



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

การพัฒนาสารเคลือบเซรามิกจากวัสดุของเสีย: แคลเซียมคาร์บอเนต และ เศษแก้ว

Ceramic glaze development by utilizing waste materials: Calcium Carbonate and Glass Cullet

ชลธิศ พิติภูมิสุขสันต์¹ วิษณุ เลิศจันทรางกูร^{2*} สุทธิณี แก้วกระจอก³ ภาณุพงศ์ โล่ห์ทองคำ³ อุบลรัตน์ หวังรักษาศิสุกุล³

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพมหานคร 10300

² ภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร 10800

³ ภาควิชาวิศวกรรมการผลิตและหุ่นยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร 10800

Chonlathit Pitipoomsuksan¹ Witsanu Loetchantharangkun^{2*} Suthinee Gaewgrajok³

Panupone Lothongkam³ Ubolrat Wangrakdiskul³

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial Education, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok 10300

² Department of Teacher Training in Mechanical Engineering, Faculty of Technical Education, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok 10800

³ Department of Production and Robotics Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok 10800

* Corresponding author.

E-mail: witsanu.l@fte.kmutnb.ac.th

วันที่รับบทความ 15 ตุลาคม 2567 ; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 14 ธันวาคม 2567; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 28 มกราคม 2568

วันที่ตอบรับบทความ 11 กุมภาพันธ์ 2568

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาสารเคลือบเซรามิกจากวัสดุของเสียของภาคอุตสาหกรรม วัสดุของเสียสำคัญที่ใช้ 3 ชนิด คือ เศษแก้วสีเขียว เศษแก้วใส และแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งเศษแก้วใช้เพื่อลดอุณหภูมิในการเผาเคลือบ ส่วนแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำตาล นอกจากนี้ยังใช้หินปูนม้าเพื่อเปรียบเทียบกับเศษแก้วในการลดอุณหภูมิในการเผาเคลือบ และยังผสมดินขาวท้องถิ่น ในสูตรเคลือบเพื่อช่วยในการยึดเกาะกับผิวหน้ากระเบื้องด้วย โดยทำการพัฒนาสูตรการทดลองจำนวน 32 สูตร สำหรับการทดลองเบื้องต้น ขึ้นรูปโดยการปั่นให้เป็นรูปโคน ทำการเผาที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส และ 1,150 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง และคงอุณหภูมิเป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังการเผา พบว่า มี 10 สูตรที่หลอมตัวได้ดี และนำไปพัฒนาต่อ โดยการเพิ่มแคลเซียมคาร์บอเนตอีกครั้ง ในอัตราร้อยละ 8.33, 7.70, 12.00, 11.11, 15.38 และ 14.28 โดยน้ำหนัก แล้วทำการเผาที่อุณหภูมิเหมือนการทดลองเบื้องต้น หลังจากนั้นทำการทดสอบคุณสมบัติชิ้นงานหลังเผา ประกอบด้วยความสามารถในการไหลตัว และสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสม คือ 1,100 องศาเซลเซียส และสูตรการทดลองที่มีการไหลตัวดี คือ 1B, 2B และ 5B ทำการทดสอบสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของทั้ง 3 สูตร และของดินอ่างทองที่เป็นกระเบื้อง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของสูตรเคลือบทั้งหมด มีค่าใกล้เคียงกับของดินอ่างทอง ซึ่งสรุปได้ว่าสูตรที่เหมาะสม สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตเป็นสารเคลือบบนกระเบื้องดินอ่างทอง คือ สูตร 1B มีส่วนประกอบ แก้วใส ดินขาวท้องถิ่น และแคลเซียมคาร์บอเนต ร้อยละ 80, 8 และ 12 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และสูตร 2B ประกอบด้วย แก้วเขียว ดินขาวท้องถิ่น และแคลเซียมคาร์บอเนต ร้อยละ 80, 8 และ 12 โดยน้ำหนักตามลำดับ

คำสำคัญ

แคลเซียมคาร์บอเนต เศษแก้ว เคลือบเซรามิก การใช้ประโยชน์เศษวัสดุ

Abstract

This research aimed to develop ceramic glaze by utilizing waste materials from the industrial sector. Calcium carbonate; by product from the sugar mill process has been selected. Glass cullet is also employed for reducing firing temperature of ceramic glaze. Three main materials used in this study consist of green glass cullet, clear glass cullet, and calcium carbonate. In addition, feldspar was used for comparing with cullet as reducing firing temperature. And local white clay was exploited as the bonding material of body surface. The 32 formulas were conducted for the preliminary experiment. They were kneaded and made cone shaped by hand. Then, they were fired at 1,100 °C and 1,150 °C with heating rate 100 °C/h and soaking for 1 h. After the firing process, 10 glaze formulas which melted were selected for further investigation. Their compositions were modified by adding calcium carbonate again with the ratio 8.33, 7.70, 12.00, 11.11, 15.38 and 14.28 wt. % and then fired at the same temperature as the first experiment. The properties of fired specimens consisting of fluidity and coefficient of thermal expansion have been investigated. It was found that the optimal temperature is 1,100 °C. The formula 1B, 2B and 5B have the optimal fluidity. Owing to this research aimed to develop glaze coating on Angthong clay tile, coefficient of thermal expansion of 3 glaze formulas and Angthong clay have been tested. Thermal expansion of all formulas was slightly greater than that of the base. The optimal formulas 1B and 2B had been proposed which could be used as ceramic glaze of Angthong clay tile. The composition of formula 1B consisted of clear glass cullet, white local clay, and calcium carbonate, 80, 8 and 12 percent by weight, respectively. While, the formula 2B consisted of green glass cullet, white local clay, and calcium carbonate, 80, 8 and 12 percent by weight, respectively

Keywords

calcium carbonate; glass cullet; glaze ceramic; waste utilization

1. บทนำ

จากการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรม เพื่อสนองตอบความต้องการของประชากรที่มีจำนวนเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้มีการใช้ทรัพยากรวัตถุดิบในการผลิตเพิ่มมากขึ้น และกลายเป็นเศษวัสดุเหลือทิ้ง ซึ่งเป็นภาระต่อผู้ประกอบการในการกำจัดทิ้ง และส่งผลกระทบต่อภาวะแวดล้อม การใช้หรือลดประโยชน์ของกากวัตถุดิบจากภาคอุตสาหกรรมเพื่อนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่มมากขึ้นนั้น นับเป็นงานที่ทำหายสำหรับนักวิจัยทั่วโลก

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีวัตถุดิบการเกษตรหลากหลาย ควรนำมาแปรรูปเพื่อผลิตสินค้าที่มีมูลค่าเพิ่มมากขึ้น ตัวอย่างเช่น อุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาลทรายที่มีมากกว่า 70 โรงงาน ทั่วประเทศ [1] กระบวนการผลิตน้ำตาล ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ที่ใช้วัตถุดิบ อ้อยเป็นหลัก และยังใช้สารเติมแต่งอื่น ๆ ที่ช่วยในการผลิตอ้อย 1 ตัน ได้น้ำตาลเฉลี่ยประมาณ 100-110 กิโลกรัม [2] ซึ่งในกระบวนการผลิตน้ำตาลยังมีการใช้แคลเซียมออกไซด์ในการผลิต และหลังกระบวนการ

ผลิต เหลือเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตที่กองเหลือทิ้งไว้ ข้อมูลจากโรงงานตัวอย่าง พบว่า มีมากถึงปีละ 200,000 ตัน ดังนั้นงานวิจัยนี้มีเป้าหมายในการใช้ประโยชน์จากแคลเซียมคาร์บอเนตเพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิตสารเคลือบเซรามิก

ซึ่ง แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) หรือ หินปูน เป็นสารที่เกิดจากการตกตะกอนของหิน กระดุกสัตว์ และสะสมตัวของเปลือกหอย ปะการัง และหินในท้องทะเล พบในธรรมชาติ เป็นหินแคลไซต์ หรือแคลสปาร์ ประโยชน์ของแคลเซียมคาร์บอเนต ใช้ทำเครื่องสำอาง ทำยารักษาโรค ใช้เป็นตัวเติมในอุตสาหกรรมกระดาษช่วยลดต้นทุน และเพิ่มคุณสมบัติความขาวสว่าง ใช้ผลิตวัสดุก่อสร้าง เช่น หินอ่อน ปูนซีเมนต์ หลังคาคอนกรีตบล็อก กระเบื้อง ใช้ในอุตสาหกรรมสี และการเคลือบในการทำหน้าที่เป็นฟิลเลอร์ช่วยเติมเนื้อสี และเคลือบสีได้ ใช้เป็นตัวเติมในการผลิตแก้ว และถุงมือลาเท็กซ์ เพื่อช่วยลดต้นทุนการผลิต ซึ่งนับว่ามีคุณประโยชน์ใช้ได้หลายอุตสาหกรรม [3]

นอกจากนี้ปัญหาจากบรรจุภัณฑ์ใช้แล้ว และทิ้งเป็นขยะเป็นจำนวนมาก เช่น บรรจุภัณฑ์ขวดแก้ว ซึ่งจากรายงานของกรมควบคุมมลพิษ พบว่า มีปริมาณขยะเศษแก้ว 2,415,842 ตัน มีการซื้อขายในชุมชน และแลกเปลี่ยนระหว่างอุตสาหกรรม คิดเป็นร้อยละ 58 โดยใช้วิธีการแปรรูปใช้ใหม่ และคิดเป็นร้อยละ 10 โดยวิธีการใช้ซ้ำ นอกจากนี้จะมีการนำกลับมาใช้ใหม่แล้ว พบว่า ยังมีปริมาณแก้วที่ไม่ได้นำกลับมาใช้จำนวนมากถึง 758,842 ตัน ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 32 [4] ซึ่งขยะบรรจุภัณฑ์แก้วเป็นหนึ่งในปัญหาขยะที่ต้องบำบัดและนำกลับมาใช้ใหม่

จากการศึกษาทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องนั้น พบว่า มีการนำแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ที่เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้มาใช้ประโยชน์ดังนี้ Lira และคณะ ได้ทำการศึกษาผลของการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตในกระเบื้องแบบพรุนตัว พบว่าการเพิ่มแคลเซียมคาร์บอเนตช่วยให้กระเบื้องทนต่อการขยายตัวเนื่องจากความชื้น และลดการหดตัวของชิ้นงาน [5] Jamaludin และคณะ ได้ทำการศึกษาโดยศึกษาผลกระทบของการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตในเคลือบผิวของซิงค์ออกไซด์ (ZnO) พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสม คือ $1,060^\circ\text{C}$ และสารเคลือบที่มี CaCO_3 มีการไหลตัวดีกว่าสารเคลือบที่ไม่มี CaCO_3 [6] Serra และคณะ ได้ทดลองใช้แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เพื่อทดแทนหินฟันม้า ซึ่งทำหน้าที่เป็นฟลักซ์ หรือตัวลดอุณหภูมิในการเผาของเซรามิกดั้งเดิม พบว่า สามารถใช้ทดแทนได้โดยเผาที่อุณหภูมิ $1,200^\circ\text{C}$ [7] นอกจากนี้ยังมีการทดลองใช้แคลเซียมคาร์บอเนตในการทดแทนดินเพื่อเพิ่มค่าความแข็งแรงในกระเบื้องดินเผา โดยผลงานนักวิจัยต่อไปนี้ Melhem และ Hammoud ได้ทดลองปรับปรุงดินที่ไม่มีคุณภาพ ซึ่งไม่สามารถผลิตกระเบื้องได้ตามมาตรฐานได้ โดยการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ในอัตราไม่เกิน 5% พบว่า สามารถเพิ่มค่าความต้านทานแรงดัด และลดการดูดซึมน้ำของกระเบื้องได้ [8] BAKAR และคณะ เสนอแนะว่าการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตในสัดส่วนไม่เกินร้อยละ 5 ในดินท้องถิ่นสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับกระเบื้องได้ [9] อย่างไรก็ตามยังไม่มีงานวิจัยที่ใช้ประโยชน์จากกากของเสียแคลเซียมคาร์บอเนตในการใช้ผลิตสารเคลือบเซรามิก

สำหรับการใช้ประโยชน์จากเศษแก้ว พบว่า มีงานวิจัยที่ใช้เศษแก้วในการเพิ่มค่าความแข็งแรงให้อูฐดินเผา [10, 11, 12,

13] ส่วนการทดลองใช้เศษแก้วในการผลิตเคลือบเซรามิก มีดังนี้ Kalilu และ Ajadi ได้ทดลองใช้เศษแก้วผสมกับดินดำเพื่อทำเป็นสารเคลือบบนผิวหน้าเซรามิก และเผาที่อุณหภูมิ $1,100^\circ\text{C}$ พบว่า สามารถผลิตเป็นสารเคลือบได้ [14] Gol และคณะ ได้ทำการทดลองผสมเศษแก้วในฟريت (Frit) ซึ่งเป็นสารเคลือบเซรามิก ผลการทดลอง พบว่า เศษแก้วอัตราส่วนร้อยละ 3 สามารถทดแทนฟريت (Frit) ได้ในการผลิตสารเคลือบของผลิตภัณฑ์บนโต๊ะอาหาร [15]

จากการทบทวนวรรณกรรมดังกล่าวข้างต้น ยังไม่พบว่ามี การวิจัยในการใช้แคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งเป็นกากของเสียจากโรงงานน้ำตาลผสมกับเศษแก้วจากบรรจุภัณฑ์ใช้แล้ว เพื่อในการผลิตสารเคลือบเซรามิก โดยที่กากของเสียแคลเซียมคาร์บอเนตมีองค์ประกอบของแคลเซียม (Ca) และเศษแก้วนั้น มีองค์ประกอบของธาตุที่ช่วยลดอุณหภูมิในการเผา เช่น โซเดียม (Na), โพแทสเซียม (K) และ แคลเซียม (Ca) และยังมีซิลิกา (Silica; SiO_2) ที่ช่วยส่งเสริมให้เกิด ความมันวาว ซึ่งมีความเป็นไปได้ในการนำมาพัฒนาใช้ผลิตสารเคลือบเซรามิกได้ และยังสามารถช่วยลดปัญหาขยะจากภาคอุตสาหกรรมอีกด้วย

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการใช้ของเสียจากของเสียแคลเซียมคาร์บอเนต และเศษแก้วจากขยะบรรจุภัณฑ์ ในการผลิตสารเคลือบเซรามิกบนเนื้อกระเบื้องดินเผาโดยประยุกต์ใช้กับดินอ่างทองในโรงงานผลิตอิฐอ่างทอง จังหวัดอ่างทอง ซึ่งสารเคลือบเซรามิกที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีราคาสูง

2. รูปแบบวัสดุ และวิธีการวิจัย

2.1 วัตถุประสงค์ที่ใช้งานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ เน้นการใช้ของเสียประโยชน์กากของเสียจากภาคอุตสาหกรรม ดังนี้

1) แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำตาล ซึ่งเป็นปัญหากากของเสียที่กองทิ้งในโรงงาน

2) เศษแก้วเป็นเศษบรรจุภัณฑ์ที่ทิ้งแล้ว ได้จากโรงงานรีไซเคิล ซึ่งใช้เศษแก้วสีเขียว และเศษแก้วใส เพื่อศึกษาสีสนที่แตกต่างกันของสีเคลือบ

นอกจากนี้ยังใช้วัตถุดิบอื่น ประกอบด้วยดังนี้

3) หินฟืนม้าสามารถใช้ลดจุดหลอมตัวของเคลือบเซรามิก และใช้เพื่อเปรียบเทียบผลกับเศษแก้วสีเขียว และเศษแก้วใส

4) ดินขาวโคกไม้ลาย ซึ่งเป็นดินท้องถิ่นใช้เพื่อช่วยเรื่องการยึดเกาะของวัสดุเคลือบกับเนื้อกระเบื้องดินเผา

5) ดินท้องถิ่น (ดินเหนียว) คือ ดินอ่างทอง ใช้เป็นเนื้อกระเบื้องสำหรับถูกเคลือบด้วยสูตรที่ทำการทดลอง

วัตถุดิบดังกล่าวนี้ ได้มีการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี โดยเทคนิค XRF (X-ray Fluorescence) ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบทางเคมีวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

สูตร	แก้วใส	แก้วเขียว	หินฟืนม้า	แคลเซียมคาร์บอเนต	ดินขาวโคกไม้ลาย	ดินอ่างทอง
SiO ₂	71.08	69.91	65.17	0.58	58.38	64.95
Al ₂ O ₃	1.69	1.91	18.45	0.19	37.87	21.95
Fe ₂ O ₃	0.12	0.43	0.17	0.08	2.11	6.45
TiO ₂	0.06	0.08	0.01		1.06	0.99
CaO	10.11	10.81	0.22	54.80	0.04	0.59
K ₂ O	0.18	0.36	12.73	0.02	0.19	2.46
Na ₂ O	14.11	14.64	3.11			0.41
MgO	2.48	1.24	0.01	0.73	0.13	1.43
Cr ₂ O ₃		0.33				

หมายเหตุ: แคลเซียมคาร์บอเนต มีผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF (X-ray Fluorescence) รวมกันไม่เท่ากับ 100% ทั้งนี้ส่วนที่หายไป คือ ก๊าซ CO₂

2.2 วิธีการวิจัย แบ่งเป็น 2 ระดับ ดังนี้

2.2.1 การทดลองเบื้องต้น

1) กำหนดสูตรสารเคลือบ ซึ่งประกอบด้วยวัตถุดิบ 5 ชนิด ได้แก่ เศษแก้วใส เศษแก้วสีเขียว หินฟืนม้า แคลเซียมคาร์บอเนต และดินขาวโคกไม้ลาย ได้สูตรเบื้องต้น จำนวน 32 สูตร ซึ่งทำการปรับเปลี่ยนสัดส่วนการใช้วัตถุดิบ เศษแก้วใส เศษแก้วสีเขียว หินฟืนม้า และแคลเซียมคาร์บอเนต ในอัตราร้อยละโดยน้ำหนัก 0, 20, 22.5, 40 และ 80 โดยเพิ่มการใช้ดินขาวโคกไม้ลาย เป็น 2 กลุ่ม ในอัตราร้อยละ 10 และ 20 รวมได้สูตรการทดลอง กลุ่มละ 16 รวมเป็น 32 สูตร

ดังแสดงในตารางที่ 2 ส่วนดินอ่างทองจะใช้ในภายหลังเป็นเนื้อกระเบื้องที่จะถูกเคลือบ

ตารางที่ 2 สูตรการทดลองสารเคลือบเบื้องต้น

สูตรที่	สัดส่วนร้อยละโดยน้ำหนัก				ดินขาวโคกไม้ลาย
	แก้วใส	แก้วเขียว	หินฟืนม้า	CaCO ₃	
1	90				
2		90			
3			90		
4				90	
5	45	45			
6	45		45		
7	45			45	
8		45	45		
9		45		45	
10			45	45	
11	22.5		22.5	45	
12	22.5		45	22.5	
13	45		22.5	22.5	
14		22.5	22.5	45	
15		22.5	45	22.5	
16		45	22.5	22.5	
17	80				
18		80			
19			80		
20				80	
21	40	40			
22	40		40		
23	40			40	
24		40	40		
25		40		40	
26			40	40	
27	20		20	40	
28	20		40	20	
29	40		20	20	
30		20	20	40	
31		20	40	20	
32		40	20	20	

2) ทำการอบแห้ง และบดวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง จากนั้นร่อนผ่านตะแกรงขนาด 50 เมช (297 ไมโครเมตร)

3) ผสมวัตถุดิบตามสูตรที่กำหนด โดยใช้น้ำหนักประมาณ 15 กรัม ผสมน้ำให้สามารถขึ้นรูปได้ และป็นเป็นรูปโคน

4) นำชิ้นงานเข้าเตาเผา ด้วยอุณหภูมิ 1,100 °C และ 1,150 °C อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 100 °C/h และคงอุณหภูมิเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

5) เมื่อชิ้นงานเย็นตัวแล้ว นำมาวิเคราะห์ผลที่ได้ โดยพิจารณาชิ้นงานที่มีการหลอมตัวได้ดี เพื่อนำไปพัฒนาสูตรต่อไปในขั้นตอนที่ 2

2.2.2 การทดลองขั้นที่ 2 สำหรับสารเคลือบที่เหมาะสม

สูตรจากการทดลองเบื้องต้นที่สามารถหลอมตัวได้ดี จะถูกเลือกมาพัฒนาต่อ โดยเน้นการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม หากสูตรที่เลือกมาไม่มีส่วนประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต หากสูตรที่เลือกมาไม่มีส่วนประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต ก็จะทำให้การบวกเพิ่มแคลเซียมคาร์บอเนตเข้าไปใหม่ และปรับสัดส่วนให้เหมาะสม มีขั้นตอนดังนี้

1) สูตรที่ปรับได้ทั้งหมดจะทำการทดลองต่อด้วยการป็นเป็นรูปโคน และเข้าเตาเผาด้วยอุณหภูมิเหมือนการทดลองเบื้องต้น

2) วิเคราะห์ผลการเผาในด้านการหลอมตัว

3) เลือกสูตรที่มีการหลอมตัวดีเพื่อทดสอบการไหลตัว (Fluidity) ด้วย มีขั้นตอนดังนี้

3.1) ทำแท่นทดสอบด้วยดินอ่างทองให้มีร่องใส่ตัวอย่าง 1 ช่อง ความลาดเอียงของแผ่นทดสอบประมาณ 30 องศา ช่องบนเป็นกลมหรือรีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. ความยาวของร่องประมาณ 6-7 ซม. ความกว้าง 6 มม. และมีความลึกลงไป 3-4 มม.

3.2) ชั่งผงเคลือบแห้งปริมาณ 10 กรัม ผสมน้ำพอป็นได้ แล้วบรรจุลงไปในช่องกลมที่ทำไว้บนแท่นทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แท่นทดสอบที่บรรจุผงเคลือบแล้ว

4) นำแท่นทดสอบเข้าเตาที่อุณหภูมิ 1,100 °C และ 1,150 °C หลังกระบวนการเผา วัดความยาวของเคลือบที่ไหลตัวลงมา

5) วัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Coefficient of Thermal Expansion; COE) ด้วยเครื่อง dilatometer รุ่น PCY-III-1000 แบบแนวนอนสมการคำนวณค่า COE แสดงในสมการที่ 1 [16]

$$\alpha = \Delta L / (L_o * \Delta T) \quad (1)$$

เมื่อ α คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน, Linear Expansion

L_o คือ ความยาวของชิ้นงานที่อุณหภูมิห้อง (cm)

L คือ ความยาวของชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงสุด (cm)

ΔL คือ ความยาวที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากความร้อน (cm) ($\Delta L = L - L_o$)

T_R คือ อุณหภูมิห้อง (°C)

T_m คือ อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้วัด (°C)

ΔT คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากความร้อน (°C) ($\Delta T = T_m - T_R$)

วัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของดินอ่างทอง เปรียบเทียบกับสูตรเคลือบที่คัดเลือกไว้ ขั้นตอนในการเตรียมชิ้นงานสำหรับวัดค่า COE มีดังนี้

กรณีสูตรเคลือบ นำผงเคลือบที่ผสมตามสูตร ทั้งหมดที่คัดเลือกไว้แล้วอัดใส่อิฐทนไฟ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การอัดผงเคลือบใส่ในแบบทนไฟ

กรณีเนื้อกระเบื้องทดสอบดินอ่างทอง ชั้นตอน นำผงดินอ่างทองผสมกับน้ำประมาณ 30-40% แล้วเทลงบนแม่พิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 การเทน้ำดินอ่างทองลงในแม่พิมพ์

นำผงเคลือบที่อัดลงแบบทั้งหมด และดินอ่างทองที่เทลงแบบ เข้าเตาเผาในอุณหภูมิ 1,100 °C

เมื่อชิ้นงานเย็นตัวแกะออกจากแบบ ซึ่งได้ชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 4 (ก) ทำการตัดแต่ง ทดสอบค่า COE ชิ้นงานด้วย เครื่อง Dilatometer ซึ่งอุณหภูมิในการวัดเริ่มตั้งแต่อุณหภูมิห้อง 40 °C ถึง 500 °C ดังแสดงในรูปที่ 4 (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 4 (ก) ชิ้นงานหลังเผาก่อนเข้าเครื่อง Dilatometer (ข) การใส่ชิ้นงานเข้าเครื่อง Dilatometer

เลือกสูตรเคลือบที่เหมาะสมในการพัฒนาเป็นเคลือบสำหรับในโรงงานกระเบื้องดินเผาต่อไป

3. ผลการทดลอง

3.1 ผลการทดลองเบื้องต้น

สูตรที่มี แคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 90 และ 80 ของสูตร 4 และ 20 ไม่นำมาทดลองต่อเนื่องจากชิ้นงานหลังเผา ไม่หลอมตัว และผิวหน้าด้าน

สำหรับสูตรที่หลอมตัวดีมี 10 สูตร ซึ่งไม่มีส่วนประกอบ CaCO_3 คือ สูตรที่ 1, 2, 5, 6 และ 8 ใช้ดินขาวโคกไม้ลายร้อยละ 10 และสูตรที่ 17, 18, 21, 22 และ 24 ใช้ดินขาวโคกไม้ลายร้อยละ 20 ให้ผลคล้ายกันทั้งการเผาที่อุณหภูมิ 1,100 °C และ 1,150 °C แสดงผลเป็นการให้คะแนน ในตารางที่ 3 และ 4

ตารางที่ 3 คะแนนสูตรทั้ง 10 ที่นำไปพัฒนาต่อได้ เผาที่ 1100 °C

สูตร ที่	ผิวหน้า			รูปทรง			ทุก หลัก
	ด้าน (0)	กึ่งเงา (0.5)	เงา (1)	มาก (0)	น้อย (0.5)	ไม่มี (1)	
1		0.5			0.5		1
2		0.5			0.5		1
5			1		0.5		1.5
6		0.5			0.5		1
8		0.5			0.5		1
17	0					1	1
18		0.5				1	1.5
21	0					1	1
22		0.5				1	1.5
24		0.5				1	1.5

หมายเหตุ: ทุกสูตรหลอมตัวดี

ตารางที่ 4 คะแนนสูตรทั้ง 10 ที่นำไปพัฒนาต่อได้ เเผที่ 1150 °C

สูตรที่	ผิวหน้า			รูปพรุน		
	ด้าน (0)	กึ่งเงา (0.5)	เงา (1)	มาก (0)	น้อย (0.5)	ไม่มี (1)
1		0.5		0		
2		0.5		0		
5			1	0		
6			1	0		
8		0.5		0		
17	0				0.5	
18		0.5			0.5	
21	0				1	
22		0.5				1
24		0.5				1

หมายเหตุ: ทุกสูตรหลอมตัวดี

ในการวิเคราะห์ผลที่ได้นั้น จะแสดงในหัวข้อที่ 4

3.2 ผลการทดลองขั้นที่ 2

สูตรที่เลือกจากขั้นตอนเบื้องต้น ถูกนำมาปรับสูตรแบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ บวกเพิ่มแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ในอัตราร้อยละ 10, 15 และ 20 ดังแสดงในตารางที่ 5, 6 และ 7

ตารางที่ 5 สูตรกลุ่ม A และ D เพิ่ม CaCO_3 ร้อยละ 10

สูตรที่	ส่วนประกอบ (%)					
	แก้วใส	แก้วเขียว	หินฟันม้า	CaCO_3	ดินขาวโคก ไม่ลาย	CaCO_3
1A	83.34	-	-	-		
2A	-	83.34	-	-		
5A	41.67	41.67	-	-	8.33	8.33
6A	41.67	-	41.67	-		
8A	-	41.66	41.67	-		
17D	76.92	-	-	-		
18D	-	76.92	-	-		
21D	38.46	38.46	-	-	15.38	7.70
22D	38.46	-	38.46	-		
24D	-	38.46	38.46	-		

ตารางที่ 6 สูตรกลุ่ม B และ E เพิ่ม CaCO_3 ร้อยละ 15

สูตรที่	ส่วนประกอบ (%)					
	แก้วใส	แก้วเขียว	หินฟันม้า	CaCO_3	ดินขาวโคก ไม่ลาย	CaCO_3
1B	80	-	-	-		
2B	-	80	-	-		
5B	40	40	-	-	8	12
6B	40	-	40	-		
8B	-	40	40	-		
17E	74.08	-	-	-		
18E	-	74.08	-	-		
21E	37.04	37.04	-	-	14.81	11.11
22E	37.04	-	37.04	-		
24E	-	37.04	37.04	-		

ตารางที่ 7 สูตรกลุ่ม C และ F ปรับเพิ่ม CaCO_3 ร้อยละ 20

สูตรที่	ส่วนประกอบ (%)					
	แก้วใส	แก้วเขียว	หินฟันม้า	CaCO_3	ดินขาวโคก ไม่ลาย	CaCO_3
1C	76.92	-	-	-		
2C	-	76.92	-	-		
5C	38.46	38.46	-	-	7.70	15.38
6C	38.46	-	38.46	-		
8C	-	38.46	38.46	-		
17F	71.44	-	-	-		
18F	-	71.44	-	-		
21F	35.72	35.72	-	-	14.28	14.28
22F	35.72	-	35.72	-		
24F	-	35.72	35.72	-		

ผลการทดลองทั้ง 30 สูตร จากตารางที่ 4, 5 และ 6 สรุปได้ว่า

3.2.1 สูตรการทดลอง

ซึ่งทำการปั้นเป็นรูปโคนเผที่อุณหภูมิเหมือนการทดลองเบื้องต้นนั้น สูตรที่หลอมตัวดี และมีความมันเงา มี 12 สูตร คือ

1) กลุ่ม A และ D ประกอบด้วยสูตร 1A, 2A, 5A, 17D, 18D และ 21D

2) กลุ่ม B และ E ประกอบด้วยสูตร 1B, 2B, 5B, 17E, 18E และ 21E

3.2.2 การทดสอบการไหลตัว

เลือกกลุ่ม B และ E ที่มีส่วนประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต 15% ซึ่งมากกว่าในกลุ่ม A และ D โดยทำการทดสอบ

- 1) ค่าการไหลตัวของกลุ่ม B ผลที่ได้ ดังแสดงในตารางที่ 8
- 2) ค่าการไหลตัวของกลุ่ม E ผลที่ได้ ดังแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 8 ผลการไหลตัวของสูตรกลุ่ม B เผาที่อุณหภูมิ 1,100 °C และ 1,150 °C

สูตรที่	การไหลตัว (cm)		ภาพชิ้นงาน	
	1,100 °C	1,150 °C	1,100 °C	1,150 °C
1B	4.0	6		
2B	6.0	1		
5B	>6.0	2		

หมายเหตุ : สูตร 6B และ 8B ไม่ทำการทดสอบการไหลตัว เนื่องจากการทดสอบเป็นรูปโคน ในหัวข้อ 3.2 แล้วทำการเผา พบว่า หลอมตัวไม่ดี สรุปว่าผลจากการใช้หินฟีนมาทำให้หลอมตัวไม่ดีเท่ากับการใช้เศษแก้ว

3.2.3 การทดสอบ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Coefficient of Thermal Expansion; COE)

เลือกทดสอบเฉพาะอุณหภูมิ 1,100 °C ค่า COE ของเคลือบควรน้อยกว่าหรือใกล้เคียงกับ COE ของเนื้อกระเบื้องเพื่อให้ชิ้นงานอยู่ในภาวะแรงอัด (Compression) และเคลือบจะไม่เกิดการร้าวตัว ซึ่งจะเลือกวิเคราะห์เฉพาะกลุ่ม B เนื่องจากใช้ดินขาวโคกไม้ลายน้อยกว่า และใช้แคลเซียมคาร์บอเนตมากกว่า กลุ่ม E ค่าที่ได้ ดังแสดงในตารางที่ 10

ตารางที่ 9 ผลการไหลตัวของสูตรกลุ่ม E เผาที่อุณหภูมิ 1,100 °C และ 1,150 °C

สูตรที่	การไหลตัว (cm)		ภาพชิ้นงาน	
	1,100 °C	1,150 °C	1,100 °C	1,150 °C
17E	4.0	>6		
18E	2.8	5.7		
21E	3.4	0.5		

หมายเหตุ: สูตร 22E และ 24E ไม่ทำการทดสอบการไหลตัว เนื่องจากการทดสอบเป็นรูปโคน ในหัวข้อ 3.2 แล้วทำการเผา พบว่า หลอมตัวไม่ดี สรุปว่าผลจากการใช้หินฟีนมาทำให้หลอมตัวไม่ดีเท่ากับการใช้เศษแก้ว

ตารางที่ 10 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (COE) ของทั้ง 3 สูตร และดินอ่างทอง

			เปรียบเทียบค่า COE เคลือบ กับ ดินอ่างทอง	
ชิ้นงาน	ขนาดชิ้นงาน (มม.)	ค่า COE (10 ⁻⁶ /°C)	ความแตกต่าง (10 ⁻⁶ /°C)	ร้อยละ
สูตรเคลือบที่ 1B	52.6	2.557	0.128	5.27%
สูตรเคลือบที่ 2B	54.3	2.543	0.114	4.69%
สูตรเคลือบที่ 5B	54.6	2.541	0.112	4.61%
-ดินอ่างทอง	55.3	2.429		

หมายเหตุ: ช่วงอุณหภูมิในการวัด 40 °C – 500 °C

จากผลการทดลองดังกล่าวข้างต้น จะทำการสรุปและวิเคราะห์ผลในหัวข้อถัดไป

4. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

การสรุปและวิเคราะห์จะแยกเป็นขั้นตอนตามขั้นตอนการทดลองในแต่ละส่วน ดังนี้

4.1 ผลการทดลองเบื้องต้น สูตรที่มีการหลอมตัว และสามารถพัฒนาต่อได้ แบ่งเป็น 2 กลุ่มย่อย คือ

4.1.1 กลุ่มย่อยที่เพิ่มดินขาวโคกไม้ลาย 10%

1) สูตร 1 และ 2 มีส่วนประกอบของเศษแก้วสีเขียว และเศษแก้วใส 90% ตามลำดับ

2) สูตร 5 มีส่วนประกอบของเศษแก้วสีเขียว และเศษแก้วใส อย่างละ 45%

3) สูตร 6 มีส่วนประกอบของเศษแก้วสีเขียว และหินฟันม้า อย่างละ 45%

4) สูตร 8 มีส่วนประกอบของเศษแก้วใส และหินฟันม้า อย่างละ 45%

สรุปว่าการใช้เศษแก้วสีเขียว และเศษแก้วใส ช่วยในเรื่องการหลอมตัว ลดอุณหภูมิในการเผา แต่หินฟันม้ามีความเป็น Fluxing น้อยกว่า และหากใช้ถึง 100% จะไม่มีการหลอมตัวเลย เนื่องจากส่วนประกอบทางเคมีของ หินฟันม้ามีส่วนประกอบที่เป็น Fluxing Agent (CaO , K_2O , Na_2O) หรือตัวช่วยหลอมละลายต่ำกว่าของเศษแก้วสีเขียว และเศษแก้วใสสรุปได้ ดังแสดงในตารางที่ 11

สูตรที่ใช้แคลเซียมคาร์บอเนตตั้งแต่ร้อยละ 25, 50 และ 100 ไม่สามารถหลอมตัว เนื่องจากส่วนประกอบทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนต มี CaO ถึงร้อยละ 54.8 ซึ่งเกินกว่าร้อยละ 15 จะไม่ช่วยให้ลดอุณหภูมิในการหลอมตัว [10]

นอกจากนี้จากการประเมินผิวหน้า และลักษณะปรากฏของชิ้นงานทั้ง 10 สูตร เผาที่อุณหภูมิ 1,100 และ 1,150 °C ตามที่แสดงในตารางที่ 3 และ 4 นั้น มีคะแนนอยู่ระหว่าง 0-1.5

ตารางที่ 11 ค่า Fluxing Agent ของเศษแก้วใส เศษแก้วสีเขียว หินฟันม้า และแคลเซียมคาร์บอเนต

	แก้วใส	แก้วเขียว	หินฟันม้า	แคลเซียมคาร์บอเนต
CaO	10.11	10.81	0.22	54.8
K_2O	0.18	0.36	12.73	
Na_2O	14.11	14.64	3.11	
รวม	24.4	25.81	16.07	54.8

หมายเหตุ: ค่า Fluxing Agent วิเคราะห์โดยเทคนิค XRF ซึ่งนำข้อมูลมาจากตารางที่ 1

4.1.2 กลุ่มย่อยที่เพิ่มดินขาวโคกไม้ลาย 20%

สูตร 17, 18, 21, 22 และ 24 จะให้ผลการทดลองคล้ายกับกลุ่มย่อยที่ใช้ดินขาวโคกไม้ลาย 10% ซึ่งส่วนประกอบหลักของสูตรเหมือนกัน ต่างกันที่ส่วนประกอบของดินขาวโคกไม้ลาย

สรุปว่าการใช้เศษแก้วสีเขียว เศษแก้วใส หินฟันม้า และแคลเซียมคาร์บอเนต มีผลต่อการหลอมละลายของสูตรเคลือบ แต่การใช้ดินขาวโคกไม้ลายมีผลต่อสูตรเคลือบน้อย

4.1.3 การประเมินผิวหน้า และลักษณะปรากฏของชิ้นงาน

การประเมินผิวหน้า และลักษณะปรากฏของชิ้นงานทั้ง 10 สูตร เผาที่อุณหภูมิ 1,100 °C และ 1,150 °C ตามที่แสดงในตารางที่ 3 และ 4 นั้น มีคะแนนอยู่ระหว่าง 0.5-1.5 สังเกตว่าคะแนนของการเผาที่อุณหภูมิ 1,150 °C มีคะแนนน้อยกว่าการเผาที่อุณหภูมิ 1,100 °C เล็กน้อย ซึ่งอาจเป็นผลจากการเผาสูงกว่า และเลยจุดหลอมตัวที่เหมาะสม ทำให้มีรูพรุนมาก [17]

4.2 ผลการทดลองของการปรับสูตรที่เลือกมาจากการทดลองเบื้องต้น

ผลการทดลองของการปรับสูตรที่เลือกมาจากการทดลองเบื้องต้น ได้ผลดังนี้

4.2.1 สูตรที่มีการหลอมตัวได้ดี

จากการทดลองปั้นเป็นรูปโคน คือ กลุ่ม A, D และกลุ่ม B, E วิเคราะห์จากส่วนประกอบของสูตรทั้ง 4 กลุ่มย่อยนี้ ไม่มีหินฟันม้าเป็นส่วนประกอบ ทั้งนี้เนื่องจากเหตุผลเหมือนข้างต้นในหัวข้อ 4.1 คือ หินฟันม้ามีค่า Fluxing Agent น้อยกว่าเศษแก้วสีเขียว และเศษแก้วใส

1) กลุ่ม B ถูกเลือกไปทดสอบต่อ เนื่องจากการใช้ อร์ธประโยชน์จากแคลเซียมคาร์บอเนตมากกว่า กลุ่ม A และ กลุ่ม D

2) แต่ไม่เลือกกลุ่ม E เนื่องจากให้ผลคล้ายกับกลุ่ม B แต่ ใช้ดินขาวโคกไม้ลายมากกว่าจึงเลือกเพียงกลุ่ม B

4.2.2 ค่าการไหลตัว (Fluidity) ของกลุ่ม B วิเคราะห์

ค่าการไหลตัว (Fluidity) ของกลุ่ม B วิเคราะห์ได้ดังนี้

1) การเผาที่อุณหภูมิ 1,100 °C สูตร 1B มีค่าการไหลตัว น้อยกว่าสูตร 2B ที่ใช้เศษแก้วสีเขียว 100% มีผลให้เกิดการ หลอมตัวและไหลตัวของเคลือบดีกว่าสูตร 1B ที่ใช้เศษแก้วใส เนื่องจากแก้วสีเขียวมีค่า Fluxing Agent มากกว่าแก้วใส แต่ สูตร 5B กลับไหลตัวมากเกินไป เนื่องจากการใช้เศษแก้วทั้งสองชนิดรวมกันอย่างละ 50% ให้ผลการไหลตัวที่มากเกินไป

2) การเผาที่อุณหภูมิ 1,150 °C สูตร 1B มีค่าการไหลตัว มากเกิน แสดงว่าอุณหภูมิในการเผาสูงเกินไป ส่วนสูตร 2B และสูตร 5B ไม่ไหลตัว เนื่องจากอุณหภูมิการเผาสูงเกินไปทำ ให้น้ำเคลือบเดือด และไม่เกิดการไหลตัว

3) จากตารางที่ 7 สูตร 1B และ 2B มีค่าการไหลตัวของ เคลือบ 4 และ 6 เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับค่าการ ไหลตัวของเคลือบในงานวิจัย [18] อยู่ระหว่าง 4.2 - 5.2 เซนติเมตร

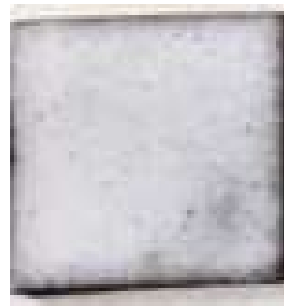
สรุปอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผา คือ 1,100 °C สูตรที่ เหมาะสมในการพัฒนาเป็นสูตรเคลือบ คือ สูตร 1B และสูตร 2B

4.2.3 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน ของกลุ่ม B และดินอ่างทอง

สรุปว่าค่า COE ของเคลือบทั้ง 3 สูตร มีค่าสูงกว่าของเนื้อ ดินอ่างทอง ซึ่งตามหลักการแล้ว ค่า COE ของเคลือบควรมีค่า ต่ำกว่าของเนื้อกระเบื้อง [19] เพื่อให้ชิ้นงานอยู่ในภาวะแรงอัด และลดการร้าวของเคลือบ แต่ถ้าค่า COE เคลือบมากกว่า เนื้อกระเบื้อง ระหว่าง $(3.3 - 4.6) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ จะส่งผลให้ เคลือบเกิดการร้าว [20] ซึ่งจากตารางที่ 9 ในงานวิจัยนี้ค่า COE ของเคลือบสูงกว่า ของเนื้อดินอ่างทอง ระหว่าง $(0.114 - 0.128) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ซึ่งยังไม่ส่งผลให้เกิดเคลือบร้าว

4.3 ทดลองเคลือบสูตร 1B และสูตร 2B บนเนื้อดินอ่างทอง ที่เป็นกระเบื้อง และเผาที่อุณหภูมิ 1,100 °C

ผลการเผาชิ้นงานแสดง พบว่า ไม่มีการร้าวตัวของเคลือบ ซึ่งการร้าวตัว หมายถึง การที่ผิวเคลือบมีการแตกลายงาบน ผิวหน้า ในรูปที่ 5 พบว่า เคลือบสูตร 1B ดังแสดงในรูป 5 (ก) ให้สีขาวทึบ ผลจากการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตจะให้สีขาวขุ่น ส่วนเคลือบสูตร 2B ดังแสดงในรูป 5 (ข) ให้สีส้มออกเขียว เนื่องจากส่วนประกอบ Cr_2O_3 ในเศษแก้วสีเขียวทำให้ได้ เคลือบสีเขียว ซึ่งไม่พบการร้าวตัวของเคลือบ โดยหลักการแล้ว ค่า COE ของเคลือบควรน้อยกว่า COE ของเนื้อดินหรือเนื้อ กระเบื้องเล็กน้อย ซึ่งค่า COE ของสารเคลือบมีค่าสูงกว่าดิน อ่างทองร้อยละ 4.61-5.27 ถือว่ายังสามารถใช้เป็นสารเคลือบ ได้



(ก)



(ข)

รูปที่ 5 (ก) เคลือบสูตร 1B บนเนื้อดินอ่างทอง (ข) เคลือบสูตร 2B บนเนื้อดินอ่างทอง เผาที่ 1,100 °C

อย่างไรก็ตาม ค่า COE ไม่มีมาตรฐานแต่เป็นค่าการ เปรียบเทียบค่า การทดสอบเมื่อจะนำไปใช้งาน เช่น COE ของ เคลือบ เทียบกับ ค่า COE ของเนื้อกระเบื้อง

5. ข้อเสนอแนะ

การประยุกต์ใช้กากแคลเซียมคาร์บอเนต และเศษแก้วใน เคลือบเซรามิกนี้ นอกจากจะช่วยลดปัญหาขยะจาก ภาควัตถุอุตสาหกรรมแล้ว ยังช่วยลดต้นทุนการผลิตเคลือบเซรามิก อีกด้วย ซึ่งสรุปได้ ดังแสดงในตารางที่ 12 และตารางที่ 13

ตารางที่ 12 ต้นทุนการผลิตสูตร 1B

รายการ	ราคาต่อหน่วย	สูตร 1B	
		จำนวนที่ใช้	ราคา (บาท)
แก้วใส [21]	2.05 บาท/กิโลกรัม	1.00 กิโลกรัม	2.050
ดินขาวโคกไม้ลาย	0.80 บาท/กิโลกรัม	0.10 กิโลกรัม	0.080
แคลเซียมคาร์บอเนต	0 บาท/กิโลกรัม	0.15 กิโลกรัม	0.000
เครื่องบดวัตถุดิบ	11.16 บาท/ชั่วโมง	2.50 ชั่วโมง	27.900
เตาอบไฟฟ้า	22.32 บาท/ชั่วโมง	2.50 ชั่วโมง	55.800
ค่าแรงงาน [22]	45.375 บาท/ชั่วโมง	3.00 ชั่วโมง	136.125
ราคา			221.955

หมายเหตุ: หน่วยค่าไฟฟ้า (Unit) = กิโลวัตต์/ชั่วโมง x ค่าไฟฟ้าเฉลี่ย 3.72 บาท/หน่วย [23] และราคาดินขาวโคกไม้ลายสอบถามจากโรงงานตัวอย่าง

ตารางที่ 13 ต้นทุนการผลิตสูตร 2B

รายการ	ราคาต่อหน่วย	สูตร 2B	
		จำนวนที่ใช้	ราคา (บาท)
แก้วสีเขียว [21]	1.6 บาท/กิโลกรัม	1.00 กิโลกรัม	1.60
ดินขาวโคกไม้ลาย	0.80 บาท/กิโลกรัม	0.10 กิโลกรัม	0.080
แคลเซียมคาร์บอเนต	0 บาท/กิโลกรัม	0.15 กิโลกรัม	0.00
เครื่องบดวัตถุดิบ	11.16 บาท/ชั่วโมง	2.50 ชั่วโมง	27.90
เตาอบไฟฟ้า	22.32 บาท/ชั่วโมง	2.50 ชั่วโมง	55.80
ค่าแรงงาน [22]	45.375 บาท/ชั่วโมง	3.00 ชั่วโมง	136.125
ราคา			221.505

หมายเหตุ: หน่วยค่าไฟฟ้า (Unit) = กิโลวัตต์/ชั่วโมง x ค่าไฟฟ้าเฉลี่ย 3.72 บาท/หน่วย [23] และราคาดินขาวโคกไม้ลายสอบถามจากโรงงานตัวอย่าง

ต้นทุนการผลิตสารเคลือบเซรามิกสูตร 1B และสูตร 2B เท่ากับ 221.955 และ 221.505 บาท/กิโลกรัม ตามลำดับ เป็นการคำนวณจากการใช้เครื่องมือในห้องปฏิบัติการ ซึ่งราคาขายสารเคลือบเซรามิกทั่วไปในตลาดมีราคา 328 บาท/กิโลกรัม [24] ซึ่งการเปรียบเทียบต้นทุนของสูตร 1B 2B และสารเคลือบในท้องตลาด ดังแสดงในตารางที่ 14 สูตร 1B และสูตร 2B มีราคาต่ำกว่าสารเคลือบในท้องตลาด 106.10 และ 106.55 บาท/กิโลกรัม ตามลำดับ วิเคราะห์ได้ว่ามีความเป็นไปได้ในการนำกากแคลเซียมคาร์บอเนต และเศษแก้ว มีประยุกต์ใช้ในการผลิตสารเคลือบเซรามิกได้

ตารางที่ 14 เปรียบเทียบราคาขายของสูตร 1B และ 2B

รายการ	ราคา (บาท/กิโลกรัม)
สารเคลือบเซรามิก [24]	328.00
สูตร 1B	221.955
สูตร 2B	221.505

สูตรที่เหมาะสมในการพัฒนาเป็นเคลือบบนเนื้อดินอ่างทอง คือ สูตร 1B และ 2B ดังแสดงในตารางที่ 15

ตารางที่ 15 ส่วนประกอบสูตรที่พัฒนาเป็นเคลือบได้

สูตรที่	ส่วนประกอบ (%)			
	แก้วใส	แก้วเขียว	ดินขาวโคกไม้ลาย	CaCO ₃
1B	80	-	8	12
2B	-	80	8	12

ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม ในการพัฒนาสูตรเคลือบให้มีค่า COE น้อยลงเพื่อป้องกันการเกิดเคลือบร้าว คือ เพิ่มทัลคัม (Talcum; 3MgO₄SiO₂H₂O) ซึ่งจะช่วยให้เคลือบเซรามิกมีค่า COE ต่ำลง และน้อยกว่าเนื้อดิน ซึ่งจะส่งผลให้ชิ้นงานอยู่ในภาวะแรงอัด (Compression) ลดภาวะการเกิดเคลือบร้าว [25] และเพิ่มซิลิกา (SiO₂) ในเนื้อดินอ่างทอง เพื่อเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (COE) และส่งผลให้ค่า COE ของเนื้อดินมีมากกว่าค่า COE ของเคลือบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Department of Industrial Works. *Department of Industrial Works*. เข้าถึงได้จาก: <https://userdb.diw.go.th/results1.asp> [เข้าถึงเมื่อ 1 ก.พ. 2025].
- [2] TCIJ. *Title of the article*. เข้าถึงได้จาก: <https://www.tcijthai.com/news/2018/28/scoop/8620> [เข้าถึงเมื่อ 9 พ.ค. 2024].
- [3] Herosign Marketing. *Herosign company*. เข้าถึงได้จาก: <https://www.herosignmarketing-th.com> [เข้าถึงเมื่อ 1 ก.พ. 2025].
- [4] Pollution Control Department. *Report Pollution Situation of Thailand*. Bangkok: Huayai Company; 2016.

- [5] Lira C, Fredel MC, Mauro DM, Alarcon OE. Effect of carbonates on firing shrinkage and on moisture. *Qualicer*. 1998;98:101-106.
- [6] Jamaludin AR, Kasim S, Ahmad ZA. The effect of CaCO_3 addition on the crystallization behavior of ZnO crystal glaze fired at different gloss firing and crystallization temperatures. *Science of Sintering*. 2010;42:345-355.
- [7] Serra M, Picicco M, Moyas E, Suárez G, Aglietti E, Rendtorff N. Talc, spodumene and calcium carbonate effect as secondary fluxes in triaxial ceramic properties. *Procedia Materials Science*. 2012;1:397-402.
- [8] Melhem M, Hammoud I. A study to improve clay soil by using calcite additive in ceramic tile manufactory. *Jordan Journal of Civil Engineering*. 2017;11(3):346-364.
- [9] Bakar NA, Daud N, Nor SMM, Muhammad NMN, Juliewatty J. The effect of calcium carbonate added into Mambong clay. *Materials Science Forum*. 2020;10:256-261.
- [10] Demir I. Reuse of waste glass in building brick production. *Waste Management & Research*. 2009;270:572-577.
- [11] Loryuenyong V, Panyachai T, Kaewsimork K, Siritai C. Effects of recycled glass substitution on the physical and mechanical properties of clay bricks. *Waste Management*. 2009;29:2717-2721.
- [12] Phonphuak N, Kanyakam S, Chindaprasit P. Utilization of waste glass to enhance physical-mechanical properties of fired clay brick. *Journal of Cleaner Production*. 2016;112:3057-3062.
- [13] Kazmi SMS, Abbas S, Nehdi ML. Feasibility of using waste glass sludge in production of ecofriendly clay bricks. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2017;29(8):04017056.
- [14] Kalilu ROR, Ajadi MO. Cullet to glaze: Converting waste for ceramic artistic, economic, and environmental development. *European Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2021;4(1):1-7.
- [15] Gol F, Yilmaz A, Kacar E, Simsek S, Saritas ZG, Ture C, Arslan M, Bekmezci M, Burha H, Sen F. Reuse of glass waste in the manufacture of ceramic tableware glazes. *Ceramics International*. 2021;47:21031-21068.
- [16] Department of Science Service. *Control of Ceramic Products Used for Food*. Bangkok; 2017. (in Thai)
- [17] Kronberg T. *Properties of raw glazes—The impact of composition, firing and functional coatings*. Turku, Finland: Painosalama Oy; 2020.
- [18] Yildizay H, Kadioğlu H. Effects of perlite addition on the structure of hard porcelain glaze. *Journal of the Australian Ceramic Society*. 2018;54(15):369-375.
- [19] Sirilar P, Srisukhumbowornchai N, Thanakijkasem P, Sirisoorn S, Klein G. Influence of Lampang pottery stone: local materials in Thailand on C-Q-F ratio, key properties, mullite formation and glaze-body fit of vitreous ceramic sanitary ware. *Journal of the Australian Ceramic Society*. 2019;55:1153-1160.
- [20] Plešingerová B, Kovalčíková M. Influence of the thermal expansion mismatch between body and glaze on the crack density of glazed ceramics. *Ceramics-Silikáty*. 2003;47(3):100-107.
- [21] Wongpanit International Co., Ltd. *Product purchase price notification*. เข้าถึงได้จาก : https://wongpanit.com/print_history_price/539 [เข้าถึงเมื่อ 13 ต.ค. 2024].
- [22] Ministry of Labour. *Announcement of the Wage Committee No. 12*. Dec 2023. เข้าถึงได้จาก : <https://www.mol.go.th/en/minimum-wage> [เข้าถึงเมื่อ 12 ต.ค. 2024].

- [23] Metropolitan Electricity Authority. *Electricity tariff rates*. เข้าถึงได้จาก: <https://www.mea.or.th/our-services/tariff-calculation/other/D5xEaEwgU> [เข้าถึงเมื่อ 13 ต.ค. 2024].
- [24] Cernic International Co., Ltd. *Clear Glaze*. เข้าถึงได้จาก : https://cernicinter.com/index.php?route=product/product&product_id=614 [เข้าถึงเมื่อ 13 ต.ค. 2024].
- [25] Boudeghdegh K, Diella V, Bernasconi A, Roula A, Amirouche Y. Composition effects on the whiteness and physical-mechanical properties of traditional sanitary-ware glaze. *Journal of the European Ceramic Society*. 2018;35(13):3735-3741.