

การศึกษาสภาพการณ์การทำงานปัจจุบันของเตาเผาเซรามิกส์
เพื่อประเมินแนวทางในการปรับปรุงสถานะในการผลิต
กรณีศึกษาศูนย์เซรามิกส์ สถาบันการเรียนรู้ตลอดชีวิต มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย
Study of The Current Working Conditions of Ceramic Kilns
to Assess The Guidelines for Improving Production Conditions.
A Case Study of The Ceramics Center, Lifelong Learning Institute,
Chiang Rai Rajabhat University

อนุพงษ์ สมพฤกษ์¹, นงนุช ศรีเล็ก² และ ปรานต์ เมฆอากาศ^{2*}
Anuphong Somphruek¹, Nongnoot Srilek² and Pran Makarkard^{2*}

¹สาขาวิชาอุตสาหกรรมศิลป์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย

²สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย

¹ Department of Industrial Arts Program, Faculty of Industrial Technology, Chiang Rai Rajabhat University

² Department of Energy Engineering and Electrical Technology Program, Faculty of Industrial Technology, Chiang Rai Rajabhat University

*Email: pran.mak@crru.ac.th

Received: September 03, 2024; Revised: October 29, 2024; Accepted: November 15, 2024

บทคัดย่อ

การศึกษาสภาพการณ์การทำงานปัจจุบันของเตาเผาเซรามิกส์ เพื่อประเมินแนวทางในการปรับปรุงสถานะในการผลิต กรณีศึกษาศูนย์เซรามิกส์ สถาบันการเรียนรู้ตลอดชีวิต มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย เป็นการศึกษาขั้นตอนการผลิตและวิเคราะห์กระบวนการเผาผลิตภัณฑ์ โดยได้ศึกษาการกระบวนการเผาผลิตภัณฑ์จากเตาเผาที่ใช้ก๊าซแอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง เพื่อนำผลการศึกษาที่จัดทำแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ให้มีประสิทธิภาพลดปริมาณความเสียหายของผลิตภัณฑ์ เช่น การควบคุมอุณหภูมิภายในเตาตลอดระยะเวลาการผลิต (Working temperature) การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ (Heating rate) ที่เหมาะสม จำนวนหรือปริมาณที่เหมาะสมของชิ้นงานที่จะเข้าสู่เตา (Samples) การเผาไหม้ที่เหมาะสม จากการศึกษาพบว่า การเผาดิบ เป็นกระบวนการที่มีอัตราการให้ความร้อนเป็น 96 °C/hour โดยการเพิ่มอุณหภูมิมีความสัมพันธ์ในแบบเชิงเส้นระหว่างอุณหภูมิ (y) และเวลา (x) โดยแบบจำลองความสัมพันธ์ที่ได้เป็น $y = 95.424x + 16.091$ มีค่าความผันแปรของตัวแปรของความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลา $R^2 = 0.998$ โดยใช้ระยะเวลาการเผา 9 ชั่วโมง อุณหภูมิจะเป็น 900 °C การเผาเคลือบ เป็นกระบวนการที่มีอัตราการให้ความร้อนเป็น 99 °C/hour โดยการเพิ่มอุณหภูมิมีความสัมพันธ์ในแบบเชิงเส้นระหว่างอุณหภูมิ (y) และเวลา (x) โดยแบบจำลองความสัมพันธ์ที่ได้เป็น $y = 106.45x + 124.43$ $R^2 = 0.964$ ระยะเวลาการเผาเคลือบเป็น 9 ชั่วโมง อุณหภูมิสิ้นสุดที่ 1,225 °C แล้วจึงทำการหยุดให้ความร้อน และปล่อยให้เย็นตัวลงอย่างช้าๆ มีการวัดวิเคราะห์ก๊าซไอเสียจากเตาเผาเคลือบ 3 ครั้ง ในเวลา 12 ชั่วโมง เมื่อ 5, 8 และ 10 ชั่วโมง พบว่า ร้อยละโดยปริมาตร (Percentage by volume: %V) ของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 18.8%V 17.1%V และ 13.5%V ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 1.2%V 2.2%V และ 4.2%V มีปริมาณอากาศเกิน 856.1% 432.7% และ 180.8% และความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (ppm) เป็น 114.0 147.0 และ 6.0 การสูญเสียจากการเผาไหม้และประสิทธิภาพการเผาไหม้ ได้จากการคำนวณโดยใช้ข้อมูลคุณสมบัติก๊าซไอเสียจากเตาเผาเคลือบ เมื่อเวลา 10 ชั่วโมง เป็น 59.2% และ 40.8% ตามลำดับ

คำสำคัญ : เซรามิกส์, เตาเผาเซรามิกส์, การเผาเคลือบ, การวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย, ประสิทธิภาพการเผาไหม้

Abstract

Study of the current working conditions of ceramic kilns to assess the guidelines for improving production conditions. A case study of the Ceramics Center, Lifelong Learning Institute, Chiang Rai Rajabhat University, is a study of the production process and analysis of the firing process of products. The study studied the firing process of products from a kiln that uses LPG as fuel. The results of the study were used to develop guidelines for developing and improving the firing process of ceramic products to be efficient and reduce the amount of product damage, such as controlling the temperature inside the kiln throughout the production period (Working temperature), appropriate temperature increase (Heating rate), appropriate number or amount of work pieces entering the kiln (Samples), and appropriate combustion. The study found that raw firing must be careful to increase the firing temperature slowly to reduce the rate of product damage. Gloss firing found that there was a problem in controlling the change of the color under the glaze that faded after firing. In the glaze firing process, there is a relationship between temperature (y) and time (x) at $y = 106.45x + 124.43$, taking a total of 12 hours, resulting in a final temperature of 1,225 °C, then stopping the heating and letting it cool down slowly. The variance values of temperature and time relationship (R^2) was 0.964 The analysis of flue gas from the glaze kiln revealed that the volume percentage (%V) of oxygen was 18.8%V, 17.1%V and 13.5%V, percentage of carbon dioxide was 1.2%V, 2.2%V and 4.2%V, excess air was 856.1%, 432.7% and 180.8%, carbon monoxide concentration (ppm) was 114.0, 147.0 and 6.0, combustion loss was 62.8%, 65.5% and 59.2%, and combustion efficiency was 37.2%, 34.5% and 40.8%, respectively.

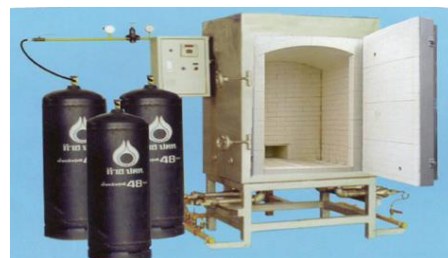
Keywords : Ceramics, Ceramic Kiln, Gloss Firing, Flue Gas Analysis, Combustion Efficiency

1. บทนำ

เซรามิกส์เป็นสินค้าสินค้าที่สร้างรายได้ให้กับทั้งอุตสาหกรรมขนาดกลาง ขนาดย่อม และขนาดใหญ่ อุตสาหกรรมเซรามิกส์ไทยที่มีการรวมกลุ่มผู้ผลิตของจังหวัดภาคเหนือตอนบน อันได้แก่ จังหวัดเชียงใหม่ ลำพูน ลำปาง ซึ่งจัดได้ว่าเป็นแหล่งผลิตเซรามิกส์ที่มีความสำคัญของประเทศ [1] การออกแบบผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จะเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นภาชนะบนโต๊ะอาหาร ของตกแต่งบ้าน [2] ชนิดผลิตภัณฑ์เซรามิกส์แบ่งตามอุณหภูมิการเผาเป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ที่เผาไฟต่ำ (800 – 1,000 °C) ผลิตภัณฑ์ที่เผาไฟกลาง (1,100 – 1,200 °C) ผลิตภัณฑ์ที่เผาไฟสูง (1,250 – 1,400 °C) [3] เตาเผาสำหรับงานอุตสาหกรรมผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกส์เป็นเตาที่ใช้อุณหภูมิสูง ซึ่งสามารถแบ่งตามลักษณะเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ได้เป็น 2 ประเภทหลัก ๆ คือ เตาเผาที่ใช้ไฟฟ้าเป็นเชื้อเพลิง ดังรูปที่ 1 และเตาเผาที่ใช้ก๊าซแอลพีจี เป็นเชื้อเพลิง ดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 ตัวอย่างเตาเผาเซรามิกส์ที่ใช้ไฟฟ้าเป็นเชื้อเพลิง [4]



รูปที่ 2 ตัวอย่างเตาเผาเซรามิกส์ที่ใช้ก๊าซแอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง [5]

ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ สามารถแบ่งประเภทของน้ำเคลือบในการใช้เคลือบผิวผลิตภัณฑ์ตามลักษณะทางกายภาพออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ [6] คือ เคลือบใส และเคลือบทึบ ซึ่งขึ้นอยู่กับความต้องการในการนำไปใช้งานในการเคลือบผิวผลิตภัณฑ์ ที่มีความแตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการแสดงให้เห็นลวดลาย การเขียนสีได้เคลือบหรือสีของเนื้อดินปั้นมักจะเลือกใช้เคลือบใสในการเคลือบผิวผลิตภัณฑ์ แต่ถ้าเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการปกปิดสีของเนื้อดินปั้น มักจะเลือกใช้เคลือบทึบในการเคลือบผิวผลิตภัณฑ์ เป็นต้น กรณีศึกษาการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ของ ศูนย์เซรามิกส์ ครั้งนี้ ใช้น้ำเคลือบใส อุณหภูมิสุดท้ายอยู่ที่ $1,230^{\circ}\text{C}$ [7]

เครื่องมือที่ใช้วัดอุณหภูมิในเตาเผา จะใช้เครื่องมือในการวัดอุณหภูมิที่แสดงผลเป็นตัวเลขบอกอุณหภูมิ คือ เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ซึ่งจะแสดงอุณหภูมิภายในเตาออกมาเป็นตัวเลขบนหน้าจอ ทำให้สะดวกต่อการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในเตาเผา และจะมีวัสดุที่ใช้ในการวัดค่าการสุกตัวของน้ำเคลือบอีกชนิดหนึ่งที่เป็นที่นิยมใช้ คือ ไพโรเมตริกโคน (Pyrometric cones) เป็นวัสดุที่นำมาใช้เพื่อที่จะวัดผลของอุณหภูมิซึ่งสัมพันธ์กับเวลาระหว่างการเผาไหม้ในเตาเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ กรณีศึกษาการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ของ ศูนย์เซรามิกส์ ครั้งนี้ใช้ Pyrometric cone No.6 วางไว้หน้าเตาเผาเพื่อใช้ตรวจสอบจุดสุกตัวของน้ำเคลือบ

มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ มีศูนย์เซรามิกส์ ซึ่งเป็นหน่วยงานภายใต้การกำกับของสถาบันการเรียนรู้ตลอดชีวิต เป็นแหล่งเรียนรู้การผลิตเซรามิกส์ สำหรับนักศึกษา บุคลากรของมหาวิทยาลัย และบุคคลภายนอก มีการจัดอบรมการทำเซรามิกส์ให้กับนักเรียน นักศึกษา และผู้ที่มีความสนใจในการทำของใช้ที่ขึ้นรูปแบบง่าย ๆ เช่น การขึ้นรูปแบบแผ่น การขึ้นรูปแบบปั้นอิสระ อีกทั้งยังมีการผลิตผลิตภัณฑ์เพื่อจำหน่ายเป็นของที่ระลึก และของใช้ต่าง ๆ ผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ที่ศูนย์เซรามิกส์ผลิต โดยส่วนใหญ่แล้วจะเป็นผลิตภัณฑ์ในกลุ่ม เครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร ของตกแต่งบ้าน ได้แก่ ชุดชา ชุดกาแฟ แจกัน ชุดวางตะเกียบ ช้อน และมีสินค้าที่ผลิตตามคำสั่งซื้อ และมีการรับเผาชิ้นงานของบุคคลภายนอก ศูนย์เซรามิกส์มีเตาเผาสำหรับการผลิตเซรามิกส์ภายในศูนย์ใช้เตาอุณหภูมิสูงที่ใช้ก๊าซแอลพีจี เป็นเชื้อเพลิงในการเผา ขนาด 2 แผ่น จำนวน 1 เตา ใช้สำหรับการเผาดิบ (Biscuit Firing) ดังรูปที่ 3 และเตาขนาด 4 แผ่น จำนวน 1 เตา ใช้สำหรับการเผาเคลือบ (Gloss Firing) ทั้ง 2 เตาเป็นเตาที่กรุด้วยวัตถุดิบไฟเซมิคอนดักเตอร์ มีอุปกรณ์ตรวจวัดจำนวน 1 จุด บริเวณ หลังคาเตา โดยการสอดแท่งวัดอุณหภูมิ (Thermocouple) เข้าไปเพื่อตรวจติดตาม

อุณหภูมิระหว่างการเผาภายในเตา แสดงผลเป็นตัวเลข ในหน้าจอดิจิทัล ดังรูปที่ 4



รูปที่ 3 เตาเผาเซรามิกส์ที่ใช้ภายในศูนย์เซรามิกส์

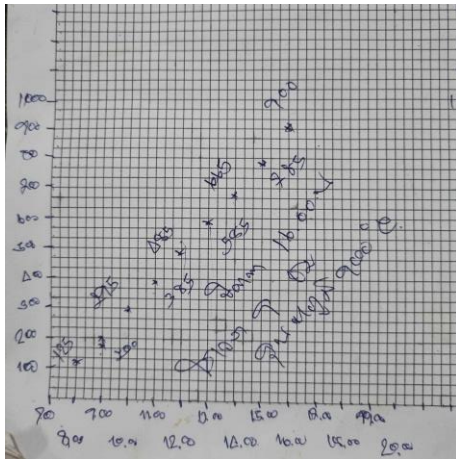


รูปที่ 4 Thermocouple และ หน้าจอแสดงผลอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกส์

การดำเนินการผลิตชิ้นงานเซรามิกส์แต่ละรอบการผลิตนั้นมีหลายขั้นตอน และใช้ระยะเวลาค่อนข้างนาน การเกิดความเสียหายขึ้นกับชิ้นงานเซรามิกส์ ส่งผลเสียหายน่าห่วงมากซึ่งการศึกษาสภาวะปัจจุบันของทุกขั้นตอนการผลิต จะทำให้ทราบข้อมูลที่แท้จริง เพื่อประเมินแนวทางที่เป็นไปได้ในการปรับปรุงด้านสภาวะการผลิตต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิภายในเตาตลอดระยะเวลาการผลิต (Working temperature) การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ (Heating rate) ที่เหมาะสม จำนวนหรือปริมาณที่เหมาะสมของชิ้นงานที่จะเข้าสู่เตา (Samples) การเผาไหม้ที่เหมาะสม เป็นต้น และสามารถจัดการการผลิตที่เหมาะสมได้ในอนาคต โดยคำนึงถึงคุณภาพที่ต้องการของชิ้นงานเซรามิกส์

ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงได้กำหนดแนวทางการศึกษาสภาพการณ์ปัจจุบันของการผลิตชิ้นงานเซรามิกส์ ของสถาบันการเรียนรู้ตลอดชีวิต มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ โดยจะศึกษาตั้งแต่ขั้นตอนเตรียมชิ้นงานเข้าเตาเผาดิบ (Samples preparation for biscuit firing) การเผาดิบ ผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ (Biscuit firing) การเคลือบ (Glazing) และ การเผาเคลือบ (Gloss firing) การตรวจวัดการเผาไหม้ (Combustion measurement) และการวิเคราะห์คุณภาพ

ชั้นงานเซรามิกส์ (Quality inspection) เพื่อให้ทราบข้อมูลที่แท้จริง สำหรับประเมินแนวทางที่เป็นไปได้ในการปรับปรุงสถานะการผลิตต่าง ๆ ให้สามารถจัดการการผลิตที่เหมาะสมได้ในอนาคตโดยยังคงคำนึงถึงคุณภาพ โดยปัจจุบันผู้ปฏิบัติงานจะทำการบันทึกข้อมูลลงในตารางชาร์ตการเผา ทุกกรณีเพื่อเป็นการควบคุมอุณหภูมิที่ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาที่เหมาะสม ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ชาร์ตการเผาเซรามิกส์ปัจจุบัน

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุ อุปกรณ์

2.1.1 เตรียมชิ้นงานเข้าเตาเผาดิบ

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ได้ใช้วัสดุที่เป็นชิ้นงานเซรามิกส์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการต่าง ๆ ทั้งแบบ การขึ้นรูปด้วยใบมีด เป็นชุดแก้วกาแฟ จานรองแก้ว งานการขึ้นรูปแบบปั้นอิสระ เช่น ตุ๊กตา แก้วกาแฟ ที่วางตะเกียบ เป็นผลิตภัณฑ์จากการผลิตตามกระบวนการผลิตปกติของศูนย์เซรามิกส์ และบางส่วนเป็นผลงานของนักเรียน นักศึกษา ที่มาอบรมการทำเซรามิกส์ดังแสดงรูปที่ 6 โดยศึกษาผลที่เกิดขึ้นก่อนและหลังการเผาดิบ และการเผาเคลือบ



รูปที่ 6 ชิ้นงานเซรามิกส์ก่อนการเผาดิบ (Biscuit firing)

2.1.2 การเผาดิบผลิตภัณฑ์เซรามิก

เตาเผาดิบขนาด 2 แผ่น ใช้ก๊าซแอลพีจี เป็นเชื้อเพลิง คุมด้วยอิฐทนไฟ มีจุดตรวจวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ล จำนวน 1 จุด บริเวณหลังคาเตา แสดงผลเป็นตัวเลขในหน้าจอดิจิทัล

2.1.3 การเคลือบ

การเคลือบชิ้นงานที่ทำการศึกษา ใช้น้ำเคลือบไซชนิดอัลคาไลน์เอิร์ธออกไซด์ เป็นเคลือบใสสำเร็จรูป มีอุณหภูมิจุดสุกตัวของน้ำเคลือบอยู่ที่ 1230°C (Cone NO.6) ใช้วิธีการชุบเคลือบผิวผลิตภัณฑ์ภายหลังการเขียนสีได้เคลือบลงบนตัวผลิตภัณฑ์แล้ว

2.1.4 การเผาเคลือบ

เตาเผาเคลือบขนาด 4 แผ่น ใช้ก๊าซแอลพีจี เป็นเชื้อเพลิง คุมด้วยอิฐทนไฟ มีจุดตรวจวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ล จำนวน 1 จุด บริเวณหลังคาเตา แสดงผลเป็นตัวเลข ในหน้าจอดิจิทัล

2.1.5 การตรวจวัดการเผาไหม้

ตรวจวัดการเผาไหม้ด้วยเครื่องมือ Flue gas analyzer รุ่น testo 300 ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 เครื่องมือตรวจวัดการเผาไหม้ Flue gas analyzer

2.1.6 การวิเคราะห์คุณภาพชิ้นงานเซรามิกส์

วิเคราะห์คุณภาพ ได้แก่ ความสม่ำเสมอของชิ้นงาน ความถูกต้องของสีชิ้นงาน การเกิดรูเข็ม การเกิดฟองอากาศ การแตกร้าว

2.2 วิธีการวิจัย

เพื่อให้ทราบสภาพการณ์ปัจจุบันของการผลิตชิ้นงานเซรามิกส์ การเผาผลิตภัณฑ์ และประเมินแนวทางในการปรับปรุงสถานะการผลิต ดังนั้น งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการศึกษาเป็น 6 ขั้นตอนหลัก ตลอดกระบวนการ คือ ได้แก่ การบรรจุชิ้นงานเซรามิกส์สำหรับการเผาดิบ (Biscuit firing) การเผาเซรามิกส์แบบปิสกิต (Biscuit firing) การเคลือบ (Glazing) และการเผาเคลือบ (Glaze firing) การตรวจวัดการเผาไหม้ (Combustion measurement) และการวิเคราะห์คุณภาพชิ้นงานเซรามิกส์ (Quality inspection)

2.2.1 การบรรจุชิ้นงานเซรามิกส์สำหรับการเผา (Biscuit firing)

บรรจุชิ้นงานเซรามิกส์ลงบนชั้นจำนวน 3 ชั้น โดยชิ้นงานมีหลากหลายลักษณะ เช่น แก้วกาแฟมีหูจับ แก้วกาแฟไม่มีหูจับ จานรอง เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 การบรรจุชิ้นงานเซรามิกส์เพื่อเผา (Biscuit firing)

2.2.2 การเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกส์

เริ่มต้นให้ความร้อนโดยใช้ก๊าซแอลพีจี จากนั้นปิดเตาและช่างเทคนิคผู้ดูแลจะให้ความร้อนเพิ่มขึ้นโดยการเปิดวาล์วก๊าซเพิ่มขึ้นเป็นลำดับ จนถึงอุณหภูมิ 900 °C ซึ่งช่วงนี้ใช้เวลา 9 hour จากนั้นจะปิดวาล์วก๊าซและปล่อยให้ อุณหภูมิลดลง จนถึงอุณหภูมิ 50 °C จึงเปิดเตาเพื่อนำผลิตภัณฑ์ออกจากเตา ระยะเวลาจากอุณหภูมิสูงสุดที่ต้องการในการผลิตจนสามารถเปิดเตาได้ ใช้เวลา 12 hour รวมระยะเวลาทั้งหมดในการเผาเป็น 21 hour เตาที่ใช้ในการเผา (Biscuit firing) แสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 เตาเผา (Biscuit firing kiln)

2.2.3 การเคลือบ

กรณีศึกษาการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ของ ศูนย์เซรามิกส์ ครั้งนี้ ใช้น้ำเคลือบสี อุณหภูมิสูงตัวอยู่ที่ 1,230 °C ชุบเคลือบลงบนผิวผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการเผา

และมีการตกแต่งผลิตภัณฑ์โดยใช้สีเขียนใต้เคลือบ ชนิดที่ใช้กับการเผาไฟสูง ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการเขียนสีใต้เคลือบและชุบเคลือบใส่บรรจุเข้าเตาเผาเคลือบ

2.2.4 การเผาเคลือบ

เตาเผาเคลือบใช้ก๊าซแอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง มีหัวเผาจำนวน 8 หัวเผาสองด้านระหว่างชั้นวางชิ้นงาน เตาเคลือบที่อุณหภูมิประมาณ 1,200 °C ซึ่งเป็นการเผาที่อุณหภูมิสูง (High temperature glazes) ระหว่าง 1,100 - 1,350 °C [8, 9] โดยช่างเทคนิคจะให้ความร้อนโดยการเปิดวาล์วก๊าซเพิ่มขึ้นเป็นลำดับ จนถึงอุณหภูมิ 1,200 °C ซึ่งช่วงนี้ใช้เวลา 12 hour และเมื่อถึงอุณหภูมิ 1,200 °C จะคงอุณหภูมิไว้ (Soaking) ที่อุณหภูมิ 1,200 °C เป็นเวลา 1 hour จึงปิดก๊าซแอลพีจีเพื่อหยุดให้ความร้อน จนถึงอุณหภูมิ 50 °C ซึ่งใช้เวลารวมทั้งหมดในการเผาเคลือบ 40 hour จึงสามารถเปิดเตาและนำชิ้นงานออกมาได้ เตาเผาเคลือบแสดงดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 เตาเผาเคลือบ

2.2.5 การตรวจวัดการเผาไหม้

เตาเผาเคลือบใช้ก๊าซแอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง มีหัวเผาจำนวน 8 หัวเผาสองด้านระหว่างชั้นวางชิ้นงาน ตรวจวัดการเผาไหม้ด้วย เครื่องมือ Flue gas analyzer รุ่น testo 300 โดยจะตรวจองค์ประกอบก๊าซภายในเตาเผาเคลือบ

(บริเวณช่องเปิดขนาดเล็กด้านหน้าเตา) และ ก๊าซไอเสียจากเตาเผาเคลือบ (ก๊าซจากปล่องไอเสีย) โดยบันทึกค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้ อุณหภูมิห้อง อุณหภูมิของก๊าซในเตาเผาเคลือบ อุณหภูมิก๊าซไอเสีย ร้อยละโดยปริมาตรของก๊าซออกซิเจน ร้อยละโดยปริมาตรของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ปริมาณอากาศเกิน ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

สำหรับผลวิเคราะห์ก๊าซไอเสียจากเตาเผาเคลือบ จะนำไปคำนวณหาการสูญเสียจากการเผาไหม้ และ ประสิทธิภาพการเผาไหม้

2.2.6 การวิเคราะห์คุณภาพชิ้นงานเซรามิกส์

หลังจากเผาเคลือบแล้วจะนำชิ้นงานซึ่งแสดงดังรูปที่ 12 มาวิเคราะห์คุณภาพ ได้แก่ ความสม่ำเสมอของชิ้นงาน ความถูกต้องของสีชิ้นงาน การเกิดรูเข็ม การเกิดฟองอากาศ การแตกร้าว



รูปที่ 12 ชิ้นงานเซรามิกส์หลังจากการเผาเคลือบ

3. ผลการทดลอง

ผลการทดลองประกอบด้วย สรุปขั้นตอนทั้งหมดในการผลิตชิ้นงานเซรามิกส์ ผลการเผาติดและการเผาเคลือบ Temperature profile องค์ประกอบก๊าซภายในเตาเผาเคลือบและก๊าซไอเสียจากเตาเผาเคลือบ

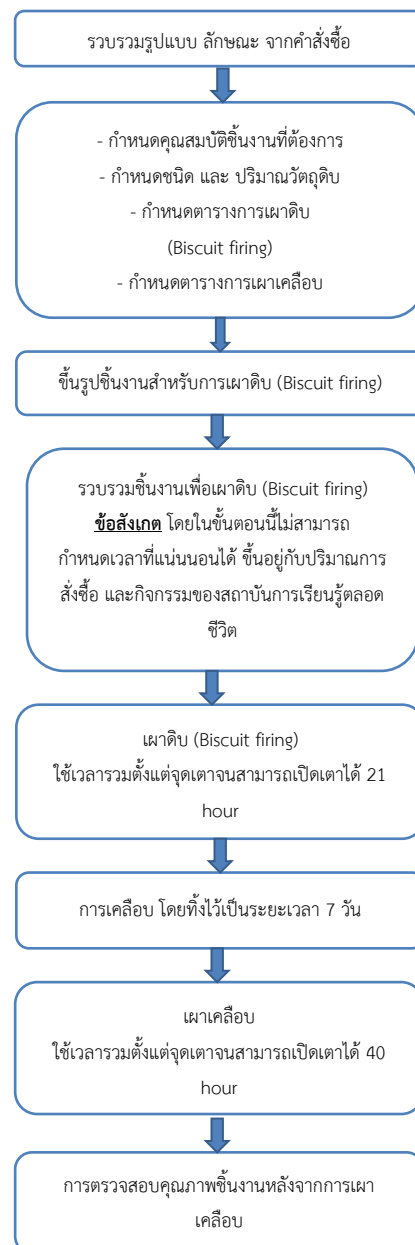
3.1 ขั้นตอนปัจจุบันในการผลิตชิ้นงานเซรามิกส์

ขั้นตอนปัจจุบันในการผลิตชิ้นงานตลอดกระบวนการเริ่มจากการรวบรวมคำสั่งซื้อ การขึ้นรูปชิ้นงาน รวบรวมชิ้นงานสำหรับการเผา โดยในขั้นตอนนี้ไม่สามารถกำหนดเวลาที่แน่นอนได้ ขึ้นอยู่กับปริมาณการสั่งซื้อ กำหนดตารางการเผาติดซึ่งใช้เวลา 21 hour การเคลือบชิ้นงานโดยทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 7 วัน การเผาเคลือบใช้เวลา 40 hour และการตรวจสอบคุณภาพชิ้นงาน เป็นขั้นตอนสุดท้าย ดังรูปที่ 13 ในระหว่างการเผาติด และเผาเคลือบ ช่วงเทคนิคที่มีความเชี่ยวชาญต้องอยู่ประจำตลอดเวลา โดยบันทึกอุณหภูมิภายในเตาชั่วโมงละ 1 ครั้ง

3.2 ผลการเผาติดและการเผาเคลือบ

ชิ้นงานในการเก็บข้อมูลครั้งนี้ แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มด้วยกันคือ

1) ผลิตภัณฑ์ที่เป็นดินดิบ เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีหลากหลายรูปแบบในการขึ้นรูป ประกอบด้วย ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการปั้นอิสระ (Free form method) การขึ้นรูปแบบแผ่น (Slab method) การขึ้นรูปแบบหล่อน้ำดิน (Slip casting) การขึ้นรูปด้วยการใช้แม่พิมพ์ใบมีด (Jiggering method) ใช้ศึกษาผลการเผาติด (Biscuit firing)



รูปที่ 13 ขั้นตอนการผลิตงานเซรามิกส์ของสถาบันการเรียนรู้ตลอดชีวิต

2) ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการเผาดิบ และใช้วิธีการตกแต่งผลิตภัณฑ์โดยการเขียนสีได้เคลือบ และชุบเคลือบทับด้วยเคลือบใส ที่มีจุดสุดท้ายที่ 1,230 °C ใช้ศึกษาผลการเผาเคลือบผลิตภัณฑ์

3.2.1 ผลการเผาดิบผลิตภัณฑ์

การเผาดิบผลิตภัณฑ์ใช้เตาก๊าซแอลพีจี ขนาด 2 แผ่น อุณหภูมิการเผาที่ 900 °C เวลาเผาผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 9 hour

ผลิตภัณฑ์ไม่มีการแตกร้าว เนื้อดินปั้นสุกตัวทั่วกันทั้งเตา โดยสังเกตจากสีของเนื้อดินปั้นสม่ำเสมอทุกชิ้น ดังแสดงในรูปที่ 14



รูปที่ 14 ผลิตภัณฑ์หลังเผาดิบ (Biscuit firing)

3.2.2 ผลการเผาเคลือบผลิตภัณฑ์เซรามิกส์

ใช้เตาก๊าซแอลพีจีขนาด 4 แผ่น ตั้งอุณหภูมิการเผาไว้ที่ 1,230 °C ใช้ Pyrometric cone No.6 วางหน้าเตา ใช้บรรยากาศการเผาแบบสันดาปสมบูรณ์ (Oxidation firing) อุณหภูมิการเผาก่อนปิดเตาที่ 1,225 °C (Cone No.6 ล้ม) เวลาเผาผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 12 hour อุณหภูมิสุดท้ายก่อนเปิดเตาเพื่อนำผลิตภัณฑ์ออกจากเตาเผาอยู่ที่ 58 °C ผลิตภัณฑ์ก่อนเผาเคลือบแสดงดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 ผลิตภัณฑ์ก่อนเผาเคลือบ

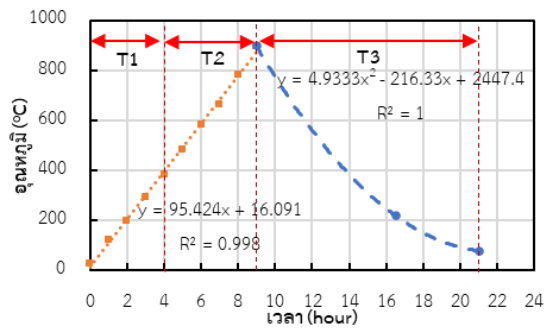
ผลหลังจากการเผาเคลือบปิดเตาที่อุณหภูมิ 1,225 °C และปล่อยให้เตาลดอุณหภูมิเพื่อให้ในเตาเย็นตัวจนเหลือประมาณ 58 °C ก่อนจะนำผลิตภัณฑ์ออกจากเตา เพื่อไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉียบพลัน (Thermal shock) กับตัวผลิตภัณฑ์ เพื่อลดอัตราการแตกร้าวของน้ำเคลือบ พบว่า ผลิตภัณฑ์มีรูปทรงที่สมบูรณ์ ไม่บิดเบี้ยว แตกร้าว หรือระเบิด น้ำเคลือบไม่มีการแตกร้าว น้ำเคลือบสุกตัวเสมอกันหมดทั้งเตา มีชิ้นงานที่เขียนด้วยสีได้เคลือบสีชมพูมีปัญหาสีซีดจาง แต่สีได้เคลือบอื่นๆ ไม่พบปัญหาสีซีดจาง ยังคงความเข้มของสีปกติแสดงดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 ผลิตภัณฑ์หลังเผาเคลือบ

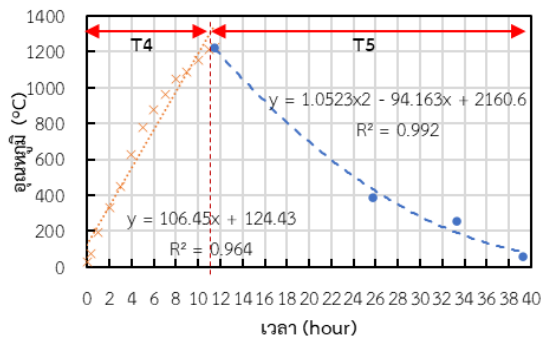
3.3 Temperature profile

ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิในเตา Biscuit จะถูกแบ่งได้เป็นสามช่วง คือ ช่วงไล่ความชื้น (T1) เป็นช่วงที่ใช้อุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องไปจนถึง 400 °C ในช่วงเวลา 4 hour เพื่อให้ น้ำที่ค้างอยู่ในชิ้นงานระเหยอย่างช้า ๆ ลดการแตกร้าวของชิ้นงาน จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิไปยัง 900 °C ในการทำให้เกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นผลึกดินเหนียวสู่ดินเผา (T2) เป็นกระบวนการที่มีอัตราการให้ความร้อนเป็น 96 °C/hour โดยการเพิ่มอุณหภูมิมีความสัมพันธ์ในแบบเชิงเส้นระหว่างอุณหภูมิ (y) และเวลา (x) โดยแบบจำลองความสัมพันธ์ที่ได้เป็น $y = 95.424x + 16.091$ ค่า $R^2 = 0.998$ เมื่อครบกำหนดแล้วจึงหยุดการให้ความร้อนแล้วปล่อยให้เย็นตัวลงช้า ๆ เพื่อไม่ให้เกิดการหดตัวอย่างรุนแรงของชิ้นงาน (T3) ดังรูปที่ 17

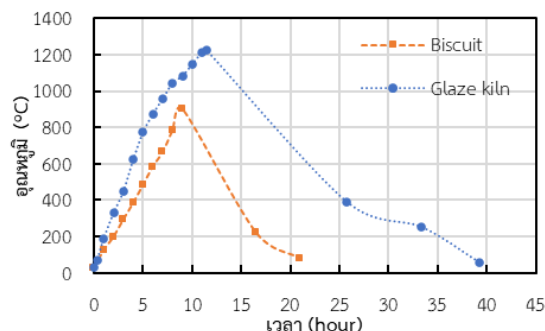


รูปที่ 17 Temperature profile ของเตา Biscuit kiln

ในส่วนของการเผาเคลือบของเตา Glaze kiln นั้นจะมีขั้นตอนอยู่ 2 ขั้นตอน คือ ช่วงให้ความร้อน เป็นการให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน เป็นกระบวนการที่มีอัตราการให้ความร้อนเป็น 99 °C/hour โดยการเพิ่มอุณหภูมิมีความสัมพันธ์ในแบบเชิงเส้นระหว่างอุณหภูมิ (y) และเวลา (x) โดยแบบจำลองความสัมพันธ์ที่ได้เป็น $y = 106.45x + 124.43$ ค่า $R^2 = 0.964$ ใช้เวลาไปทั้งหมดที่ 12 hour ทำให้อุณหภูมิที่จบอยู่ที่ 1,225 °C แล้วจึงทำการหยุดให้ความร้อน และปล่อยให้เย็นตัวลงอย่างช้าๆ เช่นเดียวกับขั้นตอนการเผาในเตา Biscuit แต่ใช้เวลามากกว่าเนื่องจากอุณหภูมิสูงกว่าดังแสดงในรูปที่ 18 และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับในสองเตาพบว่าอัตราการให้ความร้อนที่ต่างกันดังรูปที่ 19



รูปที่ 18 Temperature profile ของเตา Glaze kiln



รูปที่ 19 Temperature profile ของ Biscuit kiln และ Glaze kiln

3.4 องค์ประกอบก๊าซภายในเตาเผาเคลือบและก๊าซไอเสียจากเตาเผาเคลือบ และประสิทธิภาพในการเผาไหม้

ผลการวิเคราะห์ก๊าซภายในเตาเผาเคลือบ และก๊าซไอเสียจากเตาเผาเคลือบ ได้แก่ อุณหภูมิห้อง (Ambient temperature) อุณหภูมิก๊าซไอเสีย (Flue gas temperature) ก๊าซออกซิเจน (O_2) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ปริมาณอากาศเกิน (Excess air) ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (ppm) ดังตารางที่ 1 แสดงผลการวิเคราะห์ก๊าซภายในเตาเผาเคลือบ และ ตารางที่ 2 เป็นการตรวจวัดองค์ประกอบของก๊าซไอเสียทางปล่องไอเสีย และนำองค์ประกอบของก๊าซไอเสียคำนวณประสิทธิภาพจากการเผาไหม้

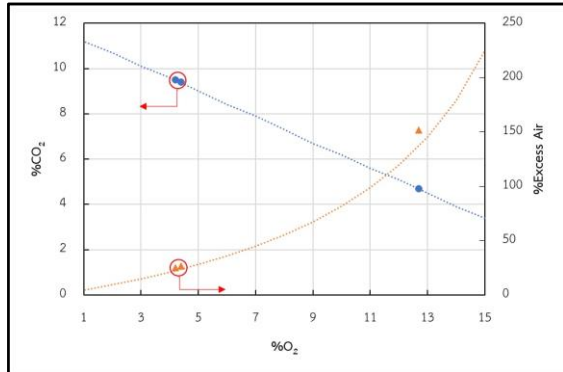
อุณหภูมิภายในเตามีผลต่อประสิทธิภาพของการกำจัดการมลพิษและยังทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ เมื่อมีการควบคุมอุณหภูมิในเตาเผาให้สูงกว่า 850 °C [10] จากตารางที่ 1 อุณหภูมิของก๊าซภายในเตาเผาเคลือบ อยู่ระหว่าง 800 – 975 °C ทั้งนี้ถ้าอุณหภูมิในห้องเผาไหม้สูงเกิน 1,100 °C จะมีโอกาสก่อให้เกิดมลพิษประเภทสารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) เพิ่มขึ้น [10] ร้อยละโดยปริมาตร (Percentage by volume: %V) ของก๊าซออกซิเจน ร้อยละโดยปริมาตรก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ปริมาณอากาศเกิน และความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหลังจากปิดเตาเป็นเวลา 10 hour ซึ่งเป็นไปในแนวทางเดียวกัน ความสัมพันธ์ของร้อยละโดยปริมาตรก๊าซออกซิเจน ร้อยละโดยปริมาตรก๊าซออกซิเจน ร้อยละโดยปริมาตรก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ปริมาณอากาศเกิน ภายในห้องเผาไหม้เตาเผาเคลือบ แสดงดังรูปที่ 20

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ก๊าซภายในเตาเผาเคลือบ

รายการ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
อุณหภูมิห้อง (°C)	32.8	32.7	35.3
อุณหภูมิก๊าซภายในเตาเผาเคลือบ (°C)	802.1	974.1	921.7
ร้อยละโดยปริมาตรของก๊าซออกซิเจน (%V)	4.4	4.2	12.7
ร้อยละโดยปริมาตรของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (%V)	9.5	9.5	4.7
ปริมาณอากาศเกิน (%)	26.7	25.2	151.6
ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอน มอนอกไซด์ (ppm)	16.0	43.0	25.0

หมายเหตุ

ครั้งที่ 1 หมายถึง การตรวจวัด 5 hour หลังจาการปิดเตา
ครั้งที่ 2 หมายถึง การตรวจวัด 8 hour หลังจาการปิดเตา
ครั้งที่ 3 หมายถึง การตรวจวัด 10 hour หลังจาการปิดเตา



รูปที่ 20 ร้อยละโดยปริมาตรก๊าซออกซิเจน ร้อยละโดยปริมาตรก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และปริมาณอากาศเกินภายในห้องเตาเผาเคลือบ

องค์ประกอบของก๊าซไอเสียแสดงดังตารางที่ 2 พบว่าอุณหภูมิก๊าซไอเสียจากเตาเผาเคลือบอยู่ระหว่าง 247.5 – 679.2 °C และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จากการวิเคราะห์มีความเข้มข้นระหว่าง 6-114 ppm ตอนท้ายของกระบวนการเผาเคลือบคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าต่ำมากเป็น 6 ppm

ค่าการสูญเสียจากก๊าซไอเสีย (Flue loss, Q_{flue}) คำนวณจาก Sievert formula [11] ดังสมการที่ (1) จากนั้นสามารถหาประสิทธิภาพการเผาไหม้ (Combustion efficiency) โดยคำนวณจาก สมการที่ (2)

$$Q_{flue} = (T_f - T_a) \{ (A/(21 - O_2)) + B \} \quad (1)$$

$$\text{ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ (\%)} = 100 - Q_{flue} \quad (2)$$

เมื่อ Q_{flue} = การสูญเสียจากก๊าซไอเสีย (flue loss)

T_f = อุณหภูมิไอเสีย (°C)

T_a = อุณหภูมิห้อง (°C)

O_2 = ร้อยละก๊าซออกซิเจน (%V)

A, B = ค่าคงที่ของ Sievert (Sievert constant)

สำหรับก๊าซแอลพีจี เมื่อ A มีค่า 0.63 และ B มีค่า 0.008

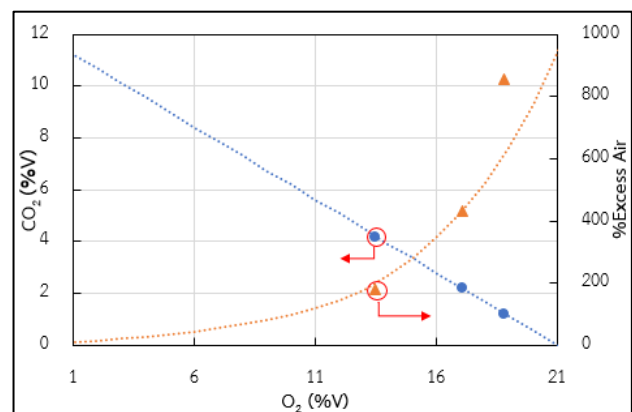
การสูญเสียจากการเผาไหม้ มีค่า 62.8, 65.5 และ 59.2 % คำนวณจากข้อมูลเมื่อ 5, 8 และ 10 hour หลังจาการปิดเตา ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่า มีประสิทธิภาพการเผาไหม้เป็น 37.5, 34.5 และ 40.8 % คำนวณจากข้อมูลเมื่อ 5 และ 8 hour หลังจาการปิดเตา ตามลำดับ และความสัมพันธ์ของร้อยละก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ปริมาณอากาศเกิน ของก๊าซไอเสีย แสดงดังรูปที่ 21

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ก๊าซไอเสียจากเตาเผาเคลือบ

รายการ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
อุณหภูมิห้อง (°C)	34.0	34.2	35.6
อุณหภูมิก๊าซไอเสีย (°C)	247.5	420.7	679.2
ร้อยละโดยปริมาตรของก๊าซออกซิเจน (%V)	18.8	17.1	13.5
ร้อยละโดยปริมาตรของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (%V)	1.2	2.2	4.2
ปริมาณอากาศเกิน (%)	856.1	432.7	180.8
ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอน มอนอกไซด์ (ppm)	114.0	147.0	6.0
การสูญเสียจากการเผาไหม้ (%)(จากการคำนวณ)	62.8	65.5	59.2
ประสิทธิภาพการเผาไหม้ (%) (จากการคำนวณ)	37.2	34.5	40.8

หมายเหตุ

ครั้งที่ 1 หมายถึง การตรวจวัด 5 hour หลังจาการปิดเตา
ครั้งที่ 2 หมายถึง การตรวจวัด 8 hour หลังจาการปิดเตา
ครั้งที่ 3 หมายถึง การตรวจวัด 10 hour หลังจาการปิดเตา



รูปที่ 21 ร้อยละโดยปริมาตรก๊าซออกซิเจน ร้อยละโดยปริมาตรของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และปริมาณอากาศเกินของก๊าซไอเสีย

4. อภิปรายผลและสรุป

การเผาติด

จากผลการเผาติดผลิตภัณฑ์ ของศูนย์เซรามิกส์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย พบว่า การเผาติดใช้เวลาที่ค่อนข้างจะยาวนาน ถึง 9 hour เมื่อเปรียบเทียบกับเวลาในการเผาในระบบอุตสาหกรรมซึ่งต้องแข่งกับเวลาในการผลิต และการควบคุมการใช้ปริมาณเชื้อเพลิงให้ประหยัดมากที่สุด โดยปกติจะใช้เวลาในการเผาประมาณ 6 - 7 hour [12] โดยควบคุมชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปแบบเดียวกัน มีขนาด และความหนาของผลิตภัณฑ์ที่ใกล้เคียงกัน ในกรณีศึกษาครั้งนี้พบว่า ชนิดของผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ที่นำเข้าเตาเผาติด มีความหลากหลายในขั้นตอนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ และผลิตภัณฑ์มีความหนาที่แตกต่างกัน ทำให้ต้องระมัดระวังในการเผา เพื่อควบคุมระยะเวลา และอัตราการคายน้ำของผลิตภัณฑ์ไม่ให้เกิดขึ้นรวดเร็วเกินไป เพื่อช่วยลดอัตราการแตกหัก เสียหาย ระหว่างการเผา โดยเฉพาะช่วงอุณหภูมิช่วง 400 °C แรกที่ผลิตภัณฑ์จะคายน้ำและความชื้นในระดับผลิตภัณฑ์ของเนื้อดินปั้น และช่วงการเผาเพื่อไล่สารอินทรีย์ในเนื้อดินปั้น ช่วงอุณหภูมิ 700 – 800 °C

การเผาเคลือบ

จากการศึกษาการเผาเคลือบผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ ของศูนย์เซรามิกส์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย ครั้งนี้ พบว่ามีปัจจัยที่ต้องควบคุมหลายประการ เช่น ขนาด ความหนา และวิธีการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ มีความแตกต่างกันมาก ส่งผลให้การเผาต้องมีความระมัดระวังในการเพิ่มอุณหภูมิในช่วงการเผาที่เป็นช่วงการคายน้ำ และความชื้นของผลิตภัณฑ์ บรรยากาศการเผาแบบสันดาปสมบูรณ์ (Oxidation firing) ที่ใช้เตาเผาแบบใช้ก๊าซแอลพีจี เป็นเชื้อเพลิง จากการศึกษาเมื่อพิจารณาองค์ประกอบก๊าซไอเสีย มีปริมาณอากาศเกิน (Excess air, %) 180.8 % และปริมาณออกซิเจนเป็น 13.5 % เมื่อเวลา 10 hour หลังจากเริ่มการเผาเคลือบ ซึ่งสอดคล้องกับความต้องการให้เกิดสภาวะการสันดาปสมบูรณ์ และเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของ [10,12] พบว่าในช่วงออกซิเดชันควรมีปริมาณออกซิเจนมากกว่าหรือเท่ากับ 8% อย่างไรก็ตามระหว่างการเผาไหม้ที่มีอากาศเกิน จะเกิดก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ขึ้นซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมกลุ่มที่ไวต่อการจับตัวกับธาตุคาร์บอนทำให้เกิดอาการสึติผื่น หรือเปลี่ยนสีไปไม่ตรงกับสีเดิมตลอดจนความเข้มของสีจางหายไปต่างกับการใช้เตาเผาแบบใช้ไฟฟ้าเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งจะมีความสะอาดในการเผาไหม้มากกว่า ทำให้ไม่มีปัญหาความผิผิวของสีได้เคลือบที่ได้จากการเผาไหม้ จากปัจจัยดังกล่าวข้างต้น อาจจะมีการ

ส่งผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์บางชิ้นงานที่ใช้สีผสมในการตกแต่งได้เคลือบ มีความชื้นจากลงจนกลายเป็นสีขาว ซึ่งอาจจะเกิดจากปัจจัยในด้านการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงจนส่งผลให้สีได้เคลือบมีความผิผิวไปจากความเป็นจริง [13,14]

สรุป

1. การสูญเสียจากการเผาไหม้อยู่ในช่วง 59.2-65.5% ส่งผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้อยู่ในช่วง 34.5-40.8% จากการศึกษาครั้งนี้ ทำให้เห็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของกระบวนการเผาเซรามิกส์ให้ดีขึ้นได้ โดยการลดการสูญเสียจากก๊าซไอเสีย (Flue loss) ทางปล่องไอเสีย ได้แก่ การปรับอัตราส่วนอากาศที่ใช้เผาไหม้ให้เหมาะสม หากอากาศมากเกินไปจะนำความร้อนออกจากเตาเผาทั้งทางปล่องไอเสียมากขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากอุณหภูมิไอเสียที่สูงขึ้น [15] 2) อุณหภูมิภายในเตาที่สูงกว่ามาตรฐานจะมีผลให้คุณภาพผลิตภัณฑ์ลดลงและก็จะส่งผลให้สูญเสียความร้อนทางปล่องไอเสียมากขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิไอเสียสูงขึ้น

2. มีความจำเป็นในการควบคุมอุณหภูมิในเตาเผาให้สูงกว่า 850 °C เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการกำจัดสารมลพิษ และให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ และอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ไม่ควรสูงเกิน 1,100 °C ซึ่งจะเพิ่มโอกาสก่อให้เกิดมลพิษประเภทสารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ (NOx)

3. ในกระบวนการการผลิตมีการควบคุมอัตราการให้ความร้อนประมาณ 100 °C/hour (การเผาติด เป็น 96 °C/hour และ การเผาเคลือบเป็น 99°C/hour) ซึ่งต้องระมัดระวังในการเพิ่มอุณหภูมิอย่างช้า ๆ R^2 เป็นสัมประสิทธิ์ทางสถิติที่ได้จากการจำลองความสัมพันธ์ซึ่งอธิบายถึงความผันแปรของตัวแปรของความสัมพันธ์ของเวลาและอุณหภูมิ มีค่าอยู่ที่ 0.998 และ 0.964 สำหรับการเผาติดและการเผาเคลือบตามลำดับ ซึ่งนับว่ามีความแม่นยำเป็นอย่างมาก เนื่องจากผู้ดำเนินการเผาคีลอบนั้นมิประสบการณในการปรับลดอัตราการให้ความร้อน

อย่างไรก็ตาม การผลิตงานเซรามิกส์ของสถาบันการเรียนรู้ตลอดชีวิต มีข้อจำกัดเรื่องปริมาณการสั่งซื้อที่จำกัด รูปแบบของชิ้นงานเซรามิกส์มีความหลากหลายในการเผาแต่ละครั้ง และกิจกรรมเพื่อผลิตชิ้นงานนั้นไม่มีมาก และไม่สม่ำเสมอ ดังนั้น จึงไม่สามารถกำหนดระยะเวลาการผลิตที่ชัดเจน และแน่นอนได้ เนื่องจากปริมาณคำสั่งซื้อ และกิจกรรมที่มีปริมาณไม่มาก และไม่สม่ำเสมอ เพื่อให้ประหยัดพลังงานก๊าซแอลพีจีที่ใช้ในการเผาจึงต้องรวบรวมชิ้นงานให้ได้เพียงพอ เหมาะสมกับการเผาแต่ละครั้ง นอกจากนี้การเกิดข้อบกพร่องกับชิ้นงาน ทำให้ไม่สามารถส่งมอบงานได้ และทำให้เกิดความไม่มั่นใจกับลูกค้าที่สั่งซื้อ

ข้อเสนอแนะที่ได้จากการศึกษาและงานวิจัยต่อเนื่อง สำหรับสถาบันการเรียนรู้ตลอดชีวิต ดังนี้

1. ติดตั้งจุดตรวจวัด ที่เหมาะสมและบันทึกข้อมูล ต่อเนื่อง ได้แก่ จุดตรวจวัดอุณหภูมิ ปริมาณอากาศเกิน บริเวณปล่องไอเสีย เป็นต้น เพื่อติดตามองค์ประกอบไอเสีย และใช้ผลดังกล่าวปรับแต่งกระบวนการเพื่อเพิ่ม ประสิทธิภาพการเผาไหม้ นอกจากนี้ เสนอแนะให้ปรับแต่ง อุปกรณ์วัดอุณหภูมิในตำแหน่งเดิมบริเวณหลังคาเตา โดยให้ สามารถบันทึกข้อมูลต่อเนื่องได้

2. ศึกษาการลดเวลาการเผาไหม้ที่ค่อนข้างนาน จาก 9 hour ให้ใกล้เคียงกับในระบบอุตสาหกรรม ซึ่ง ใช้เวลาในการเผาประมาณ 6 - 7 hour และลดเวลาการเผาเคลือบ จาก 12 ชั่วโมงลง โดยพิจารณาปัจจัยด้านอัตราการให้ความ ร้อนซึ่งปัจจุบันอยู่ที่ประมาณ 100 °C/hour

3. กำหนดขั้นตอนการทำงาน (Work Instruction) ที่ ชัดเจนและทวนสอบการทำงานโดยผู้ปฏิบัติงานร่วมกับ นักวิจัย

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันการเรียนรู้ตลอดชีวิต มหาวิทยาลัย ราชภัฏเชียงราย ที่อนุเคราะห์ข้อมูลเป็นกรณีศึกษา คณะ ครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย และคณะ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย ได้อนุเคราะห์อุปกรณ์และการใช้ห้องปฏิบัติการ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Srijun, S. Yawiraj and S. Infang, "The Development of Marketing Mix Based on Customers' s needs for Ceramics Entrepreneurs in Upper North Thailand," *Payap University Journal*, vol. 28, no. 1, pp. 57-70. Jan.-Jun. 2018.
- [2] J. Phongsaksri, "Ceramic Product Design Process," *Industrial Technology Journal*, vol. 4, no. 3, pp. 58-67. Sep.-Dec. 2019 (in Thai).
- [3] W. Thanakorn. CERAMICS: Kiln and Firing Technique. Bangkok: Mr. Copy. 2010. (in Thai).
- [4] Ran4U, Firing Technique and Kiln. [Online]. Available: <https://kiln.ran4u.com>. [Accessed: Aug. 29, 2024]. (in Thai).

- [5] Cerawan, Cerawan Website: Information and Knowledge on Ceramics. [Online]. [Cited August 29, 2024]. Available: <https://www.cerawan.com>. (in Thai).
- [6] Ceramic Online, Types of Ceramic Glazes. [Online]. [Cited August 29, 2024]. Available: <http://www.xn--12cgu2gjuw3fra7hh3g.net/artic/ประเภทของน้ำเคลือบเซรามิก>. (in Thai).
- [7] P. Y. Hsieh, "Effects of temperature non-uniformity and effective viscosity on pyrometric cone deformation," *international journal of ceramic engineering and science*, vol. 1, no. 4, pp. 216–226, Oct. 2019, doi: <https://doi.org/10.1002/ces2.10026>.
- [8] T. Pradell and J. Molera. "Ceramic technology. How to characterise ceramic glazes," *Archaeological and Anthropological Sciences*, vol. 12, no. 8, Jul. 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s12520-020-01136-9>.
- [9] E. Abubakar, S. Mbidomti, M. Lawan, and N. Abubakar, "Evaluating the combustion process of methane fired cross draft ceramic kiln for efficiency and sustainability," *Sustinere*, vol. 7, no. 1, pp. 27–38, Apr. 2023, doi: <https://doi.org/10.22515/sustinerejes.v7i1.284>.
- [10] Pollution Control Department, "Announcement of the Pollution Control Department," Sep. 26, 2018. (in Thai).
- [11] S. Gordin, I. Zaychenko, V. Sokolova and V. Bazheryanu. (2021). "To calculate heat losses with flue gases of coal-fired boilers," *In E3S Web of Conferences* (Vol. 285, p. 07028). EDP Sciences.
- [12] S. A. Hussnain, M. Farooq, M. Amjad, F. Riaz, Z. U. R. Tahir, M. Sultan and A. Bokhari (2021). "Thermal analysis and energy efficiency improvements in tunnel kiln for sustainable environment," *Processes*, 9(9), 1629.
- [13] L. Montorsi and D Pasquale. (2015). "Energy and exergy analysis of an industrial tunnel kiln used in ceramic production," *Applied Thermal Engineering*, 82, 1-9.

- [14] G. Battista and F. Fantozzi. “Wood fuel combustion and atmospheric emissions from ceramic production,” *Environmental Science and Technology*, vol.44, no.19, pp.7506-7566,2010 44(19), 7560-7566.
- [15] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy, “Energy Manager Manual (Factory) B.E. 2560, Part 3, Chapter 1: Energy Conservation for Industrial Furnace,” 2017 (in Thai).