

การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติเคลือบสีจากตะกรัน

Study of Effective Factors on Properties of Colored Glaze from Slag

เกษรินทร์ พรหมจรรย์ (Ketsarin Prommajun)* วรพงษ์ เทียมสอน (Worapong Thiemsorn)**

พุฒิพงษ์ พุกกะมาน (Putipong Bookkamana)*** ภกวรรณ พวงสมบัติ (Pakawan Puangsombat)****

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบปัจจัยขนาดอนุภาคตะกรัน ความหนาชั้นเคลือบ อุณหภูมิ และบรรยากาศการเผาที่มีผลต่อเคลือบสีจากตะกรัน ทำการทดสอบสมบัติหลังเผาเคลือบด้านสี ความแข็ง การไหลตัว และการขยายตัวเพราะ ความร้อนของเคลือบ ทำการวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยเทคนิคทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยผลการวิเคราะห์แบ่งเป็น 4 กรณี ประกอบด้วย กรณีที่ 1 เคลือบที่ใช้ตะกรันขนาดต่างกันระหว่าง 140 เมช กับ 325 เมช มีค่าสี และสัมประสิทธิ์การขยายตัวเพราะความร้อน (Coefficient of Thermal Expansion; COE) ของเคลือบแตกต่างกัน กรณีที่ 2 เคลือบที่ชุบเคลือบด้วยความหนาต่างกันระหว่าง 1 มม. กับ 2 มม. มีค่าสีแตกต่างกัน กรณีที่ 3 เคลือบที่เผาในอุณหภูมิต่างกันระหว่าง 1200°C กับ 1250°C มีค่าสี และการไหลตัวของเคลือบแตกต่างกัน และกรณีที่สุดท้าย เคลือบที่เผาด้วยบรรยากาศการเผาต่างกันระหว่างการเผาด้วยบรรยากาศแบบออกซิเดชัน กับ บรรยากาศแบบรีดักชัน มีค่าสี และ ค่า COE แตกต่างกัน

ABSTRACT

The study was conducted to compare the effects of factors i.e. particle size of slag, glaze thickness, firing temperature and firing atmosphere on colored glaze from slag. After firing, the properties of glaze samples such as color values, hardness, glaze flow and thermal expansion were investigated. The different were analyzed using statistical techniques level of significant at 0.05. The results were observed in 4 categories. Case 1 the difference particle size of slag between 140 mesh and 325 mesh affected on the color values and COE. Case 2 the glaze thickness between 1 mm. and 2 mm. have affects on the color values. Case 3 the firing temperature at 1200°C and 1250°C have effects on the color values and glaze flow. Final case the firing atmosphere under oxidation and reduction conditions affected on the color values and COE.

คำสำคัญ : ตะกรัน เคลือบสี การไหลตัวของเคลือบ

Key Words : Slag, Colored glaze, Glaze flow

*นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

**อาจารย์ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

***รองศาสตราจารย์ ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

****อาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

บทนำ

ในปัจจุบันการพัฒนาเคลือบเซรามิกสังเคราะห์ขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจาก เคลือบช่วยเพิ่มความสวยงามให้กับผลิตภัณฑ์ เพิ่มความแข็งแรง ป้องกันการซึมผ่านของแก๊สและน้ำ ป้องกันสิ่งสกปรก ทำความสะอาดง่าย และเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ องค์ประกอบหลักของเคลือบ ประกอบด้วย คือ ซิลิกา (Silica), อะลูมินา (Alumina) และสารช่วยหลอมละลาย (Fluxing agents) (สุรศักดิ์, 2534) บดส่วนผสมเคลือบกับน้ำตามอัตราส่วน นำมาเคลือบบนผิวผลิตภัณฑ์ จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิสูง ทำให้เคลือบหลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกันมีลักษณะคล้ายชั้นแก้วบาง ๆ จับอยู่บนผิวผลิตภัณฑ์ มีความมันวาวและมีสีตามแต่ชนิดของเคลือบ (ศูนย์พัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องเคลือบดินเผาภาคเหนือ, 2538)

ปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมให้ความสำคัญกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้น เริ่มมีการนำกากเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมกลับมาใช้ประโยชน์อีกครั้งจากการสำรวจแหล่งแร่และวัตถุดิบที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรม พบว่า ปริมาณของแร่และวัตถุดิบลดลงในขณะเดียวกันกากแร่โลหะจากโรงงานอุตสาหกรรมมีปริมาณเพิ่มขึ้นทุกปี จากการศึกษาวิจัยของ Setién et al. (2009) พบว่า ตะกรันกากเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตเหล็กกล้า มีสมบัติทางเคมี สมบัติทางแร่ และโครงสร้างระดับอนุภาค สามารถนำมาประยุกต์เป็นวัตถุดิบก่อสร้างได้ งานวิจัยในต่างประเทศนำตะกรันไปใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตเบืองเซรามิกสังเคราะห์ไม่เคลือบ (Ilker & Senol, 2007)

จากการศึกษางานวิจัย พบว่า ตะกรันมีองค์ประกอบทางเคมีจำพวก SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , TiO_2 และ SO_2 ดังตารางที่ 1 สามารถพัฒนาเป็นส่วนผสมและวัตถุดิบให้สีในเคลือบได้ (เอกรินทร์, 2552)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันที่ใช้ในเคลือบ

องค์ประกอบ	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	SO_2	L.O.I
ตะกรัน	60.19	17.34	5.07	11.22	1.99	1.00	0.69	0.39	0.77	-

ในการพัฒนาเคลือบแต่ละครั้งมักจะประสบปัญหาการใช้วัตถุดิบ เวลา และค่าใช้จ่ายจำนวนมาก เนื่องจาก ในการเตรียมเคลือบมักจะเกี่ยวข้องกับปัจจัยหลายปัจจัย ซึ่งบางปัจจัยอาจส่งผลต่อสมบัติเคลือบหลังเผา และ บางปัจจัยอาจไม่ส่งผลเลย หากทราบปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติเคลือบหลังเผาที่แท้จริงเบื้องต้น จะทำให้สามารถลดระยะเวลา ค่าใช้จ่าย รวมถึงวัตถุดิบที่ใช้ในการพัฒนาเคลือบลง ในการวิจัยครั้งนี้ต้องการศึกษาปัจจัยในการเตรียมเคลือบสีจากตะกรันที่มีผลต่อสมบัติเคลือบหลังเผาเบื้องต้น เพื่อนำไปพัฒนาเคลือบสีจากตะกรันหรือเคลือบชนิดอื่น ๆ ต่อไป ทั้งนี้ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบปัจจัยด้านขนาดของตะกรัน ความหนาของชั้นเคลือบ อุณหภูมิการเผา และบรรยากาศในการเผาที่แตกต่างกัน จากนั้น ศึกษาสมบัติเคลือบสีจากตะกรันหลังเผาด้านสี การไหลตัวของเคลือบ ความแข็งแรง และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเพราะความร้อน

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เปรียบเทียบสมบัติเคลือบสีจากตะกรันหลังเผาด้วยเงื่อนไขปัจจัยด้านขนาดของตะกรัน ความหนาของชั้นเคลือบ อุณหภูมิ และบรรยากาศในการเผาเคลือบที่แตกต่างกัน
2. เพื่อนำผลทางสถิติเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับวางแผนควบคุมการเตรียมเคลือบสีจากตะกรัน

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

อุปกรณ์

1. ตะแกรงคัดขนาด 140 เมช และ 325 เมช
2. เครื่องชั่งน้ำหนัก ความละเอียด 2 ตำแหน่ง
3. หม้ออบ ขนาด 500 กรัม

4. โกร่ง
5. เครื่องย่อยวัสดุ ชนิด Hammer mill
6. เตาเผาชนิดแก๊ส
7. เครื่องวัดสี (Colour meter) ระบบ Hunter lab scale
8. เครื่องทดสอบความแข็ง (Automatic Vickers Microhardness Test) รุ่น A041554
9. เครื่องทดสอบการขยายตัวเพราะความร้อน (Dilatometer) รุ่น CHEM.JICA 4/25/1-1
10. สามเหลี่ยมทดสอบการไหลตัว

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

1. โพแทสเฟลด์สปาร์ (Potash feldspar) ; $K_2O.Al_2O_3.6SiO_2$ Commercial grade ขนาด 325 เมช
2. หินปูน (Lime stone) ; $CaCO_3$ Commercial grade ขนาด 325 เมช
3. ดินขาวลำปาง ; $Al_2O_3.2SiO_2.2H_2O$ Commercial grade ขนาด 270 เมช
4. ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide) ; ZnO Lab grade ขนาด 325 เมช
5. Quartz ; SiO_2 Commercial grade ขนาด 325 เมช
6. Bentonite ; $Al_2O_3.4SiO_2.H_2O$ Commercial grade ขนาด 270 เมช
7. เนื่อดินปั้นสโตนแวร์ ที่ผ่านการดูดอากาศ

วิธีการทดลอง

1. การเตรียมชิ้นทดสอบ

นำเนื้อดินปั้นชนิดสโตนแวร์มาอัดในแบบพิมพ์ปูนพลาสติกลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด $5 \times 5 \times 1$ เซนติเมตร เผาปิ้งที่อุณหภูมิ $850^\circ C$

2. การเตรียมตะกรันใช้เป็นวัตถุดิบเคลือบ

ทำการย่อยตะกรันด้วยเครื่องย่อยแฮมเมอร์มีลให้ มีขนาดอนุภาคเล็กและละเอียด จากนั้น นำตะกรันที่ผ่านการย่อยแล้วไปร่อนด้วยตะแกรง ขนาด 140 และ 325 เมช เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบให้สีในเคลือบ

3. การเตรียมเคลือบสีจากตะกรัน

- ส่วนผสมหลักเคลือบสีมัน

เลือกส่วนผสมหลักเคลือบสีมันที่มีอุณหภูมิ การเผาในช่วง $1200 - 1250^\circ C$ มีส่วนผสม ประกอบด้วย โพแทสเฟลด์สปาร์ ร้อยละ 50.98 หินปูน ร้อยละ 19.61 ดินขาวลำปาง ร้อยละ 9.8 สังกะสี ออกไซด์ ร้อยละ 8.82 ควอร์ต ร้อยละ 5.88 และ เบน โทไนต์ ร้อยละ 4.91 (โกมล, 2538) โดยวัตถุดิบแต่ละ ชนิดร่อนผ่านตะแกรง ขนาด 80 เมช

- การทดลองเดิมตะกรันเพื่อให้สีในเคลือบ

เตรียมเคลือบสีมันหลัก อัตราส่วนผสมเคลือบต่อ น้ำเท่ากับ 1 : 0.7 ทดลองเดิมตะกรันลงไปเคลือบ สีมัน ร้อยละ 1, 5, 10, 15, 20 และ 25 ของวัตถุดิบ เคลือบ ผสมเคลือบเป็นเวลา 30 นาที จากนั้น นำชิ้นทดสอบที่ผ่านการเผาปิ้งตามาชุบเคลือบด้วย วิธีการจุ่มเคลือบ แล้วนำไปเผาด้วยเตาเผาชนิดแก๊ส ที่อุณหภูมิ $1250^\circ C$ พบว่า การเดิมตะกรัน ร้อยละ 20 ให้สีเคลือบหลังเผาใกล้เคียงผลิตภัณฑ์สีลาดที่ใช้เป็น สีอ้างอิง โดยผลจากการเดิมตะกรันในเคลือบ เมื่อเทียบกับเคลือบที่ไม่ได้เดิมตะกรัน พบว่า เคลือบหลอมตัวง่ายขึ้น มีการร่อนตัวของเคลือบเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งเป็น ข้อดีในการทำเคลือบ

4. การศึกษาปัจจัยขนาดของตะกรัน

ผสมเคลือบสีจากตะกรันขนาดอนุภาคร่อนผ่าน ตะแกรง 140 เมช และ 325 เมช ด้วยหีบอบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้น กรองผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช แล้วนำชิ้นทดสอบที่ผ่านการเผาปิ้งตามาชุบเคลือบ ความหนา 1 มิลลิเมตร อย่างละ 10 ชิ้น เผาที่อุณหภูมิ $1250^\circ C$ ด้วยบรรยากาศการเผาแบบออกซิเดชัน จากนั้น นำเคลือบไปทดสอบสมบัติเคลือบหลังเผา

5. การศึกษาปัจจัยความหนาชั้นเคลือบ

ผสมเคลือบสีจากตะกรันขนาดอนุภาคร่อนผ่าน ตะแกรง 325 เมช เป็นเวลา 1 ชั่วโมง กรองผ่าน ตะแกรงขนาด 100 เมช แล้วชุบเคลือบความหนา 1 มิลลิเมตร 10 ชิ้น และหนา 2 มิลลิเมตร 10 ชิ้น เผาที่ อุณหภูมิ $1200^\circ C$ ด้วยบรรยากาศการเผาแบบ

ออกซิเดชัน จากนั้น นำเคลือบไปทดสอบสมบัติเคลือบหลังเผา

6. การศึกษาปัจจัยอุณหภูมิการเผาเคลือบ

ผสมเคลือบสีจากตะกั่วขนาดอนุภาคก่อนผ่านตะแกรง 325 เมช เป็นเวลา 1 ชั่วโมง กรองผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช แล้วชุบเคลือบความหนา 1 มิลลิเมตร จำนวน 20 ชิ้น แบ่งเผาที่อุณหภูมิ 1200 °C จำนวน 10 ชิ้น และเผาที่อุณหภูมิ 1250 °C จำนวน 10 ชิ้น ด้วยบรรยากาศการเผาแบบออกซิเดชัน จากนั้น นำเคลือบไปทดสอบสมบัติเคลือบหลังเผา

7. การศึกษาปัจจัยบรรยากาศการเผาเคลือบ

ผสมเคลือบสีจากตะกั่วขนาดอนุภาคก่อนผ่านตะแกรง 140 เมช เป็นเวลา 1 ชั่วโมง กรองผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช แล้วชุบเคลือบความหนา 2 มิลลิเมตร 20 ชิ้น แบ่งเผาในบรรยากาศการเผาแบบออกซิเดชัน จำนวน 10 ชิ้น และ เผาในบรรยากาศแบบรีดักชัน จำนวน 10 ชิ้น ที่อุณหภูมิ 1250 °C จากนั้น นำเคลือบไปทดสอบสมบัติเคลือบหลังเผา

8. การทดสอบสมบัติเคลือบหลังเผา

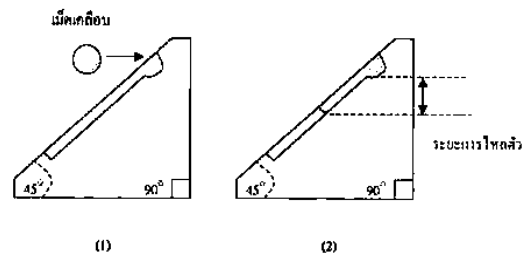
- ทดสอบสมบัติทางสีของเคลือบ

ทดสอบสีด้วย เครื่อง Colour meter วัดค่าสีได้ทั้งหมด 3 ค่า ได้แก่ ค่า L* หมายถึง ค่าความขาว – ความคล้ำของสี (+L* = สว่าง, -L* = มืด) ค่า a* หมายถึง ค่าความแดง – เขียวของสี (+a* = แดง, -a* = เขียว) และ ค่า b* หมายถึง ค่าความเหลือง – ฟ้าของสี (+b* = เหลือง, -b* = ฟ้า) นำค่าที่บันทึกได้ไปคำนวณค่าความต่างของสี (ΔE^*) เทียบกับสีมาตรฐาน จากสมการที่ 1 (ไพจิตร, 2546)

$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (1)$$

- ทดสอบการไหลตัวของเคลือบหลังเผา

วัดระยะทางการไหลตัวของเคลือบหลังเผาโดยใช้สามเหลี่ยมทำมุม 45 องศา ใช้หน่วยวัดเป็นเซนติเมตร (ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2553)



- (1) การอัดผงเคลือบลงในหลุมให้เต็ม
- (2) การวัดระยะทางการไหลของเคลือบ

ภาพที่ 1 สามเหลี่ยมสำหรับทดสอบระยะการไหลตัวของเคลือบ

- ทดสอบค่าความแข็งของเคลือบหลังเผา

ทดสอบค่าความแข็งด้วย เครื่อง Vickers Hardness ใช้น้ำหนักในการกด 200 กรัมต่อครั้ง โดยใช้เวลาในการกด 15 วินาที ส่องดูระยะเส้นทแยงมุมของรอยกด ด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 50 เท่า บันทึกค่า HV (Vickers Hardness) (ประจักษ์, 2543)

- ทดสอบการขยายตัวเพราะความร้อนของเคลือบ

วัดการขยายตัวเนื่องจากความร้อนของเคลือบด้วยเครื่อง Dilatometer ในช่วงอุณหภูมิ 0 – 600 °C บันทึกค่าการขยายตัวทุก ๆ อุณหภูมิเพิ่ม 10 °C นำมาคำนวณหาค่า ส.ป.ส.การขยายตัวเพราะความร้อน (COE) (ไพจิตร, 2541) ได้จากสมการที่ 2

$$\alpha = \frac{\Delta \delta}{\Delta T} \quad (2)$$

เมื่อ

α = ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวอันเนื่องมาจาก

อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงมีหน่วยเป็น (mm./mm.°C)

$\Delta \delta$ = ช่วงระยะการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้น

ΔT = ช่วงของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง นำมาวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

1. ผลการทดลองปัจจัยขนาดของตะกรัน

ผลการศึกษาสมบัติหลังเผาของเคลือบสีจากตะกรัน จากการทดลองใช้ตะกรันขนาด 140 เมช และ 325 เมช แสดงค่าตามตารางที่ 2

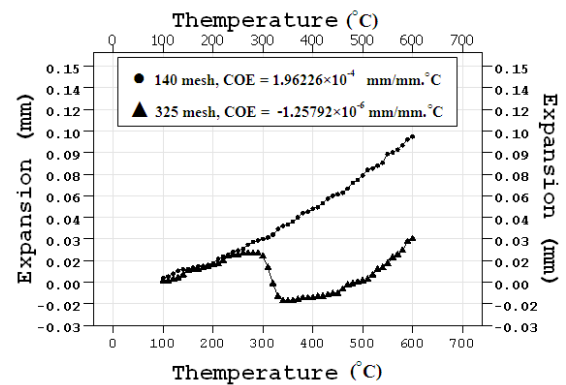
ตารางที่ 2 เปรียบเทียบสมบัติหลังเผาเคลือบสีจากตะกรันที่ใช้ตะกรันขนาดต่างกัน

Property		N	Mean ± SD, Error	Median	Minimum	Maximum	p-value
Color; ΔE^*	R9	30	19.16 ± 0.12	19.08	17.71	20.33	0.000
	R9'	30	20.85 ± 0.07	20.89	20.07	21.43	
Length (cm)	R9	4	2.78 ± 0.39	2.83	2.00	3.45	0.363
	R9'	4	3.36 ± 0.45	3.20	2.55	4.50	
Hardness; HV (N/mm ²)	R9	13	1120.57 ± 77.40	1079.20	772.40	1749.20	0.845
	R9'	9	1166.58 ± 95.29	1030.70	970.10	1735.70	
Dilatometer; COE (mm/mm.°C)	R9	51	0.04 ± 0.004	0.04	0.003	0.10	0.000
	R9'	51	0.005 ± 0.002	0.005	-0.013	0.03	

หมายเหตุ: R9 หมายถึง เคลือบที่ใช้ตะกรันขนาด 140 เมช และ R9' หมายถึง เคลือบที่ใช้ตะกรันขนาด 325 เมช

จากการทดสอบคุณสมบัติการแตกหักพบว่ามีสมบัติเคลือบหลังเผาทุกกลุ่มไม่มีการแตกหักพบ จึงใช้สถิติ Nonparametric test วิธี Mann-Whitney U ในการวิเคราะห์ความแตกต่างของสมบัติเคลือบหลังเผาของเคลือบที่ใช้ตะกรันขนาดต่างกัน พบว่า เคลือบที่ใช้ตะกรันขนาดต่างกันระหว่างตะกรันขนาด 140 เมช กับ 325 เมช หลังเผาเคลือบ เคลือบมีค่าสี และค่า COE แตกต่างกัน เนื่องจาก ตะกรันขนาดอนุภาคเล็กสามารถหลอมละลายในอุณหภูมิสูงได้ดีกว่าตะกรันขนาดอนุภาคใหญ่ ทำให้การแลกเปลี่ยนไอออนในปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นได้รวดเร็ว ส่งผลให้สีของเคลือบหลังเผาแตกต่างกัน นอกจากนี้ยัง พบว่า เคลือบที่ใช้ตะกรันขนาด 140 เมช มีค่าสีใกล้เคียงกับสีอ้างอิง และมีการขยายตัวเพราะความร้อนสูง พิจารณาได้จากภาพที่ 2

Thermal Expansion Coefficient: Slag Size Factor



ภาพที่ 2 การขยายตัวเพราะความร้อนของเคลือบที่ใช้ตะกรันขนาด 140 เมช และ 325 เมช

จากภาพที่ 2 เห็นได้ว่า ในช่วงแรกเคลือบทั้ง 2 ชนิด มีค่าการขยายตัวใกล้เคียงกัน และเมื่ออุณหภูมิอยู่ในช่วง 300 – 400 °C เคลือบที่ใช้ตะกรันขนาด 325 เมช มีการขยายตัวลดลง เนื่องจาก อนุภาคภายในเคลือบเคลื่อนที่เข้าหากัน (Attraction) ได้เร็ว ทำให้เคลือบหลอมตัวเป็นเนื้อเดียวกันได้ดี ความร้อนที่สูงขึ้นจึงทำให้ค่า COE ของเคลือบต่ำกว่าเคลือบที่ใช้ตะกรันขนาด 140 เมช (Setién et al., 2009)

2. ผลการทดลองปัจจัยความหนาของชั้นเคลือบ

ผลการศึกษาสมบัติหลังเผาของเคลือบสีจากตะกรัน จากการทดลองชุบเคลือบความหนา 1 มิลลิเมตร และ 2 มิลลิเมตร แสดงค่าตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบสมบัติหลังเผาเคลือบสีจากตะกรันที่ชุบเคลือบด้วยความหนาต่างกัน

Property		N	Mean ± SD, Error	Median	Minimum	Maximum	p-value
Color; ΔE^*	R10	30	22.25 ± .71	23.09	15.36	27.12	0.000
	R10'	27	14.90 ± .19	14.95	13.18	16.40	
Hardness; HV (N/mm ²)	R10	12	1083.49 ± 154.43	823.95	622.80	2343.20	0.203
	R10'	10	1356.82 ± 181.82	1100.10	663.80	2202.20	

หมายเหตุ: R10 คือ ชุบเคลือบหนา 2 มม. และ R10' คือ ชุบเคลือบหนา 1 มม.

จากการทดสอบคุณสมบัติการแจกแจงปกติ พบว่า สมบัติเคลือบหลังเผาทั้งสองกลุ่มไม่มีการแจกแจงปกติ จึงใช้สถิติ Nonparametric test วิธี Mann-Whitney U ในการวิเคราะห์ความแตกต่างสมบัติเคลือบหลังเผา ของเคลือบที่ชุบด้วยความหนาแตกต่างกันระหว่างการ ชุบเคลือบด้วยความหนา 1 มม. กับ 2 มม. พิจารณา ค่า p-value จากตารางที่ 3 พบว่า หลังเผาเคลือบมีสี แตกต่างกัน โดยการชุบเคลือบความหนา 1 มม. มีค่าสี ใกล้เคียงกับสีอ้างอิง เนื่องจากการชุบเคลือบหนาทำ ให้สีเคลือบหลังเผามีความเข้มมากขึ้น การไหลตัวเพื่อ หลอมเป็นเนื้อเดียวกันของชั้นเคลือบในระหว่างการ เผาแตกต่างกันเป็นผลมาจากความตึงผิว (Surface Tension) ซึ่งชั้นเคลือบที่หนาจะมีความตึงผิวสูงจึงไหล ตัวได้น้อย และส่งผลให้มีค่าความแข็งตัวพื้นผิวมาก อาจเนื่องมาจากพลังงานของพันธะยึดเหนี่ยวระหว่าง อะตอม

3. ผลการทดลองปัจจัยอุณหภูมิการเผาเคลือบ

ผลการศึกษาสมบัติหลังเผาของเคลือบสีจาก ตะกรัน จากการทดลองเผาเคลือบอุณหภูมิ 1200°C และ 1250°C แสดงค่าตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบสมบัติหลังเผาเคลือบสีจาก ตะกรันที่เผาด้วยอุณหภูมิต่างกัน

Property		N	Mean ± SD. Error	Median	Minimum	Maximum	p-value
Color; ΔE*	R16	30	18.17 ± 0.45	18.63	13.02	21.18	0.000
	R16'	30	12.24 ± 0.32	11.59	10.45	16.81	
Length (cm)	R16	4	2.65 ± 0.10	2.65	2.45	2.85	0.001
	R16'	4	7.78 ± 0.80	7.20	6.60	10.10	
Hardness; HV (N/mm ²)	R16	15	913.36 ± 131.04	630.70	571.10	2262.00	0.786
	R16'	13	704.90 ± 30.23	678.30	531.60	909.10	
Dilatometer; COE (mm/mm.°C)	R16	51	0.04 ± 0.004	0.04	0.00	0.10	0.976
	R16'	51	0.04 ± 0.005	0.03	0.00	0.11	

หมายเหตุ: R16 คือ เเผเคลือบอุณหภูมิ 1200°C และ R16' คือ เเผเคลือบอุณหภูมิ 1250°C

จากการทดสอบคุณสมบัติการแจกแจงปกติ พบว่า สมบัติเคลือบเผาบางข้อ ไม่มีการแจกแจงปกติ การวิเคราะห์ความแตกต่างข้อมูล จึงแบ่งเป็น 2 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 วิเคราะห์โดยใช้สถิติ Nonparametric test วิธี Mann-Whitney U เนื่องจากข้อมูลไม่ได้มีการแจกแจงปกติ พิจารณาค่า p-value จากตารางที่ 4 พบว่า การเผาเคลือบที่อุณหภูมิต่างกันระหว่าง 1200°C กับ 1250°C เคลือบหลังเผามีสมบัติทางสีแตกต่างกัน โดยการเผาเคลือบที่อุณหภูมิ 1250°C มีสีใกล้เคียงกับสีอ้างอิง ทั้งนี้เนื่องจาก ตะกรันเกิดการหลอมตัวที่ อุณหภูมิสูงได้ดี ส่งผลต่อปฏิกิริยาทางเคมีใน การแลกเปลี่ยนไอออนของออกไซด์ให้สีในเคลือบ ขณะเผาสามารถเกิดขึ้นได้มาก (Ilker & Senol, 2007)

กรณีที่ 2 วิเคราะห์โดยใช้สถิติ t-test เนื่องจาก ข้อมูลมีการแจกแจงปกติ และมีค่าความแปรปรวนไม่ แตกต่างกัน พิจารณาค่า p-value จากตารางที่ 4 พบว่า เคลือบ ที่เผาในอุณหภูมิแตกต่างกัน มีสมบัติการไหล ตัวของเคลือบหลังเผาแตกต่างกัน เนื่องจากเคลือบ เกิดการหลอมและไหลตัวในอุณหภูมิสูงได้ง่ายกว่า ทำให้ระยะทางการไหลตัวของเคลือบที่อุณหภูมิ 1250°C สูงกว่า

4. ผลการทดลองปัจจัยบรรยากาศในการเผาเคลือบ

ผลการศึกษาสมบัติหลังเผาของเคลือบสีจาก ตะกรัน จากการทดลองเผาเคลือบในบรรยากาศแบบ ออกซิเดชัน (Oxidation; OF) และบรรยากาศแบบ รีดักชัน (Reduction; RF) แสดงค่าตามตารางที่ 5

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบสมบัติหลังเผาเคลือบสีจาก ตะกรันที่เผาในบรรยากาศที่ต่างกัน

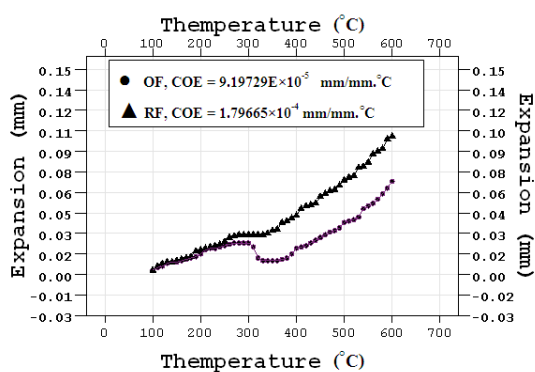
Property		N	Mean ± SD. Error	Median	Minimum	Maximum	p-value
Color; ΔE*	R6	30	21.28 ± 0.27	21.41	18.02	23.63	0.000
	R6'	30	7.31 ± 0.06	7.29	6.73	8.00	
Length (cm)	R6	4	4.53 ± 0.75	4.28	3.25	6.30	0.114
	R6'	4	3.41 ± 0.35	3.08	3.05	4.45	
Hardness; HV (N/mm ²)	R6	9	897.82 ± 79.89	907.30	527.30	1375.00	0.599
	R6'	14	889.81 ± 79.58	765.60	661.40	1743.10	
Dilatometer; COE (mm/mm.°C)	R6	51	0.02 ± 0.002	0.02	0.003	0.07	0.001
	R6'	51	0.04 ± 0.004	0.03	0.003	0.10	

หมายเหตุ: R6 คือ เเผเคลือบด้วยบรรยากาศ OF และ R6' คือ เเผเคลือบด้วย บรรยากาศ RF

จากการทดสอบคุณสมบัติการแจกแจงปกติ พบว่า สมบัติเคลือบหลังเผาทุกกลุ่มไม่มีการแจกแจงปกติ จึงใช้สถิติ Nonparametric test วิธี Mann-Whitney U ในการวิเคราะห์ความแตกต่างข้อมูล พิจารณาค่า p-value จากตารางที่ 5 พบว่า เคลือบที่เผาด้วยบรรยากาศ ที่ต่างกันระหว่างบรรยากาศการเผาแบบ OF กับ บรรยากาศแบบ RF มีค่า ρ และค่า COE ของเคลือบ แตกต่างกัน

เนื่องจาก การเผาเคลือบที่มีส่วนผสมของเหล็ก ออกไซด์ในบรรยากาศแบบสันดาปไม่สมบูรณ์จะทำให้เกิดสปีชีส์ของเฟอร์รัส (Fe^{2+}) แต่การเผาใน บรรยากาศแบบสันดาปสมบูรณ์จะทำให้เกิดสปีชีส์น้ำตาล เหลืองของเฟอร์ริก (Fe^{3+}) จากการทดลอง พบว่า การ เผาเคลือบสีจากตะกั่วในบรรยากาศแบบรีดักชันให้สี ที่ใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์สีลาดมามากกว่า และการเผา เคลือบในบรรยากาศแบบ RF มีค่า COE สูงกว่าการเผา เคลือบในบรรยากาศแบบ OF พิจารณาได้จากภาพที่ 3

Thermal Expansion Coefficient:
Oxidation Firing & Reduction Firing



ภาพที่ 3 การขยายตัวเพราะความร้อนของเคลือบที่เผา ในบรรยากาศแบบออกซิเดชัน (OF) และ รีดักชัน (RF)

จากภาพที่ 3 พบว่า แนวโน้มการขยายตัวเพราะ ความร้อนคล้ายคลึงกัน โดยการเผาเคลือบในบรรยากาศ แบบรีดักชันมีค่า COE สูงกว่า ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก ปริมาณออกซิเจนที่แตกต่างกันในกระบวนการเผาทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีแตกต่างกัน ซึ่งการเผาใน

บรรยากาศที่มีออกซิเจนไม่เพียงพอจะเอื้ออำนวยให้ เคลือบเกิดการหดตัวและเข้าถึงจุดสุกตัว (Maturing temperature) ได้เร็วทำให้การขยายตัวเพราะความร้อน สูง

สรุปผลการวิจัย

1. เคลือบที่ใช้ตะกั่วในขนาดอนุภาคแตกต่างกัน ระหว่าง 140 เมช กับ 325 เมช เป็นออกไซด์ให้สี มีสมบัติเคลือบหลังเผาด้านสี และค่า COE ของเคลือบ แตกต่างกัน
2. เคลือบที่ชุบด้วยความหนาต่างกันระหว่าง 1 มม. กับ 2 มม. มีสมบัติเคลือบหลังเผาด้านสีแตกต่างกัน
3. เคลือบที่เผาด้วยอุณหภูมิแตกต่างกันระหว่าง 1200 กับ 1250 °C มีสมบัติเคลือบหลังเผาด้านสี และการไหลตัวแตกต่างกัน
4. เคลือบที่เผาด้วยบรรยากาศแตกต่างกันระหว่าง บรรยากาศแบบออกซิเดชัน กับ บรรยากาศแบบ รีดักชัน มีสมบัติเคลือบหลังเผาด้านสี และค่า COE แตกต่างกัน

ข้อเสนอแนะ

ในการพัฒนาเคลือบสีจากตะกั่วควรคำนึงถึง ปัจจัยด้านขนาดของตะกั่ว ความหนาในการชุบ เคลือบ อุณหภูมิ และบรรยากาศในการเผาเคลือบ เนื่องจากทุกปัจจัยล้วนส่งผลต่อสมบัติเคลือบสีจาก ตะกั่วหลังเผา ทั้งสิ้น และควรใช้อุณหภูมิสูงในการ เผาเคลือบเพื่อให้ตะกั่วหลอมตัว และเพื่อให้ได้ ฟองอากาศให้หมดไป นอกจากนี้ควรศึกษา เปรียบเทียบสมบัติเคลือบหลังเผาระหว่างเคลือบที่มี การเติมตะกั่วกับเคลือบที่ไม่มีการเติมตะกั่วเพิ่มเติม ผลการวิจัยครั้งนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นใน การวางแผนการพัฒนาเคลือบสีจากตะกั่วหรือเคลือบ ชนิดอื่นในโอกาสต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

การทำการวิจัยครั้งนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาของบุคคลหลายท่าน ขอขอบคุณสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) รวมถึงบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำการวิจัย ขอขอบคุณภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี และภาควิชาสถิติ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุอุปกรณ์ รวมทั้งให้การสนับสนุนเป็นอย่างดีตลอดมา

เอกสารอ้างอิง

- โกมล รักยวงษ์. 2538. น้ำเคลือบ 2. กรุงเทพฯ: คณะอุตสาหกรรมศึกษา สถาบันราชภัฏพระนคร.
- ประจักษ์ สาทิทธิ. 2543. การทดสอบสมบัติทางฟิสิกส์ในงานเซรามิกส์. นครศรีธรรมราช: คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันราชภัฏนครศรีธรรมราช.
- ไพจิตร อังศิริวัฒน์. 2541. เนื้อดินเซรามิก. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.
- ไพจิตร อังศิริวัฒน์. 2546. สีเซรามิก. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.
- ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2553. Engineering Ceramics. ค้นเมื่อ 8 ธันวาคม 2552. จาก http://www.mne.eng.psu.ac.th/staff/lek_files/ceramic/u9.htm.
- สุรศักดิ์ โกสิยพันธ์. 2534. น้ำเคลือบ เครื่องปั้นดินเผา. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ไทยวัฒนาพานิช จำกัด.
- ศูนย์พัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องเคลือบดินเผา ภาคเหนือ. 2538. เคลือบเซรามิกเบื้องต้น. เชียงใหม่: กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.

เอกรินทร์ สาริยา. 2552. การทำกระเบื้องบุผนัง

ภายนอกชนิดเคลือบและไม่เคลือบจากวัสดุเหลือทิ้งอุตสาหกรรม. รายงานปัญหาพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

Ilker Ozdemir, and Senol Yilmaz. 2007. Processing of unglazed ceramic tiles from blast furnace slag. Materials Processing Technology. 183: 14.

Setién, J., Hernandez, D., and González, J.J.. 2009. Characterization of ladle furnace basic slag for use as a construction material. Construction and Building Materials. 23: 1790.