

เครื่องวัดอุณหภูมิแบบเวลาจริงสำหรับอาร์ทีดีในระบบระบายความร้อนของเตาหลอม

Real-Time Thermometer for RTD in Furnace Cooling System

ศโรชา รอดลอยทุกข์¹ ศรเทพ ปุญญวัตพล¹ คชพงศ์ สุมานนท์¹ อรรถพล ช่วยคำชู² อภิษฎา ทองรักษา¹ นพกฤษณ์ ดำน้อย²

ณัฐชัชชรร วัทธิกรศิริกุล² และกิจจา ลักขณ์อำนวยพร²

¹นักศึกษานิเทศศาสตร์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร E-mail: sorntap-p@rmutp.ac.th

²อาจารย์วิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร E-mail: kotchapong.s@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการประยุกต์เครื่องวัดอุณหภูมิแบบเวลาจริงสำหรับอาร์ทีดีในระบบระบายความร้อนของเตาหลอม เพื่อวัดค่าอุณหภูมิไม่ให้เกินพิกัดภายในเตาหลอม โดยมีหลักการการทำงานของเครื่องวัดอุณหภูมินี้ ใช้เซ็นเซอร์อาร์ทีดีชนิด PT-100 จำนวน 4 ตัว รับค่าอุณหภูมิมาจากขดลวดเตาหลอม และหอทำความเย็น เพื่อสังเกตพฤติกรรมอุณหภูมิของเตาหลอม โดยแสดงผลอุณหภูมิออกเป็น 2 ทางด้วยกัน คือ 7-Segment กับทางหน้าจอคอมพิวเตอร์

นอกจากนี้ เครื่องวัดอุณหภูมิที่นำเสนอมีคุณสมบัติความแม่นยำตรงเป็นที่ยอมรับได้ และความผิดพลาดสัมพัทธ์ของอุณหภูมิอยู่ในช่วง 0.53 °C ถึง 0.89 °C ตามลำดับ

คำสำคัญ: เครื่องวัดอุณหภูมิ เซ็นเซอร์อาร์ทีดี ขดลวดเตาหลอม เวลาจริง

Abstract

In this article presents the concept how to apply a real-time thermometer for RTD in furnace cooling system. It can measure the heat temperature and let us know if it overheats. The principle of this thermometer is that we use the PT-100 sensor for 4 pieces to receive the temperature from the furnace coil and the cooling tower in the process to observe the temperature of the furnace. The temperature of this thermometer is displayed in two ways. One is displayed on the 7-Segment, and another way is displayed on the computer screen.

In addition, the thermometer presented is capable of the accurate measurement, and has the relative error of the temperature between the range 0.53 °C to 0.89 °C,

Keyword: Thermometer, RTD sensors, Coil furnace, Real time

1. บทนำ

ในอดีตที่ผ่านมางานวิจัยหลายฉบับได้ผลิตชุดอุปกรณ์พร้อมกับเขียนโปรแกรมร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาอุณหภูมิสูงใน [1] ซึ่งคุณลักษณะของเครื่องวัดอุณหภูมิชนิดนี้ได้อธิบายการควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาแบบลดความผันผวน

(Resistance heat- furnace) ด้วยเทอร์โมคัปเปิล ซึ่งผลการทดลองวัดค่าอุณหภูมิจากเครื่องนี้มีอุณหภูมิคงที่อยู่ที่ 3 ค่า คือ 500 700 และ 900 °C ตามลำดับ มีการแสดงผลได้เฉพาะเวลาปัจจุบันผ่านทางหน้าจอ แอลซีดี และไม่เหมาะสมกับงานที่อุณหภูมิสูงเกินกว่า 900 °C และใน [2] เครื่องวัดอุณหภูมิอีกชนิดหนึ่งได้ใช้เทอร์โมคัปเปิลมาประยุกต์กับเตาปลูกผลึก (ทลเลียม) ซึ่งคุณลักษณะของการสร้างเครื่องชนิดนี้ จะต้องสร้างชุดตรวจวัดและบันทึกผลอุณหภูมิขึ้นมา ทำให้มีต้นทุนเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาจากงานวิจัยทั้งสองจะเห็นว่า ควรมีการปรับปรุงในส่วนเรื่องการบันทึกข้อมูลผลอุณหภูมิ และไม่สามารถแสดงผลเป็นแบบเวลาจริง (Real time) ได้

บทความนี้ได้เสนอการสร้างเครื่องวัดอุณหภูมิที่มีการปรับปรุงเป็นแบบเวลาจริง (Real-time) บันทึกข้อมูลโดยใช้โปรแกรมแสดงผล พร้อมทั้งตัวเครื่องวัดอุณหภูมิที่นำเสนอมาประยุกต์ใช้กับระบบระบายความร้อนของเตาหลอมได้จริงในทางปฏิบัติ คุณลักษณะของเครื่องวัดอุณหภูมิที่นำเสนอ ได้ใช้เซ็นเซอร์ อาร์ทีดีชนิด PT-100 จำนวน 4 ตัวสำหรับการวัดค่าอุณหภูมิ และใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล ADUC 7024 สำหรับประมวลผลการทำงาน เพื่อส่งค่าที่วัดได้ไปยัง 7-Segment และได้ใช้โปรแกรมแสดงผลเพื่อแสดงผลลัพธ์ที่อยู่ในรูปกราฟผ่านทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ ตามลำดับ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

อาร์ทีดี (Resistance temperature detectors) เป็นเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิชนิดหนึ่งที่มีหน้าที่ตรวจจับอุณหภูมิโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของโลหะสามารถแสดงได้ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิอาร์ทีดี ชนิด PT100

การคำนวณอุณหภูมิ (T) ของอาร์ทีดี ชนิด PT100 ได้จากสมการที่ 1

$$T = \frac{-R_0 A + \sqrt{R_0^2 A^2 - 4R_0 B(R_0 - R)}}{2R_0 B} \quad (1)$$

โดย R₀ คือ ความต้านทานอาร์ทีดีชนิด PT-100 มีค่า 100 Ω ที่ (T = 0 °C)

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 3
 Proceedings of the 3rd RMUTP Conference of Engineering and Technology

R คือ ความต้านทานอาร์ทีดีชนิด PT-100 มีค่า 100 Ω ที่ (T > 0°C)

ตารางที่ 1 สัมประสิทธิ์ Callendar และ Van Dusen อาร์ทีดีชนิด PT-100

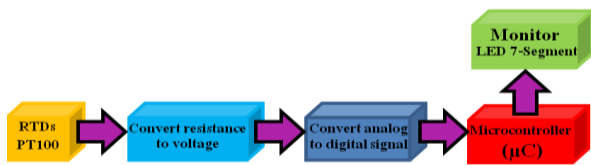
พารามิเตอร์ [3]	ค่าสัมประสิทธิ์
α	0.003850
δ	1.4999
β	0.10863

$$A = \alpha + \left(\frac{\alpha \cdot \delta}{100} \right), B = - \left(\frac{\alpha \cdot \delta}{10^4} \right), C = - \left(\frac{\alpha \cdot \beta}{10^8} \right) \quad (2)$$

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ A, B และ C ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ของตารางที่ 1 กับสมการที่ 2 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ของอาร์ทีดีชนิด PT-100 ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ มีค่า A เท่ากับ 3.908×10^{-3} B เท่ากับ -5.775×10^{-7} และ C เท่ากับ -4.183×10^{-12} ตามลำดับ นอกจากนี้ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกนำมาคำนวณหาอุณหภูมิแวดล้อม โดยจะถูกกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

2.1 หลักการเปลี่ยนอุณหภูมิเป็นแรงดันไฟฟ้าของอาร์ทีดีชนิด PT100 สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์

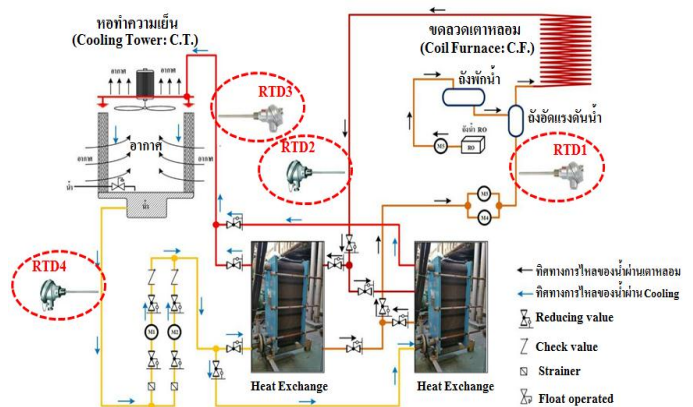
จากรูปที่ 2 ได้แสดงบล็อกไดอะแกรมหลักการทำงานของอาร์ทีดีชนิด PT100 โดยเริ่มจากอุณหภูมิแวดล้อมมีค่าเพิ่มขึ้นจึงทำให้ค่าความต้านทานของอาร์ทีดีมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าความต้านทานดังกล่าวจะถูกเปลี่ยนไปเป็นแรงดันไฟฟ้าในรูปสัญญาณแอนะล็อก อีกทั้งสัญญาณนี้ก็จะถูกแซมปิ้งไปเป็นสัญญาณดิจิทัล พร้อมทั้งถูกส่งค่าไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller : C) เพื่อประมวลผลสัญญาณและติดต่อการแสดงผลผ่านทางหน้าจอ LED 7-Segment ตามลำดับ



รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของ PT100 กับไมโครคอนโทรลเลอร์

2.2 การประยุกต์เครื่องวัดอุณหภูมิที่นำเสนอกับระบบระบายความร้อนของเตาหลอม

จากรูปที่ 3 แผนผังการทำงานของระบบระบายความร้อนแบบขดลวดเตาหลอม เมื่อพิจารณาในระบบนี้ มีการติดตั้งตัวเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchange) มีจำนวน 2 ชุด และการติดตั้ง Strainer มีจำนวน 2 ชุด เพื่อลดค่าอุณหภูมิในเตาหลอมของขบวนการหลอมทองเหลือง (ขนาด 3 ตัน) โดยระบบดังกล่าวนี้ ได้ใช้ตัวเปลี่ยนความร้อนสำหรับถ่ายเทความร้อนด้วยน้ำให้ไหลผ่านท่อเข้าไปยังขดลวดเตาหลอม (C.F.) และหอทำความเย็น (C.T.) ตามลำดับ

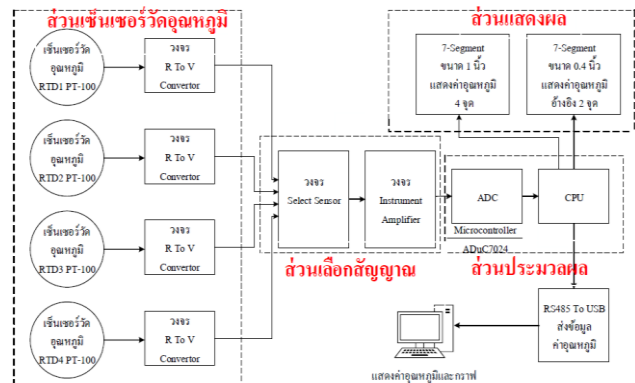


รูปที่ 3 ขบวนการทำงานระบบระบายความร้อนแบบขดลวดเตาหลอม

ดังนั้นน้ำที่ไหลออกจาก C.F. จะมีอุณหภูมิที่สูงกว่าน้ำที่ไหลเข้า เพราะน้ำที่ไหลออกจาก C.F. จะถ่ายเทความร้อนมาจากในเตาหลอม แต่ในทางกลับกันน้ำที่ไหลออกจาก C.T. มีอุณหภูมิต่ำกว่าน้ำที่ไหลเข้าอยู่เสมอ เพราะใน C.T. ได้ใช้พัดลมขนาดใหญ่ดูดอากาศที่ระบายความร้อนออกที่ นอกจากนี้น้ำที่ใช้ในระบบนี้ต้องนำมาผ่านตัว Strainer เพื่อทำการกรองฝุ่นตะกอนก่อนไหลเข้าตัวเปลี่ยนความร้อนตลอดเวลา

2.3 หลักการทำงานของเครื่องวัดอุณหภูมิที่นำเสนอ

เริ่มจากหลักการทำงานของวัดอุณหภูมิที่นำเสนอได้ใช้เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิอาร์ทีดี จำนวนทั้งหมด 4 ตัว สำหรับวัดค่าอุณหภูมิที่มาจากขดลวดเตาหลอม (C.F.) และ หอทำความเย็น (C.T.) จากนั้นค่าอุณหภูมิที่วัดได้จะมีผลกับการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานในตัวอาร์ทีดีตลอดเวลา และค่าที่ได้จะถูกส่งเข้าสู่วงจร R to V Converter เพื่อแปลงค่าความต้านทานให้อยู่ในรูปแรงดันไฟฟ้า โดยแรงดันนี้ถูกส่งไปที่ ส่วนเลือกสัญญาณ Select-Sensor เพื่อเลือกค่าสัญญาณที่วัดได้จากอาร์ทีดีแต่ละตัว และส่งสัญญาณไปยัง Instrument Amplifier เพื่อขยายสัญญาณก่อนส่งเข้าไปยังการแปลงสัญญาณแอนะล็อกไปเป็นดิจิทัล (ADC) ของไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผลและแสดงค่าอุณหภูมิมบน 7-Segment และแสดงผลเป็นกราฟบนหน้าจอกอมพิวเตอร์ ดังในรูปที่ 4



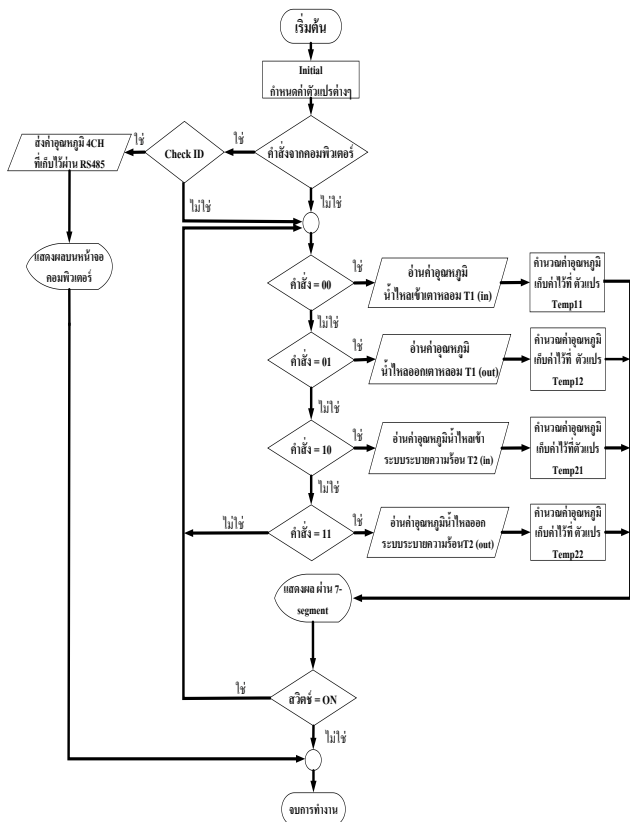
รูปที่ 4 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องวัดอุณหภูมิที่นำเสนอ

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 3

Proceedings of the 3rd RMUTP Conference of Engineering and Technology

แผนผังโปรแกรมของเครื่องวัดอุณหภูมิที่นำเสนอมีการออกแบบขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมให้ง่ายต่อการเขียนและสะดวกต่อการแก้ไขโปรแกรมในการทำงานต่างๆ ดังรูปที่ 5



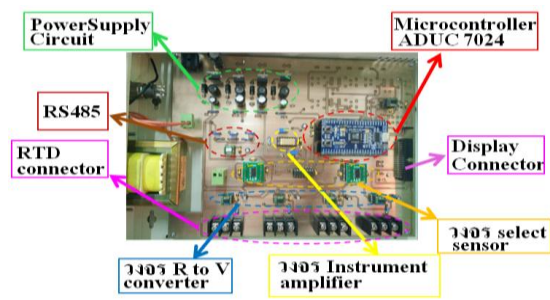
รูปที่ 5 แผนผังโปรแกรมของเครื่องวัดอุณหภูมิที่นำเสนอ

จากรูปที่ 5 เริ่มจากกำหนดค่าเริ่มต้น ตัวแปร เช่น อุณหภูมิ น้ำไหลเข้าเตาหมอม $T_1(in)$, อุณหภูมิ น้ำไหลออกเตาหมอม $T_1(out)$, อุณหภูมิ น้ำไหลเข้าหอทำความเย็น $T_2(in)$, อุณหภูมิ น้ำไหลออกหอทำความเย็น $T_2(out)$, ตัวแปรเก็บข้อมูลอุณหภูมิจาก RTD1 คือ Temp1 จนถึงตัวแปรเก็บข้อมูลอุณหภูมิจาก RTD4 คือ Temp22 ตามลำดับ ซึ่งการกำหนดเงื่อนไขการแสดงผลอุณหภูมิออกเป็น 2 โหมด คือ โหมดแรกแสดงผลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ และโหมดที่สอง แสดงผลผ่าน 7 Segment โดยโหมดแรก ทำการตรวจสอบหมายเลขรหัสผู้ใช้คอมพิวเตอร์ ผ่านทางพอร์ต RS 485 (แสดงผลอุณหภูมิที่วัดค่าได้จาก RTD ทั้ง 4 ตัว แบบเวลาจริงพร้อมกัน) และในส่วนโหมดที่สองใช้คำสั่งเงื่อนไข if ในภาษาซี กำหนดเงื่อนไขอ่านค่า ($T_1(in)$, $T_1(out)$, $T_2(in)$ และ $T_2(out)$) และเก็บค่าอุณหภูมิของ RTD ทั้ง 4 ตัว ไว้ในตัวแปร Temp ตามลำดับ

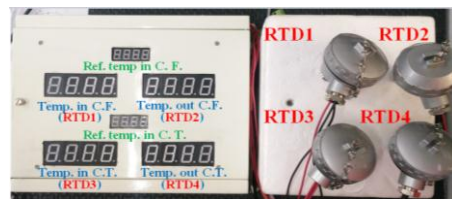
2.4 โครงสร้างของเครื่องวัดอุณหภูมิที่นำเสนอ

บทความนี้ได้ทำการสร้างเครื่องวัดอุณหภูมิที่นำเสนอไว้ในรูปที่ 6 สามารถใช้ในทางปฏิบัติพร้อมทั้งสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับระบบระบายความร้อนของเตาหมอมได้จริง ซึ่งโครงสร้างของเครื่องวัดอุณหภูมิชนิดนี้จะประกอบไปด้วยส่วนที่สำคัญดังต่อไปนี้

ส่วนที่หนึ่งวงจร Power Supply ทำหน้าที่ เป็นแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงให้กับวงจรต่างๆ ส่วนที่สองวงจร ไมโครคอนโทรลเลอร์ (ADUC7024) ทำหน้าที่ ประมวลผลสัญญาณที่รับค่าจาก RTD แต่ละตัวในรูปสัญญาณดิจิทัล ส่วนที่สาม RS485 ทำหน้าที่เป็นพอร์ตใช้สำหรับติดต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ ส่วนที่สี่วงจร R to V converter ทำหน้าที่ แปลงค่าความต้านทานในอาร์ทีดีเป็นแรงดันไฟฟ้า ส่วนที่ห้าวงจร Instrument amplifier ทำหน้าที่ขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าสำหรับการวัดค่า ส่วนที่หกวงจร select sensor ทำหน้าที่เป็นวงจรเลือกเซ็นเซอร์ที่จะแสดงผลผ่านทาง 7-Segment ตามลำดับ



รูปที่ 6 วงจรรวมของเครื่องวัดอุณหภูมิที่นำเสนอ



รูปที่ 7 เครื่องวัดอุณหภูมิที่นำเสนอพร้อมใช้งาน

3. ผลการทดลอง และการทดสอบเครื่องวัดอุณหภูมิที่นำเสนอ

ในส่วนหัวข้อนี้ได้ทำการสอบเทียบ [4] เครื่องวัดอุณหภูมิที่นำเสนอเปรียบเทียบกับเครื่องมือสอบเทียบยี่ห้อ Fluke 712b ดังแสดงในตารางที่ 2 เพื่อหาความแม่นยำตรงของเครื่องวัดอุณหภูมิที่สร้างขึ้นในรูปที่ 7 ก่อนที่จะนำเครื่องนี้ไปทดสอบสมรรถนะต่อไปในระบบระบายความร้อนของเตาหมอม (บริษัท อาซาฮี-ไทยอัลลอย จำกัด)

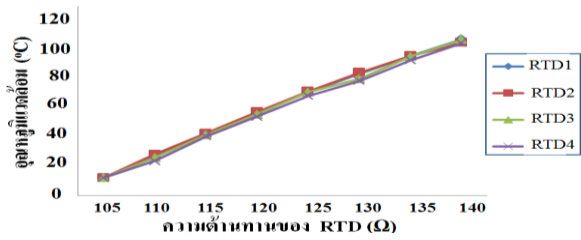
ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบการคำนวณและผลการวัดอุณหภูมิของเครื่องนำเสนอ

ความต้านทาน RTD	ความต้านทาน RTD	จำนวนอุณหภูมิ	ผลการวัดอุณหภูมิ(T_r) จากเครื่องวัดอุณหภูมิที่นำเสนอ				ความผิดพลาดสัมพัทธ์ของอุณหภูมิ (%)			
			RTD1	RTD2	RTD3	RTD4	RTD1	RTD2	RTD3	RTD4
(Ω)	(Ω)	($^{\circ}C$)	RTD1	RTD2	RTD3	RTD4	RTD1	RTD2	RTD3	RTD4
105	105.2	13.28	11.4	11.4	11.4	11.4	14.16	14.16	14.16	14.16
110	110.2	26.16	25.1	25.2	25.1	25.0	4.05	3.67	4.05	4.43
115	115.2	39.15	39.1	39.1	38.4	38.6	0.13	0.13	1.92	1.40
120	120.2	52.06	52.5	52.5	52.4	52.1	0.85	0.65	0.65	0.08
125	125.2	64.98	65.5	65.5	65.5	65.2	0.80	0.80	0.8	0.14
130	130.1	77.87	77.2	77.3	77.6	77.7	0.86	0.73	0.34	0.22
135	135.2	90.17	88.3	88.2	88.1	88.8	2.07	2.18	2.30	1.52
140	140.1	104.3	99.1	98.8	98.8	98.7	5.00	5.29	5.29	5.39

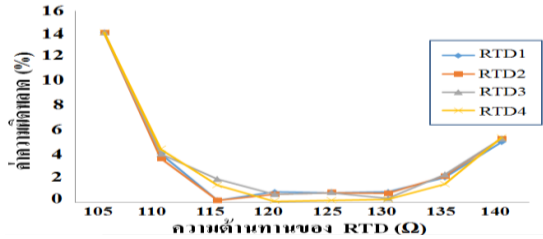
บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 3

Proceedings of the 3rd RMUTP Conference of Engineering and Technology

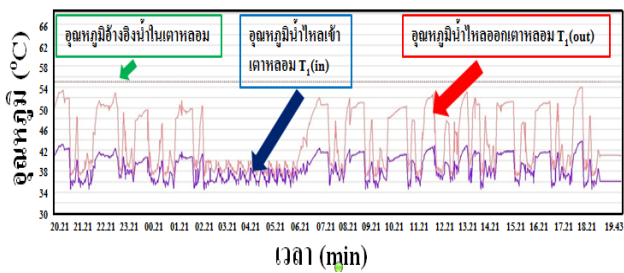


รูปที่ 8 กราฟแสดงผลอุณหภูมิเทียบกับค่าความต้านทาน (RTD)

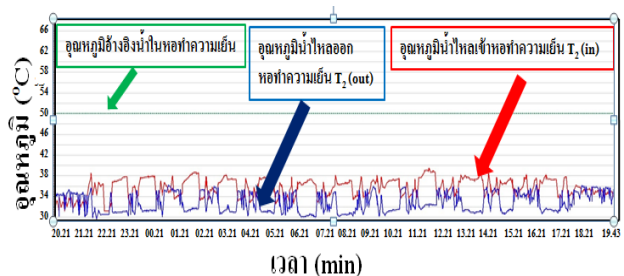


รูปที่ 9 กราฟค่าความผิดพลาดเทียบกับค่าความต้านทาน (RTD)

จากตารางที่ 2 มีความสัมพันธ์กับรูปที่ 8 และรูปที่ 9 โดยผลการสอบเทียบของกราฟในรูปที่ 8 เป็นกราฟเชิงเส้น (linear graph) ระหว่าง ความต้านทาน RTD แปรผันตรงกับอุณหภูมิแวดล้อมที่ได้จากวิเคราะห์ข้อมูล (Fitting- curve) ใน [5] โดยเริ่มตั้งแต่อุณหภูมิแวดล้อม 13.28 °C จนถึง 104.3 °C นอกจากนี้ ผลความผิดพลาดสัมพัทธ์ของอุณหภูมิแวดล้อม (%) มีความผิดพลาดลดลงในช่วงความต้านทานตั้งแต่ 115 Ω จนถึง 130 Ω และมีความผิดพลาดสัมพัทธ์อุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.53% ถึง 0.89% จึงเหมาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานวัดอุณหภูมิทางด้านอุตสาหกรรมเตาหลอมได้



รูปที่ 10 ผลการวัดอุณหภูมิที่เตาหลอมด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิที่นำเสนอแบบเวลาจริง



รูปที่ 11 ผลการวัดอุณหภูมิของน้ำที่หอทำความเย็นด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิที่นำเสนอแบบเวลาจริง

ในรูปที่ 10 ผลกราฟของการวัดอุณหภูมิที่ไหลเข้า $T_1(in)$ และออกจากเตาหลอม $T_1(out)$ มีอุณหภูมิอ้างอิงน้ำในเตาหลอมไม่เกิน 55 °C ส่วนรูปที่ 11 ผลกราฟของการวัดอุณหภูมิที่ไหลเข้า $T_2(in)$ และออกจากหอทำความเย็น $T_2(out)$ มีอุณหภูมิอ้างอิงน้ำหอทำความเย็นไม่เกิน 50 °C ตามลำดับ ซึ่งผลจากการวัดค่าผ่านทางหน้าจอกอมพิวเตอร์ ในรูปที่ 10 อุณหภูมิเฉลี่ยของ $T_1(out)$ มีค่ามากกว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของ $T_1(in)$ ประมาณ 4 °C ส่วนผลในรูปที่ 11 อุณหภูมิเฉลี่ยของ $T_2(in)$ มีค่ามากกว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของ $T_2(out)$ ประมาณ 2 °C ตามลำดับ

4. สรุป

จากผลการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิที่นำเสนอจะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์อุณหภูมิเฉลี่ยจะอยู่ในช่วง 0.53 % ถึง 0.89 % ของตัวเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิแบบอาร์ทีดี ทั้ง 4 ตัว และช่วงความต้านทานอยู่ในช่วง 115 Ω ถึง 130 Ω เป็นช่วงที่มีความแม่นยำตรงมาก ซึ่งการออกแบบได้สอดคล้องกับทฤษฎี และในอนาคตผลการวัดอุณหภูมิด้วยเครื่องที่นำเสนอแบบเวลาจริง หรือแสดงผลผ่านทางหน้าจอกอมพิวเตอร์ยังสามารถพัฒนาให้มีการส่งเสียงการแจ้งเตือนเมื่อระดับอุณหภูมิแวดล้อมสูงเกินกว่าอุณหภูมิอ้างอิงได้อีกด้วย

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] เกศแก้ว ไกรวงศ์, ชุดควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาอุณหภูมิสูงแบบตั้งโปรแกรม, การศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2547.
- [2] ฆนากร เต็มดี, ประเสริฐ อุประทอง และภัทรวิธ เจริญชาติ, การออกแบบและจัดสร้างชุดวัดบันทึกค่าอุณหภูมิเตาปลูกผลึก ซึ่งเชื่อมโยงไอโอดี (ทัลเลียม), ปรินูญานิพนธ์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพ เชียงใหม่, 2552.
- [3] WIKA Alexander Wiegand SE and Co. KG, "Callendar-Van Dusen equations for the calibration of platinum resistance thermometers," https://www.wikapolska.pl/upload/DS_IN0029_en_co_59667.pdf
- [4] Fluke Calibration, "How to calibrate an RTD or Platinum Resistance Thermometer (PRT)" http://download.flukecal.com/pub/literature/3498460B_EN_w.pdf
- [5] The Minitab Blog, "Curve Fitting with Linear and Nonlinear Regression" <http://blog.minitab.com/blog/adventures-in-statistics-2/curve-fitting-with-linear-and-nonlinear-regression>