

การพัฒนาเตาเผาเซรามิกแบบอัตโนมัติโดยใช้ PLC ที่ควบคุมอุณหภูมิแบบหลายขั้นตอน บนพื้นฐานอัลกอริทึม PID

Development of an Automatic Ceramic Kiln Using PLC with Multi-Stage Temperature Control Based on PID Algorithm

พรหมพัทธ์ บุญรักษา¹ ัญญพ ศิริมาศเกษม^{2*} วิวัฒน์ จิณศิริกุล³ มณีนรัตน์ ชนะสกุลนิยม⁴ และธีระพงษ์ บุญรักษา⁵

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

promphak.b@rmutsb.ac.th

² สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร กรุงเทพมหานคร thannyaphob.s@pnru.ac.th*

³ สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

wiwat.je@cit.kmutnb.a.th

⁴ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี mameerat.cha@bkkthon.ac.th

⁵ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ นครปฐม terapong.booo@rmutr.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างระบบควบคุมการทำงานเตาเผาเซรามิกอัตโนมัติเพื่อแก้ไขข้อจำกัดของระบบเดิมให้สามารถควบคุมอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำ สม่าเสมอ และปลอดภัย ระบบที่พัฒนาขึ้นใช้ PLC รุ่น FX3U-24MR ร่วมกับโมดูล MI-LK3U-24MR-4AD-2DA และอุปกรณ์เสริม ได้แก่ เทอร์โมคัปเปิลชนิด S สำหรับการวัดอุณหภูมิ Solid State Relay (SSR) สำหรับควบคุมการจ่ายไฟฟ้าไปยังฮีตเตอร์ จอสัมผัส HMI Samkoon ขนาด 7 นิ้วสำหรับการตั้งค่าและแสดงผล และ Temperature Controller รุ่น DTK4848V12 เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการควบคุมอุณหภูมิ โปรแกรมควบคุมพัฒนาด้วยหลักการ PID และ Ladder Diagram สามารถตั้งค่าโปรไฟล์การเผาแบบหลายช่วง (multi-stage firing) และลดความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิได้อย่างมีนัยสำคัญ ผลการทดสอบพบว่าระบบสามารถรักษาอุณหภูมิที่ $\pm 1-5^{\circ}\text{C}$ จากค่า Setpoint ในช่วง Ramp และ Soak และสามารถทำให้อุณหภูมิถึงค่า 773°C ได้อย่างแม่นยำและคงที่ และในส่วนของประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงาน พบว่าการเผา 1 รอบใช้พลังงานรวม 165.18 kWh มีต้นทุนไฟฟ้าประมาณ 660.72 บาท ให้เห็นว่าระบบควบคุมอัตโนมัติสามารถเพิ่มความแม่นยำและลดความสูญเสียได้ดีกว่าระบบควบคุมแบบอนาล็อกอย่างชัดเจน

คำสำคัญ: เตาเผาเซรามิกอัตโนมัติ, การควบคุมอุณหภูมิ, การควบคุมแบบ PID, PLC, การใช้พลังงานไฟฟ้า

Abstract

This article presents the design and development of an automatic control system for a ceramic kiln aimed at overcoming the limitations of conventional systems by enabling precise, consistent, and safe temperature regulation. The

proposed system employs a PLC model FX3U-24MR in conjunction with the MI-LK3U-24MR-4AD-2DA module, supported by auxiliary devices including an S-type thermocouple for temperature measurement, a Solid State Relay (SSR) for power control to the heater, a 7-inch Samkoon HMI touch panel for parameter setting and monitoring, and a DTK4848V12 temperature controller to enhance temperature accuracy. The control program was developed based on PID principles and Ladder Diagram programming, allowing for multi-stage firing profiles and significantly reducing temperature deviations. Experimental results demonstrate that the system can maintain the firing temperature within $\pm 1-5^{\circ}\text{C}$ of the setpoint during both ramping and soaking phases, and can accurately achieve and sustain a temperature of 773°C . In terms of energy performance evaluation, one firing cycle consumed approximately 165.18 kWh of electricity, with a cost of about 660.72 THB. The analysis indicates that the automatic control system provides superior accuracy and reduces energy losses more effectively than conventional analog control systems.

Keywords: Automatic ceramic kiln, temperature control, PID control, PLC, electrical energy consumption

1. บทนำ

เซรามิก (Ceramic) เป็นวัสดุที่มนุษย์รู้จักและใช้ประโยชน์มาอย่างยาวนาน โดยเริ่มต้นจากการนำดินเหนียวมาปั้นขึ้นรูปเป็นภาชนะก่อนนำไปเผาให้แข็งแรง และทนทาน [1] ต่อมาได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนกลายเป็นเซรามิกสมัยใหม่ (Advanced Ceramics) ที่มีคุณสมบัติเฉพาะทางสูง ในด้านความแข็งแรง ทนความร้อน ฉนวนหรือการนำไฟฟ้า ทำให้

เซรามิกกลายเป็นวัสดุสำคัญในหลากหลายอุตสาหกรรม ได้แก่ อิเล็กทรอนิกส์ ยานยนต์ การแพทย์ และอวกาศ โดยเฉพาะในชิ้นส่วนที่ต้องการความแม่นยำและความทนทานสูง เช่น ตัวเก็บประจุ เซ็นเซอร์ กระดุกเทียม หรือเกราะกันกระสุน เครื่องสุกภัณฑ์เครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร ลูกถ้วยไฟฟ้า เป็นต้น โดยมีทั้งอุตสาหกรรมเซรามิกขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่ [2] การผลิตและการจำหน่ายผลิตภัณฑ์เซรามิกในประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น หลังจากวิกฤตการณ์การแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ในปี 2567 ที่ผ่านมามีมูลค่าส่งออกเซรามิกคราฟต์สำหรับใช้บนโต๊ะอาหารและเครื่องครัวเป็นอันดับที่ 4 ของโลก ด้วยมูลค่า 139.23 ล้านดอลลาร์สหรัฐ เพิ่มขึ้นร้อยละ 5.89 เมื่อเทียบกับปี 2566 [3]

การผลิตเซรามิกในระดับอุตสาหกรรมของเตาเผาเซรามิก เป็นกระบวนการแปรสภาพของวัสดุ เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการ โดยเฉพาะกระบวนการเผา (Firing Process) ที่มีอิทธิพลต่อโครงสร้างจุลภาค ความแข็งแรงเชิงกล และสมบัติเฉพาะของวัสดุ การควบคุมอุณหภูมิอย่างแม่นยำจึงเป็นสิ่งสำคัญต่อคุณภาพของชิ้นงานเซรามิก จากการใช้งานจริงในอุตสาหกรรมพบว่าเตาเผาส่วนใหญ่มักเป็นระบบควบคุมอัตโนมัติหรือกึ่งอัตโนมัติ [4] จำเป็นจะต้องมีทักษะและประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงานในการตั้งค่าและติดตามอุณหภูมิอย่างใกล้ชิด วิธีการประเมินอุณหภูมิแบบดั้งเดิม เช่น การสังเกตสีของเปลวไฟ หรือการดูการโค้งงอของ Pyrometric cone มีข้อจำกัดหลายประการ ทั้งในด้านความแม่นยำ ความต่อเนื่องของคุณภาพ และความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับผู้ที่ยังขาดประสบการณ์ ข้อจำกัดเหล่านี้ส่งผลให้อัตราความเสียหายของชิ้นงานสูงถึง 25-35% ขณะที่ระบบควบคุมอัตโนมัติด้วย PLC (Programmable Logic Controller) สามารถลดความคลาดเคลื่อนเหลือเพียง 5-10% [5] เมื่อมีการปรับจูนอย่างเหมาะสม อีกทั้งยังช่วยลดภาระการทำงาน ลดความเสี่ยง และเพิ่มความปลอดภัยได้อย่างมีนัยสำคัญ

จากปัญหาและข้อจำกัดข้างต้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการศึกษาและพัฒนากระบวนการควบคุมเตาเผาเซรามิกแบบอัตโนมัติ โดยใช้เทคโนโลยี PLC ร่วมกับเซนเซอร์อุณหภูมิชนิด Thermocouple Type S สามารถวัดอุณหภูมิได้แม่นยำและทนความร้อนสูง ประมวลผลด้วยสมการควบคุม PID (Proportional-Integral-Derivative) เพื่อให้ระบบสามารถควบคุมอุณหภูมิในหลายช่วงเวลา (Multi-stage firing profile) ได้อย่างเสถียรและสม่ำเสมอ การพัฒนานี้ช่วยยกระดับคุณภาพของการผลิตเซรามิกไปถึงการใช้งานในอุตสาหกรรม โดยมุ่งหวังให้เกิดการลดความสูญเสีย เพิ่มประสิทธิภาพ สามารถควบคุมอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำ สม่ำเสมอ และมีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น

2. ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการประยุกต์ใช้ Programmable Logic Controller (PLC) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุนระบบอัตโนมัติได้อย่างชัดเจน เช่น งานของคงศักดิ์ จินาวัลย์, (2563) [6] ที่ใช้ PLC แทน

วงจรรีเลย์ในการควบคุมระบบบำบัดน้ำเสีย ทำให้ระบบตอบสนองรวดเร็ว และมีความเสถียรมากขึ้น

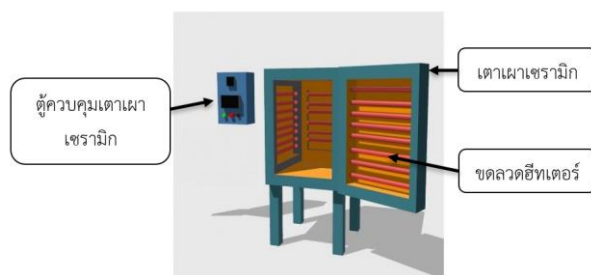
ด้านการควบคุมอุณหภูมิ งานวิจัยของกิตติคุณ นามสง่า, (2562) [7] พบว่าการใช้ PLC ร่วมกับ PID Controller ช่วยลดความคลาดเคลื่อนเหลือเพียง $\pm 3^\circ\text{C}$ และลด Overshoot ได้อย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่พิมพ์ชนก วงศ์ไธ (2561) ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino ควบคุมเตาเผาเซรามิกผ่าน HMI แบบสัมผัส ทำให้สามารถตั้งค่ากราฟการเผาได้ยืดหยุ่น และลดภาระการเผารว้างได้มากกว่า 60% ส่วนงานของประภาวรรณ แพงศรี และพรพรณิศา แพงศรี, (2567) [8] ยังยืนยันประสิทธิภาพของ PID ในการควบคุมอุณหภูมิหมักไวน์ที่เสถียรและมีคุณภาพสูง

3. ขั้นตอนวิธีการดำเนินงาน

ในการวิจัยเรื่องการพัฒนากระบวนการควบคุมการทำงานเตาเผาเซรามิกอัตโนมัติมีขั้นตอนการดำเนินงาน เริ่มต้นจากการออกแบบระบบควบคุมการทำงานของเตาเผาเซรามิกด้วยโปรแกรม Solid work แล้วทำการสร้างอุปกรณ์จริง จากนั้นนำอุปกรณ์มาติดตั้งและทดสอบระบบ เก็บรวบรวมข้อมูล และการวิเคราะห์ข้อมูล ตามลำดับ ซึ่งแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

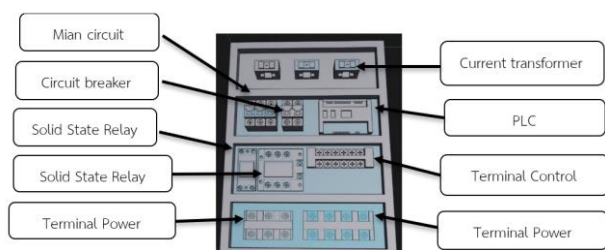
3.1 การออกแบบโครงสร้างตู้ควบคุมการทำงานเตาเผาเซรามิกอัตโนมัติ

ในการออกแบบระบบ เริ่มต้นจากการที่ผู้วิจัยได้จำลองเตาเผาเซรามิกในรูปแบบสามมิติด้วยโปรแกรม Solid Work Simulation ที่มีรูปทรงเป็นลูกบาศก์ (Cube) มีขนาดพื้นที่ในการวางชิ้นงานได้มาก จะต้องคำนึงถึงทิศทางการไหลของเปลวไฟและความร้อน โดยมีส่วนประกอบ 3 ส่วน ประกอบด้วย เตาเผาเซรามิก ขดลวดฮีตเตอร์ และตู้ควบคุมเตาเผาเซรามิกแสดงดังรูปที่ 1

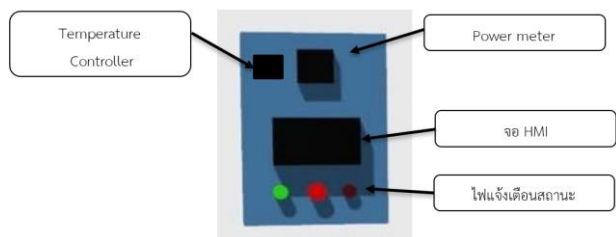


รูปที่ 1 ออกแบบเตาเผาเซรามิกและตู้ควบคุม

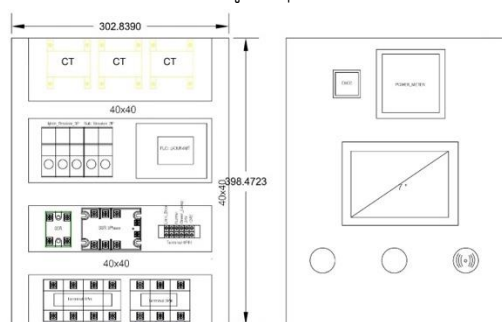
การออกแบบและจำลองภายในตู้ควบคุม ประกอบด้วย ด้านบนสุดคือ Current transformer โชนที่สองถัดลงมา คือ Main circuit, Circuit breaker และ PLC โชนที่สามถัดลงมา คือ Solid State Relay, Terminal Control และโชนล่างสุด คือ Terminal Power (Main) และ Terminal Power (Load) แสดงดังรูปที่ 2 ในส่วนของการจำลองหน้าตู้ควบคุมประกอบด้วย Temperature Controller Power meter จอ HMI และไฟแจ้งเตือนสถานะ แสดงดังรูปที่ 3 และในรูปที่ 4 แสดง Layout ของตู้ควบคุมการทำงานเตาเผาเซรามิกอัตโนมัติ



รูปที่ 2 ส่วนประกอบภายในตู้ควบคุมเตาเผาเซรามิกอัตโนมัติ



รูปที่ 3 การออกแบบด้านหน้าตู้ควบคุมของเตาเผาเซรามิกอัตโนมัติ



รูปที่ 4 Layout ของตู้ควบคุมการทำงานเตาเผาเซรามิกอัตโนมัติ

3.2 การออกแบบการควบคุมแบบ PID ของเตาเผาเซรามิกอัตโนมัติ

การออกแบบระบบควบคุมของเตาเผาเซรามิกที่พัฒนาขึ้นนี้ใช้หลักการควบคุมแบบ PID (Proportional Integral Derivative) ซึ่งเป็นอัลกอริทึมมาตรฐานที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการควบคุมอุณหภูมิ [6-7] โดยสมการพื้นฐานของ PID สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 1 [8]

$$Y(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

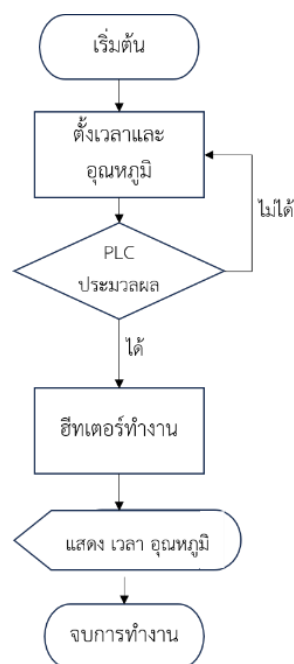
โดยที่ $e(t) = r(t) - y(t)$ คือค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าอ้างอิง (Setpoint, $r(t)$) และค่าอุณหภูมิที่วัดได้จริง (Actual, $y(t)$) K_p คือค่าขยายสัดส่วน (Proportional gain) ใช้ควบคุมความไวต่อความคลาดเคลื่อน K_i คือค่าขยายอินทิกรัล (Integral gain) ใช้ขจัดความคลาดเคลื่อนคงค้าง (Steady-state error) K_d คือค่าขยายอนุพันธ์ (Derivative gain) ใช้ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของความคลาดเคลื่อน ลดการแกว่งตัวของอุณหภูมิ [9]

ในการออกแบบและทดสอบตัวควบคุม PID สำหรับเตาเผาเซรามิก ทีมวิจัยใช้การทดสอบลักษณะพลวัตของระบบ (step/relay test) เพื่อกำหนดค่าตั้งต้น และปรับปรุงเข้าด้วยการทดสอบแบบปิดวงจร โดยเพิ่มหรือ

ลดค่า K_p , K_i , K_d ตามพฤติกรรมของระบบ ผลการปรับจนได้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมคือ $K_p = 2.0$, $K_i = 0.0033$ และ $K_d = 120$ ซึ่งช่วยลดความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง $\pm 1-5^\circ\text{C}$ และทำให้ระบบควบคุมมีความเสถียร เหมาะสมกับลักษณะการเผาเซรามิกแบบหลายช่วงเวลา เอาต์พุตของตัวควบคุม PID จะถูกแปลงให้อยู่ในรูป Duty Cycle สำหรับขับ Solid State Relay (SSR) เพื่อควบคุมการจ่ายพลังงานไปยังฮีตเตอร์ โดยสามารถปรับสัดส่วนการทำงาน (On/Off Time-Proportioning) ภายในช่วงเวลา 2-10 วินาที ทำให้ระบบสามารถรักษาอุณหภูมิของเตาเผาให้อยู่ในช่วงคลาดเคลื่อนเพียง $\pm 1-5^\circ\text{C}$ เมื่อเทียบกับค่าอ้างอิง ซึ่งมีความแม่นยำสูงกว่าการควบคุมแบบดั้งเดิมที่ใช้การสั่งเกตด้วยสายดาหรือระบบอนาล็อก

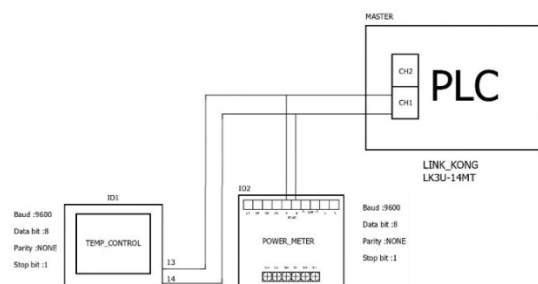
3.3 การออกแบบระบบควบคุมการทำงานเตาเผาเซรามิก

ในการพัฒนาระบบควบคุมการทำงานเตาเผาเซรามิกอัตโนมัติ ที่มีการใช้งานเตาอัตโนมัติ เริ่มต้นจากการตั้งค่าอุณหภูมิและเวลา หลังจากนั้นระบบจะส่งโปรแกรมไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อสั่งการให้ฮีตเตอร์ทำงาน ในการแสดงอุณหภูมิและเวลา หากประมวลผลได้จะทำการเก็บข้อมูล แต่ถ้าประมวลผลไม่ได้จะส่งโปรแกรมไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์อีกครั้งแสดงการทำงานของระบบดังรูปที่ 5

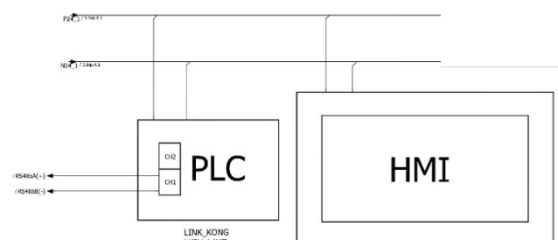


รูปที่ 5 การทำงานของระบบการควบคุมเตาเผาเซรามิกและตู้ควบคุม

ในการออกแบบวงจรเครื่องควบคุมการทำงานเตาเผาเซรามิกอัตโนมัติจะประกอบด้วยวงจรดังต่อไปนี้ วงจรการเชื่อมต่อของ Power meter วงจรการจ่ายแรงดันไฟฟ้า 24 V_{DC} ให้กับ PLC แสดงการเชื่อมต่อดังรูปที่ 6 และจอ HMI ในส่วนของการจ่ายแรงดันไฟฟ้า 24 VDC ให้กับ PLC และจอ HMI แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิและเครื่องวัดกำลังไฟฟ้าเข้ากับ PLC ผ่านทางสื่อสาร RS485



รูปที่ 7 การจ่ายแรงดันไฟฟ้า 24 VDC ให้กับ PLC และจอ HMI

3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้ดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลอย่างเป็นระบบเพื่อวิเคราะห์และประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงานในกระบวนการให้ความร้อน (Heat Treatment) ของระบบเตาเผา โดยมีการบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ ซึ่งประกอบด้วยอุณหภูมิที่ตั้งไว้ (Set point) และอุณหภูมิที่วัดได้จริง (Actual Temperature) พร้อมทั้งการสะสมพลังงานไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลา โดยมีการแบ่งขั้นตอนออกเป็นช่วง Ramp และ Soak ตามลำดับการควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการ และได้เก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับพลังงานไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor) และราคาค่าไฟฟ้า ณ เวลาที่ทำการทดลอง ขั้นตอนการบันทึกผลแสดงรายละเอียดดังนี้

1. การวัดและควบคุมอุณหภูมิ

ผู้วิจัยใช้เทอร์โมคัปเปิล Type S วัดอุณหภูมิสูงในเตาเผา ส่งสัญญาณไปยัง PLC ที่ควบคุมอุณหภูมิด้วยวงจร PID ตามโปรแกรม Ramp/Soak เพื่อปรับความร้อนแม่นยำ พร้อมใช้ Pyrometric Cone (Pyrometric Cone คือ โคนวัดอุณหภูมิ เป็นวัตถุทนไฟที่ทราบอุณหภูมิ สามารถทนความร้อนได้แน่นอน รูปร่างเหมือนพีระมิดเล็ก ๆ มีความยาว 3-6 เซนติเมตร เมื่อต้องการวัดอุณหภูมิที่จุดใด จะวางตามจุดที่ต้องการและมีส่วนที่อยู่ใกล้ช่องสำหรับมองจากภายนอก เพื่อตรวจสอบเมื่อเผาอุณหภูมิสูงที่สูงถึงจุดที่ต้องการ ถ้าหาก cone งอโค้งลงเพียงหนึ่งอัน แสดงอุณหภูมิใกล้จะถึงจุดที่ต้องการ ถ้าหาก cone อื่นกลางงอโค้งลง แสดงว่าอุณหภูมิถึงจุดที่ต้องการ) ตรวจสอบพลังงานความร้อนสะสมจริงในเตาแบบเชิงคุณภาพ โดยพิจารณาระดับการโค้งงอของโคนในแต่ละหมายเลข (เช่น Cone 017 $\approx 773^{\circ}\text{C}$, Cone 014 $\approx 843^{\circ}\text{C}$, Cone 5 $\approx 1186^{\circ}\text{C}$, Cone 7 $\approx 1215^{\circ}\text{C}$) เพื่อยืนยันว่าอุณหภูมิถึงตามที่ต้องการในแต่ละช่วงการเผา

2. การวัดและบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้า

ในการวัดและบันทึกค่าไฟฟ้าในระบบ ได้แก่ พลังงานไฟฟ้า (kWh) กระแสไฟฟ้า (A) แรงดันไฟฟ้า (V) ค่า Power Factor และความถี่ (Hz) จะถูกวัดด้วยเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้าแบบเนกประสงค์ (Multi Power Meter) ซึ่งสามารถบันทึกข้อมูลได้อย่างต่อเนื่องและแม่นยำในแต่ละช่วงเวลา ข้อมูลที่ได้จัดเก็บเพื่อใช้ในการคำนวณค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าต่อรอบการทำงาน ตามอัตราหน่วยค่าไฟฟ้าที่กำหนด (แสดงผลในรูปแบบของต้นทุนต่อรอบการทำงาน คำนวณราคาในหน่วยบาท) สมการที่ใช้ในการคำนวณแสดงสมการที่ 2-6 [10]

พลังงานไฟฟ้า (E) ที่ใช้ในช่วงเวลา Δt ชั่วโมง

$$E = P_{kw} \times \Delta t \quad (2)$$

ค่าใช้จ่ายทางไฟฟ้า ($Cost$, อัตรา r บาท/หน่วย)

$$Cost = E \times r \quad (3)$$

ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ (S)

$$S = \sqrt{3}V_{L-L} \times I_L \quad (4)$$

ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P)

$$P = S \times PF \quad (5)$$

ค่ากำลังรีแอกทีฟ (Q)

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (6)$$

โดยที่ V_{L-L} แรงดันเฟสต่อเฟส, I_L คือกระแสในสาย [9]

4. ผลการวิจัย

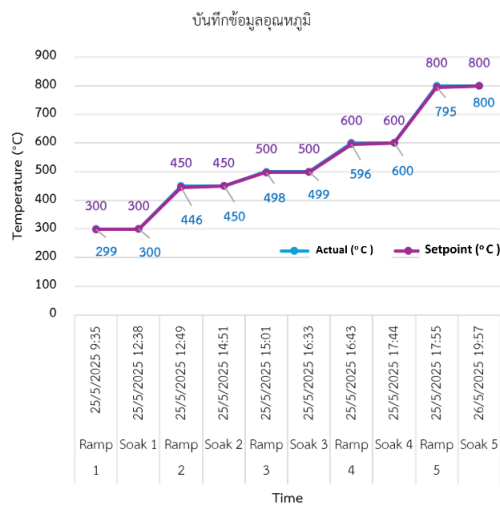
ในการหาประสิทธิภาพของระบบควบคุมการทำงานเตาเผาเซรามิกอัตโนมัติ จำเป็นต้องพิจารณาในด้านการควบคุมอุณหภูมิ และการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์เซรามิก ตลอดจนต้นทุนการผลิต การทดสอบในครั้งนี้จึงแบ่งการหาประสิทธิภาพออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ประสิทธิภาพด้านการควบคุมอุณหภูมิ และประสิทธิภาพด้านการใช้พลังงาน

4.1 ประสิทธิภาพด้านการควบคุมอุณหภูมิ

ประสิทธิภาพด้านการควบคุมอุณหภูมิ โดยพิจารณาจากความสามารถของระบบในการรักษาระดับอุณหภูมิให้ใกล้เคียงกับค่าที่ตั้งไว้ (Setpoint) ทั้งในช่วงการเพิ่มอุณหภูมิ (Ramp) และการแช่อุณหภูมิ (Soak) รวมถึงการวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบควบคุมในช่วง Ramp และ Soak ว่ามีความเสถียรและตอบสนองได้รวดเร็วเพียงใด ผลการควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาเซรามิกอัตโนมัติแสดงดังรูปที่ 8 และการนำ Pyrometric Cone ก่อนและหลังวัดอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกแสดงดังรูปที่ 9

รูปที่ 8 แสดงกราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างค่า Setpoint และค่า Actual ในแต่ละช่วงของกระบวนการเผาเซรามิก พบว่าอุณหภูมิที่วัดได้จริงมีความใกล้เคียงกับค่าที่ตั้งไว้ในทุกช่วงของการทำงาน ทั้งในช่วง Ramp และ Soak เช่น ใน Ramp 1 ค่า Actual อยู่ที่ 299°C เทียบกับ Setpoint 300°C และในช่วง Soak 5 ค่า Actual เท่ากับ 800°C ตรงกับ Setpoint แสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมสามารถรักษาระดับอุณหภูมิได้

อย่างสม่ำเสมอตลอดกระบวนการเผา ไม่มีการแปรผันของอุณหภูมิอย่างชัดเจนในแต่ละเฟสการทำงานอย่างสม่ำเสมอตลอดกระบวนการเผา ไม่มีการแปรผันของอุณหภูมิอย่างชัดเจนในแต่ละเฟสการทำงาน



รูปที่ 8 การทำงานของระบบการควบคุมเตาเผาเซรามิกและตู้ควบคุม



(ก)

(ข)

รูปที่ 9 Pyrometric Cone ภายในเตาเผาเซรามิก

(ก) ก่อนวัดอุณหภูมิ และ (ข) หลังวัดอุณหภูมิ

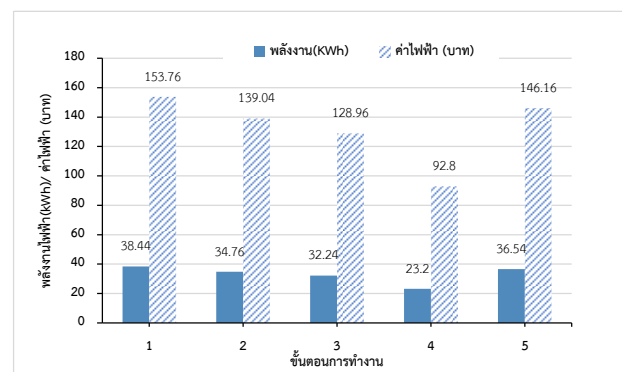
จากรูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบชิ้นงานและ Pyrometric Cone ก่อนและหลังการเผา โดยใช้ Cone หมายเลข 017 ($\approx 773^{\circ}\text{C}$), 014 ($\approx 843^{\circ}\text{C}$), 5 ($\approx 1186^{\circ}\text{C}$) และ 7 ($\approx 1215^{\circ}\text{C}$) เพื่อตรวจสอบระดับอุณหภูมิภายในเตา โดย Cone จะเอนตัวเมื่อได้รับความร้อนถึงค่าที่กำหนด หลังการเผาพบว่า Cone มีการเอนตามลำดับ แสดงว่าเตาสามารถให้ความร้อนถึงระดับที่เหมาะสมในแต่ละช่วง ยืนยันความถูกต้องของระบบควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองจากผลการทดลองพบว่า Cone มีการเอนตัวตามลำดับความร้อนที่คาดไว้และยังแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถให้ความร้อนภายในเตาได้อย่างต่อเนื่องตามโปรไฟล์ที่กำหนด และมีความสม่ำเสมอเพียงพอสำหรับกระบวนการเผาเซรามิก

4.2 ประสิทธิภาพด้านการใช้พลังงาน

ประสิทธิภาพด้านการใช้พลังงาน เพื่อศึกษาปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ตลอดกระบวนการเผา และเปรียบเทียบกับระดับอุณหภูมิและระยะเวลาในการเผาในแต่ละขั้นตอน โดยวิเคราะห์จากข้อมูลแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor) เพื่อนำไป

คำนวณเป็นค่าพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ (kWh) ซึ่งสามารถนำมาใช้ประเมินความคุ้มค่าในการใช้งานระบบ

ในการทดลองครั้งนี้ ได้ดำเนินการศึกษาการใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละช่วงของกระบวนการเผาเซรามิก เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบควบคุมอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ โดยใช้เครื่องมือวัดไฟฟ้าเวอร์มิเตอร์ (Multi Power Meter) ในการวัดค่าพลังงาน ซึ่งสามารถตรวจวัดได้ทั้งแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor) และพลังงานไฟฟ้าสะสม (kWh) ที่เกิดขึ้นตลอดการทำงานแสดงผลการทดลองโดยเริ่มทดลองตั้งแต่วันที่ 09.35 น.-19.57 น. ดังตารางที่ 1 และรูปที่ 10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทางไฟฟ้าและขั้นตอนการทำงานของเตาเผาเซรามิกอัตโนมัติ



รูปที่ 10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทางไฟฟ้าและขั้นตอนการทำงานของเตาเผาเซรามิกอัตโนมัติ

ตารางที่ 1 ข้อมูลพลังงานไฟฟ้าที่ของเตาเผาเซรามิกอัตโนมัติ

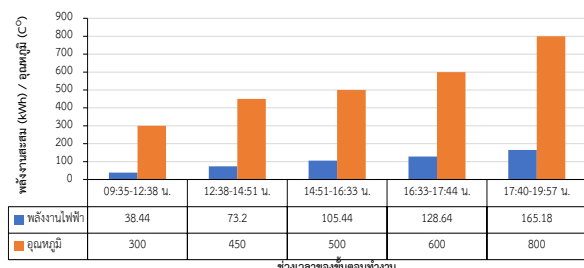
เวลา	ขั้นที่	พลังงานไฟฟ้า (kWh)	กระแสไฟฟ้า (A)	แรงดันไฟฟ้า (V)	ตัวประกอบกำลัง	ค่าไฟฟ้า (บาท)
12.38	1	38.44	24.46	406.77	0.98	153.76
14.51	2	34.76	25.83	406.34	0.99	139.04
16.33	3	32.24	30.45	405.64	0.98	128.96
17.44	4	23.2	30.15	407.38	0.97	92.8
19.57	5	36.54	28.13	405.31	0.98	146.16
พลังงานไฟฟ้ารวม		165.18	ราคาไฟฟ้ารวม			660.72

จากตารางที่ 1 แสดงผลการใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการเผาเซรามิก เมื่อวันที่ 4 พฤษภาคม 2568 โดยบันทึกข้อมูลสำคัญ ได้แก่ ค่าพลังงานไฟฟ้า (kWh) กระแสไฟฟ้า (A) แรงดันไฟฟ้า (V) ค่า Power factor ความถี่ (Hz) และคำนวณค่าไฟฟ้าในแต่ละขั้นตอน (หน่วยละ 4 บาท) พบว่าการทำงานครบทั้ง 5 ขั้นตอน ใช้พลังงานไฟฟ้ารวม 165.18 kWh หน่วย ค่าไฟฟ้าทั้งสิ้น 660.72 บาท

4.3 ผลการเปรียบเทียบระหว่างเวลา อุณหภูมิ และพลังงานสะสม

จากผลการทดลองครั้งที่ 1 ในวันที่ 4 พฤษภาคม 2568 แสดงดังรูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา อุณหภูมิ และพลังงานสะสม เมื่อเวลาเริ่มต้น 180 นาที ค่าอุณหภูมิ 299°C เมื่อเวลาผ่านไปจนสิ้นสุด

กระบวนการเมื่อเวลา 620 นาที ค่าอุณหภูมิ 800°C มีค่าพลังงานสะสม 165.18 kWh



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา อุณหภูมิ และพลังงานสะสม

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและสร้างระบบควบคุมการทำงานเตาเผาเซรามิกอัตโนมัติเพื่อการแก้ปัญหาจากระบบเดิม ซึ่งเป็นกระบวนการที่สำคัญในการควบคุมอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำ สม่าเสมอ และปลอดภัย ระบบที่พัฒนาขึ้นใช้ PLC FX3U-24MR และโมดูล MI-LK3U-24MR-4AD-2DA ควบคุมร่วมกับอุปกรณ์อื่น ๆ ได้แก่ เทอร์โมคัปเปิลชนิด S สำหรับการวัดอุณหภูมิ Solid State Relay สำหรับควบคุมการจ่ายกระแสไฟไปยังฮีตเตอร์ จอสัมผัส HMI Samkoon 7 ในการตั้งค่าและแสดงผล และ Temperature Controller DTK4848V12 เพื่อช่วยจัดการค่าอุณหภูมิให้แม่นยำ ในการเขียนโปรแกรมควบคุมระบบอัตโนมัติใช้หลักการควบคุม PID และ Ladder Diagram สามารถปรับตั้งช่วงอุณหภูมิในแต่ละเฟสของการเผาได้ตามต้องการ และลดความคลาดเคลื่อนในการควบคุมอุณหภูมิลงอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อมีการควบคุมอุณหภูมิเตาเผาอัตโนมัติ ในเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ หรือ Setpoint กับค่าอุณหภูมิที่วัดได้จริง หรือ Actual มีอุณหภูมิเริ่มต้น 300 °C อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียล อุณหภูมิที่อ่านค่าได้สูงสุด 800 °C ทำให้มีความเสถียรของระบบควบคุม PID ในการรักษาอุณหภูมิภายในเตาเผามีความคลาดเคลื่อนระหว่างในช่วง $\pm 1-5$ °C เมื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของอุณหภูมิในช่วง Ramp และ Soak และเมื่อนำ Pyrometric Cone 017 คือโคนที่ล้มลงไม่สามารถวัดมุมที่โค้งได้ ซึ่งอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกเกิน 773 °C ดังนั้นระบบ PID สามารถควบคุมให้อุณหภูมิถึงค่าดังกล่าวได้แม่นยำและคงที่เมื่อเทียบกับค่าที่โคนที่มีความโค้งและอ่อนตัวลง

ในส่วนของประสิทธิภาพของระบบควบคุมการทำงานเตาเผาเซรามิกอัตโนมัติ การใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละรอบและบันทึกผ่านเครื่องมัลติพาวเวอร์มิเตอร์ นำไปวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ค่าตัวประกอบกำลัง และพลังงานสะสม ซึ่งคำนวณค่าไฟฟ้าจากพลังงานไฟฟ้ารวม 165.18 kWh ต้นทุนค่าไฟฟ้ารวมต่อรอบประมาณ 660.72 บาท มีความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณและขั้นตอนการทำงานแบบเอกซ์โพเนนเชียล ทำให้มีการประเมินความคุ้มค่าและประสิทธิภาพของระบบควบคุมแบบอุณหภูมิแบบอัตโนมัติเมื่อเทียบกับการควบคุมอุณหภูมิแบบอะนาล็อก

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ มหาวิทยาลัยกรุงเทพมหานครบุรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ และ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ที่สนับสนุนให้นักวิจัยได้มีเวลาทำงานวิจัย รวมถึงอนุเคราะห์สถานที่ในการทำวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] สมศักดิ์ ชวาลาวันย์, *เซรามิกส์เบื้องต้น*, เอกสารตำราประกอบการสอน, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2541.
- [2] “What are advanced ceramics, and where are they used?,” *How Engineering Works*, Jun. 2025. [Online]. Available: https://www.howengineeringworks.com/questions/what-are-advanced-ceramics-and-where-are-they-used/?utm_source=chatgpt.com. [Accessed: 18-Aug-2025].
- [3] “ไทยส่งออกเซรามิกคราฟต์เครื่องครัวมูลค่าพุ่ง ติดอันดับ 4 ของโลก,” *Post Today Smart-SME*, 3 ส.ค. 2568. [ออนไลน์]. Available: <https://www.posttoday.com/smartsme/728204>.
- [4] ISA, “Optimize closed-loop control: Better understanding PID equation,” *ISA Blog*, 2019. [Online]. Available: <https://blog.isa.org/optimize-closed-loop-control-better-understanding-pid-equation>. [Accessed: Aug. 18, 2025].
- [5] ศิริพงษ์ แก้วสีหมอก, “การปรับปรุงหัวเผาสำหรับเตาเผาแบบลูกกลิ้ง : กรณีศึกษา โรงงานเซรามิก,” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2561.
- [6] คงศักดิ์ จินาวัลย์, “การศึกษาระบบควบคุมอัตโนมัติในระบบบำบัดน้ำเสียด้วยโปรแกรมควบคุม,” วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสยาม, กรุงเทพฯ, 2563.
- [7] ณัฐวัฒน์ อันสมศรี, “การพัฒนาเตาเผาผลิตถังเซรามิกขนาดเล็กที่ใช้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลขวาง,” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2565.
- [8] พรณวิภา แพงศรี และ ประภาวรรณ แพงศรี, “การออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการหมักไวน์,” *PBRU Science Journal* [ออนไลน์], ปีที่ 21, ฉบับที่ 2, หน้า 1-14.
- [9] R. C. Dorf and R. H. Bishop, *Modern Control Systems*, 13th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson, 2017.
- [10] ชำนาญ ห่อเกียรติ. *ระบบไฟฟ้ากำลัง*, พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2552.