

## การจำลองการอบแห้งข้าวเปลือกนึ่งแบบหลายขั้นตอนในเครื่องอบแห้งแบบกระแสน

### ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณร่วมกับวิธีเอลิเมนต์ไม่ต่อเนื่อง

#### Simulation of multi-stage parboiled paddy drying in an impinging stream dryer via CFD-DEM

ปวิติ คมวชิรกุล<sup>1</sup>, พีรสิทธิ์ ชฎาธร<sup>1</sup> และ วิโรจน์ ฤทธิทอง<sup>1</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร E-mail: patiwat.k@rmutp.ac.th

#### บทคัดย่อ

เครื่องอบแห้งแบบกระแสนเป็นเครื่องอบแห้งที่มีประสิทธิภาพสูงในการลดความชื้นที่ผิวของวัสดุอนุภาค อย่างไรก็ตามแม้จะมีงานวิจัยในอดีตที่แสดงให้เห็นว่าการอบแห้งแบบกระแสนเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกนึ่ง แต่การอบแห้งเพียงขั้นตอนเดียวไม่เพียงพอสำหรับข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูง งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการจำลองการอบแห้งข้าวเปลือกนึ่งในเครื่องอบแห้งแบบกระแสนแบบหลายขั้นตอน ทั้งนี้อาศัยวิธีการจำลองแบบพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณร่วมกับวิธีเอลิเมนต์ไม่ต่อเนื่อง ซึ่งแบบจำลองใช้ทำนายผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิอากาศร้อน อัตราการป้อนข้าวเปลือกนึ่ง ความเร็วอากาศขาเข้า ระยะห่างการชนและจำนวนรอบในการอบแห้ง ที่ส่งผลต่อค่าความชื้นเฉลี่ยของข้าวเปลือกนึ่งในเครื่องอบแห้งแบบกระแสน โดยในแต่ละรอบการอบแห้งจะมีการพักเมล็ดข้าวในที่อบอากาศเป็นระยะเวลา 4 นาที จากผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองสามารถทำนายผลค่าความชื้นของข้าวเปลือกนึ่งได้ใกล้เคียงกับผลการทดลอง โดยผลอัตราลดลงของความชื้นข้าวเปลือกนึ่งขึ้นอยู่กับทั้งอุณหภูมิอากาศร้อนและจำนวนรอบการอบแห้ง

คำสำคัญ: พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณร่วมกับวิธีเอลิเมนต์ไม่ต่อเนื่อง, การอบแห้งแบบรวดเร็ว, การอบแห้งแบบกระแสน, ข้าวเปลือก

#### Abstract

Impinging stream dryer (ISD), which belongs to a unique class of dryers that a high efficiency for removing surface moisture of particulate materials. Although previous research has been shown that impinging stream drying can be an attractive alternative for parboiled paddy drying, single stage impinging stream drying is not adequate due to the higher moisture nature of paddy. The aim of this study was to investigate the simulation of a multi-stage drying of parboiled paddy in

an impinging stream dryer by computational fluid dynamics with the incorporation of the discrete element method (CFD-DEM). The model was used to simulate the effects of various parameters i.e., inlet air temperatures, parboiled paddy feed rate, inlet air velocity, impinging distance and number of drying cycles, on the mean parboiled paddy moisture content in an impinging stream dryer. During each cycle the paddy was tempered for 4 min, after which the paddy was again fed back into the dryer. The results showed that the model gave predictions that were in good agreement with the experimental mean parboiled paddy moisture content. The moisture reduction rate of the parboiled paddy depended both on the inlet drying air temperature and number of drying cycles.

Keywords: CFD-DEM, flash drying, impinging stream drying, paddy

#### 1. บทนำ

เครื่องอบแห้งแบบกระแสน (Impinging stream dryer, ISD) เป็นเครื่องอบแห้งที่เหมาะสมกับการอบแห้งวัสดุอนุภาคที่มีความชื้นที่ผิวสูง มีหลักการพื้นฐานคือ การนำกระแสของไหลสองกระแสหรือมากกว่า ซึ่งมีอุณหภูมิและความเร็วสูงโดยมีทิศทางตรงกันข้ามมาชนกัน สำหรับวัสดุอนุภาคที่ต้องการจะอบแห้งสามารถป้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งไปพร้อมกับกระแสของไหล ซึ่งในบริเวณการชนมีความปั่นป่วนสูง ทำให้เกิดกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในอัตราที่สูง ดังนั้นความชื้นของอนุภาคจึงระเหยออกไปอย่างรวดเร็วส่งผลให้ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นลง เนื่องจากพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคในระบบอบแห้งแบบกระแสนมีความซับซ้อน ดังนั้นแบบจำลองการไหลจึงเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งในระบบอบแห้งแบบกระแสน ซึ่งที่ผ่านมา Khomwachirakul et al. [1] ได้ศึกษาคุณลักษณะการไหลและการอบแห้งอนุภาคความชื้นสูงในระบบอบแห้งแบบกระแสน ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณร่วมกับวิธีเอลิเมนต์ไม่ต่อเนื่อง (CFD-

## บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 3

Proceedings of the 3<sup>rd</sup> RMUTP Conference of Engineering and Technology

DEM) จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง CFD-DEM สามารถทำนายค่าความชื้นและเวลาที่อนุภาคอยู่ในระบบอบแห้งได้ใกล้เคียงกับผลการทดลอง อย่างไรก็ตามในการศึกษาของ Khomwachirakul et al. [1] ที่ผ่านมามุ่งเน้นศึกษาเฉพาะการอบแห้งแบบขั้นตอนเดียวเท่านั้น ซึ่งไม่เพียงพอเมื่ออนุภาคที่ต้องการอบแห้งมีความชื้นที่สูง สำหรับข้าวเปลือกหนึ่ง ถือเป็นอนุภาคที่มีความชื้นสูง การอบแห้งแบบหลายขั้นตอนในระบบกระแสขนนับว่าเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการลดความชื้นของข้าวเปลือกหนึ่งให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยสำหรับการเก็บรักษา ในการศึกษาครั้งนี้จึงใช้แบบจำลอง CFD-DEM ทำการศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกหนึ่งในเครื่องอบแห้งแบบกระแสขนแบบหลายขั้นตอน ซึ่งมุ่งเน้นศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิอากาศร้อน อัตราการป้อนข้าวเปลือกหนึ่ง ความเร็วอากาศขาเข้า ระยะห่างการชนและจำนวนรอบในการอบแห้ง ที่ส่งผลต่อค่าความชื้นเฉลี่ยของข้าวเปลือกหนึ่งในเครื่องอบแห้งแบบกระแสขน

## 2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

### 2.1 สมการควบคุมการไหลของของไหล [1]

สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha\rho) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha\rho u_i) = M_m \quad (1)$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha\rho u_i u_j) = -\alpha \frac{\partial P}{\partial x_j} \\ + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \alpha(\mu + \mu_t) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \alpha\rho g + M_F \end{aligned} \quad (2)$$

สมการอนุรักษ์พลังงาน

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha\rho c_p T) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha\rho c_p u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \alpha k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + M_h \quad (3)$$

สมการอนุรักษ์มวลย่อย

$$\frac{\partial(\alpha\rho C)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha\rho u_i C)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \alpha \left( \rho D + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) + M_m \quad (4)$$

สำหรับแบบจำลองความปั่นป่วน ในการศึกษาครั้งนี้ใช้แบบจำลอง Realizable  $k-\mathcal{E}$  model ซึ่งรายละเอียดสามารถดูได้จาก Khomwachirakul et al. [1]

### 2.2 สมการควบคุมการเคลื่อนที่ของอนุภาค

สมการการเคลื่อนที่ของอนุภาคสามารถกำหนดได้ดังสมการต่อไปนี้

$$m_p \frac{du_p}{dt} = F_g + F_D + F_C \quad (5)$$

โดยที่  $F_g$  คือ แรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วง  $F_D$  คือ แรงจุดลากและ  $F_C$  คือ ผลรวมของแรงปฏิสัมพันธ์กันระหว่างอนุภาคกับอนุภาค รายละเอียดสามารถดูได้จาก Khomwachirakul et al. [1]

### 2.3 การถ่ายโอนความร้อนและมวลของอนุภาค

การจำลองการถ่ายโอนความร้อนและมวลของข้าวเปลือกหนึ่ง ในแต่ละรอบของการอบแห้ง แบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอนคือ

#### 2.3.1 ขั้นตอนการอบแห้ง

สมการการถ่ายโอนความร้อนพิจารณาได้จาก [2]

$$\frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{k_p}{\rho_p c_p} \left[ \frac{\partial^2 T_p}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T_p}{\partial r} \right] \text{ เมื่อ } 0 \leq r \leq R_p \quad (6)$$

สมการการถ่ายโอนมวลพิจารณาได้จาก [2]

$$\frac{\partial M_p}{\partial t} = D_{\text{eff}} \left[ \frac{\partial^2 M_p}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial M_p}{\partial r} \right] \text{ เมื่อ } 0 \leq r \leq R_p \quad (7)$$

สภาวะเงื่อนไขเริ่มต้น

$$T_p = T_0 \text{ เมื่อ } t = 0 \text{ และ } 0 \leq r \leq R_p \quad (8)$$

$$M_p = M_0 \text{ เมื่อ } t = 0 \text{ และ } 0 \leq r \leq R_p \quad (9)$$

เงื่อนไขขอบเขต

$$\frac{\partial T_p}{\partial r} = 0 \text{ เมื่อ } t > 0 \text{ และ } r = 0 \quad (10)$$

$$\begin{aligned} k_p \frac{\partial T_p}{\partial r} = h_c (T_g - T_p) - \rho_p h_{fg} \frac{V_p}{A_p} \frac{\partial M_p}{\partial t} \\ \text{เมื่อ } t > 0 \text{ และ } r = R_p \end{aligned} \quad (11)$$

**บทความวิจัย**

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 3

Proceedings of the 3<sup>rd</sup> RMUTP Conference of Engineering and Technology

$$\frac{\partial M_p}{\partial r} = 0 \text{ เมื่อ } t > 0 \text{ และ } r = 0 \tag{12}$$

$$D_{\text{eff}} \frac{\partial M_p}{\partial r} = h_m (M_e - M_s) \text{ เมื่อ } t > 0 \text{ และ } r = R_p \tag{13}$$

**2.3.2 ขั้นตอนการพิกมัลล์ข้าวในที่อบอากาศ**

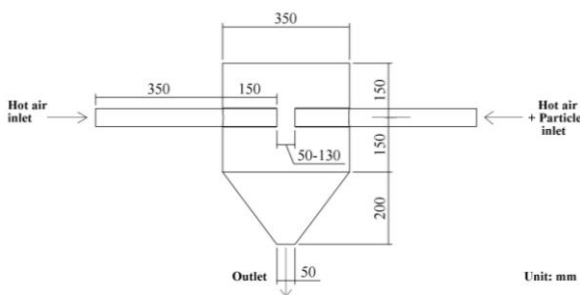
ในขั้นตอนนี้ สมการการถ่ายโอนความร้อนและมวลเป็นดังสมการที่ 6 และ 7 ตามลำดับ สำหรับเงื่อนไขที่สภาวะเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตรายละเอียดดูได้จาก Meeso et al. [2] ขณะที่สัมประสิทธิ์การแพร่ยังผล แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left(\frac{-E_0}{RT_p}\right) \tag{14}$$

สำหรับคุณสมบัติของข้าวและความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนและมวล รายละเอียดสามารถดูได้ Meeso et al. [2]

**3 สมมติฐานที่ใช้ในการจำลอง**

ในการศึกษาี้ อากาศมีค่าความหนืด ค่าการนำความร้อนและค่าความจุความร้อนเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของอากาศ [5] โดยที่ไม่พิจารณาความร้อนสูญเสียผ่านผนัง ขณะที่อุณหภูมิพิจารณาให้เป็นทรงกลมและมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน โดยที่อุณหภูมิไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ในขณะที่อุณหภูมิเกิดการชนกันหรือหลังจากชนกัน สำหรับการถ่ายโอนความร้อนและมวลภายในอนุภาคพิจารณาในแนวทิศทางรัศมีของอนุภาคเพียงอย่างเดียว ซึ่งอนุภาคมีความชื้นและอุณหภูมิภายในเมล็ดสม่ำเสมอในช่วงเริ่มต้น และอนุภาคถูกป้อนเข้าสู่ระบบอบแห้งแบบกระแสน้ำวนจำนวน 50 อนุภาค



รูปที่ 1 แผนผังห้องอบแห้งที่ใช้ในการจำลอง [1]

การศึกษานี้จะใช้รูปร่างของห้องอบแห้งของระบบอบแห้งแบบกระแสน้ำวนในการจำลองแบบ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 1 กริดที่สร้างขึ้นมีจำนวน 227,142 เอลิเมนต์ ในการจำลอง ข้าวเปลือกหนึ่งถูกอบแห้งทั้งหมด 7 รอบการอบแห้ง ซึ่งในแต่ละรอบการอบแห้ง จะถูกพักในที่อบอากาศเป็นเวลา 4 นาที หลังจากนั้นข้าวเปลือกหนึ่งจะถูกนำกลับเข้าสู่เครื่องอบแห้งอีกครั้ง สำหรับตัวแปรในการจำลองได้แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ตัวแปรสำหรับการจำลอง

ตัวแปร	การจำลอง (CFD-DEM)	การทดลอง
เส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค (mm)	3.9	3.9
อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า (°C)	150,170, 190	150,170,190
ความเร็วอากาศร้อนขาเข้า (m/s)	25	25
อัตราการป้อนวัสดุอนุภาค (kg <sub>dry solid</sub> /h)	110	110
ระยะห่างการชน (cm)	5	5
จำนวนรอบการอบแห้ง	7	7

**4 สภาวะเงื่อนไขของเขต**

กำหนดให้บริเวณท่อทางเข้า อากาศร้อนมีค่าความชื้นของความปั่นป่วน 5% ขณะที่ผนังพิจารณาเป็นแบบไม่ลื่น และบริเวณทางออกห้องอบแห้งอากาศมีค่าความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ

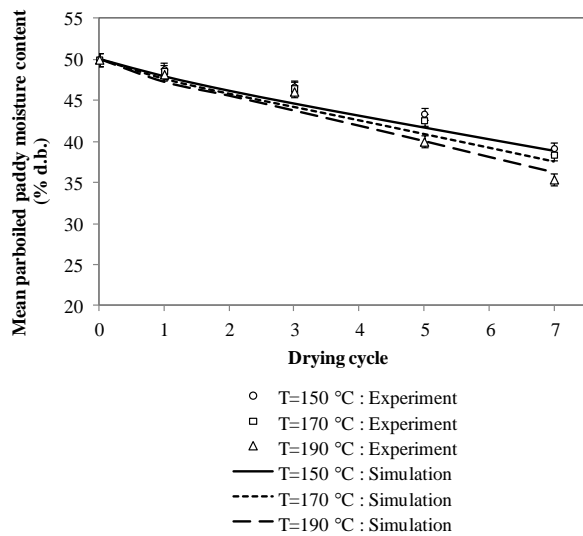
**5 ผลและวิจารณ์**

จากรูปที่ 2 จะพบว่า เมื่ออัตราการป้อนวัสดุอนุภาค ความเร็วอากาศร้อนขาเข้าและระยะห่างการชนมีค่าคงที่ อัตราการลดความชื้นของข้าวเปลือกหนึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อตัวกลางการอบแห้ง คือ อากาศร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิตัวกลางการอบแห้งขาเข้าที่สูงขึ้นทำให้ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศร้อนกับอุณหภูมิจากผิวของข้าวเปลือกหนึ่งเพิ่มมากขึ้น ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลสารมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการระเหยน้ำที่ผิวข้าวเปลือกหนึ่งเพิ่มมากขึ้น ในกรณีผลกระทบของจำนวนรอบการอบแห้งที่มีผลต่อค่าความชื้นเฉลี่ยของข้าวเปลือกหนึ่ง พบว่า การเพิ่มขึ้นของจำนวนรอบการอบแห้งทำให้ปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกหนึ่งลดลง และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลของการจำลองกับการทดลองพบว่า ผลของการจำลองให้ผลสอดคล้องกับผลการทดลอง และมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 5%

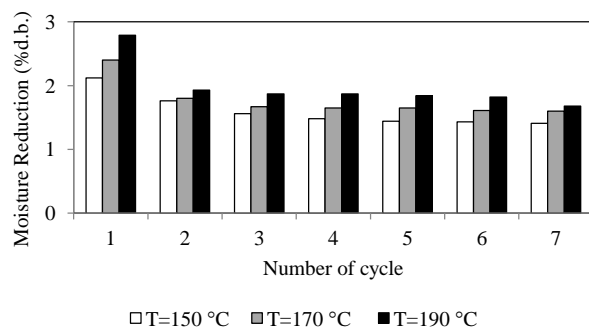
## บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 3

Proceedings of the 3<sup>rd</sup> RMUTP Conference of Engineering and Technology



รูปที่ 2 การเปรียบเทียบค่าความชื้นเฉลี่ยของข้าวเปลือกนึ่งหลังการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ ในแต่ละรอบการอบแห้งระหว่างผลของการจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลอง



รูปที่ 3 ระดับปริมาณการลดลงของความชื้นของข้าวเปลือกนึ่งหลังการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ ในแต่ละรอบการอบแห้ง

จากรูปที่ 3 จะพบว่า เมื่ออัตราการป้อนวัสดุอนุภาค ความเร็วอากาศร้อนขาเข้าและระยะห่างการชนมีค่าคงที่ การอบแห้งรอบที่ 1 ปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกนึ่งลดลง 2.12 %d.b. ที่อุณหภูมิมอบแห้งเป็น 150 °C และปริมาณความชื้นลดลง 2.79 %d.b. ที่อุณหภูมิมอบแห้งเป็น 190 °C ในระหว่างการอบแห้งรอบที่ 2 ถึง รอบที่ 7 ปริมาณความชื้นลดลง 1.76 – 1.93 %d.b., 1.56 -1.87 %d.b., 1.48 -1.86 %d.b., 1.44 – 1.84 %d.b., 1.43 – 1.82 %d.b. และ 1.41 -1.68 %d.b. ตามลำดับ ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการอบแห้ง นอกจากนี้จะพบว่า การอบแห้งในรอบแรกมีปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกนึ่งลดลงสูงกว่าการอบแห้งของรอบอื่นๆ ทุกๆ อุณหภูมิมอบแห้ง ทั้งนี้เป็นเพราะปริมาณความชื้นเริ่มต้นของเมล็ด

ข้าวเปลือกนึ่งอยู่ใกล้กับพื้นผิวของเมล็ดข้าวและทำให้ถูกดึงออกได้ง่ายขึ้น โดยปราศจากการขัดขวางจากโครงสร้างภายในของเมล็ด โดยระยะเวลาที่เมล็ดข้าวเปลือกนึ่งอยู่ในห้องอบแห้งระหว่างการอบแห้งในแต่ละรอบมีค่าเท่ากัน

## 6. สรุป

การจำลองแบบพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณร่วมกับวิธีเอลิเมนต์ไม่ต่อเนื่องได้ถูกนำมาใช้ในการจำลองการอบแห้งข้าวเปลือกนึ่งแบบหลายชั้นตอนในเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำ เพื่อหาเงื่อนไขการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับข้าวเปลือกนึ่ง ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ผลการจำลองสอดคล้องกับผลการทดลอง และมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน  $\pm 5\%$  โดยทั้งอุณหภูมิอากาศร้อนและจำนวนรอบการอบแห้งมีผลต่อระดับความชื้นที่ลดลงของข้าวเปลือกนึ่ง

## เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Khomwachirakul, S. Devahastin., T. Swasdisevi, S. Soponronnarit, "Simulation of flow and drying characteristics of high-moisture particles in an impinging stream dryer via CFD-DEM", *Drying Technology* 34, 2016, pp. 403-419.
- [2] N. Meeso, A. Nathakaranakule, T. Madhiyanon, S. Soponronnarit, "Modelling of far-infrared irradiation in paddy drying process", *Journal of Food Engineering* 78, 2007, pp. 1248-1258.
- [3] T. Madhiyanon, A. Techaprasan, S. Soponronnarit, S. "Mathematical models based on heat transfer and coupled heat and mass transfer for rapid high temperature treatment in fluidized bed: Application for grain heat disinfestations", *International Journal of Heat and mass Transfer* 49, 2006, pp. 2277-2290.
- [4] P. Bootkote, S. Soponronnarit, S. Prachayawarakorn, "Process of producing parboiled rice with difference colors by fluidized bed drying technique including tempering", *Food Bioprocess Technol* 9, 2016, pp. 1574-1586.
- [5] A. Frydman, J. Vasseur, J. Moureh, M. Sionneau, P. Tharrault, "Comparison of superheated steam and air operated spray dryers using computational fluid dynamics", *Drying Technology* 16, 1998, pp. 1305-1338.