การเตรียมเคลือบที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ สำหรับเนื้อดินภาชนะเซรามิกหุงต้มประเภทสัมผัสเปลวไฟโดยตรง

Preparation of low thermal expansion glaze for ceramic cookware body of direct flame type

ปราณี จันทร์ลา[1] , กรองกาญจน์ ศิรินุกุลวัฒนา[1], ธนากร วาสนาเพียรพงศ์[2]**

Pranee Junlar[1**], Krongkarn Sirinukunwattana[1], Thanakorn Wasanapiarnpong[2]

บทคัดย่อ

ภาชนะเซรามิกหุงต้มประเภทสัมผัสเปลวไฟโดยตรง มีสมบัติค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ มีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันได้ดี มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำ และมีค่าความแข็งแรงสูงสามารถนำมาใช้เป็นภาชนะสำหรับปรุงอาหารบนเตาแก๊สโดยไม่เกิดแตกร้าว ดังนั้นเคลือบสำหรับภาชนะเซรามิกหุงต้มประเภทนี้จะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำกว่าหรือเท่ากับเนื้อดิน และต้องมีความเข้ากันได้ดีระหว่างวัสดุเนื้อพื้นและผิวเคลือบ ในงานวิจัยนี้ทดลองเตรียมสูตรเคลือบสำหรับเนื้อดินภาชนะเซรามิกหุงต้มคอมโพสิทคอร์เดียไรต์/สปอดูมีน ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ 2.83×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส โดยคำนวณสูตรจากระบบ Li_2O-CaO-MgO-Al_2O_3-SiO_2 และแปรค่าอัตราส่วนจำนวนโมลของอะลูมินา ตั้งแต่ 0.483-0.653 และแปรค่าอัตราส่วนจำนวนโมลของซิลิกา ตั้งแต่ 4.308-4.508 โดยเตรียมจากวัตถุดิบตั้งต้นจาก แร่เพทาไลท์ แคลเซียมซิลิเกต ทัลค์ อะลูมินา ซิลิกา และเซอร์โคเนียมซิลิเกต บดผสมแบบเปียกด้วยหม้อบด เคลือบชิ้นทดสอบ เผาที่อุณหภูมิ 1275 องศาเซลเซียส ยืนไฟ 1 ชั่วโมง จากนั้นนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสด้วยเครื่อง XRD หาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนด้วยเครื่องไดลาโตมิเตอร์ ทดสอบความทนทานต่อการรานตัวของเคลือบตามมาตรฐาน ASTM C424-80 ด้วยเครื่องหม้อนึ่งอัดแรงดันที่ความดัน 250 psi การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและธาตุองค์ประกอบเชิงปริมาณทำโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนและเทคนิคเอนเนอร์จีดิสเพอร์ซีฟสเปกโทรสโกปีเอกซเรย์ตามลำดับ ผลการทดลองพบเฟสหลัก 2 เฟส คือ เพทาไลท์และเซอร์คอน ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ ผิวเคลือบมีความเรียบเนียนและปราศจากการรานตัวของผิวเคลือบ

Abstract

Ceramic flameware bodies have a low thermal expansion coefficient, excellent thermal shock resistance, low water absorption and high strength. It can be used for direct flame cooking on stove-top without cracking. Therefore, a glaze for ceramic cookware body requires thermal expansion coefficient value lower than or similar to that of the body to get compatibility between matrix and coating. This study focused on the glaze of cordierite/spodumene composite for ceramic cookware body which has low thermal expansion coefficient of 2.83×10^{-6} /°C. The glazes in a Li_2O-CaO-MgO-Al_2O_3-SiO_2 system were calculated by varying the mole ratio of Al_2O_3 between at 0.483-0.653 and SiO_2 between of 4.308-4.508. The starting material including petalite, calcium carbonate, talc, alumina, silica and zirconium silicate were mixed via wet ball milling. The samples were coated onto the composite body and fired at 1275 °C with 1 h soaking time. Phase content was analyzed by XRD. Thermal expansion coefficient was tested by dilatometer. The crazing resistance was tested using an autoclave at 250 psi followed ASTM C424-80. The microstructure quantitative analysis and elemental archived by SEM&EDX technique, respectively. The results showed

[1] *กรมวิทยาศาสตร์บริการ*

[2] *ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*

[**] *Corresponding author. e-mail address: pranee@dss.go.th*

petalite and zircon as two main phases, providing thermal expansion coefficient with smooth and crack-free surfaces.

คำสำคัญ : ภาชนะเซรามิกหุงต้ม เคลือบการขยายตัวทางความร้อนต่ำ เคลือบเซรามิก เนื้อดินเซรามิก

Keywords : Ceramic cookware, Low thermal expansion glaze, Ceramic glaze, Ceramic body

1. บทนำ (Introduction)

ภาชนะเซรามิกหุงต้มประเภทสัมผัสเปลวไฟโดยตรง สามารถนำมาใช้ปรุงอาหารบนเตาแก๊สได้โดยตรง สามารถใช้งานได้อย่างทนทานและใช้ซ้ำได้โดยไม่เกิดการแตกร้าว และยังใช้งานได้บนเตาอบ เตาไฟฟ้าและเตาไมโครเวฟได้ เนื้อดินที่จะนำมาใช้ผลิตเป็นภาชนะเซรามิกประเภทนี้จะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำประมาณ 0.9×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำ มีค่าความแข็งแรงสูง และมีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันได้ดี ปัจจุบันภาชนะเซรามิกประเภทสัมผัสเปลวไฟโดยตรง สามารถผลิตได้จากเนื้อดินคอร์เดียไรต์ เนื้อดินสปอดูมีน เนื้อดินเพทาไลท์ หรือเนื้อดินเซรามิกคอมโพสิท เช่น เนื้อดินอะลูมิเนียม/ไททาเนต เนื้อดินสปอดูมีน/มุลไลต์ เนื้อดินคอร์เดียไรต์/สปอดูมีน เนื้อดินคอร์เดียไรต์/สปอดูมีน/มุลไลต์ เป็นต้น ดังนั้นในการเคลือบผิวเนื้อดินประเภทนี้เคลือบจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำกว่าหรือเท่ากับเนื้อดิน มีความเข้ากันได้ดี สามารถยึดเกาะกันได้ดีกับวัสดุเนื้อพื้น ไม่เกิดการแตกร้าวที่ผิวหลังเผา ในระหว่างใช้งานหรือหลังใช้งานซ้ำหลายครั้งบนเตาแก๊ส เตาอบ เตาไฟฟ้า และเตาไมโครเวฟ [1-6]

จากการศึกษางานวิจัยและบทความทางวิชาการ พบว่ามีสูตรเคลือบที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ สามารถเตรียมได้จากสปอดูมีนร้อยละ 30-41 โดยน้ำหนัก แร่ฟันม้าร้อยละ 10-14 โดยน้ำหนัก โดโลไมต์ร้อยละ 6-8 โดยน้ำหนัก ทัลค์ร้อยละ 4-5 โดยน้ำหนัก ดินเหนียวร้อยละ 6-14 โดยน้ำหนัก อะลูมินาร้อยละ 2-3 โดยน้ำหนัก ควอตซ์ร้อยละ 20-42 โดยน้ำหนัก เผาที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส [3] หรือสามารถเตรียมได้จากส่วนผสมของทัลค์ร้อยละ 14 โดยน้ำหนัก แคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก สปอดูมีนร้อยละ 47 โดยน้ำหนัก ดินขาวร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และซิลิการ้อยละ 30 โดยน้ำหนัก เผาที่อุณหภูมิ 1260-1285 องศาเซลเซียส [7-8] หรือเตรียมได้จากแร่เพทาไลท์ร้อยละ 76 โดยน้ำหนัก ทัลค์ร้อยละ 14 โดยน้ำหนัก แคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนัก และดินขาวร้อยละ 6.5 โดยน้ำหนัก เผาที่อุณหภูมิ 1280 ถึง 1325 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นเคลือบในระบบ Li_2O-CaO-MgO-Al_2O_3-SiO_2 [9]

เมื่อศึกษางานวิจัยเพิ่มเติมพบว่า เพทาไลท์ (petalite) เป็นสารประกอบลิเทียมอะลูมิเนียมซิลิเกต มีสูตรทางเคมี $Li_2O{\cdot}Al_2O_3{\cdot}8SiO_2$ มีจุดหลอมเหลวประมาณ 1350 องศาเซลเซียส เป็นแร่ธรรมชาติที่พบมากในแอฟริกาใต้ จีน และออสเตรเลีย เป็นต้น มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำประมาณ 0.9×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส นิยมนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมเซรามิกและแก้วโดยผสมลงในเนื้อดินและเคลือบเซรามิก เพื่อลดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเนื้อดิน เป็นฟลักซ์ที่ดีเมื่อใส่ลงไปในเคลือบ ทำให้เกิดสีสันที่สวยงาม โดยการใช้งานไม่ต้องนำมาเผาแคลไซน์ มีความเสถียรทางโครงสร้างที่อุณหภูมิสูง [10] จึงเป็นแร่ที่น่าสนใจนำมาเป็นวัตถุดิบหลักในการทำสูตรเคลือบที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการเตรียมเคลือบที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำจากแร่เพทาไลท์ ทัลค์ แคลเซียมคาร์บอเนต อะลูมินา ดินขาว และควอตซ์ ทำการแปรค่าอัตราส่วนโดยโมลของอะลูมินาต่อซิลิกา เผาเคลือบที่อุณหภูมิ 1275 องศาเซลเซียส เพื่อใช้เคลือบภาชนะเซรามิกหุงต้มประเภทสัมผัสเปลวไฟโดยตรง

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

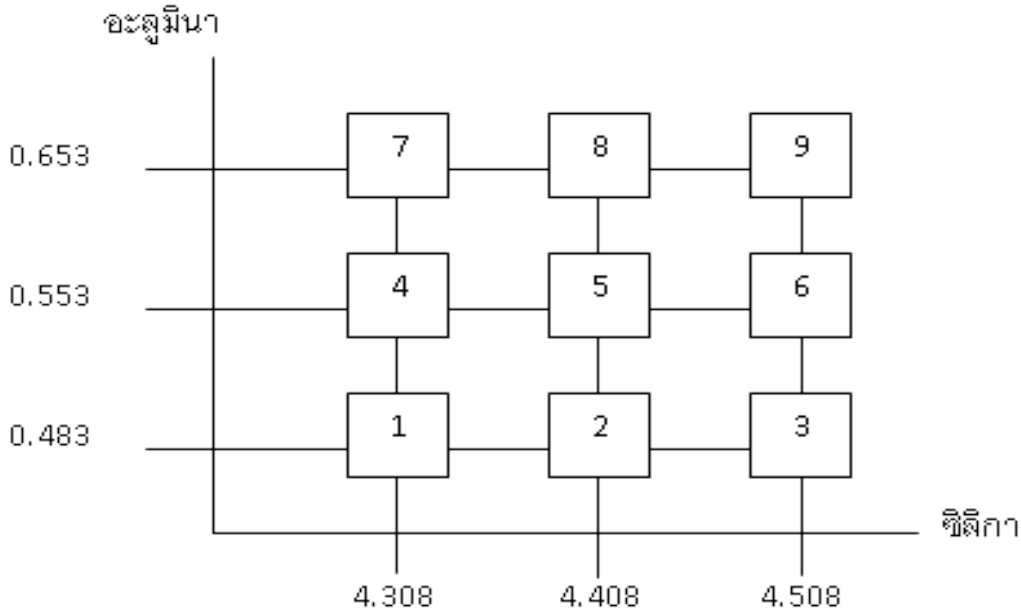
จากการศึกษางานวิจัยและบทความทางวิชาการ พบว่าเคลือบที่มีการค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ จะมีระบบ Li_2O-CaO-MgO-Al_2O_3-SiO_2 [7-9] ดังนั้นจึงนำมาใช้ในการคำนวณเป็นสูตรเคลือบพื้นฐาน และแปรค่าอะลูมินา/ซิลิกา โดยโมลของอะลูมินามีค่าอยู่ระหว่าง 0.483- 0.653 และโมลของซิลิกามีค่าอยู่ระหว่าง 4.308-4.508 ทดลองเตรียมสูตรเคลือบและนำมาเคลือบบนเนื้อดินเซรามิกคอมโพสิทชนิดสปอดูมีน/คอร์เดียไรต์ เผาที่อุณหภูมิ 1275 องศาเซลเซียส ยืนไฟที่อุณหภูมิสูงสุด 1 ชั่วโมง

2.1 การคำนวณสูตรเคลือบ

การทดลองนี้เลือกใช้เคลือบระบบ Li_2O-CaO-MgO-Al_2O_3-SiO_2 โดยมีสูตรเคลือบพื้นฐานดังนี้ คือ

0.459 Li_2O 0.350 CaO 0.191 MgO	0.483-0.653 Al_2O_3	4.308-4.508 SiO_2

ทำการแปรเปลี่ยนจำนวนโมลของอะลูมินามีค่าอยู่ระหว่าง 0.483-0.653 และโมลของซิลิกามีค่าอยู่ระหว่าง 4.308-4.508 ดังแสดงในรูปที่ 1 และตารางที่ 1 โดยทุกสูตรเคลือบเติมเซอร์คอนร้อยละ 10 เนื่องจากเซอร์คอนเป็นสารคงตัวในเคลือบ ช่วยให้เคลือบเกิดความทนทานต่อสารเคมี เพิ่มความแข็งแรงผิวเคลือบ และความทึบแสงโดยเกิดผลึกขนาดเล็ก



รูปที่ 1 : *การแปรค่าจำนวนโมลอะลูมินาและซิลิกา*

ตารางที่ 1 จำนวนโมลของอะลูมินาและซิลิกาที่ใช้ในการทดลอง

จุดที่	โมลของอะลูมินา	โมลของซิลิกา
Pe.1	0.483	4.308
Pe.2	0.483	4.408
Pe.3	0.483	4.508
Pe.4	0.553	4.308
Pe.5	0.553	4.408
Pe.6	0.553	4.508
Pe.7	0.653	4.308
Pe.8	0.653	4.408
Pe.9	0.653	4.508

2.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

- แร่เพทาไลท์ ($Li_2O{\cdot}Al_2O_3{\cdot}8SiO_2$) ของบริษัท เซรามิก อาร์ อัส อินเตอร์ เนชั่นแนล เทรดดิ้งจำกัด นำเข้าจากประเทศออสเตรเลีย
- อะลูมินา A31 (Al_2O_3, 99.6 %), ของบริษัท กลาสรูม จำกัด นำเข้าจากประเทศญี่ปุ่น
- ทัลค์ ($2MgO{\cdot}2Al_2O_3{\cdot}5SiO_2$) ของบริษัท เซอร์นิค อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด นำเข้าจากประเทศจีน
- ดินขาว (Cerafast) ของบริษัท อินดัสเตรียส มินเนอรัล ดิวิลอปเม้นท์ จำกัด จากประเทศไทย
- ควอตซ์ (Cerasil), ของบริษัท อินดัสเตรียส มินเนอรัล ดิวิลอปเม้นท์ จำกัด จากประเทศไทย
- แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ของบริษัท เซอร์นิค อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด จากประเทศไทย
- เซอร์โคเนียมซิลิเกต ($ZrSiO_4$) ของบริษัท เซอร์นิค อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด จากประเทศสเปน

2.3 การคำนวณส่วนผสม

จากค่าสูตรพื้นฐานที่กำหนดในข้อ 2.1 โดยส่วนผสมเคลือบที่ใช้ทดลอง แสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งทุกสูตรเติมเซอร์คอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 2 จำนวนโมลของอะลูมินาและซิลิกาและส่วนผสมเคลือบที่ใช้ในการทดลอง

สูตร			ส่วนผสมของเคลือบต่อ 100 กรัม					
จุด	เพทาไลท์ (กรัม) อะลูมินา	ทัลค์ (กรัม) ซิลิกา	แคลเซียม คาร์บอเนต (กรัม)	อะลูมินา (กรัม)	ดินขาว (กรัม)	ควอตซ์ (กรัม)	ดินขาว (กรัม)	ควอตซ์ (กรัม)
1	0.483	4.308	79.3	14.6	3.7	-	1.7	0.7
2	0.483	4.408	78.0	14.4	3.6	-	1.7	2.3
3	0.483	4.508	76.7	14.1	3.5	-	1.7	3.9
4	0.553	4.308	77.7	14.3	3.6	1.8	2.2	0.4
5	0.553	4.408	76.0	14.0	3.5	-	6.5	-
6	0.553	4.508	74.7	13.8	3.5	-	6.4	1.6
7	0.653	4.308	75.5	13.9	3.5	4.1	3.0	-
8	0.653	4.408	73.9	13.6	3.4	2.7	6.3	-
9	0.653	4.508	72.8	13.4	3.4	2.7	6.2	1.6

2.4 การเตรียมเคลือบและชิ้นทดสอบเคลือบ

บดส่วนผสมตามสูตรในหม้อบดให้ละเอียดผ่านตะแกรง 100 เมช ชุบเคลือบบนชิ้นทดสอบ ที่ผ่านการเผาดิบ 800 องศาเซลเซียส นำไปเผาที่อุณหภูมิ 1275 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง ยืนไฟที่อุณหภูมิสูงสุด 1 ชั่วโมง

2.5 การทดสอบสมบัติของเคลือบ

2.5.1 นำชิ้นทดสอบที่เคลือบแล้วเผาที่อุณหภูมิ 1275 องศาเซลเซียส ตรวจพินิจดูลักษณะทั่วไปด้วยตา และดูการรานด้วยสารละลายเมทิลีนบูล

2.5.2 ทดสอบความทนต่อการรานเครื่องด้วยหม้อนึ่งอัดแรงดัน (autoclave) ที่ความดัน 250 psi โดยใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C424-80

2.5.3 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส โดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8-Advance มี Cu เป็นตัวกำเนิดรังสี และ Ni เป็น filter ตั้งค่า 2θ ตั้งแต่ 5 ถึง 80 องศา ใช้ตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1275 องศาเซลเซียส

2.5.4 หาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิ 25-1000 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที ด้วยเครื่องไดลาโตมิเตอร์ (Netzsch รุ่น DIL402PC)

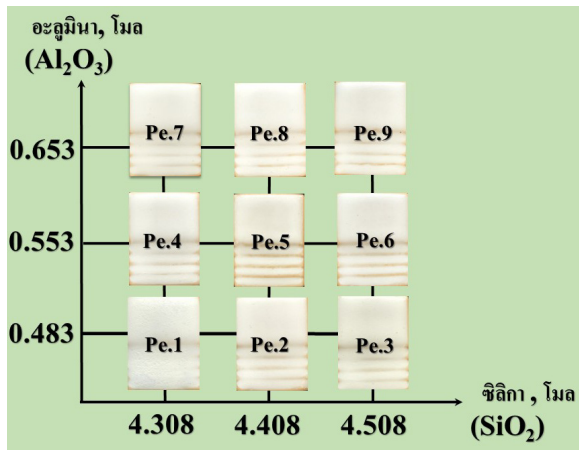
2.5.5 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วย Scanning electron microscope (SEM) และ วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDX)

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล (Results and Discussion)

3.1 ผลการทดลองเคลือบ

ผลการตรวจพินิจลักษณะทั่วไปของเคลือบบนเนื้อดินเซรามิกคอมโพสิทหลังเผาที่อุณหภูมิ 1275 องศาเซลเซียส พบว่าทุกสูตรมีลักษณะสีขาวทึบ ผิวกึ่งมัน กึ่งด้าน ไม่รานตัว และเมื่อนำไปทดสอบความทนทานต่อการรานในหม้อนึ่งอัดแรงดันที่ความดัน 250 psi โดยใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C424-80 พบการแตกร้าวในสูตร Pe.1-7 และ Pe.9 ยกเว้นสูตร Pe.8 ไม่พบการแตกร้าวของทั้งเนื้อดินและเคลือบ ดังแสดงในรูปที่ 2 และตารางที่ 3

โดยการรานตัวของสูตร Pe.1-7 และ Pe.9 สาเหตุอาจเกิดจากการที่เนื้อดินและชั้นผิวเคลือบไม่เข้ากันหรือไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เนื่องจากเนื้อดินและเคลือบมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนแตกต่างกัน โดยเคลือบสูตร Pe.1 และ Pe.3 มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเท่ากับ 0.65×10^{-6} และ Pe.3 มีค่าเท่ากับ 1.13×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนเนื้อดินมีค่าเท่ากับ 2.83×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส จึงเป็นสาเหตุทำให้เกิดความเค้นตกค้าง (residual stresses) หลังเผาชิ้นทดสอบ ระหว่างเนื้อดินและผิวชั้นเคลือบภายใต้ความเค้นแรงดึงและแรงอัด เกิดการขยายตัวและหดตัวไม่สัมพันธ์กัน ดังนั้นเมื่อทำการทดสอบการทนทานต่อการรานตัวในสภาวะภายใต้ความดันที่ 250 psi เนื้อดินและเคลือบเกิดการขยายตัวที่ไม่ใกล้เคียงกันจึงเกิดการรานตัวของเคลือบ [11-13]



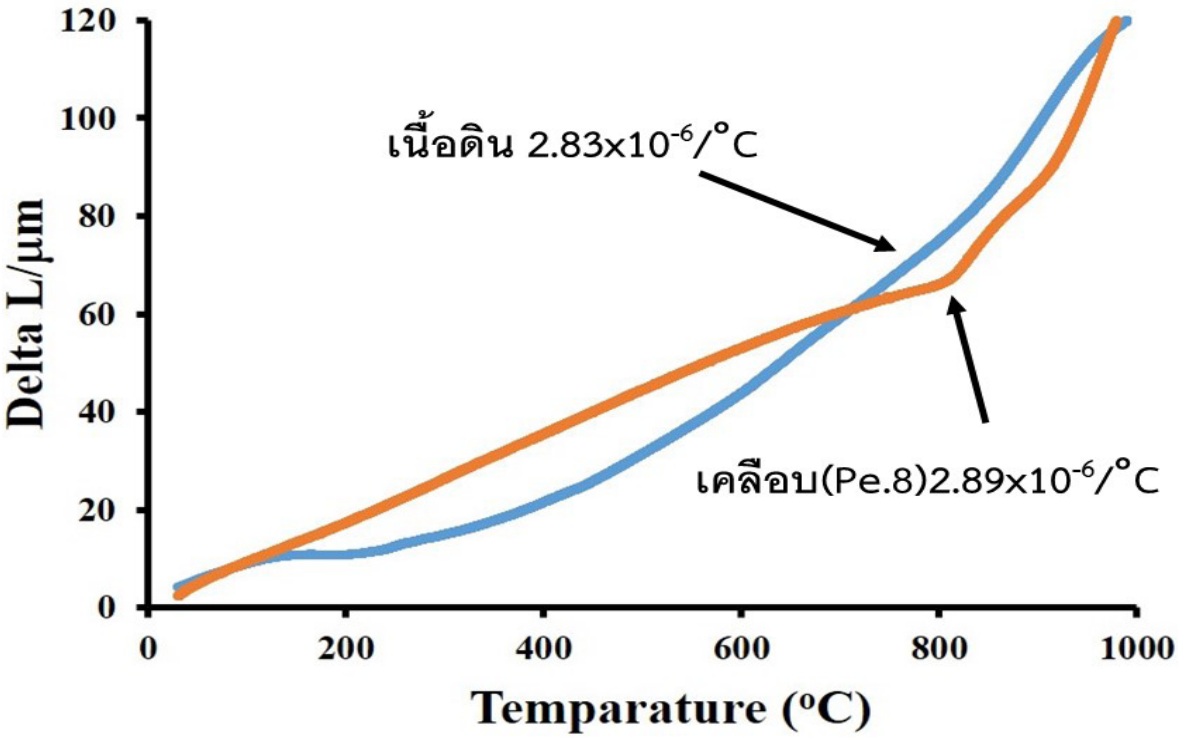
รูปที่ 2 : *ลักษณะทั่วไปของเคลือบหลังเผา 1275 องศาเซลเซียส*

ตารางที่ 3 ผลการทดลองเคลือบหลังเผาที่อุณหภูมิ 1275 องศาเซลเซียส

สูตรที่	ลักษณะของผิวเคลือบหลังเผาและทดสอบ		
	ใส-ทึบ Transpar-ent-Opaque	เนื้อแก้ว-ด้าน Glass-Matte	การทนทานต่อการรานตัว(Crazing Resistance)
Pe.1	สีขาวทึบ	กึ่งมัน-กึ่งด้าน	ราน
Pe.2	สีขาวทึบ	กึ่งมัน-กึ่งด้าน	ราน
Pe.3	สีขาวทึบ	กึ่งมัน-กึ่งด้าน	ราน

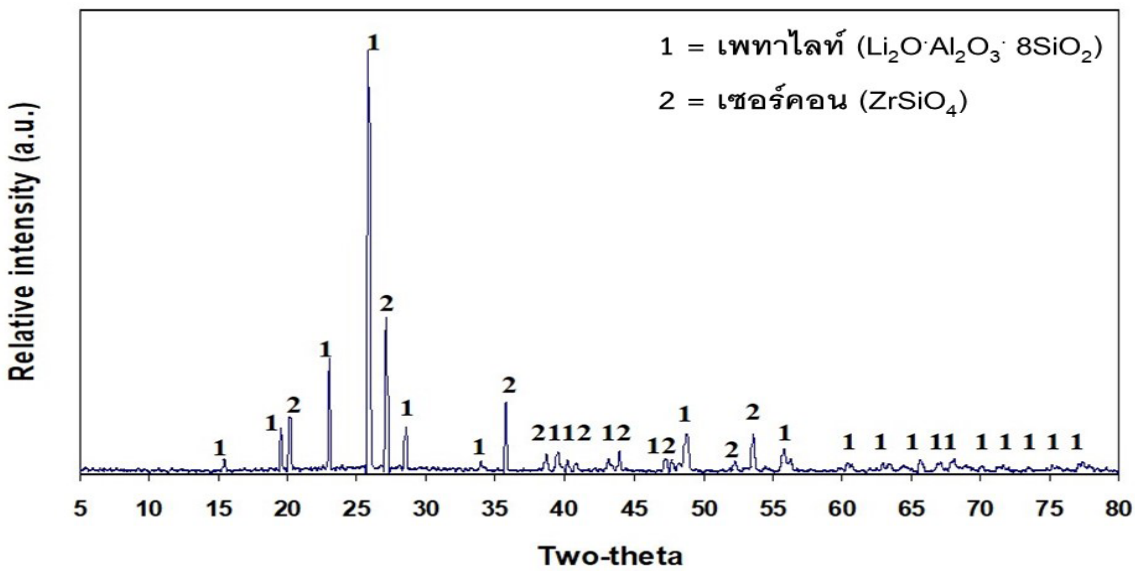
สูตรที่	ลักษณะของผิวเคลือบหลังเผาและทดสอบ		
	ใส-ทึบ Transpar-ent-Opaque	เนื้อแก้ว-ด้าน Glass-Matte	การทนทานต่อการรานตัว(Crazing Resistance)
Pe.4	สีขาวทึบ	กึ่งมัน-กึ่งด้าน	ราน
Pe.5	สีขาวทึบ	กึ่งมัน-กึ่งด้าน	ราน
Pe.6	สีขาวทึบ	กึ่งมัน-กึ่งด้าน	ราน
Pe.7	สีขาวทึบ	กึ่งมัน-กึ่งด้าน	ราน
Pe.8	สีขาวทึบ	กึ่งมัน-กึ่งด้าน	ไม่ราน
Pe.9	สีขาวทึบ	กึ่งมัน-กึ่งด้าน	ราน

เมื่อนำสูตรเคลือบ Pe.8 ทำการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนพบว่า เคลือบมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเท่ากับหรือใกล้เคียงกับเนื้อดิน คือ เนื้อดินมีค่าเท่ากับ 2.83×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส และเคลือบมีค่าเท่ากับ 2.89×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส ซึ่งจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ชิ้นทดสอบเนื่องจากชิ้นงานอยู่ภายใต้แรงอัด และไม่ทำให้เคลือบเกิดการรานตัว [14-15] ดังแสดงในรูปที่ 3

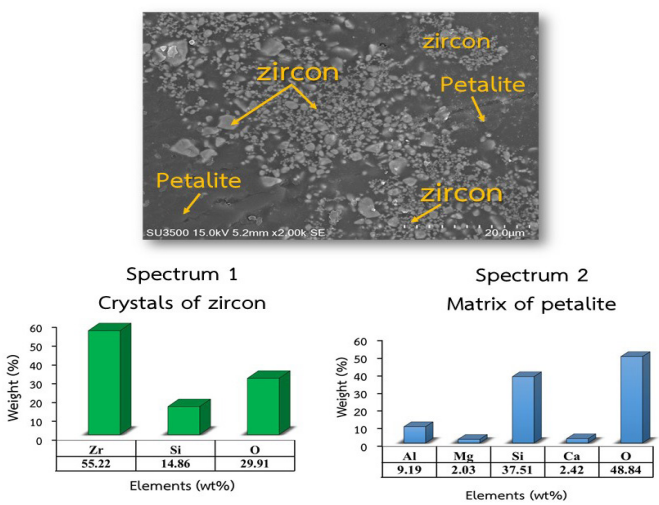


***รูปที่ 3** : ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเนื้อดินและเคลือบหลังเผาที่อุณหภูมิ 1275 องศาเซลเซียส*

จากผลการทดลองเตรียมเคลือบ พบว่าสูตร Pe.8 ไม่เกิดการรานตัวหลังทดสอบความทนทานต่อการราน โดยใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C424-80 หลังเผาที่อุณหภูมิ 1275 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงนำชิ้นทดสอบมาวิเคราะห์เฟสโดย XRD พบ 2 เฟสหลัก คือ เพทาไลต์และเซอร์คอน ดังแสดงในรูปที่ 4 เนื่องจากในสูตรส่วนผสมของเคลือบมีองค์ประกอบหลักเป็นแร่เพทาไลท์มากกว่าร้อยละ 70 จึงทำให้พบเป็นเฟสหลัก ส่วนวัตถุดิบอื่นๆ คือ ดินขาว แคลเซียมคาร์บอเนต ควอตซ์ อะลูมินาและทัลค์ เติมในอัตราส่วนเพียงเล็กน้อยหรือบางวัตถุดิบเป็นวัสดุที่สามารถหลอมได้ที่อุณหภูมิ 1275 องศาเซลเซียส จึงทำให้ไม่ปรากฏเฟส แต่ในส่วนเซอร์คอนนั้นถึงแม้ใส่เพียงร้อยละ 10 แต่เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวสูงประมาณ 1500 องศาเซลเซียส เป็นวัตถุดิบที่มีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง นิยมนำมาใส่เคลือบเพื่อให้เกิดความแข็งแรง ทนต่อการขูดขีด ช่วยให้มีความขาวทึบ [16] จึงไม่เกิดหลอมละลายผสมกับเพทาไลท์ แต่เกิดเป็นผลึกขนาดเล็กกระจายตัวรอบๆ เนื้อพื้นที่เป็นเพทาไลท์ ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยวัสดุที่เป็นส่วนเนื้อพื้นต่อเนื่องถึงกัน คือ เพทาไลท์ และเกิดผลึกเซอร์คอนที่มีรูปร่างไม่แน่นอนกระจายตัวทั่วทั้งชิ้นทดสอบ หลังเผาที่อุณหภูมิ 1275 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4 : *องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบหลังเผา ที่อุณหภูมิ 1275 องศาเซลเซียส*



รูปที่ 5 : *ผลตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วย SEM และวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณด้วย EDX หลังเผาที่อุณหภูมิ 1275 องศาเซลเซียส*

จากนั้นนำสูตรเคลือบ Pe.8 เคลือบลงบนผลิตภัณฑ์ตัวอย่างภาชนะเซรามิกหุงต้มรูปทรงหม้อที่มีความเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร มีความจุ 1 ลิตร ขึ้นรูปด้วยวิธีหล่อแบบ เผาที่อุณหภูมิ 1275 องศาเซลเซียส พบว่าผลิตภัณฑ์ตัวอย่างหลังเผามีผิวเคลือบที่เรียบเนียน ผิวกึ่งมันกึ่งด้าน ทดสอบการใช้งานโดยตั้งบนเตาแก๊สไม่พบการแตกร้าวก่อนและหลังการใช้งาน แสดงดังรูปที่ 6

รูปที่ 6 : *ผลิตภัณฑ์ตัวอย่างหลังเคลือบสูตรเคลือบ Pe.8 หลังเผาที่ อุณหภูมิ 1275 องศาเซลเซียส*

4. สรุป (Conclusion)

จากผลการทดลองสูตรเคลือบที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำสำหรับเนื้อดินภาชนะเซรามิกหุงต้มประเภทสัมผัสเปลวไฟโดยตรง หลังเผาที่อุณหภูมิ 1275 องศาเซลเซียส ยืนไฟที่อุณหภูมิสูงสุด 1 ชั่วโมง พบสูตรเคลือบที่ดีที่สุด คือ Pe.8 มีลักษณะผิวเคลือบสีขาวทึบ ผิวเคลือบกึ่งมันกึ่งด้าน ไม่เกิดรานตัวหลังทดสอบความทนทานต่อการรานตามมาตรฐาน ASTM C424-80 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ 2.89×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส เข้ากันได้กับเนื้อดินเซรามิกคอมโพสิทคอร์เดียไรต์/สปอดูมีน ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความต่ำ 2.83×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส เมื่อทดลองเคลือบผลิตภัณฑ์ตัวอย่างและทดสอบการใช้งานจริงบนเตาแก๊สไม่พบการเกิดการรานตัวของเคลือบ ดังนั้นสูตรเคลือบดังกล่าวสามารถนำมาเตรียมเคลือบเนื้อดินภาชนะเซรามิกหุงต้มประเภทสัมผัสเปลวไฟโดยตรงได้

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ขอขอบคุณผู้บังคับบัญชาและเจ้าหน้าที่ กองวัสดุและวิศวกรรม ทุกท่านช่วยสนับสนุนการทำงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง (References)

[1] ปราณี จันทร์ลา. *ความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันและสมบัติหลังเผาของวัสดุเชิงประกอบสปอดูมีน/คอร์เดียไรต์*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2554.

[2] วรรณา ต.แสงจันทร์, ลดา พันธ์สุขุมธนา และปราณี จันทร์ลา. การพัฒนาภาชนะเซรามิกหุงต้มเนื้อคอร์เดียไรต์. *วารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ*. 2555, **1**(1), มกราคม – มิถุนายน, 59-71.

[3] SAENGCHANTARA, WANNA T., LADA PUNSUKUMTANA and PRANEE JUNLAR. Development of low thermal expansion glaze cordierite body**.** Suranaree *Journal of Science and Technology*. 2013, **21**(1), 21-25.

[4] ปราณี จันทร์ลา. *การเตรียมและลักษณะสมบัติของวัสดุเชิงประกอบคอร์เดียไรต์/สปอดูมีน/มุลไลต์สำหรับภาชนะเซรามิก ประเภทสัมผัสเปลวไฟโดยตรง*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2562.

[5] OLIVEIRA, F.A. COSTA, J.A. FRANCO, J. CRUZ FERNANDES and D. DIAS. Newly developed Cordierite-Zircon composites. *Bristish Ceramic Transactions*. 2020, **101**(1), 14-21.

[6] PARMALEE, C.W. *Ceramic Glazes*. 3rd edition, Boston : Cahners Books, 1973, pp. 250-251.

[7] TECHNO FILE. *Flameware* [online]. 2011. [viewed 3 June 2020] Available from: https://ceramicartsnetwork.org/wp-content/uploads/2011/12/flamewaremay2011cmtechnofile.pdf.

[8] CHECHOPOULOS, G. J. A discussion of flameware. *Ceramics Technical*. 2011, 32, 12–18.

[9] คชินท์ สายอินทวงศ์. *สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน คุณสมบัติที่สำคัญที่หลายคนมองข้าม*. 2554. [ออนไลน์]. [อ้างถึงวันที่ 14 มิถุนายน 2564]. เข้าถึงจาก: http://www.thaiceramicsociety.com/ch_heat.php.

[10] FISHWICK, J.H. *Applications of lithium in ceramics*. Boston : Cahners Books, 1974, 156 p.

[11] KAVANOVÁ, M., A. KLOUŽKOVÁ and J. KLOUŽEK. Characterization of the interaction between glazes and ceramic bodies. *Ceramics – Silikáty*. 2017, **61**(3), 267-275.

[12] KINGERY, W.D., H.K. BOWEN and D.R. UHLMANN. *Introduction to Ceramic*. 2 nd edition. New York : John Wiley & Sons, 1976, pp. 603-611.

[13] NORTON, F.H. *Fine ceramic: Technology and appications*. New York : McGrew-Hill, 1974, pp. 287-289.

[14] EPPLER, RICHARD A. and DOUGLAS R. EPPLER. *Glazes and Glass Coatings*. Ohio : The American Ceramic Society, 2000, pp. 25-29.

[15] RHODES, DANIEL. *Clay and glazes for the potter*, 3rd edition. Revised and expanded by Robin Hopper. Wisconsin : Krause publications, 2000, pp. 111-113.

[16] EPPLER, RICHARD ANDREW and O'CONOR, EUGENE F. Composition and process for glazing ceramic ware. United states patent application 3871890. 1975-03-18.