



Comparison of Firing Temperature on Physical Properties of Copper red Glazes by Automation Shuttle Kiln in Reduction Atmosphere

¹*Soravich Mulinta

¹Department of Production Innovation and Ceramics Design, Faculty of Industrials Technology, Lampang Rajabhat University

*Corresponding author: Soravich@lpru.ac.th

Received	Reviewed	Revised	Accepted
23/07/2024	30/07/2024	29/08/2024	29/08/2024

Abstract

The objective of this study was to study firing temperatures on the physical properties of copper red glazes for ceramic products. The experiment started with the Seger formula containing basic groups of 0.2mole Feldspar ($K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$), 0.1 mole Calcium carbonate ($CaCO_3$), 0.1mole Barium carbonate (BaO) and 0.6-mole Zinc oxide (ZnO), the media group of 0.25 – 0.40mole Aluminum oxide (Al_2O_3) and an acid group of 2.0 – 4.0 mole Silicon dioxide (SiO_2), coloring agent 0.3% copper carbonate ($CuCO_3$) and 6% Tin oxide (SnO_2). The copper red glaze was used in ground forms (ground for 4 hours) as an additive in the Seger formula for firing at 1250 and 1280 °C. The firing condition in the reduction atmosphere can be divided into two parts. In the first part, the firing condition and atmosphere appear red color. A suitable firing condition for copper red glazes was a reduction from 950°C to 1250°C, reduction to natural firing to maximum temperature, and soaking at the highest temperature for 15 minutes. The second part of the firing condition for copper red glazes was a reduction from 950°C to 1280°C, reduction to natural firing to maximum temperature, and soaking at the highest temperature for 15 minutes. The appearance of copper red glaze in formula 1 and 16 red colors, good melting, flow less, and not cracking, the glaze formula can be applied to the reduction firing process in an automatic kiln.

Keywords: Glaze; Copper; Firing Temperature; Physical Properties; Reduction Atmosphere



การเปรียบเทียบอุณหภูมิการเผาที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของเคลือบสีแดงของ ทองแดงด้วยเตาเผาอัตโนมัติในบรรยากาศรีดักชัน

^{1*}สรวิศ มูลอินตะ

¹สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิตและการออกแบบเซรามิกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

*ผู้นิพนธ์หลัก: Soravich@lpru.ac.th

บทคัดย่อ

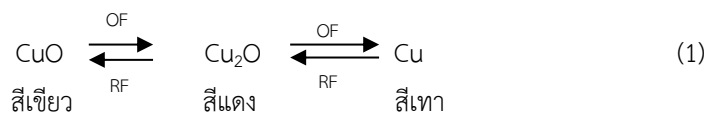
จุดมุ่งหมายของงานวิจัยครั้งนี้เพื่อศึกษาสภาวะการเผาที่มีต่อสมบัติทางกายภาพในเคลือบสีแดงของทองแดงสำหรับผลิตภัณฑ์เซรามิก โดยวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองได้แก่ วัตถุดิบกลุ่มต่างใช้ เฟลด์สปาร์, ซิงค์ออกไซด์, แบเรียมออกไซด์, แมกนีเซียมออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ วัตถุดิบกลุ่ม กลางใช้ดินขาวลำปาง และวัตถุดิบกลุ่มกรดใช้ซิลิกา ในการกำหนดอัตราส่วนผสมของสูตรเคลือบสีแดงของทองแดงใช้วิธีการของเซเกอร์ จำนวน 20 อัตราส่วนผสม ประกอบด้วย $0.20 \text{ K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$, 0.60 ZnO , 0.10 BaO , 0.10 CaO , $0.13\text{--}0.28 \text{ Al}_2\text{O}_3$ และ $0.8\text{--}2.8 \text{ SiO}_2$ การเตรียมเคลือบสีแดงของทองแดงมีการควบคุมสภาวะดังนี้ ความถ่วงจำเพาะของเคลือบ ระยะเวลาในการชุบเคลือบ ความหนาของเคลือบ เพื่อนำเข้าสู่กระบวนการเผาที่ 1250 และ 1280°C บรรยากาศรีดักชัน โดยกระบวนการเผาแบ่งเป็น 2 รูปแบบ คือ รูปแบบที่ 1 ช่วงอุณหภูมิห้องถึง 950 °Cเผาด้วยบรรยากาศ ออกซิเดชัน หลังจากอุณหภูมิ 950°C ปรับเป็นบรรยากาศรีดักชันจนถึงอุณหภูมิสูงสุด รูปแบบที่ 2 ช่วงอุณหภูมิห้องถึง 950°Cเผาด้วยบรรยากาศออกซิเดชัน หลังจากอุณหภูมิ 950°C ปรับเป็นบรรยากาศ รีดักชันจนถึงอุณหภูมิสูงสุด จากการทดลองพบว่า น้ำเคลือบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1280°C เคลือบ เกิดสีแดงชัดเจน แต่ในทางกลับกันผิวของเคลือบเกิดการหดตัวเกือบทุกอัตราส่วนผสม ส่วนน้ำเคลือบ เผาที่อุณหภูมิ 1250°C เคลือบปรากฏสีแดงในอัตราส่วนผสมที่ 1 และ 16 มีการหลอมตัวดี ผิวเคลือบไม่ เกิดการร้าวหรือการหดตัวแต่อย่างใด จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า สภาวะที่มีผลต่อการเผาเคลือบคือ การเริ่มบรรยากาศรีดักชันที่ 950°C และเผาที่อุณหภูมิ 1250°Cในอัตราส่วนผสมที่ 1 และ 16 ลักษณะของน้ำเคลือบหลังเผาปรากฏสีแดง ไม่มีรอยแตกร้าว หลอมตัวดี การไหลตัวไม่มาก สามารถ นำสูตรน้ำเคลือบไปปรับใช้กับกระบวนการรีดักชันในเตาเผาอัตโนมัติได้

คำสำคัญ: เคลือบ; ทองแดง; อุณหภูมิการเผา; สมบัติทางกายภาพ; บรรยากาศรีดักชัน

บทนำ

จังหวัดลำปางเป็นแหล่งผลิตเซรามิกที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในประเทศ อีกทั้งยังมีแหล่งวัตถุดิบดินขาวที่มีคุณภาพดี และมีความสะดวกด้านการขนส่งที่มารถเชื่อมโยงภาคเหนือ ภาคกลางและอินโดจีนทางหน่วยงานของจังหวัดลำปางจึงได้มีแนวคิดที่จะพัฒนาและผลักดันให้จังหวัดลำปางเป็นศูนย์กลางการผลิตเซรามิกอาเซียนอย่างครบวงจร โดยมุ่งยกระดับจังหวัดลำปางให้เป็นแหล่งท่องเที่ยวที่สำคัญของประเทศ ทั้งประเด็นด้านวิชาการและด้านเทคโนโลยี โดยมีแนวทางที่จะร่วมกันแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ในงานเซรามิก เริ่มตั้งแต่กระบวนการงานวัตถุดิบ การออกแบบ การทำผลิตภัณฑ์ จนถึงการจัดจำหน่ายและร่วมทุนทางธุรกิจ (Lampang Provincial Office, 2021)

จีนได้สมญานามว่าเป็นประเทศเครื่องปั้นดินเผาตั้งแต่โบราณกาล หลักฐานที่แสดงให้เห็นว่าจีนมีประวัติที่ยาวนาน และมีฝีมืออันยอดเยี่ยมในการผลิตเครื่องปั้นดินเผา ฝีมือในการผลิตเครื่องปั้นดินเผาของจีนไม่เพียงแต่ทำให้ชาวโลกได้มีโอกาสเห็นผลงานทางศิลปะที่ประณีตงดงาม เครื่องปั้นดินเผาเมืองจिंगเต๋อเจินเป็นเมืองที่มีชื่อเสียงที่สุดแห่งหนึ่ง เมืองจिंगเต๋อเจินตั้งอยู่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของมณฑลเจียงซี ทางตะวันออกของจีน เครื่องปั้นดินเผาจากเมืองจिंगเต๋อเจินมีวัตถุดิบที่ขาวเหมือนหยก บางเหมือนกระดาษใสเหมือนกระจกเงา และมีเสียงเคาะเหมือนเสียงดนตรีที่ประณีตและงดงาม (Ingsiriwat, P., 1994) นอกจากนี้เมืองจिंगเต๋อเจินยังเป็นเมืองแห่งต้นกำเนิดของเคลือบสีแดงของทองแดงได้อย่างสวยงามที่สุด เป็นสินค้าที่มีความงดงาม และมีคุณค่าทางศิลปะเป็นอย่างมาก (Larsomsri, P., 2010) เคลือบสีแดงของทองแดงที่ผลิตในจังหวัดลำปางมีการผลิตยังไม่แพร่หลายมากนัก เนื่องจากมีกระบวนการทำที่ซับซ้อนและยากแก่การควบคุมให้เคลือบมีสีแดงที่คงที่และสม่ำเสมอ ปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อการปรากฏสีแดงไม่ว่าจะเป็นคอปเปอร์คาร์บอเนต (copper carbonate) หรือคอปเปอร์ออกไซด์ (copper oxide) ที่ใช้เป็นสารให้สีในเคลือบ การใช้สารประกอบทองแดงในการเผาในบรรยากาศที่แตกต่างกันพบที่อุณหภูมิ 1250°C จะพบดังสมการที่ 1 (Larsomsri, P., 2006)



(Mellor, J.W., 1963.)

รูปแบบเหล่านี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโลหะ Cu, Cu₂O และ CuO ดังปฏิกิริยาไปกลับของทองแดงออกไซด์และโลหะทองแดงภายใต้บรรยากาศในการเผาออกซิเดชันและรีดักชัน (Robert T. 1998) ปัญหาที่พบของเคลือบสีแดงของทองแดงในกระบวนการผลิตเครื่องปั้นดินเผา โดยทั่วไปมักพบเคลือบหลุดร่อนหรือแยกตัวออกจากกัน ผิวเคลือบซีดจางไม่ได้สีแดง สีแดงหายหรือผิวเคลือบกลายเป็นสีเขียว และผิวเคลือบภายในมีจุดดำคล้ำฝังใต้ผิวเคลือบหรือสีแดงคล้ำ (Larsomsri, P., 2009) ซึ่งทำหน้าที่เคลือบที่กล่าวมาข้างต้นล้วนแล้วแต่มีความเกี่ยวเนื่องกับกระบวนการเผาโดยตรงไม่ว่าจะเป็นอุณหภูมิในการเผาที่ไม่คงที่ การควบคุมบรรยากาศในการเผาที่ไม่มีความแม่นยำปรากฏทั้งออกซิเดชันรีดักชันและนิวทรัล ซึ่งบรรยากาศเหล่านี้ส่งผลโดยตรงต่อการปรากฏสีแดงของเคลือบทองแดง การเย็นไฟเพื่อให้ผิวเคลือบเกิดการเย็นตัวที่สวยงามและผิวมีสีแดงสม่ำเสมอ

ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงมีจุดมุ่งหมายในการศึกษาอัตราส่วนผสมของเคลือบสีแดงของทองแดงและศึกษาผลของอุณหภูมิการเผาที่มีผลต่อลักษณะที่ปรากฏของเคลือบสีแดงของทองแดงให้เกิดความแม่นยำ การควบคุมปัจจัยต่างๆ ในกระบวนการเผาด้วยเตาเผาอัตโนมัติให้มีความคงที่ อีกทั้งยังใช้หลักการและเครื่องมือวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์เข้ามาอธิบายกลไกที่เกิดขึ้นตั้งแต่เริ่มต้นกระบวนการเผาจนสิ้นสุดกระบวนการเผา ในการวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเตาเผาหัวพันไฟระบบเจทในบรรยากาศรีดักชัน นอกจากนี้ยังขยายผลการทดลองให้สามารถนำสภาวะการเผาที่ได้ปรับหรือประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกได้

วิธีการวิจัย

วิธีการทดลองผลของสภาวะการเผาสมบัติทางกายภาพของเคลือบสีแดงของทองแดงในเตาเผาอัตโนมัติ สามารถแบ่งขั้นตอนการศึกษาได้ดังนี้

1. ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยได้แก่ ความรู้ทั่วไปของเคลือบสีแดงของทองแดง กลไกการเกิดเคลือบสีแดงของทองแดง ปฏิกิริยาทางเคมีในเคลือบสีแดงของทองแดง เทคนิคและวิธีการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของเคลือบ เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมน้ำเคลือบ และกระบวนการเผาเคลือบ
2. การกำหนดอัตราส่วนผสมของเคลือบสีแดงของทองแดง โดยเลือกวิธีการอ้างอิงสูตรเคลือบจากทฤษฎีเซอร์ และงานวิจัยที่เกิดขึ้น โดยการเขียนแบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มต่ำ กลุ่มกลาง และกลุ่มกรด สูตรเคลือบเขียนตามน้ำหนักโมเลกุลของวัตถุดิบ คำนวณปริมาณของวัตถุดิบออกมาเป็นอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนัก การเลือกแทนค่าวัตถุดิบในสูตรเคลือบกำหนดให้แกน X แทนด้วยวัตถุดิบอะลูมินา และแกน Y แทนด้วยวัตถุดิบซิลิกา ตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ (Aranyapak, S., 2010) & (Dinsdale, A. 1986) การกำหนดอัตราส่วนด้วยสูตรโมเลกุลของวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองดัง Figure 1 และใช้อัตราส่วนผสมที่ใช้ในการทดลองดัง Table 1



วัตถุดิบกลุ่มต่าง	วัตถุดิบกลุ่มกลาง	วัตถุดิบกลุ่มกรด
0.20 $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$	0.13–0.28 Al_2O_3	1.8–3.7 SiO_2
0.60 ZnO		
0.10 BaO		
0.10 CaO		

(2)

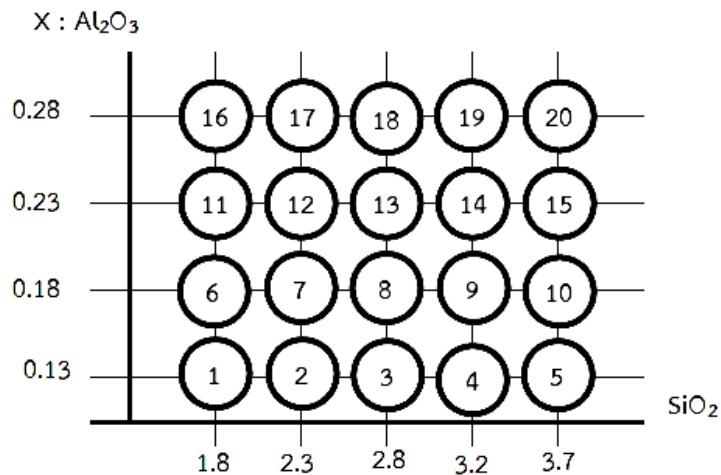


Figure 1 The Seger formula of copper red

Table 1 Composition of copper red used in the study

อัตรา ส่วนผสม	วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง (ร้อยละ)					
	โพแทสเซียม เฟลด์สปาร์	ซิงค์ออกไซด์	แบเรียม ออกไซด์	แคลเซียม ออกไซด์	ดินขาว ลำปาง	ซิลิกา
1	54.80	24.0	9.7	4.9	1.3	5.3
2	51.7	22.7	9.2	4.6	1.2	10.6
3	49.0	21.5	8.7	4.4	1.1	15.3
4	46.5	20.4	8.2	4.2	1.1	19.6
5	44.3	19.4	7.9	4.0	1.0	23.4
6	54.0	23.7	9.6	4.9	3.8	4.0
7	51.0	22.4	9.1	4.6	3.6	9.3
8	48.4	21.2	8.6	4.4	3.4	14.0
9	46.0	20.2	8.2	4.1	3.2	18.3



10	43.9	19.2	7.8	3.9	3.0	22.2
11	53.2	23.4	9.5	4.8	6.2	2.9
12	50.5	22.1	8.9	4.5	5.8	8.2
13	47.8	21.0	8.5	4.3	5.5	12.9
14	45.5	19.8	8.1	4.1	5.3	17.2
15	43.3	19.0	7.7	3.9	5.0	21.1
16	52.7	23.1	9.3	4.7	8.5	1.7
17	49.8	21.8	8.8	4.5	8.1	7.0
18	47.3	20.7	8.4	4.2	7.7	11.7
19	45.0	19.7	8.0	4.0	7.3	16.0
20	42.9	18.8	7.6	3.9	7.0	19.8

3. ผู้วิจัยทราบถึงอัตราส่วนผสมของน้ำเคลือบสีแดงของทองแดงตาม Table 1 ทำการเตรียมสารให้สีได้แก่ ซีเมนต์กระดูกร้อยละ 2 คอปเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 1 และดีบุกออกไซด์ร้อยละ 3 ในทุกอัตราส่วนผสม ทำการเตรียมน้ำเคลือบโดยการชั่งวัตถุดิบด้วยเครื่องชั่งดิจิทัล ทศนิยม 2 ตำแหน่ง ชั่งน้ำเคลือบอัตราส่วนผสมละ 1000 กรัม ทำการบดด้วยหม้อบดอะลูมินาใช้ระยะเวลา 8 ชั่วโมง และทำการกรองผ่านตะแกรงความละเอียด 325 เมช จากนั้นวัดและปรับค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำเคลือบมีค่าเท่ากับ 1.45 ในทุกอัตราส่วนผสม นำเข้าสู่กระบวนการเตรียมขึ้นทดสอบด้วยเนื้อดินปั้นสำเร็จรูปบริษัทคอมพาวด์เคลย์ รหัส PBA โดยเตรียมขึ้นทดสอบแบ่งเป็น 3 ลักษณะได้แก่ 1) แผ่นทดสอบมีความกว้างขนาด 3 น. ความยาว 3 น. และความหนา 1 ซม. 2) ขึ้นทดสอบการหลอมตัวด้วยการอัดผงเคลือบลงในแบบพิมพ์สแตนเลสทรงกรวยที่มีความกว้าง 1 น. ความสูง 1 น. และ 3) แผ่นทดสอบการไหลตัวในหลุมอัดตัวอย่างเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ซม. และมีร่องวัดระยะการไหลตัวขนาด 10 ซม. นอกจากนี้ยังเตรียมผลิตภัณฑ์ทดสอบ เพื่อใช้ในการชุบเคลือบให้มีความหนาระหว่าง 3–5 มม. สำหรับตรวจสอบลักษณะที่ปรากฏของเคลือบหลังการเผาทั้งสองอุณหภูมิ โดยขั้นตอนการเตรียมขึ้นทดสอบของน้ำเคลือบดังแสดงใน Figure 2



Figure 2 Preparation of specimens of copper red glaze

4. กระบวนการเผาขึ้นทดสอบด้วยเตาเผาอัตโนมัติ (หัวฟันไฟระบบเจท) ผู้วิจัยได้มีการกำหนดโปรแกรมการเผาของทั้งอุณหภูมิไว้ดังนี้ โปรแกรมที่ 1 การเผาที่อุณหภูมิ 1250°C แบ่งการขึ้นอุณหภูมิเป็น 3 ช่วงได้แก่ ช่วงแรกเผาที่อุณหภูมิห้อง-400°C ใช้ระยะเวลา 4 ชั่วโมง มีอัตราการเผาเฉลี่ย 1.5-2.5°C/min (T_1 : 400, $Time_1$: 240) ที่อุณหภูมิ 400-950°C ใช้ระยะเวลาในการเผา 4 ชั่วโมง อัตราการเผาเฉลี่ย 2-2.5 °C/min (T_2 : 950, $Time_2$: 240) เมื่ออุณหภูมิถึง 950°C เริ่มเข้าสู่ช่วงรีดักชัน ทำการปรับช่องระบายลมร้อนออกจากปล่องเตาเผา โดยทำการปรับอุณหภูมิในช่วงรีดักชันมีการขึ้นอัตราการเผาเฉลี่ย 3.34°C/min ใช้ระยะเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที จนถึงอุณหภูมิ 1250°C (T_3 : 1250, $Time_3$: 90) ใช้เวลาในการเย็นไฟที่อุณหภูมิสูงสุดเป็นระยะเวลา 30 นาที (T_4 : 1250, $Time_4$: 30) ในส่วนของโปรแกรมที่ 2 การเผาที่อุณหภูมิ 1280°C แบ่งการขึ้นอุณหภูมิเป็น 3 ช่วงได้แก่ ช่วงแรกเผาที่อุณหภูมิห้อง-400°C ใช้ระยะเวลา 4 ชั่วโมง มีอัตราการเผาเฉลี่ย 1.5-2.5°C/min (T_1 : 400, $Time_1$: 240) ที่อุณหภูมิ 400-950°C ใช้ระยะเวลาในการเผา 4 ชั่วโมง อัตราการเผาเฉลี่ย 2-2.5 °C/min (T_2 : 950, $Time_2$: 240) เมื่ออุณหภูมิถึง 950°C เริ่มเข้าสู่ช่วงรีดักชัน ทำการปรับช่องระบายลมร้อนออกจากปล่องเตาเผา โดยทำการปรับอุณหภูมิในช่วงรีดักชันจนถึงอุณหภูมิ 1280°C มีการขึ้นอัตราการเผาเฉลี่ย 3.67°C/min ใช้ระยะเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที (T_3 : 1280, $Time_3$: 90) ใช้เวลาในการเย็นไฟที่อุณหภูมิสูงสุดเป็นระยะเวลา 30 นาที (T_4 : 1280, $Time_4$: 30) โดยใช้โปรแกรมการเผาดัง Figure 3

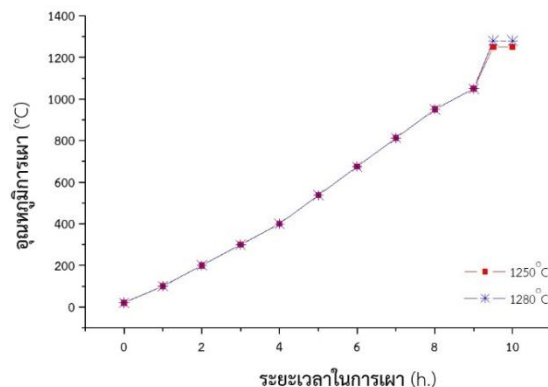


Figure 3 Firing Program of automation shuttle kiln for copper red glazes

การวิเคราะห์ข้อมูลของลักษณะปรากฏของเคลือบสีแดงของทองแดง ได้แก่ ลักษณะที่ปรากฏบนพื้นผิวของชิ้นทดสอบด้วยวิธีการสังเกตการปรากฏที่ผิวมีความมันวาวหรือผิวกึ่งมันกึ่งด้าน หรือผิวด้านและตรวจสอบรอยแตกรานที่ผิวของเคลือบ การหลอมตัวของเคลือบตรวจสอบจากการวัดการแผ่กระจายของเคลือบหลังการเผา โดยอาศัยการวัดรัศมีการแผ่กระจายและถ่ายภาพการหลอมตัวที่ปรากฏหลังการเผา การไหลตัวของน้ำเคลือบตรวจสอบจากการวัดระยะความยาวของการไหลตัวของเคลือบหลังการเผาด้วยเวอร์เนียร์ดิจิทัลดแสดงผลเป็นมิลลิเมตร (มม.) และสรุปผลการทดลอง

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

ผลของลักษณะที่ปรากฏน้ำเคลือบสีแดงของทองแดงที่อุณหภูมิ 1250°C บรรยากาศรีดักชัน

จากชิ้นทดสอบของเคลือบสีแดงของทองแดงที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1250°C ลักษณะพื้นผิวที่ปรากฏพบว่า เคลือบปรากฏผิวมันในปริมาณของซิลิกา 1.8–2.8 โมล และปริมาณอะลูมินา 0.13–0.28 ส่วนปริมาณของซิลิกา 3.2–3.7 โมล และปริมาณอะลูมินา 0.13–0.28 ด้วยการกำหนดสัดส่วนของอัตราส่วนผสมตามสูตรเซเกอร์ ลักษณะที่ปรากฏเป็นผิวกึ่งมันกึ่งด้าน นอกจากนี้ยังพบว่าในอัตราส่วนที่ 3 และ 4 เคลือบเกิดลักษณะการหดตัวเมื่อปริมาณของซิลิกาเพิ่มมากขึ้น เคลือบจะเกิดการหดตัวและเกิดการร้าว แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของอะลูมินาเคลือบจะปรากฏสีที่เริ่มจางลง สีที่ปรากฏของเคลือบภายหลังการเผาพบว่า เคลือบในอัตราส่วนที่ 1 ปรากฏเป็นสีแดง และเมื่อปริมาณของอะลูมินาเพิ่มขึ้น ลักษณะสีแดงจะมีความเข้มข้น และเกิดจุดสีดำของโลหะในอัตราส่วนที่ 16 นอกจากเมื่อมีปริมาณของซิลิกาเพิ่มขึ้นยังพบเคลือบสีชมพู และสีขาวในอัตราส่วนผสมที่ 2–5, 7–10 และ 16–20 โดยปริมาณของซิลิกาจะส่งผลต่อการปรากฏสีแดงของผิวเคลือบ ทำให้การหลอมละลายของคอปเปอร์ไม่สมบูรณ์ นอกจากนี้การปรากฏสีแดงเลือดวัว (Oxblood glaze) ในสูตรที่ 1 สอดคล้องกับผลการวิจัย

ของ Mitsuru, W. *et al.* (1986) ที่ได้นำเสนอเหตุผลการเกิดสีแดงว่าเกิดโมเลกุลของออกซิเจนอิสระสลายออกไป ทำให้คอปเปอร์ออกไซด์กลายเป็น Cu^{2+} และก่อตัวเป็นไอผลึกไอออนที่หักเหโฟตอน จึงแสดงเป็นความยาวคลื่นแสงสีแดงที่ 630-750 nm. ผลของขึ้นทดสอบปรากฏดัง Figure 4

การทดสอบหาลอมตัวของเคลือบสีแดงของทองแดงเผาที่อุณหภูมิ 1250°C บรรยากาศรีดักชัน จากการทดลองพบว่า เคลือบสีแดงของทองแดงหลังการเผาเกิดการลอมตัว โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปทรงจากทรงกรวยแผ่กระจายตัวออก ซึ่งการลอมตัวของเคลือบขึ้นอยู่กับปริมาณของซิลิกาที่เพิ่มขึ้น ตั้งแต่ 1.8–3.7 โมล ลักษณะการลอมตัวของเคลือบจะลดลงสังเกตได้จากอัตราส่วนผสมที่ 1–5 เมื่อปริมาณของอะลูมินาเพิ่มขึ้น 0.13–0.28 โมล การลอมตัวของเคลือบจะมีการแผ่กระจายลดลง ซึ่งจะเห็นได้จากผลของเคลือบหลังการเผาในอัตราส่วนผสมที่ 1, 6, 11 และ 16 ปรากฏดัง Figure 5

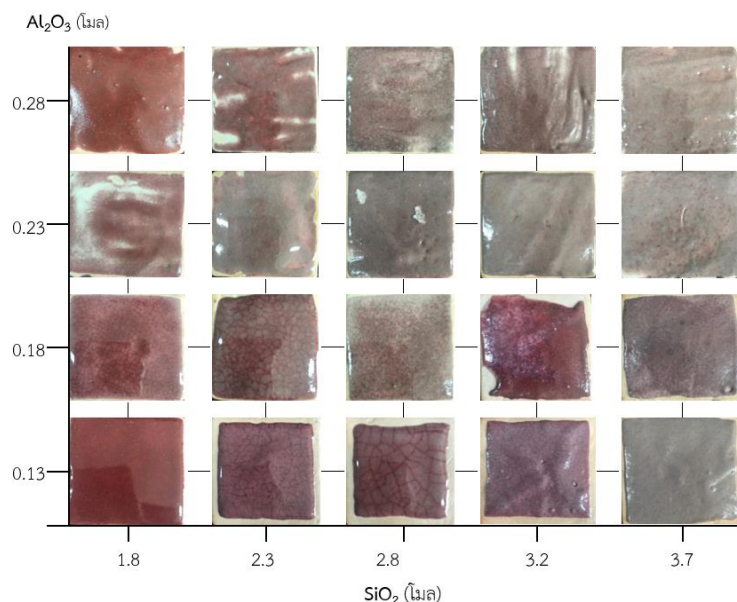


Figure 4 The appearance texture of red glaze of copper fired at 1250°C

การทดสอบการไหลตัวของเคลือบสีแดงของทองแดงเผาที่อุณหภูมิ 1250°C บรรยากาศรีดักชันปรากฏดัง Figure 6 จากการวัดจากระยะการไหลตัวของน้ำเคลือบในขั้นทดสอบ พบว่าเคลือบมีการไหลตัวสูงในอัตราส่วนผสมที่ 1 และปริมาณของอะลูมินาเพิ่มขึ้นการไหลตัวของเคลือบลดลงเล็กน้อย นอกจากนี้เมื่อปริมาณของซิลิกาเพิ่มมากขึ้นการไหลตัวของเคลือบจะลดลงเห็นได้อย่างชัดเจน เนื่องจากซิลิกาเป็นวัตถุดิบทนไฟในน้ำเคลือบ

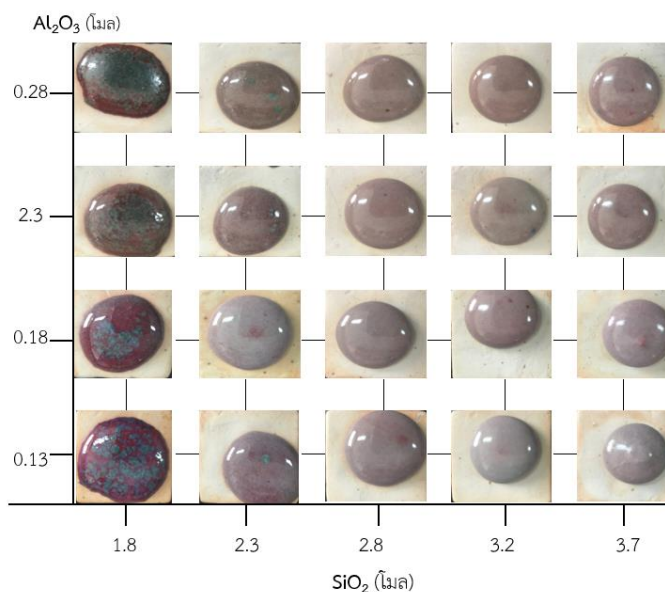


Figure 5 The melting of the red glaze of copper fired at 1250°C

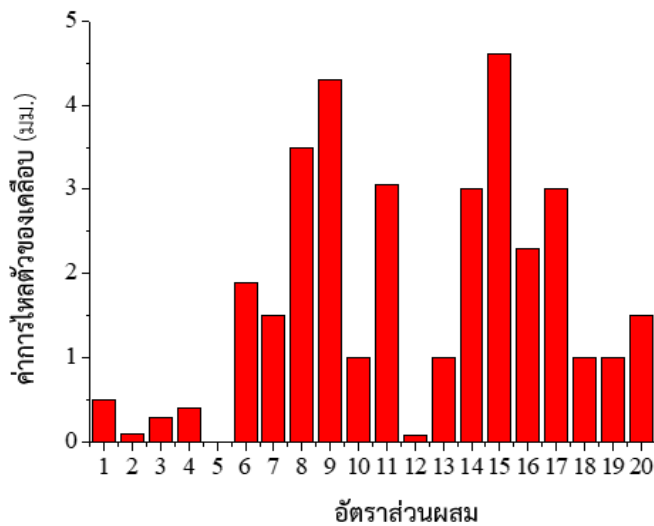


Figure 6 The flow of red copper coating at 1250°C

ผลของลักษณะที่ปรากฏน้ำเคลือบสีแดงของทองแดงที่อุณหภูมิ 1280°C บรรยากาศรีดักชัน

จากขั้นตอนทดสอบของเคลือบสีแดงของทองแดงที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1280°C บรรยากาศรีดักชัน ลักษณะพื้นผิวที่ปรากฏพบว่า เคลือบปรากฏผิวมัน และกึ่งมันกึ่งด้านในปริมาณของซิลิกา 1.8–2.8 โมล และปริมาณอะลูมินา 0.13–0.28 โดยเคลือบในอัตราส่วนผสมที่ 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 11, 12, 16 และ 17 มีผิวเคลือบที่ปรากฏคือ ผิวมัน มีการสุกตัวดี นอกจากนี้ยังพบว่าในอัตราส่วนที่ 5, 10, 13, 14, 15, 18, 19 และ 20 ผิวเคลือบที่ปรากฏคือ ผิวกึ่งมันกึ่งด้าน เคลือบภายหลังการเผาเกิดการหดตัวจำนวน 18 อัตราส่วนผสม มีเพียง 2 อัตราส่วนผสมที่ไม่เกิดการหดตัวคือ อัตราส่วนผสมที่ 6 และ 11 สีที่ปรากฏของเคลือบภายหลังการเผาพบว่า เคลือบในอัตราส่วนที่ 1 ปรากฏเป็นสีแดงสด และเมื่อปริมาณของอะลูมินาเพิ่มขึ้น ลักษณะสีแดงจะมีความเข้มข้น และเกิดเป็นสีชมพูเมื่อปริมาณของซิลิกาเพิ่มขึ้น อัตราส่วนที่ 4 และ 17 นอกจากเมื่อมีปริมาณของซิลิกาเพิ่มขึ้นยังพบเคลือบสีเทา และสีขาวในอัตราส่วนผสมที่ 5, 9, 10, 13, 14, 15, 18, 19 และ 20 จากผลการทดลองที่เคลือบที่เผาที่อุณหภูมิสูงพบว่า ดีบุกออกไซด์ที่ใช้เป็นส่วนผสมในน้ำเคลือบ โดย Sn^{2+} จะเริ่มทำปฏิกิริยาทางเคมีด้วยการการก่อตัวของนิวเคลียสร่วมกับ Cu^{1+} สามารถสะสมเป็น Cu_2O ได้ ทำให้ผิวเคลือบปรากฏเป็นสีแดง (Shingo, I. et al., 1987) ผลขั้นตอนทดสอบปรากฏดัง Figure 7

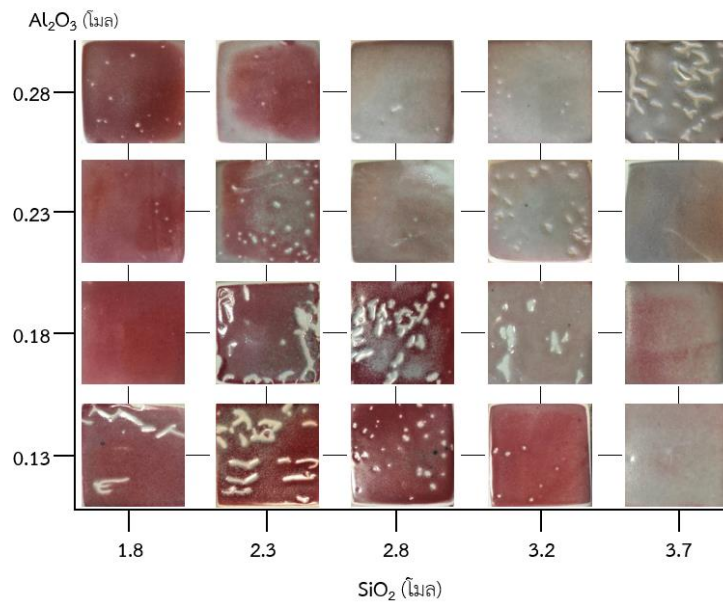


Figure 7 Appearance texture of red glaze of copper fired at 1280°C

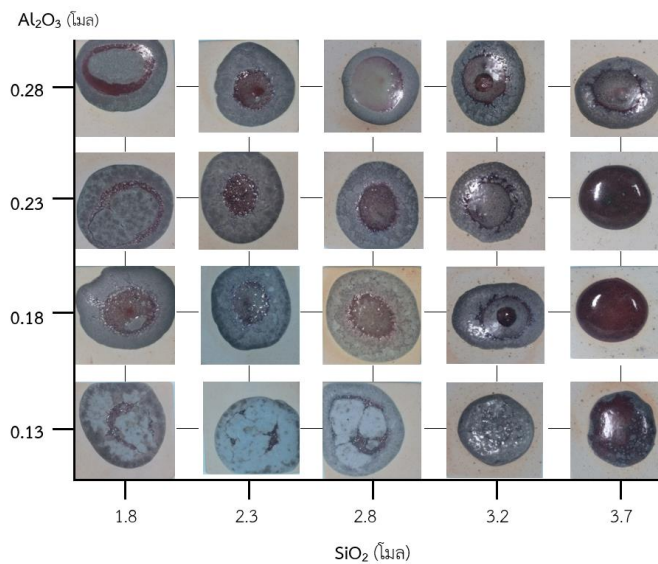


Figure 8 Melting of the red glaze of copper fired at 1280°C



การทดสอบหลอมตัวของเคลือบสีแดงของทองแดงเผาที่อุณหภูมิ 1280°C บรรยากาศรีดักชัน จากการทดลองพบว่า เคลือบสีแดงของทองแดงหลังการเผาเกิดการหลอมตัว โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปทรงจากทรงกรวยแผ่กระจายตัวออกมากกว่าการหลอมตัวที่อุณหภูมิ 1250°C ซึ่งการหลอมตัวของเคลือบขึ้นอยู่กับปริมาณของซิลิกา 1.8 โมล มีการหลอมตัวมาก โดยเคลือบเกิดการแผ่กระจายตัวมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 4 เซนติเมตร แต่เมื่อปริมาณของอะลูมินาเพิ่มขึ้น 0.13–0.28 โมล เคลือบจะมีการแผ่กระจายลดลง เมื่อปริมาณของซิลิกาลดลงจะปรากฏลักษณะการหลอมตัวของเคลือบจะลดลงสังเกตได้จากอัตราส่วนผสมที่ 1–5 เมื่อปริมาณของอะลูมินาเพิ่มขึ้น 0.13–0.28 โมล การหลอมตัวของเคลือบจะมีการแผ่กระจายลดลง ซึ่งจะเห็นได้จากอัตราส่วนผสมที่ 5 เคลือบจะมีลักษณะเป็นก้อนมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 2.5 เซนติเมตร และปริมาณของอะลูมินาเพิ่มขึ้น 0.13–0.28 โมล เคลือบจะมีการหลอมตัวเป็นก้อน และมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยลดลงปรากฏดัง Figure 8

การทดสอบการไหลตัวของเคลือบสีแดงของทองแดงเผาที่อุณหภูมิ 1280°C บรรยากาศรีดักชัน ทำการวัดจากระยะการไหลตัวของน้ำเคลือบในขึ้นทดสอบ จากการทดลองพบว่า เคลือบมีการไหลตัวสูงในปริมาณของอะลูมินา 0.18–0.28 โมลในอัตราส่วนผสมที่ 6–20 และเมื่อปริมาณของอะลูมินาเพิ่มขึ้นการไหลตัวของเคลือบลดลงเล็กน้อย นอกจากนี้เมื่อปริมาณของซิลิกาเพิ่มมากขึ้นการหลอมตัวของเคลือบจะลดลงเห็นได้อย่างชัดเจน เนื่องจากซิลิกาเป็นวัสดุทนไฟทำให้เคลือบมีสถานะเป็นกรด ซึ่งซิลิกามีจุดหลอมตัวอยู่ที่ 1710°C อุณหภูมิดังกล่าว Hye-Jin, E. (2013) และ Wang, Y. (2018) ได้ทำการศึกษาแล้ว ด้วยเหตุนี้ปริมาณของซิลิกาที่เพิ่มมากขึ้นจึงส่งผลต่อการไหลตัวของเคลือบสีแดงของทองแดงดัง Figure 9

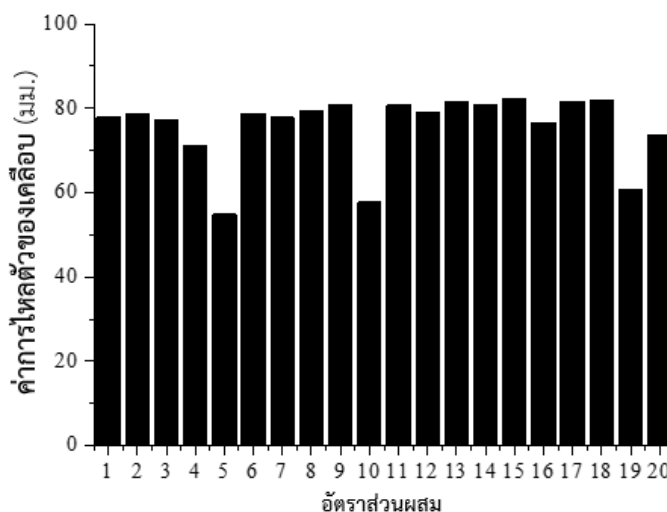


Figure 9 The flow of red copper coating at 1280°C



สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองเพื่อศึกษาอัตราส่วนผสมของเคลือบสีแดงของทองแดง และศึกษาสภาวะการเผาที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของเคลือบสีแดงของทองแดงในเตาเผาอัตโนมัติ ผลการทดลองพบว่า เมื่อนำชิ้นทดสอบเผาที่อุณหภูมิ 1250°C และ 1280°C ซึ่งขึ้นทดสอบหลังการเผาปรากฏว่าเคลือบสีแดงของทองแดงที่เผาอุณหภูมิ 1280°C มีสีแดงปรากฏที่ชัดเจนกว่าเคลือบที่เผาอุณหภูมิ 1250°C แต่มีเคลือบที่สามารถนำไปใช้งานได้เพียง 1 อัตราส่วนผสมคือ อัตราส่วนผสมที่ 6 เกิดเคลือบสีแดงสด มีผิวมัน ไม่เกิดการหลุด และแตกรานของผิวเคลือบ ผิวเคลือบมีการหลอมตัวดี ผิวเรียบ และลักษณะที่ปรากฏของเคลือบสีแดงของทองแดงที่เผาอุณหภูมิ 1250°C ปรากฏเคลือบที่สามารถนำไปใช้งานได้จำนวน 2 อัตราส่วนผสม คือ อัตราส่วนผสมที่ 1 และ 16 เคลือบเกิดสีแดงเลือนัว และสีแดงที่เกิดประกายของโลหะ ผิวเคลือบมีความมันวาว ผิวเรียบ ไม่เกิดการรานตัว และหลุด และในส่วนของสภาวะการเผาเคลือบนั้นที่อุณหภูมิ 1250°C มีการแบ่งช่วงการเผาเป็นออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงแรกเผาที่อุณหภูมิห้อง-400°C ใช้ระยะเวลา 4 ชั่วโมง อัตราการเผาเฉลี่ย 1.5-2.5°C/min อุณหภูมิ 400-950°C ใช้ระยะเวลา 4 ชั่วโมง อัตราการเผาเฉลี่ย 2-2.5°C/min และเริ่มการปรับรีดักชันด้วยการปรับปล่อยเตาเผาและปรับปริมาณลมที่ป้อนเข้าสู่เตาเผา เมื่อปรับเตาเผาให้เข้าสู่สภาวะสมดุลแล้วทำการเพิ่มอุณหภูมิขึ้น โดยในการปรับอุณหภูมิในช่วงรีดักชันมีการขึ้นอุณหภูมิเฉลี่ย 90°C/h. จนถึงอุณหภูมิ 1250°C และทำการเย็นอุณหภูมิไว้ 15-20 นาที เมื่อปิดเตาเผาแล้วทำการปิดปล่องให้อุณหภูมิลดลงอย่างช้าๆ ส่วนของสภาวะการเผาเคลือบนั้นที่อุณหภูมิ 1280°C มีส่วนต่างของอุณหภูมิที่ 30°C มีการแบ่งช่วงการเผาเป็นออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงแรกเผาที่อุณหภูมิห้อง-400°C ใช้ระยะเวลา 4 ชั่วโมง อัตราการเผาเฉลี่ย 1.5-2.5°C/min อุณหภูมิ 400-950°C ใช้ระยะเวลา 4 ชั่วโมง อัตราการเผาเฉลี่ย 2-2.5°C/min เมื่ออุณหภูมิถึง 950°C เริ่มการปรับรีดักชันด้วยการปรับปล่อยเตาเผาและปรับปริมาณลมที่ป้อนเข้าสู่เตาเผา เมื่อปรับเตาเผาให้เข้าสู่สภาวะสมดุลแล้ว ทำการเพิ่มอุณหภูมิขึ้น โดยในการปรับอุณหภูมิในช่วงรีดักชันมีการขึ้นอุณหภูมิเฉลี่ย 90°C/min จนถึงอุณหภูมิ 1280°C และทำการเย็นอุณหภูมิไว้ 15-20 นาที เมื่อปิดเตาเผาแล้วทำการปิดปล่องให้อุณหภูมิลดลงอย่างช้า ๆ ซึ่งจากการศึกษาพบว่า เคลือบสีแดงของทองแดงที่เผาอุณหภูมิ 1250°C สามารถนำไปใช้ในกระบวนการเผาเตาด้วยระบบอัตโนมัติได้ และมีลักษณะที่ปรากฏของเคลือบที่หลากหลาย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปางที่สนับสนุนทุนอุดหนุนวิจัยจากภายใต้งบประมาณรายได้ เพื่อใช้สำหรับทดลองและขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนช่วยในการทำให้การวิจัยผ่านไปด้วยดี



References

- Aranyapak, S. (2010). *Principles of Ceramic Glazes*. Bangkok: Chulalongkorn University Press.
- Dinsdale, A. (1986). *Pottery Science*. (1sted). Ellis Horwood Ltd., UK.
- Hye-Jin, E., & Byung-Ha, L. (2013). Coloration characteristics of copper red glaze. *Korean Journal of Materials Research*, 23(7), 399-403.
- Ingsirivat, P. (1994). *Ceramic Glaze Formulas Total*. Bangkok: Odeonstore Printing Co., Ltd.
- Lampang Provincial Office. (2021). Lampang Provincial Development Plan 5 years (2018-2022) Review Edition 2021, *Provincial Development Strategy and Information Working Group*.
- Larsomsri, P. (2006). *Effect of Tin Oxide Additive in Copper Red for Pottery Products. Master of Science in Industrial Chemistry, Faculty of Science*. Chiang Mai: Chiang Mai University.
- Larsomsri, P. (2009). *Red copper glaze for pottery products*. Bangkok: Odeonstore Printing Co., Ltd.
- Mellor, J.W. (1963). "The Chemistry of the Chinese Copper-red Glazes", Transactions of the British Ceramic Society, 1963.
- Mitsuru, W., Nobuyuki, T. & Shingo I. (1986). Effect of heating and cooling atmospheres on colors of glaze and glass containing copper. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 80(1-3), 412-421.
- Mitsuru, W., Nobuyuki, T., Hiroki, N., Yoshiki O. & Shingo, I. (1986). Effect of furnace atmosphere on color of copper glaze condition of atmosphere to produce red copper glaze. *Ceramic Association Magazine*, 94(4), 387-392.
- Shingo, I., Masahiko, H., Nobuyuki, T., & Mitsuru, W. (1987). Role of Sn²⁺ in development of red color during reheating of copper glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 95(2), 790-800.
- Tichane, R. (1998). *Copper red glaze*. USA: Krause Publication.
- Wang, Y., Yu, S., Chu, J., Chen, D. & Chen, J. (2018). Study on the copper and iron coexisted coloring glaze and the mechanism of the fambe. *Journal of Euro Ceramic Society*, 38(10), 3681-3688.

