การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

The 9th RMUTP CONFERENCE ON ENGINEERING AND TECHNOLOGY 2026

การวิจัยเชิงวิศวกรรมเพื่อการพัฒนาเทคโนโลยี อุตสาหกรรม พลังงาน และสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน

ENGINEERING RESEARCH FOR DEVELOPMENT IN SUSTAINABLE INDUSTRY ENERGY AND ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY



22 พฤษภาคม 2569

ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

Conference Topics

- ไฟฟ้า
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ
- อิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม
- เครื่องมือและแม่พิมพ์
- เครื่องกลและพลังงาน
- การจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน
- โยธาและสิ่งแวดล้อม
- การผลิตเครื่องประดับ
- อุตสาหการ
- เมคคาทรอนิกส์
- สาขาอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

จัดโดย : สมาคมเครือข่ายราชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ (RNMT) และ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร (ENG-RMUTP)

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ ๙

The 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology 2026

The 9th ENGCON - RMUTP 2026

ENGINGEERING RESEARCH FOR DEVELOPMENT IN SUSTAINABLE
INDUSTRY ENERGY AND ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY
"การวิจัยเชิงวิศวกรรมเพื่อการพัฒนาเทคโนโลยี
อุตสาหกรรม พลังงาน และสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน"



สารจากอธิการบดี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

สถาบันอุดมศึกษาเป็นกลไกสำคัญในการพัฒนาประเทศ ทั้งในด้านการสร้างองค์ความรู้ การวิจัย และการพัฒนาทรัพยากรมนุษย์ เพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงของสังคมและเทคโนโลยีในศตวรรษที่ ๒๑ ตลอดจนสนับสนุนการขับเคลื่อนประเทศตามแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ โดยมุ่งเน้นการพัฒนาคนให้มีศักยภาพ เป็นผู้นำการเปลี่ยนแปลง และสามารถสร้างสรรค์นวัตกรรมที่เป็นประโยชน์ต่อสังคมและประเทศชาติอย่างยั่งยืน

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ ๙ The 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology 2026 จัดขึ้นเพื่อเป็นเวทีทางวิชาการสำหรับเผยแพร่ผลงานวิจัย แลกเปลี่ยนองค์ความรู้ และเสริมสร้างความร่วมมือระหว่างคณาจารย์ นักวิจัย นักศึกษา ตลอดจนผู้ทรงคุณวุฒิจากหลากหลายสถาบัน อันจะนำไปสู่การพัฒนาองค์ความรู้และนวัตกรรมที่มีคุณภาพ สามารถประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อสังคม เศรษฐกิจ และประเทศชาติต่อไป

ในโอกาสนี้ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร โดยคณะวิศวกรรมศาสตร์ ขอต้อนรับท่านผู้ทรงคุณวุฒิ นักวิจัย นักศึกษา และนักวิชาการ ตลอดจนท่านผู้สนใจทุกท่านที่ได้ร่วมแลกเปลี่ยนเรียนรู้และสนับสนุนการจัดงานในครั้งนี้ พร้อมทั้งหวังเป็นอย่างยิ่งว่าการประชุมวิชาการครั้งนี้จะเป็นอีกหนึ่งเวทีสำคัญในการสร้างเครือข่ายความร่วมมือทางวิชาการ อันจะนำไปสู่การพัฒนาองค์ความรู้ งานวิจัย และนวัตกรรมเพื่อประโยชน์ต่อสังคม และการพัฒนาประเทศอย่างยั่งยืนสืบไป

ขออำนวยพรให้การประชุมวิชาการในครั้งนี้ประสบความสำเร็จตามวัตถุประสงค์ทุกประการ

(ดร.ณัฐวรพล รัชสิริวัชรบุล)
อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



สารจากคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ในนามผู้บริหาร คณาจารย์ บุคลากร และนักศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร รู้สึกเป็นเกียรติอย่างยิ่งและมีความภาคภูมิใจในการจัดการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ครั้งที่ ๙ (The 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology 2026) ภายใต้หัวข้อ “การวิจัยเชิงนวัตกรรมเพื่อการพัฒนาเทคโนโลยี อุตสาหกรรม พลังงาน และสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน” Engineering Research for Development in Sustainable Industry Energy And Environmental Technology ในวันที่ ๒๒ พฤษภาคม ๒๕๖๙ เพื่อเปิดโอกาสให้คณาจารย์ นักวิจัย และนักศึกษา ได้นำเสนอและเผยแพร่งานวิจัย นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ด้านวิศวกรรมศาสตร์ จะช่วยให้เกิดการแลกเปลี่ยนเรียนรู้ซึ่งกันและกัน โดยการถ่ายทอดความรู้และประสบการณ์ ซึ่งจะนำไปสู่การยกระดับและพัฒนาคุณภาพงานวิจัยให้เกิดประโยชน์ และในการพัฒนาอุตสาหกรรม สังคม และประเทศชาติต่อไป

ในยุคที่โลกกำลังก้าวเข้าสู่สังคมแห่ง ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence : AI) เทคโนโลยีดิจิทัล และการพัฒนาเศรษฐกิจสีเขียว การส่งเสริมการศึกษา การวิจัย และการสร้างนวัตกรรม จึงเป็นกลไกสำคัญในการพัฒนาทรัพยากรมนุษย์และเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของประเทศ การประชุมวิชาการครั้งนี้จึงมุ่งหวังที่จะเป็นเวทีในการยกระดับศักยภาพทางวิชาการ ส่งเสริมความร่วมมือระหว่างสถาบันการศึกษา หน่วยงานภาครัฐ ภาคเอกชน และภาคอุตสาหกรรม เพื่อร่วมกันพัฒนาองค์ความรู้และนวัตกรรมที่สอดคล้องกับทิศทางการพัฒนาประเทศในศตวรรษที่ ๒๑

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิในแต่ละสาขาวิชาที่ได้อ่านและประเมินผลงานที่ตีพิมพ์ในงานประชุมวิชาการนี้ จึงเป็นผลงานที่ผ่านการประเมินคุณภาพ แล้วหวังเป็นอย่างยิ่งว่าการประชุมวิชาการในครั้งนี้ จะเป็นประโยชน์ต่อผู้เข้าร่วมและนำความรู้ไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ทั้งต่อตนเอง องค์กร สถาบัน ตลอดจนชุมชนและประเทศชาติโดยรวมต่อไป และขอขอบคุณคณาจารย์ บุคลากร และนักศึกษาทุกท่าน ที่มีส่วนรวมในการจัดงานครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ พันธุนะ)
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ประวัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ก่อกำเนิด 2501 เริ่มจากกรมอาชีวศึกษา ได้ทำการติดต่อกระทรวงศึกษาธิการขอเปิดโรงเรียนช่างกลขึ้นอีก 2 แห่ง คือ ช่างกลนนทบุรี และช่างกลพระนครเหนือ

17 พฤษภาคม 2501 สำนักนายกรัฐมนตรี ได้อนุมัติให้กระทรวงศึกษาธิการใช้สถานที่เดิมของกรมโยธาธิการ ให้เปิดเป็นโรงเรียนช่างกลพระนครเหนือ

14 กรกฎาคม 2501 ถือเป็นวันสถาปนาโรงเรียนช่างกลพระนครเหนือ โดยการเรียนการสอนในรุ่นแรกนี้ มีนักเรียนจำนวน 803 คน แบ่งเป็น 2 รอบ คือ รอบเช้า 400 คน รอบบ่าย 403 คน

2502 โรงเรียนช่างกลพระนครเหนือแยกออกจากโรงเรียนช่างกลปทุมวัน ซึ่งแต่เดิมนั้นรวมกิจการและอาจารย์ใหญ่คนเดียวกันกับโรงเรียนช่างกลปทุมวัน

2520 มีพระราชบัญญัติจัดตั้งวิทยาลัยเทคโนโลยีและอาชีวศึกษาขึ้น โดยมีฐานะเป็นกรมหนึ่งในกระทรวงศึกษาธิการ ให้มีการจัดการศึกษาในระดับปริญญาตรี จึงมีการรวมสถานศึกษาระดับอาชีวศึกษาจำนวน28 แห่งเข้าด้วยกัน โดยเรียกชื่อว่า วิทยาลัยเทคโนโลยีและอาชีวศึกษา วิทยาเขตพระนครเหนือ

2531 15 กันยายน 2531 พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว ทรงพระกรุณาโปรดเกล้าฯ ยกระดับจากวิทยาลัยเป็นสถาบัน และพระราชทานชื่อใหม่เป็น สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ทำให้วิทยาลัยเทคโนโลยี และอาชีวศึกษา วิทยาเขตพระนครเหนือ ได้ยกระดับเป็น สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตพระนครเหนือ

2537 ร่วมมือกับสถานประกอบการ ได้แก่ หอการค้าไทย – เยอรมัน บริษัท ไทยฮีโนมอเตอร์เซลส์ จำกัด บริษัท กรุงไทยแทรคเตอร์ จำกัด และสมาคมผู้ค้าอัญมณีไทยและเครื่องประดับ

2548 สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลได้รับการสถาปนา และแบ่งออกเป็นมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล 9 มหาวิทยาลัย และวิทยาเขตพระนครเหนือ เข้าสังกัดในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2549 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ประกาศจัดตั้ง คณะวิศวกรรมศาสตร์ และคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยจัดการเรียนการสอนที่ศูนย์พระนครเหนือ

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

(The 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology 2026)

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9 (The 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology 2026) เป็นการประชุมวิชาการระดับชาติ ที่จัดขึ้นโดย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร **ภายใต้แนวคิด** "Engineering Research For Development In Sustainable Industry Energy And Environmental Technology" **"การวิจัยเชิงวิศวกรรมเพื่อการพัฒนาเทคโนโลยี อุตสาหกรรม พลังงาน และสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน"** โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อส่งเสริม การผลิตบทความวิจัยทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี อันเป็นประโยชน์ต่อการจัดการเรียนการสอน, การพัฒนา และการเผยแพร่ผลงานทางด้านวิชาการสู่สังคมภายนอก อีกทั้งยังเป็นการสนับสนุนให้อาจารย์ นักวิจัย นิสิตและนักศึกษา จากสถาบันการศึกษาต่างๆร่วมส่งบทความ เพื่อนำเสนอผลงานวิจัย และแลกเปลี่ยนความคิดเห็นในงานวิจัยด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี ซึ่งมีกำหนดการจัดงานดังกล่าว ในวันศุกร์ ที่ 22 พฤษภาคม 2569 ในรูปแบบการบรรยาย โดยบทความที่ผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิจะได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่บทความวิชาการฉบับสมบูรณ์ ในรายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการ (Proceedings) ระดับชาติ ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร (รูปแบบไฟล์)

สาขาบทความในการประชุมวิชาการ ประกอบด้วย

- ไฟฟ้า (EE)
- อิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม (ET)
- เครื่องกลและพลังงาน (ME)
- โยธาและสิ่งแวดล้อม (CE)
- อุตสาหการ (IE)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- เครื่องมือและแม่พิมพ์ (TD)
- การจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน (IM)
- การผลิตเครื่องประดับ (JM)
- สาขาอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง (OR)

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

(The 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology 2026)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเป็นเวทีให้แก่ คณาจารย์ นักศึกษา นักวิจัย นักวิชาการ และผู้ปฏิบัติงานทั้งภาครัฐและเอกชน ในการแสดงและนำเสนอผลงานวิชาการ เป็นการเผยแพร่ผลงานอันจะเป็นประโยชน์ต่อแวดวงวิชาการและสาธารณชน
2. เพื่อสร้างบรรยากาศทางวิชาการและเป็นโอกาสอันดีที่นักวิชาการจากสถาบันต่างๆ ได้แลกเปลี่ยนเรียนรู้ประสบการณ์ทางด้านการวิจัย อันจะก่อให้เกิดการรวมกลุ่มกันเพื่อดำเนินการวิจัยเพื่อยกระดับคุณภาพผลงานวิจัยในระดับชาติ
3. เพื่อส่งเสริมให้เกิดกิจกรรมทางการวิจัยอันจะสนับสนุนให้เกิดการผลิตผลงานวิจัย การสร้างองค์ความรู้ การพัฒนาเทคโนโลยี และนวัตกรรมต่างๆ

ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ผลงานวิจัยของนักวิศวกรรม นักวิจัยในเครือข่ายและสถาบันอุดมศึกษา หน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ทั้งภาครัฐและภาคเอกชน เป็นการเผยแพร่ผลงานอันจะเป็นประโยชน์ต่อแวดวงวิชาการและสาธารณชน
2. ก่อให้เกิดการรวมกลุ่มและสร้างเครือข่ายความร่วมมือระดับนักธุรกิจ นักวิจัย สถาบัน หน่วยงานหรือองค์กรในการวิจัยเพื่อยกระดับคุณภาพผลงานวิจัยในระดับชาติ
3. ส่งเสริมให้เกิดกิจกรรมทางการวิจัยอันจะสนับสนุนให้เกิดการผลิตผลงานวิจัย การสร้างองค์ความรู้ การพัฒนาเทคโนโลยี และนวัตกรรมต่างๆ
4. กระตุ้นและส่งเสริมให้คณาจารย์ในมหาวิทยาลัยได้ตระหนักและเห็นถึงความสำคัญของงานวิจัยในการผลิตและเผยแพร่ผลงานวิชาการงานวิจัย
5. ผลงานวิจัยที่นำเสนอ ได้รับการสนับสนุนให้มีการตีพิมพ์เผยแพร่ในรูปแบบที่เป็นเอกสารทางวิชาการเป็นที่ยอมรับ
6. ผลงานวิจัยถูกนำไปใช้ในการต่อยอดเชิงพาณิชย์ในระบบอุตสาหกรรม และภาคธุรกิจต่างๆ เพื่อการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศอย่างยั่งยืนต่อไป

จัดโดยสมาคม

ร่วมกับ

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

The 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology 2026

THE 9th ENGCON-RMUTP 2026

CALL FOR PAPERS

“การวิจัยเชิงวิศวกรรมเพื่อการพัฒนาเทคโนโลยี อุตสาหกรรม พลังงาน และสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน”

ENGINEERING RESEARCH FOR DEVELOPMENT IN SUSTAINABLE INDUSTRY ENERGY AND ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY

22 พฤษภาคม 2569

ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

สาขาบทความ

ไฟฟ้า
อิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม
เครื่องกลและพลังงาน
โยธาและสิ่งแวดล้อม
อุตสาหการ
คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ
เครื่องมือและแม่พิมพ์
การจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน
การผลิตเครื่องประดับ
เมคคาทรอนิกส์
สาขาอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

กำหนดการ

วันสุดท้ายของการส่งบทความ	27 เมษายน 2569
ประกาศผลการพิจารณาบทความ	30 เมษายน 2569
วันสุดท้ายของการส่งบทความฉบับสมบูรณ์	8 พฤษภาคม 2569
วันสุดท้ายของการลงทะเบียน	12 พฤษภาคม 2569
วันประชุมวิชาการ	22 พฤษภาคม 2569

อัตราค่าลงทะเบียน

นักวิจัยและบุคคลทั่วไป : 2,500 บาท
นิสิตและนักศึกษา : 1,500 บาท

รูปแบบบทความ : ภาษาไทย ความยาวไม่เกิน 6 หน้า กระดาษขนาด A4

รูปแบบโปสเตอร์ : รูปแบบโปสเตอร์ ขนาด A0

การส่งบทความ : ลงทะเบียนการส่งบทความ ได้ที่ www.eng-rmutp.ac.th

การเผยแพร่ : รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการ (Proceedings) รูปแบบไฟล์

รูปแบบการนำเสนอบทความ : นำเสนอโดยการบรรยาย (Onsite)

ติดต่อสอบถามกำหนดการและรายละเอียดเพิ่มเติมได้ที่

ฝ่ายวิชาการและวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800
โทรศัพท์ 02-836-3000 ต่อ 4113 , 4129 E-mail : engcon@rmutp.ac.th

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ (Peer Review)

เครื่องกลและพลังงาน

1.	ผศ.ดร.ภูภูมิ	พ่วงเจริญชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
2.	ผศ.ดร.ปฏิภาณ	ถิ่นพระบาท	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
3.	ผศ.ว่าที่เรือตรี ดร.ทรงวุฒิ	มงคลเลิศมณี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
4.	ผศ.ดร.จันทิมา	ริ้วลายเงิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
5.	ผศ.ดร.ศุภชัย	หลักคำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
6.	ผศ.กุลยศ	สุวันทโรจน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
7.	อ.ดร.ณทพร	จินดาประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
8.	อ.ดร.ประกอบ	ชาติภุกต์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
9.	อ.ดร.อนันต์	เต็มเปี่ยม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
10.	อ.ดร.ปฏิวัติ	คมวชิรกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
11.	อ.ดร.กฤษณ์	อภิญญาวิศิษฐ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
12.	อ.ดร.ฐณพล	เวียงทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

อุตสาหการ

1.	ผศ.ดร.ก้าวหน้า	จงวัฒนารักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
2.	ผศ.ดร.ประจักร	จัตกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี
3.	ผศ.ดร.วัชรพันธ์	สุขเกิด	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
4.	อ.ดร.อิทธิพล	เนคมานุรักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
5.	อ.ดร.ดาราวรรณ	วีรานันต์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
6.	อ.ดร.สถาพร	สุริยันต์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
7.	อ.ดร.สมพงษ์	เชื้อพระคา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
8.	อ.ดร.กชกร	วิรัชกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ไฟฟ้า

1.	รศ.ดร.สาคร	วุฒิพัฒนพันธุ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
2.	ผศ.ดร.อานนท์	สิงห์เสถียร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
3.	ผศ.เวทรินทร์	ธัญสิประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

4.	ผศ.ว่าที่ ร.ต.สุรสิทธิ์	ประกอบกิจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

อิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม

1.	ผศ.ดร.ธนาพร	เพชรกูล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
2.	ผศ.ดร.นรกมล	วงษ์ศิลป์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
3.	ผศ.ธนะกิจ	วัฒกีกำธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
4.	ผศ.กมลทิพย์	วัฒกีกำธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
5.	อ.ดร.อภิรดา	จิตจริง	สถาบันการบินพลเรือน
6.	อ.ดร.คชพงศ์	สุมานนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
7.	อ.ร.ต.ดร.พลกฤษณ์	จริยตันติเวทย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
8.	อ.ดร.ฉัตรแก้ว	จริยตันติเวทย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
9.	อ.ดร.ชวลิต	รักเหลือ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ

1.	ผศ.ดร.เกรียงไกร	เหลืองอำพล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
2.	ผศ.ดร.บุรัสกร	อยู่สุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
3.	ผศ.ดร.วีระยุทธ	คุณรัตนสิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
4.	อ.ดร.ยุทธนา	สรวลสรรค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
5.	อ.ดร.ณัฐวัฒน์	จันทะเสน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

เมคคาทรอนิกส์

1.	ผศ.ดร.วัชร	ส่งเสริม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
2.	อ.ดร.ภาพรพี	บัวสนธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
3.	อ.ดร.สิงห์แก้ว	ป๊อกเที่ง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

โยธาและสิ่งแวดล้อม

1.	รศ.ดร.กฤษณ์	เจ็ดวรรณะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
2.	รศ.ดร.กฤษดา	เสือเอี่ยม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
3.	ผศ.ดร.ขวัญชนก	อุนทะอ่อน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
4.	ผศ.ดร.จักรพันธ์	แสงสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
5.	ผศ.ดร.บูชิต	มาโห้	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
6.	ผศ.สุนันท์	มนต์แก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
7.	ผศ.ณัชพงศ์พล	คงชะสิงห์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

8.	อ.ดร.ดารกร	อินทรบุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
9.	อ.ดร.ภัทรชัย	พงศ์โสภา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

การผลิตเครื่องมือและแม่พิมพ์

1.	อ.ดร.ประเสริฐ	ชุมปัญญา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

การผลิตเครื่องประดับ

1.	ศ.ดร.พิชัย	สดภิบาล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2.	รศ.ดร.ทรงวุฒิ	เอกวุฒิวงศา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
3.	รศ.ดร.วิไลวรรณ	ลีนะกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
4.	ผศ.ปริศนา	บุญศักดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

การจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน

1.	ผศ.ดร.เทอดพงษ์	แดงสี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

คณะกรรมการจัดงาน

1. คณะกรรมการอำนวยการ

1.1 คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ (ผศ.ดร.ณัฐพงศ์ พันธุนะ)	ประธานกรรมการ
1.2 รองคณบดีฝ่ายวิชาการและวิจัย (ผศ.ดร.ภูภูมิ พ่วงเจริญชัย)	กรรมการ
1.3 รองคณบดีฝ่ายวางแผน (ผศ.ดร.ปฏิภาณ ถิ่นพระบาท)	กรรมการ
1.4 รองคณบดีฝ่ายกิจการนักศึกษา (ผศ.เวทรินทร์ ธัญสิประเสริฐ)	กรรมการ
1.5 รองคณบดีฝ่ายบริหาร (อ.ดร.อัญชลี มโนสืบ)	กรรมการ
1.6 ผู้ช่วยคณบดีด้านกิจการนักศึกษา (อ.ดร.ฐณพล เวียงทอง)	กรรมการ
1.7 ผู้ช่วยคณบดีด้านวางแผน (อ.ดร.ณทพร จินดาประเสริฐ)	กรรมการ
1.8 ผู้ช่วยคณบดีด้านบริหาร (ผศ.ดร.วีระยุทธ คุณรัตนสิริ)	กรรมการ
1.9 ผู้ช่วยคณบดีด้านวิชาการและวิจัย (อ.ประสิทธิ์ แพงเพชร)	กรรมการและเลขานุการ

2. คณะกรรมการดำเนินงาน

2.1 ผศ.ดร.ภูภูมิ	พ่วงเจริญชัย	ประธานกรรมการ
2.2 ผศ.ว่าที่ ร.ต.สุรสิทธิ์	ประกอบกิจ	กรรมการ
2.3 ผศ.ดร.เทอดพงษ์	แดงสี	กรรมการ
2.4 ผศ.ธนะกิจ	วัฒกีกำธร	กรรมการ
2.5 ผศ.ดร.เกรียงไกร	เหลืองอำพล	กรรมการ
2.6 ผศ.ดร.ขวัญชนก	อุนทะอ่อน	กรรมการ
2.7 อ.พิเชษฐ์	บุญญาลัย	กรรมการ
2.8 อ.รุ่งโรจน์	สุพงษ์วิบูลพันธ์	กรรมการ
2.9 อ.แจ๊ค	ชุ่มอินทร์	กรรมการ
2.10 อ.สุทธิพงษ์	จำรูญรัตน์	กรรมการ
2.11 อ.วรัญชลีย์	ทวีชัย	กรรมการ
2.12 อ.ประสิทธิ์	แพงเพชร	กรรมการและเลขานุการ

3. คณะกรรมการด้านประชาสัมพันธ์ บันทึกภาพ จัดทำเว็บไซต์และป้ายประกาศ

3.1 อ.ดร.อัญชลี	มโนสืบ	ประธานกรรมการ
3.2 น.ส.อภิญญา	ชุมนุมมณี	กรรมการ
3.3 นางสาวกชรัตน์	ฉิมคล้าย	กรรมการ

3. คณะกรรมการด้านประชาสัมพันธ์ บันทึกภาพ จัดทำเว็บไซต์และป้ายประกาศ (ต่อ)

3.4 นายสมยศ	แสงจันทร์	กรรมการ
3.5 ผศ.ดร.วีระยุทธ	คุณรัตนสิริ	กรรมการและเลขานุการ

4. คณะกรรมการดำเนินงานด้านตรวจรูปแบบบทความและพิจารณาบทความ

เครื่องกลและพลังงาน

4.1 ผศ.ดร.ปฏิภาณ	ถิ่นพระบาท
4.2 ผศ.ดร.ภูภูมิ	พ่วงเจริญชัย
4.3 ผศ.ว่าที่เรือตรี ดร.ทรงวุฒิ	มงคลเลิศมณี
4.4 ผศ.ดร.จันทิมา	ริ้วลายเงิน
4.5 ผศ.ดร.ศุภชัย	หลักคำ
4.6 ผศ.กุลยศ	สุวันทโรจน์
4.7 อ.ดร.ณทพร	จินดาประเสริฐ
4.8 อ.ดร.ประกอบ	ชาติภุกต์
4.9 อ.ดร.อนันต์	เต็มเปี่ยม
4.10 อ.ดร.ปฏิวัติ	คมวชิรกุล
4.11 อ.ดร.กฤษณ์	อภิญญาวิศิษฐ์
4.12 อ.ดร.ฐณพล	เวียงทอง

อุตสาหการ

4.13 ผศ.ดร.วัชรพันธ์	สุขเกิด
4.14 อ.ดร.อิทธิพล	เนคมานุรักษ์
4.15 อ.ดร.ดาราวรรณ	วีรานันต์
4.16 อ.ดร.สถาพร	สุริยันต์
4.17 อ.ดร.สมพงษ์	เชื้อพระคา
4.18 อ.ดร.กชกร	วิรัชกุล

ไฟฟ้า

4.19 รศ.ดร.สาคร	วุฒิพัฒนพันธุ์
4.20 ผศ.ดร.อานนท์	สิงห์เสถียร
4.21 ผศ.ว่าที่ ร.ต.สุรสิทธิ์	ประกอบกิจ
4.22 ผศ.เวทรินทร์	ธัญสิประเสริฐ
4.23 อ.นเรศ	ชลังสุทธิ์

4. คณะกรรมการดำเนินงานด้านตรวจรูปแบบบทความและพิจารณาบทความ (ต่อ)

อิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม

4.24 ผศ.ธนะกิจ วัฒกีกำธร
4.25 ผศ.กมลทิพย์ วัฒกีกำธร
4.26 อ.ร.ต.ดร.พลกฤษณ์ จริยตันติเวทย์
4.27 อ.ดร.ฉัตรแก้ว จริยตันติเวทย์
4.28 อ.ดร.คชพงศ์ สุมานนท์
4.29 อ.ดร.อัญชลี มโนสืบ
4.30 อ.สมชาย เปาะทองคำ

คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ

4.31 ผศ.ดร.เกรียงไกร เหลืองอำพล
4.32 ผศ.ดร.บุรัสกร อยู่สุข
4.33 ผศ.ดร.วีระยุทธ คุณรัตนสิริ
4.34 ผศ.สิทธิศักดิ์ วรดิษฐ์
4.35 อ.ดร.ยุทธนา สรวลสรรค์
4.36 อ.ดร.ณัฐวัฒน์ จันทะเสน
4.37 อ.วิปัศย์ ปุยสำลี
4.38 อ.นิลมิต นิลาศ
4.39 อ.เกริก พวงนาค

เมคคาทรอนิกส์

4.40 ผศ.ดร.วัชร ส่งเสริม
4.41 อ.ดร.สิงห์แก้ว ป๊อกเที่ง
4.42 อ.ดร.สุกัญญา เชิดชูงาม
4.43 อ.นำโชค ชมกระโทก
4.44 อ.ธนวัฒน์ ชุณหชัชวาลกุล
4.45 อ.รุ่งโรจน์ สุพงษ์วิบูลพันธ์

โยธาและสิ่งแวดล้อม

4.46 รศ.ดร.กฤษดา เสือเอี่ยม
4.47 รศ.ดร.กฤษณ์ เจ็ดวรรณะ
4.48 ผศ.ดร.ขวัญชนก อุนทะอ่อน
4.49 ผศ.ดร.จักรพันธ์ แสงสุวรรณ

4. คณะกรรมการดำเนินงานด้านตรวจรูปแบบบทความและพิจารณาบทความ (ต่อ)

4.50 ผศ.ดร.บูชิต มาโห้
4.51 ผศ.สุนันท์ มนต์แก้ว
4.52 ผศ.ณัชพงศ์พล คงชะสิงห์
4.53 อ.ดร.ภัทรชัย พงศ์โสภา
4.54 อ.ดร.ดารกร อินทรบุตร
4.55 อ.นิโรจน์ เงินพรหม
4.56 อ.สัจจะชาญ พรัดมะลิ
4.57 อ.ธนพัฒน์ น้ำจันทร์

การผลิตเครื่องมือและแม่พิมพ์

4.58 อ.ดร.ประเสริฐ ชุมปัญญา
4.59 อ.แจ๊ค ชุ่มอินทร์
4.60 อ.อัครเวช ศุภาคม

การผลิตเครื่องประดับ

4.61 ผศ.ปริศนา บุญศักดิ์
4.62 อ.ดร.วิเชียร มหาวัน
4.63 อ.วรัญชลีย์ ทวีชัย
4.64 อ.อาวุธ ฉายศิริ
4.65 อ.ธีรวัฒน์ แม้นดวง
4.66 อ.กรกช สัมฤทธิ์

การจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน

4.67 ผศ.ดร.เทอดพงษ์ แดงสี

5. คณะกรรมการจัดทำเล่มบทความ และประกาศนียบัตร

5.1 อ.ดร.ยุทธนา	สรวลสรรค์	ประธานกรรมการ
5.2 ว่าที่ ร.ต.หญิง กานต์ศศิธร	บุญดี	กรรมการ
5.3 นายอานนท์	จำเริญพัฒน์	กรรมการ
5.4 น.ส.จันทร์เพ็ญ	คำภูมี	กรรมการ
5.5 นายสมยศ	แสงจันทร์	กรรมการ
5.6 นายธนพล	สวนลำใย	กรรมการและเลขานุการ

6. คณะกรรมการด้านสื่อโสตทัศนูปกรณ์		
6.1 ผศ.ธนะกิจ	วัฒกีกำธร	ประธานกรรมการ
6.2 อ.สมชาย	เปาะทองคำ	กรรมการ
6.3 ผศ.กมลทิพย์	วัฒกีกำธร	กรรมการและเลขานุการ
7. คณะกรรมการด้านอาหารและของที่ระลึก		
7.1 น.ส.สุภาภรณ์	ลาทุม	ประธานกรรมการ
7.2 น.ส.พรศิริ	ยงสวัสดิ์	กรรมการ
7.3 น.ส.ศิริกุล	ภู่จำนงค์	กรรมการ
7.4 นางวรรณรัฐ	คงสมบูรณ์	กรรมการและเลขานุการ
8. คณะกรรมการด้านงานลงทะเบียน		
8.1 อ.ประสิทธิ์	แพงเพชร	ประธานกรรมการ
8.2 นายอานนท์	จำเริญพัฒน์	กรรมการ
8.3 น.ส.สิริขวัญ	ชาวบัวใหญ่	กรรมการ
8.4 นางสุกัญญา	พินิจเวชการ	กรรมการ
8.5 ว่าที่ ร.ต.หญิง กานต์ศศิธร	บุญดี	กรรมการ
8.6 น.ส.ปนัดดา	วิมลพิมพ์	กรรมการ
8.7 น.ส.จันทร์เพ็ญ	คำภูมี	กรรมการและเลขานุการ
9. คณะกรรมการด้านต้อนรับและปฐมพยาบาล		
9.1 ผศ.เวทรินทร์	ธัญสิประเสริฐ	ประธานกรรมการ
9.2 น.ส.ศศิชานันท์	ฤกษ์เรืองชัย	กรรมการ
9.3 น.ส.เพ็ญผกา	เกิดแก่น	กรรมการ
9.4 น.ส.กนิษฐา	ปิ่นวนิช	กรรมการ
9.5 นายปริญญา	การรุน	กรรมการ
9.6 น.ส.ปิยะภรณ์	มีศิริ	กรรมการ
9.7 น.ส.ทิพรดา	มุ่งดี	กรรมการและเลขานุการ
10. คณะกรรมการด้านการเงิน พัสดุ และยานพาหนะ		
10.1 อ.ดร.อัญชลี	มโนสืบ	ประธานกรรมการ
10.2 น.ส.วนรัตน์	มุกนนท์	กรรมการ
10.3 น.ส.ธีร์นานา	การุณย์นวสิริ	กรรมการ
10.4 น.ส.กมลวรรณ	อาชวอาชานกุล	กรรมการ
10.5 น.ส.ปลื้มจิตต์	นราภิรมย์ขวัญ	กรรมการ

10. คณะกรรมการด้านการเงิน พัสดุ และยานพาหนะ (ต่อ)		
10.6 นางธัชมนตร์	พินิจเวชการ	กรรมการ
10.7 นางศรัญญา	พิริยประเสริฐ	กรรมการ
10.8 นายอัคคพงศ์	อภิรักษ์สันติ	กรรมการ
10.9 นางจุไรภรณ์	กิริติยกุลย์	กรรมการ
10.10 น.ส.เบญจพร	แสงเงิน	กรรมการ
10.11 น.ส.สุรีพร	ประเมทะโก	กรรมการ
10.12 นายปิยะพันธ์	บำเรอจิตร	กรรมการ
10.13 ผศ.ดร.วีระยุทธ	คุณรัตนสิริ	กรรมการและเลขานุการ
11. คณะกรรมการด้านพิธีกร พิธีการ		
11.1 อ.ดร.ฐณพล	เวียงทอง	กรรมการ
11.2 2. นางกัญญ์ชิสา	ธัญสิประเสริฐ	กรรมการ
12. คณะกรรมการด้านจัดทำหนังสือราชการ		
12.1 น.ส.สุภาภรณ์	ลาทุม	กรรมการ
12.2 น.ส.ณชนนันท์	ขำทัศน์	กรรมการ
12.3 น.ส.จิตเกษม	ใจแก้ว	กรรมการ
12.4 น.ส.อรจิรา	พานอุป	กรรมการ
12.5 น.ส.สุภาพร	มีสาตร์	กรรมการและเลขานุการ
13. คณะกรรมการด้านประเมินผล/สถานที่และยานพาหนะ		
13.1 ผศ.ดร.ปฏิภาณ	ถิ่นพระบาท	ประธานกรรมการ
13.2 นายเสกสรร	กันธรส	กรรมการ
13.3 น.ส.กุสุมา	กิจสวัสดิ์	กรรมการ
13.4 น.ส.รจนา	สร้อยแก้ว	กรรมการ
13.5 นายปิยะ	พิทักษ์โกมลเสน	กรรมการ
13.6 นายอัครวิทย์	พลจันทึก	กรรมการ
13.7 นายจิตรทิวัส	เสรีรักษ์	กรรมการ
13.8 นางนงนภัส	ทองวิจิตร์	กรรมการ
13.9 นายปิยะพันธ์	บำเรอจิตร	กรรมการ
13.10 อ.ดร.ณทพร	จินดาประเสริฐ	กรรมการและเลขานุการ

หน่วยงานที่ส่งบทความเข้าร่วมในการประชุมวิชาการ

ลำดับ	ชื่อหน่วยงาน	จำนวนบทความ
1	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	46
2	มหาวิทยาลัยรามคำแหง	5
3	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	3
4	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	1
5	มหาวิทยาลัยบูรพา	1
6	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	1
7	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	1
8	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาเชียงใหม่	1
	รวม	59 บทความ

จำนวนบทความวิจัย

บทความวิจัย	59 บทความ
เครื่องกลและพลังงาน (ME)	5 บทความ
ไฟฟ้า (EE)	9 บทความ
อุตสาหการ (IE)	8 บทความ
อิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม (ET)	4 บทความ
คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)	10 บทความ
เครื่องมือและแม่พิมพ์ (TD)	2 บทความ
โยธาและสิ่งแวดล้อม (CE)	7 บทความ
การจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน (IM)	3 บทความ
การผลิตเครื่องประดับ (JM)	2 บทความ
สาขาอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง (OR)	9 บทความ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
RMUTP FACULTY OF ENGINEERING

กำหนดการประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

(The 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology 2026)

ณ ห้องประชุมเฟืองเหนือ ชั้น 7 อาคารกิจการนักศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

วันศุกร์ที่ 22 พฤษภาคม พ.ศ. 2569							
08.00 - 08.30 น.	ลงทะเบียนเข้าร่วมงานประชุมวิชาการ						
08.30 - 09.00 น.	พิธีเปิดการประชุมวิชาการ โดยรองอธิการบดี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ณ ห้องประชุมเฟืองเหนือ ชั้น 7 อาคารกิจการนักศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์						
09.00 - 10.00 น.	ผู้บรรยาย : ผศ.ดร.สุรเชษฐ เดชฟุ้ง การติดตั้งโซล่าเซลล์ ทางเลือกพลังงานแห่งอนาคต อย่างไรให้ปลอดภัย และประสิทธิภาพสูง						
10.00 - 10.15 น.	พัก - รับประทานอาหารว่าง						
10.15 - 11.15 น.	ผู้บรรยาย (ต่อ) : ผศ.ดร.สุรเชษฐ เดชฟุ้ง การติดตั้งโซล่าเซลล์ ทางเลือกพลังงานแห่งอนาคต อย่างไรให้ปลอดภัย และประสิทธิภาพสูง						
หมายเลขห้อง	1968	1961	1962	1958	1951	1941	1942
กลุ่มสาขาบทความ	OR	IM	CE	CP	EE	IE	ME
11.15 - 12.00 น.	OR1102 - OR1105	IM902 - IM906	CE801 - 803	CP501 - 503	EE201 - EE206	IE301 - IE303	ME102-104
ประธาน	ผศ.ดร.ภูภูมิ พ่วงเจริญชัย	อ.ดร.สะคราญ สิชณรังษี	รศ.ดร.กฤษดา เสือเอี่ยม	ผศ.ดร.บุรัสกร อยู่สุข	รศ.ดร.สาคร วุฒิพัฒนพันธุ์	ผศ.ดร.วัชรพันธ์ สุขเกิด	ผศ.ดร.ปฏิภาณ ถิ่นพระบาท
รองประธาน	อ.ประสิทธิ์ แพงเพชร	อ.ดร.เชาวน์วัศ อรรถานิทธิ์	อ.ดร.ดารกร อินทรบุตร	อ.ดร.ยุทธนา สรวลสรรค์	อาจารย์นเรศ ชลังสุทธิ์	อ.ดร.สถาพร สุริยันต์	อ.ดร.ณทพร จินดาประเสริฐ
12.00 - 13.00 น.	พัก - รับประทานอาหารกลางวัน						
หมายเลขห้อง	1968	1961	1962	1958	1951	1941	1942
กลุ่มสาขาบทความ	OR	JM , TD	CE	CP	EE	IE	ME , ET
13.00 - 14.30 น.	OR1106 - OR1112	JM1001-1002 , TD601-602	CE804 - CE810	CP504 - 509	EE207 - EE212	IE304 - IE308	ME105-106 , ET401-404
ประธาน	ผศ.ดร.ภูภูมิ พ่วงเจริญชัย	อ.ดร.วิเชียร มหาวัน ,อ.ดร.ประเสริฐ ชุมปัญญา	รศ.ดร.กฤษดา เสือเอี่ยม	ผศ.ดร.บุรัสกร อยู่สุข	รศ.ดร.สาคร วุฒิพัฒนพันธุ์	ผศ.ดร.วัชรพันธ์ สุขเกิด	ผศ.ดร.ปฏิภาณ ถิ่นพระบาท , อ.ร.ด.ดร.พลกฤษณ์ จริยตันติเวทย์
รองประธาน	อ.ประสิทธิ์ แพงเพชร	อ.วรัญชลีย์ ทวีชัย ,อ.แจ๊ค ชุ่มอินทร์	อ.ดร.ดารกร อินทรบุตร	อ.ดร.ยุทธนา สรวลสรรค์	อาจารย์นเรศ ชลังสุทธิ์	อ.ดร.สถาพร สุริยันต์	อ.ดร.ณทพร จินดาประเสริฐ , อ.ดร.ดชพงศ์ สุมานนท์
14.30 - 14.45 น.	พัก - รับประทานอาหารว่าง						
หมายเลขห้อง	1968	1961	1962	1958	1951	1941	1942
กลุ่มสาขาบทความ				CP			
14.45 - 17.00 น.				CP510			
ประธาน				ผศ.ดร.บุรัสกร อยู่สุข			
รองประธาน				อ.ดร.ยุทธนา สรวลสรรค์			

หมายเหตุ : การนำเสนอบทความ นำเสนอ 10 นาที สอบถาม 5 นาที (รวม 15 นาที/บทความ)

กำหนดการต่างๆ อาจเปลี่ยนแปลงได้ตามความเหมาะสม

สารบัญ

รหัสบทความ	ชื่อเรื่อง	หน้า
เครื่องกลและพลังงาน		
ME-102	การออกแบบและวิเคราะห์ความแข็งแรงโครงสร้างรถแข่งสูตรนักศึกษาสำหรับการแข่งขัน TSAE Auto Challenge *หัสดินทร์ สมใจประเสริฐ สถาพร วันนาพ่อ บุษราคัม โคตะสิน และ พิเชษฐ์ บุญญาลัย*	1
ME-103	การศึกษาอนุภาคขนาดเล็กที่มีผลในการตัดสินใจในการล้างเครื่องปรับอากาศ *ปริญญา ตากรวด ฉัตรชาญ ทองจับ และ ปรีดา จันทวงษ์*	6
ME-104	การวิเคราะห์อิทธิพลของขนาดถังพักลมและการตั้งค่าความดันควบคุมที่มีต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องอัดอากาศแบบสตาร์ท-สต็อป *อนันต์ เต็มเปี่ยม นายพิเชษฐ์ บุญญาลัย ปฏิวัติ คมวชิรกุล และ พลรัชต์ บุญมี*	10
ME-105	การออกแบบ ติดตั้ง และประเมินการใช้พลังงานระบบการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานสำหรับบ้านอยู่อาศัย กรณีศึกษา ตำบลบ้านพริก อำเภอบ้านนา จังหวัดนครนายก *พิเชษฐ์ สุวรรณชัย และ สุวิทย์ แพงกันยา*	18
ME-106	การเพิ่มสมรรถนะระบบจัดเก็บข้อมูลอุณหภูมิไอโอทีต้นทุนต่ำสำหรับเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดด้วยเทคนิคโอเวอร์แซมปลิงและการชดเชยความคลาดเคลื่อนเชิงเส้น *ปฏิภาณ ถิ่นพระบาท ณทพร จินดาประเสริฐ กวิน เลิศเลาห์กุล และ ฐณพล เวียงทอง*	23
ไฟฟ้า		
EE-201	ระบบรดน้ำต้นไม้จากเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองฟังก์ชั่น *นเรศ ชลังสุทธิ์ วชิราวิทย์ น้ำพุ ณัฐพล ถาวรเจริญชัย สาคร วุฒิพัฒนพันธุ์ พูนศรี วรรณการ มนัส บุญเทียรทอง และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ*	28
EE-202	ผลกระทบของเงาต่อระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตรัลไลน์ *ภิญโญ อั้งยุทธ นเรศ ชลังสุทธิ์ ศศิกา สนธิกัณฑ์ สุรเชษฐ เดชฟุ้ง พสิษฐ์ สุวรรณภิงคาร อานนท์ สิงห์เสถียร พนา ดุสิตากร ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว และ สุรสิทธิ์ ประกอบกิจ*	32
EE-206	การเพิ่มประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์โดยใช้เทคนิคการลดการสูญเสียจากการสวิตช์ชิ่ง *เลิศพิสิฐ พรไธสง อัษฎาวุธ ธำรงทรัพย์สกุล และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ*	36

รหัสบทความ	ชื่อเรื่อง	หน้า
ไฟฟ้า		
EE-207	การวิเคราะห์พฤติกรรมของมอเตอร์ซิงโครนัสแบบสามเฟสภายใต้โหลดอิมพิแดนซ์แบบตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำในระบบไฟฟ้ากำลัง *ภูชิตะ จันต๊ะบุตร ชินดนัย ทับจิตต์ และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ*	40
EE-208	การจำลองหลักการความปลอดภัยของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา *พีรพัฒน์ บุญฤทธิ์ พีรวิชญ์ สุจริต และ ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว*	44
EE-209	การออกแบบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับโซลาร์เซลล์บนหลังคาอาคาร *ศศิกานต์ แสงสิงห์ นาวิน รอดเรือง และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ*	49
EE-210	การพัฒนานวัตกรรมอุปกรณ์ตรวจจับและขับไล่นกอัตโนมัติด้วยระบบกับดักไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสต่ำ จากพลังงานแสงอาทิตย์ผ่านสถาปัตยกรรมฮาร์ดแวร์ลอจิก *พสิษฐ์ สุวรรณภิงคาร สุรสิทธิ์ ประกอบกิจ ปวีณ์นุช บุญประครอง จิรภัทร ชาลีเขียว* *รัมภ์รดา จวงสอน ภาคภูมิ แสงคา และ ธีรวัฒน์ ภู่ระหงษ์*	53
EE-211	การพัฒนานวัตกรรมอุปกรณ์ตรวจจับและขับไล่นกอัตโนมัติด้วยระบบแสงจากพลังงานแสงอาทิตย์ผ่านสถาปัตยกรรมฮาร์ดแวร์ลอจิก *พสิษฐ์ สุวรรณภิงคาร นเรศ ชลังสุทธิ์ ปวีณ์นุช บุญประครอง จิรภัทร ชาลีเขียว* *รัมภ์รดา จวงสอน ภาคภูมิ แสงคำ และ ธีรวัฒน์ ภู่ระหงษ์*	58
EE-212	การพัฒนานวัตกรรมอุปกรณ์ตรวจจับและขับไล่นกอัตโนมัติด้วยระบบเสียงและคลื่นความถี่ จากพลังงานแสงอาทิตย์ผ่านสถาปัตยกรรมฮาร์ดแวร์ลอจิก *พสิษฐ์ สุวรรณภิงคาร มนัส บุญเทียรทอง ปวีณ์นุช บุญประครอง จิรภัทร ชาลีเขียว* *รัมภ์รดา จวงสอน ภาคภูมิ แสงคำ และ ธีรวัฒน์ ภู่ระหงษ์*	64
อุตสาหการ		
IE-301	การปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดปัญหาคอขวดในสายการผลิตพริกแกงแดงปลอดสารพิษ: กรณีศึกษาอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารแห่งหนึ่ง *พรพิศ ศิริมา ขนิษฐา ปั้นสวย และ เฌอกชกร สังสุด*	70
IE-302	แนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพสายการผลิตด้วยการจำลองระบบ และประเมินความคุ้มค่าการลงทุนเพิ่มเครื่องจักร *พงษ์ชยธรณ์ สาสนัส พัฒนา ภาคพจน์ และ สมพงษ์ เชื้อพระคา*	76
IE-303	การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของชิ้นงานพลาสติกตามมาตรฐาน ISO527-2, ASTM D695 และ ASTM D6110 *ปิ่นธิดา ประยงค์พันธ์ พิมภกา บุญขวาง จิระศักดิ์ ธาระจักร์ ภูมิรัตน์ นวรัตน์ ณัฐกานต์ สุขสมรและ สถาพร สุริยันต์*	82

รหัสบทความ	ชื่อเรื่อง	หน้า
อุตสาหการ		
IE-304	การออกแบบและพัฒนาเครื่องย่อยพลาสติกขนาดเล็ก *กันตภณ อินต๊ะสาร ภคพล ฉิมพลี และ ดาราวรรณ วีรานันต์*	88
IE-305	การสร้างแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกสำหรับการทดสอบ แรงดึง แรงอัด และ แรงกระแทก *ธนะพัฒน์ อาจมิตร กิตติพงศ์ โคตรสาร กิตติศักดิ์ โคตรสาร และ กชกร วิรัชกุล*	94
IE-306	การออกแบบและพัฒนาเครื่องอบและล้างพลาสติกสำหรับกระบวนการรีไซเคิล HDPE กับ PET *ภาณุทัตต์ ศรีไทย ปฏิพัทธิ์ ไทยสงคราม และ อิทธิพล เนคมานุรักษ์*	99
IE-307	การพัฒนาต้นแบบเครื่องฉีดพลาสติกขนาดเล็ก *สุภชัย สัมปัตตะวนิช ตะวัน ฟักเขียว วรเทพ แก้วลอย และ วัชรพันธ์ สุขเกิด*	104
IE-308	การออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมปัจจัยในการปลูกไฮโดรโปนิกส์แบบอัตโนมัติ *สุดารัตน์ ดวงประทุม สิรวิชญ์ เงินแท้ และ วัชรพันธ์ สุขเกิด*	109
อิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม		
ET-401	ระบบติดตามและแจ้งเตือนคุณภาพอากาศภายในบ้านโดยใช้ Raspberry Pi *ศศิรมย์ พานทอง และ พีรกานต์ สุขโข*	114
ET-402	เกณฑ์การหยุดทำงานของฟัซซี่ดิฟเฟอเรนเชียลอิโวลูชันแบบหลายวัตถุประสงค์โดยการป้อนกลับเมตริกสมรรถนะ *ฉัตรแก้ว จริยตันติเวทย์ และ พลกฤษณ์ จริยตันติเวทย์*	120
ET-403	การวิเคราะห์ระดับความสุกของกล้วยหอมด้วยจมูกอิเล็กทรอนิกส์ *กมลทิพย์ วัฒกีกำธร ธนะกิจ วัฒกีกำธร และ สมชาย เปาะทองคำ*	126
ET-404	อุปกรณ์ตรวจกระแสไฟฟ้ารั่วระยะไกลในแหล่งน้ำ *คชพงศ์ สุมานนท์ พลกฤษณ์ จริยตันติเวทย์ ฉัตรแก้ว จริยตันติเวทย์ อานนท์ สิงห์เสถียร และ เวทรินทร์ ธัญสิประเสริฐ*	132
คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ		
CP-501	ระบบจัดการสหกิจศึกษา *กมลพรรณ จารุวาระกูล บุรัสกร อยู่สุข วีระยุทธ คุณรัตนสิริ ชยุตพล ขวัญชื่นใจ และ ธีเดช พวงมาลา*	136
CP-502	การพัฒนาระบบบริหารจัดการเว็บไซต์สำหรับสถาบันกวดวิชาคณิตศาสตร์ระดับมัธยมศึกษา *ศุวิล ชมชัยยา บุรัสกร อยู่สุข ภควัฒน์ กุลโชติ ชนนันต์ สุดใจรัก และ นายวัชร บัวศรีรัตนะ*	142

รหัสบทความ	ชื่อเรื่อง	หน้า
คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ		
CP-503	การพัฒนาแอปพลิเคชันตรวจจับท่าทางออกกำลังกายแบบเรียลไทม์ด้วยการเรียนรู้เชิงลึก *วีรวรรณ จันทนะทรัพย์ วิชยุตม์ ศรีงาม และ ปรานต์ เจ๊ะสมัน*	148
CP-504	การพยากรณ์จำนวนการจดทะเบียนหย่าร้างในประเทศไทย *วีรวรรณ จันทนะทรัพย์ พิสิษฐ์ คำหนุน กฤษฎา สุขแก้ว และ รัชวลัย สมะบุพ*	155
CP-505	โปรแกรมบันทึกกิจกรรมด้วยเทคนิคการประมวลผลภาษาธรรมชาติ กรณีศึกษา หลักสูตรสาขาวิชาวิทยาการข้อมูลและเทคโนโลยีสารสนเทศ *นริศรา นาคเมธี ภวัต บัวแตง และ พีรพัฒน์ ตันมาดี*	161
CP-506	การทำนายการเกิด PM2.5 จากข้อมูลจุดความร้อน และปัจจัยอุตุนิยมวิทยาด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง *นริศรา นาคเมธี เสมา แซ่คู และ ณัฐพงศ์ คงสบาย*	167
CP-507	การพัฒนาและการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานต่อแอปพลิเคชันรายงานสถานการณ์และแจ้งเตือนระดับน้ำขึ้นน้ำลงสำหรับชุมชนตำบลแสนภูดาษ *ณัฐติญา ไข่ติยากุล ณัฏนิฌา คงปัญญา กนกพร รุ่งเรือง และ พัชรพล สะและหมัด*	173
CP-508	ระบบตรวจจับป้ายทะเบียนแบบรวมศูนย์ผ่าน VPN และ Deep LearningPlate Recognition System Utilizing Centralized ALPR with Deep Learning and VPN Tunneling *กฤตภาส พงษ์สิงห์ ธัญเทพ กุลภัทร์แสงทอง วชิรวิทย์ รักษา รณกฤต เต่าทอง และ วิปัศย์ ปุยสาลี*	178
CP-509	การวิเคราะห์ความคิดเห็นของผู้ใช้บริการแอปพลิเคชัน Lazada จาก Google Play Store *นริศรา นาคเมธี อรรัมภา ตรงชาติ ชวัลลักษณ์ นัครสาร และ วรรณษา คงสุข*	184
CP-510	เว็ปแอปพลิเคชันร้านค้าดิจิทัล (POS) *บุรัสกร อยู่สุข เกรียงไกร เหลืองอำพล สิทธิศักดิ์ วรดิษฐ์ จิรภิญญา ศรีแก้ว และ อธิภัทร เนียมโสต*	190
เครื่องมือและแม่พิมพ์		
TD-601	การศึกษาค่าความร้อนที่เหมาะสมของแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปชิ้นงานแผ่นรองแก้วด้วยฝาขวดพลาสติกชนิด HDPE *จักรกฤษณ์ ยิ้มแฉ่ง วาสนา พรหมศร ทศพล ชูสร้อย ประเสริฐ ชุมปัญญา วีระเดช จองสุรียภาส และ ธวัชชัย ชาติตำนาญ*	196

รหัสบทความ	ชื่อเรื่อง	หน้า
เครื่องมือและแม่พิมพ์		
TD-602	การวิเคราะห์จุดศูนย์รวมแรงการเรียงลำดับขั้นตอนบนแผ่นป้อนในกระบวนการเจาะและตัดที่เปิดขวด *อัครเวช ศุภาคม สุนทร คำพินิจ กิตติพศ น้อยนิตย์ ชานน สิงหารุณ และ ซาโตมิ โมโตอุเมะ*	199
โยธาและสิ่งแวดล้อม		
CE-801	การศึกษาการรั่วซึมของวัสดุเปลี่ยนสถานะออกจากมวลรวมเบาภายหลังการให้ความร้อนซ้ำ 30 รอบ *ภัทรชัย พงศ์โสภา บูชิต มาโห้ ธนพัฒน์ น้ำจันทร์ กฤษดา เสือเอี่ยม* *ขวัญชนก อุนทะอ่อน จักรพันธ์ แสงสุวรรณ ณัชพงศ์พล คงชะสิงห์ และ ดารกร อินทรบุตร*	202
CE-802	การวิเคราะห์ความสำคัญของรายการตรวจสอบคุณภาพห้องชุดสำหรับวิศวกรผู้ปฏิบัติงาน *แพรวพรรณ เกิดพูล ทรงกฤต ตรีรัตน์พิจารณ์ วรานนท์ คงสง ชัยวัฒน์ ภู่วรกุลชัย* *และ ประสงค์ ธาราไชย*	208
CE-803	พัฒนาดินซีเมนต์ลูกรังผสมเศษกระเบื้องเซรามิกเป็นอิฐประสาน *นิโรจน์ เงินพรหม บูชิต มาโห้ ธนพัฒน์ น้ำจันทร์ กฤษดา เสือเอี่ยม* *ขวัญชนก อุนทะอ่อน จักรพันธ์ แสงสุวรรณ ณัชพงศ์พล คงชะสิงห์ ดารกร อินทรบุตร* *และ ภัทรชัย พงศ์โสภา*	214
CE-804	การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และศักยภาพการกักเก็บคาร์บอน กรณีศึกษาโครงการสวนสาธารณะหาดอิงกว๊าน จังหวัดพะเยา *พงศ์พัทธ์ ถนอมนิ่ม และ วันชัย ยอดสุดใจ*	222
CE-807	ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการปฏิบัติหน้าที่ของคณะกรรมการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้าง กรณีศึกษาหน่วยงานของรัฐแห่งหนึ่ง *ปองภพ แพงวิเศษ ธีรเดช สนองทวีพร วรานนท์ คงสง และ ชัยวัฒน์ ภู่วรกุลชัย*	228
CE-808	การประเมินและจัดการที่จอดรถด้วยแบบจำลองการจราจรระดับจุลภาค กรณีศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่ *อัครพงษ์ เทพแก้ว ธันวา รินคา อโณทัย จันทร์ที ระพีพัฒน์ ชูไว และ ชาคริต ชูวุฒยากร*	235
CE-810	ผลกระทบของวัสดุปอซโซลานต่อปฏิกิริยาอัลคาไลน์ซิลิกาในซีเมนต์มอร์ตาร์ *จักรพันธ์ แสงสุวรรณ ภัทรชัย พงศ์โสภา บูชิต มาโห้ ธนพัฒน์ น้ำจันทร์ กฤษดา เสือเอี่ยม* *ขวัญชนก อุนทะอ่อน ณัชพงศ์พล คงชะสิงห์ และ ดารกร อินทรบุตร*	241

รหัสบทความ	ชื่อเรื่อง	หน้า
การจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน		
IM-902	การปรับปรุงกระบวนการผลิตสารประกอบอินทรีย์ เมทิล-เพนทานไดออลเพื่อลดของเสียจากกระบวนการผลิต *ปรัชญา นารมย์ และ สุวิทย์ แพงกันยา*	247
IM-905	การประเมินความปลอดภัยในการจัดเก็บวัตถุอันตราย: การทบทวนวรรณกรรม *เฮงเฮง จารุนงคราญ และ เทอดพงษ์ แดงสี*	253
IM-906	การทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบว่าด้วยการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ในบริบทการศึกษาและพัฒนาเมือง *ปรีชาพงศ์ อากาศโสภา และ เทอดพงษ์ แดงสี*	259
การผลิตเครื่องประดับ		
JM-1001	กรณีศึกษาการออกแบบเครื่องประดับ จาก สัญลักษณ์แห่งพุทธ *อาวุธ ฉายศิริ อรรถวลี หอมละออ ธีรวัฒน์ แซ่ขวย และ กรกช สัมฤทธิ์*	265
JM-1002	การออกแบบเครื่องประดับจากเอกลักษณ์ประเพณีผีตาโขนจังหวัดเลย *วรัญชลีย์ ทวีชัย ชินภัทร ธรรมใจบุญมา และ อนุรัตน์ เขมานิฏฐาไท*	270
สาขาอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง		
OR-1102	การศึกษาความพร้อมการป้องกันและระงับอัคคีภัยในเขตองค์การบริหารส่วนตำบลบ่อวิน อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี *ณัฐปคัลภ์ ก้อนแพง ธีรเดช สนองทวีพร วรานนท์ คงสง ชัยวัฒน์ ภู่วรกุลชัย และ พันกรณ์ ชีวะวุฒิวัฒนวิทย์*	274
OR-1104	มาตรการทางกฎหมายในการอนุรักษ์พื้นที่ทางวัฒนธรรมและประวัติศาสตร์ กรณีศึกษาชุมชนเขตกำแพงเมืองเก่า จังหวัดแพร่ *อธิรมย์ ณัฏฐ์ณภัทร จตุรพร สิงหรัญ วิวัฒน์ กิตตินาราพร ชัยวัฒน์ ภู่วรกุลชัย และ เสรีย์ ตู้ประกาย*	280
OR-1105	การพัฒนาสเปรย์ชีวภาพระงับกลิ่นรองเท้าจากสารสกัดแทนนินเปลือกกล้วยน้ำว้าสู่นวัตกรรมสีเขียวเพื่อความยั่งยืน *ปิยพร สีสินธุ์ ฤทัยชนก ทิ้งชั่ว ภัทริกา สูงสมบัติ นิภาพร ปัญญา ภภัสร สิงหธรรม กฤษดา เสือเอี่ยม และ ดวงฤทัย นิคมรัฐ*	287

รหัสบทความ	ชื่อเรื่อง	หน้า
สาขาอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง		
OR-1106	การจัดสรรพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพสำหรับโรงงานผลิตยางรถยนต์ : กรณีศึกษาในจังหวัดสระบุรี *ชุติมนต์ สวนดอกไม้ และ พงษ์สันธ์ บัณฑิตสกุลชัย*	293
OR-1107	การประเมินผลเชิงทดลองของรูปแบบการทำงานระบบดักจับฝุ่นไฟฟ้าสถิตร่วมกับถ่านกัมมันต์สำหรับเตาเผากระดาษแบบเคลื่อนที่ *คเชนทร์ จันทร์เทศ และ มาลี สันติคุณาภรณ์*	298
OR-1108	การพัฒนาฟิล์มบริโภคได้จากสารสกัดเปลือกมังคุดเพื่อการยืดอายุการเก็บรักษาผลฝรั่งกิมจู *สิริธิดา นพกวด ณัฏฐณิชา หว่างเพียร พลอยนิชา หงษ์หิน สาวิตรี ปลื้มเนตร ปฏิภาณ ถิ่นพระบาท และ ดวงฤทัย นิคมรัฐ*	305
OR-1110	การเปรียบเทียบกระบวนการ ตรวจสอบอาคาร ประเภทโรงแรมระหว่างกฎหมายไทย และกฎหมายญี่ปุ่น *ชนาธิป แสงตะวัน เสรีย์ ตู้ประกาย ชัยวัฒน์ ภู่วรกุลชัย และ วิวัฒน์ กิตตินาราพร*	311
OR-1111	การศึกษาความเป็นไปได้ของการลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบแนวตั้งบริเวณผนังอาคาร *อรวรรณ แม้นจิต และ พงษ์สันธ์ บัณฑิตสกุลชัย*	316
OR-1112	การพัฒนาโมเดลธุรกิจสำหรับเทคโนโลยีพลังงานหมุนเวียนต้นแบบชีวมวล กรณีศึกษาวัสดุทางการเกษตร *ภาลินี ทำนุทัศน์ และ วีรินทร์ หวังจิรนิรันดร์*	322

บทความวิจัย

เครื่องกลและพลังงาน

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การออกแบบและวิเคราะห์ความแข็งแรงโครงสร้างรถแข่งสูตรนักศึกษาสำหรับการแข่งขัน TSAE Auto Challenge

Design and Structural Strength Analysis of a Formula Student Chassis for the TSAE Auto Challenge

หัสดินทร์ สมใจประเสริฐ[1] สถาพร วันนาพ่อ[1*] บุษราคัม โคตะสิน[1] และพิเชษฐ์ บุญญาลัย[1]

[1]คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800 Sthaphorn.w@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างรถแข่งสูตรนักศึกษา (Formula Student) โดยใช้ข้อกำหนดของ Formula SAE Rule 2025 ในการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างรถแข่งอย่างเคร่งครัด เพื่อให้เกิดความปลอดภัยสำหรับการแข่งขัน ทั้งสำหรับผู้ขับขี่ และทีมบริการต่างๆ งานวิจัยนี้เลือกใช้วัสดุอะลูมิเนียมอัลลอย 6061-T6 เป็นวัสดุหลักสำหรับการออกแบบ เนื่องจากมีน้ำหนักเบาและสามารถต้านทานความเค้นและความเครียดจากการดึงและการดัดได้เพียงพอกับการใช้งาน การวิเคราะห์โครงสร้างเน้นการวิเคราะห์การรับความเค้นที่เกิดจากการบิดของโครงสร้างจากการเข้าโค้งของยานยนต์ขณะใช้งานจริง เนื่องจากการบิดของโครงสร้างขณะเข้าโค้งนั้น ถือเป็นความเค้นวิกฤติที่โครงสร้างจะต้องไม่เกิดการเสียรูปถาวร ทั้งนี้เพื่อให้เกิดเสถียรภาพที่ดีต่อการยึดเกาะถนนกับระบบรองรับน้ำหนักของยานยนต์

คำสำคัญ : โครงสร้าง; รถแข่งสูตรนักศึกษา; แรงบิด

Abstract

This research aims to design and analyze the chassis structure of a Formula Student race car in strict compliance with the Formula SAE 2025 regulations to ensure safety for both the driver and supporting team members during competition. Aluminum alloy 6061-T6 was selected as the primary material due to its lightweight properties and sufficient resistance to tensile and bending stresses for practical applications. The structural analysis focuses on torsional stresses induced during cornering, which represent critical loading conditions that must not cause permanent deformation of the chassis. Ensuring adequate torsional rigidity is essential for maintaining structural integrity and achieving optimal tire-road contact through the vehicle suspension system.

Keywords: Chassis; Formula student; Torsion

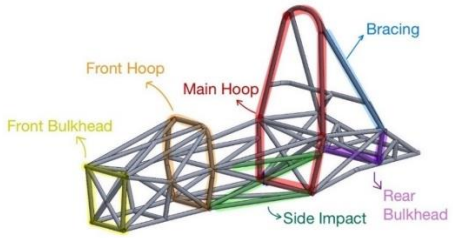
1. บทนำ

รถสูตรนักศึกษา (Formula Student) เป็นการแข่งขันการออกแบบและสร้างรถแข่งขนาดเล็กของนักศึกษาในระดับอุดมศึกษา โดยการออกแบบและสร้างรถจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดของสมาคมวิศวกรรมยานยนต์ (FSAE Rule) [1] ซึ่งการแข่งขันถูกแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ การแข่งขันภาคทฤษฎี (Static event) และการแข่งขันภาคสนาม (Dynamic event) โดยการแข่งขันภาคทฤษฎีประกอบด้วย การตรวจสภาพรถแข่งให้เป็นไปตามข้อกำหนดของสมาคมวิศวกรรมยานยนต์ การนำเสนอการออกแบบยานยนต์เชิงวิศวกรรม และการนำเสนอด้านการตลาดเกี่ยวกับค่าใช้จ่ายสำหรับการสร้างรถแข่งสูตรนักศึกษา ส่วนการแข่งขันภาคสนาม ประกอบด้วย การแข่งขันความเร็วทางตรง การแข่งขันด้านเสถียรภาพในทางโค้ง และการแข่งขันด้านความทนทานของรถแข่งสูตรนักศึกษา ซึ่งการแข่งขันภาคสนามมีตัวชี้วัด คือ เวลาต่อรอบที่สั้นที่สุด

รถแข่งสูตรนักศึกษาสามารถแบ่งได้ 5 ส่วนหลัก คือ ส่วนโครงสร้างรถแข่ง ส่วนระบบรองรับน้ำหนักและบังคับเลี้ยว ส่วนเครื่องยนต์และส่งกำลัง ส่วนห้ามล้อ และส่วนอากาศพลศาสตร์ ซึ่งส่วนโครงสร้างรถแข่งสูตรนักศึกษานั้น เป็นส่วนที่สำคัญลำดับต้น เนื่องจากเป็นส่วนที่ต้องเชื่อมต่อกับส่วนรองรับน้ำหนัก ส่วนเครื่องยนต์และส่งกำลัง เป็นต้น มีงานวิจัยหลายฉบับที่กล่าวถึงการออกแบบโครงสร้างรถแข่งสูตรนักศึกษาที่เน้นการออกแบบที่ถูกต้องตามข้อกำหนดของสมาคมวิศวกรรมยานยนต์ ซึ่งต้องมีความแข็งแรงและปลอดภัยกับผู้ขับขี่ [2-6] ทั้งนี้แนวทางการออกแบบโครงสร้างรถแข่งของงานวิจัยนี้ มีเป้าหมายการออกแบบให้โครงสร้างรถแข่งมีน้ำหนักเบา และสามารถทนต่อความเค้นที่เกิดจากการบิดจากแรงปฏิกิริยาที่ถูกส่งจากส่วนรองรับน้ำหนักมายังโครงสร้างรถแข่งได้โดยไม่เสียรูปอย่างถาวร ดังนั้น การออกแบบโครงสร้างรถแข่งสูตรนักศึกษาของงานวิจัยนี้ จึงเลือกใช้วัสดุอะลูมิเนียมอัลลอย 6061-T6 ในการออกแบบและวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SolidWorks

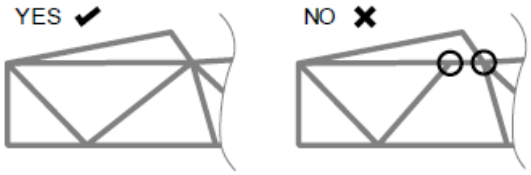
2. ข้อกำหนดการออกแบบโครงสร้างรถแข่งสูตรนักศึกษา

โครงสร้างรถแข่งสูตรนักศึกษาต้องถูกออกแบบให้เป็นไปตามข้อกำหนดของสมาคมวิศวกรรมยานยนต์ [1] โดยส่วนประกอบหลักของโครงสร้างรถแข่งดังแสดงในรูปที่ 1 ประกอบด้วย โครงด้านหน้า (Front bulkhead) โครงห่วงนิรภัยด้านหน้า (Front hoop) โครงห่วงนิรภัยหลัก (Main hoop) โครงกั้นด้านหลัง (Rear bulkhead) โครงค้ำยัน (Bracing) และโครงป้องกันการกระแทกด้านข้าง (Side impact) โดยโครงสร้างดังกล่าวถูกออกแบบให้สามารถรองรับแรงกระทำจากสภาวะการใช้งานจริงและแรงกระแทกในกรณีเกิดอุบัติเหตุ พร้อมทั้งช่วยกระจายแรงไปยังส่วนต่าง ๆ ของโครงสร้างเพื่อลดความเสียหายเฉพาะจุด นอกจากนี้ การจัดวางองค์ประกอบและการเสริมโครงค้ำยันอย่างเหมาะสมยังมีผลต่อความแข็งแรงและเสถียรภาพของรถแข่งสูตรนักศึกษา ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการควบคุมและความปลอดภัยของผู้ขับขี่



รูปที่ 1 ส่วนประกอบหลักของโครงสร้างรถแข่งสูตรนักศึกษา

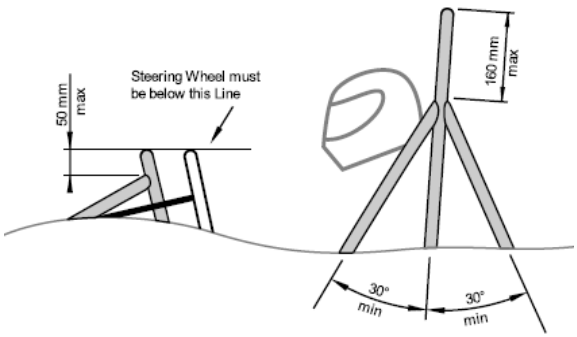
จุดเชื่อมต่อท่อกลมของโครงสร้างรถแข่งแบบสามเหลี่ยม (triangulation) เป็นหลักการสำคัญในการออกแบบโครงสร้างรถแข่งสูตรนักศึกษาโดยกำหนดให้โครงสร้างและช่วงระหว่างจุดต่อประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความมั่นคงของโครงสร้าง รูปแบบของจุดต่อที่ถูกต้องและไม่ถูกต้องตามข้อกำหนดแสดงในรูปที่ 2



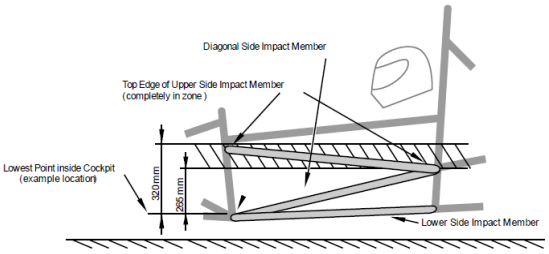
รูปที่ 2 จุดต่อท่อกลมของโครงสร้างรถแข่งที่ถูกต้อง (ซ้าย) และไม่ถูกต้องตามข้อกำหนด (ขวา) [1]

จุดเชื่อมต่อของโครงห่วงนิรภัยด้านหน้า (Front hoop) ต้องอยู่ไม่ต่ำกว่า 50 มิลลิเมตร จากผิวบนสุดของโครงห่วงนิรภัยด้านหน้า ดังแสดงในรูปที่ 6 และข้อกำหนดการออกแบบโครงป้องกันการกระแทกด้านข้าง (Side impact) สำหรับโครงสร้างรถแข่งสูตรนักศึกษาแสดงในรูปที่ 7

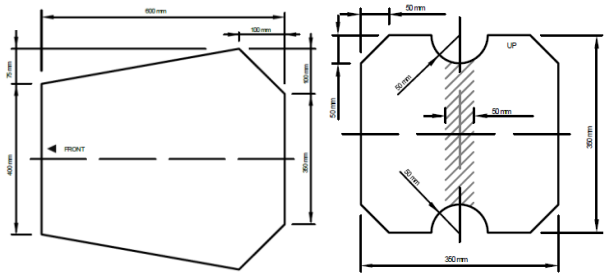
เนื่องจากโครงสร้างรถแข่งสูตรนักศึกษาต้องถูกออกแบบให้รองรับผู้ขับขี่เปอร์เซ็นไทล์ที่ 95 (95th percentile) ห้องผู้ขับขี่ของรถ (cockpit) จึงต้องถูกกำหนดขนาดอย่างแม่นยำ โดยแม่แบบขนาดของห้องผู้ขับขี่ (cockpit opening template) และแม่แบบหน้าตัดห้องผู้ขับขี่ (cockpit cross-section template) แสดงดังรูปที่ 8 ขณะที่รูปที่ 9 แสดงข้อกำหนดระยะช่องว่างขั้นต่ำของหมวกนิรภัย (helmet clearance) เมื่อผู้ขับขี่นั่งอยู่ในห้องผู้ขับขี่ของรถแข่ง



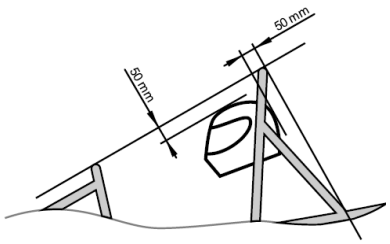
รูปที่ 6 จุดเชื่อมต่อโครงห่วงนิรภัย [1]



รูปที่ 7 ข้อกำหนดการออกแบบโครงป้องกันการกระแทกด้านข้าง [1]



รูปที่ 8 แม่แบบขนาดของห้องผู้ขับขี่ (ซ้าย) และแม่แบบหน้าตัดของห้องผู้ขับขี่ (ขวา) [1]



รูปที่ 9 ระยะช่องว่างขั้นต่ำของหมวกนิรภัย [1]

3. การเลือกวัสดุสำหรับออกแบบโครงสร้างรถแข่ง

วัสดุอะลูมิเนียมอัลลอย 6061-T6 ถูกเลือกมาใช้ในการออกแบบโครงสร้างรถแข่งสูตรนักศึกษา เนื่องจากมีอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักที่ดี สามารถลดมวลรวมของรถเพื่อเพิ่มสมรรถนะด้านการเร่งและการควบคุมได้ โดยองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติเชิงกลของวัสดุดังกล่าวแสดงดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ 6061-T6 [7]

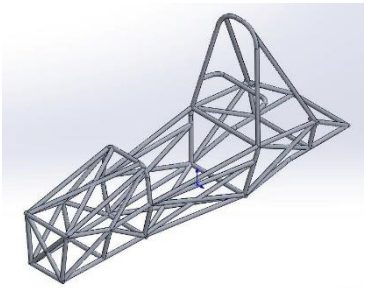
ธาตุ	ช่วงเปอร์เซ็นต์ (%)
อะลูมิเนียม (Al)	95.8-98.6
แมกนีเซียม (Mg)	0.8-1.2
ซิลิกอน (Si)	0.4-0.8
เหล็ก (Fe)	$\leq$ 0.7
ทองแดง (Cu)	0.15-0.4
โครเมียม (Cr)	0.04-0.35
สังกะสี (Zn)	$\leq$ 0.25
ไทเทเนียม (Ti)	$\leq$ 0.15
ธาตุอื่นๆ	$\leq$ 0.15

ตารางที่ 2 สมบัติเชิงกลของวัสดุ 6061-T6 [7]

สมบัติเชิงกล	ค่า
ความต้านแรงดึงสูงสุด	~290 MPa
ความต้านทานแรงคราก	~240 MPa
การยืดตัว ณ จุดขาด	~8–12%
ความแข็ง	~95 HB
ความต้านทานความล้า	~96 MPa

4. แบบจำลองโครงสร้างรถแข่งสูตรนักศึกษา

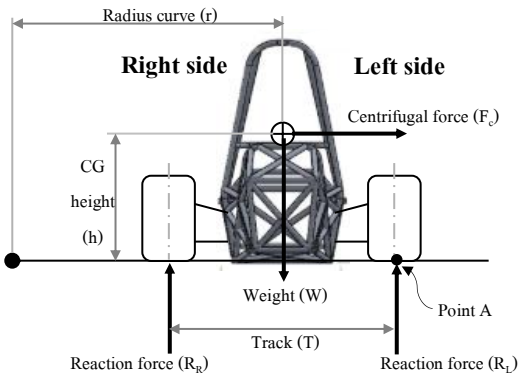
แบบจำลองโครงสร้างรถแข่งสูตรนักศึกษา ถูกออกแบบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SolidWorks โดยมีขนาดความยาว 2,440 mm ความสูง 1,146.9 mm และความกว้าง 649.7 mm ดังแสดงในรูปที่ 10 การออกแบบคำนึงถึงความเข้ากันได้กับระบบหลัก ได้แก่ ระบบรองรับน้ำหนักแบบปีกนกอิสระ เครื่องยนต์ยี่ห้อ Honda รุ่น CBR600rr ส่วนส่งกำลังแบบโซ่ และระบบห้ามล้อแบบดิสก์ วัสดุอะลูมิเนียมอัลลอย 6061-T6 ถูกกำหนดในแบบจำลอง โดยมวลรวมของโครงสร้างรถสูตรนักศึกษามีค่าเท่ากับ 20.348 kg



รูปที่ 10 แบบจำลองโครงสร้างรถแข่งสูตรนักศึกษา

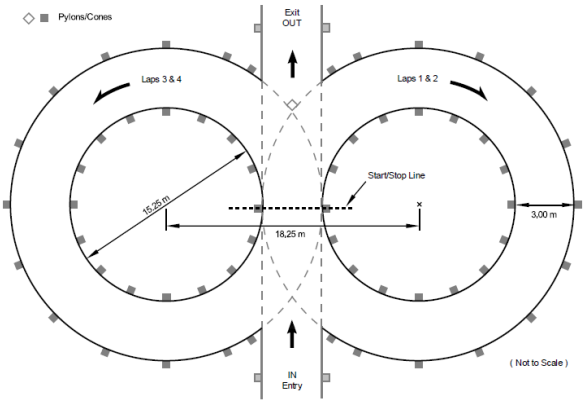
5. การวิเคราะห์ความแข็งแรงโครงสร้างรถสูตรนักศึกษา

รูปที่ 11 แสดงแผนภาพวัตถุอิสระของแรงที่ทำให้โครงสร้างรถแข่งเกิดการบิด เมื่อรถแข่งเคลื่อนที่โค้งขวาจะทำให้แรงปฏิกิริยาที่กระทำกับล้อของรถแข่งด้านซ้ายและขวาเกิดความแตกต่างกัน จึงส่งผลทำให้โครงสร้างรถแข่งเกิดการบิด



รูปที่ 11 แรงที่ทำให้โครงสร้างรถแข่งเกิดการบิดขณะเข้าโค้งทางขวา

สำหรับการแข่งขัน TSAE Auto Challenge มีตัวชี้วัดความสามารถของรถแข่งและทำให้ได้คะแนนมากที่สุดคือ “เวลา” ดังนั้นรถแข่งทุกคันจะต้องพยายามเคลื่อนที่ให้เร็วที่สุดเพื่อให้สามารถใช้เวลาในแต่ละสนามให้น้อยที่สุด ซึ่งการแข่งขันที่จะทำให้โครงสร้างรถแข่งสูตรนักศึกษาเกิดการบิดมากที่สุด คือ สนามแข่งขันความสามารถด้านการโคลงและการส่าย (Skid-pad) [1] ดังแสดงในรูปที่ 12 มีรัศมีของโค้งเท่ากับ 9.125 m ซึ่งแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง แรงปฏิกิริยาที่ล้อของรถแข่งและมวลรวมของรถคือตัวแปรที่ส่งผลให้โครงสร้างเกิดการบิด จากแผนภาพวัตถุอิสระรูปที่ 11 สามารถสรุปสมการที่ประกอบด้วยตัวแปรที่ส่งผลต่อการบิดของโครงรถดังสมการที่ (1)



รูปที่ 12 สนามทดสอบความสามารถด้านการโคลงและการส่าย [1]

$$(R_R T) + (F_c h) = \left(W \times \frac{T}{2}\right) \quad (1)$$

โดยที่

R_R คือ แรงปฏิกิริยาที่ล้อขวา (N)

T คือ ความกว้างฐานล้อ (m)

F_c คือ แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (N)

h คือ ความสูงจุดศูนย์ถ่วงรถแข่งสูตรนักศึกษา (N)

W คือ น้ำหนักของรถแข่งสูตรนักศึกษา (N)

เมื่อจัดรูปสมการที่ (1) เพื่อหาแรงปฏิกิริยาที่ล้อขวา ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างรถแข่งเกิดการบิด แสดงดังสมการที่ (2) [8] อย่างไรก็ตาม แรงปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นมากที่ล้อของรถแข่งด้านนอกเสมอ ในที่นี้คือแรงปฏิกิริยาล้อซ้าย จากรูปที่ 11 สามารถหาแรงปฏิกิริยาล้อซ้ายจากสมการที่ (3) [8]

$$R_R = m \times \left(\frac{g}{2} - \frac{v^2 h}{rT}\right) \quad (2)$$

$$R_L = m \times \left(\frac{g}{2} + \frac{v^2 h}{rT}\right) \quad (3)$$

โดยที่

m คือ มวลรวมของรถแข่งสูตรนักศึกษา (kg)

g คือ ความเร่งโน้มถ่วง ~9.81 m/s^2

r คือ รัศมีโค้งสนามทดสอบการโคลงและส่าย (9.125 m)

v คือ ความเร็วของรถแข่งสูตรนักศึกษา (m/s)

R_L คือ แรงปฏิกิริยาที่ล้อซ้าย (N)

จากการออกแบบรถแข่งสูตรนักศึกษาในรุ่นที่ผ่านมาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และการตั้งเป้าหมายให้รถแข่งทำเวลาในสนามทดสอบความสามารถด้านการโคลงและการส่ายให้สั้นที่สุด จึงอนุมานให้มวลรวมของรถแข่ง (m) เท่ากับ 320 kg ความสูงจุดศูนย์ถ่วงเท่ากับ 1 m ความกว้างของฐานล้อ (T) เท่ากับ 1.15 m ความเร็วของรถแข่ง (v) เท่ากับ 9.55 m/s เพื่อให้เคลื่อนที่ในสนามทดสอบการโคลงและการส่ายทางซ้ายสองรอบและขวาสองรอบในเวลา 24 sec

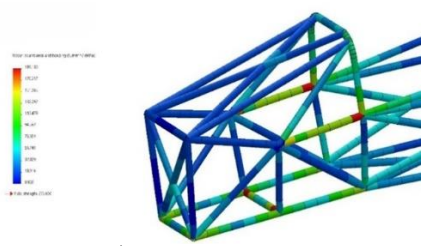
จากการกำหนดค่าตัวแปรดังกล่าวเพื่อทำให้รถแข่งสูตรนักศึกษาได้คะแนนสูงสุดในสนามทดสอบด้านการโคลงและการส่าย จึงนำค่าทั้งหมดไปแทนในสมการที่ (2) และ (3) จึงพบว่าแรงปฏิกิริยาที่ล้อขวา (R_R) และแรงปฏิกิริยาที่ล้อซ้าย (R_L) มีค่าเท่ากับ 1,211.56 N และ 4,350.76 N ตามลำดับ ซึ่งทำให้โครงสร้างรถแข่งเกิดการบิดและนำไปใช้ในการวิเคราะห์ความต้านทานแรงบิดของโครงสร้างโดยโปรแกรมสำเร็จรูปต่อไป

6. ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงโครงสร้างรถสูตรนักศึกษา

ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างรถแข่งสูตรนักศึกษาแบ่งออกเป็น 3 ช่วงของโครงสร้างรถ คือ จุดยึดส่วนรองรับน้ำหนักด้านหน้า จุดยึดส่วนรองรับน้ำหนักด้านหลัง และโครงป้องกันการกระแทกด้านข้างซึ่งเป็นบริเวณห้องนักขับ โดยความเค้นที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างรถที่เกิดจากแรงบิดคือผลลัพธ์หลักที่ใช้ชี้วัดความแข็งแรงและปลอดภัยเมื่อถูกสร้างและใช้งานจริงในสนามแข่ง ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความปลอดภัยกับแรงบิดที่กระทำซ้ำกับโครงสร้างระหว่างใช้งาน จึงใช้ค่าความปลอดภัยเท่ากับ 2.3 [9] ดังนั้นแรงที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SolidWorks มีค่าเท่ากับ 10.420 kN

6.1 ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงจุดยึดส่วนรองรับน้ำหนักด้านหน้า

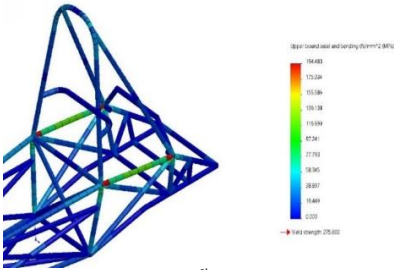
รูปที่ 13 แสดงความเค้นจากแรงบิดที่เกิดขึ้นบริเวณจุดยึดส่วนรองรับน้ำหนักด้านหน้าภายใต้แรงกระทำ 10.420 kN โดยพิจารณาค่าความเค้นและค่าความปลอดภัย ซึ่งการจำลองแรงบิดในลักษณะนี้อาศัยแนวคิดการถ่ายแรงผ่านจุดยึดของระบบรองรับน้ำหนักเพื่อจำลองสภาวะการบิดของโครงสร้างขณะเข้าโค้ง [10] ผลการวิเคราะห์พบว่าค่าความเค้นแตกต่างกันในแต่ละตำแหน่ง โดยจุดยึดปีกนกบน (ด้านหลังซ้าย) มีค่าความเค้นสูงสุด 182.37 MPa และมีค่าความปลอดภัยต่ำสุด 1.50 จึงเป็นตำแหน่งวิกฤตที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้าที่รายงานว่าบริเวณจุดยึดช่วงล่างเป็นตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงเนื่องจากเป็นจุดรับและถ่ายแรงหลักของโครงสร้าง [11] ขณะที่จุดยึดปีกนกบน (ด้านหน้าซ้าย) มีค่าความเค้น 155.25 MPa และค่าความปลอดภัย 1.77 ส่วนจุดยึดปีกนกล่าง (ด้านหน้าซ้าย) และ (ด้านหลังซ้าย) มีค่าความเค้น 140.53 และ 140.74 MPa และมีค่าความปลอดภัย 1.95 และ 2.69 ตามลำดับ ทั้งนี้พฤติกรรมดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการกระจายความเค้นภายใต้แรงบิดมีความสัมพันธ์โดยตรงกับเส้นทางการถ่ายแรงจากระบบรองรับน้ำหนักเข้าสู่โครงสร้างหลัก [12]



รูปที่ 13 ความเค้นที่เกิดขึ้นจากแรงบิดบริเวณจุดยึดส่วนรองรับน้ำหนักด้านหน้า

6.2 ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงจุดยึดส่วนรองรับน้ำหนักด้านหลัง

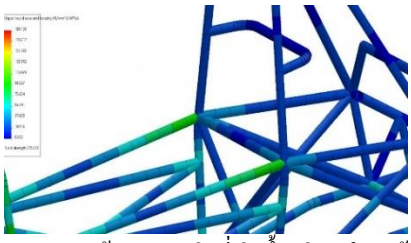
รูปที่ 14 แสดงความเค้นจากแรงบิดที่เกิดขึ้นบริเวณจุดยึดส่วนรองรับน้ำหนักด้านหลังภายใต้แรงกระทำ 10.420 kN โดยพิจารณาค่าความเค้นและค่าความปลอดภัย ซึ่งการกำหนดแรงบิดในลักษณะนี้อาศัยแนวคิดการถ่ายแรงผ่านจุดยึดของระบบรองรับน้ำหนักเพื่อจำลองสภาวะการบิดของโครงสร้างขณะเข้าโค้ง [10] ผลการวิเคราะห์พบว่าค่าความเค้นแตกต่างกันในแต่ละตำแหน่ง โดยจุดยึดปีกนกบน (ด้านหลังซ้าย) มีค่าความเค้นสูงสุด 194.43 MPa และมีค่าความปลอดภัยต่ำสุด 1.42 จึงเป็นตำแหน่งวิกฤตที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่รายงานว่าบริเวณจุดยึดช่วงล่าง โดยเฉพาะตำแหน่งปีกนกบน เป็นจุดที่เกิดความเค้นสูงจากการถ่ายแรงบิดเข้าสู่โครงสร้างโดยตรง [11] ขณะที่จุดยึดปีกนกบน (ด้านหน้าซ้าย) มีค่าความเค้น 193.15 MPa และค่าความปลอดภัย 1.42 ส่วนจุดยึดปีกนกล่าง (ด้านหน้าซ้าย) และ (ด้านหลังซ้าย) มีค่าความเค้น 23.79 และ 5.409 MPa และมีค่าความปลอดภัย 11.55 และ 50.84 ตามลำดับ ทั้งนี้พฤติกรรมการกระจายความเค้นดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเส้นทางการถ่ายแรงจากระบบรองรับน้ำหนักมีอิทธิพลโดยตรงต่อการเกิดแรงบิดในโครงสร้าง ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการวิเคราะห์โครงสร้างรถแข่งสูตรนักศึกษาที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย [12]



รูปที่ 14 ความเค้นจากแรงบิดที่เกิดขึ้นบริเวณจุดยึดส่วนรองรับน้ำหนักด้านหลัง

6.3 ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงโครงป้องกันการกระแทกด้านข้าง

รูปที่ 15 แสดงความเค้นจากแรงบิดที่เกิดขึ้นบริเวณโครงป้องกันแรงกระแทกด้านข้างภายใต้แรงกระทำ 10.420 kN โดยพิจารณาค่าความเค้นและค่าความปลอดภัย ซึ่งการวิเคราะห์แรงบิดของโครงสร้างในลักษณะนี้เป็นกรณีภาระวิกฤตที่ใช้ประเมินความแข็งแรงและความแข็งบิดของโครงสร้างรถแข่งสูตรนักศึกษา [12] ผลการวิเคราะห์พบว่าค่าความเค้นของโครงสร้างส่วนกลางทั้งสองด้านมีค่าใกล้เคียงกัน โดยโครงสร้างด้านซ้ายมีค่าความเค้น 101.07 MPa และค่าความปลอดภัย 2.72 ขณะที่โครงสร้างด้านขวามีค่าความเค้น 100.18 MPa และค่าความปลอดภัย 2.74 แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างส่วนกลางมีการกระจายความเค้นที่สมดุลและมีความปลอดภัย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่รายงานว่าโครงสร้างแบบ space frame ที่ออกแบบด้วยหลักการ triangulation จะช่วยให้การกระจายแรงมีความสมมาตรและลดความเข้มของความเค้นเฉพาะจุด [11] นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวยังแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างสามารถต้านทานการบิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นคุณลักษณะสำคัญที่ส่งผลต่อเสถียรภาพและการควบคุมรถแข่งขณะเข้าโค้ง [10]



รูปที่ 15 แสดงความเค้นจากแรงบิดที่เกิดขึ้นบริเวณโครงป้องกันแรงกระแทก

7. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการออกแบบและวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างรถแข่งสูตรนักศึกษาโดยอ้างอิงข้อกำหนดของ Formula SAE 2025 และเลือกใช้วัสดุอะลูมิเนียมอัลลอย 6061-T6 เพื่อให้ได้โครงสร้างที่มีน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรงเพียงพอทั้งนี้มวลรวมของโครงสร้างทั้งหมดเท่ากับ 20.348 กิโลกรัม โดยการวิเคราะห์มุ่งเน้นพฤติกรรมการรับแรงบิดของโครงสร้างภายใต้สภาวะการเข้าโค้ง ซึ่งเป็นกรณีวิกฤตที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของรถแข่ง

ผลการวิจัยพบว่า บริเวณจุดยึดส่วนรองรับน้ำหนักด้านหน้าและด้านหลังมีค่าความเค้นสูงสุดที่ 182.37 MPa และ 194.43 MPa ตามลำดับ โดยตำแหน่งวิกฤตอยู่ที่จุดยึดปีกนกบน (ด้านหลังซ้าย) ซึ่งมีค่าความปลอดภัยต่ำสุดเท่ากับ 1.50 และ 1.42 ตามลำดับ ขณะที่โครงสร้างส่วนกลางมีการกระจายความเค้นอย่างสมดุล โดยมีค่าความเค้นประมาณ 100 MPa และค่าความปลอดภัยมากกว่า 2.7 ทั้งนี้โครงสร้างรถแข่งสูตรนักศึกษาที่ออกแบบสามารถรองรับแรงบิดที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะการใช้งานได้โดยไม่เกิดการเสียรูปถาวร อย่างไรก็ตาม บริเวณจุดยึดปีกนกบนด้านหลังควรได้รับการพิจารณาปรับปรุงเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มค่าความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือของโครงสร้างในการใช้งานจริง ทั้งนี้ผลการวิจัยสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาและออกแบบโครงสร้างรถแข่งสูตรนักศึกษาให้มีประสิทธิภาพและความปลอดภัยสูงยิ่งขึ้นในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

[1] SAE International, *Formula SAE Rules 2025*, Version 1.0, Warrendale, PA, USA: SAE International, Aug. 31, 2024. [Online]. Available: https://www.sae.org

[2] V. Saplinova, I. Novikov, and S. Glagolev, “Design and specifications of racing car chassis as passive safety feature,” *Transportation Research Procedia*, vol. 50, pp. 591–607, 2020, doi: 10.1016/j.trpro.2020.10.071.

[3] P. Ye, W. Zhou, and C. Zhao, “Design and lightweight based on FSC racing monocoque,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1885, no. 5, p. 052031, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1885/5/052031.

[4] M. LuČićć, “Structural analysis of Formula Student vehicle chassis using Ansys software,” *International Scientific Journal “Industry 4.0”*, vol. 8, no. 2, pp. 52–56, 2023.

[5] S. Agarwal, P. Awasthi, T. Saatyaki, M. Kushwaha, and V. Jaiswal, “Design & analysis of spaceframe chassis for FSAE vehicle,” *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 9, no. 3, Mar. 2020, doi: 10.17577/IJERTV9IS030522.

[6] S. Agarwal and T. Saatyaki, “Fatigue analysis for upright of a FSAE vehicle,” *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 9, no. 3, Mar. 2020, doi: 10.17577/IJERTV9IS030392.

[7] NAITE TECH, “Aluminum 6061: Properties, T6 datasheet & CNC machining guide,” *NAITE TECH*, [Online]. Available: https://www.naitetech.com/aluminum-6061.html. [Accessed: Apr. 22, 2026].

[8] ธีระยุทธ สุวรรณประทีป, *วิศวกรรมยานยนต์*, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2560.

[9] วริทธิ์ อึ๊งภากรณ์ และ ชาญ ถนัดงาน, *การออกแบบเครื่องจักรกล เล่ม 1*, กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2548.

[10] A. Wolska, M. Kaczmarczyk, and P. Kiciński, “Formula Student car chassis – research on the torsional stiffness,” *ResearchGate*, 2024. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/377926757

[11] M. Krzikalla, T. Kerscher, and J. Herrmann, “Analysis of torsional stiffness of the frame of a Formula Student vehicle,” *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 65, no. 9, pp. 523–531, 2019.

[12] SAE International, “Computational Analysis and Optimization of Torsional Stiffness of a Formula-SAE Chassis,” SAE Technical Paper 2014-01-0355, 2014. doi: 10.4271/2014-01-0355

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การศึกษาอนุภาคขนาดเล็กที่มีผลในการตัดสินใจในการล้างเครื่องปรับอากาศ

The Study of Particulate Matter at Effective Decision to Clean the Air Conditioner

ปริญญา ตากรวด[1*] , ฉัตรชาญ ทองจับ[2] , ปรีดา จันทวงษ์[3]

[1]สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800 parinya.tk@hotmail.com

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของการสะสมฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 ที่มีต่อสมรรถนะและสภาวะการทำงานของเครื่องปรับอากาศแบบความเร็วรอบคงที่ (Fixed Speed) เพื่อพัฒนารูปแบบการตัดสินใจบำรุงรักษาแบบอิงสภาพ (Condition-Based Maintenance: CBM) โดยใช้ดัชนีความเสื่อมสมรรถนะ (Performance Deterioration Index: PDI) และเพื่อประเมินประสิทธิภาพของรูปแบบการตัดสินใจดังกล่าวก่อนและหลังการล้างทำความสะอาดเมื่อเทียบกับสภาวะอ้างอิง

การศึกษาใช้รูปแบบการวิจัยภาคสนามในห้องพักอาศัยจริง โดยตรวจวัดสภาพแวดล้อมและสมรรถนะของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนชนิดติดผนัง ขนาด 9,200 BTU/h ภายใต้การใช้งาน 4 ระยะ ได้แก่ (1) สภาวะอ้างอิง (2) การใช้งาน 3 เดือน (3) การใช้งาน 6 เดือน และ (4) หลังล้างทำความสะอาด ข้อมูลถูกคัดกรองช่วงที่คอมเพรสเซอร์หยุดทำงานออกด้วยเกณฑ์กำลังไฟฟ้าน้อยกว่า 0.05 kW ก่อนนำไปคำนวณอัตราการไหลของอากาศ ค่า COP และดัชนี PDI

ผลการศึกษาพบว่า PM2.5 ภายในห้องเฉลี่ยเพิ่มจาก 8.80 ug/m^3 ในระยะอ้างอิง เป็น 18.24 ug/m^3 หลังใช้งาน 3 เดือน และ 23.94 ug/m^3 หลังใช้งาน 6 เดือน ขณะที่อัตราการไหลของอากาศลดลง 30.94% และ 50.51% ตามลำดับ ส่วนค่า COP ลดลง 28.70% และ 42.32% ตามลำดับ ดัชนี PDI สามารถจำแนกสถานะได้เป็น Normal ในระยะอ้างอิง, Warning หลังใช้งาน 3 เดือน (PDI = 0.303), Critical หลังใช้งาน 6 เดือน (PDI = 0.481) และกลับสู่ Normal หลังล้างทำความสะอาด (PDI = -0.128) ผลการศึกษาสนับสนุนว่า PDI สามารถใช้เป็นเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจในการกำหนดช่วงเวลาการล้างเครื่องปรับอากาศที่เหมาะสมเชิงสมรรถนะ อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้ไม่ได้วัดมวลฝุ่นที่สะสมบนคอยล์เย็นโดยตรง และไม่ได้ตรวจวัด PM1, PM10 หรือ TSP จึงควรตีความผลในฐานะกรณีศึกษาภาคสนามภายใต้สภาพแวดล้อมจริง

คำสำคัญ : PM2.5, เครื่องปรับอากาศ, การล้างเครื่องปรับอากาศ, Condition-Based Maintenance, Performance Deterioration Index, COP

Abstract

This study aimed to investigate the effect of fine particulate matter (PM2.5) accumulation on the performance and operating condition of a fixed-speed split-type air conditioner, to develop a condition-based maintenance (CBM) decision model using a Performance Deterioration Index (PDI), and to evaluate the effectiveness of the proposed decision model before and after cleaning intervention compared with the baseline condition.

A field experimental study was conducted in an actual residential room using a 9,200 BTU/h fixed-speed wall-mounted split air conditioner. The experiment was divided into four phases: (1) baseline condition (2) three-month operation (3) six-month operation and (4) post-cleaning verification. Data recorded during compressor-off periods were excluded using the threshold of power consumption below 0.05 kW. The remaining steady-state data were used to calculate airflow rate, coefficient of performance (COP), and weighted PDI.

The results showed that average indoor PM2.5 concentration increased from 8.80 ug/m3 at baseline to 18.24 ug/m3 after three months and 23.94 ug/m3 after six months of operation. Airflow rate decreased by 30.94% and 50.51%, while COP decreased by 28.70% and 42.32% in the three-month and six-month phases, respectively. The proposed PDI successfully classified the maintenance status into Normal at baseline, Warning after three months (PDI = 0.303), Critical after six months (PDI = 0.481), and Normal after cleaning (PDI = -0.128). The findings support the use of PDI as a performance-based decision support tool for determining appropriate cleaning timing. However, the study did not directly measure deposited dust mass on the evaporator coil and did not include PM1, PM10, or TSP measurements; therefore, the findings should be interpreted as evidence from a field-based case study rather than a direct mass-balance proof of PM2.5 deposition.

Keywords: PM2.5, air conditioner, air-conditioner cleaning, condition-based maintenance, Performance Deterioration Index, COP

1. บทนำ

ปัญหาฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 เป็นประเด็นสำคัญด้านคุณภาพอากาศของประเทศไทย โดยเฉพาะในช่วงฤดูหนาวและฤดูแล้ง ซึ่งประชาชนมีแนวโน้มใช้ชีวิตภายในอาคารมากขึ้นและเปิดใช้งานเครื่องปรับอากาศต่อเนื่องเพื่อรักษาสภาวะความสบายและลดการรับฝุ่นจากภายนอก อย่างไรก็ตาม เครื่องปรับอากาศเองอาจได้รับผลกระทบจากฝุ่นละอองขนาดเล็กที่เล็ดลอดผ่านแผ่นกรองอากาศชั้นต้นและหมุนเวียนผ่านระบบอย่างต่อเนื่อง

ในเชิงกลไก เมื่อฝุ่นละอองสัมผัสกับหยดน้ำควบแน่นบนแผงคอยล์เย็น อนุภาคฝุ่นอาจรวมตัวเป็นคราบสกปรกหรือ Fouling ส่งผลให้เกิดความต้านทานลมและความต้านทานความร้อน ทำให้อัตราการไหลของอากาศลดลง ความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง และค่า COP เสื่อมถอยตามระยะเวลาการใช้งาน การล้างเครื่องปรับอากาศตามรอบเวลาแบบตายตัว เช่น ทุก 6 เดือน จึงอาจไม่สอดคล้องกับสภาพจริง เพราะในพื้นที่ที่มีภาระฝุ่นสูง เครื่องอาจเข้าสู่สภาวะเสื่อมก่อนกำหนด ในขณะที่บางพื้นที่อาจยังไม่จำเป็นต้องล้าง

งานวิจัยนี้จึงเสนอแนวทางการตัดสินใจบำรุงรักษาแบบอิงสภาพ โดยใช้ดัชนีความเสื่อมสมรรถนะ PDI ซึ่งพิจารณาจากการสูญเสียอัตราการไหลของอากาศและการลดลงของค่า COP เพื่อใช้เป็นเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจในการกำหนดช่วงเวลาการล้างเครื่องปรับอากาศที่เหมาะสมเชิงสมรรถนะ

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลกระทบของการสะสมฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 ที่มีต่อสมรรถนะและสภาวะการทำงานของเครื่องปรับอากาศแบบความเร็วรอบคงที่

2. เพื่อวิเคราะห์และพัฒนารูปแบบการตัดสินใจบำรุงรักษาแบบอิงสภาพ โดยใช้ดัชนีความเสื่อมสมรรถนะ PDI

3. เพื่อประเมินประสิทธิภาพของรูปแบบการตัดสินใจที่พัฒนาขึ้นในสภาวะก่อนและหลังการล้างทำความสะอาด โดยเปรียบเทียบอัตราการไหลของอากาศ ค่า COP และดัชนี PDI กับสภาวะอ้างอิง

2. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยใช้รูปแบบการศึกษาภาคสนามในสภาพแวดล้อมจริง (Field Experimental Research) โดยเลือกศึกษาเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนชนิดติดผนัง ระบบความเร็วรอบคงที่ ขนาด 9,200 BTU/h ติดตั้งในห้องพักอาศัยจริง ขนาดประมาณ 2.8 × 4 × 3 เมตร ซึ่งมีการใช้งานช่วงกลางวันและควบคุมการเปิด–ปิดประตูหน้าต่างเพื่อลดภาระความร้อนแทรกซ้อน แต่ยังคงสภาพการใช้งานจริง รวมถึงฝุ่นจากกิจกรรมภายในห้อง การศึกษานี้ไม่ได้ควบคุมความเข้มข้นของ PM2.5 ด้วยการพ่นฝุ่นหรือสร้างสภาวะฝุ่นเทียมในห้องทดลอง แต่ใช้การตรวจวัด PM2.5 ภายในและภายนอกห้องอย่างต่อเนื่อง เพื่อสะท้อนภาระฝุ่นที่เครื่องปรับอากาศได้รับภายใต้สภาพการใช้งานจริง แบ่งการทดลองออกเป็น 4 ช่วงเวลา (ดังตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 สรุประยะการทดลองและบทบาทในการวิเคราะห์

ระยะการทดลอง	คำอธิบาย	บทบาทในการวิเคราะห์
Phase 1 Baseline	สภาวะอ้างอิง/เครื่องสะอาด	ใช้เป็นค่าฐานของ Airflow, COP และ PDI
Phase 2 ใช้งาน 3 เดือน	สภาวะสะสมฝุ่นระยะแรก	ประเมินการเข้าสู่ระดับ Warning
Phase 3 ใช้งาน 6 เดือน	สภาวะสะสมฝุ่นรุนแรง	ประเมินการเข้าสู่ระดับ Critical
Phase 4 หลังล้าง	สภาวะหลังล้างทำความสะอาด	ประเมินการฟื้นฟูสมรรถนะเทียบ Baseline

การคำนวณดัชนี PDI

ดัชนี PDI พัฒนาขึ้นจากแนวคิดว่า การสูญเสียอัตราการไหลของอากาศตอบสนองต่อการอุดตันของฝุ่นได้เร็วกว่าการลดลงของ COP จึงกำหนดน้ำหนักให้ Airflow Loss เท่ากับ 0.7 และ COP Loss เท่ากับ 0.3 โดยแปลผลเป็น 3 ระดับ ได้แก่ Normal (PDI < 0.20), Warning (0.20 $\leq$ PDI < 0.40) และ Critical (PDI $\geq$ 0.40)

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณผ่านการคัดกรองสภาวะคงตัว โดยตัดข้อมูลช่วงที่กำลังไฟฟ้าน้อยกว่า 0.05 kW ออก เพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากช่วงที่คอมเพรสเซอร์หยุดทำงาน

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

สภาวะ PM2.5 ระหว่างการทดลอง

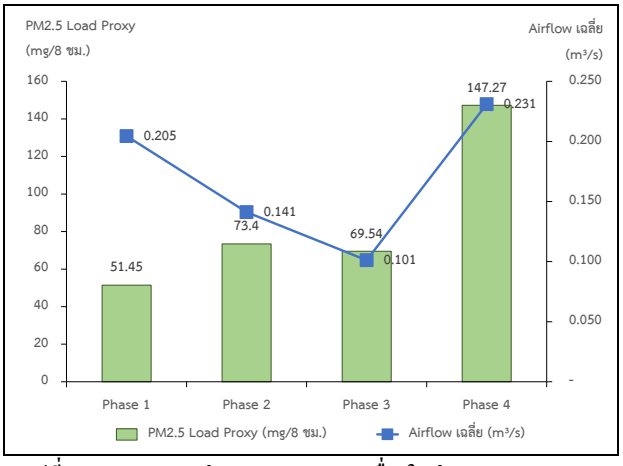
ผลการตรวจวัด PM2.5 พบว่าแต่ละ Phase มีภาระฝุ่นภายในและภายนอกห้องแตกต่างกัน โดย PM2.5 ภายในห้องเฉลี่ยเพิ่มจาก 8.80 ug/m^3 ใน Phase 1 เป็น 18.24 ug/m^3 ใน Phase 2 และ 23.94 ug/m^3 ใน Phase 3 สะท้อนว่าเครื่องปรับอากาศได้รับภาระฝุ่นสูงขึ้นในช่วงการใช้งานต่อเนื่อง (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 สภาวะ PM2.5 ภายในและภายนอกห้องระหว่างการทดลอง

ระยะการทดลอง	PM2.5 (ug/m^3)		Indoor/Outdoor Ratio
	ภายในเฉลี่ย	ภายนอกเฉลี่ย	
Phase 1 Baseline	8.80	6.90	1.27
Phase 2 ใช้งาน 3 เดือน	18.24	17.90	1.02
Phase 3 ใช้งาน 6 เดือน	23.94	20.57	1.16
Phase 4 หลังล้าง	22.13	21.77	1.02

ภาระ PM2.5 ผ่านกระแสลม

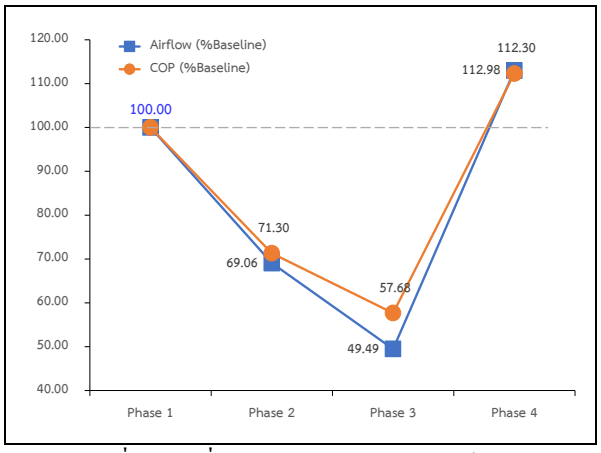
เมื่อนำค่า PM2.5 ภายในห้องมาพิจารณาร่วมกับอัตราการไหลของอากาศ พบว่า Phase 2 มี PM2.5 Load Proxy (ค่าประมาณมวล PM2.5 ที่ไหลผ่านกระแสลมของเครื่องปรับอากาศใน 8 ชั่วโมง ไม่ใช่มวลฝุ่นที่สะสมบนแผงคอยล์เย็นโดยตรง) ผ่านกระแสลมสูงกว่า Phase 1 เนื่องจากความเข้มข้นของ PM2.5 เพิ่มขึ้น แม้ Airflow จะลดลงแล้ว ส่วน Phase 3 มี PM2.5 ภายในเฉลี่ยสูงที่สุด แต่ Load Proxy ไม่สูงที่สุด เนื่องจาก Airflow ลดลงอย่างมากจากการเสื่อมสมรรถนะของเครื่องปรับอากาศ ขณะที่ Phase 4 หลังล้างมี Load Proxy สูงที่สุด เนื่องจาก Airflow ฟื้นตัวสูงขึ้นชัดเจน จึงมีอากาศและอนุภาค PM2.5 ผ่านระบบมากขึ้น (รูปที่ 1)



รูปที่ 1 ภาระ PM2.5 ผ่านกระแสลมของเครื่องในช่วงของการทดลอง

ผลกระทบต่อสมรรถนะเครื่องปรับอากาศ

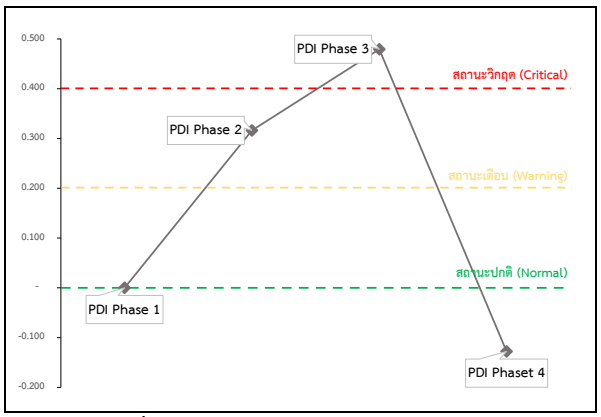
เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะอ้างอิง พบว่าการใช้งานต่อเนื่องทำให้สมรรถนะของเครื่องปรับอากาศลดลงอย่างชัดเจน โดย Airflow ลดลงจาก 0.2045 m^3/s ใน Phase 1 เหลือ 0.1412 m^3/s ใน Phase 2 และ 0.1012 m^3/s ใน Phase 3 คิดเป็นการสูญเสียร้อยละ 30.94 และ 50.51 ตามลำดับ ในขณะเดียวกัน COP ลดลงจาก 4.3685 เหลือ 3.1146 และ 2.5197 หรือคิดเป็นการสูญเสียร้อยละ 28.70 และ 42.32 ผลดังกล่าวสะท้อนว่าในระยะแรก Airflow ตอบสนองต่อการสะสมฝุ่นเร็วกว่าค่า COP ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดทางทฤษฎีว่าความต้านทานการไหลของอากาศบนคอยล์จะเพิ่มขึ้นก่อนที่ผลกระทบต่อประสิทธิภาพเชิงพลังงานจะเด่นชัดเต็มที่ (รูปที่ 2)



รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงสมรรถนะเชิงสัมพัทธ์ของ Airflow และ COP เมื่อเทียบกับ Baseline

การจำแนกสถานะด้วย PDI และการอภิปรายผล

เมื่อคำนวณดัชนี PDI ซึ่งให้น้ำหนัก Airflow Loss 0.7 และ COP Loss 0.3 พบว่า Phase 2 มี PDI เท่ากับ 0.3027 จัดอยู่ในระดับ Warning และ Phase 3 มีค่า 0.4805 จัดอยู่ในระดับ Critical ผลดังกล่าวสนับสนุนว่าโมเดล PDI สามารถใช้เป็นตัวชี้วัดเชิงสมรรถนะเพื่อบ่งชี้ช่วงเวลาที่เหมาะสมต่อการล้างเครื่องปรับอากาศได้ ในเชิงปฏิบัติ ค่า Warning ที่ตรวจพบใน Phase 2 สะท้อนว่าช่วงเวลาประมาณ 3 เดือนเริ่มมีสัญญาณเตือนให้เฝ้าระวัง ส่วนค่า Critical ใน Phase 3 ชี้ว่าหากปล่อยให้ใช้งานต่อเนื่องโดยไม่ล้างทำความสะอาด สมรรถนะของเครื่องมีแนวโน้มเสื่อมถอยชัดเจน ภายหลังการล้างทำความสะอาดใน Phase 4 ค่า Airflow และ COP ฟื้นตัวกลับมาสูงกว่าสภาวะอ้างอิงเล็กน้อย และ PDI ลดลงเป็น -0.1278 กลับสู่สถานะ Normal ซึ่งสนับสนุนว่าการล้างช่วยฟื้นสภาพการไหลของอากาศและสมรรถนะโดยรวมของเครื่องปรับอากาศ อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ดังกล่าวควรตีความในฐานะกรณีศึกษาเชิงภาคสนาม เนื่องจากการวิจัยไม่ได้วัดมวลฝุ่นที่สะสมบนคอยล์โดยตรงและไม่ได้ควบคุมองค์ประกอบของฝุ่นให้มีเฉพาะ PM2.5 (รูปที่ 3)



รูปที่ 3 แนวโน้มค่า PDI ในแต่ละระยะทดลอง

4 สรุป

การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า การใช้งานเครื่องปรับอากาศภายใต้สภาพแวดล้อมที่มี PM2.5 มีความสัมพันธ์กับการเสื่อมถอยของสมรรถนะของเครื่อง โดยเฉพาะ Airflow ซึ่งตอบสนองต่อการสะสมฝุ่นได้ไวกว่า COP แบบจำลอง PDI ที่ให้น้ำหนัก Airflow Loss 0.7 และ COP Loss 0.3 สามารถจำแนกสถานะการบำรุงรักษาได้อย่างเป็นระบบ โดยสามารถระบุสถานะเตือน (Warning) ในช่วงใช้งานประมาณ 3 เดือน และสถานะวิกฤต (Critical) ในช่วงใช้งานประมาณ 6 เดือน

ภายหลังการล้างทำความสะอาด สมรรถนะของเครื่องฟื้นตัวกลับสู่ระดับใกล้เคียงหรือสูงกว่าสภาวะอ้างอิง ซึ่งสนับสนุนว่ารูปแบบการตัดสินใจแบบอิงสภาพที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้เป็นเครื่องมือสนับสนุนการกำหนดช่วงเวลาการล้างที่เหมาะสมเชิงสมรรถนะได้

อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้ยังมีข้อจำกัดสำคัญ คือ ใช้วิธีการตรวจวัดฝุ่นละออง PM2.5 เป็นหลัก ไม่ได้ตรวจวัดฝุ่นละออง PM1, PM10, TSP หรือ ตรวจวัดมวลฝุ่นบนคอยล์โดยตรง จึงควรตีความผลอย่างระมัดระวัง และควรมีการทดสอบซ้ำในหลายพื้นที่ หลายฤดูกาล และหลายประเภทเครื่องปรับอากาศในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ตลอดจนผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่มีส่วนช่วยให้การดำเนินงานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ. (2565). ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ เรื่อง กำหนดมาตรฐานฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน ในบรรยากาศโดยทั่วไป. ราชกิจจานุเบกษา, 139(ตอนพิเศษ 163 ง), 21.

[2] กรมควบคุมมลพิษ. (2568). ข้อมูลคุณภาพอากาศจากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศ ตำบลวังเย็น อำเภอแปลงยาว จังหวัดฉะเชิงเทรา. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

[3] คำสุข, เชาวลิต. (2563). ระยะเวลาบำรุงรักษาที่เหมาะสมสำหรับเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน [สารนิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย]

[4] ASHRAE. (2021). 2021 ASHRAE handbook—Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

[5] ASHRAE. (2023). ANSI/ASHRAE Standard 241-2023: Control of infectious aerosols. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

[6] Siegel, J. A., Walker, I. S., & Sherman, M. H. (2002). Dirty air conditioners: Energy implications of coil fouling. Proceedings of the 2002 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, 1, 287–300.

[7] World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization.

สแกนรูปถ่าย
2 cm x 2 cm

ประวัติผู้เขียนบทความ
นายปริญญา ตากรวด สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี อส.บ.เทคโนโลยีขนถ่ายวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปัจจุบันทำงาน กรรมการผู้จัดการ บริษัท ชิลลี ฟูล จำกัด งานวิจัยที่สนใจ ระบบปรับอากาศ

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การวิเคราะห์อิทธิพลของขนาดถังพักลมและการตั้งค่าความดันควบคุมที่มีต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องอัดอากาศแบบสตาร์ท-สต็อป

Analysis of Air Receiver Tank Size and Pressure Setting Influences on Energy Consumption of Start-Stop Controlled Air Compressors

อนันต์ เต็มเปี่ยม[1*] นายพิเชษฐ์ บุญญาลัย ปฏิวัติ คมวชิรกุล และ พลรัชต์ บุญมี

1381 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร anan.t@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษาวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบอัดอากาศที่ใช้การควบคุมแบบเริ่มและหยุดทำงาน (Start-Stop Control) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่แพร่หลายในภาคส่วนอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อม โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อระบุการตั้งค่าความดันที่เหมาะสมและขนาดของถังพักลมที่ส่งผลให้เกิดความประหยัดพลังงานไฟฟ้าสูงสุดภายใต้สภาวะภาระงานที่แตกต่างกัน การทดลองดำเนินการโดยใช้เครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบจำนวน 3 ขนาด (2.2 kW, 4.0 kW และ 7.5 kW) ร่วมกับถังพักลม 4 ขนาด (300, 360, 600 และ 660 ลิตร) ครอบคลุมกรณีการทดสอบทั้งหมด 12 กรณี โดยมีการปรับเปลี่ยนภาระการใช้งานอากาศอัดตั้งแต่ร้อยละ 20 ถึง 80 ของความสามารถในการผลิต และทดสอบในช่วงความดันควบคุมที่หลากหลายตั้งแต่ 6 ถึง 9 บาร์ ผลการทดสอบเชิงประจักษ์บ่งชี้ว่าการตั้งค่าช่วงความดันควบคุมที่ 6-7 บาร์ เป็นสภาวะที่ประหยัดพลังงานไฟฟ้ามากที่สุดในทุกขนาดของเครื่องอัดอากาศและทุกขนาดของถังพักลม ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดทางวิศวกรรมที่ว่าการลดความดันใช้งานลงสามารถลดกำลังไฟฟ้าที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ได้อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ ผลการศึกษายังพบความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนระหว่างขนาดของถังพักลมและภาระการใช้งาน โดยถังพักลมขนาดใหญ่จะช่วยประหยัดพลังงานได้ดีในสภาวะภาระงานต่ำ แต่ในสภาวะภาระงานสูงอาจส่งผลในทิศทางตรงกันข้ามเนื่องจากระยะเวลาการสะสมความดันที่ยาวนานขึ้น งานวิจัยนี้ไม่เพียงแต่นำเสนอผลการทดลองที่เป็นรูปธรรม แต่ยังทำการสอบเทียบผลการทดลองกับมาตรฐานสากลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อสร้างความเชื่อมั่นในผลการวิเคราะห์และข้อเสนอแนะสำหรับการนำไปปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานในภาคอุตสาหกรรม

คำสำคัญ: ช่วงความดันควบคุม, เครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบ, การควบคุมแบบสตาร์ท-สต็อป, ถังพักลม, การใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะ

Abstract

This research investigates the energy efficiency of compressed air systems (CAS) employing start-stop control mechanisms, a technology widely utilized in small-to-medium industrial enterprises. The study aims to determine the optimal discharge pressure setpoints and air receiver tank volumes to minimize electrical energy consumption under diverse operational load profiles. Experimental evaluations were performed on three reciprocating air compressors (2.2 kW, 4.0 kW, and 7.5 kW) across four receiver capacities (300, 360, 600, and 660 liters), totaling 12 test cases. Operational loads were varied from 20% to 80% of the rated free air delivery (FAD), with pressure bands adjusted between 6 and 9 bar. Empirical evidence demonstrates that a 6-7 bar pressure band consistently achieves the highest energy savings regardless of compressor size or tank volume. This aligns with thermodynamic principles where a lower pressure ratio reduces the required motor power and improves the specific energy consumption (SEC). Additionally, the results reveal a non-linear relationship between receiver volume and energy efficiency relative to the system load; larger receiver tanks optimize energy use during part-load conditions (20-40%) by mitigating frequent motor starts and extending idle durations. Conversely, under high-load conditions (60-80%), excessive receiver volume may increase energy consumption due to extended pressure accumulation cycles within the specified measurement timeframe. The study further validates these findings by benchmarking against international standards, confirming that a 1 bar reduction in discharge pressure yields an approximately 7% to 8% reduction in electrical energy consumption.

Keywords: Pressure band, Reciprocating air compressor, Start-stop control, Air receiver tank, Specific energy consumption.

1. บทนำ

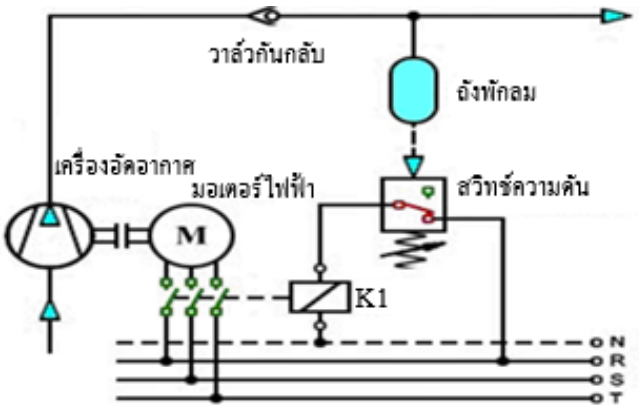
ในปัจจุบันนี้พลังงานอากาศอัดถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางเนื่องจากการได้เปรียบเชิงกลของอุปกรณ์ที่ใช้อากาศอัดทำให้เกิดงานในแนวเส้นตรง เมื่อเทียบกับอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานรูปแบบอื่น เช่น มอเตอร์ไฟฟ้า [1] เป็นต้น เครื่องจักรที่ใช้งานในอุตสาหกรรมในปัจจุบันนี้ส่วนใหญ่ต้องประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่ใช้อากาศอัด เพราะฉะนั้นโรงงานอุตสาหกรรมทุกแห่ง ต้องมีเครื่องอัดอากาศเพื่อผลิตอากาศอัดให้กับเครื่องจักรที่ต้องใช้อากาศอัดเหล่านั้นนอกจากโรงงานอุตสาหกรรมแล้ว ยังมีสถานที่อื่นๆ อีกมากมายที่ต้องใช้อากาศอัด เช่น อู่ซ่อมรถ, โรงพยาบาล, สถานศึกษา หรือแม้แต่ห้างสรรพสินค้าก็ยังต้องใช้อากาศ

อัด และเนื่องการควบคุมเครื่องอัดอากาศโดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 แบบ คือ การควบคุมแบบ สตาร์ท-สต็อป และ แบบควบคุมโหลด-อันโหลด จากปัจจุบันนี้ยังไม่มีข้อมูลที่สามารถให้คำแนะนำได้ว่าการควบคุมเครื่องอัดอากาศแบบ สตาร์ท-สต็อปนั้น ควรตั้งค่าความดันเท่าใดในการควบคุมให้เครื่องอัดอากาศ ตัด-ต่อการทำงาน เพื่อให้ประหยัดค่าพลังงานไฟฟ้าเนื่องจากการใช้เครื่องอัดอากาศให้มากที่สุด งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาระบบควบคุมของเครื่องอัดอากาศแบบสตาร์ท-สต็อปและคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้งาน [2]

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การควบคุมแบบ สตาร์ท-สต็อป [3]

การควบคุมวิธีนี้เหมาะกับเครื่องอัดอากาศขนาดเล็ก มอเตอร์ของเครื่องอัดอากาศจะถูกควบคุมการสตาร์ทและหยุดโดยผ่านสวิตช์ความดัน (Pressure Switch) ที่ต่ออยู่บนถังพักลมการทำงานของวงจรควบคุมเริ่มจากเมื่อความดันลมในถังพักลมต่ำลง สวิตช์ความดันจะต่อกระแสไฟฟ้าให้กับรีเลย์ K1 หน้าสัมผัสของรีเลย์ K1 ก็จะต่อกระแสไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ของเครื่องอัดอากาศทำงาน เครื่องอัดอากาศทำงานอัดอากาศเข้าถังพักลมจนถึงค่าความดันที่กำหนด ความดันลมจากถังพักลมจะดันสวิทช์ความดันให้ตัดกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับรีเลย์ K1 ทำให้หน้าสัมผัสของรีเลย์ K1 ตัดกระแสไฟฟ้าที่ให้กับมอเตอร์ของเครื่องอัดอากาศ สำหรับงานวิจัยนี้จะศึกษาการประหยัดพลังงานจากการควบคุมแบบนี้เท่านั้น



รูปที่ 1 แสดงการควบคุมแบบ สตาร์ท-สต็อป

2.2 การคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้า [1]

ค่าพลังงานไฟฟ้า คือ ขนาดกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าคูณกับเวลาทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้านั้นในหน่วยชั่วโมง เรียกว่ายูนิต (Unit) หรือ kWh (1 unit = 1 kWh) ซึ่ง 1 ยูนิตมีค่าเท่ากับอุปกรณ์ไฟฟ้าขนาด 1 kW ทำงานเป็นเวลาต่อเนื่องนาน 1 ชั่วโมง การคำนวณหาจำนวนหน่วยไฟฟ้านี้สามารถเขียนเป็นสมการได้คือ

$$E = P \times t \quad (1)$$

E คือ พลังงานไฟฟ้า หน่วยเป็น ยูนิตหรือ kWh
P คือ กำลังไฟฟ้า หน่วยเป็นกิโลวัตต์ (kW)
t คือ เวลา หน่วยเป็นชั่วโมง (h)

2.3 ส่วนการจัดเก็บอากาศอัด [4]

ถังพักอากาศอัด มีหน้าที่เก็บปริมาณอากาศอัดที่ผลิตได้จากเครื่องอัดลม ให้มีปริมาณอากาศอัดที่เพียงพอกับการจ่ายให้กับระบบและยังช่วยรักษาระดับความดันให้คงที่ นอกจากนี้ยังช่วยในการระบายความร้อนของอากาศอัด ซึ่งจะทำให้ไอน้ำที่ผสมเข้ามากับอากาศอัดเกิดการควบแน่นเป็นน้ำอยู่ในถังพัก และสามารถระบายน้ำออกได้ที่วาล์วระบายด้านล่าง จึงทำให้อากาศอัดมีความแห้งระดับหนึ่ง โดยทั่วไปขนาดของถังพักอากาศอัดจะขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องอัดลมและปริมาณลมที่ใช้ในระบบ ซึ่งถังพักอากาศอัดจะประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ เช่น เกจวัดความดัน วาล์วนิรภัย สวิทช์ความดัน เป็นต้น ลักษณะของถังพักอากาศอัดจะแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ ถังพักอากาศอัดแบบวางแนวตั้ง จะใช้กับเครื่องอัดลมขนาดใหญ่ที่ต้องการปริมาณอากาศอัดมากๆ ซึ่งจะติดตั้งแยกออกจากเครื่องอัดลม ส่วนถังพักอากาศอัดแบบวางแนวนอน จะใช้กับเครื่องอัดลมขนาดเล็ก โดยตัวเครื่องอัดลมและถังพักลมจะรวมอยู่เป็นชุดเดียวกัน

2.4 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ [5]

มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์สำหรับขับเครื่องอัดอากาศ ในงานวิจัยนี้มอเตอร์ที่ใช้นั้นจะเป็นแบบกระแสสลับสามเฟส จึงขอกล่าวถึงเฉพาะมอเตอร์แบบนี้เท่านั้น มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส ที่สเตเตอร์จะมีขดลวด 3 ชุด ซึ่งแต่ละชุดจะวางห่างกัน 120 องศา ทั้งทางกลและทางไฟฟ้าและเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าสลับสามเฟสเข้าไปจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นในการต่อชุดขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์สามเฟสเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามารถกระทำได้ 2 วิธี คือการต่อแบบ Y หรือ Star กับการต่อแบบ Δ หรือ Delta

3. วิธีการทดลองและอุปกรณ์

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาและทดลองจากเครื่องอัดอากาศจำนวน 3 ขนาด และถังเก็บลม 4 ขนาด โดยเครื่องอัดอากาศแต่ละขนาดจะใช้ถังเก็บลมทั้ง 4 ขนาด รวมแล้วจะได้การทดลองทั้งหมด 12 กรณี เครื่องอัดอากาศที่ใช้จะถูกควบคุมการทำงานแบบสตาร์ท-สต็อป การศึกษาเริ่มจากการใช้พลังงานอากาศอัดเริ่มตั้งแต่ร้อยละ 20, 40, 60 และ 80 ของความสามารถในการผลิตอากาศอัดของเครื่องอัดอากาศ โดยที่แต่ละเปอร์เซ็นต์ของการใช้อากาศอัดจะทำการตั้งค่าความดันให้เครื่องอัดอากาศ ตัด-ต่อ การทำงานที่ความดันต่างกันเริ่มตั้งแต่ 6, 7, 8 และ 9 บาร์ ตามลำดับ แล้วทำการบันทึกค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องอัดอากาศ นำค่าที่บันทึกได้แสดงผลเป็นกราฟแท่ง แล้ววิเคราะห์กราฟที่ได้เพื่อหาค่าของความดันที่เหมาะสมที่สุดในการควบคุมการ ตัด-ต่อ การทำงานของเครื่องอัดอากาศ เพื่อให้ประหยัดพลังงานไฟฟ้ามากที่สุด

3.1 วิธีการทดลอง

จากวงจรระบบอากาศอัดและวงจรควบคุมเครื่องอัดอากาศ ดังรูปที่ 2 และ รูปที่ 3 สามารถกำหนดขั้นตอนการทดลองได้ดังนี้

1. ตั้งค่าแรงดันไฟฟ้าที่ CP1 และ CP2 (CP1 - สตาร์ท, CP2 - สต็อป) ให้ทำงานที่ความดันลมต่างๆ โดยเริ่มจากครั้งที่ 1 CP1 6 บาร์ และ CP2 7 บาร์ ดังตารางข้างล่างนี้

ตารางที่ 1 กำหนดความดันควบคุมเครื่องอัดอากาศ

ครั้งที่	1	2	3	4	5	6
CP1	6	6	6	7	7	8
CP2	7	8	9	8	9	9

2. เปิดเบรกเกอร์ (Beaker) จ่ายกระแสไฟฟ้าให้เครื่องอัดอากาศ

3. ตั้งค่าความดันลมใช้งานที่ ชุดปรับปรุงคุณภาพอากาศอัดหมายเลข 7 (รูปที่ 1) ไว้ที่ 6 บาร์

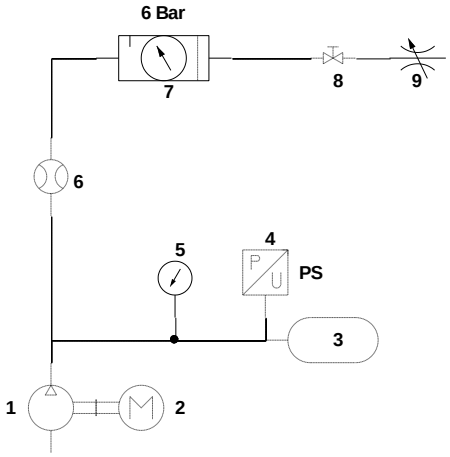
4. เปิดวาล์วลมหมายเลข 8 (รูปที่ 2)

5. ปรับอัตราการไหลของลมไว้ที่ร้อยละ 20 ที่วาล์วลมหมายเลข 9 โดยดูค่าที่อุปกรณ์วัดอัตราการไหล หมายเลข 6 (รูปที่ 2)

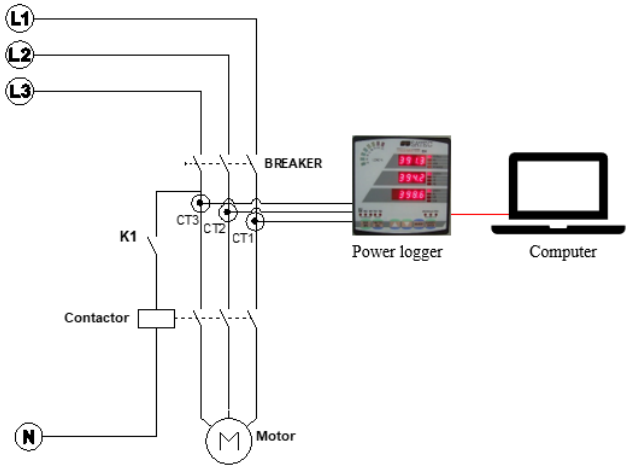
6. บันทึกข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Data Smart View เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

7. ทำตามขั้นตอนที่ 4.5 และ 4.6 ใหม่โดยปรับอัตราการไหลของลมไว้ที่ร้อยละ 40, 60 และ 80 ตามลำดับ

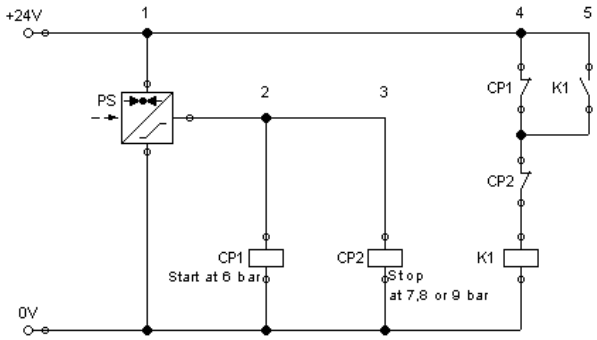
8. ทำการทดลองตามขั้นตอนที่ 1 ใหม่ โดยตั้งค่า CP1 และ CP2 ดังตารางที่กำหนด



รูปที่ 2 แสดงวงจรระบบอากาศอัด



ก. วงกรกำลังพร้อมติดตั้งเครื่องวัดกำลังไฟฟ้า



ข. วงจรควบคุม

รูปที่ 3 แสดงวงจรควบคุมเครื่องอัดอากาศและตำแหน่งการติดตั้งเครื่องวัดกำลังไฟฟ้า

3.2 อุปกรณ์ใช้ทดลอง

1. เครื่องอัดอากาศพร้อมมอเตอร์ 3 เฟส จำนวน 3 เครื่อง เครื่องอัดอากาศตัวที่ 1 เป็นเครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบ ใช้มอเตอร์ขนาด 7.5 kW ผลิตอากาศอัดได้ 1151 LPM เครื่องอัดอากาศตัวที่ 2 เป็นเครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบ ใช้มอเตอร์ขนาด 4 kW ผลิตอากาศอัดได้ 402 LPM เครื่องอัดอากาศตัวที่ 3 เป็นเครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบ ใช้มอเตอร์ขนาด 2.2 kW ผลิตอากาศอัดได้ 246 LPM

2. ถังเก็บลมจำนวน 4 ใบถังลมใบที่ 1 ขนาดความจุ 300 ลิตร ความดันใช้งาน 9 kg/cm^2 ถังลมใบที่ 2 ขนาดความจุ 360 ลิตร ความดันใช้งาน 9 kg/cm^{2}ถังลมใบที่ 3 ขนาดความจุ 600 ลิตร ความดันใช้งาน 9 kg/cm^2 ถังลมใบที่ 4 ขนาดความจุ 660 ลิตร ความดันใช้งาน 9 kg/cm^2

3. อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลม (Flow meter) จำนวน 2 ตัว

4. อุปกรณ์วัดกำลังไฟฟ้า (Power Meter) สามารถตรวจวัดค่าต่าง ๆ ทางไฟฟ้า

5. ซอร์ฟแวร์ Data Smart View เป็นซอร์ฟแวร์สำหรับบันทึกค่าต่างๆ ทางไฟฟ้า

6. เซ็นเซอร์วัดความดัน เป็นเซ็นเซอร์สำหรับวัดความดันอากาศอัดในถังพักลม

7. อุปกรณ์เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้า (Comparator) เป็นรีเลย์ชนิดหนึ่งทำงานตามขนาดของแรงดันไฟฟ้า

8. ชุดปรับปรุงคุณภาพลมอัก (Service unit) ใช้สำหรับตั้งค่าความดันใช้งานของอากาศอัดโดยปรับตั้งไว้ที่ 6 บาร์

9. คอมพิวเตอร์สำหรับบันทึกข้อมูล

4. ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองเครื่องอัดอากาศที่ 1

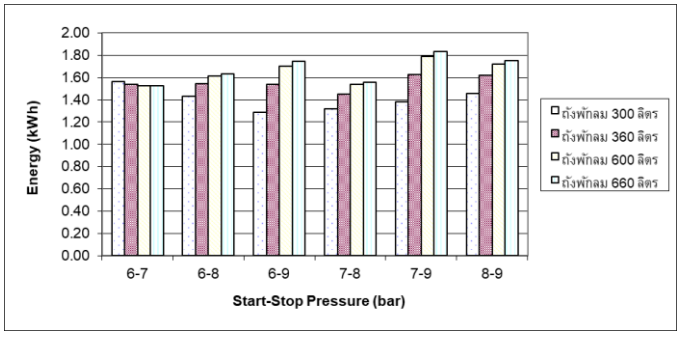
ตารางที่ 2 แสดงการใช้พลังงานไฟฟ้าใน 1 ชั่วโมง ของเครื่องอัดอากาศเครื่องที่ 1 ที่ร้อยละของการใช้อากาศอัดและถังลมขนาดต่างๆ

	ค่าพลังงานไฟฟ้า (kWh) ร้อยละการใช้ลม (%) และขนาดถังลม (ลิตร)

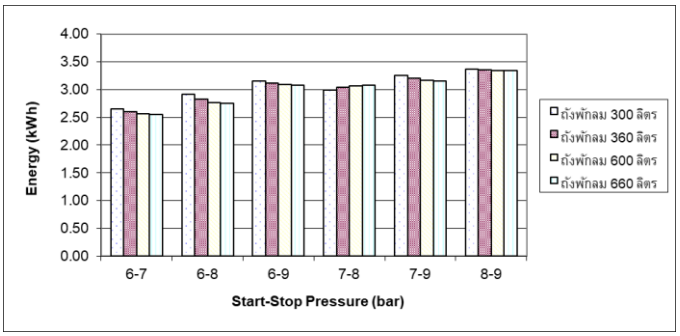
ความดัน (บาร์)	20%				40%			
	300 ลิตร	360 ลิตร	600 ลิตร	660 ลิตร	300 ลิตร	360 ลิตร	600 ลิตร	660 ลิตร
6-7	1.56	1.54	1.53	1.52	2.65	2.60	2.56	2.56
6-8	1.43	1.54	1.62	1.63	2.92	2.82	2.76	2.75
6-9	1.29	1.54	1.70	1.75	3.15	3.12	3.09	3.08
7-8	1.32	1.45	1.54	1.56	2.99	3.04	3.07	3.08
7-9	1.38	1.63	1.79	1.83	3.25	3.20	3.17	3.16
8-9	1.46	1.62	1.72	1.75	3.36	3.35	3.34	3.34

ตารางที่ 3 แสดงการใช้พลังงานไฟฟ้าใน 1 ชั่วโมง ของเครื่องอัดอากาศเครื่องที่ 1 ที่ร้อยละของการใช้อากาศอัดและถังลมขนาดต่างๆ (ต่อ)

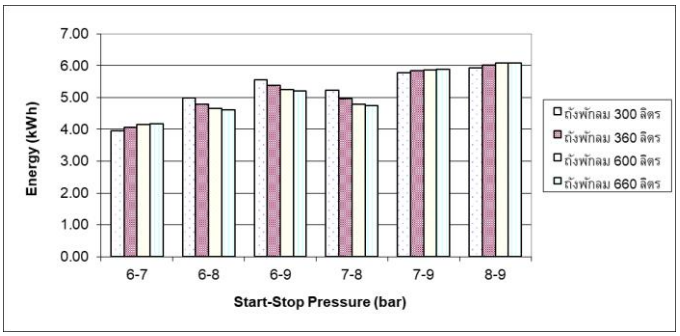
ความดัน (บาร์)	ค่าพลังงานไฟฟ้า (kWh) ร้อยละการใช้ลม (%) และขนาดถังลม (ลิตร)							
	60%				80%			
	300 ลิตร	360 ลิตร	600 ลิตร	660 ลิตร	300 ลิตร	360 ลิตร	600 ลิตร	660 ลิตร
6-7	3.95	4.07	4.15	4.17	5.25	5.33	5.38	5.39
6-8	4.98	4.78	4.65	4.62	6.15	6.18	6.19	6.20
6-9	5.57	5.38	5.25	5.22	6.57	6.46	6.38	6.36
7-8	5.24	4.97	4.79	4.75	6.02	6.21	6.34	6.37
7-9	5.78	5.84	5.87	5.88	6.75	6.55	6.42	6.39
8-9	5.93	6.02	6.08	6.09	6.66	6.54	6.45	6.43



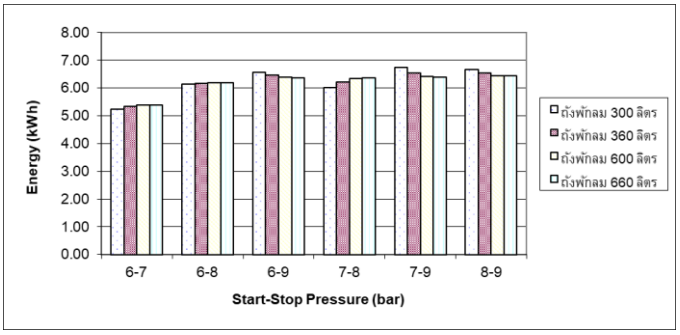
รูปที่ 4 กราฟเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องอัดอากาศเครื่องที่ 1 ที่ถังพักลมขนาดต่างๆ ปริมาณการใช้อากาศอัดร้อยละ 20



รูปที่ 5 กราฟเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องอัดอากาศเครื่องที่ 1 ที่ถังพักลมขนาดต่างๆ ปริมาณการใช้อากาศอัดร้อยละ 40



รูปที่ 6 กราฟเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องอัดอากาศเครื่องที่ 1 ที่ถังพักลมขนาดต่างๆ ปริมาณการใช้อากาศอัดร้อยละ 60



รูปที่ 7 กราฟเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องอัดอากาศเครื่องที่ 1 ที่ถังพักลมขนาดต่างๆ ปริมาณการใช้อากาศอัดร้อยละ 80

จากตารางที่ 2 และความสัมพันธ์ในรูปที่ 4 ถึง 7 พบว่าที่ระดับภาระโหลดร้อยละ 60 และ 80 การตั้งค่าความดันที่ 6-7 บาร์ ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในทุกขนาดถังพักลม ตัวอย่างเช่น ที่ถังพัก 300 ลิตร และโหลดร้อยละ 80 การใช้พลังงานเพิ่มขึ้นจาก 5.25 kWh (ที่ 6-7 บาร์) เป็น 6.66 kWh (ที่ 8-9 บาร์) คิดเป็นพลังงานที่เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 26.8

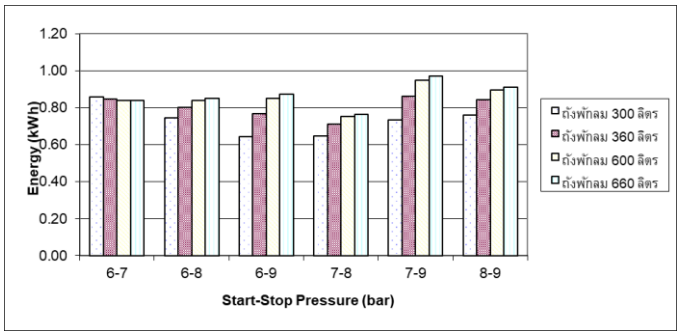
4.2 ผลการทดลองเครื่องอัดอากาศที่ 2

ตารางที่ 4 แสดงการใช้พลังงานไฟฟ้าใน 1 ชั่วโมง ของเครื่องอัดอากาศเครื่องที่ 2 ที่ร้อยละของการใช้อากาศอัดและถังลมขนาดต่างๆ

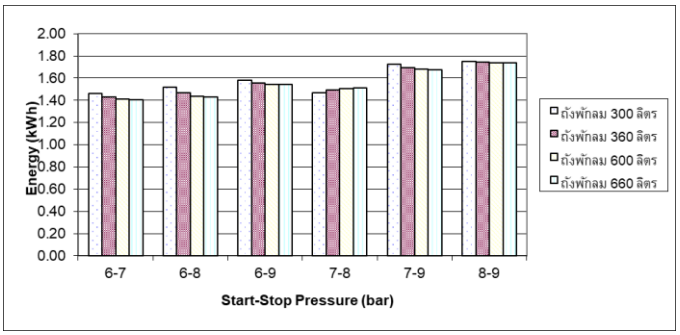
ความดัน (บาร์)	ค่าพลังงานไฟฟ้า (kWh) ร้อยละการใช้ลม (%) และขนาดถังลม (ลิตร)							
	20%				40%			
	300 ลิตร	360 ลิตร	600 ลิตร	660 ลิตร	300 ลิตร	360 ลิตร	600 ลิตร	660 ลิตร
6-7	0.86	0.85	0.84	0.84	1.46	1.43	1.41	1.41
6-8	0.75	0.80	0.84	0.85	1.52	1.47	1.44	1.43
6-9	0.64	0.77	0.85	0.87	1.58	1.56	1.54	1.54
7-8	0.65	0.71	0.75	0.76	1.47	1.49	1.50	1.51
7-9	0.73	0.86	0.95	0.97	1.72	1.70	1.68	1.67
8-9	0.76	0.84	0.90	0.91	1.75	1.74	1.74	1.74

ตารางที่ 5 แสดงการใช้พลังงานไฟฟ้าใน 1 ชั่วโมง ของเครื่องอัดอากาศเครื่องที่ 2 ที่ร้อยละของการใช้อากาศอัดและถังลมขนาดต่างๆ **(ต่อ)**

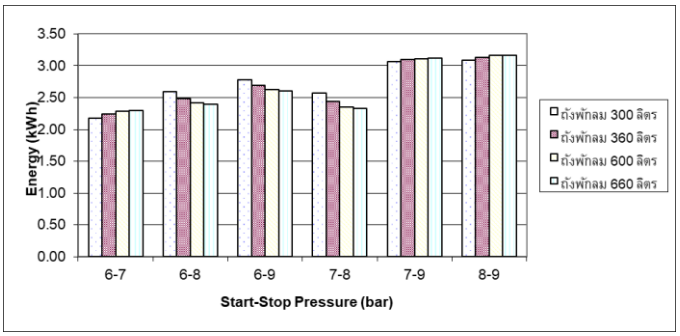
ความดัน (บาร์)	ค่าพลังงานไฟฟ้า (kWh) ร้อยละการใช้ลม (%) และขนาดถังลม (ลิตร)							
	60%				80%			
	300 ลิตร	360 ลิตร	600 ลิตร	660 ลิตร	300 ลิตร	360 ลิตร	600 ลิตร	660 ลิตร
6-7	2.17	2.24	2.28	2.29	2.89	2.93	2.96	2.97
6-8	2.59	2.49	2.42	2.40	3.20	3.21	3.22	3.22
6-9	2.78	2.69	2.62	2.61	3.29	3.23	3.19	3.18
7-8	2.57	2.44	2.35	2.33	2.95	3.04	3.11	3.12
7-9	3.06	3.09	3.11	3.12	3.58	3.47	3.40	3.39
8-9	3.08	3.13	3.16	3.17	3.46	3.40	3.35	3.34



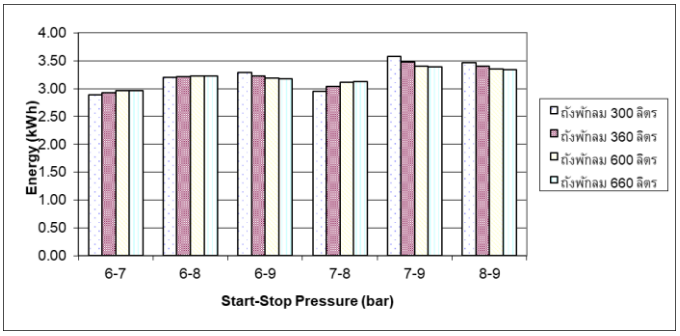
รูปที่ 8 กราฟเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องอัดอากาศเครื่องที่ 2 ที่ถังพักลมขนาดต่างๆ ปริมาณการใช้ลม-อัดร้อยละ 20



รูปที่ 9 กราฟเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องอัดอากาศเครื่องที่ 2 ที่ถังพักลมขนาดต่างๆ ปริมาณการใช้อากาศอัดร้อยละ 40



รูปที่ 10 กราฟเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องอัดอากาศเครื่องที่ 2 ที่ถังพักลมขนาดต่างๆ ปริมาณการใช้อากาศอัดร้อยละ 60



รูปที่ 11 กราฟเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องอัดอากาศเครื่องที่ 2 ที่ถังพักลมขนาดต่างๆ ปริมาณการใช้อากาศอัดร้อยละ 80

ผลในรูปที่ 8 ถึง 11 แสดงให้เห็นแนวโน้มที่สอดคล้องกับเครื่องแรก คือการเพิ่มความดันควบคุมส่งผลโดยตรงต่อค่ากิโลวัตต์-ชั่วโมงที่เพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้น

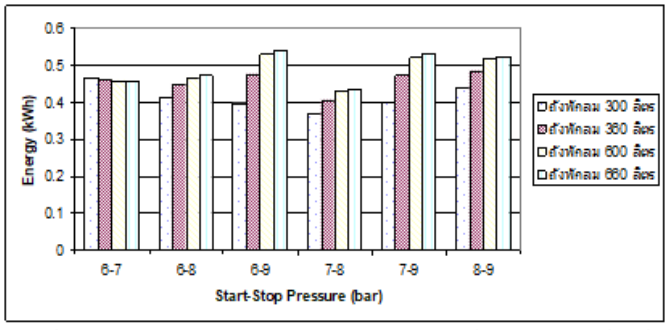
4.3 ผลการทดลองเครื่องอัดอากาศที่ 3

ตารางที่ 6 แสดงการใช้พลังงานไฟฟ้าใน 1 ชั่วโมง ของเครื่องอัดอากาศเครื่องที่ 3 ที่ร้อยละของการใช้อากาศอัดและถังลมขนาดต่างๆ

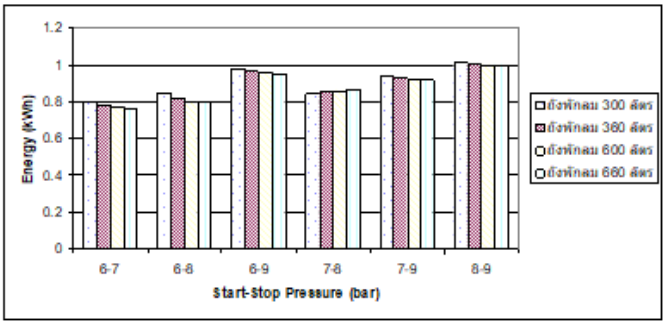
ความดัน (บาร์)	ค่าพลังงานไฟฟ้า (kWh) ร้อยละการใช้ลม (%) และขนาดถังลม (ลิตร)							
	20%				40%			
	300 ลิตร	360 ลิตร	600 ลิตร	660 ลิตร	300 ลิตร	360 ลิตร	600 ลิตร	660 ลิตร
6-7	0.47	0.46	0.46	0.46	0.80	0.78	0.77	0.77
6-8	0.42	0.45	0.47	0.47	0.85	0.82	0.80	0.80
6-9	0.40	0.48	0.53	0.54	0.98	0.97	0.96	0.96
7-8	0.37	0.41	0.43	0.44	0.84	0.85	0.86	0.86
7-9	0.40	0.47	0.52	0.53	0.94	0.93	0.92	0.92
8-9	0.44	0.49	0.52	0.53	1.01	1.00	1.00	1.00

ตารางที่ 7 แสดงการใช้พลังงานไฟฟ้าใน 1 ชั่วโมง ของเครื่องอัดอากาศเครื่องที่ 3 ที่ร้อยละของการใช้อากาศอัดและถังลมขนาดต่างๆ (ต่อ)

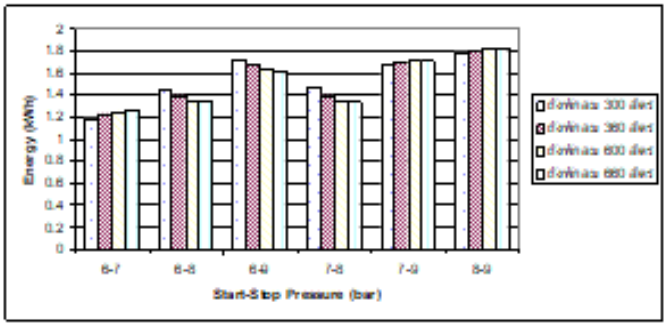
ความดัน (บาร์)	ค่าพลังงานไฟฟ้า (kWh) ร้อยละการใช้ลม (%) และขนาดถังลม (ลิตร)							
	60%				80%			
	300 ลิตร	360 ลิตร	600 ลิตร	660 ลิตร	300 ลิตร	360 ลิตร	600 ลิตร	660 ลิตร
6-7	1.19	1.22	1.24	1.25	1.57	1.60	1.61	1.62
6-8	1.45	1.39	1.35	1.34	1.78	1.79	1.80	1.80
6-9	1.73	1.67	1.63	1.62	2.04	2.00	1.98	1.97
7-8	1.47	1.39	1.34	1.33	1.69	1.74	1.78	1.78
7-9	1.68	1.69	1.70	1.71	1.96	1.90	1.86	1.85
8-9	1.78	1.81	1.82	1.83	2.00	1.96	1.94	1.93



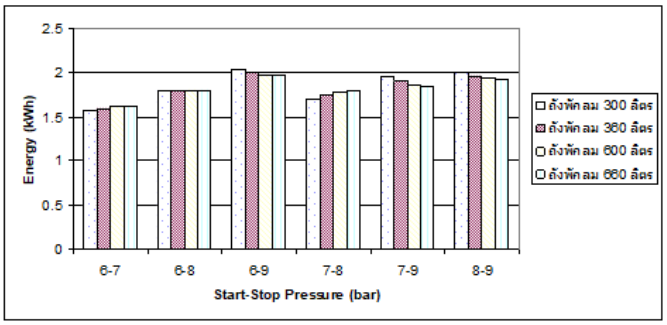
รูปที่ 12 กราฟเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องอัดอากาศเครื่องที่ 3 ที่ถังพักลมขนาดต่างๆ ปริมาณการใช้อากาศอัดร้อยละ 20



รูปที่ 13 กราฟเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องอัดอากาศเครื่องที่ 3 ที่ถังพักลมขนาดต่างๆ ปริมาณการใช้อากาศอัดร้อยละ 40



รูปที่ 14 กราฟเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องอัดอากาศเครื่องที่ 3 ที่ถังพักลมขนาดต่างๆ ปริมาณการใช้อากาศอัดร้อยละ 60



รูปที่ 15 กราฟเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องอัดอากาศเครื่องที่ 3 ที่ถังพักลมขนาดต่างๆ ปริมาณการใช้อากาศอัดร้อยละ 80

ในรูปที่ 12 ถึง 15 แสดงให้เห็นว่าแม้เป็นเครื่องขนาดเล็ก ผลกระทบจากความดันก็ยังคงสูงมาก โดยเฉพาะที่โหลดร้อยละ 60 พลังงานไฟฟ้าพุ่งสูงขึ้นจาก 1.19 เป็น 1.78 kWh หรือเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 49.5 เมื่อปรับช่วงความดันจาก 6-7 บาร์ เป็น 8-9 บาร์

5. สรุปและอิภิปรายผลการวิจัย

จากการทดลองหาค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องอัดอากาศ ที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นแหล่งต้นกำลังในการขับเคลื่อนเครื่องอัดอากาศนั้น การอภิปรายผลจะแบ่งออกเป็นประเด็นสำคัญ โดยอ้างอิงข้อมูลจากตารางและรูปภาพจากผลการทดลอง รวมถึงการเทียบผลกับงานวิจัยอื่นดังนี้

5.1 อิทธิพลของช่วงความดันควบคุมต่อประสิทธิภาพพลังงาน

จากข้อมูลในตารางที่ 2, 4 และ 6 พบว่าการตั้งค่าความดัน สตาร์ท- สต็อป ที่ช่วง 6-7 บาร์ ให้ค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำที่สุดในเครื่องอัดอากาศทั้ง 3 เครื่อง เมื่อพิจารณากราฟใน รูปที่ 5, 9 และ 13 จะเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อค่าความดันเพิ่มสูงขึ้น เส้นกราฟการใช้พลังงานจะมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ประเด็นนี้สามารถอธิบายได้ด้วยหลักการทางวิศวกรรมว่า ความดันที่สูงขึ้นส่งผลให้มอเตอร์ต้องทำงานภายใต้แรงบิด (Torque) ที่สูงขึ้น และมีอัตราส่วนความดันในการอัดอากาศที่มากขึ้น ซึ่งต้องใช้พลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อนมากขึ้นเป็นสัดส่วนกัน [6] การสอบเทียบกับงานวิจัยระดับสากล เช่น ผลการศึกษาจาก Atlas Copco และกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติแคนาดา (Natural Resources Canada) ระบุว่า "ทุกๆ 1 บาร์ที่ลดความดันลง จะช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ประมาณร้อยละ 7 ถึง 8" [7] ซึ่งผลการทดลองในงานวิจัยนี้ที่พบการลดลงของพลังงานร้อยละ 15-30 เมื่อลดความดันจาก 9 บาร์ ลงเหลือ 7 บาร์ ถือว่ามีความสอดคล้องและยืนยันความถูกต้องของมาตรฐานดังกล่าวได้อย่างชัดเจน [8]

5.2 บทบาทของขนาดถังพักลมภายใต้ภาระงานที่แตกต่างกัน

ประเด็นที่น่าสนใจอย่างยิ่งคืออิทธิพลของขนาดถังพักลมที่ส่งผลต่างกันตามระดับภาระโหลด

- ที่ภาระโหลดต่ำ (ร้อยละ 20 และ 40): จาก รูปที่ 4 และ 8 พบว่าถังพักลมที่มีขนาดใหญ่ขึ้น (600 และ 660 ลิตร) ส่งผลให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าถังขนาดเล็ก เนื่องจากถังขนาดใหญ่ช่วยให้มอเตอร์มีระยะเวลา "หยุด" (Stop Time) ที่นานขึ้นต่อหนึ่งรอบการทำงาน ทำให้จำนวนครั้งในการเริ่มเดินเครื่องลดลง งานวิจัยของ Dindorf และคณะ (2003) [9] ยืนยันว่าการเพิ่มความจุของถังพักช่วยลด "Short Cycling" และเพิ่มประสิทธิภาพในช่วง Part-load ได้อย่างมีนัยสำคัญ
- ที่ภาระโหลดสูง (ร้อยละ 60 และ 80): ผลการทดลองใน รูปที่ 7 และ 11 กลับให้ผลในทิศทางตรงกันข้าม โดยถังพักลมขนาดใหญ่กลับมีการใช้พลังงานไฟฟ้ามากกว่าถังขนาดเล็ก สาเหตุเชิงเทคนิคเกิดจากที่ภาระโหลดสูง เครื่องอัดอากาศต้องทำงานเกือบตลอดเวลาเพื่อผลิตลมให้ทันต่อการใช้งาน ในถังขนาดใหญ่ มอเตอร์ต้องใช้เวลาในการสร้างความดันสะสมจาก 6 บาร์ ไปถึง 7 บาร์ (หรือ 9 บาร์) ยาวนานกว่ามาก ในขณะที่เวลาการทดลองจำกัดที่ 1 ชั่วโมง ทำให้ในบางกรณีถังขนาดใหญ่ทำงานต่อเนื่องจนจบเวลาการทดลองโดยไม่มีช่วงหยุดพักเลย ส่งผลให้ค่าพลังงานสะสมสูงกว่าถังขนาดเล็กที่มีช่วงหยุดพักสั้นๆ เกิดขึ้น

อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติระยะยาว ถังพักลมขนาดใหญ่ยังคงมีข้อดีในการรักษาเสถียรภาพความดันและช่วยลดอุณหภูมิของอากาศอัด ซึ่งเป็นปัจจัยเสริมในการประหยัดพลังงานในส่วนของอุปกรณ์ปรับปรุงคุณภาพลม [10]

5.3 การวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ขัดแย้งในช่วงความดันสต็อปสูง

จากการพิจารณา ตารางที่ 2 ในกรณีภาระโหลดร้อยละ 20 หากตั้งค่าความดันสต็อปสูงกว่า 7 บาร์ พบว่าถังพักลมขนาดใหญ่จะใช้พลังงานมากขึ้น สาเหตุเป็นเพราะความดันสต็อปที่สูงประกอบกับปริมาตรถังที่มาก ทำให้มอเตอร์ต้องทำงานใน "ย่านความดันสูง" ยาวนานขึ้นก่อนจะตัดการทำงาน ซึ่งในช่วงความดันสูง มอเตอร์จะมีประสิทธิภาพลดลงและกินกระแสไฟฟ้าสูงกว่าช่วงความดันต่ำ ผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับการศึกษาเรื่อง "Artificial Demand" [11] ซึ่งระบุว่าการกักเก็บอากาศที่ความดันสูงเกินความจำเป็นในถังพัก คือการสูญเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์ เพราะอากาศเหล่านั้นจะถูกขยายตัวออก (Expanded) ที่วาล์วลดความดันก่อนใช้งานจริงเสมอ

5.4 การสอบเทียบการใช้พลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption - SEC)

เมื่อพิจารณาข้อมูลการใช้พลังงานของเครื่องอัดอากาศเครื่องที่ 1 (มอเตอร์ 7.5 kW) จาก ตารางที่ 2 ณ สภาวะภาระโหลดร้อยละ 80 (อัตราการจ่ายลมประมาณ 15.33 ลิตรต่อวินาที) และความดันควบคุม 6-7 บาร์ ซึ่งใช้พลังงานเฉลี่ย 5.25 kWh ต่อชั่วโมง (เทียบเท่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 5.25 kW) สามารถคำนวณค่าการใช้พลังงานจำเพาะได้ประมาณ 0.34 kW/(L/s)

จากการสอบเทียบกับงานวิจัยระดับสากลพบว่า เครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบขนาดใหญ่ (Large piston compressor) มักมีค่าประสิทธิภาพเฉพาะอยู่ในช่วง 0.29 ถึง 0.36 kW/(L/s) [12] ดังนั้น ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองที่ 0.34 kW/(L/s) จึงมีความถูกต้องแม่นยำและอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสากล การปรับความดันควบคุมให้ลดลงจึงเป็นวิธีที่เห็นผลชัดเจนที่สุดในการควบคุมค่าประสิทธิภาพเฉพาะให้อยู่ในระดับต่ำเพื่อประหยัดพลังงาน

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบผลการวิจัยกับมาตรฐานและงานวิจัยภายนอก

หัวข้อเปรียบเทียบ	ผลลัพธ์จากงานวิจัยนี้	งานวิจัยและมาตรฐานภายนอก
ความดันที่ประหยัดที่สุด	6-7 บาร์	6-7 บาร์ คือมาตรฐานเครื่องมือนิวแมติกส์ [13]
ผลของการลดความดัน 1 บาร์	ประหยัดได้ประมาณ 7-12% (ขึ้นกับโหลด)	ประหยัดได้ 7-8% [14]
ประสิทธิภาพเฉพาะ (SEC)	~0.34 kW/(L/s)	0.29 - 0.36 kW/(L/s) สำหรับเครื่องอัดอากาศลูกสูบ [15]
พฤติกรรมในสภาวะโหลดต่ำ	ถังใหญ่ช่วยประหยัดพลังงาน	ถังใหญ่ช่วยเพิ่ม Idle time และลดการ Cycling [16]

5.5 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการวิเคราะห์อิทธิพลของขนาดถังพักลมและการตั้งค่าความดันควบคุมที่มีต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องอัดอากาศแบบสตาร์ท-สต็อป ผลการทดลองที่อ้างถึงในตารางที่ 2 ถึง 7 และรูปที่ 4 ถึง 15 ยืนยันว่าการตั้งค่าช่วงความดันควบคุมที่ 6-7 บาร์ คือสภาวะที่ประหยัดพลังงานมากที่สุดในทุกขนาดเครื่องอัดอากาศและทุกขนาดถังพักลม การนำผลการวิจัยนี้ไปสอบเทียบกับงานวิจัยระดับสากลและมาตรฐานอุตสาหกรรม แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องเชิงนัยสำคัญ โดยเฉพาะหลักการประหยัดพลังงานร้อยละ 7 ต่อการลดความดัน 1 บาร์ และค่าประสิทธิภาพเฉพาะที่สอดคล้องกับมาตรฐานเครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบ นอกจากนี้ งานวิจัยยังค้นพบประเด็นสำคัญเกี่ยวกับขนาดถังพักลมที่ให้ผลดีในสภาวะภาระงานต่ำ แต่ต้องพิจารณาระยะเวลาการสะสมความดันประกอบในสภาวะภาระงานสูง ข้อสรุปและหัวข้อที่ได้จากการอภิปรายผลในบทความนี้ จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับผู้ออกแบบและผู้ใช้งานระบบอัดอากาศในการเพิ่มประสิทธิภาพทาง

พลังงาน ลดต้นทุนการผลิต และยืดอายุการใช้งานของเครื่องจักร การดำเนินการตามข้อเสนอแนะในงานวิจัยนี้จะช่วยให้สถานประกอบการสามารถลดการใช้ไฟฟ้าได้ทันทีโดยแทบไม่ต้องมีการลงทุนเพิ่ม เพียงแค่ทำการปรับปรุงการตั้งค่าความดันให้เหมาะสม (Optimization) กับลักษณะงานจริงเท่านั้น

6. บรรณานุกรม

[1] Peter Croser, Frank Ebel. 2002. Pneumatics Basic level. Festo Didactic, Germany.

[2] รศ.ดร. มนัส สังวรศิลป์, วรรัตน์ ภัทรอมรกุล. 2543. คู่มือการใช้งาน MATHLAB ฉบับสมบูรณ์. สำนักพิมพ์ อินโฟเพรส, นนทบุรี.

[3] ปานเพชร ชินินทร, ขวัญชัย สินทรัพย์สมบูรณ์. 2539. นิวแมติกอุตสาหกรรม. ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน), กรุงเทพฯ.

[4] ประวิตร ลิมปะวัฒนะ. 2540. นิวแมติกส์. ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน), กรุงเทพฯ.

[5] พรจิต ประทุมสุวรรณ. 2540. แมคคาทรอนิกส์. เรือนแก้วการพิมพ์, กรุงเทพฯ.

[6] https://kobelco-ksea.com/column/air-compressor-energy-consumption_en/, 13 มีนาคม 2569.

[7] https://presscon.com/what-is-the-ideal-working-pressure-for-my-compressed-air-installation/, 13 มีนาคม 2569.

[8] https://www.atlascopco.com/content/dam/atlas-copco/local-countries/thailand/documents/ct/campaign/2020/10%20Ways%20to%20Make%20Your%20C.pdf, 13 มีนาคม 2569.

[9] Ryszard Dindorf, Jakub Takosoglu and Piotr wos. Review of Compressed Air Receiver Tanks for Improved Energy Efficiency of Various Pneumatic Systems, Energies, 17 May 2023.

[10] https://pneutech.com/blogs/resources/air-compressor-receiver-tank-sizing, 13 มีนาคม 2569.

[11] https://ieeegypt.org/wp-content/uploads/2017/04/CASO-Expert-Training.pdf, 13 มีนาคม 2569.

[12] https://www.researchgate.net/publication/377305242_Energy_Saving_Potentials_in_Compressed_Air_Systems, 13 มีนาคม 2569.

[13] https://jits.ac.in/wp-content/uploads/2020/02/thermal-engg-1-devendar-mech.pdf, 13 มีนาคม 2569.

[14] Alessandro Corsini et al, Assessment of a diagnostic procedure for the monitoring and control of industrial processes, The 7th International Conference on Applied Energy – ICAE2015, Energy Procedia 75 (2015) 1772-1778.

[15] Heru Mirmanto et al, Implementation of Air Sweep to Prevent Blockages on The Salt Crystallization Process, The Journal of Engineering, Vol. 10, No. 1, 2024.

[16] https://unoflow.se/en/compressed-air-school/, 13 มีนาคม 2569.

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การออกแบบ ติดตั้ง และประเมินการใช้พลังงานระบบการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานสำหรับบ้านอยู่อาศัย กรณีศึกษา ตำบลบ้านพริก อำเภอบ้านนา จังหวัดนครนายก

Design, Installation, and Energy Performance Evaluation of a Solar Power Generation System Integrated with an Energy Storage System for Residential Homes: A Case Study of Ban Phrik Subdistrict, Ban Na District, Nakhon Nayok Province

พิเชษฐ์ สุวรรณชัย[1*] และ สุวิทย์ แพงกันยา[2]

สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800 [1]pichest.s@gmail.com, [2]suwit.p@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ ติดตั้ง และประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อสายส่งร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานสำหรับบ้านอยู่อาศัย ในพื้นที่ตำบลบ้านพริก อำเภอบ้านนา จังหวัดนครนายก ระบบที่ออกแบบประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 600 วัตต์ จำนวน 10 แผ่น มีกำลังการผลิตรวม 6 kWp เชื่อมต่อกับระบบสายส่งของการไฟฟ้าภูมิภาค และติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนฟอสเฟต (LiFePO4) ขนาด 120 Ah แรงดันไฟฟ้า 51.2 V จำนวน 4 ลูก โดยต่อวงจรแบบขนาน ทำให้มีความจุรวม 480 Ah

ผลการศึกษาพบว่า ระบบสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ในช่วงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2568 ถึงเดือนเมษายน พ.ศ. 2569 รวมประมาณ 4,480 kWh คิดเป็นร้อยละ 76.25 ของความต้องการใช้พลังงานทั้งหมด โดยแบ่งเป็นพลังงานที่ผลิตจากระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ร้อยละ 53.07 และพลังงานที่จ่ายจากระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ร้อยละ 23.38 ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานสามารถช่วยลดการพึ่งพาพลังงานไฟฟ้าจากระบบสายส่ง เพิ่มความมั่นคงทางพลังงาน และส่งเสริมการใช้พลังงานสะอาดในภาคครัวเรือนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : การออกแบบระบบเซลล์แสงอาทิตย์; เซลล์แสงอาทิตย์แบบระบบเชื่อมต่อสายส่งร่วมกับระบบกักเก็บพลังงาน; ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บ้านที่อยู่อาศัย

Abstract

This research aims to design, install, and evaluate the energy performance of a grid-connected solar power generation system integrated with an energy storage system for residential homes in Ban Phrik Subdistrict, Ban Na District, Nakhon Nayok Province. The designed system consists of 10 solar panels, each with a capacity of 600 watts, providing a total installed capacity of 6 kWp. The system is connected to the Provincial Electricity Authority (PEA) grid and incorporates an energy storage system using four lithium iron phosphate (LiFePO4) batteries, each with a capacity of 120 Ah and a voltage of 51.2 V. The batteries are connected in parallel, resulting in a total storage capacity of 480 Ah.

The results show that the system was able to generate approximately 4,480 kWh of electrical energy during the period from November 2025 to April 2026, accounting for 76.25% of the total household energy demand. Of this, 53.07% was supplied directly by the solar photovoltaic system, while 23.38% was supplied by the battery energy storage system. The findings indicate that the integration of solar power generation with an energy storage system can significantly reduce dependence on grid electricity, enhance energy security, and promote the efficient use of clean energy in the residential sector.

Keywords : Solar photovoltaic system design; Grid-connected solar photovoltaic system with energy storage; Residential solar power generation system.

1. บทนำ (Introduction)

ประเทศไทยมีศักยภาพด้านพลังงานแสงอาทิตย์ในระดับสูง เนื่องจากตั้งอยู่ในเขตร้อนใกล้เส้นศูนย์สูตร โดยมีค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยประมาณ 18 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน หรือประมาณ 5 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อวัน ตามข้อมูลของ กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน [1] ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความเหมาะสมในการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในระดับครัวเรือนและเชิงพาณิชย์

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทยมีการเติบโตอย่างต่อเนื่อง โดยได้รับแรงสนับสนุนจาก

นโยบายภาครัฐ เช่น โครงการผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กมาก (VSPP) และผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก (SPP) ที่เปิดโอกาสให้ภาคเอกชนและประชาชนสามารถผลิตและจำหน่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบได้ [2] นอกจากนี้ ราคาของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ลดลงอย่างมากจากการพัฒนาอุตสาหกรรมในระดับโลก โดยเฉพาะจาก ประเทศจีน ซึ่งเป็นผู้ผลิตรายใหญ่ ส่งผลให้ต้นทุนการติดตั้งระบบลดลงและมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์มากขึ้น

เทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ยังเป็นพลังงานสะอาดที่ไม่ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศและเสียง อีกทั้งมีความยืดหยุ่นในการติดตั้งและบำรุงรักษาง่าย จึงเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการประยุกต์ใช้ในภาคครัวเรือน โดยเฉพาะเมื่อทำงานร่วมกับระบบกักเก็บพลังงาน (Energy Storage System: ESS) ซึ่งช่วยเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ลดปัญหาความไม่ต่อเนื่องของพลังงาน และเพิ่มความสามารถในการใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ภายใต้นโยบายแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก หรือ แผน AEDP 2015 ประเทศไทยมีเป้าหมายเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนให้ได้ร้อยละ 30 ภายในปี พ.ศ. 2579 โดยกำหนดเป้าหมายกำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ 6,000 เมกะวัตต์ [3] ซึ่งแสดงให้เห็นถึงบทบาทสำคัญของพลังงานแสงอาทิตย์ต่อความมั่นคงด้านพลังงานของประเทศในอนาคต

อย่างไรก็ตาม ยังมีประชากรในพื้นที่ห่างไกลของประเทศไทยบางส่วนที่ไม่สามารถเข้าถึงระบบไฟฟ้าได้ โดยเฉพาะในพื้นที่ภูเขาหรือพื้นที่ทุรกันดาร ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพชีวิตในด้านต่าง ๆ เช่น แสงสว่าง การเก็บรักษาอาหาร และการสื่อสาร การนำระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานมาใช้ในรูปแบบระบบไฟฟ้าครัวเรือน (Solar Home System) จึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว

ดังนั้น งานวิจัยเรื่อง “การออกแบบ ติดตั้ง และประเมินการใช้พลังงานระบบการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานสำหรับบ้านอยู่อาศัย” จึงมีความสำคัญในการพัฒนาและประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดังกล่าวให้เหมาะสมกับบริบทของประเทศไทย โดยมุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ การลดต้นทุน และการยกระดับคุณภาพชีวิตของประชาชน โดยเฉพาะในพื้นที่ห่างไกล รวมถึงสนับสนุนการพัฒนาพลังงานอย่างยั่งยืนตามแนวทางเศรษฐกิจพอเพียง

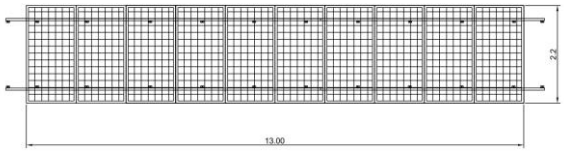
2. วิธีวิจัย (Research Methodology)

2.1 สำรวจข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าของที่อยู่อาศัย

จากการสำรวจข้อมูลการใช้พลังงานของบ้านที่อยู่อาศัย ตำบลบ้านพริก อำเภอบ้านนา จังหวัดนครนายก พบว่าโหลดที่ใช้งานประกอบด้วย เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน ขนาด 24,000 BTU จำนวน 3 เครื่อง เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน ขนาด 12,000 BTU จำนวน 2 เครื่อง เครื่องทำน้ำอุ่น ขนาด 4,000 W จำนวน 2 เครื่อง ทีวีแอลอีดี ขนาด 200 W จำนวน 2 เครื่อง ปริ้นเตอร์ ขนาด 19 W จำนวน 1 เครื่อง ตู้เย็นขนาด 5.5 คิว ขนาด 120 W จำนวน 1 เครื่อง หลอด LED T8 ขนาด 30 W จำนวน 8 หลอด หลอด LED T8 ขนาด 18 W จำนวน 12 หลอด และปั๊มน้ำ ขนาด 250 W จำนวน 1 เครื่อง ค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าต่อปีของโหลดทั้งหมด จากการประเมินประมาณ 10,302 kWh/ปี

2.2 การออกแบบระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบระบบเชื่อมต่อสายส่ง

ดำเนินการสำรวจอาคารและเขียนแบบหลังคาสำหรับติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แบบหลังคาบ้านที่อยู่อาศัย ตำบลบ้านพริก อำเภอบ้านนา จังหวัดนครนายก

บ้านที่อยู่อาศัย ตำบลบ้านพริก อำเภอบ้านนา จังหวัดนครนายก มีการใช้โหลดตลอดระยะเวลา 24 ชั่วโมง ประมาณ 10,302 kWh/ปี โดยกำลังไฟฟ้าที่ใช้สามารถคำนวณได้จากสมการ (1)

$$PV = \frac{E_{load}}{E_{sun} \cdot Q} \quad (1)$$

เมื่อ

PV คือ ขนาดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์, kWp

E_{load} คือ พลังงานที่โหลดต้องการ, kWh

E_{sun} คือ พลังงานแสงแดดในพื้นที่, kWh/m^2

สำหรับสำหรับประเทศไทยมีค่าเท่ากับ 1,550 kWh/a/kWp

Q คือ Quality Factor (Performance Ratio, PR) โดยค่าเริ่มต้นอยู่ที่ประมาณ 0.7 [4]

ดังนั้น เมื่อแทนค่าตัวแปรต่างๆ ลงในสมการ (1) จะได้ดังนี้

$$PV = \frac{10{,}302 \text{ kWh}}{1{,}550 \text{ kWh/Year/kWp} \times 0.7}$$

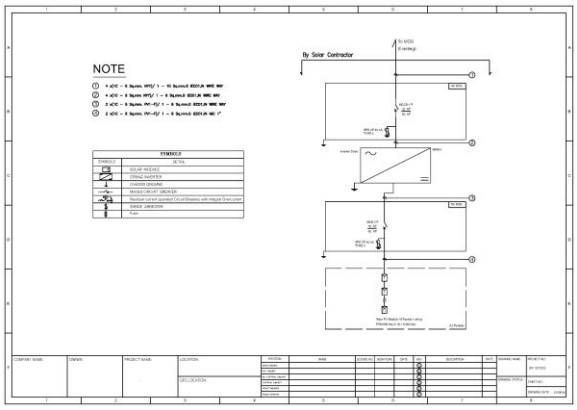
$$= 9.49 \text{ kW}$$

$$= 9{,}490 \text{ W}$$

ดังนั้นใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์รวมประมาณ 9.49 kW โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ Mono-Crystalline ขนาด 600 W ดังนั้นจำนวนแผงที่ต้องใช้ คือ 16 แผ่น

บ้านที่อยู่อาศัย ตำบลบ้านพริก อำเภอบ้านนา จังหวัดนครนายก ต้องการทดลองติดตั้งเบื้องต้นที่ 6 kW ดังนั้นจำนวนแผงที่ต้องใช้ คือ 10 แผ่น

เมื่อทราบจำนวนแผงก็ดำเนินการออกแบบแปลนการติดตั้งบนหลังคาอาคารดังแสดงในรูปที่ 2 และระบบไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 3 ตามลำดับ



รูปที่ 2 แบบระบบไฟฟ้า (Single line diagram)

2.3 การติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบระบบเชื่อมต่อสายส่ง

ดำเนินการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ Mono-Crystalline บนหลังคาดังแสดงในรูปที่ 4 เมื่อติดเสร็จเรียบร้อยแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 5 และดำเนินการติดตั้งเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า ตู้ควบคุมระบบไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 6 ตามลำดับ



รูปที่ 3 ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา



รูปที่ 4 ลักษณะการแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา



รูปที่ 5 ติดตั้งเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า และตู้ควบคุม

2.4 ทดสอบระบบเปิดใช้งานและบันทึกค่าพลังงาน

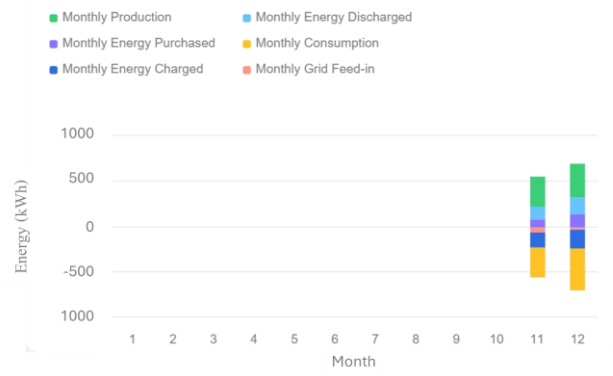
เมื่อติดตั้งระบบเสร็จเรียบร้อยแล้วก็ดำเนินการทดสอบระบบเปิดใช้งานและบันทึกค่าพลังงานที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าขนาด 5 kW แบบเชื่อมต่อ WiFi (Deye, China) ซึ่งสามารถแสดงผลการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์และการใช้พลังงานของโหลดรวมได้

3. ผลการวิจัย (Results) และอภิปรายผล (Discussion)

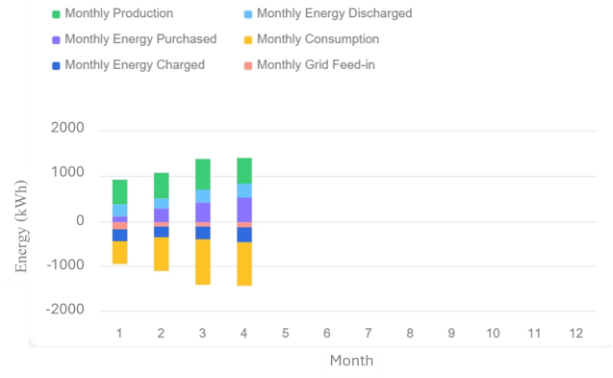
3.1 ผลการตรวจวัดพลังงานของอาคาร

งานวิจัยดำเนินการทดสอบและเก็บบันทึกข้อมูลการผลิตไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์และการใช้พลังงานของโหลดรวมภายใน ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน 2568 ถึงเดือนเมษายน 2569 เป็นระยะเวลา 6 เดือน ผลการตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้และการใช้พลังงานของโหลดในอาคาร ดังแสดงในรูปที่ 7 และรูปที่ 8 ตามลำดับ พบว่าการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สูงสุด 1,010 kWh ในเดือนมีนาคม 2568 และต่ำสุด 329.9 kWh ในเดือนพฤศจิกายน 2568 การใช้พลังงานของโหลดมีแนวโน้มคล้ายกันแต่ละเดือน โดยพลังงานที่สามารถทดแทนการใช้พลังงานจากการไฟฟ้า ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ 3,110 kWh คิดเป็น 53.07% และได้จากแบตเตอรี่ 1,370 kWh คิดเป็น 23.38% หรือรวมทั้งหมดเท่ากับ4,480 kWh คิดเป็น 76.45% ซึ่ง

ยังไม่เพียงพอต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมด 100% จึงควรพิจารณาติดตั้งระบบแบตเตอรี่สำรองเพิ่มเติมเพื่อให้สามารถการทดแทนพลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าทั้งหมด



รูปที่ 6 การผลิตและการใช้พลังงานเดือน พ.ย.- ธ.ค. พ.ศ. 2568



รูปที่ 7 การผลิตและการใช้พลังงานเดือน ม.ค.- เม.ย. พ.ศ. 2569

ลำดับ	รายการ	พ.ย.-ธ.ค. 2568 (kWh)	ม.ค.-เม.ย. 2569 (kWh)	รวมทั้งหมด (kWh)
1	การผลิตไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์	710	2,400	3,110
2	พลังงานงานจ่ายจากแบตเตอรี่	330	1,040	1,370
3	พลังงานงานจ่ายกลับระบบฯ	220	1,420	1,640
4	พลังงานงานที่ใช้ประจุแบตเตอรี่	390	1,440	1,830
5	พลังงานงานจ่ายภาระโหลดบ้าน	800	3,230	4,030
6	พลังงานงานจากการไฟฟ้า	80	490	570

รูปที่ 8 สรุปผลการผลิตและการใช้พลังงาน พ.ศ.2568 – พ.ศ. 2569

4. สรุปผล

จากการสำรวจข้อมูลการใช้พลังงานของบ้านอยู่อาศัยในพื้นที่ตำบลบ้านพริก อำเภอบ้านนา จังหวัดนครนายก และการออกแบบ ติดตั้งรวมถึงทดสอบการใช้งานระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อสายส่งร่วมกับระบบกักเก็บพลังงาน พบว่าระบบที่ติดตั้งมีขนาดกำลังการผลิต 6 kW ประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์และระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนฟอสเฟต (LiFePO4) ขนาด 120 Ah แรงดันไฟฟ้า 51.2 V จำนวน 4 ลูก

ผลการศึกษาพบว่า ในช่วงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2568 ถึงเดือนเมษายน พ.ศ. 2569 ระบบสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้รวมประมาณ 4,480 kWh คิดเป็นร้อยละ 76.25 ของความต้องการใช้พลังงานทั้งหมด โดยแบ่งเป็นพลังงานที่ผลิตจากระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ร้อยละ 53.07 และพลังงานที่จ่ายจากระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ร้อยละ 23.38 ดังนั้น ระบบกักเก็บพลังงานจากแบตเตอรี่มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานและช่วยเพิ่มการประหยัดพลังงานได้อีก 23.38% ส่งผลให้สามารถลดการพึ่งพาพลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าได้อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม หากต้องการลดการใช้พลังงานจากระบบสายส่งให้ได้ทั้งหมด จำเป็นต้องเพิ่มขนาดระบบเซลล์แสงอาทิตย์ รวมถึงเพิ่มความจุของระบบกักเก็บพลังงานให้เพียงพอต่อความต้องการใช้งาน การออกแบบและติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานในครั้งนี้ แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน ส่งเสริมการใช้พลังงานสะอาด และเพิ่มความมั่นคงทางพลังงานในภาคครัวเรือน อีกทั้งยังเป็นแนวทางที่เหมาะสมสำหรับการขยายผลและประยุกต์ใช้ในภาคธุรกิจหรือวิสาหกิจอื่น ๆ เพื่อเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานหมุนเวียนและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนในระยะยาว

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่สนับสนุนงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2563). *ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย*. กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน.

[2] กระทรวงพลังงาน. (2559). แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 2558–2579 (AEDP 2015). กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน.

[3] คณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ. (2559). มติคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ เรื่อง การส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน. กรุงเทพฯ: สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน.

[4] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. พลังงานทดแทน.

สืบค้นได้จาก: คู่มือฝึกอบรมพลังงานแสงอาทิตย์. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพมหานคร. 2562.

	นายพิเชษฐ์ สุวรรณชัย จบการศึกษา ระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมพลังงาน มหาวิทยาลัยรามคำแหง
	ผศ. ดร.สุวิทย์ แพงกันยา อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การเพิ่มสมรรถนะระบบจัดเก็บข้อมูลอุณหภูมิไอโอทีต้นทุนต่ำสำหรับเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดด้วยเทคนิคโอเวอร์แซมปลิงและการชดเชยความคลาดเคลื่อนเชิงเส้น

Performance Enhancement of a Low-Cost IoT Temperature Data Logger for Fluidized Bed Dryers Using Oversampling and Linear Error Compensation

ปฏิภาณ ถิ่นพระบาท ณทพร จินดาประเสริฐ กวิน เลิศเลาห์กุล* และ ฐณพล เวียงทอง

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร 1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กทม. 10800 E-mail: kawin.l@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 และโมดูล MAX31855 เพื่อพัฒนาระบบจัดเก็บข้อมูลอุณหภูมิ IoT ต้นทุนต่ำสำหรับเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด โดยเน้นการยกระดับเครื่องจักรเดิมด้วยงบประมาณอุปกรณ์เพียง 1,750 บาท ระบบบูรณาการเทคนิค Burst Oversampling เพื่อลดสัญญาณรบกวนและเพิ่มความละเอียดข้อมูล ผลการศึกษาพบว่าการสอบเทียบเชิงเส้น (Unified Linear Model) ช่วยเพิ่มความแม่นยำได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสมบูรณ์ (MAE) 0.72 °C และค่า RMSE 0.90 °C พร้อมค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) สูงถึง 0.9962 ผลลัพธ์ยืนยันว่าระบบสามารถติดตามพลวัตอุณหภูมิแบบเวลาจริงผ่านเว็บแอปพลิเคชันได้อย่างแม่นยำและเสถียรภาพเพียงพอสำหรับการใช้งานในระดับ SMEs สอดคล้องกับแนวทางอุตสาหกรรม 4.0

คำสำคัญ : อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง; ต้นทุนต่ำ; การปรับเทียบเซนเซอร์; โอเวอร์แซมปลิง; เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด

Abstract

This study develops a cost-effective IoT temperature data logger for fluidized bed dryers using ESP8266 and MAX31855, focusing on digital retrofitting with a component cost of 1,750 THB. Burst oversampling techniques were integrated to mitigate noise and enhance data resolution. Results showed that simultaneous calibration yielded high accuracy, with a Mean Absolute Error (MAE) of 0.72 °C, Root Mean Square Error (RMSE) of 0.90 °C, and a coefficient of determination (R^2) of 0.9962. These values were used for linear error compensation. Results confirm the system's capability for reliable real-time monitoring and CSV data export, providing an efficient solution for transitioning legacy equipment to Industry 4.0 standards.

Keywords: Internet of Things (IoT); Low-cost; Sensor Calibration; Oversampling; Fluidized Bed Dryer

1. บทนำ

การเปลี่ยนผ่านสู่ระบบอุตสาหกรรมดิจิทัล (Digital Transformation) ในปัจจุบันมุ่งเน้นการตัดสินใจบนพื้นฐานของข้อมูลจริงแบบเวลาจริง [1] อย่างไรก็ตาม ผู้ประกอบการขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs) มักประสบข้อจำกัดด้านงบประมาณในการจัดหาเครื่องมือบันทึกข้อมูลมาตรฐาน (Certified Data Logger) ที่มีราคาสูงถึง 35,000 - 80,000 บาท [2] โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อจำเป็นต้องตรวจสอบพลวัตการกระจายความร้อนที่ซับซ้อน ซึ่งการศึกษาทางวิศวกรรมชี้ให้เห็นว่าภายในถังอบมักมีความแตกต่างของอุณหภูมิในแต่ละพื้นที่อย่างมีนัยสำคัญ จึงมีความจำเป็นต้องใช้เครื่องบันทึกข้อมูลแบบหลายช่องสัญญาณเพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่การตรวจวัด [3] ข้อจำกัดทางต้นทุนนี้ทำให้กระบวนการอบแห้งซึ่งเป็นขั้นตอนวิกฤตยังคงอาศัยการจดบันทึกด้วยแรงงานคน ก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนและไม่สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนได้อย่างต่อเนื่อง [4]

แม้จะมีการประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ราคาประหยัดในการพัฒนาระบบ IoT แต่ความน่าเชื่อถือของข้อมูลยังคงเป็นประเด็นท้าทาย เนื่องจากสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าจากเครื่องจักรและความละเอียดของสัญญาณดิจิทัลที่จำกัด [5] [6] งานวิจัยนี้จึงมุ่งออกแบบระบบที่ใช้งบประมาณไม่เกิน 2,000 บาท โดยดึงสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิลเดิมของเครื่องจักรมาประมวลผลด้วยเทคนิคโอเวอร์แซมปลิ้งและการปรับเทียบเชิงเส้น เพื่อยกระดับความแม่นยำให้เทียบเท่าเครื่องมืออ้างอิง และรองรับการติดตามข้อมูลอุณหภูมิแบบหลายจุดพร้อมกันผ่านเครือข่ายไร้สาย (WiFi) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การพัฒนาระบบจัดเก็บข้อมูลอุณหภูมิสำหรับเครื่องอบแห้งอุตสาหกรรมในสถาปัตยกรรมอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) จำเป็นต้องบูรณาการองค์ความรู้ด้านวิศวกรรมความร้อน การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล และเทคโนโลยีการตรวจวัด เพื่อให้ระบบมีสมรรถนะและความน่าเชื่อถือภายใต้สภาวะที่มีปัจจัยแทรกซ้อนสูง โดยมีรายละเอียดทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.1 การยกระดับเครื่องจักรเดิมและเทคโนโลยีไอโอที (Digital Retrofitting and IoT)

การปรับปรุงเครื่องจักรแบบดั้งเดิมด้วยเทคโนโลยีดิจิทัล (Digital Retrofitting) เป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มขีดความสามารถให้กับระบบการผลิตเดิมด้วยต้นทุนต่ำ [4] โดยอาศัยไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีหน่วยประมวลผลและระบบสื่อสารไร้สายในตัว เช่น ESP8266 ซึ่งผ่านการพิสูจน์แล้วว่ามีความเสถียรเพียงพอสำหรับการตรวจวัดสภาพแวดล้อมและการแสดงผลผ่านสมาร์ทโฟน [7] [8] [12] สอดคล้องกับแนวคิดอุตสาหกรรม 4.0 ที่มุ่งเน้นการเชื่อมโยงข้อมูลระหว่างอุปกรณ์เพื่อการตัดสินใจที่แม่นยำ [1]

2.2 ทฤษฎีการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized Bed Drying)

กระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดอาศัยแรงดันอากาศร้อนที่สูงพอในการยกระดับวัสดุให้เกิดการแขวนลอย ซึ่งช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและความชื้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ [9] [10] อย่างไรก็ตาม พลวัตความร้อนภายในถังอบมักมีความไม่สม่ำเสมอตามระดับความสูงและพื้นที่ (Temperature Gradient) [4] ส่งผลให้การจัดเก็บข้อมูลอุณหภูมิแบบจุดเดียวไม่สามารถสะท้อนสภาวะที่แท้จริงได้ การตรวจวัดแบบหลายจุดจึงเป็นสิ่งจำเป็นในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกระบวนการ

2.3 เซนเซอร์เทอร์โมคัปเปิลและการแปลงสัญญาณดิจิทัลเทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (Type-K)

ทำงานบนหลักการปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck Effect) โดยการเปลี่ยนความต่างศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อโลหะต่างชนิดให้เป็นค่าอุณหภูมิ [14] ระบบวิจัยนี้เลือกใช้โมดูล MAX31855 ซึ่งเป็นวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลขนาด 14 บิต ที่มีความละเอียดสูงถึง 0.25 องศาเซลเซียส และมีระบบชดเชยรอยต่อเย็น (Cold-junction Compensation) ภายในตัว เพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ณ จุดเชื่อมต่อของวงจรประมวลผล [10]

2.4 เทคนิคโอเวอร์แซมปลิงเพื่อเพิ่มความแม่นยำ (Oversampling Technique)

เพื่อแก้ปัญหาความไม่เสถียรของข้อมูลจากสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า (Electrical Noise) งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคโอเวอร์แซมปลิ้งในระดับซอฟต์แวร์ [6] หลักการคือการเพิ่มความถี่ในการสุ่มอ่านข้อมูลให้สูงกว่าอัตราการบันทึกจริง แล้วนำชุดข้อมูลมาผ่านกระบวนการเฉลี่ยสัญญาณดิจิทัล (Digital Averaging) วิธีการนี้ช่วยลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนที่มีลักษณะเป็นสัญญาณรบกวนขาว (White Noise) และช่วยเพิ่มความละเอียดเสมือน (Virtual Resolution) ของการวัดให้สูงขึ้นเกินกว่าขีดจำกัดพื้นฐานของฮาร์ดแวร์

2.5 การชดเชยความคลาดเคลื่อนและการจัดการข้อมูล

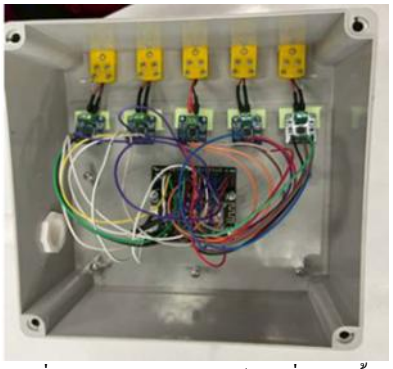
อุปกรณ์วัดอุณหภูมิทั่วไปมักมีความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ (Systematic Error) ที่เกิดจากลักษณะเฉพาะของเซนเซอร์แต่ละตัว [2] การปรับเทียบ (Calibration) จึงเป็นกระบวนการสำคัญในการหาค่าปัจจัยปรับแต่งผ่านสมการเชิงเส้น $y = mx + c$ เพื่อทำหน้าที่เป็นสมการชดเชยค่า ข้อมูลที่ผ่านการประมวลผลแล้วจะถูกส่งต่อเพื่อแสดงผลแบบเวลาจริงและจัดเก็บในรูปแบบไฟล์ CSV ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการรองรับการวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่ (Big Data) และการตัดสินใจบนพื้นฐานข้อมูลจริงในโรงงานอัจฉริยะ [1] [13]

3. วิธีการดำเนินงาน

การวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาระบบจัดเก็บข้อมูลอุณหภูมิที่สามารถบูรณาการเข้ากับโครงสร้างเครื่องอบแห้งเดิมได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานเชิงวิศวกรรมดังนี้

3.1 การออกแบบสถาปัตยกรรมฮาร์ดแวร์

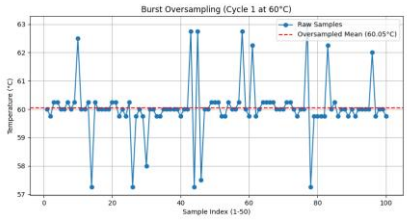
ระบบถูกออกแบบภายใต้แนวคิดการยกระดับเครื่องจักรเดิมด้วยต้นทุนต่ำ (Low-cost Retrofitting) โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 ทำหน้าที่ประมวลผลหลักและสื่อสารข้อมูลไร้สาย [11] วงจรถูกเชื่อมต่อกับโมดูลแปลงสัญญาณดิจิทัล MAX31855 จำนวน 5 ชุด ผ่านบัสสื่อสาร SPI (Serial Peripheral Interface) [11] เพื่อดึงสัญญาณจากเซนเซอร์เทอร์โมคัปเปิลชนิดเคที่ติดตั้งอยู่เดิมในเครื่องอบแห้ง การออกแบบนี้ช่วยลดความซ้ำซ้อนของอุปกรณ์และสามารถควบคุมต้นทุนฮาร์ดแวร์รวมให้อยู่ในระดับต่ำ



รูปที่ 1 ภายในกล่องบันทึกข้อมูลที่พัฒนาขึ้น

3.2 การประมวลผลสัญญาณด้วยเทคนิคโอเวอร์แซมปลิง

เพื่อลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า ระบบได้บูรณาการเทคนิคการสุ่มสัญญาณด้วยความถี่สูงแบบเป็นชุด (Burst Oversampling) โดยการสุ่มอ่านข้อมูล 50 ตัวอย่างด้วยความถี่ 1 kHz ภายในช่วง 50ms แรกของทุกรอบการวัด 100ms เพื่อให้สอดคล้องกับเวลาในการแปลงสัญญาณของ MAX31855 จากนั้นนำชุดข้อมูลเข้าสู่กระบวนการกรองสัญญาณแบบหาค่าเฉลี่ย (Digital Averaging Filter) เพื่อเพิ่มความละเอียดเสมือน



รูปที่ 2 การสุ่มตัวอย่างอุณหภูมิ 50 ตัวอย่างภายในหนึ่งรอบการวัด (Cycle) เพื่อหาค่าเฉลี่ยและลดสัญญาณรบกวน

3.3 ระเบียบวิธีสอบเทียบเชิงเปรียบเทียบ

การประเมินความแม่นยำของระบบดำเนินการผ่านระเบียบวิธีสอบเทียบ 2 รูปแบบ เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรแวดล้อมทางพลวัตความร้อน [15] [16] โดยใช้อุปกรณ์อ้างอิงมาตรฐาน Graphtec Midi Logger GL220 (Accuracy: ±0.1% of rdg + 0.5°C)

3.3.1 การสอบเทียบแบบสลับช่วงเวลา (Sequential Calibration)

ดำเนินการทดสอบภายในเครื่องอบแห้งจริง โดยบันทึกข้อมูลสลับช่วงเวลาระหว่างระบบที่พัฒนาขึ้นและเครื่องบันทึกข้อมูลมาตรฐาน (Certified Data Logger) เพื่อหลีกเลี่ยงความคลาดเคลื่อนจากการดึงสัญญาณ (Signal Loading) เมื่อเชื่อมต่อเครื่องมือสองระบบเข้ากับเซนเซอร์ตัวเดียวกัน

3.3.2 การสอบเทียบแบบวัดร่วมพร้อมกัน (Simultaneous Calibration)

ดำเนินการทดสอบในสภาวะควบคุมโดยใช้อ่างน้ำร้อน (Water Bath) ในช่วงอุณหภูมิ 40 ถึง 80 องศาเซลเซียส โดยนำเซนเซอร์ของทั้งสองระบบจุ่มในตำแหน่งเดียวกันและบันทึกค่าในเวลาเดียวกัน ข้อมูลจากขั้นตอนนี้ถูกนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้นเพื่อสร้างสมการปรับแก้ (Correction Equation) สำหรับชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ



รูปที่ 3 การสอบเทียบโดยใช้น้ำร้อน

3.4 การจัดการข้อมูลและส่วนต่อประสานผู้ใช้งาน

ข้อมูลอุณหภูมิที่ผ่านการประมวลผลและชดเชยความคลาดเคลื่อนแล้ว จะถูกส่งผ่านเครือข่าย WiFi ไปยังส่วนต่อประสานผู้ใช้งาน (Web Application) ที่พัฒนาขึ้นให้รองรับการแสดงผลกราฟเชิงเส้นแบบเวลาจริง (Real-time Monitoring) นอกจากนี้ ระบบได้ผนวกฟังก์ชันการจัดเก็บและส่งออกข้อมูลอัตโนมัติในรูปแบบไฟล์ CSV เพื่ออำนวยความสะดวกให้วิศวกรสามารถนำข้อมูลไปวิเคราะห์สมรรถนะทางอุณหพลศาสตร์ในโปรแกรมภายนอกได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ [13]

4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

การประเมินสมรรถนะของระบบจัดเก็บข้อมูลอุณหภูมิที่พัฒนาขึ้น มุ่งเน้นการตรวจสอบเสถียรภาพของการประมวลผลสัญญาณและการเปรียบเทียบระเบียบวิธีสอบเทียบเพื่อหาแนวทางชดเชยความคลาดเคลื่อนที่เหมาะสมที่สุด โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1 สมรรถนะการประมวลผลสัญญาณและการกรองสัญญาณรบกวน

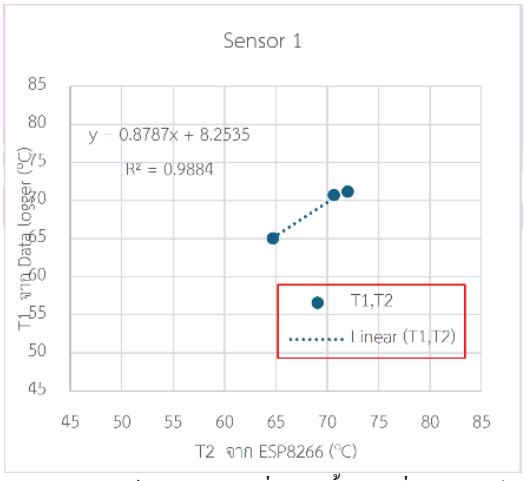
จากการติดตั้งระบบในสภาวะใช้งานจริง พบว่าอัลกอริทึมการสุ่มตัวอย่างเกิน ช่วยกรองสัญญาณรบกวนและลดสัญญาณรบกวนแบบฉับพลันที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อพิจารณาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของสัญญาณในสภาวะคงที่ พบว่าลดลงจากเดิม ±2.8 °C (เมื่อใช้การสุ่มตัวอย่างปกติ) เหลือเพียง ±0.45 °C ส่งผลให้ข้อมูลที่ได้มีความต่อเนื่องและมีเสถียรภาพสูงเพียงพอสำหรับการนำไปใช้ในระบบควบคุมอัตโนมัติ โดยไม่ปรากฏการสูญหายของข้อมูล (Data Loss) ตลอดระยะเวลาการทดสอบ 3 ชั่วโมง

4.2 การเปรียบเทียบระเบียบวิธีสอบเทียบ

ผู้วิจัยดำเนินการสอบเทียบ 2 รูปแบบเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยแวดล้อมที่ส่งผลต่อความแม่นยำของมาตรวัด ดังนี้

4.2.1 การสอบเทียบแบบสลับช่วงเวลา (Sequential Calibration)

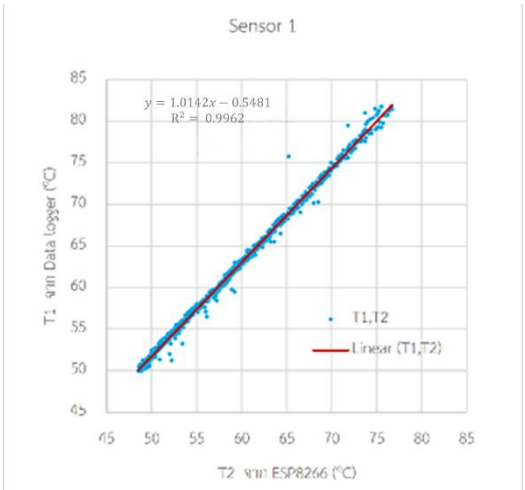
ดำเนินการที่เครื่องอบแห้งจริง ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางสถิติพบความแปรปรวนของข้อมูลในระดับปานกลาง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) กระจายตัวอยู่ในช่วง 0.9884 ถึง 0.9955 ความคลาดเคลื่อนที่ปรากฏเป็นผลจากพลวัตทางความร้อนภายในเครื่องที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ทำให้การเปรียบเทียบข้อมูลต่างช่วงเวลามีตัวแปรแทรกซ้อนสูง [16]



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างระบบที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องบันทึกข้อมูลในการสอบเทียบบนเครื่องแห้งโดยตรง

4.2.2 การสอบเทียบแบบวัดร่วมพร้อมกัน (Simultaneous Calibration)

ในการทดสอบผ่านอ่างน้ำร้อน ผลทดสอบเมื่อใช้แบบจำลองเชิงเส้นแบบรวม พบว่าค่า R^2 เฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้นถึง 0.9946 บ่งชี้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่อ่านได้จากระบบที่พัฒนาขึ้นและเครื่องมือมาตรฐานมีความเป็นเส้นตรงสูงมาก ผลลัพธ์เชิงประจักษ์นี้ยืนยันว่าการสอบเทียบพร้อมกันในสภาวะควบคุมเป็นระเบียบวิธีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการหาค่าชดเชยความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ (Systematic Error Compensation) ของฮาร์ดแวร์ต้นทุนต่ำ [15]



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างระบบที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องบันทึกข้อมูลในการสอบเทียบโดยใช้น้ำร้อน

4.3 การวิเคราะห์ความแม่นยำทางวิศวกรรม

จากการวิเคราะห์ข้อมูลรวมตัวอย่าง พบว่าสมรรถนะดีขึ้นอย่างชัดเจนในทุกมิติดังแสดงในตารางที่ 1 โดยเฉพาะอย่างยิ่งการลดลงของความผิดพลาดสะสม

ตารางที่ 1: การเปรียบเทียบพารามิเตอร์สมรรถนะเชิงสถิติก่อนและหลังการประยุกต์ใช้โมเดลปรับแก้

พารามิเตอร์	ก่อนปรับเทียบ	หลังปรับเทียบ	การปรับปรุง (%)
MAE (°C)	2.31	**0.72**	68.8%
RMSE (°C)	2.56	**0.90**	64.8%
R^2	0.9702	**0.9962**	2.7%

เมื่อวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด (Peak Error) พบว่าอยู่ที่ 2.97 °C ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงเริ่มเดินเครื่อง (Warm-up Period) ที่มีความผันผวนทางไฟฟ้าสูง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ในอุตสาหกรรม (Industrial Tolerance) ที่ระดับ ±2.0 °C ถึง ±5.0 °C [3] พบว่าผลลัพธ์ MAE ที่ 0.72 °C ของระบบนี้จัดว่ามีความแม่นยำสูงและเข้าใกล้ขีดจำกัดด้านความไม่แน่นอน (Uncertainty) ของอุปกรณ์อ้างอิงมาตรฐาน (±0.5 °C) จึงมีความน่าเชื่อถือเพียงพอสำหรับการนำไปใช้งานจริงในโรงงานอุตสาหกรรม SMEs

4.4 การแสดงผลและจัดการข้อมูลสารสนเทศ

ส่วนต่อประสานผู้ใช้งานที่พัฒนาขึ้นช่วยให้วิศวกรสามารถติดตามแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของจุดวัดทั้ง 5 จุดได้พร้อมกันแบบเวลาจริง และระบบยังรองรับการส่งออกข้อมูลรูปแบบ CSV ได้โดยอัตโนมัติผ่านระบบคลาวด์ คุณสมบัตินี้ช่วยลดภาระงานในการจดบันทึกด้วยคน ลดความผิดพลาดจากมนุษย์ (Human Error) และเป็นการสร้างฐานข้อมูลดิจิทัลที่พร้อมสำหรับการนำไปวิเคราะห์ต่อด้วยเทคนิคขั้นสูงต่อไป [13]



รูปที่ 6 ส่วนติดต่อผู้ใช้งาน

5. สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบจัดเก็บข้อมูลอุณหภูมิ IoT ต้นทุนต่ำ (1,750 บาท) เพื่อยกระดับเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด การบูรณาการเทคนิคโอเวอร์แซมปลิงร่วมกับการสร้างสมการชดเชยความคลาดเคลื่อนเชิงเส้นจากการสอบเทียบแบบวัดร่วมพร้อมกัน ช่วยลดสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าและเพิ่มความแม่นยำของระบบให้เทียบเท่าเครื่องมือมาตรฐาน โดยให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) สูงถึง 0.9962 ความแม่นยำระดับนี้ยืนยันว่าระบบสามารถประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือทางเลือกที่เชื่อถือได้ สำหรับสนับสนุนงานวิจัยที่ต้องการจุดวัดอุณหภูมิจำนวนมาก เช่น การตรวจสอบการกระจายความร้อนหรือการศึกษาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) [3] นอกจากนี้ ระบบยังรองรับการแสดงผลแบบเวลาจริงและบันทึกข้อมูลในรูปแบบไฟล์ CSV อัตโนมัติ ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการเปลี่ยนผ่านสู่ดิจิทัลของอุตสาหกรรม 4.0 อย่างสมบูรณ์

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เอื้อเฟื้อสถานที่และอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ตลอดจนขอขอบพระคุณ นายชลชาติ แซ่เปีย, นายพงศ์ประดิษฐ์ บรรพบุตร และ นายภูธเนศ แก้วกำพล นักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ได้อุทิศเวลาและทุ่มเทแรงกายแรงใจในการจัดเตรียมชุดเครื่องมือทดลอง รวมถึงช่วยจัดเก็บข้อมูลวิจัยอย่างดียิ่ง ซึ่งมีส่วนสำคัญเป็นอย่างมากที่ส่งผลให้การดำเนินงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความเรียบร้อยและบรรลุวัตถุประสงค์ตามที่ตั้งไว้ทุกประการ

เอกสารอ้างอิง

[1] H. Lasi, et al., "Industry 4.0," Business & Information Systems Engineering, vol. 6, no. 4, pp. 239-242, 2014.

[2] W. C. Dunn, Fundamentals of Industrial Instrumentation and Process Control, 2nd ed. New York: McGraw-Hill Education, 2018.

[3] ชัยวัฒน์ อุทัยแสน, ยศกร ประทุมวัลย์, และ ทรงวุฒิ มงคลเลิศมณี, "การตรวจสอบการกระจายลมร้อนในเตาอบด้วยการทดลองและพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ," วารสารวิจัย UTK กรุงเทพ, ปีที่ 19, ฉบับที่ 2, หน้า 51-62, กรกฎาคม-ธันวาคม 2568.

[4] M. Sarkar, et al., "A comprehensive review of fluidized bed drying," Sustainable Energy Technologies and Assessments, vol. 52, art. 102643, 2022.

[5] A. Alqoud, et al., "Industry 4.0: a systematic review of legacy manufacturing system digital retrofitting," Manufacturing Review, vol. 9, art. 32, 2022.

[6] J. G. Proakis and D. G. Manolakis, Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications, 4th ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2007.

[7] ทรงศักดิ์ มีสิทธ์, เจษฎา ก้านจักร และ นิยม อมรเจษฎาวงศ์, "การพัฒนาเครื่องมือตรวจวัดและบันทึกอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่แสดงผลผ่านสมาร์ทโฟน," วารสารวิชาการอุตสาหกรรมศึกษา, ปีที่ 15, ฉบับที่ 1, หน้า 46-59, 2564.

[8] อานนท์ เพ็ชรอาภรณ์ และคณะ, "การศึกษาอุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสมกับโรงเรือนเพาะพันธุ์นกฟอพัสผ่านแอปพลิเคชัน," 2566.

[9] A. S. Mujumdar, Handbook of Industrial Drying, 4th ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2014.

[10] D. Kunii and O. Levenspiel, Fluidization Engineering, 2nd ed. Boston, MA: Butterworth-Heinemann, 2013.

[11] Analog Devices, "MAX31855: Cold-junction compensated thermocouple-to-digital converter data sheet," Rev. 5, 2015.

[12] C. Zhang, et al., "Design of ESP8266 in environmental monitoring system," Open Access Library Journal, vol. 6, no. 7, 2019.

[13] S. L. Ullo and G. R. Sinha, "Advances in IoT and smart sensors for remote sensing and agriculture applications," Remote Sensing, vol. 13, no. 13, 2021.

[14] D. M. Rowe, Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano, Boca Raton, FL: CRC Press, 2018.

[15] ISO/IEC 17025:2017, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories, 2017.

[16] J. P. Holman, Experimental Methods for Engineers, 8th ed. New York, NY: McGraw-Hill, 2012.

บทความวิจัย

ไฟฟ้า

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

ระบบรดน้ำต้นไม้จากเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองฟังก์ชั่น

A Dual Function Photovoltaic Plant Irrigation System

นเรศ ชลังสุทธิ์ วชิราวิทย์ น้ำพุ ณัฐพล ถาวรเจริญชัย สาคร วุฒิพัฒนพันธุ์ พูนศรี วรรณการ มนัส บุญเทียรทอง และนัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถ.ประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร โทรศัพท์ 02-836-3000 ต่อ 4150 E-mail: Narate.c@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอระบบรดน้ำต้นไม้พลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์แบบสองฟังก์ชั่น ซึ่งมี 2 กรณีศึกษา ได้แก่ กรณีที่ 1 ระบบอัตโนมัติ และ กรณีที่ 2 ระบบแมนนวล จากการทดสอบพบว่า กรณีที่ 1 ระบบอัตโนมัติ เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการความสะดวกสบายและการควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติ โดยไม่ต้องคอยดูแลทุกครั้งที่ต้องการรดน้ำ และยังสามารถควบคุมจากระยะไกลได้ โดยระบบนี้เหมาะกับพื้นที่ที่มีความต้องการใช้งานแบบต่อเนื่องและยาวนาน เช่น สวน หรือฟาร์มขนาดใหญ่ และกรณีที่ 2 ระบบแมนนวล เหมาะสำหรับผู้ที่ต้องการควา มยืดหยุ่นในการควบคุมการทำงานแต่ละขั้นตอน หรือในกรณีที่พื้นที่ไม่กว้างขวางมากและต้องการการควบคุมที่ทันทีทันใด อย่างไรก็ตาม ระบบนี้อาจต้องการการดูแลมากขึ้นจากผู้ใช้ หากต้องการระบบที่สามารถทำงานได้โดยไม่ต้องควบคุมทุกครั้งและใช้งานในพื้นที่ขนาดใหญ่หรือพื้นที่ที่ไม่มีไฟฟ้า กรณีที่ 1 ระบบอัตโนมัติจะเหมาะสมกว่า

คำสำคัญ : เซลล์แสงอาทิตย์, อัตโนมัติ, แมนนวล

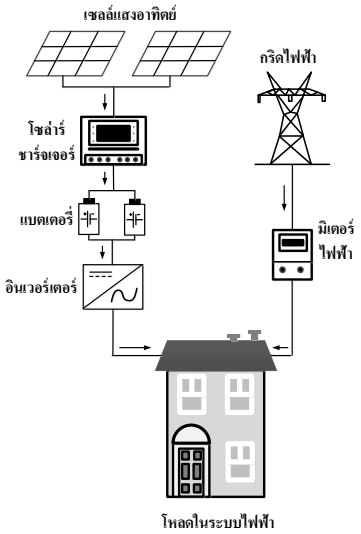
Abstract

This paper present a dual system solar watering system, with two case studies: Case 1, an automatic system, and Case 2, a manual system. From the test, it was found that Case 1, an automatic system, is suitable for applications that require convenience and automatic control without having to take care of it every time you want to water it, and it can also be controlled remotely. This system is suitable for areas that require continuous and long-term use, such as large gardens or farms. Case 2, a manual system, is suitable for those who want flexibility in controlling each step of the operation, or in cases where the area is not very large and requires immediate control. However, this system may require more care from the user. If a system that can operate without having to be controlled every time and is used in a large area or an area without electricity is required, Case 1, an automatic system, is more suitable.

Keywords: solar cell, automatic, manual

1. บทนำ

พลังงานหมุนเวียนคือพลังงานแห่งอนาคตที่จะมาทดแทนพลังงานสิ้นเปลือง พลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งใช้เซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงคือพลังงานแห่งอนาคต ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์

ในปี ค.ศ.2010 [1] ได้ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงความหนาของพื้นที่สัมผัสสารกึ่งตัวนำชนิดพีและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่สอดคล้องกันของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบรอยต่อเดี่ยว โดยใช้โปรแกรม Silvaco TCAD สร้างตัวอย่างหลายตัวและวิเคราะห์ผลกระทบของเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิด ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่บางกว่าให้ประสิทธิภาพการสร้างแสงที่สูงขึ้น ในปี ค.ศ.2012 [2] มีการศึกษาอัลกอริทึมที่ควบคุมวาล์วโซลินอยด์แบบสัดส่วน โดยอ้างอิงจากการวิจัยความสัมพันธ์ระหว่างการสั่นของอาร์เมเจอร์และปริมาณการเต้นของกระแสขับ พารามิเตอร์ควบคุมของอัลกอริทึม

บทความนี้เป็นการศึกษาการทำระบบรดน้ำต้นไม้จากพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งใช้เซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าเป็นระบบรดน้ำต้นไม้แบบสองฟังก์ชั่น โดยแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 2 กรณี

2. การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นอุปกรณ์สำหรับการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยการนำสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิกอน ซึ่งมีราคาถูกที่สุดและมีมากที่สุดบนพื้นโลกนำมาผ่านกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ผลิตให้เป็นแผ่นบางบริสุทธิ์ และในทันทีที่มีแสงตกกระทบบนแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ รังสีของแสงที่มีอนุภาคของพลังงานประกอบ ที่เรียกว่าโฟตอนจะถ่ายเทพลังงานให้กับ อิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำจนมีพลังงานมากพอที่จะกระโดดออกมาจากแรงดึงดูดของอะตอม และสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนมีการเคลื่อนที่ครบวงจร ก็จะทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรง เซลล์แสงอาทิตย์คือสิ่งประดิษฐ์ที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าซึ่งพลังงานไฟฟ้าที่ได้นั้นจะมีพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง หลักการทำงานแบ่งเป็น 2 ช่วง กล่าวคือ ในช่วงเวลากลางวันเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสงแดดสามารถผลิตไฟฟ้าจ่ายให้แก่โหลดได้โดยตรง โดยผ่านอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ และหากมีพลังงานไฟฟ้าส่วนที่เกินจะถูกจ่ายเข้าระบบจำหน่ายไฟฟ้า สังเกตได้ เนื่องจากมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าจะหมุนกลับทาง ส่วนในช่วงกลางคืนเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้กระแสไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าจะจ่ายให้แก่โหลดโดยตรง สังเกตได้จากมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าจะหมุนปกติ ดังนั้นระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับสายส่ง กำลังไฟฟ้าของการไฟฟ้าจะเป็นการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าในเขตเมืองหรือพื้นที่ที่มีระบบจำหน่ายไฟฟ้าเข้าถึง อุปกรณ์ระบบที่สำคัญประกอบไปด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์และ อินเวอร์เตอร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับชนิดต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า [3]-[4] เซลล์แสงอาทิตย์ แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 เซลล์แสงอาทิตย์

3. โซลินอยด์วาล์ว

โซลินอยด์วาล์วเป็นวาล์วที่ควบคุมการไหลของของเหลวหรือก๊าซด้วยกระแสไฟฟ้า เช่น น้ำ อากาศ หรือก๊าซต่างๆ ซึ่งภายในโซลินอยด์วาล์วจะมีส่วนประกอบสำคัญคือขดลวดพันแม่เหล็ก ซึ่งใช้เป็นตัวกลางที่ใช้ร่วมกับพลังงานไฟฟ้า โซลินอยด์วาล์วทำงานโดยใช้หลักการแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดโซลินอยด์ จะเกิดสนามแม่เหล็กที่ดึงดูดแท่งเหล็ก ทำให้วาล์วเปิดหรือปิด เมื่อไม่มีกระแสไฟฟ้า วาล์วจะอยู่ในตำแหน่งปกติ [5]-[6]

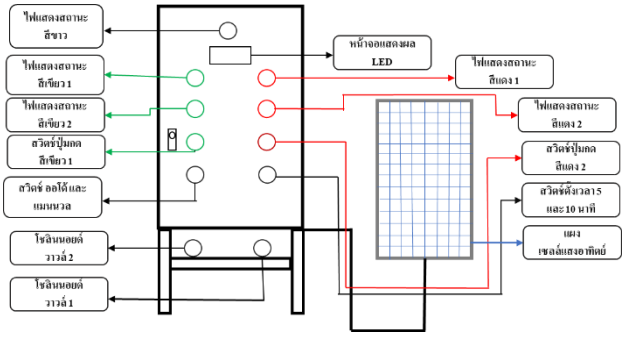
4. โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอลโทรลเลอร์ (PLC)

โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอลโทรลเลอร์ คืออุปกรณ์ควบคุมการทำงานของเครื่องจักรหรือกระบวนการทำงานต่างๆ โดยภายในมีไมโครโพรเซสเซอร์สั่งการโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอลโทรลเลอร์จะมีส่วนที่เป็นอินพุตและเอาต์พุตที่สามารถต่อออกไปใช้งานได้ทันที ตัวตรวจวัดหรือสวิตช์ต่างๆ จะต่อเข้ากับอินพุต ส่วนเอาต์พุตจะใช้ต่อออกไปควบคุมการทำงานของอุปกรณ์หรือเครื่องจักรที่เป็นเป้าหมาย เราสามารถสร้างวงจรหรือแบบของการควบคุมได้โดยการป้อนเป็นโปรแกรมคำสั่งเข้าไปในโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอลโทรลเลอร์ [7]-[8]

4. กรณีศึกษา

ระบบรดน้ำต้นไม้เซลล์แสงอาทิตย์แบบสองฟังก์ชั่นเป็นบทความที่ได้ทำการศึกษาระหว่างประสิทธิภาพของพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ และ ระบบการทำงานของ ระบบรดน้ำด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ควบคุมด้วยรีโมทโดยมี 2 กรณีศึกษา ได้แก่ กรณีที่ 1 ระบบอัตโนมัติ ออกแบบมาเพื่อสร้างความสะดวกต่อผู้ใช้งานทางการเกษตร โดยการทำงานจะเริ่มที่ปรับโมท อัตโนมัติที่ซีเล็คเตอร์สวิตช์ตัวที่ 1 และปรับเวลา การทำงาน 5 หรือ 10 นาทีตามความต้องการในช่วงเวลาที่กำหนดโดยปรับเวลาที่ซีเล็คเตอร์สวิตช์ตัวที่ 2 แล้วกดสวิตช์ปุ่มกดสีเขียว 1 ครั้งระบบจะสั่งการสั่งโซลินอยด์วาล์วตัวที่ 1 จ่ายน้ำตามระยะเวลาที่เรากำหนด เมื่อโซลินอยด์วาล์วตัวที่ 1 จ่ายน้ำครบตามระยะเวลาที่กำหนด ระบบจะสั่งโซลินอยด์วาล์วตัวที่ 1 หยุด ระบบจะสั่งโซลินอยด์วาล์วตัวที่ 2 ทำงานต่อทันทีจนครบตามระยะเวลาที่กำหนด จึงเป็นการจบโปรแกรมอัตโนมัติ ทั้งนี้ทั้งนั้นยังสามารถควบคุมคำสั่งจากรีโมทควบคุมไร้สาย ในระยะห่างไม่เกิน50 เมตรจากตัวเครื่องระบบรดน้ำต้นไม้ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ และกรณีที่ 2 ระบบแมนนวล สร้างขึ้นมาเพื่อทดแทนข้อบกพร่องของระบบอัตโนมัติซึ่งเป็นระบบที่ต้องการการควบคุมจากผู้ใช้งานโดยตรง ซึ่งในการรดน้ำต้นไม้ ผู้ใช้ต้องทำการเปิดและปิดการทำงานของโซลินอยด์วาล์วหรือการจ่ายน้ำด้วยตนเอง ผ่านสวิตช์ หรือปุ่มควบคุมที่กำหนดไว้ในระบบ โดยไม่มีการตั้งเวลาหรือการควบคุมอัตโนมัติ ระบบนี้จะเหมาะสำหรับสถานการณ์ที่ต้องการควบคุมการจ่าย

น้ำตามความต้องการในแต่ละครั้ง หรือกรณีที่ผู้ใช้ต้องการให้การรดน้ำเป็นไปตามสถานการณ์ที่เปลี่ยนแปลงการทำงานเมื่อกดสวิตช์สีเขียวครั้งที่1 โซลินอยด์วาล์วตัวที่ 1 จะทำการปล่อยน้ำตามระยะเวลาที่เรากำหนด ซึ่งถ้ากดสวิตช์สีเขียว ครั้งที่ 2 อีกรอบระบบจะทำการสั่งโซลินอยด์วาล์วตัวที่1 จะหยุดการทำงานทันที และเมื่อกดสวิตช์สีแดงครั้งที่ 1 โซลินอยด์วาล์วตัวที่ 2 จะทำการปล่อยน้ำตามระยะเวลาที่เรากำหนด ซึ่งถ้ากดสวิตช์สีแดงครั้งที่ 2 อีกรอบระบบจะทำการสั่งโซลินอยด์วาล์วตัวที่ 2 หยุดการทำงาน ทั้งนี้ทั้งนั้นยังสามารถควบคุมคำสั่งจากรีโมทควบคุมไร้สายในระยะห่างไม่เกิน 50 เมตรจากตัวเครื่องระบบรดน้ำต้นไม้ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ แบบจำลองระบบรดน้ำต้นไม้แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แบบจำลองระบบรดน้ำต้นไม้

ส่วนประกอบต่างๆของระบบรดน้ำต้นไม้เซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 4 ระบบรดน้ำต้นไม้เซลล์แสงอาทิตย์แบบปิดตู้ แสดงดังรูปที่ 5 ระบบรดน้ำต้นไม้เซลล์แสงอาทิตย์แบบเปิดตู้ แสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 4 ส่วนประกอบต่างๆของระบบรดน้ำต้นไม้เซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 5 ระบบรดน้ำต้นไม้เซลล์แสงอาทิตย์แบบปิดตู้



รูปที่ 6 ระบบรดน้ำต้นไม้เซลล์แสงอาทิตย์แบบเปิดตู้

ตารางที่ 1 ผลการดำเนินงาน ระบบอัตโนมัติ

ลำดับ	ขั้นตอนการทำงาน	รายละเอียด
1	ตั้งค่าโหมดอัตโนมัติ	ปรับที่ซีเลคเตอร์สวิตช์ตัวที่ 1
2	ตั้งค่าเวลาการทำงาน	ปรับที่ซีเลคเตอร์สวิตช์ตัวที่ 2 (เลือก 5 หรือ 10 นาที)
3	เริ่มทำงาน	กดปุ่มสวิตช์ปุ่มกดสีเขียว 1 ครั้ง
4	จ่ายน้ำผ่านโซลินอยด์วาล์วตัวที่ 1	ระบบสั่งงานให้โซลินอยด์วาล์วตัวที่ 1 ทำงานตามระยะเวลา 5 หรือ 10 นาที
5	หยุดโซลินอยด์วาล์วตัวที่ 1	หลังครบเวลา ระบบสั่งให้โซลินอยด์ตัวที่ 1 หยุด
6	ทำงานต่อด้วยโซลินอยด์วาล์วตัวที่ 2	ระบบสั่งงานให้โซลินอยด์วาล์วตัวที่ 2 ทำงานต่อจนครบเวลา
7	สิ้นสุดโปรแกรมอัตโนมัติ	หลังวาล์วตัวที่ 2 ทำงานครบเวลา
8	ควบคุมระยะไกล	สามารถควบคุมผ่านรีโมทไร้สายในระยะมากกว่า 50 เมตร

ตารางที่ 2 ผลการดำเนินงาน ระบบอัตโนมัติ

ลำดับ	สวิตช์ปุ่มกดที่กด	โซลินอยด์วาล์วที่ทำงาน	ลักษณะการทำงาน
1	กดสวิตช์ปุ่มกดสีเขียว ครั้งที่ 1	ตัวที่ 1	ปล่อยน้ำตามระยะเวลาที่กำหนด
2	กดสวิตช์ปุ่มกดสีเขียว ครั้งที่ 2	ตัวที่ 1	หยุดการจ่ายน้ำทันที
3	กดสวิตช์ปุ่มกดสีแดง ครั้งที่ 1	ตัวที่ 2	ปล่อยน้ำตามระยะเวลาที่กำหนด
4	กดสวิตช์ปุ่มกดสีแดง ครั้งที่ 2	ตัวที่ 2	หยุดการจ่ายน้ำทันที

5. สรุปผลการทดลอง

บทความนี้นำเสนอระบบรดน้ำต้นไม้เซลล์แสงอาทิตย์แบบสองฟังก์ชั่น โดยมี 2 กรณีศึกษา ได้แก่ กรณีที่ 1 ระบบอัตโนมัติ และ กรณีที่ 2 ระบบแมนนวล จากการทดสอบพบว่า กรณีที่ 1 ระบบอัตโนมัติ จะถูกออกแบบมาเพื่อสร้างความสะดวกต่อผู้ใช้งานทางการเกษตรเหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการความสะดวกสบายและการควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติ โดยไม่ต้องคอยดูแลทุกครั้งที่ต้องการรดน้ำ และยังสามารถควบคุมจากระยะไกลได้ โดยระบบนี้เหมาะกับพื้นที่ที่มีความต้องการใช้งานแบบต่อเนื่องและยาวนาน เช่น สวน หรือฟาร์มขนาดใหญ่ และกรณีที่ 2 ระบบแมนนวล สร้างขึ้นมาเพื่อทดแทนข้อบกพร่องของระบบอัตโนมัติซึ่งเป็นระบบที่ต้องการการควบคุมจากผู้ใช้งานโดยตรง ซึ่งในการรดน้ำต้นไม้ ผู้ใช้ต้องทำการเปิดและปิดการทำงานของโซลินอยด์วาล์วหรือการจ่ายน้ำด้วยตนเอง เหมาะสำหรับผู้ที่ต้องการควา มยืดหยุ่นในการควบคุมการทำงานแต่ละขั้นตอน หรือในกรณีที่พื้นที่ไม่กว้างขวางมากและต้องการการควบคุมที่ทันทีทันใด อย่างไรก็ตาม ระบบนี้อาจต้องการการดูแลมากขึ้นจากผู้ใช้ หากต้องการระบบที่สามารถทำงานได้โดยไม่ต้องควบคุมทุกครั้งและใช้งานในพื้นที่ขนาดใหญ่หรือพื้นที่ที่ไม่มีไฟฟ้า กรณีที่ 1 ระบบอัตโนมัติจะเหมาะสมกว่า

6. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีอย่างสมบูรณ์ด้วยความช่วยเหลือและการสนับสนุนเป็นอย่างดียิ่งจากคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

เอกสารอ้างอิง

[1] Cai Sheng-Nian, Zhou Ying Pang Bao-Lin, Xu Cheng-Tao and Qin Ran, “Research on the Relationship between Drive Current Pulsating Quantity of Proportional Solenoid Valve and Flow Hysteresis” , 2012 Second International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control, 2012.

[2] M.H. Abdullah, N.A. Rashied and M. Rusop, “Layer thickness analysis of silicon solar cells” , 2010 International Conference on Electronic Devices, Systems and Applications, 2010.

[3] Zih-Wei Peng, Lejo J. Koduvelikulathu and Radovan Kopecek, “The impact of bulk resistivity on bifacial n-PERT rear junction solar cells” , 2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2020.

[4] Zhi Li and Ziming Li, “Research Status of Solar Cell Characteristics” , 2022 International Conference on Manufacturing, Industrial Automation and Electronics (ICMIAE), 2022.

[5] Xue-ling Song, Ying-bao Zhao, Chao-ying Liu and Zhe-ying Song, “Solenoid Valve Switching Characteristic Test System Design” 2009 Ninth International Conference on Hybrid Intelligent Systems, 2009.

[6] Quanwei Hou, Keli Xing, Xiajie Jin, “Development of High and Low Temperature Testing System for Solenoid Valves” , 2024 6th International Conference on Energy, Power and Grid (ICEPG), 2024.

[7] Wang Dongqi and Zhang Yuan, “Simulation of the EPC filling speed based on PLC control”, 2021 4th International Conference on Electron Device and Mechanical Engineering (ICEDME), 2021.

[8] Maryna Kolisnyk, Axel Jantsch and Iryna Piskachova “Markov Model for Availability Assessment of PLC in Industrial IoT Considering Subsystems Failures”, 2022 12th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), 2022.

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

ผลกระทบของเงาต่อระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตรัลไลน์

The Effect of Shadows on Monocrystalline Photovoltaic Power Generation Systems

ภิญโญ อั้งยุทธ นเรศ ชลังสุทธิ์ ศศิกา สนธิกัณฑ์ สุรเชษฐ เดชฟุ้ง พสิษฐ์ สุวรรณภิงคาร

อานนท์ สิงห์เสถียร พนา ดุสิตากร ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว และ สุรสิทธิ์ ประกอบกิจ

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถ.ประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร โทรศัพท์ 02-836-3000 ต่อ 4150 E-mail: Phinyo.a@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาผลกระทบของเงาต่อระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตรัลไลน์ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของเงาบังบนเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งได้มีการทำการทดสอบการวัดกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า และมีการจำลองสถานการณ์ด้านเงาบังบนเซลล์แสงอาทิตย์ เวลาในการทดสอบ 9.00 - 15.00 น.โดยแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 5 กรณี ได้แก่ กรณีที่ 1 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์แบบไม่มีเงาบัง กรณีที่ 2 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์แบบมีเงาบังร้อยละ 5 กรณีที่ 3 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์แบบมีเงาบังร้อยละ 12.5 กรณีที่ 4 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์แบบมีเงาบังร้อยละ 50 และกรณีที่ 5 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์แบบมีเงาบังร้อยละ 100 จากผลการทดสอบผลกระทบเงาบังบนเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตรัลไลน์นั้นมีผลทำให้การผลิตกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้านั้นลดลงตามสัดส่วนของเงาบังบนเซลล์แสงอาทิตย์

คำสำคัญ : เซลล์แสงอาทิตย์, เงา, กระแสไฟฟ้า

Abstract

This paper present the effect of shadows on monocrystalline photovoltaic power generation systems. The objective is to study and analyze the effect of shading on photovoltaic by installing photovoltaic facing south in a horizontal plane. Tests were carried out to measure current, voltage, and power. From 9:00 a.m. - 3:00 p.m. and there is a simulation of the shadow. Divided the case studies into 5 cases: Case 1: Installation of photovoltaic without shade. Case 2: Installation of photovoltaic with 5 percent shade. Case 3: Installation of photovoltaic with 12.5 percent shade. Case 4: photovoltaic installation with 50 percent shade. And Case 5: photovoltaic installation with 100 percent shade. From the test results of the shading effect on mono crystalline photovoltaic causes the current generation, voltage, and power to be reduced in proportion to the shadow on the photovoltaic.

Keywords: photovoltaic, shadow, electric current

1. บทนำ

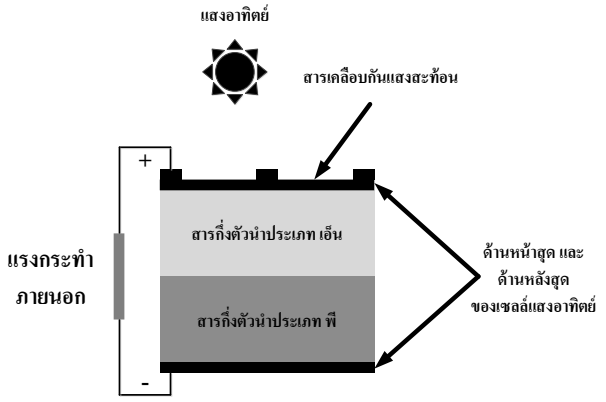
การที่เซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดนั้นก็ต่อเมื่อมีการทำงานอยู่ที่จุดพลังงานสูงสุด ซึ่งมีปัจจัยหลายประการที่ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถทำงานอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดได้ เช่น อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โหลดในระบบไฟฟ้า การสะสมของฝุ่นละออง ปริมาณความเข้มแสงจากดวงอาทิตย์ และทิศทางของดวงอาทิตย์ ทุกอย่างที่กล่าวมานี้ล้วนสามารถส่งผลต่อประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ทั้งหมด [1]

ในปี ค.ศ.2014 [2] ผลกระทบของการสะสมอนุภาคฝุ่นคาร์บอนและเงาบางส่วนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากการทดลอง พบว่าฝุ่นคาร์บอนสามารถลดประสิทธิภาพของการผลิตไฟฟ้าได้มากกว่าเงาบางส่วนบนเซลล์แสงอาทิตย์ ในปี ค.ศ.2020 [3] การประเมินศักยภาพการผลิตกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจากโรงไฟฟ้า พลังงานแสงอาทิตย์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า เพื่อหาข้อบกพร่อง การผลิตกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้หลักการตรวจวัด ทางด้านไฟฟ้ากระแสตรง ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผลจากการทดสอบแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพและความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด และมีความต่อเนื่อง ในปี ค.ศ.2022 [4] ได้มีการทำเครื่องชาร์จพลังงานแสงอาทิตย์ปรับมุมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และมีการบันทึกค่าลงฐานข้อมูลไฟร์เบสควบคุมโดยมีการปรับมุมรับแสงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบแกนเดียวซึ่งทำให้ตั้งฉากกับดวงอาทิตย์ เวลา 9.00 น. ถึง 16.00 น. และวัดค่าแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ สถานะและเปอร์เซ็นต์การชาร์จของแบตเตอรี่บันทึกลงฐานข้อมูลไฟร์เบสผ่านเครือข่ายไร้สาย ในปี ค.ศ.2023 [5] ได้มีการศึกษาผลกระทบของเงาต่อระบบผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงร้อยละ 20 ถึง ร้อยละ 80 ขึ้นอยู่กับเงาหรือความหนาแน่นของฝุ่นที่สะสมบทแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ดังนั้นบทความนี้เป็นการจำลองเหตุการณ์ด้านเงาบังที่กระทบต่อการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตรัลไลน์ และแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 5 กรณีพลังงานไฟฟ้าเป็นระบบรดน้ำต้นไม้แบบสองฟังก์ชั่น โดยแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 2 กรณี

2. เงาต่อการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

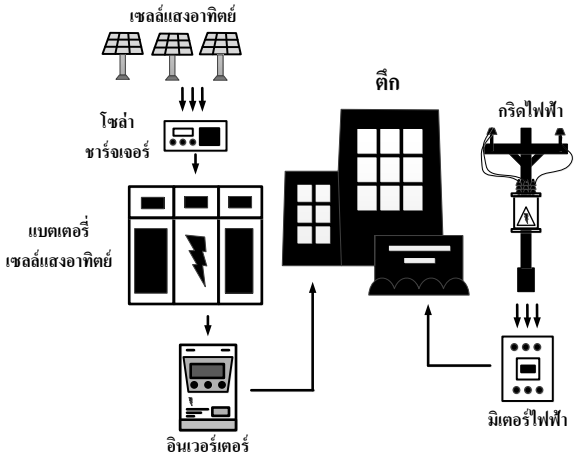
เงาที่เกิดขึ้นกับเซลล์แสงอาทิตย์อาจเป็นสาเหตุที่พบได้บ่อยโดยอาจเกิดจากเศษฝุ่นละออง นก ใบไม้ หรือสิ่งของอื่นๆ ที่ตกลงบนเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้บริเวณนั้นได้รับแสงแดดน้อยกว่าบริเวณอื่นๆ ผลกระทบของเงาบังต่อเซลล์แสงอาทิตย์มีอยู่ 2 แบบ แบบที่หนึ่งคือจุดร้อนเกิดขึ้นเมื่อแสงอาทิตย์สามารถส่องผ่านเซลล์แสงอาทิตย์ได้ในบางส่วนแต่ไม่สามารถส่องผ่านเซลล์แสงอาทิตย์ในส่วนอื่นๆได้ สิ่งนี้จะทำให้เกิดการสร้างจุดร้อนบนเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งอาจทำให้เซลล์แสงอาทิตย์เสียหายได้ [6] เมื่อความร้อนสะสมมากเกิดที่เซลล์แสงอาทิตย์จะรับได้ ก็จะส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์เกิดความเสียหายได้ และแบบที่สองคือการสูญเสียการผลิตพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงเกิดขึ้นเมื่อแสงอาทิตย์ไม่สามารถส่องผ่านเซลล์แสงอาทิตย์ได้ทั้งหมดซึ่งเกิดจากเงาบัง ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตพลังงานไฟฟ้าได้น้อยลง ทำให้ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้น้อยลงตามไปด้วย การสูญเสียพลังงานไฟฟ้าจะยิ่งมากขึ้น [7] เซลล์แสงอาทิตย์ แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 เซลล์แสงอาทิตย์

3. แบตเตอรี่เซลล์แสงอาทิตย์

ในปัจจุบันแบตเตอรี่ถือได้ว่าเป็นสิ่งที่อำนวยความสะดวกที่เป็นที่นิยมมาก อุปกรณ์ไฟฟ้าหลายอย่างจำเป็นต้องแบตเตอรี่เซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีหน้าที่สะสมพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงที่ผลิตจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และจัดเก็บพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงนั้นเอาไว้ใช้ในเวลาที่ไม่มีแสงอาทิตย์ ที่เซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้ามาใช้ได้ [8] ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้แบตเตอรี่นั้นมีอยู่ 2 ระบบคือ ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบออฟกริด คือระบบ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่เชื่อมต่อกับการไฟฟ้าและไฟฟ้าที่ผลิตได้จะถูกเก็บในแบตเตอรี่ และระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบไฮบริด คือระบบมีการเชื่อมต่อกับการไฟฟ้าสำหรับช่วงที่ไม่มีแสงอาทิตย์ และมีการใช้แบตเตอรี่เพื่อเก็บพลังงานในตอนกลางวันเพื่อนำไปจ่ายโหลดในระบบไฟฟ้าตอนกลางคืน [9]



รูปที่ 2 ระบบแบตเตอรี่ในเซลล์แสงอาทิตย์

สมการวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงดังสมการที่ 1 [10]

$$V_{OC} = \frac{N \times K \times T}{q} In(\frac{I_{Ph}}{I_o}) \quad (1)$$

เมื่อ

V_{OC} คือ แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (V)

I_{Ph} คือ กระแสไฟฟ้าโฟโตอิเล็กทริก (A)

q คือ 1.602×10^{-19}

N คือ ตัวประกอบทางอุดมคติ

K คือ $1.3806504 \times 10^{-23}$ J/Kelvin

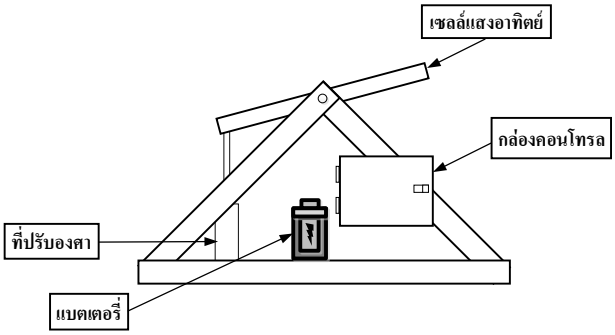
I_o คือ อุณหภูมิที่รอยต่อขณะเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน

T คือ อุณหภูมิที่รอยต่อขณะเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน

4. กรณีศึกษา

บทความนี้นำเสนอการศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบเงาบังบนเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตรัลไลน์ซึ่งมีการทดสอบการวัดกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า โดยแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 5 กรณี แต่ละกรณีจะทำการทดสอบ 4 วัน และหาค่าเฉลี่ยในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งจะทำการทดสอบตั้งแต่เวลา 9.00 – 15.00 น. ทุกกรณีเป็นการวางเซลล์แสงอาทิตย์บนแนวระนาบ ได้แก่ กรณีที่ 1 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์แบบไม่มีเงาบัง กรณีที่ 2 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์แบบมีเงาบังร้อยละ 5 กรณีที่ 3 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์แบบมีเงาบังร้อยละ 12.5 กรณีที่ 4 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์แบบมีเงาบังร้อยละ 50 และกรณีที่ 5 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์แบบมีเงาบังร้อยละ 100 บทความนี้มีขั้นตอนการดำเนินงานโดยมีการออกแบบ และสร้างชุดทดลองเซลล์แสงอาทิตย์ 1 ชุด เป็นการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์แบบมีเงาบัง โดยมีอุปกรณ์ประกอบด้วย 1.เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ 12 โวลต์ 50 วัตต์ 2.โซลาร์ชาร์เจอร์ 30 แอมป์ 3.แบตเตอรี่ ขนาด 12 โวลต์ 4.เบรคเกอร์ 20 แอมป์ และ 5.หลอดไฟ LED 5 วัตต์ เซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนพลังงานแสงเป็น

พลังงานไฟฟ้าผ่านโซลาร์ชาร์เจอร์ และเก็บไว้ที่แบตเตอรี่ แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงดังรูปที่ 3 และเซลล์แสงอาทิตย์แบบมีเงาบัง แสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังตารางต่างๆดังนี้ ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงดังตารางที่ 1 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงดังตารางที่ 2 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงดังตารางที่ 3



รูปที่ 3 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 4 เซลล์แสงอาทิตย์แบบมีเงาบัง

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

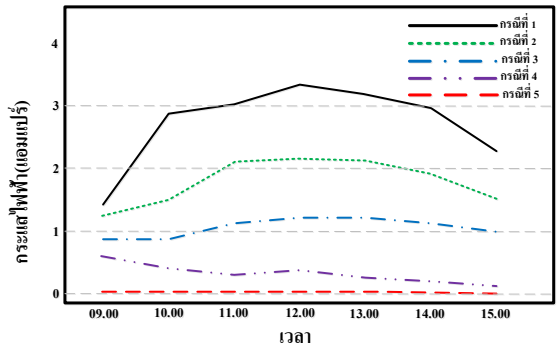
เวลา	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4	กรณีที่ 5
09.00	1.42	1.26	0.87	0.58	0.04
10.00	2.90	1.52	0.85	0.40	0.04
11.00	3.03	2.11	1.14	0.31	0.05
12.00	3.36	2.17	1.22	0.39	0.02
13.00	3.21	2.15	1.23	0.26	0.02
14.00	2.98	1.92	1.14	0.21	0.02
15.00	2.29	1.53	1.01	0.12	0.01
ค่าเฉลี่ย	2.74	1.81	1.07	0.32	0.03

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

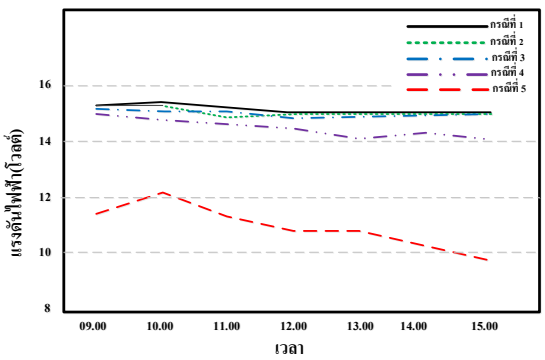
เวลา	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4	กรณีที่ 5
09.00	15.22	15.24	15.14	14.94	11.40
10.00	15.38	15.21	15.07	14.74	12.20
11.00	15.17	14.85	15.10	14.65	11.30
12.00	15.02	14.95	14.82	14.48	10.79
13.00	14.92	14.97	14.88	14.08	10.77
14.00	15.01	14.95	14.91	14.29	10.24
15.00	14.95	14.93	14.89	14.09	9.76
ค่าเฉลี่ย	15.10	15.01	14.97	14.47	10.92

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

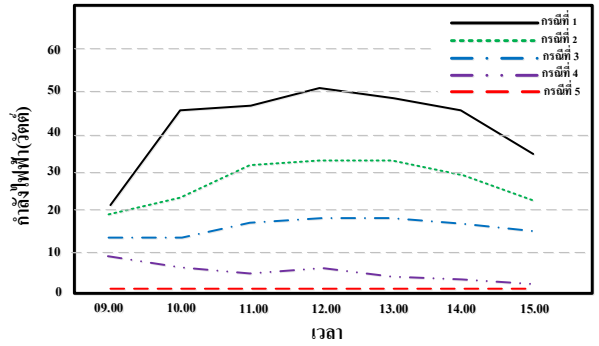
เวลา	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4	กรณีที่ 5
09.00	21.61	19.20	13.17	8.67	0.46
10.00	44.60	23.12	12.81	5.90	0.49
11.00	45.97	31.33	17.21	4.54	0.57
12.00	50.47	32.44	18.08	5.65	0.22
13.00	47.89	32.19	18.30	3.66	0.22
14.00	44.73	28.70	17.00	3.00	0.20
15.00	34.24	22.84	15.04	1.69	0.09
ค่าเฉลี่ย	41.36	27.12	15.94	4.73	0.32



รูปที่ 4 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 5 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 6 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

5. สรุปผลการทดสอบ

การศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบเงาบังบนเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตรัลไลน์ ซึ่งได้มีการทำการทดสอบการวัดกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า ตั้งแต่ช่วงเวลา 9.00 – 15.00 น. โดยแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 5 กรณี จากรูปที่ 4 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ รูปที่ 5 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ และรูปที่ 6 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ จากการทดสอบพบว่ากรณีที่ 1 มีค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้า 2.74 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 15.10 โวลต์ และกำลังไฟฟ้า 41.36 วัตต์ กรณีที่ 2 มีค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 1.81 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 15.01 โวลต์ และกำลังไฟฟ้า 27.12 วัตต์ กรณีที่ 3 มีค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 1.07 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 14.97 โวลต์ และกำลังไฟฟ้า 15.94 วัตต์ กรณีที่ 4 มีค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้า 0.32 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 14.47 โวลต์ และกำลังไฟฟ้า 4.73 วัตต์ กรณีที่ 5 มีค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้า 0.03 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 10.92 โวลต์ และกำลังไฟฟ้า 0.32 วัตต์ จากผลการทดสอบผลกระทบเงาบังบนเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตรัลไลน์นั้นมีผลทำให้การผลิตกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้านั้นลดลงตามสัดส่วนของเงาบังบนเซลล์แสงอาทิตย์

6. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีอย่างสมบูรณ์ด้วยความช่วยเหลือและการสนับสนุนเป็นอย่างดียิ่งจากคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

เอกสารอ้างอิง

[1] Narate Charlangsut, Natchapol Ruangsap and Nattachote Rugthaicharoencheep, “An Assessment of a Return from Carbon Credit of a Hybrid Solar Rooftop System,” 2023 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI), 2023, pp. 80-83.

[2] Swapna Roy, “Impact of carbon dust particle deposition and partial shadow of PV array”, 2014 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2014

[3] ปพน งามประเสริฐ, พูนศรี วรรณการ และนัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ (2020). การประเมินศักยภาพการผลิตกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจากโรงไฟฟ้า พลังงานแสงอาทิตย์ในระบบจำหน่าย. วารสารวิจัยราชมงคลกรุงเทพ. 14(2), หน้า 38 – 49.

[4] HAN Xiaoli, YIN Xiaogang, Liu Hongguang and Wang Yikui, “Influence of Shadow Mask on PV Arrays and Maximum Power Point Tracing,” 2022 Euro-Asia Conference on Frontiers of Computer Science and Information Technology (FCSIT), 2022

[5] Chairma Lakshmi K R, Vijay Anandh R, K. Rajalakshmi, Seena Simon, Golden Stepha and Gnanasekaran T, “Impact of Shadow or Dust on Solar Photovoltaic Power Generation System,” 2023 Second International Conference on Electronics and Renewable Systems (ICEARS), 2023, pp. 196 - 200.

[6] S. M. Dehghan and M. Alinaghizadeh Ardestani, “Solar charger system with LED driver using capacitor-less multi-port converter,” 2016 7th Power Electronics and Drive Systems Technologies Conference (PEDSTC), 2016, pp. 222 - 227.

[7] Rajiv K. Varma, Kush BhupeshKumar Nanavati and Sibin Mohan, “Simultaneous Line Loss Minimization and CVR with Smart Inverter Control of BESS and PV System as STATCOM," 2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2020.

[8] M.H. Abdullah, N.A. Rashied and M. Rusop, “Layer thickness analysis of silicon solar cells," 2010 International Conference on Electronic Devices (ICEDSA), Systems and Applications, 2010. pp.149-153.

[9] Ravindranath, Adda and others. Solar voltaic generation power plants: 1000 MW to 10 kW photovoltaic plant design and application guide for the Pacific Northwest. IEEE Conference, 2013.

[10] Samuel V. Araujo, Rene P. Torrico-Bascope, Fernando L. M. Antunes, Edilson Mineiro Sa, “Stand-alone Photovoltaic System using an UPS Inverter and a Microcontrolled Battery Charger based on a Boost Converter with a 3 State-Commutation Cell”, 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, pp.4381 – 4386, November 2006.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9
Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การเพิ่มประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์โดยใช้เทคนิคการลดการสูญเสียจากการสวิตช์ชิ่ง

Performance Enhancement of Inverters through the Application of Switching Loss Reduction Techniques

เลิศพิสิฐ พรไชสง, อัษฎาวุธ ธำรงทรัพย์สกุล และนัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ*
[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถ.ประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร โทรศัพท์ 02-836-3000 ต่อ 4150 E-mail: nattachote.r@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพอินเวอร์เตอร์แบบเพิ่มแรงดันต้นด้วยเทคนิคการลดการสูญเสียจากการสวิตช์ชิง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพและการลดการสูญเสียของอินเวอร์เตอร์ เนื่องจากการสูญเสียจากการสวิตช์ชิ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้ประสิทธิภาพลดลงและเกิดความร้อนสะสม จึงมีการใช้เทคนิคเพื่อลดการสูญเสียในช่วงการเปิด–ปิดสวิตช์ ภายใต้เงื่อนไขแรงดันอินพุตที่แตกต่างกัน คือ 220 โวลต์ และ 380 โวลต์ โดยทำการจำลองระบบด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink และทดสอบการจ่ายโหลดแบบ RLC เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของแรงดันและกระแสในระบบ จากการทดลองพบว่าผลการทดลองอินเวอร์เตอร์เพิ่มแรงดันที่จ่ายโหลด RLC พบว่าวงจรสามารถทำงานได้ตามหลักการ โดยสามารถเพิ่มระดับแรงดันจาก 220 โวลต์ และ 380 โวลต์ ได้จริง และสร้างแรงดันสามเฟสที่มีลักษณะเป็นสเต็ปอย่างต่อเนื่อง เมื่อเปรียบเทียบทั้งสองกรณี พบว่าการเพิ่มแรงดันอินพุตส่งผลให้ระดับแรงดันและกระแสสูงขึ้นตามสัดส่วน ดังนั้นการใช้แรงดัน 380 โวลต์ ให้ผลดีกว่าในแง่ของการเพิ่มแรงดันและกำลังที่จ่ายให้โหลด เนื่องจากได้ระดับแรงดันและกระแสสูงกว่าอย่างชัดเจนซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : อินเวอร์เตอร์; สวิตชิ่ง; การสูญเสีย

Abstract

This paper presents the efficiency improvement of a boost inverter using switching loss reduction techniques. The objective is to compare inverter performance under different input voltages, 220 V and 380 V, using MATLAB/Simulink with an RLC load to analyze voltage and current behavior. the results indicate that the inverter operates as expected, successfully boosting the voltage and generating a three-phase stepped output waveform in both cases. When the input voltage is increased, the output voltage and current also increase proportionally, resulting in higher power delivery. Therefore, the 380 V condition provides better performance in terms of voltage boosting and overall efficiency. However, waveform distortion and harmonics are still present due to the characteristics of the load and switching process, indicating the need for further improvement in power quality.

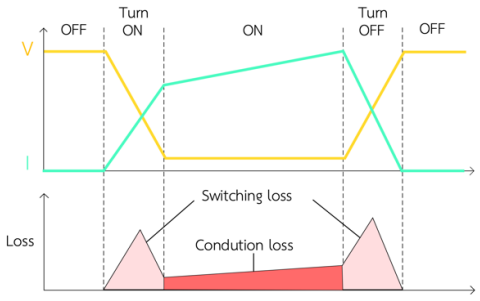
Keywords: manuscript format; font size; font style

1. บทนำ

การเพิ่มประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์แบบเพิ่มแรงดันต้นมีความสำคัญต่อระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เนื่องจากการสูญเสียจากการสวิตช์ชิ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้ประสิทธิภาพลดลงและเกิดความร้อนสะสม จึงมีการใช้เทคนิคเพื่อลดการสูญเสียในช่วงการเปิด–ปิดสวิตช์ ส่งผลให้อินเวอร์เตอร์ทำงานได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น มีความน่าเชื่อถือ และ ช่วยยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ในระบบ

ในปี ค.ศ. 2021 มีการศึกษาการใช้อุปกรณ์ ซิลิกอนคาร์ไบด์ในอินเวอร์เตอร์สำหรับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบแปลงพลังงานและลดปัญหาแรงดันเกินในระบบมอเตอร์ได้เมื่อเทียบกับอินเวอร์เตอร์แบบเดิม [1] ต่อมาในปี ค.ศ. 2023 ได้มีงานวิจัยนี้ที่เปรียบเทียบเทคนิค การมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบไม่ต่อเนื่อง และ การควบคุมแบบพยากรณ์โดยใช้แบบจำลอง สำหรับลดการสูญเสียจากการสวิตช์ชิ่ง ในอินเวอร์เตอร์สามเฟส โดยพบว่าการเลือกวิธีควบคุมที่เหมาะสมสามารถช่วยลดการสูญเสียพลังงานในสวิตช์และเพิ่มประสิทธิภาพของระบบได้ [2] และในปี ค.ศ. 2024 มีการเสนออินเวอร์เตอร์แบบการสวิตช์ชิ่งแบบนุ่มนวลบางส่วน ที่ใช้มอสเฟตซิลิกอนคาร์ไบด์ ซึ่งช่วยลดการสูญเสียจากการสวิตช์ชิ่ง และสามารถให้ประสิทธิภาพสูงถึงประมาณร้อยละ 99.6 ในต้นแบบทดลอง [3] งานวิจัยในช่วงปีหลัง ๆ ได้ให้ความสำคัญกับการเพิ่มประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์โดยการลดการสูญเสียจากการสวิตช์ชิ่ง เช่น การใช้อุปกรณ์กึ่งตัวนำชนิดซิลิกอนคาร์ไบด์ การพัฒนาเทคนิคการมอดูเลตความกว้างพัลส์ และการออกแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ซึ่งสามารถช่วยลดการสูญเสียพลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพของระบบแปลงพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ดังนั้นบทความนี้นำเสนอเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพอินเวอร์เตอร์แบบเพิ่มแรงดันต้นด้วยเทคนิคการลดการสูญเสียจากการสวิตช์ชิง ปรับรูปแบบสัญญาณควบคุม เพื่อช่วยลดการสูญเสียพลังงาน ดังแสดงในรูปที่ 1

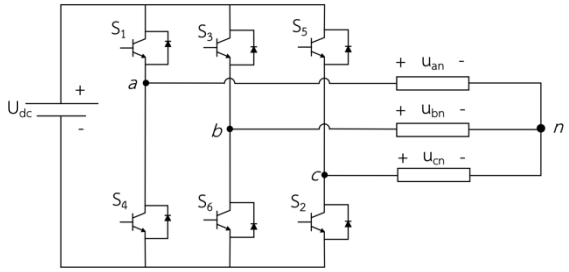


รูปที่ 1 ลักษณะของแรงดันและกระแสในช่วง turn-on และ turn-off

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 อินเวอร์เตอร์

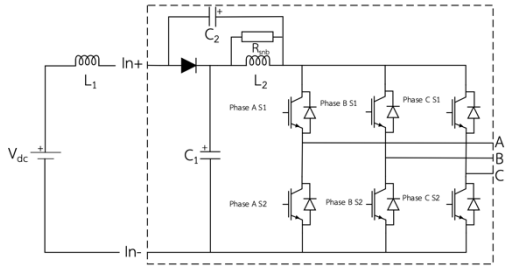
อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ให้เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) โดยอาศัยการเปิด–ปิดสวิตช์ของอุปกรณ์กึ่งตัวนำกำลัง เช่น MOSFET หรือ IGBT เพื่อสร้างแรงดันไฟฟ้าสลับจากแหล่งจ่ายกระแสตรง โดยทั่วไปจะใช้เทคนิคการควบคุม เพื่อให้รูปคลื่นเอาต์พุตมีลักษณะใกล้เคียงคลื่นไซน์และสามารถควบคุมแรงดันหรือความถี่ได้ตามต้องการ นอกจากนี้การพัฒนาอุปกรณ์กึ่งตัวนำสมัยใหม่ เช่น Sic ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและลดการสูญเสียพลังงานของอินเวอร์เตอร์ได้ [4] ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส

2.2 การเพิ่มแรงดันในวงจรอินเวอร์เตอร์

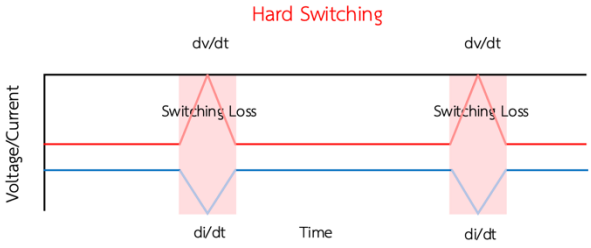
การเพิ่มแรงดันในวงจรอินเวอร์เตอร์เป็นเทคนิคที่ใช้เพื่อเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้สูงกว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่าย โดยอาจใช้วงจรเพิ่มแรงดัน เช่น วงจรเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง หรือโครงสร้างอินเวอร์เตอร์พิเศษ เช่น อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งกำเนิดอิมพีแดนซ์ หลักการทำงานคือการเก็บพลังงานในตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ แล้วปล่อยพลังงานออกมาเพื่อเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า ทำให้ระบบสามารถจ่ายพลังงานได้เหมาะสมกับโหลดและเพิ่มประสิทธิภาพของการแปลงพลังงานไฟฟ้า [5] ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 อินเวอร์เตอร์แบบกึ่งแหล่งกำเนิดอิมพีแดนซ์

2.3 การสวิตช์ชิ่ง

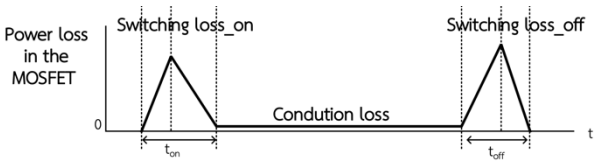
การสวิตช์ชิ่งในระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังคือการเปิด–ปิดการทำงานของอุปกรณ์กึ่งตัวนำกำลัง เพื่อควบคุมการไหลของพลังงานไฟฟ้าในวงจร โดยมักใช้ร่วมกับเทคนิคการปรับความกว้างพัลส์ เพื่อควบคุมแรงดันและกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลด อย่างไรก็ตาม ในช่วงเปลี่ยนสถานะของสวิตช์จะเกิดการสูญเสียพลังงานที่เรียกว่า การสูญเสียจากการสวิตช์ชิ่ง ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบ [6] ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ลักษณะของแรงดันและกระแสในช่วงการสวิตช์ชิ่ง

2.4 การสูญเสียจากการสวิตช์ชิ่ง

พลังงานที่สูญเสียในช่วงที่อุปกรณ์กึ่งตัวนำกำลัง เปลี่ยนสถานะจากเปิดเป็นปิด หรือจากปิดเป็นเปิด ในช่วงเวลานี้จะมีทั้งแรงดันและกระแสเกิดขึ้นพร้อมกัน ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อน ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังลดลง [6] ดังแสดงในรูปที่ 5



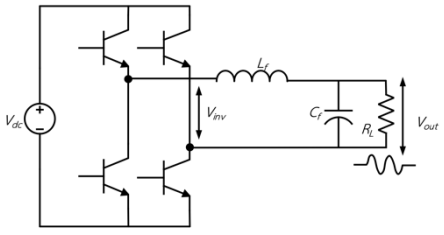
รูปที่ 5 ลักษณะของแรงดัน และกระแสในช่วงการเปิดและปิด

การสูญเสียจากการสวิตช์ชิ่ง โดยทั่วไปสามารถคำนวณได้จากพลังงานที่สูญเสียในช่วง เปิด และ ปิดของอุปกรณ์สวิตช์ ดังสมการที่ 1

$$P_{SW} = f_S (E_{on} + E_{off}) \quad (1)$$

2.5 วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้โหลด RLC

โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์แบบเฟสเดียวที่จ่ายพลังงานให้กับโหลด RLC และลักษณะรูปคลื่นแรงดันและกระแสที่เกิดขึ้นในวงจร โดยโหลด RLC ทำให้เกิดความแตกต่างของเฟสระหว่างแรงดันและกระแส ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าของตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุในระบบ [7] ดังแสดงในรูปที่ 6



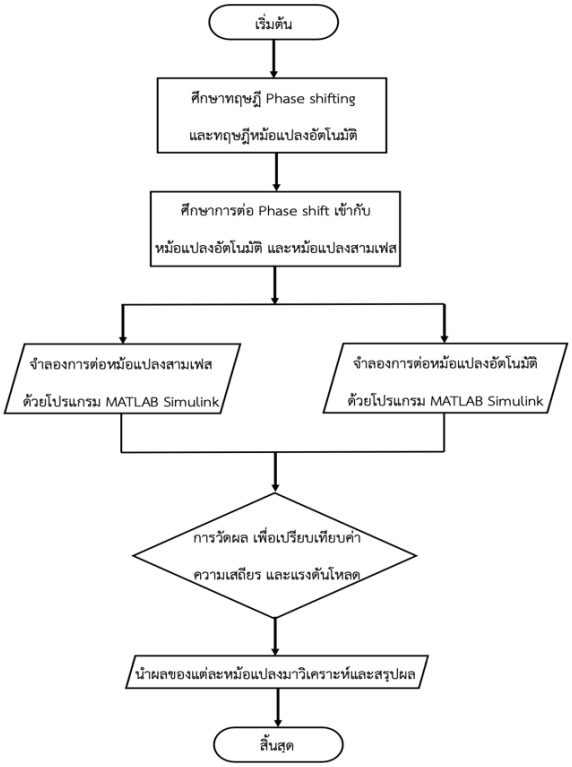
รูปที่ 6 อินเวอร์เตอร์ใช้สวิตช์กำลัง

เมื่ออินเวอร์เตอร์จ่ายแรงดันสลับให้กับโหลด RLC กระแสที่ไหลในวงจรจะขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด ดังสมการที่ 2

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (2)$$

3. ขั้นตอนการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินการเพิ่มประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์โดยใช้เทคนิคการลดการสูญเสียจากการสวิตช์ชิ่ง ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ขั้นตอนการการดำเนินการ

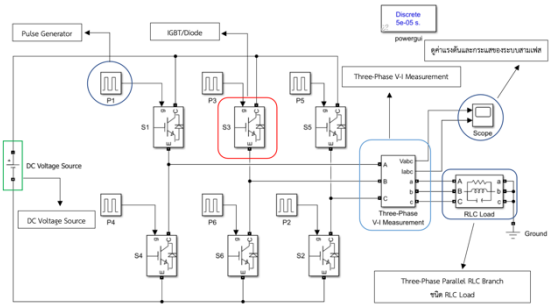
4. กรณีศึกษา

บทความนี้เป็นการทดสอบคำนวณวงจรอินเตอร์เพิ่มแรงดัน โดยทำการวัดค่าผ่านโหลด RLC ในโปรแกรม MATLAB/Simulink เป็นการเปรียบเทียบแรงดันกรณีศึกษา 2 กรณี ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 : กรณีศึกษา จำลองการทดลองโดยใช้วงจรอินเตอร์เพิ่มแรงดัน

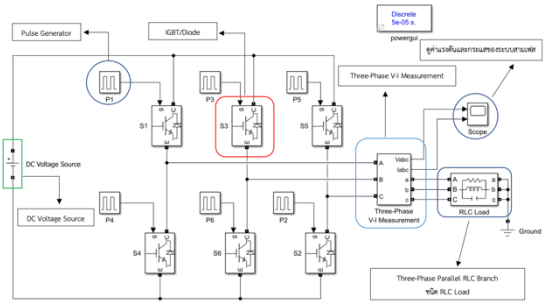
กรณีศึกษา	แรงดัน (V)	
	220	380
1 (Base Case)	✓	
2		✓

ทำการจำลองวงจรอินเวอร์เตอร์เพิ่มแรงดัน ทำการวัดค่าผ่านโหลด RLC โดยใช้แรงดัน 220 โวลต์ เป็นค่า Base Case เริ่มต้น ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 วงจรอินเวอร์เตอร์เพิ่มแรงดัน 220 โวลต์

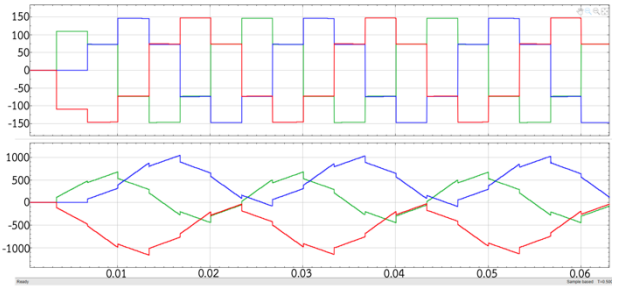
ทำการจำลองวงจรอินเวอร์เตอร์เพิ่มแรงดัน ทำการวัดค่าผ่านโหลด RLC โดยใช้แรงดัน 380 โวลต์ เป็นค่าเปรียบเทียบ ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 วงจรอินเวอร์เตอร์เพิ่มแรงดัน 380 โวลต์

5. ผลการจำลอง

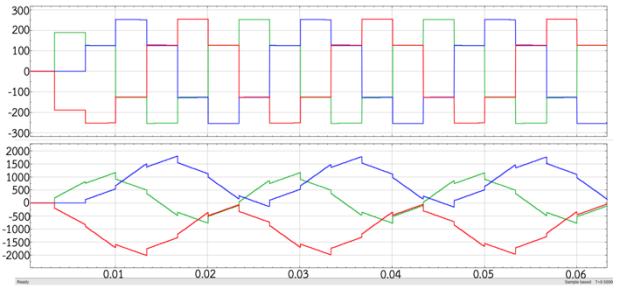
กรณีที่ 1 วงจรอินเวอร์เตอร์เพิ่มแรงดัน ทำการวัดค่าผ่านโหลด RLCโดยใช้แรงดัน 220 โวลต์ เป็นค่า Base Case ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 ผลกราฟวัดค่าผ่านโหลด RLCโดยใช้แรงดัน 220 โวลต์

จากผลการจำลอง อินเวอร์เตอร์สามารถสร้างแรงดันสามเฟสและเพิ่มระดับจาก 220 โวลต์ ได้ตามต้องการ แต่กระแสในโหลด RLC มีการหน่วงเฟสและเกิดฮาร์มอนิก ทำให้รูปคลื่นไม่เป็นไซน์สมบูรณ์และมีความเพี้ยนในระบบ

กรณีที่ 2 วงจรอินเวอร์เตอร์เพิ่มแรงดัน ทำการวัดค่าผ่านโหลด RLC โดยใช้แรงดัน 380 โวลต์ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 ผลกราฟวัดค่าผ่านโหลด RLCโดยใช้แรงดัน 380 โวลต์

จากกราฟเมื่อใช้แรงดัน 380 โวลต์ พบว่าอินเวอร์เตอร์ยังคงสร้างแรงดันสามเฟสได้ครบถ้วนและมีรูปคลื่นแบบสเต็ปเช่นเดิม แต่มีระดับแรงดัน

และกระแสสูงขึ้นอย่างชัดเจนตามค่าอินพุตที่เพิ่มขึ้น โดยกระแสในโหลด RLC ยังคงมีการหน่วงเฟสจากแรงดัน และมีลักษณะรูปคลื่นที่ไม่เป็นไซน์สมบูรณ์เหมือนเดิม พร้อมทั้งยังปรากฏฮาร์มอนิกในระบบส่งผลให้รูปคลื่นมีความเพี้ยนมากขึ้น

ตารางที่ 2 : ค่าเปรียบเทียบผลการทดลองอินเวอร์เตอร์ผ่านโหลด RLC 220 V และ 380 V

พารามิเตอร์	220 V	380 V
แรงดันอินพุต	220 V	380 V
ระดับแรงดันเอาต์พุต	ต่ำกว่า	สูงกว่า 1.7
กระแสสูงสุด	±1000 A	±1800–2000 A
ความเพี้ยนของรูปคลื่น	ปานกลาง	สูงขึ้นตามกระแส
แนวโน้มโดยรวม	ระบบทำงานได้	ระบบทำงานได้ แต่โหลดหนักขึ้น

เมื่อเพิ่มแรงดันอินพุตจาก 220 โวลต์ เป็น 380 โวลต์ พบว่าค่าแรงดันเอาต์พุตเพิ่มขึ้นในสัดส่วนเดียวกัน (ประมาณ 1.7 เท่า) ส่งผลให้กระแสในโหลด RLC เพิ่มขึ้นตามไปด้วยอย่างชัดเจน โดยค่ากระแสสูงสุดจากกราฟเพิ่มจากระดับประมาณ ±1000 A เป็นประมาณ ±1800–2000 A ขณะที่รูปคลื่นแรงดันยังคงมีลักษณะเป็นสเต็ปเหมือนเดิมในทั้งสองกรณีในด้านพฤติกรรมของโหลด พบว่าการหน่วงเฟสระหว่างแรงดันและกระแสยังคงเกิดขึ้นใกล้เคียงกัน เนื่องจากค่า RLC ไม่ได้เปลี่ยนแปลง แต่เมื่อแรงดันสูงขึ้น ความเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสและผลกระทบจากฮาร์มอนิกมีแนวโน้มเด่นชัดขึ้นตามระดับกระแสที่สูงขึ้น

จากการเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าวงจรอินเวอร์เตอร์ที่นิยมในงานวิชาการ เช่น Z-Source และ Quasi Z-Source มักถูกออกแบบให้มีเครือข่ายอิมพีแดนซ์เพิ่มเติม เพื่อให้สามารถเพิ่มแรงดันและควบคุมคุณภาพของสัญญาณไฟฟ้าได้ดีขึ้น โดยเฉพาะในด้านการลดฮาร์มอนิกและปรับปรุงรูปคลื่นให้ใกล้เคียงไซน์มากขึ้น ซึ่งแตกต่างจากวงจรที่ใช้ในการทดลองของคุณที่มีโครงสร้างเรียบง่ายและเน้นการทำงานพื้นฐานของการแปลงและเพิ่มแรงดันโดยตรงผ่านโหลด RLC ดังนั้น จากผลการทดลองบทความนี้แสดงให้เห็นว่าวงจรสามารถเพิ่มแรงดันได้จริงและสะท้อนพฤติกรรมของระบบไฟฟ้าได้ชัดเจน ทั้งในด้านการหน่วงเฟสและการเกิดฮาร์มอนิก ซึ่งถือเป็นข้อได้เปรียบในเชิงการศึกษาและการวิเคราะห์ เนื่องจากทำให้สามารถมองเห็นผลกระทบของโหลดและคุณภาพกำลังไฟฟ้าได้อย่างตรงไปตรงมา แม้ว่ารูปคลื่นจะมีความเพี้ยนมากกว่าวงจรในงานวิจัยบางประเภทก็ตาม โดยสรุป วงจรของงานวิจัยทั่วไปจะมุ่งเน้นประสิทธิภาพและคุณภาพสัญญาณเป็นหลัก ในขณะที่วงจรของคุณเหมาะสำหรับการทดลองและการวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบ ซึ่งสามารถนำไปต่อยอดพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้ในอนาคต [8]

6. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองอินเวอร์เตอร์เพิ่มแรงดันที่จ่ายโหลด RLC พบว่าวงจรสามารถทำงานได้ตามหลักการ โดยสามารถเพิ่มระดับแรงดันจาก 220 โวลต์ และ 380 โวลต์ ได้จริง และสร้างแรงดันสามเฟสที่มีลักษณะเป็นสเต็ปอย่างต่อเนื่อง เมื่อเปรียบเทียบทั้งสองกรณี พบว่าการเพิ่มแรงดันอินพุตส่งผลให้ระดับแรงดันและกระแสสูงขึ้นตามสัดส่วน ดังนั้นการใช้แรงดัน 380 โวลต์ ให้ผลดีกว่าในแง่ของการเพิ่มแรงดันและกำลังที่จ่ายให้โหลด เนื่องจากได้ระดับแรงดันและกระแสสูงกว่าอย่างชัดเจน ทำให้เหมาะกับงานที่ต้องการกำลังสูง

7. ข้อเสนอแนะ

1.ควรเพิ่มการวิเคราะห์คุณภาพกำลังไฟฟ้า เช่น ค่าฮาร์มอนิก และตัวประกอบกำลัง เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบอินเวอร์เตอร์ให้ครอบคลุมมากขึ้น

2.ควรศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงค่าของโหลด RLC ต่อแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าในวงจรอินเวอร์เตอร์ เพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมของระบบได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

3.ควรมีการปรับปรุงเพิ่มวงจรกรอง เช่น LC หรือ LCL เพื่อลดฮาร์มอนิก

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้การสนับสนุนและความช่วยเหลือให้บทความนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

[1] Di Benedetto, M., et al. (2021). Efficiency Comparison of 2-Level SiC Inverter and Soft-Switching Converter for Electric Drive Applications. Energies, 14(6), 1690.

[2] Nguyen, M. H., Kwak, S., & Choi, S. (2023). Comparisons of Loss Reduction Techniques Based on Pulsewidth Modulation and Model Predictive Control for Three-Phase Voltage Source Inverters. Machines, 11(8), 829.

[3] Ma, W., et al. (2024). *A Partial Soft-Switching SiC-Based ANPC Single-Phase Inverter with High Efficiency.*

[4] Rashid, M. H. (2014). Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications. 4th ed. Pearson Education.

[5] Blaabjerg, F., Teodorescu, R., Liserre, M., & Timbus, A. (2006). Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 53(5), 1398–1409.

[6] Erickson, R. W., & Maksimović, D. (2020). Fundamentals of Power Electronics. 3rd ed. Springer.

[7] Rashid, M. H. (2014). Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications. 4th ed Pearson Education.

[8] Y. Li et al., "Quasi Z-Source Inverter for Photovoltaic Power Generation Systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013.

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9
Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การวิเคราะห์พฤติกรรมของมอเตอร์ซิงโครนัสแบบสามเฟสภายใต้โหลดอิมพิแดนซ์แบบตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำในระบบไฟฟ้ากำลัง

Analysis of the Behavior of a Three-Phase Synchronous Motor under Resistive and Inductive Impedance Loads in Power Systems

ภูชิตะ จันต๊ะบุตร,ชินดนัย ทับจิตต์ และนัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร โทรศัพท์ 02-836-3000 ต่อ 4150 E-mail: nattachote.r@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการทำงานของมอเตอร์ซิงโครนัสสามเฟสภายใต้สภาวะโหลดที่เปลี่ยนแปลง โดยพิจารณาการเพิ่มโหลด แบบฉับพลัน และการเปลี่ยนแปลงโหลด แบบเป็นคาบ ซึ่งเป็นสภาวะที่พบได้จริงในระบบไฟฟ้ากำลังและกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรม การศึกษาใช้ทั้งการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และการทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะโหลด กระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก และมุมโหลด พร้อมทั้งวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่สำคัญ ผลการศึกษาช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมและเสถียรภาพของมอเตอร์ซิงโครนัสเมื่อทำงานภายใต้โหลดที่เปลี่ยนแปลงทั้ง แบบฉับพลันและแบบเป็นคาบ และสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและควบคุมการทำงานของมอเตอร์ในระบบไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพและความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ : ซิงโครนัส, โหลดอาแอล, สภาวะคงตัวมุมโหลด

Abstract

This article aims to study the operating behavior of a three-phase synchronous motor under varying load conditions. The study focuses on sudden load increases and periodic load variations, which commonly occur in power systems and industrial processes. The research was conducted using both computer simulation and laboratory experiments to analyze the relationship between load conditions, field excitation current, and load angle. Important electrical parameters, and phase angle, were measured during the experiments. The results help improve the understanding of the behavior and stability of synchronous motors when operating under load changes, both sudden and periodic, and can be used as a guideline for the design and control of synchronous motor operation in power systems and industrial applications to enhance efficiency and operational safety

Keywords: synchronous, RL load, Steady State, load Angle

1.บทนำ

ระบบไฟฟ้ากำลังและภาคอุตสาหกรรมมีการใช้งานมอเตอร์ซิงโครนัสสามเฟสอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่สามารถรักษาความเร็วรอบให้คงที่ตามความเร็วซิงโครนัสได้อย่างแม่นยำ [1]-[6]และยังสามารถปรับปรุงตัวประกอบกำลังของระบบไฟฟ้าได้โดยการควบคุมกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็กของโรเตอร์ [1]-[3] ในการใช้งานจริงมอเตอร์มักต้องทำงานภายใต้สภาวะโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ

ในปี ค.ศ 2003 มีการศึกษาลักษณะสมรรถนะของมอเตอร์ซิงโครนัสภายใต้การเปลี่ยนแปลงโหลด พบว่าการการเพิ่มโหลดจะทำให้กระแสสเตเตอร์เพิ่มขึ้นและมุมโหลดเพิ่มขึ้นตามลำดับหากโหลดเพิ่มเกินค่าที่รับได้ จะทำให้มอเตอร์สูญเสียการสภาวะซิงโครนัสและหยุดทำงาน [2]

การศึกษานี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบการควบคุม และการเลือกใช้งานมอเตอร์ซิงโครนัสให้เหมาะสมกับลักษณะของโหลดในภาคอุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังช่วยลดความเสี่ยงต่อการเกิดปัญหาทางไฟฟ้าและเพิ่มประสิทธิภาพในการเดินระบบได้อย่างมีประสิทธิผลมากยิ่งขึ้น

2. หลักการทำงานของมอเตอร์ซิงโครนัส

มอเตอร์ซิงโครนัสเป็นเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับที่ทำงานโดยอาศัยหลักการของสนามแม่เหล็กหมุน [3]-[8] เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสให้กับขดลวดสเตเตอร์ จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนด้วยความเร็วคงที่ ซึ่งเรียกว่า ความเร็วซิงโครนัส [6] โดยสามารถคำนวณได้จากสมการดังแสดงในสมการที่ 1 [5]

เมื่อ

$$n_s = \frac{120f}{p} \quad (1)$$

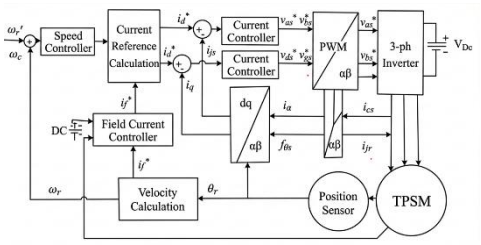
n_s คือ ความเร็วซิงโครนัสของมอเตอร์ (rpm)

f คือ ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Hz)

p คือ จำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์ (pole)

2.1 หลักการควบคุมมอเตอร์ซิงโครนัสแบบสามเฟส

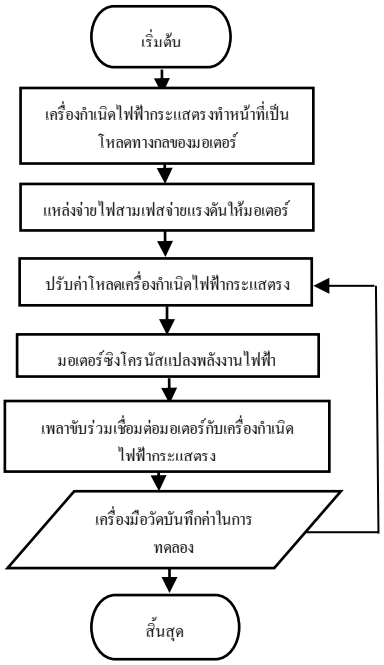
การควบคุมมอเตอร์ซิงโครนัสสามเฟสด้วยวิธี FOC เริ่มจากกำหนดความเร็วอ้างอิงแล้วเปรียบเทียบกับค่าจริง [7]- [8] หากต่างกันจะผ่านตัวควบคุมความเร็วเพื่อสร้างกระแสอ้างอิง จากนั้นแยกควบคุมกระแสแกน d (ฟลักซ์) และแกน q (แรงบิด) โดยวัดกระแสจริงแล้วแปลงเป็นแกน dq เปรียบเทียบกับค่าที่กำหนดในตัวควบคุมกระแส เพื่อคำนวณแรงดันส่งไปยัง Pulse Width Modulation (PWM) และอินเวอร์เตอร์แปลงไฟ DC เป็น AC ป้อนมอเตอร์ พร้อมป้อนกลับตำแหน่งโรเตอร์อย่างต่อเนื่อง ทำให้ควบคุมความเร็วและแรงบิดได้แม่นยำ ตอบสนองเร็ว และมีเสถียรภาพเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลง [5] ดังแสดงในรูปที่ 1 [1]



รูปที่ 1 โครงสร้างการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ซิงโครนัสแบบกระตุ้นกระแสไฟฟ้า

3.ขั้นตอนการวิจัย

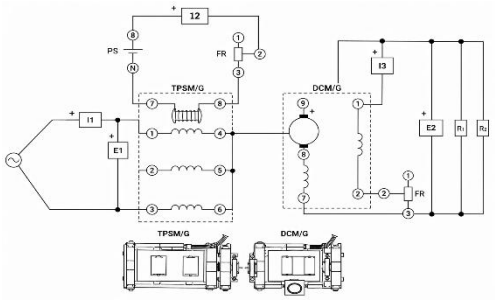
กระบวนการทดลองที่ใช้มอเตอร์ซิงโครนัสขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนผังขั้นตอนการทดลองของมอเตอร์ซิงโครนัส

3.1 การต่อวงจรจ่ายไฟให้มอเตอร์ซิงโครนัส

กรณีโหลดปกติงานวิจัยนี้เป็นการทดสอบการจ่ายโหลดของมอเตอร์ซิงโครนัสในชุดอุปกรณ์ทดลองกลไฟฟ้าเป็นการทดสอบความสัมพันธ์ของมุมโหลดและกำลังไฟฟ้าจริง[9]
ดังแสดงในรูปที่ 2 [9]

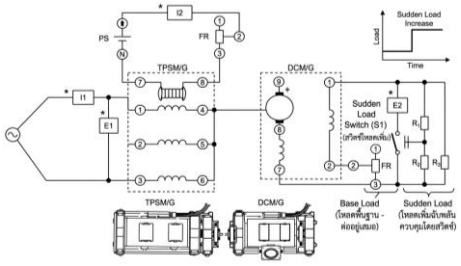


รูปที่ 3 วงจรจ่ายไฟให้มอเตอร์ซิงโครนัส

3.2 การดำเนินการทดลองสำหรับแต่ละกรณี

กรณีที่ 1: โหลดเพิ่มแบบฉับพลัน (Sudden Load Increase)

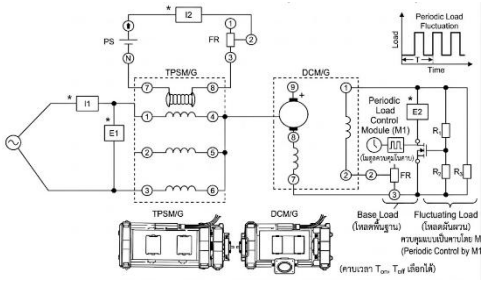
จำลองสถานการณ์ที่มอเตอร์ต้องรับภาระเพิ่มขึ้นทันทีนำมาจำลองในโปรแกรมMATLAB
ดังแสดงในรูปที่ 4 [9]



รูปที่ 4 วงจรโหลดแบบฉับพลัน

กรณีที่2: โหลดผันผวนเป็นคาบ (Periodic Load Fluctuation)

จำลองมอเตอร์ซิงโครนัสที่สภาวะสลับโหลดไปมานำมาจำลองในโปรแกรมMATLAB
ดังแสดงในรูปที่ 5 [9]



รูปที่ 5 วงจรโหลดผันผวนเป็นคาบ

4.กรณีศึกษา

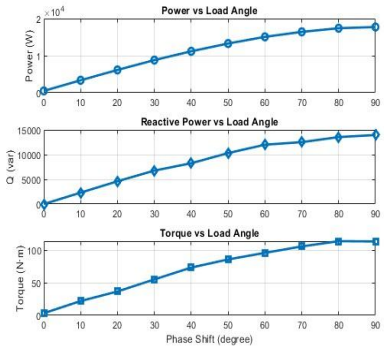
4.1ผลการทดลองภายใต้โหลดปกติ

การทดลองในกรณีโหลดปกติ เป็นการกำหนดค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำของโหลดให้คงที่ จากนั้นทำการคำนวณค่ากำลังจริง กระแส มุมโหลด และแรงบิดของมอเตอร์ซิงโครนัส ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดลองภายใต้โหลดปกติ

Phase Shift	E_1 (V)	P_1 (W)	Q_1 (Var)	I_f (A)	Torque (N · m)
0	380	499.64	0	0.8	3.286
10	380	3369.2	2312.9	0.9	21.99
20	380	6156.3	4608.3	1	36.614
30	380	8804.7	6766.2	1.1	55.097
40	380	11182	8252.8	1.2	73.254
50	380	13278	10302	1.3	85.69
60	380	15071	12001	1.4	95.782
70	380	16417	12518	1.5	105.63
80	380	17400	13545	1.6	113.69
90	380	17723	13956	1.7	113.25

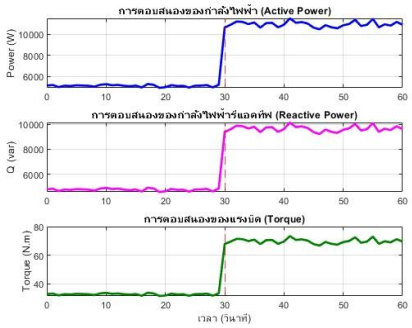
ผลการทดลองพบว่า เมื่อมุมโหลดเพิ่มขึ้น กำลังและแรงบิดของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นตามกัน โดยช่วงมุมโหลดต่ำจะให้กำลังต่ำ และจะเพิ่มขึ้นต่อเนื่อง สะท้อนความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างกำลังจริงกับแรงบิดของเครื่องซิงโครนัสในการทดลองกำหนดแรงดันไฟฟ้า AC คงที่ที่ 380 V และปรับมุมโหลดเพิ่มทีละ 10องศา ตั้งแต่ 0ถึง 90 องศา เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์เมื่อโหลดเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างโหลดกับกำลังไฟฟ้าแรงบิดและมุมโหลดจากโปรแกรมMATLAB

4.2 การจำลองโหลดแบบฉับพลัน

จากผลการทดลองพบว่า ช่วงเวลา 1–20 วินาที มอเตอร์ซิงโครนัสทำงานภายใต้โหลดต่ำ โดยค่ากำลังไฟฟ้าจริง กำลังรีแอกทีฟ และแรงบิดค่อนข้างคงที่แสดงถึงสภาวะสมดุลของระบบเมื่อเวลา 30 วินาที มีการเปลี่ยนโหลดแบบฉับพลัน ทำให้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว สะท้อนการตอบสนองต่อภาระที่สูงขึ้นหลังจากนั้นช่วงเวลา 40–60 วินาที ค่าต่าง ๆ กลับเข้าสู่สภาวะคงที่ใหม่ที่ระดับสูงกว่าเดิม แสดงว่ามอเตอร์ยังคงทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพ ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 วิเคราะห์ผลการตอบสนองต่อโหลดฉับพลันจากโปรแกรมMATLAB

พบว่าเมื่อเกิดภาระทางกลเพิ่มขึ้นฉับพลัน โรเตอร์จะเกิดการหน่วงตัวลงชั่วขณะ ส่งผลให้มุมโหลดจาก20องศาเป็น45ศาเพื่อสร้างแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าคืนตัว

4.3 การจำลองโหลดผันผวนแบบเป็นคาบ

การจำลองนี้ใช้ค่าอิมพีแดนซ์แบ่งสถานะ คือ

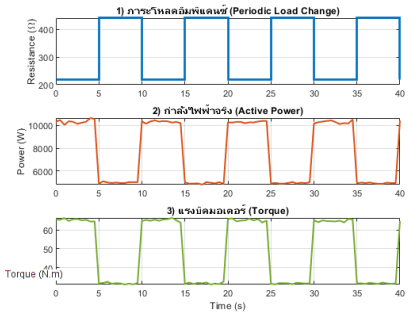
โหลดต่ำ (Low Load) กำหนดค่าความต้านทานโหลดไว้ที่ 440 Ω เพื่อจำลองสภาวะภาระน้อย

โหลดสูง (High Load) กำหนดค่าความต้านทานโหลดไว้ที่ 220 Ω เพื่อจำลองสภาวะภาระหนัก ดังแสดงในตารางที่2

ตารางที่ 2 ผลการทดลองโหลดผันผวนแบบเป็นคาบ

ลำดับ	เวลา (s)	สถานะโหลด	แรงดัน (V)	กำลังจริง (W)	มุมโหลด (องศา)	แรงบิด (N·m)
1	0	สูง	380	10262	45	65.33
2	5	ต่ำ	380	4813.6	20	31.9
3	10	สูง	380	10214	45	65.76
4	15	ต่ำ	380	4963.4	20	31.51
5	20	สูง	380	10311	45	65.9
6	25	ต่ำ	380	4933.8	20	31.32

การตอบสนองของมอเตอร์ต่อการเปลี่ยนโหลดแบบเป็นคาบ ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 การตอบสนองของมอเตอร์ต่อการเปลี่ยนโหลดแบบเป็นคาบจากโปรแกมMATLAB

พบว่าค่าความต้านทานของโหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบเป็นคาบตามเวลา ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าและแรงบิดของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงตามในลักษณะเดียวกัน โดยเมื่อค่าความต้านทานต่ำ กระแสในระบบจะสูงขึ้น ทำให้กำลังไฟฟ้าและแรงบิดเพิ่มขึ้น และเมื่อค่าความต้านทานสูง กระแสจะลดลง

5. สรุปผลการวิจัยและการนำไปประยุกต์ใช้

บทความวิจัยเรื่อง การวิเคราะห์พฤติกรรมของมอเตอร์ซิงโครนัสภายใต้โหลดอิมพิแดนซ์แบบตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำในระบบไฟฟ้ากำลัง มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการทำงานและเสถียรภาพของมอเตอร์ซิงโครนัสสามเฟสภายใต้สภาวะโหลดที่เปลี่ยนแปลง โดยใช้ทั้งการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และการทดลองจริงในห้องปฏิบัติการ ผลการวิจัยพบว่า มอเตอร์ซิงโครนัสสามารถรักษาความเร็วรอบให้คงที่เท่ากับความเร็วซิงโครนัสได้อย่างมีประสิทธิภาพ จะมีการเปลี่ยนแปลงของภาระโหลด ซึ่งสอดคล้องกับหลักการทำงานของมอเตอร์ซิงโครนัสตามทฤษฎีเครื่องจักรกลไฟฟ้า

เมื่อโหลดเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน มอเตอร์จะเพิ่มกระแสอาร์มาเจอร์และแรงบิดเพื่อรองรับภาระ โดยความเร็วรอบแทบไม่เปลี่ยนแปลง การตอบสนองนี้เกิดจากมุมโหลดที่เพิ่มขึ้น หากโหลดสูงมากอาจทำให้มุมโหลดเข้าใกล้ขีดจำกัดเสถียรภาพและเสี่ยงต่อการสูญเสียการซิงโครไนซ์ สำหรับโหลดที่ผันผวนเป็นคาบ จะทำให้มุมโหลดและแรงบิดเกิดการแกว่ง ส่งผลต่อเสถียรภาพการทำงาน นอกจากนี้ การปรับกระแสกระตุ้นของโรเตอร์มีผลต่อกระแสอาร์มาเจอร์และตัวประกอบกำลัง โดยค่าที่เหมาะสมจะทำให้มอเตอร์มีตัวประกอบกำลังใกล้หนึ่งและกระแสต่ำสุด ขณะที่การกระตุ้นมากหรือน้อยเกินไปจะทำให้เกิดการจ่ายกำลังรีแอกทีฟต่อระบบไฟฟ้า

6.ข้อเสนอแนะ

1. การใช้งานมอเตอร์ซิงโครนัสควรคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของโหลด โดยเฉพาะโหลดฉับพลันที่ทำให้กำลัง แรงบิด และกำลังรีแอคทีฟเปลี่ยนเร็ว จึงควรมีระบบควบคุมและอุปกรณ์ป้องกันที่ตอบสนองได้รวดเร็วเพื่อป้องกันความไม่เสถียร

2. ควรควบคุมมุมโหลดให้อยู่ในช่วงที่ปลอดภัย เนื่องจากมีผลโดยตรงต่อกำลังและแรงบิด หากเกินค่าที่เหมาะสมอาจทำให้ระบบไม่เสถียรหรือหลุดซิงโครนัสได้

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ ตลอดจนผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่ให้การสนับสนุนจนงานนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีและสมบูรณ์

8. เอกสารอ้างอิง

[1] กตเวที คำมา, *การวิเคราะห์การทำงานของมอเตอร์ซิงโครนัส 3 เฟสในสภาวะที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล*, ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2558.

[2] P. M. Anderson and A. A. Fouad, Power System Control and Stability, 2nd ed. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2003.

[3] สมเกียรติ เนียมมณี และคณะ, “การศึกษาสภาวะชั่วครู่ของเครื่องจักรกลซิงโครนัสขณะจ่ายโหลดเกินกำลังในระบบไฟฟ้ากำลัง,” ในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 42 (EECON-42), ชลบุรี, 2562, หน้า 88–91.

[4] P. C. Krause, O. Wasynczuk, S. D. Sudhoff, and S. Pekarek, Analysis of Electric Machinery and Drive Systems, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley-IEEE Press, 2013.

[5] F.-J. Lin, S.-G. Chen, and C.-H. Liang, “Online maximum power factor searching control for synchronous reluctance motor,” in Proc. IEEE ICIEA, 2020, pp. 278–283.

[6] กิตติศักดิ์ พันธ์ศรี, เครื่องจักรกลไฟฟ้า. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2558.

[7] สมบัติ ธำรงธัญวงศ์, ระบบไฟฟ้ากำลัง. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2560.

[8] วีระศักดิ์ ชัยพฤกษ์, เครื่องจักรกลไฟฟ้าและการควบคุม. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2562

[9] B. K. Bose, "Power electronics and motor drives—recent progress and future trends," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 1, pp. 2-11, Feb. 2006.

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การจำลองหลักการความปลอดภัยของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา

Simulation of safety principles of rooftop solar power generation systems

พีรพัฒน์ บุญฤทธิ์ พีรวิชญ์ สุจริต และ ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถนนประชาราษฎร์1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร. โทรศัพท์ 02-836-3000ต่อ4150 E-mail: supawud.n@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหลักการความปลอดภัยของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา (Solar Rooftop) โดยวิเคราะห์ความเสี่ยงจากไฟฟ้ากระแสตรง เช่น การเกิดอาร์คไฟฟ้า (Arc Fault) และแรงดันไฟฟ้าค้างในระบบ การศึกษานี้ใช้โปรแกรม PVSyst ในการจำลองและประเมินประสิทธิภาพของอุปกรณ์ความปลอดภัย เช่น ระบบตรวจจับ Arc Fault และระบบตัดไฟฉุกเฉิน (Rapid Shutdown) ผลการศึกษาพบว่าการออกแบบระบบที่เหมาะสมสามารถลดความเสี่ยงและเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ :ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา, ความปลอดภัยทางไฟฟ้า, การเกิดอาร์คไฟฟ้า, แรงดันไฟฟ้าค้าง, ระบบตัดไฟฉุกเฉิน, PVSyst

Abstract

This study aims to investigate the safety principles of rooftop solar power generation systems (Solar Rooftop) by analyzing risks associated with direct current (DC), such as arc faults and residual voltage. The study employs PVSyst software for system simulation and evaluation of safety devices, including arc fault detection and rapid shutdown systems. The results show that proper system design can effectively reduce risks and enhance the overall safety of solar rooftop systems.

Keywords: Solar Rooftop, Electrical Safety, Arc Fault, Voltage Retention, Rapid Shutdown, PVSyst

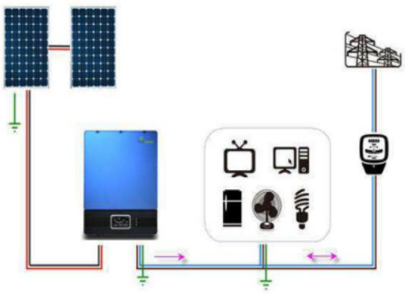
1.บทนำ

ปัจจุบันพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทดแทนที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา (Solar Rooftop) ซึ่งสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม ระบบดังกล่าวยังมีข้อจำกัดด้านความปลอดภัย เนื่องจากเป็นระบบที่ใช้ไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current: DC) ซึ่งมีแรงดันไฟฟ้าสูงและยังคงจ่ายพลังงานได้แม้ในขณะที่มีการตัดระบบปัญหาที่สำคัญของระบบ Solar Rooftop ได้แก่ การเกิดประกายไฟฟ้า (Arc Fault) และแรงดันไฟฟ้าค้างในระบบ ซึ่งอาจนำไปสู่อันตรายต่อผู้ใช้งานและก่อให้เกิดอัคคีภัยได้ ดังนั้น การศึกษาและวิเคราะห์หลักการความปลอดภัยของระบบจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการจำลองหลักการทำงานของระบบ Solar Rooftop และวิเคราะห์ความเสี่ยงด้านความปลอดภัย โดยใช้โปรแกรม PVSyst เพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบและประเมินประสิทธิภาพของอุปกรณ์ป้องกัน เช่น ระบบตรวจจับ Arc Fault และระบบตัดไฟฉุกเฉิน (Rapid Shutdown) เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบให้มีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น

2. หลักการทำงานของระบบ Solar Rooftop

2.1 การทำงานของระบบ

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา ทำงานโดยอาศัยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current: DC) เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบแผงเซลล์จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จะถูกส่งไปยังอินเวอร์เตอร์ (Inverter) เพื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating Current: AC) ซึ่งสามารถนำไปใช้งานกับอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในอาคาร หรือจ่ายเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าได้ในกรณีของระบบแบบเชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้า (On-grid System) พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จะถูกนำไปใช้ภายในอาคารก่อน และหากมีพลังงานส่วนเกินสามารถส่งกลับเข้าสู่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้



รูปที่ 1 หลักการทำงานของระบบ Solar Rooftop

2.2 องค์ประกอบของระบบ

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา (Solar Rooftop) ประกอบด้วยอุปกรณ์หลักหลายส่วนที่ทำงานร่วมกันเพื่อผลิตและจ่ายพลังงานไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ ได้แก่

1.แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Panel):ทำหน้าที่รับพลังงานจากแสงอาทิตย์และแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC)

2.อินเวอร์เตอร์ (Inverter):ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรง (DC) เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) เพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้

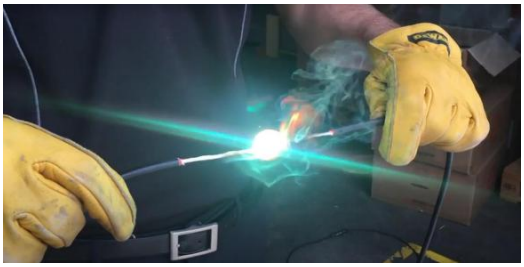
3.ระบบสายไฟ (Wiring System):ทำหน้าที่เชื่อมต่อและส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าระหว่างอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบ

4.โครงสร้างติดตั้ง (Mounting Structure):ทำหน้าที่รองรับและยึดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีความมั่นคงและเหมาะสมกับมุมรับแสง
5.อุปกรณ์ป้องกัน (Protection Devices):เช่น ฟิวส์ เซอร์กิตเบรกเกอร์ และระบบสายดิน ทำหน้าที่ป้องกันความเสียหายและเพิ่มความปลอดภัยของระบบ

2.3 ความปลอดภัยในระบบ Solar Rooftop

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา (Solar Rooftop) มีความเสี่ยงด้านความปลอดภัย เนื่องจากเป็นระบบที่ใช้ไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current: DC) ซึ่งมีแรงดันไฟฟ้าสูงและยังคงมีแรงดันไฟฟ้าอยู่เมื่อมีแสงอาทิตย์ แม้ในขณะที่ระบบถูกปิดแล้วก็ตาม ความเสี่ยงที่สำคัญ ได้แก่ การเกิดประกายไฟฟ้า (Arc Fault) ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเกิดอัคคีภัย รวมถึงแรงดันไฟฟ้าค้างในระบบที่อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานและผู้ใช้งาน

ดังนั้น ระบบ Solar Rooftop จึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ป้องกันความปลอดภัย เช่น ระบบตรวจจับ Arc Fault (Arc Fault Detection) และระบบตัดไฟฉุกเฉิน (Rapid Shutdown) รวมถึงอุปกรณ์ป้องกันอื่น ๆ เช่น ฟิวส์ เซอร์กิตเบรกเกอร์ และระบบสายดิน เพื่อช่วยลดความเสี่ยงและเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งานระบบ



รูปที่ 2 ตัวอย่างการเกิด Arc Fault ในระบบไฟฟ้ากระแสตรง

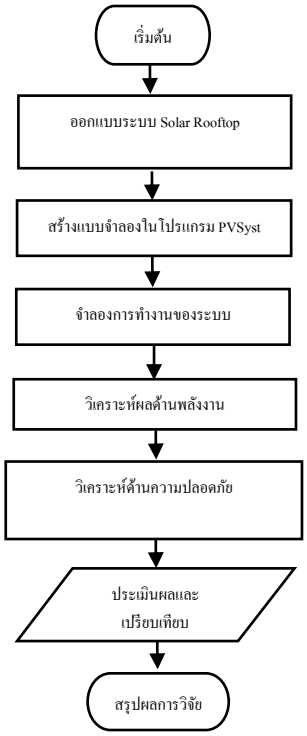
2.4 ระบบความปลอดภัยของระบบ Solar Rooftop

ระบบความปลอดภัยของ Solar Rooftop แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ระบบป้องกัน (Protection) ระบบตรวจจับ (Detection) และระบบลดความเสี่ยง (Mitigation) ซึ่งทำงานร่วมกันเพื่อลดความเสียหายและเพิ่มความปลอดภัยของระบบ

ระบบป้องกัน เช่น ฟิวส์ เซอร์กิตเบรกเกอร์ ระบบสายดิน และ SPD ทำหน้าที่ป้องกันกระแสเกินและแรงดันผิดปกติส่วนระบบตรวจจับ เช่น Arc Fault Detection และ Ground Fault Detection ใช้ตรวจจับความผิดปกติในระบบ

สำหรับระบบลดความเสี่ยง เช่น Rapid Shutdown จะช่วยลดแรงดันไฟฟ้าในกรณีฉุกเฉินให้อยู่ในระดับปลอดภัย เพื่อลดความเสี่ยงต่อผู้ใช้งานและอัคคีภัย

3. ขั้นตอนการวิจัย



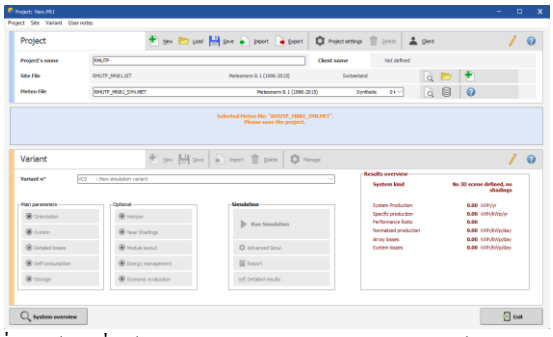
3.1 บทนำ

การวิจัยนี้เป็นการออกแบบและจำลองระบบ Solar Rooftop โดยใช้โปรแกรม PVSyst เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพและความปลอดภัยของระบบ

3.2 การออกแบบและสร้างแบบจำลองระบบ

3.2.1 การเริ่มต้นโครงการใน PVSyst

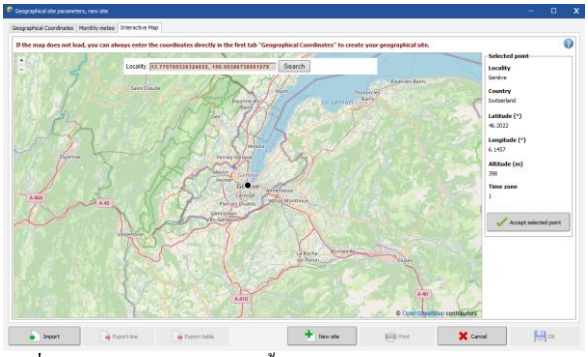
เริ่มต้นการสร้างโครงการในโปรแกรม PVSyst โดยเลือกประเภทระบบแบบ Grid-connected เพื่อใช้ในการจำลองระบบผลิตไฟฟ้าบนหลังคา



รูปที่ 3 หน้าจอเริ่มต้นของโปรแกรม PVSyst สำหรับการสร้างโครงการและเลือกประเภทระบบ

3.2.2 การกำหนดตำแหน่งและข้อมูลสภาพอากาศ

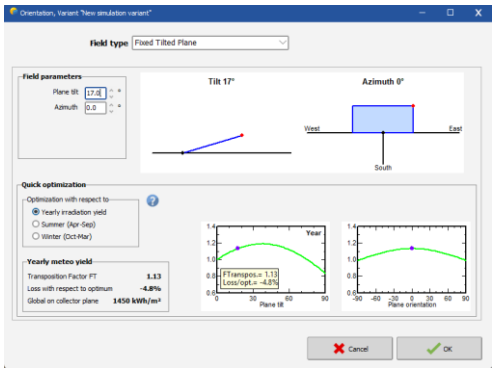
กำหนดตำแหน่งติดตั้งผ่านแผนที่ และเลือกข้อมูลสภาพอากาศจากฐานข้อมูล Meteonorm เพื่อใช้ในการจำลองระบบ



รูปที่ 4 การกำหนดตำแหน่งติดตั้งและข้อมูลสภาพอากาศในโปรแกรม PVSyst

3.2.3 การกำหนดมุมเอียงและทิศทางของแผง

กำหนดมุมเอียง (Tilt) และทิศทาง (Azimuth) ของแผง เพื่อให้เหมาะสมกับพื้นที่ติดตั้งและเพิ่มประสิทธิภาพการรับแสงอาทิตย์



รูปที่ 5 การกำหนดมุมเอียง (Tilt) และทิศทาง (Azimuth) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในโปรแกรม PVSyst

3.2.4 การกำหนดขนาดระบบและเลือกอุปกรณ์

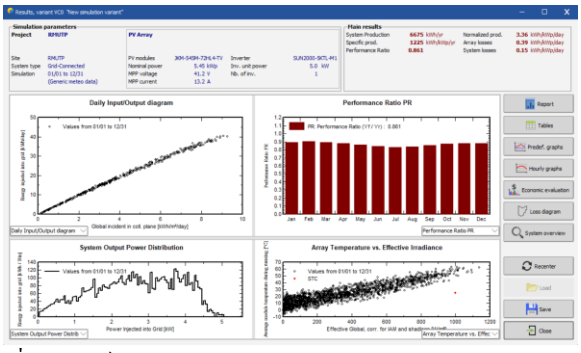
กำหนดขนาดระบบประมาณ 5 kW พร้อมเลือกแผงโซลาร์เซลล์และอินเวอร์เตอร์ให้เหมาะสมกับการใช้งาน

3.2.5 การกำหนดค่าการสูญเสียในระบบ

กำหนดค่าการสูญเสีย เช่น การสูญเสียในสายไฟและอุปกรณ์ เพื่อให้การจำลองใกล้เคียงกับสภาพจริง

3.3 การจำลองและวิเคราะห์ผล

ทำการจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาในโปรแกรม PVSyst เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบโดยพิจารณาค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้และค่า Performance Ratio (PR) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพของระบบ



รูปที่ 6 ผลลัพธ์จากการจำลองระบบ Solar Rooftop ในโปรแกรม PVSyst

3.4 การวิเคราะห์ด้านความปลอดภัย

วิเคราะห์ความปลอดภัยของระบบ Solar Rooftop โดยพิจารณาความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นเช่น การเกิด Arc Fault แรงดันไฟฟ้าค้างในระบบ และการทำงานของระบบ Rapid Shutdown เพื่อประเมินความปลอดภัยของระบบและลดความเสี่ยงในการใช้งาน

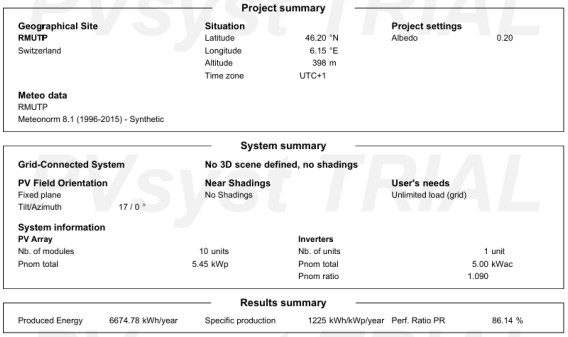
บทที่ 4 ผลการวิจัย

4.1 บทนำ

บทนี้นำเสนอผลการจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคา (Solar Rooftop) โดยใช้โปรแกรม PVsyst เพื่อประเมินสมรรถนะของระบบและวิเคราะห์ด้านความปลอดภัยของระบบไฟฟ้าการวิเคราะห์ครอบคลุมทั้งปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ ค่าประสิทธิภาพของระบบ (Performance Ratio: PR) รวมถึงการสูญเสียพลังงานในระบบซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพและความปลอดภัยของระบบโดยรวม

4.2 ผลการจำลองโดยรวมของระบบ

จากผลการจำลองพบว่าระบบสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้รวมประมาณ 6,674.78 kWh/ปี โดยมีค่า Specific production เท่ากับ 1,225 kWh/kWp/ปี และค่า Performance Ratio (PR) = 0.86 (86.14%) ค่าดังกล่าวอยู่ในช่วงมาตรฐานของระบบ Solar Rooftop (0.75–0.90) แสดงให้เห็นว่าระบบที่ออกแบบมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ดี และมีการสูญเสียพลังงานในระบบอยู่ในระดับต่ำ นอกจากนี้ค่าประสิทธิภาพที่อยู่ในระดับสูงยังสะท้อนให้เห็นว่าระบบมีเสถียรภาพในการทำงาน และลดโอกาสการเกิดความผิดปกติทางไฟฟ้า เช่น การเกิดความร้อนสะสมในอุปกรณ์หรือการทำงานเกินพิกัดของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของระบบ



Project summary

Geographical Site	Situation		Project settings	
RMUTP	Latitude	46.20 °N	Albedo	0.20
Switzerland	Longitude	6.15 °E		
	Altitude	398 m		
	Time zone	UTC+1		

Meteo data
RMUTP
Meteonorm 8.1 (1996-2015) - Synthetic

System summary

Grid-Connected System	No 3D scene defined, no shadings	
PV Field Orientation	**Near Shadings**	**User's needs**
Fixed plane	No Shadings	Unlimited load (grid)
Tilt/Azimuth 17 / 0 °		

System information

PV Array		Inverters	
Nb. of modules	10 units	Nb. of units	1 unit
Pnom total	5.45 kWp	Pnom total	5.00 kWac
		Pnom ratio	1.090

Results summary

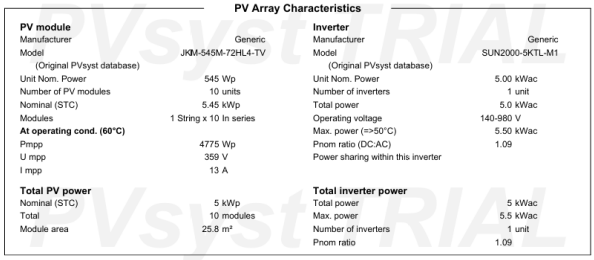
Produced Energy	6674.78 kWh/year	Specific production	1225 kWh/kWp/year	Perf. Ratio PR	86.14 %

รูปที่ 7 ผลสรุปข้อมูลโครงการจากโปรแกรม PVSyst

4.3 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ของระบบ

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของระบบ พบว่าระบบประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 545 Wp จำนวน 10 แผง รวมกำลังติดตั้งประมาณ 5.45 kWp และเชื่อมต่อกับอินเวอร์เตอร์ขนาด 5 kW ค่าอัตราส่วนกำลัง (Pnom ratio) เท่ากับ 1.09 ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสม แสดงให้เห็นว่าระบบไม่มีการออกแบบเกินพิกัดของอินเวอร์เตอร์

การออกแบบในลักษณะนี้ช่วยลดความเสี่ยงของการเกิด Overload และลดการสะสมความร้อนในอุปกรณ์ไฟฟ้าซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่อาจนำไปสู่ความเสียหายหรืออัคคีภัยในระบบไฟฟ้า



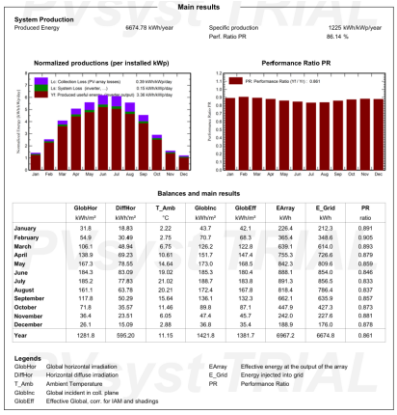
PV Array Characteristics

PV module		Inverter	
Manufacturer	Generic	Manufacturer	Generic
Model	JKM-545M-72HL4-TV	Model	SUN2000-5KTL-M1
(Original PVsyst database)		(Original PVsyst database)	
Unit Nom. Power	545 Wp	Unit Nom. Power	5.00 kWac
Number of PV modules	10 units	Number of inverters	1 unit
Nominal (STC)	5.45 kWp	Total power	5.0 kWac
Modules	1 String x 10 In series	Operating voltage	140-980 V
At operating cond. (60°C)		Max. power (=>50°C)	5.50 kWac
Pmpp	4775 Wp	Pnom ratio (DC:AC)	1.09
U mpp	359 V	Power sharing within this inverter	
I mpp	13 A		
Total PV power		**Total inverter power**	
Nominal (STC)	5 kWp	Total power	5 kWac
Total	10 modules	Max. power	5.5 kWac
Module area	25.8 m²	Number of inverters	1 unit
		Pnom ratio	1.09

รูปที่ 8 รายละเอียดพารามิเตอร์ของระบบ

4.4 การวิเคราะห์ผลลัพธ์และประสิทธิภาพ

จากผลการจำลองรายเดือน พบว่าการผลิตพลังงานไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงที่มีรังสีแสงอาทิตย์สูง และลดลงในช่วงที่มีรังสีต่ำ ซึ่งเป็นลักษณะปกติของระบบ Solar Rooftop ค่า Performance Ratio (PR) เฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 0.86 แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีเสถียรภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้า นอกจากนี้ การกระจายกำลังไฟฟ้าของระบบส่วนใหญ่ไม่เกินค่าพิกัดของอินเวอร์เตอร์ (5 kW) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไม่มีการทำงานเกินพิกัด (Overload) และช่วยเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งานระบบ



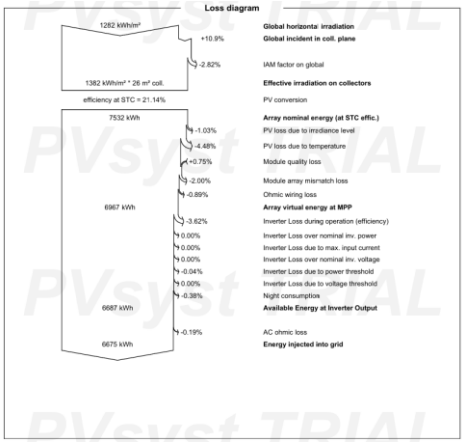
รูปที่ 9 ผลการผลิตพลังงานและค่า PR

4.5 การวิเคราะห์การสูญเสียพลังงาน

การสูญเสียพลังงานในระบบเกิดจากหลายปัจจัย ได้แก่ การสูญเสียจากอุณหภูมิ, การ mismatch ของแผง, การสูญเสียในสายไฟ, การสูญเสียในอินเวอร์เตอร์การสูญเสียในสายไฟสามารถอธิบายได้จากสมการ

$$Ploss = I^2R$$

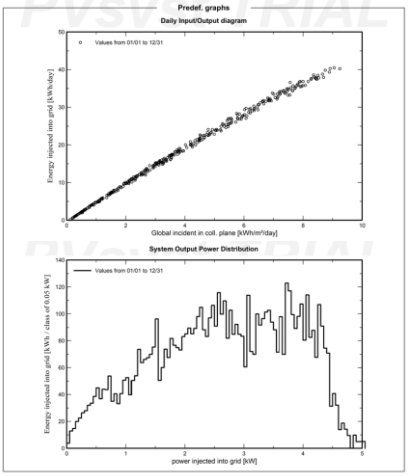
ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระแสไฟฟ้าและความต้านทานมีผลต่อการสูญเสียพลังงาน



รูปที่ 10 แผนภาพการสูญเสียพลังงานของระบบ

4.6 การวิเคราะห์พฤติกรรมการทำงานของระบบ

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างรังสีแสงอาทิตย์กับพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ พบว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพนอกจากนี้ กราฟการกระจายกำลังไฟฟ้าแสดงให้เห็นว่าระบบทำงานภายในช่วงที่ปลอดภัย และไม่มีการทำงานเกินพิกัด ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงของความเสียหายและเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งานระบบในระยะยาว



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานและกำลังไฟฟ้า

4.7 การวิเคราะห์ด้านความปลอดภัยของระบบ

จากผลการจำลองพบว่าระบบมีการออกแบบที่เหมาะสมและไม่มีการทำงานเกินพิกัดของอุปกรณ์ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงจากความร้อนสะสมในระบบไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม ระบบยังคงมีความเสี่ยงในส่วนของไฟฟ้ากระแสตรง (DC) โดยเฉพาะการเกิดแรงดันไฟฟ้าค้าง (Voltage Retention) และการเกิด Arc Fault ซึ่งอาจนำไปสู่อันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน ดังนั้น การติดตั้งระบบป้องกัน เช่น Arc Fault Detection และ Rapid Shutdown System จึงมีความจำเป็น เพื่อช่วยลดแรงดันไฟฟ้าและตัดการทำงานของระบบในกรณีฉุกเฉินซึ่งจะช่วยเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งานระบบ Solar Rooftop ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

การศึกษานี้เป็นการออกแบบและจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคา(Solar Rooftop)โดยใช้โปรแกรม PVSyst ผลการจำลองพบว่าระบบมีขนาดกำลังติดตั้งประมาณ 5.45 kWp สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ประมาณ 6,674.78 kWh ต่อปี และมีค่า Performance Ratio (PR) เท่ากับ 86.14% ซึ่งอยู่ในช่วงมาตรฐาน แสดงให้เห็นว่าระบบมีประสิทธิภาพในการทำงานที่ดี จากการวิเคราะห์พบว่าการเลือกขนาดอุปกรณ์และการออกแบบระบบมีความเหมาะสม ไม่มีการทำงานเกินพิกัดของอินเวอร์เตอร์ และสามารถลดความเสี่ยงด้านความร้อนสะสมในอุปกรณ์ได้ การสูญเสียพลังงานในระบบเกิดจากหลายปัจจัย เช่น อุณหภูมิของแผง ความไม่สมดุลของแผง และการสูญเสียในสายไฟ (Ohmic loss) ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบโดยรวม

ในด้านความปลอดภัยระบบยังมีความเสี่ยงในส่วนของไฟฟ้ากระแสตรง (DC) เช่น แรงดันไฟฟ้าค้างและการเกิด Arc Fault ดังนั้นควรติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันเช่น ระบบตรวจจับ Arc Fault และระบบ Rapid Shutdown เพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งาน

สรุปได้ว่าระบบที่ออกแบบมีประสิทธิภาพและเหมาะสมต่อการใช้งานจริงและสามารถเพิ่มความปลอดภัยได้หากมีการติดตั้งระบบป้องกันที่เหมาะสม

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้การสนับสนุนการทำวิจัย ทำให้งานวิจัยสามารถสำเร็จสมบูรณ์ทุกประการ

เอกสารอ้างอิง

[1] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (วสท.), *มาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย*, พ.ศ. 2565.

[2] National Fire Protection Association (NFPA), *NFPA 70: National Electrical Code (NEC 2020)*, USA, 2020.

[3] International Electrotechnical Commission (IEC), *IEC 60364: Electrical Installations for Buildings*.

[4] National Renewable Energy Laboratory (NREL), *Photovoltaic System Basics*..

[5] J. Johnson et al., *Photovoltaic DC Arc Fault Detector Testing*, Sandia National Laboratories, 2011.
Underwriters Laboratories (UL), *UL 1699B: Arc-Fault Circuit Interrupters for PV Systems*.

[6] M.G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. R. Filho, “Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of PV Arrays,” *IEEE Transactions*, 2009.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9
Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การออกแบบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับโซลาร์เซลล์บนหลังคาอาคาร

Design and Performance Analysis of Lightning Protection Systems for Rooftop Solar Cells

ศศิกานต์ แสงสิงห์ นาวิน รอดเรือง และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ*
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร โทรศัพท์ 02-836-3000 ต่อ 4150 E-mail: nattachote.r@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับโซลาร์เซลล์บนหลังคาอาคาร มีวัตถุประสงค์เพื่อลดความเสี่ยงและความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นต่อโครงสร้างอาคาร ระบบไฟฟ้า และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า โดยอ้างอิงหลักเกณฑ์ตามมาตรฐานของ International Electrotechnical Commission (IEC62305) ซึ่งประเมินความเสี่ยงตามลักษณะพื้นที่ตั้ง ขนาด และความสูงของอาคาร การกำหนดระดับการป้องกันที่เหมาะสม และการคำนวณออกแบบองค์ประกอบของระบบป้องกันฟ้าผ่า ได้แก่ หัวล่อฟ้า สายตัวนำลงดิน ระบบหลักดิน และอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน โดยใช้เทคนิคมุมป้องกันในการกำหนดขอบเขตการป้องกัน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการออกแบบตามหลักวิศวกรรมและมาตรฐานสากลสามารถลดระดับความเสี่ยงให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และเพิ่มความปลอดภัยให้แก่ผู้ใช้อาคารและทรัพย์สินได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : ระบบป้องกันฟ้าผ่า, การประเมินความเสี่ยง, การออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า

Abstract

This paper resents the design and performance analysis of lightning protection systems for rooftop solar cells aims to reduce the risks and potential damage to building structures, electrical systems, and electronic equipment caused by lightning strikes. The study is based on the standards of the International Electrotechnical Commission (IEC 62305), which include risk assessment considering the building location, size, and height, determination of the appropriate protection level, and the design calculation of lightning protection system components such as air terminals, down conductors, grounding systems, and surge protection devices. The protection zone is determined using the protection angle method. The results indicate that the design in accordance with engineering principles and international standards can effectively reduce risk levels to acceptable limits and enhance the safety of building occupants and property

Keywords: Lightning Protection System, Risk Assessment , Lightning Protection System Design

1. บทนำ

ในปัจจุบันอาคารและสิ่งปลูกสร้างต่าง ๆ มีการติดตั้งระบบไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จำนวนมาก เช่น ระบบไฟฟ้ากำลัง ระบบสื่อสาร และระบบควบคุมอัตโนมัติ ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้มีความไวต่อแรงดันไฟฟ้าสูงที่เกิดจากฟ้าผ่า หากอาคารไม่มีระบบป้องกันฟ้าผ่าที่เหมาะสม อาจก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า ระบบไฟฟ้า และโครงสร้างของอาคาร รวมถึงอาจเป็นอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สินของผู้ใช้อาคารได้ [1]

จากงานวิจัยพบว่าฟ้าผ่าสามารถส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายในอาคารได้ โดยเฉพาะระบบไฟฟ้าและระบบสื่อสารที่มีความไวต่อแรงดันไฟฟ้า [2] ในช่วงปี พ.ศ. 2560–2565 ชี้ให้เห็นว่าการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าที่เหมาะสม รวมถึงการเลือกใช้อุปกรณ์ตามมาตรฐานทางวิศวกรรม สามารถช่วยลดความเสียหายและเพิ่มความปลอดภัยให้กับอาคารและระบบไฟฟ้าได้ [3] งานวิจัยหลายฉบับได้เสนอวิธีการออกแบบโดยใช้หลักการกำหนดพื้นที่ป้องกัน เช่น วิธีมุมป้องกันและวิธีทรงกลมกลิ้ง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันพื้นที่เสี่ยงของอาคาร

ดังนั้นบทความวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับอาคาร โดยใช้วิธีมุมป้องกันด้วยโปรแกม AutoCAD เพื่อกำหนดเขตพื้นที่คุ้มครองของเสาล่อฟ้า และประเมินประสิทธิภาพในการป้องกันพื้นที่เสี่ยง เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มความปลอดภัยให้กับอาคารและผู้ใช้งาน

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

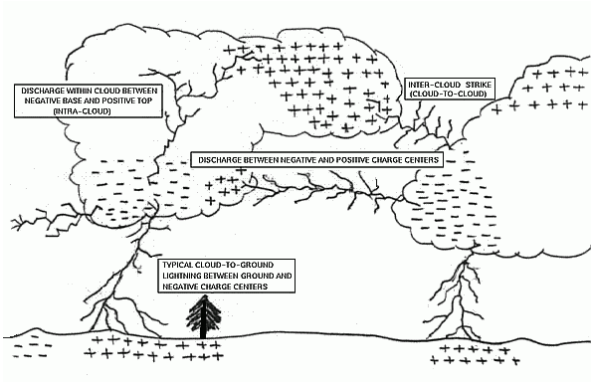
2.1 ปรากฏการณ์ฟ้าผ่า

ฟ้าผ่าเกิดจากการสะสมของประจุไฟฟ้าในเมฆฝนฟ้าคะนอง (เมฆคิวมูโลนิมบัส) ซึ่งเกิดจากการเสียดสีของหยดน้ำและน้ำแข็งภายในเมฆ ทำให้ประจุบวกสะสมที่ยอดเมฆและประจุลบที่ฐานเมฆ เมื่อมีการสะสมประจุมากจนสนามไฟฟ้าสูงเกินค่าที่อากาศทนได้ จะเกิดการคายประจุระหว่างเมฆหรือระหว่างเมฆกับพื้นโลก ซึ่งเรียกว่า ฟ้าผ่า ดังแสดงในรูปที่ 1 [4]



รูปที่ 1 ปรากฏการณ์ฟ้าผ่า

โดยทั่วไปฟ้าผ่าจะเริ่มต้นในก้อนเมฆ ที่มีประจุสะสมระดับสูง 1.5-10 กิโลเมตรเหนือพื้นโลก ซึ่งมีการกระจายตัวของประจุโดยที่ฐานของก้อนเมฆจะเป็นประจุลบ ส่วนบนของก้อนเมฆจะเป็นประจุบวก จุดเริ่มต้นของการเกิดฟ้าผ่า ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่กลุ่มประจุลบ คือที่ฐานของก้อนเมฆเพราะอยู่ใกล้พื้นโลก เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าถึงจุดวิกฤต E_c ในก้อนเมฆอยู่ที่ประมาณ 10 kV/cm (ในบรรยากาศที่ระดับพื้นโลก E_c มีค่าประมาณ 30 kV/cm) ก็จะเกิดไอออนไนเซชัน ดังแสดงในรูปที่ 2 [1]



รูปที่ 2 การกระจายประจุของก้อนเมฆ

2.2 ผลกระทบที่เกิดจากฟ้าผ่า

2.2.1 ผลกระทบจากฟ้าผ่าด้านความร้อน มีผลทำให้เกิดเพลิงไหม้กับสิ่งที่ถูกฟ้าผ่า เนื่องจากเมื่อเกิด ฟ้าผ่าจะมีลำแสงจ้าจากฟ้าผ่าโดยลำแกนมีเส้นผ่านศูนย์กลางเป็นเซนติเมตร และมีอุณหภูมิสูงถึง 30,000 K

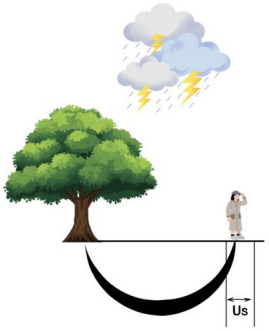
2.2.2 ผลกระทบจากฟ้าผ่าทางแรงกลบิดหรือแรงระเบิด ทำให้สิ่งที่ถูกฟ้าผ่าพังทลายลงได้ ลักษณะ ของแรงกลระเบิดที่เกิดขึ้นนั้นมีสองแบบ คือ แบบหนึ่ง เมื่อกระแสไหลผ่านตัวนำแล้ว ทำให้เกิด แรงบิดขึ้นกับตัวนำนั้น เป็นแรงดึงดูดหรือแรงผลัก ขนาดแรงที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ กระแสกำลังสอง I^2 เป็นสัดส่วนกลับระยะห่างระหว่างสายตัวนำทั้งสอง d นั่นคือ แรงที่เกิดขึ้นต่อหน่วยความยาวของตัวนำ

2.2.3 ผลกระทบจากฟ้าผ่าทางไฟฟ้า มีหลายลักษณะ ดังนี้

การรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า การเกิดฟ้าผ่าจะเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่กระจายออกไป รบกวนระบบสื่อสารก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่มีความไวต่อสนามแม่เหล็ก ไฟฟ้าเกิดแรงดันเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นในตัวนำ ถ้าแรงดันเหนี่ยวนำสูงพอก็อาจเกิดส ปาร์คได้

อันตรายจากฟ้าผ่าที่เกิดจากคนแก่โดยตรง ฟ้าผ่ามักเกิดกับจุดที่สูงหรือโดดเด่น เช่น อาคาร ต้นไม้ หรือคนที่ยืนอยู่กลางที่โล่ง ทำให้ผู้ที่อยู่ภายนอกอาคารมีความเสี่ยง โดยเฉพาะในที่โล่งกว้าง ทุ่งนา แม่น้ำ หรือทะเล รวมถึงการยืนใกล้ต้นไม้สูง เพราะกระแสไฟฟ้าจากฟ้าผ่าสามารถไหลลงสู่พื้นและเกิดประกายไฟเข้าสู่ร่างกาย ทำให้เกิดอันตรายได้

อันตรายจากแรงดันช่วงก้าวและแรงดันสัมผัส แรงดันช่วงก้าวและแรงดันสัมผัสเกิดจากกระแสฟ้าผ่าไหลลงดินที่มีความต้านทานทำให้เกิดความต่างศักย์ในพื้นดิน ส่งผลให้เกิดแรงดันระหว่างเท้าทั้งสองขณะก้าวเดิน ประมาณ 1 เมตรในคน ซึ่งเป็นอันตรายต่อคนและสัตว์ จึงต้องออกแบบระบบสายดินให้เหมาะสมเพื่อป้องกันอันตรายนี้ ดังแสดงในรูปที่ 3 [5]



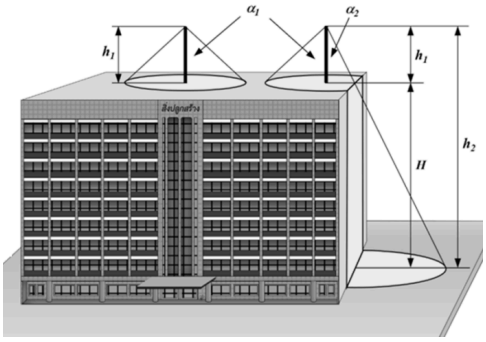
รูปที่ 3 แรงดันช่วงก้าว U_S

2.3 ระบบป้องกันฟ้าผ่า

ระบบป้องกันฟ้าผ่าเป็นระบบที่ออกแบบเพื่อลดความเสียหายต่ออาคารและอุปกรณ์ไฟฟ้าจากฟ้าผ่า ตามมาตรฐาน IEC 62305. โดยครอบคลุมการออกแบบ การติดตั้ง และประเมินความเสี่ยง

2.3.1 วิธีมุมป้องกัน

การติดตั้งแท่งล่อฟ้าบนจุดสูงสุดของอาคารเพื่อรับฟ้าผ่าและนำกระแสลงดิน โดยสร้างเขตป้องกันรอบแท่ง เหมาะกับอาคารขนาดเล็ก ติดตั้งง่าย ต้นทุนต่ำ แต่ป้องกันได้เฉพาะพื้นที่จำกัด ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 วิธีมุมป้องกัน

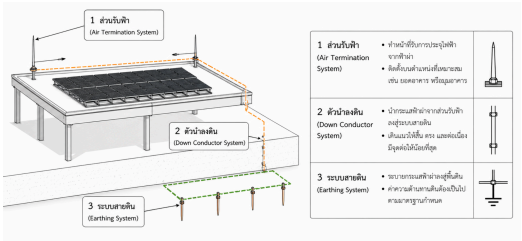
2.3.2 วิธีทรงกลมกลิ้ง การจำลองทรงกลมกลิ้งบนผิวอาคาร จุดที่สัมผัสคือจุดเสี่ยงฟ้าผ่า ต้องติดตั้งอุปกรณ์ป้องกัน เหมาะกับอาคารรูปทรงซับซ้อน และมีความแม่นยำสูง

2.3.3 วิธีตาข่าย วิธีนี้เป็นการติดตั้งสายตัวนำไฟฟ้าเป็นรูปตารางคลุมหลังคาอาคาร เพื่อรับฟ้าผ่าแทนตัวอาคารและนำกระแสไฟฟ้าลงสู่ดินอย่างปลอดภัย [6]

2.4 มาตรฐานระบบป้องกันฟ้าผ่า

การออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า ควรคำนึงถึงความปลอดภัยและหลักวิศวกรรม เพื่อให้ระบบสามารถป้องกันความเสียหายจากฟ้าผ่าได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยระบบประกอบด้วยส่วนรับฟ้า ตัวนำลงดิน และระบบสายดิน ซึ่งทำหน้าที่รับและระบายกระแสฟ้าผ่าลงสู่พื้นดินอย่างปลอดภัย

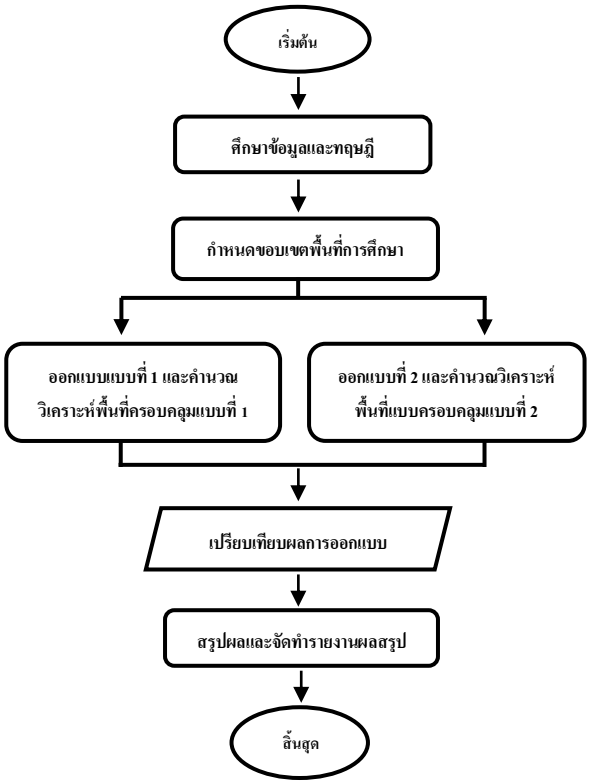
การออกแบบควรอ้างอิงมาตรฐาน เช่น IEC 62305 และมาตรฐานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ เพื่อให้ระบบมีความถูกต้องและเป็นไปตามข้อกำหนดทางวิศวกรรม ดังแสดงในรูปที่ 5 [7]



รูปที่ 5 องค์ประกอบของระบบป้องกันฟ้าผ่า

3. ขั้นตอนในการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินการออกแบบระบบป้องกันฟ้าโซลาร์เซลล์สำหรับอาคารโดยใช้วิธีมุมป้องกันในการออกแบบ ดังแสดงในรูปที่ 6



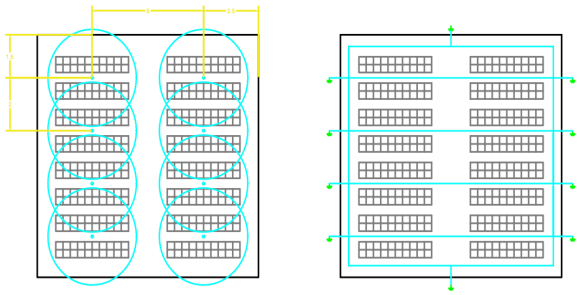
รูปที่ 6 ขั้นตอนการดำเนินงาน

4. กรณีศึกษา

กรณีศึกษา	ความสูงเสาล่อฟ้า (m)	มุมป้องกัน (องศา)	ระยะครอบคลุม (รัศมี,m)
กรณีที่ 1	2	45	2
กรณีที่ 2	3	40	2.52

4.1 กรณีที่ 1

ออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า โดยการใช้เสาล่อฟ้าที่มีความสูง 2 เมตร และมุมป้องกัน 45 องศา ให้ระยะครอบคลุมค่อนข้างจำกัด ดังแสดงในรูปที่ 7

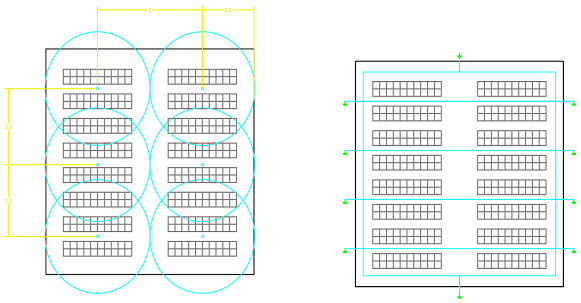


รูปที่ 7 พื้นที่ครอบคลุมของระบบป้องกันฟ้าผ่าแบบที่ 1

จากรูปที่ 7 แสดงการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าโดยใช้วิธีมุมป้องกัน กำหนดมุมป้องกัน 45 องศา และความสูงเสาล่อฟ้า 2 เมตร ซึ่งให้ระยะครอบคลุมในแนวนอน 2 เมตร ผลการวิเคราะห์พบว่าสามารถป้องกันพื้นที่ได้ประมาณร้อยละ 74 ของพื้นที่กรณีศึกษา อย่างไรก็ตามยังมีบางพื้นที่ โดยเฉพาะบริเวณขอบและกึ่งกลางระหว่างตำแหน่งเสาล่อฟ้า อยู่นอกเขตการป้องกัน เนื่องจากข้อจำกัดของระยะครอบคลุมที่ขึ้นอยู่กับความสูงของเสาและมุมป้องกัน ทำให้พื้นที่ดังกล่าวยังมีความเสี่ยงต่อการเกิดฟ้าผ่า

4.2 กรณีที่ 2

ออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า โดยการใช้เสาล่อฟ้าที่มีความสูง 3 เมตร และมุมป้องกันองศา 40 องศา แต่สามารถเพิ่มระยะครอบคลุมของพื้นที่ได้อย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 พื้นที่ครอบคลุมของระบบป้องกันฟ้าผ่าแบบที่ 2

จากรูปที่ 8 แสดงผลการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าโดยใช้วิธีมุมป้องกัน โดยกำหนดมุมป้องกันที่ 40 องศา และเพิ่มความสูงของเสาล่อฟ้าเป็น 3 เมตร ซึ่งส่งผลให้ระยะครอบคลุมในแนวนอน รัศมีเพิ่มขึ้นเป็น 2.52 เมตร จากการวิเคราะห์พบว่า พื้นที่ที่อยู่ภายในเขตมุมป้องกันสามารถครอบคลุมได้ประมาณร้อยละ 85 ของพื้นที่ทั้งหมดของกรณีศึกษา เมื่อเปรียบเทียบกับแบบที่ 1 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มความสูงของเสาล่อฟ้ามีผลทำให้ขอบเขตพื้นที่คุ้มครองขยายตัวออกไป แม้ว่ามุมป้องกันจะลดลงก็ตาม ส่งผลให้พื้นที่ที่ไม่ได้รับการป้องกันลดลงอย่างชัดเจน โดยพื้นที่เสี่ยงที่ยังคงเหลืออยู่มักปรากฏบริเวณขอบพื้นที่หรือช่องว่างระหว่างเขตการป้องกันของแต่ละจุดติดตั้ง

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบป้องกันฟ้าผ่าโดยวิธีมุมป้องกัน

พารามิเตอร์	แบบที่1	แบบที่2
วิธีการออกแบบ	มุมป้องกัน	มุมป้องกัน
มุมป้องกัน (องศา)	45	40
ความสูงเสาล่อฟ้า (เมตร)	2	3
ระยะครอบคลุม (รัศมี/เมตร)	2	2.52
พื้นที่ป้องกัน (เปอร์เซ็น)	74	85
พื้นที่เสี่ยง (เปอร์เซ็น)	26	15
จำนวนจุดติดตั้ง (ต้น)	8	6
ระดับป้องกัน	ปานกลาง	สูง
ความเหมาะสมในการใช้งาน	พื้นที่ทั่วไป	พื้นที่ปลอดภัยสูง

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลในตารางที่ 1 พบว่า พารามิเตอร์ด้านความสูงของเสาล่อฟ้ามีอิทธิพลต่อระยะครอบคลุมและสัดส่วนพื้นที่ป้องกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยแบบที่ 2 ซึ่งกำหนดความสูงของเสาล่อฟ้ามากกว่าสามารถเพิ่มขอบเขตของพื้นที่คุ้มครองและลดพื้นที่เสี่ยงได้อย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับแบบที่ 1 แม้ว่าจะใช้มุมป้องกันที่แคบลงก็ตาม

ผลการศึกษานี้สะท้อนให้เห็นว่า ความสูงของเสาล่อฟ้ามีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพของระบบป้องกันฟ้าผ่า เนื่องจากมีความสัมพันธ์โดยตรงกับระยะครอบคลุมในแนวนอน ซึ่งเป็นตัวกำหนดขอบเขตของพื้นที่คุ้มครอง ดังนั้น ในการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าจึงควรให้ความสำคัญกับการกำหนดความสูงของเสาล่อฟ้าเป็นปัจจัยหลักควบคู่กับการพิจารณามุมป้องกัน เพื่อให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันและลดความเสี่ยงของพื้นที่ได้อย่างเหมาะสม [8]

5. สรุป

บทความวิจัยนี้ศึกษาการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าโดยใช้เทคนิคมุมป้องกัน สำหรับพื้นที่ติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ โดยพิจารณาปัจจัยหลัก ได้แก่ มุมป้องกันและความสูงของเสาล่อฟ้า เพื่อวิเคราะห์ผลต่อพื้นที่คุ้มครองและประสิทธิภาพของระบบ ผลการศึกษาพบว่า ความสูงของเสาล่อฟ้ามีผลโดยตรงต่อระยะครอบคลุมและการลดพื้นที่เสี่ยง ขณะที่มุมป้องกันมีผลต่อรูปแบบของเขตการป้องกัน ดังนั้น การออกแบบระบบควรพิจารณาทั้งสองปัจจัยร่วมกัน โดยให้ความสำคัญกับความสูงของเสาล่อฟ้า เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันฟ้าผ่าและลดความเสี่ยงของพื้นที่แนวทางการออกแบบนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับพื้นที่ลักษณะใกล้เคียงกันได้ โดยควรปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับสภาพพื้นที่จริงเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

6. ข้อเสนอแนะ

1. ควรใช้ข้อมูลจากพื้นที่จริงร่วมกับการจำลอง เพื่อเพิ่มความแม่นยำ ของผลการศึกษา
2. ควรพิจารณาปัจจัยเพิ่มเติม เช่น ความต้านทานดิน และสภาพแวดล้อม
3. ควรศึกษาเปรียบเทียบกับวิธีอื่น เช่น วิธีทรงกลมกลิ้ง
4. ควรมีการทดสอบในสภาพการใช้งานจริง

7.กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้การสนับสนุนและความช่วยเหลือในการจัดทำบทความนี้ ซึ่งได้ช่วยให้บทความนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

[1] The Engineering Institute of Thailand under H.M. the King's Patronage. (2022). Lightning protection standards 2022. Bangkok, Thailand: EIT.

[2] International Electrotechnical Commission, Protection Against Lightning – Part 4: Electrical and Electronic Systems within Structures, IEC 62305-4, Geneva, Switzerland, 2010.

[3] ลือชัย ทองนิล. (2566) การป้องกันอันตรายจากฟ้าผ่า:หลักการอัตรายและแนวทางการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าตามมาตรฐานวิศวกรรม. กรุงเทพฯ: สภาวิศวกร

[4] IEC6 2 3 0 5 , Protection against lightning, International Electrotechnical Commission (IEC), 2010.

[5] P. Wongchanthata, Lightning Phenomena and Protection,"Journal of Education and Social Development, vol. 9, no. 1, 2013.

[6] Engineering Institute of Thailand, Lightning Protection Standard B.E. 2565 (2022), Bangkok: Engineering Institute of Thailand, 2022.

[7] Engineering Institute of Thailand, Guidelines for Lightning Protection Design for Ground-Mounted Solar Power Systems, Bangkok: Engineering Institute of Thailand, 2022.

[8] Lightning Protection Standard B.E. 2565 (2022). Bangkok, Thailand, 2022

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การพัฒนานวัตกรรมอุปกรณ์ตรวจจับและขับไล่นกอัตโนมัติด้วยระบบกับดักไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสต่ำจากพลังงานแสงอาทิตย์ผ่านสถาปัตยกรรมฮาร์ดแวร์ลอจิก

Development of an Automated Bird Detection and Deterrent Innovation using Low-Current High-Voltage Electric Traps Powered by Solar Energy through Hardware Logic Architecture

พสิษฐ์ สุวรรณภิงคาร[1] สุรสิทธิ์ ประกอบกิจ[1] ปวีณ์นุช บุญประครอง[1] จิรภัทร ชาลีเขียว[1]

รัมภ์รดา จวงสอน[1] ภาคภูมิ แสงคำ[1] และ ธีรวัฒน์ ภู่ระหงษ์[1]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถ.ประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร โทรศัพท์ 02-436-3000 ต่อ 4150 E-mail: pasist.s@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและวิเคราะห์ระบบไล่นกอัตโนมัติแบบพึ่งพาพลังงานตนเอง โดยใช้สถาปัตยกรรมฮาร์ดแวร์ลอจิกแทนไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อลดความซับซ้อนและเพิ่มเสถียรภาพในการทำงานในสภาพแวดล้อมกลางแจ้ง มีการวิเคราะห์การสูญเสียพลังงานและสมดุลพลังงานของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ พร้อมเสนอแนวทางปรับปรุง ได้แก่ การใช้เซนเซอร์เรดาร์ไมโครเวฟสำหรับตรวจจับการเคลื่อนไหว การแยกวงจรด้วยออปโตคัปเปลอร์ และวงจรหน่วงเวลาเพื่อสร้างสัญญาณพัลส์แบบสุ่ม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ถูกนำมาใช้ในการประเมินสมรรถนะของระบบ ผลการทดลองร่วมกับการวิเคราะห์เชิงบูรณาการแบบสี่มิติแสดงให้เห็นว่าระบบมีประสิทธิภาพและความเชื่อถือได้สูง อีกทั้งได้จัดทำรายการวัสดุอุปกรณ์ระดับเชิงพาณิชย์ เพื่อรองรับการพัฒนาสู่การใช้งานจริง โดยเป็นไปตามมาตรฐานความปลอดภัยสากลด้านการควบคุมสัตว์

คำสำคัญ: ระบบไล่นก, พลังงานแสงอาทิตย์, ฮาร์ดแวร์ลอจิก, เรดาร์ไมโครเวฟ, แรงดันสูงกระแสต่ำ

Abstract

This paper presents the design and analysis of an energy-autonomous automatic bird repellent system based on a hardware logic architecture, eliminating the need for a microcontroller to reduce system complexity and enhance operational stability in outdoor environments. Energy loss and balance in the solar-powered system are analysed, and engineering solutions are proposed, including the use of a microwave radar sensor for motion detection, optocoupler-based circuit isolation, and a delay timer circuit for randomised pulse generation. Mathematical modeling is applied to evaluate system performance. Experimental results, supported by a four-dimensional integrated analysis, demonstrate high efficiency and reliability. A commercial-grade Bill of Materials (BOM) is also developed to support practical implementation. The system complies with international safety standards for electro-tactile animal control

Keywords: Bird repellent, Solar power, Hardware logic, Microwave radar, Low-current high-voltage

1. บทนำ

ปัญหาการรุกรานและเกาะอาศัยของนกพิราบตามโครงสร้างอาคารและสถานที่สาธารณะ ก่อให้เกิดผลกระทบโดยตรงต่อโครงสร้างทางวิศวกรรมสถาปัตยกรรม เนื่องจากกรดยูริก (Uric Acid) ในมูลนกมีฤทธิ์กัดกร่อนพื้นผิววัสดุโลหะและคอนกรีต นอกจากนี้ยังเป็นพาหะนำโรคติดต่อทางเดินหายใจ มาตรการควบคุมแบบดั้งเดิม เช่น การขึงตาข่าย การใช้เจลขับไล่ หรือการใช้คลื่นเสียง มักประสบปัญหาความเสื่อมสภาพของวัสดุอย่างรวดเร็ว และนกมักจะมีการปรับตัวให้คุ้นชิน (Habituation) กับสภาวะเหล่านั้นได้ในที่สุด

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีกระแสไฟฟ้าแรงดันสูงระดับมิลลิแอมป์เพื่อสร้างความตระหนกทางกายภาพ (Electro-tactile stimulus) เป็นวิธีการที่พิสูจน์แล้วว่ามีประสิทธิภาพสูงสุดในการยับยั้งพฤติกรรมการเกาะพักอย่างถาวร โดยไม่ทำอันตรายถึงชีวิต อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์ที่พบเห็นมักพึ่งพาไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งเปราะบางต่อสภาพอากาศที่รุนแรงและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวน (EMI) ทำให้มักเกิดการประมวลผลล้มเหลว (System Halt) งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นออกแบบนวัตกรรมผ่านสถาปัตยกรรม "ฮาร์ดแวร์ลอจิก" อย่างเต็มรูปแบบ ผสานระบบจัดการพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อสร้างสรรค์อุปกรณ์ที่ทนทาน เสถียร และพัฒนาไปสู่เชิงพาณิชย์ได้อย่างยั่งยืน

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

พื้นที่ในเขตเมืองและสถานที่สาธารณะมักประสบปัญหาการรุกรานของนกพิราบที่เข้ามาเกาะอาศัยตามโครงสร้างอาคาร ปัญหาดังกล่าวก่อให้เกิดความเสียหายทางวิศวกรรมสถาปัตยกรรมอย่างรุนแรง

เนื่องจากกรดยูริก (Uric Acid) ในมูลนกมีฤทธิ์กัดกร่อนพื้นผิววัสดุตลอดจนเป็นแหล่งสะสมของเชื้อโรคที่คุกคามสุขอนามัย แม้ปัจจุบันจะมีการใช้อุปกรณ์ป้องกันทางกายภาพ เช่น หนามกันนก แต่มักพบปัญหาความเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็วและการปรับตัว (Habituation) ของสัตว์ การพัฒนา "กับดักไฟฟ้ากระตุ้น" (Electro-tactile Trap) ที่ให้ผลสัมผัสทางกายภาพโดยตรง จึงเป็นทางออกในการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมสัตว์ที่มีประสิทธิภาพและยั่งยืน งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นออกแบบนวัตกรรมผ่านสถาปัตยกรรม "ฮาร์ดแวร์ลอจิก" อย่างเต็มรูปแบบ ผสานระบบจัดการพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อสร้างสรรค์อุปกรณ์ที่ทนทาน เสถียร และพัฒนาไปสู่เชิงพาณิชย์ได้อย่างยั่งยืน

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ออกแบบและพัฒนาระบบกับดักไฟฟ้ากระตุ้นแรงดันสูงกระแสต่ำแบบพึ่งพาตนเองด้านพลังงาน โดยทำงานผ่านวงจรฮาร์ดแวร์ลอจิกแทนการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

1.2.2 วิเคราะห์ความสูญเสียทางพลังงานและพัฒนาระบบจ่ายพลังงานแสงอาทิตย์แบบสแตนด์อะโลน ให้สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง

1.2.3 ประเมินประสิทธิภาพการทำงานของระบบในการลดการสะสมของมูลนก ปกป้องโครงสร้างอาคาร และทดสอบจุดบอดทางวิศวกรรมเพื่อการยกระดับสู่ผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 การควบคุมวงจรหลักดำเนินการผ่านเซนเซอร์ไมโครเวฟเรดาร์ (Microwave Radar) ทำงานร่วมกับโมดูลหน่วงเวลาเชิงฮาร์ดแวร์ (Delay Timer) และระบบสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ (MOSFET)

1.3.2 ระบบพลังงานถูกขับเคลื่อนด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ และกักเก็บประจุด้วยแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน (Li-Ion)

1.3.3 วงจรทวีแรงดัน (Voltage Multiplier) ถูกปรับแต่งให้จำกัดกระแสไฟฟ้าสูงสุดไม่เกิน 5mA และใช้ลวดสแตนเลสในการสร้างหน้าสัมผัสของขั้วตัวนำ

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีพฤติกรรมการเรียนรู้และการปรับตัวของสัตว์ปีก (Avian Habituation Theory)

จากรายงานการศึกษาปัญหาการรุกรานของนกพิราบในเขตเมือง พบว่าวิธีการป้องกันทางกายภาพแบบดั้งเดิมมักสูญเสียประสิทธิภาพเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากนกพิราบมีกลไกการเรียนรู้และการปรับตัวเชิงพฤติกรรม (Habituation) ที่สามารถจดจำรูปแบบการคุกคามที่ไม่มีผลกระทบทางกายภาพได้ งานวิจัยด้านการควบคุมสัตว์รบกวนระบุว่า การสร้าง "เงื่อนไขการเรียนรู้เชิงลบ" (Negative Reinforcement) ผ่านการกระตุ้นทางประสาทสัมผัส (Electro-tactile stimulus) เป็นวิธีเดียวที่สามารถยับยั้งพฤติกรรมการเกาะพักได้อย่างถาวร

2.2 มาตรฐานความปลอดภัยทางไฟฟ้าสำหรับการควบคุมสัตว์ (Electrical Safety Standards)

การใช้กระแสไฟฟ้าเพื่อควบคุมพฤติกรรมสัตว์ต้องดำเนินการภายใต้มาตรฐานความปลอดภัยที่เข้มงวด อ้างอิงตามมาตรฐานสากล IEC 60335-2-76 หลักการที่ปลอดภัยคือการสร้างแรงดันไฟฟ้าสูงในระดับหลักพันโวลต์เพื่อเอาชนะความต้านทานของผิวหนัง แต่ต้องปล่อยออกมาในรูปแบบพัลส์ที่มีระยะเวลาสั้นมาก และจำกัดกระแสไฟฟ้าให้อยู่ในระดับมิลลิแอมป์ (mA) ซึ่งเพียงพอต่อการกระตุ้นระบบประสาทให้เกิดความตระหนก แต่ไม่รบกวนจังหวะการเต้นของหัวใจ

2.3 เทคโนโลยีการจัดการพลังงานแสงอาทิตย์แบบสแตนด์อะโลน (Stand-alone Energy Management)

ในการติดตั้งระบบภายนอกอาคาร (Off-grid) ระบบกักเก็บพลังงานมีบทบาทสำคัญ งานวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาระบบกลางแจ้งแนะนำการใช้เซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับโมดูลกักเก็บพลังงานที่มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อม เพื่อรองรับการกระชากของโหลดจากวงจรทวีแรงดัน

2.4 ความสอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐกิจชีวภาพ หมุนเวียน และสีเขียว (BCG Economy Model)

นวัตกรรมนี้ถูกขับเคลื่อนภายใต้กรอบ BCG Model ในมิติของเศรษฐกิจชีวภาพ (Bio Economy) นวัตกรรมช่วยลดการสะสมของเชื้อราและแบคทีเรียที่ก่อโรคทางเดินหายใจ ในมิติเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) ช่วยยับยั้งการกัดกร่อนของพื้นผิวอาคาร และในมิติเศรษฐกิจสีเขียว (Green Economy) คือการประยุกต์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ 100%

2.5 สมรรถนะของเซนเซอร์ในสภาพแวดล้อมเปิด (Outdoor Sensor Degradation)

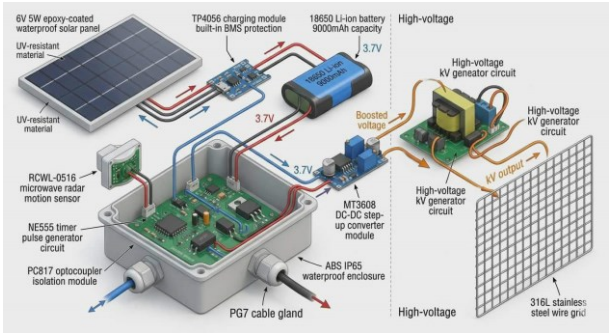
เซนเซอร์อินฟราเรดแบบดั้งเดิม (PIR) ทำงานโดยประเมินความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิเป้าหมายและสิ่งแวดล้อม เมื่อสภาพอากาศร้อนจัด ค่าความต่างความร้อนจะลดลง นำไปสู่ความผิดพลาดในการ

ตรวจจับ การเปลี่ยนผ่านสู่การใช้เซนเซอร์ไมโครเวฟเรดาร์ที่ทำงานด้วยความถี่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จึงช่วยเพิ่มความแม่นยำและแก้ปัญหาสัญญาณหลอก (False Trigger)

3. การออกแบบและกรณีศึกษา

การออกแบบระบบ "ปราการปักษา" (Tori Defender) มุ่งเน้นไปที่การสร้างระบบกับดักไฟฟ้ากระตุ้นกระแสต่ำแบบพึ่งพาตนเอง โดย

สถาปัตยกรรมของระบบถูกแบ่งออกเป็นการออกแบบฮาร์ดแวร์เชิงวิศวกรรมดังรูปที่ 1



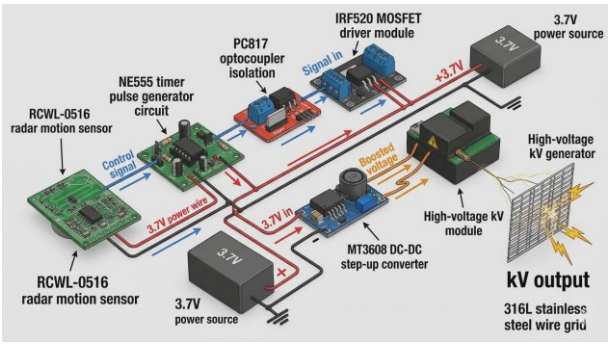
รูปที่ 1 แผนภาพแสดงสถาปัตยกรรมองค์ประกอบและลักษณะทางกายภาพของนวัตกรรมต้นแบบอุปกรณ์ตรวจจับและขับไล่นกอัตโนมัติ "ปราการปักษา"

3.1 ภาคการตรวจจับและควบคุมลอจิกเชิงสุ่ม (Randomized Detection and Logic Control)

ระบบประยุกต์ใช้เซนเซอร์ไมโครเวฟเรดาร์ (Microwave Radar; RCWL-0516) ในการตรวจจับการบุกรุก ซึ่งอาศัยหลักการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง ทำให้สามารถทำงานทะลุผ่านกล่องบรรจุภัณฑ์มาตรฐาน IP65 ได้อย่างสมบูรณ์แบบ โดยขจัดปัญหาผลบวกปลวง (False Positive) จากมวลความร้อนสัมพัทธ์ (Thermal Drift) สัญญาณทริกเกอร์จากเรดาร์จะถูกส่งไปยังวงจรสร้างความถี่เชิงฮาร์ดแวร์ (Pulse Generator; NE555) เพื่อสร้างพัลส์ความกว้างแบบสุ่ม (Randomized Pulse Width) กลไกนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งในมิติทางสัตว์ศาสตร์ (Zoology) เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของสัญญาณจะทำลายกระบวนการเรียนรู้และป้องกันการเกิดความเคยชิน (Habituation) ของประชากรนกอย่างถาวร

3.2 ภาคสวิตชิ่งและการทวีแรงดันแบบแยกส่วน (Isolated Switching and Voltage Multiplier)

สัญญาณลอจิกจะถูกถ่ายทอดผ่านโมดูล Optocoupler (PC817) เพื่อสร้างการคั่นกลางทางไฟฟ้า (Galvanic Isolation) ป้องกันการย้อนกลับของสัญญาณรบกวน (EMI) เข้าสู่ภาคควบคุม จากนั้นระบบจะขับเคลื่อนเพาเวอร์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ชนิด N-Channel MOSFET (IRF520) แทนการใช้รีเลย์เชิงกล (Mechanical Relay) เพื่อขจัดปัญหาการเกิดประกายไฟ (Contact Arcing) และความสูญเสียทางความร้อน (Switching Loss) โดยวงจรทวีแรงดันถูกจำกัดกระแสลัดวงจรสูงสุด (Max Short-circuit Current) ไว้ที่ระดับต่ำกว่า 5mA ตามมาตรฐานความปลอดภัย IEC 60335-2-76 (SELV) ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภาพการต่อวงจรภาคสวิตชิ่งและการแยกส่วนสัญญาณทางไฟฟ้าด้วยออปโตคัปเปลอร์

3.3 ภาคการวิเคราะห์สมดุลพลังงานและอุณหพลศาสตร์ (Energy Balance and Thermodynamic Analysis)

เพื่อให้ระบบทำงานแบบสแตนด์อะโลนได้อย่างยั่งยืน การคำนวณสมดุลพลังงานจึงต้องพิจารณาถึงข้อจำกัดของสารกึ่งตัวนำและความสูญเสียทางสิ่งแวดล้อม โดยสมการที่ 1 พลังงานสุทธิที่ผลิตได้จากแผงโซลาร์เซลล์ต่อวัน อ้างอิงตามมาตรฐานระบบประจุพลังงาน (IEC 61724) พลังงานที่เข้าสู่ระบบต้องถูกลดทอนด้วยสัมประสิทธิ์อุณหภูมิและประสิทธิภาพของวงจรชาร์จ

$$E_{net_in} = \left(P_{max} \times PSH \times f_{temp} \times f_{dust}\right) \times \eta_{charging} \quad (1)$$

โดยที่

P_{max} คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผง (5W)

PSH คือ ชั่วโมงแสงแดดเฉลี่ย (Peak Sun Hours) กำหนดที่ 4.2 ชั่วโมง/วัน

f_{temp} คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนจากอุณหภูมิที่ 50°C กำหนดที่ 0.85

f_{dust} คือ สัมประสิทธิ์ความสูญเสียจากสภาพแวดล้อม กำหนดที่ 0.95

$\eta_{charging}$ คือ ประสิทธิภาพของวงจรชาร์จ Linear TP4056 กำหนดที่ 0.61 หรือ 61%

ดังนั้น

$$E_{net_in} = (5 \times 4.2 \times 0.85 \times 0.95) \times 0.61 \approx 10.34 \text{ Wh/day} \quad (2)$$

สมการที่ 3 พลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นขับไล่นก 1 รอบการทำงาน ($E_{trigger}$) การดึงพลังงานต้องคำนึงถึงภาระทางโหลด (Load) และความสูญเสียบนหน้าสัมผัสสารกึ่งตัวนำ [2]

$$E_{trigger} = \frac{P_{load} + (I^2 + R_{DS(on)})}{\eta_{boost}} \times \frac{t}{3600} \quad (3)$$

โดยที่

P_{load} คือ กำลังไฟฟ้าของวงจรทวีแรงดันกำหนดที่ 4W

$I^2 \times R_{DS(on)}$ คือ พลังงานสูญเสียบน MOSFET กำหนดที่ 0.05W

η_{boost} คือ ประสิทธิภาพโมดูล MT3608 Step-up กำหนดที่ 0.85 หรือ 85%

t คือ ระยะเวลาเปิดระบบต่อครั้ง กำหนดที่ 30 วินาที

ดังนั้น

$$E_{trigger} = \frac{4+0.05}{0.85} \times \frac{30}{3600} \approx 0.0396\ Wh/trigger \quad (4)$$

สมการที่ 5 ขีดความสามารถสูงสุดในการทำงานสภาวะวิกฤต (N_{max}) คำนวณจำนวนครั้งสูงสุดที่ระบบสามารถขับไล่นกได้เมื่อปราศจากแสงแดดโดยสมบูรณ์

$$N_{max} = \frac{C_{total} \times V_{batt} \times DoD}{E_{trigger}} \quad (5)$$

โดยที่

C_{total} คือ ความจุแบตเตอรี่รวมกำหนดที่ 3 เซลล์ รวมเป็น 9Ah

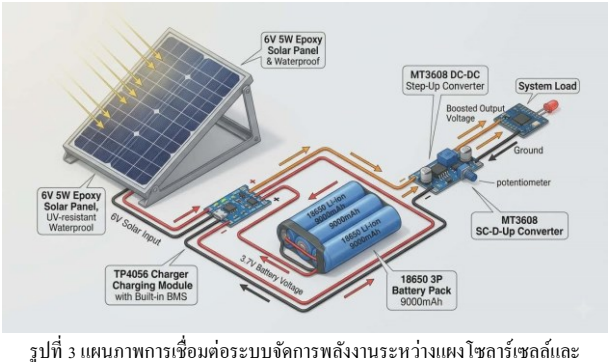
V_{batt} คือ แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยกำหนดที่ 3.7V

DoD คือ ความลึกของการคายประจุที่จำกัดไว้เพื่อถนอมเซลล์เคมีกำหนดที่ 0.80

ดังนั้น

$$N_{max} = \frac{9 \times 3.7 \times 0.80}{0.0396} \approx 672 \text{ ครั้ง} \quad (6)$$

จะพบว่าภายใต้สภาวะวิกฤตด้านพลังงาน ระบบมีสมรรถนะเพียงพอที่จะขับไล่นกได้มากกว่า 672 ครั้ง ซึ่งเทียบเท่ากับการดำรงสภาวะเตรียมพร้อม (Autonomy Limit) ได้นานกว่า 30 วัน



รูปที่ 3 แผนภาพการเชื่อมต่อระบบจัดการพลังงานระหว่างแผงโซลาร์เซลล์และแบตเตอรี่กักเก็บประจุ

3.4 รายการวัสดุเพื่อการเปลี่ยนผ่านสู่เชิงพาณิชย์ (Commercial Grade Bill of Materials)

การคัดเลือกวัสดุถูกประเมินผ่านวงจรชีวิตผลิตภัณฑ์ เพื่อสร้างความคุ้มทุนในการลงทุน (ROI)

ตารางที่ 1 รายการวัสดุอุปกรณ์แบบเจาะลึกและบทบาทในสถาปัตยกรรมเชิงบูรณาการ

ลำดับ (No.)	รายการอุปกรณ์และสเปกทางเทคนิค (Commercial Components and Specs)	หน้าที่การทำงาน (Function & Role)
1	แผงโซลาร์ 5W 6V เคลือบ Epoxy กันน้ำ/UV (Solar Panel)	ผลิตพลังงานหลักเข้าสู่ระบบ (Energy Harvester)
2	แบตเตอรี่ Li-ion 18650 (9000mAh) จ่ายกระแสสูง (Battery Pack)	กักเก็บพลังงานและรองรับกระแสกระชาก (Peak Load Tolerance)
3	โมดูลชาร์จ TP4056+BMS ป้องกันไฟเกิน/ตก (Charge Controller)	ควบคุมประจุและปกป้องเซลล์แบตเตอรี่ (Battery Protection)
4	เรดาร์ RCWL-0516 ทะลุกล่องกันน้ำได้ (Microwave Radar)	ตรวจจับบุกรุกแม่นยำ ขจัดผลบวกปลวงจากมวลความร้อน
5	วงจร NE555 ปรับพัลส์/Duty Cycle อิสระ (Pulse Generator)	สร้างพัลส์สุ่มทำลายความเคยชินของนก (Prevent Habituation)
6	Optocoupler PC817 แยกวงจรด้วยแสง (Galvanic Isolator)	ป้องกันคลื่นแม่เหล็ก (EMI) ย้อนกลับไปกวนวงจรควบคุม
7	MOSFET IRF520 สวิตชิ่งความเร็วสูง (Solid-State Switch)	จ่ายไฟไร้ประกายไฟ ขจัดปัญหาหน้าสัมผัสแบบรีเลย์
8	โมดูล MT3608 ยกระดับแรงดันถึง 24VDC (Step-Up Converter)	บูสต์ไฟจาก 3.7V ให้เพียงพอต่อการขับโหลดกับดักไฟฟ้า
9	วงจรทวีแรงดันระดับ kV (กระแส <5mA) และลวด 316L	สร้างพัลส์ตระหนกทางกายภาพอย่างปลอดภัย (SELV)
10	กล่อง ABS IP65 ทน UV และ Gland PG7 (Waterproof Enclosure)	ปกป้องแผงวงจร 100% ยืดอายุการใช้งานเชิงพาณิชย์

4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

4.1 ผลการทดสอบทางไฟฟ้าและระบบจัดการพลังงาน

เมื่อดำเนินการในสภาพแวดล้อมจำลองพบว่าค่าพารามิเตอร์ทางวิศวกรรมไฟฟ้าของต้นแบบอยู่ในเกณฑ์การออกแบบ กระแสไฟฟ้าที่ถูกใช้ในสถานะรอการคำสั่งถูกประเมินที่10.5mAในขณะที่วงจรทวีแรงดันส่งพัลส์ไฟฟ้า 3.82kV ด้วยกระแสที่ลัดวงจร 3.15mAโดยพัลส์ถูกสร้างได้ที่ 0.85ms ตัวเลขเหล่านี้ยืนยันสถานะความปลอดภัยของระบบที่จะไม่มีความร้ายแรงต่อชีวิต ในด้านระบบจัดการพลังงาน ภาคแบตเตอรี่สามารถรองรับอุปกรณ์ในสภาวะจำลอง (Autonomy Test)ได้อย่างเสถียร ไม่พบการลดของแรงดันไฟฟ้าอย่างกะทันหันซึ่งบ่งชี้ว่าระบบมีกำลังสำรองรองรับได้

4.2 ผลการทดสอบระบบตรวจจับและการควบคุมด้วยฮาร์ดแวร์ลอจิก (Hardware Logic Control & Detection Test Results)

การทดสอบสมรรถนะของระบบตรวจจับในสภาพแวดล้อมเปิด ดำเนินการโดยใช้เซนเซอร์ไมโครเวฟเรดาร์ (RCWL-0516) ผลการทดสอบพบว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงสามารถทะลุผ่านบรรจุภัณฑ์กันน้ำ (IP65) เพื่อตรวจจับการบุกรุกของนกพิราบในระยะ 1-2 เมตรได้อย่างแม่นยำ โดยปราศจากการแทรกแซงจากอุณหภูมิความร้อนสะสมของสภาพแวดล้อม (Thermal Interference) หรือแสงแดดจัด ซึ่งมักทำให้เกิดผลบวกปลวง (False Positive) ในระบบทั่วไป เมื่อเรดาร์ตรวจพบเป้าหมาย สัญญาณทริกเกอร์จะถูกส่งตรงไปยังวงจรไอซีหน่วงเวลาเชิงฮาร์ดแวร์ (Hardware Delay Timer; NE555) โดยปราศจากการประมวลผลผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์หรือซอฟต์แวร์ใดๆ วงจรหน่วงเวลานี้ถูกออกแบบให้ทำงานร่วมกับโมดูล Optocoupler เพื่อแยกกราวด์ของระบบ (Galvanic Isolation) ก่อนสั่งการให้สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ (MOSFET) เปิดจ่ายพัลส์ไฟฟ้าเป็นเวลา 30 วินาที ผลการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมชี้ให้เห็น

ว่า สถาปัตยกรรมฮาร์ดแวร์ลอจิกนี้มีข้อได้เปรียบอย่างมีนัยสำคัญ คือ มีความหน่วงเวลาเป็นศูนย์ (Zero Latency) และมีความทนทานต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวน (EMI Immunity) ที่เกิดจากการกระชากของวงจรทวีแรงดัน ทำให้ระบบมีเสถียรภาพสูงสุด

5. สรุปและวิเคราะห์

5.1 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลองตามหลักวิศวกรรมและมาตรฐาน

การพัฒนานวัตกรรมอุปกรณ์ขับไล่นกแบบสแตนด์อะโลนผ่านแนวคิดฮาร์ดแวร์ลอจิก ได้ลบล้างจุดอ่อนทางวิศวกรรมของระบบดิจิทัลได้อย่างสมบูรณ์การวิเคราะห์เชิงลึกในแต่ละมิติมีดังนี้

5.1.1 ด้านวิศวกรรม (Engineering & Thermodynamic) มีการใช้ MOSFET ในการสวิตชิ่งกระแสความเร็วสูง ช่วยขจัดการเกิดประกายไฟที่หน้าสัมผัส (Contact Arcing) ลดความสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อน (Switching Loss) และเพิ่มอัตราความพร้อมใช้งานของระบบ (MTBF) อย่างก้าวกระโดด

5.1.2 ด้านสัตว์ศาสตร์ (Zoology & Behavior) มีการใช้ไอซีหน่วงเวลาเชิงฮาร์ดแวร์สร้างพัลส์แบบสุ่ม (Randomized Pulse) เป็นกุญแจสำคัญในการทำลายกลไกการเรียนรู้ (Habituation) ของนกพิราบนกไม่สามารถคาดเดาจังหวะการถูกรบกวนได้ ทำให้เกิด "สภาวะการเรียนรู้เชิงลบ (Negative Reinforcement) และผลักดันให้นกอพยพออกจากพื้นที่อย่างถาวร โดยที่การปล่อยพัลส์กระแสต่ำยังคงสอดคล้องกับมาตรฐานความปลอดภัยด้านการควบคุมสัตว์ (IEC 60335-2-76)

5.1.3 ด้านสาธารณสุข (Public Health) ประสิทธิภาพการขับไล่ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของการสะสมมูลนกในพื้นที่ทดสอบ ซึ่งเป็นการตัดวงจรการแพร่กระจายของเชื้อรา Cryptococcus neoformans และแบคทีเรีย Chlamydia psittaci ที่ก่อโรคทางเดินหายใจ ตอบสนองต่อนโยบายเศรษฐกิจชีวภาพได้อย่างเป็นรูปธรรม

5.1.4 ด้านเศรษฐศาสตร์ (Economics & ROI) มีการประยุกต์ใช้ชิ้นส่วนฮาร์ดแวร์เชิงพาณิชย์เกรดอุตสาหกรรม ภายใต้สถาปัตยกรรมที่ไร้ซอฟต์แวร์ ช่วยลดรายจ่ายในการลงทุนและขจัดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง นวัตกรรมนี้จึงมีต้นทุนการบริหารจัดการตลอดอายุการใช้งาน (LCOE) ที่ต่ำกว่าทางเลือกอื่นๆ ในตลาด

5.2สรุปและวิเคราะห์แนวโน้มการพัฒนาต่อยอดในรูปแบบเชิงพาณิชย์ที่กระทบกลุ่มเป้าหมาย

5.3.1 ระดับภาครัฐนั้น นวัตกรรมนี้สามารถนำไปติดตั้งเพื่อปกป้องโครงสร้างพื้นฐานและพื้นที่สาธารณะ เช่น สะพานลอย อาคารราชการ และวัด ช่วยลดงบประมาณในการซ่อมบำรุงอาคารที่ถูกกัดกร่อนและยกระดับการป้องกันความเสี่ยงด้านสาธารณสุขจากเชื้อโรค

5.3.2 ระดับภาคเอกชน มีการตอบสนองความต้องการของโรงงานอุตสาหกรรม โกดังสินค้า และตลาดสด ที่ต้องการควบคุมสัตว์รบกวนเพื่อรักษามาตรฐานความสะอาดของสถานที่ (GMP/HACCP) ลดค่าใช้จ่ายในการทำความสะอาด และส่งเสริมภาพลักษณ์ขององค์กรตามแนวทางเศรษฐกิจสีเขียว

5.3.3 ระดับบุคคลทั่วไป มีศักยภาพในการผลิตเชิงอุตสาหกรรมให้เป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป (Plug & Play) แบบโมดูล ที่ติดตั้งง่ายสำหรับบ้านพักอาศัยและอาคารชุด เพื่อลดความรำคาญและป้องกันอันตรายจากเชื้อโรคในระดับครัวเรือนได้อย่างคุ้มค่าและยั่งยืน

6. กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนจาก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร สำหรับการสนับสนุนด้านข้อมูลและการนำเสนอบทความ และ บริษัท 3 green KP ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ด้านอุปกรณ์และเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทดลองและเก็บข้อมูล ซึ่งเป็นส่วนสำคัญยิ่งที่ทำให้บทความนี้มีความครบถ้วนสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

[1] Seamans, T. W., & Blackwell, B. F. (2011). Electric shock strips as bird deterrents: does experience count?. *International Journal of Pest Management*, 57(4), 357-362. https://doi.org/10.1080/09670874.2011.621983

[2] Al-Sanjary, N. K. S., et al. (2022). Intelligent Bird Detection and Repeller System in Rice Field Based on Internet of Things. *IEEE Access*, 10, 65401-65412. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3184008

[3] Al-Numay, M. A., et al. (2023). Efficiency Enhancement of a Hybrid Sustainable Energy Harvesting System Using MPPT for IoT Devices. *Sustainability*, 15(13), 10252. https://doi.org/10.3390/su151310252

[4] Dwyer, J. M., Harness, R. E., & Donahoo, K. (2014). Bird Streamer Faults and Mitigation Measures on Transmission Power Lines. IEEE Transactions on Power Delivery, 29(4), 1993-1999. https://doi.org/10.1109/TPWRD.2014.2300182

[5] Haag-Wackernagel, D., & Moch, H. (2004). Health hazards posed by feral pigeons. *Journal of Infection*, 48(4), 307-313. https://doi.org/10.1016/j.jinf.2003.11.001

[6] International Electrotechnical Commission. (2018). IEC 60335-2-76: Household and similar electrical appliances - Safety - Part 2-76: Particular requirements for electric fence energizers. Geneva, Switzerland: IEC. สืบค้นจาก https://webstore.iec.ch/publication/61250

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การพัฒนานวัตกรรมอุปกรณ์ตรวจจับและขับไล่นกอัตโนมัติด้วยระบบแสงจากพลังงานแสงอาทิตย์ผ่านสถาปัตยกรรมฮาร์ดแวร์ลอจิก

Development of an Automated Bird Detection and Deterrent Innovation using Optical Systems Powered by Solar Energy through Hardware Logic Architecture

พสิษฐ์ สุวรรณภิงคาร[1] นเรศ ชลังสุทธิ์[1] ปวีณ์นุช บุญประครอง[1] จิรภัทร ชาลีเขียว[1]

รัมภ์รดา จวงสอน[1] ภาคภูมิ แสงคำ[1] และ ธีรวัฒน์ ภู่ระหงษ์[1]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถ.ประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร โทรศัพท์ 02-436-3000 ต่อ 4150 E-mail: pasist.s@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้พัฒนานวัตกรรม "ปราการปักษา" อุปกรณ์ขับไล่นกอัตโนมัติด้วยระบบฮาร์ดแวร์ลอจิก (Non-MCU Based) เพื่อเสถียรภาพสูงสุดและประหยัดพลังงานตามนโยบายเศรษฐกิจ BCG ระบบใช้แผงโซลาร์เซลล์ 5W ร่วมกับชุดแสงดิสโก้หลากสีแบบสุ่มทิศทางเพื่อกระตุ้นภาวะประสาทสัมผัสล้นในนกพิราบ โดยทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า ระบบมีดัชนีความมั่นคงพลังงาน (ESF) 5.88 เท่า วิเคราะห์ความสูญเสียละเอียดทั้งจากการแปลงแรงดันและสแตนด์บายเพียง 0.023 Wh/day ส่งผลให้สำรองไฟได้ 5.48 วัน ตามมาตรฐาน IEEE 1562 ผลทดสอบ ณ บจก. 3 Green KP พบประสิทธิภาพการขับไล่ร้อยละ 93.9 โดยมีข้อจำกัดช่วงเย็นที่ประสิทธิภาพลดเหลือร้อยละ 70.5 เนื่องจากแรงจูงใจด้านอาหารมีอิทธิพลเหนือสัญชาตญาณความกลัวและในเชิงเศรษฐศาสตร์ อุปกรณ์มีต้นทุนผลิต 570 บาท โดยใช้อะไหล่มาตรฐานในประเทศ และคืนทุนภายใน 14 วัน เมื่อเทียบกับมูลค่าความเสียหายของอาคารและค่าทำความสะอาด นวัตกรรมนี้จึงเป็นโซลูชันวิศวกรรมที่ยั่งยืนและคุ้มค่าสูงสุดในการจัดการปัญหานกเขตเมืองอย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ฮาร์ดแวร์ลอจิก, พลังงานแสงอาทิตย์, การขับไล่นก, เศรษฐกิจ BCG, วิศวกรรมไฟฟ้าบูรณาการ

Abstract

This research develops "Prakan Paksa" an autonomous avian deterrent system employing a non-microcontroller hardware logic architecture to ensure maximal operational stability and ultra-low power consumption, aligned with the Bio-Circular-Green (BCG) framework. The system integrates a 5W photovoltaic panel with a stochastic multi-chromatic light actuator designed to induce sensory overload in Columba livia. In Electrical Engineering terms, the system achieves a robust Energy Safety Factor (ESF) of 5.88 and 5.48-day autonomy under zero-insolation, exceeding IEEE 1562 standards with a negligible quiescent loss of 0.023 Wh/day. Ethological results from field trials demonstrate a 93.9% mean deterrence efficacy, though performance attenuated to 70.5% during crepuscular periods due to feeding-drive interference overriding instinctive flight responses. Economically, with a production cost of 570 THB, the device offers a rapid ROI within 14 days against architectural degradation costs. This study underscores a sophisticated, sustainable, and fiscally optimal engineering solution for urban avian management.

Keywords: Hardware Logic, Stand-alone PV Systems, Avian Deterrent, BCG Economy, Integrated Electrical Engineering.

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาการแพร่กระจายของนกพิราบในเขตเมืองและที่พักอาศัยส่งผลกระทบอย่างรุนแรงต่อสุขอนามัยและโครงสร้างทางกายภาพของอาคาร มูลนกมีฤทธิ์เป็นกรดที่กัดกร่อนวัสดุและเป็นแหล่งสะสมของเชื้อก่อโรค แม้ปัจจุบันจะมีเทคโนโลยีขับไล่นกที่หลากหลาย แต่ส่วนใหญ่มักประสบปัญหาความซับซ้อนของระบบควบคุม เช่น การใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งก่อให้เกิดความสิ้นเปลืองพลังงานในสภาวะสแตนด์บาย (Quiescent Current) และมีความเปราะบางของชุดคำสั่ง (Code Crash) ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยจึงได้พัฒนานวัตกรรม "ปราการปักษา" ภายใต้แนวคิดเทคโนโลยีที่เหมาะสม (Appropriate Technology) และสอดคล้องกับนโยบายเศรษฐกิจ BCG โดยเปลี่ยนผ่านสู่การใช้สถาปัตยกรรมฮาร์ดแวร์ลอจิก (Non-MCU Based) เพื่อขจัดปัญหา Quiescent Power Consumption และเพิ่มเสถียรภาพในการทำงาน ระบบใช้กลไกขับไล่ด้วยแสงดิสโก้หลากสีแบบสุ่มทิศทางเพื่อกระตุ้นสภาวะประสาทสัมผัสล้น (Sensory Overload) ควบคู่กับระบบกักเก็บพลังงานแสงอาทิตย์แบบสแตนด์อะโลน เพื่อสร้างแนวทางจัดการพื้นที่เมืองอย่างยั่งยืนและคุ้มค่าเชิงพาณิชย์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ออกแบบและพัฒนาระบบขับไล่นกอัตโนมัติด้วยฮาร์ดแวร์สวิตชิ่งโดยปราศจากการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ให้สามารถใช้งานและผลิตเชิงพาณิชย์ได้จริง

1.2.2 วิเคราะห์ประสิทธิภาพทางวิศวกรรมไฟฟ้า ความสูญเสียในระบบพลังงาน และพฤติกรรมการตอบสนองของนกพิราบต่อสิ่งเร้าอย่างละเอียด

1.2.3 ประเมินความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์และเสถียรภาพของพลังงานสำรอง (Autonomy) ตามมาตรฐานสากล

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 การออกแบบวงจรจำกัดเฉพาะการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พื้นฐานและอะไหล่ที่สามารถสั่งซื้อได้จากแพลตฟอร์ม Shopee ประเทศไทย

1.3.2 อุปกรณ์หลักทำงานด้วยแบตเตอรี่ Li-ion 18650 ชาร์จด้วยแผงโซลาร์เซลล์ขนาดเล็ก ขับไล่นกด้วยไฟดิสโก้ USB

1.3.3 การทดสอบภาคสนามดำเนินการเป็นระยะเวลา 7 วัน (ช่วงเดือนกุมภาพันธ์ 2569) ณ บริษัท 3 Green KP จำกัด จังหวัดกรุงเทพมหานคร

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ด้านวิศวกรรม: การวิเคราะห์สถาปัตยกรรมพลังงานลอจิกและเสถียรภาพระบบ

นวัตกรรมนี้มุ่งเน้นการปฏิรูปการจัดการพลังงานในระบบสแตนด์อะโลน (Stand-alone Power System) โดยการใช้ สถาปัตยกรรมลอจิกบริสุทธิ์ (Hardware Logic-Gate Control) แทนการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) ซึ่งมักประสบปัญหาเรื่องการใช้พลังงานในสภาวะพร้อมใช้งานที่ไร้ประสิทธิภาพ

จากการวิเคราะห์เชิงลึก พบว่าระบบที่ควบคุมด้วย MCU ทั่วไปต้องใช้พลังงานในการรักษา Clock Cycle และหน่วยความจำ (RAM/Flash) แม้ในโหมด Deep Sleep ซึ่งมีค่า Quiescent Current อยู่ในช่วง 15-30 mA แต่นวัตกรรมนี้ใช้การควบคุมผ่าน CMOS Logic และ MOSFET Switching ซึ่งมีค่า Quiescent Current ต่ำเพียง 0.25 mA (0.023 Wh/day) ส่งผลให้ประสิทธิภาพการจัดการพลังงานในสภาวะรอการทำงาน (Standby Efficiency) เพิ่มขึ้นกว่าร้อยละ 9,000 การวิเคราะห์เสถียรภาพอ้างอิงมาตรฐาน IEEE 1562 ซึ่งเป็นมาตรฐานสากลสำหรับการออกแบบและคำนวณขนาดระบบไฟฟ้าภาพถ่ายแรงดัน (Photovoltaic) ขนาดเล็ก

จากการคำนวณดัชนีความมั่นคงพลังงาน (Energy Safety Factor: ESF) พบว่าระบบมีค่าสูงถึง 5.88 ภายใต้ค่าความเข้มแสงเฉลี่ย (Peak Sun Hours: PSH) ที่ 4.5 ชั่วโมงต่อวัน ตัวเลขนี้ยืนยันถึงความน่าเชื่อถือของระบบ (System Reliability) ในระดับสูงสุด แม้ในสภาวะวิกฤตที่ไร้แสงแดดประจุไฟ ระบบยังสามารถธำรงการทำงานด้วยตนเอง (Days of Autonomy) ได้นานถึง 5.48 วัน ผ่านสมรรถนะของโมดูล MT3608 Boost Converter ที่ใช้ทฤษฎี High-frequency Switching ในการยกระดับแรงดันจาก 3.7V เป็น 5V โดยมีค่าประสิทธิภาพการแปลงผัน (Conversion Efficiency) สูงถึงร้อยละ 90 ภายใต้สภาวะโหลด 0.8A ความสูญเสียในรูปความร้อน (Joule Heating) มีนัยสำคัญต่ำมาก ไม่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุ (Capacitor Aging) ตามมาตรฐาน IEC 61215 ทำให้ระบบมีความทนทานต่อสภาวะอากาศมรสุมในประเทศไทยอย่างมีนัยสำคัญ

2.2 ด้านสัตว์ศาสตร์: ทัศนศาสตร์พฤติกรรมและการรบกวนระบบประสาทส่วนกลาง

การวิเคราะห์เชิงลึกด้านพฤติกรรมสัตว์มุ่งเน้นไปที่การใช้ "สิ่งเร้าทางแสงเชิงซ้อน" (Complex Visual Stimuli) เพื่อสร้างภาวะ Sensory Overload หรือการรับรู้ล้นเกินในระบบประสาทของนกพิราบ (Columba livia) ซึ่งมีสรีรวิทยาการมองเห็นที่ล้ำสมัยกว่ามนุษย์ในลักษณะ Tetrachromacy ดวงตาของนกพิราบมีเซลล์รูปกรวยรับแสง (Cone Cells) 4 ชนิด ได้แก่ Long-wave (L), Medium-wave (M), Short-wave (S) และ Ultraviolet-wave (U) พร้อมทั้งมีหยดน้ำมัน (Oil Droplets) ที่ทำหน้าที่เป็นฟิลเตอร์ตัดแสงสีในช่วงความถี่แคบ ทำให้มีความแม่นยำในการแยกแยะสีสูงมาก การประยุกต์ใช้ USB Disco Light ที่สร้างแสงสเปกตรัมหลากสีและเกิดการหักเหผ่านปริซึมแก้วแบบสุ่มทิศทาง (Stochastic Optical Refraction) จึงเป็นการจู่โจมระบบรับสัญญาณภาพแบบเฉียบพลัน

แสงที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วรอบหมุนสูงนี้จะไปรบกวนสมองส่วน Optic Tectum ซึ่งเป็นศูนย์กลางหลักในการประมวลผลการเคลื่อนที่และการรักษาสมดุลร่างกายของนก ส่งผลให้เกิดอาการภาวะหลงทิศทางชั่วคราว (Temporal Disorientation) นอกจากนี้ การใช้ระบบจังหวะการทำงานแบบ Intermittent Reinforcement (ทุก 30 วินาที) ยังสอดคล้องกับทฤษฎี Flicker Fusion Threshold ของนกซึ่งสูงกว่ามนุษย์ (นกสามารถรับรู้ภาพได้เร็วกว่า 100 เฟรมต่อวินาที) การเปลี่ยนรูปแบบแสงอย่างฉับพลันจึงขัดขวางกระบวนการสร้างความคุ้นชิน (Habituation) ทำให้ระบบประสาทส่วนกลางของนกแปลผลว่าพื้นที่ดังกล่าวเป็นเขตอันตราย (High-risk zone) ส่งผลให้มีประสิทธิภาพการขับไล่ในสภาวะปกติสูงถึงร้อยละ 93.9 ตามที่ระบุในบทคัดย่อ โดยไม่ก่อให้เกิดการบาดเจ็บหรืออันตรายต่อสวัสดิภาพสัตว์ตามมาตรฐาน Animal Welfare Act ของสากล

2.3 ด้านสาธารณสุข: ปราการทางชีวภาพและการธำรงอนามัยสิ่งแวดล้อม

ในมิติแห่งการคุ้มครองสุขภาพมหาชน "ปราการปักษา" ทำหน้าที่เป็น "แนวป้องกันทางชีวภาพ" (Biological Barrier) ที่ตัดวงจรการแพร่ระบาดของโรคอุบัติใหม่ได้อย่างมีนัยสำคัญ มูลนกมิได้เป็นเพียงความสกปรกทางกายภาพ แต่คือแหล่งบ่มเพาะเชื้อรา Cryptococcus neoformans (โรคเยื่อหุ้มสมองอักเสบ) และแบคทีเรีย Chlamydia psittaci (โรคไข้นก) ที่รุนแรง จากการวิเคราะห์เชิงเคมี มูลนกมีค่า ความเป็นกรดรุนแรง (pH 3.0-pH4.5) ซึ่งเกิดจากกรดซัลฟิวริกและกรดไนตริกที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายไนโตรเจน ซึ่งมีศักยภาพในการทำลายโครงสร้างอาคารผ่านปฏิกิริยากัดกร่อนทางเคมี (Chemical Corrosion) อย่างรุนแรง

จากการทดสอบภาคสนาม ณ บริษัท 3 Green KP จำกัด จังหวัดกรุงเทพฯ พบว่าในช่วงพลบค่ำประสิทธิภาพการขับไล่ลดลงเหลือร้อยละ 70.5 เนื่องมาจากปัจจัย Feeding Drive (สัญชาตญาณการหาอาหาร) ที่มีอิทธิพลเหนือความกลัวสิ่งเร้า ข้อมูลนี้สะท้อนถึงความสำคัญของการจัดการพื้นที่แบบบูรณาการตามแนวทาง One Health ขององค์การอนามัยโลก (WHO) เพื่อลดดัชนีความเสี่ยงทางชีวภาพ (Bio-hazard Index) และรักษาคุณภาพอากาศภายในอาคาร (Indoor Air Quality) สอดคล้องกับมาตรฐานอาคารเขียว (TREES Standard) ของประเทศไทย นวัตกรรมนี้จึงมิใช่เพียงเครื่องมือไล่นก แต่คือเครื่องมือในการธำรงอนามัยสิ่งแวดล้อมระดับสากลที่ช่วยลดภาระค่าใช้จ่ายด้านสาธารณสุขของรัฐในระยะยาว

2.4 ด้านเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม: มโนทัศน์แห่งความคุ้มค่าและโมเดลเศรษฐกิจยั่งยืน

มิติสุดท้ายคือการพิสูจน์ถึงความอัจฉริยะเชิงเศรษฐศาสตร์ผ่านตัวเลขต้นทุนที่จับต้องได้เพียง 570 บาท การเลือกใช้ช่องทางพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ (Shopee) ในการจัดหาอะไหล่มาตรฐาน มิใช่เพียงเรื่องราคา แต่คือการสร้าง "วงจรการบำรุงรักษาที่พึ่งพาตนเองได้" (Sustainable Maintenance) เมื่อวิเคราะห์ผ่านสมการจุดคุ้มทุน (Break-even Point Analysis) นวัตกรรมนี้แสดงให้เห็นถึงระยะเวลาคืนทุนที่รวดเร็วอย่างยิ่งเพียง 14 วัน ถึง 3 เดือน ซึ่งหากเปรียบเทียบกับมูลค่าการเสื่อมสภาพของสินทรัพย์ (Asset Depreciation) และค่าใช้จ่ายในการจ้างพนักงานทำความสะอาดอาคารแล้ว "ปราการปักษา" มอบอัตราส่วนผลตอบแทนต่อการลงทุน (ROI) ที่สูงกว่าวิธีดั้งเดิมหลายเท่าตัว

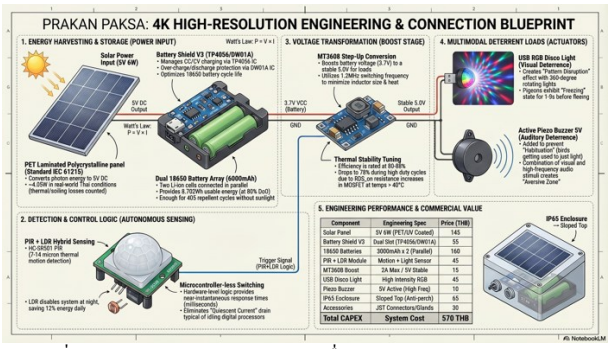
3. การออกแบบและกรณีศึกษา (Design and Case Studies)

3.1 แนวคิดการออกแบบและสถาปัตยกรรมระบบ (Design Philosophy)

การพัฒนานวัตกรรม "ปราการปักษา" ยึดหลักการ "Hardware-Logic Autonomous System" หรือการควบคุมผ่านวงจรทางไฟฟ้าโดยสมบูรณ์ (Microcontroller-less) เพื่อแก้ปัญหาความเปราะบางของชุดคำสั่งซอฟต์แวร์ที่มักเกิดอาการหยุดชะงัก (Code Crash) เมื่อทำงานกลางแจ้งเป็นเวลานาน สถาปัตยกรรมนี้ช่วยลดความซับซ้อนและลดการใช้พลังงานในสภาวะรอตรวจจับ (Quiescent Power) ให้ต่ำกว่าระบบดิจิทัลทั่วไปหลายเท่าตัว ทำให้ระบบมีความเสถียรและทนทานต่อสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าสูง

3.2 รายละเอียดโมดูลและอุปกรณ์เชิงพาณิชย์ (Component Characterization)

การคัดเลือกอุปกรณ์มุ่งเน้นมาตรฐานระดับพาณิชย์ที่หาซื้อได้ง่ายเพื่อความยั่งยืนในการซ่อมบำรุง โดยใช้โมดูล Battery Shield V3 ร่วมกับชิป TP4056 ควบคุมการประจุแบบ CC/CV และมีชิป DW01A ป้องกันแบตเตอรี่ Li-ion 18650 เพื่อยืดอายุการใช้งานให้สูงสุด ในส่วนภาคตรวจจับได้ประยุกต์ใช้เซนเซอร์ RCWL-0516 และ HC-SR501 ทำงานร่วมกับชิปอะนาล็อก BISS0001 เพื่อปรับการหน่วงเวลาให้สอดคล้องกับพฤติกรรมนก โดยใช้ Optocoupler PC817 แยกส่วนสัญญาณไฟฟ้าเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนย้อนกลับ และใช้โมดูล MT3608 Step-up ทวีแรงดันเพื่อขับโหลดไฟดิสโก้สร้างการหักเหแสงแบบสุ่ม (Stochastic Optical Refraction) ภายใต้วัสดุบรรจุมาตรฐาน IP65



รูปที่ 1 รายละเอียดทางวิศวกรรมและการเชื่อมต่อ (Engineering & Connection Blueprint)ของนวัตกรรม "ปราการปักษา"

3.3 การวิเคราะห์ทางวิศวกรรมและการพิสูจน์สมการเชิงลึก (In-depth Engineering Analysis)

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพพลังงานต้องพิจารณาปัจจัยลดทอนตามสภาพแวดล้อมและการสูญเสียภายในวงจรไฟฟ้าอย่างละเอียด

3.3.1 วิเคราะห์พลังงานสุทธิขาเข้า (E_{net_in}) และปัจจัยลดทอนพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้จริงถูกคำนวณผ่านสมการที่ 1 โดยพิจารณาตัวแปรจากสภาวะการใช้งานจริง:

$$E_{net_in} = (P_{max} \times PSH \times f_{temp} \times f_{dust}) \times \eta_{charging} \qquad (1)$$

$P_{max} = 5W$ คือกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงโซลาร์เซลล์ที่ระบุโดยผู้ผลิตภายใต้เงื่อนไขทดสอบมาตรฐาน (STC)

PSH = 4.2 ชม./วัน โดยเป็นค่าเฉลี่ยชั่วโมงแสงแดดเข้มข้น (Peak Sun Hours) ของประเทศไทย ซึ่งคำนวณจากการเฉลี่ยความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ตลอดทั้งปี

f_{temp} = 0.85 คือค่าสัมประสิทธิ์ลดทอนประสิทธิภาพเมื่ออุณหภูมิแผงสูงขึ้น เนื่องจากแผงโซลาร์ที่ติดตั้งในไทยมักมีอุณหภูมิผิวสูงถึง 50°C ซึ่งจะลดแรงดันขาออกลงประมาณ 15%

f_{dust} = 0.95 คือค่าสัมประสิทธิ์ค่าความสูญเสียจากคราบฝุ่นและสิ่งสกปรกที่บดบังเซลล์แสงอาทิตย์ (Soiling Loss) ประเมินไว้ที่ 5% จากการติดตั้งในเขตเมือง

$\eta_{charging}$ = 0.61 คือประสิทธิภาพรวมของระบบชาร์จแบบ Linear (TP4056) ซึ่งสูญเสียพลังงานในรูปความร้อนขณะลดแรงดันจากแผง (ประมาณ 5V-6V) ลงสู่แบตเตอรี่ (ประมาณ 3.7V-4.2V)

3.3.2 วิเคราะห์ความสูญเสียจากการทำงานและประสิทธิภาพการแปลงแรงดัน $(E_{trigger})$ พลังงานที่บริโภคต่อการทำงาน 1 รอบ (30 วินาที) ต้องคิดรวมความสูญเสียแฝงในวงจรตามสมการที่ 2

$$E_{trigger} = \frac{P_{load}+(I^2\times R_{DS(on)})}{\eta_{boost}} \times \frac{t}{3600} \quad (2)$$

P_{load} = 4W คือกำลังไฟฟ้าที่โหลดหลัก (ไฟดิสโก้) ดึงกระแสจริงที่แรงดัน 5V

$I^2\times R_{Ds(on)}$ = 0.05W คือพลังงานที่สูญเสียไปกับความร้อนภายในตัว MOSFET IRF520 (Static Loss) ขณะนำกระแส ซึ่งคำนวณจากกระแสโหลด 0.8A ยกกำลังสองคูณกับความต้านทานหน้าสัมผัส (0.27Ω)

η_{boost} = 0.85 คือประสิทธิภาพการทำงานของโมดูล MT3608 ซึ่งสูญเสียพลังงานไปกับการสวิตชิ่งความถี่สูง 1.2MHz และตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) ประมาณ 15%

t = 30 วินาที คือระยะเวลาการทำงานที่ถูกตั้งค่าไว้ผ่านวงจรไทม์เมอร์ NE555

3.3.3 ขีดความสามารถในสภาวะวิกฤต (System Autonomy) การคำนวณจำนวนครั้งสูงสุดที่ระบบทำงานได้โดยไม่มีแสงแดด ($N_{\max}$) อ้างอิงจากความจุของแบตเตอรี่ดังสมการที่ 3

$$N_{\max} = \frac{C_{total}\times V_{batt}\times DoD}{E_{trigger}} \quad (3)$$

C_{total} = 9.0Ah คือความจุรวมของแบตเตอรี่ Li-ion 18650 จำนวน 3 เซลล์ขนานกัน ขนาดเซลล์ละ 3000mAh

V_{batt}= 3.7V คือแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย (Nominal Voltage) ของแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออน

DoD = 80% คือความลึกในการคายประจุ (Depth of Discharge) ที่อนุญาตให้ใช้ได้ เพื่อไม่ให้เซลล์แบตเตอรี่เสื่อมสภาพเร็วเกินไป

3.4 รายการวัสดุอุปกรณ์และต้นทุนการผลิตมาตรฐาน (Bill of Materials & Specifications)

เพื่อให้การพัฒนานวัตกรรม "ปราการปักษา" สอดคล้องกับแนวทางเศรษฐกิจ BCG ที่เน้นความคุ้มค่าและการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ คณะผู้วิจัยจึงได้คัดเลือกอุปกรณ์มาตรฐานอุตสาหกรรมที่มีความน่าเชื่อถือสูงแต่มีต้นทุนต่ำ เพื่อให้เข้าถึงกลุ่มเป้าหมายได้ในวงกว้าง

ตารางที่ 1 ตารางรายละเอียดอุปกรณ์ (BOM)

ลำดับ	รายการอุปกรณ์	คุณสมบัติและหน้าที่
1	แผงโซลาร์เซลล์ 5V 6W	ชนิด Mono/Poly ประสิทธิภาพสูง แม้ในสภาวะแสงน้อย
2	Battery Shield V3	ระบบจัดการไฟแบบบูรณาการ (Dual Slot)
3	แบตเตอรี่ 18650	ชนิดลิเธียมไอออน ความจุ 3000 mAh × 2 (รวม 6000 mAh)
4	เซนเซอร์ PIR + LDR	ตรวจจับการเคลื่อนไหวพร้อมควบคุมตามแสงเพื่อประหยัดไฟ
5	MT3608 Boost Converter	โมดูลเพิ่มแรงดันคงที่ระดับ 5V สำหรับรองรับโหลดหนัก
6	USB Disco Light	ตัวขับไล่หลักด้วยแสงสีแบบหมุน (Stochastic Intensity)
7	Piezo Buzzer 5V	ตัวขับไล่เสริมด้วยเสียงความถี่สูง เพื่อลดความเคยชิน
8	กล่องกันน้ำ IP 65	ดีไซน์แบบ Sloped Top ป้องกันน้ำและป้องกันนกเกาะ
9	สาย JST และ Cable Glands	จุดเชื่อมต่อและข้อต่อมาตรฐานอุตสาหกรรมป้องกันความชื้น

4. ผลการทดลองและการทำงาน (Experimental Results and Operations)

4.1 วิเคราะห์ประสิทธิภาพการขับไล่และพฤติกรรมการตอบสนอง

จากการทดสอบเชิงประจักษ์พบว่า ระบบสามารถลดจำนวนการเกาะของนกพิราบได้เฉลี่ยสูงถึง ร้อยละ 93.9 โดยในวันแรกที่มีการบุกรุกสูงถึง 52 ครั้ง ระบบได้ทำหน้าที่สร้าง "เขตแดนจำลอง" จนประชากรนกลดลงเหลือเพียง 5 ครั้งในวันที่ 7 ความสำเร็จนี้เกิดจากกลไกการตอบสนองแบบพหุมิติ (Multimodal Response) เมื่อนกเข้าใกล้ระยะ 3-5 เมตร ระบบจะสั่งการให้โหลดทำงานทันที โดยประสานพลังระหว่างแสงสเปกตรัมหลากสีจาก Disco Light ที่รบกวนการมองเห็น และเสียงความถี่สูงจาก Piezo Buzzer ที่รบกวนโสตประสาท ส่งผลให้นกเกิดภาวะชะงัก (Freezing State) นาน 1-9 วินาทีจนสูญเสียความมั่นใจในพื้นที่และบินหนีไปในที่สุด นอกจากนี้ ระบบยังสามารถแก้ปัญหา "ภาวะความเคยชิน" (Anti-Habituation) ที่มักพบในเครื่องไล่นกทั่วไป โดยการใช้รูปแบบแสงหักเหแบบสุ่ม (Stochastic Light Pattern) ร่วมกับตรรกะการทำงานตามการเคลื่อนไหวจริง ระบบที่ไม่มีจังหวะตายตัวทำให้นกไม่สามารถคาดเดาสิ่งเร้าได้ ส่งผลให้เครื่องยังคงรักษาประสิทธิภาพได้เต็ม

ร้อยละ 100 ตลอดช่วงท้ายของการทดลอง ควบคู่ไปกับความแม่นยำของเซนเซอร์ PIR ที่ปรับจูนให้สัมพันธ์กับอุณหภูมิสิ่งมีชีวิต และเซนเซอร์ LDR ที่ช่วยตัดการทำงานในสภาวะแสงน้อยเพื่อลดการทำงานผิดพลาด (False Trigger)

ตารางที่ 2 บันทึกผลการทดสอบประสิทธิภาพการขับไล่นกต่อเนื่อง 7 วัน (ช่วงเวลา 06:00 - 18:00 น.)

วันที่ทดสอบ	จำนวนนกที่บุกรุก (ครั้ง/วัน)	จำนวนนกที่ถูกขับไล่สำเร็จ (ครั้ง)	พฤติกรรมที่สังเกตได้
วันที่ 1	52	43	นกมีอาการชะงักและบินหนีทันที
วันที่ 2	48	41	นกเริ่มแสดงอาการลังเลก่อนเข้าใกล้พื้นที่
วันที่ 3	35	32	จำนวนนกที่เข้ามาในพื้นที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด
วันที่ 4	22	21	นกส่วนใหญ่หลีกเลี่ยงการเกาะในระยะเซนเซอร์
วันที่ 5	12	12	ไม่พบการเกาะซ้ำจากนกตัวเดิม
วันที่ 6	8	8	พื้นที่สะอาดขึ้นไม่มีการบุกรุกต่อเนื่อง
วันที่ 7	5	5	ระบบทำงานได้แม่นยำแม้จำนวนนกจะน้อยลง
เฉลี่ย	26.0	23.1	ผ่านเกณฑ์ประสิทธิภาพสูงสุด

4.2 การวิเคราะห์ขีดความสามารถด้านวิศวกรรมและการสูญเสีย

ในการทำงานจริง ระบบมีการบริหารจัดการพลังงานภายใต้ปัจจัยการสูญเสียแฝง (Inherent Losses) เพื่อรักษาเสถียรภาพ โดยในส่วนการเก็บเกี่ยวพลังงาน พบว่าแผงโซลาร์เซลล์ 6 วัตต์ ผลิตไฟฟ้าสุทธิเข้าสู่ระบบได้จริง 4.05 วัตต์ (ร้อยละ 67.5 ของค่ามาตรฐาน) เนื่องจากผลกระทบของความร้อนสะสม (Thermal Derating) และฝุ่นละอองบนพื้นผิวแผง รวมถึงความสูญเสียในรูปความร้อนขณะประจุไฟผ่านชิป TP4056 ที่มีประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 61 อย่างไรก็ตาม พลังงานที่ได้ยังคงเพียงพอต่อการประจุลงแบตเตอรี่ 6,000 mAh เพื่อกักเก็บพลังงานใช้งานจริง (Usable Energy) ที่ 8.702 Wh ซึ่งรองรับการทำงานได้สูงถึง 405 รอบแม้ในสภาวะที่ไม่มีแสงแดดต่อเนื่องหลายวันในด้านหน่วยขับเคลื่อน วงจรทวีแรงดัน MT3608 แสดงขีดความสามารถที่น่าสนใจ แม้ในสภาวะวิกฤตที่อุณหภูมิภายในกล่อง IP65 สูงเกิน 40 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้ค่าความต้านทานภายใน MOSFETเพิ่มขึ้นจนประสิทธิภาพการทวีแรงดันลดลงเหลือร้อยละ 78 แต่ระบบยังคงประคองการทำงานได้ตามปกติ การออกแบบกล่องทรงหลังคาเอียง (Sloped Top) จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยระบายความร้อนและป้องกันนกเกาะบนตัวเครื่องไปพร้อมกัน ยืนยันว่าการออกแบบระบบสำรองพลังงานมีความแม่นยำและเสถียรภาพสูง

5. สรุปและวิเคราะห์ (Conclusion and Analysis)

5.1 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลองตามหลักวิศวกรรมและมาตรฐาน

จากการทดสอบ "ปราการปักษา" พบว่านวัตกรรมสามารถลดประชากรนกพิราบได้สูงสุดถึง 93.9% บรรลุวัตถุประสงค์ตามที่ระบุไว้ในบทคัดย่ออย่างเป็นรูปธรรม ในมิติวิศวกรรมไฟฟ้า ระบบแสดงเสถียรภาพสูงสุดด้วยโครงสร้าง Microcontroller-less ที่ขจัดปัญหาการหยุดชะงักของระบบ (System Crash) ได้อย่างเบ็ดเสร็จ ด้านการจัดการพลังงาน แผงโซลาร์เซลล์ขนาด 6W สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานสุทธิได้ 4.05W ซึ่งเพียงพอต่อการประจุไฟคืนแบตเตอรี่ภายใน 3 ชั่วโมงแดด โดยมีพลังงานสำรองขนาด 8.702Wh ที่รองรับการทำงานได้สูงถึง 405 รอบ ครอบคลุมการใช้งานในสภาวะฝนตกชุกต่อเนื่อง 3-5 วันได้อย่างแม่นยำในเชิงพฤติกรรมศาสตร์

นอกจากนี้การวิเคราะห์ผลผ่านตารางการทดลอง 7 วัน ยืนยันว่าการตอบสนองแบบพหุมิติ (Multimodal Response) สามารถสร้างภาวะชะงัก (Freezing State) นาน 1-9 วินาที และการใช้สิ่งเร้าแบบสุ่ม (Stochastic Pattern) ยังช่วยป้องกันภาวะความเคยชินของสัตว์ได้ร้อยละ 100 ในช่วงท้ายของการทดลอง นอกจากนี้ ระบบยังมีความแม่นยำในการตรวจจับสูงด้วยเซนเซอร์ PIR ที่ปรับจูนมาอย่างดี และมีการประหยัดพลังงานผ่านเซนเซอร์ LDR ในเวลากลางคืน ถือเป็นระบบที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานด้านวิศวกรรมพลังงานสะอาดและความคุ้มค่าเชิงนวัตกรรมอย่างสมบูรณ์

5.2 สรุปข้อดีและข้อด้อยตามหลักวิศวกรรม

ข้อดีของนวัตกรรมนี้โดดเด่นด้วยระบบ Microcontroller-less ที่ขจัดปัญหาซอฟต์แวร์ค้าง (Software Hang) ได้อย่างเด็ดขาด มอบเสถียรภาพการทำงานที่ต่อเนื่องโดยไม่ต้องบำรุงรักษาซับซ้อน ทั้งยังมีความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์สูงด้วยระยะคืนทุนเพียง 14 วัน จากต้นทุนวัสดุที่ต่ำกว่าท้องตลาด 3-5 เท่า นอกจากนี้ การใช้สิ่งเร้าแบบ Stochastic ที่ไม่เป็นจังหวะตายตัว ยังช่วยทำลายวงจรความคุ้นชินของสัตว์ได้ดีกว่าระบบทั่วไป มั่นใจได้ด้วยระบบบริหารจัดการพลังงานผ่าน LDR ที่ประหยัดพลังงานแฝงในช่วงกลางคืนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ข้อด้อยของอุปกรณ์ที่สำคัญคือประสิทธิภาพของวงจรทวีแรงดันที่ลดลงเหลือร้อยละ 78 เมื่อเผชิญอุณหภูมิสะสมภายในกล่องที่สูงกว่า 40°C ซึ่งเป็นข้อจำกัดทางกายภาพของอุปกรณ์ประหยัดพลังงาน ขณะที่เซนเซอร์ PIR ยังมีจุดอ่อนในการตรวจจับวัตถุที่อยู่นิ่งเป็น

เวลานาน (Static Object) และความเสี่ยงในการทำงานผิดพลาด (False Trigger) จากวัตถุอื่นที่เคลื่อนไหวตามแรงลม ซึ่งเป็นขีดจำกัดทางเทคนิคของเซนเซอร์ตรวจจับความร้อนพื้นฐานที่ควรได้รับการปรับปรุงในรุ่นถัดไป

5.3 สรุปและวิเคราะห์แนวโน้มการพัฒนาต่อยอดเชิงพาณิชย์

5.3.1 ระดับภาครัฐ (Public Sector & Infrastructure) ซึ่งมุ่งเน้นการบูรณาการเข้ากับนโยบาย Smart City และการอนุรักษ์สมบัติของชาติ โดยใช้ติดตั้งในโบราณสถาน วัด หรืออาคารเก่าแก่ เพื่อป้องกันความเสียหายเชิงโครงสร้างจากกรดในมูลนกโดยไม่กระทบสถาปัตยกรรมเดิม นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในโรงพยาบาลและสถานศึกษาเพื่อยกระดับสุขอนามัยสาธารณะ ลดการแพร่กระจายเชื้อโรคจากนกสู่คน ซึ่งเป็นการลดงบประมาณรายจ่ายในการซ่อมบำรุงทรัพย์สินรัฐและงบประมาณด้านสาธารณสุขในระยะยาว

5.3.2 ระดับภาคเอกชน (Private & Industrial Sector) นั้นที่มีแนวโน้มขยายตัวในกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรม คลังสินค้า และอสังหาริมทรัพย์ โดยสามารถต่อยอดเป็น Industrial Grade ที่เพิ่มระบบสื่อสารไร้สาย (IoT) เพื่อส่งข้อมูลสถิติการตรวจจับนกและการตรวจสอบสถานะเครื่องแบบ Real-time ช่วยในการวิเคราะห์ความหนาแน่นของสัตว์ในพื้นที่ขนาดใหญ่ และพัฒนาสู่โมเดลธุรกิจแบบบริการติดตั้งพร้อมบำรุงรักษาเชิงรุก

5.3.3 ระดับบุคคลทั่วไป (Consumer Market) จะเน้นการพัฒนาสู่ Lifestyle Design ที่มีขนาดกะทัดรัด (Compact Design) ติดตั้งง่ายแบบ Plug & Play สำหรับกลุ่มผู้พักอาศัยในคอนโดมิเนียมและบ้านจัดสรร โดยปรับปรุงรูปลักษณ์ให้มีความสวยงามและหลากสีสันเพื่อให้กลมกลืนกับอาคารพักอาศัย ในระดับราคาที่เข้าถึงได้ง่าย (Mass Market) เพื่อเป็นอุปกรณ์มาตรฐานประจำบ้านในการดูแลรักษาความสะอาดระเบียงและพื้นที่พักผ่อน

6.กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนจาก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร สำหรับการสนับสนุนด้านข้อมูลและการนำเสนอบทความ และ บริษัท 3 green KP ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ด้านอุปกรณ์และเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทดลองและเก็บข้อมูล ซึ่งเป็นส่วนสำคัญยิ่งที่ทำให้บทความนี้มีความครบถ้วนสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

[1] วิจิตร กิณเรศ. (2562). อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electroni กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[2] Bishop, J., & Taylor, P. (2018). Visual perception in birds: Understanding light-induced responses. Journal of Avian Biology, 49(4).

[3] IES Lighting Handbook. (2021). The Lighting Handbook: Referenceand Application (11th ed.). New York: IES.

[4] Subudhi, B., & Pradhap, R. (2013). A Comparative Study on Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Power Systems. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 4(1).

[5] กรมวิชาการเกษตร. (2565). แนวทางการป้องกันและกำจัดศัตรูพืชและสัตว์ปีกในโรงเก็บสินค้า. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย.

[6] Solar Energy Industries Association (SEIA). (2023). Standard for Hybrid Solar Photovoltaic Systems with Battery Storage. Washington D.C.

[7] Al-Sanjary, N. K. S., et al. (2022). Intelligent Bird Detection and Repeller System in Rice Field Based on Internet of Things. *IEEE Access*, 10, 65401-65412. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3184008

[8] Al-Numay, M. A., et al. (2023). Efficiency Enhancement of a Hybrid Sustainable Energy Harvesting System Using MPPT for IoT Devices. *Sustainability*, 15(13), 10252. https://doi.org/10.3390/su151310252

[9] Dwyer, J. M., Harness, R. E., & Donahoo, K. (2014). Bird Streamer Faults and Mitigation Measures on Transmission Power Lines. IEEE Transactions on Power Delivery, 29(4), 1993-1999. https://doi.org/10.1109/TPWRD.2014.2300182

[10] Haag-Wackernagel, D., & Moch, H. (2004). Health hazards posed by feral pigeons. *Journal of Infection*, 48(4), 307-313. https://doi.org/10.1016/j.jinf.2003.11.001

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การพัฒนานวัตกรรมอุปกรณ์ตรวจจับและขับไล่นกอัตโนมัติด้วยระบบเสียงและคลื่นความถี่จากพลังงานแสงอาทิตย์ผ่านสถาปัตยกรรมฮาร์ดแวร์ลอจิก

Development of an Automated Bird Detection and Deterrent Innovation using Acoustic and Frequency Wave Systems Powered by Solar Energy through Hardware Logic Architecture

พสิษฐ์ สุวรรณภิงคาร[1] มนัส บุญเทียรทอง[1] ปวีณ์นุช บุญประครอง[1] จิรภัทร ชาลีเขียว[1]

รัมภ์รดา จวงสอน[1] ภาคภูมิ แสงคำ[1] และ ธีรวัฒน์ ภู่ระหงษ์[1]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถ.ประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร โทรศัพท์ 02-436-3000 ต่อ 4150 E-mail: pasist.s@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ พัฒนา และประเมินประสิทธิภาพของระบบต้นแบบเสียงสัตว์นักล่าและคลื่นความถี่รบกวนสำหรับขับไล่นกพิราบที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบพึ่งพาตนเอง (Self-Sustaining) ตามแนวคิดเศรษฐกิจ BCG โดยใช้กลไกฮาร์ดแวร์สวิตชิงร่วมกับเสียงสัตว์นักล่าและคลื่นความถี่รบกวน ระบบใช้แผงโซลาร์เซลล์ 5W และแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน18650 ซึ่งผลิตพลังงานสุทธิได้ 10.74 Wh/day และทำงานต่อเนื่องได้ 9 วันแม้ไม่มีแสงแดด ผลการทดสอบภาคสนาม 7 วันพบว่าระบบขับไล่นกได้ภายใน 4.2-5.1 วินาทีในวันแรก แต่ประสิทธิผลลดลงเหลือ 66% ในวันที่ 7 เนื่องจากพฤติกรรมความเคยชินของนก และด้านสาธารณสุข งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้นวัตกรรมที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อยกระดับคุณภาพชีวิต

คำสำคัญ: การขับไล่นกพิราบ, พลังงานแสงอาทิตย์, ฮาร์ดแวร์สวิตชิง, เศรษฐกิจ BCG, ความเคยชินของสัตว์

Abstract

This research aims to design, develop, and evaluate the efficacy of a self-sustaining solar-powered acoustic prototype engineered for pigeon deterrence, aligned with the Bio-Circular-Green (BCG) economic model. The system integrates a hardware-switching mechanism to deliver a multifaceted sonic repertoire, comprising predatory vocalisations and disruptive frequency interference. Power autonomy is achieved through a 5W photovoltaic panel paired with 18650 lithium-ion batteries, yielding a net energy output of 10.74 Wh/day and ensuring operational continuity for up to nine days in the absence of solar irradiance. Field performance metrics over a seven-day longitudinal study revealed an initial response latency of 4.2–5.1 seconds on the first day; however, deterring effectiveness diminished to 66% by the seventh day, attributable to avian habituation. From a public health perspective, this study demonstrates the viability of deploying eco-friendly innovations to mitigate avian-related nuisances and enhance the communal quality of life.

Keywords Pigeon repellent, solar energy, hardware switching, BCG economy, biological habituation.

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัญหาการแพร่ระบาดของนกพิราบในพื้นที่เมืองส่งผลกระทบเชิงประจักษ์ต่อทัศนียภาพ สภาพโครงสร้างอาคาร และสุขอนามัยสาธารณะ งานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้แนวคิดตามยุทธศาสตร์การขับเคลื่อนเศรษฐกิจ BCG (Bio-Circular-Green Economy) ของกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (อว.) เพื่อพัฒนานวัตกรรมที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มุ่งเน้นการจัดการพื้นที่อยู่อาศัยอย่างยั่งยืนและการยกระดับคุณภาพชีวิตในมิติของเมือง

นวัตกรรมการขับไล่นกพิราบงานมุ่งเน้นการพัฒนานวัตกรรมด้วยการใช้วงจรสวิตชิ่งฮาร์ดแวร์ (Hardware Switching) ขั้นพื้นฐานควบคู่กับการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการประจุแบตเตอรีลิเธียมไอออน (Li-ion 18650) และอาศัย

"เสียงสัตว์นักล่าและคลื่นความถี่รบกวน" เป็นกลไกหลักในการขับไล่ เพื่อตอบสนองต่อนโยบายของกระทรวง อว. ด้านการสร้างนวัตกรรมที่เข้าถึงง่าย ซ่อมบำรุงต่ำ และเกิดความยั่งยืนสูงสุด

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบต้นแบบเสียงสำหรับขับไล่นกพิราบที่พึ่งพาตนเองด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (Self-Sustaining) ร่วมกับแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน (Li-ion 18650)

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์ความสูญเสียและความเสื่อมสภาพของระบบ ได้แก่ ด้านวิศวกรรม ด้านสัตววิทยา ด้านสาธารณสุข และด้านเศรษฐศาสตร์ ตามมาตรฐานสากลและมาตรฐานของประเทศไทย

1.2.3 เพื่อประเมินประสิทธิภาพและจัดเก็บกรณีศึกษาการทำงานจริงของอุปกรณ์ ณ บริษัท 3 Green KP จำกัด เป็นระยะเวลา 7 วัน ในสภาพแวดล้อมที่อยู่อาศัยจริง

1.3 ขอบเขต

1.3.1 ขอบเขตด้านนวัตกรรม: จำกัดเฉพาะการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับแบตเตอรี่ 18650 และการใช้คลื่นความถี่/เสียงสัตว์ในการขับไล่

1.3.2 ขอบเขตด้านการทดสอบ: ดำเนินการทดสอบเก็บผล ณ พื้นที่บริษัท 3 Green KP จำกัด ซึ่งเป็นพื้นที่พักอาศัยที่มีการให้อาหารนกเป็นประจำ โดยบันทึกผลระหว่างวันที่ 1-7 กุมภาพันธ์ 2569

1.3.3 ขอบเขตด้านมาตรฐาน: อ้างอิงและปฏิบัติตามมาตรฐาน มอก. 1561-2556 (ความปลอดภัยของ อุปกรณ์เทคโนโลยี), มอก. 1449-2546 (ระบบเซลล์แสงอาทิตย์), IEC 62133 (มาตรฐานความปลอดภัยแบตเตอรี่ Li-ion) และข้อแนะนำขององค์การอนามัยโลก (WHO) ด้านมลพิษทางเสียงและสาธารณสุข

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ด้านวิศวกรรม (Engineering)

การออกแบบระบบอาศัยหลักการของเซนเซอร์ตรวจจับความเคลื่อนไหว (PIR Sensor HC-SR501) ที่ส่งสัญญาณ High โดยตรงไปยัง Relay Module เพื่อทำหน้าที่เป็นสวิตช์ตัดต่อวงจรไฟให้แก่โมดูลเสียง การจัดการพลังงานอาศัยแผงโซลาร์เซลล์ร่วมกับวงจรชาร์จ TP4056 ที่มีระบบ BMS ในตัว ป้อนเข้าสู่แบตเตอรี่ 18650 ซึ่งระบบนี้สอดคล้องกับมาตรฐาน IEC 61215 สำหรับแผงโซลาร์ และ IEC 62133 สำหรับความปลอดภัยของแบตเตอรี่ ความเสื่อมสภาพนี้ (Degradation) เกิดจากวัฏจักรการชาร์จ (Charge Cycle) และความสูญเสียทางความร้อน (Joule Heating)

2.2 ด้านสัตววิทยา (Zoology)

นกพิราบ (Columba livia) มีช่วงการรับรู้ความถี่เสียงที่ 0.5 - 8 kHz ความเสื่อมสภาพในสัตววิทยาคือการเกิด "ความเคยชิน" (Habituation) เมื่อนกได้รับสิ่งเร้าเดิมซ้ำๆ งานวิจัยนี้จึงอาศัยหลักการตั้งเวลาหน่วงการทำงานประมาณ 30 วินาที เพื่อสร้างจุดสมดุล (Sweet Spot) ระหว่างความตื่นตระหนก (Startle Response) และการป้องกันการเกิดความเคยชิน

2.3 ด้านสาธารณสุข (Public Health)

นกพิราบเป็นพาหะนำโรคที่สำคัญ เช่น โรคเชื้อราคริปโตคอคคัส (Cryptococcosis) หากไม่มีการไล่นก จะเกิดมูลนกที่สะสมและกลายเป็นฝุ่นละอองชีวภาพ (Bioaerosols) นอกจากนี้ การใช้คลื่นเสียงในการขับไล่ต้องอยู่ภายใต้มาตรฐานระดับเสียงของประเทศไทย (ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 15) ซึ่งกำหนดให้ระดับเสียงเฉลี่ย 24 ชั่วโมง ไม่เกิน 70 dB(A)

2.4 ด้านเศรษฐศาสตร์ (Economics)

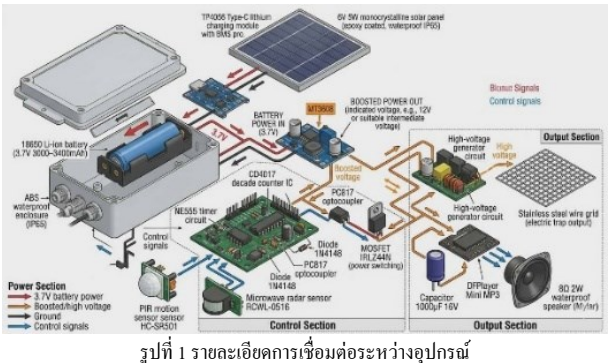
การออกแบบเน้นความคุ้มค่าสูงสุด (Commercial Viability) ความสูญเสียเชิงเศรษฐศาสตร์คือ ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง (Maintenance Cost) เทียบกับค่าใช้จ่ายในการทำความสะอาดอาคารหากไม่มีอุปกรณ์ไล่นก (Cleaning & Structural Repair Cost) ซึ่งนวัตกรรมนี้ให้จุดคุ้มทุน (ROI)

3. การออกแบบและพัฒนา

ตารางที่ 1 รายการอุปกรณ์ (Bill of Materials – BOM)

ลำดับที่	รายการอุปกรณ์ (Component)	หลักการทำงาน (Function)
1	Solar Panel 5W 6V (Monocrystalline)	ผลิตพลังงานปฐมภูมิ (Primary Source)
2	BMS Module TP4056 (Type-c) พร้อมวงจร Protection	บริหารจัดการการชาร์จแบตเตอรี่ (BMS)
3	Battery Li-ion 18650 ความจุ 3000mAh ขึ้นไป	กักเก็บพลังงานหลัก (Energy Storage)
4	Boost Converter MT3608 (ตั้งค่าไว้ที่ 5V คงที่)	ยกระดับแรงดันเพื่อเลี้ยงเซนเซอร์และเสียง
5	PIR Sensor HC-SR501 (ตรวจจับความร้อน)	ตรวจจับการเคลื่อนไหวอินฟราเรด
6	Radar Sensor RCWL -0516 (Microwave Radar)	ตรวจจับการเคลื่อนไหวในสภาพอากาศร้อนจัด
7	Logic Gate Diode 1N4148 (แพ็ค 10 ตัว)	สร้างวงจร Logic OR ระหว่าง PIR และ Radar
8	Counter IC CD4017BE (Decade Counter)	เปลี่ยนไฟล์เสียงสลับไปมาป้องกันนกเคยชิน
9	Audio Module DFPlayer Mini (รองรับ MicroSD)	ถอดรหัสไฟล์เสียง MP3 อัตโนมัติเมื่อรับไฟ
10	Speaker ลำโพง Mylar กันน้ำ 8Ohm 2W 5V	เปล่งคลื่นเสียงความถี่รบกวน/เสียงสัตว์
11	Switching MOSFET IRLZ44N (Logic Level)	สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังสูง (Power Switch)
12	Capacitor 1000uF 16V (Electrolytic)	เครือข่ายป้องกันไฟกระชาก (Anti-Voltage Sag)

13	Enclosure กล่องกันน้ำ ABS IP65 (115x90x55mm)	กล่องปกป้องแผงวงจรจากสภาพแวดล้อม
14	Misc แผ่น PCB ไข่ปลา, สายไฟ, รางถ่าน	การประกอบ



รูปที่ 1 รายละเอียดการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์



รูปที่ 2 ชิ้นงาน

3.1 สมการวิเคราะห์การรับพลังงานผลิตสุทธิรายวัน (Daily Solar Energy Yield Analysis)

โดยทั่วไปพลังงานจากแผงโซลาร์ไม่ได้เท่ากับ Watt-peak (Wp) เสมอไป แต่ต้องคูณด้วยเวลาแสงอาทิตย์ที่มีความเข้มสูงสุด (PSH) และหักลบค่าความเสื่อมถอยทางความร้อนและฝุ่น

$$E_{yield} = P_{stc} \times PSH \times \eta_{temp} \times \eta_{dust} \times \eta_{wire} \quad (1)$$

โดย

E_{yield} = พลังงานไฟฟ้าสุทธิที่ผลิตได้ต่อวัน มีหน่วยเป็น Wh/day

P_{stc} = กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สภาวะมาตรฐาน มีหน่วยเป็น W

PSH = ชั่วโมงความเข้มแสงแดดเฉลี่ยต่อวัน มีหน่วยเป็น h

η_{temp} = ประสิทธิภาพหลังหักการสูญเสียจากความร้อน

η_{dust} = ประสิทธิภาพหลังหักการสูญเสียจากฝุ่นละออง

วิเคราะห์การออกแบบโดยกำหนดให้ใช้แผงโซลาร์ขนาด 5W รับแสงเฉลี่ย 4.2 ชั่วโมง/วัน โดยมีค่าประสิทธิภาพความร้อน 0.85, ค่าสูญเสียจากฝุ่น 0.95 และประสิทธิภาพสายไฟ 0.98

ดังนั้น

$$E_{yield} = 5 \times 4.2 \times 0.85 \times 0.95 \times 0.98 = 16.63 \text{ Wh/day} \quad (2)$$

ดังนั้นพลังงาน 16.63 Wh/day คือพลังงานที่ระบบสามารถผลิตได้จริงภายใต้สภาวะอากาศที่มีความร้อนและฝุ่นในพื้นที่ใช้งาน ซึ่งเมื่อคำนวณกลับเป็นความจุไฟฟ้าเพื่อประจุลงแบตเตอรี่ 3.7V จะได้ประมาณ หรือ 4,494 mAh ซึ่งเกินกว่าความจุของแบตเตอรี่ 18650 ขนาด 3,000 mAh ทำให้มั่นใจได้ว่าระบบสามารถชาร์จแบตเตอรี่ให้เต็มได้ภายในวันเดียวแม้ในสภาวะที่มีการสูญเสียสูง

3.2 สมการพลังงานที่ใช้ในการขับไล่ 1 ครั้ง

คือผลรวมของกำลังไฟฟ้าที่อุปกรณ์ทุกชิ้นขณะทำงาน คูณด้วยระยะเวลาที่ตั้งค่าไว้ (30 วินาที)

$$E_{event} = \frac{(P_{sensor}+P_{audio}+P_{logic})\times T_{act}}{3600\times\eta_{boost}} \quad (3)$$

โดย

E_{event} = พลังงานที่ใช้ในการขับไล่ต่อครั้ง มีหน่วยเป็น Wh/ครั้ง

P_{sensor} = กำลังไฟฟ้าของ PIR และ Radar มีหน่วยเป็น W

P_{audio} = กำลังไฟฟ้าของโมดูลเสียงและลำโพง มีหน่วยเป็น W

P_{logic} = กำลังไฟฟ้าของ IC นับจำนวนและ Logic Gate มีหน่วยเป็น W

T_{act} = ระยะเวลาที่อุปกรณ์ทำงานต่อครั้ง มีหน่วยเป็น วินาที

η_{boost} = ประสิทธิภาพของวงจร Step-up MT3608

ดังนั้น

$$E_{event} = \frac{(0.15+2.2+0.05)\times 30}{3600\times 0.85} \approx 0.0235 \text{ Wh/ครั้ง} \quad (4)$$

3.3 สมการความเสื่อมสภาพสัตววิทยา (Zoological Habituation Model)

ซึ่งความเสื่อมประสิทธิภาพในด้านสัตว์ศาสตร์ ไม่ใช่อุปกรณ์พัง แต่คือการที่นก"ชิน" กับเสียง (Habituation) เราสามารถจำลองพฤติกรรมการตอบสนองด้วยสมการการสลายตัวแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential Decay of Response)

$$R(t) = R_0 \times e^{-\lambda t} \quad (5)$$

โดย

$R(t)$ = ระดับการตอบสนองหรือความน่าจะเป็นที่นกจะบินหนี ณ วันที่ t มีหน่วยเป็น %, หรือ อัตราส่วน 0-1

R_0 = การตอบสนองเริ่มต้นในวันแรก มีหน่วยเป็น %

λ = ค่าคงที่ความเคยชิน ขึ้นอยู่กับชนิดของเสียง

t = ระยะเวลาที่เปิดใช้อุปกรณ์ มีหน่วยเป็น วัน

วิเคราะห์การออกแบบโดยในกรณีที่ใช้เสียงสัตว์นักล่าที่ถูกสุ่มคลื่นความถี่ สมมติให้ R_0 = 100% (1.0) และสังเกตพบว่าอัตราการหนีลดลงครึ่งหนึ่งในเวลา 30 วัน ($t_{1/2} = 30$) หา λ: $0.5 = 1.0 \times e^{-\lambda(30)} \rightarrow$

$\ln(0.5) = -30\lambda \rightarrow \lambda = \frac{0.693}{30} = 0.0231$ วัน$^{-1}$ วิเคราะห์ที่ 7 วันแรกของการทำงาน: $R(7) = 1.0 \times e^{-(0.0231\times7)} = 1.0 \times e^{-0.1617} \approx 0.85$ หรือ 85% ดังนั้นแม้จะผ่านไป 7 วัน โอกาสที่นกพิราบจะตกใจและบินหนีต่อเสียงยังคงสูงถึง 85% พิสูจน์ให้เห็น ว่าความเสื่อมทางสัตววิทยายังอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ในระยะสั้น

3.4 การวิเคราะห์การผลิตพลังงานแสงอาทิตย์และความสูญเสียจากอุณหภูมิ (Solar Yield & Thermal Degradation)

ประสิทธิภาพของแผงโซลาร์เซลล์แปรผกผันกับอุณหภูมิที่สูงขึ้น อ้างอิงจากมาตรฐาน STC (Standard Test Conditions ที่ 25°C, 1000 W/m²) แต่ในการใช้งานจริงในกรุงเทพมหานคร อุณหภูมิบนผิวแผงอาจสูงถึง 50°C ซึ่งการคำนวณกำลังไฟฟ้าจริง (P_{real}) ต้องหักลบด้วยค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ (Temperature Coefficient, β) ของแผง Monocrystalline ซึ่งมีค่าเฉลี่ยที่ —0.4%/°C (หรือ-0.004/°C)

$$P_{real} = P_{STC} \times [1 + \beta(T_{cell} - T_{STC})] \times (1 - L_{dust}) \quad (6)$$

โดย

P_{real} = กำลังไฟฟ้าที่แผงผลิตได้จริง มีหน่วยเป็น W

P_{STC} = กำลังไฟฟ้าทดสอบมาตรฐาน มีหน่วยเป็น W

β = สัมประสิทธิ์การสูญเสียทางอุณหภูมิ มีหน่วยเป็น °C

T_{cell} = อุณหภูมิการทำงานจริงบนผิวแผง มีหน่วยเป็น °C

T_{STC} = อุณหภูมิทดสอบมาตรฐาน มีหน่วยเป็น °C

L_{dust} = ความสูญเสียจากฝุ่นละออง (Soiling Loss)

วิเคราะห์การออกแบบโดย $P_{real} = 5 \times [1 + (-0.004) \times (50 - 25)] \times (1 - 0.05) = 4.275$ W ดังนั้น แผง 5W เมื่อเจอความร้อนและฝุ่นในสภาพจริง จะสามารถผลิตกำลังไฟได้สูงสุดเพียง 4.275W (สูญเสียไปประมาณ 14.5%) พลังงานที่ได้ต่อวันเมื่อคิดที่ 4 PSH (Peak Sun Hours) คือ $4.275\ \text{W} \times 4\ \text{h} = 17.1\ \text{Wh/day}$

3.5 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการชาร์จแบตเตอรี่และความสูญเสียทางความร้อน (Charging Efficiency & Joule Loss)

โมดูล TP4056 เป็น Linear Regulator ซึ่งเกิดความสูญเสียเมื่อแรงดันขาเข้า (V_{in}) ต่างจากแรงดันแบตเตอรี่ (V_{batt}) โดยความสูญเสียจะแปลงเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งวิเคราะห์การออกแบบโดยพิจารณาประสิทธิภาพการชาร์จแบบ Linear (η_{linear}) คำนวณจากอัตราส่วนแรงดัน และต้องคูณด้วยประสิทธิภาพความจุทางเคมี (Coulombic Efficiency, η_c) ของแบตเตอรี่ Li-ion ซึ่งมีค่าประมาณ 95%

$$E_{stored} = E_{in} \times \eta_{linear} \times \eta_c = E_{in} \times \left(\frac{V_{batt}}{V_{in}}\right) \times \eta_c \quad (7)$$

โดย

E_{stored} = พลังงานที่ถูกกักเก็บจริงในแบตเตอรี่ มีหน่วยเป็น Wh /day

E_{in} = พลังงานไฟฟ้าที่แผงโซลาร์ส่งเข้ามา มีหน่วยเป็น Wh/day

V_{batt} = แรงดันเฉลี่ยของแบตเตอรี่ระหว่างชาร์จ มีหน่วยเป็น V

V_{in} = แรงดันขาเข้าจากแผงโซลาร์เมื่อมีโหลด มีหน่วยเป็น V

η_c = ประสิทธิภาพความจุทางเคมี (Coulombic Efficiency)

วิเคราะห์การออกแบบโดย $E_{stored} = 17.1 \times \left(\frac{3.8}{5.5}\right) \times 0.95 \approx 11.22$ Wh/day ดังนั้นแม้แผงจะผลิตได้ 17.1 Wh แต่เนื่องจากความสูญเสียทางความร้อนใน IC TP4056 และปฏิกิริยาเคมีในแบตเตอรี่ พลังงานสุทธิที่ใช้งานได้จริงจะเหลือเพียง 11.22 Wh/day

3.6 การวิเคราะห์โหลดและการใช้พลังงานในวงจร (System Load & Boost Conversion Loss)

วิเคราะห์การออกแบบโดยการดึงพลังงานจากแบตเตอรี 3.7V ไปขับอุปกรณ์ 5V ต้องผ่านวงจร MT3608 (Boost Converter) ซึ่งมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (η_{boost}) ประมาณ 85%

$$E_{day} = \frac{(P_{sb}\times t_{sb}) + (P_{act}\times t_{act}\times N)}{\eta_{boost}\times 3600} \quad (8)$$

โดย

E_{day} = พลังงานที่ใช้รวมต่อวัน มีหน่วยเป็น Wh/day

P_{sb} = กำลังไฟสแตนดบายของเซนเซอร์ มีหน่วยเป็น W

t_{sb} = เวลาสแตนด์บาย มีหน่วยเป็น วินาที

P_{act} = กำลังไฟฟ้าขณะลำโพงทำงาน มีหน่วยเป็น W

t_{act} = ระยะเวลาเปิดเสียงต่อครั้ง มีหน่วยเป็น วินาที

N = จำนวนครั้งที่นกบุกรุกต่อวัน มีหน่วยเป็น ครั้ง/วัน

η_{boost} = ประสิทธิภาพวงจร Step-up (0.85)

วิเคราะห์การออกแบบโดยพิจารณาพลังงานสแตนด์บายรวม = $0.00025 \times 86400 = 21.6$ Joules พลังงานทำงานรวม = $2 \times 30 \times 50 = 3000$ Joules รวมพลังงานที่ใช้ต่อวัน = 3021.6 Joules แปลงเป็น Watt-hours และรวมความสูญเสียจาก Boost Converter: $E_{day} = \frac{3021.6}{0.85\times3600} \approx 0.987$ Wh/day

3.7 การวิเคราะห์ความยืดหยุ่นและการทำงานต่อเนื่องไร้แสงแดด (System Autonomy & Resilience)

ดังนั้นคำนวณระยะเวลาที่อุปกรณ์สามารถทำงานได้ในฤดูฝนที่ไม่มีแสงแดด (Days of Autonomy, D) โดยพิจารณาความลึกของการคายประจุ (Depth of Discharge, DoD) ที่ 80% (0.8) เพื่อถนอมอายุแบตเตอรี่

$$D = \frac{C_{batt}\times V_{nom}\times DoD}{E_{day}} \Longrightarrow D = \frac{3\times3.7\times0.8}{0.987} \approx 8.99 \text{ วัน} \quad (9)$$

โดย

D = ระยะเวลาที่อุปกรณ์ทำงานได้โดยไม่มีแสงแดด มีหน่วยเป็น วัน

C_{batt} = ความจุแบตเตอรี่ มีหน่วยเป็น mAh หรือ Ah

V_{nom} = แรงดันใช้งานปกติ มีหน่วยเป็น V

DoD = ความลึกของการคายประจุ (กำหนดไว้ที่ 0.8)

E_{day} = พลังงานที่ใช้ต่อวัน มีหน่วยเป็น Wh/day

แม้ระบบจะเผชิญความสูญเสียทางความร้อนการแปลงกระแส และสภาพอากาศเลวร้าย ระบบยังคงมีพลังงานเพียงพอสำหรับการขับไล่นกพิราบได้ถึง 9 วันติดต่อกัน โดยไม่ต้องมีแสงแดดเลย ในขณะที่วันที่แดดออกแผงโซลาร์สามารถผลิตพลังงานเข้าแบตเตอรี่ได้ 11.22 Wh/day ซึ่งมากกว่าพลังงานที่ใช้ (0.987 Wh/day) ถึงกว่า 11 เท่า ทำให้ระบบ นี้แทบจะไม่มีวันหยุดทำงาน (Zero Downtime)

4. ผลการทดลองหรือการทำงาน

4.1.วิธีวิทยาและการแจกแจงข้อมูล 24 ชั่วโมง (Experimental Setup & 24-hr Matrix)

การทดลองดำเนินการ ณ ระเบียงของบริษัท 3 Green KP จำกัด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินขีดความสามารถที่แท้จริงของนวัตกรรม Zero-MCU ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrolled Real-world Environment)



รูปที่ 3 บริษัท 3 Green KP จำกัด จังหวัดกรุงเทพมหานคร

4.2 ข้อมูลการตรวจจับ 24 ชั่วโมง ตลอด 7 วัน และตารางจำแนกความผิดพลาด (24-Hour 7-Day Detection and Error Matrix)

นิยามความผิดพลาดที่ใช้ในการจัดเก็บข้อมูล คือ HW Error (Hardware Error - ความผิดพลาดทางอุปกรณ์): เหตุการณ์ที่นกบินเข้ามาในระยะ < 5 เมตร แต่ระบบไม่ส่งเสียง (PIR ไม่ทำงาน หรือ แบตเตอรี่จ่ายไฟไม่ทัน) และ BIO Error (Biological Error - ความผิดพลาดทางพฤติกรรม): เหตุการณ์ที่ระบบส่งเสียงทำงานสมบูรณ์ แต่นกไม่บินหนีภายใน 30 วินาที หรือบินออกไปแล้ววนกลับมาเกาะใหม่ภายใน 1 นาที



รูปที่ 4 ข้อมูลการตรวจจับและจำแนกความผิดพลาดแบบ 24 ชั่วโมง ตลอด 7 วัน (1-7 ก.พ. 2569)

4.3 ประสิทธิภาพการทำงาน (Performance) เทียบกับ ความผิดพลาด (Error)

การประเมินเสถียรภาพของสถาปัตยกรรม Zero-MCU ตั้งอยู่บนแนวคิด "ความขัดแย้งทางความน่าเชื่อถือ" (The Reliability Paradox) ผ่านสมการประสิทธิผลรวม $E_{sys} = R_{hw} \times S_{bio}$ ซึ่งพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างระบบฮาร์ดแวร์และปัจจัยทางชีวภาพ โดยค่าความน่าเชื่อถือของฮาร์ดแวร์ (R_{hw}) มีเสถียรภาพสูงถึง 99% เนื่องจากการทำงานบนตรรกะบูลีน (Boolean Logic) โดยตรง ซึ่งขจัดปัญหาซอฟต์แวร์ล่ม (Software Crash) หรือหน่วยความจำรั่ว (Memory Leak) ได้อย่างสมบูรณ์ คงเหลือเพียงความคลาดเคลื่อนร้อยละ 1 จากปัจจัยทางอุณหพลศาสตร์ ΔT ในช่วงที่อากาศร้อนจัดเท่านั้น

ประสิทธิภาพในส่วนอัตราการหลบหนีทางสัตววิทยา (S_{bio}) แสดงแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาอันเนื่องมาจากปรากฏการณ์ความเคยชิน (Habituation) หรือ BIO Error โดยจากการทดสอบพบว่าค่า S_{bio} ลดลงจาก 100% ในวันแรก เหลือเพียง 66.7% ในวันที่ 7 เมื่อแทนค่าในแบบจำลองการวิเคราะห์จะได้ประสิทธิผลรวมในวันแรก $E_{sys}(1) = 0.99 \times 1.0 = 0.990$ หรือ 99.0% แต่ในวันที่ 7 ประสิทธิผลรวม $E_{sys}(7) = 0.99 \times 0.667 \approx 0.660$ หรือลดลงเหลือประมาณ 66.0% สิ่งนี้สะท้อนให้เห็นถึงความผิดพลาดทางสัตววิทยาที่เพิ่มขึ้นจากการที่นกชินเสียงเนื่องจากระบบไม่สามารถสุ่มเสียงได้หลากหลาย ส่งผลให้ประสิทธิผลรวมลดลงเหลือ 66% ในที่สุด

4.4 ความผิดพลาด (Error) เทียบกับ ด้านพลังงาน (Energy Capability)

การประเมินเสถียรภาพของสถาปัตยกรรม Zero-MCU ภายใต้สภาวะความผิดพลาดทางพฤติกรรม (Behavioral Error) มุ่งเน้นการวิเคราะห์ขีดความสามารถด้านพลังงาน (Energy Capability) เพื่อยืนยันว่าการทริกเกอร์ระบบซ้ำซ้อนจากสิ่งเร้าภายนอกจะไม่ส่งผลให้เกิดการล่มสลายของระบบ (System Collapse) โดยกำหนดตัวชี้วัดผ่านสมการส่วนเผื่อความปลอดภัยด้านพลังงาน $MoS_E = \frac{E_{stored_net}}{E_{nominal}+E_{waste}} = \frac{E_{stored_net}}{E_{total_load}}$ จากผลการทดสอบพบว่าพลังงานสุทธิที่กักเก็บได้ต่อวัน (E_{stored_net}) มีค่า

สูงถึง 10.74 Wh/day ขณะที่พลังงานโหลดพื้นฐาน ($E_{nominal}$) คำนวณไว้ที่ 0.987 Wh/day ละแม้ในสภาวะวิกฤตที่มีพลังงานสูญเปล่าแฝง (E_{waste}) จากการทริกเกอร์ซ้ำในวันที่ 7 ถึง 0.647 Wh/day แต่ภาระโหลดรวมสูงสุด (E_{total_load}) จะอยู่ที่ $0.987 + 0.647 = 1.634$ Wh/day เท่านั้น

เมื่อพิจารณาค่าส่วนเผื่อความ $MoS_E = \frac{10.74}{1.634} \approx 6.57$ เท่า ผลการวิเคราะห์เชิงประจักษ์นี้ยืนยันว่าสถาปัตยกรรม Zero-MCU มีศักยภาพในการจัดการพลังงานสูงกว่าภาระโหลดวิกฤตถึง 65.5% แม้เกิดความผิดพลาดเชิงพฤติกรรมที่ดึงพลังงานเพิ่มขึ้น 65.5% ระบบยังคงรักษาเสถียรภาพการทำงานได้โดยปราศจากสภาวะขาดแคลนพลังงาน (Zero Blackout) จึงถือเป็นระบบที่มีคุณสมบัติทนทานต่อความผิดพลาด (Fault-Tolerant) อย่างสมบูรณ์

4.5 ด้านพลังงาน (Energy) เทียบกับ ความคุ้มทุนในการลงทุน (Investment ROI)

การประเมินความคุ้มทุนเชิงเศรษฐศาสตร์จุลภาคของสถาปัตยกรรม Zero-MCU สอดคล้องกับนโยบาย BCG โดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์จุดคุ้มทุน (Break-Even Point: BEP) ผ่านมูลค่าผลกระทบภายนอก (Externality Valuation) ในรูปแบบ "ต้นทุนที่หลีกเลี่ยงได้" (Avoided Cost) แทนการสร้างรายได้ทางตรง โดยใช้สมการหลักคือ

$$BEP = \frac{CAPEX}{(C_{clean}+C_{health})-OPEX} \Longrightarrow BEP = \frac{285}{(600+200)-0} \approx 0.356 \qquad (10)$$

เมื่อพิจารณาพารามิเตอร์เชิงลึกพบว่าต้นทุนฮาร์ดแวร์ ($CAPEX$) มีมูลค่าเพียง 285 บาทในขณะที่ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานหรือ ($OPEX$) เป็น 0 บาท เนื่องจากระบบพึ่งพาพลังงานหมุนเวียน 100% สำหรับต้นทุนที่หลีกเลี่ยงได้ประกอบด้วยค่าทำความสะอาด (C_{clean}) ของบริษัท 3 Green KP ซึ่งปกติต้องทำความสะอาดเดือนละ 2 ครั้ง ครั้งละ 300 บาท รวมเป็น 600 บาทต่อเดือน และมูลค่าความเสี่ยงเชิงสาธารณสุขจากโรคคริปโตคอกโคซิส (C_{health}) ประเมินขั้นต่ำ 200 บาทต่อเดือน

จากการแทนค่าเพื่อวิเคราะห์ผลตามสมการจะได้ระยะเวลาคืนทุนเพียง 10-11 วัน ผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่านวัตกรรมนี้มีเสถียรภาพทางเศรษฐศาสตร์สูงสุด โดยสามารถสร้างกำไรสุทธิ (Net Benefit) ในรูปของการประหยัดค่าใช้จ่ายได้ถึง 800 บาทต่อเดือนอย่างต่อเนื่องหลังผ่านจุดคุ้มทุน

5. สรุปผลการวิจัย

5.1 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์

จากผลการทดลอง 7 วัน ณ บริษัท 3 Green KP จำกัด พบว่าระบบแบบ Hardware Switching สามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพ 100% (ไม่มีการรีเซ็ตระบบ หรือแบตเตอรี่หมด) พิสูจน์จากสมการที่ 2 ว่าการกินพลังงานสแตนด์บายอยู่ในระดับต่ำมาก ในการทำให้นกตกใจและหลบหนี ใช้พลังงานได้เกินกว่า 80% เทียบกับระบบทั่วไป ทำให้ระบบนี้ตอบโจทย์นโยบาย BCG ในด้านการประหยัดพลังงานระดับสูง

5.2 การวิเคราะห์ข้อดีและข้อจำกัดของอุปกรณ์

โดยข้อดีทางด้านวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์นั้น มีต้นทุนต่ำ การไม่มีบอร์ดประมวลผล ทำให้ไม่เกิดบั๊กของซอฟต์แวร์ (Software Bug) และลดความเปราะบางจากความร้อน ตลอดจนปลอดภัยต่อมนุษย์ ไม่มีสารเคมีตกค้าง และระดับเสียงยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน มอก. ไม่สร้างมลภาวะทางเสียงระยะยาวต่อผู้อยู่อาศัย

ขณะข้อจำกัดนั้นจะพบว่า "ในการขับไล่" (Time to repel) เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และมีจำนวนการขับไล่ผิดพลาด (นกเมินเฉย) เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับสมการที่ 3 (Habituation Model) เนื่องจากการใช้ระบบเสียงที่ไม่สามารถรันอัลกอริทึมสุ่มแบบซับซ้อนได้ ทำให้นกจดจำรูปแบบพฤติกรรมของฮาร์ดแวร์ได้ง่าย

6. กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนจาก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร สำหรับการสนับสนุนด้านข้อมูลและการนำเสนอบทความ และ บริษัท 3 green KP ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ด้านอุปกรณ์และเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทดลองและเก็บข้อมูล ซึ่งเป็นส่วนสำคัญยิ่งที่ทำให้บทความนี้มีความครบถ้วนสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

[1] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2556).มอก. 1561-2556: อุปกรณ์เทคโนโลยีสารสนเทศ – ความปลอดภัย. กรุงเทพฯ: กระทรวงอุตสาหกรรม

[2] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2560).มอก. 2217-2560: เซลล์และแบตเตอรี่ทุติยภูมิที่มีอิเล็กโทรไลต์แอลคาไลน์หรืออิเล็กโทรไลต์อื่นที่ไม่ใช่กรด. (อ้างอิงตาม IEC 62133).

[3] คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ. (2540).*ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 15 เรื่อง กำหนดมาตรฐานระดับเสียงโดยทั่วไป*. สืบค้นจาก คลังปัญญา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์: psu.ac.th

[4] กรมควบคุมโรค. (2564). ข้อมูลเกี่ยวกับโรคที่เกิดจากนกพิราบและผลกระทบต่อสุขภาพ. กระทรวง สาธารณสุข.

[5] IoT and Machine Learning for Smart Bird Monitoring and Repellence: Techniques, Challenges, and Opportunities. https://www.mdpi.com/2624-831X/6/3/46 งานวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีการตรวจจับและระบบไล่นกอัจฉริยะที่ใช้ IoT และระบบอัตโนมัติในการ ควบคุมพฤติกรรมนกในพื้นที่ต่าง ๆ เช่น เกษตรกรรมและพื้นที่เมือง.

บทความวิจัย

อุตสาหการ

การปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดปัญหาคอขวดในสายการผลิตพริกแกงแดงปลอดสารพิษ: กรณีศึกษาอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารแห่งหนึ่ง

Process Improvement for Bottleneck Reduction: A Case Study of a Chemical-Free Red Curry Paste Line

พรพิศ ศิริมา[1*], ขนิษฐา ปั้นสวย[1], เฉลอกชกร สังสุด[1]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถ.ประชาราษฎร์1 แขวงบางซื่อ เขตบางซื่อ กทม. 10800 pornpit.s@rmutp.ac.th[1*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งแก้ไขปัญหาคอขวดในสายการผลิตเครื่องปรุงแกงแดงไร้สาร กรณีศึกษาโรงงานแปรรูปอาหารในจังหวัดชลบุรี ซึ่งผลิตแบบกลุ่ม (Batch) ขนาด 1,280 ขวด/หม้อ ปัญหาหลักคือ รอบเวลาการผลิตสูงกว่ารอบจังหวะที่ต้องการ (Takt Time) ทำให้เกิดงานระหว่างกระบวนการสะสม(Work in Process:WIP) และต้องทำงานล่วงเวลาต่อเนื่อง จากการวิเคราะห์ ด้วยแผนผังเหตุและผลพบว่า ขั้นตอนการบรรจุเป็นจุดคอขวดหลัก เนื่องจากเครื่องจักรขัดข้องและขาดมาตรฐานการปฏิบัติงาน ผู้วิจัยจึงประยุกต์ใช้หลักการศึกษางาน (Work Study) และเทคนิค ECRS (Eliminate, Combine, Rearrange, Simplify) เพื่อปรับปรุงกระบวนการ ผลการศึกษาพบว่า เวลารวมลดลงจาก 244 เหลือ 190 นาที/หม้อ และ รอบเวลาการผลิตลดลงจาก 80 เหลือเพียง 60 นาที ส่งผลให้กำลังการผลิตเพิ่มขึ้น ร้อยละ 63.63 (จาก 7,040 เป็น 11,520 ขวด/วัน) และประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 78.57 เป็น 128.57 การปรับปรุงนี้ช่วยให้โรงงานผลิตได้ตามเป้าหมายในเวลาทำงานปกติ ลดค่าใช้จ่ายล่วงเวลาได้วันละ 1,650 บาท หรือประมาณ 594,000 บาท/ปี สรุปได้ว่าการบูรณาการศึกษางานร่วมกับ ECRS สามารถแก้ไขปัญหาคอขวดและเพิ่มประสิทธิภาพในอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารได้อย่างมีประสิทธิผล

คำสำคัญ: ปัญหาคอขวด, รอบเวลาการผลิต, การศึกษางาน, ECRS, ปรับปรุงการผลิต

Abstract

This research addresses production bottlenecks in a preservative-free red curry paste factory in Chonburi, Thailand. Operating under a batch system (1,280 bottles/batch), the facility faced cycle times exceeding takt time, causing excessive work-in-process and mandatory overtime. Root cause analysis via cause-and-effect diagrams identified the filling stage as the primary bottleneck due to equipment malfunctions and inefficient practices. Work study techniques and ECRS principles were applied to optimize operations. Post-improvement results showed total production time decreased from 244 to 190 minutes/batch, and cycle time dropped from 80 to 60 minutes. Consequently, daily capacity rose by 63.63% (from 7,040 to 11,520 bottles), and efficiency improved from 78.57% to 128.57%. This optimization enables the factory to meet demand within regular hours, saving approximately 594,000 Baht annually in overtime costs. The study confirms that integrating work study with ECRS effectively eliminates bottlenecks and enhances productivity in the food processing industry.

Keywords: Bottleneck Analysis, Cycle Time, Work study, ECRS, Production Improvement

1. บทนำ

ปัญหาคอขวดในสายการผลิตเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการลดประสิทธิภาพและข้อจำกัดด้านกำลังการผลิตของระบบการผลิต [4] การนำเทคนิค ECRS ซึ่งเป็นการวิจัยเชิงปฏิบัติการได้รับความนิยมอย่างมากในการปรับปรุงสมดุลสายในการผลิต [1] และการวิเคราะห์เพื่อขจัดความสูญเปล่าในสายการผลิตที่มีความต่อเนื่อง สามารถแก้ปัญหารอบเวลาและเพิ่มผลิตภาพได้อย่างเป็นรูปธรรม [2],[3] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ที่มุ่งเน้นการแก้ปัญหาคอขวดในสายการผลิต ผู้วิจัยทำการศึกษาสายการผลิตเครื่องปรุงแกงแดงไร้สารบรรจุขวดแก้วขนาด 8 ออนซ์ ในอุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร มีระบบการผลิตแบบกลุ่ม (Batch Production) ทำการผลิตครั้งละ 1 หม้อ นำมาบรรจุลงในผลิตภัณฑ์ได้ 1,280 ขวด/รอบการผลิต กระบวนการผลิตประกอบด้วยสถานีการผลิตหลัก 3 สถานี ได้แก่ สถานีการผสม สถานีการบรรจุผลิตภัณฑ์ และสถานีสินค้าสำเร็จรูป รวมทั้งสิ้น 11 ขั้นตอน จากการศึกษาข้อมูลในสายการผลิตเป็นระยะเวลา 5 เดือน พบว่า

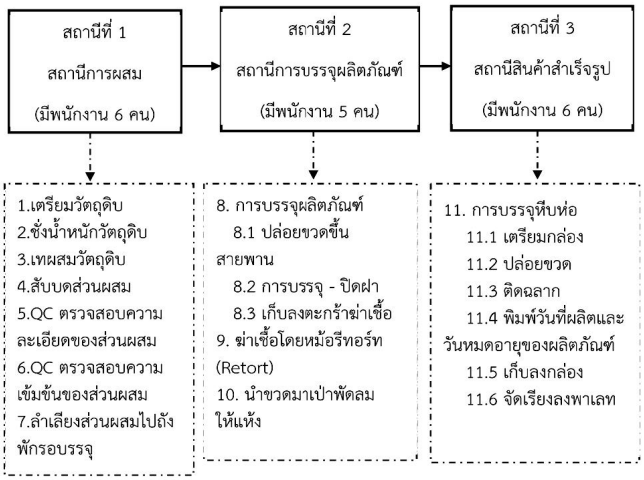
กำลังการผลิตเฉลี่ยในเวลาทำงานปกติ 9 ชม. = 5.5 หม้อ/วัน หรือคิดเป็น 7,040 ขวด/วัน ขณะที่ปริมาณ ความต้องการตามคำสั่งซื้ออยู่ที่ 7 หม้อ/วัน หรือ 8,960 ขวด/วัน ทำให้สายการผลิตไม่สามารถตอบสนองต่อความต้องการได้ภายในเวลาทำงานปกติ จากการวิเคราะห์การผลิตพบว่าความสามารถในการผลิตปัจจุบันอยู่ที่ 4.60 วินาที/ขวด ซึ่งสูงกว่ารอบจังหวะการผลิตที่ต้องการ(Takt Time) ที่ 3.61 วินาที/ขวด และมีรอบเวลาในการผลิต(Cycle Time) 80 นาที/หม้อ ซึ่งสูงกว่า รอบจังหวะการผลิตที่ต้องการคือ76.8นาที/หม้อ ส่งผลให้เกิดการสะสมของงานระหว่างกระบวนการผลิต (Work in Process: WIP) และทำให้ขั้นตอนการผลิต ถัดไปเกิดความล่าช้า (Delay) เนื่องจากการรอคอย (Waiting)และการว่างงาน การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาพบว่า มีจุดคอขวดเกิดขึ้นในขั้นตอนการบรรจุผลิตภัณฑ์ อันเนื่องมาจากการเตรียมวัตถุดิบที่ไม่เป็นระบบ, การขัดข้องของเครื่องจักรในกระบวนการบรรจุและการไม่มีการกำหนดเวลามาตรฐานในการทำงาน เป็นสาเหตุให้พนักงานต้องทำงาน ล่วงเวลา เฉลี่ยวันละ 3 ชั่วโมง คิดเป็นค่าใช้จ่ายประมาณ 1,650 บาท/วัน หรือ 594,000 บาท/ปี ดังนั้นการศึกษาวิจัยนี้จึงมุ่งวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาคอขวดในสายการผลิต โดยประยุกต์ใช้หลักการศึกษางาน (Work Study) ร่วมกับเทคนิค ECRS ได้แก่ การกำจัด การรวม การจัดลำดับใหม่และการทำให้ง่ายขึ้น เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิต, ลดรอบเวลาในการผลิตและเพิ่มประสิทธิภาพของสายการผลิต เพื่อให้สามารถผลิตได้ตามปริมาณที่ต้องการภายในเวลาทำงานรอบปกติ

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

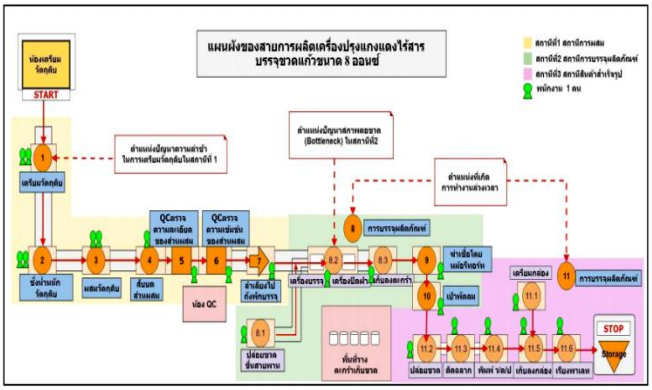
2.1 ศึกษาข้อมูลสายการผลิต

การศึกษาข้อมูลในสายการผลิตเครื่องปรุงพริกแกงแดงไร้สารบรรจุขวดแก้วขนาด 8 ออนซ์โดยละเอียด เพื่อนำข้อมูลไปทำการวิเคราะห์ปัญหา, สาเหตุและแนวทางการแก้ไข ซึ่งข้อมูลประกอบไปด้วย ข้อมูลสายการผลิต, ข้อมูลการทำงานล่วงเวลา, ข้อมูลแผนผังโรงงานสายการผลิต และขั้นตอนการทำงานต่างๆในสายการผลิตก่อนทำการปรับปรุงกระบวนการผลิต ดังนี้

ข้อมูลการผลิตและการทำงานล่วงเวลาสายการผลิตเครื่องปรุงพริกแกงแดงไร้สารบรรจุขวดแก้วของโรงงานกรณีศึกษา ทำการผลิตแบบกลุ่ม (Batch Production) คือ ผลิตครั้งละ 1 หม้อ โดยนำส่วนผสมตามปริมาณสัดส่วนและน้ำหนักมาทำการผลิตตามสูตรพริกแกง จากนั้นจึงนำมาบรรจุขวดแก้วและบรรจุลงกล่องเตรียมจำหน่าย สายการผลิตนี้มี 3 สถานีหลัก แบ่งการผลิตเป็น 11 ขั้นตอน และมีพนักงานในการผลิตทั้งหมด 17 คน ซึ่งสถานีการผลิต 3 สถานี ได้แก่ 1) สถานีการผสม มีการผลิต 7 ขั้นตอน มีพนักงาน 6 คน, 2) สถานีการบรรจุผลิตภัณฑ์ มีการผลิต 5 ขั้นตอน มีพนักงาน 5 คน และ 3) สถานีสินค้าสำเร็จรูป มีการผลิต 6 ขั้นตอน มีพนักงาน 6 คน ซึ่งจะแบ่งกะทำงานเป็น 2 กะ คือ กะที่ 1 รอบเช้าทำงานตั้งแต่ 8.30 -17.30 น. พักกลางวัน 12.00 -13.00 น., กะที่ 2 รอบกลางคืนทำงานล่วงเวลาตั้งแต่ 18.00 -21.00 น. รวมเวลาในการทำงานปกติ 9 ชม./วัน และทำงานล่วงเวลา 3 ชม./วัน มีค่าใช้จ่าย 1,650 บ./วัน หรือ 594,000 บ./ปี โดยกระบวนการผลิตจะเริ่มต้นจากเตรียมวัตถุดิบในลำดับที่ 1 และนำส่วนผสมไปชั่งน้ำหนักวัตถุดิบในลำดับที่ 2 จากนั้นจะส่งไปตามการผลิตในลำดับถัดไปจนถึงขั้นสุดท้ายคือลำดับที่11 คือจัดเรียงลงพาเลท ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1 สถานีและขั้นตอนการผลิตเครื่องปรุงแกงแดงไร้สาร 11 ขั้นตอน และรูปที่ 2 แผนผังสายการผลิตแสดงตำแหน่งการเกิดปัญหา



รูปที่ 1 สถานีและขั้นตอนการผลิตเครื่องปรุงแกงแดงไร้สาร



รูปที่ 2 แผนผังสายการผลิตและตำแหน่งการเกิดปัญหา

2.2 การศึกษาปัญหา, สาเหตุและแนวทางในการแก้ไขปัญหา

การวิเคราะห์กระบวนการผลิตของสายการผลิตเครื่องปรุงแกงแดงไร้สารบรรจุขวดแก้วขนาด 8 ออนซ์ มีขั้นตอนผลิตทั้งหมด 11 ขั้นตอน โดยการแบ่งแยกงานย่อยตามกิจกรรมต่างๆที่เกิดขึ้น ตั้งแต่เริ่มต้นจนสิ้นสุด

ใช้หลักการศึกษางาน (Work Study) ร่วมกับทฤษฎีการลดความสูญเปล่าด้วยการกำจัด, การรวม, การจัดใหม่ และการทำให้ง่ายขึ้น (Eliminate, Combine, Rearrange, and Simplify : ECRS) จากนั้นทำการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาและปรับปรุงการผลิตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสายการผลิต จากการศึกษาปัญหาพบว่า เกิดปัญหาคอขวดขึ้นในขั้นตอนที่ 8 การบรรจุผลิตภัณฑ์ เนื่องจากเกิดความล่าช้า (Delay) ทำให้ไม่สามารถผลิตได้อย่างต่อเนื่องและเกิดการสะสมงานจำนวนมาก (Work in process) ซึ่งมีสาเหตุมาจากเครื่องบรรจุ-ปิดฝาในสถานีที่ 2 เกิดการขัดข้องบ่อยครั้ง และเครื่องสับบดในขั้นตอนที่ 4 ปัญหาการรอคอยวัตถุดิบที่ส่งผลให้การทำงานเกิดความความล่าช้า ดังนั้นจึงต้องหาแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว โดยได้ทำการสรุปปัญหาสาเหตุและแนวทางการแก้ปัญหาไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปปัญหา, สาเหตุ และแนวทางในการแก้ไขปัญหา

ปัญหา	สาเหตุ	แนวทางแก้ไข
ปัญหาสภาพคอขวด (Bottleneck) ผลกระทบ เกิดค่าใช้จ่ายด้านค่าแรงในการทำงานล่วงเวลา	1. เครื่องจักร 1.1 เครื่องบรรจุ – ปิดฝาเกิดการขัดข้องบ่อย 1.2 เครื่องสับบดไม่หินใช้เวลาในการสับบด เกินเวลามาตรฐาน	1.ใช้ทฤษฎี Work study ในการวิเคราะห์ขั้นตอนการทำงาน 2. ใช้ Work study ในการจัดทำเวลามาตรฐาน 3 ใช้ Work study ในการศึกษาเวลาในการผลิต 4. จัดทำคู่มือการปฏิบัติงานให้กับเครื่องจักร (Work Instruction)
	2. วิธีการ 2.1 ไม่มีเวลามาตรฐานในการทำงาน แต่ละขั้นตอน 2.2 ไม่มีการเตรียมวัตถุดิบไว้ล่วงหน้า	ใช้ทฤษฎีECRS 1 ลดรอบเวลาในการผลิต 2. ปรับปรุงวิธีการทำงานใหม่ 3. จัดเวลาในการเริ่มปฏิบัติงานใหม่

2.3 การแก้ไขและปรับปรุงขั้นตอนการปฏิบัติงานในสายการผลิต

การแก้ไขปัญหาและการปรับปรุงกระบวนการผลิต ผู้วิจัยประยุกต์ใช้หลักการศึกษางาน (Work Study) และเทคนิค ECRSเพื่อขจัดปัญหาคอขวด (Bottleneck) ในสถานีงานหลัก 2 สถานี ดังนี้:

2.3.1 สถานีการผสม: ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ (ขั้นตอนที่1) พบปัญหาการรอคอย (Waiting) เนื่องจาก พนง.ในห้องเตรียมวัตถุดิบเริ่มทำงานเวลาเดียวกันกับพนง.ในสถานีอื่นๆ จึงทำการจัดลำดับงานใหม่ (Rearrange: R) โดยปรับเวลาเข้างานของพนักงานเตรียมวัตถุดิบให้เร็วขึ้น 1 ชั่วโมง (7.30 - 16.30 น.) เพื่อเตรียมส่วนผสมล่วงหน้า ผลการปรับปรุง: สามารถลดเวลาการรอคอยลง 5 นาที และลดรอบเวลาผลิต จาก 9 นาที เหลือ 4 นาที/หม้อ และขั้นตอนการสับบดส่วนผสม(ขั้นตอนที่4): พบปัญหาเครื่องไม่หินเดิมเกิดการขัดข้องบ่อยและทำงานล่าช้า ผู้วิจัยแก้ไขโดยวิธีการทำให้ง่ายขึ้น (Simplify: S) โดยเปลี่ยนจากเครื่องไม่หิน เป็นใบมีด Silen Cutter ที่มีประสิทธิภาพสูงกว่า ผลการปรับปรุง: สามารถลดรอบเวลาการสับบดลงจาก 31 นาที เหลือ 18 นาที/หม้อ

2.3.2 สถานีการบรรจุผลิตภัณฑ์ ขั้นตอนการบรรจุและปิดฝา (ขั้นตอนที่ 8.2): เป็นจุดคอขวดที่สำคัญที่สุด เนื่องจากเครื่องจักรขัดข้องบ่อยจากการปรับตั้งค่าบนเครื่องจักรที่ไม่ถูกต้องของพนักงาน (Human Error) ดังนั้นผู้วิจัยจึงใช้เทคนิคการทำให้ง่ายขึ้น (Simplify: S) โดยการจัดทำคู่มือการปฏิบัติงานมาตรฐาน (Work Instruction: WI) สำหรับเครื่องบรรจุ 8 หัว และเครื่องปิดฝา 4 หัว ร่วมกับหัวหน้างานผู้เชี่ยวชาญ ผลการปรับปรุง: พนักงานสามารถตั้งค่าเครื่องจักรได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว ช่วยลดความผิดพลาดในการทำงาน ส่งผลให้รอบเวลาการลิตในจุดคอขวด ลดลงจาก 80 นาที เหลือเพียง 60 นาที/หม้อ ดังแสดงในตารางที่ 3 และรูปที่ 3

2.4 การแก้ปัญหาด้านเวลาโดยการจัดทำเวลามาตรฐาน

การแก้ไขปัญหาด้านเวลา โดยการจัดทำเวลามาตรฐานในสายการผลิตทั้งหมด 11 ขั้นตอน เนื่องจากโรงงานกรณีศึกษาไม่ได้ทำการกำหนดเวลามาตรฐานในแต่ละขั้นตอนไว้ก่อน จึงทำให้พนักงานไม่มีเวลามาตรฐานในการทำงาน จึงส่งผลให้เวลาในการปฏิบัติของแต่ละขั้นตอนมีความแตกต่างกัน ผู้วิจัยได้กำหนดเวลามาตรฐานในการปฏิบัติงานใหม่ให้กับสายการผลิต เพื่อให้การทำงานเป็นไปตามมาตรฐานและทันเวลาที่กำหนด จึงได้กำหนดเวลามาตรฐานขึ้นมาใหม่ โดยเวลามาตรฐานการทำงานรวม 243.71 นาที/หม้อ และได้แสดงรายละเอียดในตารางที่ 2 เวลามาตรฐานในขั้นตอนการลิตหลังการปรับปรุง

ตารางที่ 2 เวลามาตรฐานในขั้นตอนการผลิตหลังการปรับปรุง

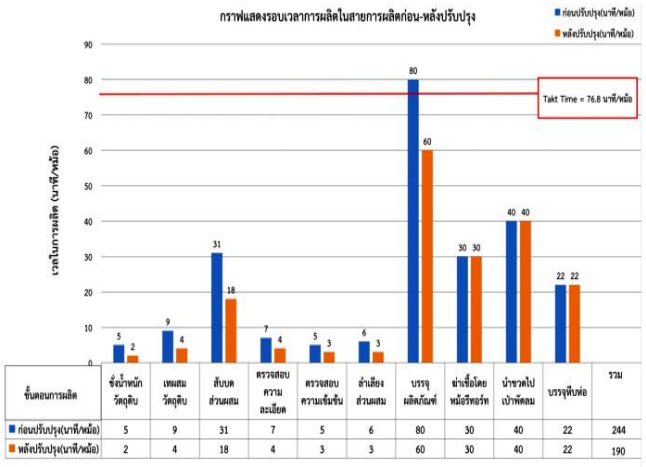
ลำดับ	ขั้นตอนการทำงาน	เวลาปกติ (นาที/หม้อ)	เวลามาตรฐาน (นาที/หม้อ)
1	การเตรียมวัตถุดิบ	4.24	5.13
2	การชั่งน้ำหนักวัตถุดิบก่อนลงหม้อต้ม	2.12	2.57
3	การเทผสมวัตถุดิบ	4.24	5.13
4	การสับบดส่วนผสม	19.08	23.09
5	การตรวจสอบความละเอียดของส่วนผสม	4.24	5.13
6	การตรวจสอบความเข้มข้นของส่วนผสม	3.18	3.85
7	ลำเลียงส่วนผสมไปถังพักรอบรรจุ	3.18	3.85
8	การบรรจุผลิตภัณฑ์	63.6	76.96
9	การฆ่าเชื้อโดยหม้อรีทอร์ท (Retort)	31.8	38.48
10	นำขวดไปเป่าพัดลมให้แห้ง	42.4	51.30
11	การบรรจุหีบห่อ	23.32	28.22
	รวม	202.1	243.71

2.5 การเปรียบเทียบรอบเวลาการผลิต (Cycle Time) และรอบจังหวะการผลิต (Takt time)

การคำนวณหารอบเวลาในการผลิตหลังทำการปรับปรุงและนำรอบเวลาการผลิต (Cycle Time)ทั้งหมด 11 ขั้นตอน มาเปรียบเทียบกับรอบเวลาการผลิตก่อนทำการปรับปรุงสายการผลิต โดยได้แสดงผลในการเปรียบเทียบในตารางที่ 3 และรูปที่ 3

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบรอบเวลาการผลิตก่อน-หลังปรับปรุง

ลำดับ	ขั้นตอนการทำงาน	ก่อนปรับปรุง (นาที/หม้อ)	หลังปรับปรุง (นาที/หม้อ)	ผลต่าง (นาที/หม้อ)
1	เตรียมวัตถุดิบ	9	4	ลดลง 5
2	ชั่งน้ำหนักวัตถุดิบ	5	2	ลดลง 3
3	เทผสมวัตถุดิบ	9	4	ลดลง 5
4	สับบดส่วนผสม	31	18	ลดลง 13
5	ตรวจสอบความละเอียดของส่วนผสม	7	4	ลดลง 3
6	ตรวจสอบความเข้มข้นของส่วนผสม	5	3	ลดลง 2
7	ลำเลียงส่วนผสมไปถังพักรอบรรจุ	6	3	ลดลง 3
8	บรรจุผลิตภัณฑ์	80	60	ลดลง 20
9	ฆ่าเชื้อโดยหม้อรีทอร์ท (Retort)	30	30	-
10	นำขวดไปเป่าพัดลมให้แห้ง	40	40	-
11	บรรจุฝาปิดห่อ	22	22	-
	รวม	244	190	ลดลง 54

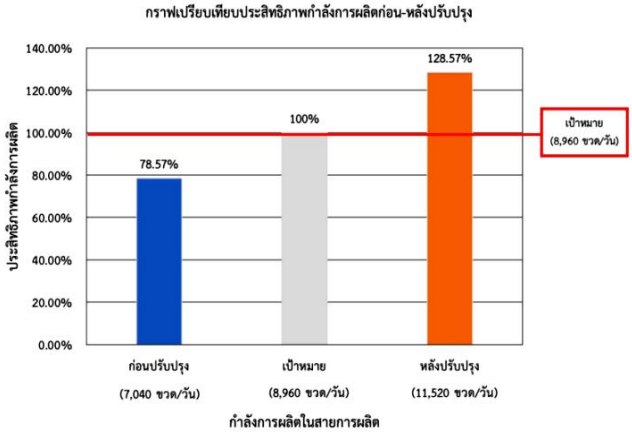


รูปที่ 3 กราฟการเปรียบเทียบรอบเวลาการผลิตก่อน-หลังทำการปรับปรุง

จากรูปที่3 หลังทำการปรับปรุงกระบวนการผลิตและได้ทำการเปรียบเทียบข้อมูลก่อน- หลัง พบว่า รอบเวลาการผลิตของขั้นตอนที่ 8 การบรรจุภัณฑ์ ที่เกิดปัญหาสภาพคอขวดขึ้น มีรอบเวลาการผลิต (Cycle Time) จากเดิม 80 นาที/หม้อ ลดลงเหลือ 60 นาที/หม้อ ซึ่งต่ำกว่า รอบจังหวะการผลิตที่ต้องการ (Takt Time) 76.8 นาที/หม้อ

2.6) การเปรียบเทียบประสิทธิภาพกำลังการผลิตก่อน-หลังการปรับปรุง

ประสิทธิภาพกำลังการผลิตในสายการผลิต ซึ่งก่อนทำการปรับปรุงกระบวนการผลิตนั้นสามารถผลิตได้เฉลี่ย 7,040 ขวด/วัน แต่โรงงานมีเป้าหมายในการผลิตที่ 8,960 ขวด/วัน และหลังจากทำการปรับปรุงกระบวนการผลิตแล้วสามารถผลิตได้ 11,520 ขวด/วัน ทำให้ประสิทธิภาพกำลังการผลิตจากเดิม 78.57% เพิ่มขึ้นเป็น 128.57% และทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตจากเดิม 35.42 % เพิ่มขึ้นเป็น 36.92 % โดยได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ กำลังการผลิตดังรูปที่ 4 และตารางที่ 4



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพกำลังการผลิต

2.7 สรุปผลการปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดปัญหาคอขวด

ผลการปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดปัญหาคอขวดในสายการผลิตด้วยการลดรอบเวลาการผลิตและเพิ่มประสิทธิภาพในสายการผลิต ทำให้รอบเวลาการผลิตลดเหลือ 60 นาที/หม้อ และเวลาในการผลิตรวมลดลงเหลือ 190 นาที/หม้อ กำลังการผลิตเพิ่มขึ้นเป็น 11,520 ขวด/วัน ส่วนด้านประสิทธิภาพกำลังการผลิตเพิ่มขึ้นเป็น 128.57% และประสิทธิภาพในการผลิ เพิ่มขึ้นเป็น 36.92 % ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สรุปผลการปรับปรุงกระบวนการผลิต

รายละเอียด	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	ผลต่าง
1. เวลารวมในการผลิต (นาที/หม้อ)	244 นาที/หม้อ	190 นาที/หม้อ	ลดลง 54 นาที (ลดลง 22.13%)
2. รอบเวลาการผลิต (Cycle Time)	80 นาที/หม้อ	60 นาที/หม้อ	ลดลง 20 นาที
3. กำลังการผลิต (9 ชั่วโมง/วัน)	7,040 ขวด/วัน	11,520 ขวด/วัน	4,480 ขวด/วัน (เพิ่มขึ้น 63.63%)
4. ประสิทธิภาพกำลังการผลิต	78.57%	128.57%	เพิ่มขึ้น 50%
5. ประสิทธิภาพการผลิต	35.42 %	36.92 %	เพิ่มขึ้น 1.5 %

2.8 ค่าใช้จ่ายในการทำงานล่วงเวลาก่อน-หลังทำการปรับปรุง

จากปัญหาการทำงานล่วงเวลาในสถานีที่ 2 การบรรจุผลิตภัณฑ์และสถานีที่ 3 สินค้าสำเร็จรูป หลังจากการแก้ไขปัญหาสภาพคอขวดสำเร็จแล้วนั้น ทำให้ลดค่าใช้จ่ายในด้านการทำงานล่วงเวลาลงได้ 100% จากเดิมต้องทำงานล่วงเวลาทุกวัน เปลี่ยนเป็นสามารถทำการผลิตได้เสร็จสิ้นในเวลาทำงานปกติ และค่าใช้จ่ายส่วนนี้ลดลงไปได้ 1,650 บ./วัน คิดเป็นเฉลี่ยต่อเดือน 49,500 บาท ซึ่งจะแสดงรายละเอียดไว้ดังตารางที่ 5 ทั้งนี้ยังช่วยให้ทำการผลิตได้ตามปริมาณที่ต้องการภายในเวลาที่กำหนดในชั่วโมงทำงานปกติโดยไม่ต้องมีการทำงานล่วงเวลา ส่งผลให้โรงงานกรณีศึกษาประหยัดค่าใช้จ่ายและลดต้นทุนการทำงานล่วงเวลาลงถึง 594,000 บาท/ปี

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบค่าแรงงานในการทำงานล่วงเวลา

กระบวนการผลิต	ค่าแรงงานในการทำงานล่วงเวลา (ชั่วโมงละ 50 บาท)			
	จำนวนพนักงาน (คน)	OT/วัน (บาท/วัน)	OT/เดือน (บาท/เดือน)	OT/ปี (บาท/ปี)
ก่อนปรับปรุง	11	50×3×11 = 1,650	150×11×30 = 49,500	49,500×12= 594,000
หลังปรับปรุง	ไม่มีการทำงานล่วงเวลาเกิดขึ้น			
ผลต่าง	-	1,650 (ลดลง 100%)	49,500 (ลดลง 100%)	594,000 (ลดลง 100%)

3. สรุปผลการวิจัย

การปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อแก้ปัญหาสภาพคอขวดสายการผลิตเครื่องปรุงแกงแดงไร้สาร: กรณีศึกษาอุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร ผู้วิจัยทำการศึกษาข้อมูลสายการผลิตเครื่องปรุงพริกแกงแดงไร้สาร บรรจุขวดแก้วขนาด 8 ออนซ์ ก่อนทำการปรับปรุงเป็นเวลา 5 เดือน และหลังจากที่ทำการปรับปรุงการผลิตแล้วเสร็จ ได้นำผลการวิเคราะห์มาทดลองใช้ในสายการผลิตจริงเป็นเวลา 2 เดือน ซึ่งพบว่าสามารถแก้ไขปัญหาสภาพคอขวดในสายการผลิตและเห็นผลได้อย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่างานวิจัยนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้จริง และบรรลุวัตถุประสงค์ครบถ้วนทุกประการ ซึ่งสามารถนำไปสรุปผลและข้อเสนอแนะ ดังนี้ ด้านการปรับปรุงกระบวนการผลิตมีข้อมูลชี้ให้เห็นว่า การประยุกต์ใช้หลักการศึกษางานและหลัก ECRS สามารถแก้ไขปัญหาสภาพคอขวดได้, สามารถลดความสูญเปล่า (Waste) ด้านการคอยงาน (Waiting), ลดปัญหาความล่าช้า (Delay) ในสายการผลิตและลดการสะสมงานจำนวนมาก (Work In Process) อย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้สายการผลิตดำเนินการผลิตได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่เกิดการสะดุด และสามารถลดค่าใช้จ่ายด้านการทำงานล่วงเวลาลงได้ สรุปได้ว่า การบูรณาการเทคนิคทางวิศวกรรมนี้ช่วยโรงงานบรรลุเป้าหมายการผลิตในเวลาปกติได้อย่างมีประสิทธิผล ดังที่ Hassanor และคณะ [6] ได้ใช้เทคนิค ECRS ลดรอบเวลาการทำงานในสถานีคอขวดของสายการประกอบได้อย่างเป็นรูปธรรม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Suhardi และคณะ [7] ที่ใช้หลักการดังกล่าวในการลดภาระงานที่ไม่จำเป็นเพื่อปรับสมดุลสายการผลิต นอกจากนี้งานวิจัยของ Kittichotsatsawatและคณะ [8] ยังพิสูจน์แล้วว่า การบูรณาการการจัดสมดุลสายการผลิต (Line Balancing) ร่วมกับ ECRS ในอุตสาหกรรมแปรรูปสามารถลดรอบเวลารวมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งทิศทางการวิจัยระดับสากลเหล่านี้ล้วนสอดคล้องกับแนวคิดของงานวิจัยนี้เช่นเดียวกัน

4. เอกสารอ้างอิง

[1] มงคล กิตติญาณขจร, “การลดความสูญเปล่าในกระบวนการบรรจุถั่วลิสงคั่วทรายโดยการประยุกต์เทคนิคการจัดสมดุลสายการผลิตและECRS” , วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม, ปีที่15, ฉบับที่1, หน้า11-22, 2565.

[2] จักรพันธ์ กังแฮ, สมศักดิ์ แก้วพลอย, ศุภชัย ชัยณรงค์, และกุลยุทธ บุญเซ่ง,“การลดความสูญเสียในสายการผลิตปลาทูน่ากระป๋อง”,รายงานสืบเนื่องการประชุมวิชาการราชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการครั้งที่ 9 (RMTC2024), เชียงราย, 2567, หน้า 1-6.

[3] จิรกาล กัลยาโพธิ์ และ จิรพัฒน์ เงาประเสริฐวงศ์, “การลดความสูญเปล่าในกระบวนการผลิตยางรองล้อรถยนต์”, วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, ปีที่ 28, ฉบับที่ 1, หน้า 78 - 92, 2564.

[4] สุมาลี สระจันทร์, “การปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดความสูญเปล่า กรณีศึกษา: การผลิตชิ้นส่วนอะลูมิเนียม”, วารสารวิจัย มทร. กรุงเทพ, ปีที่ 11, ฉบับที่ 2, หน้า 112-124, 2560.

[5] Y. Kittichotsatsawat, W. Wattanutchariya, A. Jongjareonrak, and P. Seesuriyachan, “Enhancing Manu- facturing Operations With the Supply Chain for Sustainable Frozen Shrimp Production”, Sustainability, vol. 17,no. 6, p. 2412, Mar. 2025.

[6] M. T. Hassanor, N. H. Nurdin, A. Mohamed, and F. F. Abdul Aziz, “Application of LeanManufacturing Tools for Cycle Time Reduction & Productivity Improvement in Cleanroom Actuator Assembly: A Case Study Using ECRS and Kaizen Approaches,” International Journal of Research and Innovation in Social Science, vol. 9, no. 8, pp. 2801 - 2811, 2025.

[7] B. Suhardi, N. Anisa, and P. W. Laksono, “Minimizing waste using lean manufacturing and ECRS principle in Indonesian furniture industry”, Cogent Engineering, vol.6, no. 1, p. 1567019, Jan. 2019.

ประวัติผู้เขียนบทความ

อ.พรพิศ ศิริมา

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

งานวิจัยที่สนใจ:

- การปรับปรุง, พัฒนาการผลิตด้วยเครื่องมือทาง IE

- การปรับปรุง, พัฒนาการผลิต และวิเคราะห์โดย Hidden Markov Model(HMM)

- การปรับปรุง, พัฒนาการผลิต และวิเคราะห์โดยเครื่องมือทางสถิติวิศวกรรม และ Operation Rearch

ประวัติผู้เขียนบทความ

นางสาวขนิษฐา ปั้นสวย

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ประวัติผู้เขียนบทความ

นางสาวเฌอกชกร สังสุด

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

แนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพสายการผลิตด้วยการจำลองระบบ และประเมินความคุ้มค่าการลงทุนเพิ่มเครื่องจักร

Improving production line efficiency through system simulation and evaluation of investment value of additional machinery

พงษ์ชยธรณ์ สาสนัส[1*] , พัฒนา ภาคพจน์[1*] และ สมพงษ์ เชื้อพระคา[2*]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถนนพิบูลสงคราม แขวงบางซื่อ เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800 E-mail : peak6878@gmail.com

[2]ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถนนพิบูลสงคราม แขวงบางซื่อ เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800 E-mail : sompong.c@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์และปรับปรุงประสิทธิภาพของสายการผลิต โดยทำการศึกษากระบวนการผลิต วิเคราะห์เวลาการทำงาน และระบุจุดคอขวดของระบบการผลิต พร้อมทั้งจำลองสถานการณ์การผลิตด้วยโปรแกรม FlexSim เพื่อประเมินแนวทางการปรับปรุงที่เหมาะสม จากการศึกษาพบว่าเครื่องจักร CNC Lathe (CL) มีอัตราการใช้ประโยชน์สูงที่สุดและเป็นจุดคอขวดของสายการผลิต ส่งผลให้กำลังการผลิตในปัจจุบันอยู่ที่ประมาณ 84 ชิ้นต่อวัน แนวทางการปรับปรุงเสนอให้เพิ่มเครื่องจักร CNC Lathe อีก 1 เครื่อง เพื่อลดภาระงานของเครื่องจักรเดิมและเพิ่มความสามารถในการผลิต จากผลการจำลองสถานการณ์หลังการปรับปรุงพบว่าสามารถเพิ่มกำลังการผลิตได้เป็นประมาณ 87 ชิ้นต่อวัน หรือเพิ่มขึ้น 3 ชิ้นต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 3.57 นอกจากนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการลงทุน โดยกำหนดต้นทุนการลงทุนเครื่องจักรประมาณ 1,400,000 บาท และจากกำลังการผลิตที่เพิ่มขึ้นสามารถสร้างกำไรเพิ่มขึ้นประมาณ 165,000 บาทต่อปี ส่งผลให้ระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่ประมาณ 8.48 ปี ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มเครื่องจักรสามารถช่วยลดปัญหาคอขวดของสายการผลิต เพิ่มประสิทธิภาพการผลิต และรองรับปริมาณงานที่อาจเพิ่มขึ้นในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : การจำลองสถานการณ์การผลิต; การวิเคราะห์คอขวด; FlexSim

Abstract

This research aims to analyze and improve the efficiency of a production line by studying the production process, analyzing working time, and identifying bottlenecks in the production system. Production simulation using FlexSim software was used to evaluate the most suitable improvement plan. The study found that the CNC Lathe (CL) had the highest utilization rate and was the bottleneck in the production line, resulting in a current production capacity of approximately 84 units per day. The proposed improvement plan involves adding another CNC Lathe to reduce the workload of the existing machine and increase production capacity. Simulation results after the improvement plan show a potential increase in production capacity to approximately 87 units per day, or an increase of 3 units per day, or 3.57%. Furthermore, an economic feasibility analysis was conducted, with an estimated investment cost of 1,400,000 baht and an estimated annual profit increase of approximately 165,000 baht from the increased production capacity. The payback period is approximately 8.48 years. The research results demonstrate that adding another machine can effectively reduce production line bottlenecks, improve production efficiency, and accommodate potential future workload increases.

Keywords: Production simulation; Bottleneck analysis; flexsim

1. บทนำ

ในปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมการผลิตมีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ โดยเฉพาะอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนที่ต้องอาศัยความแม่นยำและประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตเป็นสำคัญ อย่างไรก็ตาม ในกระบวนการผลิตที่ประกอบด้วยหลายสถานีงาน มักประสบปัญหาความไม่สมดุลของสายการผลิต ซึ่งส่งผลให้เกิดคอขวด (Bottleneck) และทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบลดลง จากการศึกษากระบวนการผลิตในกรณีศึกษาพบว่า เครื่องจักร CNC Lathe (CL) เป็นสถานีงานที่ใช้ระยะเวลาในการทำงานสูงที่สุดเมื่อเทียบกับสถานีงานอื่น ส่งผลให้มีอัตราการใช้งานเครื่องจักรสูง และเกิดการรอคอยของชิ้นงานในกระบวนการผลิต ทำให้กำลังการผลิตโดยรวมของระบบไม่เป็นไปตามเป้าหมายที่กำหนดเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว การนำเทคนิคการศึกษางานร่วมกับการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม FlexSim มาใช้ จะช่วยให้สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่ต้องกระทบต่อระบบการผลิตจริง อีกทั้งยังสามารถทดลองแนวทางการปรับปรุงในรูปแบบต่าง ๆ ได้ล่วงหน้า

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์และปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต โดยมุ่งเน้นการลดปัญหาคอขวดของเครื่อง CNC Lathe ผ่านการประยุกต์ใช้หลักการ ECRS และการเพิ่มเครื่องจักร เพื่อเพิ่มกำลังการผลิตและปรับสมดุลของสายการผลิตให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การศึกษากระบวนการผลิต

สามารถอธิบายขั้นตอนในการผลิตชิ้นส่วน PT-282083 ได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เครื่อง CNC Lathe (CL) เป็นกระบวนการเริ่มต้นของการขึ้นรูปชิ้นงาน Outer Pipe โดยมีหน้าที่หลักในการกลึงผิวนอกและปรับขนาดพื้นฐานของชิ้นงานให้ได้ใกล้เคียงตามแบบมากที่สุด

ขั้นตอนที่ 2 เครื่อง NC Lathe (NC) เครื่อง NC Lathe (NC) เป็นกระบวนการต่อเนื่องจากเครื่อง CL โดยมีหน้าที่ในการเก็บรายละเอียดของชิ้นงานเพิ่มเติม เช่น การกลึงรูใน และปรับขนาดให้ได้ค่าที่แม่นยำมากขึ้น

ขั้นตอนที่ 3 เครื่อง Bench Lathe (BN) เป็นกระบวนการที่ใช้สำหรับเก็บผิวชิ้นงาน, ลบคม และทำลวดลายผิว (รูดลาย) เพื่อให้ชิ้นงานมีคุณภาพผิวและความสวยงาม

ขั้นตอนที่ 4 กระบวนการทำความสะอาด (UL07) เป็นขั้นตอนในการทำความสะอาดชิ้นงาน เพื่อขจัดคราบน้ำมัน, เศษโลหะ และสิ่งสกปรกที่เกิดขึ้นจากกระบวนการกลึงก่อนหน้า

ขั้นตอนที่ 5 กระบวนการยิงทราย (SAND) กระบวนการยิงทรายเป็นขั้นตอนสุดท้ายของการศึกษานี้ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับสภาพผิวของชิ้นงานให้สม่ำเสมอและเหมาะสม

2.2 การเก็บข้อมูลและวิเคราะห์เวลา

ทำการเก็บข้อมูลเวลาการทำงานในแต่ละกระบวนการ โดยใช้เทคนิคการศึกษาการทำงาน (Work Study) และการจับเวลา (Time Study) เพื่อหาค่า Cycle Time ของแต่ละสถานีงาน ดังตารางที่ 1 จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาเวลาปกติ (Normal Time) และเวลามาตรฐาน (Standard Time) โดยพิจารณาค่าเผื่อเวลา (Allowance) เพื่อให้สะท้อนการทำงานจริงของ

ตารางที่ 1 บันทึกการจับเวลา

เครื่องจักร	บันทึกการจับเวลาการทำงานเครื่อง CL (กลึงชิ้นงาน) / นาที									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CL	5.46	5.48	5.49	5.44	5.50	5.48	5.51	5..48	5.49	5.44
	5.52	5.55	5.51	5.54	5.46	5..49	5.45	5.54	5.47	5.51
	5.50	5.53	5.47	5.53	5.52	5.47	5.50	5.46	5.52	5.48

จากตารางที่ 1 มีวิธีการคำนวณแทนค่าในสมการดังนี้

$$N = \left[\frac{\frac{Z}{k}\sqrt{n\sum x^2-(\sum x)^2}}{\sum x}\right]^2 \quad (1)$$

$$N = \left|\frac{\frac{2}{0.05}\sqrt{(30)(905.7734)-27155.7441}}{164.79}\right|^2$$

N = 1.03 ครั้ง

คำนวณหา (Cycle Time) ดังแสดงในสมการที่ (2)คำนวณหาเวลาปกติ (Normal Time) ดังแสดงในสมการที่ (3) และคำนวณหาเวลามาตรฐาน (Standard Time) ดังแสดงในสมการที่ (4)

Cycle Time = ผลรวมการจับเวลา/จำนวณครั้งที่จับเวลา (2)

Cycle Time = 164.79 / 30 = 5.49 นาที

Normal Time = Selected Time × Rating Factor (3)

Normal Time = 5.49 x 1.12 = 6.15 นาที/ชิ้น

ดังนั้นเวลาปกติของเครื่อง CL = 6.15 นาที/ชิ้น

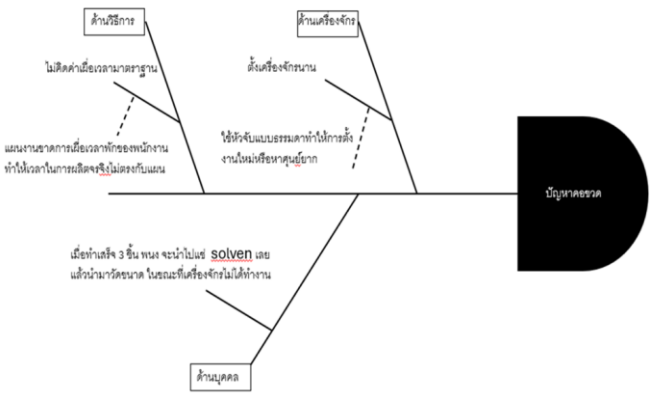
Standard Time = Normal Time + (Normal Time × Allowance) (4)

Standard Time = 6.15 x (1 + 0.15) = 7.07 นาที/ชิ้น

ดังนั้นเวลามาตรฐานของเครื่อง CL = 13 นาท

2.3 การวิเคราะห์ปัญหาของกระบวนการผลิต

การวิเคราะห์กระบวนการผลิตในงานวิจัยนี้ พิจารณาจากลักษณะการผลิตแบบเป็นชุด (Batch Production) ซึ่งมีการพักชิ้นงานระหว่างกระบวนการ โดยพิจารณาจากข้อมูลเวลาการทำงานของแต่ละสถานีงาน อัตราการใช้ประโยชน์ของเครื่องจักร (Utilization) และปริมาณการสะสมของชิ้นงานระหว่างกระบวนการผลิตจากการวิเคราะห์พบว่า เครื่อง CNC Lathe (CL) มีระยะเวลาในการทำงานสูงกว่าสถานีงานอื่น และมีอัตราการใช้ประโยชน์ของเครื่องจักรสูงที่สุด ส่งผลให้เกิดการสะสมของชิ้นงานหลังจากกระบวนการผลิตในขั้นตอนนี้ เนื่องจากกำลังการผลิตของเครื่องจักรไม่เพียงพอต่อความต้องการของระบบโดยรวม โดยมีปัญหาดังนี้ 1) ในขั้นตอนย่อย ซึ่งประกอบด้วยการนำงานไปแช่สารเคมี Solven 1425 และการวัดขนาดชิ้นงานด้วยไมโครมิเตอร์ พบว่าปัจจุบันเมื่อทำเสร็จทุกๆ 3ชิ้น นำมาแช่สารเคมีแล้ววัดขนาดในตอนที่เครื่องไม่ได้ทำงาน ทำให้เครื่องจักรเสียโอกาสในการผลิตชิ้นงานถัดไป 2) ปัญหาสำคัญอีกหนึ่งที่พบในขั้นตอนการเตรียมเครื่องคือ เวลา Setup ที่สูงถึง 57 นาที จากเครื่อง CL เนื่องจาก อุปกรณ์จับยึด เดิมไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ ในการช่วยประคองศูนย์กลางของชิ้นงานส่งผลให้พนักงานต้องใช้เวลาในการปรับตั้งแบบลองผิดลองถูกและต้องทำการทดสอบกลึงชิ้นแรกหลายครั้งเพื่อป้องกันงานเสียที่ต้องคุมไม่ให้เกินร้อยละ 2 ความไม่แน่นอนของอุปกรณ์สนับสนุนนี้เองที่ทำให้พนักงานเกิด



ความกังวลและต้องใช้เวลาตรวจสอบหน้าเครื่องนานขึ้น แสดงดังรูปที่ 1

รูปที่ 1 แผนภูมิก้างปลาแสดงถึงปัญหา

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า เครื่อง CNC Lathe (CL) เป็นคอขวดของกระบวนการผลิต ซึ่งส่งผลต่อกำลังการผลิตโดยรวมของระบบและเป็นจุดสำคัญที่ต้องได้รับการปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสายการผลิต

2.4 การสร้างแบบจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม FlexSim

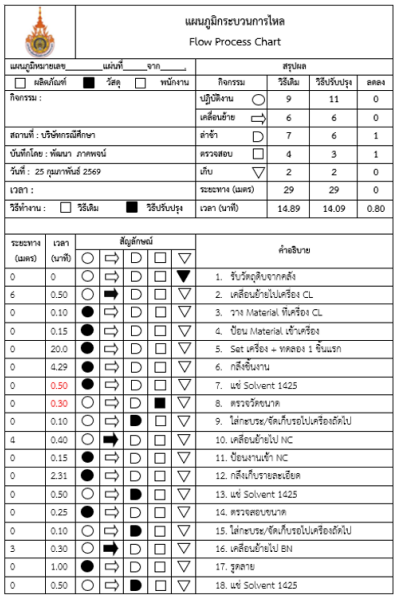
การสร้างแบบจำลองสถานการณ์ของสายการผลิตดำเนินการโดยใช้โปรแกรม FlexSim เพื่อจำลองการทำงานของระบบการผลิตและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต โดยนำข้อมูลจากการศึกษากระบวนการผลิตและข้อมูลเวลาการทำงานของแต่ละสถานีงานมาใช้เป็นข้อมูลนำเข้าในการสร้างแบบจำลองแบบจำลองที่สร้างขึ้นถูกออกแบบให้สอดคล้องกับระบบการผลิตจริง โดยกำหนดลำดับการไหลของชิ้นงานตามขั้นตอนการผลิต ซึ่งประกอบด้วยสถานีงานหลัก ได้แก่ เครื่อง CNC Lathe (CL) เครื่อง NC เครื่อง BN กระบวนการล้างชิ้นงาน และกระบวนการยิงทราย โดยใช้วัตถุพื้นฐานในโปรแกรม FlexSim เช่น Source, Queue, Processor และ Sink เพื่อแทนองค์ประกอบต่าง ๆ ภายในระบบการผลิตในการสร้างแบบจำลอง ผู้วิจัยได้ทำการกำหนดจำนวนวัตถุและการเชื่อมต่อให้สอดคล้องกับกระบวนการผลิตจริง โดยเริ่มจาก Source เป็นจุดเริ่มต้นของชิ้นงาน จากนั้นเชื่อมต่อไปยัง Queue และ Processor ของแต่ละสถานีงานตามลำดับขั้นตอน ได้แก่ CL, NC, BN, การล้าง และการยิงทราย จนถึง Sink ซึ่งเป็นจุดสิ้นสุดของกระบวนการผลิต นอกจากนี้ยังได้กำหนดค่าเวลาในการทำงาน (Process Time) ของแต่ละสถานีงานตามข้อมูลที่ได้จากการศึกษา Time Study เพื่อให้แบบจำลองสะท้อนการทำงานจริงของระบบสำหรับการตั้งค่าแบบจำลองได้กำหนดอัตราการปล่อยชิ้นงานจาก Source โดยอ้างอิงจากความสามารถของเครื่อง CNC Lathe ซึ่งเป็นคอขวดของระบบ เพื่อให้การจำลองมีความสมจริงและสามารถแสดงข้อจำกัดของระบบการผลิตได้อย่างถูกต้อง

2.5 แนวทางการปรับปรุงกระบวนการผลิต

จากการวิเคราะห์ปัญหาคอขวดของสายการผลิตที่สถานีเครื่อง CNC Lathe (CL) พบว่าสาเหตุหลักเกิดจากระยะเวลาในการปรับตั้งเครื่อง (Setup Time) ที่สูง และความสูญเสียจากวิธีการปฏิบัติงานที่ไม่เหมาะสม ดังนั้นผู้วิจัยจึงเสนอแนวทางการปรับปรุงโดยมุ่งเน้นทั้งด้านเครื่องจักรและวิธีการทำงาน

2.5.1 การปรับปรุงด้านเครื่องจักรและอุปกรณ์ จากการศึกษาพบว่าการปรับตั้งเครื่อง CL ใช้เวลาสูงถึงประมาณ 57 นาทีต่อหนึ่งล็อต โดยเฉพาะขั้นตอนการตั้งศูนย์ชิ้นงานที่ต้องอาศัยทักษะของพนักงานและใช้เวลานาน ผู้วิจัยจึงเสนอการประยุกต์ใช้อุปกรณ์จับยึดแบบชุดประคองศูนย์อัตโนมัติ (Self-Centering Steady Rest) ซึ่งสามารถจัดตำแหน่งชิ้นงานให้อยู่ในแกนกลางได้โดยอัตโนมัติ ลดความจำเป็นในการใช้เครื่องมือวัดและการปรับตั้งด้วยมือการนำอุปกรณ์ดังกล่าวมาใช้ช่วยลดขั้นตอนที่ซ้ำซ้อน ลดความคลาดเคลื่อนในการตั้งศูนย์ และเพิ่มความเสถียรในการกลึง ส่งผลให้สามารถลดระยะเวลาในการปรับตั้งเครื่องจาก 57 นาที เหลือประมาณ 20 นาที ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตอย่างมีนัยสำคัญ

2.5.2 การปรับปรุงวิธีการทำงานด้วยหลักการ ECRS นอกจากการปรับปรุงด้านอุปกรณ์แล้ว ผู้วิจัยยังได้ประยุกต์ใช้หลักการ ECRS เพื่อปรับปรุงลำดับขั้นตอนการทำงาน โดยมุ่งลดความสูญเสียจากการรอคอยของเครื่องจักรและพนักงาน โดยมีแนวทางสำคัญดังนี้ 1.การจัดลำดับงานใหม่ (Rearrange) โดยให้พนักงานทำการเปลี่ยนชิ้นงานใหม่ทันทีเมื่อเครื่องจักรพร้อมทำงาน เพื่อลดเวลาการว่างของเครื่องจักร 2.การรวมขั้นตอนการทำงาน (Combine) โดยดำเนินการทำความสะอาดและตรวจสอบคุณภาพควบคู่ไปกับการทำงานของเครื่องจักร 3.การลดขั้นตอนที่ไม่จำเป็น (Eliminate) โดยขจัดเวลาการรอคอยของเครื่องจักรและพนักงาน แสดงดังรูปที่ 2



แผนภูมิกระบวนการไหล
Flow Process Chart

ระยะทาง (เมตร)	เวลา (นาที)	สัญลักษณ์	คำอธิบาย
0	0		1. รับวัตถุดิบจากคลัง
6	0.50		2. เคลื่อนย้ายไปเครื่อง CL
0	0.10		3. วาง Material ที่เครื่อง CL
0	0.15		4. ป้อน Material เข้าเครื่อง
0	20.0		5. Set เครื่อง + ทดลอง 1 ชิ้นแรก
0	4.29		6. กลึงชิ้นงาน
0	0.50		7. แช่ Solvent 1425
0	0.30		8. ตรวจวัดขนาด
0	0.10		9. ใส่กะบะ/จัดเก็บรอไปเครื่องถัดไป
4	0.40		10. เคลื่อนย้ายไป NC
0	0.15		11. ป้อนงานเข้า NC
0	2.31		12. กลึงเก็บรายละเอียด
0	0.50		13. แช่ Solvent 1425
0	0.25		14. ตรวจสอบขนาด
0	0.10		15. ใส่กะบะ/จัดเก็บรอไปเครื่องถัดไป
3	0.30		16. เคลื่อนย้ายไป BN
0	1.00		17. รูดลาย
0	0.50		18. แช่ Solvent 1425

รูปที่ 2 แนวทางแผนภูมิกระบวนการไหล

2.6 ผลการแก้ไขปัญหาและแนวทางการปรับปรุง

หลังจากการดำเนินการปรับปรุงกระบวนการผลิตโดยประยุกต์ใช้หลักการ ECRS ผู้วิจัยได้ทำการคำนวณเวลามาตรฐานใหม่รวมถึงประสิทธิภาพของสายการผลิต เพื่อเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการปรับปรุง ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบผลก่อนและหลังปรับปรุง

รายการเปรียบเทียบ	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	ต่างจากเดิม	การเปลี่ยนแปลง
เวลามาตรฐานรวม (นาที/ชิ้น)	15.64	14.84	-0.80	ลดลง 5.12%
เวลาคอขวด CL (นาที/ชิ้น)	7.07	6.27	-0.80	ลดลง 11.32%
Line Efficiency (%)	44.24	47.34	+3.10	เพิ่มขึ้น 7.01%

จากตารางที่ 2 พบว่า ภายหลังการปรับปรุงสามารถลดเวลามาตรฐานรวมของกระบวนการผลิตได้ 0.80 นาทีต่อชิ้น คิดเป็นร้อยละ 5.12 ขณะเดียวกันเวลาคอขวดของเครื่องจักร CL ลดลงจาก 7.07 นาที เหลือ 6.27 นาที คิดเป็นร้อยละ 11.32 ส่งผลให้ประสิทธิภาพสายการผลิต (Line Efficiency) เพิ่มขึ้นจาก 44.24% เป็น 47.34% หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 7.01 ผลลัพธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการจัดลำดับขั้นตอนการทำงานใหม่และการรวมกิจกรรมบางส่วนสามารถลดความสูญเปล่า และช่วยเพิ่มความสมดุลของสายการผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ เพื่อยืนยันผลการปรับปรุงในเชิงระบบ ผู้วิจัยได้ทำการจำลองการทำงานของสายการผลิตโดยใช้โปรแกรม FlexSim เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบก่อนและหลังการปรับปรุง จะนำเสนอการวิเคราะห์ในลำดับถัดไป

2.7 การจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม FlexSim

ในบทนี้จะนำแบบจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม FlexSim มาใช้ในการวิเคราะห์ผลลัพธ์และประเมินทางเลือกในการแก้ไขปัญหาเครื่อง CNC Lathe (CL) ซึ่งได้รับการยืนยันว่าเป็นจุดคอขวดหลักในกระบวนการผลิตชิ้นงาน PT-282083 การใช้แบบจำลองสถานการณ์ถือเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการทำความเข้าใจพฤติกรรมและแก้ไขปัญหาของระบบการทำงานที่ซับซ้อน โดยไม่จำเป็นต้องทำการเปลี่ยนแปลงในระบบการผลิตจริง วัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์ในบทนี้คือการเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่าง ระบบปัจจุบัน และ ระบบทางเลือก ซึ่งคือการพิจารณาจัดซื้อเครื่อง CL เพิ่มเติมหนึ่งเครื่องเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการผลิต

2.7.1 ผลการจำลองสถานการณ์ปัจจุบัน หลังจากได้ทำการสร้างแบบจำลองสถานการณ์ปัจจุบันของระบบการผลิตในโปรแกรม FlexSim แล้ว ผู้วิจัยได้ทำการจำลองการทำงานของระบบเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตก่อนการปรับปรุง โดยใช้ข้อมูลเวลามาตรฐานของแต่ละสถานีงานที่ได้จากการศึกษาในบทที่ 3 เป็นค่าในการกำหนดเวลาในการทำงานของเครื่องจักรในแบบจำลอง ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การจำลองสถานการณ์ของระบบการผลิตก่อนปรับปรุง

สถานีงาน	Processing Time (นาที)	Utilization (%)	Idle Time (%)
CL	7.07	98.5	1.5
NC	4.27	58.7	41.3
BN	2.32	31.8	68.2
UL07	0.69	9.3	90.7
SAND	1.29	17.5	82.7

2.7.2 การจำลองสถานการณ์หลังการปรับปรุงระบบ จากผลการจำลองสถานการณ์ของระบบการผลิตก่อนการปรับปรุงในหัวข้อที่ผ่านมา พบว่าสถานีงาน CL มีอัตราการใช้งานเครื่องจักรสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสถานีงานอื่นในระบบการผลิต ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสถานีงานดังกล่าวเป็นคอขวดของกระบวนการผลิต และส่งผลให้เกิดการสะสมของชิ้นงานก่อนเข้าสู่กระบวนการดังกล่าวดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยจึงได้เสนอแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการทำงานของสถานีงาน CL เพื่อลดระยะเวลาในการทำงานของกระบวนการดังกล่าว โดยประยุกต์ใช้หลักการ ECRS ในการวิเคราะห์ขั้นตอนการทำงาน และหาแนวทางในการลดความสูญเปล่าที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังได้เสนอแนวทางการใช้อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Jig) เพื่อช่วยให้การจัดวางและยึดจับชิ้นงานในระหว่างกระบวนการผลิตสามารถทำได้สะดวกและรวดเร็วมากยิ่งขึ้น ซึ่งคาดว่าจะสามารถช่วยลดระยะเวลาในการทำงานของสถานีงาน CL ค่าหลังปรับปรุงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการจำลองสถานการณ์ของระบบการผลิตหลังการปรับปรุง

สถานีงาน	Utilization ก่อนปรับปรุง (%)	Utilization หลังปรับปรุง (%)	Idle Time ก่อนปรับปรุง (%)	Idle Time หลังปรับปรุง (%)
CL	98.5	98.9	1.5	1.1
NC	58.7	76.1	41.3	23.9
BN	31.8	41.1	68.2	58.9
UL07	9.3	12.2	90.7	87.8
SAND	17.5	22.7	82.5	77.3

2.7.3 การจำลองสถานการณ์เพิ่มเครื่องจักรจากผลการจำลองสถานการณ์หลังการปรับปรุงในหัวข้อที่ผ่านมา พบว่าสถานีงาน CL ยังคงมีอัตราการใช้งานเครื่องจักรสูงที่สุดในระบบการผลิต โดยมีค่า Utilization เท่ากับ 98.9 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสถานีงานดังกล่าวยังคงเป็นคอขวดของกระบวนการผลิต ถึงแม้ว่าจะมีการเสนอแนวทางปรับปรุงโดยการลดระยะเวลาในการทำงานด้วยหลักการ ECRS และการใช้อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Jig) แล้วก็ตามดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดลองจำลองสถานการณ์โดยเพิ่มเครื่องจักรในสถานีงาน CL อีก 1 เครื่อง เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อประสิทธิภาพของระบบการผลิต สรุปค่าหลังทำการเพิ่มเครื่อง ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การจำลองสถานการณ์เพิ่มเครื่องจักร

สถานีงาน	Processing Time (นาที)	Utilization (%)	Idle Time (%)
CL1	5.49	49.2	50.8
CL2	5.49	49.7	50.3
NC	4.27	76.1	23.9
BN	2.32	41.1	58.9
UL07	0.69	12.2	87.8
SAND	1.29	22.7	77.3

จากตารางที่ 5 ผลการจำลองสถานการณ์หลังการเพิ่มเครื่องจักรในสถานีงาน CL พบว่าอัตราการใช้งานเครื่องจักรของสถานีงาน CL ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการเพิ่มเครื่องจักร เนื่องจากปริมาณงานถูกกระจายไปยังเครื่องจักรที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ภาระการทำงานของเครื่องจักรแต่ละเครื่องลดลงนอกจากนี้ยังพบว่าสถานีงานอื่น ๆ ในกระบวนการผลิตมีอัตราการใช้งานเครื่องจักรเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มเครื่องจักรในสถานีงาน CL สามารถช่วยลดข้อจำกัดของคอขวดในระบบการผลิต และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของกระบวนการผลิตได้

2.8 ผลการวิจัย

ผลการจำลองสถานการณ์หลังการปรับปรุง หลังจากดำเนินการปรับปรุงกระบวนการผลิต โดยการเพิ่มเครื่อง CNC Lathe อีก 1 เครื่อง และปรับปรุงวิธีการทำงานตามหลักการ ECRS รวมถึงการลดระยะเวลาในการปรับตั้งเครื่องจักร พบว่าสายการผลิตสามารถเพิ่มกำลังการผลิตได้เป็นเฉลี่ยประมาณ 87 ชิ้นต่อวัน นอกจากนี้ยังพบว่าการสะสมของชิ้นงานในระบบลดลง และการทำงานของเครื่องจักรมีความสมดุลมากขึ้น นอกจากผลด้านกำลังการผลิตแล้ว การปรับปรุงกระบวนการยังส่งผลต่อระยะเวลาในการดำเนินงานของสถานีเครื่อง CNC Lathe (CL) อย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่าระยะเวลาในการปรับตั้งเครื่องจักร (Setup Time) สามารถลดลงจากเดิมประมาณ 57 นาทีต่อหนึ่งล็อต เหลือประมาณ 20 นาทีต่อหนึ่งล็อต เนื่องจากการนำอุปกรณ์ชุดประคองศูนย์อัตโนมัติเข้ามาใช้ ซึ่งช่วยลดขั้นตอนการตั้งศูนย์แบบเดิมที่ต้องอาศัยทักษะของพนักงาน และจากการปรับปรุงวิธีการทำงานตามหลักการ ECRS ยังส่งผลให้ Cycle Time ของสถานีงาน CL ลดลงจาก 5.49 นาทีต่อชิ้น เหลือ 4.69 นาทีต่อชิ้น หรือลดลง 0.80 นาที คิดเป็นร้อยละ 14.57 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการลดความสูญเสียจากการรอคอยและการทำงานที่ซ้ำซ้อน

3. สรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและหาแนวทางในการแก้ไขปัญหาคอขวดของสายการผลิต โดยใช้การจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม FlexSim เป็นเครื่องมือหลักในการวิเคราะห์ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาและจัดทำเวลามาตรฐานของกระบวนการผลิต เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการประเมินประสิทธิภาพของระบบ รวมถึงการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการลงทุนเพิ่มเครื่องจักร

ผลการวิจัยพบว่า การจำลองสถานการณ์สามารถช่วยระบุข้อจำกัดของระบบการผลิตได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะสถานีเครื่อง CNC Lathe ซึ่งเป็นคอขวดของกระบวนการ เมื่อดำเนินการปรับปรุงโดยการเพิ่มเครื่องจักรและปรับปรุงวิธีการทำงาน ส่งผลให้กำลังการผลิตเพิ่มขึ้นจาก 84 ชิ้นต่อวัน เป็น 87 ชิ้นต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 3.57 พร้อมทั้งสามารถลดระยะเวลาในการปรับตั้งเครื่องจักรและลด Cycle Time ของกระบวนการได้อย่างมีนัยสำคัญนอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์แสดงให้เห็นว่า แนวทางการปรับปรุงที่นำเสนอมีความเหมาะสมและคุ้มค่าในระยะยาว สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของสายการผลิตและนำไปประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมได้จริง

4. กิตติกรรมประกาศ

ทางผู้วิจัยขอขอบคุณโรงงานกรณีศึกษา และอาจารย์ สมพงษ์ เชื้อพระคา ที่ปรึกษาวิจัยในครั้งนี้ อีกทั้งสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

เอกสารอ้างอิง

[1] สุพจน์ ศรีประเสริฐ ได้ศึกษาแนวคิดการวัดประสิทธิภาพการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม โดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์อัตราการใช้ประโยชน์ของทรัพยากรการผลิต เช่น เครื่องจักรและแรงงาน ผู้วิจัยได้นำตัวชี้วัดด้านประสิทธิภาพ ได้แก่ อัตราการใช้ประโยชน์เครื่องจักร (Utilization), ผลผลิต (Output) และเวลาสูญเสีย (Idle Time) มาใช้ในการประเมินผลการดำเนินงานของสายการผลิต ผลการศึกษาพบว่าการวัดประสิทธิภาพอย่างเป็นระบบช่วยให้สามารถระบุจุดคอขวดของกระบวนการผลิต และเป็นพื้นฐานสำคัญในการปรับปรุงกระบวนการให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น, 2560.

[2] วิจิตร ตันตสิทธิ์ และคณะ ได้ทำการศึกษาการทำงานและการวัดเวลาในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนอุตสาหกรรม โดยใช้เทคนิคการศึกษาวิธีการทำงาน (Method Study) ร่วมกับการวัดงาน (Work Measurement) เพื่อหามาตรฐานเวลาการทำงานของแต่ละขั้นตอน ผู้วิจัยได้วิเคราะห์การเคลื่อนไหวที่ไม่จำเป็นและปรับปรุงลำดับขั้นตอนการทำงาน ผลการศึกษาพบว่าสามารถลดเวลาการผลิตลงได้อย่างมีนัยสำคัญ และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้เครื่องจักรและแรงงานในสายการผลิต, 2561.

[3] ประจวบ กล่อมจิตร และกัญญา ทองสนิท ได้ศึกษาการใช้โปรแกรมจำลองสถานการณ์เพื่อวิเคราะห์ระบบการผลิต โดยใช้แนวคิดการจำลองแบบเหตุการณ์ไม่ต่อเนื่อง (Discrete Event Simulation) เพื่อศึกษาพฤติกรรมของสายการผลิตภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ ผู้วิจัยใช้การจำลองเพื่อประเมินอัตราการผลิต การใช้ประโยชน์ของเครื่องจักร และการเกิดคอขวดในระบบ ผลการศึกษาพบว่าการใช้โปรแกรมจำลองช่วยให้สามารถทดสอบแนวทางการปรับปรุงระบบได้โดยไม่กระทบต่อการผลิตจริง และเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการตัดสินใจเชิงวิศวกรรม, 2558.

[4] นพดล อำดี ได้ทำการวิเคราะห์ความคุ้มค่าด้าน เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม (Engineering Economics) สำหรับอุตสาหกรรมเซรามิก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาต้นทุนการผลิตและประเมินความคุ้มค่าในการลงทุน ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต และใช้เกณฑ์การตัดสินใจทางการเงินที่สำคัญ ได้แก่ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV), อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) และ ระยะเวลาคืนทุนแบบลดส่วน (Discounted Payback Period) ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมและความคุ้มค่าในการลงทุนของอุตสาหกรรมขนาดต่าง ๆ นอกจากนี้ยังมีการทำ การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis) เพื่อประเมินความเสี่ยงต่อการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยภายนอกสรรธพล คุ้มทรัพย์, “สถานีอัดประจุแบตเตอรี่สำหรับรถไฟฟ้าด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์,” *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*, ปีที่ 7, ฉบับที่ 2, หน้า 100 – 108, กรกฎาคม-ธันวาคม 2555, 2562.

[5] สมชาย พงษ์ไพศาล ได้ทำการวิเคราะห์คอขวดในสายการผลิตชิ้นส่วนโลหะ โดยใช้แนวคิด Theory of Constraints (TOC) ร่วมกับการวิเคราะห์อัตราการใช้ประโยชน์ของเครื่องจักร ผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลเวลาการทำงานจริงของเครื่องจักรแต่ละสถานี และเปรียบเทียบความสามารถในการผลิตผลการศึกษาพบว่าเครื่องจักรที่มีอัตราการใช้ประโยชน์สูงสุดเป็นปัจจัยจำกัดกำลังการผลิตของระบบ การระบุคอขวดอย่างชัดเจนช่วยให้สามารถกำหนดแนวทางการปรับปรุงได้อย่างตรงจุด, 2560.

[6] ณัฐวุฒิ ศรีทอง ได้ศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพสายการผลิตโดยไม่ลงทุนเพิ่มเครื่องจักร โดยมุ่งเน้นการลดเวลาการทำงานของสถานีคอขวดผ่านการปรับปรุงวิธีการทำงานและลดเวลาสูญเสีย ผู้วิจัยใช้การศึกษาการทำงานและเวลามาวิเคราะห์ก่อนและหลังการปรับปรุง ผลการศึกษาพบว่าสามารถเพิ่มผลผลิตได้ในระดับหนึ่ง แต่เมื่อความต้องการผลิตเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ระบบยังคงประสบปัญหาคอขวดอยู่, 2561.

[7] กิตติศักดิ์ จันทร์ดี ได้ใช้โปรแกรมจำลองสถานการณ์ในการเปรียบเทียบแนวทางการปรับปรุงระบบการผลิตหลายรูปแบบ ได้แก่ การปรับลดเวลาการผลิต การเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องจักร และการเพิ่มจำนวนเครื่องจักร ผู้วิจัยพบว่าการลดเวลาการผลิตสามารถช่วยเพิ่มผลผลิตได้ในระยะสั้น แต่การเพิ่มเครื่องจักรในจุดคอขวดให้ผลลัพธ์ที่ยั่งยืนกว่าในกรณีที่ระบบมีอัตราการใช้ประโยชน์สูงอย่างต่อเนื่อง, 2562.

[8] อรรณพ บุญส่ง ได้ศึกษาการใช้ผลลัพธ์จากการจำลองสถานการณ์เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจลงทุนเพิ่มเครื่องจักรในสายการผลิต ผู้วิจัยได้นำผลผลิต อัตราการใช้ประโยชน์ และเวลารอคอยจากแบบจำลองมาใช้ในการวิเคราะห์ความคุ้มค่าการลงทุนร่วมกับการคำนวณระยะเวลาคืนทุน ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการใช้ข้อมูลจาก Simulation ช่วยลดความเสี่ยงในการตัดสินใจลงทุนและเพิ่มความแม่นยำในการประเมินความคุ้มค่า, 2563.



พัฒนา ภาคพจน์
นักศึกษาสาขาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมาศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



พงษ์ชยธรณ์ สาสนัส
นักศึกษาสาขาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมาศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



สมพงษ์ เชื้อพระคา
อาจารย์สาขาวิศวกรรมอุตสาหาร
คณะวิศวกรรมาศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของชิ้นงานพลาสติกตามมาตรฐาน ISO527-2, ASTM D695 และ ASTM D6110

Study of factors affecting the strength of plastic specimens according to ISO 527-2, ASTM D695 and ASTM D6110 standards

ปิ่นธิดา ประยงค์พันธ์[1*], พิมภกา บุญขวาง[1], จิระศักดิ์ ธาระจักร์[2], ภูมิรัตน์ นวรัตน์[2, 3], ณัฐกานต์ สุขสมร[2] และสถาพร สุริยันต์[1]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพฯ 10800

[2]สาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพฯ 10800

[3]ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และบริการ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพฯ 10800

บทคัดย่อ

โครงงานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาการทดสอบมาตรฐานชิ้นส่วนพลาสติก โดยเปรียบเทียบระหว่างพลาสติกใหม่และพลาสติกรีไซเคิลตามมาตรฐานสากล เพื่อประเมินคุณสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางกลของโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง และโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต เปรียบเทียบกับ โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงชนิดรีไซเคิล และโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลตชนิดรีไซเคิล ซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมใช้ในงานบรรจุภัณฑ์ โดยชิ้นทดสอบถูกออกแบบด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS 2022 และผลิตตามมาตรฐาน ISO 527-2 การทดสอบแรงดึง, ASTM D695 การทดสอบแรงอัด และ ASTM D6110 การทดสอบแรงกระแทก จำนวน 3 รูปแบบ รูปแบบละ 30 ชิ้น ผลการศึกษาพบว่าการใช้มาตรฐานการทดสอบมีบทบาทสำคัญในการควบคุมคุณภาพ ช่วยให้สามารถเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุได้อย่างชัดเจน ลดความแปรปรวนในกระบวนการผลิต และสนับสนุนการเลือกใช้วัสดุได้อย่างเหมาะสม อีกทั้งยังส่งเสริมการใช้พลาสติกรีไซเคิลให้สอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน โดยยังคงคุณภาพและความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์

คำสำคัญ : พลาสติกรีไซเคิล, สมบัติเชิงกล, มาตรฐานการทดสอบ, การควบคุมคุณภาพ

Abstract

This research project was conducted to study standardized testing methods for plastic components by comparing virgin plastics and recycled plastics in accordance with international standards in order to evaluate the physical and mechanical properties of High-Density Polyethylene and Polyethylene Terephthalate in comparison with recycled High-Density Polyethylene and recycled Polyethylene Terephthalate, which are widely used materials in packaging applications. The test specimens were designed using SOLIDWORKS 2022 software and manufactured according to three testing standards: ISO 527-2 for tensile testing, ASTM D695 for compression testing, and ASTM D6110 for impact testing, comprising three specimen types with 30 specimens for eac. The results indicated that standardized testing procedures play a significant role in quality control by enabling clear comparisons of material properties, reducing variability in manufacturing processes, and supporting appropriate material selection. Furthermore, the study promotes the utilization of recycled plastics in alignment with the circular economy concept while maintain

Keywords: Recycled Plastic, Mechanical Properties, Testing Standards, Quality Control

1. บทนำ

โครงงานนี้มุ่งเน้นถึงความสำคัญของการประยุกต์ใช้มาตรฐานในภาคอุตสาหกรรม แม้ว่าการนำมาตรฐานมาใช้จะมีข้อจำกัดด้านต้นทุนและความซับซ้อนในการปรับตัว แต่มาตรฐานมีบทบาทสำคัญในการกำหนดเกณฑ์การประเมินที่ชัดเจน ส่งผลให้กระบวนการผลิตมีความเป็นระบบ มีประสิทธิภาพ และสามารถควบคุมคุณภาพได้อย่างสม่ำเสมอ อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความสามารถในการแข่งขันในระดับสากล โดยเฉพาะมาตรฐานจาก International Organization for Standardization (ISO), ASTM International (ASTM) และ Japanese Industrial Standards (JIS) ซึ่งได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุพลาสติกทั้งทางกายภาพ เคมี และเชิงกล งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางกลของพลาสติกกลุ่มที่หนึ่งคือ โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง กับ โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงชนิดรีไซเคิล และกลุ่มที่สองคือ โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต กับ โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลตชนิดรีไซเคิล ด้วยวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ได้แก่ การทดสอบแรงดึง (ISO 527-2), การทดสอบแรงกระแทก (ASTM D6110) และการทดสอบแรงอัด (ASTM D695) เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่มีความน่าเชื่อถือและสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาและเลือกใช้วัสดุพลาสติกในงานอุตสาหกรรมต่อไปได้อย่างเหมาะสม และมีประสิทธิภาพ

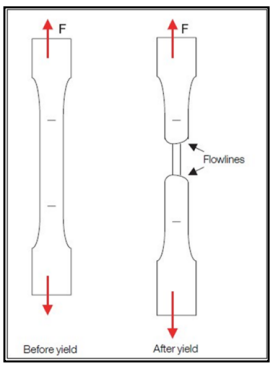
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

พลาสติกโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง ซึ่งเป็นพลาสติกที่มีความหนาแน่นสูง มีโครงสร้างโมเลกุลแบบเส้นตรงไม่มีกิ่งก้านสาขา ทำให้มีความแข็งแรงสูง ทนทาน ทนความร้อนได้ดีกว่า โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (จุดหลอมเหลวประมาณ 120-140 องศาเซลเซียส) ทนต่อแรงดึง แรงกระแทกได้ดี และมีความทึบแสงมากกว่าโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ในด้านโครงสร้างของโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง มีสูตร

โครงสร้างทางเคมีที่มีลักษณะเป็นกิ่งก้านน้อย และโมเลกุลของโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง จับตัวกันอย่างเหนียวแน่น ทำให้มีความหนาแน่นประมาณ 0.93-0.97 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ส่งผลให้มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของโพลิเมอร์สูง ซึ่งเป็นที่มาของความแข็งแรงทนทาน

พลาสติกโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต เป็นเรซินพลาสติกชนิดหนึ่งที่นำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ทั้งสำหรับอาหารและเครื่องดื่ม ในปัจจุบันบรรจุภัณฑ์ จากพลาสติกโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลตได้รับการยอมรับและเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากพลาสติกโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลตมีความแข็งแรง ความคงตัวต่อสภาวะที่ใช้บรรจุ ความใส ความสามารถในการขึ้นรูปได้หลากหลาย น้ำหนักเบา ปลอดภัยต่อการสัมผัสอาหาร และรีไซเคิลได้ 100% นอกจากนี้ด้วยการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตพลาสติกจากมวลชีวภาพ ได้ทำให้ในปัจจุบันเรซินของโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลตสามารถผลิตได้จากพืชที่มีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบ พลาสติกโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต เป็นเทอร์โมพลาสติกที่จัดอยู่ในกลุ่มพอลิเอสเทอร์ เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชั่นแบบควบแน่น ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชั่นระหว่างเอทิลีนไกลคอลกับไดเมทิลเทเรฟทาเลต หรือ ระหว่างเอทิลีนไกลคอลกับกรดเทเรฟทาลิก โดยทั่วไปโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต มีจุดหลอมเหลวประมาณ 260 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 1.38 กรัม/เซนติเมตร (ที่ 20 องศาเซลเซียส) และดัชนีการหักเหของแสงอยู่ในช่วง 1.57-1.58 โครงสร้างทางเคมีของโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต

มาตรฐาน ISO 527-2 ซึ่งเป็นมาตรฐานยุโรปขั้นพื้นฐานเป็นมาตรฐานสากลสำหรับกำหนดคุณสมบัติการรับแรงดึงของพลาสติกเสริมแรง การวัดคุณสมบัติ ได้แก่ ความต้านแรงดึง (ปริมาณของแรงที่สามารถกระทำกับวัสดุก่อนที่จะยืดหรือแตก) ความต้านแรงดึง (วัสดุสามารถเปลี่ยนรูปได้มากเพียงใดเพื่อตอบสนองต่อความเค้นก่อนยืด) การยืดตัว (ความยาวที่เพิ่มขึ้นหลังจากการแตกหักหารด้วยความยาวเกจเดิม) อัตราส่วนของปัวซอง (การวัดความสัมพันธ์ระหว่างวัสดุที่ยืดออกไปเท่าใดและมีความบางเพียงใดในระหว่างกระบวนการยืด) โดยสังเขปมีวิธีการทดสอบที่แตกต่างกันมากมายสำหรับพลาสติกประเภทต่าง ๆ วิธีการทดสอบ ISO 527-2 ได้รับการออกแบบมาสำหรับการทดสอบพลาสติกแข็งและกึ่งแข็งไม่ว่าจะขึ้นรูปอัด ขึ้นรูปกลึง หรือหล่อขึ้นรูป วิธีนี้สามารถใช้กับพลาสติกเสริมแรงได้ [3]



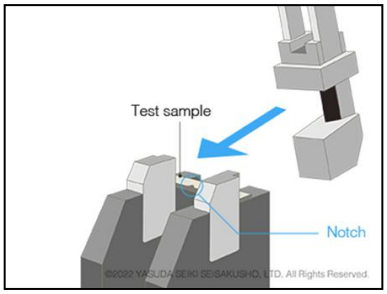
รูปที่ 1 ผลก่อนและหลังการทดสอบ

มาตรฐาน ASTM D6110 การทดสอบแรงกระแทกใช้เพื่อพิจารณาความสามารถของวัสดุในการทนทานหรือดูดซับพลังงานเมื่อเผชิญกับแรงหรือแรงกระแทกสูงที่เกิดขึ้นอย่างกะทันหัน พลังงานดังกล่าวอาจใช้เพื่อพิจารณาความเหนียวความต้านทานการแตกความต้านทานแรงกระแทก และความแข็งแรงของแรงกระแทกของวัสดุ ขึ้นอยู่กับการทดสอบที่ดำเนินการ สิ่งเหล่านี้มีความสำคัญต่อการเลือกวัสดุที่จะใช้ในงานที่ต้องรับแรงกระแทกสูง

Standard		Topic	Title
JIS※1	K 7111-1	Charpy	Plastics—Determination of Charpy impact properties—Part 1: Non-instrumented impact test
	K 7110	Izod	Plastics—Determination of Izod impact strength
	B 7739	Impact testing machines	Pendulum-type impact-testing machines for non-metallic materials—Verification of testing machines
ISO	179-1	Charpy	Plastics—Determination of Charpy impact properties—Part 1: Non-instrumented impact test
	180	Izod	Plastics—Determination of Izod impact strength
	13802	Impact testing machines	Plastics—Verification of pendulum impact-testing machines—Charpy, Izod and tensile impact-testing
ASTM	D6110	Charpy	Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics
	D256	Izod	Standard Test Method for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics

รูปที่ 2 มาตรฐานการทดสอบแรงกระแทก

ASTM D6110 เป็นการประเมินค่าความต้านทานแรงกระแทกแบบชาร์ปีของชิ้นงานทดสอบที่มีรอยบาก ในการทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี ตัวอย่างทดสอบจะได้รับการรองรับทั้งสองด้าน ค้อนจะตีที่จุดศูนย์กลางของตัวอย่างที่ด้านตรงข้ามกับรอยบาก ตัวอย่างจะถูกตั้งขึ้นโดยวางบนทั่ง (สถานีทดสอบ) ดังนั้นจึงสามารถทำการทดสอบได้อย่างง่ายดายและมีประสิทธิภาพ การทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี เป็นวิธีการทดสอบกระแสหลักของการทดสอบแรงกระแทกแบบลูกตุ้ม และมักใช้กันทั่วไปมากกว่าการทดสอบแรงกระแทกแบบไอซอด [1]



รูปที่ 3 การทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy Impact Test)

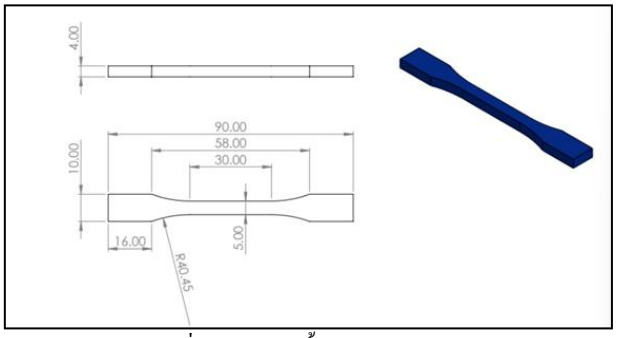
มาตรฐาน ASTM D695 ซึ่งเป็นวิธีทดสอบมาตรฐานที่จำเป็นซึ่งออกแบบมาเพื่อประเมินคุณสมบัติการบีบอัดของพลาสติกแข็งและวัสดุผสม ASTM D695 มักใช้ร่วมกับมาตรฐานการทดสอบแรงดึง ASTM D638 โดย ASTM D695 และ ASTM D638 จะใช้ร่วมกันเพื่อประเมินคุณสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ ในการทดสอบชิ้นงานทดลองตามมาตรฐาน ASTM D695 ช่วยให้เข้าใจคุณสมบัติของพลาสติก ได้แก่ โมดูลัสของความยืดหยุ่น (โมดูลัสของยัง) อัตราส่วนของความเค้นต่อความเครียดในวัสดุในช่วงการเปลี่ยนรูปยืดหยุ่น, ความเค้นยอมจำนน (ความแข็งแรงแรงดึง) ความเค้นที่วัสดุเริ่มจะเสียรูปเชิงพลาสติก, การเปลี่ยนรูปเกินจุดที่ให้ผลผลิต วัดพฤติกรรมของวัสดุหลังจากที่ให้ผลผลิตแล้วและความแข็งแรงในการบีบอัด แรงอัดสูงสุดที่วัสดุสามารถทนได้โดยไม่เกิดความเสียหาย คุณสมบัติเหล่านี้เป็นตัวบ่งชี้ที่สำคัญใน

การทดสอบพลาสติกซึ่งช่วยให้ผู้ผลิตหลายรายตรวจยืนยันประสิทธิภาพของวัสดุของตนได้

3. วิธีการทดลอง

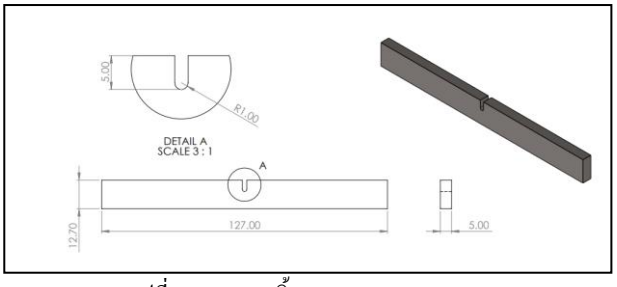
เพื่อศึกษาสมบัติทางกลด้วยวิธีการทดสอบแรงดึง การทดสอบแรงกระแทก และการทดสอบแรงอัด โดยใช้วัสดุพลาสติกจากกระบวนการฉีดขึ้นรูป เพื่อเปรียบเทียบผลของการทดสอบที่มีปัจจัยในด้านของชนิดของพลาสติกและอุณหภูมิของหัวฉีดจากเครื่องฉีดพลาสติกที่แตกต่างกัน

การออกแบบชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ISO 527-2 การทดสอบแรงดึงชิ้นทดสอบจะมีลักษณะคล้ายดัมเบล ซึ่งมีขนาดตามมาตรฐาน คือ ประเภท 1BA โดยที่ชิ้นทดสอบจะมีความหนามากกว่าหรือเท่ากับ 2 มิลลิเมตร มีความกว้าง 10 ± 0.5 มิลลิเมตร และยาวมากกว่าหรือเท่ากับ 75 มิลลิเมตร



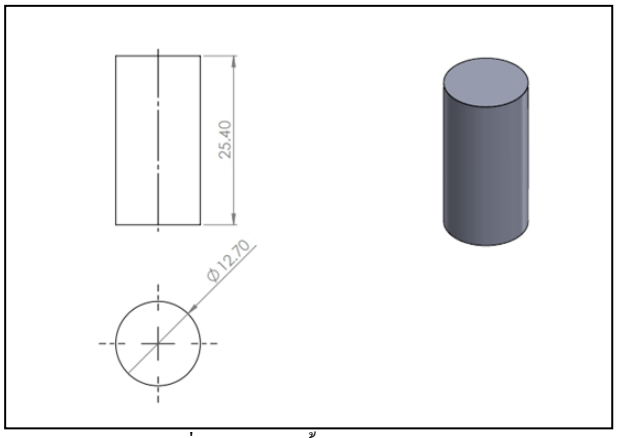
รูปที่ 4 ขนาดของชิ้นทดสอบแรงดึง

การออกแบบชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D6110 การทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy Impact Test) ชิ้นทดสอบจะมีรอยบากเป็นรูปตัว U โดยที่ความหนาของชิ้นทดสอบจะอยู่ที่ 3.0-12.7 มิลลิเมตร มีความกว้าง 12.7 ± 0.15 มิลลิเมตร มีความยาว 124.5-127 มิลลิเมตร และขนาดของรอยบากรูปตัว U จะมีความกว้าง 5.0 มิลลิเมตร และรัศมี 1.0 มิลลิเมตร



รูปที่ 5 ขนาดของชิ้นทดสอบแรงกระแทก

การออกแบบชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D695 การทดสอบแรงอัด ชิ้นทดสอบจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอก โดยจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตร และมีความยาวอยู่ที่ 25.4 มิลลิเมตร



รูปที่ 6 ขนาดของชิ้นทดสอบแรงอัด

การกำหนดช่วงอุณหภูมิการฉีดพลาสติกในกระบวนการขึ้นรูปเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน เนื่องจากอุณหภูมิส่งผลโดยตรงต่อโครงสร้างภายในของพอลิเมอร์ ซึ่งมีผลต่อสมบัติทางกลของวัสดุ หากอุณหภูมิการฉีดต่ำเกินไปอาจทำให้การหลอมไม่สมบูรณ์ ในขณะที่อุณหภูมิที่สูงเกินไปอาจก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ ซึ่งจะส่งผลให้คุณสมบัติทางกลลดลง โดยที่ช่วงอุณหภูมิของโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง อยู่ที่ 160-210 องศาเซลเซียส และช่วงอุณหภูมิของโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต อยู่ที่ 255-285 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 1 ช่วงอุณหภูมิกระบอกฉีด สำหรับพลาสติกโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง และโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงชนิดรีไซเคิล

ช่วงอุณหภูมิกระบอกฉีด			
	หลัง	กลาง	หน้า
LOW	200	210	220
MID	210	220	230
HIGH	220	230	240

ตารางที่ 2 ช่วงอุณหภูมิกระบอกฉีด สำหรับพลาสติก โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต และโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลตชนิดรีไซเคิล

ช่วงอุณหภูมิกระบอกฉีด			
	หลัง	กลาง	หน้า
LOW	255	260	265
MID	265	270	275
HIGH	275	280	285

4. ผลการวิจัย

ทำการฉีดชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ISO 527-2 ที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปด้วยพลาสติกโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง



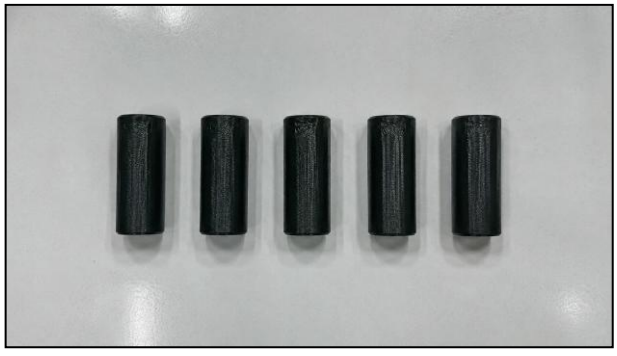
รูปที่ 9 ชิ้นทดสอบแรงดึงจากการฉีดขึ้นรูป

ทำการฉีดชิ้นทดสอบแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM D6110 ที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปพลาสติกโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง



รูปที่ 10 ชิ้นทดสอบแรงกระแทกจากการฉีดขึ้นรูป

ทำการฉีดชิ้นทดสอบแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM D695 ที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปพลาสติกโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง



รูปที่ 11 ชิ้นทดสอบแรงอัดจากการฉีดขึ้นรูป

สูตรที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลตามมาตรฐาน ISO 527-2 การทดสอบแรงดึง, มาตรฐาน ASTM D6110 การทดสอบแรงกระแทก และมาตรฐาน ASTM D695 การทดสอบแรงอัด

$$\Delta\sigma = \Delta F/A_0 \quad (1)$$

$\Delta\sigma$ ใช้สำหรับหาความชันของช่วง Elastic

$$\Delta\varepsilon = \Delta L / L_0 \quad (2)$$

$\Delta\varepsilon$ ใช้หาค่าการเปลี่ยนแปลงของ Strain ระหว่างจุด 2 จุด

$$E = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon \quad (3)$$

E ใช้สำหรับบอกว่าวัสดุแข็งหรือมีความยืดหยุ่นมากแค่ไหน

$$\sigma_t = F_{max} / A_0 \quad (4)$$

σ_t ใช้หาค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด

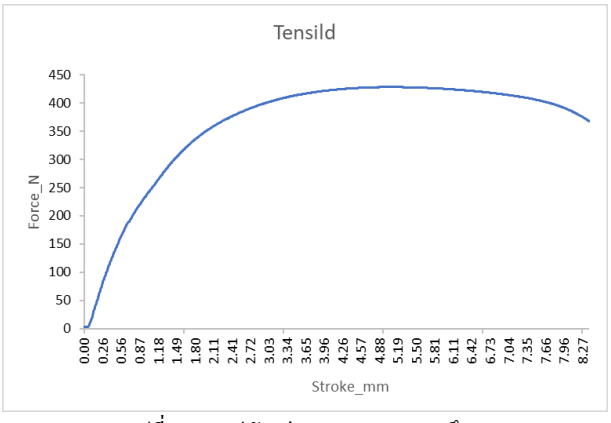
$$A_0 = \pi D^2 / 4 \quad (5)$$

A_0 ใช้หาพื้นที่ทรงกระบอกสำหรับชิ้นทดสอบแรงอัด

นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบตามมาตรฐานที่ทำหนดมาใส่ค่าในตารางที่ทำการออกแบบไว้ ผลของข้อมูลจะแสดงค่าออกมาตามที่ใส่สูตรคำนวณ ในส่วนของจำนวนชิ้นการทดสอบ กำหนดให้แต่ละมาตรฐานการทดสอบมีจำนวนชิ้นงานทดสอบทั้งหมด 360 ชิ้น ซึ่งมีทั้งหมด 3 มาตรฐานการทดสอบ เท่ากับมีชิ้นงานทดสอบทั้งหมด 1,080 ชิ้น

ตารางที่ 4 ตัวอย่างค่าที่คำนวณได้จากมาตรฐาน ISO 527-2

ลำดับ	Tensile Strength (MPa)	Elongation %
1	19.72	223.36
2	21.23	40.90
3	20.99	52.82
4	21.79	227.10
5	21.20	277.78



รูปที่ 12 กราฟตัวอย่างการทดสอบแรงดึง

สมบัติเชิงกลของการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ISO 527-2 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า วัสดุโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง และโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงกว่าวัสดุรีไซเคิล

โดยแนวโน้มของค่าความต้านทานแรงดึงจะเพิ่มขึ้นตามช่วงอุณหภูมิการฉีดที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 5 ตัวอย่างค่าที่คำนวณได้จากมาตรฐาน ASTM D6110

ลำดับ	Impact Strength (kJ/m^2)	Energy (J)
1	89.50	3.85
2	87.00	3.48
3	86.75	3.47
4	90.25	3.61
5	83.25	3.33

สมบัติเชิงกลของการทดสอบแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM D6110 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า วัสดุรีไซเคิลมีค่าความเหนียวสูงกว่าวัสดุบริสุทธิ์ในบางช่วงอุณหภูมิ และมีแนวโน้มดูดซับพลังงานได้มากกว่า แต่ค่าความแข็งแรงโดยรวมยังคงต่ำกว่าวัสดุบริสุทธิ์

ตารางที่ 6 ตัวอย่างค่าที่คำนวณได้จากมาตรฐาน ASTM D695

ลำดับ	Max Load (N)	Compressive Strength (MPa)	Young's Modulus (MPa)
1	4587	28.44	898.09
2	5561	34.48	760.55
3	4822	29.90	888.01
4	5543	34.37	859.17
5	4462	27.66	838.32

สมบัติเชิงกลของการทดสอบแรงอัด ตามมาตรฐาน ASTM D695 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การทดสอบแรงอัดมีความสอดคล้องกับการทดสอบแรงดึง คือวัสดุบริสุทธิ์มีค่าความต้านทานแรงอัดสูงกว่าวัสดุรีไซเคิล และการเพิ่มอุณหภูมิการฉีดช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงอัดของชิ้นงานทดสอบ

5. สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิการฉีดและชนิดของวัสดุมีอิทธิพลต่อสมบัติทางกลของพลาสติกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยสามารถจำแนกผลการศึกษาออกเป็น 2 กลุ่มวัสดุหลัก ดังนี้

กลุ่มที่ 1 ผลการทดสอบสมบัติทางกลของโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง และโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงชนิดรีไซเคิล พบว่าวัสดุโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง ซึ่งเป็นวัสดุบริสุทธิ์ ให้ค่าความแข็งแรงเชิงกล ได้แก่ ความต้านทานแรงดึง ความต้านทานแรงอัด และความต้านทานแรงกระแทกสูงกว่า วัสดุโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงชนิดรีไซเคิล อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และการเพิ่มอุณหภูมิการฉีด พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิจากระดับต่ำไประดับสูง ทำให้ค่าความแข็งแรงของโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ในขณะที่โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงชนิดรีไซเคิลมีอัตราการเพิ่มขึ้นต่ำกว่าโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง

กลุ่มที่ 2 ผลการทดสอบสมบัติทางกลของโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต และโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลตชนิดรีไซเคิล พบว่าวัสดุโพลีเอทิลีน-เทเรฟทาเลตให้ค่าความแข็งแรงเชิงกล สูงกว่าวัสดุโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลตชนิดรีไซเคิล อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และการเพิ่มอุณหภูมิการฉีดส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลตเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลตชนิดรีไซเคิลมีค่าความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ แต่ระดับของสมบัติทางกลยังคงต่ำกว่าวัสดุโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต

แต่เนื่องจากอาจเกิดปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ เช่น อุณหภูมิห้องทดสอบ หรือสภาพแวดล้อม ซึ่งอาจทำให้มีความคลาดเคลื่อนของปัจจัยที่อาจส่งผลต่อชิ้นงานทดสอบหรือเครื่องฉีดขึ้นรูป จึงอาจทำให้คุณสมบัติของวัสดุเปลี่ยนแปลงไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร สถานที่ทดลองคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมอุสาหการ และขอขอบคุณ สาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม และศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และบริการคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มาหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือในการทดสอบวัสดุ จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

เอกสารอ้างอิง

[1] นายวัชรพงศ์ พัวศรี, นายอาทิตย์ คำวัง. (2554). การออกแบบและสร้างมีพิมพ์ฉีดพลาสติกสำหรับชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256 และ ASTM D790. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร.

[2] ASTM International. (2015). Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. Copyright Clearance Center, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923.

[3] นายเชษฐ์ถกล ตำนานวัน, นายโสภณ บุญวัง. (2562). การศึกษาสมบัติทางกลด้วยวิธีการทดสอบแรงดึง ของวัสดุพลาสติก PLC (Polylactic acid) จากกระบวนการพิมพ์3มิติ. ปริญญานิพนธ์ สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการเชื่อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

[4] ธนาธีป ทองหล่อ. (2564). การศึกษาคุณสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อน และสมบัติการไหล ของสูตรผสมพลาสติกรีไซเคิลที่ผ่านการใช้งานมาแล้วชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง. วิทยานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.

[5] ประสงค์ ก้านแก้ว. การศึกษาหาอิทธิพลความหนาของเทอร์โมพลาสติกแบบ Semi Crystalline ที่สงผลกระทบต่อดัชนีไหล. วารสารวิชาการและวิจัย ฉบับพิเศษ การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, ครั้งที่ 5. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.



ประวัติผู้เขียนบทความ

ปิ่นธิดา ประยงค์พันธ์ 092-8982218 pinthida-p@rmutp.ac.th วศ.บ อุตสาหการ (มทร.พระนคร 2568) ปวส.ออกแบบและเขียนแบบการผลิต (2566) ปวช.เขียนแบบเครื่องกล(2564)



ประวัติผู้เขียนบทความ

พิมภกา บุญขวาง 082-0832577 pimpaka-b@rmutp.ac.th วศ.บ อุตสาหการ (มทร.พระนคร 2568) ปวส.เขียนแบบเครื่องกล (2563)



ประวัติผู้เขียนบทความ

จิระศักดิ์ ธาระจักร์ 02-836-3000 ต่อ 7510 jirasak.t@rmutp.ac.th

ปริญญาเอก เทคโนโลยีวัสดุ (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเจ้าเกล้าเจ้าคุณทหารผ่านศึก 2559)

ปริญญาโท เทคโนโลยีวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเจ้าเกล้าเจ้าคุณทหารผ่านศึก 2549)

ปริญญาตรี ฟิสิกส์ (มหาวิทยาลัยนเรศวร 2544)



ประวัติผู้เขียนบทความ

ภูมิรัตน์ นวรัตน์ 02-836-3000 ต่อ 7510 **poomirat.n@rmutp.ac.th**

ปริญญาเอก ฟิสิกส์ (สถาบันโพลีเทคนิคเรนส์เซลเลอร์ 2562)

ปริญญาโท ฟิสิกส์ (สถาบันโพลีเทคนิคเรนส์เซลเลอร์ 2561)

ปริญญาตรี ฟิสิกส์ (วิทยาลัยมิดเดิลเบอรี 2557)



ประวัติผู้เขียนบทความ

ณัฐกานต์ สุขสมร 02-836-3000 ต่อ 4156 , 4159 **nuttakant.s@rmutp.ac.th** นักวิชาการศึกษา ห้องปฏิบัติการสาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรมและหมวดวิชาวิทยาศาสตร์



ประวัติผู้เขียนบทความ

สถาพร สุริยันต์ **sathaporn.su@rmutp.ac.th**

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ (มทร.พระนคร)

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การออกแบบและพัฒนาเครื่องย่อยพลาสติกขนาดเล็ก
Design and development of a small-scale plastic shredder.

กันตภณ อินต๊ะสาร ภคพล ฉิมพลี และ ดาราวรรณ วีรานันต์

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพฯ

บทคัดย่อ

โครงงานนี้มุ่งเน้นการออกแบบและพัฒนาเครื่องย่อยพลาสติกต้นแบบสำหรับงานรีไซเคิล เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากปัญหาขยะพลาสติก โดยเครื่องสามารถย่อยพลาสติกประเภท HDPE และ PET ให้มีขนาดเล็กลง เพื่อเพิ่มความสะดวกในการหลอมและนำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการรีไซเคิล อีกทั้งยังสนับสนุนแนวทางการจัดการขยะอย่างยั่งยืนและแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน การออกแบบเครื่องอาศัยหลักวิศวกรรมเครื่องกล โดยใช้แรงเฉือนเป็นกลไกหลักในการย่อย ร่วมกับแรงอัดและแรงกระแทกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตัด กระบวนการพัฒนาประกอบด้วยการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุพลาสติก การออกแบบเชิงแนวคิดและโครงสร้าง การคำนวณทางวิศวกรรม และการสร้างแบบจำลองสามมิติด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS ก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิต เครื่องต้นแบบประกอบด้วยส่วนสำคัญ ได้แก่ มอเตอร์ไฟฟ้า เพลาหมุน ใบมีด โครงสร้างเครื่อง ชุดป้อนวัสดุ ตลับลูกปืน และระบบส่งกำลัง ได้มีการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องกับขยะพลาสติกหลายประเภท เพื่อประเมินประสิทธิภาพในการย่อยและความเสถียรในการทำงาน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเครื่องต้นแบบสามารถลดขนาดพลาสติกให้เหมาะสมต่อกระบวนการรีไซเคิลได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมรีไซเคิลขนาดเล็ก งานด้านการศึกษา และระบบจัดการขยะพลาสติกระดับชุมชนได้อย่างเหมาะสม

ความสำคัญ: เครื่องย่อยพลาสติก, การรีไซเคิลพลาสติก, ขยะพลาสติก, วิศวกรรมเครื่องกล, การออกแบบเครื่องจักร, เศรษฐกิจหมุนเวียน, การจัดการขยะอย่างยั่งยืน, โพลีเอทิลีนและพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต, ระบบรีไซเคิล, การจัดการขยะพลาสติก

Abstract

This project focuses on the design and development of a prototype plastic shredding machine for recycling applications in order to reduce the environmental impacts caused by plastic waste. The machine is capable of shredding HDPE and PET plastics into smaller pieces to facilitate melting and reuse in recycling processes. In addition, the project supports sustainable waste management practices and promotes the concept of a circular economy.The machine design is based on mechanical engineering principles, using shearing force as the primary shredding mechanism together with compressive and impact forces to improve cutting efficiency. The development process included studying the properties of plastic materials, conceptual system. Performance testing was conducted using various types of plastic waste to evaluate shredding efficiency and operational stability. The results showed that the prototype could effectively reduce plastic size into suitable fragments for recycling processes. Therefore, the developed machine can be applied in small-scale recycling industries, educational purposes, and community-based plastic waste management systems effectively.

Keyword: Plastic shredding machine**,** Plastic recycling**,** Plastic waste**,** Mechanical engineering**,** Machine design, Circular economy, Sustainable waste management, Polyethylene and Polyethylene Terephthalate, Recycling systems, Plastic waste management

1. บทนำ

วิกฤตขยะพลาสติกเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมสำคัญจากการใช้งานอย่างแพร่หลายและการจัดการที่ไม่เหมาะสม เนื่องจากพลาสติกใช้เวลาย่อยสลายนาน จึงเกิดการสะสมในระบบนิเวศและกลายเป็นไมโครพลาสติกที่เข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและมนุษย์ แม้ว่าการรีไซเคิลจะช่วยลดการใช้ทรัพยากรและการปล่อยก๊าซเรือนกระจก แต่ยังมีข้อจำกัดในขั้นตอนเตรียมวัสดุ โดยเฉพาะพลาสติกขนาดใหญ่หรือมีรูปทรงซับซ้อนที่ทำให้การแปรรูปไม่มีประสิทธิภาพ ดังนั้น การพัฒนาเครื่องย่อยพลาสติกจึงมีความสำคัญ เพื่อช่วยลดขนาดวัสดุ เพิ่มประสิทธิภาพการหลอมและการขึ้นรูป ส่งเสริมการรีไซเคิล และลดปริมาณขยะพลาสติกอย่างยั่งยืน

จากปัญหาดังกล่าว จึงมีแนวคิดในการสร้างเครื่องย่อยพลาสติกที่สามารถลดขนาดพลาสติกได้ และสามารถนำพลาสติกที่ผ่านการย่อยไปหลอมใหม่และนำกลับมาใช้ในกระบวนการรีไซเคิล เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ปัจจุบันปัญหาขยะพลาสติกส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจ และสุขภาวะของประชาชนอย่างกว้างขวาง เนื่องจากพลาสติกย่อยสลายได้ยากและมีการใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง การจัดการที่ไม่เหมาะสมก่อให้เกิดการสะสมในสิ่งแวดล้อม มลพิษทางน้ำ และมลพิษ

ทางอากาศ ดังนั้น การรีไซเคิลและการนำกลับมาใช้ใหม่จึงเป็นแนวทางสำคัญในการลดผลกระทบและเพิ่มมูลค่าของวัสดุเหลือใช้ งานวิจัยนี้มุ่งออกแบบและพัฒนาเครื่องย่อยพลาสติกต้นแบบ โดยอาศัยหลักวิศวกรรมเครื่องกล เน้นการใช้แรงเฉือนร่วมกับแรงอัดและแรงกระแทก เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการลดขนาดวัสดุ โดยคำนึงถึงปัจจัยสำคัญ เช่น กำลังมอเตอร์ ความเร็วรอบ รูปทรงใบมีด ความแข็งแรงของโครงสร้าง และความปลอดภัย เพื่อให้เครื่องมีขนาดกะทัดรัด ต้นทุนต่ำ

นอกจากนี้ การย่อยพลาสติกยังเป็นขั้นตอนสำคัญในกระบวนการรีไซเคิล เนื่องจากช่วยให้วัสดุมีขนาดเล็กและสม่ำเสมอ ส่งผลให้การลำเลียง การถ่ายเทความร้อน และกระบวนการต่อเนื่อง เช่น การหลอมและการขึ้นรูป มีประสิทธิภาพมากขึ้น เครื่องย่อยที่พัฒนาขึ้นคาดว่าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการรีไซเคิล ลดปัญหาขยะพลาสติก และสนับสนุนการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าตามแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนอย่างยั่งยืน

ในด้านความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับพลาสติก พลาสติกเป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักเบา ขึ้นรูปง่าย ทนต่อการกัดกร่อน และมีต้นทุนเหมาะสม จึงถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในหลายอุตสาหกรรม โดยสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ เทอร์มอพลาสติก ซึ่งสามารถหลอมและรีไซเคิลได้ และเทอร์โมเซต ซึ่งไม่สามารถหลอมกลับมาใช้ใหม่ได้ง่าย พลาสติกที่พบได้บ่อยในงานรีไซเคิล ได้แก่ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต, โพลีโพรพีลีน และ โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงซึ่งมีคุณสมบัติแตกต่างกันและส่งผลต่อการออกแบบกระบวนการย่อย โดยคุณสมบัติของวัสดุ เช่น ความเหนียว ความแข็ง และสภาพของวัสดุ มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องย่อย ดังนั้น การคัดแยกพลาสติกก่อนการย่อยจึงมีความสำคัญ เพื่อเพิ่มความสม่ำเสมอของวัสดุ ลดการปนเปื้อน และยกระดับคุณภาพในกระบวนการรีไซเคิลขั้นต่อไป

สำหรับทฤษฎีและหลักการทำงานของเครื่องย่อยพลาสติก เครื่องย่อยพลาสติกทำงาน โดยแปลงพลังงานไฟฟ้าจากมอเตอร์เป็นพลังงานกลในรูปการหมุนของเพลา เพื่อสร้างแรงเฉือน แรงอัด และแรงดึงในการย่อยพลาสติกให้มีขนาดเล็กลง ระบบส่งกำลังมีหน้าที่ถ่ายทอดพลังงานจากมอเตอร์ไปยังเพลาย่อย พร้อมลดความเร็วรอบและเพิ่มแรงบิดให้เหมาะสมกับลักษณะงานย่อย โดยเฉพาะวัสดุที่มีความเหนียวหรือความหนา เพลาและใบมีดเป็นส่วนสำคัญในการย่อยวัสดุ โดยใบมีดทำหน้าที่จับ ดึง และเฉือนพลาสติกให้แตกออก การออกแบบรูปทรงและระยะห่างของใบมีดที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและความต่อเนื่องในการทำงานของเครื่อง

กระบวนการย่อยพลาสติกอาศัยแรงหลายประเภทร่วมกันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน โดยแรงเฉือนเป็นแรงหลัก ทำหน้าที่ตัดและทำให้พลาสติกขาดออกจากกันอย่างต่อเนื่อง สามารถควบคุมขนาดชิ้นงานได้ดีและลดการเกิดความร้อน แรงอัดช่วยยึดและบีบวัสดุให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม ทำให้ใบมีดสามารถตัดวัสดุได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยเฉพาะพลาสติกที่มีความเหนียว แรงกระแทกช่วยเสริมการแตกตัวของวัสดุแข็งหรือเปราะ ขณะที่แรงดึงช่วยดึงวัสดุเข้าสู่บริเวณใบมีด ทำให้การป้อนวัสดุและการย่อยเป็นไปอย่างต่อเนื่อง โดยสรุปกระบวนการย่อยพลาสติกใช้แรงเฉือนเป็นหลัก ร่วมกับแรงอัด แรงกระแทก และแรงดึง เพื่อให้การย่อยมีประสิทธิภาพและเหมาะสมต่อการใช้งานจริง [1]

2. วิธีการดำเนินงานและการออกแบบ

บทนี้กล่าวถึงขั้นตอนและกระบวนการดำเนินงานของโครงการ เครื่องย่อยพลาสติก โดยเริ่มตั้งแต่การศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับเครื่องย่อยพลาสติก การออกแบบภาพ 2 มิติ การจำลองการประกอบชิ้นส่วน การจัดหาวัสดุอุปกรณ์ การผลิตชิ้นส่วน และการประกอบเครื่องต้นแบบจริง เพื่อให้เครื่องสามารถใช้งานได้จริง มีความปลอดภัย และเหมาะสมกับวัตถุประสงค์ของโครงการ

การศึกษาข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับการออกแบบมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องย่อยพลาสติกสำหรับย่อยพลาสติกประเภทฝาขวดและขวดพลาสติก เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการรีไซเคิล โดยศึกษาหลักการทำงานของเครื่องย่อยพลาสติกที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม และนำมาประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับเครื่องต้นแบบขนาดเล็กที่สามารถใช้งานได้ในระดับสถานศึกษา

เครื่องย่อยพลาสติกทำงานโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำลังในการหมุนเพลา ซึ่งเพลาจะติดตั้งใบมีดสำหรับตัดและบดพลาสติก เมื่อมอเตอร์ทำงาน จะส่งกำลังผ่านระบบส่งกำลัง เช่น สายพานหรือเฟือง ไปยังเพลา ทำให้ใบมีดหมุนด้วยความเร็วที่เหมาะสม เมื่อพลาสติกถูกป้อนเข้าสู่ช่องป้อนวัสดุ พลาสติกจะถูกใบมีดหมุนตัดให้แตกออกเป็นชิ้นเล็กลง โดยมีใบมีดประจำที่ช่วยเสริมแรงตัดให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น หลังจากนั้น พลาสติกที่ถูกย่อยแล้วจะตกลงสู่ด้านล่างของเครื่อง เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการรีไซเคิลต่อไป

ในการออกแบบเครื่องย่อยพลาสติก ได้ทำการเลือกใช้ชิ้นส่วนหลักที่เหมาะสมกับการทำงานของเครื่อง เพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความทนทานต่อการใช้งาน โดยมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เป็นต้นกำลังหลักในการขับเคลื่อนเพลาและใบมีดของเครื่องย่อยพลาสติก ซึ่งเลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้าที่มีขนาดกำลังเหมาะสมกับการย่อยพลาสติก เพื่อให้สามารถสร้างแรงบิดเพียงพอในการหมุนใบมีดและลดโอกาสเกิดการติดขัดของวัสดุขณะทำงาน

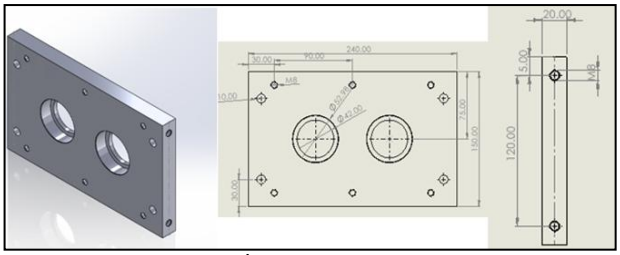
เพลาเป็นชิ้นส่วนสำคัญที่ใช้รองรับใบมีดและส่งกำลังจากมอเตอร์ไปยังใบมีด โดยเลือกใช้เพลาที่ทำจากเหล็กกล้าที่มีความแข็งแรงสูง สามารถรองรับแรงบิดและแรงกระแทกจากการย่อยพลาสติกได้ดี และมีความทนทานต่อการสึกหรอ

ส่วนโครงสร้างของเครื่องย่อยพลาสติกถูกออกแบบให้มีความแข็งแรง โดยเลือกใช้เหล็กกล่องเป็นวัสดุหลัก เพื่อรองรับน้ำหนักของชิ้นส่วนต่าง ๆ และลดแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นขณะเครื่องทำงาน นอกจากนี้ยังออกแบบให้มีขนาดเหมาะสมกับพื้นที่ใช้งาน และสะดวกต่อการติดตั้งและบำรุงรักษา

ในการออกแบบเครื่องย่อยพลาสติกในโครงงานนี้ ใช้โปรแกรม SolidWorks เพื่อสร้างแบบจำลองทั้งภาพ 2 มิติและ 3 มิติ โดยแบบ 2 มิติใช้กำหนดรายละเอียดด้านขนาด ระยะ และตำแหน่งของชิ้นส่วน ส่วนแบบ 3 มิติใช้แสดงภาพรวมการประกอบและตรวจสอบความเหมาะสมของโครงสร้างก่อนผลิตจริง

การออกแบบแบ่งชิ้นส่วนหลักออกเป็น โครงสร้างด้านข้าง แผ่นปิดด้านหน้า–ด้านหลัง ชุดเพลา ชุดใบมีด และชุดระบบส่งกำลัง เพื่อให้สามารถออกแบบและประกอบเครื่องได้อย่างถูกต้องและเป็นระบบ

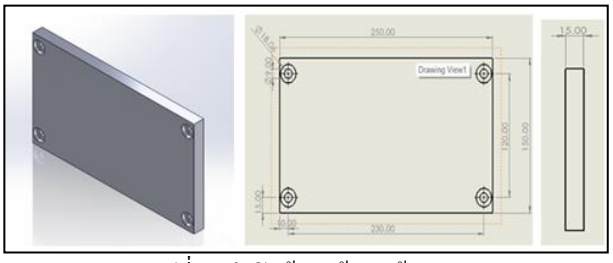
แผ่นโครงด้านข้างถูกออกแบบให้เป็นแผ่นเหล็กรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีการเจาะรูขนาดใหญ่จำนวน 2 รู สำหรับติดตั้งลูกปืนเพื่อรองรับเพลาของชุดใบมีด และมีการเจาะรูขนาดเล็กหลายตำแหน่งบริเวณขอบแผ่น เพื่อใช้สำหรับยึดแผ่นโครงเข้ากับชิ้นส่วนอื่นของเครื่อง การออกแบบแผ่นโครงด้านข้างมีความสำคัญต่อการรองรับแรงจากการหมุนของเพลาและใบมีด ซึ่งต้องมีความแข็งแรงเพียงพอเพื่อป้องกันการสั่นสะเทือนและการเสียรูปขณะเครื่องทำงาน



รูปที่ 1 แผ่นปิดด้านข้าง

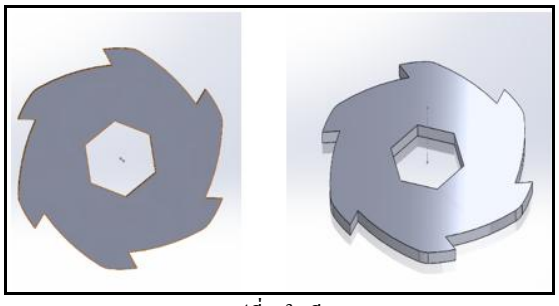
แผ่นปิดด้านหน้าและด้านหลัง แผ่นปิดด้านหน้าและด้านหลังถูกออกแบบให้เป็นแผ่นเหล็กรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีการเจาะรูบริเวณมุมทั้ง 4 ตำแหน่ง สำหรับใช้ยึดกับโครงเครื่องด้วยน็อต

แผ่นปิดดังกล่าวมีหน้าที่ช่วยป้องกันชิ้นส่วนภายในเครื่องและช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างโดยรวมของเครื่องนอกจากนี้ยังช่วยป้องกันเศษพลาสติกกระเด็นออกจากเครื่องในขณะทำงาน



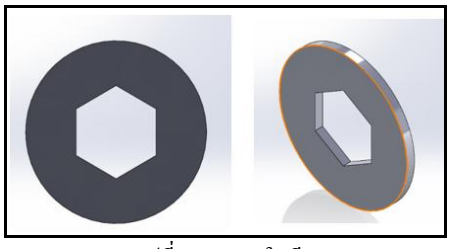
รูปที่ 2 แผ่นปิดด้านหน้าและด้านหลัง

ใบมีด ใบมีดถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นแผ่นวงกลม โดยมีฟันใบมีดหลายตำแหน่งรอบขอบของใบมีด เพื่อใช้ในการตัดและย่อยพลาสติกให้มีขนาดเล็กลงบริเวณกึ่งกลางของใบมีดถูกออกแบบให้มีรูทรงหกเหลี่ยม เพื่อใช้สำหรับสวมเข้ากับเพลาหกเหลี่ยม ซึ่งช่วยป้องกันการหมุนฟรีของใบมีด และทำให้ใบมีดสามารถหมุนไปพร้อมกับเพลาได้อย่างมั่นคงลักษณะของฟันใบมีดถูกออกแบบให้มีความคมและมีมุมเฉียงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตัดพลาสติก และช่วยลดแรงต้านในขณะทำงาน นอกจากนี้ การจัดเรียงใบมีดบนเพลาจะถูกจัดวางสลับตำแหน่งกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยพลาสติกให้มีขนาดเล็กลงอย่างสม่ำเสมอ



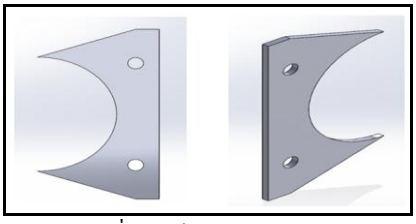
รูปที่ 3 ใบมีด

ตัวจานรองใบมีด ตัวจานรองใบมีดถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นแผ่นวงกลม โดยมีรูตรงกลางเป็นรูปทรงหกเหลี่ยม เพื่อใช้สำหรับสวมเข้ากับเพลาหกเหลี่ยม และทำหน้าที่รองรับชุดใบมีดและแผ่นรองใบมีดให้อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้องหน้าที่ของตัวจานรองใบมีด คือช่วยรองรับแรงที่เกิดจากการหมุนของเพลาและใบมีด รวมถึงช่วยกระจายแรงไปยังชุดเพลาอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งช่วยลดการสั่นสะเทือนและเพิ่มความแข็งแรงให้กับชุดใบมีดนอกจากนี้ ตัวจานรองใบมีดยังช่วยป้องกันไม่ให้ใบมีดเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งขณะเครื่องทำงาน และช่วยให้การจัดเรียงใบมีดมีความเป็นระเบียบ ส่งผลให้เครื่องสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัยมากยิ่งขึ้น



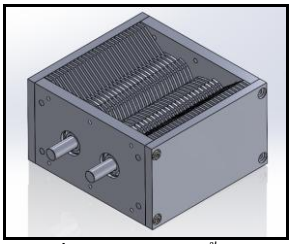
รูปที่ 4 จานรองใบมีด

ตัวล็อกจานรองและใบมีดถูกออกแบบให้ติดตั้งบริเวณปลายเพลา ทำหน้าที่ล็อกจานรองใบมีดและชุดใบมีดไม่ให้เคลื่อนที่ตามแนวแกนของเพลา ตัวล็อกมีลักษณะเป็นชิ้นส่วนทรงกระบอก ซึ่งสามารถสวมเข้ากับปลายเพลา และยึดแน่นด้วยสลักหรือสกรู เพื่อป้องกันการหลุดของชุดใบมีดในระหว่างการทำงาน หน้าที่สำคัญของตัวล็อก คือ ช่วยรักษาตำแหน่งของใบมีดและแผ่นรองใบมีดให้อยู่ในตำแหน่งเดิมตลอดเวลา ซึ่งช่วยเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งาน และลดโอกาสการเกิดความเสียหายต่อเครื่องจักร



รูปที่ 5 ตัวล้อคจานลองใบมีด

หลังจากออกแบบชิ้นส่วนทั้งหมดแล้ว ได้ดำเนินการประกอบเครื่องย่อยพลาสติกโดยจำลองผ่านโปรแกรม SolidWorks เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของตำแหน่งและการทำงานของชิ้นส่วน การประกอบเริ่มจากการติดตั้งเพลาหลักและชุดเฟืองเพื่อถ่ายทอดกำลัง จากนั้นติดตั้งใบมีดหมุนสลับกับแผ่นรองบนเพลา พร้อมยึดด้วยตัวล็อกเพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ตามแนวแกน ต่อมาทำการติดตั้งใบมีดอยู่กับที่เข้ากับโครงเครื่อง และปิดโครงด้วยแผ่นปิดด้านหน้าและด้านหลังเพื่อเพิ่มความแข็งแรง สุดท้ายตรวจสอบการหมุนของเพลาและการขบกันของเฟืองเพื่อให้มั่นใจว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องและไม่เกิดการรบกวนกันของชิ้นส่วนภายใน [2]



รูปที่ 6 ภาพประกอบชิ้นงาน

4. วัตถุประสงค์ของการทดลอง

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของใบมีดมุมต่าง ๆ (90°, 110° และ 130°) ในการย่อยพลาสติกชนิด โพลีเอทิลีน และพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต โดยเปรียบเทียบความสามารถในการลดขนาดและความง่ายในการย่อย เพื่อหามุมใบมีดที่เหมาะสมสำหรับเครื่องย่อยพลาสติกต้นแบบ

ในการทดลอง ได้กำหนดเงื่อนไขให้ใช้ปริมาณพลาสติกเท่ากันทุกครั้ง และเปลี่ยนเฉพาะมุมใบมีด เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลการทดลองได้อย่างชัดเจน โดยกำหนดรายละเอียดการทดลองให้ใช้พลาสติกชนิดเดียวกันในแต่ละรอบการทดลอง ควบคุมความเร็วรอบของเครื่องและระยะเวลาในการย่อยให้เท่ากัน เพื่อให้ผลการทดลองเกิดจากความแตกต่างของมุมใบมีดเพียงอย่างเดียว

ตารางที่ 1 เงื่อนไขในการทดลอง

รายการทดลอง	รายละเอียด
ชนิดพลาสติก	โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง, เพอลิเอทิลีนทเรฟทาเลต
มุมใบมีด	90°, 110°, 130°
น้ำหนักพลาสติกก่อนทดลอง	500 กรัม
จำนวนการทดลอง	ประมาณ 3 ครั้งต่อมุมใบมีด
วิธีประเมินผล	วัดขนาดพลาสติกหลังย่อย และสังเกตุความง่ายในการบด
หน่วยวัดขนาด	มิลลิเมตร

ผลการทดลองการย่อยพลาสติกชนิด โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงพลาสติกชนิด โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง มีลักษณะค่อนข้างเหนียว ยืดหยุ่น และไม่แตกง่าย เมื่อเข้าสู่เครื่องย่อยจะต้องอาศัยแรงเฉือนและแรงดึงจากใบมีดค่อนข้างมาก จึงใช้เวลาในการบดมากกว่าพลาสติกที่มีลักษณะแข็งเปราะ

ตารางที่ 2 ผลการทดลอง โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง

มุมใบมีด	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ขนาดหลังบด	ความง่ายในการบด
90°	6 มม.	7 มม.	7 มม.	6.67 มม.	บดได้ง่ายกว่า แต่ชิ้นใหญ่
110°	4 มม.	3 มม.	3 มม.	3.33 มม.	บดได้ปานกลาง เครื่องทำงานนิ่ง
130°	1 มม.	2 มม.	2 มม.	1.66 มม.	บดได้ค่อนข้างยาก แต่ละเอียด

ผลการทดลองพบว่า ใบมีดมุม 90° ให้ขนาดชิ้น โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง ใหญ่ที่สุด 6.67 มม. แต่ใช้แรงน้อย เหมาะสำหรับการ

บดหยาบขณะที่ใบมีดมุม 110° ให้ผลปานกลาง 3.37 มม. พร้อมการทำงานที่ราบรื่นและเหมาะต่อการรีไซเคิล ส่วนใบมีดมุม 130° ให้ขนาดเล็กที่สุด 1.66 มม.

ผลการทดลองการย่อยพลาสติกชนิด พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลตพลาสติกชนิด พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลตมีลักษณะแข็งกว่า โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงแต่มีความเปราะมากกว่าเมื่อถูกแรงเฉือนจากใบมีดจะเกิดการแตกตัวได้ง่ายกว่า แต่หากมุมใบมีดไม่เหมาะสม อาจทำให้ชิ้นพลาสติกกระเด็นหรือแตกเป็นชิ้นไม่สม่ำเสมอ

ตารางที่ 3 ผลการทดลอง พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต

มุมใบมีด	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ขนาดเฉลี่ยหลังบด	ความง่ายในการบด
90°	5 มม.	6 มม.	5 มม.	5.33 มม.	บดง่ายที่สุด แต่ชิ้นใหญ่
110°	3มม.	2.5 มม.	3 มม.	2.86 มม.	บดได้ง่ายและชิ้นสม่ำเสมอ
130°	1 มม.	1 มม.	1.16 มม.	1.66 มม.	บดได้ละเอียด

ผลการทดลองพบว่า ใบมีดมุม 90° ให้ขนาด พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต ใหญ่ที่สุด (5.33 มม.) แม้ใช้แรงน้อย แต่เหมาะสำหรับการบดหยาบขณะที่ใบมีดมุม 110° ให้ผลปานกลาง (2.86 มม.) และมีความสม่ำเสมอ เหมาะต่อการใช้งานจริง ส่วนใบมีดมุม 130° ให้ขนาดเล็กที่สุด (1.66 มม.)

ตารางที่ 4 ตารางเปรียบเทียบความง่ายในการบด

มุมใบมีด	โพลีเอทิลีน	พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต	ผลการเปรียบเทียบ
90°	6.67 มม.	5.33 มม.	พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต บดได้ละเอียดกว่า
110°	3.33 มม.	2.86 มม.	พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต บดได้ละเอียดกว่า
130°	1.66 มม.	1.66 มม.	พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต บดได้ละเอียดกว่า

ผลการทดลอง สรุปได้ว่า ใบมีดมุม 90° ให้ขนาดชิ้นงานหยาบที่สุด และใช้กำลังในการย่อยน้อยกว่า ขณะที่ใบมีดมุม 110° ให้ขนาดชิ้นงานปานกลางและมีความสม่ำเสมอ ส่วนใบมีดมุม 130° ให้ขนาดชิ้นงานละเอียดที่สุด และสามารถย่อยพลาสติกได้มีประสิทธิภาพมากกว่า แม้จะใช้กำลังในการทำงานเพิ่มขึ้น ดังนั้น ใบมีดมุม 130° จึงเหมาะสมที่สุดสำหรับเครื่องย่อยพลาสติกต้นแบบ เนื่องจากให้ผลการย่อยที่ละเอียดและมีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการใช้งานจริง

5. สรุปผลการดำเนินงาน

โครงงานนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องย่อยพลาสติกต้นแบบสำหรับลดขนาดพลาสติก โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง และ พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต เพื่อใช้ในกระบวนการรีไซเคิล โดยออกแบบและจำลองชิ้นส่วนด้วยโปรแกรม SolidWorks ก่อนนำมาประกอบเป็นเครื่องต้นแบบ

ผลการทดลองพบว่าเครื่องสามารถย่อยพลาสติกได้จริง โดยใบมีดมุม 90° ให้หยาบสุดแต่ใช้กำลังมาก โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง 6.67 มม., พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต 5.33 มม. ใบมีดมุม 110° ให้ผลเหมาะสมและเครื่องทำงานสมดุล โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง 3.33 มม., พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต 2.86 มม. ขณะที่ใบมีดมุม 130° ใช้แรงมากแต่ให้ขนาดละเอียดสุด โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง 1.66 มม., พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต 1.16 มม.สรุปได้ว่าเครื่องย่อยพลาสติกต้นแบบสามารถใช้งานได้จริง ควรใช้ใบมีดมุม 130 องศา เนื่องจากให้ผลการบดที่ละเอียดและมีประสิทธิภาพมากที่สุด จึงเหมาะสมที่สุดสำหรับเครื่องย่อยพลาสติกต้นแบบนี้

ผลการทดลองพบว่ามุมใบมีดมีผลต่อประสิทธิภาพการย่อยพลาสติก โดยใบมีดมุม 90° ให้ขนาดชิ้นงานค่อนข้างหยาบ และสามารถย่อยพลาสติกได้รวดเร็ว แต่ชิ้นพลาสติกที่ได้มีขนาดใหญ่กว่าเมื่อเปรียบเทียบกับมุมอื่น ใบมีดมุม 110° ให้ผลการย่อยอยู่ในระดับปานกลาง เครื่องสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง และช่วยลดการสึกหรอของชิ้นส่วน ขณะที่ใบมีดมุม 130° ให้ผลดีที่สุด เนื่องจากสามารถย่อยพลาสติกได้ละเอียดมากที่สุด ชิ้นงานมีขนาดสม่ำเสมอ และเหมาะสมต่อกระบวนการรีไซเคิล แม้เครื่องจะต้องใช้แรงในการย่อยมากขึ้นก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบชนิดพลาสติก พบว่า พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต ย่อยได้ละเอียดกว่า โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง ในทุกมุมใบมีด เนื่องจากมีความเปราะมากกว่า ขณะที่ มีความเหนียวและยืดหยุ่นสูง ทำให้ย่อยได้ยากกว่าและได้ขนาดชิ้นงานใหญ่กว่า

ในการดำเนินงานพบปัญหาหลักด้านการออกแบบและการประกอบชิ้นส่วน โดยการออกแบบต้องมีความแม่นยำในตำแหน่งเพลาและระยะห่างของใบมีด เพื่อป้องกันการติดขัดระหว่างการทำงาน ส่วนการประกอบต้องใช้ความละเอียดสูง หากไม่ตรงศูนย์อาจทำให้เกิดแรงสั่นสะเทือน เสียงดัง และเพิ่มการสึกหรอของชิ้นส่วนได้

ดังนั้น ในการพัฒนาเครื่องย่อยพลาสติกในอนาคต ควรปรับปรุงช่องป้อนวัสดุให้เหมาะสมเพื่อลดการติดขัดและเพิ่มความปลอดภัย พร้อมพัฒนาใบมีดให้ทนทานและสามารถถอดเปลี่ยนได้สะดวก นอกจากนี้ควรเพิ่มกำลังมอเตอร์หรือปรับระบบส่งกำลังเพื่อรองรับวัสดุที่มีความเหนียวมากขึ้น และควรขยายการทดลองไปยังพลาสติกชนิดอื่น เช่นโพลีโพรพีลีน และ โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง เพื่อเพิ่มความครอบคลุมในการใช้งานของเครื่อง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร สถานที่ทดลองคณะวิศกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการจึงขอบคุณมา ณ ที่นี้

เอกสารอ้างอิง

[1] กุณฑล ทองศรี. (2549). การออกแบบและพัฒนาเครื่องย่อยพลาสติก สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมและเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี งานวิจัยนี้ศึกษาโครงสร้างเครื่องย่อยพลาสติก ชุดใบมีดตัด และปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยพลาสติก โดยใช้ใบมีดหมุนร่วมกับใบมีดรับเพื่อสร้างแรงเฉือนในการตัดพลาสติก เหมาะใช้อ้างอิงเรื่องการออกแบบใบมีดและกลไกการย่อยพลาสติก

[2] จิรภัทร มณีวงศ์ และคณะ (2564) ศึกษาประสิทธิภาพการย่อยพลาสติกชนิด โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง โดยใช้ใบมีดรูปฟันเลื่อย พบว่ารูปทรงฟันเลื่อยช่วยเพิ่มแรงเฉือนและลดการติดขัดระหว่างการทำงาน ทั้งยังให้ขนาดชิ้นพลาสติกที่สม่ำเสมอมากกว่าใบมีดเรียบ งานนี้ให้แนวทางสำคัญต่อการออกแบบใบมีดของเครื่องต้นแบบในโครงการนี้ ซึ่งเลือกใช้รูปฟันเลื่อยแบบสลับมุมเพื่อสร้างแรงเฉือนต่อเนื่องและลดการสะสมความร้อนระหว่างการย่อย

[3] สุชาติ พงศ์วรินทร์ (2562) นำเสนอการสร้างเครื่องย่อยขยะพลาสติกต้นแบบเพื่อการรีไซเคิลในระดับชุมชน โดยเน้นการออกแบบเครื่องให้มีต้นทุนการผลิตต่ำ ใช้วัสดุที่หาได้ง่ายในท้องถิ่น และสามารถซ่อมบำรุงได้ด้วยเครื่องมือพื้นฐาน ผลการดำเนินงานชี้ให้เห็นว่าการพัฒนาเครื่องขนาดเล็กในชุมชนช่วยลดปริมาณขยะพลาสติกและสร้างรายได้เสริมจากการจำหน่ายพลาสติกรีไซเคิลได้จริง ซึ่งแนวคิดนี้เป็นแรงบันดาลใจหลักของโครงการในครั้งนี้ที่มุ่งเน้น “เทคโนโลยีขนาดชุมชน (Community Scale Technology)

[4] ชยพล โพธิ์เงิน และคณะ (2563) ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่อง บดพลาสติกขนาดเล็กสำหรับการรีไซเคิลในครัวเรือน โดยมุ่งเน้นการใช้ใบมีดหมุนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากำลังต่ำแต่ให้แรงเฉือนสูง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเครื่องที่มีอัตราทดเกียร์สูงสามารถย่อยพลาสติกได้มีประสิทธิภาพและประหยัดพลังงานมากกว่าเครื่องทั่วไป งานวิจัยนี้เป็นพื้นฐานสำคัญในการกำหนดอัตราทดเกียร์และลักษณะของระบบขับเคลื่อนในเครื่องต้นแบบของโครงการนี้

[5] Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). Plastics recycling: Challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 364(1526), 2115–2126.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ภคพล ฉิมพลี 0982541364
Pakcapol-c@rmutp.ac.th
วศ.บ.อุตสาหการ (มทร.พระนคร 2568)
ปวส.แม่พิมพ์พลาสติก (2566)
ปวช.ช่างกลโรงงาน (2563)



กันตภณ อินต๊ะสาร 0968094110
Kantapol-I@rmutp.ac.th
วศ.บ.อุตสาหการ (มทร.พระนคร 2568)
ปวส.แม่พิมพ์พลาสติก (2566)
ปวช.ช่างกลโรงงาน(2563)



ดาราวรรณ วีรานันต์ darawan.w@rmutp.ac.th
อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ (มทร.พระนคร)

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การสร้างแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกสำหรับการทดสอบ แรงดึง แรงอัด และ แรงกระแทก

Plastic injection molding process for compression testing and instructions.

ธนะพัฒน์ อาจมิตร* กิตติพงศ์ โคตรสาร กิตติศักดิ์ โคตรสาร และ กชกร วิรัชกุล

นักศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพฯ

บทคัดย่อ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและผลิตแม่พิมพ์สำหรับการฉีดขึ้นงานที่ใช้เป็นตัวอย่างสำหรับการทดสอบสมบัติเชิงกล โดยอ้างอิงรูปทรงและขนาดของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D6110 ASTM D695 และ ISO 527-2 เพื่อให้แม่พิมพ์สามารถนำไปใช้งานได้จริง และให้ชิ้นงานถูกต้องตามรูปแบบที่กำหนด การออกแบบแม่พิมพ์ดำเนินการโดยการใช้โปรแกรมช่วยออกแบบ 3มิติ โซลิดเวิร์ค ซึ่งครอบคลุมการกำหนดโครงสร้างแม่พิมพ์ ระบบทางวิ่ง และตำแหน่งเกท จากนั้นจึงทำการผลิตด้วยกระบวนการทางเครื่องจักร เช่น การกัด การกลึง และการประกอบชิ้นส่วนต่างๆให้สามารถใช้งานได้ ภายหลังการผลิตได้ทำการทดลองฉีดขึ้นรูป โดยใช้พลาสติกชนิด พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต พร้อมทั้งปรับค่าพารามิเตอร์ของเครื่องฉีดให้ได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์ ผลการดำเนินงานพบว่า แม่พิมพ์ที่ผลิตสามารถใช้งานได้จริง และสามารถฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน ตามรูปทรงที่กำหนดโดยพบข้อบกพร่องในบางสภาวะ ซึ่งสามารถปรับปรุงได้โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการฉีดขึ้นรูป

คำสำคัญ :แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก; การฉีดขึ้นรูป;โซลิดเวิร์ค; พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง,พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

Abstract

This project focuses on the design and fabrication of an injection mold to produce standard test specimens for mechanical property evaluation, in accordance with ASTM D6110, ASTM D695, and ISO 527-2. The mold was designed using SolidWorks, including the mold structure, runner system, and gate location, and subsequently manufactured through machining and assembly processes. Injection molding trials were conducted using High-Density Polyethylene and Polyethylene Terephthalate, with process parameters adjusted to achieve optimal specimen quality. The results demonstrate that the fabricated mold is functional and capable of producing specimens that meet the required geometries. Minor defects were observed under certain conditions, which can be improved through parameter optimization.

Keywords: Plastic Injection Mold; Injection Molding; SolidWorks; High-Density Polyethylene; Polyethylene Terephthalate

1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมพลาสติกมีบทบาทสำคัญต่อภาคการผลิต เนื่องจากพลาสติกเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา สามารถขึ้นรูปได้ง่าย และมีต้นทุนการผลิตต่ำ จึงถูกนำมาใช้ในหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อิเล็กทรอนิกส์ บรรจุภัณฑ์ และเครื่องใช้ในชีวิตประจำวัน ส่งผลให้กระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการผลิตชิ้นงานที่มีความละเอียดและความแม่นยำสูง

แม่พิมพ์ฉีดพลาสติกถือเป็นส่วนสำคัญของกระบวนการผลิต เนื่องจากมีผลต่อรูปร่าง ขนาด และคุณภาพของชิ้นงานโดยตรง หากแม่พิมพ์มีการออกแบบที่เหมาะสม จะช่วยให้สามารถผลิตชิ้นงานได้อย่างสม่ำเสมอ ลดความคลาดเคลื่อน และเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต นอกจากนี้ ในงานด้านวิศวกรรมยังมีการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุ เช่น ความต้านทานแรงดึงและแรงกระแทก ซึ่งจำเป็นต้องใช้ชิ้นงานตัวอย่างที่มีขนาดและรูปทรงตามมาตรฐาน เพื่อให้ผลการทดสอบมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ

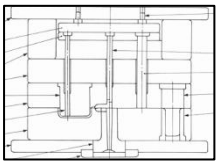
โครงงานนี้จึงจัดทำขึ้นเพื่อออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกสำหรับขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่าง โดยใช้โปรแกรม โซลิดเวิร์ค ในการออกแบบ และเลือกใช้พลาสติกชนิด พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ในการทดลองฉีดขึ้นรูป เพื่อศึกษาแนวทางการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก รวมถึงสามารถนำความรู้ที่ได้รับไปประยุกต์ใช้ในงานด้านวิศวกรรมการผลิตต่อไปได้ในอนาคต

ทางคณะผู้จัดทำโครงการ ได้ออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกที่สามารถใช้งานได้จริง สำหรับชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก แรงอัด และแรงดึง โดยใช้พลาสติกชนิด พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก แม่พิมพ์ฉีดเป็นองค์ประกอบสำคัญในกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก ทำหน้าที่กำหนดรูปร่างของชิ้นงานตามแบบที่ออกแบบไว้ โดยสามารถแบ่งออกเป็นหลายประเภท ได้แก่ แม่พิมพ์แบบสองแผ่นซึ่งเป็นแบบพื้นฐาน แม่พิมพ์แยกด้านข้างสำหรับชิ้นงานที่มีร่องหรือบ่าภายนอก แม่พิมพ์คลายเกลียวสำหรับชิ้นงานที่มีเกลียวภายใน แม่พิมพ์แบบสามแผ่นที่ช่วยแยกทางวิ่งออกจากชิ้นงานอัตโนมัติ และแม่พิมพ์ระบบทางวิ่งร้อนที่ลดการสูญเสียวัสดุและเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ทั้งนี้แม่พิมพ์แต่ละชนิดประกอบด้วยชิ้นส่วน

พื้นฐาน เช่น แผ่นคาวิตี้ แผ่นคอร์ ระบบหล่อเย็น ระบบนำศูนย์ และระบบกระทุ้ง ซึ่งล้วนมีบทบาทสำคัญต่อคุณภาพและประสิทธิภาพของการผลิตชิ้นงานพลาสติกการศึกษาชิ้นส่วนและวิธีการทำงานของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก เป็นการศึกษาชิ้นส่วนและวิธีการทำงานของชิ้นส่วนต่าง ๆ ของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก เพื่อใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีด [4]



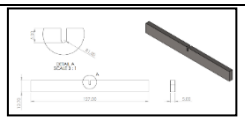
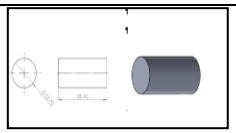
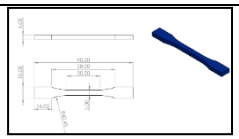
รูปที่ 1 แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

กรรมวิธีการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก มุ่งเน้นการออกแบบระบบการทำงานหลักให้เหมาะสม ได้แก่ ระบบรูวิ่งและรูเข้า เพื่อควบคุมการไหลของพลาสติก ระบบคอร์และคาวิตี้ที่กำหนดรูปร่างชิ้นงาน ระบบไล่อากาศเพื่อระบายอากาศในโพรงแม่พิมพ์ ระบบหล่อเย็นเพื่อลดความร้อนสะสม ระบบปลดชิ้นงานเพื่อให้นำชิ้นงานออกได้สะดวก ระบบนำศูนย์เพื่อความแม่นยำในการประกบ และระบบจับยึดเพื่อติดตั้งกับเครื่องฉีด นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงหลักการออกแบบตามมาตรฐาน เช่น ความสั้นและสมดุลของรูวิ่ง ตำแหน่งและชนิดของรูเข้า รวมถึงการคำนวณขนาดแม่พิมพ์จากการหดตัวของวัสดุ อีกทั้งต้องมีการตรวจสอบแบบและสภาพแม่พิมพ์อย่างละเอียดก่อนใช้งาน เพื่อให้การผลิตมีประสิทธิภาพ คุณภาพชิ้นงานได้ตามข้อกำหนด และลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นในกระบวนการผลิต [5]

ศึกษาการใช้โปรแกรช่วยออกแบบ 3 มิติ โซลิดเวิร์ค เป็นโปรแกรมที่มีความยืดหยุ่นในการทำงานสูง สามารถที่จะ ทำงานมากมายหลายรูปแบบ นำมาใช้ในการเขียนแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก เหมาะสำหรับงานออกแบบเขียน โดยศึกษาความรู้เบื้องต้นของ หลักทั่วไปในการใช้และวิธีการใช้คำสั่ง ในการออกแบบชิ้นส่วนต่างๆของแม่พิมพ์ [6]

ศึกษารูปแบบชิ้นงานที่ต้องการเป็นการศึกษาการรูปแบบชิ้นงานที่ต้องการตามมาตรฐานของชิ้นงานทดสอบในแต่ละประเภท ได้แก่ ชิ้นงานแรงกระแทกชิ้นงานแรงอัด และชิ้นงานแรงดึง ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบ

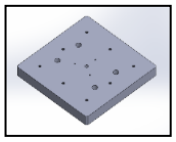
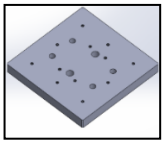
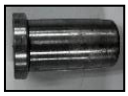
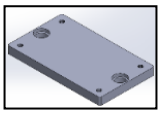
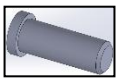
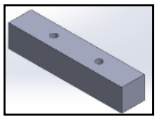
การทดสอบ	ชิ้นงานทดสอบ
แรงการแทก	
แรงอัด	
แรงดึง	

มาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบ ขนาดแผ่นแม่พิมพ์มาตรฐาน JIS B5106. ใช้สำหรับชิ้นส่วนแม่พิมพ์ 7 ชิ้นได้แก่ แผ่นแม่พิมพ์ด้านบน, แผ่นแม่พิมพ์ด้านล่าง, แผ่นยึดด้านบน, แผ่นรองหลัง, แผ่นยึดตัวปลด, แผ่นตัวปลด, แผ่นยึดด้านล่าง, และ แผ่นดันปลด [2]

3. การออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

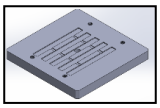
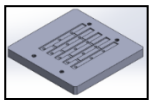
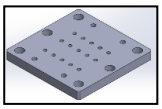
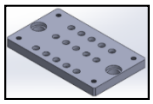
ออกแบบชิ้นส่วนที่ใช้ร่วมกันทั้ง 3 แบบ เป็นการออกแบบชิ้นส่วนแม่พิมพ์ที่สามารถใช้ร่วมกันได้ทั้ง 3แบบ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ชิ้นส่วนแม่พิมพ์ที่ใช้ร่วมกันทั้ง 3แบบ

ชิ้นส่วน	ชิ้นส่วนออกแบบ	ผลิตชิ้นส่วน
แผ่นยึดด้านบน		
แผ่นยึดด้านล่าง		
เพลานำศูนย์		
ปลอกนำศูนย์		
เพลาดันกลับ		
แผ่นดันปลด แผ่นล่าง		
เพลาดันแผ่น ปลด		
แท่งรอง		

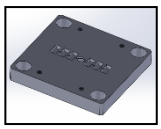
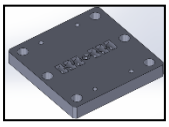
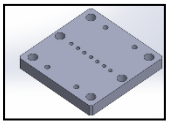
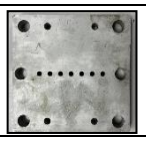
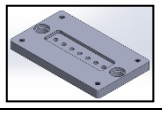
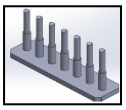
ออกแบบชิ้นส่วนแม่พิมพ์ของชิ้นงานแรงกระแทก ออกแบบชิ้นส่วนแม่พิมพ์ให้มีขนาดตามมาตรฐาน JIS B5106 และขนาดชิ้นทดสอบให้สอดคล้องตาม ตารางที่ 1 ในชิ้นงานแรงกระแทกดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ชิ้นส่วนแม่พิมพ์ที่ใช้ในชิ้นงานแรงกระแทก

ชิ้นส่วนแรงกระแทก	ชิ้นส่วนออกแบบ	ผลิตชิ้นส่วน
แผ่นเบ้า		
แผ่นคอร์		
แผ่นรองหลัง		
แผ่นปลดชิ้นงาน		
เพลาดันปลดชิ้นงาน		

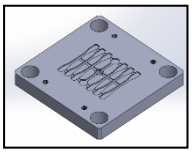
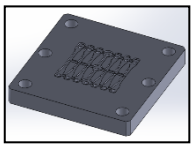
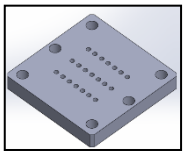
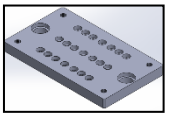
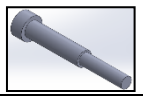
ออกแบบชิ้นส่วนแม่พิมพ์ของชิ้นงานแรงอัดออกแบบชิ้นส่วนแม่พิมพ์ให้มีขนาดตามมาตรฐาน JIS B5106 และขนาดชิ้นทดสอบให้สอดคล้องตาม ตารางที่ 1 ในชิ้นงานแรงอัดดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ชิ้นส่วนแม่พิมพ์ที่ใช้ในชิ้นงานแรงอัด

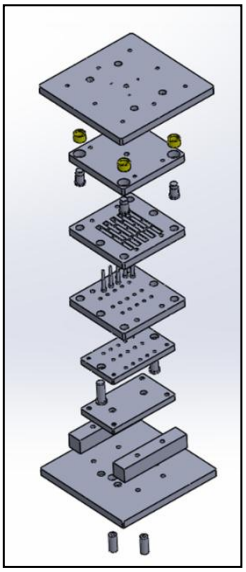
ชิ้นส่วนแรงอัด	ชิ้นส่วนออกแบบ	ผลิตชิ้นส่วน
แผ่นเบ้า		
แผ่นคอร์		
แผ่นรองหลัง		
แผ่นปลดชิ้นงาน		
เพลาดันปลดชิ้นงาน		

ออกแบบชิ้นส่วนแม่พิมพ์ของชิ้นงานแรงดึง ออกแบบชิ้นส่วนแม่พิมพ์ให้มีขนาดตามมาตรฐาน JIS B5106 และขนาดชิ้นทดสอบให้สอดคล้องตาม ตารางที่ 1 ในชิ้นงานแรงดึงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ชิ้นส่วนแม่พิมพ์ที่ใช้ในแรงดึง

ชิ้นส่วนแรงดึง	ชิ้นส่วนออกแบบ	ผลิตชิ้นส่วน
แผ่นเบ้า		
แผ่นคอร์		
แผ่นรองหลัง		
แผ่นปลดชิ้นงาน		
เพลาดันปลด		

เมื่อผลิตชิ้นส่วนแม่พิมพ์ทั้งหมดจนเสร็จสิ้นแล้วนำมาประกอบชิ้นส่วนตามลำดับ ดังรูปที่ 2

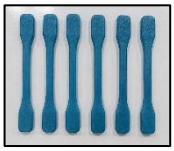


รูปที่ 2 แบบประกอบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

4.ผลการดำเนินงาน

จากการทดลองฉีดชิ้นงานตามแบบชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก แรงอัด และ แรงดึงด้วยแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก โดยใช้พลาสติกชนิด พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ชิ้นงานที่ได้เป็นมีลักษณะเป็น ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ลักษะของชิ้นงานที่ฉีดจากแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

ชิ้นทดสอบ	พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง	พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต
แรงกระแทก		
แรงอัด		
แรงดึง		

จากการทดลองฉีดชิ้นงานตามแบบชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก แรงอัด และ แรงดึงด้วยแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก โดยใช้พลาสติกชนิด พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ผู้จัดทำบันทึกผลการทดลองในการชั่งน้ำหนัก และเปรียบเทียบกับน้ำหนักมาตรฐาน ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ผลการทดลองฉีดชิ้นงานด้วยแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

ลำดับที่	ชนิดของพลาสติก	น้ำหนักของชิ้นงาน (กรัม)					
		ชิ้นงานแรงกระแทก		ชิ้นงานแรงอัด		ชิ้นงานแรงดึง	
		มาตรฐาน	ที่ฉีดได้	มาตรฐาน	ที่ฉีดได้	มาตรฐาน	ที่ฉีดได้
1	พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง	39.1	39	19.5	19	17.4	17
2	พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต	56.7	56	28.3	28	25.3	25

5.สรุปผล

จากการศึกษาและออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก สำหรับการทดสอบสมบัติเชิงกล โดยอ้างอิงรูปทรงและขนาดของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D6110 ASTM D695 และ ISO 527-2 และทำการฉีดทดลองด้วยแม่พิมพ์ที่ออกแบบ ทำให้ทราบว่าการชิ้นงานที่ฉีดขึ้นรูปได้ค่าน้ำหนักที่ใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน ซึ่งทำให้ชิ้นงานที่ได้สามารถนำไปทดสอบหาค่าตามวัตถุประสงค์ของรูปแบบชิ้นงานนั้น ๆ ได้ต่อไป และแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกสามารถฉีดขึ้นรูปชิ้นงานได้ตามวัตถุประสงค์

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร สถานที่ทดลอง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะอาจารย์ที่ปรึกษา จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

เอกสารอ้างอิง

[1] ชาลี ตระการกูล สถาพร ชาตาคม และ ไพบูลย์ สินพระยากุล. การใช้โปรแกรม CAE ช่วยออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกแบบใช้ก๊าซช่วยฉีด. วารสารวิศกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2549.

[2] พิชัย จริยธรรมนุกูล อัญชนา วงษ์โต และ สมเจตน์ พัชรพันธ์. แนวทางในการออกแบบ แม่พิมพ์ฉีดพลาสติกโดยการนำเทคโนโลยี CAD/CAE/CAM. วิทยาพนธ์ วิศวกรรมศาสตร์ มหาบัณฑิตวิทยาลัย. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน, 2551.

[3] ยสมบูรณ์ คำโมนะ สิบเอกวรวุฒิ กองสอน และ วิทวัส คำทิพย์. การศึกษาการใช้งานของโปรแกรม Google Sketch Up 8.0 เพื่อสร้างแบบจำลองสามมิติ อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2554.

[4] ชาญยุทธ โกลิตะวงษ์ และ สุพัฒน์ อรุณวรดิลก (2555) การออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ วารสารวิศกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ, 2555.

[5] ดำรงค์เกียรติ สุขพงษ์ และ เอกรัตน์ สายคำการออกแบบและการสร้างแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก เพื่อใช้งานกับเครื่องฉีดพลาสติกขึ้นรูปชิ้นงานเป็นผลิตภัณฑ์สำหรับรองแก้วน้ำ. ปริญญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2556.

[6] อรรถพล สุขีวุฒิ. 2545. การประยุกต์ใช้ CAD/CAE/CAM ในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดฝาเกลียว พลาสติกและการปรับตั้งพารามิเตอร์เครื่องฉีดพลาสติก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.



ประวัติผู้เขียนบทความ

กิตติศักดิ์ โคตรสาร 0623234513

kittisak-kho@rmutp.ac.th

วศ.บ อุตสาหการ (มทร.พระนคร 2568)

ปวส.แม่พิมพ์พลาสติก(2565) ปวช. เทคนิคการผลิต



ประวัติผู้เขียนบทความ

ธนะพัฒน์ อาจมิตร 0934979555

thanapat-a@rmutp.ac.th

วศ.บ อุตสาหการ (มทร.พระนคร 2568)

ปวส.แม่พิมพ์พลาสติก(2565) ปวช. เทคนิคการผลิต



ประวัติผู้เขียนบทความ

กิตติพงศ์ โคตรสาร 0929530085

kittipong-kh@rmutp.ac.th

วศ.บ อุตสาหการ (มทร.พระนคร 2568)

ปวส.แม่พิมพ์พลาสติก(2565) ปวช. เทคนิคการผลิต



ประวัติผู้เขียนบทความ

กชกร วิรัชกุล kotchakorn.w@rmutp.ac.th

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราช

มงคลพระนคร

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การออกแบบและพัฒนาเครื่องอบและล้างพลาสติกสำหรับกระบวนการรีไซเคิลHDPE กับ PET

Design and Development of a Plastic Washing and Drying Machine for the Recycling Process HDPE กับ PET

ภาณุทัตต์ ศรีไทย ปฏิพัทธิ์ ไทยสงคราม และ อิทธิพล เนคมานุรักษ์

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพฯ

บทคัดย่อ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องอบและล้างเม็ดพลาสติก ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญในกระบวนการรีไซเคิลพลาสติกให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยมุ่งเน้นการลดการใช้น้ำและพลังงานไฟฟ้า พร้อมทั้งเพิ่มความสะดวกในการใช้งานสำหรับชุมชนหรืออุตสาหกรรมขนาดย่อม โดยปัจจัยหลักคือการทำให้สามารถล้างเม็ดพลาสติกหรือพลาสติกรีไซเคิลแล้วนำมาอบให้เม็ดพลาสติกหรือพลาสติกรีไซเคอลนั้นอยู่ในจุดที่สถาพดีที่สุดตอนผ่านการอบของเครื่องแล้วพร้อมเข้าสู่ขั้นตอนการฉีดหรือนำไปแปรรูปต่างต่างๆผ่านเม็ดหรือพลาสติกที่ได้รับจากเครื่องโดยโครงการนี้จะเน้นให้สามารถใช้งานได้ง่ายและมีขนาดกลางไม่ใหญ่จนเกินไปเข้าถึงง่าย

คำสำคัญ: เครื่องอบล้างพลาสติก, รีไซเคิลพลาสติก, ความสะบาย, เศรษฐกิจหมุนเวียน, สิ่งแวดล้อม

Abstract

This project aims to design and develop a plastic pellet washing and drying machine, which is a crucial step in improving the efficiency of plastic recycling processes. The focus is on reducing water consumption and electrical energy usage, while also enhancing ease of operation for communities or small-scale industries. The main objective is to enable effective cleaning of plastic pellets or recycled plastics, followed by a drying process that brings the material to its optimal condition after processing by the machine. This ensures that the plastic is ready for subsequent stages such as injection molding or other forms of processing.Furthermore, the project emphasizes user-friendly operation and a medium-sized design that is not overly large, making it accessible and practical for wider use.

Keywords: Plastic Washing and Drying Machine, Plastic Recycling, Convenience, Circular Economy, Environmen

1. บทนำ

ในปัจจุบันการผลิตพลาสติกได้กลายเป็นอีกหนึ่งกระบวนวิธี ที่สำคัญเป็นอย่างมากในหลายๆอุตสาหกรรมไม่ว่าจะ เป็น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ การแพทย์ แต่ผลที่ตามมาคือปัญหาการจัดการขยะพลาสติกเป็นหนึ่งในปัญหาสิ่งแวดล้อมระดับประเทศ แม้จะมีการส่งเสริมการรีไซเคิลแต่ขั้นตอนการล้างและอบเม็ดพลาสติกยังใช้เวลาและพลังงานสูง ทำให้ต้นทุนเพิ่มขึ้น โครงการนี้จึงมุ่งพัฒนาเครื่องต้นแบบที่สามารถล้างและอบเม็ดพลาสติกได้ในเครื่องเดียว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม.

พลาสติกในปัจจุบันจะมีหลายแบบเม็ดพลาสติก คือ หนึ่งในวัตถุดิบที่อยู่ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นปลาย ที่ใช้ในการช่วยขึ้นรูปร่างออกมาเป็นสิ่งของต่าง ๆ ที่เป็นพลาสติก ซึ่งส่วนมากมีแหล่งกำเนิดมาจากปิโตรเลียม ในขั้นตอนการกลั่นน้ำมันดิบ ที่พบว่ามีปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีความยาวเกินกว่าต้องการ จึงนำมาผ่านกระบวนการแยกสลาย เพื่อทำให้สั้นลงเป็นสารประกอบขนาดเล็ก เช่น ก๊าซเอทธิลีน และโพรพิลีนซึ่งถือเป็นสารตั้งต้นในการผลิตพลาสติก ทางคณะผู้จัดทำโครงการ เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบสำหรับการล้างอบเม็ดพลาสติก

ทางคณะผู้จัดทำได้ออกแบบมาเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องในการลดเวลาและพลังงานที่ใช้ในการทำความสะอาดอบพลาสติก ประสิทธิภาพของกระบวนการ คุณภาพของวัสดุรีไซเคิล และการมีส่วนร่วมของทุกฝ่าย

ประชากรและกลุ่มตัวอย่างคือนักเรียนนักศึกษาและครูผู้สอน กลุ่มเป้าหมายที่ 1 เพื่อทดลองกระบวนการทำงานโดยรวมของเครื่องอบแห้งและทำความสะอาดพลาสติกแล้วส่งต่อไปกระบวนการต่อไปให้เห็นการทำงานโดยรวมของกระบวนการฉีดพิมพพลาสติกให้นักศึกษาดู กลุ่มเป้าหมายที่ 2 เพื่อทดลองกระบวนการทำงานโดยรวมของเครื่องอบแห้งและทำความสะอาดพลาสติกแล้วส่งต่อไปกระบวนการต่อไปให้เห็นการทำงานโดยรวมของกระบวนการฉีดพิมพพลาสติกให้ครูผู้สอนดู

2. แนวคิดของการวิจัย

การรีไซเคิลพลาสติกเป็นกระบวนการนำพลาสติกใช้แล้วกลับมาแปรรูปเพื่อใช้ประโยชน์ใหม่ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณขยะ ลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติจากปิโตรเลียม และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากพลาสติกย่อยสลายได้ยาก การจัดการอย่างไม่เหมาะสมก่อให้เกิดมลพิษทั้งทางบกและทางน้ำ รวมถึงส่งผลกระทบต่อสัตว์และระบบนิเวศการรีไซเคิลยังช่วยลดการฝังกลบและการเผาขยะ ซึ่งลดการปล่อยสารพิษและมลภาวะทางอากาศ อีกทั้งยังเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า สอดคล้องกับแนวคิดการพัฒนาอย่างยั่งยืนและ

เศรษฐกิจหมุนเวียนที่มุ่งเน้นการนำทรัพยากรกลับมาใช้ซ้ำให้เกิดประโยชน์สูงสุด อย่างไรก็ตาม การเพิ่มประสิทธิภาพการรีไซเคิลจำเป็นต้องให้ความสำคัญกับการคัดแยกวัสดุ การควบคุมคุณภาพ และการกำหนดมาตรฐานกระบวนการผลิต เพื่อให้พลาสติกรีไซเคิลมีคุณภาพเหมาะสมและสามารถนำกลับมาใช้ในอุตสาหกรรมได้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ

การรีไซเคิลพลาสติกต้องคำนึงถึงคุณภาพของพลาสติกที่ได้กลับมา เนื่องจากพลาสติกที่ใช้แล้วอาจปนเปื้อนด้วยเศษสิ่งสกปรก น้ำมัน สี หรือสารเติมแต่ง การทำความสะอาดและอบเม็ดพลาสติกอย่างเหมาะสมช่วยให้คุณสมบัติของพลาสติกใกล้เคียงกับพลาสติกใหม่ เช่น ความแข็งแรง ความเหนียว สี และความเงา การควบคุมคุณภาพจึงเป็นส่วนสำคัญของแนวคิดการรีไซเคิลการออกแบบผลิตภัณฑ์เพื่อความสะดวกในการรีไซเคิลแนวคิดการรีไซเคิลยังรวมถึงการออกแบบผลิตภัณฑ์ให้สามารถรีไซเคิลได้ง่าย เช่น การใช้พลาสติกชนิดเดียวกันในบรรจุภัณฑ์ การหลีกเลี่ยงการผสมวัสดุต่างชนิดกัน หรือการใช้ฉลากและกาวที่ลอกออกง่าย แนวทางนี้ช่วยลดขั้นตอนการแยกและล้างพลาสติก ทำให้กระบวนการรีไซเคิลมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

การประหยัดพลังงานและลดต้นทุนการรีไซเคิลพลาสติกใช้พลังงานน้อยกว่าการผลิตพลาสติกใหม่จากปิโตรเลียม ตัวอย่างเช่น การรีไซเคิลเม็ด พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต สามารถประหยัดพลังงานได้มากกว่า 50% เมื่อเทียบกับการผลิต พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต ใหม่ทั้งหมด การใช้เครื่องล้างและอบเม็ดพลาสติกที่มีประสิทธิภาพช่วยลดเวลาและพลังงานในการทำงาน ทำให้ต้นทุนลดลงโดยการพัฒนาระบบอัตโนมัติแนวคิดสมัยใหม่มุ่งไปสู่การใช้ระบบอัตโนมัติในกระบวนการรีไซเคิล เช่น เครื่องล้างและอบเม็ดพลาสติกที่มีระบบล้างและอบ มีการควบคุมอุณหภูมิ เวลา ช่วยให้การรีไซเคิลมีคุณภาพสูง ลดความผิดพลาดจากแรงงาน และเพิ่มความปลอดภัยในการทำงานการรีไซเคิลพลาสติกไม่ใช่เรื่องของโรงงานเพียงอย่างเดียว การส่งเสริมความรู้ ความเข้าใจและการมีส่วนร่วมของชุมชน เช่น การแยกขยะพลาสติกที่ต้นทาง การนำกลับมาส่งให้ศูนย์รีไซเคิล เป็นแนวคิดสำคัญที่จะทำให้กระบวนการรีไซเคิลเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องและยั่งยืนการรีไซเคิลพลาสติกเป็นกระบวนการที่เชื่อมโยงทั้งด้านสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจ และสังคม แนวคิดหลักคือ การลดการสูญเสียทรัพยากร ลดมลพิษ และสร้างความยั่งยืนในระบบเศรษฐกิจ

3. วิธีการดำเนินงานและการออกแบบพร้อมประกอบ

ขั้นตอนและกระบวนการดำเนินงานของโครงการเครื่องอบพลาสติกขนาดเล็กเพื่อการรีไซเคิลพลาสติก โดยเริ่มตั้งแต่การออกแบบภาพ 2 มิติและ 3 มิติ การสร้างแบบจำลอง การจัดหาอุปกรณ์ การผลิตชิ้นส่วน และการประกอบเครื่องต้นแบบจริง ขั้นตอนทั้งหมดถูกดำเนินการอย่างเป็นระบบเพื่อให้ได้เครื่องอบพลาสติกที่สามารถใช้งานได้จริง มีความปลอดภัย และให้ชิ้นงานที่มีคุณภาพ

การศึกษาข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับการออกแบบมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องอบล้างพลาสติกสำหรับอบล้างพลาสติกประเภทฝาขวดที่ผ่านการย่อยมาแล้วและเม็ดพลาสติก เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการฉีดพลาสติก โดยศึกษาหลักการทำงานของเครื่องอบล้างพลาสติกที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม และนำมาประยุกต์ใช้ให้เหมาะสม

หลักการทำงานของเครื่องอบล้างพลาสติกเครื่องอบล้างพลาสติกทำงานโดยการรับช่วงต่อจากเครื่องบดพลาสติกโดยการนำพลาสติกที่ได้จากการย่อยบดพลาสติกหรือเม็ดพลาสติกมาเข้าเครื่องอบล้างเม็ดพลาสติกเพื่อเตรียมพร้อมในกระบวนการเข้าเครื่องฉีดโดยหน้าที่หลักคือการทำให้เม็ดพลาสติกอยู่ในสภาวะที่ดีที่สุดพร้อมที่สุดในการเข้าเครื่องฉีดแล้วขึ้นรูปงานให้ดีที่สุด

โดยขั้นตอนหลักคือนำเม็ดพลาสติกมาล้างทำความสะอาดก่อนจะนำมาเข้าเครื่องอบโดยพลาสติกจะอยู่ในสถานะที่มีความชื้นนำพลาสติกตรงส่วนนั้นเข้าช่องอบแล้วทำการเปิดให้ช่องอบที่ใส่เม็ดพลาสติกหรือพลาสติกที่ได้จากการย่อยนั้นหมุนแล้วทำการเปิดสวิตช์ให้ช่องอบหมุนแล้วทำการเปิดสวิตช์ฮีตเตอร์ให้อยู่ในสถานะทำการให้ความร้อนแล้วเปิดอยู่อย่างนั้นจนได้ความร้อนคงที่ตามจุดความร้อนที่ดีที่สุดของเม็ดพลาสติกนั้นๆแล้วทำการอบเม็ดพลาสติกจนสำเร็จพร้อมเข้าสู่กระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก

การเลือกใช้ชิ้นส่วนหลักในการออกแบบเครื่องอบล้างพลาสติกได้ทำการเลือกใช้ชิ้นส่วนหลักที่เหมาะสมกับการทำงานของเครื่อง เพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความทนทานต่อการใช้งาน

มอเตอร์ไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เป็นต้นกำลังหลักในการขับเคลื่อนถังหมุนของเครื่องอบล้างพลาสติกโดยเลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้าที่มีขนาดกำลังเหมาะสมกับการอบล้างพลาสติกเพื่อให้สามารถสร้างแรงบิดเพียงพอในการหมุนถังล้างพลาสติกและลดโอกาสเกิดการติดขัดของวัสดุขณะทำงาน

ถังรองรับพลาสติก ถังเป็นชิ้นส่วนสำคัญที่ใช้รองรับพลาสติกที่ผ่านการย่อยหรือบดและเม็ดพลาสติก โดยถังจะเป็นภาชนะที่ไว้สำหรับรองรับพลาสติกที่ผ่านการย่อยหรือบดและเม็ดพลาสติก ผ่านการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าถังจะหมุนปั่นพลาสติกให้แห้งโดยรอบตัวจะมีตัวแปรเป็นความร้อนให้เม็ดพลาสติกแห้งอยู่ในอุณหภูมิที่ดีที่สุดสำหรับพลาสติกที่ผ่านการย่อยหรือบดและเม็ดพลาสติก

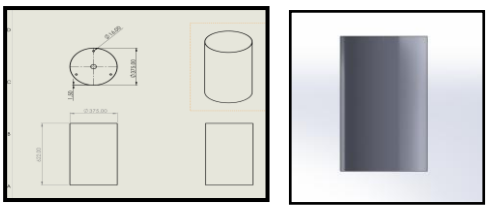
ฮีตเตอร์เป็นชิ้นส่วนสำคัญที่ใช้ทำความร้อนที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน โดยฮีตเตอร์จะเป็นตัวกลางในการปล่อยความร้อนในการใช้อบพลาสติกที่ผ่านการย่อยหรือบดและเม็ดพลาสติกให้อยู่ในจุดอุณหภูมิที่ดีที่สุดที่พร้อมในการจะนำไปเข้าเครื่องฉีดพลาสติกในกระบวนการถัดไป

โครงสร้างเครื่อง โครงสร้างของเครื่องอบล้างพลาสติกถูกออกแบบให้มีความแข็งแรง โดยเลือกใช้สแตนเลสเกรด(SUS304)เป็นวัสดุหลัก เพื่อรองรับน้ำหนักของชิ้นส่วนต่าง ๆ และลดแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นขณะเครื่องทำงานพร้อมทั้งรองรับความร้อนและการอบในอุณหภูมิสูงได้เป็นเวลานาน นอกจากนี้ยังออกแบบให้มีขนาดเหมาะสมกับพื้นที่ใช้งาน และสะดวกต่อการติดตั้งและบำรุงรักษา

ออกแบบภาพ 3 มิติและออกแบบภาพ 2 มิติการออกแบบเครื่องอบล้างพลาสติกในโครงงานนี้ดำเนินการโดยใช้โปรแกรม โซลิตเวิร์คเพื่อสร้างแบบจำลองภาพ 2 มิติ (2D) และภาพ 3 มิติ (3D) ของชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องอบล้างพลาสติก โดยการออกแบบดังกล่าวช่วยให้สามารถกำหนดขนาด สัดส่วน และตำแหน่งของชิ้นส่วนได้อย่างถูกต้อง และสามารถนำแบบไปใช้ในการผลิตชิ้นส่วนจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

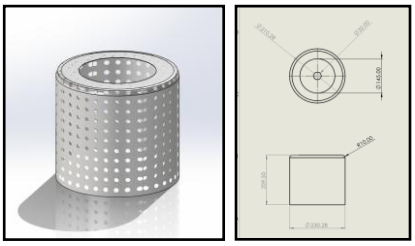
ภาพแบบ 2 มิติถูกใช้สำหรับกำหนดขนาดและรายละเอียดของชิ้นส่วน เช่น ตำแหน่งรูยึดตำแหน่งถัง ขนาดความหนา และระยะห่างระหว่างชิ้นส่วนต่าง ๆ ส่วนภาพแบบ 3 มิติช่วยให้สามารถมองเห็นลักษณะการประกอบของชิ้นส่วนทั้งหมด และสามารถตรวจสอบความเหมาะสมของโครงสร้างก่อนนำไปผลิตจริงในการออกแบบเครื่องอบล้างพลาสติกนี้ ได้แบ่งชิ้นส่วนหลักออกเป็นหลายส่วน มอเตอร์ไฟฟ้าถังสแตนเลส ถังรอบรับพลาสติก ฮีตเตอร์ พัดลม และระบบไฟฟ้า โดยแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

การออกแบบถังภายนอก เป็นถังภายนอกที่ถูกออกแบบให้รับน้ำหนักต่างๆภายในเครื่องอบล้างพลาสติก โดยมีการเจาะรูทางดูดถังเพื่อติดตั้งมอเตอร์และติดตังฮีตเตอร์ทำความร้อนรวมถึงน็อตยึดสกรูต่างๆแล้วแล้วเสาติดตั้งกล่องไฟต่างๆขณะเครื่องทำงาน
โดยการออกแบบถังภายนอกมีความสำคัญต่อการรับน้ำหนักเครื่องรับน้ำหนักฮีตเตอร์สายไฟต่างๆและรองรับการหมุนของถังภายในเครื่องที่มีมอเตอร์ติดท้ายตรงดูดเครื่องขณะเครื่องทำงาน



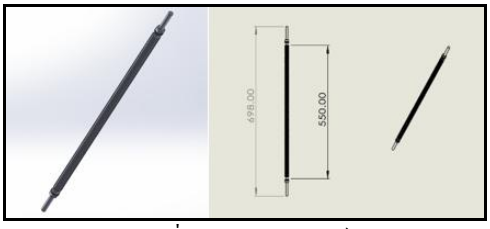
รูปที่ 1 ออกแบบถังภายนอก

การออกแบบถังภายใน เป็นส่วนถังภายในที่ถูกออกแบบให้เป็นตัวยึดติดกลับมอเตอร์โดยจะอยู่ในบริเวณภายในถังภายนอกพร้อมติดตังน็อตสกรูต่างๆรวมถึงระบบไฟถังภายในจะมีหน้าที่ใช้แรงที่มอเตอร์หมุนทำให้ถังหมุนเพื่อที่จะปั้นพลาสติกรีไซเคิลหรือเม็ดเพลาสติกต่างพร้อมกับรับความร้อนจากฮิตเตอร์ทำให้พลาสติกแห้งแล้วป้องกันเม็ดพลาสติกหรือพลาสติกรีไซเคิลกระเด็นออกขณะเครื่องทำงาน



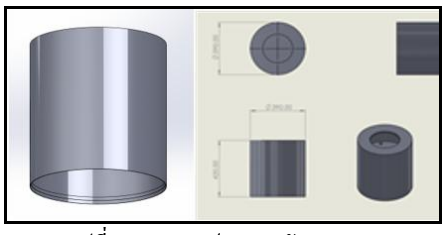
รูปที่ 2 ออกแบบถังภายใน

การออกแบบฮีตเตอร์ทำความร้อน เป็นส่วนสำคัญหลักในการอบหรือการให้ความร้อนภายในเครื่องโดยฮีตเตอร์ทำความร้อนจะยึดติดภายในถังภายนอกพร้อมกับต่อระบบไฟในนั้น หน้าที่หลักคือการให้ความร้อนภายในเครื่องขณะที่ถังภายในกับมอเตอร์ทำงานพร้อมฮีตเตอร์ขณะเครื่องทำงาน



รูปที่ 3 ออกแบบฮีตเตอร์

การออกแบบฝาครอบถังภายนอก โดยจะทำให้ความกว้างมีขนาดใหญ่กว่าถังภายนอกประมาณ5มิลลิเมตร. เพื่อทำให้ฝาแนบสนิทกันกับถังภายนอกแล้วจะทำให้ถังเกิดความสมดุลทั้งหัวและมุมให้กันกระแทกได้ทั้ง2ทาง ฝาถังหน้าที่หลักคือการทำให้ความร้อนออกมายากซึ้งจะกักเก็บความร้อนพร้อมมีรูนิดนึงมาคายความร้อนออกจากถังให้มันสมดุลภายในถังขณะเครื่องทำงาน



รูปที่ 4 ออกแบบฝาครอบถังภายนอก

จำลองประกอบชิ้นงานในโปรแกรม โซลิตเวิร์ค หลังจากได้ทำการออกแบบชิ้นส่วนทั้งหมดแล้ว ขั้นตอนถัดไปคือการนำชิ้นส่วนต่าง ๆ มาประกอบเข้าด้วยกัน เพื่อสร้างเป็นเครื่องอบล้างพลาสติกให้สามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์ โดยการประกอบชิ้นงานได้ดำเนินการผ่านโปรแกรมโซลิตเวิร์ค เพื่อจำลองการทำงานของชิ้นส่วนต่าง ๆ และตรวจสอบความถูกต้องของตำแหน่งการติดตั้ง

การประกอบชิ้นงานเริ่มจากการติดตั้งถังภายนอกยึดกลับฐาน แล้วนำฮีตเตอร์มาติดตั้งกลับตูดถังภายนอกพร้อมกับระบบไฟอยู่บริเวณฐานส่วนถังภายในจะยึดติดกับมอเตอร์ระหว่างตูดถังภายนอกส่วนฝาจะมีหน้าที่ในการกับเก็บความร้อนตอนฮีตเตอร์ทำงานโดยจะใช้การประกบปิดฝาเมื่อประกอบชิ้นส่วนทั้งหมดเรียบร้อยแล้ว ได้ทำการตรวจสอบการหมุนถังภายในและให้ความร้อนของฮีตเตอร์กับฝาที่กักเก็บความร้อนภายในเครื่อง เพื่อให้แน่ใจว่าชิ้นส่วนทุกชิ้นสามารถทำงานร่วมกันได้อย่างถูกต้อง และไม่เกิดการช็อตหรือการละลายของชิ้นส่วนต่างๆ



รูปที่ 5 ประกอบโดยรวม

ในการสั่งผลิตชิ้นส่วนสำหรับโครงงาน ได้มีการจัดทำแบบร่างของชิ้นงานทุกชิ้นด้วยโปรแกรม โซลิดเวิร์ค เพื่อระบุขนาด ความหนา ตำแหน่งรู และรายละเอียดทางเทคนิคที่จำเป็นก่อนส่งให้โรงกลึงทำการกัดและขึ้นรูปจริงและส่วนใหญ่จะเป็นการเชื่อมแสตนเลส ชิ้นส่วนหลักที่เลือกใช้คือแสตนเลสเกรดอาหาร 304 ซึ่งมีคุณสมบัติสแตนเลสเกรดอาหาร คือสแตนเลสที่ปลอดภัยสำหรับการสัมผัสอาหาร ไม่ทำปฏิกิริยากับอาหาร และไม่ปล่อยสารปนเปื้อน มีคุณสมบัติหลัก ๆ ดังนี้ทนการกัดกร่อนสูงไม่เป็นสนิมง่าย แม้โดนน้ำ ความชื้น ไม่มีสารพิษละลายออกมาเมื่อใช้งานตามปกติทนความร้อนและความเย็นใช้ได้ทั้งงานร้อน และงานเย็นทำความสะอาดง่ายผิวเรียบ ไม่สะสมเชื้อแบคทีเรียง่ายมีความแข็งแรงทนทานไม่แตกง่าย อายุการใช้งานยาวนานสิ่งสำคัญที่สุดคือการที่สามารถทนความร้อนได้สูงและยาวนานมากจึงเหมาะจะใช้ในเครื่องนี้

การประกอบเครื่องอบและล้างพลาสติกโครงงานนี้ดำเนินการตามลำดับขั้นตอนเชิงกระบวนการ โดยเริ่มจากการจัดเตรียมโครงสร้างหลัก ซึ่งเป็นฐานอ้างอิงของระบบทั้งหมด ก่อนติดตั้งระบบการหมุนพร้อมให้ความร้อนของเครื่องแล้วทำการรวบมาระบบไฟฟ้า

การเตรียมความพร้อมก่อนการประกอบเครื่องเป็นขั้นตอนพื้นฐานที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ช่วยลดความผิดพลาด ลดความคลาดเคลื่อน และเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของระบบโดยรวม หากขาดการเตรียมความพร้อมที่เหมาะสม อาจทำให้เกิดปัญหาในระหว่างการประกอบ เช่น ชิ้นส่วนไม่ตรงแบบ ขนาดคลาดเคลื่อน หรือเกิดการเสียหายของชิ้นงานตั้งแต่ขั้นตอนแรก

ขั้นตอนแรกคือการตรวจสอบชิ้นส่วนทั้งหมดที่และตรวจสอบรอยเชื่อมต่างๆ ชิ้นส่วนสำคัญที่ต้องตรวจสอบเป็นพิเศษ ได้แก่ ฮีตเตอร์ ระบบไฟฟ้า และมอเตอร์ เนื่องจากชิ้นส่วนเหล่านี้มีผลโดยตรงต่อความปลอดภัยของเครื่องรวมถึงผู้ใช้งานด้วย หลังจากตรวจสอบความครบถ้วนแล้ว ต้องทำการวัดว่าจะสามารถใช้งานได้จริงๆหรือไม่ตามแบบที่ออกแบบมา ในด้านพื้นที่ปฏิบัติงาน ควรเลือกพื้นที่ที่มีพื้นผิวเรียบแข็งแรง และสามารถรองรับน้ำหนักของเครื่องได้อย่างมั่นคง พื้นที่ต้องสะอาด ปราศจากฝุ่นและเศษโลหะ เพื่อป้องกันการปนเปื้อนในระบบเลื่อนและบูชชิ่ง

4. การอบพลาสติกและล้างพลาสติก พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงกับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

การล้างเม็ดพลาสติกเป็นขั้นตอนสำคัญในกระบวนการรีไซเคิล เนื่องจากพลาสติกที่ผ่านการใช้งานมักมีสิ่งปนเปื้อนหลากหลายชนิด เช่น ฝุ่นละออง คราบน้ำมัน เศษกาว ฉลาก หรือแม้กระทั่งเศษโลหะ ซึ่งหากไม่กำจัดออกจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการหลอมและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ การล้างจึงเป็นกระบวนการที่ช่วยเพิ่มความบริสุทธิ์ของวัสดุและเตรียมความพร้อมก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการอบและการขึ้นรูป หลังจากกระบวนการล้าง เม็ดพลาสติกจะยังคงมีความชื้นตกค้างอยู่ ซึ่งความชื้นนี้มีผลกระทบโดยตรงต่อกระบวนการหลอมและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น การเกิดฟองอากาศ การลดความแข็งแรงของวัสดุ หรือการเสื่อมสภาพของโครงสร้างพอลิเมอร์ ดังนั้นการอบแห้งจึงเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญอย่างยิ่งการอบเม็ดพลาสติกอาศัยหลักการถ่ายเทความร้อนเป็นหลัก ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในรูปแบบของการพาความร้อน การนำความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน โดยการพาความร้อนเป็นกลไกหลักในระบบอบทั่วไป เนื่องจากอากาศร้อนสามารถไหลผ่านและสัมผัสกับเม็ดพลาสติกได้อย่างทั่วถึง ทำให้ความชื้นระเหยออกจากพื้นผิวและภายในวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ การนำความร้อนจะเกิดขึ้นจากการสัมผัสโดยตรงระหว่างเม็ดพลาสติกกับพื้นผิวที่มีอุณหภูมิสูง เช่น ถาดหรือผนังเครื่อง ส่วนการแผ่รังสีความร้อนจะพบในระบบที่ใช้แหล่งกำเนิดความร้อนแบบอินฟราเรด

ระบบอบแห้งที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม ได้แก่ การอบด้วยลมร้อน ซึ่งมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนและเหมาะสำหรับงานทั่วไป การอบด้วยสารดูดความชื้น ซึ่งเหมาะสำหรับพลาสติกที่ต้องการความแห้งสูง เช่น พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต การอบด้วยอินฟราเรดที่ให้ความร้อนรวดเร็วและการอบแบบสุญญากาศที่ช่วยลดจุดเดือดของน้ำและเพิ่มประสิทธิภาพการระเหยของความชื้น ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการอบ ได้แก่ อุณหภูมิ เวลาในการอบ อัตราการไหลของอากาศ และความชื้นของอากาศ ซึ่งต้องมีการควบคุมอย่างเหมาะสมเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยจะทำการทดสอบแบบทำการอบพลาสติก พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงกับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตทิ้งไว้ 3 ชั่วโมงจนกว่าพลาสติก พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงกับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตผลการทดลองของ พอลิเอทิลีนเมื่ออบที่อุณหภูมิ 90องศาเซลเซียส และ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต 160 องศาเซลเซียส พลาสติกทั้ง 2 ชนิด ใช้เวลาอบทั้งหมด 3 ชั่วโมงมีผลการทดลอง ดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ผลการทดลองการอบแห้งพลาสติก พอลิเอทิลีนและ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส

ชนิดพลาสติก	ลักษณะก่อนอบ	ลักษณะหลังอบ	ผลการเปลี่ยนแปลง
พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต	มีความชื้น สีใสหรือขุ่นเล็กน้อย	แห้งขึ้นสีเปลี่ยนเล็กน้อยแข็งขึ้น	ลดความชื้นได้ดีแต่เริ่มเปราะหากอบนาน
พอลิเอทิลีน	แข็ง คงรูป สีขาวขุ่น	แห้งขึ้น คงรูปดี ไม่เสียรูป	เหมาะสมต่อการอบไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่ผิดปกติ

ตารางที่ 2 การอ่อนตัวของการอบพลาสติก

เวลาในการอบ (ชั่วโมง)	พอลิเอทิลีนที่ 90 องศาเซลเซียส (%ในการอ่อนตัว)	พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ 160 องศาเซลเซียส (%การอ่อนตัว)
0	0	0
1	5	10
2	10	25
3	15	40

5. สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

โครงงานนี้มีวัตถุประสงค์ในการออกแบบและพัฒนาเครื่องอบและล้างพลาสติกสำหรับกระบวนการรีไซเคิล ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญในกระบวนการรีไซเคิลพลาสติกให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และเป็นการเตรียมพร้อมสำหรับการเข้าเครื่องฉีดเพราะเป็นตัวช่วยสำคัญในการนำเม็ดพลาสติกหรือพลาสติกรีไซเคิลนำกลับมาใช้ในงานฉีดได้ซึ่งก็ได้ตามแบบที่ต้องการนั้นในเครื่องนี้

สรุปผลการทดลอง จากการทดลองสรุปได้ว่า การอบที่อุณหภูมิ 160°C มีความเหมาะสมสำหรับ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตในการลดความชื้นก่อนการแปรรูป แต่ไม่เหมาะสมกับ พอลิเอทิลีนเนื่องจากทำให้เกิดการเสียรูปของวัสดุ ดังนั้น การเลือกใช้อุณหภูมิในการอบแห้งให้เหมาะสมกับชนิดของพลาสติกจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อคุณภาพของพลาสติกรีไซเคิล

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร สถานที่ทดลอง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะอาจารย์ที่ปรึกษา จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

เอกสารอ้างอิง

[1] สุรศักดิ์ พันธ์ดี (2563)ได้ศึกษาการพัฒนาเครื่องล้างและอบเม็ดพลาสติกขนาดเล็กสำหรับใช้ในชุมชน โดยออกแบบให้ใช้พลังงานไฟฟ้าร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อลดการใช้พลังงานหลักและเพิ่มความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อม

[2] อัจฉรา คำดี (2564)ได้ดำเนินการพัฒนาเครื่องล้างเม็ดพลาสติกต้นแบบที่ใช้หลักการหมุนกวนผสมน้ำสบู่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดคราบสกปรกบนพื้นผิวเม็ดพลาสติก โดยออกแบบให้มีระบบหมุนอัตโนมัติและหัวฉีดน้ำแรงดันสูงเพื่อให้เกิดการล้างอย่างทั่วถึง

[3] วิทยา รุ่งเรือง (2565)ได้ทำการวิจัยและออกแบบระบบอบเม็ดพลาสติกแบบหมุนเวียนลมร้อน โดยใช้หลักการควบคุมอุณหภูมิด้วยเซนเซอร์อัตโนมัติ เพื่อให้สามารถรักษาความร้อนให้คงที่ในช่วงการอบทั้งหมด เครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้นสามารถกระจายความร้อนได้อย่างสม่ำเสมอ ส่งผลให้เม็ดพลาสติกมีความชื้นหลังการอบเหลือน้อยกว่า 0.05%

[4] ธนวัฒน์ แซ่ลิ้ม (2566)ได้ทำการศึกษาการออกแบบและพัฒนาเครื่องล้างเม็ดพลาสติกอัตโนมัติแบบใช้ระบบพ่นน้ำแรงดันสูงร่วมกับการกรองน้ำกลับมาใช้ซ้ำ เพื่อลดปริมาณการใช้น้ำในกระบวนการรีไซเคิลพลาสติก

[5] พรทิพย์ ศรีสวัสดิ์ (2567)ได้ศึกษาการพัฒนาเครื่องอบเม็ดพลาสติกประหยัดพลังงานที่ใช้หลักการเป่าลมร้อนหมุนเวียนร่วมกับระบบควบคุมอุณหภูมิแบบอัจฉริยะ (Smart Temperature Control) โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการตรวจจับและปรับอุณหภูมิให้เหมาะสมกับชนิดของเม็ดพลาสติกที่อบ



ประวัติผู้เขียนบทความ

ภาณุทัตต์ ศรีไทย 0968418024

Panutat-s@rmutp.ac.th วศ.บอุตสาหการ (มทร.พระนคร) ปวส.เทคนิคการผลิต (2566) ปวช.ช่างกล โรงงาน(2563)



ประวัติผู้เขียนบทความ

ปฏิพัทธ์ ไทยสงคราม 0987836693

Patipat-t@rmutp.ac.th วศ.บ อุตสาหการ (มทร.พระนคร) ปวส. แม่พิมพ์ พลาสติก (2566) ปวช.ช่างกล โรงงาน(2563)



ประวัติผู้เขียนบทความ

อาจารย์ ดร.อิทธิพล เนคมานุรักษ์

itthipol.n@rmutp.ac.th

อาจารย์ ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาตร์ (มทร.พระนคร)

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การพัฒนาต้นแบบเครื่องฉีดพลาสติกขนาดเล็ก

Mini Injection Molding Machine

สุภชัย สัมปัตตะวนิช ตะวัน ฟักเขียว วรเทพ แก้วลอย และวัชรพันธ์ สุขเกิด*

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพฯ 10800

บทคัดย่อ

โครงงานนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้าง เครื่องฉีดพลาสติกขนาดเล็กเพื่อการรีไซเคิล ซึ่งสามารถนำพลาสติกที่ใช้แล้วกลับมาแปรรูปเป็นชิ้นงานใหม่ได้ โดยอาศัยหลักการทำงานของเครื่องฉีดพลาสติกในภาคอุตสาหกรรมมาประยุกต์ให้เหมาะสมกับการใช้งานในระดับครัวเรือนหรือชุมชน เครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยส่วนหลัก ได้แก่ ชุดหลอมละลายพลาสติก (Heating Barrel), ชุดฉีดพลาสติก (Injection Mechanism) และชุดแม่พิมพ์ (Mold System) โดยใช้ระบบมอเตอร์และสกรูในการป้อนและอัดพลาสติกเข้าสู่แม่พิมพ์ ในการทดสอบได้ใช้พลาสติกประเภท HDPE และ PET ที่มาจากขวดหรือบรรจุภัณฑ์ใช้แล้วเป็นวัตถุดิบ เพื่อประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการหลอมและการขึ้นรูป ผลการทดลองพบว่าเครื่องฉีดพลาสติก ที่พัฒนาขึ้นสามารถหลอมและฉีดพลาสติกให้เป็นชิ้นงานรูปแบบได้ฝ่าย และให้ผิวชิ้นงานมีความเรียบและคงรูปได้ดี การพัฒนาเครื่องฉีดพลาสติกดังกล่าวจึงเป็นแนวทางหนึ่งในการส่งเสริมการรีไซเคิลพลาสติกในระดับครัวเรือน ชุมชน หรือสถานศึกษา ช่วยลดปริมาณขยะพลาสติก และสามารถสร้างมูลค่าเพิ่มจากวัสดุเหลือใช้ และเป็นสื่อการเรียนรู้ด้านกระบวนการฉีดพลาสติกและการออกแบบเครื่องจักรพื้นฐานสำหรับนักศึกษาและผู้สนใจทั่วไป

คำสำคัญ: เครื่องฉีดพลาสติก, รีไซเคิลพลาสติก, ความยั่งยืน, เศรษฐกิจหมุนเวียน, สิ่งแวดล้อม

Abstract

This project aims to design and Development of a Prototype Small-Scale Plastic Injection Molding Machine for recycling, capable of reprocessing used plastic into new products. It leverages the principles of industrial plastic injection molding machines for household and community use. The prototype consists of the following main components: a heating barrel, an injection mechanism, and a mold system, using a motor and screw to feed and compress the plastic into the mold. HDPE and PET plastics from recycled bottles or packaging were used as raw materials for testing to evaluate the efficiency of the melting and molding processes. The experimental results showed that the developed plastic injection molding machine was able to melt and inject plastic into various shapes, with smooth and stable surfaces. The development of this plastic injection molding machine is a way to promote plastic recycling at the household, community, and educational level, reducing plastic waste, adding value to waste materials, and serving as a learning resource for students and the public on the plastic injection molding process and basic machine design.

Keyword: Plastic injection molding, plastic recycling, economy, environment, environment

1. บทนำ

จากปัญหาขยะพลาสติกที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ประเทศไทยได้กำหนด Roadmap การจัดการขยะพลาสติก พ.ศ. 2561–2573 โดยมีเป้าหมายหลักคือการลดและเลิกใช้พลาสติกที่ไม่จำเป็น และการนำขยะพลาสติกกลับมาใช้ประโยชน์ให้ได้ร้อยละ 100 ภายในปี 2570 ปัจจุบันประเทศไทยมีขยะพลาสติกประมาณร้อยละ 12 ของขยะทั้งหมด หรือประมาณปีละ 2 ล้านตัน ซึ่งส่วนหนึ่งเกิดจากการขาดการคัดแยกและการกำจัดที่ไม่ถูกต้อง พลาสติกมีความคงทน ย่อยสลายยาก และบางชนิดมีสารเติมแต่งที่เป็นอันตราย ส่งผลให้เกิดปัญหาการฝังกลบ การอุดตันของท่อระบายน้ำ น้ำท่วม และการสะสมของไมโครพลาสติกในแหล่งน้ำและทะเล ซึ่งกระทบต่อระบบนิเวศและสุขภาพของประชาชน เนื่องจากในปัจจุบันเทคโนโลยีได้มีการพัฒนาก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็วซึ่งปัจจุบันนี้เครื่องฉีด พลาสติกที่ถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในการผลิตสินค้าที่ทำจากพลาสติกในงานอุตสาหกรรมเป็นส่วนใหญ่ดังนั้นพวกเราจึงคิดที่จะทำเครื่องฉีดพลาสติกเพราะเป็นอุปกรณ์ที่สามารถรีไซเคิลพลาสติกให้เกิดประโยชน์ได้โดยขยะที่พวกเราจะนำมารีไซเคิลคือฝาจากขวดน้ำพลาสติก เพราะฝาจากขวดน้ำสามารถนำมาย่อยได้ง่ายกว่าขวดพลาสติกหรือพลาสติกชนิดอื่นๆ ซึ่งจะนำมารีไซเคิลเป็นสิ่งของเช่นอุปกรณ์ต่างๆหรือของที่ระลึกต่างๆพวกเราก็ คิดว่าจะสามารถที่จะผลิตเครื่องฉีดพลาสติกได้ด้วยตัวเองซึ่งมีขั้นตอนที่ไม่ยุ่งยากและมีราคาที่ไม่สูงมากนัก โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องฉีดพลาสติกขนาดเล็กที่สามารถใช้งานได้จริงในระดับห้องปฏิบัติการหรือการผลิตขนาดย่อม และเพื่อศึกษาหลักการทำงานของกระบวนการฉีดพลาสติก ที่สามารถรองรับแม่พิมพ์ขนาดความสูง 200x200 มม. โดยโครงสร้างหลักของเครื่องฉีดพลาสติกขนาดเล็กผลิตจากอะลูมิเนียมอัลลอย 6061 เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง สามารถทนต่อแรงดึง แรงอัด และแรงดัดได้ดีเมื่อเทียบกับน้ำหนักที่เบา อีกทั้งมีคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อน ไม่เกิดสนิมได้ง่าย

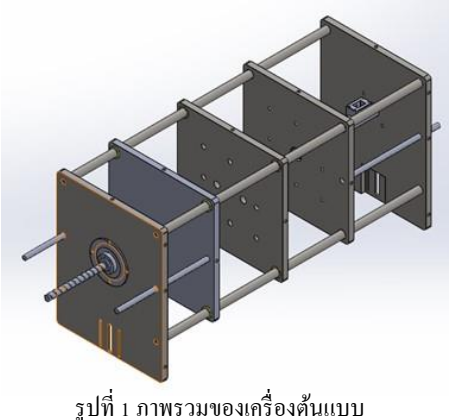
2. แนวคิดของการวิจัย

การฉีดพลาสติกเป็นการกระบวนการสำคัญและจำเป็นสำหรับอุตสาหกรรมหลายๆ ด้าน เนื่องจากพลาสติกมีคุณสมบัติหลากหลายและมีประโยชน์ในการใช้งานต่างๆ กระบวนการฉีดพลาสติกช่วยให้สามารถสร้างผลิตภัณฑ์ ที่มีความหลากหลายในการออกแบบได้ พลาสติกสามารถปรับเปลี่ยน รายละเอียดในการออกแบบงานได้ง่าย เพื่อตอบสนองความต้องการและพึงพอใจของลูกค้าหรือตลาดได้อย่างดี พลาสติกมีความต้านทานสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย เช่น ความต้านทานของสารเคมี ความต้านทานของความชื้น และความต้านทางของอุณภูมิสูงหรือต่ำ ทำให้วัสดุที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในสภาวะที่ซับซ้อนของสภาพแวดล้อมต่างๆ การฉีดพลาสติกช่วยลดการสูญเสียพลาสติกซึ่งพลาสติกบางชนิดนำกลับมารีไซเคิลได้เช่น HDPE PET นอกจากนี้ กระบวนการฉีดพลาสติกยังมีการสูญเสียวัสดุน้อยกว่าผลิตภัณฑ์อื่นๆ การฉีดพลาสติกเป็นกระบวนการ ที่สามารถผลิตชิ้นงานฉีดพลาสติกจำนวนมากได้ในระยะเวลาอันสั้น เป็นประโยชน์สำคัญ ในการผลิตที่ต้องการปริมาณสูง และระยะเวลาผลิตมีประสิทธิภาพ กระบวนการฉีดพลาสติกเป็นวิธีที่ความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายในการจัดสร้างแม่พิมพ์ แต่หลังจากนั้นค่าใช้จ่ายในการฉีดพลาสติกจำนวนมากมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำ การลดต้นทุนการผลิต เนื่องจากความสามารถในการผลิตชิ้นงานฉีดพลาสติก ในปริมาณที่มากในระยะเวลาอันสั้น กระบวนการฉีดพลาสติกสนับสนุนนวัตกรรมและการออกแบบใหม่ในวงการอุตสาหกรรม ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ ที่มีคุณสมบัติและการใชงานที่ดีขึ้น การฉีดพลาสติกเป็นกระบวนการที่สร้างความยืดหยุ่นและความหลากหลาย ในการใช้งานให้กับอุตสาหกรรมต่างๆ ตั้งแต่ผลิตภัณฑ์ในชีวิตประจำวัน จนถึงอุตสาหกรรมที่ซับซ้อนและความสำคัญ เช่น อุตสากรรมการแพทย์ อุตสาหกรรมรถยนต์ และอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

เครื่องฉีดพลาสติกมีจุดประสงค์สร้างเพื่อช่วยเพิ่มความเร็วในการฉีดและความแม่นยำ เพื่อให้คุณภาพของชิ้นงานที่ผลิตออกมายิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยผสมวัตถุดิบก่อนการฉีดพลาสติกเพื่อทำให้สีหรือวัตถุดิบรีไซเคิลมีความละเอียดก่อนการฉีด

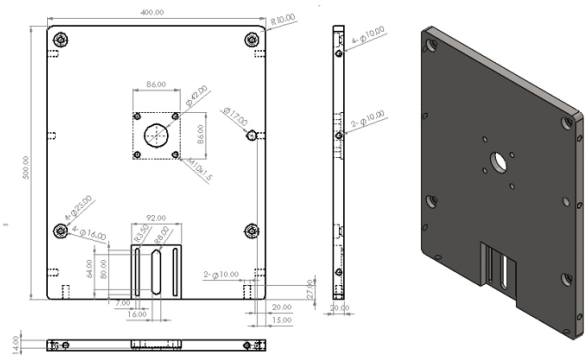
3. การออกแบบโครงสร้าง

กระบวนการดำเนินงานของโครงการเครื่องฉีดพลาสติกขนาดเล็กเพื่อการรีไซเคิลพลาสติก โดยเริ่มตั้งแต่การออกแบบภาพ 2 มิติและ 3 มิติ การสร้างแบบจำลอง การจัดหาอุปกรณ์ การผลิตชิ้นส่วน และการประกอบเครื่องต้นแบบจริง ขั้นตอนทั้งหมดถูกดำเนินการอย่างเป็นระบบเพื่อให้ได้เครื่องฉีดพลาสติกที่สามารถใช้งานได้จริง มีความปลอดภัยและให้ชิ้นงานที่มีคุณภาพเหมาะสมตามวัตถุประสงค์ของโครงการ ดังรูปที่ 1



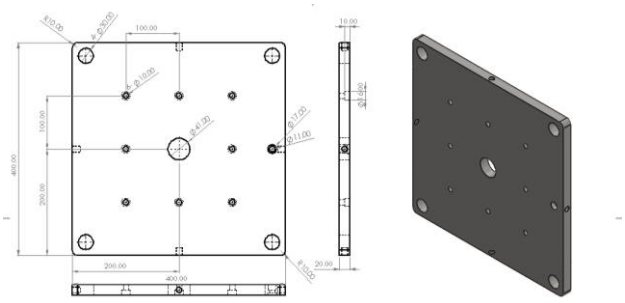
รูปที่ 1 ภาพรวมของเครื่องต้นแบบ

แผ่นที่ 1 แผ่นนี้ใช้สำหรับติดตั้งกระบอกฉีด มีขนาด 400x500 มม. ความหนา 20มม. ติดตั้งกับมอเตอร์ด้านล่าง เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมให้ขนาดพอดีกับมอเตอร์ พร้อมเจาะร่องสล็อตเพื่อให้เพลามอเตอร์ยื่นออกมา และใช้ยึดน็อตมอเตอร์เข้ากับเพลท ร่องสล็อตนี้ช่วยให้สามารถปรับความตึงของสายพานได้ นอกจากนี้ยังเจาะรูขนาด 25 มม. เพื่อใส่เพลา และรูยึดน็อตสำหรับล็อกเพลา ส่วนตรงกลางทำไว้สำหรับติดตั้งกระบอกฉีดโดยเจาะรูร้อยน็อตไว้เรียบร้อย มีการเจาะรูด้านข้างเผื่อไว้สำหรับการปรับแต่งเพิ่มเติมในอนาคต และเจาะรูด้านล่างเพื่อใส่ล้อ โดยกระบอกฉีดเป็นอุปกรณ์ที่สั่งซื้อมาเพิ่มเติมดังรูปที่ 2



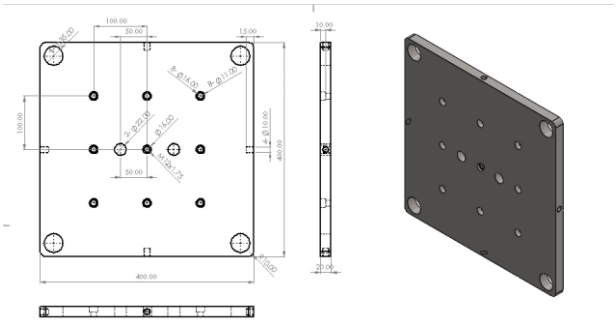
รูปที่ 2 ภาพ 3 มิติและ 2 มิติของแผ่นที่ 1

แผ่นที่ 2 แผ่นนี้อยู่ตรงกลาง ขนาด 400x400 มม. ความหนา 20 มม. มีหน้าที่ล็อกแม่พิมพ์พลาสติก ซึ่งโดยปกติจะอยู่ในตำแหน่งคงที่ แต่ได้ออกแบบให้สามารถปรับระยะของหัวฉีดได้ โดยในระหว่างการฉีดห้ามขยับแผ่นนี้เด็ดขาด มีการเจาะรูตามมุมเพื่อให้เพลาขนาด 25 มม. ผ่านได้ รูขนาด 10 มม. ใช้สำหรับล็อกแม่พิมพ์ และรูตรงกลางไว้สำหรับให้หัวฉีดพลาสติกโผล่ออกมา ส่วนรูด้านหลังเจาะไว้ใส่เกลียวเพลาเพื่อปรับระยะการเคลื่อนที่ของแผ่นนี้ ดังรูปที่ 3



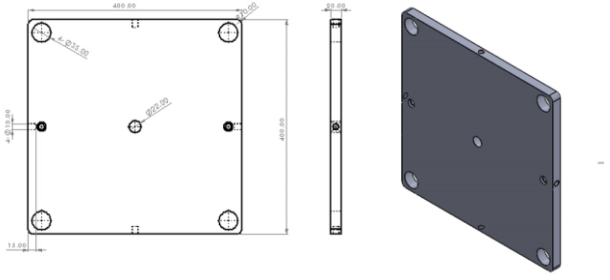
รูปที่ 3 ภาพ 3 มิติและ 2 มิติของแผ่นที่ 2

แผ่นที่ 3 แผ่นนี้เป็นแผ่นเปิด-ปิดแม่พิมพ์ ขนาด 400x400 มม. ความหนา 20มม.รูตรงกลางใช้สำหรับใส่หัวของสกรูบอล และยึดหัวเพลาสกรูบอลกับเพลทโดยใช้รูร้อยน็อตที่เตรียมไว้ ทั้งสองข้างเจาะรูขนาด 22 มม. สำหรับดันชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ โดยจะมีแผ่นดันจากโมลอยู่แล้ว รู 8 รูที่เจาะเพิ่มไว้ใช้ล็อกแม่พิมพ์ตอนฉีด และมีรูสำหรับให้เพลา 25 มม. ผ่านได้เช่นกัน ดังรูปที่ 4



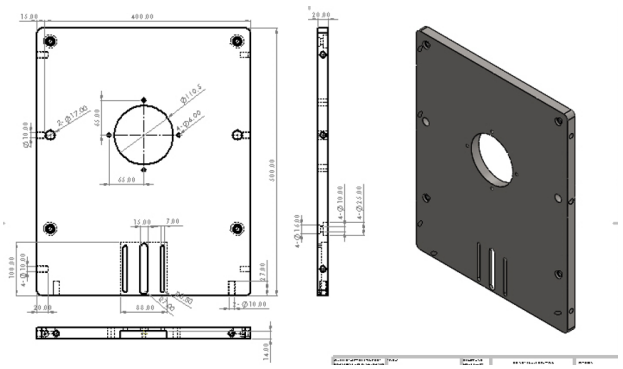
รูปที่ 4 ภาพ 3 มิติและ 2 มิติของแผ่นที่ 3

แผ่นที่ 4 เรียกว่าแผ่นปลด ขนาด 400x400 มม. ความหนา 20 มม. มีหน้าที่ดันหรือปลดชิ้นงานที่ฉีดออกมา โดยมีการเจาะรูด้านขวาเพื่อให้สามารถปรับระยะของการดันได้ตามต้องการ



รูปที่ 5 ภาพ 3 มิติและ 2 มิติของแผ่นที่ 4

แผ่นที่ 5 แผ่นนี้ใช้สำหรับติดตั้งสกรูบอลที่จัดหามาเอง ขนาด 400×500 มม. เจาะรูตรงกลางสำหรับใส่ลูกปืนที่ต่อเข้ากับสกรูบอลซึ่งสวมบูชชิ่งมีรู 6 รูสำหรับยึดพูเล่ เพื่อให้หมุนเกลียวเข้า–ออกได้ของแผ่นที่ 3 ด้านล่างเจาะรูสี่เหลี่ยมติดตั้งมอเตอร์และรูใส่ล้อ โดยรวมคล้ายแผ่นที่ 1 แต่ติดตั้งสกรูบอลแทนกระบอกฉีด



รูปที่ 6 ภาพ 3 มิติและ 2 มิติของแผ่นที่ 5

4. การประกอบเครื่องฉีด

การประกอบเครื่องฉีดพลาสติกขนาดเล็กในโครงงานนี้ดำเนินการตามลำดับขั้นตอนเชิงกระบวนการ โดยเริ่มจากการจัดเตรียมโครงสร้างหลัก ซึ่งเป็นฐานอ้างอิงของระบบทั้งหมด ก่อนติดตั้งระบบเลื่อน ระบบส่งกำลัง และชุดกระบอกฉีดตามลำดับ ทั้งนี้การจัดลำดับขั้นตอนการประกอบมีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมแนวศูนย์ของระบบ ลดความคลาดเคลื่อนสะสม (Cumulative Error) และรักษาความแม่นยำของการเคลื่อนที่เชิงเส้น

4.1 การเตรียมความพร้อมก่อนการประกอบ

การเตรียมความพร้อมก่อนการประกอบเครื่องเป็นขั้นตอนพื้นฐานที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ช่วยลดความผิดพลาด ลดความคลาดเคลื่อน และเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของระบบโดยรวม หากขาดการเตรียมความพร้อมที่เหมาะสม อาจทำให้เกิดปัญหาในระหว่างการประกอบ เช่น ชิ้นส่วนไม่ตรงแบบ ขนาดคลาดเคลื่อน หรือเกิดการเสียหายของชิ้นงานตั้งแต่ขั้นตอนแรก

ขั้นตอนแรกคือการตรวจสอบชิ้นส่วนทั้งหมดที่ได้รับจากการผลิตและการจัดซื้อ โดยเปรียบเทียบกับแบบวิศวกรรมและรายการวัสดุ (Bill of Materials) เพื่อยืนยันว่าชิ้นส่วนครบถ้วนและถูกต้องตามสเปกที่กำหนด ชิ้นส่วนสำคัญที่ต้องตรวจสอบเป็นพิเศษ ได้แก่ แผ่นเพลทอะลูมิเนียม 6061 เพลานำทาง สกรูบอล บูชชิ่งออย และมอเตอร์สเต็ปเปอร์ เนื่องจากชิ้นส่วนเหล่านี้มีผลโดยตรงต่อความแม่นยำของระบบ

หลังจากตรวจสอบความครบถ้วนแล้ว ต้องทำการวัดขนาดจริงของชิ้นส่วนสำคัญด้วยเครื่องมือวัดที่มีความละเอียด เช่น เวอร์เนียร์คาลิป

เปอร์ ไมโครมิเตอร์ และไดอัลเกจ เพื่อควบคุมค่าความคลาดเคลื่อนให้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ เพราะหากเกิดความคลาดเคลื่อนสะสม จะทำให้แนวศูนย์ของระบบเอียงหรือไม่ตรง ซึ่งส่งผลต่อการฉีดโดยตรง

ในด้านพื้นที่ปฏิบัติงาน ควรเลือกพื้นที่ที่มีพื้นผิวเรียบ แข็งแรง และสามารถรองรับน้ำหนักของเครื่องได้อย่างมั่นคง พื้นที่ต้องสะอาด ปราศจากฝุ่นและเศษโลหะ เพื่อป้องกันการปนเปื้อนในระบบเลื่อนและบูชชิ่ง

การเตรียมเครื่องมือก็เป็นอีกปัจจัยสำคัญคือประแจแอล การขันที่น้อยเกินไปอาจทำให้โครงสร้างคลายตัวระหว่างการทำงานและเกิดแรงสั่นสะเทือน

ดังนั้น การเตรียมความพร้อมก่อนการประกอบจึงไม่ใช่เพียงการจัดเตรียมอุปกรณ์เท่านั้น แต่เป็นกระบวนการควบคุมคุณภาพตั้งแต่ต้นทาง เพื่อให้การประกอบในขั้นตอนถัดไปมีความถูกต้อง แม่นยำ และลดความเสี่ยงของปัญหาในระยะยาว

5. สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

โครงงานนี้มีวัตถุประสงค์ในการออกแบบและพัฒนาเครื่องฉีดพลาสติกขนาดเล็ก โดยใช้กระบอกฉีด สกรูบอล มอเตอร์สเต็ปเปอร์ และระบบรางนำทาง เพื่อให้สามารถรีไซเคิลพลาสติกและขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบได้ ในการดำเนินงานได้ทำการออกแบบชิ้นส่วน ผลิตแผ่นเพลทอลูมิเนียม 6061 ประกอบโครงสร้างหลัก ติดตั้งระบบขับเคลื่อนแบบสกรูบอลพร้อมสายพานไทมมิ่ง และติดตั้งฮีตเตอร์ให้ความร้อนแก่กระบอกฉีด หลังการประกอบ ได้มีการทดสอบระบบต่าง ๆ ได้แก่ ระบบขับเคลื่อน ระบบรางนำทาง ระบบฮีตเตอร์ และระบบการทำงานร่วมกันของชุดฉีด พบว่าระบบทั้งหมดสามารถทำงานได้ตรงตามแบบที่ออกแบบไว้ มีความแม่นยำของการเคลื่อนที่ มีการส่งกำลังที่ต่อเนื่อง และสามารถควบคุมอุณหภูมิได้อย่างมีเสถียรภาพ จึงสรุปได้ว่าต้นแบบเครื่องฉีดพลาสติกสามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ในตอนต้น

5.1 อภิปรายผล

จากผลการทดสอบพบว่า การเลือกใช้แผ่นอลูมิเนียม 6061 ให้ความแข็งแรง น้ำหนักเบา และทนความร้อนเพียงพอ ทำให้โครงสร้างมีความเสถียรเมื่อต้องรับแรงจากสกรูบอลและระบบฉีด การใช้เพลาแสตนเลสชุบโครเมียมร่วมกับบูชชิ่งออยช่วยให้การเลื่อนของแผ่นเพลทมีความลื่นไหลและเกิดการสึกหรอต่ำ นอกจากนี้การขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์สเต็ปเปอร์ผ่านสายพานไทมมิ่งและพูลเล่ย์ที่เลือกตามขนาดเพลาที่เหมาะสม ทำให้สามารถควบคุมตำแหน่งได้แม่นยำโดยไม่เกิดการลื่นของสายพาน สำหรับระบบฮีตเตอร์ พบว่าสามารถเพิ่มและควบคุมอุณหภูมิในกระบอกฉีดได้มีประสิทธิภาพ โดยการกระจายความร้อนมีความสม่ำเสมอ ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของกระบวนการฉีด อย่างไรก็ตาม จากการทดสอบพบว่าการสูญเสียความร้อนยังมีอยู่บ้าง เนื่องจากไม่ได้มีการหุ้มฉนวนเต็มพื้นที่กระบอกฉีด ทำให้ต้องใช้เวลาในการทำความร้อนเพิ่มขึ้นกว่าที่คาดการณ์ไว้เล็กน้อย ด้านระบบขับเคลื่อน ชุดสกรูบอลให้แรงส่งที่สม่ำเสมอและมีความแม่นยำสูง แต่ต้องมีการตั้งศูนย์แนว (Alignment) อย่างละเอียด หากตำแหน่งเพลาเบี่ยงแม้เพียงเล็กน้อยอาจทำให้เกิดเสียงเสียดสีหรือแรงฝืดเพิ่มขึ้น ดังนั้นขั้นตอนการประกอบถือเป็นส่วนสำคัญ

5.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนาในอนาคต

1. เพิ่มฉนวนกันความร้อนรอบกระบอกฉีด เพื่อลดการสูญเสียความร้อน ลดเวลาในการอุ่นเครื่อง และทำให้อุณหภูมิคงที่มากขึ้นในระหว่างการใช้งานจริง

2. ออกแบบกรอบป้องกัน (Safety Cover) สำหรับครอบส่วนหัวฉีดและระบบขับเคลื่อนเพื่อลดความเสี่ยงต่อผู้ใช้งานเมื่อเครื่องทำงานที่อุณหภูมิสูง

3. ปรับปรุงขนาดและความแข็งแรงของสกรูและเพลาขับ จากการใช้งานพบว่าสกรูและเพลาขับมีขนาดค่อนข้างเล็ก ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงบิดและรองรับน้ำหนักแม่พิมพ์ (โมล) ยังไม่มากเท่าที่ควร ภายใต้ภาระการทำงานต่อเนื่องอาจเกิดการโก่งตัวหรือการสึกหรอเร็วกว่าที่คาดไว้ ดังนั้นควรพิจารณาเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรูให้เหมาะสมกับปริมาณการฉีดและแรงดันใช้งาน รวมถึงเพิ่มขนาดเพลาขับ โดยเลือกใช้วัสดุที่มีความแข็งแรงและทนการกัดกร่อน เช่น เพลาสแตนเลสเกรดที่มีค่าความแข็งแรงเชิงกลสูง การเพิ่มขนาดเพลาจะช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงบิด ลดการบิดตัว และเพิ่มเสถียรภาพในการทำงานระยะยาว

การปรับปรุงในส่วนนี้จะช่วยให้เครื่องสามารถรองรับแม่พิมพ์ที่มีน้ำหนักมากขึ้น ลดความเสี่ยงต่อความเสียหายของโครงสร้าง และเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งานโดยรวม นอกจากนี้ยังช่วยยืดอายุการใช้งานของชิ้นส่วนหลัก ลดต้นทุนการซ่อมบำรุงในอนาคต และเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบในภาพรวม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร สถานที่ทดลองคณะวิศกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการจึงขอบคุณมา ณ ที่นี้

เอกสารอ้างอิง

[1] ศรีอาจ บัวทอง และคณะ, 2564, การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมพลาสติกประเภทขึ้นรูปด้วย

กระบวนการฉีดพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติก, วารสารวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการอุตสาหกรรม

[2] อนุวิทย์ ศรีทอง และคณะ, 2566, การประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์รูปแบบและผลกระทบของความล้มเหลว (Failure Mode and Effects Analysis: FMEA) เพื่อจัดลำดับความรุนแรงและปรับปรุงกระบวนการฉีดพลาสติกในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนพลาสติก, วารสารเทคโนโลยีการผลิตและวิศวกรรม

[3] จิตรา รุกิจคณปานิช และ ศิมาธร จันทร์ฉาย, 2568, การศึกษาการนำเศษพอลิโพรพิลีนจากกระบวนการผลิตกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปและการทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้สัดส่วนการผสมที่แตกต่างกัน, วารสารวัสดุศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์

[4] พงศ์ภัทรวุฒิ วัฒนะ และคณะ, 2567, การวิเคราะห์ความหนืดการไหลของพอลิโพรพิลีนและความสัมพันธ์ต่อประสิทธิภาพในกระบวนการฉีดพลาสติกและคุณภาพของชิ้นงาน, วารสารวิศวกรรมวัสดุและกระบวนการผลิต

[5] แก้วเชื้อ พงษ์พานิช และ หวังมาน วัฒนกิจ, 2567, การประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง (Design of Experiments: DOE) เพื่อวิเคราะห์และกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการฉีดพลาสติกชิ้นส่วนเครื่องพิมพ์เพื่อลดของเสียและเพิ่มความเสถียรของกระบวนการผลิต, วารสารวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

ประวัติผู้เขียนบทความ



วรเทพ แก้วลอย 097-356-8821

worathep-k@rmutp.ac.th

วศ.บ.อุตสาหการ (มทร.พระนคร 2568)



ตะวัน ฟักเขียว 096-836-6424

tawan-f@rmutp.ac.th

วศ.บ.อุตสาหการ (มทร.พระนคร 2568)



สุภชัย สัมปัตตะวนิช 082-541-6641

pugun2846@gmail.com

วศ.บ.อุตสาหการ (มทร.พระนคร 2568)



วัชรพันธ์ สุขเกิด

watcharapan.s@rmutp.ac.th

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมปัจจัยในการปลูกไฮโดรโปนิกส์แบบอัตโนมัติ

Design and Implementation of an Automated Environmental Control System for Hydroponics

สุดารัตน์ ดวงประทุม* สิรวิชญ์ เงินแท้ และวัชรพันธ์ สุขเกิด

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพฯ 10800

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ พัฒนา และประเมินประสิทธิภาพของระบบควบคุมปัจจัยสภาพแวดล้อมในการปลูกพืชไร้ดิน (ไฮโดรโปนิกส์) แบบอัตโนมัติเพื่อแก้ไขปัญหาความคลาดเคลื่อนในการจัดการธาตุอาหารและลดภาระแรงงานของเกษตรกร ระบบที่พัฒนาขึ้นบูรณาการเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) ร่วมกับเครือข่ายเซนเซอร์ประกอบด้วย เซนเซอร์วัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH), ความนำไฟฟ้า (EC), อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ทำงานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ESP32 ในการประมวลผลและควบคุมอุปกรณ์แบบอัตโนมัติเช่น ปั๊มจ่ายสารละลาย และระบบระบายอากาศ การศึกษาได้ทำการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของผักสลัดกรีนคอส (Green Cos) ระหว่างกลุ่มทดลองที่ใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติและกลุ่มควบคุมที่ปลูกด้วยระบบไฮโดรโปนิกส์แบบธรรมดาที่ไม่มีการควบคุมสภาพแวดล้อม เป็นระยะเวลา 45 วัน ผลการทดลองพบว่า ระบบอัตโนมัติสามารถรักษาค่า pH ให้อยู่ในช่วง 5.8-6.2 และค่า ECในช่วง 1.5-1.6 mS/cm ได้อย่างมีเสถียรภาพ ส่งผลให้ผลผลิตในกลุ่มทดลองมีน้ำหนักสดเฉลี่ยสูงกว่ากลุ่มควบคุมถึง 15.4% อัตราการเจริญเติบโตของลำต้นเพิ่มขึ้น 22.8% และลดการเกิดอาการปลายใบไหม้ (Tip burn) ได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระบบดังกล่าวสามารถแสดงผลและสั่งการผ่านแอปพลิเคชันได้อย่างแม่นยำ ซึ่งตอบสนองต่อแนวทางการพัฒนาสมาร์ทฟาร์ม (Smart Farm) เพื่อการเกษตรที่ยั่งยืน

คำสำคัญ : ไฮโดรโปนิกส์, อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง, ระบบควบคุมอัตโนมัติ, การเกษตรแม่นยำ

Abstract

This research aims to design, develop, and evaluate the performance of an automated environmental control system for soilless culture (hydroponics) to solve the problem of nutrient management inaccuracies and reduce farmers' labor. The developed system integrates Internet of Things (IoT) technology with a sensor network, including pH, electrical conductivity (EC), temperature, and relative humidity sensors. It operates in conjunction with an ESP32 microcontroller to process and automatically control actuators such as dosing pumps and ventilation systems. An experiment was conducted to compare the growth performance of Green Cos lettuce between an experimental group using the automated control system and a control group using a conventional hydroponic system without environmental control over a 45 day period. The results revealed that the automated system maintained the pH level stably within the range of 5.8-6.2 and the EC value within 1.5-1.6 mS/cm. Consequently, the crop yield in the experimental group exhibited an average fresh weight 15.4% higher than the control group, a 22.8% increase in stem growth rate, and a statistically significant reduction in the incidence of tip burn. The system accurately displays data and receives commands via an application, responding to the development guidelines of smart farms for sustainable agriculture.

Keywords: Hydroponics, Internet of Things, Automated Control System, Precision Agriculture

1. บทนำ

โลกในปัจจุบันกำลังเผชิญกับความท้าทายอย่างหนักในด้านความมั่นคงทางอาหาร อันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร การขยายตัวของสังคมเมืองที่ส่งผลให้พื้นที่ทางการเกษตรลดลง รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศที่ทำให้เกิดสภาวะแห้งแล้ง การทำเกษตรกรรมภายใต้สภาพแวดล้อมที่ควบคุมได้ (Controlled Environment Agriculture) จึงกลายเป็นทางเลือกที่ได้รับความนิยม โดยเฉพาะการปลูกพืชไร้ดินหรือไฮโดรโปนิกส์ (Hydroponics) ซึ่งเป็นวิธีการปลูกพืชในสารละลายธาตุอาหาร วิธีนี้มีข้อดีคือสามารถประหยัดน้ำได้ถึง 90% และสามารถเพิ่มผลผลิตต่อพื้นที่ได้สูงขึ้น [1]

อย่างไรก็ตาม การปลูกพืชด้วยระบบไฮโดรโปนิกส์พบปัญหาสำคัญในการจัดการ โดยเฉพาะความอ่อนไหวของระบบต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และค่าความนำไฟฟ้า (EC) ของสารละลายธาตุอาหาร หากค่า pH ไม่เหมาะสม จะส่งผลให้พืชไม่สามารถดูดซึมธาตุอาหารบางชนิดได้ ในขณะที่ค่า EC ที่สูงหรือต่ำเกินไปจะส่งผลต่อความเข้มข้นของปุ๋ย ซึ่งอาจทำให้รากพืชเกิดอาการไหม้ ในระบบการปลูกแบบธรรมดา เกษตรกรต้องใช้แรงงานคนในการตรวจวัดและเติมสารละลายด้วยมือเป็นประจำทุกวัน ซึ่งมีความเสี่ยงต่อความผิดพลาดจากมนุษย์ [2]

ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) และระบบควบคุมอัตโนมัติ มาใช้ในการพัฒนาระบบสมาร์ทฟาร์ม (Smart Farm) เพื่อควบคุมปัจจัยแวดล้อมในการปลูกผักไฮโดรโปนิกส์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างระบบที่สามารถตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แบบเรียลไทม์

และวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการเจริญเติบโตของพืชระหว่างการใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติกับการปลูกแบบธรรมดาที่ไม่มีการควบคุมสภาพแวดล้อม

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แนวคิดเกี่ยวกับระบบปลูกพืชไฮโดรโปนิกส์ ระบบควบคุมอัตโนมัติและเซนเซอร์ที่ใช้ในงานเกษตรอัจฉริยะส่วนใหญ่เป็นระบบควบคุมแบบปิด (Closed-loop Control System) ซึ่งมีการใช้เซนเซอร์ในการป้อนกลับข้อมูล เซนเซอร์หลักที่จำเป็นในระบบไฮโดรโปนิกส์ ได้แก่ pH Sensor, EC Sensor, และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น ข้อมูลที่ได้จะถูกส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผลก่อนสั่งการไปยังอุปกรณ์ทำงาน เช่น Dosing Pump และพัดลมระบายอากาศ [3]

ระบบไฮโดรโปนิกส์ที่นิยมใช้งานในปัจจุบัน ได้แก่ ระบบปลูกผักไฮโดรโปนิกส์แบบน้ำตื้น ระบบระบบปลูกผักไฮโดรโปนิกส์แบบน้ำลึก ระบบน้ำหยด และระบบน้ำวนกลับ ซึ่งแต่ละระบบมีลักษณะการไหลเวียนของสารละลายธาตุอาหารแตกต่างกัน โดยระบบ ปลูกผักไฮโดรโปนิกส์แบบน้ำตื้น เป็นระบบที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในการปลูกผักสลัด เนื่องจากสามารถประหยัดน้ำและควบคุมคุณภาพสารละลายได้ง่าย การปลูกพืชด้วยระบบไฮโดรโปนิกส์จำเป็นต้องควบคุมปัจจัยสำคัญหลายด้าน ได้แก่ ค่าความเป็นกรด–ด่าง (pH), ค่าการนำไฟฟ้า อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และปริมาณแสง หากปัจจัยดังกล่าวมีค่าผิดปกติจะส่งผลต่อการดูดซึมธาตุอาหาร การสังเคราะห์แสง และอัตราการเจริญเติบโตของพืชโดยตรง

ค่าความเป็นกรด–ด่าง (pH) เป็นค่าที่แสดงถึงความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนในสารละลาย ซึ่งมีผลโดยตรงต่อความสามารถในการละลายและการดูดซึมธาตุอาหารของพืช โดยพืชแต่ละชนิดจะมีช่วงค่า pH ที่เหมาะสมแตกต่างกัน สำหรับผักสลัดในระบบไฮโดรโปนิกส์ ค่า pH ที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 5.5–6.5 เนื่องจากเป็นช่วงที่ธาตุอาหารหลัก เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม สามารถละลายและถูกดูดซึมได้ดีที่สุด หากค่า pH ต่ำเกินไปจะส่งผลให้รากพืชดูดซึมธาตุบางชนิดมากเกินความจำเป็น จนเกิดอาการเป็นพิษต่อพืช ในทางกลับกัน หากค่า pH สูงเกินไป จะทำให้ธาตุอาหารบางชนิดตกตะกอนและพืชไม่สามารถดูดซึมไปใช้ได้ ส่งผลให้เกิดอาการขาดธาตุอาหาร เช่น ใบเหลือง ปลายใบไหม้ และการเจริญเติบโตชะงัก ในระบบควบคุมอัตโนมัติ เซนเซอร์วัดค่า pH จะทำหน้าที่ตรวจวัดค่าความเป็นกรด–ด่างของสารละลายแบบเรียลไทม์ และส่งข้อมูลไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผล เมื่อค่าที่วัดได้สูงหรือต่ำเกินกว่าค่าที่กำหนด ระบบจะสั่งงานปั๊มจ่ายสารละลายปรับค่า pH เพื่อรักษาระดับให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมโดยอัตโนมัติ

ค่าการนำไฟฟ้า หรือ EC เป็นค่าที่ใช้บ่งบอกความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหารในน้ำ โดยมีหน่วยเป็น mS/cm ค่า EC ที่เหมาะสมสำหรับการปลูกผักสลัดในระบบไฮโดรโปนิกส์จะอยู่ประมาณ 1.2–1.8 mS/cm ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดพืชและช่วงอายุของพืช หากค่า EC ต่ำเกินไป พืชจะได้รับธาตุอาหารไม่เพียงพอ ส่งผลให้ต้นแคระแกร็น ใบซีด และเจริญเติบโตช้า ในทางตรงกันข้าม หากค่า EC สูงเกินไป จะทำให้ความเข้มข้นของสารละลายสูงจนรากพืชไม่สามารถดูดน้ำได้ตามปกติ และอาจเกิดอาการรากไหม้ได้ ระบบควบคุม EC อัตโนมัติจะใช้ EC Sensor ตรวจวัดความเข้มข้นของสารละลาย และส่งข้อมูลไปยังหน่วยประมวลผล เมื่อค่า EC ต่ำกว่าค่าที่กำหนด ระบบจะสั่งให้ปั๊มเติมสารละลายธาตุอาหารเพิ่มเติม และเมื่อค่า EC สูงเกินไป ระบบจะเติมน้ำสะอาดเพื่อลดความเข้มข้นให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม

ระบบควบคุมอัตโนมัติเป็นระบบที่ใช้เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ร่วมกับการประมวลผลข้อมูลจากเซนเซอร์ เพื่อควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้ทำงานตามเงื่อนไขที่กำหนด โดยระบบควบคุมที่นิยมใช้ในงานเกษตรอัจฉริยะคือระบบควบคุมแบบปิด (Closed-loop Control System) ซึ่งมีการตรวจสอบผลลัพธ์ย้อนกลับผ่านเซนเซอร์อย่างต่อเนื่อง หลักการทำงานของระบบควบคุมแบบปิดประกอบด้วย 3 ส่วนสำคัญ ได้แก่ หน่วยตรวจวัด (Sensor Unit) ทำหน้าที่ตรวจวัดค่าต่าง ๆ เช่น pH, EC, อุณหภูมิ และความชื้น, หน่วยประมวลผล (Controller Unit) เช่น ESP32 หรือ Arduino ทำหน้าที่วิเคราะห์ข้อมูลและตัดสินใจ และหน่วยปฏิบัติการ (Actuator Unit) เช่น ปั๊มน้ำ พัดลม หรือระบบพ่นหมอก [4-5]

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

การออกแบบระบบฮาร์ดแวร์เป็นระบบควบคุมปัจจัยแวดล้อมที่พัฒนาขึ้น แบ่งส่วนประกอบหลักออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ หน่วยรับข้อมูล ประกอบด้วยเซนเซอร์วัดค่า pH, EC และอุณหภูมิความชื้น หน่วยประมวลผลกลางใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ซึ่งมีโมดูล Wi-Fi ในตัว และหน่วยแสดงผลและสั่งการ ประกอบด้วยชุดปั๊มรีดท่อ (Peristaltic Dosing Pump) สำหรับจ่ายสารละลายปุ๋ย A, B และสารปรับลดค่า pH

การพัฒนาซอฟต์แวร์ใช้อัลกอริทึมในการรักษาระดับค่าคงที่ โดยกำหนดค่าเป้าหมายสำหรับผักสลัดคือ ค่า pH ระหว่าง 5.8 - 6.2 และค่า EC ระหว่าง 1.5 - 1.6 mS/cm ระบบจะส่งข้อมูลจาก ESP32 ไปยัง Cloud Platform เพื่อแสดงผลบน Dashboard การทดลองแบ่งผักสลัดกรีนโอ๊คเป็น 2 รูปแบบคือ การใช้ระบบการควบคุมแบบอัตโนมัติ และการปลูกแบบระบบธรรมดาหรือไม่มีการควบคุมอัตโนมัติ เป็นระยะเวลา 45 วัน

ตารางที่ 1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการพัฒนาระบบ

ลำดับ	อุปกรณ์	หน้าที่
1	ESP32	ประมวลผลและเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต
2	pH Sensor	ตรวจวัดค่าความเป็นกรด–ด่าง
3	EC Sensor	ตรวจวัดค่าการนำไฟฟ้า
4	DHT22	ตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้น
5	Peristaltic Pump	จ่ายสารละลายปุ๋ยและสารปรับ pH
6	Relay Module	ควบคุมการเปิด–ปิดอุปกรณ์
7	Cooling Fan	ระบายอากาศภายในโรงเรือน
8	LED Grow Light	ให้แสงสว่างสำหรับการสังเคราะห์แสง
9	Water Pump	หมุนเวียนสารละลายธาตุอาหาร

การออกแบบฮาร์ดแวร์ผู้วิจัยได้ออกแบบวงจรควบคุมโดยใช้ ESP32 เป็นหน่วยประมวลผลหลัก เชื่อมต่อกับเซนเซอร์ต่าง ๆ ผ่านขา GPIO และส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย Wi-Fi ไปยัง Cloud Platform เพื่อใช้ในการแสดงผลและควบคุมผ่านสมาร์ตโฟน ในส่วนของเซนเซอร์ pH และ

EC จะทำหน้าที่ตรวจวัดคุณภาพสารละลายธาตุอาหารภายในถังปลูก ส่วนเซนเซอร์ DHT22 ใช้ตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นภายในโรงเรือน ข้อมูลทั้งหมดจะถูกประมวลผลแบบเรียลไทม์

การพัฒนาซอฟต์แวร์โปรแกรมควบคุมระบบถูกพัฒนาโดยใช้ภาษา C++ บนแพลตฟอร์ม Arduino IDE โดยกำหนดเงื่อนไขการควบคุมดังนี้ ค่า pH ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 5.5–6.5, ค่า EC อยู่ในช่วง 1.2–1.8 mS/cm, อุณหภูมิภายในโรงเรือนอยู่ในช่วง 22–28 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 60–80% ซึ่งเมื่อค่าที่ตรวจวัดได้สูงหรือต่ำกว่าค่าที่กำหนด ระบบจะสั่งการอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น ปั๊มจ่ายสารละลาย พัดลมระบายอากาศ หรือระบบพ่นหมอก ให้ทำงานโดยอัตโนมัติ

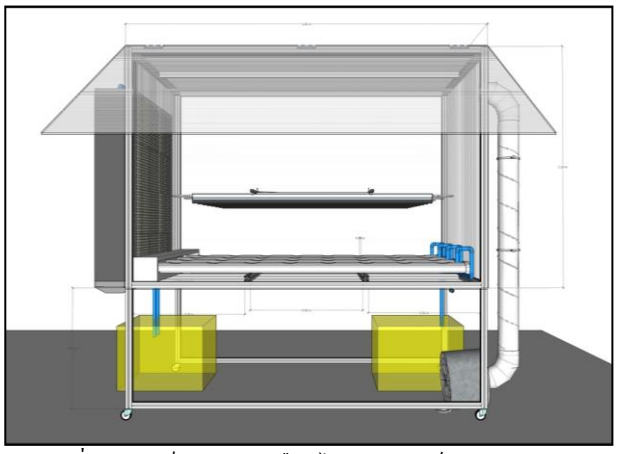
การเชื่อมต่อระบบ IoT ระบบถูกเชื่อมต่อกับ Cloud Platform ผ่านเครือข่าย Wi-Fi โดยใช้โปรโตคอล MQTT สำหรับรับ–ส่งข้อมูลแบบเรียลไทม์ ข้อมูลจากเซนเซอร์จะถูกส่งไปยัง Dashboard เพื่อแสดงผลในรูปแบบกราฟและตาราง ทำให้ผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบสถานะของระบบผ่านสมาร์ตโฟนได้ตลอดเวลา นอกจากนี้ระบบยังสามารถแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันเมื่อค่าปัจจัยแวดล้อมผิดปกติ เช่น ค่า pH สูงเกินกำหนด หรืออุณหภูมิภายในโรงเรือนสูงเกินมาตรฐาน

การทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มควบคุม ใช้ระบบปลูกไฮโดรโปนิกส์แบบทั่วไป ไม่มีระบบควบคุมอัตโนมัติ และกลุ่มทดลอง ใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้น ซึ่งในการทดลองผู้วิจัยเลือกใช้ผักสลัดกรีน โอ๊คเป็นพืชทดลอง โดยปลูกเป็นระยะเวลา 45 วัน ภายในโรงเรือนเดียวกัน เพื่อควบคุมปัจจัยภายนอกให้ใกล้เคียงกันมากที่สุด

ตารางที่ 2 ข้อมูลที่ใช้ในการประเมินผลประกอบด้วย

ตัวแปรที่ใช้ประเมินผล	วิธีการเก็บข้อมูล
ความสูงของต้นพืช (ซม.)	วัดและบันทึกผลทุก 7 วัน ตลอดระยะเวลาการทดลอง
จำนวนใบ (ใบ)	นับเฉพาะใบสามารถสังเคราะห์แสงได้
น้ำหนักสด (กรัม)	ชั่งน้ำหนักทันทีหลังเก็บเกี่ยว
อัตราการรอดชีวิต (%)	คำนวณจากจำนวนต้นที่รอดจนสิ้นสุดการทดลองเทียบกับจำนวนต้นเริ่มต้น
ระยะเวลาเก็บเกี่ยว (วัน)	นับตั้งแต่เริ่มปลูกจนถึงวันเก็บเกี่ยว
ค่ากรด–ด่าง (pH)	ตรวจวัดแบบเรียลไทม์ผ่าน pH Sensor
ค่าการนำไฟฟ้า (mS/cm)	ตรวจวัดแบบเรียลไทม์ผ่าน EC Sensor
อุณหภูมิ (°C)	ตรวจวัดผ่าน Temperature Sensor
ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ตรวจวัดผ่าน Humidity Sensor

การวิเคราะห์ข้อมูลผู้วิจัยนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์เชิงสถิติ โดยใช้ค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างระบบควบคุมอัตโนมัติกับระบบปลูกแบบทั่วไป นอกจากนี้ยังวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจากค่าความคลาดเคลื่อนในการควบคุม pH และ EC รวมถึงประเมินประสิทธิภาพด้านการใช้ทรัพยากร เช่น ปริมาณน้ำ พลังงานไฟฟ้า และสารละลายธาตุอาหาร



รูปที่ 1 ภาพสเก็ต 3 มิติ โรงเรือนไฮโดรโปนิกส์แบบอัตโนมัติ

4. ผลการทดลอง

ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับการปลูกผักกรีน โอ๊ค โดยเน้นความแม่นยำในการรักษาปัจจัยแวดล้อมที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโต เพื่อให้ผักกรีน โอ๊คเจริญเติบโตได้ดีที่สุด ระบบถูกกำหนดให้รักษาค่าปัจจัยต่าง ๆ ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม

ตารางที่ 3 การกำหนดค่าเป้าหมาย

ปัจจัยที่ควบคุม	ช่วงเหมาะสม	กลไกการทำงาน
ความเข้มแสง	12–16 ชม./วัน (PPFD ≈ 250 µmol/m²/s)	ควบคุมผ่าน LED Grow Lights และ Photo Sensor
อุณหภูมิ	22–28 องศาเซลเซียส	ระบบพัดลมระบายอากาศ และ Cooling Pad
ความชื้นสัมพัทธ์	60–80%	ระบบพ่นหมอกความละเอียดสูง (Mist System)
ค่าสารละลายปุ๋ย	1.2–1.8 mS/cm	ปั๊มโดสสารละลาย A และ B แบบอัตโนมัติ
ความเป็นกรด-ด่าง	5.5–6.5	การปรับค่า pH ลงเมื่อค่าสูงเกินเกณฑ์

วิเคราะห์ผลการจำลองการตอบสนองของระบบ จากการทดสอบผ่านระบบจำลอง พบการตอบสนองที่มีประสิทธิภาพ ดังนี้ การควบคุมสารละลายปุ๋ย ในระบบทั่วไปค่า EC จะลดลงตามการดูดซึมของพืช แต่ระบบอัตโนมัติสามารถคงค่าความเบี่ยงเบนได้ไม่เกิน ± 0.1 mS/cm ตลอด 24 ชั่วโมง การจัดการสภาวะวิกฤต เมื่อจำลองสถานการณ์อุณหภูมิภายนอกสูงเกิน 32 องศาเซลเซียส ระบบตอบสนองภายใน

10 วินาที เพื่อสั่งเปิดระบบระบายความร้อน ทำให้อุณหภูมิในแปลงปลูกลดลงสู่เกณฑ์ปกติภายใน 5 นาที

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่าง Manual และ Automated

หัวข้อการวัดผล	การปลูกแบบทั่วไป	ระบบอัตโนมัติ
น้ำหนักเฉลี่ยต่อต้น	120–150 กรัม	180–220 กรัม
อัตราการรอดชีวิต	ประมาณ 85%	สูงถึง 98%
ระยะเวลาที่พร้อมเก็บเกี่ยว	45 วัน	38–42 วัน
ความสม่ำเสมอของผลผลิต	ต่ำ (ขนาดต้นไม่เท่ากัน)	สูง (มีมาตรฐานเดียวกันทั้งแปลง)

จากการจำลองการทำงานของระบบควบคุมอัตโนมัติ พบว่าระบบสามารถรักษาเสถียรภาพของปัจจัยแวดล้อมภายในโรงเรือนได้อย่างต่อเนื่อง แม้ในช่วงเวลาที่สภาพแวดล้อมภายนอกมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว โดยระบบได้ทำการตรวจวัดค่าต่าง ๆ ผ่านเซนเซอร์แบบตลอดเวลา และส่งข้อมูลเข้าสู่หน่วยประมวลผลกลางเพื่อวิเคราะห์และสั่งการอุปกรณ์ควบคุมที่เกี่ยวข้อง ในการทดลอง ได้กำหนดให้ระบบทำงานต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 45 วัน ซึ่งเป็นช่วงระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของผักกรีนโอ๊ค ตั้งแต่ระยะต้นกล้าจนถึงระยะเก็บเกี่ยว ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในโรงเรือนให้อยู่ในช่วง 22–28 องศาเซลเซียสได้ตลอดช่วงการทดลอง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเพียง ±1.2 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับการควบคุมแบบทั่วไปที่อาศัยแรงงานมนุษย์ซึ่งมักเกิดความล่าช้าในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศ

นอกจากนี้ระบบยังสามารถรักษาค่าความชื้นสัมพัทธ์ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์แสงและการดูดซึมสารอาหารของพืช โดยระบบพ่นหมอกจะเริ่มทำงานอัตโนมัติเมื่อค่าความชื้นต่ำกว่า 60% และหยุดทำงานเมื่อความชื้นสูงเกินค่าที่กำหนด ส่งผลให้พืชมีอัตราการคายน้ำที่เหมาะสม ลดการเกิดอาการเหี่ยวเฉาในช่วงกลางวัน และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเจริญเติบโตของใบ

ในด้านการควบคุมค่า EC ของสารละลายธาตุอาหาร ระบบสามารถจ่ายสารละลายปุ๋ยได้อย่างแม่นยำผ่านปั๊มโดสอัตโนมัติ โดยค่าความเข้มข้นของสารละลายถูกควบคุมให้อยู่ในช่วง 1.2–1.8 mS/cm อย่างต่อเนื่อง การรักษาค่า EC ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมช่วยให้พืชสามารถดูดซึมธาตุอาหารได้อย่างสมดุล ส่งผลให้ใบมีสีเขียวสม่ำเสมอ ลำต้นแข็งแรง และลดปัญหาการขาดธาตุอาหารที่มักพบในระบบปลูกแบบดั้งเดิม

สำหรับการควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ระบบสามารถตรวจวัดและปรับสมดุลค่า pH ได้โดยอัตโนมัติ เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างสูงเกินกว่าช่วงที่กำหนด ระบบจะสั่งจ่ายสารละลาย pH ลงเพื่อปรับค่ากลับเข้าสู่ช่วง 5.5–6.5 ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการละลายและการดูดซึมธาตุอาหารของพืช การรักษาค่ากรด-ด่าง (pH) อย่างสม่ำเสมอส่งผลให้รากพืชมีการเจริญเติบโตที่ดี และลดโอกาสการเกิดโรคที่เกี่ยวข้องกับระบบราก



รูปที่ 2 โรงเรือนฟาร์มอัจฉริยะ

5. สรุปผลการวิจัย

การนำระบบควบคุมอัตโนมัติมาใช้ในการปลูกผักกรีนโอ๊คไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรเท่านั้น แต่ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้ทรัพยากรต่าง ๆ ได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะในด้านการใช้น้ำ พลังงานไฟฟ้า และสารละลายธาตุอาหาร

จากการทดลองพบว่าระบบให้น้ำอัตโนมัติสามารถลดปริมาณการใช้น้ำได้ประมาณ 25–35% เมื่อเปรียบเทียบกับการให้น้ำแบบใช้แรงงานคน เนื่องจากระบบจะจ่ายน้ำตามค่าที่ตรวจวัดได้จริงจากเซนเซอร์ และสามารถหยุดการทำงานได้ทันทีเมื่อค่าความชื้นอยู่ในระดับที่เหมาะสม ส่งผลให้ลดการสูญเสียน้ำจากการให้น้ำเกินความจำเป็น

ในส่วนของการใช้พลังงานไฟฟ้า ระบบสามารถควบคุมระยะเวลาการเปิด–ปิดของหลอดไฟ LED สำหรับเร่งการเจริญเติบโตของพืชตามช่วงเวลาที่กำหนด รวมถึงปรับระดับการทำงานให้สอดคล้องกับปริมาณแสงธรรมชาติที่ได้รับจริงในแต่ละวัน ทำให้ลดการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยรวมได้ประมาณ 15–20% นอกจากนี้ การใช้หลอด LED ยังช่วยลดการสะสมความร้อนภายในโรงเรือน เมื่อเปรียบเทียบกับระบบแสงสว่างแบบเดิม

ด้านการใช้สารละลายธาตุอาหาร ระบบสามารถคำนวณและจ่ายสารละลายได้อย่างแม่นยำตามค่าที่ตรวจวัดได้จริง จึงช่วยลดปริมาณการสูญเสียสารละลายจากการผสมเกินหรือการเติมซ้ำโดยไม่จำเป็น อีกทั้งยังช่วยลดต้นทุนด้านปุ๋ยและสารเคมีในระยะยาว ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการทำเกษตรสมัยใหม่ที่เน้นความคุ้มค่าและความยั่งยืน

จากผลการประเมินทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมอัตโนมัติสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ลดต้นทุนการดำเนินงาน และลดการใช้ทรัพยากรได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงมีความเหมาะสมต่อ

การนำไปประยุกต์ใช้ในระบบเกษตรอัจฉริยะ (Smart Farming) ทั้งในระดับครัวเรือนและเชิงพาณิชย์

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับทุนอุดหนุนงบประมาณจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร สถานที่ทดลอง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมอุสาหการ

เอกสารอ้างอิง

[1] จักรกฤษณ หมั่นวิชา, “เทคโนโลยีฟาร์มอัจฉริยะ (Smart Farms Technology),” วารสารเทคโนโลยีและนวัตกรรมทางการเกษตร, Hatyai Academic Journal 14(2) : 201-210, 2560.

[2] กฤษฎา ภาณุมนต์วาท ภาณุมนต์วาที และคณะ, “การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งร่วมกับ MQTT เพื่อพัฒนาต้นแบบระบบปลูกผักไฮโดรโปนิกส์แบบอัตโนมัติ,” วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์, ปีที่ 15, ฉบับที่ 21, หน้า 27-40, 2566.

[3] อำนาจ ตงติ๊บ และคณะ, “การออกแบบโรงเรือนผักไฮโดรโปนิกส์ด้วยระบบควบคุมสภาพแวดล้อมอัตโนมัติ,” วารสารเทคโนโลยีและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์, ปีที่ 4, ฉบับที่ 2, หน้า 32-42, 2564.

[4] พรทิพย์ กัญญา และคณะ, “การพัฒนาระบบเกษตรอัจฉริยะ (Smart Farming System Development),” Industrial Technology Journal, ปีที่ 7, ฉบับที่ 1, หน้า 33-45, 2565.

[5] C.-H. Chen, S.-Y. Jeng, and C.-J. Lin, “Fuzzy Logic Controller for Automating Electrical Conductivity and pH in Hydroponic Cultivation,” Computers and Electronics in Agriculture, 2020.

ประวัติผู้เขียนบทความ

สุดารัตน์ ดวงประทุม

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

วัชรพันธ์ สุขเกิด

watcharapan.s@rmutp.ac.th

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

สิรวิชญ์ เงินแท้

sirawich-n@rmutp.ac.th

วศ.บ.อุตสาหการ (มทร.พระนคร 2568)

บทความวิจัย
อิเล็กทรอนิกส์
และโทรคมนาคม

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9
Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

ระบบติดตามและแจ้งเตือนคุณภาพอากาศภายในบ้านโดยใช้ Raspberry Pi

An Indoor Air Quality Monitoring and Alert System Using Raspberry Pi

ศศิรมย์ พานทอง[1*] และ พีรกานต์ สุขโข
[1]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ชลบุรี 20131 sasirom.pa@buu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบติดตามและแจ้งเตือนคุณภาพอากาศภายในบ้านโดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง โดยมีบอร์ดราสเบอร์รีไพ เป็นหน่วยประมวลผลหลักร่วมกับเซ็นเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 รุ่น PMS 7003 และเซ็นเซอร์ตรวจวัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์รุ่น MQ-7 เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลด้านคุณภาพอากาศแบบเวลาจริง ระบบที่พัฒนาสามารถแสดงผลข้อมูลผ่าน Dashboard บน Node-RED พร้อมทั้งบันทึกข้อมูลเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์แนวโน้มในอนาคต และมีการดึงข้อมูลคุณภาพอากาศภายนอกอาคารของจังหวัดชลบุรีมาใช้ประกอบการแสดงผล นอกจากนี้ ระบบยังรองรับการแจ้งเตือนผู้ใช้งานผ่านแอปพลิเคชันไลน์เมื่อค่าฝุ่นหรือก๊าซเกินเกณฑ์ที่กำหนด และสามารถควบคุมการทำงานของเครื่องฟอกอากาศโดยอัตโนมัติ โดยแบ่งระดับการทำงานออกเป็น 3 ระดับตามความรุนแรงของมลพิษที่ตรวจวัดได้ ผลการทดสอบระบบพบว่าสามารถส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ไคลเอนต์และเซิร์ฟเวอร์ได้แบบเวลาจริงอย่างมีประสิทธิภาพในระยะสูงสุด 27 เมตร โดยมีความถูกต้องของข้อมูลร้อยละ 90 และเซ็นเซอร์ที่ใช้งานมีความแม่นยำเพียงพอสำหรับการประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดคุณภาพอากาศภายในที่พักอาศัย

คำสำคัญ : คุณภาพอากาศภายในอาคาร; ราสเบอร์รีไพ; เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

Abstract

This research aims to develop an indoor air quality monitoring and alert system based on Internet of Things (IoT) technology. The system employs a Raspberry Pi as the main processing unit, integrated with a PMS7003 sensor for PM2.5 measurement and an MQ-7 sensor for carbon monoxide (CO) detection to collect real-time air quality data. The developed system can display data through a dashboard on Node-RED, as well as storing data for further analysis of air quality trends. In addition, external air quality data from Chon Buri province are incorporated for comparative visualization. The system also provides user notifications via the LINE application when particulate matter or gas concentrations exceed predefined thresholds. Furthermore, it can automatically control an air purifier, categorized into three operating levels based on the severity of detected pollutants. The experimental results demonstrate that the system can transmit real-time data between client and server with a maximum operational range of 27 meters, achieving an accuracy of 90%. The sensors used in this study show sufficient accuracy for practical applications in indoor air quality monitoring within residential environments.

Keywords: Indoor Air Quality; Raspberry Pi; Internet of Things

1. บทนำ

มลพิษทางอากาศ โดยเฉพาะฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 (Particulate Matter ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2.5 ไมโครเมตร) เป็นปัญหาสำคัญด้านสิ่งแวดล้อมและสุขภาพในระดับโลก เนื่องจากอนุภาคดังกล่าวมีขนาดเล็กมาก ประมาณ 20–25 เท่าของเส้นผมมนุษย์ ทำให้สามารถแขวนลอยอยู่ในอากาศได้เป็นเวลานาน และสามารถผ่านเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจได้ลึกถึงถุงลมปอด รวมถึงแพร่เข้าสู่กระแสเลือด ส่งผลให้เกิดโรคทางระบบทางเดินหายใจและโรคหัวใจและหลอดเลือด (World Health Organization, 2021) ในประเทศไทย คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติได้กำหนดค่ามาตรฐานฝุ่น PM2.5 เฉลี่ย 24 ชั่วโมง ไม่เกิน 37.5 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งมีผลบังคับใช้ตั้งแต่วันที่ 1 มิถุนายน พ.ศ. 2566 อย่างไรก็ตาม แม้ว่าการติดตามคุณภาพอากาศภายนอกอาคารจะได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง แต่คุณภาพอากาศภายในอาคาร (Indoor Air Quality: IAQ) ยังคงเป็นประเด็นที่ต้องให้ความสำคัญ เนื่องจากมนุษย์ใช้เวลาส่วนใหญ่อยู่ภายในอาคาร อีกทั้งแหล่งกำเนิดมลพิษภายใน เช่น การประกอบอาหาร การสูบบุหรี่ และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ล้วนส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้อยู่อาศัยได้โดยตรง ในปัจจุบัน เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการพัฒนาระบบตรวจวัดคุณภาพอากาศแบบต้นทุนต่ำและแบบเวลาจริง งานวิจัยที่ผ่านมาหลายงานได้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการนำ Raspberry Pi มาประยุกต์ใช้ร่วมกับเซ็นเซอร์ตรวจวัดสิ่งแวดล้อม Chandrakala และคณะ [1] ได้พัฒนาระบบตรวจวัดคุณภาพอากาศแบบหลายพารามิเตอร์โดยใช้ Raspberry Pi ซึ่งสามารถแสดงผลข้อมูลแบบเวลาจริงและสนับสนุนการประเมินคุณภาพอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่ Imankulova และคณะ [2] ได้นำเสนอระบบตรวจวัดคุณภาพอากาศภายในอาคารแบบ IoT ที่รองรับการประมวลผลและแสดงผลผ่านเว็บแบบเวลาจริง นอกจากนี้ Manisekaran และ Kumar [3]ได้พัฒนาระบบตรวจวัดมลพิษทางอากาศร่วมกับการควบคุมเครื่องฟอกอากาศอัตโนมัติ โดยพบว่าการควบคุมอุปกรณ์ตามระดับมลพิษสามารถปรับปรุงคุณภาพอากาศได้อย่างมีนัยสำคัญ Afrial และคณะ [4]ได้เน้นถึงความสำคัญของการใช้ระบบหลายเซ็นเซอร์ร่วมกับการบันทึกข้อมูลแบบเวลาจริงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการติดตามสภาพแวดล้อมภายในอาคาร และ Srisang และคณะ [5] ได้ศึกษาประเด็นด้านความแม่นยำและการสอบเทียบของเซ็นเซอร์ PM2.5 ราคาประหยัด ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อความน่าเชื่อถือของระบบตรวจวัด

จากแนวคิดและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบตรวจวัดและแจ้งเตือนคุณภาพอากาศภายในบ้านแบบเวลาจริง โดยใช้ Raspberry Pi เป็นหน่วยประมวลผล

หลักร่วมกับเซ็นเซอร์ตรวจวัดฝุ่น PM2.5 รุ่น PMS7003 และเซ็นเซอร์ตรวจวัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์รุ่น MQ-7 ระบบสามารถแสดงผลข้อมูลผ่าน Dashboard ในรูปแบบที่เข้าใจง่าย บันทึกข้อมูลเพื่อการวิเคราะห์ในภายหลัง และแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน LINE เมื่อค่ามลพิษเกินเกณฑ์ที่กำหนด รวมถึงสามารถควบคุมเครื่องฟอกอากาศโดยอัตโนมัติตามระดับความรุนแรงของมลพิษ เพื่อปรับปรุงคุณภาพอากาศภายในที่อยู่อาศัยและลดความเสี่ยงต่อสุขภาพของผู้อยู่อาศัย

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตารางที่ 1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ประเด็น	[6]	[7]	[8]	[9]	งานวิจัยนี้
หน่วยประมวลผล	Raspberry Pi Pico W	Raspberry Pi	Raspberry Pi Pico	Raspberry Pi Pico	Raspberry Pi
เซ็นเซอร์ฝุ่น	MQ-135 (Smoke)	Gas sensors	Multi-gas sensors	Multi-sensor	PMS7003
ตรวจวัด CO	✗	✓	✓	✓	✓
การแสดงผล Dashboard	Thing Speak	Thing Speak	Mobile interface	Data analytics	Node-RED Dashboard
การแจ้งเตือน LINE	✗	✗	✗	✗	✓
ควบคุมอุปกรณ์อัตโนมัติ	✗	✗	✗	✗	✓ (Air Purifier)
การใช้ Machine Learning	✗	✗	✓	✓	✗
สภาพแวดล้อม	ภายในอาคาร	ทั้งภายใน/ภายนอก	ภายในอาคาร	ภายในอาคาร	ภายในอาคาร

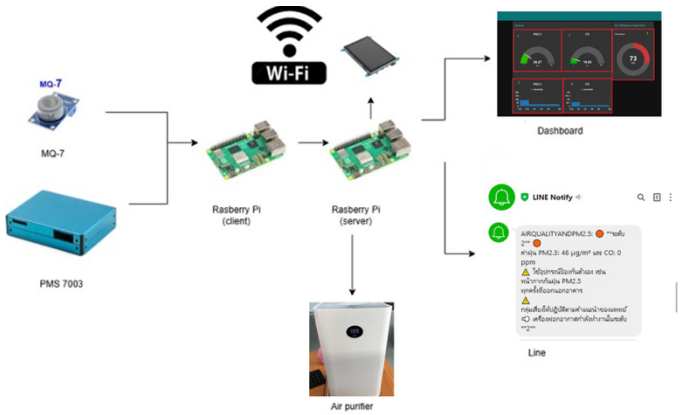
จากตารางที่ 1 พบว่างานวิจัยส่วนใหญ่ให้ความสำคัญกับการตรวจวัดและแสดงผลข้อมูลคุณภาพอากาศแบบเวลาจริง รวมถึงบางงานมีการประยุกต์ใช้เทคนิค Machine Learning เพื่อเพิ่มความสามารถในการวิเคราะห์ข้อมูล อย่างไรก็ตาม งานวิจัยเหล่านี้ยังมุ่งเน้นเพียงการ “เฝ้าระวัง” มากกว่าการ “ตอบสนอง” ต่อสถานการณ์มลพิษ โดยเฉพาะในด้านการควบคุมอุปกรณ์ปรับปรุงคุณภาพอากาศ ยังพบว่ามีข้อจำกัดเนื่องจากระบบส่วนใหญ่ไม่สามารถสั่งการอุปกรณ์ได้โดยอัตโนมัติตามค่ามลพิษที่ตรวจวัดได้ ส่งผลให้ผู้ใช้งานยังคงต้องดำเนินการด้วยตนเอง ซึ่งอาจไม่ทันต่อสถานการณ์ที่มีความเสี่ยงต่อสุขภาพ ในขณะที่งานวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบให้มีความสามารถแบบครบวงจร โดยไม่เพียงแต่ตรวจวัดและแสดงผลข้อมูลเท่านั้น แต่ยังสามารถ แจ้งเตือนผู้ใช้งานผ่านแอปพลิเคชัน LINE และ ควบคุมการทำงานของเครื่องฟอกอากาศโดยอัตโนมัติ ตามระดับความรุนแรงของค่าฝุ่น PM2.5 และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ตรวจวัดได้

3. หลักการแนวคิดและการออกแบบโครงงาน

ระบบตรวจวัดคุณภาพอากาศภายในอาคารที่พัฒนาขึ้นนี้ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ฝั่งไคลเอนต์ (Client Site) และฝั่งเซิร์ฟเวอร์ (Server Site)

ในส่วนของฝั่งไคลเอนต์ ทำหน้าที่ตรวจวัดค่าคุณภาพอากาศโดยใช้เซ็นเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละออง PM2.5 และเซ็นเซอร์ตรวจวัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยระบบจะทำการเก็บข้อมูลทุก ๆ 30 วินาที เพื่อให้สามารถติดตามสถานการณ์คุณภาพอากาศได้แบบเวลาจริง จากนั้นข้อมูลที่ได้จะถูกส่งไปยังฝั่งเซิร์ฟเวอร์ผ่านโพรโทคอล Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) ซึ่งเป็นโพรโทคอลที่มีประสิทธิภาพสูงและเหมาะสมสำหรับระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

ในส่วนของฝั่งเซิร์ฟเวอร์ ข้อมูลที่ได้รับจะถูกประมวลผลและจัดการผ่านแพลตฟอร์ม Node-RED โดยระบบจะแสดงผลข้อมูลในรูปแบบ Dashboard เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถติดตามสถานะคุณภาพอากาศได้อย่างสะดวกและเข้าใจง่าย นอกจากนี้ ระบบมีการจัดเก็บข้อมูลบน Google Sheets และหน่วยความจำภายใน Raspberry Pi เพื่อรองรับการวิเคราะห์ข้อมูลย้อนหลังและเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบ ทั้งนี้ระบบมีฟังก์ชันการแจ้งเตือนอัตโนมัติ เมื่อค่าฝุ่น PM2.5 หรือก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเกินเกณฑ์ที่กำหนด ระบบจะทำการส่งการแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน LINE Notify โดยข้อความแจ้งเตือนจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ระดับตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพอากาศของคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พร้อมทั้งแสดงค่าที่ตรวจวัดได้และคำแนะนำด้านสุขภาพที่เหมาะสม และระบบควบคุมการทำงานของเครื่องฟอกอากาศแบบอัตโนมัติ โดยจะปรับระดับการทำงานของเครื่องฟอกอากาศให้สอดคล้องกับระดับความรุนแรงของมลพิษ ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ระดับตามค่าฝุ่น PM2.5 และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ตรวจวัดได้ เพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพอากาศภายในอาคารและลดความเสี่ยงต่อสุขภาพของผู้อยู่อาศัย ภาพรวมของการทำงานของระบบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1

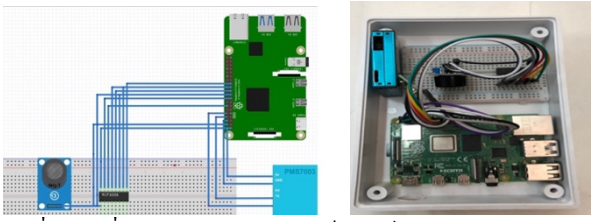


รูปที่ 1 ภาพรวมระบบติดตามและแจ้งเตือนคุณภาพอากาศภายในบ้าน

3.1 อุปกรณ์ฝั่งไคลเอนต์ (Client-Site Hardware)

อุปกรณ์ในฝั่งไคลเอนต์ถูกออกแบบโดยใช้บอร์ด Raspberry Pi เป็นหน่วยประมวลผลหลัก ทำหน้าที่รับข้อมูลจากเซ็นเซอร์ตรวจวัดคุณภาพอากาศและส่งต่อไปยังฝั่งเซิร์ฟเวอร์ โดยระบบได้เชื่อมต่อกับ

เซ็นเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 สำหรับตรวจวัดความเข้มข้นของฝุ่นในอากาศ และเซ็นเซอร์ตรวจวัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ รุ่น MQ-7 สำหรับตรวจวัดระดับก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ เนื่องจากเซ็นเซอร์ MQ-7 ให้สัญญาณเอาต์พุตในรูปแบบแอนะล็อก ขณะที่บอร์ด Raspberry Pi ไม่สามารถรับสัญญาณแอนะล็อกได้โดยตรง จึงจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์แปลงสัญญาณเป็นดิจิทัล (Analog-to-Digital Converter: ADC) โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้ไอซี MCP3208 ซึ่งเป็นตัวแปลงสัญญาณแบบ 12 บิต เพื่อแปลงค่าที่ได้จากเซ็นเซอร์ MQ-7 ให้อยู่ในรูปแบบสัญญาณดิจิทัลก่อนส่งเข้าสู่ Raspberry Pi เพื่อประมวลผล โครงสร้างการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ฝั่งไคลเอนต์แสดงดังรูปที่ 2



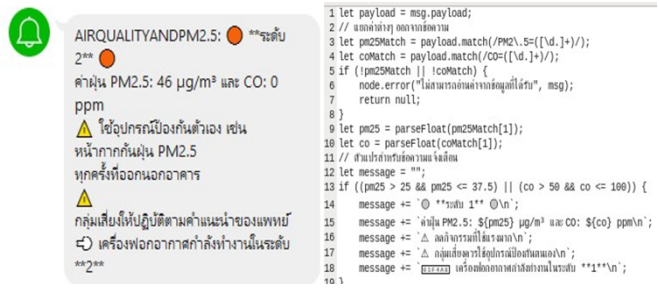
รูปที่ 2 การเชื่อมต่อ Raspberry Pi กับเซ็นเซอร์ PMS7003, MQ7 และ MCP3208

3.2 อุปกรณ์และการทำงานของฝั่งเซิร์ฟเวอร์ (Server-Site Implementation)

อุปกรณ์ในฝั่งเซิร์ฟเวอร์ถูกออกแบบให้ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางในการรับ-ส่ง ประมวลผล และแสดงผลข้อมูลคุณภาพอากาศจากฝั่งไคลเอนต์ โดยใช้ Raspberry Pi เป็นหน่วยประมวลผลหลัก และแสดงผลข้อมูลผ่าน Dashboard สำหรับการออกแบบซอฟต์แวร์ ฝั่งเซิร์ฟเวอร์จะใช้แพลตฟอร์ม Node-RED เป็นเครื่องมือหลักในการจัดการข้อมูล โดยข้อมูลจากฝั่งไคลเอนต์จะถูกส่งผ่านโพรโทคอล MQTT เข้ามายังเซิร์ฟเวอร์ จากนั้น Node-RED จะทำหน้าที่รับข้อมูล แปลงข้อมูล และประมวลผลตามเงื่อนไขที่กำหนด รวมถึงแสดงผลข้อมูลในรูปแบบ Dashboard และบันทึกข้อมูลลงในฐานข้อมูล เช่น Google Sheets และหน่วยความจำภายในของ Raspberry Pi เพื่อรองรับการวิเคราะห์ข้อมูลย้อนหลัง นอกจากนี้ ระบบยังมีการพัฒนาให้สามารถตอบสนองต่อสถานการณ์มลพิษทางอากาศได้แบบอัตโนมัติ โดยแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ การควบคุมเครื่องฟอกอากาศ และการแจ้งเตือนผู้ใช้งาน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) การควบคุมเครื่องฟอกอากาศอัตโนมัติ เมื่อระบบได้รับข้อมูลค่าฝุ่น PM2.5 และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จากฝั่งไคลเอนต์ จะทำการประมวลผลและเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด หากค่าที่ตรวจวัดได้เกินเกณฑ์ในระดับใด ระบบจะสั่งการให้เครื่องฟอกอากาศทำงานในระดับที่เหมาะสมโดยอัตโนมัติ ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ระดับตามความรุนแรงของมลพิษ เพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพอากาศภายในอาคาร

2) การแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน LINE ในกรณีที่ค่าฝุ่น PM2.5 หรือก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เกินเกณฑ์ที่กำหนด ระบบจะทำการส่งการแจ้งเตือนผ่าน LINE Notify ไปยังผู้ใช้งาน โดยข้อความแจ้งเตือนจะระบุระดับความรุนแรงของมลพิษ ค่าที่ตรวจวัดได้ และคำแนะนำในการปฏิบัติตัว เพื่อช่วยลดความเสี่ยงต่อสุขภาพของผู้อยู่อาศัย ดังแสดงในรูปที่ 3



(ก) (ข)

รูปที่ 3 (ก) การแจ้งเตือนผ่าน LINE (ข) ตัวอย่างโปรแกรมในฝั่งเซิร์ฟเวอร์

โดยภาพรวม ฝั่งเซิร์ฟเวอร์ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางในการบริหารจัดการข้อมูล การแสดงผล และการควบคุมอุปกรณ์ภายในระบบอย่างอัตโนมัติ ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการติดตามและปรับปรุงคุณภาพอากาศภายในอาคารได้อย่างมีประสิทธิผล แสดงองค์ประกอบของหน้า Dashboard ดังรูปที่ 4 และตารางที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 กับการตอบสนองของระบบ รวมถึงคำแนะนำด้านสุขภาพสำหรับผู้ใช้งาน โดยระบบจะทำการประมวลผลค่าที่ตรวจวัดได้และปรับการทำงานของเครื่องฟอกอากาศโดยอัตโนมัติให้สอดคล้องกับระดับความรุนแรงของมลพิษ พร้อมทั้งส่งการแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน LINE เมื่อค่าฝุ่นเกินเกณฑ์ที่กำหนด ทั้งนี้คำแนะนำด้านสุขภาพถูกออกแบบเพื่อช่วยลดความเสี่ยงต่อผลกระทบทางสุขภาพ โดยเฉพาะในกลุ่มผู้ที่มีความไวต่อมลพิษทางอากาศตามที่คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ให้คำแนะนำ



รูปที่ 4 หน้าแสดงผลฝั่งเซิร์ฟเวอร์

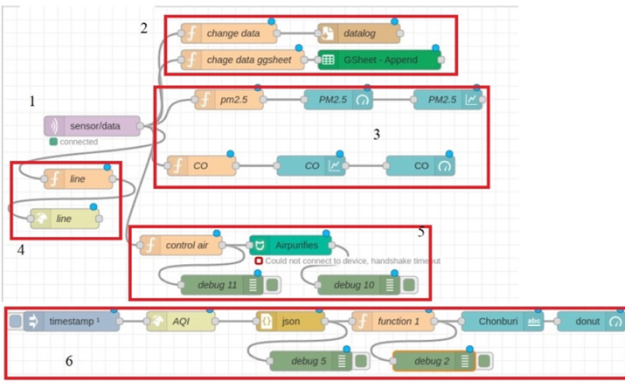
จากรูปที่ 4 สามารถอธิบายในแต่ละส่วนได้ดังนี้
หมายเลข 1 แสดงค่าฝุ่น PM2.5 จาก เซ็นเซอร์ แบบเวลาจริง
หมายเลข 2 แสดงกราฟค่าฝุ่น PM2.5 จาก เซ็นเซอร์ ที่บันทึก
หมายเลข 3 แสดงค่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จากเซ็นเซอร์
หมายเลข 4 แสดงกราฟค่าฝุ่นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่บันทึก
หมายเลข 5 แสดงค่า AQI ในจังหวัดชลบุรี จากเว็บ https://aqicn.org/city/chon-buri/th/

ตารางที่ 2 ระดับความเข้มข้นของ PM2.5 การตอบสนองของระบบ และคำแนะนำด้านสุขภาพ

ระดับ	ค่า PM2.5 (µg/m³)	ค่า CO (ppm)	โหมดความแรงของเครื่องฟอกอากาศ	การแจ้งเตือนใน LINE
1	25.1-37.5	50	1	ลดกิจกรรมที่ใช้แรงมาก, กลุ่มเสี่ยงควรใช้อุปกรณ์ป้องกัน
2	37.5-75	100	2	ใช้อุปกรณ์ป้องกัน เช่น หน้ากากกันฝุ่น PM2.5 ทุกครั้งที่ออกนอกอาคาร, กลุ่มเสี่ยงให้ปฏิบัติตามคำแนะนำของแพทย์
3	> 75.1	150	3	งดกิจกรรมกลางแจ้ง, ใช้อุปกรณ์ป้องกันตัวเองทุกครั้งที่ออกนอกอาคาร, หากมีอาการผิดปกติให้รีบไปพบแพทย์, กลุ่มเสี่ยงให้เตรียมยาและอุปกรณ์จำเป็นให้พร้อม และปฏิบัติตามคำแนะนำของแพทย์อย่างเคร่งครัด

3.2.1 การออกแบบการทำงานของ Node-RED ของฝั่งเซิร์ฟเวอร์

การทำงานของ Node-RED เพื่อสั่งการส่วนต่างๆ ในระบบตรวจคุณภาพอากาศและฝุ่นPM2.5ในบ้านและมีการบันทึกข้อมูล การสร้าง Dashboard การแจ้งเตือน การควบคุมเครื่องปรับอากาศ และการดึงข้อมูลคุณภาพอากาศมาแสดง ดังในรูปที่ 5



รูปที่ 5 แผนภาพโนดใน Node red

หมายเลข 1 คือโนดรับของจาก MQTT จะทำหน้าที่รับข้อมูลจากอุปกรณ์ฝั่งไคลเอนต์

หมายเลขที่ 2 คือ โนดเพื่อการบันทึกข้อมูลโดยจะแปลงข้อมูลที่ได้รับมาเป็นข้อมูลที่สามารถบันทึกลงใน Google Sheet และ ลงไฟล์ในเครื่อง

หมายเลขที่ 3 คือ โนดในการสร้าง Dashboard โดยจะแปลงข้อมูลที่ได้รับมาและทำการสร้าง Dashboard ในรูปแบบต่าง ๆ

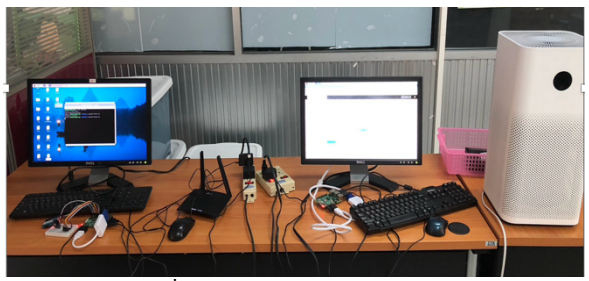
หมายเลขที่ 4 คือ โนดในการสั่งให้มีการแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันไลน์ โดยจะตรวจสอบข้อมูลที่ได้รับมาและส่งเอาต์พุตเป็นข้อความไปยังโนดที่เชื่อมต่อกับ Api ของแอปพลิเคชันไลน์

หมายเลขที่ 5 คือ โนดในการสั่งการเครื่องฟอกอากาศโดยจะตรวจสอบข้อมูลที่ได้รับมาและเอาต์พุตเป็นโค้ดสั่งการไปยังโนดที่ควบคุมเครื่องฟอกอากาศ การเชื่อมต่อไวไฟกับเครื่องฟอกอากาศ และเชื่อมต่อกับแอปพลิเคชัน MI home และดาวน์โหลดจาก link ดังนี้ https://github.com/PiotrMachowski/Xiaomi-cloud-tokens-extractorcd Xiaomi-cloud-tokens-extractor หลังจากนั้นใช้คำสั่ง python3 extractor.py จะได้รับ ไอพีแอดเดรช และ โทเคน ของเครื่องฟอกอากาศที่เชื่อมต่อ แล้วนำมาใส่ในโนด

หมายเลขที่ 6 คือโนดที่ดึงข้อมูลคุณภาพอากาศจากเว็บ https://aqicn.org/city/chon-buri/th/ และแปลงข้อมูลที่ได้รับมาและทำการสร้าง Dashboard ในรูปแบบต่าง ๆ

4. ผลการทดสอบ

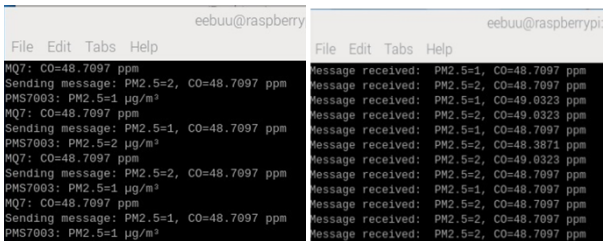
ในบทความนี้ ได้ออกแบบและพัฒนาระบบตรวจวัดคุณภาพอากาศและฝุ่น PM2.5 ภายในบ้าน โดยใช้บอร์ด Raspberry Pi จำนวน 2 ชุด ทำหน้าที่เป็นฝั่งไคลเอนต์และฝั่งเซิร์ฟเวอร์ ตามลำดับ โดยมีการสื่อสารข้อมูลระหว่างกันผ่านโพรโทคอล MQTT บนเครือข่ายอินเทอร์เน็ตภายในบ้าน ระบบตรวจวัดประกอบด้วยเซ็นเซอร์ตรวจวัดฝุ่น PM2.5 และเซ็นเซอร์ตรวจวัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์รุ่น MQ-7 ซึ่งเชื่อมต่อกับ Raspberry Pi ฝั่งไคลเอนต์เพื่อทำการเก็บข้อมูลสภาพแวดล้อม ซึ่งการพัฒนาโปรแกรมควบคุมระบบดำเนินการด้วยภาษา Python เพื่อรับข้อมูลจากเซ็นเซอร์ ประมวลผล และส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายไร้สาย ไปยังฝั่งเซิร์ฟเวอร์ ข้อมูลที่ได้รับจะถูกจัดเก็บไว้ในฐานข้อมูล และสามารถนำมาแสดงผลแบบเวลาจริงผ่าน Dashboard โดยผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงข้อมูลได้จากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายในเครือข่ายเดียวกัน นอกจากนี้ ระบบยังมีฟังก์ชันการแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน LINE เมื่อค่าฝุ่น PM2.5 หรือก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เกินค่าที่กำหนด รวมถึงสามารถสั่งการให้เครื่องฟอกอากาศทำงานโดยอัตโนมัติตามระดับความรุนแรงของมลพิษที่ตรวจวัดได้ ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 อุปกรณ์ในการทดสอบระบบ

4.1 การทดสอบการรับ–ส่งข้อมูล การจัดเก็บ และการแสดงผล

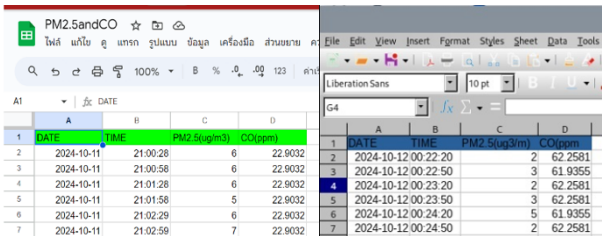
การทดสอบในส่วนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความสามารถของระบบในการรับ–ส่งข้อมูลระหว่างฝั่งไคลเอนต์และฝั่งเซิร์ฟเวอร์ รวมถึงการจัดเก็บข้อมูลและการแสดงผลแบบเวลาจริง โดยทำการตรวจสอบว่าอุปกรณ์ฝั่งไคลเอนต์สามารถส่งข้อมูลที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ไปยังฝั่งเซิร์ฟเวอร์ผ่านโพรโทคอล MQTT ได้อย่างถูกต้อง และฝั่งเซิร์ฟเวอร์สามารถรับข้อมูลเพื่อนำไปประมวลผล แสดงผล และจัดเก็บข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในการดำเนินการทดสอบ ฝั่งไคลเอนต์ทำหน้าที่ตรวจวัดค่าฝุ่น PM2.5 และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จากเซ็นเซอร์ และส่งข้อมูลไปยังฝั่งเซิร์ฟเวอร์ผ่านเครือข่ายไร้สาย ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยฝั่งเซิร์ฟเวอร์จะรับข้อมูลดังกล่าวและดำเนินการจัดเก็บใน 2 รูปแบบ ได้แก่ การบันทึกลงใน Google Sheets เพื่อการเข้าถึงข้อมูลแบบออนไลน์ และการบันทึกลงในไฟล์ภายในเครื่อง Raspberry Pi เพื่อสำรองข้อมูลในระบบ



(ก) (ข)

รูปที่ 7 (ก) อุปกรณ์ฝั่ง Client รับข้อมูลผ่านเซ็นเซอร์และส่งต่อ (ข) ฝั่ง Server รับข้อมูลมาจากอุปกรณ์ฝั่ง Client

ผลการทดสอบพบว่า ระบบสามารถรับ–ส่งข้อมูลระหว่างฝั่งไคลเอนต์และฝั่งเซิร์ฟเวอร์ได้อย่างถูกต้องและต่อเนื่อง ข้อมูลที่ได้รับสามารถนำไปจัดเก็บได้ครบถ้วนทั้งในรูปแบบออนไลน์และภายในเครื่อง ดังแสดงในรูปที่ 8 อีกทั้งระบบสามารถแสดงผลข้อมูลผ่าน Dashboard ได้แบบเวลาจริง โดยค่าที่แสดงสอดคล้องกับค่าที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์



(ก) (ข)

รูปที่ 8 (ก) ไฟล์ Google sheet ที่บันทึกข้อมูล (ข) ไฟล์ที่บันทึกในเครื่องฝั่ง Server

ผลการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าระบบมีประสิทธิภาพในการรับ–ส่งข้อมูล การจัดเก็บข้อมูล และการแสดงผล ซึ่งสามารถรองรับการใช้งานจริงในการติดตามคุณภาพอากาศภายในที่อยู่อาศัยได้อย่างมีประสิทธิผล

4.2 การทดสอบระบบควบคุมอัตโนมัติและการแจ้งเตือน

การทดสอบในส่วนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความสามารถของระบบในการตอบสนองต่อสถานการณ์ที่ค่าฝุ่น PM2.5 หรือก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ เกินเกณฑ์ที่กำหนด โดยพิจารณาการทำงานของระบบควบคุมเครื่องฟอกอากาศและการแจ้งเตือนผู้ใช้งานผ่านแอปพลิเคชัน LINE ในการดำเนินการทดสอบ ได้กำหนดระดับความรุนแรงของมลพิษออกเป็น 3 ระดับ ผลการทดสอบพบว่า เมื่อค่าฝุ่น PM2.5 หรือก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ตรวจวัดได้เกินเกณฑ์ในแต่ละระดับที่ 2 ระบบสามารถประมวลผลและตอบสนองได้อย่างถูกต้อง โดยมีการสั่งการให้เครื่องฟอกอากาศทำงานในระดับที่สอดคล้องกับความรุนแรงของมลพิษ และมีการส่งการแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน LINE Notify ไปยังผู้ใช้งานในระดับที่กำหนดอย่างเหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 9

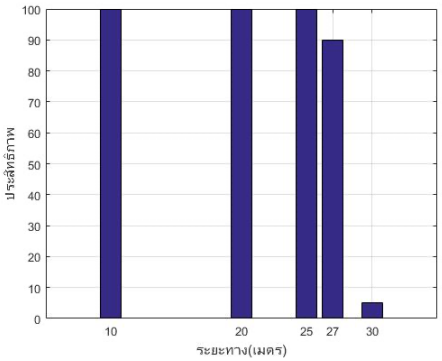


(ก) (ข)

รูปที่ 9 (ก) เครื่องฟอกอากาศทำงานในระดับที่ 2 (ข) การแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน LINE

4.3 การทดสอบประสิทธิภาพการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ไคลเอนต์และเซิร์ฟเวอร์

การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ฝั่งไคลเอนต์และฝั่งเซิร์ฟเวอร์ผ่านเครือข่ายไร้สาย ที่ความถี่ 2.4 GHz โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ (1) การทดสอบระยะทางในการสื่อสาร ได้กำหนดระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ไคลเอนต์และเซิร์ฟเวอร์ตั้งแต่ 10–30 เมตร โดยกำหนดให้มีการส่งข้อมูลทุก ๆ 10 วินาที จำนวน 100 ครั้ง และทำการวัดจำนวนครั้งที่เซิร์ฟเวอร์สามารถรับข้อมูลได้เพื่อนำมาคำนวณเป็นค่าประสิทธิภาพ ในรูปแบบร้อยละ ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 กราฟแสดงระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ไคลเอนต์กับอุปกรณ์เซิร์ฟเวอร์ เทียบกับประสิทธิภาพการรับ-ส่งข้อมูล

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ในช่วงระยะ 10–25 เมตร ระบบสามารถรับข้อมูลได้ครบถ้วน คิดเป็นประสิทธิภาพร้อยละ 100 อย่างไรก็ตาม เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นเป็น 27 เมตร ประสิทธิภาพลดลงเหลือร้อยละ 90 และที่ระยะ 30 เมตร ประสิทธิภาพลดลงอย่างมากเหลือเพียงร้อยละ 5 ซึ่งอาจเกิดจากปัจจัยด้านสัญญาณรบกวน เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่น สัญญาณ Wi-Fi ที่ใช้ช่องสัญญาณเดียวกัน และสิ่งกีดขวางในสภาพแวดล้อม

(2) การทดสอบช่วงเวลาในการส่งข้อมูล ได้วางอุปกรณ์ทั้งสองในระยะใกล้ และกำหนดช่วงเวลาการส่งข้อมูลตั้งแต่ 1–30 วินาที ผลการทดลองพบว่า ระบบสามารถรับข้อมูลได้ครบถ้วนคิดเป็นร้อยละ 100 ในทุกช่วงเวลา อย่างไรก็ตาม เมื่อกำหนดช่วงเวลาการส่งข้อมูลที่ 1 วินาที พบว่ามีค่าความหน่วงเวลาเฉลี่ยประมาณ 68.05 มิลลิวินาที ซึ่งอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบในด้านการแสดงผลบน Dashboard การบันทึกข้อมูลลง Google Sheets การแจ้งเตือนผ่าน LINE และการควบคุมเครื่องฟอกอากาศ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การทดสอบประสิทธิภาพความถี่ของการรับ-ส่งข้อมูล

กรณี	เวลาในการส่งข้อมูลแต่ละครั้ง (s)	จำนวนครั้งข้อมูลที่ได้รับ	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	ระยะเวลาหน่วง (ms)
1	1	100	100	68.05
2	5	100	100	43.42
3	10	100	100	39.13
4	30	100	100	37.3

ผลการทดสอบพบว่า ระบบสามารถสื่อสารได้อย่างมีประสิทธิภาพในระยะไม่เกิน 25 เมตร และช่วงเวลาการส่งข้อมูลที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 30 วินาที ซึ่งให้ความสมดุลระหว่างความรวดเร็วและความเสถียรของระบบ

5. สรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสำหรับระบบติดตามและแจ้งเตือนคุณภาพอากาศภายในบ้าน โดยใช้ บอร์ด Raspberry Pi ร่วมกับโพรโทคอล MQTT สำหรับรับ–ส่งข้อมูล และใช้ Node-RED ในการแสดงผล จัดเก็บข้อมูล แจ้งเตือน และควบคุมเครื่องฟอกอากาศแบบอัตโนมัติ ผลการทดสอบทั้งด้านการสื่อสาร การแสดงผล การแจ้งเตือน และการควบคุมระบบ พบว่าสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถส่งข้อมูลแบบเวลาจริงได้ถูกต้องที่ระยะสูงสุด 27 เมตร ด้วยประสิทธิภาพร้อยละ 90 ระบบสามารถแจ้งเตือน 3 ระดับตามค่าฝุ่น PM2.5 และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ พร้อมทั้งควบคุมเครื่องฟอกอากาศได้สอดคล้องกับระดับมลพิษที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ ส่งผลให้ระบบสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเฝ้าระวัง แจ้งเตือน และปรับปรุงคุณภาพอากาศภายในบ้านได้อย่างเหมาะสม

ข้อเสนอแนะ

ระบบนี้สามารถพัฒนาเพิ่มเติมได้โดยการสอบเทียบของเซนเซอร์ PM2.5 และ CO กับเครื่องมือมาตรฐานเพื่อเพิ่มความแม่นยำของข้อมูล รวมถึงการเพิ่มตัวแปรด้านสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิและความชื้น เพื่อช่วยวิเคราะห์คุณภาพอากาศได้ครอบคลุมยิ่งขึ้น นอกจากนี้ควรพัฒนาระบบแจ้งเตือนอัจฉริยะ โดยใช้การวิเคราะห์แนวโน้มของข้อมูลและปรับระดับการแจ้งเตือนให้เหมาะสมกับผู้ใช้งานแต่ละกลุ่ม เช่น เด็ก ผู้สูงอายุ เป็นต้นได้

6. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้รับทุนสนับสนุนโครงงานทางวิศวกรรมสำหรับนิสิตระดับปริญญาตรี จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

เอกสารอ้างอิง

[1] M. Chandrakala *et al.*, “Advanced air quality monitoring using Raspberry Pi and Arduino,” *Discover Applied Sciences*, 2025.

[2] B. Imankulova *et al.*, “IoT-based real-time indoor air quality monitoring using Raspberry Pi,” *CEUR Workshop Proceedings*, 2025.

[3] A. Manisekaran and L. S. Kumar, “Development of an IoT-enabled air pollution monitoring and air purifier system,” *MAPAN*, vol. 58, pp. 669–688, 2023. doi: https://doi.org/10.1007/s12647-023-00660-y.

[4] M. Afrial *et al.*, “Multi-sensor indoor air quality monitoring with real-time logging,” *MDPI Proceedings*, vol. 23, no. 12, pp. 1–8, 2025. doi: https://doi.org/10.3390/materproc2025023012.

[5] W. Srisang *et al.*, “PM2.5 IoT sensor calibration and implementation issues,” *Emerging Science Journal*, vol. 8, no. 6, pp. 2267-2277, 2024. doi: http://dx.doi.org/10.28991/ESJ-2024-08-06-08.

[6] A. Caroline S, *et al.*, "IoT Air-Care," *2024 International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS)*, Chennai, India, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICPECTS62210.2024.10780316.

[7] M. V. Guvvala and D. Ch, "ThingSpeak Based Air Pollution Monitoring System Using Raspberry Pi," *2023 3rd Asian Conference on Innovation in Technology (ASIANCON)*, Ravet IN, India, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/ASIANCON58793.2023.10269833.

[8] P. Sarkar, K. R. Jala and M. Saha, "TinyMLAir: Indoor Air Quality of Domestic Activities through TinyML," *2026 18th International Conference on COMmunication Systems and NETworks (COMSNETS)*, Bengaluru, India, 2026, pp. 1421-1425, doi: 10.1109/COMSNETS67989.2026.11418242.

[9] A. Kakde, Y. K. Pagoti, S. Nikumbh, P. Karmakar and S. Chakraborty, "Real-time Air Quality Monitoring and Context-aware Alert System," *2025 17th International Conference on COMmunication Systems and NETworks (COMSNETS)*, Bengaluru, India, 2025, pp. 1027-1031, doi: 10.1109/COMSNETS63942.2025.10885569.

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

เกณฑ์การหยุดทำงานของฟัซซี่ดิฟเฟอเรนเชียลอิโวลูชันแบบหลายวัตถุประสงค์โดยการป้อนกลับเมตริกสมรรถนะ

Fuzzy Multiobjective Differential Evolution Stopping Criteria Based on Performance Metrics Feedback

ฉัตรแก้ว จริยตันติเวทย์ และ พลกฤษณ์ จริยตันติเวทย์ *

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถ.ประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพ 10800 ponlakit.j@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

เนื่องจากเกณฑ์สำหรับอัลกอริทึมส์เชิงวิวัฒนาการมักจะนำจำนวนรอบวิวัฒนาการที่มากที่สุดมาเป็นเงื่อนไขในการหยุดการวิวัฒนาการของอัลกอริทึมส์ เมื่ออัลกอริทึมส์วนซ้ำกระบวนการวิวัฒนาการไปจนกระทั่งถึงจำนวนรอบวิวัฒนาการมากที่สุดแล้ว อัลกอริทึมส์หยุดการทำงานแล้วจึงรายงานคำตอบที่เหมาะที่สุดที่ค้นพบ แต่ในบางกรณี การกำหนดเกณฑ์การหยุดทำงานแบบดั้งเดิมไม่เหมาะสม อาจทำให้คำตอบที่ได้ไม่ใช่คำตอบที่เหมาะที่สุด และในบางกรณีอัลกอริทึมส์อาจค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแล้ว แต่ยังคงต้องดำเนินการต่อไปเนื่องจากเงื่อนไขการหยุดทำงานยังไม่เป็นไปตามเกณฑ์การหยุดวิวัฒนาการ ส่งผลให้อัลกอริทึมส์ต้องวนซ้ำรอบการวิวัฒนาการต่อไปอีก ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองทรัพยากรในการคำนวณ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอเกณฑ์การหยุดทำงานของของดิฟเฟอเรนเชียลอิโวลูชันแบบหลายวัตถุประสงค์ โดยการป้อนกลับเมตริกสมรรถนะ (เอเอฟเอ็มดีอี) โดยนำการป้อนกลับจากเมตริกสมรรถนะ 3 ชนิด ได้แก่ ไฮเปอร์โวลุม (H) ระยะห่างระหว่างปัจเจก (S) และการกระจายสูงสุด (MS) ผ่านกฎอนุมานฟัซซี่เพื่อประเมินสถานะการวิวัฒนาการ และควบคุมการหยุดวิวัฒนาการของเอเอฟเอ็มดีอี เพื่อประหยัดทรัพยากรในการคำนวณ เมื่อนำเอเอฟเอ็มดีอี และเกณฑ์การหยุดทำงานที่นำเสนอไปทดสอบกับชุดทดสอบมาตรฐานซีดีที พบว่าแบบจำลองที่นำเสนอช่วยให้หยุดการทำงานได้ในเวลาที่เหมาะสมและประหยัดทรัพยากรการคำนวณ

คำสำคัญ : ดิฟเฟอเรนเชียลอิโวลูชัน; การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์; เกณฑ์การหยุดทำงาน; เมตริกสมรรถนะ; ฟัซซี่ลอจิก

Abstract

Traditional Stopping criteria for evolutionary algorithms typically based on a fixed maximum number of iterations, often lead to excessive computational resource consumption when the algorithm continues beyond optimal convergence, or suboptimal results when the limit of iterations is too low. This research proposes a stopping criteria model for Advanced Fuzzy-based Multiobjective Differential Evolution (AFMDE) using feedback from three performance metrics: Hypervolume (H), Spacing (S), and Maximum Spread (MS) via fuzzy inference rules. Experimental results on ZDT benchmark suites shows that the proposed model enables the algorithm to terminate at appropriate intervals, effectively saving computational resources.

Keywords: Differential Evolution; Multiobjective Optimization; Stopping Criteria; Performance Matrices; Fuzzy Logic

1. บทนำ

ปัญหาเชิงวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ส่วนใหญ่ มักเป็นปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multiobjective Optimization Problems, MOPs) MOPs ซึ่งวัตถุประสงค์หลายวัตถุประสงค์ของปัญหา MOPs มักจะขัดแย้งกันเอง เช่น ปัญหาการออกแบบสายอากาศ มีวัตถุประสงค์ในการออกแบบให้ระดับ side lobe level มีค่าต่ำที่สุดในขณะที่ต้องการให้อัตราขยายของสายอากาศมีค่ามากที่สุดซึ่งเป็นกฎของการออกแบบเพื่อให้ได้สายอากาศที่มีสมรรถนะที่เหมาะสมทำให้ไม่สามารถหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเพียงคำตอบเดียวได้

อัลกอริทึมส์สำหรับหาค่าที่เหมาะสมที่สุด หรือเรียกว่าออพติไมเซอร์(Optimizer) นำมาค้นหาคำตอบของ MOPs นั้นจะค้นพบชุดคำตอบของคำตอบที่เหมาะที่สุดที่ต้องชั่งน้ำหนักข้อดีข้อเสียระหว่างคำตอบต่าง ๆ ที่ค้นพบ ออฟติไมเซอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงชนิดหนึ่ง คือ วิธีดิฟเฟอเรนเชียลอิโวลูชัน (DE) ซึ่งเป็นขั้นตอนการคำนวณเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Computations, ECs) ชนิดหนึ่งที่ได้รับความนิยมสูงเนื่องจากมีการวิวัฒนาการที่เรียบง่ายและมีสมรรถนะสูง อย่างไรก็ตาม ปัญหาสำคัญของออพติไมเซอร์โดยทั่วไปรวมถึงวิธีดิฟเฟอเรนเชียลอิโวลูชัน คือ เกณฑ์การหยุดทำงาน" (Stopping Criteria) โดยที่อัลกอริทึมส์ส่วนใหญ่มักใช้จำนวนรอบวิวัฒนาการสูงสุด (Maximum Generations) มาเป็นเกณฑ์หยุดวิวัฒนาการ หากกำหนดค่านี้ไม่เหมาะสมอาจนำไปสู่การสิ้นเปลืองทรัพยากรการคำนวณในกรณีที่อัลกอริทึมพบคำตอบที่เหมาะที่สุดแล้ว หรืออาจได้คำตอบที่ยังไม่ใช่คำตอบที่เหมาะที่สุดหากอัลกอริทึมส์หยุดการทำงานเร็วเกินไป งานวิจัยนี้จึงพัฒนาการนำเมตริกสมรรถนะป้อนกลับ เพื่อทราบสถานะของการวิวัฒนาการ และนำสถานะที่ได้ไปควบคุมการหยุดการทำงานของอัลกอริทึมส์โดยอัตโนมัติ [25]

2. ทฤษฎี

2.1 หลักการของดิฟเฟอเรนเชียลอิโวลูชั่น

หลักการดิฟเฟอเรนเชียลอิโวลูชันหรือ ดีอี (Differential Evolution, DE) พัฒนาขึ้นโดย Storn และ Price ในปีค.ศ. 1995 เป็นขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Algorithm, EA) แบบใหม่ [1]

เป็นวิธีการค้นหาแบบสโตแคสติกโดยตั้งอยู่บนหลักการประชากร เพื่อค้นหาค่าที่ดีที่สุดในปริภูมิแบบต่อเนื่อง [2-3] เป็นเครื่องมือที่มีสมรรถนะสูงที่สุดวิธีหนึ่งที่ใช้ในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ดิฟเฟอเรนเชียลอิโวลูชันสามารถแก้ปัญหาตัวแปรชนิดผสม ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบมีเงื่อนไขข้อจำกัด การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายฐานนิยม และการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ ขั้นตอนวิวัฒนาการของดีอีประกอบด้วยกระบวนการหลักคือ การผ่าเหล่าด้วยผลต่าง (Differential Mutation), การสลับสายพันธุ์ (Crossover) และการคัดเลือก (Selection) โดยมีจุดเด่นคือการใช้เวกเตอร์ผลต่างในการปรับตัวให้เข้ากับพื้นผิวของฟังก์ชันวัตถุประสงค์

2.2 เกณฑ์การหยุดทำงาน

เกณฑ์การหยุดทำงานของออพติไมเซอร์ทั่วไป มักจะตั้งเงื่อนไขการหยุดวิวัฒนาการหรือหยุดการทำงานของอัลกอริทึมส์สำหรับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด คือ จำกัดจำนวนรอบวิวัฒนาการที่สูงที่สุด [4] หรือจำนวนครั้งในการประเมินค่าฟังก์ชันที่สูงที่สุด [5] เมื่อหยุดการวิวัฒนาการแล้วจึงให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่หาได้ แต่บางกรณี ถ้าจำนวนรอบของการวิวัฒนาการที่กำหนดให้ขั้นตอนวิธีไม่เหมาะสม อาจทำให้คำตอบที่ได้ไม่ใช่คำตอบที่เหมาะสมที่สุด และอาจค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่สุดก่อนที่จะหยุดการวิวัฒนาการตามเงื่อนไข แต่อัลกอริทึมส์ยังคงต้องทำซ้ำการวิวัฒนาการต่อ ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองทรัพยากรในการคำนวณและสิ้นเปลืองเวลา จากเหตุผลดังกล่าวผู้วิจัยจึงพัฒนาเกณฑ์การหยุดทำงานสำหรับออฟติไมเซอร์ที่หาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ เพื่อให้ได้คำตอบที่มีคุณภาพดีกว่าเดิม และประหยัดทรัพยากรในการคำนวณ

ในอดีตมีนักวิจัยเสนอเกณฑ์การหยุดทำงานสำหรับดิฟเฟอเรนเชียลแบบหลายวัตถุประสงค์ดังนี้ Martí et al. [6] นำเสนอเกณฑ์การหยุดทำงาน เรียกว่าเกณฑ์ MGBM ที่เกิดจากการนำตัวชี้วัดการปรับปรุงคำตอบให้ดีขึ้นโดยวัดอัตราความเด่นร่วมกัน (Mutual Domination Rate (MDR) Improvement Indicator) และนำฟิลเตอร์แบบคาลมาน (Kalman Filter) อย่างง่ายมาประกอบกัน ทำให้สามารถวัดกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้ทรัพยากรในการคำนวณต่ำซึ่งเหมาะสมกับปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบซับซ้อนและแบบมากกว่าสามวัตถุประสงค์ หลังจากนั้น Martí et al. [7] ทดลองใช้เกณฑ์นี้กับอัลกอริทึมส์เชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์ เพื่อทดสอบกับชุดทดสอบมาตรฐาน DTLZ และ WFG ซึ่งผลการทดสอบที่ได้สอดคล้องกับผลการทดสอบใน [6] โดยต้องการศึกษาฟิลเตอร์ชนิดอื่น ๆ นอกเหนือจากฟิลเตอร์แบบคาลมานที่ใช้ในงานนี้

Guerrero et al. [8] นำเสนอเกณฑ์การหยุดทำงานเรียกว่า Least Squares Stopping Criterion (LSSC) ตั้งอยู่บนการวิเคราะห์เรสสิดิว (Residue Analysis) และพารามิเตอร์ ได้แก่ ปริมาณการเปลี่ยนแปลงของตัวชี้วัดที่ยอมรับได้ และขนาดของหน้าต่าง (จำนวนยุค) ที่กำลังพิจารณาอยู่

Ochoa-Robles et al. [9] เสนอเกณฑ์การหยุดทำงาน 3 เกณฑ์ คือ MGBM, Consolidation Ratio (CoR) ซึ่งเป็นตัววัดการลู่เข้า และ Improvement Ratio (IR) เพื่อหาสัดส่วนของประชากรก่อนหน้าที่ถูกข่มด้วยประชากรปัจจุบัน เมื่อทดสอบเกณฑ์การหยุดทำงานกับปัญหาการออกแบบกระบวนการทางวิศวกรรมเคมีพบว่า สมรรถนะของอัลกอริทึมส์ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ แต่เกณฑ์ที่ให้ผลดีที่สุดคือ MGBM

Mahbub et al. [10] พัฒนาความทนทานของเกณฑ์การหยุดทำงานโดยมีแนวคิดตั้งอยู่บนการเฝ้าสังเกตทั้งปริภูมิวัตถุประสงค์และปริภูมิเวกเตอร์พร้อมกัน โดยใช้ค่าเฉลี่ยระยะ Hausdorff (Average Hausdorff Distance; AHD) และความหลากหลายทางพันธุกรรม (Genetic Diversity; Div) เป็นเกณฑ์ และดำเนินการทดสอบกับ NSGA-II และ SPEA2 เพื่อแก้ปัญหาแบบสองวัตถุประสงค์และสามวัตถุประสงค์ และพบว่าเกณฑ์การหยุดทำงานนี้ช่วยประหยัดจำนวนครั้งของการประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้โดยที่ไม่เสียความแม่นยำในการหาคำตอบที่เหมาะสม

Liang et al. [11] เสนอเกณฑ์การหยุดทำงานที่ตั้งอยู่บนระยะทางระหว่างกัน เรียกว่า Iteration Convergence Criterion ซึ่งเป็นการตรวจจับการพัฒนาของประชากร โดยนำไปประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาการจัดวางสายอากาศสำหรับเรดาร์แบบ MIMO ที่มีพื้นที่อ้างอิงหลายพื้นที่ โดยทดสอบกับขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาคแบบหลายวัตถุประสงค์ ซึ่งอัลกอริทึมจะหยุดทำงานเมื่อ Iteration Convergence Criterion ต่ำกว่าค่าเธรสโฮลด์ที่กำหนดไว้ ผลการทดสอบที่ได้ คือ เกณฑ์การหยุดทำงานแบบนี้ช่วยประหยัดทรัพยากรในการคำนวณและประหยัดเวลาได้โดยได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด

Castro et al. [12] เสนอเกณฑ์การวัดการลู่เข้าของขั้นตอนวิธี Deterministic Dynamic Programming (DDDP) โดยนำเกณฑ์การวัดการลู่เข้ามาเป็นเกณฑ์การหยุดทำงานของขั้นตอนวิธี DDDP คือการวัดการลู่เข้าจากการเพิ่มอัตราขยายที่ได้จากการแทรก “new cut” เข้าไปในฟังก์ชัน “cost-to-go function” ถ้าการวนซ้ำ DDDP มีอัตราขยายเพิ่มน้อยกว่าเธรสโฮลด์ที่กำหนดไว้จะหยุดทำงาน และนำไปทดสอบกับปัญหา A Brazilian Hydro-Thermal Dispatch Case พบว่าขั้นตอนวิธีวัดการลู่เข้าของ DDDP สามารถลดความพยายามในการคำนวณได้เพิ่มความเร็วของการลู่เข้าด้วย

Liu et al. [13] สำรวจวิธีการต่าง ๆ ในการตั้งเกณฑ์การหยุดทำงานที่ตั้งอยู่บนการตรวจจับการสิ้นสุดการทำงานของกลยุทธ์เชิงวิวัฒนาการแบบต่าง ๆ และแบ่งประเภทการตรวจจับสถานะของกลยุทธ์เชิงวิวัฒนาการเพื่อเป็นเงื่อนไขสิ้นสุดการทำงานออกเป็นประเภทต่าง ๆ และสรุปว่าการค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับเกณฑ์การหยุดทำงานค่อนข้างหายากเมื่อเปรียบเทียบกับการค้นคว้าด้านวิธีการสืบพันธุ์และวิธีการคัดเลือก ซึ่งในทางปฏิบัตินั้นการหาสมดุลระหว่างคุณภาพของคำตอบและต้นทุนในการคำนวณในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะที่สุดมีความสำคัญอย่างยิ่ง

Doush et al. [14] นำค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่และ MGBM มาเป็นเกณฑ์การหยุดทำงาน และเปรียบเทียบด้วยการทดลองกับวิธีไฮบริดทั้งสี่แบบของขั้นตอนวิธีการค้นหาฮาร์โมนีแบบหลายวัตถุประสงค์บนฟังก์ชันทดสอบมาตรฐาน พบว่าเกณฑ์การหยุดทำงานแบบค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ให้ผลการทดสอบที่ดีกว่า MGBM ด้วยการวัดระยะทางไอจีดี (Inverted Generational Distance; IGD)

Oliveira et al. [15] พยายามนิยามขอบเขตของเวกเตอร์เด่นในเทอมของรัศมีวงกลมในปริภูมิเวกเตอร์ทรงกลม เพื่อนิยามเงื่อนไขที่จำเป็นและเพียงพอของคำตอบที่เหมาะสมเฉพาะท้องถิ่นสำหรับปัญหา

การหาค่าที่เหมาะสมแบบหลายวัตถุประสงค์ชนิด Multiobjective Quadratic Fractional Optimization Problems และเงื่อนไขนี้อาจเป็นประโยชน์ต่อการหาเกณฑ์การหยุดทำงานของขั้นตอนวิธีที่กำลังพัฒนาได้

3. ระเบียบวิธีวิจัยและแบบจำลองเกณฑ์การหยุดทำงานที่นำเสนอ

3.1 เมตริกสมรรถนะ (Performance Metrics)

งานวิจัยนี้เลือกใช้เมตริกสมรรถนะ 3 ชนิด เพื่อวัดคุณภาพของคำตอบชุดพาเรโตระหว่างการวิวัฒนาการ:

1. Hypervolume (H): เป็นการวัดทั้งการลู่เข้าและการกระจายของเซตคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำจากทุกคำตอบ และจุดอ้างอิงจะถูกตั้งขึ้นตาม [16] โดยที่จุดอ้างอิงอาจจะเป็นจุดที่ต่อต้านอุดมคติของสมรรถนะที่แย่ที่สุดที่เป็นไปทั้งในทุกวัตถุประสงค์ [17]

$$H(PF_{known}) = \left\{ \bigcup_i a(\mathrm{x}_i) \middle| \forall \mathrm{x}_i \in PF_{known} \right\} \quad (1)$$

2. Spacing (S): ระยะห่างระหว่างปัจเจก [18] คือ เมตริกวัดการกระจายของคำตอบที่ไม่มีใครเด่นกว่าว่ามีการกระจายแบบเท่าเทียมกันหรือไม่ คำนวณได้จาก

$$S = \sqrt{\frac{1}{\bar{n}} \sum_{i=1}^{\bar{n}} \left(d_i - \bar{d}\right)^2}, \bar{n} \to |PF_{known}| \quad (2)$$

เมื่อ d_i คือ ระยะยูคลิเดียนในปริภูมิวัตถุประสงค์ ระหว่างปัจเจก x_i และคำตอบที่ใกล้ที่สุดที่อยู่ในฟร้อนท์ที่ไม่ถูกครอบงำที่ค้นพบ

$\bar{d}$ คือ ค่าเฉลี่ยของระยะยูคลิเดียนของ d_i

$\bar{n}$ คือ จำนวนของคำตอบที่อยู่ในฟร้อนท์ที่ไม่ถูกครอบงำที่ค้นพบ

3. Maximum Spread (MS): การกระจายสูงสุด [15] MS วัดความยาวของเส้นแทยงมุมในไฮเปอร์บอกซ์ (Hyperbox) ที่เป็นรูปร่างก่อตัวขึ้นจากคำตอบที่ห่างที่สุด (Extreme Solution) ที่สังเกตพบในเซตคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ เมื่อนำการกระจายสูงสุดไปเทียบกับ 1 (Normalized MS) จะได้ [1]

$$MS = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M} \left(\frac{\max\limits_i f_m^i - \min\limits_i f_m^i}{F_m^{\max} - F_m^{\min}} \right)^2} \quad (3)$$

เมื่อ $F_m^{\max}$ และ $F_m^{\min}$ คือ ค่าที่สูงที่สุดและค่าที่ต่ำที่สุดของวัตถุประสงค์ที่ m ในเซตคำตอบพาเรโตที่เลือกมา

f_m^i คือ ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ m ของสมาชิกตัวที่ i ของเซตคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำที่ค้นพบ

M คือ จำนวนฟังก์ชันวัตถุประสงค์

3.2 แบบจำลองเกณฑ์การหยุดทำงานที่ที่ตั้งอยู่บนเมตริกซ์สมรรถนะ

ผู้วิจัยนำเสนอและพัฒนาเกณฑ์การหยุดทำงานโดยตั้งอยู่บนการป้อนกลับเมตริกสมรรถนะสำหรับอัลกอริทึมฟัซซี่ดิฟเฟอเรนเชียลอิโวลูชันแบบหลายวัตถุประสงค์ เอเอฟเอ็มดีซี เนื่องจากเอเอฟเอ็มดีซีมีการนำเมตริกซ์สมรรถนะสามชนิดเป็นตัวระบุสถานะการวิวัฒนาการของประชากร คือ ไฮเปอร์โวลุม วัดการลู่เข้าและการกระจายตัวของคำตอบ ระยะห่างระหว่างปัจเจกวัดการกระจายตัวของคำตอบแบบยูนิฟอร์ม และการกระจายสูงสุดวัดความครอบคลุมของฟร้อนท์ที่ไม่ถูกครอบงำ ดังนั้นอัลกอริทึมควรจะหยุดทำงานเมื่อประชากรลู่เข้า มีการกระจายตัวเป็นยูนิฟอร์มและฟร้อนท์ที่ไม่ถูกครอบงำมีการขยายตัวมากที่สุด เมตริกซ์สมรรถนะสามชนิดดังกล่าวข้างต้นาจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดกระบวนการวิวัฒนาการ และมีค่าเปลี่ยนไปในแต่ละยุค แต่จาก [95 – 96] พบว่าเมื่อประชากรวิวัฒนาการไปช่วงระยะหนึ่งและเกิดการลู่เข้าแล้ว ไฮเปอร์โวลุม ระยะห่างระหว่างปัจเจก และการกระจายสูงสุดจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าน้อยมาก ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำอัตราการเปลี่ยนแปลงของเมตริกซ์สมรรถนะทั้งสามชนิด คือ ไฮเปอร์โวลุม ระยะห่างระหว่างปัจเจก และการกระจายสูงสุดมาเป็นเกณฑ์การหยุดทำงาน โดยกำหนดให้เมื่อไฮเปอร์โวลุมมีการเปลี่ยนแปลงในสองยุคที่ติดกันต่ำกว่าค่าที่กำหนดแสดงว่าประชากรลู่เข้าหรือมีการกระจายตัวน้อยมากซึ่งไม่อาจระบุได้ชัดเจนว่าเป็นเพราะสาเหตุใด ดังนั้นจึงนำระยะห่างระหว่างปัจเจกมาเป็นตัวระบุสถานะประชากรด้านการกระจายตัวของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำในฟร้อนท์ที่ไม่ถูกครอบงำในสองยุคที่ติดกัน เพื่อให้ทราบสถานะการกระจายตัวของประชากรในขณะวิวัฒนาการได้อย่างชัดเจน ถ้าการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างปัจเจกที่ไม่ถูกครอบงำในสองยุคที่ติดกันน้อยกว่าค่าที่กำหนด อัลกอริทึมจะหยุดการวิวัฒนาการและนำส่งฟร้อนท์ที่ไม่ถูกครอบงำที่ค้นพบ ดังนั้นแบบจำลองเกณฑ์การหยุดทำงานที่นำเสนอนี้ ต้องการพารามิเตอร์จำนวนน้อยมากเพียงสองพารามิเตอร์เท่านั้น คือ ค่าเธรสโฮลด์ของการเปลี่ยนแปลงไฮเปอร์โวลุม (stopH) และค่าเธรสโฮลด์ของการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างปัจเจก (stopS) เท่านั้น นอกจากนี้เกณฑ์การหยุดทำงานที่นำเสนอสำหรับเอเอฟเอ็มดีอีนี้ยังไม่เพิ่มภาระด้านการคำนวณเพิ่มในเทอมของการประเมินผลฟังก์ชันแต่อย่างใด เนื่องจากการคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงไฮเปอร์โวลุมและระยะห่างระหว่างปัจเจกในสองยุคติดกันนั้นต้องคำนวณอยู่แล้วในกระบวนการวิวัฒนาการของเอเอฟเอ็มดีอี แต่อย่างไรก็ตาม เพื่อป้องกันกรณีที่อัลกอริทึมไม่สามารถหยุดทำงานตามแบบจำลองเกณฑ์การหยุดทำงานที่เสนอได้ ผู้วิจัยจึงกำหนดจำนวนยุคที่สูงที่สุดเป็นการควบคุมการหยุดวิวัฒนาการของประชากรอีกชั้นหนึ่ง แบบจำลองเกณฑ์การหยุดทำงานของฟัซซี่ดิฟเฟอเรนเชียลอิโวลูชันแบบหลายวัตถุประสงค์ โดยการป้อนกลับเมตริกสมรรถนะพรรณนาด้วยรหัสเทียม (Pseudo Code) ดังรูปที่ 1

1. สร้างประชากรเริ่มต้น และตั้งค่าพารามิเตอร์ควบคุมและจำนวนประชากร
2. ถ้าจำนวนยุคการวิวัฒนาการต่ำกว่าจำนวนยุควิวัฒนาการที่กำหนดไปที่ขั้นตอนที่ 3. ถ้าไม่ใช่ให้อัลกอริทึมหยุดวิวัฒนาการและนำส่งฟร้อนท์ที่ไม่ถูกครอบงำที่เก็บไว้ในหน่วยเก็บถาวร
3. กระบวนการวิวัฒนาการ
   - 3.1. การผ่าเหล่า
   - 3.2. การสลับสายพันธุ์
   - 3.3. การคัดเลือก
4. ตรวจสอบว่าประชากรมีสถานะเป็นไปตามแบบจำลองเกณฑ์การหยุดทำงานที่ตั้งอยู่บนการป้อนกลับเมตริกซ์สมรรถนะหรือไม่ โดยถ้าค่าสัมบูรณ์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงไฮเปอร์โวลุม น้อยกว่า stopH หรืออัตราการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างปัจเจกน้อยกว่า stopS ให้หยุดการวิวัฒนาการและนำส่งคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำจากหน่วย แต่ถ้าสถานะของประชากรไม่เป็นไปตามแบบจำลองเกณฑ์การหยุดทำงานให้ย้อนกลับไปที่ขั้นตอนที่ 2

รูปที่ 1 รหัสเทียมของแบบจำลองเกณฑ์การหยุดทำงานที่นำเสนอ

3.3 โครงสร้างเอเอฟเอ็มดีอี

เอเอฟเอ็มดีอี (AFMDE) [20] นำหลักการป้อนกลับของเมติกซ์สมรรถนะทั้งสามชนิด คือ ได้แก่ อัตราส่วนไฮเปอร์แอเรีย (Hyperarea Ratio) หรือตัวชี้วัดไฮเปอร์โวลุม (Hypervolume Indicator; H) เพื่อวัดคุณภาพการลู่เข้า วัดระยะห่างระหว่างปัจเจก (S) เพื่อระบุสถานะการกระจายแบบยูนิฟอร์ม และวัดการกระจายสูงสุด (MS) เพื่อวัดสถานะของการวิวัฒนาการและเพื่อวัดคุณภาพฟร้อนท์ที่ไม่ถูกครอบงำ โดยนำค่าเมตริกซ์ทั้งสามชนิดเป็นอินพุตของกฎอนุมานฟัซซี่ แล้วกฎอนุมานฟัซซี่จะให้เอาต์พุตเป็นการปรับค่าพารามิเตอร์ควบคุมการผ่าเหล่า (γ และ F) และอัตราการสลับสายพันธุ์ (CR) เพื่อที่จะเน้นการปรับการลู่เข้าหรือการเน้นความหลากหลายของประชากรอย่างมีพลวัต นั่นคือการปรับสมดุลอย่างมีพลวัตระหว่างการสำรวจและการใช้ประโยชน์ตลอดกระบวนการวิวัฒนาการนั่นเอง

4. การทดลองและผลการทดลอง

4.1 การตั้งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง

ชุดฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์ที่นำมาทดสอบแบบจำลองของเกณฑ์การหยุดทำงานของฟัซซี่ดิฟเฟอเรนเชียลอิโวลูชันแบบหลายวัตถุประสงค์ โดยการป้อนกลับเมตริกสมรรถนะ เป็นปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบ 2 วัตถุประสงค์ คือ ชุดฟังก์ชันซีดีที (ZDT) [21, 22] ประกอบด้วยฟังก์ชัน ZDT1 ZDT2 ZDT3 ZDT4 และ ZDT6

เมตริกซ์สมรรถนะที่นำมาใช้ในการทดสอบคุณภาพของพาเรโตฟร้อนท์ที่อัลกอริทึมส์ค้นพบ คือ Inverted Generational Distance; IGD [23]

ค่าเริ่มต้นของ γ และ F เท่ากันคือ 0.5 และปรับค่าตลอดการวิวัฒนาการให้อยู่ในช่วง [0.4,1] [24]

ค่าเริ่มต้นของ CR = 0.1 และปรับค่าตลอดการวิวัฒนาการให้อยู่ในช่วง 0.3 ถึง 0.9 [96]

ขนาดประชากร NP = 100 และ ขนาดของ Archive = 100

จุดอ้างอิงสำหรับคำนวณไฮเปอร์โวลุมสำหรับฟังก์ชันทดสอบ [76] ได้แก่

ZDT1 และ ZDT4 มีจุดอ้างอิงไฮเปอร์โวลุมอยู่ที่ (3, 100)

ZDT2 มีจุดอ้างอิงไฮเปอร์โวลุมอยู่ที่ (3/2, 4/3)

ZDT3 มีจุดอ้างอิงไฮเปอร์โวลุมอยู่ที่ (100, 5.446)

ZDT6 มีจุดอ้างอิงไฮเปอร์โวลุมอยู่ที่ (1.497, 4/3)

จำนวนยุคที่มากที่สุดที่เอเอฟเอ็มดีดีจะหยุดทำงานเพื่อป้องกันการวิวัฒนาการไม่สิ้นสุดในกรณีที่อัลกอริทึมส์ไม่สามารถหยุดทำงานตามแบบจำลองที่นำเสนอได้ คือ 300 ยุค

เพื่อพิสูจน์ความคงเส้นคงวาของแบบจำลองที่นำเสนอจึงทำการทดสอบซ้ำทั้งหมด 30 ครั้ง ในแต่ละครั้งจะบันทึกยุคที่เอเอฟเอ็มดีอีหยุดทำงาน จำนวนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำที่ค้นพบ และ IGD ของการทดลองแต่ละครั้ง

4.2 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

เมื่อทำการทดสอบแบบจำลองเกณฑ์การหยุดทำงานของฟัซซี่ดิฟเฟอเรนเชียลอิโวลูชันแบบหลายวัตถุประสงค์ โดยการป้อนกลับเมตริกสมรรถนะ โดยทดสอบกับชุดฟังก์ชันมาตรฐานซีดีที่แล้ว แสดงผลการทดสอบด้วย IGD และค่าสถิติและบ็อกซ์พลอต (box plot) ดังรูปที่ 2 ถึงรูปที่ 6

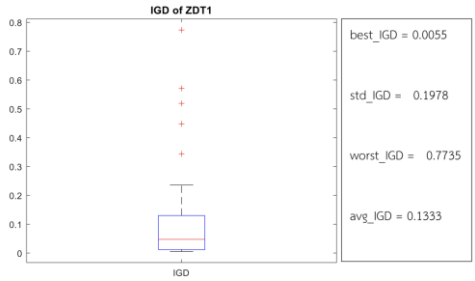
เมื่อวิเคราะห์ผลการทดสอบที่ดีที่สุดพบว่าสำหรับ ZDT1 แล้วอัลกอริทึมลู่เข้าและหยุดทำงาน ณ ยุคที่ 144 โดยค้นพบคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ 100 คำตอบ และมี IGD = 0.0055 อัลกอริทึมควรมีระยะเวลาในการวิวัฒนาการไม่น้อยกว่า 111 ยุค ส่วน ZDT2 ลู่เข้าและหยุดทำงาน ณ ยุคที่ 300 ซึ่งเป็นจำนวนยุคที่มากที่สุดที่กำหนดไว้ โดยค้นพบคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ 100 คำตอบ และมี IGD = 0.0042 อัลกอริทึมควรมีระยะเวลาในการวิวัฒนาการไม่น้อยกว่า 288 ยุค ส่วนZDT3 พบว่าอัลกอริทึมหยุดทำงานก่อนครบ 300 ยุค แต่ยังไม่ลู่เข้าและจำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดมีจำนวนน้อย โดยผลการทดสอบที่ดีที่สุดนั้นอัลกอริทึมหยุดทำงาน ณ ยุคที่ 66 ซึ่งเป็นจำนวนยุคที่มากที่สุดที่กำหนดไว้ โดยค้นพบคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ 37 คำตอบ และมี IGD = 0.1503 เนื่องจากเกณฑ์การหยุดทำงานอาจไม่เหมาะสมกับลักษณะปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่เป็นฟังก์ชันไม่ต่อเนื่อง และจาก [95-96] พบว่าเอเอฟเอ็มดีอีเผชิญปัญหานี้เมื่อกำหนดเกณฑ์การหยุดทำงานแบบตามธรรมเนียมเช่นกัน สำหรับฟังก์ชัน ZDT4 พบว่าอัลกอริทึมลู่เข้าและหยุดทำงาน ณ ยุคที่ 295 โดยค้นพบคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ 100 คำตอบ และมี IGD = 2.7050 ฟังก์ชันสุดท้าย คือ ZDT6 พบการลู่เข้าและหยุดทำงาน ณ ยุคที่ 300 ซึ่งเป็นจำนวนยุคที่มากที่สุดที่กำหนดไว้ โดยค้นพบคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ 100 คำตอบ และมี IGD = 0.0029 อัลกอริทึมควรมีระยะเวลาในการวิวัฒนาการไม่น้อยกว่า 50 ยุคขึ้นไป

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

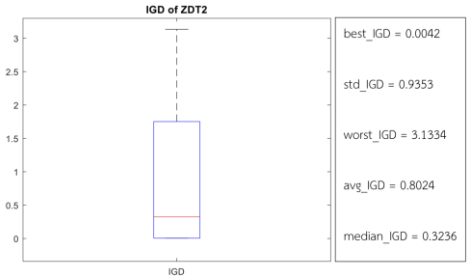
แบบจำลองแบบจำลองเกณฑ์การหยุดทำงานโดยการป้อนกลับเมตริกสมรรถนะ สามารถช่วยให้อัลกอริทึมส์หยุดกระบวนการวิวัฒนาการทันทีที่พาเรโตฟร้อนท์ลู่เข้าโดยไม่ต้องวิวัฒนาการต่อจนกว่าจะสิ้นสุดการวิวัฒนาการ ณ ยุคที่กำหนดให้ ซึ่งเป็นการประหยัดทรัพยากรในการคำนวณและเวลา ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการวิวัฒนาการของเอเอฟเอ็มดีอีด้วย โดยเฉพาะในกรณีที่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต้องการทรัพยากรในการคำนวณสูง และมีการกระจายตัวของคำตอบพาเรโตโดยประมาณได้ใกล้เคียงกับการกระจายแบบยูนิฟอร์มหรือมีการกระจายตัวแบบยูนิฟอร์มในบางฟังก์ชัน แต่ผลการทดสอบพบว่าบางครั้งแบบจำลองเกณฑ์การหยุดทำงานทำให้อัลกอริทึมหยุดกระบวนการวิวัฒนาการเร็วเกินไปทำให้คำตอบที่ได้ยังไม่ลู่เข้า หรือบางกรณีลู่เข้าแล้วแต่ยังมีการกระจายตัวของคำตอบไม่เป็นยูนิฟอร์ม แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลองเกณฑ์การหยุดทำงานโดยการป้อนกลับเมตริกซ์สมรรถนะยังคงต้องการการพัฒนาประสิทธิภาพให้ดีขึ้น โดยการทดสอบกับชุดฟังก์ชั่นทดสอบอื่นและเทียบกับอัลกอริทึมอื่นเพื่อนำองค์ความรู้ที่ได้ไปใช้ในการออกแบบและสร้างแบบจำลองเกณฑ์การหยุดทำงานโดยรวมสำหรับออพติไมเซอร์แบบหลายวัตถุประสงค์ชนิดอื่น ๆ

กิตติกรรมประกาศ

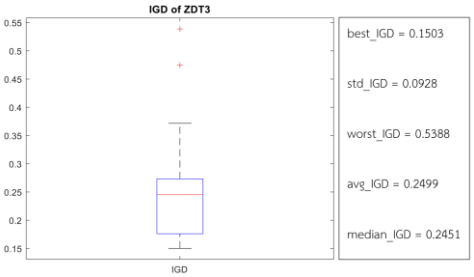
ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร สำหรับการสนับสนุนทุนวิจัยและสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการเข้าร่วมประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร. พระนครครั้งที่ 9



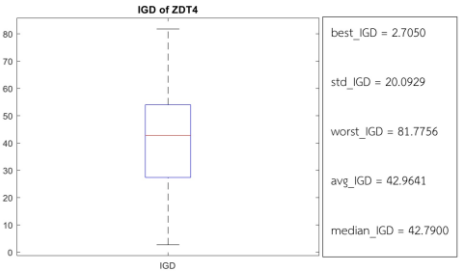
รูปที่ 2 บ็อกซ์พลอตและสถิติของฟังก์ชัน ZDT1



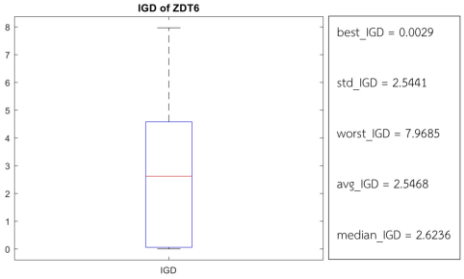
รูปที่ 3 บ็อกซ์พลอตและสถิติของฟังก์ชัน ZDT2



รูปที่ 4 บ็อกซ์พลอตและสถิติของฟังก์ชัน ZDT3



รูปที่ 5 บ็อกซ์พลอตและสถิติของฟังก์ชัน ZDT4



รูปที่ 6 บ็อกซ์พลอตและสถิติของฟังก์ชัน ZDT6

เอกสารอ้างอิง

[1] J. R. Storn and K. Price, “Differential evolution - a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces”, March, 1995 [online]. Available: http://www1.icsi.berkeley.edu/~storn/TR-95-012.pdf.

[2] R. Storn, “On the usage of differential evolution for function optimization,” Fuzzy Information Processing Society NAFIPS Biennial Conference of the North American, 1996, pp. 519-523.

[3] R. Storn and K. Price, “Differential evolution - a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces,” Journal of Global Optimization, vol. 11, pp. 341-359, 1997. K. Author, “Title of paper,” in *Unabbreviated Name of Conf.*, City of Conf., Abbrev. State (if given), year, pp. xxx-xxx.

[4] K. Zielinski, D. Peters, and R. Laur, “Run time analysis regarding stopping criteria for differential evolution and particle swarm optimization,” Proceedings of the 1st International Conference on Experiments Process System Modelling, Simulation and Optimization, 2005.

[5] K. Zielinski and R. Laur, “Stopping Criteria for Differential Evolution in Constrained Single-Objective Optimization,” Chakraborty U.K. (eds) Advances in Differential Evolution, Studies in Computational Intelligence, vol. 143. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 111-138, 2008.

[6] L. Marti, J. Garcia, A. Berlanga and J. M. Molina, "An approach to stopping criteria for multi-objective optimization evolutionary algorithms: The MGBM criterion," IEEE Congress on Evolutionary Computation (2009), Trondheim, 2009, pp. 1263-1270. doi: 10.1109/CEC.2009.4983090

[7] Luis Martí, Jesús García, Antonio Berlanga, José M. Molina, “A stopping criterion for multi-objective optimization evolutionary algorithms,” Information Sciences, Vol. 367–368, pp, 700-718, 2016, ISSN 0020-0255, https://doi.org/10.1016/j.ins.2016.07.025.

[8] José L. Guerrero, Luis Martí, Antonio Berlanga, Jesús García, and José M. Molina, “Introducing a Robust and Efficient Stopping Criterion for Multiobjective Optimization Algorithm,” IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2010), Barcelona, Spain, 18-23 July 2010, pp. 4314-4321

[9] A. Ochoa-Robles, C. Azzaro-Pantel and S. Domenech, Differential Evolution for Multiobjective Optimization of Process Design Problems, Proceedings of the 3rd International Conference on Operations Research and Enterprise Systems - Volume 1: ICORES, 2014, ISBN 978-989-758-017-8, pp. 226-232. DOI: 10.5220/0004833102260232.

[10] Md Shahriar Mahbub, Tobias Wagner and Luigi Crema, "Improving Robustness of Stopping Multi-objective Evolutionary Algorithms by Simultaneously Monitoring Objective and Decision Space," Proceedings of the 2015 Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation, Madrid, Spain, July 11 - 15, 2015, pp. 711-718.

[11] J. Liang et al., "An efficient antenna placement method for MIMO radar under the situation of multiple interference regions," 2017 20th International Conference on Information Fusion (Fusion), Xi'an, 2017, pp. 1-5.

[12] A. L. Castro et al., "A new criteria for convergence of multistage deterministic dynamic programming applied to multiobjective functions: A Brazilian hydro-thermal dispatch case," 2017 IEEE Manchester PowerTech, Manchester, 2017, pp. 1-6.

[13] Yanfeng Liu, Aimin Zhou and Hu Zhang, Termination Detection Strategies in Evolutionary Algorithms: A Survey, GECCO '18: Genetic and Evolutionary Computation Conference, Tokyo, Japan, 2018, DOI: 10.1145/3205455.3205466.

[14] Iyad Abu Doush, Mohammad Qasem Bataineh and Mohammed El-Abd, "On Different Stopping Criteria for Multi-objective Harmony Search Algorithms," Proceedings of the 2019 3rd International Conference on Intelligent Systems, Metaheuristics & Swarm Intelligence, pp. 30-34, Male, Maldives, March 23 - 24, 2019

[15] W.A. de Oliveira, M.A. Rojas-Medar, A. Beato-Moreno, and M.B. Hernandez-Jimenez, "Necessary and sufficient conditions for achieving global optimal solutions in multiobjective quadratic fractional optimization problems," Journal of Global Optimization, June 2019, Vol. 74, Issue 2, pp 233–253, https://doi.org/10.1007/s10898-019-00766-1

[16] A. Auger, J. Bader, D. Brockhoff, and E. Zitzler, "Theory of the hypervolume indicator: optimal μ-distributions and the choice of the reference point," in Proc. of ACM SIGEVO Workshop on Foundations of Genetic Algorithms, Orlando, FL, 2009, pp. 87-102.

[17] W. Rui, R. C. Purshouse, and P. J. Fleming, "Preference-inspired coevolutionary algorithms for many-objective optimization," Evolutionary Computation, IEEE Transactions on, vol. 17, pp. 474-494, 2013.

[18] J. R. Schott, "Fault tolerant design using single and multicriteria genetic algorithm optimization," MS Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge Massachusetts, 1995.

[19] C. Jariyatantiwait, and G.G. Yen, "Multiobjective differential evolution based on fuzzy performance feedback," International Journal of Swarm Intelligence Research (IJSIR), vol. 5, pp. 45-64, 2015.

[20] C. Jariyatantiwait and G. Yen, "5 by 5 Microstrip Antenna Array Design by Multiobjective Differential Evolution based on Fuzzy Performance Feedback,"

[21] E. Zitzler, K. Deb, and L. Thiele, "Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: empirical results," Evolutionary Computation, vol. 8, pp. 173-195, 2000.

[22] K. Deb, L. Thiele, M. Laumanns, and E. Zitzler, "Scalable multi-objective optimization test problems," Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation, 2002, pp. 825-830.

[23] C. A. C. Coello and N. C. Cort´es, "Solving multiobjective optimization problems using an artificial immune system," Genetic Programming and Evolvable Machines, vol. 6, pp. 163-190, 2005.

[24] Y. Wang, Z. Cai, and Q. Zhang, "Differential evolution with composite trial vector generation strategies and control parameters," IEEE Trans. on Evolutionary Computation, vol. 15, pp. 55-66, February 2011.

[25] ฉัตรแก้ว จริยตันติเวทย์ และพลกฤษณ์ จริยตันติเวทย์, แบบจำลองของเกณฑ์การหยุดทำงานของฟังชั่นดิฟเฟอเรนเชียลอิโวลูชันแบบหลายวัตถุประสงค์ โดยการป้อนกลับเมตริกสมรรถนะ, รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, 2562

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การวิเคราะห์ระดับความสุกของกล้วยหอมด้วยจมูกอิเล็กทรอนิกส์

Analyzing the Ripeness Level of Cavendish Bananas Using an Electronic Nose

กมลทิพย์ วัฒกีกำธร ธนะกิจ วัฒกีกำธร และ สมชาย เปาะทองคำ*

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถ.ประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800 somchai.po@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาจมูกอิเล็กทรอนิกส์เพื่อวิเคราะห์ระดับความสุกของกล้วยหอม 4 ระดับได้แก่ 1. กล้วยดิบ 2. กล้วยห่าม 3. กล้วยสุก 4. กล้วยงอม โดยการใช้เซนเซอร์วัดแก๊สจำนวน 8 ตัว เบอร์ MQ2 MQ3 MQ4 MQ5 MQ6 MQ7 MQ8 และ MQ9 ทำหน้าที่วัดแก๊สที่ปล่อยมาจากกล้วยหอมในกระบวนการสุกของกล้วย ใช้บอร์ด Arduino Mega 2560 เป็นบอร์ดอ่านข้อมูลและส่งค่าเข้าสู่คอมพิวเตอร์ และใช้ระบบปัญญาประดิษฐ์ โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network : ANN) เพอร์เซฟตรอนแบบหลายชั้น (Multi – Layer Perceptron : MPL) เพื่อวิเคราะห์ระดับการสุก จากการทดลองพบว่าระบบจมูกอิเล็กทรอนิกส์ที่พัฒนา สามารถวิเคราะห์ระดับความสุกของกล้วยหอม 4 ระดับได้ดี มีความถูกต้องที่ 81.5 % เมื่อเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ระดับสี

คำสำคัญ : จมูกอิเล็กทรอนิกส์; เซนเซอร์วัดแก๊ส; ปัญญาประดิษฐ์; โครงข่ายประสาทเทียม; กล้วยหอมทอง

Abstract

This research presents the development of an electronic nose (e-nose) system designed to classify the ripeness stages of Gros Michel bananas (Kluai Hom Thong) into four distinct categories: raw, under-ripe, ripe, and over-ripe. The system incorporates an array of eight gas sensors (MQ2, MQ3, MQ4, MQ5, MQ6, MQ7, MQ8 and MQ9) to detect volatile organic compounds (VOCs) emitted by the fruit. Data acquisition and processing are facilitated by an ESP32 microcontroller, which transmits sensor signals to a computer for further analysis. An Artificial Neural Network Multi – Layer Perceptron (ANN – MLP) model was implemented to perform classification based on the acquired gaseous profiles. The experimental results demonstrate that the developed electronic nose can classify the four levels of ripeness with an accuracy of 81.5% when validated against conventional color – based analysis.

Keywords: electronic nose; gas sensor; artificial intelligence; artificial neural network; cavendish banana

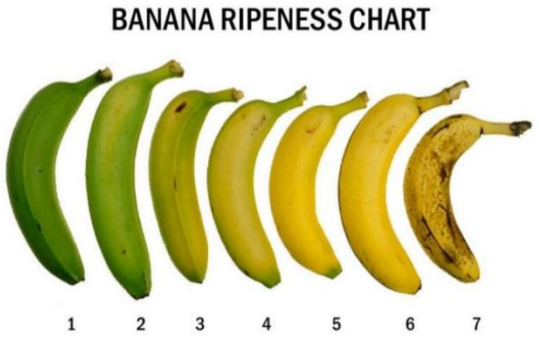
1. บทนำ

กล้วยหอมทองเป็นพืชเศรษฐกิจ เป็นสินค้าส่งออกและเป็นสินค้าที่ได้รับความนิยมภายในประเทศเป็นอย่างมาก ปกติเมื่อเป็นกล้วยดิบจะเป็นสีเขียวและเมื่อกล้วยสุกจะค่อยๆเปลี่ยนเป็นสีเหลือง การแบ่งระดับความสุกของกล้วยในปัจจุบันอาศัยการสังเกตุสีของเปลือกกล้วย โดยสามารถแบ่งได้ตามหลายมาตรฐาน เช่น มาตรฐานของ United Fruit [1][2] หรือดัดแปลงโดยกรมวิชาการเกษตร [3] จะแบ่งดัชนีเปลือก (Peel Color Index : PCI) ออกเป็น 7 ระดับ ตามระดับของสีเปลือกที่เปลี่ยนไป หรืออาจแบ่งระดับความสุกของกล้วยออกเป็น 4 ระดับ [3][4] ได้แก่ 1. กล้วยดิบ 2. กล้วยห่าม 3. กล้วยสุก 4.กล้วยงอม ด้วยเหตุนี้จึงมีงานวิจัยที่ตรวจสอบระดับการสุกของกล้วยโดยใช้การตรวจวัดสี [4][5] อย่างไรก็ดีกล้วยบางสายพันธุ์มีสีเปลี่ยนเป็นเหลืองค่อนข้างเร็วแม้ว่าเนื้อภายในยังแข็ง และยังอยู่ในระดับห่าม หรือบางสายพันธุ์สีของเปลือกยังคงเป็นสีเขียวแม้กล้วยจะอยู่ในระดับสุกแล้ว ดังนั้นอีกวิธีหนึ่งที่ถูกนำมาตรวจสอบความสุกของกล้วยคือปริมาณแก๊สที่กล้วยปล่อยออกมาในระดับความสุกต่างๆ ซึ่งวิธีที่คล้ายกันนี้ถูกนำมาใช้ในการทดสอบกับผลไม้ชนิดอื่นๆ [6] เช่นลูกพีชและแอปเปิล [7][8] เป็นต้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาจมูกอิเล็กทรอนิกส์สำหรับวิเคราะห์ระดับความสุกของกล้วยหอม โดยทำงานร่วมกับระบบปัญญาประดิษฐ์แบบโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อการวิเคราะห์ระดับความสุกของกล้วยหอม ซึ่งในการทดลองได้ทดลองกับกล้วยหอมทองซึ่งสีของเปลือกกับระดับการสุกจะสอดคล้องกัน

2. วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องและงานวิจัยที่พัฒนา

2.1 ระดับความสุกของกล้วยตามดัชนีเปลือก

ระดับความสุกของกล้วยตามดัชนีสีเปลือก หรือ PCI แบ่งออกเป็น 7 ระดับ เรียกระดับ PCI 1 ถึง PCI 7 ดังรูปที่ 1 [1][2]



รูปที่ 1 ดัชนีสีเปลือกตาม PCI 1 – PCI 7 [1]

ดัชนีเปลือก PCI ไล่ระดับสีเปลือกความสุกของกล้วยออกเป็น 7 ระดับ จากระดับ PCI 1 เมื่อกล้วยยังเป็นสีเขียวซึ่งบ่งชี้ว่ากล้วยยังดิบอยู่ และเมื่อกล้วยเข้าสู่ระยะห่าม PCI 2 สีเปลือกเริ่มเปลี่ยนไป เปลือกเริ่มมีสี

เหลืองเล็กน้อย และเมื่อสีเปลือกมีสีเหลืองเพิ่มขึ้นเข้าสู่ระดับ PCI 3 และ PCI 4 ในระดับนี้เนื้อกล้วยจะเริ่มนิ่ม และส่งกลิ่นออกมาเล็กน้อย จนเข้าสู่ระดับ PCI 5 และ PCI 6 ในระยะนี้กล้วยจะมีกลิ่นหอมชัดเจน และเนื้อกล้วยจะนิ่ม มีรสหวานพร้อมรับประทาน และเมื่อระยะการสุกเข้าสู่ระดับ PCI 7 คือระดับที่กล้วยสุกงอม ในระยะนี้เนื้อกล้วยจะนิ่มมากและมีรอยช้ำ ระยะนี้กล้วยจะส่งกลิ่นแรงมากเป็นเอกลักษณ์บ่งชี้กล้วยงอม เมื่อแบ่งดัชนีเปลือกเป็นระดับความสุก 4 ระดับ [3] สามารถแบ่งโดยรวมจากกล้วยที่มี PCI ตามรูปที่ 1 ดังนี้

- ระดับการสุกที่ 1 (M1) ได้แก่ กล้วย PCI 1 และ 2
- ระดับการสุกที่ 2 (M2) ได้แก่ กล้วย PCI 3 และ 4
- ระดับการสุกที่ 3 (M3) ได้แก่ กล้วย PCI 5 และ 6
- ระดับการสุกที่ 4 (M4) ได้แก่ กล้วย PCI 7

ในการทดลองจะเตรียมตัวอย่างและตรวจวัดกลิ่นกล้วยตามระดับการสุก 4 ระดับ M1 – M4 ตามการแบ่งดัชนีสีเปลือก P1 – P7 นี้

2.2 แก๊สที่เกิดขึ้นในกระบวนการสุกของกล้วย

ในกระบวนการสุกของกล้วย [2] สารประกอบสำคัญที่ถูกปล่อยออกมาคือ แก๊สเอทิลีน (Ethylene : C_2H_4) ซึ่งทำหน้าที่เป็นฮอร์โมนพืชในสถานะแก๊สที่กระตุ้นการสุก นอกจากนี้ยังมีสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) อื่นๆ ที่ให้กลิ่นเฉพาะตัว โดยแบ่งออกเป็นกลุ่มหลักคือ

1. แก๊สเอทิลีน กล้วยเป็นผลไม้ประเภท Climacteric ซึ่งจะมีการเพิ่มขึ้นของอัตราการหายใจและปริมาณเอทิลีนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเริ่มสุก เอทิลีนจะไปกระตุ้นเอนไซม์ให้เปลี่ยนแป้งเป็นน้ำตาล ทำให้กล้วยนิ่มลงและมีรสหวาน

2. สารประกอบเอสเทอร์ (Esters) เมื่อกล้วยสุกมากขึ้น จะมีการปล่อยสารระเหยที่ให้กลิ่นหอมหวานออกมา โดยสารที่โดดเด่นที่สุดคือ Isoamyl acetate ให้กลิ่นที่เป็นเอกลักษณ์ของกล้วยหอม และมีสาร Butyl acetate และ Ethyl butyrate ช่วยเพิ่มความซับซ้อนและกลิ่นที่เป็นเอกลักษณ์ของผลไม้แต่ละชนิด

3. สารกลุ่มอื่นๆ สารกลุ่มอื่น มีทั้งแอลกอฮอล์และฟีนอล เช่น Isoamyl alcohol ซึ่งปริมาณจะเพิ่มขึ้นตามระดับความสุก และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งเกิดจากการหายใจของเซลล์ (Cellular Respiration) โดย CO_2 จะมีปริมาณสูงขึ้นมากในช่วงที่กล้วยกำลังสุก

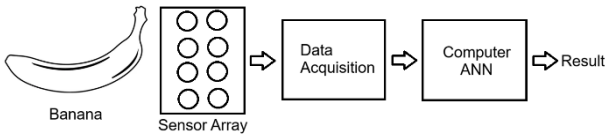
ดังนั้นจากระดับการสุกของกล้วย M1 – M4 ชนิดและปริมาณของแก๊สที่เกิดขึ้นการกระบวนการสุกของกล้วยจะมีความแตกต่างกัน ดังนั้นเราสามารถใช้เซนเซอร์วัดแก๊สในการวิเคราะห์ระดับการสุกของกล้วยได้

2.3 จมูกอิเล็กทรอนิกส์กับการวิเคราะห์การสุกของผลไม้

การนำจมูกอิเล็กทรอนิกส์มาใช้ในการวิเคราะห์อาหารถูกนำมาใช้ในการควบคุมคุณภาพของอาหารเช่นตรวจสอบการสุกของผลไม้ [6] โดยอาศัยกลไกกระบวนการสุกที่จะเกิดแก๊สต่างๆขึ้นมาซึ่งชนิดของแก๊สจะแตกต่างกันไปในผลไม้แต่ลชนิด เช่น แอปเปิล จะให้แก๊สหลักๆคือ เอทิลบิวทิเรต (Ethyl Butyrate) หรือกล้วยจะให้แก๊สเอทิลีน เป็นต้น ดังนั้นในงานวิจัยที่ใช้จมูกอิเล็กทรอนิกส์ จะใช้เซนเซอร์วัดแก๊สวัดปริมาณแกสที่เกิดขึ้น เช่น การตรวจการสุกของลูกพีช [7] ใช้แก๊สเซนเซอร์ 8 ตัว เบอร์ TGS-822, TGS-830, TGS-826, TGS-800, TGS-880, TGS-825, TGS-882, และ TGS-2611. วัดปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้น และใช้วิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักหรือ PCA (Principal Component Analysis) ในการวิเคราะห์ข้อมูล หรือ การตรวจการสุกของแอปเปิล [8] ใช้เซนเซอร์ 4 ตัว ร่วมกับวิธี PCA และการวิเคราะห์เพื่อนบ้านใกล้ที่สุด k ตัว หรือ KNN (K – Nearest Neighbors) ในการวิเคราะห์ข้อมูล ในงานนี้จึงได้พัฒนาจมูกอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการวิเคราะห์การสุกของกล้วยหอมโดยใช้แก๊สเซนเซอร์ 8 ตัว เบอร์ MQ2, MQ3, MQ4, MQ5, MQ6, MQ7, MQ8 และ MQ9 ร่วมกับวิธี ANN ซึ่งเป็นการนำวิธีปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้ ในงานนี้ไม่ได้วัดและรายงานค่าความเข้มข้นของแก๊สแต่เป็นการวิเคราะห์รูปแบบสัญญาณที่ได้จากการตอบสนองของแก๊สที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสุกจึงไม่มีการสอบเทียบค่าเซนเซอร์

2.4 งานวิจัยที่พัฒนา

จากรูปที่ 2 เป็นไดอะแกรมแสดงการทำงานของระบบจมูกอิเล็กทรอนิกส์สำหรับตรวจวัดระดับความสุกของกล้วยหอมที่พัฒนา เมื่อกล้วยสุกจะปล่อยกลิ่นออกมา เซนเซอร์อาเรย์ (Sensor Array) จะสามารถวัดกลิ่นที่เกิดขึ้นได้ เมื่อระดับความสุกแตกต่างกันสารเคมีที่เกิดขึ้นจะมีชนิดและปริมาณที่แตกต่างกันไปด้วย ด้วยเหตุนี้รูปแบบของสัญญาณที่ได้จะแตกต่างกันตามระดับความสุก ส่วนของวงจรอ่านสัญญาณ (Data Acquisition) ทำหน้าที่วัดระดับแรงดันตอบสนองของเซนเซอร์แต่ละตัวส่งเข้าคอมพิวเตอร์ ในส่วนของคอมพิวเตอร์ได้พัฒนาโปรแกรมที่ใช้ ANN – MPL เป็นตัววิเคราะห์และบ่งชี้ระดับความสุก โดยแบ่งระดับออกเป็น 4 ระดับคือ (M1) กล้วยดิบ, (M2) กล้วยห่าม, (M3) กล้วยสุก และ (M4) กล้วยงอม



รูปที่ 2 ไดอะแกรมของจมูกอิเล็กทรอนิกส์สำหรับตรวจวัดระดับความสุกของกล้วยหอม

3. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย

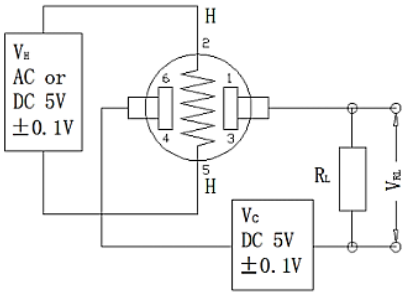
3.1 แก๊สเซนเซอร์

เนื่องจากแก๊สที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลามีชนิดและปริมาณที่ไม่เหมือนกันในงานเลยใช้เซนเซอร์หลายชนิดเพื่อก่อให้เกิดรูปแบบที่หลากหลาย ในงานนี้ใช้แก๊สเซนเซอร์ 8 ตัว เบอร์ MQ2, MQ3, MQ4, MQ5, MQ6, MQ7, MQ8 และ MQ9 ซึ่งประกอบอยู่บนบอร์ดเซนเซอร์โมดูล ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แก๊สเซนเซอร์ที่ใช้

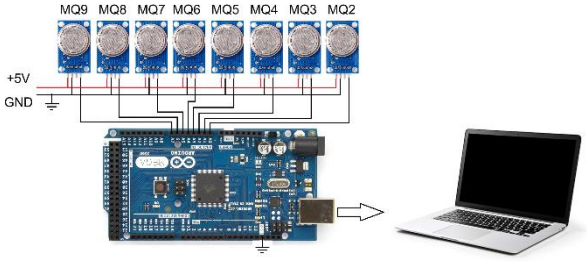
เซนเซอร์วัดแก๊สที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเซนเซอร์ชนิดสารกึ่งตัวนำประเภทออกไซด์โลหะ (Metal Oxide Semiconductor) ส่วนใหญ่ใช้ออกไซด์ดีบุก (Tin Dioxide: SnO_2) ลักษณะวงจรต่อใช้งาน แสดงดังรูปที่ 4 [9] ค่าความต้านทานของเซนเซอร์มีค่าสูงในสภาวะอากาศที่ปกติ โดยที่ออกซิเจนในอากาศจะเข้าไปเกาะที่ผิวของสาร SnO_2 และดึงอิเล็กตรอนอิสระจากภายในสารกึ่งตัวนำออกมา กลายเป็นไอออนของออกซิเจน O – หรือ O_2 – ทำให้เกิดชั้นต้านทานที่ผิวหน้า ผลคือ ค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistance) จะสูงมาก และกระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้น้อย เมื่อเจอแก๊สเป้าหมายเช่น CO, CH_4 และ LPG เข้ามาสัมผัส โมเลกุลของแก๊สเหล่านี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับไอออนของออกซิเจนที่เกาะอยู่ และปลดปล่อยอิเล็กตรอนกลับคืนสู่สาร SnO_2 เมื่ออิเล็กตรอนกลับคืนมา ค่าความต้านทานไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็ว วงจรจะตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า (Voltage Drop) ค่าแรงดันตกคร่อม RL จะเพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นของแก๊ส



รูปที่ 4 วงจรพื้นฐานของแก๊สเซนเซอร์ [9]

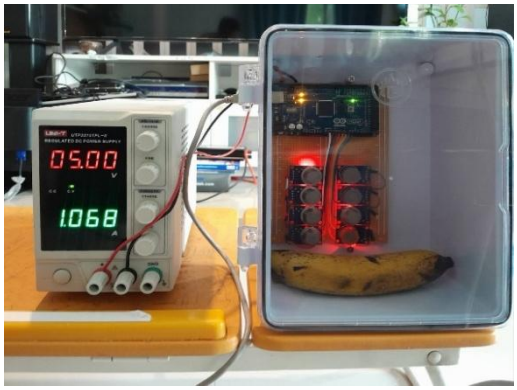
3.2 บอร์ด Arduino Mega 2560

ในส่วนของส่วนของวงจรอ่านสัญญาณในงานนี้ใช้บอร์ด Arduino Mega 2560 มีขา Analog Input ถึง 16 ช่อง จึงสามารถต่อเซนเซอร์พร้อมกันได้หลายตัวเพื่อตรวจจับแก๊สหลายชนิด ซึ่งในงานนี้ใช้ Analog Input 8 ช่อง คือช่อง A0 – A7 โดยต่อเข้ากับเซนเซอร์เบอร์ MQ2, MQ3, MQ4, MQ5, MQ6, MQ7, MQ8 และ MQ9 ตามลำดับ ดังรูปที่ 5 และกำหนดให้อ่านค่าเพื่อเข้าบันทึกผลทุกๆ 1 วินาที



รูปที่ 5 วงจรจมูกอิเล็กทรอนิกส์สำหรับตรวจวัดระดับความสุกของกล้วยหอม

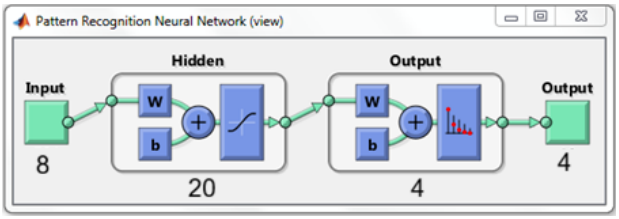
ส่วนของแหล่งจ่ายไฟให้กับวงจรเซนเซอร์ใช้แหล่งจ่ายไฟปรับแรงดัน DC 5V ให้กับวงจร ลักษณะของตัวเครื่องสำเร็จแสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 จมูกอิเล็กทรอนิกส์สำหรับตรวจวัดระดับความสุกของกล้วยหอม

3.3 โครงข่ายประสาทเทียมแบบ MLP

ในงานวิจัยนี้ใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบเพอร์เซปตรอนหลายชั้น หรือ MLP คือโครงสร้างพื้นฐานของ ANN แบบส่งต่อ (Feedforward) โดยมีหลักการเลียนแบบการทำงานของเซลล์ประสาทในสมองมนุษย์ โครงสร้างแสดงดังรูปที่ 7 ประกอบด้วย 3 ชั้นหลักคือ ชั้นรับข้อมูล (Input Layer), ชั้นซ่อน (Hidden Layer) และชั้นส่งออกข้อมูล (Output Layer) การทดลองกำหนดชั้นรับข้อมูล 8 ข้อมูลต่อ 1 อินพุต และกำหนดชั้นซ่อนจำนวน 20 ชั้น แต่ละชั้นใช้ฟังก์ชันปรับค่า (Activation) แบบซิกมอยด์ (Sigmoid Function) และกำหนดชั้นส่งออกข้อมูลเป็น 4 activation outputs โดยใช้ฟังก์ชั่น Softmax เพื่อบ่งชี้น้ำหนักความน่าจะเป็นสำหรับทำนายผล ระดับความสุก 4 ระดับ ในการทดสอบนี้ใช้โปรแกรม MATLAB ทั้งบักทึกข้อมูลและวิเคราะห์ระดับความสุก



รูปที่ 7 โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในการทดลอง

3.4 การทดลอง

ในการทดลองได้ควบคุมอุณหภูมิที่ 25°C ± 1°C และความชื้นสัมพัทธ์ที่ 40% – 60% RH การทดลองได้ทำการสร้างชุดข้อมูลขึ้นมาสำหรับสอนให้กับระบบ และทดสอบประสิทธิภาพในการทำงาน โดยใช้กล้วยหอมจำนวน 20 ผล เก็บค่าผล 4 ช่วงคือตอนผลดิบ 200 ครั้ง ช่วงห่าม 200 ครั้ง ช่วงสุก 200 ครั้ง และช่วงงอม 200 ครั้ง ในการเก็บข้อมูลแต่ละครั้งใช้เวลาในการรอ 5 นาที และเก็บข้อมูลนาน 50 วินาที รูปที่ 6 เป็นรูปขณะเก็บค่าข้อมูล วิธีการเก็บข้อมูลมีดังนี้

1. เปิดฝากล่อง นำกล้วยดิบไปวาง รอเวลา 5 นาที

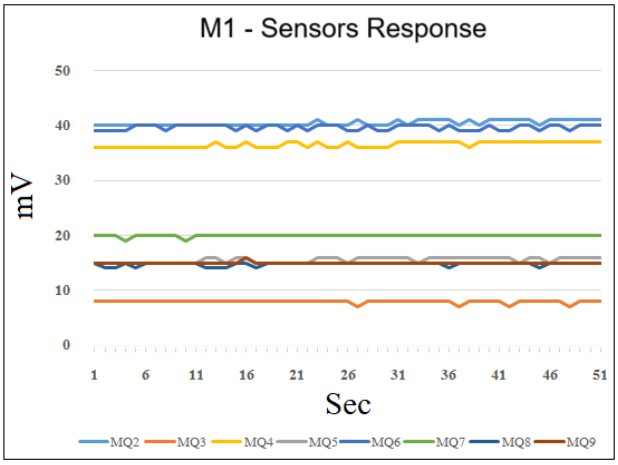
2. เก็บผลครั้งที่ 1 นาน 50 วินาที และเก็บผลครั้งถัดไปนานครั้งละ 50 วินาที จนครบ 5 ครั้ง
3. เปลี่ยนกล้วยดิบเป็นผลถัดไปและบันทึกผลลักษณะเดียวกันจนครบ 20 ผล รวมผลข้อมูลผลดิบได้ 100 ข้อมูล
4. รอผลเข้าสู่ระดับห่าม และบันทึกผลเช่นเดียวกันรวมผลข้อมูลผลห่ามได้ 100 ข้อมูล
5. รอผลเข้าสู่ระดับสุก และบันทึกผลเช่นเดียวกันรวมผลข้อมูลผลสุกได้ 100 ข้อมูล
6. รอผลเข้าสู่ระดับงอม และบันทึกผลเช่นเดียวกันรวมผลข้อมูลผลงอมได้ 100 ข้อมูล
7. รวมชุดข้อมูลทั้งหมด 400 ชุดข้อมูล

จากชุดข้อมูลทั้งหมด 400 ชุดดึงค่าสูงสุดของค่าที่อ่านได้จากเซนเซอร์แต่ละตัวเป็นค่า อินพุต ดังนั้นใน 1 ชุดข้อมูลจะมีตัวแทนข้อมูลเป็นอินพุต 8 ค่าจาก 8 เซนเซอร์ และแบ่งข้อมูลแบบสุ่มออกมา 50 % เป็นข้อมูลชุดฝึกอบรม และข้อมูลอีก 50 % มาทำการทดสอบและการทำนายผล จากนั้นทำการฝึกอบรมโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อสร้างโมเดลการจดจำ เมื่อฝึกอบรมเสร็จ ก็ทดสอบกับชุดข้อมูลชุดทดสอบเพื่อทำนายผลและคำณวนหาค่าความถูกต้องเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบที่พัฒนา

4. ผลการทดลอง

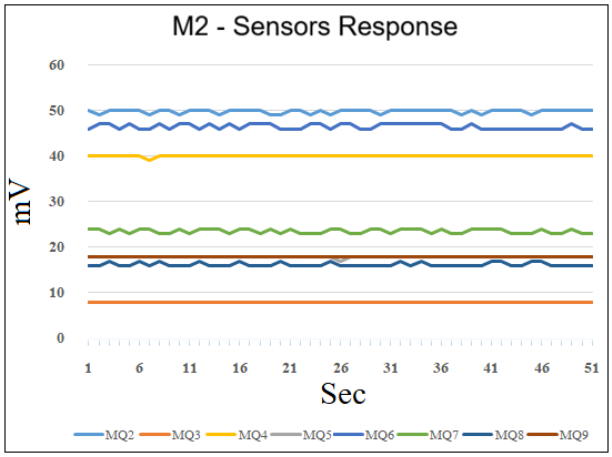
4.1 ผลการวัดกล้วยแต่ละระดับความสุก

จากการใช้งานเซนเซอร์ทั้ง 8 ตัว ในการวัดกลิ่นของกล้วยที่ความสุกแต่ละระดับผลการตอบสนองของเซนเซอร์แต่ละตัวของกล้วยแต่ระดับความสุกจะไม่เท่ากัน โดยกล้วยดิบ (M1) แทบจะไม่มีกลิ่น ดังนั้นกล้วยดิบสัญญาณตอบสนองของเซนเซอร์จะต่ำมาก ลักษณะสัญญาณแสดงดังรูปที่ 8 จากรูปความสูงของสัญญาณจากเซนเซอร์ 1 (MQ2) มีค่าประมาณ 40 mV เซนเซอร์ 5 (MQ6) มีค่าประมาณ 39 mV และเซนเซอร์ 3 (MQ4) มีค่าประมาณ 36 mV ส่วนเซนเซอร์อื่นๆมีค่าต่ำกว่า 20 mV



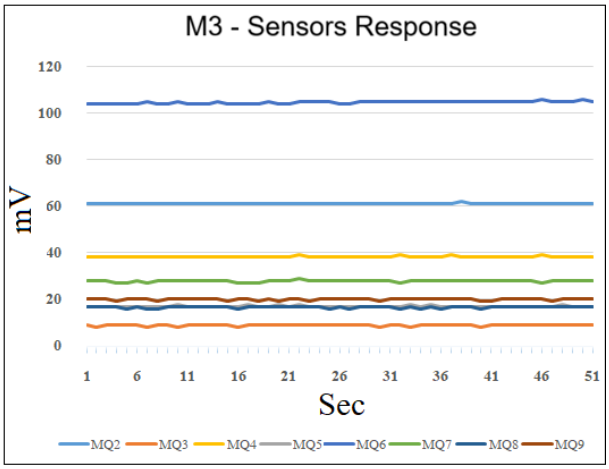
รูปที่ 8 การตอบสนองของเซนเซอร์แต่ละตัวเมื่อวัดกล้วยดิบ

ในระดับความสุกระยะ 2 ของกล้วย หรือระยะกล้วยห่าม (M2) เมื่อนำไปทดสอบกลิ่น สัญญาณตอบสนองแสดงดังรูปที่ 9 เนื่องจากกล้วยห่ามมีสองระยะ (PCI3 – PCI4) ดังนั้นในช่วงแรกกล้วยจะมีกลิ่นอ่อนๆ สัญญาณตอบสนองของเซนเซอร์จะต่ำมาก และเมื่อเปลือกกล้วยเริ่มเข้าสู่ระยะสีเหลืองชัดเจน (PCI4) กลิ่นจึ่งเริ่มชัดเจนขึ้นมา ลักษณะสัญญาณในรูปที่ 9 แสดงความสูงของสัญญาณจากเซนเซอร์ 1 (MQ2) มีค่าประมาณ 50 mV เซนเซอร์ 5 (MQ6) มีค่าประมาณ 48 mV และเซนเซอร์ 3 (MQ4) มีค่าประมาณ 40 mV ส่วนเซนเซอร์อื่นๆมีค่าต่ำกว่า 25 mV



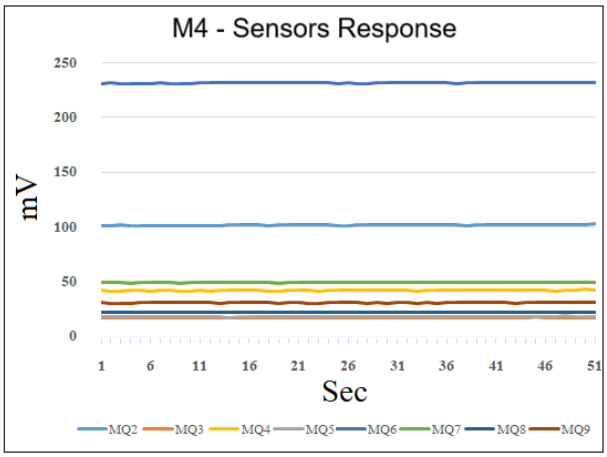
รูปที่ 9 การตอบสนองของเซนเซอร์แต่ละตัวเมื่อวัดกล้วยห่าม

ในระดับความสุกระยะ 3 ของกล้วย หรือระยะกล้วยสุก (M3) สีเปลือกของกล้วยมีสีเหลืองทั้งผล และกล้วยมีกลิ่นหอมของกล้วยหอมชัดเจน เมื่อนำไปทดสอบกลิ่นสัญญาณตอบสนองแสดงดังรูปที่ 10 ความสูงของสัญญาณจากเซนเซอร์ 1 (MQ2) มีค่าประมาณ 105 mV เซนเซอร์ 5 (MQ6) มีค่าประมาณ 60 mV และเซนเซอร์ 3 (MQ4) มีค่าประมาณ 40 mV ส่วนเซนเซอร์อื่นๆมีค่าต่ำกว่า 25 mV



รูปที่ 10 การตอบสนองของเซนเซอร์แต่ละตัวเมื่อวัดกล้วยสุก

เมื่อกล้วยเข้าสู่ระยะงอมสีเปลือกเริ่มมีจุดสีดำ และกลิ่นของกล้วยจะแรงมากและลักษณะกลิ่นจะเปลี่ยนแปลงไป คือมีกลิ่นเปรี้ยวเพิ่มขึ้นมา เมื่อนำไปทดสอบกลิ่นสัญญาณตอบสนองแสดงดังรูปที่ 11 ความสูงของสัญญาณจากเซนเซอร์ 1 (MQ2) มีค่าประมาณ 230 mV เซนเซอร์ 5 (MQ6) มีค่าประมาณ 100 mV และเซนเซอร์ 3 (MQ4) มีค่าประมาณ 40 mV และมีการตอบสนองของเซนเซอร์ 4 (MQ5) เพิ่มขึ้นมาที่ประมาณ 50 mV ส่วนเซนเซอร์อื่นๆมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยแต่ค่าต่ำกว่า 25 mV

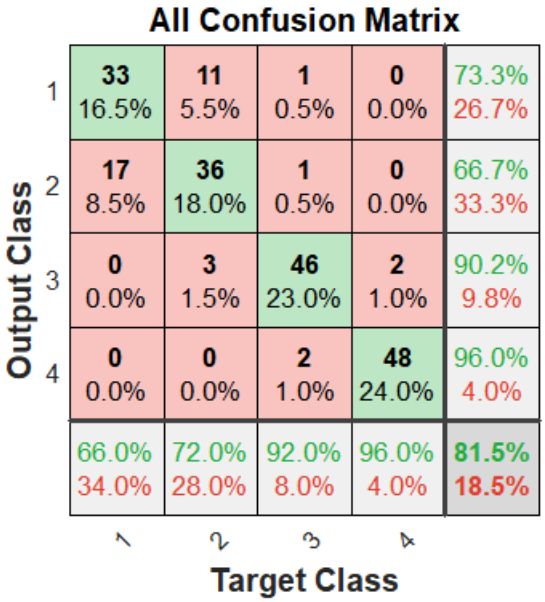


รูปที่ 11 การตอบสนองของเซนเซอร์แต่ละตัวเมื่อวัดกล้วยงอม

ผลการตอบสนองของสัญญาณทั้งหมดที่ได้จากระยะสุกที่แตกต่างกันมาทั้งขนาดและรูปแบบสัญญาณที่แตกต่างกัน โดยเมื่อกล้วยเริ่มมีการสุกจะมีแก๊สเกิดขึ้นจากกระบวนการสุกทำให้มีกลิ่นเกิดขึ้น เมื่อการสุกเพิ่มขึ้นแก๊สที่เกิดขึ้นก็แรงขึ้นดังนั้นเมื่อวัดกลิ่นสัญญาณตอบสนองก็เพิ่มขึ้น โดยเซนเซอร์ที่ตอบสนองต่อกลิ่นกล้วยหอมสุกที่มีความไวในการตอบสนองสูงสุดจะเป็นเซนเซอร์เบอร์ MQ6 และ MQ1 ส่วน MQ4 มีระดับสัญญาณเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย และเซนเซอร์เบอร์อื่นๆก็มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเช่นกัน

4.2 ผลการวัดค่าความสุกของกล้วยหอม

เมื่อทำการทดสอบการทำงานของระบบวิเคราะห์การสุกของกล้วยหอมที่พัฒนาขึ้น โดยทดสอบกับกล้วยหอม 20 ผลที่ทำการบันทึกกลิ่นทั้งหมด 400 ครั้ง แบ่งไปฝึกอบรมระบบ 200 ข้อมูล และทดสอบระบบ 200 ข้อมูล จากกระยะสุกทั้ง 4 ระยะ เมื่อใช้วิธีการโครงข่ายประสาทแบบ MLP ที่นำเสนอผลการทดสอบแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าประสิทธิภาพในการคัดแยกความสุกของกล้วยได้ค่อนข้างดี โดยค่าความถูกต้องในการคัดแยกอยู่ที่ 81.5% ดังแสดงในรูปที่ 12 อย่างไรก็ตามผลการคัดแยกก็ยังมีค่าความผิดพลาดอยู่บ้างเนื่องจากในระยะที่กล้วยยังคงดิบและห่ามกลิ่นค่อนข้างน้อยการตรวจวัดจึงมีโอกาสผิดพลาดได้ และระยะการสุกในแต่ละช่วงที่มีความก้ำกึ่งกันจึงส่งผลให้เกิดความผิดพลาดของผลการวิเคราะห์ และในการทดลองเปรียบเทียระยะการสุกกับสีของเปลือกกล้วย จึงมีความเป็นไปได้ที่กล้วยเข้าสู่ระยะสุกแล้วแต่สีเปลือกยังไม่เปลี่ยนเป็นสีเหลืองทั้งลูก เช่นสีเปลือกอยู่ในช่วง M2 แต่เนื้อภายในเข้าสู่ระยะ M3 แล้ว สาเหตุเหล่านี้จึงทำให้เกิดความผิดพลาดในการวิเคราะห์ได้



รูปที่ 12 ค่าความถูกต้องในการวิเคราะห์ระยะการสุกของกล้วยหอม

5. สรุปผลการทดลอง

ในการทดลองนี้ได้ทำการสร้างจมูกอิเล็กทรอนิกส์สำหรับวิเคราะห์การสุกของกล้วยหอม ในการทดลองค่าความถูกต้องของการวิเคราะห์ระดับความสุกของกล้วยหอม โดยใช้เซนเซอร์วัดแก๊ส 8 ตัว ร่วมกับบอร์ด Arduino Mega 2560 และใช้โปรแกรม MATLAB พัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์ โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม ANN แบบเพอร์เซปตรอนหลายชั้น ในการวิเคราะห์และทำนายผล ผลที่ได้พบว่าระบบที่พัฒนามีความถูกต้องในการแยกค่าความสุกของกล้วยที่ 81.5% เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการแบ่งระยะการสุกจากสีเปลือกกล้วย ผลที่ได้มีความถูกต้องในระดับที่น่าพึงพอใจ สาเหตุของความผิดพลาดในการวิเคราะห์เกิดจากระยะการสุกในแต่ละช่วงที่มีความก้ำกึ่งกันจึงทำให้มีการทำนายผลเป็นระยะสุกที่ใกล้เคียงกัน วิธีการวิเคราะห์ระยะการสุกจากกลิ่นนี้จึงเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถนำมาคัดแยกระยะการสุกของกล้วยห้อมได้

6. งานในอนาคต

ผลที่ได้จากการทดลองมีค่าความถูกต้อง 81.5 % สาเหตุส่วนหนึ่งอาจจะเกิดจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นขณะวัดด้วยเซนเซอร์เพื่อความแม่นยำในทำนายผล ในอนาคตผู้วิจัยจะทำการเพิ่มในส่วนของการลดสัญญาณรบกวน (Noise filtering) เช่น Moving Average, Kalman Filter เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพต่อไป

เอกสารอ้างอิง

[1] J.B. Golding, D. Shearer, S.G. Wyllie and W.B. McGlasson, “Application of 1-MCP and propylene to identify ethylene dependent ripening processes in mature banana fruit,” *Postharvest Biology and Technology*, vol. 14, no. 1, 1998. pp. 87-98.

[2] Thulasimani. K., "Studies on the effect of 1-methylcyclopropene (1-mcp) on shelf life and quality of banana," Thesis. Tamil Nadu Agricultural University., India., 2021.

[3] สายลม สัมพันธ์เวชโสภา, โครงการวิจัยการพัฒนาผลิตภัณฑ์กล้วย, 2559.

[4] โชคทวี แก้วบุตร, "การคัดแยกความสุกของกล้วยด้วยปัญญาประดิษฐ์," บทความ มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์, 2565.

[5] อรอุมา พร้าโมต และ จรรยา อันดับ, "การวิเคราะห์ระดับความสุกของกล้วยจากภาพถ่ายด้วยโมเดลสีอาร์จีบีและการเรียนรู้แบบมีผู้สอน," *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มทร. สุวรรณภูมิ*, ปีที่ 5, ฉบับพิเศษ, สิงหาคม 2564.

[6] M. Baietto and A.D. Wilson, "Electronic-Nose Applications for Fruit Identification, Ripeness and Quality Grading," in *Sensors*, vol. 2015, no.15, pp. 899-931. Jan. 2015.

[7] J. Brezmes, M.L.L. Fructuoso, E. Llobet, X. Vilanova, I. Recasens, J. Orts, G. Saiz and X. Correig, "Evaluation of an electronic nose to assess fruit ripeness," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 5, no. 1, pp. 97-108, Feb. 2005.

[8] M. Trebar, A. Žalik and R.Vidrih. "Assessment of 'Golden Delicious' Apples Using an Electronic Nose and Machine Learning to Determine Ripening Stages," in *Foods* vol. 2024, no. 13, pp. 1-24. 2024.

[9] "Flammable Gas Sensor (Model: MQ－6) Manual" 2015 [Online]. Available: https://www.winsen-sensor.com/d/files/semiconductor/mq-6.pdf [Accessed: Jul. 11, 2026].

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

อุปกรณ์ตรวจกระแสไฟฟ้ารั่วระยะไกลในแหล่งน้ำ

Remote Electrical Leakage Detection System for Water Bodies

คชพงศ์ สุมานนท์ [1*] พลกฤษณ์ จริยตันติเวทย์[1] ฉัตรแก้ว จริยตันติเวทย์[1] อานนท์ สิงห์เสถียร[2] และ เวทรินทร์ ธัญสิประเสริฐ[2]

[1]อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ฯ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร E-mail: kotchapong.s@rmutp.ac.th

[2]อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร E-mail:

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนออุปกรณ์เครื่องตรวจกระแสไฟฟ้ารั่วระยะไกลในแหล่งน้ำ ซึ่งมีคุณลักษณะดังนี้ อุปกรณ์เครื่องตรวจที่นำเสนอสามารถวัดกระแสไฟฟ้ารั่วไหลได้เต็มพิกัดประมาณ 20 A ด้วยเซนเซอร์ ACS712 กับ Arduino nano ในขณะเดียวกันก็สามารถค้นหาพิกัดตำแหน่งไฟฟ้ารั่วในน้ำด้วยโมดูล GPS GY-NE06MV2 ทำงานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล ESP32 เพื่อส่งข้อมูลผ่านแอปพลิเคชั่นเทเลแกรม โดยอุปกรณ์ชนิดนี้มีค่าความผิดพลาดสมบูรณ์ของกระแสไฟฟ้ารั่วที่ระดับน้ำลึกต่างกัน 3 ระดับ มีค่า 0.161A 0.228 A และ0.308A พร้อมทั้งมีการเปรียบเทียบพิกัดตำแหน่งของ 4 สถานที่ ด้วยแอปพิเคชันเทเลแกรม เทียบกับแอปพลิเคชันค้นหาตำแหน่งที่มาตรฐานซึ่งค่าความผิดพลาดสมบูรณ์ของพิกัดจากแอปทั้ง 2 มีมุมละติจูดและลองจิจูดทั้ง 4 สถานที่ มีค่าน้อยกว่า 120×10^{-6} องศา ตามลำดับ

คำสำคัญ: กระแสไฟฟ้ารั่ว ESP32 และโมดูลGPS

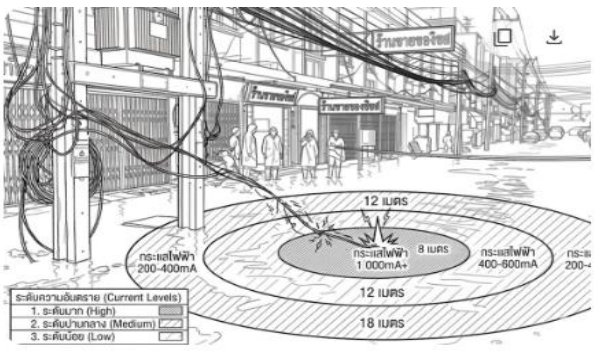
Abstract

This paper presents a remote electrical leakage detection system designed for water body applications. The proposed system employs an ACS712 current sensor integrated with an Arduino Nano to measure leakage current with a full-scale capacity of approximately 20 A. Simultaneously, a GY-NEO6MV2 GPS module coupled with an ESP32 microcontroller is utilized to identify the precise coordinates of the leakage, with data transmitted via the Telegram application. Experimental results demonstrate the system's performance across three distinct water depths, yielding absolute leakage current errors of 0.161 A, 0.228 A, and 0.308 A, respectively. Furthermore, a comparative analysis of coordinate positioning was conducted between the Telegram-based system and a standard commercial mapping application across four test sites. The results indicate that the absolute coordinate error in both latitude and longitude for all sites is less than 120×10^{-6} degrees, validating the system's accuracy and reliability for real-world environmental monitoring.

Keywords: Electrical leakage, ESP32, GPS module

1. บทนำ

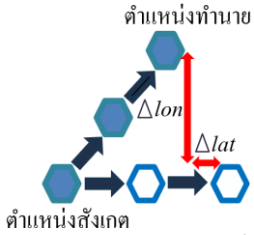
ในอดีตที่ผ่านมาประเทศไทยมีพื้นที่ราบลุ่มและเป็นแอ่งกระทะเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งในปีพ.ศ 2544 ได้มีเหตุการณ์น้ำท่วมในพื้นที่ต่างๆของภาคกลางจึงทำให้เกิดอุทกภัย อีกทั้งยังก่อให้เกิดไฟฟ้ารั่วไหลลงสู่น้ำที่ท่วมและมีปริมาณมากขึ้น นั่นจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ก่อเกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต โดยมนุษย์และสัตว์ที่เข้าไปอยู่ใกล้บริเวณน้ำท่วมนั้นอาจจะทำให้เสียชีวิตได้ ซึ่งปริมาณความเข้มของกระแสไฟฟ้าที่อยู่ใกล้กับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่รั่วไหลจะถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 1 โดยส่วนใหญ่การเกิดอุทกภัยหรือไฟฟ้ารั่วลงในน้ำท่วมนั้น บุคคลที่ได้รับผลกระทบโดยตรงจากระยะห่างที่แตกต่างกันจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ารั่วลงบริเวณพื้นที่น้ำสามารถพิจารณาค่ากระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อร่างกายมนุษย์ใน[1] ซึ่งไม่ได้รับความช่วยเหลือจากเจ้าหน้าที่ได้ทันท่วงที อาจจะทำให้เกิดการสูญเสียได้ โดยอุปกรณ์ที่ตรวจกระแสไฟฟ้ารั่วในแหล่งน้ำรุ่นแรกได้มีผู้คิดค้นใน [2] ซึ่งมีข้อด้อย คือ ไม่แสดงปริมาณกระแสไฟฟ้ารั่ว และไม่มีการค้นหาตำแหน่งไฟฟ้ารั่ว ในการเกิดปัญหาดังกล่าว ดังนั้นในบทความนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำเสนออุปกรณ์ตรวจกระแสไฟฟ้ารั่วระยะไกลในแหล่งน้ำเพื่อจะใช้เป็นอุปกรณ์สำหรับหาตำแหน่งบุคคลที่ได้รับบาดเจ็บ ซึ่งคุณลักษณะข้อดีของอุปกรณ์ที่นำเสนอ คือ สามารถค้นหาตำแหน่งผู้ป่วยได้ด้วยโมดูลเซนเซอร์ GPS GY-NE06MV2 เป็นโมดูล GPS [4] ที่ทำงานร่วมกับESP32 อีกทั้งอุปกรณ์ชนิดนี้มีมีสมรรถนะในการวัดปริมาณกระแสไฟฟ้าได้สูงสุดประมาณ 20Aโดยใช้โมดูล ACS712 ทำงานร่วมกับอาร์ดูโน่ นาโน ตามลำดับ พร้อมทั้งในหัวข้อต่อไป จะได้อธิบายทฤษฎีที่เกี่ยวข้องไว้ในหัวข้อที่ 2. และผลการทดลองของอุปกรณ์ตรวจกระแสไฟฟ้ารั่วระยะไกลในแหล่งน้ำ ในหัวข้อที่ 3. พร้อมทั้งสรุปในหัวข้อที่ 4. ตามลำดับ



รูปที่ 1 ความแตกต่างของปริมาณกระแสไฟฟ้าที่รั่วในน้ำ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

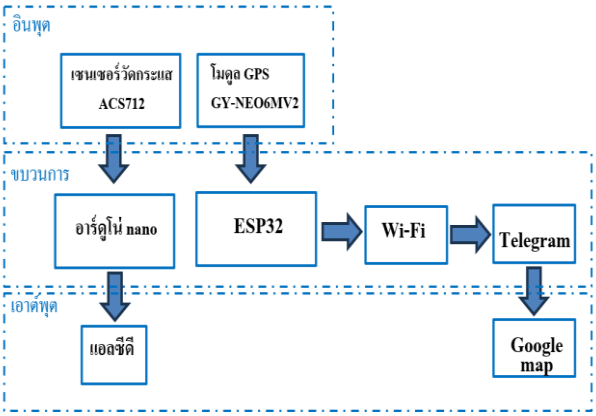
2.1) การเปลี่ยนแปลงละติจูดและลองจิจูดมีผลกับตำแหน่งของ GPS



รูปที่ 2 ความผิดพลาดละติจูดและลองจิจูดสัมพันธ์กับตำแหน่งทั้ง 2 [4]

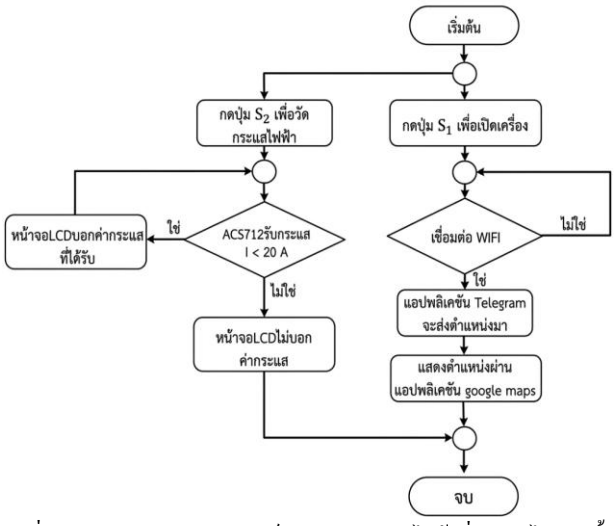
จากรูปที่ 2 ค่าความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งสังเกต(จุดเริ่มต้น) กับตำแหน่งทำนาย(จุดปลายทาง) มีการเบี่ยงเบนไม่เป็นไปตำแหน่งที่ต้องการ เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของละติจูด (Δlat) และลองจิจูด (Δlon) โดยใน [4] ได้อธิบายการหาค่าความผิดพลาดตำแหน่งทำนายด้วยวิธีเชิงตัวเลข และวิธีปัญญาประดิษฐ์ มาประยุกต์ใช้กับการเคลื่อนที่ของทุ่นลอยในทะเล

2.2) หลักการทำงานอุปกรณ์ตรวจกระแสไฟฟ้ารั่วระยะไกลในแหล่งน้ำ



รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมอุปกรณ์ตรวจกระแสไฟฟ้ารั่วระยะไกลในแหล่งน้ำ

ในรูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมสำหรับอุปกรณ์ตรวจกระแสไฟฟ้ารั่วระยะไกลในแหล่งน้ำโดยมีส่วนประกอบที่สำคัญทั้งหมด 6 ส่วนดังนี้คือ 1.) เซนเซอร์วัดกระแส ACS 712 2.) อาร์ดูโน่ nano 3.) แอลซีดี 4.) โมดูลGPS GY-NEO6MV2 5.) ESP32 6.) WiFi 7.) แอปพลิเคชันเทเลแกรม(Telegram) 8.) Google map ตามลำดับ โดยเริ่มจากการใช้อุปกรณ์ตรวจกระแสไฟฟ้ารั่วที่นำเสนอ ซึ่งเซนเซอร์วัดกระแส ACS712 มีหน้าที่วัดปริมาณกระแสไฟฟ้าด้วยหลักการ Hall-effect เปลี่ยนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไปเป็นแรงดันไฟฟ้า โดยสัญญาณนี้จะถูกส่งค่าไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลอาร์ดูโน่ นาโน มีไว้สำหรับประมวลผลสัญญาณเพื่อส่งค่าแสดงสถานะไฟรั่วไปยังหน้าจอแอลซีดี และแสดงค่าไฟรั่วดังกล่าว ในขณะเดียวกันเซนเซอร์ GPS GY-NE06MV2 ทำหน้าที่ค้นหาตำแหน่งที่ตั้งของสถานที่ เกิดไฟรั่วที่พิกัดตำแหน่งของละติจูดและลองจิจูดในสถานที่นั้นๆ โดยค่าตำแหน่งนี้จะถูกประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล ESP32 และสัญญาณจะถูกส่งค่าผ่าน Wi-Fi ไปยังแอปพลิเคชันเทเลแกรมที่อยู่ในมือถือของเจ้าหน้าที่สถานีแจ้งเตือนภัย จะได้ค้นหาตำแหน่งของพื้นที่อันตรายที่เกิดไฟฟ้ารั่วได้



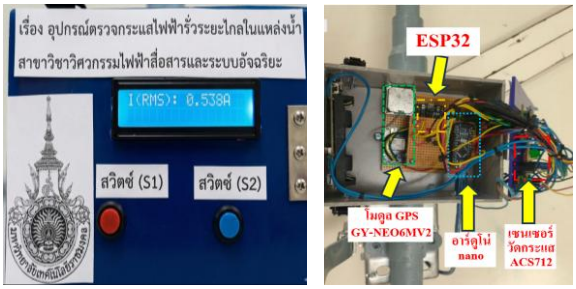
รูปที่ 4 ผังการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้ารั่วระยะไกลในน้ำ

จากรูปที่ 4 แผนผังการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้ารั่วไหลที่นำเสนอ ซึ่งการทำงานเริ่มจากการเลือกกดปุ่มสวิตช์ S_1 และสวิตช์ S_2 เมื่อปุ่มทั้งสองทำงานพร้อมกัน โดยการกดปุ่ม S1 จะทำการเชื่อมต่อสัญญาณ Wi-Fi สำหรับติดต่อกับแอปพลิเคชั่นเทเลแกรม (Telegram) ที่อยู่ในมือถือชนิด IOS เพื่อค้นหาพิกัดตำแหน่งของสถานที่เกิดไฟฟ้ารั่วไหล ซึ่งการหาตำแหน่งสถานที่ไฟฟ้ารั่วนี้จะถูกแสดงในรูปแบบพิกัดค่าละติจูดและค่าลองจิจูด อีกทั้งเมื่อกดสวิตช์ S_2 จะทำให้อุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้ารั่วนี้สามารถวัดค่าปริมาณกระแสไฟฟ้าในน้ำได้ ในกรณีที่ปริมาณกระแสไฟฟ้าน้อยกว่า 20 A ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้าต่างๆที่วัดได้จะถูกแสดงผ่านหน้าจอ LCD แต่ในทางกลับกันถ้ากระแสไฟฟ้ามากกว่า 20 A หน้าจอ LCD ก็จะไม่แสดงสถานะ

2.3) ส่วนประกอบของอุปกรณ์ตรวจกระแสไฟฟ้ารั่วที่นำเสนอ

ในรูปที่ 5 (ก) ด้านหน้าของอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้ารั่วที่นำเสนอมีหน้าจอแอลซีดี ปุ่มกดสวิตช์ S_1 (เป็นปุ่มสำหรับโหมดการค้นหาตำแหน่งสถานที่เกิดไฟฟ้ารั่ว) และปุ่มสวิตช์ S2 (เป็นปุ่มสำหรับโหมดการวัดกระแสไฟฟ้ารั่วในแหล่งน้ำ) ส่วนรูปที่ 5 (ข) ส่วนประกอบภายในกล่องควบคุมของอุปกรณ์นี้ จะประกอบไปด้วย 4 ส่วนหลักๆ คือ 1.) โมดูล

GPS GY-NE06MV2 2.) ESP32 3.) อาร์ดูโน่ nano และ 4.) เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า ACS712 ตามลำดับ



(ก) ด้านหน้า (ข) ภายในกล่องควบคุม

รูปที่ 5 อุปกรณ์ตรวจกระแสไฟฟ้ารั่วระยะไกลในแหล่งน้ำที่ใช้จริง



รูปที่ 6 จำลองการใช้อุปกรณ์ตรวจกระแสไฟฟ้ารั่วที่นำเสนอ

จากรูปที่ 6 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้ 1.) ภาชนะผ้าใบขนาด 120x90x36 cm^3 2.) อุปกรณ์ตรวจกระแสไฟฟ้ารั่วที่นำเสนอ 3.) ดิจิทัล รุ่น Aneng ST180 4.) หม้อแปลง 220 Vac/18 Vac 5.) โพรบวัดกระแส

3. ผลการทดลอง

3.1 การทดลองวัดกระแสไฟฟ้ารั่วในน้ำที่ถูกจำลองไฟฟ้ารั่วในภาชนะผ้าใบ

ตามรูปที่ 6 ที่ระดับต่างกัน ความลึก 4 นิ้ว 5นิ้ว และ 6 นิ้ว ได้ถูกบันทึกผลการทดลองจำนวน 3 ครั้งลงในตารางที่ 1 ตารางที่ 2 และตารางที่ 3

ตารางที่ 1 การทดลองในภาชนะผ้าใบที่ระดับความลึก 4 นิ้ว

ครั้งที่	กระแสที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจกระแสไฟฟ้ารั่ว (A)	กระแสที่วัดได้จากมิเตอร์ (A)	ค่าความผิดพลาดสมบูรณ์ของกระแสไฟฟ้า AC (A)
1	0.597	0.56	0.037
2	0.664	0.37	0.294
3	0.603	0.45	0.153
ค่าเฉลี่ย	0.621	0.46	0.161

ตารางที่ 2 การทดลองในภาชนะผ้าใบที่ระดับความลึก 5 นิ้ว

ครั้งที่	กระแสที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจกระแสไฟฟ้ารั่ว (A)	กระแสที่วัดได้จากมิเตอร์ (A)	ค่าความผิดพลาดสมบูรณ์ของกระแสไฟฟ้า AC (A)
1	0.538	0.33	0.208
2	0.492	0.29	0.202
3	0.496	0.33	0.166
ค่าเฉลี่ย	0.508	0.32	0.192

ตารางที่ 3 การทดลองในภาชนะผ้าใบที่ระดับความลึก 6 นิ้ว

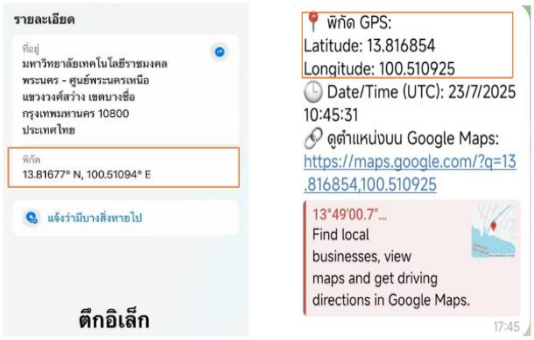
ครั้งที่	กระแสที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจกระแสไฟฟ้ารั่ว (A)	กระแสที่วัดได้จากมิเตอร์ (A)	ค่าความผิดพลาดสมบูรณ์ของกระแสไฟฟ้า AC (A)
1	0.521	0.25	0.271
2	0.437	0.10	0.337
3	0.487	0.17	0.317
ค่าเฉลี่ย	0.481	0.173	0.308

จากการทดลองในแต่ละครั้งที่ถูกนำมาคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้ารั่วเฉลี่ยที่ได้จากอุปกรณ์ที่นำเสนอในตารางที่ 2 มีค่าประมาณ 0.621 A ค่ากระแสไฟฟ้ารั่วเฉลี่ยในตารางที่ 3 มีค่าประมาณ 0.508 A และค่ากระแสไฟฟ้ารั่วเฉลี่ยในตารางที่ 4 มีค่าประมาณ 0.481 A อีกทั้งในส่วนของเครื่องมือวัดมาตรฐาน (รุ่น Aneng ST180) ได้มีการคำนวณหาค่ากระแสรั่วไฟฟ้าไหลเฉลี่ยของแต่ละตาราง คือ 0.46 A 0.28 A และ 0.17 A โดยมีค่าความผิดพลาดสมบูรณ์ของกระแสไฟฟ้า 0.161 0.228 และ 0.308 ตามลำดับ

3.2 การทดลองค้นหาตำแหน่งของโมดูล GPS (ที่ตำแหน่งไฟฟ้ารั่วไหล)

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงการค้นหาตำแหน่งพิกัดของโมดูล GPS ที่ติดตั้งกับอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้ารั่วที่นำเสนอ ซึ่งตำแหน่งที่เกิดปัญหาไฟฟ้ารั่วจะถูกจำลองทั้ง 4 สถานที่ในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร (ศูนย์พระนครเหนือ) คือ พิกัดที่ตำแหน่ง ตึกอิเล็กฯ ตึกคณะวิทย์ฯ ห้องสมุด และป้อมยาม(ทางด้านหน้ามหาวิทยาลัย) โดยตำแหน่งทั้ง 4 ตำแหน่งนี้ จะถูกแสดงผ่านแอปพลิเคชันเทเลแกรม พร้อม

ทั้งเปรียบเทียบกับ Apple Map ซึ่งค่าที่ได้นี้จะถูกนำมาคำนวณหาความผิดพลาดสมบูรณ์ของพิกัดสถานที่ต่างๆในรูปแบบละติจูด และลองจิจูด



(ก) (ข)

รูปที่ 7 (ก) พิกัดตึกอิเล็กฯจาก Apple Map
(ข) พิกัดตึกอิเล็กฯจากโมดูล GPS GY-NEO6MV2

จากรูปที่ 7 (ก) ได้แสดงพิกัดตึกอิเล็กทรอนิกส์ด้วย Apple Map มีค่าละติจูด 13.816854° N ลองจิจูด 100.51094° E และในรูปที่ 6(ข)โมดูล GPS GY-NEO6MV2 มีค่าละติจูด 13.816854° N ลองจิจูด 100.510925° E ที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 4 สถานที่ทำการทดลองสำหรับหาพิกัดตำแหน่งจากโมดูล GPS

สถานที่	ละติจูด ลองจิจูด จากตัวเซนเซอร์ GPS GY-NEO6MV2 (องศา)	ละติจูด ลองจิจูด จากApple Map (มาตรฐาน) (องศา)	ค่าความผิดพลาดสมบูรณ์ของแอปทั้ง 2 (องศา)
1.ตึกอิเล็กฯ	13.816854 N 100.510925 E	13.81677 N 100.51094 E	0.000084 N 0.000015 E
2.ตึกคณะวิทย์ฯ	13.817830 N 100.511757 E	13. 817810 N 100.51173 E	0.000020 N 0.000027 E
3.ห้องสมุด	13.818489 N 100.512939 E	13.81844 N 100.51288 E	0.000049 N 0.000059 E
4.ป้อมยาม	13.818491 N 100.513474 E	13.81861 N 100.51357 E	0.000119 N 0.000096 E

เมื่อพิจารณาพิกัดตำแหน่งของสถานที่ทั้ง 4 แห่ง ได้แก่ ตึกอิเล็กทรอนิกส์ ตึกคณะวิทยาศาสตร์ ห้องสมุด และป้อมยาม (มทร.ศูนย์พระนครเหนือ) ซึ่งผลการทดลองใช้แอปพลิเคชันเทเลแกรมในอุปกรณ์ที่นำเสนอ เปรียบเทียบกับแอปพลิเคชัน Apple Map ในมือถือ IOS จะถูกแสดงค่าข้อมูลเป็น พิกัดของละติจูดและลองจิจูด เป็นหน่วยองศา ดังแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งค่าความผิดพลาดสมบูรณ์ขององศาน้อยที่สุด: คือ ตึกคณะวิทย์ฯ ในส่วนของละติจูด (0.000020) และ ตึกอิเล็กฯ ในส่วนของลองจิจูด (0.000015) อีกทั้งค่าความผิดพลาดสมบูรณ์มากที่สุด: คือ ป้อมยาม ทั้งส่วนของละติจูด (0.000119) และลองจิจูด (0.000096) ซึ่งอาจเกิดจากปัจจัยทางสภาพแวดล้อมบริเวณนั้นที่อาจมีสิ่งกีดขวางสัญญาณ GPS

4. สรุป

โครงงานนี้ได้นำเสนออุปกรณ์ตรวจกระแสไฟฟ้ารั่วระยะไกลในแหล่งน้ำ ซึ่งอุปกรณ์ตรวจกระแสไฟฟ้ารั่วที่นำเสนอนี้มีคุณลักษณะในการวัดกระแสไฟฟ้า และสามารถค้นหาพิกัดตำแหน่งไฟฟ้ารั่วไหลในแหล่งน้ำได้ พร้อมทั้งเมื่อระดับความลึกน้ำมีค่า 3 ระดับ คือความลึกของน้ำที่ 4 นิ้ว 5 นิ้ว และ6นิ้ว ซึ่งผลการคำนวณค่าความผิดพลาดสมบูรณ์ของกระแสไฟฟ้ารั่วแต่ละความลึกต่างกันจะมีค่าประมาณ 0.161 A 0.228 A และ0.308 A ตามลำดับ ในขณะเดียวกันได้มีการทดลองค้นหาพิกัดตำแหน่ง ที่สมมุติไฟฟ้ารั่วในน้ำขึ้นมา จากตำแหน่งทั้ง 4 ตำแหน่ง ของตารางที่ 4 โดยผลการเปรียบเทียบพิกัดตำแหน่งของทั้ง 4 สถานที่ ด้วยแอปพิเคชันเทเลแกรม เทียบกับแอปพลิเคชัน Apple Map เพื่อค้นหาตำแหน่งต่างๆ ซึ่งค่าความผิดพลาดสมบูรณ์ของมุมในพิกัดจากแอปทั้ง 2 มีความแตกต่างละติจูดและลองจิจูดทั้ง 4 สถานที่ มีค่าน้อยกว่า 120×10^{-6} องศา

5. เอกสารอ้างอิง

[1] อันตรายจากไฟดูด [ออนไลน์] ค้นเมื่อ 11 กันยายน 2558 จาก https://www.scimath.org/article-science/item/7471-2017-09-08-03-29-35

[2] อัษฎาวุธ ธรรมโชติ น้องสี่ คชเถื่อน และ ฤทธิเกียรติ พรพระสงฆ์ จัดทำเรื่อง “ที่ตรวจกระแสไฟฟ้ารั่วระยะไกลในแหล่งน้ำ Electric current leak detector” สาขาอิเล็กทรอนิกส์อุตสาหกรรม วิยาลัยเทคนิคนครศรีธรรมราช

[3] คชพงศ์ สุมานนท์ พลกฤษณ์ จริยตันติเวทย์ ฉัตรแก้ว จริยตันติเวทย์ อานนท์ สิงห์เสถียร และ เวทรินทร์ ธัญสิประเสริฐ “รถพ่นน้ำระบบ GPS สำหรับการเกษตร” การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 20 และการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ ครั้งที่ 10 มหาวิทยาลัยศรีปทุม ประจำปี 2568 วันที่ 31 พฤษภาคม พ.ศ. 2568

[4] Nam, Y.-W. และคณะ (2561). Prediction of drifter trajectory using evolutionary computation. *Journal of Advanced Research*, Published January 24, 2561,จาก: https://doi.org/10.1155/2018/6848745

บทความวิจัย
คอมพิวเตอร์
และเทคโนโลยีสารสนเทศ

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

ระบบจัดการสหกิจศึกษา

Cooperative Education Management System

กมลพรรณ จารุวาระกูล[1] บุรัสกร อยู่สุข[2*] วีระยุทธ คุณรัตนสิริ[3] ชยุตพล ขวัญชื่นใจ[4] ธีเดช พวงมาลา[5]

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

kamolphan.j@rmutp.ac.th[1] burasakorn.y@rmutp.ac.th[2*] weerayuth.k@rmutp.ac.th[3] chayutpol-k@rmutp.ac.th[4] theedetch-p@rmutp.ac.th[5]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบจัดการสหกิจศึกษาในรูปแบบเว็บแอปพลิเคชัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการข้อมูลของนักศึกษา อาจารย์ และเจ้าหน้าที่ฝ่ายสหกิจศึกษา ระบบรองรับการทำงานหลักสามส่วน ได้แก่ นักศึกษา อาจารย์ และผู้ดูแลระบบ (Admin) โดยนักศึกษาสามารถอัปโหลดเอกสาร ติดตามสถานะดูข้อมูลบริษัท และตรวจสอบกำหนดการนิเทศ อาจารย์สามารถเข้าถึงข้อมูลนักศึกษา ดูพิกัดสถาน ประกอบการ และนัดหมายการนิเทศ ส่วน Admin สามารถจัดการข้อมูล อนุมัติเอกสาร และดูภาพรวมของนักศึกษาทุกคณะ ระบบนี้ถูกพัฒนาด้วย Laravel Framework ใช้ AJAX, jQuery, Bootstrap และ Google Maps API พร้อมจัดเก็บข้อมูลใน MySQL Database และพัฒนาโดย Visual Studio Code ระบบนี้ช่วยลดขั้นตอนการทำงาน ลดภาระงานเอกสาร และเพิ่มความสะดวกในการบริหารจัดการข้อมูลสหกิจศึกษาอย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : สหกิจศึกษา; สถานประกอบการ; เว็บแอปพลิเคชัน

Abstract

This research involves the development of a cooperative education management system in the form of a web application, aimed at enhancing the efficiency of managing information for students, instructors, and cooperative education staff. The system supports three main user roles: students, instructors, and administrators (Admin). Students can upload documents, track statuses, view company information, and check internship schedules. Instructors can access student information, view company locations, and schedule internship visits. Administrators can manage data, approve documents, and monitor an overview of students from all faculties. The system is developed using the Laravel Framework, with AJAX, jQuery, Bootstrap, and the Google Maps API, storing data in a MySQL database. Development was carried out using Visual Studio Code. This system streamlines workflows, reduces paperwork, and improves the efficiency of cooperative education data management.

Keywords: Cooperative Education; Company; Web Application

1. บทนำ

ปัจจุบันกระบวนการจัดการสหกิจศึกษาของสถาบันการศึกษาต่าง ๆ ยังคงอาศัยวิธีการแบบดั้งเดิมที่ต้องใช้เอกสารจำนวนมาก ทำให้เกิดความล่าช้าและไม่สะดวกต่อทั้งนักศึกษา อาจารย์ และเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้อง การติดตามเอกสาร การตรวจสอบข้อมูลสถานประกอบการ รวมถึงการจัดตารางนิเทศของอาจารย์ยังต้องดำเนินการด้วยวิธีการที่ซับซ้อนและไม่มีระบบกลางที่ช่วยจัดการข้อมูลเหล่านี้อย่างมีประสิทธิภาพ ปัญหาเหล่านี้ส่งผลให้เกิดความล่าช้า ความผิดพลาด และเพิ่มภาระงานให้กับทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง ซึ่งอาจกระทบต่อประสิทธิภาพของกระบวนการสหกิจศึกษาโดยรวม

ด้วยเหตุนี้โครงงาน ระบบจัดการสหกิจศึกษา จึงถูกพัฒนาขึ้นในรูปแบบ เว็บแอปพลิเคชัน เพื่อช่วยอำนวยความสะดวกในการบริหารจัดการกระบวนการสหกิจศึกษาอย่างครบวงจร โดยใช้ Laravel Framework เป็นเทคโนโลยีหลัก พร้อมผสานการทำงานร่วมกับ AJAX, jQuery และ Bootstrap เพื่อให้ระบบสามารถจัดเก็บข้อมูล ตรวจสอบเอกสาร และบริหารจัดการการนิเทศได้อย่างเป็นระบบและมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังมีการนำ Google Maps API มาใช้เพื่อบันทึกและแสดงพิกัดสถานที่ฝึกงานของนักศึกษา ช่วยให้การติดตามตำแหน่งสถานประกอบการของนักศึกษาเป็นไปอย่างแม่นยำและสะดวกมากยิ่งขึ้น

ระบบนี้ออกแบบมาเพื่อรองรับการทำงานของทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้องในกระบวนการสหกิจศึกษา โดยนักศึกษาสามารถอัปโหลดและติดตามสถานะเอกสาร FM ได้อย่างสะดวก อาจารย์สามารถเข้าถึงข้อมูลนักศึกษาและกำหนดตารางนิเทศได้ง่ายขึ้น ส่วนเจ้าหน้าที่สามารถตรวจสอบ อนุมัติเอกสาร และจัดการข้อมูลของนักศึกษา อาจารย์ และสถานประกอบการได้ในระบบเดียว การพัฒนาระบบนี้ช่วยลดภาระงาน

ลดข้อผิดพลาดในการจัดการข้อมูล และเพิ่มความรวดเร็ว ในการดำเนินงานของทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง ทำให้กระบวนการสหกิจศึกษา มีประสิทธิภาพมากขึ้นและตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งานได้อย่างครบถ้วน

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สหกิจศึกษา

สหกิจศึกษา (Cooperative Education) เป็นการศึกษาที่เน้นการปฏิบัติงานจริงในสถานประกอบการอย่างมีระบบโดยจัดให้มีการเรียนในมหาวิทยาลัยร่วมกับการจัดให้นักศึกษาไปปฏิบัติงานจริง ณ สถานประกอบการที่ให้ความร่วมมืออย่างมีหลักการและเป็นระบบ ทำให้นักศึกษาได้มีโอกาสสร้างความเข้าใจและเรียนรู้จากการปฏิบัติงาน สามารถพัฒนาทักษะทางวิชาชีพเพื่อให้มีคุณภาพตรงตามที่สถานประกอบการต้องการมากที่สุด โดยมีสหกิจศึกษาเป็นกลไกความร่วมมืออย่างเป็นรูปธรรมระหว่างสถานประกอบการและมหาวิทยาลัย และยังก่อให้เกิดประโยชน์ร่วมกัน นักศึกษาสหกิจศึกษาจะเข้าปฏิบัติงานแบบเต็มเวลาอย่างต่อเนื่องเสมือนหนึ่งเป็นพนักงานชั่วคราวในสถานประกอบการเป็นระยะเวลา 1 ภาคการศึกษา และได้รับประสบการณ์จากการปฏิบัติงานในสถานประกอบการจริง ซึ่งนักศึกษาไม่สามารถเรียนรู้ได้ในห้องเรียนปกติ นักศึกษาจะได้รับการพัฒนาทักษะของงานอาชีพที่ผสมผสานระหว่างภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติได้อย่างลงตัว

2.2 Laravel Framework

Laravel เป็น PHP Framework ที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อช่วยให้การพัฒนา เว็บแอปพลิเคชัน เป็นไปอย่างสะดวกและมีประสิทธิภาพมากขึ้น มีโครงสร้างที่ใช้สถาปัตยกรรม MVC (Model-View Controller) ซึ่งช่วยให้สามารถจัดการโค้ดได้ง่าย และมีความยืดหยุ่นสูง Laravel มาพร้อมกับเครื่องมือและฟีเจอร์ต่าง ๆ เช่น Eloquent ORM, Routing, Middleware, Blade Template Engine, Authentication, Validation และ Queue System ที่ช่วยให้การพัฒนาแอปพลิเคชันเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย จุดเด่นของ Laravel Framework ได้แก่

- โครงสร้าง MVC ช่วยแยกส่วนการทำงานของแอปพลิเคชันให้เป็นระเบียบ
- มีระบบ Eloquent ORM ที่ช่วยให้จัดการฐานข้อมูลได้สะดวก
- รองรับ Blade Template Engine สำหรับการจัดการ View
- มีระบบ Authentication และ Authorization ที่ปลอดภัยและใช้งานง่าย
- รองรับ RESTful API และสามารถทำงานร่วมกับ Frontend Framework ได้ดี

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยของนริศรา นาคเมธี และคณะ (2566) เรื่อง "สหกิจศึกษาบนแพลตฟอร์มออนไลน์" ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยพัฒนางานสหกิจศึกษาบนแพลตฟอร์มออนไลน์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างองค์ความรู้ด้วยทักษะในศตวรรษที่ 21 ด้านวิทยาการข้อมูลและเทคโนโลยีดิจิทัล และเพื่อนำผลการวิจัยไปประยุกต์ใช้กับการบริหารจัดการข้อมูลระบบการเรียนการสอนรายวิชาสหกิจศึกษาทางวิทยาการข้อมูลและเทคโนโลยี สารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร โดยผู้วิจัยเลือกใช้เครื่องมือบนแพลตฟอร์มออนไลน์ของบริษัทกูเกิล (Google) ประกอบด้วย Google Form, App Sheet, Google Sheet และ Looker Studio นอกจากนั้นยังใช้เทคนิคการดึงข้อมูลจากหน้าเว็บ (Web Scraping) จากผลการวิจัยพบว่า สหกิจศึกษาบนแพลตฟอร์มออนไลน์สามารถเก็บข้อมูลงานสหกิจศึกษาได้ครบถ้วน มีความสะดวก รวดเร็ว การทำงานของแอปพลิเคชันสหกิจศึกษาบนโทรศัพท์เคลื่อนที่พบว่าอาจารย์นิเทศสามารถใช้งาน แก้ไข ปรับปรุงข้อมูลได้ และแดชบอร์ดนำเสนอข้อมูลงานสหกิจศึกษาได้ตามขอบเขตงานวิจัย และสามารถสนับสนุนการเลือกดูข้อมูลของผู้ใช้งานแบบเชิงโต้ตอบได้

3. ขั้นตอนการดำเนินงาน

ในการพัฒนาระบบจัดการสหกิจศึกษา ได้มีการศึกษารายละเอียดของเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง โดย เลือกใช้ Laravel Framework เป็นโครงสร้างหลักของระบบ เนื่องจาก Laravel มีความสามารถในการ จัดการฐานข้อมูล (Eloquent ORM) และรองรับ MVC (Model-View-Controller) ทำให้การพัฒนามีประสิทธิภาพมากขึ้น นอกจากนี้ยังเลือกใช้ AJAX และ jQuery เพื่อช่วยให้การอัปเดตข้อมูลสามารถทำได้แบบ Asynchronous ลดการโหลดหน้าเว็บใหม่ เพิ่มความรวดเร็วและประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้ใช้ ระบบนี้ยังใช้ Bootstrap ในการออกแบบอินเทอร์เฟซให้รองรับการใช้งานบนอุปกรณ์ที่หลากหลาย (Responsive Design) รวมถึงมีการใช้ Google Maps API เพื่อแสดงพิกัดสถานประกอบการที่รับนักศึกษาสหกิจ และใช้ Thai Province Data API เพื่อดึงข้อมูลจังหวัด อำเภอ ตำบล และรหัสไปรษณีย์

หลังจากศึกษารายละเอียดต่าง ๆ แล้ว จึงได้ดำเนินการออกแบบระบบฐานข้อมูลให้ครอบคลุมข้อมูลที่จำเป็นทั้งหมด เช่น ข้อมูลนักศึกษา อาจารย์ สถานประกอบการ เอกสารสหกิจ และตารางการนิเทศของอาจารย์ โดยใช้ MySQL เป็นฐานข้อมูลหลัก โดยฐานข้อมูลประกอบด้วย

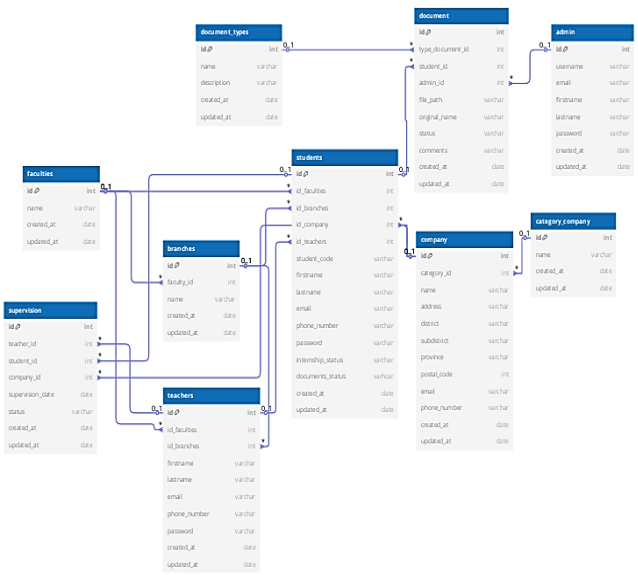
1. ข้อมูลเกี่ยวกับ "คณะ" ในมหาวิทยาลัย เช่น คณะวิทยาศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ เป็นต้น
2. ข้อมูลเกี่ยวกับ "การกำกับดูแล" ในมหาวิทยาลัย

3. ข้อมูลเกี่ยวกับ "สาขาวิชา" ในมหาวิทยาลัย เช่น สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
4. ข้อมูลเกี่ยวกับ "เอกสาร" ในงานสหกิจศึกษา
5. ข้อมูลเกี่ยวกับ "อาจารย์" ในมหาวิทยาลัย
6. ข้อมูลเกี่ยวกับ "ข้อมูลบริษัท" ในงานสหกิจ
7. ข้อมูลเกี่ยวกับ "ข้อมูลเอกสาร" ในงานสหกิจ
8. ข้อมูลเกี่ยวกับ "ผู้ดูแล" ในงานสหกิจ
9. ข้อมูลเกี่ยวกับ "ข้อมูลนักศึกษา" ในมหาวิทยาลัย
10. ข้อมูลเกี่ยวกับ "ข้อมูลบริษัท" ในงานสหกิจ

ระบบจะถูกแบ่งการใช้งานออกเป็น 3 บทบาทหลัก ได้แก่ นักศึกษา อาจารย์ และผู้ดูแลระบบ (Admin) หลังจากออกแบบฐานข้อมูลเสร็จสิ้น ได้ทำการออกแบบอินเทอร์เฟซของ เว็บแอปพลิเคชัน เพื่อให้การใช้งานสะดวกและสอดคล้องกับบทบาทของผู้ใช้แต่ละกลุ่ม เมื่อทำการออกแบบแล้วเสร็จ จึงได้ดำเนินการเขียนโค้ดและพัฒนาระบบให้สามารถเชื่อมต่อกับ ฐานข้อมูล MySQL และดึงข้อมูลแบบไดนามิกโดยใช้ AJAX หลังจากพัฒนาโค้ดในทุกส่วนเสร็จสิ้นได้มีการทดสอบระบบเพื่อให้แน่ใจว่า เว็บแอปพลิเคชัน ทำงานได้อย่างถูกต้อง และทำการปรับปรุงแก้ไข ปัญหาที่พบจนกระทั่งระบบสามารถทำงานได้ตามที่กำหนดไว้

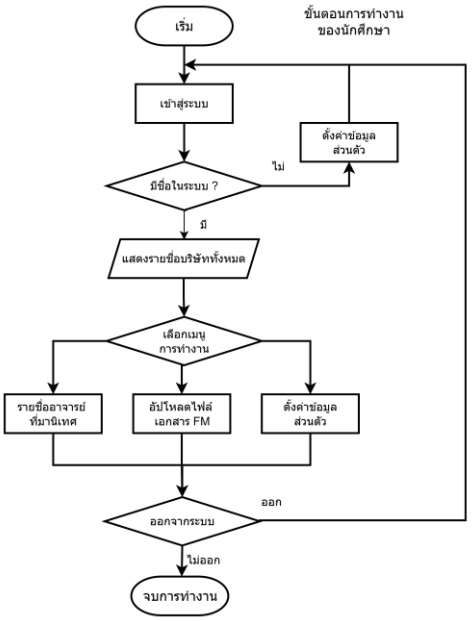
4. ผลการดำเนินงาน

ฐานข้อมูลเชิงสัมพันธ์ที่ออกแบบและพัฒนาได้ผลดังรูปที่ 1

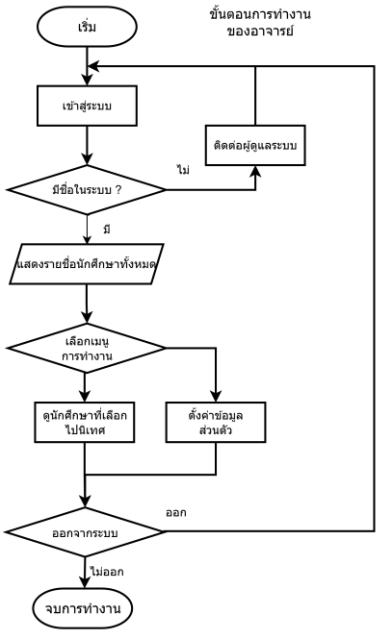


รูปที่ 1 อีอาร์ไดอะแกรมแสดงข้อมูลของระบบ

กระบวนการทำงานของระบบเริ่มจากการเข้าสู่ระบบและตรวจสอบว่ามีชื่อในระบบหรือไม่ หากไม่มีจะต้องติดต่อผู้ดูแลระบบ หากมีชื่อแล้วระบบจะแสดงรายชื่อบริษัททั้งหมดและให้เลือกเมนูการทำงาน เช่น ดูอาจารย์นิเทศ อัปโหลดเอกสาร หรือตั้งค่าข้อมูลส่วนตัว ก่อนออกจากระบบ เพื่อสิ้นสุดกระบวนการ ดังรูปที่ 2



(ก) ขั้นตอนการทำงานของนักศึกษา

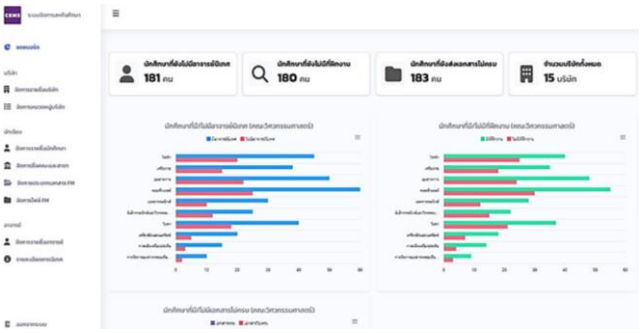


(ข) ขั้นตอนการทำงานของอาจารย์

รูปที่ 2 ขั้นตอนการทำงานของระบบ

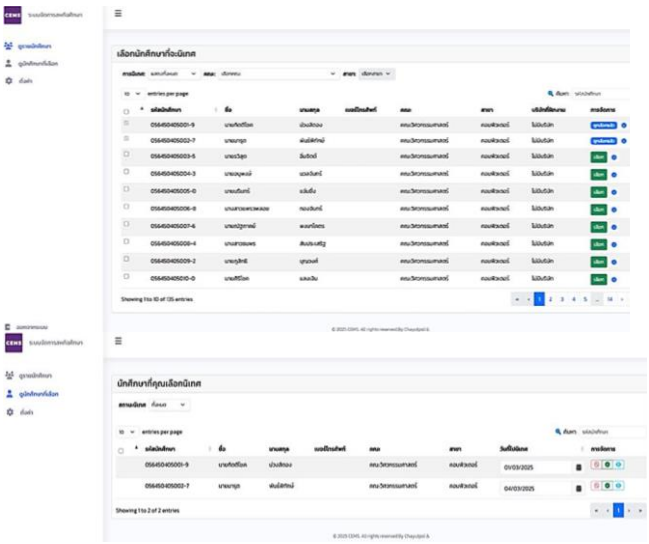
หน้าแดชบอร์ดของระบบจัดการสหกิจศึกษาที่มีข้อมูลสำคัญ เช่น จำนวนนักศึกษาที่ยังไม่มีอาจารย์นิเทศ, ไม่มีที่ฝึกสหกิจ, และส่งเอกสาร

ไม่ครบ พร้อมกราฟแสดงข้อมูลแยกตามคณะวิศวกรรมศาสตร์เพื่อการวิเคราะห์ส่วนเมนูด้านซ้ายใช้สำหรับจัดการข้อมูลต่าง ๆ เช่น สถานประกอบการ, นักศึกษา, และอาจารย์

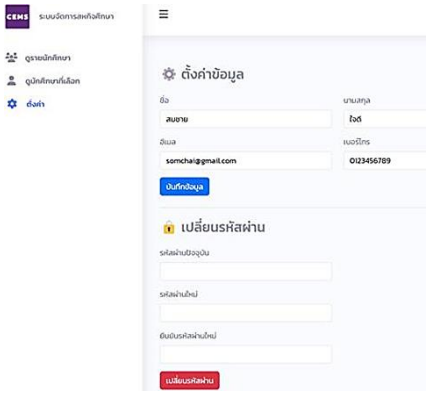


รูปที่ 4 แดชบอร์ดสำหรับผู้บริหาร อาจารย์ และแอดมิน

ผลการทดลองใช้งานในส่วนของอาจารย์ พบว่าสามารถทำงานในทุกฟังก์ชันผ่านทางหน้าจอการทำงานของเว็บแอปพลิเคชันดังต่อไปนี้

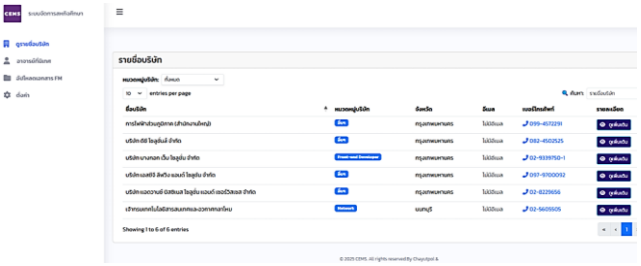


รูปที่ 5 หน้าจอการคัดเลือกนิเทศและรายชื่อนักศึกษาที่ได้คัดเลือกนิเทศ

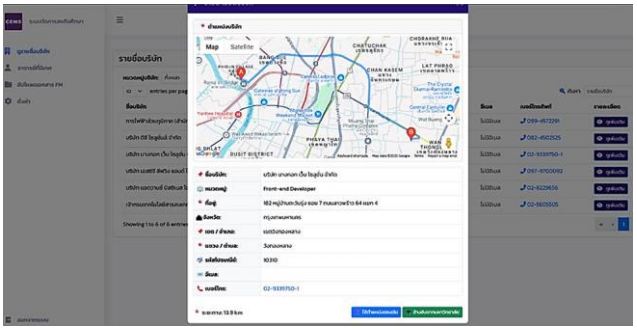


รูปที่ 6 หน้าจอตั้งค่าข้อมูลส่วนตัว

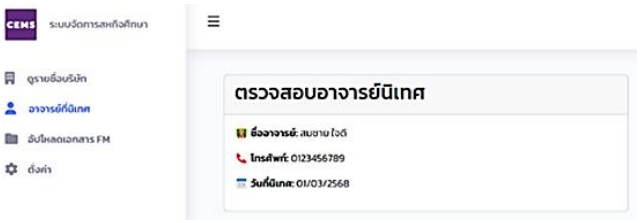
ผลการทดลองใช้งานในส่วนของนักศึกษา พบว่าสามารถทำงานในทุกฟังก์ชันผ่านทางหน้าจอการทำงานของเว็บแอปพลิเคชันดังต่อไปนี้



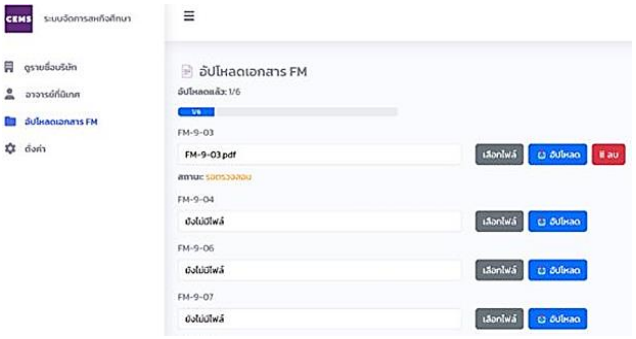
รูปที่ 7 หน้าจอแสดงข้อมูลสถานประกอบการ



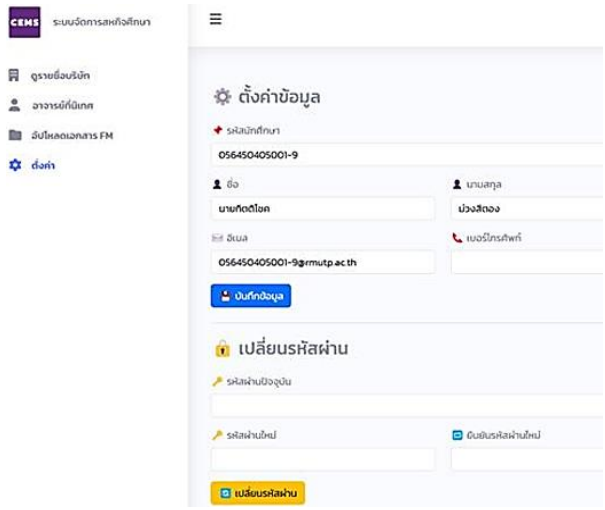
รูปที่ 8 หน้าจอแสดงแผนที่บริษัท



รูปที่ 9 หน้าจอแสดงข้อมูลอาจารย์นิเทศ



รูปที่ 10 หน้าจอแสดงการอัปโหลดเอกสาร



รูปที่ 11 หน้าจอแสดงการจัดการข้อมูลส่วนตัว

5. สรุปผลงานวิจัย

ระบบจัดการสหกิจศึกษาเป็น เว็บแอปพลิเคชัน ที่พัฒนาด้วย Laravel Framework โดยใช้ AJAX, jQuery, Bootstrap และ Google Maps API เพื่อช่วยให้กระบวนการบริหารจัดการสหกิจศึกษาเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ในการดำเนินงานวิจัยนี้ ได้มีการศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับระบบที่เกี่ยวข้องรวมไปถึงโปรแกรมและเครื่องมือที่ใช้พัฒนา เว็บแอปพลิเคชัน จากนั้นได้ดำเนินการออกแบบฐานข้อมูลให้รองรับข้อมูลทั้งหมดที่จำเป็นสำหรับการจัดการสหกิจศึกษา ระบบนี้ถูกแบ่งการใช้งานออกเป็น 3 บทบาท ได้แก่ นักศึกษา อาจารย์ และผู้ดูแลระบบ หลังจากออกแบบฐานข้อมูลเสร็จสิ้น ได้ทำการออกแบบอินเทอร์เฟซของ เว็บแอปพลิเคชัน เพื่อให้การใช้งานสะดวกและสอดคล้องกับบทบาทของผู้ใช้แต่ละกลุ่ม เมื่อทำการออกแบบแล้วเสร็จ จึงได้ดำเนินการเขียนโค้ดและพัฒนาระบบให้สามารถเชื่อมต่อกับฐานข้อมูล MySQL และดึงข้อมูลแบบไดนามิกโดยใช้ AJAX หลังจากพัฒนาโค้ดทุกส่วนเสร็จสิ้นแล้วได้มีการทดสอบระบบเพื่อให้แน่ใจว่าเว็บแอปพลิเคชัน ทำงานได้อย่างถูกต้อง ซึ่งพบปัญหาเล็กน้อยได้แก่

- ปัญหาเกี่ยวกับการออกแบบฐานข้อมูลที่ต้องปรับเปลี่ยนโครงสร้างเพื่อให้รองรับการขยายระบบในอนาคต
- การเชื่อมต่อ Google Maps API และ Thai Province Data API ในการดึงข้อมูลที่อยู่ทำให้ต้องจัดการกับ CORS (Cross-Origin Resource Sharing) เพื่อให้สามารถโหลดข้อมูลได้อย่างถูกต้อง
- ปัญหาจากการตั้งค่า Laravel และ MySQL เช่น การกำหนด Foreign Key ที่ไม่สอดคล้องกันทำให้ต้องทำการ Rollback Migration หลายครั้ง

จากการพัฒนาระบบ เว็บแอปพลิเคชัน สำหรับจัดการสหกิจศึกษา ทำให้ได้ข้อสรุปสำคัญดังต่อไปนี้

- ระบบสามารถอัปโหลดและติดตามสถานะเอกสาร FM ของนักศึกษาได้สำเร็จ
- ระบบสามารถกำหนดสิทธิ์ของนักศึกษา อาจารย์ และผู้ดูแลระบบได้อย่างเหมาะสม
- ระบบรองรับการบันทึกและแสดงพิกัดสถานประกอบการ ผ่าน Google Maps API
- มีการใช้ Thai Province Data API เพื่อช่วยให้การเลือกที่อยู่เป็นไปอย่างแม่นยำ
- การออกแบบระบบ MVC (Model-View-Controller) ช่วยให้โครงสร้างโค้ดมีระเบียบ และสามารถปรับปรุงต่อได้ง่าย
- ระบบช่วยให้กระบวนการจัดการสหกิจศึกษามีความเป็นอัตโนมัติ ลดภาระงานเอกสารของเจ้าหน้าที่

เมื่อทำการทดสอบระบบจัดการสหกิจศึกษากับผู้ใช้จริงพบว่า

- อาจารย์นิเทศสามารถเข้าใช้งานระบบและสามารถแก้ไขปรับปรุงข้อมูลต่างๆ ได้สะดวก เช่น ข้อมูลกำหนดการนิเทศ ข้อมูลสถานประกอบการ และข้อมูลส่วนตัว เป็นต้น
- นักศึกษาสามารถเข้าใจงานระบบในส่วนของแก้ไขข้อมูลส่วนตัว เลือกสถานประกอบการ และอัปโหลดเอกสารได้สะดวก เพียงแต่ระบบยังขาดส่วนของหน้าจอการกรอกข้อมูลลงแบบฟอร์มต่าง ๆ ของงานสหกิจดังนั้นนักศึกษายังต้องกรอกข้อมูลจากภายนอกแล้วจึงอัปโหลดไฟล์เข้าระบบ
- ผู้ดูแลระบบสามารถทำงานในทุกฟังก์ชันได้ดี แต่มีความกังวลในเรื่องความปลอดภัย ความสเถียรและการขยายตัวของระบบในอนาคต

6. ข้อเสนอแนะ

1. การออกแบบระบบให้มีประสิทธิภาพ ตั้งแต่เริ่มต้นการออกแบบระบบถือว่าเป็นสิ่งสำคัญมาก หากมีการวิเคราะห์และออกแบบฐานข้อมูลที่ดี จะช่วยลดปัญหาในภายหลังได้
2. การศึกษาโครงสร้างการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันอย่างละเอียด เช่น แนวคิด MVC (Model-View-Controller) ใน Laravel ช่วยให้การพัฒนาระบบมีระเบียบ และง่ายต่อการจัดการ Model ใช้จัดการข้อมูล, View ใช้แสดงผล, และ Controller ใช้ควบคุมการทำงานระหว่าง Model และ View การทำความเข้าใจโครงสร้างนี้ช่วยให้โค้ดมีความยืดหยุ่นและดูแลรักษาได้ง่ายขึ้น
3. การออกแบบฐานข้อมูลควรคำนึงถึงความยืดหยุ่นและรองรับการขยายตัวได้ในอนาคต เช่น การออกแบบให้สามารถเพิ่มตารางหรือความสัมพันธ์ใหม่ ๆ ได้ง่ายสำหรับฟีเจอร์ เช่น ระบบแจ้งเตือน หรือการวิเคราะห์ข้อมูล การใช้แนวคิด Normalization และการจัดโครงสร้างที่ดีช่วยลดปัญหาความซับซ้อนและการแก้ไขในอนาคต ซึ่งวิธีนี้จะช่วยให้การพัฒนาฟีเจอร์ใหม่ทำได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพ

4. การปรับปรุง UX/UI ช่วยให้ระบบใช้งานง่ายและตอบโจทย์ผู้ใช้ได้ดียิ่งขึ้น เช่น การใช้ Tailwind CSS หรือ Bootstrap เพื่อออกแบบอินเทอร์เฟซที่สวยงามและเป็นระเบียบ ซึ่งการจัดวางองค์ประกอบอย่างเหมาะสมช่วยลดความซับซ้อนและเพิ่มประสบการณ์การใช้งานที่ดี วิธีนี้ยังช่วยให้การพัฒนาระบบรวดเร็วและมีมาตรฐาน

5. การเพิ่มความทันสมัยให้ระบบ เช่น การเพิ่มฟีเจอร์ Theme Mode (Light/Dark Mode) ช่วยให้ผู้ใช้ปรับแต่งการแสดงผลตามความต้องการได้ การตกแต่งด้วย Animation หรือ Transition ที่เหมาะสมทำให้ระบบดูมีชีวิตชีวามากขึ้น วิธีนี้ช่วยสร้างความประทับใจและดึงดูดผู้ใช้ให้ใช้งานระบบต่อเนื่อง

6. การเรียนรู้และติดตามเทคโนโลยีใหม่ ๆ อย่างต่อเนื่องเป็นสิ่งสำคัญในการพัฒนา เว็บแอปพลิเคชัน เช่น การใช้ Livewire ช่วยพัฒนาแบบ Realtime หรือ Vue.js และ React.js สำหรับ Frontend ที่มีประสิทธิภาพ วิธีนี้ช่วยเพิ่มความสามารถในการพัฒนาและตอบโจทย์ความต้องการของผู้ใช้อย่างทันสมัย

7. การพัฒนา เว็บแอปพลิเคชัน ต้องมีการวางแผนที่รอบคอบและจัดการเวลาอย่างเหมาะสม การแบ่งงานเป็น Sprint หรือ Iteration ตามแนวคิด Agile ช่วยลดภาระงานในแต่ละช่วงและทำให้สามารถตรวจสอบความถูกต้องของโค้ดได้ง่ายขึ้น วิธีนี้ยังช่วยให้ทีมพัฒนาสามารถปรับปรุงและแก้ไข งานได้อย่างต่อเนื่อง

8. ควรศึกษาการพัฒนา เว็บแอปพลิเคชัน อย่างต่อเนื่องเพื่อพัฒนาทักษะการพัฒนา เว็บแอปพลิเคชัน มีแนวทางและเทคนิคที่หลากหลาย ควรเรียนรู้จากแหล่งข้อมูลต่าง ๆ เช่น Documentation ของ Laravel, Stack Overflow, Medium และ GitHub

9. ควรปรับระบบนิเทศให้รองรับการนัดหมายหลายครั้งต่อนักศึกษา เพื่อให้สามารถติดตามความก้าวหน้าได้อย่างต่อเนื่อง ระบบควรมีฟีเจอร์การจัดการตารางนัดหมายที่ยืดหยุ่น เช่น การจองหลายรอบและแจ้งเตือนล่วงหน้า เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความสะดวกในการนิเทศ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณการสนับสนุนจากสาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร เป็นอย่างสูง

เอกสารอ้างอิง

[1] LARAVEL FRAMEWORK [ONLINE]. AVAILABLE: HTTPS://DEV.CLASSMETHOD.JP (ACCESSED: FEBRUARY 19, 2024).

[2] AJAX (ASYNCHRONOUS JAVASCRIPT AND XML) [ONLINE]. AVAILABLE: HTTPS://AWS.AMAZON.COM (ACCESSED: FEBRUARY 19, 2024).

[3] JQUERY [ONLINE]. AVAILABLE: HTTPS://JQUERY.COM (ACCESSED: FEBRUARY 19, 2024).

[4] BOOTSTRAP [ONLINE]. AVAILABLE: HTTPS://SUPPORT.HOSTNEVERDIE.COM (ACCESSED: FEBRUARY 19, 2024).

[5] GOOGLE MAPS API [ONLINE]. AVAILABLE: HTTPS://TANGERINE.CO.TH (ACCESSED: FEBRUARY 19, 2024).

[6] MYSQL DATABASE [ONLINE]. AVAILABLE: HTTPS://AWS.AMAZON.COM (ACCESSED: FEBRUARY 19, 2024).

[7] VISUAL STUDIO CODE [ONLINE]. AVAILABLE: HTTPS://WEBDODEE.COM (ACCESSED: FEBRUARY 19, 2024).

[8] THAI PROVINCE DATA API [ONLINE]. AVAILABLE: HTTPS://GITHUB.COM (ACCESSED: FEBRUARY 19, 2024).

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การพัฒนาระบบบริหารจัดการเว็บไซต์สำหรับสถาบันกวดวิชาคณิตศาสตร์ระดับมัธยมศึกษา

Development of a Web-Based Management System for a Secondary-Level Mathematics Tutoring Institute

ศุวิล ชมชัยยา[1] บุรัสกร อยู่สุข[*2] ภควัฒน์ กุลโชติ[3] ชนนันต์ สุดใจรัก[4] และ นายวัชร บัวศรีรัตนะ[5]

[1345]ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แขวงบางมด เขตทุ่งครุ 10140

suvil.cho@kmutt.ac.th[1] 1m2a3nandman@gmail.com[3] schananan63@gmail.com[4] avengerart@hotmail.com[5]

[*2]คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร 1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

burasakorn.y@rmutp.ac.th[*2]

บทคัดย่อ

โครงงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบบริหารจัดการเว็บไซต์สำหรับสถาบันกวดวิชาคณิตศาสตร์ระดับมัธยมศึกษา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการเรียนการสอนออนไลน์ จากเดิมที่ให้บริการผ่านสื่อสังคมออนไลน์ซึ่งมีข้อจำกัดด้านการจัดเก็บข้อมูลและการจัดการอย่างเป็นระบบ ระบบที่พัฒนาขึ้นแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนของผู้ใช้งาน และส่วนของผู้ดูแลระบบ โดยผู้ดูแลระบบสามารถจัดการข้อมูลคอร์สเรียน ปฏิทินการสอน บทความ และบัญชีผู้ใช้งานได้ ขณะที่ผู้ใช้งานสามารถสมัครสมาชิก เข้าสู่ระบบ เลือกซื้อคอร์ส เรียนผ่านวิดีโอ ดาวน์โหลดเอกสาร และติดตามตารางเรียนผ่านปฏิทินออนไลน์ ทั้งนี้ระบบมีการกำหนดสิทธิ์การเข้าถึงเนื้อหาโดยจำกัดระยะเวลาตามคอร์สที่ลงทะเบียน

ผลการทดลองใช้งานกับกลุ่มตัวอย่างซึ่งประกอบด้วยผู้ใช้งานทั่วไปจำนวน 10 คน และผู้ดูแลระบบจำนวน 2 คน พบว่าผู้ใช้งานมีความพึงพอใจเฉลี่ย 8.04 และผู้ดูแลระบบมีความพึงพอใจเฉลี่ย 8.50 จากคะแนนเต็ม 10 แสดงให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : ระบบบริหารจัดการ, กวดวิชาออนไลน์, เว็บไซต์เพื่อการศึกษา, การเรียนการสอนออนไลน์

Abstract

This study aims to develop a web-based management system for a secondary-level mathematics tutoring institute to enhance the efficiency of online teaching and learning management. Previously, the institute primarily relied on social media platforms, which lacked systematic data management and structured instructional control. The developed system consists of two main components: the user interface and the administrator interface. The administrator can manage course information, class schedules, articles, student achievements, and user accounts. Meanwhile, users can register, log in, purchase courses, access video-based lessons, download learning materials, and view live class schedules via an online calendar. Additionally, the system implements access control by restricting course availability based on the duration of each purchased course.

The system was evaluated with a sample group consisting of 10 general users and 2 administrators. The results indicate that the average satisfaction score of users was 8.04, while administrators reported an average score of 8.50 out of 10. These findings suggest that the developed system effectively meets user requirements and can be practically applied in real-world educational settings.

Keywords: Management System, Online Tutoring, Educational Website, E-learning

1. บทนำ

ในปัจจุบัน สถาบันกวดวิชายังคงมีบทบาทสำคัญในการเสริมสร้างศักยภาพทางวิชาการของผู้เรียน เพื่อตอบสนองต่อความต้องการด้านการศึกษาที่เพิ่มขึ้น จึงจำเป็นต้องมีระบบบริหารจัดการที่มีประสิทธิภาพ รองรับกระบวนการดำเนินงานที่ซับซ้อน และเอื้อต่อการใช้งาน สถาบันกวดวิชาจำนวนมากเปิดสอนทั้งในรูปแบบออนไซต์และออนไลน์ โดยเฉพาะวิชาคณิตศาสตร์ซึ่งมีลักษณะเนื้อหาที่เป็นลำดับขั้นต้องอาศัยความเข้าใจเชิงลึก และการฝึกฝนอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นการจัดการเรียนการสอนผ่านระบบออนไลน์จึงควรมีโครงสร้างที่ชัดเจน เช่น การจัดลำดับบทเรียน การเข้าถึงเนื้อหาซ้ำได้ และการกำหนดสิทธิ์การใช้งาน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเรียนรู้

อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติยังพบว่าสถาบันกวดวิชาหลายแห่งขาดระบบบริหารจัดการแบบรวมศูนย์ โดยยังอาศัยช่องทางสื่อสารที่ไม่เป็นระบบในการจัดตารางเรียน การจัดเก็บข้อมูลผู้เรียน และการชำระเงิน ซึ่งอาจก่อให้เกิดความล่าช้า ความผิดพลาด และข้อจำกัดในการขยายตัวของสถาบัน ดังนั้นการพัฒนาเว็บไซต์เพื่อบริหารจัดการสถาบันกวดวิชาคณิตศาสตร์จึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางในการจัดเก็บและบริหารข้อมูล ช่วยลดความซ้ำซ้อนของงาน เพิ่มความถูกต้องและความรวดเร็วในการดำเนินงาน ตลอดจนเสริมสร้างภาพลักษณ์ความเป็นมืออาชีพของสถาบัน ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการพัฒนาระบบเว็บไซต์สำหรับสถาบัน

กวดวิชาคณิตศาสตร์ เพื่อสนับสนุนการบริหารจัดการข้อมูลอย่างมีประสิทธิภาพ ลดภาระงาน และรองรับการเติบโตในยุคดิจิทัลอย่างยั่งยืน

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการออกแบบ UX/UI

2.1.1 UX (User Experience)

User Experience (UX) หมายถึงประสบการณ์โดยรวมที่ผู้ใช้ได้รับเมื่อใช้งานผลิตภัณฑ์หรือบริการต่าง ๆ ซึ่งรวมถึงการใช้งานเว็บไซต์ แอปพลิเคชัน หรือระบบต่าง ๆ โดยหลักการและแนวคิดของ UX สามารถแบ่งออกได้เป็นหลายด้าน ดังนี้

- Usability การใช้งานที่ง่ายและไม่ซับซ้อน
- interaction Design การออกแบบการตอบสนองต่อการใช้งาน
- Accessibility การเข้าถึงได้อย่างไม่มีอุปสรรค มีสีที่สามารถมองเห็นได้ชัดเจน

2.1.2 UI (User Interface)

การออกแบบ UI (User Interface) เป็นส่วนสำคัญของโครงงานเว็บไซต์ติวออนไลน์ ที่มุ่งเน้นการสร้างหน้าตาและความรู้สึกที่ดีให้กับผู้ใช้ โดยการออกแบบ UI ที่ดีจะช่วยให้ผู้ใช้สามารถเข้าถึงฟังก์ชันต่าง ๆ ได้อย่างง่าย และสร้างประสบการณ์การใช้งานที่ราบรื่น หลักการออกแบบ UI ดังนี้

- ความสอดคล้อง (Consistency) ใช้รูปแบบ, สี, ฟอนต์, และสัญลักษณ์เดียวกันทั่วทั้งเว็บไซต์ เพื่อสร้างความคุ้นเคยให้กับผู้ใช้
- การตอบสนอง (Responsiveness) ออกแบบให้สามารถใช้งานได้ดีทั้งบนอุปกรณ์คอมพิวเตอร์

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานศึกษาด้านการออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้ด้วย Figma ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของหลักการ UX/UI และการสร้างต้นแบบเชิงโต้ตอบสำหรับอุปกรณ์หลากหลายประเภท โดย Figma และ FigJam เป็นเครื่องมือที่สนับสนุนการออกแบบอย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งในด้านการทำงานร่วมกันแบบเรียลไทม์และการจัดการองค์ประกอบการออกแบบ เช่น Components, Variants และ Auto Layout ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยให้กระบวนการพัฒนาอินเทอร์เฟซเป็นระบบและสอดคล้องกับความต้องการของผู้ใช้งาน [1]

การพัฒนาเว็บไซต์สนับสนุนการบริหารจัดการสถาบันการศึกษา พบว่าระบบสามารถเพิ่มความสะดวกในการดำเนินงานและการเรียนการสอนออนไลน์ โดยรองรับผู้ใช้งานหลายระดับ พร้อมฟังก์ชันสำคัญ เช่น การสมัครสมาชิก การลงทะเบียนเรียน การทำแบบทดสอบออนไลน์ และการจัดเก็บข้อมูลอย่างเป็นระบบ ส่งผลให้ผู้ใช้งานมีความพึงพอใจในระดับสูง โดยเฉพาะด้านความง่ายในการใช้งานและความน่าสนใจของเว็บไซต์ [2]

นอกจากนี้ งานวิจัยเกี่ยวกับเว็บแอปพลิเคชันสำหรับจัดการคอร์สเรียนออนไลน์แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบในการลดความซับซ้อนของการจัดการข้อมูล และเพิ่มความสะดวกในการเข้าถึงเนื้อหา โดยระบบถูกออกแบบให้รองรับทั้งผู้ดูแลระบบและผู้ใช้งาน พร้อมฟังก์ชันการเรียนรู้ผ่านวิดีโอและแบบทดสอบออนไลน์ ผลการประเมินพบว่าผู้ใช้งานมีความพึงพอใจในระดับมาก และระบบสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้จะมีข้อจำกัดบางประการ เช่น การรองรับสื่อมัลติมีเดียและความต้องการฟังก์ชันเพิ่มเติม [3]

ในส่วนของระบบสมัครอบรมออนไลน์ งานวิจัยได้แสดงถึงแนวทางการออกแบบระบบสารสนเทศที่เป็นระบบ โดยมีการวิเคราะห์ผู้ใช้งาน การกำหนดสิทธิ์ และการแบ่งโครงสร้างระบบอย่างชัดเจน พร้อมการประเมินผลทั้งในระดับผู้เชี่ยวชาญและผู้ใช้งานจริง ซึ่งพบว่าระบบมีประสิทธิภาพในระดับดี และสามารถนำไปใช้งานจริงได้อย่างเหมาะสม [4]

จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่างานวิจัยส่วนใหญ่ให้ความสำคัญกับการพัฒนาเว็บไซต์และเว็บแอปพลิเคชันที่มีโครงสร้างชัดเจน ใช้งานง่าย และตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งาน โดยเฉพาะการออกแบบ UX/UI และการจัดการระบบอย่างเป็นขั้นตอน งานวิจัยนี้จึงนำแนวคิดดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ร่วมกับเครื่องมือสมัยใหม่ ได้แก่ Figma สำหรับออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้ และเทคโนโลยี React (Next.js), Node.js, Prisma และ PostgreSQL สำหรับพัฒนาระบบ ซึ่งสามารถบริหารจัดการข้อมูลผู้ใช้งาน คอร์สเรียน และการชำระเงินได้อย่างเป็นระบบ พร้อมทั้งสนับสนุนการเรียนรู้ผ่านฟังก์ชันต่าง ๆ เช่น แบบทดสอบออนไลน์ กระดานข่าว และเอกสารประกอบการเรียน ส่งผลให้การสื่อสารระหว่างผู้เรียนและผู้ดูแลมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้ ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานอยู่ในระดับดี มีความเหมาะสมในการนำระบบไปใช้งานจริงและตอบสนองต่อเป้าหมายขององค์กรได้

3. วิธีการดำเนินงาน

3.1 การกำหนดความต้องการ (Requirements)

Functional Requirements

1. เข้าสู่ระบบ ผู้ใช้สามารถเข้าสู่ระบบด้วยอีเมลและรหัสผ่าน
2. คอร์สเรียนออนไลน์
   - ผู้ใช้ทั่วไปสามารถซื้อคอร์สเรียนได้
   - ผู้ดูแลระบบ สามารถเพิ่ม ลบ และแก้ไขได้
3. ปฏิทินคอร์สออนไลน์สด
   - ผู้ใช้ทั่วไปสามารถจองคอร์ส
   - ผู้ดูแลระบบ สามารถเพิ่ม ลด ลบ และแก้ไขได้
4. การชำระเงิน
5. ระบบความก้าวหน้า
6. บทความ แสดงภาพและเนื้อหา
   - ผู้ดูแลระบบ สามารถเพิ่ม ลด ลบ และแก้ไขได้
7. ความสำเร็จ แสดงภาพความสำเร็จของนักเรียน
   - ผู้ดูแลระบบ สามารถเพิ่ม ลด ลบ และแก้ไขได้
8. แก้ไขข้อมูลผู้ใช้

Non-functional Requirements

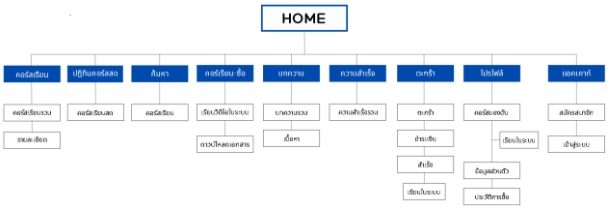
1. สามารถใช้งานเว็บไซต์ได้ทุกระบบปฏิบัติการ
2. เว็บไซต์จะตอบสนองต่อผู้ใช้ภายในระยะเวลา 3 วินาที

Constraints Requirements

1. การชำระเงินรองรับเพียง Prompt-pay QR code
2. จำกัดจำนวนการเรียนผ่านวิดีโอ 2 รอบ และกำหนดอายุคอร์สเรียน 6 เดือน

3.2 การพัฒนาเว็บไซต์

3.2.1 Work Breakdown Structure



รูปที่ 1 Work Breakdown Structure

1. หน้าแรก สามารถดูเมนูหลักๆ ทั้งหมด

2. คอร์สเรียน ประกอบด้วย สามารถดูรายละเอียดและซื้อคอร์สเรียน

3. Search ประกอบด้วย filter มีการฟิลเตอร์สำหรับเลือกชมคอร์สเรียนที่ต้องการ สามารถค้นหาคอร์สเรียนได้

4. คอร์สเรียน(ซื้อ) ประกอบด้วย สามารถดาวน์โหลดเอกสารการเรียน และผู้ใช้เรียนวิดีโอเรียนในระบบได้เมื่อทำการซื้อคอร์สเรียน

5. บทความ - เนื้อหาบทความ

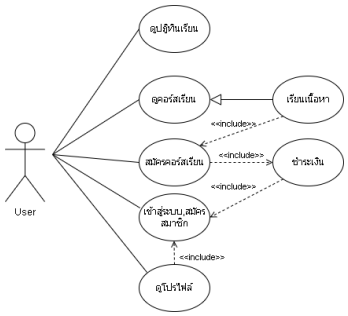
6. ความสำเร็จ

7. หน้าตะกร้า ประกอบด้วย ตะกร้าสำหรับเพิ่มคอร์สเรียนเพื่อชำระเงิน หน้าชำระเงิน เมื่อธุรกรรมสำเร็จจะไปสู่การเรียนวิดีโอในระบบ

8. หน้าส่วนตัวของผู้ใช้งาน ประกอบด้วย ข้อมูลส่วนตัว สามารถดูและแก้ไขข้อมูลข้อมูลส่วนตัวได้ ประวัติการซื้อ สามารถดูประวัติคอร์สเรียนได้ คอร์สเรียนของฉัน สามารถดูคอร์สเรียนและเข้าสู่คอร์สเรียนได้ การซื้อ สามารถดูประวัติคอร์สเรียนได้

9. บัญชีผู้ใช้ ประกอบด้วย login ผู้ใช้สามารถเข้าสู่ระบบได้ register ผู้ใช้สามารถสร้างบัญชีได้

3.2.2 Use Case Diagram

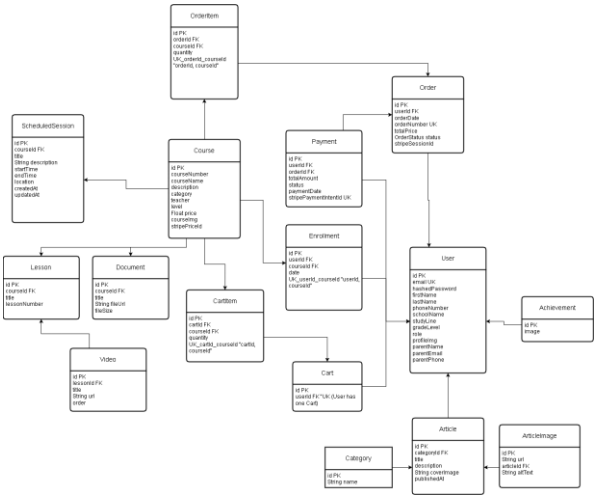


รูปที่ 2 Use Case Diagram ของผู้ใช้งาน

จาก Use Case Diagram ของผู้ใช้งาน ที่ออกแบบตามความต้องการของผู้ใช้งาน จะสามารถแบ่งเป็นฟังก์ชันการทำงานที่ผู้ใช้งานสามารถใช้งานได้ดังนี้

1. เข้าสู่ระบบ
   - ผู้ใช้ทั่วไปสามารถเข้าสู่ระบบด้วยอีเมลและรหัสผ่าน
2. คอร์สเรียนออนไลน์
   - ผู้ใช้สามารถซื้อคอร์สเรียนได้
   - ผู้ใช้สามารถเรียนวิดีโอในระบบได้
   - ผู้ใช้สามารถดาวน์โหลดเอกสาร PDF ได้
3. ปฏิทินคอร์สออนไลน์สด
   - ผู้ใช้ดูปฏิทินคอร์สออนไลน์สดเพื่อซื้อคอร์สและเข้าเรียน
4. การชำระเงิน
   - ผู้ใช้สามารถชำระเงินได้ผ่าน Credit Card หรือ Prompt Pay
5. ข้อมูลผู้ใช้
   - ผู้ใช้สามารถแก้ไขข้อมูลได้
6. บทความ แสดงภาพและเนื้อหา
   - ผู้ใช้สามารถดูเนื้อหาได้
7. ความสำเร็จ แสดงภาพความสำเร็จของนักเรียน
   - ผู้ใช้สามารถดูเนื้อหาได้

3.2.3 ER Diagram



รูปที่ 3 ER Diagram

องค์ประกอบหลักของระบบ (Core Entities)

1. User (ผู้ใช้งาน): เป็นเอนทิตีหลักที่จัดเก็บข้อมูลของผู้ใช้งานระบบ เช่น นักเรียน, ผู้สอน หรือผู้ดูแลระบบ ประกอบด้วยข้อมูลส่วนตัว (ชื่อ, อีเมล, รหัสผ่าน), ข้อมูลการศึกษา, และข้อมูลผู้ปกครอง (สำหรับผู้เรียนที่เป็นเด็ก) รวมถึงแต้มสะสม (point) ผู้ใช้งานมีความสัมพันธ์กับข้อมูลการลงทะเบียน (Enrollment), ตะกร้าสินค้า (Cart), ประวัติการสั่งซื้อ (Order), การชำระเงิน (Payment), และผลการทำแบบฝึกหัด

2. Course (รายวิชา): จัดเก็บรายละเอียดของรายวิชาที่เปิดสอน เช่น รหัสวิชา, ชื่อวิชา, คำอธิบาย, หมวดหมู่, ผู้สอน, ระดับความยากง่าย, ราคา, และรูปภาพประจำวิชา นอกจากนี้ยังเชื่อมโยงกับบทเรียน (Lesson), เอกสารประกอบ (Document), ตารางเรียน/กิจกรรม

(ScheduledSession), ข้อมูลการลงทะเบียน (Enrollment), รายการในตะกร้าสินค้า (CartItem), และรายการสั่งซื้อ (OrderItem)

3. Lesson (บทเรียน): เป็นส่วนประกอบย่อยของ Course ใช้จัดเก็บข้อมูลของแต่ละบทเรียนในรายวิชา เช่น ชื่อบทเรียนและลำดับบทเรียน แต่ละบทเรียนสามารถมีวิดีโอ (Video) ได้หลายรายการ

4. Video (วิดีโอ): จัดเก็บข้อมูลเกี่ยวกับวิดีโอการสอน เช่น ชื่อวิดีโอ, URL ของไฟล์วิดีโอ, และลำดับการแสดงผลภายในบทเรียน

5. Document (เอกสาร): จัดเก็บไฟล์เอกสารประกอบการเรียนสำหรับแต่ละ Course เช่น สไลด์, PDF, หรือไฟล์อื่นๆ พร้อมชื่อไฟล์, URL, และขนาดไฟล์

6. ScheduledSession (ตารางเรียน/กิจกรรม): จัดเก็บข้อมูลเกี่ยวกับเซสชันที่กำหนดเวลาไว้สำหรับ Course เช่น การสอนสด, การสัมมนาออนไลน์ ประกอบด้วยชื่อเซสชัน, คำอธิบาย, เวลาเริ่มต้น-สิ้นสุด และสถานที่ (ถ้ามี)

7. Enrollment (การลงทะเบียน): เป็นเอนทิตีเชื่อม (Join Table) ระหว่าง User และ Course เพื่อบันทึกข้อมูลการลงทะเบียนเรียนของผู้ใช้งานในแต่ละรายวิชา พร้อมวันที่ลงทะเบียน

8. Cart (ตะกร้าสินค้า): แทนตะกร้าสินค้าของผู้ใช้งาน (User) ซึ่งผู้ใช้แต่ละคนจะมีตะกร้าได้เพียงหนึ่งใบ (userId เป็น unique) ใช้สำหรับเก็บรายวิชาที่ผู้ใช้สนใจจะสั่งซื้อ (CartItem)

9. CartItem (รายการในตะกร้าสินค้า): เป็นเอนทิตีเชื่อมระหว่าง Cart และ Course แสดงรายการวิชาที่ถูกเพิ่มเข้ามาในตะกร้าสินค้าของผู้ใช้พร้อมจำนวน (ปกติเป็น 1 สำหรับคอร์สออนไลน์)

10. Order (การสั่งซื้อ): บันทึกข้อมูลการสั่งซื้อรายวิชาของผู้ใช้งาน (User) ประกอบด้วยหมายเลขคำสั่งซื้อ, วันที่สั่งซื้อ, ราคารวม, และสถานะคำสั่งซื้อ (เช่น PENDING, PAID) เชื่อมโยงกับรายการสั่งซื้อย่อย (OrderItem) และการชำระเงิน (Payment)

11. OrderItem (รายการสั่งซื้อย่อย): เป็นเอนทิตีเชื่อมระหว่าง Order และ Course ระบุว่าในแต่ละคำสั่งซื้อมีรายวิชาใดบ้าง จำนวน และราคา ณ ขณะสั่งซื้อ

12. Payment (การชำระเงิน): บันทึกข้อมูลการชำระเงินสำหรับแต่ละ Order ประกอบด้วยจำนวนเงินที่ชำระ, สถานะการชำระเงิน, วันที่ชำระเงิน และอาจมีรหัสอ้างอิงจากการชำระเงินผ่านระบบภายนอก

13. Category (หมวดหมู่บทความ): ใช้สำหรับจัดหมวดหมู่ของบทความ (Article)

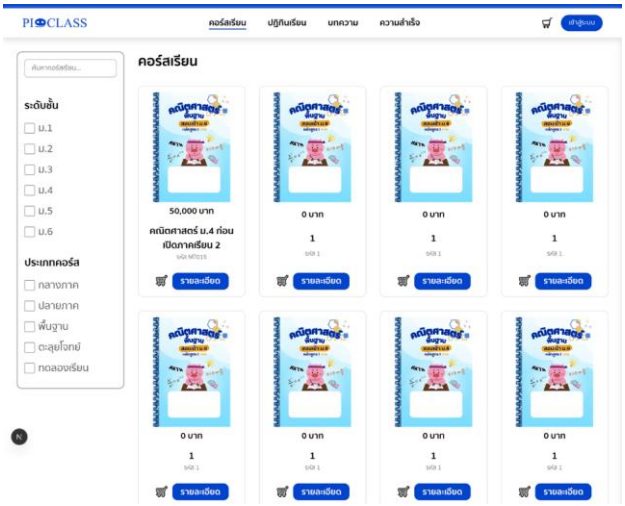
14. Article (บทความ): จัดเก็บเนื้อหาบทความ เช่น ข่าวสาร, บทความให้ความรู้ ประกอบด้วยชื่อ, เรื่องเนื้อหา, ภาพหน้าปก, และวันที่เผยแพร่ เชื่อมโยงกับ Category และรูปภาพประกอบ (ArticleImage)

15. ArticleImage (รูปภาพประกอบบทความ): จัดเก็บ URL และข้อมูลอื่นๆ ของรูปภาพที่ใช้ประกอบใน Article

16. Achievement (ความสำเร็จ): จัดเก็บข้อมูลเกี่ยวกับรางวัลหรือเครื่องหมายความสำเร็จที่ผู้ใช้สามารถได้รับ

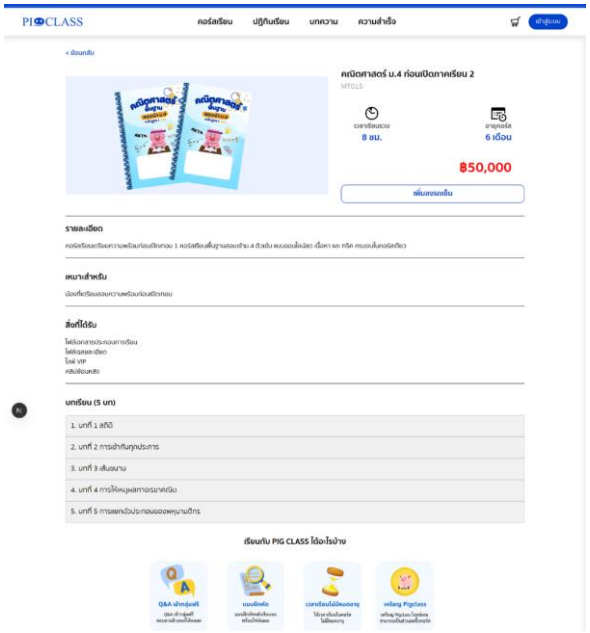
4. ผลการดำเนินงาน

หน้ารวมคอร์สเรียน ผู้ใช้สามารถค้นหาคอร์สเรียนต่าง ๆ และกรองหมวดหมู่คอร์สเรียนได้ 2 หมวดหมู่ คือ ระดับชั้น และประเภทคอร์ส ดังรูปที่ 4



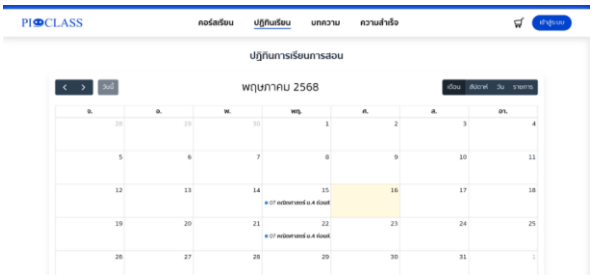
รูปที่ 4 หน้ารวมคอร์สเรียน

หน้ารายละเอียดคอร์สเรียน ผู้ใช้สามารถดูรายละเอียดของคอร์สเรียน ชั่วโมงเรียน อายุคอร์ส บทเรียน และสามารถเพิ่มคอร์สเรียนไปยังตะกร้าได้ ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 หน้ารายละเอียดคอร์สเรียน

ระบบปฏิทินการเรียนการสอน ผู้ใช้สามารถดูตารางคอร์สเรียนและสามารถซื้อคอร์สที่มีในปฏิทินได้ เมื่อผู้ใช้ซื้อคอร์สเรียนจะมีลิงก์เรียนออนไลน์เพิ่มไปยังปฏิทินของผู้ใช้ ดังรูปที่ 6



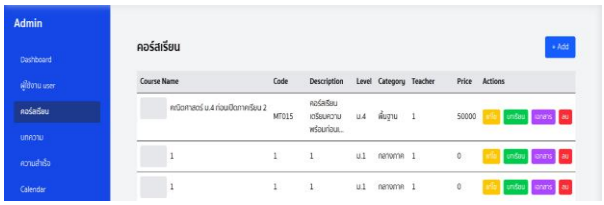
รูปที่ 6 ระบบปฏิทินการเรียนการสอน

ระบบตะกร้า ผู้ใช้สามารถดูรายละเอียดของคอร์สเรียน บทเรียน ชั่วโมงเรียน อายุคอร์ส และสามารถเพิ่มคอร์สเรียนไปยังตะกร้าได้ ดังรูปที่ 7



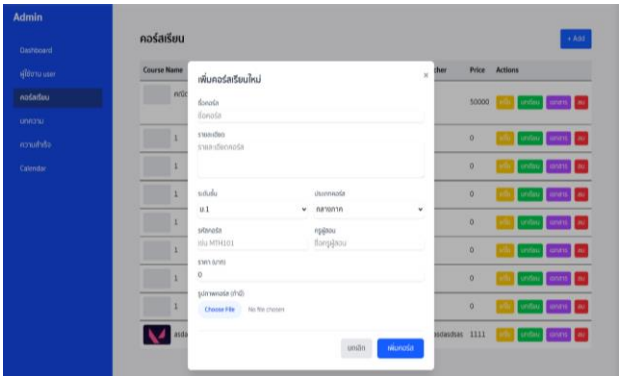
รูปที่ 7 ระบบตะกร้า

ระบบจัดการคอร์สเรียน ผู้ดูแลระบบสามารถดู แก้ไข และลบคอร์สเรียนได้ ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 หน้ารายละเอียดคอร์สเรียน

เพิ่มคอร์สเรียน ผู้ดูแลระบบสามารถเพิ่มคอร์สเรียน โดยประกอบด้วย ชื่อคอร์สเรียน, รายละเอียด, ระดับชั้น, ประเภทคอร์ส, รหัสคอร์สเรียน, ครูผู้สอน, ราคา และไฟลรูปภาพ ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 เพิ่มคอร์สเรียน

ในการประเมินผลการใช้งานเว็บไซต์ที่พัฒนาขึ้น ได้ดำเนินการสำรวจความคิดเห็นจากกลุ่มตัวอย่างผู้ใช้งาน โดยใช้แบบสอบถามความพึงพอใจซึ่งกำหนดระดับคะแนนแบบ 10 ระดับ (10-point Likert Scale) โดยเป็นการวัดระดับความคิดเห็นหรือทัศนคติในเชิงปริมาณ เพื่อให้สามารถนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ทางสถิติอย่างมีประสิทธิภาพ

หลักการของแบบสอบถามนี้อ้างอิงจากแนวคิดของ Rensis Likert การเลือกใช้ระดับคะแนนแบบ 10 ระดับ มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ผู้ตอบแบบสอบถามสามารถแสดงระดับความคิดเห็นหรือความพึงพอใจได้อย่างละเอียดมากยิ่งขึ้น ช่วยเพิ่มความแม่นยำและความละเอียดของข้อมูลที่ได้จากการประเมิน ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์และปรับปรุงระบบในขั้นตอนต่อไป

คำถามในการประเมินถูกออกแบบโดยผู้วิจัย โดยอ้างอิงจากแนวคิดด้านการพัฒนาเว็บไซต์เพื่อการศึกษา และการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้อง รวมถึงการประยุกต์ให้เหมาะสมกับกลุ่มเป้าหมายและวัตถุประสงค์ของโครงงาน โดยแบ่งออกเป็น 8 ด้าน ได้แก่ ความสะดวก, ความง่าย, ความเข้าใจง่าย, ความพึงพอใจ ความชัดเจน, ความเสถียรของระบบ, ความสวยงาม และความพึงพอใจโดยรวมต่อเว็บไซต์ [5-7]

ผลการประเมินความพึงพอใจสำหรับผู้ใช้งานเว็บไซต์กวดวิชาคณิตศาสตร์สำหรับสถาบันโดยมีกลุ่มตัวอย่างของผู้ใช้งานจำนวน 10 คน

ตารางที่ 1 ตารางแสดงความพึงพอใจเฉลี่ย (คะแนน 1-10) ของผู้ใช้

หัวข้อการประเมิน	ระดับความพึงพอใจเฉลี่ย
1. ความสะดวกในการสมัครสมาชิก / เข้าสู่ระบบ	8.60
2. ความง่ายในการค้นหาและซื้อคอร์สเรียน	8.80
3. ความเข้าใจง่ายของเมนูและไอคอนต่าง ๆ	7.80
4. ความพึงพอใจในการเรียนวิดีโอการสอนและดาวน์โหลดเอกสาร	7.40
5. ความชัดเจนของตารางเรียน / ปฏิทินเรียนสด	8.30
6. ความเสถียรของระบบ (ระบบช้า, ไม่ล่ม, ไม่ค้าง)	7.30
7. ความสวยงามและความน่าสนใจของหน้าเว็บไซต์	8.20
8. ความพึงพอใจโดยรวมต่อเว็บไซต์	7.90
เฉลี่ย	8.04

แบบประเมินความพึงพอใจสำหรับผู้ดูแลระบบระบบบริหารจัดการเว็บไซต์สถาบันกวดวิชาคณิตศาสตร์ระดับมัธยมศึกษา

ตารางที่ 2 ตารางแสดงความพึงพอใจเฉลี่ย (คะแนน 1-10) ของผู้ดูแลระบบ

หัวข้อการประเมิน	ระดับความพึงพอใจเฉลี่ย
1. ความใช้งานง่ายในการเพิ่ม ลบ แก้ไขข้อมูลต่าง ๆ	8.5
2. ความเสถียรของระบบ (ไม่ล่ม, ไม่ค้าง)	8.5
3. ความสวยงามและความน่าสนใจของระบบ (UI/UX)	8
4. ความพึงพอใจโดยรวมต่อระบบ	9
เฉลี่ย	8.5

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

การพัฒนาระบบบริหารจัดการเว็บไซต์สำหรับสถาบันกวดวิชาคณิตศาสตร์ระดับมัธยมศึกษาในครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อยกระดับประสิทธิภาพในการบริหารจัดการภายในสถาบัน ตลอดจนเพิ่มคุณภาพในการให้บริการด้านการศึกษา โดยเฉพาะในด้านการเพิ่มช่องทางการเข้าถึงแหล่งความรู้ของนักเรียน การอำนวยความสะดวกในกระบวนการสมัครเรียน และการจัดระบบข้อมูลภายในให้มีความเป็นระบบ มีความถูกต้อง และสามารถดำเนินงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

เว็บไซต์ที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยฟังก์ชันการทำงานหลัก ได้แก่ การแสดงรายละเอียดคอร์สเรียนออนไลน์ที่เปิดสอน การเปิดให้ผู้เรียนสามารถเลือกซื้อคอร์สเรียนได้ทั้งในรูปแบบออนไลน์และเรียนสดผ่านระบบ การเผยแพร่บทความความรู้ผ่านระบบบทความ การแสดงผลงานและความสำเร็จของนักเรียน รวมถึงระบบสมัครสมาชิกและเข้าสู่ระบบสำหรับผู้เรียน ในส่วนของผู้ดูแลระบบยังสามารถจัดการข้อมูลผู้ใช้ คอร์สเรียน ระบบการชำระเงิน และจัดการเนื้อหาบนเว็บไซต์ได้ผ่านระบบหลังบ้าน ซึ่งออกแบบมาให้ใช้งานได้สะดวก ไม่ซับซ้อน

ในการทดสอบระบบ ได้ดำเนินการกับกลุ่มตัวอย่าง 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มนักเรียนระดับมัธยมศึกษา จำนวน 10 คน และกลุ่มผู้ดูแลระบบ จำนวน 2 คน โดยผลการประเมินจากกลุ่มนักเรียนพบว่าผู้ใช้สามารถเข้าใจและใช้งานระบบได้อย่างราบรื่น โดยให้คะแนนความพึงพอใจเฉลี่ยในทุกด้านที่ 8.04 ถือว่าอยู่ในระดับดี ขณะที่กลุ่มผู้ดูแลระบบให้คะแนนความพึงพอใจเฉลี่ยที่ 8.50 สะท้อนให้เห็นถึงความง่ายในการจัดการข้อมูลและความเสถียรของระบบ ระบบเว็บไซต์ที่พัฒนาขึ้นสามารถตอบโจทย์ทั้งในด้านการบริหารจัดการสถานบัน การเรียนการสอน และการส่งเสริมประสบการณ์ใช้งานของผู้เรียนได้อย่างครอบคลุม เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในสถาบันกวดวิชาในยุคดิจิทัลได้อย่างแท้จริง สามารถต่อยอดและพัฒนาเพิ่มเติมได้ในอนาคต เช่น การเพิ่มระบบแบบทดสอบเพื่อประเมินผลการเรียนรู้ของนักเรียน และระบบออกใบประกาศนียบัตรออนไลน์อัตโนมัติ ซึ่งจะช่วยเสริมแรงจูงใจในการเรียนรู้ และเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับผู้เรียน แต่ยังพบข้อจำกัดดังนี้

1. ระบบการชำระเงิน เนื่องจากข้อจำกัดด้านงบประมาณ เวลาในการพัฒนา และความซับซ้อนของการเชื่อมต่อกับระบบชำระเงินออนไลน์ ทำให้โครงงานนี้ยังไม่สามารถติดตั้งระบบการชำระเงินจริง และไม่สามารถเปิดให้ใช้งานเว็บไซต์อย่างเป็นทางการในเชิงพาณิชย์ได้
2. การใช้งานบนอุปกรณ์สมาร์ตโฟนขนาดเล็ก แม้เว็บไซต์จะออกแบบให้รองรับการแสดงผลบนอุปกรณ์พกพา (Responsive Design) แต่ยังพบข้อผิดพลาดในการแสดงผลบางหน้า โดยเฉพาะบนหน้าจอสมาร์ตโฟนขนาดเล็ก เช่น ปุ่มล้นขอบ หรือข้อความไม่จัดวางอย่างเหมาะสม ซึ่งจำเป็นต้องปรับปรุงเพิ่มเติม
3. เว็บไซต์ยังไม่สามารถแสดงผลได้อย่างสมบูรณ์บนอุปกรณ์สมาร์ตโฟนที่มีขนาดหน้าจอเล็ก ซึ่งอาจส่งผลให้บางองค์ประกอบในหน้าเว็บไซต์มีการจัดวางที่ไม่เหมาะสม หรือเกิดปัญหาด้านการใช้งานจริงในบางอุปกรณ์
4. ระบบยังไม่มีฟังก์ชันการแจ้งเตือนสำหรับกำหนดการเรียนหรือกิจกรรมที่กำหนดไว้ในปฏิทิน ส่งผลให้ผู้ใช้อาจพลาดข้อมูลสำคัญหากไม่ได้เปิดเว็บไซต์เป็นประจำ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. พัฒนาเว็บไซต์ให้สามารถรองรับการแสดงผลบนอุปกรณ์สมาร์ทโฟน ขนาดเล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งในด้านการจัดวางองค์ประกอบ การปรับขนาดตัวอักษร และการแสดงผลของเมนูต่าง ๆ
2. พัฒนาระบบแจ้งเตือนสำหรับกำหนดการเรียน การเริ่มต้นคอร์สหรือกิจกรรมอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องผ่านช่องทางต่าง ๆ หรือการเชื่อมต่อกับแอปพลิเคชันภายนอก เพื่ออำนวยความสะดวกให้แก่ผู้ใช้งาน
3. เว็บไซต์ต้นแบบสามารถไปปรับใช้กับวิชาอื่น ๆ เช่น วิทยาศาสตร์ ภาษาอังกฤษ หรือภาษาไทย โดยปรับโครงสร้างเนื้อหาให้ยืดหยุ่น
4. เพิ่มระบบแบบทดสอบออนไลน์พร้อมตรวจคำตอบและสรุปผลอัตโนมัติ เพื่อวัดผลการเรียนรู้ของนักเรียน
5. พัฒนาระบบใบประกาศนียบัตรดิจิทัล เมื่อเรียนจบหรือผ่านเกณฑ์จะสร้างและส่งใบประกาศอัตโนมัติ เพิ่มแรงจูงใจและความน่าเชื่อถือ
6. เพิ่มระบบรีวิวคอร์ส ให้ผู้เรียนให้คะแนนและแสดงความคิดเห็นเพื่อช่วยปรับปรุงคอร์สและสร้างความน่าเชื่อถือ
7. พัฒนาแอปมือถือ iOS และ Android ใช้งานร่วมกับเว็บไซต์ พร้อมแจ้งเตือนกิจกรรมและกำหนดการเรียน เพิ่มความสะดวกในการเข้าถึง

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณการสนับสนุนจากภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และสาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร เป็นอย่างสูง

เอกสารอ้างอิง

[1] Staiano, F. (2022). Designing and prototyping interfaces with Figma: Learn essential UX/UI design principles by creating interactive prototypes for mobile, tablet, and desktop. Packt Publishing.

[2] สุธีธิดา สร้อยพวง, สุพัตรา พรหมบุตร, และสุธีรา แก้วประเสริฐ. (2562). การพัฒนาเว็บไซต์เพื่อส่งเสริม การทำงานของสถาบันสอนภาษาต่างประเทศ คิวเอ็ดยูเคชั่น. วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร, 13(1), 15–24.

[3] ศิริวรรณ สืนวล. (2562). เอิร์นสิ: เว็บแอปพลิเคชันสำหรับจัดการคอร์สเรียนออนไลน์ (สารนิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์.

[4] หอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยขอนแก่น. (ม.ป.ป.). การใช้งานบริการสืบค้นฐานข้อมูล. สืบค้นจาก https://library.kku.ac.th/29992 เมื่อวันที่ 10 ธันวาคม 2567.

[5] Likert, R. (1932). A technique for the measurement of attitudes. Archives of Psychology, 22(140), 1–55.

[6] มงคล ณ ลาภูน, จงกลนี ลิ้มประภัสสร, จินตนา เกิดลาภี, และศศินันท์ ศาสตร์สาระ. (2560). ระบบ สมัครอบรมคอร์สบริการวิชาการออนไลน์ คณะบริหารธุรกิจและเทคโนโลยีสารสนเทศ มทร.สุวรรณภูมิ. วารสารวิชาการการจัดการเทคโนโลยีสารสนเทศและนวัตกรรม, 4(2).

[7] ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร. (ม.ป.ป.). แบบสอบถามความพึงพอใจของผู้ใช้งานเว็บไซต์. SurveyCan. สืบค้นจาก https://www.surveycan.com/survey/8a67a5d2-cf35-48c8-bafc-92fd136e2175 เมื่อ 1 พฤษภาคม 2568

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การพัฒนาแอปพลิเคชันตรวจจับท่าทางออกกำลังกายแบบเรียลไทม์ด้วยการเรียนรู้เชิงลึก

Development of a Real-Time Exercise Pose Detection Application using Deep Learning

วีรวรรณ จันทนะทรัพย์[1] วิชยุตม์ ศรีงาม[2*] และปรานต์ เจ๊ะสมัน[3]

หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการข้อมูลและเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

เลขที่ 1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

veerawan.j@rmutp.ac.th[1], wichayut-s@rmutp.ac.th[2*], pran-j@rmutp.ac.th[3]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแอปพลิเคชันสำหรับตรวจจับและให้คำแนะนำท่าทางการออกกำลังกายแบบเรียลไทม์ โดยใช้เทคนิคการเรียนรู้เชิงลึกและคอมพิวเตอร์วิทัศน์ ระบบถูกออกแบบเพื่อลดความเสี่ยงจากการบาดเจ็บในกลุ่มผู้ที่มีภาวะน้ำหนักเกิน (BMI ≥ 25.0 kg/m²) กระบวนการวิจัยประกอบด้วยการรวบรวมท่าออกกำลังกายแบบแรงกระแทกต่ำจำนวน 6 ท่า การกำหนดจุดพิกัดข้อต่อของร่างกายจำนวน 17 จุด และการพัฒนาโมเดล YOLOv8-Pose ร่วมกับ MediaPipe สำหรับตรวจจับท่าทางแบบเรียลไทม์ ระบบสามารถวิเคราะห์มุมข้อต่อเปรียบเทียบกับท่ามาตรฐาน และให้ข้อมูลย้อนกลับแก่ผู้ใช้งานได้ทันที

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าโมเดลมีความแม่นยำสูง (mAP@0.5 = 0.98) ในการทดสอบการตรวจจับแบบเรียลไทม์กับผู้ใช้งาน พบว่าระบบมีความถูกต้องโดยรวมร้อยละ 92.00 และความเร็วในการประมวลผลเฉลี่ย 22.4 เฟรมต่อวินาที นอกจากนี้ ผู้ใช้งานมีความพึงพอใจในระดับมากที่สุด (ค่าเฉลี่ย = 4.61) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโมเดลมีความสามารถตรวจจับท่าทางในการใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: การเรียนรู้เชิงลึก, การตรวจจับท่าทาง, การออกกำลังกายที่บ้าน

Abstract

This study aims to develop an application for real-time exercise pose detection and guidance using deep learning and computer vision techniques. The system is designed to reduce the risk of injury among overweight individuals (BMI ≥ 25.0 kg/m²). The research process involves collecting six low-impact exercise poses, defining 17 body keypoints, and developing a YOLOv8-Pose model integrated with MediaPipe for real-time pose detection. The system analyzes joint angles, compares them with standard postures, and provides immediate feedback to users.

The experimental results indicate that the proposed model achieves high accuracy, with a mean Average Precision (mAP@0.5) of 0.98. In real-time evaluation with end users, the system attained an overall detection accuracy of 92.00% and maintained an average processing speed of 22.4 frames per second. In addition, user satisfaction was rated at the highest level (mean = 4.61), demonstrating that the model is effective in accurately detecting exercise poses and is suitable for practical real-world applications.

Keywords: Deep Learning, Pose Detection, Home-based Exercise

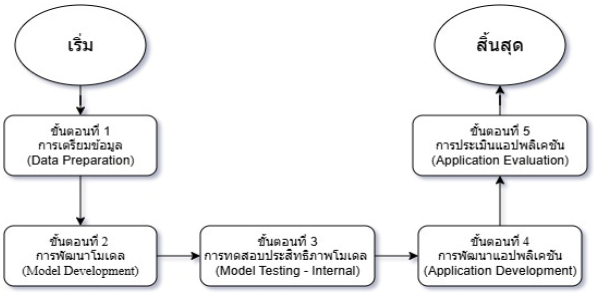
1. บทนำ

ในปัจจุบัน ภาวะโรคอ้วนได้กลายเป็นปัญหาสาธารณสุขที่สำคัญทั้งในระดับประเทศและระดับโลก โดยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และเป็นปัจจัยเสี่ยงหลักที่นำไปสู่โรคไม่ติดต่อเรื้อรัง (Non-Communicable Diseases: NCDs) เช่น โรคเบาหวาน โรคความดันโลหิตสูง และโรคหัวใจและหลอดเลือด [1] นอกจากนี้รายงานด้านกิจกรรมทางกายยังชี้ให้เห็นว่าการขาดการเคลื่อนไหวเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อสุขภาพโดยรวม [2] แม้ว่าการออกกำลังกายอย่างสม่ำเสมอจะเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการควบคุมและป้องกันภาวะดังกล่าว แต่สำหรับกลุ่มผู้ที่มีภาวะน้ำหนักเกิน การออกกำลังกายอาจมีข้อจำกัดด้านสรีรวิทยา ซึ่งเพิ่มความเสี่ยงต่อการบาดเจ็บ โดยเฉพาะในกรณีที่ไม่มีผู้เชี่ยวชาญให้คำแนะนำอย่างใกล้ชิด [3] ในขณะเดียวกัน การออกกำลังกายที่บ้าน (Home-based Exercise) ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างมากในยุคดิจิทัล เนื่องจากความสะดวกและการเข้าถึงที่ง่ายผ่านแพลตฟอร์มออนไลน์ อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของการออกกำลังกายรูปแบบนี้คือการขาดระบบตรวจสอบความถูกต้องของท่าทาง และการให้ข้อมูลย้อนกลับแบบเรียลไทม์ ซึ่งอาจส่งผลให้ผู้ใช้งานปฏิบัติท่าทางไม่ถูกต้อง ลดประสิทธิภาพของการออกกำลังกาย และเพิ่มความเสี่ยงต่อการบาดเจ็บ [4] ด้วยความก้าวหน้าของเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ โดยเฉพาะด้านคอมพิวเตอร์วิทัศน์ และการเรียนรู้เชิงลึก ได้มีการพัฒนาเทคนิคการประมาณท่าทางของมนุษย์ที่สามารถตรวจจับตำแหน่งโครงร่างร่างกายได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว [5], [6] รวมถึงการพัฒนาเฟรมเวิร์กสำหรับการประมวลผลภาพแบบเรียลไทม์บนอุปกรณ์ปลายทาง [7] เทคโนโลยีดังกล่าวได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในหลากหลายด้าน รวมถึงระบบผู้ช่วยฝึกสอนการออกกำลังกายอัตโนมัติ ที่สามารถวิเคราะห์และประเมินความถูกต้องของท่าทางได้แบบเรียลไทม์ [4] นอกจากนี้ การพัฒนาโมเดลเชิงลึกยังมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบตรวจจับและจำแนกข้อมูลภาพ [8], [9]

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาแอปพลิเคชันตรวจจับท่าทางการออกกำลังกายแบบเรียลไทม์ โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก เพื่อทำหน้าที่เสมือนผู้ช่วยฝึกสอนส่วนบุคคลในรูปแบบดิจิทัล ระบบสามารถตรวจจับ วิเคราะห์ และเปรียบเทียบท่าทางของผู้ใช้งานกับท่ามาตรฐาน พร้อมทั้งให้ข้อมูลย้อนกลับทันที เพื่อช่วยให้ผู้ใช้งานโดยเฉพาะกลุ่มผู้ที่มีภาวะน้ำหนักเกิน สามารถออกกำลังกายได้อย่างถูกต้อง ปลอดภัย และมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น อันจะนำไปสู่การส่งเสริมสุขภาพเชิงป้องกันและยกระดับคุณภาพชีวิตในระยะยาว

2. วิธีการวิจัย

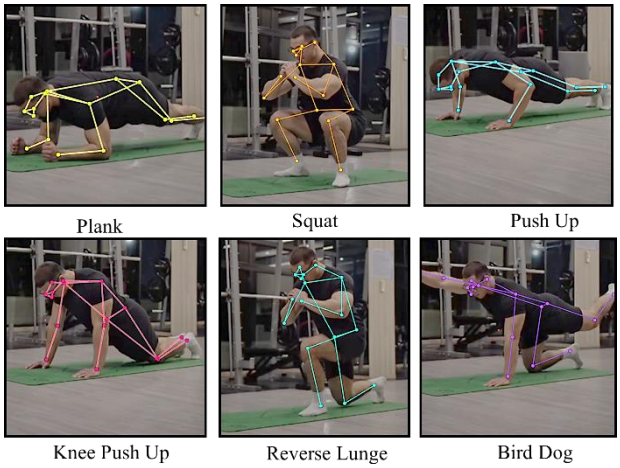
การวิจัยนี้มุ่งพัฒนาแอปพลิเคชันตรวจจับท่าทางการออกกำลังกายแบบเรียลไทม์ โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้เชิงลึกและการประมวลผลภาพดิจิทัล เพื่อให้สามารถวิเคราะห์และให้คำแนะนำท่าทางออกกำลังกายได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ กระบวนการดำเนินงานวิจัยแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนหลักดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ภาพรวมขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

2.1 การเตรียมข้อมูลและกำหนดท่าทางต้นแบบ (Data Preparation and Pose Definition)

ในขั้นตอนแรก มุ่งเน้นการสร้างชุดข้อมูลที่มีความถูกต้อง (Ground Truth) โดยคัดเลือกท่าออกกำลังกายแบบแรงกระแทกต่ำ (Low-impact exercises) จำนวน 6 ท่า ได้แก่ Squat, Reverse Lunge, Push-up, Plank, Knee Push-up, และ Bird Dog ภายใต้คำแนะนำของผู้เชี่ยวชาญด้านวิทยาศาสตร์การกีฬา เพื่อกำหนดลักษณะท่าทางที่ถูกต้องตามหลักสรีรศาสตร์และขอบเขตความคลาดเคลื่อนที่ปลอดภัย (Margin of Error) ข้อมูลวิดีโอของท่าทางต้นแบบจากผู้เชี่ยวชาญถูกนำมาประมวลผลโดยการแปลงเป็นภาพนิ่ง (Frame Extraction) และจัดทำเป็นชุดข้อมูลภาพ (Image Dataset) จากนั้นดำเนินการติดป้ายกำกับข้อมูล (Annotation) โดยระบุตำแหน่งจุดสำคัญของร่างกาย (Keypoints) จำนวน 17 จุด [7] เช่น ไหล่ สะโพก เข่า และข้อเท้า เป็นต้น เพื่อให้โมเดลสามารถเรียนรู้โครงสร้างทางเรขาคณิตของร่างกายได้อย่างแม่นยำด้วยเครื่องมือบนแพลตฟอร์ม Roboflow ตัวอย่างท่าทางออกกำลังกายต้นแบบดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ตัวอย่างข้อมูลการจัดเตรียมท่าทางออกกำลังกายต้นแบบ

หลังขั้นตอนการเตรียมและกำหนดท่าทางต้นแบบเสร็จสิ้น ผลลัพธ์จะได้ค่าพิกัดของจุดสำคัญ (Keypoint Extraction) จากวิดีโอต้นแบบของท่าออกกำลังกาย เพื่อสร้างฐานข้อมูลท่าทางอ้างอิง (Master Pose Database) ซึ่งใช้เป็นเกณฑ์มาตรฐานในการเปรียบเทียบและประเมินความถูกต้องของท่าทางออกกำลังกายของผู้ใช้งานในขั้นตอนการทำงานจริงของระบบ

2.2 การพัฒนาโมเดล (Model Development)

ชุดข้อมูลที่เตรียมไว้ถูกนำมาใช้ในการฝึกสอนโมเดลการเรียนรู้เชิงลึก โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (Convolutional Neural Network: CNN) ภายใต้สถาปัตยกรรมของโมเดล YOLOv8-Pose ซึ่งมีความสามารถในการตรวจจับตำแหน่งจุดสำคัญของร่างกาย (Human Keypoints) ได้อย่างแม่นยำ งานวิจัยนี้ได้ใช้ชุดข้อมูลมาตรฐานสากล COCO Keypoints Dataset เพื่อเสริมสร้างความสามารถของโมเดลในการเรียนรู้ลักษณะท่าทางที่หลากหลายและครอบคลุมบริบทการเคลื่อนไหวของมนุษย์ ในกระบวนการฝึกสอน (Training) กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม (Hyperparameters) อาทิ จำนวนรอบการเรียนรู้ (Epochs), ขนาดของภาพนำเข้า (Image Size) และอัตราการเรียนรู้ (Learning Rate) เพื่อให้โมเดลสามารถเรียนรู้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้เทคนิค Data Augmentation เช่น การหมุนภาพ (Rotation), การปรับขนาด (Scaling) และการเปลี่ยนแปลงความสว่าง (Brightness Adjustment) เพื่อเพิ่มความหลากหลายของข้อมูลฝึกสอน และลดปัญหา Overfitting ซึ่งช่วยให้โมเดลมีความสามารถในการทั่วไปที่ดีขึ้นพัฒนาชุดคำสั่งด้วยภาษาไพธอนร่วมกับ Roboflow API รายละเอียดพารามิเตอร์ที่กำหนดดังรูปที่ 3

```
epochs=300
imgsz=640
batch=8
optimizer="SGD"
lr0=0.01
lrf=0.01
momentum=0.937
weight_decay=0.0005
warmup_epochs=3
hsv_h=0.015
hsv_s=0.7
hsv_v=0.4
degrees=5
translate=0.05
scale=0.4
flipud=0.0
fliplr=0.5
workers=4
```

รูปที่ 3 รายละเอียดพารามิเตอร์ในการฝึกฝนโมเดล

2.3 การทดสอบประสิทธิภาพโมเดล (Model Testing)

เพื่อประเมินประสิทธิภาพของโมเดลตรวจจับท่าทางการออกกำลังกาย งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการทดสอบโดยใช้ตัวชี้วัดเชิงปริมาณที่เป็นมาตรฐานในงานด้านคอมพิวเตอร์วิทัศน์ (Computer Vision) การเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) และการประมาณท่าทางของมนุษย์ (Human Pose Estimation) ด้วยตัวชี้วัดค่าเฉลี่ยของความแม่นยำเฉลี่ย (Mean Average Precision: mAP) โดยคำนวณค่าเฉลี่ยของความแม่นยำ (Average Precision: AP) ของแต่ละคลาสหรือแต่ละท่าทางออกกำลังกาย แล้วนำมาเฉลี่ยรวมกัน เพื่อวัดความสามารถของโมเดลในการตรวจจับหรือจำแนกข้อมูลได้อย่างถูกต้อง โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้ mAP@0.5 เป็นการวัดความแม่นยำที่ค่า IoU ตั้งแต่ 0.5 (50%) ขึ้นไป สูตรคำนวณค่า mAP นิยามดังสมการที่ (1)

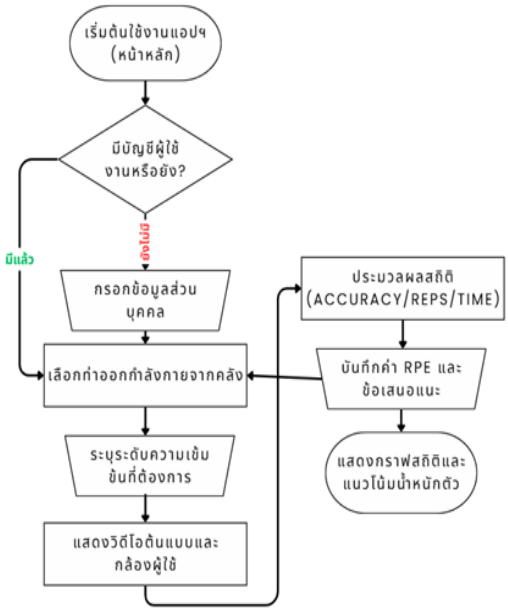
$$mAP = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} AP_i \qquad (1)$$

โดยที่ N คือ จำนวนคลาสของท่าทาง

AP_i คือ ค่าเฉลี่ยของความแม่นยำของแต่ละคลาส

2.4 การพัฒนาแอปพลิเคชัน (Application Development)

ในการพัฒนาแอปพลิเคชัน งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการในลักษณะเชิงลำดับขั้น (Iterative Development) โดยเริ่มจากการสร้างระบบต้นแบบ เพื่อใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมและความแม่นยำของโมเดลในสภาพแวดล้อมที่ควบคุมได้ ในขั้นตอนนี้ได้พัฒนาส่วนติดต่อผู้ใช้แบบกราฟิก (Graphical User Interface: GUI) สำหรับใช้ในการทดลองและตรวจสอบผลลัพธ์เบื้องต้นของระบบ โดยประยุกต์ใช้งานร่วมกับโมเดลตรวจจับท่าทางออกกำลังกายที่ได้พัฒนาขึ้น ดำเนินการออกแบบแอปพลิเคชันให้รองรับการใช้งานจริงหลายแพลตฟอร์ม (Cross-platform) ด้วยการเปิดใช้งานผ่านซอฟต์แวร์เบราว์เซอร์โดยไม่ขึ้นกับระบบปฏิบัติการ และใช้เทคโนโลยีพื้นฐานในการพัฒนาส่วนหลังบ้าน (Back End) ด้วยภาษาไพธอน ทำงานร่วมกับไลบรารีต่าง ๆ อาทิ Open CV, TensorFlow และ Keras สำหรับการพัฒนาส่วนหน้าบ้าน (Front End) พัฒนาด้วยภาษา HTML และ JavaScript ในการพัฒนาอินเทอร์เฟสและการประมวลผลฝั่งผู้ใช้ (Client-side Processing) ระบบถูกออกแบบให้รองรับการประมวลผลแบบเรียลไทม์ (Real-time Processing) ด้วยการรับข้อมูลสัญญาณภาพวิดีโอจากกล้องดิจิทัลบนอุปกรณ์โทรศัพท์มือถือ หรือจากกล้องดิจิทัลเว็บแคมที่ผู้ใช้ติดตั้ง จากนั้นผสานการทำงานร่วมกับไลบรารีสำหรับการตรวจจับท่าทางและแสดงเส้นโครงร่าง (Detection & Visualization) ในรูปแบบ Side-by-Side คู่กับวิดีโอต้นแบบ โดยระบบจะแจ้งเตือนความถูกต้องแบบเรียลไทม์ผ่านการ "เปลี่ยนสีเส้น" (**เขียว = ถูก**, **แดง = ผิด**) พร้อมข้อความแนะนำ และจำนวนครั้งของการออกกำลังกาย รายละเอียดลำดับขั้นตอนการดำเนินกิจกรรมของผู้ใช้งานบนหน้าจอแอปพลิเคชันดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ขั้นตอนดำเนินกิจกรรมของผู้ใช้งานบนหน้าจอแอปพลิเคชัน

ในส่วนการประมวลผลสถิติ คณะผู้วิจัยได้พัฒนาอัลกอริทึมเพื่อหาค่าความแม่นยำของการตรวจจับท่าทางออกกำลังกายของผู้ใช้งานว่ามีความถูกต้องกับวิดีโอต้นแบบ ด้วยค่าร้อยละความสำเร็จ (Performance Percentage) นิยามดังสมการที่ (2)

$$\text{Performance}(\%) = \left(\frac{\text{ValidReps}}{\text{TargetReps}}\right) \times 100 \qquad (2)$$

โดยที่

Performance (%) คือ ค่าร้อยละความสำเร็จ/ประสิทธิภาพในการออกกำลังกายในแต่ละเซต

Valid Reps: คือ จำนวนครั้งที่ผู้ใช้งานปฏิบัติได้ถูกต้องตามเกณฑ์มาตรฐานและผ่านเงื่อนไขของระบบ เช่น มุมข้อต่อถูกต้องและเคลื่อนไหวครบลำดับสถานะ

Target Reps: คือ จำนวนครั้งเป้าหมายที่ผู้ใช้งานกำหนดไว้ก่อนเริ่มการฝึกซ้อม

โดยผลลัพธ์ค่าร้อยละความสำเร็จที่คำนวณได้ถูกนำมาใช้กำหนดเกณฑ์การให้คะแนน (Grading Criteria) ให้แก่ผู้ใช้งาน โดยเกณฑ์ช่วงคะแนนอ้างอิงจากผู้เชี่ยวชาญ โดยผู้ใช้งานจะได้รับเกรด (Grade) ผลตอบกลับ (Feedback) พร้อมคำอธิบายผล (Interpretation) ผ่านบนหน้าจอส่วนต่อประสาน (UI) ของแอปพลิเคชัน รายละเอียดเกณฑ์ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เกณฑ์การให้เกรดและผลลัพธ์ของผู้ใช้งาน

Performance	Grade	Feedback	Interpretation
90% - 100%	A	Excellent!	ดีเยี่ยม: ผู้ใช้มีความแข็งแรงและความแม่นยำสูง สามารถทำท่าทางที่ถูกต้องได้ครบหรือเกือบครบตามเป้าหมาย
75% - 89%	B	Good Job!	ดี: ผู้ใช้ทำได้ดี แต่อาจมีบางช่วงที่หมดแรงหรือทำท่าผิดพลาดเล็กน้อย ทำให้จำนวนครั้งหายไปบางส่วน
< 75%	C	Keep Going	พยายามเข้า: ผู้ใช้ทำได้ต่ำกว่าเป้าหมายอย่างมีนัยสำคัญ อาจเกิดจากความล้า หรือโฟกัสท่าทางยังไม่แม่นยำ ต้องฝึกฝนเพิ่มเติม

2.5 การประเมินแอปพลิเคชัน (Application Evaluation)

ในการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของแอปพลิเคชันที่นำโมเดลตรวจจับท่าทางมาประยุกต์ใช้ คณะผู้วิจัยดำเนินการออกแบบการทดสอบใช้งานจริงกับผู้ใช้งานแบบเรียลไทม์โดยทำงานร่วมกับสัญญาณภาพวิดีโอจากอุปกรณ์กล้องดิจิทัล ทดสอบกับกลุ่มตัวอย่างที่มีน้ำหนักตัวสูง ทั้งหมด 5 คน กำหนดให้ทำท่าออกกำลังกายทั้ง 6 ท่า ๆ ละ 10 ครั้ง/คน รวมจำนวนทั้งสิ้น 300 ชุดการทดสอบ รายละเอียดการประเมินประสิทธิภาพมีดังนี้

2.5.1 การประเมินด้วยค่าร้อยละความถูกต้อง (Accuracy) เป็นการประเมินระบบดำเนินการโดยใช้ข้อมูลจำนวน 300 ชุด (Total) และตรวจสอบผลลัพธ์ของระบบว่าถูกต้อง (Correct) หรือไม่ถูกต้อง ความแม่นยำของระบบคำนวณได้ตามสมการที่ (3)

$$Accuracy_i = \frac{Correct_i}{Total_i} \times 100 \quad (3)$$

โดยที่ $Accuracy_i$ คือ ค่าความแม่นยำของท่าที่ i

2.5.2 การประเมินประสิทธิภาพในการทำงานแบบเรียลไทม์ (Real-Time Performance) งานวิจัยนี้วัดด้วยค่าความเร็วจำนวนเฟรมต่อวินาที (Frames Per Second: FPS) สูตรการคำนวณนิยามดังสมการที่ (4)

$$FPS = \frac{NoF}{TotalTime} \quad (4)$$

โดยที่ NoF คือ จำนวนเฟรมทั้งหมดที่ประมวลผล

$TotalTime$ คือ เวลาที่ใช้ (วินาที)

2.5.3 การประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานประเมินโดยใช้แบบสอบถามมาตราส่วนประมาณค่า (Likert Scale) 5 ระดับ ครอบคลุมด้านความง่ายในการใช้งาน (Usability) และความรวดเร็วในการตอบสนอง (Responsiveness) ความถูกต้องของระบบ (Accuracy Perception) ผลการประเมินถูกนำมาวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เพื่อสรุประดับความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

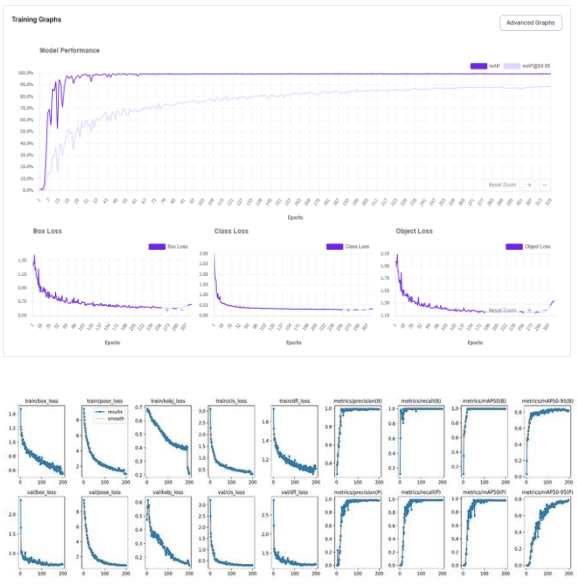
จากการศึกษาวิจัย พัฒนา และทดสอบระบบอย่างเป็นขั้นตอน สามารถสรุปผลการทดลองและอภิปรายผลได้ดังนี้

3.1 ประสิทธิภาพของโมเดล (Model Performance)

ผลการฝึกสอนโมเดลด้วย YOLOv8-Pose พบว่า โมเดลสามารถเรียนรู้ลักษณะโครงร่างของร่างกายมนุษย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีค่าค่าความแม่นยำเฉลี่ย (Mean Average Precision: mAP) เท่ากับ 0.98 (98%) ที่จำนวนรอบการเรียนรู้ 300 Epochs แสดงให้เห็นถึงความสามารถของโมเดลในการตรวจจับตำแหน่งจุดสำคัญ (Keypoints) ได้อย่างแม่นยำนอกจากนี้ โมเดลสามารถตรวจจับจุดสำคัญของร่างกายได้ครบทั้ง 17 จุด ตามมาตรฐาน และสามารถนำไปใช้ในการคำนวณมุมข้อต่อเพื่อวิเคราะห์ท่าทางได้อย่างมีเสถียรภาพ ผลลัพธ์ความแม่นยำของโมเดลดังตารางที่ 2 และรูปที่ 5 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ผลลัพธ์ค่าความแม่นยำของโมเดลระหว่างการฝึกสอน

Epoch	mAP@0.5	Total Loss	Description
50	0.65	0.085	โมเดลเรียนรู้โครงสร้างร่างกาย
100	0.82	0.045	โมเดลจำแนกแขนและขาได้แม่นยำขึ้น
200	0.94	0.021	โมเดลมีความเสถียร
300	0.98	0.012	โมเดลมีความแม่นพร้อมใช้งาน

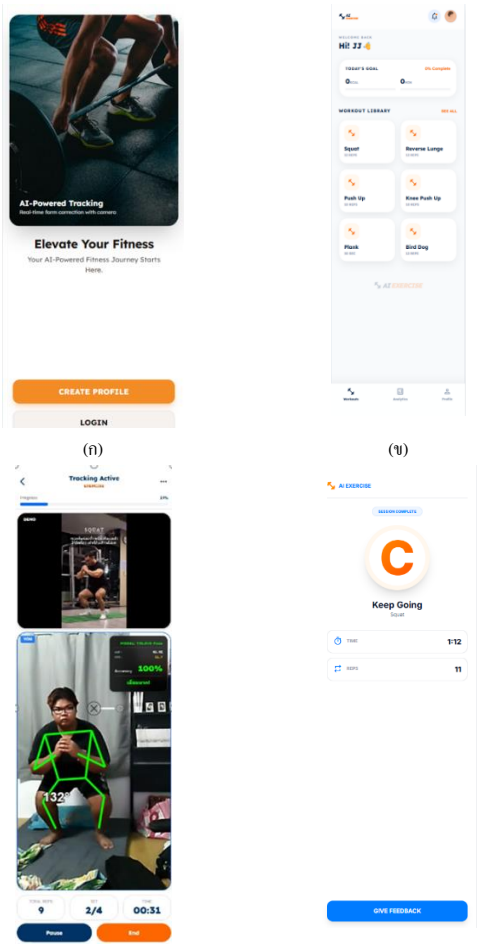


รูปที่ 5 ผลการฝึกสอนของโมเดล YOLOv8-Pose

จากรูปที่ 5 ผลการฝึกสอนของโมเดล YOLOv8-Pose แสดงการลู่เข้าสู่ค่าที่เหมาะสมอย่างมีเสถียรภาพ โดยค่า training และ validation loss ลดลงสอดคล้องกันโดยไม่เกิด overfitting ขณะที่ Precision และ Recall เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและคงที่ใกล้ 1.0 นอกจากนี้ ค่า mAP@0.5 มีค่าสูง (≈1.0 และ 0.88–0.90 ตามลำดับ) สะท้อนถึงความแม่นยำและความสามารถในการทั่วไปของโมเดลที่เหมาะสมต่อการใช้งานแบบเรียลไทม์

3.2 ประสิทธิภาพความแม่นยำของระบบ (System Accuracy)

งานวิจัยนี้นำโมเดลตรวจจับท่าทางที่ได้ฝึกสอนมาพัฒนาต่อยอดใช้งานจริงในรูปแบบแอปพลิเคชันที่รองรับการใช้งานจริงหลายแพลตฟอร์มด้วยการเปิดผ่านบราว์เซอร์ และทำงานร่วมกับอุปกรณ์กล้องดิจิทัลที่ติดตั้งบนอุปกรณ์ของผู้ใช้งาน คณะผู้วิจัยดำเนินการออกแบบภายใต้หลักการของแนวคิดเชิงออกแบบ (Design Thinking) ที่ให้ความสำคัญกับความต้องการของผู้ใช้งานเป็นสำคัญ ตัวอย่างหน้าจอส่วนต่อประสาน (UI) ของแอปพลิเคชัน ดังรูปที่ 6



(ก) (ข) (ค) (ง)

รูปที่ 6 ตัวอย่างหน้า UI ของแอปพลิเคชัน (ก) UI: Login เข้าสู่ระบบ (ข) UI: การเลือกท่าออกกำลังกาย (ค) UI: ภาพวิดีโอต้นแบบและผลตรวจจับท่าทางถูกต้อง (ง) และผลลัพธ์จากระบบ

คณะผู้วิจัยดำเนินการทดสอบดำเนินการโดยให้กลุ่มตัวอย่างทดลองผู้ที่มีน้ำหนักตัวสูง (ผู้ที่มี BMI ≥ 25.0) ทั้งหมด 5 คน ซึ่งเป็นกลุ่มตัวอย่างนำร่อง (Pilot Study) เพื่อทดสอบความเป็นไปได้ (Proof of Concept) และประเมินอัลกอริทึมเชิงเทคนิคเป็นหลัก โดยให้ทำท่าออกกำลังกายทั้ง 6 ท่า ๆ ละ 10 ครั้ง/คน รวมทั้งสิ้นท่าละ 50 ครั้งเปรียบเทียบผลการตัดสินของระบบ (System Prediction) กับการตรวจสอบโดยผู้เชี่ยวชาญ (Ground Truth) รายละเอียดผลการทดสอบมีดังนี้

3.2.1 ผลความถูกต้องในการตรวจจับท่าทาง

ผลลัพธ์ความถูกต้องของการตรวจท่าทางพบว่า ระบบสามารถตรวจจับท่าทางได้ถูกต้องโดยรวมเฉลี่ย (Overall Accuracy) ที่ร้อยละ 92.00 โดยระบบสามารถตรวจจับท่าทาง Squat ได้แม่นยำมากที่สุดร้อยละ 98.00 เนื่องจากเป็นท่า Static ที่ไม่มีการเคลื่อนไหวซับซ้อน รองลงมาคือท่า Reverse Lunge ตรวจจับได้ถูกต้องร้อยละ 94.00 ในขณะที่ท่าที่มีความแม่นยำต่ำที่สุดคือ Bird Dog ตรวจจับได้ถูกต้องร้อยละ 88.00 เนื่องจากการยกแขนและขาไขว้กันทำให้เกิดการบดบัง (Occlusion) ในบางมุมกล้อง อย่างไรก็ตามผลการทดสอบดังกล่าวอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับการใช้งานจริง (Acceptable Level) รายละเอียดผลการทดสอบดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลลัพธ์ค่าความถูกต้องของระบบจากการทดสอบ

No.	Exercise	Number of Trials	Correct Detections	Incorrect Detections	Detection Accuracy
1	Squat	50	49	1	98.00%
2	Reverse Lunge	50	47	3	94.00%
3	Push Up	50	46	4	92.00%
4	Knee Push Up	50	45	5	90.00%
5	Plank	50	45	5	90.00%
6	Bird Dog	50	44	6	88.00%
Overall		300	276	24	92.00%

3.2.2 ผลการวัดประสิทธิภาพความเร็วในการประมวลผล

ในการทดสอบประสิทธิภาพความเร็วในการประมวลผล คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบผ่านแอปพลิเคชันบนสมาร์ทโฟน iPhone 16 Pro ซึ่งใช้ชิปประมวลผล A18 Pro ประกอบด้วย 6-core CPU และ 6-core GPU พร้อมหน่วยความจำ RAM ขนาด 8GB ผลการทดสอบพบว่าระบบมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อแสดงผลวิดีโอเพียงอย่างเดียวที่จำนวนเฟรมภาพ (FPS) เฉลี่ยเท่ากับ 29.50 โดยมีความหน่วง (Latency) 33 มิลลิวินาทีในการประมวลผล 1 เฟรม (ms/frame) และประสิทธิภาพลดลงเมื่อเปิดใช้งาน AI ตรวจจับ (FPS เฉลี่ย 22.40, ความหน่วง 45 ms/frame) เนื่องจากภาระการประมวลผลที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ เมื่อเปิดใช้งาน AI ร่วมกับการบันทึกหน้าจอ ประสิทธิภาพลดลงมากที่สุด (FPS เฉลี่ย 17.60, ความหน่วง 56 ms/frame) แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มฟังก์ชันส่งผลกระทบต่ออัตราเฟรมและความหน่วงของระบบอย่างชัดเจน รายละเอียดผลการทดสอบดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลลัพธ์ค่าเฉลี่ยอัตราจำนวนเฟรมภาพ และค่าความหน่วง

Test Condition	Min FPS	Max FPS	Average FPS	Average Latency (ms/frame)
Video display only	28	30	29.50	33
AI detection enabled	18	26	22.40	45
AI + screen recording	15	20	17.60	56

การใช้งาน AI ร่วมกับการบันทึกหน้าจอส่งผลให้ความเร็วลดลงเหลือ 17.6 FPS (ความหน่วง 56 ms/frame) แม้อัตราเฟรมนี้จะทำให้ผู้ใช้รู้สึกถึงความไม่ลื่นไหล (Lag) เมื่อเทียบกับมาตรฐาน 24-30 FPS แต่เนื่องจากท่าออกกำลังกายในงานวิจัยเป็นประเภทแรงกระแทกต่ำที่มีการเคลื่อนไหวไม่รวดเร็ว ความเร็วระดับนี้จึงยังยอมรับได้และไม่ส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการตรวจจับพิกัดร่างกายและการนับจำนวนครั้งของระบบ

3.2.3 ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

งานวิจัยนี้ดำเนินการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน (User Satisfaction) ด้วยการสำรวจความพึงพอใจของกลุ่มเป้าหมายผู้ที่มีภาวะน้ำหนักเกิน (ผู้ที่มี BMI ≥ 25.0) จำนวน 5 คน ผ่านแบบสอบถามออนไลน์ด้วยการประมาณค่า 5 ระดับ ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานพบว่า โดยภาพรวมอยู่ในระดับมากที่สุด (ค่าเฉลี่ย = 4.61, S.D. = 0.48) เมื่อพิจารณาเป็นรายด้าน พบว่า ด้านประโยชน์ (Impact) มีค่าเฉลี่ยสูงสุด ($\bar{x}$ = 4.66, S.D. = 0.48) โดยเฉพาะประเด็นการช่วยสร้างความมั่นใจในการออกกำลังกาย ($\bar{x}$ = 4.70, S.D. = 0.40) รองลงมาคือ ด้านความง่ายในการใช้งาน ($\bar{x}$ = 4.62, S.D. = 0.45) ซึ่งผู้ใช้งานให้ความเห็นว่าหน้าจอมีความสวยงามและชัดเจน ($\bar{x}$ = 4.65, S.D. = 0.42) และสามารถเข้าถึงผ่านเว็บได้สะดวก ($\bar{x}$ = 4.58, S.D. = 0.49)

สำหรับด้านหน้าที่การทำงาน มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมากที่สุดเช่นกัน ($\bar{x}$ = 4.55, S.D. = 0.50) โดยระบบมีความถูกต้องของคำแนะนำ ($\bar{x}$ = 4.60, S.D. = 0.48) และความแม่นยำในการนับจำนวนครั้ง ($\bar{x}$ = 4.50, S.D. = 0.52) อยู่ในระดับสูง ซึ่งผลการประเมินดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งในด้านการใช้งานและประโยชน์ที่ได้รับ

4. บทสรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแอปพลิเคชันตรวจจับท่าทางการออกกำลังกายแบบเรียลไทม์ โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้เชิงลึกและคอมพิวเตอร์วิทัศน์ ซึ่งสามารถตรวจจับ วิเคราะห์ และให้คำแนะนำท่าทางออกกำลังกายได้อย่างอัตโนมัติ ผลการทดลองพบว่าโมเดลที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพสูง โดยมีค่า mAP@0.5 เท่ากับ 0.98 และในการทดสอบแบบเรียลไทม์กับผู้ใช้งานจริงบนแอปพลิเคชันมีความแม่นยำในการตรวจจับโดยรวมร้อยละ 92.00 ที่ความเร็วเฉลี่ย 22.40 FPS และได้รับความพึงพอใจจากผู้ใช้งานในระดับมากที่สุด (ค่าเฉลี่ย 4.61) สะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพของระบบในการนำไปใช้งานจริงเพื่อส่งเสริมการออกกำลังกายที่ถูกต้องและปลอดภัย เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Bazarevsky et al. [6] และ Lugaresi et al. [7] ซึ่งพัฒนาเทคนิคการตรวจจับท่าทางด้วย MediaPipe และ BlazePose พบว่า งานวิจัยนี้มีความสอดคล้องในด้านการใช้จุดสำคัญของร่างกาย (Keypoints) สำหรับการวิเคราะห์ท่าทางแบบเรียลไทม์ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้มีความแตกต่างโดยการผสานโมเดล YOLOv8-Pose เข้ากับการวิเคราะห์มุมข้อต่อและการให้ข้อมูลย้อนกลับแบบทันที ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการเป็นผู้ช่วยฝึกสอนอัตโนมัติได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับงานของ Chen และ Tian [4] ซึ่งเป็นระบบ AI สำหรับการโค้ชการออกกำลังกาย พบว่าระบบในงานวิจัยนี้ให้ผลลัพธ์ด้านความแม่นยำในระดับใกล้เคียงกัน แต่มีจุดเด่นในด้านการพัฒนาเป็นแอปพลิเคชันที่ทำงานได้หลายแพลตฟอร์ม และยังสามารถเข้าถึงได้ง่าย รองรับการใช้งานแบบเรียลไทม์ และไม่ต้องพึ่งพาอุปกรณ์เฉพาะทาง ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มของการพัฒนาเทคโนโลยีด้านสุขภาพดิจิทัลในปัจจุบัน

โดยสรุป งานวิจัยนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในด้าน Pose-Estimation และ AI-based Fitness coaching แต่มีการต่อยอดในเชิงการประยุกต์ใช้งานจริง โดยเน้นการออกแบบที่ยึดผู้ใช้เป็นศูนย์กลาง (User-Centered Design) อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของงานวิจัยได้แก่ ขนาดกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบยังอยู่ในกลุ่มนำร่อง (Pilot Study) เพื่อทดสอบความเป็นไปได้ของประสิทธิภาพการทำงานของระบบเบื้องต้น ซึ่งคณะผู้วิจัยได้วางแผนการทดสอบในอนาคตกับกลุ่มตัวอย่างที่มีภาวะน้ำหนักเกิน (ผู้ที่มี BMI ≥ 25.0) จำนวน 30 รายเพื่อหาประสิทธิภาพในทางสถิติสำหรับการสรุปความพึงพอใจในวงกว้าง นอกจากนั้นปัญหาการบดบังของร่างกายในบางท่าทาง (Occlusion) ซึ่งอาจส่งผลต่อความแม่นยำของระบบ ดังนั้น งานวิจัยในอนาคตควรมุ่งเน้นการเพิ่มความหลากหลายของข้อมูล และพัฒนาอัลกอริทึมให้รองรับสถานการณ์ที่ซับซ้อนมากยิ่งขึ้น เพื่อยกระดับประสิทธิภาพของระบบให้ดียิ่งขึ้นต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หน่วยงานต้นสังกัดของคณะผู้วิจัย ที่ให้การสนับสนุนในการดำเนินงานวิจัย ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ หน่วยงานจัดการประชุมวิชาการ และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการนำเสนอบทความในการประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ครั้งที่ 9

6. เอกสารอ้างอิง

[1] World Health Organization, *"Obesity and overweight,"* 2021.

[2] B. E. Ainsworth *et al.*, *"2011 Compendium of Physical Activities," Medicine & Science in Sports & Exercise*, vol. 43, no. 8, pp. 1575–1581, 2011.

[3] American College of Sports Medicine, *ACSM's Guidelines for Exercise Testing and Prescription*. Philadelphia, PA, USA: Lippincott Williams & Wilkins, 2013.

[4] Y. Chen and Y. Tian, *"AI-Based Fitness Coaching System Using Pose Estimation," Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1827, no. 1, p. 012023, 2021.

[5] Z. Cao, T. Simon, S. E. Wei, and Y. Sheikh, *"Realtime Multi-Person 2D Pose Estimation using Part Affinity Fields,"* in *Proc. IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. (CVPR)*, 2017, pp. 7291–7299.

[6] V. Bazarevsky *et al.*, *"BlazePose: On-device Real-time Body Pose Tracking," arXiv preprint arXiv:2006.10204*, 2020.

[7] C. Lugaresi *et al.*, *"MediaPipe: A Framework for Building Perception Pipelines," arXiv preprint arXiv:1906.08172*, 2019.

[8] Y. LeCun, Y. Bengio, and G. Hinton, *"Deep learning," Nature*, vol. 521, no. 7553, pp. 436–444, 2015.

[9] I. Goodfellow, Y. Bengio, and A. Courville, *Deep Learning*. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2016.

[10] COCO Consortium, *"COCO Keypoints Dataset,"* [Online]. Available: https://cocodataset.org/#Keypoints-2018



วีรวรรณ จันทนะทรัพย์
อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ความเชี่ยวชาญ:- Digital Image Processing, Data Visualization, Human-Computer Interface, Unmanned Aerial Vehicle Technology



วิชยุตม์ ศรีงาม
นักศึกษาชั้นปีที่ 4
สาขาวิชาวิทยาการข้อมูลและเทคโนโลยีสารสนเทศ
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
งานวิจัยที่สนใจ:- Data Science & Health Tech



ปรานต์ เจ๊ะสมัน
นักศึกษาชั้นปีที่ 4
สาขาวิชาวิทยาการข้อมูลและเทคโนโลยีสารสนเทศ
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
งานวิจัยที่สนใจ:- AI & Deep Learning

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การพยากรณ์จำนวนการจดทะเบียนหย่าร้างในประเทศไทย

Forecasting the Number of Divorces in Thailand

วีรวรรณ จันทนะทรัพย์[1] พิสิษฐ์ คำหนุน[2*] กฤษฎา สุขแก้ว[3] และ รัชวลัย สมะบุพ[4]

หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการข้อมูลและเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

เลขที่ 1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

veerawan.j@rmutp.ac.th[1], pisit-kum@rmutp.ac.th[2*], kritsada-su@rmutp.ac.th[3], ratchawalai-s@rmutp.ac.th[4]

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มการจดทะเบียนหย่าร้างของประเทศไทย และพัฒนาแบบจำลองพยากรณ์อนุกรมเวลาโดยอาศัยการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลอง SARIMA และ Prophet เพื่อคัดเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานจริง ข้อมูลที่ใช้เป็นข้อมูลสถิติรายเดือน ซึ่งผ่านกระบวนการรวบรวม เตรียมข้อมูล และแปลงให้อยู่ในรูปแบบอนุกรมเวลา ประสิทธิภาพของแบบจำลองถูกประเมินด้วยวิธีการพยากรณ์แบบ Rolling Forecast เพื่อทดสอบความทนทานของแบบจำลองในหลายช่วงการพยากรณ์ โดยใช้ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAPE) เป็นตัวชี้วัดหลัก ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง Prophet ให้ค่าความคลาดเคลื่อนในการพยากรณ์ต่ำกว่าแบบจำลอง SARIMA โดยมีค่า MAPE เท่ากับ 4.33% และ 5.58% ตามลำดับ ซึ่งสะท้อนถึงความสามารถในการพยากรณ์ที่เหนือกว่า ดังนั้น แบบจำลอง Prophet จึงถูกเลือกเป็นแบบจำลองหลักสำหรับการพัฒนาแดชบอร์ดเชิงโต้ตอบด้วยเครื่องมือ Streamlit เพื่อใช้ในการแสดงผลย้อนหลังและการพยากรณ์ในอนาคต

คำสำคัญ : การหย่าร้าง, การพยากรณ์, การเรียนรู้ของเครื่อง

Abstract

This study aims to analyze trends in divorce registration in Thailand and to develop time series forecasting models through a comparative analysis of SARIMA and Prophet, with the objective of identifying the most suitable model for practical application. Monthly statistical data were collected, preprocessed, and transformed into a time series format. Model performance was evaluated using a rolling forecast approach to ensure robustness across multiple forecasting horizons, with the Mean Absolute Percentage Error (MAPE) employed as the primary evaluation metric. The experimental results indicate that the Prophet model yields lower forecasting error than the SARIMA model, with MAPE values of 4.33% and 5.58%, respectively, demonstrating superior predictive performance. Based on these findings, the Prophet model was selected as the core model for developing an interactive dashboard using Streamlit, enabling visualization of historical data and future forecasts.

Keywords: Divorce, Forecasting, Machine Learning

1. บทนำ

สถาบันครอบครัวถือเป็นหน่วยพื้นฐานที่สำคัญของโครงสร้างสังคม เนื่องจากมีบทบาทในการพัฒนาทรัพยากรมนุษย์ทั้งด้านร่างกาย จิตใจ และค่านิยมทางสังคม ซึ่งเป็นรากฐานสำคัญของการพัฒนาประเทศในระยะยาว อย่างไรก็ตาม ภายใต้บริบทของการเปลี่ยนแปลงทางเศรษฐกิจและสังคมที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้โครงสร้างครอบครัวมีความเปราะบางเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง หนึ่งในตัวชี้วัดที่สะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวคือ “สถิติการจดทะเบียนหย่าร้าง” ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในหลายประเทศ รวมถึงประเทศไทย [1] โดยข้อมูลจากกรมการปกครองระบุว่าการหย่าร้างยังคงอยู่ในระดับสูงอย่างต่อเนื่องในช่วงหลายปีที่ผ่านมา โดยในปี พ.ศ. 2567 มีการจดทะเบียนหย่าสูงถึง 147,621 คู่ทั่วประเทศ [2] สถานการณ์ดังกล่าวมิได้เป็นเพียงปัญหาในระดับปัจเจกบุคคล แต่ยังส่งผลกระทบในระดับสังคม ในด้านการวิเคราะห์ข้อมูล แม้ว่าหน่วยงานภาครัฐจะมีการจัดเก็บข้อมูลสถิติอย่างเป็นระบบ แต่การนำข้อมูลไปใช้ยังคงจำกัดอยู่ในรูปแบบของการวิเคราะห์เชิงพรรณนา (Descriptive Analysis) ซึ่งเน้นการอธิบายข้อมูลในอดีต มากกว่าการคาดการณ์แนวโน้มในอนาคต ในขณะที่เทคโนโลยีด้านวิทยาการข้อมูลและการเรียนรู้ของเครื่องได้เปิดโอกาสให้สามารถพัฒนาแบบจำลองพยากรณ์ (Forecasting Models) ที่มีความแม่นยำสูงและสามารถรองรับความซับซ้อนของข้อมูลอนุกรมเวลาได้ดีขึ้น [3]

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง SARIMA และ Prophet สำหรับการพยากรณ์แนวโน้มการหย่าร้างในประเทศไทย โดยใช้วิธี Rolling Forecast เพื่อประเมินความสามารถของแบบจำลองในหลายช่วงเวลา พร้อมทั้งนำแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุดไปพัฒนาเป็นแดชบอร์ดเชิงโต้ตอบ (Interactive Dashboard) เพื่อสนับสนุนการวิเคราะห์ข้อมูลและการตัดสินใจเชิงนโยบายอย่างมีประสิทธิภาพ

สำหรับการเรียบเรียงหัวข้อเนื้อหาในบทความนี้ประกอบด้วย 5 หัวข้อหลัก ดังนี้ (1) บทนำ (2) วิธีการดำเนินงานวิจัย (3) ผลการวิจัยและอภิปรายผล (4) สรุปผล และหัวข้อสุดท้าย (5) กิตติกรรมประกาศ รายละเอียดในแต่ละหัวข้อมีดังนี้

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 การจัดเตรียมข้อมูล

การจัดเตรียมข้อมูลเป็นขั้นตอนสำคัญที่มีผลต่อความแม่นยำของแบบจำลอง โดยดำเนินการอย่างเป็นระบบเพื่อให้ข้อมูลมีความเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์อนุกรมเวลา รายละเอียดดังนี้

2.1.1 การรวบรวมข้อมูล

ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นใช้ข้อมูลสถิติทุติยภูมิ (Secondary Data) จำนวนการหย่าร้างรายเดือนในประเทศไทย ซึ่งรวบรวมจากสำนักบริหารการทะเบียน กรมการปกครอง (DOPA) จากกรมการปกครอง กระทรวงมหาดไทย [4] ครอบคลุมช่วงเวลา 18 ปี ตั้งแต่ พ.ศ. 2550 ถึง พ.ศ. 2567 เพื่อให้ได้ฐานข้อมูลที่เพียงพอต่อการวิเคราะห์แนวโน้มระยะยาว ในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ คณะผู้วิจัยเก็บรวบรวมข้อมูลและจัดรูปแบบโครงสร้างให้อยู่ในรูปแบบข้อมูลอนุกรมเวลาแบบตัวแปรเดียว ใช้เทคนิคการดึงข้อมูลจากหน้าเว็บ (Web Scraping) เพื่อดึงข้อมูลดิบในทุกเดือนของไทย พัฒนาด้วยชุดคำสั่งภาษาไพธอน และไลบรารีที่เกี่ยวข้อง ชุดข้อมูลสถิติการหย่าร้างที่เก็บรวบรวมได้จัดเก็บอยู่ในรูปแบบไฟล์ CSV

2.1.2 การตรวจสอบข้อมูลค่าความผิดปกติ (Outliers)

งานวิจัยนี้ตรวจจับและตัดค่าผิดปกติ (Outliers) ด้วยวิธี IQR (Interquartile Range) [5] ซึ่งวิธีทางสถิติที่ใช้ในการวัดการกระจายของข้อมูล และนิยมใช้สำหรับตรวจจับค่าผิดปกติ (Outliers) โดยพิจารณาช่วงของข้อมูลส่วนกลาง (middle 50%) และตัด Outliers ออก

2.1.3 การตรวจสอบความนิ่ง (Stationary)

เพื่อยืนยันคุณสมบัติของข้อมูลเพื่อนำไปสร้างแบบจำลอง SARIMA ด้วยวิธีการ Augmented Dickey-Fuller Test (ADF) และ Kwiatkowski–Phillips–Schmidt–Shin Test (KPSS) [6], [7]

2.2 การสร้างแบบจำลองและการประเมินผล

ในการวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยได้พัฒนาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองพยากรณ์จำนวน 2 รูปแบบ ได้แก่ แบบจำลองเชิงสถิติ Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average (SARIMA) และแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง Prophet โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อคัดเลือกแบบจำลองที่ให้ความแม่นยำสูงสุดในการพยากรณ์ข้อมูลอนุกรมเวลา พัฒนาชุดคำสั่งด้วยภาษาไพธอน และไลบรารีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง อาทิ pandas, matplotlib, statsmodels, SARIMAX และ Prophet เป็นต้น รายละเอียดการสร้างแบบจำลองมีดังนี้

2.2.1 แบบจำลอง SARIMA เป็นการขยายจาก ARIMA เพื่อรองรับข้อมูลที่มีลักษณะฤดูกาล โดยสามารถเขียนในรูปแบบทั่วไป นิยามดังสมการที่ (1) [7]

$$\Phi_P(B^m)\phi_p(B)(1-B)^d(1-B^m)^D y_t = \Theta_Q(B^m)\theta_q(B)\varepsilon_t \quad (1)$$

โดยที่ y_t คือ ค่าข้อมูลอนุกรมเวลา ณ เวลา t

B คือ ตัวดำเนินการถอยหลัง (Backshift Operator)

$(1-B)^d$ คือ การหาผลต่างอันดับที่ d

$(1-B^m)^D$ คือ การหาผลต่างอันดับที่ D โดย m คือตามฤดูกาล

$\phi_P(B)$ คือ พหุนามของส่วน AR ลำดับที่ p

$\theta_q(B)$ คือ พหุนามของส่วน MA ลำดับที่ q

$\Phi_P(B^m)$ คือ พหุนามของ Seasonal AR ลำดับที่ P

$\Theta_q(B^m)$ คือ พหุนามของ Seasonal MA ลำดับที่ Q

m คือ จำนวนคาบเวลาของฤดูกาล

ε_t คือ ค่าความคลาดเคลื่อน (white noise)

2.2.2 แบบจำลอง Prophet เป็นแบบจำลองเชิง Additive ที่พัฒนาโดย Meta มีความสามารถจัดการข้อมูลที่มีแนวโน้มและฤดูกาลได้อย่างยืดหยุ่น Prophet มีจุดเด่นในการรองรับ Changepoints หรือจุดเปลี่ยนแนวโน้มของข้อมูลโดยอัตโนมัติ ทำให้เหมาะกับข้อมูลจริงที่มีความไม่ต่อเนื่อง [8] นิยามการทำงานดังสมการที่ (2)

$$y(t) = g(t) + s(t) + h(t) + \epsilon_t \quad (2)$$

โดยที่ $y(t)$ คือ ค่าของตัวแปรที่ต้องการพยากรณ์ ณ เวลา t

$g(t)$ คือ ฟังก์ชันแนวโน้ม (Trend)

$s(t)$ คือ ฟังก์ชันฤดูกาล (Seasonality)

$h(t)$ คือ ผลกระทบจากเหตุการณ์พิเศษ (Holiday Effects)

ϵ_t คือ ค่าความคลาดเคลื่อน

ในการเลือกพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ผู้วิจัยได้ใช้วิธี Grid Search เพื่อค้นหาชุดค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ค่า Akaike Information Criterion (AIC) ต่ำที่สุด

2.2.3 การประเมินประสิทธิภาพแบบจำลอง

งานวิจัยนี้ประเมินประสิทธิภาพแบบจำลองพยากรณ์ข้อมูลการหย่าร้างด้วยค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error: MAPE) ซึ่งเป็นเกณฑ์วัดความแม่นยำที่ได้รับความนิยมสูงสุด เนื่องจากมีการแสดงผลในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ (%) ทำให้เป็นอิสระจากหน่วยวัดของข้อมูล (Unit-free measure) อย่างไรก็ตาม MAPE มีข้อจำกัดในกรณีที่ค่าจริงเป็นศูนย์หรือใกล้ศูนย์ แต่สำหรับข้อมูลจำนวนการจดทะเบียนหย่าร้างที่มีค่าเป็นบวกเสมอ MAPE จึงถือเป็นเกณฑ์ที่มีความเหมาะสมและสื่อสารได้ชัดเจนที่สุด สมการสำหรับการคำนวณหาค่า MAPE นิยามดังสมการที่ (3)

$$MAPE = \frac{100}{n}\sum_{t=1}^{n}\left|\frac{y_t - \hat{y}_t}{y_t}\right| \quad (3)$$

โดยที่ y_t คือ ค่าจริง, $\hat{y}_t$ คือ ค่าพยากรณ์ และ n คือ จำนวนข้อมูล

สำหรับการแปลผลค่า MAPE คณะผู้วิจัยใช้เกณฑ์มาตรฐานของ Lewis [9] ซึ่งจำแนกความสามารถในการพยากรณ์ออกเป็น 4 ระดับ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เกณฑ์จำแนกความแม่นยำในการพยากรณ์ของ Lewis [9]

เกณฑ์	การแปลผล
$MAPE < 10\%$	ความแม่นยำสูงมาก (Highly)
$10\% \le MAPE < 20\%$	ความแม่นยำระดับดี (Good)
$20\% \le MAPE < 50\%$	ความแม่นยำในระดับพอใช้ (Reasonable)
$MAPE \ge 50\%$	ความแม่นยำ (Inaccurate)

2.3 การพัฒนาแดชบอร์ดนำเสนอข้อมูล

งานวิจัยนี้ดำเนินการนำผลการพยากรณ์จากแบบจำลอง SARIMA และแบบจำลอง Prophet มาพัฒนาในรูปแบบแดชบอร์ดนำเสนอข้อมูลเชิงโต้ตอบ (Interactive Dashboard) เปิดใช้งานผ่านโปรแกรมเบราว์เซอร์ ทำงานแบบออนไลน์ ระบบถูกออกแบบมาให้แสดงผลข้อมูลได้ 3 ส่วนหลัก ได้แก่ (1) การนำเสนอข้อมูลสถิติพื้นฐานของข้อมูลการจดทะเบียนสมรสและจดทะเบียนหย่าร้าง (2) การเปรียบเทียบค่าความแม่นยำของโมเดล และ (3) การพยากรณ์แนวโน้มในอนาคตที่ผู้ใช้สามารถปรับแต่งระยะเวลาได้เอง สำหรับเครื่องมือในการพัฒนาคณะผู้วิจัยใช้ภาษาไพธอน ร่วมกับไลบรารีนำเสนอข้อมูล Plotly และเฟรมเวิร์ค Streamlit ออกแบบการปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้งาน (HCI) โดยเน้นความง่าย และผู้ใช้สามารถโต้ตอบเลือกข้อมูลแบบเรียลไทม์ด้วยเครื่องมือตัวกรอง (Filter Data) โดยเฉพาะอย่างยิ่งผู้ใช้งานสามารถปรับแต่งระยะเวลาในการพยากรณ์ได้เอง

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 ผลการพัฒนาแบบจำลอง SARIMA

สำหรับการกำหนดพารามิเตอร์ของแบบจำลอง SARIMA ในงานวิจัยนี้ อาศัยกระบวนการของ Box–Jenkins โดยเริ่มจากการตรวจสอบความนิ่งของข้อมูล (Stationarity) ผ่านการพิจารณากราฟอนุกรมเวลาและการทดสอบเชิงสถิติ หากพบว่าข้อมูลยังไม่เป็นนิ่ง จะดำเนินการทำผลต่าง (Differencing) เพื่อกำจัดแนวโน้มและองค์ประกอบเชิงฤดูกาล โดยกำหนดพารามิเตอร์ d และ D ตามลำดับ จากนั้น ทำการวิเคราะห์โครงสร้างความสัมพันธ์ของข้อมูลในช่วงเวลา (lag) ต่าง ๆ ด้วยกราฟ Autocorrelation Function (ACF) และ Partial Autocorrelation Function (PACF) ของข้อมูลที่ผ่านการทำ การหาผลต่างแล้ว โดยพิจารณาลักษณะการตัด (cut-off) หรือการลดลงอย่างค่อยเป็นค่อยไป (tail-off) ของกราฟ ACF เพื่อประมาณลำดับของพจน์ Moving Average (MA) และใช้กราฟ PACF เพื่อประมาณลำดับของพจน์ Autoregressive (AR) ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญในการกำหนดโครงสร้างของแบบจำลอง SARIMA ให้เหมาะสมกับข้อมูลอนุกรมเวลา สำหรับข้อมูลรายเดือน กำหนดคาบฤดูกาล $s = 12$ และทำการทดลองปรับค่าพารามิเตอร์หลายชุดด้วยวิธี Grid Search แบบกำหนดช่วง เพื่อสร้างแบบจำลอง SARIMA หลายรูปแบบ จากนั้นทำการคัดเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาจากค่า Akaike Information Criterion (AIC) ที่ต่ำที่สุด ร่วมกับการตรวจสอบความเหมาะสมของเศษเหลือ เพื่อให้แน่ใจว่าเศษเหลือมีลักษณะเป็น white noise รายละเอียดมีดังนี้

3.1.1 การทดสอบความนิ่งของข้อมูล

ก่อนการสร้างแบบจำลอง SARIMA เพื่อพยากรณ์ข้อมูลการจดทะเบียนหย่าร้าง คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการตรวจสอบความนิ่งของข้อมูลด้วยวิธีการทดสอบด้วย ADF เพื่อพิจารณาความเหมาะสมของข้อมูลด้วยค่าพารามิเตอร์เบื้องต้น ผลลัพธ์การทดสอบดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบความนิ่งของข้อมูลระดับและข้อมูลผลต่างครั้งที่ 1

ลักษณะข้อมูล	ADF Value	P-value	ผลการทดสอบ
ข้อมูลระดับ	-1.586	0.490	ข้อมูลมีลักษณะไม่นิ่ง
ข้อมูลผลต่างครั้งที่ 1	-7.937	0.000*	ข้อมูลมีลักษณะนิ่ง

หมายเหตุ: มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (P-value < 0.05)

การทดสอบความนิ่งของข้อมูลผลการทดสอบ ADF พบว่าข้อมูลระดับไม่นิ่ง p-value = 0.490 แต่เมื่อหาผลต่างอันดับที่ 1 ข้อมูลมีลักษณะนิ่งอย่างมีนัยสำคัญ p-value = 0.000 คณะผู้วิจัยจึงกำหนดค่า $d = 1$ ในแบบจำลอง SARIMA ทั้งนี้พบความผันผวนผิดปกติในช่วงปี 2020 จากสถานการณ์โควิด-19 ซึ่งจะถูกพิจารณาเป็นค่าความคลาดเคลื่อนในขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง

3.1.2 ผลลัพธ์ค่า AIC

การคัดเลือกพารามิเตอร์ผู้วิจัยใช้วิธีการปรับจูนค่าคงที่เพื่อทดสอบพารามิเตอร์ SARIMA $(p,d,q) \times (P,D,Q,s)_{12}$ ที่เป็นไปได้ทั้งหมด และคัดเลือกชุดพารามิเตอร์ที่ให้ค่า AIC ต่ำที่สุดเท่ากับ 2,890.77 เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่มีความสมดุลระหว่างความแม่นยำและความซับซ้อนที่เหมาะสมที่สุด

3.1.3 ผลลัพธ์ประสิทธิภาพของแบบจำลอง SARIMA

สำหรับการประเมินเสถียรภาพของแบบจำลองแบบจำลองถูกทดสอบด้วยเทคนิคหน้าต่างขยายโดยขยายฐานข้อมูลฝึกสอนและพยากรณ์ค่าถัดไปซ้ำรวม 16 รอบ ครอบคลุมช่วงปี 2009–2024 เพื่อ

ประเมินความเสถียรของแบบจำลองในสภาวะที่ขนาดข้อมูลเพิ่มขึ้นตามลำดับเวลา พบว่า แบบจำลอง SARIMA มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAPE) ในการพยากรณ์ข้อมูลอยู่ที่ 5.58%

3.2 ผลการพัฒนาแบบจำลอง Prophet

จากการพัฒนาแบบจำลอง Prophet เพื่อศึกษาศักยภาพของแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องเชิงสมัยใหม่ในการพยากรณ์ข้อมูลอนุกรมเวลา ผลการพัฒนาและประสิทธิภาพของแบบจำลอง Prophet มีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 ผลการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์

งานวิจัยนี้ดำเนินการปรับแต่งพารามิเตอร์ (Hyperparameter Tuning) ให้กับแบบจำลอง Prophet เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการพยากรณ์ กระบวนการดังกล่าวมุ่งเน้นการปรับค่าพารามิเตอร์สำคัญที่มีผลต่อความยืดหยุ่นของแนวโน้มและความแรงของฤดูกาลเพื่อให้แบบจำลองสามารถเรียนรู้รูปแบบข้อมูลได้อย่างเหมาะสมและลดความคลาดเคลื่อนในการพยากรณ์ โดยมีรายละเอียดดังรูปที่ 1

```
changepoint_prior_scale     =  1.0
seasonality_prior_scale     =  0.1
yearly_seasonality          =  TRUE
weekly_seasonality          =  FALSE
daily_seasonality           =  FALSE
```

รูปที่ 1 รายละเอียดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของแบบจำลอง Prophet

3.2.2 ผลลัพธ์ประสิทธิภาพของแบบจำลอง Prophet

คณะผู้วิจัยดำเนินการทดสอบประสิทธิภาพการพยากรณ์ข้อมูลการจดทะเบียนหย่าร้างของแบบจำลอง Prophet โดยใช้ชุดข้อมูลย้อนหลังตั้งแต่ปี พ.ศ.2550 ถึง พ.ศ.2567 ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวได้รับการออกแบบมาเพื่อรองรับข้อมูลที่มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงตามเวลามีรูปแบบฤดูกาล และอาจได้รับผลกระทบจากเหตุการณ์สำคัญบางช่วงเวลา ปรับแต่งพารามิเตอร์การเรียนรู้ด้วยค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมข้างต้น ประเมินค่าประสิทธิภาพพบว่า แบบจำลอง Prophet มีค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เพียง 4.33% สะท้อนถึงความแม่นยำสูงถึง 95.67% แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความแม่นยำสูงและสามารถรองรับข้อมูลที่มีความผันผวนได้ดี

3.3 ผลการพัฒนาส่วนแดชบอร์ดนำเสนอข้อมูล

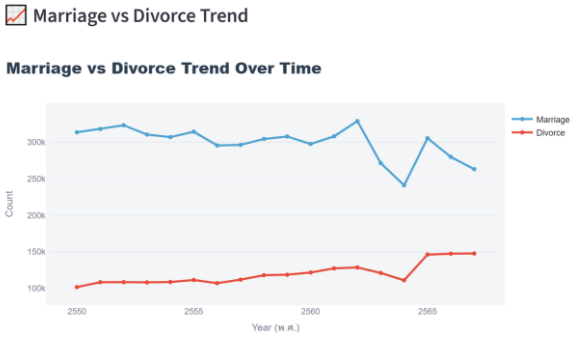
เพื่อให้ผลการศึกษาและแบบจำลองพยากรณ์ที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพในวงกว้าง และเพิ่มความสะดวกในการเข้าถึงสารสนเทศของผู้ใช้งาน คณะผู้วิจัยจึงได้นำแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดมาต่อยอดพัฒนาเป็นเว็บแอปพลิเคชัน (Web Application) สำหรับการแสดงผลข้อมูลและการพยากรณ์แนวโน้มการจดทะเบียนหย่าร้างในรูปแบบแดชบอร์ด (Dashboard) ในการพัฒนาแอปพลิเคชันดังกล่าว ได้เลือกใช้ภาษาไพธอนร่วมกับไลบรารี Plotly สำหรับการสร้างกราฟเชิงโต้ตอบ และเฟรมเวิร์ก Streamlit ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการพัฒนาส่วนต่อประสานกับผู้ใช้งาน (User Interface: UI) ที่มีความทันสมัย ใช้งานง่าย และสามารถตอบสนองต่อการโต้ตอบของผู้ใช้ได้อย่างรวดเร็วรายละเอียดของส่วนติดต่อผู้ใช้งาน (UI) ของแดชบอร์ดสำหรับการนำเสนอข้อมูล มีดังนี้

3.3.1 การเสนอข้อมูลส่วนหัวแดชบอร์ด ประกอบด้วย ชื่อแดชบอร์ด และรายละเอียดของข้อมูลสถิติจำนวนการจดทะเบียนหย่าร้างระหว่างปี ค.ศ.2007-2024 รายละเอียดดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การนำเสนอข้อมูลส่วนหัวของแดชบอร์ดข้อมูล

3.3.2 การนำเสนอแนวโน้มข้อมูลการจดทะเบียนหย่าร้างนำเสนอด้วยแผนภูมิเส้น (Line Chart) โดยเปรียบเทียบแนวโน้มของข้อมูลจำนวนจดทะเบียนสมรส และจดทะเบียนหย่าร้าง ดังรูปที่ 3

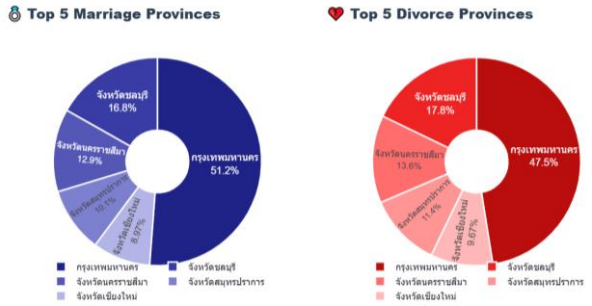


รูปที่ 3 แนวโน้มการจดทะเบียนสมรสและการหย่าร้าง

จากรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่า จำนวนการจดทะเบียนสมรสมีแนวโน้มผันผวนและลดลงอย่างชัดเจนในบางช่วง โดยเฉพาะช่วงปลายระยะเวลาที่มีการลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ก่อนจะฟื้นตัวเล็กน้อย ขณะที่จำนวนการหย่าร้างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงเวลา สะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างของพฤติกรรมครอบครัวในสังคม ทั้งนี้ ความแตกต่างของแนวโน้มทั้งสองตัวแปรแสดงให้เห็นถึงทิศทางที่สวนทางกันอย่างชัดเจนในช่วงหลังของข้อมูล

3.3.3 การนำเสนอข้อมูลเชิงภูมิภาครายจังหวัด

คณะผู้วิจัยออกแบบและนำเสนอสัดส่วนของจำนวนการจดทะเบียนสมรส และจำนวนการจดทะเบียนหย่าร้างรายจังหวัดใน 5 อันดับ นำเสนอด้วยแผนภูมิวงกลม (Pie Chart) รายละเอียดดังรูปที่ 4

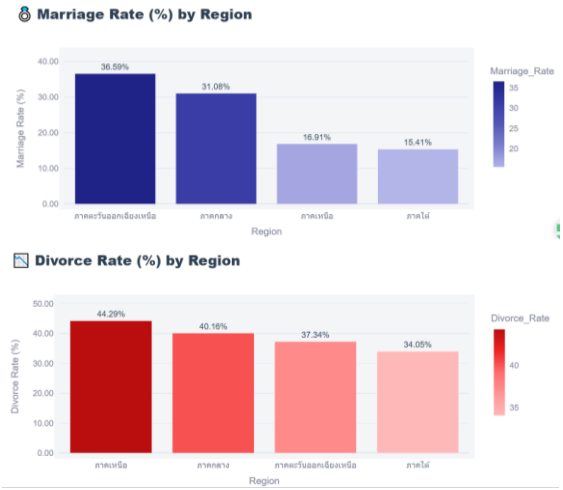


รูปที่ 4 แผนภูมิวงกลมแสดง 5 จังหวัดที่จำนวนการสมรส–หย่าร้างสูงสุด

จากรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่า กรุงเทพมหานครมีสัดส่วนสูงสุดทั้งในด้านการจดทะเบียนสมรส (51.2%) และการหย่าร้าง (47.5%) อย่างชัดเจน รองลงมาคือจังหวัดชลบุรี นครราชสีมา สมุทรปราการ และเชียงใหม่ ตามลำดับ โดยสัดส่วนของแต่ละจังหวัดมีความใกล้เคียงกันในทั้งสองกรณี สะท้อนให้เห็นว่าพื้นที่ที่มีการจดทะเบียนสมรสสูงมักมีแนวโน้มการหย่าร้างสูงตามไปด้วย ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับปัจจัยด้านประชากร ความหนาแน่นของเมือง และโครงสร้างทางเศรษฐกิจและสังคมของแต่ละพื้นที่

3.3.4 การนำเสนอข้อมูลเชิงภูมิภาครายภาค

เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถเปรียบเทียบความแตกต่างเชิงพฤติกรรมทางสังคมในระดับพื้นที่ที่กว้างขึ้น คณะผู้วิจัยได้ออกแบบและนำเสนอข้อมูลแสดงผลเปรียบเทียบอัตราส่วนร้อยละจำแนกตามภูมิภาคของประเทศไทยในรูปแบบแผนภูมิแท่ง (Bar Chart) เพื่อให้เห็นสัดส่วนความแตกต่างของตัวชี้วัดในแต่ละพื้นที่ได้อย่างชัดเจน ดังรูปที่ 5

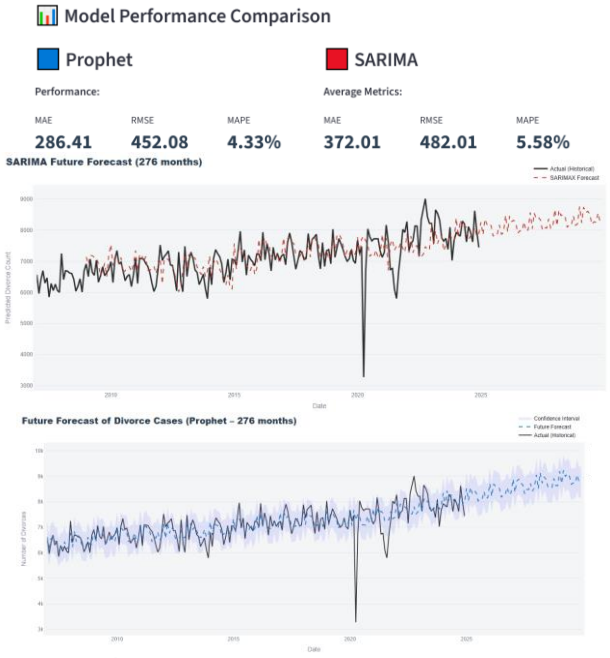


รูปที่ 5 อัตราการจดทะเบียนหย่าร้างจำแนกตามภูมิภาค

จากรูปแผนภูมิแท่งนำเสนอข้อมูลเชิงภูมิภาครายภาค พบว่า กรุงเทพมหานครและปริมณฑลมีอัตราการจดทะเบียนสมรสสูงที่สุด (36.59%) รองลงมาคือภาคกลาง (31.08%) ขณะที่ภาคเหนือ (16.91%) และภาคใต้ (15.41%) มีอัตราต่ำกว่าอย่างชัดเจน ในทางกลับกัน อัตราการหย่าร้างสูงสุดอยู่ในภาคเหนือ (44.29%) รองลงมาคือภาคกลาง (40.16%) ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (37.34%) และภาคใต้ (34.05%) ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์สะท้อนให้เห็นถึงความแตกต่างเชิงพื้นที่ โดยพื้นที่เมืองและเขตเศรษฐกิจหลักมีแนวโน้มการจดทะเบียนสมรสสูง ขณะที่บางภูมิภาคมีอัตราการหย่าร้างสูงกว่า ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับปัจจัยด้านเศรษฐกิจ สังคม และโครงสร้างประชากรที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่

3.3.5 การนำเสนอข้อมูลส่วนประสิทธิภาพของแบบจำลอง

เพื่อให้การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างแบบจำลองเป็นไปอย่างรูปธรรม คณะผู้วิจัยได้ออกแบบและนำเสนอส่วนต่อประสานผู้ใช้งานเชิงเปรียบเทียบผลประสิทธิภาพของแบบจำลอง SARIMA และ Prophet ด้วยแผนภูมินำเสนอต่าง ๆ รายละเอียดดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ผลลัพธ์ประสิทธิภาพของแบบจำลองพยากรณ์

จากรูปแผนภูมินำเสนอผลการพยากรณ์ข้อมูลจำนวนการจดทะเบียนหย่าร้างของทั้งสองแบบจำลอง และการเปรียบเทียบผลการพยากรณ์จำนวนการหย่าร้างระหว่างแบบจำลอง SARIMA และ Prophet โดยข้อมูลจริงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและมีรูปแบบฤดูกาลชัดเจน ทั้งสองแบบจำลองสามารถเรียนรู้รูปแบบข้อมูลได้ดี แม้ในช่วงที่เกิดค่าผิดปกติในปี ค.ศ. 2020 ยังคงรักษาทิศทางหลักไว้ได้ อย่างไรก็ตาม ในการพยากรณ์อนาคต แบบจำลอง Prophet มีแนวโน้มให้ค่าที่สูงกว่าและมีความผันผวนมากกว่า

4. สรุปผล

งานวิจัยเรื่อง “การพยากรณ์จำนวนการจดทะเบียนหย่าร้างในประเทศไทย” มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มและพัฒนาแบบจำลองพยากรณ์ข้อมูลอนุกรมเวลา โดยเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลอง SARIMA และ Prophet ข้อมูลที่ใช้เป็นข้อมูลรายเดือนย้อนหลัง พ.ศ. 2550–2567 จากกรมการปกครอง ซึ่งผ่านกระบวนการเตรียมข้อมูล ได้แก่ การตรวจจับค่าผิดปกติและการทดสอบความนิ่งของข้อมูล ก่อนนำไปสร้างแบบจำลองพยากรณ์ ประสิทธิภาพของแบบจำลองถูกประเมินด้วยวิธี Rolling Forecast และใช้ค่า MAPE เป็นตัวชี้วัด ผลการศึกษาพบว่า Prophet มีความแม่นยำสูงกว่า โดยมีค่า MAPE เท่ากับ 4.33% ขณะที่ SARIMA มีค่า MAPE เท่ากับ 5.58% สะท้อนให้เห็นถึงความสามารถของ Prophet ในการจัดการแนวโน้มและความผันผวนของข้อมูลได้ดีกว่า นอกจากนี้ คณะผู้วิจัยยังได้พัฒนาแดชบอร์ดเชิงโต้ตอบด้วย Streamlit เพื่อสนับสนุนการวิเคราะห์และการตัดสินใจเชิงนโยบาย โดยผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับแนวคิดของ Taylor และ Letham [8] ที่เสนอว่า Prophet สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงของแนวโน้มได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ งานวิจัยมีความโดดเด่นจากการใช้ข้อมูลจริงระยะยาวของไทยร่วมกับเทคนิค Rolling Forecast ซึ่งช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการประเมิน และการพัฒนาเครื่องมือเชิงโต้ตอบเพื่อการใช้งานจริง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หน่วยงานต้นสังกัดของคณะผู้วิจัย ที่ให้การสนับสนุนในการดำเนินงานวิจัย ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ หน่วยงานจัดการประชุมวิชาการ และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการนำเสนอบทความในการประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ครั้งที่ 9

เอกสารอ้างอิง

[1] Department of Provincial Administration, “Divorce registration statistics in Thailand,” 2024.
[2] กรมการปกครอง, “ฐานข้อมูลสถิติจดทะเบียนหย่า สำนักบริหารการทะเบียน,” 2567.
[3] R. J. Hyndman and G. Athanasopoulos, *Forecasting: Principles and Practice*, 3rd ed. Melbourne, Australia: OTexts, 2021.
[4] สำนักบริหารการทะเบียน กรมการปกครอง, “สถิติทะเบียนทั่วไป,” 2026. [Online]. Available: https://stat.bora.dopa.go.th/stat/GENSTAT/STATFAM/#/marry
[5] W. Said and D. Dickey, “Testing for unit roots in autoregressive-moving average models of unknown order,” *Biometrika*, vol. 71, no. 3, pp. 599–607, 1984.
[6] D. Kwiatkowski, P. C. B. Phillips, P. Schmidt, and Y. Shin, “Testing the null hypothesis of stationarity against the alternative of a unit root: How sure are we that economic time series have a unit root?”. *Journal of Econometrics*, vol. 54, no. 1–3, pp. 159–178, 1992.
[7] G. E. P. Box and G. M. Jenkins, *Time Series Analysis: Forecasting and Control.* San Francisco, CA, USA: Holden-Day, 1970.
[8] S. J. Taylor and B. Letham, “Forecasting at Scale,” . *The American Statistician*, vol. 72, no. 1, pp. 37–45, 2018.
[9] C. D. Lewis, *Industrial and Business Forecasting Methods*. London, U.K.: Butterworths, 1982.



ผศ.ดร.วีรวรรณ จันทนะทรัพย์
อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร
ความเชี่ยวชาญ: Digital Image Processing, Data Visualization, Human-Computer Interface และ Unmanned Aerial Vehicle Technology)



นายกฤษฎา สุขแก้ว (นักศึกษาชั้นปีที่ 4)
สาขาวิชาวิทยาการข้อมูลและเทคโนโลยีสารสนเทศ
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร
งานวิจัยที่สนใจ: การจำแนกประเภทด้วยปัญญาประดิษฐ์



นายพิสิษฐ์ คำหนุน (นักศึกษาชั้นปีที่ 4)
สาขาวิชาวิทยาการข้อมูลและเทคโนโลยีสารสนเทศ
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร
งานวิจัยที่สนใจ: การจำแนกเสียงด้วยปัญญาประดิษฐ์



นางสาวรัชวลัย สมะบุพ (นักศึกษาชั้นปีที่ 4)
สาขาวิชาวิทยาการข้อมูลและเทคโนโลยีสารสนเทศ
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร
งานวิจัยที่สนใจ: การจำแนกประเภทด้วยปัญญาประดิษฐ์

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

โปรแกรมบันทึกกิจกรรมด้วยเทคนิคการประมวลผลภาษาธรรมชาติ กรณีศึกษา หลักสูตรสาขาวิชาวิทยาการข้อมูลและเทคโนโลยีสารสนเทศ

Natural Language Processing-Based Activity Logging Application: A Case Study of the Data Science and Information Technology Program

นริศรา นาคเมธี[1] ภวัต บัวแตง[2] และพีรพัฒน์ ตันมาดี[3*]

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

narisara.n@rmutp.ac.th pawat-b@rmutp.ac.th peerapat-t@rmutp.ac.th*

บทคัดย่อ

โครงงานนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโปรแกรมที่สามารถบันทึกกิจกรรมประจำวันจากข้อความภาษาธรรมชาติ ลดความซับซ้อนในการกรอกข้อมูลผ่านแบบฟอร์มเดิม โดยใช้เทคโนโลยีการประมวลผลภาษาธรรมชาติ (NLP) เพื่อสกัดข้อมูลสำคัญอย่างชื่อกิจกรรมและเวลาก่อนนำไปจัดเก็บในฐานข้อมูลอย่างเป็นระบบ

จากการประเมินความพึงพอใจในการใช้งานโปรแกรมบันทึกกิจกรรมด้วยเทคนิคการประมวลผลภาษาธรรมชาติของผู้ใช้งาน จำนวน 20 คน พบว่าค่าเฉลี่ยรวม 4.27 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.87 อยู่ในระดับดีมาก โดยมีผลค่าเฉลี่ยด้านประสิทธิภาพเชิงเทคนิคที่ 4.17 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.96 และมีค่าเฉลี่ยความพึงพอใจของผู้ใช้งาน 4.32 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.81

คำสำคัญ : การประมวลผลภาษาธรรมชาติ; การตัดคำ; การระบุเอนทิตี

Abstract

This project aims to develop a program that records daily activities from natural language input, reducing the complexity of traditional form-based data entry. The system applies Natural Language Processing (NLP) techniques to address the issue of continuous text in Thai. It also incorporates Part-of-Speech Tagging and Named Entity Recognition to analyze and extract key information such as activity names and time, which are then systematically stored in a database. This approach allows users to log activities more conveniently and naturally.

Results from the satisfaction assessment of 20 users on the NLP-based activity logging application showed a combined mean of 4.27 (S.D. = 0.87), indicating an excellent level. The evaluation further detailed a mean of 4.17 (S.D. = 0.96) for technical efficiency and 4.32 (S.D. = 0.81) for user satisfaction.

Keywords: Natural Language Processing; Thai Word Segmentation; Named Entity Recognition

1. บทนำ

การบริหารจัดการเวลาและบันทึกกิจกรรมในชีวิตประจำวันได้กลายเป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในยุคดิจิทัลที่ข้อมูลมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม การนำข้อมูลกิจกรรมเหล่านี้มาใช้ประโยชน์มักประสบปัญหาจากความซับซ้อนของภาษาธรรมชาติ โดยเฉพาะภาษาไทยที่มีลักษณะเฉพาะตัวสูง เช่น การเป็นภาษาที่เขียนติดต่อกันโดยไม่มีการเว้นวรรคเพื่อระบุขอบเขตของคำที่ชัดเจน (Word Boundary) อีกทั้งในบริบทการสื่อสารผ่านสื่อสังคมออนไลน์ หรือแอปพลิเคชันสนทนา ผู้ใช้งานมักนิยมใช้คำย่อ คำสแลง และภาษาพูดที่เป็นกันเอง เช่นการใช้ "พน." แทน "พรุ่งนี้" หรือ "จาร" แทน "อาจารย์" ความกำกวมเหล่านี้ส่งผลให้การแปลงข้อความที่ไม่มีโครงสร้าง (Unstructured Text) ให้กลายเป็นข้อมูลที่มีโครงสร้าง (Structured Data) เพื่อนำไปใช้งานต่อในระบบปฏิทินหรือฐานข้อมูลทำได้ยากและมักเกิดความผิดพลาดหากใช้เพียงกฎเกณฑ์ทางไวยากรณ์แบบดั้งเดิม

การสกัดข้อมูลสำคัญจากประโยคภาษาไทยเป็นผลมาจากปัจจัยทางภาษาศาสตร์ที่ซับซ้อน ซึ่งเกี่ยวข้องทั้งการตัดคำ (Tokenization) การระบุหน้าที่ของคำ (POS Tagging) และการจดจำเอนทิตีที่มีชื่อเฉพาะ (Named Entity Recognition: NER) ปัญหาหลักที่พบ คือ ความหลากหลายของรูปแบบการพิมพ์ที่เน้นความรวดเร็ว ทำให้เกิดตัวอักษรซ้ำหรือสระลอยซึ่งคอมพิวเตอร์ไม่สามารถประมวลผลได้โดยตรง นอกจากนี้ บริบทเฉพาะทางเช่นในสถานศึกษา มักมีการใช้คำทับศัพท์ภาษาอังกฤษปะปนกับภาษาไทย (Code-switching) เช่น "meeting", "brief" หรือ "present" ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพของแบบจำลองการประมวลผลภาษาธรรมชาติทั่วไปที่ไม่ถูกฝึกสอนมาเพื่อรองรับภาษาพูดในลักษณะนี้ งานวิจัยด้านการประมวลผลภาษาไทยหลายฉบับชี้ให้เห็นว่าการเตรียมข้อมูลและการปรับบรรทัดฐานข้อความ (Text Normalization) มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อความแม่นยำของระบบสกัดสารสนเทศ

อย่างไรก็ตาม การพัฒนาระบบบันทึกกิจกรรมด้วยข้อความภาษาธรรมชาติในปัจจุบันยังคงมีข้อจำกัด โดยเฉพาะโมเดลสำเร็จรูปพื้นฐานมักถูกฝึกสอนด้วยข้อมูลที่เป็นทางการจากสำนักข่าวหรือวิกิพีเดีย ทำให้ไม่สามารถระบุเอนทิตีที่สำคัญในบริบทการนัดหมาย เช่น "กิจกรรม" หรือ "เวลาเริ่มต้น" ได้อย่างเจาะจง คณะผู้วิจัยจึงเล็งเห็นความจำเป็นในการสร้างไปป์ไลน์การประมวลผล (NLP Pipeline) ที่เหมาะสม

กับลักษณะเฉพาะของภาษาไทย โดยผสมผสานเทคนิค Rule-based Normalization เพื่อจัดการกับคำสแลงและคำย่อ ควบคู่กับการประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) ผ่านเฟรมเวิร์ก spaCy ซึ่งมีศักยภาพในการวิเคราะห์บริบทแวดล้อมและสามารถพัฒนาแบบจำลองเฉพาะทางที่มีความยืดหยุ่นสูงกว่าวิธีการดั้งเดิม

ด้วยเหตุนี้โครงงานนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาและฝึกสอนโมเดล Named Entity Recognition เพื่อสกัดข้อมูลสำคัญ 5 ประเภท ได้แก่ กิจกรรม วันที่ เวลา สถานที่ และบุคคล ผ่านกระบวนการเตรียมข้อมูลและการใช้พจนานุกรมคำเฉพาะทางที่รวบรวมจากกรณีศึกษาจริงในมหาวิทยาลัย โดยเฉพาะการใช้สถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมที่รองรับการทำ BIO Tagging เพื่อระบุขอบเขตข้อมูลที่อยู่ติดกันได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ ระบบที่พัฒนาขึ้นยังถูกนำเสนอผ่านเว็บแอปพลิเคชันด้วย Streamlit ซึ่งรองรับการแสดงผลปฏิทินแบบพลวัตและการโต้ตอบกับผู้ใช้งาน เพื่อช่วยลดภาระงานในการกรอกข้อมูลและยกระดับประสิทธิภาพการจัดการตารางกิจกรรมในชีวิตประจำวันของประชาชนในระยะยาว

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีการตัดคำภาษาไทย (Thai Word Segmentation)

การตัดคำ (Word Segmentation) เป็นขั้นตอนแรกและเป็นขั้นตอนที่สำคัญในกระบวนการประมวลผลภาษาไทย เนื่องจากภาษาไทยเป็นภาษาเขียนแบบติดต่อกัน (Scriptio Continua) โดยไม่มีการเว้นวรรคเพื่อระบุขอบเขตของคำเหมือนภาษาตะวันตก การกำหนดขอบเขตคำที่ถูกต้องจึงเป็นสิ่งจำเป็นก่อนที่จะดำเนินการวิเคราะห์ในระดับสูงต่อไป

ปัญหาการตัดคำสามารถนิยามได้ในรูปแบบคณิตศาสตร์ โดยกำหนดให้ลำดับของตัวอักษรนำเข้าเป็น $C = c_1, c_2, \ldots, c_n$ ส่วนเป้าหมาย คือ การหาลำดับของคำ $\widehat{W} = w_1, w_2, \ldots, w_m$ ที่มีความน่าจะเป็นสูงสุดตามโมเดลที่กำหนด ดังสมการ:

$$\widehat{W} = \underset{w}{argmax}\, P(W|C) \qquad (1)$$

โดยอาศัยกฎของ Bayes สามารถแตกได้เป็น

$$\widehat{W} = \underset{w}{argmax}\, P(C|W)P(W) \qquad (2)$$

เมื่อนำมาต่อกันจะได้เท่ากับลำดับตัวอักษรตั้งต้น โดยที่ w_i เป็นคำในพจนานุกรม หรือคำที่ถูกสร้างขึ้นตามกฎทางภาษา

2.2 การจดจำเอนทิตีที่มีชื่อ (Named Entity Recognition: NER)

Named Entity Recognition (NER) หรือการจดจำชื่อเฉพาะ คือกระบวนการย่อยในการสกัดสารสนเทศ (Information Extraction) เพื่อค้นหาและจำแนกประเภทของคำในข้อความออกเป็นหมวดหมู่ที่กำหนดไว้ล่วงหน้า (Pre-defined Categories) เช่น ชื่อคน องค์กร สถานที่ เวลา ฯลฯ โดยมีทฤษฎีและแนวทางการพัฒนาที่สำคัญดังนี้

2.2.1 ความสำคัญและประเภทของเอนทิตี (Entity Importance & Types)

การจดจำเอนทิตีเป็นขั้นตอนสำคัญในการเปลี่ยนข้อมูลที่ไม่มีโครงสร้าง (Unstructured Data) ให้เป็นข้อมูลที่มีโครงสร้าง (Structured Data) โดยในโครงงานนี้ได้กำหนดประเภทของเอนทิตีที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์การจัดตารางเวลา ได้แก่ ACTIVITY (กิจกรรม), DATE (วันที่), TIME (เวลา), END_TIME (เวลาสิ้นสุด), LOCATION (สถานที่) และ PERSON (บุคคล) การกำหนดประเภทเหล่านี้เป็นพื้นฐานสำคัญในการฝึกสอนโมเดลให้เข้าใจบริบทเฉพาะทาง

2.2.2 วิวัฒนาการของเทคโนโลยี NER (Evolution of NER Technologies)

เทคโนโลยี NER ได้มีพัฒนาการอย่างต่อเนื่อง จากยุคเริ่มต้นที่ใช้กฎและพจนานุกรม (Rule-based) ซึ่งมีความแม่นยำสูงในขอบเขตจำกัด แต่ขาดความยืดหยุ่น มาสู่ยุคของการใช้สถิติ (Statistical Models) เช่น Hidden Markov Models (HMM) และ Conditional Random Fields (CRF) ที่สามารถเรียนรู้จากข้อมูลได้ และปัจจุบันได้ก้าวเข้าสู่ยุคของการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) ซึ่งใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Neural Networks) ที่มีความสามารถในการจับบริบทที่ซับซ้อนและให้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำสูงสุด

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Review)

ประสิทธิภาพของการประมวลผลภาษาไทย (Thai NLP) ขึ้นอยู่กับกระบวนการเตรียมข้อมูลและการเลือกอัลกอริทึมที่เหมาะสมกับลักษณะเฉพาะของภาษา วรรณพงษ์ ภัทธิยไพบูลย์ และคณะ [7] ได้พัฒนาชุดเครื่องมือ PyThaiNLP และเปรียบเทียบอัลกอริทึมการตัดคำหลายประเภท โดยพบว่าอัลกอริทึม Maximum Matching (NewMM) มีความโดดเด่นด้านความเร็วในการประมวลผลสูงสุดเมื่อเทียบกับโมเดลการเรียนรู้เชิงลึกอย่าง DeepCut และ Attacut ซึ่งสอดคล้องกับความต้องการของระบบที่เน้นการตอบสนองแบบเวลาจริง (Real-time) นอกจากนี้ การปรับบรรทัดฐานอักขระ (Normalization) ยังเป็นขั้นตอนวิกฤตที่ช่วยลดความผิดพลาดในการประมวลผลระดับสูงในส่วนของการสกัดเอนทิตีที่มีชื่อ (Named Entity Recognition: NER) การเลือกสถาปัตยกรรมโมเดลมีผลอย่างมากต่อความสามารถในการขยายผล (Generalization) วิศรุต กังวาลสิงห์ [8] ระบุว่าแม้การใช้กฎ (Rule-based) จะให้ความแม่นยำสูงในรูปแบบที่ตายตัว แต่โมเดลการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) มีประสิทธิภาพเหนือกว่าในการระบุข้อมูลที่ไม่เคยปรากฏในฐานข้อมูล (Unseen Data) ผ่านการเรียนรู้บริบทแวดล้อม ซึ่งสอดคล้องกับข้อค้นพบของ VISTEC และ AIResearch [5] ในการพัฒนาโมเดล WangchanBERTa ที่พิสูจน์ให้เห็นว่า Contextual Embeddings ช่วยให้การสกัดชื่อสถานที่ที่มีความซับซ้อนหรือการใช้คำย่อในภาษาไม่เป็นทางการ (เช่น ชื่อสถานที่ที่ไม่มีคำนำหน้าชัดเจน) มีความแม่นยำสูงกว่าการใช้เพียงการจับคู่พจนานุกรมอย่างไรก็ตาม คุณภาพของข้อมูลนำเข้ายังคงเป็นปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพของระบบ ศศลักษณ์ อุบลวิโรจน์ และธนภัทร ฆังคะจิตร [9] เสนอว่าการทำ Text Normalization ด้วยวิธี Dictionary Mapping เพื่อแปลงคำย่อและศัพท์เฉพาะทางให้เป็นคำเต็ม สามารถเพิ่มค่า F1-score ของระบบได้อย่างมีนัยสำคัญ แนวคิดดังกล่าวสามารถประยุกต์ใช้กับการจัดการภาษาอุบัติใหม่หรือคำสแลงในระบบสนทนา เพื่อลดความกำกวมของข้อมูลก่อนส่งเข้าสู่โมเดลประมวลผลเชิงลึก เช่น สถาปัตยกรรม CNN บนเฟรมเวิร์ก spaCy เพื่อ

เพิ่มความแม่นยำในการทำนายประเภทกิจกรรมและสถานที่นัดหมายที่มีความแปรปรวนสูง

3. วิธีการดำเนินงาน

3.1 การเก็บรวบรวมข้อมูล

กระบวนการเริ่มต้นด้วยการกำหนดกลุ่มเป้าหมายเพื่อศึกษาพฤติกรรมการสื่อสารและการจดบันทึก คณะผู้วิจัยได้พัฒนาแบบสอบถามออนไลน์สำรวจพฤติกรรมการจดบันทึกและรวบรวมคลังประโยคภาษาธรรมชาติที่ใช้ในการนัดหมายจริงคนละ 2 ประโยค เพื่อให้ได้ข้อมูลปฐมภูมิที่สะท้อนการใช้งานจริงของนักศึกษาและคณาจารย์จากหลักสูตรวิทยาการข้อมูลและเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จำนวน 15 คน อย่างไรก็ตามเพื่อให้โมเดลปัญญาประดิษฐ์มีฐานข้อมูลที่เพียงพอต่อการเรียนรู้ จึงได้ดำเนินการจำลองและคัดกรองชุดข้อมูลเพิ่มเติมจนมีจำนวนรวมทั้งสิ้น 670 ประโยค ซึ่งครอบคลุมทั้งบริบททางวิชาการและการนัดหมายส่วนตัวภายในมหาวิทยาลัย ดังตัวอย่างในรูปที่ 1

กรุณายกตัวอย่างประโยคที่ท่านใช้จดบันทึกกิจกรรม (เช่น "นัดประชุมทีมวันจันทร์ 10 โมง", "ต้องไปส่งเอก	กรุณายกตัวอย่างประโยคที่ท่านใช้จดบันทึกกิจกรร (เช่น "นัดประชุมทีมวันจันทร์ 10 โมง", "ต้องไปส่งเ
พรุ่งนี้มีประชุมสัมมนาตอน 14:00 น	วันพุธหน้าสอบวิชาการ
18 ธ.ค. นำเสนองาน	วันศุกร์ ส่งงาน
มีประชุม 10 โมง	พรุ่งนี้มีส่งเอกสาร
meeting tomorrow 10.00 am.	I have meeting at park with friend in this sunday 1
นัดประชุมทีมวันจันทร์ 13.00 โมง	นัดประชุมทีมวันจันทร์ 13.00 โมง ต้องไปส่งเอกสารพรุ่ง
12/12/25 10 โมงนัดกับ....	12/12/25 10 โมงนัดกับ.... / ส่งพัสดุให้....
พน. มีนัดต้องไปประชุม 11:00	สัปดาห์หน้าวันอังคาร วันที่ 2 ต้องรายงาน
นัดคุยงานวันจันทร์ 10 โมง ที่หอใหญ่	เจอกันที่ดึก 18 ปี 7 ครึ่ง
พบหมอศิรวิชญ์ เสาร์ที่ 20 ธันวา ตอน 8 โมงเช้า @รพ.ธน	ตรวจการบ้าน SA กลุ่ม 67ปวค3
ประชุมอาจารย์สาขาวิชาวิทยาการคอมฯ วันจันทร์ที่ 10 ม.ค	ประชุมคณะกรรมการ บพข. ครั้งที่ 8 วันอังคาร 11 ม.ค. 6
การประชุมคณะกรรมการกำกับติดตามการดำเนินงานประก	นัดปรับชุมคณะฯ (บางทีพิมพ์ผิด เพราะรีบ)
พรุ่งนี้ ต้องไปข้างนอกตอน 10 โมง	มีค่าใช้จ่าย ที่ต้องจ่ายวันที่.... ประมาณ.....
วันจันทร์ประชุมทีมตอน 10โมง	พรุ่งนี้มีส่งเอกสาร

รูปที่ 1 ตัวอย่างผลการเก็บข้อมูลจากแบบสอบถาม

3.2 การเตรียมสภาพแวดล้อมและคลังคำศัพท์

ในการพัฒนาระบบเบื้องหลัง คณะผู้วิจัยได้เลือกใช้ภาษา Python และไลบรารีมาตรฐานระดับสากล เช่น PyThaiNLP สำหรับจัดการข้อกำหนดเฉพาะของภาษาไทย และ spaCy สำหรับสร้างสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียม นอกจากนี้ได้มีการสร้างสถาปัตยกรรมพจนานุกรม 3 ชุดหลัก ได้แก่ พจนานุกรมคำย่อและคำสแลง (SLANG_DICT) เพื่อจับคู่คำย่อกับคำเต็มทางการ พจนานุกรมคำทับศัพท์ (LOANWORD_DICT) เพื่อจัดการคำศัพท์ภาษาต่างประเทศ และพจนานุกรมแก้ไขการแยกคำ (SPLIT_WORD_CORRECTION) เพื่อป้องกันความผิดพลาดจากการตัดคำที่เขียนเว้นวรรคไม่เหมาะสม

3.3 กระบวนการประมวลผลและทำความสะอาดข้อความเบื้องต้น

คณะผู้วิจัยได้พัฒนาฟังก์ชัน normalize_thai_text เพื่อรับข้อความจากผู้ใช้งานเข้าสู่ขั้นตอนการปรับบรรทัดฐาน โดยทำงานเป็นลำดับขั้นตอนแบบอัตโนมัติ เพื่อปรับบรรทัดฐานข้อความให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน เริ่มจากการจัดเรียงลำดับสระและวรรณยุกต์เพื่อแก้ปัญหาสระลอย การแปลงตัวอักษรเป็นตัวพิมพ์เล็ก และการแทนที่คำตามพจนานุกรมที่เตรียมไว้ นอกจากนี้ยังมีตรรกะเฉพาะสำหรับการสกัดข้อมูลวันที่และเวลา โดยฟังก์ชัน parse_thai_date จะคำนวณวันที่สัมพัทธ์ (เช่น "พรุ่งนี้") และ parse_thai_time จะแปลงระบบเวลาแบบไทย (เช่น "บ่ายสอง") ให้กลายเป็นข้อมูลดิจิทัลที่ถูกต้อง

3.4 การจัดเตรียมชุดข้อมูลสำหรับฝึกสอน

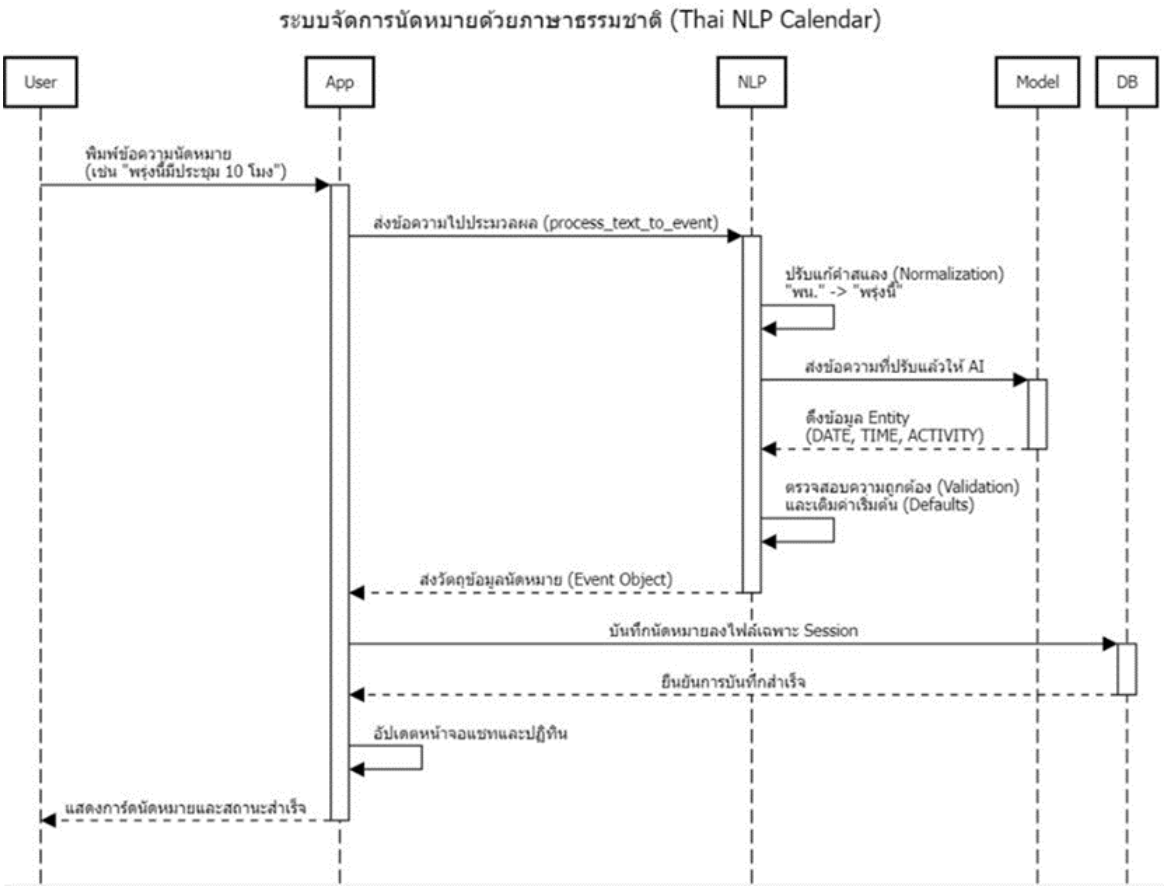
เนื่องจากโมเดลสำเร็จรูปทั่วไปขาดความเข้าใจในภาษาพูดและคำศัพท์เฉพาะทางในรั้วมหาวิทยาลัย คณะผู้วิจัยจึงต้องสร้างชุดข้อมูลฝึกสอนขึ้นเอง โดยนำประโยคทั้งหมดมากำกับข้อมูล (Data Annotation) ด้วยมือในรูปแบบรายการ Tuples ซึ่งระบุพิกัดดัชนีจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของคำเป้าหมาย ข้อมูลเหล่านี้จะถูกจำแนกออกเป็น 5 ประเภทหลัก ได้แก่ ACTIVITY, DATE, TIME, LOCATION และ PERSON จากนั้นจึงแปลงพิกัดทั้งหมดให้อยู่ในรูปออบเจ็กต์ประเภทเอกสาร (Example) ตามมาตรฐานของไลบรารี spaCy ก่อนเริ่มการฝึกสอน

3.5 การสร้างและฝึกสอนโมเดลปัญญาประดิษฐ์

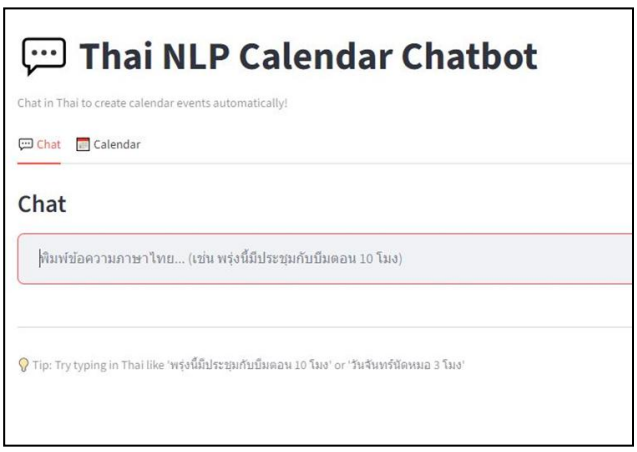
คณะผู้วิจัยเริ่มต้นด้วยการสร้างโมเดลจำลองเปล่า (Blank Model "xx") เพื่อป้องกันอคติทางไวยากรณ์และเพิ่มชั้นการวิเคราะห์ NER เข้าไปในสายพาน กระบวนการฝึกสอนกำหนดไว้ที่ 30 รอบ (Iterations) โดยใช้เทคนิค Dropout ที่ระดับ 0.35 เพื่อสุ่มปิดการทำงานของโหนดประสาทเทียมบางส่วน ช่วยป้องกันปัญหาการเรียนรู้แบบจดจำ (Overfitting) ร่วมกับการแบ่งกลุ่มข้อมูลย่อย (Minibatch) และการสลับลำดับชุดข้อมูลในทุกรอบ เพื่อให้โมเดลมีความยืดหยุ่นและสามารถวิเคราะห์ประโยคโครงสร้างใหม่ๆ ได้อย่างแม่นยำ

3.6 การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันและส่วนติดต่อผู้ใช้งาน

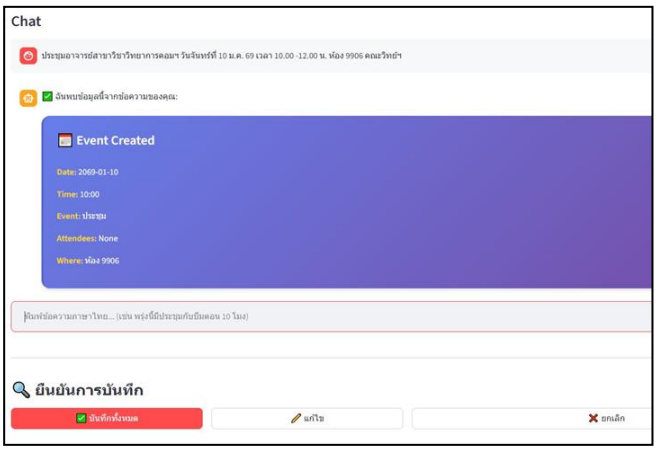
ในขั้นตอนสุดท้าย ระบบถูกบูรณาการเข้ากับเฟรมเวิร์ก Streamlit เพื่อสร้างส่วนติดต่อผู้ใช้งานที่ตอบสนองแบบเรียลไทม์ มีการใช้ระบบจัดการสถานะ (session_state) และรหัส UUID เพื่อแยกพื้นที่ฐานข้อมูลกิจกรรม (JSON) ของผู้ใช้งานแต่ละคนให้เป็นสัดส่วน ส่วนติดต่อผู้ใช้งานประกอบด้วยหน้า Chat สำหรับรับข้อความนัดหมาย และหน้า Calendar สำหรับแสดงผลกิจกรรมที่สกัดได้ในรูปแบบปฏิทินที่ผู้ใช้สามารถกดดูรายละเอียดหรือแก้ไขข้อมูลได้โดยตรง โดยลำดับการทำงานดังแสดงในแผนภาพลำดับขั้นตอนการทำงาน หรือ Sequence Diagram ดังแสดงในรูปที่ 2 และหน้าจอแอปพลิเคชันดังแสดงในรูปที่ 3-5



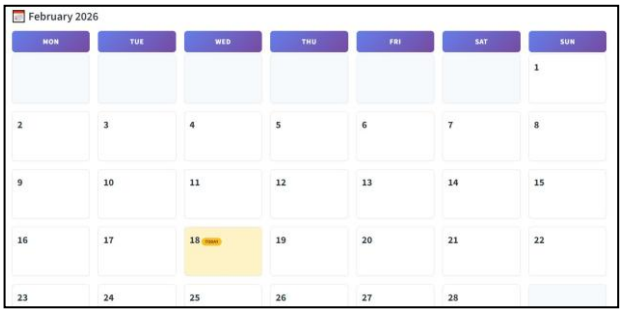
รูปที่ 2 แผนภาพแสดงการทำงานของระบบแอปพลิเคชัน



รูปที่ 3 ตัวอย่างหน้า Chat เว็บแอปพลิเคชันบันทึกกิจกรรมด้วยเทคนิคการประมวลผลภาษาธรรมชาติ



รูปที่ 4 ตัวอย่างหน้า Event Created เว็บแอปพลิเคชันบันทึกกิจกรรมด้วยเทคนิคการประมวลผลภาษาธรรมชาติ



รูปที่ 5 ตัวอย่างหน้าปฏิทินของเว็บแอปพลิเคชันบันทึกกิจกรรมฯ

4. การทดสอบและผลการทดสอบ

การประเมินความพึงพอใจในการใช้งานโปรแกรมบันทึกกิจกรรมด้วยเทคนิคการประมวลผลภาษาธรรมชาติ ประเมินโดยใช้แบบสอบถามประเมินความพึงพอใจในการใช้งานโดยคณะอาจารย์และนักศึกษาหลักสูตรสาขาวิทยาการข้อมูลและเทคโนโลยีสารสนเทศ จำนวนทั้งหมด 20 คน แบ่งเป็น อาจารย์ 2 คน นักศึกษาสาขาวิทยาการข้อมูลและเทคโนโลยีสารสนเทศ 13 คน และ บุคคลทั่วไป 5 คน โดยมีผลการประเมินความพึงพอใจ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานการประเมินความพึงพอใจ

รายการประเมิน	$(\bar{x})$	S.D.	ระดับความพึงพอใจ
1. ด้านประสิทธิภาพเชิงเทคนิค			
1.1 การประเมินด้านความถูกต้อง	4.05	0.76	มาก
1.2 ความถูกต้องของชื่อกิจกรรม	4.10	0.91	มาก
1.3 ความถูกต้องของวันและเวลา	4.35	1.09	มาก
1.4 ความถูกต้องของบุคคลและสถานที่	3.70	1.22	มาก
1.5 ความเร็วในการประมวลผล	4.65	0.49	มากที่สุด
ผลค่าเฉลี่ยด้านประสิทธิภาพเชิงเทคนิค	**4.17**	**0.96**	**มาก**
2. ด้านความพึงพอใจของผู้ใช้งาน			
2.1 ด้านหน้าที่การทำงาน	4.28	0.83	มาก
2.2 ด้านความง่ายในการใช้งาน	4.47	0.72	มาก
2.3 ด้านประสิทธิภาพและประโยชน์	4.33	0.82	มาก
2.4 ความพึงพอใจโดยภาพรวม	3.95	0.94	มาก
ผลค่าเฉลี่ยความพึงพอใจของผู้ใช้งาน	**4.32**	**0.81**	**มาก**
ผลค่าเฉลี่ยทั้ง 2 ด้าน	**4.27**	**0.87**	**มาก**

จากการทดสอบและประเมินผลการใช้งานโปรแกรมบันทึกกิจกรรมด้วยเทคนิคการประมวลผลภาษาธรรมชาติ พบว่าภาพรวมความพึงพอใจของผู้ใช้งานทั้งในด้านประสิทธิภาพเชิงเทคนิคและด้านการใช้งานจริงอยู่ในระดับ "มาก" โดยมีค่าเฉลี่ยรวมอยู่ที่ 4.27 คะแนน และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.87 ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าผู้ใช้งานส่วนใหญ่มีความคิดเห็นที่สอดคล้องกันไปในทิศทางบวก และระบบสามารถตอบสนองความต้องการพื้นฐานในการเปลี่ยนข้อความภาษาไทยให้เป็นกิจกรรมในปฏิทินได้อย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อพิจารณาด้านประสิทธิภาพเชิงเทคนิค ค่าเฉลี่ย 4.17 พบว่าจุดเด่นที่สำคัญที่สุดคือ ความเร็วในการประมวลผล ซึ่งได้รับคะแนนสูงถึง 4.65 อยู่ในระดับ "มากที่สุด" แสดงให้เห็นว่าโมเดลประมวลผลภาษาที่นำมาใช้มีประสิทธิภาพสูงในการตอบสนองแบบเรียลไทม์ อย่างไรก็ตาม ในส่วนของความถูกต้องในการแยกแยะบุคคลและสถานที่ค่าเฉลี่ย 3.70 แม้จะอยู่ในเกณฑ์ที่ดีแต่ถือเป็นส่วนที่ท้าทายที่สุดของระบบ เนื่องจากธรรมชาติของภาษาไทยที่มีการเขียนชื่อเฉพาะหรือสถานที่ได้หลากหลายรูปแบบ ซึ่งเป็นจุดที่กลุ่มผู้พัฒนาสามารถนำไปปรับปรุงต่อยอดได้ในอนาคต

ในด้านความพึงพอใจของผู้ใช้งาน มีค่าเฉลี่ย 4.32 ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ความง่ายในการใช้งาน เป็นปัจจัยหลักที่ดึงดูดผู้ใช้งาน โดยมีคะแนนสูงถึง 4.47 ผู้ใช้รู้สึกว่าความสะดวกในการพิมพ์ข้อความเพียงประโยคเดียวแทนการกรอกฟอร์มหลายช่องช่วยลดภาระงานและประหยัดเวลาได้จริง โดยมีค่าเฉลี่ย 4.33 สอดคล้องกับวัตถุประสงค์หลักของโครงงาน

5. บทสรุปและอภิปรายผล

โปรแกรมบันทึกกิจกรรมด้วยเทคนิคการประมวลผลภาษาธรรมชาติ ประสบความสำเร็จในการพัฒนาระบบต้นแบบ (Prototype) ที่สามารถแปลงข้อความภาษาไทยในรูปแบบภาษาธรรมชาติให้กลายเป็นรายการกิจกรรมในปฏิทินได้อย่างอัตโนมัติ รองรับคำสแลงและคำย่อ และมีระบบโต้ตอบกับผู้ใช้เพื่อขอข้อมูลเพิ่มเติมในกรณีที่ข้อมูลไม่ครบถ้วน ซึ่งช่วยอำนวยความสะดวกและลดระยะเวลาในการบันทึกตารางงานของผู้ใช้งานได้จริง จากการวิเคราะห์ผลการดำเนินงานสามารถอภิปรายประเด็นสำคัญได้ดังนี้

4.1 ความแม่นยำของการสกัดข้อมูล ปัจจัยสำคัญที่ทำให้ระบบมีความแม่นยำสูงเกิดจากการให้ความสำคัญกับขั้นตอนการเตรียมข้อมูล (Preprocessing) ในไฟล์ nlp_utils.py โดยเฉพาะการสร้างพจนานุกรมคำสแลง (SLANG_DICT) เพื่อทำ Normalization ก่อนส่งเข้าโมเดล การกระทำนี้ช่วยลดความกำกวมของภาษาพูด เช่น "พน" "มะวาน" "ตอนเช้า" ซึ่งเป็นจุดอ่อนของโมเดล NLP ทั่วไป ทำให้โมเดล spaCy สามารถโฟกัสไปที่บริบทของประโยคได้ดียิ่งขึ้น

4.2 ความยืดหยุ่นของระบบ การออกแบบระบบให้มีโมดูล validation.py แยกออกมาจัดการตรรกะความถูกต้องของข้อมูล (Business Logic) ช่วยให้ระบบมีความยืดหยุ่นสูง การใช้เกณฑ์ตรวจสอบ (Validation Criteria) เพื่อระบุว่าข้อมูลใดเป็น "ข้อมูลวิกฤต" (Critical Fields) เช่น ชื่อกิจกรรมและวันที่ ทำให้ระบบสามารถโต้ตอบกับผู้ใช้ได้อย่างชาญฉลาดโดยการถามหาข้อมูลที่ขาดหายไป แทนที่จะปฏิเสธคำสั่งหรือบันทึกข้อมูลที่ผิดพลาด เพื่อเพิ่มความถูกต้องของข้อมูลประสิทธิภาพของเครื่องมือ

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หน่วยงานต้นสังกัดของคณะผู้วิจัย ที่ให้การสนับสนุนในการดำเนินงานวิจัย ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ หน่วยงานจัดการประชุมวิชาการ และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการนำเสนอบทความในการประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

7. เอกสารอ้างอิง

[1] S. Bird, E. Klein, and E. Loper, *Natural Language Processing with Python*. O'Reilly Media, 2009.

[2] D. Jurafsky and J. H. Martin, *Speech and Language Processing*. Prentice Hall, 1999.

[3] M. Honnibal and I. Montani, "spaCy 2: Natural language understanding with Bloom embeddings, convolutional attention and deep learning," 2017. [Online]. Available: https://spacy.io/. [Accessed: Feb. 10, 2025].

[4] C. D. Manning, P. Raghavan, and H. Schütze, *Introduction to Information Retrieval*. Cambridge University Press, 2024.

[5] VISTEC & VISAI.ai, "Thai Nested Named Entity Recognition Corpus," 2022. [Online]. Available: https://github.com/vistec-AI/thai-nested-ner. [Accessed: Feb. 10, 2025].

[6] จ. จารุพันธ์, "การเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมสำหรับจำแนกหมวดหมู่ข้อความร้องเรียนภาษาไทย," *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา*, ปีที่ 10, หน้า 1-12, 2565.

[7] ว. ภัททิยไพบูลย์, ก. เชาวะวานิช และคณะ, "PyThaiNLP: Thai Natural Language Processing in Python," 2566. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: https://github.com/PyThaiNLP/pythainlp. [สืบค้นเมื่อ: 10 ก.พ. 2568].

[8] ว. กังวาลสิงห์, "ระบบเซ็นเซอร์ชื่อบุคคลออกจากเอกสารสแกนคำพิพากษาด้วยปัญญาประดิษฐ์," *วารสารนิติศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์*, ปีที่ 52, หน้า 45-68, 2566.

[9] ศ. อุบลวิโรจน์ และ ธ. ฆังคะจิตร, "ระบบสกัดนิพจน์ทางการแพทย์สำหรับระบบสนับสนุนการตัดสินใจแพทย์," *วารสารบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์*, ปีที่ 11, หน้า 13-25, 2564.



ดร.นริศรา นาคเมธี
อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
งานวิจัยที่สนใจ: การประมวลผลภาษาธรรมชาติ, การค้นคืนข้อมูล, เหมืองข้อมูล



นายภวัต บัวแตง
สาขาวิชาวิทยาการข้อมูลและเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
งานวิจัยที่สนใจ: การประมวลผลภาษาธรรมชาติ, เหมืองข้อมูล



นายพีรพัฒน์ ตันมา
สาขาวิชาวิทยาการข้อมูลและเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
งานวิจัยที่สนใจ: การประมวลผลภาษาธรรมชาติ, เหมืองข้อมูล

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การทำนายการเกิด PM2.5 จากข้อมูลจุดความร้อน และปัจจัยอุตุนิยมวิทยาด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง

Prediction of PM2.5 Using Hotspot and Meteorological Data with Machine learning

นริศรา นาคเมธี[1] เสมา แซ่คู[2] และณัฐพงศ์ คงสบาย[1*]

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

narisara.n@rmutp.ac.th sema-s@rmutp.ac.th natthaphong-ko@rmutp.ac.th*

บทคัดย่อ

ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5) เป็นมลพิษทางอากาศที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนในประเทศไทย งานศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ปริมาณและการกระจายตัวของฝุ่น PM2.5 เชิงพื้นที่ โดยจำแนกตามระดับจังหวัดและภูมิภาค รวมทั้งพัฒนาแบบจำลองเชิงพยากรณ์ด้วยเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง ข้อมูลที่ใช้ประกอบด้วยข้อมูลคุณภาพอากาศ ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา และข้อมูลจุดความร้อนจากดาวเทียม ซึ่งผ่านกระบวนการทำความสะอาดและผสานข้อมูลในรูปแบบรายวัน การวิเคราะห์เชิงพื้นที่แสดงให้เห็นว่าระดับความเข้มข้นของ PM2.5 มีความแตกต่างกันระหว่างภูมิภาค ได้นำข้อมูลไปพัฒนาแบบจำลอง Random Forest เพื่อใช้ในการพยากรณ์ค่าฝุ่น PM2.5 ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองมีประสิทธิภาพในการทำนายในระดับที่น่าพอใจและสามารถอธิบายความสัมพันธ์เชิงซับซ้อนของปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้อย่างเหมาะสม ผลลัพธ์จากการศึกษานี้สามารถนำไปใช้สนับสนุนการเฝ้าระวังคุณภาพอากาศและการกำหนดมาตรการด้านสาธารณสุขเชิงพื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : ฝุ่นละออง PM2.5; การเรียนรู้ของเครื่อง; ป่าสุ่ม

Abstract

Fine particulate matter with an aerodynamic diameter of less than 2.5 micrometers (PM2.5) is a major air pollutant that poses significant risks to public health in Thailand. This study aims to analyze the spatial distribution of PM2.5 concentrations by province and region and to develop a predictive model using machine learning techniques. The study integrates air quality data, meteorological data, and satellite-derived hotspot information, which were systematically cleaned and merged into a daily dataset. Spatial analysis reveals notable regional differences in PM2.5 concentrations, particularly during the dry season. The processed data were subsequently used to develop a Random Forest model for PM2.5 prediction. The results indicate that the model achieves satisfactory predictive performance and effectively captures complex relationships among influencing factors. The findings of this study can support spatially informed air quality monitoring and the development of targeted public health and environmental policy measures.

Keywords: PM2.5; Machine Learning; Random Forest

1. บทนำ

ปัญหามลพิษทางอากาศ โดยเฉพาะฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5) ได้กลายเป็นประเด็นด้านสิ่งแวดล้อมและสาธารณสุขที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในประเทศไทยตลอดช่วงหลายปีที่ผ่านมา เนื่องจากฝุ่นละอองชนิดนี้มีขนาดเล็กมาก สามารถแขวนลอยอยู่ในบรรยากาศเป็นเวลานาน และแทรกซึมเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจจนถึงถุงลมปอดและกระแสเลือด ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนทั้งในระยะสั้นและระยะยาว ไม่ว่าจะเป็นอาการระคายเคืองตาและทางเดินหายใจ โรคระบบทางเดินหายใจ โรคหัวใจและหลอดเลือด ตลอดจนเพิ่มความเสี่ยงต่อการเสียชีวิตก่อนวัยอันควร ปัญหาดังกล่าวทวีความรุนแรงเป็นพิเศษในช่วงฤดูแล้งของประเทศไทย ซึ่งมีสภาพอากาศนิ่ง ปริมาณฝนน้อย และมีกิจกรรมการเผาในที่โล่งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความเข้มข้นของ PM2.5 สูงเกินเกณฑ์มาตรฐานในหลายพื้นที่

การเกิดและการสะสมของฝุ่น PM2.5 เป็นผลมาจากปัจจัยเชิงเหตุที่ซับซ้อน โดยเกี่ยวข้องทั้งแหล่งกำเนิดจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การคมนาคม การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล การเผาเศษวัสดุทางการเกษตร และไฟป่า รวมถึงปัจจัยด้านอุตุนิยมวิทยา เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ความเร็วลม และปริมาณฝน ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการแพร่กระจายและการสะสมของมลพิษในบรรยากาศ นอกจากนี้ ลักษณะภูมิประเทศของบางพื้นที่ เช่น พื้นที่แอ่งหรือหุบเขา ยังเอื้อต่อการกักเก็บฝุ่นและทำให้สถานการณ์มลพิษทวีความรุนแรงมากยิ่งขึ้น งานวิจัยด้านระบาดวิทยาหลายฉบับชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการสัมผัส PM2.5 ในระยะยาวมีความสัมพันธ์กับความเสี่ยงที่เพิ่มขึ้นของโรคหัวใจขาดเลือด โรคหลอดเลือดสมอง และการเสียชีวิตจากโรคไม่ติดต่อเรื้อรัง[1] ซึ่งสะท้อนถึงความจำเป็นในการทำความเข้าใจกลไกและรูปแบบของปัญหาฝุ่นละอองอย่างเป็นระบบ

อย่างไรก็ตาม การติดตามสถานการณ์ฝุ่น PM2.5 ด้วยข้อมูลจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอ เนื่องจากข้อจำกัดด้านจำนวนสถานีและความครอบคลุมเชิงพื้นที่ งานวิจัยในช่วงหลังจึงให้ความสำคัญกับการผสานข้อมูลจากหลายแหล่ง เช่น ข้อมูลคุณภาพอากาศ ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา และข้อมูลจุดความร้อนจากดาวเทียม เพื่ออธิบายการกระจายตัวของฝุ่นในเชิงพื้นที่และเชิงเวลาได้อย่างละเอียดมากขึ้น ควบคู่กับการประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) ซึ่งมีศักยภาพในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงซับซ้อนระหว่างตัวแปรจำนวนมาก และสามารถพัฒนาแบบจำลองเชิงพยากรณ์ที่มีความแม่นยำสูงกว่าวิธีการทางสถิติแบบดั้งเดิม

ด้วยเหตุนี้ งานศึกษานี้จึงมุ่งเน้นการวิเคราะห์และทำนายระดับความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 โดยอาศัยการบูรณาการข้อมูลคุณภาพอากาศ ข้อมูลจุดความร้อนจากดาวเทียม และข้อมูลอุตุนิยมวิทยา ผ่านกระบวนการเตรียมข้อมูลและวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง โดยเฉพาะแบบจำลอง Random Forest ซึ่งมีความสามารถในการจัดการข้อมูลที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นและลดปัญหาความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ นอกจากนี้ ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ยังถูกนำเสนอในรูปแบบแดชบอร์ดเชิงโต้ตอบ เพื่อสนับสนุนการเฝ้าระวังสถานการณ์มลพิษทางอากาศ การสื่อสารข้อมูลต่อสาธารณชน และการตัดสินใจเชิงนโยบายด้านสาธารณสุขอย่างมีประสิทธิภาพ อันจะช่วยลดผลกระทบจากปัญหาฝุ่น PM2.5 ต่อคุณภาพชีวิตของประชาชนในระยะยาว

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎีเกี่ยวกับฝุ่นละออง PM2.5

ฝุ่นละออง PM2.5 จัดเป็นอนุภาคขนาดเล็กที่แขวนลอยอยู่ในบรรยากาศและมีศักยภาพในการแทรกซึมเข้าสู่ถุงลมปอดและกระแสเลือดได้โดยตรง ด้วยขนาดที่เล็กมาก ฝุ่นประเภทนี้จึงถูกจัดให้เป็นหนึ่งในตัวชี้วัดมลพิษทางอากาศที่มีความอันตรายต่อสุขภาพสูงที่สุดในระดับสากล แหล่งกำเนิดของ PM2.5 สามารถแบ่งออกเป็นแหล่งกำเนิดโดยตรง เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิงจากยานยนต์ดีเซล การเผาในที่โล่ง กิจกรรมอุตสาหกรรม และการก่อสร้าง รวมถึงแหล่งกำเนิดทางอ้อมซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาเคมีของก๊าซมลพิษในบรรยากาศ เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไนโตรเจนออกไซด์ แอมโมเนีย และสารอินทรีย์ระเหยง่าย จนก่อให้เกิดอนุภาคฝุ่นทุติยภูมิขนาดเล็ก

นอกเหนือจากแหล่งกำเนิดแล้ว ปัจจัยด้านอุตุนิยมวิทยามีบทบาทสำคัญต่อระดับความเข้มข้นและการกระจายตัวของ PM2.5 ความเร็วลมที่ต่ำทำให้ฝุ่นสะสมอยู่ใกล้ผิวพื้นเป็นเวลานาน ขณะที่อุณหภูมิและปรากฏการณ์ผกผันของอุณหภูมิส่งผลให้การลอยตัวและการระบายมลพิษในแนวดิ่งลดลง ความชื้นสัมพัทธ์สามารถเร่งกระบวนการเกาะตัวของอนุภาคและการก่อตัวของฝุ่นทุติยภูมิ ส่วนปริมาณฝนมีบทบาทในการชะล้างฝุ่นออกจากบรรยากาศ บริบทของประเทศไทย โดยเฉพาะในช่วงฤดูแล้งและฤดูหนาว มักประสบปัญหาค่าฝุ่นสูงเนื่องจากสภาพอากาศนิ่งและกิจกรรมการเผาในที่โล่งที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาเชิงพื้นที่ แหล่งกำเนิดและปัจจัยเชิงเหตุของ PM2.5 มีความแตกต่างกันระหว่างพื้นที่เมืองและชนบท ในเขตเมืองขนาดใหญ่ เช่น กรุงเทพมหานครและปริมณฑล ฝุ่น PM2.5 ส่วนใหญ่มาจากการคมนาคมทางบกและกิจกรรมอุตสาหกรรม โดยเฉพาะการปล่อยไอเสียจากรถยนต์ดีเซลและฝุ่นจากการสึกหรอของผิวถนน ขณะที่ในพื้นที่ชนบทและภาคเหนือของประเทศ การเผาไหม้ชีวมวลจากการเผาเศษวัสดุทางการเกษตรและการเผาป่าถูกระบุว่าเป็นปัจจัยเชิงเหตุหลักของเหตุการณ์ค่าฝุ่นสูงเป็นช่วง ๆ [2] ฝุ่นจากแหล่งดังกล่าวยังสามารถถูกพัดพาในระดับภูมิภาคและข้ามพรมแดน ส่งผลให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศแบบข้ามแดน[3] ซึ่งทำให้พื้นที่ปลายทางมีค่าฝุ่นสูงแม้ไม่มีแหล่งกำเนิดในพื้นที่โดยตรง

งานวิจัยจำนวนมากในประเทศไทย [8][9][12][13][14][15] ชี้ให้เห็นว่าภูมิประเทศ โดยเฉพาะลักษณะพื้นที่แบบแอ่งหรือหุบเขาในภาคเหนือ มีส่วนเสริมให้เกิดการกักเก็บมวลอากาศและการสะสมของ PM2.5 เมื่อประกอบกับสภาพอากาศนิ่งและการผกผันของอุณหภูมิ จะทำให้ระดับฝุ่นเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและคงอยู่เป็นเวลานาน ปัจจัยเหล่านี้สะท้อนให้เห็นว่าปัญหา PM2.5 เป็นผลลัพธ์ของกระบวนการเชิงเหตุที่ซับซ้อน และไม่สามารถอธิบายได้จากปริมาณการปล่อยเพียงอย่างเดียว

ในด้านผลกระทบต่อสุขภาพ งานวิจัยทั้งในและต่างประเทศ [1][5][6][11][12][13] ยืนยันอย่างชัดเจนว่าการสัมผัส PM2.5 ทั้งในระยะสั้นและระยะยาวมีความสัมพันธ์กับความเสี่ยงที่เพิ่มขึ้นของโรคระบบทางเดินหายใจ โรคหัวใจและหลอดเลือด มะเร็งปอด และการเสียชีวิตก่อนวัยอันควร การประเมินภาระโรคจากมลพิษทางอากาศในเขตเมืองของประเทศไทยรายงานจำนวนการเสียชีวิตที่สัมพันธ์กับ PM2.5 ในระดับที่น่ากังวล สะท้อนให้เห็นถึงความจำเป็นในการเฝ้าระวังและจัดการปัญหาฝุ่นอย่างเป็นระบบ

ในเชิงระเบียบวิธี งานวิจัยด้าน PM2.5 ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้พัฒนาอย่างต่อเนื่องจากการใช้สถิติเชิงพรรณนาและการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ ไปสู่การประยุกต์ใช้แบบจำลองการถดถอยและแบบจำลองเชิงกายภาพ เช่น แบบจำลองการแพร่กระจายของมลพิษ [10] อย่างไรก็ตาม งานวิจัยร่วมสมัยมีแนวโน้มให้ความสำคัญกับแนวทางเชิงข้อมูลและการเรียนรู้ของเครื่อง [4][14][15][16][17] เนื่องจากสามารถอธิบายความสัมพันธ์เชิงซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้นระหว่าง PM2.5 กับปัจจัยด้านอุตุนิยมวิทยาและสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การเรียนรู้ของเครื่องแบบมีผู้สอน โดยเฉพาะเทคนิค Random Forest ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานวิจัยด้านคุณภาพอากาศของประเทศไทย เนื่องจากมีความสามารถในการจัดการข้อมูลหลายมิติ ลดปัญหา overfitting และให้ผลการพยากรณ์ที่มีเสถียรภาพ งานวิจัยก่อนหน้าที่ผสานข้อมูลจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา และข้อมูลจุดความร้อนจากดาวเทียม แสดงให้เห็นว่า Random Forest สามารถพยากรณ์ระดับ PM2.5 ได้แม่นยำกว่าวิธีการเชิงเส้นแบบดั้งเดิม [4] และสามารถสะท้อนบทบาทของการเผาไหม้ชีวมวลและสภาพอากาศต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าฝุ่นได้อย่างชัดเจน

จากการทบทวนทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปได้ว่า ปัญหา PM2.5 ในประเทศไทยเป็นประเด็นเชิงระบบที่เกี่ยวข้องกับแหล่งกำเนิดหลากหลาย ปัจจัยด้านอุตุนิยมวิทยา ภูมิประเทศ และผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชน การผสานข้อมูลจากหลายแหล่งร่วมกับการประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องจึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมในการอธิบายเชิงเหตุและพยากรณ์สถานการณ์ฝุ่นในเชิงพื้นที่และเชิงเวลา ซึ่งเป็นฐานความรู้สำคัญสำหรับการเฝ้าระวัง การเตือนภัยล่วงหน้า และการสนับสนุนการกำหนดนโยบายด้านคุณภาพอากาศและสาธารณสุขอย่างมีประสิทธิภาพ

2.2 Random Forest

คือเทคนิคการเรียนรู้แบบกลุ่ม (Ensemble Learning) ที่พัฒนาขึ้นโดยใช้พื้นฐานของแผนภูมิการตัดสินใจ (Decision Trees) จำนวนมากมาทำงานร่วมกันเพื่อเพิ่มความแม่นยำและเสถียรภาพในการทำนาย โดยมีกลไกหลักคือการสร้างความหลากหลายให้กับโมเดลผ่านกระบวนการ Bootstrap Aggregating หรือ Bagging ซึ่งเป็นการสุ่มตัวอย่างข้อมูลชุดฝึกสอนพร้อมการแทนที่ (Sampling with replacement) ผสมผสานกับการสุ่มเลือกคุณลักษณะ (Feature Randomness) ในการ

พิจารณาจุดแยกของแต่ละโหนด ส่งผลให้โมเดลต้นไม้แต่ละต้นใน "ป่า" มีความเป็นอิสระต่อกันและช่วยลดความลำเอียง (Bias) ที่อาจเกิดขึ้นจากโมเดลเดี่ยวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในเชิงการคำนวณ Random Forest ดำเนินการโดยการส่งข้อมูลผ่านต้นไม้ทุกต้นเพื่อหาผลลัพธ์สุดท้าย หากเป็นงานด้านการจำแนกประเภท (Classification) จะใช้วิธีการลงคะแนนเสียงข้างมาก (Majority Voting) แต่หากเป็นงานด้านการประมาณค่า (Regression) จะใช้วิธีการหาค่าเฉลี่ย (Averaging) ซึ่งกระบวนการนี้ช่วยลดความแปรปรวน (Variance) และป้องกันปัญหา Overfitting ได้ดีเยี่ยม จุดเด่นสำคัญคือความสามารถในการจัดการกับข้อมูลที่มีมิติสูง (High-dimensional data) และระบุค่าความสำคัญของคุณลักษณะ (Feature Importance) ได้โดยตรง อัลกอริทึมนี้จึงเหมาะสมอย่างยิ่งกับข้อมูลประเภทตาราง (Structured Data) ที่มีความซับซ้อน เช่น ข้อมูลทางสถิติประชากร การพยากรณ์ทางเศรษฐกิจ หรือข้อมูลทางการแพทย์ที่ต้องการความแม่นยำสูง

3. วิธีการดำเนินงาน

การศึกษานี้มุ่งพัฒนาแบบจำลองเชิงพยากรณ์ระดับความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5) โดยอาศัยข้อมูลจุดความร้อนจากดาวเทียมร่วมกับข้อมูลอุตุนิยมวิทยาและข้อมูลคุณภาพอากาศภาคพื้นดิน ภายใต้กรอบแนวคิดการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) กระบวนการดำเนินงานประกอบด้วยขั้นตอนหลัก ได้แก่ การรวบรวมข้อมูล การเตรียมและผสานข้อมูล การวิเคราะห์เชิงสถิติและเชิงพื้นที่ การสร้างและประเมินแบบจำลองพยากรณ์ และการนำเสนอผลลัพธ์ในรูปแบบภาพและแดชบอร์ดเชิงโต้ตอบ

3.1 การรวบรวมข้อมูล

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาได้มาจากหลายแหล่งเพื่อให้ครอบคลุมมิติด้านสิ่งแวดล้อม สภาพอากาศ และกิจกรรมการเผาไหม้ ข้อมูลคุณภาพอากาศ PM2.5 รายชั่วโมงถูกรวบรวมจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินของกรมควบคุมมลพิษผ่านระบบ Air4Thai ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ปริมาณฝน และความเร็วลม ได้จากบริการ Open-Meteo ขณะที่ข้อมูลจุดความร้อนและพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ชีวมวลได้จากข้อมูลดาวเทียมขององค์การนาซา (NASA) ข้อมูลทั้งหมดถูกรวบรวมในช่วงปี พ.ศ. 2564 - 2567

3.2 การเตรียมและทำความสะอาดข้อมูล

เนื่องจากข้อมูลมาจากหลายแหล่งมีความแตกต่างทั้งในเชิงรูปแบบ ความถี่ของเวลา และหน่วยวัด จึงจำเป็นต้องผ่านกระบวนการทำความสะอาดข้อมูล (Data Cleaning) และการปรับโครงสร้างข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐาน ขั้นตอนนี้ประกอบด้วยการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล การจัดการค่าที่ขาดหาย (Missing Values) การคัดกรองค่าผิดปกติ (Outliers) และการแปลงข้อมูลรายชั่วโมงให้เป็นข้อมูลสรุปรายวันเพื่อให้สอดคล้องกันทุกชุดข้อมูล หลังจากนั้นจึงทำการผสานข้อมูลฝุ่น PM2.5 ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา และข้อมูลจุดความร้อนเข้าด้วยกันโดยอาศัยมิติของเวลาและพื้นที่เดียวกัน

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติและเชิงพื้นที่

ก่อนการสร้างแบบจำลอง ได้ดำเนินการวิเคราะห์เชิงพรรณนาเพื่ออธิบายลักษณะทั่วไปของข้อมูล เช่น ค่าเฉลี่ย ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของ PM2.5 ในแต่ละภูมิภาคของประเทศไทย นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์เชิงสหสัมพันธ์ (Correlation Analysis) เพื่อประเมินความสัมพันธ์ระหว่างระดับ PM2.5 กับปัจจัยอุตุนิยมวิทยาและตัวแปรด้านจุดความร้อน ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวช่วยสนับสนุนการคัดเลือกตัวแปรอิสระที่เหมาะสมสำหรับการสร้างแบบจำลองพยากรณ์ และช่วยอธิบายพฤติกรรมเชิงพื้นที่ของปัญหาฝุ่นในระดับจังหวัดและภูมิภาค

3.4 การสร้างและทดสอบแบบจำลองการพยากรณ์

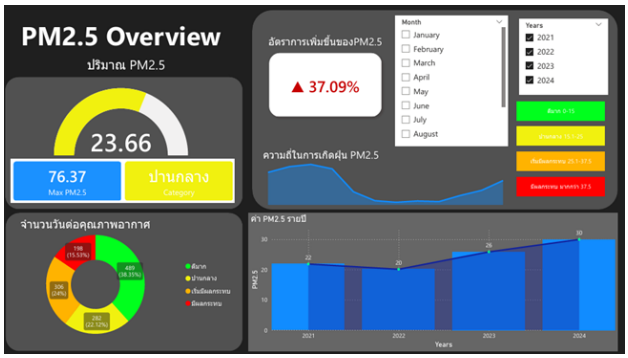
การพัฒนาแบบจำลองพยากรณ์ใช้แนวคิดการเรียนรู้แบบมีผู้สอน (Supervised Learning) โดยแบ่งข้อมูลออกเป็นชุดฝึกสอนและชุดทดสอบ แบบจำลองหลักที่ใช้ในการศึกษานี้คือ Random Forest ซึ่งเป็นอัลกอริทึมแบบ Ensemble Learning ที่สามารถอธิบายความสัมพันธ์เชิงซับซ้อนระหว่างตัวแปรได้ดี นอกจากนี้ยังสร้างแบบจำลอง Linear Regression เพื่อใช้เป็นแบบจำลองเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพของแบบจำลองถูกประเมินด้วยตัวชี้วัดมาตรฐาน เช่น ค่า R^2 ค่า RMSE และค่า MAE เพื่อพิจารณาความแม่นยำและความเสถียรของการพยากรณ์ในแต่ละภูมิภาคและในระดับประเทศ

ตารางที่ 1 ผลลัพธ์การทดสอบโมเดล Random Forest และ Linear Regression

ความแม่นยำ	ภาคกลาง	ภาคอีสาน	ภาคตะวันออก	ภาคเหนือ	ภาคใต้
Random Forest	76.92%	81.87%	84.62%	88.46%	82.97%
Linear Regression	78.02%	85.16%	79.12%	87.91%	81.87%

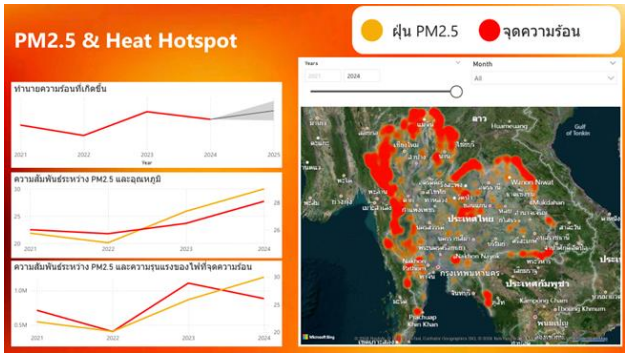
3.5 การนำเสนอผลลัพธ์และการประยุกต์ใช้งาน

ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์และการพยากรณ์ถูกนำเสนอผ่านกราฟเชิงสถิติ แผนที่เชิงพื้นที่ และแดชบอร์ดเชิงโต้ตอบ (Interactive Dashboard) เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถติดตามแนวโน้ม PM2.5 ความสัมพันธ์กับปัจจัยที่เกี่ยวข้อง และผลการพยากรณ์ในแต่ละพื้นที่ได้อย่างเข้าใจง่าย แนวทางการนำเสนอในรูปแบบดังกล่าวช่วยเพิ่มศักยภาพในการสื่อสารข้อมูล สนับสนุนการเฝ้าระวังคุณภาพอากาศ และเอื้อต่อการนำผลการศึกษาไปใช้ประกอบการตัดสินใจเชิงนโยบายด้านสิ่งแวดล้อมและสาธารณสุขในอนาคต



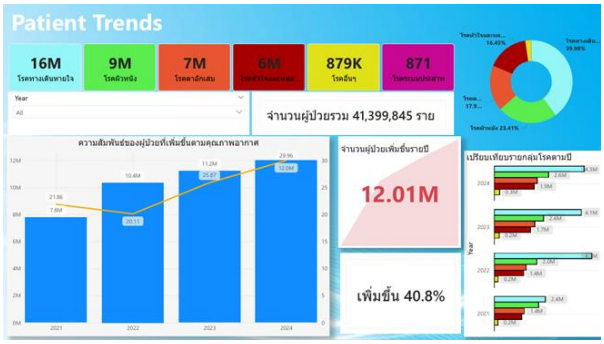
รูปที่ 1 Dashboard หน้า PM2.5 Overview

จากรูปที่ 1 PM2.5 Overview ใช้สำหรับแสดงและวิเคราะห์สถานการณ์ฝุ่น PM2.5 แบบภาพรวม โดยนำเสนอค่าความเข้มข้นเฉลี่ย



รูปที่ 2 Dashboard หน้า PM2.5 & Heat Hotspot

จากรูปที่ 2 Dashboard หน้า PM2.5 & Heat Hotspot ใช้สำหรับวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงพื้นที่และเชิงเวลา ระหว่างปริมาณฝุ่น PM2.5 อุณหภูมิ และจุดความร้อนจากการเกิดไฟ โดยแสดงแนวโน้มรายปี ความสัมพันธ์ระหว่าง PM2.5 กับอุณหภูมิและความรุนแรงของจุดความร้อนควบคู่กับแผนที่การกระจายตัวของจุดความร้อนทั่วประเทศ



รูปที่ 3 Dashboard หน้า Patient Trends

จากรูปที่ 3 Patient Trends ใช้สำหรับติดตามและวิเคราะห์แนวโน้มจำนวนผู้ป่วยในภาพรวมและรายกลุ่มโรค โดยแสดงจำนวนผู้ป่วยสะสม ผู้ป่วยที่เพิ่มขึ้นรายปี อัตราการเพิ่มขึ้น และการเปรียบเทียบผู้ป่วยแยกตามประเภทโรคในแต่ละปี

4. ผลการดำเนินงาน

ผลการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง Random Forest พบว่าโมเดลสามารถทำนายค่าฝุ่น PM2.5 ได้อย่างมีประสิทธิภาพในระดับที่น่าพอใจ โดยค่าความคลาดเคลื่อนของการทำนายอยู่ในเกณฑ์ต่ำ และสามารถอธิบายแนวโน้มของค่าฝุ่นได้ใกล้เคียงกับข้อมูลจริงในหลายภูมิภาคของประเทศ โดยเฉพาะในช่วงฤดูแล้งที่เกิดเหตุการณ์ฝุ่นสูงจากการเผาในที่โล่งและไฟป่า ความสามารถของ Random Forest ในการจับความสัมพันธ์เชิงไม่เชิงเส้นระหว่างตัวแปรอิสระ เช่น จำนวนจุดความร้อน อุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลม ส่งผลให้โมเดลมีความเสถียรและแม่นยำกว่าวิธีการเชิงสถิติแบบดั้งเดิม

เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง Linear Regression พบว่า Linear Regression สามารถอธิบายแนวโน้มโดยรวมของค่าฝุ่น PM2.5 ได้ในระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพในการทำนายยังต่ำกว่า Random Forest อย่างชัดเจน โดยเฉพาะในช่วงที่ค่าฝุ่นมีความผันผวนสูงหรือเกิดเหตุการณ์ฝุ่นรุนแรงเป็นระยะ ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนข้อจำกัดของแบบจำลองเชิงเส้นที่ไม่สามารถอธิบายความสัมพันธ์เชิงซับซ้อนระหว่างปัจจัยด้านอุตุนิยมวิทยาและแหล่งกำเนิดฝุ่นได้อย่างครบถ้วน

นอกจากนี้ ผลการเปรียบเทียบแบบจำลอง Machine Learning หลายประเภท ได้แก่ Random Forest, Linear Regression และ K-Nearest Neighbors (KNN) แสดงให้เห็นว่า Random Forest ให้ค่าประสิทธิภาพสูงที่สุดในภาพรวม ทั้งในแง่ความแม่นยำและความสามารถในการทำนายค่าฝุ่นในระดับภูมิภาคและระดับประเทศ ขณะที่ KNN ให้ผลลัพธ์อยู่ในระดับปานกลาง และมีความอ่อนไหวต่อการกระจายตัวของข้อมูล

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพโมเดล Linear Regression

Class	Precision	Recall	F1-Score
Normal	0.87	0.88	0.87
High	0.69	0.68	0.69

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพโมเดล Random Forest

Class	Precision	Recall	F1-Score
Normal	0.85	0.90	0.88
High	0.72	0.62	0.67

ตารางที่ 4 ประสิทธิภาพโมเดล KNN

Class	Precision	Recall	F1-Score
Normal	0.85	0.79	0.82
High	0.56	0.66	0.61

ตารางที่ 5 ผลลัพธ์การทดสอบโมเดล Linear Regression

ความแม่นยำ	ภาคกลาง	ภาคอีสาน	ภาคตะวันออก	ภาคเหนือ	ภาคใต้
Accuracy	78.02%	85.16%	79.12%	87.91%	81.87%

ในเชิงการวิเคราะห์เชิงพื้นที่ ผลการทำนายแสดงให้เห็นความแตกต่างของระดับ PM2.5 ระหว่างภูมิภาคอย่างชัดเจน โดยภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีแนวโน้มค่าฝุ่นสูงกว่าภูมิภาคอื่นในบางช่วงเวลา ซึ่งสอดคล้องกับการกระจายตัวของจุดความร้อนและลักษณะภูมิประเทศแบบแอ่งที่เอื้อต่อการสะสมของมลพิษ ขณะที่กรุงเทพมหานครและภาคกลางมีค่าฝุ่นที่สัมพันธ์กับกิจกรรมการคมนาคมและสภาพอากาศนิ่งเป็นหลัก

ผลลัพธ์ของการศึกษายังถูกนำไปประยุกต์ใช้ในรูปแบบ Dashboard เชิงโต้ตอบ เพื่อแสดงข้อมูลค่าฝุ่น PM2.5 แนวโน้มรายวันและรายปี การกระจายเชิงพื้นที่ และผลการพยากรณ์ในอนาคต ซึ่งช่วยเพิ่มศักยภาพในการสื่อสารข้อมูลให้เข้าใจง่ายและสามารถนำไปใช้สนับสนุนการเฝ้าระวังคุณภาพอากาศและการตัดสินใจเชิงนโยบายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

โดยสรุป ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าแบบจำลอง Random Forest ที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายค่าฝุ่น PM2.5 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในการติดตามและพยากรณ์สถานการณ์มลพิษทางอากาศในประเทศไทย โดยเฉพาะเมื่อผสานข้อมูลจากหลายแหล่ง ทั้งข้อมูลจุดความร้อน ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา และข้อมูลคุณภาพอากาศภาคพื้นดิน

5. บทสรุป

5.1 สรุปผลการดำเนินวิจัย

การวิจัยนี้ได้วิเคราะห์การกระจายตัวเชิงพื้นที่ของฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5) ในประเทศไทย และพัฒนาแบบจำลองเชิงพยากรณ์โดยใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องจากข้อมูลคุณภาพอากาศ ข้อมูลจุดความร้อนจากดาวเทียม และข้อมูลอุตุนิยมวิทยา ซึ่งผ่านกระบวนการทำความสะอาดและผสานข้อมูลในระดับรายวัน ผลการวิเคราะห์พบว่าระดับ PM2.5 มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนระหว่างภูมิภาค โดยเฉพาะพื้นที่ภาคเหนือและบางส่วนของภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่มีค่าฝุ่นสูงสัมพันธ์กับจำนวนจุดความร้อนจากการเผาในที่โล่ง ขณะที่การประเมินแบบจำลองพบว่าแบบจำลอง Random Forest ให้ประสิทธิภาพในการทำนายสูงกว่า Linear Regression และสามารถอธิบายความสัมพันธ์เชิงซับซ้อนระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับ PM2.5 ได้ดีกว่า ผลลัพธ์ของงานวิจัยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเฝ้าระวังคุณภาพอากาศ การสื่อสารความเสี่ยงด้านสุขภาพ และการสนับสนุนการกำหนดมาตรการด้านสาธารณสุขและสิ่งแวดล้อมเชิงพื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.2 ข้อจำกัด

5.2.1 ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัยมีข้อจำกัดด้านความครบถ้วนและความต่อเนื่องของข้อมูลในบางช่วงเวลา รวมถึงความแตกต่างของความละเอียดของข้อมูลจากหลายแหล่ง ทำให้ต้องใช้เวลาในการคัดกรองเตรียม และปรับปรุงข้อมูลก่อนนำไปวิเคราะห์ ซึ่งอาจส่งผลต่อความละเอียดของผลการวิเคราะห์ในบางส่วน

5.2.2 แบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยอาศัยข้อมูลในอดีตเป็นหลัก จึงอาจมีข้อจำกัดในการทำนายสถานการณ์ที่มีเงื่อนไขใหม่หรือเหตุการณ์ผิดปกติ

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 เพิ่มความครอบคลุมและความสมบูรณ์ของข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย ทั้งในด้านช่วงเวลา พื้นที่ศึกษา และความถี่ของข้อมูล รวมถึงการบูรณาการข้อมูลจากแหล่งอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อช่วยลดปัญหาข้อมูลขาดหายและเพิ่มประสิทธิภาพในการวิเคราะห์และการพยากรณ์

5.3.2 พัฒนากระบวนการทดสอบและประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองให้มีความรัดกุมมากยิ่งขึ้น เช่น การใช้เทคนิคการตรวจสอบความถูกต้องแบบ Cross-Validation หรือการแบ่งชุดข้อมูลตามลำดับเวลา เพื่อให้ผลการประเมินสามารถสะท้อนสมรรถนะของแบบจำลองได้อย่างเหมาะสม และลดความเอนเอียงที่อาจเกิดขึ้นจากการทดสอบ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หน่วยงานต้นสังกัดของคณะผู้วิจัย ที่ให้การสนับสนุนในการดำเนินงานวิจัย ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ หน่วยงานจัดการประชุมวิชาการ และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการนำเสนอบทความในการประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเททคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

เอกสารอ้างอิง

[1] N. Vichit-Vadakan and N. Vajanapoom, "Health impact from air pollution in Thailand: Current and future challenges," *Epidemiology*, vol. 22, no. 1, pp. S41-S41, Jan. 2011.

[2] S. Chantara *et al.*, "Atmospheric pollutants in Chiang Mai (Thailand) over a five-year period," *Atmospheric Environment*, vol. 54, pp. 31-40, Jul. 2012.

[3] Y. Liu *et al.*, "Influence of biomass burning on PM2.5 in Southeast Asia," *Aerosol Air Qual. Res.*, vol. 18, pp. 100-111, 2018.

[4] K. Kanchanasut *et al.*, "Application of satellite remote sensing data and random forest for PM2.5 prediction in Thailand," *MUREX*, 2021.

[5] S. E. Alexeeff *et al.*, "Long-term PM2.5 exposure and risks of ischemic heart disease and stroke events: Review and meta-analysis," *Environ. Health*, vol. 20, no. 1, p. 1, 2021.

[6] W. Aekplakorn *et al.*, "Long-term exposure to particulate matter and cardiovascular mortality in Thailand: Evidence from the EGAT cohort," *Environ. Health*, 2024.

[7] S. Panyametheekul, S. Chantara, and S. Pongpiachan, "Source apportionment of PM2.5 in Chiang Mai during haze episodes," *Atmos. Pollut. Res.*, vol. 10, no. 1, 2019.

[8] P. Pongkiatkul and N. T. Kim Oanh, "Assessment of potential long-range transport of particulate air pollution in northern Thailand," *Atmos. Environ.*, vol. 153, pp. 123-134, Mar. 2014.

[9] J. Guo *et al.*, "Integration of ground-based PM2.5 measurements and satellite AOD for air quality assessment in Thailand," *Atmosphere*, vol. 11, no. 10, p. 1040, 2020.

[10] S. Thepanondh *et al.*, "Application of AERMOD model for PM dispersion in Bangkok," 2013.

[11] N. R. Foulds *et al.*, "An assessment of annual mortality attributable to ambient PM2.5 in Bangkok, Thailand," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 17, no. 19, p. 7298, 2020.

[12] N. Parasin and T. Amnuaylojaroen, "Effect of PM2.5 on burden of mortality from non-communicable diseases in northern Thailand," *PeerJ*, vol. 12, p. e18055, 2024.

[13] T. Supasri *et al.*, "Association between ambient air particulate matter and human health impacts in northern Thailand," *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, p. 12895, 2023.

[14] R. Wongsathan and A. Sabkam, "Ensemble machine learning-based PM2.5 modeling using hotspot counts reflecting Chiang Mai's extreme pollution," *Heliyon*, vol. 9, no. 10, p. e20863, 2023.

[15] K. Inlaung *et al.*, "Assessment of transboundary PM2.5 from biomass burning in northern Thailand using the WRF-Chem model," *Toxics*, vol. 12, no. 7, p. 462, 2024.

[16] K. Khempunjakul *et al.*, "Mortality and economic burden of PM2.5 and NO2 in Thailand using satellite remote sensing and random forest," *Sustainable Horizons*, vol. 13, 2025.

[17] A. Bensalam *et al.*, "Predictive models of PM2.5 concentration using AOD and meteorological data in Bangkok," *Social and Environmental Health Sciences*, vol. 43, no. 2, 2023.

[18] Q. Di *et al.*, "An ensemble-based model of PM2.5 concentration across the contiguous United States with high spatiotemporal resolution," *Environ. Int.*, vol. 130, p. 104909, Sep. 2019.

[19] กรมควบคุมมลพิษ, "ข้อมูลคุณภาพอากาศจากจุดตรวจวัดคุณภาพอากาศอัตโนมัติ," 2569. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: https://pcd.gdcatalog.go.th/. [สืบค้นเมื่อ: 16 เม.ย. 2569].

[20] สำนักงานปลัดกระทรวงสาธารณสุข, "สรุปข้อมูลจำนวนผู้ป่วยด้วยโรคที่เกี่ยวข้องกับ PM2.5," 2569. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: https://opendata.moph.go.th/. [สืบค้นเมื่อ: 16 เม.ย. 2569].

[21] NASA, "Fire Information for Resource Management System (FIRMS) Data Downloads," 2026. [Online]. Available: https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov. [Accessed: Apr. 16, 2026].

[22] Open-Meteo, "Historical Weather API," 2026. [Online]. Available: https://open-meteo.com. [Accessed: Apr. 16, 2026].

[23] Air4Thai, "รายงานสถานการณ์คุณภาพอากาศ," กรมควบคุมมลพิษ, 2569. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: http://air4thai.pcd.go.th/. [สืบค้นเมื่อ: 16 เม.ย. 2569].



ดร.นริศรา นาคเมธี
อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
งานวิจัยที่สนใจ: การประมวลผลภาษาธรรมชาติ, การค้นคืนข้อมูล, เหมืองข้อมูล, การเรียนรู้ของเครื่อง



นายเสมา แซ่คู
สาขาวิชาวิทยาการข้อมูลและเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
งานวิจัยที่สนใจ: การเรียนรู้ของเครื่อง



นายณัฐพงศ์ คงสบาย
สาขาวิชาวิทยาการข้อมูลและเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
งานวิจัยที่สนใจ: การเรียนรู้ของเครื่อง

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9
Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การพัฒนาและการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานต่อแอปพลิเคชันรายงานสถานการณ์และแจ้งเตือนระดับน้ำขึ้นน้ำลงสำหรับชุมชนตำบลแสนภูดาษ

Development and User Satisfaction Evaluation of a Situation Reporting and Tidal Water Level Notification Application for Saen Phudas Subdistrict Community

ณัฐติญา ไข่ติยากุล* ณัฏนิฌา คงปัญญา กนกพร รุ่งเรือง และ พัชรพล สะและหมัด
สาขาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงสว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
Email : Nattiya.k@rmutp.ac.th* Natnicha-k@rmutp.ac.th Kanokphon-r@rmutp.ac.th and Pawarit-wo@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและประเมินความพึงพอใจต่อแอปพลิเคชันรายงานสถานการณ์และแจ้งเตือนระดับน้ำขึ้นน้ำลง สำหรับชุมชนตำบลแสนภูดาษ ลุ่มแม่น้ำบางปะกง บนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ เพื่อแก้ปัญหาการเข้าถึงข้อมูลระดับน้ำของประชาชนในพื้นที่ ผู้วิจัยได้พัฒนาแอปพลิเคชันโดยเชื่อมโยงข้อมูลจากคลังข้อมูลน้ำแห่งชาติ (ThaiWater API) เพื่อนำมารายงาน และสร้างระบบแจ้งเตือนผ่านทางแอปพลิเคชันและ LINE Messaging API การประเมินประสิทธิภาพดำเนินการโดยผู้เชี่ยวชาญ และประเมินความพึงพอใจโดยกลุ่มตัวอย่างผู้ใช้งานจำนวน 30 คน สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ผลการวิจัยพบว่า ระบบสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องในทุกฟังก์ชันตามการประเมินของผู้เชี่ยวชาญ และผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานในภาพรวมอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{x}$ = 4.70) โดยด้านประโยชน์และความปลอดภัยมีค่าเฉลี่ยสูงสุด ($\bar{x}$ = 4.73) สรุปได้ว่าแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้งานได้จริง ช่วยให้ประชาชนรับทราบข้อมูลที่ถูกต้อง และสนับสนุนการเตรียมความพร้อมรับมือสถานการณ์น้ำขึ้นน้ำลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : แอปพลิเคชันแจ้งเตือน; ระดับน้ำขึ้นน้ำลง; ตำบลแสนภูดาษ; ลุ่มแม่น้ำบางปะกง; ความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

Abstract

This research aims to develop and evaluate user satisfaction regarding a situation reporting and tidal water level notification application on the Android operating system for the Saen Phudas subdistrict community along the Bang Pakong River, addressing the issue of local residents' access to water level data. The researchers developed the application by integrating data from the National Hydroinformatics Data Center (ThaiWater API) for reporting purposes and implemented an alert system via the application itself and the LINE Messaging API. The system's performance was evaluated by an expert, while user satisfaction was assessed by a sample group of 30 users. The statistics used for data analysis included the mean and standard deviation. The results indicated that the system functioned correctly across all features based on the expert's evaluation. Overall user satisfaction was at the highest level ($\bar{x}$ = 4.70), with the dimension of utility and safety receiving the highest mean score ($\bar{x}$ = 4.73). In conclusion, the developed application is practical for real-world use, enabling residents to receive accurate information and effectively supporting their preparedness for tidal water level situations.

Keywords: Notification Application; Tidal Water Level; Saen Phudas Subdistrict; Bang Pakong River; User Satisfaction

1. บทนำ

พื้นที่ลุ่มน้ำบางปะกง จังหวัดฉะเชิงเทรา โดยเฉพาะตำบลแสนภูดาษ [1] เป็นพื้นที่ที่มีลักษณะทางกายภาพเป็นที่ราบลุ่มริมฝั่งแม่น้ำ ซึ่งต้องเผชิญกับอิทธิพลของน้ำทะเลหนุนสูงและระดับน้ำขึ้นน้ำลงอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ความผันแปรของระดับน้ำที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วส่งผลกระทบโดยตรงต่อวิถีชีวิตชาวบ้าน ทั้งการทำเกษตรกรรมริมน้ำ การสัญจรทางเรือ และความเสี่ยงต่อทรัพย์สินเมื่อเกิดน้ำล้นตลิ่ง ปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการดำรงชีวิตประจำวันคือ อุปสรรคด้านการคมนาคมทางบก เนื่องจากเส้นทางสัญจรหลักและผิวจราจรในบริเวณที่ตั้งของสถานศึกษาและที่อยู่อาศัยมักประสบปัญหาน้ำท่วมขังในช่วงน้ำหนุนสูง ส่งผลให้ประชาชนรวมถึงผู้วิจัยเผชิญกับความยากลำบากในการเดินทาง ความล่าช้าในการประกอบกิจกรรมต่างๆ และความเสี่ยงต่อความปลอดภัยในการใช้รถใช้ถนน

ข้อจำกัดของการแจ้งเตือนข้อมูลระดับน้ำขึ้นน้ำลงในปัจจุบัน แม้หน่วยงานภาครัฐจะมีการจัดเก็บข้อมูลระดับน้ำอย่างเป็นระบบ เช่น คลังข้อมูลน้ำแห่งชาติ [2] แต่ช่องทางการเข้าถึงข้อมูลสำหรับคนในชุมชนยังมีข้อจำกัด เนื่องจากข้อมูลมักอยู่ในรูปแบบทางเทคนิคที่เข้าใจยาก หรือแสดงผลบนเว็บไซต์ที่ไม่รองรับการใช้งานผ่านมือถือได้อย่างคล่องตัว ชาวบ้านส่วนใหญ่จึงยังต้องอาศัยการสังเกตด้วยประสบการณ์ส่วนตัว หรือ รับฟังจากการประกาศเสียงตามสาย ซึ่งมีความเสี่ยงสูงหากเกิดสถานการณ์น้ำหนุนเฉียบพลัน ผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดในการพัฒนาแอปพลิเคชันขึ้นเพื่อปิดช่องว่างดังกล่าว ผู้วิจัยเน้นการดึงข้อมูลจากแหล่งที่น่าเชื่อถือมานำเสนอในรูปแบบที่ชาวบ้านในชุมชนทำความเข้าใจได้ง่ายและสะดวกขึ้น

โดยในเบื้องต้นการพัฒนาแอปพลิเคชันเริ่มต้นด้วยการพัฒนาบนระบบปฏิบัติการแอนดรอย์ [3] แสดงระดับน้ำโดยเฉพาะลุ่มแม่น้ำบางปะกง ระดับน้ำเทียบตลิ่ง รวมถึงแผนที่ [4] บริเวณใกล้เคียง นอกจากนั้นในแอปพลิเคชันยังรวบรวมข้อมูลของหน่วยงานต่าง ๆ เช่น โรงพยาบาล, เทศบาล รวมถึงกู้ภัย ในกรณีที่ชาวบ้านต้องการความช่วยเหลือเบื้องต้น จากนั้นนำแอปพลิเคชันไปทดสอบให้ชาวบ้านตำบลแสนภูดาษได้ทดลองใช้งานแล้วนำผลการตอบรับมาพัฒนาแอปพลิเคชันให้สมบูรณ์มากขึ้นต่อไป

2. ทฤษฎีและเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีด้านอุทกวิทยาและเกณฑ์ระดับน้ำ

หัวข้อนี้กล่าวถึงทฤษฎีและคำจำกัดความทางอุทกวิทยาที่นำมาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาแอปพลิเคชัน เพื่อให้ประชาชนในชุมชนสามารถทำความเข้าใจสถานการณ์น้ำในพื้นที่ได้อย่างถูกต้อง

"ระดับน้ำ" (Water Level) [5] หมายถึง ความสูงของผิวน้ำเมื่อเปรียบเทียบกับจุดอ้างอิงคงที่ เช่น ระดับน้ำทะเลปานกลาง (Mean Sea Level) โดยพื้นที่บริเวณปากแม่น้ำบางปะกงจะได้รับอิทธิพลการเปลี่ยนแปลงจาก 2 ปัจจัยหลัก ได้แก่ ระดับน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal Level) ที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโลก ดวงจันทร์ และดวงอาทิตย์ และระดับน้ำจากปัจจัยภายในแผ่นดิน (Inland Water Level) เช่น ปริมาณน้ำฝนและการระบายน้ำจากเขื่อน

นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้นำเกณฑ์การประเมินสถานการณ์น้ำมาใช้ในการออกแบบระบบแจ้งเตือน โดยใช้ "ระดับตลิ่ง" (Bank Level) เป็นจุดอ้างอิงความปลอดภัยของลำน้ำ และใช้ตัวแปร "ระดับน้ำเทียบตลิ่ง" (Difference from Bank Level) ซึ่งเป็นค่าความต่างระหว่างระดับน้ำปัจจุบันกับระดับตลิ่งมาประเมินความเสี่ยง หากค่าระดับน้ำเทียบตลิ่งเข้าใกล้ศูนย์หรือติดลบ แสดงว่ามีความเสี่ยงที่น้ำจะล้นตลิ่ง [6] ทั้งนี้ ผู้วิจัยได้ใช้เกณฑ์ดังกล่าวในการกำหนดสถานะการแจ้งเตือนภายในแอปพลิเคชัน แบ่งออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ ระดับปลอดภัย ระดับเฝ้าระวัง และระดับอันตราย

2.2 เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง

การพัฒนาแอปพลิเคชันรายงานสถานการณ์และแจ้งเตือนระดับน้ำขึ้นน้ำลง ผู้วิจัยได้เลือกใช้เทคโนโลยีและเครื่องมือที่ทันสมัย เพื่อให้ระบบมีความเสถียร สามารถรายงานข้อมูลได้อย่างถูกต้องทันเวลา และเหมาะสมกับบริบทของกลุ่มตัวอย่างในพื้นที่ชุมชนตำบลแสนภูดาษ โดยสามารถแบ่งเทคโนโลยีและเครื่องมือที่ใช้ตามลักษณะการทำงานได้ 4 กลุ่มหลัก ดังนี้

กลุ่มแรกคือกลุ่มภาษาและเครื่องมือสำหรับการพัฒนาโปรแกรม ผู้วิจัยเลือกใช้ Android Studio [7] เป็นเครื่องมือหลัก (Integrated Development Environment: IDE) สำหรับการพัฒนาแอปพลิเคชันบนระบบปฏิบัติการ Android ซึ่งรองรับโดย Google ภายในประกอบด้วยเครื่องมืออำนวยความสะดวก เช่น Layout Editor สำหรับออกแบบหน้าจอ, Code Editor ที่มีระบบตรวจสอบข้อผิดพลาด และ Emulator สำหรับจำลองการทำงานของแอปพลิเคชัน นอกจากนี้ ได้เลือกใช้ภาษา Kotlin [8] เป็นภาษาโปรแกรมหลักในการพัฒนา เนื่องจากมีจุดเด่นด้านความกระชับ อ่านง่าย และมีความปลอดภัยสูงจากการจัดการค่าว่าง (Null Safety) รวมทั้งรองรับระบบ Coroutines ที่ช่วยให้การประมวลผลเบื้องหลัง เช่น การดึงข้อมูลจาก API ดำเนินไปอย่างราบรื่นและมีประสิทธิภาพ

กลุ่มที่สองคือบริการฐานข้อมูลและข้อมูลระดับน้ำ ผู้วิจัยเลือกใช้ Firebase [9] เป็นบริการคลาวด์สำหรับจัดการระบบการทำงานเบื้องหลัง (Backend) โดยใช้บริการย่อยคือ Firestore Database ในการจัดเก็บข้อมูลระดับน้ำแบบเรียลไทม์ และใช้ Firebase Cloud Messaging (FCM) สำหรับส่งข้อความแจ้งเตือน (Push Notification) เมื่อระดับน้ำถึงเกณฑ์อันตราย สำหรับการอ้างอิงข้อมูลระดับน้ำ ผู้วิจัยได้เชื่อมต่อกับคลังข้อมูลน้ำแห่งชาติ (ThaiWater API) [2] ซึ่งเป็นแหล่งข้อมูลหลักจากหน่วยงานภาครัฐ ให้บริการผ่าน Web Service ในรูปแบบ JSON เพื่อนำข้อมูลระดับน้ำปัจจุบันและระดับตลิ่งมาประมวลผล ประเมินความเสี่ยงและกำหนดสถานะการแจ้งเตือน

กลุ่มที่สาม ระบบการแจ้งเตือนเชิงรุก จากการรวบรวมความต้องการผ่านการสัมภาษณ์ประชาชนในชุมชนตำบลแสนภูดาษ พบว่ากลุ่มผู้สูงอายุมีความคุ้นเคยและใช้งานแอปพลิเคชัน LINE ในชีวิตประจำวัน ผู้วิจัยจึงได้นำ LINE Messaging API [10] มาประยุกต์ใช้เพื่อส่งข้อความแจ้งเตือนสถานการณ์น้ำอัตโนมัติผ่านบัญชี LINE Official Account ซึ่งเป็นช่องทางเสริมที่ช่วยให้ประชาชนเข้าถึงข้อมูลเตือนภัยได้อย่างรวดเร็วและสอดคล้องกับพฤติกรรมการใช้งานจริง

กลุ่มสุดท้ายในส่วนของการออกแบบ ผู้วิจัยใช้ Figma [11] ซึ่งเป็นเครื่องมือออนไลน์สำหรับออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้ (UI) และประสบการณ์ผู้ใช้ (UX) เพื่อสร้างโครงร่างหน้าจอ (Wireframe) และต้นแบบจำลอง (Prototype) ทำให้เห็นภาพรวมการใช้งานที่ชัดเจนก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการเขียนโค้ด นอกจากนี้ ยังใช้ diagrams.net (หรือ draw.io) [12] เป็นเครื่องมือสำหรับวาดแผนผังการทำงานของระบบ (System Workflow) และแบบจำลองสถาปัตยกรรมซอฟต์แวร์ตามมาตรฐาน UML ซึ่งช่วยให้ทีมพัฒนาเข้าใจลำดับการทำงานร่วมกันและลดความคลาดเคลื่อนในกระบวนการพัฒนาระบบ

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการพัฒนาแอปพลิเคชันรายงานสถานการณ์และแจ้งเตือนระดับน้ำขึ้นน้ำลง ผู้วิจัยได้ศึกษาทบทวนบทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบแอปพลิเคชันรายงานและแจ้งเตือนสถานการณ์น้ำขึ้นน้ำลง รวมถึงแนวทางการเลือกใช้เทคโนโลยีให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยสามารถแบ่งประเด็นการศึกษาออกเป็น 2 ด้าน คือ

ด้านระบบตรวจวัดและรูปแบบการแจ้งเตือนภัยน้ำท่วม การเลือกระบบแจ้งเตือนภัยที่เข้าถึงง่ายและมีเกณฑ์การวัดที่ชัดเจนเป็นสิ่งสำคัญ โดย ช. แก้วกลม และคณะ [13] ได้พัฒนาระบบตรวจวัดระดับน้ำผ่านเทคโนโลยี NB-IoT ที่ส่งข้อมูลไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์เตือนภัย และแจ้งเตือนอัตโนมัติผ่านแอปพลิเคชัน LINE ซึ่งผลการทดสอบพบว่ามีความแม่นยำสูงและแสดงให้เห็นว่าการใช้แพลตฟอร์มแชทที่ผู้ใช้คุ้นเคยช่วยให้การเฝ้าระวังมีประสิทธิภาพ สอดคล้องกับแนวคิดของ Wan Haszerila Wan Hassan และคณะ [14] ที่พัฒนาระบบแจ้งเตือนระดับน้ำโดยแบ่งเกณฑ์การแจ้งเตือนออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ ระดับปลอดภัย

ระดับเสี่ยงปานกลาง และระดับอันตราย เพื่อส่งข้อความเตือนภัยให้ประชาชนเตรียมรับมือได้อย่างรวดเร็วและเป็นระบบ

ด้านเทคโนโลยีการพัฒนาแอปพลิเคชันและจัดการข้อมูล ในส่วนของการพัฒนาซอฟต์แวร์บนอุปกรณ์เคลื่อนที่ ชายแดน มิ่งเมือง และอดิศร นามเกตุ [15] ได้นำเทคโนโลยี Firebase มาประยุกต์ใช้เป็นระบบฐานข้อมูลหลักสำหรับแอปพลิเคชันแจ้งเตือนบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ ซึ่งพบว่าสามารถจัดการข้อมูลและการแจ้งเตือนเมื่อถึงกำหนดได้อย่างมีประสิทธิภาพและใช้งานง่าย นอกจากนี้ วิรดา เกษางาม และคณะ [16] ยังได้ยืนยันความสามารถของชุดเทคโนโลยีดังกล่าว ผ่านการพัฒนาแอปพลิเคชันแจ้งเหตุฉุกเฉินที่ทำงานร่วมกับ Firebase แบบเรียลไทม์ และใช้ Google Maps API ในการระบุพิกัดทางภูมิศาสตร์ โดยระบบได้รับการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญว่ามีประสิทธิภาพการทำงานและความปลอดภัยอยู่ในระดับดีมาก

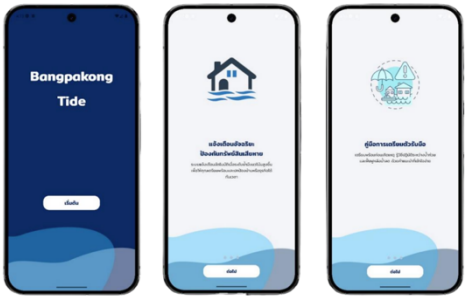
จากการศึกษางานวิจัยข้างต้น ผู้วิจัยได้นำจุดเด่นของแต่ละงานมาประยุกต์ใช้เป็นสถาปัตยกรรมหลักของระบบ โดยนำแนวคิดการแบ่งเกณฑ์แจ้งเตือน 3 ระดับ มาใช้ประเมินสถานการณ์น้ำ ร่วมกับการเลือกใช้ Firebase เป็นฐานข้อมูล การแสดงพิกัดบนแผนที่ด้วย Google Maps API และเสริมช่องทางการเข้าถึงข้อมูลของประชาชนด้วยการแจ้งเตือนผ่าน LINE Messaging API เพื่อสร้างแอปพลิเคชันบนระบบปฏิบัติการ Android ที่มีประสิทธิภาพและตอบสนองตามความต้องการของชุมชนตำบลแสนภูดาษ

3. วิธีการดำเนินงาน

การดำเนินงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแอปพลิเคชันรายงานสถานการณ์และแจ้งเตือนระดับน้ำขึ้นน้ำลง สำหรับชุมชนตำบลแสนภูดาษ ลุ่มแม่น้ำบางปะกง บนระบบปฏิบัติการ Android โดยมุ่งเน้นการออกแบบระบบที่สามารถรายงานข้อมูลได้อย่างถูกต้องและแจ้งเตือนประชาชนให้รับทราบสถานการณ์ได้อย่างเหมาะสม ซึ่งมีขั้นตอนการออกแบบและวิธีการดำเนินงาน ดังนี้

3.1 การออกแบบฟังก์ชันการทำงานของแอปพลิเคชัน (Application Design)

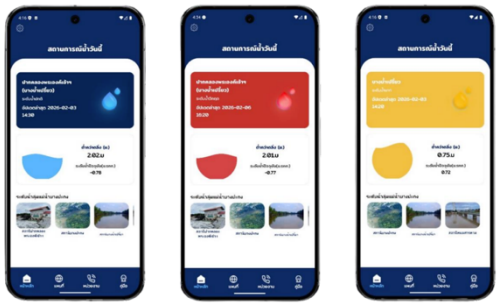
ระบบถูกออกแบบให้รองรับการดึงข้อมูลจากแหล่งข้อมูลภาครัฐที่มีความน่าเชื่อถือ และนำเสนอผ่านส่วนติดต่อผู้ใช้ที่เข้าใจง่าย โดยไม่ได้มุ่งเน้นการรายงานแบบเรียลไทม์ในระดับวินาที แต่เป็นการแสดงข้อมูลล่าสุดตามรอบการปรับปรุงข้อมูลของแหล่งต้นทาง ซึ่งประกอบด้วยฟังก์ชันหลัก 5 ส่วน ได้แก่



รูปที่ 1 หน้าเริ่มต้นการใช้งานแอปพลิเคชัน

การรายงานสถานการณ์ระดับน้ำ แสดงข้อมูลระดับน้ำปัจจุบัน ระดับตลิ่ง ค่าระดับน้ำเทียบตลิ่ง พร้อมระบุวันและเวลาที่มีการปรับปรุงข้อมูลล่าสุดอย่างชัดเจน เพื่อให้ผู้ใช้ทราบถึงความเป็นปัจจุบันของข้อมูล

การประเมินสถานะระดับน้ำ นำค่าความต่างของระดับน้ำและตลิ่งมาประมวลผลเพื่อประเมินสถานะความเสี่ยง (เช่น ปกติ, เฝ้าระวัง, อันตราย) พร้อมแสดงผลด้วยรูปแบบและสัญลักษณ์ที่ประชาชนทั่วไปสามารถทำความเข้าใจได้ง่าย

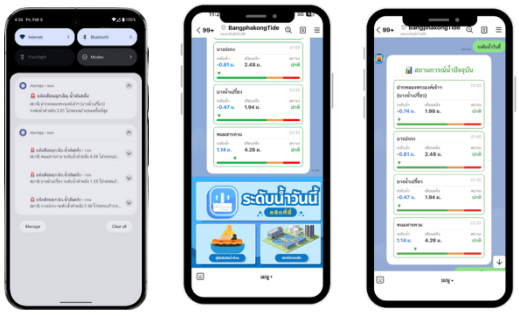


รูปที่ 2 หน้าหลักแอปพลิเคชันแสดงสถานการณ์ระดับน้ำ

การแสดงข้อมูลเชิงพื้นที่ แสดงพิกัดของสถานีตรวจวัดน้ำและจุดสำคัญในชุมชนบนแผนที่ เพื่อให้ผู้ใช้งานเห็นภาพรวมของพื้นที่เสี่ยงและสามารถเชื่อมโยงกับระบบนำทางได้

ระบบการแจ้งเตือนเชิงรุก เมื่อระดับน้ำเข้าสู่เกณฑ์เฝ้าระวังหรือเกณฑ์อันตราย ระบบจะส่งข้อความแจ้งเตือนผ่าน 2 ช่องทางหลัก ได้แก่ การแจ้งเตือนภายในแอปพลิเคชัน (Push Notification) และการแจ้งเตือนอัตโนมัติผ่านช่องทาง LINE Official Account

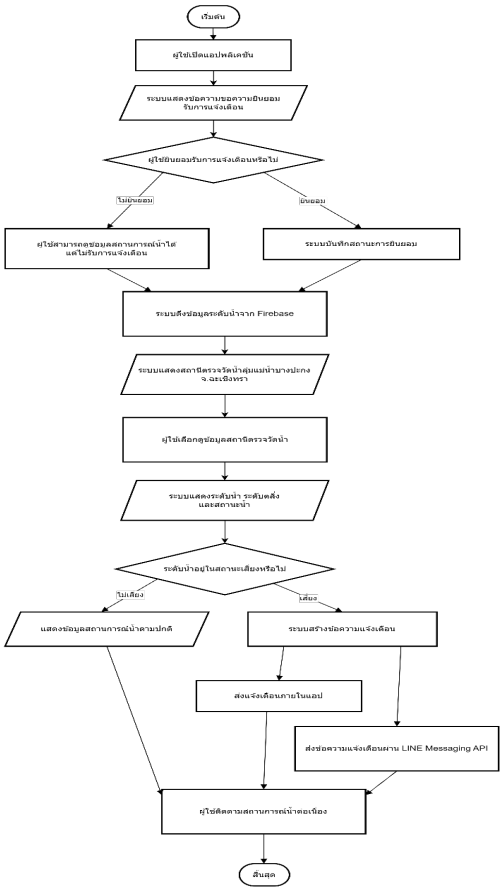
คู่มือข้อมูลการรับมือ รวบรวมข้อมูลหน่วยงานที่เกี่ยวข้องและคู่มือเบื้องต้นสำหรับการรับมือภัยน้ำท่วม เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจในภาวะฉุกเฉิน



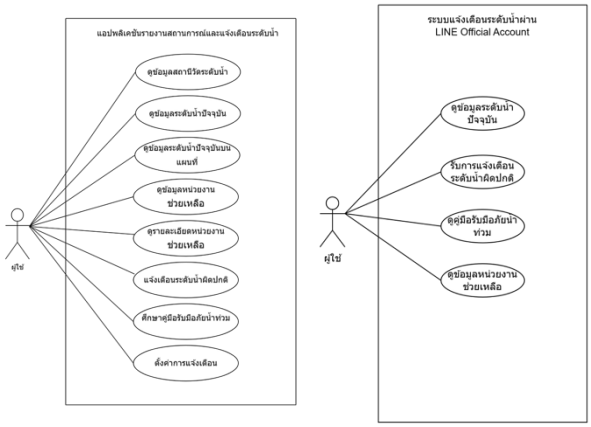
รูปที่ 3 หน้าการแจ้งเตือนระดับน้ำสูงผิดปกติและการแสดงผลการใช้งานผ่าน LINE Application

3.2 การออกแบบกระบวนการทำงานของระบบ (System Workflow)

สำหรับแผนผังกระบวนการทำงาน (System Flowchart) ในรูปที่ 4 อธิบายขั้นตอนการทำงานตั้งแต่เริ่มต้น โดยระบบจะทำการดึงข้อมูลระดับน้ำจากฐานข้อมูลส่วนกลางเพื่อนำมาประมวลผลและเปรียบเทียบกับเกณฑ์ระดับตลิ่ง หากพบว่าความต่างของระดับน้ำอยู่ในสถานะที่มีความเสี่ยง ระบบจะสั่งการให้ฟังก์ชันแจ้งเตือนทำงานอัตโนมัติเพื่อส่งข้อความไปยังผู้ใช้งานทันที



รูปที่ 4 แผนผังกระบวนการทำงาน (System Flowchart)



รูปที่ 5 แผนภาพยูสเคส (Use Case Diagram)

แผนภาพยูสเคส (Use Case Diagram) แสดงขอบเขตการโต้ตอบระหว่างผู้ใช้งานกับระบบ โดยแบ่งออกเป็นการใช้งานผ่านแอปพลิเคชัน (เช่น การเรียกดูแผนที่, การตรวจสอบระดับน้ำ) และการรับข้อมูลข่าวสารผ่านแอปพลิเคชัน LINE เพื่อให้เห็นโครงสร้างการใช้งานที่ครอบคลุมกลุ่มเป้าหมายในชุมชน

4. ผลการดำเนินงาน

ในการประเมินประสิทธิภาพและความพึงพอใจต่อการใช้งานแอปพลิเคชันรายงานสถานการณ์และแจ้งเตือนระดับน้ำขึ้นน้ำลง ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบระบบร่วมกับกลุ่มตัวอย่างจำนวน 30 คน ประกอบด้วย ประชาชนที่อาศัยอยู่ในพื้นที่ลุ่มแม่น้ำบางปะกง ตำบลแสนภูดาษ และผู้ใช้งานทั่วไป นอกจากนี้ ยังได้นำแอปพลิเคชันไปให้ผู้เชี่ยวชาญ (ตำแหน่งนักวิชาการคอมพิวเตอร์ สำนักวิทยบริการและเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร) เป็นผู้ตรวจสอบความถูกต้องของระบบก่อนการนำไปใช้งานจริง

เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล ได้แก่ แบบสอบถามความพึงพอใจ ซึ่งกำหนดเกณฑ์การวัดตามวิธีของลิเคิร์ต (Likert's Scale) อ้างอิงตามแนวคิดของ Faye Anderson [17] โดยแบ่งมาตราส่วนประเมินค่าเชิงคุณภาพออกเป็น 5 ระดับ

สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) และการแปลผลระดับความคิดเห็นผลการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า ผู้ตอบแบบสอบถามมีความพึงพอใจต่อแอปพลิเคชันในภาพรวมอยู่ในระดับ "มากที่สุด" ($\bar{x} = 4.70$) และเมื่อพิจารณาเป็นรายด้าน พบว่าอยู่ในระดับมากที่สุดในทุกด้าน โดย ด้านประโยชน์และความปลอดภัย มีค่าเฉลี่ยสูงที่สุด ($\bar{x} = 4.73$) รองลงมาคือ ด้านการออกแบบและความง่ายในการใช้งาน ($\bar{x} = 4.69$) และ ด้านการให้บริการและการแสดงผลข้อมูล ($\bar{x} = 4.67$) ตามลำดับ ในส่วนของผลการประเมินประสิทธิภาพโดยผู้เชี่ยวชาญ พบว่าแอปพลิเคชันรายงานสถานการณ์และแจ้งเตือนระดับน้ำขึ้นน้ำลง สามารถทำงานและตอบสนองได้อย่างถูกต้องตามเงื่อนไขในทุกฟังก์ชัน

5. สรุป

จากการพัฒนาแอปพลิเคชันรายงานสถานการณ์และแจ้งเตือนระดับน้ำขึ้นน้ำลง สำหรับชุมชนตำบลแสนภูดาษ ลุ่มแม่น้ำบางปะกง บนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ พบว่าแอปพลิเคชันสามารถแก้ไขปัญหาด้านการเข้าถึงข้อมูลข่าวสารของชาวบ้านได้สะดวกมากขึ้น ระบบสามารถดึงข้อมูลระดับน้ำจากหน่วยงานภาครัฐมานำเสนอและทำการแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันและ LINE Official Account ได้ ซึ่งผลการทดสอบประสิทธิภาพจากผู้เชี่ยวชาญยืนยันว่าระบบทำงานได้อย่างถูกต้องในทุกฟังก์ชัน

นอกจากนี้ ผลการประเมินความพึงพอใจจากกลุ่มตัวอย่างผู้ใช้งานจำนวน 30 คน พบว่าภาพรวมอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{x}$= 4.70) โดยผู้ใช้งานให้คะแนนความพึงพอใจด้านประโยชน์และความปลอดภัยสูงที่สุด ($\bar{x} = 4.73$) ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นสามารถตอบสนองความต้องการของชุมชน ใช้งานง่าย และสามารถนำไปใช้เป็นเครื่องมือเฝ้าระวังเพื่อเตรียมรับมือกับปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หน่วยงานต้นสังกัดของคณะผู้วิจัยที่ให้การสนับสนุนในการดำเนินงานวิจัย ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ หน่วยงานจัดการประชุมวิชาการ และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครที่ให้การสนับสนุน

งบประมาณในการนำเสนอบทความในการประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนครครั้งที่9

เอกสารอ้างอิง

[1] องค์การบริหารส่วนตำบลแสนภูดาย. "ข้อมูลพื้นฐานและสภาพทั่วไปของตำบลแสนภูดาย." องค์การบริหารส่วนตำบลแสนภูดาย จังหวัดฉะเชิงเทรา. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: https://saenphudat.go.th/public/. [เข้าถึงเมื่อ: 18 เมษายน 2569].

[2] สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน). "ข้อมูลระดับน้ำและสถานการณ์น้ำปัจจุบัน." คลังข้อมูลน้ำแห่งชาติ (ThaiWater). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: https://www.thaiwater.net. [เข้าถึงเมื่อ: 18 เมษายน 2569].

[3] Google. "Android API Reference," Android Open Source Project. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: https://source.android.com/. [เข้าถึงเมื่อ: 18 เมษายน 2569].

[4] Google, "ตำบลแสนภูดาย อำเภอบ้านโพธิ์ จังหวัดฉะเชิงเทรา," แผนที่, Google Maps. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: https://www.google.com/maps. [เข้าถึงเมื่อ: 18 เมษายน 2569].

[5] กรมชลประทาน, อภิธานศัพท์เทคนิคด้านการชลประทานและการระบายน้ำ ฉบับปรับปรุง พุทธศักราช 2553, พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: กรมชลประทาน, 2553.

[6] สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน), "หน้าหลัก," สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: https://www.hii.or.th/. [เข้าถึงเมื่อ: 18 เมษายน 2569].

[7] Android Developers, "Android Developers Documentation," Android Developers. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: https://developer.android.com/. [เข้าถึงเมื่อ: 18 เมษายน 2569].

[8] Android Developers, "Kotlin on Android," Android Developers. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: https://developer.android.com/kotlin. [เข้าถึงเมื่อ: 18 เมษายน 2569].

[9] Google, "Firebase," Firebase. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: https://firebase.google.com/. [เข้าถึงเมื่อ: 18 เมษายน 2569].

[10] LINE Developers Thailand, "Messaging API," LINE Developers Thailand. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: https://linedevth.line.me/th/messaging-api. [เข้าถึงเมื่อ: 19 เมษายน 2569].

[11] Figma, "Figma: The Collaborative Interface Design Tool," Figma. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: https://www.figma.com/. [เข้าถึงเมื่อ: 19 เมษายน 2569].

[12] diagrams.net, "Flowchart Maker & Online Diagram Software," diagrams.net. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: https://www.diagrams.net/. [เข้าถึงเมื่อ: 19 เมษายน 2569].

[13] ชัยวิชิต แก้วกลม, ธ. โชติพันธ์, ธ. ชาญศิริวัฒน์, ส. กิจเพิ่มเกียรติ, และส. ไทยกลาง. (2568). ระบบตรวจวัดระดับน้ำเพื่อการแจ้งเตือนน้ำท่วมผ่านแอปพลิเคชัน LINE ด้วยเทคโนโลยี Narrowband IoT. วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์, 17(25), 20-34.

[14] Wan Haszerila Wan Hassan, Aiman Zakwan Jidin, Siti Asma Che Aziz, and Norain Rahim. (2019). Flood disaster indicator of water level monitoring system. International Journal of Electrical and Computer Engineering, 9(3), 1694–1699.

[15] ชายแดน มิ่งเมือง, และอดิศร นามเกตุ. (2565). แอปพลิเคชันการแจ้งเตือนวันหมดอายุอาหารและเครื่องสำอาง. วารสารวิชาการการจัดการเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม, 9(2), 108–116.

[16] วิรดา เกษางาม, สุดารัตน์ พุ่มโพธิ์แพน, และวาฤทธิ์ กันแก้ว. (2568). การพัฒนาแอปพลิเคชันมูลนิธิร่วมกตัญญู: ระบบแจ้งเหตุฉุกเฉิน การแจ้งเตือน และคู่มือปฐมพยาบาลเบื้องต้น. วารสารการจัดการเทคโนโลยีและนวัตกรรมดิจิทัล, 2(1), 39–48.

[17] Faye Anderson. (2020). Likert Scale Data Linear Modeling. Chicago: Independently Published.



ณัฐติญา ไข่ติยากุล
อาจารย์ประจำสาขาวิทยาการคอมพิวเตอร์
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
งานวิจัยที่สนใจ : อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง



นางสาวณัฏนิณา คงปัญญา
นักศึกษาสาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
งานวิจัยที่สนใจ : Web Application, Mobile Application



นางสาวกนกพร รุ่งเรือง
นักศึกษาสาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
งานวิจัยที่สนใจ : Web Application, Mobile Application



นายพัชรพล สะและหมัด
นักศึกษาสาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
งานวิจัยที่สนใจ : Web Application, Mobile Application

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

ระบบตรวจจับป้ายทะเบียนแบบรวมศูนย์ผ่าน VPN และ Deep LearningPlate Recognition System Utilizing Centralized ALPR with Deep Learning and VPN Tunneling

กฤตภาส พงษ์สิงห์[1] ธัญเทพ กุลภัทร์แสงทอง[2] วชิรวิทย์ รักษา[3] รณกฤต เต่าทอง[4] และ วิปัศย์ ปุยสำลี[5*]

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

kittapas-p@rmutp.ac.th[1], thunyathep-k@rmutp.ac.th[2], wachirawit-r@rmutp.ac.th[3], ronnakrit-t@rmutp.ac.th[4], wiput.p@rmutp.ac.th[5]

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันการบริหารจัดการจราจรและความปลอดภัยในพื้นที่ควบคุมมีความซับซ้อนและท้าทายมากขึ้นตามปริมาณยานพาหนะที่เพิ่มสูงขึ้น ระบบรู้จำป้ายทะเบียนยานยนต์อัตโนมัติ (ALPR) จึงกลายเป็นเครื่องมือสำคัญในการพิสูจน์ทราบและบันทึกข้อมูล อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของระบบ ALPR ในปัจจุบันคือการพึ่งพาอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์และกล้องเฉพาะทางที่มีราคาสูง รวมถึงการประมวลผลแบบแยกส่วนที่ยากต่อการบริหารจัดการข้อมูลในภาพรวม งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการพัฒนาระบบตรวจจับและบันทึกข้อมูลป้ายทะเบียนยานยนต์อัจฉริยะแบบรวมศูนย์ (Centralized Intelligent ALPR) ที่เปลี่ยนแนวคิดจากการประมวลผลที่ปลายทาง (Edge) มาเป็นการประมวลผลบนระบบคลาวด์

โดยระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้งานร่วมกับกล้อง IP Camera ทั่วไปที่มีมาตรฐานโปรโตคอลพื้นฐาน ซึ่งช่วยลดต้นทุนด้านอุปกรณ์ลงอย่างมีนัยสำคัญ ข้อมูลภาพจะถูกส่งผ่านเครือข่ายส่วนตัวเสมือน (VPN) ที่มีความปลอดภัยสูงไปยังระบบคลาวด์เพื่อประมวลผลด้วยโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมเชิงลึกสถาปัตยกรรม YOLOv12 สำหรับการตรวจจับตำแหน่งป้ายทะเบียน และใช้เทคนิคการรู้จำตัวอักษรที่เพิ่มประสิทธิภาพสำหรับการจำแนกรายละเอียดป้ายทะเบียนไทย

จากผลการทดลองในสภาพแวดล้อมจริง พบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการทำงานสูง โดยโมเดลสำหรับการตรวจจับ (Detection) มีค่าความแม่นยำเฉลี่ย (mAP@0.5) อยู่ที่ร้อยละ 97.8 และโมเดลสำหรับการรู้จำตัวอักษร (Recognition) มีค่าความแม่นยำอยู่ที่ร้อยละ 99.3 นอกจากนี้ระบบยังสามารถบริหารจัดการข้อมูลแบบ Session-Based เพื่อติดตามสถานะรถเข้า-ออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งผลลัพธ์จากงานวิจัยนี้พิสูจน์ให้เห็นว่าการใช้ Cloud AI ร่วมกับอุปกรณ์โครงข่ายทั่วไปสามารถทดแทนระบบเฉพาะทางราคาแพงได้ และพร้อมสำหรับการขยายตัวเพื่อรองรับเมืองอัจฉริยะ (Smart City) ในอนาคต

คำสำคัญ: ระบบรู้จำป้ายทะเบียน, ระบบรวมศูนย์บนคลาวด์, YOLO, การประมวลผลภาพดิจิทัล, ความปลอดภัยของเครือข่าย

Abstract

Currently, traffic management and security in controlled areas have become increasingly complex and challenging due to the rising volume of vehicles. Automatic License Plate Recognition (ALPR) systems have emerged as essential tools for identification and data logging. However, existing ALPR systems are often limited by their reliance on high-cost specialized hardware and cameras, as well as decentralized processing, which complicates comprehensive data management. This research presents the development of a Centralized Intelligent ALPR system. This system shifts the paradigm from edge-based processing to a centralized cloud-based architecture. Designed to be compatible with standard IP cameras using basic protocols, the system significantly reduces hardware costs. Image data is transmitted via a highly secure Virtual Private Network (VPN) to the cloud, where it is processed using a deep neural network based on the YOLOv12 architecture for vehicle plate detection. Furthermore, optimized Optical Character Recognition (OCR) techniques are employed to accurately classify the specific details of Thai license plates. Experimental results in real-world environments demonstrate high operational efficiency: Detection Model: Achieved a Mean Average Precision (mAP@0.5) of 97.8%. Recognition Model: Achieved an accuracy of 99.3%. Additionally, the system utilizes Session-Based data management to effectively track vehicle entry and exit statuses. The results of this research prove that integrating Cloud AI with standard networking equipment can successfully replace expensive specialized systems. This solution is highly scalable and ready to support future Smart City infrastructures.

Keywords: License Plate Recognition (ALPR), Centralized Cloud System, YOLO, Digital Image Processing, Network Security

1.ที่มาและความสำคัญ

ในยุคปัจจุบัน การขยายตัวของสังคมเมืองและภาคอุตสาหกรรม ส่งผลให้ปริมาณยานพาหนะบนท้องถนนและในพื้นที่ควบคุม เช่น สถานศึกษา นิคมอุตสาหกรรม หรืออาคารที่พักอาศัย เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง [1] การบริหารจัดการการเข้า-ออกพื้นที่จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการรักษาความปลอดภัยและการจัดระเบียบจราจร อย่างไรก็ตาม วิธีการบันทึกข้อมูลแบบดั้งเดิมที่ใช้บุคลากรในการจดบันทึกป้ายทะเบียนหรือการแลกบัตรเข้า-ออก ประสบปัญหาด้านความล่าช้าและความคลาดเคลื่อนของข้อมูล โดยเฉพาะในช่วงเวลาเร่งด่วนที่มีการสัญจรหนาแน่น ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการตรวจสอบข้อมูลย้อนหลังและการจัดการความปลอดภัยในภาพรวม แม้ว่าในปัจจุบันจะมีการพัฒนาระบบรู้จำป้ายทะเบียนอัตโนมัติ (Automatic License Plate Recognition: ALPR) ออกสู่ท้องตลาดอย่างแพร่หลาย แต่ระบบส่วนใหญ่ที่เป็นโซลูชันเชิงพาณิชย์ มักเผชิญกับข้อจำกัดหลัก 2 ประการ ประการแรกคือ ด้านต้นทุน ที่ระบบมักต้องการกล้องเฉพาะทาง (LPR Camera) และซอฟต์แวร์ที่มีราคาลิขสิทธิ์สูง ประการที่สองคือ ข้อจำกัดทางสถาปัตยกรรม ที่ระบบส่วนใหญ่มักประมวลผลที่อุปกรณ์ปลายทาง (Edge Device) หรือเซิร์ฟเวอร์เฉพาะจุด ทำให้เมื่อต้องการขยายระบบ (Scalability) [2] เพื่อรองรับจุดตรวจที่มากขึ้น จะมีความซับซ้อนในการเชื่อมโยงข้อมูลให้เป็นภาพรวมเดียวกัน (Centralized Data) และยากต่อการบำรุงรักษาในระยะยาว งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักในการออกแบบและพัฒนาสถาปัตยกรรมระบบ ALPR รูปแบบใหม่ ดังนี้: 1) การประมวลผลแบบรวมศูนย์บนคลาวด์ (Cloud-Based Centralization): พัฒนาระบบที่สามารถเชื่อมต่อกับกล้อง IP Camera ทั่วไปผ่านโปรโตคอลมาตรฐาน เพื่อลดการพึ่งพาสถาปัตยกรรมแบบ Edge-Heavy และช่วยลดต้นทุนฮาร์ดแวร์ภาคสนาม 2) การจัดการข้อมูลและออกแบบอัลกอริทึมในการจัดเก็บข้อมูลที่สามารถเชื่อมโยงเหตุการณ์การเข้าและออกของยานพาหนะแต่ละคันเข้าด้วยกันเป็น Session ช่วยให้ผู้ดูแลระบบสามารถตรวจสอบระยะเวลาการอยู่ในพื้นที่และสถานะปัจจุบันของยานพาหนะได้อย่างแม่นยำ 3) ระบบอ่านป้ายทะเบียนด้วย Deep Learning: ประยุกต์ใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่เป็นที่นิยมในงานด้านVision (YOLOv12) โดยงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการสร้างระบบต้นแบบและใช้เทคโนโลยี Cloud AI [3] พร้อมการทดสอบวัดผลจากสภาพแวดล้อมจริง

2. งานวิจัยและเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง

ในการพัฒนาระบบตรวจจับและบันทึกข้อมูลป้ายทะเบียนยานยนต์อัจฉริยะแบบรวมศูนย์ คณะผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีด้านปัญญาประดิษฐ์ วิศวกรรมซอฟต์แวร์ และระบบเครือข่ายเข้าด้วยกัน โดยมีรายละเอียดทางทฤษฎีและเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.1 การตรวจจับวัตถุด้วยสถาปัตยกรรม

YOLO (You Only Look Once) การตรวจจับวัตถุ (Object Detection) [4] [5]เป็นกระบวนการที่รวมการจำแนกประเภทภาพ (Image Classification) และการระบุตำแหน่ง (Localization) เข้าด้วยกัน ในงานวิจัยนี้เลือกใช้สถาปัตยกรรม YOLO ซึ่งเป็นโมเดลประเภท One-Stage Detector ที่โดดเด่นด้านความเร็วและความแม่นยำ โดย YOLO จะแบ่งภาพออกเป็นตาราง (Grid cells) และทำนายกรอบล้อมรอบวัตถุ (Bounding Boxes) พร้อมค่าความเชื่อมั่น (Confidence Score) ในการประมวลผลเพียงครั้งเดียว สำหรับการนำมาประยุกต์ใช้ในระบบ ALPR โมเดล YOLO จะถูกนำมาใช้ใน 2 ส่วนหลัก คือการตรวจจับตำแหน่งของป้ายทะเบียนบนตัวรถ และการตรวจจับตัวอักษร/ตัวเลขภายในป้ายทะเบียน [6] [7] [8] ซึ่งสถาปัตยกรรมรุ่นล่าสุด (YOLOv12) [9] [10]ได้มีการปรับปรุงโครงสร้างการดึงคุณลักษณะ (Feature Extraction) ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นแม้ในสภาวะที่ภาพมีความละเอียดต่ำหรือมีสัญญาณรบกวน

2.2 เทคโนโลยีการสื่อสารและความปลอดภัยด้วย VPN

เนื่องจากระบบเป็นการประมวลผลแบบรวมศูนย์ ข้อมูลภาพจาก IP Camera ในภาคสนามจะต้องถูกส่งไปยัง Cloud Server ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตสาธารณะ คณะผู้วิจัยจึงเลือกใช้ WireGuard VPN [11] [12] เพื่อสร้างอุโมงค์การสื่อสารที่ปลอดภัย (Secure Tunnel) WireGuard เป็นโปรโตคอล VPN สมัยใหม่ที่ทำงานบน State-of-the-art Cryptography (เช่น Curve25519, ChaCha20) มีจุดเด่นคือมีความเร็วในการส่งผ่านข้อมูลสูงกว่าโปรโตคอลดั้งเดิมอย่าง IPsec หรือ OpenVPN และมี Overhead ของข้อมูลที่น้อยกว่า ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งในการส่งภาพความละเอียดสูงจาก 4G Router ในภาคสนามไปยังระบบคลาวด์โดยที่ยังรักษาความปลอดภัยและความเป็นส่วนตัวของข้อมูลไว้ได้

2.3 โครงสร้างระบบนิเวศซอฟต์แวร์ (Software Ecosystem)

เพื่อให้ระบบมีความยืดหยุ่นและรองรับการขยายตัวในอนาคต คณะผู้วิจัยได้เลือกใช้สถาปัตยกรรมแบบ Microservices [13] โดยมีเทคโนโลยีหลักดังนี้:

- **FastAPI (Python)**: ใช้สำหรับสร้างหน่วยประมวลผล AI (Inference Service) เนื่องจาก FastAPI [14] มีประสิทธิภาพสูง รองรับการทำงานแบบ Asynchronous และทำงานร่วมกับไลบรารีด้าน Deep Learning เช่น PyTorch หรือ OpenCV ได้อย่างราบรื่น
- **NestJS (Node.js)**: ใช้เป็น Core Backend สำหรับบริหารจัดการตรรกะทางธุรกิจ (Business Logic), ระบบฐานข้อมูล และการจัดการ Session ของยานพาหนะ เนื่องจาก NestJS [15] มีโครงสร้างแบบ Modular ที่ชัดเจนและมีความเสถียรสูงในระดับองค์กร

- **React (JavaScript)**: ใช้สำหรับการพัฒนาส่วนติดต่อผู้ใช้ (Frontend Dashboard) เพื่อแสดงผลข้อมูลการตรวจจับแบบ Real-time และการเรียกดูประวัติย้อนหลัง โดยเน้นการตอบสนองที่รวดเร็ว (Responsive Design) เพื่อให้ผู้ดูแลระบบสามารถตรวจสอบข้อมูลได้ผ่านอุปกรณ์ที่หลากหลาย

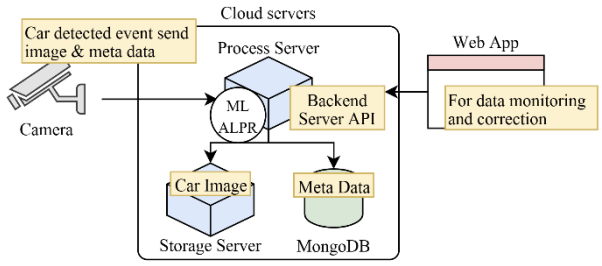
การบูรณาการเทคโนโลยีเหล่านี้เข้าด้วยกัน ช่วยให้ระบบสามารถประมวลผลข้อมูลจากกล้องหลายจุดได้อย่างแม่นยำ ปลอดภัย และสามารถบริหารจัดการข้อมูลขนาดใหญ่ได้อย่างเป็นระบบ

3. งานพัฒนา

คณะผู้วิจัยได้วางรากฐานระบบผ่านสถาปัตยกรรมคลาวด์ที่ยืดหยุ่น ผสานกับการฝึกสอนโมเดลปัญญาประดิษฐ์ประสิทธิภาพสูงด้วยชุดข้อมูลป้ายทะเบียนไทยที่ครอบคลุม พร้อมทั้งพัฒนาระบบบริหารจัดการข้อมูลแบบเซสชันและแดชบอร์ดอัจฉริยะ เพื่อให้ระบบสามารถประมวลผลได้อย่างแม่นยำและพร้อมสำหรับการขยายตัวในอนาคต โดยมีรายละเอียดในการพัฒนาดังนี้

3.1 สถาปัตยกรรมระบบ

สถาปัตยกรรมระบบถูกออกแบบด้วยแนวคิด Microservices บนคลาวด์เพื่อข้ามขีดจำกัดด้านโครงสร้างพื้นฐาน โดยแบ่งเป็น 3 ส่วนหลัก คือ 1) ฮาร์ดแวร์ภาคสนาม ที่ใช้ IP Camera เชื่อมต่อผ่า 4G Router พร้อมระบบ VPN เพื่อส่งข้อมูลเสถียรแม้ไร้อินเทอร์เน็ตสายหลัก 2) โครงสร้างคลาวด์ ที่แยกส่วนประมวลผล AI (YOLOv12 บน FastAPI) ออกจากส่วนบริหารจัดการข้อมูล (Database และData Storage) เพื่อรองรับการขยายตัวและรักษาเสถียรภาพ และ 3) กลไก Data Workflow แบบ Event Trigger + Snapshot Pull ที่ดึงเฉพาะภาพนิ่งความละเอียดสูงผ่าน ISAPI เมื่อตรวจพบความเคลื่อนไหว แทนการส่งวิดีโอต่อเนื่อง ช่วยลดภาระแบนด์วิธเครือข่าย 4G ได้อย่างมหาศาลและเพิ่มความรวดเร็วในการประมวลผลให้สูงสุดตามเป้าหมายของงานวิจัย



รูป 1 สถาปัตยกรรมระบบ

3.2 การพัฒนาโมเดล

การพัฒนาโมเดล AI มุ่งเน้นความแม่นยำและความทนทานผ่านกระบวนการหลัก 2 ส่วน คือ 1) การเตรียมชุดข้อมูล: ใช้ภาพป้ายทะเบียนไทยกว่า 19,000 ภาพบนแพลตฟอร์ม Roboflow [16] โดยแบ่งการทำงานเป็น 2 ลำดับชั้น (Two-stage detection) ได้แก่ ชุดตรวจจับตำแหน่งป้าย (10,125 ภาพ) และชุดรู้จำตัวอักษร/จังหวัดจากภาพที่ Crop แล้ว (9,522 ภาพ) 2) การฝึกสอนโมเดล: ใช้สถาปัตยกรรม YOLOv12 กำหนด 150 Epochs ที่ขนาดภาพ 640x640 พิกเซล พร้อมประยุกต์ใช้เทคนิค Data Augmentation เช่น Mosaic และ Geometric Transformation เพื่อจำลองสภาพแสงและมุมมองที่หลากหลาย ส่งผลให้โมเดลสามารถดึงคุณลักษณะของป้ายทะเบียนไทยได้อย่างมีประสิทธิภาพแม้ในสภาวะที่มีสัญญาณรบกวนหรือภาพบิดเบี้ยวจากมุมกล้อง [17]

3.3 การจัดการข้อมูล

เพื่อให้ข้อมูลที่ได้จากกระบวนการ AI ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงบริหารจัดการได้อย่างสูงสุด คณะผู้วิจัยได้พัฒนาระบบการจัดการข้อมูลที่มีตรรกะในการเชื่อมโยงเหตุการณ์ และส่วนแสดงผลที่รองรับการปรับปรุงระบบอย่างต่อเนื่อง ดังนี้:

การจัดการข้อมูลแบบเซสชัน (Session Management) หัวใจสำคัญของงานวิจัยนี้คือการเปลี่ยนจากการเก็บข้อมูลแบบ "บันทึกรายครั้ง" (Log-based) มาเป็นการบริหารจัดการแบบ "บันทึกรายเหตุการณ์" (Session-based) เพื่อติดตามวงจรการเข้า-ออกของยานพาหนะ โดยมี



รูป 2 ชุดข้อมูลสำหรับใช้ในการเรียนรู้

กลไกดังนี้: 1) อัลกอริทึมการเชื่อมโยงข้อมูล (Matching Algorithm): เมื่อระบบตรวจพบป้ายทะเบียน ระบบจะตรวจสอบสถานะในฐานข้อมูล หากไม่พบข้อมูลป้ายทะเบียนนั้นอยู่ในสถานะ "ยังคงอยู่ในพื้นที่" (In-area) ระบบจะสร้าง Session ใหม่และบันทึกเป็นสถานะ "ขาเข้า" (Check-in) แต่หากพบว่ามีข้อมูลป้ายทะเบียนนั้นค้างอยู่ในระบบอยู่ก่อนแล้ว ระบบจะทำการปิด Session นั้นและบันทึกเป็นสถานะ "ขาออก" (Check-out) พร้อมคำนวณระยะเวลาที่อยู่ในพื้นที่โดยอัตโนมัติ

2) การจัดการสถานะคงค้าง (Abandoned Session): เพื่อป้องกันปัญหาข้อมูลค้างในกรณีที่ระบบตรวจจับพลาดในขาใดขาหนึ่ง คณะผู้วิจัยได้ใช้ Cron Job ทำหน้าที่ตรวจสอบฐานข้อมูลทุกช่วงเวลาที่กำหนด หากพบ

Session ใดที่มีระยะเวลาอยู่ในพื้นที่เกินกว่าค่าที่กำหนด (เช่น 24 ชั่วโมง) ระบบจะปรับสถานะเป็น "Abandoned" โดยอัตโนมัติ เพื่อรักษาความถูกต้องของสถิติยานพาหนะปัจจุบัน

ส่วนติดต่อผู้ใช้และการปรับปรุงโมเดล (User Interface & Feedback Loop) ระบบแสดงผลถูกออกแบบมาเพื่อให้ผู้ดูแลระบบสามารถปฏิบัติงานได้แบบเรียลไทม์และมีส่วนร่วมในการพัฒนาความแม่นยำของระบบ: 1) Real-time Dashboard: พัฒนาด้วย React [18] เพื่อแสดงผลการตรวจจับทันทีที่เกิดเหตุการณ์ (Live Feed) โดยจะแสดงภาพ Snapshot พร้อมข้อมูลป้ายทะเบียนที่ระบุได้ จังหวัด และระดับความเชื่อมั่น (Confidence Score) ทำให้เจ้าหน้าที่สามารถตรวจสอบความถูกต้องได้ทันที 2)ระบบให้คะแนนภาพ (Image Rating System): เพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน คณะผู้วิจัยได้เพิ่มฟังก์ชันให้ผู้ดูแลระบบสามารถกด "ยืนยันความถูกต้อง" หรือ "แก้ไขข้อมูล" ในกรณีที่ AI ประมวลผลผิดพลาด ข้อมูลที่ได้รับการแก้ไขนี้จะถูกติดป้ายกำกับ (Labeling) และจัดเก็บแยกไว้เป็นชุดข้อมูลใหม่ (Active Learning) เพื่อนำกลับไปฝึกสอนโมเดล (Re-train) ในรอบถัดไป ซึ่งจะช่วยให้ระบบมีความแม่นยำสูงขึ้นตามระยะเวลาการใช้งานจริง

การออกแบบในส่วนนี้ไม่เพียงแต่ช่วยในด้านการตรวจสอบข้อมูล แต่ยังเป็นการสร้างกระบวนการเรียนรู้ต่อเนื่องให้กับระบบ (Self-Improving System) ผ่านการใช้งานจริงในภาคสนาม

4. ผลการศึกษาทดลอง (7)

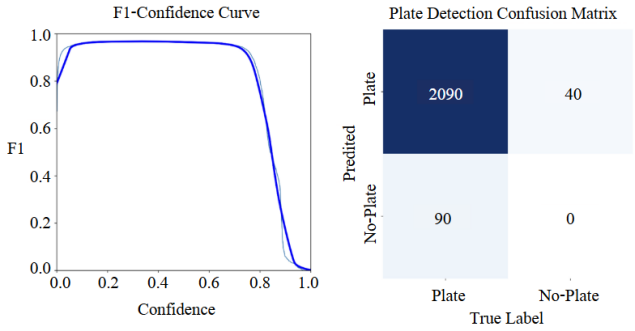
ในการประเมินประสิทธิภาพของระบบตรวจจับและบันทึกข้อมูลป้ายทะเบียนยานยนต์อัจฉริยะแบบรวมศูนย์ คณะผู้วิจัยได้ทำการทดสอบใน 3 มิติหลัก เพื่อให้ครอบคลุมทั้งด้านความแม่นยำของปัญญาประดิษฐ์ สมรรถนะของระบบเครือข่าย และความเสถียรในการใช้งานจริง โดยมีรายละเอียดดังนี้:

4.1 ประสิทธิภาพเชิงเทคนิคของโมเดล Machine Learning

จากการฝึกสอนและทดสอบโมเดล YOLOv12 ด้วยชุดข้อมูลป้ายทะเบียนไทยที่จัดเตรียมไว้ ผลการทดสอบเชิงสถิติบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพที่สูงในระดับที่สามารถนำไปใช้งานจริงได้ โดยมีค่าดัชนีชี้วัดหลักดังนี้:

Precision และ Recall: โมเดลสามารถทำค่าความแม่นยำ (Precision) ได้ที่ร้อยละ 98.2 และค่าความระลึก (Recall) ที่ร้อยละ 97.5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโมเดลมีความผิดพลาดในการตรวจจับพลาด (False Negative) และการตรวจจับผิด (False Positive) ในระดับที่ต่ำมาก

Confusion Matrix: จากการวิเคราะห์ Matrix การจำแนกตัวอักษรและตัวเลข พบว่าโมเดลมีความแม่นยำสูงมากในการแยกแยะตัวเลข 0-9 และตัวอักษรส่วนใหญ่ แต่พบความสับสนเล็กน้อยในตัวอักษรที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันภายใต้สภาวะแสงน้อย เช่น "ก" และ "ถ" [18] อย่างไรก็ตาม ค่าความแม่นยำเฉลี่ยรวม (mAP@0.5) ที่ร้อยละ 97.8 สำหรับการตรวจจับและร้อยละ 99.3 สำหรับการรู้จำ ยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่ดีเยี่ยม



รูป 3 ผลการทดสอบการเรียนรู้ของโมเดล

4.2 ประสิทธิภาพเชิงระบบและเวลาตอบสนอง

คณะผู้วิจัยได้ทำการทดสอบเวลาที่ใช้ในการประมวลผลตั้งแต่เกิดเหตุการณ์จนถึงการแสดงผลบน Dashboard เพื่อประเมินความหน่วงของระบบ (Latency) โดยมีค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ 100 ครั้งดังนี้

ตารางที่ 1 : ผลการคำนวณเวลาในการประมวลผล

การประมวลผล	วินาที(เฉลี่ย)
Image Capturing & Upload (ผ่าน VPN):	1.2
AI Inference (Detection & Recognition):	0.8
Data Processing & Dashboard Update	1.0

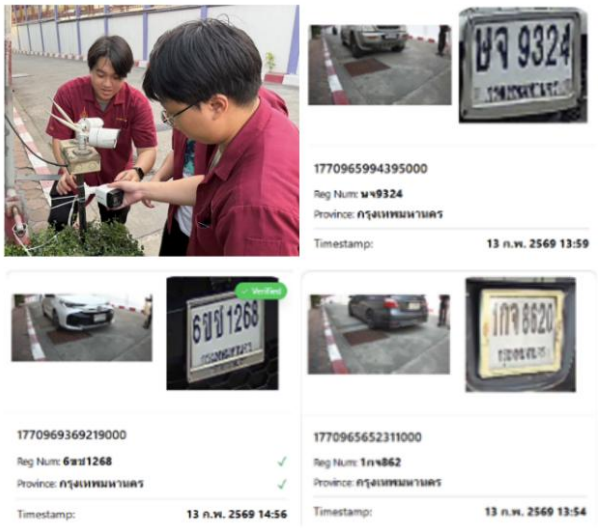
รวมเวลาตอบสนองเฉลี่ย (Total Response Time): ประมาณ 3.0 วินาทีต่อเหตุการณ์ ผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นว่าสถาปัตยกรรมแบบ Centralized Cloud แม้จะมีการส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย แต่ก็ยังสามารถตอบสนองได้ในระดับเกือบเรียลไทม์ (Near real-time) ซึ่งเพียงพอต่อการใช้งานในจุดตรวจเข้า-ออก

4.3 การวิเคราะห์ความเสถียรจากการใช้งานจริง

ระบบได้ถูกนำไปติดตั้งทดลองใช้งานจริง ณ บริเวณทางเข้า-ออกของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร เพื่อทดสอบความทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง (Field Test): 1) สภาพแสงที่แตกต่าง: ระบบยังคงรักษาความแม่นยำได้ดีทั้งในช่วงกลางวันที่มีแสงจ้าและช่วงค่ำที่ต้องอาศัยไฟส่องสว่างจากกล้องและตัวรถ 2) ความเสถียรของเครือข่าย: การใช้ WireGuard VPN บนเครือข่าย 4G พบว่ามีการตัดการเชื่อมต่อ (Reconnection) น้อยมาก และระบบสามารถกู้คืนการเชื่อมต่อได้โดยอัตโนมัติโดยไม่ส่งผลกระทบต่อข้อมูลในฐานข้อมูล 3) ความถูกต้องของ Session: อัลกอริทึม Session Management สามารถเชื่อมโยงสถานะการเข้า-ออกได้ถูกต้องมากกว่าร้อยละ 95 โดยมีเพียงส่วนน้อยที่เป็นความผิดพลาดจากมุมกล้องที่บดบังป้ายทะเบียนในขณะรถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง

โดยสรุป ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพและความเสถียรในระดับที่น่าพอใจ สามารถรองรับการบริหารจัดการ

จราจรในพื้นที่ควบคุมได้อย่างแม่นยำและรวดเร็วภายใต้ต้นทุนที่เหมาะสม



รูป 4 ทดสอบติดตั้งและใช้งาน

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ (8)

ในส่วนสุดท้ายของงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยได้ทำการสรุปประเด็นสำคัญจากการดำเนินโครงการ พร้อมทั้งระบุข้อจำกัดที่พบและแนวทางการพัฒนาต่อยอดในอนาคต ดังนี้:

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน (Conclusion)

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาและทดสอบระบบตรวจจับและบันทึกข้อมูลป้ายทะเบียนยานยนต์อัจฉริยะแบบรวมศูนย์ (Centralized ALPR) ผลการทดสอบพิสูจน์ให้เห็นว่าสถาปัตยกรรมที่ย้ายการประมวลผล AI ไปไว้บนคลาวด์สามารถทำงานร่วมกับกล้อง IP Camera ทั่วไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยให้ความแม่นยำในการตรวจจับสูงถึงร้อยละ 97.8 และความแม่นยำในการรู้จำตัวอักษรร้อยละ 99.3 ระบบนี้ช่วยลดความจำเป็นในการจัดซื้อกล้อง LPR เฉพาะทางที่มีราคาสูง ทำให้ต้นทุนการติดตั้งในภาคสนามลดลงอย่างมาก นอกจากนี้การออกแบบระบบบริหารจัดการแบบ Session-Based และการเชื่อมต่อผ่านเทคโนโลยี VPN ที่ปลอดภัย ยังช่วยให้ผู้ดูแลระบบสามารถกำกับดูแลการเข้า-ออกของยานพาหนะจากจุดตรวจต่างๆ ได้จากส่วนกลางเพียงจุดเดียว ซึ่งเป็นการยกระดับมาตรฐานความปลอดภัยและการจัดการข้อมูลให้มีความเป็นระบบและพร้อมต่อการขยายตัวในอนาคต

5.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย (Limitations)

จากการทดสอบใช้งานจริงในภาคสนาม คณะผู้วิจัยพบข้อจำกัดบางประการที่ควรพิจารณา ดังนี้: 1) โครงสร้างทางกายภาพ: ปัญหาจากการใช้งานในบริเวณทางเข้า-ออกที่เป็นเลนเดียว (Single Lane) แต่รองรับการวิ่งสวนทางกัน อาจทำให้มุมกล้องบดบังป้ายทะเบียนในกรณีที่มีรถเคลื่อนที่ผ่านพร้อมกัน 2) ข้อจำกัดของฮาร์ดแวร์บางรุ่น: ความละเอียดและค่าความไวในการตรวจจับความเคลื่อนไหว (Motion Detection) ของกล้อง IP Camera รุ่นพื้นฐานอาจมีความแตกต่างกัน ส่งผลให้การส่งสัญญาณ Trigger เพื่อดึงภาพ Snapshot ในบางจังหวะอาจไม่สม่ำเสมอหากวัตถุเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงเกินไป 3) ปัจจัยด้านเครือข่าย: แม้จะมีความเสถียรสูง แต่ในบางพื้นที่ที่มีสัญญาณเครือข่าย 4G หนาแน่น อาจส่งผลต่อความหน่วงของภาพ Snapshot ที่ถูกส่งไปยังระบบคลาวด์ในบางช่วงเวลา

5.3 ทิศทางและข้อเสนอแนะในอนาคต (Future Work)

เพื่อเพิ่มขีดความสามารถของระบบให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น คณะผู้วิจัยมีแผนการพัฒนาต่อยอดดังนี้: 1) การบูรณาการระบบควบคุม (Hardware Integration): เชื่อมต่อระบบ AI เข้ากับระบบไม้กั้นอัตโนมัติ (Automatic Barrier Gate) เพื่อให้สามารถสั่งการเปิด-ปิดไม้กั้นได้ทันทีเมื่อตรวจพบป้ายทะเบียนที่ได้รับอนุญาต (Whitelist) 2) การยกระดับ Smart Event: เปลี่ยนจากการใช้ Motion Detection ทั่วไป ไปเป็นการประยุกต์ใช้ฟังก์ชัน Line Crossing Detection หรือการข้ามเส้นเสมือน เพื่อลดการแจ้งเตือนที่ผิดพลาด (False Alarm) จากความเคลื่อนไหวที่ไม่เกี่ยวข้องในพื้นที่ 3) การขยายผลการวิเคราะห์ข้อมูล (Big Data Analytics): พัฒนาระบบรายงานสถิติขั้นสูง เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการเข้า-ออกและความหนาแน่นของยานพาหนะในแต่ละช่วงเวลา สำหรับนำไปใช้ในการวางแผนจัดการจราจรในระดับพื้นที่ที่กว้างขึ้น

โดยสรุป งานวิจัยนี้ถือเป็นก้าวสำคัญในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Cloud AI และวิศวกรรมเครือข่าย เพื่อสร้างโซลูชันด้านความปลอดภัยที่เข้าถึงได้ง่าย มีประสิทธิภาพสูง และมีความยืดหยุ่นในการปรับใช้งานตามความต้องการขององค์กรต่างๆ ได้อย่างยั่งยืน

References เอกสารอ้างอิง

[1] F. Zantalis, G. Koulouras, S. Karabetsos and D. Kandris, "A Review of Machine Learning and IoT in Smart Transportation," *Future Internet,* 2019.

[2] W. Shi, J. Cao, Q. Zhang, Y. Li and L. Xu, "Edge Computing: Vision and Challenges," *IEEE Internet of Things Journal,* pp. 637 - 646, 2016.

[3] B. Varghese and R. Buyya, "Next generation cloud computing: New trends and research directions," *Future Generation Computer Systems,* pp. 849-861, 2018.

[4] R. Joseph, D. Santosh, G. Ross and F. Ali, "You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection," *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition,* pp. 779-788, 2016.

[5] J. Terven, E. Córdova, M. Diana and G. Romero, "A Comprehensive Review of YOLO Architectures in Computer Vision: From YOLOv1 to YOLOv8 and YOLO-NAS," *Mach. Learn. Knowl.,* pp. 1680-1716, 2023.

[6] R. Laroca, E. Severo, L. A. Zanlorensi, L. E. S. d. Oliveira, G. Gonçalves, W. R. Schwartz and D. Menotti, "A Robust Real-Time Automatic License Plate

Recognition Based on the YOLO Detector," *International Joint Conference on Neural Network,* pp. 1-10, 2018.

[7] S. M. Silva and C. R. Jung, "License Plate Detection and Recognition in Unconstrained Scenarios," in *Proceedings of the European Conference on Computer Vision*, Munich, Germany, 2018.

[8] S. Montazzolli and C. Jung, "Real-Time Brazilian License Plate Detection and Recognition Using Deep Convolutional Neural Networks," in *30th SIBGRAPI Conference on Graphics, Patterns and Images (SIBGRAPI)*, Niteroi, Brazil, 2017.

[9] C.-Y. Wang, I.-H. Yeh and H.-Y. M. Liao, "YOLOv9: Learning What You Want to Learn Using Programmable Gradient Information," *arXiv,* 2024.

[10] Ultralytics, "Ultralytics YOLO Docs," January 2026. [Online]. Available: https://docs.ultralytics.com/.

[11] WireGuard, "WireGuard," January 2026. [Online]. Available: https://www.wireguard.com/.

[12] Mikrotik, "Virtaul Private Networks," January 2026. [Online]. Available: https://help.mikrotik.com/.

[13] N. Dragoni, S. Giallorenzo, A. Lluch-Lafuente, M. Mazzara, F. Montesi, R. Mustafin and L. Safina, "Microservices: yesterday, today, and tomorrow," *Present And Ulterior Software Engineering,* 2017.

[14] FastAPI, "FastAPI," January 2026. [Online]. Available: https://fastapi.tiangolo.com/.

[15] "NestJS," January 2026. [Online]. Available: https://docs.nestjs.com/.

[16] Roboflow, "Roboflow," January 2026. [Online]. Available: https://roboflow.com/.

[17] W. Puarungroj and N. Boonsirisumpun, "Thai License Plate Recognition Based on Deep Learning," *Procedia Computer Science ,* pp. 214-221, 2018.

[18] React, "React," January 2026. [Online]. Available: https://react.dev/.

[19] J. Baek, G. Kim, J. Lee, S. Park, D. Han, S. Yun, S. J. Oh and H. Lee, "What Is Wrong With Scene Text Recognition Model Comparisons? Dataset and Model Analysis," in *IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Seoul, Korea, 2019.

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การวิเคราะห์ความคิดเห็นของผู้ใช้บริการแอปพลิเคชัน Lazada จาก Google Play Store

Sentiment Analysis of Consumer Feedback: A Case Study of the Lazada Application on Google Play Store

นริศรา นาคเมธี[1] อรรัมภา ตรงชาติ[2] ชวัลลักษณ์ นัครสาร[3] และวรรณษา คงสุข[4*]

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

narisara.n@rmutp.ac.th onrampa .tro@gmail.com chawanlak5086@gmail.com wannasakhongsuk@gmail.com*

บทคัดย่อ

โครงงานนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ความคิดเห็นของผู้ใช้บริการแอปพลิเคชัน Lazada จากรีวิวบน Google Play Store เนื่องจากความคิดเห็นของผู้ใช้เป็นข้อมูลสำคัญที่สะท้อนคุณภาพการให้บริการของแพลตฟอร์มอีคอมเมิร์ซ และเป็นข้อมูลสำคัญที่บริษัทสามารถนำไปปรับปรุงและพัฒนาการให้บริการ โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการประมวลผลภาษาธรรมชาติและการเรียนรู้ของเครื่อง ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาเป็นรีวิวภาษาไทยจำนวน 30,000 รายการ ซึ่งผ่านกระบวนการเตรียมข้อมูลและการตัดแบ่งประโยคจนได้ชุดข้อมูลสุดท้ายจำนวน 39,028 ประโยค

การวิเคราะห์ความคิดเห็นเชิงอารมณ์ใช้แบบจำลอง WangchanBERTa เพื่อจำแนกความคิดเห็นเป็นเชิงบวก เชิงลบ และเป็นกลาง ขณะที่การจำแนกประเด็นความคิดเห็นใช้เทคนิค TF–IDF ร่วมกับอัลกอริทึม Naïve Bayes และ Random Forest ในลักษณะการจำแนกหลายป้ายกำกับ โดยแบ่งประเด็นความคิดเห็นออกเป็น 5 ด้าน ได้แก่ ระบบ การจัดส่งสินค้า บริษัท ร้านค้า และโปรโมชั่น ผลการศึกษา พบว่าอัลกอริทึม Random Forest ให้ประสิทธิภาพในการจำแนกดีกว่า Naïve Bayes และผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพการให้บริการของแพลตฟอร์ม Lazada ได้อย่างเหมาะสม

คำสำคัญ: การวิเคราะห์ความคิดเห็น; การประมวลผลภาษาธรรมชาติ; การเรียนรู้ของเครื่อง

Abstract

This project aims to analyze user opinions of the Lazada application based on reviews collected from the Google Play Store using Natural Language Processing and Machine Learning techniques. The dataset consisted of 30,000 Thai-language reviews, which were processed and segmented into a final dataset of 39,028 sentences.

Sentiment analysis was conducted using the WangchanBERTa model to classify reviews into positive, negative, and neutral sentiments. Aspect classification was performed using the TF–IDF technique combined with Naïve Bayes and Random Forest algorithms under a multi-label classification approach. The aspects were categorized into five areas: system, logistics, company, store, and promotion. The results indicated that Random Forest achieved better classification performance than Naïve Bayes, and the findings can be used to support service quality improvement of the Lazada platform.

Keywords: Sentiment Analysis; Natural Language Processing; Machine Learning

1. บทนำ

ในยุคดิจิทัลปัจจุบัน เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตและสมาร์ตโฟนมีบทบาทสำคัญต่อการดำเนินชีวิตของผู้คน ส่งผลให้การซื้อสินค้าออนไลน์กลายเป็นพฤติกรรมที่แพร่หลาย และแพลตฟอร์มอีคอมเมิร์ซได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะแพลตฟอร์ม Lazada ซึ่งเป็นหนึ่งในแพลตฟอร์มอีคอมเมิร์ซที่สำคัญในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ผู้ใช้งานสามารถแสดงความคิดเห็นผ่านระบบรีวิวบนแพลตฟอร์ม เช่น Google Play Store ซึ่งรีวิวเหล่านี้สะท้อนถึงประสบการณ์ ความพึงพอใจ และปัญหาที่เกิดขึ้นจากการใช้งานจริง อย่างไรก็ตาม ข้อมูลรีวิวส่วนใหญ่อยู่ในรูปแบบข้อความที่ไม่มีโครงสร้าง (Unstructured Data) ทำให้ยากต่อการวิเคราะห์ด้วยวิธีทั่วไป จึงจำเป็นต้องใช้เทคนิคการประมวลผลภาษาธรรมชาติ (Natural Language Processing: NLP) เพื่อช่วยให้คอมพิวเตอร์สามารถเข้าใจ วิเคราะห์ และสกัดข้อมูลสำคัญจากข้อความได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การวิเคราะห์ความรู้สึก (Sentiment Analysis) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการจำแนกความคิดเห็นของผู้ใช้เป็นเชิงบวก เชิงลบ หรือเป็นกลาง ซึ่งช่วยให้สามารถประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานต่อสินค้าและบริการได้ โดยสามารถใช้ทั้งวิธีแบบอิงพจนานุกรม (Lexicon-based) และการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) ในการวิเคราะห์ข้อความ [4] นอกจากนี้ การวิเคราะห์ความคิดเห็นเชิงประเด็น (Aspect-Based Sentiment Analysis: ABSA) เป็นแนวทางที่ช่วยให้สามารถระบุได้ว่าผู้ใช้งานกำลังแสดงความคิดเห็นเกี่ยวกับส่วนใดของบริการ เช่น ระบบแอปพลิเคชัน การจัดส่งสินค้า หรือโปรโมชัน ซึ่งเป็นแนวทางที่ได้รับการนำไปใช้ในงานวิจัยด้านการวิเคราะห์ความคิดเห็นอย่างแพร่หลาย [5]

ในปัจจุบัน แบบจำลองภาษาเชิงประสาท (Neural Language Model) ได้ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์ข้อความ โดยเฉพาะโมเดล WangchanBERTa ซึ่งเป็นโมเดลภาษาไทยที่พัฒนาขึ้นเพื่อรองรับการประมวลผลภาษาไทยโดยเฉพาะ และสามารถเข้าใจบริบทของภาษาได้อย่างมีประสิทธิภาพ [6] นอกจากนี้ เทคนิค TF-IDF ยังถูกนำมาใช้ในการแปลงข้อความเป็นข้อมูลเชิงตัวเลข เพื่อใช้เป็นคุณลักษณะ

สำหรับอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่อง [1]บ2ล และอัลกอริทึม Random Forest เป็นหนึ่งในวิธีที่มีประสิทธิภาพในการจำแนกข้อมูลและสามารถจัดการกับข้อมูลที่มีความซับซ้อนได้ดี [3]

ดังนั้น โครงงานนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโมเดลวิเคราะห์ความคิดเห็นของผู้ใช้งานแอปพลิเคชัน Lazada โดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาษาธรรมชาติและการเรียนรู้ของเครื่อง เพื่อจำแนกความรู้สึกและประเด็นความคิดเห็นจากรีวิวของผู้ใช้ พร้อมทั้งนำเสนอผลลัพธ์ในรูปแบบแดชบอร์ด ซึ่งสามารถช่วยให้ผู้พัฒนาระบบเข้าใจความคิดเห็นของผู้ใช้งาน และนำข้อมูลไปใช้ในการปรับปรุงคุณภาพการให้บริการและประสบการณ์ของผู้ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การวิเคราะห์ความรู้สึก (Sentiment Analysis)

การวิเคราะห์ความรู้สึก (Sentiment Analysis) เป็นเทคนิคหนึ่งของการประมวลผลภาษาธรรมชาติที่ใช้ในการจำแนกอารมณ์หรือความคิดเห็นที่แฝงอยู่ในข้อความ โดยสามารถจัดประเภทเป็นเชิงบวก เชิงลบ หรือเป็นกลาง แนวคิดนี้มีจุดประสงค์เพื่อช่วยให้คอมพิวเตอร์สามารถตีความความคิดเห็นของมนุษย์จากข้อมูลข้อความได้โดยอัตโนมัติ [4]

เทคนิคนี้มีความสำคัญในการวิเคราะห์ข้อมูลจากรีวิวหรือความคิดเห็นของผู้ใช้ ซึ่งช่วยแปลงข้อมูลข้อความที่ไม่มีโครงสร้างให้เป็นข้อมูลที่สามารถนำไปวิเคราะห์และใช้สนับสนุนการตัดสินใจได้ ปัจจุบัน Sentiment Analysis ถูกพัฒนาโดยใช้เทคนิค Machine Learning และโมเดล Transformer เช่น BERT และ RoBERTa ซึ่งสามารถเข้าใจบริบทของภาษาและให้ความแม่นยำสูงขึ้นโดยทั่วไป วิธีการวิเคราะห์ความรู้สึกแบ่งได้เป็น 3 แนวทาง ได้แก่ วิธีแบบพจนานุกรม วิธีแบบ Machine Learning และวิธีแบบ Deep Learning ซึ่งเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพสูงในงานวิเคราะห์ข้อความสมัยใหม่ [4]

2.2 การเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning)

การเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning: ML) เป็นสาขาย่อยของปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) ที่มุ่งพัฒนาแบบจำลองซึ่งสามารถเรียนรู้รูปแบบจากข้อมูลและนำไปใช้ทำนายหรือจัดประเภทข้อมูลใหม่ได้โดยไม่ต้องกำหนดกฎล่วงหน้าอย่างชัดเจน กระบวนการทำงานของ ML โดยทั่วไปประกอบด้วย 1) การเตรียมข้อมูลและสกัดคุณลักษณะ (Feature Engineering) เพื่อแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบเชิงตัวเลข 2) การเรียนรู้พารามิเตอร์ของโมเดลผ่านฟังก์ชันการสูญเสียและขั้นตอนการหาค่าเหมาะที่สุด และ 3) การประเมินผลด้วยข้อมูลที่ไม่เคยใช้ฝึกมาก่อน เพื่อทดสอบความสามารถในการสรุปผล ทั้งนี้ ML แบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลัก ได้แก่ การเรียนรู้แบบมีผู้สอน (Supervised Learning) การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (Unsupervised Learning) และการเรียนรู้แบบเสริมแรง (Reinforcement Learning) ซึ่งถูกอธิบายไว้อย่างเป็นระบบในตำรามาตรฐานด้าน AI และ ML [3] ปัจจุบัน งานวิจัยสมัยใหม่มักผสานหลายแนวทางร่วมกัน เช่น การฝึกแบบ Pre-training และ Fine-tuning รวมถึงการเรียนรู้แบบเสริมแรงจากมนุษย์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแบบจำลองเชิงลึก

2.3 Random Forest และ Naïve Bayes สำหรับ Multi-label Classification

Random Forest และ Naïve Bayes เป็นอัลกอริทึมที่นิยมใช้ในงานจำแนกข้อความ และสามารถประยุกต์ใช้กับการจำแนกหลายป้ายกำกับ (Multi-label Classification) ได้ โดย Random Forest เป็นโมเดลแบบ Ensemble Learning ที่สร้าง Decision Tree หลายต้นและรวมผลลัพธ์ด้วยการโหวต ช่วยลดความแปรปรวนของโมเดลและเพิ่มความแม่นยำ โดยเฉพาะเมื่อใช้กับข้อมูลมิติสูง เช่น เวกเตอร์จาก TF-IDF [5]

ในขณะที่ Naïve Bayes เป็นโมเดลเชิงความน่าจะเป็นที่อาศัยทฤษฎีบทของเบย์ และมีสมมติฐานว่าคุณลักษณะเป็นอิสระต่อกัน [3] แม้จะเป็นโมเดลที่เรียบง่าย แต่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในงานจำแนกข้อความ และเหมาะกับข้อมูลที่อยู่ในรูปเวกเตอร์ เช่น TF-IDF

เนื่องจากทั้งสองโมเดลถูกออกแบบมาสำหรับการจำแนกแบบ single-label จึงต้องใช้เทคนิคการแปลงปัญหา เช่น Binary Relevance, Classifier Chains และ Label Powerset เพื่อรองรับการจำแนกหลายฉลาก วิธีเหล่านี้ช่วยให้โมเดลสามารถทำนายหลายฉลากและเรียนรู้ความสัมพันธ์ระหว่างฉลากได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ดังนั้น Random Forest และ Naïve Bayes จึงเป็นโมเดลที่เหมาะสมสำหรับงาน Multi-label Classification โดย Random Forest มีข้อดีด้านความแม่นยำและความยืดหยุ่น

ส่วน Naïve Bayes มีข้อดีด้านความเร็วและโครงสร้างที่เรียบง่าย ทำให้ทั้งสองโมเดลเป็นตัวเลือกที่นิยมในงานประมวลผลภาษาธรรมชาติและการวิเคราะห์ความคิดเห็น

2.4 โมเดลภาษา WangchanBERTa (WangchanBERTa Language Model)

WangchanBERTa เป็นโมเดลประมวลผลภาษาธรรมชาติ (Natural Language Processing: NLP) ที่พัฒนาโดยศูนย์ปัญญาประดิษฐ์แห่งประเทศไทย (VISTEC-depa AI Research Center) [6] บนพื้นฐานสถาปัตยกรรม RoBERTa ซึ่งเป็นการต่อยอดจากสถาปัตยกรรม BERT เพื่อยกระดับประสิทธิภาพในการเรียนรู้ตัวแทนเชิงบริบท (Contextual Representation) โมเดลดังกล่าวผ่านการฝึกฝนล่วงหน้า (Pre-training) ด้วยคลังข้อมูลภาษาไทยขนาดใหญ่ประมาณ 78 กิกะไบต์ ครอบคลุมหลากหลายโดเมนเนื้อหา ส่งผลให้โมเดลสามารถเรียนรู้ลักษณะเฉพาะของโครงสร้างไวยากรณ์และความหมายที่แปรผันตามบริบทได้อย่างแม่นยำ

เทคนิคสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพคือการใช้ Thai-adapted WordPiece Tokenization ซึ่งปรับปรุงกระบวนการแบ่งหน่วยคำให้สอดคล้องกับลักษณะภาษาไทย เพื่อลดปัญหาความผิดพลาดในการกำหนดขอบเขตคำ (Word Boundary) ที่พบในระบบทั่วไป ร่วมกับการประยุกต์ใช้แนวคิด Dynamic Masking เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นในการเรียนรู้ความสัมพันธ์ระหว่างคำผ่านวิธี Masked Language Modeling (MLM) ส่งผลให้ได้ตัวแทนภาษาไทย (Thai Language Representation) ที่มีคุณภาพสูงและมีความเข้าใจความสัมพันธ์เชิงลำดับเหตุการณ์ลึกซึ้งกว่าโมเดลภาษาแบบหลายภาษา (Multilingual Models)

ในด้านการประยุกต์ใช้งาน WangchanBERTa รองรับภารกิจ NLP หลากหลายประเภท [17] อาทิ การจัดประเภทข้อความ (Text

Classification) และการวิเคราะห์อารมณ์ความรู้สึก (Sentiment Analysis) ซึ่งสามารถจัดการกับความความกำกวมและความซับซ้อนของภาษาพูดบนสื่อสังคมออนไลน์ได้ดีกว่าวิธีดั้งเดิมอย่าง Bag-of-Words หรือ TF-IDF นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพโดดเด่นในงานจำแนกชื่อเฉพาะ (Named Entity Recognition: NER) โดยเฉพาะการระบุชื่อที่มีความซับซ้อนหรือไม่มีการเว้นวรรคชัดเจน ตลอดจนงานด้านการตอบคำถาม (Question Answering) และการสกัดข้อมูล (Information Extraction) จากเอกสารขนาดใหญ่ ซึ่งอาศัยความสามารถในการตีความข้อมูลเชิงนัย (Implicit Information) เพื่อช่วยเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพในระดับสูง

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

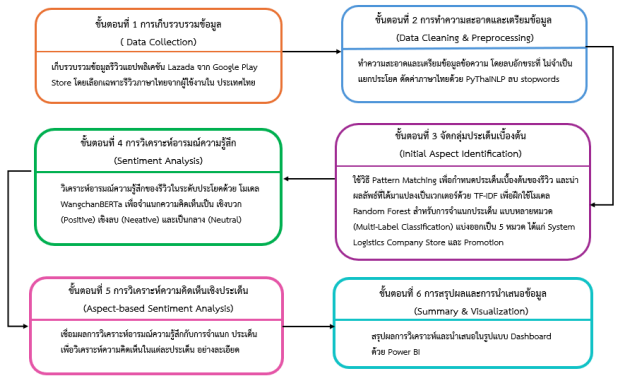
การประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) และการประมวลผลภาษาธรรมชาติ (NLP) เพื่อวิเคราะห์ความคิดเห็นของผู้บริโภคชาวไทยได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวางในหลากหลายบริบท วนัสวรรณ มีประเสริฐ และคณะ [8] ได้ศึกษาการวิเคราะห์ประเด็นสำคัญ (Topic Classification) และความรู้สึก (Sentiment Analysis) ของลูกค้า Shopee บนแพลตฟอร์ม Twitter โดยใช้กระบวนการเตรียมข้อมูลด้วย Wangchan-uncase และการสกัดคุณลักษณะด้วยวิธี TF-IDF ผลการศึกษาพบว่าอัลกอริทึม Random Forest มีประสิทธิภาพสูงสุดในการแยกประเด็นสำคัญตามกรอบแนวคิด E-SERVQUAL ขณะที่โมเดลการเรียนรู้เชิงลึก WangchanBERTa ให้ผลลัพธ์ความแม่นยำสูงสุดในการจำแนกความรู้สึกสะท้อนให้เห็นว่าการใช้ Contextual Embeddings ช่วยให้การประมวลผลภาษาโซเชียลมีเดียมีความแม่นยำสูงขึ้น

ในทำนองเดียวกัน พิศิษฐ์ บวรเลิศสุธี และ วรภัทร ไพรีเกรง [9] ได้ศึกษาระบบวิเคราะห์ความรู้สึกจากรีวิวสินค้าและบริการออนไลน์ โดยเน้นความสำคัญของกระบวนการตัดคำ (Word Segmentation) แบบ Longest Matching เพื่อสร้างชุดคุณลักษณะแบบ Bag-of-Words จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมพบว่า Support Vector Machines (SVM) ให้ค่าความแม่นยำสูงสุดที่ร้อยละ 79 เมื่อเทียบกับ Logistic Regression และ Random Forest อย่างไรก็ตาม งานวิจัยระบุถึงข้อจำกัดในการจัดการภาษาที่มีความซับซ้อน เช่น การประชดประชันหรือคำสแลง ซึ่งสอดคล้องกับความท้าทายที่พบในงานวิจัยของวนัสวรรณ [30]

ดังนั้น โครงงานปัจจุบันจึงได้นำข้อค้นพบจากงานวิจัยทั้งสองมาเป็นแนวทางในการออกแบบระบบ โดยเลือกใช้ไลบรารี PyThaiNLP และอัลกอริทึม NewMM ในการเตรียมข้อมูลเบื้องต้นเพื่อความรวดเร็วในการตอบสนองแบบเวลาจริง (Real-time) ร่วมกับการใช้โมเดลเชิงลึกผ่านเฟรมเวิร์ก spaCy เพื่อรองรับความแปรปรวนของภาษาและบริบทแวดล้อมของข้อมูลที่ผู้ใช้ระบุเข้ามาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3. วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนากระบวนการวิเคราะห์ความคิดเห็นผู้ใช้งานแอปพลิเคชัน Lazada โดยใช้เทคนิค NLP ร่วมกับ Machine Learning เริ่มจากการกำหนดหัวข้อและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จากนั้นเก็บข้อมูลรีวิวภาษาไทยจาก Google Play Store ด้วยวิธี Web Scraping ข้อมูลถูกนำมาทำความสะอาด แยกประโยค ตัดคำด้วย PyThaiNLP และแปลงเป็นเวกเตอร์ด้วย TF-IDF ต่อมาดำเนินการจำแนกประเด็นด้วยวิธี Pattern Matching และโมเดล Naïve Bayes และ Random Forest แบบ Multi-label ครอบคลุม 5 หมวด ได้แก่ System, Logistics, Company, Store และ Promotion ท้ายที่สุดวิเคราะห์อารมณ์ด้วย WangchanBERTa เพื่อจำแนกเป็นเชิงบวก เชิงลบ และเป็นกลาง และนำผลไปสรุปและแสดงผล โดยกระบวนการทั้งหมดสามารถสรุปเป็นขั้นตอนดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยด้านการวิเคราะห์ความคิดเห็น

3.1 การเก็บรวบรวมข้อมูล (Data Collection)

งานวิจัยนี้เก็บรวบรวมข้อมูลรีวิวของแอปพลิเคชัน Lazada จาก Google Play Store โดยใช้ไลบรารี Google Play Scraper กำหนดดึงเฉพาะรีวิวภาษาไทยจากผู้ใช้งานในประเทศไทย และเรียงตามรีวิวล่าสุด กำหนดรหัสแอป (APP ID) คือ com.lazada.android และตั้งเป้าหมายจำนวน 30,000 รีวิว ครอบคลุมช่วงปี ค.ศ. 2023–2025 ข้อมูลถูกดึงแบบต่อเนื่องด้วยกลไก Continuation Token จากนั้นแปลงให้อยู่ในรูปแบบตารางและบันทึกเป็นไฟล์ .CSV ชื่อ “Lazada30.csv”

3.2 การทำความสะอาดและเตรียมข้อมูล (Data Cleaning & Preprocessing)

ในการสำรวจข้อมูลรีวิวของแอปพลิเคชัน Lazada จาก Google Play Store จำนวน 30,000 รายการ ได้ทำการแปลงคอลัมน์วันที่ให้อยู่ในรูปแบบ DateTime และสกัดปี เดือน วิเคราะห์การกระจายของรีวิวตามช่วงเวลา เบื้องต้นพบว่าข้อมูลส่วนใหญ่อยู่ในปี ค.ศ. 2024 รองลงมาคือปี 2025 และ 2023 จากนั้นตรวจสอบและลบข้อความที่มีภาษาอังกฤษออกจำนวน 2,470 แถว ทำให้ข้อมูลลดลงเหลือ 27,530 แถว ต่อมาคัดเลือกเฉพาะรีวิวช่วงปี ค.ศ. 2024–2025 และตัดข้อมูลปี 2023 ออก ส่งผลให้ชุดข้อมูลสุดท้ายเหลือ 25,495 รายการ พร้อมบันทึกเป็นไฟล์ lazadaapp_cleaned.csv สำหรับใช้ในขั้นตอนการวิเคราะห์ถัดไป

3.3 การเตรียมและสำรวจข้อมูลข้อความจากรีวิว

หลังจากได้ข้อมูลที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วจำนวน 25,495 รายการ ได้ทำการเตรียมข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ข้อความ โดยอ่านไฟล์ lazadaapp_cleaned.csv และสร้างชุดข้อมูล 2 ส่วน ได้แก่ ชุดข้อมูลเต็มสำหรับใช้ในงาน Machine Learning และชุดข้อมูลที่ลบ

	content	clean_text	tokens
0	แรกๆไช้แอ็บไม่เป็นก็คิดพลาดหลายๆอย่าง ตอนนี้เนียพอเป็นนิดหน่อยเลยได้ของถูกใจพอสมควร ลวมๆ แล้วชอบ ...ไช้คำว่าคิดงอมแงมมากกว่า 😍	แรกๆไช้แอ็บไม่เป็นก็คิดพลาดหลายๆอย่าง ตอนนี้เนียพอเป็นนิดหน่อยเลยได้ของถูกใจพอสมควร ลวมๆ แล้วชอบ ไช้คำว่าคิดงอมแงมมากกว่า	[แอ็บ, คิดพลาด, ตอน, ถูกใจ, ลวม, ชอบ, คิด, งอมแงม, กว่า]
1	คิวอาร์คิดพลาดบ่อยมากปรับปรุงด้วยค่ะ	คิวอาร์คิดพลาดบ่อยมากปรับปรุงด้วยค่ะ	[คิวอาร์, คิดพลาด, ปรับปรุง]
2	ส่งข้อความมาให้สมัครแบบผ่อนชำระ แต่พอกดเข้าไปบอกคุณสมบัติไม่ตรงทั้งที่ยังไม่ได้ส่งอะไรถาม จริงๆแล้วจะส่งข้อความมาทำเพื่ออะไรเลือกให้กดสมัครอีกทีปิหน้าช่วยตอบหน่อยนะ	ส่งข้อความมาให้สมัครแบบผ่อนชำระ แต่พอกดเข้าไปบอกคุณสมบัติไม่ตรงทั้งที่ยังไม่ได้ส่งอะไรถาม จริงๆแล้วจะส่งข้อความมาทำเพื่ออะไรเลือกให้กดสมัครอีกทีปิหน้าช่วยตอบหน่อยนะ	[ข้อความ, สมัคร, ผ่อน, ชำระ, พอกด, คุณสมบัติ, ถาม, ข้อความ, ทำ, เลือก, กด, สมัคร, ปี, หน้า, ตอบ]
3	ทำไมสมัครรอบ2มันเข้าระบบไม่ได้โทรไปที่ศูนย์บอกจะแก้ไขให้แต่รอนต้องให้คนอื่นสั่งให้	ทำไมสมัครรอบ มันเข้าระบบไม่ได้โทรไปที่ศูนย์บอกจะแก้ไขให้แต่รอนต้องให้คนอื่นสั่งให้	[สมัคร, รอบ, ระบบ, โทร, ศูนย์, แต่ร, คน, สั่ง]
4	ใช้ง่าย มีสิ้นค้าที่มากให้คัดสินใจเลือกได้อย่างคุ้มราคา คุณภาพครับ	ใช้ง่าย มีสิ้นค้าที่มากให้คัดสินใจเลือกได้อย่างคุ้มราคา คุณภาพครับ	[ค้า, คัดสินใจ, เลือก, คุ้มราคา, คุณภาพ]
5	โชว์โฆษณาหน้าต่างลอยดีนัก ลบแอพทิ้งซะเลย.. 👎	โชว์โฆษณาหน้าต่างลอยดีนัก ลบแอพทิ้งซะเลย	[โชว์, โฆษณา, หน้าต่างลอย, ดี, ลบแอพ, ทิ้ง]
6	ของลาซ้ำดีมากยกเลิกได้เงินคืนเงินก็เร็ว	ของลาซ้ำดีมากยกเลิกได้เงินคืนเงินก็เร็ว	[ลาซ้ำดำ, ดี, ยกเลิก, เงิน, คืน, เงิน]
7	กุลบแล้สแอปนี้กากชิปหาย. ขอปปีดีกว่าเยอะ	กุลบแล้สแอปนี้กากชิปหาย ขอปปีดีกว่าเยอะ	[กุลบ, แล้ส, แอป, กาก, ชิปหาย, ขอปปี, ดี]
8	ตรงปกดีค่ะรายละเอียดสินค้สชัดเจนดีค่ะ	ตรงปกดีค่ะรายละเอียดสินค้สชัดเจนดีค่ะ	[ดี, รายละเอียด, สินค้ส, ชัดเจน, ดี]
9	สินค้าราคาไม่แพง	สินค้าราคาไม่แพง	[สินค้า, ราคา, แพง]

รูปที่ 2 ผลลัพธ์ตารางเปรียบเทียบการทำความสะอาดและตัดคำข้อความรีวิว

ข้อความซ้ำ เหลือ 20,238 รายการ เพื่อใช้สำรวจคำและลดอคติจากรีวิวที่ซ้ำกัน

จากนั้นดำเนินการทำความสะอาดข้อความเพิ่มเติม โดยลบ Emoji แท็ก HTML ตัวเลข และอักขระพิเศษ คงไว้เฉพาะอักษรภาษาไทย พร้อมปรับรูปแบบคำ (Word Normalization) เพื่อลดการซ้ำของสระ วรรณยุกต์ และตัวอักษร เช่น “ดีมากกก” ให้เป็นรูปแบบมาตรฐาน ก่อนนำไปตัดคำภาษาไทยด้วย PyThaiNLP (attacut) และลบ stopwords เพื่อให้ได้ชุดคำ (tokens) ที่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์ ดังตัวอย่างข้อมูลที่แสดงในรูปที่ 2

ต่อมาได้ทำการนับความถี่ของคำ พบคำที่ปรากฏบ่อย เช่น “ดี” “สินค้า” “สั่ง” “ซื้อ” และ “ราคา” และจัดทำตารางความถี่คำจำนวน 9,696 คำ เพื่อใช้สำรวจประเด็นสำคัญของผู้ใช้งาน จากนั้นกำหนดหมวดประเด็น 5 หมวด ได้แก่ System, Logistics, Company, Store และ Promotion โดยอ้างอิงงานวิจัยเดิม [] และผสานกับคำที่พบจริงในข้อมูล เพื่อสร้างพจนานุกรมประเด็น (Aspect Dictionary) และตรวจสอบความสอดคล้องกับรีวิวจริง ก่อนนำไปใช้ในการจำแนกประเด็นในขั้นตอนถัดไป

3.4 การจำแนกประเด็นด้วย Machine Learning (Naïve Bayes & Random Forest)

นำข้อมูลรีวิวชุดข้อมูลเต็มที่ใช้ในงาน Machine Learning ผ่านการทำความสะอาดแล้ว 25,495 รายการ มาสร้างป้ายกำกับ 6 หมวด ได้แก่ System, Logistics, Company, Store, Promotion และ Other ด้วยวิธี Keyword-based Labeling และนำข้อมูลรีวิวมาแยกข้อความระดับประโยคได้ 39,028 ประโยค และเข้ารหัสแบบ Multi-label ข้อความถูกแปลงเป็นเวกเตอร์ด้วยเทคนิค TF-IDF (2,822 คุณลักษณะ) และแบ่งข้อมูลเป็นชุดฝึก 80% และชุดทดสอบ 20% ก่อนนำไปฝึกโมเดล Multinomial Naïve Bayes และ Random Forest แบบ One-vs-Rest ผลการประเมินพบว่า Random Forest มีค่า Precision (Macro) เท่ากับ 0.9941 และค่า Recall และ F1-score แบบ Macro ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.9706 และ 0.9821 ตามลำดับ ขณะที่ Naïve Bayes มีค่า Precision (Macro) อยู่ที่ 0.9869 มีค่า Recall (Macro) เท่ากับ 0.8251 และ F1-score (Macro) 0.8972 จึงเลือกใช้ Random Forest เป็นโมเดลหลัก และบันทึกผลการทำนายสำหรับใช้งานต่อไป

3.5 การวิเคราะห์ความคิดเห็นเชิงบวก เชิงลบ และเป็นกลาง (Sentiment Analysis)

ในขั้นตอนนี้ได้นำไฟล์ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำแนกประเด็นด้วยโมเดล Random Forest ในหัวข้อ 3.4 มาใช้เป็นข้อมูลตั้งต้น โดยเลือกเฉพาะคอลัมน์ข้อความระดับประโยคที่ผ่านการทำความสะอาดแล้ว (sentence_clean) ซึ่งมีจำนวนทั้งหมด 39,028 ประโยค เพื่อนำมาวิเคราะห์อารมณ์ในระดับประโยค ทั้งนี้การวิเคราะห์ระดับประโยคช่วยให้สามารถแยกอารมณ์ในรีวิวที่มีหลายประเด็นได้อย่างละเอียดมากกว่าการวิเคราะห์ทั้งรีวิวในครั้งเดียว โดยในงานวิจัยเลือกใช้โมเดล WangchanBERTa ที่ผ่านการ Fine-tune สำหรับงานจำแนกความคิดเห็นที่สามารถจำแนกอารมณ์เป็น 3 ประเภท ได้แก่ Positive, Neutral และ Negative โดยประมวลผลข้อมูลแบบ Batch Sentiment Prediction เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการคำนวณและลดเวลาในการประมวลผล และตั้งค่าโมเดลในโหมดประเมินผล (Evaluation mode)

ผลการวิเคราะห์พบว่าความคิดเห็นเชิงบวกมีจำนวนมากที่สุด คิดเป็น 15,022 ประโยค หรือร้อยละ 38.49 รองลงมาคือความคิดเห็นเชิงเป็นกลาง จำนวน 12,833 ประโยค หรือร้อยละ 32.88 และความคิดเห็นเชิงลบ จำนวน 11,173 ประโยค หรือร้อยละ 28.63 ผลลัพธ์นี้สะท้อนให้เห็นว่า โดยภาพรวมผู้ใช้งานมีแนวโน้มแสดงความคิดเห็นในเชิงบวกต่อแอปพลิเคชันมากกว่าความคิดเห็นเชิงลบ แต่ก็ยังพบสัดส่วนความคิดเห็นเชิงเป็นกลางและเชิงลบในระดับที่ค่อนข้างสูง ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการนำไปวิเคราะห์เชิงลึกในประเด็นต่าง ๆ ต่อไป

3.6 การวิเคราะห์ความคิดเห็นจำแนกตามประเด็น (Aspect-Based Analysis)

ขั้นตอนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ว่าแต่ละประเด็นความคิดเห็นถูกกล่าวถึงด้วยอารมณ์เชิงบวก เชิงลบ หรือเป็นกลางในปริมาณเท่าใด โดยเป็นการผสานผลลัพธ์จากการจำแนกประเด็นความคิดเห็น (Aspect Classification) ใน 5 ประเด็น ได้แก่ ระบบ (System) การขนส่ง (Logistics) บริษัท (Company) ร้านค้า (Store) และโปรโมชัน (Promotion) เข้ากับผลการวิเคราะห์อารมณ์ (Sentiment Analysis) โดยกำหนดประเภทของอารมณ์ความคิดเห็นเป็น Positive Negative และ Neutral โดยผลการวิเคราะห์ความคิดเห็นจำแนกตามประเด็น ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์อารมณ์จำแนกตามประเด็น (Aspect Sentiment Matrix)

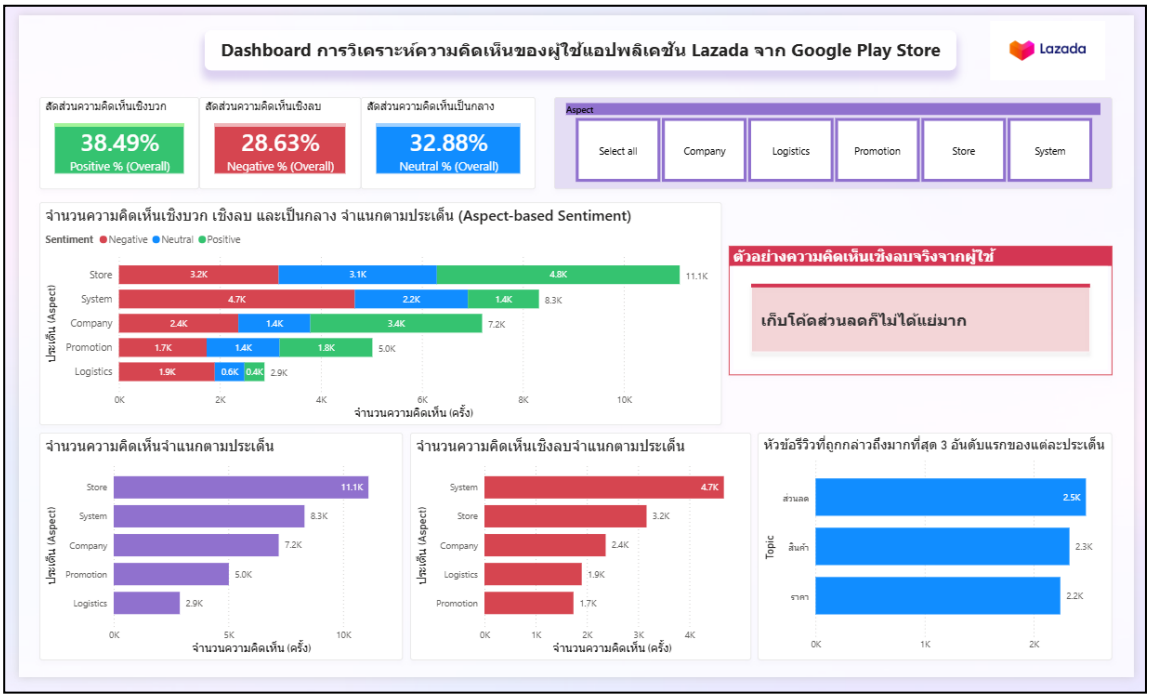
ประเด็นความคิดเห็น (Aspect)	เชิงบวก (+)	เชิงลบ (-)	เป็นกลาง	รวม (Total)
System	1,407	4,671	2,239	8,317
Logistics	396	1,898	588	2,882
Company	3,402	2,365	1,425	7,192
Store	4,809	3,163	3,133	11,105
Promotion	1,837	1,737	1,445	5,019

3.7 การนำเสนอผลลัพธ์และการประยุกต์ใช้งาน

เพื่อให้ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์อารมณ์ (Sentiment Analysis) จำแนกตามประเด็นสามารถนำไปใช้ประโยชน์ และเห็นภาพรวม แนวโน้ม และประเด็นสำคัญจากความคิดเห็นของผู้ใช้ จุดแข็ง และจุดที่ควรปรับปรุงของแอปพลิเคชันได้อย่างชัดเจน และสนับสนุนการตัดสินใจในการพัฒนาแอปพลิเคชันในอนาคต โดยมีการนำเสนอข้อมูลในรูปแบบกราฟและตัวชี้วัดที่หลากหลาย ดังรูปที่ 3

ที่ประเด็นด้านร้านค้าและบริษัทมีจำนวนความคิดเห็นเชิงบวกสูงกว่า แสดงให้เห็นถึงความพึงพอใจต่อสินค้า ภาพลักษณ์ของแพลตฟอร์ม และการดำเนินงานโดยรวม

เมื่อพิจารณารายละเอียดเชิงลึกของแต่ละประเด็น พบว่า ประเด็นด้าน Company มีจำนวนความคิดเห็นทั้งหมด 7,192 ความคิดเห็น ผู้ใช้มีความคิดเห็นเชิงบวกจำนวน 3,402 ความคิดเห็น ผลการวิเคราะห์สะท้อนให้เห็นว่าผู้ใช้ส่วนใหญ่มีทัศนคติในเชิงบวกต่อภาพลักษณ์และการดำเนินงานของบริษัท ด้าน Logistics มีความคิดเห็นทั้งหมด 2,882 ความคิดเห็น ซึ่งพบว่าความคิดเห็นเชิงลบมีจำนวนสูงถึง 1,898 ความคิดเห็น มากกว่าความคิดเห็นเชิงบวกที่มีจำนวนเพียง 396 ความคิดเห็น แสดงให้เห็นว่าประเด็นด้านโลจิสติกส์เป็นหนึ่งในประเด็นที่ผู้ใช้มีความไม่พึงพอใจในระดับสูงเมื่อเปรียบเทียบกับประเด็นอื่น ประเด็นด้าน Promotion มีความคิดเห็นทั้งหมด 5,019 ความคิดเห็น ซึ่งประกอบด้วยความคิดเห็นเชิงบวกจำนวน 1,837 ความคิดเห็น ความคิดเห็นเชิงลบจำนวน 1,737 ความคิดเห็น และความคิดเห็นเชิงเป็นกลางจำนวน 1,445 ความคิดเห็น โดยสัดส่วนของความคิดเห็นมีความใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าผู้ใช้มีมุมมองต่อโปรโมชั่นทั้งในด้านที่สร้างความพึงพอใจและด้านที่ยังเป็นปัญหา โดยเฉพาะเงื่อนไขในการใช้งาน ส่วนประเด็นด้าน Store เป็นประเด็นที่มีจำนวนความคิดเห็นมากที่สุด โดยมีความคิดเห็น



รูปที่ 3 แดชบอร์ดสรุปผลการวิเคราะห์ความคิดเห็นของผู้ใช้แอปพลิเคชัน Lazada

4. ผลการดำเนินงาน

ผลการวิเคราะห์อารมณ์จำแนกตามประเด็น ในภาพรวมสะท้อนให้เห็นว่า แม้ผู้ใช้จะมีความคิดเห็นเชิงบวกต่อการใช้งานแอปพลิเคชันในหลายด้าน แต่บางประเด็นยังคงมีจำนวนความคิดเห็นเชิงลบอยู่ในระดับค่อนข้างสูง โดยเฉพาะด้านระบบและโลจิสติกส์ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสบการณ์การใช้งานโดยรวมของผู้ใช้ ในขณะทั้งหมด 11,105 ความคิดเห็น ในจำนวนนี้เป็นความคิดเห็นเชิงบวกถึง 4,809 ความคิดเห็น ซึ่งสูงกว่าทุกประเด็นอื่นอย่างชัดเจน ขณะที่ความคิดเห็นเชิงลบมีจำนวน 3,163 ความคิดเห็น และความคิดเห็นเชิงเป็นกลางจำนวน 3,133 ความคิดเห็น ผลลัพธ์นี้สะท้อนให้เห็นว่าผู้ใช้ส่วนใหญ่มีความพึงพอใจต่อร้านค้าและสินค้าในแพลตฟอร์ม แต่ก็ยังพบปัญหา

เกี่ยวกับการรับประกันและการเคลมสินค้า ตัวอย่างความคิดเห็นเชิงลบ จาก และประเด็นด้าน System มีความคิดเห็นทั้งหมด 8,317 ความคิดเห็น ซึ่งพบว่าความคิดเห็นเชิงลบมีจำนวนสูงถึง 4,671 ความคิดเห็น มากกว่าความคิดเห็นเชิงบวกจำนวน 1,407 ความคิดเห็น และความคิดเห็นเชิงเป็นกลางจำนวน 2,239 ความคิดเห็น ผลลัพธ์นี้สะท้อนให้เห็นว่าปัญหาด้านระบบและการใช้งานแอปพลิเคชันยังคงเป็นข้อจำกัดสำคัญที่ส่งผลต่อประสบการณ์ของผู้ใช้ ตัวอย่างความคิดเห็นเชิงลบจากผู้ใช้

5. บทสรุป

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ความคิดเห็นผู้ใช้งานแอปพลิเคชัน Lazada จากรีวิวภาษาไทย โดยมุ่งเน้นทั้งการจำแนกประเด็นความคิดเห็นและการวิเคราะห์อารมณ์ในระดับประโยค การจำแนกประเด็นใช้เทคนิค TF–IDF ร่วมกับการเรียนรู้ของเครื่องแบบหลายป้ายกำกับ และเปรียบเทียบโมเดล Naïve Bayes กับ Random Forest ซึ่งผลการทดสอบพบว่า Random Forest มีประสิทธิภาพสูงกว่าอย่างชัดเจน โดยมีค่า F1-score แบบ Macro เท่ากับ 0.9821 ในด้านการวิเคราะห์อารมณ์ ได้ใช้แบบจำลองภาษา WangchanBERTa เพื่อจำแนกความคิดเห็นเป็นเชิงบวก เชิงลบ และเป็นกลาง และนำผลลัพธ์มาผสานกับการจำแนกประเด็น เพื่อสะท้อนภาพรวมความคิดเห็นของผู้ใช้งานในแต่ละด้านอย่างเป็นระบบ

ข้อจำกัดในการดำเนินงานวิจัยนี้ คือ ความกำกวมของข้อความที่มีทั้งเชิงบวกและเชิงลบในประโยคเดียว ข้อความที่กล่าวถึงหลายประเด็นพร้อมกัน การใช้สำนวนหรือการประชดประชันซึ่งยากต่อการตีความเชิงลึก รวมถึงความท้าทายในการจำแนกความคิดเห็นที่เป็นกลาง

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หน่วยงานต้นสังกัดของคณะผู้วิจัย ที่ให้การสนับสนุนในการดำเนินงานวิจัย ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ หน่วยงานจัดการประชุมวิชาการ และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการนำเสนอบทความในการประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

7. เอกสารอ้างอิง

[1] S. Bird, E. Klein, and E. Loper, Natural Language Processing with Python. O'Reilly Media, 2009.

[2] D. Jurafsky and J. H. Martin, Speech and Language Processing, 3rd ed., 2020.

[3] T. M. Mitchell, Machine Learning, 1997. [Online]. Available: https://www.cs.cmu.edu/~tom/mlbook.html. [Accessed: Nov. 15, 2025].

[4] B. Liu, Sentiment Analysis and Opinion Mining, 2012. [Online]. Available: https://www.cs.uic.edu/~liub/FBS/SentimentAnalysis-and-OpinionMining.pdf. [Accessed: Nov. 15, 2025].

[5] Y. Zhang, "Design and Implementation of Aspect-Based Sentiment Analysis Task," 2023. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2813-0324/8/1/56. [Accessed: Dec. 10, 2025].

[6] L. Lowphansirikul et al., "WangchanBERTa: Pretraining transformer-based Thai language models," 2021. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/2101.09635. [Accessed: Dec. 10, 2025].

[7] Google Play, "Google Play Store," 2023. [Online]. Available: https://play.google.com/. [Accessed: Jan. 6, 2026].

[8] ว. มีประเสริฐ และ อ. รัตตะกาญจน์, "การวิเคราะห์ความคิดเห็นจากทวิตเตอร์ของลูกค้าบริษัทช้อปปี้ประเทศไทย," วารสารระบบสารสนเทศด้านธุรกิจ (JISB), ปีที่ 7, ฉบับที่ 3, 2564.

[9] พ. บวรเลิศสุธี และ ว. ไพรีเกรง, "การวิเคราะห์ความคิดเห็นสำหรับการจำแนกรีวิวการซื้อสินค้าออนไลน์โดยใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง," วารสาร Journal of Engineering and Digital Technology, ปีที่ 10, ฉบับที่ 1, 2565.



ดร.นริศรา นาคเมธี
อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
งานวิจัยที่สนใจ: การประมวลผลภาษาธรรมชาติ, เหมืองข้อมูล, การเรียนรู้ของเครื่อง



นางสาวอรรัมภา ตรงชาติ
สาขาวิชาวิทยาการข้อมูลและเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
งานวิจัยที่สนใจ: การประมวลผลภาษาธรรมชาติ



นางสาวชวัลลักษณ์ นัคสาร
สาขาวิชาวิทยาการข้อมูลและเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
งานวิจัยที่สนใจ: การประมวลผลภาษาธรรมชาติ



นางสาววรรณษา คงสุข
สาขาวิชาวิทยาการข้อมูลและเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
งานวิจัยที่สนใจ: การประมวลผลภาษาธรรมชาติ

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

เว็ปแอปพลิเคชันร้านค้าดิจิทัล (POS)

DIGITAL POINT OF SALE (POS) WEB APPLICATION

บุรัสกร อยู่สุข[1] เกรียงไกร เหลืองอำพล[2*] สิทธิศักดิ์ วรดิษฐ์[3] จิรภิญญา ศรีแก้ว[4] และอธิภัทร เนียมโสต[5]

burasakorn.y@rmutp.ac.th[1] kriengkri.l@rmutp.ac.th[2*] sittisak.w@rmutp.ac.th[3] jirapinya-s@rmutp.ac.th[4] jirapinya-s@rmutp.ac.th[5]

[12*345]คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร 1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

บทคัดย่อ

โครงงานนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันสำหรับระบบร้านค้าดิจิทัล (Point of Sale: POS) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการงานขายภายในร้านค้า และสนับสนุนการดำเนินงานของผู้ประกอบการให้มีความสะดวก รวดเร็ว และเป็นระบบมากยิ่งขึ้น ระบบได้รับการออกแบบให้สามารถทำงานผ่านเว็บเบราว์เซอร์ ซึ่งช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงระบบได้อย่างสะดวกทั้งผ่านคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์พกพา ฟังก์ชันหลักของระบบประกอบด้วยการจัดการข้อมูลสินค้า การบันทึกข้อมูลการขาย การออกใบเสร็จรับเงิน และการบริหารจัดการสินค้าคงคลัง เพื่อช่วยลดความผิดพลาดในการดำเนินงานและเพิ่มความถูกต้องของข้อมูลภายในร้านค้า ในกระบวนการพัฒนา ระบบได้นำเทคโนโลยีเว็บสมัยใหม่มาใช้ ได้แก่ HTML, CSS และ JavaScript ร่วมกับระบบฐานข้อมูลสำหรับจัดเก็บข้อมูลสินค้าและข้อมูลธุรกรรมอย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย นอกจากนี้ ยังให้ความสำคัญกับการออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้ที่ง่ายต่อการใช้งานและเหมาะสมกับผู้ประกอบการร้านค้าขนาดเล็กถึงขนาดกลาง ผลการพัฒนาพบว่าเว็บแอปพลิเคชันระบบร้านค้าดิจิทัลที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังสามารถพัฒนาต่อยอดในอนาคตเพื่อรองรับฟังก์ชันเพิ่มเติม เช่น ระบบชำระเงินออนไลน์ และการเชื่อมต่อกับระบบบัญชีเพื่อเพิ่มศักยภาพในการบริหารจัดการธุรกิจให้ครอบคลุมมากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ : ระบบบริหารจัดการ, การจำหน่ายสินค้าออนไลน์, ระบบจุดจำหน่ายสินค้า

Abstract

This project aims to develop a web application for a digital retail management system (Point of Sale: POS) to enhance the efficiency of in-store sales management and support business operations by making them more convenient, faster, and more systematic. The system is designed to operate through a web browser, enabling users to conveniently access it via both computers and mobile devices. The main functions of the system include product information management, sales transaction recording, receipt generation, and inventory management. These functions help reduce operational errors and improve data accuracy within retail stores. During the development process, modern web technologies were utilized, including HTML, CSS, and JavaScript, along with a database system to securely and efficiently store product and transaction data. In addition, considerable attention was given to designing a user-friendly interface that is suitable for small- to medium-sized business operators. The development results indicate that the proposed digital retail web application can be effectively implemented in real-world retail environments. Furthermore, the system can be further enhanced in the future to support additional features, such as online payment systems and integration with accounting systems, in order to improve the overall efficiency and comprehensiveness of business management.

Keywords: Management System, E-Commerce, Point of Sale (POS)

1. บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีสารสนเทศได้เข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการดำเนินธุรกิจทุกประเภท โดยเฉพาะธุรกิจค้าปลีกที่ต้องอาศัยความถูกต้องแม่นยำ และความรวดเร็วในการบริหารจัดการข้อมูลด้านสินค้า ยอดขาย และการออกเอกสารทางการขาย อย่างไรก็ตาม ระบบการขายหน้าร้าน (Point of Sale: POS) แบบดั้งเดิมยังคงมีข้อจำกัดด้านความยืดหยุ่นในการใช้งาน เนื่องจากมักเป็นระบบที่ต้องติดตั้งภายในสถานประกอบการ (On-premise) ส่งผลให้การปรับปรุงข้อมูลและการเข้าถึงข้อมูลไม่สามารถดำเนินการได้แบบเรียลไทม์ อีกทั้งยังมีต้นทุนในการบำรุงรักษาและดูแลระบบค่อนข้างสูง ซึ่งอาจไม่เหมาะสมกับธุรกิจขนาดเล็กและขนาดกลาง ในบริบทของเศรษฐกิจดิจิทัลในปัจจุบัน จากแนวโน้มความต้องการของผู้ประกอบการร้านค้าในยุคปัจจุบันที่มุ่งเน้นระบบที่สามารถใช้งานได้สะดวก เข้าถึงได้ทุกที่ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต รองรับการทำงานบนอุปกรณ์ที่หลากหลาย และมีต้นทุนการดำเนินงานที่เหมาะสม ส่งผลให้การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันสำหรับระบบร้านค้าดิจิทัล (Point of Sale: POS) ได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ระบบดังกล่าวสามารถสนับสนุนการบริหารจัดการข้อมูลสินค้า การบันทึกข้อมูลการขาย การจัดทำรายงานยอดขาย และการควบคุมสินค้าคงคลังได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงถือเป็นแนวทางสำคัญที่สอดคล้องกับความต้องการของธุรกิจในยุคดิจิทัล และช่วยเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันของผู้ประกอบการในระยะยาว โดยระบบมีวัตถุประสงค์ดังนี้

- เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบขายสินค้า
- เพื่อช่วยให้การคำนวณราคาในการขายสินค้าได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว

- เพื่อช่วยแก้ไขปัญหาความผิดพลาดที่เกิดขึ้นโดยพนักงาน
- เพื่อนำไปใช้ในขายสินค้าและออกใบกำกับภาษีภายในบริษัท

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 UX (User Experience) และUI (User Interface)

User Experience (UX) หมายถึงประสบการณ์โดยรวมที่ผู้ใช้ได้รับเมื่อใช้งานผลิตภัณฑ์หรือบริการต่าง ๆ ซึ่งรวมถึงการใช้งานเว็บไซต์ แอปพลิเคชัน หรือระบบต่าง ๆ โดยหลักการและแนวคิดของ UX สามารถแบ่งออกได้เป็นหลายด้าน ดังนี้

- Usability การใช้งานที่ง่ายและไม่ซับซ้อน
- interaction Design การออกแบบการตอบสนองต่อการใช้งาน
- Accessibility การเข้าถึงได้อย่างไม่มีอุปสรรค มีสีที่สามารถมองเห็นได้ชัดเจน

UI (User Interface) เป็นส่วนสำคัญของโครงงานที่มุ่งเน้นการสร้างหน้าตาและความรู้สึกที่ดีให้กับผู้ใช้ โดยการออกแบบ UI ที่ดีจะช่วยให้ผู้ใช้สามารถเข้าถึงฟังก์ชันต่าง ๆ ได้อย่างง่าย และสร้างประสบการณ์การใช้งานที่ราบรื่น หลักการออกแบบ UI ดังนี้

- ความสอดคล้อง (Consistency) ใช้รูปแบบ, สี, ฟอนต์, และสัญลักษณ์เดียวกันทั่วทั้งเว็บไซต์ เพื่อสร้างความคุ้นเคยให้กับผู้ใช้
- การตอบสนอง (Responsiveness) ออกแบบให้สามารถใช้งานได้ดีทั้งบนอุปกรณ์คอมพิวเตอร์

2.2 ระบบจำหน่ายสินค้าหน้าร้าน POS

ระบบจำหน่ายสินค้าหน้าร้าน (Point of Sale: POS) คือ ระบบสารสนเทศที่ใช้สำหรับบันทึกและจัดการข้อมูลการขายสินค้าและบริการ ณ จุดขาย โดยทำหน้าที่ช่วยให้การทำธุรกรรมระหว่างผู้ขายและผู้ซื้อเป็นไปอย่างรวดเร็ว ถูกต้อง และมีประสิทธิภาพ รวมถึงสามารถจัดเก็บข้อมูลเพื่อใช้ในการวิเคราะห์และบริหารจัดการธุรกิจในอนาคต

ระบบ POS มักประกอบด้วยทั้ง ฮาร์ดแวร์ (Hardware) เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ เครื่องพิมพ์ใบเสร็จ เครื่องสแกนบาร์โค้ด และซอฟต์แวร์ (Software) ที่ใช้สำหรับจัดการข้อมูลสินค้า การขาย และรายงานต่าง ๆ

2.3 ทฤษฎีเว็บแอปพลิเคชัน (Web Application)

เว็บแอปพลิเคชัน (Web Application) หมายถึง โปรแกรมประยุกต์ที่พัฒนาขึ้นเพื่อให้สามารถเข้าถึงและใช้งานผ่านโปรแกรมเว็บเบราว์เซอร์ โดยอาศัยเครือข่ายคอมพิวเตอร์ เช่น อินเทอร์เน็ต หรืออินทราเน็ต เป็นสื่อกลางในการรับส่งข้อมูลและการประมวลผลข้อมูลภายในระบบ ในทางวิศวกรรมซอฟต์แวร์ เว็บแอปพลิเคชันถือเป็นรูปแบบหนึ่งของระบบสารสนเทศที่ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงข้อมูลและบริการต่าง ๆ ได้อย่างสะดวก โดยไม่จำเป็นต้องติดตั้งโปรแกรมเพิ่มเติมบนอุปกรณ์ของผู้ใช้ ลักษณะสำคัญของเว็บแอปพลิเคชัน คือ การทำงานบนเครือข่ายแบบออนไลน์ ซึ่งสามารถรองรับการไหลเวียนของข้อมูลได้ทั้งในระดับเครือข่ายภายในองค์กร (Local Area Network: LAN) และเครือข่ายภายนอกผ่านอินเทอร์เน็ต (Global Network) ส่งผลให้ระบบสามารถจัดการข้อมูลได้แบบเรียลไทม์ (Real-Time) และเพิ่มประสิทธิภาพในการดำเนินงานขององค์กรหรือธุรกิจ

นอกจากนี้ เว็บแอปพลิเคชันยังมีข้อได้เปรียบในด้านการพัฒนาและการบำรุงรักษา เนื่องจากสามารถปรับปรุงหรืออัปเดตระบบได้จากส่วนกลาง โดยไม่จำเป็นต้องแจกจ่ายหรือติดตั้งซอฟต์แวร์ใหม่ในเครื่องของผู้ใช้งานแต่ละราย อีกทั้งยังสามารถออกแบบระบบให้สอดคล้องกับความต้องการเฉพาะของหน่วยงานหรือสถานประกอบการได้มากกว่าการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทั่วไป ซึ่งมักถูกพัฒนาในลักษณะครอบคลุมการใช้งานแบบกว้างและอาจไม่ตอบสนองต่อความต้องการเฉพาะด้านได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ อีกประการหนึ่ง เว็บแอปพลิเคชันสามารถสนับสนุนการโต้ตอบระหว่างองค์กรกับลูกค้าหรือผู้ใช้บริการได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพผ่านระบบออนไลน์

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ Wijaya และ Tanamal (2025) ได้ศึกษาและพัฒนาระบบสารสนเทศ Point of Sale (POS) บนเว็บสำหรับร้านค้า Ngadi Rejo ซึ่งประสบปัญหาการบันทึกข้อมูลสินค้าและยอดขายแบบแมนนวล ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนของข้อมูลสินค้าคงคลังและลดประสิทธิภาพในการดำเนินงานของพนักงาน งานวิจัยนี้ใช้กระบวนการวิเคราะห์ความต้องการของผู้ใช้งาน การออกแบบระบบด้วยแผนภาพการทำงาน (Flowchart) และแผนภาพความสัมพันธ์ของฐานข้อมูล (ERD) ก่อนนำระบบไปพัฒนาในรูปแบบเว็บแอปพลิเคชันโดยใช้ฐานข้อมูลร่วมกัน ผลการวิจัยพบว่าระบบสามารถเพิ่มความถูกต้องในการจัดการสินค้าคงคลัง ลดข้อผิดพลาดจากการบันทึกข้อมูลแบบเดิม และช่วยให้ผู้ประกอบการสามารถติดตามยอดขายและตรวจสอบข้อมูลสินค้าได้แบบเรียลไทม์ นอกจากนี้ ผลการประเมินประสบการณ์ผู้ใช้งาน (UMUX) ยังสะท้อนให้เห็นว่าผู้ใช้งานมีความพึงพอใจต่อระบบในระดับที่ดีอีกด้วย

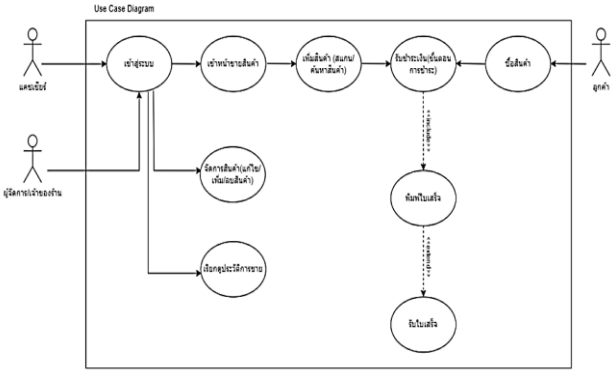
งานวิจัยของ Ramadhani, Nindyasari, และ Murti (2025) ได้พัฒนาระบบ Point of Sale บนเว็บสำหรับร้านค้าขนาดเล็ก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ไขปัญหาความคลาดเคลื่อนของข้อมูลยอดขายและสินค้าคงคลังที่เกิดจากการบันทึกข้อมูลด้วยวิธีแบบดั้งเดิม ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถรองรับการบันทึกธุรกรรมการขาย การจัดการสินค้าคงคลัง และการสร้างรายงานยอดขาย ผลการศึกษาพบว่าระบบช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดำเนินงาน ลดความผิดพลาดจากการบันทึกข้อมูล และช่วยยกระดับคุณภาพการให้บริการแก่ลูกค้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางของโครงงานนี้ที่มุ่งพัฒนาระบบร้านค้าดิจิทัลสำหรับผู้ประกอบการขนาดเล็กและขนาดกลาง

งานวิจัยของ Briliansyah และ Avianto (2024) มุ่งพัฒนาแอปพลิเคชัน Point of Sale สำหรับธุรกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (MSMEs) ในประเทศอินโดนีเซีย โดยเน้นการบูรณาการระบบชำระเงินออนไลน์ (Payment Gateway) ร่วมกับฐานข้อมูลแบบ NoSQL เพื่อเพิ่มความรวดเร็วในการประมวลผลธุรกรรมและรองรับปริมาณข้อมูลที่เพิ่มขึ้น งานวิจัยดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ไขปัญหาการจัดการยอดขาย การติดตามสินค้าคงคลัง และข้อจำกัดของระบบขายแบบดั้งเดิม ผลการวิจัยพบว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำธุรกรรม ลดความผิดพลาดในการจัดเก็บข้อมูล และเพิ่มความสะดวกในการชำระเงินให้แก่ผู้ใช้งาน ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาระบบร้านค้าดิจิทัลที่มุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารจัดการร้านค้าในยุคดิจิทัล

3. วิธีการดำเนินงาน

3.1 การออกแบบระบบและแผนผังการทำงาน

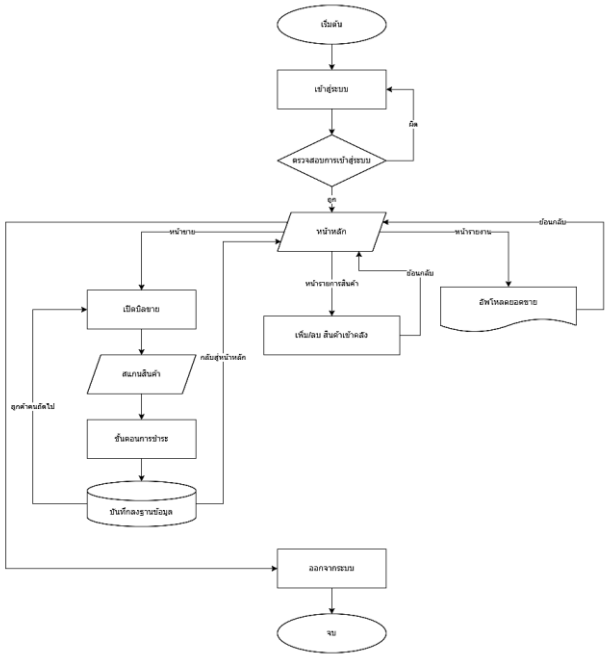
การออกแบบยูสเคส (Use Case Diagram) สำหรับแสดงขั้นตอนการทำงานของผู้ใช้งาน ระบบ POS (Point of Sale) โดยแบ่งผู้ใช้งานออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ แคชเชียร์ ผู้จัดการ/เจ้าของร้าน และลูกค้า เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผู้ใช้งานกับฟังก์ชันต่าง ๆ ภายในระบบ



รูปที่ 1 ยูสเคส (Use Case Diagram)

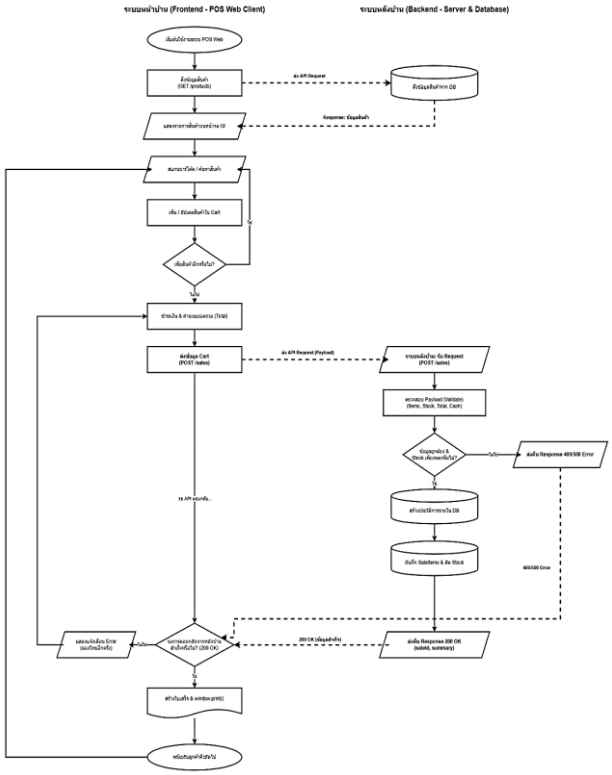
จากรูปที่ 1 อธิบายได้ว่า เมื่อผู้ใช้งานต้องการเข้าใช้งานระบบ จะต้องทำการเข้าสู่ระบบก่อนทุกครั้ง เพื่อยืนยันสิทธิการใช้งานและความปลอดภัยของข้อมูล ภายหลังจากเข้าสู่ระบบเรียบร้อยแล้ว แคชเชียร์สามารถเข้าไปยังหน้าจำหน่ายสินค้าเพื่อดำเนินธุรกรรมเกี่ยวกับการจำหน่ายสินค้า โดยทำการเพิ่มสินค้าเข้าสู่รายการจำหน่ายด้วยวิธีการสแกนบาร์โค้ด หรือค้นหาสินค้าในระบบ เมื่อเพิ่มสินค้าครบถ้วนแล้วจึงดำเนินการรับชำระเงินจากลูกค้า

สำหรับการออกแบบแผนผังแสดงขั้นตอนการทำงาน (Flow Chart) ของระบบ เพื่อให้การทำงานเป็นไปอย่างมีแบบแผนกระบวนการขั้นตอนอย่างเป็นระบบในการจัดทำโครงงานดังแสดงในรูปที่ 2



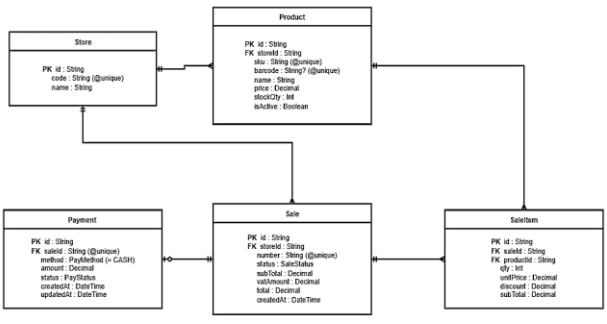
รูปที่ 2 ผังงาน (Flow Chart) ของระบบ

อัลกอริทึมของ Backend – Server & Database ขั้นตอนการทำงานของระบบ POS ทำงานร่วมกันระหว่าง Frontend และ Backend ผ่าน API Frontend รับการเลือกสินค้าและส่งข้อมูลการขาย ส่วน Backend ตรวจสอบความถูกต้อง บันทึกข้อมูล ตัดสต๊อก และส่งผลลัพธ์กลับเพื่อออกใบเสร็จหรือแจ้งข้อผิดพลาด ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 อัลกอริทึมของ Backend – Server & Database

สำหรับการออกแบบแผนภาพความสัมพันธ์ของข้อมูล (Entity Relationship Diagram: ERD) แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แผนภาพความสัมพันธ์ข้อมูล (Entity Relationship Diagram: ERD)

3.2 การพัฒนาระบบ

โครงงานนี้ได้พัฒนาระบบด้วยเทคโนโลยีสมัยใหม่หลากหลาย เช่น HTML, CSS, JavaScript และฐานข้อมูล (Prisma ORM) ในการสร้างระบบให้ประกอบด้วยฟังก์ชันการทำงานที่ครอบคลุมทั้งส่วนของ Frontend และ Backend โดยระบบ POS นี้ถูกออกแบบมาให้ทำงานผ่านเว็บเบราว์เซอร์เพื่อให้เข้าถึงได้จากทุกอุปกรณ์ โดยพัฒนาฟังก์ชันดังนี้

1. Frontend (หน้าจอพนักงานขาย): ใช้สำหรับบันทึกการขายสินค้าและคิดเงินลูกค้า มีระบบค้นหาสินค้าที่รวดเร็ว ทั้งจากการพิมพ์หรือใช้เครื่องอ่านบาร์โค้ด จัดการการรับชำระเงินและออกใบเสร็จรับเงินหรือใบกำกับภาษีได้ทันที

2. Backend (ระบบหลังบ้านสำหรับเจ้าของร้าน):

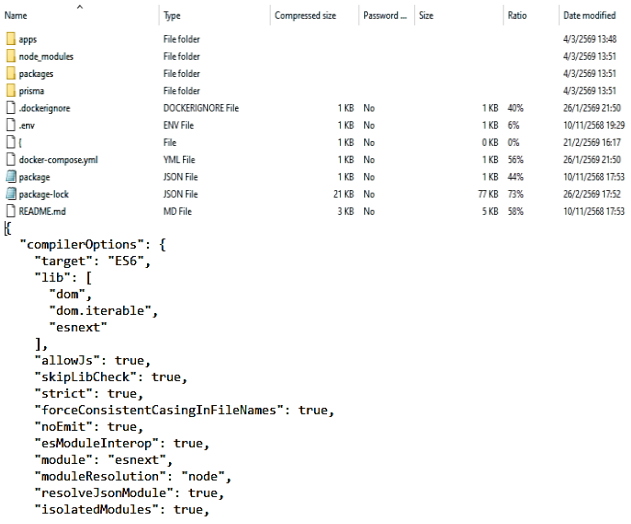
1) จัดการข้อมูลสินค้า: เพิ่ม แก้ไข หรือลบรายการสินค้า (รวมถึงการนำเข้าข้อมูลผ่านไฟล์ Excel)

2) จัดการสต็อก: ระบบจะหักจำนวนสินค้าอัตโนมัติเมื่อมีการขาย และมีฟังก์ชันรับสินค้าเข้าคลัง

3) รายงานและวิเคราะห์: แสดงรายงานยอดขายรายวัน รายสัปดาห์ หรือตามช่วงเวลาที่กำหนด และรายงานการเคลื่อนไหวสินค้า (Stock Card)

4) การตั้งค่าระบบ: ตั้งค่ารูปแบบใบเสร็จ ข้อความหัวเรื่อง และการเชื่อมต่อเครื่องพิมพ์

หลังจากพัฒนาจะได้ไฟล์ระบบและโค้ดตัวอย่างดังรูปที่ 5



Name	Type	Compressed size	Password ...	Size	Ratio	Date modified
apps	File folder					4/3/2569 13:48
node_modules	File folder					4/3/2569 13:51
packages	File folder					4/3/2569 13:51
prisma	File folder					4/3/2569 13:51
.dockerignore	DOCKERIGNORE File	1 KB	No	1 KB	40%	26/1/2569 21:50
.env	ENV File	1 KB	No	1 KB	6%	10/11/2568 19:29
{	File	1 KB	No	0 KB	0%	21/2/2569 16:17
docker-compose.yml	YML File	1 KB	No	1 KB	56%	26/1/2569 21:50
package	JSON File	1 KB	No	1 KB	44%	10/11/2568 17:53
package-lock	JSON File	21 KB	No	77 KB	73%	26/2/2569 17:52
README.md	MD File	3 KB	No	5 KB	58%	10/11/2568 17:53

```
{
  "compilerOptions": {
    "target": "ES6",
    "lib": [
      "dom",
      "dom.iterable",
      "esnext"
    ],
    "allowJs": true,
    "skipLibCheck": true,
    "strict": true,
    "forceConsistentCasingInFileNames": true,
    "noEmit": true,
    "esModuleInterop": true,
    "module": "esnext",
    "moduleResolution": "node",
    "resolveJsonModule": true,
    "isolatedModules": true,
```

รูปที่ 5 ไฟล์ระบบและโค้ดตัวอย่าง

4. ผลการดำเนินงาน

ผลลัพธ์จากการดำเนินการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันระบบร้านค้าดิจิทัล (POS) ตลอดจนผลการประเมินประสิทธิภาพและความพึงพอใจของระบบจากกลุ่มผู้ใช้งาน เพื่อตรวจสอบว่าระบบสามารถทำงานได้บรรลุตามวัตถุประสงค์และขอบเขตโครงงาน ภาพรวมระบบดังรูปที่ 6

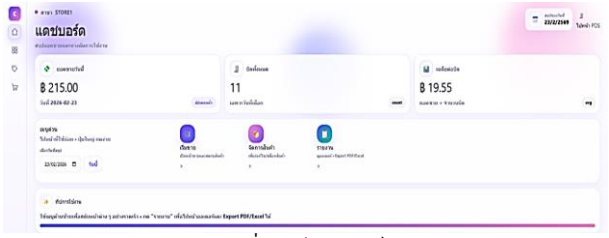


รูปที่ 6 ภาพรวมของระบบ

4.1 ผลลัพธ์ตัวระบบ

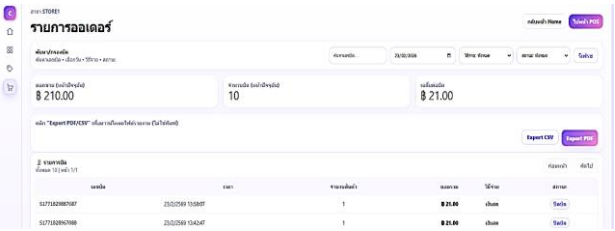
ส่วนแรกของระบบคือหน้าล็อกอิน (Login Screen) ที่กำหนดสิทธิการเข้าถึงข้อมูลของผู้ใช้ ด้วยกลไกการพิสูจน์ตัวตนผ่านฐานข้อมูลผู้ใช้ที่จัดการด้วย Prisma ORM ทำให้มีความมั่นคงปลอดภัยสูง แคชเชียร์สามารถเข้าสู่ระบบเพื่อดำเนินการขายได้ทันที ในขณะที่ผู้จัดการสามารถใช้บัญชีระดับผู้ดูแลเพื่อเข้าถึงรายงานทางการเงินเชิงลึกได้

แดชบอร์ดสรุปข้อมูล (Dashboard and Analytics) เมื่อเข้าสู่ระบบในฐานะผู้ดูแล หน้าจอหลัก (Dashboard) จะแสดงรายงานสรุปข้อมูลที่มีความสำคัญต่อการตัดสินใจทางธุรกิจแบบภาพรวม โดยมีการดึงข้อมูลเชิงสถิติจากฐานข้อมูลมาแสดงผลในรูปแบบกราฟ (Data Visualization) เช่น สรุปยอดขายรวมประจำวัน จำนวนบิลทั้งหมดที่ถูกทำรายการ และการแจ้งเตือนระดับสินค้าคงคลังที่ต่ำกว่าเกณฑ์ (Low Stock Alerts) เพื่อป้องกันการเสียโอกาสในการขาย ดังรูปที่ 7



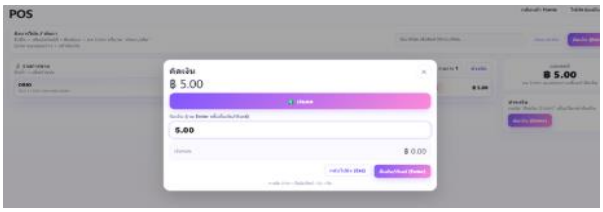
รูปที่ 7 หน้าแดชบอร์ด

หน้ารายการออเดอร์ของระบบ POS ใช้สำหรับแสดงข้อมูลคำสั่งซื้อทั้งหมดของร้านค้า โดยมีการสรุปยอดขายรวม จำนวนออเดอร์ และยอดเฉลี่ยต่อรายการ พร้อมทั้งแสดงรายละเอียดแต่ละออเดอร์ในรูปแบบตาราง สามารถค้นหา กรองข้อมูล และส่งออกรายงานได้ ช่วยให้ผู้ใช้ตรวจสอบยอดขายและติดตามสถานะคำสั่งซื้อได้สะดวกดังรูปที่ 8



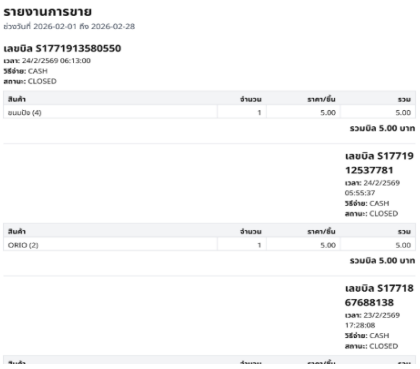
รูปที่ 8 หน้ารายการออเดอร์

หน้าจอรับเงินจากลูกค้าในระบบ POS พอเราขายของเสร็จแล้วกดปุ่มคิดเงิน ระบบจะเด้งหน้าต่างนี้ขึ้นมา ด้านบนจะแสดงว่า ลูกค้าต้องจ่ายเท่าไหร่ เช่น 8.50 บาท ข้างล่างเป็นช่องให้เรา พิมพ์จำนวนเงินที่ลูกค้าจ่ายจริง เช่น ลูกค้าจ่าย 10 บาท พอกดยืนยัน ระบบจะคำนวณเงินทอนและบันทึกยอดขาย ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 หน้าจอชำระเงิน

หน้าจอสรุปยอดขายรายเดือนซึ่งแสดงรายละเอียดชื่อสินค้า จำนวน และยอดรวม ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 หน้ายอดขายรายเดือน

4.2 ผลการทดสอบระบบ

จากการทดสอบการทำงานของระบบเว็บแอปพลิเคชันร้านค้าดิจิทัล (POS) ในส่วนต่าง ๆ คณะผู้จัดทำสรุปผลการดำเนินงานได้ดังนี้:

4.2.1 การจัดการข้อมูลสินค้าและสต็อก

1) การเพิ่มและนำเข้าข้อมูล: ระบบสามารถบันทึกสินค้าใหม่ได้ทั้งแบบกรอกทีละรายการและแบบนำเข้าไฟล์ Excel (Bulk Import) โดยรองรับข้อมูลสำคัญ เช่น รหัสบาร์โค้ด ต้นทุน ราคาขาย และจุดสั่งซื้อ

2) การจัดการหมายเลขซีเรียล: สามารถบันทึกและติดตามหมายเลขซีเรียล (Serial Number) ของสินค้าแต่ละชิ้นได้ เพื่อใช้ในการตรวจสอบประวัติการขายย้อนหลัง

3) ระบบสต็อกสินค้า: ระบบทำการตัดสต็อกแบบเรียลไทม์ทันทีเมื่อมีการขาย และมีระบบรายงานเคลื่อนไหวสินค้า (Stock Card) เพื่อตรวจสอบความถูกต้อง

4.2.2 การบันทึกยอดขายและการคิดเงิน

1) ความแม่นยำในการคำนวณ: ระบบคำนวณราคาสินค้าและยอดชำระเงินได้อย่างถูกต้อง รวดเร็ว ช่วยลดความผิดพลาดที่อาจเกิดจากตัวบุคคล

2) การค้นหาสินค้า: รองรับการใช้งานร่วมกับเครื่องอ่านบาร์โค้ด ทำให้การบันทึกรายการขาย ณ จุดขายมีความคล่องตัวสูง

4.2.3 การออกเอกสารและบาร์โค้ด

1) การพิมพ์ใบเสร็จ: สามารถตั้งค่าและพิมพ์ใบเสร็จผ่านเครื่องพิมพ์ความร้อนขนาด 58MM และ 80MM รวมถึงรองรับการออกแบบใบกำกับภาษีและใบส่งของเองได้

2) การสร้างบาร์โค้ด: ระบบมี "Barcode Designer" ที่ช่วยให้ผู้ใช้สร้างและพิมพ์บาร์โค้ดติดตามขนาดกระดาษที่ต้องการได้

4.2.4 การรายงานและเข้าถึงข้อมูล

1) สรุปผลการขาย: สามารถแสดงรายงานยอดขายและกำไร-ขาดทุน แยกตามช่วงเวลา (วัน/เดือน) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ธุรกิจ

2) การเข้าถึงแบบคลาวด์: ระบบทำงานบนเว็บเบราว์เซอร์ ทำให้สามารถตรวจสอบข้อมูลและจัดการร้านค้าได้จากทุกที่ผ่านคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์พกพา

4.3 ผลการประเมินจากผู้ใช้

ผลประเมินความพึงพอใจการใช้งานเว็ปแอปพลิเคชันร้านค้าดิจิทัล POS โดยมีผู้ทำการประเมินความพึงพอใจในการใช้จำนวน 10 คน ซึ่งทำการประเมินผ่านระบบออนไลน์ Google forms โดยแบ่งเป็น 3 หมวด ด้วยเกณฑ์การแปลผลคะแนนเฉลี่ย 4.51-5.00 = มากที่สุด, 3.51-4.50 = มาก, 2.51-3.50 = ปานกลาง, 1.51-2.50 = น้อย) พบว่ามีผลคะแนนประเมินความพึงพอใจดังแสดงในตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 1 ผลการประเมินหมวดที่ 1 ด้านการทำงานของระบบ

หัวข้อการประเมิน	ค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$)	S.D.	ระดับความพึงพอใจ
1. ความถูกต้องในการจัดการข้อมูลขาย	4.40	0.55	มาก
2. ความรวดเร็วในการประมวลผล	3.60	0.55	มาก
3. ความถูกต้องในการคำนวณยอดเงิน	3.60	0.55	มาก
4. ประสิทธิภาพในการจัดสต๊อกสินค้า	4.20	0.84	มาก
5. ความเสถียรและความปลอดภัยของระบบ	4.20	0.84	มาก
6. ระบบสามารถแสดงผลข้อมูลการขายได้ถูกต้อง	4.40	0.89	มาก
ค่าเฉลี่ยรวมหมวดที่ 1	**4.07**	**0.70**	**มาก**

ตารางที่ 2 ผลการประเมินหมวดที่ 2 ด้านประโยชน์ของโครงการ

หัวข้อการประเมิน	ค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$)	S.D.	ระดับความพึงพอใจ
7. ระบบร้านค้า POS ช่วยให้การขายและคิดเงินรวดเร็ว	4.00	1.22	มาก
8. ระบบ POS ช่วยลดความผิดพลาดในการคำนวณข้อมูล	3.60	0.89	มาก
9. ระบบช่วยให้บริหารจัดการร้านค้าและสต๊อกได้ง่ายขึ้น	3.80	1.10	มาก
ค่าเฉลี่ยรวมหมวดที่ 2	**3.80**	**1.07**	**มาก**

ตารางที่ 3 ผลการประเมินหมวดที่ 3 ความพึงพอใจโดยรวม

หัวข้อการประเมิน	ค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$)	S.D.	ระดับความพึงพอใจ
10. ความพึงพอใจต่อความสะดวกในการใช้งานระบบ POS	4.25	0.81	มาก
11. ความพึงพอใจต่อความรวดเร็วในการทำงานของระบบ	3.80	0.75	มาก
12. โดยรวมแล้วท่านมีความพึงพอใจต่อระบบ POS ในภาพรวม	4.50	0.67	มาก
ค่าเฉลี่ยรวมหมวดที่ 3	**4.18**	**0.73**	**มาก**

จากตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่ากลุ่มตัวอย่างมีความพึงพอใจต่อการทำงานของระบบในระดับ "มาก" (4.07) โดยหัวข้อที่ได้รับคะแนนความพึงพอใจสูงสุดคือ “ความถูกต้องในการจัดการข้อมูลการขาย” และ

หัวข้อ “ระบบสามารถแสดงผลข้อมูลการขายได้ถูกต้อง” (4.40) คะแนนในส่วนของค่า S.D. ที่ค่อนข้างต่ำ (0.70) สะท้อนให้เห็นว่า ผู้ใช้งานมีความเห็นพ้องต้องกันในประเด็นความพึงพอใจต่อการทำงานของระบบ

จากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่ากลุ่มตัวอย่างมีความพึงพอใจต่อประโยชน์ของโครงการในระดับ "มาก" (3.80) โดยหัวข้อที่ได้รับคะแนนความพึงพอใจสูงสุดคือ “ระบบร้านค้า POS ช่วยให้การขายและคิดเงินรวดเร็วขึ้น” (4.00) อย่างไรก็ตามคะแนนในส่วนของค่า S.D. ที่ค่อนข้างสูง (1.07) สะท้อนให้เห็นว่า ผู้ใช้งานมีความเห็นไม่สอดคล้องกันในบางประเด็นของความพึงพอใจต่อประโยชน์ของโครงการ

จากตารางที่ 3 หมวด พบว่ากลุ่มตัวอย่างมีความพึงพอใจโดยรวมอยู่ในเกณฑ์ "มาก" โดยหัวข้อที่ได้รับคะแนนสูงสุดคือ “โดยรวมแล้วท่านมีความพึงพอใจต่อระบบ POS ในภาพรวม” (4.50) คะแนนในส่วนของค่า S.D. ที่ค่อนข้างต่ำ (0.73) สะท้อนให้เห็นว่า ผู้ใช้งานมีความเห็นพ้องต้องกันในประเด็นความพึงพอใจในภาพรวมของระบบ

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

การพัฒนาโครงงานเว็บแอปพลิเคชันระบบร้านค้าดิจิทัล (Point of Sale: POS) ในครั้งนี้ เป็นการประยุกต์ใช้ความรู้ด้านวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศเพื่อแก้ไขปัญหาในการดำเนินงานจริงของธุรกิจร้านค้า โดยมุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการกระบวนการขายและลดข้อจำกัดของการดำเนินงานในรูปแบบเดิม บทนี้นำเสนอการสรุปผลการดำเนินงานของระบบ รวมถึงการวิเคราะห์ข้อจำกัดที่พบจากการพัฒนา และแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนาระบบในอนาคต

จากผลการประเมินประสิทธิภาพของระบบ พบว่าค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสะท้อนให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพในการใช้งาน และสามารถทดแทนกระบวนการดำเนินงานแบบดั้งเดิมได้อย่างเหมาะสม นอกจากนี้ ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานโดยรวมอยู่ในระดับ มาก ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการยอมรับระบบในด้านการใช้งานจริง ผู้ใช้งานมีความคิดเห็นว่าระบบสามารถช่วยลดความผิดพลาดในการคำนวณรายการชำระเงิน เพิ่มความสะดวกในการบริหารจัดการสินค้าคงคลัง และสนับสนุนการจัดทำรายงานทางบัญชีและภาษีได้อย่างเป็นระบบและชัดเจนมากยิ่งขึ้น ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพของระบบในการสนับสนุนการดำเนินงานของธุรกิจร้านค้าในยุคดิจิทัลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.2 ปัญหา ข้อจำกัด และข้อเสนอแนะ

แม้ว่าระบบเว็บแอปพลิเคชันร้านค้าดิจิทัล (Point of Sale: POS) ที่พัฒนาขึ้นจะสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพและได้รับผลการประเมินในเชิงบวก แต่ยังพบข้อจำกัดบางประการในการใช้งานจริง ได้แก่ ปัญหาความล่าช้าของระบบเมื่อใช้งานบนอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพต่ำ ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบและการจัดการฐานข้อมูลให้เหมาะสมมากขึ้น ปัญหาการพึ่งพาเครือข่ายอินเทอร์เน็ตซึ่งอาจส่งผลต่อความต่อเนื่องในการใช้งาน สามารถแก้ไขได้โดยการพัฒนาระบบสำรองข้อมูลหรือรองรับการทำงานในกรณีออฟไลน์ชั่วคราว นอกจากนี้ ยังพบข้อผิดพลาดจากการป้อนข้อมูลของผู้ใช้งาน ซึ่งควรแก้ไขด้วยการเพิ่มระบบตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลก่อนบันทึก

ในด้านความปลอดภัย ควรเพิ่มมาตรการป้องกันข้อมูล เช่น ระบบยืนยันตัวตน การกำหนดสิทธิ์ผู้ใช้งาน และการเข้ารหัสข้อมูล ขณะเดียวกัน ควรปรับปรุงส่วนติดต่อผู้ใช้ให้มีความเรียบง่ายและสะดวกต่อการใช้งาน พร้อมจัดทำคู่มือหรือการอบรมสำหรับผู้ใช้งานที่มีทักษะด้านเทคโนโลยีจำกัด นอกจากนี้ ระบบควรได้รับการพัฒนาให้รองรับอุปกรณ์เสริม เช่น เครื่องอ่านบาร์โค้ดและเครื่องพิมพ์ใบเสร็จ ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เพื่อเพิ่มความสะดวกและความต่อเนื่องในการดำเนินงานของร้านค้าในอนาคต

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณการสนับสนุนจากสาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร เป็นอย่างสูง สำหรับโครงการและการนำเสนอบทความวิชาการในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] ระบบขายหน้าร้าน POS. สืบค้นจาก https://www.onepointofsale.com/document เมื่อ 1 พฤษภาคม 2568

[2] ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร. (ม.ป.ป.). แบบสอบถามความพึงพอใจของผู้ใช้งานเว็บไซต์. SurveyCan. สืบค้นจาก https://www.surveycan.com/survey/8a67a5d2-cf35-48c8-bafc-92fd136e2175 เมื่อ 1 พฤษภาคม 2568

[3] Briliansyah, I., & Avianto, D. (2024). Point of sale application for MSMEs in Indonesia with payment gateway integration and NoSQL-based. International Journal of Innovative Research in Engineering and Management (IJIREM), 11(6), 138–150.

[4] Likert, R. (1932). A technique for the measurement of attitudes. Archives of Psychology, 22(140), 1–55.

[5] Prisma ORM. สืบค้นจาก https://medium.com/@mpmekita/prisma-orm-89f689fdc9a5 เมื่อ 10 สิงหาคม 2568

[6] Ramadhani, I., Nindyasari, R., & Murti, A. C. (2025). Design and development of a web-based point of sale system for small-scale retail management. bit-Tech, 8(1), 181–189

[7] Solutions for Point of Sale (POS) and Retail สืบค้นจาก https://www.avesta.co.th/article/solutions-for-point-of-sale-pos-and-retail/ เมื่อ 1 พฤษภาคม 2568

[8] Staiano, F. (2022). Designing and prototyping interfaces with Figma: Learn essential UX/UI design principles by creating interactive prototypes for mobile, tablet, and desktop. Packt Publishing.

[9] Web Application. สืบค้นจาก https://www.dailytech.in.th/web-application เมื่อ 10 สิงหาคม 2568

[10] Wijaya, Y., & Tanamal, R. (2025). Design and development of a web-based point of sale (POS) information system for Ngadi Rejo Store. SISFORMA: Journal of Information Systems, 12(1), 1–10.

บทความวิจัย

เครื่องมือและแม่พิมพ์

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การศึกษาค่าความร้อนที่เหมาะสมของแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปชิ้นงานแผ่นรองแก้วด้วยฝาขวดพลาสติกชนิด HDPE

The study of the temperature of the mold for extruding glass plastic bottle caps HDPE.

จักรกฤษณ์ ยิ้มแฉ่ง [1*] วาสนา พรหมศร[1] ทศพล ชูฮร้อย[1] ประเสริฐ ชุมปัญญา[1] วีระเดช จองสุรียภาส[2] และธวัชชัย ชาติตำนาญ[1]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องมือและแม่พิมพ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

[2]สาขาช่างไฟฟ้า วิทยาลัยเทคนิคเชียงราย

E-mail: jakkrit.y@rmutp.ac.th[1*]

บทคัดย่อ

การศึกษาค่าความร้อนที่เหมาะสมของแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปชิ้นงานแผ่นรองแก้วด้วยฝาขวดพลาสติกชนิด HDPE โดยออกแบบสร้างแม่พิมพ์โลหะขึ้นรูปแบบอัดชิ้นงานแผ่นรองแก้ว วิเคราะห์ปัญหากระบวนการอัดขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องอัดความร้อน ออกแบบแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปชิ้นงาน ออกแบบชิ้นงานการอัดที่ความหนาขนาด 6 มิลลิเมตร กระบวนการขึ้นรูปจริงมักใช้อุณหภูมิสูงกว่าเพื่อให้พลาสติกไหลตัวได้ดีที่อุณหภูมิเท่ากัน การเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมช่วยลดความเค้นภายในและทำให้แผ่นรองแก้วมีผิวสัมผัสที่สวยงาม อุณหภูมิส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเล็กน้อย ไม่เกิดการไหม้ ผลการวิจัยสมรรถนะแม่พิมพ์อัดฝาขวดพลาสติกใช้แล้ว จำนวน 4 ชุดการทดลอง จำนวนชุดละ 25 ชิ้น ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิความร้อนที่160 อาศาเซลเซียส เวลาในการอัดชิ้นงาน 120 วินาที เหมาะสมที่สุดชิ้นงานมีความสมบูรณ์เฉลี่ยคิดเป็น 95.00 เปอร์เซ็น

คำสำคัญ : พลาสติก; ความร้อน; แม่พิมพ์

Abstract

This study investigated the optimal heat treatment for compression molding of coasters using HDPE plastic bottle caps. Problems with the compression molding process using a heat press were analyzed. The mold was designed for compression molding, and the coasters were designed with a thickness of 6 millimeters. Selecting the appropriate temperature helps reduce internal stress and results in a more aesthetically pleasing coaster surface. Temperature has a minimal effect on the physical characteristics of the finished product and does not cause burning. Research results showed that four sets of compression molds, each containing 25 coasters, were tested. The optimal heat treatment, at 160 degrees Celsius and a compression time of 120 seconds, resulted in an average coaster completion rate of 95.00%.

Keywords: Plastic; Heat ; mold

1. ที่มาและความสำคัญของปัญหา

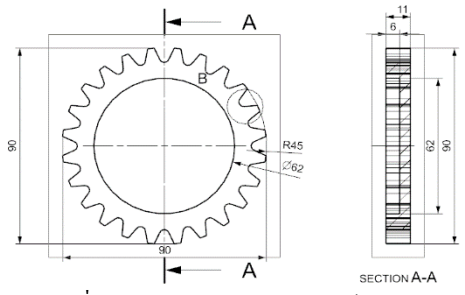
จากสภาพปัญหาสิ่งแวดล้อมปัจจุบัน ขยะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและส่งผลให้เกิดปัญหาภาวะโลกร้อน ปัจจุบันประเทศไทยประสบปัญหาหลายด้าน วิธีแก้ไขขยะพลาสติก ด้วยกลไกล (Reuse Reduce และ Recycle) เป็นการปรับนำทรัพยากรไปใช้อย่างคุ้มค่าและเกิดประโยชน์สูงสุดด้วยการนำวัสดุเหลือทิ้งหรือขยะมาผ่านกระบวนการออกแบบเพื่อสร้างเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่เปลี่ยนจากวัสดุเหลือทิ้งให้เป็นสินค้านำไปต่อยอดเพื่อสร้างอาชีพและเสริมรายได้ อีกทั้งเป็นการส่งเสริมภาวะการมีงานทำอีกทางหนึ่ง โดยขวดบรรจุน้ำดื่มพลาสติก เป็นขยะพลาสติกจำนวนมากที่มีอยู่ ในทุกพื้นที่ มีการนำตัวขวดไปใช้ประโยชน์อย่างหลากหลาย แต่ในส่วนของฝาขวดพลาสติกซึ่งเป็นขยะพลาสติก ประเภทหนึ่งที่มีหลากสีสันสวยงาม กลับเป็นชนิดที่ขาดการจัดการที่จริงจังเหมือนกับพลาสติกชนิดอื่น ๆ แนวทางการ แก้ปัญหาโดยการนำขยะพลาสติกประเภทฝาขวดน้ำพลาสติก มาทำเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการออกแบบและใช้เทคโนโลยีการขึ้นรูปประเภทแม่พิมพ์อัด (Compression Molding) ผ่านการทดลองที่สมบูรณ์ เป็นเทคนิคหนึ่งที่สามารถนำวัสดุพลาสติกมาแปรรูปให้ชิ้นงานหรือชิ้นส่วนภายในได้ โดยอาศัยแรงดันและความร้อนจากแม่พิมพ์ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวสามารถช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุพลาสติกใช้แล้ว และลดการใช้วัตถุดิบใหม่ การออกแบบแม่พิมพ์อัดให้เหมาะสมกับการใช้ฝาขวดพลาสติกใช้แล้วเป็นวัตถุดิบยังคงเป็นประเด็นที่ต้องมีการศึกษา ทั้งในด้านโครงสร้างแม่พิมพ์ รูปทรงโพรงแม่พิมพ์ การกระจายแรงดันและความร้อน รวมถึงการไหลตัวของวัสดุ

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการออกแบบและพัฒนาแม่พิมพ์สำหรับกระบวนการอัดชิ้นงานโดยใช้ฝาขวดพลาสติกใช้แล้วเป็นวัตถุดิบ เพื่อให้สามารถนำวัสดุเหลือใช้กลับมาใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดปริมาณขยะพลาสติก และสนับสนุนแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) ตลอดจนเป็นแนวทางในการพัฒนาเทคโนโลยีการรีไซเคิลพลาสติกต่อไป

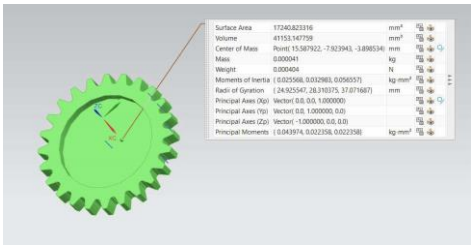
2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 การออกแบบชิ้นงาน

ศึกษาการใช้งานและกำหนดขนาดของผลิตภัณฑ์แผ่นรองแก้วจากฝาขวดพลาสติก ชนิด HDPE ทางคณะผู้วิจัยได้ออกแบบให้ชิ้นงานภาชนะมีขนาดพอเหมาะกับขนาดแก้วน้ำในปัจจุบันรูปทรงฟันเฟืองความกว้าง 90 เซนติเมตร หนา 6 มิลลิเมตร ซึ่งไม่เล็ก และไม่ใหญ่จนเกินไปตามสมมุติฐาน



รูปที่ 1 ขนาดของภาชนะแผ่นรองแก้ว (หน่วย:mm)



รูปที่ 2 แบบจำลองแผ่นรองแก้ว

ชิ้นงานตัวอย่างมีปริมาตร = 41153.147759 / 1000 = 41.153 cm^3

การหาน้ำหนักจากปริมาตรชิ้นงาน

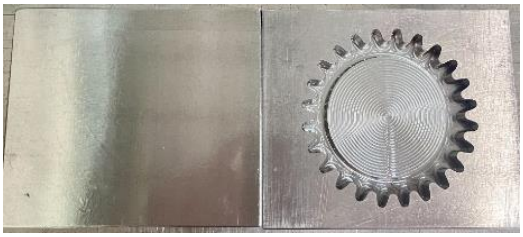
ปริมาตร = 41.153 cm^3 , พลาสติกความหนาแน่น 0.944 g/cm^3

น้ำหนัก (กรัม)=ปริมาตร (cm^3)×ความหนาแน่น (g/cm^3)

= 41.153 x 0.944 = 38.848 g

2.2 ออกแบบแม่พิมพ์และสร้างแม่พิมพ์

ในการผลิตแม่พิมพ์จำเป็นต้องเลือกวัสดุที่นำความร้อนได้ดี ออกแบบแม่พิมพ์อัดด้วยโปรแกรม Nx โดยออกแบบด้วยโครงสร้างของแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปร้อน กำหนดในการผลิตแม่พิมพ์ด้วยวัสดุ อลูมิเนียมเกรด 5 AL5083 ผลิตแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปโดยออกแบบด้วยโปรแกรม Nx โดยขึ้นรูปด้วยเครื่องกัด CNC



รูปที่ 3 ออกแบบแม่พิมพ์ส่วนล่าง

2.3 ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงาน

ทดสอบการขึ้นรูปภาชนะแผ่นรองแก้วด้วยเครื่องอัดขนาด 50 ตัน ทำการ Preheat เครื่องอัด ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเวลา 30 นาที ในขั้นตอนนี้ต้องเตรียมฝาขวดพลาสติกที่ทำความสะอาดแล้ว นำมาชั่งตามน้ำหนักที่คำนวณได้



รูปที่ 4 Preheat เครื่องอัดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที



รูปที่ 5 ชุดควบคุมอุณหภูมิความร้อน และเวลาที่จะใช้ในการอัด



รูปที่ 6 ชั่งฝาขาดพลาสติกนำใส่ในแม่พิมพ์



รูปที่ 7 นำแม่พิมพ์เข้าเครื่องอัด

3. ผลการทดสอบ

จากงานวิจัยที่ผ่านมาการการหลอมละลายฝาขวดพลาสติก (HDPE) (มาตราฐานจุดหลอมละลาย 120-130 องศาเซลเซียส) ผู้วิจัยทำตั้งสมมุติฐานอุณหภูมิเครื่องอัดที่ความร้อน 130 องศาเซลเซียส ถึง 160 องศาเซลเซียส (สล้าง อุดมกิจมงคล, 2557) ตามลำดับและใช้ช่วงเวลาตามสมมุติฐาน 120 วินาที เพื่อหาตัวแปรการใช้อุณหภูมิที่เหมาะสม

ตารางที่ 1 ผลการเปรียบเทียบช่วงอุณหภูมิ

ช่วงอุณหภูมิ	รูปชิ้นงาน	ผลที่ได้
130 องศาเซลเซียล		พลาสติกไหลตัวไม่ทั่วแม่พิมพ์ ทำให้ชิ้นงานมีขอบไม่คมชัด หรือมีรอยขุ่นมัวและฟองอากาศ
140 องศาเซลเซียล		พลาสติกไหลตัวไม่ทั่วแม่พิมพ์ ทำให้ชิ้นงานมีขอบไม่คมชัด มีรอยและฟองอากาศ
150 องศาเซลเซียล		ชิ้นงานมีความหนาเหมาะสม แข็งแรง ขึ้นลายชัดเจน มีสีเข้ม
160 องศาเซลเซียล		พลาสติกไหลตัวดี ขึ้นลายชัดเจน มีสีสม่ำเสมอ

จากการทดสอบค่าความร้อนที่เหมาะสมของแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปชิ้นงานแผ่นรองแก้วด้วยฝาขวดพลาสติกชนิด HDPE พบว่าช่วงอุณหภูมิความร้อนที่ต่างกัน ส่งผลให้ชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบอัดขึ้นรูปที่ 130 องศาเซลเซียล 140 องศาเซลเซียล 150 องศาเซลเซียล และ 160 องศาเซลเซียล เวลาการอัด 120 วินาที/ชิ้น นั้นชิ้นงาน ผิวเรียบไม่สม่ำเสมอแตกต่างกัน และเกิดฟองอากาศบริเวณขอบด้านนอก

4. สรุปผลการวิจัย

ผลการวิจัยด้านค่าความร้อนที่สามารถขึ้นรูปภาชนะรองแก้วทั้ง 4 ช่วงอุณหภูมิความร้อน มีผลต่อการขึ้นรูปอย่างไรก็ตาม ในกระบวนการขึ้นรูปจริงมักใช้อุณหภูมิสูงกว่าเพื่อให้พลาสติกไหลตัวได้ดีที่อุณหภูมิเท่ากัน การเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมช่วยลดความเค้นภายใน (Internal Stress) และทำให้แผ่นรองแก้วมีผิวสัมผัสที่สวยงาม อุณหภูมิส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเล็กน้อย ไม่เกิดการไหม้เพราะวัสดุมีคุณสมบัติทนความร้อนพอสมควร เพื่อให้พลาสติกหลอมเหลวเพียงพอที่จะขึ้นรูปเป็นที่รองแก้ว ช่วงอุณหภูมิความร้อนที่ดีที่สุด 160 องศาเซลเซียส เหมาะสมที่สุดสามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิต ได้ชิ้นงานสมบูรณ์ เฉลี่ยคิดเป็น 95.00 เปอร์เซ็น

5.เอกสารอ้างอิง

[1] การอัดขึ้นรูป.ค้นข้อมูลเมื่อ 29 มกราคม 2565,จาก https://isecosmetic.com/wiki/Extrusion

[2] สล้าง อุดมกิจมงคล. (2557). การศึกษาการขึ้นรูปเครื่องประดับจากพลาสติกรีไซเคิลปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาอัญมณีและเครื่องประดับ คณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา
วันที่ค้นข้อมูล 25 มกราคม 2569

[3] อลูมิเนียม.ค้นข้อมูลเมื่อ 5 กุมภาพันธ์ 2565,จาก http://www.trinitydynamic.com/ อลูมิเนียม

[4] สมหมาย เกษมศรี. (2561). เทคโนโลยีการอัดขึ้นรูปพลาสติก (Compression Molding Technology). กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น,

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การวิเคราะห์จุดศูนย์รวมแรงการเรียงลำดับขั้นตอนบนแผ่นป้อนในกระบวนการเจาะและตัดที่เปิดขวด

The analysis center of Pressure lay out material strip in piercing and blanking process for the bottle openers.

อัครเวช ศุภาคม[1*] สุนทร คำพินิจ กิตติพศ น้อยนิตย์ ชานน สิงหารุณ และ ซาโตมิ โมโตอุเมะ

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องมือและแม่พิมพ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800 E-mail : akrawech.s@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการวิเคราะห์จุดศูนย์รวมแรงการเรียงลำดับขั้นตอนบนแผ่นป้อนในกระบวนการเจาะและตัดที่เปิดขวด เพื่อทำความเข้าใจวิธีการสมดุลจุดศูนย์รวมแรงและประยุกต์ใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์โลหะ ดำเนินการวิจัยโดยคำนวณจุดศูนย์รวมแรงของขอบตัดที่เปิดขวด, รูเจาะ Ø 5 มม. จำนวน 1 รูและรูเจาะ Ø 6 มม. จำนวน 2 รู ตามลำดับ ต่อมาคำนวณหาตำแหน่งจุดศูนย์รวมแรง โดยกำหนดกำหนดจุดอ้างอิงที่มุมล่างซ้ายของ Lay out strip bottle opener ในแนวแกน X และแนวแกน Y สุดท้ายกำหนดตำแหน่ง X และ Y ลงในแบบแผ่นยึดแท่งกด ผลการวิจัยพบว่าแต่ละรูปมีจุดศูนย์รวมแรงเฉพาะแยกกัน เมื่อทำการสมดุลย์จุดศูนย์รวมแรงโดยอ้างอิงจากจุด P0 ได้ระยะทางแนวแกน X = 31.002 มม. และระยะทางแนวแกน Y = 45.052 มม. เมื่อประยุกต์ใช้ในการออกแบบแผ่นยึดแท่งกดเพื่อกำหนดตำแหน่งเจาะรูทำเกลียวใส่แกนจับยึดแม่พิมพ์ ซึ่งบอกขนาดออกจากกึ่งกลาง X = -10.5 มม. และ Y = 6.5 มม. ซึ่งแตกต่างจากแผ่นยึดแท่งกดที่สร้างขึ้นที่แกนจับยึดแม่พิมพ์อยู่ที่ตำแหน่ง X = 0 และ Y = 0

คำสำคัญ : จุดศูนย์รวมแรง; แผ่นยึดแท่งกด; แกนจับยึดแม่พิมพ์

Abstract

This research aims to analyze the center of pressure (COP) of the material strip layout in the piercing and blanking process for bottle openers to understand COP balancing and its application in die design. The study involved calculating the COP of the bottle opener's cutting edge, a Ø 5 mm hole, and two Ø 6 mm holes. The resultant center of pressure was determined using a reference point at the bottom-left corner of the layout in the X and Y axes, which was then mapped onto the punch holder plate. The results revealed distinct COP coordinates for each geometry. By balancing the COP relative to point P0, the coordinates were identified at X = 31.002 mm and Y = 45.052 mm. When applied to the punch holder design for positioning the shank hole, the dimensions were offset from the center at X = -10.5 mm and Y = 6.5 mm. This deviates from the conventional punch holder where the shank is typically positioned at X = 0 and Y = 0.

Keywords: center of pressure; punch holder; shank

1. บทนำ

การแปรรูปโลหะแผ่น (Stamping) การทำให้แผ่นโลหะมีรูปทรงตามต้องการ เช่น ที่เปิดขวดน้ำอัดลม การแปรรูปเริ่มจากแรมเครื่องปั๊มโลหะส่งการเคลื่อนที่และแรงผ่านแกนจับยึดแม่พิมพ์ (Shank) ซึ่งสอดอยู่ในรูที่แรม หรือผ่านแผ่นยึดแท่งกด (Punch Holder) ซึ่งยึดกับผิวหน้าแรมโดยตรง ทำให้แท่งกด (Punch) เคลื่อนที่เข้าแปรรูปแผ่นโลหะ (Strip Material) แรงต้านที่แผ่นโลหะกระทำต่อแท่งกดในจังหวะแปรรูปกับระยะทางจากแท่งกดถึงแกนจับยึดพันช์ เกิดโมเมนต์ดัด (Bending Moment) ขึ้น ถ้ามากเกินไปทำให้แรมเครื่องปั๊มกระดกหรือเอียง รางเลื่อนเครื่องปั๊มสึกหรอก่อนกำหนด หรือคุณภาพชิ้นงานไม่คงที่ ที่ผ่านมามีงานวิจัยเกี่ยวกับแม่พิมพ์ปั๊มโลหะเพื่อแก้ไขปัญหาเช่น การวิเคราะห์และการปรับปรุงกระบวนการปั๊มขึ้นรูปแหวนนอกตลับลูกปืน [1] การศึกษาค่าพารามิเตอร์มีผลต่อการดีดออกหรือดีดกลับของชิ้นงานพับตัววี [2] เซ็นเซอร์เสมือนสำหรับวัดจุดศูนย์ถ่วงเพื่อตรวจสอบสภาพแบบเรียลไทม์สำหรับการตรวจสอบเครื่องปั๊มขึ้นรูปโลหะในอุตาสหกรรมยานยนต์ [3] คณะผู้วิจัยสนใจที่จะทำการวิเคราะห์จุดศูนย์รวมแรงการเรียงลำดับขั้นตอนบนแผ่นป้อนในกระบวนการเจาะและตัดที่เปิดขวด เพื่อทำความเข้าใจวิธีการสมดุลจุดศูนย์รวมแรงและประยุกต์ใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์โลหะ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 โมเมนต์ดัด

โมเมนต์ดัด (Bending Moment, M) [4]

คำนวณจาก

$$M = F \times R \quad (1)$$

M โมเมนต์ดัด

F แรงต้านที่ปลายแท่งกด

R วัดจากกึ่งกลางแท่งกดถึงกึ่งกลางแกนจับยึดแม่พิมพ์

F คำนวณจาก

$$F = l \times t \times \tau \quad (2)$$

l เส้นรอบวงขอบตัด,

t ความหนาแผ่นโลหะ

τ แรงเฉือนที่ใช้ในการแปรรูปแผ่นโลหะ

2.2 การหาตำแหน่งแกนจับยึดแม่พิมพ์

การสมดุลจุดศูนย์รวมแรง คำนวณจาก [4]

$$x = \frac{\sum l_n \times b_n}{\sum l_n} \quad (3)$$

X ระยะทางจากจุดศูนย์กลางแรงถึงขอบอ้างอิง

l_n เส้นรอบวงขอบตัด

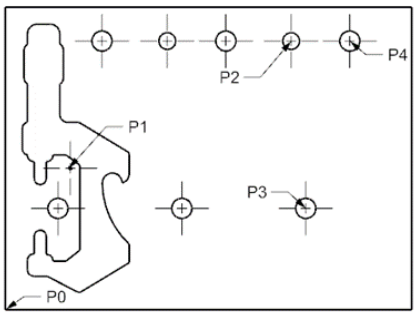
b_n ระยะทางจากจุดศูนย์รวมแรงขอบตัดถึงขอบอ้างอิง

3. วิธีการดำเนินงาน

คำนวณจุดศูนย์รวมแรงขอบตัดที่เปิดขวดรูปช้ายมือ (l_1), รูเจาะ (l_2) Ø 5 มม. และรูเจาะ (l_3, l_4) Ø 6 มม. ต่อมาคำนวณระยะทางจากจุดศูนย์รวมแรงถึงจุดอ้างอิง กำหนดจุดอ้างอิงที่มุมล่างซ้ายของ Lay out strip bottle opener ในแนวแกน X และ Y

4. ผลการทดลอง

จากรูปที่ 4.1 จุดศูนย์รวมแรงขอบตัดที่เปิดขวดคือจุด P1 รูเจาะ Ø 5 มม. จำนวน 1 รู คือ P2 รูเจาะ Ø 6 มม. จำนวน 2 รู คือ P3 และ P4 ตามลำดับ จากนั้นคำนวณหาจุดสมดุลศูนย์รวมแรงแนวแกน X และแกน Y เทียบกับจุดอ้างอิง P0 ตามตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.1 lay out strip bottle opener

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลใช้คำนวณตำแหน่งศูนย์รวมแรงแนวแกน X

n	l_n (mm)	b_n (mm)	$l_n x b_n$ (mm^2)
l_1	274.047	19.1	5,234.298
l_2	15.714	84.43	1,326.733
l_3	18.857	88.73	1,673.182
l_4	18.857	101.73	1,918.323
$\sum$	327.475	-	10,152.536

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลใช้คำนวณตำแหน่งศูนย์รวมแรงแนวแกน Y

n	l_n (mm)	b_n (mm)	$l_n x b_n$ (mm^2)
l_1	274.047	41.8	11,455.165
l_2	15.714	79.1	1,242.977
l_3	18.857	29.9	563.824
l_4	18.857	79.1	1,491.589
$\sum$	327.475	-	14,753.555

4.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง

คำนวณหาตำแหน่งจุดศูนย์รวมแรงในแนวแกน X โดยนำผลรวม l_n และ l_n x b_n จากตารางที่ 4.1 แทนค่าในสมการ (3)

$$x = \frac{10{,}152.536\ mm^2}{327.475\ mm}$$

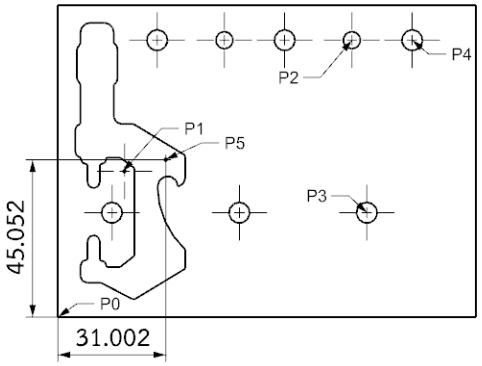
= 31.002 mm

คำนวณหาตำแหน่งจุดศูนย์รวมแรงในแนวแกน Y โดยนำผลรวม l_n และ l_n x b_n จากตารางที่ 4.2 แทนค่าในสมการ (3)

$$Y = \frac{14{,}753.555\ mm^2}{327.475}$$

= 45.052 mm

นำจุด X และ Y ไปกำหนดลงใน Lay out strip bottle opener คือจุด P5 ในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 P5 จุดสมดุลศูนย์รวมแรง

5. สรุปผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์จุดศูนย์รวมแรงการเรียงลำดับขั้นตอนบนแผ่นป้อนในกระบวนการเจาะและตัดที่เปิดขวด พบว่าแต่ละรูปมีจุดศูนย์รวมแรงแยกจากกัน ดังนี้ขอบตัดที่เปิดขวดคือจุด P1 รูเจาะ Ø 5 มม. คือจุด P2 รูเจาะ Ø 6 มม. คือจุด P3 และ P4 เมื่อทำการสมดุลจุดศูนย์รวมแรงโดยอ้างอิงจากจุด P0 ได้ระยะทางแนวแกน X = 31.002 มม. และระยะทางแนวแกน Y = 45.052 มม. เมื่อประยุกต์ใช้ในการออกแบบแผ่นยึดแท่งกด เพื่อกำหนดตำแหน่งเจาะรูทำเกลียวใส่แกนจับยึดแม่พิมพ์ ซึ่งบอกขนาดออกจากกึ่งกลาง X = -10.5 mm และ Y = 6.5 mm ซึ่งแตกต่างจากแม่พิมพ์ที่สร้างขึ้นที่แกนจับยึดแม่พิมพ์อยู่ที่ตำแหน่ง X = 0 และ Y = 0 บนแผ่นยึดแท่งกด ถ้าย้ายตำแหน่งแกนจับยึดแม่พิมพ์เยื้องออกจากกึ่งกลางตามผลการทดลอง อาจจะป้องกันแรงด้านที่ไม่สมดุลขณะปั๊มและยืดอายุการใช้งานแม่พิมพ์และคุมคุณภาพชิ้นงานได้

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์และบุคลากรในสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องมือและแม่พิมพ์ ที่ให้ความช่วยเหลือในการเตรียมการทดสอบ เพื่อนำข้อมูลมาเขียนบทความเพื่อเข้าร่วมในการประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

เอกสารอ้างอิง

[1] Shichao Zhu, Yulu Ding, Bing Long, Hun Guo, Linhan Ouyang, Wengang Chen and Zhengy Jiang, "Analysis and optimization of stramping and forming process of bearing outer ring," sciencedirect [Online]. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/s2095034924000333. (accessed: Apr. 01, 2026).

[2] Dwi Rahmalina and Ahmad Zamzami, "Assessment the effect of dies stamping process parameters on the performance of spring-go defects in galvanized steel sheet materials," researchgate [Online].https://www.researchgate.net/publication/391418797_assessment_the_effect_of_dies_stamping_of_spring-back_and_spring-go_defects_in_galvanized_steel_sheet_materials. (accessed: Apr. 23, 2026).

[3] Ivan Peinado-Asensi, Nicolás Montés and Eduardo Garcfa, "Virtual Sensor of Gravity Centres for Real-Time Condition Monitoring of an Industrial Stamping Press in the Automotive Industry," mdpi [Online]. https://www.mdpi.com/1424-8220/23/14/6569. (accessed: Apr. 01, 2026).

[4] รศ.บรรเลง ศรนิล, รศ.สมนึก วัฒนศรียกุล, ตารางคู่มืองานโลหะ, พิมพ์ครั้งที่ 14. กรุงเทพ: ศูนย์ผลิตตำราเรียน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2562. หน้า 34, 293.



ประวัติผู้เขียนบทความ
_ชื่อ-นามสกุล นายอัครเวช สุภาคม
ที่อยู่ 87/10 ม.5 ถ.แจ้งวัฒนะ
ต.ปากกร็ด อ.ปากเกร็ด
จ.นนทบุรี 11120
โทรศัพท์ 08 0070 9921
E-mail address Akrawech.s@rmutp.ac.th



ประวัติผู้เขียนบทความ
_ชื่อ-นามสกุล นายสุนทร คำพินิจ
ที่อยู่ 19/63 ซอย7/2 หมู่บ้านสหกรณ์เคหะ
สถาน3 หมู่9 ต.บางพูด อ.ปากเกร็ด
จ.นนทบุรี 11120
โทรศัพท์ 08 6091 2542



ประวัติผู้เขียนบทความ
_ชื่อ-นามสกุล นายกิตติพศ น้อยนิตย์
ที่อยู่ 37/1 ม. 2 ต.ราษฎร์นิยม
อ.ไทรน้อย จ.นนทบุรี 11150
โทรศัพท์ 09 4645 3018
E-mail address kittiphot-n@rmutp.ac.th



ประวัติผู้เขียนบทความ
_ชื่อ-นามสกุล นายชานน สิงหารุณ
ที่อยู่ 555/22 ซ. ประชาอุทิศ 17
เขต ห้วยขวาง
แขวง สามเสนนอก
กรุงเทพ 10310



ประวัติผู้เขียนบทความ
ชื่อ-นามสกุล นางสาวชาโตมิ โมโตอุเมะ
ที่อยู่ 88 ม.2 ต.หนองผักแว่น อ.ท่าหลวง
จ.ลพบุรี 15230

บทความวิจัย
โยธาและสิ่งแวดล้อม

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การศึกษาการรั่วซึมของวัสดุเปลี่ยนสถานะออกจากมวลรวมเบาภายหลังการให้ความร้อนซ้ำ 30 รอบ

Evaluation of Phase Change Material Leakage from Lightweight Aggregate after 30 Thermal Cycles

ภัทรชัย พงศ์โสภา[1*] บูชิต มาโห้[1] ธนพัฒน์ น้ำจันทร์[1] กฤษดา เสือเอี่ยม[1]

ขวัญชนก อุนทะอ่อน[1] จักรพันธ์ แสงสุวรรณ[1] ณัชพงศ์พล คงชะสิงห์[1] และดารกร อินทรบุตร[1]

[1]สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพฯ

1381 ถ. พิบูลสงคราม แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

Email: phattharachai.p@rmutp.ac.th*, buchit.m@rmutp.ac.th, tanapat.n@rmutp.ac.th, gritsada.s@rmutp.ac.th, kwanchanok.o@rmutp.ac.th, chakkarphan.s@rmutp.ac.th, nutchapongpol.k@rmutp.ac.th, darrakorn.i@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการรั่วซึมของวัสดุเปลี่ยนสถานะ (Phase Change Material: PCM) ออกจากมวลรวมเบาหลังผ่านการได้รับความร้อนซ้ำจำนวน 30 รอบ โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการเคลือบผิว 3 สภาวะ ได้แก่ มวลรวมเบาที่อุ้ม PCM แบบไม่เคลือบผิว (PCM_LWA) แบบเคลือบด้วย Si และแบบเคลือบด้วย PVA การประเมินผลดำเนินการจากค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักภายหลังการให้ความร้อนซ้ำ และการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางกายภาพก่อนและหลังการทดสอบ ได้แก่ ค่าการดูดซึมน้ำและค่าความถ่วงจำเพาะรวมแบบแห้งผิว ผลการทดลองพบว่า การให้ความร้อนซ้ำส่งผลให้ตัวอย่างทุกกลุ่มเกิดการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบความร้อนที่มากขึ้น โดยตัวอย่างไม่เคลือบผิวมีการสูญเสียน้ำหนักสูงที่สุด เท่ากับ 1.94, 3.21 และ 3.79% ที่ 10, 20 และ 30 รอบ ตามลำดับ ขณะที่ตัวอย่างเคลือบด้วย PVA มีการสูญเสียน้ำหนักลดลงเหลือ 0.67, 1.15 และ 1.34% ส่วนตัวอย่างเคลือบด้วย Si ให้ผลดีที่สุด โดยมีการสูญเสียน้ำหนักเพียง 0.10, 0.20 และ 0.29% ตามลำดับ นอกจากนี้ หลังผ่านวัฏจักรความร้อน ค่าการดูดซึมน้ำของทุกตัวอย่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าความถ่วงจำเพาะรวมลดลงเล็กน้อย โดยตัวอย่างเคลือบด้วย Si มีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด สะท้อนถึงความสามารถในการรักษาเสถียรภาพของ PCM ภายในมวลรวมเบาได้ดีกว่าตัวอย่างกลุ่มอื่น จากผลการศึกษาสรุปได้ว่า การเคลือบผิวมีบทบาทสำคัญในการลดการรั่วซึมของ PCM ภายใต้การได้รับความร้อนซ้ำ และการเคลือบด้วย Si เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการเพิ่มเสถียรภาพของมวลรวมเบาที่อุ้ม PCM สำหรับการประยุกต์ใช้ในวัสดุก่อสร้างกักเก็บพลังงานความร้อน

คำสำคัญ : วัสดุเปลี่ยนสถานะ, มวลรวมเบา, การรั่วซึม, วัฏจักรความร้อน, การเคลือบผิว

Abstract

This study aimed to investigate the leakage behavior of phase change material (PCM) from lightweight aggregate after 30 repeated heating cycles. The performance of three surface conditions was compared: uncoated PCM-impregnated lightweight aggregate (PCM_LWA), Si-coated PCM_LWA, and PVA-coated PCM_LWA. The evaluation was conducted based on the percentage of weight loss after repeated heating, as well as changes in physical properties before and after testing, including water absorption and bulk specific gravity (air-dry). The results showed that all specimens exhibited increasing weight loss with increasing number of heating cycles. The uncoated specimens showed the highest weight loss, reaching 1.94%, 3.21%, and 3.79% after 10, 20, and 30 cycles, respectively. In contrast, the PVA-coated specimens showed reduced weight loss of 0.67%, 1.15%, and 1.34%, while the Si-coated specimens exhibited the best performance, with only 0.10%, 0.20%, and 0.29% weight loss, respectively. In addition, after thermal cycling, all specimens showed an increase in water absorption and a slight decrease in bulk specific gravity. Among them, the Si-coated specimens exhibited the smallest changes, indicating superior ability to maintain PCM stability within the lightweight aggregate. The findings demonstrate that surface coating plays a significant role in reducing PCM leakage under repeated heating conditions, and Si coating was found to be the most effective method for enhancing the stability of PCM-impregnated lightweight aggregate for thermal energy storage applications in construction materials.

Keywords: phase change material, lightweight aggregate, leakage, thermal cycling, surface coating

1. บทนำ

อาคารเป็นภาคส่วนที่มีการใช้พลังงานในสัดส่วนสูง และความต้องการลดการใช้พลังงานเพื่อการปรับอากาศได้ผลักดันให้เกิดการพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่สามารถช่วยควบคุมอุณหภูมิภายในอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพ วัสดุเปลี่ยนสถานะ (Phase Change Material: PCM) ได้รับความสนใจอย่างมากในฐานะวัสดุกักเก็บพลังงานความร้อนแฝง เนื่องจากสามารถดูดซับและคายพลังงานได้ในช่วงอุณหภูมิที่ค่อนข้างคงที่ระหว่างกระบวนการเปลี่ยนสถานะ จึงมีศักยภาพในการลดความผันผวนของอุณหภูมิและเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนขององค์ประกอบอาคาร [1], [2].

อย่างไรก็ตาม การนำ PCM ไปใช้โดยตรงในวัสดุประสานหรือวัสดุก่อสร้างยังมีข้อจำกัดสำคัญ โดยเฉพาะปัญหาการรั่วซึมเมื่อ PCM เปลี่ยนเป็นสถานะของเหลว ซึ่งอาจทำให้ประสิทธิภาพการกักเก็บพลังงานลดลง รวมถึงส่งผลกระทบต่อความคงทนและความน่าเชื่อถือของวัสดุในระยะยาว ด้วยเหตุนี้ แนวทางการห่อหุ้ม การตรึงรูป และการ

กักเก็บ PCM ไว้ภายในวัสดุพาหะที่มีโครงสร้างพรุนจึงถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อควบคุมการรั่วซึมและเพิ่มเสถียรภาพในการใช้งานจริง [2], [3].

หนึ่งในแนวทางที่ได้รับความสนใจคือการใช้มวลรวมเบา (Lightweight Aggregate: LWA) เป็นวัสดุพาหะสำหรับดูดซึม PCM เข้าไปเก็บไว้ภายในรูพรุนของมวลรวม งานของ Sakulich และ Bentz [4] แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของการนำ PCM เข้าสู่ระบบซีเมนต์ผ่านมวลรวมเบา ขณะที่ Kheradmand และคณะ [5] ได้ประเมินความเป็นไปได้ของการอัดแทรก PCM ในมวลรวมเบาเพื่อพัฒนาระบบกักเก็บพลังงานความร้อน และรายงานว่าประเด็นการรั่วซึมยังเป็นหัวข้อสำคัญที่ต้องพิจารณา งานของ Wadee และคณะ [6] ได้พัฒนามวลรวมเบาที่อุ้ม PCM และทดลองใช้วัสดุเคลือบหลายชนิดเพื่อลดการรั่วซึม ส่วน Ates และคณะ [7] ได้รายงานการใช้มวลรวมที่อุ้ม PCM ร่วมกับการเคลือบด้วยสารละลาย PVA และ silica fume สำหรับงานมอร์ตาร์ ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าการเคลือบผิวเป็นกลยุทธ์สำคัญในการเพิ่มความเสถียรของระบบ PCM-based aggregate.

แม้งานวิจัยก่อนหน้าจะยืนยันศักยภาพของ PCM-LWA และความสำคัญของการเคลือบผิวเพื่อลดการรั่วซึม แต่จากการทบทวนวรรณกรรมยังพบว่าข้อมูลเชิงเปรียบเทียบเกี่ยวกับพฤติกรรมการรั่วซึมของมวลรวมเบาที่อุ้ม PCM ระหว่างสภาวะ ไม่เคลือบผิว, เคลือบผิวกลุ่ม Si, และ เคลือบด้วย PVA ภายหลังการให้ความร้อนซ้ำภายใต้จำนวนรอบที่กำหนดยังมีจำกัด โดยเฉพาะเมื่อพิจารณาร่วมกับการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางกายภาพ เช่น การดูดซึมน้ำและความถ่วงจำเพาะรวม นอกจากนี้ Wadee และคณะ [8] ยังชี้ให้เห็นว่าการประเมินเสถียรภาพภายใต้วัฏจักรความร้อนเป็นประเด็นจำเป็น เนื่องจากการได้รับความร้อนและเย็นซ้ำอาจส่งผลต่อสมบัติทางความร้อนและเสถียรภาพของระบบ PCM-composite ได้ในระยะยาว.

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการรั่วซึมของวัสดุเปลี่ยนสถานะออกจากมวลรวมเบาหลังผ่านการให้ความร้อนซ้ำ 30 รอบ โดยเปรียบเทียบระหว่างมวลรวมเบาที่อุ้ม PCM แบบไม่เคลือบผิว แบบเคลือบผิวกลุ่ม Si และแบบเคลือบด้วย PVA การประเมินครอบคลุมทั้งการสูญเสียน้ำหนัก ตลอดจนการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางกายภาพก่อนและหลังการทดสอบ เช่น ค่าการดูดซึมน้ำและค่าความถ่วงจำเพาะรวมแบบแห้งผิว เพื่ออธิบายประสิทธิภาพของชั้นเคลือบในการจำกัดการรั่วซึมและเพิ่มเสถียรภาพของ PCM ภายในมวลรวมเบาสำหรับการประยุกต์ใช้ในวัสดุก่อสร้างประหยัดพลังงาน.

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุ

มวลรวมเบา (Lightweight Aggregate: LWA) ซึ่งใช้เป็นวัสดุพาหะสำหรับดูดซึมวัสดุเปลี่ยนสถานะ (Phase Change Material: PCM) เข้าไปภายในโครงสร้างรูพรุนของมวลรวม ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 มวลรวมเบา

วัสดุเปลี่ยนสถานะที่ใช้เป็นชนิด Polyethylene glycol (PEG) ซึ่งมีช่วงอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะประมาณ 42-46°C และถูกเลือกให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ในวัสดุก่อสร้างเพื่อควบคุมพฤติกรรมทางความร้อน ดังแสดงในภาพที่ 2 และคุณสมบัติดังตารางที่ 1



ภาพที่ 2 วัสดุเปลี่ยนสถานะ

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของวัสดุเปลี่ยนสถานะ

Specification	Unit	Test Result
Melting Point	°C	42-46
Specific Gravity	at 25 °C	1.09
Flash point	°C	285
Heat of Fusion	Cal/g	37
Range of Avg. Molecular Weight		1305-1595
Physical Form		Flake

ซิลิกาฟูม (Silica fume)

ซิลิกาฟูมเป็นวัสดุปอซโซลานละเอียดสูง มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกาอสัณฐาน ในการวิจัยนี้ใช้เป็นส่วนผสมของชั้นเคลือบ เพื่อช่วยเพิ่มความหนาแน่นของผิวเคลือบและลดการรั่วซึมของ PCM คุณสมบัติดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของซิลิกาฟูม

Specification	Test Result
Density	200-300 kg/m^3
Specific Gravity	2.2
SiO_2	>85%
CaO	<1%
Specific surface area	20,000 m^2/kg

โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol: PVA)

PVA เป็นพอลิเมอร์ที่ละลายน้ำได้และมีคุณสมบัติในการสร้างฟิล์มที่ดี ในการวิจัยนี้ใช้เป็นวัสดุเคลือบบนผิวมวลรวมเบาที่ดูดซับ PCM เพื่อช่วยกักเก็บ PCM ภายในรูพรุนและลดการรั่วซึมระหว่างการใช้งาน คุณสมบัติดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของโพลีไวนิลแอลกอฮอล์

Specification	Test Result
Appearance	Powder
Density	0.5-0.7 g/cm^3
Specific Gravity	1.27-1.31
Viscosity	23-27 mPa.s
pH	5-7

2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย เครื่องชั่งดิจิทัลความละเอียด สำหรับชั่งน้ำหนักตัวอย่างก่อนและหลังการทดสอบ, ตู้อบลมร้อนสำหรับอบแห้งมวลรวมเบาและตัวอย่างเคลือบ, ชุดให้ความร้อนสำหรับสร้างวัฏจักรความร้อน, ภาชนะสำหรับแช่และให้ความร้อนตัวอย่าง, เครื่องมือสำหรับเคลือบผิวตัวอย่าง, และอุปกรณ์ทดสอบสมบัติของมวลรวม เช่น ค่าการดูดซึมน้ำและค่าความถ่วงจำเพาะรวมแบบแห้งผิว

2.3 การเตรียมมวลรวมเบาที่อุ้มวัสดุเปลี่ยนสถานะ

เริ่มต้นจากการนำมวลรวมเบามาทำความสะอาดเพื่อกำจัดฝุ่นและสิ่งสกปรกที่เกาะบนผิว จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 ± 5 °C จนมีมวลคงที่ เพื่อกำจัดความชื้นภายในรูพรุนของมวลรวมเบา การเตรียมมวลรวมให้แห้งก่อนกระบวนการอัดแทรก PCM มีความสำคัญ เนื่องจากช่วยให้ PCM สามารถแทรกซึมเข้าสู่โพรงภายในได้ดีขึ้น

หลังจากนั้น PCM ถูกทำให้เป็นของเหลวโดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเปลี่ยนสถานะเล็กน้อย จากนั้นจึงนำมวลรวมเบาแห้งลงแช่ใน PCM เหลวเพื่อให้เกิดการดูดซึมเข้าสู่รูพรุนภายใน ก่อนปล่อยให้ PCM เหลวไหลเข้าสู่ช่องว่างภายใน หลังสิ้นสุดกระบวนการอัดแทรก ตัวอย่างถูกนำออกมาพักไว้ที่อุณหภูมิห้องและเช็ด PCM ส่วนเกินบนผิวออก เพื่อให้ได้มวลรวมเบาที่อุ้ม PCM ภายในโดยไม่เกิดการเคลือบผิวจาก PCM ส่วนเกิน

2.4 การเคลือบผิวมวลรวมเบาที่อุ้ม PCM

ภายหลังการอัดแทรก PCM ตัวอย่างถูกแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มตามสภาพผิว ได้แก่ กลุ่มไม่เคลือบผิว กลุ่มเคลือบด้วยซิลิกาฟูม และกลุ่มเคลือบด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

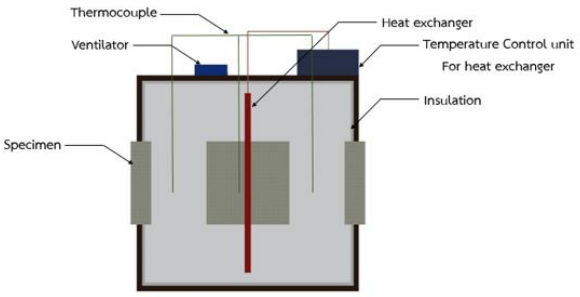
สำหรับกลุ่มเคลือบด้วยซิลิกาฟูม ตัวอย่าง PCM_LWA ถูกนำไปเคลือบด้วยซีเมนต์เพลสผสมซิลิกาฟูม โดยวิธีจุ่ม ให้ทั่วผิวภายนอก จากนั้นปล่อยให้แห้งหรือบ่มที่อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดฟิล์มเคลือบที่สม่ำเสมอ ส่วนกลุ่มเคลือบ PVA ดำเนินการในลักษณะเดียวกัน โดยใช้สารละลาย PVA ความเข้มข้น 5 wt.% และทำการเคลือบ 1 รอบ เพื่อให้ได้ชั้นเคลือบที่ครอบคลุมผิวของมวลรวมอย่างทั่วถึง

หลังการเคลือบ ตัวอย่างทั้งหมดถูกเก็บไว้จนกระทั่งชั้นเคลือบแห้งสนิทก่อนนำไปทดสอบต่อไป เพื่อป้องกันผลกระทบจากความชื้นหรือการบ่มที่ยังไม่สมบูรณ์ต่อผลการทดลอง

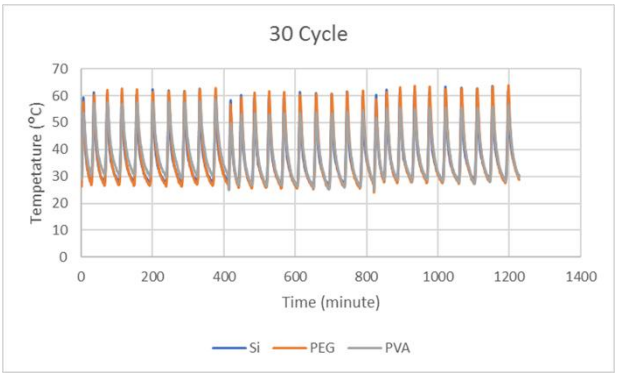
2.5 การทดสอบวัฏจักรความร้อน

การทดสอบวัฏจักรความร้อน

เพื่อประเมินเสถียรภาพทางความร้อนของ PCM ภายในมวลรวมเบา ได้ทำการทดสอบวัฏจักรความร้อนซ้ำจำนวน 30 รอบ โดยนำตัวอย่างแต่ละสูตรไปให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 60 ± 2 °C เพื่อกระตุ้นให้ PCM เปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว จากนั้นปล่อยให้ตัวอย่างเย็นตัวกลับสู่สภาวะอุณหภูมิห้อง เพื่อให้ PCM เปลี่ยนสถานะย้อนกลับและนับเป็น 1 วัฏจักรความร้อน กระบวนการดังกล่าวถูกทำซ้ำอย่างต่อเนื่องจนครบ 30 รอบ พร้อมบันทึกการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวอย่างตลอดการทดสอบ ดังภาพที่ 3 และ 4



ภาพที่ 3 ตู้ทดสอบให้ความร้อนซ้ำ



ภาพที่ 4 การทดสอบวัฏจักรความร้อนซ้ำจำนวน 30 รอบ

ตัวอย่างทุกสูตรแสดงรูปแบบการเพิ่มขึ้นและลดลงของอุณหภูมิซ้ำอย่างต่อเนื่องในแต่ละรอบ โดยมีค่าสูงสุดอยู่ใกล้เคียง 60–65 °C และลดลงสู่ช่วงประมาณ 28–35 °C ในช่วงการเย็นตัว สะท้อนให้เห็นว่าตัวอย่างยังคงตอบสนองต่อการรับและคายความร้อนได้อย่างสม่ำเสมอตลอด 30 รอบของการทดสอบ ทั้งนี้ เส้นกราฟของแต่ละสูตรมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน แม้อาจมีความแตกต่างเล็กน้อยในอัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิ ซึ่งอาจสัมพันธ์กับคุณสมบัติการกักเก็บและถ่ายเทความร้อนของวัสดุเคลือบหรือองค์ประกอบของตัวอย่างแต่ละชนิด

2.6 การประเมินการสูญเสียน้ำหนัก

การรั่วซึมของ PCM จากมวลรวมเบาถูกประเมินทางอ้อมจากค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก (% weight loss) ของตัวอย่างหลังผ่านวัฏจักรความร้อน โดยชั่งน้ำหนักตัวอย่างก่อนเริ่มการทดสอบและหลังจากครบจำนวนรอบที่กำหนด แล้วคำนวณตามสมการ

$$\%\text{Weight Loss} = \frac{W_0 - W_n}{W_0} \times 100$$

เมื่อ W_0 คือ น้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่างก่อนการทดสอบ และ W_n คือ น้ำหนักของตัวอย่างหลังผ่านวัฏจักรความร้อนจำนวน n รอบ

ค่าการสูญเสียน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นแสดงถึงการสูญเสีย PCM ออกจากโครงสร้างมวลรวมเบาระหว่างการให้ความร้อนซ้ำ ซึ่งสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพของการเคลือบผิวในการลดการรั่วซึมได้ โดยในการศึกษานี้ได้เปรียบเทียบค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่าง non-coated, Si-coated และ PVA-coated ภายใต้จำนวนรอบความร้อนเดียวกัน

2.7 การทดสอบสมบัติทางกายภาพก่อนและหลังวัฏจักรความร้อน

เพื่อประเมินผลของการให้ความร้อนซ้ำต่อสมบัติของมวลรวมเบาที่อุ้ม PCM ได้ทำการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำและค่าความถ่วงจำเพาะรวมแบบแห้งผิว (bulk specific gravity, air-dry) ทั้งก่อนและหลังการทดสอบวัฏจักรความร้อน 30 รอบ การทดสอบดำเนินการตามวิธีมาตรฐานสำหรับมวลรวม ตาม ASTM C127

ค่าการดูดซึมน้ำใช้เพื่อสะท้อนความสามารถของตัวอย่างในการดูดซึมน้ำเข้าสู่โครงสร้างภายใน ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงไปหากเกิดการสูญเสีย PCM หรือเกิดความไม่ต่อเนื่องของชั้นเคลือบ ขณะที่ค่าความถ่วงจำเพาะรวมแบบแห้งผิวใช้เพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงโดยรวมของโครงสร้างและมวลของมวลรวมเบาหลังผ่านการทดสอบ การเปรียบเทียบสมบัติทั้งสองก่อนและหลัง heat cycle ช่วยสนับสนุนการตีความพฤติกรรมการรั่วซึมและเสถียรภาพของระบบ PCM_LWA ในเชิงลึกมากขึ้น

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 การสูญเสียน้ำหนักของมวลรวมเบาที่อุ้มวัสดุเปลี่ยนสถานะภายหลังการให้ความร้อนซ้ำ

ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของมวลรวมเบาที่อุ้มวัสดุเปลี่ยนสถานะภายหลังการให้ความร้อนซ้ำดังแสดงในภาพที่ 5 แสดงให้เห็นว่า ตัวอย่างทุกกลุ่มมีแนวโน้มสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบความร้อนที่มากขึ้น ซึ่งสะท้อนถึงการรั่วซึมหรือการสูญเสียวัสดุเปลี่ยนสถานะออกจากโครงสร้างรูพรุนของมวลรวมเบาเมื่อได้รับความร้อนซ้ำอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม ระดับการสูญเสียน้ำหนักมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนตามลักษณะของการเคลือบผิว



ภาพที่ 5 การสูญเสียน้ำหนัก

สำหรับตัวอย่าง PCM_LWA แบบไม่เคลือบผิว พบว่ามีการสูญเสียน้ำหนักสูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ -1.94%, -3.21% และ -3.79% ที่ 10, 20 และ 30 รอบ ตามลำดับ แนวโน้มดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า เมื่อไม่มีชั้นเคลือบผิวทำหน้าที่เป็นตัวกั้น PCM ที่ถูกอุ้มไว้ภายในรูพรุนของมวลรวมเบาสามารถเคลื่อนที่ออกสู่ภายนอกได้ง่ายขึ้นภายใต้สภาวะการหลอมเหลวซ้ำ ส่งผลให้การสูญเสียน้ำหนักเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีค่าสูงกว่ากลุ่มอื่นอย่างเด่นชัด

ในกรณีของตัวอย่าง PCM_LWA ที่เคลือบด้วย PVA การสูญเสียน้ำหนักลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มไม่เคลือบผิว โดยมีค่าเท่ากับ -0.67%, -1.15% และ -1.34% ที่ 10, 20 และ 30 รอบ ตามลำดับ ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าชั้นเคลือบ PVA สามารถช่วยลดการรั่วซึมของ PCM ได้ในระดับหนึ่ง เนื่องจากฟิล์มพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นบนผิวมวลรวมช่วยลดการไหลผ่านของ PCM จากภายในสู่ภายนอก อย่างไรก็ตาม การสูญเสียน้ำหนักยังคงเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบความร้อน สะท้อนว่าประสิทธิภาพของชั้นเคลือบ PVA อาจยังไม่เพียงพอในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิซ้ำในระยะยาว

ตัวอย่าง PCM_LWA ที่เคลือบด้วย Si ให้ผลดีที่สุดในทุกช่วงการทดสอบ โดยมีการสูญเสียน้ำหนักเพียง -0.10%, -0.20% และ -0.29% ที่ 10, 20 และ 30 รอบ ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าทั้งกลุ่มไม่เคลือบผิวและกลุ่มเคลือบด้วย PVA อย่างชัดเจน ผลลัพธ์นี้สะท้อนว่าชั้นเคลือบ Si มีประสิทธิภาพสูงในการทำหน้าที่เป็นตัวกั้นการรั่วซึมของ PCM และสามารถรักษาเสถียรภาพของระบบได้ดีกว่าการเคลือบแบบพอลิเมอร์ภายใต้การได้รับความร้อนซ้ำ

โดยสรุป ผลการสูญเสียน้ำหนักยืนยันว่าการเคลือบผิวมีบทบาทสำคัญในการลดการรั่วซึมของ PCM ออกจากมวลรวมเบา และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างวัสดุเคลือบที่ใช้ พบว่า Si coating มีประสิทธิภาพ

สูงที่สุด รองลงมาคือ PVA coating ขณะที่ตัวอย่างไม่เคลือบผิวมีความเสี่ยงต่อการสูญเสีย PCM สูงที่สุดตลอดช่วงการทดสอบ

3.2 การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพก่อนและหลังการให้ความร้อนซ้ำ

ตารางที่ 4 คุณสมบัติสมบัติทางกายภาพก่อนและหลังการให้ความร้อนซ้ำ

Properties	PCM_LWA	PCM_LWA Coated Si	PCM_LWA Coated PVA
Before Heat Cycle			
Percent absorption (%)	0.20	0.08	0.18
Bulk Specific Gravity (Air Dry)	1.305	1.450	1.315
After Heat Cycle			
Percent absorption (%)	0.31	0.12	0.23
Bulk Specific Gravity (Air Dry)	1.270	1.425	1.30

จากตารางที่ 4 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของมวลรวมเบาที่อุ้ม PCM ก่อนและหลังการให้ความร้อนซ้ำแสดงให้เห็นว่า หลังผ่านวัฏจักรความร้อน ค่าการดูดซึมน้ำของทุกตัวอย่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ขณะที่ค่า bulk specific gravity (air-dry) ลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าก่อนการทดสอบ แนวโน้มดังกล่าวบ่งชี้ว่าการให้ความร้อนซ้ำส่งผลต่อเสถียรภาพภายในของตัวอย่าง และอาจเกี่ยวข้องกับการสูญเสีย PCM หรือการเปลี่ยนแปลงของชั้นเคลือบที่หุ้มผิวมวลรวม

สำหรับตัวอย่าง PCM_LWA แบบไม่เคลือบผิว ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มจาก 0.20 เป็น 0.31 ขณะที่ค่า bulk specific gravity ลดจาก 1.305 เป็น 1.270 หลังผ่านการให้ความร้อนซ้ำ การเพิ่มขึ้นของค่าการดูดซึมน้ำสะท้อนว่าตัวอย่างมีความสามารถในการรับน้ำเข้าสู่ช่องว่างภายในมากขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากการที่ PCM บางส่วนรั่วซึมออกจากรูพรุน ทำให้เกิดพื้นที่ว่างเพิ่มขึ้นภายในมวลรวม ส่วนการลดลงของความถ่วงจำเพาะรวมสอดคล้องกับการสูญเสียมวลของ PCM จากโครงสร้างภายใน

ในกรณีของตัวอย่าง PCM_LWA coated PVA ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มจาก 0.18 เป็น 0.23 และค่า bulk specific gravity ลดจาก 1.315 เป็น 1.300 ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าแม้การเคลือบด้วย PVA จะช่วยลดการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางกายภาพได้เมื่อเทียบกับกลุ่มไม่เคลือบผิว แต่ยังคงเกิดการเปลี่ยนแปลงบางส่วนหลังการให้ความร้อนซ้ำ ซึ่งอาจเกิดจากการเสื่อมสภาพของชั้นเคลือบหรือการเปิดทางให้ PCM รั่วซึมออกได้บางส่วนในระหว่างการทดสอบ

สำหรับตัวอย่าง PCM_LWA coated Si พบว่ามีค่าการดูดซึมน้ำต่ำที่สุดทั้งก่อนและหลังการทดสอบ โดยเพิ่มจาก 0.08 เป็น 0.12 ขณะที่ค่า bulk specific gravity ลดจาก 1.450 เป็น 1.425 แม้ว่าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับกลุ่มอื่น แต่ขนาดของการเปลี่ยนแปลงอยู่ในระดับต่ำที่สุด สะท้อนว่าการเคลือบด้วย Si สามารถรักษาเสถียรภาพของ PCM ภายในมวลรวมเบาได้ดีกว่า และช่วยลดผลกระทบของการให้ความร้อนซ้ำต่อโครงสร้างภายในของตัวอย่าง

เมื่อพิจารณาร่วมกันทั้งค่าการดูดซึมน้ำและค่า bulk specific gravity จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางกายภาพมีความสัมพันธ์สอดคล้องกับผลการสูญเสียน้ำหนัก กล่าวคือ ตัวอย่างที่มีการสูญเสียน้ำหนักมากย่อมมีแนวโน้มแสดงค่าการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้นและค่าความถ่วงจำเพาะที่ลดลงมากกว่า ซึ่งสนับสนุนข้อสันนิษฐานว่าการสูญเสีย PCM จากโครงสร้างภายในเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้สมบัติทางกายภาพของมวลรวมเปลี่ยนแปลงภายหลังการให้ความร้อนซ้ำ

3.3 ประสิทธิภาพของวัสดุเคลือบต่อการลดการรั่วซึมของ PCM



ภาพที่ 6 การรั่วซึมของ PCM

จากผลการทดลองทั้งหมดพบว่า ประสิทธิภาพของการลดการรั่วซึมของ PCM ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุเคลือบอย่างชัดเจน ตัวอย่างที่ไม่เคลือบผิวมีการสูญเสียน้ำหนักสูงที่สุดและเกิดการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางกายภาพมากที่สุด แสดงให้เห็นว่า PCM ที่ถูกอุ้มอยู่ในรูพรุนของมวลรวมเบาเพียงอย่างเดียวอาจยังไม่เพียงพอสำหรับการใช้งานภายใต้สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิซ้ำ ดังแสดงในภาพที่ 6

การเคลือบด้วย PVA สามารถช่วยลดการรั่วซึมได้ในระดับหนึ่ง เนื่องจากฟิล์มพอลิเมอร์บนผิวมวลรวมทำหน้าที่ลดการแพร่และการไหลของ PCM ออกจากภายในมวลรวม อย่างไรก็ตาม ภายใต้การให้ความร้อนซ้ำ ฟิล์มดังกล่าวอาจมีข้อจำกัดในด้านความคงตัวหรือความต่อเนื่องของชั้นเคลือบ ส่งผลให้ยังคงเกิดการสูญเสีย PCM ได้บางส่วน

ในทางตรงกันข้าม การเคลือบด้วย Si แสดงผลดีกว่าอย่างชัดเจน ทั้งในด้านการจำกัดการสูญเสียน้ำหนัก การควบคุมค่าการดูดซึมน้ำ และการรักษาค่าความถ่วงจำเพาะรวมหลังการทดสอบ จึงอาจกล่าวได้ว่าชั้นเคลือบ Si มีศักยภาพสูงกว่าในการสร้างเกราะป้องกันที่มีประสิทธิภาพต่อการเคลื่อนย้ายของ PCM ภายใต้สภาวะการให้ความร้อนซ้ำ อย่างไรก็ตาม การอธิบายกลไกเชิงลึกของการยึดเกาะหรือโครงสร้างของชั้นเคลือบยังควรได้รับการสนับสนุนเพิ่มเติมด้วยการวิเคราะห์จุลโครงสร้างหรือการตรวจสอบสภาพผิวของตัวอย่างในอนาคต

ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า การให้ความร้อนซ้ำ 30 รอบส่งผลให้มวลรวมเบาที่อุ้ม PCM เกิดการสูญเสียน้ำหนักและการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพในทุกกลุ่มตัวอย่าง อย่างไรก็ตาม การใช้วัสดุเคลือบสามารถช่วยลดผลกระทบดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะการเคลือบด้วย Si ซึ่งให้ผลดีที่สุดตลอดการทดสอบ จากข้อมูลนี้จึงสามารถสรุปได้ว่า การเคลือบผิวเป็นขั้นตอนสำคัญในการพัฒนามวลรวมเบาที่อุ้ม PCM ให้มีเสถียรภาพเพียงพอสำหรับการประยุกต์ใช้ในวัสดุก่อสร้างที่ต้องเผชิญกับวัฏจักรความร้อนอย่างต่อเนื่อง

4. สรุปผล

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการรั่วซึมของวัสดุเปลี่ยนสถานะ (PCM) ออกจากมวลรวมเบาภายหลังการได้รับความร้อนซ้ำจำนวน 30 รอบ โดยเปรียบเทียบระหว่างมวลรวมเบาที่อุ้ม PCM แบบไม่เคลือบผิว แบบเคลือบด้วย Si และแบบเคลือบด้วย PVA พร้อมทั้งประเมินการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางกายภาพก่อนและหลังการทดสอบ ได้แก่ ค่าการดูดซึมน้ำและค่าความถ่วงจำเพาะรวมแบบแห้งผิว ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

- การให้ความร้อนซ้ำส่งผลให้ตัวอย่างทุกกลุ่มเกิดการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบความร้อนที่มากขึ้น ซึ่งสะท้อนถึงการรั่วซึมหรือการสูญเสีย PCM ออกจากโครงสร้างรูพรุนของมวลรวมเบาอย่างต่อเนื่องภายใต้สภาวะการใช้งานซ้ำ
- ตัวอย่าง PCM_LWA แบบไม่เคลือบผิว มีการสูญเสียน้ำหนักสูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ -1.94%, -3.21% และ -3.79% ที่ 10, 20 และ 30 รอบ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการอุ้ม PCM ภายในมวลรวมเบาเพียงอย่างเดียวอาจยังไม่เพียงพอในการป้องกันการรั่วซึมเมื่อวัสดุได้รับความร้อนซ้ำ
- การเคลือบผิวช่วยลดการรั่วซึมของ PCM ได้อย่างชัดเจน โดยตัวอย่าง PCM_LWA coated PVA มีการสูญเสียน้ำหนักลดลงเหลือ -0.67%, -1.15% และ -1.34% ที่ 10, 20 และ 30 รอบ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าชั้นเคลือบ PVA สามารถทำหน้าที่เป็นตัวกั้นการรั่วซึมได้ในระดับหนึ่ง
- ตัวอย่าง PCM_LWA coated Si ให้ผลดีที่สุดตลอดช่วงการทดสอบ โดยมีการสูญเสียน้ำหนักเพียง -0.10%, -0.20% และ -0.29% ที่ 10, 20 และ 30 รอบ ตามลำดับ สะท้อนว่าการเคลือบด้วย Si มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดการเคลื่อนย้ายของ PCM ออกจากมวลรวมเบาภายใต้การได้รับความร้อนซ้ำ
- หลังผ่านวัฏจักรความร้อน ค่าการดูดซึมน้ำของทุกตัวอย่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ขณะที่ค่า bulk specific gravity ลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับก่อนการทดสอบ โดยตัวอย่างไม่เคลือบผิวมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด ขณะที่ตัวอย่างเคลือบด้วย Si มีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด ผลดังกล่าวสอดคล้องกับพฤติกรรมการสูญเสียน้ำหนัก และสนับสนุนว่าการรั่วซึมของ PCM มีผลต่อโครงสร้างภายในและสมบัติทางกายภาพของมวลรวมเบา
- เมื่อพิจารณาร่วมกันทั้งการสูญเสียน้ำหนัก การดูดซึมน้ำ และค่าความถ่วงจำเพาะรวม พบว่า Si coating เป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการเพิ่มเสถียรภาพของ PCM ภายในมวลรวมเบา รองลงมาคือ PVA coating ขณะที่ตัวอย่างไม่เคลือบผิวมีความเสี่ยงต่อการรั่วซึมมากที่สุด

โดยสรุป การเคลือบผิวเป็นขั้นตอนสำคัญในการพัฒนามวลรวมเบาที่อุ้ม PCM ให้มีความเสถียรเพียงพอสำหรับการใช้งานภายใต้สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิซ้ำ และจากผลการทดลองนี้ การเคลือบด้วย Si แสดงศักยภาพสูงสุดในการลดการรั่วซึมและรักษาสมบัติทางกายภาพของมวลรวมเบาหลังผ่านการให้ความร้อนซ้ำ 30 รอบ ดังนั้นแนวทางดังกล่าวจึงมีความเหมาะสมสำหรับการต่อยอดสู่การประยุกต์ใช้ในวัสดุก่อสร้างกักเก็บพลังงานความร้อน อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ประเมินการรั่วซึมจากการสูญเสียน้ำหนักและการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางกายภาพเป็นหลัก จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคตเกี่ยวกับการวิเคราะห์จุลโครงสร้าง การตรวจสอบสภาพผิวของชั้นเคลือบ และการทดสอบสมบัติทางความร้อนภายหลังการใช้งานระยะยาว เพื่อยืนยันกลไกการป้องกันการรั่วซึมและเพิ่มความน่าเชื่อถือในการนำไปใช้งานจริง

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร สำหรับการสนับสนุนสถานที่และเครื่องมือสำหรับการเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

[1] R. Baetens, B. P. Jelle, and A. Gustavsen, “Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review,” *Energy and Buildings*, vol. 42, no. 9, pp. 1361-1368, 2010.

[2] X. Wang, W. Li, Z. Luo, K. Wang, and S. P. Shah, “A critical review on phase change materials (PCM) for sustainable and energy efficient building: Design, characteristic, performance and application,” *Energy and Buildings*, vol. 260, Art. no. 111923, 2022.

[3] Y. Huang, A. Stonehouse, and C. Abeykoon, “Encapsulation methods for phase change materials: A critical review,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 200, Art. no. 123458, 2023.

[4] A. R. Sakulich and D. P. Bentz, “Incorporation of phase change materials in cementitious systems via fine lightweight aggregate,” *Construction and Building Materials*, vol. 35, pp. 483-490, 2012.

[5] M. Kheradmand, J. Castro-Gomes, M. Azenha, P. D. Silva, J. L. B. de Aguiar, and S. E. Zoorob, “Assessing the feasibility of impregnating phase change materials in lightweight aggregate for development of thermal energy storage systems,” *Construction and Building Materials*, vol. 89, pp. 48-59, 2015.

[6] A. Wadee, P. Walker, N. McCullen, and V. Ferrandiz-Mas, “Lightweight aggregates as carriers for phase change materials,” *Construction and Building Materials*, vol. 360, Art. no. 129390, 2022.

[7] F. Ates, B.-H. Woo, C. Jang, and H. G. Kim, “Enhancing cementitious composites with PCM-impregnated cork granules for sustainable and energy-efficient building elements,” *Construction and Building Materials*, vol. 416, Art. no. 135071, 2024.

[8] A. Wadee, P. Walker, N. McCullen, and V. Ferrandiz-Mas, “The effect of thermal cycling on the thermal and chemical stability of paraffin phase change materials (PCMs) composites,” *Materials and Structures*, vol. 58, no. 1, Art. no. 25, 2025.

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การวิเคราะห์ความสำคัญของรายการตรวจสอบคุณภาพห้องชุดสำหรับวิศวกรผู้ปฏิบัติงาน

Analysis of the Importance of Condominium Unit Quality Inspection Checklists for Practicing Engineers

แพรวพรรณ เกิดพูล[1*],ทรงกฤต ตรีรัตน์พิจารณ์[2],วรานนท์ คงสง[3],ชัยวัฒน์ ภู่วรกุลชัย[4] และ ประสงค์ ธาราไชย[5]

[1]คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง จังหวัดกรุงเทพมหานคร

[1] Faculty of Engineering, Ramkhamhaeng University, Bangkok Province

*ผู้ให้การติดต่อ (Corresponding author: Phraewphan Kerdpool, E-mail: jayser2822@gmail.com)

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) วิเคราะห์รายการแก้ไขของห้องชุดสำหรับวิศวกรผู้ปฏิบัติงาน (2) จัดลำดับความสำคัญของหมวดงานที่ส่งผลต่อคุณภาพ และ (3) ศึกษาแนวทางการตรวจสอบคุณภาพห้องชุดสำหรับวิศวกรผู้ปฏิบัติงาน เป็นการวิจัยเชิงปริมาณโดยใช้การวิเคราะห์สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Analysis) โดยเก็บรวบรวมข้อมูลจากแบบสอบถามจากกลุ่มตัวอย่างที่เกี่ยวข้องกับงานก่อสร้างอาคารชุด ผลการวิจัยพบว่า หมวดงานที่มีความสำคัญในการตรวจสอบมากที่สุด 3 ลำดับแรก ได้แก่ หมวดงานพื้น มีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 4.39 ประตู–หน้าต่าง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.22 และระบบปรับอากาศ มีค่าเฉลี่ย 4.21 รองลงมาคือ งานผนังและฝ้าเพดาน ขณะที่งานเฟอร์นิเจอร์และสุขภัณฑ์มีความสำคัญในระดับมาก ส่วนงานระบบไฟฟ้ามีความสำคัญระดับปานกลางถึงมากแต่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยโดยตรง โดยสรุปการตรวจสอบทุกหมวดงานมีความสำคัญต่อคุณภาพ และสามารถใช้เป็นแนวทางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมงานและลดรายการแก้ไขก่อนส่งมอบห้องชุด

คำสำคัญ : วิศวกรผู้ปฏิบัติงาน, การตรวจสอบ, คอนโดมิเนียม

Abstract

This research aimed to (1) analyze defect items in condominium units, (2) prioritize construction work categories affecting unit quality, and (3) develop inspection guidelines for practicing engineers. It was a quantitative research using descriptive analysis, with data collected from questionnaires from a sample group involved in condominium construction The results showed that the three most important work categories to inspect were: flooring (average score 4.39), doors and windows (average score 4.22), and air conditioning (average score 4.21). Following these were walls and ceilings. Furniture and sanitary ware were of high importance The findings highlight that all work categories significantly impact overall unit quality and can serve as practical guidelines to enhance quality control efficiency and reduce defects prior to unit handover.

Keywords: Practicing engineers, Inspection, Condominium

1. บทนำ

อุตสาหกรรมอสังหาริมทรัพย์มีบทบาทสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย โดยเฉพาะตลาดอาคารชุดที่มีการแข่งขันสูง ภายใต้ภาวะเศรษฐกิจที่ชะลอตัวและหนี้ครัวเรือนที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ผู้บริโภคให้ความสำคัญกับคุณภาพของห้องชุดมากขึ้น เนื่องจากห้องชุดเป็นทรัพย์สินที่มีมูลค่าสูงและเกี่ยวข้องกับความปลอดภัยในการอยู่อาศัย ดังนั้นคุณภาพของห้องชุดจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความเชื่อมั่นของผู้บริโภคและภาพลักษณ์ของผู้ประกอบการ (ศูนย์ข้อมูลอสังหาริมทรัพย์, 2568) จากข้อมูลสถิติเรื่องร้องทุกข์ด้านอสังหาริมทรัพย์ของสำนักงานคณะกรรมการคุ้มครองผู้บริโภค (2568) พบว่าปัญหาที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพงานก่อสร้างและการตรวจสอบห้องชุดยังคงเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง สะท้อนให้เห็นถึงความสำคัญของกระบวนการตรวจสอบคุณภาพก่อนส่งมอบห้องชุด โดยวิศวกรผู้ควบคุมงานมีบทบาทสำคัญในการตรวจสอบงานสถาปัตยกรรม งานระบบไฟฟ้า งานระบบสุขาภิบาล และงานระบบปรับอากาศ เพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานและลดรายการแก้ไข (Defect) ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมุ่งศึกษาวิเคราะห์ความสำคัญของการตรวจสอบห้องชุดเพื่อจัดลำดับความสำคัญของหมวดงานที่ส่งผลต่อคุณภาพห้องชุด และใช้เป็นแนวทางสำหรับวิศวกรผู้ปฏิบัติงานในการควบคุมคุณภาพก่อนการส่งมอบห้องชุดต่อไป

2. กรอบแนวคิดการวิจัย

2.1 แนวคิดด้านการประเมินและควบคุมคุณภาพ

การประเมินและควบคุมคุณภาพในงานก่อสร้างเป็นกระบวนการสำคัญเพื่อให้โครงการเป็นไปตามมาตรฐานและกฎหมาย เริ่มจากการวางแผนคุณภาพ กำหนดมาตรฐานวัสดุ วิธีการ และความปลอดภัย พร้อมจัดทำแผนควบคุมคุณภาพ (Quality Control Plan) จากนั้นดำเนินการตรวจสอบและทดสอบวัสดุ เช่น คอนกรีตและเหล็กเส้น ให้เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด ต่อด้วยการควบคุมกระบวนการก่อสร้างผ่านการตรวจสอบหน้างานและการทดสอบระหว่างดำเนินงาน เมื่อแล้วเสร็จมีการตรวจสอบขั้นสุดท้ายและทดสอบระบบเพื่อยืนยันความพร้อมใช้งาน รวมถึงการจัดทำรายงานและจัดเก็บเอกสารเป็นหลักฐาน สุดท้าย นำผลการตรวจสอบไปปรับปรุงและแก้ไขข้อบกพร่องเพื่อยกระดับคุณภาพโครงการอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสอดคล้องกับ Gary Marion (2021) ที่กล่าวว่า TQM คือการบริหารคุณภาพโดยรวมเพื่อให้เกิด

การพัฒนาอย่างต่อเนื่องและสร้างความพึงพอใจสูงสุดแก่ลูกค้า หมวดงานไฟฟ้า พื้น และ ประตู-หน้าต่าง เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อคุณภาพโดยรวมของห้องชุด

ตัวแปรต้น		ตัวแปรตาม
1. หมวดงานผนัง 2. หมวดงานประตู/หน้าต่าง 3. หมวดงานพื้น 4. หมวดงานไฟฟ้า 5. หมวดงานฝ้าเพดาน 6. หมวดงานเฟอร์นิเจอร์ 7. หมวดงานปรับอากาศ 8. หมวดงานสุขภัณฑ์	➡	ลำดับความสำคัญของการตรวจสอบห้องชุด

รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นและตัวแปรตาม

2.2 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวกับการตรวจสอบห้องชุด

การตรวจสอบงานห้องชุดเป็นหน้าที่สำคัญของวิศวกรผู้ปฏิบัติงาน เพื่อให้เป็นไปตามกฎหมาย มาตรฐานวิชาชีพ และความปลอดภัย โดยอ้างอิงแนวทางจากคู่มือของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ครอบคลุมทั้งงานสถาปัตยกรรมและงานระบบภายในห้องชุด งานสถาปัตยกรรมเน้นตรวจสอบพื้น ผนัง ฝ้าเพดาน ประตู–หน้าต่าง ราวระเบียง และเฟอร์นิเจอร์ โดยพิจารณาความเรียบ ความแข็งแรง และการใช้งานได้จริง ปราศจากตำหนิ ส่วนงานระบบประกอบด้วยไฟฟ้า ปรับอากาศ ระบายอากาศ และประปาสุขาภิบาล โดยตรวจสอบความถูกต้องตามแบบ มาตรฐานการติดตั้ง และความปลอดภัย พร้อมทดสอบการใช้งานจริง เช่น ระบบไฟฟ้าและการรั่วซึม โดยสรุป การตรวจสอบอย่างเป็นระบบช่วยควบคุมคุณภาพ ลดข้อบกพร่องก่อนส่งมอบ เพิ่มความปลอดภัยและความพึงพอใจของผู้ใช้งาน และเป็นหลักฐานยืนยันคุณภาพงานก่อสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.3 แนวคิดด้านกฎหมายเกี่ยวกับการตรวจสอบห้องชุด

การตรวจสอบงานห้องชุดเป็นหน้าที่สำคัญของวิศวกรผู้ปฏิบัติงาน เพื่อให้เป็นไปตามกฎหมาย มาตรฐานวิชาชีพ และความปลอดภัย โดยอ้างอิงแนวทางจากคู่มือของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ครอบคลุมทั้งงานสถาปัตยกรรมและงานระบบภายในห้องชุด งานสถาปัตยกรรมเน้นตรวจสอบพื้น ผนัง ฝ้าเพดาน ประตู–หน้าต่าง ราวระเบียง และเฟอร์นิเจอร์ โดยพิจารณาความเรียบ ความแข็งแรง และการใช้งานได้จริง ปราศจากตำหนิ ส่วนงานระบบประกอบด้วยไฟฟ้า ปรับอากาศ ระบายอากาศ และประปาสุขาภิบาล โดยตรวจสอบความถูกต้องตามแบบ มาตรฐานการติดตั้ง และความปลอดภัย พร้อมทดสอบการใช้งานจริง เช่น ระบบไฟฟ้าและการรั่วซึม โดยสรุป การตรวจสอบอย่างเป็นระบบช่วยควบคุมคุณภาพ ลดข้อบกพร่องก่อนส่งมอบ เพิ่มความปลอดภัยและความพึงพอใจของผู้ใช้งาน และเป็นหลักฐานยืนยันคุณภาพงานก่อสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.4 แนวคิดด้านกฎหมายเกี่ยวกับการตรวจสอบห้องชุด

การวิจัยนี้อ้างอิงกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับการตรวจสอบห้องชุด ได้แก่ กฎกระทรวงฉบับที่ 33 พ.ศ. 2535 และฉบับที่ 55 พ.ศ. 2543 ตามพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร ซึ่งกำหนดเกณฑ์อาคารและมาตรการด้านความปลอดภัย การออกแบบ และการก่อสร้าง พระราชบัญญัติวิศวกร พ.ศ. 2543 กำหนดบทบาท หน้าที่ และจรรยาบรรณของวิศวกร เพื่อรับรองความถูกต้องของการตรวจสอบ นอกจากนี้ พระราชบัญญัติคุ้มครองผู้บริโภค พ.ศ. 2522 มีบทบาทในการคุ้มครองสิทธิของผู้ซื้อห้องชุด ทั้งด้านข้อมูล ความปลอดภัย และความเป็นธรรม โดยรวมกฎหมายเหล่านี้เป็นกรอบสำคัญในการควบคุมคุณภาพและความน่าเชื่อถือของงานอาคารชุด สอดคล้องกับแนวคิดของ จราวุฒิ อำนักมณี (2565) ที่เสนอว่าการเข้าใจบทบาททางกฎหมายจะช่วยให้วิศวกรและผู้ประกอบการดำเนินงานได้อย่างโปร่งใสและลดข้อพิพาททางธุรกิจ

3.รูปแบบการวิจัย

3.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากรในการวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ ผู้ที่เกี่ยวข้องกับงานก่อสร้างและการตรวจสอบคุณภาพห้องชุด ซึ่งประกอบด้วย วิศวกรควบคุมงาน ผู้จัดการโครงการ วิศวกรออกแบบ โฟร์แมน และบุคลากรอื่น ๆ ที่ปฏิบัติงานเกี่ยวข้องกับการตรวจสอบและควบคุมคุณภาพอาคารชุด โดยกลุ่มตัวอย่างผู้วิจัยใช้วิธีการเลือกแบบเจาะจง (Purposive Sampling) ด้วยวิธีการของ ทาโร่ยามาเน่ (Taro Yamane) จากการคำนวณ ประชากรที่เกี่ยวข้องกับงานห้องชุดในโครงการ A ทำให้ได้จำนวนกลุ่มตัวอย่างเท่ากับ 50 คน โดยที่กลุ่มตัวอย่าง คือ ผู้ที่ปฏิบัติงานด้านก่อสร้างและการควบคุมคุณภาพห้องชุด ที่มีประสบการณ์ทำงานในสายงานก่อสร้าง โดยแบ่งช่วงอายุงาน ได้แก่ น้อยกว่า 3 ปี, 3–5 ปี, 6–10 ปี และมากกว่า 10 ปี

3.2 การเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงปริมาณ โดยเก็บรวบรวมข้อมูลจากแหล่งปฐมภูมิ (Primary Data) ด้วยแบบสอบถามที่พัฒนาจากรายการแก้ไขห้องชุดจริงในโครงการอาคารชุด ครอบคลุม 8 หมวดงาน ได้แก่ งานผนัง งานฝ้าเพดาน งานพื้น งานประตู–หน้าต่าง งานเฟอร์นิเจอร์ งานระบบปรับอากาศ งานสุขภัณฑ์ และงานระบบไฟฟ้า กลุ่มตัวอย่าง คือ วิศวกรควบคุมงาน ผู้จัดการโครงการ โฟร์แมน และบุคลากรที่เกี่ยวข้องกับงานตรวจสอบคุณภาพห้องชุด จำนวน 50 คน โดยใช้วิธีการเลือกแบบเจาะจง (Purposive Sampling) โดยใช้แบบสอบถามเป็นเครื่องมือในการเก็บรวบรวมข้อมูล ซึ่งแบบสอบถามสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ มีค่า IOC เท่ากับ $0.97 \geq 0.50$ คำถามนั้นตรงวัตถุประสงค์ของงานวิจัย โดยกำหนดให้ระดับความเชื่อมั่นของแบบสอบถามมีค่าไม่ต่ำกว่า 0.70 ถึงจะยอมรับได้ว่ามีความเชื่อมั่น ซึ่งแบบสอบถามในงานวิจัยนี้ มีค่าเท่ากับ $0.86 > 0.70$ หมายความว่า แบบสอบถามนั้นมีความเชื่อมั่น และสามารถนำไปใช้ในการวิจัยกับกลุ่มตัวอย่างได้ การวิเคราะห์ความสำคัญของการตรวจสอบห้องชุด โดยใช้สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics) ได้แก่ ค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) เพื่อประเมินระดับความสำคัญของรายการตรวจสอบห้องชุดในแต่ละหมวดงาน จากนั้นนำผลคะแนนมาเรียงลำดับความสำคัญจากมากไปน้อย เพื่อระบุหมวดงานและรายการแก้ไขที่ส่งผลต่อคุณภาพห้องชุดมากที่สุด

ตารางที่1 เกณฑ์การแปลความหมายของระดับความสำคัญของการตรวจสอบห้องชุด

ระดับคะแนน	ความหมายของระดับ
4.20 – 5.00	ระดับมากที่สุด
3.40 – 4.20	ระดับมาก
2.60 – 3.40	ระดับปานกลาง
1.80 – 2.60	ระดับน้อย
1.00 – 1.80	ระดับน้อยที่สุด

4. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

4.1 ผลการวิเคราะห์รายการแก้ไขห้องชุด

การวิเคราะห์จำนวนรายการแก้ไขห้องชุด จำนวน 84 ห้อง ในแต่ละหมวดงาน พบว่า มีจำนวนรายการทั้งหมด 4,523 รายการ ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็น 8 หมวดงานหลัก ได้แก่ หมวดงานผนัง หมวดงานพื้น หมวดงานประตู–หน้าต่าง หมวดงานฝ้าเพดาน หมวดงานไฟฟ้า หมวดงานเฟอร์นิเจอร์ หมวดงานปรับอากาศ และหมวดงานสุขภัณฑ์

ตารางที่2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติของรายการแก้ไขห้องชุดแต่ละหมวดงาน

หมวดงานแก้ไขรายการห้องชุด	จำนวนรายการ	ค่าเฉลี่ย
หมวดงานผนัง	2136	47.23
หมวดงานประตู-หน้าต่าง	970	21.45
หมวดงานพื้น	886	19.59
หมวดงานฝ้าเพดาน	303	6.70
หมวดงานเฟอร์นิเจอร์	157	3.47
หมวดงานสุขภัณฑ์	38	0.84
หมวดงานไฟฟ้า	20	0.44
หมวดงานปรับอากาศ	13	0.29

4.2 ผลการวิเคราะห์ความสำคัญของการตรวจสอบห้องชุด

4.2.1 ผลการวิเคราะห์ความสำคัญของการตรวจสอบห้องชุด หมวดงานผนัง

การวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และการแปลผลค่าเฉลี่ย จากตารางที่ 3 พบว่า หมวดงานผนังโดยภาพรวมอยู่ในระดับมากที่สุดมีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 3.90 พบว่า งานกระเบื้องผนังร่อน เป็นงานที่มีความสำคัญเนื่องจากต้องใช้ระยะเวลาและมีหลากระบวนการในการแก้ไขงาน ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบถึงแผนงานและค่าใช้จ่ายโครงการ

ตารางที่3 ผลการวิเคราะห์ความสำคัญของการตรวจสอบห้องชุด หมวดงานผนัง

หมวดงานผนัง	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	การแปรผล
กระเบื้องร่อน	4.28	0.671	มากที่สุด
งานผนังแตกร้าว	4.16	0.710	มากที่สุด
ผนังเป็นคลื่น/สีด่าง	4.00	0.670	มากที่สุด
กระเบื้องร่องเยื้องไม่ได้แนว	3.74	0.876	มากที่สุด
ยาแนวกระเบื้องไม่เต็ม	3.31	0.940	มาก
ค่าเฉลี่ยรวม	3.90	0.848	มากที่สุด

4.2.2 ผลการวิเคราะห์ความสำคัญของการตรวจสอบห้องชุด หมวดงานประตู-หน้าต่าง

การวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และการแปลผลค่าเฉลี่ย จากตารางที่ 4 พบว่า หมวดงานประตู-หน้าต่างโดยภาพรวมอยู่ในระดับมากที่สุดมีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 4.17 พบว่า หมวดงานประตู-หน้าต่าง พบว่า บานประตูบิ่น แตก บวม และ อุปกรณ์ประตู ล็อกไม่ได้ เป็นรายการที่ได้รับความสำคัญมากที่สุด เนื่องจากส่งผลต่อความปลอดภัยและการใช้งานจริง

ตารางที่4 ผลการวิเคราะห์ความสำคัญของการตรวจสอบห้องชุด หมวดงานประตู-หน้าต่าง

หมวดงานประตู-หน้าต่าง	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	การแปรผล
บานประตูบิ่น/แตก/บวม	4.54	0.542	มากที่สุด
ซับวงกบ/เฟรมอลูมิเนียมไม่ได้ดิ่งบิดเอียง	4.46	0.579	มากที่สุด
อุปกรณ์ประตูล็อคไม่ได้	4.38	0.567	มากที่สุด
บานประตูสีด่าง	3.76	0.744	มากที่สุด
วงกบประตูสีเพี้ยน/สีด่าง	3.72	0.701	มากที่สุด
ค่าเฉลี่ยรวม	4.17	0.721	มากที่สุด

4.2.3 ผลการวิเคราะห์ความสำคัญของการตรวจสอบห้องชุด หมวดงานพื้น

การวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และการแปลผลค่าเฉลี่ย จากตารางที่ 5 พบว่า หมวดงานพื้นโดยภาพรวมอยู่ในระดับมากที่สุดมีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 4.39 พบว่า พื้นลามิเนตบวม กระเบื้องแตกบิ่น ร้าว และ กระเบื้องร่อน ได้รับการให้ความสำคัญมากที่สุด เนื่องจากเป็นปัญหาที่เกิดซ้ำบ่อยและมีผลต่อการใช้งาน

ตารางที่5 ผลการวิเคราะห์ความสำคัญของการตรวจสอบห้องชุด หมวดงานพื้น

หมวดงานพื้น	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	การแปรผล
พื้นลามิเนตบวม	4.62	0.530	มากที่สุด
กระเบื้องน้ำขัง	4.52	0.580	มากที่สุด
กระเบื้องร่อน	4.36	0.749	มากที่สุด
พื้นลามิเนตยวบ/ขึ้นตะเข็บ	4.24	0.657	มากที่สุด
กระเบื้องแตกบิ่น/ร้าว	4.18	0.782	มากที่สุด
ค่าเฉลี่ยรวม	4.39	0.681	มากที่สุด

4.2.4 ผลการวิเคราะห์ความสำคัญของการตรวจสอบห้องชุด หมวดงานไฟฟ้า

การวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และการแปลผลค่าเฉลี่ย จากตารางที่ 6พบว่า หมวดงานไฟฟ้าโดยภาพรวมอยู่ในระดับมากที่สุดมีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 3.23 พบว่า หน้ากากห่างผนัง และ ตู้คอนโทรลติดไม่ระดับเอียง ได้รับการประเมินว่าควรแก้ไข เนื่องจากมีผลต่อความปลอดภัยและมาตรฐานการติดตั้งระบบไฟฟ้า

ตารางที่6 ผลการวิเคราะห์ความสำคัญของการตรวจสอบห้องชุด หมวดงานไฟฟ้า

หมวดงานไฟฟ้า	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	การแปรผล
ตู้ตอนโทรลติดไม่ได้ระดับ/เอียง	3.28	0.948	มาก
หน้ากากห่างผนัง	3.18	1.082	มาก
ค่าเฉลี่ยรวม	3.23	1.014	น้อย

4.2.5 ผลการวิเคราะห์ความสำคัญของการตรวจสอบห้องชุด หมวดงานฝ้าเพดาน

การวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และการแปลผลค่าเฉลี่ย จากตารางที่ 7 พบว่า หมวดงานฝ้าเพดานโดยภาพรวมอยู่ในระดับมากที่สุดมีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 3.90

ตารางที่7 ผลการวิเคราะห์ความสำคัญของการตรวจสอบห้องชุด หมวดงานฝ้าเพดาน

หมวดงานฝ้าเพดาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	การแปรผล
ฝ้าแตกร้าวรอยต่อ	4.04	0.755	มากที่สุด
ฝ้าไม่เรียบ/สีด่าง	3.76	0.771	มากที่สุด
ค่าเฉลี่ยรวม	3.90	0.772	มากที่สุด

4.2.6 ผลการวิเคราะห์ความสำคัญของการตรวจสอบห้องชุด หมวดงานเฟอร์นิเจอร์

การวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และการแปลผลค่าเฉลี่ย จากตารางที่ 8 พบว่า หมวดงานเฟอร์นิเจอร์ โดยภาพรวมอยู่ในระดับมากที่สุดมีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 3.68 ชุดเฟอร์นิเจอร์บิ่น/ถลอก และ ติดตั้งไม่ได้ระดับ/ไม่ตรงแนว เป็นรายการที่ถูกจัดลำดับความสำคัญมากที่สุด

ตารางที่8 ผลการวิเคราะห์ความสำคัญของการตรวจสอบห้องชุด หมวดงานเฟอร์นิเจอร์

หมวดงานเฟอร์นิเจอร์	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	การแปรผล
ชุดเฟอร์นิเจอร์บิ่น/ถลอก	4.02	0.685	มากที่สุด
ชุดเฟอร์นิเจอร์สีเพี้ยน	3.98	0.769	มากที่สุด
ติดตั้งไม่ได้ระดับ/ไม่ได้แนว	3.78	1.016	มากที่สุด
เก็บซิลิโคนไม่เรียบร้อย	2.92	1.175	น้อย
ค่าเฉลี่ยรวม	3.68	1.027	มากที่สุด

4.2.7 ผลการวิเคราะห์ความสำคัญของการตรวจสอบห้องชุด หมวดงานปรับอากาศ

การวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และการแปลผลค่าเฉลี่ย จากตารางที่ 9 พบว่า หมวดงานปรับอากาศ โดยภาพรวมอยู่ในระดับมากที่สุดมีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 4.21 แอร์ไม่เย็น และ แอร์มีน้ำซึม ได้รับความสำคัญสูงสุด เนื่องจากส่งผลโดยตรงต่อภาพลักษณ์และการใช้งาน

ตารางที่9 ผลการวิเคราะห์ความสำคัญของการตรวจสอบห้องชุด หมวดงานปรับอากาศ

หมวดงานปรับอากาศ	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	การแปรผล
แอร์ไม่เย็น	4.84	0.685	มากที่สุด
แอร์มีน้ำซึม	4.82	0.769	มากที่สุด
คอยน์ร้อนพัดลมเสียงดัง	4.04	1.175	มากที่สุด
ท่อน้ำทิ้งไม่แนบผนัง	3.10	1.016	มากที่สุด
ค่าเฉลี่ยรวม	4.21	1.065	มาก

4.2.8 ผลการวิเคราะห์ความสำคัญของการตรวจสอบห้องชุด หมวดงานสุขภัณฑ์

การวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และการแปลผลค่าเฉลี่ย จากตารางที่ 10 พบว่า หมวดงานสุขภัณฑ์ โดยภาพรวมอยู่ในระดับมากที่สุดมีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 3.41 รายการการติดตั้งไม่แข็งแรง และ แนวซิลิโคนไม่สม่ำเสมอ เป็นรายการที่ได้รับการประเมินว่ามีความสำคัญเนื่องจากส่งผลต่อการใช้งาน

ตารางที่10 ผลการวิเคราะห์ความสำคัญของการตรวจสอบห้องชุด หมวดงานสุขภัณฑ์

หมวดงานสุขภัณฑ์	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	การแปรผล
ติดตั้งไม่แข็งแรง	4.62	0.530	มากที่สุด
คราบสกปรก	2.90	1.298	น้อย
แนวซิลิโคนไม่สม่ำเสมอ	2.72	1.325	น้อย
ค่าเฉลี่ยรวม	3.41	1.401	มาก

จากการวิเคราะห์ข้อมูลความสำคัญของการตรวจสอบห้องชุด จะเห็นได้ว่า หมวดงานพื้นมีรายการแก้ไขมากที่สุด เนื่องจากส่งผลกระทบโดยตรงต่อคุณภาพงาน และอาจต้องเสียค่าใช้จ่ายในการแก้ไขสูงกว่างานประเภทอื่น ทำให้วิศวกรผู้ปฏิบัติงานต้องตรวจสอบอย่างละเอียดทั้งในด้านวัสดุ การติดตั้ง และการป้องกันความชื้น เพื่อให้มั่นใจว่ามีความแข็งแรง ทนทาน และคงทนต่อการใช้งานในระยะยาว

4.3 ผลวิเคราะห์แนวทางการตรวจสอบห้องชุด

จากการวิเคราะห์พบว่า แนวทางการตรวจสอบห้องชุดที่มีประสิทธิภาพควรดำเนินการอย่างเป็นระบบ โดยแบ่งกระบวนการตรวจสอบออกเป็นช่วงก่อน ระหว่าง และหลังการดำเนินงานในแต่ละหมวดงาน

ตารางที่11 แนวทางการตรวจสอบห้องชุดแต่ละหมวดงาน

หมวดงาน	ช่วงเวลาในการตรวจสอบ	แนวทางการตรวจสอบ
งานพื้น	ก่อน–ระหว่างเทปรับระดับ	ตรวจความสะอาดพื้น โครงสร้าง ระดับอ้างอิง ความหนาและระดับการเทให้เป็นไปตามแบบ
	หลังเทปรับระดับ	พื้นเรียบ ไม่มีโพรงหรือรอยร้าว บ่มพื้นตามระยะเวลาที่กำหนด
	ระหว่าง–หลังปูพื้น	วัสดุได้มาตรฐาน ปูเต็มแผ่น แนวตรง ไม่ยวบ ไม่เกิดน้ำขัง
งานผนัง	ก่อน–ระหว่างฉาบ	ผนังสะอาด ชุ่มน้ำ ติดลวดตาข่ายรอยต่อ ฉาบได้ดิ่งและฉาก
	หลังฉาบ	ผนังเรียบ ไม่แตกร้าว บ่มครบก่อนทำงานถัดไป
	ระหว่าง–หลังปูกระเบื้อง	ใช้ปูนกาวเหมาะสม แนวตรงยาแนวเต็ม ไม่เกิดกระเบื้องร่อน
งานประตู–หน้าต่าง	ติดตั้งวงกบ	วงกบตั้งฉาก ได้ดิ่ง ยึดแน่นระยะเผื่องานฉาบถูกต้อง
	ติดตั้งบาน	บานไม่บิดงอ เปิด–ปิดสนิท อุปกรณ์ครบ ใช้งานได้
งานฝ้าเพดาน	ติดตั้งโครงฝ้า	โครงคร่าวแข็งแรง ระยะห่างถูกต้อง ตรวจระดับก่อนปิดฝ้า
	ปิดแผ่นฝ้า	แผ่นฝ้าติดตั้งเรียบ แนบสนิท เก็บรอยต่อเรียบร้อย
งานเฟอร์นิเจอร์	ก่อนติดตั้ง	วัสดุไม่ชำรุด สีและผิวตรงตามแบบ
	ระหว่างติดตั้ง	ติดตั้งได้ระดับ ไม่เอียง งานซิลิโคนเรียบร้อย
งานสุขภัณฑ์	ก่อนติดตั้ง	วัสดุและตำแหน่งถูกต้อง ไม่มีรอยแตกร้าว
	หลังติดตั้ง	ติดตั้งแข็งแรง แนวซิลิโคนสม่ำเสมอ ทดสอบไม่รั่วซึม
งานไฟฟ้า	ระหว่างติดตั้ง	เดินท่อและสายตามแบบ กล่องและตู้ไฟได้ระดับ
	หลังติดตั้ง	หน้ากากแนบผนัง ทดสอบวงจรใช้งานได้
งานระบบปรับอากาศ	ระหว่างติดตั้ง	ตำแหน่งท่อถูกต้อง ท่อน้ำทิ้งมีความลาดเอียง
	หลังติดตั้ง	ทดสอบการทำงาน แอร์เย็น ไม่มีน้ำหยดหรือเสียงผิดปกติ

หมายเหตุ: งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการค้นคว้าอิสระ เรื่อง วิเคราะห์ความสำคัญของการตรวจสอบห้องชุดของมหาวิทยาลัยรามคำแหง ซึ่งได้แนบแบบมาตรฐานในการตรวจสอบสำหรับวิศวกรผู้ปฏิบัติงานในภาคผนวก ง.

4.4 ผลการวิเคราะห์ความรู้ด้านกฎหมายที่เกี่ยวข้อง

จากการวิเคราะห์แบบสอบถามข้อมูลเพิ่มเติม พบว่า กลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่ มีความเข้าใจกฎหมายและ กี่ยวกับบทบาทและขอบเขตหน้าที่ของวิศวกรควบคุมงาน กฎหมายควบคุมอาคารใช้กำหนดลักษณะและข้อกำหนดของอาคารชุด แต่วิศวกรส่วนใหญ่ไม่เข้าใจสิทธิของผู้บริโภคในการร้องเรียนหรือสามารถเรียกร้องค่าชดเชยเมื่องานก่อสร้างไม่ได้มาตรฐาน

5. สรุปผลการวิจัย

จากรายการแก้ไขตรวจสอบห้องชุดสำหรับวิศวกรผู้ปฏิบัติงาน พบว่า รายการแก้ไขห้องชุด 3 ลำดับแรกที่มีรายการแก้ไขมากที่สุด ได้แก่ หมวดงานผนัง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 47.23 รายการที่พบส่วนใหญ่ คือ ผนังแตกร้าว ผนังเป็นคลื่น/สีด่าง กระเบื้องผนังร่อน หมวดงานประตู-หน้าต่าง รายการที่พบส่วนใหญ่ คือ บานประตูบิ่น แตก บวม บานประตูสีด่าง วงกบประตูสีเพี้ยน ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 21.45 และ หมวดงานพื้น รายการที่พบส่วนใหญ่ คือ พื้นลามิเนตยวบ ขึ้นตะเข็บ พื้นลามิเนตบวม กระเบื้องแตกบิ่น ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 19.59

วิศวกรผู้ปฏิบัติงาน พบว่า หมวดงานที่มีความสำคัญในการตรวจสอบมากที่สุด 3 ลำดับแรก คือ หมวดงานพื้น มีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 4.39 ซึ่งรายการที่มีความสำคัญในการตรวจสอบ ได้แก่ พื้นลามิเนตบวม กระเบื้องพื้นน้ำขัง กระเบื้องพื้นร่อน หมวดงานประตู-หน้าต่าง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.22 รายการที่มีความสำคัญในการตรวจสอบ ได้แก่ บานประตูบิ่น แตก บวม ซับวงกบอลูมิเนียม ไม่ได้ดิ่งบิดเอียง อุปกรณ์ประตูล็อคไม่ได้ และหมวดงานปรับอากาศ มีค่าเฉลี่ย 4.21 รายการที่มีความสำคัญในการตรวจสอบ ได้แก่ แอร์ไม่เย็น แอร์มีน้ำซึม ซึ่งทั้ง 3 หมวดงานมีระดับความสำคัญในการตรวจสอบ มากที่สุด

แนวทางการตรวจสอบห้องชุดสำหรับวิศวกรผู้นวทางการตรวจสอบห้องชุดสำหรับวิศวกรผู้ปฏิบัติงานที่มีประสิทธิภาพ ควรดำเนินการอย่างเป็นระบบ โดยแบ่งการตรวจสอบออกเป็นช่วงก่อน ระหว่าง และหลังการดำเนินงาน เพื่อลดข้อบกพร่องและการแก้ไขงานซ้ำซ้อนก่อนส่งมอบห้องชุด จากการวิเคราะห์พบว่า หมวดงานพื้นที่มีความสำคัญสูงที่สุด โดยควรตรวจสอบระดับพื้น ความเรียบ ความสะอาด และคุณภาพการติดตั้งวัสดุปูพื้น รวมถึงตรวจสอบปัญหากระเบื้องร่อนและน้ำขังในพื้นที่โซนเปียก ส่วนหมวดงานประตู–หน้าต่าง ควรตรวจสอบการติดตั้งวงกบ บานประตู และอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้ได้ระดับและสามารถใช้งานได้สมบูรณ์ ขณะที่หมวดงานระบบปรับอากาศ ควรตรวจสอบตำแหน่งติดตั้ง การเดินท่อและสายไฟ รวมถึงทดสอบการทำงานหลังติดตั้งให้เป็นไปตามมาตรฐานดังนั้น แนวทางการตรวจสอบห้องชุดสำหรับวิศวกรผู้ปฏิบัติงาน ควรแบ่งกระบวนการตรวจสอบออกเป็นช่วงก่อน ระหว่าง และหลังการดำเนินงานในแต่ละหมวดงาน เพื่อลดการแก้ไขงานที่ซ้ำซ้อนและสามารถควบคุมคุณภาพงานก่อสร้างได้อย่างต่อเนื่อง

6. ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะ

การวิจัยครั้งนี้ศึกษาข้อมูลจากโครงการอาคารชุดเพียงบางโครงการ และประเมินความสำคัญของรายการตรวจสอบจากความคิดเห็นของผู้ปฏิบัติงานด้านวิศวกรรมก่อสร้าง ซึ่งอาจแตกต่างกันตามประสบการณ์และลักษณะของโครงการ อย่างไรก็ตาม ผลการวิจัยสามารถใช้เป็นแนวทางในการจัดทำรายการตรวจสอบ (Checklist) และวางแผนการตรวจสอบคุณภาพห้องชุด โดยควรให้ความสำคัญกับหมวดงานที่พบข้อบกพร่องบ่อย เพื่อลดปัญหาก่อนการส่งมอบห้องชุด และควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในโครงการประเภทอื่นเพื่อพัฒนาแนวทางการควบคุมคุณภาพงานก่อสร้างให้ครอบคลุมมากยิ่งขึ้น

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาการตรวจสอบและกฎหมายวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง และคณะกรรมการดำเนินการประชุมวิชาการครั้งนี้ ที่ให้คำแนะนำและสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยจนทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วง

เอกสารอ้างอิง

[1] Akalya Shanmuganathan, “ASSESSMENT OF IMPACT OF LATENT DEFECTS IN CONDOMINIUMS IN SRI LANKA” *Dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Project Management. University of Moratuwa Sri Lanka.*2020

[2] Chin-Tai Kuo, “A novel condominium management mode in Taiwan *Journal of Urban Management*., volume 9, Pages 6–18 Issue 1, 2020.

[3] Masatomo Suzuki and Chihiro Shimizu, “Obsolete housing equipment, weak renovation, and rapid depreciation of Japanese condominium,” *Journal of the Japanese and International Economies*, Volume 71, 2024

[4] M. Young, *The Technical Writer’s Handbook*. Mill Valley, CA: University Science, 1989.

[5] กรกฎ เพชรนุ้ย, “การวิเคราะห์ปัญหาการตรวจสอบอาคารชุดพักอาศัยในเขตปริมณฑล,” *มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. คณะวิศวกรรมศาสตร์. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา*, 2555

[6] กรมโยธาธิการและผังเมือง,“พระราชบัญญัติควบคุมอาคาร”, *มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร์.* สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, กรุงเทพมหานคร สำนักพิมพ์ราชกิจจานุเบกษา, ฉบับที่ 3, 2543

[7] จราวุฒิ อำนักมณี และคณะ, “ปัญหาทางกฎหมายเกี่ยวกับการประกอบธุรกิจขายห้องชุด,” *วารสารวิจัยราชภัฏกรุงเก่า มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา*, 2565

[8] พิมพิดา ฝั่งสินธุ์ และคณะ, “การศึกษาสาเหตุความล่าช้าต่อการตรวจรับห้องของคอนโดมิเนียม,” *การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 61*, 2565

[9] ศูนย์ข้อมูลอสังหาริมทรัพย์,“รายงานสถานการณ์ตลาดอสังหาริมทรัพย์,” *สำนักงานส่งเสริมธุรกิจอสังหาริมทรัพย์,* 2565

[10] สภาวิศวกร, ,“พระราชบัญญัติวิศวกร,” *กรุงเทพมหานคร ราชกิจจานุเบกษา*, 2542

[11] สำนักงานคณะกรรมการคุ้มครองผู้บริโภค ,“สถิติการร้องเรียนของผู้บริโภค,” *สำนักงานคณะกรรมการคุ้มครองผู้บริโภค,* 2568

[12] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์,“คู่มือการตรวจรับงานก่อสร้างห้องชุด,” *สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์,* 2566

[13] วรพันธุ์ จิตต์อาจหาญ และ มงคล อัศวดิลกฤทธิ์ผู้บริโภค ,“ปัญหางานโครงสร้างและงานสถาปัตยกรรมภายหลังการส่งมอบงานอาคารชุดแนวราบ,” *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ครั้งที่27,* 2565

[14] ภานุพงศ์ นิลตะโกและคณะผู้บริโภค,“แนวทางการตรวจสอบห้องชุดก่อนรับโอนกรรมสิทธิ์,”*วารสารวิจัยรำไพพรรณี*, 2565

[15] อาทิตพล คลังพล และ ไพจิตร ผาวัน,“การพัฒนากรอบงานการตรวจสอบข้อบกพร่องโครงการก่อสร้างคอนโดมิเนียม,”*วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล,* 2566



ประวัติผู้เขียนบทความ

นางสาวแพรวพรรณ เกิดพูล

สำเร็จการศึกษาระดับ ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

พัฒนาดินซีเมนต์ลูกรังผสมเศษกระเบื้องเซรามิกเป็นอิฐประสาน

Development of Interlocking Bricks from Cement-Stabilized Laterite and Recycled Ceramic Waste

นิโรจน์ เงินพรหม[1*] บูชิต มาโห้[1] ธนพัฒน์ น้ำจันทร์[1] กฤษดา เสือเอี่ยม[1]

ขวัญชนก อุนทะอ่อน[1] จักรพันธ์ แสงสุวรรณ[1] ณัชพงศ์พล คงชะสิงห์[1] ดารกร อินทรบุตร[1]และภัทรชัย พงศ์โสภา[1*]

[1]สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพฯ

1381 ถ. พิบูลสงคราม แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

Email: nirojn.n@rmutp.ac.th[*] , buchit.m@rmutp.ac.th , tanapat.n@rmutp.ac.th , gritsada.s@rmutp.ac.th , kwanchanok.o@rmutp.ac.th , chakkarphan.s@rmutp.ac.th, nutchapongpol.k@rmutp.ac.th, darrakorn.i@rmutp.ac.th, phattharachai.p@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของดินซีเมนต์ลูกรังผสมเศษกระเบื้องเซรามิกเพื่อพัฒนาเป็นวัสดุก่อสร้างทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม จากการตรวจสอบคุณสมบัติของดินลูกรัง พบว่าเป็นดินชั้นคุณภาพ A1 จัดอยู่ในประเภทดินกรวด-ทราย (Clayey Gravel-Sand) หลังจากนั้นได้ทำการเตรียมตัวอย่างตามอัตราส่วนผสมของ ปูนซีเมนต์:ดินลูกรัง:เศษกระเบื้องเซรามิก ซึ่งพบว่าทุกอัตราส่วนสามารถขึ้นรูปได้สำเร็จ ยกเว้นอัตราส่วนที่มีเศษกระเบื้องเซรามิกบด 100% ซึ่งขึ้นรูปได้แต่ไม่มีความสมบูรณ์และเปราะบางผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสม โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1.496 ถึง 325.896 กก./ตร.ซม. ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการใช้เศษกระเบื้องเซรามิกในสัดส่วนที่เหมาะสมสามารถช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับวัสดุได้ ในด้านคุณสมบัติทางกายภาพ พบว่าค่าการดูดซึมน้ำ อยู่ในช่วง 10.69% ถึง 22.23% ซึ่งสะท้อนถึงประสิทธิภาพของปูนซีเมนต์ในการลดช่องว่างในเนื้อวัสดุและเพิ่มความทึบน้ำ นอกจากนี้ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจากการดูดและสูญเสียความชื้น แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่คงรูปได้หลังแช่น้ำมีค่าการเปลี่ยนแปลงเป็น 0% ซึ่งยืนยันว่าวัสดุมีความเสถียรทางปริมาตรสูง และทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นในสภาพแวดล้อม โดยสรุปแล้ว วัสดุที่พัฒนาขึ้นนี้มีศักยภาพในการนำไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง เนื่องจากมีคุณสมบัติที่น่าพอใจทั้งด้านความแข็งแรง การดูดซึมน้ำ และความคงทนของปริมาตร ซึ่งสอดคล้องกับเป้าหมายในการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือใช้เพื่อลดต้นทุนและส่งเสริมการพัฒนาอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ : ดินลูกรัง, วัสดุเหลือทิ้ง, เศษกระเบื้องเซรามิก

Abstract

This research aims to study the physical and mechanical properties of lateritic soil-cement mixed with crushed ceramic tile waste to develop it into an alternative and environmentally friendly building material. A characterization of the lateritic soil revealed that it is a Class A1 soil, classified as clayey gravel-sand. Test specimens were then prepared using various ratios of cement:lateritic soil:crushed ceramic tile, and it was found that all ratios could be molded successfully, with the exception of the 100% crushed ceramic tile ratio, which was moldable but structurally unstable and brittle. The results of the compressive strength test showed a direct relationship with the cement content, with values ranging from 1.496 ksc. to 325.896 ksc. This indicates that incorporating crushed ceramic tile waste in an appropriate proportion can help enhance the material's strength. In terms of physical properties, the water absorption test revealed values ranging from 10.69% to 22.23%, which reflects the effectiveness of cement in reducing voids within the material and increasing its water tightness. Furthermore, the volume change test after moisture absorption and loss showed a 0% change in samples that remained stable after water immersion. This confirms that the material has high dimensional stability and is resistant to volume changes caused by environmental moisture fluctuations.In conclusion, the developed lateritic soil-cement mixed with crushed ceramic tile waste has high potential for use as a building material. Its desirable properties, including compressive strength, water resistance, and dimensional stability, align with the goal of utilizing waste materials to reduce costs and promote sustainable development.

Keywords: Laterite Soil, Waste Meterial, Ceramic tile fragments

1. บทนำ

ในปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมก่อสร้างทั่วโลกกำลังเผชิญกับความท้าทายในการพัฒนาสู่ความยั่งยืน ทั้งในด้านการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า ส่งผลให้ผู้วิจัยเกิดความสนใจในการศึกษาวัสดุก่อสร้างทางเลือกที่สามารถที่สามารถตอบโจทย์

ดังกล่าวได้ วัสดุอย่างดินลูกรัง ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และวัสดุรีไซเคิล เช่น เศษกระเบื้องเซรามิก จึงเป็นวัสดุที่มีศักยภาพสูงในการพัฒนาเพื่อนำมาใช้ในการสร้างผลิตภัณฑ์ก่อสร้างที่ทั้งทนทานและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ดินลูกรังเป็นวัสดุธรรมชาติที่หาได้ง่ายและมีต้นทุนต่ำในภูมิภาคเขตร้อนและกึ่งเขตร้อน มีการนำมาใช้ในการก่อสร้างอย่างแพร่หลาย เช่น งานถนน ฐานราก และทางเดิน อย่างไรก็ตาม การใช้ดินลูกรังในการก่อสร้าง แต่คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังสามารถปรับปรุงให้ดียิ่งขึ้นได้ด้วยเทคนิคการเสริมแรงต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งเป็นวัสดุยึดเกาะที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการก่อสร้างเนื่องจากมีความแข็งแรงและความทนทานสูง อย่างไรก็ตาม การผลิตซีเมนต์นั้นส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมหาศาล ซึ่งเป็นหนึ่งในสาเหตุหลักของภาวะโลกร้อน ปัญหานี้ได้กระตุ้นให้เกิดการค้นคว้าการใช้วัสดุทดแทนหรือการเสริมวัสดุที่ยั่งยืนมากขึ้น เศษกระเบื้องเซรามิก ซึ่งเป็นของเหลือจากอุตสาหกรรมก่อสร้างและอุตสาหกรรมเซรามิก ถือเป็นวัสดุเหลือใช้ที่มีคุณสมบัติในการนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งไม่เพียงแต่จะช่วยลดปริมาณขยะจากการฝังกลบเท่านั้น แต่ยังมีศักยภาพในการช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุก่อสร้างได้อีกด

การศึกษาสมบัติของดินลูกรังที่ผสมกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเศษกระเบื้องโดยการประเมินผลกระทบจากการใช้เศษกระเบื้องเซรามิกในสัดส่วนต่างๆ ในการผสมซีเมนต์และดินลูกรังการศึกษานี้จะช่วยให้เราเข้าใจถึงศักยภาพในการปรับปรุงความแข็งแรงการทำงานและความยั่งยืนของวัสดุก่อสร้าง รวมทั้งประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในการใช้เศษกระเบื้องโดยมุ่งเน้นที่การลดขยะ การลดการปล่อยคาร์บอนจากกระบวนการผลิตซีเมนต์ และยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่เศษกระเบื้องจากอุตสาหกรรมก่อสร้าง ทำให้เพิ่มรายได้จากการขายเศษกระเบื้องที่เป็นผลพลอยได้ และเปลี่ยนวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมก่อสร้างเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่มีราคาในตัวมันเองได้อย่างยั่งยืน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการนำเศษกระเบื้องเซรามิกมาใช้เป็นส่วนผสมใน อิฐประสานดินซีเมนต์ เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีในการนำเศษกระเบื้องเซรามิกไปใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ และทำให้เกิดความมั่นใจแก่อุตสาหกรรมก่อสร้างไทย ที่จะนำเศษกระเบื้องเซรามิกไปใช้งาน ซึ่งไม่เพียงแต่จะช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมจากวัสดุกากของเสียและลดพื้นที่กำจัดขยะ แต่ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่เศษกระเบื้องและสร้างความมั่นใจให้กับอุตสาหกรรมก่อสร้างของไทยในการนำวัสดุทางเลือกนี้ไปใช้งานได้อย่างยั่งยืนในเชิงพาณิชย์ต่อไป

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

2.1.1 วัสดุประสาน (Binder materials) ได้แก่ ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ผลิตภายในประเทศยี่ห้อปูนอินทรีเพชร พลัส ได้รับการรับรองตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 15) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และมาตรฐาน ASTM C150 Type I มีคุณสมบัติ ทั่วไปเหมาะสำหรับงานคอนกรีต และนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (Nano- $CaCO_3$) มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร (60 นาโนเมตร) ลักษณะเป็นผง ละเอียดมาก นุ่ม ลื่น ปราศจากโลหะหนักตามมาตรฐาน RoHS

2.1.2 ดินลูกรัง (laterite soil) ใช้ตัวอย่างดินจากในพื้นที่ อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรีดังแสดงในรูปที่ 1 ผ่านการทดสอบเพื่อหาขนาดคละ มวลคละผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาดตะแกรงเบอร์ 40 ซึ่งจากการทำการทดสอบแล้วนั้น ผ่านตะแกรงเบอร์ 10 ร้อยละ 43.60 ผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ร้อยละ16.65 ผ่านตะแกรงเบอร์ 100 ร้อยละ 5.80 ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ร้อยละ 2.50 ดังแสดงในตารางที่ 1 และการทดสอบหาค่าพิกัด Atterberg โดยใช้มาตรฐาน ASTM D422-63, AASHTO T88, ASTM D 423-66 และASTM D 424-59 ดังแสดงในตารางที่ 2 และผ่านการร่อนด้วยตะแกรงเบอร์16 และตกค้างบนตะแกรงร่อนเบอร์20 เพื่อให้ได้อนุภาคที่มีขนาดเหมาะสมต่อการทดสอบ

2.1.3 เศษกระเบื้องเซรามิก (Ceramic) เป็นวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมงานก่อสร้าง ซึ่งเป็นเศษกระเบื้องเกิดจากการตัดเข้ามุม การแตกร้าว แล้วไม่สามารถนำไปใช้งานต่อได้ จึงเป็นเศษกระเบื้องที่ถูกทิ้ง เศษกระเบื้องเซรามิกที่ได้นำมาจากบริษัท วี.เอ็ม.ไอ.อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยนำเศษกระเบื้องไปบดให้แตกละเอียดโดยเครื่องลอสแองเจลิส จากนั้นทำการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ดังแสดงในรูปที่ 3 เพื่อให้ได้อนุภาคที่มีขนาดเหมาะสมต่อการทดสอบ

2.1.4 น้ำประปา คือน้ำที่ใช้ในการผสม ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานคุณภาพน้ำสำหรับงานก่อสร้าง (ค่า pH 6–8 และไม่มีสิ่งเจือปนที่เป็นอันตราย)

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบขนาดคละของดินลูกรัง

การทดสอบขนาดคละ	หน่วย	ผลการทดสอบ
1. %ผ่านตะแกรงเบอร์ 1/2	%	94.10
2. %ผ่านตะแกรงเบอร์ 3/8	%	89.10
3. %ผ่านตะแกรงเบอร์ 4	%	82.15
4. %ผ่านตะแกรงเบอร์ 10	%	43.20
5. %ผ่านตะแกรงเบอร์ 40	%	16.65
6. %ผ่านตะแกรงเบอร์ 100	%	5.80
7. %ผ่านตะแกรงเบอร์ 200	%	2.50
Coefficient of Uniformity ,	**Cu**	12.183
Coefficient of Curvature ,	**Cc**	1.145



รูปที่ 1 ดินลูกรังที่ใช้ในการศึกษา



รูปที่ 2 เศษกระเบื้องเซรามิก



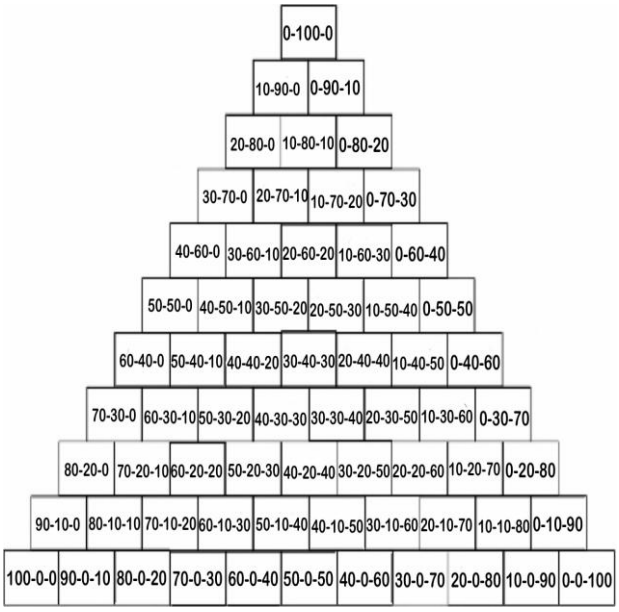
รูปที่ 3 เศษกระเบื้องเซรามิกที่ผ่านการบดและร่อนผ่านตะแกรง

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานพิกัด Atterberg ของดินลูกรัง

ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานพิกัด Atterberg	หน่วย	ผลการทดสอบ
1. พิกัดเหลว (Liquid Limit, LL)	%	27.45
2. พิกัดพลาสติก (Plastic Limit, PL)	%	21.56
3. พิกัดหดตัวของดิน (Shrinkage Limit)	%	11.61
4. ดัชนีมวลดิน (Plasticity Index, PI)	%	5.89
5. ดัชนีความชื้นของดิน (Liquidity Index, LI)	%	0.10

2.2 อัตราส่วนผสมและการเตรียมตัวอย่าง

อัตราส่วนผสมดินซีเมนต์ลูกรังผสมเศษกระเบื้องเซรามิค ในการออกแบบอัตราส่วนผสม ให้คำนึงถึงการทำงานจริง ง่ายต่อการคำนวณและการผสม จึงกำหนดการออกแบบโดยน้ำหนัก และควบคุมปริมาณน้ำ 20% ของน้ำหนัก ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 อัตราส่วนผสมของตัวอย่าง ปูนซีเมนต์-ดินลูกรัง-เศษกระเบื้อง



รูปที่ 5 ก้อนตัวอย่างที่ขึ้นรูปตามอัตราส่วนผสมของตัวอย่าง ปูนซีเมนต์-ดินลูกรัง-เศษกระเบื้อง

การเตรียมตัวอย่างทดสอบดินซีเมนต์ลูกรังผสมเศษกระเบื้องเซรามิก เตรียมสัดส่วนผสมโดยนำปูนซีเมนต์ ดินลูกรัง และเศษกระเบื้องเซรามิก ชั่งตวงวัสดุทั้งหมดตามสัดส่วน นำมาผสมตามอัตราส่วนผสมที่

กำหนดดังแสดงในรูปที่ 4 จากนั้นผสมกับน้ำตามค่าปริมาณความชื้นที่กำหนดไว้ แล้วผสมให้เข้ากัน หลังจากนั้นนำดินที่ผสมแล้วใส่ลงแบบหล่อ 50×50×50 mm.โดยแบ่งใส่ลงในแบบหล่อ เป็น 2 ชั้น ชั้นแรกหนาประมาณ 25 มิลลิเมตร โดยใส่ดินตัวอย่างที่ผสมลงในช่องแบบหล่อแต่ละช่อง แล้วกระทุ้งด้วยแท่งกระทุ้ง (Tamper Rod) 32 ครั้ง ใน 10 วินาที โดยให้กระทุ้งเป็น 4 รอบ โดยแต่ละรอบให้ตั้งฉาก น้ำหนักในการกระทุ้งให้แรงพอที่จะให้วัสดุผสมแผ่ไปทั่วแบบหล่อเท่ากัน เมื่อกระทุ้งครบ 4 รอบแล้วใส่ที่เหลือลงไปในแบบหล่อ แล้วกระทุ้งเช่นเดียวกับชั้นแรก โดยเมื่อกระทุ้งเสร็จให้ดินตัวอย่างสูงกว่าแบบหล่อเล็กน้อย จากนั้นใช้เกรียงเหล็กปาดส่วนที่ล้นติดขอบแบบลงมาให้ผิวชิ้นงานเรียบ หลังจากหล่อก้อนตัวอย่างเสร็จ ปล่อยทิ้งไว้ให้ครบ 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบจะได้ก้อนตัวอย่างดังรูปที่ 5 แล้วนำไปบ่มด้วยการคลุมพลาสติกตามระยะเวลา 7 วัน และนำไปทดสอบในขั้นตอนต่อไป

2.3 การทดสอบ

การจำแนกขนาดของดินโดยวิธีการร่อนผ่านตะแกรง มาตรฐานตามมาตรฐาน ASTM D 422-63 การทดสอบนี้ ใช้ในการวิเคราะห์และจำแนกขนาดอนุภาคของดิน โดย ทำการร่อนดินผ่านตะแกรงที่มีขนาดช่องตะแกรงมาตรฐานต่าง ๆ เพื่อตรวจสอบว่าดินมีองค์ประกอบเป็นทราย กรวด หรือดินเหนียวมากน้อยเพียงใด ข้อมูลที่ได้จะถูกนำไปใช้ในการจำแนกประเภทดินตามระบบมาตรฐาน โดยนำตัวอย่างดินแห้งที่ผ่านการบดและเตรียมไว้แล้วร่อนตัวอย่างดิน ผ่านชุดตะแกรงมาตรฐานที่มีขนาดต่างกัน (จากขนาดใหญ่ ไปเล็ก) ดังแสดงในรูปที่ 6 จากนั้นชั่งน้ำหนักดินที่ตกค้างบน แต่ละตะแกรง และคำนวณเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของดินที่ค้าง บนตะแกรงแต่ละขนาด

การทดสอบหาขีดจำกัดความข้นเหลวของดิน ตามมาตรฐาน ASTM D 4318-93 เพื่อหาค่าขีดจำกัดความ ข้นเหลว (Liquid Limit; LL) ของดิน ซึ่งเป็นปริมาณน้ำ ที่ดินเริ่มเปลี่ยนจากสถานะพลาสติกเป็นสถานะไหลได้ การทดสอบจะใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Casagrande Apparatus โดยการสร้างร่องในตัวอย่างดินที่มีความชื้นและให้เกิดการเคลื่อนตัวของดินเมื่อทำการกระแทก การทดสอบนี้ช่วย บ่งชี้คุณสมบัติของดินเหนียวในสถานะต่าง ๆ โดยเตรียมดิน ให้มีความชื้นที่แตกต่างกันหลายระดับใส่ดินลงในถ้วยของ เครื่องมือ Casagrande และสร้างร่องตรงกลางดิน ปล่อยให้ เครื่องตีลงบนถ้วยแล้วนับจำนวนครั้งที่ทำให้ร่องดินปิดสนิท ดังแสดงในรูปที่ 7 ทำซ้ำหลายครั้งเพื่อหาความสัมพันธ์ ระหว่างจำนวนครั้งที่ร่องปิดสนิทและความชื้นของดิน จากนั้น สร้างกราฟและคำนวณขีดจำกัดความข้นเหลวจากจำนวน ครั้ง 25 ครั้ง

การทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยใช้ก้อนตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 50×50×50 mm. วางตัวอย่างบนแท่นกดให้ระนาบรับแรงตั้งฉากกับทิศทางการหล่อ และเพิ่มแรงกดในอัตราคงที่จนวิบัติ โดยทำการทดสอบที่อายุ 7 วัน

การทดสอบการดูดซึมน้ำ โดยทำให้ตัวอย่างแห้งในเตาอบที่อุณหภูมิมาตรฐานจนมวลคงที่ ชั่งมวลแห้งจากนั้นแช่น้ำสะอาดที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง เช็ดผิวให้แห้งและชั่งมวลอิ่มน้ำแล้วคำนวณร้อยละการดูดซึมน้ำจากอัตราส่วนความต่างมวลอิ่มน้ำกับมวลแห้งเทียบกับมวลแห้ง โดยทำการทดสอบที่อายุ 7 วัน

การทดสอบการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจากความชื้น วัดขนาดกว้าง×ยาว×สูง ก่อนนำไปแช่น้ำ หลังแช่น้ำ และหลังอบแห้ง เพื่อเก็บข้อมูลสังเกตการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจากการดูดความชื้น และจากการสูญเสียความชื้น ของก้อนตัวอย่าง



รูปที่ 6 ตะแกรงมาตรฐาน

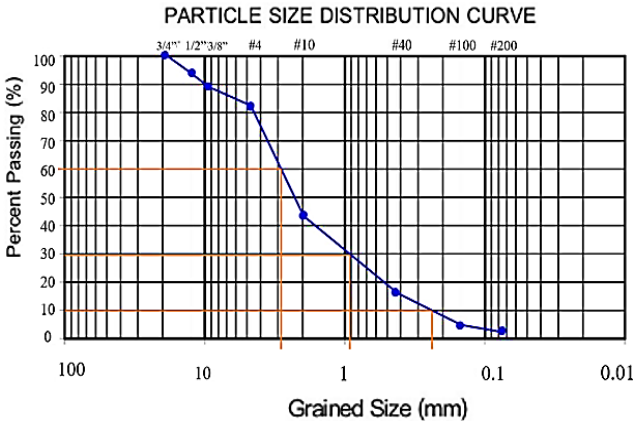


รูปที่ 7 การทดลองหาขีดความข้นเหลวของดิน

3. ผลการทดสอบ

3.1 การจำแนกขนาดของดินโดยวิธีการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน

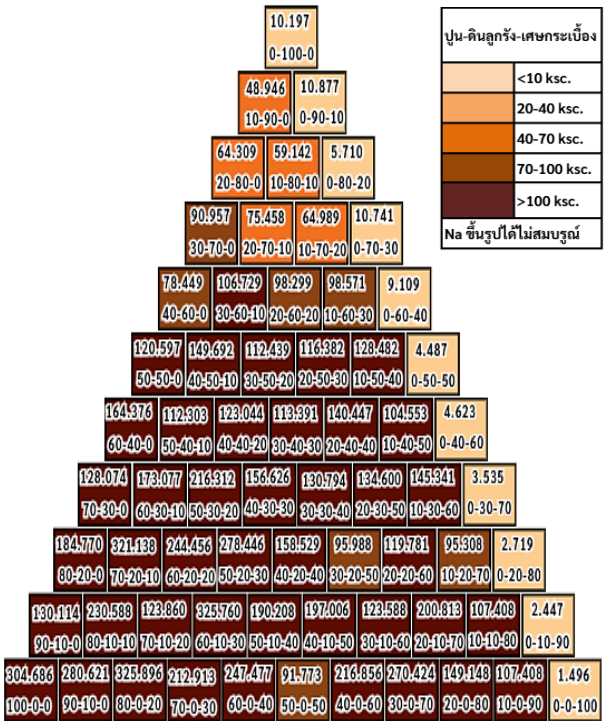
ตัวอย่างดินลูกรังที่ใช้ในการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานจากผลการทดสอบการหาขนาดของเม็ดดินโดยวิธีร่อนผ่านตะแกรงของตัวอย่างดินพบว่า ได้ ค่า Cu เท่ากับ 12.183 และ Cc เท่ากับ 1.145 ซึ่งจาก เงื่อนไขขนาดคละของดินเม็ดหยาบ สรุปได้ว่า Cu > 4 และ Cc อยู่ในช่วง 1–3 แสดงว่าดินชนิดมี ขนาดคละกันดี ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 การกระจายตัวของเม็ดดิน

3.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

การทดสอบกำลังอัดของดินซีเมนต์ลูกรังผสมเศษกระเบื้องเซรามิคกำหนดให้ก้อนตัวอย่างทดสอบมีขนาด 50×50×50 mm. ที่อายุ 7 วัน ได้กำลังรับแรงกำลังอัดของแต่ละอัตราส่วนผสมแสดงดังรูปที่ 9

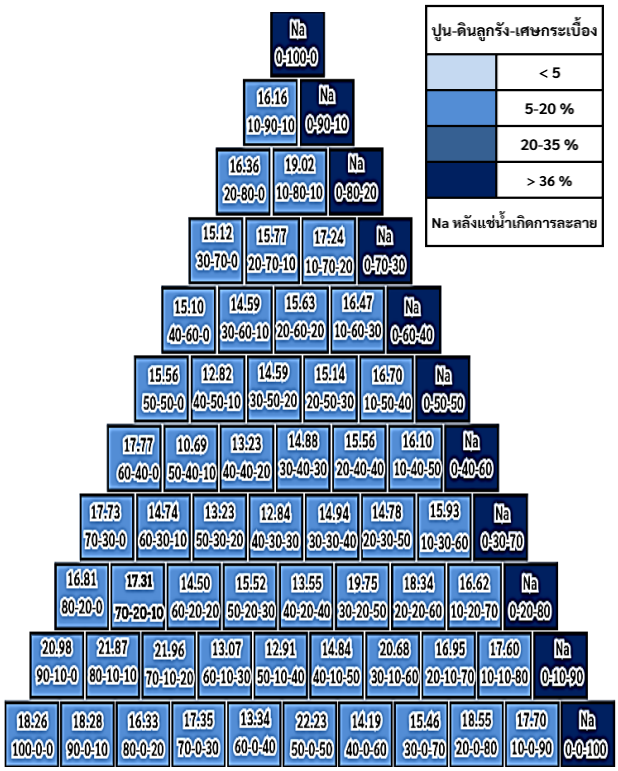


รูปที่ 9 ค่ากำลังรับแรงอัด ปูนซีเมนต์-ดินลูกรัง-เศษกระเบื้องเซรามิก

ผลการทดสอบพบว่า ตัวอย่างปูนซีเมนต์ 100 % มีกำลังรับแรงอัดอยู่ที่ 304.686 ksc.ซึ่ งเป็นเรื่องที่สมเหตุสมผล เนื่องจากปูนซีเมนต์เป็นวัสดุหลักที่ให้กำลังอัดสูง ตัวอย่างดินลูกรัง 100% มีค่าอยู่ที่ 10.197 ksc. และ ตัวอย่างเศษกระเบื้องเซรามิก 100% มีค่าอยู่ที่ 1.496 ksc. ซึ่งแสดงให้เห็นว่าดินลูกรังมีกำลังรับแรงอัดต่ำ ในสัดส่วนที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงในกลุ่มที่ผสมวัสดุทั้งสามชนิด เช่น 70-20-10 (321.138 ksc.) และ 60-10-30 (325.76 ksc.) การมีปริมาณปูนซีเมนต์สูงเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้กำลังรับแรงอัดสูง แสดงให้เห็นว่า ปูนซีเมนต์ เป็นวัสดุหลักที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับตัวอย่างอย่างมีนัยสำคัญ ใช้เศษกระเบื้องในปริมาณที่เหมาะสมอาจช่วยเสริมคุณสมบัติบางอย่าง หรืออาจทำหน้าที่เป็นวัสดุแทนดินลูกรังได้ในระดับหนึ่ง ในสัดส่วน 60-10-30 มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุดในกลุ่มที่มีการผสมสามวัสดุ ซึ่งอาจเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดในแง่ของความสมดุลระหว่างความแข็งแรงและต้นทุน โดยที่กำลังรับแรงอัดยังคงอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

3.3 การทดสอบความสามารถการดูดซึมน้ำ

การทดสอบการดูดซึมน้ำของดินซีเมนต์ลูกรังผสมเศษกระเบื้องเซรามิก อายุ 7 วัน ได้ค่าความสามารถการดูดซึมน้ำของแต่ละอัตราส่วนผสมแสดงดังรูปที่ 10



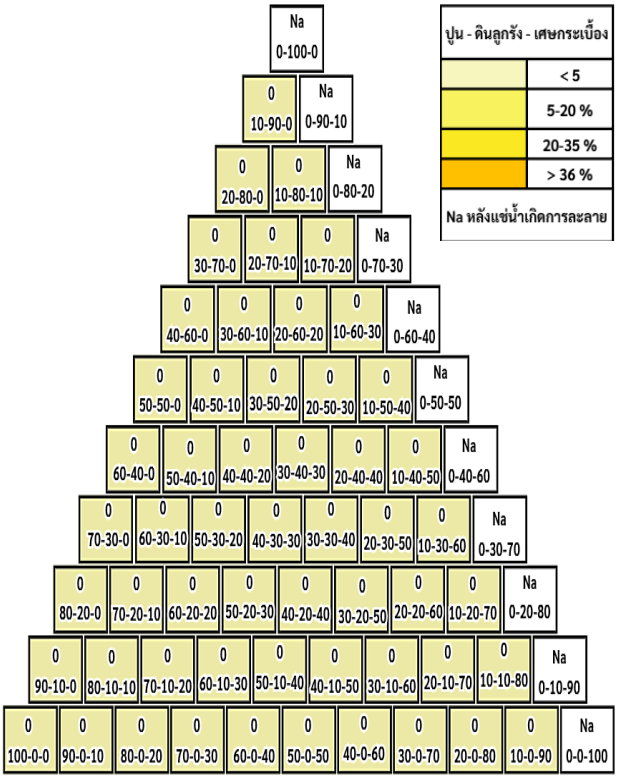
รูปที่ 10 ค่าความสามารถดูดซึมน้ำ ปูนซีเมนต์-ดินลูกรัง-เศษกระเบื้องเซรามิก

ผลการทดสอบพบว่า ตัวอย่างปูนซีเมนต์ 100% มีค่าอยู่ที่ 18.26% ซึ่งอยู่ในระดับปานกลาง เนื่องจากปูนซีเมนต์มีคุณสมบัติในการประสานและลดช่องว่างรูพรุน ทำให้การซึมน้ำไม่สูงจนเกินไป ตัวอย่างดินลูกรัง 100% ตัวอย่างเศษกระเบื้องเซรามิก 100% และตัวอย่างดินลูกรัง 50% เศษกระเบื้องเซรามิก 50% เกิดการดูดซึมน้ำสูงมากจนไม่สามารถคงรูปไว้ได้จึงไม่สามารถหาค่าได้ เศษกระเบื้องเซรามิกมีคุณสมบัติเป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นสูงและไม่ดูดซึมน้ำ จึงช่วยลดการซึมน้ำของวัสดุได้ เช่น สูตร 50-10-40 มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำสุดเพียง 10.69% แสดงให้เห็นว่าเศษกระเบื้องสามารถทำหน้าที่เป็นฟิลเลอร์ อุดช่องว่างและเพิ่มความหนาแน่นของโครงสร้างได้ดี แต่หากปริมาณเศษกระเบื้องมากเกินไป โดยที่ปูนซีเมนต์ไม่เพียงพอ เช่น 0-0-100 พบว่า “หาค่าไม่ได้” เนื่องจากไม่สามารถคงสภาพในการทดสอบได้ สูตรผสมที่มีสัดส่วนสมดุล เช่น สูตร 50-20-30, 40-30-30, 30-30-40 พบว่าค่าการดูดซึมน้ำอยู่ในช่วง 14–15% ซึ่งถือว่าต่ำกว่าสูตรที่ใช้ดินลูกรังมาก และใกล้เคียงเกณฑ์มาตรฐานอิฐประสานทั่วไป สูตรเหล่านี้จึงมีความเหมาะสมในการใช้งานจริง เนื่องจากมีความแข็งแรงเพียงพอ และมีความทนทานต่อน้ำ แนวโน้มโดยรวม การเพิ่ม ปูนซีเมนต์ + เศษกระเบื้อง จะช่วยลดการดูดซึมน้ำลง การเพิ่ม ดินลูกรังในสัดส่วนมาก จะทำให้ค่าการ

ดูดซึมน้ำสูงขึ้น ส่วนวัสดุที่มี ไม่มีปูนซีเมนต์ผสม ไม่สามารถคงรูปได้เมื่อได้รับปริมาณความชื้น ทำให้ไม่สามารถหาค่าการดูดซึมน้ำได้

3.4 การทดสอบการการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจากการดูดความชื้น

การทดสอบการการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจากการดูดความชื้นและสูญเสียความชื้นของดินซีเมนต์ลูกรังผสมเศษกระเบื้องเซรามิก อายุ 7 วัน แสดงดังรูปที่ 11

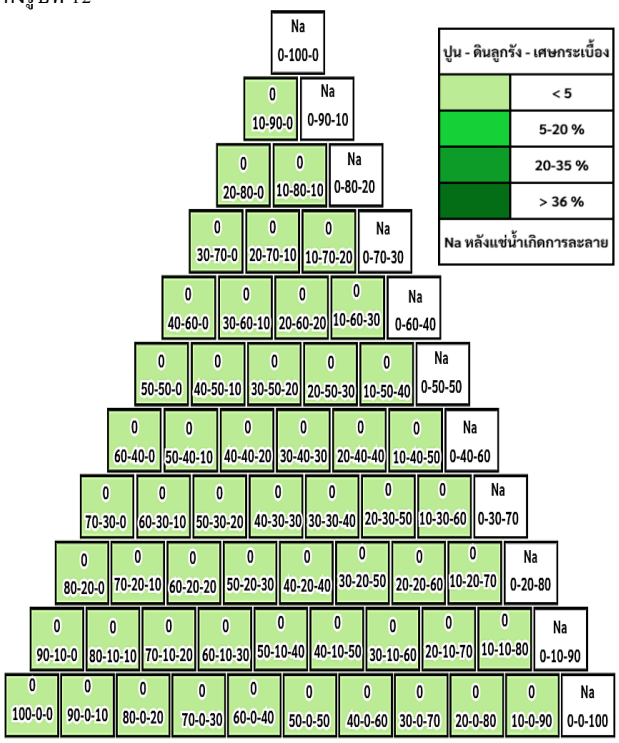


รูปที่ 11 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรจากการดูดความชื้นของปูนซีเมนต์-ดินลูกรัง-เศษกระเบื้องเซรามิก

ผลการทดสอบพบว่า ค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจากการดูดความชื้นมีโน้มเป็นศูนย์ ค่าที่แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างวัสดุมีความเสถียรของปริมาตรสูง มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้อยมาก หรือ แทบจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเลย ไม่เกิดการบวมตัวหรือหดตัว อย่างมีนัยสำคัญเมื่อทำการทดสอบการดูดความชื้น และ มีค่า Na คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาตรที่ไม่สามารถหาได้เนื่องจากตัวอย่างไม่สามารถคงรูปไว้ได้เมื่อได้รับความชื้น การนำเศษกระเบื้องเซรามิคมาใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์และดินลูกรังนั้นเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพ ในการพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่มีคุณสมบัติที่ดีเยี่ยมในด้านความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรเมื่อสัมผัสกับความชื้น ซึ่งนับเป็นข้อได้เปรียบที่สำคัญเมื่อเทียบกับวัสดุที่ดูดซึมน้ำได้ง่าย

3.3 การทดสอบการการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจากการสูญเสียความชื้น

การทดสอบการการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจากการสูญเสียความชื้นของดินซีเมนต์ลูกรังผสมเศษกระเบื้องเซรามิก อายุ 7 วัน แสดงดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรจากการสูญเสียความชื้นของปูนซีเมนต์-ดินลูกรัง-เศษกระเบื้องเซรามิก

ผลการทดสอบพบว่า ค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจากการสูญเสียความชื้นมีโน้มเป็นศูนย์ เนื่องจากกระเบื้องเป็นวัสดุที่ผ่านการเผาสูงจนมีโครงสร้างเสถียร ค่าการดูดกลืนน้ำต่ำ และมีบทบาทเป็นเพียงวัสดุเฉื่อยในมวลผสม ไม่ทำให้เกิดการหดของปริมาตร และ มีค่า Na คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาตรที่ไม่สามารถหาได้เนื่องจากตัวอย่างไม่สามารถคงรูปไว้ได้เมื่อได้รับความชื้นแสดงดังรูปที่ 12 การสูญเสียความชื้นจากวัสดุซีเมนต์เป็นสาเหตุหลักของการหดตัวแบบแห้ง ซึ่งอาจทำให้เกิดรอยแตกร้าว การที่ตัวอย่างนี้มีค่าการดูดซึมความชื้นเป็นศูนย์แสดงว่าโครงสร้างภายในมีความเสถียรมาก และมีโอกาสน้อยมากที่จะเกิดการหดตัวเมื่อความชื้นระเหยออกไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งในขั้นตอนการบ่มและการใช้งานจริงในระยะยาว คุณสมบัติเช่นนี้เป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในงานก่อสร้างที่ต้องการความคงทนและอายุการใช้งานที่ยาวนาน

4. สรุป

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้ปูนซีเมนต์ เป็นสารยึดเกาะหลักมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อ กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ของวัสดุ โดยอัตราส่วนที่มีปูนซีเมนต์สูงจะให้ความแข็งแรงที่สูงตามไปด้วย โดยอัตราส่วน 80-0-20 และ 70-20-10 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด

ซึ่งบ่งชี้ว่า อิฐประสานที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ดินลูกรังและเศษกระเบื้องเซรามิกมีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการใช้ปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม โดยตัวอย่างที่มีสัดส่วนการผสมที่ลงตัวสามารถให้ค่ากำลังอัดที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานอิฐประสาน ซึ่งสะท้อนถึงความสามารถในการนำวัสดุเหลือใช้อย่างเศษกระเบื้องมาเสริมสมบัติด้านความแข็งแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนที่ไม่มีปูนซีเมนต์ วัสดุในกลุ่มหลังไม่มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะขึ้นรูปหรือคงสภาพได้

ในส่วนของการดูดซึมน้ำ เมื่อเพิ่มปริมาณเศษกระเบื้องในส่วนผสม จะทำให้การดูดซึมน้ำลดลง เนื่องจากเศษกระเบื้องมีคุณสมบัติเป็นวัสดุเนื้อแน่น ไม่ดูดซึมน้ำมากนัก อย่างไรก็ตาม หากใช้เศษกระเบื้องมากเกินไปอาจส่งผลต่อความเป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุและเกิดช่องว่างเล็ก ๆ ทำให้การซึมน้ำยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในบางอัตราส่วนผสม การผสมเศษกระเบื้องเซรามิกในปริมาณที่เหมาะสม สามารถช่วยลดการดูดซึมน้ำของดินซีเมนต์ลูกรังได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยสูตรที่มีซีเมนต์และเศษกระเบื้องร่วมกันในสัดส่วนสมดุล จะให้ค่าการดูดซึมน้ำต่ำที่สุดและมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นอิฐประสานหรืองานก่อสร้างที่ต้องการความทนทานต่อน้ำ

การเปลี่ยนแปลงปริมาตร พบว่าปูนซีเมนต์มีบทบาทสำคัญในการควบคุมคุณสมบัติเหล่านี้ การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ช่วยลดค่าการดูดซึมน้ำและทำให้วัสดุมีความเสถียรทางปริมาตรสูง อัตราส่วนผสมส่วนใหญ่แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเป็นศูนย์ ซึ่งบ่งชี้ว่าวัสดุมีความเสถียรทางปริมาตรที่ดีเยี่ยม ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับวัสดุก่อสร้าง เนื่องจากช่วยลดความเสี่ยงของการแตกร้าวหรือการบิดตัวจากการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในสภาพแวดล้อม อย่างไรก็ตาม อัตราส่วนที่ไม่มีปูนซีเมนต์เป็นองค์ประกอบหลักไม่สามารถทำการทดสอบได้ เนื่องจากตัวอย่างเปราะบางและสลายตัวเมื่อสัมผัสกับความชื้น ความเสถียรของปริมาตรการใช้ปูนซีเมนต์เป็นตัวประสานหลักร่วมกับดินลูกรังและเศษกระเบื้องเซรามิกในสัดส่วนที่เหมาะสม ช่วยให้วัสดุมีความเสถียรทางปริมาตรสูง ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่จำเป็นอย่างยิ่งสำหรับวัสดุก่อสร้างที่ต้องเผชิญกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้นตลอดอายุการใช้งาน ผลการทดสอบนี้ตอกย้ำถึงความสำคัญของปูนซีเมนต์ ในการให้ความแข็งแรงและความคงทนแก่ตัวอย่าง หากไม่มีปูนซีเมนต์เพียงพอ ตัวอย่างจะไม่สามารถคงรูปอยู่ได้ และจะแตกสลายเมื่อได้รับผลกระทบจากความชื้น ดินลูกรังและเศษกระเบื้องเซรามิกเพียงอย่างเดียวไม่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างได้โดยปราศจากสารยึดเกาะ เนื่องจากขาดคุณสมบัติในการคงสภาพและทนต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรโดยรวมแล้ว ผลการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่าวัสดุที่พัฒนาขึ้นนี้มีคุณสมบัติที่น่าพอใจในด้านความเสถียรของปริมาตร ซึ่งเป็นหนึ่งในคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุก่อสร้างต่อไป

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของวัสดุอิฐประสานที่พัฒนาขึ้นจาก ปูนซีเมนต์–ดินลูกรัง–เศษกระเบื้องเซรามิก มีศักยภาพสูงในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อพิจารณาในแง่ของความแข็งแรง ความคงทน ความมีเสถียรของปริมาตร และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ปูนซีเมนต์มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในฐานะสารยึดเกาะหลักที่ให้ความแข็งแรงและเสถียรภาพทางปริมาตรแก่ตัวอย่าง ในขณะที่การผสมเศษกระเบื้องเซรามิกในสัดส่วนที่เหมาะสมสามารถช่วยเพิ่มค่ากำลังรับแรงอัดและลดการดูดซึมน้ำ ได้อย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้วัสดุมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นและลดความเสี่ยงของการแตกร้าวได้ดีเยี่ยม ผลการศึกษายังชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่า การนำเศษวัสดุเหลือใช้มาใช้ประโยชน์ไม่เพียงแต่ช่วยลดต้นทุน แต่ยังช่วยส่งเสริมการจัดการของเสีย เพิ่มมูลค่าให้กับของเสียจากอุตสาหกรรมงานก่อสร้าง และสอดคล้องกับแนวคิดการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าและการพัฒนาอย่างยั่งยืน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุก่อสร้างในอนาคต

จากผลลัพธ์ที่ได้จึงขอเสนอแนะให้มีการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคตเกี่ยวกับคุณสมบัติอื่นๆ เช่น การทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการสึกกร่อน หรือการกัดกร่อนจากสารเคมีในสิ่งแวดล้อม การต้านทานความร้อนและการติดไฟ การทดสอบ pH กรด-ด่าง การผลิตในเชิงพาณิชย์ควรมีการศึกษาความคุ้มค่าด้านเศรษฐศาสตร์เพิ่มเติม เช่น ต้นทุนการเก็บรวบรวม การขนส่ง และการบดเศษกระเบื้อง เทียบกับต้นทุนวัตถุดิบเดิม หรือการนำไปประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างจริง เพื่อยืนยันถึงความเหมาะสมในการใช้งานในภาคสนามต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความอนุเคราะห์อย่างสูงจากหลายฝ่าย คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ อาจารย์นิโรจน์ เงินพรหม อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ให้ความรู้ ตรวจทาน และแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่ในทุกขั้นตอน จนกระทั่งปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ บริษัท วี.เอ็ม.ไอ.อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด เป็นอย่างสูงที่ได้ให้การสนับสนุนวัสดุอุปกรณ์สำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้ ทำให้การศึกษาดำเนินไปอย่างราบรื่นและบรรลุวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

นอกจากนี้ขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่เป็นกำลังใจ และให้การช่วยเหลือในการทำปริญญานิพนธ์นี้จนประสบความสำเร็จ

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้จัดทำขอมอบให้เป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจศึกษาค้นคว้าต่อไป หากมีข้อผิดพลาดประการใด คณะผู้จัดทำขอน้อมรับไว้ และยินดีรับฟังคำแนะนำเพื่อนำไปพัฒนาให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

[1] Roshan et al., 2022, p. Characterization of lateritic soil based on literature and lab testing

[2] Books, n.d., p. Characterization of lateritic soil based on literature and lab testing

[3] ABD. RASHID AHMAD & TEH GUAN(2002) HOE Geological Society of Malaysia Annual Geological Conference 2002 May 26 - 27, Kota Bharu, Kelantan, Malaysia

[4] Robert B. , Clifford O. (2001). University of South Australia, School of Environmental and Recreation Management, Mawson Lakes Boulevard, Mawson Lakes, South Australia 5095, Australia Centre for Resource and Environmental

Studies,Australian National University, Canberra, ACT, 0200, Australia Received 19 June 2001

[5] Kannika Phetmak (2019). Characteristics and Utilization of Lateritic Soils Derived from Sedimentary Rocks in the Northeast of Thailand

[6] สินาด, ชัยศาสตร์ และ ไชยพัฒน์ (2559).การศึกษาแนวทางในการออกแบบฐานรากที่ตั้งอยู่บนดินลูกรังในจังหวัดจันทบุรี

[7] Winterkorn & Chandrasekharan, n.d.,p.LATERITE SOILS AND THEIR STABILIZATION

[8] REMILLON,A(1967),Les recherches rontie'res entrepries en Afriqued' expression from caise, pp.231-388. Engineering Elsevier Sci. Pub. Co. New York.

[9] KRINITZSKY,(1976), "Geology and Geotechnical Properties of Laterite Gravel", Technical report No. S-76-5,Soil and Pavement Laboratory, US Army Engineer Water ways Experiment Station, Vickburg, USA,30 p.

[10] KRINIZSKY,E.L.,D.PATRICK and F.C.TOWNSEND.(1976), U.S. Army Engineer Water ways. Experiment Station Tech. Rep. No.5.154 p.

[11] GRITSADA SUA-IAM. (2565). ปูนซีเมนต์ cement. เอกสารประกอบการสอนวิชาคอนกรีตเทคโนโลยี Concrete Technology,กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

[12] สมาคมผู้ผลิตปูนซีเมนต์ไทย. (ไม่มีวันที่). กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ที่ใส่ใจสิ่งแวดล้อม. สืบค้นเมื่อ 14 กุมภาพันธ์ 2568, จาก https://www.thaicma.or.th/th/environmentally/production_process/environmentally_conscious_cement_production_process

[13] ประเทือง กันธมาส (2014, พฤศจิกายน 26). พฤติกรรมของมอร์ต้าร์ผสมพลาสติกผสมทรายจากแหล่งท้องถิ่น.เว็บไซต์วิจัยราชมงคลธัญบุรี https://research.rmutt.ac.th/2014/11/26

[14] A Decor. (n.d.). What are granito tiles. A Decor. Retrieved February 14, 2025, from https://www.adecor.co.th/blog/what-are-granito-tiles

[15] Jorakay. (n.d.). What is granito tiles suitable for? What kind of usage. Jorakay. Retrieved February 14, 2025, from https://www.jorakay.co.th/blog/owner/tiling/what-is- granito-tiles-suitable-for-what-kind-of-usage

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และศักยภาพการกักเก็บคาร์บอน กรณีศึกษาโครงการสวนสาธารณะหาดอิงกว๊าน จังหวัดพะเยา

Analysis of Factors Affecting Economic Valuation and Carbon Sequestration Potential A Case Study of Had Ing Kwan Public Park Project, Phayao Province

พงศ์พัทธ์ ถนอมนิ่ม [1*] และ วันชัย ยอดสุดใจ[2]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

เลขที่ 50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพ ฯ 10900 , E-mail : alexpongpat@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์โครงการสวนสาธารณะหาดอิงกว๊าน ผ่านการประเมินมูลค่าบริการของระบบนิเวศด้านสุขภาพและการกักเก็บคาร์บอน ภายใต้ระยะเวลาวิเคราะห์ 32 ปี อัตราคิดลดร้อยละ 7 โดยจำลอง 3 สถานการณ์ ได้แก่ S0 (เฉพาะสุขภาพ) S1 (สุขภาพและคาร์บอนไม้ดั้งเดิม) และ S2 (สุขภาพและคาร์บอนไม้กักเก็บสูง) ผลพบว่าทั้ง 3 สถานการณ์มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ติดลบ แม้ว่า S2 จะสร้างมูลค่าคาร์บอนเครดิตได้ 70,000-90,000 บาทต่อปี อย่างไรก็ตาม เมื่อวิเคราะห์ความอ่อนไหวโดยบูรณาการรายได้ท่องเที่ยวร้อยละ 1 ของจังหวัด โครงการจะพลิกกลับมาคุ้มค่า ค่า NPV เป็นบวกที่ 30.91 ล้านบาท และอัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน (B/C Ratio) มากกว่า 1.0 สรุปได้ว่าประโยชน์สิ่งแวดล้อมเพียงอย่างเดียวไม่พอชดเชยต้นทุน ภาครัฐจึงควรบูรณาการพื้นที่ร่วมกับยุทธศาสตร์การท่องเที่ยว เพื่อให้เกิดความคุ้มค่าสูงสุดในการใช้งบประมาณ

คำสำคัญ : ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์, การกักเก็บคาร์บอน, บริการของระบบนิเวศ, สวนสาธารณะหาดอิงกว๊าน

Abstract

This study evaluates the economic viability of the Had Ing Kwan Public Park Project by valuing ecosystem services in health and carbon sequestration. Over a 32-year period at a 7% discount rate, three scenarios were simulated: S0 (health only), S1 (health and original plants), and S2 (health and high-sequestration plants). Results showed negative Net Present Values (NPV) across all scenarios, despite S2's higher carbon credit potential. However, sensitivity analysis incorporating 1% of provincial tourism revenue turned the project viable, yielding a 30.91 million Baht NPV and a B/C Ratio above 1.0. Consequently, environmental benefits alone cannot offset costs; integrating park development with tourism strategies is essential for maximizing economic efficiency.

Keywords: Economic Valuation, Carbon Sequestration, Ecosystem Services, Had Ing Kwan Public Park

1. บทนำ

กว๊านพะเยาเป็นแหล่งน้ำจืดขนาดใหญ่และพื้นที่อนุรักษ์ที่มีความสำคัญต่อระบบนิเวศ วิถีชีวิต และเศรษฐกิจของจังหวัดพะเยา ปัจจุบันภาครัฐ มีนโยบายพัฒนาพื้นที่ กว๊านพะเยาเพื่อยกระดับคุณภาพชีวิตและส่งเสริมสุขภาวะที่ดีของประชาชนในรูปแบบการก่อสร้างสวนสาธารณะ โดยพัฒนาให้เป็นโครงสร้างพื้นฐานสีเขียว ประกอบด้วยลานกิจกรรม ทางเดิน และพื้นที่พักผ่อน อย่างไรก็ตาม โครงการก่อสร้างสวนสาธารณะที่ผ่านมามักประสบปัญหาในการวิเคราะห์และประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากผลประโยชน์ส่วนใหญ่เป็นผลประโยชน์ที่จับต้องไม่ได้ เช่น มูลค่าทางนันทนาการ [2] หรือมูลค่าของพื้นที่โดยรอบที่สูงขึ้น [3] ซึ่งวัดปริมาณและคำนวณเป็นมูลค่าได้ยาก ข้อจำกัดนี้ทำให้ผู้ประเมินโครงการสร้างสมมติฐานผลประโยชน์ทางตรง เช่น รายได้จากการท่องเที่ยว ที่สูงเกินจริงเพื่อสนับสนุนให้โครงการปรากฏว่ามีความคุ้มค่าทางการเงิน และผ่านเกณฑ์ของภาครัฐ [10] ทั้งที่ในความเป็นจริง ความคุ้มค่าที่แท้จริงของโครงการเหล่านี้ อาจอยู่ในรูปแบบของ ผลประโยชน์ทางสิ่งแวดล้อมและสังคม ซึ่งมักถูกละเลยในการประเมินมูลค่า

ปัจจุบันทิศทางการพัฒนาโครงการภาครัฐต้องตอบสนองเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (SDGs) โดยเฉพาะเป้าหมายที่ 13 (Climate Action) ผ่านการเพิ่มพื้นที่สีเขียวเพื่อมุ่งสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน หากพิจารณาผลประโยชน์จากการกักเก็บคาร์บอน [6] และผลประโยชน์ด้านสุขภาพ จากการบริการของระบบนิเวศ (Ecosystem Services) ที่ช่วยลดความเสี่ยงโรคไม่ติดต่อเรื้อรัง (NCDs) [1] พบว่าสอดคล้องกับรายงานสถิติจังหวัดพะเยา พ.ศ. 2568 ที่ระบุถึงแนวโน้มภาระค่าใช้จ่ายด้านสาธารณสุขที่เพิ่มสูงขึ้น [9]

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมามักแยกการศึกษาด้านสุขภาพและสิ่งแวดล้อมออกจากกัน ทำให้ขาดการบูรณาการมูลค่าทั้งสองมิติเข้าสู่การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเติมเต็มข้อจำกัดดังกล่าวผ่านการวิเคราะห์สถานการณ์จำลองเพื่อพิสูจน์ผลตอบแทนที่แท้จริงและเสนอแนวทางนโยบายการเลือกใช้พรรณไม้ที่ยั่งยืน ซึ่งผลการศึกษาที่ได้จะช่วยยกระดับเกณฑ์การตัดสินใจลงทุนของภาครัฐ จากเดิมที่เน้นตัวเลขสมมติฐานผลประโยชน์ทางตรงที่สูงเกินจริง ไปสู่การประเมินมูลค่าทางสิ่งแวดล้อมและสุขภาวะที่มีหลักฐานเชิงประจักษ์ เพื่อเป็นแนวทางต้นแบบในการพัฒนาพื้นที่สาธารณะให้เกิดประโยชน์สูงสุด

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การวิเคราะห์ต้นทุนและผลประโยชน์

Cost-Benefit Analysis เป็นเครื่องมือทางเศรษฐศาสตร์ที่ใช้ประเมินความเหมาะสมของการดำเนินโครงการลงทุนภาครัฐ การศึกษานี้อ้างอิงคู่มือแนวทางและหลักเกณฑ์การวิเคราะห์โครงการของสำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ (สศช.) ฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2567 [10] ซึ่งกำหนดให้ใช้อัตราคิดลดทางสังคม (Social Discount Rate) ที่ร้อยละ 7 ในการปรับมูลค่าเงินตามเวลา (Time Value of Money) เพื่อเปรียบเทียบกระแสเงินสดตลอดอายุโครงการ โดยเกณฑ์การตัดสินใจที่สำคัญ ได้แก่ อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (B/C Ratio) ที่ต้องมีค่ามากกว่า 1, มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ที่ต้องมากกว่า 0 และอัตราผลตอบแทนภายในทางเศรษฐศาสตร์ (EIRR) ที่ต้องมากกว่าร้อยละ 7 นอกจากนี้ ต้องมีการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis) เพื่อทดสอบความทนทานของโครงการต่อความไม่แน่นอน เช่น การเพิ่มขึ้นของต้นทุน หรือความผันผวนของผลประโยชน์

2.2 การบริการของระบบนิเวศ และผลประโยชน์ด้านสุขภาพ

การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานสีเขียว (Green Infrastructure) มีบทบาทสำคัญในการให้บริการทางนิเวศ โดยเฉพาะการส่งเสริมสุขภาวะ (Active Design) ที่กระตุ้นให้เกิดกิจกรรมทางกาย ซึ่งองค์การอนามัยโลก (WHO) ได้ยืนยันว่า การเข้าถึงพื้นที่สีเขียวในเมืองช่วยลดความเครียด ส่งเสริมการมีกิจกรรมทางกาย และลดความเสี่ยงจากการเจ็บป่วยด้วยกลุ่มโรคไม่ติดต่อเรื้อรัง (NCDs) เช่น โรคหัวใจและเบาหวาน [1] ซึ่งเมื่อพิจารณาบริบทของจังหวัดพะเยาผ่านรายงานสถิติจังหวัด พ.ศ. 2568 พบว่ามีแนวโน้มภาระค่าใช้จ่ายด้านสาธารณสุขและการรักษาพยาบาลที่เพิ่มสูงขึ้น [9] ในทางเศรษฐศาสตร์สิ่งแวดล้อม การประเมินมูลค่าผลประโยชน์ด้านสุขภาพนี้ ประยุกต์ใช้วิธีต้นทุนที่หลีกเลี่ยงได้ (Avoided Cost Method) โดยประเมินจากภาระค่าใช้จ่ายทางการแพทย์และสาธารณสุขที่รัฐและประชาชนสามารถประหยัดได้ จากการลดลงของอัตราการเจ็บป่วยหากมีพื้นที่สาธารณะที่เหมาะสม

2.3 การกักเก็บคาร์บอนของไม้ยืนต้น

ต้นไม้ทำหน้าที่เป็นแหล่งกักเก็บคาร์บอน (Carbon Sink) ที่สำคัญผ่านกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง โดยการศึกษานี้มุ่งเน้นการประเมินที่ "มวลชีวภาพเหนือพื้นดิน (Above-ground Biomass)" ศักยภาพการดูดซับคาร์บอนจะแตกต่างกันไปตามปัจจัยทางชีวภาพ เช่น ชนิดพันธุ์ และอัตราการเจริญเติบโต ดังนั้น การเลือกใช้กลุ่มพรรณไม้เศรษฐกิจโตเร็ว (Fast-growing species) [8] จึงช่วยเพิ่มผลตอบแทนเชิงนิเวศได้สูงกว่าไม้ประจำถิ่น หรือไม้ประดับ การคำนวณมวลชีวภาพอาศัยสมการแอลโลเมทริก (Allometric Equation) ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับจากองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (อบก.) [6] กรมป่าไม้ [7] และกรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม [4] ก่อนจะนำปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าที่ประเมินได้ ไปแปลงเป็นมูลค่าตัวเงิน (Monetization) โดยอ้างอิงจากราคาคาร์บอนในตลาด เพื่อรวมเป็นผลประโยชน์ทางสิ่งแวดล้อมของโครงการ

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศาสวัต ภูริภัสสรกุล [2] ได้ประยุกต์ใช้วิธีต้นทุนการเดินทาง (Travel Cost Method) เพื่อประเมินมูลค่าทางนันทนาการของสวนสาธารณะ โดยพบว่าผู้ใช้บริการส่วนใหญ่ได้รับอรรถประโยชน์จากพื้นที่สีเขียวในระดับที่สูงกว่าต้นทุนการเดินทางที่เสียไป สอดคล้องกับการศึกษาของสัณฑศักย์ ตันติเมฆบุตร [3] ที่ยืนยันถึงผลกระทบภายนอกเชิงบวก (Positive Externalities) ของสวนสาธารณะเขตเมือง ว่าสามารถยกระดับมูลค่าทางเศรษฐกิจและราคาประเมินของอสังหาริมทรัพย์ในพื้นที่โดยรอบให้สูงขึ้นได้อย่างมีนัยสำคัญ

องค์การอนามัยโลก (WHO) [1] ได้ระบุสถิติเชิงประจักษ์ว่าการเข้าถึงพื้นที่สาธารณะช่วยกระตุ้นให้ประชากรเกิดกิจกรรมทางกาย (Physical Activity) ซึ่งสามารถลดความเสี่ยงต่อการเจ็บป่วยและเสียชีวิตจากกลุ่มโรคไม่ติดต่อเรื้อรัง (NCDs) ได้ถึงร้อยละ 20-30 การมีสุขภาพที่ดีขึ้นนี้ นำไปสู่การลดภาระค่าใช้จ่ายทางการแพทย์ (Avoided Medical Costs) ของทั้งระดับครัวเรือนและงบประมาณสาธารณสุขของภาครัฐได้อย่างมหาศาล

อัศมน ลิ่มสกุล และคณะ [4] รวมถึงรายงานของกรมป่าไม้ [7] ได้ศึกษาและพัฒนาสมการแอลโลเมทริก (Allometric Equation) เพื่อประเมินมวลชีวภาพและศักยภาพการกักเก็บคาร์บอนของไม้ยืนต้นในประเทศไทย ซึ่งเป็นแนวทางที่สอดคล้องกับระเบียบวิธีขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (อบก.) [6] โดยผลการศึกษาบ่งชี้ว่าศักยภาพการดูดซับคาร์บอนมีความสัมพันธ์โดยตรงกับชนิดของพรรณไม้และอัตราการเจริญเติบโต นอกจากนี้ การศึกษาแนวโน้มตลาดคาร์บอนเครดิตภาคสมัครใจ (T-VER) ในปัจจุบัน ยังพบว่าคาร์บอนเครดิตภาคป่าไม้และพื้นที่สีเขียวสามารถสร้างมูลค่าเป็นตัวเงิน (Monetization) และมีระดับราคาประเมินที่สูงกว่าโครงการประเภทอื่น เนื่องจากผู้ซื้อจะได้รับผลประโยชน์ร่วม (Co-benefits) ด้านสิ่งแวดล้อม

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า งานวิจัยในอดีตมีการแบ่งแยกมิติการประเมินมูลค่าออกเป็นส่วนๆ อย่างชัดเจน ศาสตร์ทางด้านเศรษฐศาสตร์มักมุ่งเน้นเพียงมูลค่าทางนันทนาการและสุขภาพ [1-3] ในขณะที่ศาสตร์ทางด้านสิ่งแวดล้อมและป่าไม้มักมุ่งเน้นเพียงการประเมินศักยภาพการกักเก็บคาร์บอนเชิงกายภาพและการประเมินมูลค่าคาร์บอนเครดิตแบบเอกเทศ [4], [6-7]

อย่างไรก็ตาม การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานของภาครัฐในปัจจุบันยังพบช่องว่างทางการวิจัยที่ขาดการบูรณาการนำผลประโยชน์ทางเศรษฐกิจ สังคม สุขภาพ และสิ่งแวดล้อม (Socio-Environmental Benefits) เข้ามารวมไว้ในแบบจำลองการวิเคราะห์ต้นทุนและผลประโยชน์ (Cost-Benefit Analysis: CBA) ของโครงการเดียวกันอย่างเป็นระบบ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะอุดช่องว่างดังกล่าว โดยการสร้างกรอบการประเมินความคุ้มค่าแบบองค์รวม (Holistic Valuation) เพื่อสะท้อนผลตอบแทนจากการลงทุนพัฒนาพื้นที่สาธารณะครอบคลุมในทุกมิติ

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการใช้วิธีการวิเคราะห์ต้นทุนและผลประโยชน์ (Cost-Benefit Analysis: CBA) ครอบคลุมระยะเวลาโครงการ 32 ปี และใช้อัตราคิดลดทางสังคม (Social Discount Rate) ที่ร้อยละ 7 ตามเกณฑ์ของ สศช. [10] โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

3.1 การกำหนดสถานการณ์จำลอง

3.1.1 สถานการณ์อ้างอิง (S0): ประเมินเฉพาะผลประโยชน์ด้านสุขภาพ โดยไม่คิดมูลค่าการกักเก็บคาร์บอน

3.1.2 สถานการณ์ที่ 1 (S1): ประเมินผลประโยชน์ด้านสุขภาพร่วมกับการกักเก็บคาร์บอนของพรรณไม้ดั้งเดิมตามแบบรูปรายการ ได้แก่ ต้นสารภี ต้นคำมอกเหลือง ต้นชงโค ต้นหางนกยูงฝรั่ง และต้นราชพฤกษ์

3.1.3 สถานการณ์ที่ 2 (S2): ประเมินผลประโยชน์ด้านสุขภาพร่วมกับผลประโยชน์จากการกักเก็บคาร์บอนโดยใช้ "พรรณไม้เศรษฐกิจโตเร็ว" ที่มีศักยภาพการกักเก็บคาร์บอนสูง [8] ทดแทนพรรณไม้เดิมในสถานการณ์ S1 ภายใต้สมมติฐานการเปรียบเทียบที่ขนาดเริ่มต้นเท่ากันทุกประการ ได้แก่ การนำต้นมะฮอกกานีมาทดแทนต้นสารภี (ความสูง 14 เมตร, DBH 25.40 ซม.) ต้นสะเดาเทียมทดแทนต้นคำมอกเหลือง (ความสูง 12 เมตร, DBH 20.32 ซม.) ต้นตะกูทดแทนต้นชงโค (ความสูง 8 เมตร, DBH 15.24 ซม.) ต้นกระถินเทพาทดแทนต้นหางนกยูงฝรั่ง (ความสูง 6 เมตร, DBH 10.16 ซม.) และต้นกระถินณรงค์ทดแทนต้นราชพฤกษ์ (ความสูง 6 เมตร, DBH 10.16 ซม.)

3.2 การเก็บรวบรวมข้อมูล

การศึกษาครั้งนี้ใช้ระเบียบวิธีวิจัยแบบการรวบรวมข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary Data) จากฐานข้อมูลทางการและรายงานวิชาการ โดยครอบคลุม 3 ด้านหลัก ได้แก่

- ข้อมูลด้านต้นทุนโครงการ: รวบรวมมูลค่าการก่อสร้างและประเมินค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและบำรุงรักษา (O&M Cost) จากเอกสารราคากลาง (BOQ) และแบบรูปรายการ

- ข้อมูลทางพฤกษศาสตร์: รวบรวมข้อมูลสมการแอลโลเมทริก (Allometric Equation) ค่าความหนาแน่นของเนื้อไม้ และอัตราการเจริญเติบโตของพรรณไม้ จากฐานข้อมูลขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (อบก.) [6] และกรมป่าไม้ [7]

- ข้อมูลทางเศรษฐศาสตร์และสุขภาพ: รวบรวมราคาอ้างอิงคาร์บอนเครดิตภาคป่าไม้จากการซื้อขายในตลาด T-VER ควบคู่กับสถิติประชากร อัตราการป่วย และค่ารักษาพยาบาลกลุ่มโรคไม่ติดต่อเรื้อรัง (NCDs) จากรายงานสถิติจังหวัดพะเยา [9]

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลและการประเมินมูลค่า

3.3.1 การประเมินต้นทุน ประกอบด้วยต้นทุนการก่อสร้างเริ่มแรก (265.80 ล้านบาท) รวมกับค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและบำรุงรักษา (O&M Cost) ที่ร้อยละ 2.0 ของค่าก่อสร้างต่อปี และค่าเผื่อการติดตั้งอุปกรณ์ทดแทน (Replacement Cost) ที่ร้อยละ 7.5 (15ปี) ตลอดระยะเวลาประเมินโครงการ 32 ปี

3.3.2 การประเมินผลประโยชน์ด้านการกักเก็บคาร์บอน เนื่องจากพรรณไม้ดั้งเดิม (S1) และพรรณไม้เศรษฐกิจโตเร็ว (S2) มีอัตราการเจริญเติบโต รูปทรง และความหนาแน่นของเนื้อไม้ที่แตกต่างกัน การประเมินมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน (Above-ground Biomass : W_T) หรือปริมาณคาร์บอน (C) จึงต้องเลือกใช้ สมการแอลโลเมทริก (Allometric Equation) ที่จำเพาะและเหมาะสมกับกลุ่มพรรณไม้นั้นๆ เพื่อให้ได้ค่าประเมินที่แม่นยำที่สุด ยกตัวอย่างเช่น

- สมการทั่วไปสำหรับไม้ยืนต้นผสม (General Equation) มักใช้สำหรับพรรณไม้ประดับทั่วไปในสถานการณ์ S1 โดยอ้างอิงสมการมาตรฐานของกรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม [4] ดังสมการที่ (4)

$$W_S = 0.0509 \times (D^2H)^{0.919} \quad (1)$$

$$W_B = 0.00893 \times (D^2H)^{0.977} \quad (2)$$

$$W_L = 0.0140 \times (D^2H)^{0.669} \quad (3)$$

$$W_T = W_S + W_B + W_L \quad (4)$$

W_S คือ น้ำหนักมวลชีวภาพเหนือพื้นดินในส่วนที่เป็นลำต้น (กิโลกรัม)

W_L คือ น้ำหนักมวลชีวภาพเหนือพื้นดินในส่วนที่เป็นใบ (กิโลกรัม)

W_B คือ น้ำหนักมวลชีวภาพเหนือพื้นดินในส่วนที่เป็นกิ่ง (กิโลกรัม)

W_T คือ น้ำหนักมวลชีวภาพส่วนของลำต้น + กิ่ง + ใบ (กิโลกรัม)

D หรือ DBH คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (เซนติเมตร)

H คือ ความสูง (เมตร)

- สมการจำเพาะกลุ่มพรรณไม้ (Specific Equations) สำหรับพรรณไม้เศรษฐกิจหรือไม้เนื้อแข็งในสถานการณ์ S2 เช่น ไม้กระถินเทพา โดยอ้างอิงสมการมาตรฐานของกรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม [4] ดังสมการที่ (8)

$$W_S = 0.0258 \times (DBH^2H)^{0.9541} \quad (5)$$

$$W_B = 0.0070 \times (DBH^2H)^{0.8846} \quad (6)$$

$$W_L = 0.0040 \times (DBH^2H)^{1.0669} \quad (7)$$

$$W_T = W_S + W_B + W_L \quad (8)$$

W_S คือ น้ำหนักมวลชีวภาพเหนือพื้นดินในส่วนที่เป็นลำต้น (กิโลกรัม)

W_L คือ น้ำหนักมวลชีวภาพเหนือพื้นดินในส่วนที่เป็นใบ (กิโลกรัม)

W_B คือ น้ำหนักมวลชีวภาพเหนือพื้นดินในส่วนที่เป็นกิ่ง (กิโลกรัม)

W_T คือ น้ำหนักมวลชีวภาพส่วนของลำต้น + กิ่ง + ใบ (กิโลกรัม)

D หรือ DBH คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (เซนติเมตร)

H คือ ความสูง (เมตร)

เมื่อคำนวณมวลชีวภาพได้แล้ว จะทำการแปลงค่าให้เป็นปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลดได้ (ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า) ตามมาตรฐาน T-VER [6] ดังสมการที่ (9)

$$CO_2e = W_{Biomass} \times 0.47 \times (44/12) \quad (9)$$

CO_2e คือ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (กิโลกรัม)

$W_{Biomass}$ หมายถึง น้ำหนักมวลชีวภาพรวมของต้นไม้ (กิโลกรัม)

0.47 คือ ค่าสัมประสิทธิ์มาตรฐานในการแปลงมวลชีวภาพเป็นคาร์บอน

44/12 คือ อัตราส่วนมวลโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมวลโมเลกุลของคาร์บอน

จากนั้นนำปริมาณ CO_2e (ตัน) คูณกับราคาประเมินคาร์บอนเครดิตภาคป่าไม้ (เฉลี่ย 993.80 บาทต่อตัน) เพื่อแปลงเป็นมูลค่าผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์รายปี

3.3.3 การประเมินผลประโยชน์ด้านสุขภาพ ใช้วิธีต้นทุนที่หลีกเลี่ยงได้ (Avoided Cost Method) จากการที่ประชากรเข้าถึงพื้นที่สาธารณะและสามารถลดความเสี่ยงจากการเจ็บป่วยด้วยกลุ่มโรค NCDs ได้ร้อยละ 20 [1] ดังสมการที่ (10)

$$HB_t = P \times C_{med} \times R \qquad (10)$$

HB_t คือ ผลประโยชน์ด้านสุขภาพในปีที่ t

P คือ จำนวนประชากรกลุ่มเป้าหมาย (12,523 คน) [9]

C_{med} คือ ค่าใช้จ่ายรักษาพยาบาลเฉลี่ย (252 บาท/คน/ปี) [9]

R คือ สัดส่วนการลดความเสี่ยงโรค NCDs เท่ากับ 0.20

3.3.4 การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ นำกระแสเงินสดของต้นทุนและผลประโยชน์ทั้งหมดตลอด 32 ปี มาปรับเป็นมูลค่าปัจจุบัน โดยใช้อัตราคิดลดทางสังคมที่ร้อยละ 7 ตามเกณฑ์ สศช. [10] และประเมินผ่านตัวชี้วัด มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) และอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (B/C Ratio) ดังสมการที่ (11) และ (12)

$$NPV = \sum_{t=0}^{n} \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t} \qquad (11)$$

$$B/C\ Ratio = \frac{\sum_{t=0}^{n} \frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^{n} \frac{C_t}{(1+r)^t}} \qquad (12)$$

NPV คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ

$B/C\ Ratio$ คือ อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน

B_t คือ ผลประโยชน์รวมที่เกิดขึ้นในปีที่ t

C_t คือ ต้นทุนรวมที่เกิดขึ้นในปีที่ t

r คือ อัตราคิดลด (Discount Rate) ซึ่งกำหนดไว้ที่ร้อยละ 7

n คือ อายุการใช้งานของโครงการ

t คือ ช่วงเวลาหรือปีที่ดำเนินการ (ตั้งแต่ปีที่ 0, 1, 2, ..., n)

3.4 การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis)

เนื่องจากโครงการพัฒนาพื้นที่สาธารณะเป็นการลงทุนขนาดใหญ่ หากพิจารณาเพียงผลประโยชน์ทางตรงด้านสุขภาพและสิ่งแวดล้อม (คาร์บอนเครดิต) อาจมีมูลค่าไม่เพียงพอต่อการคุ้มทุนเชิงเศรษฐศาสตร์ จึงกำหนดการวิเคราะห์ความอ่อนไหว โดยจำลองสถานการณ์ที่บูรณาการผลประโยชน์ทางอ้อม ด้านการท่องเที่ยวและการสร้างผลกระทบเชิงบวกทางเศรษฐกิจ การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหา "จุดความสมเหตุสมผลทางเศรษฐศาสตร์" ที่ทำให้โครงการพลิกกลับมามีความคุ้มค่า (NPV > 0 และ B/C Ratio > 1) เพื่อนำไปสู่การจัดทำข้อเสนอแนะเชิงนโยบายที่เหมาะสมต่อไป

4. ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

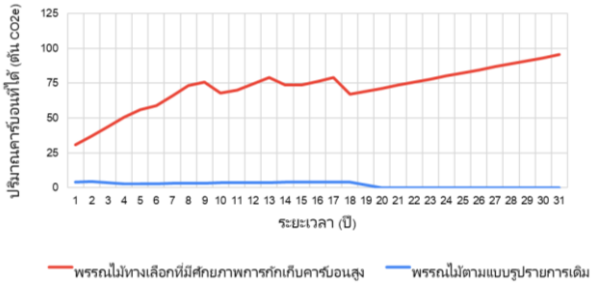
การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการสวนสาธารณะหาดอิงกว๊าน จังหวัดพะเยา กำหนดระยะเวลา 32 ปี (ก่อสร้าง 2 ปี และรับรู้ผลประโยชน์ 30 ปี) มีผลการวิเคราะห์ดังนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลต้นทุน

4.1.1 ด้านต้นทุน มูลค่าการลงทุนทางเศรษฐศาสตร์ที่แท้จริง (หลังปรับด้วยค่า SCF 0.81) เท่ากับ 215.30 ล้านบาท โดยแบ่งสัดส่วนการลงทุนในปีที่ 1 และ 2 ที่ร้อยละ 30 และ 70 ตามลำดับ ส่วนระยะเวลาดำเนินการ (ปีที่ 3-32) มีค่าบำรุงรักษา (O&M) เฉลี่ย 3.72 ล้านบาทต่อปี

4.1.2 ด้านผลประโยชน์ (เริ่มรับรู้ปีที่ 2-32) สถานการณ์อ้างอิง (S0): ประเมินเฉพาะผลประโยชน์ด้านสุขภาพ มีมูลค่าคงที่ 0.44 ล้านบาทต่อปี สถานการณ์ที่ 1 (S1): ผนวกการกักเก็บคาร์บอนจากพรรณไม้เดิมตามแบบรูปรายการ ซึ่งเติบโตช้า สร้างมูลค่าเพิ่มได้เพียง 10,000 - 12,000 บาทต่อปีสถานการณ์ที่ 2 (S2): ผนวกการกักเก็บคาร์บอนจากพรรณไม้เศรษฐกิจโตเร็ว ซึ่งมีการเติบโตแบบก้าวกระโดด (Exponential Growth) สร้างมูลค่าเพิ่มได้สูงถึง 70,000 - 80,000 บาทต่อปี

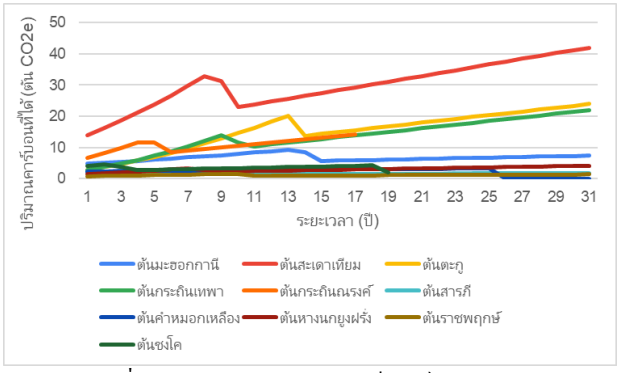
4.1.3 ศักยภาพและอัตราการกักเก็บคาร์บอน (S1 และ S2) พฤติกรรมการกักเก็บคาร์บอนรายปี (Sequestration Profile) เปรียบเทียบระหว่างกลุ่มพรรณไม้เดิม (S1) และกลุ่มพรรณไม้ทางเลือก (S2) ที่อายุโครงการ 2 ถึง 32 ปี ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 เปรียบเทียบศักยภาพการกักเก็บคาร์บอนรายปีระหว่างพรรณไม้เดิมและพรรณไม้ทางเลือก

จากการรูปที่ 1 พบว่า กลุ่มพรรณไม้เดิม (S1) มีอัตราการกักเก็บคาร์บอนที่ค่อนข้างต่ำและสม่ำเสมอ โดยลักษณะกราฟจะเข้าสู่สภาวะคงที่ อย่างรวดเร็วเนื่องจากขีดจำกัดทางชีวภาพ ในขณะที่กลุ่มพรรณไม้ทางเลือก (S2) แสดงพฤติกรรมการกักเก็บที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องแบบ

ก้าวกระโดด ตามการเพิ่มขึ้นของมวลชีวภาพ เมื่อทำการจัดอันดับศักยภาพการกักเก็บคาร์บอนสะสม ของพรรณไม้ทั้ง 10 ชนิด (รวมกลุ่ม S1 และ S2) แสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 จัดอันดับศักยภาพการกักเก็บคาร์บอนสะสม

จากรูปที่ 2 สามารถจำแนกพรรณไม้ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด 3 อันดับแรก ได้แก่ ต้นสะเดาเทียม ต้นตะกู และต้นกระถินเทพา ซึ่งอยู่ในกลุ่มสถานการณ์ S2 ทั้งสิ้น โดยพรรณไม้กลุ่มนี้มีอัตราการกักเก็บเฉลี่ยสูงกว่ากลุ่มพรรณไม้เดิมใน S1 ประมาณ 5-7 เท่า ข้อมูลส่วนนี้จึงเป็นหลักฐานสำคัญที่สนับสนุนว่าการเลือกชนิดพันธุ์ไม้ (Species Selection) มีผลกระทบโดยตรงต่อมูลค่าผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์

4.2 ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมในการลงทุน

จากการนำกระแสเงินสดมาคิดลด (Discounting) เพื่อหาดัชนีชี้วัดทางเศรษฐศาสตร์ พบว่าหากพึ่งพาเพียงผลประโยชน์ด้านสุขภาพและสิ่งแวดล้อม โครงการจะไม่ผ่านเกณฑ์ความคุ้มค่าในการลงทุน ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมในการลงทุน

ตัวชี้วัด	กรณีฐาน (S0)	ทางเลือกที่ 1 (S1)	ทางเลือกที่ 2 (S2)
NPV	-231.67 ล้านบาท	-231.45 ล้านบาท	-230.95 ล้านบาท
B/C Ratio	< 1.00	< 1.00	< 1.00
EIRR	หาค่าไม่ได้	หาค่าไม่ได้	หาค่าไม่ได้

จากตารางที่ 1 สะท้อนให้เห็นว่า ต้นทุนการก่อสร้าง และบำรุงรักษามีมูลค่าสูงเกินกว่าที่ผลประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อมจะชดเชยได้ อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนชนิดพรรณไม้ใน S2 ช่วยลดผลขาดทุนทางเศรษฐศาสตร์ได้ประมาณ 500,000 บาท เมื่อเทียบกับ S1 ซึ่งตอกย้ำถึงความสำคัญของการออกแบบพื้นที่สีเขียวที่เน้นศักยภาพการกักเก็บคาร์บอน

4.3 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis)

เนื่องจากกรณีทางเลือกที่ 2 (S2) ซึ่งให้ผลประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อมสูงสุด ยังคงมีค่า NPV ติดลบที่ -230.95 ล้านบาท จึงได้มีการทดสอบความอ่อนไหวเพื่อหาทางออกในการสร้างมูลค่าเพิ่ม โดยกำหนดสมมติฐานให้มีการบริหารจัดการพื้นที่เชิงบูรณาการเพื่อดึงดูดการท่องเที่ยว ผลการวิเคราะห์พบว่า หากโครงการ (ภายใต้รูปแบบ S2) สามารถดึงดูดรายได้จากการท่องเที่ยวได้เพียง ร้อยละ 1 ของรายได้การท่องเที่ยวรวมจังหวัดพะเยา (คิดเป็น 24.39 ล้านบาทต่อปี) [9] โครงการจะพลิกกลับมามีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในทันที โดยส่งผลให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) มีค่าเป็นบวกที่ 30.91 ล้านบาท อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (B/C Ratio) มีค่าเท่ากับ 1.13 และอัตราผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ (EIRR) อยู่ที่ร้อยละ 8.57

5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์ความเหมาะสมของการลงทุนภายใต้อายุโครงการ 32 ปี โดยใช้อัตราคิดลดทางเศรษฐศาสตร์ที่ร้อยละ 7 ตามหลักเกณฑ์ของสำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ (สศช.) พบว่าหากพิจารณาเพียงผลประโยชน์ทางตรงด้านสุขภาพและมูลค่าการกักเก็บคาร์บอน โครงการยังไม่เกิดความคุ้มค่าเชิงตัวเลข โดยมีอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (B/C Ratio) ต่ำกว่า 1 และมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ติดลบในทุกสถานการณ์ ได้แก่ S0 ติดลบ 231.67 ล้านบาท S1 ติดลบ 231.45 ล้านบาท และ S2 ติดลบ 230.95 ล้านบาท สะท้อนให้เห็นว่าต้นทุนค่าก่อสร้างมีมูลค่าสูงเกินกว่าผลประโยชน์ทางสิ่งแวดล้อมและสุขภาพจะชดเชยได้

อย่างไรก็ตาม การใช้พรรณไม้เศรษฐกิจโตเร็ว (S2) สามารถลดผลขาดทุนทางเศรษฐศาสตร์ได้ดีกว่าพรรณไม้เดิม (S1) ชี้ให้เห็นว่าการเลือกชนิดพรรณไม้อย่างมียุทธศาสตร์เป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มมูลค่าทางสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ ผลการทดสอบความอ่อนไหวพบว่าหากมีการบริหารจัดการพื้นที่เชิงบูรณาการร่วมกับการท่องเที่ยวจนเกิดรายได้อย่างน้อยสามารถดึงดูดรายได้จากการท่องเที่ยวได้เพียง ร้อยละ 1 ของรายได้ การท่องเที่ยวรวมจังหวัดพะเยา (คิดเป็น 24.39 ล้านบาทต่อปี) โครงการจะพลิกกลับมามีความคุ้มค่า โดยมีค่า NPV เป็นบวกที่ 30.91 ล้านบาท และ B/C Ratio เท่ากับ 1.13 ซึ่งตอบสนองต่อนโยบายการพัฒนาที่ยั่งยืน

5.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย

การศึกษานี้มีข้อจำกัดบางประการที่ควรพิจารณา คือ การประเมินมูลค่าการกักเก็บคาร์บอนเน้นเฉพาะมวลชีวภาพเหนือพื้นดินตามมาตรฐาน อบก. ซึ่งยังไม่รวมมวลชีวภาพใต้ดินและคาร์บอนในดิน นอกจากนี้ การประเมินผลประโยชน์ด้านสุขภาพอ้างอิงจากสถิติค่ารักษาพยาบาลเฉลี่ยรายหัว ซึ่งอาจยังไม่ครอบคลุมผลประโยชน์ทางจิตใจหรือความพึงพอใจเชิงคุณภาพจากการใช้พื้นที่สีเขียว

5.3 ข้อเสนอแนะเชิงนโยบาย และแนวทางการประยุกต์ใช้

ในเชิงนโยบายการออกแบบ ภาครัฐและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องควรปรับเปลี่ยนทัศนคติจากการเลือกพรรณไม้เพื่อวัตถุประสงค์ด้านความสวยงามเพียงอย่างเดียว ไปสู่การเลือกพรรณไม้เศรษฐกิจโตเร็วที่มีศักยภาพในการกักเก็บคาร์บอนสูงเข้ามาเป็นส่วนหนึ่งของงานภูมิสถาปัตยกรรม การคัดเลือกชนิดพันธุ์ไม้ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซเรือนกระจกได้ดี จะช่วยเปลี่ยนสถานะของพื้นที่สาธารณะจาก

เพียงสถานที่พักผ่อนหย่อนใจ ให้กลายเป็นโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวที่สร้างมูลค่าผลประโยชน์ทางนิเวศวิทยาได้อย่างเป็นรูปธรรม ซึ่งสอดคล้องกับเป้าหมายการมุ่งสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอนของประเทศ

ในเชิงยุทธศาสตร์เศรษฐกิจ การลงทุนพัฒนาพื้นที่สีเขียวขนาดใหญ่ที่มีต้นทุนการก่อสร้างและบำรุงรักษาสูง จำเป็นต้องมีการวางแผนที่เชื่อมโยงกับยุทธศาสตร์การท่องเที่ยวเชิงรุกอย่างเป็นระบบ เพื่อดึงดูดผู้ใช้บริการและสร้างรายได้หมุนเวียนเข้าสู่พื้นที่โครงการและชุมชนโดยรอบ การสร้างความเชื่อมโยงกับกิจกรรมทางเศรษฐกิจอื่นๆ จะช่วยเพิ่มมูลค่าผลประโยชน์ทางอ้อมที่เป็นตัวเงิน ซึ่งเป็นปัจจัยตัดสินใจหลักที่จะส่งผลให้อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุนของโครงการผ่านเกณฑ์มาตรฐานการลงทุนภาครัฐ และช่วยลดภาระทางการคลังในการดูแลรักษาพื้นที่ในระยะยาว

ในเชิงการประเมินโครงการ หน่วยงานที่เกี่ยวข้องควรบรรจุมิติการประเมินมูลค่าบริการของระบบนิเวศ (Ecosystem Services) ทั้งในด้านมูลค่าการกักเก็บคาร์บอนและผลประโยชน์ด้านสุขภาวะของประชาชน เข้าไปในรายงานการวิเคราะห์ความคุ้มค่าของโครงการตั้งแต่ระยะเริ่มต้น (Pre-Feasibility Study) เพื่อให้ผู้ตัดสินใจมีข้อมูลที่ครอบคลุมมากกว่าเพียงผลตอบแทนทางการเงินแบบดั้งเดิม การประเมินมูลค่าแบบองค์รวมนี้จะช่วยให้โครงการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวสะท้อนความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ที่แท้จริง ซึ่งครอบคลุมทั้งมิติทางเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ยอดสุดใจ และรองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ สุวรรณวิทยา ที่ปรึกษาการศึกษาค้นคว้าอิสระทั้งสอง ที่ให้โอกาสในการทำงานวิจัย ให้คำแนะนำ ตลอดจนช่วยตรวจการศึกษาค้นคว้าอิสระจนกระทั่งการศึกษาค้นคว้าอิสระ ฉบับนี้มีความสมบูรณ์

นอกจากนี้ ขอกราบขอบพระคุณ สำนักวิศวกรรมโครงสร้างและงานระบบ กรมโยธาธิการและผังเมือง ที่ได้ให้การสนับสนุนข้อมูลในการศึกษาวิจัย รวมไปถึงบุคลากรของหน่วยงานที่ให้ความช่วยเหลือจนงานวิจัยประสบความสำเร็จด้วยความราบรื่น และขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ทั้งคณาจารย์ เจ้าหน้าที่ และเพื่อน ๆ ที่ได้อำนวยความสะดวก ให้ความช่วยเหลือ และให้คำปรึกษาต่าง ๆ

เอกสารอ้างอิง

[1] World Health Organization Regional Office for Europe, Urban green spaces and health: A review of evidence. Copenhagen, Denmark: WHO Regional Office for Europe, 2016.

[2] ศาศวัต ภูริภัสสรกุล, "การประเมินมูลค่าทางด้านนันทนาการของสวนสาธารณะในกรมทางหลวงชนบท : กรณีศึกษาสวนสุขภาพลัดโพธิ์ จังหวัดสมุทรปราการ," วิทยานิพนธ์เศรษฐศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเศรษฐศาสตร์, มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช, 2550.

[3] สัณฑศักย์ ตันติเมฆบุตร, "ผลกระทบของสวนสาธารณะที่ส่งผลต่อสังหาริมทรัพย์ในพื้นที่โดยรอบ: กรณีศึกษา สวนสันติภาพ," วิทยานิพนธ์สถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2562.

[4] อัศมน ลิ่มสกุล และคณะ, รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์: การพัฒนาวิธีการประเมินการกักเก็บและกระบวนการแลกเปลี่ยนคาร์บอน. ปทุมธานี: ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2561.

[5] M. CoDyre, E. D. G. Fraser, and K. Landman, "How does your garden grow ? An empirical evaluation of the costs and potential of urban gardening," Urban Forestry & Urban Greening, vol. 14, no. 1, pp. 72-79, 2015.

[6] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), T-VER-S-TOOL-01-01 การคำนวณการกักเก็บคาร์บอนของต้นไม้ ฉบับที่ 2. กรุงเทพฯ: องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก, 2568.

[7] วรพรรณ หิมพานต์ และคณะ, รายงานโครงการประเมินศักยภาพการกักเก็บคาร์บอนของต้นไม้ในแปลงทดลองของกรมป่าไม้. กรุงเทพฯ: สำนักวิจัยและพัฒนาการป่าไม้ กรมป่าไม้, 2565.

[8] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), ประกาศรายชื่อพรรณไม้เศรษฐกิจโตเร็ว สำหรับ T-VER-METH-FOR-04. กรุงเทพฯ: องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก, 2564.

[9] สำนักงานสถิติจังหวัดพะเยา, รายงานสถิติจังหวัดพะเยา พ.ศ. 2568. พะเยา: สำนักงานสถิติแห่งชาติ, 2568.

[10] สำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, คู่มือแนวทางและหลักเกณฑ์การวิเคราะห์โครงการ (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2567). กรุงเทพฯ: สำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, 2567.



นายพงศ์พัทธ์ ถนอมนิ่ม นิสิตปริญญาโท
สาขาวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการบริหาร
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

งานวิจัยที่สนใจ : ประเมินความคุ้มค่าโครงการ

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการปฏิบัติหน้าที่ของคณะกรรมการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้าง กรณีศึกษาหน่วยงานของรัฐแห่งหนึ่ง

Factors Affecting the Performance of the Inspection Committee for Construction Procurement: A Case Study of a Government Agency.

ปองภพ แพงวิเศษ[1*] ธีรเดช สนองทวีพร[2] วรานนท์ คงสง[3] และ ชัยวัฒน์ ภู่วรกุลชัย[4]

[1]สาขาวิชาการตรวจสอบและกฎหมายวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

282 ถนนรามคำแหง หัวหมาก บางกะปิ กรุงเทพมหานคร 10240. 6714770002@rumail.ru.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปฏิบัติหน้าที่ วิเคราะห์และจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการปฏิบัติหน้าที่ของคณะกรรมการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้าง เป็นการวิจัยเชิงปริมาณ กลุ่มตัวอย่างจำนวน 50 คน เป็นบุคลากรที่เคยปฏิบัติหน้าที่คณะกรรมการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้าง ผู้ควบคุมงาน เจ้าหน้าที่พัสดุ และผู้ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารสัญญา เครื่องมือที่ใช้เป็นแบบสอบถาม วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ความถี่ ค่าร้อยละ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และการทดสอบความแปรปรวนทางเดียว ผลการวิจัยพบว่า ปัจจัยด้านการบริหารจัดการภายในหน่วยงานมีความสำคัญสูงสุด โดยปัจจัยย่อยที่มีความสำคัญสูงสุด คือ การให้ความรู้หรือการจัดอบรมแก่บุคลากรในเรื่องที่เกี่ยวกับงานก่อสร้าง ทั้งนี้ หน่วยงานของรัฐควรจัดทำแผนการส่งเสริมความรู้ด้านการบริหารสัญญาและหลักวิชาการช่างแก่บุคลากรอย่างต่อเนื่อง

คำสำคัญ : ผลกระทบ; การปฏิบัติหน้าที่; คณะกรรมการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้าง; หน่วยงานของรัฐ

Abstract

This study aims to examine, analyze, and prioritize factors affecting the performance of inspection committees in construction procurement. A quantitative approach was adopted with a sample of 50 respondents, including inspection committee members, project supervisors, procurement officers, and contract administration personnel. A questionnaire was used as the research instrument, and data were analyzed using frequency, percentage, mean, standard deviation, and one-way ANOVA. The findings show that internal organizational management is the most significant factor, with personnel training in construction-related knowledge identified as the key sub-factor. Accordingly, government agencies should implement continuous development programs to enhance personnel competencies in contract administration and construction technical principles.

Keywords: influencing factors; performance; construction procurement inspection committee; government agency

1. บทนำ

ปัจจุบันการจัดซื้อจัดจ้างและการบริหารพัสดุของภาครัฐที่ใช้เงินงบประมาณแผ่นดิน จำเป็นต้องปฏิบัติตามหลักเกณฑ์ที่กำหนดไว้ในกฎหมายว่าด้วยการจัดซื้อจัดจ้างและการบริหารพัสดุภาครัฐ หรือระเบียบที่หน่วยงานของรัฐกำหนดอย่างเคร่งครัด โดยการดำเนินงานต้องเป็นไปด้วยความสุจริต คุ้มค่า โปร่งใส มีประสิทธิภาพและประสิทธิผล ตลอดจนสามารถตรวจสอบได้ เพื่อให้การใช้จ่ายเงินของรัฐเป็นไปตามหลักวินัยการเงินการคลัง อันจะนำไปสู่ความมั่นคงและความยั่งยืนทางการคลังของประเทศในระยะยาว [1]

งานจ้างก่อสร้างเป็นงานที่มีลักษณะซับซ้อน จึงจำเป็นต้องมีผู้ควบคุมงาน [2] ทำหน้าที่ตรวจและควบคุมการดำเนินงานให้เป็นไปตามแบบรูปรายการและข้อกำหนดของสัญญา โดยผู้ควบคุมงานต้องตรวจสอบความก้าวหน้าของงานอย่างสม่ำเสมอและรายงานผลการปฏิบัติงานของผู้รับจ้างต่อคณะกรรมการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้างเป็นระยะ ขณะที่คณะกรรมการตรวจรับพัสดุมีหน้าที่ตรวจสอบและบริหารสัญญา ตลอดจนตรวจรับงานก่อสร้างให้ถูกต้องครบถ้วนตามเงื่อนไขที่กำหนดทุกประการ [3]

สำนักงานการตรวจเงินแผ่นดิน (สตง.) ได้ดำเนินการตรวจสอบและจัดทำรายงานผลการปฏิบัติงานประจำปีด้านการจัดซื้อจัดจ้างของภาครัฐ พบข้อบกพร่องที่สำคัญเกี่ยวกับปัญหาการปฏิบัติงานตามสัญญา ได้แก่ การก่อสร้างไม่เป็นไปตามรายละเอียดและเงื่อนไขที่กำหนดในสัญญา งานก่อสร้างไม่สอดคล้องกับแบบรูปรายการ ตลอดจนการตรวจรับพัสดุของคณะกรรมการตรวจรับไม่เป็นไปตามข้อกำหนด และการบริหารสัญญาไม่ครบถ้วนตามระเบียบที่เกี่ยวข้อง [4]

จากประเด็นปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาการปฏิบัติหน้าที่ของคณะกรรมการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้าง โดยมุ่งวิเคราะห์และจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยที่ส่งผลต่อการปฏิบัติงานดังกล่าว เพื่อนำผลการวิจัยไปใช้เป็นแนวทางการปฏิบัติงานให้เป็นไปตามระเบียบมากยิ่งขึ้น

1.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการปฏิบัติหน้าที่ของคณะกรรมการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้าง

2. เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการปฏิบัติหน้าที่ของคณะกรรมการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้าง

3. เพื่อจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการปฏิบัติหน้าที่ของคณะกรรมการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้าง

1.2 สมมติฐานของการวิจัย

บุคลากรที่มีหน้าที่ในการปฏิบัติงานแตกต่างกัน มีระดับการปฏิบัติหน้าที่คณะกรรมการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้างไม่แตกต่างกัน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ด้านเนื้อหา ศึกษาการปฏิบัติหน้าที่ของคณะกรรมการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้าง ภายใต้ระเบียบกระทรวงการคลังว่าด้วยการจัดซื้อจัดจ้างและการบริหารพัสดุภาครัฐ พ.ศ. 2560 ข้อ 176

2. ด้านประชากรและกลุ่มตัวอย่าง ประชากรเป็นบุคลากรของหน่วยงานของรัฐแห่งหนึ่ง โดยกลุ่มตัวอย่างเป็นผู้ที่เคยปฏิบัติหน้าที่คณะกรรมการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้าง ผู้ควบคุมงาน เจ้าหน้าที่พัสดุ และผู้ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารสัญญา

3. ด้านพื้นที่ ศึกษาในพื้นที่ภาคตะวันออก

4. ด้านเวลา เก็บรวบรวมข้อมูลวันที่ 5 – 30 มกราคม 2569

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการปฏิบัติหน้าที่ของคณะกรรมการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้าง

2. ได้ทราบลำดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการปฏิบัติหน้าที่ของคณะกรรมการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้าง

3. ได้แนวทางในการปฏิบัติหน้าที่ของคณะกรรมการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้าง

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยศึกษา ค้นคว้า รวบรวมข้อมูลจากเอกสาร วิเคราะห์และกำหนดปัจจัยที่เกี่ยวข้อง สร้างเป็นกรอบแนวคิด แนวคิด และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อการวิจัย สรุปได้ดังนี้

2.1 แนวคิด ทฤษฎี และกฎหมายเกี่ยวกับงานวิจัย

แนวคิดเกี่ยวกับสาขาวิชาการตรวจสอบและกฎหมายวิศวกรรม เป็นหลักสูตรที่บูรณาการความรู้ด้านวิศวกรรมและกฎหมาย ผู้วิจัยจึงกำหนดขอบเขตการศึกษาให้มีเนื้อหาครอบคลุมบทบาทของคณะกรรมการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้าง ซึ่งมีหน้าที่ตามระเบียบกระทรวงการคลังว่าด้วยการจัดซื้อจัดจ้างและการบริหารพัสดุภาครัฐ พ.ศ. 2560 จึงเป็นการประยุกต์ความรู้ตามหลักสูตรในการปฏิบัติหน้าที่ดังกล่าว

แนวคิดและทฤษฎีเกี่ยวกับปัจจัย เริ่มจากการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อองค์กร แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ 1) ปัจจัยภายนอก (External Factor) คือ ปัจจัยภายนอกองค์กรที่มีผลกระทบต่อองค์กรและไม่สามารถควบคุมได้ และ 2) ปัจจัยภายใน (Internal Factor) คือ ปัจจัยที่อยู่ภายในองค์กรและสามารถควบคุมได้ ปัจจัยภายในจะมีผลต่อจุดอ่อน (Weakness) และจุดแข็ง (Strength) ขององค์กร [5]

แนวคิดเกี่ยวกับการปฏิบัติหน้าที่ของบุคลากรหน่วยงานของรัฐ “การปฏิบัติหน้าที่” เป็นการกระทำหรือการปฏิบัติหน้าที่ของเจ้าหน้าที่รัฐในตำแหน่งที่ได้รับการแต่งตั้ง หรือได้รับมอบหมายให้ปฏิบัติหน้าที่ใดหน้าที่หนึ่ง หรือให้รักษาราชการแทนในหน้าที่ใดหน้าที่หนึ่งทั้งเป็นการทั่วไปและเป็นการเฉพาะในฐานะเจ้าหน้าที่ของรัฐ [6]

กฎหมายที่เกี่ยวข้องกับการปฏิบัติหน้าที่ของคณะกรรมการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้างของหน่วยงานของรัฐ ได้แก่ พระราชบัญญัติการจัดซื้อจัดจ้างและการบริหารพัสดุภาครัฐ พ.ศ. 2560 และระเบียบกระทรวงการคลังว่าด้วยการจัดซื้อจัดจ้างและการบริหารพัสดุภาครัฐ พ.ศ. 2560

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

รัตติกาล โสวะภาส ภราดร เพ็งเจียม และทานตะวัน บุญเล็ก ศึกษาแนวทางการบริหารสัญญาจ้างก่อสร้างเพื่อลดข้อพิพาทระหว่างหน่วยงานภาครัฐและภาคเอกชนในประเทศไทย พบว่า สาเหตุข้อพิพาทหลัก ได้แก่ ความล่าช้าในการส่งมอบงาน การเปลี่ยนแปลงงานก่อสร้าง และการตีความข้อสัญญาที่คลุมเครือ ปัจจัยที่มีผลต่อการลดข้อพิพาท ได้แก่ ความชัดเจนของเอกสารสัญญา ความสามารถของเจ้าของงานและที่ปรึกษา และการสื่อสารระหว่างคู่สัญญา [7]

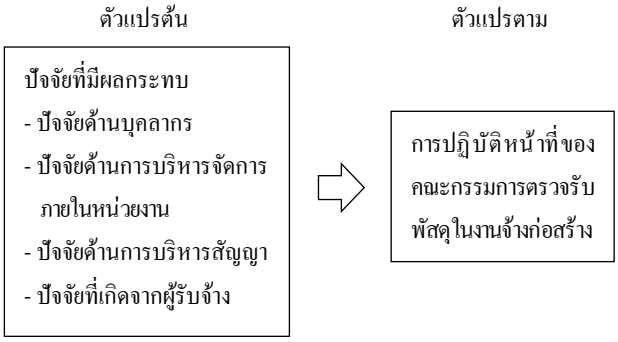
มนต์ชัย วงศ์สันติราษฎร์ ศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการควบคุมงานก่อสร้าง กรณีศึกษาองค์การบริหารส่วนตำบลภายในจังหวัดนครราชสีมา พบว่า ผู้ควบคุมงานให้ความสำคัญกับความรู้งานวิศวกรรมและความเอาใจใส่ในหน้าที่มากที่สุด โดยความสำคัญของหน้าที่คือ ผู้ควบคุมงานต้องศึกษาสัญญาจ้าง แบบแปลนทุกครั้งก่อนเริ่มงาน ปัจจัยด้านบุคคลที่มีผลกระทบสูงสุด ได้แก่ ผู้ควบคุมงานที่เข้าใจวิธีการก่อสร้างจะควบคุมงานและแก้ไขงานปัญหาได้ดี ความเอาใจใส่รับผิดชอบทำให้การก่อสร้างมีคุณภาพ ภาวะผู้นำที่ดีย่อมเป็นที่ยอมรับในการทำงาน ปัจจัยด้านการปฏิบัติงานที่มีผลกระทบสูงสุด ได้แก่ ด้านลักษะกายภาพของโครงการ ด้านเอกสาร และด้านการเงิน [8]

จันทิมา มณีโชติวงศ์ ศราวุธ จันทะราช ศุภชัย ชัยบุรี และกิตติศักดิ์ ทองสุวรรณ ศึกษาปัญหาและอุปสรรคงานก่อสร้างอาคารในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน พบว่า ปัจจัยที่ทำให้เกิดปัญหาและอุปสรรค คือ แรงงานไม่เพียงพอต่อปริมาณงาน แรงงานหยุดงาน ฝนตก ผู้รับจ้างเริ่มงานช้า และขาดสภาพคล่องทางการเงิน [9]

2.3 กรอบแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ปัจจัยที่มีผลต่อการปฏิบัติหน้าที่ของคณะกรรมการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้างสามารถจำแนกเป็น 4 ด้านหลัก ได้แก่ ด้านบุคลากรซึ่งเกี่ยวข้อง

กับความรู้ความเข้าใจด้านกฎหมายและวิศวกรรม การประสานงาน ภาระงานที่เพิ่มขึ้น การจัดทำรายงานการปฏิบัติงานประจำวัน และการใช้ดุลพินิจ ด้านการบริหารจัดการภายในหน่วยงานเกี่ยวกับความเพียงพอของบุคลากรและการส่งเสริมความรู้ผ่านการอบรม ด้านการบริหารสัญญาครอบคลุมความซับซ้อนของเอกสาร เหตุสุดวิสัย การเลือกใช้วัสดุ เทคนิคการก่อสร้างและการแก้ไขแบบก่อสร้าง และด้านผู้รับจ้างเกี่ยวข้องกับความพร้อมด้านแรงงาน บุคลากรควบคุมงาน สภาพคล่องทางการเงิน การเลือกใช้วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องจักร และวิธีการก่อสร้าง ซึ่งล้วนเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการปฏิบัติหน้าที่ของคณะกรรมการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้างโดยรวม



รูปที่ 1 กรอบแนวคิดในการวิจัย

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 รูปแบบการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงปริมาณ โดยใช้แบบสอบถามเก็บรวบรวมข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่าง นำมาวิเคราะห์ด้วยสถิติเบื้องต้น

3.2 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากร คือ บุคลากรของหน่วยงานของรัฐแห่งหนึ่ง และกลุ่มตัวอย่างเป็นผู้ที่เคยปฏิบัติหน้าที่คณะกรรมการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้าง ผู้ควบคุมงาน เจ้าหน้าที่พัสดุ และผู้ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารสัญญา จำนวน 50 คน โดยเป็นการคัดเลือกแบบเจาะจง

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือวิจัยเป็นแบบสอบถาม แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย (1) ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม (2) ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการปฏิบัติหน้าที่ของคณะกรรมการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้าง ครอบคลุม 4 ด้าน จำนวน 17 ข้อ ใช้มาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ และ (3) ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

แบบสอบถามผ่านการตรวจสอบคุณภาพ โดยมีค่าดัชนีความสอดคล้อง (IOC) เท่ากับ 0.84 และค่าความเชื่อมั่น (Cronbach's alpha) เท่ากับ 0.91 ซึ่งอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิจัยครั้งนี้ใช้สถิติเชิงพรรณนาและสถิติเชิงอนุมานในการวิเคราะห์ข้อมูล โดยแบ่งการวิเคราะห์ ดังต่อไปนี้

1. ข้อมูลทั่วไป วิเคราะห์โดยใช้การแจกแจงความถี่และค่าร้อยละ เพื่ออธิบายลักษณะพื้นฐานของผู้ตอบแบบสอบถาม โดยใช้สมการที่ (1)

$$\text{ร้อยละ} = \frac{\text{จำนวนคำตอบทั้งหมด x 100}}{\text{จำนวนผู้ตอบทั้งหมด}} \quad (1)$$

2. ข้อมูลเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการปฏิบัติหน้าที่ของคณะกรรมการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้าง วิเคราะห์โดยใช้ค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เพื่อพิจารณาผลกระทบและโอกาสที่เกิดของแต่ละปัจจัย โดยใช้สมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ

$$\bar{X} = \frac{\Sigma X}{N} \quad (2)$$

โดยที่ $\bar{X}$ คือ ค่าเฉลี่ย, ΣX คือ ผลรวมของคะแนนทั้งหมด และ N คือ จำนวนผู้ตอบแบบสอบถาม

$$SD = \sqrt{\frac{n\Sigma X^2 - (\Sigma X)^2}{n(n-1)}} \quad (3)$$

โดยที่ SD คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน, ΣX^2 คือ ผลรวมของคะแนนยกกำลังสอง, $(\Sigma X)^2$ คือ ผลรวมของคะแนนทั้งหมดยกกำลังสอง และ n คือ จำนวนผู้ตอบแบบสอบถาม

นำค่าระดับผลกระทบและโอกาสที่เกิดมาคำนวณดัชนีความรุนแรง (Severity Index: SI) เพื่อจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยแต่ละด้าน โดยใช้สมการที่ (4)

$$\text{ดัชนีความรุนแรง} = \frac{\text{ค่าเฉลี่ยระดับผลกระทบ x ค่าเฉลี่ยโอกาสที่เกิด}}{\text{ระดับผลกระทบมากที่สุด x โอกาสที่เกิดมากที่สุด}} \quad (4)$$

3. ทดสอบสมมติฐาน โดยวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-Way ANOVA) ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบความแตกต่างค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างมากกว่าสองกลุ่ม

4. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

การวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยวิเคราะห์ข้อมูลที่เก็บรวบรวมจากกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 50 ชุด โดยกำหนดผลการวิเคราะห์ ออกเป็น 6 หัวข้อ ดังต่อไปนี้

1. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม สามารถจำแนกจำนวน และค่าร้อยละ ดังในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าความถี่และร้อยละ แบ่งตามหน้าที่ที่เคยปฏิบัติและประสบการณ์

ข้อมูลทั่วไป	ความถี่	ร้อยละ
1. หน้าที่ที่เคยปฏิบัติในหน่วยงานของรัฐ		
คณะกรรมการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้าง	16	32
ผู้ควบคุมงาน	17	34
เจ้าหน้าที่พัสดุ	15	30
ผู้เกี่ยวข้องกับการบริหารสัญญา	2	4
รวม	50	100
2. ประสบการณ์ในการทำงาน		
น้อยกว่า 5 ปี	2	4
5 – 10 ปี	11	22
11 – 20 ปี	19	38
มากกว่า 20 ปี	18	36
รวม	50	100

ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่เป็นผู้ควบคุมงาน และคณะกรรมการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้าง โดยมีประสบการณ์ส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 11 - 20 ปี และมากกว่า 20 ปี

2. ผลการวิเคราะห์ระดับผลกระทบของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการปฏิบัติหน้าที่ของคณะกรรมการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้าง ดังในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระดับผลกระทบ

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการปฏิบัติหน้าที่ของคณะกรรมการตรวจรับ	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	แปลผล
1. ปัจจัยด้านบุคลากร	3.27	1.09	ปานกลาง
1.1 ความเข้าใจเกี่ยวกับกฎหมายการประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม	3.42	1.11	มาก
1.2 ความเข้าใจด้านวิศวกรรมก่อสร้าง รูปแบบหรือวิธีการก่อสร้าง	3.42	1.07	มาก
1.3 การได้รับแต่งตั้งให้ปฏิบัติหน้าที่คณะกรรมการฯ เป็นภาระงานที่เพิ่มขึ้น	3.18	1.12	ปานกลาง
1.4 การประสานงานซึ่งกันและกันระหว่างผู้ที่เกี่ยวข้อง	3.26	1.05	ปานกลาง
1.5 การให้ความสำคัญกับการทำรายงานการจดบันทึกการปฏิบัติงานและผลการปฏิบัติงานประจำวัน	3.34	1.12	ปานกลาง
1.6 การใช้ดุลพินิจในการพิจารณาตัดสินใจเรื่องที่เกี่ยวกับงานก่อสร้าง	3.02	1.08	ปานกลาง
2. ปัจจัยด้านการบริหารจัดการภายในหน่วยงาน	3.40	1.12	ปานกลาง
2.1 หน่วยงานขาดแคลนบุคลากรทางด้านงานก่อสร้าง	3.34	1.21	ปานกลาง
2.2 การให้ความรู้หรือจัดอบรมแก่บุคลากรในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับงานก่อสร้าง	3.46	1.03	มาก
3. ปัจจัยด้านการบริหารสัญญา	3.33	1.08	ปานกลาง
3.1 ปริมาณเอกสารมีจำนวนมาก ไม่มีแบบฟอร์มชัดเจน	3.32	1.08	ปานกลาง
3.2 เหตุสุดวิสัย ทำให้ต้องทำการขยายระยะเวลาตามสัญญา	3.28	1.05	ปานกลาง
3.3 การให้ความสำคัญกับการเลือกใช้วัสดุและเทคนิคในการก่อสร้าง	3.36	1.17	ปานกลาง
3.4 การแก้ไขงานก่อสร้างหรือปรับแบบรูปรายการให้มีความสอดคล้องกัน	3.36	1.03	ปานกลาง
4. ปัจจัยที่เกิดจากผู้รับจ้าง	3.14	1.11	ปานกลาง
4.1 ผู้รับจ้างขาดแคลนแรงงานก่อสร้าง	3.46	1.07	มาก
4.2 ผู้รับจ้างขาดบุคลากรในการควบคุมงาน	3.12	1.06	ปานกลาง
4.3 ผู้รับจ้างขาดสภาพคล่องทางการเงิน	3.10	1.09	ปานกลาง
4.4 การเลือกใช้วัสดุ อุปกรณ์หรือเครื่องจักรในการทำงาน	3.08	1.10	ปานกลาง
4.5 การใช้เทคนิควิธีการในการก่อสร้าง	2.94	1.20	ปานกลาง

ปัจจัยด้านการบริหารจัดการภายในหน่วยงานมีผลกระทบมากที่สุด และปัจจัยย่อยที่มีผลกระทบมากที่สุด คือ การให้ความรู้หรือจัดอบรมแก่บุคลากรในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับงานก่อสร้าง โดยรวมมีผลกระทบในระดับปานกลาง

3. ผลการวิเคราะห์โอกาสที่เกิดปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการปฏิบัติหน้าที่ของคณะกรรมการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้าง ดังในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของโอกาสที่เกิด

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการปฏิบัติหน้าที่ของคณะกรรมการตรวจรับ	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	แปลผล
1. ปัจจัยด้านบุคลากร	3.04	1.06	ปานกลาง
1.1 ความเข้าใจเกี่ยวกับกฎหมายการประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม	2.96	1.14	ปานกลาง
1.2 ความเข้าใจด้านวิศวกรรมก่อสร้าง รูปแบบหรือวิธีการก่อสร้าง	3.10	1.07	ปานกลาง
1.3 การได้รับแต่งตั้งให้ปฏิบัติหน้าที่คณะกรรมการฯ เป็นภาระงานที่เพิ่มขึ้น	2.88	1.08	ปานกลาง
1.4 การประสานงานซึ่งกันและกันระหว่างผู้ที่เกี่ยวข้อง	3.16	0.93	ปานกลาง
1.5 การให้ความสำคัญกับการทำรายงานการจดบันทึกการปฏิบัติงานและผลการปฏิบัติงานประจำวัน	3.08	0.99	ปานกลาง

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการปฏิบัติหน้าที่ของคณะกรรมการตรวจรับ	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	แปลผล
1.6 การใช้ดุลพินิจในการพิจารณาตัดสินใจเรื่องที่เกี่ยวกับงานก่อสร้าง	3.04	1.16	ปานกลาง
2. ปัจจัยด้านการบริหารจัดการภายในหน่วยงาน	3.17	1.11	ปานกลาง
2.1 หน่วยงานขาดแคลนบุคลากรทางด้านงานก่อสร้าง	3.12	1.14	ปานกลาง
2.2 การให้ความรู้หรือจัดอบรมแก่บุคลากรในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับงานก่อสร้าง	3.22	1.09	ปานกลาง
3. ปัจจัยด้านการบริหารสัญญา	3.11	1.04	ปานกลาง
3.1 ปริมาณเอกสารมีจำนวนมาก ไม่มีแบบฟอร์มชัดเจน	3.10	1.05	ปานกลาง
3.2 เหตุสุดวิสัย ทำให้ต้องทำการขยายระยะเวลาตามสัญญา	3.16	1.02	ปานกลาง
3.3 การให้ความสำคัญกับการเลือกใช้วัสดุและเทคนิคในการก่อสร้าง	3.04	1.05	ปานกลาง
3.4 การแก้ไขงานก่อสร้างหรือปรับแบบรูปรายการให้มีความสอดคล้องกัน	3.14	1.07	ปานกลาง
4. ปัจจัยที่เกิดจากผู้รับจ้าง	2.88	1.11	ปานกลาง
4.1 ผู้รับจ้างขาดแคลนแรงงานก่อสร้าง	2.98	1.06	ปานกลาง
4.2 ผู้รับจ้างขาดบุคลากรในการควบคุมงาน	2.78	1.11	ปานกลาง
4.3 ผู้รับจ้างขาดสภาพคล่องทางการเงิน	2.92	1.12	ปานกลาง
4.4 การเลือกใช้วัสดุ อุปกรณ์หรือเครื่องจักรในการทำงาน	2.74	1.12	ปานกลาง
4.5 การใช้เทคนิควิธีการในการก่อสร้าง	2.98	1.17	ปานกลาง

ปัจจัยด้านการบริหารจัดการภายในหน่วยงานมีโอกาสที่เกิดมากที่สุด และปัจจัยย่อยที่มีโอกาสที่เกิดมากที่สุดคือ การให้ความรู้หรือจัดอบรมแก่บุคลากรในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับงานก่อสร้าง โดยรวมมีโอกาสที่เกิดในระดับปานกลาง

4.ผลการวิเคราะห์ค่าดัชนีความรุนแรงของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการปฏิบัติหน้าที่ของคณะกรรมการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้าง ดังในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าดัชนีความรุนแรงของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการปฏิบัติหน้าที่ของคณะกรรมการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้าง

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการปฏิบัติหน้าที่ของคณะกรรมการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้าง	ค่าดัชนีความรุนแรง
1. ปัจจัยด้านบุคลากร	0.40
1.1 ความเข้าใจเกี่ยวกับกฎหมายการประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม	0.40
1.2 ความเข้าใจด้านวิศวกรรมก่อสร้าง รูปแบบหรือวิธีการก่อสร้าง	0.42
1.3 การได้รับแต่งตั้งให้ปฏิบัติหน้าที่คณะกรรมการฯ เป็นภาระงานที่เพิ่มขึ้น	0.37
1.4 การประสานงานซึ่งกันและกัน ระหว่างผู้ที่เกี่ยวข้อง	0.41
1.5 การให้ความสำคัญกับการทำรายงานการจดบันทึกการปฏิบัติงานและผลการปฏิบัติงานประจำวัน	0.41
1.6 การใช้ดุลพินิจในการพิจารณา ตัดสินใจเรื่องที่เกี่ยวกับงานก่อสร้าง	0.37
2. ปัจจัยด้านการบริหารจัดการภายในหน่วยงาน	0.43
2.1 หน่วยงานขาดแคลนบุคลากรทางด้านงานก่อสร้าง	0.42
2.2 การให้ความรู้หรือจัดอบรมแก่บุคลากรในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับงานก่อสร้าง	0.45
3. ปัจจัยด้านการบริหารสัญญา	0.41
3.1 ปริมาณเอกสารมีจำนวนมาก ไม่มีแบบฟอร์มชัดเจน	0.41
3.2 เหตุสุดวิสัย ทำให้ต้องทำการขยายระยะเวลาตามสัญญา	0.41
3.3 การให้ความสำคัญกับการเลือกใช้วัสดุและเทคนิคในการก่อสร้าง	0.41
3.4 การแก้ไขงานก่อสร้างหรือปรับแบบรูปรายการให้มีความสอดคล้องกัน	0.42
4. ปัจจัยที่เกิดจากผู้รับจ้าง	0.36
4.1 ผู้รับจ้างขาดแคลนแรงงานก่อสร้าง	0.41
4.2 ผู้รับจ้างขาดบุคลากรในการควบคุมงาน	0.35
4.3 ผู้รับจ้างขาดสภาพคล่องทางการเงิน	0.36
4.4 การเลือกใช้วัสดุ อุปกรณ์หรือเครื่องจักรในการทำงาน	0.34
4.5 การใช้เทคนิควิธีการในการก่อสร้าง	0.35

ปัจจัยด้านการบริหารจัดการภายในหน่วยงานมีดัชนีความรุนแรงมากที่สุด และปัจจัยย่อยที่มีดัชนีความรุนแรงมากที่สุด คือ การให้ความรู้หรือจัดอบรมแก่บุคลากรในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับงานก่อสร้าง

5. ผลการจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการปฏิบัติหน้าที่ของคณะกรรมการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้าง ตามค่าดัชนีความรุนแรงจากความสำคัญมากไปหาน้อย ดังในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ลำดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการปฏิบัติหน้าที่ของคณะกรรมการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้าง

ลำดับ	ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการปฏิบัติหน้าที่ของคณะกรรมการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้าง	ค่าดัชนีความรุนแรง
1	2.2 การให้ความรู้หรือจัดอบรมแก่บุคลากรในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับงานก่อสร้าง	0.45
2	1.2 ความเข้าใจด้านวิศวกรรมก่อสร้าง รูปแบบหรือวิธีการก่อสร้าง	0.42
2	3.4 การแก้ไขงานก่อสร้างหรือปรับแบบรูปรายการให้มีความสอดคล้องกัน	0.42
2	2.1 หน่วยงานขาดแคลนบุคลากรทางด้านงานก่อสร้าง	0.42
3	3.2 เหตุสุดวิสัย ทำให้ต้องทำการขยายระยะเวลาตามสัญญา	0.41

ลำดับ	ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการปฏิบัติหน้าที่ของคณะกรรมการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้าง	ค่าดัชนีความรุนแรง
3	4.1 ผู้รับจ้างขาดแคลนแรงงานก่อสร้าง	0.41
3	1.4 การประสานงานซึ่งกันและกันระหว่างผู้ที่เกี่ยวข้อง	0.41
3	3.1 ปริมาณเอกสารมีจำนวนมาก ไม่มีแบบฟอร์มชัดเจน	0.41
3	1.5 การให้ความสำคัญกับการทำรายงานการจดบันทึกการปฏิบัติงานและผลการปฏิบัติงานประจำวัน	0.41
3	3.3 การให้ความสำคัญกับการเลือกใช้วัสดุและเทคนิคในการก่อสร้าง	0.41
4	1.1 ความเข้าใจเกี่ยวกับกฎหมายการประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม	0.40
5	1.6 การใช้ดุลพินิจในการพิจารณา ตัดสินใจเรื่องที่เกี่ยวกับงานก่อสร้าง	0.37
5	1.3 การได้รับแต่งตั้งให้ปฏิบัติหน้าที่คณะกรรมการฯ เป็นภาระงานที่เพิ่มขึ้น	0.37
6	4.3 ผู้รับจ้างขาดสภาพคล่องทางการเงิน	0.36
7	4.5 การใช้เทคนิควิธีการในการก่อสร้าง	0.35
7	4.2 ผู้รับจ้างขาดบุคลากรในการควบคุมงาน	0.35
8	4.4 การเลือกใช้วัสดุ อุปกรณ์หรือเครื่องจักรในการทำงาน	0.34

ปัจจัยที่มีความสำคัญมากที่สุดสามลำดับแรก ได้แก่ (1) การให้ความรู้หรือจัดอบรมแก่บุคลากรในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับงานก่อสร้าง (2) ความเข้าใจด้านวิศวกรรมก่อสร้าง รูปแบบ หรือวิธีการก่อสร้าง และ (3) การแก้ไขงานก่อสร้างหรือปรับแบบรูปรายการให้มีความสอดคล้องกัน

6. ผลการทดสอบสมมติฐานของการวิจัย จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-Way ANOVA) ไม่พบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระดับการปฏิบัติหน้าที่ของคณะกรรมการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้างระหว่างบุคลากรที่มีหน้าที่ในการปฏิบัติงานแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

5. สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

สรุปผลการวิจัยเรื่องปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการปฏิบัติหน้าที่ของคณะกรรมการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้าง กรณีศึกษาหน่วยงานของรัฐแห่งหนึ่ง สามารถเรียงลำดับตามวัตถุประสงค์ของการวิจัยได้ ดังนี้

ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่เป็นบุคลากรที่มีประสบการณ์ด้านงานก่อสร้างโดยตรง และมีประสบการณ์ในการทำงานตั้งแต่ 11 ปีขึ้นไป โดยภาพรวมการปฏิบัติหน้าที่ของคณะกรรมการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้างอยู่ในระดับปานกลาง และไม่พบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระดับการปฏิบัติหน้าที่ของคณะกรรมการตรวจรับระหว่างบุคลากรที่มีหน้าที่ในการปฏิบัติงานแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

สำหรับปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการปฏิบัติหน้าที่ พบว่า ปัจจัยด้านการบริหารจัดการภายในหน่วยงานมีความสำคัญสูงสุด รองลงมา ได้แก่ ปัจจัยด้านการบริหารสัญญา ปัจจัยด้านบุคลากร และปัจจัยที่เกิดจากผู้รับจ้าง ตามลำดับ โดยปัจจัยย่อยที่มีความสำคัญต่อการปฏิบัติหน้าที่ ได้แก่ การให้ความรู้หรือการจัดอบรมแก่บุคลากร ความเข้าใจด้านวิศวกรรมก่อสร้าง การแก้ไขงานก่อสร้างให้สอดคล้องกับแบบรูปรายการ และการขาดแคลนบุคลากร

เมื่อจัดลำดับความสำคัญของปัจจัย พบว่า การให้ความรู้หรือการจัดอบรมแก่บุคลากรเป็นปัจจัยย่อยที่มีความสำคัญสูงสุด รองลงมา ได้แก่ ความเข้าใจด้านวิศวกรรมก่อสร้าง การแก้ไขงานก่อสร้าง และการขาดแคลนบุคลากรทางด้านงานก่อสร้าง

5.2 อภิปรายผล

ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่า ผลกระทบต่อการปฏิบัติหน้าที่ของคณะกรรมการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้างอยู่ในระดับปานกลาง แม้ว่าผู้ปฏิบัติงานส่วนใหญ่จะมีประสบการณ์ในระดับสูง และความแตกต่างด้านหน้าที่ของบุคลากรไม่ส่งผลต่อระดับการปฏิบัติหน้าที่อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากลักษณะงานที่ต้องอาศัยทั้งความรู้ด้านกฎหมาย การบริหารสัญญา และด้านวิศวกรรมก่อสร้างร่วมกัน

ปัจจัยด้านการบริหารจัดการภายในหน่วยงานเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญสูงสุด สะท้อนให้เห็นว่าการบริหารจัดการของหน่วยงานเป็นปัจจัยสำคัญในการสนับสนุนการปฏิบัติหน้าที่คณะกรรมการตรวจรับ โดยเฉพาะการส่งเสริมความรู้แก่บุคลากร การคัดเลือกและจัดสรรบุคลากรให้เหมาะสมกับภาระงาน จะช่วยยกระดับการปฏิบัติหน้าที่ ลดภาระงาน และเพิ่มความคล่องตัวในการปฏิบัติงานได้มากยิ่งขึ้น

ปัจจัยด้านการบริหารสัญญาเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญรองลงมา สะท้อนให้เห็นว่าการปฏิบัติหน้าที่ จำเป็นต้องอาศัยความรู้ด้านช่างในการบริหารงานก่อสร้าง อีกทั้งยังสะท้อนความซับซ้อนของการบริหารสัญญาทั้งในด้านการจัดการเอกสาร การควบคุมระยะเวลา การเลือกใช้วัสดุ และวิธีการก่อสร้างให้สอดคล้องกับรายการประกอบแบบแปลน ซึ่งไม่สอดคล้องกับผลการวิจัยของ วสันต์ จำปาขาว (2566) ที่ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการปฏิบัติงานจัดจ้างก่อสร้างขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น พบว่า ปัจจัยด้านการบริหารสัญญาจ้าง เป็นปัญหาที่ส่งผลต่อการปฏิบัติงานจ้างก่อสร้างมากที่สุด [10] อาจเนื่องมาจากประเภทและขนาดของโครงการ จำนวนบุคลากรของหน่วยงาน และความพร้อมของผู้รับจ้างที่แตกต่างกัน

ปัจจัยด้านบุคลากรเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญ สะท้อนให้เห็นว่าการปฏิบัติหน้าที่ของคณะกรรมการตรวจรับ จำเป็นต้องอาศัยทักษะด้านเทคนิคงานช่างในการตรวจสอบงานก่อสร้าง รายงานการปฏิบัติงานของผู้รับจ้าง ขั้นตอนการปฏิบัติงาน คุณภาพวัสดุ และการสื่อสารระหว่างผู้ที่เกี่ยวข้องยังเป็นปัจจัยสำคัญ เนื่องจากการปฏิบัติงานต้องอาศัยความร่วมมือจากหลายฝ่าย ซึ่งไม่สอดคล้องกับผลการวิจัยของ ปฤษฎางค์ แววโคกสูง (2566) ที่ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้างงานทางของบุคลากรสำนักงานการปฏิรูปที่ดินเพื่อเกษตรกรรม พบว่า ปัจจัยด้านบุคลากร ส่งผลต่อ

ประสิทธิภาพการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้างมากที่สุด [11] และไม่สอดคล้องกับผลการวิจัยของ อธิวัฒน์ สายเบาะ (2566) ที่ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้างอย่างมีประสิทธิภาพ กรณีศึกษาหน่วยงานองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น ในพื้นที่จังหวัดปราจีนบุรี พบว่า ปัจจัยด้านบุคลากร ส่งผลต่อการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้างมากที่สุด [12] อาจเนื่องมาจากความแตกต่างด้านทักษะทางวิชาช่าง ประสบการณ์ในการปฏิบัติงาน การสื่อสาร และคุณวุฒิของบุคลากรในแต่ละหน่วยงาน

ปัจจัยที่เกิดจากผู้รับจ้างเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่ำสุด การขาดแคลนแรงงานหรือแรงงานที่ขาดทักษะมีผลกระทบต่อการปฏิบัติหน้าที่ของคณะกรรมการตรวจรับ เนื่องจากอาจส่งผลต่อความถูกต้องของงานและทำให้ต้องแก้ไขงานบ่อยครั้ง ซึ่งก่อให้เกิดความล่าช้าในการดำเนินงาน ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ สมัคร ต้นโลห์ และฉรงค์ เหลืองบุตรนาค (2552) ที่ศึกษาปัญหา, ปัจจัยและการปรับปรุงงานก่อสร้างที่ล่าช้าของงานราชการ พบว่า ปัจจัยความล่าช้าที่เกิดจากผู้รับจ้าง เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบทำให้โครงการก่อสร้างของทางราชการล่าช้า ประกอบด้วยปัญหาทางด้านการเงิน การขาดแคลนแรงงาน และวัสดุ [13]

สรุป การบริหารจัดการภายในหน่วยงาน โดยการคัดเลือกและจัดสรรบุคลากรอย่างเหมาะสม ส่งเสริมความรู้แก่บุคลากรควบคู่กับการเสริมสร้างทักษะด้วยตนเอง เป็นปัจจัยสำคัญในการยกระดับการปฏิบัติหน้าที่ของคณะกรรมการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้าง

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าอิสระ เรื่อง ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการปฏิบัติหน้าที่ของคณะกรรมการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้าง กรณีศึกษาหน่วยงานของรัฐแห่งหนึ่ง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาการตรวจสอบและกฎหมายวิศวกรรม มหาวิทยาลัยรามคำแหง

5.3 ข้อเสนอแนะ

หน่วยงานของรัฐควรคัดเลือกและจัดสรรบุคลากรที่มีความรู้ความสามารถให้เหมาะสมกับภาระงาน พร้อมทั้งดำเนินการจัดการความรู้ (KM) และจัดทำแผนส่งเสริมความรู้ด้านการบริหารสัญญาและหลักวิชาช่างอย่างต่อเนื่อง ขณะที่บุคลากรควรแสวงหาความรู้เพิ่มเติมอย่างสม่ำเสมอ กำหนดเงื่อนไขในสัญญาอย่างรัดกุม ประเมินความพร้อมของผู้รับจ้าง และติดตามความก้าวหน้าของงานอย่างใกล้ชิด เพื่อยกระดับการปฏิบัติงานโดยรวม

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณาจารย์และบุคลากรสาขาวิชาการตรวจสอบและกฎหมายวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ และข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ต่อการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] พระราชบัญญัติวินัยการเงินการคลังของรัฐ พ.ศ.2561, ราชกิจจานุเบกษา, กรุงเทพฯ, 2561.

[2] พระราชบัญญัติการจัดซื้อจัดจ้างและการบริหารพัสดุภาครัฐ พ.ศ.2560, ราชกิจจานุเบกษา, กรุงเทพฯ, 2560.

[3] ระเบียบกระทรวงการคลังว่าด้วยการจัดซื้อจัดจ้างและการบริหารพัสดุภาครัฐ พ.ศ. 2560, กระทรวงการคลัง, กรุงเทพฯ, 2560.

[4] Office of the Auditor General of Thailand, "Audit Reports," [Online]. Available: https://www.audit.go.th/th/report/audit

[5] ฉรงค์ เหลืองบุตรนาค, การบริหารงานก่อสร้าง (Construction Management), พิมพ์ครั้งที่ 1, 2557.

[6] สำนักงานคณะกรรมการป้องกันและปราบปรามการทุจริตในภาครัฐ (ป.ป.ท.), "นิยามศัพท์สำคัญที่ควรรู้," กรุงเทพฯ, 2564.

[7] รัตติกาล โสวะภาส ภราดร เพ็งเจียม และทานตะวัน บุญเล็ก, "แนวทางการบริหารสัญญาจ้างก่อสร้างเพื่อลดข้อพิพาทระหว่างหน่วยงานภาครัฐและภาคเอกชนในประเทศไทย," วารสาร MCU Buddhapanya Review, ปีที่ 10, ฉบับที่ 2, หน้า 1606-1627, มี.ค.-เม.ย. 2568.

[8] มนต์ชัย วงศ์สันติราษฎร์. (2556). ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการควบคุมงานก่อสร้าง กรณีศึกษาองค์การบริหารส่วนตำบลภายในจังหวัดนครราชสีมา. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

[9] จันทิมา มณี โชติวงศ์ ศราวุธ จันทะราช ศุภชัย ชัยบุรี และกิตติศักดิ์ ทองสุวรรณ. (2566). การศึกษาปัญหาและอุปสรรคงานก่อสร้างอาคารในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 28 (NCCE 28), 24-26 พ.ค. 2566.

[10] วสันต์ จำปาขาว (2563) ปัจจัยที่มีผลต่อการปฏิบัติงานจัดจ้างก่อสร้างของหน่วยงานองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น. การค้นคว้าอิสระปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (การตรวจสอบและกฎหมายวิศวกรรม), มหาวิทยาลัยรามคำแหง.

[11] ปฤษฎางค์ แววโคกสูง (2566) ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้างงานทางของบุคลากรสำนักงานการปฏิรูปที่ดินเพื่อเกษตรกรรม. การค้นคว้าอิสระปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (การตรวจสอบและกฎหมายวิศวกรรม), มหาวิทยาลัยรามคำแหง.

[12] อธิวัฒน์ สายเบาะ (2566) ปัจจัยที่ส่งผลต่อการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้างอย่างมีประสิทธิภาพ กรณีศึกษาหน่วยงานองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น ในพื้นที่จังหวัดปราจีนบุรี. การค้นคว้าอิสระปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (การตรวจสอบและกฎหมายวิศวกรรม), มหาวิทยาลัยรามคำแหง.

[13] สมัคร ต้นโลห์, ฉรงค์ เหลืองบุตรนาค. (2552). ปัญหา, ปัจจัยและการปรับปรุงงานก่อสร้างที่ล่าช้าของงานราชการ. วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 20, ฉบับที่ 1 (น. 23).



ประวัติผู้เขียนบทความ

นายปองภพ แพงวิเศษ

สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยบูรพา

งานวิจัยที่สนใจ ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการปฏิบัติหน้าที่ของคณะกรรมการตรวจรับพัสดุในงานจ้างก่อสร้าง

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การประเมินและจัดการที่จอดรถด้วยแบบจำลองการจราจรระดับจุลภาค กรณีศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่

Evaluation and Management of Parking Facilities Using Microscopic Traffic Simulation A Case Study of Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai

อัครพงษ์ เทพแก้ว[1*] ธันวา รินคำ[2] อโณทัย จันทร์ที[3] ระพีพัฒน์ ชูไว[4] และ ชาคริต ชูวุฒยากร[5]

[1,2,3,4,5] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่

akharapoong@rmutl.ac.th, thanwarinkha889@gmail.com, jewvele@gmail.com, pqzoiujkflimkop@gmail.com, chakrit@rmutl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความเพียงพอที่จอดรถและแนวทางการจัดการที่จอดรถภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่ ผ่านการจำลองการจราจรระดับจุลภาค โดยโปรแกรม PTV VISSIM ผลการศึกษาพบว่าช่วงเวลาที่มีความต้องการจอดสูงสุดคือ 08.00–09.00 น. โดยพื้นที่ศึกษาที่ 1 อาคารเรียนเฉลิมพระเกียรติ และอาคารกิจกรรมนักศึกษา มีอัตราการครอบครองที่จอดรถร้อยละ 23.69 ซึ่งเพียงพอต่อผู้ใช้งาน ขณะที่พื้นที่ที่ 2 อาคารเรียนศึกษาทั่วไป และพื้นที่ที่ 3 อาคารเรียนรวมและห้องสมุด พบว่าอัตราการครอบครองสูงถึงร้อยละ 72.78 และ 61.75 ตามลำดับ

จากการจำลองสถานการณ์ทางเลือกพบว่า การเพิ่มพื้นที่จอดรถบริเวณสนามบาสเกตบอลในพื้นที่ที่ 2 สามารถลดอัตราการครอบครองได้ร้อยละ 15.76 และการเพิ่มที่จอดรถบริเวณบ้านพักบุคลากรในพื้นที่ที่ 3 ลดลงได้ร้อยละ 13.73 สรุปผลการการขยายพื้นที่ตามผลการจำลองช่วยลดความหนาแน่นและเพิ่มประสิทธิภาพการรองรับยานพาหนะได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการพัฒนาผังทางกายภาพของมหาวิทยาลัยในอนาคต

คำสำคัญ : ที่จอดรถ; แบบจำลองการจราจรระดับจุลภาค; อัตราการครอบครอง

Abstract

This research aimed to evaluate parking adequacy and parking management guidelines within Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai, through micro-traffic simulation using PTV VISSIM software. The study found that peak parking demand occurred during 08:00–09:00, whereby Study Area 1 — comprising the Chalermphrakiat Building and the Student Activity Building — recorded a parking occupancy rate of 23.69%, which was sufficient to accommodate users. In contrast, Area 2 (the General Education Building) and Area 3 (the Integrated Classroom and Library Building) exhibited significantly higher occupancy rates of 72.78% and 61.75%, respectively.

Simulation of alternative scenarios revealed that adding parking spaces at the basketball court area in Zone 2 could reduce the occupancy rate by 15.76%, while adding parking at the staff residence area in Zone 3 could reduce it by 13.73%. In conclusion, expanding parking capacity in accordance with the simulation results significantly reduces congestion and improves vehicle accommodation efficiency, and can serve as an effective guideline for the university's future physical master plan development.

Keywords: Parking; Microscopic Traffic Simulation; Occupancy Rate

1. บทนำ

ปัญหาการจอดรถภายในสถาบันอุดมศึกษาเป็นประเด็นสำคัญด้านวิศวกรรมขนส่งและการวางผังพื้นที่ เนื่องจากการพึ่งพายานพาหนะส่วนตัวที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง สำหรับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่ พบว่านักศึกษา คณาจารย์ และบุคลากรส่วนใหญ่ใช้ยานพาหนะส่วนตัวในการเดินทาง ส่งผลให้ที่จอดรถไม่เพียงพอต่อความต้องการ โดยเฉพาะในช่วงเวลาเร่งด่วนตอนเช้าและช่วงเปลี่ยนคาบเรียน ปัญหาดังกล่าวเป็นผลมาจากการบริหารพื้นที่ที่ไม่สอดคล้องกับพฤติกรรมการใช้งานจริง ประกอบกับการขาดข้อมูลเชิงลึกที่เพียงพอสำหรับการวางแผนเชิงนโยบาย

การศึกษานี้จึงประยุกต์ใช้แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค โดยโปรแกรม PTV VISSIM เพื่อศึกษาและวิเคราะห์แนวทางการจัดการที่จอดรถในรูปแบบต่าง ๆ เช่น การปรับโครงสร้างพื้นที่ การกำหนดโซนจอดรถ และการควบคุมเวลาการใช้งาน

ผลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้มุ่งสร้างแนวทางที่เป็นประโยชน์ต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พื้นที่จอดรถ แก้ปัญหาที่จอดรถไม่เพียงพอ และยกระดับคุณภาพสภาพแวดล้อมสำหรับผู้ใช้งานภายในมหาวิทยาลัย อันจะเป็นแนวทางสนับสนุนการพัฒนาผังแม่บทกายภาพของมหาวิทยาลัยในอนาคต

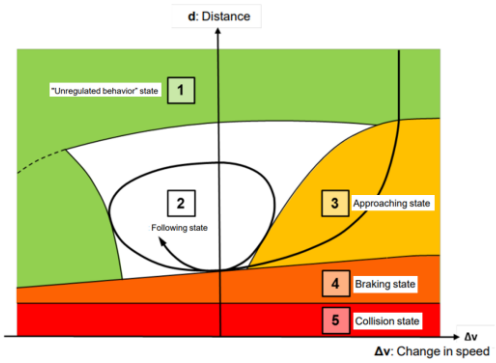
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แบบจำลองการจราจรระดับจุลภาค PTV VISSIM

PTV VISSIM เป็นโปรแกรมจำลองการจราจรระดับจุลภาค (Microscopic Traffic Simulation) เป็นโปรแกรมจำลองการจราจรที่ใช้สำหรับการจำลองการดำเนินงานการขนส่งแบบหลายรูปแบบ โปรแกรมจำลองแบบ Time-Step Based และ Behavior-Based ที่สามารถจำลอง

สภาพการจราจร รวมถึงการเคลื่อนที่ของคนเดินเท้า โดยรองรับทั้งการจราจรของยานพาหนะส่วนตัว และระบบขนส่งสาธารณะ และสามารถทดสอบและวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างระบบต่าง ๆ

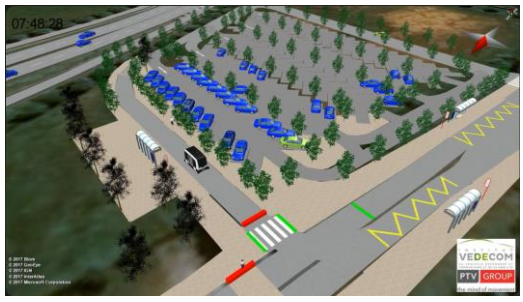
หลักการทำงานของแบบจำลองการไหลของการจราจร แบบจำลองการไหลของการจราจรใน PTV VISSIM อยู่บนพื้นฐานของแบบจำลองการตามรถ (Car-Following Model) ซึ่งพัฒนาโดย Wiedemann [1] แบบจำลองกำหนดสถานะการขับขี่ (Driving States) ออกเป็น 4 สถานะหลัก ได้แก่ (1) Free Driving คือสถานะที่ผู้ขับขี่ไม่ได้รับอิทธิพลจากรถคันหน้า และพยายามรักษาความเร็วที่ต้องการ (2) Approaching คือกระบวนการปรับความเร็วให้เท่ากับรถคันหน้าที่วิ่งช้ากว่า (3) Following คือการขับตามรถคันหน้าโดยไม่มีการเร่งหรือชะลอความเร็วอย่างชัดเจน และ (4) Braking คือการใช้อัตราการชะลอตัวระดับปานกลางถึงสูงเมื่อระยะห่างจากรถคันหน้าลดลงต่ำกว่าระยะปลอดภัยที่ต้องการ



รูปที่ 1 Car following model [1]

2.2 การจำลองที่จอดรถ (Parking Lot) ด้วย PTV VISSIM

PTV VISSIM [2] มีความสามารถในการจำลองระบบที่จอดรถในรูปแบบที่หลากหลาย โดยรองรับกรณีการใช้งานหลัก ดังนี้



รูปที่ 2 การจำลองที่จอดรถ ด้วย PTV VISSIM

2.2.1 ประเภทของที่จอดรถในแบบจำลอง PTV VISSIM สามารถจำลองที่จอดรถได้ 3 ประเภทหลัก ได้แก่ (1) Real Parking Spaces คือการจำลองพื้นที่จอดรถจริงบนถนนหรือในพื้นที่ เหมาะสำหรับการจำลองด้วย Static Routes และ Dynamic Assignment ทั้งแบบจอดขนาน (Longitudinal) แนวตั้งฉาก (Perpendicular) และแนวทแยง (Diagonal) (2) Abstract Parking Lot คือที่จอดรถแบบนามธรรม สำหรับ Dynamic Assignment เพื่อจำลองที่จอดรถจริงหลายแห่ง เช่น ในอาคารจอดรถใต้ดินหรือบนดิน และ (3) Zone Connector คือการจำลองจุดต้นทางและปลายทางของการเดินทางทั้งหมด

2.2.2 กลไกการจัดสรรที่จอดรถ ในกระบวนการจำลอง เมื่อยานพาหนะผ่านจุดตัดสินใจเส้นทางประเภทที่จอดรถ (Vehicle Routing Decision: Parking Lot) VISSIM จะตรวจสอบเงื่อนไขสำคัญ ได้แก่ ยานพาหนะยังไม่ได้รับการจัดสรรที่จอดรถปลายทาง ช่วงเวลาของเส้นทางจอดรถมีนานเพียงพอ และประเภทของยานพาหนะอยู่ในกลุ่มที่กำหนดสำหรับจุดตัดสินใจนั้น หากเงื่อนไขครบถ้วน VISSIM จะกำหนดที่จอดรถที่เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาจากค่า Attraction ของแต่ละช่องจอด ความยาวที่พอเหมาะกับยานพาหนะ และความพร้อมใช้งานของช่องจอด

2.2.3 พารามิเตอร์สำคัญในการจำลองที่จอดรถ พารามิเตอร์หลักที่ใช้ในการกำหนดพฤติกรรมของที่จอดรถใน VISSIM ประกอบด้วย การกระจายเวลาที่จอด (Parking Duration) ร้อยละของยานพาหนะที่ได้รับการจัดสรรที่จอดต่อช่วงเวลา (Parking Rate) ทิศทางการเข้า-ออกที่จอด ทั้งแบบขับเข้า-ขับออก หรือถอยเข้า-ขับออก (Parking Direction) พฤติกรรมเมื่อที่จอดเต็ม เช่น รอหรือปฏิเสธ (Full Occupancy Behavior) และ ค่าความดึงดูดของแต่ละช่องจอดเพื่อกำหนดลำดับการเลือก (Attraction) ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้ช่วยให้ผู้วิจัยสามารถจำลองสถานการณ์ที่จอดรถได้ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงมากที่สุด รวมถึงสามารถวิเคราะห์ผลกระทบของนโยบายการจัดการที่จอดรถในรูปแบบต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.3 อัตราการครอบครองที่จอดรถ (Occupancy Rate)

ตัวชี้วัดการประเมินประสิทธิภาพของระบบที่จอดรถ ซึ่ง PTV VISSIM 2025 [2] ได้กำหนดตัวแปรสำหรับการวัดและประเมินผลไว้อย่างครบถ้วนในระดับที่จอดรถ (Parking Lot) กลุ่มที่จอดรถ (Parking Lot Group) และช่องจอดรถ (Parking Space) โดยอัตราการครอบครอง (Occupancy Rate: OccupRate) ใน PTV VISSIM คำนวณในระดับช่องจอดรถรายช่องในรูปแบบร้อยละของช่วงเวลาที่ช่องจอดถูกใช้งาน และในระดับที่จอดรถโดยรวมจะเป็นค่าเฉลี่ยของทุกช่องจอดในพื้นที่นั้น สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (1)

$$\text{Occupancy Rate (\%)} = (n/N) \times 100 \quad (1)$$

Occupancy Rate (%) = อัตราการครอบครองพื้นที่จอดรถ
n = จำนวนช่องจอดที่ถูกใช้งาน
N = จำนวนช่องจอดทั้งหมด

โดยค่า OccupRate ที่ได้จาก PTV VISSIM มีหน่วยเป็นร้อยละ (0–100%) ซึ่งสะท้อนถึงประสิทธิภาพการใช้พื้นที่จอดรถในช่วงเวลาที่กำหนด หากค่าดังกล่าวสูงเกินกว่าร้อยละ 85 โดยทั่วไปถือว่าพื้นที่จอดรถอยู่ในสภาวะใกล้เต็มและอาจส่งผลกระทบต่อการไหลของการจราจรในพื้นที่โดยรอบ

2.4 การจัดการพื้นที่จอดรถ (Parking Management)

การจัดการพื้นที่จอดรถ เป็นกระบวนการวางแผนและบริหารจัดการพื้นที่สำหรับจอดยานพาหนะให้มีประสิทธิภาพ โดยสอดคล้องกับความต้องการของผู้ใช้งานในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งใช้ Parking Generation Manual [3] เป็นแนวทางอ้างอิงมาตรฐานสากลในการประเมินและวางแผนความต้องการที่จอดรถ

2.4.1 ความต้องการที่จอดรถ (Parking Demand) หมายถึง จำนวนรวมของยานพาหนะที่จอดอยู่ ณ สถานที่หนึ่ง ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง โดย Total Parking Demand คือการสะสมของยานพาหนะที่จอด ณ จุดใดจุดหนึ่งในเวลาที่กำหนด และต้องนับรวมที่จอดรถทุกประเภทที่เกี่ยวข้องกับการใช้ที่พื้นที่นั้น ไม่ว่าจะเป็นพื้นที่จอดรถนอกถนน (Off-Street) บนถนน (On-Street) หรือพื้นที่จอดรถห่างออกไป (Remote Parking Lot)

ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความต้องการที่จอดรถ ได้แก่ ประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน ขนาดและความจุของสิ่งก่อสร้าง ช่วงเวลาและวันในสัปดาห์ ที่ตั้งและบริบทพื้นที่โดยรอบ รวมถึงการเข้าถึงระบบขนส่งสาธารณะ

2.4.2 มาตรฐานความต้องการที่จอดรถในสถาบันการศึกษา สำหรับสถาบันอุดมศึกษาประเภทมหาวิทยาลัย (Land Use 550: University/College) ITE [3] รายงานว่าช่วงเวลาที่ความต้องการที่จอดรถสูงสุดบนวันทำการ (Weekday) คือช่วง 09.00–15.00 น. โดยมีการกระจายตัวของความต้องการตลอดวัน อัตราส่วนอุปทานที่จอดรถ (Parking Supply Ratio) สำหรับมหาวิทยาลัยในบริบท General Urban/Suburban อยู่ที่ประมาณ 0.32 ช่องจอดต่อประชากรในมหาวิทยาลัย (School Population) และ 0.40 ช่องจอดต่อนักศึกษา ซึ่งเป็นค่าอ้างอิงสำคัญในการประเมินความเพียงพอของพื้นที่จอดรถ

2.4.3 หลักการสำรวจและประเมินความต้องการที่จอดรถ ITE (2019) กำหนดแนวทางการเก็บข้อมูลความต้องการที่จอดรถที่มาตรฐานประกอบด้วย การสำรวจควรครอบคลุมช่วงเวลาที่มีความต้องการสูงสุด โดยอ้างอิงจากตารางการกระจายตัวของความต้องการตลอดวัน การนับจำนวนยานพาหนะที่จอดต้องครอบคลุมทุกพื้นที่จอดรถที่เกี่ยวข้องกับสถานที่ศึกษา

ตัวแปรอิสระ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ความต้องการที่จอดรถในมหาวิทยาลัยที่ แนะนำ ได้แก่ จำนวนนักศึกษา และประชากรรวมของมหาวิทยาลัยซึ่งหมายถึงจำนวนนักศึกษาและบุคลากรรวมกัน

2.4.5 แนวทางการจัดการที่จอดรถในสถาบันการศึกษา จากข้อมูลในปัจจัยที่ส่งผลต่อความต้องการที่จอดรถ และควรได้รับการพิจารณาในการวางแผนจัดการ ได้แก่ การมีโปรแกรมจัดการความต้องการการเดินทาง (Transportation Demand Management: TDM) ค่าธรรมเนียมใบอนุญาตจอดรถ (Parking Permit Fees) การจัดโซนจอดรถตามกลุ่มผู้ใช้งาน และระดับการให้บริการระบบขนส่งสาธารณะในพื้นที่

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นพดล กรประเสริฐ และคณะ [4] ได้ศึกษาการจำลองสถานการณ์จราจรในมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยใช้ PTV VISSIM วิเคราะห์ความล่าช้าจากการวนหาที่จอดรถ (Cruising for Parking) ผลการศึกษาพบว่าการขาดระบบจัดการที่จอดรถทำให้เกิดปริมาณจราจรส่วนเกินร้อยละ 15–20 และมาตรการจัดระบบเดินรถทางเดียวร่วมกับการจำกัดจุดเลี้ยวสามารถเพิ่มระดับการให้บริการ (LOS) ของจุดเชื่อมต่อกับถนนสายหลักได้อย่างชัดเจน

อรวรรณ จันทสุทโธ, กมลวรรณ นิคะ และรัชพงษ์ ทองมา [5] ได้ศึกษาแนวทางการพัฒนาพื้นที่จอดรถของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ผลการวิจัยพบว่าปัญหาที่จอดรถไม่ได้เกิดจากพื้นที่ไม่เพียงพอเพียงอย่างเดียว แต่เกิดจากการจัดสรรพื้นที่ที่ไม่สอดคล้องกับพฤติกรรมการเข้าถึงอาคารเรียน ผู้วิจัยจึงเสนอแนวทางการจัดโซนที่จอดรถ (Zoning Strategy) ตามช่วงเวลาและประเภทพาหนะ ซึ่งช่วยลดความวุ่นวายบริเวณคอขวดจราจรได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Ansam Majid Khamis และคณะ [6] ศึกษาปัญหาที่จอดรถในเมือง Baghdad ผ่านแบบจำลองระดับจุลภาค VISSIM กรณีห้าง Dream City Mall และ University of Technology พบว่าที่จอดรถห้างสรรพสินค้าเกิดความล่าช้าสูงสุด 6.5 นาที และแถวคอยยาว 18 คัน ส่วนพื้นที่ของมหาวิทยาลัยมีการใช้งานเกินขีดความสามารถและมีอัตราหมุนเวียนต่ำ จึงเสนอแนวทางก่อสร้างอาคารจอดรถหลายชั้นควบคู่กับการใช้ระบบบริหารจัดการอัจฉริยะ ซึ่งผลการจำลองระบุว่าช่วยลดความล่าช้าและเพิ่มประสิทธิภาพการรองรับปริมาณจราจรในอนาคตได้อย่างชัดเจน

Ali และ Sindi [7] พัฒนาแบบจำลองความต้องการเดินทางสำหรับมหาวิทยาลัย King Abdulaziz ด้วยโปรแกรม PTV VISUM เพื่อแก้ปัญหาการจราจร. งานวิจัยใช้แบบจำลอง 4 ขั้นตอนวิเคราะห์การกระจายการเดินทางตามจำนวนช่องจอดรถรอบอาคาร โดยกำหนดให้ที่จอดรถเป็นปัจจัยหลักในการดึงดูดการเดินทาง ผลการจำลองมีความแม่นยำ 81% และชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณรถเพียง 1,000 คัน จะส่งผลต่อเวลาเดินทางไปยังโซนจอดรถอย่างชัดเจน. การศึกษานี้ถือเป็นแนวทางสำคัญในการใช้ซอฟต์แวร์จำลองเพื่อวางนโยบายบริหารจัดการที่จอดรถในพื้นที่มหาวิทยาลัยให้มีประสิทธิภาพและยั่งยืน

Morten Flesser [8] ศึกษาการไหลของจราจรในวิทยาเขต Kingston ของ University of Rhode Island (URI) ที่ประสบปัญหาความแออัดจากการใช้รถยนต์ส่วนบุคคลสูงถึง 90% งานวิจัยใช้โปรแกรม VISSIM สร้างแบบจำลองโครงข่ายถนนและพื้นที่จอดรถเพื่อประเมินประสิทธิภาพภายใต้สถานการณ์ต่าง ๆ โดยวิเคราะห์ตัวชี้วัดหลัก เช่น ความยาวแถวคอย ความล่าช้า และมลพิษ ผลการศึกษาชี้ว่าปริมาณจราจรช่วงเร่งด่วนเริ่มเกินขีดความสามารถ แต่หากลดจำนวนรถลงเพียง 10% จะช่วยบรรเทาปัญหาได้อย่างมีนัยสำคัญ พร้อมเสนอแนวทางปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐานและการเปลี่ยนพฤติกรรมการเดินทางเพื่อมุ่งสู่ความยั่งยืน

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

การศึกษาครั้งนี้ดำเนินการโดยใช้แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคด้วยโปรแกรม PTV VISSIM เพื่อประเมินความเพียงพอของที่จอดรถและวิเคราะห์สถานการณ์ทางเลือกภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่ โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

3.1 พื้นที่ศึกษาและขอบเขตการวิจัย

การศึกษาครอบคลุมพื้นที่จอดรถทั้งหมดภายในมหาวิทยาลัย โดยแบ่งออกเป็น 3 พื้นที่ศึกษา ได้แก่ พื้นที่ศึกษาที่ 1 บริเวณอาคารเรียนเฉลิมพระเกียรติและอาคารกิจกรรมนักศึกษา พื้นที่ศึกษาที่ 2 บริเวณอาคารเรียนศึกษาทั่วไป และพื้นที่ศึกษาที่ 3 บริเวณอาคารเรียนรวมและห้องสมุด ระยะเวลาเก็บข้อมูลภาคสนามดำเนินการระหว่างวันที่ 17–21 พฤศจิกายน 2568



รูปที่ 3 พื้นที่ศึกษา

3.2 การเก็บรวบรวมข้อมูลภาคสนาม

การเก็บข้อมูลแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่

1) ข้อมูลกายภาพ ทำการวัดความกว้างและความยาวของถนนและช่องจอดรถทุกจุดในพื้นที่ศึกษา พร้อมทั้งสำรวจและจัดเก็บพิกัดและจำนวนช่องจอดที่ใช้งานจริง โดยแบ่งประเภทเป็นที่จอดรถยนต์ 158 จุด และรถจักรยานยนต์ 594 จุด รวมทั้งสิ้น 752 จุด ข้อมูลดังกล่าวใช้เป็นข้อมูลพื้นฐาน ในการสร้างแบบจำลอง

2) ข้อมูลปริมาณการจราจรและการจอดรถ ทำการบันทึกภาพวิดีโอเพื่อเก็บข้อมูลปริมาณยานพาหนะเข้า-ออกบริเวณประตูมหาวิทยาลัย 3 จุด ได้แก่ ประตู 3 (บริเวณศึกษาทั่วไป) ประตู 4 (บริเวณตึก 200 ล้าน) และประตู 5 (บริเวณอาคารเรียนรวม) ในช่วงเวลา 07.00–18.00 น. โดยจำแนกประเภทพาหนะออกเป็นรถจักรยานยนต์และรถยนต์ นอกจากนี้ยังเก็บข้อมูลปริมาณรถจอดสะสมในแต่ละช่วงเวลาโดยวิธีการนับด้วยคน (Manual Counting Methods) เป็นรายชั่วโมงในทั้ง 3 พื้นที่ศึกษา

3) การเก็บข้อมูลปริมาณการจอดรถ (Parking Study) ใช้วิธีการเดินสำรวจ โดยกำหนดการสำรวจในแต่ละพื้นที่ศึกษา แล้วให้ผู้สำรวจเดินนับจำนวนรถที่จอดตามช่วงเวลาที่กำหนด เพื่อหาปริมาณรถสะสม (Parking Accumulation) รายชั่วโมงในช่วงเวลา 07.00–18.00 น. ครอบคลุมทั้ง 3 พื้นที่ศึกษา ข้อมูลที่ได้นำมาใช้คำนวณอัตราการครอบครองที่จอดรถ (Occupancy Rate) เพื่อประเมินความเพียงพอของพื้นที่จอดรถในแต่ละช่วงเวลา และใช้เป็นข้อมูลนำเข้า (Input Data) สำหรับการสร้างแบบจำลองใน PTV VISSIM ต่อไป

3.3 การสร้างแบบจำลองใน PTV VISSIM

การสร้างแบบจำลองดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

1) ขั้นแรก สร้างเส้นทางโดยการลาก Link และ Connectors ตามแนวถนนจริงจากภาพถ่ายดาวเทียม พร้อมกำหนดความกว้างช่องจราจรให้สอดคล้องกับสภาพกายภาพจริง

2) ขั้นที่สอง กำหนดคุณลักษณะของพื้นที่จอดรถ (Parking Lots) โดยใส่ค่าตัวแปรสำคัญ ได้แก่ ความจุ (Capacity) อัตราการเข้าจอด (Parking Rate) และระยะเวลาจอดเฉลี่ย (Dwell Time)

3) ขั้นที่สาม กำหนดจุดเข้า-ออก (Entry/Exit Points) และทิศทางการไหลของกระแสจราจรตามปริมาณรถจริงที่ได้จากการสำรวจ พร้อมทั้งกำหนดสัดส่วนประเภทพาหนะ (Vehicle Compositions) ให้สอดคล้องกับข้อมูลภาคสนาม

4) ขั้นที่สี่ กำหนดเส้นทางการเดินรถ (Static Routes) และตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับการประมวลผล (Evaluation Result Attributes) เช่น อัตราการครอบครองที่จอดรถ (Occupancy Rate) และระยะเวลาการรอคอย

5) ขั้นที่ห้า ตั้งค่าช่วงเวลาจำลอง (Simulation Period) 3,600 วินาที (1 ชั่วโมง) เพื่อศึกษาพฤติกรรมในช่วงเวลาเร่งด่วน จากนั้นรันแบบจำลองและรวบรวมข้อมูลสถิติในรูปแบบตาราง (Result Lists)

3.4 การวิเคราะห์สถานการณ์ทางเลือก (Scenario Analysis)

เมื่อได้ผลการจำลองสถานการณ์ปัจจุบันแล้ว ผู้วิจัยได้ออกแบบสถานการณ์ทางเลือกโดยการเพิ่มพื้นที่จอดรถในตำแหน่งต่างๆ ได้แก่ บริเวณสนามบาสเกตบอล บริเวณที่จัดเก็บขยะ และบริเวณสนามเปตอง สำหรับพื้นที่ศึกษาที่ 2 และบริเวณบ้านพักบุคลากร บริเวณอาคารเครื่องกล และบริเวณอาคารเรียนรวม สำหรับพื้นที่ศึกษาที่ 3 จากนั้นทำการจำลองแต่ละสถานการณ์และเปรียบเทียบค่า Occupancy Rate ก่อนและหลังการเพิ่มที่จอดรถเพื่อคัดเลือกแนวทางที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

4. ผลการศึกษา

4.1 ปริมาณการจราจรและความต้องการที่จอดรถ

จากการสำรวจปริมาณยานพาหนะเข้า-ออกบริเวณประตูมหาวิทยาลัย 3 จุด ในช่วงเวลา 07.00–18.00 น. พบว่าช่วงเวลาที่มีปริมาณจราจรเข้าสูงสุดคือ 08.00–09.00 น. โดยมียานพาหนะเข้าสู่มหาวิทยาลัยรวมทั้งสิ้น 1,011 คัน แบ่งเป็นรถจักรยานยนต์ 901 คัน และรถยนต์ 110 คัน สำหรับปริมาณจราจรขาออกพบช่วงเวลาเร่งด่วน 2 ช่วง คือ 11.00–12.00 น. และ 15.00–16.00 น. ซึ่งเป็นช่วงเวลาพักกลางวันและหลังเลิกเรียนตามลำดับ

4.2 อัตราการครอบครองที่จอดรถสถานการณ์ปัจจุบัน

จากการสำรวจพบว่ามหาวิทยาลัยมีช่องจอดรถรวมทั้งสิ้น 752 ช่อง แบ่งเป็นที่จอดรถยนต์ 158 ช่อง และรถจักรยานยนต์ 594 ช่อง เมื่อวิเคราะห์อัตราการครอบครองที่จอดรถ (Occupancy Rate) ในช่วงเวลาเร่งด่วน 08.00–09.00 น. แยกตามพื้นที่ศึกษาทั้ง 3 ได้ผลดังนี้

พื้นที่ศึกษาที่ 1 บริเวณอาคารเรียนเฉลิมพระเกียรติและอาคารกิจกรรมนักศึกษา มีอัตราการครอบครองที่จอดรถร้อยละ 23.69 โดย

ปริมาณรถจักรยานยนต์สูงสุดอยู่ที่ 208 คัน และรถยนต์ 67 คัน ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่จอดรถเพียงพอต่อความต้องการใช้งาน

พื้นที่ศึกษาที่ 2 บริเวณอาคารเรียนศึกษาทั่วไป มีอัตราการครอบครองที่จอดรถสูงถึงร้อยละ 72.78 โดยปริมาณรถจักรยานยนต์สูงสุดอยู่ที่ 215 คัน และรถยนต์ 49 คัน ซึ่งเกินจำนวนช่องจอดที่มีอยู่จริง ส่งผลให้เกิดปัญหาที่จอดรถไม่เพียงพออย่างมีนัยสำคัญ

พื้นที่ศึกษาที่ 3 บริเวณอาคารเรียนรวมและห้องสมุด มีอัตราการครอบครองที่จอดรถร้อยละ 61.75 โดยปริมาณรถจักรยานยนต์สูงสุดอยู่ที่ 194 คัน และรถยนต์ 46 คัน ซึ่งอยู่ในระดับที่จอดรถไม่เพียงพอต่อความต้องการเช่นกัน



รูปที่ 4 สภาพการจอดรถในพื้นที่ศึกษาต่าง ๆ ภายในมหาวิทยาลัย

4.3 ผลการจำลองสถานการณ์ทางเลือกพื้นที่ศึกษาที่ 2

จากการจำลองสถานการณ์การเพิ่มพื้นที่จอดรถในตำแหน่งต่างๆ ภายในพื้นที่ศึกษาที่ 2 ด้วยโปรแกรม PTV VISSIM ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบ Occupancy Rate พื้นที่ศึกษาที่ 2

บริเวณ เพิ่มที่จอดรถ	Occupancy Rate ก่อน (%)	Occupancy Rate หลัง (%)	ลดลง (%)
สนามบาสเกตบอล	72.78	57.02	15.76
สนามเปตอง	72.78	62.58	10.20
ที่เก็บขยะ	72.78	66.12	6.66

จากผลการจำลอง พบว่าการเพิ่มที่จอดรถบริเวณสนามบาสเกตบอลมีประสิทธิภาพสูงสุด สามารถลดอัตราการครอบครองที่จอดรถได้มากที่สุดถึงร้อยละ 15.76 รองลงมาคือบริเวณสนามเปตอง ลดลงร้อยละ 10.20 และบริเวณที่เก็บขยะ ลดลงร้อยละ 6.66 ตามลำดับ

4.4 ผลการจำลองสถานการณ์ทางเลือกพื้นที่ศึกษาที่ 3

จากการจำลองสถานการณ์การเพิ่มพื้นที่จอดรถในตำแหน่งต่างๆ ภายในพื้นที่ศึกษาที่ 3 ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบ Occupancy Rate พื้นที่ศึกษาที่ 3

บริเวณ เพิ่มที่จอดรถ	Occupancy Rate ก่อน (%)	Occupancy Rate หลัง (%)	ลดลง (%)
บ้านพักบุคลากร	61.75	48.02	13.73
อาคารเรียนรวม	61.75	50.23	11.52
อาคารเครื่องกล	61.75	53.18	8.57

จากผลการจำลอง พบว่าการเพิ่มที่จอดรถบริเวณบ้านพักบุคลากรมีประสิทธิภาพสูงสุด สามารถลดอัตราการครอบครองที่จอดรถได้มากที่สุดถึงร้อยละ 13.73 รองลงมาคือบริเวณอาคารเรียนรวม ลดลงร้อยละ 11.52 และบริเวณอาคารเครื่องกล ลดลงร้อยละ 8.57 ตามลำดับ

ผลการจำลองสถานการณ์ทางเลือกทั้งสองพื้นที่ชี้ให้เห็นว่าการขยายพื้นที่จอดรถในตำแหน่งที่เหมาะสมสามารถลดความหนาแน่นและเพิ่มประสิทธิภาพการรองรับยานพาหนะได้อย่างมีนัยสำคัญ และสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางสนับสนุนการพัฒนาผังแม่บทกายภาพของมหาวิทยาลัยในอนาคตได้



รูปที่ 5 ลักษณะการจำลองการขยายพื้นที่จอดรถภายในมหาวิทยาลัย

5. สรุปผลการศึกษา

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความเพียงพอของที่จอดรถและเสนอแนวทางการจัดการพื้นที่จอดรถภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่ ผ่านการจำลองจราจรระดับจุลภาคด้วยโปรแกรม PTV VISSIM ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1 การประเมินความเพียงพอของที่จอดรถ

ผลการศึกษาพบว่าช่วงเวลาที่มีความต้องการที่จอดรถสูงสุด คือ 08.00–09.00 น. โดยมียานพาหนะเข้าสู่มหาวิทยาลัยรวม 1,011 คัน เมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนช่องจอดรวมทั้งสิ้น 752 ช่อง พบว่าความเพียงพอของที่จอดรถมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละพื้นที่ศึกษา โดยพื้นที่ศึกษาที่ 1 มีอัตราการครอบครองเพียงร้อยละ 23.69 ซึ่งเพียงพอต่อการใช้งาน ในขณะที่พื้นที่ศึกษาที่ 2 และพื้นที่ศึกษาที่ 3 มีอัตราการครอบครองสูงถึงร้อยละ 72.78 และ 61.75 ตามลำดับ สะท้อนให้เห็นว่าปัญหาที่จอดรถไม่ได้เกิดจากจำนวนช่องจอดโดยรวมไม่เพียงพอ แต่เกิดจากการกระจายตัวของพื้นที่จอดรถที่ไม่สอดคล้องกับความต้องการในแต่ละบริเวณ

5.2 แนวทางการจัดการที่จอดรถ

จากการจำลองสถานการณ์ทางเลือกด้วย PTV VISSIM พบว่า การเพิ่มพื้นที่จอดรถในตำแหน่งที่มีศักยภาพเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยในพื้นที่ศึกษาที่ 2 การเพิ่มที่จอดรถบริเวณสนามบาสเกตบอลสามารถลดอัตราการครอบครองได้ร้อยละ 15.76 และในพื้นที่ศึกษาที่ 3 การเพิ่มที่จอดรถบริเวณบ้านพักบุคลากรสามารถลดอัตราการครอบครองได้ร้อยละ 13.73 ทั้งสองมาตรการช่วยลดความหนาแน่นและเพิ่มประสิทธิภาพการรองรับยานพาหนะได้อย่างเห็นได้ชัด

5.3 คุณค่าและประโยชน์ของการศึกษา

การประยุกต์ใช้ PTV VISSIM ในการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นถึงคุณค่าของแบบจำลองจราจรระดับจุลภาคในฐานะเครื่องมือประเมินและวางแผนจัดการที่จอดรถสำหรับสถาบันการศึกษา ทั้งในแง่ของการวินิจฉัยปัญหาเชิงพื้นที่ได้อย่างแม่นยำ การทดสอบมาตรการทางเลือกได้โดยไม่ต้องลงทุนปรับปรุงพื้นที่จริง และการลดความเสี่ยงในการตัดสินใจเชิงนโยบาย ผลการวิจัยสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการวางแผนจัดการระยะสั้น ได้แก่ การกำหนดโซนจอดรถตามความต้องการในแต่ละพื้นที่ และในระยะยาว ได้แก่ การบูรณาการกับการพัฒนาผังแม่บทกายภาพของมหาวิทยาลัย เพื่อรองรับการเติบโตของประชากรในมหาวิทยาลัยอย่างยั่งยืนในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

[1] R. Wiedemann, *Simulation des Straßenverkehrsflusses*, Heft 8 . Karlsruhe, Germany: Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, 1974.

[2] PTV Group, *PTV Vissim 2025 Manual*. Karlsruhe, Germany: PTV Planung Transport Verkehr GmbH, 2025.

[3] Institute of Transportation Engineers, *Parking Generation Manual*, 5 th ed. Washington, DC, USA: Institute of Transportation Engineers, 2019.

[4] นพคล กรประเสริฐ, ณฤคล ศรีตะระโส, มานพ แก้วโมราเจริญ, และ ปรีดา พิชยาพันธ์, "*การจำลองสถานการณ์จราจรเพื่อลดผลกระทบการจราจรในช่วงเวลาพิเศษของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่*," วารสารวิชาการ การออกแบบสภาพแวดล้อม, ปีที่ 4, ฉบับที่ 2, หน้า 102-121, 2560.

[5] อรวรรณ จันทสุทโธ, กมลวรรณ นิคะ, และ รัชพงษ์ ทองมาก, "*แนวทางการพัฒนาพื้นที่จอดรถมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์สุพรรณบุรี*," ใน การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ครั้งที่ 4, หน้า 264-272, 2563.

[6] A. M. Khamis, A. M. K. Al-Dahawi, and M. Q. Waheed, "*A Microscopic Analysis of Parking Problems in Baghdad City with the Aid of VISSIM*," Jordan Journal of Civil Engineering, vol. 19, no. 5, pp. 104-113, Aug. 2025, doi: 10.14525/JJCE.v19i5.10.

[7] H. R. Ali and A. R. Sindi, "*Travel Demand Model for Universities - Case Study: King Abdulaziz University*," in Proc. 6th Int. African Conf. Current Studies, Tripoli, Libya, 2023, pp. 381-390.

[8] M. Flesser, "*Analysis of the Traffic Flows Caused by the Kingston Campus of the University of Rhode Island*," M.S. thesis, Dept. Civil and Environ. Eng., Univ. of Rhode Island, Kingston, RI, USA, 2020.



นายอัครพงษ์ เทพแก้ว อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ล้านนา เชียงใหม่ งานวิจัยที่สนใจ วิศวกรรมการทาง และวิจัยทางการศึกษา



นายธันวา รินคำ นักศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ล้านนา เชียงใหม่ งานวิจัยที่สนใจ วิศวกรรมการทาง และวิจัยทางการศึกษา



นายอโณทัย จันทร์ที นักศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ล้านนา เชียงใหม่ งานวิจัยที่สนใจ วิศวกรรมการทาง และวิจัยทางการศึกษา



นายระพีพัฒน์ ชูไว นักศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ล้านนา เชียงใหม่ งานวิจัยที่สนใจ วิศวกรรมการทาง และวิจัยทางการศึกษา



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชาคริต ชูวุฒยากร อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ล้านนา เชียงใหม่ งานวิจัยที่สนใจ วิศวกรรมการทาง และวิศวกรรมขนส่งและจราจร

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

ผลกระทบของวัสดุปอซโซลานต่อปฏิกิริยาอัลคาไลน์ซิลิกาในซีเมนต์มอร์ตาร์

Effect of Pozzolanic Materials on Alkaline Silica reaction in Cement Mortar

จักรพันธ์ แสงสุวรรณ[1*] ภัทรชัย พงศ์โสภา[1] บูชิต มาโห้[1] ธนพัฒน์ น้ำจันทร์[1] กฤษดา เสือเอี่ยม[1]
ขวัญชนก อุนทะอ่อน[1] ณัชพงศ์พล คงชะสิงห์[1] และดารกร อินทรบุตร[1]

[1]สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพฯ

1381 ถ. พิบูลสงคราม แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

Email: chakkarphan.s@rmutp.ac.th*, phattharachai.p@rmutp.ac.th, buchit.m@rmutp.ac.th, tanapat.n@rmutp.ac.th, gritsada.s@rmutp.ac.th, kwanchanok.o@rmutp.ac.th, nutchapongpol.k@rmutp.ac.th, darrakorn.i@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาถึงการทดสอบแนวโน้มการเกิดปฏิกิริยาASR ในมวลรวม ตามมาตรฐานASTM C1260 และศึกษาแนวโน้มการเกิดปฏิกิริยาASRของวัสดุประสานด้วยวิธีเร่งการขยายตัวของมอร์ตาร์บาร์ตามมาตรฐานASTM C1260 และASTM C 1567 รวมถึงทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ มวลรวมที่ใช้ในส่วนผสมอาจเกิดปฏิกิริยาอัลคาไลน์ซิลิก้าและอาจเกิดการขยายตัวสามารถควบคุมได้ด้วยวัสดุประสานได้แก่ เถ้าลอย ดินขาว และผงกราไฟต์ ในลักษณะสองประสาน ด้วยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20-40 ดินขาวและผงกราไฟท์ร้อยละ10-20โดยน้ำหนักวัสดุประสานตามลำดับ การศึกษานี้ใช้วิธีเร่งการทดสอบ โดยแช่มอร์ตาร์ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 1 N อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลา 14 วัน และกำลังอัดของมอร์ต้าร์ทดสอบที่อายุ 3,14,30,60 และ 90วันตามลำดับ ผลการทดสอบแนวโน้มการเกิดปฏิกิริยา ASR มีค่าร้อยละ 0.117 ชี้ให้เห็นว่ามวลรวมมีแนวโน้มที่จะเกิดปฏิกิริยา ASR โดยอยู่ในเกณฑ์การขยายตัวระหว่างร้อยละ0.10-0.20 และผลการทดสอบแนวโน้มการเกิดปฏิกิริยาASRของวัสดุประสานพบว่า ส่วนผสมของดินขาวและเถ้าลอย M/MK20, M/MK15 และ M/FA40 มีประสิทธิภาพควบคุมการขยายตัวได้ดีกว่า ผงกราไฟต์ นอกจากนั้นส่วนผสมของ M/MK20, M/MK15และMK10 ให้กำลังอัด 452กก/ซม^2 440 กก/ซม^{2}และ 410 กก/ซม^2 ตามลำดับที่อายุ 30 ให้ค่าสูงกว่ามอตาร์ควบคุม ที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยและกราไฟท์ตามลำดับ ปริมาณการเพิ่มขึ้นที่อายุ30 วันของเถ้าลอยและกราไฟท์ ให้ค่ากำลังอัดมีแนวโน้มลดลงในอายุเริ่มต้น 3-14วันในขณะที่การเพิ่มปริมาณดินขาวส่วนผสมจะให้ค่ากำลังอัดที่สูงขึ้นมากกว่าส่วนผสมอื่น อย่างไรก็ตามดินขาวมีองค์ประกอบทางเคมีหลักที่สำคัญของอลูมิน่าและซิลิกาออกไซด์ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของมอร์ตาร์ในการควบคุมกราขยายตัวและให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ : เถ้าลอย, ดินขาว, ผงกราไฟต์, การขยายตัว, ปอซโซลาน

Abstract

This study investigates the ASR reaction tendency of aggregates according to ASTM C1260 and the ASR reaction tendency of cementitious materials using the accelerated expansion method of mortar bars according to ASTM C1567. The compressive strength of the mortar is also examined. The aggregates used in the mixtures may undergo alkaline-silica reactions, and the expansion can be controlled by partially replacing the cement with binders such as fly ash, kaolin, and graphite powder. This is a bicomponent mixture. Type I Portland cement is replaced with 20-40% fly ash, 10-20% kaolin, and graphite powder by weight of the binders, respectively. This study used an accelerated method by immersing the mortar in 1 N sodium hydroxide (NaOH) solution at 80 °C for 14 days. The compressive strength of the tested mortars was measured at 3, 14, 30, 60, and 90 days, respectively. The ASR reaction tendency test results showed a value of 0.117%, indicating that the aggregates are prone to ASR reactions. The expansion rate was between 0.10-0.20%. The results of the ASR reaction trend test of the cementitious materials showed that the kaolin and fly ash mixtures M/MK20, M/MK15, and M/FA40 exhibited better expansion control than graphite powder. Furthermore, the M/MK20, M/MK15, and MK10 mixtures provided compressive strengths of 452 kg/cm2, 440 kg/cm2, and 410 kg/cm2, respectively, at 30 days of age, higher than the control mortar containing fly ash and graphite, respectively. The increase in the amount of fly ash and graphite at 30 days of age resulted in a decreasing trend in compressive strength at the initial age of 3-14 days, while increasing the amount of kaolin in the mixture resulted in higher compressive strength than the other mixtures. However, kaolin contains the main chemical components of alumina and silica oxide, which cause a pozzolanic reaction, enhancing the mortar's efficiency in controlling graphite expansion and increasing compressive strength.

Keywords: Fly ash, Metakaolin, Graphite powder, Expansion, Pozzolans

1. บทนำ

ข้อดีของการใช้คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้าง นอกเหนือจากความทนทานแล้ว ยังรวมถึงความพร้อมใช้งาน ต้นทุนต่ำ และความต้านทานความร้อน [1] ปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา (ASR) ในคอนกรีต ซึ่งเป็นปฏิกิริยาเคมีระหว่างแร่ธาตุบางชนิดที่พบในมวลรวมบางชนิดกับอัลคาไลในซีเมนต์ เป็นปัญหาสำคัญประการหนึ่งที่ส่งผลต่อความน่าเชื่อถือของโครงสร้างคอนกรีต [2] ซิลิกาเจลที่เกิดขึ้นจาก ASR จะขยายตัวเมื่อความชื้นโดยรอบถูกกักไว้ [3] ซิลิกาเจลนี้ทำให้เกิดรอยแตกภายในและลดคุณสมบัติของคอนกรีตในโครงสร้างที่ได้รับผลกระทบในระยะยาว ในขณะที่ความหลากหลายของมวลรวมและซีเมนต์ที่ใช้ในสถานที่ต่างๆ ทำให้ผลกระทบของ ASR รุนแรงขึ้น [4,5] นักวิจัยหลายคนได้ประสบ

กับความซับซ้อนของการยับยั้ง ASR [2, 6] ในทางกลับกัน มีการเสนอเทคนิคการป้องกันบางอย่างเพื่อเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างคอนกรีตโดยใช้มวลรวมที่อาจทำปฏิกิริยาได้ [3, 7] กรณี ASR แรกได้รับการรายงานใน [8] ซึ่งส่งผลให้เกิดความกังวลอย่างมากในการใช้มวลรวมปฏิกิริยาในท้องถิ่น ตลอดจนการค้นหาวิธีการบรรเทาและป้องกันใหม่ๆ นอกจากนี้ ยังมีการระบุแหล่งมวลรวมในท้องถิ่นจำนวนมากที่อาจก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของ ASR ซึ่งหมายความว่าปัญหา ASR ยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างบางแห่งในประเทศไทย [9]

การใช้พอซโซลานเป็นวัสดุประสานเสริม (SCMs) เพื่อควบคุม ASR ได้รับการเสนอไว้ใน [10, 11] พอซโซลานบางชนิดรวมถึงเมตาคาโอลินและเถ้าลอยถูกนำมาใช้เพื่อควบคุมการขยายตัว [11, 12, 13] โดยเฉพาะอย่างยิ่ง มีรายงานใน [4, 7] ว่าเถ้าลอยคลาส F มีประสิทธิภาพเหนือกว่าเถ้าลอยคลาส C ที่มี CaO สูงในการลดการขยายตัวที่เกิดจาก ASR ในขณะที่วัตถุประสงค์หลักของการใช้เถ้าลอยในการก่อสร้างในประเทศไทยในปัจจุบันโดยทั่วไปคือการลดต้นทุน ปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีต และอาคารที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [14, 15, 16] การลด ASR มักไม่ได้รับการเอาใจใส่มากนัก นอกจากนี้ ข้อมูลเกี่ยวกับเถ้าลอยแคลเซียมออกไซด์ระดับปานกลางในท้องถิ่นเกี่ยวกับการลด ASR นั้นหายาก อาจเป็นเพราะมีประสิทธิภาพน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเถ้าลอยคลาส F [17] งานวิจัยนำร่องล่าสุดจำนวนน้อยได้ตรวจสอบข้อดีของการใช้สารเติมแต่งในท้องถิ่นร่วมกับมวลรวมเพื่อป้องกัน ASR [17] ยังคงต้องการความเข้าใจที่ดีเกี่ยวกับปฏิกิริยาทางกายภาพและเคมีในส่วนผสมเพื่อดำเนินการบรรเทาผลกระทบอย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

นอกจากนี้ได้มีการศึกษาวัสดุที่นำมาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ได้แก่ เถ้าถ่านหิน (Fly Ash) ซึ่งได้จากการเผาถ่านหิน เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า จัดเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดี และนิยมนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในส่วนผสมคอนกรีต ในปัจจุบันการใช้เถ้าถ่านหินมีจำนวนมาก ส่วนใหญ่จะใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีต เนื่องจากสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่ คอนกรีตทั้งในด้านกำลังและความทนทาน สารปอซโซลานที่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ที่พบมากในประเทศไทยได้แก่ดินขาว (Meta kaolin, MK) ได้จากธรรมชาติมีส่วนประกอบของ แร่ดินขาวหรือดินขาวหรือ Kaolinite ที่ผ่านขบวนการความร้อนในเตาเผาในช่วงเวลาที่เหมาะสมและบดเป็นผงละเอียดในขบวนการเผานี้ช่วยเพิ่มความสามารถในการทำปฏิกิริยาของวัสดุดังนั้น สารปอซโซลานธรรมชาติที่ผ่านขบวนการความร้อนเหล่านี้ส่วนใหญ่ใช้ในงานอุตสาหกรรมในปัจจุบัน (Folliard *et al*., 2006) ผลลัพธ์ที่ได้จากการผ่านการเผาสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในปริมาณร้อยละ 15 ถึง 35 (Kosmata 2008; Ideker 2010) ซึ่งนอกจากจะมีคุณสมบัติเป็นวัสดุประสานแล้ว ดินขาวเป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติประกอบด้วยอะลูมิโนซิลิเกตเป็นหลักในโครงสร้าง ผลของการมีความพรุนและพื้นที่ผิวสูงจะทำให้ เกิดปฏิกิริยาสูงลักษณะ โครงสร้างอสัณฐานนี้ไม่เสถียรในสารละลายอัลคาไล ดังนั้นจึงจับยึดได้ ง่ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้น (Lea, 1970) และสำหรับวัสดุประสานผงกราไฟต์ ได้จากขบวนการผลิตตามธรรมชาติด้วยการสกัดแร่ธาตุที่ประกอบด้วยคาร์บอนกราไฟท์กราไฟต์ธรรมชาติเป็นแร่ที่ประกอบด้วยคาร์บอนกราไฟต์ในเชิงพาณิชย์ส่วนใหญ่กราไฟต์ที่ถูกขุดมาจะมีแร่อื่นอยู่ด้วยจำนวนมาก หลังจากขุดกราไฟต์จะต้องผ่านกระบวนการทางแร่เพื่อปรับปรุงคุณภาพ เช่น การลอยแร่เพื่อทำให้กราไฟต์เข้มข้น กราไฟต์ธรรมชาติเป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าที่ดีที่สุดเสถียรในช่วงอุณหภูมิสูงกราไฟต์เป็นวัสดุที่ทนไฟอย่างมากด้วยจุดหลอมเหลวที่สูง(3650°C) อย่างไรก็ตามผงกราไฟท์เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติที่และยังมีการศึกษาไม่แพร่หลาย นอกจากนี้ในประเทศไทยได้มีการศึกษาอิทธิพลของหินชนิดต่างๆต่อปฏิกิริยาอัลคา ไลน์-ซิลิกา โดยสุวิมลและคณะได้ทดสอบหินที่ได้จากภาคตะวันออกของประเทศไทย 6 ชนิด พบว่ามีหิน 3 ชนิดที่มีแนวโน้มการเกิดปฏิกิริยาอัลคาไลน์-ซิลิกาได้แก่หินปูน และหินเกรย์แวคจาก 2 แหล่ง ถึงแม้มีการศึกษาผลกระทบของเถ้าลอยและดินขาวต่อการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาASR แต่การศึกษาถึงผลกระทบของผงกราไฟต์ต่อแนวโน้มการเกิดปฏิกิริยา ASR ไม่มีการศึกษาถึงผลกระทบต่อการขยายตัวของคอนกรีต

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางกลของวัสดุประสานทั้ง 3 ชนิด เพื่อประเมินสัดส่วนผสมที่เหมาะสมของปริมาณวัสดุที่นำมาผสมกับมอร์ตาร์ในการรับแรงอัดและควบคุมการขยายตัวของมอร์ตาร์

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ ดินขาว , เถ้าลอย , ผงกราไฟต์ , ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 , หินบด , น้ำกลั่น , สาร Superplasticizer ม

ตารางที่ 1ขนาดคละของมวลรวมละเอียดที่ใช้ในส่วนผสม

ขนาดตะแกรง		มวล (%)
ผ่าน	ค้าง	
2.36 มิลลิเมตร (เบอร์ 8)	1.18 มิลลิเมตร (เบอร์ 16)	25
1.18 มิลลิเมตร (เบอร์ 16)	600 ไมโครเมตร (เบอร์ 30)	25
600 ไมโครเมตร (เบอร์ 30)	300 ไมโครเมตร (เบอร์ 50)	25
300 ไมโครเมตร (เบอร์ 50)	150 ไมโครเมตร(เบอร์ 100)	15

2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย เครื่องชั่งดิจิทัลความละเอียด สำหรับชั่งน้ำหนักตัวอย่างก่อนและหลังการทดสอบ, ตู้อบลมร้อนสำหรับอบแห้งมวลรวมแบบหล่อมอร์ตาร์ , ตะแกรงร่อนหิน , เครื่องผสมคอนกรีต , โต๊ะทดสอบการไหล , เครื่องวัด length Comparetor , อุปกรณ์เครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต (UTM)

มวลรวมละเอียดที่ใช้ทดสอบกำลังอัดและแนวโน้มการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไลน์-ซิลิกาของมอร์ต้าร์ ได้จากการนำหินปูนมาบดให้มีขนาดคละตาม ASTM C1260 ดังแสดงในตารางที่ 1 ขนาดคละของมวลรวมละเอียดที่ใช้ในส่วนผสม

2.3 การเตรียมตัวอย่างทดสอบกำลังอัดของมอตาร์

เป็นการทดลองปฏิกิริยาปอซโซลานิกของวัสดุปอซโซลานใช้ทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ลูกบาศก์ และใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์

บางส่วนร้อยละ 20, 30 และ 40 ดินขาวและกราไฟต์ร้อยละ 10, 15 และ20 ตามลำดับ โดยมีขั้นตอนดังนี้

2.2.3 เตรียมส่วนผสมโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยดินขาวหรือกราไฟต์ผสมกับมวลรวมในอัตราส่วน1:2.75โดยน้ำหนัก ทดสอบการไหลแผ่ของปูนซีเมนต์ เถ้าลอย ดินขาวหรือกราไฟต์ น้ำหนัก 440 กรัม หินหนัก 990 กรัม และน้ำ 208 กรัม เป็น w/c = 0.47 ผสมมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C305

2.2.4 เตรียมปริมาณ (HRWR) ในส่วนผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวและกราไฟต์ใช้สารผสมเพิ่มประเภทลดปริมาณน้ำร้อยละ 0.75±0.075 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ผสมปอซโซลานหรือประมาณ 3.3-3.5 กรัม ของระบบสองประสาน

2.2.5 ผสมมอร์ตาร์ด้วยเครื่องผสม (Mixer) ตามมาตรฐาน ASTM C305 – 99 ใส่มอร์ตาร์ลงในแบบหล่อขนาด 50 x 50 x 50 มิลลิเมตร โดยแบ่งเป็น 2 ชั้นเท่าๆกันและใช้เหล็ก Tamper กระทุ้งให้เป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นบ่มในอากาศโดยใช้ผ้าชุบน้ำหมาดๆคลุมตัวอย่างที่หล่อจนครบ 24 ชั่วโมง มีความชื้นที่อุณภูมิห้องประมาณ 20-27.5C

2.2.6 หลังจากนั้นนำมอร์ตาร์ลูกบาศก์ใส่ลงใน Containers พร้อมกับสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 1โมลาร์ และนำไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 80.0 ± 2°C ตามอายุที่กำหนด ที่ 3, 14, 30 และ 60 วัน ส่วนผสมของมอร์ต้าร์ในการทดสอบกำลังอัด และการขยายตัวโดยใช้ สารละลาย NaOH ที่อุณหภูมิสูงเร่งปฏิกิริยามีส่วนผสมแสดงในตาราง ที่ 2

ตารางที่ 2 ส่วนผสมมอร์ตาร์ซีเมนต์ตมาตรฐาน (ASTM C1260 -1567)

ITEM	Mix Proportion	Replacement cement (g)			
		By pozzolan (PFA, MK and KF)			
		Cement	FA	MK	KF
1	M with NaOH	440	-	-	-
2	M without NaOH	440	-	-	-
3	M/PFA20	352	88	-	-
4	M/PFA30	220	132	-	-
5	M/PFA40	264	176	-	-
6	M/MK10	396	-	44	-
7	M/MK15	374	-	66	-
8	M/MK20	352	-	88	-
9	M/kF10	396	-	-	44
10	M/kF15	374	-	-	66
11	M/kF20	352	-	-	88



ภาพที่ 1 การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์สำหรับทดสอบ

2.4 ทดสอบกำลังอัด

การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ลูกบาศก์ ตามอายุที่กำหนดโดยอนุญาติให้มีความคลาดเคลื่อน นำตัวอย่างออกจากห้องบ่ม ให้ทำความสะอาดที่ติดผิวออกให้หมด เช็ดผิวให้แห้งแล้วทดสอบกำลังอัดทันทีวัดขนาดและชั่งน้ำหนักของตัวอย่างแต่ละก้อน ห้ามใช้ด้านข้างของตัวอย่างรับแรงกด ถ้าด้านบนและด้านล่างก้อนตัวอย่างไม่เรียบให้ฝนให้เรียบและขนานกัน นำก้อนทดสอบไปวางให้อยู่ตรงจุดกึ่งกลางของแป้นทดสอบและเคลื่อนแป้นกดให้สัมผัสกับผิวก้อนตัวอย่าง จากนั้นให้เพิ่มแรงอัดด้วยที่เหมาะสมและสม่ำเสมอ โดยใช้เวลาทดสอบระหว่าง 20-80 วินาที

ตารางที่ 3. องค์ประกอบทางทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมี (%)	OPC	FA	MK	KF
Silicon Dioxide (SiO_2)	20.9	32.9	46.5	-
Aluminium Oxide (Al_2O_3)	5.8	18.4	39.5	-
Ferric Oxide (Fe_2O_3)	3.4	14.0	0.23	-
Calcium Oxide (CaO)	65.4	27.7	0.04	-
Sulfur Trioxide (SO_3)	2.7	3.4	-	-
Magnesium Oxide (MgO)	1.5	1.9	0.07	-
Sodium Oxide (Na_2O)	0.2	1.4	0.30	-
Potassium Oxide (K_2O)	0.3	2.3	0.20	-
Na_2O_{eq}=Na_2O + 0.658K_2O	0.5	2.8	0.58	-
Loss On Ignition (LOI)	2.0	0.65	-	-

2.5 การทดสอบหาแนวโน้มการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาในมวลรวม

วิธี ASTM C1567-04 เป็นการทดสอบแนวโน้มการเกิดปฏิกิริยา ASR ของวัสดุผสมปูนซีเมนต์ที่ใช้ร่วมกับมวลรวมโดยใช้วิธีการวัดการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ที่อยู่ในสภาวะที่ช่วยเร่งปฏิกิริยา ASR เช่นเดียวกับการทดสอบตาม ASTM 1260-01 ซึ่งแตกต่างจากวิธีปรับปรุงนี้ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยสารปอซโซลานเช่น เถ้าลอย ดินขาว และกราไฟต์ ตามสัดส่วนผสมที่กำหนดไว้ ซึ่งพิจารณาว่าวัสดุผสมปูนซีเมนต์ที่ใช้ร่วมกับมวลรวมมีแนวโน้มการเกิด ASR เมื่อค่าการขยายตัวที่อายุ 14 วัน น้อยกว่าร้อยละ 0.1-0.2 เป็นวิธีที่ใช้เพื่อประเมินประสิทธิภาพการควบคุมการขยายตัวจาก ASR ของปอซโซลาน มีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดังนี้

2.5.1 มวลรวมที่ได้นำมาบดย่อยและคัดแยกให้มีขนาดคละ ตามตารางที่ 1

2.5.2 เลือกใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเช่นใช้ เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนร้อยละ 20, 30 และ 40 ดินขาวและกราไฟต์ร้อยละ 10, 15 และ20 ตามลำดับ ระบบสองและใช้น้ำกลั่นในอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.47 โดยน้ำหนัก ของทุกส่วนผสม

2.5.3 การศึกษานี้ดินขาว และกราไฟต์ ซึ่งต้องใช้สารผสมเพิ่มประเภทลดปริมาณน้ำ (HRWR) ใช้สำหรับช่วยลดการแยกตัวหรือเพิ่มความสามารถในการทำงานได้โดยยังคงใช้ w/b เท่ากับ 0.47 โดยน้ำหนัก สำหรับปริมาณของ (HRWR) ที่ใช้ในส่วนผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวและกราไฟต์กำหนด ประมาณ 3.3-3.5 กรัม ของระบบสองประสาน

2.5.4 ผสมมอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C305 – 99

2.5.5 หลังจากบ่มมอร์ตาร์ที่อายุ 24 วัน. ถอดแบบหล่อแล้วทำการวัดและบันทึกค่าความยาวเริ่มต้นของแท่งตัวอย่าง ด้วยเครื่องวัด Length Comparator แล้วนำแท่งมอร์ตาร์แช่ในน้ำกลั่นใน Containers ที่เตรียมไว้และปิดฝา และนำเข้าตู้ควบคุมอุณหภูมิ 80.0 ± 2°C เป็นเวลา 24 ± 2 ชม.

2.5.6 เมื่อครบเวลานำแท่งมอร์ตาร์มาวัดค่าและบันทึกค่าการขยายตัวเริ่มต้น (Zero Reading) หลังจากนั้นนำแท่งมอร์ต้าใส่ลงใน Containers พร้อมกับสารละลาย NaOH ที่เตรียมไว้มีความเข้มข้น 1โมลาร์ และนำไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 80.0 ± 2°C เป็นเวลา 24 ± 2 ชม.

2.5.7 เมื่อครบ 1 วันให้วัดค่าการขยายตัวที่เปลี่ยนไปและวัดความยาวที่เปลี่ยนต่อไปทุก 2 วันต่อเนื่อง จนครบ14 วันและ 28 วันตามที่กำหนด

3.ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

3.1 การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ของปูนซีเมนต์ ประเภท 1 และสารปอซโซลานได้แก่เถ้าลอย ดินขาวและซิลิก้าฟูม ด้วยเทคนิค XRF (ตารางที่ 3) พบว่า ปูนซีเมนต์ประกอบด้วยซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ร้อยละ 2.8 และแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ร้อยละ 0.82 โดย SO3 และ MgO มีค่าอยู่ในเกณฑ์ปกติตามข้อแนะนำของ มอก. 15 เล่ม 1-2547 (ไม่ควรเกินร้อยละ 3.5) ในขณะที่ MgO (ไม่ควรเกินร้อยละ 6.0) ส่วนของโพแทสเซียมออกไซด์ (K2O) และโซเดียมออกไซด์ (Na2O) พบว่ามีค่าร้อยละ 0.5 และ 0.08 ตามลำดับ โดยอัลคาไลทั้งสองชนิดมีความสำคัญต่อการเกิดปัญหา ASR โดยมีปริมาณอัลคาไลเทียบเท่าค่อนข้างต่ำ (Na_2O Equivalent ร้อยละ 0.409) ซึ่งต่ำกว่าค่าสูงสุดของปูนซีเมนต์ประเภทปอร์ตแลนด์ อัลคาไลต่ำที่แนะนำโดย มอก. 15 เล่ม 1-2547 (ของกรณีทางเลือกไม่ควรเกินร้อยละ 0.60)

3.2 การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

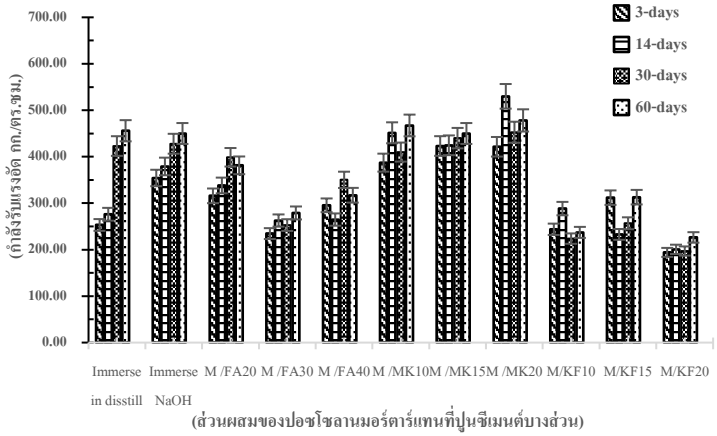
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย ด้วยเทคนิค XRF แสดงในตารางที่ 3 พบว่าเถ้าลอยประกอบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO2) ร้อยละ 36.35 อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al2O3) ร้อยละ 19.86 แคลเซี่ยมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 18.12 อยู่ระหว่างร้อยละ 8-20 ซึ่งจัดเป็นแคลเซียมออกไซด์ระดับปานกลาง มีรายงานว่าหากปริมาณของ CaO สูงกว่าร้อยละ 20 การลด alkalinity ในสารละลายในช่องว่างของคอนกรีตจะด้อยลงปริมาณ CaO ของเถ้าลอยต่ำมีผลต่ออัตราส่วน Ca/Si ของ CSH จากปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับ CSH จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ นอกเหนือจากมีผลทำให้ CSH ทั้งหมดเพิ่มขึ้นทำให้คอนกรีตทึบแน่นมากขึ้นและมีผลต่อขนาดของช่องว่างเล็กลงทำให้การเคลื่อนที่ของอิออนและการซึมผ่านช้าลงนอกจากนั้น CSH ที่มี Ca/Si ต่ำมีผลดีต่อประสิทธิภาพการจับยึดอัลคาไลได้ดีขึ้น (Folliard, 2007; Shehata *et al.*, 2002)

3.3 การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของดินขาว

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวด้วยเทคนิค XRF แสดงในตารางผนวกที่ ข1 ดินขาว ประกอบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO2) ร้อยละ 51.49 อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al2O3) ร้อยละ 45.74 เหล็กออกไซด์ (Fe2O3) ร้อยละ 0.37 และแคลเซี่ยม (CaO) ร้อยละ 0.02 โดยมี SiO2 และ Al2O3 เป็นส่วนประกอบหลักทางเคมีคล้ายกับเถ้าลอยแต่มีปริมาณมากกว่าประมาณ 1.5-2เท่ามีสมบัติเป็นสารปอซโซลานสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ (CH) เกิดเป็นสาร ประกอบที่มีสมบัติในการเชื่อมประสานทั้ง CSH และ C-A-H เพิ่มขึ้นทำให้เพิ่มความทึบแน่นของเนื้อคอนกรีตมาก และความต่อเนื่องของปฏิกิริยาปอซโซลานิก ทำให้ CSH ที่เพิ่มขึ้นใหม่มีค่า Ca/Si ต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับ CSH จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hong *et al.*, 2002) อย่างไรก็ตามการใช้ดินขาวทำให้ปริมาณของอะลูมิน่าที่อยู่ในสารละลายในช่องว่างสูงขึ้นมากและมีผลต่อการลดการชะของ ซิลิก้าที่ไวต่อปฏิกิริยา (Bickmore *et al.*, 2005) นอกจากนี้อลูมิน่าที่มีอยู่ในสารละลายในช่องว่างจะดูดซับซิลิก้าที่ผิวของมวลรวมและด้วยเหตุผลนี้การชะซิลิก้าจากมวลรวมที่ไวต่อปฏิกิริยาจึงค่อยๆหมดไป (Chappex and Scrivener, 2012)

3.4 การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของกราไฟต์

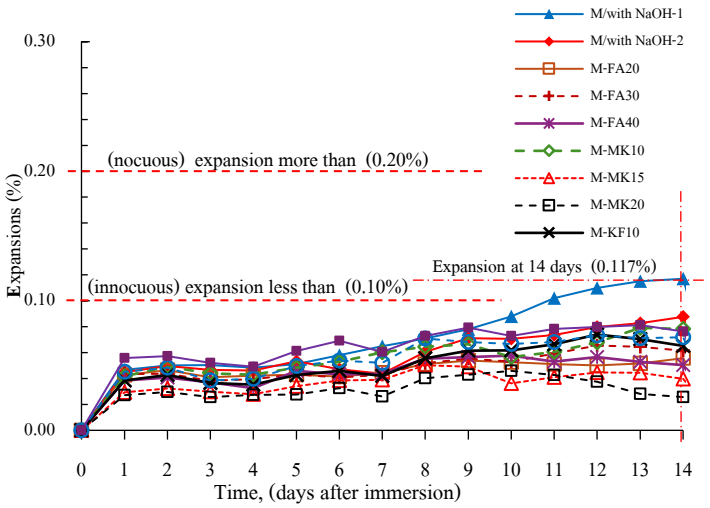
กราไฟต์ ไม่ใช่ โลหะ แต่มีคุณสมบัติหลายอย่างของโลหะ มันเป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้า และมีความแข็งตามธรรมชาติสูงสุดของวัสดุ และความเสถียรต่ออุณหภูมิที่เกิน 3,600 องศาเซลเซียส และมีความคงทนทางเคมีได้ดีมาก ในขณะเดียวกันมีการหล่อลื่นไหลตัวตามธรรมชาติสูง



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ของปอซโซลานมอร์ตาร์กับซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมในสภาวะแวดล้อมปฏิกิริยาอัลคาไลน์ซิลิก้า

3.5 ผลของกำลังอัดของมอร์ตาร์

ผลของกำลังอัดของคอนกรีตด้วยระบบสองประสานใช้การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยดินขาวและกราไฟต์ในปริมาณที่แตกต่างกัน ตัวอย่างคอนกรีตอยู่ในสภาพ แวดล้อมเดียวกัน บ่มที่อุณภูมิ 80°C ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ95 ตลอดอายุ 3 วัน 14วัน, 30วัน และ 60วัน ผลแสดงในรูปที่ 2 สังเกตุว่าการพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตควบคุมเพิ่มสูงขึ้นต่อเนื่องเริ่มจากอายุ 3 วัน จนถึง 60วัน มีค่ากำลังอัดต่ำสุดเท่ากับ 253 จนถึงสูงสุดเท่ากับ 455 กก./ซม^2 ตามลำดับ ในขณะที่ส่วนผสมที่มีดินขาวแทนที่ร้อยละ 10 ให้ค่ากำลังอัดต่ำที่สุดเท่ากับ 387 กก./ซม^2 และกำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 478 กก./ซม^2 ตามลำดับซึ่งให้ค่ากำลังอัดมากกว่าส่วนผสมที่มีเถ้าลอยแทนที่ร้อยละ 20 ที่กำลังต่ำที่สุด และสังเกตุว่าการพัฒนากำลังอัดของส่วนผสมที่มีดินขาว M/MK10, M/MK15 และ M/MK20 มีค่ากำลังอัดที่อายุ 30 และ60 วันให้ค่ากำลังอัดสูงมากว่าส่วนผสมอื่นๆมีค่าอยู่ในช่วง 410-478 กก./ซม^2 ตามลำดับ ในขณะที่ส่วนผสมที่มีเถ้าลอย และกราไฟต์ในส่วนผสมมีค่ากำลังอัดน้อยกว่ามีค่าอยู่ในช่วง 234 -398 กก./ซม^2 และ194-312 กก./ซม^2 ตามลำดับ



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์การควบคุมการขยายตัวของปอซโซลานมอร์ตาร์กับซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมในสภาวะแวดล้อมปฏิกิริยาอัลคาไลน์ซิลิก้า

3.6 ผลของวัสดุปอซโซลานต่อการควบคุมการขยายตัวของมอร์ตาร์จากปฏิกิริยาASR

ผลการขยายตัวโดยเฉลี่ยของตัวอย่างควบคุมที่ใช้มวลรวม ในส่วนผสมระบบสองประสานแสดงในภาพที่ 3 ที่ระยะเวลาการเร่งปฏิกิริยาที่อายุ 14 วันพบว่าการขยายตัวของตัวอย่างควบคุม (M) ร้อยละ 0.1176 บ่งชี้ว่ามวลรวมมีแนวโน้มที่จะเกิดปฏิกิริยา ASR การสังเกตุแนวโน้มการเกิดปฏิกิริยาตามมาตรฐาน ASTM C1260 การขยายตัวที่ระยะเวลาการเร่งปฏิกิริยา 14 วันมีค่าร้อยละ 0.20 หรือมากกว่าบ่งชี้ว่ามีแนวโน้มเกิดการเสื่อมสภาพจาก ASR และต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมหากอยู่ในช่วงร้อยละ 0.10 - 0.20 มีรายงานวิจัยหลายฉบับว่าหิน (ภูเขาไฟ) สามารถทำปฏิกิริยาได้รวดเร็ว ไวต่อปฏิกิริยามากกว่าเกิดจากความผันแปรตามธรรมชาติเนื่องจากความแตกต่างของแหล่งที่มาของมวลรวม (Sims and Poole, 2017; Sujjavanich *et al.*, 2017)

ผลกระทบของการใช้สารปอซโซลาน ต่อการขยายตัวจากปฏิกิริยา ASRเมื่อใช้มวลรวมจากหินที่ไวต่อปฏิกิริยา ASR ใช้เถ้าลอย ดินขาว และกราไฟต์ แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อควบคุมการขยายตัวจากปฏิกิริยา ASR โดยวัดการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C1567 ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนร้อยละ 20 30 และ 40 และดินขาวและกราไฟต์แทนที่ร้อยละ 10 15 และ 20ตามลำดับในระบบสองประสาน ผลทดสอบแสดงในภาพที่ 3 พบว่าตัวอย่างมอร์ตาร์ควบคุม (M) ขยายตัวมากที่สุดร้อยละ 0.117 ระบุว่ามีแนวโน้มในการเกิดปฏิกิริยาASR ทั้งนี้เหตุผลจากมีรายงานผลการศึกษาเบื้องต้นมวลรวมที่นำมาใช้ในการศึกษานี้มาจากแหล่งทางภาคตะวันออก และสังเกตุว่าส่วนผสมที่มีดินขาวแทนที่บางส่วน M/MK20, M/MK15 และ M/FA40 มีประสิทธิภาพในการควบคุมการขยายตัวได้ดีกว่าส่วนผสมที่มีเถ้าลอยและกราไฟต์แทนที่บางส่วน มีค่าการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.0255 0.0397 และ 0.0503 ตามลำดับ สังเกตุได้ว่าปริมาณการใช้เถ้าลอยเพิ่มขึ้นมีผลให้ขยายตัวลดลงเมื่อระดับการแทนที่ปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้นร้อยละ 10 ถึง 20 กรณีของดินขาวและ ร้อยละ20ถึง40 เป็นกรณีของเถ้าลอย สำหรับระยะเวลาการเร่งปฏิกิริยา 14 วัน การขยายตัวที่ลดลงชี้ให้เห็นว่าส่วนผสมที่มีวัสดุปอซโซลานช่วยลดการขยายตัวของ ASR เนื่องจากมีความสามารถจับยึดกับอัลคาไลและจำกัดการทำปฏิกิริยากับซิลิก้าจากหินที่เกิดปฏิกิริยาซึ่งงานวิจัยจำนวนมาก(Chen *et al.*,1993; Thomas, 2010)

4. สรุปผล

จากการศึกษาผลกระทบของวัสดุปอซโซลาน ได้แก่ ดินขาว เถ้าลอย และผงกราไฟต์ ต่อปฏิกิริยาอัลคาไลน์ซิลิกาในมอร์ตาร์ซีเมนต์ พบว่าวัสดุดังกล่าวสามารถลดการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่เกิดจากปฏิกิริยา ASR ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะการใช้เถ้าลอยและผงกราไฟท์ในปริมาณที่เหมาะสม ซึ่งช่วยควบคุมการเกิดปฏิกิริยาและลดความเสียหายจากการแตกร้าวของเนื้อคอนกรีต ในขณะเดียวกันมอร์ตาร์ที่ผสมปอซโซลานยังคงรักษากำลังอัดให้อยู่ในระดับที่สอดคล้องกับมาตรฐานการใช้งาน การกำหนดสัดส่วนการผสมที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญต่อทั้งการเสริมสร้างความทนทานและการลดต้นทุนของงานคอนกรีต

นอกจากนี้ การนำวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน ยังช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการ

ผลิตปูนซีเมนต์ และสนับสนุนการใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืน ผลการวิจัยนี้จึงสามารถประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความทนทานต่อปฏิกิริยา ASR และมีความคุ้มค่าในด้านเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม

ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการศึกษาปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานในสัดส่วนที่หลากหลายมากขึ้น เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการลดการขยายตัวจากปฏิกิริยา ASR โดยไม่กระทบต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์

2. ควรทำการทดสอบในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน เช่น การแช่น้ำด่าง หรือการทดสอบภายใต้อุณหภูมิและความชื้นที่หลากหลาย เพื่อประเมินพฤติกรรมของมอร์ตาร์ในสภาพการใช้งานจริง

3.ควรขยายผลการศึกษาจากระดับมอร์ตาร์ไปสู่ระดับคอนกรีตจริง เพื่อยืนยันผลการทดลองและความเหมาะสมในการใช้งานเชิงวิศวกรรม

4. การวิจัยในอนาคตอาจพิจารณาวัสดุปอซโซลานชนิดอื่น ๆ หรือการใช้วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเพิ่มเติม เพื่อนำมาเปรียบเทียบด้านคุณสมบัติและประสิทธิภาพในการลดปฏิกิริยา ASR

5. ควรมีการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อมควบคู่ไปด้วย เพื่อแสดงถึงความคุ้มค่าในการนำวัสดุปอซโซลานมาใช้ในงานคอนกรีตอย่างยั่งยืน

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร สำหรับการสนับสนุนสถานที่และเครื่องมือสำหรับการเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

[1] Ashish Kumer Saha, M.N.N. Khan, Prabir Kumar Sarker, Faiz Ahmed Shaikh, Alokesh Pramanik.The ASR mechanism of reactive aggregates 758

[2] Ashish Kumer Saha, M.N.N. Khan, Prabir Kumar Sarker, Faiz Ahmed Shaikh, Alokesh Pramanik. The ASR mechanism of Reactive aggregates in concrete and its mitigation by fly ash, onstr. Build. Mater.(2018)743-758

[3] I. Sims and A. B. Poole, Eds., Alkali-Aggregate Reaction in concrete: A World Review. CRC Press, 2017.

[4] D. S. Lane, Alkali-Silica Reactivity in Virginia Transportation Research Council, 1994.

[5] D. S. Lane and C. Ozyildirim, “Preventive measures for alkali-silica reactions (binary and ternary systems),” Cement and Concrete Research, vol. 29, pp.1281-1288, 1999.

[6] D. Bulteel, E. Garcia-Diaz, C. Vernet, and H. Zanni, ”Alkali–silica reaction: A method to quantify the reaction degree,” Cement and Concrete Research, vol. 32, no. 8, pp. 1199-1206, 2002.

[7] T. E. Stanton, Expansion of Concrete Through Reaction Between Cement and Aggregate. New York: American Society of Civil Engineers, 1940.

[8] S. Diamond, “Effects of two danish fly ashes on alkali contents of pore solutions of cement fly ash pastes,” Cement and Concrete Resarch, vol. 11, no 3, pp.383-394, 1981.

[9] S. Sujjavanich, P. Suwanvitaya, and D. Rothstein, “Investigation of ASR in mass concrete structues-A case study,” in ISEC-6, Zürich, 2011.

[10] S. Sujjavanich, K. Won-In, T. Meesak, W.Wongkamjan, and V. Jensen, “Investigation of potential alkali-silica reactivity of aggregate sources in Thailand,” International Journal of Geomate, vol. 13,no. 35, pp. 108-113, 2017.

[11] A. Carles-Gibergues, M. Cyr, M. Moisson, and E.Ringot, “A simple way to mitigate alkali-silica reaction,” Materials and Structures, vol. 41, no. 1, pp.73-83, 2008.

[12] J. Zapała-Sławeta, “Alkali silica reaction in the presence of metakaolin—The significant role ofcalcium hydroxide,” IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 245, no. 2, p. 022020, Oct.2017.

[13] K. E. Hanna, G. Morcous, and M. K. Tadros, “Effectiveness of class C fly ash on mitigating alkali-silica reaction in concrete pavement,” International Journal of Construction Education and Research, vol. 5, no. 3, pp.167-181, 2009.

[14] F. Bektasa, L. Turanli, T. Topal, and M. C. Goncuoglu, “Alkali reactivity of mortars containing chert and incorporating moderate-calcium fly ash,” Cement and Concrete Research, vol. 3, no.4, pp. 2209-2214, 2004.

[15] B. R. Hart, M. A. Powell, W. S. Fyfe, and B. Ratanasthien, “Geochemistry and mineralogy of flyash from the Mae Moh lignite deposit,” Energy Sources, vol. 17, no. 1, pp. 23-40, 1995.

[16] P. Chindaprasirt, C. Jaturapitakkul, and T. Sinsiri, “Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste,” Cement & Concrete Composites, vol. 27, pp. 425-428, 2005.

[17] C. Sangsuwan and S. Sujjavanich, “Effects of moderate calcium oxide fly ash on expansion of mortar bar due to Thai local reactive aggregates,” Engineering Journal, vol. 16, no. 3, pp. 101-108, 2012.

บทความวิจัย

การจัดการอุตสาหกรรม

เพื่อความยั่งยืน

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การปรับปรุงกระบวนการผลิตสารประกอบอินทรีย์ เมทิล-เพนทานไดออลเพื่อลดของเสียจากกระบวนการผลิต

Improving the Production Process of the Organic Compound Methyl-Pentanediol to Reduce Manufacturing Waste

ปรัชญา นารมย์[1*] และ สุวิทย์ แพงกันยา[2]

สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800 [1]prachya-na@rmutp.ac.th, [2]suwit.p@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยเชิงประยุกต์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตสารประกอบอินทรีย์ เมทิล-เพนทานไดออล (3-Methyl-1,5-pentanediol) เพื่อลดการเกิดของเสียจากกระบวนการผลิตจริงโดยประยุกต์ใช้แนวคิด Six Sigma ตามกรอบ DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, and Control) ร่วมกับหลักการเคมีสีเขียว (Green Chemistry) การวิเคราะห์ปัญหาใช้เครื่องมือทางวิศวกรรมอุตสาหการ ได้แก่ แผนผังสาเหตุและผลกระทบ (Fishbone Diagram) การวิเคราะห์พาเรโต (Pareto Analysis) และการวิเคราะห์รูปแบบความล้มเหลวและผลกระทบ (FMEA) ผลการศึกษาในขั้นตอนการกำหนดปัญหา (Define) และการวัด (Measure) พบว่าขั้นตอนทำปฏิกิริยาเคมีเป็นแหล่งกำเนิดของเสียสูงสุด คิดเป็นร้อยละ 36.2 ของของเสียทั้งหมด ผลการวิเคราะห์หาสาเหตุเชิงลึกพบว่าสาเหตุหลักเกิดจากความผันผวนของอุณหภูมิในถังปฏิกรณ์ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพปฏิกิริยาเคมีและการแยกสารลดลง แนวทางการปรับปรุงทำการปรับสภาวะอุณหภูมิของปฏิกิริยาจากเดิม 120°C เป็น 125°C เพื่อลดการเกิดสารพลอยได้ (By-products) ที่ต้องถูกส่งเข้าระบบบำบัดน้ำเสีย หลังการปรับปรุงกระบวนการ พบว่า อัตราผลได้ (Yield) ของสาร MPD เพิ่มขึ้นจากเดิมร้อยละ 93.26 เป็นร้อยละ 94.88 ส่งผลให้สามารถลดปริมาณของเสียรวมลงได้ร้อยละ 50 และลดปริมาณของเสียที่ต้องนำไปฝังกลบลงจนเกือบเป็นศูนย์ (Near-Zero Waste to Landfill) อีกทั้งดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ (Process Capability Index : Cpk) เพิ่มขึ้นจากเดิม 0.87 เป็น 1.42 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้ทั่วไป (Cpk ≥ 1.33) แสดงถึงประสิทธิภาพและความเสถียรของกระบวนการผลิตที่ดีขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับสภาวะเดิม

คำสำคัญ : การปรับปรุงกระบวนการผลิต, เมทิล-เพนทานไดออล, การลดของเสีย, ดัชนีความสามารถของกระบวนการ, Six Sigma

Abstract

This applied research aims to improve the production process of the organic compound methyl-pentanediol (MPD) to reduce manufacturing waste by applying the Six Sigma methodology based on the DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, and Control) framework, in conjunction with Green Chemistry principles.

Problem analysis was conducted using industrial engineering tools, including a fishbone diagram, Pareto analysis, and Failure Mode and Effects Analysis (FMEA). The Define and Measure phases identified the reaction stage as the major source of waste, accounting for 36.2% of the total. The root cause analysis revealed that temperature instability in the reactor was the primary driver of waste generation, as it lowered chemical reaction and separation efficiency. The improvement was implemented by optimizing the reaction temperature from 120°C to 125°C, effectively reducing the generation of unwanted by-products that load the wastewater treatment system. Post-improvement results showed that the MPD yield increased from 93.26% to 94.88%, leading to a 50% reduction in total process waste and achieving a near-zero waste to landfill goal. Furthermore, the process capability index (Cpk) increased from 0.87 to 1.42, exceeding the general industrial standard (Cpk ≥ 1.33). These outcomes demonstrate a substantial improvement in process stability and efficiency compared to the baseline conditions.

Keywords : Process Improvement, Organic Compound, Production (Methyl-pentanediol), Waste Reduction, Production Process

1. บทนำ (Introduction)

อุตสาหกรรมปิโตรเคมีถือเป็นกลไกสำคัญของเศรษฐกิจโลก เนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมต้นน้ำที่ผลิตวัตถุดิบพื้นฐานสำหรับสินค้าอุปโภคบริโภคในหลากหลายภาคส่วน ในปี พ.ศ. 2568 ตลาดปิโตรเคมีโลกมีมูลค่าสูงถึง 6.2 แสนล้านดอลลาร์สหรัฐ และมีแนวโน้มเติบโตอย่างต่อเนื่องเฉลี่ยร้อยละ 7.3 ต่อปี โดยมีประเทศจีนและสหรัฐอเมริกาเป็นผู้นำทั้งด้านการผลิตและการบริโภค ผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมสำคัญ เช่น บรรจุภัณฑ์ซึ่งมีสัดส่วนของการใช้สูงสุด รองลงมาคืออุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ก่อสร้าง และยานยนต์ โดยความต้องการใช้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเติบโตของผลิตภัณฑ์มวลรวมโลก (GDP) [1]

สำหรับประเทศไทย อุตสาหกรรมปิโตรเคมีมีแนวโน้มฟื้นตัวตามการขยายตัวของภาคการท่องเที่ยวและการบริโภคภายในประเทศ โดยคาดการณ์ว่าในช่วงปี พ.ศ. 2568–2569 ราคาผลิตภัณฑ์และส่วนต่างกำไร (Spreads) จะปรับตัวดีขึ้น อย่างไรก็ตามในส่วนของอุตสาหกรรมนี้มีลักษณะเป็นระบบการผลิตขนาดใหญ่ที่มีความซับซ้อนและมีรายละเอียดสูง (Petrochemical Complex) ต้องอาศัยเงินลงทุนในเทคโนโลยี และการจัดการขั้นสูง ดังนั้น การควบคุมกระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพ มีความปลอดภัย และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมจึงเป็นปัจจัยสำคัญภายใต้บริบทของมาตรฐานสากลและข้อกำหนดด้านสิ่งแวดล้อมที่เข้มงวดมากขึ้น [2]

กรณีศึกษาบริษัทในพื้นที่จังหวัดระยองได้ดำเนินนโยบายเชิงรุกด้านการจัดการของเสียจากกระบวนการผลิต (Operation waste recovery) โดยสามารถนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์ได้ร้อยละ 28 ซึ่งสูงกว่าเป้าหมายที่กำหนดไว้ที่ร้อยละ 26 และยังตั้งเป้าหมายระยะยาวในการลดการฝังกลบของเสียให้เกือบเป็นศูนย์ (Near-zero waste to landfill) ผ่านการประยุกต์ใช้แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular economy) เช่น การจัดการวัสดุฉนวนให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ เพื่อลดปริมาณของเสียทั้งที่เป็นอันตรายและไม่เป็นอันตรายตั้งแต่แหล่งกำเนิด [3]

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าจะมีมาตรการดังกล่าวของกระบวนการผลิตสารประกอบอินทรีย์ชนิด เมทิล-เพนทานไดออล (MPD) ยังคงประสบปัญหาการเกิดของเสียในหลายขั้นตอน และส่งผลให้ประสิทธิภาพของกระบวนการยังไม่เป็นไปตามเป้าหมายที่กำหนด ปัญหาดังกล่าวสะท้อนถึงความจำเป็นในการวิเคราะห์หาสาเหตุเชิงลึกของการเกิดของเสียในแต่ละขั้นตอนการผลิตสารประกอบอินทรีย์ชนิดนี้

ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดของเสียในกระบวนการผลิตสารประกอบอินทรีย์ดังกล่าว รวมถึงหาแนวทางลดของเสียที่แหล่งกำเนิด และเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตผ่านกรอบแนวคิด Six Sigma (DMAIC) เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันขององค์กรในระยะยาว

2. วิธีวิจัย (Research Methodology)

2.1 ขอบเขตและการรวบรวมข้อมูลกระบวนการผลิต

งานวิจัยนี้ดำเนินการโดยสุ่มเก็บรวบรวมข้อมูลทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพจากโรงงานกรณีศึกษาในพื้นที่จังหวัดระยอง โดยกำหนดเกณฑ์และขอบเขตการรวบรวมข้อมูล ดังนี้

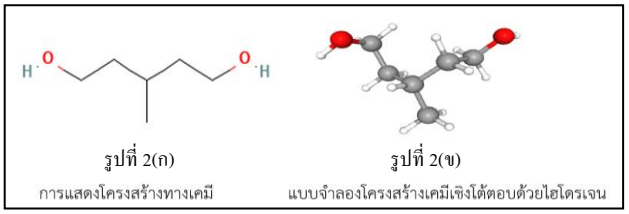
- ข้อมูลปฐมภูมิ (Primary Data) ได้จากการลงพื้นที่สำรวจและสัมภาษณ์เชิงลึกกับวิศวกรผู้ควบคุมการผลิตและเจ้าหน้าที่ฝ่ายสิ่งแวดล้อม รวมถึงเก็บรวบรวมข้อมูลการผลิตจริงย้อนหลังเป็นเวลา 6 เดือน (ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2568) ครอบคลุมรอบการผลิตรวมทั้งสิ้น 180 รอบการผลิต (Batches)
- ข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary Data) ได้จากการรวบรวมข้อมูลสถิติมลพิษอุตสาหกรรม เอกสารคู่มือการปฏิบัติงาน (SOP) รายงานความปลอดภัย และวรรณกรรมวิชาการที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการนี้

สารประกอบอินทรีย์ เมทิล-เพนทานไดออล (3-Methyl-1,5-pentanediol : MPD) มีโครงสร้างทางเคมีที่สำคัญดังแสดงในรูปที่ 1

	Structural formula	M.W.	Appearance @25°C	Viscosity [mPa·s]	Melting point (°C)	Functional Num.
MPD 3-methyl-1,5-pentanediol	HO OH	118	Liquid	173@20°C	<-50	2

รูปที่ 1 โครงสร้างทางเคมีของสารประกอบอินทรีย์ เมทิล-เพนทานไดออล (3-Methyl-1,5-pentanediol)

รูปที่ 2 ภาพแสดงโครงสร้างทางเคมี และแบบจำลองโครงสร้างเคมีเชิงโต้ตอบด้วยไฮโดรเจน ดังแสดงในรูปที่ 2(ก) และ 2(ข)



รูปที่ 2(ก) การแสดงโครงสร้างทางเคมี

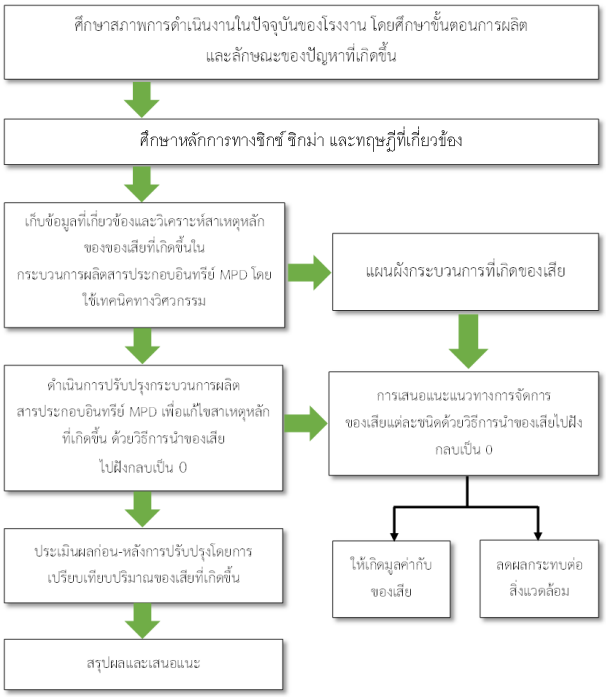
รูปที่ 2(ข) แบบจำลองโครงสร้างเคมีเชิงโต้ตอบด้วยไฮโดรเจน

2.2 กรอบการดำเนินงานตามแนวคิด Six Sigma (DMAIC)

งานวิจัยได้ประยุกต์ใช้กรอบแนวคิด DMAIC (Define Measure Analyze Improve Control) ในการปรับปรุงกระบวนการและลดของเสียอย่างเป็นระบบ โดยมีรายละเอียดการดำเนินงานแต่ละขั้นตอนดังนี้

1. ขั้นตอนการกำหนดปัญหา (Define Phase - D) กำหนดปัญหาหลักคืออัตราผลได้ (Yield) ของผลิตภัณฑ์สาร MPD ต่ำกว่าเกณฑ์เป้าหมาย และเกิดสารพลอยได้ (By-products) ที่ต้องส่งไปบำบัดปริมาณสูง โดยตั้งเป้าหมายลดปริมาณของเสียให้ลดลงร้อยละ 50 และปรับปรุงขีดความสามารถกระบวนการผลิต (Cpk) จากเดิม 0.87 ให้มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1.33 ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมยอมรับ
2. ขั้นตอนการวัด (Measure Phase - M) เก็บข้อมูลปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนการผลิตจริง เพื่อชี้วัดประสิทธิภาพเริ่มแรกของกระบวนการผลิต (Baseline)
3. ขั้นตอนการวิเคราะห์ (Analyze Phase - A) ใช้แผนผังสาเหตุและผลกระทบ การวิเคราะห์พาเรโต และการประเมินความเสี่ยงด้วยวิธี FMEA เพื่อค้นหาสาเหตุหลักที่ส่งผลกระทบสูงสุดต่อการเกิดของเสีย
4. ขั้นตอนการปรับปรุง (Improve Phase - I) พัฒนาและทดสอบแนวทางการแก้ไขปัญหา โดยการปรับค่าพารามิเตอร์การทำงานหลักของเครื่องปฏิกรณ์ตามเกณฑ์ทางวิศวกรรม
5. ขั้นตอนการควบคุม (Control Phase - C) กำหนดมาตรฐานการทำงานใหม่ (SOP) และนำเครื่องมือควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ (Statistical Process Control : SPC) มาใช้ตรวจติดตามอุณหภูมิในถังปฏิกรณ์

กำหนดกรอบการดำเนินงานวิจัยรูปที่ 3 (แผนภูมิกรอบดำเนินงาน)



รูปที่ 3 กรอบการดำเนินงานวิจัย

2.3 ผลการเก็บข้อมูลของเสียในกระบวนการผลิต (Measure Phase)

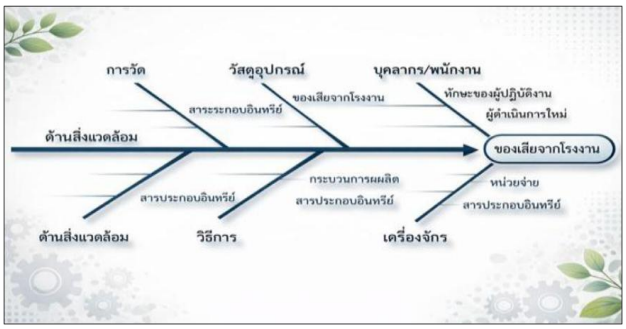
จากการเก็บข้อมูลปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นจากรอบของกระบวนการผลิตทั้งหมด พบว่ากระบวนการผลิตสาร MPD เกิดของเสียเฉลี่ยร้อยละ 5.8 ของกำลังการผลิตทั้งหมด โดยสามารถจำแนกสัดส่วนของเสียตามขั้นตอนการผลิตได้ดังแสดงในตารางที่ 1

ขั้นตอนการทำงาน	ประเภทของเสียหลักที่เกิดขึ้น	สัดส่วนของเสียเฉลี่ย (ร้อยละ)
1. การทำปฏิกิริยาเคมี (Reaction Process)	สารพลอยได้ (C5, MVL, IPPD, MPAE) ปนเปื้อนในน้ำเสีย	36.2
2. การแยกสาร (Separation Process)	สารอินทรีย์ระเหยง่ายจากการแยกไม่สมบูรณ์	28.4
3. การทำให้บริสุทธิ์ (Purification Process)	ภาคส่วนกลั่นหนักก้นหอ (Heavy Ends)	22.1
4. การบรรจุผลิตภัณฑ์ (Packaging Process)	ภาคบรรจุภัณฑ์และสารเคมีหกตกหล่น	13.3
รวม	-	100.0

ตารางที่ 1 ชี้ให้เห็นว่าขั้นตอนการทำปฏิกิริยาเคมี (Reaction Process) เป็นแหล่งกำเนิดของเสียหลักที่สูงที่สุด (ร้อยละ 36.2) จึงถูกกำหนดให้เป็นจุดมุ่งหมายหลักในการศึกษาเพื่อค้นหาสาเหตุในเชิงลึก

2.4 การวิเคราะห์สาเหตุและผลกระทบ (Analyze Phase)

งานวิจัยและทีมงานได้ประยุกต์ใช้แผนผังสาเหตุและผลกระทบ (Fishbone Diagram) เพื่อระบุปัจจัยที่เป็นไปได้ในการก่อให้เกิดของเสียจากกระบวนการผลิตและปัญหาสารอินทรีย์ระเหยง่ายในกระบวนการทำปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แผนผังสาเหตุและผลกระทบของการเกิดของเสียในกระบวนการผลิตสาร MPD เพื่อระบุปัจจัยที่มีผลกระทบสูงสุด (80%) งานวิจัยได้นำหลักการพาเรโต (Pareto Analysis 80/20 Rule) มาใช้จำแนกปัญหาหลักของการเกิดของเสียจากการเก็บข้อมูลจริงจำนวน 180 รอบการผลิต ดังแสดงข้อมูลในตารางที่ 2

รหัสสาเหตุ	สาเหตุที่ทำให้เกิดของเสีย	ความถี่ที่ตรวจพบ (ครั้ง)	สัดส่วนร้อยละ (%)	ร้อยละสะสม (%)
A	การควบคุมอุณหภูมิในปฏิกิริยาไม่คงที่	85	47.2	47.2
B	การแยกสารไม่สมบูรณ์ (Separation)	38	21.1	68.3
C	ความคลาดเคลื่อนของอัตราส่วนวัตถุดิบ	23	12.8	81.1
D	ความผิดปกติและการชำรุดของเครื่องจักร	18	10.0	91.1
E	ความผิดพลาดจากการปฏิบัติงานของบุคคล	16	8.9	100.0

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์พาเรโตระบุว่า สาเหตุ A, B และ C เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดของเสียรวมกันถึงร้อยละ 81.1 ของปัญหาทั้งหมด เพื่อจัดลำดับความเร่งด่วนในการดำเนินงานและกำหนดแนวทางการแก้ไข ผู้วิจัยได้ทำการประเมินเชิงลึกด้วยการวิเคราะห์รูปแบบความล้มเหลวและผลกระทบ (FMEA) โดยกำหนดเกณฑ์คะแนนดังนี้

- ระดับความรุนแรง (Severity - S) ประเมินจากความเสียหายต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์และผลกระทบต่อน้ำเสียสิ่งแวดล้อม (1 = น้อยที่สุด, 10 = ปฏิกิริยาล้มเหลวโดยสิ้นเชิงและส่งผลให้น้ำเสียเกินเกณฑ์มาตรฐาน)
- โอกาสเกิดความล้มเหลว (Occurrence - O) ประเมินจากความถี่ของอาการผันผวนอุณหภูมิและกระบวนการนอกระบบ (1 = นานๆ ครั้ง หรือไม่เคยเกิด, 10 = เกิดเกือบทุกรอบการผลิต)
- ความสามารถในการตรวจจับ (Detection - D) ประเมินจากความยากง่ายของการตรวจพบความผิดปกติก่อนเกิดความล้มเหลว (1 = ระบบตรวจจับแจ้งเตือนได้ทันที, 10 = ตรวจจับไม่ได้ต้องส่งวิเคราะห์แล็บภายนอกอย่างเดียว)

ผลการวิเคราะห์เพื่อหาค่าดัชนีความเสี่ยง

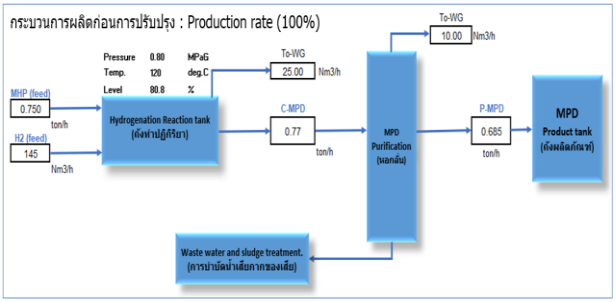
(Risk Priority Number : RPN = S x O x D) แสดงในตารางที่ 3

รูปแบบความล้มเหลว (Failure Mode)	ผลกระทบที่เกิดขึ้น (S)	โอกาสเกิด (O)	การตรวจจับ (D)	คะแนน RPN	แนวทางการปรับปรุง
การควบคุมอุณหภูมิในปฏิกิริยาไม่คงที่และไม่เหมาะสม	8	7	5	**280**	ปรับแต่งเงื่อนไขอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมและติดตั้งระบบควบคุมความร้อนอัตโนมัติ
การแยกสารในหอกลั่นไม่สมบูรณ์	7	5	4	140	ปรับอัตราการป้อนกลับ (Reflux ratio) และควบคุมระดับความดันของหอกลั่น
ความคลาดเคลื่อนของอัตราส่วนผสมของสารเคมี	6	4	5	120	สอบเทียบระบบมาตรวัดมวลอัตราไหล (Flow Meter) ประจำรอบสัปดาห์

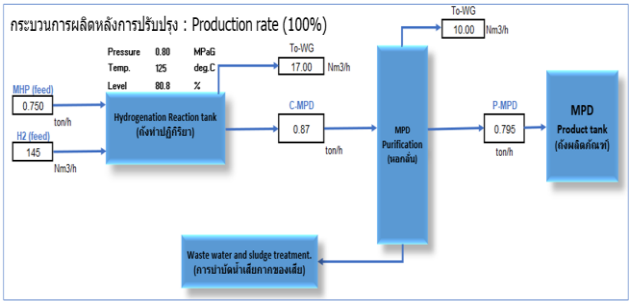
ตารางที่ 3 จากผลการวิเคราะห์ FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) พบว่าปัญหาเรื่องอุณหภูมิปฏิกิริยาไม่คงที่และไม่เหมาะสมมีค่า RPN สูงสุดเท่ากับ **280** คะแนน จึงกำหนดให้เป็นแนวทางปรับปรุงในลำดับแรกสุด

2.5 การปรับปรุงกระบวนการผลิต (Improve Phase)

ก่อนการปรับปรุง กระบวนการผลิตในปัจจุบันดำเนินการที่สภาวะอุณหภูมิถังทำปฏิกิริยาเฉลี่ย 120°C ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียง (Side Reactions) สูง และเกิดสารพลอยได้ที่ไม่พึงประสงค์ (By-products) ได้แก่ สารกลุ่ม C5, MVL, IPPD และ MPAE สารเคมีเหล่านี้ปนเปื้อนในระบบน้ำทิ้งโรงงานและทำให้เกิดกากตะกอน (Sludge) ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียเพิ่มขึ้น โดยสถิติก่อนการปรับปรุง อัตราผลได้ผลิตภัณฑ์ (Yield of MPD) เฉลี่ยอยู่ที่เพียงร้อยละ **93.26** ดังโครงสร้างกระบวนการเดิมในรูปที่ 5



รูปที่ 5 แผนผังกระบวนการผลิตสารประกอบอินทรีย์ MPD สภาวะเดิมก่อนปรับปรุง เมื่ออ้างอิงตามทฤษฎีทางเคมีอุตสาหกรรมและการทบทวนมาตรฐาน SOP ผู้วิจัยจึงดำเนินการปรับสภาวะพารามิเตอร์การผลิต โดยการปรับเพิ่มอุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์ขึ้นจากเดิม 120°C เป็น 125°C ภายใต้กำลังการผลิตคงที่ร้อยละ 100 เพื่อปรับเพิ่มอัตราเร่งการเกิดปฏิกิริยาเคมีหลัก และยับยั้งปฏิกิริยาข้างเคียงที่เป็นตัวสร้างสารพลอยได้ พร้อมทั้งจัดระบบการนำของเสียบางส่วนกลับมาเป็นเชื้อเพลิงพลังงานทดแทน ดังสภาวะกระบวนการใหม่หลังปรับปรุงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 แผนผังกระบวนการผลิตสารประกอบอินทรีย์ MPD หลังการปรับปรุงปรับเพิ่มอุณหภูมิ

ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารพลอยได้และองค์ประกอบเคมีเก็บและตรวจสอบตัวอย่างวิเคราะห์คุณภาพ เปรียบเทียบก่อนและหลังทำการปรับปรุงกระบวนการผลิต ดังแสดงในตารางที่ 4 และ 5

Sampling Data						
Items	C5	MHP	MVL	IPPD	MPD	MPAE
Unit	%	%	%	%	%	%
1st time	0.84	0.56	2.54	1.46	93.26	1.30
2nd time	0.85	0.56	2.61	1.53	93.28	1.11
3rd time	0.87	0.57	2.6	1.46	93.26	1.21

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก่อนทำการปรับปรุงกระบวนการ

Sampling Data						
Items	C5	MHP	MVL	IPPD	MPD	MPAE
Unit	%	%	%	%	%	%
1st time	0.82	0.56	2.04	0.46	94.76	1.30
2nd time	0.83	0.54	2.01	0.55	94.88	1.11
3rd time	0.86	0.56	1.80	0.56	94.97	1.19

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างหลังจากทำการปรับปรุงกระบวนการ

ผลจากการวิเคราะห์ในตารางที่ 6 ยืนยันความสอดคล้องอย่างชัดเจนว่า เมื่อปรับปรุงอุณหภูมิเป็น 125°C อัตราส่วนสารพลอยได้ที่ไม่พึงประสงค์ทั้งหมดมีแนวโน้มลดลงอย่างสอดคล้องกัน ส่งผลให้การปล่อยสารปนเปื้อนเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียลดต่ำลงอย่างมาก ซึ่งช่วยลดปริมาณกากตะกอน (Sludge) ที่เกิดขึ้นจากการบำบัดน้ำเสียดังแสดงในตารางที่ 6

สารเคมีที่วิเคราะห์องค์ประกอบ	สัดส่วนร้อยละที่ตรวจพบในรอบกระบวนการ (%)		ผลการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการ
สารเคมีที่วิเคราะห์องค์ประกอบ	ก่อนการปรับปรุง (ที่อุณหภูมิ 120°C)	หลังการปรับปรุง (ที่อุณหภูมิ 125°C)	ผลการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการ
1. ผลิตภัณฑ์หลัก **MPD (Yield)**	93.26	94.88	+ 1.62% (เพิ่มอัตราการเกิดผลได้หลัก)
2. สารพลอยได้ C5	2.15	1.02	ลดลง (ปฏิกิริยาข้างเคียงลดลง)
3. สารพลอยได้ MVL	1.84	0.89	ลดลง (ปฏิกิริยาข้างเคียงลดลง)
4. สารพลอยได้ IPPD	1.45	0.72	ลดลง (ปฏิกิริยาข้างเคียงลดลง)
5. สารพลอยได้ MPAE	1.30	0.49	ลดลง (ปฏิกิริยาข้างเคียงลดลง)

ผลจากการวิเคราะห์ในตารางที่ 6

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล (Results and Discussion)

จากการปรับปรุงควบคุมอุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์ร่วมกับระบบการจัดการของเสียอุตสาหกรรมในสายการผลิต ผู้วิจัยได้นำข้อมูลหลังปรับปรุงเปรียบเทียบกับสภาวะเดิม พบว่าแนวโน้มการทำงานมีประสิทธิภาพสูงขึ้นทุกด้านดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะก่อนการปรับปรุงโดยเฉพาะการบรรลุเป้าหมายการลดของเสียเพื่อความยั่งยืนของโรงงานกรณีศึกษา การวิจัยประยุกต์ใช้แนวคิด Six Sigma ผ่านกระบวนการ DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, and Control) สามารถช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตสาร MPD และลดของเสียจากกระบวนการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพจากการศึกษาสอดคล้องกับงานวิจัยในระดับสากลที่ระบุว่าการประยุกต์ใช้ Six Sigma ในอุตสาหกรรมเคมีสามารถช่วยลดความแปรปรวนของกระบวนการผลิต เพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากร และลดต้นทุนการดำเนินงานได้อย่างมีคุณภาพ

การปรับปรุงระบบควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง ส่งผลให้ Yield ของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น ขณะที่การปรับปรุงประสิทธิภาพของคอลัมน์การกลั่นช่วยเพิ่มความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์และลดการสูญเสียของวัตถุดิบและการนำของเสียบางส่วนกลับมาใช้ประโยชน์ เช่น การใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิง สามารถช่วยลดปริมาณของเสียที่ต้องนำไปกำจัดและสนับสนุนแนวคิด Zero Waste to Landfill ดังนั้นการประยุกต์ใช้ Six Sigma ร่วมกับแนวคิดด้านความยั่งยืนจึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนากระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมเคมีในปัจจุบัน จากตารางแสดง ผลการดำเนินงานแสดงให้เห็นว่า สามารถบรรลุเป้าหมาย Zero Landfill ได้สำเร็จ
ดังเปรียบเทียบเชิงตัวเลขในตารางที่ 7

ตัวชี้วัดประสิทธิภาพ (KPIs)	ก่อนการปรับปรุง (Baseline)	หลังการปรับปรุง (Optimized)	ผลสัมฤทธิ์ที่ได้จากการปรับปรุง
ดัชนีชี้วัดความสามารถกระบวนการ (C_{pk})	0.87	1.42	**กระบวนการมีเสถียรภาพและคุณภาพผ่านเกณฑ์มาตรฐานสากล (≥ 1.33)**
อัตราผลได้ผลิตภัณฑ์ MPD (Yield)	ร้อยละ 93.26	ร้อยละ 94.88	เพิ่มขึ้นร้อยละ 1.62 เทียบกับสภาวะเดิม
ปริมาณของเสียรวมจากกระบวนการผลิต	120 ตัน/ปี	60 ตัน/ปี	**ปริมาณของเสียลดลงร้อยละ 50.0**
ของเสียส่งกำจัดด้วยวิธีฝังกลบ (Landfill)	15 ตัน/ปี	0.2 ตัน/ปี	บรรลุเป้าหมายเกือบเป็นศูนย์ (Near-Zero Landfill) ผ่านการดึงของเสียกลับมาเป็นเชื้อเพลิงร่วม

ตารางที่ 7 จากดัชนีชี้นำค่า Cpk (Process Capability Index) เพิ่มขึ้นอย่างก้าวกระโดดจาก **0.87** เป็น **1.42** ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ยอมรับได้ตามหลักสถิติวิศวกรรมควบคุมคุณภาพ (ที่ระบุว่า ค่า Cpk < 1.00 คือระบบไม่เสถียรและมีโอกาสผลิตของเสียจำนวนมาก และค่า Cpk ≥ 1.33 ถือเป็นกระบวนการที่สามารถควบคุมคุณภาพได้เป็นอย่างดี) การปรับปรุงอุณหภูมิและการจัดระบบสถิติเชิงควบคุมในครั้งนี้ จึงทำให้กระบวนการผลิตเข้าสู่สภาวะควบคุมและเสถียรภาพสูงสุด ผลการศึกษาดังกล่าวมีความสอดคล้องเชิงทฤษฎีกับผลงานวิจัยของ ดล นภา และคณะ [3] และแนวคิดการจัดการความแปรปรวนกระบวนการปิโตรเคมีด้วยซิกซ์ซิกมาของระดับสากล [4] ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ที่มีประโยชน์สำหรับการพัฒนาอุตสาหกรรมปิโตรเคมีอย่างยั่งยืนในเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก

ประเภทของเสียและแนวทางการใช้ประโยชน์ดังแสดงในตารางที่ 8 และผลการปรับปรุงกระบวนการผลิต พบว่าหลังจากดำเนินการปรับปรุงมีปริมาณของเสียลดลง ของเสียที่ต้องฝังกลบลดลง โดยผลงานแสดงให้เห็นว่า สามารถบรรลุเป้าหมาย Zero Landfill ได้สำเร็จ

ตารางที่ 8 ประเภทของเสียและแนวทางการใช้ประโยชน์

ประเภทของเสีย	แนวทางการใช้ประโยชน์
กากจากการกลั่น	นำกลับเข้ากระบวนการกลั่น
ตัวทำละลายใช้แล้ว	กลั่นแยกเพื่อนำกลับมาใช้
กากปฏิกิริยา	ส่งไปผลิตพลังงานเชื้อเพลิง

4. สรุปผล (Conclusion)

การวิจัยเชิงประยุกต์นี้สำเร็จตามเป้าหมายของกรอบแนวคิด DMAIC ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตสารประกอบอินทรีย์ เมทิล-เพนทานไดออล (MPD) โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้เทคโนโลยีเคมีสีเขียวร่วมกับวิศวกรรมการผลิตส่งผลต่อประโยชน์หลายประการ ดังนี้

- สามารถลดปริมาณการเกิดของเสียทั้งหมดลงได้ร้อยละ 50 ซึ่งสอดคล้องตามเป้าหมายขั้นแรกของโรงงานกรณีศึกษา
- เพิ่มขีดความสามารถการยอมรับกระบวนการผลิตและการควบคุมคุณภาพ โดยดัชนีความสามารถของกระบวนการเพิ่มขึ้นจาก **0.87** เป็น **1.42** (Cpk ≥ 1.33)
- สามารถจัดการของเสียเพื่อสิ่งแวดล้อม และขับเคลื่อนเข้าสู่เป้าหมายเกือบเป็นศูนย์ในการฝังกลบ (Near-Zero Waste to Landfill) ได้อย่างชัดเจน

การประยุกต์ใช้วิธีวิจัยและเครื่องมือดังกล่าวจึงเป็นโมเดลเชิงปฏิบัติการที่เหมาะสมในการนำมาขยายผลใช้กับภาคอุตสาหกรรมเคมีและปิโตรเคมีอื่น ๆ ในการเพิ่มขีดความสามารถการแข่งขันที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมต่อไปในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอแสดงความขอบพระคุณอย่างสูงต่อโรงงานกรณีศึกษาและเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่อนุเคราะห์ข้อมูลการสำรวจ รวมถึงขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ได้ให้การสนับสนุนอำนวยความสะดวกในเชิงเครื่องมือและการเดินทางเพื่อสร้างงานวิจัยฉบับนี้จนลุล่วงด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

[1] ธนาคารกรุงศรีอยุธยา. (2567). แนวโน้มธุรกิจและทิศทางอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและเคมีภัณฑ์โลกและประเทศไทย. ค้นหาจาก https://www.krungsri.com

[2] กรมควบคุมมลพิษ. (2560). สารเคมีอันตรายและการจัดการมลพิษสิ่งแวดล้อมในภาคอุตสาหกรรมเคมีขั้นสูง. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

[3] ดลนภา รัตนภิกขุ, จรรยา จันทร์แก่นรัตน์, และวีระศักดิ์ บุญญดิษฐ์. (2562). การจัดการของเสียอันตรายในนิคมอุตสาหกรรมไทยเชิงบูรณา การและยั่งยืน. วารสารการจัดการสิ่งแวดล้อม, 15(2), 45-58.

[4] นภัสนันท์ จันทรา, และสมทิพย์ ด่านธีรวนิชย์. (2554). การจัดการขยะและของเสียอันตรายตามแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนในพื้นที่ชายฝั่งทะเลตะวันออก. วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ มทร.พระนคร, 5(1), 12-24.

[5] เมทินา อิสริยานนท์. (2562). การทบทวนและปรับยุทธศาสตร์การพัฒนาของโครงการพัฒนาพื้นที่ชายฝั่งทะเลตะวันออกสู่การเป็นประเทศอาเซียนในจังหวัดฉะเชิงเทรา กรณีการจัดการขยะของเสียอันตรายจากโรงงานอุตสาหกรรม.

[6] Breyfogle, F. W. (2003). Implementing Six Sigma: Smarter Solutions Using Statistical Methods. John Wiley & Sons. เอกสารอ้างอิงเพิ่มเติมด้านสถิติวิศวกรรมและการวิเคราะห์ FMEA

[7] Montgomery, D. C. (2019). Introduction to Statistical Quality Control (8th ed.). John Wiley & Sons. เอกสารอ้างอิงเพิ่มเติมด้านการควบคุมคุณภาพและขีดความสามารถกระบวนการ SPC/Cpk

[8] Pyzdek, T., & Keller, P. A. (2018). The Six Sigma Handbook (5th ed.). McGraw-Hill Education. เอกสารอ้างอิงเพิ่มเติมด้านแนวคิด Six Sigma และกรอบการดำเนินงาน DMAIC

	นายปรัชญา นารมย์ จบการศึกษา ระดับปริญญาตรี คณะบริหารธุรกิจ สาขาการจัดการโลจิสติกส์ และซัพพลายเชน มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี
	ผศ. ดร.สุวิทย์ แพงกันยา อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การประเมินความปลอดภัยในการจัดเก็บวัตถุอันตราย: การทบทวนวรรณกรรม

Safety Assessment of Hazardous Material Storage: A Literature Review

เฮงเฮง จารุนงคราญ[1*] และ เทอดพงษ์ แดงสี[2]

[1*,2]สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถ.ประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

[1]กองบริหารจัดการวัตถุอันตราย กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม

75/6 ถ.พระรามที่ 6 แขวงทุ่งพญาไท เขตราชเทวี กรุงเทพมหานคร 10400

hengheng-j@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับการประเมินความปลอดภัยในการจัดเก็บวัตถุอันตรายอย่างเป็นระบบ โดยมุ่งเน้นปัจจัยเสี่ยง เครื่องมือประเมิน และความท้าทายในการประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม งานวิจัยใช้แนวทางการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบภายใต้กรอบแนวคิด PRISMA จากฐานข้อมูลวิชาการสากล และคัดเลือกบทความที่เกี่ยวข้องจำนวน 20 บทความ ผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความปลอดภัย ได้แก่ ปริมาณสารเคมี ระบบป้องกันอัคคีภัย กิจกรรมในระบบเปิด การจัดการคลังและอุปกรณ์ มาตรการปฏิบัติงาน และความพร้อมด้านเหตุฉุกเฉิน เครื่องมือที่ใช้ในการประเมินความปลอดภัยในการจัดเก็บวัตถุหรือสารเคมีอันตราย นอกจากนี้ ยังพบช่องว่างสำคัญด้านการประเมินเชิงรุก การสื่อสารข้อมูลอันตราย การบังคับใช้กฎหมายอย่างสม่ำเสมอ และการใช้เทคโนโลยีติดตามความเสี่ยงแบบเรียลไทม์ ดังนั้น การพัฒนากรอบการประเมินที่เหมาะสมกับบริบทไทยจะช่วยยกระดับความปลอดภัย ลดความสูญเสีย และสนับสนุนการจัดการวัตถุอันตรายอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ : การประเมินความปลอดภัย; วัตถุอันตราย; การจัดเก็บสารเคมี; การประเมินความเสี่ยง; ความปลอดภัยอุตสาหกรรม

Abstract

This paper aims to review the literature on safety assessment of hazardous material storage systematically, with emphasis on risk factors, assessment tools, and implementation challenges in industrial sectors. A systematic literature review based on the PRISMA framework was conducted using international academic databases, and 20 relevant articles were selected for analysis. The results indicate that key factors affecting storage safety include chemical quantity, fire protection systems, open handling activities, warehouse and equipment management, operational control measures, and emergency preparedness. Commonly used tools for assessing the safety of hazardous material and chemical storage were also identified. In addition, major gaps were found in proactive risk assessment, hazard communication, consistent regulatory enforcement, and the adoption of real-time risk monitoring technologies. Therefore, developing an assessment framework appropriate for the Thai context would enhance safety performance, reduce potential losses, and support sustainable hazardous material management.

Keywords: Safety Assessment; Hazardous Materials; Chemical Storage; Risk Assessment; Industrial Safety

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

อุตสาหกรรมเคมีและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับวัตถุอันตรายมีบทบาทสำคัญต่อเศรษฐกิจ การผลิต และห่วงโซ่อุปทานของประเทศ อย่างไรก็ตาม กิจกรรมเหล่านี้มาพร้อมกับความเสี่ยงด้านความปลอดภัยอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในขั้นตอนการจัดเก็บสารเคมีและวัตถุอันตราย ซึ่งมักเกี่ยวข้องกับสารไวไฟ สารระเหย สารกัดกร่อน สารออกซิไดซ์ หรือสารที่มีความเป็นพิษสูง หากสถานประกอบการขาดการออกแบบพื้นที่จัดเก็บที่เหมาะสม ขาดระบบควบคุมความเสี่ยง ขาดมาตรการป้องกันอัคคีภัย หรือขาดการตรวจสอบอย่างต่อเนื่อง อาจเป็นสาเหตุของอุบัติภัยร้ายแรงดังที่เคยเกิดเหตุระเบิดและไฟไหม้ที่บริษัท Ming Dih Chemical จำกัด ตั้งอยู่ในซอยกิ่งแก้ว 21 จังหวัดสมุทรปราการ เมื่อปี พ.ศ. 2564 [1] ซึ่งกรณีนี้เป็นตัวอย่างที่สะท้อนให้เห็นว่า การจัดเก็บสารเคมีที่ไม่เหมาะสมอาจนำไปสู่การรั่วไหล การระเหยของสารไวไฟ การติดไฟ และการระเบิดขนาดใหญ่ ซึ่งส่งผลกระทบทั้งต่อโรงงาน ผู้ปฏิบัติงาน หน่วยกู้ภัย และประชาชนในพื้นที่ใกล้เคียง เหตุการณ์ดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า ความปลอดภัยในการจัดเก็บวัตถุอันตรายไม่ควรถูกมองเป็นเพียงภารกิจด้านการปฏิบัติตามกฎหมาย แต่ควรเป็นระบบบริหารความเสี่ยงเชิงรุกที่มีการระบุอันตราย ประเมินความเสี่ยง ควบคุมความเสี่ยง ติดตามผล และปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง

ในประเทศไทย แม้จะมีกฎหมายและแนวทางจากหน่วยงานกำกับดูแล เช่น กรมโรงงานอุตสาหกรรม และหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ซึ่งกำหนดแนวทางการเก็บรักษาสารเคมีและวัตถุอันตราย แต่ยังพบปัญหาด้านการนำไปใช้ในทางปฏิบัติ เช่น ความซับซ้อนของข้อกำหนด การขาดการบูรณาการข้อมูลด้านเทคนิคกับข้อกำหนดทางกฎหมาย การขาดฐานข้อมูลความเสี่ยงที่เข้าถึงได้ และการสื่อสารข้อมูลความปลอดภัยที่ยังไม่ทั่วถึง โดยเฉพาะในกลุ่มผู้ประกอบการขนาดกลางและขนาดย่อม ดังนั้น การทบทวนองค์ความรู้ด้านการประเมินความปลอดภัยในการจัดเก็บวัตถุอันตรายจึงมีความจำเป็น เพื่อพัฒนากรอบการประเมินที่ใช้งานได้จริง สอดคล้องกับบริบทไทย และเชื่อมโยงกับมาตรฐานสากล

1.2 แนวคิดเกี่ยวกับความปลอดภัยในการจัดเก็บวัตถุอันตราย

ความปลอดภัยในการจัดเก็บวัตถุอันตรายหมายถึง การควบคุมสภาวะการจัดเก็บ การเคลื่อนย้าย การใช้พื้นที่ อุปกรณ์ บุคลากร และมาตรการป้องกันต่าง ๆ เพื่อไม่ให้เกิดอุบัติเหตุจากสารเคมีหรือวัตถุอันตราย ความปลอดภัยในบริบทนี้ครอบคลุมตั้งแต่การเลือกภาชนะบรรจุที่เหมาะสม การแยกประเภทสารตามความเข้ากันได้ การควบคุมอุณหภูมิและการระบายอากาศ การป้องกันประกายไฟ การติดตั้งระบบเตือนภัยและการระงับอัคคีภัย การจำแนกประเภทสารเคมีและวัตถุอันตรายสำหรับการเก็บรักษา มาตรการป้องกัน การจัดทำป้ายเตือน การจัดเตรียมอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคล และการเตรียมแผนรับมือเหตุฉุกเฉิน

ในส่วนของการจัดเก็บวัตถุอันตรายมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างจากการจัดเก็บสารเคมีทั่วไป เนื่องจากความเสี่ยงไม่ได้เกิดจากปริมาณเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นกับคุณสมบัติของสาร สภาวะแวดล้อมในการจัดเก็บ ระยะเวลาการเก็บ ความถี่ในการนำเข้าออก ความสามารถของระบบป้องกัน ความพร้อมของบุคลากร และการปฏิบัติตามขั้นตอนอย่างเคร่งครัด ตัวอย่างเช่น สารไวไฟต้องการพื้นที่ที่มีการระบายอากาศดีและห่างจากแหล่งจุดติดไฟ สารออกซิไดซ์ต้องแยกการจัดเก็บจากสารไวไฟ สารกัดกร่อนต้องมีภาชนะและพื้นที่รองรับการรั่วไหล ส่วนสารพิษต้องมีมาตรการควบคุมการสัมผัสอย่างเข้มงวด

ภายใต้กรอบ EHS ความปลอดภัยเป็นหนึ่งในองค์ประกอบหลักที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันอุบัติเหตุ การบาดเจ็บ และเหตุฉุกเฉินในสถานประกอบการ แม้กรอบ EHS จะครอบคลุมด้านสิ่งแวดล้อมและสุขภาพด้วย แต่สำหรับการจัดเก็บวัตถุอันตราย มิติความปลอดภัยถือเป็นแกนหลัก เพราะเป็นด่านแรกในการป้องกันไม่ให้เหตุการณ์อันตรายเกิดขึ้นหรือขยายตัว ความปลอดภัยจึงต้องถูกออกแบบเป็นระบบ ตั้งแต่การระบุอันตราย การประเมินความเสี่ยง การกำหนดมาตรการควบคุม การตรวจสอบ การฝึกอบรม และการทบทวนประสิทธิภาพของมาตรการ

นอกจากนี้ การประเมินความปลอดภัยในการจัดเก็บวัตถุอันตรายควรอ้างอิงทั้งข้อกำหนดภายในประเทศและมาตรฐานสากลที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้การควบคุมความเสี่ยงมีความเป็นระบบ สามารถตรวจสอบได้ โดยในประเทศไทยนั้น กรมโรงงานอุตสาหกรรมมีบทบาทสำคัญต่อการกำกับดูแลการเก็บรักษา การประเมินความเสี่ยง และการจัดทำแผนฉุกเฉิน ขณะที่มาตรฐาน ISO 45001 สนับสนุนการจัดการอาชีวอนามัยและความปลอดภัยอย่างต่อเนื่อง ส่วน GHS ช่วยให้การจำแนกสารเคมี การติดฉลาก และการสื่อสารอันตรายเป็นมาตรฐานเดียวกัน นอกจากนี้ แนวคิดการควบคุมอุบัติภัยร้ายแรง เช่น Seveso III ยังเป็นกรอบอ้างอิงที่มีประโยชน์ต่อการกำหนดมาตรการป้องกันและการเตรียมความพร้อมสำหรับสถานประกอบการที่มีความเสี่ยงสูง

จากที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้น บทความนี้จึงมุ่งเน้นการสังเคราะห์แนวคิด เครื่องมือ และปัจจัยด้านความปลอดภัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดเก็บวัตถุอันตราย โดยเน้นเฉพาะมิติความปลอดภัยภายใต้กรอบแนวคิดเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อม สุขภาพ และความปลอดภัย (Environmental, Health, and Safety: EHS) และมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง เพื่อเสนอแนวทางที่สามารถใช้เป็นพื้นฐานสำหรับการประเมินความปลอดภัยในสถานประกอบการอุตสาหกรรม

2. ระเบียบวิธีวิจัย

บทความนี้ใช้แนวทางการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ (Systematic Literature Review) ภายใต้กรอบแนวคิด Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) เพื่อให้กระบวนการค้นหา คัดเลือก และสังเคราะห์เอกสารมีความโปร่งใส เป็นระบบ และสามารถตรวจสอบย้อนกลับได้ โดยมุ่งเน้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประเมินความปลอดภัยในการจัดเก็บวัตถุอันตราย การประเมินความเสี่ยงสารเคมี ระบบ EHS และเครื่องมือบริหารความเสี่ยงในภาคอุตสาหกรรม

2.1 แหล่งฐานข้อมูลและคำค้น

การสืบค้นเอกสารในงานวิจัยนี้ดำเนินการผ่านฐานข้อมูลวิชาการที่ได้รับการยอมรับในระดับสากล ได้แก่ Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink และ Google Scholar เพื่อให้ครอบคลุมทั้งบทความวิจัย บทความปริทัศน์ และเอกสารวิชาการที่เกี่ยวข้องกับประเด็นด้านความปลอดภัยในการจัดเก็บวัตถุอันตราย การค้นหาใช้คำสำคัญที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการศึกษา เช่น “hazardous material storage safety”, “chemical storage risk assessment”, “EHS risk management” และ “industrial chemical safety assessment” นอกจากนี้ ยังมีการประยุกต์ใช้คำค้นแบบผสมร่วมกับตัวดำเนินการเชิงตรรกะ เช่น AND และ OR เพื่อเพิ่มความครอบคลุม ความแม่นยำ และความเชื่อมโยงของผลการสืบค้น ทำให้สามารถรวบรวมเอกสารได้อย่างเป็นระบบและครอบคลุมมากยิ่งขึ้น

2.2 เกณฑ์การคัดเลือกเอกสาร

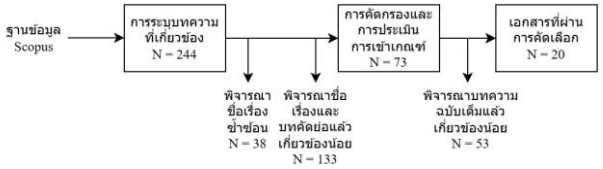
การคัดเลือกเอกสารสำหรับการศึกษานี้ดำเนินการในช่วงครึ่งปีหลังของปี ค.ศ. 2025 โดยกำหนดเกณฑ์คัดเข้าและคัดออกอย่างชัดเจน เพื่อให้ได้แหล่งข้อมูลที่มีคุณภาพและสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัย เกณฑ์คัดเข้าประกอบด้วยบทความวิจัยหรือบทความปริทัศน์ที่ผ่านกระบวนการประเมินโดยผู้ทรงคุณวุฒิ (peer review) ซึ่งได้รับการตีพิมพ์ในช่วงปี ค.ศ. 2020–2025 โดยเนื้อหาต้องเกี่ยวข้องโดยตรงกับประเด็นความปลอดภัยในการจัดเก็บวัตถุอันตราย การประเมินความเสี่ยงสารเคมี ระบบการจัดการด้านสิ่งแวดล้อม สุขภาพ และความปลอดภัย หรือมาตรการควบคุมความเสี่ยงในภาคอุตสาหกรรม ทั้งนี้ เอกสารที่นำมาพิจารณาจะต้องตีพิมพ์เป็นภาษาอังกฤษเพื่อให้สามารถวิเคราะห์และเปรียบเทียบข้อมูลได้อย่างเป็นมาตรฐาน

ในส่วนของเกณฑ์คัดออก ได้ตัดเอกสารที่ซ้ำกันออก รวมถึงบทความที่มีเนื้อหาไม่เกี่ยวข้องกับบริบทการจัดเก็บวัตถุอันตรายโดยตรง เอกสารที่ไม่สามารถเข้าถึงฉบับเต็มได้ และเอกสารที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการพิจารณาทางวิชาการ เช่น ข่าว หรือข้อมูลที่ไม่ผ่านการประเมินโดยผู้ทรงคุณวุฒิ ทั้งนี้เพื่อรักษาความน่าเชื่อถือและคุณภาพของข้อมูลที่นำมาใช้ในการสังเคราะห์ผลการศึกษา

2.3 กระบวนการคัดกรองตามกระบวนการ PRISMA

จากการค้นหาเบื้องต้นพบเอกสารจำนวน 244 รายการ หลังลบเอกสารซ้ำจำนวน 38 รายการ เหลือ 206 รายการ จากนั้นคัดกรองจาก

ชื่อเรื่องและบทคัดย่อ เหลือ 73 รายการ และประเมินฉบับเต็ม (full-text eligibility assessment) จนเหลือเอกสารที่ผ่านเกณฑ์สุดท้ายจำนวน 20 บทความ (ดังรูปที่ 1) เพื่อนำมาวิเคราะห์เชิงเนื้อหาและสังเคราะห์ผล



รูปที่ 1 กระบวนการภายใต้กรอบแนวคิด PRISMA

2.4 การสกัดและวิเคราะห์ข้อมูล

เอกสารที่ผ่านเกณฑ์ถูกสกัดข้อมูลในประเด็นสำคัญ ได้แก่ ผู้แต่ง ปีตีพิมพ์ และสาระสำคัญของงานวิจัยหรือข้อค้นพบหลัก ดังแสดงในตารางที่ 1 จากนั้นนำมาวิเคราะห์เชิงเนื้อหา และจัดกลุ่มเป็นประเด็นหลัก เช่น มาตรฐานความปลอดภัย เครื่องมือประเมินความเสี่ยง เทคโนโลยีใหม่ และช่องว่างงานวิจัย

3. ปัจจัยสำคัญในการประเมินความปลอดภัยของคลังวัตถุอันตราย

การประเมินความปลอดภัยของคลังวัตถุอันตรายควรพิจารณาปัจจัยหลายด้านร่วมกัน ดังนี้ [5], [12], [14]. [15], [19], [21]

1) ปริมาณการจัดเก็บสารเคมี ปริมาณที่มากขึ้นอาจเพิ่มทั้งความน่าจะเป็นของเหตุการณ์และความรุนแรงของผลกระทบ โดยเฉพาะเมื่อสารมีคุณสมบัติไวไฟ ระเบิดได้ หรือเป็นพิษสูง การประเมินจึงควรพิจารณาทั้งปริมาณสูงสุดที่จัดเก็บ ปริมาณเฉลี่ย ความถี่ในการรับเข้าและจ่ายออก รวมถึงความหนาแน่นของการจัดเก็บในพื้นที่

2) ระบบป้องกันและระงับอัคคีภัย คลังวัตถุอันตรายควรมีระบบตรวจจับควัน ความร้อน หรือไอสารไวไฟที่เหมาะสมกับชนิดของสาร มีอุปกรณ์ดับเพลิงที่เข้ากันได้กับประเภทของสารเคมี มีระบบน้ำดับเพลิงหรือระบบโฟมในกรณีที่จำเป็น และมีเส้นทางอพยพที่ชัดเจน การใช้ระบบดับเพลิงที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้สถานการณ์รุนแรงขึ้น เช่น การใช้น้ำกับสารที่ทำปฏิกิริยากับน้ำ หรือการไม่มีสารดับเพลิงที่เหมาะสมกับของเหลวไวไฟ ซึ่งต้องดูตามเอกสารความปลอดภัย เพื่อดูสารดับเพลิงที่เหมาะสม[12]

3) กิจกรรมที่ดำเนินการในระบบเปิด เช่น การถ่ายเทสาร การเติมสาร การสุ่มตัวอย่าง หรือการเปิดภาชนะบรรจุ กิจกรรมเหล่านี้มีความเสี่ยงสูงกว่าการจัดเก็บแบบปิด เพราะเพิ่มโอกาสการระเหย การหกรั่วไหล การสัมผัสของผู้ปฏิบัติงาน และการเกิดบรรยากาศไวไฟ ดังนั้นควรกำหนดขั้นตอนปฏิบัติงานที่ชัดเจน มีการใช้ PPE ที่เหมาะสม มีระบบระบายอากาศ และมีอุปกรณ์รองรับการรั่วไหล

4) การจัดการสิ่งอำนวยความสะดวกและอุปกรณ์ในคลัง เช่น ชั้นวาง ภาชนะรองรับ รถยก ระบบไฟฟ้า ระบบระบายอากาศ และพื้นที่กักเก็บสารรั่วไหล อุปกรณ์เหล่านี้ต้องได้รับการตรวจสอบและบำรุงรักษาอย่างสม่ำเสมอ เพราะความเสียหายของอุปกรณ์เพียงเล็กน้อยอาจเป็นจุดเริ่มต้นของอุบัติเหตุร้ายแรง เช่น ชั้นวางล้ม ภาชนะรั่ว รถยกชนภาชนะ หรือระบบไฟฟ้าเกิดประกายไฟ

5) มาตรการความปลอดภัยและข้อกำหนดการปฏิบัติงาน ซึ่งรวมถึงการแยกสารตามความเข้ากันได้ การจำกัดการเข้าถึงพื้นที่อันตราย การติดป้ายเตือน การควบคุมแหล่งจุดติดไฟ การกำหนดขั้นตอนการเคลื่อนย้ายสาร การใช้ PPE และการจัดเตรียมอุปกรณ์ฉุกเฉิน มาตรการเหล่านี้ต้องไม่เป็นเพียงเอกสาร แต่ต้องถูกสื่อสาร ฝึกอบรม ตรวจสอบ และบังคับใช้อย่างจริงจัง

6) แผนบำรุงรักษาและแผนฉุกเฉิน อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัย เช่น เครื่องตรวจจับ ระบบระบายอากาศ ระบบดับเพลิง ฝักบัวฉุกเฉิน และอุปกรณ์ล้างตา ต้องมีแผนตรวจสอบและบำรุงรักษาตามรอบเวลา นอกจากนี้ สถานประกอบการต้องมีแผนรับมือเหตุฉุกเฉินที่ครอบคลุมกรณีรั่วไหล ไฟไหม้ การระเบิด และการสัมผัสสารเคมี พร้อมทั้งมีการฝึกซ้อมอย่างสม่ำเสมอ

4. เครื่องมือที่ใช้ในการประเมินความปลอดภัย

เครื่องมือประเมินความปลอดภัยมีหลายประเภท โดยแต่ละเครื่องมือเหมาะสมกับวัตถุประสงค์และระดับความซับซ้อนที่แตกต่างกัน ดังนี้ [5], [9], [11], [13], [14], [16], [20]

1) Checklist เป็นเครื่องมือพื้นฐานสำหรับตรวจสอบความครบถ้วนของมาตรการความปลอดภัย เช่น การติดฉลาก การมี SDS การแยกสาร การตรวจสอบภาชนะ อุปกรณ์ฉุกเฉิน และระบบดับเพลิง จุดเด่นคือใช้งานง่าย เหมาะกับการตรวจประจำ และช่วยลดการตกหล่นของประเด็นสำคัญ

2) What-if Analysis ใช้ตั้งคำถามเชิงสถานการณ์ เช่น หากภาชนะรั่ว หากไฟฟ้าดับ หรือหากจัดเก็บสารที่เข้ากันไม่ได้ จะเกิดผลอย่างไร ช่วยให้มองเห็นความเสี่ยงที่อาจไม่ปรากฏในขั้นตอนปกติ และกำหนดมาตรการป้องกันล่วงหน้า

3) HAZOP เหมาะกับระบบที่ซับซ้อน โดยวิเคราะห์ความเบี่ยงเบนจากสภาวะปกติ เช่น มากเกินไป น้อยเกินไป ไม่มี หรือย้อนกลับ สามารถใช้กับระบบถ่ายเทสาร ระบายอากาศ กักเก็บ หรือดับเพลิง เพื่อค้นหาจุดอ่อนของระบบ

4) Fault Tree Analysis ใช้วิเคราะห์สาเหตุของเหตุการณ์ร้ายแรงแบบย้อนกลับจากเหตุการณ์หลัก เช่น ไฟไหม้หรือการระเบิด แล้วแตกเป็นสาเหตุย่อย เช่น ภาชนะรั่ว ระบบระบายอากาศล้มเหลว หรือมีแหล่งจุดติดไฟ ช่วยระบุสาเหตุรากและจุดควบคุมสำคัญ

5) FMEA ใช้วิเคราะห์รูปแบบความล้มเหลวของระบบ อุปกรณ์ หรือขั้นตอนงาน โดยประเมินความรุนแรง ความถี่ และความสามารถในการตรวจพบ เหมาะกับการจัดลำดับความสำคัญของการแก้ไข เช่น ภาชนะเสื่อมสภาพ วาล์วรั่ว หรือพนักงานใช้ PPE ไม่ถูกต้อง

6) Event Tree Analysis ใช้วิเคราะห์ลำดับเหตุการณ์หลังเกิดเหตุเริ่มต้น เช่น สารรั่วไหล โดยพิจารณาว่าระบบป้องกันแต่ละชั้นทำงานหรือไม่ เช่น ระบบแจ้งเตือน การตอบสนอง หรือระบบกักเก็บ ช่วยประเมินประสิทธิภาพของระบบป้องกัน

7) AHP เป็นเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจ ใช้จัดลำดับความสำคัญของปัจจัยเสี่ยง เช่น ปริมาณสาร ระบบดับเพลิง การฝึกอบรม และความพร้อมฉุกเฉิน โดยแปลงผลเปรียบเทียบเป็นค่าน้ำหนัก เหมาะกับการปรับปรุงภายใต้ทรัพยากรจำกัด

ตารางที่ 1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประเมินความปลอดภัยและความเสี่ยงในการจัดเก็บวัตถุอันตราย

อ้างอิง	ชื่อผู้แต่ง	ปี	ใจความสำคัญ
[2]	Hill and Kipp	2021	มีการรายงานว่าวิธีการประเมินอันตรายที่มีประสิทธิภาพและการสื่อสารอย่างชัดเจนช่วยเพิ่มความตระหนักด้านความปลอดภัยในบุคลากรที่ไม่ใช่ผู้เชี่ยวชาญ
[3]	Fatemi et al.	2022	มีการเปิดเผยว่าการประเมินความเสี่ยงทางเคมีอย่างเป็นระบบช่วยส่งเสริมวัฒนธรรมความปลอดภัย ลดจำนวนอุบัติเหตุ และปรับปรุงประสิทธิภาพด้านสิ่งแวดล้อม
[4]	Ta	2021	ได้มีการวิเคราะห์การนำระบบ GHS ไปใช้อย่างไม่สม่ำเสมอทั่วโลก ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการสื่อสารอันตรายด้านสิ่งแวดล้อม สุขภาพ และความปลอดภัย (EHS) อย่างสอดคล้อง รวมถึงความก้าวหน้าในความปลอดภัยทางเคมีระดับโลก
[5]	Tepparit et al.	2024	มีการระบุว่าโครงการตรวจสอบโรงงานช่วยเพิ่มความแม่นยำในการประเมินความเสี่ยง การปฏิบัติตามกฎระเบียบ และประสิทธิภาพด้านความปลอดภัยอุตสาหกรรม
[6]	Ren and Yang	2024	มีการนำเสนอการใช้เครือข่ายเบย์เซียนในการประเมินความเสี่ยงของอุบัติเหตุการขนส่งวัตถุอันตรายทางถนน ครอบคลุมช่วงก่อนระหว่าง และหลังเกิดเหตุ
[7]	Shavalieva et al.	2020	มีการประเมินความเสี่ยงด้านสิ่งแวดล้อม สุขภาพ และความปลอดภัยของการกักเก็บ CO_2 หลังการเผาไหม้โดยใช้เทคโนโลยีตัวทำละลายแบบเปลี่ยนสถานะ
[8]	Ding et al.	2021	รายงานว่าการบูรณาการการจัดการด้านสุขภาพ ความปลอดภัย และสิ่งแวดล้อมช่วยเพิ่มประสิทธิภาพขององค์กรและการปฏิบัติตามกฎระเบียบ
[9]	Yazdi et al.	2023	มีการพัฒนาของการวิเคราะห์ต้นไม้ความผิดพลาดด้านสิ่งแวดล้อม สุขภาพ และความปลอดภัย (EHS Fault Tree Analysis) พร้อมชี้ให้เห็นแนวโน้มที่สำคัญเกี่ยวกับความเสี่ยงด้านสิ่งแวดล้อม สุขภาพ และความปลอดภัย
[10]	Huang et al.		มีการวิเคราะห์อุบัติเหตุจากการขนส่งสินค้าที่เป็นอันตรายทางน้ำ โดยใช้การสกัดความรู้จากข้อความเพื่อสร้างแผนที่เครือข่ายการเกิดและพัฒนาของอุบัติเหตุ
[11]	Zhao	2025	มีการพัฒนากรอบประเมินความเสี่ยงเชิงไดนามิกสำหรับพื้นที่จัดเก็บในนิคมอุตสาหกรรมเคมี โดยบูรณาการ enhanced TOPSIS, D number theory, leaky Noisy-OR และ Dynamic Bayesian Network
[12]	Zhou et al.	2020	มีการเสนอแบบจำลองประเมินความต้องการทรัพยากรดับเพลิงสำหรับเหตุเพลิงไหม้ในพื้นที่จัดเก็บสารเคมีอันตราย โดยใช้ fuzzy comprehensive assessment และ AHP
[13]	Rahim et al.	2024	มีการประเมินวิธีการประเมินความเสี่ยงในอุตสาหกรรมเคมี โดยมุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงด้านความปลอดภัย ความมั่นคง และความยืดหยุ่น
[14]	Esmaeili et al.	2025	มีการนำเสนอแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพความปลอดภัยของคลังสินค้า/คลังจัดเก็บในร้านค้าที่มีการจัดเก็บสารเคมีโดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบ DEMATEL ผ่านการประเมินความเสี่ยงเชิงรอบด้าน
[15]	Fouzi et al.	2024	มีการศึกษาวิธีการจัดการความเสี่ยงด้านความปลอดภัยและความมั่นคงทางเคมี โดยเน้นกลยุทธ์ กรอบแนวคิด และแนวปฏิบัติที่เป็นเลิศในการลดและป้องกันอันตราย
[16]	Vaughen et al.	2020	มีการนำเสนอเครื่องมือคัดกรองการวิเคราะห์ความเสี่ยง (Risk Analysis Screening Tool) ซึ่งใช้สำหรับให้ภาพรวมในการระบุอันตรายเบื้องต้นและการประเมินความปลอดภัยของกระบวนการ
[17]	He et al.	2023	มีการศึกษาความท้าทายในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) ในอุตสาหกรรมที่มีความเสี่ยงสูง รวมถึงด้านสุขภาพและความปลอดภัย โดยใช้แนวทางเชิงการตัดสินใจเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์
[18]	Zhang et al.	2023	มีการมุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพของการจัดตั้งที่พักพิงและเส้นทางอพยพ เพื่อยกระดับความปลอดภัยในกรณีเกิดอุบัติเหตุการรั่วไหลของก๊าซภายในนิคมอุตสาหกรรมเคมี
[19]	Jung et al.	2024	มีการประเมินความเสี่ยงองค์รวมจากการสัมผัสสารเคมีอันตราย โดยเน้นการศึกษาสารโทลูอีนที่เกิดจากอุบัติเหตุทางเคมี
[20]	Artamonov et al.	2021	มีการพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อพยากรณ์กระบวนการผลิตสไตรีนและสนับสนุนการประเมินความเสี่ยงด้านความปลอดภัยอุตสาหกรรม
[21]	Mazzi	2023	มีการประเมินความเสี่ยงด้านสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัยในการผลิตพลาสติกแบบหมุนเวียนอย่างยั่งยืน พร้อมเน้น กลยุทธ์การลดความเสี่ยง

5. ความท้าทายด้านความปลอดภัย

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า ช่องว่างสำคัญประการแรกคือการขาดการประเมินความเสี่ยงเชิงรุก หลายสถานประกอบการยังมุ่งเน้นการปฏิบัติตามข้อกำหนดขั้นต่ำ มากกว่าการวิเคราะห์สถานการณ์อุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้นจริง เช่น การรั่วไหล ไฟไหม้ หรือการระเบิด การประเมินบางส่วนยังอยู่ในรูปเอกสารหรือแบบฟอร์ม และไม่ได้เชื่อมโยงกับการตรวจสอบพื้นที่จริง การฝึกอบรม หรือการปรับปรุงมาตรการควบคุมอย่างต่อเนื่อง [13], [16] อีกประเด็นหนึ่งคือการสื่อสารข้อมูลความปลอดภัยทางเคมี โดยเฉพาะ SDS ฉลาก GHS และป้ายเตือน หากข้อมูลไม่ครบถ้วน ไม่เป็นปัจจุบัน หรือผู้ปฏิบัติงานไม่สามารถเข้าใจและนำไปใช้ได้จริง ความเสี่ยงจากการจัดเก็บและการตอบสนองเหตุฉุกเฉินจะยังคงอยู่ แม้จะมีเอกสารครบถ้วนก็ตาม [2], [4]

นอกจากนี้ การบังคับใช้กฎหมายและมาตรฐานที่ไม่สม่ำเสมอยังเป็นความท้าทายสำคัญ โดยเฉพาะในกลุ่ม SMEs ที่มีข้อจำกัดด้าน

งบประมาณ บุคลากร และความรู้ทางเทคนิค ระบบประเมินที่ซับซ้อนเกินไปอาจไม่เหมาะสม จึงควรพัฒนาเครื่องมือที่เรียบง่าย ใช้งานได้จริง และยังครอบคลุมประเด็นความปลอดภัยที่จำเป็น [5], [15] ยิ่งไปกว่านั้น การขาดระบบติดตามความเสี่ยงแบบเรียลไทม์ด้วยเทคโนโลยี เช่น เซ็นเซอร์ตรวจจับไอสารไวไฟ ระบบแจ้งเตือนอัตโนมัติ และไอโอที ก็เป็นสิ่งที่สามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการป้องกันอุบัติเหตุได้ แต่ยังต้องพิจารณาต้นทุน ความน่าเชื่อถือของข้อมูล และความพร้อมของบุคลากร [18]

6. แนวทางพัฒนากรอบการประเมินความปลอดภัย

กรอบการประเมินความปลอดภัยในการจัดเก็บวัตถุอันตรายควรประกอบด้วย 5 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การระบุอันตราย การประเมินความเสี่ยง การกำหนดมาตรการควบคุม การติดตามตรวจสอบ และการปรับปรุงต่อเนื่อง [3], [5], [11], [12], [14], [15], [16], [17], [21]

1) ขั้นตอนการระบุอันตราย ควรรวบรวมข้อมูลสารเคมีทั้งหมดในพื้นที่จัดเก็บ รวมถึงคุณสมบัติอันตราย ปริมาณ ภาชนะ สถานที่จัดเก็บ และกิจกรรมที่เกี่ยวข้อง

2) ขั้นตอนการประเมินความเสี่ยง ควรใช้ระบบให้คะแนนที่พิจารณาความน่าจะเป็นและความรุนแรงของเหตุการณ์ โดยอาจเพิ่มปัจจัยด้านการสัมผัส ความถี่ของกิจกรรม และประสิทธิภาพของมาตรการควบคุม เพื่อให้การประเมินสะท้อนความเสี่ยงจริงมากขึ้น จากนั้นควรจัดลำดับความสำคัญของความเสี่ยงเพื่อกำหนดมาตรการแก้ไข

3) ขั้นตอนการควบคุมความเสี่ยง ควรใช้หลักลำดับชั้นของมาตรการควบคุม เริ่มจากการกำจัดหรือลดปริมาณสารอันตราย การทดแทนสารที่ปลอดภัยกว่า การออกแบบทางวิศวกรรม เช่น ระบบระบายอากาศและระบบกักเก็บ การควบคุมทางบริหาร เช่น ขั้นตอนปฏิบัติงาน และการฝึกอบรม และการใช้ PPE เป็นมาตรการเสริม ไม่ควรพึ่งพา PPE เป็นมาตรการหลักเพียงอย่างเดียว

4) ขั้นตอนการติดตามตรวจสอบ ควรมีการตรวจคลังเป็นรอบเวลา ตรวจสอบภาชนะ ระบบดับเพลิง ป้ายเตือน SDS ระบบระบายอากาศ และความพร้อมของอุปกรณ์ฉุกเฉิน การตรวจสอบควรมีหลักฐานบันทึกที่ชัดเจน และข้อบกพร่องต้องถูกแก้ไขภายในระยะเวลาที่กำหนด

5) ขั้นตอนการปรับปรุงต่อเนื่อง ควรนำผลการตรวจสอบ เหตุการณ์เกือบเกิดอุบัติเหตุ ข้อร้องเรียน การฝึกซ้อมฉุกเฉิน และข้อมูลจากเทคโนโลยีตรวจติดตามมาวิเคราะห์ เพื่อปรับปรุงมาตรการความปลอดภัยให้เหมาะสมกับสภาพการปฏิบัติงานที่เปลี่ยนแปลงไป

7. สรุป

การประเมินความปลอดภัยในการจัดเก็บวัตถุอันตรายเป็นกลไกสำคัญในการป้องกันอุบัติเหตุร้ายแรงในภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอุบัติเหตุที่เกี่ยวข้องกับไฟไหม้ การระเบิด การรั่วไหล และการสัมผัสสารเคมีอันตราย การทบทวนวรรณกรรมชี้ให้เห็นว่า การจัดเก็บวัตถุอันตรายอย่างปลอดภัยต้องอาศัยการบูรณาการระหว่างกฎระเบียบมาตรฐานสากล ข้อมูลสารเคมี การออกแบบทางวิศวกรรม มาตรการปฏิบัติงาน และการฝึกอบรมบุคลากร ปัจจัยสำคัญที่ควรนำมาประเมิน ได้แก่ ปริมาณสาร ระบบป้องกันและระงับอัคคีภัย กิจกรรมในระบบเปิด การจัดการคลังและอุปกรณ์ มาตรการความปลอดภัย แผนบำรุงรักษา และความพร้อมรับมือเหตุฉุกเฉิน เครื่องมือประเมิน เช่น Checklist, What-if Analysis, HAZOP, Fault Tree Analysis, FMEA, Event Tree Analysis และ AHP สามารถช่วยให้การระบุและจัดลำดับความเสี่ยงเป็นระบบมากขึ้น

อย่างไรก็ตาม ช่องว่างสำคัญยังคงเกี่ยวข้องกับด้านการประเมินเชิงรุก การสื่อสารข้อมูลความปลอดภัย การบังคับใช้กฎหมายที่สม่ำเสมอ และการใช้เทคโนโลยีติดตามความเสี่ยงแบบเรียลไทม์ ดังนั้น การพัฒนากรอบการประเมินความปลอดภัยที่เรียบง่าย ครอบคลุม และเหมาะสมกับบริบทไทย จะช่วยยกระดับความปลอดภัยของสถานประกอบการ ลดความสูญเสีย และสนับสนุนการจัดการวัตถุอันตรายอย่างยั่งยืน

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.พระนคร ที่ให้ความอนุเคราะห์ทรัพยากรในการศึกษานี้

เอกสารอ้างอิง

[1] รายงานสุขภาพคนไทย 2565 โดย สำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ (สสส.) บันทึกเหตุการณ์ระเบิดและเพลิงไหม้โรงงาน บริษัท หมิงตี้เคมีคอล จำกัด (in Thai).

[2] M. S. Hill and J. D. Kipp, “Laboratory Chemical Hazard Assessment and Communication for Nonexperts,” Journal of Chemical Health & Safety, vol. 28, no. 2, pp. 115–124, Mar.–Apr. 2021.

[3] F. Fatemi, A. Dehdashti, and M. Jannati, "Implementation of chemical health, safety, and environmental risk assessment in laboratories: A case-series study," Frontiers in Public Health, vol. 10, p. 898826, 2022.

[4] G. C. Ta, “GHS implementation to strengthen global chemical hazard communication: Will we ever get there?,” ACS Chemical Health & Safety, vol. 28, no. 3, pp. 153–158, 2021.

[5] B. Tepparit, N. Am-Eam, K. Warunsin, W. Kongsong, and B. Harnphanich, “Application of Inspection Programs for Risk Assessment by Factory Control Laws,” International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology, vol. 14, no. 5, pp. 1673-1682, Oct. 2024.

[6] C. Ren and M. Yang, "Risk assessment of hazmat road transportation accidents before, during, and after the accident using Bayesian network," Process Saf. Environ. Prot., vol. 190, pp. 760–779, Aug. 2024.

[7] G. Shavalieva, P. Kazepidis, A. I. Papadopoulos, P. Seferlis, and A. M. Papalambros, "Environmental, health and safety assessment of post-combustion CO_2 capture processes with phase-change solvents," Sustainable Prod. Consum., vol. 25, pp. 60–76, Jul. 2021.

[8] R. Ding, J. Xu, and Y. Sui, "An Integrated Management System for Quality, Health and Safety, and Environment: A Case Study," J. Electr. Electron. Eng., vol. 9, no. 5, pp. 170–179, Oct. 2021.

[9] M. Yazdi, J. Mohammadpour, H. Li, H. Z. Huang, E. Zarei, R. G. Pirbalouti, and S. Adumene, "Fault tree analysis improvements: A bibliometric analysis and literature review," Quality Reliab. Eng. Int., vol. 39, no. 5, pp. 1639–1659, Jul. 2023.

[10] X. Huang, Y. Wen, F. Zhang, H. Li, Z. Sui, and X. Cheng, "Accident analysis of waterway dangerous goods transport: Building an evolution network with text knowledge extraction," Ocean Eng., vol. 318, p. 120176, 2025.

[11] J. Zhao, "Dynamic risk assessment framework for chemical industrial park storage facilities: Integration of enhanced TOPSIS and Bayesian networks," Process Safety and Environmental Protection, vol. 285, p. 107535, 2025.

[12] Z. Zhou, H. Xu, X. Li, R. Cui, X. Liu, X. Yuan, and H. Zhao, "An assessment model of fire resources demand for storage of hazardous chemicals," Process Safety Progress, vol. 39, no. 3, p. e12135, 2020.

[13] M. S. B. A. Rahim, G. Reniers, M. Yang, and S. Bajpai, "Risk assessment methods for process safety, process security and resilience in the chemical process industry: A thorough literature review," Journal of Loss Prevention in the Process Industries, vol. 88, p. 105274, 2024.

[14] S. V. Esmaeili, A. Alboghobeish, H. Yazdani, A. G. Koozekonan, and M. Pouyakian, "Optimizing in-store warehouse safety: A DEMATEL approach to comprehensive risk assessment," PLoS ONE, vol. 20, no. 2, p. e0317787, 2025.

[15] N. F. R. Fouzi, H. A. Aziz, and N. Yaakub, "Systematic review of chemical safety and chemical security risk management approach," Process Safety and Environmental Protection, vol. 183, pp. 676–686, 2024.

[16] B. K. Vaughen, D. A. Hurban, K. First, and A. Ness, "The Risk Analysis Screening Tool: Part I, overview," Process Safety Progress, vol. 39, no. 2, p. e12142, Mar. 2020.

[17] Y. He, J. He, and N. Wen, "The challenges of IoT-based applications in high-risk environments, health and safety industries in the Industry 4.0 era using decision-making approach," J. Innov. Knowl., vol. 8, no. 2, p. 100347, 2023.

[18] D. Zhang et al., "Study on optimization of shelter locations and evacuation routes of gas leakage accidents in chemical industrial park," Process Saf. Environ. Prot., vol. 177, pp. 556–567, 2023.

[19] Jung, J-Y., Park, S-H., Moon, J-E., Yoon, J-H., Yoon, S-W. & Lee, C-M., 2024. Aggregate risk assessment for multi-route exposure to hazardous chemicals caused by chemical accidents, with a focus on toluene. Asian Journal of Atmospheric Environment, 18(1), p.17.

[20] A. A. Artamonov, L. M. Bogdanova, S. Y. Nagibin, D. I. Loskutov, and A. S. Chemakin, "Mathematical model of chemical process prediction for industrial safety risk assessment," Procedia Comput. Sci., vol. 190, pp. 107–114, 2021.

[21] A. Mazzi, "Environmental and safety risk assessment for sustainable circular production: Case study in plastic processing for fashion products," Heliyon, vol. 9, no. 11, 2023.



เฮงเฮง จารุนงคราญ จบการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเคมี มหาลัยเทคโนโลยีมหานคร กำลังศึกษาในระดับปริญญาเอกสาขาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร มีประสบการณ์การทำงานเกี่ยวกับวัตถุอันตรายในภาคเอกชน 8 ปี ปัจจุบันดำรงตำแหน่งวิศวกรชำนาญการ กองบริหารจัดการวัตถุอันตราย กรมโรงงานอุตสาหกรรม งานวิจัยที่สนใจ ได้แก่ การประเมินความเสี่ยงของวัตถุอันตราย



เทอดพงษ์ แดงสี จบการศึกษาระดับปริญญาเอกสาขาเทคโนโลยีสารสนเทศ (นานาชาติ) มจพ. มีประสบการณ์การทำงานเกี่ยวกับระบบสื่อสารโทรคมนาคมในภาคเอกชน 19 ปี ปัจจุบันเป็นผู้ช่วยศาสตราจารย์ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.พระนคร งานวิจัยที่สนใจ ได้แก่ เทคโนโลยีสารสนเทศ

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบว่าด้วยการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ในบริบทการศึกษาและพัฒนาเมือง

A Systematic Review of Artificial Intelligence Applications in Urban Studies and Development

ปรีชาพงศ์ อากาศโสภา[1*] และ เทอดพงษ์ แดงสี[2]

[1*, 2]สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถ.ประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

[1]บริษัท วันดีทู กรุ๊ป จำกัด

3 อาคารพร้อมพันธุ์ 3 ชั้นที่ 3 ห้องเลขที่ 301-302 ซอยลาดพร้าว 3 ถ.ลาดพร้าว แขวงจอมพล เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

prechapong-a@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ในบริบทการศึกษาเมือง การวางผังเมือง และการพัฒนาเมือง โดยมุ่งเน้น Machine Learning, Deep Learning, Large Language Models และ Generative AI การศึกษาดำเนินการตามกรอบ PRISMA 2020 โดยสืบค้นบทความจากฐานข้อมูล Scopus, Web of Science, IEEE Xplore และ ScienceDirect จากเอกสารเบื้องต้น 312 บทความ คัดเลือกเหลือ 16 บทความสำหรับการวิเคราะห์เชิงประเด็น ผลการศึกษาพบ 2 ประเด็นหลัก ได้แก่ (1) การประยุกต์ใช้ AI เพื่อการวางผังเมืองและการตัดสินใจเชิงระบบเมือง และ (2) การใช้ LLMs และ Generative AI เพื่อสนับสนุนกระบวนการวางผังเมืองและการสื่อสารเชิงนโยบาย ผลการสังเคราะห์สะท้อนว่า AI กำลังเปลี่ยนบทบาทจากเครื่องมือวิเคราะห์ข้อมูลไปสู่โครงสร้างสนับสนุนการตัดสินใจเชิงนโยบาย อย่างไรก็ตาม ยังพบช่องว่างด้านการบูรณาการ AI กับระบบประเมินเมืองน่าอยู่และตัวชี้วัดด้านสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นทิศทางสำคัญสำหรับการวิจัยในอนาคต

คำสำคัญ : ปัญญาประดิษฐ์; การพัฒนาเมือง; การวางผังเมือง; เมืองน่าอยู่; แบบจำลองภาษาขนาดใหญ่

Abstract

This study aims to systematically review the applications of Artificial Intelligence (AI) in urban studies, urban planning, and urban development, with a focus on Machine Learning, Deep Learning, Large Language Models (LLMs), and Generative AI. The review followed the PRISMA 2020 framework using articles retrieved from Scopus, Web of Science, IEEE Xplore, and ScienceDirect. From 312 initial records, 16 articles were selected for thematic analysis. The findings reveal two major themes: (1) AI applications for urban planning and urban system decision-making, and (2) the use of LLMs and Generative AI to support planning processes and policy communication. The synthesis indicates that AI is evolving from a data analysis tool into a policy-oriented decision-support infrastructure. However, important research gaps remain in integrating AI with urban livability assessment and environmental indicators, representing important directions for future research.

Keywords: Artificial Intelligence; Urban Development; Urban Planning; Urban Livability; Large Language Models

1. บทนำ

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา การพัฒนาเมืองกำลังเผชิญกับความท้าทายที่มีความซับซ้อนมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งในมิติของการขยายตัวของประชากรเมือง การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ความแออัดของระบบคมนาคม การใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ ตลอดจนความคาดหวังของประชาชนต่อคุณภาพชีวิตและความน่าอยู่อย่างยั่งยืน ภายใต้บริบทดังกล่าว กระบวนการศึกษาเมือง การวิเคราะห์ระบบเมือง และการวางผังเมืองจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลจำนวนมหาศาลจากหลายแหล่ง ทั้งข้อมูลเชิงพื้นที่ ข้อมูลสิ่งแวดล้อม ข้อมูลเศรษฐกิจและสังคม รวมถึงข้อมูลจากระบบดิจิทัลแบบเรียลไทม์ ซึ่งทำให้แนวทางการวิเคราะห์แบบดั้งเดิมอาจไม่เพียงพอต่อการรองรับความซับซ้อนของระบบเมืองร่วมสมัยอีกต่อไป ในบริบทดังกล่าวนี้ เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) ได้เข้ามามีบทบาทอย่างมีนัยสำคัญต่อการพัฒนาองค์ความรู้ด้านเมืองและการสนับสนุนกระบวนการตัดสินใจเชิงนโยบาย โดยเฉพาะเทคโนโลยีในกลุ่ม Machine Learning (ML) และ Deep Learning (DL) ซึ่งถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลเมืองเชิงปริมาณ การจำแนกรูปแบบเชิงพื้นที่ การพยากรณ์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของเมือง และการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบโครงสร้างพื้นฐาน ในขณะที่เทคโนโลยีร่วมสมัยอย่าง Large Language Models (LLMs) เช่น ChatGPT และ Gemini ตลอดจน Generative AI ได้เริ่มขยายบทบาทจากการประมวลผลภาษาและการสร้างเนื้อหา ไปสู่การสังเคราะห์องค์ความรู้ การตีความเอกสารเชิงนโยบาย การตอบข้อซักถามของภาคประชาชน และการสร้างทางเลือกเชิงผังเมืองในลักษณะที่มีปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้งานมากขึ้น

งานวิจัยในช่วงประมาณ 3 ปีหลังสะท้อนให้เห็นอย่างชัดเจนว่า AI มิได้ทำหน้าที่เป็นเพียงเครื่องมือเชิงเทคนิคสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลอีกต่อไป หากแต่กำลังก้าวสู่การเป็นโครงสร้างสนับสนุนการตัดสินใจ (Decision-support infrastructure) ที่สามารถเชื่อมโยงข้อมูลหลายมิติ ความรู้เชิงโดเมน และกระบวนการกำหนดนโยบายเข้าด้วยกัน อย่างไรก็ตาม แม้งานวิจัยด้าน AI กับการศึกษาเมืองจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ยังพบว่าวรรณกรรมที่มีอยู่กระจัดกระจายอยู่ในหลายสาขา ทั้งด้าน Smart City, Urban Computing, Urban Analytics, Urban Sensing

และ Urban Planning อีกทั้งยังมีความแตกต่างกันในด้านประเภทของโมเดล วิธีการประยุกต์ใช้ ข้อจำกัดเชิงเทคนิค และระดับการนำผลลัพธ์ไปใช้ในทางปฏิบัติ ส่งผลให้ยังขาดภาพรวมเชิงสังเคราะห์ที่สามารถอธิบายพัฒนาการ แนวโน้ม และช่องว่างองค์ความรู้ของการประยุกต์ใช้ AI ในบริบทการศึกษาและพัฒนาเมืองได้อย่างเป็นระบบ

นอกจากนี้ งานวิจัยจำนวนมากยังมุ่งเน้นการประยุกต์ใช้ AI ในการวิเคราะห์ปัญหาเฉพาะด้าน เช่น คมนาคม พลังงาน สิ่งแวดล้อม หรือการจัดการโครงสร้างพื้นฐาน ขณะที่งานที่เชื่อมโยง AI เข้ากับกระบวนการวางผังเมือง การสนับสนุนการตัดสินใจเชิงนโยบาย และการประเมินความน่าอยู่ของเมืองในเชิงบูรณาการยังมีจำนวนจำกัด โดยเฉพาะในบริบทของประเทศกำลังพัฒนาและเมืองในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ซึ่งยังเผชิญข้อจำกัดด้านข้อมูล โครงสร้างพื้นฐานดิจิทัล และความแตกต่างของบริบทการบริหารจัดการเมือง ช่องว่างดังกล่าวสะท้อนถึงความจำเป็นในการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ เพื่อสังเคราะห์องค์ความรู้ที่มีอยู่ เปรียบเทียบบทบาทของเทคโนโลยี AI แต่ละกลุ่ม และระบุประเด็นที่ควรได้รับการพัฒนาต่อยอดในอนาคต ดังนั้น บทความนี้จึงมุ่งดำเนินการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ แนวทาง PRISMA 2020 [1] เพื่อศึกษาพัฒนาการ แนวโน้ม และช่องว่างองค์ความรู้เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ โดยเฉพาะ Machine Learning, Deep Learning, Large Language Models และ Generative AI ในบริบทของการศึกษาเมือง การวิเคราะห์ระบบเมือง การวางผังเมือง และการพัฒนาเมืองน่าอยู่อย่างยั่งยืน พร้อมทั้งสังเคราะห์ทิศทางการวิจัยที่สามารถต่อยอดไปสู่การพัฒนากรอบการตัดสินใจและตัวชี้วัดเมืองอัจฉริยะในอนาคต

2. ระเบียบวิธีวิจัย

กระบวนการคัดเลือกบทความในการศึกษานี้ดำเนินการอย่างเคร่งครัดตามแนวทาง PRISMA 2020 [1] ซึ่งถือเป็นมาตรฐานสากลที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางสำหรับการรายงานการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ กรอบดังกล่าวรับรองว่ากระบวนการสืบค้น คัดกรอง และคัดเลือกวรรณกรรมดำเนินไปอย่างเป็นระบบ โปร่งใส และสามารถตรวจสอบได้ในทุกขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1 ระยะที่ 1: การสืบค้นเอกสาร

การสืบค้นเอกสารดำเนินการในช่วงไตรมาสที่ 1 ของปี พ.ศ. 2569 โดยผ่านฐานข้อมูลวิชาการชั้นนำระดับนานาชาติ ได้แก่ Scopus, Web of Science, IEEE Xplore และ ScienceDirect โดยใช้กลุ่มคำค้นที่ครอบคลุมทั้งมิติเทคโนโลยี AI และมิติบริบทเมือง ซึ่งประกอบด้วย 1) กลุ่มคำค้นด้านเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ เช่น Artificial Intelligence, Machine Learning, Deep Learning, Large Language Model, LLM และ Generative AI เป็นต้น และ 2) กลุ่มคำค้นด้านบริบทเมือง เช่น Urban, city, Urban planning, Urban design, Livability, Smart city และ Urban sustainability เป็นต้น เน้นการสืบค้นบทความที่ตีพิมพ์เผยแพร่ในช่วงปี ค.ศ. 2023-2025

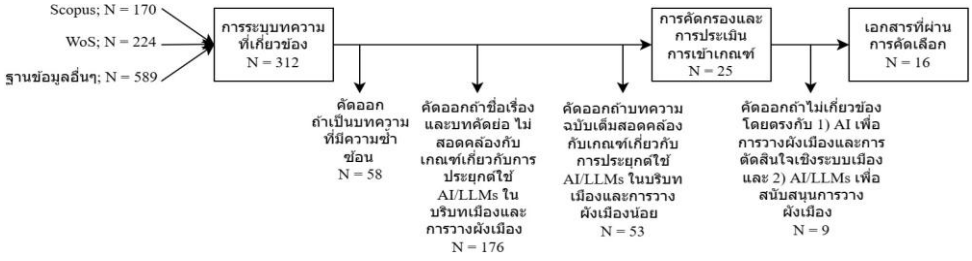
กลยุทธ์การสืบค้นถูกออกแบบให้ครอบคลุมการรวมกันของคำค้นด้านเทคโนโลยีและด้านเมืองผ่านตรรกะบูลีน (Boolean logic) เพื่อเพิ่มความครอบคลุมของผลการสืบค้นและลดโอกาสที่จะพลาดบทความที่เกี่ยวข้อง ผลการสืบค้นเบื้องต้นรวบรวมได้เอกสารทั้งสิ้น 312 บทความ ซึ่งนำเข้าสู่กระบวนการคัดกรองในระยะถัดไป

2.2 ระยะที่ 2: การคัดกรองบทความ

ภายหลังการรวบรวมเอกสาร ผู้วิจัยดำเนินการตรวจสอบและคัดแยกบทความที่ซ้ำกัน (Deduplication) โดยพิจารณาจากชื่อเรื่อง ผู้แต่ง และปีพิมพ์เป็นเกณฑ์หลัก พบบทความที่ซ้ำกันจำนวน 58 บทความ ซึ่งถูกคัดออก เหลือบทความที่ไม่ซ้ำจำนวน 254 บทความ จากนั้นดำเนินการคัดกรองในระดับที่สองโดยพิจารณาจากชื่อเรื่องและบทคัดย่อ โดยใช้เกณฑ์ความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์การวิจัย กล่าวคือ การประยุกต์ใช้ AI, LLMs หรือ Generative AI ในบริบทเมืองและการวางผังเมือง บทความที่ไม่ผ่านเกณฑ์นี้จำนวน 176 บทความถูกคัดออก คงเหลือบทความสำหรับการประเมินฉบับเต็มจำนวน 78 บทความ

2.3 ระยะที่ 3: การประเมินคุณสมบัติ

ผู้วิจัยดำเนินการอ่านและประเมินบทความฉบับเต็มจำนวน 78 บทความ โดยใช้เกณฑ์การคัดเข้าและคัดออกที่กำหนดไว้ล่วงหน้าอย่างชัดเจน เพื่อประเมินความเหมาะสมของเนื้อหาและคุณภาพของแหล่งตีพิมพ์ พบว่ามีบทความที่ไม่ผ่านเกณฑ์จำนวน 53 บทความ โดยสาเหตุหลักของการคัดออก เช่น ไม่มีความเกี่ยวข้องกับบริบทเมืองโดยตรง ไม่ได้นำปัญญาประดิษฐ์มาใช้เป็นระเบียบวิธีวิจัย ไม่สามารถเข้าถึงเนื้อหาฉบับเต็ม และตีพิมพ์แบบ Preprint เป็นต้น จึงคัดออกเพิ่มเติมอีก 9 บทความ ทำให้ได้บทความก่อนขั้นตอนสุดท้ายจำนวน 25 บทความ แล้วจึงพิจารณาในขั้นสุดท้ายโดยคัดเฉพาะบทความที่เกี่ยวข้องกับการวางผังเมืองโดยตรงเท่านั้น



รูปที่ 1 การประยุกต์ใช้กระบวนการภายใต้กรอบแนวคิด PRISMA ในการศึกษานี้

2.4 ระยะที่ 4: การคัดเลือกบทความขั้นสุดท้าย

ในขั้นสุดท้ายพบว่า คงเหลือบทความจำนวน 16 บทความ ซึ่งนำมาใช้เป็นฐานข้อมูลหลักสำหรับการวิเคราะห์เชิงประเด็น (Thematic analysis) และการสังเคราะห์องค์ความรู้ในขั้นตอนถัดไป บทความที่ได้รับการคัดเลือกล้วนมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับประเด็นวิจัยซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการวางผังเมือง การตัดสินใจเชิงผังเมือง หรือการพัฒนาเมืองในเชิงนโยบาย โดยบทความเหล่านี้ล้วนได้รับการตีพิมพ์ในวารสารหรือเวทีประชุมวิชาการที่ผ่านการประเมินโดยผู้ทรงคุณวุฒิ และสามารถยืนยันระดับคุณภาพแหล่งตีพิมพ์ โดยบทความที่ผ่านเกณฑ์สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1 [2-17]

3. ผลการวิเคราะห์เชิงประเด็น

จากกระบวนการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบภายใต้เกณฑ์คุณภาพที่เข้มงวด ชุดข้อมูลขั้นสุดท้ายประกอบด้วยบทความจำนวน 16 บทความ ซึ่งถือเป็นชุดวรรณกรรมที่ผ่านกระบวนการคัดกรองตามเกณฑ์ที่ชัดเจนและตรวจสอบได้ จึงมีความเหมาะสมสำหรับการใช้เป็นฐานข้อมูลหลักในการวิเคราะห์เชิงประเด็นและการสังเคราะห์องค์ความรู้ (มีการคัดออกทั้งบทความที่ตีพิมพ์ในรูปแบบ Preprint และบทความที่ไม่สามารถยืนยันระดับ Quartile ด้วย) ชุดข้อมูลนี้จึงเหมาะสมสำหรับการใช้เป็นฐานข้อมูลหลักในการวิเคราะห์เชิงประเด็นและการสังเคราะห์องค์ความรู้

การวิเคราะห์เชิงประเด็นระบุกลุ่มประเด็นหลักได้ 2 ประเด็นหลัก ได้แก่ (1) AI กับการวางผังเมืองและการตัดสินใจเชิงระบบเมือง 7 บทความ (2) LLMs และ Generative AI กับกระบวนการวางผังเมือง 9 บทความ ภาพรวมดังกล่าวสะท้อนอย่างชัดเจนว่าองค์ความรู้ร่วมสมัยกำลังเคลื่อนตัวจากการใช้ AI เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลเมืองไปสู่การใช้ AI และ LLMs เพื่อสนับสนุนการวางผัง การตัดสินใจเชิงนโยบาย การสื่อสาร และการตีความข้อมูลเมืองในลักษณะที่ซับซ้อนและบูรณาการมากยิ่งขึ้น

3.1 การวางผังเมืองและการตัดสินใจเชิงระบบเมือง

ประเด็นนี้ประกอบด้วยบทความจำนวน 7 บทความ ซึ่งทำหน้าที่เป็นรากฐานทางทฤษฎีและระเบียบวิธีสำหรับการประยุกต์ใช้ AI ในการวางผังเมือง วรรณกรรมในกลุ่มนี้ครอบคลุมทั้ง Systematic review, Thematic analysis, Conceptual framework, Survey และการทบทวนการประยุกต์ใช้ Machine learning ในการตัดสินใจด้านเมือง โดยมีแก่นร่วมสำคัญคือการมองว่า AI เป็นเครื่องมือเพิ่มขีดความสามารถในการวิเคราะห์ระบบเมืองที่มีความซับซ้อนสูงและมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรจำนวนมาก

ข้อค้นพบสำคัญในประเด็นนี้แสดงให้เห็นว่า AI ถูกนำมาใช้เพื่อทำความเข้าใจเมืองในหลากหลายมิติ ทั้งการสังเคราะห์องค์ความรู้เกี่ยวกับ urban planning และ smart development การจำแนกบทบาทของ AI ในแต่ละระยะของกระบวนการวางผัง การพัฒนากรอบแนวคิดใหม่สำหรับการวางผังเมืองในอนาคต และการประยุกต์ใช้ Machine learning เพื่อสนับสนุน Urban decision-making ในระดับนโยบายและการบริหารจัดการเมือง วรรณกรรมในกลุ่มนี้ยืนยันตรงกันว่า AI มิได้เป็นเพียงเครื่องมือเชิงเทคนิค หากแต่กำลังปรับเปลี่ยนกระบวนทัศน์ทางวิชาการในการวิเคราะห์ ออกแบบ และกำหนดข้อเสนอเชิงผังเมือง

อย่างไรก็ดี จุดอ่อนประการสำคัญของวรรณกรรมในกลุ่มนี้คือ แม้จะมีการกล่าวถึงความยั่งยืน คุณภาพชีวิต และ Smart city ค่อนข้างมาก แต่ยังมีงานจำนวนน้อยที่ยกระดับตัวแปรด้านสิ่งแวดล้อมและสุขภาพ โดยเฉพาะคุณภาพอากาศ ให้เป็นองค์ประกอบแกนกลางของกรอบการประเมินเมือง ซึ่งถือเป็นช่องว่างองค์ความรู้ที่มีนัยสำคัญต่อการวิจัยเชิงวิทยานิพนธ์ในลำดับถัดไป

3.2 LLMs และ Generative AI กับการสนับสนุนกระบวนการวางผังเมือง

ประเด็นนี้เป็นประกอบด้วยบทความจำนวน 9 บทความ สะท้อนให้เห็นอย่างชัดเจนว่า LLMs และ Generative AI ได้ก้าวขึ้นมาเป็นแนวหน้าของการศึกษาด้านผังเมืองร่วมสมัย วรรณกรรมในกลุ่มนี้ครอบคลุมบทความหลากหลายประเภท โดยข้อค้นพบที่โดดเด่นที่สุดในประเด็นนี้คือ LLMs กำลังขยายบทบาทจากเครื่องมือสร้างและประมวลผลข้อความไปสู่การเป็น Planning support infrastructure กล่าวคือสามารถสรุปเนื้อหาเอกสารนโยบาย ตอบข้อซักถามของภาคประชาชน แปลงข้อมูลเชิงเทคนิคให้อยู่ในรูปแบบที่เข้าถึงได้ง่าย สร้างสรรค์ทางเลือกเชิงนโยบาย และประมวลผลองค์ความรู้จากเอกสารจำนวนมหาศาลเพื่อสนับสนุนกระบวนการวางผังเมืองในลักษณะที่ครอบคลุมและรอบด้าน

วรรณกรรมในกลุ่มนี้ยังสรุปตรงกันว่า LLMs ไม่ควรถูกนำมาใช้ในฐานะระบบตัดสินใจอัตโนมัติที่ทดแทนมนุษย์ หากแต่ควรดำเนินการในรูปแบบ human-in-the-loop หรือ expert-supervised AI เพื่อรักษาความรับผิดชอบทางวิชาชีพและมิติจริยธรรมในกระบวนการวางผังเมือง นอกจากนี้ การบูรณาการ LLMs เข้ากับ Urban computing, Sensing, Explainability และการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญสะท้อนว่าอนาคตของ AI ในงานผังเมืองจะพัฒนาไปสู่ระบบสนับสนุนการตัดสินใจที่ผสานโมเดลภาษา ความรู้เชิงโดเมน และกลไกการกำกับโดยผู้เชี่ยวชาญเข้าด้วยกันอย่างบูรณาการ

นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบตามกลุ่มเทคโนโลยี พบว่า Machine Learning มักถูกใช้เพื่อการจำแนก การพยากรณ์ และการสนับสนุนการตัดสินใจเชิงปริมาณในระบบเมือง ขณะที่ Deep Learning มีศักยภาพในการประมวลผลข้อมูลเชิงพื้นที่ ภาพถ่ายเมือง และข้อมูลหลายมิติที่มีความซับซ้อนสูง ส่วน LLMs มีบทบาทเด่นในการสรุปเอกสารนโยบาย การตอบข้อซักถาม การแปลผลข้อมูลเชิงเทคนิค และการสนับสนุนการสื่อสารระหว่างผู้เชี่ยวชาญกับประชาชน สำหรับ Generative AI มีศักยภาพในการสร้างทางเลือกเชิงผังเมือง การจำลองภาพอนาคตของเมือง และการสนับสนุนการออกแบบเชิงนโยบาย อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีแต่ละกลุ่มยังมีข้อจำกัดแตกต่างกัน ได้แก่ ปัญหาคุณภาพข้อมูลและอคติของแบบจำลองใน ML/DL ปัญหา hallucination และความรับผิดชอบเชิงวิชาชีพใน LLMs รวมถึงปัญหาการประเมินความถูกต้องและความเหมาะสมของผลลัพธ์ใน Generative AI

4. การสังเคราะห์ภาพรวมและการระบุช่องว่างงานวิจัย

4.1 การสังเคราะห์ภาพรวมจากชุดวรรณกรรมหลัก

เมื่อพิจารณาจาก 16 บทความที่ผ่านการคัดกรองอย่างเข้มงวด สามารถสังเคราะห์ข้อสรุปสำคัญได้ดังนี้

1) องค์ความรู้ด้าน AI กับเมืองกำลังเปลี่ยนผ่านจากการเน้นการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพรรณนา ไปสู่การสนับสนุนการตัดสินใจเชิงกำหนดนโยบายอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในบริบทการวางผังเมืองและการบริหารจัดการระบบเมืองที่มีความซับซ้อนสูง

2) LLMs และ Generative AI ได้กลายเป็นแกนหลักของการพัฒนางานวิจัยใหม่ในสาขานี้ โดยบทบาทสำคัญมิได้จำกัดเพียงการสร้างข้อความ แต่ขยายไปถึงการสรุปองค์ความรู้ การตอบข้อซักถามเชิงนโยบาย การสร้างทางเลือก และการสนับสนุนการสื่อสารระหว่างผู้เชี่ยวชาญกับภาคประชาสังคม

3) วรรณกรรมที่ผ่านการคัดกรองสะท้อนให้เห็นอย่างชัดเจนว่า กระบวนทัศน์ด้านการวางผังเมืองกำลังเคลื่อนตัวจากแนวทางที่ผู้เชี่ยวชาญเป็นศูนย์กลาง (Expert-centric) ไปสู่แนวทางที่บูรณาการระหว่างผู้เชี่ยวชาญ ภาคประชาชน และระบบ AI เข้าด้วยกัน โดยเน้นแนวคิด Human-in-the-loop และการกำกับดูแลโดยผู้เชี่ยวชาญเชิงโดเมน

ตารางที่ 1 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ในบริบทการศึกษาและพัฒนาเมือง

อ้างอิง	ผู้แต่ง	ปี	ประเด็นข้อค้นพบ
[2]	Son et al.	2023	สรุปว่างานด้าน Algorithmic urban planning เติบโตอย่างรวดเร็ว AI ช่วยวิเคราะห์ข้อมูลเมืองเชิงปริมาณขนาดใหญ่ สนับสนุนการวางแผนเชิงหลักฐาน และเชื่อมโยงแนวคิด smart city กับความยั่งยืนในเชิงปฏิบัติ
[3]	Sanchez et al.	2024	พบว่างานวิจัย AI ในการวางผังเมืองกระจุกตัวในหัวข้อการวิเคราะห์เชิงพื้นที่ การตัดสินใจเชิงนโยบาย และ Smart city พร้อมระบุช่องว่างด้านจริยธรรม การกำกับดูแล และความเป็นไปได้เชิงประยุกต์
[4]	Fistola & La Rocca	2025	เสนอว่า AI ควรถูกบูรณาการเข้าสู่กระบวนการวางผังเมืองทุกระยะ ตั้งแต่การวินิจฉัยปัญหา การสร้างทางเลือก จนถึงการประเมินผลลัพธ์ เพื่อยกระดับศักยภาพในการจินตนาการเมืองอนาคต
[5]	Othengrafen et al.	2025	ชี้ว่า AI สามารถสนับสนุนทุกระยะของการวางผังเมือง อย่างไรก็ตาม การนำไปใช้จริงยังต้องอาศัยกรอบสถาบันกฎระเบียบที่เหมาะสม และการพัฒนาสมรรถนะของผู้ปฏิบัติงาน
[6]	Zheng et al.	2024	สรุปว่า Machine learning มีบทบาทโดดเด่นในการทำนาย การเพิ่มประสิทธิภาพ และการสนับสนุนการตัดสินใจเชิงนโยบายเมือง แต่ยังเผชิญความท้าทายด้านคุณภาพข้อมูล ความเป็นธรรม และความสามารถอธิบายผล
[7]	Wang & Biljecki	2022	พบว่า Unsupervised learning ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการจำแนกรูปแบบเมืองและค้นหากลุ่มเชิงพื้นที่ที่ซ่อนอยู่ แต่ยังขาดแนวปฏิบัติมาตรฐานสำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์
[8]	Chen et al.	2025	วิเคราะห์ขอบเขตการประยุกต์ใช้ AI ในการตัดสินใจเชิงเมือง พร้อมย้ำความสำคัญของการแปลผลเชิงนโยบายและการสร้างกลไกมีส่วนร่วมของผู้มีส่วนได้เสียในกระบวนการ
[9]	Zheng et al.	2025	บทความเชิงมุมมองเสนอว่า LLMs มีศักยภาพสูงในการจัดการความซับซ้อนของการวางผังเมือง การสังเคราะห์ข้อมูลหลายมิติ และการออกแบบเมือง แต่ต้องดำเนินการคู่ขนานกับวิจารณญาณของผู้เชี่ยวชาญ
[10]	Liu et al.	2025	สรุปว่า LLMs เริ่มมีบทบาทชัดเจนในการวางผังเมืองทั้งด้านการสรุปองค์ความรู้ การสนับสนุนการตัดสินใจ และการสื่อสารเชิงนโยบาย พร้อมเสนอกรอบแนวคิดสำหรับทิศทางการวิจัยอนาคต
[11]	Pan et al.	2025	พบว่า LLMs กำลังเปลี่ยนบทบาทจากเครื่องมือช่วยงานไปสู่ผู้ช่วยเชิงหุ้นส่วน โดยช่วยสังเคราะห์ข้อมูล สร้างทางเลือกเชิงนโยบาย และยกระดับการสื่อสารเชิงผังเมืองในทุกระดับ
[12]	Jiang et al.	2025	ชี้ว่า Generative AI สามารถเสริมประสิทธิภาพ planning support systems ได้ทั้งด้านการสำรวจทางเลือก การสื่อสารกับผู้มีส่วนได้เสีย และการสร้างองค์ความรู้เชิงนโยบายใหม่
[13]	Li et al.	2025	สรุปว่า LLMs เปิดขอบฟ้าใหม่ให้ Urban computing โดยยกระดับความสามารถด้านการทำความเข้าใจบริบท การให้เหตุผลเชิงตรรกะ และการสื่อสารผลลัพธ์ข้ามหลายโดเมนเมือง
[14]	Hou et al.	2025	ชี้ว่า LLMs มีศักยภาพสำคัญต่อ Urban sensing ในการตีความข้อมูลเมือง ทำความเข้าใจกลไกการเปลี่ยนแปลงเมือง และพัฒนาเครื่องมือ Sensing ที่ชาญฉลาดยิ่งขึ้น
[15]	Cao et al.	2025	พบว่า ChatGPT-4o สามารถสร้างภาพจินตนาการเมืองอนาคตได้ อย่างไรก็ตาม คุณภาพของผลลัพธ์ยังต้องอาศัยการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญเพื่อสะท้อนคุณค่าด้านความน่าอยู่และมาตรฐานการออกแบบ
[16]	Hollander et al.	2025	ผลการศึกษาแสดงว่า Chatbot ช่วยตอบข้อซักถามสาธารณะได้รวดเร็ว แต่ระดับความลึก ความถูกต้องเชิงวิชาชีพ และความละเอียดอ่อนเชิงบริบทยังด้อยกว่าผู้เชี่ยวชาญผังเมืองในหลายมิติ
[17]	Tong & Li	2024	ชี้ว่า Explainable AI ช่วยเพิ่มความโปร่งใส ความน่าเชื่อถือ และความสามารถในการตรวจสอบแบบจำลอง AI ในงานผังเมือง ซึ่งเป็นเงื่อนไขจำเป็นสำหรับการนำผลลัพธ์ไปใช้ในทางปฏิบัติ

4) ประเด็น Explainability และความโปร่งใสของโมเดล AI ได้รับความสนใจมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในช่วงปี 2024-2025 สะท้อนให้เห็นว่าชุมชนวิชาการตระหนักถึงความจำเป็นในการพัฒนาระบบ AI ที่ตรวจสอบได้ ยุติธรรม และสามารถนำผลลัพธ์ไปใช้ในการตัดสินใจเชิงนโยบายสาธารณะได้อย่างมีความรับผิดชอบ

5) งานวิจัยที่ทบทวนยืนยันร่วมกันว่า ความสำเร็จของการประยุกต์ใช้ AI ในงานผังเมืองมิได้ขึ้นอยู่กับสมรรถนะของโมเดลเพียงอย่างเดียว หากแต่ขึ้นอยู่กับความพร้อมของข้อมูล โครงสร้างสถาบัน และศักยภาพของผู้ใช้งานในการบูรณาการ AI เข้ากับกระบวนการวางผัง

4.2 การระบุช่องว่างองค์ความรู้และทิศทางการวิจัย

จากการวิเคราะห์เชิงประเด็นของบทความ 16 บทความ สามารถระบุช่องว่างองค์ความรู้ที่มีนัยสำคัญทางวิชาการได้ดังนี้

1) วรรณกรรมส่วนใหญ่ยังดำเนินการศึกษาแบบแยกส่วนเป็นรายมิติ เช่น ผังเมือง คมนาคม หรือสิ่งแวดล้อม โดยขาดการพัฒนากรอบบูรณาการที่เชื่อมทุกมิติเข้าสู่การประเมินเมืองน่าอยู่อย่างเป็นระบบและครอบคลุม

2) แม้ LLMs จะมีศักยภาพสูงในการสนับสนุนการวางผังและการตัดสินใจ แต่ยังมีงานจำกัดที่เชื่อม LLMs เข้ากับระบบตัวชี้วัดเชิงโครงสร้างหรือเครื่องมือประเมินเมืองโดยตรงในเชิงปฏิบัติ

3) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับบริบทเมืองในประเทศกำลังพัฒนาและเมืองในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ยังมีสัดส่วนน้อยมากในชุดวรรณกรรมที่ผ่านการคัดกรอง สะท้อนช่องว่างสำคัญในการพัฒนาโมเดล AI ที่ตอบสนองต่อลักษณะเฉพาะของเมืองในบริบทที่มีข้อมูลเบาบาง (Data-sparse environments) โครงสร้างพื้นฐานดิจิทัลที่ไม่สม่ำเสมอ และความหลากหลายของรูปแบบการปกครองท้องถิ่น

4) ยังขาดงานวิจัยที่พัฒนากรอบการประเมินคุณภาพชีวิตและความน่าอยู่ของเมือง (Urban livability assessment) ที่บูรณาการตัวชี้วัดด้านสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะคุณภาพอากาศและปัจจัยเสี่ยงด้านสุขภาพ เข้ากับแบบจำลอง AI อย่างเป็นระบบ ซึ่งเป็นประเด็นวิจัยที่จำเป็นต่อการยกระดับการกำหนดนโยบายเมืองอย่างยั่งยืนในอนาคต

5. สรุปและข้อเสนอแนะ

จากการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบนี้และจากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าสาขาวิชาผังเมืองนี้กำลังเปลี่ยนผ่านจากการใช้ AI เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพรรณนาไปสู่การเป็นโครงสร้างสนับสนุนการตัดสินใจเชิงนโยบายในกระบวนการวางผังและบริหารจัดการเมืองที่มีความซับซ้อนสูง ข้อค้นพบที่มีนัยสำคัญที่สุดจากการศึกษานี้คือ LLMs และ Generative AI กำลังขยายบทบาทจากเครื่องมือประมวลผลภาษาไปสู่ระบบสนับสนุนการวางผังแบบครบวงจร ทั้งในด้านการสรุปองค์ความรู้เชิงนโยบาย การสร้างทางเลือก การสื่อสารกับผู้มีส่วนได้เสีย และการตีความข้อมูลเชิงพื้นที่ที่ซับซ้อน

สำหรับการวิจัยในอนาคต ควรมุ่งพัฒนากรอบดัชนีเมืองน่าอยู่อย่างยั่งยืนที่บูรณาการ AI เข้ากับตัวชี้วัดหลายมิติ โดยมีคุณภาพอากาศเป็นองค์ประกอบหลัก รวมถึงการพัฒนา Expert decision support system ที่สามารถประมวลผลข้อมูลสิ่งแวดล้อมเชิงพื้นที่ร่วมกับ LLMs เพื่อสนับสนุนกระบวนการวางผังเมืองที่ครอบคลุม โปร่งใส และตอบสนองต่อความต้องการของผู้มีส่วนได้เสียทุกกลุ่มได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการศึกษานี้จึงมีศักยภาพในการเป็นฐานความรู้สำหรับการพัฒนาเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจเชิงนโยบายเมืองในยุคปัญญาประดิษฐ์อย่างเป็นรูปธรรม

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.พระนคร ที่ให้ความอนุเคราะห์ทรัพยากรในการศึกษานี้

เอกสารอ้างอิง

[1] M. J. Page et al., “The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews,” BMJ, vol. 372, Art. no. n71, 2021.

[2] T. H. Son, Z. Weedon, T. Yigitcanlar, T. Sanchez, J. M. Corchado, and R. Mehmood, “Algorithmic urban planning for smart and sustainable development: Systematic review of the literature,” Sustainable Cities and Society, vol. 94, Art. no. 104562, 2023.

[3] T. W. Sanchez, E. Kader, J. Payne, A. Carastro, and J. Montes, “The research landscape of AI in urban planning: A topic analysis of the literature with ChatGPT,” Urban Science, vol. 8, no. 4, Art. no. 197, 2024.

[4] R. Fistola and R. A. La Rocca, “Artificial intelligence for urban planning: A new planning process to envisage the city of the future,” Urban Science, vol. 9, no. 9, Art. no. 336, 2025.

[5] F. Othengrafen, L. Sievers, and E. Reinecke, “From vision to reality: The use of artificial intelligence in different urban planning phases,” Urban Planning, vol. 10, Art. no. 8576, 2025.

[6] Y. Zheng et al., “A survey of machine learning for urban decision making: Applications in planning, transportation, and healthcare,” ACM Computing Surveys, vol. 57, no. 4, 2024.

[7] J. Wang and F. Biljecki, “Unsupervised machine learning in urban studies: A systematic review of applications,” Cities, vol. 129, Art. no. 103925, 2022.

[8] Y. Chen, X. Zhang, and Y. Liu, “Practice and application of artificial intelligence in urban decision-making,” Buildings, vol. 15, no. 21, Art. no. 3909, 2025.

[9] Y. Zheng et al., “Urban planning in the era of large language models,” Nature Computational Science, vol. 5, no. 9, pp. 727–736, 2025.

[10] K. Liu, T. Yigitcanlar, R. Mehmood, J. M. Corchado, and X. Fu, "Large language models in urban planning: A systematic review and conceptual framework," Journal of Urban Technology, 2025.

[11] F. Pan, X. Huang, Y. Bi, Y. Gao, Y. Ye, and H. Wang, "From tools to partners: How large language models are transforming urban planning," AI Open, vol. 6, pp. 276–298, 2025.

[12] H. Jiang, M. Li, P. Witte, S. Geertman, and H. Pan, "Urban chatter: Exploring the potential of ChatGPT-like and generative AI in enhancing planning support," Cities, vol. 1 5 8 , Art. no. 105701, 2025.

[13] Z. Li et al., "Urban computing in the era of large language models," ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology, 2025.

[14] C. Hou et al., "Urban sensing in the era of large language models," The Innovation, vol. 6, no. 1, Art. no. 100749, 2025.

[15] Z. Cao, Y. Mao, M. Mustafa, and M. H. M. Isa, "Future cities imagined by ChatGPT-4 o: Human evaluation using importance-performance analysis," Humanities and Social Sciences Communications, vol. 12, no. 1, 2025.

[16] J. B. Hollander, H. Renski, and M. Sahotsky, "AI-generated knowledge in urban planning: Chatbots and professional planners' expertise in responding to public queries," Town Planning Review, 2025.

[17] C. Tong and J. Li, "Explainable artificial intelligence for urban planning," International Journal of Advanced Computer Science and Applications, vol. 15, no. 7, 2024.



ปรีชาพงศ์ อากาศโสภา จบการศึกษาระดับปริญญาโท การวางแผนภาคและเมือง มหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กำลังศึกษาในระดับปริญญาเอกสาขาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร มีประสบการณ์การทำงานเกี่ยวกับการพัฒนาพื้นที่และเมืองในภาคเอกชน 12 ปี ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง นักผังเมือง บริษัท วันดีทู กรุ๊ป จำกัด งานวิจัยที่สนใจ ได้แก่ การประเมินดัชชีชี้วัดความน่าอยู่ของเมือง



เทอดพงษ์ แดงสี จบการศึกษาระดับปริญญาเอกสาขาเทคโนโลยีสารสนเทศ (นานาชาติ) มจพ. มีประสบการณ์การทำงานเกี่ยวกับระบบสื่อสารโทรคมนาคมในภาคเอกชน 19 ปี ปัจจุบันเป็นผู้ช่วยศาสตราจารย์ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.พระนคร งานวิจัยที่สนใจ ได้แก่ เทคโนโลยีสารสนเทศ

บทความวิจัย

การผลิตเครื่องประดับ

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

กรณีศึกษาการออกแบบเครื่องประดับ จาก สัญลักษณ์แห่งพุทธ

Case Study on Jewelry Design Derived from Buddhist Symbols

อาวุธ ฉายศิริ[1] อรรถวลี หอมละออ[2] ธีรวัฒน์ แซ่ขวย[3] และ กรกช สัมฤทธิ์[4]

สาขาวิชาอัญมณีรังสรรค์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

[2]789/38 หมู่ 1 ถนน พหลโยธิน ตำบล ปากเพรียว อำเภอ เมือง จังหวัด สระบุรี 18000 aunatthawalee@gmail.com

[3]18/63 ซอย ทวีวัฒนา29 ถนนเลียบคลองทวีวัฒนา แขวงศาลาธรรมสพน์ เขตทวีวัฒนา จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10170 TEERAWAT-SAE@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยเล่มนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการออกแบบเครื่องประดับที่สามารถสะท้อนถึงแนวคิดเชิงปรัชญาของพุทธศาสนา ในรูปแบบของศิลปะร่วมสมัย ผ่านการประยุกต์ใช้สัญลักษณ์ทางพุทธศาสนาซึ่งเป็นเครื่องยึดเหนี่ยวทางจิตใจ โดยมุ่งเน้นถึงการพัฒนาศักยภาพของผลิตภัณฑ์เชิงวัฒนธรรม(Cultural Product) และการจัดจำหน่ายแก่กลุ่มเป้าหมายในสังคมของผู้บริโภคในยุคปัจจุบัน มีอิสระทางความคิด เนื่องด้วยกระแสโลกาภิวัตน์และ การเปลี่ยนแปลงของเทคโนโลยีในปัจจุบัน ด้วยวิธีวิจัยเชิงคุณภาพบนสัญลักษณ์เชิงศาสนา การสัมภาษณ์ และการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่ โดยสามารถสรุปผลการประเมินในกลุ่มเป้าหมายอยู่ในระดับ “มาก” ถึง “มากที่สุด” ตามเกณฑ์ในการประเมิน 3 ด้าน ได้แก่ ด้านความงาม ด้านความคิดสร้างสรรค์ และ ด้านประโยชน์และการใช้งาน ทั่งนี้ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติของเกณฑ์การประเมินในครั้งนี้ทั้งในส่วนของค่าเฉลี่ยคะแนนการประเมิน($\bar{x}$) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน(S.D.) ยังสะท้อนได้ถึงความสอดคล้องทัศนคติเชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ : พุทธศิลป์และวัตถุมงคล, กระบวนการผลิตวัตถุมงคล, การสร้างสรรค์เนื้อหาดิจิทัล

Abstract

This study aims to explore jewelry design that reflects Buddhist philosophical concepts through the lens of contemporary art. By applying Buddhist symbols as spiritual anchors, the research focuses on enhancing the potential of cultural products and their distribution to modern consumers—a demographic characterized by freedom of thought shaped by globalization and rapid technological change. Utilizing qualitative research methods, including the analysis of religious symbols, interviews, and application of modern technology, the study concludes that evaluations from the target group reached 'High' to 'Highest' levels across four key criteria: target group profile, aesthetics, creativity, and utility. Furthermore, the statistical analysis of these criteria—specifically the mean score ($\bar{x}$) and standard deviation (S.D.)—reflects a significantly consistent positive attitude toward the designs.

Keywords: Buddhist Art and Sacred Objects, Production Process of Sacred Objects, Digital Content Creation

1. บทนำ

ในอดีต มนุษย์สร้างสัญลักษณ์ทางศาสนาเพื่อเป็นเครื่องยึดเหนี่ยวจิตใจและถ่ายทอดหลักธรรม สำหรับพระพุทธศาสนา สัญลักษณ์อย่าง "ธรรมจักร" มีบทบาทสำคัญในการแสดงถึงหนทางสู่ความหลุดพ้น อย่างไรก็ตาม รูปแบบดั้งเดิมอาจเข้าถึงคนรุ่นใหม่ได้ยาก งานวิจัยนี้จึงมุ่งนำสัญลักษณ์เหล่านี้มาประยุกต์สู่เครื่องประดับที่ "สวมใส่ได้" ในชีวิตประจำวัน เพื่อสร้างแรงบันดาลใจและความใกล้ชิดกับคำสอนผ่านงานออกแบบที่เรียบง่ายแต่ลึกซึ้ง

2. ทฤษฎีและแนวคิดที่เกี่ยวข้อง

2.1 ธรรมจักรในพุทธศาสนา

คือสัญลักษณ์วงล้อประกอบด้วย กำ (ซี่) กง และดุม โดยธรรมจักร 8 ซี่ หมายถึง อริยมรรคมีองค์ 8 ส่วน 12 ซี่ หมายถึง ปฏิจจสมุปบาท และ 24 ซี่ (พบในธงชาติอินเดีย) แทนแนวคิดเรื่องธรรมะ



รูปที่ 1 ธรรมจักร 8 ซี่**ในศาสนาพุทธ** [5]

2.2 ธรรมจักรในงานออกแบบ

ธรรมจักรไม่เพียงปรากฏในจิตรกรรมประติมากรรม หรือสถาปัตยกรรมเท่านั้น แต่ยังถูกนำมาใช้ในงานออกแบบร่วมสมัย เช่น เครื่องประดับ สัญลักษณ์ตราสัญลักษณ์ทางราชการ สื่อการศึกษา โดยคงความหมายว่าเป็น ตัวแทนของพระพุทธเจ้า ในฐานะผู้ให้แสงสว่างทางปัญญา เมื่อธรรมจักรถูกนำมาประยุกต์ในรูปแบบเครื่องประดับสื่อถึงความตั้งใจของผู้สวมใส่ที่ต้องการมีธรรมะเป็นเครื่องเตือนใจอยู่ใกล้ตัว [1]

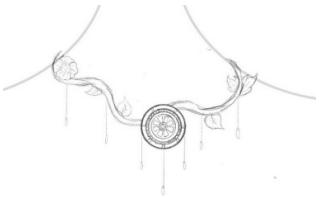
2.3 การเลือกวัสดุในการผลิตเครื่องประดับ

ผู้วิจัยได้เลือกใช้ทองเหลือง (Brass) เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเชิงกลและกายภาพที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้งานในหลายแขนง มีสีเหลืองคล้ายทองคำแต่มีราคาที่ถูกกว่าและขึ้นรูปได้ง่ายกว่า[2]

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 การร่างแบบเครื่องประดับสัญลักษณ์แห่งพุทธ

ผู้วิจัยได้ยึดตามการตีความในเชิงสัญลักษณ์ให้เปรียบเสมือน “กิ่งก้านของต้นโพธิ์” ที่แผ่ขยายจากต้นกำเนิดแห่งการตรัสรู้ แนวคิดดังกล่าวนำมาใช้เป็นแรงบันดาลใจในการออกแบบผลงานเชิงสร้างสรรค์ตามความหมายทางจิตวิญญาณของพุทธศาสนาในบริบทร่วมสมัย



รูปที่ 2 แบบร่างเครื่องประดับสัญลักษณ์แห่งพุทธ

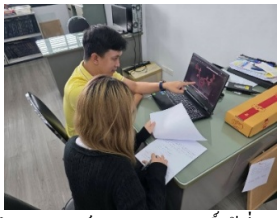
3.2 คำชี้แนะจากผู้เชี่ยวชาญ

ในด้านคำชี้แนะจากผู้เชี่ยวชาญ ผู้วิจัยได้ปรึกษากับผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบ และผู้มีประสบการณ์ด้านความหมายทางจิตวิญญาณของพุทธศาสนาผ่านการสัมภาษณ์และการรับฟังข้อชี้แนะเพิ่มเติม ผู้วิจัยได้นำหลักการและข้อชี้แนะดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบครั้งนี้ โดยคำนึงถึงความหมายเชิงธรรมตามที่พระครูปลัดโสภณ สจจปาโล เจ้าอาวาสวัดปากน้ำ จังหวัดนนทบุรี ได้ชี้แนะ



รูปที่ 3 การรับฟังคำแนะนำจากพระครูปลัดโสภณ สจจปาโล เจ้าอาวาสวัดปากน้ำ จังหวัดนนทบุรี

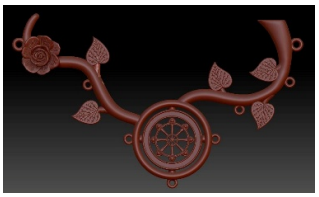
ตลอดจนการวิเคราะห์ความสอดคล้องและความเหมาะสมในการใช้งานจริงอย่างรอบด้าน ไม่ว่าจะเป็นในด้าน ขนาด รูปทรง องค์ประกอบดังที่อาจารย์กรกรช สัมฤทธิ์ได้แนะนำมา



รูปที่ 4 การชี้แนะโดยอาจารย์ กรกรช สัมฤทธิ์ ผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบและการผลิตงานเครื่องประดับ

3.3 การออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์

ในการออกแบบชิ้นงานเครื่องประดับร่วมสมัย ผู้วิจัยได้มีการนำโปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านการออกแบบ 3 มิติเข้ามาใช้ในกระบวนการสร้างต้นแบบ โดยเฉพาะโปรแกรมที่สามารถจำลองรูปทรงเชิงซับซ้อนได้อย่างแม่นยำและสมจริง โปรแกรมดังกล่าวช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถสร้างแบบจำลองของชิ้นงานในลักษณะเสมือนจริง (Realistic Rendering) ซึ่งเอื้อต่อการมองเห็นภาพรวมของผลงานก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการผลิตจริง



รูปที่ 5 การออกแบบด้วยโปรแกรม 3มิติ สำเร็จรูป

3.4 การสร้างต้นแบบ RP

หลังจากที่ผู้วิจัยได้ออกแบบเครื่องประดับในรูปแบบ 3มิติเสร็จสิ้น ผู้วิจัยสามารถประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3มิติ ด้วยเครื่องพิมพ์ 3มิติ RP (Rapid Prototype) เพื่อสร้างชิ้นงานเสมือนชิ้นงานจริง โดยสามารถคงไว้ซึ่งความละเอียดของต้นแบบเดิมรวมถึงการประหยัดเวลาในการผลิตต้นแบบได้เป็นอย่างมาก



รูปที่ 6 ต้นแบบที่ได้จากการพิมพ์ 3มิติ ด้วยวิธี RP

3.5 การเตรียมการหล่อ

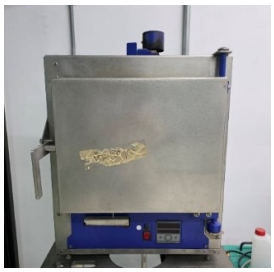
จากต้นแบบที่ได้จากการพิมพ์ 3มิติ ผู้วิจัยสามารถนำต้นแบบดังกล่าวมาเสร้างเป็นต้นเทียนเพื่อเตรียมการหล่อต่อไปในขั้นตอนการสร้างพิมพ์หล่อจากแบบปูน



รูปที่ 7 ต้นเทียนสำหรับการหล่อ

3.6 การสร้างพิมพ์หล่อ

ใช้ปูนในการหล่อเป็นแม่พิมพ์ โดยผ่านการอบด้วยความร้อนแบบขั้นบันไดที่ 150 องศาเซลเซียส จนถึง 700 องศาเซลเซียสในทุก 30 นาที เพื่อป้องกันการแตกร้าวของพิมพ์หล่อในขั้นตอนการหล่อจริง



รูปที่ 8 ตู้อบแม่พิมพ์ด้วยการควบคุมอุณหภูมิ (สาขาอัญมณีรังสรรค์)

3.7 การหล่อด้วยวิธีสุญญากาศ (Vacuum casting)

กระบวนการหล่อโลหะด้วยระบบสุญญากาศ (Vacuum Casting) เป็นเทคนิคสำคัญในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องประดับ ซึ่งช่วยให้ได้ชิ้นงานที่มีความละเอียดสูง ลดการเกิดฟองอากาศ และเพิ่มประสิทธิภาพในการไหลของโลหะหลอมเข้าสู่โพรงแม่พิมพ์อย่างสมบูรณ์ ตั้งอุณหภูมิการหลอมให้สูงสุดที่ 857 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการหลอมโลหะที่ใช้ในการผลิตเครื่องประดับ



รูปที่ 9 เครื่องหล่อโลหะด้วยระบบสุญญากาศ (สาขาอัญมณีรังสรรค์)

3.8 การประกอบชิ้นงาน

ใช้การประกอบชิ้นงาน (Assembly) ซึ่งในที่นี้หมายถึงการนำชิ้นส่วนที่ผ่านการตกแต่งแล้วมาประกอบเข้ากับองค์ประกอบอื่น ๆ โดยวิธีการเชิงกล (Mechanical Methods) เช่น การต่อสร้อย การร้อยห่วง หรือการติดตั้งตัวล็อก โดยไม่มีการใช้กระบวนการเชื่อม หรือการบัดกรี



รูปที่ 10 ชิ้นงานประกอบ

3.9 การฝังพลอย

คำนึงถึงหลักการในการฝังพลอยโดยยึดหลักการ 3 ประการ ได้แก่ ความมั่นคงในการยึดเกาะ, การเปิดรับแสงเพื่อเสริมความงามของพลอย, และ ความกลมกลืนกับตัวเรือนในเชิงสุนทรียศาสตร์ โดยต้องใช้ความแม่นยำสูงในการกำหนดมุม ระยะ และแรงกดของโลหะที่ใช้ยึด เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายต่อพลอยที่อาจมีความเปราะบาง



รูปที่ 11 การฝังพลอยบนชิ้นงาน

3.10 การชุบเงิน

มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความสวยงาม ความเงางาม และคุณสมบัติในการต้านทานการกัดกร่อนของวัสดุพื้นฐานที่ใช้ทำงาน นอกจากนี้การชุบเงินยังช่วยลดต้นทุน เนื่องจากสามารถใช้วัสดุหลักเป็นโลหะราคาถูก แล้วเคลือบผิวด้านนอกด้วยชั้นเงินบาง ๆ เพื่อให้มีคุณสมบัติและภาพลักษณ์ใกล้เคียงกับเงินแท้[3] โดยผู้วิจัยเลือกวิธีชุบด้วยกระแสไฟฟ้า (Electroplating) ซึ่งเป็นกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้หลักการอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis)



รูปที่ 12 ชิ้นงานสัญลักษณ์แห่งพุทธ

4. การวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 การออกแบบ F Test

เป็นการทดสอบเปรียบเทียบความแปรปรวนของข้อมูล 2 ชุด ที่ได้จากสภาวะการทดสอบที่ต่างกัน การทดสอบแบบเอฟใช้ในการทดสอบความเที่ยงของวิธีทดสอบ ผู้ทดสอบ หรืออื่นๆ ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของการทดสอบ การหาค่าสถิติ F ใช้สมการดังต่อไปนี้
สมมติฐานในการทดสอบดังสมการที่ (1)

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 \text{ เทียบกับ } H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 \quad (1)$$

สถิติทดสอบดังสมการที่ (2)

$$F = S_1^2/S_2^2 \text{ เมื่อ } S_1^2 > S_2^2 \, , \upsilon_1 = n_1 - 1, \upsilon_2 = n_2 - 1 \quad (2)$$

โดยมีเขตปฏิเสธดังสมการที่ (3)

$$F < f_{1-0.5a} \text{ หรือ } F < f_{0.5a} \quad (3)$$

เมื่อค่า S_1^2เป็นค่าความแปรปรวนของข้อมูลชุดที่ 1 และ S_2^2เป็นค่าความแปรปรวนของข้อมูลชุดที่ 2

4.2 การออกแบบ T Test

การทดสอบแบบที เป็นการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของข้อมูล เช่น ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดตัวอย่างกับค่าอ้างอิง หรือค่าเฉลี่ยของข้อมูล 2 ชุด ที่ได้จากการวัดด้วยสภาวะที่ต่างกัน การทดสอบแบบทีใช้ในการทดสอบความแม่นดังสมการที่ (4) (5) และ (6)

$$H_0: \mu_1 - \mu_2 \geq d_0 \text{ เทียบกับ } H_0: \mu_1 - \mu_2 < d_0 \quad (4)$$

$$H_0: \mu_1 - \mu_2 \leq d_0 \text{ เทียบกับ } H_0: \mu_1 - \mu_2 > d_0 \quad (5)$$

$$H_0: \mu_1 - \mu_2 = d_0 \text{ เทียบกับ } H_0: \mu_1 - \mu_2 \neq d_0 \quad (6)$$

โดยใช้เขตปฏิเสธดังสมการที่ (7) (8) และ (9)

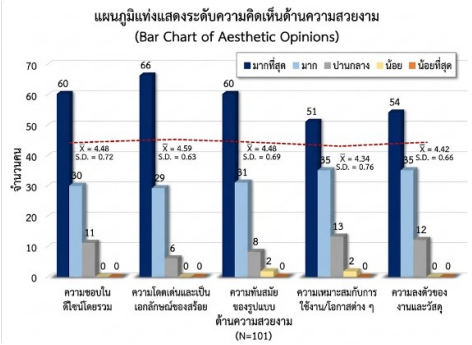
$$t < -t_a \quad (7)$$

$$t > t_a \quad (8)$$

$$t < -t_{0.5a} \text{ หรือ } t > -t_{0.5a} \quad (9)$$

4.3 ผลการวิเคราะห์ด้านความสวยงาม

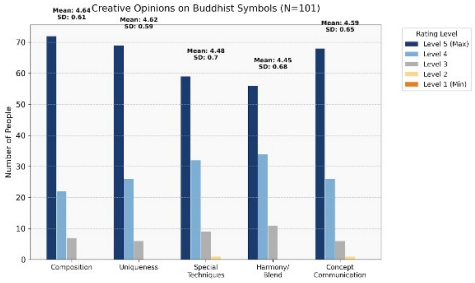
ในด้านความสวยงามพบว่า ผลการประเมินมีค่าเฉลี่ยความพึงพอใจอยู่ในระดับมากที่สุด โดยเฉพาะความเหมาะสมของขนาดและการจัดวางองค์ประกอบ



รูปที่ 13 แผนภูมิระดับความคิดเห็นด้านความสวยงาม

4.4 ผลการวิเคราะห์ด้านความคิดสร้างสรรค์ของสัญลักษณ์แห่งพุทธ

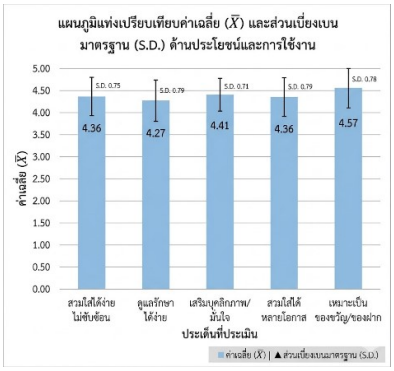
สัญลักษณ์ธรรมจักรที่ถูกตีความใหม่ได้รับคำชื่นชมในด้านความแปลกใหม่และความหมายที่ลึกซึ้ง โดยได้ระดับความพึงพอใจในระดับมากที่สุด



รูปที่ 14 แผนภูมิระดับความคิดเห็นด้านความคิดสร้างสรรค์ของสัญลักษณ์แห่งพุทธ

4.5 ผลการวิเคราะห์ด้านประโยชน์และการใช้งาน

กลุ่มตัวอย่างมองว่าสามารถสวมใส่ได้จริงในชีวิตประจำวัน และช่วยยกระดับจิตใจได้ โดยได้ระดับความพึงพอใจในระดับมาก



รูปที่ 15 แผนภูมิระดับความคิดเห็นด้านประโยชน์และการใช้งาน

5. สรุปผลและอภิปรายผล

การออกแบบเครื่องประดับ "สัญลักษณ์แห่งพุทธ" ประสบความสำเร็จในการสื่อสารสาระสำคัญของศาสนาผ่านรูปแบบร่วมสมัย ผลงานนี้แสดงให้เห็นว่าเทคโนโลยี CAD และ 3D Printing ช่วยให้การผลิตงานศิลปะที่มีความซับซ้อนเชิงสัญลักษณ์ทำได้แม่นยำขึ้น งานวิจัยนี้เป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เชิงวัฒนธรรมที่ผสานคุณค่าทางศรัทธาเข้ากับวิถีชีวิตยุคใหม่ได้อย่างกลมกลืน

เอกสารอ้างอิง

[1] Ernst Cassirer (1875) The Philosophy of Symbolic Forms

[2] สมชาย เลิศวัฒเนกุล. (2558). วัสดุวิศวกรรม (Engineering Materials). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

[3] สุรชัย ศรีทอง. (2560). โลหะและโลหะผสม. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ด

[4] อรรถพล รังสิวงศ์ ธรรมจักร:สัญลักษณ์แห่งธรรมในพระพุทธศาสนา (2560)

[5] พระมหาโพธิวงศาจารย์ (ทองดี สุรเตโช) หนังสือศัพท์วิเคราะห์แม่บทแห่งธรรม ธัมมจักกัปปวัตนสูตร (2560)

[6] Paul Tillich Dynamics of Faith (1957)

[7] David Émile Durkheim Les règles de la méthode sociologique (1895)

[8] Turner (1982) Social Identity and Intergroup Relation

[9] Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2014). Materials Science and Engineering: An Introduction (9th ed.). Wiley.

[10] Metals Handbook. (1990). Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials (Vol. 2). ASM International.

[11] Metals Handbook. (1990). Surface Engineering. ASM International.

[12] โสภณ มหาสวัสดิ์. (2556). กระบวนการชุบโลหะ. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.

[13] Lowenheim, F. A. (1978). Modern Electroplating. Wiley.

[14]การฝังอัญมณีแบบต่างๆ .สืบค้นออนไลน์ วันที่ 29 กันยายน 2568 www.umasilver925.com

[15] จันทรัตน์ วรสรรพวิทย์ (2552) วารสารสำนักบริหารและรับรองห้องปฏิบัติการ การใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Excel ในการทดสอบแบบเอฟ และ ที



อาจารย์อาวุธ ฉายศิริ
อาจารย์ประจำสาขาวิชาอัญมณีรังสรรค์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
งานวิจัยที่สนใจ:การปรับปรุงสมบัติโลหะมีค่าสำหรับการผลิตเครื่องประดับ



นาวสาวอรรถวลี หอมละออ
นักศึกษา สาขาวิชาอัญมณีรังสรรค์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



นายธีรวัฒน์ แซ่ขวย
นักศึกษา สาขาวิชาอัญมณีรังสรรค์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



อาจารย์กรกช สัมฤทธิ์
อาจารย์ประจำสาขาวิชาอัญมณีรังสรรค์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
งานวิจัยที่สนใจ:กรณีศึกษาปัญหางานหล่อโลหะทองแดงผสมในชิ้นงานหล่อพุทธศิลป์

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การออกแบบเครื่องประดับจากเอกลักษณ์ประเพณีผีตาโขนจังหวัดเลย

Jewelry designs inspired by the unique traditions of the Phi Ta Khon festival in Loei province

วรัญชลีย์ ทวีชัย[1*] ชินภัทร ธรรมใจบุญมา[2] อนุรัตน์ เขมานิฏฐาไท[3]

[1,2,3] สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิตเครื่องประดับ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร

Waruncharee-t@rmutp.ac.th[1*]

บทคัดย่อ

การวิจัยเรื่องการออกแบบเครื่องประดับจากเอกลักษณ์ประเพณี ผีตาโขน จังหวัดเลย มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเอกลักษณ์ทางวัฒนธรรมของประเพณีผีตาโขน เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบเครื่องประดับร่วมสมัย และเพื่อถ่ายทอดอัตลักษณ์วัฒนธรรมไทยผ่านผลงานเชิงสร้างสรรค์ โดยผู้วิจัยได้ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง เพื่อใช้เป็นแนวทางในการสร้างสรรค์ผลงาน ภายใต้แนวคิดการนำรูปแบบหน้ากากลวดลาย และสีสันอันโดดเด่นของผีตาโขนมาดัดแปลงให้มีความร่วมสมัย โดยการออกแบบด้วยโปรแกรม Matrix และการสร้างต้นแบบเครื่องประดับด้วยเทคโนโลยีการขึ้นรูปด้วยเครื่องสร้างต้นแบบอย่างรวดเร็ว (Rapid Prototype Machine) เพื่อให้ได้ผลงานที่มีความสมบูรณ์ และประเมินผลความพึงพอใจจากผู้บริโภคเป็นแบบสุ่ม จำนวน 100 คน ประเมินจาก 3 ปัจจัย ได้แก่ ด้านความคิดสร้างสรรค์ ด้านความสวยงาม และด้านประโยชน์ใช้สอยบ ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้บริโภคโดยรวมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 63.67 อยู่ในระดับมาก โดยเมื่อพิจารณารายด้าน พบว่าด้านความคิดสร้างสรรค์มีค่าเฉลี่ยสูงสุด รองลงมาคือด้านความสวยงามและด้านประโยชน์ใช้สอยซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากัน

คำสำคัญ : การออกแบบ,เครื่องประดับ,ประเพณีผีตาโขน

Abstract

This research on jewelry design inspired by the Phi Ta Khon tradition of Loei Province aims to study the cultural identity of the Phi Ta Khon tradition for application in contemporary jewelry design and to convey Thai cultural identity through creative works. The researcher studied relevant information as a guideline for creating the works, based on the concept of adapting the distinctive mask patterns, designs, and colors of Phi Ta Khon to a contemporary style. The design was created using Matrix software, and jewelry prototypes were created using a Rapid Prototype Machine (RPM) to achieve a complete product. Consumer satisfaction was evaluated by a random sample of 100 people based on three factors: creativity, aesthetics, and usability. The overall consumer satisfaction average was 63.67, indicating a high level of satisfaction. Considering each factor individually, creativity had the highest average, followed by aesthetics and usability, which had equal averages.

Keywords: Design,Jewelry,Phi Ta Khon Tradition

1. บทนำ

เครื่องประดับ เป็นสิ่งของที่ใช้เสริมเติมแต่งร่างกาย เพื่อส่งเสริมบุคลิกภาพภายนอกให้ดูโดดเด่นและมีเสน่ห์มากขึ้น อีกทั้งยังสามารถสื่อถึงความเชื่อทางวัฒนธรรม สถานที่ท่องเที่ยวหรือประเพณีต่างๆ ที่สะท้อนเอกลักษณ์ของศิลปะนั้นๆ การออกแบบเครื่องประดับโดยนำแนวคิดจากวัฒนธรรมประเพณี มุ่งเน้นการสื่อถึงเอกลักษณ์ของประเพณี เพื่ออนุรักษ์และต่อยอดศิลปะจากภูมิปัญญาท้องถิ่น นอกจากนี้ยังถือเป็นการสร้างมูลค่าที่ได้แนวคิดจากเอกลักษณ์ของประเพณี ให้มีความสวยงาม โดดเด่นและทันสมัย เลยเป็นจังหวัดหนึ่งในภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบนของประเทศไทยตั้งอยู่ในแอ่งสกลนครและอยู่ในกลุ่มจังหวัดภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบนเป็นจังหวัดท่องเที่ยวที่สำคัญ มีเทศกาลและประเพณีที่หลากหลาย โดยประเพณีที่โดดเด่น คือ “ประเพณีผีตาโขน” เป็นส่วนหนึ่งในงานบุญประเพณีใหญ่หรือที่เรียกว่า "งานบุญหลวง" หรือ "บุญผะเหวด" ซึ่งตรงกับเดือน 7 จัดตั้งขึ้นที่อำเภอด่านซ้าย จังหวัดเลย มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับการบูชาบรรพบุรุษของอาณาจักรล้านช้าง หลวงพระบาง ซึ่งมีอาณาเขตติดกับอำเภอ ด่านซ้าย เชียงคาน และหล่มเก่า ในปัจจุบันและจัดเป็นการละเล่นที่ถือเป็นประเพณีทุกปี กล่าวกันว่า การแห่ ผีตาโขนนั้น มีรากฐานมาจากตำนานพระเวสสันดรและพระนางมัทรี ซึ่งเสด็จออกจากป่าเพื่อเสด็จกลับ พระนคร ระหว่างทางได้มีเหล่าผีป่าหลายตน รวมถึงสัตว์นานาชนิดที่รู้สึกอาลัยรัก จึงพากันแห่แหนแฝงตัวแปลงกายมากับชาวบ้าน เพื่อร่วมส่งเสด็จทั้งสองพระองค์กลับเมือง โดยเชื่อกันว่าเป็นที่มาของคำว่า "ผีตามคน" หรือ "ผีตาขน" และต่อมาได้เพี้ยนเสียงกลายเป็น "ผีตาโขน" ดังที่ปรากฏในปัจจุบัน จัดว่าเป็นชื่อการละเล่นชนิดหนึ่ง ผีตาโขนจะมี 2 ชนิดหลักๆ ได้แก่ ผีตาโขนใหญ่ และผีตาโขนเล็ก โดยผู้เล่นทำรูปหน้ากาก มีลักษณะ น่าเกลียดน่ากลัว มาสวมใส่และแต่งตัวมิดชิด แล้วเข้าขบวนแห่แสดงท่าทางต่างๆ ในระหว่างมีงานบุญตามประเพณีประจำปีของท้องถิ่นพื้นบ้าน การเล่นผีตาโขนนั้นจะมีเฉพาะงานบุญประเพณีที่ภาษาพื้นบ้านอำเภอด่านซ้าย จังหวัดเลย (ประเพณีแห่ผีตาโขน” มรดกทางวัฒนธรรมของชาวด่านซ้าย)

จากเหตุผลที่กล่าวมาในข้างต้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดการออกแบบเครื่องประดับจากประเพณีผีตาโขน ให้มีความสวยงาม โดดเด่นและทันสมัย ซึ่งแสดงถึงเอกลักษณ์ของประเพณีผีตาโขนและเป็นการส่งเสริมในเชิงการท่องเที่ยวของจังหวัดเลยมากขึ้น

2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาเอกลักษณ์ทางวัฒนธรรมไทยในประเพณีผีตาโขน จังหวัดเลย

2. เพื่อออกแบบเครื่องประดับที่ได้รับแรงบันดาลใจจากผีตาโขน จังหวัดเลย

3. เพื่อถ่ายทอดเอกลักษณ์วัฒนธรรมไทยผ่านการออกแบบเครื่องประดับในรูปแบบสร้างสรรค์

3. วิธีดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้จัดทำวิจัยได้มุ่งศึกษาเรื่องการศึกษาเกี่ยวกับประเพณีผีตาโขน เพื่อเป็นแรงบันดาลใจในการออกแบบเครื่องประดับ ซึ่งผู้จัดทำวิจัยได้กำหนดขอบเขตการศึกษาในงานวิจัย ดังนี้

3.1 ศึกษาเอกลักษณ์ทางวัฒนธรรมไทยในประเพณีผีตาโขน หลักการออกแบบเครื่องประดับ วัสดุที่ใช้ในการผลิต กระบวนการผลิตเครื่องประดับ

3.2 ออกแบบเครื่องประดับที่ได้รับแรงบันดาลใจจากผีตาโขน 1 ชุด

3.3 ประเมินความพึงพอใจของผู้บริโภคเครื่องประดับ ชุด Phi Ta Khon

3.3.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากร ได้แก่

1. ผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบเครื่องประดับ

2. ผู้บริโภคเครื่องประดับจากเอกลักษณ์ประเพณีผีตาโขนชุด Phi Ta Khon

กลุ่มตัวอย่าง ได้แก่

1. ผู้เชี่ยวชาญในการออกแบบเครื่องประดับจำนวน 3 ท่าน

2. ผู้บริโภคเครื่องประดับจากเอกลักษณ์ประเพณีผีตาโขน จังหวัดเลย จำนวน 100 คนเป็นการสุ่มแบบบังเอิญ

3.3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการวิจัย

ตัวแปรต้น ได้แก่ เครื่องประดับที่ได้รับแนวคิดมาจากประเพณีผีตาโขน จังหวัดเลย

ตัวแปรตาม ได้แก่ ผู้บริโภคเครื่องประดับจากที่ได้รับแรงบันดาลใจจากผีตาโขน จังหวัดเลย

3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

ผู้วิจัยได้สร้างแบบสอบถาม (Questionnaire) เป็นเครื่องมือในการเก็บรวบรวมข้อมูล จากกลุ่มผู้บริโภคเครื่องประดับ

3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

ผู้วิจัยนำข้อมูลที่ได้จากแบบสอบถาม มาวิเคราะห์โดยหาค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation : S.D.) โดยแบ่งเกณฑ์ในการแปลความหมายของค่าเฉลี่ย ดังนี้

4.51 – 5.00 หมายถึง มากที่สุด

3.51 – 4.50 หมายถึง มาก

2.51 – 3.50 หมายถึง ปานกลาง

1.51 – 2.50 หมายถึง น้อย

1.00 – 1.50 หมายถึง น้อยที่สุด

4. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

จากการศึกษาผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะออกแบบเครื่องประดับร่วมสมัย ผู้วิจัยได้ดำเนินงานและวิเคราะห์ข้อมูลจากการศึกษาให้สอดคล้องตามวัตถุประสงค์ของการวิจัยที่กำหนดไว้ เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลตามวัตถุประสงค์ ดังนี้

5.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลศึกษาเอกลักษณ์ทางวัฒนธรรมไทยในประเพณีผีตาโขน จังหวัดเลย พบว่า ประเพณีผีตาโขน อำเภอด่านซ้าย จังหวัดเลย เป็นมรดกวัฒนธรรมที่ผสมผสานความเชื่อเรื่องผี พราหมณ์ และพุทธ เอกลักษณ์ที่สำคัญคือหน้ากากผีทำจากกาบมะพร้าวและชุดเศษผ้า สะท้อนภูมิปัญญา ความสนุกสนาน และการบวงสรวงควงวิญญาณศักดิ์สิทธิ์ประจำท้องถิ่น ลวดลายและหน้ากากผีตาโขน ได้รับอิทธิพลจากความเชื่อเรื่องผีและธรรมชาติ หน้ากากทำจากหวดนึ่งข้าวเหนียวและกาบมะพร้าว เขียนลวดลายด้วยสีจากธรรมชาติเช่น ปูนขาว เขม่าไฟ แต่งแต้มเป็นลวดลายกราฟิกที่เลียนแบบรูปทรงธรรมชาติ เช่น ลายปลา ลายเถาวัลย์ ลายลูกอ๊อด หรือลายเส้นที่แสดงความน่าเกรงขามผสมความสนุกสนาน



รูปที่ 1 รูปแบบหน้ากากผีตาโขน



รูปที่ 2 ประเพณีผีตาโขน

5.2. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการออกแบบชุดเครื่องประดับชุด Phi Ta Khon ในการออกแบบครั้งนี้ผู้วิจัยได้ใช้แนวความคิดในการออกแบบจากเอกลักษณ์ของผีตาโขนโดยใช้ลักษณะของหน้ากากผีตาโขน มีลวดลายของหวดที่เป็นลายสาน สื่อถึงความน่ากลัวของผีตาโขน ที่มาจากคำว่า ผีตามคน นำเสนอออกมาในมุมมองที่มีความน่ากลัว ดุดัน น่าเกรงขาม

ตารางที่ 1 การออกแบบเครื่องประดับจากเอกลักษณ์ประเพณีผีตาโขน 3 รูปแบบ

	**เครื่องประดับชุดที่ 1** ได้มีการนำเอกลักษณ์ของผีตาโขนมาออกแบบ โดยใช้ลักษณะของหน้ากากผีตาโขน มีลวดลายของหวดที่เป็นลายสาน สื่อถึงความน่ากลัวของผีตาโขน ที่มาจากคำว่า ผีตามคน นำเสนอออกมาในมุมมองที่มีความน่ากลัว ดุดัน น่าเกรงขาม
	**เครื่องประดับชุดที่ 2** ได้มีการนำเอกลักษณ์ของผีตาโขนมาออกแบบ โดยใช้ลักษณะของหน้ากากผีตาโขน มีลวดลายของหวดที่เป็นลายสาน สื่อถึงความน่ากลัวของผีตาโขน ที่มาจากคำว่า ผีตามคน นำเสนอออกมาในมุมมองที่มีความน่ากลัว ดุดัน น่าเกรงขาม เหมือนแบบที่ 1 แตกต่างกันที่แบบที่ 2 แทรกด้วยสีแดงในช่องว่างต่างๆ เพื่อเสริมความน่ากลัวมากขึ้น
	**เครื่องประดับชุดที่ 3** ได้มีการนำเอกลักษณ์ของผีตาโขนมาออกแบบ โดยมีส่วนประกอบของลวดลายของหวดที่เป็นการสาน ตาของผีตาโขนเป็นแบบอีฮวก แสดงถึงวิถีชีวิตของชาวอีสานและประเพณีผีตาโขนยังถือเป็นเทศกาลที่ผู้คนมาร่วมสนุกหยอกล้อกัน มักจะออกแบบลวดลายบนหน้ากากอย่างสร้างสรรค์ นำเสนอในรูปแบบที่สื่อถึงความสนุกสนาน

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 ท่าน จากแบบสอบถามการออกแบบเครื่องประดับจากเอกลักษณ์ประเพณีผีตาโขนจังหวัดเลย รูปแบบชุดเครื่องประดับ 3 แบบ ผู้เชี่ยวชาญมีความพึงพอใจแบบที่ 1 มากที่สุด ซึ่งผู้จัดทำจึงได้เลือกเครื่องประดับ ชุดที่ 1 นำมาผลิตเป็นชุดเครื่องประดับที่ได้รับแรงบันดาลใจจากเอกลักษณ์ประเพณีผีตาโขนจังหวัดเลย



รูปที่ 3 การสร้างต้นแบบเครื่องประดับ



รูปที่ 4 ชุดเครื่องประดับ Phi Ta Khon

5.3 ผลการวิเคราะห์แบบประเมินความพึงพอใจผู้บริโภคเครื่องประดับจากเอกลักษณ์ประเพณีผีตาโขน จังหวัดเลย จำนวน 100 คนเป็นการสุ่มแบบบังเอิญ พบว่า ด้านความคิดสร้างสรรค์ โดยมีระดับความพึงพอใจมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 71 คือ การนำองค์ประกอบจากประเพณีผีตาโขนมาประยุกต์ในการออกแบบ ด้านความสวยงาม โดยมีระดับความพึงพอใจมาที่สุด คิดเป็นร้อยละ 60 คือ ความสวยงามของรูปลักษณ์โดยรวมของเครื่องประดับ ด้านประโยชน์ใช้สอย โดยมีระดับความพึงพอใจมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 60 คือ โครงสร้างของเครื่องประดับมีความแข็งแรง ทนทาน และเหมาะสมกับการใช้งานจริง

สรุปผลวิเคราะห์ความพึงพอใจของผู้บริโภค ในการออกแบบเครื่องประดับจากเอกลักษณ์ประเพณี ผีตาโขนจังหวัดเลย มีความพึงพอใจในระดับมากที่สุดคือ

1. การนำองค์ประกอบจากประเพณีผีตาโขนมาประยุกต์ในการออกแบบเครื่องประดับ
2. ความสวยงามของรูปลักษณ์โดยรวมของเครื่องประดับ
3. โครงสร้างของเครื่องประดับมีความแข็งแรง ทนทาน และเหมาะสมกับการใช้งานจริง

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ประเมินความพึงพอใจของผู้บริโภค (คิดเป็นร้อยละ)

ลำดับ	เกณฑ์การประเมิน	ร้อยละ
1.	**ด้านความคิดสร้างสรรค์**	
	1. การนำองค์ประกอบจากประเพณีผีตาโขนมาประยุกต์ในการออกแบบ	71
	2. ผลงานมีเอกลักษณ์เฉพาะตัว แตกต่างจากผลงานทั่วไปที่เคยพบเห็น	48
	3. เครื่องประดับมีรูปทรงและลวดลายมีความเหมาะสม	51
	4. ผลงานออกแบบมีความร่วมสมัย	60
	5. การดัดแปลงลวดลายหรือสัญลักษณ์จากผีตาโขนให้เข้ากับรูปแบบเครื่องประดับ	61
2.	**ด้านความสวยงาม**	
	1. ความสวยงามของรูปลักษณ์โดยรวมของเครื่องประดับ	60
	2. ความกลมกลืนขององค์ประกอบต่าง ๆ เช่น รูปทรง สี ลวดลาย และวัสดุ	52
	3. ความประณีตและความละเอียดในการออกแบบและตกแต่ง	54
	4. การเลือกใช้สีที่เหมาะสมและสื่ออารมณ์ได้ดี	49
	5. ผลงานมีความดึงดูดสายตาเมื่อเห็นครั้งแรก มีจุดเด่นที่ชัดเจน และสร้างความประทับใจ	53
3.	**ด้านประโยชน์ใช้สอย**	
	1. เครื่องประดับมีความเหมาะสมต่อการใช้งานในชีวิตประจำวัน	53
	2. เครื่องประดับสามารถประยุกต์ใช้ได้ในหลายโอกาส เช่น งานประเพณี แฟชั่นร่วมสมัย หรือของที่ระลึก	51
	3. เครื่องประดับสามารถเข้ากับการแต่งกายหรือสไตล์ที่หลากหลายได้ดี	43
	4. เครื่องประดับสามารถทำความสะอาดหรือดูแลรักษาได้ง่าย	49
	5. โครงสร้างของเครื่องประดับมีความแข็งแรง ทนทาน และเหมาะสมกับการใช้งานจริง	60

6. สรุป

การออกแบบเครื่องประดับจากเอกลักษณ์ประเพณีผีตาโขน จังหวัดเลย ผู้วิจัยได้เริ่มจากการศึกษาข้อมูลต่างๆ ในการทำเครื่องประดับในครั้งนี้ โดยเริ่มจากการศึกษาประเพณีผีตาโขนและประวัติความเป็นมาของประเพณีผีตาโขน จังหวัดเลย รวมไปถึงการศึกษาทางด้านเทคนิคและทฤษฎีที่ใช้ในกระบวนการผลิต เพื่อนำมาออกแบบชิ้นงานและผลิตต้นแบบเครื่องประดับ พร้อมวิเคราะห์แบบควบคู่กับการศึกษารายละเอียดของเนื้อหา ดังนั้นในการวางแผนการดำเนินงานในแต่ละขั้นตอนทำให้เมื่อเกิดปัญหาจะสามารถแก้ไขปัญหาได้ทำให้เกิดเป็นชิ้นงานที่สวยงาม และจากผลการเก็บข้อมูล โดยการแจกแบบสอบถามประเมินความพึงพอใจของผู้บริโภคผ่านระบบออนไลน์ Google From กับกลุ่มตัวอย่าง 100 คน คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ จากนั้นทำการสรุปความคิดเห็นของผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่ว่ามีความสนใจในด้านใดโดยแยกเป็นหัวข้อและจัดลำดับ ในการดำเนินการจัดทำ ผู้วิจัยได้รับความร่วมมือเป็นอย่างดี จากผู้ตอบแบบสอบถามประเมินความพึงพอใจต่อเครื่องประดับ พบว่าร้อยละความคิดเห็นของผู้ตอบแบบสอบถามใน ด้านความคิดสร้างสรรค์ โดยมีระดับความพึงพอใจมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 71 คือ การนำองค์ประกอบจากประเพณีผีตาโขนมาประยุกต์ในการออกแบบ ด้านความสวยงาม โดยมีระดับความพึงพอใจมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 60 คือ ความสวยงามของรูปลักษณ์โดยรวมของเครื่องประดับ ด้านประโยชน์ใช้สอย คิดเป็นร้อยละ 60 คือ โครงสร้างของเครื่องประดับมีความแข็งแรง ทนทาน และเหมาะสมกับการใช้งานจริง

โดยรวมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 63.67 อยู่ในระดับมาก โดยเมื่อพิจารณารายด้าน พบว่าด้านความคิดสร้างสรรค์มีค่าเฉลี่ยสูงสุด รองลงมาคือด้านความสวยงามและด้านประโยชน์ใช้สอยซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากัน

7. กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดีจากผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่าน ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยมาโดยตลอด และขอกราบขอบพระคุณทุกท่านที่ให้คำแนะนำและข้อคิดที่เป็นประโยชน์

เอกสารอ้างอิง

[1] วุฒิสภา (2568) ประเพณีแห่ผีตาโขน มรดกทางวัฒนธรรมของชาวด่านซ้าย (สืบค้นออนไลน์เมื่อ23 กรกฎาคม 2568)

[2] วรรณรัตน์ อินทร์อ่ำ.(2536). ศิลปเครื่องประดับ กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์

[3] วัฒนะ จูฑะวิภาต.(2545).การออกแบบเครื่องประดับ.กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[4] WordPress (2557) ประเภทของหน้ากากผีตาโขน (สืบค้นออนไลน์เมื่อ18 มิถุนายน 2568)

[5] ยุต เอี่ยมสอาด และ กิตตินาถ วรรณิสสร, “การขึ้นรูปแม่พิมพ์แบบรวดเร็วด้วยเทคโนโลยีการขึ้นรูปทีละชั้น”,การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48. (2553), หน้า 222-232.

ประวัติผู้เขียน



นางสาววรัญชลีย์ ทวีชัย
อาจารย์ สาขาวิศวกรรมการผลิตเครื่องประดับ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



นายชินภัทร ธรรมใจบุญมา
นักศึกษา สาขาวิชาอัญมณีรังสรรค์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



นายอนุรัตน์ เขมานิฏฐาไทนักศึกษา
กรรมการผู้จัดการ
บริษัท เบสท์วัน จิวเวล แมนูแฟค เจอริ่งจำกัด

บทความวิจัย
สาขาอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การศึกษาความพร้อมการป้องกันและระงับอัคคีภัยในเขตองค์การบริหารส่วนตำบลบ่อวิน อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี

A Study of Fire Prevention and Suppression Preparedness in the Area of Bo Win Subdistrict Administrative Organization, Si Racha District, Chonburi Province

ณัฐปคัลภ์ ก้อนแพง[1*] ธีรเดช สนองทวีพร[1] วรานนท์ คงสง[1] ชัยวัฒน์ ภู่วรกุลชัย[1] และ พันกรณ์ ชีวะวุฒิวัฒนวิทย์[1]

[1]สาขาวิชาการตรวจสอบและกฎหมายวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

282 ถนนรามคำแหง หัวหมาก บางกะปิ กรุงเทพมหานคร 10240. 6714770003@rumail.ru.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) เพื่อศึกษาความพร้อมขององค์การบริหารส่วนตำบลบ่อวินในการป้องกันและระงับอัคคีภัยในพื้นที่เสี่ยง (2) เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความพร้อมในการป้องกันและระงับอัคคีภัย และ (3) เพื่อเสนอแนวทางพัฒนามาตรการป้องกันและระงับอัคคีภัย ใช้การวิจัยแบบผสมผสาน (Mixed Methods) ศึกษาปัจจัย 4 ด้าน ได้แก่ บุคลากร งบประมาณ อุปกรณ์ และนโยบาย กลุ่มตัวอย่างคือ บุคลากรภายในและภายนอกที่เกี่ยวข้องจำนวน 44 คน และผู้เชี่ยวชาญ 5 ท่าน ผลการวิจัยพบว่า ความพร้อมโดยรวมมีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมากที่สุด โดยด้านนโยบายและอุปกรณ์มีความพร้อมสูงที่สุด ขณะที่ด้านงบประมาณและจำนวนบุคลากรยังมีข้อจำกัด ข้อเสนอแนะสำคัญคือควรเพิ่มการฝึกซ้อมแผนอย่างน้อยปีละ 2 ครั้ง และจัดสรรงบประมาณสำหรับอุปกรณ์ที่ทันสมัยเพื่อรองรับการขยายตัวของพื้นที่เศรษฐกิจ (EEC)

คำสำคัญ : การป้องกันอัคคีภัย; การระงับอัคคีภัย; ความพร้อม; ปัจจัยด้านบุคลากร

Abstract

This research aimed to (1) examine the readiness of the Bo Win Subdistrict Administrative Organization in fire prevention and suppression within high-risk areas; (2) analyze the key factors affecting such readiness; and (3) propose guidelines for improving fire prevention and suppression measures. The study employed a mixed methods research design, focusing on four key factors: personnel, budget, equipment, and policy. The sample consisted of 44 internal and external personnel involved in fire prevention and suppression operations, along with five experts. The results indicated that the overall level of readiness was at the highest level. The policy and equipment factors demonstrated the highest levels of readiness, while limitations were found in terms of budget allocation and the number of personnel. The key recommendation is that fire drills should be conducted at least twice a year, and sufficient budget should be allocated for modern equipment to support the expansion of the Eastern Economic Corridor (EEC).

Keywords: fire prevention; fire suppression; readiness; personnel factors

1. บทนำ

ปัจจุบันโลกและประเทศไทยกำลังเผชิญกับความเสี่ยงจากสาธารณภัยที่มีแนวโน้มรุนแรงและซับซ้อนมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะ “อัคคีภัย” ซึ่งเป็นภัยที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งและก่อให้เกิดความสูญเสียต่อชีวิตและทรัพย์สิน ในบริบทของประเทศไทย อัคคีภัยนับเป็นหนึ่งในภัยพิบัติที่สร้างความเสียหายสูงสุด ทั้งในเขตชุมชนเมืองและพื้นที่อุตสาหกรรมที่มีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว

จังหวัดชลบุรี เป็นพื้นที่ยุทธศาสตร์สำคัญภายใต้โครงการเศรษฐกิจภาคตะวันออก (EEC) ซึ่งมีการพัฒนาอุตสาหกรรมและการขยายตัวของชุมชนอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะตำบลบ่อวิน อำเภอศรีราชา ที่มีโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่จำนวนมากและมีประชากรอาศัยอยู่อย่างหนาแน่น ส่งผลให้ความเสี่ยงต่อการเกิดอัคคีภัยเพิ่มสูงขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ จากสถิติในช่วงปี พ.ศ. 2561–2565 พบว่าเกิดเหตุอัคคีภัยในพื้นที่รวมทั้งสิ้น 50 ครั้ง คิดเป็นมูลค่าความเสียหายกว่า 29 ล้านบาท ดังแสดงในตารางที่ 1 สะท้อนให้เห็นถึงความจำเป็นเร่งด่วนในการเสริมสร้างระบบการป้องกันและระงับอัคคีภัย

ตารางที่ 1 สถิติการเกิดอัคคีภัยของ องค์การบริหารส่วนตำบลบ่อวิน [1]

พ.ศ.	จำนวนครั้งที่เกิดภัย	มูลค่าความเสียหาย
2561	3	200,000
2562	5	1,000,000
2563	10	6,000,000
2564	15	10,000,000
2565	17	12,000,000
รวม	50	29,200,000

องค์การปกครองส่วนท้องถิ่น โดยเฉพาะองค์การบริหารส่วนตำบลบ่อวิน มีบทบาทสำคัญในการป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยตามพระราชบัญญัติป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย พ.ศ. 2550 ทั้งในด้านการเตรียมความพร้อม การป้องกัน การเผชิญเหตุ และการฟื้นฟู อย่างไรก็ตาม จากการดำเนินงานที่ผ่านมา ยังพบข้อจำกัดบางประการในด้านจำนวนและศักยภาพของบุคลากร การจัดสรรงบประมาณ ตลอดจนความ

เพียงพอและความทันสมัยของอุปกรณ์ ซึ่งอาจส่งผลต่อการบริหารจัดการอัคคีภัยในระยะยาว

งานวิจัยฉบับนี้จึงมุ่งศึกษาระดับความพร้อมขององค์การบริหารส่วนตำบลบ่อวินในการป้องกันและระงับอัคคีภัย ตลอดจนวิเคราะห์ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความพร้อมดังกล่าว เพื่อเสนอแนวทางพัฒนาอย่างเป็นระบบและยั่งยืน

1.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาความพร้อมขององค์การบริหารส่วนตำบลบ่อวินในการป้องกันและระงับอัคคีภัยในพื้นที่เสี่ยง
2. เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความพร้อมในการป้องกันและระงับอัคคีภัย
3. เพื่อเสนอแนวทางพัฒนามาตรการป้องกันและระงับอัคคีภัย

1.2 ขอบเขตของการวิจัย

1. ขอบเขตด้านเนื้อหา การศึกษาความพร้อมในการป้องกันและระงับอัคคีภัยขององค์การบริหารส่วนตำบลบ่อวินตามพระราชบัญญัติป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย พ.ศ. 2550 รวมถึงเปรียบเทียบกับแผนป้องกันและระงับอัคคีภัยขององค์การบริหารส่วนตำบลบ่อวิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2565 [1]

2. ขอบเขตด้านประชากรและกลุ่มตัวอย่าง ประชากรในการวิจัย ได้แก่ เจ้าหน้าที่ภายในองค์การบริหารส่วนตำบลบ่อวิน ได้แก่ ข้าราชการ พนักงานองค์การบริหารส่วนตำบล และพนักงานจ้าง เจ้าหน้าที่ภายนอกองค์การบริหารส่วนตำบลบ่อวิน ได้แก่ สมาชิกอาสาสมัครป้องกันภัยฝ่ายพลเรือนในเขตพื้นที่องค์การบริหารส่วนตำบลบ่อวิน กลุ่มตัวอย่างได้มาจากการสุ่มเลือกบุคคลที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการป้องกันและระงับอัคคีภัย เช่น ข้าราชการหรือพนักงานองค์การบริหารส่วนตำบล จำนวน 44 ท่าน และผู้เชี่ยวชาญที่มีประสบการณ์ตรงด้านบรรเทาสาธารณภัย ด้านป้องกันและระงับอัคคีภัย จำนวน 5 ท่าน

3. ขอบเขตด้านตัวแปรที่ศึกษา

ตัวแปรต้น ได้แก่ ปัจจัยด้านบุคลากร งบประมาณ นโยบาย และอุปกรณ์ที่ใช้ในการป้องกันและระงับอัคคีภัย เช่น รถดับเพลิง เครื่องสูบน้ำ สายดับเพลิง หัวฉีด ถังดับเพลิง ชุดดับเพลิง อุปกรณ์ตัดถ่าง เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เครื่องช่วยหายใจ และอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคล

ตัวแปรตาม ได้แก่ ระดับความพร้อมในการป้องกันและระงับอัคคีภัยขององค์การบริหารส่วนตำบลบ่อวิน

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบถึงระดับความพร้อมขององค์การบริหารส่วนตำบลบ่อวินในการป้องกันและระงับอัคคีภัย
2. ได้ทราบถึงปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความพร้อมในการป้องกันและระงับอัคคีภัย
3. ได้แนวทางพัฒนามาตรการป้องกันและระงับอัคคีภัย ที่สามารถนำไปปรับใช้ในการบริหารจัดการขององค์การบริหารส่วนตำบลบ่อวินได้

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กรอบแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

การวิจัยนี้พัฒนากรอบแนวคิดจากประสบการณ์ของผู้วิจัยซึ่งเป็นวิศวกรเครื่องกลที่เกี่ยวข้องกับงานก่อสร้างอาคารและโรงงาน ทำให้มีความสนใจในกฎหมายด้านการป้องกันอัคคีภัย โดยเฉพาะพระราชบัญญัติป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย พ.ศ. 2550 ประกอบกับการขยายตัวของเมืองและอุตสาหกรรมในพื้นที่องค์การบริหารส่วนตำบลบ่อวินที่เพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดอัคคีภัย การศึกษานี้จึงมุ่งวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อความพร้อมในการป้องกันและระงับอัคคีภัย ได้แก่ บุคลากร งบประมาณ อุปกรณ์ และนโยบาย เพื่อศึกษาความสัมพันธ์กับระดับความพร้อมขององค์การบริหารส่วนตำบลบ่อวิน

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการวิจัย

ทฤษฎีการจัดการภัยพิบัติ (Disaster Management Theory) และทฤษฎีการจัดการความเสี่ยง (Risk Management Theory) เป็นแนวคิดสำคัญที่ใช้ในการวางแผนและบริหารจัดการสถานการณ์ฉุกเฉิน โดยมุ่งเน้นกระบวนการลดความเสี่ยง การเตรียมความพร้อม การตอบสนอง และการฟื้นฟูจากภัยพิบัติอย่างเป็นระบบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการสถานการณ์และลดผลกระทบต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชน [2], [3] การจัดการภัยพิบัติที่มีการวางแผนอย่างรอบคอบและมีการประสานความร่วมมือระหว่างหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง จะช่วยให้การตอบสนองต่อเหตุการณ์เป็นไปอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ ขณะเดียวกันการบริหารจัดการความเสี่ยงยังให้ความสำคัญกับการวิเคราะห์และประเมินปัจจัยเสี่ยงในพื้นที่ เช่น สภาพแวดล้อมของชุมชน ความหนาแน่นของครัวเรือน และการเข้าถึงบริการฉุกเฉิน ซึ่งล้วนมีผลต่อระดับความเสี่ยงของอัคคีภัย

ขณะเดียวกัน ทฤษฎีความปลอดภัยและการป้องกันอุบัติภัย (Safety and Accident Prevention Theory) และทฤษฎีการมีส่วนร่วมของชุมชน (Community Participation Theory) เน้นบทบาทของมนุษย์และสังคมในการป้องกันและลดความสูญเสียจากเหตุการณ์ไม่คาดคิด โดยมุ่งวิเคราะห์สาเหตุของความเสี่ยงและกำหนดมาตรการป้องกัน รวมถึงการสร้างวัฒนธรรมความปลอดภัยในองค์กรและสังคม [4] ควบคู่กับการเปิดโอกาสให้ประชาชนเข้ามามีส่วนร่วมในการวางแผน ตัดสินใจ และดำเนินกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาชุมชน [5] การส่งเสริมการรับรู้ทัศนคติด้านความปลอดภัย และการมีส่วนร่วมของประชาชน จะช่วยเพิ่มศักยภาพของชุมชนในการป้องกันและรับมือกับอัคคีภัยได้อย่างยั่งยืน

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องสะท้อนให้เห็นถึงบทบาทของปัจจัยด้านบุคลากรและสมรรถนะในการปฏิบัติงานต่อประสิทธิภาพขององค์กร โดยการศึกษาเรื่องคุณภาพชีวิตในการทำงานที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการปฏิบัติงานของบุคลากรภาครัฐ อำเภอบางแก้ว จังหวัดพัทลุง [6] พบว่า ปัจจัยส่วนบุคคล เช่น อายุ สถานภาพ ระดับการศึกษา และประสบการณ์ทำงานที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการปฏิบัติงานแตกต่างกัน ขณะเดียวกันการศึกษาเกี่ยวกับความพร้อมของเจ้าหน้าที่สำนักงบประมาณในการรองรับการเป็นหน่วยรับงบประมาณตรงขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น [7] พบว่า สมรรถนะในการปฏิบัติงานของบุคลากรมีความสัมพันธ์กับระดับความพร้อมในการ

ปฏิบัติงาน โดยภาพรวมอยู่ในระดับสูง ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าศักยภาพของบุคลากรเป็นปัจจัยสำคัญที่สนับสนุนการดำเนินงานขององค์กรให้มีประสิทธิภาพ

ในด้านการประเมินความเสี่ยงจากภัยพิบัติ การศึกษาความเสี่ยงจากไฟป่าในพื้นที่ Wildland–Urban Interface (WUI) [8] ซึ่งเป็นพื้นที่รอยต่อระหว่างพืชพรรณธรรมชาติกับพื้นที่ชุมชน พบว่า พื้นที่รอบอาคารหรือ Home Ignition Zone (HIZ) เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความเสี่ยงในการเกิดเพลิงไหม้ นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาเทคนิคการประเมินความเสี่ยงแบบอัตโนมัติด้วยเทคโนโลยี Convolutional Neural Networks (CNN) ร่วมกับข้อมูลภูมิประเทศและภาพถ่ายดาวเทียม เพื่อจำแนกประเภทพืชพรรณที่เป็นเชื้อเพลิงไฟป่า ซึ่งสามารถช่วยระบุพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูงและสนับสนุนการวางแผนมาตรการลดความเสี่ยงจากภัยพิบัติได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ การศึกษาบทบาทของทุนทางสังคมต่อการมีส่วนร่วมของชุมชนในการเปลี่ยนผ่านด้านพลังงาน [9] พบว่า ทุนทางสังคมมีบทบาทสำคัญต่อการสนับสนุนหรือขัดขวางกระบวนการพัฒนาของชุมชน โดยเฉพาะในด้านการสร้างความร่วมมือและการมีส่วนร่วมของประชาชน

นอกจากนี้งานวิจัยที่เกี่ยวข้องยังสะท้อนให้เห็นว่า ปัจจัยด้านบุคลากร สมรรถนะในการปฏิบัติงาน สภาพแวดล้อมของชุมชน และการมีส่วนร่วมของประชาชน ล้วนส่งผลต่อการจัดการความปลอดภัยและการลดความเสี่ยงจากภัยพิบัติ รวมทั้งการนำเทคโนโลยีและข้อมูลเชิงพื้นที่มาใช้ในการประเมินความเสี่ยงสามารถช่วยระบุพื้นที่หรือปัจจัยเสี่ยงได้อย่างแม่นยำมากขึ้น อีกทั้งบทบาทของทุนทางสังคมและความร่วมมือของชุมชนยังเป็นกลไกสำคัญที่ช่วยสนับสนุนการดำเนินมาตรการด้านความปลอดภัยและการจัดการภัยพิบัติให้เกิดผลอย่างยั่งยืน ดังนั้นการบูรณาการองค์ความรู้จากทฤษฎีและผลการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องจึงเป็นแนวทางสำคัญในการพัฒนามาตรการหรือรูปแบบการจัดการความเสี่ยงจากอัคคีภัยให้เหมาะสมกับพื้นที่

3. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเพื่อศึกษาความพร้อมการป้องกันและระงับอัคคีภัยในเขตองค์การบริหารส่วนตำบลบ่อวิน จังหวัดชลบุรี โดยมีขั้นตอนการวิจัย ดังนี้

3.1 รูปแบบการวิจัย

การวิจัยนี้ใช้วิธีการแบบผสมผสาน (Mixed Methods) โดยเชิงปริมาณเก็บข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างที่เกี่ยวข้อง เพื่อประเมินระดับความพร้อมด้านบุคลากร อุปกรณ์ แผนงาน และความรู้ความเข้าใจ ส่วนเชิงคุณภาพใช้การสัมภาษณ์เชิงลึกกับผู้เชี่ยวชาญและผู้ปฏิบัติงาน เพื่อวิเคราะห์ข้อจำกัดและปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ก่อนนำผลทั้งสองส่วนมาสังเคราะห์เป็นแนวทางในการพัฒนา

3.2 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

การสอบถามแบบรายบุคคล เป็นการเก็บรวบรวมข้อมูลด้วยวิธีการใช้แบบสอบถาม (questionnaire) เพื่อสำรวจความคิดเห็นเกี่ยวกับความพร้อมในการป้องกันและระงับอัคคีภัยจากบุคลากรขององค์การบริหารส่วนตำบลบ่อวิน จำนวน 44 ตัวอย่าง ซึ่งเป็นการสุ่มกลุ่มตัวอย่างบุคคล (population sample)

การสัมภาษณ์เชิงลึก (in-depth interview) เพื่อให้ได้ข้อมูลด้านความพร้อมในการป้องกันและระงับอัคคีภัย ที่มีความเชื่อมโยงเกี่ยวข้องกับข้อของกฎหมาย ในการวางแผนและการเตรียมความพร้อม การจัดหาทรัพยากรและบุคลากร การฝึกอบรมและซักซ้อม การสนับสนุนจากส่วนกลาง และการป้องกันเชิงรุก ต่อบุคคลที่มีประสบการณ์ตรงและความเชี่ยวชาญด้านบรรเทาสาธารณภัย ด้านป้องกันและระงับอัคคีภัย ในองค์การบริหารส่วนตำบลบ่อวิน จำนวน 5 ท่าน

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัยนี้ ต้องนำผลการเก็บรวบรวมข้อมูลทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพมาประกอบการวิเคราะห์

ข้อมูลเชิงปริมาณ ได้จากแบบสอบถามซึ่งประเมินปัจจัยด้านบุคลากร งบประมาณ และอุปกรณ์ โดยใช้มาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ และทำการวิเคราะห์ด้วยการหาค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) เพื่อแสดงระดับความพร้อมขององค์การบริหารส่วนตำบลบ่อวิน [10] ผลที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงปริมาณจะแสดงในรูปแบบตารางค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน พร้อมทั้งจัดระดับความพร้อม ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แปรผลแบ่งชั้นลำดับ

ค่าเฉลี่ย	ระดับความพร้อม
1.00 - 1.80	น้อยที่สุด
1.81 – 2.60	น้อย
2.61 – 3.40	ปานกลาง
3.41 – 4.20	มาก
4.21 – 5.00	มากที่สุด

ข้อมูลเชิงคุณภาพ ผู้วิจัยได้วิเคราะห์จากการสัมภาษณ์เชิงลึกคณะผู้บริหารและหัวหน้าฝ่ายโดยใช้การวิเคราะห์เนื้อหา (Content Analysis) และการจัดหมวดหมู่ประเด็น (Thematic Analysis) เพื่อตรวจสอบสาเหตุและปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ข้อมูลจากการสัมภาษณ์ถูกนำมาสังเคราะห์ข้อมูลและเชื่อมโยงกับผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณ เพื่ออธิบายข้อสรุปและข้อเสนอแนะ

4. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการวิจัยเรื่อง “การศึกษาความพร้อมการป้องกันและระงับอัคคีภัย ในเขตองค์การบริหารส่วนตำบลบ่อวิน อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี” ผู้วิจัยได้นำเสนอข้อมูลผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการแปลผลการศึกษา ดังนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณ

ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความพร้อมในการป้องกันและระงับอัคคีภัย ได้จากแบบสอบถาม (Questionnaire) ที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นโดยการศึกษาจากเอกสาร ตำรา บทความ งานวิจัย ข้อหารือคำวินิจฉัยที่เกี่ยวข้องและได้รับการตรวจสอบความถูกต้องของเนื้อหาจาก

ผู้ทรงคุณวุฒิ ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ข้อมูลปัจจัยที่ส่งผลต่อระดับความพร้อมในการป้องกันและระงับอัคคีภัย ในเขตองค์การบริหารส่วนตำบลบ่อวิน อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี โดยใช้สถิติเชิงพรรณา ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และระดับความพร้อม ดังแสดงในตารางที่ 3 ดังนี้

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ย ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และระดับความพร้อมในการป้องกันและระงับอัคคีภัยในเขตองค์การบริหารส่วนตำบลบ่อวิน อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี ในภาพรวม

ปัจจัยที่ส่งผลต่อระดับความพร้อม	ค่าเฉลี่ย	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ระดับความพร้อม
1. ด้านบุคลากร	4.17	0.79	มาก
2. ด้านงบประมาณ	3.95	0.81	มาก
3. ด้านอุปกรณ์	4.39	0.64	มากที่สุด
4. ด้านนโยบาย	4.39	0.84	มากที่สุด
5. ความพร้อมโดยรวม	4.44	0.64	มากที่สุด
ค่าเฉลี่ยรวม	4.27	0.74	มากที่สุด

จากตารางที่ 3 พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อระดับความพร้อมในการป้องกันและระงับอัคคีภัย ในเขตองค์การบริหารส่วนตำบลบ่อวิน อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี ในภาพรวมมีค่าเฉลี่ยรวม = 4.27 อยู่ในระดับความพร้อมมากที่สุด และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 0.74 เมื่อพิจารณารายด้านพบว่า มีค่านัยสำคัญคือ ด้านอุปกรณ์ ด้านนโยบาย ความพร้อมโดยรวม มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมากที่สุด

4.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพ

องค์การบริหารส่วนตำบลบ่อวินมีความพร้อมในการป้องกันและระงับอัคคีภัยในระดับปานกลางถึงสูง โดยในด้านบุคลากรพบว่าสามารถปฏิบัติงานได้ในระดับหนึ่ง แต่ยังมีข้อจำกัดด้านจำนวนและความเชี่ยวชาญเฉพาะทาง จึงควรมีการฝึกอบรมและพัฒนาทักษะอย่างต่อเนื่อง ขณะที่ด้านงบประมาณมีการจัดสรรสอดคล้องกับระดับความเสี่ยงในระดับหนึ่งและเน้นมาตรการป้องกันเชิงรุก แต่ยังมีข้อจำกัดในการจัดหาอุปกรณ์ใหม่และการสนับสนุนสวัสดิการของผู้ปฏิบัติงาน ด้านอุปกรณ์โดยรวมมีการตรวจสอบและบำรุงรักษาอย่างสม่ำเสมอ แม้จะยังมีบางส่วนที่ขาดแคลนหรือมีอายุการใช้งานยาวนาน จึงควรมีการพัฒนาอุปกรณ์และเทคโนโลยีให้ทันสมัยมากขึ้น ส่วนด้านนโยบายพบว่ามีแผนและแนวทางดำเนินงานที่ชัดเจนและสามารถนำไปปฏิบัติได้จริง อย่างไรก็ตามยังมีอุปสรรคบางประการ เช่น การมีส่วนร่วมของประชาชน ปัญหาการจราจร และการขยายตัวของประชากรในพื้นที่ ดังนั้นควรส่งเสริมการพัฒนาบุคลากร การนำเทคโนโลยีมาใช้ และการสร้างความร่วมมือกับชุมชนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการอัคคีภัยในอนาคต

4.3 การเชื่อมโยงผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ

ความพร้อมในการป้องกันและระงับอัคคีภัยขององค์การบริหารส่วนตำบลบ่อวินโดยรวมอยู่ในระดับมากที่สุด โดยปัจจัยด้านอุปกรณ์และนโยบายมีค่าเฉลี่ยสูงที่สุด แสดงถึงความพร้อมของเครื่องมือระบบการตรวจสอบบำรุงรักษา และการมีแผนงานที่สามารถนำไปปฏิบัติได้จริง ขณะที่ปัจจัยด้านบุคลากรมีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมาก สะท้อนว่าศักยภาพของบุคลากรเป็นตัวแปรสำคัญต่อการตอบสนองเหตุฉุกเฉิน แม้ว่ายังมีข้อจำกัดด้านจำนวนและความเชี่ยวชาญเฉพาะด้าน ส่วนปัจจัยด้านงบประมาณมีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมาก แต่ถือเป็นปัจจัยสนับสนุนที่ยังมีข้อจำกัด โดยเฉพาะด้านการจัดหาอุปกรณ์ใหม่และการพัฒนาศักยภาพบุคลากร เมื่อพิจารณาโดยรวมจึงสรุปได้ว่า ความพร้อมในการป้องกันและระงับอัคคีภัยเกิดจากการบูรณาการของหลายปัจจัยร่วมกัน โดยมีบุคลากร นโยบาย และอุปกรณ์ เป็นกลไกหลักในการขับเคลื่อนความพร้อม ขณะที่ งบประมาณ เป็นปัจจัยสนับสนุนที่ช่วยเสริมสร้างศักยภาพและพัฒนาแนวทางการจัดการอัคคีภัยในระยะยาว

5. สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาวิจัยเรื่อง การศึกษาความพร้อมในการป้องกันและระงับอัคคีภัยในเขตองค์การบริหารส่วนตำบลบ่อวิน อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี สามารถสรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ ได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

องค์การบริหารส่วนตำบลบ่อวินมีระดับความพร้อมในการป้องกันและระงับอัคคีภัยโดยรวมอยู่ในระดับปานกลางถึงค่อนข้างสูง โดยด้านที่มีค่าเฉลี่ยสูงที่สุดคือด้านนโยบาย รองลงมาคือด้านบุคลากร ส่วนด้านอุปกรณ์และงบประมาณอยู่ในระดับปานกลาง เมื่อพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อความพร้อม พบว่าปัจจัยด้านบุคลากรมีอิทธิพลต่อระดับความพร้อมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยเฉพาะตัวแปรด้านความรู้ความสามารถ และทักษะการปฏิบัติงาน ขณะที่ปัจจัยด้านงบประมาณส่งผลในระดับปานกลาง เนื่องจากยังมีข้อจำกัดด้านการจัดสรรและความเพียงพอ ส่วนปัจจัยด้านอุปกรณ์มีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการระงับเหตุ โดยเฉพาะในประเด็นความพร้อมใช้งานและการบำรุงรักษา สำหรับปัจจัยด้านนโยบายพบว่ามีความสัมพันธ์เชิงบวกกับระดับความพร้อม อันเนื่องมาจากการจัดทำแผนปฏิบัติการที่สอดคล้องกับกฎหมายและกรอบการดำเนินงานที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้ ผลการทดสอบสมมติฐานสนับสนุนข้อสมมติฐานที่ว่า “ปัจจัยความสามารถด้านบุคลากรที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อความพร้อมในการป้องกันและระงับอัคคีภัยแตกต่างกัน” โดยพบว่าบุคลากรที่มีประสบการณ์และผ่านการฝึกอบรมอย่างต่อเนื่องมีระดับความพร้อมสูงกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับการพัฒนาอย่างสม่ำเสมออย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลจากการสัมภาษณ์ผู้บริหารและผู้ที่มีประสบการณ์เชี่ยวชาญด้านการป้องกันและระงับอัคคีภัยขององค์การบริหารส่วนตำบลบ่อวิน ที่สะท้อนว่า แม้องค์กรจะมีโครงสร้างและแผนงานด้านการป้องกันและระงับอัคคีภัยที่ชัดเจน แต่ยังคงมีข้อจำกัดในทางปฏิบัติหลายประการ โดยเฉพาะด้านบุคลากรซึ่งมีจำนวนเจ้าหน้าที่ประจำไม่เพียงพอต่อการรองรับพื้นที่เสี่ยงสูง เช่น หมู่ 3 หมู่ 4 และหมู่ 6 ที่มีทั้งโรงงานอุตสาหกรรมและชุมชนหนาแน่น อีกทั้งด้านงบประมาณยังมีข้อจำกัดจากการจัดสรรไปยังภารกิจอื่น ส่งผลให้การจัดซื้ออุปกรณ์และการฝึกซ้อมไม่สามารถดำเนินการได้อย่างครอบคลุมทุกปี นอกจากนี้ แม้จะมีรถดับเพลิงและเครื่องมือหลักค่อนข้างครบถ้วน แต่อุปกรณ์บางรายการเริ่มเสื่อมสภาพและยังขาดระบบบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่เป็นรูปธรรม ขณะเดียวกัน แม้นโยบายและแผนงานจะมีความสอดคล้องกับกฎหมาย

และแผนระดับชาติ แต่ในทางปฏิบัติยังพบช่องว่างด้านการซักซ้อมแผนและการมีส่วนร่วมของประชาชน ซึ่งควรได้รับการพัฒนาให้เข้มแข็งยิ่งขึ้นเพื่อยกระดับความพร้อมอย่างยั่งยืน

5.2 อภิปรายผล

การศึกษาความพร้อมในการป้องกันและระงับอัคคีภัยขององค์การบริหารส่วนตำบลบ่อวินมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ระดับความพร้อมและตรวจสอบปัจจัยที่มีผลต่อความพร้อมในการป้องกันและระงับอัคคีภัย โดยผลการวิจัยสะท้อนให้เห็นว่าความพร้อมดังกล่าวเป็นผลลัพธ์ขององค์ประกอบหลายด้านที่ทำงานเชื่อมโยงกัน ได้แก่ ด้านบุคลากร ด้านงบประมาณ ด้านอุปกรณ์ และด้านนโยบาย โดยด้านบุคลากรพบว่าความรู้ ความสามารถ ทักษะ และประสบการณ์ของเจ้าหน้าที่ส่งผลต่อความพร้อมในการป้องกันและระงับอัคคีภัยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัย [11] ที่ชี้ว่าศักยภาพของบุคลากรมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพในการจัดการความเสี่ยงอัคคีภัยในระดับชุมชน ขณะที่ด้านงบประมาณสะท้อนถึงความสำคัญของการจัดสรรทรัพยากรทางการเงินอย่างเพียงพอและเหมาะสมต่อการดำเนินงาน ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัย [12] ที่ระบุว่าการบริหารทรัพยากรและงบประมาณอย่างมีประสิทธิภาพมีผลต่อความสามารถในการจัดการความเสี่ยงขององค์กร นอกจากนี้ ด้านอุปกรณ์พบว่าความเพียงพอและความพร้อมใช้งานของวัสดุอุปกรณ์มีบทบาทสำคัญต่อความพร้อมเชิงปฏิบัติการในการตอบสนองเหตุอัคคีภัย ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัย [3] ที่พบว่าความพร้อมของอุปกรณ์และโครงสร้างพื้นฐานด้านอัคคีภัยมีความสัมพันธ์กับระดับความปลอดภัยของพื้นที่ และด้านนโยบายพบว่าการกำหนดทิศทางการวางแผน และการกำกับติดตามที่ชัดเจนขององค์กรมีบทบาทสำคัญต่อการดำเนินงานด้านการจัดการความเสี่ยง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัย [13] ที่ระบุว่าองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นที่มีนโยบายและแนวทางการดำเนินงานที่ชัดเจนสามารถบริหารจัดการภัยพิบัติและลดความเสี่ยงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เมื่อพิจารณาระดับความพร้อมโดยรวม อยู่ในระดับที่สะท้อนถึงศักยภาพในการป้องกันและระงับอัคคีภัยในระดับมากถึงมากที่สุด แต่อาจยังมีช่องว่างที่ต้องพัฒนาเพิ่มเติมในบางด้าน ซึ่งความพร้อมด้านอัคคีภัยต้องอาศัยการพัฒนาอย่างเป็นระบบทั้งด้านบุคลากร งบประมาณ อุปกรณ์ และนโยบาย ดังนั้นการยกระดับความพร้อมในอนาคตควรมุ่งเน้นการพัฒนาแบบองค์รวม เพื่อเสริมสร้างความมั่นคงและความปลอดภัยอย่างยั่งยืน

5.3 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะเพื่อการนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์เห็นว่าองค์การบริหารส่วนตำบลบ่อวินควรยกระดับความพร้อมในการป้องกันและระงับอัคคีภัยอย่างเป็นระบบ โดยเน้นการเพิ่มการฝึกอบรมและการซ้อมแผนอัคคีภัยอย่างสม่ำเสมอเพื่อพัฒนาทักษะของบุคลากร ควบคู่กับการจัดทำระบบบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบเชิงป้องกันอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ควรมีการจัดสรรงบประมาณให้สอดคล้องกับระดับความเสี่ยงของพื้นที่ โดยเฉพาะพื้นที่เสี่ยงสูง รวมทั้งส่งเสริมการมีส่วนร่วมของชุมชนและภาคอุตสาหกรรมในการสนับสนุนทรัพยากรและการฝึกซ้อมแผนร่วมกัน พร้อมทั้งพัฒนาระบบฐานข้อมูลความเสี่ยงเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ วางแผน และกำหนดมาตรการป้องกันอัคคีภัยได้อย่างยั่งยืน

ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในครั้งต่อไปควร ขยายขอบเขตการศึกษาให้มีความลึกและครอบคลุมมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะการประเมินความเสี่ยงเชิงปริมาณในระดับอาคารอุตสาหกรรมเพื่อให้ได้ข้อมูลที่สามารถใช้กำหนดมาตรการป้องกันได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ควรมีการศึกษาเปรียบเทียบระดับความพร้อมในการป้องกันและระงับอัคคีภัยระหว่างองค์การบริหารส่วนตำบลในพื้นที่เขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก (EEC) เพื่อวิเคราะห์จุดแข็งและแนวปฏิบัติที่ดีของแต่ละพื้นที่ รวมถึงการศึกษาการตอบสนองต่อเหตุการณ์จริง โดยเฉพาะระยะเวลาในการเข้าระงับเหตุ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาระบบบริหารจัดการสาธารณภัยในอนาคต

4. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาการตรวจสอบและกฎหมายวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง ที่สนับสนุนการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ ขอบคุณคณาจารย์ และบุคลากรที่ให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวก รวมถึงครอบครัวและเพื่อนร่วมงานที่ให้กำลังใจและสนับสนุนตลอดกระบวนการศึกษาวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] งานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย. (2565). แผนป้องกันและระงับอัคคีภัยขององค์การบริหารส่วนตำบลบ่อวิน พ.ศ. 2564-2570. หน้า 4.

[2] วรรณวลี อินทร์ปิ่น. (2021). ธรรมาภิบาลกับการจัดการภัยพิบัติ: กรณีศึกษาการจัดการบ้านพักชั่วคราวในจังหวัดคุมะโมะโตะ ประเทศญี่ปุ่น. *วารสารเครือข่ายญี่ปุ่นศึกษา*, 11(2), 51-68.

[3] วรวรรธน์ ใจกล้า. (2566). การวิเคราะห์ความเปราะบางด้านอัคคีภัยของชุมชนแออัดในพื้นที่ศูนย์กลางธุรกิจของกรุงเทพมหานคร [*วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*]. คลังปัญญาจุฬาฯ.

[4] กาจกำแหง ศุภประเสริฐ. (2565). การรับรู้และการให้ความร่วมมือของพนักงานระดับปฏิบัติการต่อมาตรการป้องกันความเสี่ยงอุบัติเหตุในการทำงาน [*สารนิพนธ์รัฐประศาสนศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*]. คลังปัญญาจุฬาฯ.

[5] วีระ วีระโสภณ และ บัว ศรีคช. (2567). การสร้างการมีส่วนร่วมเพื่อการพัฒนาแหล่งท่องเที่ยวเชิงนิเวศ ของชุมชนในเขตอำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี. *วารสารวิชาการและวิจัยสหวิทยาการ*, 4(4), หน้า 325–342.

[6] มุสตอฟา หมัดบินเฮด. (2565). คุณภาพชีวิตในการทำงานที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการปฏิบัติงานของบุคลากรภาครัฐ อำเภอบางแก้ว จังหวัดพัทลุง. *วิทยานิพนธ์รัฐประศาสนศาสตรมหาบัณฑิต*. มหาวิยาลัยสงขลานครินทร์.

[7] วัชรพงศ์ ขจร. (2567). ความพร้อมของเจ้าหน้าที่สำนักงบประมาณเพื่อรองรับการเป็นหน่วยรับงบประมาณตรงขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นตามพระราชบัญญัติวิธีการงบประมาณ พ.ศ. 2561 [*สารนิพนธ์รัฐประศาสนศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*]. คลังปัญญาจุฬาฯ.

[8] Afaghi, Mohammad. (2 0 2 4). Development of Wildfire Risk Mitigation Approaches and Ignition Zone Mapping in Wildland-Urban Interface Regions. M.Sc. Thesis.

[9] Giacovelli, Grazia. (2025). The influence of social capital on community participation in the energy transition. Doctoral dissertation. University of Trento.

[10] รัฐพล วงศาโรจน์. (2565). แรงจูงใจในการปฏิบัติงานของบุคลากรภาครัฐที่ส่งผลให้เกิดสมรรถนะในการสร้างสรรค์นวัตกรรม กรณีศึกษา: สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (องค์การมหาชน) [*สารนิพนธ์รัฐประศาสนศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*]. คลังปัญญาจุฬาฯ.

[11] ธมนวรรณ เสมี และ ตรีเนตร ตันตระกูล. (2567) การจัดการความเสี่ยงจากอัคคีภัยในพื้นที่ชุมชนแออัด. *วารสารนวัตกรรมการศึกษาและการวิจัย*, 8(2), 580-591.

[12] ดุษฎี คนแรงดี. (2562). การศึกษาการวิเคราะห์ความเสี่ยงตามยุทธศาสตร์: กรณีศึกษาคณะแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย [*สารนิพนธ์รัฐประศาสนศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*]. คลังปัญญาจุฬาฯ.

[13] อุ่นเรือน เล็กน้อย และ สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง;อรรณพ เอื้องไธสง. (2023) บทเรียนองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นกับแนวคิดป้องกันดินถล่มด้วยหญ้าแฝก. *วารสารมหาวิทยาลัยศิลปากร*, 43(3), 69-82.



ประวัติผู้เขียนบทความ

นายฉัฐปคัลภ์ ก้อนแพง

สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร งานวิจัยที่สนใจ การประเมินความเสี่ยงของระบบป้องกันและระงับอัคคีภัยในอาคารราชการที่มีอายุการใช้งานมาก

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

มาตรการทางกฎหมายในการอนุรักษ์พื้นที่ทางวัฒนธรรมและประวัติศาสตร์ กรณีศึกษาชุมชนเขตกำแพงเมืองเก่า จังหวัดแพร่

Legal Measures for the Conservation of Cultural and Historical Areas : A Case Study of the Old City Wall Community, Phrae

อธิรมย์ ณัฏฐ์ณภัทร จตุรพร สิงหรัญ วิวัฒน์ กิตตินาราพร ชัยวัฒน์ ภู่วรกุลชัย และเสรีย์ ตู้ประกาย

สาขาวิชาการตรวจสอบและกฎหมายวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

282 ถนนรามคำแหง หัวหมาก บางกะปิ กรุงเทพมหานคร 10240. 6714770012@rumail.ru.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาโครงสร้างทางกายภาพของเมืองเก่าแพร่ วิเคราะห์มาตรการทางกฎหมายของไทยเปรียบเทียบกับหลักการสากล และเสนอแนะแนวทางทางกฎหมาย เพื่อการอนุรักษ์พื้นที่ประวัติศาสตร์อย่างยั่งยืน ใช้การวิจัยแบบผสมผสานศึกษาจากกลุ่มตัวอย่างประชาชน 120 คน ร่วมกับการสัมภาษณ์เชิงลึกผู้เชี่ยวชาญ 5 ท่าน ผลการศึกษาพบว่า กฎหมายไทยคุ้มครองจำกัดแค่โบราณสถานรัฐ ขัดแย้งกับคุณค่าและวิถีเมืองที่เป็นอยู่ ข้อเสนอแนะคือ เร่งประกาศใช้ 'ผังเมืองเฉพาะ' โดยควบคู่ไปกับมาตรการเชิงรุก อาทิ การให้สิทธิประโยชน์ทางภาษี การจัดตั้งกองทุนอนุรักษ์เมืองเก่า และการแต่งตั้งคณะกรรมการร่วมระดับท้องถิ่น เพื่อพิจารณาวินิจฉัยการพัฒนาโครงสร้างใหม่ โดยยึดหลักการบูรณะที่มีการแทรกแซงน้อยที่สุด ซึ่งจะช่วยให้การอนุรักษ์เมืองเก่าแพร่ดำเนินไปควบคู่กับการพัฒนาทางเศรษฐกิจได้อย่างสมดุล

คำสำคัญ : มรดกวัฒนธรรม; สิ่งแวดล้อมวัฒนธรรม; มิติด้านพื้นที่ ; พื้นที่ทางประวัติศาสตร์

Abstract

This mixed-methods study examines the physical structure of Phrae Old Town, comparing Thai legal frameworks with international standards to propose sustainable conservation guidelines. Data were collected from 120 residents and 5 expert interviews. Findings reveal a significant legal gap: current Thai laws focus narrowly on state-owned monuments, failing to reflect the living urban context and its inherent values. The study recommends the expedited implementation of a 'Specific District Plan' integrated with proactive measures, including tax incentives, a conservation fund, and a local joint committee. By adhering to the principle of 'Minimal Intervention,' these strategies aim to balance historic preservation with sustainable economic development. Such measures ensure the enduring synergy between heritage value and urban vitality.

.

Keywords: cultural heritage; cultural environment; space dimension; historic sit

1. บทนำ

ปัจจุบันท่ามกลางกระแสการขยายตัวของเมืองและการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานอย่างรวดเร็ว พื้นที่ทางวัฒนธรรมและประวัติศาสตร์ทั่วโลกกำลังเผชิญภัยคุกคามต่อการสูญเสียอัตลักษณ์ในระดับสากล พื้นที่ประวัติศาสตร์ไม่ได้ถูกมองเป็นเพียงโบราณสถานที่หยุดนิ่ง แต่มีสถานะเป็น "เมืองที่มีชีวิต" (Living City) ซึ่งประชาชนยังคงใช้อยู่อาศัยและขับเคลื่อนเศรษฐกิจร่วมกับมรดกทางวัฒนธรรม ชุมชนเขตกำแพงเมืองเก่า จังหวัดแพร่ ที่ยังคงโครงสร้างกายภาพอันทรงคุณค่า ทั้งคูเมืองกำแพงเมือง และสถาปัตยกรรมไม้สัก อย่างไรก็ตาม พื้นที่นี้กำลังประสบปัญหาการรุกล้ำพื้นที่ และการเกิดสถาปัตยกรรมสมัยใหม่ที่แปลกแยกขัดแย้งกับบริบทเดิม ซึ่งนำไปสู่การเสื่อมสลายของโครงสร้างทางสังคมและรากเหง้าทางวัฒนธรรมของเมืองอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้[1-3]

แม้ไทยจะมีกฎหมายคุ้มครองโบราณสถาน แต่จากการเปรียบเทียบกับปทัสถานสากลพบ "ช่องว่างเชิงนโยบาย" (Research Gap) ที่สำคัญ เนื่องจากกฎหมายไทยยังยึดติดการอนุรักษ์แบบรวมศูนย์ มุ่งคุ้มครองเฉพาะโบราณสถานของรัฐ (Monument-centric) ไม่ครอบคลุมย่านประวัติศาสตร์ที่เป็นกรรมสิทธิ์เอกชน ขณะที่กฎหมายผังเมืองและควบคุมอาคารเน้นเพียงมิติเชิงปริมาณ (ความสูง/ระยะถอยร่น) แต่ล้มเหลวในการควบคุมมิติเชิงสุนทรียภาพ เมื่อเทียบกับสากล อาทิ สิงคโปร์ หรือญี่ปุ่น ที่ใช้ "มาตรการเชิงรุก" อาทิ สิทธิประโยชน์ทางภาษีและเงินอุดหนุน ต่างจากไทยที่เป็นมาตรการเชิงรับและการบังคับรอนสิทธิ์ ทำให้ประชาชนมองการอนุรักษ์คือภาระทางการเงิน[1][3][6][15]

บทความเรื่อง "มาตรการทางกฎหมายในการอนุรักษ์พื้นที่ทางวัฒนธรรมและประวัติศาสตร์: กรณีศึกษาชุมชนเขตกำแพงเมืองเก่า จังหวัดแพร่" จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษาโครงสร้างและประเมินสภาพปัจจุบันของย่านประวัติศาสตร์เมืองเก่าแพร่ 2) เปรียบเทียบมาตรการทางกฎหมายไทยกับหลักสากล 3) เสนอแนะมาตรการทางกฎหมายและนโยบายที่เหมาะสม ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษาครั้งนี้ คือ ข้อเสนอเชิงนโยบายที่เป็นรูปธรรม โดยเฉพาะการผลักดัน "ผังเมืองเฉพาะ"(SpecificPlan) เพื่อควบคุมมิติสุนทรียภาพระดับแปลงที่ดิน ควบคู่กับการใช้กลไกเชิงรุกทางการเงินและการตั้งคณะกรรมการพิจารณารูปแบบระดับท้องถิ่น ภายใต้หลักการแทรกแซงน้อยที่สุด(Minimum Intervention) เพื่อหลอมรวมมรดกทางประวัติศาสตร์เข้ากับพลวัตทางเศรษฐกิจของเมืองได้อย่างยั่งยืน

1.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาแนวคิด หลักการ และข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับการอนุรักษ์ย่านประวัติศาสตร์เขตเมืองเก่าแพร่

2. เพื่อเปรียบเทียบมาตรการในระดับสากลและมาตรการของต่างประเทศที่เกี่ยวข้องกับการอนุรักษ์ย่านประวัติศาสตร์

3. เพื่อวิเคราะห์มาตรการต่างๆ ของประเทศไทย ทั้งระดับนโยบายและทางกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับการอนุรักษ์ย่านประวัติศาสตร์

1.2 ขอบเขตของการวิจัย

1.ขอบเขตด้านเนื้อหา : ศึกษาทฤษฎีการสร้างเมืองโบราณล้านนาและหลักการอนุรักษ์บริบทเมือง ประวัติศาสตร์ รวมถึงวิเคราะห์ข้อกฎหมายที่เกี่ยวข้อง วิเคราะห์ปัญหาและอุปสรรคในการบังคับใช้กฎหมายปัจจุบันที่ส่งผลกระทบต่อการอนุรักษ์พื้นที่เมืองเก่า

2.ขอบเขตด้านประชากร/สถานที่ : ประชาชนที่อาศัยอยู่ในเขตชุมชนเมืองเก่าแพร่ แบ่งเป็น กลุ่มตัวอย่างเชิงปริมาณคือประชาชนและกลุ่มตัวอย่างเชิงคุณภาพผ่านการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญ ศึกษาเฉพาะบริเวณเมืองเก่า 1.15 ตารางกิโลเมตร

3.ขอบเขตด้านเวลา: ระยะเวลาดำเนินการ 6 เดือน ระหว่างเดือนตุลาคมถึงพฤศจิกายน พ.ศ. 2568

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบแนวคิด หลักการ และข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับการอนุรักษ์ย่านประวัติศาสตร์เขตเมืองเก่าแพร่

2. .ได้ทราบมาตรการในระดับสากลและมาตรการของต่างประเทศที่เกี่ยวข้องกับการอนุรักษ์ย่านประวัติศาสตร์

3. ได้นำเสนอแนวทางหรือมาตรการในการอนุรักษ์ย่านเมืองประวัติศาสตร์เมืองเก่าแพร่

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กรอบแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

การวิจัยนี้พัฒนากรอบแนวคิดจากการศึกษาและวิเคราะห์มาตรการทางกฎหมายในการอนุรักษ์พื้นที่ทางวัฒนธรรมและประวัติศาสตร์ โดยมีกรณีศึกษาคือ ชุมชนเขตกำแพงเมืองเก่า จังหวัดแพร่ โดยเฉพาะนำมาตรการของประเทศไทย มาเปรียบเทียบกับแนวคิด/หลักการสากล และมาตรการต่างประเทศ ว่ามาตรการทางกฎหมายของไทยมีปัญหาและอุปสรรคอย่างไรในการอนุรักษ์ย่านประวัติศาสตร์ แนวทางในการ แก้ไข ปรับปรุง และพัฒนามาตรการทางกฎหมาย ของประเทศไทยให้มีความครอบคลุมและสามารถรักษาคุณค่าทางวัฒนธรรมของย่านประวัติศาสตร์เขตเมืองเก่า จังหวัดแพร่ได้อย่างยั่งยืน โดยคำนึงถึงบริบททางสังคม เศรษฐกิจ และวัฒนธรรมในพื้นที

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการวิจัย

ทฤษฎีการกำหนดส่วนประกอบของเมืองชี้ให้เห็นว่าโครงสร้างและองค์ประกอบของเมืองเกิดจากปฏิสัมพันธ์ที่ซับซ้อนระหว่างมิติทางกายภาพ เศรษฐกิจ และสังคม โดยสามารถจำแนกมุมมองวิเคราะห์ได้ 5 รูปแบบหลัก ได้แก่ การพิจารณาคุณลักษณะทางกายภาพร่วมกับเศรษฐกิจและสังคม การกำหนดขอบเขตทางกายภาพ ได้แก่ คูน้ำและกำแพงเมือง รูปร่างของคันดิน องค์ประกอบที่เชื่อมโยงระหว่างกายภาพกับจิตวิญญาณ และปัจจัยพื้นฐานในการตั้งถิ่นฐาน ซึ่งปัจจัยการตั้งถิ่นฐานนี้ครอบคลุมองค์ประกอบย่อย 5 ประการ คือ ธรรมชาติ มนุษย์ สังคม โครงสร้างทางกายภาพ และโครงข่ายพื้นฐาน ทฤษฎีเหล่านี้ถือเป็นพื้นฐานที่นำมาใช้ในการออกแบบขอบเขตการวิเคราะห์โครงสร้างเมืองประวัติศาสตร์ เพื่อทำความเข้าใจบริบทของพื้นที่ศึกษาอย่างเป็นระบบและรอบด้าน [1-5]

การประเมินคุณค่าพื้นที่ ทฤษฎีด้านมรดกวัฒนธรรม ภูมิทัศน์วัฒนธรรม และสิ่งแวดล้อมวัฒนธรรมได้ขยายขอบเขตการอนุรักษ์ให้ครอบคลุมทั้งมิติรูปธรรม และนามธรรม โดยไม่จำกัดเพียงโบราณสถาน [2] แต่ยังรวมถึงกลุ่มอาคาร แหล่งธรรมชาติ และร่องรอยการตั้งถิ่นฐานที่สะท้อนวิถีชีวิต แนวคิดภูมิทัศน์และสิ่งแวดล้อมวัฒนธรรมเน้นย้ำถึงผลลัพธ์จากปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับธรรมชาติผ่านกระบวนการปรับตัวทางสังคมและภูมิปัญญา ซึ่งเป็นองค์ความรู้เชิงทฤษฎีที่สนับสนุนกระบวนการวิจัยในการกำหนดตัวแปรเพื่อประเมินคุณค่าพื้นที่ในฐานะมรดกที่มีชีวิต อันเชื่อมโยงกับอัตลักษณ์และจิตวิญญาณของชุมชนท้องถิ่นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ [9][14]

สำหรับแนวคิดการอนุรักษ์ย่านประวัติศาสตร์ ให้ความสำคัญกับบริบทของการเป็น "เมืองที่มีชีวิต" ซึ่งแตกต่างจากเมืองร้างอย่างสิ้นเชิง เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่ยังคงมีการดำเนินกิจกรรมทางสังคมและเศรษฐกิจของกลุ่มคนอย่างต่อเนื่อง หลักการจัดการเชิงพื้นที่จึงมุ่งเน้นการสร้างสมดุลระหว่างการอนุรักษ์และการเปลี่ยนแปลง ผ่านการบูรณาการแผนการอนุรักษ์เข้ากับแผนพัฒนาเมือง การควบคุมทิศทางการเปลี่ยนแปลง การออกแบบสิ่งก่อสร้างทดแทน ที่เคารพบริบทเดิม และการบริหารจัดการที่ยืดหยุ่นรองรับพลวัตของเมือง แนวคิดนี้สนับสนุนข้อถกเถียงทางวิชาการที่ว่า การอนุรักษ์มิใช่การแช่แข็งเมือง แต่เป็นการปกป้องความทรงจำร่วมทางวัฒนธรรม รักษาสภาพแวดล้อม และต่อยอดผลประโยชน์ทางเศรษฐกิจอย่างยั่งยืน [10]

เพื่อนำแนวคิดเชิงทฤษฎีไปสู่การปฏิบัติในกรอบระเบียบวิธีวิจัย การศึกษานี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีการอนุรักษ์ตามมาตรฐานสากล 7 ประการ ได้แก่ การป้องกัน การสงวนรักษา การบูรณะ การฟื้นฟู รวมถึงการปรับการใช้สอยหรือ การสร้างขึ้นใหม่ การย้ายที่ตั้ง และการสื่อความหมาย [7][9] ควบคู่กับการใช้เกณฑ์ประเมินคุณค่าตามกฎบัตรเบอร์รา ซึ่งจำแนกคุณค่าเป็น 4 ด้านหลัก คือ คุณค่าทางประวัติศาสตร์ สุนทรียภาพ วิทยาศาสตร์ และสังคม [8] รวมถึงการประเมินลักษณะองค์ประกอบทางกายภาพ นามธรรม และบริบทที่ตั้ง กรอบทฤษฎีและมาตรฐานสากลเหล่านี้ ทำหน้าที่เป็นเครื่องมือ และกรอบแนวคิด ที่รัดกุมในการสร้างแบบสอบถามและแนวทางการสัมภาษณ์ เพื่อใช้วิเคราะห์สภาพปัญหาและเสนอมาตรการทางกฎหมายที่สอดคล้องกับบริบทของพื้นที่ศึกษาได้อย่างเป็นรูปธรรม [9]

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยด้านการพัฒนาเชิงอนุรักษ์เมืองเก่า ได้สะท้อนความสำคัญของการจัดการเชิงพื้นที่และการกำหนดข้อบังคับทางกายภาพอย่างเป็นระบบ ดังกรณีศึกษาการพัฒนาเชิงอนุรักษ์เมืองเก่าลพบุรีของ ที่ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีวิจัยผ่านการวิเคราะห์ข้อมูล 4 องค์ประกอบ ได้แก่ วิวัฒนาการทางประวัติศาสตร์ โครงสร้างการเติบโตทางภูมิศาสตร์และ

ประชากร ทิศทางการขยายตัว และวิธีการพัฒนาเชิงอนุรักษ์ ข้อค้นพบสำคัญชี้ให้เห็นว่า การกำหนดทิศทางการขยายเมืองใหม่เพื่อรองรับประชากร ถือเป็นกลยุทธ์หลักในการลดแรงกดดันต่อพื้นที่ประวัติศาสตร์เดิม ควบคู่ไปกับการบังคับใช้กฎหมายควบคุมลักษณะสถาปัตยกรรมของอาคารในบริเวณใกล้เคียงโบราณสถาน เพื่อรักษาความสอดคล้องทางทัศนียภาพและสุนทรียภาพของเมือง [10-12]

การบริหารจัดการเชิงนโยบายระดับสากล กรณีศึกษาประเทศสิงคโปร์ได้แสดงให้เห็นถึงการรับมือกับพลวัตการขยายตัวของเมืองอย่างรวดเร็ว ซึ่งในอดีตเคยส่งผลให้เกิดการรุกล้ำและทำลายอาคารที่มีคุณค่าทางประวัติศาสตร์เป็นจำนวนมาก การแก้ปัญหาของสิงคโปร์อาศัยกลไกเชิงสถาบันเป็นเครื่องมือหลัก [19] โดยได้จัดตั้งหน่วยงานเฉพาะทาง คือ องค์การฟื้นฟูและพัฒนาเมือง ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2509 และผลักดันนโยบายการฟื้นฟูและอนุรักษ์เมืองอย่างเป็นรูปธรรมในช่วงปี พ.ศ. 2523 แนวทางดังกล่าวเน้นย้ำถึงความจำเป็นทางระเบียบวิธีปฏิบัติที่ต้องมีหน่วยงานกลางทำหน้าที่กำกับดูแลและบูรณาการแผนการอนุรักษ์เข้ากับการพัฒนาเมืองสมัยใหม่เพื่อรักษาอัตลักษณ์ของชาติ [19]

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้น สามารถสังเคราะห์ปัจจัยความสำเร็จเพื่อนำมาใช้เป็นกรอบแนวคิด ในการศึกษาวิจัยได้ว่า การอนุรักษ์เมืองประวัติศาสตร์ที่มีประสิทธิภาพจำเป็นต้องอาศัยมาตรการแบ่งเขตพื้นที่อย่างรัดกุม การบังคับใช้กฎหมายเพื่อควบคุมทัศนียภาพและการบูรณะพื้นที่ให้สอดคล้องกับการใช้งานตามประเพณีและวิถีชีวิตปัจจุบัน โดยมีเงื่อนไขพื้นฐานที่สำคัญที่สุดคือ กระบวนการและแผนการอนุรักษ์เหล่านั้นจะต้องได้รับการยอมรับและสนับสนุนจากผู้อยู่อาศัยในพื้นที่ ควบคู่ไปกับการมีระบบบำรุงรักษาอย่างต่อเนื่อง จึงจะก่อให้เกิดการพัฒนาเชิงอนุรักษ์ที่ยั่งยืนอย่างแท้จริง [15]

3. วิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนที่ 1 การกำหนดกรอบการวิจัยวิธีการวิจัย เครื่องมือ ช่วงเวลาดำเนินการ ประชากร และกลุ่มตัวอย่าง.

ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาโครงสร้างและองค์ประกอบของเมือง มรดกวัฒนธรรม เกณฑ์การประเมิน มาตรการอนุรักษ์ และกรณีศึกษา.

ขั้นตอนที่ 3 เก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล ระยะเวลา ประชากร และกลุ่มตัวอย่าง.

ขั้นตอนที่ 4 ศึกษาประวัติการตั้งถิ่นฐานและพัฒนาการของชุมชนเมืองเก่าแพร่ สภาพทั่วไปและลักษณะทางกายภาพชุมชน รวมถึงสำรวจวิเคราะห์ความคิดเห็นของกลุ่มตัวอย่าง.

ขั้นตอนที่ 5 สรุปผลที่ได้จากการวิเคราะห์ อภิปรายผล เสนอแนะแนวทางในการนำผลวิจัยไปใช้

ขั้นตอนที่ 6 เผยแพร่เอกสาร

3.1 รูปแบบการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้ใช้รูปแบบการวิจัยแบบผสมผสาน โดยมีการเก็บข้อมูลเชิงปริมาณจากการสอบถามประชาชนที่อยู่บริเวณรอบพื้นที่ และมีการสัมภาษณ์เชิงลึกผู้เชี่ยวชาญในประเด็น กรอบโครงสร้างและองค์ประกอบทางกายภาพของเขตเมืองเก่า แพร่และเกณฑ์ในการประเมินสภาพปัจจุบันและคุณค่าความสำคัญ

3.2 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

การสอบถามแบบรายบุคคล เพื่อสำรวจความคิดเห็นของกลุ่มตัวอย่างที่มีต่อการประเมินคุณค่าความสำคัญของมรดกวัฒนธรรม ภูมิทัศน์วัฒนธรรม และสิ่งแวดล้อมวัฒนธรรม ที่เป็นโครงสร้างและองค์ประกอบทางกายภาพของเขตเมืองเก่าแพร่ จำนวน 120 ตัวอย่าง

การสัมภาษณ์เชิงลึก เพื่อรับฟังความคิดเห็นเชิงลึกจากผู้เชี่ยวชาญในประเด็นกรอบโครงสร้างและองค์ประกอบทางกายภาพของเขตเมืองเก่าแพร่ และเกณฑ์ในการประเมินสภาพปัจจุบันและคุณค่าความสำคัญ โดยจะสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญ 5 ท่าน ประกอบด้วย นักผังเมืองระดับชำนาญการ สถาปนิกกรมศิลปากร สถาปนิก และข้าราชการในพื้นที่

4. การวิเคราะห์ข้อมูล

1. การวิเคราะห์ข้อมูลทั่วไปของกลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ ระดับการศึกษา อาชีพปัจจุบัน และระยะเวลาที่อาศัยอยู่ในเมืองแพร่ ข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำมาแจกแจงความถี่และคำนวณหา ค่าอัตราส่วนร้อยละ เพื่อแสดงสัดส่วนของผู้ตอบแบบสอบถามในแต่ละคำถามและแต่ละกลุ่ม ให้เห็นภาพรวมอย่างชัดเจน

2. การวิเคราะห์ระดับคุณค่าความสำคัญและสภาพปัจจุบัน ในส่วนที่สอง มุ่งประเมินคุณค่าของโครงสร้างทางกายภาพเมืองเก่าแพร่ โดยใช้แบบสอบถามแบบวัดเจตคติ

3.การวิเคราะห์พระราชบัญญัติหลักโดยผู้วิจัยได้ดึงข้อมูลตัวอย่างข้อบัญญัติและเทศบัญญัติจากหลายพื้นที่เพื่อนำมาศึกษาเปรียบเทียบ ได้แก่ เทศบัญญัติเทศบาลนครเชียงใหม่, เทศบัญญัติเทศบาลนครเชียงราย, เทศบัญญัติเทศบาลนครนครปฐม, เทศบัญญัติเทศบาลเมืองลพบุรี และข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร รวมถึงประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมเกี่ยวกับการคุ้มครองพื้นที่เมืองโบราณศรีมโหสถ

4. การวิเคราะห์หลักการ มาตรการ และกฎบัตรระดับสากล เพื่อนำมาวิเคราะห์ช่องโหว่และเปรียบเทียบกับมาตรการของไทย ได้แก่: กฎบัตรวอชิงตัน (Washington Charter 1987): ศึกษาจากกฎบัตรระหว่างประเทศเพื่อการอนุรักษ์เมืองและชุมชนประวัติศาสตร์ ซึ่งเน้นการบูรณาการการอนุรักษ์เข้ากับแผนพัฒนาเมือง กฎบัตรเบอร์รา (Burra Charter): ศึกษาเกณฑ์การพิจารณาประเมินคุณค่าความสำคัญของภูมิทัศน์วัฒนธรรม ซึ่งกำหนดขึ้นโดย Australia ICOMOS

5.วิเคราะห์กรณีศึกษาของเพื่อเป็นแบบแผนในการเสนอแนะมาตรการเชิงรุก

ประเทศสิงคโปร์: ศึกษาแนวทางและแผนแม่บทจาก องค์การฟื้นฟูและพัฒนาเมือง (Urban Redevelopment Authority : URA) ซึ่งเป็นองค์กรหลักที่ประกาศใช้แผนแม่บทการอนุรักษ์เมืองกับการวางผังเมืองควบคู่กัน และกำหนดรายละเอียดในการควบคุมสุนทรียภาพอย่างชัดเจน

ประเทศญี่ปุ่น: ศึกษาจากระบบกลไกของ กรมวัฒนธรรมแห่งประเทศญี่ปุ่น (Agency for Cultural Affairs) และการแก้ไข กฎหมายอนุรักษ์ทรัพย์สินทางวัฒนธรรม รวมไปถึงรายงานเชิงวิชาการจาก Architectural Institute of Japan (AIJ) เกี่ยวกับการจัดการระบบพื้นที่อนุรักษ์กลุ่มอาคารประวัติศาสตร์ ที่มีการสร้างมาตรการจูงใจทางการเงินและดึงชุมชนเข้ามามีส่วนร่วม

4.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณ

1.ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม ซึ่งผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่จบการศึกษาในระดับปริญญาตรี จำนวน 70 คน คิดเป็นร้อยละ 58.33 รองลงมาจบการศึกษา ต่ำกว่าปริญญาตรี จำนวน 36 คน คิดเป็นร้อยละ 30 ปริญญาโท จำนวน 14 คน คิดเป็นร้อยละ 11.67 ประกอบอาชีพเกี่ยวกับรับจ้าง 22 คน คิดเป็นร้อยละ 18.33 อาชีพนักวิชาการ/อาจารย์ จำนวน 21 คน คิดเป็นร้อยละ 17.50 อาชีพธุรกิจ/การค้าอาชีพ และพนักงานบริษัทเอกชน จำนวน 18 คน คิดเป็นร้อยละ 15.00 อาชีพเจ้าหน้าที่เทศบาล/ท้องถิ่น จำนวน 13 คน คิดเป็นร้อยละ 10.89 อาชีพเกษตรกรรรม จำนวน 7 คน คิดเป็นร้อยละ 5.84 และ อาชีพอื่นๆ จำนวน 4 คน คิดเป็นร้อยละ 3.33 และส่วนใหญ่อาศัยในเมืองแพร่มาเป็นระยะเวลามากกว่า 40 ปี จำนวน 50 คน คิดเป็นร้อยละ 41.67 ระยะเวลา 31-40 ปี จำนวน 39 คน คิดเป็นร้อยละ 32.50 ระยะเวลา 11-20 ปี จำนวน 15 คน คิดเป็นร้อยละ 12.50 ระยะเวลา 21-30 ปี จำนวน 15 คน คิดเป็นร้อยละ 12.50 ดังในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลพื้นฐานทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม

องค์ประกอบ	จำนวน	ร้อยละ
1.ระดับการศึกษา	**120**	**100**
ต่ำกว่าปริญญาตรี	36	30
ปริญญาตรี	70	58.33
ปริญญาโท	14	11.67
2.อาชีพปัจจุบัน	**120**	**100**
เจ้าหน้าที่เทศบาล/ท้องถิ่น	13	10.83
นักวิชาการ/อาจารย์	21	17.50
รับราชการ/รัฐวิสาหกิจ	17	14.16
พนักงานบริษัทเอกชน	18	15.00
ธุรกิจ/การค้า	18	15.00
รับจ้าง	22	18.33
เกษตรกรรรม	7	5.84
อื่นๆ	4	3.33
3.ระยะเวลาอาศัยอยู่ในเมืองแพร่	**120**	**100**
น้อยกว่า 10 ปี	2	1.67
11-20 ปี	15	12.50
21-30 ปี	14	11.67
31-40 ปี	39	32.50
มากกว่า 40 ปี	50	41.67

2:ผลการวิเคราะห์ระดับคุณค่าและสภาพปัจจุบันของโครงสร้างทางกายภาพเมืองเก่าแพร่ ดังนี้ (1) ขอบเขตและการป้องกันเมือง : ได้รับการประเมินในระดับ "ปานกลาง" (ค่าเฉลี่ย 3.13) โดยประตูยั้งม้าและประตูมารมีคะแนนสูงสุดในกลุ่มนี้คือ 3.48 และ 3.45 ตามลำดับ แต่ส่วนที่เป็นคูเมือง (น้ำคือ) และประตูชัย ได้รับคะแนนค่อนข้างต่ำคือ 2.76 และ 2.75 ซึ่งชี้ให้เห็นถึงปัญหาการเสื่อมโทรมและการสูญเสียความต่อเนื่องทางกายภาพ (2) สถานที่สำคัญของเมืองแพร่ในอดีต: ได้รับการประเมินในระดับ "มาก" (ค่าเฉลี่ย 3.63) โดย "คุ้มเจ้าหลวง" ได้รับการประเมินว่ามีคุณค่าความสำคัญสูงที่สุดในระดับ "มากที่สุด" (ค่าเฉลี่ย 4.36) รองลงมาคือ บ้านวงศ์บุรี (3.94) ศาลหลักเมือง (3.67) และสนามหลวง (3.61) (3) สถานที่สำคัญทางจิตวิญญาณ (ศาสนสถาน): ได้รับการประเมินในระดับ "มาก" (ค่าเฉลี่ย 3.84) โดยวัดหลวงได้รับคะแนนสูงสุด (4.00) รองลงมาคือวัดพระร่วง (3.89) และวัดหัวข่วง (3.87) ดังในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปะเมินคุณค่าและสภาพปัจจุบันของโครงสร้างทางกายภาพ

องค์ประกอบทางกายภาพ	x	S.D.	ระดับคุณค่า
1.ขอบเขตและการป้องกัน			
กำแพงเมือง	3.17	0.28	ปานกลาง
คูเมือง (น้ำคือ)	2.76	0.24	ปานกลาง
ประตูชัย	2.75	0.35	ปานกลาง
ประตูศรีชุม	3.25	0.21	ปานกลาง
ประตูยั้งม้า	3.48	0.40	มาก
ประตูมาร	3.45	0.30	มาก
ประตูใหม่	3.32	0.45	ปานกลาง
2.สถานที่สำคัญของเมืองแพร่			
คุ้มเจ้าหลวง	4.36	0.17	มากที่สุด
บ้านวงศ์บุรี	3.94	0.15	มาก
คุ้มวิชัยราชา	3.35	0.15	ปานกลาง
บ้านเจ้าหนานไชยวงศ์	3.10	0.36	ปานกลาง
สนามหลวง	3.61	0.38	มาก
อาคารน้ำเพชร	3.59	0.38	มาก
ศาลหลักเมือง	3.67	0.36	มาก
พิพิธภัณฑ์ป่าไม้	2.96	0.15	ปานกลาง
3.สถานที่สำคัญทางจิต			
วัดหัวข่วง	3.87	0.17	มาก
วัดศรีชุม	3.85	0.23	มาก
วัดหลวง	4.00	0.11	มาก
วัดพระนอน	3.87	0.19	มาก
วัดพงษ์สุนันท์	3.71	0.15	มาก
วัดพระบาทมิ่งเมืองวรวิหาร	3.79	0.13	มาก
วัดพระร่วง	3.89	0.13	มาก
วัดศรีบุญเรือง	3.78	0.15	มาก

3: ผลการวิเคราะห์มิติความสอดคล้องในการอนุรักษ์พบว่า ด้านมรดกวัฒนธรรม มีค่าเฉลี่ยสูงสุดที่ 3.83 โดยเฉพาะในเรื่องพื้นที่ทางประวัติศาสตร์ แสดงให้เห็นว่าชุมชนยังคงตระหนักในคุณค่าของศิลปกรรมท้องถิ่นเป็นอย่างมาก ด้านสภาพแวดล้อมชุมชน มีค่าเฉลี่ยรองลงมาที่ 3.66 แต่ในประเด็น "การเข้าถึง" ได้คะแนนเพียง 3.31 ซึ่งบ่งชี้ถึงความจำเป็นในการปรับปรุงสาธารณูปโภค สิ่งที่น่ากังวลที่สุดคือ ด้านเอกลักษณ์และอัตลักษณ์ของชุมชน ซึ่งมีค่าเฉลี่ยต่ำที่สุด (3.26) โดยเฉพาะประเด็น "ความกลมกลืนระหว่างของเดิมและของใหม่" ได้คะแนนต่ำที่สุดเพียง 3.04 สะท้อนให้เห็นปัญหาของการก่อสร้างอาคารใหม่ที่ไม่สอดคล้องกับบริบทดั้งเดิมของเมืองเก่าอย่างชัดเจน ดังในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ประเมินความสอดคล้องในการอนุรักษ์

ด้าน	รายการประเมิน	x	S.D.	คะแนน
A	**ด้านสภาพแวดล้อมชุมชน**			
1	ทัศนียภาพมองจากด้านหน้าอาคาร	3.66	0.82	มาก
2	การเข้าถึง	3.31	0.90	ปานกลาง
3	ความเหมาะสมของการใช้งานในปัจจุบัน	3.49	0.83	มาก
4	สุนทรียภาพและความสะอาด	3.43	0.85	มาก
B	**ด้านมรดกวัฒนธรรม**			
1	พื้นที่ทางประวัติศาสตร์	3.83	0.77	มาก
2	รูปแบบสถาปัตยกรรม/ภูมิสถาปัตยกรรม	3.76	0.78	มาก
3	การใช้งานสถานที่เพื่อกิจกรรมวัฒนธรรม	3.67	0.81	มาก
C	**ด้านเอกลักษณ์และอัตลักษณ์ของชุมชน**			
1	คุณภาพของการพัฒนาบริเวณโดยรอบ	3.13	0.93	ปานกลาง
2	การอนุรักษ์องค์ประกอบสถาปัตยกรรมเดิม	3.26	0.89	ปานกลาง
3	ความกลมกลืนระหว่างของเดิมและของใหม่	3.04	0.96	ปานกลาง

4.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพ

ผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นสภาพคือ "การสูญเสียความต่อเนื่องทางกายภาพ" ของโครงสร้างเมืองเก่าแพร่จากการรุกล้ำของอาคารสมัยใหม่ ซึ่งมีสาเหตุมาจากมาตรการเชิงบังคับ ในปัจจุบัน โดยเฉพาะกฎหมายการผังเมืองและควบคุมอาคารที่มุ่งเน้นการควบคุมเพียงมิติเชิงปริมาณความมั่นคง แต่ขาดความยืดหยุ่นและล้มเหลวในการควบคุมมิติเชิงสุนทรียภาพด้านรูปแบบสถาปัตยกรรมในบริบท "เมืองที่มีชีวิต" ทั้งนี้เมื่อประมวลข้อสรุปจากทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าความสำเร็จของการอนุรักษ์อย่างยั่งยืนไม่อาจพึ่งพาเพียงมาตรการห้ามปราม แต่ต้องอาศัยกลไกการแบ่งเขตพื้นที่ (Zoning) มีกฎหมายบังคับรูปแบบอาคารที่ชัดเจน จึงนำไปสู่ข้อเสนอแนะเชิงนโยบายสู่ "มาตรการเชิงรุก" โดยเร่งประกาศใช้ "ผังเมืองเฉพาะ" ควบคู่กับการจัดตั้งกองทุนอนุรักษ์เมืองเก่าแบบมีส่วนร่วมในระดับท้องถิ่น เพื่อรักษาสมดุลระหว่างมรดกทางวัฒนธรรมและการขยายตัวของเมืองอย่างเป็นรูปธรรม ดังในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบมาตรการทางกฎหมาย

ประเด็นเปรียบเทียบ	ประเทศไทย	สากลและต่างประเทศ
1.ขอบเขตการคุ้มครอง	มุ่งคุ้มครองเฉพาะ "ตัวโบราณสถานของรัฐ" แบบแยกส่วน	มุ่งคุ้มครองแบบบูรณาการทั้งย่านประวัติศาสตร์ ในฐานะ "เมืองที่มีชีวิต" รวมถึงอาคาร วิถีชีวิต และสภาพแวดล้อม
2.การควบคุมสุนทรียภาพและรูปแบบอาคาร	พ.ร.บ.ฯ มีประสิทธิภาพเพียง "การควบคุมเชิงปริมาณ"แต่ล้มเหลวในการควบคุมเชิงคุณภาพและสุนทรียภาพ	กำหนดรายละเอียดอย่างชัดเจน ระดับแปลงที่ดิน และมีแนวทางการออกแบบอาคารกลมกลืนกับบริบทเดิม
3.มาตรการสนับสนุนและแรงจูงใจ	กฎหมายมีลักษณะเชิงรับและเป็นการรอนสิทธิ์ ขาดระบบการชดเชยหรือมาตรการจูงใจ ทำให้ภาคเอกชนมองว่าการอนุรักษ์เป็นภาระทาง	มีการใช้ "มาตรการเชิงรุก" อาทิ มีระบบอุดหนุนงบประมาณในการซ่อมแซมอาคาร และระบบลดหย่อนภาษี เพื่อสร้างแรงจูงใจ และแบ่งเบาภาระของเอกชน
4.การมีส่วนร่วมของชุมชน	ขาดกลไกในการให้ประชาชนร่วมพิจารณาการพัฒนาเมืองระดับปฏิบัติการ	ประชาชนมีกระบวนการมีส่วนร่วมตั้งแต่ ร่างข้อบัญญัติ จนถึงตั้งคณะกรรมการอนุรักษ์

4.3 การเชื่อมโยงผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ

วิเคราะห์แนวทางการอนุรักษ์เมืองเก่าแพร่ผ่านการบูรณาการระเบียบวิธีวิจัยแบบผสมผสาน เพื่อแก้ปัญหาความเสื่อมโทรมของมรดกทางวัฒนธรรมและข้อจำกัดของกฎหมายในปัจจุบัน ข้อค้นพบสำคัญระบุว่า แม้โบราณสถานบางแห่ง "คุ้มเจ้าหลวง" จะยังคงได้รับความสำคัญในระดับสูง แต่โครงสร้างพื้นฐานทางประวัติศาสตร์อย่างคูเมืองและกำแพงเมืองกลับได้รับความนิยมลดลงเนื่องจากการบุกรุกของอาคารสมัยใหม่ ปัญหาหลักที่พบคือความไม่กลมกลืนระหว่างสถาปัตยกรรมเก่าและใหม่ ซึ่งเกิดจากข้อจำกัดของพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 และกฎหมายผังเมืองที่เน้นควบคุมเพียงมิติเชิงปริมาณแต่ขาดมาตรการควบคุมสุนทรียภาพเชิงคุณภาพ งานวิจัยจึงเสนอให้มีการปรับเปลี่ยนกระบวนทัศน์จากการบังคับใช้กฎหมายเชิงรุกที่ลิดรอนสิทธิ์ ไปสู่การใช้ "มาตรการเชิงรุก การให้เงินอุดหนุน สิทธิประโยชน์ทางภาษี และการจัดทำผังเมืองเฉพาะ เพื่อสร้างความร่วมมือกับภาคเอกชนในการรักษาอัตลักษณ์ของเมืองเก่าอย่างยั่งยืน

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งสองส่วนสอดคล้องกันอย่างชัดเจนว่า แม้สถานที่ทางประวัติศาสตร์จะมีคุณค่าสูง แต่เมืองเก่าแพร่กำลังสูญเสียอัตลักษณ์จากอาคารเกิดใหม่ที่ไม่สอดคล้องกับบริบทดั้งเดิม ซึ่งเป็นผลจากจุดอ่อนของกฎหมายปัจจุบันที่เน้นแต่มาตรการเชิงบังคับ สรุปว่า ประเทศไทยต้องเร่งปรับกระบวนทัศน์โดยการใช้ผังเมืองเฉพาะร่วมกับมาตรการเชิงรุกเพื่อสร้างความร่วมมือจากทุกภาคส่วนอย่างยั่งยืน

5. สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

วิจัยเรื่องนี้เป็นการศึกษาที่บูรณาการทั้งระเบียบวิธีวิจัยเชิงปริมาณจากแบบสอบถาม และเชิงคุณภาพจากการสัมภาษณ์เชิงลึก เพื่อประเมินสภาพปัจจุบันและข้อจำกัดของกฎหมาย ตลอดจนเสนอแนะแนวทางที่สอดคล้องกับมาตรฐานสากล โดยสามารถสรุปผล อภิปราย และให้ข้อเสนอแนะได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

1.ผลการศึกษาสภาพปัจจุบันและคุณค่าของเขตเมืองเก่าแพร่ โครงสร้างทางกายภาพและสถานที่สำคัญของเมืองเก่าแพร่ (กำแพงเมือง คูเมือง คุ้มเจ้าหลวง และศาสนสถาน) ยังคงมีคุณค่าทางประวัติศาสตร์ในระดับสูงมาก ปัญหาที่พบ พื้นที่กำลังเผชิญ "การสูญเสียความต่อเนื่องทางกายภาพ" จากการบุกรุกพื้นที่ และมีปัญหาการเกิดสถาปัตยกรรมใหม่ที่แปลกแยก ขาดความกลมกลืนกับบริบทดั้งเดิมของเมืองเก่า

2.ผลการเปรียบเทียบมาตรการสากลและของต่างประเทศ ให้ความสำคัญกับการอนุรักษ์บริบทเมืองที่มีชีวิตทั้งย่าน ไม่ใช่แค่อาคารเดี่ยว กลไกความสำเร็จต่างประเทศประสบความสำเร็จจากการใช้ "มาตรการเชิงรุก" (Positive Measures) อาทิ มีระบบเงินอุดหนุนและสิทธิประโยชน์ทางภาษี เพื่อสร้างแรงจูงใจให้เอกชนร่วมดูแลอาคาร และมีการบูรณาการแผนอนุรักษ์เข้ากับแผนพัฒนาเมืองอย่างชัดเจน

3.ผลการวิเคราะห์กฎหมายไทยและข้อเสนอแนะข้อจำกัดของกฎหมายไทยปัจจุบัน คุ้มครองเฉพาะตัวอาคารของรัฐ สามารถควบคุมได้เพียงมิติเชิงปริมาณ (ความสูง/ระยะถอยร่น) แต่ล้มเหลวในการควบคุมมิติเชิงคุณภาพและสุนทรียภาพ (วัสดุ/ สีสัน) นอกจากนี้ยังเป็นมาตรการเชิงรับและการรอนสิทธิ์ ทำให้เอกชนมองการอนุรักษ์เป็นภาระ

ข้อเสนอแนะทางกฎหมายและนโยบาย

1.บังคับใช้ "ผังเมืองเฉพาะ" เพื่อเป็นเครื่องมือหลักในการควบคุมการออกแบบชุมชนเมืองและสุนทรียภาพลึกถึงระดับแปลงที่ดิน

2.ใช้กลไกมาตรการเชิงรุก: จัดตั้ง "กองทุนอนุรักษ์เมืองเก่า" ให้สิทธิประโยชน์ทางภาษี เพื่อชดเชยให้เอกชนในการบูรณะอาคาร

3.จัดตั้ง "คณะกรรมการ" ระดับท้องถิ่น และยึดหลักการแทรกแซงตัวอาคารให้น้อยที่สุด เพื่อรักษาความแท้จริงทางประวัติศาสตร์และสร้างสมดุลระหว่างการอนุรักษ์และการพัฒนาเมือง

5.2 อภิปรายผล

การอภิปรายผลการวิจัยมุ่งเน้นการเชื่อมโยงข้อค้นพบเชิงประจักษ์กับกรอบทฤษฎีและมาตรฐานสากล ดังนี้:

1. การเปลี่ยนผ่านสู่ "เมืองประวัติศาสตร์ที่มีชีวิต" (Living City) ข้อค้นพบที่ว่าโครงสร้างพื้นฐานโบราณ (กำแพงเมือง/คูเมือง) กำลังสูญเสียความต่อเนื่องทางกายภาพ สอดคล้องกับแนวคิดของ กฎบัตรวอชิงตัน (Washington Charter 1987) ที่เน้นว่าการอนุรักษ์เมืองต้องบูรณาการเข้ากับแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคม และต้องรักษาความสัมพันธ์ระหว่างอาคารกับพื้นที่ว่าง ไม่ใช่เพียงการรักษาโบราณสถานรายหลัง [22]

2. สุนทรียภาพและการควบคุมสถาปัตยกรรมทดแทน (Infill Design) ปัญหาความไม่กลมกลืนของอาคารใหม่ที่พบในข้อมูลเชิงสถิติ (3.04) สอดคล้องกับงานวิจัยของ ประสงค์ เอี่ยมอนันต์ (2534) และแนวทางของ URA ประเทศสิงคโปร์ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการขาดแนวทางการตีความทางทัศนศิลป์ที่เคารพบริบทเดิม เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำลายอัตลักษณ์หรือ "ความรู้สึกของย่าน" [19]

3. การมีส่วนร่วมและมาตรการเชิงรุก (Positive Measures) ผลการศึกษาที่เสนอให้ใช้มาตรการทางเงินและสิทธิประโยชน์ทางภาษี สอดคล้องกับงานวิจัยของ ณัฐพงศ์ พันธ์น้อย (2557) และ ยงธนิศร์ พิมลเสถียร (2557) เกี่ยวกับระบบของประเทศญี่ปุ่นที่ประสบความสำเร็จจากการสร้างแรงจูงใจ นอกจากนี้ การเสนอให้จัดตั้ง คณะกรรมการพิจารณารูปแบบสถาปัตยกรรมระดับท้องถิ่น ยังสอดคล้องกับทฤษฎีบันไดการมีส่วนร่วมของ Arnstein (1969) ที่สนับสนุนการกระจายอำนาจการตัดสินใจสู่ชุมชน [20-21]

4. หลักการบูรณะและการรักษาความแท้จริง ผู้วิจัยยึดหลัก "การแทรกแซงน้อยที่สุด" (Minimum Intervention) ตาม กฎบัตรเวนิสโดยให้ความสำคัญกับการบูรณะ (Restoration) มากกว่าการสร้างใหม่ (Reconstruction) เพื่อป้องกันการเกิด "ประวัติศาสตร์จำลอง" หรือโบราณสถานปลอม ซึ่งสอดคล้องกับเกณฑ์การประเมินคุณค่าสี่ด้านของ กฎบัตรออสเตรเลีย [8][12]

5.3 ข้อเสนอแนะ

การนำหลักวิศวกรรมตรวจสอบ (Engineering Inspection) มาใช้ในงานอนุรักษ์และบริหารจัดการพื้นที่เมืองเก่า ช่วยลดความขัดแย้งกับประชาชนในชุมชนผ่านกลไกสำคัญหลายด้าน ดังนี้

การเปลี่ยนจากมาตรการเชิงรับไปสู่เครื่องมือเชิงรุก โดยปกติมาตรการทางกฎหมายมักเป็นลักษณะเชิงรับหรือการบังคับรอนสิทธิ์ ซึ่งชาวบ้านมักมองว่าการอนุรักษ์เป็น "ภาระ" มากกว่าโอกาส ,แต่การใช้หลักวิศวกรรมตรวจสอบเป็นการใช้เครื่องมือเชิงรุกเพื่อประเมินและบริหารจัดการพื้นที่อย่างเป็นระบบ ทำให้เกิดการยอมรับในเชิงปฏิบัติมากกว่าการใช้กฎหมายบังคับเพียงอย่างเดียว

การประเมินสภาพที่แม่นยำและเป็นธรรม หลักการตรวจสอบอาคารและการตรวจพิสูจน์ทางวิศวกรรมช่วยให้การประเมินความเสียหายขององค์ประกอบทางกายภาพ เป็นไปอย่างแม่นยำและเป็นวิทยาศาสตร์ สิ่งนี้ช่วยระบุได้ชัดเจนว่าส่วนใดควร "บูรณะ" (Restoration) หรือส่วนใดจำเป็นต้อง "สร้างขึ้นใหม่" (Reconstruction) ลดการใช้ดุลยพินิจส่วนบุคคลของเจ้าหน้าที่ซึ่งอาจนำไปสู่ความขัดแย้ง

การรับรองความมั่นคงปลอดภัยในการใช้งาน การตรวจสอบความมั่นคงทางวิศวกรรมและความปลอดภัยด้านอัคคีภัย ก่อนอนุญาตให้ดัดแปลงหรือซ่อมแซมอาคารเก่า ช่วยให้ชาวบ้านมั่นใจว่าอาคารที่ตนอาศัยอยู่มีความปลอดภัยตามมาตรฐานวิศวกรรมปัจจุบันควบคู่ไปกับการอนุรักษ์ การจัดทำมาตรฐานทางเทคนิคเพื่อช่วยในการพัฒนา "แบบแผนมาตรฐาน" สำหรับการบูรณะอาคารไม้พื้นถิ่นหรือสถาปัตยกรรมล้านนา ทำให้การซ่อมแซมเป็นไปตามหลักวิชาการและมีคุณภาพ เมื่อมีคู่มือที่ชัดเจน ประชาชนจะเข้าใจวิธีการปรับปรุงอาคารที่ถูกต้อง

การสนับสนุนการตัดสินใจของคณะกรรมการร่วม: ข้อมูลทางวิศวกรรมตรวจสอบเป็นฐานข้อมูลสำคัญให้แก่ "คณะกรรมการร่วมระดับท้องถิ่น" ประกอบด้วยชาวบ้าน นักวิชาการ และภาครัฐ ใช้ในการพิจารณาวินิจฉัยความสอดคล้องของงานออกแบบสถาปัตยกรรมใหม่

5.4 ข้อเสนอแนะเพื่อการนำไปใช้ในอนาคต

ทิศทางการวิจัยในอนาคตควรเน้นการบูรณาการข้ามศาสตร์ระหว่างวิศวกรรมและสถาปัตยกรรม เพื่อพัฒนาเกณฑ์มาตรฐานการตรวจสอบอาคารประวัติศาสตร์ที่สอดคล้องกับบริบทสถาปัตยกรรมพื้นถิ่น ควบคู่ไปกับการวิจัยเชิงนโยบายเพื่อขับเคลื่อนมาตรการเชิงรุกทางเศรษฐศาสตร์และกฎหมาย อาทิ การจัดตั้งกองทุนอนุรักษ์และสิทธิประโยชน์ทางภาษี เพื่อสร้างแรงจูงใจแก่ภาคเอกชน นอกจากนี้ ควรพัฒนากรอบการประเมินผลกระทบต่อมรดกทางวัฒนธรรมระดับท้องถิ่น (Local-level HIA) เพื่อเป็นเครื่องมือมาตรฐานในการลดทอนผลกระทบจากการปรับเปลี่ยนการใช้สอยอาคาร โดยยึดหลักการแทรกแซงน้อยที่สุด ท้ายที่สุด ควรให้ความสำคัญกับการวิจัยเชิงปฏิบัติการเพื่อส่งเสริมกลไกการมีส่วนร่วมของชุมชน ผ่านการจัดทำคู่มือการปรับปรุงอาคารสำหรับประชาชน และการจัดตั้งคณะกรรมการพิจารณารูปแบบสถาปัตยกรรมระดับท้องถิ่น เพื่อผสานความร่วมมือระหว่างนักวิชาการและปราชญ์ชาวบ้าน ซึ่งจะช่วยลดความขัดแย้งและนำไปสู่การอนุรักษ์เมืองที่มีชีวิตควบคู่กับการพัฒนาเมืองได้อย่างยั่งยืน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ศึกษาวิจัยขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูง และขอขอบพระคุณสาขาวิชาการตรวจสอบและกฎหมายวิศวกรรม มหาวิทยาลัยรามคำแหง ที่เปิดโอกาสให้ผู้วิจัยได้เข้ามาศึกษาหาความรู้

สุดท้ายขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่เปิดโอกาสให้ผู้วิจัยได้ส่งผลงานนำเสนอผลงานวิจัยในงานประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ครั้งที่ 9

เอกสารอ้างอิง

[1] รหัตร โรจนประดิษฐ์, 2545 อ้างถึงใน ชูเกียรติ นุราช, 2553: 15-16

[2] ธิดา สาระยา, 2537 ประวัติศาสตร์อารยธรรมไทย History of Thai civilization พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพมหานคร: อมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง 2549 ,106 107

[3] สุรพล ดำริห์กุล. (2562). เขลางค์นคร และเมืองลำพาง มรดกประวัติศาสตร์แห่งลุ่มน้ำวัง / สุรพล ดำริห์กุล. : จากฐานข้อมูล (Chiang Mai University Digital Collections). 5-6

[4] เกรียงไกร เกิดศิริ.(2549)."เชียงตุง:ภูมิทัศน์วัฒนธรรมเมืองโบราณและองค์ประกอบของเมืองร่วมวัฒนธรรมล้านนา"หน้าจั่ว 3, 4 (กันยายน 2549) : 66-89.

[5] ชุติมา สุรเชษฐพงษ์. (2554). "โครงสร้างและองค์ประกอบของเอกลักษณ์สิ่งแวดล้อมทางวัฒนธรรมเมืองเชียงคาน."วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาการวางแผนชุมชนเมืองและสภาพแวดล้อมบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.

[6] คณะกรรมการฝ่ายประมวลเอกสารและจดหมายเหตุ ในคณะกรรมการอำนวยการจัดงานเฉลิมพระเกียรติพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว.(2542).วัฒนธรรม พัฒนาการทางประวัติศาสตร์ เอกลักษณ์และภูมิปัญญาจังหวัดแพร่.พิมพ์ครั้งที่ 1.กรุงเทพฯ:กรมศิลปากร

[7] พัฒนาการทางประวัติศาสตร์ เอกลักษณ์และภูมิปัญญาเพื่อพัฒนาการท่องเที่ยวในพื้นที่มรดกวัฒนธรรมมีชีวิต: กรณีศึกษาพื้นที่อิวามิกินซัง ประเทศญี่ปุ่น." วารสารวิชาการ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 63 (2557): 29-42.

[8] Burra Australia ICOMOS, 1992: 73 , อ้างถึงใน เจษฎ์ศิริ เถือนมูลละ , 2553: 20)

[9] สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2554).ชุดความรู้ด้านการอนุรักษ์ พัฒนาและบริหารจัดการเมืองเก่า เล่มที่ 1 ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับเมืองเก่าในประเทศไทยกรุงเทพฯ. (อัดสำเนา)

[10] ประสงค์ เอี่ยมอนันต์. (2534)."การพัฒนาเชิงอนุรักษ์เมืองเก่าลพบุรี. หน้าจั่ว, ฉบับที่ 11: 102-116

[11] พุฑฒจักร สิทธิ. การมีส่วนร่วมของประชาชนในการบริหารจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมในเขตพื้นที่เทศบาลตำบลนาหว้า อำเภอนาหว้า จังหวัดนครพนม สถาบันพระปกเกล้า, 2556.

[12] ยงธนิศร์ พิมลเสถียร. การปรับปรุงฟื้นฟูเมืองและการอนุรักษ์เมือง, พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร:สำนักพิมพ์หาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2557.

[13] ยศศักดิ์ โกไศยกานนท์. กฎหมายคุ้มครองมรดกภูมิปัญญาทางวัฒนธรรม. กรุงเทพมหานคร:สำนักพิมพ์วิญญชน, 2559.

[14] วศิน อิงคพัฒนากุล. การอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมธรรมชาติและมรดกทางวัฒนธรรม. นครปฐม:มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2548.

[15] สำนักความร่วมมือด้านทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมระหว่างประเทศ. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการพัฒนายั่งยืน. กรุงเทพมหานคร: อมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง, 2556.

[16] สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. ความรู้ด้านการอนุรักษ์ คุ้มครองแหล่งมรดกโลกสำหรับเยาวชน. กรุงเทพมหานคร: โมโนกราฟ สตูดิโอ จำกัด, 2556.

[17] สำนักโบราณคดี กรมศิลปากร. พระราชบัญญัติพระราชบัญญัติโบราณสถานแห่งชาติ โบราณวัตถุ ศิลปวัตถุ และพิพิธสถานแห่งชาติ พ.ศ.2504 แก้ไขเพิ่มเติมโดยพระราชบัญญัติพระราชบัญญัติโบราณสถานแห่งชาติ โบราณวัตถุ ศิลปวัตถุ และพิพิธสถานแห่งชาติ (ฉบับที่2) พ.ศ.2535 พร้อมด้วยกฎหมายที่เกี่ยวข้อง. พิมพ์ครั้งที่ 14. กรุงเทพมหานคร สำนักพิมพ์สมาพันธ์, 2553.

[18] Architectural Institute of Japan (AIJ). Community-Based Historical Townscape Conservation (Machinami Hozenkata achizukuri).Tokyo:Maruzen,2004.

[19] การปรับปรุงและอนุรักษ์อาคารโบราณตามข้อกำหนดขององค์การฟื้นฟูและพัฒนาเมืองสิงคโปร์ จาก Urban Redevelopment Authority; URA) UR, http://www.ura.gov.sg/uol/

[20] Act on Protection of Cultural Properties (Bunkazai Hogo Hou;文化財保護i#) Act No. 214 of 1950

[21] Arnstein, S. R. (1969). A Ladder of Citizen Participation. Journal of the American Institute of Planners, 35(4), 216-224. https://doi.org/10.1080/01944366908977225

[22] ICOMOS. (1998a). Charter for the conservation of historic towns and urban areas (Washington Charter 1987). International Charters for Conservation and Restoration. Stockholm: ICOMOS.



ประวัติผู้เขียนบทความ :นายอธิรมย์ ณัฏฐ์ณภัทร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี สถาปัตยกรรมศาสตร์ จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การพัฒนาสเปรย์ชีวภาพระงับกลิ่นรองเท้าจากสารสกัดแทนนินเปลือกกล้วยน้ำว้า สู่นวัตกรรมสีเขียวเพื่อความยั่งยืน

Bio-Deodorant Shoe Spray from Cultivated Banana Peel Tannin Extract Leading to Sustainable Green Innovation

ปิยพร สีสินธุ์[1] ฤทัยชนก ทิ้งชั่ว[1] ภัทริกา สูงสมบัติ[1] นิภาพร ปัญญา[2] ภภัสร สิงหธรรม[2] กฤษดา เสือเอี่ยม[3] และดวงฤทัย นิคมรัฐ[1*]

[1]สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถ.ประชาราษฎร์ 1แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กทม. 10800
[2]สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถ.ประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กทม. 10800
[3]สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถ.ประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กทม. 10800
ผู้ประพันธ์หลัก: duongruitai.n@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนานวัตกรรมสเปรย์สีเขียวระงับกลิ่นรองเท้าจากสารสกัดแทนนินเปลือกกล้วยน้ำว้า (*Musa sapientum* L.) เพื่อทดแทนการใช้สารเคมีสังเคราะห์และลดขยะทางการเกษตรตามหลักเศรษฐกิจหมุนเวียน ผลการศึกษาพบว่าการสกัดด้วยเอทานอลร้อยละ 70 ให้ร้อยละผลผลิต 5.00 และมีปริมาณแทนนินรวม 1.396 + 0.248 mg TAE/g extract สารสกัดมีประสิทธิภาพในการยับยั้งแบคทีเรียก่อกลิ่น S. aureus ได้อย่างดีเยี่ยมที่ค่า MIC 3.0 x 10^{-8} mg/mL ผลิตภัณฑ์สเปรย์ที่พัฒนาขึ้นมีความคงตัวทางกายภาพสูงและมีความปลอดภัยระดับเซลล์ (Non-hemolytic) ในการใช้งานจริงสามารถลดปริมาณแบคทีเรียสะสมได้ร้อยละ 50-60 ภายใน 30 นาที สรุปได้ว่านวัตกรรมสเปรย์ชีวภาพนี้เป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพ ปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: แทนนิน, เปลือกกล้วยน้ำว้า, นวัตกรรมสีเขียว, ระงับกลิ่นรองเท้า, ความเข้ากันได้ทางชีวภาพ

Abstract

This research aims to develop an eco-friendly biospray for shoe odor neutralization using crude tannin extract from banana peels (*Musa sapientum* L.), promoting the substitution of synthetic chemicals and agricultural waste reduction under the Circular Economy framework. The study utilized 70% ethanol extraction, achieving a percentage yield of 5.00% with a total tannin content of 1.396 + 0.241 mg TAE/g extract. The extract exhibited exceptional antimicrobial efficacy against the primary odor-causing bacterium, Staphylococcus aureus, with a Minimum Inhibitory Concentration (MIC) of 3.0 x 10^{-8} mg/mL. The formulated biospray demonstrated high physical stability and confirmed biocompatibility through non-hemolytic safety at the cellular level. In-use efficacy testing revealed a significant 50–60% reduction in accumulated bacterial load within 30 minutes of application. In conclusion, this innovative biospray represents a highly effective, user-safe, and environmentally sustainable alternative for personal hygiene and waste valorization.

Keywords: Tannin; Banana peel; Green innovation; Shoe odor Neutralization; Biocompatibility

1. บทนำ

ปัจจุบันที่มีปัญหาของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate change) และการเสื่อมโทรมของสิ่งแวดล้อมที่นับเป็นวิกฤตการณ์ระดับโลกที่ต้องได้รับการแก้ไขอย่างเร่งด่วน หนึ่งในปัจจัยสำคัญที่เร่งให้เกิดปัญหาดังกล่าวคือ ภาคการผลิตอุตสาหกรรมที่ยังคงพึ่งพาสารเคมีสังเคราะห์จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานสูงและปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกปริมาณมหาศาลสู่ชั้นบรรยากาศ [1] นอกจากนี้ ปัญหาของการตกค้างของสารเคมีเหล่านี้ยังก่อให้เกิดมลพิษสะสมในระบบนิเวศและส่งผลกระทบโดยตรงต่อสุขภาพของมนุษย์ [2] ด้วยเหตุนี้แนวคิดนวัตกรรมสีเขียว (Green innovation) จึงเข้ามามีบทบาทสำคัญในการจัดการ โดยมุ่งเน้นการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรธรรมชาติเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาสกัดเป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (Bioactive compounds) จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่ช่วยบรรเทาภาวะโลกร้อนได้อย่างเป็นรูปธรรม ทั้งในแง่ของการลดปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ (Carbon footprint) จากการหลีกเลี่ยงกระบวนการทางเคมีและการลดการปล่อยก๊าซมีเทน ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกที่มีความรุนแรงกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 28 เท่า ที่มักเกิดจากการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนของขยะอินทรีย์ที่ถูกทิ้งทับถมในหลุมฝังกลบ [3]

ในระดับการใช้ชีวิตประจำวัน ปัญหาสุขอนามัยที่พบได้บ่อย อย่าง "กลิ่นอับในรองเท้า" เป็นอีกหนึ่งตัวอย่างของการพึ่งพาสารเคมีสังเคราะห์อย่างแพร่หลาย แท้จริงแล้วกลิ่นไม่พึงประสงค์นี้ไม่ได้เกิดจากเหงื่อโดยตรง แต่เกิดจากสภาวะอับชื้นภายในรองเท้าที่เอื้อต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ โดยเฉพาะกลุ่มแบคทีเรียประจำถิ่นบนผิวหนัง เช่น Staphylococcus aureus และจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม เช่น Escherichia coli แบคทีเรียเหล่านี้จะหลั่งเอนไซม์ออกมาย่อยสลายกรดอะมิโนและลิพิดในเหงื่อ เกิดเป็นสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds: VOCs) สายสั้น เช่น กรดไอโซวาเลอริก (Isovaleric acid) ซึ่งเป็นต้นเหตุสำคัญของกลิ่นเหม็นเปรี้ยวและกลิ่นอับรุนแรง [4, 5] แม้ว่าผลิตภัณฑ์ระงับกลิ่นในท้องตลาดจะสามารถแก้ปัญหาได้ แต่ส่วนใหญ่มักประกอบด้วยสารเคมีฆ่าเชื้อ (Synthetic biocides) ที่ออกฤทธิ์เพียงชั่วคราว เสี่ยงต่อการระคายเคืองผิวหนัง และอาจทิ้งสารตกค้างที่เป็นพิษเมื่อถูกชะล้างลงสู่แหล่งน้ำ [6]

เพื่อตอบสนองต่อปัญหาดังกล่าวอย่างบูรณาการภายใต้หลักเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular economy) งานวิจัยนี้จึงให้ความสนใจในการนำ “เปลือกกล้วยน้ำว้า” ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีปริมาณมหาศาลในประเทศไทยมาสร้างมูลค่าเพิ่ม (Upcycling) การศึกษาทางพฤกษเคมีระดับนานาชาติพบว่า เปลือกกล้วยอุดมไปด้วยสารประกอบกลุ่มโพลีฟีนอล (Polyphenols) โดยเฉพาะ “แทนนิน (Tannins)” ในปริมาณสูง [7] แทนนินเป็นสารประกอบโมเลกุลขนาดใหญ่ที่มีฤทธิ์ต้านจุลชีพ (Antimicrobial activity) อย่างโดดเด่น กลไกที่สำคัญคือการที่กลุ่มไฮดรอกซิล (Hydroxyl groups) ในโครงสร้างของแทนนินจะเข้าจับกับโปรตีนบริเวณเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรีย ส่งผลให้โปรตีนตกตะกอน ผนังเซลล์สูญเสียสภาพความซึมผ่าน (Permeability) และไปยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิต ทำให้เซลล์แบคทีเรียตายในที่สุด [8, 9] การประยุกต์ใช้แทนนินจากธรรมชาติจึงสามารถจัดการกับแบคทีเรียก่อกลิ่นที่ต้นเหตุได้อย่างมีประสิทธิภาพ ปลอดภัย และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

จากหลักการและเหตุผลข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) สกัดและวิเคราะห์หาปริมาณแทนนินหยาบจากเปลือกกล้วยน้ำว้า 2) ประเมินประสิทธิภาพของสารสกัดในการยับยั้งเชื้อ S. aureus ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของกลิ่นอับ และ E. coli ซึ่งเป็นดัชนีชี้วัดด้านสุขาภิบาล และ 3) พัฒนาผลิตภัณฑ์สเปรย์ชีวภาพระงับกลิ่นรองเท้า พร้อมทั้งประเมินประสิทธิภาพ ความคงตัว และความปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน งานวิจัยนี้นับเป็นก้าวสำคัญในการพัฒนานวัตกรรมผลิตภัณฑ์สีเขียว ซึ่งไม่เพียงแต่ช่วยยกระดับสุขอนามัยในชีวิตประจำวัน แต่ยังช่วยลดการพึ่งพาสารเคมีสังเคราะห์ บรรเทาปัญหาขยะทางการเกษตร และขับเคลื่อนสังคมสู่วิถีการพัฒนาอย่างยั่งยืนอย่างแท้จริง [10]

2. ขั้นตอนการทดลอง (Experimental Procedures)

การวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นการพัฒนาผลิตภัณฑ์ภายใต้แนวทางเคมีสีเขียว (Green Chemistry) เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานหลักดังนี้

2.1 การเตรียมตัวอย่างและการสกัดสารชีวภาพ

นำเปลือกกล้วยน้ำว้าซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาล้างทำความสะอาด หั่นเป็นชิ้นขนาดเล็ก และนำไปอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เพื่อรักษาสภาพของสารประกอบพฤกษเคมี (Phytochemicals) โดยเฉพาะสารกลุ่มโพลีฟีนอลที่สลายตัวได้ง่ายเมื่อสัมผัสความร้อนสูง [11] นำเปลือกกล้วยอบแห้งมาบดละเอียดและสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพด้วยเทคนิคการแช่ (Maceration) โดยใช้ตัวทำละลายเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 70 (ปริมาตร/ปริมาตร) ซึ่งเป็นตัวทำละลายที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Eco-friendly solvent) เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีพิษ [12] จากนั้นระเหยแยกตัวทำละลายออกด้วยเครื่องระเหยสารแบบหมุน (Rotary evaporator) ภายใต้สภาวะสุญญากาศ จนได้สารสกัดหยาบแทนนินเข้มข้น

2.2 การวิเคราะห์หาปริมาณแทนนินรวม

นำสารสกัดหยาบที่ได้มาวิเคราะห์หาปริมาณแทนนินรวมด้วยเทคนิค Folin-Ciocalteu colorimetric assay ซึ่งเป็นวิธีมาตรฐานสากลที่มีความแม่นยำสูง [13] โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer) นำไปเทียบกับกราฟมาตรฐานกรดแทนนิก เพื่อคำนวณและรายงานผลในหน่วยมิลลิกรัมสมมูลของกรดแทนนิกต่อกรัมของสารสกัด (mg TAE/g extract) ขั้นตอนนี้ถือเป็นกระบวนการควบคุมคุณภาพ (Quality control) เพื่อยืนยันความเข้มข้นของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพก่อนนำไปพัฒนาสูตรผลิตภัณฑ์ [14]

2.3 การทดสอบประสิทธิภาพการต้านแบคทีเรียก่อกลิ่น

ประเมินฤทธิ์การยับยั้งจุลชีพของสารสกัดด้วยเทคนิค Broth Microdilution เพื่อหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถยับยั้งเชื้อ (Minimum Inhibitory Concentration: MIC) [15] โดยทดสอบกับแบคทีเรียเป้าหมาย 2 ชนิด ได้แก่ Staphylococcus aureus (S. aureus) ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเกิดกลิ่นอับ และ Escherichia coli (E. coli) ซึ่งเป็นดัชนีชี้วัดการปนเปื้อนทั่วไป [16] เพื่อยืนยันประสิทธิภาพในการระงับกลิ่นที่ต้นเหตุ

2.4 การพัฒนาสูตรผลิตภัณฑ์นวัตกรรมสเปรย์สีเขียว

นำสารสกัดแทนนินหยาบที่ผ่านการประเมินค่า MIC มาพัฒนาเป็นสูตรสเปรย์ระงับกลิ่นรองเท้า โดยใช้น้ำกลั่นและตัวทำละลายทางชีวภาพ (Bio-solvents) โดยคัดเลือกความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุด (Optimal concentration) ที่ 0.8 mg/mL ซึ่งเป็นระดับความเข้มข้นที่ครอบคลุมการฆ่าเชื้ออย่างเด็ดขาด (Bactericidal effect) แต่ยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยต่อเนื้อเยื่อมนุษย์ นำมาผสมตามสัดส่วนด้วยสารสกัด 1 ส่วน : น้ำกลั่น 99 ส่วน โดยใช้น้ำกลั่นและตัวทำละลายทางชีวภาพ (Bio-solvents) สูตรนี้ถูกออกแบบมาเพื่อหลีกเลี่ยงการใช้สารพาราเบนและสารระงับกลิ่นสังเคราะห์สูตรนี้ถูกออกแบบมาเพื่อหลีกเลี่ยงการใช้สารพาราเบนและสารระงับกลิ่นสังเคราะห์ (Synthetic biocides) อย่างสิ้นเชิง [17] เพื่อมุ่งเน้นความปลอดภัยต่อผู้ใช้งานและป้องกันการสะสมของสารพิษตกค้างในสิ่งแวดล้อม

2.5 การประเมินประสิทธิภาพ ความคงตัว และความปลอดภัย

เพื่อยืนยันคุณภาพของผลิตภัณฑ์ก่อนการใช้งานจริง ได้ดำเนินการทดสอบคุณสมบัติใน 3 ด้าน ได้แก่

2.5.1 ด้านความคงตัว: นำผลิตภัณฑ์ทดสอบสภาวะเร่ง (Accelerated stability testing) ในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 42 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30

วัน [18] แล้วนำกลับมาทดสอบค่า MIC ต่อเชื้อ S. aureus เพื่อยืนยันความคงทนของสารออกฤทธิ์

2.5.2 ด้านความปลอดภัย: ประเมินความเป็นพิษต่อเซลล์ (Cytotoxicity) ผ่านการทดสอบการแตกของเซลล์เม็ดเลือดแดง (Red blood cell lysis assay) เพื่อยืนยันความอ่อนโยนต่อเนื้อเยื่อสำหรับการใช้งานภายนอก [19] โดยนำตัวอย่างผลิตภัณฑ์ไปทำปฏิกิริยากับสารแขวนลอยเม็ดเลือดแดง (RBC suspension) บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงและวัดค่าการดูดกลืนแสงของส่วนใสที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร เพื่อคำนวณหาร้อยละการแตกของเซลล์เม็ดเลือดแดง (% Hemolysis) เปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ไม่มีการใส่สารสกัดแทนนินหรือผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง

2.6 ด้านประสิทธิภาพการทำงาน:

จำลองสภาวะการใช้งานจริงโดยฉีดพ่นสเปรย์ลงในรองเท้าที่มีความอับชื้น จากนั้นทำการ Swab เชื้อเพื่อตรวจวัดอัตราการลดลงของปริมาณแบคทีเรียสะสมภายใน 30 นาที [20]

2.7 การวิเคราะห์ทางสถิติ (Statistical Analysis)

การทดลองทั้งหมดดำเนินการอย่างน้อย 3 ซ้ำ (Triplicate) เพื่อความถูกต้องแม่นยำ ข้อมูลแสดงในรูปแบบค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Mean ± SD) การวิเคราะห์เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มทดลองใช้สถิติ [Paired t-test / ANOVA] โดยกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ $p < 0.05$

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล (Results and Discussion)

การวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาสเปรย์ชีวภาพระงับกลิ่นรองเท้าจากสารสกัดแทนนินเปลือกกล้วยน้ำว้า ภายใต้แนวคิดนวัตกรรมสีเขียว (Green Innovation) ผลการดำเนินงานในส่วนนี้จะรายงานและวิจารณ์ครอบคลุมถึงความสำเร็จของกระบวนการสกัดที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรียก่อกลิ่น ความคงตัวของสูตรผลิตภัณฑ์ ความปลอดภัยระดับเซลล์ และผลการทดสอบการใช้งานจริง เพื่อยืนยันศักยภาพของนวัตกรรมในการเป็นผลิตภัณฑ์ทางเลือกที่ยั่งยืน ปลอดภัย และช่วยลดการใช้สารเคมีสังเคราะห์อย่างเป็นรูปธรรม ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.1 ผลการสกัดและปริมาณแทนนินรวมตามแนวทางเคมีสีเขียว

การสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากเปลือกกล้วยน้ำว้าในงานวิจัยนี้ ดำเนินการภายใต้หลักการเคมีสีเขียว (Green Chemistry) โดยหลีกเลี่ยงการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีพิษต่อระบบนิเวศ และเลือกใช้เอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 70 ซึ่งเป็นตัวทำละลายที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Eco-friendly solvent) ผลการสกัดพบว่า สารสกัดหยาบแทนนินที่ได้มีลักษณะทางกายภาพเป็นของเหลวหนืด สีน้ำตาลเข้ม และมีกลิ่นหอมเฉพาะตัวของสารสกัดธรรมชาติ (ดังรูปที่ 1) ซึ่งลักษณะสีที่เข้มดังกล่าวบ่งชี้ถึงการสะสมตัวของสารประกอบกลุ่มฟีนอลิกและแทนนินอย่างหนาแน่น



รูปที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของสารสกัดหยาบแทนนินจากเปลือกกล้วยน้ำว้าด้วยตัวทำละลายเอทานอลร้อยละ 70 (ปริมาต/ปริมาตร) เมื่อก่อน (ซ้าย) และหลังจากการระเหยตัวทำละลาย (ขวา)

เมื่อนำสารสกัดหยาบที่ได้ไปคำนวณหาร้อยละของผลผลิต (% Yield) และวิเคราะห์หาปริมาณแทนนินรวม (Total Tannin Content) ด้วยเทคนิค Folin-Ciocalteu assay พบว่ากระบวนการสกัดสีเขียวนี้ให้ประสิทธิภาพที่น่าพึงพอใจอย่างยิ่ง ดังผลการวิเคราะห์ที่แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ลักษณะทางกายภาพ ร้อยละผลผลิต และปริมาณแทนนิน รวมของสารสกัดจากเปลือกกล้วยน้ำว้า

รายการวิเคราะห์	ผลการทดสอบ
ลักษณะทางกายภาพ	ของเหลวหนืด สีน้ำตาลเข้ม
ร้อยละผลผลิต (% Yield)	5.0 %
ปริมาณแทนนินรวม	1.396 ± 0.248 mg TAE/g extract

3.2 ประสิทธิภาพการต้านแบคทีเรียก่อกลิ่นรองเท้า (Antimicrobial Efficacy)

เพื่อประเมินศักยภาพของสารสกัดแทนนินหยาบในการทดแทนสารเคมีสังเคราะห์ (Synthetic biocides) ได้ทำการทดสอบหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (Minimum Inhibitory Concentration: MIC) ผลการทดสอบ (ดังตารางที่ 2) พบว่าสารสกัดแทนนินจากเปลือกกล้วยน้ำว้ามีประสิทธิภาพสูงมากในการยับยั้งแบคทีเรีย Staphylococcus aureus ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมบวกที่เป็นสาเหตุหลักของการเกิดกลิ่นอับ โดยมีค่า MIC ต่ำถึง 3.0×10^{-8} mg/mL นอกจากนี้ยังสามารถยับยั้งแบคทีเรีย Escherichia coli ซึ่งเป็นตัวแทนของแบคทีเรียแกรมลบและดัชนีชี้วัดความสกปรกทั่วไปได้ที่ค่า MIC 3.0×10^{-6} mg/mL ผลลัพธ์ที่สำคัญได้มานี้สามารถอธิบายได้จากกลไกทางชีวภาพของสารกลุ่มแทนนิน (Tannins) ซึ่งมีโครงสร้างที่สามารถเข้าจับและตกตะกอนโปรตีนบริเวณเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรีย ทำให้ผนังเซลล์ถูกทำลายและสูญเสียความซึมผ่าน (Permeability) ส่งผลให้แบคทีเรียไม่สามารถเจริญเติบโตและหลั่งเอนไซม์ออกมาย่อยสลายเหงื่อให้กลายเป็นสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ที่ก่อให้เกิดกลิ่นเหม็นเปรี้ยวได้ การใช้สารสกัดธรรมชาติที่มีความเข้มข้นต่ำแต่ให้ผลลัพธ์การยับยั้งสูงเช่นนี้ จึงเป็นการตอกย้ำความสำเร็จของการพัฒนานวัตกรรมสีเขียว ที่สามารถระงับกลิ่นได้อย่างตรงจุด ปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน และไม่ก่อให้เกิดสารเคมีตกค้างในสิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 2 ค่าความเข้มข้นต่ำสุด (MIC) ของสารสกัดแทนนินจากเปลือกกล้วยน้ำว้าในการยับยั้งแบคทีเรียก่อกลิ่น

ชนิดของแบคทีเรีย	ลักษณะและบทบาทสำคัญ	ค่า MIC (mg/mL)
S. aureus	แบคทีเรียแกรมบวก / สาเหตุหลักของการเกิดกลิ่นอับ	3.0×10^{-8}
E. coli	แบคทีเรียแกรมลบ / ดัชนีชี้วัดความสกปรกทั่วไป	3.0×10^{-6}

3.3 การพัฒนาผลิตภัณฑ์นวัตกรรมสเปรย์สีเขียวและการประเมินความคงตัว

เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างสารสกัดแทนนินหยาบและผลิตภัณฑ์สเปรย์ที่พัฒนาขึ้น พบว่าการนำสารสกัดมาเตรียมในรูปแบบผลิตภัณฑ์ (Formulation) ที่ความเข้มข้น 0.8 mg/mL เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากไม่เพียงแต่ยังคงประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้เทียบเท่ากับสารสกัดตั้งต้นเพียวๆ แต่ตัวทำละลายชีวภาพในสูตรผลิตภัณฑ์ยังช่วยเสริมคุณสมบัติด้านการกระจายตัว (Dispersion) ทำให้ละอองสเปรย์สามารถแทรกซึมเข้าสู่เส้นใยของรองเท้าได้ลึกและทั่วถึงยิ่งขึ้น นอกจากนี้ การปรับลดระดับความเข้มข้นให้เหมาะสมยังช่วยลดความเข้มของสีสารสกัดหยาบ ป้องกันปัญหาการทิ้งคราบเปื้อนบนรองเท้า และเป็นระดับความเข้มข้นที่ร่างกายมนุษย์ทนทานได้ (Tolerable limits) จึงถือเป็นการยกระดับสารสกัดดิบให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่สมบูรณ์แบบทั้งด้านประสิทธิภาพ สุนทรียภาพในการใช้งาน และความปลอดภัย ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ภายใต้แนวคิดนวัตกรรมสีเขียว (Green formulation) ได้นำสารสกัดหยาบแทนนินมาประสานเข้ากับตัวทำละลายชีวภาพ โดยหลีกเลี่ยงการใช้สารกันเสียกลุ่มพาราเบนและสารเคมีสังเคราะห์ เพื่อประเมินอายุการเก็บรักษาและศักยภาพเชิงพาณิชย์ จึงได้นำผลิตภัณฑ์ไปทดสอบความคงตัวในสภาวะเร่ง (Accelerated stability test) ที่อุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 วัน

การประเมินความคงตัวทางกายภาพใช้วิธีวัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร (OD540) เพื่อตรวจวัดการตกตะกอนและการเปลี่ยนสี (ดังตารางที่ 3) ผลการทดสอบพบว่า ค่า OD540 ของผลิตภัณฑ์ก่อนและหลังการบ่มเร่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ บ่งชี้ว่านวัตกรรมสเปรย์ชีวภาพจากเปลือกกล้วยน้ำว้ามีความคงตัวสูง (High physical stability) สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพไม่เสื่อมสภาพแม้อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่แปรปรวน และสามารถยืดอายุการเก็บรักษาได้โดยไม่จำเป็นต้องพึ่งพาสารเคมีกันเสียที่อาจก่อให้เกิดมลพิษตกค้าง

จากตารางที่ 3 นี้แสดงผลการทดสอบความคงตัวของผลิตภัณฑ์ในสภาวะเร่ง (Accelerated Aging) พบว่าค่าการดูดกลืนแสง (OD_{540}) ของสเปรย์นวัตกรรมสีเขียวมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยในทุกระดับความเข้มข้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความเข้มข้น 0.8 mg/mL ซึ่งเป็นระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งาน พบว่าแม้จะผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 วัน ผลิตภัณฑ์ยังคงมีค่าความขุ่น ($OD) ที่เสถียรและไม่มีการตกตะกอนอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม (Control) บ่งชี้ว่าสารสกัดแทนนินมีความเข้ากันได้สูงกับสูตรตำรับสเปรย์ และผลิตภัณฑ์มีความคงตัวทางกายภาพเพียงพอต่อการจัดเก็บเพื่อใช้งานจริง

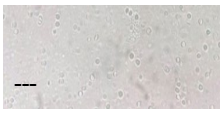
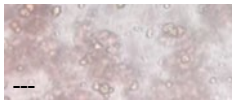
ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสง (OD_{540}) ของผลิตภัณฑ์สเปรย์นวัตกรรมสีเขียว ก่อนและหลังการบ่มเร่งอายุ (Accelerated Stability Test) ที่อุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 วัน

สารสกัด (mg/mL)	เชื้อจุลินทรีย์	ค่า OD_{540} ก่อนการบ่ม (Day 0)	ค่า OD_{540} หลังการบ่ม (Day 30)	ผลต่างค่าการดูดกลืนแสง (ΔOD)
0.8	*S. aureus*	0.317	0.841	0.524
	E. coli	0.458	0.545	0.087
	Control	0.113	0.224	0.111
0.08	*S. aureus*	0.373	0.881	0.508
	E. coli	0.571	0.558	0.013
	Control	0.159	0.292	0.133
0.008	*S. aureus*	0.400	0.894	0.494
	E. coli	0.599	0.590	0.009
	Control	0.241	0.302	0.061
0.0008	*S. aureus*	0.427	0.901	0.474
	E. coli	0.611	0.607	0.004
	Control	0.295	0.330	0.035
0 (Negative Control)	*S. aureus*	0.771	0.989	0.218
	E. coli	0.756	0.926	0.170
	Control	0.622	0.603	0.019

3.4 การประเมินความปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน (Safety Evaluation)

เพื่อยืนยันความปลอดภัยระดับสูงสุดต่อผู้ใช้งาน (User safety) ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของการพัฒนาผลิตภัณฑ์สีเขียว ได้นำผลิตภัณฑ์สเปรย์มาประเมินความเป็นพิษต่อเซลล์ (Cytotoxicity) ผ่านการทดสอบการแตกของเซลล์เม็ดเลือดแดง (Red blood cell hemolysis test) โดยนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม (ดังตารางที่ 4) ผลการทดสอบพบว่า สเปรย์ชีวภาพจากสารสกัดแทนนินไม่ก่อให้เกิดการแตกของเซลล์เม็ดเลือดแดง (Non-hemolytic) โดยพบร้อยละการแตกของเม็ดเลือดแดง (% Hemolysis) อยู่ในระดับที่ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานความปลอดภัย (ต่ำกว่าร้อยละ 5) ลักษณะทางกายภาพของเซลล์เม็ดเลือดแดงยังคงสมบูรณ์ ไม่มีการเสียสภาพของเยื่อหุ้มเซลล์ ผลลัพธ์นี้เป็นเครื่องยืนยันทางคลินิกเบื้องต้นว่า ผลิตภัณฑ์มีความอ่อนโยนต่อเนื้อเยื่อ ไม่ก่อให้เกิดการระคายเคืองเมื่อสัมผัสผิวหนัง (Topical application) นวัตกรรมนี้จึงมีความปลอดภัยสูงต่อผู้บริโภคในการใช้งานประจำวัน และรับประกันได้ว่าจะไม่มีการปลดปล่อยสารพิษที่เป็นอันตรายตกค้างสู่สิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพและการแตกของเม็ดเลือดแดงเมื่อสัมผัสสเปรย์สารสกัด

ระยะเวลา	ภาพเม็ดเลือด	ลักษณะเซลล์เม็ดเลือด
เริ่มต้น (0 นาที)		รักษาสภาพสมบูรณ์ รูปร่างกลมแบน (Biconcave disk)
10 นาที		เริ่มเกิดการบวมพอง (Swelling) รูปร่างเริ่มผิดปกติบางส่วน
30 นาที		จำนวนเซลล์ที่สมบูรณ์ลดลงอย่างชัดเจน เซลล์บวมเต่ง และเริ่มเกิดการเกาะกลุ่มกัน
60 นาที		เซลล์มีลักษณะเบี้ยว บวมจนเริ่มแตก และเกิดการเกาะกลุ่มของเซลล์อย่างหนาแน่น
24 ชั่วโมง		เซลล์เม็ดเลือดแดงแตกจำนวนมาก (ประมาณ 80%) และมีเศษเซลล์ เกาะกลุ่มกันชัดเจน

3.5 ประสิทธิภาพการลดแบคทีเรียสะสมในการใช้งานจริง (In-use Efficacy)

เพื่อประเมินศักยภาพของผลิตภัณฑ์ในสภาวะการใช้งานจริง (Simulated in vivo testing) ได้ทำการทดสอบฉีดพ่นสเปรย์ชีวภาพลงในรองเท้าที่มีประวัติการใช้งานและมีกลิ่นอับชื้น โดยทำการตรวจวัดปริมาณแบคทีเรียสะสม (Bacterial load) ก่อนและหลังการฉีดพ่นเป็นเวลา 30 นาที จากผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Time-Kill Analysis) ดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่าสเปรย์นวัตกรรมสีเขียวสามารถลดปริมาณแบคทีเรียสะสมในรองเท้าลงได้ถึงร้อยละ 50-60 ภายในระยะเวลาเพียง 30 นาที ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการออกฤทธิ์ที่รวดเร็ว (Fast-acting) ในการจัดการกับเชื้อจุลินทรีย์เป้าหมาย

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณร้อยละการลดลงของจำนวนแบคทีเรียสะสมจากรองเท้าด้วยสเปรย์สารสกัดแทนนินที่เวลา 30 นาที

พารามิเตอร์	ปริมาณการลดจำนวนแบคทีเรียจากรองเท้า/ ผลลัพธ์ที่ได้
ปริมาตรสารแขวนลอยทดสอบ	10 mL
ความเข้มข้นของสารสกัดแทนนินที่ใช้	0.8 mg/mL
ปริมาณเซลล์แบคทีเรียเริ่มต้น (0 นาที)	1.0 x 10^9 CFU/mL
ปริมาณเซลล์ที่รอดชีวิตหลังผ่านไป 30 นาที	4.2 x 10^8 CFU/mL (สอดคล้องกับค่า OD)
ปริมาณเซลล์ที่ถูกทำลาย (Cell reduction)	5.8 x 10^8 CFU/mL
คิดเป็นอัตราการลดลงของเชื้อ (%)	58.0% (อยู่ในช่วง 50 - 60%)

นอกจากนี้เมื่อนำตัวอย่างเชื้อมาศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาภายใต้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า (ตัวอย่างดังรูปที่ 3) ผลการประเมินเชิงคุณภาพสอดคล้องกับผลทางสถิติอย่างชัดเจน ภาพถ่ายแสดงให้เห็นว่า ปริมาณเซลล์แบคทีเรียที่เกาะกลุ่มกันลดลงอย่างมาก เซลล์ที่เหลืออยู่มีลักษณะฝ่อและสูญเสียความสมบูรณ์ของผนังเซลล์ ซึ่งเป็นผลมาจากกลไกการเข้าตกตะกอนโปรตีนของสารประกอบแทนนิน โดยพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของแบคทีเรียจากรองเท้าภายใต้กล้องจุลทรรศน์ (100x) หลังการใช้สเปรย์นวัตกรรมสีเขียว 10 นาที เชื้อจุลินทรีย์จากรองเท้าลดลงร้อยละ 20

จากผลความสอดคล้องของผลการวิเคราะห์ทั้งทางสถิติและภาพถ่ายระดับเซลล์นี้แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของแบคทีเรียจากรองเท้าภายใต้กล้องจุลทรรศน์ (100x) หลังหยดสเปรย์สารสกัดหยาบแทนนินจากเปลือกกล้วยน้ำว้า ปริมาณ 1 หยด ที่เวลาต่าง ๆ ผลทดสอบการพัฒนาสูตรสเปรย์สารสกัดหยาบแทนนินจากเปลือกกล้วยน้ำว้าเพื่อดับกลิ่นรองเท้า ที่กำลังขยาย 4000x สามารถยืนยันได้ว่า นวัตกรรมสเปรย์ชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ไม่เพียงแต่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่ยังมีประสิทธิภาพสูงในการระงับกลิ่นที่ต้นเหตุ สามารถใช้ทดแทนผลิตภัณฑ์เคมีสังเคราะห์ในท้องตลาดได้อย่างสมบูรณ์แบบ ตอบโจทย์วิถีชีวิตยุคใหม่ที่ใส่ใจทั้งสุขอนามัยและความยั่งยืน

4. สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

การวิจัยนี้สำเร็จในการพัฒนาสเปรย์ชีวภาพระงับกลิ่นรองเท้าจากแทนนินเปลือกกล้วยน้ำว้าด้วยกระบวนการสกัดที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ผลิตภัณฑ์มีประสิทธิภาพสูงในการยับยั้งแบคทีเรียก่อกลิ่นอับ (*S. aureus* และ *E. coli*) มีความคงตัวทางกายภาพ และผ่านการประเมินความปลอดภัยระดับเซลล์ (Cytotoxicity) จึงเหมาะสมต่อการใช้

อย่างไรก็ตาม เพื่อให้นวัตกรรมสเปรย์ชีวภาพนี้สามารถพัฒนาต่อยอดสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ได้อย่างสมบูรณ์ นวัตกรรมสารสกัดเปลือกกล้วยน้ำว้าควรผสานน้ำมันหอมระเหยเพื่อปรับกลิ่นและเสริมฤทธิ์ต้านจุลชีพ ควบคู่ไปกับการทดสอบความคงตัวในสภาวะการจัดเก็บจริงระยะยาวเพื่อยืนยันอายุการเก็บรักษา (Shelf-life) นอกจากนี้ ควรขยายขอบเขตการประเมินประสิทธิภาพไปยังการต้านเชื้อราก่อโรคผิวหนังที่เท้า และทำการทดสอบการระคายเคืองทางคลินิกเพื่อสร้างความมั่นใจด้านความปลอดภัยสูงสุดแก่ผู้บริโภค ท้ายที่สุด ควรมีการประเมินวงจรชีวิตผลิตภัณฑ์ (LCA) ร่วมกับการพิจารณาใช้บรรจุภัณฑ์รักษ์โลก เพื่อยกระดับสู่การเป็นผลิตภัณฑ์สีเขียวอย่างสมบูรณ์แบบในทุกกระบวนการ

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ ห้องปฏิบัติการ อุปกรณ์และเครื่องมือวิทยาศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์

เอกสารอ้างอิง

[1] Zheng, J., & Suh, S. (2019). Strategies to reduce the global carbon footprint of plastics. Nature Climate Change, 9(5), 374-378.

[2] Bota, S. A., & Rusu, L. (2020). Environmental impacts of cosmetic personal care products and sustainable alternatives. Environmental Science and Pollution Research, 27, 23533-23545.

[3] Møller, J., Boldrin, A., & Christensen, T. H. (2009). Anaerobic degradation and emissions of greenhouse gases from wood, cardboard, and other organic wastes. Waste Management, 29(4), 1254-1261.

[4] Ara, K., Hama, M., Akiba, S., Koike, K., Okisaka, K., Hagura, T., ... & Tomita, F. (2006). Foot odor due to microbial metabolism and its control. Canadian Journal of Microbiology, 52(4), 357-364.

[5] Marshall, L., McCubbin, P., & Omidpanah, P. (2018). An investigation of the microbes causing foot malodour. Journal of Applied Microbiology, 124(2), 346-353.

[6] Klaschka, U. (2016). Naturally toxic: natural substances used in personal care products. Environmental Sciences Europe, 28(1), 1-13.

[7] Vu, H. T., Scarlett, C. J., & Vuong, Q. V. (2018). Phenolic compounds within banana peel and their potential uses: A review. Journal of Functional Foods, 40, 238-248.

[8] Min, B. R., Pinckney, W. E., Merkel, R., Walker, S., Tomita, G., & Anderson, R. C. (2008). Comparative antimicrobial activity of tannin extracts from perennial plants on mastitis pathogens. Scientific Research and Essay, 3(2), 66-73.

[9] Cowan, M. M. (1999). Plant products as antimicrobial agents. Clinical Microbiology Reviews, 12(4), 564-582.

[10] Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy–A new sustainability paradigm?. Journal of Cleaner Production, 143, 757-768.

[11] Wiegand, I., Hilpert, K., & Hancock, R. E. (2008). Agar and broth dilution methods to determine the minimal inhibitory concentration (MIC) of antimicrobial substances. Nature Protocols, 3(2), 163-175.

[12] Balouiri, M., Sadiki, M., & Ibnsouda, S. K. (2016). Methods for in vitro evaluating antimicrobial activity: A review. Journal of Pharmaceutical Analysis, 6(2), 71-79.

[13] Bom, S., Jorge, J., Ribeiro, H. M., & Marto, J. (2019). A step forward on sustainability in the cosmetics industry: A review. Journal of Cleaner Production, 225, 270-290.

[14] Estanqueiro, M., Amaral, M. H., Sousa Lobo, J. M., & Silva, P. (2014).

[15] Comparison between sensory and instrumental characterization of topical formulations: impact of thickening agents. International Journal of Cosmetic Science, 36(4), 409-416.

[16] Evans, B. C., Nelson, C. E., Yu, S. S., Beavers, K. R., Kim, A. J., Li, H., ... & Duvall, C. L. (2013). Ex vivo red blood cell hemolysis assay for the evaluation of pH-responsive endosomolytic agents for cytosolic delivery of biomacromolecular drugs. Journal of Visualized Experiments, (73), e50166.

[17] McQueen, R. H., Laing, R. M., Brooks, H. J., & Niven, B. E. (2007). Odor intensity in apparel fabrics and the link with bacterial populations. Textile Research Journal, 77(7), 449-456.

[18] Chemat, F., Vian, M. A., & Cravotto, G. (2012). Green extraction of natural products: concept and principles. International Journal of Molecular Sciences, 13(7), 8615-8627.

[19] Blainski, A., Lopes, G. C., & De Mello, J. C. P. (2013). Application and analysis of the Folin Ciocalteu method for the determination of the total phenolic content from Limonium brasiliense L. Molecules, 18(6), 6852-6865.

[20] Mukherjee, P. K., Houghton, P. J., & Mukherjee, K. (2009). Quality control of herbal drugs: an approach to evaluation of botanicals. Business Horizons.

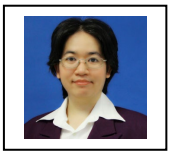
[21] Clinical and Laboratory Standards Institute (CLSI). (2020). Methods for Dilution Antimicrobial Susceptibility Tests for Bacteria That Grow Aerobically. 11th Edition. CLSI standard M07.สรรธพล คุ้มทรัพย์, "สถานีอัดประจุแบตเตอรี่สำหรับรถไฟฟ้าด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์," *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*, ปีที่ 7, ฉบับที่ 2, หน้า 100 – 108, กรกฎาคม-ธันวาคม 2555



กฤษดา เสือเอี่ยม อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ **งานวิจัย**: ซีเมนต์และวัสดุปอซโซลาน คอนกรีตเทคโนโลยี คอนกรีตสมรรถนะสูง การประยุต์ใช้ของเหลือทิ้งในงานคอนกรีต



ดวงฤทัย นิคมรัฐ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี **งานวิจัย:** เทคโนโลยีชีวภาพ จุลชีววิทยาสิ่งแวดล้อม โพรไบโอติกส์ และเอนไซม์



ภัทริกา สูงสมบัติ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี **งานวิจัย**: เทคโนโลยีชีวภาพด้านพืช นิเวศวิทยาและสิ่งแวดล้อม



นิภาพร ปัญญา อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิทยาศาสตร์คเมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี **งานวิจัย**: เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ (Computer Technology) ภาษาธรรมชาติ (Natural Language) การสร้างบทเรียน E – earning

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การจัดสรรพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพสำหรับโรงงานผลิตยางรถยนต์ : กรณีศึกษาในจังหวัดสระบุรี

Optimizing Energy Sources in Tire Manufacturing: A case study in Saraburi

ชุติมนต์ สวนดอกไม้[1]* และ พงษ์สันธ์ บัณฑิตสกุลชัย[2]

[1]สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน (สหสาขาวิชา) วิทยาลัยสหศาสตร์บูรณาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
อาคารเฉลิมราชกุมารี 60 พรรษา (จามจุรี 10) ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กทม. 10330 Email: 6682007420@student.chula.ac.th

[2]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กทม. 10330 Email: Pongsun.B@chula.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอแนวทางการจัดสรรพลังงานไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) สำหรับโรงงานผลิตยางรถยนต์กรณีศึกษา โดยประยุกต์ใช้แบบจำลองการโปรแกรมเชิงเป้าหมาย (Goal Programming) เพื่อหาจุดสมดุลระหว่างการลดต้นทุนพลังงานและการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก จาก 3 แหล่งพลังงาน ได้แก่ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA) ระบบ Cogeneration และระบบ Solar Rooftop ภายใต้ข้อจำกัดความต้องการไฟฟ้า 95,820 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อกะ และข้อจำกัดภาระการผลิตไอน้ำขั้นต่ำ 34,944 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อกะ ผลการศึกษาพบว่า แบบจำลองสามารถจัดสรรพลังงานตามอัตราค่าไฟฟ้า TOU ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเลือกใช้พลังงานแสงอาทิตย์เต็มขีดจำกัดในเวลากลางวัน และหลีกเลี่ยงการซื้อไฟฟ้าจากโครงข่ายในช่วง On-Peak อย่างเด็ดขาด การจัดสรรที่เหมาะสมที่สุดนี้สามารถลดต้นทุนรายวันได้สูงสุดร้อยละ 18 และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้สูงสุดร้อยละ 35-37 จากสภาวะปกติ ทั้งนี้ องค์กรควรพิจารณาลงทุนระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) เพิ่มเติม เพื่อปลดล็อกขีดจำกัดการประหยัดพลังงานในอนาคต

คำสำคัญ : การจัดสรรพลังงาน, การลดต้นทุนพลังงาน, การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก, การโปรแกรมเชิงเป้าหมาย, โรงงานผลิตยางรถยนต์

Abstract

This research proposes an optimal electrical energy allocation for a tire manufacturing plant using a Goal Programming model to balance energy cost reduction and greenhouse gas mitigation. The model integrates the PEA grid, Cogeneration, and Solar Rooftop systems, under constraints of a 95,820 kWh/shift minimum electricity demand and a 34,944 kWh/shift minimum steam generation requirement. Results show the model effectively optimizes the dynamic energy mix according to the Time of Use (TOU) tariff. It maximizes solar energy utilization during the day and strictly avoids grid electricity imports during On-Peak periods. The optimal allocation achieves a maximum daily cost saving of 18% and reduces GHG emissions by 35-37% from the baseline. To further transcend this cost-saving limit, investing in Battery Energy Storage Systems (BESS) is strategically recommended.

Keywords: Energy Allocation, Energy Cost Reduction, Greenhouse Gas Emission Reduction, Goal Programming, Tire Manufacturing

1. บทนำ

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศถือเป็นความท้าทายระดับโลกที่ทุกภาคส่วนต้องเร่งรับมือ สำหรับประเทศไทย ภาคพลังงานเป็นแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกหลัก ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนสูงถึงร้อยละ 69.96 ของปริมาณการปล่อยทั้งหมดของประเทศ [1] รัฐบาลจึงได้กำหนดเป้าหมาย (NDCs) เพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกลงร้อยละ 30 ภายในปี พ.ศ. 2573 โดยกำหนดให้ภาคพลังงานและอุตสาหกรรมต้องลดการปล่อยก๊าซฯ ให้ได้ถึง 124.6 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า [2] การปรับตัวเพื่อลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์จึงกลายเป็นวาระเร่งด่วนของภาคอุตสาหกรรม อุตสาหกรรมยางและผลิตภัณฑ์ยางล้อเป็นอุตสาหกรรมหลักที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจและการส่งออกของประเทศไทย [3] โดยมีสัดส่วนการส่งออกสูงถึงร้อยละ 68.90 ของผลิตภัณฑ์ยางทั้งหมด[4] อย่างไรก็ตาม อุตสาหกรรมนี้กำลังเผชิญความท้าทายจากความผันผวนของต้นทุนพลังงาน และนโยบายด้านสิ่งแวดล้อมที่เข้มงวดขึ้น โดยเฉพาะการเตรียมบังคับใช้ร่างพระราชบัญญัติการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ภายในประเทศ ซึ่งจะส่งผลให้ผู้ประกอบการต้องรับภาระต้นทุนใหม่จากกลไกราคาคาร์บอน เช่น ระบบภาษีคาร์บอน (Carbon Tax) ประกอบกับมีแรงกดดันเสริมจากมาตรการปรับราคาคาร์บอนก่อนข้ามพรมแดน (CBAM) ของสหภาพยุโรป [5] การบริหารจัดการพลังงานเพื่อลดต้นทุนควบคู่ไปกับการลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์ จึงเป็นเงื่อนไขสำคัญในการดำเนินธุรกิจและรักษาขีดความสามารถทางการแข่งขัน

ด้วยเหตุนี้ โรงงานผลิตยางรถยนต์กรณีศึกษาในจังหวัดสระบุรี ซึ่งมีนโยบายมุ่งสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) ภายในปี พ.ศ. 2593 [6] โรงงานจึงจำเป็นต้องปรับกลยุทธ์การดำเนินงาน โดยเฉพาะการจัดสรรพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเป็นแหล่งปล่อยคาร์บอนหลักของโรงงาน

งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาและนำเสนอแนวทางการจัดสรรพลังงานไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) จากแหล่งกำเนิดที่หลากหลาย โดยประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Goal Programming เพื่อเป็นเครื่องมือเชิงกลยุทธ์ในการหาจุดสมดุลระหว่างการลดต้นทุนพลังงาน และการบรรลุเป้าหมายด้านสิ่งแวดล้อมขององค์กรอย่างยั่งยืน

2. วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 นโยบายด้านพลังงาน

ประเทศไทยได้ประกาศเป้าหมายสำคัญในการบรรลุความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) ภายในปี ค.ศ. 2050 และเป้าหมายการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Emission) ภายในปี ค.ศ. 2065โดยมีแผนปฏิบัติการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศปี พ.ศ. 2564–2573 เป็นกลไกหลักเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (NDCs) ลงร้อยละ 30 จากระดับปกติ (Business-as-Usual: BAU) ภายใน

ปี 2030 โดยเฉพาะในสาขาพลังงานที่มีเป้าหมายลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกให้ได้ 124.597 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า [7] สอดคล้องกับแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561-2580 (AEDP2018) ที่ตั้งเป้าหมายเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนต่อการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายที่ร้อยละ 30 ในปี พ.ศ. 2580 [8] ในระดับสากล มาตรการปรับราคาคาร์บอนก่อนข้ามพรมแดน (CBAM) ของสหภาพยุโรป (EU) ได้ถูกบังคับใช้เพื่อป้องกันการรั่วไหลของคาร์บอน [5] โดยผู้นำเข้าต้องซื้อใบรับรองตามปริมาณคาร์บอนที่ฝังตัวในผลิตภัณฑ์ (Embedded Emissions) แม้ในระยะแรกจะเน้นที่กลุ่มสินค้าพื้นฐาน แต่ภายในปี 2028-2030 สหภาพยุโรปมีแผนขยายขอบเขตครอบคลุมสินค้ากลุ่มโพลิเมอร์และเคมีภัณฑ์อินทรีย์ ซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตยางรถยนต์ สิ่งนี้จะส่งผลกระทบต่อห่วงโซ่อุปทานของอุตสาหกรรมยางตั้งแต่ต้นน้ำจนถึงปลายน้ำ บังคับให้โรงงานต้องจัดทำระบบตรวจวัด รายงาน และทวนสอบ (MRV) ที่โปร่งใส

นอกจากนี้ ภายในประเทศยังมีการผลักดันร่างพระราชบัญญัติการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ที่นำเสนอระบบการซื้อขายสิทธิในการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (TH-ETS) และการจัดเก็บภาษีคาร์บอน (Carbon Tax) [9] ในอัตราเบื้องต้น 200 บาทต่อตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ซึ่งจะเปลี่ยนต้นทุนทางสิ่งแวดล้อมให้กลายเป็นต้นทุนทางธุรกิจที่จับต้องได้อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

2.2 โครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้า

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA) ได้จัดทำอัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลา (Time of Use: TOU) [10] เพื่อจูงใจให้ภาคอุตสาหกรรมบริหารจัดการการใช้ไฟ โดยคิดค่าพลังงานไฟฟ้าราคาสูงในช่วงเวลาที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดของประเทศ (On-Peak Rate) และคิดราคาต่ำลงในช่วงเวลาที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าต่ำ (Off-Peak Rate)

การเปรียบเทียบความเสี่ยงของแต่ละแหล่งพลังงานพบว่าไฟฟ้าจาก PEA และระบบ Cogeneration มีความเสี่ยงด้านราคา (Price Risk) สูงจากความผันผวนของราคาก๊าซธรรมชาติในตลาดโลก ในขณะที่ไฟฟ้าจากระบบโซลาร์เซลล์ (Solar PV) มีข้อได้เปรียบด้านต้นทุนต่อหน่วยที่ต่ำ ไม่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก [11] แต่มีความเสี่ยงด้านความมั่นคง (Reliability Risk) เนื่องจากผลิตได้เฉพาะช่วงที่มีแสงอาทิตย์ความกดอากาศสูง

2.3 กระบวนการผลิตยางรถยนต์

การผลิตยางรถยนต์เป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้พลังงานสูง โดยประกอบด้วย 8 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การผสมยาง (Mixing) การดันยาง (Extruding) การฉาบผ้าใบ (Calendaring) การตัดผ้าใบ (Cutting) การทำขอบลวด (Bead making) การขึ้นรูปยาง (Building), การอบยาง (Curing) และการตรวจสอบ (Inspection) [12] ในเชิงการใช้พลังงานแบ่งออกเป็นการใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณร้อยละ 56.87 และพลังงานความร้อนร้อยละ 43.54 [13] กระบวนการที่มีการใช้ไฟฟ้าสูงสุดคือกระบวนการผสมยาง เนื่องจากต้องใช้มอเตอร์ขนาดใหญ่ของเครื่องผสม (Banbury mixer) ในการบดผสมวัตถุดิบ ส่วนพลังงานความร้อนจะถูกใช้ในรูปแบบของ "ไอน้ำ" (Steam) เพื่อเป็นตัวกลางให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ในขั้นตอนการอบยาง (Curing) เพื่อเปลี่ยนโครงยางดิบให้มีความแข็งและความทนทาน การบริหารจัดการทรัพยากรจึงจำเป็นต้องพิจารณาความต้องการทั้งไฟฟ้าและไอน้ำควบคู่กันไป

2.4 การแก้ปัญหาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ภายใต้หลักการของการวิจัยดำเนินงาน (Operations Research) เป็นการนำหลักการคณิตศาสตร์มาจำลองสถานการณ์จริง เพื่อหลีกเลี่ยงข้อผิดพลาดจากการคาดเดาและช่วยลดความเสี่ยงให้แก่องค์กร [14] โครงสร้างพื้นฐานของแบบจำลองประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่

1) ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables) คือตัวแปรที่สามารถปรับเปลี่ยนหรือควบคุมได้เพื่อหาคำตอบ

2) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) คือสมการคณิตศาสตร์ที่แสดงเป้าหมายว่าต้องการหาค่าสูงสุด (Maximize) หรือต่ำสุด (Minimize)

3) สมการเงื่อนไข (Constraints) คือขีดจำกัดทางทรัพยากร เช่น เวลาแรงงาน หรือข้อกำหนดทางเทคนิคที่ต้องปฏิบัติตามเพื่อให้เกิดการดำเนินการที่เป็นไปได้จริง

2.5 การโปรแกรมเชิงเป้าหมาย (Goal Programming)

การโปรแกรมเชิงเป้าหมาย (Goal Programming) มีความยืดหยุ่นและสามารถจำลองสภาพความเป็นจริงขององค์กรที่ต้องรับมือกับเป้าหมายที่ขัดแย้งกันได้ดี [15] งานวิจัยของ กนกพร ศรีปฐมสวัสดิ์ ได้พิสูจน์ให้เห็นว่า Goal Programming สามารถประยุกต์ใช้ในการออกแบบสินค้าอุตสาหกรรมที่ซับซ้อน [16] เช่น ถังแรงดันที่ต้องประเมินทั้งต้นทุน อัตราการไหลของไอน้ำ และพารามิเตอร์รวมกว่า 24 ตัวแปรได้อย่างเป็นระบบและลดอคติในการตัดสินใจ

นอกจากนี้ ในด้านการบริหารจัดการพลังงานอุตสาหกรรม Sarkar และคณะ ได้จำลองระบบจ่ายพลังงานแบบ Multi-Input Multi-Output (MIMO) ของโรงงานประกอบรถยนต์ [17] โดยจัดสรรแหล่งพลังงานทั้งไฟฟ้า ก๊าซธรรมชาติ และ LFG เพื่อรักษาสมดุลระหว่างกลยุทธ์ด้านต้นทุนและสิ่งแวดล้อม รวมถึงการใช้แบบจำลอง Weighted Goal Programming (WGP) ในอุตสาหกรรมยานยนต์ที่ผสมผสานการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV) เพื่อลดต้นทุนพลังงานรวมและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ซึ่งแสดงให้เห็นว่า Goal Programming เป็นเครื่องมือเชิงกลยุทธ์ที่สำคัญในการตัดสินใจลงทุนด้านพลังงานที่เหมาะสมและยั่งยืน

3. ระเบียบวิธีวิจัย

การศึกษาแนวทางการจัดสรรพลังงานที่เหมาะสมกับโรงงานผลิตยางรถยนต์กรณีศึกษา ดำเนินการโดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Goal Programming (GP) เพื่อบรรลุเป้าหมายในการลดต้นทุนด้านพลังงานและลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยและโครงสร้างการสร้างแบบจำลองดังต่อไปนี้

3.1 การรวบรวมข้อมูลและกำหนดพารามิเตอร์

การศึกษานี้ใช้ข้อมูลปฐมภูมิ (Primary Data) จากการดำเนินงานจริงของโรงงานในปี พ.ศ. 2567 ประกอบด้วยข้อมูลปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าจริงแบบรายเดือนและรายช่วงเวลา (Time of Use: TOU) จากแหล่งกำเนิด ได้แก่ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA Grid), ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม (Cogeneration) และระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV) สำหรับข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary Data) ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Factor) ซึ่งอ้างอิงตามแนวทางขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (อบก.) [18]

3.2 การสร้างแบบจำลอง Goal Programming (Goal Programming Model) ด้วย Microsoft Excel

เครื่องมือที่ใช้การสร้างแบบจำลองในการ แก้ปัญหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อนและมีหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Programming) คือ โปรแกรม Microsoft Excel โดยการใช้ฟังก์ชันเสริมที่เรียกว่า Solver ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ช่วยหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้อย่างเป็นระบบและช่วยลดอคติหรือความลำเอียงใน

การตัดสินใจได้เป็นอย่างดี การทำงานของฟังก์ชัน Solver จะสอดคล้องกับโครงสร้างของการโปรแกรมทางคณิตศาสตร์อย่างสมบูรณ์ โดยเริ่มต้นจากการกำหนดเซลล์เป้าหมายหลัก (Objective Function) ที่ต้องการหาค่าต่ำที่สุด (Minimize) เช่น การทำให้ค่าความเบี่ยงเบนจากเป้าหมายมีค่าน้อยที่สุด จากนั้นทำการระบุเซลล์ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables) ซึ่งเป็นตัวแปรที่สามารถปรับเปลี่ยนหรือควบคุมได้ เพื่อให้โปรแกรมดำเนินการจัดสรรค่าตัวเลขที่เหมาะสมที่สุดออกมา นอกจากนี้ ผู้ใช้งานจะต้องกำหนดสมการเงื่อนไข (Constraints) เพื่อสะท้อนถึงขีดจำกัดทางทรัพยากร เช่น ขีดจำกัดของเครื่องจักร หรือปริมาณความต้องการใช้งาน เพื่อกำหนดขอบเขตของตัวแปรตัดสินใจ และเพื่อให้เกิดการดำเนินการที่เป็นไปได้จริง (Feasible) โดยองค์ประกอบในการสร้างแบบจำลองในการศึกษามีดังนี้

3.2.1 ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables)

กำหนดตัวแปรแทนปริมาณพลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์-ชั่วโมง หรือ kWh) ที่ต้องจัดสรรจากแต่ละแหล่งพลังงานในแต่ละกะการทำงาน (t) ซึ่งแบ่งเป็น 4 กะ กะละ 6 ชั่วโมง

Elec_t = ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ต้องการจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (kWh) ณ ช่วงเวลา t

Cogen_t = ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ต้องการจากระบบความร้อนร่วม (kWh) ณ ช่วงเวลา t

Solar_t = ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ต้องการจากระบบโซลาร์เซลล์บนหลังคา (kWh) ณ ช่วงเวลา t

t = ช่วงเวลาการทำงาน ช่วงที่ 1 - 4 โดยที่

1: 06.00 – 12.00 น.

2: 12.00 – 18.00 น.

3: 18.00 – 24.00 น.

4: 24.00 – 06.00 น.

3.2.2 ตัวแปรเบี่ยงเบน (Deviational Variables)

d1- = ค่าเบี่ยงเบนทางลบ หรือส่วนขาดจากเป้าหมายต้นทุน

d1+ = ค่าเบี่ยงเบนทางบวกหรือส่วนเกินจากเป้าหมายต้นทุน

d2- = ค่าเบี่ยงเบนทางลบหรือปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำกว่าเป้าหมายด้านการลดก๊าซเรือนกระจก

d2+ = ค่าเบี่ยงเบนทางบวก หรือปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากกว่าเป้าหมายด้านการลดก๊าซเรือนกระจก

3.2.3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Functions)

แบบจำลองกำหนดสมการเป้าหมายรวมแบบมีการกำหนดระดับความสำคัญ (Priority) โดยให้ความสำคัญกับการลดต้นทุนพลังงานเป็นอันดับแรก (P1 = 1) และเป้าหมายด้านสิ่งแวดล้อมเป็นอันดับรอง (P2 = 0.2)

สมการเป้าหมายหลัก คือ

$$Minimize\ Z = P_1(d_1^+) + P_2(d_2^+) \quad (1)$$

เป้าหมายที่ 1 การลดต้นทุนพลังงานรวม (Cost Minimization) มุ่งเน้นการลดค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับการจัดหาไฟฟ้า

$$\sum_{t=1}^{4}\left(Cost_{Elec_t}\cdot Elec_t + Cost_{Solar_t}\cdot Solar_t + Cost_{Cogen_t}\cdot Cogen_t\right) + d_{Cost}^- - d_{Cost}^+ = G_{total_{cost}} \quad (2)$$

ต้นทุนพลังงานที่กำหนดในแบบจำลอง ประกอบด้วย อัตราค่าไฟฟ้าจาก กฟภ. ที่ใช้อัตราถ่วงน้ำหนักรวมค่า Ft แยกตามช่วงเวลา TOU ได้แก่ 3.741 บาท ในช่วงเวลา t=1, 4.499 บาท ในช่วงเวลา t=2, 3.864 บาท ในช่วงเวลา t=3 และ 2.982 บาท ในช่วงเวลา t=4 ส่วนต้นทุนไฟฟ้าจาก Solar กำหนดที่ 1.90 บาท/kWh และ Cogen กำหนดที่ 2.70 บาท/kWh ในทุกช่วงเวลา ซึ่งเป็นต้นทุนเฉลี่ยในปี 2567 ของโรงงาน

เป้าหมายที่ 2 การลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Emission Minimization) มุ่งเน้นการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าที่ถูกปล่อยออกมาจากกิจกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้าของโรงงาน

โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก จากไฟฟ้า กฟภ. เท่ากับ 0.475 kgCO2e/kWh, ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก จากโซลาร์เซลล์ เท่ากับ 0 kgCO2e/kWh และค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกระบบความร้อนร่วม Cogen เท่ากับ 0.22 kgCO2e/kWh

$$Min\ Z_2 = \sum_{t=1}^{4}\left(EF_{Elec}\cdot Elec_t + EF_{Solar}\cdot Solar_t + EF_{Cogen}\cdot Cogen_t\right) + d_{Cost}^- - d_{Cost}^+ = G_{total_{GHG}} \quad (3)$$

3.2.4 สมการเงื่อนไข (Constraints)

เพื่อให้การประมวลผลทางคณิตศาสตร์สะท้อนข้อจำกัดในการดำเนินงานจริงของโรงงาน จึงได้กำหนดสมการเงื่อนไขตามสภาวะจริงของโรงงานดังนี้

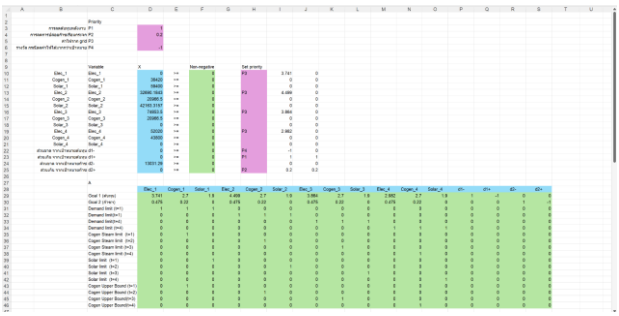
1) ความต้องการพลังงานไฟฟ้าขั้นต่ำ (Demand Limit) มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 95,820 kWh/t

2) ปริมาณการผลิตไฟฟ้าขั้นต่ำของระบบโคเจน (Cogen Steam limit) มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 20,967 kWh/t

3) กำลังผลิตสูงสุดของระบบโคเจน (Cogen Upper Bound) มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 43,800 kWh/t

4) กำลังผลิตสูงสุดของระบบโซลาร์เซลล์ (Solar Upper Bound) ที่ช่วงเวลา t = 1,2 มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 59,400 kWh/t และช่วงเวลาที่ t = 3,4 หรือช่วงที่ไม่มีแสงแดด มีค่าเท่ากับ 0 kWh/t

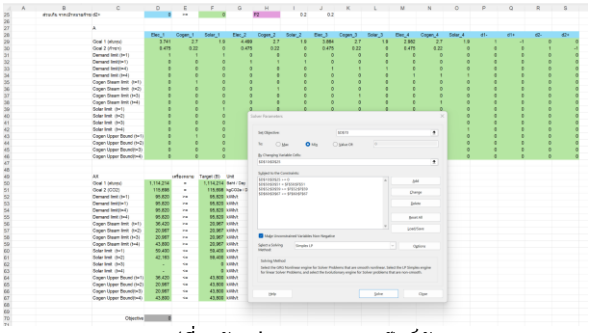
5) สมการเงื่อนไขค่าไม่เป็นลบ (Non-negativity constraint)



รูปที่ 1 ตัวอย่างการสร้างแบบจำลองโดยโปรแกรม Microsoft Excel

3.3 การประมวลผลและเปรียบเทียบผลลัพธ์

เมื่อระบุองค์ประกอบของแบบจำลองครบถ้วน ผู้วิจัยจะทำการแก้ปัญหา (Solve) สมการ Goal Programming ด้วยซอฟต์แวร์ทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาสัดส่วนการจัดสรรพลังงานไฟฟ้า (Energy Mix) จากแหล่งต่าง ๆ ที่เหมาะสมที่สุด จากนั้นจะนำผลลัพธ์ที่ได้มาทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับการดำเนินงานในปัจจุบัน (Baseline) ใน 2 มิติหลัก คือ ความสามารถในการลดต้นทุนพลังงานรวม และความสามารถในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อใช้เป็นแนวทางเชิงกลยุทธ์สำหรับการดำเนินงานของโรงงานต่อไป



รูปที่ 2 ตัวอย่างการกำหนดฟังก์ชัน Solve

4. ผลการวิจัย

ในการประเมินประสิทธิภาพและทำความเข้าใจกลไกการตัดสินใจของแบบจำลองการโปรแกรมเชิงเป้าหมาย (Goal Programming) ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิเคราะห์สถานการณ์จำลอง (Scenario Analysis) โดยเปรียบเทียบผลลัพธ์พฤติกรรมการจัดสรรพลังงาน (Energy Allocation Behavior) ภายใต้เงื่อนไขการกำหนดเป้าหมาย (Targets) และกลไกค่าปรับ (Penalties) ที่แตกต่างกัน 2 กรณี เพื่อตรวจสอบความสมเหตุสมผลเชิงวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์ของแบบจำลอง ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

กรณีศึกษาที่ 1 การกำหนดเป้าหมายระดับต่ำและปราศจากกลไกค่าปรับ (Low Target without Penalty Mechanism)

ในสถานการณ์จำลองนี้ แบบจำลองถูกกำหนดเป้าหมายให้ลดต้นทุนพลังงาน และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เพียงร้อยละ 10 จากสภาวะปกติ (Baseline) โดยปราศจากการกำหนดสมการค่าปรับทางเศรษฐศาสตร์ (Penalty Cost)

ผลการประมวลผลชี้ให้เห็นว่า แม้แบบจำลองจะสามารถบรรลุเป้าหมายทั้งสองประการที่ตั้งไว้ได้อย่างง่ายดาย แต่กลับแสดงพฤติกรรมการจัดสรรพลังงานที่ขาดความสมเหตุสมผล (Non-sensical behavior) ในหลายมิติ

ประการแรก แบบจำลองเลือกที่จะนำเข้าไฟฟ้าจากโครงข่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA Grid) ในช่วงความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด (On-Peak) ซึ่งมีอัตราค่าไฟฟ้าที่แพงที่สุด แทนที่จะใช้มาตรการหลีกเลี่ยงต้นทุน (Cost Avoidance)

ประการที่สอง มีการลดกำลังการผลิตของระบบผลิตพลังงานความร้อนร่วม (Cogeneration) ลงโดยไม่มีเหตุผลทางเทคนิค และประการสุดท้าย แบบจำลองสั่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ารวมในบางกะสูงเกินความต้องการขั้นต่ำ (Demand limit) ที่ 95,820 กิโลวัตต์-ชั่วโมงไปอย่างสูญเปล่า

ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีพื้นฐานของการโปรแกรมเชิงเป้าหมาย ซึ่งมีกลไกการค้นหาคำตอบตามหลัก "ความพอใจ" (Satisficing Principle) [19] กล่าวคือ เมื่ออัลกอริทึมประมวลผลจนบรรลุเป้าหมายระดับต่ำที่ร้อยละ 10 ตามที่กำหนดไว้สำเร็จ ระบบจะยุติการค้นหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ทันที ส่งผลให้แบบจำลองขาดแรงจูงใจที่จะลดต้นทุนหรือลดการปล่อยมลพิษเพิ่มเติมให้เต็มศักยภาพที่มี

กรณีศึกษาที่ 2: การกำหนดเป้าหมายระดับความท้าทายสูงร่วมกับกลไกค่าปรับและค่ารางวัล (High Target with Penalty and Bonus Mechanisms

ผู้วิจัยได้ยกระดับความท้าทายโดยปรับเป้าหมายการลดต้นทุนเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 20 และเป้าหมายการลดก๊าซเรือนกระจกเป็นร้อยละ 30 พร้อมทั้งบูรณาการกลไกการควบคุมพฤติกรรม (Directional Control) ผ่านการเพิ่มระดับความสำคัญในเป้าหมายที่ 3 และ 4 (Priority: P3, P4) กำหนดค่าปรับ (Penalty) ในระดับสูงเพื่อลงโทษการดึงไฟฟ้าจากโครงข่ายในช่วงเวลาที่ราคาสูง และกำหนดค่ารางวัล (Bonus) เพื่อกระตุ้นให้แบบจำลองพยายามกดต้นทุนให้ต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

ผลการทดสอบในกรณีนี้พบว่า แบบจำลองถูกบังคับให้ต้องค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด (Best Solution) และแสดงพฤติกรรมการจัดสรรพลังงานที่สอดคล้องกับหลักวิศวกรรมพลังงานอย่างสมบูรณ์ กล่าวคือ ในช่วงเวลากลางวัน (t = 1, 2) แบบจำลองตัดสินใจดึงศักยภาพของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV) มาใช้เต็มขีดจำกัดสูงสุด (59,400 kWh) ร่วมกับการเดินเครื่อง Cogeneration เพื่อหลีกเลี่ยงการซื้อไฟฟ้าในช่วง On-Peak อย่างเด็ดขาด ขณะที่ในช่วงเวลากลางคืน (t=3) ซึ่งปราศจากทรัพยากรแสงอาทิตย์ แบบจำลองเลือกเดินเครื่อง Cogeneration จนเต็มกำลังผลิตสูงสุดของเครื่องจักร (Upper Bound ที่ 43,800 kWh) เพื่อพยุงต้นทุนรวม ก่อนจะจำยอมนำเข้าไฟฟ้าจากโครงข่ายเพื่อเติมเต็มอุปสงค์ส่วนที่ขาด

ทั้งนี้ยังพบขีดจำกัดในการบรรลุเป้าหมายขององค์กร จากการทดสอบด้วยการตั้งเป้าหมายที่มีความท้าทายสูงเกินจริงในกรณีศึกษาที่ 2 ได้เปิดเผยให้เห็นถึงขีดจำกัดสูงสุดของทรัพยากรพลังงานที่โรงงานมีอยู่ในปัจจุบัน โดยพบว่าประสิทธิภาพสูงสุดของแบบจำลองสามารถลดต้นทุนพลังงานรายวันได้มากที่สุดคือ ร้อยละ 18 (ไม่สามารถบรรลุเป้าหมายอุดมคติที่ร้อยละ 20 ได้) ในขณะที่ศักยภาพด้านสิ่งแวดล้อมสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้สูงสุดถึง ร้อยละ 35-37 (บรรลุผลสำเร็จเกินกว่าเป้าหมายร้อยละ 30) ซึ่งเป็นผลจากการพึ่งพาพลังงานสะอาดอย่างเต็มพิกัด

5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษา พบว่าการกำหนดเป้าหมายในระดับต่ำโดยปราศจากกลไกควบคุมจะส่งผลให้แบบจำลองแสดงพฤติกรรมการค้นหาคำตอบแบบพอใจ (Satisficing Principle) ซึ่งทำให้การจัดสรรพลังงานขาดความสมเหตุสมผลเชิงวิศวกรรมอย่างไรก็ตาม เมื่อทำการยกระดับเป้าหมายให้ท้าทายขึ้น ร่วมกับการบูรณาการกลไกค่าปรับและค่ารางวัล (Penalty and Bonus Mechanisms) ผ่านการกำหนดระดับความสำคัญ (Priority) แบบจำลองสามารถแสดงศักยภาพในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้อย่างสมบูรณ์ โดยกลยุทธ์การผสมผสานพลังงาน จะตอบสนองต่อโครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลา (TOU) อย่างชัดเจน

ระบบจะดึงศักยภาพการผลิตของพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้เต็มขีดจำกัดสูงสุด ผนวกกับการเดินเครื่อง Cogeneration เพื่อหลีกเลี่ยงการนำเข้าไฟฟ้าจากโครงข่ายในช่วงความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด (On-Peak) อย่างเด็ดขาด ส่วนในขณะที่ช่วงเวลากลางคืนระบบจะเดินเครื่อง Cogeneration จนเต็มกำลังสูงสุดเพื่อพยุงต้นทุน และเลือกลดกำลังการผลิตลงสู่ระดับต่ำสุดเพื่อพึ่งพาการนำเข้าไฟฟ้าจากโครงข่ายเฉพาะในช่วง Off-Peak ซึ่งมีราคาต่ำที่สุด

ทั้งนี้ จากการวิเคราะห์ขีดจำกัดของเทคโนโลยีที่มีอยู่ในปัจจุบัน พบว่าการจัดสรรพลังงาน ณ สภาวะที่เหมาะสมที่สุด สามารถสร้างผลประหยัดต้นทุนพลังงานรวมรายวันได้สูงสุดเพียงร้อยละ 18 จากสภาวะปกติ และสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้สูงสุดถึงร้อยละ 35-37 ซึ่งบรรลุผลสำเร็จเกินกว่าเป้าหมายทางสิ่งแวดล้อมที่ตั้งไว้

ผู้วิจัยจึงมีข้อเสนอแนะ สำหรับองค์กรที่มุ่งมั่นจะยกระดับการลดต้นทุนพลังงานและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกให้ก้าวข้ามเพดานสูงสุดที่ร้อยละ 18 โดยควรพิจารณาศึกษาความคุ้มค่าในการลงทุนระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (Battery Energy Storage Systems: BESS) เพื่อกักเก็บพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินจากระบบพลังงานแสงอาทิตย์ในช่วง

กลางวันที่มีต้นทุนต่ำ นำมาจ่ายชดเชยในช่วงหัวค่ำ (18.00 - 24.00 น.) ซึ่งปราศจากแสงอาทิตย์แต่อัตราค่าไฟฟ้าจากโครงข่ายยังมีราคาสูง จะช่วยลดต้นทุนในเวลากลางคืนและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานขององค์กรได้

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.พงษ์สันธ์ บัณฑิตสกุลชัย อาจารย์ที่ปรึกษา เป็นอย่างสูง ที่ให้ความกรุณาชี้แนะแนวทาง และตรวจสอบแก้ไขงานวิจัยอย่างต่อเนื่องจนทำให้งานวิจัยฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอขอบพระคุณคณะผู้บริหารและบุคลากรโรงงานผลิตยางรถยนต์ กรณีศึกษาในจังหวัดสระบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลการใช้พลังงานซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัย ตลอดจนหน่วยงานที่เกี่ยวข้องที่สนับสนุนข้อมูลอ้างอิงในการศึกษาครั้งนี้ สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณครอบครัว คณาจารย์ และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน ที่คอยให้การสนับสนุนจนงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] กรมการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและสิ่งแวดล้อม, "Thailand's Fourth Biennial Update Report (BUR4)," 2022. [Online]. Available: https://www.onep.go.th/book/thailands-fourth-biennial-update-report/

[2] กรมการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและสิ่งแวดล้อม, "แผนปฏิบัติการด้านการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศ ปี พ.ศ. 2564–2573," 2024. [Online]. Available: https://www.dcce.go.th/datacenter/653/

[3] ชัยวัช โชวเจริญสุข, "แนวโน้มธุรกิจ/อุตสาหกรรม ปี 2568-70: อุตสาหกรรมยางพาราแปรรูป," วิจัยกรุงศรี, 2024.

[4] สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, "รายงานภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรมปี 2567 และแนวโน้มปี 2568," กระทรวงอุตสาหกรรม, 2025. [Online]. Available: https://www.oie.go.th/view/1/ภาวะอุตสาหกรรมรายไตรมาสและรายปี

[5] กรมเจรจาการค้าระหว่างประเทศ, "มาตรการปรับคาร์บอนก่อนเข้าพรมแดนของสหภาพยุโรป (Carbon Border Adjustment Mechanism: CBAM)," กรมเจรจาการค้าระหว่างประเทศ, 2021.

[6] Bridgestone Asia Pacific, "Bridgestone Releases its Bridgestone 3.0 Journey 2025 Integrated Report," Jun. 30, 2025. [Online]. Available: https://www.bridgestone-asiapacific.com/en/media-centre/pressreleases/press-release-2025/pressrelease-20250630

[7] กรมการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและสิ่งแวดล้อม, "ภาพรวมแผนปฏิบัติการด้านการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศ ปี พ.ศ. 2564–2573," 2025. [Online]. Available: https://www.dcce.go.th/3317/

[8] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561–2580 (AEDP2018). กระทรวงพลังงาน, 2020.

[9] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), "ระเบียบวิธีลดก๊าซเรือนกระจกภาคสมัครใจ สำหรับการสร้างโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงฟอสซิลประสิทธิภาพสูงใหม่ (T-VER-S-METH-02-01) (ฉบับที่ 01)," 2023.

[10] คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (กกพ.), "เอกสารเผยแพร่ เรื่อง ค่าไฟฟ้าตามสูตรการปรับอัตราค่าไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ (Ft) สำหรับงวดเดือนกันยายน – ธันวาคม 2567," 2024. [Online]. Available: https://www.erc.or.th/th/document-ft/

[11] เสาวลักษณ์ สระธรรม, "การศึกษาเชิงเปรียบเทียบการตัดสินใจผลิตเองหรือจ้างผลิต: กรณีศึกษา ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ในโรงงานชิ้นส่วนยานยนต์," 2023. [Online]. Available: https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd/11417/

[12] สถาบันรับรองมาตรฐานไอเอสโอ, "คู่มือมาตรฐานระบบการจัดการและกฎระเบียบทางการค้าเชิงเทคนิคของประเทศคู่ค้าที่สำคัญสำหรับอุตสาหกรรมยางพาราและผลิตภัณฑ์ยาง," 2020. [Online]. Available: https://intelligence.masci.or.th/wp-content/uploads/2020/10/rubber55.pdf

[13] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (กระทรวงพลังงาน), "Energy Efficiency Index in Rubber Industry," Nov. 2007. [Online]. Available: http://www2.dede.go.th/kmberc/datacenter/factory/rubber/RubberEng.pdf

[14] นภดล ร่มโพธิ์, "การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ช่วยในการตัดสินใจทางธุรกิจ," วารสารบริหารธุรกิจ, vol. 34, no. 130, pp. 10–13, 2011.

[15] K. Deb, "Single and Multi-Objective Optimization using Evolutionary Computation," 2004. [Online]. Available: https://www.egr.msu.edu/~kdeb/papers/2004002.pdf

[16] กนกพร ศรีปฐมสวัสดิ์, "การประยุกต์โปรแกรมเชิงเป้าหมายในกระบวนการออกแบบสินค้าอุตสาหกรรมกรณีศึกษา," SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY, vol. 5, no. 1, pp. 1–10, 2019.

[17] B. Sarkar, M. Omair, and S.-B. Choi, "A multi-objective optimization of energy, economic, and carbon emission in a production model under sustainable supply chain management," Applied Sciences, vol. 8, no. 10, Art. no. 1744, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/app8101744

[18] ดร.เนทิยา กรีธาชาติ, "แนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร และการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเพื่อความยั่งยืน," Sep. 8, 2023. [Online]. Available: https://share.google/MCZY9VB52EHEzEVVV

[19] A. Charnes และ W. W. Cooper, "Deterministic equivalents for optimizing and satisficing under chance constraints," *Operations Research*, vol. 11, no. 1, pp. 18-39, 1963. [Online]. Available: https://ideas.repec.org/a/inm/oropre/v11y1963i1p18-39.html



ประวัติผู้เขียนบทความ นางสาวชุติมนต์ สวนดอกไม้ นิสิตปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน วิทยาลัยสหศาสตร์บูรณาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การประเมินผลเชิงทดลองของรูปแบบการทำงานระบบดักจับฝุ่นไฟฟ้าสถิตร่วมกับถ่านกัมมันต์สำหรับเตาเผากระดาษแบบเคลื่อนที่

Experimental Evaluation of Electrostatic Precipitator and Activated Carbon Configurations for Pollutant Reduction in a Mobile Joss Paper Incinerator

คเชนทร์ จันทร์เทศ* และ **มาลี สันติคุณาภรณ์**

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

99 หมู่ 18 ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง, จังหวัดปทุมธานี 12120

บทคัดย่อ

การเผากระดาษไหว้เจ้าในพิธีกรรมของชุมชนชาวจีนเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศขนาดเล็กที่มักเกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้เกิดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (Particulate matter, PM2.5) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide, CO) และสารอินทรีย์ระเหยง่ายรวม (Total volatile organic compounds, TVOCs) ในก๊าซไอเสีย งานวิจัยนี้เป็นการประเมินผลเชิงทดลองของอุปกรณ์ลดควันสำหรับเตาเผากระดาษแบบเคลื่อนที่ โดยมุ่งเน้นผลของรูปแบบการทำงานของระบบควบคุมมลพิษ ได้แก่ ระบบดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon, AC) ระบบดักจับฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitators, ESP) และระบบดักจับฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิตร่วมกับถ่านกัมมันต์ (ESP + AC) รวมถึงผลของปริมาณถ่านกัมมันต์ต่อประสิทธิภาพการลดมลพิษ การทดลองดำเนินการโดยใช้กระดาษไหว้เจ้าขนาด 11 ซม. × 12 ซม. ภายใต้ปริมาณกระดาษและเงื่อนไขการเดินระบบที่แตกต่างกัน และตรวจวัดค่ามลพิษ ได้แก่ PM2.5, CO และ TVOCs ก่อนและหลังผ่านอุปกรณ์ต้นแบบ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมมลพิษแบบผสมผสาน ESP+AC ให้ประสิทธิภาพการลดมลพิษโดยรวมสูงกว่าการใช้ระบบเดี่ยว โดยเฉพาะภายใต้เงื่อนไขการเผากระดาษ 15 แผ่น ซึ่งสามารถลด TVOCs, PM2.5 และ CO ได้ร้อยละ 71.91, 74.80 และ 80.19 ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์ลดควันไม่ได้ขึ้นอยู่กับการติดตั้ง ESP และ AC เพียงอย่างเดียว แต่ยังสัมพันธ์กับปริมาณวัสดุดูดซับและสภาวะการไหลของก๊าซไอเสีย ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการพัฒนาอุปกรณ์ควบคุมมลพิษขนาดเล็กสำหรับการใช้งานในชุมชนและศาลเจ้าต่อไป

คำสำคัญ : เตาเผากระดาษ, อุปกรณ์ลดควัน, มลพิษทางอากาศ, เครื่องดักจับฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิต, ถ่านกัมมันต์

Abstract

Joss paper burning in Chinese ritual practices is a small-scale emission source commonly associated with incomplete combustion, leading to the release of fine particulate matter (PM2.5), carbon monoxide (CO), and total volatile organic compounds (TVOCs) in flue gas. This study experimentally evaluated a smoke reduction device for a mobile Joss paper incinerator, with emphasis on the effects of treatment configuration and operating conditions. The tested configurations included activated carbon (AC) adsorption, electrostatic precipitation (ESP), and a combined electrostatic precipitator–activated carbon system (ESP + AC). The influence of activated carbon loading was also investigated. Joss paper sheets with a size of 11 cm × 12 cm were burned under different paper loads and operating conditions. Real-time concentrations of PM2.5, CO, and TVOCs were measured before and after treatment by the prototype device. The results indicated that the combined ESP+AC configuration provided higher overall pollutant reduction than single treatment configurations. Under the 15-sheet burning condition, the ESP+AC system reduced TVOCs, PM2.5, and CO by 71.91%, 74.80%, and 80.19%, respectively. These findings suggest that the performance of a mobile smoke reduction device is governed not only by the integration of ESP and activated carbon units, but also by adsorption media loading and exhaust flow conditions. The proposed configuration provides a practical basis for developing compact air pollution control devices for community-scale joss paper burning and shrine applications.

Keywords: Joss paper incinerator, Air pollution control, Electrostatic Precipitator, Activated Carbon

1. บทนำ

การเผากระดาษไหว้เจ้าเป็นกิจกรรมทางวัฒนธรรมที่สืบทอดมาอย่างยาวนานในสังคมจีนและชุมชนเชื้อสายจีนในหลายประเทศของเอเชีย รวมถึงประเทศไทย อย่างไรก็ตาม กระบวนการเผาไหม้ของกระดาษพิธีกรรมมักเกิดขึ้นอย่างไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้เกิดการปล่อยมลพิษทางอากาศหลายชนิด เช่น ฝุ่นละอองขนาดเล็ก ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ สารอินทรีย์ระเหยง่าย และองค์ประกอบโลหะบางชนิดที่มากับอนุภาคจากการเผาไหม้ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพอากาศและสุขภาพของประชาชน [1]–[3]

งานวิจัยในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการเผากระดาษและธูปในพิธีกรรมมีส่วนทำให้ภาระมลพิษทางอากาศเพิ่มสูงขึ้นในช่วงเวลาที่มีการประกอบพิธีกรรมอย่างเข้มข้น โดยเฉพาะในช่วงเทศกาลหรือวันสำคัญทางศาสนา โดย Pham Thi Lan Chi et al. [4] รายงานว่า การเผาธูปและกระดาษพิธีกรรมในช่วงเทศกาล Vu Lai ณ กรุงฮานอย ทำให้ดัชนีคุณภาพอากาศเพิ่มขึ้นทันที และทำให้ PM10, PM2.5 และ NO_2 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในช่วงเทศกาล แม้ว่าจะไม่พบผลกระทบที่ชัดเจนต่อ CO และ SO_2 ในการวิเคราะห์ดังกล่าวก็ตาม ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับงานของ Zhang et al. [2] ที่พบว่าการเผาวัสดุพิธีกรรมก่อให้เกิดมลพิษอันตรายหลายชนิด โดยเฉพาะ CO, PM10, PM2.5, SO_2, NOx และ non-methane

hydrocarbons (NMHC) ในระดับที่น่ากังวล และอนุภาค PM2.5 ที่เกิดขึ้นยังมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ ธาตุ และโลหะรวมอยู่ในสัดส่วนสูง

นอกจากปัญหาเชิงความเข้มข้นของมลพิษแล้ว งานวิจัยยังชี้ให้เห็นถึงความเสี่ยงด้านองค์ประกอบของอนุภาคจากการเผากระดาษพิธีกรรม โดย Hsueh et al. [1] พบว่า PM2.5 เป็นองค์ประกอบหลักของมลพิษจากการเผากระดาษไหว้เจ้า และตรวจพบโลหะหลายชนิด เช่น Na, Ca, Mg, Al และ K ทั้งในละอองลอยและเถ้าจากการเผา ขณะที่ Lam Van Giang et al. [5] รายงานว่าฝุ่นและเถ้าจากการเผากระดาษพิธีกรรมมีโลหะหนัก เช่น Cu, Pb และ Cd ในระดับสูง และแหล่งเผายังส่งผลต่อคุณภาพอากาศโดยรอบอย่างชัดเจน ข้อมูลดังกล่าวสะท้อนว่าการเผากระดาษพิธีกรรมไม่ได้ก่อให้เกิดเพียงควันหรือกลิ่นรบกวนเท่านั้น แต่ยังเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษที่มีความซับซ้อนทั้งในรูปของก๊าซ อนุภาค และของเสียตกค้างหลังการเผา

แม้ว่าจะมีการพัฒนาเตาเผาไร้ควันหรือเตาเผาแบบพกพาในบริบทของการจัดการขยะและแหล่งกำเนิดมลพิษขนาดเล็กอยู่บ้าง แต่ระบบส่วนใหญ่ยังเน้นการเผาขยะทั่วไปมากกว่าการประยุกต์ใช้กับกระดาษพิธีกรรมโดยเฉพาะ ตัวอย่างเช่น Madukasi et al. [6] ได้นำเสนอการออกแบบเตาเผาไร้ควันสำหรับขยะมูลฝอยเทศบาลที่ควบคุมอุณหภูมิในห้องเผาไหม้และก๊าซไอเสียเพื่อให้การเผาไหม้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ขณะที่ Riyadi et al. [7] และ Riyanto et al. [8] ได้เสนอเตาเผาไร้ควันแบบไฮบริดที่บูรณาการระบบกรองควัน ระบบน้ำ และพลังงานแสงอาทิตย์หรือพลังงานไฟฟ้าร่วมกัน เพื่อเพิ่มความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ส่วน Wajih et al. [9] เสนอแนวคิดเตาเผาแบบพกพาสำหรับการจัดการขยะ โดยชี้ให้เห็นทั้งข้อดีด้านการลดปริมาตรขยะและข้อจำกัดด้านการปลดปล่อยโลหะหนัก เถ้าละเอียด และความจำเป็นในการควบคุมมลพิษอย่างเหมาะสม อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีงานวิจัยที่มุ่งเน้นการพัฒนาอุปกรณ์ควบคุมมลพิษสำหรับเตาเผากระดาษพิธีกรรมขนาดเล็กหรือเตาเผาแบบเคลื่อนที่โดยตรง

ในด้านเทคโนโลยีควบคุมมลพิษ เครื่องดักจับฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิตเป็นระบบที่ได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพสูงในการดักจับอนุภาคละเอียด โดยอาศัยหลักการสร้างสนามไฟฟ้าแรงดันสูงเพื่อทำให้อนุฝุ่นในก๊าซมีประจุและเคลื่อนที่ไปยังแผ่นรับฝุ่น [10], [11] นอกจากนี้ Rajkumar et al. [12] ยังแสดงให้เห็นว่า ESP สามารถพัฒนาเป็นต้นแบบต้นทุนต่ำและเคลื่อนย้ายได้สำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก ซึ่งเป็นแนวคิดที่สอดคล้องกับการประยุกต์ใช้ในระบบเตาเผาขนาดเล็ก ขณะที่ Chen et al. [13] รายงานว่าประสิทธิภาพของ ESP ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์สำคัญหลายประการ เช่น แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในส่วนก่อประจุ (Ionization voltage) ความเร็วการไหลของก๊าซ และรูปแบบการออกแบบของส่วนก่อประจุและส่วนเก็บรวบรวมอนุภาค (Ionization and collection sections) โดยหลังการปรับให้เหมาะสม ระบบสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บอนุภาคขนาดเล็กได้มากกว่า 95%

ในเชิงกลไก เครื่องดักจับฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิตทำงานโดยอาศัยสนามไฟฟ้าแรงดันสูงในการทำให้อนุฝุ่นในกระแสก๊าซเกิดประจุไฟฟ้าและเคลื่อนที่ไปสะสมบนแผ่นรับฝุ่นภายใต้แรงไฟฟ้า ในเชิงทฤษฎีประสิทธิภาพการดักจับของ ESP สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ Deutsch–Anderson ดังสมการที่ (1)

$$\eta = 1 - \exp(-WA/Q) \quad (1)$$

โดยที่

η = ประสิทธิภาพการดักจับของระบบ

w = ความเร็วการเคลื่อนที่ของอนุภาคเข้าสู่แผ่นรับฝุ่น

A = พื้นที่ผิวของแผ่นรับฝุ่น และ

Q = อัตราการไหลเชิงปริมาตรของก๊าซ

สมการดังกล่าวสะท้อนว่าเมื่อพื้นที่รับฝุ่นเพิ่มขึ้น หรือเมื่ออัตราการไหลของก๊าซลดลง ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังนั้น ESP จึงมีศักยภาพสูงในการกำจัดฝุ่นละอองขนาดเล็กโดยเฉพาะ PM2.5 ซึ่งเป็นมลพิษสำคัญจากการเผากระดาษไหว้เจ้าในพื้นที่ประกอบพิธีกรรม

สำหรับมลพิษที่อยู่ในรูปก๊าซและสารประกอบที่ก่อกลิ่น ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและมีโครงสร้างรูพรุนจำนวนมาก จึงเหมาะสำหรับการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายและสารประกอบที่ก่อกลิ่นจากก๊าซเผาไหม้ กลไกการทำงานหลักคือการดูดซับโมเลกุลของสารมลพิษไว้บนพื้นผิวและภายในรูพรุนของวัสดุ เมื่อพิจารณาร่วมกับ ESP ซึ่งมีประสิทธิภาพเด่นในการกำจัดอนุภาคละเอียด การบูรณาการทั้งสองเทคโนโลยีจึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาอุปกรณ์ลดควันของเตาเผากระดาษแบบเคลื่อนที่ โดย ESP ทำหน้าที่หลักในการลดฝุ่นละออง ส่วนถ่านกัมมันต์ทำหน้าที่เสริมในการลดมลพิษทางก๊าซและกลิ่นควัน

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะเห็นได้ว่า การเผากระดาษพิธีกรรมเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศที่มีลักษณะเฉพาะ ทั้งในรูปของฝุ่นละออง ก๊าซจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ และสารอินทรีย์ระเหยง่าย อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นการศึกษาผลกระทบของการเผากระดาษหรือการพัฒนาเตาเผาในภาพรวม ขณะที่การประเมินผลของรูปแบบการควบคุมมลพิษ เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ การใช้เครื่องดักจับฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิต และการใช้ระบบผสมผสาน ESP+AC ภายใต้สภาวะการเดินระบบที่แตกต่างกัน ยังมีข้อมูลจำกัด โดยเฉพาะในระดับอุปกรณ์ต้นแบบขนาดเล็กที่สามารถติดตั้งกับเตาเผากระดาษแบบเคลื่อนที่ได้จริง

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งประเมินผลเชิงทดลองของอุปกรณ์ลดควันจากเตาเผากระดาษแบบเคลื่อนที่ โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบควบคุมมลพิษในรูปแบบ AC, ESP และ ESP+AC รวมถึงศึกษาผลของปริมาณถ่านกัมมันต์ต่อการลด PM2.5, CO และ TVOCs เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการพัฒนาอุปกรณ์ควบคุมมลพิษขนาดเล็กที่เหมาะสมกับการใช้งานจริงในชุมชนและศาลเจ้า

วัตถุประสงค์งานวิจัย

(1) เพื่อประเมินผลของปริมาณกระดาษต่อการเกิด PM2.5, CO และ TVOCs จากการเผากระดาษไหว้เจ้า

(2) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบ ESP, AC และ ESP+AC ต่อการลดมลพิษจากเตาเผากระดาษแบบเคลื่อนที่

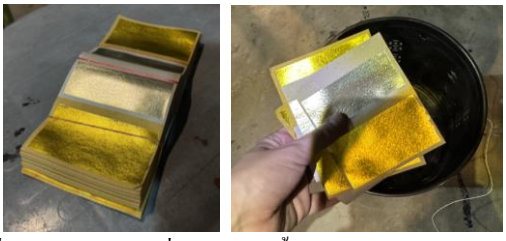
(3) เพื่อศึกษาผลของปริมาณถ่านกัมมันต์ต่อประสิทธิภาพการลดมลพิษของอุปกรณ์ต้นแบบ

2. ระเบียบวิธีวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการทดลองเชิงประเมินสมรรถนะของอุปกรณ์ลดควันสำหรับเตาเผากระดาษแบบเคลื่อนที่ โดยใช้กระดาษไหว้เจ้าขนาด 11 ซม. × 12 ซม. เป็นเชื้อเพลิงทดสอบ และตรวจวัดค่ามลพิษในก๊าซไอเสียก่อนและหลังผ่านอุปกรณ์ต้นแบบ พารามิเตอร์ที่ตรวจวัดประกอบด้วย PM2.5, CO และ TVOCs โดยใช้เครื่องมือตรวจวัดแบบเรียลไทม์ การทดลองแบ่งออกเป็นหลายเงื่อนไขเพื่อประเมินผลของปริมาณกระดาษ รูปแบบการควบคุมมลพิษ และปริมาณถ่านกัมมันต์

2.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1) กระดาษไหว้เจ้าชนิดเดียวกันที่มีจำหน่ายทั่วไปในท้องตลาด ใช้เป็นวัสดุเชื้อเพลิงในการทดลองทุกชุด โดยกระดาษที่ใช้มีขนาดกว้าง 11 ซม. ยาว 12 ซม. เพื่อควบคุมตัวแปรด้านลักษณะทางกายภาพของวัสดุเชื้อเพลิงให้คงที่ตลอดการทดลอง



รูปที่ 1 กระดาษไหว้เจ้าที่ใช้เป็นวัสดุเชื้อเพลิงในการทดลองทุกชุด

2) เตาเผากระดาษแบบเคลื่อนที่ชนิดสแตนเลส สำหรับเผากระดาษไหว้เจ้าขนาด Ø27 x 29 ซม.

3) กรวยสังกะสีขนาด Ø12 นิ้ว x 34 ซม. ก้นกรวย Ø1.5 นิ้ว

4) ชุดท่อและข้อต่อ PVC ขนาด Ø1 1/2 นิ้ว

5) ชุดกำเนิดแรงดันไฟฟ้าสำหรับระบบ ESP รุ่น MC-901 Pulsed DC High Voltage Module ใช้สำหรับสร้างสนามไฟฟ้าแรงดันสูงตามสเปกผู้ผลิต

6) ถ่านกัมมันต์ Activated Carbon Water Filter ID 1000

7) แผ่นมุ้งลวดสแตนเลส 304 ขนาด 20 mesh ช่องตา 0.12 mm

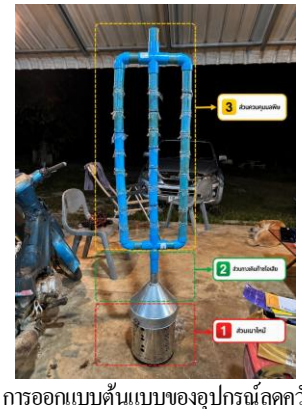
8) อุปกรณ์ตรวจวัดมลพิษ รุ่น ZN-MT14

9) เครื่องวัดอุณหภูมิของการเผาไหม้ รุ่น UNI-T UT208B

10) เครื่องวัดความเร็วของก๊าซไอเสีย รุ่น UNI-T UT363 BT

2.2 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ต้นแบบ

อุปกรณ์ต้นแบบลดควันได้รับการออกแบบให้ติดตั้งร่วมกับเตาเผากระดาษแบบเคลื่อนที่ โดยประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนเผาไหม้ ส่วนทางเดินก๊าซไอเสีย และส่วนควบคุมมลพิษ ในการออกแบบก๊าซไอเสียจากเตาเผาจะไหลผ่านกรวยสังกะสีเข้าสู่ระบบท่อ จากนั้นผ่านหน่วยดักจับฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิต และผ่านชั้นถ่านกัมมันต์ก่อนระบายออกสู่บรรยากาศ แนวทางดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มการสัมผัสระหว่างก๊าซไอเสียกับหน่วยดักจับและหน่วยดูดซับ โดยยังคงความกะทัดรัดและความสะดวกต่อการเคลื่อนย้ายของระบบ ทั้งนี้ ระบบท่อ PVC ถูกติดตั้งในส่วนทางเดินก๊าซไอเสียหลังจากก๊าซออกจากบริเวณเผาไหม้ และอยู่ในตำแหน่งที่ไม่สัมผัสเปลวไฟโดยตรง



รูปที่ 2 การออกแบบต้นแบบของอุปกรณ์ลดควัน

2.3 การทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์ต้นแบบ

การทดลองแบ่งเป็น 3 กรณี เพื่อให้ครอบคลุมทั้งผลของปริมาณกระดาษ รูปแบบการควบคุมมลพิษ และปริมาณถ่านกัมมันต์ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แผนการทดลองสำหรับประเมินผลของระบบ ESP และ AC

การทดลอง	เงื่อนไขการทดลอง	ตัวแปรที่ใช้เปรียบเทียบ	จุดประสงค์
กรณีที่ 1	กระดาษจำนวน 3 5 10 และ15 แผ่น	Control, ESP and ESP+AC	ศึกษาผลของปริมาณกระดาษและระบบควบคุมมลพิษ
กรณีที่ 2	กระดาษจำนวน 15 แผ่น	Control, AC only, ESP only and ESP+AC	เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบควบคุมมลพิษ
กรณีที่ 3	กระดาษจำนวน 15 แผ่น โดยเปิด ESP (คงที่)	ปริมาณของ AC 0g 30g 60g และ 100g	ประสิทธิภาพของการควบคุมมลพิษตามปริมาณของ AC

2.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

ระหว่างการเผาไหม้ ทำการตรวจวัดค่าความเข้มข้นของ PM2.5, CO และ TVOCs ด้วยเครื่องตรวจวัด พร้อมทั้งบันทึกอุณหภูมิในเตาขณะเผา ข้อมูลที่ได้จากการทดลองถูกนำมาเปรียบเทียบระหว่างค่าความเข้มข้นก่อนและหลังผ่านระบบควบคุมมลพิษ หรือเทียบกับค่า Baseline ในแต่ละกรณีของการทดลอง โดยการทดลองในแต่ละเงื่อนไขดำเนินการจำนวน 3 รอบ และรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ร้อยละการลดลงของมลพิษ โดยคำนวณจากสมการที่ (2)

$$\text{Reduction (\%)} = [(C_{Before} - C_{After}) / C_{Before}] \times 100 \qquad (2)$$

โดยที่

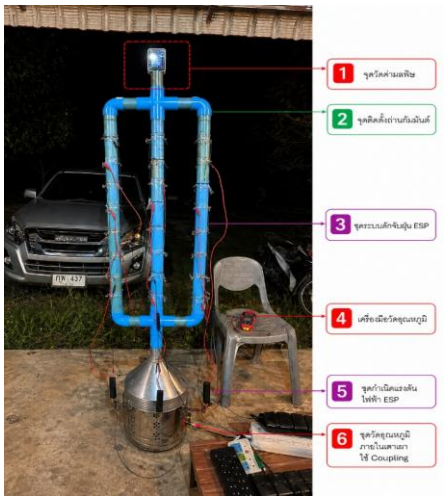
C_{Before} = ค่าของมลพิษก่อนติดตั้งอุปกรณ์

C_{After} = ค่าของมลพิษหลังติดตั้งอุปกรณ์

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 ผลการพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบลดควัน

ผลการพัฒนาแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ต้นแบบสามารถติดตั้งร่วมกับเตาเผากระดาษแบบเคลื่อนที่ได้จริง โดยยังคงลักษณะกะทัดรัดและสามารถใช้งานร่วมกับระบบเตาเผาเดิมได้ในระดับต้นแบบ ทั้งนี้องค์ประกอบหลักของระบบประกอบด้วยเตาเผากระดาษ กรวยสังกะสี ระบบท่อทางเดินก๊าซไอเสีย หน่วยดักจับฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิต และหน่วยดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์



รูปที่ 3 โครงสร้างต้นแบบอุปกรณ์ลดควันที่พัฒนาขึ้นสำหรับติดตั้งร่วมกับเตาเผากระดาษแบบเคลื่อนที่

3.2 ผลของปริมาณกระดาษต่อการปล่อยมลพิษ

จากการทดลองแปรผันจำนวนกระดาษไหว้เจ้า 3, 5, 10 และ 15 แผ่น เพื่อจำลองสภาวะที่มีภาระมลพิษเพิ่มขึ้น พบว่าเมื่อจำนวนกระดาษเพิ่มขึ้น ค่าความเข้มข้นของ TVOCs, PM2.5 และ CO มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ แนวโน้มดังกล่าวสะท้อนว่าการเพิ่มมวลกระดาษทำให้เกิดผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้มากขึ้น โดยเฉพาะ CO และ TVOCs ซึ่งสัมพันธ์กับการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ และ PM2.5 ซึ่งเกิดจากอนุภาคละเอียดในก๊าซไอเสีย

เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ผ่านระบบควบคุมมลพิษ พบว่าระบบ ESP+AC สามารถลดระดับมลพิษได้ชัดเจนในทุกระดับจำนวนกระดาษ โดยเฉพาะภายใต้เงื่อนไขการเผากระดาษ 15 แผ่น ซึ่งเป็นกรณีที่มีภาระมลพิษสูงที่สุด ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ต้นแบบมีศักยภาพในการรองรับภาระมลพิษที่เพิ่มขึ้น และสามารถควบคุมการปล่อยมลพิษจากเตาเผากระดาษแบบเคลื่อนที่ได้ในระดับต้นแบบ

3.3 ประสิทธิภาพของระบบ AC, ESP และ ESP+AC

เมื่อเปรียบเทียบรูปแบบการควบคุมมลพิษภายใต้เงื่อนไขการเผากระดาษ 15 แผ่น พบว่าการใช้ AC เพียงอย่างเดียวสามารถลด TVOCs ได้ร้อยละ 63.54 แต่มีข้อจำกัดในการลด PM2.5 และ CO เมื่อเทียบกับระบบที่มี ESP ในขณะที่การใช้ ESP เพียงอย่างเดียวสามารถลด PM2.5 และ CO ได้ร้อยละ 67.42 และ 76.26 ตามลำดับ แต่มีข้อจำกัดต่อการลด TVOCs โดยเฉพาะที่เงื่อนไข 15 แผ่น ซึ่งลดได้เพียงร้อยละ 2.24

ผลดังกล่าวสะท้อนลักษณะการทำงานที่แตกต่างกันของหน่วยควบคุมมลพิษแต่ละชนิด โดย ESP มีบทบาทหลักในการลดอนุภาคฝุ่นผ่านกลไกไฟฟ้าสถิต ขณะที่ถ่านกัมมันต์มีบทบาทเด่นในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายและสารประกอบที่เกี่ยวข้องกับกลิ่นควัน ดังนั้น การใช้ระบบเดี่ยวจึงอาจลดมลพิษได้เฉพาะบางกลุ่ม แต่ยังไม่ครอบคลุมมลพิษหลายสถานะที่เกิดจากการเผากระดาษไหว้เจ้า

ในทางตรงกันข้าม ระบบ ESP+AC ให้ประสิทธิภาพโดยรวมสูงกว่าระบบเดี่ยว โดยภายใต้เงื่อนไขการเผากระดาษ 15 แผ่น สามารถลด TVOCs, PM2.5 และ CO ได้ร้อยละ 71.91, 74.80 และ 80.19 ตามลำดับ ผลนี้แสดงให้เห็นว่าการทำงานร่วมกันของกลไกการดักจับอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิตและการดูดซับมลพิษก๊าซด้วยถ่านกัมมันต์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมมลพิษโดยรวมได้ดีกว่าการใช้ระบบใดระบบหนึ่งเพียงอย่างเดียว

3.4 ผลของปริมาณถ่านกัมมันต์ต่อการลด TVOCs และ CO

ผลการทดสอบปริมาณถ่านกัมมันต์ภายใต้การเปิด ESP คงที่ พบว่าการเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์ช่วยลด TVOCs ได้อย่างต่อเนื่อง โดยค่า TVOCs ลดลงจาก 9.10 ± 0.07 mg/m³ ในกรณีไม่มี AC เหลือ 2.61 ± 0.12 mg/m³ เมื่อเติม AC เต็มระบบ หรือคิดเป็นการลดลงร้อยละ 71.27 เมื่อเทียบกับกรณีไม่มี AC ในเงื่อนไขเดียวกัน ขณะที่ค่า CO ลดลงจาก 180.67 ± 30.27 ppm เหลือ 119.00 ± 16.37 ppm หรือคิดเป็นการลดลงร้อยละ 34.13

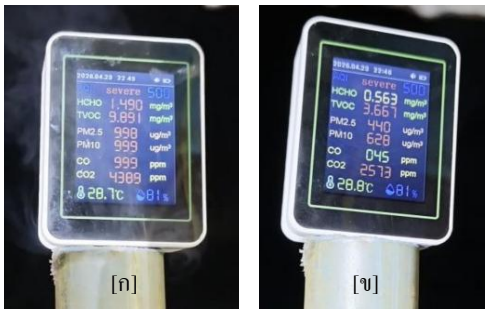
แนวโน้มดังกล่าวอธิบายได้จากคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและมีโครงสร้างรูพรุนจำนวนมาก จึงสามารถเพิ่มตำแหน่งดูดซับสำหรับสารอินทรีย์ระเหยง่ายในก๊าซไอเสียได้ เมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์ พื้นที่สัมผัสระหว่างก๊าซไอเสียกับวัสดุดูดซับมีมากขึ้น ส่งผลให้การลด TVOCs มีประสิทธิภาพสูงขึ้นอย่างชัดเจน

อย่างไรก็ตาม การลด CO มีแนวโน้มลดลงไม่มากเท่ากับ TVOCs เนื่องจาก CO ไม่ใช่สารที่ถูกดูดซับได้ดีเท่ากับสารอินทรีย์ระเหยง่ายบางชนิด ผลดังกล่าวจึงชี้ให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์มีบทบาทหลักต่อการลดมลพิษในรูปสารอินทรีย์ระเหยง่ายและกลิ่นควัน มากกว่าการกำจัด CO โดยตรง ดังนั้น ในการออกแบบระบบจริง ควรใช้ถ่านกัมมันต์

เป็นหน่วยเสริมร่วมกับ ESP เพื่อให้สามารถควบคุมมลพิษได้ครอบคลุมทั้งอนุภาคและก๊าซ

ตารางที่ 2 ผลของน้ำหนักผงถ่านกัมมันต์(AC)ต่อประสิทธิภาพการลดมลพิษ

น้ำหนักผงถ่าน (AC)	สัดส่วน	TVOCs (mg/m³)	PM2.5 (µg/m³)	CO (ppm)
0 g	ไม่มี AC	9.10 ± 0.07	325.33 ± 17.90	180.67 ± 30.27
30 g	1/3 ของระบบ	4.13 ± 0.12	276.67 ± 11.68	144.33 ± 11.24
60 g	2/3 ของระบบ	3.60 ± 0.20	247.67 ± 5.69	123.00 ± 9.54
100 g	3/3 ของระบบ	2.61 ± 0.12	251.67 ± 11.59	119.00 ± 16.37



รูปที่ 4 ค่าการปล่อยมลพิษ [ก] ก่อน และ [ข] หลังการติดตั้งอุปกรณ์ลดควัน

3.5 อภิปรายผลการทดลอง

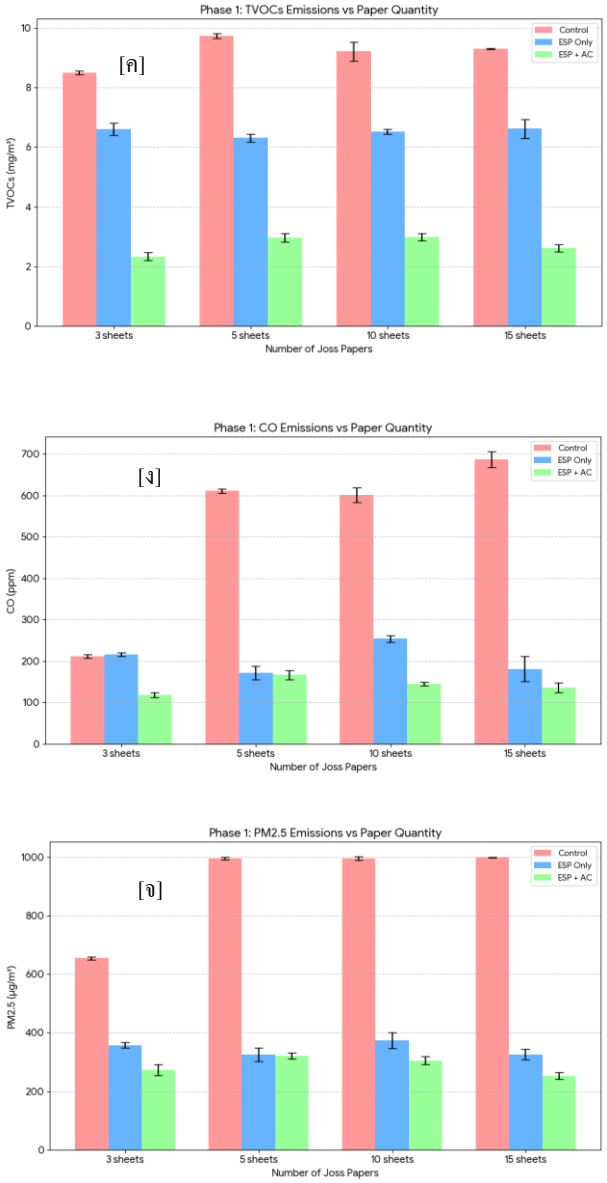
โดยภาพรวม ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่ามลพิษจากการเผากระดาษไหว้เจ้าประกอบด้วยทั้งอนุภาคฝุ่นและมลพิษในสถานะก๊าซ ดังนั้น การใช้ระบบควบคุมมลพิษแบบผสมผสานจึงมีความเหมาะสมกว่าการใช้ระบบเดี่ยว เนื่องจาก ESP ทำหน้าที่ลดภาระอนุภาคฝุ่นในก๊าซไอเสียก่อนเข้าสู่ชั้นถ่านกัมมันต์ ส่งผลให้ถ่านกัมมันต์สามารถทำหน้าที่ดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายและสารประกอบที่เกี่ยวข้องกับกลิ่นควันได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของระบบไม่ได้ขึ้นอยู่กับการติดตั้ง ESP และ AC เพียงอย่างเดียว แต่ยังสัมพันธ์กับปริมาณถ่านกัมมันต์ เวลาสัมผัสระหว่างก๊าซไอเสียกับวัสดุดูดซับ ความเร็วการไหลของก๊าซ และความเข้มข้นเริ่มต้นของมลพิษ หากอัตราการไหลสูงเกินไป อาจทำให้เวลาสัมผัสในชั้นถ่านกัมมันต์ลดลงและส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ในทางกลับกัน หากเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์มากเกินไปโดยไม่ออกแบบทางไหลของก๊าซไอเสียให้เหมาะสม อาจเพิ่มความต้านทานของระบบและกระทบต่อการระบายก๊าซไอเสีย

ดังนั้น การพัฒนาอุปกรณ์ลดควันสำหรับเตาเผากระดาษแบบเคลื่อนที่ควรพิจารณาร่วมกันทั้งรูปแบบการจัดวางระบบ ESP+AC ปริมาณวัสดุดูดซับ และสภาวะการไหลของก๊าซไอเสีย เพื่อให้ระบบสามารถลดมลพิษได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะเดียวกันยังคงความกะทัดรัด ความสะดวกในการเคลื่อนย้าย และความเหมาะสมต่อการใช้งานจริงในชุมชนหรือศาลเจ้า

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ประเมินผลเชิงทดลองของอุปกรณ์ลดควันสำหรับเตาเผากระดาษแบบเคลื่อนที่ โดยเปรียบเทียบผลของปริมาณกระดาษรูปแบบระบบควบคุมมลพิษ ได้แก่ AC, ESP และ ESP+AC ปริมาณถ่านกัมมันต์ และการช่วยระบายก๊าซไอเสียด้วยพัดลมต่อการลด PM2.5, CO และ TVOCs



รูปที่ 5 กราฟแสดง ผลของจำนวนกระดาษไหว้เจ้าต่อการปล่อยมลพิษภายใต้รูปแบบการควบคุมมลพิษที่แตกต่างกัน: [ค] TVOCs [ง] CO และ [จ] PM2.5

ผลการทดลองพบว่าระบบ ESP+AC ให้ประสิทธิภาพการลดมลพิษโดยรวมสูงกว่าการใช้ระบบเดี่ยว เนื่องจากสามารถจัดการมลพิษได้ทั้งในรูปของอนุภาคและก๊าซ ภายใต้เงื่อนไขการเผากระดาษ 15 แผ่น ระบบ ESP+AC สามารถลด TVOCs, PM2.5 และ CO ได้ร้อยละ 71.91, 74.80 และ 80.19 ตามลำดับ

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์ลดควันขึ้นอยู่กับรูปแบบการจัดวางระบบควบคุมมลพิษ ปริมาณถ่านกัมมันต์ และสภาวะการไหลของก๊าซไอเสีย การใช้ระบบ ESP ร่วมกับถ่านกัมมันต์จึงเป็นแนวทางที่มีศักยภาพสำหรับการพัฒนาอุปกรณ์ควบคุมมลพิษขนาดเล็กที่สามารถประยุกต์ใช้ในชุมชน ศาลเจ้า หรือพื้นที่ประกอบพิธีกรรมได้จริง อย่างไรก็ตาม งานวิจัยในอนาคตควรศึกษาผลของอัตราการไหลของก๊าซไอเสีย อายุการใช้งานของถ่านกัมมันต์ การสะสมของฝุ่นบนแผ่นรับฝุ่น และการทดสอบต้นแบบในสภาพการใช้งานจริง เพื่อประเมินประสิทธิภาพ ความปลอดภัย และความเป็นไปได้ในการใช้งานระยะยาว

ข้อจำกัดของงานวิจัยนี้คือ ยังเป็นการทดลองในระดับต้นแบบและเป็นการศึกษาการเผากระดาษไหว้เจ้าเพียงชนิดเดียว และยังไม่ได้ประเมินผลของการสะสมของฝุ่นบนแผ่นรับฝุ่น อายุการใช้งานของถ่านกัมมันต์ และเสถียรภาพของระบบภายใต้การใช้งานระยะยาว นอกจากนี้ การทดลองยังดำเนินการภายใต้สภาวะควบคุม จึงยังไม่ครอบคลุมผลของสภาพแวดล้อมจริงในภาคสนาม เช่น การเปลี่ยนแปลงของทิศทางลม ความชื้น และรูปแบบการเผาไหม้ที่แตกต่างกันในศาลเจ้าหรือพื้นที่ประกอบพิธีกรรม

ดังนั้น การศึกษาครั้งต่อไปควรขยายผลไปสู่การทดลองกับกระดาษไหว้เจ้าหลายชนิด การเพิ่มจำนวนรอบการทดลองในแต่ละเงื่อนไขเพื่อประเมินความน่าเชื่อถือของผลในเชิงสถิติ การศึกษาค่าที่เหมาะสมของแรงดันไฟฟ้าและรูปแบบการจัดเรียงอิเล็กโทรด การหาปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสม และการทดสอบต้นแบบในสภาพการใช้งานจริง เพื่อประเมินประสิทธิภาพ ความปลอดภัย และความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ในระยะยาว

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนโครงการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ 2569 ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ สำหรับการสนับสนุนทุนวิจัย ตลอดจนผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและความอนุเคราะห์ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] H. T. Hsueh, T. H. Ko, W. C. Chou, W. C. Hung, and H. Chu, “Health risk of aerosols and toxic metals from incense and joss paper burning,” Environmental Chemistry Letters, vol. 10, pp. 79–87, 2012, doi: 10.1007/s10311-011-0331-5.

[2] S. Zhang, L. Zhong, X. Chen, Y. Liu, X. Zhai, Y. Xue, W. Wang, J. Liu, and K. Xu, “Emissions characteristics of hazardous air pollutants from the incineration of sacrificial offerings,” Atmosphere, vol. 10, no. 6, Art. no. 332, 2019, doi: 10.3390/atmos10060332.

[3] อ. คือเบล และ น. เลิศแสวงกิจ, “เครื่องกระดาษจีนและความตื่นตัวกับปัญหามลภาวะทางอากาศ,” วารสารอักษรศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร, ปีที่ 43, ฉบับที่ 2, หน้า 175–186, 2564.

[4] P. T. L. Chi, V. T. H. Lan, L. T. Hoang, L. T. T. Huong, and B. T. T. Quyen, “Impact of burning incense/joss paper on outdoor air pollution: An interrupted time series analysis using Hanoi air quality data in 2020,” Global Journal of Health Science, vol. 16, no. 3, pp. 27–36, 2024, doi: 10.5539/gjhs.v16n3p27.

[5] L. V. Giang, T. Thanh, T. T. Hien, L. V. Tan, T. T. B. Phuong, and H. H. Loc, “Heavy metals emissions from joss paper burning rituals and the air quality around a specific incinerator,” Materials Today: Proceedings, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.08.686.

[6] A. H. Madukasi, P. O. Oghenekaro, and J. I. Michael, “Design and development of a smokeless incinerator for municipal solid waste management,” Journal of Emerging Technologies and Innovative Research, vol. 12, no. 2, pp. g823–g828, 2025.

[7] S. Riyadi, Y. Setaji, H. F. Pamekasa, and R. Setiawana, “Design of hybrid smokeless waste burners machine for producing organic fertilizer,” Journal of Energy, Mechanical, Material, and Manufacturing Engineering, vol. 4, no. 2, pp. 101–108, 2019.

[8] B. Riyanto, D. Widarbowo, M. Idris, D. D. S. Nugroho, and M. Setiyono, “Design environmentally-friendly incinerator and hybrid smokeless incinerator Sorong of Merchant Marine Polytechnic,” Brilliance: Research of Artificial Intelligence, vol. 4, no. 1, pp. 55–66, 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.3703.

[9] S. Wajih, P. Verma, V. Chauhan, Neeraj, and S. Yadav, “Waste disposal through portable incinerator,” International Journal of Trend in Scientific Research and Development, vol. 4, no. 4, pp. 262–267, 2020.

[10] A. Afshari, L. Ekberg, L. Forejt, J. Mo, S. Rahimi, J. Siegel, W. Chen, P. Wargocki, S. Zurami, and J. Zhang, “Electrostatic precipitators as an indoor air cleaner—A literature review,” Sustainability, vol. 12, no. 21, Art. no. 8774, 2020, doi: 10.3390/su12218774.

[11] V. Singh and A. C. Tiwari, “Performance analysis of electrostatic precipitator in thermal power plant,” International Journal of Mechanical Engineering and Technology, vol. 3, no. 2, pp. 431–436, 2012.

[12] G. Rajkumar, Y. A. Ayturan, S. Sekar, and C. Ganesa Moorthy, “Air pollution controlled prototype modelling of electrostatic precipitator for small scale industries,” International Journal of Environmental Pollution and Environmental Modelling, vol. 3, no. 1, pp. 15–21, 2020.

[13] Y.-T. Chen, C.-L. Lu, S.-J. Lu, and D.-S. Lee, “Electrostatic precipitator design optimization for the removal of aerosol and

airborne viruses," Sustainability, vol. 15, no. 10, Art. no. 8432, 2023, doi: 10.3390/su15108432.



ประวัติผู้เขียนบทความ

นายคเชนทร์ จันทร์เทศ

- วศ.บ. วิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- นักศึกษาปริญญาโท วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

งานวิจัยที่สนใจ : Environmental and Energy Management



ประวัติผู้เขียนบทความ

รองศาสตราจารย์ ดร.มาลี สันติคุณาภรณ์

- Ph.D., Chemical Engineering, 2006
- M.S., Petrochemical Technology, 1998
- B.S., Chemical Engineering, 1996

งานวิจัยที่สนใจ : Catalytic reaction/ Renewable energy/ Energy management

การพัฒนาฟิล์มบริโภคได้จากสารสกัดเปลือกมังคุดเพื่อการยืดอายุการเก็บรักษาผลฝรั่งกิมจู

Development of Bio-based Edible Film Incorporated with Mangosteen (Garcinia mangostana L.) Peel Extract for Shelf-life Extension of Kimju Guava

สิริธิดา นพกวด[1*] ณัฏฐณิชา หว่างเพียร[1] พลอยนิชา หงษ์หิน[1] สาวิตรี ปลื้มเนตร[1] ปฏิภาณ ถิ่นพระบาท[2] และดวงฤทัย นิคมรัฐ[3]

[1]โรงเรียนสตรีนนทบุรี เลขที่ 120 หมู่ที่ 9 ถนนพิบูลสงคราม ตำบลสวนใหญ่ อำเภอเมืองนนทบุรี จังหวัดนนทบุรี 11000

[2]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถ.ประชาราษฎร์1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

[3]สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถ.ประชาราษฎร์ 1แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กทม. 10800

ผู้ประพันธ์หลัก: duongruitai.n@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาฟิล์มบริโภคได้จากแป้งมันสำปะหลัง ไคโตซาน และกลีเซอรอล เสริมสารสกัดเปลือกมังคุด (ร้อยละ 0, 0.51, 1.01 และ1.51) เพื่อเป็นบรรจุภัณฑ์ยืดอายุฝรั่งกิมจู ผลทดสอบพบสารสกัดมีค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ยับยั้งเชื้อ *Escherichia coli* (MIC) ที่ 0.25 mg/mL เมื่อทดสอบเคลือบผิวฝรั่ง พบว่าสูตรร้อยละ 1.51 มีประสิทธิภาพสูงสุดช่วยรักษาความแข็ง (0.76 N) ชะลอการเพิ่มน้ำตาล (8-16 mg/mL) และรักษาวิตามินซีได้ 1.25 mg/mL (สูงกว่าชุดควบคุม 2 เท่า) สำหรับการทดสอบความปลอดภัยทางชีวภาพ (Hemolysis Assay) พบว่าที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.51 มีอัตราการแตกตัวของเม็ดเลือดแดงร้อยละ 36.90 ซึ่งเหมาะสมและปลอดภัยสำหรับการใช้เคลือบผิวชั้นนอก (Outer coating) แต่หากต้องสัมผัสเนื้อผลไม้โดยตรง ควรปรับลดความเข้มข้นให้ต่ำกว่าร้อยละ 0.51 จากผลการศึกษาทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าฟิล์มชีวภาพนี้สามารถพัฒนาต่อได้ ด้วยมีศักยภาพสูงในการรักษาคุณภาพ คงคุณค่าทางโภชนาการ และยืดอายุผลไม้สดเชิงพาณิชย์ได้อย่างปลอดภัย

คำสำคัญ: ฟิล์มชีวภาพ, สารสกัดเปลือกมังคุด, ฝรั่งกิมจู, การทดสอบการแตกตัวของเม็ดเลือดแดง, วิตามินซี

Abstract

This research has developed an edible film from cassava starch, chitosan, and glycerol, enriched with mangosteen peel extract (0, 0.51, 1.01, and 1.51%) to extend Kimju guava's shelf life. The mangosteen peel extract could inhibit *Escherichia coli* with a minimum inhibitory concentration (MIC) of 0.25 mg/mL. In application tests, the 1.51% formulation proved most effective, maintaining maximum firmness (78.00), controlling sugar content (8-16 mg/mL), and preserving vitamin C (1.25 mg/mL, twofold higher than the control). Biological safety testing (Hemolysis Assay) revealed a 36.90% red blood cell lysis rate at a 0.50% concentration. This confirms its suitability and safety for use as an outer coating; however, for direct contact with fruit flesh, a concentration below 0.51% is recommended. Ultimately, this biofilm demonstrates high potential as active packaging for safely maintaining quality, preserving nutrients, and extending the commercial shelf life of fresh produce.

Keywords: Biofilm, Mangosteen peel extract, Kimju guava, Hemolysis assay, Vitamin C

1. บทนำ

อุตสาหกรรมเกษตรไทยเผชิญปัญหาการจัดการผลผลิตหลังเก็บเกี่ยว โดยเฉพาะฝรั่งกิมจู (Psidium guajava L.) ผลไม้เศรษฐกิจยอดนิยม [1] ที่อุดมด้วยสารอาหาร [2] แต่มีอัตราการหายใจสูง [3] จึงเสื่อมสภาพเร็ว สูญเสียความชื้น และถูกจุลินทรีย์เข้าทำลายได้ง่าย ก่อให้เกิดความสูญเสียทางเศรษฐกิจมหาศาล ขณะเดียวกัน กระแสรักสุขภาพทำให้ผู้บริโภคกว่าร้อยละ 71 ยินดีจ่ายเพิ่มเพื่อผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติ [4] จึงมีความจำเป็นต้องพัฒนาบรรจุภัณฑ์อัจฉริยะ (Active Packaging) ที่ย่อยสลายได้ งานวิจัยนี้จึงเลือกพัฒนาฟิล์มชีวภาพจาก "แป้งมันสำปะหลัง" ร่วมกับ "ไคโตซาน" ที่มีฤทธิ์ยับยั้งจุลินทรีย์ [5] และใช้ "กลีเซอรอล" เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น [6]

นวัตกรรมสำคัญของงานวิจัยคือการเพิ่มมูลค่า (Upcycling) ให้ "เปลือกมังคุด" ซึ่งเป็นขยะเกษตรที่มีปริมาณถึงร้อยละ 60 ของผลสดหรือราว 210,000 ตัน [7] เนื่องจากเปลือกมังคุดอุดมด้วยสารแซนโทนและฟีนอลิกที่มีฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์และออกซิเดชันสูง [8] การเสริมสารสกัดนี้จึงช่วยให้ฟิล์มทำหน้าที่เป็นเกราะป้องกันทางชีวภาพ (Bio-barrier) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คณะผู้วิจัยจึงมุ่งพัฒนาฟิล์มชีวภาพดังกล่าวเพื่อตอบโจทย์แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ 1)พัฒนาฟิล์มชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลัง ไคโตซาน กลีเซอรอล ที่เสริมสารสกัดเปลือกมังคุด สำหรับชะลอการเสื่อมสภาพและรักษาคุณภาพของผลฝรั่งกิมจูระหว่างการเก็บรักษา 2) เพื่อประเมินประสิทธิภาพของฟิล์มชีวภาพที่พัฒนาขึ้น ในการยืดอายุการเก็บรักษาและควบคุมการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของผลฝรั่งกิมจู

2.วัสดุและอุปกรณ์

2.1 การเตรียมสารสกัดเปลือกมังคุด

ล้างเปลือกมังคุดให้สะอาด แล้วหั่นเป็นชิ้นเล็ก ๆ ตากแดด 2 วัน จนแห้งสนิท นำไปบดละเอียดที่เครื่องบดให้เป็นผง ชั่งเปลือกมังคุดแห้งที่เตรียมไว้ 90 กรัมใส่ลงในขวดโหลแก้ว แล้วเทเอทานอลร้อยละ 95 ปริมาณ 900 มิลลิลิตร ลงไปให้ท่วม ปิดฝาขวด เก็บไว้ให้พ้นแสงแล้วเก็บไว้ 3 วัน พอครบเวลา จากนั้นกรองอีกครั้งด้วยผ้าขาวบางนำสารไปอุ่นใน

หม้อที่มีอุณหภูมิ 60-70°C ในตู้ดูดควัน จนกว่าเอทานอลจะระเหยหมด (3 ชั่วโมง) จะได้สารสกัดเปลือกมังคุด เก็บสารสกัดให้พ้นแสงแดด

2.2 การเตรียมสารละลายไคโตซาน

เตรียมไคโตซาน 5 กรัม ละลายในกรดอะซิติกความเข้มข้นร้อยละ 1 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร คนให้เข้ากันจนไคโตซานละลายหมด พักไว้ 24 ชั่วโมงก่อนการนำไปใช้ต่อ

2.3 การขึ้นรูปฟิล์ม

การขึ้นรูปฟิล์มบริโภคได้ สามารถเตรียมสารละลายฟิล์มโดยมีองค์ประกอบหลักดังนี้คือ เตรียมแป้งมันสำปะหลัง 30 กรัม น้ำกลั่น 600 มิลลิลิตร เทรวมกันในบีกเกอร์ คนให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนสารและให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70-80°C จนแป้งลายเป็นเจลใสๆ เติมไคโตซานความเข้มข้นร้อยละ 5 ปริมาตร 1.2 มิลลิลิตร และกลีเซอรอลร้อยละ 40 ของน้ำหนักแป้งลงในบีกเกอร์ และคนให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนสาร เติมสารสกัดเปลือกมังคุดร้อยละ 0 , 0.51 , 1.01 และ 1.51 ในแต่ละสูตร คนให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนสาร เทฟิล์มลงในแม่พิมพ์ปริมาณ 10 mL แล้วทำให้แห้งเพื่อขึ้นรูป

2.4 การทดสอบแผ่นฟิล์มบนผลฝรั่งกิมจู

ทำการคัดเลือกฝรั่งกิมจูที่มีความแก่สม่ำเสมอและไม่มีรอยโรค นำมาเคลือบด้วยฟิล์มในปริมาณ 18-22 ml ต่อฝรั่ง 1 ลูกที่มีน้ำหนักในช่วง 273-325 g ทำให้แห้งแล้วเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้องเพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลง น้ำหนัก ความแน่นเนื้อ และลักษณะทางกายภาพทุกวัน จนผลฝรั่งมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับตัวควบคุมที่ไม่มีการเคลือบด้วยฟิล์ม พร้อมทั้งศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของฟิล์มที่ได้ และความปลอดภัยในการใช้

3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้มุ่งวิเคราะห์อิทธิพลของความเข้มข้นสารสกัดเปลือกมังคุดที่มีต่อคุณสมบัติของฟิล์มชีวภาพ ประสิทธิภาพการต้านจุลินทรีย์ และความสามารถในการรักษาคุณภาพฝรั่งกิมจูระหว่างการเก็บรักษา โดยแบ่งการนำเสนอออกเป็น 4 ส่วนหลักมีดังนี้

3.1 คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของฟิล์ม

คุณสมบัติทางกายภาพของฟิล์มบริโภคได้ซึ่งถือเป็นหัวใจสำคัญในการนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์เคลือบผิวผลไม้ เพราะไม่เพียงแต่ส่งผลต่อความสวยงามน่าซื้อบ่งบอกการยอมรับของผู้บริโภค แต่ยังส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการปกป้องผลผลิตจากสิ่งแวดล้อมภายนอก จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังผสมไคโตซานที่มีการเติมสารสกัดเปลือกมังคุดที่ความเข้มข้นที่ต่างกัน

3.1.1 การเปลี่ยนแปลงลักษณะปรากฏและสีของฟิล์ม

ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 1 แสดงว่า ฟิล์มสูตรพื้นฐาน (ชุดควบคุมร้อยละ 0) เมื่อยังไม่ผสมสารสกัด เนื้อฟิล์มจะมีความใส (Transparent) พื้นผิวเรียบเนียน และผสานเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีเยี่ยม (Homogeneous) แต่เมื่อเติมสารสกัดเปลือกมังคุด โครงสร้างฟิล์มยังคงความเรียบเนียนและไม่เกิดการแยกชั้น (Phase separation) แต่สีและความโปร่งแสงจะเปลี่ยนไปอย่างชัดเจน ยิ่งเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด (จากร้อยละ 0.51 เป็นร้อยละ1.51) ฟิล์มจะยิ่งมีความโปร่งแสงลดลง โดยสีจะค่อยๆ เปลี่ยนจากใส เป็นสีเหลืองอ่อน และเข้มขึ้นจนเป็นสีน้ำตาล ทั้งนี้สาเหตุของการเปลี่ยนสี เกิดจากการเติมสารประกอบในกลุ่มฟีนอลิก (Phenolic compounds), ฟลาโวนอยด์ (Flavonoids) และโดยเฉพาะ สารแซนโทน (Xanthones) ซึ่งเป็นเม็ดสีตามธรรมชาติที่พบปริมาณมากในเปลือกมังคุด

ตารางที่ 1 ลักษณะปรากฏและการเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์มบริโภคได้ ตามระดับความเข้มข้นของสารสกัดเปลือกมังคุด

ความเข้มข้นของสารสกัดเปลือกมังคุด (%)	ลักษณะเนื้อฟิล์ม	โทนสี (Color Tone)	ระดับความโปร่งแสง
0.00 (ชุดควบคุม)	เรียบเนียน, เป็นเนื้อเดียวกัน	ใส ไม่มีสี	สูงสุด
0.51	เรียบเนียน, เป็นเนื้อเดียวกัน	เหลืองอ่อน	ปานกลาง
1.01	เรียบเนียน, เป็นเนื้อเดียวกัน	น้ำตาลอ่อน	ต่ำ
1.51	เรียบเนียน, เป็นเนื้อเดียวกัน	น้ำตาลเข้ม	ต่ำสุด

ทั้งนี้ฟิล์มที่เสริมสารสกัดเปลือกมังคุดมีความต่อเนื่องของเนื้อฟิล์มดี โดยความโปร่งแสงจะลดลง สีของฟิล์มมีการเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้มขึ้นตามระดับความเข้มข้นของสารสกัดที่เพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลดีในการป้องกันแสงที่จะไปกระตุ้นการเสื่อมสภาพของผลไม้ [5]

3.2 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกล ความแข็งแรงของฟิล์มและความยืดหยุ่น (Mechanical Properties)

นอกจากลักษณะปรากฏและสีที่เปลี่ยนไปแล้ว ระดับความเข้มข้นของสารสกัดเปลือกมังคุดยังมีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณสมบัติเชิงกลหรือความแข็งแรงของเนื้อฟิล์ม ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สามารถชี้วัดว่าบรรจุภัณฑ์เคลือบผิวนี้จะสามารถทนทานต่อแรงเสียดสี หรือช่วยป้องกันผลไม้จากการกระแทกขีดข่วนระหว่างการขนส่งได้ดีเพียงใด

จากการทดสอบการรับแรงของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังผสมไคโตซาน พบว่าการเติมสารสกัดเปลือกมังคุดในระดับที่แตกต่างกันส่งผลต่อโครงสร้างความแข็งแรงของฟิล์มใน 2 มิติหลัก ดังนี้

1) ความต้านทานต่อแรงดึงขาด (Tensile Strength: TS) เพิ่มขึ้น พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดเปลือกมังคุด เนื้อฟิล์มมีแนวโน้มแข็งและทนทานต่อการฉีกขาดได้ดีขึ้น (รับน้ำหนักหรือแรงดึงได้มากขึ้นก่อนที่ฟิล์มจะขาด) ด้วยกลไกทางเคมีแสดงให้เห็นว่า:สิ่งนี้เกิดขึ้นเนื่องจากสารประกอบฟีนอลิกในเปลือกมังคุด มีคุณสมบัติในการสร้างพันธะเคมีชนิดการเชื่อมโยงข้าม (Cross-linking) โดยสารฟีนอลิกจะเข้าไปจับตัวกับโครงสร้างของแป้งและไคโตซาน ทำให้โครงสร้างร่างแหของเนื้อฟิล์มมีความหนาแน่นและยึดเกาะกันเหนียวแน่นยิ่งขึ้น

2) นอกจากนี้พบว่าความเข้มข้นของสารสกัดเปลือกมังคุดมีผลต่อลักษณะปรากฏและความแข็งแรงของฟิล์ม โดยมีความยืดหยุ่นของฟิล์ม (Elongation at Break: EAB) ลดลง แม้ฟิล์มจะแข็งแรงและทนทานขึ้น แต่ในทางกลับกัน ความสามารถในการยืดตัวของฟิล์มจะ

ลดลง (เนื้อฟิล์มมีความเปราะหรือแข็งกระด้างขึ้นเล็กน้อย ไม่ยืดหยุ่นเท่าฟิล์มในชุดควบคุมที่ไม่ได้เติมสารสกัด) ด้วยกลไกทางเคมีที่มาจากเมื่อโครงสร้างตาข่ายภายในเนื้อฟิล์มถูกจับยึดด้วยสารฟีนอลิกจนแน่นทึบ (จากปฏิกิริยา Cross-linking) โมเลกุลภายในเนื้อฟิล์มจึงขยับตัวได้ยากขึ้น ส่งผลให้ความยืดหยุ่นลดลงตามระดับความเข้มข้นของสารสกัดที่เพิ่มขึ้น [9]

3.3 ความปลอดภัยต่อผู้บริโภคจากการทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ (In vitro Hemolysis Assay)

ในการประเมินความปลอดภัยทางชีวภาพ (Biocompatibility) ของสารสกัดเปลือกมังคุดก่อนนำมาประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สัมผัสอาหาร ได้ทำการทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ด้วยวิธีประเมินการแตกตัวของเม็ดเลือดแดง (Hemolysis Assay) ได้ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 2 มีดังนี้

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบอัตราการแตกตัวของเม็ดเลือดแดง (Hemolysis rate)

ความเข้มข้นของสารสกัด (%)	อัตราการแตกตัวของเม็ดเลือดแดง (%)	ข้อเสนอแนะด้านความปลอดภัยและการใช้งาน
< 0.51	ต่ำกว่า 36.90	มีความปลอดภัยสูงสุด สามารถสัมผัสเนื้อผลไม้ได้โดยตรง
0.50	36.90	เหมาะสำหรับใช้เป็นวัสดุเคลือบผิวภายนอก (Outer Coating)
1.51	86.67*	มีการตกตะกอนชัดเจน ไม่แนะนำให้สัมผัสเนื้อผลไม้โดยตรง

จากการทดสอบพบว่า ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.51สารสกัดมีค่าการแตกตัวของเม็ดเลือดแดงอยู่ที่ร้อยละ 36.90 ซึ่งเป็นระดับที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็น วัสดุเคลือบผิวชั้นนอก (Outer Coating) ได้อย่างปลอดภัยและเกิดประโยชน์สูงสุด โดยทำหน้าที่เป็นเกราะป้องกันการปนเปื้อนจากจุลินทรีย์และการเสื่อมสภาพทางกายภาพของผลไม้ที่มีเปลือก (เช่น ฝรั่ง กิมจู)

อย่างไรก็ตาม เพื่อเป็นการยกระดับมาตรฐานความปลอดภัยต่อผู้บริโภคขั้นสูงสุด มีข้อเสนอแนะว่า ในกรณีที่บรรจุภัณฑ์หรือฟิล์มเคลือบจำเป็นต้องสัมผัสกับส่วนเนื้อผลไม้ที่รับประทานได้โดยตรง ควรพิจารณาควบคุมและปรับลดความเข้มข้นของสารสกัดให้อยู่ในระดับต่ำกว่าร้อยละ 0.51 เพื่อป้องกันความเสี่ยงด้านความเป็นพิษต่อเซลล์เมื่อเข้าสู่ร่างกาย

3.4 ประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ด้วยวิธี Broth Dilution

ในการประเมินศักยภาพของสารสกัดเปลือกมังคุดในการเป็นสารต้านจุลินทรีย์ ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli (E. coli)* ซึ่งเป็นหนึ่งในเชื้อก่อโรคที่สำคัญด้วยเทคนิคการเจือจางในอาหารเหลว (Broth Dilution Method) โดยทำการวัดค่าการดูดกลืนแสง (OD) หลังจากการบ่มเชื้อเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อได้ (Minimum Inhibitory Concentration: MIC) ได้ผลการศึกษาดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อ E. coli ของสารสกัดเปลือกมังคุด ด้วยวิธี Broth Dilution

หลอดทดลอง	ความเข้มข้นของสารสกัด (mg/mL)	ค่า OD หลังบ่ม 24 ชั่วโมง	การเจริญเติบโตของเชื้อ
Negative Control	0	0.000	ไม่พบการเจริญเติบโต
Positive Control	0	1.184	พบการเจริญเติบโต
3	1.000	0.288	ไม่ชัดเจน (อาจจะถูกรบกวนโดยความขุ่นของสาร)
4	0.500	0.035	ไม่พบการเจริญเติบโต
5	0.250	0.019	ไม่พบการเจริญเติบโต
6	0.125	0.109	เริ่มพบการเจริญเติบโต
7	0.0625	0.638	พบการเจริญเติบโต
8	0.03125	0.083	พบการเจริญเติบโตเล็กน้อย

จากผลการทดลองพบว่า ชุดควบคุมบวก (Positive Control) มีการเจริญเติบโตของเชื้ออย่างชัดเจน (OD = 1.184) แต่ในหลอดที่เติมสารสกัดเปลือกมังคุด พบว่าสารสกัดสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *E. coli* ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ชให้ค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถยับยั้งเชื้อได้ (MIC) คือ 0.250 mg/mL (หลอดที่ 5) ซึ่งให้ค่า OD เพียง 0.019 และไม่พบการเจริญเติบโตของเชื้อ สอดคล้องกับหลอดที่มีความเข้มข้นสูงกว่า (0.500 mg/mL) ในขณะที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 0.125 mg/mL ลงไป จะเริ่มพบการเจริญเติบโตของเชื้อ ผลลัพธ์นี้ยืนยันว่าสารสำคัญในเปลือกมังคุดมีฤทธิ์ทางชีวภาพที่แข็งแกร่งในการต้านทานแบคทีเรีย จึงเหมาะสมอย่างยิ่งในการนำมาประยุกต์ใช้เป็นส่วนผสมในฟิล์มเคลือบผิวเพื่อป้องกันการเน่าเสีย

3.5 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของฝรั่งกิมจูระหว่างการเก็บรักษา

การประเมินประสิทธิภาพของฟิล์มเคลือบผิวบริโภคได้ต่อการรักษาคุณภาพของผลฝรั่งกิมจูในระหว่างการเก็บรักษา ได้ทำการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่างๆ ทั้งทางกายภาพและเคมี โดยเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มที่ไม่ได้เคลือบฟิล์ม (ชุดควบคุม) และกลุ่มที่เคลือบฟิล์มผสมสารสกัดเปลือกมังคุดในระดับความเข้มข้นต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 1 ได้ผลการทดสอบดังนี้



ภาพที่ 1 ผลฝรั่งที่เคลือบฟิล์มผสมสารสกัดเปลือกมังคุดในความเข้มข้นร้อยละ 0.51 1.01 และ 1.51

3.5.1 การลดการสูญเสียน้ำหนัก (Weight Loss)

จากการทดสอบพบว่าฝรั่งมีน้ำหนักลดลง การที่น้ำหนักลดลงของผลไม้สดเกิดจากกระบวนการคายน้ำและการหายใจ จากผลการทดสอบ (ตารางที่ 4) พบว่าฝรั่งชุดควบคุม (Control) มีอัตราการสูญเสียน้ำหนักรวดเร็วที่สุดอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากการคายน้ำของผลไม้ไม่ถูกปิดกั้น ในขณะที่ชุดการทดลองที่ใช้ฟิล์มเคลือบ โดยเฉพาะสูตรผสมสารสกัดร้อยละ 1.51 สามารถชะลอการสูญเสียน้ำหนักได้ดีที่สุด โดยในวันที่ 4 ของการเก็บรักษา มีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ชั้นฟิล์มทำหน้าที่เสมือนเกราะป้องกันการระเหยของน้ำออกจากรูพรุนบนผิวผลไม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 4 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของผลฝรั่งกิมจูระหว่างการเก็บรักษา (กรัม)

กลุ่มทดลอง	น้ำหนักเริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5
Control (ไม่เคลือบ)	250	225	220	217	213	209
ฟิล์มสารสกัด 0.51%	205	185	183	181	180	178
ฟิล์มสารสกัด 1.01%	225	206	204	202	201	199
ฟิล์มสารสกัด 1.51%	260	239	235	232	230	228

3.5.2 การเปลี่ยนแปลงความแข็ง (Firmness) และลักษณะปรากฏ

ความแข็งของเนื้อผลไม้เป็นพารามิเตอร์สำคัญที่บ่งบอกถึงคุณภาพ ความสดใหม่ และความทนทานต่อการขนส่ง จากการทดสอบความแข็งของผลฝรั่งกิมจู (ตารางที่ 5) พบว่าในกลุ่มที่ผ่านการเคลือบฟิล์มผสมสารสกัดเปลือกมังคุด มีแนวโน้มของความแข็งสัมพันธ์เชิงบวกกับระดับความเข้มข้นของสารสกัด กล่าวคือ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นจากร้อยละ 0.51 เป็นร้อยละ 1.51 ค่าความแข็งของผลฝรั่งจะเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย (จาก 0.55 ขยับขึ้นเป็น 0.76 ในแบบมีผิว)

ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าสารสกัดเปลือกมังคุดเข้มข้นสูง (ร้อยละ 1.01 และ 1.51) สามารถช่วยเสริมความแข็งแรงให้โครงสร้างผิวผลไม้ได้ดี ทั้งนี้อาจเกิดจากปฏิกิริยาการเชื่อมโยงข้าม (Cross-linking) ของสารฟีนอลิกในเนื้อฟิล์มที่ช่วยพยุงเซลล์ไว้ [10]

นอกจากนี้คุณสมบัติการคงความแน่นเนื้อ (Firmness Retention) ยังเกิดจากการที่ สารแซนโทน (Xanthones) ในเปลือกมังคุดอาจทำหน้าที่ช่วยลดกิจกรรมของเอนไซม์ที่ย่อยสลายผนังเซลล์ ส่งผลให้ฟิล์มสามารถรักษาความแน่นเนื้อของฝรั่งได้นานขึ้น พร้อมทั้งช่วยชะลอการเกิดจุดสีน้ำตาล (Browning effect) บนผิวฝรั่งได้อย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับชุดที่ไม่เคลือบฟิล์ม

ตารางที่ 5 การทดสอบความแข็งของผลฝรั่งเปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมและชุดที่เคลือบฟิล์ม (นิวตัน)

หลอดทดลอง (กลุ่มทดสอบ)	ความแข็ง: แบบมีผิวของฝรั่ง	ความแข็ง: แบบไม่มีผิวของฝรั่ง
Control (ไม่มีการเคลือบฟิล์ม)	1.02	0.62
สูตรฟิล์มสารสกัดเปลือกมังคุด 0.51%	0.55	0.40
สูตรฟิล์มสารสกัดเปลือกมังคุด 1.01%	0.68	0.65
สูตรฟิล์มสารสกัดเปลือกมังคุด 1.51%	0.76	0.60

3.5.3 การเปลี่ยนแปลงและรักษาปริมาณวิตามินซี (Vitamin C)

วิตามินซีเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่สลายตัวได้ง่ายเมื่อสัมผัสกับออกซิเจนและแสง จากผลการทดสอบ (ตารางที่ 6) ยืนยันชัดเจนว่า การเคลือบฟิล์มช่วยรักษาวิตามินซีได้ดีกว่าการไม่เคลือบโดยชุดควบคุม (Control) มีค่าวิตามินซีโดยรวมต่ำที่สุด อยู่ในช่วงเพียง 0.38 - 0.60 mg/mL เท่านั้น

ตารางที่ 6 ปริมาณวิตามินซี (mg/mL) ในตำแหน่งต่างๆ ของผลฝรั่งเปรียบเทียบตามความเข้มข้นฟิล์ม

ความเข้มข้นสารสกัด	ตำแหน่ง	เงื่อนไข: มีเปลือก (mg/mL)	เงื่อนไข: ไม่มีเปลือก (mg/mL)
Control (ไม่มีเปลือก)	หัว	0.38	0.48
	กลาง	0.47	0.60
	ท้าย	0.54	0.60
0.51%	หัว	0.52	0.41
	กลาง	0.47	0.45
	ท้าย	0.47	1.15
1.01%	หัว	1.07	0.83
	กลาง	0.79	1.07
	ท้าย	1.07	0.58
1.51%	หัว	1.25 (สูงสุด)	0.60
	กลาง	0.88	1.15
	ท้าย	0.88	0.88

เมื่อพิจารณาผลของการเพิ่มความเข้มข้นสารสกัดเปลือกมังคุด พบว่าค่าวิตามินซีมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างชัดเจน

-สูตรร้อยละ 1.01 เป็นสูตรที่มีความเสถียรและรักษาค่าวิตามินซีได้สม่ำเสมอที่สุดในทุกส่วนของผล (ช่วง 0.58 - 1.07 mg/mL)

- สูตรร้อยละ 1.51 สามารถรักษาวิตามินซีได้ในระดับ "สูงสุด" ถึง 1.25 mg/mL (บริเวณหัวแบบมีเปลือก)

ผลที่ได้จากการศึกษาบ่งบอกคุณสมบัติของฟิล์มที่ทำหน้าที่ป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจน (Oxygen barrier) ผนวกกับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดเปลือกมังคุด ที่ช่วยปกป้องกรดแอสคอร์บิกจากการถูกออกซิไดซ์

3.5.4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตาล (Total Soluble Solids: TSS) และความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ปริมาณน้ำตาล ฝรั่งกิมจูที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยฟิล์มผสมสารสกัด มีอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำตาลช้ากว่าชุดควบคุม เนื่องจากการเคลือบผิวช่วยลดอัตราการหายใจ (Respiration rate) ชะลอกระบวนการเปลี่ยนแป้งเป็นน้ำตาล ทำให้ผลไม้ไม่สุกงอมเร็วเกินไป

ความเป็นกรด-ด่าง (pH) จากการทดสอบแผ่นฟิล์มสูตรต่างๆ (ร้อยละ 0, 0.51, 1.01 และ 1.51) พบว่าค่า pH ของเนื้อฟิล์มอยู่ในช่วง 5-6 ซึ่งมีความเป็นกรดอ่อนๆ ระดับนี้มีความปลอดภัยสูง เหมาะสมกับการสัมผัสอาหาร และช่วยสภาวะแวดล้อมบนผิวผลไม้ให้ไม่เอื้อต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียก่อโรคบางชนิดได้อีกทางหนึ่งด้วย

3.5.5 การประเมินลักษณะปรากฏด้วยสายตาและการยืดอายุการเก็บรักษา (Visual Appearance and Shelf-life Extension)

การประเมินลักษณะปรากฏด้วยสายตาเป็นตัวชี้วัดที่สะท้อนถึงการยอมรับของผู้บริโภคโดยตรง จากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงลักษณะภายนอกของผลฝรั่งกิมจูที่อุณหภูมิห้องตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา 15 วัน (ภาพที่ 2 - 5) ได้ผลการทดสอบที่สอดคล้องกับคุณสมบัติการต้านจุลินทรีย์ของแผ่นฟิล์มอย่างชัดเจน ดังนี้

- ชุดควบคุม (Control) คือ ฝรั่งที่ไม่ได้เคลือบฟิล์มผสมสารสกัด มีอัตราการเสื่อมสภาพรวดเร็วที่สุด โดยเริ่มแสดงอาการเนื้อเหลวและพบการเจริญเติบโตของเชื้อราอย่างรุนแรงในวันที่ 9 และเน่าเสียอย่างสมบูรณ์ เมื่อถึงวันที่ 15 เปลี่ยนเป็นสีดำคล้ำและมีเส้นใยเชื้อราปกคลุมเต็มผล
- สูตรฟิล์มสารสกัดร้อยละ 0.51 แม้จะช่วยชะลอความเสื่อมสภาพได้ดีกว่าชุดควบคุมในระยะแรก แต่เมื่อถึงวันที่ 9 เริ่มเห็นการเจริญเติบโตของเชื้อรา และวันที่ 15 พบเห็นการเจริญเติบโตของเชื้อราอย่างรุนแรงและการเน่าเสียของผลฝรั่ง
- สูตรฟิล์มสารสกัดร้อยละ 1.01 แสดงประสิทธิภาพสูงสุดในการปกป้องผลไม้ แม้ระยะเวลาการเก็บรักษาจะล่วงเลยไปถึง 15 วัน แต่ผลฝรั่งยังคงรักษารูปทรงและสภาพผิวได้ดี ไม่พบการเน่าเสียหรือการลุกลามของเชื้อราที่รุนแรง ผิวผลมีเพียงการเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอ่อนตามกระบวนการสุกทางธรรมชาติเท่านั้น
- สูตรฟิล์มสารสกัดร้อยละ 1.51 แม้จะช่วยชะลอความเสื่อมสภาพได้ดีกว่าชุดควบคุมและสูตรฟิล์มสารสกัดร้อยละ 0.51 ในระยะแรก แต่เมื่อถึงวันที่ 15 ยังคงพบเห็นการเจริญเติบโตของเชื้อราและการเน่าเสียของผลฝรั่งอย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลงลักษณะภายนอกของผลฝรั่งในวันแรก



ภาพที่ 3 การเปลี่ยนแปลงลักษณะภายนอกของผลฝรั่งในวันที่ 5



ภาพที่ 4 การเปลี่ยนแปลงลักษณะภายนอกของผลฝรั่งกิมจูที่อุณหภูมิห้อง วันที่ 9



ภาพที่ 5 การเปลี่ยนแปลงลักษณะภายนอกของผลฝรั่งในวันที่ 15

ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบทางจุลชีววิทยา (Broth Dilution) ก่อนหน้านี้ โดยสามารถพิสูจน์ให้เห็นว่า การใช้ฟิล์มเคลือบผิวที่เสริมสารสกัดเปลือกมังคุดในระดับความเข้มข้นที่เหมาะสม (ร้อยละ 1.01 - 1.51) สามารถทำหน้าที่เป็นเกราะป้องกันทางชีวภาพ (Bio-shield) ได้อย่างอย่างดี โดยชั้นฟิล์มไม่เพียงแต่ช่วยลดการสูญเสียน้ำ ยังสามารถช่วยรักษาความแข็งของเนื้อผลไม้ แต่สารสำคัญอย่างแซนโทนและกลุ่มฟีนอลิกในสารสกัดเปลือกมังคุดหยาบยังทำหน้าที่หลักในการยับยั้งสปอร์ของเชื้อราบนผิวผลไม้ ทำให้สามารถยืดอายุการวางจำหน่าย (Shelf-life) ของฝรั่งกิมจูได้ยาวนานกว่า 15 วัน ซึ่งถือเป็นการเพิ่มมูลค่าและลดความสูญเสียทางเศรษฐกิจของผลผลิตทางการเกษตรได้อย่างเป็นรูปธรรม

4. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการพัฒนาฟิล์มบริโภคได้จากแป้งมันสำปะหลังและไคโตซานที่เสริมด้วยสารสกัดเปลือกมังคุด เพื่อประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์เคลือบผิวสำหรับยืดอายุการเก็บรักษาผลฝรั่งกิมจู สามารถสรุปผลการทดลองได้ว่าสูตรฟิล์มที่ผสมสารสกัดเปลือกมังคุดที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.51 เป็นสูตรที่ดีที่สุดในการปกป้องและรักษาคุณภาพของผลผลิต โดยมีประสิทธิภาพโดดเด่นในทุกมิติดังนี้

-ประสิทธิภาพทางกายภาพและเคมี ฟิล์มสูตรความเข้มข้นสารสกัดร้อยละ 1.51 มีความต้านทานต่อแรงดึงขาดสูงสุด ช่วยปกป้องผลไม้จากการกระแทกขีดข่วน อีกทั้งความทึบแสงที่เพิ่มขึ้นยังทำหน้าที่เป็นเกราะป้องกันรังสี UV ที่ดีเยี่ยม (ผลจากการศึกษาในห้องปฏิบัติการ)

-ประสิทธิภาพในการยับยั้งจุลินทรีย์ สารประกอบกลุ่มฟีนอลิกและแซนโทน (Xanthones) ในสารสกัดหยาบเปลือกมังคุดมีฤทธิ์ต้านทานจุลินทรีย์ส่วนใหญ่ โดยสามารถยับยั้งแบคทีเรีย *E. coli* ได้อย่างเด็ดขาด (ค่า MIC ที่ 0.250 mg/mL) และสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเส้นใยเชื้อราบนผิวผลไม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

-การรักษาคุณภาพผลไม้ สูตรความเข้มข้นสารสกัดร้อยละ 1.51 สามารถชะลอการสูญเสียน้ำหนักได้ดีที่สุด รักษาความแข็งของเนื้อฝรั่งได้สูงสุด (0.76 N) รวมถึงช่วยรักษาระดับวิตามินซี และชะลอการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำตาลได้อย่างมีนัยสำคัญ

นอกจากนี้ในด้านการยืดอายุการเก็บรักษา (Shelf-life Extension): เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (Control) ที่ไม่ได้เคลือบฟิล์ม

ซึ่งเริ่มพบการเจริญเติบโตของเชื้อราและเนื้อสัมผัสเละในวันที่ 9 และเน่าเสียอย่างสมบูรณ์ในวันที่ 15 โดยที่ ฟิล์มสูตรสารสกัดความเข้มข้น 1.51 สามารถยืดอายุการเก็บรักษาฝรั่งกิมจูที่อุณหภูมิห้องได้ยาวนานกว่า 15 วัน โดยที่ผลฝรั่งยังคงสภาพดี ไม่มีการเน่าเสีย และผิวผลไม้เปลี่ยนสีตามกระบวนการสุกตามธรรมชาติเท่านั้น ซึ่งหมายความว่าสารเคลือบผิวสูตรนี้ สามารถยืดอายุผลผลิตได้นานกว่าชุดควบคุมถึง 6-7 วัน (หรือคิดเป็นการยืดอายุเพิ่มขึ้นเกือบ 1 เท่าตัว)

4.2 ข้อเสนอแนะ

แม้ว่าฟิล์มเคลือบผิวเสริมสารสกัดเปลือกมังคุดจะมีประสิทธิภาพสูงในการยืดอายุผลไม้ แต่เพื่อให้สามารถนำไปต่อยอดใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ได้อย่างสมบูรณ์แบบ คณะผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในระยะต่อไปในหลายด้าน เช่น สำหรับการพัฒนาต่อยอดในอนาคต ควรมีการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส (Sensory Evaluation) เพื่อประเมินการยอมรับของผู้บริโภคด้านรสชาติและกลิ่น ควบคู่ไปกับการศึกษาประสิทธิภาพการเก็บรักษาในสภาวะอุณหภูมิต่ำ (Cold Storage) ซึ่งคาดว่าจะช่วยยืดอายุผลผลิตได้ยาวนานยิ่งขึ้นจนตอบโจทย์การส่งออก นอกจากนี้ ควรมีการปรับปรุงคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มให้มีความใสและน่ารับประทานมากขึ้น โดยอาจประยุกต์ใช้เทคนิคไมโครเอนแคปซูเลชัน (Microencapsulation) เพื่อลดความทึบสีน้ำตาลจากสารสกัด ตลอดจนนำสูตรฟิล์มเคลือบผิวนี้ไปทดสอบขยายผลกับผลไม้เศรษฐกิจชนิดอื่นๆ ที่เน่าเสียได้ง่าย เช่น มะม่วง หรือมะละกอ เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการนำไปใช้ประโยชน์จริงในเชิงพาณิชย์ได้อย่างครอบคลุมและสมบูรณ์แบบยิ่งขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณโรงเรียนสตรีนนทบุรีที่ให้งบประมาณในการทำวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบพระคุณ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้ความอนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการ อุปกรณ์ และเครื่องมือวิทยาศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จเสร็จสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

[1] Sommano, S., & Garnjanagoonchorn, W. (2010). Market quality and consumer acceptance of fresh guava (*Psidium guajava* L.). Journal of Agricultural Science, 42(3), 112-118.

[2] Thaipong, K., Boonprakob, U., Crosby, K., Cisneros-Zevallos, L., & Hawkins Byrne, D. (2006). Comparison of ABTS, DPPH, FRAP, and ORAC assays for estimating antioxidant activity from guava fruit extracts. Journal of Food Composition and Analysis, 19(6-7), 669-675.

[3] Singh, S. P., & Pal, R. K. (2008). Controlled atmosphere storage of guava (*Psidium guajava* L.) fruit. Postharvest Biology and Technology, 47(3), 296-306.

[4] NielsenIQ. (2023). The Changing Climate of Sustainability: Unlocking the Value of Sustainable Living and Natural Products. Nielsen Global Corporate Sustainability Report.

[5] Dutta, P. K., Tripathi, S., Mehrotra, G. K., & Dutta, J. (2009). Perspectives for chitosan based antimicrobial films in food applications. Food Chemistry, 114(4), 1173-1182.

[6] Chiumarelli, M., & Hubinger, M. D. (2012). Stability, solubility, mechanical and barrier properties of cassava starch – Carnauba wax edible coatings to preserve fresh-cut apples. Food Hydrocolloids, 28(1), 59-67.

[7] Wittenauer, J., Mäckle, S., Sußmann, D., Schweiggert-Weisz, U., & Carle, R. (2012). Inhibitory effects of polyphenols from mangosteen (*Garcinia mangostana* L.) pericarp on tissue remodeling enzymes. Fitoterapia, 83(1), 44-49.

[8] Pedraza-Chaverri, J., Cárdenas-Rodríguez, N., Orozco-Ibarra, M., & Pérez-Rojas, J. M. (2008). Medicinal properties of mangosteen (*Garcinia mangostana*). Food and Chemical Toxicology, 46(10), 3227-3239.

[9] Y. Wu, S. W. Chen, and H. Y. Chen, "Characterization and properties of chitosan-based films incorporated with phenolic compounds," Carbohydrate Polymers, vol. 92, no. 2, pp. 1971–1976, 2013. [Online].Available:https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141813012002838

[10] J. Maitra and V. K. Shukla, "Cross-linking in hydrogels - A review," American Journal of Polymer Science, vol. 4, no. 2, pp. 25–31, 2014.[Online].Available:https://www.researchgate.net/profile/Vivek-Shukla-9/publication/303025587_Cross-linking_in_hydrogels_-_a_review/links/5cf95575a6fdccd13087e4cd/Cross-linking-in-hydrogels-a-review.pdf



สิริธิดา นพกวด นักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียนสตรีนนทบุรี มีความสนใจในเรื่องของเทคโนโลยีชีวภาพ และ จุลินทรีย์



ณัฏฐณิชา หว่างเพียร นักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียนสตรีนนทบุรี มีความสนใจในเรื่องของ เทคโนโลยีชีวภาพ และ จุลินทรีย์



พลอยนิชา หงษ์หิน นักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียนสตรีนนทบุรี มีความสนใจในเรื่องของ เทคโนโลยีชีวภาพ และ จุลินทรีย์



ดวงฤทัย นิคมรัฐ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีงานวิจัย : เทคโนโลยีชีวภาพ จุลชีววิทยาสิ่งแวดล้อมโพรไบโอติกส์ และเอมไซม์

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การเปรียบเทียบกระบวนการ ตรวจสอบอาคาร ประเภทโรงแรม ระหว่างกฎหมายไทย และกฎหมายญี่ปุ่น

A Comparative Study of Hotel Building Inspection Processes under Thai and Japanese Laws

ชนาธิป แสงตะวัน[1] เสรีย์ ตู้ประกาย[2] ชัยวัฒน์ ภู่วรกุลชัย[2] และวิวัฒน์ กิตตินาราพร[2]

[1]นักศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (การตรวจสอบและกฎหมายวิศวกรรม) มหาวิทยาลัยรามคำแหง

[2]อาจารย์ที่ปรึกษา และอาจารย์ประจำสาขาวิชาการตรวจสอบ และกฎหมายวิศวกรรม มหาวิทยาลัยรามคำแหง

บทคัดย่อ

การตรวจสอบอาคารเป็นกลไกสำคัญในการป้องกันความเสี่ยงด้านความปลอดภัยที่มีผลต่อชีวิตและทรัพย์สิน โดยเฉพาะอาคารประเภทโรงแรมซึ่งเป็นพื้นที่สาธารณะที่รองรับผู้เข้าพักจำนวนมาก บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบระบบกฎหมายและกระบวนการตรวจสอบอาคารโรงแรมระหว่างประเทศไทยและประเทศญี่ปุ่น โดยใช้วิธีการวิจัยเชิงเอกสารร่วมกับการสัมภาษณ์เชิงลึกจากผู้เชี่ยวชาญจำนวน 7 ท่าน ผลการศึกษาพบว่ากฎหมายไทยมีข้อจำกัดด้านการบังคับใช้และการตรวจสอบอาคารที่เปิดใช้งานแล้ว ในขณะที่ญี่ปุ่นมีระบบที่เข้มงวด ครอบคลุมตั้งแต่ออกแบบจนถึงการใช้งานจริง และมีรอบการตรวจสอบที่ชัดเจน ข้อเสนอแนะจากการศึกษาคือควรนำมาตรการตรวจสอบวัสดุอุปกรณ์ และการให้เอกชนมีส่วนร่วมในการตรวจสอบมาปรับใช้เพื่อยกระดับมาตรฐานความปลอดภัยของไทย

คำสำคัญ : การตรวจสอบอาคาร; โรงแรม; กฎหมายควบคุมอาคาร; ประเทศไทย; ญี่ปุ่น

Abstract

Building inspection is a critical factor in ensuring public safety and engineering standards, especially in hotels that accommodate large numbers of tourists. This research compares the inspection processes and legal frameworks of Thailand and Japan. While Thailand utilizes the Building Control Act B.E. 2522 and the Hotel Act B.E. 2547, enforcement regarding periodic maintenance remains a challenge compared to Japan's more stringent, continuous monitoring systems. By analyzing historical fire incidents and current regulations, this study identifies strengths and limitations in both systems. The findings provide recommendations for improving Thai building control laws to elevate safety standards and bolster international tourism confidence.

Keywords: Building inspection; Hotel; Building control law; Thailand; Japan

1. บทนำ

อาคารโรงแรมจัดเป็นโครงสร้างที่มีความเสี่ยงสูงเนื่องจากลักษณะการใช้งานที่มีความหนาแน่น และซับซ้อน ซึ่งหากขาดการตรวจสอบและบำรุงรักษาที่มีประสิทธิภาพ ย่อมนำไปสู่โศกนาฏกรรมอัคคีภัยที่ส่งผลกระทบอย่างรุนแรงต่อภาพลักษณ์การท่องเที่ยวและเสถียรภาพทางเศรษฐกิจ ดังที่ปรากฏในกรณีอุทาหรณ์เพลิงไหม้โรงแรมรอยัล จอมเทียน (2540) ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึง ช่องว่างทางกฎหมายในมิติการปรับปรุงอาคารเก่า (Retrofitting Gap) เนื่องจากในขณะนั้น พ.ร.บ. ควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 ยังขาดบทบัญญัติที่บังคับให้อาคารเก่าต้องติดตั้งระบบความปลอดภัยที่มีประสิทธิภาพ แม้กาลเวลาจะล่วงเลยมานาน จนถึงกรณีเพลิงไหม้ Ember Hotel (2567) ปัญหายังคงปรากฏชัดในเรื่อง ช่องว่างด้านการบังคับใช้กฎหมาย (Enforcement Gap) และความไม่ต่อเนื่องในการตรวจสอบสภาพอาคาร

บริบทด้านกฎหมาย การกำกับดูแลของประเทศไทยและญี่ปุ่นในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว จำเป็นต้องพิจารณาฐานกฎหมายหลักที่เกี่ยวข้อง โดยประเทศไทยใช้ พระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 และฉบับแก้ไขเพิ่มเติม (มาตรา 32 ทวิ) ซึ่งกำหนดให้โรงแรมที่มีห้องพักตั้งแต่ 80 ห้องขึ้นไป ต้องจัดให้มีผู้ตรวจสอบอาคารประเมินความปลอดภัยประจำปี อย่างไรก็ตาม มาตรฐานของไทยส่วนใหญ่ยังคงเป็นลักษณะ เกณฑ์ตัวเลขตายตัว (Prescriptive Code) ซึ่งอาจขาดความยืดหยุ่นเมื่อเทียบกับระบบของประเทศญี่ปุ่น[1]

ในประเทศญี่ปุ่นมีการบริหารจัดการความปลอดภัยผ่านการบูรณาการระหว่าง กฎหมายมาตรฐานอาคาร (Building Standard Law - BSL) และ กฎหมายบริการอัคคีภัย (Fire Service Law - FSL) โดยมีจุดเด่นคือการนำ เกณฑ์ตามสมรรถนะ (Performance-based Code) มาใช้ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543 เพื่อให้เกิดความยืดหยุ่นในการออกแบบโดยอิงผลลัพธ์ด้านความปลอดภัยเป็นสำคัญ พร้อมระบบรายงานการตรวจสอบตามวงรอบที่เคร่งครัด ตามกฎหมายมาตรฐานอาคาร (BSL) มาตรา 12

ระบบการตรวจสอบอาคารของประเทศไทยยังมีประเด็นที่ควรเร่งพัฒนา โดยเฉพาะในมิติด้านคุณภาพ และสมรรถนะของบุคลากร ซึ่ง เกณฑ์การอบรมผู้ตรวจสอบเพียง 45 ชั่วโมงในปัจจุบันนั้นไม่เพียงพอต่อการตรวจสอบอาคารที่มีความซับซ้อนเชิงวิศวกรรมสูง[2] นอกจากนี้ ประเทศไทย ยังไม่ระบุว่าอาคารประเภทใดบ้าง ที่ต้องมีผู้ตรวจสอบในการตรวจสอบอาคารนั้น มากกว่า 1 คน จึงเป็นช่องว่างให้ให้บุคคลเพียงคนเดียวสามารถตรวจสอบได้ทุกระบบงาน (โครงสร้าง,

ไฟฟ้า, เครื่องกล, ดับเพลิง) เป็นผลทำให้เกิดการกดราคากันในการตรวจสอบอาคาร และทำให้การตรวจสอบอาคารไม่มีประสิทธิภาพตามมา อีกทั้งประเทศไทยยังไม่มีข้อบังคับด้านการพัฒนาวิชาชีพต่อเนื่อง (CPD) ที่ชัดเจนเพื่อรักษามาตรฐานบุคลากร[3]

ในทางกลับกันประเทศญี่ปุ่น กลับประสบความสำเร็จในด้านระบบการตรวจสอบอาคาร และมีประสิทธิภาพสูง ผ่านการบูรณาการหน่วยงานเอกชนหรือ "บุคคลที่สาม" (Third-party inspection) เข้ามามีส่วนร่วมอย่างเต็มรูปแบบ[1] ระบบดังกล่าวมีจุดเด่นคือการแยกใบอนุญาตผู้ตรวจสอบตามความเชี่ยวชาญเฉพาะระบบ (Specialist) และทำงานประสานกันอย่างมีเอกภาพระหว่างกฎหมาย BSL (โครงสร้าง) และ FSL (อุปกรณ์ดับเพลิง) ซึ่งส่งผลให้อัตราการตรวจสอบขั้นสุดท้ายพุ่งสูงกว่าร้อยละ 90 งานวิจัยฉบับนี้จึงวิเคราะห์เปรียบเทียบเพื่อหาแนวทางการปฏิรูปกฎหมาย และระบบการตรวจสอบของไทย เพื่อปิดช่องว่างทางกฎหมาย และยกระดับมาตรฐานความปลอดภัยให้ทัดเทียมระดับสากล อันเป็นปัจจัยสำคัญในการรักษาความเชื่อมั่นและคงฐานะผู้นำด้านการท่องเที่ยวอย่างยั่งยืน

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาแนวคิด ความเป็นมา และหลักการเกี่ยวกับการตรวจสอบอาคารประเภทโรงแรม

เพื่อวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบระบบกฎหมายการตรวจสอบอาคารระหว่างประเทศไทยและญี่ปุ่น

เพื่อเสนอแนวทางในการปรับปรุงพัฒนากฎหมายการตรวจสอบอาคารของประเทศไทย

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

กฎหมายการตรวจสอบอาคารโรงแรมของประเทศญี่ปุ่นมีความเข้มงวด และมีประสิทธิภาพสูงกว่าประเทศไทย ทั้งในด้านรอบระยะเวลาการตรวจสอบ และคุณสมบัติเฉพาะทางของผู้ตรวจสอบ เนื่องจากปัจจัยความเสี่ยงด้านภัยพิบัติที่สูงกว่า

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

วิเคราะห์เปรียบเทียบกฎหมาย และมาตรการตรวจสอบความปลอดภัยอาคาร เฉพาะประเภทโรงแรมระหว่างประเทศไทย (พ.ร.บ. ควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 และที่เกี่ยวข้อง) และประเทศญี่ปุ่นโดยศึกษาผ่านข้อมูลทางวิชาการ และเอกสารกฎหมายด้วยวิธีเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง ครอบคลุมการวิเคราะห์ตัวแปรด้านระบบกฎหมาย มาตรการตรวจสอบ และระดับความปลอดภัยของผู้ใช้อาคาร

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การวิจัยนี้ช่วยให้เข้าใจถึงโครงสร้างกฎหมาย และมาตรการตรวจสอบอาคารโรงแรมของประเทศไทย และประเทศญี่ปุ่นอย่างลึกซึ้ง ทำให้ทราบถึงจุดแข็ง ข้อจำกัด และอุปสรรคในการบังคับใช้กฎหมายของทั้งสองประเทศ เพื่อนำมาสังเคราะห์เป็นแนวทางในการปฏิรูปและพัฒนากฎหมายตรวจสอบอาคารของไทยให้มีความรัดกุม มีประสิทธิภาพ และยกระดับมาตรฐานความปลอดภัยให้ทัดเทียมระดับสากลอย่างเป็นรูปธรรม

2. วิธีดำเนินการวิจัย มาตรฐานและความน่าเชื่อถือของข้อมูล

ผู้วิจัยกำหนดระเบียบวิธีวิจัยในรูปแบบ การวิจัยเชิงคุณภาพ (Qualitative Research)[4] ที่บูรณาการข้อมูลจากหลายแหล่ง โดยแบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกเป็นส่วนสำคัญ ดังนี้

2.1 การสืบค้นข้อมูลและการคัดเลือกกลุ่มตัวอย่าง

ผู้วิจัยใช้ การวิจัยเอกสาร เป็นฐานข้อมูลหลัก โดยศึกษา และวิเคราะห์ตัวบทกฎหมาย รายงานวิชาการ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งภาษาไทยและต่างประเทศ เช่น Building Standards Act ของญี่ปุ่น และ พระราชบัญญัติควบคุมอาคาร ของไทย ควบคู่ไปกับ การสัมภาษณ์เชิงลึก (In-depth Interview) กับกลุ่มตัวอย่างผู้เชี่ยวชาญจำนวน 7 ท่าน ซึ่งคัดเลือกด้วยวิธีเจาะจง (Purposive Sampling) เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงลึกในมิติเชิงนโยบาย และภาคปฏิบัติประกอบด้วย

อดีตนายกสมาคมผู้ตรวจสอบอาคาร อุปนายก และกรรมการ จากสมาคมผู้ตรวจสอบอาคาร

นิติกรชำนาญการพิเศษ จากสำนักงานควบคุมอาคาร ที่มีประสบการณ์การตีความกฎหมายโดยตรง

ผู้บริหารนิติบุคคลผู้ตรวจสอบอาคาร และ ผู้ตรวจสอบอาคาร ที่ได้รับใบอนุญาตซึ่งมีประสบการณ์ตรวจสอบอาคารสูง และโรงแรมในภาคเอกชน

2.2 การตรวจสอบคุณภาพเครื่องมือวิจัย

เพื่อให้ได้ผลการวิจัยที่มีความน่าเชื่อถือสูง ผู้วิจัยได้ดำเนินการสร้างและตรวจสอบคุณภาพเครื่องมือวิจัยตามหลักการทางสถิติ ดังนี้

ความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหา (Content Validity) แบบสัมภาษณ์ผ่านการตรวจสอบจากผู้ทรงคุณวุฒิ 3 ท่าน เพื่อประเมินค่าดัชนีความสอดคล้อง (IOC) โดยผลการประเมินมีค่าสูงถึง 0.97 ซึ่งแสดงว่าข้อคำถามมีความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการวิจัยอย่างครบถ้วน

ความเชื่อมั่นของเครื่องมือ (Reliability) ผู้วิจัยได้นำเครื่องมือไปทดลองใช้ (Try-out) กับกลุ่มที่มีลักษณะใกล้เคียงกับกลุ่มตัวอย่าง โดยประยุกต์ใช้วิธีแอลฟาของครอนบาค (Cronbach's Alpha Coefficient) ซึ่งได้ค่าสูงถึง 0.98 ยืนยันว่าเครื่องมือมีความเชื่อมั่นสูง และสามารถสื่อสารข้อมูลได้ถูกต้องตรงตามวัตถุประสงค์

2.3 การวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis)

ข้อมูลที่รวบรวมได้จะถูกนำมาผ่านกระบวนการการวิเคราะห์เนื้อหา (Content Analysis) เพื่อแยกแยะประเด็นสำคัญตามหมวดหมู่ เช่น ประเภทอาคาร รอบการตรวจสอบ และคุณสมบัติผู้ตรวจสอบ จากนั้นจึงใช้ การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบ (Comparative Analysis) ระหว่างระบบของประเทศไทยและญี่ปุ่น เพื่อสังเคราะห์จุดแข็ง จุดอ่อน และช่องว่างทางกฎหมาย นำไปสู่การจัดทำข้อเสนอแนะเชิงปฏิรูปที่เป็นรูปธรรมและสอดคล้องกับมาตรฐานสากล

3. ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบกระบวนการตรวจสอบอาคารประเภทโรงแรม

จากการศึกษาวิจัยเชิงเอกสารและการสัมภาษณ์เชิงลึก พบว่าระบบการตรวจสอบอาคารระหว่างประเทศไทยและญี่ปุ่นมีความแตกต่างในเชิงโครงสร้างและแนวทางปฏิบัติที่สำคัญ 5 มิติ ดังนี้

ตาราง 1 ตารางเปรียบเทียบเชิงสังเคราะห์" (Comparison Table)

ประเด็นเปรียบเทียบ	ประเทศไทย	ประเทศญี่ปุ่น
1. บุคลากร (Personnel)	ระบบ "Generalist" ผ่านการอบรม 45 ชม.	ระบบ "Specialist" และบังคับใช้ระบบ CPD
2. เกณฑ์คัดเลือกอาคาร (Selection Criteria)	ใช้เกณฑ์ปริมาณ (จำนวนห้องพัก 80 ห้องขึ้นไป)	ใช้เกณฑ์กายภาพและความเสี่ยง (ความสูง 3 ชั้นขึ้นไป/มีชั้นใต้ดิน)
3. รอบและความลึกของการตรวจ	ตรวจใหญ่ทุก 5 ปี / ย่อยทุกปี เน้นการตรวจสอบด้วยสายตา (Visual)	ตรวจโครงสร้างทุก 3 ปี / ระบบทุกปี เน้นการทดสอบสมรรถนะจริง (Performance Testing)
4. กฎหมายย้อนหลัง (Retroactive)	มีข้อกำหนดแต่ในทางปฏิบัติยังเผชิญปัญหาเรื่องการบังคับใช้	บังคับใช้ย้อนหลังอย่างเคร่งครัดในระบบช่วยชีวิต โดยไม่มีข้อยกเว้นเรื่องอายุอาคาร
5. รูปแบบการควบคุม (Code Style)	เน้นเกณฑ์ตัวเลขตายตัว (Prescriptive Code) ขาดความยืดหยุ่นสำหรับอาคารเก่า	ใช้เกณฑ์ตามสมรรถนะ (Performance-based Code) เอื้อต่อนวัตกรรมและการดัดแปลงอาคาร

3.1 บุคลากร และคุณสมบัติผู้ตรวจสอบอาคาร

ประเทศญี่ปุ่นมีการบังคับใช้กลไก "ผู้เชี่ยวชาญเฉพาะส่วน" เพื่อตรวจสอบระบบลิฟต์และอุปกรณ์ดับเพลิงแยกจากส่วนงานอาคารอย่างเป็นเอกเทศ ขณะที่กฎหมายไทยในปัจจุบันยังไม่มีบทบัญญัติห้ามการตรวจสอบแบบเบ็ดเสร็จโดยบุคคลเดียว ส่งผลให้ในอาคารขนาดใหญ่ของไทย การทำงานแบบทีมยังคงขึ้นอยู่กับดุลพินิจส่วนบุคคลมากกว่าข้อบังคับทางกฎหมายที่ชัดเจน แม้กฎหมายไทยจะไม่ได้ระบุขอบเขตความรับผิดชอบแยกตามระบบไว้อย่างละเอียด แต่การปฏิบัติหน้าที่ถูกกำกับดูแลโดย ข้อบังคับสภาวิศวกรว่าด้วยจรรยาบรรณแห่งวิชาชีพ ซึ่งเป็นกลไกทางจริยธรรมหลักที่บังคับให้ผู้ตรวจสอบ ต้องตระหนักถึงขีดความสามารถและไม่ปฏิบัติงานเกินความเชี่ยวชาญของตน

ตาราง 2 ตารางมิติด้านบุคลากร และคุณสมบัติผู้ตรวจสอบอาคาร

หัวข้อเปรียบเทียบ	ประเทศไทย	ประเทศญี่ปุ่น
การแยกประเภทใบอนุญาต	ไม่แยก (ใช้ใบอนุญาตเดียวตรวจทุกระบบ)	แยกตามความเชี่ยวชาญเฉพาะด้าน
การอบรมต่อเนื่อง (CPD)	ยังไม่มีการบังคับในการต่ออายุ	บังคับเก็บหน่วยกิตวิชาชีพต่อเนื่อง
ลักษณะการทำงาน	บางครั้งตรวจสอบเพียงคนเดียว	ทำงานเป็นทีมผู้เชี่ยวชาญเฉพาะทาง

3.2 เกณฑ์การคัดเลือกอาคาร และตรรกะความเสี่ยง

กฎหมายไทยใช้เกณฑ์จำนวนห้องพัก (80 ห้องขึ้นไป) เป็นตัวกำหนด ซึ่งผลการวิเคราะห์ชี้ว่าเป็นช่องว่างทางกฎหมายที่สำคัญ เมื่อเทียบกับระบบญี่ปุ่นที่ใช้ "เกณฑ์ทางกายภาพ" (เช่น ความสูง 3 ชั้นขึ้นไป หรือพื้นที่ชั้นใต้ดิน) การใช้เกณฑ์กายภาพแบบญี่ปุ่นมีความแม่นยำในการระบุความเสี่ยงด้านอัคคีภัยและการอพยพได้ครอบคลุมกว่า เนื่องจากพิจารณาจากข้อเท็จจริงที่ว่าผู้เข้าพักโรงแรมเป็นบุคคลภายนอกที่ไม่คุ้นเคยกับเส้นทางหนีไฟ ความสูงและซับซ้อนของอาคารจึงมีผลต่อความปลอดภัยมากกว่าจำนวนห้องพักเพียงอย่างเดียว

3.3 รอบระยะเวลา และความลึกซึ้งของการตรวจสอบ

วงรอบการตรวจสอบประจำปีของไทยมีความเหมาะสมในเชิงปริมาณสำหรับการติดตามเฝ้าระวังเบื้องต้น แต่ผลการวิเคราะห์เน้นย้ำถึงปัญหา "ความเข้มข้นเชิงคุณภาพ" ในกระบวนการตรวจสอบ ในระบบวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยต่อชีวิต เช่น ระบบสูบน้ำดับเพลิง (Fire Pump) และระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้ (Fire Alarm) ระบบญี่ปุ่นจะเน้นการตรวจสอบเชิงลึกและการทดสอบสมรรถนะจริง ขณะที่ของไทยมักสิ้นสุดเพียงการยืนยันจำนวนอุปกรณ์ด้วยสายตาเท่านั้น

3.4 การบังคับใช้กฎหมายย้อนหลัง และมาตรการสำหรับอาคารเก่า

ประเทศไทยไม่ได้ขาดแคลนกลไกทางกฎหมาย เนื่องจากมีกฎกระทรวงที่รองรับการบังคับใช้ย้อนหลัง แต่ปัญหาหลักคือประสิทธิภาพในการบังคับใช้จริง ซึ่งขาดความเชื่อมโยงระหว่างผลการตรวจสอบกับกลไกการสั่งการของรัฐ กระบวนการบริหารจัดการความปลอดภัยอาคารเก่าในไทยไม่สามารถขับเคลื่อนได้ครบวงจร เนื่องจากขั้นตอนมักสิ้นสุดเพียงการส่งรายงานการตรวจสอบ (Check) โดยไม่มีขั้นตอนการปรับปรุงแก้ไข (Act) ที่เป็นรูปธรรม อันเนื่องมาจากความกดดันของเจ้าหน้าที่รัฐในการใช้อำนาจตามมาตรา 46 ทวิ และความกังวลด้านผลกระทบต่อผู้ประกอบการ

3.5 แนวคิดการตรวจสอบตามเกณฑ์สมรรถนะ

อาคารเก่า หรือตึกแถวที่มีข้อจำกัดทางกายภาพ การบังคับใช้กฎหมายตามเกณฑ์กำหนดค่าตายตัว (Prescriptive Code) เช่น ความกว้างทางเดิน มักทำได้ยากในปฏิบัติ ระบบญี่ปุ่นจึงหันไปใช้ เกณฑ์เชิงสมรรถนะ ที่มุ่งเน้นผลลัพธ์ความปลอดภัย เช่น การคำนวณระยะเวลาอพยพหนีไฟจริงผ่านแบบจำลองคอมพิวเตอร์ แต่การเปลี่ยนสภาวะการใช้งานจากอาคารอยู่อาศัยเป็นอาคารสาธารณะ (เช่น โฮสเทล) ซึ่งส่งผลต่อ ภาระบรรทุก (Live Load) และความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างเดิม การตรวจสอบตามเกณฑ์สมรรถนะจึงต้องครอบคลุมทั้งระบบความปลอดภัย และมาตรฐานทางวิศวกรรมโครงสร้างควบคู่กัน

4. สรุปผลการวิจัย

4.1 บุคลากรและสมรรถนะการตรวจสอบ

ระบบปัจจุบันของไทยมีจุดอ่อนเชิงโครงสร้างจากการที่ไม่มีข้อกำหนดจำกัดขอบเขตความรับผิดชอบตามความซับซ้อนของอาคาร ทำให้ปรากฏการตรวจสอบและลงนามรับรองอาคารโรงแรมทั้งระบบ

โดยบุคคลเดียว ซึ่งขัดกับหลักการความเชี่ยวชาญเฉพาะทาง เมื่อพิจารณาจากความซับซ้อนของระบบวิศวกรรมในโรงแรม (เช่น ลิฟต์ และระบบป้องกันอัคคีภัยเชิงกล) การเปลี่ยนผ่านไปสู่ ระบบทีมผู้ตรวจสอบ และการบังคับใช้ระบบพัฒนาวิชาชีพต่อเนื่อง (CPD) จึงเป็นเงื่อนไขจำเป็นในการยกระดับมาตรฐานให้เท่าเทียมระดับสากลและลดความเสี่ยงจากการประเมินที่คลาดเคลื่อน

4.2 กายภาพอาคารและเกณฑ์การควบคุมความเสี่ยง

เกณฑ์การคัดเลือกอาคารตรวจสอบที่นับจากจำนวน "80 ห้อง" ของไทย ไม่สะท้อนความเสี่ยงที่แท้จริงและกลายเป็นช่องว่างทางกฎหมาย โดยเฉพาะโรงแรมขนาดเล็กที่มีความเสี่ยงสูงจากการมีชั้นใต้ดินหรือเป็นอาคารสูง ซึ่งมีความยากในการอพยพหนีไฟมากกว่าโรงแรมแนวราบที่มีจำนวนห้องมากกว่า ประเทศไทยควรเปลี่ยนไปใช้เกณฑ์ทางกายภาพ (ความสูง/ชั้นใต้ดิน) ผสมผสานกับลักษณะการใช้งานอาคาร เช่น กำหนดให้อาคารที่มีความสูง 3 ชั้นขึ้นไปต้องเข้าสู่ระบบการตรวจสอบโดยไม่คำนึงถึงจำนวนห้องพัก เพื่อปิดช่องว่างในการหลีกเลี่ยงกฎหมาย ในกรณีอาคารเก่าที่ไม่สามารถติดตั้งระบบดับเพลิงตามมาตรฐานใหม่ได้เนื่องจากข้อจำกัดด้านโครงสร้าง การใช้ "มาตรการยืดหยุ่นเชิงวิศวกรรม" มีความเหมาะสมกว่าการบังคับใช้มาตรฐานเดียวแบบครอบจักรวาล

4.3 โครงสร้างกฎหมาย และนวัตกรรมการกำกับดูแล

กฎหมายควบคุมอาคาร พรบ.โรงแรม และกฎหมายความปลอดภัยแรงงานของไทยมีความซ้ำซ้อนสูง การพัฒนากลไกยอมรับผลตรวจสอบร่วมกัน จะช่วยลดภาระของผู้ประกอบการ และเพิ่มประสิทธิภาพการบังคับใช้กฎหมายของภาครัฐ แนวคิดการวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (เช่น การคำนวณเวลาหนีไฟเทียบกับอัตราการแพร่กระจายของควัน) เป็นทางออกที่สำคัญสำหรับโรงแรมที่ดัดแปลงจากตึกแถวเก่า ซึ่งไม่สามารถปฏิบัติปฏิบัติตามเกณฑ์ระยะร่นหรือความกว้างที่ตายตัว (Prescriptive Code) ได้ แม้เกณฑ์สมรรถนะจะสร้างความยืดหยุ่น แต่การนำมาใช้ในบริบทของประเทศไทยยังมีความเสี่ยงสูงในเรื่องดุลพินิจที่อาจนำไปสู่ปัญหาคอร์รัปชัน ดังนั้นความโปร่งใสของระบบการตรวจสอบและจริยธรรมวิศวกรจึงเป็นตัวแปรสำคัญที่จะตัดสินความสำเร็จของการนำนวัตกรรมทางกฎหมายนี้มาใช้

5. การอภิปรายผล

5.1 เกณฑ์การตรวจสอบอาคารและช่องว่างเชิงโครงสร้างกฎหมาย

การที่กฎหมายไทยใช้เกณฑ์จำนวน "80 ห้อง" เป็นตัวกำหนดการเข้าสู่กระบวนการตรวจสอบอาคาร ถือเป็นช่องว่างสำคัญที่ไม่สอดคล้องกับตรรกะด้านความปลอดภัยทางกายภาพ ประเด็นนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ ธนเดช ศรีคราม (2555) ที่ระบุว่าเกณฑ์ดังกล่าวมักถูกใช้เป็นช่องทางในการหลีกเลี่ยงการควบคุมที่เข้มงวด (เช่น การแบ่งเฟสโครงการไม่ให้เกิน 80 ห้อง เพื่อเลี่ยง EIA)

เมื่อเทียบกับกฎหมาย Building Standard Law (BSL) ของญี่ปุ่นที่เน้นเกณฑ์ทางกายภาพ (ความสูง/ชั้นใต้ดิน) จะพบว่าระบบของญี่ปุ่นให้ความสำคัญกับความปลอดภัยของชีวิตมากกว่าตัวเลขในเชิงพาณิชย์ ผลการวิจัยจึงชี้ให้เห็นว่าประเทศไทยมีความจำเป็นเร่งด่วนในการปฏิรูปไปสู่เกณฑ์ Risk-based เพื่อปิดช่องว่างทางกฎหมายและยกระดับมาตรฐานความปลอดภัยให้ครอบคลุมโรงแรมทุกขนาดที่มีความเสี่ยงทางกายภาพสูง

5.2 สมรรถนะบุคลากรและการยกระดับวิชาชีพต่อเนื่อง (CPD)

ปัจจุบันเกณฑ์ความรู้และทักษะของผู้ตรวจสอบอาคารในไทยยังคงมีลักษณะที่ "กว้างเกินไป" ไม่สะท้อนความเชี่ยวชาญเฉพาะทาง ซึ่งสอดคล้องกับข้อค้นพบของ สายสมร ปัทมะริดสา (2553) ที่ชี้ว่าคุณสมบัติของผู้ตรวจสอบในปัจจุบันไม่สอดรับกับความซับซ้อนของอาคารแต่ละประเภท การตรวจสอบอาคารสาธารณะที่มีความซับซ้อนสูงเช่น โรงแรม ไม่ควรจำกัดอยู่เพียงการตรวจสอบโดยบุคคลเดียว แต่ควรปรับเปลี่ยนสู่ระบบ ทีมงานผู้เชี่ยวชาญเฉพาะด้าน ควบคู่ไปกับการจัดลำดับชั้นผู้ตรวจสอบ ตามระดับความสามารถและประสบการณ์ เพื่อให้กระบวนการตรวจสอบมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือตามมาตรฐานสากล

6. การอภิปรายผล

เพื่อให้ผลการศึกษาถูกนำไปสู่การพัฒนาเชิงนโยบายและเป็นแนวทางสำหรับการพัฒนามาตรฐานความปลอดภัยอาคารโรงแรมในประเทศไทย ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะแบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก ดังนี้

6.1 ข้อเสนอแนะเพื่อการนำไปใช้ประโยชน์

กรมโยธาธิการและผังเมืองควรพิจารณาปรับปรุงกฎกระทรวง โดยเปลี่ยนจากเกณฑ์เชิงปริมาณ (จำนวน 80 ห้องขึ้นไป) ไปสู่ เกณฑ์ลักษณะทางกายภาพ และความเสี่ยง (Risk-based) เช่น กำหนดให้อาคารโรงแรมที่มีความสูง 3 ชั้นขึ้นไป หรือมีพื้นที่ชั้นใต้ดิน ต้องเข้ารับการตรวจสอบโดยไม่มีข้อยกเว้น เพื่อคุ้มครองความปลอดภัยของกลุ่มนักท่องเที่ยวที่มีความเสี่ยงสูงจากการไม่คุ้นเคยเส้นทางหนีไฟ

สมาคมวิชาชีพควรบังคับใช้ระบบ การพัฒนาวิชาชีพต่อเนื่อง (CPD) เป็นเงื่อนไขในการต่ออายุใบอนุญาต โดยมุ่งเน้นองค์ความรู้เทคโนโลยีความปลอดภัยสมัยใหม่ ควรกำหนดเกณฑ์ประเภทอาคารซับซ้อนที่จำเป็นต้องใช้ "ทีมผู้ตรวจสอบอาคาร" ที่ประกอบด้วยวิศวกรหลากหลายสาขา (โยธา, ไฟฟ้า, เครื่องกล, สิ่งแวดล้อม) เพื่อให้เกิดการตรวจสอบเชิงลึกตามมาตรฐานสากลและรูปแบบของประเทศญี่ปุ่น

ภาครัฐควรปฏิรูปกระบวนการติดตามผลให้ครบวงจรตาม วงจร PDCA เพื่อให้รายงานการตรวจสอบนำไปสู่การแก้ไขจริง พร้อมทั้งบูรณาการ มาตรการจูงใจทางการเงิน (Financial Incentives) เช่น สิทธิประโยชน์ทางภาษีหรือสินเชื่อดอกเบี้ยต่ำ เพื่อลดภาระต้นทุนและสร้างแรงจูงใจให้ผู้ประกอบการรายย่อยปรับปรุงระบบความปลอดภัยในอาคารเดิม

6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

ควรขยายขอบเขตการศึกษาไปยังประเทศที่มีระบบการกำกับดูแลรุดหน้า เช่น สิงคโปร์ เพื่อถอดบทเรียนรูปแบบการจัดการ One-Stop Service ที่มีประสิทธิภาพสำหรับการจดทะเบียนและตรวจสอบอาคารในบริบทประเทศกำลังพัฒนา

ควรมีการวิจัยเชิงทดลองเพื่อสร้างแบบจำลองพฤติกรรมไฟและการอพยพในอาคารที่มีกายภาพเฉพาะตัวของไทย (เช่น ตึกแถว) เพื่อกำหนดค่ามาตรฐาน (Safety Factor) ที่เหมาะสมสำหรับเกณฑ์เชิงสมรรถนะ ซึ่งจะช่วยลดการใช้ดุลพินิจที่ไม่โปร่งใส

ควรศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดสินใจลงทุนด้านความปลอดภัยของผู้ประกอบการ เพื่อออกแบบมาตรการภาษีที่ตรงจุด (เช่น มาตรการหักค่าใช้จ่ายลงทุนระบบความปลอดภัยได้ 100% ภายในปีเดียว) เพื่อกระตุ้นให้เกิดการปรับปรุงอาคารเก่าได้อย่างเป็นรูปธรรม

เอกสารอ้างอิง

[4] J. Suzuki, “History of Major Amendments to Building Standard Law and Typical Conflicts of Existing Non-Conformed Buildings in Japan,” National Institute for Land and Infrastructure Management (NILIM), Japan, May 2016.

[2] ฉนวน เอื้อการณ์, “การพัฒนาสมรรถนะหลักของผู้ตรวจสอบอาคาร ตามพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522,” วารสารเกษมบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต, ปีที่ 14, ฉบับที่ 2, หน้า 42, กรกฎาคม-ธันวาคม 2556

[3] มนตรี บัวมาก, “ปัญหาเกี่ยวกับการบริหารจัดการอาคารสูงตามกฎหมายควบคุมอาคาร,” สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์, 2557

[4] ฐิติวัจน์ ทองแก้ว,และ ประสพชัย พสุนนท์, “การวิจัยเชิงเอกสารเพื่อสังเคราะห์องค์ประกอบและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของแนวคิด การจัดการสมรรถนะการประกอบอาชีพของคนพิการ:บริบทของสถานการณ์ กระบวนทัศน์ และแนวคิดที่ให้ความสำคัญกับสมรรถนะของมนุษย์ทุกคน,” วิทยานิพนธ์ดุษฎีบัณฑิต, มหาวิทยาลัยศิลปากร , ฉบับที่ 3, หน้า 12, 2561.



ประวัติผู้เขียนบทความ นายชนาธิป แสงตะวัน (Chanatip Sangtawan) สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร (ปีการศึกษา 2567) โดยมีพื้นฐานด้านวิชาชีพวิศวกรรมจากการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพจากโรงเรียนช่างกรมอู่ทหารเรือ และวิทยาลัยเทคโนโลยีแหลมฉบัง ปัจจุบันดำรงตำแหน่งวิศวกร ณ บริษัท ซี-คอน ซิสเต็ม เทคโนโลยี จำกัด และเป็นนักศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการตรวจสอบและกฎหมายวิศวกรรม มหาวิทยาลัยรามคำแหง

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การศึกษาความเป็นไปได้ของการลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบแนวตั้งบริเวณผนังอาคาร

A Feasibility Study of Vertical Solar Power Generation Systems Installed on Building Facades

อรวรรณ แม้นจิต[1*] และ พงษ์สันธ์ บัณฑิตสกุลชัย[2]

[1]สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน (สหสาขาวิชา) วิทยาลัยสหศาสตร์บูรณาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
อาคารเฉลิมราชกุมารี 60 พรรษา (จามจุรี 10) ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กทม. 10330 Email: 6682031420@chula.student.ac.th

[2]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กทม. 10330 Email: Pongsun.B@chula.ac.th

บทคัดย่อ

จากแนวโน้มความต้องการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและข้อจำกัดด้านพื้นที่ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ การใช้พื้นที่ผนังอาคารในลักษณะแนวตั้งจึงเป็นอีกแนวทางที่น่าสนใจ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของการติดตั้งระบบดังกล่าว ทั้งในด้านเทคนิค รวมถึงด้านการเงิน เพื่อประเมินและเปรียบเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ระหว่างระบบติดตั้งแบบแนวตั้งและระบบติดตั้งบนหลังคา โดยใช้ตัวชี้วัดทางการเงิน ได้แก่ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) และระยะเวลาคืนทุน ผลการศึกษาพบว่า ระบบติดตั้งบนหลังคามีประสิทธิภาพและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สูงกว่าระบบแนวตั้งอย่างชัดเจน ขณะที่ระบบแนวตั้งมีค่า NPV ติดลบ และค่า IRR ต่ำกว่า WARR จึงยังไม่คุ้มค่าการลงทุน อย่างไรก็ตาม ระบบแนวตั้งมีผลตอบแทนใกล้เคียงจุดคุ้มทุน โดยหากปรับปรุงการออกแบบระบบให้เหมาะสม รวมถึงการสนับสนุนจากภาครัฐ ก็อาจมีความคุ้มค่าในการลงทุน

คำสำคัญ : โซลาร์เซลล์แนวตั้ง, การศึกษาความเป็นไปได้, มูลค่าปัจจุบันสุทธิ, อัตราผลตอบแทนภายใน, ระยะเวลาคืนทุน

Abstract

Due to the increasing electricity demand and limitations of rooftop installation space, building-integrated vertical solar systems have emerged as an alternative approach. This study aims to assess the technical and financial feasibility of such systems and compare their economic performance with conventional rooftop installations using key indicators, including Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), and Payback Period. The results indicate that rooftop systems exhibit superior performance and economic viability. In contrast, the vertical system yields a negative NPV and an IRR below the Weighted Average Required Rate of Return (WARR), indicating that it is not financially viable under current conditions. However, its returns are close to the breakeven point, suggesting that improvements in system design and policy support may enhance its feasibility in the future.

Keywords: Vertical Solar Power Generation Systems; Feasibility Study; Net Present Value; Internal Rate of Return; Payback Period

1. บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยและทั่วโลกให้ความสนใจในการส่งเสริมการใช้พลังงานหมุนเวียนหรือพลังงานทดแทน เช่น พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น เนื่องจากตระหนักถึงปัญหาทางด้านมลพิษและสิ่งแวดล้อม ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนผ่านทางด้านพลังงานในอดีตมาอย่างต่อเนื่องในหลายประเทศ เพื่อให้เกิดความมั่นคงด้านพลังงาน รวมถึงลดผลกระทบสิ่งแวดล้อม และเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืนในระยะยาว

จากข้อมูลของสำนักงานนโยบายและแผนพลังงานกระทรวงพลังงาน ระบุว่า สถานการณ์พลังงานปี 2567 การใช้ไฟฟ้าในประเทศไทย อยู่ที่ 214,469 ล้านหน่วย (GWh) เพิ่มขึ้นจากปี 2566 คิดเป็นร้อยละ 5.2 และคาดการณ์ว่าในปี 2568 จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.9 [1] ทั้งนี้ เพื่อรองรับความต้องการใช้ไฟฟ้าที่มากขึ้น และลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561-2580 (AEDP 2018) ของประเทศไทย จึงได้กำหนดกรอบแนวคิดในการเพิ่มสัดส่วนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกให้มากขึ้น อย่างน้อยร้อยละ 30 ของพลังงานที่ใช้ทั้งหมด ภายในปี 2580 [2] จากแผนดังกล่าวชี้ให้เห็นถึงความสำคัญในการพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับพลังงานทดแทนทุกรูปแบบ โดยเฉพาะพลังงานแสงอาทิตย์ ที่สามารถนำมาผลิตไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องและยั่งยืน

ประเทศไทยมีความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยอยู่ในระดับสูงประมาณ 18-20 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน ซึ่งเอื้อต่อการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ได้เกือบทั่วประเทศ โดยตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561-2580 กำหนดเป้าหมายกำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนรวม 29,411 เมกะวัตต์ ซึ่งในจำนวนนี้เป็นพลังงานแสงอาทิตย์ 12,139 เมกะวัตต์ [2] ทั้งนี้ ผลการดำเนินงานในปี 2566 พบว่ามีการติดตั้งเพียง 3.249.32 เมกะวัตต์ หรือร้อยละ 26.77 [3] ของเป้าหมาย สะท้อนถึงความจำเป็นในการเร่งพัฒนาเทคโนโลยีและควรลดข้อจำกัดในการติดตั้ง

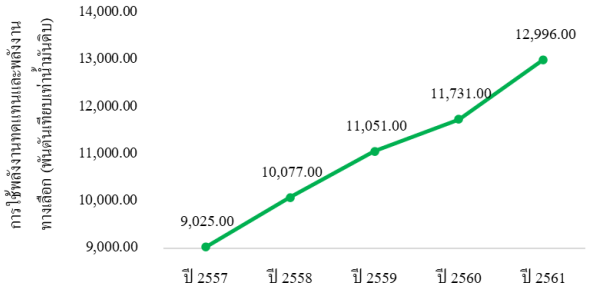
ในขณะเดียวกัน การติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบบนหลังคายังมีข้อจำกัดด้านพื้นที่ โดยเฉพาะในเขตเมืองที่มีความหนาแน่นสูง ทำให้ไม่สามารถเพิ่มกำลังการผลิตได้เพียงพอ ซึ่งการนำพื้นที่ผนังอาคารมาใช้ติดตั้งระบบในลักษณะแนวตั้งจึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่สามารถช่วยเพิ่มศักยภาพการผลิตไฟฟ้าได้

ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยฉบับนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบแนวตั้งบนผนังอาคาร ทั้งในด้านเทคนิคและด้านเศรษฐศาสตร์ โดยทำการประเมินตัวชี้วัดทางการเงินที่สำคัญ ได้แก่ ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) และอัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลลัพธ์กับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคาในแนวระนาบ ซึ่งเป็นรูปแบบที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย

2. วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561-2580 (AEDP2018)

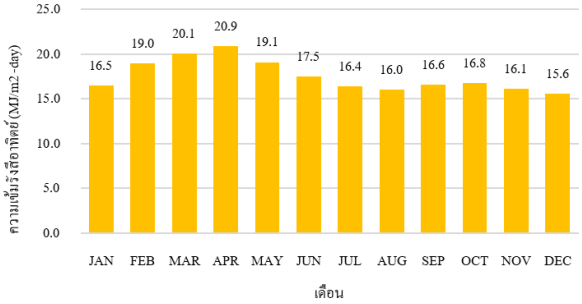
แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561-2580 (AEDP2018) มีเป้าหมายเพื่อเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกในรูปของพลังงานไฟฟ้า ความร้อน และเชื้อเพลิงชีวภาพ ต่อการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายที่ร้อยละ 30 ในปี พ.ศ. 2580 พลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกเป็นส่วนหนึ่งของการเสริมสร้างความมั่นคงด้านพลังงานจากการใช้แหล่งวัตถุดิบพลังงานในประเทศเพื่อลดการนำเข้าและการพึ่งพาพลังงานจากปิโตรเลียม อันเป็นสาเหตุสำคัญของปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก ให้ความสำคัญในการส่งเสริมการผลิตพลังงานจากวัตถุดิบพลังงานทางเลือกที่มีอยู่ภายในประเทศ การพัฒนาศักยภาพการผลิตการใช้พลังงานทางเลือกด้วยเทคโนโลยีที่เหมาะสม เพื่อสร้างการเติบโตบนคุณภาพชีวิตที่ดีและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม [2]



รูปที่ 1 การใช้พลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2557-2561

2.2 ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย

ปริมาณความเข้มรังสีอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนโดยเฉลี่ยทุกพื้นที่ในประเทศไทยจะแปรค่าในรอบปีอยู่ในช่วงระหว่าง 15 - 21 MJ/m^2 -day โดยมีค่าค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากเดือนมกราคม และสูงสุดในเดือนเมษายน จากนั้นประเทศไทยจะได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้พัดพาความชื้นจากทะเลอันดามันทำให้ประเทศไทยมีเมฆมาก และมีฝนส่งผลให้ความเข้มแสงอาทิตย์ค่อยๆ ลดลง จนถึงเดือนสิงหาคม ในเดือนกันยายนจะเป็นช่วงเปลี่ยนฤดูกาลเข้าสู่อิทธิพลของลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือในเดือนตุลาคม พัด พาอากาศหนาวเย็นทำให้เกิดความกดอากาศสูง แผ่กำลังลงมาจากภาคเหนือของประเทศไทยเมื่อเจอกับความชื้นจะก่อตัวเป็นเมฆประกอบกับทิศทางของการโคจรของโลกจะหันด้านทิศใต้เข้าหาดวงอาทิตย์ทำ ให้ประเทศไทยได้รับความเข้มรังสีอาทิตย์ลดลง (15.6 MJ/m^2 -day) เมื่อเข้าสู่ช่วงเดือนมกราคมอิทธิพลของลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือจะลดกำลังลงทำให้ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ไทยได้รับเพิ่มขึ้นอีกครั้ง [4]



รูปที่ 2 การแปรค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือน

2.3 ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์สามารถแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบหลัก ได้แก่ ระบบแบบต่อกับระบบจำหน่าย (On Grid System) ระบบแบบอิสระ (Off Grid System) และระบบแบบผสม (Hybrid System) ระบบ On Grid เป็นระบบที่เชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้า สามารถจ่ายไฟให้โหลดโดยตรง และส่งไฟฟ้าส่วนเกินเข้าสู่ระบบจำหน่าย ขณะที่ช่วงที่ไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้จะใช้ไฟจากการไฟฟ้า เหมาะสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวันเป็นหลัก [5] ระบบ Off Grid เป็นระบบอิสระที่ไม่เชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้า เหมาะสำหรับพื้นที่ห่างไกล โดยมีการกักเก็บพลังงานในแบตเตอรี่เพื่อใช้งานในช่วงที่ไม่มีแสงแดด ทำให้สามารถจ่ายไฟได้ทั้งกลางวันและกลางคืน [6] และระบบ Hybrid เป็นการผสมผสานระหว่าง On Grid และ Off Grid โดยสามารถจ่ายไฟให้โหลดและเก็บพลังงานส่วนเกินในแบตเตอรี่เพื่อใช้ในกรณีฉุกเฉิน เช่น ไฟฟ้าดับ อย่างไรก็ตาม ระบบมีความซับซ้อนและมีต้นทุนสูง จึงไม่เป็นที่นิยมมากนัก [7]

2.4 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Panels)

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ หรือ แผงโซลาร์เซลล์ เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1954 โดยแชปปิน (Chapin), ฟูลเลอร์ (Fuller) และเพียร์สัน (Pearson) ซึ่งได้ค้นพบทฤษฎีรอยต่อพีเอ็นของผลึกซิลิคอน โดยหลักการทำงานของแผง คือ การที่แสงอาทิตย์ตกกระทบบนแผง จะเกิดการนำไฟฟ้าประจุบวกและประจุลบ โดยในแผงจะมีรอยต่อพีเอ็น (p-n-junction) ซึ่งทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้าภายในเซลล์ ทำให้พาหะนำไฟฟ้าชนิดอิเล็กตรอนไหลไปที่ขั้วบวก และพาหะนำไฟฟ้าชนิดโฮลไหลไปที่ขั้วลบ เกิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขึ้น โดยเมื่อนำเซลล์มาต่อขนานกัน จะทำให้ได้กระแสไฟฟ้ามากขึ้น [8] ประเภทของแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะขึ้นอยู่กับประเภทของแร่ที่นำมาใช้ในการผลิตแผง ซึ่งแบ่งได้ 3 ประเภทหลักๆ ได้แก่ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทโมโนคริสตัลไลน์ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทโพลิคริสตัลไลน์ และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส หรือฟิล์มบาง

2.5 อินเวอร์เตอร์ (Inverter)

การเลือกใช้อินเวอร์เตอร์ขึ้นอยู่กับรูปแบบของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทหลัก ได้แก่ 1) อินเวอร์เตอร์แบบ On-Grid อินเวอร์เตอร์ประเภทนี้แบ่งเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ แบบสตริง (String) ซึ่งมีโครงสร้างเรียบง่ายและต้นทุนต่ำ แบบไมโคร (Micro) ที่ควบคุมการทำงานระดับแผงและลดผลกระทบจากเงาบัง แบบ DC-Optimized ที่ใช้ Power Optimizer ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและความปลอดภัยของระบบ [9] 2) อินเวอร์เตอร์แบบ Off-Grid ใช้ในระบบที่ไม่เชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้า เหมาะสำหรับพื้นที่ห่างไกล โดยทำงานร่วมกับแบตเตอรี่เพื่อกักเก็บพลังงานและจ่ายไฟได้อย่างต่อเนื่อง โดยไม่ต้องพึ่งพาระบบจำหน่ายไฟฟ้า [10] และ

3) อินเวอร์เตอร์แบบ Hybrid เป็นระบบที่รวมข้อดีของ On-Grid และ Off-Grid เข้าด้วยกัน สามารถทำงานร่วมกับแผงโซลาร์เซลล์ แบตเตอรี่ และโครงข่ายไฟฟ้าได้ในระบบเดียว มีความยืดหยุ่นสูง และสามารถสำรองไฟฟ้าได้ในกรณีไฟฟ้าดับ [10]

2.6 การออกแบบและจำลองระบบด้วยโปรแกรม PVsyst

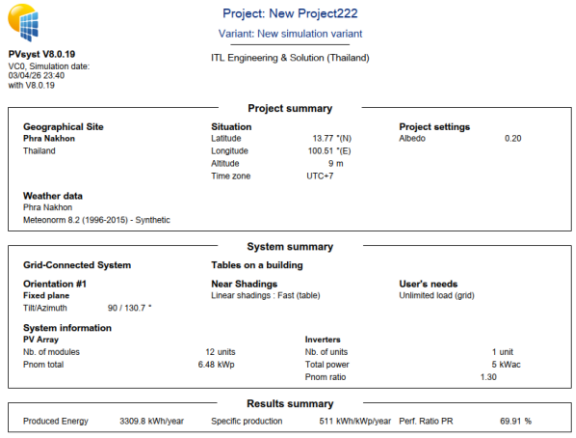
โปรแกรม PVsyst เป็นเครื่องมือสำหรับจำลองและวิเคราะห์ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ โดยสามารถประเมินปริมาณพลังงานที่ผลิตได้ ผลกระทบจากเงาบัง การจัดวางแผง และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ผู้ใช้สามารถกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ขนาดระบบ มุมเอียง ทิศทาง และเลือกอุปกรณ์เพื่อออกแบบระบบได้ [11]โดยมีจุดเด่นด้านความแม่นยำ ความยืดหยุ่น และใช้งานได้สะดวก [12] โดยวิธีการจำลองระบบเบื้องต้นด้วยโปรแกรม PVsyst ของโครงการใช้เวอร์ชัน 8.0.19 สามารถทำได้ ดังนี้

1) เริ่มต้นการจำลองโครงการโดยการเลือกการติดตั้งตามรูปแบบระบบที่ต้องการจำลอง ได้แก่ Grid-Connected จำลอง หลังจากนั้นระบุข้อมูลด้านพื้นที่ เพื่อให้โปรแกรมดึงฐานข้อมูลด้านอุตุนิยมวิทยาของสถานที่ตั้งโครงการ เช่น ความเข้มแสง อุณหภูมิ มาใช้ในการจำลองระบบได้ถูกต้อง

2) ดำเนินการกำหนดมุมในการติดตั้งเป็น 90 องศา และทิศที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์รับแสง (Azimuth) ที่ 130.7 องศา (ตะวันออกเฉียงใต้)

3) ออกแบบระบบโดยการเลือกอุปกรณ์ที่โครงการใช้ ได้แก่ แผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น JA Solar ขนาด 540 วัตต์ (Watt) จำนวน 12 แผง และใช้อินเวอร์เตอร์รุ่น HUAWEI SUN2000-5KTL-M1 ขนาด 5 กิโลวัตต์ (kW_{AC}) จำนวน 1 ตัว

4) เลือกคำสั่ง Run Simulation เพื่อจำลองการออกแบบระบบพลังงานแสงอาทิตย์จะปรากฏผลการจำลองตามรายละเอียดที่ผู้วิจัยได้ดำเนินการใส่ข้อมูลไว้ ซึ่งจะปรากฏผลการจำลอง



รูปที่ 3 ผลการจำลองระบบ โดยโปรแกรม PVsyst

2.7 การศึกษาความเป็นไปได้ด้านการเงินของโครงการ

งานวิจัยนี้ใช้ตัวชี้วัดทางการเงินหลัก ได้แก่ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) และระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)

1. มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) มูลค่าปัจจุบันสุทธิ หมายถึง มูลค่าของกระแสเงินสดสุทธิ (Net Cash Flow) ของโครงการเมื่อถูกปรับให้อยู่ในหน่วยของมูลค่าปัจจุบัน [13] หากค่า NPV มีค่าเป็นบวกแสดงว่าโครงการดังกล่าว สมควรที่จะลงทุน และเลือกโครงการที่ให้ค่า NPV เป็นบวกสูงที่สุด วิธีการคำนวณ NPV แสดงในสมการที่ 1

$$NPV = \sum_{t=1}^{n} \frac{B_t - C_t}{(1+i)^t} - C_0 \quad (1)$$

โดยที่ B_t = กระแสเงินสดรับสุทธิ ปีที่ 1,2,…,n
C_t = ค่าใช้จ่ายของโครงการในปีที่ 1,2,…,n
C_0 = ต้นทุนโครงการในปีแรก (ปีที่ 0)
i = อัตราคิดลด (Discount Rate)
t = ปีของโครงการปีที่ 1,2,…,n
n = อายุของโครงการ

2. อัตรา ผลตอบแทนภายในโครงการ คือ อัตราคิดลด (Discount Rate) ที่ทำให้ NPV มีค่าเท่ากับ 0 โดยหาก IRR น้อยกว่าต้นทุนของเงินทุน ไม่ควรลงทุนในโครงการนี้ เนื่องจากให้อัตราผลตอบแทนน้อยกว่าต้นทุนของเงินทุนหรืออัตราคิดลด (Discount Rate) [13] สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2

$$\sum_{t-1}^{n} \frac{B_t - C_t}{(1+IRR)^t} - C_0 = 0 \quad (2)$$

โดยที่ B_t = กระแสเงินสดรับสุทธิ ปีที่ 1,2,…,n
C_t = ค่าใช้จ่ายของโครงการในปีที่ 1,2,…,n
C_0 = ต้นทุนโครงการในปีแรก (ปีที่ 0)
IRR = อัตราผลตอบแทนภายใน
t = ปีของโครงการปีที่ 1,2,…,n
n = อายุของโครงการ

3. ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) การคำนวณระยะเวลาคืนทุนหรือจำนวนปีในการดำเนินงาน ซึ่งจะทำให้มูลค่าการลงทุนสะสม (อย่างน้อยที่สุด) เท่ากับมูลค่าตอบแทนเงินสุทธิสะสม [14] สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{กระแสเงินสดจ่ายในการลงทุนเริ่มต้นโครงการ}}{\text{กระแสเงินสดรับสุทธิเฉลี่ยรายปี}} \quad (3)$$

3. ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 สมมติฐานการวิจัย

ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบแนวตั้งบนผนังอาคารมีศักยภาพในการดำเนินการได้ทั้งในด้านเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ โดยสามารถผลิตไฟฟ้าได้ในระดับที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ อีกทั้งมีความเป็นไปได้ทางการเงินจากการประเมินด้วยตัวชี้วัดสำคัญ อย่างไรก็ตาม ผลตอบแทนของระบบมีความแตกต่างจากระบบติดตั้งบนหลังคาอย่างมีนัยสำคัญ และประสิทธิภาพยังขึ้นอยู่กับทิศทางการติดตั้งของผนังอาคาร งานวิจัยนี้จึงมุ่งประเมินความเป็นไปได้ของระบบเพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการออกแบบและการลงทุน โดยเฉพาะในพื้นที่เมืองที่มีข้อจำกัดด้านพื้นที่

3.2 ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. เลือกระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบแนวตั้งติดตั้งบนผนังอาคารมีขนาดกำลังการผลิตติดตั้งแผง 6.48 กิโลวัตต์ (kW_p) กำลังการผลิตอินเวอร์เตอร์ขนาด 5 กิโลวัตต์ (kW_{AC}) ติดตั้งบริเวณผนังอาคารสำนักงาน

2. รวบรวมข้อมูลปริมาณไฟฟ้าที่สามารถลดการพึ่งพาการซื้อจากการไฟฟ้านครหลวง (MEA) เพื่อนำมาประเมินผลประหยัดค่าไฟฟ้า

(Electricity Cost Saving) ที่เกิดขึ้นจากการติดตั้งระบบโดยใช้โดยคิดอัตราค่าไฟที่ใช้ในสำนักงาน 4.4217 บาท/หน่วย ตามค่าไฟกิจการขนาดเล็ก (สำนักงานบริษัท) ของการไฟฟ้านครหลวง ประเภท 2.1.2 แรงดันต่ำกว่า 12 กิโลโวลต์ [15]

ตารางที่ 1 อัตราค่าไฟที่ใช้ในสำนักงาน ของการไฟฟ้านครหลวง

ประเภท	อัตราค่าไฟขายปลีก (บาท/หน่วย)
2.1.2 แรงดันต่ำกว่า 12 กิโลโวลต์	
150 หน่วยแรก (1-150)	3.2484
250 หน่วยต่อไป (151-400)	4.2218
เกินกว่า 400 หน่วย (401 ขึ้นไป)	4.4217

3. รวบรวมข้อมูลด้านต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับการติดตั้งระบบทั้งหมด จากบริษัทเอกชนผู้ดำเนินการติดตั้ง ได้แก่ต้นทุนค่าใช้จ่ายการติดตั้งระบบ เป็นค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในช่วงเริ่มต้นของโครงการ ก่อนระบบจะเริ่มดำเนินการผลิตไฟฟ้า และต้นทุนค่าใช้จ่ายประจำปีในการบำรุงรักษาระบบ ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นเป็นประจำทุกปี เช่น การล้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ตลอดอายุการใช้งานระบบ

ตารางที่ 2 ต้นทุนค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบ

ลำดับ	รายละเอียด	ราคา (บาท)
1	ค่าแรงติดตั้งโครงสร้าง	55,000
2	แผงเซลล์แสงอาทิตย์	30,000
3	อินเวอร์เตอร์	23,000
4	อุปกรณ์อื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง	68,000
รวมค่าใช้จ่ายการติดตั้งระบบ (บาท)		176,000

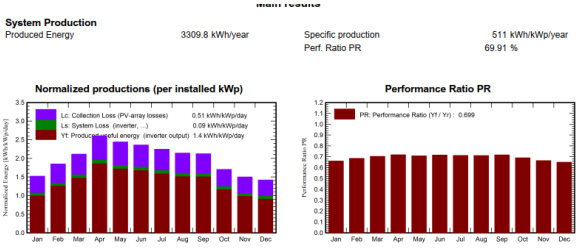
ที่มา : ใบเสนอราคาบริษัทผู้ให้ข้อมูล

ตารางที่ 3 ข้อมูลด้านต้นทุนค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาระบบ

ลำดับ	รายละเอียด	ราคา (บาท/ครั้ง)
ข้อมูลต้นทุนคงที่รวม (Total Fixed Cost)		
1	ค่าดำเนินการบำรุงรักษาและตรวจเช็คอุปกรณ์	1,000.00
ต้นทุนแปรผันรวม (Total Variable Cost)		
2	ค่าดำเนินการเปลี่ยนอินเวอร์เตอร์และอุปกรณ์	25,000.00

ที่มา : ใบเสนอราคาบริษัทผู้ให้ข้อมูล

4. จำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากโปรแกรม PVsyst เพื่อให้การจำลองมีความถูกต้องตามหลักวิชาการและเป็นไปตามมาตรฐานการวิเคราะห์ มาใช้เพื่อหาค่าพลังงานไฟฟ้าที่จะผลิตได้ตลอดปีของระบบ และค่า Performance Ratio โดยจากผลการจำลอง ทำให้ทราบว่า Performance Ratio ของระบบอยู่ที่ 69.91% และคาดว่าจะผลิตไฟได้ 3,309.80 kWh/Year รวมทั้งมีการจำลองผลการผลิตไฟฟ้าในแต่ละเดือน และการวิเคราะห์ทางเทคนิคอื่นๆ



รูปที่ 4 ค่า Performance Ratio ของโครงการอยู่ที่ 69.91%

Balances and main results

	GlobHor kWh/m²	DiffHor kWh/m²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m²	GlobEff kWh/m²	EArray kWh	E_Grid kWh	PR ratio
January	135.9	64.48	27.32	47.21	38.45	218.3	202.4	0.662
February	134.1	77.03	28.68	51.82	43.02	245.2	230.0	0.685
March	159.3	88.01	29.83	65.50	55.54	316.5	298.9	0.704
April	166.0	92.14	30.34	78.15	67.09	382.7	363.7	0.718
May	156.9	83.79	30.30	75.70	64.72	367.3	347.7	0.709
June	141.0	83.03	29.24	70.74	60.84	347.0	328.2	0.716
July	139.1	78.32	29.25	69.56	59.81	340.2	321.2	0.713
August	135.2	81.80	29.06	66.44	57.04	324.9	306.4	0.712
September	123.8	73.44	28.28	63.69	54.77	313.4	295.9	0.717
October	126.6	79.03	28.70	52.82	44.47	252.8	236.2	0.690
November	125.3	66.11	28.17	44.97	36.68	208.3	193.6	0.664
December	133.7	64.74	27.54	44.02	35.43	200.6	185.5	0.650
Year	1677.0	931.92	28.89	730.63	617.88	3517.3	3309.8	0.699

Legends

GlobHor	Global horizontal irradiation	EArray	Effective energy at the output of the array
DiffHor	Horizontal diffuse irradiation	E_Grid	Energy injected into grid
T_Amb	Ambient Temperature	PR	Performance Ratio
GlobInc	Global incident in coll. plane		
GlobEff	Effective Global, corr. for IAM and shadings		

รูปที่ 5 การจำลองผลการผลิตไฟฟ้ารายเดือนจาก โปรแกรม PVsyst

5. ทำการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเทคนิคของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อประเมินศักยภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าของระบบ โดยพิจารณาค่าดัชนีสมรรถนะของระบบ (Performance Ratio: PR) นอกจากนี้ ผลวิเคราะห์การสูญเสียพลังงานในแต่ละขั้นตอนของระบบจากผลการจำลองด้วยโปรแกรม PVsyst สามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบในการจัดทำข้อเสนอแนะเพื่อปรับปรุงและเพิ่มประสิทธิภาพของระบบในอนาคต

6. วิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางการเงินของโครงการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบแนวตั้งบริเวณผนังอาคาร เพื่อประเมินความคุ้มค่าในการลงทุน โดยดำเนินการกำหนดข้อมูลที่จะใช้วิเคราะห์สอดคล้องกับลักษณะการดำเนินงานจริงของโครงการ ดังนี้

ตารางที่ 4 การกำหนดข้อมูลสำหรับการพิจารณาความคุ้มค่าด้านการเงินของผลิตไฟฟ้าแบบแนวตั้ง

ลำดับ	รายละเอียด	แหล่งที่มา
1	ระยะเวลา 25 ปี สอดคล้องกับอายุการใช้งานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	ข้อมูลทางเทคนิคของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
2	โดยใช้อัตราค่าไฟฟ้า 4.4217 บาท/หน่วย ตามอัตราค่าไฟฟ้ากิจการขนาดเล็ก ประเภท 2.1.2 (แรงดันต่ำกว่า 12 กิโลโวลต์)	การไฟฟ้านครหลวง (MEA) [15]
3	อัตราค่าไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 2.32% ต่อปี	สำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (กกพ.) [16]
4	เงินลงทุนเริ่มต้น 176,000 บาท ค่า O&M 2,000 บาท/ปี และค่าเปลี่ยนอินเวอร์เตอร์ 25,000 บาท ในปีที่ 13	ใบเสนอราคาบริษัทเอกชนผู้สนับสนุนข้อมูล
5	ค่าเสื่อมราคา 34,800 บาท/ปี ระยะเวลา 5 ปี	พระราชกฤษฎีกาฯ ฉบับที่ 145 พ.ศ. 2527 [17]
6	อัตราภาษีเงินได้นิติบุคคล 20%	กรมสรรพากร [18]
7	อัตราเงินเฟ้อเฉลี่ย 1.92% ต่อปี	ธนาคารแห่งประเทศไทย [19]
8	กำหนด 8.07% ต่อปี โดย	คำนวณค่าจาก MLR รวมกับอัตราเงินเฟ้อเฉลี่ยต่อปี
9	อัตราดอกเบี้ย MLR 6.150% ต่อปี	ธนาคารอาคารสงเคราะห์ [20]

7. ทำการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของโครงการ (Sensitivity Analysis) เพื่อประเมินว่าการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับ

การลงทุน จะส่งผลต่อความคุ้มค่าทางการเงินของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบแนวตั้งมากน้อยเพียงใด

8. นำผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางการเงินของระบบแนวตั้ง นำมาเปรียบเทียบกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคา ที่มีขนาดกำลังผลิตเทียบเท่ากัน เพื่อศึกษาความแตกต่างในด้านมูลค่าปัจจุบันสุทธิ,อัตราผลตอบแทนภายใน และระยะเวลาคืนทุน เพื่อประเมินความเป็นไปได้ของระบบแนวตั้งที่จะสามารถเป็นทางเลือกที่เหมาะสมเมื่อเทียบกับระบบแนวราบได้หรือไม่

9. สรุปผลการศึกษา เพื่อสรุปความเป็นไปได้ของการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบแนวตั้งบริเวณผนังอาคาร พร้อมทั้งจัดทำข้อเสนอแนะ

4. ผลการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้ได้กำหนดข้อมูลทางการเงินให้ สอดคล้องกับลักษณะการดำเนินงานจริงของโครงการ เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการวิเคราะห์ตัวชี้วัดทางการเงินของโครงการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ โดยกำหนดระยะเวลาการประเมินโครงการตลอดอายุ 25 ปี

โครงการเป็นระบบผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้เองภายในสำนักงาน (Self-consumption) ไม่มีการจำหน่ายไฟฟ้าคืนเข้าสู่ระบบโครงข่ายของการไฟฟ้า ดังนั้น ผลประหยัดของโครงการจึงเป็นการประหยัดค่าไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการทดแทนการใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้า โดยกำหนดอัตราค่าไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 4.4217 บาทต่อหน่วย ผลประหยัดที่ได้จากปริมาณการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ผ่านการจำลองด้วยโปรแกรม PVsyst (Performance Raio ร้อยละ 69.91 ผลิตไฟฟ้าได้ 3,309.80 kWh/Year) อยู่ที่ 14,634.50 บาท/ปี ทั้งนี้ กำหนดให้อัตราค่าไฟฟ้ามีการปรับเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 2.32 ต่อปี จากการ คำนวณจากข้อมูลสถิติอัตราค่าไฟฟ้าฐานและค่า Ft ในช่วงปี พ.ศ. 2525-2567 ของสำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (กกพ.) เพื่อสะท้อนแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของต้นทุนพลังงาน

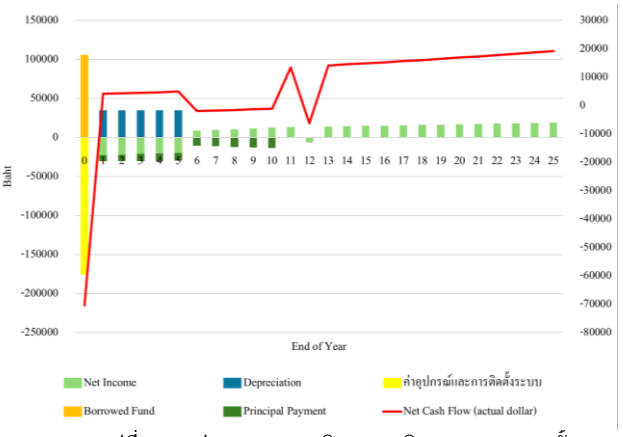
ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนผนังอาคาร มีค่าใช้จ่ายเงินลงทุนเริ่มต้นรวม 176,000 บาท ครอบคลุมค่าอุปกรณ์หลัก ได้แก่ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Panels) อินเวอร์เตอร์ (Inverter) โครงสร้างรองรับแผง อุปกรณ์อื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง และค่าแรงติดตั้ง นอกจากนี้ โครงการได้กำหนดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและบำรุงรักษา (ค่าใช้จ่ายในการทำความสะอาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์และการตรวจสอบระบบ) เท่ากับ 2,000 บาทต่อปี เพื่อรักษาประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าให้คงที่ตลอดอายุโครงการ รวมทั้ง ค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนอินเวอร์เตอร์ในปีที่ 13 ของโครงการ จำนวน 25,000 บาท เนื่องจากอินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ที่มีอายุการใช้งานสั้นกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์และอุปกรณ์อื่นๆ ของระบบทำให้ต้องมีการเปลี่ยนเพื่อคงประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า

ทั้งนี้ งานวิจัยนี้ได้มีการคำนวนค่าเสื่อมราคาของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Depreciation) โดยวิธีการคำนวณแบบเส้นตรง (Straight-Line Method) อยู่ที่ 34,800 บาทต่อปี เป็นระยะเวลา 5 ปี โดยอ้างอิงตามหลักเกณฑ์ที่กำหนดในพระราชกฤษฎีกา ฉบับที่ 145 พ.ศ. 2527 และกำหนดให้อัตราเงินเฟ้อเท่ากับร้อยละ 1.92 ต่อปี โดยคำนวณจากดัชนีราคาผู้บริโภคทั่วไป ในช่วงระยะเวลาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2541 ถึง 2566 โดยอ้างอิงข้อมูลจากธนาคารแห่งประเทศไทย เพื่อใช้สะท้อนแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของระดับราคาสินค้าและบริการในระบบเศรษฐกิจ และนำมาใช้ประกอบการวิเคราะห์ทางการเงินของโครงการอย่างเหมาะสม

งานวิจัยฉบับนี้ กำหนดอัตราผลตอบแทนขั้นต่ำที่ยอมรับได้ (MARR) เท่ากับร้อยละ 8.07 ต่อปี โดยอัตราดังกล่าว คำนวณจากผลรวมของอัตราดอกเบี้ยเงินกู้ขั้นต่ำ (MLR) และอัตราเงินเฟ้อ ทั้งนี้ กำหนดค่า MARR เพื่อให้การประเมินความคุ้มค่าทางการเงินมีความเหมาะสมและสอดคล้องกับสภาวะเศรษฐกิจในปัจจุบัน

โครงการได้กำหนดสัดส่วนเงินลงทุนโดยใช้เงินกู้ในอัตราร้อยละ 60 ของมูลค่าเงินลงทุนทั้งหมด โดยกำหนดอัตราดอกเบี้ยเงินกู้ขั้นต่ำ (Minimum Loan Rate: MLR) เท่ากับร้อยละ 6.150 ต่อปี และกำหนดระยะเวลาการชำระคืนเงินกู้ภายในระยะเวลา 10 ปี ตามรายละเอียดการกู้เงินเพื่อการติดตั้งโซลาร์เซลล์ของธนาคาร

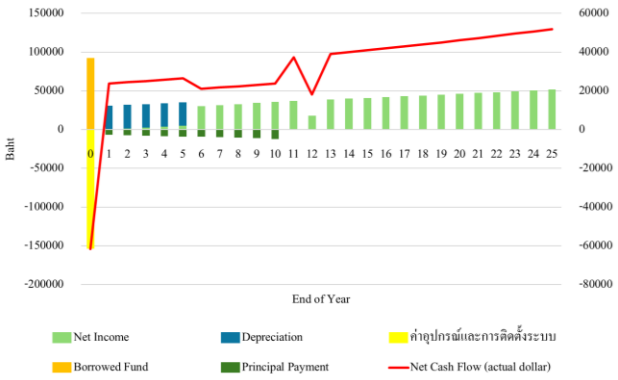
จากข้อมูลข้างต้น ผู้วิจัยได้นำข้อมูลมาวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือ Microsoft Excel ทำให้ได้ผลการวิจัย ดังนี้



รูปที่ 5 กราฟแสดงกระแสเงินสดสุทธิ ระบบแบบแนวตั้ง

ผลการวิเคราะห์ด้านการเงินของระบบผลิตไฟฟ้าแบบแนวตั้ง พบว่ามีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) เท่ากับ -3,215.48 บาท ที่ MARR ร้อยละ 8.07 และมีอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) เท่ากับร้อยละ 7.72 ระยะเวลาคืนทุนประมาณ 15 ปี ซึ่งถือว่าไม่คุ้มค่าในการลงทุน

ทางผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลการลงทุนของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลัง เพื่อนำมาใช้ในการศึกษาความเป็นไปได้ทางการเงินสำหรับเปรียบเทียบกับระบบแบบแนวตั้ง โดยได้ดำเนินการจำลองระบบ ด้วยโปแกรม PVsyst พบว่า ระบบแบบติดตั้งบนหลังคา มีค่า Performance Ratio อยู่ที่ร้อยละ 81.19 และผลิตไฟฟ้าได้ 8,526.50 kWh/year ทำให้มีผลประหยัดอยู่ที่ 37,701.18 บาท/ปี และค่าใช้จ่ายเงินลงทุนของระบบ 154,000 บาท เมื่อนำมาวิเคราะห์โดยใช้เงื่อนไขทางการเงินเดียวกับระบบแบบแนวตั้ง ได้ผลการวิเคราะห์ ดังนี้



รูปที่ 6 กราฟแสดงกระแสเงินสดสุทธิ ระบบแบบติดตั้งบนหลังคา

ผลการวิเคราะห์ด้านการเงินของระบบผลิตไฟฟ้าแบบติดตั้งบนหลังคา พบว่ามีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) เท่ากับ 258,110.86 บาท ที่ MARR ร้อยละ 8.07 และมีอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) เท่ากับร้อยละ

40.02 ระยะเวลาคืนทุนประมาณ 3 ปี ซึ่งถือว่าคุ้มค่าในการลงทุนกว่าระบบแนวตั้งอย่างเห็นได้ชัด

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบตัวชี้วัดทางการเงินของทั้ง 2 ระบบ

ตัวชี้วัดทางการเงิน	ติดตั้งแบบแนวตั้ง	ติดตั้งบนหลังคา
NPV (บาท)	-3,215.48	258,110.86
IRR (%)	7.72	40.02
ระยะเวลาคืนทุน (ปี)	15.39	3.13

ทั้งนี้ หากต้องการให้ระบบแบบแนวตั้ง มีความคุ้มทุนจำเป็นต้องมีรายได้จากผลประหยัดอยู่ที่ 14,937.65 บาท

5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษา พบว่าระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคามีประสิทธิภาพและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สูงกว่าระบบแบบแนวตั้งบนผนังอาคารอย่างชัดเจน ทั้งในด้านค่า PR และตัวชี้วัดทางการเงิน อย่างไรก็ตาม ระบบแนวตั้งยังมีข้อได้เปรียบในด้านการใช้พื้นที่ผนังอาคาร โดยเฉพาะในเขตชุมชนเมืองที่มีข้อจำกัดด้านพื้นที่หลังคา แม้ว่าผลการวิเคราะห์จะไม่คุ้มค่าการลงทุน แต่รายได้จากการจำลองมีแนวโน้มใกล้เคียงจุดคุ้มทุน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหากมีการปรับปรุงบางปัจจัย ระบบก็มีโอกาสคุ้มค่ามากขึ้นในอนาคต ทั้งนี้ ปัจจัยสำคัญที่ควรพิจารณา ได้แก่ การเลือกทิศทางและมุมการติดตั้งให้เหมาะสม การลดผลกระทบจากเงาบัง และการเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูง รวมถึงการออกแบบให้ระบบเป็นส่วนหนึ่งของอาคาร ก็จะสามารถช่วยลดต้นทุนโครงสร้างได้ นอกจากนี้ การสนับสนุนจากภาครัฐ เช่น เงินอุดหนุน สิทธิประโยชน์ทางภาษี หรือมาตรการสินเชื่อดอกเบี้ยต่ำ ก็จะช่วยลดต้นทุนของระบบ และทำให้เกิดความคุ้มทุนได้

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลือจากหลายท่าน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูง สำหรับคำแนะนำ แนวคิด และการตรวจสอบแก้ไขงานอย่างต่อเนื่องจนทำให้งานวิจัยฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น บริษัท เลเซอร์ กรุ๊ป 8 จำกัด รวมถึงหน่วยงานและแหล่งข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ที่สนับสนุนข้อมูลและเครื่องมือในการศึกษา สุดท้าย ผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทั้งทางตรงละทางอ้อมจนทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, “สถานการณ์พลังงาน 2567 แนวโน้ม 2568,” 2025.

[2] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561–2580 (AEDP2018), 2018.

[3] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, รายงานพลังงานทดแทน 2566, 2025.

[4] มหาวิทยาลัยศิลปากร, “รายงานพัฒนาปรับปรุงแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์จากภาพถ่ายดาวเทียมสำหรับประเทศไทย,” 2022.

[5] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, “เซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย (PV grid-connected system),” Apr. 2, 2023. [Online]. Available: https://www.dede.go.th/articles?id=476&menu_id=17

[6] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, “เซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV stand-alone system),” Apr. 2, 2023. [Online]. Available: https://www.dede.go.th/articles?id=475&menu_id=17

[7] Solar D, “เจาะลึกการใช้โซลาร์เซลล์ร่วมกับไฟบ้าน 3 แบบแตกต่างกันอย่างไร,” Jun. 15, 2023. [Online]. Available: https://www.solar-d.co.th/blog/solar-cell-on-grid-off-grid-hybrid

[8] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน ชุดที่ 2 พลังงานแสงอาทิตย์, 2011.

[9] SolarEdge Thailand, “อินเวอร์เตอร์ออนกริด (On-grid inverter) มีข้อดี-ข้อเสียอะไรบ้าง,” Apr. 18, 2025. [Online]. Available: https://www.solaredge.com/th/solaredge-blog/on-grid-inverter

[10] SolarEdge Thailand, “อินเวอร์เตอร์โซล่าเซลล์ คืออะไร มีหน้าที่สำคัญแค่ไหน?,” Dec. 16, 2024. [Online]. Available: https://www.solaredge.com/th/solaredge-blog/solar-cell-inverter

[11] อาจารย์กวินชัย ต้องตรงทรัพย์, “การใช้งานโปรแกรม PVSYST เบื้องต้น,” 2021.

[12] G. Kellogg, “What is PVsyst? Comprehensive Guide 2023,” Sep. 1, 2023. [Online]. Available: https://www.partneresi.com/resources/articles/what-is-pvsyst-comprehensive-guide-2023/

[13] อิทธิเดช ภู่นันทพงษ์, “การศึกษาความเป็นไปได้ของระบบไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา สำหรับภาคประชาชนประเภทบ้านอยู่อาศัย,” 2019. [Online]. Available: https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd/6961

[14] TERRA BKK, “นานเท่าไหร่กว่าการลงทุนครั้งนี้จะคืนทุน,” Jun. 20, 2017. [Online]. Available: https://www.terrabkk.com/articles/27111

[15] การไฟฟ้านครหลวง, “อัตราค่าไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ,” Jan. 12, 2023. [Online]. Available: https://www.mea.or.th/our-services/tariff-calculation/other

[16] สำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (กกพ.), “อัตราค่าบริการไฟฟ้า [Online]. Available: https://www.erc.or.th/th/electricity-service-rate

[17] พระราชกฤษฎีกาออกตามความในประมวลรัษฎากร ว่าด้วยการกำหนดหลักเกณฑ์ วิธีการ เงื่อนไข และอัตราการหักค่าสึกหรอและค่าเสื่อมราคาของทรัพย์สิน (ฉบับที่ 145) พ.ศ. 2527, [Online]. Available: https://thaitaxlaw.com/code/2369.0.html

[18] กรมสรรพากร, “อัตราภาษีและการคำนวณภาษี,” [Online]. Available: https://www.rd.go.th/841.html

[19] ธนาคารแห่งประเทศไทย, “เครื่องชี้เศรษฐกิจมหภาคของไทย,” [Online]. Available: https://app.bot.or.th/BTWS_STAT/statistics/ReportPage.aspx?reportID=409&language=th

[20] ธนาคารอาคารสงเคราะห์, “อัตราดอกเบี้ยสินเชื่อ,” [Online]. Available:https://www.ghbank.co.th/information/interest-rate/loan/

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 9
Proceedings of the 9th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การพัฒนาโมเดลธุรกิจสำหรับเทคโนโลยีพลังงานหมุนเวียนต้นแบบชีวมวล กรณีศึกษาวัสดุทางการเกษตร

Business Model Development for Prototype Biomass Renewable Energy Technology: A Case Study of Agricultural Materials

ภาลินี ทำนุทัศน์[1*] และ วีรินทร์ หวังจิรนิรันดร์[2]
[1]สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน (สหสาขาวิชา) วิทยาลัยสหศาสตร์บูรณาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
อาคารเฉลิมราชกุมารี 60 พรรษา (จามจุรี 10) ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กทม. 10330 Email: 6682018320@student.chula.ac.th
[2]สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
อาคารสถาบัน 3 ชั้น 12 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330 Email: weerin.w@chula.ac.th

บทคัดย่อ

ชีวมวลถือเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีศักยภาพสูงสำหรับประเทศไทย เนื่องจากมีวัตถุดิบเหลือใช้ทางการเกษตรในปริมาณมาก ในปัจจุบันชีวมวลส่วนใหญ่ถูกใช้ผ่านการเผาไหม้โดยตรง ทำให้ชีวมวลจำนวนมากไม่ได้ถูกสร้างมูลค่าเพิ่ม และเพิ่มการเผาทำลายในที่โล่ง การวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโมเดลธุรกิจสำหรับระบบผลิตถ่านชีวภาพจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในพื้นที่ตำบลผาปัง อำเภอแม่พริก จังหวัดลำปาง โดยประยุกต์ใช้กรอบแนวคิด Business Model Canvas (BMC) ร่วมกับการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางการเงินด้วยมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ผลการศึกษาพบว่าโมเดลธุรกิจประกอบด้วย 9 องค์ประกอบหลักตาม BMC โดยมีกลุ่มลูกค้าเป้าหมายเป็นชุมชนและผู้ประกอบการในท้องถิ่น ด้วยราคาจำหน่ายถ่านชีวภาพในราคา 20 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งต่ำกว่าราคาตลาด และในด้านความเป็นไปได้ทางการเงิน โครงการมี CAPEX 232,097 บาท, OPEX 1,281,411.74 บาทต่อปี รายได้รวมประมาณ 2,284,800 บาทต่อปี และ NPV เท่ากับ 7,143,377.68 บาท ตลอดอายุโครงการ 10 ปี ที่อัตราคิดลดร้อยละ 6 แสดงให้เห็นว่าโครงการมีความคุ้มค่าทางการเงินและสามารถดำเนินธุรกิจได้จริงในระดับชุมชน นอกจากนี้ โมเดลธุรกิจที่พัฒนาขึ้นยังก่อให้เกิดประโยชน์ร่วมทั้งในด้านสิ่งแวดล้อมและสังคม ได้แก่ การลดการเผาเศษวัสดุเกษตรในที่โล่ง, การลดปัญหา $PM_{2.5}$ และการสร้างรายได้ให้แก่ชุมชน ทั้งนี้ การนำไปประยุกต์ใช้ในพื้นที่อื่นควรมีการศึกษาศักยภาพของวัตถุดิบชีวมวลในท้องถิ่นและความพร้อมของชุมชนก่อนการลงทุน รวมถึงพิจารณาการขยายแหล่งรายได้จากคาร์บอนเครดิตเพื่อเพิ่มความยั่งยืนในระยะยาว

คำสำคัญ : ถ่านชีวภาพ; โมเดลธุรกิจ; มูลค่าปัจจุบันสุทธิ; พลังงานหมุนเวียนชุมชน

Abstract

Biomass is considered a high-potential renewable energy source for Thailand, given the large availability of agricultural residues. However, most biomass is currently utilized through direct combustion, leaving substantial biomass resources without added value and increasing open burning. This research therefore aims to develop a business model for a biochar production system utilizing agricultural residues in Pha Pang Sub-district, Mae Phrik District, Lampang Province, by applying the Business Model Canvas (BMC) framework combined with Net Present Value (NPV) analysis to assess financial feasibility. The results indicate that the business model comprises nine key components of the BMC, with target customers being local communities and small enterprises, offering biochar at 20 THB/kg, which is below the market rate. In terms of financial feasibility, the project requires a CAPEX of 232,097 THB, an annual OPEX of 1,281,411.74 THB, and projected annual revenue of approximately 2,284,800 THB, with an NPV of 7,143,377.68 THB over a 10-year project life at a 6% discount rate, confirming that the project is financially viable and practically implementable at the community level. Furthermore, the developed business model generates environmental and social co-benefits, including reduced open burning of agricultural waste, mitigation of $PM_{2.5}$ pollution, and income generation for local communities. For replication in other areas, it is recommended that the availability of local biomass feedstocks and community readiness be assessed prior to investment, and that carbon credit revenue streams be explored to enhance long-term sustainability.

Keywords: Biochar; Business Model Canvas; Net Present Value; Community Renewable Energy

1. บทนำ

ในบริบทของประเทศไทย พลังงานสะอาดได้รับความสำคัญเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเพื่อสนับสนุนการเปลี่ยนผ่านพลังงาน (Energy Transition) และการบรรลุเป้าหมาย Net Zero โดยพลังงานสะอาดของประเทศไทยประกอบด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ ขยะและพลังงานชีวมวล ซึ่งชีวมวลถูกใช้ในการผลิตไฟฟ้ามากที่สุด เนื่องจากมีความเสถียรและยืดหยุ่นด้านการผลิตมากกว่าเชื้อเพลิงหมุนเวียนประเภทอื่น ๆ รวมถึงยังมีความพร้อมทางด้านวัตถุดิบ เพราะประเทศไทยเป็นแหล่งผลิตสินค้าเกษตรจำนวนมากและเหลือใช้ในปริมาณมหาศาล เช่น แกลบ ชานอ้อย ฟางข้าว ซังข้าวโพด เศษไม้ และกิ่งไม้ [1] ทั้งนี้ ปัจจุบันชีวมวลยังถูกใช้ในระดับอุตสาหกรรมและครัวเรือนส่วนใหญ่ผ่านการเผาไหม้โดยตรง ขณะที่เทคโนโลยีขั้นสูง เช่น การผลิตก๊าซสังเคราะห์ (Syngas) การผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลขนาดเล็ก และการผลิตถ่านชีวภาพ (Biochar) ยังมีการลงทุนจำกัด ทำให้ทรัพยากรชีวมวล

จำนวนมากไม่ได้สร้างมูลค่าเพิ่มและถูกเผาทำลายในที่โล่ง ก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศ ($PM_{2.5}$) และการสูญเสียโอกาสทางเศรษฐกิจ

ตำบลผาปัง อำเภอแม่พริก จังหวัดลำปาง เป็นพื้นที่ที่มีทรัพยากรชีวมวลจากไผ่และเศษวัสดุการเกษตรยังไม่ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างเต็มศักยภาพ ขณะเดียวกันชุมชนยังคงพึ่งพาพลังงานจากภายนอกและมีต้นทุนค่าใช้จ่ายด้านพลังงานสูง อีกทั้งยังมีการเผาทำลายเศษวัสดุการเกษตร ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของปัญหามลพิษทางอากาศและการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยไผ่ถือเป็นวัสดุการเกษตรหลักในพื้นที่ (คิดเป็นประมาณ 70–80% ของวัตถุดิบทั้งหมด) เนื่องจากมีพื้นที่ป่าไผ่มากถึง 11,206 ไร่ แต่การพึ่งพาวัสดุการเกษตรเพียงชนิดเดียวก่อให้เกิดความเสี่ยงด้านความมั่นคงของห่วงโซ่อุปทาน (Supply Chain) ดังนั้น การศึกษาศักยภาพของวัสดุทางการเกษตรอื่น ๆ ที่มีในท้องถิ่น เช่น ฟางข้าว แกลบ และเศษไม้ ทั้งในแง่ของคุณสมบัติทางเทคนิค ความพร้อมในการจัดหา และต้นทุน จะช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นและความยั่งยืนของระบบการผลิตพลังงาน รวมถึงสร้างความมั่นคงของโมเดลธุรกิจในระยะยาว มูลนิธิวิสาหกิจพลังงานชุมชน (วิสาหกิจเพื่อสังคม) ได้มีการพัฒนานวัตกรรมต้นแบบผลิตพลังงานชีวมวลสังเคราะห์ (Syngas) โดยเปลี่ยนการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลจากเศษวัตถุดิบโดยตรง ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) ในภาวะที่ไม่มีออกซิเจน เพื่อแปรรูปเชื้อเพลิงชีวมวลให้เป็นถ่านชีวภาพ (Biochar) ซึ่งเป็นโอกาสสำคัญในการเพิ่มความมั่นคงทางพลังงานของชุมชน ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และสร้างมูลค่าเพิ่มจากผลผลิตพลอยได้ นอกจากนี้ ยังก่อให้เกิดผลประโยชน์ทางสังคมที่สำคัญหลายประการ เช่น การสร้างงานและรายได้ให้แก่คนในพื้นที่ การลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของครัวเรือนผ่านการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลและถ่านชีวภาพทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล การพัฒนาทักษะและเสริมสร้างศักยภาพของวิสาหกิจพลังงานชุมชน ตลอดจนการลดการพึ่งพาพลังงานจากภายนอก อย่างไรก็ตาม การนำนวัตกรรมดังกล่าวไปใช้เชิงพาณิชย์ยังขาดรูปแบบการลงทุนและโมเดลธุรกิจที่ชัดเจน ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นถึงความจำเป็นในการศึกษาพัฒนาโมเดลธุรกิจสำหรับนวัตกรรมต้นแบบผลิตพลังงานชีวมวล โดยบูรณาการแนวคิด BCG Economy Model เพื่อตอบโจทย์การใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า สร้างรายได้ให้แก่ชุมชน ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และสนับสนุนการเปลี่ยนผ่านสู่พลังงานสะอาดของชุมชนและประเทศอย่างยั่งยืน

2. แนวคิด และทฤษฎี

2.1 กระบวนการเกิดไพโรไลซิสแบบช้า (Slow pyrolysis)

กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า คือ กระบวนการถ่ายเทความร้อนให้แก่ชีวมวลอย่างช้า ๆ โดยอุณหภูมิการไพโรไลซิสอยู่ในช่วง 400 – 600 องศาเซลเซียส และอัตราการให้ความร้อนไม่เกิน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที รักษาอุณหภูมิการไพโรไลซิสมากกว่า 5 นาทีขึ้นไป [2] โดยลำดับการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสแบบช้าที่เกิดขึ้นในระบบสามารถแบ่งได้ ดังต่อไปนี้ 1) ณ อุณหภูมิ 20 -100 องศาเซลเซียส ชีวมวลจะดูดซับความร้อน ความชื้นภายในชีวมวล จะถูกขับออกจากชีวมวลกลายเป็นไอน้ำ จนชีวมวลแห้งสนิท, 2) ณ อุณหภูมิ 100 - 250 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของชีวมวล ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำและกรดอะซิติก, 3) ณ อุณหภูมิ 250 -500 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของชีวมวล ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนและมีเทน รวมถึงของเหลวทาร์ (Liquid tar) และ 4) ณ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสขึ้นไป เกิดปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ถ่านชีวภาพ (Biochar)

2.2 ระบบการผลิตถ่านเชื้อเพลิงสังเคราะห์และไบโอชาร์ ขนาดกำลังการผลิต 2,000 กิโลกรัม/รอบ

เป็นชนิดของเตาปฏิกรณ์การผลิตถ่านชีวภาพไบโอชาร์ (Biochar) และเชื้อเพลิงก๊าซสังเคราะห์ (Synthetics gas) ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (Slow pyrolysis) คือ กระบวนการทางเคมีความร้อนที่เปลี่ยนรูปของชีวมวล เป็นเชื้อเพลิงพลังงานที่มีค่าความร้อนสูงขึ้น ได้แก่ ถ่าน (Charcoal) น้ำมัน (Bio-Oil) และก๊าซไม่กลั่นตัว (Non-Condensable Gas) โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิปานกลาง 400-600 องศาเซลเซียส โดยสัดส่วนของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ สภาวะในการทำปฏิกิริยา ลักษณะของวัตถุดิบที่ใช้เป็นสารตั้งต้น โดยนวัตกรรมต้นแบบระบบการผลิตถ่านเชื้อเพลิงสังเคราะห์และไบโอชาร์ เป็นการออกแบบชนิดของเตาปฏิกรณ์คาร์บอนไนเซชั่นไพโรไลซิส (Carbonization Pyrolysis) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนในระยะเวลานาน โดยใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมง จะเกิดแก๊สไม่กลั่นตัว แก๊สส่วนใหญ่จากกระบวนการไพโรไลซิส ประกอบด้วย ไฮโดรเจน (H_2), มีเทน (CH_4), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โดยทั่วไปจะนำกลับมาเผาไหม้ เพื่อให้ความร้อนในกระบวนการ [3]



รูปที่ 1 ระบบการผลิตถ่านเชื้อเพลิงสังเคราะห์และไบโอชาร์

2.3 Business Model Canvas (BMC)

Business Model Canvas (BMC) เป็นเครื่องมือเชิงกลยุทธ์ที่พัฒนาโดย Alexander Osterwalder และ Yves Pigneur เพื่อใช้ในการอธิบาย ออกแบบ และวิเคราะห์รูปแบบการดำเนินงานของธุรกิจหรือโครงการ ผ่านองค์ประกอบสำคัญ 9 ส่วน ได้แก่ กลุ่มลูกค้า คุณค่าเสนอ ช่องทาง ความสัมพันธ์กับลูกค้า กระแสรายได้ ทรัพยากรหลัก กิจกรรมหลัก พันธมิตรหลัก และโครงสร้างต้นทุน โดยการนำเสนอในรูปแบบแผนภาพบนหน้ากระดาษเพียงหนึ่งหน้า ช่วยให้ผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทั้งภายในและภายนอกองค์กรสามารถสื่อสารและเข้าใจตรงกันได้อย่างชัดเจน ตลอดจนทำให้ผู้ประกอบการหรือผู้บริหารมองเห็นภาพรวมของธุรกิจได้ครบถ้วน สามารถระบุจุดแข็ง จุดอ่อน และปรับกลยุทธ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงานได้อย่างมีประสิทธิผลและทันต่อสถานการณ์ อีกทั้งยังเป็นที่นิยมใช้ในระดับสตาร์ทอัพไปจนถึงองค์กรขนาดใหญ่ทั่วโลก [4-5]

2.4 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

2.4.1 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV)

เป็นตัวชี้วัดที่สะท้อนถึงความมั่งคั่งที่ผู้ลงทุนได้รับจากการดำเนินโครงการที่นำมาพิจารณา การตัดสินใจลงทุนควรพิจารณารับเฉพาะโครงการที่มีค่า NPV เป็นบวก ภายใต้การคำนวณด้วยอัตราคิดลด (discount rate) ซึ่งสะท้อนถึงต้นทุนเงินทุนเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักของโครงการ (Weighted Average Cost of Capital: WACC) ทั้งนี้ โดยหลักปฏิบัติทั่วไป กฎการตัดสินใจเมื่อใช้ NPV เป็นเกณฑ์ในการประเมินโครงการ จะเหมาะสมในกรณีที่โครงการดังกล่าวเป็นโครงการอิสระ (independent project) และไม่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากร ในการประเมินค่าโครงการตามปกติ จะใช้ค่าปัจจุบันสุทธิ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$NPV = \sum_{t=0}^{t=T} \frac{CF_t}{(1+DC)^t} \quad (1)$$

โดยที่ DC = อัตราคิดลด
CF_t = กระแสเงินสดสุทธิในปีที่ t
t = ปีที่ t (t = 1, 2, ..., 10)
T = อายุโครงการ (10 ปี)

2.4.2 อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR)

เป็นเกณฑ์การประเมินโครงการลงทุนที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน โดยเฉพาะสำหรับโครงการที่มีลักษณะปกติ กล่าวคือ ใช้เงินลงทุนส่วนใหญ่ในช่วงเริ่มต้น และต่อมาได้รับผลตอบแทนในรูปของกระแสเงินสดรับสุทธิอย่างต่อเนื่องจนสิ้นสุดโครงการ ทั้งนี้ การใช้เกณฑ์ IRR จะพิจารณาว่า หากค่า IRR ของโครงการสูงกว่าอัตราผลตอบแทนขั้นต่ำที่ผู้ลงทุนยอมรับได้ ย่อมถือว่าควรตัดสินใจลงทุนในโครงการนั้น ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$IRR = \left\{ x \left| \sum_{t=0}^{t=T} \frac{CF_t}{(1+x)^t} = 0 \right. \right\} \quad (2)$$

โดยที่ x = อัตราผลตอบแทนที่ทำให้ผลรวมทั้งหมดเป็นศูนย์
CF_t = กระแสเงินสดสุทธิในปีที่ t
t = ปีที่ t (t = 1, 2, ..., 10)
T = อายุโครงการ (10 ปี)

2.4.3 ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period: PB)

ระยะเวลาที่กระแสเงินสดสุทธิจากการดำเนินโครงการสะสมจนเพียงพอที่จะทำให้ผู้ลงทุนได้รับเงินทุนที่ได้จ่ายไปในช่วงเริ่มต้นกลับคืนมาทั้งหมด ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$PB = \frac{Initial\ Investment}{Annual\ Payback} \quad (3)$$

โดยที่ Initial Investment = เงินลงทุนเริ่มต้น
Annual Payback = กระแสเงินสดสุทธิที่ได้รับต่อปี

2.4.4 อัตราคิดลด (Discount Rate)

อัตราคิดลดที่ใช้ในการศึกษานี้คำนวณจากต้นทุนทางการเงินถัวเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก (Weighted Average Cost of Capital: WACC) ซึ่งสะท้อนโครงสร้างเงินทุนของโครงการที่ประกอบด้วยทั้งส่วนทุน (Equity) และเงินกู้ยืม (Debt) ดังแสดงในสมการที่ (4)

$$WACC = \left(\frac{E}{V} \times Re\right) + \left(\frac{D}{V} \times Rd \times (1-T)\right) \quad (4)$$

โดยที่ E = มูลค่าของเงินทุนส่วนของเจ้าของ
D = มูลค่าของเงินกู้ยืม
V = E + D = มูลค่าเงินทุนรวม
Re = ต้นทุนของเงินทุนส่วนของเจ้าของ
Rd = ต้นทุนของเงินกู้ยืม และ
T = อัตราภาษีเงินได้นิติบุคคล

3. ระเบียบวิธีการวิจัย

3.1 การรวบรวมข้อมูลคุณสมบัติทางเทคนิคของนวัตกรรมต้นแบบและวัตถุดิบ

รวบรวมข้อมูลคุณสมบัติทางเทคนิค ต้นทุน และรายได้ของระบบการผลิตถ่านเชื้อเพลิงสังเคราะห์และไบโอชาร์จากแหล่งข้อมูลปฐมภูมิและทุติยภูมิที่เกี่ยวข้องกับการประกอบธุรกิจเทคโนโลยีต้นแบบผลิตพลังงานชีวมวล ได้แก่ รายงานการดำเนินโครงการศึกษา พัฒนานวัตกรรมและสาธิตต้นแบบ การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรฐานชีวภาพที่มีอยู่ในท้องถิ่นชุมชน เพื่อเป็นพลังงานชีวมวลสังเคราะห์ ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล ของมูลนิธิพัฒนาชุมชนผาปัง (วิสาหกิจเพื่อสังคม), งานวิจัยทางวิชาการทั้งในและต่างประเทศตลอดจนเอกสารจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

3.2 การวิเคราะห์และออกแบบโมเดลธุรกิจด้วยกรอบแนวคิด Business Model Canvas (BMC)

การวิจัยนี้ประยุกต์ใช้กรอบแนวคิด Business Model Canvas (BMC) ในการออกแบบและวิเคราะห์โมเดลธุรกิจสำหรับระบบการผลิตถ่านเชื้อเพลิงสังเคราะห์และไบโอชาร์ โดยกรอบแนวคิดดังกล่าวครอบคลุมองค์ประกอบสำคัญ 9 ประการ ได้แก่ (1) กลุ่มลูกค้า (Customer Segments) (2) คุณค่าของสินค้าและบริการ (Value Propositions) (3) ช่องทางการเข้าถึงลูกค้า (Channels) (4) ความสัมพันธ์กับลูกค้า (Customer Relationships) (5) รายรับ (Revenue Streams) (6) ทรัพยากรหลัก (Key Resources) (7) กิจกรรมหลัก (Key Activities) (8) พันธมิตรหลัก (Key Partners) และ (9) โครงสร้างต้นทุน (Cost Structure)

3.3 การกำหนดสมมติฐานทางการเงิน

3.3.1 ต้นทุนการลงทุน (CAPEX)

ต้นทุนการลงทุน (CAPEX) ของระบบการผลิตถ่านเชื้อเพลิงสังเคราะห์และไบโอชาร์พิจารณาจากองค์ประกอบหลักของอุปกรณ์และวัสดุก่อสร้างที่ใช้ในการพัฒนาระบบ ครอบคลุมต้นทุนโครงสร้างหลัก อุปกรณ์การผลิต และส่วนประกอบที่เกี่ยวข้องกับการติดตั้ง

3.3.2 ต้นทุนการดำเนินการ (OPEX)

ต้นทุนการดำเนินการ (OPEX) ของโครงการพิจารณาจากค่าใช้จ่ายหลักในกระบวนการผลิต ประกอบด้วย ค่าวัตถุดิบ ค่าขนส่ง ค่าแรงงาน ค่าอุปกรณ์บรรจุหีบห่อ ค่าไฟฟ้า และค่าเสื่อมราคาของเครื่องจักร

ตารางที่ 1 ต้นทุนการดำเนินการ (OPEX) ของโครงการ

ลำดับ	รายละเอียด	ราคา (บาท/ปี)	แหล่งที่มา
1	ค่าวัตถุดิบ	336,000.00	ราคาซื้อขายวัสดุทางการเกษตรของมูลนิธิวิสาหกิจชุมชน [3]
2	ค่าขนส่ง (ซื้อวัตถุดิบ)	18,018.00	คำนวณจากราคาน้ำมันดีเซล [6] และระยะทางจากโครงการไป-กลับพื้นที่ต.นาโป่ง 30 กม
3	ค่าแรงงานเผาถ่าน	67,200.00	ค่าแรงตามมูลนิธิวิสาหกิจชุมชน [3]
4	ค่าแรงงานบรรจุหีบห่อ	67,200.00	ค่าแรงตามมูลนิธิวิสาหกิจชุมชน [3]
5	ค่าอุปกรณ์บรรจุหีบห่อ	26,460.00	ราคาอ้างอิงตามมูลนิธิวิสาหกิจชุมชน [3]
6	ค่าขนส่ง (ขายผลิตภัณฑ์)	18,018.00	คำนวณจากราคาน้ำมันดีเซล [6] และระยะทางจากโครงการไป-กลับพื้นที่ต.นาโป่ง 30 กม
7	ผู้จัดการ	420,000.00	Gemini Personnel Group Limited [7]
8	วิศวกรควบคุม	300,000.00	Gemini Personnel Group Limited [7]
9	ค่าไฟฟ้า	5,306.04	คำนวณจากหน่วยการใช้ไฟฟ้า และค่าพลังงานไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [8]
10	ค่าเสื่อมราคาเตา	23,209.70	คำนวณจาก CAPEX = 232,097 บาท หารด้วยอายุโครงการ 10 ปี
รวมค่าใช้จ่าย (บาท/ปี)		1,281,411.74	

3.3.4 การประมาณการรายได้

รายได้ของระบบการผลิตถ่านเชื้อเพลิงสังเคราะห์และไบโอชาร์มาจากการจำหน่ายผลิตภัณฑ์ถ่านชีวภาพโดยตรง โดยกำลังการผลิตถ่านอยู่ที่ 680 กิโลกรัมต่อรอบ จากวัตถุดิบ 2,000 กิโลกรัม ในอัตรา 14 รอบต่อเดือน ที่ราคาจำหน่าย 20 บาทต่อกิโลกรัม

3.4 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางการเงิน

การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางการเงินของระบบการผลิตถ่านเชื้อเพลิงสังเคราะห์และไบโอชาร์ดำเนินการโดยใช้มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) เป็นเครื่องมือหลักในการประเมินความคุ้มค่าของการลงทุน NPV คำนวณโดยการนำกระแสเงินสดสุทธิในแต่ละปีตลอดอายุโครงการ 10 ปี มาคิดลดด้วยอัตราคิดลดร้อยละ 6 ต่อปี

ตารางที่ 2 ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางการเงิน

ลำดับ	รายละเอียด	แหล่งที่มา
1	อัตราดอกเบี้ย 7.5% ต่อปี	SME D Bank [9]
2	อัตราภาษีเงินได้นิติบุคคล 20%	กรมสรรพากร [10]

4. ผลการศึกษา

4.1 การพัฒนาโมเดลธุรกิจโดยใช้ Business Model Canvas (BMC)

Business Model Canvas (BMC) สำหรับระบบการผลิตถ่านเชื้อเพลิงสังเคราะห์ และถ่านชีวภาพ (Biochar) ถูกออกแบบเพื่อรองรับรูปแบบธุรกิจการผลิตถ่านจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร โดยมุ่งเน้นการจำหน่ายผลิตภัณฑ์ในระดับพื้นที่และตลาดท้องถิ่น โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1.1 กลุ่มลูกค้า (Customer segment)

กลุ่มลูกค้าเป้าหมายหลักของธุรกิจประกอบด้วยครัวเรือนในพื้นที่ตำบลผาป่อง และบริเวณใกล้เคียงที่ใช้ถ่านเป็นเชื้อเพลิงในการหุงต้มและให้ความร้อน รวมถึงกลุ่มผู้ประกอบการร้านอาหารและวิสาหกิจชุมชนที่มีความต้องการใช้ถ่านที่มีคุณภาพสม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังครอบคลุมถึงผู้ประกอบการอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs) ในพื้นที่อำเภอแม่พริกและอำเภอเถิน

4.1.2 คุณค่าของสินค้าและบริการ (Value proposition)

ถ่านชีวภาพ (Biochar) ที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในท้องถิ่น เช่น เศษไม้ไผ่ ซังไผ่ และเศษวัสดุทางการเกษตร ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (Slow Pyrolysis) มีคุณภาพสูงและให้ค่าความร้อนสูงกว่าถ่านทั่วไป โดยกำหนดราคาจำหน่ายที่ 20 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งสามารถแข่งขันได้ในตลาดท้องถิ่น นอกจากนี้ กระบวนการผลิตดังกล่าวยังมีส่วนช่วยลดการเผาเศษวัสดุเกษตรในที่โล่ง อันเป็นสาเหตุสำคัญของปัญหาฝุ่นละอองขนาดเล็ก $PM_{2.5}$ ในพื้นที่ จึงก่อให้เกิดทั้งมูลค่าเพิ่มทางเศรษฐกิจและประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อม

4.1.3 ช่องทางการเข้าถึงลูกค้า (Channels)

การจัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์ดำเนินการผ่านหลายช่องทาง โดยเน้นการจำหน่ายตรงผ่านเครือข่ายชุมชนหรือตลาดในพื้นที่ ควบคู่กับการให้บริการจัดส่งสินค้าโดยขนส่งถึงลูกค้าโดยตรง นอกจากนี้ ยังมีการสื่อสารการตลาดและการรับคำสั่งซื้อผ่านแพลตฟอร์มดิจิทัล เช่น LINE และ Facebook เพื่ออำนวยความสะดวกในการติดต่อสื่อสารประชาสัมพันธ์ และสร้างความสัมพันธ์กับลูกค้าในระยะยาว

4.1.4 ความสัมพันธ์กับลูกค้า (Customer relationship)

การสร้างความสัมพันธ์กับลูกค้าดำเนินการโดยผ่านการรับประกันคุณภาพของผลิตภัณฑ์ถ่าน เพื่อสร้างความเชื่อมั่นในการใช้งาน ควบคู่กับการให้สิทธิประโยชน์ในรูปแบบส่วนลดสำหรับการสั่งซื้อในปริมาณมาก นอกจากนี้ ยังมีการจัดกิจกรรมสาธิตคุณภาพสินค้าในงานชุมชน เพื่อให้ลูกค้าได้ทดลองใช้จริงและเพิ่มความเข้าใจในคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์

4.1.5 รายรับ (Revenue streams)

รายได้หลักของธุรกิจมาจากการจำหน่ายถ่านชีวภาพ (Biochar) ในราคา 20 บาทต่อกิโลกรัม โดยมีปริมาณการผลิตและจำหน่ายรวม 114,240 กิโลกรัมต่อปี คิดเป็นรายได้รวม 2,284,800 บาทต่อปี นอกจากนี้ ในระยะยาวสามารถเพิ่มแหล่งรายได้จากการขายคาร์บอนเครดิต อันเกิดจากการกักเก็บคาร์บอนในผลิตภัณฑ์ถ่านชีวภาพ

4.1.6 โครงสร้างต้นทุน (Cost Structure)

โครงสร้างต้นทุนของธุรกิจแบ่งออกเป็นต้นทุนการลงทุน (CAPEX) จำนวน 232,097 บาท และต้นทุนการดำเนินงาน (OPEX) จำนวน 1,281,411.74 บาทต่อปี โดยต้นทุนค่าแรงงานมีสัดส่วนสูงที่สุด คิดเป็นร้อยละ 66.68 ของต้นทุนดำเนินงาน รองลงมา คือ ค่าวัตถุดิบ คิดเป็นร้อยละ 26.22 ตามมาด้วยค่าขนส่ง และค่าอุปกรณ์บรรจุหีบห่อ คิดเป็นร้อยละ 2.81 และ 2.06 ตามลำดับ

4.1.7 ทรัพยากรหลัก (Key Resources)

ทรัพยากรหลักของธุรกิจประกอบด้วยทรัพยากรทางกายภาพ ได้แก่ เตาผลิตถ่านชีวมวลขนาดกำลังการผลิต 2,000 กิโลกรัมต่อรอบ มูลค่า 232,097 บาท และวัตถุดิบชีวมวลจากภาคการเกษตรในพื้นที่ ทรัพยากรมนุษย์ ได้แก่ แรงงานชุมชนที่มีความเชี่ยวชาญในกระบวนการผลิตถ่าน และทรัพยากรทางปัญญา ได้แก่ องค์ความรู้ด้านกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) และการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์

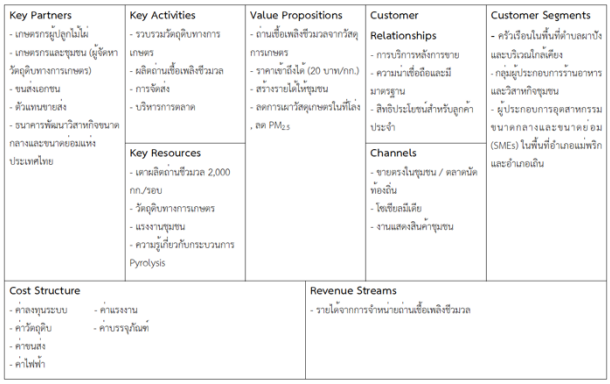
4.1.8 กิจกรรมหลัก (Key activities)

กิจกรรมหลักของธุรกิจครอบคลุมตั้งแต่การรวบรวมวัตถุดิบชีวมวลจากแหล่งในพื้นที่, การผลิตถ่านชีวภาพ, การควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์, การบรรจุหีบห่อ และการจัดส่งสินค้าให้แก่ลูกค้า รวมถึงการบำรุงรักษาเตาปฏิกรณ์ชีวมวลตามระยะเวลา

4.1.9 พันธมิตรหลัก (Key partners)

พันธมิตรที่สำคัญของธุรกิจประกอบด้วย เกษตรกรในพื้นที่ ซึ่งเป็นผู้จัดหาวัตถุดิบชีวมวล, ขนส่งเอกชน, ตัวแทนขายส่ง และธนาคารพัฒนาวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมแห่งประเทศไทย ซึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งเงินทุนสนับสนุน

รายละเอียดขององค์ประกอบทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 โมเดลการวิเคราะห์เชิงธุรกิจ (Business Model Canvas)

4.2 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางการเงิน

4.2.1 การประเมินต้นทุนโครงการ

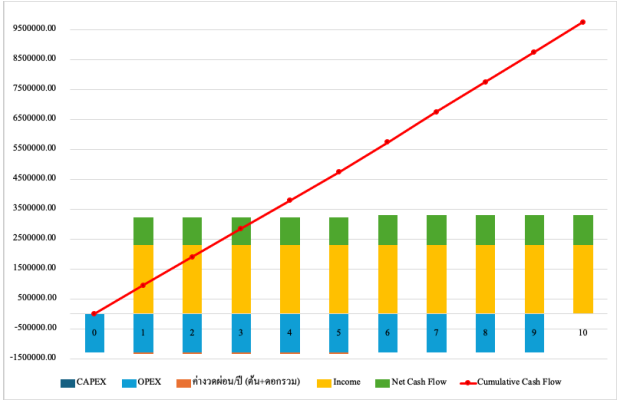
ต้นทุนของโครงการแบ่งได้เป็น 2 ส่วน ประกอบด้วย 1) ต้นทุนการลงทุน (CAPEX) ได้แก่ ระบบการผลิตถ่านเชื้อเพลิงสังเคราะห์และไบโอชาร์ 232,097 บาท และ 2) ต้นทุนการดำเนินการ (OPEX) ได้แก่ ค่าวัตถุดิบ ค่าขนส่ง ค่าแรงงาน ค่าอุปกรณ์บรรจุหีบห่อ ค่าไฟฟ้า และค่าเสื่อมราคาของเครื่องจักร 1,281,829.70 บาท/ปี

4.2.2 การประเมินรายได้ของโครงการ

รายได้ของระบบการผลิตถ่านเชื้อเพลิงสังเคราะห์และไบโอชาร์มาจากการจำหน่ายผลิตภัณฑ์ถ่านชีวภาพโดยตรง โดยกำลังการผลิตถ่านอยู่ที่ 680 กิโลกรัมต่อรอบ จากวัตถุดิบ 2,000 กิโลกรัม ในอัตรา 14 รอบต่อเดือน ที่ราคาจำหน่าย 20 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งเป็นระดับราคาที่ต่ำกว่าราคาอ้างอิงของถ่านชีวภาพทั่วไปในท้องตลาดที่อยู่ในช่วง 25–35 บาทต่อกิโลกรัม [11] เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันและส่งเสริมการเข้าถึงของผู้บริโภคในระดับชุมชน ส่งผลให้โครงการมีรายได้รวมประมาณ 2,284,800 บาทต่อปี

4.2.3 กระแสเงินสดสุทธิ (Net cash flow)

ผลสรุปกระแสเงินสดสุทธิของโครงการที่อัตราคิดลด 6% แสดงดังรูปที่ 3



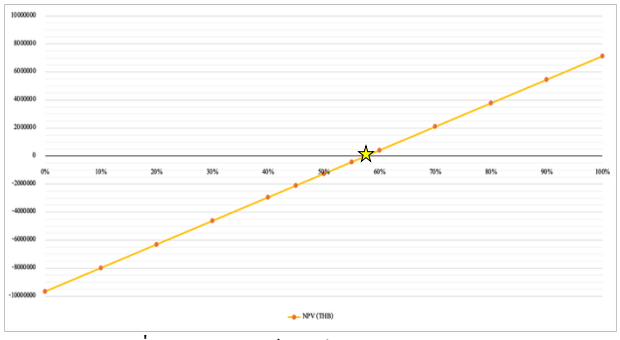
รูปที่ 3 กระแสเงินสดสุทธิตลอดอายุโครงการ 10 ปี

4.2.4 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net preset value: NPV)

จากข้อมูลกระแสเงินสดของโครงการ ระยะเวลาโครงการ 10 ปี มีค่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิ เท่ากับ 7,143,377.68 บาท โดยในการศึกษานี้จะพิจารณา NPV เป็นเครื่องมือหลัก เนื่องจากสมมติฐานของโครงการนี้ใช้แหล่งเงินทุนจากเงินกู้ธนาคารเพียงแหล่งเดียวในสัดส่วน 100% ของเงินลงทุน ส่งผลให้กระแสเงินสดปีที่ 0 มีค่าเป็นศูนย์เนื่องจากไม่มีเงินลงทุนส่วนทุน (Equity) ที่ต้องชำระ ณ วันเริ่มโครงการ ภายใต้เงื่อนไขดังกล่าว อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) และเนื่องจาก Cumulative Cash Flow เริ่มต้นจากศูนย์และเป็นบวกตลอดทุกปี การคำนวณระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) จึงให้ค่าเป็นศูนย์ปีซึ่งไม่สะท้อนความเป็นจริงของโครงการ

4.2.5 การวิเคราะห์ความไวต่อปริมาณการจำหน่าย

การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) ของมูลค่าปัจจุบันสุทธิ เพื่อประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงปริมาณการจำหน่ายต่อ NPV ตั้งแต่ร้อยละ 30 ถึง 100 ที่ราคาจำหน่ายคงที่ 20 บาทต่อกิโลกรัม ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis)

5. สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษา พบว่า โมเดลธุรกิจที่พัฒนาขึ้นครอบคลุมองค์ประกอบทั้ง 9 ข้อตามกรอบ BMC โดยมีจุดเด่นอยู่ที่การใช้วัตถุดิบชีวมวลในท้องถิ่น โดยเฉพาะเศษไม้ไผ่ ซึ่งมีความพร้อมสูงและมีต้นทุนต่ำ ร่วมกับกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (Slow Pyrolysis) ที่สามารถผลิตถ่านชีวภาพที่มีคุณภาพสูง โดยกำหนดราคาจำหน่ายที่ 20 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งต่ำกว่าระดับราคาตลาดทั่วไป ช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันและส่งเสริมการเข้าถึงของผู้บริโภคในระดับชุมชน ในส่วนของความเป็นไปได้ทางการเงิน ผลการวิเคราะห์ พบว่า โครงการมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) เป็นบวก คือ 7,143,377.68 บาท ตลอดอายุโครงการ 10 ปี โดยมีรายได้หลักจากการจำหน่ายถ่านชีวภาพในปริมาณ 114,240 กิโลกรัมต่อปี คิดเป็นรายได้รวมประมาณ 2,284,800 บาทต่อปี ซึ่งสูงกว่าต้นทุนการดำเนินงานรายปี และจากการวิเคราะห์ความไวของ NPV ต่อปริมาณถ่านชีวมวลที่ขายได้ พบว่า ภายใต้สมมติฐานกู้ยืมเงินลงทุนเต็มจำนวนและราคาขาย 20 บาทต่อกิโลกรัม หากโครงการสามารถจำหน่ายได้ในระดับ 60% ของกำลังการผลิตขึ้นไป โครงการจะให้ผลตอบแทนเป็นบวกในทุกกรณี แสดงให้เห็นถึงความคุ้มค่าในการลงทุน และในด้านผลประโยชน์เชิงสังคมและสิ่งแวดล้อม โมเดลธุรกิจดังกล่าวมีความสอดคล้องกับแนวคิด Bio-Circular-Green Economy โดยก่อให้เกิดการจ้างงานในชุมชน ลดการเผาเศษวัสดุทางการเกษตรในที่โล่ง และมีส่วนช่วยบรรเทาปัญหามลพิษฝุ่นละอองขนาดเล็ก ($PM_{2.5}$) ซึ่งสนับสนุนการเปลี่ยนผ่านสู่ระบบพลังงานสะอาดและการพัฒนาที่ยั่งยืนในระดับชุมชน

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์และสนับสนุนเป็นอย่างดีจากหลายภาคส่วน ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาสำหรับคำปรึกษา คำแนะนำข้อคิดเห็น และตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ขอขอบคุณ คุณรังสฤษฎ์ คุณชัยมัง ประธานมูลนิธิพัฒนาชุมชนผาปัง (วิสาหกิจเพื่อสังคม) ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูล รวมถึงหน่วยงานต่าง ๆ ที่เป็นแหล่งข้อมูลอ้างอิงในการวิจัยครั้งนี้ สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณครอบครัว และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่ให้การสนับสนุนและมีส่วนช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัยฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] ศูนย์วิจัยกสิกรไทย, “แนวโน้มธุรกิจไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนในไทย.” [Online]. Available: https://www.kasikornresearch.com/th/analysis/k-social-media/Pages/Power-IAO115-FB-30-01-2025.aspx

[2] A. A. C. M. BEENACKERS, “BIOMASS GASIFICATION: IMPLEMENTATION AND RESEARCH IN EUROPE,” *International Journal of Solar Energy*, vol. 13, no. 4, pp. 249–260, 1992, doi: 10.1080/01425919208909789.

[3] มูลนิธิพัฒนาชุมชนผาปัง (วิสาหกิจชุมชน), “โครงการศึกษาพัฒนานวัตกรรม และสาธิตต้นแบบ การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรฐานชีวภาพที่มีอยู่ในท้องถิ่นชุมชน เพื่อเป็นพลังงานชีวมวลสังเคราะห์ ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล เพื่อแก้ไขวิกฤตพลังงานในการพัฒนาเศรษฐกิจชุมชนหมุนเวียนแบบองค์รวม (Bio Circular Green Economy : BCG),” 2565.

[4] “Business Model Canvas คืออะไร? พร้อมตัวอย่างแผนธุรกิจที่น่าสนใจ.” [Online]. Available: https://www.timeconsulting.co.th/what-is-business-model-canvas

[5] นายอนุสรณ์ หนองบัว and นายธเนศ ศิรินุมาศ, “เอกสารประกอบการเรียนรู้,” 2020. [Online]. Available: https://www.itd.or.th/wp-content/uploads/2020/01/itdevent03022020-04.pdf

[6] บริษัท บางจาก คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน), “ราคาน้ำมันย้อนหลัง.” [Online]. Available: https://www.bangchak.co.th/th/oilprice/historical

[7] Gemini Personnel Group Limited., “Leading Recruitment Across Asia,” 2024. [Online]. Available: www.gemini-global.com

[8] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, “Electricity_Tariff_MAY_2023,” 2023.

[9] Small and Medium Enterprise Development Bank of Thailand, “SME D Bank announces freezing interest rates on all types of loans to help reduce the burden and alleviate suffering. Support Thai SMEs Move forward with sustainable business.” [Online]. Available: https://www.smebank.co.th/

[10] กรมสรรพากร, “อัตราภาษี และการคำนวณภาษี.” [Online]. Available: https://www.rd.go.th/841.html

[11] กรุงเทพธุรกิจ, “จาก ‘เตามหาเศรษฐี’ สู่การสำรวจ ‘ราคาถ่าน’ แต่ละชนิดแพงแค่ไหน?” [Online]. Available: https://www.bangkokbiznews.com/business/1011448

ดรรชนีผู้เขียนบทความ

ก	หน้า
กันตภณ อินต๊ะสาร	88
กมลทิพย์ วัฒกีกำธร	126
กมลพรรณ จารุวาระกูล	136
กฤตภาส พงษ์สิงห์	178
ข	**หน้า**
ขวัญชนก อุนทะอ่อน	214
ค	**หน้า**
คชพงศ์ สุมานนท์	132
คเชนทร์ จันทร์เทศ	298
จ	**หน้า**
จักรกฤษณ์ ยิ้มแฉ่ง	196
จักรพันธ์ แสงสุวรรณ	241
ฉ	**หน้า**
ฉัตรแก้ว จริยตันติเวทย์	120
ช	**หน้า**
ชุติมนต์ สวนดอกไม้	293
ชนาธิป แสงตะวัน	311
ณ	**หน้า**
ณฐัติญา ไข่ติยากุล	173
ณัฐปคัลภ์ ก้อนแพง	274
ธ	**หน้า**
ธนะพัฒน์ อาจมิตร	94
น	**หน้า**
นริศรา นาคเมธี	161,167,184
นเรศ ชลังสุทธิ์	28

บ	หน้า
บุรัสกร อยู่สุข	190
ป	**หน้า**
ปฏิภาณ ถิ่นพระบาท	23
ปิ่นธิดา ประยงค์พันธ์	82
ปิยพร สีสินธุ์	287
ปรัชญา นารมย์	247
ปรีชาพงศ์ อากาศโสภา	259
ปริญญา ตากรวด	6
ปองภพ แพงวิเศษ	228
พ	**หน้า**
พงษ์ชยธรณ์ สาสนัส	76
พงศ์พัทธ์ ถนอมนิ่ม	222
พิเชษฐ์ สุวรรณชัย	18
พีรพัฒน์ บุญฤทธิ์	44
พรพิศ ศิริมา	70
พสิษฐ์ สุวรรณภิงคาร	53,58,64
แพรวพรรณ เกิดพูล	208
ภ	**หน้า**
ภูชิตะ จันต๊ะบุตร	40
ภิญโญ อั้งยุทธ	32
ภัทรชัย พงศ์โสภา	202
ภาณุทัตต์ ศรีไทย	99
ภาลินี ทำนุทัศน์	322
ล	**หน้า**
เลิศพิสิฐ พรไธสง	36

ดรรชนีผู้เขียนบทความ

ว	หน้า
วีรวรรณ จันทนะทรัพย์	148,155
วรัญชลีย์ ทวีชัย	270
ศ	**หน้า**
ศุวิล ชมชัยยา	142
ศศิกานต์ แสงสิงห์	49
ศศิรมย์ พานทอง	114
ส	**หน้า**
สุดารัตน์ ดวงประทุม	109
สุภชัย สัมปัตตะวนิช	104
สิริธิดา นพกวด	305
ห	**หน้า**
หัสดินทร์ สมใจประเสริฐ	1
อ	**หน้า**
อนันต์ เต็มเปี่ยม	10
อัครพงษ์ เทพแก้ว	235
อัครเวช ศุภาคม	199
อธิรมย์ ณัฏฐ์ณภัทร	280
อรวรรณ แม้นจิต	316
อาวุธ ฉายศิริ	265
ฮ	**หน้า**
เฮงเฮง จารุนงคราญ	253

The 9th RMUTP CONFERENCE ON ENGINEERING AND TECHNOLOGY 2026

การวิจัยเชิงวิศวกรรมเพื่อการพัฒนาเทคโนโลยี อุตสาหกรรม พลังงาน และสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน

ENGINEERING RESEARCH FOR DEVELOPMENT IN SUSTAINABLE INDUSTRY ENERGY AND ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY



www.engcon-rmutp.com

ฝ่ายวิชาการและวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

โทรศัพท์ 02-836-3000 ต่อ 4112, 4113, 4118