การใช้กากของเสียจากการผลิตคะตะลิสต์สำหรับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงในเคลือบเซรามิก

นางสาวสุนีย์พร โพธิ์แก้ว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2556
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

UTILIZATION OF WASTE FROM HIGH DENSITY POLYETHYLENE CATALYST PRODUCTION IN CERAMIC GLAZE

Miss Suneeporn Pokaew

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Ceramic Technology
Department of Materials Science
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้กากของเสียจากการผลิตคะตะลิสต์สำหรับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงในเคลือบเซรามิก
โดย	นางสาวสุนีย์พร โพธิ์แก้ว
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเซรามิก
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันทนีย์ พุกกะคุปต์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันทนีย์ พุกกะคุปต์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร.อุไรวรรณ ลีลาอดิศร)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.จตุรงค์ จิตพุทธิ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สุนีย์พร โพธิ์แก้ว : การใช้กากของเสียจากการผลิตคะตะลิสต์สำหรับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงในเคลือบเซรามิก. (UTILIZATION OF WASTE FROM HIGH DENSITY POLYETHYLENE CATALYST PRODUCTION IN CERAMIC GLAZE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.วันทนีย์ พุกกะคุปต์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. ดร. ธนากร วาสนาเพียรพงศ์, 123 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้กากของเสียที่ได้จากการผลิตตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการผลิตพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมาใช้เป็นวัตถุดิบของเคลือบทึบขาวในผลิตภัณฑ์กระเบื้องเซรามิก องค์ประกอบหลักทางเคมีของกากของเสียประกอบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์และมีสิ่งเจือปนอื่นๆ ซึ่งพบในส่วนผสมเคลือบทึบขาว งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การนำกากของเสียมาใช้เป็นส่วนผสมเคลือบดิบโดยตรง และการใช้กากของเสียในฟริตโดยกากหลอมเป็นแก้วฟริต แล้วจึงนำฟริตที่ได้ไปเตรียมเป็นเคลือบ ทำการศึกษาวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของเคลือบ ได้แก่ พฤติกรรมการหลอมตัว อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะ ความแข็ง ความทนทานต่อการขูดขีด ความทนทานต่อสารเคมี สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน และสี โดยเน้นที่จะใช้กากของเสียแทนที่สารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งมีราคาค่อนข้างสูงสำหรับกระบวนการเตรียมเคลือบดิบ กากของเสียจะต้องนำไปเผาแคลไซน์ก่อนที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดสารประกอบคลอไรด์ หลังจากนั้นเตรียมเคลือบทึบขาวมาตรฐานเพื่อเปรียบเทียบกับเคลือบที่ใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบซึ่งเผาที่ 1200 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังได้ทำการปรับสูตรเคลือบและศึกษาบทบาทของวัตถุดิบต่างๆ ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่ากากของเสียสามารถใช้ทดแทนวัตถุดิบทางการค้าในเคลือบได้ในสัดส่วนไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ได้เคลือบสีขาวทึบแสงที่มีค่าความขาวตั้งแต่ 90 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป อีกทั้งยังมีลักษณะสมบัติใกล้เคียงกับเคลือบมาตรฐานด้วย ส่วนการใช้กากของเสียมาเป็นวัตถุดิบในการเตรียมฟริตนั้น กากของเสียไม่ต้องผ่านการเผาแคลไซน์ อุณหภูมิในการหลอมส่วนผสมฟริต คือ 1450 องศาเซลเซียส แก้วฟริตที่ได้จะถูกเตรียมเป็นน้ำเคลือบ เคลือบผิวผลิตภัณฑ์กระเบื้อง และเผาที่ 1120 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจึงทำการศึกษาวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของเคลือบฟริตที่เตรียมได้จากกากของเสีย สัดส่วนของกากของเสียที่ใช้ในส่วนผสมในแก้วฟริตคือประมาณ 10-15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เคลือบฟริตที่ได้มีลักษณะทึบสีขาวที่มีค่าความขาวมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์เช่นกัน งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่ากากของเสียจากตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับพอลิเอทิลีนสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับเคลือบขาวทึบและใช้ในผลิตภัณฑ์เซรามิกได้

ภาควิชา	วัสดุศาสตร์	ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเซรามิก	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....
ปีการศึกษา	2556	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

5472135723 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY
KEYWORDS: WASTE / CERAMIC GLAZE / HIGH DENSITY POLYETHYLENE CATALYST / TITANIUM DIOXIDE

SUNEEPORN POKAEW: UTILIZATION OF WASTE FROM HIGH DENSITY POLYETHYLENE CATALYST PRODUCTION IN CERAMIC GLAZE. ADVISOR: ASST. PROF. WANTANEE BUGGAKUPTA, Ph.D., CO-ADVISOR: ASST. PROF. THANAKORN WASANAPIARNPONG, D.Eng., 123 pp.

This research studied the utilization of a waste obtained from catalyst used in HDPE production as a white and opaque glaze raw material for ceramic products. The main chemical constituents of the waste are titanium dioxide, along with other oxides which were similar to raw materials used in white opaque glazes. The research was divided into two parts : the use of waste in raw glaze slip and the use of waste in frit preparation. Properties of the waste-containing glazes, i.e. melting behaviour, characteristic temperatures, hardness, chemical durability, abrasion resistance, thermal expansion and colours, were characterized. The purpose of the work was to replace the waste to expensive conventional titanium dioxide. As for the raw glaze slip, the pre-calcination process at 350 °C was required in order to remove chloride compound. A standard glaze was then prepared and compared with the waste-bearing glazes fired at 1200 °C. Formulation of the glaze recipe as well as the roles of raw materials in these glaze were determined. The work showed that the waste could substitute a conventional commercial grade titanium dioxide. The appropriate content of the waste to other materials for this in the glazes was up to 10 wt%, providing the white opaque glaze with whiteness value of 90 % and had similar properties to those of the standard glaze. For the frit, the waste could be employed without calcination. The melting temperature of the frit mixture were 1450 °C. Then, the frit containing were prepared, applied onto ceramic tiles and fired at 1120 °C. The properties of the frit itself as well as the frit glazes were also observed. The appropriate content of the waste in frit composition was around 10-15 wt% with whiteness value higher than 90 %. Therefore, the research works indicated that the waste derived from HDPE catalyst production was enable to be used as a substitute for raw material of the white opaque ceramic glazes.

Department:	Materials Science	Student's Signature .....
Field of Study:	Ceramic Technology	Advisor's Signature .....
Academic Year:	2013	Co-Advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

สำหรับงานวิจัยและการเขียนเล่มวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ได้รับความเมตตากรุณาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันทนีย์ พุกกะคุปต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ อบรม สั่งสอน ตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และคณาจารย์ทุกท่าน สำหรับการตรวจแก้ไขข้อบกพร่องของรูปเล่มวิทยานิพนธ์และคำแนะนำต่างๆ ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้ถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจาก บริษัท เอสซีจี เคมิคอลส์ จำกัด ภายใต้โครงการวิจัยการใช้กากของเสียจากคะตะลิสต์ในการผลิตพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงสำหรับงานเคลือบเซรามิก

ขอขอบคุณ ทุนอุดหนุนการศึกษาจาก ทุนศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณ หน่วยปฏิบัติการวิจัยเซรามิกขั้นสูง ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับเครื่องมือและอุปกรณ์การทำวิจัย

ขอขอบคุณ คุณสมคิด ทองศิลา และคุณวิรพงษ์ ครพนม เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเซรามิกส์ และคุณสมพงษ์ ชุติกุลสวัสดิ์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการพอลิเมอร์ ที่ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีในการวิเคราะห์ทดสอบ

ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร. อภิรัฐ ธีรภาพวิเศษพงษ์ ห้องปฏิบัติการแก้ว ที่ให้คำปรึกษา และให้ความช่วยเหลืออย่างดี

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

ขอขอบคุณ บริษัท เฟอร์โร (ประเทศไทย) จำกัด และ คุณรุ่งทิวา ดุษฎีรังสีกุล สำหรับคำแนะนำทางด้านเทคนิคการวิเคราะห์วัตถุดิบ และเครื่องมือในการทดสอบ

ขอขอบคุณ บริษัท เซรามิคอุตสาหกรรมไทย จำกัด สำหรับกระเบื้องดิบ

ขอขอบคุณ คุณนิธิวัชธ์ นวอัครฐานันท์ ที่ให้คำปรึกษา และช่วยเหลือมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ พี่ น้อง และเพื่อน ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่คอยเป็นกำลังใจ ให้คำปรึกษา และช่วยเหลือมาโดยตลอด

สุดท้ายขอขอบพระคุณครอบครัวผู้วิจัย ที่คอยให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจมาโดยตลอด

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ฐ
สารบัญรูปภาพ ..... ฒ
บทที่ 1 1
บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2
บทที่ 2 3
ปริทัศน์วรรณกรรม 3
2.1 กระบวนการผลิตและการเกิดกากของเสียที่ได้จากกระบวนการผลิตพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง 3
2.2 เคลือบเซรามิก 5
2.2.1 การเตรียมเคลือบ 6
2.2.2 การเคลือบ 8
2.2.3 เคลือบสำหรับผลิตภัณฑ์เผาครั้งเดียว 8
2.2.4 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการเผาเคลือบ 9
2.3 เคลือบฟริต 10
2.4 การทดสอบสมบัติของเคลือบ 11
2.4.1 พฤติกรรมการหลอมตัว (Melting behaviour) 11
2.4.2 อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะ (Characteristic temperatures) 12
2.4.3 สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Coefficient of thermal expansion) 14
2.4.4 ความต้านทานต่อสารเคมี (Chemical resistance) 14

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

2.4.5 ความต้านทานต่อการขูดขีด (Abrasion resistance) 16
2.4.6 สี (Colour) 17
2.5 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) 18
2.6 แคลเซียมออกไซด์ (CaO) 19
2.7 อะลูมินา (Al_2O_3) 19
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 19
บทที่ 3 23
วิธีดำเนินงานวิจัย 23
3.1 วัตถุดิบ สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 23
3.1.1 วัตถุดิบและสารเคมี 23
3.1.2 อุปกรณ์ 23
3.2 ขั้นตอนการวิจัย 24
3.2.1 การเตรียมกากของเสียและวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของกากของเสีย 24
3.2.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี 24
3.2.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบเฟส 24
3.2.1.3 การเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาและการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่เกิดขึ้นตามอุณหภูมิ 25
3.2.1.4 ความหนาแน่นของผงกากของเสีย 25
3.2.1.5 น้ำหนักที่หายไปหลังการอบ 26
3.2.1.6 การกำจัดคลอรีนในกากของเสีย 26
3.2.2 การใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบทดแทนไทเทเนียมไดออกไซด์ในเคลือบเซรามิก 26
3.2.2.1 การเลือกสูตรเคลือบมาตรฐานและการปรับสูตรเคลือบที่มีกากของเสียเป็นวัตถุดิบทดแทน 26
3.2.2.2 การเตรียมเคลือบ การเคลือบและอุณหภูมิในการเผา 27
3.2.2.2.1 ความหนาแน่นของน้ำเคลือบ 27
3.2.2.2.2 กากค้างตะแกรงของเคลือบ 28
3.2.2.2.3 อัตราการไหลตัวของน้ำเคลือบ 28
3.2.2.2.4 การเคลือบและอุณหภูมิในการเผา 28

หน้า

3.2.2.3 การทดสอบสมบัติของเคลือบหลังเผา 29
3.2.2.3.1 พฤติกรรมการหลอมตัว 29
3.2.2.3.2 อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะ 30
3.2.2.3.3 องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบหลังเผา 30
3.2.2.3.4 สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน 30
3.2.2.3.5 ความทนทานต่อสารเคมี 30
3.2.2.3.6 ความทนทานต่อการขูดขีด 31
3.2.2.3.7 ความแข็งของเคลือบ 31
3.2.2.3.8 สี 32
3.2.3 การใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบทดแทนไทเทเนียมไดออกไซด์ในเคลือบฟริต 33
3.2.3.1 ทำการเลือกสูตรฟริตมาตรฐาน และปรับสูตรฟริตโดยใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบทดแทนในฟริต 33
3.2.3.2 การเตรียมฟริต 33
3.2.3.3 การเตรียมเคลือบฟริต 33
3.2.3.4 อุณหภูมิในการเผาเคลือบ 33
3.2.3.5 การทดสอบสมบัติของเคลือบหลังเผา 33
3.3 แผนผังการทดลอง 34
บทที่ 4 36
การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของกากของเสีย 36
4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ 36
4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของกากของเสีย 37
4.3 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อกากของเสียได้รับความร้อน 40
4.4 ความหนาแน่นของผงกากของเสีย 41
4.5 การสูญเสียน้ำหนักหลังการอบและหลังการเผาของกากของเสีย 41
บทที่ 5 42
การใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบในเคลือบเซรามิก 42
5.1 การเลือกสูตรเคลือบมาตรฐาน 42
5.2 สูตรทางเคมีของกากของเสีย 44

หน้า

5.3 การใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบทดแทนไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้าในสูตรเคลือบมาตรฐาน 45
5.3.1 พฤติกรรมการหลอมตัวและอุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบ 47
5.3.2 ลักษณะทางกายภาพและค่าสีของเคลือบ 48
5.3.3 องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบหลังเผา 49
5.3.4 สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน 50
5.3.5 ความทนทานต่อสารเคมี 51
5.3.6 ความแข็งและความทนทานต่อการขูดขีด 52
5.4 การปรับสูตรเคลือบ 53
5.4.1 การปรับสูตรเคลือบโดยการเพิ่มปริมาณกากของเสียในสูตรเคลือบ โดยที่วัตถุดิบตัวอื่นๆ ลดลงในอัตราส่วนเท่าๆ กัน 53
5.4.1.1 อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบ 53
5.4.1.2 ลักษณะทางกายภาพของเคลือบ 54
5.4.1.3 สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน 56
5.4.2 การปรับสูตรเคลือบโดยการใช้แผนภาพ triaxial 57
5.4.2.1 การปรับสูตรเคลือบโดยการเพิ่มปริมาณกากของเสียในสูตรเคลือบ โดยที่วัตถุดิบกลุ่ม II (ซิลิกาและโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์) คงที่ และวัตถุดิบกลุ่ม III (โดโลไมต์ หินปูน ซิงก์ออกไซด์ และเซอร์โคเนียมซิลิเกต) ลดลง 57
5.4.2.1.1 พฤติกรรมการหลอมตัวและอุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบ 58
5.4.2.1.2 ลักษณะทางกายภาพของเคลือบและค่าสีของเคลือบ 60
5.4.2.1.3 องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบหลังเผา 61
5.4.2.1.4 สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน 62
5.4.2.1.5 ความทนทานต่อสารเคมี 63
5.4.2.2 การปรับสูตรเคลือบโดยการเพิ่มปริมาณวัตถุดิบกลุ่ม II ในสูตรเคลือบ โดยที่ปริมาณกากของเสียคงที่ และวัตถุดิบกลุ่ม III ลดลง 65
5.4.2.2.1 พฤติกรรมการหลอมตัวและอุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบ 67
5.4.2.2.2 ลักษณะทางกายภาพของเคลือบ 69

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.4.2.2.3 องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบหลังเผา 70
5.4.2.2.4 สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน 71
5.4.2.2.5 ความทนทานต่อสารเคมี 72
5.4.2.2.6 ความแข็งและความทนทานต่อการขูดขีด 72
5.4.2.3 การปรับสูตรเคลือบโดยการเพิ่มปริมาณวัตถุดิบกลุ่ม III ในสูตรเคลือบ โดยที่ปริมาณกากของเสียคงที่ และวัตถุดิบกลุ่ม II ลดลง 73
5.4.2.3.1 พฤติกรรมการหลอมตัวและอุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบ 74
5.5 สรุปผลการทดลองการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบในเคลือบเซรามิก 77
บทที่ 6 78
การใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบในเคลือบฟริต 78
6.1 การเลือกสูตรฟริตมาตรฐานและการปรับสูตรฟริต 78
6.2 ลักษณะสมบัติของฟริตที่ได้ 79
6.2.1 ลักษณะกายภาพของฟริต 79
6.2.2 ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของฟริต 81
6.3 ลักษณะสมบัติของเคลือบฟริต 82
6.3.1 ลักษณะทางกายภาพและค่าสีของเคลือบฟริต 82
6.3.2 องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบหลังเผา 84
6.3.3 สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน 85
6.3.4 ความทนทานต่อสารเคมี 85
6.3.5 ความแข็งและความทนทานต่อการขูดขีด 86
6.4 สรุปผลการทดลองการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบในการเตรียมฟริตสำหรับเคลือบฟริต 87
บทที่ 7 88
สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ 88
7.1 สรุปผลการวิจัย 88
7.2 ข้อเสนอแนะ 89
รายการอ้างอิง 90
ภาคผนวก 94

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

ภาคผนวก ก 95
ภาคผนวก ข 96
ภาคผนวก ค 107
ภาคผนวก ง 119
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 123

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 เนื้อกระเบื้องโมเสคของบริษัท เซรามิคอุตสาหกรรมไทย จำกัด 29
ตารางที่ 4.1 ปริมาณของธาตุองค์ประกอบในกากของเสีย 37
ตารางที่ 5.1 ส่วนผสมของวัตถุดิบในเคลือบมาตรฐาน (STD) 43
ตารางที่ 5.2 ส่วนผสมของสูตรเคลือบมาตรฐานที่มีการใช้กากของเสียทดแทนวัตถุดิบปกติ 46
ตารางที่ 5.3 พฤติกรรมการหลอมตัวของเคลือบ STD และเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร A ที่อุณหภูมิ 1000 -1250 องศาเซลเซียส 47
ตารางที่ 5.4 การเปรียบเทียบอุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบมาตรฐาน STD และเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร A 48
ตารางที่ 5.5 ค่าสีของเคลือบมาตรฐาน STD และเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร A 49
ตารางที่ 5.6 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเนื้อดินและของเคลือบมาตรฐาน STD และเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร A 51
ตารางที่ 5.7 ระดับความทนทานต่อสารเคมีของของเคลือบมาตรฐาน STD และเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร A 51
ตารางที่ 5.8 ความแข็งและความทนทานต่อการขูดขีดของเคลือบมาตรฐาน STD และเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร A 52
ตารางที่ 5.9 ส่วนผสมของสูตรเคลือบที่ทำการปรับสูตรเคลือบ โดยเพิ่มปริมาณกากของเสียในสูตรเคลือบ และวัตถุดิบตัวอื่นๆ ลดลงในอัตราส่วนเท่าๆ กัน 53
ตารางที่ 5.10 อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบที่มีการเพิ่มปริมาณกากของเสียในสูตรเคลือบและวัตถุดิบตัวอื่นๆ ลดลงในอัตราส่วนเท่าๆ กัน 54
ตารางที่ 5.11 ส่วนผสมของสูตรเคลือบที่มีการปรับโดยการเพิ่มปริมาณกากของเสีย 58
ตารางที่ 5.12 พฤติกรรมการหลอมตัวของเคลือบที่มีการเพิ่มปริมาณกากของเสียในสูตรเคลือบที่อุณหภูมิ 1000 -1250 องศาเซลเซียส 59
ตารางที่ 5.13 อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบที่มีการเพิ่มปริมาณกากของเสียในสูตรเคลือบ 60
ตารางที่ 5.14 ค่าสีของเคลือบที่มีการเพิ่มปริมาณกากของเสียในสูตรเคลือบ 61
ตารางที่ 5.15 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบเมื่อมีการเพิ่มกากของเสียในสูตรเคลือบ 63
ตารางที่ 5.16 ระดับความทนทานต่อสารเคมีของเคลือบที่มีการเพิ่มปริมาณกากของเสียในสูตรเคลือบ 64
ตารางที่ 5.17 ความแข็งและความทนทานต่อการขูดขีดของเคลือบที่มีการเพิ่มปริมาณกากของเสียในสูตรเคลือบ 65
ตารางที่ 5.18 ส่วนผสมของสูตรเคลือบที่มีการปรับโดยการเพิ่มปริมาณของซิลิกาและโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ 66

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

ตารางที่ 5.19 พฤติกรรมการหลอมตัวของเคลือบที่มีปริมาณของวัตถุดิบกลุ่ม II เพิ่มขึ้น 68
ตารางที่ 5.20 อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบที่มีปริมาณของวัตถุดิบกลุ่ม II เพิ่มขึ้น..... 68
ตารางที่ 5.21 ค่าสีของเคลือบสูตร a เปรียบเทียบกับเคลือบมาตรฐาน STD และเคลือบสูตร A..... 70
ตารางที่ 5.22 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบสูตร a เปรียบเทียบกับ
เคลือบมาตรฐาน STD และเคลือบสูตร A..... 71
ตารางที่ 5.23 ระดับความทนทานต่อสารเคมีของเคลือบสูตร a เปรียบเทียบกับเคลือบมาตรฐาน STD
และเคลือบสูตร A..... 72
ตารางที่ 5.24 ความแข็งและความทนทานต่อการขูดขีดของเคลือบสูตร a เปรียบเทียบกับเคลือบสูตร
มาตรฐาน STD และเคลือบสูตร A..... 73
ตารางที่ 5.25 แผนภาพ triaxial ของสูตรเคลือบที่ปรับสูตรเคลือบโดยการเพิ่มปริมาณวัตถุดิบ
กลุ่ม III..... 74
ตารางที่ 5.26 พฤติกรรมการหลอมตัวของเคลือบที่มีปริมาณของวัตถุดิบกลุ่ม III เพิ่มขึ้น เปรียบเทียบ
กับเคลือบมาตรฐาน STD และเคลือบสูตร A..... 75
ตารางที่ 5.27 อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบที่มีปริมาณของวัตถุดิบกลุ่ม III เพิ่มขึ้น
เปรียบเทียบกับเคลือบมาตรฐาน STD และเคลือบสูตร A..... 76
ตารางที่ 6.1 ส่วนผสมของฟริตมาตรฐาน STD-Z..... 78
ตารางที่ 6.2 ส่วนผสมของวัตถุดิบของสูตรฟริตมาตรฐาน และสูตรฟริตที่ทำการปรับ..... 79
ตารางที่ 6.3 อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของฟริต..... 82
ตารางที่ 6.4 ค่าสีของเคลือบฟริต..... 84
ตารางที่ 6.5 การเปรียบเทียบค่าความขาวและความอิ่มสีระหว่างเคลือบฟริตทีมีการใช้ผงไทเทเนียม
ไดออกไซด์ทางการค้าเป็นวัตถุดิบ และเคลือบฟริตที่มีการใช้กากของเสียทดแทนไทเทเนียมได
ออกไซด์ทางการค้า..... 84
ตารางที่ 6.6 ระดับความทนทานต่อสารเคมีของเคลือบฟริตมาตรฐาน STD-Z เคลือบฟริต T และ W
..... 86
ตารางที่ 6.7 ค่าความแข็งและความต้านทานต่อการขูดขีดของเคลือบฟริตมาตรฐาน STD-Z เคลือบ
ฟริต T และ W..... 87

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 กระบวนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง 4
รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการเตรียมเคลือบและการทดสอบสมบัติของเคลือบ 7
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปจากการเผาผนึก 12
รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของชิ้นงานที่บันทึกได้จากกล้องจุลทรรศน์ 13
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างลักษณะการบันทึกรูปทรงของชิ้นงานและอุณหภูมิที่ได้จากการวิเคราะห์จากเครื่อง heating microscope 14
รูปที่ 2.6 การจำแนกระดับความทนทานสารเคมีของเคลือบเซรามิก 16
รูปที่ 2.7 เครื่องทดสอบความทนทานต่อการขัดสี ตามมาตรฐาน ASTM D 968-93 17
รูปที่ 2.8 จักรวาลสีและการแบ่งสีของแกนทั้งสาม 18
รูปที่ 3.1 แผนภาพ triaxial ที่ใช้ในการปรับสูตรเคลือบ 26
รูปที่ 3.2 การอัดโคนเพื่อศึกษาพฤติกรรมการหลอมตัว 29
รูปที่ 3.3 ตัวอย่างที่กำลังหลอมตัวภายในเครื่อง Heating microscope 30
รูปที่ 3.4 การทดสอบความทนทานต่อสารเคมีของเคลือบ 31
รูปที่ 3.5 ลักษณะของหัวกดและเครื่องวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ส 32
รูปที่ 3.6 แผนผังการเตรียมกากของเสียและการทดสอบสมบัติเบื้องต้นของกากของเสีย 34
รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการเตรียมเคลือบเซรามิกและการวิเคราะห์สมบัติของเคลือบ 34
รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการเตรียมฟริต เคลือบฟริต และการวิเคราะห์สมบัติของเคลือบฟริต 35
รูปที่ 4.1 องค์ประกอบธาตุของกากของเสีย (เมื่อทำการสุ่มตักกากของเสียเป็นจำนวน 10 ครั้งมาทำการวิเคราะห์) 36
รูปที่ 4.2 องค์ประกอบทางเฟสของกากของเสียที่อุณหภูมิห้อง 38
รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเฟสของกากของเสียที่ผ่านการอบแห้งและผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส 39
รูปที่ 4.4 องค์ประกอบทางเฟสของกากของเสียที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 600-1100 องศาเซลเซียส 40
รูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาเคมีและน้ำหนักของกากของเสียเมื่อได้รับความร้อน 41
รูปที่ 5.1 สูตร Seger Formula และลักษณะของเคลือบทึบสีขาวสูตรมาตรฐาน 43
รูปที่ 5.2 แผนภาพ triaxial ของเคลือบที่มีการใช้กากของเสียทดแทนวัตถุดิบในเคลือบมาตรฐาน . 46
รูปที่ 5.3 ลักษณะของเคลือบมาตรฐาน STD เผาที่ 1250 °C และเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร A เผาที่ 1200 °C 48
รูปที่ 5.4 องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบสูตรมาตรฐาน STD และเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร A 50

หน้า

รูปที่ 5.5 ลักษณะผิวของเคลือบมาตรฐาน STD ที่ผ่านการทดสอบความทนทานต่อสารเคมี..... 52
รูปที่ 5.6 ลักษณะผิวของเคลือบสูตร A ที่ผ่านการทดสอบความทนทานต่อสารเคมี 52
รูปที่ 5.7 ลักษณะการแตกระแหงของเคลือบสูตร B* C* และ D* 54
รูปที่ 5.8 ลักษณะของเคลือบสูตร B* C* และ D* เปรียบเทียบกับเคลือบมาตรฐาน STD และเคลือบสูตร A 55
รูปที่ 5.9 การหดตัวของเคลือบภายในแบบสำหรับเตรียมชิ้นงานของเคลือบสูตร B* C* และ D* เปรียบเทียบกับเคลือบสูตร A 56
รูปที่ 5.10 แผนภาพ triaxial ของสูตรเคลือบที่มีการปรับสูตรเคลือบโดยการเพิ่มปริมาณกากของเสีย 57
รูปที่ 5.11 ลักษณะของเคลือบสูตร B และ C เปรียบเทียบกับเคลือบมาตรฐานและเคลือบสูตร A... 61
รูปที่ 5.12 องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบหลังเผาเมื่อมีการเพิ่มปริมาณกากของเสียในสูตรเคลือบ 62
รูปที่ 5.13 ลักษณะของเคลือบสูตร B ที่ผ่านการทดสอบความทนทานต่อสารเคมี 64
รูปที่ 5.14 แผนภาพ triaxial ของสูตรเคลือบที่มีการปรับสูตรเคลือบโดยการเพิ่มปริมาณวัตถุดิบกลุ่ม II ได้แก่ ซิลิกา และโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ 66
รูปที่ 5.15 การหลอมตัวของเคลือบสูตร a b และ c ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส..... 69
รูปที่ 5.16 ลักษณะของเคลือบสูตร a เปรียบเทียบกับเคลือบสูตรมาตรฐาน STD และเคลือบสูตร A 69
รูปที่ 5.17 องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบสูตร a หลังเผา เปรียบเทียบกับเคลือบสูตรมาตรฐาน STD และเคลือบสูตร A 71
รูปที่ 5.18 ลักษณะของเคลือบสูตร ก ที่ผ่านการทดสอบความทนทานต่อสารเคมี 72
รูปที่ 5.19 แผนภาพ triaxial ของสูตรเคลือบที่มีการปรับสูตรเคลือบโดยการเพิ่มปริมาณวัตถุดิบกลุ่ม III ได้แก่ โดโลไมต์ หินปูน ซิงก์ออกไซด์ และเซอร์โคเนียมซิลิเกต..... 74
รูปที่ 5.20 พฤติกรรมการหลอมตัวของเคลือบสูตร d e และ f 76
รูปที่ 6.1 ลักษณะของฟริตที่ได้หลังอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส 80
รูปที่ 6.2 ลักษณะของฟริตเมื่อทำการบดให้ละเอียด 81
รูปที่ 6.3 ลักษณะของเคลือบฟริตมาตรฐาน STD-Z เคลือบฟริต T และ W ที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ 1120 องศาเซลเซียส 83
รูปที่ 6.4 องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบฟริตมาตรฐาน STD-Z เคลือบฟริต T และ W..... 85
รูปที่ 6.5 ลักษณะของผิวเคลือบฟริตสูตร T15 ที่ผ่านการทดสอบความทนทานต่อสารเคมี..... 86

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันประชากรได้มีการขยายตัวอย่างเร็ว ทำให้ประเทศไทยมีความต้องการในการพัฒนาด้านเศรษฐกิจเป็นอย่างมาก ซึ่งส่งผลให้เกิดการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรม ภาคอุตสาหกรรมเหล่านี้ก็ต้องการวัตถุดิบสำหรับขั้นตอนของกระบวนการผลิต ทำให้มีการใช้ทรัพยากรที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ภาคอุตสาหกรรมยังก่อให้เกิดกากของเสียจำนวนมาก ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อสิ่งแวดล้อม คือ ทำให้เกิดมลพิษทางด้านสิ่งแวดล้อม ทั้งมลพิษทางดิน อากาศ และน้ำ[1] จากเหตุผลที่ได้กล่าวมานั้น งานวิจัยนี้จึงได้มีความมุ่งเน้นเรื่องการนำกลับมาใช้ใหม่ของกากของเสีย ซึ่งถือเป็นการช่วยลดสาเหตุของการเกิดมลพิษสิ่งแวดล้อม ลดการใช้วัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติ ลดพลังงานในการกำจัดกากของเสีย เป็นการใช้กากของเสียเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด และเพื่อเพิ่มมูลค่าของกากของเสียอีกด้วย

อุตสาหกรรมเซรามิกในประเทศไทยนั้น ส่วนใหญ่เป็นอุตสาหกรรมที่มีการลงทุนภายในประเทศ และมีความแตกต่างกันไปในด้านขนาดอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีในการผลิต โดยมีตั้งแต่อุตสาหกรรมในครัวเรือนที่มีขนาดเล็กไปจนถึงอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เช่น โรงงานผลิตกระเบื้องปูพื้น กระเบื้องบุผนัง และสุขภัณฑ์ เป็นต้น อุตสาหกรรมเซรามิกนี้มีการใช้วัตถุดิบในประเทศเป็นหลัก นอกจากนี้อุตสาหกรรมเซรามิกยังถือเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่รองรับอุตสาหกรรมอื่นๆ อีกด้วย[2] สำหรับกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกนั้นขั้นตอนที่สำคัญ คือ ขั้นตอนของการเตรียมเคลือบเซรามิก ทำให้ความต้องการวัตถุดิบที่นำมาใช้ทำเคลือบนั้นมีความต้องการเป็นอย่างมาก วัตถุดิบบางชนิดก็มีราคาสูง เคลือบเซรามิกเป็นวัสดุที่มีลักษณะเหมือนแก้ว ฉาบบางๆ บนผิวผลิตภัณฑ์เซรามิกอย่างต่อเนื่อง เกิดขึ้นจากการที่ส่วนผสมของสารประกอบซิลิเกตหลอมเหลว และยึดติดแน่นอยู่บนผิวผลิตภัณฑ์เซรามิก วัตถุประสงค์ของการเคลือบผลิตภัณฑ์ คือ เพื่อป้องกันการเกิดรอยบนผิว ป้องกันการซึมผ่านของของเหลว เพื่อให้สามารถทำความสะอาดผลิตภัณฑ์ได้ง่าย และเพื่อให้เกิดความสวยงาม[3]

ในกระบวนการผลิตพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ต้องมีการใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมจากสารประกอบไทเทเนียมเอทอกซีคลอไรด์ อะลูมิเนียมเอทอกซีคลอไรด์ และตัวทำละลายเฮกเซนเป็นสารตั้งต้น ซึ่งนอกจากจะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแล้ว ก็ยังก่อให้เกิดกากตะกอนของเสียที่มีสภาพเป็นกรดจำนวนหนึ่งอีกด้วย การปรับสภาพความเป็นกรดด่างด้วยน้ำและปูนขาว ทำให้กากของเสียมีหินปูนเจือปนอยู่ กากของเสียมีองค์ประกอบหลัก คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) อะลูมินา (Al_2O_3) และมีสารประกอบคลอไรด์อยู่ในปริมาณเล็กน้อย กากของเสียมีองค์ประกอบหลักคล้ายกับส่วนผสมของเคลือบทึบขาวที่ใช้กันทั่วไปในการผลิตเคลือบเซรา

มิก ดังนั้นหากมีการนำกากของเสียนี้มาใช้เป็นวัตถุดิบในส่วนผสมเคลือบได้ ก็จะทำให้ปริมาณของกากของเสียลดลง อีกทั้งเป็นการเพิ่มมูลค่า และเป็นการลดการใช้วัตถุดิบจากธรรมชาติอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกากของเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมาใช้เป็นส่วนผสมเคลือบเซรามิกและเคลือบฟริตในอุตสาหกรรมเซรามิก
2. เพื่อศึกษาวิธีการปรับปรุงกากของเสียที่ได้จากอุตสาหกรรมการผลิตพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงให้มีสมบัติใกล้เคียงกับวัตถุดิบทางการค้า ได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก
3. เพื่อเป็นการนำกากของเสียที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์ เป็นการเพิ่มมูลค่าของกากของเสีย และลดต้นทุนในการกำจัดกากของเสีย

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. เตรียมเคลือบทึบมาตรฐานที่มีการใช้วัตถุดิบทางการค้า และเคลือบที่มีการใช้กากของเสียทดแทนวัตถุดิบทางการค้า โดยมีการศึกษาสมบัติของกากของเสียเบื้องต้น ได้แก่ องค์ประกอบทางเคมี องค์ประกอบทางเฟส การเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาเมื่อได้รับความร้อน ความหนาแน่นของผงกาก และปริมาณของแข็งและการสูญเสียน้ำหนักหลังการอบและการเผา หลังจากนั้นทำการเตรียมกากให้มีความเหมาะสม และทำการปรับสูตรเคลือบเพื่อให้ได้เคลือบขาวทึบแสงที่มีความสวยงาม
2. เตรียมฟริตมาตรฐานที่มีการใช้วัตถุดิบทางการค้า และฟริตที่มีการใช้กากของเสียทดแทนวัตถุดิบทางการค้า ทำการศึกษาเปรียบเทียบ ปรับสูตรฟริต และเตรียมเคลือบฟริตที่ให้ลักษณะขาวทึบ
3. ศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพของเคลือบที่ได้จากการใช้กากของเสียเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ สี ลักษณะผิวเคลือบ องค์ประกอบทางเฟส อุณหภูมิในการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบ สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเนื้อดินและเคลือบ ความแข็งของผิวเคลือบ ความทนทานต่อสารเคมี และความทนทานต่อการขูดขีด

CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถทดแทนวัตถุดิบทางการค้าในเคลือบเซรามิกด้วยกากของเสียที่ได้จากการผลิตตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และพัฒนาสูตรเคลือบเซรามิก

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรม

2.1 กระบวนการผลิตและการเกิดกากของเสียที่ได้จากกระบวนการผลิตพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

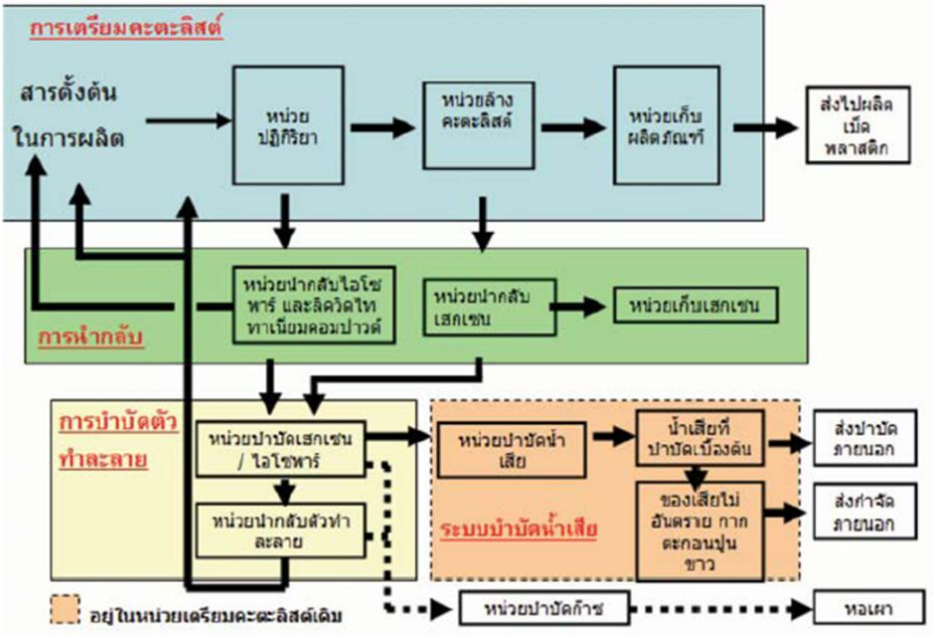
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High density polyethylene) หรือที่เรียกว่า HDPE เป็นพลาสติกที่มีความหนาแน่นสูง มีความเหนียวไม่แตกง่าย จุดหลอมเหลว คือ 135 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่น 0.95-0.97 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สมบัติโดยทั่วไปของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง คือ มีความยืดหยุ่นดี เหนียวมากที่อุณหภูมิต่ำ มีความทนทานต่อสารเคมีได้ดีมาก ทนต่อสภาวะอากาศได้ดีพอสมควรอากาศสามารถซึมผ่านได้ดี เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีมาก ผสมสีได้ง่าย ไม่มีกลิ่นและไม่มีรส เหมาะสำหรับผลิตถุงพลาสติกทั่วไป ถุงขยะ และถุงอุตสาหกรรม[4]

ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ เรียกว่า พอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาการรวมตัวของมอนอเมอร์ภายใต้สภาวะต่างๆ เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิ ความดัน เป็นต้น ทำให้เกิดพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ขึ้นมากมาย[5] โดยกระบวนการผลิตพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงนั้นจำเป็นต้องมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาหรือที่เรียกว่าคะตะลิสต์ (Catalyst) คือ Ziegler – Natta ในกระบวนการผลิต[6] แผนผังการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาดังรูปที่ 2.1 โดยกระบวนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวมีขั้นตอน[7] ดังนี้

- หน่วยเก็บสารตั้งต้น เป็นหน่วยที่เก็บสารเคมีที่ใช้เป็นสารตั้งต้น และจะถูกส่งไปเก็บในถังพักเพื่อเตรียมใช้เป็นวัตถุดิบ
- การเตรียมสารตั้งต้น เป็นการเตรียมสารให้ได้ปริมาณและความเข้มข้นตามที่ต้องการก่อนที่จะส่งสารตั้งต้นไปยังหน่วยผลิต ซึ่งเป็นระบบปิด สารเคมีตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการผลิต ได้แก่ (1) สารละลายเฮกเซน (2) สารละลายไอโซพาร์ (3) แอลกอฮอล์ (4) ลิควิดไทเทเนียมคอมปาว (5) สารประกอบลิควิดซิลิกา (6) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (7) สารประกอบอัลคิลไทเทเนียม และ (8) สารประกอบแมกนีเซียม
- หน่วยผลิตหลัก แบ่งออกเป็น 2 กระบวนการย่อย ได้แก่ (1) หน่วยทำปฏิกิริยาเคมี และ (2) หน่วยล้างคะตะลิสต์

    - หน่วยทำปฏิกิริยาเคมี เป็นหน่วยที่มีการเติมสารเคมีต่างๆ ที่เตรียมได้จากหน่วยเตรียมสารตั้งต้นภายใต้สภาวะควบคุมความดันและอุณหภูมิ ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีลักษณะเป็นตะกอนสีขาว ในขั้นตอนการทำปฏิกิริยานี้จะก่อให้เกิดกากของเสียทั้งที่เป็นของแข็งและของเหลว โดยกากของเสียที่เป็นของแข็งนั้น จะถูกส่งไปที่หอบำบัดไอโซพาร์ ก่อนนำไอโซพาร์กลับมาใช้ใหม่ ส่วนของเสียที่เป็นของเหลว ได้แก่ น้ำเสีย จะถูกบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสียต่อไป

- หน่วยล้างตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นหน่วยที่ทำความสะอาดตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จากการทำปฏิกิริยาเคมีด้วยการเติมสารละลายไอโซพาร์ ซึ่งสารละลายไอโซพาร์ทำหน้าที่ชะล้างส่วนที่ทำปฏิกิริยาไม่หมด จากนั้นจึงตามด้วยการล้างโดยการใช้เฮกเซนเพื่อให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำไปใช้ในกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงต่อไป ส่วนสารละลายไอโซพาร์และเฮกเซนจะถูกส่งไปหน่วยนำกลับและหน่วยบำบัด เพื่อนำมากลับมาใช้ใหม่



รูปที่ 2.1 กระบวนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง[7]

- หน่วยเก็บผลิตภัณฑ์ เป็นหน่วยที่ทำการเก็บตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ผ่านการล้างเรียบร้อยแล้วและพร้อมนำไปใช้ในกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง
- หน่วยนำกลับ สารละลายไอโซพาร์และเฮกเซนที่ผ่านการใช้งานนั้นจะมีสารที่เป็นมลทินเจือปนอยู่ สารละลายไอโซพาร์และเฮกเซนเหล่านี้จะถูกนำไปเก็บยังถังพัก แล้วจึงส่งมายังหน่วยนำกลับเพื่อทำให้สารละลายดังกล่าวมีความบริสุทธิ์ขึ้นด้วยการใช้หอกลั่น แล้วจึงส่งกลับไปยังหน่วยผลิตเพื่อใช้งานใหม่อีกครั้ง
- หน่วยบำบัด แบ่งออกได้เป็น 2 หน่วยคือ (1) หน่วยบำบัดไอโซพาร์และ (2) หน่วยบำบัดก๊าซ
    - หน่วยบำบัดไอโซพาร์ เป็นการทำให้สารประกอบไทเทเนียมที่เจือปนอยู่ในสารละลายไอโซพาร์หมดสภาพโดยการทำปฏิกิริยากับน้ำ จากนั้นจะดึงไอโซพาร์

ออกจากน้ำแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ ส่วนน้ำเสียที่เหลือจะถูกส่งไปยังหน่วยบำบัดน้ำเสียที่หน่วยเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาต่อไป

- หน่วยบำบัดก๊าซ เป็นหน่วยที่ทำการบำบัดก๊าซไนโตรเจนด้วยการฉีดพ่นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ก่อนปล่อยสู่บรรยากาศ

น้ำเสียที่เกิดจากการดึงเอาสิ่งเจือปนออกจากสารละลายมีฤทธิ์เป็นกรดเนื่องจากมีค่า pH ต่ำมาก จึงต้องมีการปรับ pH ให้มีความเป็นด่างมากขึ้นด้วยการเติมน้ำและหินปูน ($CaCO_3$) ทำให้เกิดเป็นตะกอนสีขาวข้นที่เรียกว่า lime mud ซึ่งเป็นกากของเสียที่มีลักษณะเป็นของแข็ง มีหินปูนเจือปนอยู่ จากกระบวนการการผลิตตัวเร่งปฏิกิริยาจะเห็นได้ว่ากากของเสียนั้นน่าจะออกไซด์ที่ตกค้างเจือปนมากับกากตะกอน ซึ่งได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) อะลูมินา (Al_2O_3) และมีสารประกอบคลอไรด์อยู่ในปริมาณเล็กน้อย

2.2 เคลือบเซรามิก

เคลือบคือ ชั้นแก้วบางๆ เกิดจากสารประกอบซิลิเกตซึ่งเมื่อถูกความร้อนแล้วเกิดการหลอมละลายเป็นเนื้อแก้ว และฉาบอยู่บนผิวของผลิตภัณฑ์หรือผิวของเนื้อดินปั้น (body) มีลักษณะโปร่งใส แข็งแกร่ง ทนทานต่อกรดและด่างได้เป็นอย่างดี จุดประสงค์ในการเคลือบ คือ เพื่อเป็นการตกแต่งผลิตภัณฑ์ให้มีความสวยงาม และทำให้ผลิตภัณฑ์มีความคงทน ความคงทนเป็นสมบัติซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะทนต่อการขูดขีด ความทนทานต่อกรดและด่าง และทำความสะอาดได้ง่าย[8,9,10,11]

วัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียมส่วนผสมของเคลือบนั้นสามารถแบ่งกลุ่มตามหน้าที่ของวัตถุดิบได้ดังนี้

- กลุ่มที่ทำให้เกิดโครงสร้างแก้วหรือโครงตาข่าย (Glass Former หรือ Network Former) แก้วเป็นวัสดุที่อสัณฐาน และมีโครงสร้างแบบไร้ระเบียบหรือมีระเบียบในช่วงสั้นเท่านั้น โดยออกไซด์ที่สามารถทำให้เกิดโครงสร้างแก้วได้ดีที่สุด คือ ออกไซด์ของธาตุที่มีขนาดเล็กและมีประจุสูง ได้แก่ ซิลิกา (SiO_2) ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่นำมาใช้ในเคลือบเพื่อทำให้เคลือบหลอมกลายเป็นเนื้อแก้ว ตัวอย่างวัตถุดิบดังกล่าว ได้แก่ ทราย ควอตซ์ หินฟันม้า เถ้าแกลบ เป็นต้น
- กลุ่มที่ปรับโครงสร้างแก้วหรือฟลักซ์ (Network modifier) เนื่องจากการอุณหภูมิในการหลอมตัวของสารกลุ่มที่ทำให้เกิดเนื้อแก้วนั้นสูงมาก และเมื่อหลอมแล้วของเหลวที่ได้จะมีความหนืดที่สูงเกินไป เราจึงมีการใส่วัตถุดิบกลุ่มนี้เพื่อทำหน้าที่ลดจุดสุกตัวของเคลือบและลดความหนืดของแก้ว วัตถุดิบกลุ่มนี้ ได้แก่ ขี้เถ้า (Ash) หินปูน (Lime) โดโลไมต์ (Dolomite) ทัลค์ (Talc) ซิงก์ออกไซด์ (ZnO) แบเรียมออกไซด์ (BaO) ฯลฯ
- กลุ่มที่ทำให้เกิดความเสถียร (Intermediate elements) ทำหน้าที่เป็นตัวปรับความหนืดทำให้เนื้อแก้วที่ถูกสร้างขึ้นมาไม่ไหลหลุดไปจากผิวผลิตภัณฑ์ เคลือบสามารถเกาะติดผิวผลิตภัณฑ์ได้ดี และช่วยเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนและเพิ่มความแข็งแกร่งให้กับเคลือบ วัตถุดิบกลุ่มนี้ ได้แก่ อะลูมินา (Al_2O_3) ซึ่งได้จากดิน หินฟันม้า ฯลฯ

- กลุ่มที่ทำให้เกิดลักษณะพิเศษ หรือตัวเติมอื่นๆ ได้แก่
    - ตัวทำให้เกิดความทึบแสง ใส่เพื่อทำให้เคลือบมีลักษณะทึบแสง ได้แก่ เซอร์คอน ($ZrSiO_4$) เซอร์โคเนีย (ZrO_2) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (rutile, TiO_2) และทินออกไซด์ (SnO_2)
    - ตัวที่ทำให้เกิดผลึก ได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO)
    - ตัวที่ให้สี ได้แก่ ออกไซด์ของธาตุทรานซิชัน เช่น คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ซึ่งให้สีฟ้าหรือสีเขียว เฟอร์ริกออกไซด์ให้สีเขียว
    - ตัวช่วยประสาน ใช้เติมเพื่อให้การจับตัวระหว่างเนื้อดินและเคลือบเกิดได้ดีและเพิ่มความต้านทานการขูดขีด ตัวอย่างตัวช่วยประสาน เช่น เบนโทไนท์ (bentonite) โซเดียมหรือโพแทสเซียมซิลิเกต (Sodium/Potassium silicate) และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxy methylcellulose)
    - ตัวช่วยกระจาย เช่น โซเดียมซิลิเกตหรือดิสเป็กซ์ (Dispex) และตัวช่วยจับตัว เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$)

2.2.1 การเตรียมเคลือบ

การเตรียมเคลือบนิยมใช้วิธีบดเปียก โดยนำส่วนผสมและน้ำใส่ลงไปในหม้อบดที่มีลูกบดอยู่ข้างใน น้ำเคลือบจำเป็นต้องการการบดที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ความละเอียดและการไหลตัวที่เหมาะสมกับการใช้งาน ดังนั้นการทดลองจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น ในการบดผสมนั้นมีปัจจัยที่ต้องคำนึงถึง ได้แก่ (1) ปริมาณของวัตถุดิบที่มีความแข็ง (2) ปริมาณและชนิดของดิน (3) ขนาดของหม้อบด (4) จำนวนรอบต่อนาทีของหม้อบด (5) ขนาดและปริมาณของลูกบด และ (6) ปริมาณน้ำที่ใช้ สิ่งเหล่านี้เป็นส่วนสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบด[11,12]

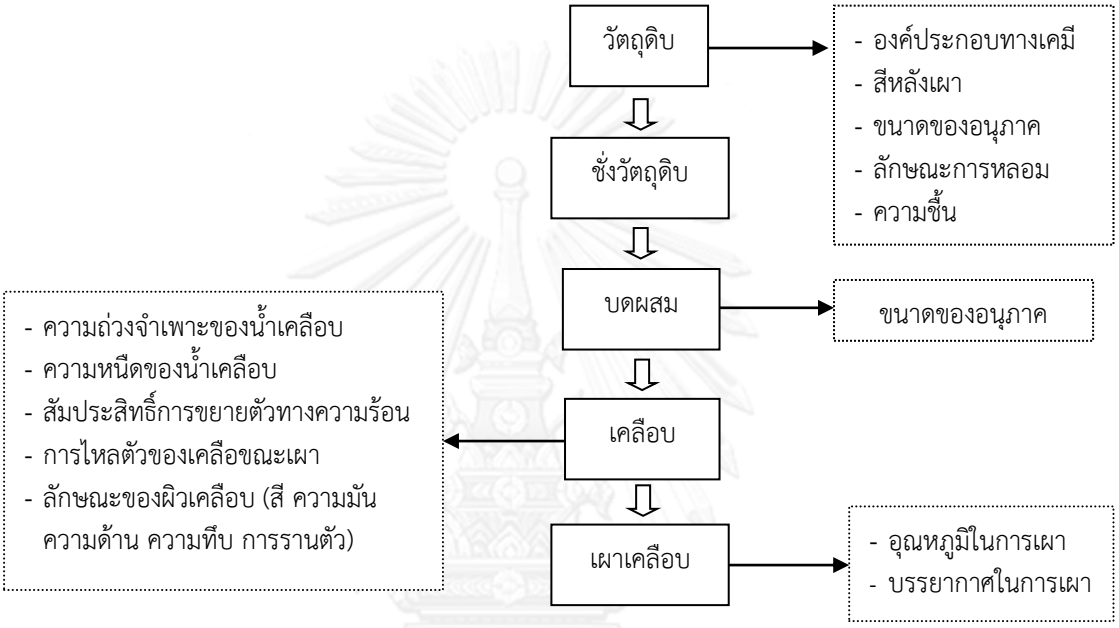
ความเร็วต่อรอบของหม้อบด (Speed of the mill) ทำให้การเคลื่อนตัวของลูกบดแตกต่างกัน ดังนี้

- Slow Speed : ลูกบดจะถูกเหวี่ยงให้เคลื่อนตัวขึ้นเพียงเล็กน้อย และตกลงมา
- Normal Speed : ลูกบดจะถูกเหวี่ยงให้เคลื่อนตัวไปมากขึ้น และจะตกลงมากระทบกัน
- Rapid Speed : ลูกบดจะถูกเหวี่ยงไปรอบๆ หม้อบด

* การบดจะมีประสิทธิภาพสูงเมื่อพื้นที่ผิวของลูกบดเกิดการกระทบกันมากขณะทำการบด

ขั้นตอนในการบดเพื่อให้การบดมีประสิทธิภาพและลดเวลาในการบด ควรบดวัตถุดิบที่มีความแข็งและหยาบก่อน ซึ่งวัตถุดิบเหล่านี้ ได้แก่ ฟริต (frit) และสีออกไซด์ (colouring oxide) เป็นต้น และเพื่อป้องกันการจับตัวกันควรเติมดินในส่วนผสมที่ทำการบดด้วย โดยมีการใช้น้ำประมาณ 10–30 % ของน้ำหนักวัตถุดิบในหม้อบด และเมื่อได้ความละเอียดตามต้องการแล้ว จึงใส่วัตถุดิบที่เหลือซึ่งมีความแข็งน้อยและสามารถบดให้ละเอียดได้ง่ายลงไป เวลาที่ใช้ในการบดก็มีความสำคัญ

เช่นกัน โดยต้องใช้เวลาในการบดนานเพื่อให้ได้น้ำเคลือบที่มีการบดอย่างสมบูรณ์ ในการบดนั้นไม่สามารถกำหนดปริมาณของน้ำที่ใช้ได้แน่นอน เนื่องจากขึ้นอยู่กับวัตถุดิบของส่วนผสมด้วย จึงต้องมีการทดลองบดก่อนในการเตรียมเคลือบแต่ละสูตร เมื่อเคลือบผ่านกระบวนการบดแล้ว หลังจากนั้นจะนำน้ำเคลือบที่ได้มาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 200 เมช เพื่อกรองวัตถุดิบส่วนที่บดไม่ละเอียดทิ้งไป ตัวอย่างขั้นตอนการเตรียมเคลือบและการทดสอบสมบัติของเคลือบ แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการเตรียมเคลือบและการทดสอบสมบัติของเคลือบ[11]

การควบคุมสภาพที่เหมาะสมของน้ำเคลือบทำได้โดยการควบคุมสมบัติของน้ำเคลือบได้แก่ (1) ความหนาแน่นหรือความถ่วงจำเพาะ ซึ่งบ่งบอกถึงปริมาณน้ำในเคลือบ มีผลต่อความหนืดและความหนาของเคลือบ โดยความหนาของเคลือบส่งผลต่อการเกิดตำหนิในเคลือบ และ (2) อัตราการไหลของน้ำเคลือบหรือความหนืด ซึ่งสัมพันธ์กับความหนาของเคลือบ วิธีการทดสอบความหนาของเคลือบสามารถทำได้โดยวัดอัตราการไหลของเคลือบ ด้วยเครื่อง Brookfield เป็นต้น หรือสามารถวัดได้ด้วยวิธีแบบง่าย คือ จับเวลาในการไหลตัวของน้ำเคลือบที่เราทราบปริมาตรแน่นอน หากน้ำเคลือบใช้เวลาในการไหลนานแสดงว่าน้ำเคลือบมีความหนืดสูง

สิ่งที่ควรคำนึงถึงในขั้นตอนการเตรียมเคลือบ คือ

1. เนื้อดินและเคลือบ ควรมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่ใกล้เคียงกัน มิฉะนั้นจะทำให้เกิดตำหนิในเคลือบ เช่น เกิดการรานตัว (Crazing) เคลือบไม่ติดบนเนื้อผลิตภัณฑ์ (Crawling) เคลือบเกิดการร่อนตามริมหรือตามขอบ (Shivering)

2. ควรทราบจุดสุกตัวของเนื้อดินก่อน เพื่อจะได้เลือกเคลือบที่เหมาะสม โดยเคลือบที่ใช้นั้นต้องมีอุณหภูมิการเผาไม่สูงกว่าจุดสุกตัวของเนื้อดิน

3. หากเนื้อดินที่เผาแล้วไม่ขาว แต่ต้องการให้ผลิตภัณฑ์มีสีขาวหรือไม่เห็นเนื้อผลิตภัณฑ์นั้น เคลือบที่ใช้ควรเป็นเคลือบทึบ ซึ่งสามารถปกปิดเนื้อของผลิตภัณฑ์ได้ดี

4. เนื้อดินอาจเติมตัวให้สีที่เกิดจากออกไซด์ (Coloring oxide) เพื่อให้เนื้อดินมีสี และเคลือบด้วยเคลือบใส

2.2.2 การเคลือบ

การเคลือบสามารถทำได้หลายวิธี การเลือกวิธีในการเคลือบนั้น ขึ้นอยู่กับลักษณะและขนาดของผลิตภัณฑ์ วิธีในการเคลือบ ได้แก่

วิธีการทาด้วยพู่กัน (Painting) ซึ่งเป็นวิธีที่เก่าแก่ที่สุด โดยยังมีการใช้วิธีนี้อยู่ในหมู่นักศิลปกรรมสมัยใหม่ ที่ต้องการลักษณะเฉพาะหรือเทคนิคพิเศษ ในการทาเคลือบนั้นควรทาไปทางไหนทางหนึ่งเท่านั้น และไม่ควรทาน้ำเคลือบซ้ำๆ กันหลายครั้ง เนื่องจากจะทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของเคลือบ พู่กันที่ใช้นั้นต้องเป็นพู่กันที่มีขนยาวนุ่ม สามารถอมน้ำได้มาก

วิธีการจุ่ม (Dipping) วิธีนี้นิยมใช้มาก จำเป็นต้องใช้น้ำเคลือบปริมาณมากพอที่จะสามารถจุ่มผลิตภัณฑ์ได้ทั้ง การจุ่มเหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่สามารถใช้มือจับได้ถนัด ต้องอาศัยความชำนาญในการเคลือบ เนื่องจากต้องมีการประมาณเวลาในการจุ่มเคลือบเพื่อให้ได้ความหนาที่เหมาะสม และต้องทราบถึงลักษณะของผลิตภัณฑ์ด้วย

วิธีการเทราด (Pouring) เป็นวิธีที่ใช้กับผลิตภัณฑ์กระเบื้อง โดยทำการวางกระเบื้องไว้บนถาด หลังจากนั้นจึงทำการเทน้ำเคลือบราดลงบนแผ่นกระเบื้อง และทำการตกแต่งขอบของกระเบื้องที่ได้ทีละแผ่น วิธีนี้ช้าและสิ้นเปลืองมาก ปัจจุบันได้มีการพัฒนาให้มีการวางแผ่นกระเบื้องลงบนสายพาน และปล่อยน้ำเคลือบให้ไหลผ่านแผ่นกระเบื้องนั้นๆ พร้อมกับมีเครื่องมืออัตโนมัติในการตกแต่งเช็ดถูขอบกระเบื้องทั้ง 4 ด้าน ในปัจจุบันวิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้ในการเคลือบสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตกระเบื้องมากที่สุด

วิธีการพ่น (Spraying) วิธีนี้เหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่ อุปกรณ์ที่ใช้ในการพ่นเคลือบได้แก่ ตัวพ่น (Spray gun) กระบอกใส่เคลือบ (Reservoir) ตู้พ่น (Spray booth) และที่วางของที่จะพ่น โดยจะทำการพ่นในตู้ที่มีพัดลมเพื่อให้ดูดละอองของเคลือบ และป้องกันการฟุ้งกระจายของเคลือบ หลักการ คือ ทำให้น้ำเคลือบพ่นออกมาเป็นฝอย และตกลงเกาะบนผิวของผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสำหรับการเคลือบด้วยวิธีนี้มีขนาดใหญ่และรูปร่างซับซ้อน ได้แก่ สุขภัณฑ์ อ่างล้างหน้า ฯลฯ

2.2.3 เคลือบสำหรับผลิตภัณฑ์เผาครั้งเดียว

การเผาผลิตภัณฑ์ครั้งเดียว (Once-firing) [11] มีข้อดี คือ ช่วยลดพลังงาน เนื่องจากไม่ต้องสูญเสียพลังงานที่ใช้ในการเผาดิบ และประหยัดแรงงานในการนำชิ้นงานเข้าและออกจากเตาเผา จะเห็นได้ว่าการเคลือบสำหรับผลิตภัณฑ์เผาครั้งเดียวนั้น ช่วยประหยัดทั้งพลังงานและแรงงาน โดย

เคลือบสำหรับผลิตภัณฑ์เผาครั้งเดียวนั้นมีการนำมาใช้สำหรับผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทกระเบื้อง แต่ก็ต้องมีข้อควรคำนึง ได้แก่

1) ชิ้นงานง่ายต่อการแตกหักเนื่องจากยังไม่ผ่านการเผา ทำให้การขนย้ายทำได้ยาก จึงต้องมีความระมัดระวังเป็นอย่างมาก
2) เคลือบที่ใช้สำหรับผลิตภัณฑ์เผาครั้งเดียวนั้น ต้องแน่ใจว่าเคลือบสามารถยึดติดได้ดีกับเนื้อดิน และมีการหดตัวที่ใกล้เคียงกัน โดยเคลือบสำหรับผลิตภัณฑ์เผาครั้งเดียวนั้นต้องมีปริมาณของดินในสูตรเคลือบมากกว่าเคลือบที่ใช้กับผลิตภัณฑ์เผา 2 ครั้ง
3) ผลิตภัณฑ์ที่เผาครั้งเดียวนั้น ผิวเคลือบมักมีตำหนิ เช่นเกิดเคลือบร่อน (Crawling) เกิดรูเข็ม (Pin hole) ฯลฯ

2.2.4 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการเผาเคลือบ

การเผาเคลือบจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งทางกายภาพและทางเคมี โดยการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพนั้น ได้แก่ การละลาย การเดือด การระเหยหรือระเหิด และการเปลี่ยนแปลงเฟส ส่วนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีนั้น ได้แก่ การเผาไหม้ของสาร การเกิดการสลายตัวของสารและเกิดเป็นสารใหม่ และการเกิดปฏิกิริยากลายเป็นสารใหม่ โดยการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิ[8,9,10] มีดังนี้

<u>ช่วงอุณหภูมิที่เคลือบเริ่มมีอุณหภูมิสูงขึ้น</u>

- จากอุณหภูมิห้อง - 600 องศาเซลเซียส : มีการปล่อยก๊าซเนื่องจากความชื้น การสลายตัวของสารช่วยประสานและสารอินทรีย์ในดิน โดยอุณหภูมิช่วงนี้เคลือบจะมีรูพรุนเพิ่มขึ้นประมาณ 30 -50 เปอร์เซ็นต์

- อุณหภูมิ 400 – 600 องศาเซลเซียส : เกิดปฏิกิริยาดูดความร้อนเนื่องจากกระบวนการขจัดกลุ่มไฮดรอกซิล (Dehydroxylation) ในดิน โดยมีการให้ไอน้ำออกมา ทำให้สารมีมวลลดลง ชั้นของเคลือบพรุนตัวมากขึ้น

- อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นต้นไป : สำหรับเคลือบฟริตที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส จะเป็นอุณหภูมิที่เคลือบเริ่มเยิ้มตัว แต่สำหรับเคลือบอื่นๆ การเกิดแก้วในเคลือบจะเกิดที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียสขึ้นไป เกิดการสลายตัวของสารประกอบคาร์บอเนต หรือซัลเฟต สารต่างๆ มีการละลาย เคลือบหลอมและหดตัว เคลือบเริ่มมีการเคลื่อนที่เพื่อปกปิดผิวของเนื้อดินและให้ผิวที่เรียบ รูพรุนในเคลือบเล็กลง ก๊าซต่างๆ ที่เกิดในเนื้อดินและเคลือบยังสามารถหลุดหนีออกไปได้ แต่ถ้าหากเคลือบมีความหนืดสูงนั้นกระบวนการนี้จะเกิดได้ช้า ทำให้มีฟองก๊าซหลงเหลืออยู่ในเคลือบหลังจากที่เคลือบนั้นเย็นตัวลง ส่งผลให้ความทึบแสงของเคลือบลดลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

<u>ช่วงอุณหภูมิที่ปล่อยให้เคลือบเย็นตัวลง</u>

- อุณหภูมิเผาเคลือบ – 600 องศาเซลเซียส : อุณหภูมิของเคลือบลดลงอย่างรวดเร็ว แต่หากกระบวนการในช่วงนี้เกิดขึ้นช้า อาจทำให้เกิดการเกิดผลึกในเคลือบได้ เคลือบมีการหดตัว แต่ยังเกิดความเค้นขึ้นในเคลือบ เนื่องจากการหดตัวระหว่างเนื้อดินและเคลือบไม่เท่ากัน (การเกิดความเค้นในเคลือบมากนั้นอาจทำให้เคลือบเกิดการเสียหาย โดยเคลือบมีความต้านทานต่อแรงอัดสูงและมีความต้านทานต่อแรงดึงต่ำ ส่งผลให้เกิดการรานตัวของเคลือบ)
- 1000 – 800 องศาเซลเซียส : หากต้องการให้เคลือบมีผลึก ควรลดอุณหภูมิช้าๆ ในช่วงนี้
- 600 องศาเซลเซียส – อุณหภูมิห้อง : เคลือบเกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ความหนืดของเคลือบเพิ่มขึ้นอย่างมาก เกิดความเค้นในเคลือบ

2.3 เคลือบฟริต

ฟริต คือ แก้วหรือเคลือบเหมือนแก้ว เป็นการเตรียมส่วนผสมของวัตถุดิบและทำการหลอมก่อน หลังจากนั้นจึงนำฟริตที่ได้ไปเป็นองค์ประกอบในการเตรียมเคลือบฟริต กรรมวิธีการเตรียมเคลือบโดยใช้ฟริตเป็นองค์ประกอบมีข้อได้เปรียบเคลือบที่เตรียมจากวัตถุดิบหลายประการ[9] ดังนี้

1. วัตถุดิบที่ละลายน้ำ เช่น อัลคาไลน์ คาร์บอเนต ไนเทรต บอเรต อื่นๆ ปกติจะไม่สามารถผสมลงในน้ำเคลือบได้ แต่ถ้านำวัตถุดิบเหล่านี้มาหลอมรวมกับวัตถุดิบอื่นๆ เพื่อทำให้ได้เป็นฟริตซึ่งไม่ละลายน้ำก่อน ก็จะทำให้สามารถใช้ฟริตที่ได้นี้ผสมลงในน้ำเคลือบได้

2. วัตถุดิบที่มีความเฉื่อยต่อปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำ เช่น สารประกอบของแบเรียมจะกลายเป็นตัวลดจุดหลอมตัวอย่างรุนแรง เมื่อนำมาหลอมรวมเป็นฟริต ความสามารถในการเลือกใช้ทั้งปริมาณและชนิดของวัตถุดิบที่เป็นตัวลดจุดหลอมตัว จะช่วยทำให้เลือกผลิตเคลือบที่มีจุดสุกตัวและมีสีต่างๆ อย่างกว้างขวาง

3. วัตถุดิบที่เป็นส่วนผสมของเคลือบที่เป็นพิษ สามารถทำให้พิษหมดไปได้เมื่อหลอมเป็นฟริตด้วยกรรมวิธีที่เหมาะสม

4. ในน้ำเคลือบจะมีฟริตมากที่สุด น้ำเคลือบที่มีฟริตจะใช้ปริมาณน้อยกว่าน้ำเคลือบที่เตรียมจากวัตถุดิบที่เคลือบผลิตภัณฑ์ปริมาณเท่าๆ กัน น้ำเคลือบฟริตมีสมบัติทางเคมีที่ไม่ว่องไว เพราะว่าการหลอมฟริตได้ทำให้เกิดการแตกตัวและเกิดปฏิกิริยามาแล้วอย่างสมบูรณ์ ดังนั้นจะไม่ทำลายเนื้อผลิตภัณฑ์หรือแม้แต่ลวดลายที่ตกแต่งบนผลิตภัณฑ์ก่อนทำการชุบเคลือบ

5. การทำฟริตจะทำให้ได้ความเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นจึงป้องกันการเกิดการแยกตัวของวัตถุดิบในน้ำเคลือบ เนื่องจากมีความหนาแน่น ขนาดและรูปร่างหรือความแข็งแตกต่างกันไป ดังนั้นฟริตจึงช่วยให้ผงสีเซรามิกกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และช่วยป้องกันการเกิดจุดสีที่ต่างไป และนอกจากนี้ยังเป็นไปได้ที่จะได้เคลือบที่มีสีสุกใสมากขึ้น

นอกจากนี้เคลือบฟริตที่ได้ยังดีกว่าเคลือบเซรามิก คือ เคลือบสุกตัวได้ดีมากกว่า เนื้อเคลือบมีความสม่ำเสมอมากกว่า โอกาสเกิดพิษจากสารตะกั่วน้อยกว่า โครงสร้างของเคลือบสม่ำเสมอมากกว่า และโอกาสในการเกิดตำหนิในเคลือบน้อยกว่า

2.4 การทดสอบสมบัติของเคลือบ

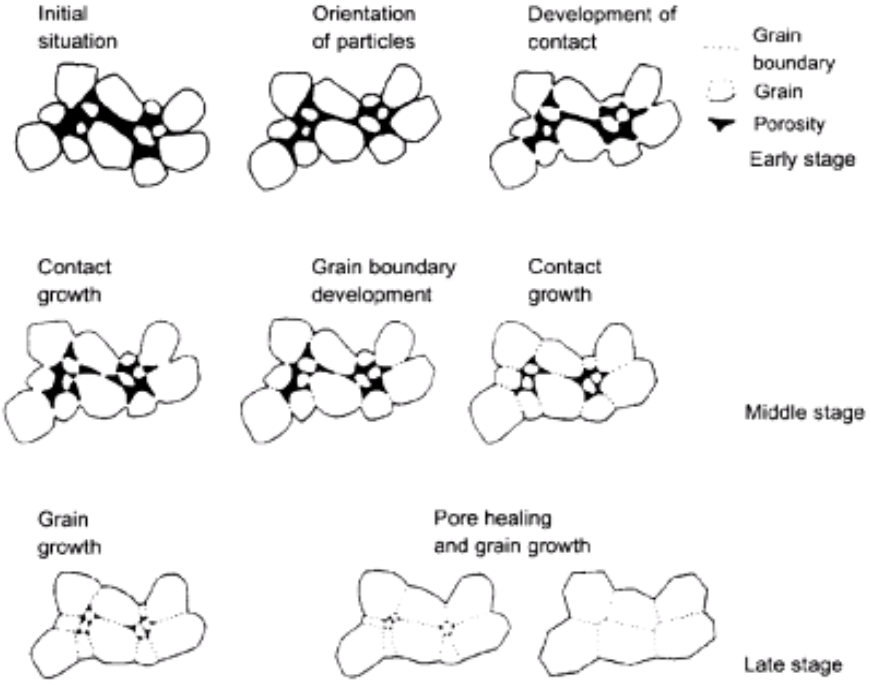
การทดสอบสมบัติของเคลือบ เพื่อต้องการให้เคลือบที่ได้นั้นมีสมบัติและลักษณะที่สม่ำเสมอ เช่น สี ความสุกตัว ความมันหรือด้าน ความทึบหรือใสของเคลือบ การควบคุมและการทดสอบเคลือบในขั้นตอนต่างๆ ของการผลิตมีความจำเป็นอย่างมาก

2.4.1 พฤติกรรมการหลอมตัว (Melting behaviour)

พฤติกรรมการหลอมตัวของเคลือบมีความสำคัญอย่างมากต่อกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิก[13,14] พฤติกรรมการหลอมตัวเป็นการวิเคราะห์การเสียรูปหลังเผา ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการใช้วัตถุดิบในการช่วยหลอม และเพิ่มการไหลตัวของเคลือบ และเป็นการคาดคะเนอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาเคลือบ ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อพฤติกรรมการหลอมตัวของเคลือบ ได้แก่ องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ สัดส่วนในการผสมวัตถุดิบ ขนาดของอนุภาค และอุณหภูมิในการเผา[15] พฤติกรรมการหลอมตัวนั้นเกี่ยวข้องกับกระบวนการที่เรียกว่ากระบวนการเผาผนึก ซึ่งเป็นกระบวนการทางความร้อนที่ทำให้อนุภาคของชิ้นงานที่มีความพรุนตัวมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นหรือเป็นการกำจัดความพรุนตัวของเนื้อวัสดุดังแสดงในรูปที่ 2.3 ที่อุณหภูมิปกติการขึ้นรูปชิ้นงานนั้นอนุภาคของวัสดุจะถูกอัดตัวกันและมีรูพรุนแทรกอยู่ โดยในช่วงแรกเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอนุภาคของวัสดุจะเริ่มเกิดการหลอมเชื่อมติดกันเรียกว่าคอคอด (Necking) ขนาดของอนุภาคลดลงแต่รูปร่างไม่เปลี่ยนแปลง ต่อมาอนุภาคจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่และเคลื่อนใกล้กันมากขึ้นเนื่องจาก viscous flow นำไปสู่การเพิ่มความหนาแน่น (Densification) เกิดเกรน (Grain) และขอบเกรน (Grain boundary) รูพรุนในโครงสร้างกลายเป็นรูพรุนปิด ซึ่งในขั้นตอนนี้ชิ้นงานจะเกิดการหดตัวจากเดิม และในขั้นตอนสุดท้ายรูพรุนจะถูกกำจัดออกจากโครงสร้าง อนุภาคเกิดการเชื่อมต่อกันอย่างสมบูรณ์และเกรนใหม่มีขนาดใหญ่ขึ้น (Grain growth) สำหรับชิ้นงานที่เป็นแก้ว ฟริต หรือเคลือบนั้น ปัจจัยที่ช่วยส่งเสริมกระบวนการเผาผนึก คือ ระดับพลังงานอิสระที่พื้นผิวและแรงตึงผิวของเฟสเนื้อแก้วที่เกิดจากออกไซด์ที่มีหน้าที่ลดจุดหลอมตัว (Flux) ทำให้ชิ้นงานบิดเบี้ยวและเสียรูปทรงจนกว่าขั้นตอนการเพิ่มความหนาแน่นจะสิ้นสุด วัสดุที่มีเนื้อแก้วเป็นองค์ประกอบจะมีการเกิดเฟสของเหลวเนื้อแก้ว (Liquid glassy phase) ทำให้ชิ้นงานมีการเสียรูปทรงอย่างชัดเจน โดยการตรวจสอบอุณหภูมิที่ทำให้วัสดุเริ่มเกิดเนื้อแก้วนั้นสามารถพิจารณาได้จากรูปร่างของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไป 5 เปอร์เซ็นต์ จากรูปร่างตั้งต้นซึ่งมีการกำหนดให้เป็น 100 เปอร์เซ็นต์ อัตราในการเผาผนึกจะถูกควบคุมโดยความหนืดของเฟสของเหลวเนื้อแก้วเป็นหลัก

2.4.2 อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะ (Characteristic temperatures)

อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะเป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปทรงและขนาดของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง heating microscope[17] ตามมาตรฐานเยอรมนี DIN51730 โดยชิ้นงานจะถูกเตรียมด้วยการอัดขึ้นรูปผงเคลือบให้มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตรและมีความสูง 3 มิลลิเมตรและวางลงบนแผ่นรองชิ้นงาน หลังจากนั้นนำเข้าเครื่อง heating microscope โดยเครื่องมีการให้ความร้อนเพื่อให้เคลือบเกิดการเปลี่ยนแปลง วิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เป็นหลัก โปรแกรมทำหน้าที่วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ได้แก่ ความกว้าง ความสูง และมุมสัมผัสของชิ้นงานที่อุณหภูมิและเวลาการเผาต่างๆ ซึ่งบ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของชิ้นงานระหว่างการเผาได้ จากภาพที่กล้องทำการบันทึกไว้นั้นสามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงรูปทรงเฉพาะ (Characteristic shape) ของเคลือบได้ [16,17]



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปจากการเผาผนึก[16]

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างและรูปทรงของชิ้นงานที่บันทึกจากกล้องจุลทรรศน์สอดคล้องกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นและสามารถระบุอุณหภูมิที่เกี่ยวข้องแสดงดังรูปที่ 2.4 และ รูปที่ 2.5 ได้แก่

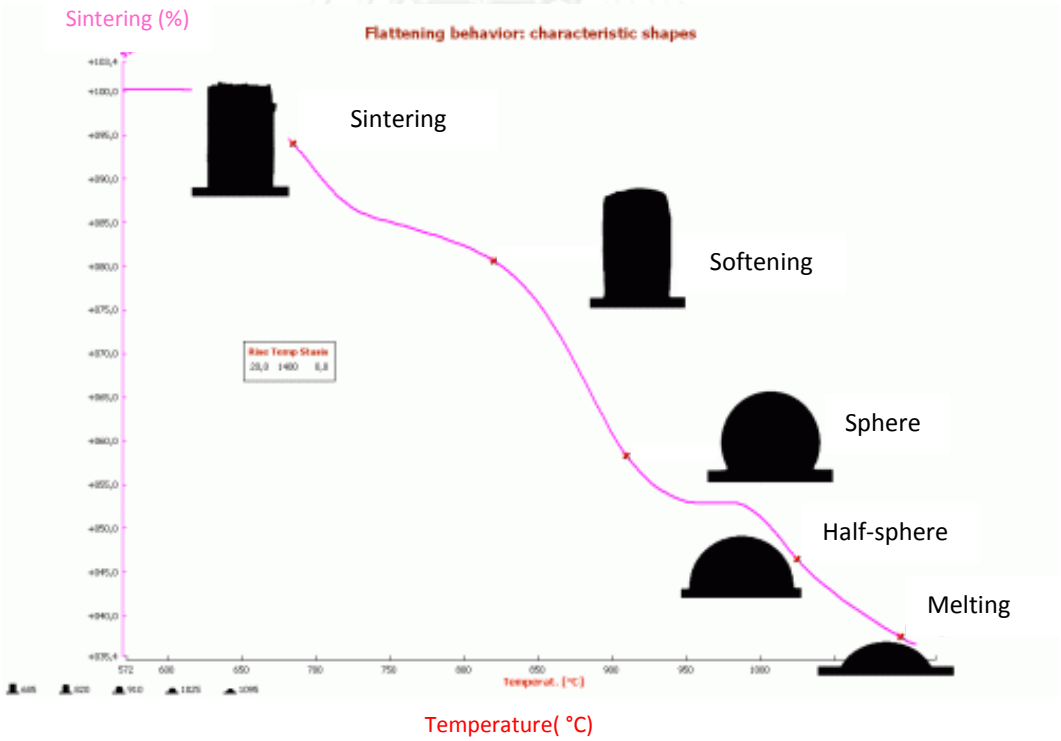
(1) อุณหภูมิการเผาผนึก (Sintering temperature) เป็นอุณหภูมิที่เคลือบเริ่มมีการหดตัว

(2) อุณหภูมิการอ่อนยวบ (Softening temperature หรือ Rounding temperature) ซึ่งเป็นจุดอุณหภูมิที่เคลือบเริ่มมีการหลอมตัว เนื่องจากความตึงผิวของเฟสของเหลว มุมของชิ้นงานเริ่มโค้งมนมากขึ้น

(3) อุณหภูมิที่ชิ้นงานเริ่มเป็นทรงกลม (Sphere temperature) เป็นอุณหภูมิที่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเคลือบจะเริ่มมีความเป็นแก้วมากขึ้น และมีการเปลี่ยนรูปทรงจากเดิมเป็นทรงลูกเต๋าไปเป็นลูกทรงกลมเนื่องจากชิ้นงานมีแรงตึงผิวสูงขึ้น แต่ชิ้นงานยังมีความสูงเท่าเดิม

(4) อุณหภูมิที่ชิ้นงานกลายเป็นครึ่งวงกลม (Half-sphere temperature) คือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอีก เคลือบเริ่มหลอมตัวมากขึ้นจนลูกทรงกลมเริ่มเกิดการแผ่เป็นรูปครึ่งทรงกลม ความสูงของชิ้นงานลดลงเหลือเพียง 1/2 เท่าของความสูงตั้งต้นและมีมุมสัมผัสเท่ากับ 90 องศา

(5) อุณหภูมิในการหลอมละลาย (Melting temperature) เมื่อเคลือบได้รับความร้อนจนถึงจุดหลอมเหลวก็จะเริ่มไหลตัวจนกระทั่งแบนราบไปกับแผ่นรอง ความสูงของชิ้นงานลดลงเหลือเพียง 1/3 เท่าของความสูงตั้งต้น ชิ้นงานมีการหลอมตัวอย่างสมบูรณ์ ซึ่งเป็นจุดสุดท้ายที่เครื่องทำการบันทึก



รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของชิ้นงานตามอุณหภูมิที่บันทึกได้จากกล้อง heating microscope

Sintering	Rounding	Sphere	Half-sphere	Melting
804°C 94.89% 72°	892°C 81.82% 112°	1086°C 53.98% 65°	1162°C 42.33% 100°	1242°C 32.95% 117°

รูปที่ 2.5 ตัวอย่างลักษณะการบันทึกรูปทรงของชิ้นงานและอุณหภูมิที่ได้จากการวิเคราะห์จากเครื่อง heating microscope[14]

2.4.3 สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Coefficient of thermal expansion)

สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบ คือ ค่าความแตกต่างของความยาวหรือปริมาตรของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป 1 องศาเซลเซียส เมื่อเทียบกับความยาวหรือปริมาตรเริ่มต้น โดยสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเครื่องไดลาโตมิเตอร์ (Dilatometer)[18] การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบและเนื้อดินมีความสำคัญมาก โดยเคลือบและเนื้อดินนั้นควรมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากหากเคลือบมีการขยายตัวทางความร้อนต่ำกว่าเนื้อดินนั้น เคลือบจะอยู่ในสภาพแรงอัด (Compression) สูงเกินไป ซึ่งส่งผลให้เกิดการกะเทาะออกของเคลือบ หรือที่เรียกว่าเคลือบร่อน (Peeling) แต่หากเคลือบนั้นมีการขยายตัวทางความร้อนสูงกว่าเนื้อดิน เคลือบจะอยู่ในสภาพแรงดึง (Tension) ซึ่งจะส่งผลให้เคลือบอาจเกิดการรานได้ในอนาคต ด้วยเหตุผลที่ได้กล่าวมานี้จึงควรมีการปรับให้เคลือบและเนื้อดินมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่เหมาะสมกัน โดยทั่วไปเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีผิวเคลือบที่สวยงามนั้น จะมีการปรับให้เคลือบมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่ต่ำกว่าเคลือบเล็กน้อย เพื่อให้เคลือบอยู่ในสภาพแรงอัด เนื่องจากมีความแข็งแรงสูงกว่า และช่วยลดปัญหาที่เกิดจากการขยายตัวของเนื้อดินเมื่อมีการดูดความชื้นย้อนกลับได้

2.4.4 ความต้านทานต่อสารเคมี (Chemical resistance)

วัสดุเซรามิก เช่น วัสดุเซรามิกแบบดั้งเดิม เป็นวัสดุประเภทออกไซด์ และไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับออกซิเจนในอากาศเพราะเป็นออกไซด์อยู่แล้ว วัสดุเซรามิกสามารถทนทานต่อความชื้นและสภาพอากาศต่างๆ ทนทานต่อกรด เกลือ และด่างได้เกือบทุกชนิดได้ดีกว่าวัสดุโลหะและพอลิเมอร์ ระดับของการกัดกร่อนของสารเคมีขึ้นอยู่กับสมบัติของพื้นผิว และความแข็งแรงของโครงสร้างแก้ว รวมทั้งความเข้มข้นของสารเคมี เวลา และอุณหภูมิ

สำหรับวิธีการทดสอบความทนทานต่อสารเคมีของเคลือบสามารถทำได้ตามมาตรฐาน มอก. 2398 เล่ม 13-2553[19] มีวิธีการทดสอบดังนี้ ทำการวางวัสดุยารอยต่อ เช่น ดินน้ำมัน ที่ขอบกระบอกแก้ว หลังจากนั้นคว่ำกระบอกแก้วลงบนผิวเคลือบ และทำการกดวัสดุยารอยต่อรอบๆ

กระบอกแก้วให้แน่น เทสารละลายทดสอบ ได้แก่ สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่มีความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่มีความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ โดยให้ระดับความสูงของสารละลาย 20 ± 1 มิลลิเมตร ทำการแช่ชุดทดสอบเป็นเวลา 4 วัน โดยทำการเขย่าชุดทดสอบเบาๆ วันละ 1 ครั้ง มีการควบคุมความสูงของสารละลายให้คงที่ เปลี่ยนสารละลายใหม่ทุก 2 วัน หลังจากนั้นอีก 2 วัน ให้ทำการนำกระบอกแก้วออก และทำความสะอาดผิวเคลือบด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสมเพื่อล้างวัสดุยารอยต่อ หลังจากนั้นจึงทำการจำแนกระดับความทนทานต่อสารเคมี

<u>การจำแนกระดับความทนทานต่อสารเคมี</u>

(1) ทั่วไป

ทำให้ผิวชิ้นทดสอบแห้งก่อนทำการทดสอบด้วยดินสอ ใช้ดินสอขีดเส้น 2-3 เส้น บนผิวเคลือบบริเวณที่ไม่ถูกทดสอบ แล้วเช็ดรอยดินสอด้วยผ้าเปียก ถ้าไม่สามารถเช็ดรอยดินสอได้ แสดงว่าไม่สามารถจำแนกตามรูปที่ 2.6 ได้ ให้รายงานว่าไม่สามารถจำแนกระดับแบบปกติได้ และต้องใช้วิธีการจำแนกระดับตามข้อ (3)

(2) การจำแนกแบบปกติ

สำหรับการะเบื้องที่ผ่านการทดสอบด้วยดินสอ ให้ทำการทดสอบต่อตาม ข้อ 2.1 ข้อ 2.2 และข้อ 2.3 แล้วจำแนกระดับความทนทานสารเคมีตามรูปที่ 2.6

<u>การวิเคราะห์ระดับความทนทานต่อสารเคมี</u>

วิเคราะห์ผิวหน้าของชิ้นทดสอบที่ระยะห่าง 25 เซนติเมตร ในแสงธรรมชาติหรือแสงจากหลอดไฟที่ความสว่างประมาณ 30 ลักซ์ หลีกเลี่ยงแสงแดดโดยตรง ให้สังเกตความแตกต่างเปรียบเทียบกับผิวหน้าที่ไม่ถูกทดสอบ เช่นการสะท้อนแสงและความมันเงาที่เปลี่ยนไป ถ้าไม่พบความแตกต่างให้ทำการทดสอบด้วยดินสอตามข้อ 2.1 แต่ถ้าพบความแตกต่างให้ทำการทดสอบการสะท้อนแสงตามข้อ 2.2

2.1 การทดสอบด้วยดินสอ

ใช้ดินสอ HB ขีดเส้น 2-3 เส้น บนผิวเคลือบบริเวณที่ถูกทดสอบและบริเวณที่ไม่ถูกทดสอบ แล้วเช็ดรอยขีดด้วยผ้าเปียก ถ้าสามารถเช็ดรอยดินสอออกจากผิวเคลือบบริเวณที่ถูกทดสอบได้ จัดเป็น A แต่ถ้าไม่สามารถเช็ดรอยดินสอได้ จัดเป็นระดับ B

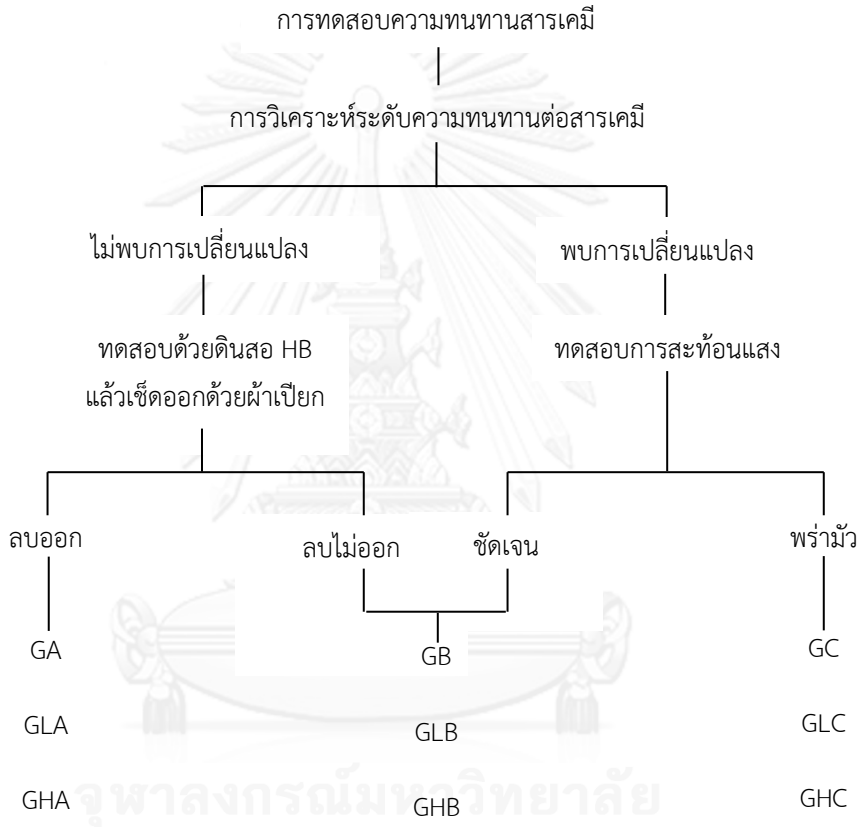
2.2 การทดสอบการสะท้อนแสง

ถือกระเบื้องให้รูปของหลอดไฟสะท้อนลงบนผิวหน้าที่ไม่ถูกทดสอบ โดยมุมตกกระทบของแสงประมาณ 45 องศา ระยะห่างระหว่างกระเบื้องและหลอดไฟ 350 ± 100 มิลลิเมตร พิจารณาความคมชัดของการสะท้อนแสงโดยไม่ดูความสว่างของผิวกระเบื้อง ตำแหน่งของกระเบื้องต้องให้รูปหลอดไฟตกลงบนผิวหน้าทั้งส่วนที่ถูกทดสอบและไม่ถูกทดสอบพร้อมกัน แล้วพิจารณาความคมชัดในส่วนของกระเบื้องที่ถูกทดสอบ ถ้าการสะท้อนแสงชัดเจนเหมือนเดิม จัดเป็นระดับ B ถ้าการสะท้อนแสงพร่ามัว จัดเป็นระดับ C

(3) การจำแนกโดยการวิเคราะห์แบบอื่น

กระเบื้องทดสอบที่ไม่ผ่านการทดสอบด้วยดินสอ ซึ่งรายงานว่าไม่สามารถใช้การจำแนกปกติได้ ให้จำแนกระดับความทนสารเคมี ดังนี้

- ระดับ GLA(V) : ไม่พบการเปลี่ยนแปลง
- ระดับ GLB(V) : พบการเปลี่ยนแปลงที่ผิวหน้าอย่างชัดเจน
- ระดับ GLC(V) : ผิวเคลือบบางส่วนหรือทั้งหมดถูกทำลาย



* หมายเหตุ: G หมายถึง เคลือบเซรามิก (glaze)

รูปที่ 2.6 การจำแนกระดับความทนทานสารเคมีของเคลือบเซรามิก[19]

2.4.5 ความต้านทานต่อการขูดขีด (Abrasion resistance)

ความทนทานต่อการขูดขีดของเคลือบเซรามิกบนผิวกระเบื้องประยุกต์มาจากการวัดความทนทานต่อการขัดสีของสารเคลือบผิวบนพื้นผิวระนาบ สำหรับการทดสอบการปกปิดผิวด้วยสี น้ำยาเคลือบผิว และสารเคลือบผิวที่ประกอบด้วยสารเคมีอินทรีย์ ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 968-93 [20] ใช้วิธีการทดสอบแบบ sand falling ทำได้โดยการนำแผ่นกระเบื้องเคลือบวางตั้งทำมุม 45 องศากับพื้น และทำการปล่อยทรายซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) ที่มีขนาดอนุภาค 80 เมช ให้ไหลลง

มากระแทกกับตัวอย่าง โดยมีการกำหนดปริมาตรของทรายที่ใช้ในการทดสอบแต่ละครั้งประมาณ 2000 ± 10 มิลลิลิตร อัตราการไหลของทรายอยู่ในช่วง 21 -23.5 วินาที ตัวอย่างกระเบื้องเคลือบจะถูกชั่งน้ำหนักก่อนและหลังทำการทดสอบเพื่อดูน้ำหนักที่หายไป การวิเคราะห์ความต้านทานต่อการขูดขีดของเคลือบสามารถรู้ได้จากน้ำหนักของเคลือบที่หายไป หากเคลือบมีน้ำหนักที่หายไปหลังทำการทดสอบในปริมาณน้อย แสดงว่าเคลือบสามารถทนทานต่อการขูดขีดได้ดี

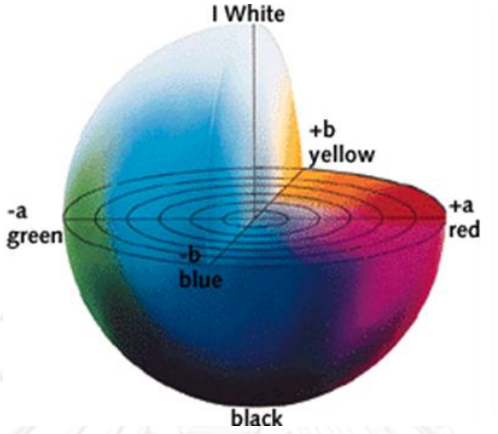
รูปที่ 2.7 เครื่องทดสอบความทนทานต่อการขัดสี ตามมาตรฐาน ASTM D 968-93 [21]

2.4.6 สี (Colour)

สีเป็นสมบัติทางกายภาพที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า แต่สำหรับสีของเคลือบเซรามิกนั้นสามารถทำการวัดค่าสีได้ด้วยเครื่อง spectrophotometer เป็นการวัดค่าสีในช่วงความยาวคลื่น visible คือช่วงสเปคตรัมตั้งแต่ 380 – 750 นาโนเมตร ส่วนประกอบสำคัญของเครื่องวัดสีคือแหล่งกำเนิดแสงที่ไส้หลอดทำจากทังสเตน และมีการทำให้กลายเป็นลำสเปคตรัมด้วยปริซึม และควบคุมการสะท้อนแสงกลับที่ความยาวคลื่นต่างๆ ด้วยสลิต (slit) จากนั้นจึงวัดและคำนวณค่าแสงที่สะท้อนกลับจากผิวชิ้นงานที่ทำการทดสอบ โดยค่าที่ได้ออกมาในรูปของค่า L a* และ b* ดังรูปที่ 2.8 และไม่สามารถระบุถึงลักษณะของพื้นผิว เช่น ขนาด ความเงามัน หรือความขรุขระได้

สำหรับค่า L a* และ b* นั้น แกนตั้ง L เรียกว่าแกนความขาว (Whiteness) เป็นแกนที่บอกความขาว เทา และดำโดยไม่พิจารณาถึงค่าสี (hue) แกนจะมีค่าตั้งแต่ 0 – 100 โดยที่ ค่า 0 แสดงถึงค่าความดำ และค่า 100 แสดงถึงค่าความขาว ส่วนแกน a* และ b* เป็นแกนที่บ่งบอกค่าสีตามพิกัดที่นอกเหนือไปจากความสว่าง เรียกว่าค่าอิ่มสี (Chroma หรือ Saturation) ปลายของแกน a

แบ่งเป็น –a และ +a โดย –a บ่งบอกถึงความเขียว และ +a บ่งบอกถึงความแดง และแกน b ก็แบ่งออกเป็น –b และ +b เช่นกัน โดย –b บ่งบอกถึงค่าความเป็นสีน้ำเงิน และ +b บ่งบอกถึงค่าความเหลือง



รูปที่ 2.8 จักรวาลสีและการแบ่งสีของแกนทั้งสาม[22]

2.5 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)

สารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นออกไซด์ที่มีสมบัติคล้ายกับซิลิกา (SiO_2) คือมีฤทธิ์เป็นกรดในปฏิกิริยาทางเคมีที่อุณหภูมิสูง ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อยู่ในธรรมชาตินั้นอยู่ในรูปของอะนาเทส (Anatase) และรูไทล์ (Rutile) รูไทล์เป็นเฟสที่เสถียรและมีค่าดัชนีการหักเหของแสงเท่ากับ 2.76 ซึ่งสูงกว่าอะนาเทสที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงเท่ากับ 2.52 อะนาเทสดูดกลืนสีม่วงได้มากกว่าสีแดง และไม่เสถียรที่อุณหภูมิสูงกว่า 900 องศาเซลเซียส โดยจะกลายเป็นรูไทล์ที่อุณหภูมิสูง ไทเทเนียมไดออกไซด์มีการใช้อย่างกว้างขวางเพื่อเป็นวัตถุดิบสำหรับเคลือบพอร์ซเลน แต่ไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่ได้ทำให้เกิดเคลือบที่มีสีขาว โดยสีเคลือบที่ได้จะมีสีตั้งแต่สีฟ้าไปจนถึงสีเหลืองทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของรูไทล์ต่ออะนาเทสในการเผาเคลือบ สีเหลืองในเคลือบมีความสัมพันธ์กับอนุภาครูไทล์ขนาดใหญ่ ในขณะที่สีฟ้าในเคลือบเกี่ยวเนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กของอะนาเทส ดังนั้นการใส่ไทเทเนียมไดออกไซด์ลงไปในเคลือบจะช่วยให้สีในเคลือบเปลี่ยนไปแต่ไม่นิยมใช้เป็นตัวให้กำเนิดสีโดยตรง[23,24,25]

ไทเทเนียมไดออกไซด์จัดว่าเป็นตัวทึบแสง (Opacifier) ที่มีประสิทธิภาพดีตัวหนึ่ง ความทึบแสงของการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดจากการเติบโตของผลึก หากเคลือบสามารถไหลตัวได้ดีผลึกก็จะเติบโตได้ดีด้วย ปัจจัยที่ส่งผลต่อความทึบแสงของเคลือบที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบมีหลายประการ ได้แก่ ขนาดของผลึก ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ในส่วนผสมเคลือบ เวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเคลือบ และชนิดของโครงสร้างผลึกที่เกิดในเคลือบ

ความสามารถในการทึบแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีรูปผลึกไม่เหมือนกันจะมีความแตกต่างกัน [9,26]

2.6 แคลเซียมออกไซด์ (CaO)

ในเคลือบเซรามิกเกือบทุกชนิดจะมีการใส่แคลเซียมออกไซด์ ซึ่งเป็นตัวที่ทำให้เคลือบที่สุกตัวดีแล้วมีความแข็งแรงสูงขึ้น ทนต่อการขูดขีด เพิ่มความต้านทานต่อการผุกร่อนเนื่องจากสิ่งแวดล้อม เมื่อใส่ลงในเคลือบในปริมาณที่เหมาะสม แคลเซียมออกไซด์จะเป็นตัวลดจุดสุกตัวของเคลือบ แต่ถ้าใส่ในปริมาณที่มากเกินไปส่งส่งผลให้จุดสุกตัวของเคลือบสูงขึ้น นั้นคือมีความทนไฟมากขึ้น และเกิดการตกผลึกเล็กๆ ในเคลือบ ทำให้เกิดเคลือบด้าน[9]

2.7 อะลูมินา (Al_2O_3)

อะลูมินา (Alumina) [27,28,29,30] หรืออะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่พบตามธรรมชาติจะอยู่ในรูปคอรันดัม (α-Al_2O_3) มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 3.9 - 4.1 และมีความแข็ง 9 โมส์สเกล มีความทนทานต่อการขูดขีด มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ 2050 องศาเซลเซียส มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนอยู่ในช่วง 7.5 - 8.5 x 10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส และมีค่าการทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันต่ำ ทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดและด่าง อะลูมินามีความสำคัญมากในกระบวนการผลิตวัสดุเซรามิก เช่น วัสดุทนไฟ เบ้าหลอมแก้ว อิฐทนไฟ และแผ่นรองเผา ใช้เป็นวัตถุดิบในเคลือบเซรามิก และวัสดุอื่นๆ อีกมากมาย

ในเคลือบเซรามิกอะลูมินาเป็นตัวทำหน้าที่ในการควบคุมการไหลตัวของเคลือบที่หลอมเหลวให้เป็นไปอย่างคงที่และสม่ำเสมอที่อุณหภูมิสุกตัวของเคลือบ ไม่เช่นนั้นเคลือบจะไม่สามารถคลุมผิวผลิตภัณฑ์ได้ทั่วถึง หรืออาจจะไหลไปกองรวมกันบริเวณผิวที่ต่ำๆ หมด ปริมาณของอะลูมินาในเคลือบมีผลต่อความทนไฟ จึงส่งผลถึงจุดสุกตัวของเคลือบด้วย

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

R.C. da Silva และคณะ [31] ได้ศึกษาการเตรียมเคลือบที่มีการใช้กากของเสียที่ได้จากอุตสาหกรรมที่แตกต่างกันเป็นวัตถุดิบ โดยกากของเสียที่ได้นำมาศึกษา คือ กระจกแผ่น (Float glass) หินแกรนิต (Granite) และแผ่นหินแคลเซียม (Lime shale) จากอุตสาหกรรมการผลิตหินน้ำมัน กากของเสียทั้ง 3 ชนิด มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบมากกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ และมีแหล่งกำเนิดของออกไซด์ที่ทำให้เกิดโครงสร้างแก้ว เช่น โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นต้น งานวิจัยนี้มีการใช้กากของเสียดังกล่าวมาใช้แทนวัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติ โดยมีการแทนลงไปในสูตรเคลือบในสัดส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักขึ้นไป คำนวณเคลือบโดยการใช้วิธีการคำนวณอย่างง่ายและทำการเคลือบด้วยวิธีการพ่นเคลือบ เผาเคลือบที่อุณหภูมิ 1050 และ 1080 องศาเซลเซียส ตามลำดับ หลังจากนั้นทำการทดสอบสมบัติของเคลือบได้แก่ สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน ความทนทานต่อสารเคมี สมบัติเชิงแสง และความแข็ง

พบว่าเคลือบที่ได้จากการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบนั้นมีสมบัติใกล้เคียงกับเคลือบที่มีการใช้วัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติ

N. Yalçın และ V. Sevinç [32] ได้ศึกษาการใช้กากของเสียบอกไซต์ (Bauxite) ซึ่งเป็นผลพลอยได้ที่ได้จากการสกัดแร่บอกไซต์เพื่อผลิตอะลูมินา (Al_2O_3) มาใช้เป็นวัตถุดิบในเคลือบเซรามิก กากของเสียบอกไซต์มีองค์ประกอบหลัก คือ ฮีมาไทต์และโซเดียมอะลูมิเนียมซิลิเกตไฮเดรต โดยได้ศึกษาการใช้กากของเสียบอกไซต์เป็นวัตถุดิบในการผลิตเคลือบพอร์ซเลน (Porcelain) เคลือบสุขภัณฑ์ (Sanitary ware) เคลือบกระเบื้อง (Tile) และเคลือบสำหรับลูกถ้วยไฟฟ้า (Electrical porcelain) ทำการเผาเคลือบที่อุณหภูมิ 1000 – 1250 องศาเซลเซียส สมบัติของผิวเคลือบที่ทำการทดสอบ ได้แก่ ความทนทานต่อสารเคมี และความทนทานต่อการขูดขีด พบว่าสามารถใช้กากของเสียบอกไซต์เป็นวัตถุดิบในส่วนผสมของเคลือบได้สูงสุดในสัดส่วนถึง 37 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไปโดยน้ำหนัก สีของเคลือบที่ได้ คือสีครีม สีน้ำตาลอ่อน สีเหลือง สีเหลืองเข้มออกน้ำตาล สีเขียว สีแดง สีน้ำตาล และสีดำ โดยผิวของเคลือบที่ได้นั้นมีความมันวาว ซึ่งทำให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ในการใช้กากของเสียบอกไซต์เป็นวัตถุดิบในการผลิตสีเคลือบและเคลือบเซรามิก

R.A. Kamarudin และ M. Shahir Zakaria [33] ได้ประยุกต์ใช้ยิปซัมแดง (Red gypsum) ซึ่งเป็นผลพลอยได้ที่ได้จากการสกัดแร่อิลเมไนต์ (Ilmenite) เพื่อผลิตไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) มาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเคลือบ โดยยิปซัมแดงมีองค์ประกอบหลัก คือ แคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำการเผาเคลือบที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส งานวิจัยนี้มีการนำกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมต่างๆ มาใช้เป็นวัตถุดิบในเคลือบเซรามิก เพื่อเป็นการลดการใช้วัตถุดิบจากธรรมชาติ ช่วยลดสาเหตุของการเกิดมลพิษ และเพื่อช่วยเพิ่มมูลค่าของกากของเสีย

B. Karasu และคณะ [34] ได้ศึกษาผลของการใช้กากของเสียแอลไบท์ (Albite) ที่ได้จากอุตสาหกรรมต่างๆ ต่อสมบัติและโครงสร้างทางจุลภาคของเคลือบ กากของเสียแอลไบท์มีองค์ประกอบหลัก คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยมีการใช้กากของเสียแอลไบท์เป็นวัตถุดิบเคลือบเพื่อทดแทนโซดาเฟลด์สปาร์ในสูตรเคลือบมาตรฐาน และทำการเผาเคลือบที่อุณหภูมิ 1200 - 1280 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศออกซิเดชัน วิเคราะห์เฟสของผลึกในเนื้อเคลือบด้วยวิธี X-ray Diffractometry (XRD) และวิธี Scanning Electron Microscopy (SEM) จากงานวิจัยนี้พบว่ากากของเสียแอลไบท์มีประสิทธิภาพในการใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนเฟลด์สปาร์ในเคลือบผลึกพอร์ซเลน โดยทำให้อุณหภูมิของการเกิดผลึกในเคลือบลดลงจาก 1280 องศาเซลเซียส เป็น 1250 องศาเซลเซียส คณะผู้วิจัยทีมเดียวกันนี้ยังได้ศึกษาการประยุกต์ใช้กากของเสียบอแร็กซ์ซึ่งเป็นกากของเสียที่ได้จากอุตสาหกรรมการผลิตโบรอนมาใช้ในเคลือบเซรามิกสำหรับผลิตภัณฑ์เผาครั้งเดียว [35] โดยมีการเตรียมฟริตจากกากของเสียบอแร็กซ์ หลังจากนั้นมีการเตรียมเคลือบมาตรฐานและเคลือบฟริตที่มีการใช้ฟริตที่ได้จากการใช้กากของเสียบอแร็กซ์เป็นวัตถุดิบ และทำการเผาเคลือบที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้ถูกนำมาทดสอบสมบัติมาตรฐาน ได้แก่ ความแข็ง ความทนทานต่อการเสียดสี สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน ความมันวาว และค่าสีของเคลือบ และได้ทำการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและการเปลี่ยนแปลงเฟสของเคลือบหลังเผา ซึ่งพบว่า

เคลือบฟริตที่มีการใช้กากของเสียบอแร็กซ์เป็นวัตถุดิบนั้นได้เคลือบที่มีผิวเคลือบเงามาก มีความคงทนต่อการเสียดสีที่สูงและไม่มีรูพรุนอยู่ในผิวเคลือบ ทำให้มีความเป็นไปได้ในการใช้กากของเสียบอแร็กซ์เป็นวัตถุดิบในเคลือบสำหรับผลิตภัณฑ์เคลือบเผาครั้งเดียวได้

สิรินาถ วรรณคล้ำ และโสวรรณ มนัสกิจสำราญ [36] ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำฝุ่นเหล็กที่ได้จากอุตสาหกรรมการรีไซเคิลเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้ามาใช้เป็นวัตถุดิบในเคลือบเซรามิกที่มีซิงก์ออกไซด์ และเหล็กออกไซด์ในปริมาณมาก โดยฝุ่นเหล็กที่นำมาศึกษามีลักษณะเป็นผงละเอียดที่ประกอบด้วยออกไซด์หลัก ได้แก่ ซิงก์เฟอไรต์ ($ZnFe_2O_4$) และมีโลหะหนัก ได้แก่ ตะกั่ว โครเมียม และปรอท ปนอยู่ในปริมาณเล็กน้อย มีการศึกษาสมบัติของฝุ่นเหล็กเบื้องต้น ได้แก่ องค์ประกอบทางเคมี การหลอมตัวของฝุ่นเหล็กในเนื้อแก้วที่สัดส่วนและอุณหภูมิเผาเคลือบต่างๆ ได้มีการทดแทนวัตถุดิบปกติในเคลือบด้วยฝุ่นเหล็ก ทำการเผาเคลือบที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส และทดสอบสมบัติต่างๆ ของตัวเคลือบหลังเผา ลักษณะของเคลือบที่ปรากฏ ได้แก่ สี ความมันวาว และตำหนิ เช่น รูพรุนบนผิวเคลือบ และรอยแตก พร้อมทั้งทำการทดสอบความเป็นพิษของเคลือบด้วยวิธีการละลายในสารละลายกรดอ่อน พบว่าเคลือบที่ได้จากการใช้ฝุ่นเหล็กเป็นวัตถุดิบมีลักษณะใกล้เคียงกับเคลือบที่มีการใช้วัตถุดิบปกติ เคลือบที่ได้มีสีน้ำเงินเงามัน มีผลึกที่ผิวเล็กน้อย และไม่มีการรานตัว เนื้อแก้วไม่มีการละลายของโลหะหนักออกมาเกินกว่ามาตรฐานที่กำหนด แสดงให้เห็นว่าฝุ่นเหล็กสามารถนำมาใช้ทดแทนวัตถุดิบปกติในเคลือบเซรามิกได้

ปวีณา เกตุบุญเรือง [37] ได้ศึกษาการใช้ขี้เถ้าเตาเผาขยะจากจังหวัดภูเก็ตและขวดแก้วมาใช้เป็นวัตถุดิบในการเตรียมเคลือบเซรามิกอุณหภูมิต่ำ เพื่อช่วยลดอุณหภูมิในการเผาเคลือบ โดยขี้เถ้าเตาเผาขยะจากจังหวัดภูเก็ตมีแคลเซียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก และมีตัวช่วยหลอมอื่นด้วย เช่น โซเดียมออกไซด์ และโพแทสเซียมออกไซด์ ส่วนขวดแก้วนั้นมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก ทำการเตรียมเคลือบและเคลือบลงบนเนื้อดินสโตนแวร์และเนื้อดินอุณหภูมิต่ำ และเผาเคลือบที่อุณหภูมิ 950 และ 1000 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์สมบัติของเคลือบหลังเผา ได้แก่ การหลอมตัว การไหลตัว สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน องค์ประกอบทางเฟส และความทนทานต่อสารเคมี จากงานวิจัยนี้พบว่าหากมีการใช้ปริมาณบอแร็กซ์ในสูตรเคลือบ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักขึ้นไป ก็จะสามารถใช้ขี้เถ้าเตาเผาขยะจากจังหวัดภูเก็ตเป็นวัตถุดิบในเคลือบได้สูงถึง 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักขึ้นไป โดยเคลือบที่ได้มีความสุกตัวและมันเงาสวยงาม

E. Karamanova และ A. Karamanov [38] ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการแทนที่โซเดียมเฟลด์สปาร์ในการเตรียมเคลือบสำหรับกระเบื้องเนื้อแดงไม่เคลือบ (Terracotta tile) ด้วยฟริตที่ได้จากขี้เถ้าแกลบและเศษแก้ว ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตกระเบื้องสโตนแวร์ โดยได้ทำการเตรียมกระเบื้องทนไฟ ที่มีการใช้ฟริตที่ได้จากขี้เถ้าแกลบและเศษแก้วเป็นวัตถุดิบทดแทนโซเดียมเฟลด์สปาร์ในกระบวนการผลิต 2 แบบ คือ 1) ทำการแทนที่ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ของโซเดียมเฟลด์สปาร์ด้วยฟริต และ 2) ทำการแทนที่โซเดียมเฟลด์สปาร์ทั้งหมดด้วยฟริต 35 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และกากทนไฟ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเปรียบเทียบสมบัติของกระเบื้องเคลือบที่ได้กับกระเบื้องเคลือบมาตรฐานที่ผลิตจากโรงงานในประเทศบัลแกเรีย ซึ่งมีการใส่โซเดียมเฟลด์สปาร์ 45 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นได้วิเคราะห์สมบัติ ได้แก่ การ

เปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วย DTA-TG วิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส ด้วย X-ray diffraction และวิเคราะห์ความต้านทานการดัดโค้ง (Bending strength) ด้วยวิธี three-point bending method จากงานวิจัยนี้พบว่าการใช้ฟริตที่ได้จากขี้เถ้าแกลบและเศษแก้ว เป็นวัตถุดิบทดแทนโซเดียมเฟลด์สปาร์นั้นทำให้อุณหภูมิและเวลาในการเผาลดลง และสมบัติทางด้าน ความต้านทานการดัดโค้งดีขึ้น

B. Karasu และคณะ [39] ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้กากของเสียบอแร็กซ์เข้มข้นเพื่อทดแทนกรดบอริกในการเตรียมฟริตเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตเคลือบสำหรับกระเบื้องบุผนัง โดยเตรียมฟริตมาตรฐานและมีการนำกากของเสียบอแรกซ์เข้มข้นทดแทนกรดบอริกในสูตรฟริตมาตรฐาน และทำการเพิ่มปริมาณกากของเสียในสูตรฟริต หลังจากนั้นนำฟริตที่ได้ไปเตรียมเคลือบ และทดสอบสมบัติของเคลือบฟริตที่ได้ ได้แก่ ค่าสีและความสว่างโดยใช้ chromometer และความทนทานต่อสารเคมี (18% HCl และ 10% KOH) พบว่าเคลือบที่มีการใช้ฟริตที่เตรียมได้จากกากของเสียในสูตรฟริตมาตรฐานนั้นเคลือบที่ได้ไม่เกิดตำหนิบนผิวเคลือบ เคลือบสามารถทนทานต่อสารเคมีได้ดีในระดับ GHA และเมื่อมีการใส่กากของเสียในสูตรฟริตมากขึ้น จะทำให้เกิดเคลือบด้าน เนื่องจากปริมาณของ CaO MgO Al_2O_3 และ SiO_2 ที่มีอยู่ในกากของเสียนั้นเป็นตัวที่ทำให้เกิดผลึก

S. Mestre และคณะ [40] ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกลับมาใช้ใหม่ของซิงก์ออกไซด์ที่ได้จากกากของเสีย มาใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนซิงก์ออกไซด์ปกติในการเตรียมฟริต หลังจากนั้นได้ทำการวิเคราะห์สมบัติของฟริตที่ได้ ได้แก่ องค์ประกอบทางเฟส ด้วยเทคนิค X-ray Diffractometry และพฤติกรรมทางความร้อน (Thermal behaviour) ด้วย Hot State Microscopy และ Differential Thermal Analysis หลังจากนั้นก็ทำการเตรียมเคลือบ โดยทำการผสมฟริตและดินในอัตราส่วน 100:8 โดยน้ำหนัก และวิเคราะห์สมบัติของเคลือบที่ได้ ได้แก่ ค่าสีด้วย Spectrophotometer และความมันวาว ด้วย reflectrometer จากงานวิจัยนี้พบว่าฟริตที่ได้จากการใช้ซิงก์ออกไซด์ที่ได้จากกากของเสียเป็นวัตถุดิบนั้นสามารถเตรียมฟริตได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าฟริตมาตรฐาน เนื่องจากฟริตที่เตรียมได้จากซิงก์ออกไซด์ที่ได้จากกากของเสียนั้นมี characteristic temperature ที่ต่ำกว่าฟริตมาตรฐาน แต่สีของเคลือบที่ได้จากฟริตกากจะมีค่าความสว่างของสีที่ต่ำกว่าเคลือบที่เตรียมได้จากฟริตที่ใช้ซิงก์ออกไซด์ปกติ ซิงก์ออกไซด์ที่ได้จากกากของเสียนั้นสามารถใช้ทดแทนซิงก์ออกไซด์ปกติในการเตรียมฟริตได้

งานวิจัยเหล่านี้แสดงให้เห็นว่ากากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมต่างๆ สามารถนำมาใช้ทดแทนวัตถุดิบในเคลือบเซรามิกและเคลือบฟริตได้ในระดับหนึ่ง งานวิจัยนี้จึงเป็นการนำกากของเสียที่ได้จากกระบวนการผลิตพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมาใช้เป็นวัตถุดิบเคลือบเซรามิก และเคลือบ ฟริต ตลอดจนศึกษาวิธีการเตรียมกากของเสียและปรับปรุงส่วนผสมของเคลือบให้เหมาะสมกับการใช้งานในงานเคลือบเซรามิก

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวัตถุดิบ สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย รวมถึงขั้นตอนการทดลองและการวิเคราะห์ทดสอบสมบัติต่างๆ

3.1 วัตถุดิบ สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 วัตถุดิบและสารเคมี

- กากของเสีย (Waste, SCG Chemicals Co., Ltd.)
- กระเบื้องดิบ (Green tile, COTTO Co.,Ltd)
- โพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ ($K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$, Sibelco Minerals (Thailand) Co.,Ltd.)
- โดโลไมต์ ($MgCO_3 \cdot CaCO_3$, Sibelco Minerals (Thailand) Co., Ltd.)
- หินปูน ($CaCO_3$, Sibelco Minerals (Thailand) Co., Ltd.)
- ซิลิกา (SiO_2, Sibelco Minerals (Thailand) Co., Ltd.)
- ซิงก์ออกไซด์ (ZnO, Union Chemical 1986 Co., Ltd.)
- เซอร์โคเนียมซิลิเกต ($ZrSiO_4$, Union Chemical 1986 Co., Ltd.)
- ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2 (rutile), Union Chemical 1986 Co., Ltd.)
- บอแร็กซ์ (โซเดียมเตตระบอเรต) ($Na_2O \cdot 2B_2O_3 \cdot 10H_2O$, UNIVARTM)
- ดินขาวระนอง ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$, Sibelco Minerals (Thailand) Co., Ltd.)
- โพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3, UNILABTM)
- โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3, UNIVARTM)
- ทัลคัม ($3MgO \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$, T.C. Sathaporn Co., Ltd)
- Sodium tripolyphosphate (STTP)
- Carboxy Methyl Cellulose (CMC)
- น้ำกลั่น

3.1.2 อุปกรณ์

- เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง
- บีกเกอร์
- ตะแกรงร่อน (Sieve) ขนาด 100 และ 325 เมช
- ถ้วยฟอร์ดคัพหมายเลข 2

- ถ้วยสเตนเลสสำหรับหาความหนาแน่น
- หม้อบดอะลูมินา
- ถ้วยเคลือบเซรามิก
- ตู้อบ
- เตาเผาลำดับอุณหภูมิ
- เตาเผาไฟฟ้า

3.2 ขั้นตอนการวิจัย

ในส่วนนี้ได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 คือ การเตรียมกากของเสียและวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของกากของเสีย

ส่วนที่ 2 คือ การใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบในเคลือบเซรามิก มีขั้นตอนการวิจัย 5 ขั้นตอน ดังนี้ 1) การกำจัดคลอรีน 2) การเลือกสูตรเคลือบมาตรฐาน 3) การใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบทดแทนในสูตรเคลือบมาตรฐาน และการปรับสูตรเคลือบที่มีกากของเสียเป็นวัตถุดิบทดแทน 4) การเตรียมเคลือบและการเตรียมชิ้นงาน และ 5) การทดสอบสมบัติต่างๆ ของเคลือบ

ส่วนที่ 3 คือ การใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบในเคลือบฟริต มีขั้นตอนการวิจัย 4 ขั้นตอน ดังนี้ 1) การเลือกสูตรฟริตมาตรฐาน และการปรับสูตรฟริตโดยใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบทดแทน 2) การเตรียมฟริต 3) การเตรียมเคลือบฟริตและการเตรียมชิ้นงาน และ 4) ทดสอบสมบัติต่างๆ ของเคลือบ

3.2.1 การเตรียมกากของเสียและวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของกากของเสีย

นำกากของเสียที่ได้จากกระบวนการผลิตพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง มาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นออกจากกากของเสีย จากนั้นบดกากของเสียด้วยโกร่งบด และร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาด 100 เมช เพื่อให้ได้อนุภาคของกากของเสียที่มีขนาดเล็กลง ทำให้สะดวกต่อการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของกากของเสีย จากนั้นจึงนำกากของเสียไปทำการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นดังนี้

3.2.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของกากของเสียด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF) ด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometer (Philips model PW2400)

3.2.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบเฟส

เพื่อศึกษาองค์ประกอบเฟสของกากของเสียที่หลังอบให้แห้งแล้ว และผงกากของเสียที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 700 800 900 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส ด้วยเทคนิค X-ray

Diffractometry (XRD) ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (Bruker รุ่น D8 Advanced) โดยใช้ Cu-K_{α} radiation ด้วย Scanning speed 2.4 องศาต่อนาที ช่วง 2θ เท่ากับ 10-70 องศา

3.2.1.3 การเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาและการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่เกิดขึ้นตามอุณหภูมิ

เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาและการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่เกิดขึ้นของกากของเสียที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA)

3.2.1.4 ความหนาแน่นของผงกากของเสีย

หาความหนาแน่นของผงกากของเสียโดยใช้ขวดพิคโนมิเตอร์ (Pycnometer) วิธีการทดสอบดังนี้

1. อบขวดพิคโนมิเตอร์พร้อมฝาให้แห้งสนิท หลังจากนั้นชั่งน้ำหนัก โดยบันทึกน้ำหนักเป็นกรัม
2. เติมน้ำกลั่นและบันทึกอุณหภูมิเป็น T_1 (องศาเซลเซียส) ปิดฝาและชั่งน้ำหนัก บันทึกน้ำหนักเป็น W_1 (กรัม)
3. เทน้ำกลั่นทิ้ง และอบขวดให้แห้ง
4. ใส่ผงกากของเสียอบแห้งที่ผ่านการบดและร่อนผ่านตะแกรง 100 เมช และอบแห้งประมาณ 8-12 กรัม ลงในขวด หลังจากนั้นปิดฝา และชั่งน้ำหนัก บันทึกน้ำหนักเป็น W (กรัม)
5. เติมน้ำกลั่น บันทึกอุณหภูมิของน้ำกลั่นเป็น T_2 (องศาเซลเซียส) ปิดฝาและชั่งน้ำหนัก บันทึกน้ำหนักเป็น W_2 (กรัม)

<u>หมายเหตุ</u> : T_1 และ T_2 ควรต่างกันไม่เกิน 5 องศาเซลเซียส

6. คำนวณตามสูตร

$$\text{Density (D)} = \frac{[d_1 d_2 (W-P)]}{0.999973[T_2 (W_1-P)-T_1(W_2-W)]}$$

โดย ;

d_1 = ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิ T_1 (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
d_2 = ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิ T_2 (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
P = น้ำหนักของขวด + ฝาปิด (กรัม)
W = น้ำหนักของขวด + ฝาปิด + ตัวอย่าง (กรัม)
W_1 = น้ำหนักของขวด + ฝาปิด + น้ำกลั่น (กรัม)
W_2 = น้ำหนักของขวด + ฝาปิด + ตัวอย่าง + น้ำกลั่น (กรัม)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.2.1.5 น้ำหนักที่หายไปหลังการอบ

ชั่งกากของเสียที่มีลักษณะเป็นของเหลวข้นใส่ลงในบีกเกอร์ปริมาณ 50 กรัม ให้เป็น W_1 (กรัม) หลังจากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส และชั่งน้ำหนักอีกครั้งให้เป็น W_2 (กรัม) คำนวณปริมาณของแข็งตามสูตร

$$\text{Solid content (\%)} = \frac{(W_1 - W_2)\times 100}{W_1}$$

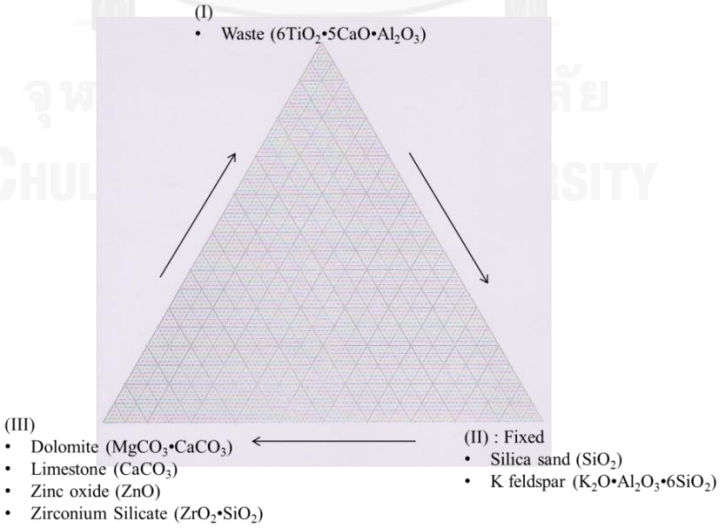
3.2.1.6 การกำจัดคลอรีนในกากของเสีย

สารประกอบแคลเซียมคลอไรด์สามารถเกิดการสลายตัวได้ที่อุณหภูมิประมาณ 300-350 องศาเซลเซียส[41,42] งานวิจัยนี้จึงทำการกำจัดคลอรีนด้วยการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิการเผาแคลไซน์เท่ากับ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที และยืนไฟที่อุณหภูมิสูงสุด เป็นเวลา 2 ชม. (ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนแสดงในหัวข้อที่ 4.3)

3.2.2 การใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบทดแทนไทเทเนียมไดออกไซด์ในเคลือบเซรามิก

3.2.2.1 การเลือกสูตรเคลือบมาตรฐานและการปรับสูตรเคลือบที่มีกากของเสียเป็นวัตถุดิบทดแทน

การคำนวณสูตรเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบทดแทน และการปรับสูตรเคลือบจะทำการปรับโดยใช้สามเหลี่ยม triaxial ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพ triaxial ที่ใช้ในการปรับสูตรเคลือบ

ทำการจัดกลุ่มวัตถุดิบออกเป็น 3 ส่วน ตามหน้าที่ในเคลือบ ได้แก่

- กลุ่มที่ 1 : กากของเสีย
- กลุ่มที่ 2 : วัตถุดิบที่ให้เนื้อแก้วและช่วยลดจุดสุกตัวของเคลือบที่เป็นอัลคาไลหมู่ที่ 1 ได้แก่ ซิลิกา (SiO_2) และโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ ($K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$)
- กลุ่มที่ 3 : วัตถุดิบที่ให้ความทึบแสงและช่วยลดจุดสุกตัวของเคลือบที่เป็นอัลคาไลหมู่ที่ 2 ได้แก่ โดโลไมต์ ($MgCO_3 \cdot CaCO_3$) หินปูน ($CaCO_3$) ซิงก์ออกไซด์ (ZnO) และเซอร์โคเนียมซิลิเกต ($ZrO_2 \cdot SiO_2$)

มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบทดแทนไทเทเนียมไดออกไซด์ในเคลือบเซรามิก ดังนี้

1. การใช้กากของเสียทดแทนวัตถุดิบทางการค้าในเคลือบมาตรฐาน
2. การปรับสูตรเคลือบ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

(2.1) เพิ่มปริมาณกากของเสียในสูตรเคลือบ โดยลดวัตถุดิบตัวอื่นๆ ในอัตราส่วนเท่าๆ กัน

(2.2) การปรับสูตรเคลือบโดยใช้แผนภาพสามเหลี่ยม triaxial

(2.2.1) เพิ่มปริมาณกากของเสียในสูตรเคลือบ โดยให้วัตถุดิบกลุ่ม II คงที่ และวัตถุดิบกลุ่ม III ลดลง

(2.2.2) เพิ่มปริมาณวัตถุดิบกลุ่ม II ในสูตรเคลือบ โดยให้ปริมาณกากของเสียคงที่ และวัตถุดิบกลุ่ม III ลดลง

(2.2.3) เพิ่มปริมาณวัตถุดิบกลุ่ม III ในสูตรเคลือบ โดยให้ปริมาณกากของเสียคงที่ และวัตถุดิบกลุ่ม III ลดลง

3.2.2.2 การเตรียมเคลือบ การเคลือบและอุณหภูมิในการเผา

ชั่งส่วนผสมของวัตถุดิบตามสูตรเคลือบที่ใช้ และบดผสมเคลือบด้วยวิธีการบดเปียก โดยใส่น้ำประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของวัตถุดิบ บดด้วยหม้อบดอะลูมินา ใช้เวลาบด 20 นาที โดยมีการควบคุมคุณสมบัติของน้ำเคลือบให้น้ำเคลือบมีความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) ให้อยู่ในช่วง 1.3 - 1.5 และความหนืดให้อยู่ในช่วง 10 - 12 วินาที หลังจากนั้นทำการกรองน้ำเคลือบผ่านตะแกรงร่อนขนาด 200 เมช เพื่อให้ได้น้ำเคลือบที่มีความละเอียดตามต้องการ

3.2.2.2.1 ความหนาแน่นของน้ำเคลือบ

หาความถ่วงจำเพาะของน้ำเคลือบด้วยการใช้ถ้วยหาความถ่วงจำเพาะของน้ำเคลือบ ชั่งน้ำหนักถ้วยสเตนเลสและฝาซึ่งทราบปริมาตรที่แน่นอน บันทึกน้ำหนักของถ้วยสเตนเลสเป็น W (กรัม) และปริมาตรของถ้วยเป็น V (ลูกบาศก์เซนติเมตร) หลังจากนั้นเทน้ำเคลือบลงในถ้วยสเตนเลสและปิดฝา แล้วชั่งน้ำหนักและบันทึกเป็น W_s (กรัม) คำนวณความถ่วงจำเพาะของน้ำเคลือบตามสูตร

$$\text{specific gravity} = \frac{(W_s - W)}{V}$$

เมื่อ W_s = น้ำหนักของถ้วยสเตนเลส + ฝา + น้ำเคลือบ (กรัม)
W = น้ำหนักของถ้วยสเตนเลส + ฝา (กรัม)
V = ปริมาตรของน้ำเคลือบในถ้วยสเตนเลสขนาด 100 มิลลิลิตร (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

3.2.2.2.2 กากค้างตะแกรงของเคลือบ

ชั่งน้ำเคลือบ 100 กรัม (W_1) และนำไปกรองผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช หลังจากนั้นนำตะแกรงไปผ่านด้วยน้ำจนสะอาด นำกากค้างตะแกรงไปอบและชั่งน้ำหนัก (R_1) คำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์กากค้างตะแกรงตามสูตร

$$\% \text{ residue} = \frac{R_1 \times 100}{A}$$

เมื่อ R_1 = น้ำหนักของกากค้างตะแกรง 325 เมช (กรัม)
W_1 = น้ำหนักของน้ำเคลือบที่ใช้ในการทดสอบ (100 กรัม)
$A = (W_1 \times 100) \times (\%\text{Dry})$

3.2.2.2.3 อัตราการไหลตัวของน้ำเคลือบ

วัดอัตราการไหลตัวของน้ำเคลือบโดยใช้ถ้วยฟอร์ดหมายเลข 2 ซึ่งเป็นถ้วยอะลูมิเนียมปริมาตร 100 มิลลิลิตร ทางด้านก้นถ้วยมีลักษณะคล้ายกรวยและมีรูเพื่อให้น้ำเคลือบไหลออก วางเครื่องมือให้ได้ระดับ ปิดรูที่ก้นถ้วยด้วยนิ้วมือ หลังจากนั้นเติมน้ำเคลือบลงไปให้ล้นถ้วยและใช้ไม้พายปาดส่วนที่ล้นออกหลังจากนั้นนำนิ้วที่ปิดรูออกเพื่อปล่อยให้น้ำเคลือบไหล จับเวลาการไหลตัวของน้ำเคลือบตั้งแต่เคลือบเริ่มไหลตัวจนกระทั่งน้ำเคลือบไหลออกหมด บันทึกเวลาการไหลเป็นวินาที

3.2.2.2.4 การเคลือบและอุณหภูมิในการเผา

การเคลือบต้องมีการทำความสะอาดผิวของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการนำมาเคลือบโดยเช็ดด้วยฟองน้ำที่ชุบน้ำหมาดๆ ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเคลือบ คือ กระเบื้องดิบชนิดบุผนัง (wall tile) ขนาด 2x2 เซนติเมตร^2 หรือที่เรียกว่ากระเบื้องโมเสค (mosaic) ซึ่งเป็นกระเบื้องที่ยังไม่ผ่านการเผา (green tile) เนื้อกระเบื้องจัดอยู่ในประเภทพวกพอร์ซเลน (porcelain body) เป็นเนื้อกระเบื้องสีขาว นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์จะต้องเผาจนมีการดูดซึมน้ำต่ำมาก ส่วนผสมต้องใช้วัตถุดิบที่มีคุณภาพสูง สำหรับงานวิจัยนี้มีการใช้กระเบื้องโมเสคของบริษัท เซรามิคอุตสาหกรรมไทย (COTTO) จำกัด โดยส่วนผสมของเนื้อดินกระเบื้องโมเสคของบริษัท เซรามิคอุตสาหกรรมไทย จำกัด แสดงดังตารางที่ 3.1 กระเบื้องโมเสคผลิตด้วยวิธีเดียวกับกระเบื้องเซรามิกชนิดต่างๆ แต่แตกต่างที่ขนาดและอุณหภูมิในการเผา โดยกระเบื้องโมเสคเป็นกระเบื้องชนิดเผาครั้งเดียวที่อุณหภูมิประมาณ 1200 องศาเซลเซียส เป็นกระเบื้องที่มีเปอร์เซ็นต์การดูดน้ำต่ำ มีความแข็งแรงสูง และมีความทนทานต่อสารเคมีได้ดีกว่ากระเบื้องปูพื้นหรือบุผนังทั่วไป เนื่องจากกระเบื้องโมเสคใช้อุณหภูมิในการเผาที่สูงกว่า จึงสามารถใช้

วัตถุดิบที่ทนทานต่อสารเคมีได้ดีกว่ากระเบื้องชนิดอื่น แต่การใช้กระเบื้องโมเสคก็มีข้อเสีย คือ ทำความสะอาดได้ยาก เนื่องจากกระเบื้องมีขนาดเล็ก ทำให้ในการติดตั้งจะเกิดรอยต่อระหว่างแผ่นที่เรียกว่า joint มาก และเป็นบริเวณที่มีการใช้ปูนซีเมนต์ขาวในการยาแนว หากดูแลหรือทำความสะอาดบริเวณนี้ไม่ทั่วถึงจะทำให้เกิดคราบสกปรก และเป็นที่สะสมของเชื้อโรคได้ [43,44]

ตารางที่ 3.1 เนื้อกระเบื้องโมเสคของบริษัท เซรามิคอุตสาหกรรมไทย จำกัด

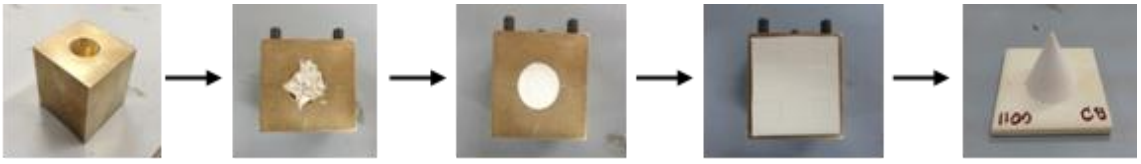
ส่วนผสมของเนื้อกระเบื้อง	เปอร์เซ็นต์ (%)
SiO_2	75.76 ± 0.40
Al_2O_3	16.61 ± 0.40
Fe_2O_3	1.15 ± 0.20
Na_2O	3.58 ± 0.20
Others	~3

งานวิจัยนี้ทำการเคลือบกระเบื้องด้วยวิธีการพ่นเคลือบ (Sparying) มีการควบคุมความหนาของชั้นเคลือบให้อยู่ระหว่าง 1-1.5 มิลลิเมตร ด้วยการกำหนดน้ำหนักของเคลือบบนกระเบื้องให้มีน้ำหนักประมาณ 8 กรัม คิดเป็น 26 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักกระเบื้อง ทำการเผาเคลือบในเตาเผาไฟฟ้า อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา คือ 1000-1200 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราในการให้ความร้อนเท่ากับ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที และยืนไฟที่อุณหภูมิสูงสุดเป็นเวลา 20 นาที

3.2.2.3 การทดสอบสมบัติของเคลือบหลังเผา

3.2.2.3.1 พฤติกรรมการหลอมตัว

นำผงเคลือบมาบดผสมให้เข้ากันด้วยโกร่งบดอะลูมินา หลังจากนั้นนำมาอัดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ทองเหลือง ให้มีลักษณะเป็นโคนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ฐาน 25 มิลลิเมตร สูง 30 มิลลิเมตร นำมาวางลงบนกระเบื้องบิสกิตดังรูปที่ 3.2 และนำไปเผาในเตาเผาลำดับอุณหภูมิ (Thermal gradient furnace) ที่อุณหภูมิ 6 อุณหภูมิ ได้แก่ 1000 1050 1100 1150 1200 และ 1250 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราในการให้ความร้อน คือ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ยืนไฟที่อุณหภูมิสูงสุดเป็นเวลา 20 นาที หลังจากนั้นสังเกตลักษณะการหลอมตัวของเคลือบ



รูปที่ 3.2 การอัดโคนเพื่อศึกษาพฤติกรรมการหลอมตัว

3.2.2.3.2 อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะ

วิเคราะห์อุณหภูมิเฉพาะที่แน่นอนของการเปลี่ยนแปลงของเคลือบด้วยเครื่อง Heating Microscope (misura 3.32) การเตรียมตัวอย่างทำโดยนำผงเคลือบที่ผ่านการบดผสมด้วยโกร่งบดอะลูมินา มาร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 200 เมช หลังจากนั้นนำผงเคลือบที่ร่อนผ่านตะแกรงมาขึ้นรูปให้มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตรและมีความสูง 3 มิลลิเมตร และนำเข้าเครื่อง Heating Microscope โดยเครื่องมีการให้ความร้อนเพื่อให้เคลือบเกิดการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิ 300-1350 องศาเซลเซียส แสดงในรูปที่ 3.3

รูปที่ 3.3 ตัวอย่างที่กำลังหลอมตัวภายในเครื่อง Heating Microscope [16]

3.2.2.3.3 องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบหลังเผา

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบด้วยเทคนิค X-ray diffractometry (XRD) ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer โดยใช้ Cu-K_{α} radiation เป็น X-ray source ด้วย Scanning speed 2.4 องศาต่อนาที และช่วง 2θ เท่ากับ 10-70 องศา

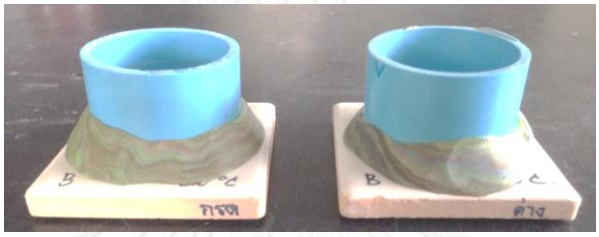
3.2.2.3.4 สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน

นำผงเคลือบไปอัดในแบบที่ทำจากคอร์เดียไรท์และเผาที่อุณหภูมิที่ต้องการ คงอุณหภูมิสูงสุดเป็นเวลา 20 นาที หลังจากนั้นตัดชิ้นงานให้มีขนาด 0.5 x 0.5 x 2.5 มิลลิเมตร วิเคราะห์สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 27 – 800 องศาเซลเซียส โดยใช้เครื่องไดลาโตมิเตอร์ (Dilatometer, รุ่น DIL 402C, Netzsch) อัตราในการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยทำการเปรียบเทียบกับวัสดุมาตรฐานที่ทำจากอะลูมินา

3.2.2.3.5 ความทนทานต่อสารเคมี

วางดินน้ำมันหนาประมาณ 3 มิลลิเมตรที่ขอบท่อ คว่ำท่อลงบนผิวเคลือบแล้วกดวัสดุยารอยต่อรอบๆ ท่อให้แน่นดังรูปที่ 3.4 เทสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่มีความเข้มข้น 3

เปอร์เซ็นต์ และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่มีความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ลงในท่อให้ระดับความสูงของสารละลาย 20 ± 1 มิลลิเมตร แช่สารละลายไว้ 4 วัน โดยให้เขย่าชุดทดสอบเบาๆ วันละ 1 ครั้ง และตรวจสอบระดับความสูงของสารละลายไม่ให้เปลี่ยนแปลง เปลี่ยนสารละลายใหม่หลังจากครบ 2 วัน หลังจากนั้นอีก 2 วัน นำท่อออกแล้วทำความสะอาดผิวเคลือบด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสมเพื่อล้างวัสดุยารอยต่อออกให้หมด และสังเกตสีและผิวของเคลือบ โดยทำการจำแนกระดับความทนทานต่อสารเคมีตามมาตรฐาน มอก. 2398 เล่ม 13-2553 [19]



รูปที่ 3.4 การทดสอบความทนทานต่อสารเคมีของเคลือบ

3.2.2.3.6 ความทนทานต่อการขูดขีด

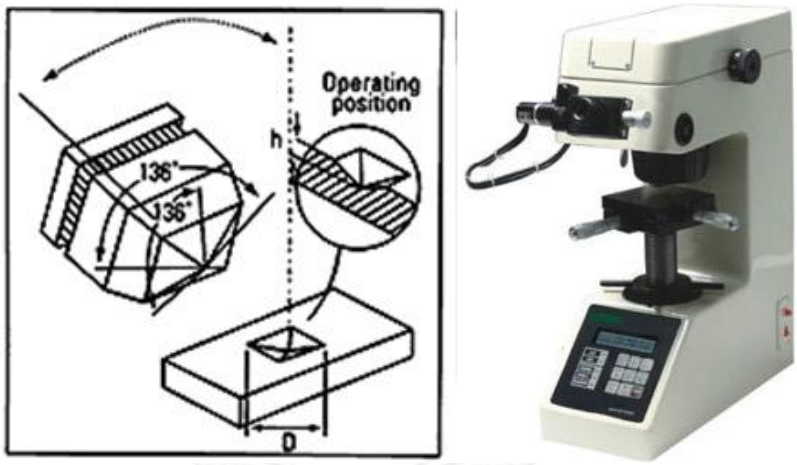
ความทนทานต่อการขูดขีดทำการทดสอบด้วยวิธี sand blast test ด้วยเครื่อง sand blast test ชั่งน้ำหนักกระเบื้องก่อนทำการทดสอบ หลังจากนั้นนำแผ่นกระเบื้องมาตั้งทำมุม 45 องศา แล้วพ่นทราย (SiC) ขนาด 80 เมช โดยกำหนดจำนวนของทราย 2000 ± 10 มิลลิลิตรต่อครั้ง อัตราการไหลของทราย 21 - 23.5 วินาที ค่าความทนทานต่อการขูดขีด วัดโดยใช้ปริมาณของเคลือบที่หลุดลอกออกมา ซึ่งหาได้โดยชั่งน้ำหนักที่หายไปหลังจากทำการทดสอบ (D 968-93) [20]

3.2.2.3.7 ความแข็งของเคลือบ

วัดความแข็งของเคลือบตามมาตรฐาน ASTM C1327-08 ด้วยวิธี Vickers microhardness test[45] โดยมีการใช้หัวกดลงบนเคลือบโดยให้แรง 1 kgf เป็นเวลา 15 วินาที วัดขนาดของเส้นทะแยงมุมของรอยกดที่ปรากฏบนผิวเคลือบและคำนวณความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Hv) มีหน่วยเป็นกิกะปาสคาล (GPa) ลักษณะของหัวกดและเครื่องวัดความแข็งแบบวิกเกอร์สแสดงดังรูปที่ 3.5 งานวิจัยนี้เลือกใช้หัวกดแบบวิกเกอร์สและเครื่องวัดความแข็งวิกเกอร์ส (รุ่น HV50A ของ Laizhou Huayin) ในการทดสอบ คำนวณค่าความแข็งตามสูตร

$$H_v = \frac{1.8544 \times p}{d^2}$$

เมื่อ H_v = ค่าความแข็ง (กิกะปาสคาล)
p = แรงที่กดลงบนชิ้นงาน (นิวตัน, 1 กิโลกรัม = 9.8 นิวตัน)
d = เส้นทแยงมุมเฉลี่ยของรอยแตก (มิลลิเมตร)



รูปที่ 3.5 ลักษณะของหัวกดและเครื่องวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ส [46,47]

3.2.2.3.8 สี

ค่าสีของเคลือบ จะทำการวิเคราะห์เป็นค่า L a* และ b* โดยใช้เครื่อง Spectrophotometer ของ MACBETH รุ่น Colour-Eye 7000 ช่วงของแสง 360-750 nm โหมด reflectance การเปรียบเทียบสีจะถูกคำนวณออกมาเป็นผลต่าง[48] ดังนี้

dL = L (sample) – L (standard)
da* = a* (sample) - a* (standard)
db* = b* (sample) - b* (standard)

จากนั้นค่าผลต่างทั้งสามจะถูกคำนวณออกมาเป็นค่าสรุปหรือ dE* อีกครั้งตามสูตร

$$dE^* = (dL^2 + da^{*2} + db^{*2})^{1/2}$$

ในการควบคุมคุณภาพสีประเภทที่ใช้ตกแต่ง (Decorating colours) ค่า dE* ของสีที่สามารถยอมรับได้จะต้อง มีค่าเกิน 1.5 หน่วย เมื่อเทียบกับค่า dE* ตัวอย่างมาตรฐาน (master Standard) แต่ละสีจะมีค่าที่แคบ และกว้างไม่เท่ากัน บางสี 0.5 หน่วย บางสี 1.5 หน่วย สีที่มีค่าแคบ 0.5 หน่วย ค่าของสีจะเปลี่ยนแปลงได้ง่าย สำหรับสีสะเตนมักจะจำกัดค่า dE* ไม่เกิน 1.0 ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของสีแต่ละชนิด

3.2.3 การใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบทดแทนไทเทเนียมไดออกไซด์ในเคลือบฟริต

3.2.3.1 ทำการเลือกสูตรฟริตมาตรฐาน และปรับสูตรฟริตโดยใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบทดแทนในฟริต

3.2.3.2 การเตรียมฟริต

ชั่งวัตถุดิบตามสูตรฟริตที่ได้คำนวณ นำไปบดให้เข้ากันด้วยโกร่งบดอะลูมินา และเทใส่เบ้าหลอมที่ทำจากอะลูมินา หลังจากนั้นนำไปใส่เตาหลอมแก้ว เพื่อหลอมฟริตที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในน้ำ นำฟริตที่ได้ไปอบให้แห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เมื่อแห้งแล้วจึงนำไปบดให้ละเอียดจนได้เป็นผงฟริต

3.2.3.3 การเตรียมเคลือบฟริต

นำฟริตที่บดให้ละเอียดแล้วปริมาณ 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มาผสมกับดินขาว 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก STTP 0.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก CMC 0.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และน้ำ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แล้วนำไปบดด้วยหม้อบดอะลูมินาเป็นเวลา 20 นาที โดยมีการควบคุมสมบัติของน้ำเคลือบให้มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.7-1.8 และมีความหนืดประมาณ 50 วินาที หลังจากนั้นทำการกรองน้ำเคลือบผ่านตะแกรงร่อนขนาด 200 เมช เพื่อให้ได้น้ำเคลือบที่มีความละเอียดตามต้องการ โดยทำการทดสอบสมบัติของน้ำเคลือบเหมือนกับการวิเคราะห์สมบัติน้ำเคลือบเซรามิกที่ได้กล่าวมาในหัวข้อ 3.2.2.2

3.2.3.4 อุณหภูมิในการเผาเคลือบ

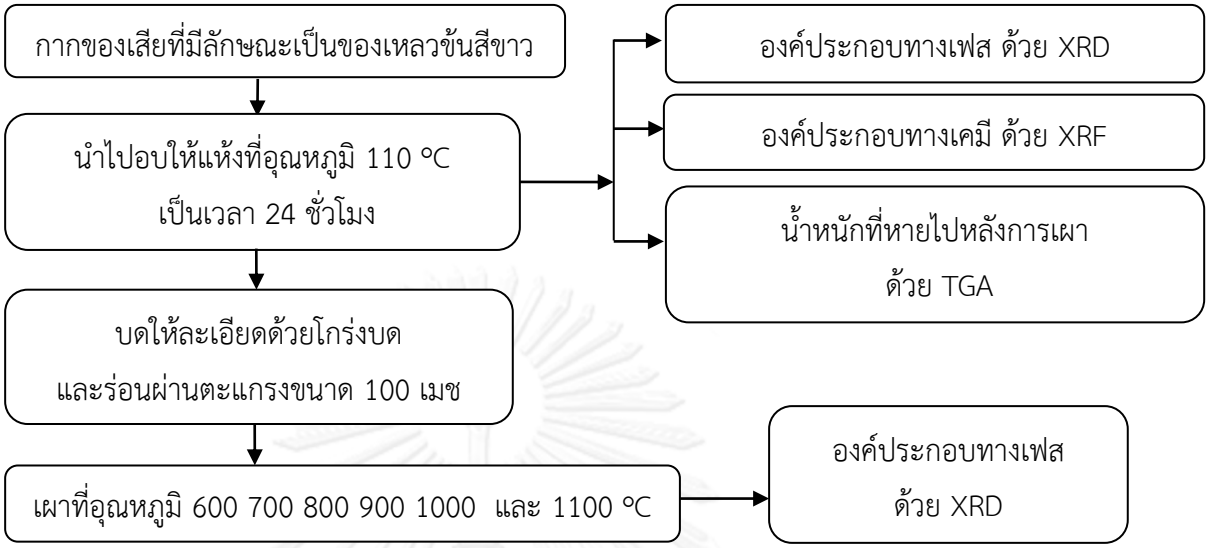
เผาด้วยเตาเผาไฟฟ้า โดยอุณหภูมิในการเผา คือ 1120 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที และยืนไฟที่อุณหภูมิสูงสุดเป็นเวลา 20 นาที

3.2.3.5 การทดสอบสมบัติของเคลือบหลังเผา

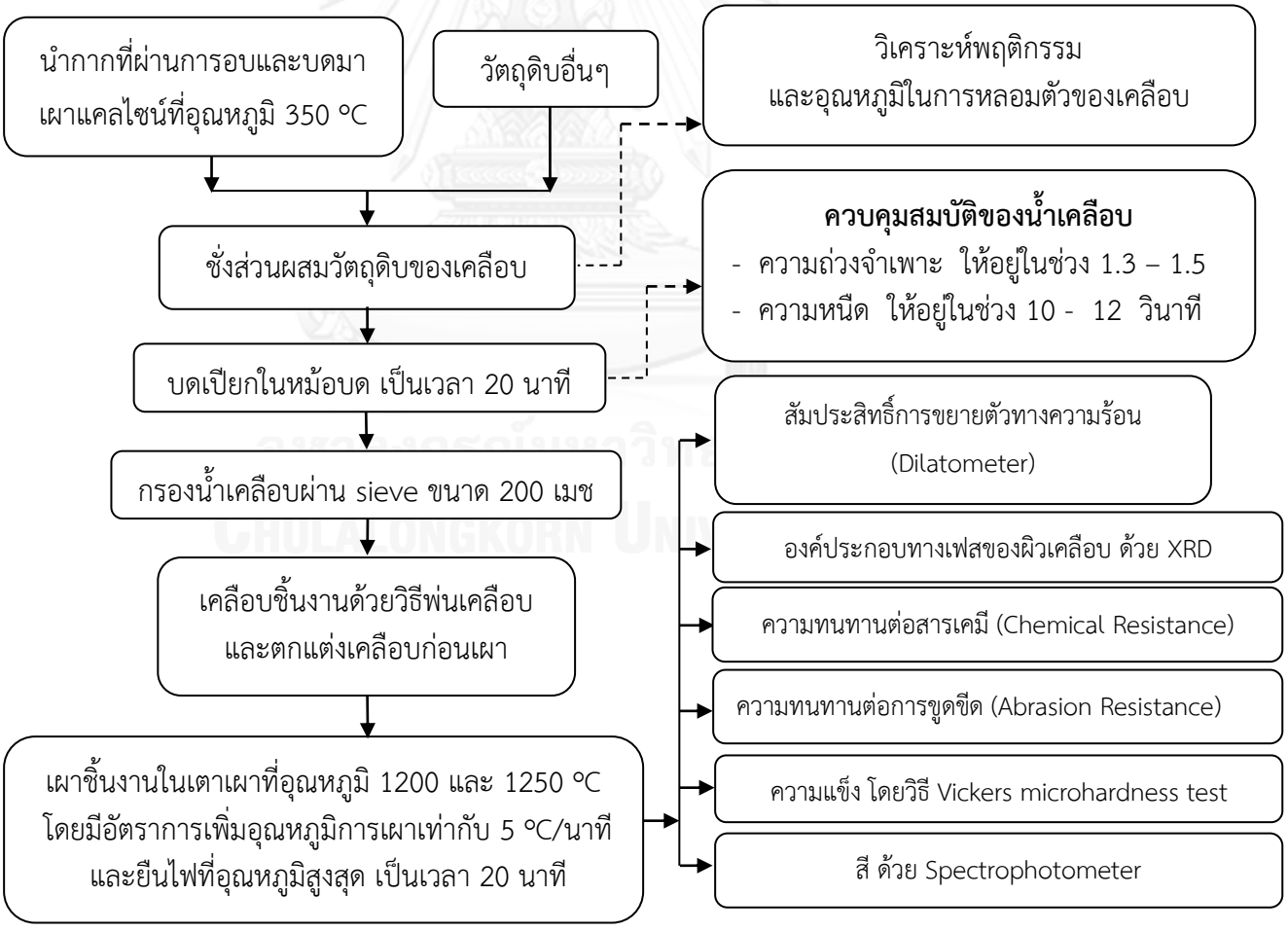
ทดสอบสมบัติของเคลือบหลังเผาตามข้อ 3.2.2.3 โดยสมบัติของเคลือบหลังเผาที่ทำการทดสอบ ได้แก่

- พฤติกรรมและอุณหภูมิในการหลอมตัวของเคลือบ
- องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบหลังเผา
- ความทนทานต่อสารเคมี
- ความทนทานต่อการขูดขีด
- ความแข็งของเคลือบ
- ค่าสี (L a* b*)

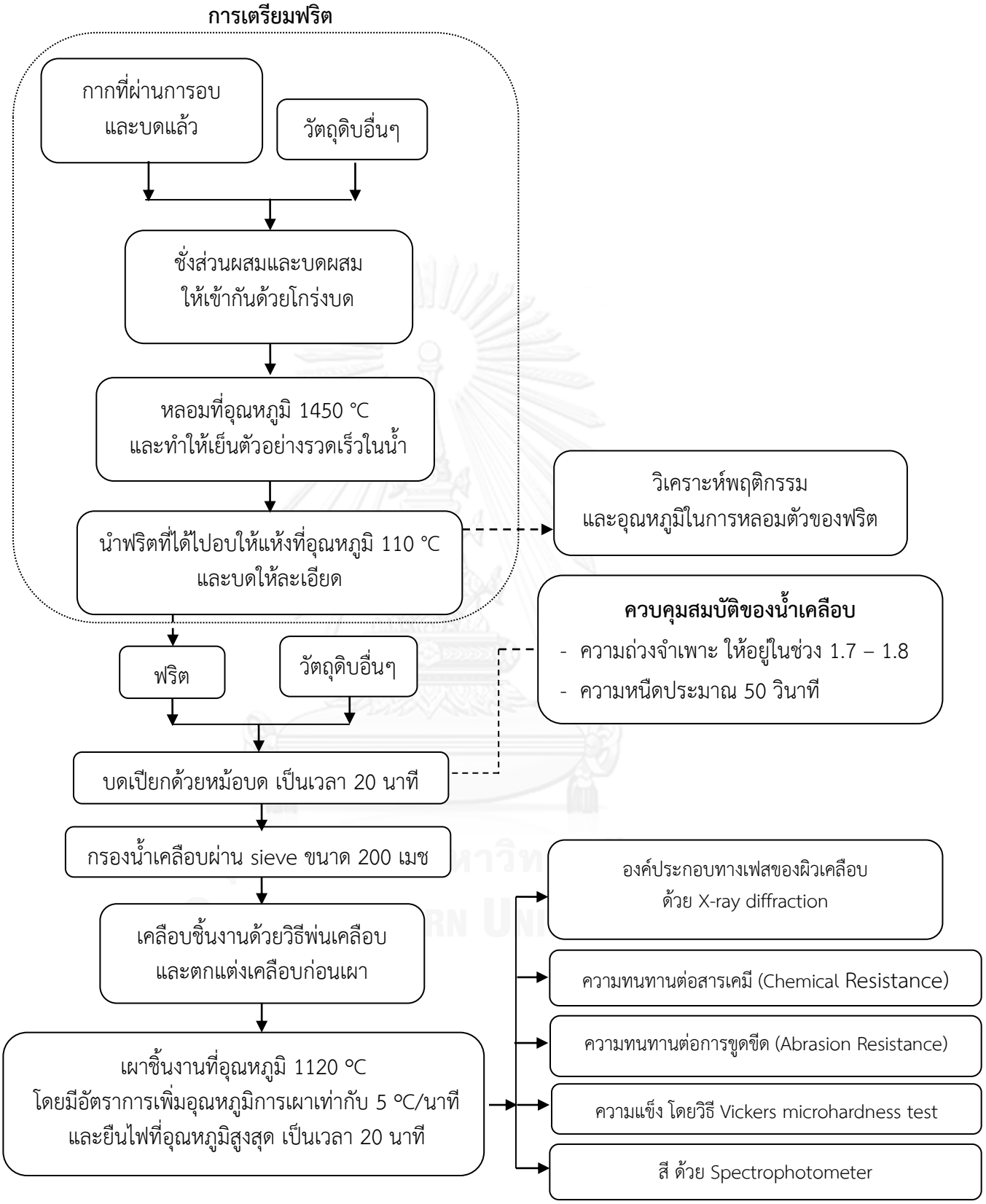
3.3 แผนผังการทดลอง



รูปที่ 3.6 แผนผังการเตรียมกากของเสียและการทดสอบสมบัติเบื้องต้นของกากของเสีย



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการเตรียมเคลือบเซรามิกและการวิเคราะห์สมบัติของเคลือบ



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการเตรียมฟริต เคลือบฟริต และการวิเคราะห์สมบัติของเคลือบฟริต

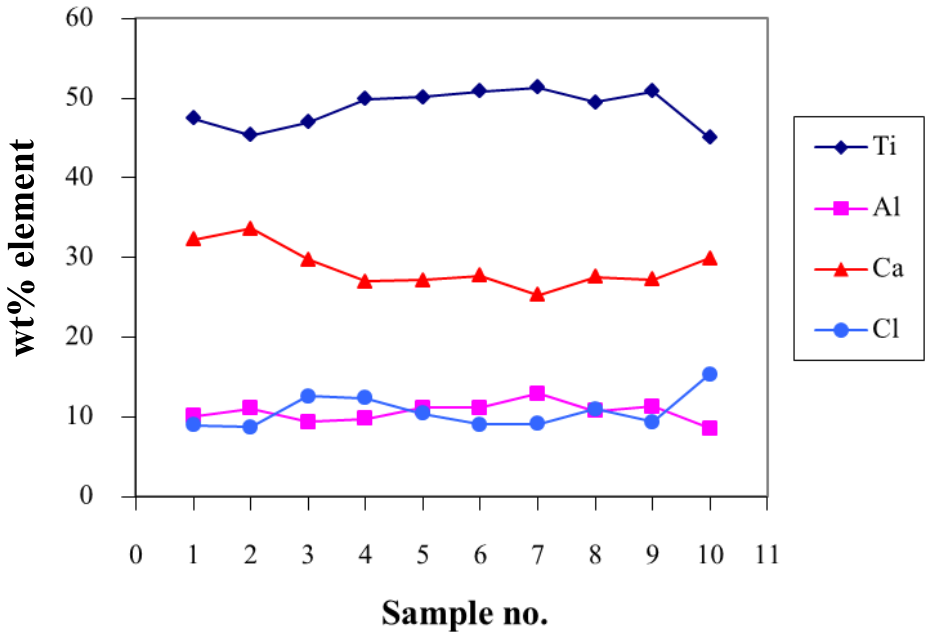
บทที่ 4

การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของกากของเสีย

บทที่ 4 ประกอบด้วย ผลการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของกากของเสีย ได้แก่ องค์ประกอบทางเคมี องค์ประกอบทางเฟส ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อกากของเสียได้รับความร้อน ความหนาแน่นของผงกากของเสีย และการสูญเสียน้ำหนักหลังการอบและหลังกากเผาของกากของเสีย

4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

จากการสุ่ม (sampling) ตักกากของเสียที่มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวข้นเป็นจำนวน 10 ครั้ง เพื่อยืนยันว่ากากของเสียที่ได้จากกระบวนการผลิตพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงนั้นมีสมบัติที่คงที่ในทุกการผลิต ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกากของเสียแสดงดังรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.1 พบว่าในกากของเสียประกอบด้วยธาตุหลัก 4 ธาตุ ได้แก่ ไทเทเนียม (Ti) แคลเซียม (Ca) อะลูมิเนียม (Al) และคลอรีน (Cl) และมีธาตุอื่นๆ อยู่น้อยมาก (ไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ธาตุหลักน่าจะอยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ สารประกอบไฮเดรต (H_2O) ไฮดรอกไซด์ (OH) และสารประกอบคลอไรด์ (Cl) ซึ่งสารประกอบเหล่านี้จะเกิดการแตกตัวที่อุณหภูมิสูงขึ้น เหลือเพียงแต่สารประกอบออกไซด์ในกากของเสียเท่านั้น



รูปที่ 4.1 องค์ประกอบธาตุของกากของเสีย (เมื่อทำการสุ่มตักกากของเสียเป็นจำนวน 10 ครั้งมาทำการวิเคราะห์)

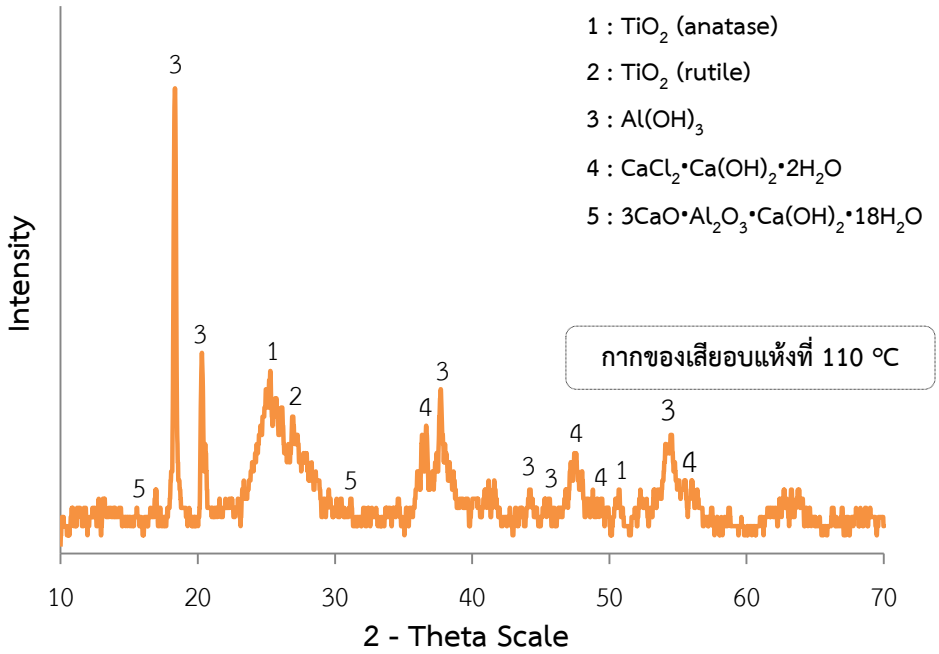
ตารางที่ 4.1 ปริมาณของธาตุองค์ประกอบในกากของเสีย

ธาตุ	ปริมาณ (wt%)	สารประกอบที่เป็นไปได้
Ti	48.75 ± 2.33	TiO_2
Ca	28.77 ± 2.60	CaO, $Ca(OH)_2$, $CaCl_2$
Al	10.61 ± 1.23	$Al(OH)_3$, Al_2O_3
Cl	10.69 ± 2.17	$CaCl_2$
Mg	0.49 ± 0.06	MgO, $Mg(OH)_2$
Si	0.25 ± 0.02	SiO_2
S	0.14 ± 0.02	SO_2
Fe	0.24 ± 0.01	Fe_2O_3
Cu	< 0.02	-
Zn	< 0.02	-
Zr	< 0.02	-

4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของกากของเสีย

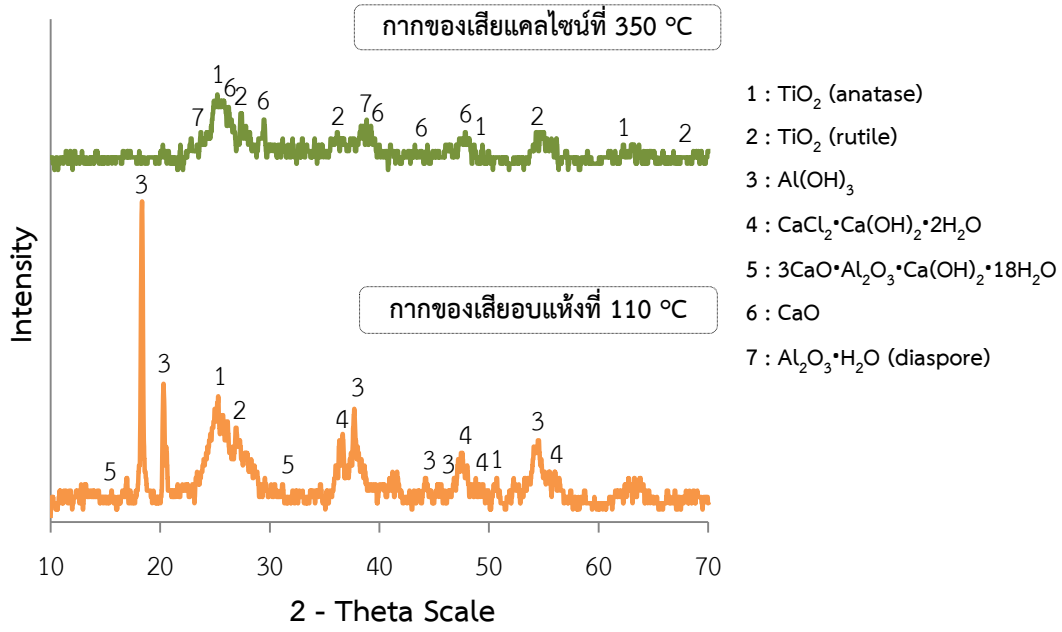
จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของกากของเสียที่ทำการอบแห้งแสดงในรูปที่ 4.2 พบว่าธาตุหลักที่อยู่ในกากของเสียนั้นอยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ ไฮเดรต (H_2O) ไฮดรอกไซด์ (OH) และสารประกอบคลอไรด์ โดยกากของเสียประกอบด้วยเฟสหลัก ได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ในรูปของทั้งอะนาเทสและรูไทล์ กิบบ์ไซต์ ($Al(OH)_3$) แคลเซียมอะลูมิเนียมออกไซด์ไฮดรอกไซด์ไฮเดรต ($3CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}Ca(OH)_2{\cdot}18H_2O$) และแคลเซียมคลอไรด์ไฮดรอกไซด์ไฮเดรต ($CaCl_2{\cdot}Ca(OH)_2{\cdot}H_2O$) สารประกอบไฮดรอกไซด์เหล่านี้มีสมบัติในการดูดความชื้นได้ ทำให้เมื่อมีการนำกากของเสียไปทำการอบให้แห้งและตั้งทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้อง พบว่ากากของเสียมีการดูดความชื้นกลับได้ และเมื่อมีการนำผงกากของเสียที่อบให้แห้งแล้วไปทำการร่อนผ่านตะแกรงร่อน (sieve) พบว่าตะแกรงร่อนถูกกากของเสียกัดกร่อนจนตะแกรงร่อนผุและเป็นสนิม เนื่องจากเกิดจากการกัดกร่อนของสารประกอบคลอไรด์ที่มีในกากของเสีย นอกจากนี้สารประกอบคลอไรด์ ($CaCl_2$) เมื่อนำมาใส่ลงน้ำเคลือบจะทำให้น้ำเคลือบมีความหนืดมากและไหลตัวได้ยากอีกด้วย เนื่องจากมีสมบัติเป็นอิเล็กโทรไลต์ ทำให้อนุภาคในน้ำเคลือบเกิดการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน เช่นเดียวกับกรดต่างๆ เช่น แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) และโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) [9] งานวิจัยนี้ต้องการใช้กากของเสียดังกล่าวเป็นวัตถุดิบทดแทนวัตถุดิบไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้าในเคลือบ จึงจำเป็นต้องกำจัดสารประกอบคลอไรด์ก่อน เพื่อจะได้ไม่เกิดปัญหาน้ำเคลือบเกิดการตกตะกอนเร็ว เมื่อใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบในน้ำเคลือบ สารประกอบแคลเซียมคลอไรด์เกิดการสลายตัวได้ที่อุณหภูมิประมาณ

300-350 องศาเซลเซียส [41,42] งานวิจัยจึงมีการนำกากของเสียไปทำการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดสารประกอบคลอไรด์



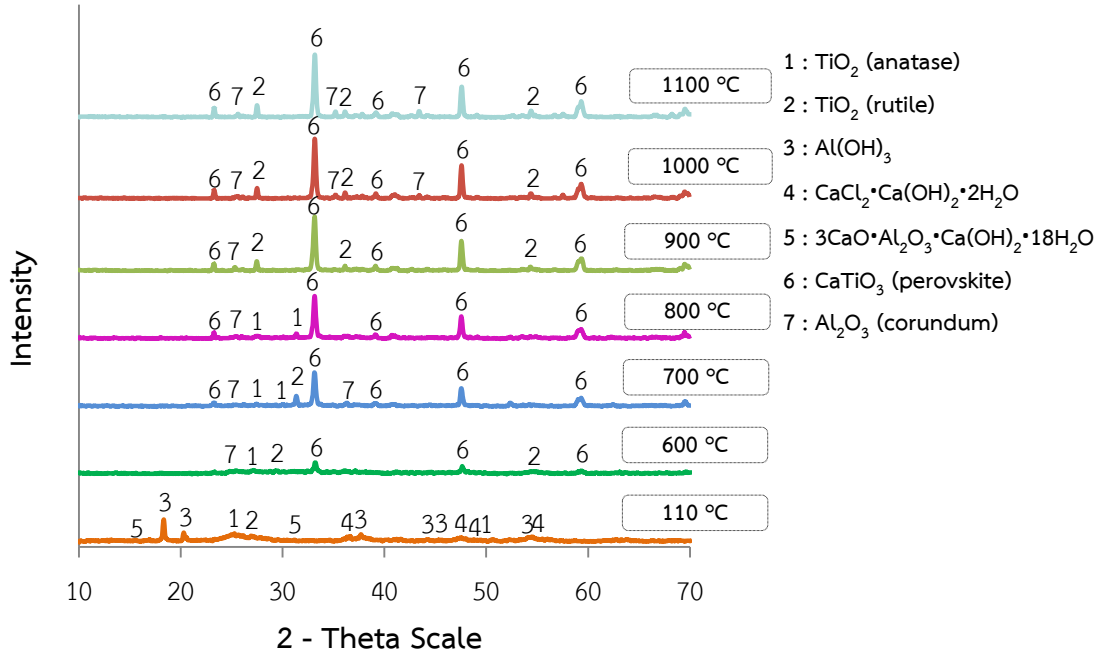
รูปที่ 4.2 องค์ประกอบทางเฟสของกากของเสียที่อุณหภูมิห้อง

เมื่อนำกากของเสียไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส และนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสดังรูปที่ 4.3 พบว่าสารประกอบคลอไรด์ในกากของเสียเกิดการสลายตัวออกไปจนหมด และองค์ประกอบทางเฟสของกากของเสียที่ผ่านการแคลไซน์แล้วจะพบเพียงไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่อยู่ในรูปของทั้งอะนาเทสและรูไทล์ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และไดอะสปอร์ ($Al_2O_3 \cdot H_2O$) เท่านั้น



รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเฟสของกากของเสียที่ผ่านการอบแห้งและผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส

เมื่อนำกากของเสียไปทำการแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 600 – 1100 องศาเซลเซียส และนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส ดังรูปที่ 4.4 พบว่าสารประกอบไฮเดรต ไฮดรอกไซด์ และสารประกอบคลอไรด์ จะเกิดการสลายตัวกลายเป็นสารประกอบออกไซด์ทั้งหมด และที่อุณหภูมิสูงกว่า 1000 องศาเซลเซียส แคลเซียมออกไซด์ที่พบในกากที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสนั้น เมื่อทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูงขึ้นแคลเซียมออกไซด์นี้จะเกิดปฏิกิริยากับไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดเป็นเฟสแคลเซียมไทเทเนตที่มีโครงสร้างเป็นเพอรอฟสไกต์ (Perovskite) ดังนั้นในกากของเสียที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1000 องศาเซลเซียส จะพบเพียงอะลูมินา แคลเซียมไททาเนต และไทเทเนียมไดออกไซด์เท่านั้น ไทเทเนียมไดออกไซด์พบเพียงเฟสที่เป็นรูไทล์ เนื่องจากเฟสอะนาเทสจะเกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นรูไทล์ทั้งหมดที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่อุณหภูมิตั้งแต่ 900 องศาเซลเซียสขึ้นไป เฟสอะนาเทสจะไม่เสถียร นอกจากนี้ความเข้มของพีคในแต่ละพีคสูงขึ้นเมื่อเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น พีคในแต่ละอุณหภูมิมีความคล้ายคลึงกัน

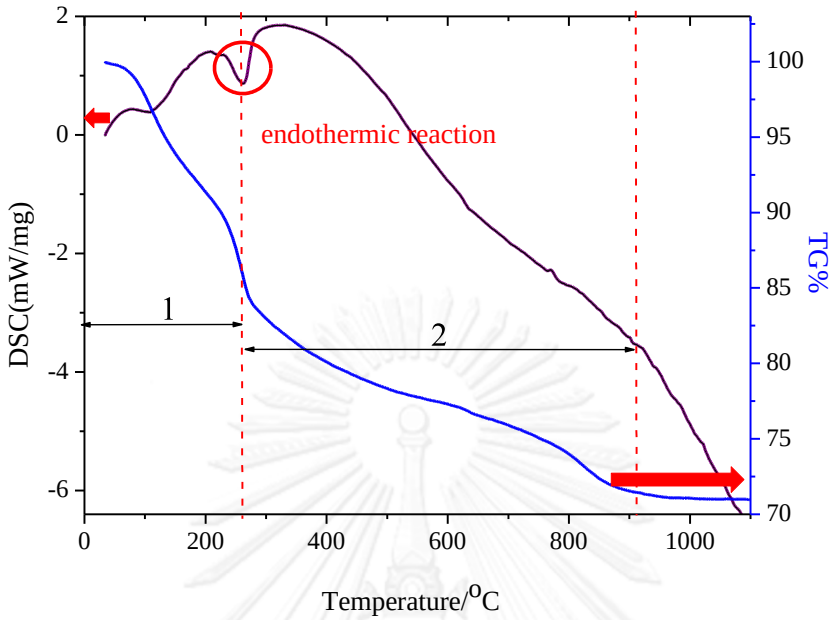


รูปที่ 4.4 องค์ประกอบทางเฟสของกากของเสียที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 600-1100 องศาเซลเซียส

4.3 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อกากของเสียได้รับความร้อน

จากผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาและน้ำหนักที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่อกากของเสียได้รับความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าที่อุณหภูมิประมาณ 270 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยาดูดความร้อน ซึ่งแสดงการสลายตัวของสารประกอบไฮเดรต และที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เกิดการเปลี่ยนเฟสของไทเทเนียมไดออกไซด์จากอะนาเทสเป็นรูไทล์ และเกิดการเกิดขึ้นของเพอรอฟสไกต์ นอกจากนี้ยังพบการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก (เส้นสีน้ำเงิน) 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส: เกิดการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากความชื้นที่ถูกดูดกลับเข้ามาหลังการอบแห้ง และเกิดการสลายตัวของน้ำในโครงสร้างผลึกของเฟสกิบบ์ไซต์ ($Al(OH)_3$) แคลเซียมอะลูมิเนียมออกไซด์ไฮดรอกไซด์ไฮเดรต ($3CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}Ca(OH)_2{\cdot}18H_2O$) และแคลเซียมคลอไรด์ไฮดรอกไซด์ไฮเดรต ($CaCl_2{\cdot}Ca(OH)_2{\cdot}H_2O$) ซึ่งเป็นเฟสหลักที่อยู่ในกากของเสียอบแห้ง และเกิดการสลายตัวของคลอไรด์ด้วย และช่วงที่ 2 ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส: เกิดการสลายตัวของน้ำในโครงสร้างผลึกไดอะสปอร์ ($Al_2O_3{\cdot}H_2O$) และน้ำในโครงสร้างผลึกที่ยังสลายตัวออกไม่หมดในช่วงแรก

จากผลการวิเคราะห์นี้ช่วยยืนยันได้ว่าสารประกอบคลอไรด์ในกากของเสียมีการสลายตัวได้อย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส ดังนั้นการนำกากของเสียที่ผ่านการแคลไซน์ที่ 350 องศาเซลเซียส ไปใช้เป็นวัตถุดิบในน้ำเคลือบ จึงน่าจะไม่เกิดปัญหาที่ทำให้น้ำเคลือบหนืดหรือไหลตัวได้ช้า เนื่องจากสารประกอบคลอไรด์เกิดการสลายตัวไปแล้ว



รูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาเคมีและน้ำหนักของกากของเสียเมื่อได้รับความร้อน

4.4 ความหนาแน่นของผงกากของเสีย

ค่าความหนาแน่นของผงกากของเสียอบแห้งที่ได้ทำการวิเคราะห์โดยใช้ขวดพิคโนมิเตอร์ (Pycnometer) คือ 2.0114 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

4.5 การสูญเสียน้ำหนักหลังการอบและหลังการเผาของกากของเสีย

เมื่อนำกากของเสียที่ยังไม่ผ่านการอบแห้งอยู่ในลักษณะของเหลวข้น 100 กรัม มาทำการอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส พบว่ากากของเสียเหลือน้ำหนักหลังการอบเพียง 20 กรัมเท่านั้น จะเห็นได้ว่าในกากของเสียที่เป็นของเหลวข้นนั้นมีเปอร์เซ็นต์ของของแข็งเพียง 20 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น หลังจากนั้นนำกากของเสียไปแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส พบว่าจากเดิมที่มีกากของเสียแข็งอยู่ 20 กรัม แต่เมื่อนำไปแคลไซน์พบว่ากากของเสียเหลือเพียง 14 กรัมเท่านั้น จากผลการวิเคราะห์นี้สามารถกล่าวได้ว่ากากของเสียมีการสูญเสียน้ำหนักหลังการเผาประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับการสูญเสียน้ำหนักของกากของเสียอบแห้งที่แคลไซน์จนถึงอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.5 ที่มีการสูญเสียน้ำหนักประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์เช่นเดียวกัน ผลการวิเคราะห์ส่วนนี้มีความสำคัญในการคำนวณสูตรเคลือบ เมื่อมีการนำกากของเสียไปใช้เป็นวัตถุดิบในสูตรเคลือบ

บทที่ 5

การใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบในเคลือบเซรามิก

บทที่ 5 ประกอบด้วยผลการทดลองการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบในเคลือบเซรามิก แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ (1) การใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบทดแทนไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้าในสูตรเคลือบมาตรฐาน และ (2) การปรับสูตรเคลือบ เพื่อศึกษาบทบาทของกากของเสียต่อสมบัติของเคลือบที่ได้

5.1 การเลือกสูตรเคลือบมาตรฐาน

เกณฑ์ในการเลือกสูตรเคลือบมาตรฐาน มีดังนี้

(1) มีส่วนผสมของไทเทเนียมไดออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ และอะลูมินาในสูตรเคลือบ

(2) ปริมาณโดยโมลของแคลเซียมออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ ต้องใช้มากกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบในเคลือบนั้น จะทำให้ได้ออกไซด์ 3 ชนิด ได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ และ อะลูมินา นอกจากนี้ยังต้องมีการใส่วัตถุดิบอื่นๆ อีกเพื่อให้ได้เคลือบที่มีสมบัติตามต้องการ ซึ่งวัตถุดิบเหล่านั้นอาจให้แคลเซียมออกไซด์ และอะลูมินาด้วย หากไม่คำนึงในส่วนนี้ อาจทำให้ออกไซด์ที่ใส่ในเคลือบเกินความจำเป็นได้

(3) ให้เคลือบทึบสีขาวที่เผาที่อุณหภูมิประมาณ 1200 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการเผากระเบื้องโมเสค

(4) มีชนิดของออกไซด์ในส่วนผสมไม่เกิน 10 ชนิด เพื่อให้ง่ายต่อการเตรียมส่วนผสม

(5) ส่วนผสมวัตถุดิบอื่นๆ สามารถหาได้ง่ายไม่ซับซ้อน

ผู้วิจัยเลือกสูตรเคลือบที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบและเข้าเกณฑ์การเลือกมากที่สุดโดยสูตรเคลือบ Seger Formula และลักษณะของเคลือบมาตรฐานที่ได้จะมีความสุกตัว และมีผิวมันเงาเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 5.1

K_2O	0.15	Al_2O_3	0.15	SiO_2	1.88
MgO	0.17			TiO_2	0.14
CaO	0.14			ZrO_2	0.06

T_{firing} = 1250 °C

รูปที่ 5.1 สูตร Seger Formula และลักษณะของเคลือบทึบสีขาวสูตรมาตรฐาน

ส่วนผสมของวัตถุดิบของเคลือบมาตรฐาน แสดงในตารางที่ 5.1 มีการแทนการเรียกสูตรเคลือบมาตรฐานด้วยเคลือบ STD

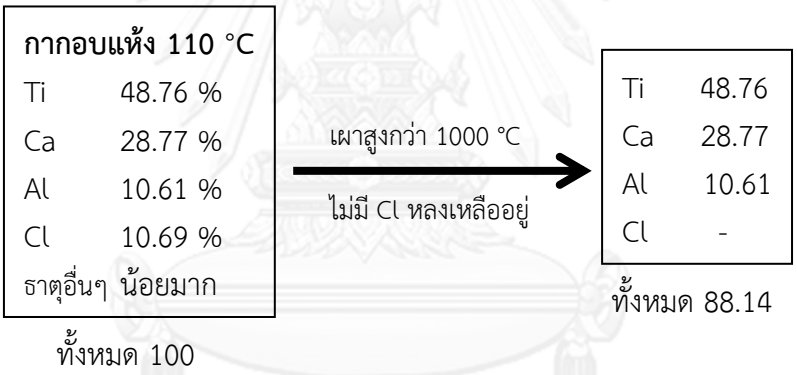
ตารางที่ 5.1 ส่วนผสมของวัตถุดิบในเคลือบมาตรฐาน (STD)

วัตถุดิบ	สูตรเคมี	สัดส่วนเปอร์เซ็นต์ (wt%)
โพแทสเซียมเฟลด์สปาร์	$K_2O{\cdot}Al_2O_3{\cdot}6SiO_2$	34.1
ซิลิกา	SiO_2	23.8
โดโลไมต์	$CaCO_3{\cdot}MgCO_3$	13.5
หินปูน	$CaCO_3$	9.5
ซิงก์ออกไซด์	ZnO	9.5
ไทเทเนียมไดออกไซด์ (รูไทล์)	TiO_2	4.8
เซอร์โคเนียมซิลิเกต	$ZrSiO_4$	4.8

5.2 สูตรทางเคมีของกากของเสีย

การเตรียมส่วนผสมของเคลือบมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทราบถึงสูตรทางเคมีของวัตถุดิบทุกตัวรวมไปถึงออกไซด์ที่หลงเหลืออยู่ในเนื้อเคลือบภายหลังการเผา สำหรับการหาสูตรทางเคมีของกากของเสียนั้น จากองค์ประกอบทางเฟสที่พบที่อุณหภูมิการสูงดังรูปที่ 4.4 พบว่ากากของเสียมีองค์ประกอบหลัก คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) แคลเซียมออกไซน์ (CaO) และอะลูมินา (Al_2O_3) กากของเสียจึงน่าจะมีสูตรทางเคมี คือ $aTiO_2 \cdot bCaO \cdot cAl_2O_3$ เมื่อ a b และ c เป็นจำนวนโมลของออกไซด์ในกากของเสียที่เผาที่ 1200 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงคำนวณย้อนกลับว่าเมื่อเตรียมกากของเสียจะใส่กากของเสียลงในส่วนผสมเคลือบในรูปแบบใด ไม่ว่าจะเป็นกากที่อบแห้งหรือกากที่เป็นครีมขาวข้นโดยอาศัยข้อมูลเปอร์เซนต์ของแข็งและการสูญเสียหลังเผา สำหรับงานวิจัยนี้จะมีการใช้กากของเสียในรูปของผงกากอบแห้ง ดังนั้นจำเป็นต้องระบุค่าของ a b และ c และหาอัตราส่วนระหว่าง a :b :c เพื่อให้ทราบสูตรทางเคมีของกากของเสียที่แน่นอน

เมื่อมีการนำกากของเสียไปทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย X-ray Fluorescence (XRF) ผลในหัวข้อที่ 4.1.1 นั้นพบว่ากากของเสียมีธาตุ Ti Ca Al และ Cl เป็นองค์ประกอบหลัก



มวลโมเลกุลของ TiO_2 CaO และ Al_2O_3มีค่าเท่ากับ 79.88 56 และ 102 กรัมต่อโมล ตามลำดับ (มวลอะตอมของ Ti = 47.88 Ca = 40 Al = 27 และ O= 16 หน่วยเป็นกรัมต่อโมล)

ทำการคำนวณหาน้ำหนักของออกไซด์แต่ละชนิดจากน้ำหนักของธาตุแต่ละธาตุที่ยังคงหลงเหลือภายหลังการเผาเผาจะได้ว่า

Ti 48.76 % $\longrightarrow \frac{W_{TiO_2}}{W_{Ti}} = \frac{MW_{TiO_2}}{MW_{Ti}} \longrightarrow W_{TiO_2} = \frac{79.88}{47.88} \times 48.76 = 81.35$ กรัม

Ca 28.77 % $\longrightarrow \frac{W_{CaO}}{W_{Ca}} = \frac{MW_{CaO}}{MW_{Ca}} \longrightarrow W_{CaO} = \frac{56}{40} \times 28.77 = 45.71$ กรัม

Al 10.61 & $\longrightarrow \frac{W_{Al_2O_3}}{W_{Al}} = \frac{MW_{Al_2O_3}}{MW_{Al}} \longrightarrow W_{Al_2O_3} = \frac{102}{54} \times 10.61 = 20.04$ กรัม

$$\text{จากสูตร จำนวนโมล} = \frac{\text{น้ำหนัก}}{\text{มวลโมเลกุล}}$$

ทำการคำนวณอัตราส่วนโดยโมลของออกไซด์ที่มีในกากของเสีย โมล$\mathbf{TiO_2}$: โมล$\mathbf{CaO}$: โมล$\mathbf{Al_2O_3}$

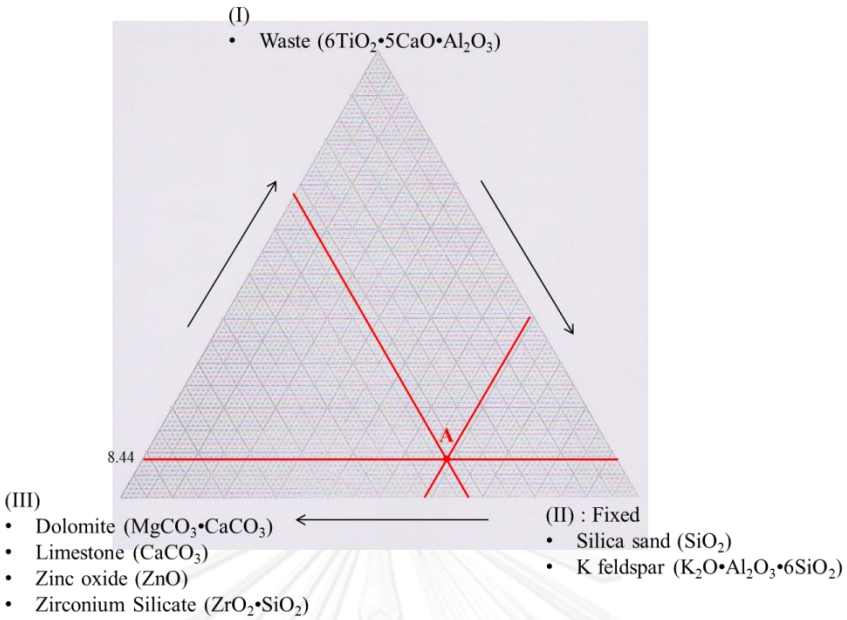
- อัตราส่วนโดยโมลของออกไซด์ในกากของเสีย เท่ากับ 81.35/79.88 TiO_2: 45.71/56 CaO : 20.04/102 Al_2O_3
- ได้จำนวนโมลของออกไซด์ในกากของเสียโดยประมาณ เท่ากับ 1.02 TiO_2: 0.82 CaO: 0.19 Al_2O_3

แสดงว่าค่าของ a = 1.02 b = 0.82 และ c = 0.19 เมื่อ a b และ c เป็นค่าจำนวนโมลของ TiO_2 CaO และ Al_2O_3 ตามลำดับ เมื่อทำให้เป็นอัตราส่วนอย่างง่ายของ a : b : c จะได้เป็น 6 : 5 : 1 โดยประมาณ ดังนั้นกากของเสียมีสูตรทางเคมีเป็น $\mathbf{6TiO_2 \cdot 5CaO \cdot Al_2O_3}$ และมีมวลโมเลกุลเท่ากับ 862 กรัมต่อโมล

เมื่อทราบสูตรทางเคมีของกากที่ผ่านการแคลไซน์แล้ว การเตรียมส่วนผสมทางเคมีจำเป็นต้องคำนวณย้อนกลับว่าน้ำหนักของกากอบแห้งเท่าใดจึงจะให้ได้ออกไซด์ตรงกับกากที่แคลไซน์แล้ว ตัวอย่างเช่น กากอบแห้ง 100 กรัมมีส่วนที่ไม่ใช่ Loss on ignition (LOI) 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ส่วนที่เป็น Loss on ignition ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากหัวข้อ 4.1.5) หากต้องการเนื้อออกไซด์ 100 กรัมต้องใช้กากอบแห้งเติมลงในส่วนผสม 142.8 กรัม เป็นต้น

5.3 การใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบทดแทนไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้าในสูตรเคลือบมาตรฐาน

ในการทดลองส่วนนี้จะใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบทดแทนไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้าในสูตรเคลือบมาตรฐาน โดยทำการเตรียมผงเคลือบและน้ำเคลือบสูตรมาตรฐาน แทนด้วย STD และสูตรที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบทดแทนไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้าในสูตรเคลือบมาตรฐาน แทนด้วย A ในสามเหลี่ยม triaxial ดังรูปที่ 5.2 โดยส่วนผสมของเคลือบที่เตรียมตามตารางที่ 5.2 โดยทั้งสองสูตรนี้เมื่อทำการเผาจะมีการให้ออกไซด์หลังการเผาเหมือนกัน อย่างไรก็ตามเคลือบทั้ง 2 สูตรนี้มีอุณหภูมิในการเผาที่แตกต่างกัน โดยเคลือบมาตรฐานมีอุณหภูมิในการเผาเคลือบคือ 1250 องศาเซลเซียส ในขณะที่เคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบนั้นงานวิจัยนี้มีความมุ่งเน้นเพื่อนำไปใช้สำหรับกระเบื้องโมเสคซึ่งต้องการเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ดังนั้นเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบทดแทนจึงมีอุณหภูมิเป้าหมายในการเผา คือ 1200 องศาเซลเซียส ได้ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ของเคลือบ ผลการวิเคราะห์ ดังนี้



รูปที่ 5.2 แผนภาพ triaxial ของเคลือบที่มีการใช้กากของเสียทดแทนวัตถุดิบในเคลือบมาตรฐาน

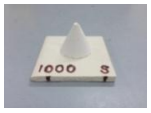
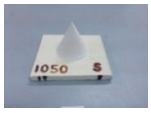
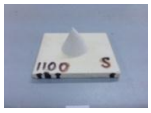
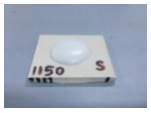
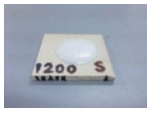
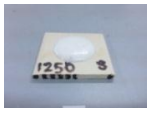
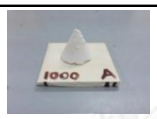
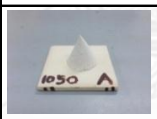
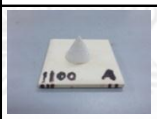
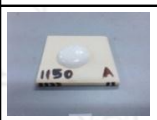
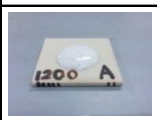
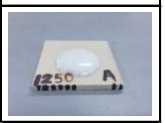
ตารางที่ 5.2 ส่วนผสมของสูตรเคลือบมาตรฐานที่มีการใช้กากของเสียทดแทนวัตถุดิบปกติ

วัตถุดิบ	**สูตรเคมี**	**เคลือบมาตรฐาน (wt%)**	**เคลือบกาก : จุด A (wt%)**
โพแทสเซียมเฟลด์สปาร์	K_2O•Al_2O_3•$6SiO_2$	34.1	35.5
หินปูน	$CaCO_3$	9.5	4.9
โดโลไมต์	$CaCO_3$•$MgCO_3$	13.5	13.5
ซิลิกา	SiO_2	23.8	23.5
ซิงค์ออกไซด์	ZnO	9.5	9.5
ไทเทเนียมไดออกไซด์ (รูไทล์)	TiO_2	4.8	-
เซอร์โคเนียมซิลิเกต	$ZrSiO_4$	4.8	4.7
กากของเสีย	$6TiO_2$•$5CaO$•Al_2O_3	-	**8.4**

5.3.1 พฤติกรรมการหลอมตัวและอุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบ

ทดสอบพฤติกรรมการหลอมตัวของเคลือบโดยการเผาเคลือบด้วยเตาเผาลำดับอุณหภูมิสำหรับเผาโคนเคลือบซึ่งแบ่งเป็น 6 อุณหภูมิ คือ 1000 1050 1100 1150 1200 และ 1250 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 5.3 พบว่าทั้งเคลือบมาตรฐาน STD และเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร A นั้น ที่อุณหภูมิ 1000 และ 1050 องศาเซลเซียส เคลือบไม่เกิดการหลอมตัว เมื่อมีการสัมผัสชิ้นงานด้วยมือเปล่า ผงเคลือบมีการหลุดติดมือมา ที่อุณหภูมิระหว่าง 1100 – 1150 องศาเซลเซียส เคลือบทั้งสองสูตร เริ่มเกิดการหลอมตัว โดยเคลือบสูตรมาตรฐาน STD เกิดการหลอมตัวได้มากกว่าสูตร A ที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส ซึ่งดูได้จากการแผ่รัศมีของเคลือบ ยิ่งเคลือบสามารถแผ่ได้มาก แสดงว่ามีการหลอมตัวได้ดี และที่อุณหภูมิระหว่าง 1200 – 1250 องศาเซลเซียส เคลือบทั้งสองมีการหลอมตัวและลักษณะของผิวเคลือบที่ได้ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 5.3 พฤติกรรมการหลอมตัวของเคลือบ STD และเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร A ที่อุณหภูมิ 1000 -1250 องศาเซลเซียส

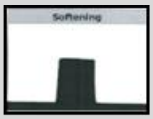
สูตร	อุณหภูมิการเผา					
	1000 °C	1050 °C	1100 °C	1150 °C	1200 °C	1250 °C
Standard (STD)						
A : waste 8.44 wt%						

ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบมาตรฐาน STD และเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร A แสดงในตารางที่ 5.4 พบว่าเคลือบทั้งสองสูตรมีอุณหภูมิในการ sintering softening และ sphere ที่ใกล้เคียงกัน แต่มีอุณหภูมิ hemisphere และ melting ที่แตกต่างกัน โดยเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร A มีอุณหภูมิ melting ที่มากกว่าเคลือบมาตรฐาน STD ทั้งๆ ที่ทั้งสองสูตรนี้เมื่อเผาแล้วจะมีองค์ประกอบออกไซด์ที่เหมือนกัน อาจเป็นเพราะว่ากากของเสียที่ใส่ในเคลือบสูตร A มีไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อยู่ทั้งในรูปของอะนาเทสและรูไทล์ จึงต้องมีการให้พลังงานในการเปลี่ยนแปลงเฟสจากอะนาเทสไปเป็นรูไทล์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และอาจเกิดจากสารประกอบอื่นๆ ที่เจือปนมากับกากของเสียมีความทนไฟ ทำให้เคลือบมี melting temperature ที่สูงกว่าเคลือบมาตรฐาน STD ขณะที่สูตรเคลือบมาตรฐาน STD มีการใช้ผงไทเทเนียมที่อยู่ในรูปของรูไทล์เพียงอย่างเดียวทำให้มีความสามารถในการเกิดเป็นเนื้อแก้วของเคลือบเกิดได้ง่ายกว่า

กากของเสียมีความเป็นไปได้ในการใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้าในเคลือบมาตรฐาน STD เคลือบทั้งสองสูตรมีพฤติกรรมการหลอมตัวและอุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะที่

ใกล้เคียงกัน ผิวเคลือบที่ได้ทั้งสองสูตรคือเคลือบสีขาวทึบแสง แต่ผิวเคลือบที่ได้จากสูตรเคลือบ A มีความมันวาวมากกว่าเมื่อเทียบกับสูตร STD ที่อุณหภูมิเดียวกัน

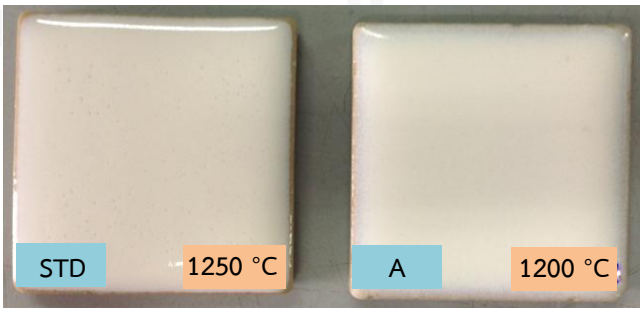
ตารางที่ 5.4 การเปรียบเทียบอุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบมาตรฐาน STD และเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร A

เคลือบ	Characteristic temperatures (°C)				
	sintering	softening	sphere	half-sphere	melting
					
STD	1097	1128	1163	1164	**1182**
A (8.44 wt%)	1080	1124	1173	1175	**1216**

wt% หมายถึงสัดส่วนของกากของเสียในส่วนผสมเคลือบ หน่วยเป็นเปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก

5.3.2 ลักษณะทางกายภาพและค่าสีของเคลือบ

จากการสังเกตลักษณะของผิวเคลือบสูตรมาตรฐาน STD ที่เผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส และสูตรที่มีการใช้กากของเสียทดแทนวัตถุดิบทางการค้าในสูตรมาตรฐานสูตร A ที่เผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียสแสดงดังรูปที่ 5.3 พบว่าผิวเคลือบที่ได้จากเคลือบทั้งสองชนิด ได้เคลือบที่มีผิวมันเงาสีขาวทึบ จากการสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่าเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร A จะมีความขาวน้อยกว่าเคลือบมาตรฐาน STD เล็กน้อย เคลือบทั้งสองสามารถปกปิดผิวของเนื้อกระเบื้องได้ดี ไม่เกิดการไหลเยิ้มของเคลือบ และไม่เกิดตำหนิบนเคลือบ เช่น การรานตัว หรือการเกิดรูพรุน ทั้งนี้เนื่องจากเคลือบทั้งสองชนิดน่าจะมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนระหว่างเนื้อดินและเคลือบที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 5.3 ลักษณะของเคลือบมาตรฐาน STD เผาที่ 1250 องศาเซลเซียส และเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร A เผาที่ 1200 องศาเซลเซียส

เมื่อเราสังเกตด้วยตาเปล่า จะเห็นว่าเคลือบสูตร A มีสีขาวกว่าเคลือบมาตรฐาน STD แต่เคลือบมาตรฐาน STD มีความทึบแสงมากกว่าเคลือบสูตร A เล็กน้อย สำหรับค่าสีของเคลือบที่วัดด้วยเครื่อง spectrophotometer แสดงในตารางที่ 5.5 โดยแสดงด้วยค่า L a* และ b* ค่า L* บ่งบอกถึงค่าความสว่าง แกน a* และ b* บ่งบอกถึงค่าสี โดย –a +a -b และ +b จะแสดงความเป็นสีเขียว แดง น้ำเงิน และเหลืองตามลำดับ จากผลการวัดค่าสีพบว่า เคลือบมาตรฐาน STD มีค่าความสว่างมากกว่าเคลือบสูตร A ซึ่งมีค่าความสว่าง คือ 94.53 และ 91.95 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และเคลือบสูตร A มีค่าความเขียวมากกว่าเคลือบมาตรฐาน STD สาเหตุที่เคลือบมีค่าความสว่างที่ต่ำกว่าเคลือบมาตรฐาน STD นั้น อาจเนื่องมาจากสิ่งเจือปนที่มากับกากของเสียที่ใส่เป็นวัตถุดิบในเคลือบ

ตารางที่ 5.5 ค่าสีของเคลือบมาตรฐาน STD และเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร A

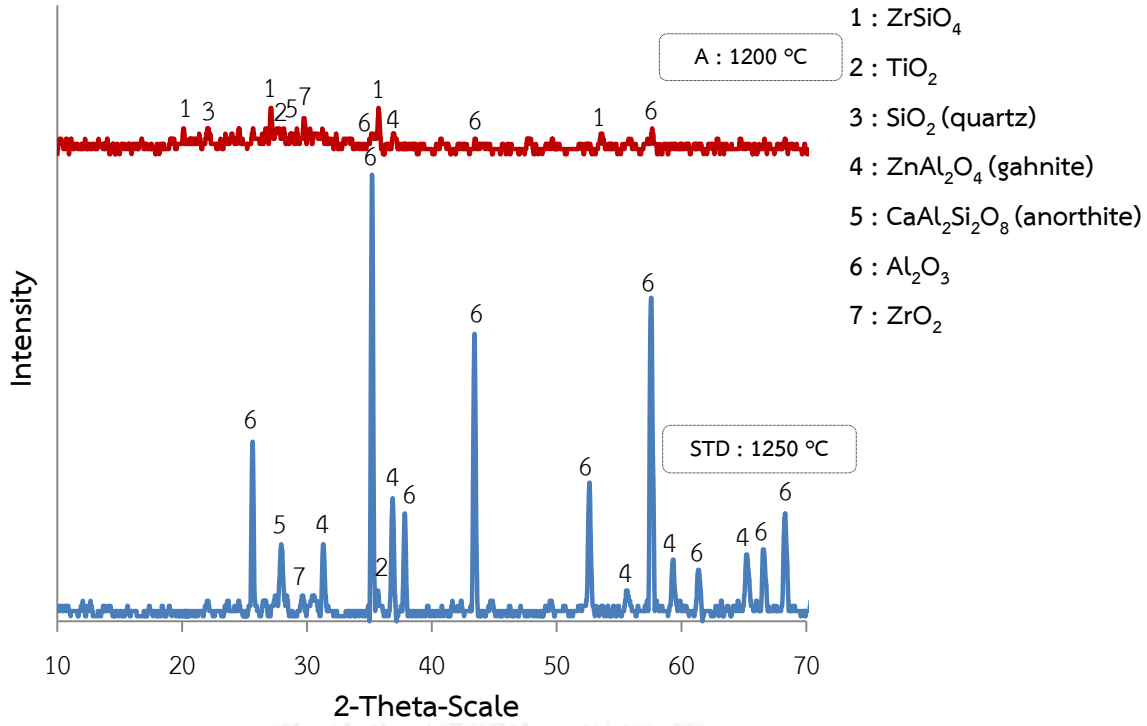
ค่าสี	เคลือบ	
	STD	A (8.44 wt%)
L (whiteness)	94.53	91.95
a* (green-red)	-0.64	-1.72
b* (blue-yellow)	1.81	-1.32
ลักษณะสีเคลือบ		
dL ($L-L_{STD}$)	-	2.58
da* ($a-a_{STD}$)	-	1.08
db* ($b-b_{STD}$)	-	3.13
dE*		4.198

wt% หมายถึงสัดส่วนของ**กากของเสีย**ในส่วนผสมเคลือบ หน่วยเป็นเปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.3.3 องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบหลังเผา

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบหลังเผาของเคลือบมาตรฐาน STD และเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบทดแทนไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้าสูตร A รูปที่ 5.4 พบว่าเคลือบทั้งสองชนิดมีเฟสองค์ประกอบที่คล้ายคลึงกัน คือพบเฟสของเซอร์โคเนียมซิลิเกต ($ZrSiO_4$) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ซิลิกา (SiO_2) ซิงก์อะลูมิเนต ($ZnAl_2O_4$) อะนอร์ไทต์ ($CaAl_2Si_2O_8$) และอะลูมินา (Al_2O_3) เนื่องจากเมื่อทำการเผาวัตถุดิบของเคลือบทั้งสองชนิดนั้น เคลือบทั้งสองชนิดจะให้ออกไซด์ที่เหมือนกัน แต่พีคของเคลือบมาตรฐาน STD มีความเป็นพีคชัดเจนกว่าเคลือบสูตร A ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเคลือบสูตร A มีการใช้กากของเสียที่มีความเป็นผลึกต่ำเป็นวัตถุดิบนั่นเอง



รูปที่ 5.4 องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบสูตรมาตรฐาน STD และเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร A

5.3.4 สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน

จากทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ว่าการที่เคลือบจะสามารถยึดเกาะผลิตภัณฑ์ได้ดี มีความแข็งแรง และไม่เกิดการแตกรานเมื่อใช้งานนั้น การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบควรมีค่าต่ำกว่าเนื้อดิน เพื่อให้เคลือบอยู่ภายใต้สภาวะกดอัด (Compression) [9] จากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ทางความร้อนของเนื้อดินและเคลือบดังแสดงในตารางที่ 5.6 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเนื้อดินและเคลือบมาตรฐาน STD ที่เผาที่อุณหภูมิเดียวกัน คือ 1250 องศาเซลเซียส ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบมีค่าสูงกว่าเนื้อดิน โดยค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเนื้อดินและเคลือบ คือ 7.98×10^{-6} และ 8.83×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส ตามลำดับ ทำให้เคลือบอยู่ในสภาวะแรงดึง (Tension) ซึ่งจะส่งผลให้เคลือบอาจเกิดการรานได้ในอนาคต และเมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนระหว่างเนื้อดินและเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบทดแทนไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้าสูตร A ที่เผาที่อุณหภูมิเดียวกัน คือ 1200 องศาเซลเซียส พบว่าเคลือบมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่ต่ำกว่าเนื้อดิน ทำให้เคลือบอยู่ในสภาวะแรงอัด ทำให้ได้เคลือบที่สามารถยึดติดกับเนื้อกระเบื้องโมเสคได้ดี เคลือบมีความแข็งแรง และไม่เกิดการรานตัวเมื่อใช้งานในอนาคต จากส่วนนี้จะเห็นได้ว่าเคลือบที่เตรียมได้จากกากของเสียสูตร A นี้สามารถปิดคลุมผิวของผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่าเคลือบมาตรฐาน STD

ตารางที่ 5.6 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเนื้อดินและของเคลือบมาตรฐาน STD และเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร A

เคลือบ	coefficient of thermal expansion, COE ($x10^{-6}$ $°C^{-1}$)	ΔCOE (COE_{body}-COE_{glaze})
body (1250 °C)	**7.98**	
STD	8.83	-0.85
body (1200 °C)	**8.70**	
A (8.44 wt%)	7.90	0.80

wt% หมายถึงสัดส่วนของ**กากของเสีย**ในส่วนผสมเคลือบ หน่วยเป็นเปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก

5.3.5 ความทนทานต่อสารเคมี

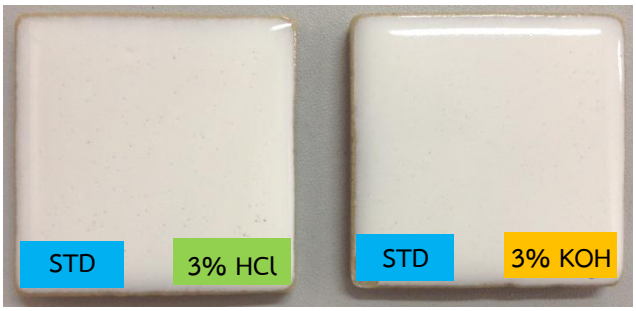
ระดับความทนทานต่อสารเคมีของเคลือบมาตรฐาน STD และเคลือบสูตร A แสดงดังตารางที่ 5.7 จากการทดสอบนั้นพบว่าเคลือบทั้ง 2 ชนิด สามารถทนทานต่อกรด (3% HCl) และด่าง (3% KOH) ได้ในระดับดีมาก โดยอยู่ในระดับ A คือ เมื่อทำการแช่กรดและด่างเป็นเวลา 4 วันแล้ว ปรากฏว่าสีและผิวของเคลือบไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างผิวที่ถูกทดสอบและผิวที่ไม่ถูกทดสอบพบว่าการสะท้อนแสงของเคลือบยังสามารถสะท้อนแสงได้ดีเหมือนเดิม ลักษณะของผิวเคลือบที่ผ่านการทดสอบแล้วแสดงในรูปที่ 5.5 สำหรับเคลือบมาตรฐาน STD และรูปที่ 5.6 สำหรับเคลือบสูตร A

ตารางที่ 5.7 ระดับความทนทานต่อสารเคมีของของเคลือบมาตรฐาน STD และเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร A

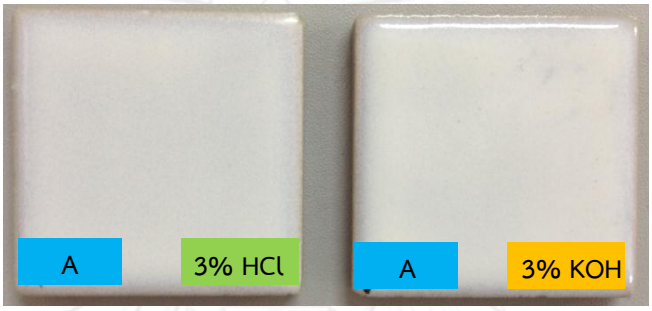
เคลือบ	ระดับความทนทานต่อสารเคมี	
	HCl 3%	KOH 3%
STD	GA	GA
A (8.44 wt%)	GA	GA

wt% หมายถึงสัดส่วนของ**กากของเสีย**ในส่วนผสมเคลือบ หน่วยเป็นเปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก

CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 5.5 ลักษณะผิวของเคลือบมาตรฐาน STD ที่ผ่านการทดสอบความทนทานต่อสารเคมี



รูปที่ 5.6 ลักษณะผิวของเคลือบสูตร A ที่ผ่านการทดสอบความทนทานต่อสารเคมี

5.3.6 ความแข็งและความทนทานต่อการขูดขีด

ค่าความแข็งและความทนทานต่อการขูดขีดของเคลือบแสดงในตารางที่ 5.8 เคลือบเซรามิกจัดเป็นวัสดุที่มีความเปราะ ดังนั้นจึงมีค่าความแข็งที่ไม่สูงมากนัก [49] เมื่อทดสอบความทนทานต่อการขูดขีดของเคลือบด้วยเครื่อง sand falling เคลือบที่ทนทานต่อการขูดขีดได้มาก จะมีการสูญเสียน้ำหนักของเคลือบต่ำ ค่าความแข็งและความทนทานต่อการขูดขีดของเคลือบแสดงในตารางที่ 5.8 พบว่าเคลือบทั้งสองชนิดมีความแข็งที่ใกล้เคียงกัน แต่เคลือบมาตรฐาน STD สามารถทนทานต่อการขูดขีดได้ดีกว่าเคลือบสูตร A เล็กน้อย

ตารางที่ 5.8 ความแข็งและความทนทานต่อการขูดขีดของเคลือบมาตรฐาน STD และเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร A

เคลือบ	Vickers hardness, H_v (GPa)	น้ำหนักที่หายไปหลังทำการทดสอบความต้านทานต่อการขูดขีด (%)
STD	4.5134 ± 0.2880	0.084 ± 0.030
A (8.44 wt%)	4.6021 ± 0.3390	0.101 ± 0.008

wt% หมายถึงสัดส่วนของ**กากของเสีย**ในส่วนผสมเคลือบ หน่วยเป็นเปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก

5.4 การปรับสูตรเคลือบ

5.4.1 การปรับสูตรเคลือบโดยการเพิ่มปริมาณกากของเสียในสูตรเคลือบ โดยที่วัตถุดิบตัวอื่นๆ ลดลงในอัตราส่วนเท่าๆ กัน

การทดลองส่วนนี้เป็นการปรับส่วนผสมของเคลือบ โดยมีการเพิ่มปริมาณของกากของเสียในสูตรเคลือบ และกำหนดให้วัตถุดิบตัวอื่นๆ ในสูตรนั้นลดลงในสัดส่วนคงที่ จากเดิมที่สูตร A มีปริมาณกากของเสีย คือ 8.44 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักนั้น ในส่วนนี้จะทำการเพิ่มปริมาณกากของเสียในสูตรเคลือบเป็น 15 20 25 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และทำการแทนสัญลักษณ์แต่ละสูตรด้วย B* C* D* และ E* ตามลำดับ ส่วนผสมของวัตถุดิบแสดงใน ตารางที่ 5.9

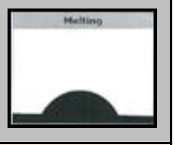
5.4.1.1 อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบ

ค่าการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบแสดงในตารางที่ 5.10 พบว่าค่าการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบเมื่อทำการปรับสูตรเคลือบไม่แตกต่างกันมากนั้น เนื่องจากเมื่อทำการปรับสูตรเคลือบแล้ววัตถุดิบที่เป็นตัวลดจุดสุกตัวของเคลือบนั้นมีปริมาณที่ไม่แตกต่างกันมากนัก วัตถุดิบที่มีจุดหลอมเหลวสูงได้แก่ ซิลิกาลดลง ในขณะที่หินปูนและไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งเป็นตัวทนไฟเพิ่มขึ้น ดังนั้นวัตถุดิบที่มีผลต่ออุณหภูมิในการหลอมตัวจึงไม่แตกต่างไปจากเดิมด้วย จึงเป็นเหตุให้อุณหภูมิในการหลอมตัวไม่แตกต่างกัน

ตารางที่ 5.9 ส่วนผสมของสูตรเคลือบที่ทำการปรับสูตรเคลือบ โดยเพิ่มปริมาณกากของเสียในสูตรเคลือบ และวัตถุดิบตัวอื่นๆ ลดลงในอัตราส่วนเท่าๆ กัน

วัตถุดิบ	สัดส่วนโดยน้ำหนัก (wt%)				
	STD	A	B*	C*	D*
โพแทสเซียมเฟลด์สปาร์	34.13	35.52	32.98	31.04	29.10
ซิลิกา	23.81	23.49	21..81	20.52	19.24
โดโลไมต์	13.49	13.35	12.39	11.66	10.94
หินปูน	9.52	4.89	4..54	4.27	4.00
ซิงก์ออกไซด์	9.52	9.65	8.96	8.43	7.90
เซอร์โคเนียมซิลิเกต	4.76	4.67	4.34	4.08	3.83
ไทเทเนียมไดออกไซด์ (รูไทล์)	4.76	-	-	-	-
กากของเสีย	-	8.44	15.00	20.00	25.00

ตารางที่ 5.10 อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบที่มีการเพิ่มปริมาณกากของเสียในสูตรเคลือบและวัตถุดิบตัวอื่นๆ ลดลงในอัตราส่วนเท่าๆ กัน

เคลือบ (% ของกากของเสีย)	Characteristic temperature (°C)				
	sintering	softening	sphere	half-sphere	melting
					
STD	1097	1128	1163	1164	**1182**
A (8.44 wt%)	1080	1124	1173	1175	**1216**
B* (15 wt%)	1099	1149	1193	1194	**1206**
C* (20 wt%)	1133	1153	1188	1189	**1205**
D* (25 wt%)	1107	1152	1185	1186	**1201**

wt% หมายถึงสัดส่วนของ**กากของเสีย**ในส่วนผสมเคลือบ หน่วยเป็นเปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก

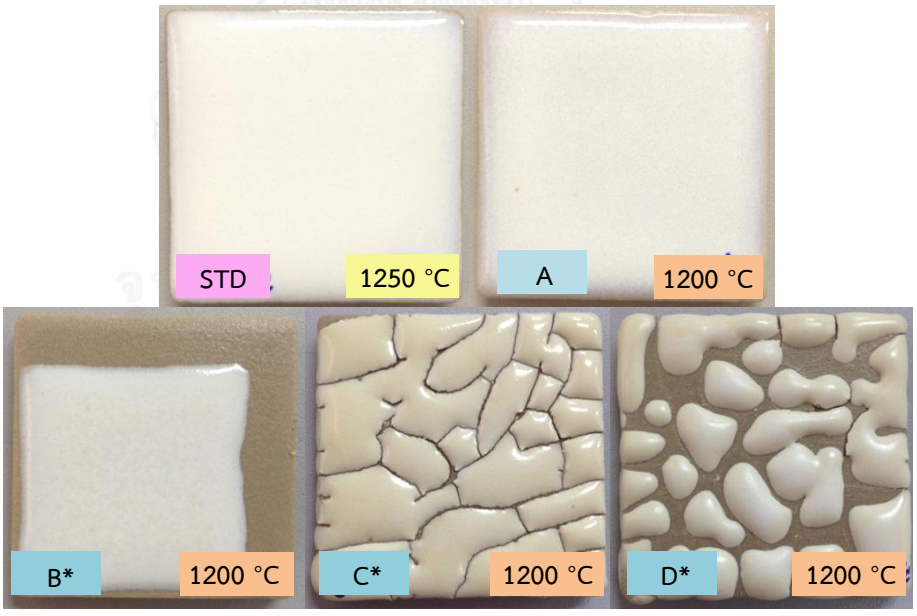
5.4.1.2 ลักษณะทางกายภาพของเคลือบ

เมื่อมีนำน้ำเคลือบสูตร B* C* และ D* มาเคลือบลงบนผิวผลิตภัณฑ์ และวางชิ้นงานที่เคลือบแล้วทิ้งไว้ให้แห้งในอากาศ พบว่าเคลือบเกิดการแตกระแหงดังรูปที่ 5.7 การยึดติดระหว่างชั้นเคลือบกับผลิตภัณฑ์ยึดติดได้ไม่ดี และเมื่อทำการหยิบชิ้นงาน เคลือบมีการหลุดติดมือขึ้นมา ซึ่งแตกต่างกับเคลือบมาตรฐาน STD และเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร A ที่สามารถปกคลุมผิวของผลิตภัณฑ์ได้ดีและไม่เกิดการแตกระแหงหลังชุบเคลือบ ทั้งนี้เนื่องจากการปรับเคลือบของสูตร B* C* และ D* เคลือบที่ได้มีสมบัติในการยืดหยุ่นได้น้อย ทำให้เคลือบเกิดการแตกกระแหงเนื่องจากความเครียด ส่งผลให้เคลือบเกิดการดึงตัวและผิวเคลือบผลิตภัณฑ์เป็นหย่อมๆ เนื่องจากกากของเสียที่มีการใช้เป็นวัตถุดิบเคลือบนั้นมีความละเอียด และเกิดการหดตัวหลังชุบเคลือบมากเกินไป ดังนั้นเมื่อมีการใส่กากของเสียในสูตรเคลือบในปริมาณมากขึ้น ก็ย่อมทำให้ชั้นเคลือบเกิดการแตกระแหงมากขึ้นด้วย การแก้ปัญหาทำได้ด้วยการเช็ดผิวชิ้นงานก่อนทำการชุบเคลือบให้ชุ่มน้ำ ลดความหนาของชั้นเคลือบ หรืออาจเติมวัตถุดิบที่ทำหน้าที่เป็นตัวยึดเกาะ (Binder) ลงในเคลือบ [9]

รูปที่ 5.7 ลักษณะการแตกระแหงของเคลือบสูตร B* C* และ D* เมื่อแห้งแล้ว

เมื่อนำเคลือบสูตร B* C* และ D* ไปทำการเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส แล้วเปรียบเทียบลักษณะเคลือบสูตร B* C* และ D* กับเคลือบมาตรฐาน STD และเคลือบสูตร A แสดงในรูปที่ 5.8 พบว่าเคลือบสูตร B* มีผิวเคลือบเรียบเนียนมันเงาสวยงาม แต่เคลือบเกิดการรั้งตัวมากกว่าเนื้อดินอย่างเห็นได้ชัด จนเห็นผิวของผลิตภัณฑ์ ส่วนเคลือบสูตร C* และ D* ผิวเคลือบเกิดการดึงรั้งมากขึ้น เคลือบเกิดตำหนิที่เรียกว่าเคลือบร่น (Crawling) โดยเคลือบสูตร C* และ D* นั้นเกิดตำหนิที่รุนแรงมากจนเกิดการแตกของชั้นเคลือบ เห็นเนื้อของผลิตภัณฑ์อย่างชัดเจน สาเหตุของการเกิดเคลือบร่นเกิดจากการที่ขนาดอนุภาคของน้ำเคลือบมีความละเอียดมากเกินไป มีปริมาณของซิลิกาในเคลือบมากเกินไป ปริมาณดินในเคลือบมากเกินไปและการใช้วัตถุดิบบางตัว เช่น ซิงก์ออกไซด์ (ZnO) แมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) ทำให้เคลือบหดตัวมาก และการใช้วัตถุดิบที่มีความหดตัวมาก [50]

จากการปรับส่วนผสมของสูตรเคลือบในส่วนนี้ ได้ทำการปรับสูตรเคลือบโดยการเพิ่มปริมาณของกากของเสีย แต่วัตถุดิบตัวอื่นๆ ลดลง ดังนั้นการเกิดการร่นของเคลือบในส่วนนี้ จึงเกิดจากการที่ใช้กากของเสียที่มีความละเอียดและมีความหดตัวสูง ดังนั้นการใส่กากของเสียในเคลือบในปริมาณมาก เคลือบที่ได้หลังบดมีความละเอียดมากเกินไป และการหดตัวที่สูงของกากของเสียในเคลือบ ก็ส่งผลให้เคลือบที่ได้มีการหดตัวที่มากขึ้นตามไปด้วย

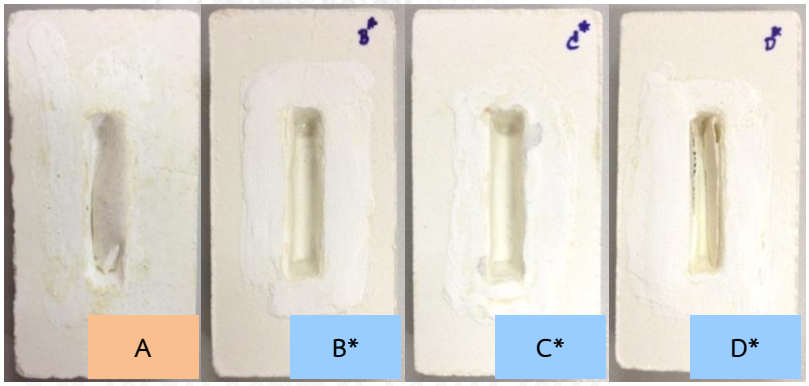


รูปที่ 5.8 ลักษณะของเคลือบสูตร B* C* และ D* เปรียบเทียบกับเคลือบมาตรฐาน STD และเคลือบสูตร A

นอกจากการเกิดตำหนิในเคลือบแล้ว ยังสังเกตได้ว่าเมื่อมีการใส่กากของเสียในสูตรเคลือบมากขึ้น ยังทำให้เคลือบมีสีเหลืองนวลอีกด้วย ทั้งนี้เนื่องจากการใส่ปริมาณกากเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์นั้น นอกจากจะเป็นตัวที่ให้ความทึบแสงในเคลือบแล้ว ยังเป็นตัวที่ทำให้เกิดสีเหลืองในเคลือบด้วย นอกจากนี้เคลือบที่ได้ยังมีความมันวาวลดลง เนื่องจากปริมาณของซิลิกาที่เป็นตัวที่ทำให้เกิดเนื้อแก้วในเคลือบลดลง และมีไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งเป็นตัวทนไฟเพิ่มขึ้น ทำให้ผิวเคลือบมีความมันวาวลดลง

5.4.1.3 สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน

จากลักษณะของเคลือบที่หดตัวมากนั้น จึงต้องทำการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบเพิ่มเติม โดยเตรียมชิ้นงานด้วยวิธีตามข้อที่ 3.2.2.3.4 แต่ในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานพบว่าเคลือบสูตร B* C* และ D* มีการหดตัวมากเกินไป เคลือบหลอมและเกาะติดตามขอบแบบ ซึ่งต่างจากเคลือบสูตร A ที่ชิ้นงานสามารถเตรียมและแกะออกจากแบบได้ง่าย ดังรูปที่ 5.9 ทำให้เคลือบสูตร B* C* และ D* ไม่สามารถเตรียมชิ้นงานสำหรับทำการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนได้



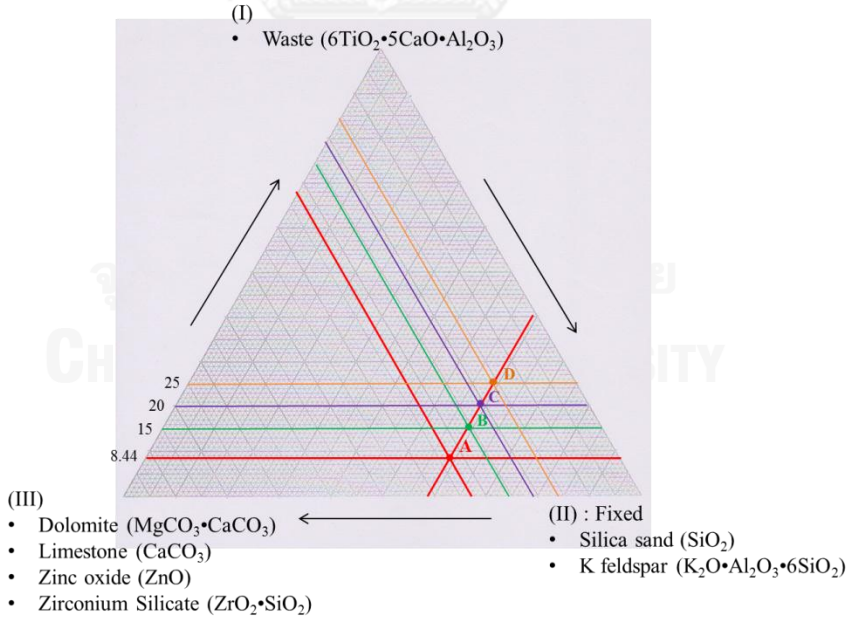
รูปที่ 5.9 การหดตัวของเคลือบภายในแบบสำหรับเตรียมชิ้นงานของเคลือบสูตร B* C* และ D* เปรียบเทียบกับเคลือบสูตร A

จากลักษณะของเคลือบที่ได้มีความหดตัวของเคลือบมาก และเคลือบที่ได้ไม่สวยงามตามต้องการ ทำให้การวิเคราะห์สมบัติของเคลือบอื่นๆ ไม่มีความจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์และทดสอบ เพราะเคลือบที่ทำการปรับส่วนนี้ไม่มีแนวโน้มในการนำไปใช้เป็นเคลือบเซรามิกสำหรับกระเบื้องได้

5.4.2 การปรับสูตรเคลือบโดยการใช้แผนภาพ triaxial

5.4.2.1 การปรับสูตรเคลือบโดยการเพิ่มปริมาณกากของเสียในสูตรเคลือบ โดยที่วัตถุดิบกลุ่ม II (ซิลิกาและโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์) คงที่ และวัตถุดิบกลุ่ม III (โดโลไมต์ หินปูน ซิงก์ออกไซด์ และเซอร์โคเนียมซิลิเกต) ลดลง

ในการทดลองส่วนนี้จะมีการปรับสูตรเคลือบโดยการเพิ่มปริมาณกากของเสียในสูตรเคลือบ ในขณะที่วัตถุดิบกลุ่ม II ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ให้เนื้อแก้วและช่วยลดจุดสุกตัวของเคลือบที่เป็นอัลคาไลหมู่ที่ 1ได้แก่ ซิลิกา และโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์คงที่ และวัตถุดิบกลุ่ม III ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ให้ความทึบแสงและช่วยลดจุดสุกตัวของเคลือบที่เป็นอัลคาไลหมู่ที่ 2ได้แก่ โดโลไมต์ หินปูน ซิงก์ออกไซด์ และเซอร์โคเนียมซิลิเกตลดลง ได้มีการกำหนดให้เคลือบสูตร A ที่เป็นสูตรที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบทดแทนไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้าในสูตรเคลือบมาตรฐาน STD โดยมีปริมาณของกากของเสียอยู่ในสูตรเคลือบเท่ากับ 8.44 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นสูตรตั้งต้น และทำการเพิ่มปริมาณกากของเสียในสูตรเคลือบเป็น 15 20 และ 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงด้วยจุด B C และ D ตามลำดับ โดยได้แสดงสัดส่วนของวัตถุดิบในแผนภาพ triaxial ดังรูปที่ 5.10 และปริมาณของวัตถุดิบที่ได้คำนวณไว้ในตารางที่ 5.11 ได้ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ของเคลือบ มีผลการวิเคราะห์ ดังนี้



รูปที่ 5.10 แผนภาพ triaxial ของสูตรเคลือบที่มีการปรับสูตรเคลือบโดยการเพิ่มปริมาณกากของเสีย

ตารางที่ 5.11 ส่วนผสมของสูตรเคลือบที่มีการปรับโดยการเพิ่มปริมาณกากของเสีย

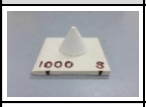
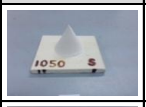
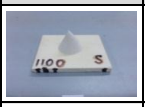
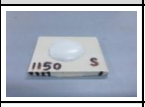
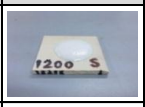
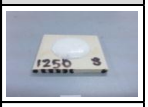
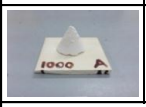
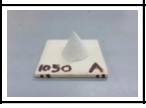
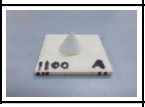
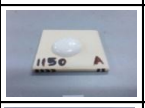
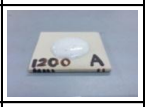
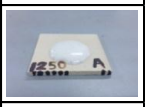
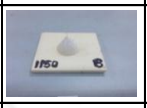
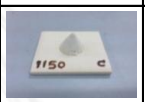
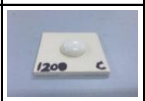
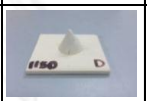
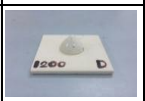
วัตถุดิบ	สัดส่วนโดยน้ำหนัก (wt%)			
	A	B	C	D
โพแทสเซียมเฟลด์สปาร์	35.5	35.5	35.5	35.5
ซิลิกา	23.5	23.5	23.5	23.5
โดโลไมต์	13.5	10.7	8.6	6.6
หินปูน	4.9	3.9	3.2	2.4
ซิงก์ออกไซด์	9.5	7.7	6.2	4.7
เซอร์โคเนียมซิลิเกต	4.7	3.7	3.0	2.3
กากของเสีย	8.4	15.0	20.0	25.0

5.4.2.1.1 พฤติกรรมการหลอมตัวและอุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบ

พฤติกรรมการหลอมตัวและอุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบแสดงในตารางที่ 5.12 และตารางที่ 5.13 ตามลำดับ ในการปรับสูตรเคลือบส่วนนี้ได้มีการกำหนดให้วัตถุดิบกลุ่ม II ได้แก่ ซิลิกาและโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ทำให้เกิดเนื้อแก้วและช่วยลดจุดสุกตัวของเคลือบคงที่ ดังนั้นสมบัติต่างๆ ของเคลือบจึงขึ้นอยู่กับสัดส่วนของวัตถุดิบ คือ กากของเสียที่มีสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น และวัตถุดิบกลุ่ม III ได้แก่ โดโลไมต์ หินปูน ซิงก์ออกไซด์ และเซอร์โคเนียมซิลิเกตที่ลดลง จากการวิเคราะห์พฤติกรรมการหลอมตัวของเคลือบแสดงในตารางที่ 5.12 พบว่าที่อุณหภูมิ 1000 – 1100 องศาเซลเซียส เคลือบสูตร B C และ D ไม่เกิดการหลอมตัวเลย และเมื่อทำการสัมผัสโคนเคลือบ เคลือบมีการหลุดติดมือออกมาเป็นผง การเพิ่มปริมาณของกากของเสียในสูตรเคลือบจากสูตร A ที่มีปริมาณกากของเสียเท่ากับ 8.44 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็น 15 20 และ 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักนั้น ส่งผลให้ความสามารถในการหลอมตัวของเคลือบลดลง โดยพิจารณาได้จากอุณหภูมิ 1150 – 1250 องศาเซลเซียส คือ เมื่อมีการเพิ่มปริมาณกากของเสีย และลดวัตถุดิบกลุ่ม III เคลือบหลอมตัวได้ยากขึ้น ดูได้จากการรัศมีการแผ่ของเคลือบ เคลือบมีรัศมีน้อยลง เมื่อเทียบกับเคลือบมาตรฐาน STD และเคลือบสูตร A ทั้งนี้เนื่องจากในการเพิ่มปริมาณกากของเสีย นอกจากจะทำให้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ในสูตรเคลือบเพิ่มขึ้นแล้ว ยังทำให้ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ และอะลูมินาเพิ่มขึ้นอีกด้วย เนื่องจากในกากของเสียมีส่วนประกอบหลัก คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ และอะลูมินา ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวที่ทำให้เกิดความทึบแสง อะลูมินาเป็นตัวที่มีความทนไฟสูงจึงทำให้เคลือบหลอมตัวได้ยาก และเป็นตัวทำให้เคลือบมีความหนืดสูง นอกจากนี้วัตถุดิบกลุ่ม III ที่มีวัตถุดิบหินปูน และโดโลไมต์ ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ให้แคลเซียมออกไซด์ในเคลือบ เป็นตัวลดจุดหลอมตัวของเคลือบที่อุณหภูมิสูงยังลดลง และถึงแม้มีการทดแทนด้วยปริมาณ

ของแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากกากของเสีย แต่ก็ยังทดแทนได้ไม่เพียงพอ ก็ยิ่งช่วยส่งเสริมให้เคลือบหลอมตัวที่อุณหภูมิสูงขึ้นอีกด้วย

ตารางที่ 5.12 พฤติกรรมการหลอมตัวของเคลือบที่มีการเพิ่มปริมาณกากของเสียในสูตรเคลือบที่อุณหภูมิ 1000 -1250 องศาเซลเซียส

สูตร (กลุ่ม II คงที่ = 59 wt%)	อุณหภูมิการเผา					
	1000 °C	1050 °C	1100 °C	1150 °C	1200 °C	1250 °C
มาตรฐาน (STD)						
A : กากของเสีย 8.44 wt% กลุ่ม III : 31.6 wt%						
B : กากของเสีย 15 wt% กลุ่ม III : 26 wt%	← ไม่หลอมตัว →					
C : กากของเสีย 20 wt% กลุ่ม III : 21 wt%	← ไม่หลอมตัว →					
D : กากของเสีย 8.44 % กลุ่ม III : 15 wt%	← ไม่หลอมตัว →					

จากการวิเคราะห์อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะในตารางที่ พบว่าเคลือบมีอุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเพิ่มปริมาณกากของเสีย และลดวัตถุดิบกลุ่ม III ในสูตรเคลือบ ซึ่งตรงกับผลของการศึกษาพฤติกรรมการหลอมตัวของเคลือบในตารางที่ 5.12 ในส่วนของอุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบจะมีการอุณหภูมิในการหลอมตัวเป็นหลัก โดยเคลือบสูตร B C และ D หลอมตัวที่อุณหภูมิสูงกว่าเคลือบมาตรฐาน STD และเคลือบสูตร A โดยเคลือบ B C และ D เคลือบจะหลอมตัวที่อุณหภูมิ 1125 1257 และ 1256 องศาเซลเซียสตามลำดับ ส่วนเคลือบมาตรฐาน STD และเคลือบสูตร A จะหลอมตัวที่อุณหภูมิ 1182 และ 1216 องศาเซลเซียส ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเคลือบ B C และ D ที่เผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียสก็ยังให้เคลือบที่มีผิวสวยงาม เนื่องจากในการเผาจะมีการยืนไฟเป็นเวลา 20 นาที ทำให้เคลือบสามารถหลอมตัวและไหลตัวแผ่ได้บ้าง แต่เคลือบที่ได้จะมีความหนืดมากและหลอมตัวไม่ดีเท่าตรงจุดอุณหภูมิหลอมตัวเท่านั้นเอง จากการวิเคราะห์ในส่วนนี้จึงทำให้สามารถทราบได้ว่าเคลือบสูตร B C และ D นี้ สามารถใช้นำมาทำเคลือบเซรามิกได้จริง แต่น่าจะเหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่เผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 1200 องศาเซลเซียส ซึ่งงานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายในการทำเคลือบสำหรับกระเบื้องโมเสคที่เผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามเราก็ได้มีการเตรียมชิ้นงานเคลือบ และทำการเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต้องการ เพื่อวิเคราะห์สมบัติอื่นๆ ของเคลือบต่อไป

ตารางที่ 5.13 อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบที่มีการเพิ่มปริมาณกากของเสียในสูตรเคลือบ

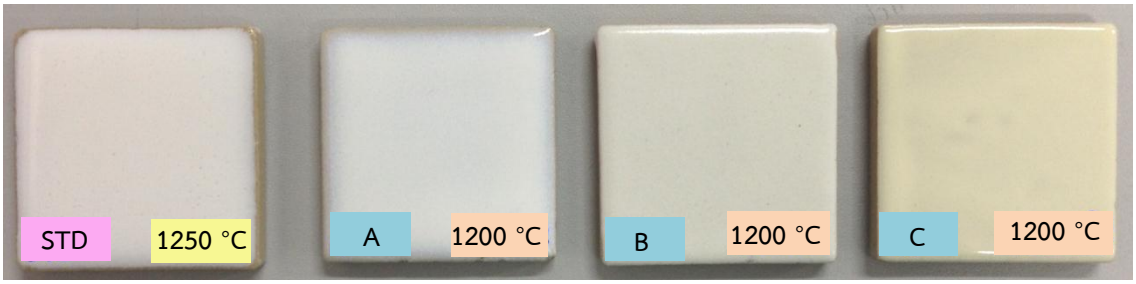
เคลือบ (%ของกากของเสีย)	Characteristic temperatures (°C)				
	sintering	softening	sphere	half-sphere	melting
STD	1097	1128	1163	1164	**1182**
A (8.44 wt%)	1080	1124	1173	1175	**1216**
B (15 wt%)	1095	1149	1192	1194	**1225**
C (20 wt%)	1118	1166	1217	1218	**1257**
D (25 wt%)	1131	1184	1237	1238	**1256**
E (30 wt%)	1161	1202	1276	1279	**1306**

wt% หมายถึงสัดส่วนของ**กากของเสีย**ในส่วนผสมเคลือบ หน่วยเป็นเปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก

5.4.2.1.2 ลักษณะทางกายภาพของเคลือบและค่าสีของเคลือบ

ลักษณะของเคลือบสูตร B และ C ซึ่งมีการเพิ่มปริมาณกากของเสีย และลดวัตถุดิบกลุ่ม III ในสูตรเคลือบ และทำการเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับเคลือบมาตรฐาน STD และเคลือบสูตร A แสดงในรูปที่ 5.11 พบว่าผิวเคลือบที่ได้นั้นมีความมันวาวลดลง มีความทึบแสงเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณกากของเสียมากขึ้นทำให้ได้เคลือบสีเหลืองนวล เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มปริมาณกากของเสีย ไทเทเนียมไดออกไซด์นอกจากจะเป็นตัวให้ความทึบแสงแล้ว ยังก่อให้เกิดสีเหลืองในเคลือบเมื่อใส่ในปริมาณมากอีกด้วย นอกจากนี้เมื่อในสูตรเคลือบมีปริมาณของอะลูมินาซึ่งเป็นตัวทนไฟเพิ่มขึ้น ทำให้ความมันวาวในเคลือบลดลง

เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าสีของเคลือบที่มีการเพิ่มปริมาณกากของเสียในสูตรด้วยเครื่อง Spectrophotometer ดังแสดงในตารางที่ 5.14 พบว่าเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบนั้นมีค่าความขาว (L) ของเคลือบที่น้อยกว่าเคลือบสูตรมาตรฐาน STD และค่าความขาวของเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบนั้นจะลดลง เมื่อมีการใส่ปริมาณกากของเสียในสูตรเคลือบเพิ่มขึ้นโดยเคลือบสูตร A B และ C มีค่าความขาวเท่ากับ 91.95 90.61 และ 86.86 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเคลือบมีค่าความเหลืองเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นตัวทำให้เกิดความทึบแสงนั้นเมื่อใส่ปริมาณมากในเคลือบจะทำให้เกิดสีเหลืองในเคลือบ เนื่องจากการเผาเคลือบที่อุณหภูมิสูงทำให้ผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ใหญ่ขึ้น จึงทำให้เคลือบมีสีเหลืองมากยิ่งขึ้น [9] และค่าการเบี่ยงเบนของสี (dE*) ของเคลือบทุกสูตรนั้นมีค่ามากกว่า 1 และเบี่ยงเบนออกจากค่าของสูตรเคลือบมาตรฐาน STD มากขึ้นเมื่อปริมาณกากของเสียในสูตรเคลือบเพิ่มขึ้น ทำให้เห็นอย่างชัดเจนว่าสีของเคลือบมีการเปลี่ยนแปลงไปตามสัดส่วนของกากของเสีย



รูปที่ 5.11 ลักษณะของเคลือบสูตร B และ C เปรียบเทียบกับเคลือบมาตรฐานและเคลือบสูตร A

ตารางที่ 5.141 ค่าสีของเคลือบที่มีการเพิ่มปริมาณกากของเสียในสูตรเคลือบ

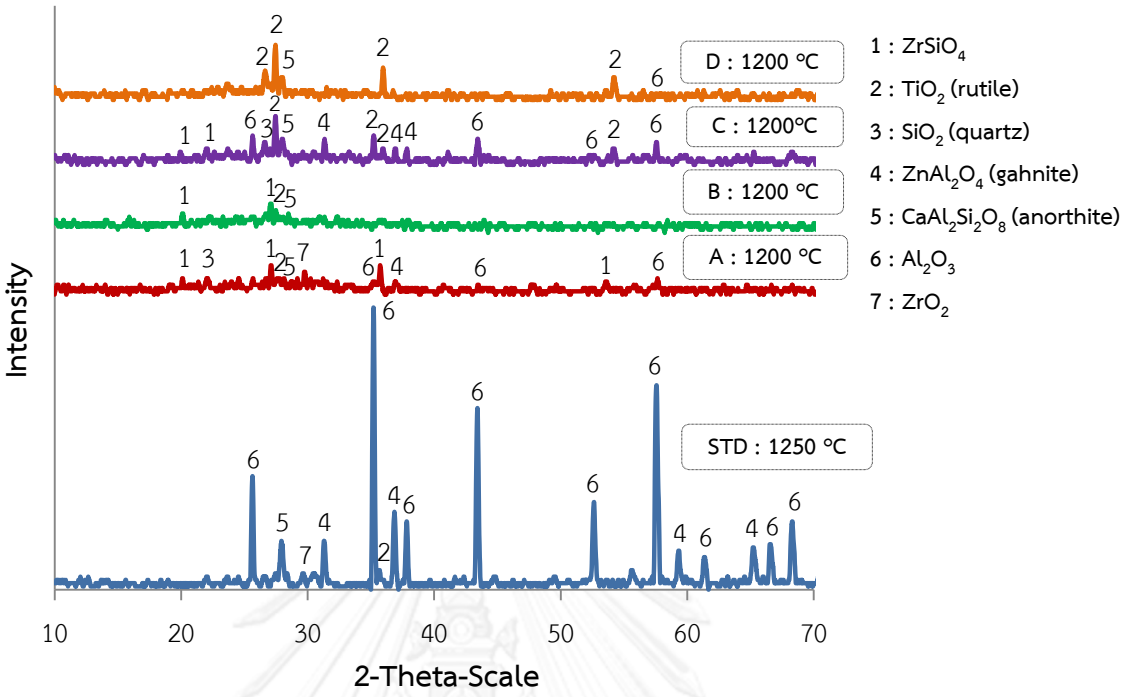
ค่าสี	เคลือบ			
	STD	A (8.44 wt%)	B (15 wt%)	C (20 wt%)
L (whiteness)	94.53	91.95	90.61	86.86
a* (green-red)	-0.64	-1.72	-1.14	-1.86
b* (blue-yellow)	1.81	-1.32	4.66	12.88
เคลือบ				
dL ($L-L_{STD}$)	-	2.58	3.92	7.67
da* ($a-a_{STD}$)	-	1.08	0.5	1.22
db*($b-b_{STD}$)	-	3.13	2.85	11.07
dE*		4.198	4.872	13.523

wt% หมายถึงสัดส่วนของ**กากของเสีย**ในส่วนผสมเคลือบ หน่วยเป็นเปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.4.2.1.3 องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบหลังเผา

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบสูตร B C และ D เปรียบเทียบกับสูตรมาตรฐาน STD และเคลือบสูตร A ซึ่งเป็นสูตรตั้งต้นดังแสดงในรูปที่ 5.12 นั้น พบว่าองค์ประกอบทางเฟสของเคลือบสูตร B C และ D มีลักษณะคล้ายคลึงกับเคลือบสูตร A คือเกิดเฟสของเซอร์โคเนียมซิลิเกต ($ZrSiO_4$) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ซิลิกา (SiO_2) ซิงก์อะลูมิเนต ($ZnAl_2O_4$) อะนอร์ไทต์ ($CaAl_2Si_2O_8$) และอะลูมินา (Al_2O_3) โดยเมื่อมีการเพิ่มปริมาณกากของเสียลงในสูตรเคลือบพบว่าพีคของไทเทเนียมไดออกไซด์ อะนอร์ไทต์และอะลูมินา มีความเข้มของพีคสูงขึ้น โดยเฉพาะเคลือบสูตร D ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากในกากของเสียที่ใส่เพิ่มเข้าไปนั้นมีไทเทเนียมไดออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ และอะลูมินา เป็นองค์ประกอบหลัก จึงให้พีคดังกล่าวมีความเข้มของพีคมากขึ้น



รูปที่ 5.12 องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบหลังเผาเมื่อมีการเพิ่มปริมาณกากของเสียในสูตรเคลือบ

5.4.2.1.4 สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน

จากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบดังแสดงในตารางที่ 5.15 เมื่อมีการเพิ่มปริมาณกากของเสียในสูตรเคลือบเปรียบเทียบกับของเนื้อดินที่เผาที่อุณหภูมิเดียวกันนั้น พบว่าเคลือบทั้ง 3 สูตร ได้แก่ สูตร A ที่เป็นสูตรตั้งต้น และสูตร B และ C ซึ่งมีปริมาณกากของเสียในสูตรเคลือบเพิ่มขึ้นนั้น มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน คือ 7.90×10^{-6} 8.05×10^{-6} และ 7.72×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนของเนื้อดินเท่ากับ 8.70×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส เคลือบมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่ต่ำกว่าเนื้อดินทุกสูตร เคลือบอยู่ในสภาวะแรงอัด (compressive) จึงสามารถยึดติดกับเนื้อดินของกระเบื้องโมเสคได้เป็นอย่างดี มีความแข็งแรง และไม่เกิดการรานตัวเมื่อใช้งานในอนาคต

ตารางที่ 5.15 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบเมื่อมีการเพิ่มกากของเสียในสูตรเคลือบ

เคลือบ	coefficient of thermal expansion, COE ($x10^{-6}$ °C^{-1})	ΔCOE (COE_{body}-COE_{glaze})
body (1250 °C)	**7.98**	
STD	8.83	-0.85
body (1200 °C)	**8.70**	
A (8.44 wt%)	7.90	0.80
B (15 wt%)	8.05	0.65
C (20 wt%)	7.72	0.98

wt% หมายถึงสัดส่วนของ**กากของเสีย**ในส่วนผสมเคลือบ หน่วยเป็นเปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก

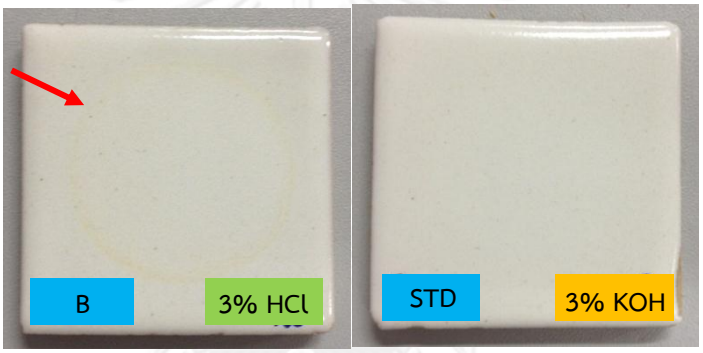
5.4.2.1.5 ความทนทานต่อสารเคมี

การทดสอบความทนทานต่อสารเคมี ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบต้องมีผิวเคลือบที่เรียบ ไม่มีตำหนิ ดังนั้นในส่วนนี้จึงได้ทำการทดสอบเพียงเคลือบสูตร A B และ C ซึ่งมีผิวเคลือบที่เรียบเนียนและสวยงามเท่านั้น ระดับความทนทานต่อสารเคมีแสดงดังตารางที่ 5.16 จากการทดสอบเคลือบสูตร A และ C สามารถทนทานต่อกรดและด่างได้ในระดับ A คือ หลังจากทำการแช่สารเคมีกรดและด่างนั้น ผิวเคลือบไม่มีการเปลี่ยนแปลง และยังมีความสะท้อนแสงได้ดีเช่นเดิม ส่วนเคลือบสูตร B มีความทนทานต่อกรดได้ในระดับ C คือเมื่อทำการแช่ผิวเคลือบในสารละลายกรดนั้น ผิวของเคลือบถูกทำลาย สีของเคลือบระหว่างบริเวณที่ทำการทดสอบและบริเวณที่ไม่ถูกทดสอบนั้นแตกต่างกันอย่างชัดเจน เคลือบบริเวณที่ถูกทดสอบสีของเคลือบเปลี่ยนแปลงไปจากสีขาวเป็นสีเหลือง และการสะท้อนแสงของเคลือบลดลง ส่วนระดับความทนทานต่อด่างนั้นอยู่ในระดับ B คือ ในตอนแรกที่เราทำการขีดรอยดินสอ HB ลงบนผิวเคลือบที่ยังไม่ผ่านการทดสอบแช่ด่างและทำการลบ ยังสามารถลบรอยดินสอได้ แต่หลังจากที่เราแช่ในสารละลายด่าง และทำการทดลองขีดรอยดินสอ HB อีกครั้งลงบนผิวเคลือบที่ผ่านการทดสอบแล้ว ปรากฏว่ารอยดินสอลบออกได้ยากมาก แสดงว่าผิวเคลือบถูกทำลายลงไปบางส่วน แต่การสะท้อนแสงของเคลือบยังเหมือนเดิม โดยลักษณะของเคลือบสูตร B ที่ผ่านการทดสอบแล้วแสดงในรูปที่ 5.13

ตารางที่ 5.16 ระดับความทนทานต่อสารเคมีของเคลือบที่มีการเพิ่มปริมาณกากของเสียในสูตรเคลือบ

เคลือบ	ระดับความทนทานต่อสารเคมี	
	HCl 3%	KOH 3%
STD	GA	GA
A (8.44 wt%)	GA	GA
B (15 wt%)	GC	GB
C (20 wt%)	GA	GA

wt% หมายถึงสัดส่วนของ**กากของเสีย**ในส่วนผสมเคลือบ หน่วยเป็นเปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 5.13 ลักษณะของเคลือบสูตร B ที่ผ่านการทดสอบความทนทานต่อสารเคมี

5.4.2.1.6 ความแข็งและความทนทานต่อการขูดขีด

ความแข็งและความทนทานต่อการขูดขีดของเคลือบเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของกากของเสียในสูตรเคลือบแสดงในตารางที่ 5.17 เคลือบมาตรฐาน STD และเคลือบสูตร A ซึ่งมีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบทดแทนไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้านั้น มีค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกัน โดยที่เคลือบสูตร A มีค่าความแข็งมากกว่าเคลือบมาตรฐาน STD เล็กน้อย โดยทั่วไปแล้ววัสดุที่มีความแข็งมากจะมีความทนทานต่อการขูดขีดได้ดีด้วย ดังนั้นเคลือบเซรามิกที่มีความแข็งมากก็ย่อมทนทานต่อการขูดขีดได้ดีเช่นกัน และเมื่อมีการเพิ่มปริมาณกากของเสียในสูตรเคลือบคือ เคลือบสูตร B และ C นั้น พบว่าเคลือบมีความแข็งและความทนทานต่อการขูดขีดได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณกากของเสียในเคลือบทำให้ปริมาณของแคลเซียมออกไซด์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งแคลเซียมออกไซด์เป็นตัวที่ทำให้เคลือบมีความแข็งแรงสูงขึ้น ทนต่อการขูดขีด ดังนั้นเมื่อปริมาณของแคลเซียมออกไซด์เพิ่มขึ้น ค่าความแข็งและความทนทานต่อการขูดขีดของเคลือบจึงเพิ่มขึ้นด้วย

ตารางที่ 5.17 ความแข็งและความทนทานต่อการขูดขีดของเคลือบที่มีการเพิ่มปริมาณกากของเสียในสูตรเคลือบ

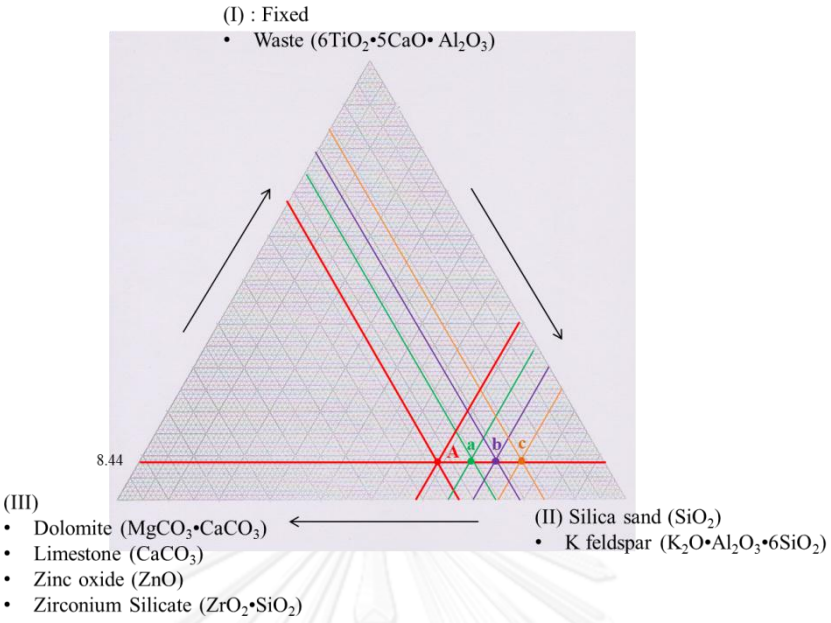
เคลือบ	Vickers hardness, H_v (GPa)	น้ำหนักที่หายไปหลังทำการทดสอบความต้านทานต่อการขูดขีด (%)
STD	4.5134 ± 0.2888	0.084 ± 0.030
A (8.44 wt%)	4.6021 ± 0.3390	0.101 ± 0.008
B (15 wt%)	4.6917 ± 0.2923	0.096 ± 0.030
C (20 wt%)	4.8433 ± 0.1609	0.070 ± 0.008

wt% หมายถึงสัดส่วนของ**กากของเสีย**ในส่วนผสมเคลือบ หน่วยเป็นเปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก

5.4.2.2 การปรับสูตรเคลือบโดยการเพิ่มปริมาณวัตถุดิบกลุ่ม II ในสูตรเคลือบ โดยที่ ปริมาณกากของเสียคงที่ และวัตถุดิบกลุ่ม III ลดลง

การทดลองส่วนนี้เป็นการศึกษาผลของวัตถุดิบกลุ่ม II ได้แก่ ซิลิกาและโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ในเคลือบ มีการกำหนดให้เคลือบสูตร A เป็นสูตรตั้งต้น ทำการปรับวัตถุดิบกลุ่ม II ให้มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นในสูตรเคลือบ ในขณะที่วัตถุดิบกลุ่ม III ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ให้ความทึบแสงและช่วยลดจุดสุกตัวของเคลือบที่เป็นอัลคาไลน์หมู่ที่ 2ได้แก่ โดโลไมต์ หินปูน ซิงก์ออกไซด์ และเซอร์โคเนียมซิลิเกตลดลง และมีการกำหนดให้ปริมาณของกากของเสียคงที่ โดยได้ทำการเพิ่มปริมาณของวัตถุดิบกลุ่ม II จากเดิมที่สูตร A มี 59 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็น 65 70 และ 75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยทำการแทนด้วย a b และ c ตามลำดับ สัดส่วนของวัตถุดิบในเคลือบแสดงในสามเหลี่ยม triaxial ดังรูปที่ 5.14 และปริมาณของวัตถุดิบที่ได้คำนวณแสดงในตารางที่ 5.18 หลังจากนั้นได้ทำการศึกษาสมบัติต่างๆ ของเคลือบ ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 5.14 แผนภาพ triaxial ของสูตรเคลือบที่มีการปรับสูตรเคลือบโดยการเพิ่มปริมาณวัตถุดิบกลุ่ม II ได้แก่ ซิลิกา และโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์

ตารางที่ 5.18 ส่วนผสมของสูตรเคลือบที่มีการปรับโดยการเพิ่มปริมาณของซิลิกาและโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์

วัตถุดิบ	สัดส่วนโดยน้ำหนัก (wt%)			
	A	a	b	c
โพแทสเซียมเฟลด์สปาร์	35.5	39.1	42.1	45.1
ซิลิกา	23.5	25.9	27.9	29.9
โดโลไมต์	13.5	10.9	8.8	6.8
หินปูน	4.9	4.0	3.2	2.5
ซิงก์ออกไซด์	9.5	7.9	6.4	4.9
เซอร์โคเนียมซิลิเกต	4.7	3.8	3.1	2.4
กากของเสีย	8.4	8.4	8.4	8.4

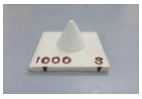
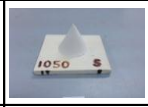
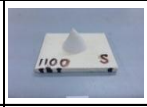
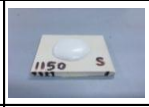
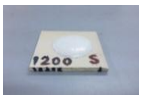
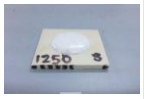
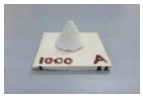
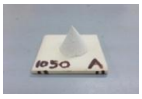
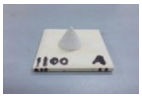
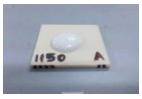
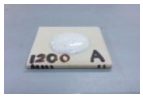
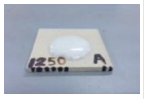
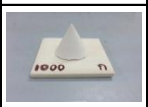
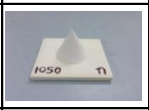
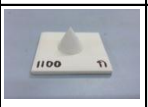
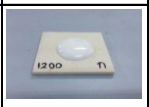
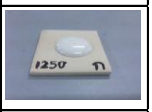
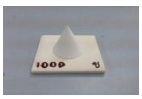
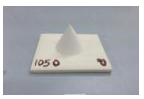
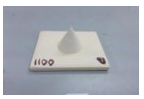
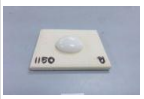
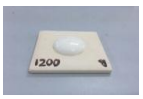
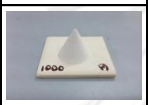
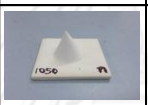
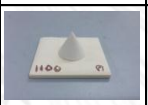
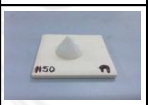
5.4.2.2.1 พฤติกรรมการหลอมตัวและอุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบ

พฤติกรรมการหลอมตัวของเคลือบที่มีปริมาณของวัตถุดิบกลุ่ม II ที่แตกต่างกันแสดงในตารางที่ 5.19 ในช่วงอุณหภูมิ 1000 – 1100 องศาเซลเซียสนั้นเคลือบทุกสูตรไม่เกิดการหลอมตัว และเคลือบเริ่มเกิดการหลอมตัวที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส เคลือบสามารถหลอมตัวได้ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เมื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะการหลอมตัวของเคลือบแต่ละสูตรที่ช่วงอุณหภูมิ 1150 – 1250 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อปริมาณของวัตถุดิบกลุ่ม II ในเคลือบเพิ่มขึ้น ได้แก่ เคลือบสูตร a b และ c เปรียบเทียบกับเคลือบสูตร A ที่เป็นสูตรตั้งต้น เคลือบมีอุณหภูมิในการหลอมเคลือบที่สูงขึ้น เคลือบหลอมตัวได้น้อยลง สังเกตได้จากรัศมีการแผ่ของโคนที่หลอมตัวที่น้อยลง แต่ลักษณะของผิวเคลือบได้เคลือบที่สีขาวทึบแสงและผิวมันวาวสุกตัวได้ดีทุกสูตร เมื่อพิจารณาสัดส่วนของวัตถุดิบที่เปลี่ยนแปลงไปนั้น การที่เคลือบสามารถหลอมตัวได้น้อยลง เมื่อเพิ่มปริมาณของวัตถุดิบกลุ่ม II เกิดจากซิลิกาที่เพิ่มลงไปในสูตรเคลือบไม่มีผลในการลดจุกสุกตัว และยังเป็นตัวที่มีจุดหลอมสูง จึงทำให้เคลือบมีความหนืดมากขึ้น ไหลตัวได้น้อยลง เมื่อซิลิกาเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้เคลือบหลอมตัวได้ยากขึ้น ถึงแม้ว่าจะมีโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ซึ่งเป็นตัวลดจุดสุกตัวของเคลือบเพิ่มขึ้นก็ตาม แต่ก็ยังไม่เพียงพอ นอกจากนี้วัตถุดิบกลุ่ม III ซึ่งถือว่าเป็นวัตถุดิบที่ช่วยลดอุณหภูมิการเผาของเคลือบที่อุณหภูมิสูงยังลดลง เมื่อวัตถุดิบกลุ่ม II เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการคำนวณแบบแทนที่กันของส่วนผสม วัตถุดิบกลุ่ม III ลดลงด้วย จึงยิ่งส่งผลให้เคลือบหลอมตัวได้ที่อุณหภูมิสูงขึ้นอีกด้วย ในส่วนนี้เคลือบสูตร a มีลักษณะการหลอมตัวใกล้เคียงกับเคลือบสูตร A มากที่สุด

จากการวิเคราะห์อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบแสดงในตารางที่ 5.20 การเพิ่มปริมาณของวัตถุดิบกลุ่ม II ในสูตรเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบทำให้เคลือบหลอมตัวที่อุณหภูมิสูงขึ้น เคลือบสูตร A นั้นมีอุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะที่ใกล้เคียงกับเคลือบมาตรฐาน STD อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบมาตรฐาน STD และเคลือบสูตร A เท่ากับ 1182 และ 1216 องศาเซลเซียสตามลำดับ และเมื่อทำการเพิ่มปริมาณของวัตถุดิบกลุ่ม II ในสูตร ได้แก่ สูตร a b และ c เคลือบมีอุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเป็น 1369 1369 และ1382 องศาเซลเซียสตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาพฤติกรรมการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบที่กล่าวมาก่อนหน้านี้

Chulalongkorn University

ตารางที่ 5.19 พฤติกรรมการหลอมตัวของเคลือบที่มีปริมาณของวัตถุดิบกลุ่ม II เพิ่มขึ้น

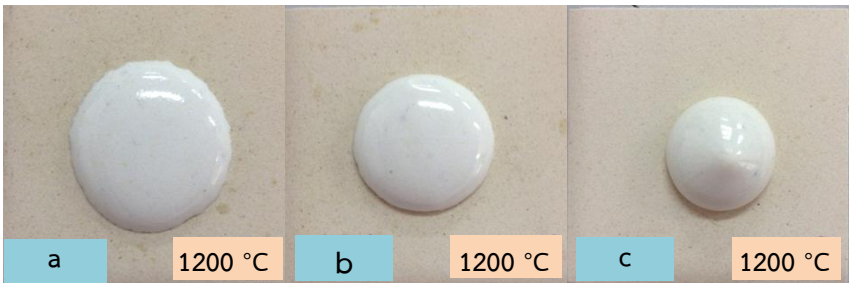
สูตร (*กากของเสียคงที่ = 8.44 wt%)	อุณหภูมิการเผา					
	1000 °C	1050 °C	1100 °C	1150 °C	1200 °C	1250 °C
มาตรฐาน (STD)						
(A) กลุ่ม II : 59 wt % กลุ่ม III : 32.6 wt%						
(a) กลุ่ม II : 65 wt % กลุ่ม III : 26.6 wt%						
(b) กลุ่ม II : 70 wt% กลุ่ม III : 21.6 wt%						
(c) กลุ่ม II :75 wt% กลุ่ม III : 11.6 wt%						

ตารางที่ 5.20 อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบที่มีปริมาณของวัตถุดิบกลุ่ม II เพิ่มขึ้น

เคลือบ (% ของวัตถุดิบกลุ่ม II)	Characteristic temperatures (°C)				
	sintering	softening	sphere	half-sphere	melting
STD	1097	1128	1163	1164	**1182**
A (59 wt%)	1080	1124	1173	1175	**1216**
a (65 wt%)	1093	1134	1204	1209	**1369**
b (70 wt%)	1095	1145	1224	1253	**1369**
c (75 wt%)	1097	1163	1263	1309	**1382**

wt% หมายถึงสัดส่วนของ**กากของเสีย**ในส่วนผสมเคลือบ หน่วยเป็นเปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก

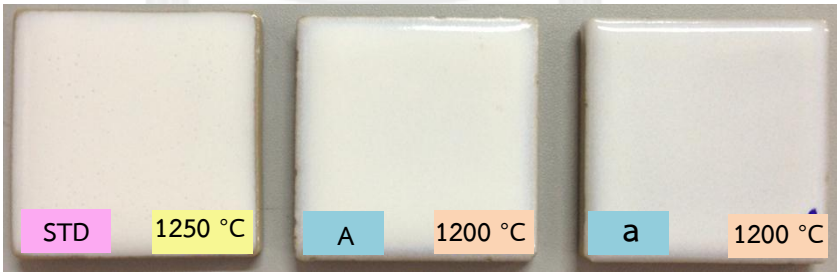
เคลือบสูตร a b และ c นั้นถึงแม้ว่าจะมีอุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะสูงกว่า 1300 องศาเซลเซียส แต่เมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต้องการเผาเคลือบปรากฏว่าเคลือบที่ได้ยังคงมีผิวขาวมันเงาเป็นเนื้อแก้ว และสุกตัวดีดังรูปที่ 5.15 ทั้งนี้อาจเนื่องจากว่ามีการยืนไฟระยะเวลา 20 นาที จึงทำให้เคลือบยังสามารถหลอมตัวและเกิดการสุกตัวได้ อีกทั้งซิลิกาและโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ก็ยังเป็นตัวที่ช่วยส่งเสริมกันทำให้เกิดเนื้อแก้ว นอกจากนี้โพแทสเซียมเฟลด์สปาร์นั้น เมื่อใส่ในเคลือบปริมาณมาก จะยิ่งทำให้เคลือบมีความสุกใสมากขึ้น [9]



รูปที่ 5.15 การหลอมตัวของเคลือบสูตร a b และ c ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส

5.4.2.2.2 ลักษณะทางกายภาพของเคลือบ

เมื่อทำการเตรียมน้ำเคลือบของเคลือบสูตร a b และ c ที่ได้มีการปรับสัดส่วนของวัตถุดิบกลุ่ม II ได้แก่ ซิลิกาและโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์เพิ่มขึ้น พบว่าน้ำเคลือบที่สามารถไหลตัวได้ดีนั้นมีเพียงเคลือบสูตร a เพียงสูตรเดียวเท่านั้น ส่วนเคลือบสูตร b และ c นั้นพบว่าน้ำเคลือบมีความหนืดมาก อนุภาควัตถุดิบมีการจับตัวกันเป็นก้อนๆ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณของซิลิกาที่เพิ่มขึ้นทำให้การไหลตัวของเคลือบลดลง จึงไม่สามารถเตรียมชิ้นงานเคลือบสูตร b และ c ได้ ชิ้นงานของเคลือบส่วนนี้จึงมีเพียงสูตรเคลือบ a ลักษณะของผิวเคลือบสูตร a เผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับเคลือบมาตรฐาน STD และเคลือบสูตร A แสดงในรูปที่ 5.16 เคลือบสูตร a ได้เคลือบมีผิวที่สวยงาม สีขาวมันเงาเป็นเนื้อแก้วมากกว่าเคลือบสูตร A และเคลือบมาตรฐาน STD เคลือบสูตร a ไม่มีการเกิดตำหนิบนผิวเคลือบ ผิวเคลือบมีความสวยงาม และเมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพของเคลือบสูตร a แล้ว หลังจากนั้นจึงได้นำเคลือบสูตรนี้ไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของเคลือบ



รูปที่ 5.16 ลักษณะของเคลือบสูตร a เปรียบเทียบกับเคลือบสูตรมาตรฐาน STD และเคลือบสูตร A

ค่าสีของเคลือบที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Spectrophotometer แสดงในตารางที่ 5.21 เคลือบสูตร a มีค่าความขาว (L) ที่ ใกล้เคียงกับเคลือบสูตร A เนื่องจากว่าทั้งสองสูตรมีการใช้ปริมาณของกากของเสียในเคลือบเท่ากัน แต่เคลือบ a จะมีค่าความขาวที่น้อยกว่าเล็กน้อย เนื่องจากเคลือบสูตร a มีการปรับปริมาณของวัตถุดิบกลุ่ม 3 ซึ่งมีซิงก์ออกไซด์ และเซอร์โคเนียมซิลิเกตที่มีผลต่อการให้ความทึบแสงในเคลือบให้ลดลง ทำให้เคลือบสูตร a มีค่าความขาวที่น้อยกว่า ส่วนค่าเบี่ยงเบนสี

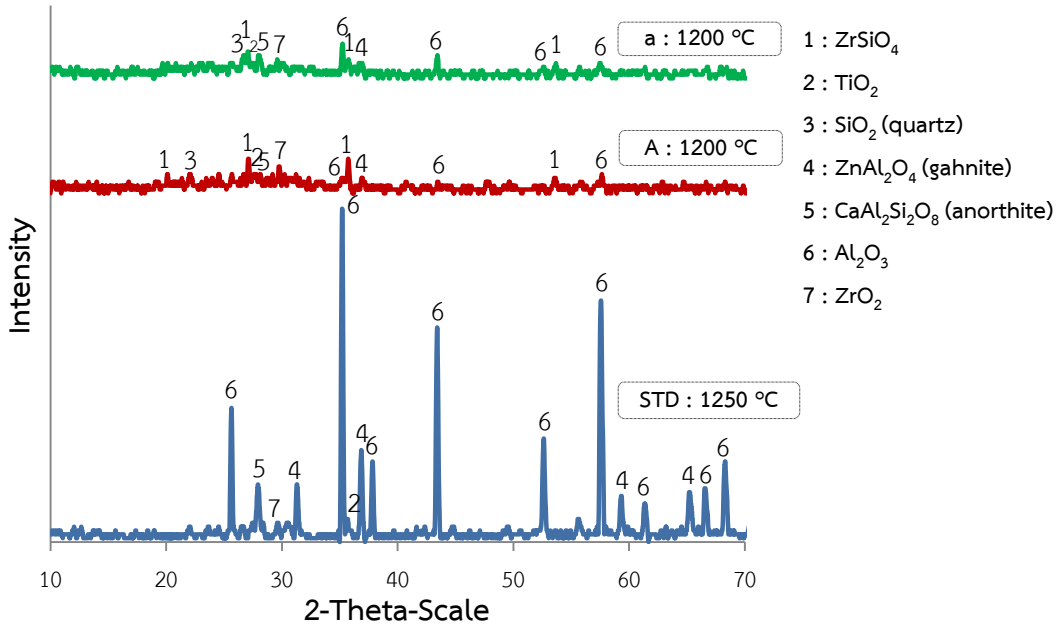
(dE*) ของเคลือบสูตร A และ a ต่างก็เบี่ยงเบนออกจากเคลือบมาตรฐาน STD ทั้งคู่ และยังมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก บ่งชี้ได้ว่าเคลือบสูตร A และ a มีค่าสีของเคลือบที่คล้ายคลึงกันมาก

ตารางที่ 5.21 ค่าสีของเคลือบสูตร a เปรียบเทียบกับเคลือบมาตรฐาน STD และเคลือบสูตร A

ค่าสี	เคลือบ		
	STD	A	a
L (whiteness)	94.53	91.95	90.47
a* (green-red)	-0.64	-1.72	-1.25
b* (blue-yellow)	1.81	-1.32	0.92
เคลือบ			
dL ($L-L_{STD}$)	-	2.58	4.06
da* ($a-a_{STD}$)	-	1.08	0.61
db* ($b-b_{STD}$)	-	3.13	0.89
dE*		4.198	4.201

5.4.2.2.3 องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบหลังเผา

เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบสูตร a หลังเผา ดังแสดงในรูปที่ 5.17 พบว่าเคลือบประกอบด้วยเฟสของเซอร์โคเนียมซิลิเกต ($ZrSiO_4$) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ซิลิกา (SiO_2) ซิงก์อะลูมิเนต ($ZnAl_2O_4$) อะนอร์ไทต์ ($CaAl_2Si_2O_8$) อะลูมินา (Al_2O_3) และเซอร์โคเนียมออกไซด์ (ZrO_2) ซึ่งคล้ายคลึงกับเฟสของเคลือบสูตร A แต่มีความเข้มพีคของเซอร์โคเนียมซิลิเกตและซิลิกาที่สูงขึ้น เนื่องจากผิวเคลือบสูตร a มีความเป็นเนื้อแก้วเงามันมากกว่าเคลือบสูตร A เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของซิลิกาและโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ในสูตร จึงทำให้พีคดังกล่าวมีความเข้มสูงกว่า



รูปที่ 5.17 องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบสูตร a หลังเผา เปรียบเทียบกับเคลือบสูตรมาตรฐาน STD และเคลือบสูตร A

5.4.2.2.4 สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน

ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบแสดงในตารางที่ 5.22 เคลือบสูตร a มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบที่ต่ำกว่าเคลือบสูตร A เนื่องจากโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์และซิลิกาที่เพิ่มขึ้นในสูตรเคลือบ ส่งผลให้เคลือบมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนลดลง และเมื่อเทียบเคลือบสูตร A และ a กับเนื้อดินที่เผาอุณหภูมิเดียวกันคือ 1200 องศาเซลเซียส เคลือบจะอยู่ในสภาวะแรงอัด (compressive) ทำให้เคลือบมีความแข็งแรง และไม่เกิดการแตกราน

ตารางที่ 5.22 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบสูตร a เปรียบเทียบกับเคลือบมาตรฐาน STD และเคลือบสูตร A

เคลือบ	coefficient of thermal expansion, COE ($x10^{-6}$ °C^{-1})	ΔCOE (COE_{body}-COE_{glaze})
body (1250 °C)	**7.98**	
STD	8.83	-0.85
body (1200 °C)	**8.70**	
A (8.44 wt%)	7.90	0.80
a	7.74	0.96

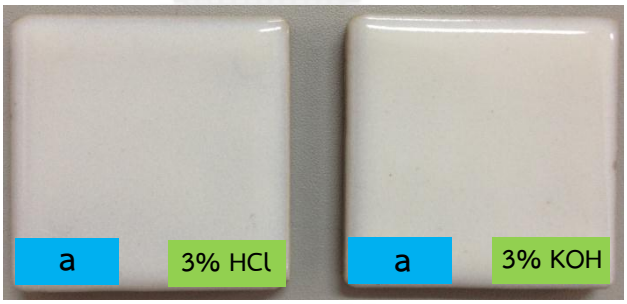
5.4.2.2.5 ความทนทานต่อสารเคมี

ระดับความทนทานของสารเคมีของเคลือบสูตร a แสดงในตารางที่ 5.23 เคลือบสูตร a สามารถทนทานต่อสารเคมีกรดด่างได้ในระดับเดียวกันกับเคลือบมาตรฐาน STD และเคลือบสูตร A คือ ระดับ A ผิวของเคลือบไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อทดสอบด้วยการแช่ในสารละลายกรดและด่าง เคลือบสามารถสะท้อนแสงได้เท่าเดิม โดยลักษณะของเคลือบสูตร a ที่ผ่านการแช่ด้วยกรดและด่างแสดงในรูปที่ 5.18

ตารางที่ 5.23 ระดับความทนทานต่อสารเคมีของเคลือบสูตร a เปรียบเทียบกับเคลือบมาตรฐาน STD และเคลือบสูตร A

เคลือบ	ระดับความทนทานต่อสารเคมี	
	HCl 3%	KOH 3%
STD	GA	GA
A	GA	GA
a	GA	GA

wt% หมายถึงสัดส่วนของ**กากของเสีย**ในส่วนผสมเคลือบ หน่วยเป็นเปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 5.18 ลักษณะของเคลือบสูตร ก ที่ผ่านการทดสอบความทนทานต่อสารเคมี

5.4.2.2.6 ความแข็งและความทนทานต่อการขูดขีด

ความแข็งและความทนทานต่อการขูดขีดของเคลือบสูตร a เปรียบเทียบกับเคลือบมาตรฐาน STD และเคลือบสูตร A แสดงในตารางที่ 5.24 เคลือบสูตร a มีค่าความแข็งของผิวเคลือบที่ต่ำกว่าเคลือบมาตรฐาน STD และเคลือบสูตร A ทั้งนี้เนื่องจากเคลือบสูตร a มีความเป็นเนื้อแก้วที่มากกว่าเคลือบทั้งสองสูตร แก้วมีความแข็งและเปราะมากในเวลาเดียวกัน เมื่อมีการกดด้วยหัวกดวิกเกอร์สมีความแข็งและความแหลมที่ปลายหัวกด จึงทำให้เคลือบที่มีผิวเป็นเนื้อแก้วนั้นแตกได้ง่าย ค่าความแข็ง

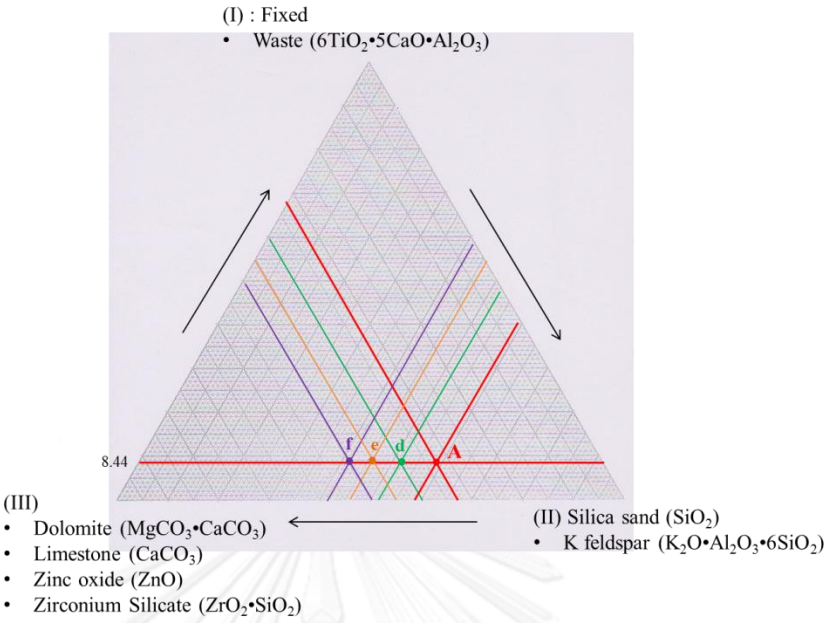
ของเคลือบที่ออกมาจึงมีค่าที่น้อยกว่า แต่ในทางกลับกันพบว่าเคลือบสูตร a ความทนทานต่อการขูดขีดได้มากกว่าเคลือบมาตรฐาน STD และเคลือบสูตร A สังเกตได้จากการสูญเสียน้ำหนักของเคลือบซึ่งสูตร a สูญเสียน้ำหนักหลังทำการทดสอบน้อยที่สุด

ตารางที่ 5.24 ความแข็งและความทนทานต่อการขูดขีดของเคลือบสูตร a เปรียบเทียบกับเคลือบสูตรมาตรฐาน STD และเคลือบสูตร A

เคลือบ	Vickers hardness, H_v (GPa)	น้ำหนักที่หายไปหลังทำการทดสอบ ความต้านทานต่อการขูดขีด (%)
STD	4.5134 ± 0.2888	0.084 ± 0.030
A	4.6021 ± 0.3390	0.101 ± 0.008
a	3.9555 ± 0.3825	0.082 ± 0.011

5.4.2.3 การปรับสูตรเคลือบโดยการเพิ่มปริมาณวัตถุดิบกลุ่ม III ในสูตรเคลือบ โดยที่ปริมาณกากของเสียคงที่ และวัตถุดิบกลุ่ม II ลดลง

การทดลองส่วนนี้เป็นการปรับสูตรเคลือบโดยการเพิ่มปริมาณของวัตถุดิบกลุ่ม III ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ให้ความทึบแสงและช่วยลดจุดสุกตัวของเคลือบที่เป็นอัลคาไลหมู่ที่ 2 ได้แก่ โดโลไมต์ หินปูน ซิงก์ออกไซด์ และเซอร์โคเนียมซิลิเกต วัตถุดิบกลุ่ม II ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ให้เนื้อแก้วและช่วยลดจุดสุกตัวของเคลือบที่เป็นอัลคาไลหมู่ที่ 1ได้แก่ ซิลิกา และโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ลดลง และกำหนดให้กากของเสียมีปริมาณคงที่ และมีเคลือบสูตร A เป็นเคลือบตั้งต้น โดยทำการปรับวัตถุดิบกลุ่มที่ III จากสูตร A มี 32.6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็น 40 45 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และแทนแต่ละสูตรด้วยสูตร d e และ f ตามลำดับ สัดส่วนของวัตถุดิบแสดงในแผนภาพ triaxial ดังรูปที่ 5.19 และส่วนผสมของเคลือบแต่ละสูตรแสดงในตารางที่ 5.25 ทำการเตรียมผงเคลือบและเคลือบ หลังจากนั้นจึงทดสอบสมบัติต่างๆ ของเคลือบ ผลการวิเคราะห์ ดังนี้



รูปที่ 5.19 แผนภาพ triaxial ของสูตรเคลือบที่มีการปรับสูตรเคลือบโดยการเพิ่มปริมาณวัตถุดิบกลุ่ม III ได้แก่ โดโลไมต์ หินปูน ซิงก์ออกไซด์ และเซอร์โคเนียมซิลิเกต

ตารางที่ 5.25 แผนภาพ triaxial ของสูตรเคลือบที่ปรับสูตรเคลือบโดยการเพิ่มปริมาณวัตถุดิบกลุ่ม III

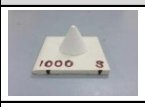
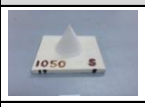
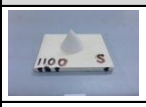
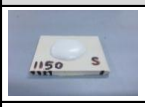
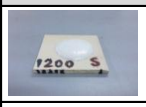
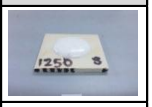
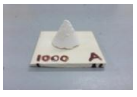
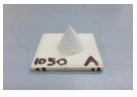
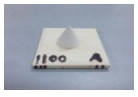
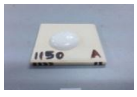
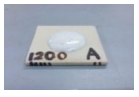
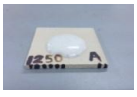
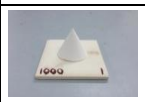
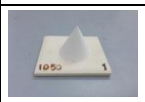
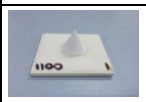
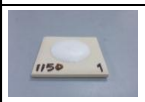
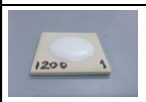
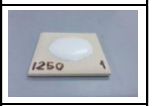
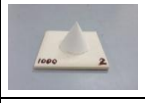
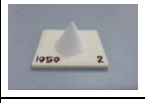
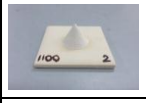
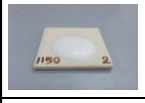
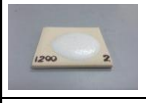
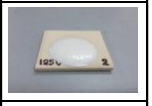
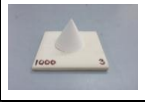
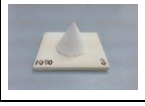
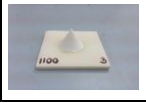
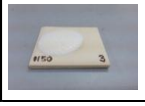
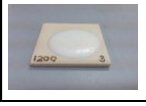
วัตถุดิบ	wt%			
	A	d	e	f
โพแทสเซียมเฟลด์สปาร์	35.5	31.04	28.03	25.02
ซิงก์ออกไซด์	9.5	11.86	13.34	14.82
โดโลไมต์	13.5	16.4	18.45	20.5
หินปูน	4.9	6.01	6.76	7.51
ซิลิกา	23.5	20.52	18.53	16.54
เซอร์โคเนียมซิลิเกต	4.7	5.74	6.45	7.17
กากของเสีย	8.4	8.44	8.44	8.44

5.4.2.3.1 พฤติกรรมการหลอมตัวและอุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบ

พฤติกรรมการหลอมตัวของเคลือบเมื่อทำการปรับสูตรเคลือบที่มีปริมาณของวัตถุดิบกลุ่มที่ III ที่แตกต่างกันนั้นแสดงในตารางที่ 5.26 ในช่วงอุณหภูมิ 1000 – 1100 องศาเซลเซียสนั้นเคลือบทุกสูตรไม่เกิดการหลอมตัว และเคลือบเริ่มเกิดการหลอมตัวที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส เคลือบ

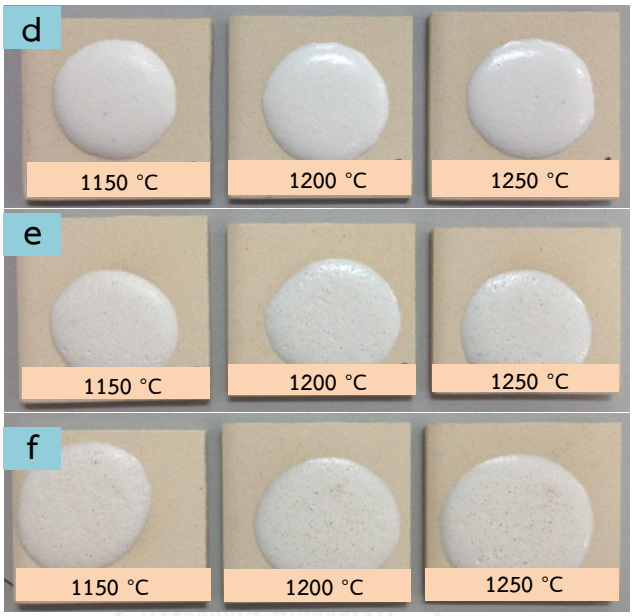
สามารถหลอมตัวได้ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการหลอมตัวของเคลือบแต่ละสูตรที่ช่วงอุณหภูมิ 1150 – 1250 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อปริมาณของวัตถุดิบกลุ่ม III ในเคลือบเพิ่มขึ้น ได้แก่ เคลือบสูตร d e และ f เปรียบเทียบกับเคลือบสูตร A ที่เป็นสูตรตั้งต้น เคลือบมีอุณหภูมิในการหลอมตัวต่ำลง เคลือบสามารถหลอมตัวได้มากขึ้น สังเกตได้จากรัศมีการแผ่ของเคลือบที่มากขึ้น ลักษณะของผิวเคลือบสูตร d e และ f ได้เคลือบที่มีผิวด้าน และเคลือบมีความด้านมากขึ้น เมื่อวัตถุดิบกลุ่ม III เพิ่มขึ้น เคลือบเกิดลักษณะของเคลือบเดือดเนื่องจากเผาที่อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิในการหลอมตัว ส่งผลให้เคลือบเกิดตำหนิเป็นรูเข็มบนผิวเคลือบ (pinhole) ดังแสดงในรูปที่ 5.20 เมื่อพิจารณาสัดส่วนของวัตถุดิบที่เปลี่ยนแปลงไปนั้น การที่เคลือบสามารถหลอมตัวได้มากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของวัตถุดิบกลุ่ม III ได้แก่ โดโลไมต์ หินปูน ซิงก์ออกไซด์ และเซอร์โคเนียมซิลิเกต โดยซิงก์ออกไซด์ และเซอร์โคเนียมซิลิเกตนั้นเป็นตัวที่ทำให้เคลือบมีความทึบแสง แมกนีเซียมออกไซด์ที่ได้จากโดโลไมต์ ที่อุณหภูมิสูงจะทำหน้าที่เป็นตัวลดจุดหลอมตัวของเคลือบที่รุนแรง ทำให้เคลือบไหลตัวได้ดีมาก ช่วยส่งเสริมให้เกิดความทึบแสงของเคลือบ ส่วนแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากโดโลไมต์และหินปูนเป็นตัวลดจุดหลอมตัวของเคลือบที่อุณหภูมิสูง เคลือบจะเคลื่อนตัวได้ดียิ่งขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่การใส่แคลเซียมออกไซด์มากเกินไปจะทำให้จุดสุกตัวของเคลือบสูงขึ้น คือ ทนไฟมากขึ้นและจะเกิดการตกผลึกเล็กๆ (อาจเป็นผลึกอะนอร์ไทต์) เป็น microcrystalline ขึ้นมาในผิวเคลือบ ซึ่งทำให้เกิดเคลือบด้าน[9] ดังนั้นการที่เคลือบทั้ง 3 สูตรมีจุดหลอมเหลวของเคลือบที่ต่ำ ทำให้สามารถหลอมตัวได้ดี และได้ผิวเคลือบด้านนั้นก็เนื่องมาจากวัตถุดิบกลุ่ม III ที่เพิ่มขึ้น และสมบัติต่างๆ ของวัตถุดิบที่ส่งผลต่อสมบัติของเคลือบนั่นเอง

ตารางที่ 5.26 พฤติกรรมการหลอมตัวของเคลือบที่มีปริมาณของวัตถุดิบกลุ่ม III เพิ่มขึ้น เปรียบเทียบกับเคลือบมาตรฐาน STD และเคลือบสูตร A

สูตร (*กากของเสียคงที่ : 8.44 wt%)	อุณหภูมิการเผา					
	1000 °C	1050 °C	1100 °C	1150 °C	1200 °C	1250 °C
Standard (STD)						
(A) Group II : 59 wt % Group III : 32.6 wt%						
(d) Group III : 40 wt% Group II : 51.6 wt%						
(e) Group III : 45 wt% Group II : 46.5 wt%						
(f) Group III : 50 wt% Group II : 41.6 wt%						

อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบแสดงในตารางที่ 5.27 เมื่อเปรียบเทียบกับเคลือบสูตร A พบว่าเคลือบสูตร d e และ f มีอุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะที่ต่ำกว่าสูตรเคลือบ A อย่าง

ชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในส่วนพฤติกรรมการหลอมตัวของเคลือบในตารางที่ 5.26 และรูปที่ 5.20 และถึงแม้ว่าเคลือบสูตร d จะมีอุณหภูมิหลอมตัวเฉพาะหลอมตัวของเคลือบใกล้เคียงกับเคลือบมาตรฐาน STD ก็ตาม แต่ผิวของเคลือบสูตร d ที่ได้ ก็ไม่สวยงามเหมือนเคลือบมาตรฐาน STD



รูปที่ 5.20 พฤติกรรมการหลอมตัวของเคลือบสูตร d e และ f

ตารางที่ 5.27 อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบที่มีปริมาณของวัตถุดิบกลุ่ม III เพิ่มขึ้นเปรียบเทียบกับเคลือบมาตรฐาน STD และเคลือบสูตร A

เคลือบ (% ของวัตถุดิบกลุ่ม III)	Characteristic temperatures (°C)				
	sintering	softening	sphere	half-sphere	melting
STD	1097	1128	1163	1164	**1182**
A (42.6 wt%)	1080	1124	1173	1175	**1216**
d (40 wt%)	1085	1115	1144	1152	**1189**
e (45 wt%)	1095	1100	1137	1138	**1146**
f (50 wt%)	1115	1119	1149	1152	**1171**

wt% หมายถึงสัดส่วนของ**กากของเสีย**ในส่วนผสมเคลือบ หน่วยเป็นเปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก

จากผลการทดลองในส่วนนี้ ทำให้เห็นแนวโน้มของลักษณะของเคลือบที่ได้จากสูตรเคลือบ d e และ f ว่าไม่เหมาะสมในการนำมาเตรียมชิ้นงานเคลือบ หรือวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของเคลือบต่อไป เนื่องจากเคลือบที่ได้ผิวเคลือบมีความด้าน และไม่ความสวยงาม

5.5 สรุปผลการทดลองการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบในเคลือบเซรามิก

กากของเสียที่ได้จากกระบวนการผลิตคะตะลิสต์สำหรับการผลิตพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนวัตถุดิบทางการค้าสำหรับการผลิตเคลือบเซรามิกได้ และก่อนการนำกากของเสียไปใช้เป็นวัตถุดิบนั้น มีความจำเป็นต้องทำการกำจัดสารประกอบคลอไรด์ออกจากกากของเสียก่อน เนื่องจากสารประกอบคลอไรด์เป็นตัวทำให้น้ำเคลือบมีความหนืดมาก งานวิจัยนี้เลือกวิธีการกำจัดสารประกอบคลอไรด์ด้วยการนำกากของเสียไปผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เนื่องจากสารประกอบคลอไรด์จะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 300 – 350 องศาเซลเซียส การใช้กากของเสียในสูตรเคลือบเพื่อให้ได้เคลือบทึบสีขาวที่มีค่าความขาวตั้งแต่ 90 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป ควรใช้ปริมาณกากของเสียไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยสมบัติของเคลือบที่ได้ ได้แก่ ความทนทานต่อสารเคมี ความแข็งและความทนทานต่อการขูดขีด มีสมบัติใกล้เคียงกับเคลือบมาตรฐาน และหากมีการใส่ปริมาณกากของเสีย 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักขึ้นไป จะทำให้เคลือบหลอมตัวที่อุณหภูมิสูงขึ้น เคลือบที่ได้มีสีออกเหลืองนวล และความมันวาวลดลง เนื่องจากกากของเสียมีความทนไฟ และเคลือบที่ได้มีความแข็งเพิ่มขึ้นและสามารถทนทานต่อการขูดขีดได้ดีขึ้น ในการเลือกสูตรเคลือบ ควรเลือกใช้สูตรเคลือบที่มีแคลเซียมออกไซด์ และอะลูมินาในสูตรเคลือบเนื่องจากการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบ จะทำให้ได้แคลเซียมออกไซด์และอะลูมินาด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 6

การใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบในเคลือบฟริต

บทที่ 6 ประกอบด้วยผลการทดลองการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบในเคลือบฟริต ผลของการปรับสูตรฟริต และผลการวิเคราะห์สมบัติของเคลือบฟริตหลังเผา

6.1 การเลือกสูตรฟริตมาตรฐานและการปรับสูตรฟริต

งานวิจัยนี้ได้ทำการเลือกสูตรฟริตมาตรฐานที่มีเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ (ZrO_2) เป็นตัวให้ความทึบแสง แทนด้วย STD-Z [40] โดยส่วนผสมของฟริตมาตรฐานดังกล่าวแสดงในตารางที่ 6.1 เมื่อได้สูตรฟริตมาตรฐานแล้ว จึงได้มีการปรับสูตรฟริต โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) สูตรฟริตที่ทำการปรับโดยมีการใส่ TiO_2 แทน ZrO_2 ในสัดส่วน 5 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยแทนด้วย T5 T10 และ T15 ตามลำดับ และ 2) สูตรฟริตที่มีการใส่กากของเสียเป็นวัตถุดิบทดแทนไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้าในสูตร T5 T10 และ T15 แทนด้วย W5 W10 และ W15 ส่วนผสมของวัตถุดิบของฟริตที่ทำการปรับเมื่อเปรียบเทียบกับฟริตมาตรฐาน แสดงในตารางที่ 6.2 หลังจากนั้นนำฟริตที่ได้ไปเตรียมเป็นเคลือบฟริต และศึกษาสมบัติของฟริตและเคลือบฟริตที่ได้

ตารางที่ 6.1 ส่วนผสมของฟริตมาตรฐาน STD-Z [40]

วัตถุดิบ	สูตรเคมี	สัดส่วนโดยน้ำหนัก (wt%)
บอแร็กซ์	$Na_2O.2B_2O_3.10H_2O$	10.3
โพแทสเซียมคาร์บอเนต	K_2CO_3	0.7
หินปูน	$CaCO_3$	10.4
ทัลค์	$3MgO.4SiO_2.H_2O$	3.5
โซเดียมคาร์บอเนต	Na_2CO_3	13.6
ดินขาว	$Al_2O_3.2SiO_2.2H_2O$	9.4
เซอร์โคเนียมซิลิเกต	$ZrSiO_4$	14.1
ทรายแก้ว	SiO_2	38.0
ไทเทเนียมไดออกไซด์ (รูไทล์)	TiO_2	-

ตารางที่ 6.2 ส่วนผสมของวัตถุดิบของสูตรฟริตมาตรฐาน และสูตรฟริตที่ทำการปรับ

วัตถุดิบ	สูตร						
	STD-Z	T5	T10	T15	W5	W10	W15
บอแร็กซ์	10.3	13.8	11.9	11.9	14.1	12.4	12.6
โพแทสเซียมคาร์บอเนต	0.7	0.1	0.7	0.6	0.1	0.7	0.6
หินปูน	10.4	10.1	12.9	11.9	5.2	3.9	-
ทัลค์	3.5	-	-	-	-	-	-
โซเดียมคาร์บอเนต	13.6	3.7	6.9	4.1	3.8	7.3	4.1
ดินขาว	9.4	12.3	10.4	10.0	9.9	6.0	2.7
เซอร์โคเนียมซิลิเกต	14.1	-	-	-	-	-	-
ทรายแก้ว	38.0	55.2	48.5	47.7	57.9	53.2	53.8
ไทเทเนียมไดออกไซด์ (รูไทล์)	-	4.8	8.8	13.9	-	-	-
กากของเสีย (อบแห้ง)	-	-	-	-	8.9	16.5	21.8

หมายเหตุ ตัวเลข 5, 10, 15 หลังอักษร T และ W แสดงปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปรากฏในสูตรฟริตหลังการหลอม

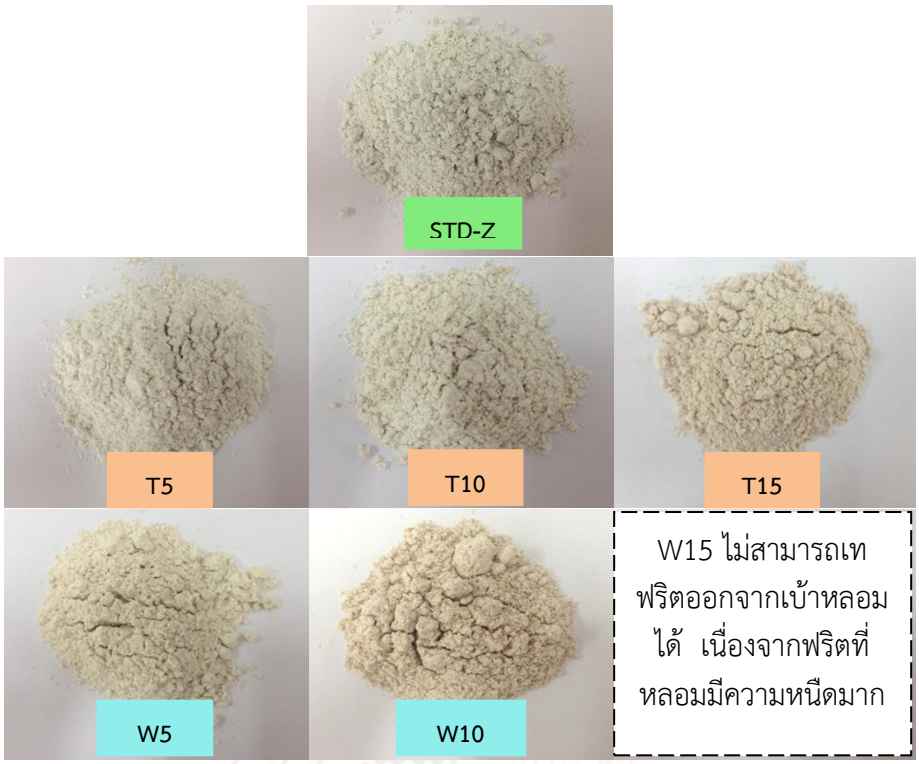
6.2 ลักษณะสมบัติของฟริตที่ได้

6.2.1 ลักษณะกายภาพของฟริต

เมื่อทำการเตรียมฟริตตามสูตรที่ได้คำนวณในตารางที่ 6.2 พบว่าลักษณะของฟริตสูตรต่างๆ มีลักษณะดังรูปที่ 6.1 โดยฟริตมาตรฐานที่มีการใช้เซอร์โคเนียมไดออกไซด์เป็นตัวให้ความทึบแสง หรือที่เรียกว่าฟริตสูตร STD-Z นั้น เมื่อทำการหลอมจะได้ฟริตที่มีสีเขียวใส ในขณะที่เคลือบที่มีการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้าเป็นวัตถุดิบหรือที่เรียกว่าฟริตสูตร T และเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบหรือที่เรียกว่าฟริตสูตร W นั้น เมื่อทำการหลอมจะให้ฟริตที่มีสีเหลืองน้ำตาล และสีได้สีเข้มมากขึ้นเมื่อมีการใส่ไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้าและกากของเสียในสูตรมากขึ้น ส่วนฟริตสูตร W15 นั้น หากมีการทำให้ฟริตมีการเย็นตัวอย่างรวดเร็วในน้ำก็จะทำให้เกิดสีน้ำตาลเช่นเดียวกันกับสูตรอื่นๆ แต่ที่เห็นเป็นสีน้ำเงินอมม่วงนั้นก็เนื่องจากฟริตที่ได้จากการหลอมมีความหนืดสูงมาก จึงไม่สามารถเทออกจากเบ้าหลอมได้ ฟริตสูตรนี้จึงถูกปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ ทำให้ฟริตมีเวลาในการเกิดการเปลี่ยนเฟสและดูดกลืนแสงบางความยาวคลื่น [9] จึงทำให้ฟริตเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำตาลไปเป็นสีน้ำเงินอมม่วง จากขั้นตอนในการหลอมฟริตทำให้ทราบว่าการใส่ไทเทเนียมไดออกไซด์และกากของเสียในสูตรฟริตเพิ่มขึ้นนั้น นอกจากจะทำให้ได้ฟริตที่สีเข้มขึ้นแล้ว ยังทำให้ฟริตมีความหนืดที่สูงขึ้นอีกด้วย ฟริตที่มีการไหลตัวดีและหลอมตัวดีนั้นควรมีอัตราส่วนของ $RO:RO_2$ อยู่ระหว่าง 1:1 ถึง 1:3 [9] แต่เนื่องจากการปรับสูตรฟริตนี้มีการเพิ่มวัตถุดิบที่ให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้สัดส่วนของ $RO:RO_2$ ไม่อยู่ระหว่าง 1:1 ถึง 1:3 โดยการเพิ่มวัตถุดิบไทเทเนียมไดออกไซด์จะเป็นการ

เพิ่มวัตถุดิบกลุ่ม RO_2 จึงทำให้ฟริตเกิดการหลอมตัวและไหลตัวได้ยากขึ้น ลักษณะของฟริตหลังการบดแสดงในรูปที่ 6.2 เมื่อทำการบดฟริตทุกสูตร พบว่าสีของผงฟริตที่ได้ไม่แตกต่างกันมากนัก ส่วนฟริตสูตร W15 นั้น ไม่สามารถทำการเตรียมผงฟริตได้ เนื่องจากฟริตมีความหนืดจึงไม่สามารถเทออกจากเบ้าหลอมได้ดังที่กล่าวมาก่อนหน้านี้

รูปที่ 6.1 ลักษณะของฟริตที่ได้หลังอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส

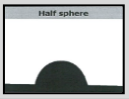


รูปที่ 6.2 ลักษณะของฟริตเมื่อทำการบดให้ละเอียด

6.2.2 ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของฟริต

อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของฟริตสูตรต่างๆ แสดงในตารางที่ 6.3 พบว่าฟริตมาตรฐาน STD-Z มีอุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะที่ต่ำที่สุด คือ 1164 องศาเซลเซียส ในขณะที่ฟริตที่มีการปรับใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้า T5 T10 และ T15 มีอุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะเท่ากับ 1320 1216 และ 1260 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และฟริตที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบ คือ ฟริต W5 W10 และ W15 มีอุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะเท่ากับ 1292 1228 และ 1310 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะระหว่างฟริต T และ W ฟริต T10 และ W10 มีอุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะที่ใกล้เคียงกัน และต่ำกว่าสูตรอื่นๆ ทั้งนี้เมื่อทำการวิเคราะห์จากสัดส่วนของวัตถุดิบในสูตรฟริต พบว่าฟริตสูตร T10 และ W10 มีปริมาณของโพแทสเซียมคาร์บอเนตและโซเดียมคาร์บอเนตที่ทำหน้าที่เป็นตัวลดจุดหลอมตัวที่ค่อนข้างรุนแรงมากกว่าสูตรอื่นๆ จึงทำให้ฟริต 2 สูตรนี้มีจุดหลอมตัวเฉพาะต่ำ ทำให้สามารถคาดคะเนได้ว่าฟริตสูตร T10 และ W10 น่าจะเป็นสูตร ฟริตที่ทำการปรับที่ดีที่สุดในการนำมาเตรียมเคลือบฟริตต่อไป

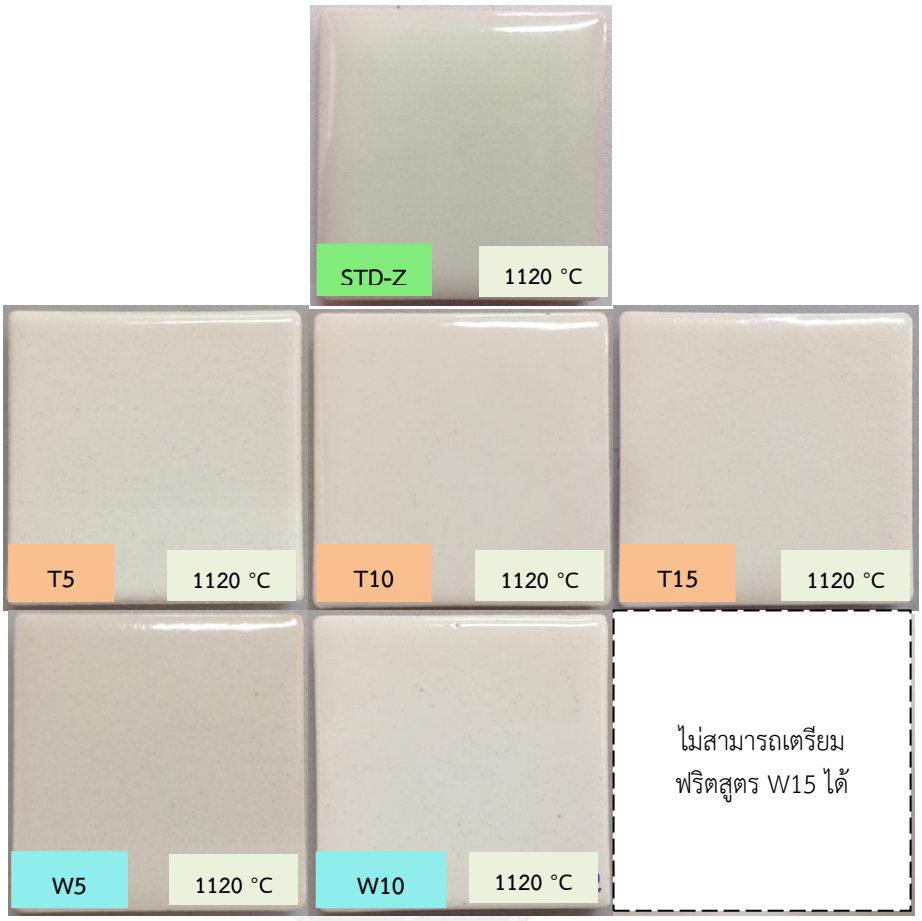
ตารางที่ 6.3 อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของฟริต

ฟริต		Characteristic temperatures (°C)				
		Sintering	Softening	Sphere	Half sphere 	Melting
ใช้ ZrO_2 (STD-Z)		770	856	998	1098	**1164**
ใช้ TiO_2 ทางการค้า	T5	834	918	1083	1254	**1320**
	T10	775	846	1155	1199	**1216**
	T15	875	985	1207	1239	**1260**
ใช้กากของเสียทดแทน TiO_2 ทางการค้า	W5	844	965	1162	1250	**1292**
	W10	835	926	1116	1176	**1228**
	W15	917	1035	1225	1285	**1310**

6.3 ลักษณะสมบัติของเคลือบฟริต

6.3.1 ลักษณะทางกายภาพและค่าสีของเคลือบฟริต

เมื่อนำฟริตแต่ละสูตรที่ได้ไปทำการเตรียมชิ้นงานเคลือบและเผาที่อุณหภูมิเดียวกันทุกสูตร คือ 1120 องศาเซลเซียส พบว่าลักษณะของเคลือบในแต่ละสูตรเป็นดังรูปที่ 6.3 เคลือบฟริตมาตรฐาน STD-Z ซึ่งมีการใช้เซอร์โคเนียมไดออกไซด์เป็นตัวให้ความทึบแสงให้เคลือบทึบที่มีสีเขียวอมเทาและผิวมันวาวสวยงาม นอกจากนี้ยังพบว่าเคลือบสูตรนี้เกิดการหดตัวตามขอบกระเบื้องเล็กน้อย ส่วนเคลือบที่มีการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้า และกากของเสียเป็นวัตถุดิบนั้นจะให้เคลือบทึบที่มีสีขาว โดยเคลือบสูตร T5 T10 W5 และ W10 ผิวของเคลือบมีความมันวาวสวยงาม ส่วนเคลือบสูตร T15 ได้เคลือบที่มีผิวออกมันกึ่งด้าน เคลือบ T และ W ทุกสูตรเคลือบสามารถปกปิดชิ้นงานได้ดี สาเหตุที่เคลือบฟริตมาตรฐาน STD-Z ได้เคลือบที่มีสีเขียวอมเทาก็เนื่องจากฟริตสูตรนี้มีการใส่เซอร์โคเนียมซิลิเกต ที่ให้ ZrO_2 ซึ่งนอกจากจะทำให้ได้เคลือบทึบ ยังทำให้เกิดสีเขียวในเคลือบด้วย อีกทั้งฟริต STD-Z ยังมีการใส่ทัลค์ที่มีสูตรเคมีคือ $3MgO{\cdot}4SiO_2{\cdot}H_2O$ ซึ่งให้ MgO และ SiO_2 ในสูตรเคลือบ MgO เป็นตัวที่ช่วยส่งเสริมการเกิดสีเขียวอีก จึงทำให้เคลือบ STD-Z ได้เคลือบที่มีสีเขียวอมเทาได้ [9] หรืออาจเกิดจากการที่มีเหล็กออกไซด์เจือปนมากับวัตถุดิบบางตัว เช่น ดินขาว เป็นต้น



รูปที่ 6.3 ลักษณะของเคลือบฟริตมาตรฐาน STD-Z เคลือบฟริต T และ W ที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ 1120 องศาเซลเซียส

ค่าสีของเคลือบที่ได้จากเครื่อง Spectrophotometer แสดงในตารางที่ 6.4 เคลือบฟริตสูตร T และเคลือบฟริตสูตร W ให้เคลือบสีขาวที่มีความขาวมากกว่าเคลือบฟริตมาตรฐาน STD-Z เคลือบฟริตสูตร W10 มีความขาวที่มากกว่าเคลือบฟริตสูตร W5 เคลือบที่มีค่าความขาวสูงที่สุดนั้นได้แก่ เคลือบสูตร T10 และ W10 โดยมีค่าความขาวของเคลือบสูงถึง 95.41 และ 96.09 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ในส่วนของเคลือบฟริตนั้นไม่มีแนวโน้มว่าการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบในปริมาณเพิ่มขึ้นในสูตรเคลือบจะส่งผลให้เกิดสีเหลืองในเคลือบมากขึ้นเหมือนกับในส่วนของเคลือบเซรามิก

เมื่อเปรียบเทียบค่าความขาวและความอิ่มสีระหว่างเคลือบฟริตทีมีการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้าเป็นวัตถุดิบสูตร T และเคลือบฟริตที่มีการใช้กากของเสียทดแทนไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้าสูตร W ดังแสดงในตารางที่ 6.5 พบว่าเคลือบฟริตสูตร T10 และ W10 มีสีของเคลือบใกล้เคียงกันมากที่สุด เนื่องจากมีค่าความต่างของค่า L a* และ b* น้อยมาก และเคลือบฟริตทั้ง 2 สูตรนี้ก็เป็นเคลือบฟริตที่สวยงามและมีความมันวาวมาก และมีจุดหลอมตัวของสูตรฟริตที่ต่ำที่สุดด้วย

ตารางที่ 6.4 ค่าสีของเคลือบฟริต

ค่าสี	เคลือบฟริต						
	STD-Z	T5	T10	T15	W5	W10	W15
L (whiteness)	80.57	94.98	95.41	93.94	88.41	96.09	n/a
a* (green-red)	-1.97	-0.38	0.41	-0.61	0.89	-0.24	n/a
b* (blue to yellow)	10.08	3.17	2.1	11.98	5.67	3.35	n/a
เคลือบ							n/a

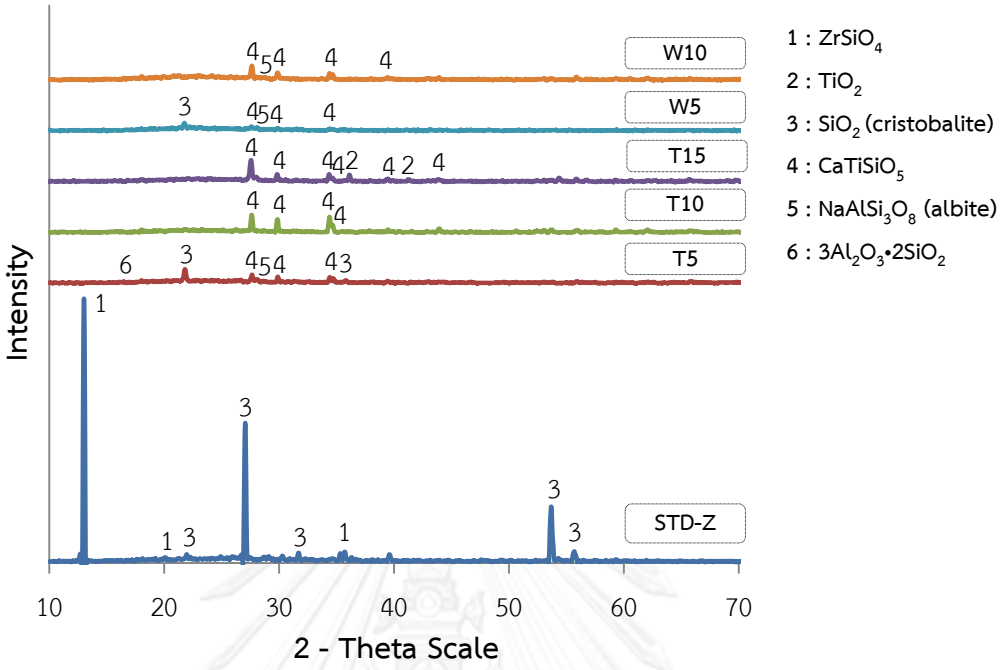
n/a คือ ไม่สามารถเตรียมฟริตและเคลือบฟริตได้

ตารางที่ 6.5 การเปรียบเทียบค่าความขาวและความอิ่มสีระหว่างเคลือบฟริตทีมีการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้าเป็นวัตถุดิบ และเคลือบฟริตที่มีการใช้กากของเสียทดแทนไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้า

ค่าเปรียบเทียบ	T5 / W5	T10 / W10
dL	6.57	0.68
da*	1.27	0.65
db*	2.5	1.25
dE*	7.143	1.564

6.3.2 องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบหลังเผา

องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบฟริตหลังเผาสูตรมาตรฐาน STD-Z เคลือบฟริต T และเคลือบฟริต W แสดงในรูปที่ 6.4 เคลือบฟริตมาตรฐานสูตร STD-Z มีเฟสของเซอร์โคเนียมซิลิเกตปรากฏอยู่ซึ่งแตกต่างจากสูตรอื่นๆ เนื่องจากเคลือบมาตรฐาน STD-Z มีการใช้เซอร์โคเนียมซิลิเกตเป็นวัตถุดิบเพื่อให้เกิดความทึบแสงในเคลือบ เคลือบฟริตสูตร T5 และ W5 ซึ่งมีส่วนประกอบของออกไซด์ที่เหมือนกันนั้นมีองค์ประกอบทางเฟสของเคลือบที่คล้ายคลึงกัน คือมีการเกิดเฟสของไทเทไนต์ ($CaTiSiO_5$) อัลไบต์ ($NaAlSi_3O_8$) และซิลิกา (SiO_2) เฟสที่ปรากฏอย่างชัดเจนในเคลือบฟริตสูตร W5 และ W10 คือ ไทเทไนต์ และอัลไบต์ ส่วนเคลือบฟริตสูตร W15 นั้น ไม่สามารถเตรียมได้ เนื่องจากฟริตสูตร W15 มีความหนืดมากทำให้ไม่สามารถเทฟริตออกจากเบ้าหลอมได้



รูปที่ 6.4 องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบฟริตมาตรฐาน STD-Z เคลือบฟริต T และ W

6.3.3 สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน

ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบฟริตที่ได้น่าจะมีความใกล้เคียงกับเนื้อดินกระเบื้อง เนื่องจากเคลือบสามารถปกคลุมผิวของชิ้นงานได้อย่างสวยงาม และไม่เกิดตำหนิของเคลือบ ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบฟริตชุดนี้จึงไม่ได้ทำการตรวจวัดค่าด้วยเครื่อง dilatometer

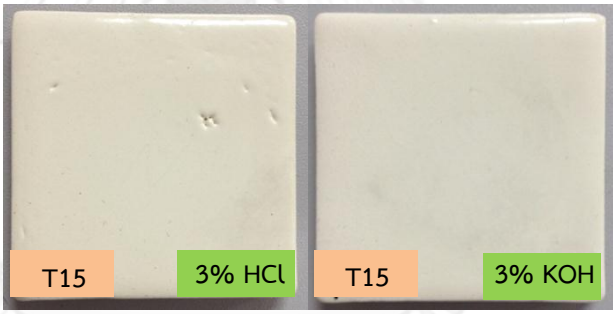
6.3.4 ความทนทานต่อสารเคมี

ระดับความทนทานต่อสารเคมีกรดและด่างของเคลือบฟริตมาตรฐาน STD-Z เคลือบฟริต T และ W แสดงในตารางที่ 6.6 เคลือบเกือบทุกสูตรมีความทนทานต่อสารละลายกรด 3%HCl และสารละลายด่าง 3%KOH อยู่ในระดับ A ซึ่งหมายความว่าเคลือบสามารถทนทานต่อสารเคมีได้ดี ผิวของเคลือบไม่ถูกทำลาย ไม่มีความแตกต่างระหว่างผิวที่ไม่ถูกทดสอบและผิวที่ถูกทดสอบ เคลือบมีความสะท้อนได้ดีเหมือนเดิม และมีเพียงเคลือบฟริตสูตร T15 ซึ่งมีการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในสูตรมากที่สุดเท่านั้น ที่มีระดับความทนทานต่อกรด 3%HCl อยู่ในระดับ B คือเมื่อทำการทดสอบพบว่าผิวของเคลือบเกิดการเปลี่ยนแปลง เมื่อทำการทดสอบบริเวณผิวที่ถูกทดสอบด้วยการขีดด้วยดินสอ HB และทำการลบ ปรากฏว่าไม่สามารถลบรอยดินสอบนผิวได้ แต่การสะท้อนแสงของผิวเคลือบเหมือนเดิมไม่เปลี่ยนแปลง ลักษณะของผิวเคลือบฟริตสูตร T15 ที่ผ่านการทดสอบแสดงในรูปที่ 6.5

ตารางที่ 6.6 ระดับความทนทานต่อสารเคมีของเคลือบฟริตมาตรฐาน STD-Z เคลือบฟริต T และ W

เคลือบ	ระดับความทนทานต่อสารเคมี	
	HCl 3%	KOH 3%
STD-Z	GA	GA
T5	GA	GA
T10	GA	GA
T15	GB	GA
W5	GA	GA
W10	GA	GA
W15	n/a	n/a

n/a คือ ไม่สามารถเตรียมฟริตและเคลือบฟริตได้



รูปที่ 6.5 ลักษณะของผิวเคลือบฟริตสูตร T15 ที่ผ่านการทดสอบความทนทานต่อสารเคมี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

6.3.5 ความแข็งและความทนทานต่อการขูดขีด

ค่าความแข็งและและความทนทานต่อการขูดขีดของเคลือบฟริตมาตรฐาน STD เคลือบ ฟริต T และ W แสดงในตารางที่ 6.7 เคลือบฟริตมาตรฐาน STD-Z มีค่าความแข็ง คือ 4.5584 GPa เคลือบฟริต T และ W มีค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกัน เคลือบฟริต T ที่มีการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้าเป็นวัตถุดิบพบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ในสูตร ความแข็งของเคลือบจะลดลง ในทางกลับกันเคลือบกลับมีความทนทานต่อการขูดขีดเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ เคลือบฟริต T มีค่าความแข็งและความทนทานต่อการขูดขีดที่น้อยกว่าเคลือบฟริตมาตรฐาน STD-Z และเคลือบฟริต W โดยที่เคลือบฟริตมาตรฐาน STD-Z และเคลือบ ฟริต W มีค่าความแข็งและความทนทานต่อการขูดขีดที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความแข็งอยู่ที่ 4.4079 - 4.9577 GPa และมีการสูญเสียน้ำหนักหลังทำการทดสอบเพียง 0.046 - 0.050 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่าน้อยมาก

ในขณะที่เคลือบ T มีค่าความแข็งเพียง 3.9883 – 4.3023 GPa และมีการสูญเสียน้ำหนักอยู่ในช่วงกว้างสูงกว่า คือ 0.058 – 0.079 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าเคลือบฟริต W ที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบให้สมบัติของเคลือบฟริตทางด้านความแข็งและความทนทานต่อการขูดขีดที่ใกล้เคียงกับเคลือบฟริตมาตรฐาน STD-Z มากที่สุด ในทางทฤษฎีนั้นเคลือบฟริตมักมีความแข็งและความทนทานมากกว่าเคลือบเซรามิก เนื่องจากเคลือบฟริตมีการหลอมฟริตให้เป็นเนื้อเดียวกันก่อน เคลือบที่ได้จึงมีความเสถียร

ตารางที่ 6.7 ค่าความแข็งและความต้านทานต่อการขูดขีดของเคลือบฟริตมาตรฐาน STD-Z เคลือบฟริต T และ W

เคลือบฟริต	**Vickers hardness, H_v (GPa)**	**น้ำหนักที่หายไปหลังทำการทดสอบความทนทานต่อการขูดขีด (%)**
STD-Z	4.5584 ± 0.5499	0.042 ± 0.002
T5	3.9883 ± 0.7562	0.058 ± 0.016
T10	4.2387 ± 0.3448	0.067 ± 0.003
T15	4.3023 ± 0.2867	0.079 ± 0.001
W5	4.9577 ± 0.6199	0.046 ± 0.010
W10	4.4079 ± 0.2790	0.050 ± 0.003
W15	n/a	n/a

n/a คือ ไม่สามารถเตรียมฟริตและเคลือบฟริตได้

6.4 สรุปผลการทดลองการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบในการเตรียมฟริตสำหรับเคลือบฟริต

กากของเสียที่ได้จากกระบวนการผลิตคะตะลิสต์สำหรับการผลิตพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการเตรียมฟริตสำหรับเคลือบฟริตได้ โดยกากของเสียสามารถใช้เป็นผงกากของเสียโดยตรงได้เลย ไม่จำเป็นต้องมีการเผาแคลไซน์เพื่อกำจัดคลอรีน เนื่องจากคลอรีนจะสลายตัวในขั้นตอนการหลอมฟริต การใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบในฟริต จำเป็นต้องมีการใส่วัตถุดิบที่เป็นตัวลดจุดหลอมตัวด้วย เนื่องจากฟริตที่เตรียมได้จากกากของเสียจะมีจุดหลอมตัวที่สูง การใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบทดแทนไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้านั้น ให้สมบัติของเคลือบที่ใกล้เคียงกับเคลือบที่มีการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้าเป็นวัตถุดิบอย่างมาก มากไปกว่านั้นเคลือบฟริต W ยังให้เคลือบที่มีความแข็งและความทนทานต่อการขูดขีดได้ดีมากกว่าเคลือบฟริตสูตร T และยังใกล้เคียงกับฟริตมาตรฐาน STD-Z อีกด้วย โดยปริมาณของกากของเสียที่ใช้ในสูตรฟริตที่เหมาะสม คือ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อนำฟริตมาทำการเตรียมเคลือบนั้น ได้เคลือบฟริตทึบสีขาวที่มีค่าความขาวมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองที่ได้มีการใช้กากของเสียที่ได้จากการผลิตคะตะลิสต์สำหรับการผลิตพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมาใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้าในเคลือบเซรามิกและเคลือบฟริต และได้เตรียมชิ้นงานเคลือบสูตรต่างๆ ตลอดจนทำการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่างๆ ของเคลือบ สามารถสรุปผลการทดลองได้ ดังนี้

7.1.1 ในการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบในเคลือบดิบ มีความจำเป็นต้องกำจัดสารประกอบคลอไรด์ก่อน ด้วยการเผาแคลไซน์กากของเสียที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เพราะสารประกอบคลอไรด์ทำให้น้ำเคลือบมีความหนืดมาก ไหลตัวได้ยาก เนื่องจากมีสมบัติเป็นอิเล็กโทรไลต์ ทำให้อนุภาคในน้ำเคลือบเกิดการจับตัวเป็นก้อน

7.1.2 ในการศึกษาสัดส่วนของกากของเสียที่ใช้เป็นวัตถุดิบในเคลือบเซรามิก พบว่าปริมาณที่เหมาะสมของกากของเสียในสูตรเคลือบเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรเคลือบมาตรฐานและทำให้เคลือบได้สมบัติที่ดี คือ 8.44 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไม่ควรใส่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพราะการใส่กากของเสียในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้เคลือบมีจุดหลอมตัวที่สูงขึ้น เนื่องจากกากของเสียมีอะลูมินาซึ่งเป็นตัวทนไฟอยู่ด้วย และเคลือบที่ใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสามารถเผาได้ที่ 1200 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดเคลือบทึบสีขาว มีความมันวาว

7.1.4 ในการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบทดแทนในการหลอมฟริต ไม่จำเป็นต้องผ่านการเผาแคลไซน์ก่อนเหมือนในกรณีใช้ทดแทนไทเทเนียมไดออกไซด์ในเคลือบดิบ เนื่องจากสารประกอบคลอไรด์สามารถสลายตัวได้ระหว่างการหลอม เคลือบฟริตที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบทดแทน ให้สมบัติของเคลือบที่ใกล้เคียงกับเคลือบที่มีการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้าเป็นวัตถุดิบ โดยปริมาณที่เหมาะสมในการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบทดแทนไทเทเนียมไดออกไซด์ ไม่ควรเกิน 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรเคลือบฟริตมาตรฐาน และเผาเคลือบที่อุณหภูมิ 1120 องศาเซลเซียส

7.1.5 การใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบในฟริต จำเป็นต้องใส่ตัวช่วยลดจุดหลอมตัว เนื่องจากฟริตที่มีการเติมกากของเสียจะมีจุดหลอมตัวสูง เพราะมีอะลูมินาที่มีสมบัติด้านการทนไฟ

7.2 ข้อเสนอแนะ

7.2.1 ในกากของเสียมีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ และอะลูมินาเป็นส่วนประกอบหลัก ดังนั้นในการเลือกใช้สูตรเคลือบและฟริตจำเป็นต้องเลือกสูตรที่มีออกไซด์ 3 ชนิดนี้อยู่ในสูตรด้วย

7.2.2 อาจทำการปรับเปลี่ยนวัตถุดิบอื่นๆ ในสูตรเคลือบ เพื่อให้ได้เคลือบที่มีสมบัติตามต้องการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รายการอ้างอิง

[1] Zimmer, A. Ceramic Products from Waste Ceramic Materials (2010): 215-228.

[2] สมนึก ศิริสุนทร. (2553). สถานภาพอุตสาหกรรมเซรามิกของประเทศไทยในปัจจุบัน. เซรามิกส์ 14: 43-53.

[3] ปรีดา พิมพ์ขาวขำ. เคลือบเซรามิกส์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์อักษรเจริญทัศน์, 2530.

[4] พลาสติกประเภท HDPE โพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง[Online]. 2552. แหล่งที่มา: http://greeniebag.blogspot.com/2009/03/hdpe-130-0.html[4 มี.ค. 57]

[5] พอลิเมอร์[Online]. แหล่งที่มา: http://www.nmt.ac.th/home/chemistry/08.html[4 มี.ค. 57]

[6] Wolf, C. R., Forte, M. M. d. C. and dos Santos, J. H. Z. Characterization of the nature of chemical species of heterogeneous Ziegler–Natta catalysts for the production of HDPE. Catalysis Today 107–108 (2005): 451-457.

[7] บริษัท เอสซีจี เคมิคอลส์ จำกัด, เอกสารการประชุมเรื่องการกำหนดขอบเขตและแนวทางการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและสุขภาพโดยสาธารณะ, 2553.

[8] เอ็ททสึโซะ คาโต. หลักการทำเคลือบเซรามิก (The Fundamenttals of the Graze Preparation). พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.

[9] ปรีดา พิมพ์ขาวขำ. เซรามิกส์. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535.

[10] ดรุณี วัฒนศิริเวช. การวิเคราะห์แร่ดิน เคลือบ และตำหนิในผลิตภัณฑ์เซรามิก. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.

[11] วรรณา ต.แสงจันทร์ และลดา พันธุ์สุขุมธนา. เคลือบเซรามิก[Online]. แหล่งที่มา: http://lib3.dss.go.th[4 มี.ค. 57]

[12] สุรศักดิ์ โกสิยพันธ์. น้ำเคลือบเครื่องปั้นดินเผา. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: วัฒนาพานิช, 2531.

[13] Ahmed, M. and Earl, D. A. Characterizing glaze melting behavior via HSM. American Ceramic Society Bulletin 81(2002): 47.

[14] Salem, Sh., Jazayeri, S.H., Bondioli, F., Allahverdi, A. and Shirvani, M. Characterizing thermal behavior of ceramic glaze containing nano-sized cobalt-aluminate pigment by hot stage microscopy. Thermochimica Acta 521(2011): 191-196.

[15] Froberg, L., Kronberg, T., Hupa, M. Influence of firing parameters on phase composition of raw glazes. Journal of the European Ceramic Society (2007): 1671-1675.

[16] Latorre, K. Glaze talk[Online]. 2010. Avaiable from: http://www.docstoc.com [2014, January 3]

[17] Reed, J. S. Principles of Ceramics Processing. 2nd ed. London: Chapman & Hall, 1995.

[18] คชินท์ สายอินทวงศ์. สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน[Online]. 2551. แหล่งที่มา: http://www.ceramicsociety.com/ch_heat.php[2 พ.ย.56]

[19] ISO 3585:1991., มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องเซรามิก 2553.

[20] ASTM D968-93., Abrasion resistance of coating.

[21] Gardner Falling Sand Abrasion Tester[Online]. Avaiable from: http://www.abtek.com[2014, January 3]

[22] L a* b*: Color Space in 3D[Online]. Avaiable from: http:// www.thyon.com/blog/gamut-lets-get-techni-colour.com[2014, January 3]

[23] Casasola, R., Rincon, J.M., Romero, M. Glass-ceramic glazes for ceramic tiles – a review Journal of Materials Science 47(2012): 553-582.

[24] Eppler, R. A. Microstructure of Titania-Opacified Porcelain Enamels. American Ceramic Society 54(12) (2006): 595-600.

[25] Eppler, R.A. and Mcleran Ja. W. A. Kinetics of Opacification of a TiO_2-Opacified Cover Coat Enamel. American Ceramic Society 50(3) (2006): 152-156.

[26] Teixeira, S. and Bernardin, A.M. Development of TiO_2 white glazes for ceramic tiles. Dyes and Pigments 80(2009): 292-296.

[27] Heimann, R. B. Oxide Ceramics: Structure, Technology, and Applications. Classic and Advanced Ceramics (2010)**:** 175-252.

[28] ฉัตรชัย โรจนไพฑูรย์ และ วนิดา ถาวรประดิษฐ์. การเตรียมอะลูมินาจากอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชุบผิวชิ้นงานอลูมิเนียม. 2544.

[29] สุจินต์ พราวพันธุ์. อะลูมินากับการนำไปใช้ในงานเซรามิก[Online]. 2554. แหล่งที่มา: http://soclaimon.wordpress.com/2011/07/23/อะลูมินากับการนำไปใช้งาน[3 ธ.ค.56]

[30] ไพจิตร อิ่งศิริวัฒน์. เนื้อดินเซรามิก. พิมพ์ครั้งที่ 1. โอ.เอส. พริ้นติ้ง เฮ้าส์: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, 2541.

[31] da Silva, R. C., Pianaro, S. A. and Tebcherani, S. M. Preparation and characterization of glazes from combinations of different industrial wastes. Ceramics International 38(4) (2012): 2725-2731.

[32] Yalçın, N. and Sevinç, V. Utilization of bauxite waste in ceramic glazes. Ceramics International 26(5) (2000): 485-493.

[33] Kamarudin, R. A. and Shahir Zakaria, M. The utilization of red gypsum waste for glazes. The Malaysian Journal of Analytical Sciences 11(2007): 57-64.

[34] Karasu, B., Çakı, M. and Yeşilbaş, Y. G. The effect of albite wastes on glaze properties and microstructure of soft porcelain zinc crystal glazes. Journal of the European Ceramic Society 21(8) (2001): 1131-1138.

Chulalongkorn University

[35] Karasu, B., Kaya, G., Cakir, A. and Yesilay, S. Utilization of borax solid waste in fast single-firing porcelain tile glass - ceramic glazes under industrial working conditions. The Minerals & Materials Society (2008): 379-387.

[36] สิรินาถ วรรณคล้ำ และ โสวรรณ มนัสกิจสำราญ. การนำฝุ่นเหล็กจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้ในเคลือบเซรามิก. โครงงานเฉพาะเรื่องปริญญาบัณฑิต, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2554.

[37] ปวีณา เกตุบุญเรือง. การพัฒนาสูตรเคลือบเซรามิกอุณหภูมิต่ำโดยใช้วัสดุเหลือทิ้ง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2553.

[38] Karamanov, E. and Karamanov, A. Glass-ceramic frits from fly ash in terracotta production. Waste Management & Research 27(2009): 87–92.

[39] Karasu, B., Kaya, G. and Kozulu, R. Utilization of concentrator waste of Etibor Kirka Borax Company in the recipe of an opaque frit used for wall tile glazes as an acid boric replacement. Key Engineering Materials 264-268(2004): 2505-2508.

[40] Mestre, S., Gómez, M.P., Agut, P., Barba, A. and Añó, E. Synthesis of Frits with ZnO Made from Zamak Waste. CASTELLÓN (SPAIN) (2008): 257-272.

[41] Castro, A., Soares, D., Vilarinho, C., Soares, D., Maçães, C., Sousa, C. and Castro, F. Kinetic study of thermal de-chlorination of PVC-containing waste. WASTES: Solutions, Treatments and Opportunities (2011)

[42] Castro, A., Soares, D., Vilarinho, C. and Castro, F. Kinetics of thermal de-chlorination of PVC under pyrolytic conditions. Waste Management 32(5) (2012): 847-851.

[43] คชินท์ สายอินทวงศ์. แนวทางในการเลือกใช้งานกระเบื้องเซรามิก[Online]. 2557. แหล่งที่มา: http://www.thaiceramicsociety.com/pd_tile_way2.php[3 ธ.ค.56]

[44] กระเบื้องปูผนังได้หรือไม่ แล้วจะเลือกใช้อย่างไร[Online]. 2556. แหล่งที่มา: www.scghomesolution.com/home_society_detail.php?ci=52[3 ธ.ค.56]

[45] ASTM C1327.08., Vickers Microhardness[Online]. 2555. แหล่งที่มา: http://www.tonanasia.com[3 ธ.ค.56]

[46] Tonan Asia Autotech Co., LTD. การทดสอบแบบ Vickers[Online]. 2555. แหล่งที่มา: http://www.tonanasia.com[3 ธ.ค.56]

[47] Digital Micro Hardness Tester Model : ISH - DV1000[Online]. 2555. Avaiable from: http://www.scghomesolution.com[2013, December 7].

[48] ไพจิตร อิ่งศิริวัฒน์. รวมสูตรเคลือบเซรามิกส์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์ 2547.

[49] Groover, M. P. Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems. America: Wiley, 2010.

[50] Ece, O. I. and Zenbe, E. Bending strength of porcelains. Ceramics International 28(2) (2002): 131-140.

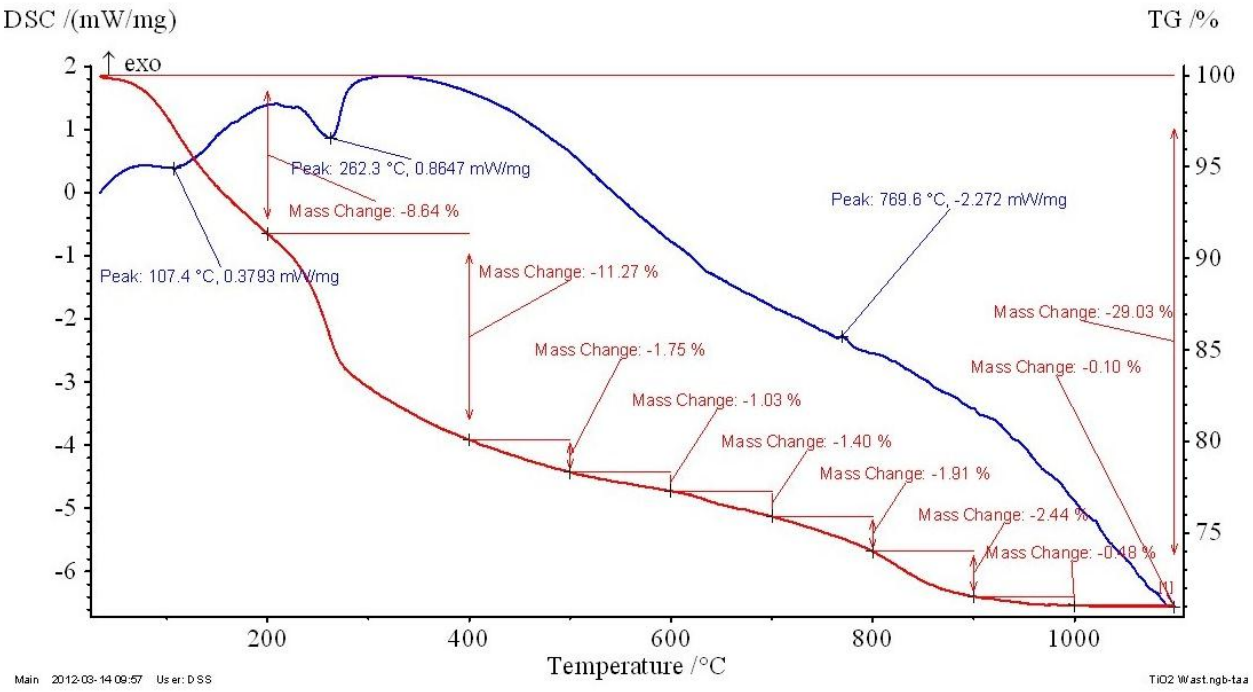
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก

การเปลี่ยนแปลงเชิงอุณหภูมิและน้ำหนักที่เปลี่ยนไปของกากของเสียที่อุณหภูมิต่างๆ

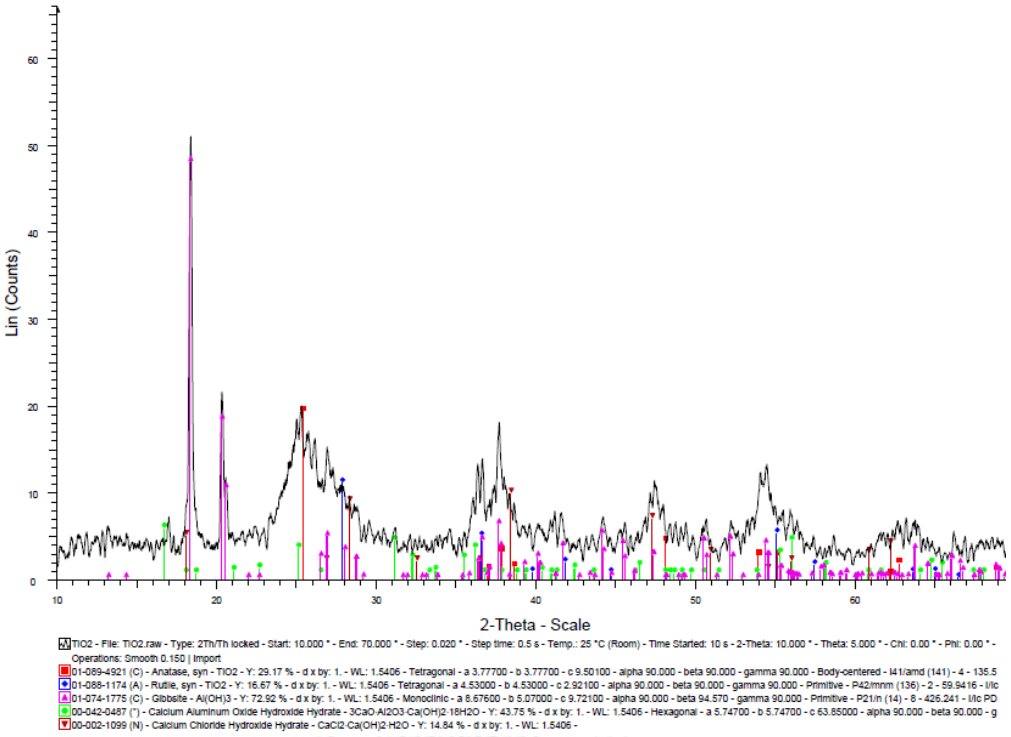


ภาพที่ ก การเปลี่ยนแปลงเชิงอุณหภูมิและน้ำหนักที่เปลี่ยนไปของกากของเสียที่อุณหภูมิต่างๆ

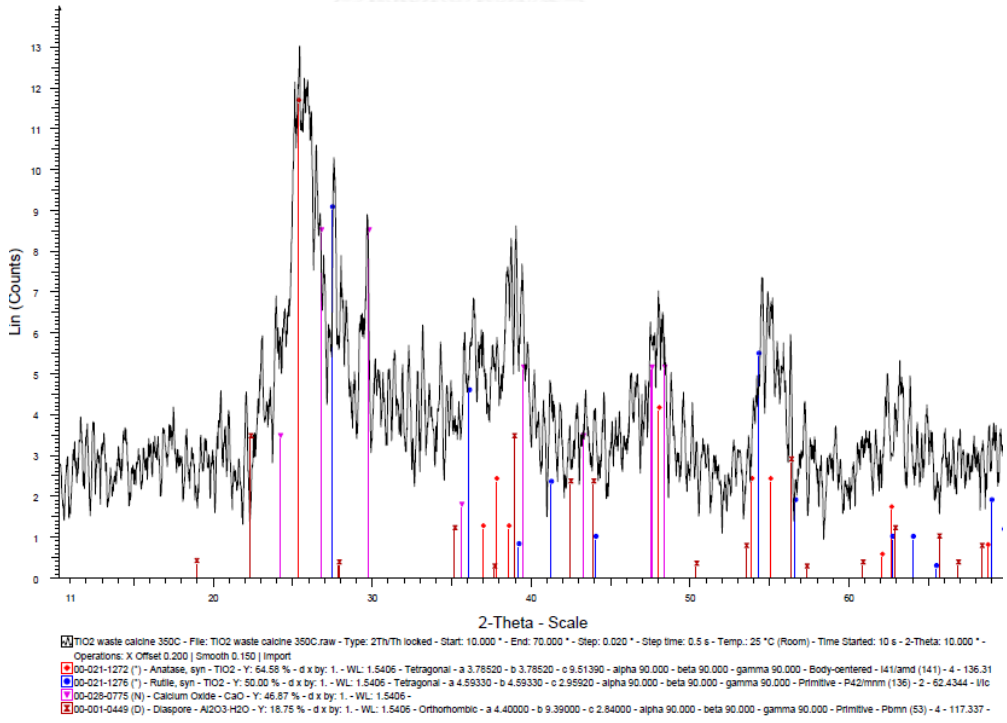
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ข

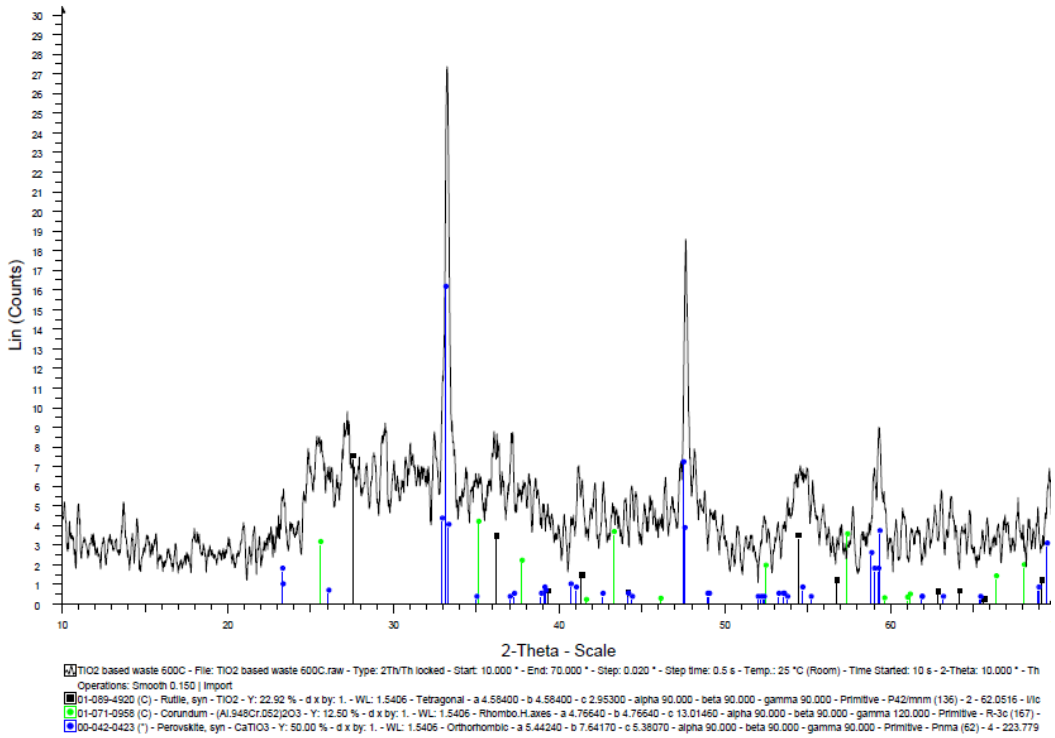
องค์ประกอบทางเฟส



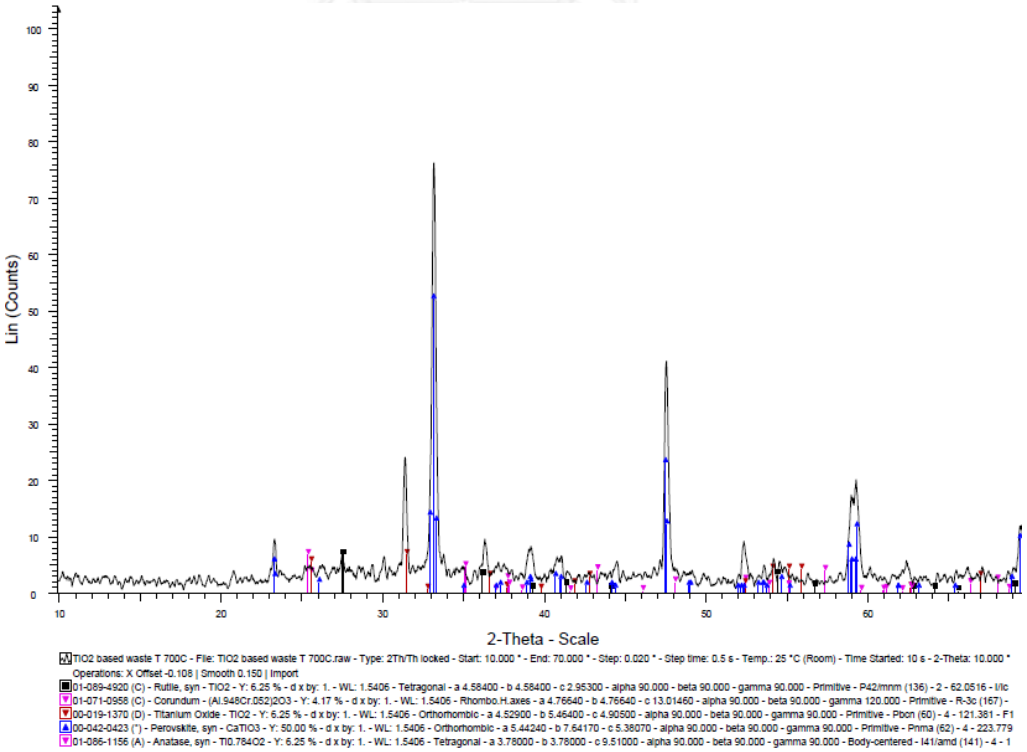
ภาพที่ ข.1 องค์ประกอบทางเฟสของกากของเสียที่ผ่านการอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 °C



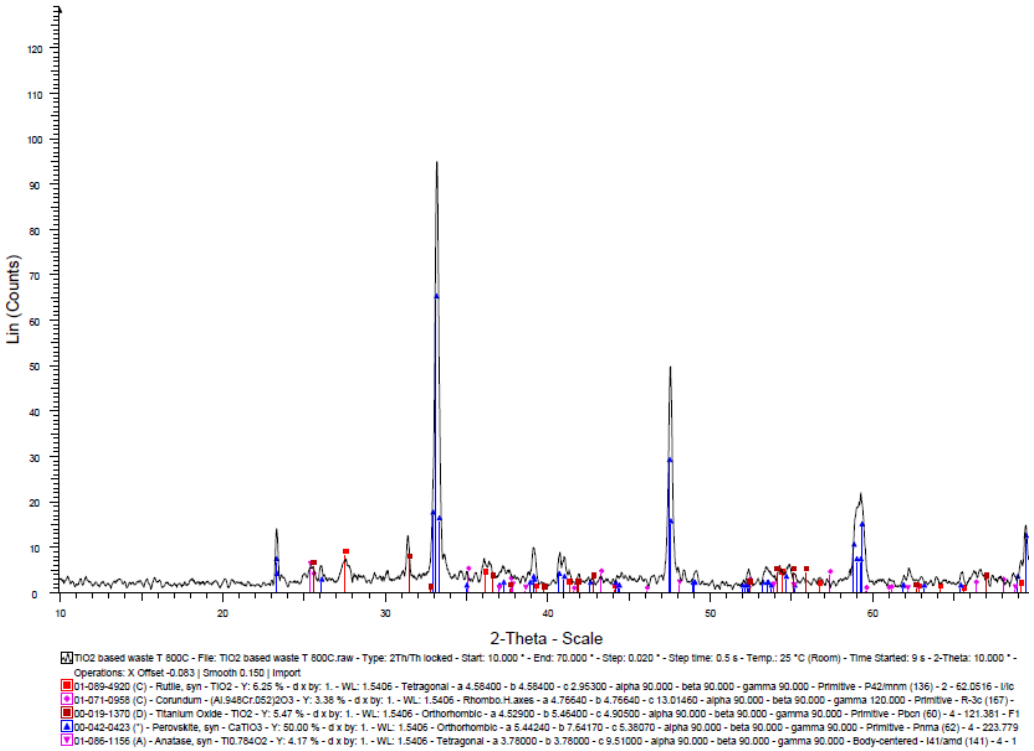
ภาพที่ ข.2 องค์ประกอบทางเฟสของกากของเสียที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 350 °C



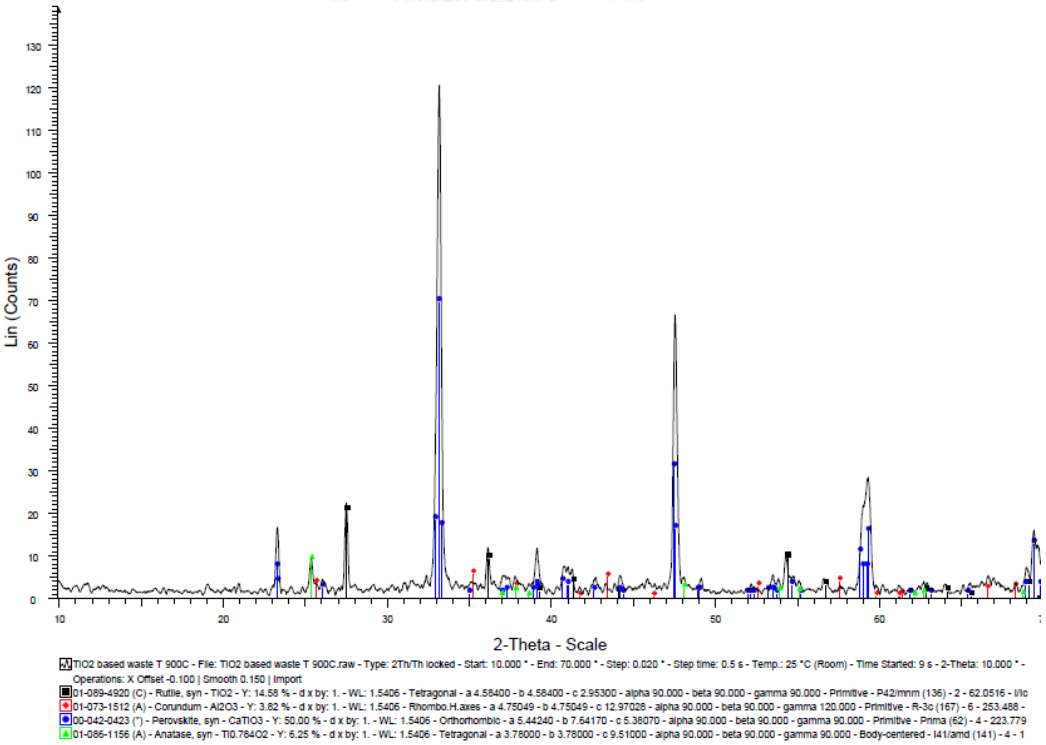
ภาพที่ ข.3 องค์ประกอบทางเฟสของกากของเสียที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 ℃



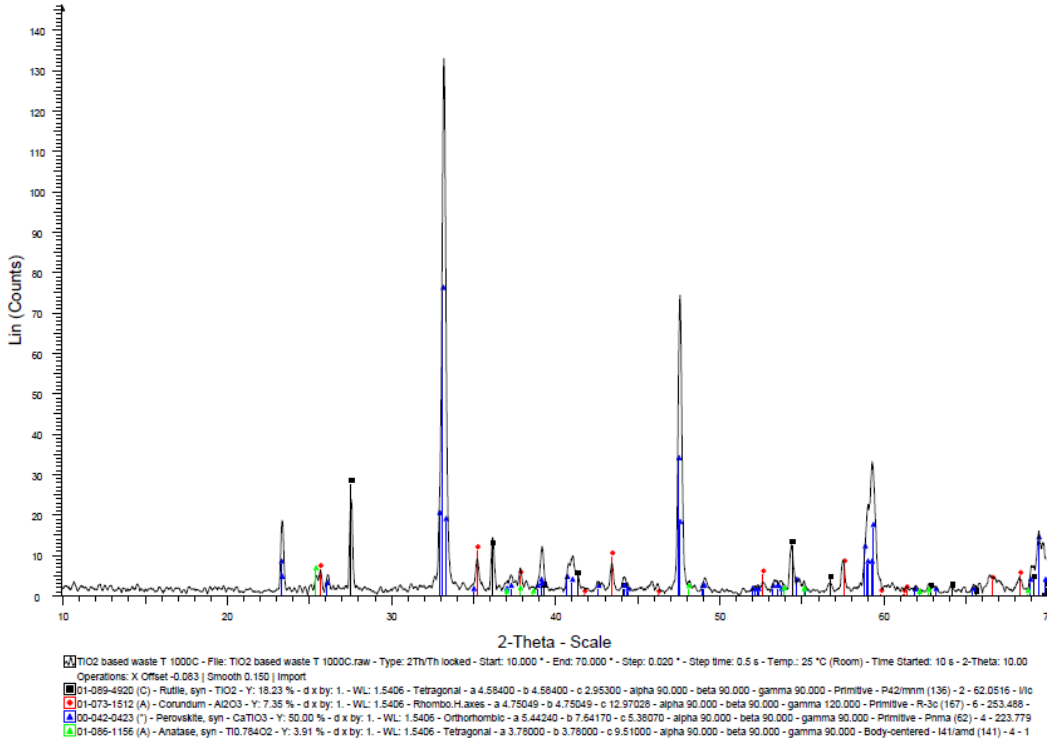
ภาพที่ ข.4 องค์ประกอบทางเฟสของกากของเสียที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 ℃



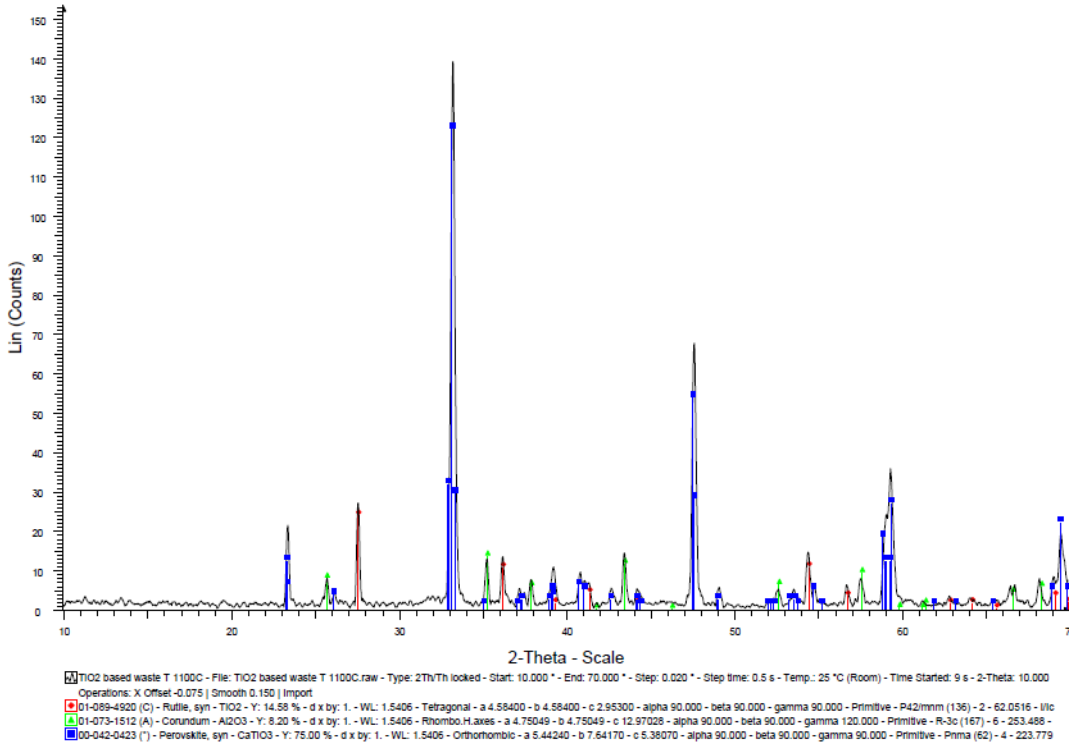
ภาพที่ ข.5 องค์ประกอบทางเฟสของกากของเสียที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 °C



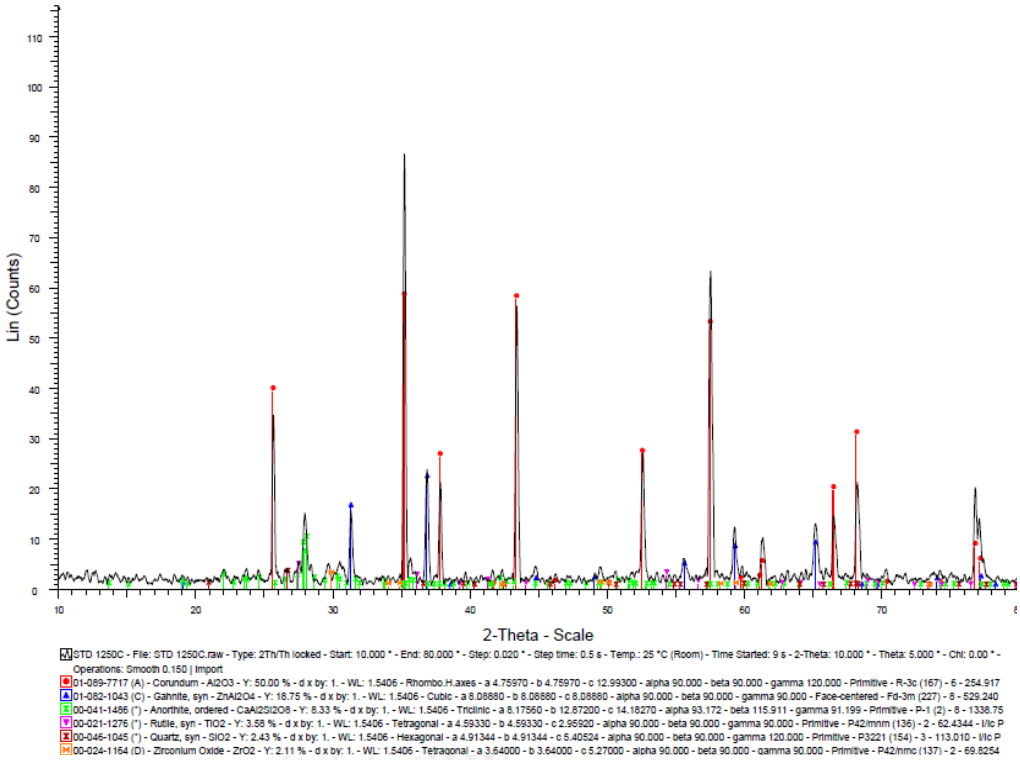
ภาพที่ ข.6 องค์ประกอบทางเฟสของกากของเสียที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 °C



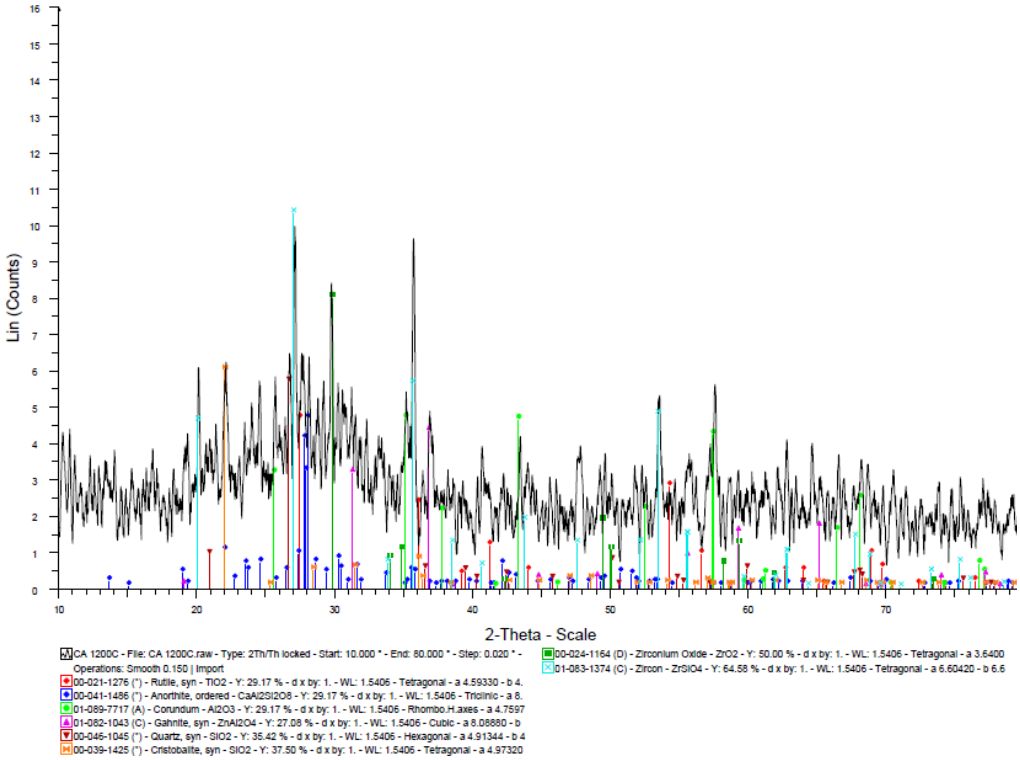
ภาพที่ ข.7 องค์ประกอบทางเฟสของกากของเสียที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1000 °C



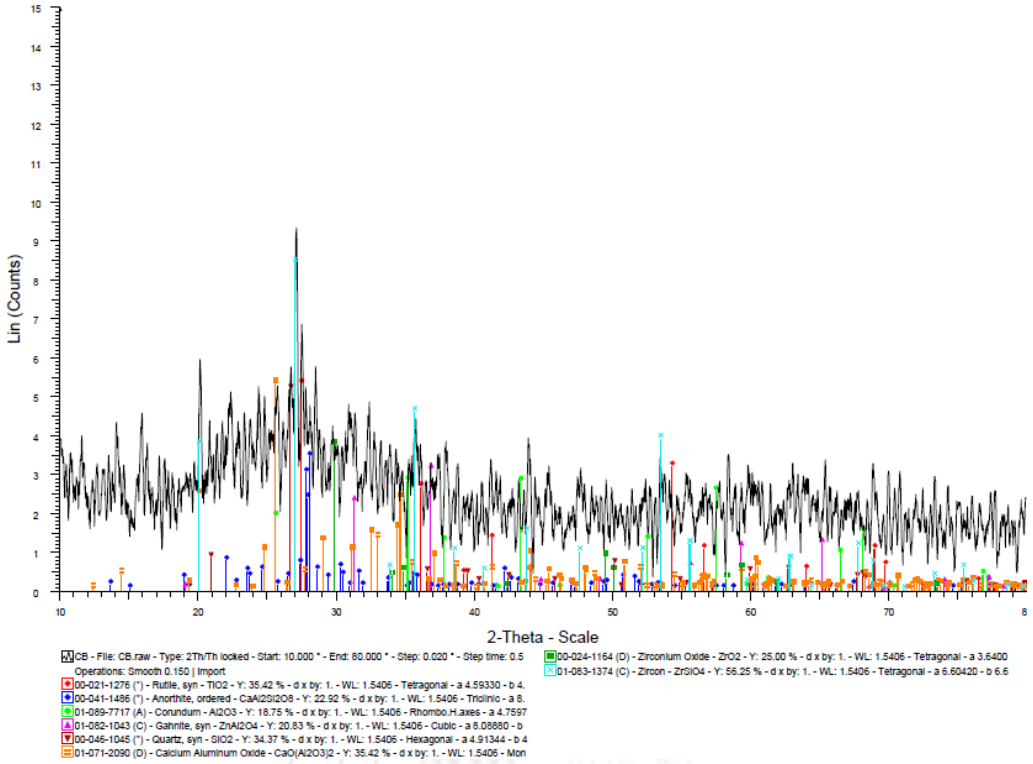
ภาพที่ ข.8 องค์ประกอบทางเฟสของกากของเสียที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1100 °C



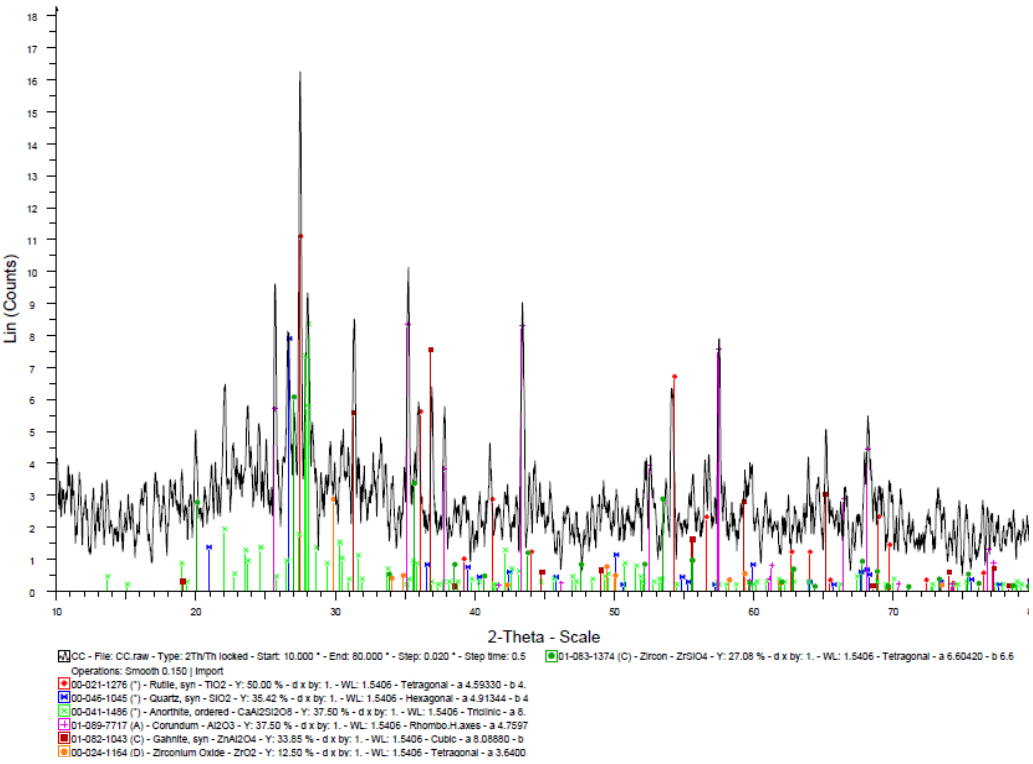
ภาพที่ ข.9 องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบสูตรมาตรฐาน STD ที่เผาที่อุณหภูมิ 1250 ℃



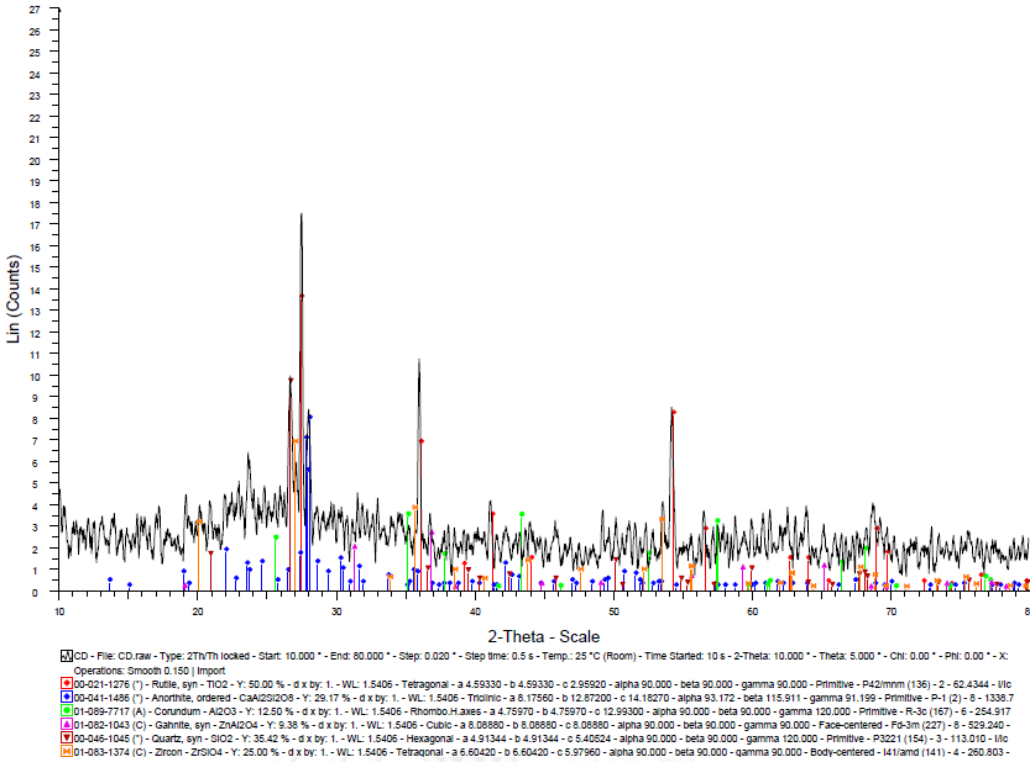
ภาพที่ ข.10 องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร A ที่เผาที่อุณหภูมิ 1200 ℃



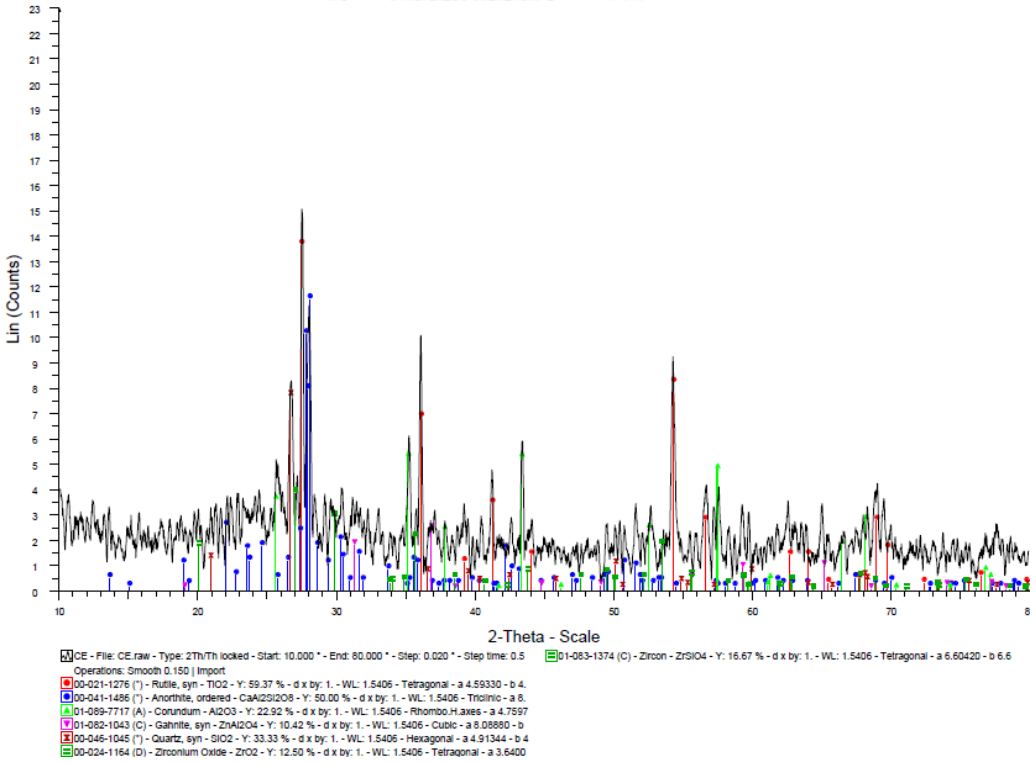
ภาพที่ ข.11 องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร B ที่เผาที่อุณหภูมิ 1200 ℃



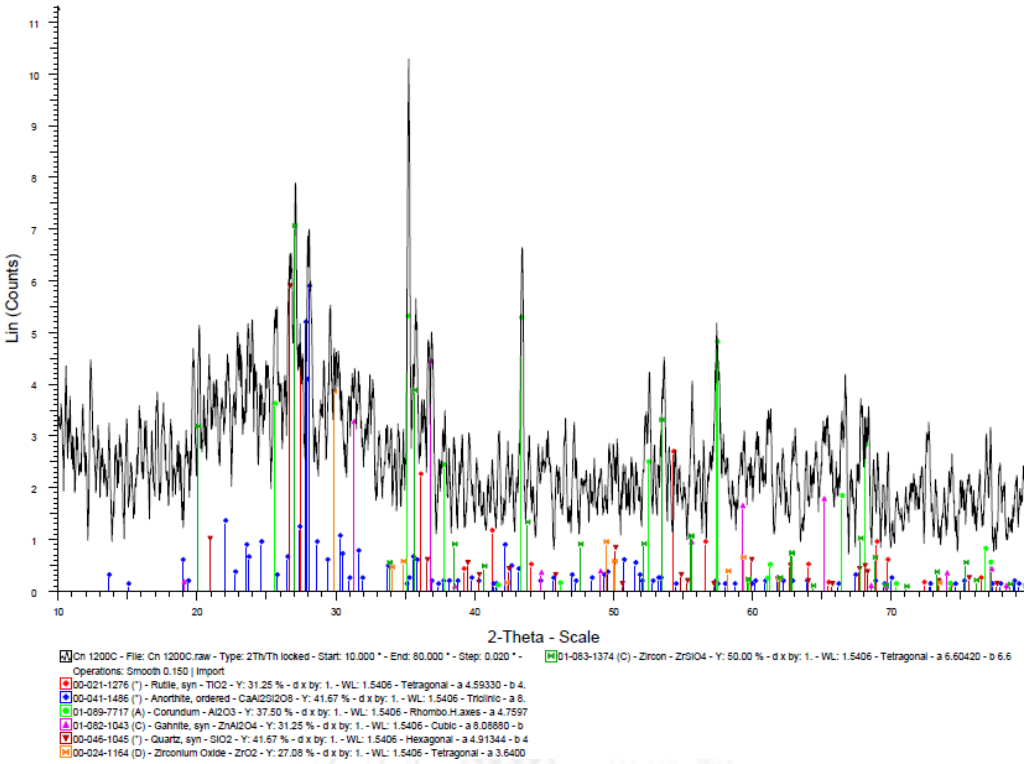
ภาพที่ ข.12 องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร C ที่เผาที่อุณหภูมิ 1200 ℃



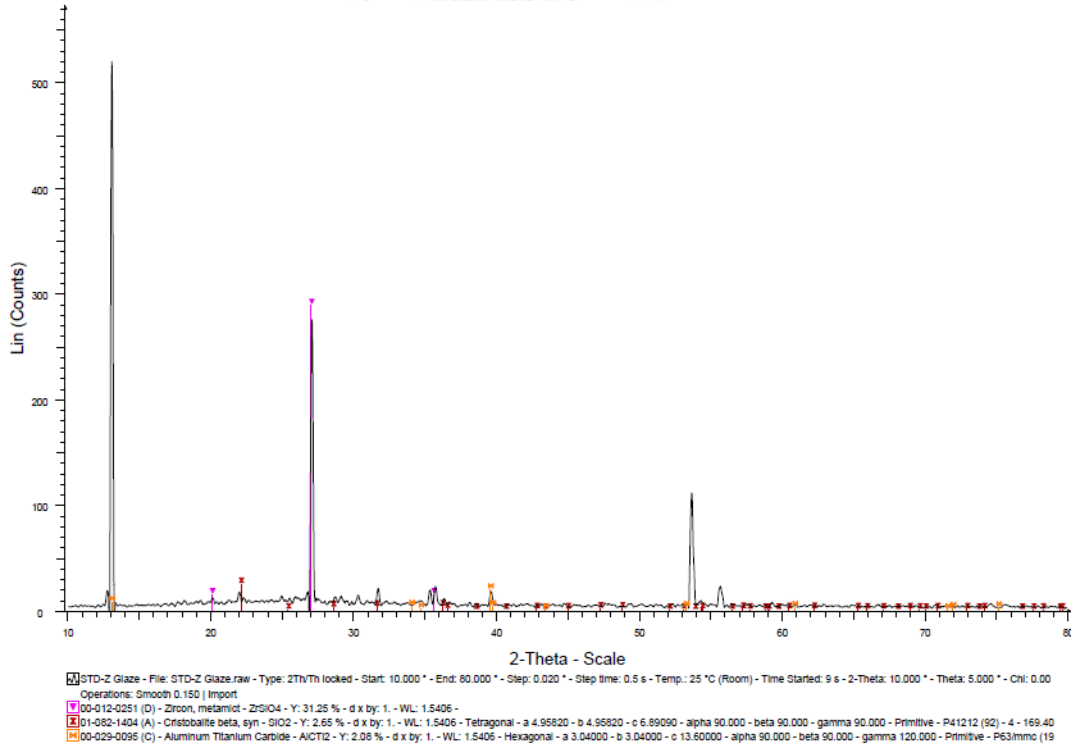
ภาพที่ ข.13 องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร D ที่เผาที่อุณหภูมิ 1200 ℃



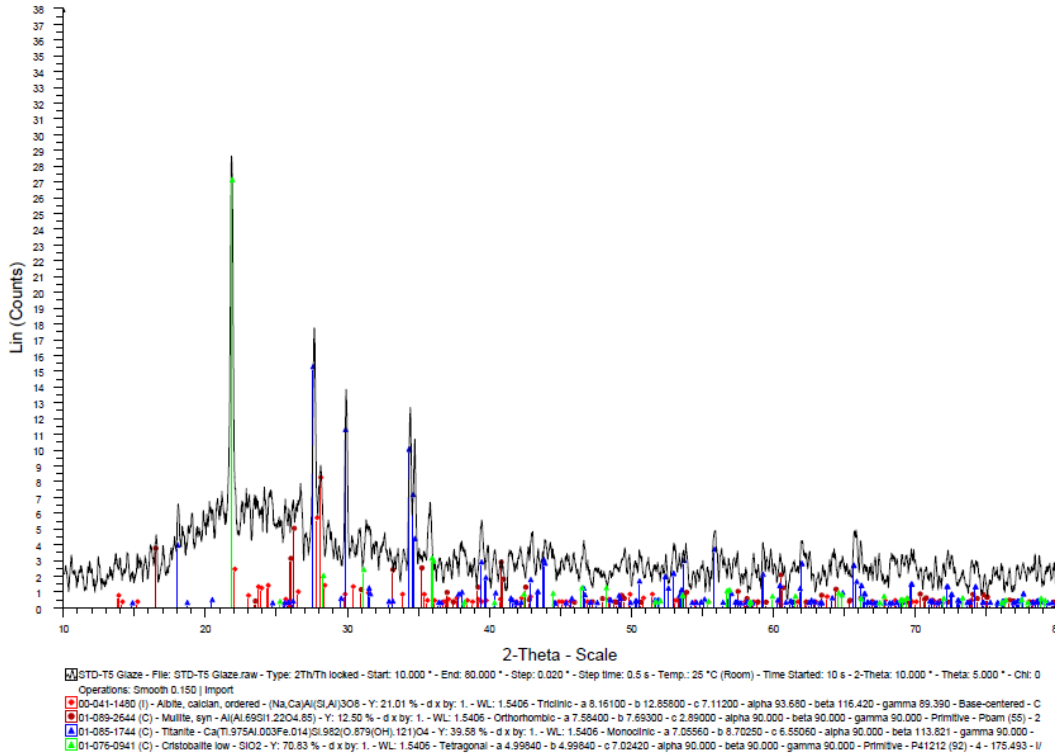
ภาพที่ ข.14 องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร E ที่เผาที่อุณหภูมิ 1200 ℃



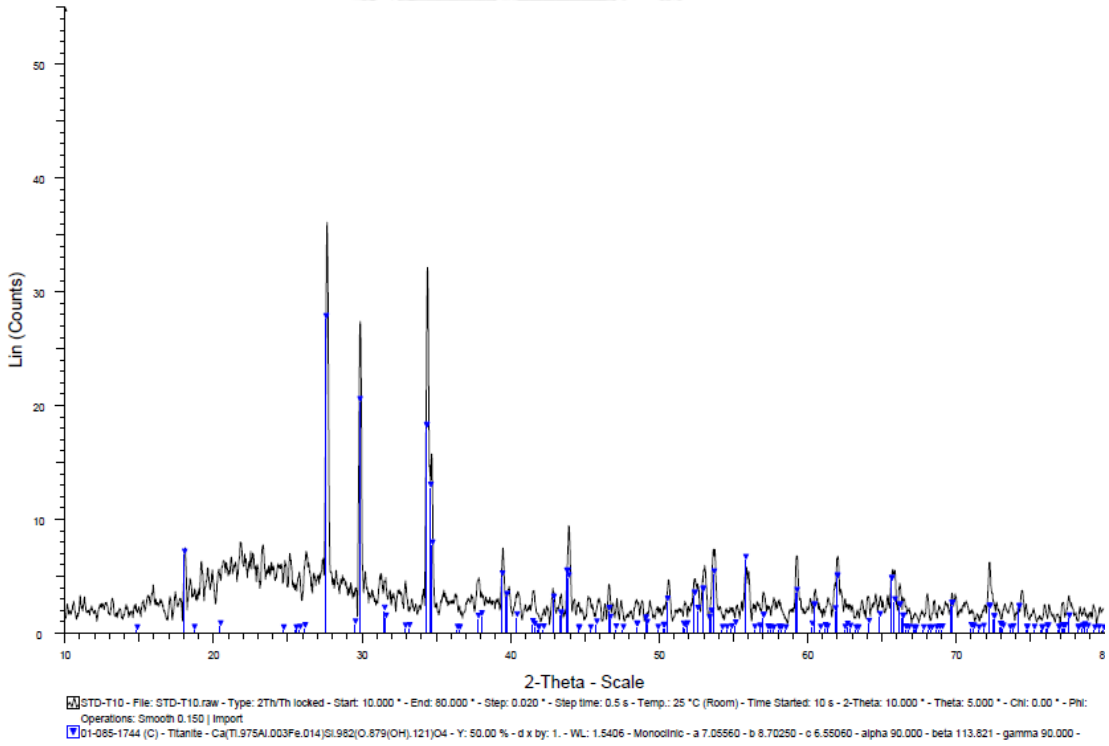
ภาพที่ ข.15 องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร a ที่เผาที่อุณหภูมิ 1200 °C



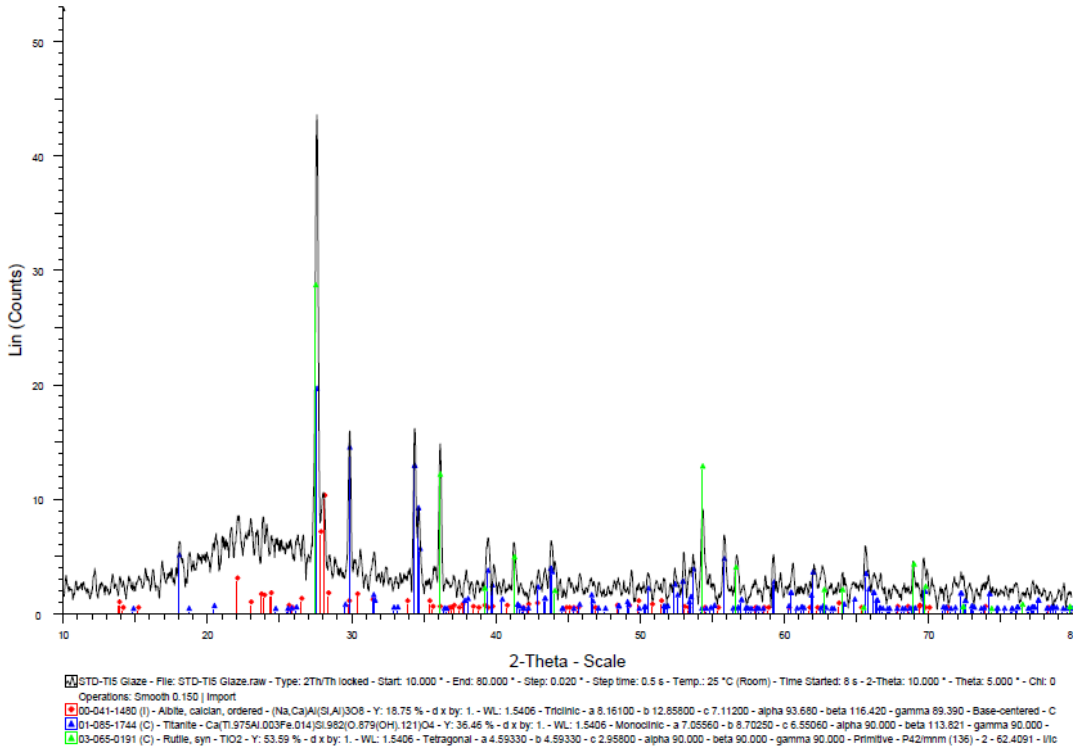
ภาพที่ ข.16 องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบฟริตมาตรฐาน STD-Z ที่มีเซอร์โคเนียมซิลิเกตเป็นตัวทึบแสง ที่เผาที่อุณหภูมิ 1120 °C



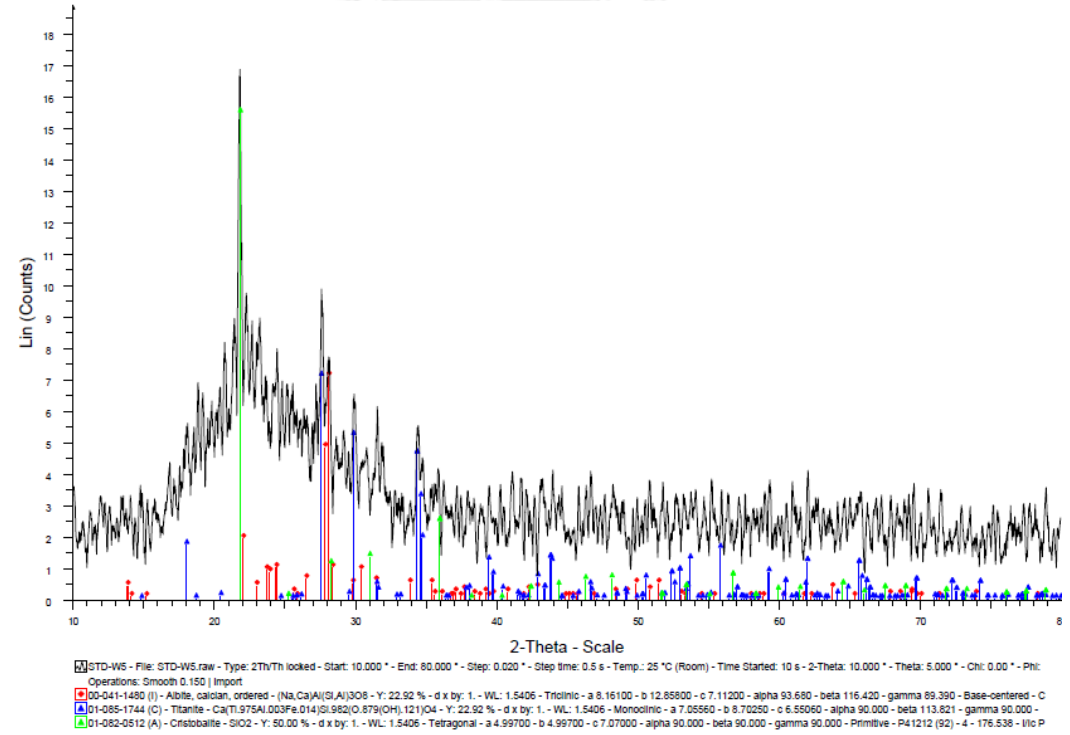
ภาพที่ ข.17 องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบฟริต T5 ที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้าเป็นตัวให้ความทึบแสงแทนที่เซอร์โคเนียมซิลิเกต ที่เผาที่อุณหภูมิ 1120 ℃



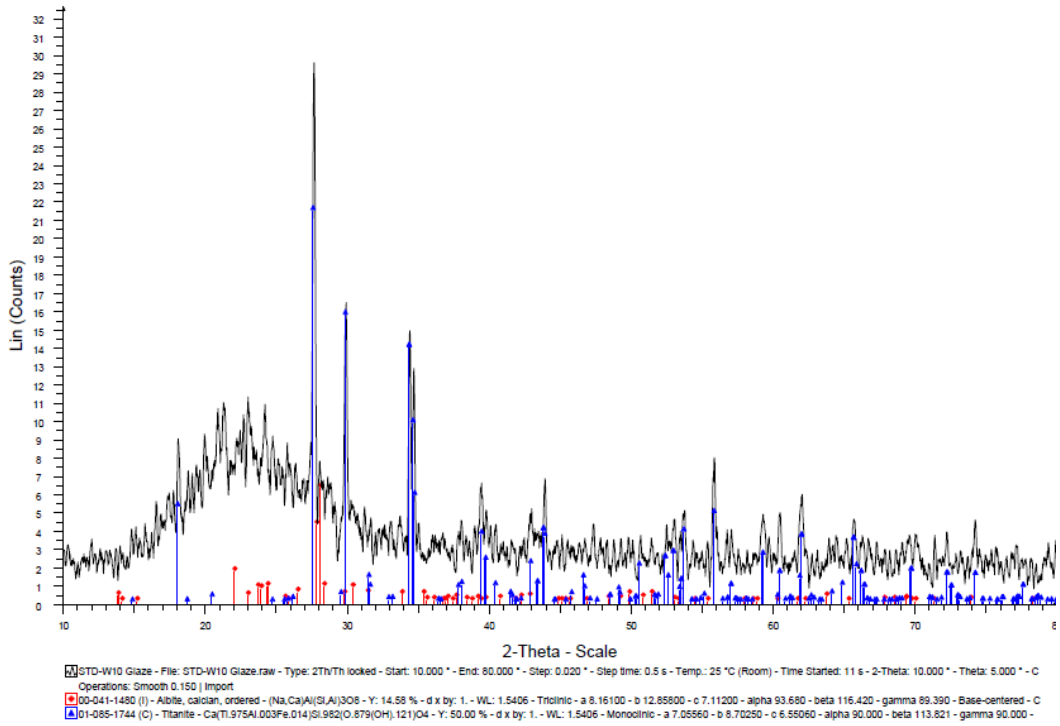
ภาพที่ ข.18 องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบฟริต T10 ที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้าเป็นตัวให้ความทึบแสงแทนที่เซอร์โคเนียมซิลิเกต ที่เผาที่อุณหภูมิ 1120 ℃



ภาพที่ ข.19 องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบฟริต T15 ที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้าเป็นตัวให้ความทึบแสงแทนที่เซอร์โคเนียมซิลิเกต ที่เผาที่อุณหภูมิ 1120 ℃



ภาพที่ ข.20 องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบฟริต W5 ที่มีการใช้กากของเสียทดแทนไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้าในสูตรฟริต T5 ที่เผาที่อุณหภูมิ 1120 ℃

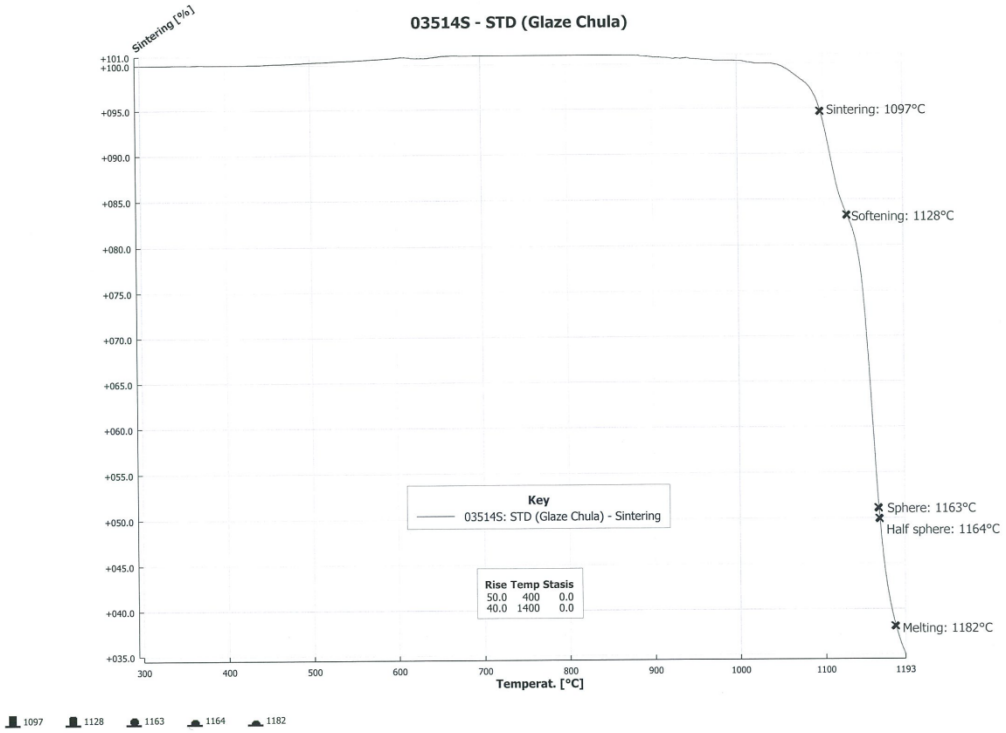


ภาพที่ ข.21 องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบฟริต W10 ที่มีการใช้กากของเสียทดแทนไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้าในสูตรฟริต T10 ที่เผาที่อุณหภูมิ 1120 °C

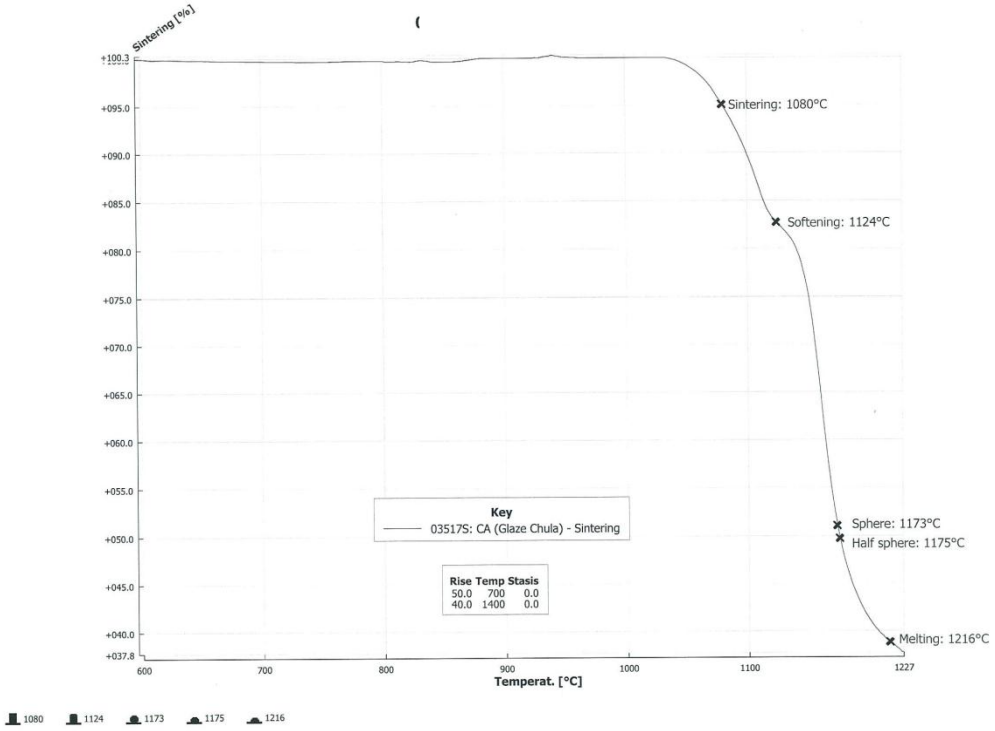
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ค

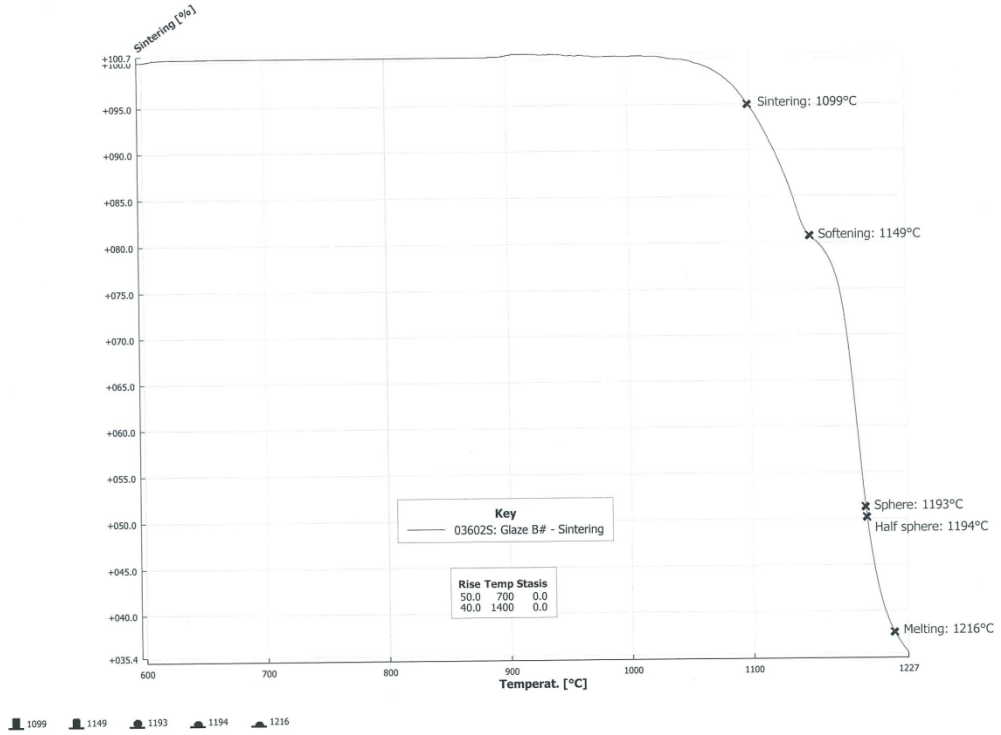
อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะ



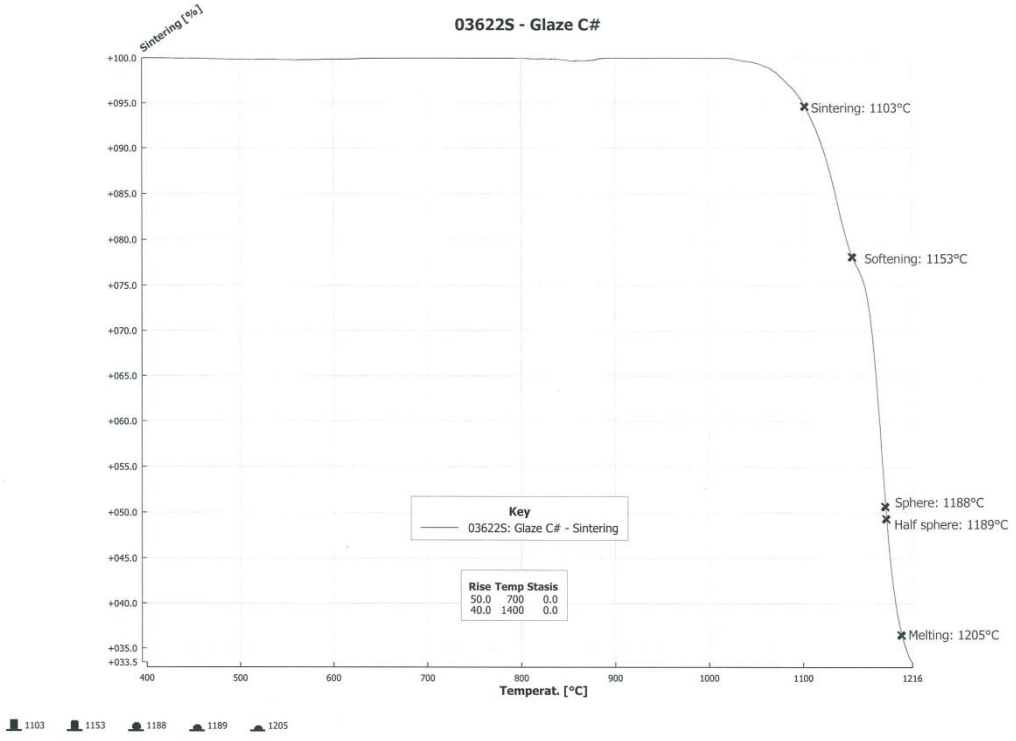
ภาพที่ ค.1 อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบมาตรฐาน STD



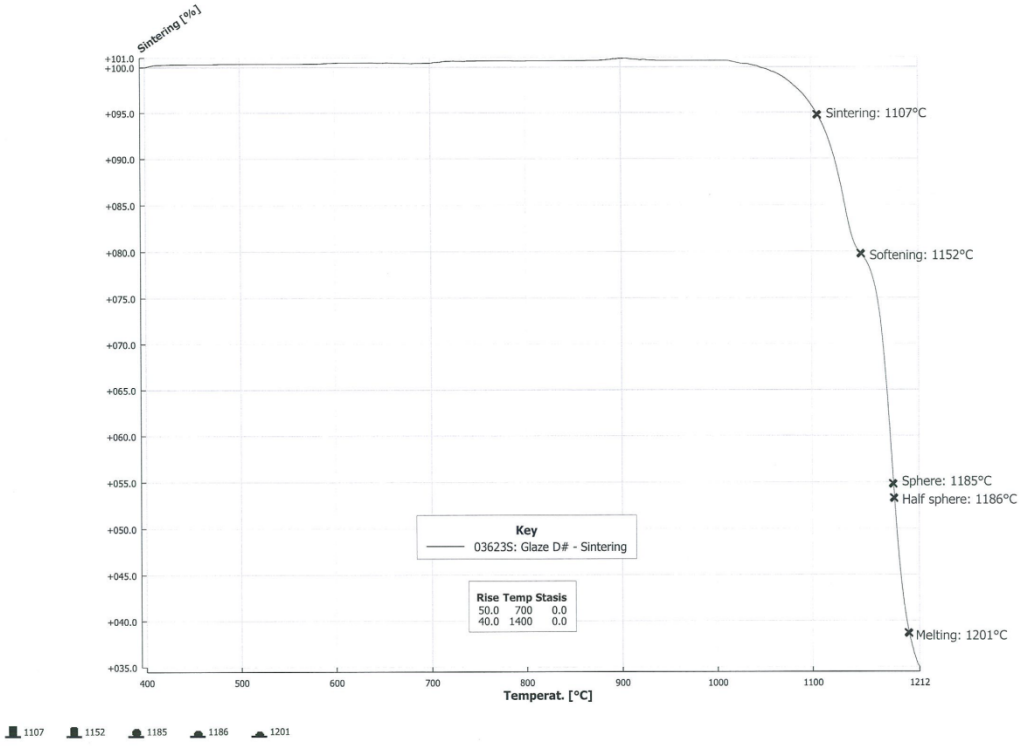
ภาพที่ ค.2 อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร A



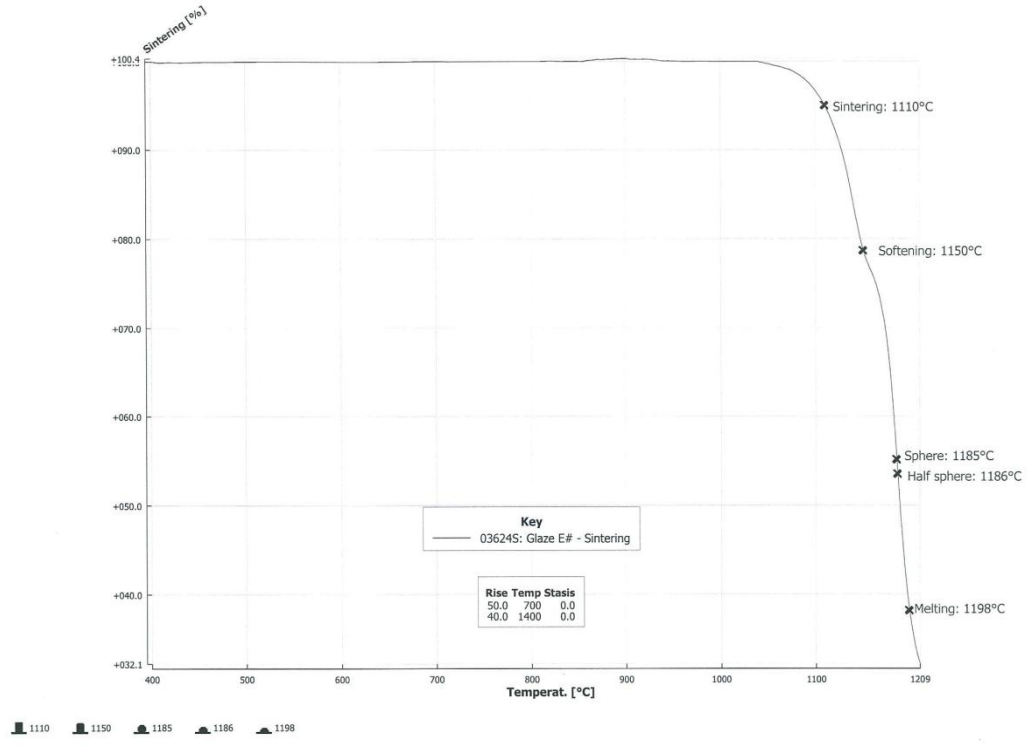
ภาพที่ ค.3 อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร B*



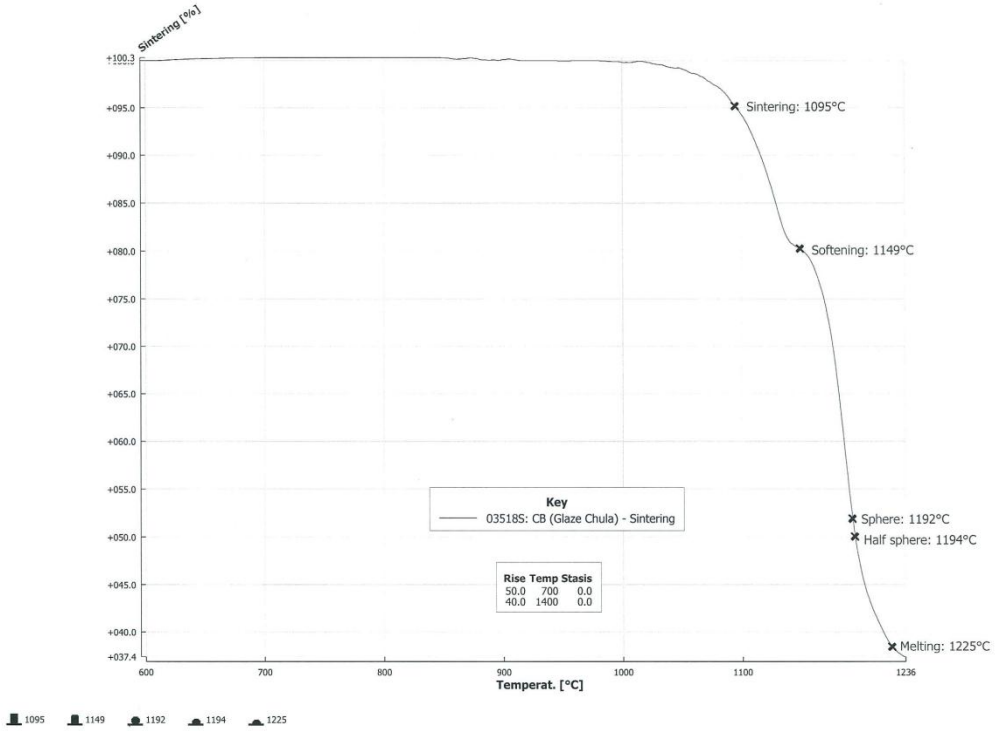
ภาพที่ ค.4 อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร C*



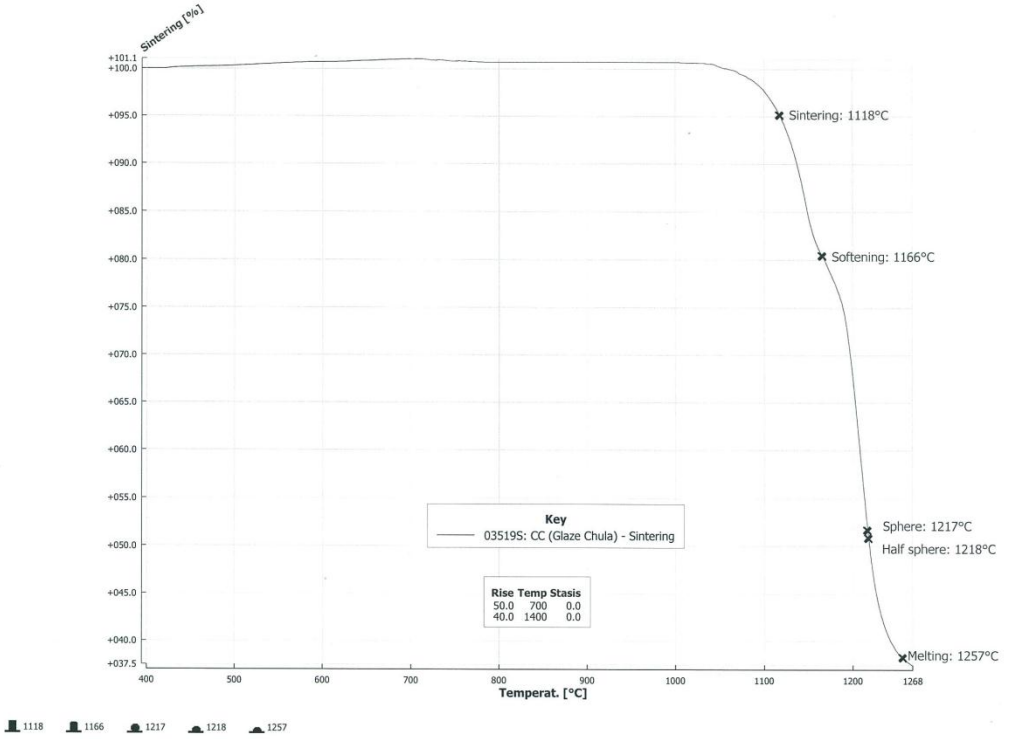
ภาพที่ ค.5 อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร D*



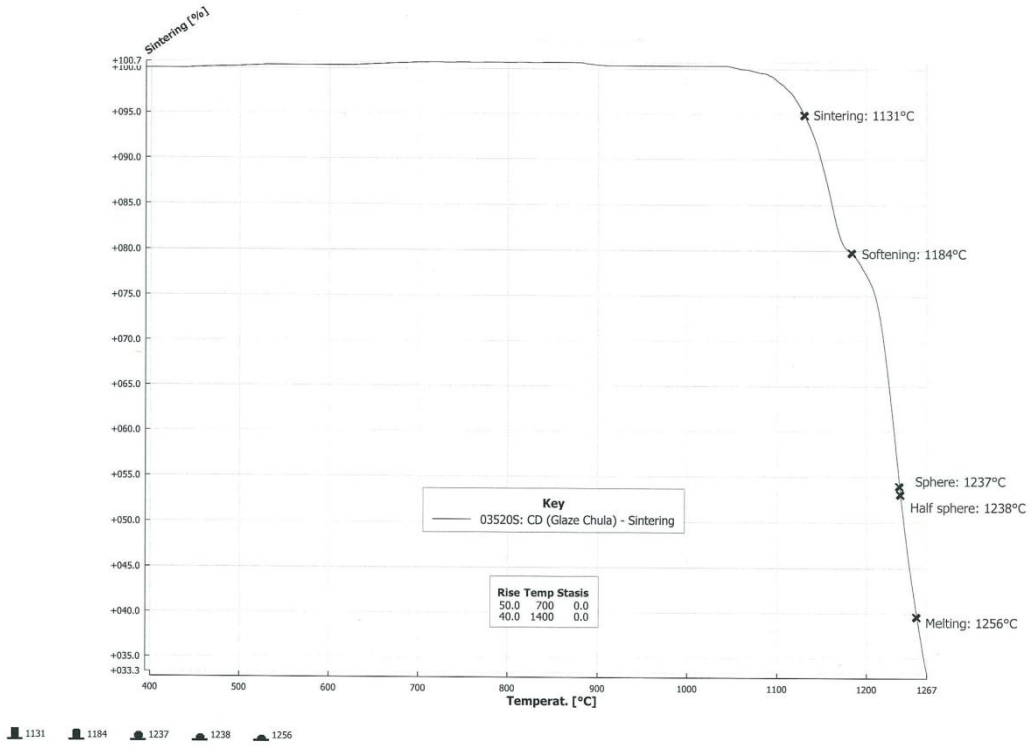
ภาพที่ ค.6 อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร E*



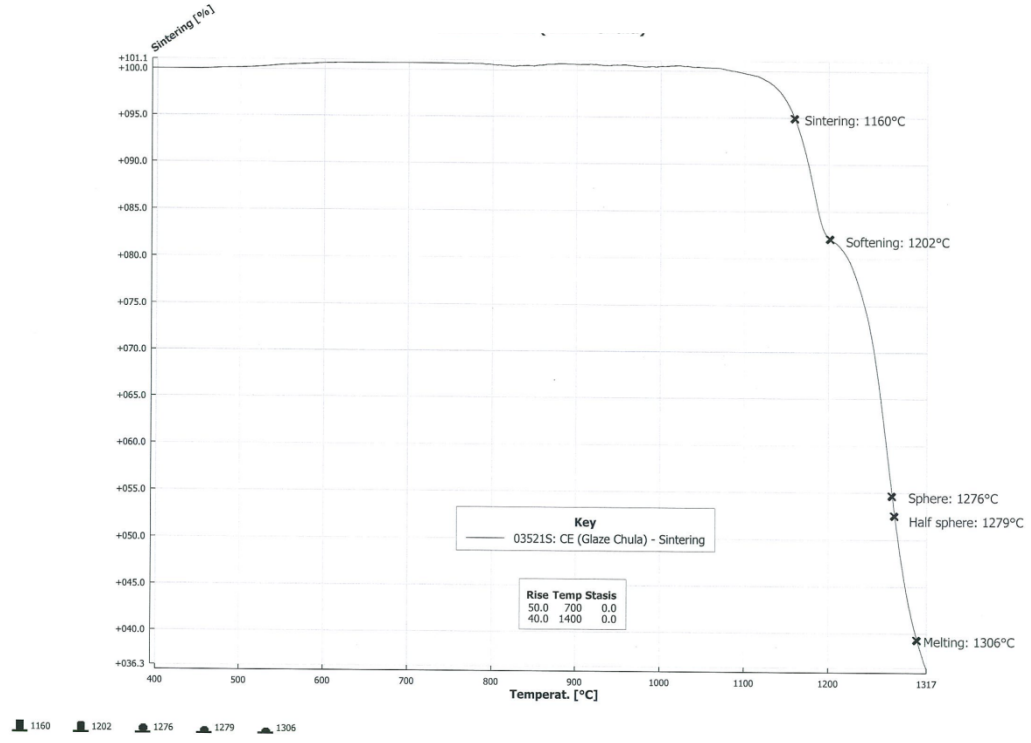
ภาพที่ ค.7 อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร B



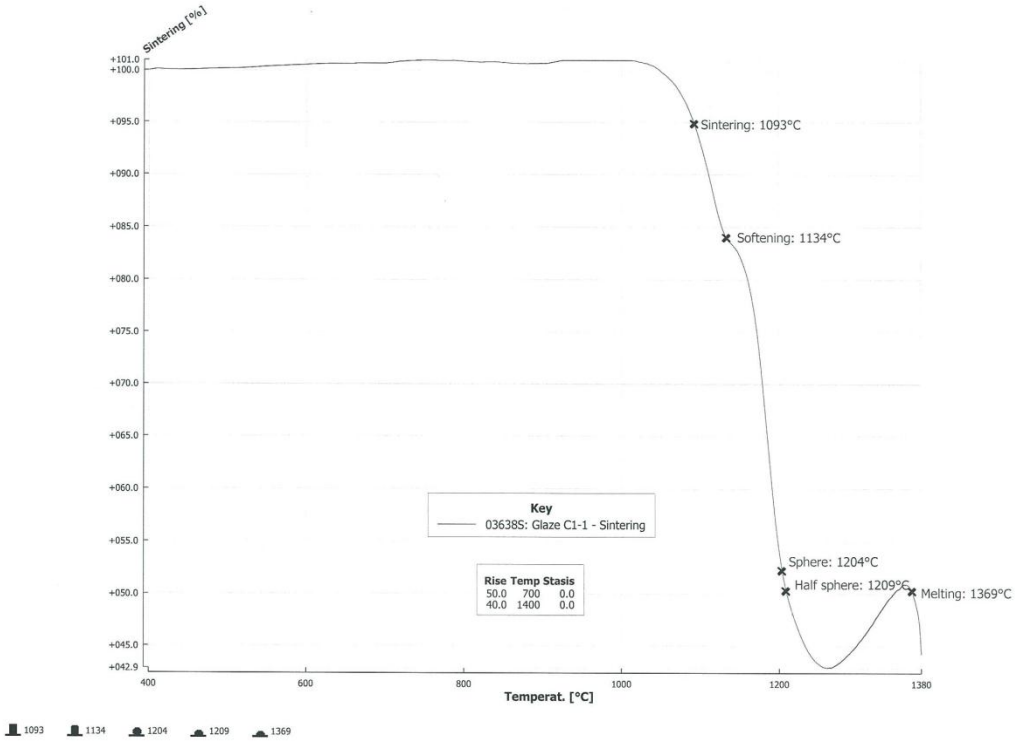
ภาพที่ ค.8 อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร C



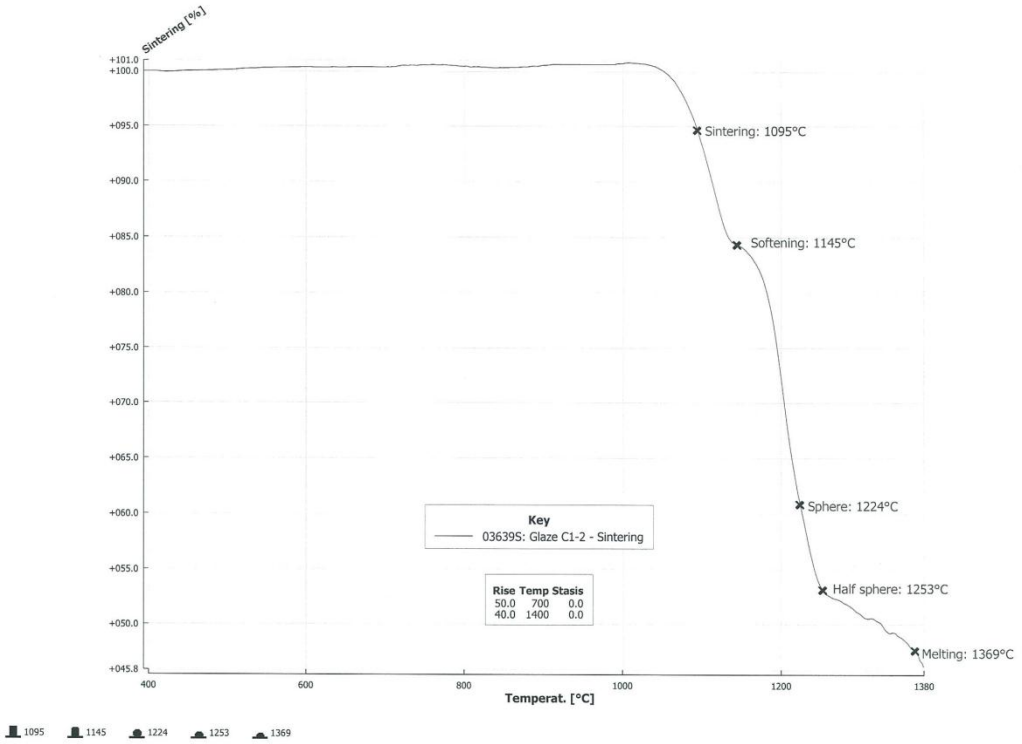
ภาพที่ ค.9 อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร D



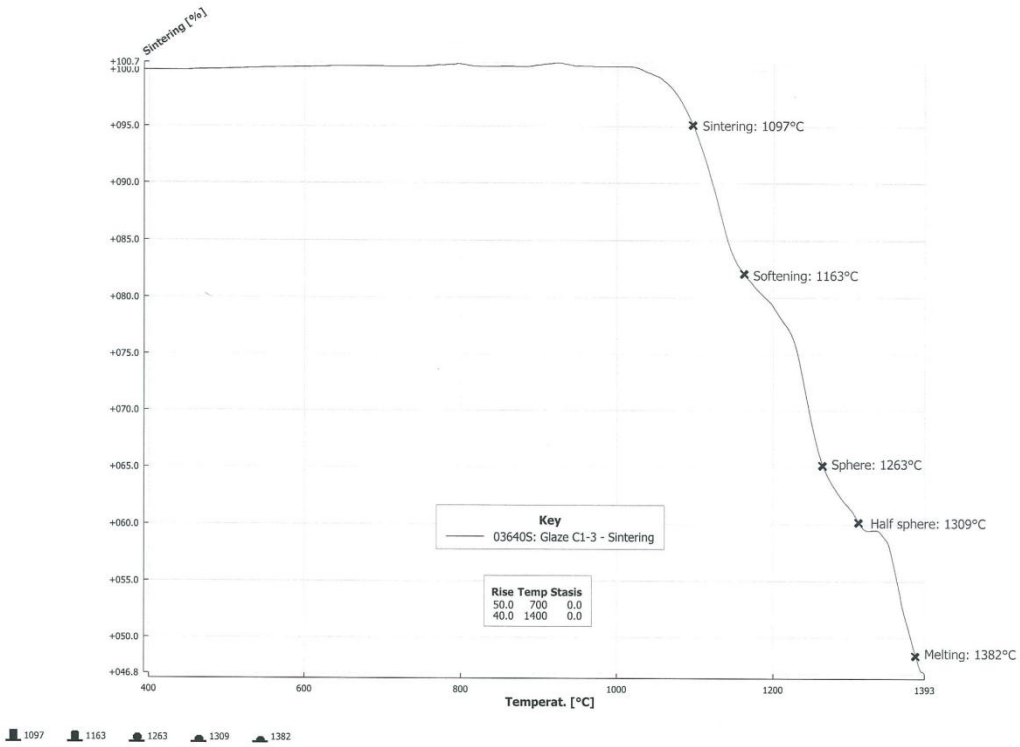
ภาพที่ ค.10 อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร E



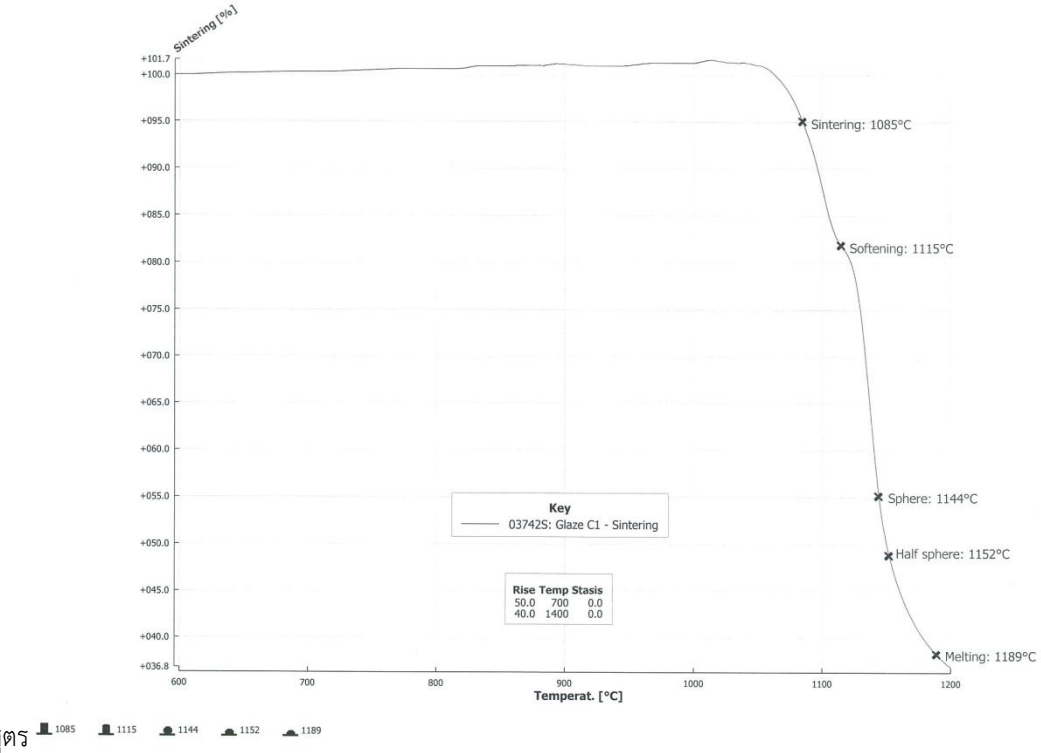
ภาพที่ ค.11 อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร a



ภาพที่ ค.12 อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร b

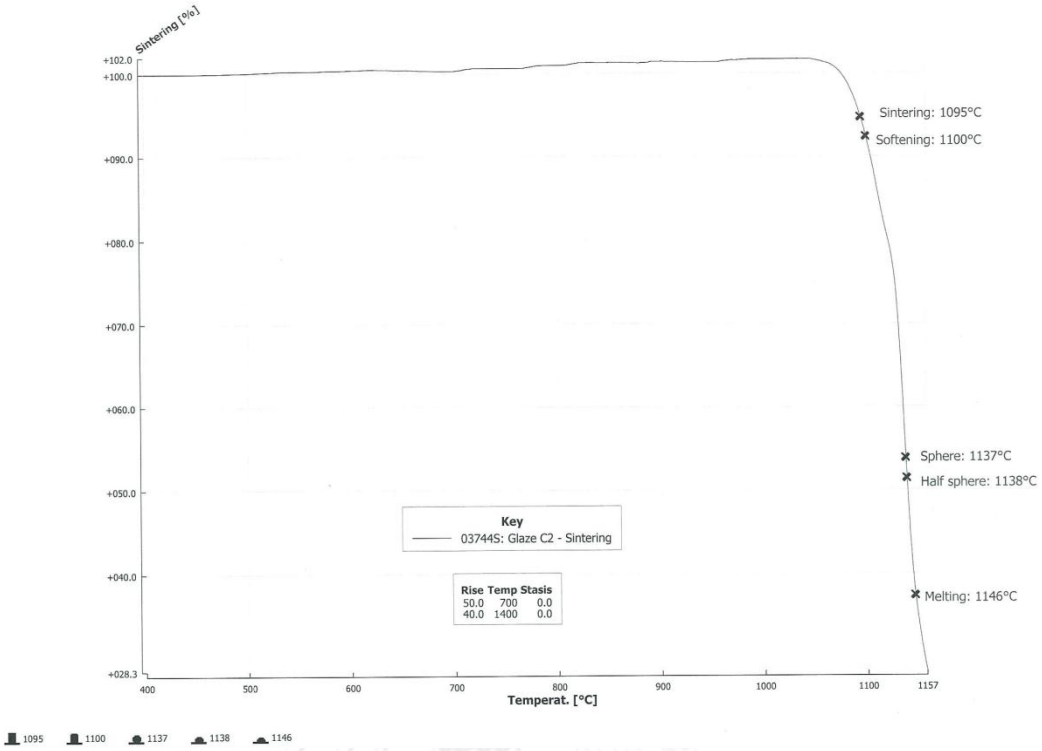


ภาพที่ ค.13 อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบ c

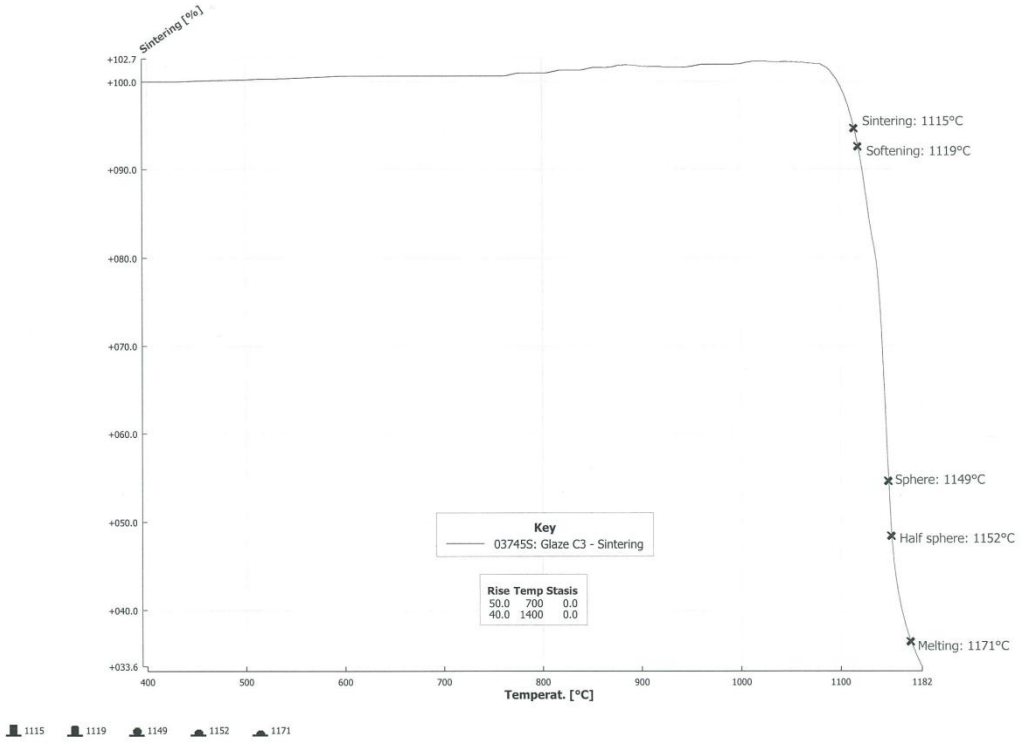


สูตร

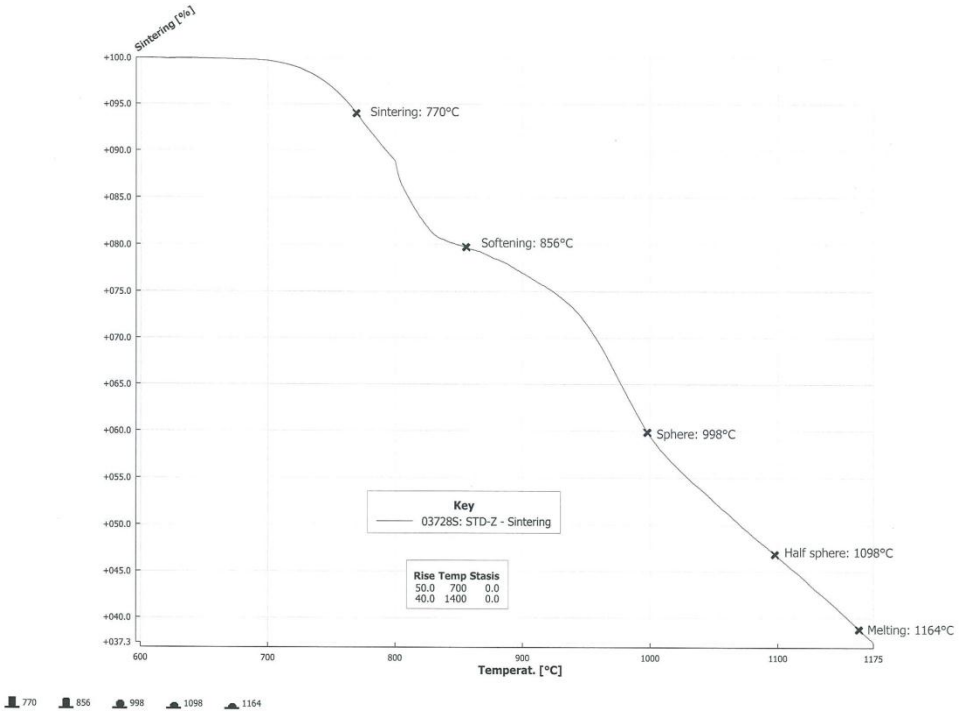
ภาพที่ ค.14 อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร d



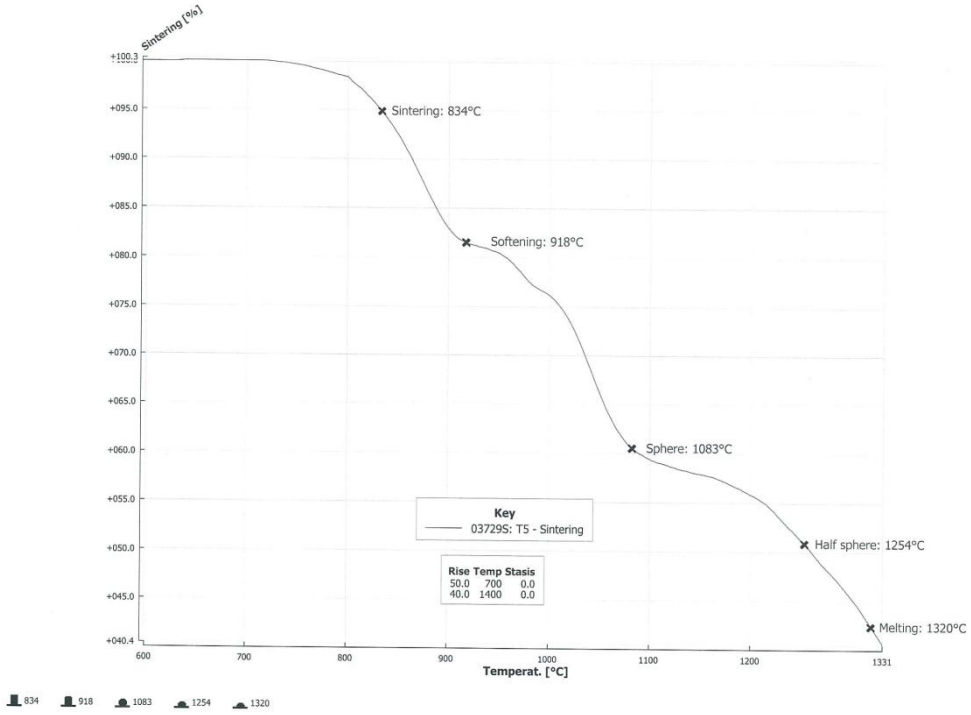
ภาพที่ ค.15 อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร e



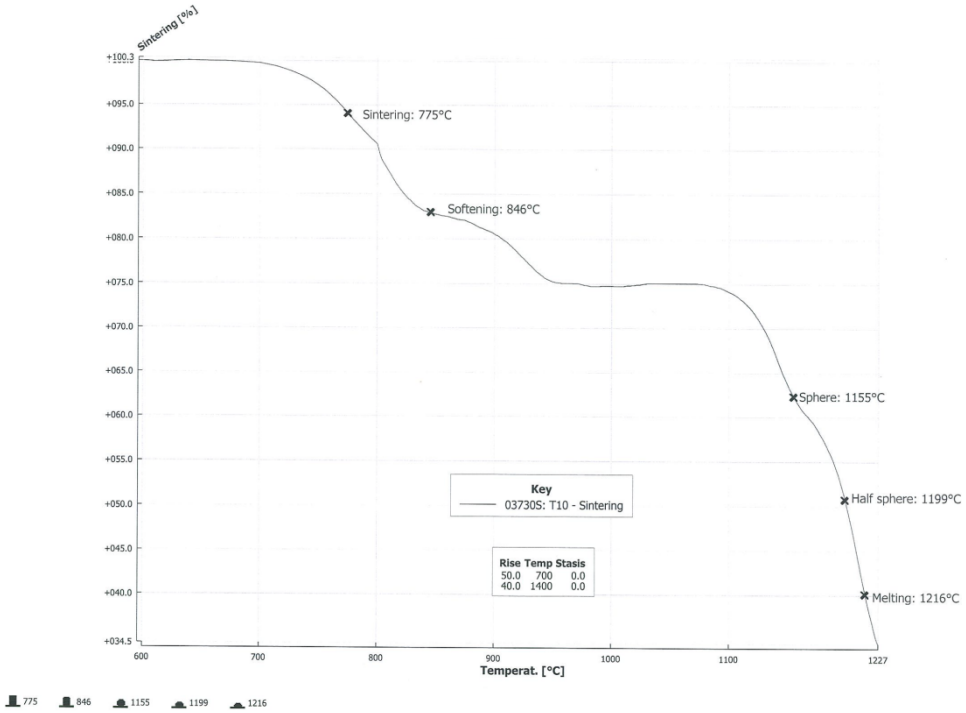
ภาพที่ ค.16 อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร f



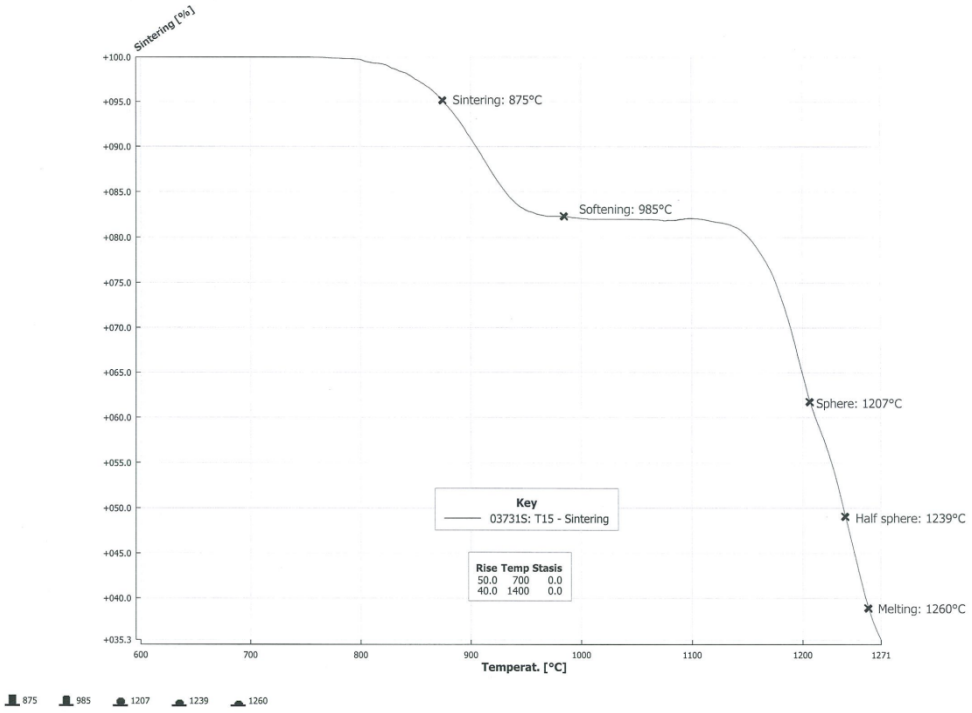
ภาพที่ ค.17 อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของฟริตมาตรฐาน STD-Z ที่มีเซอร์โคเนียมซิลิเกตเป็นตัวให้ความทึบแสง



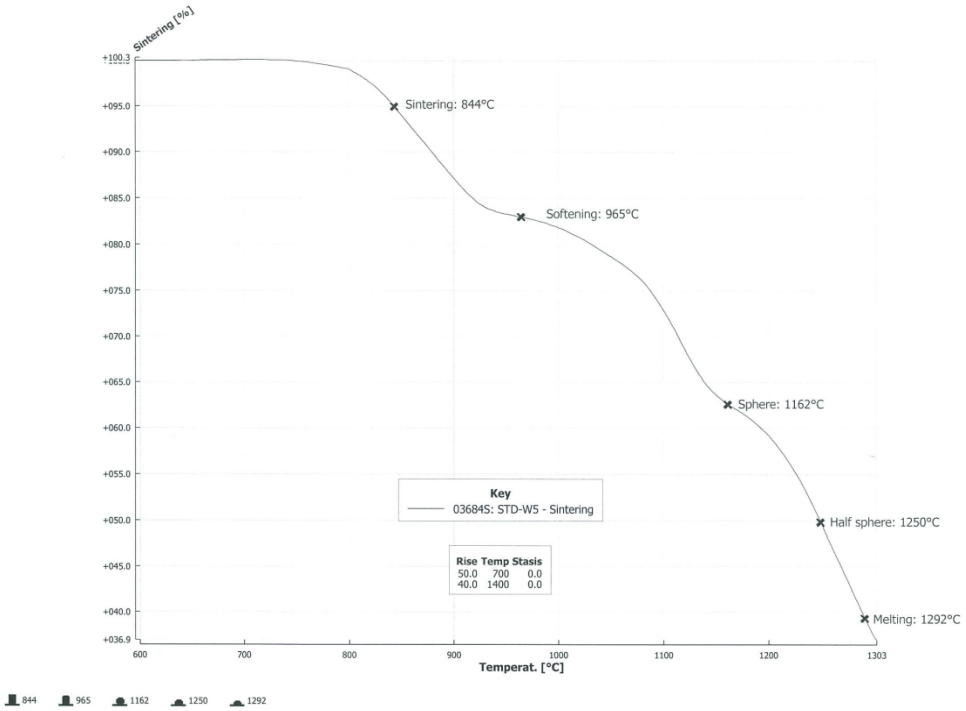
ภาพที่ ค.18 อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของฟริตสูตร T5 ที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้าเป็นตัวให้ความทึบแสงแทนที่เซอร์โคเนียมซิลิเกต



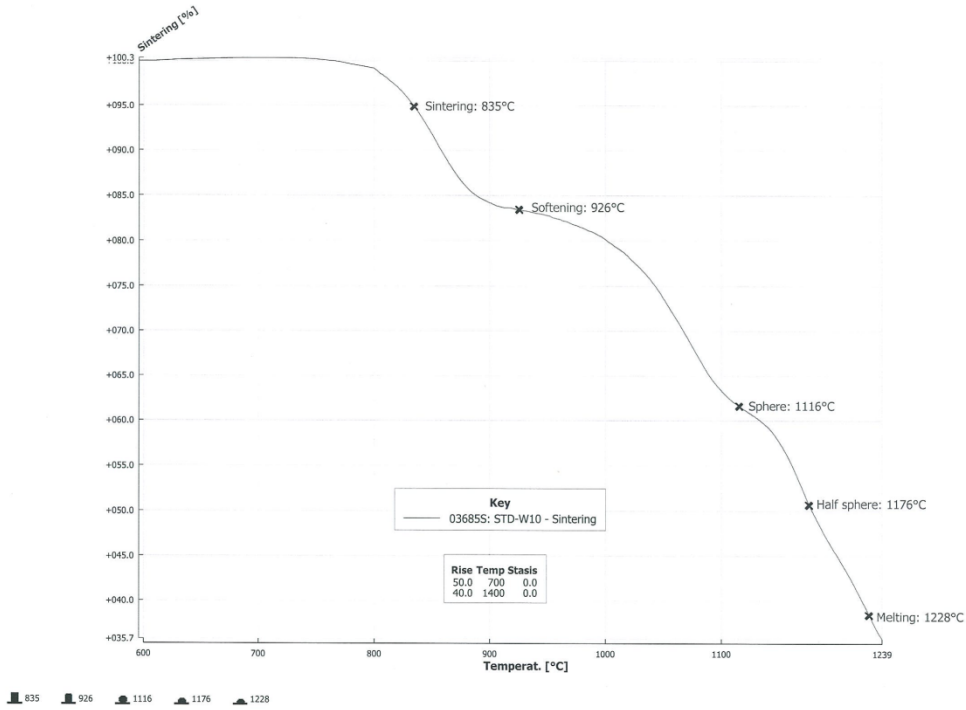
ภาพที่ ค.19 อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของฟริตสูตร T10 ที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้าเป็นตัวให้ความทึบแสงแทนที่เซอร์โคเนียมซิลิเกต



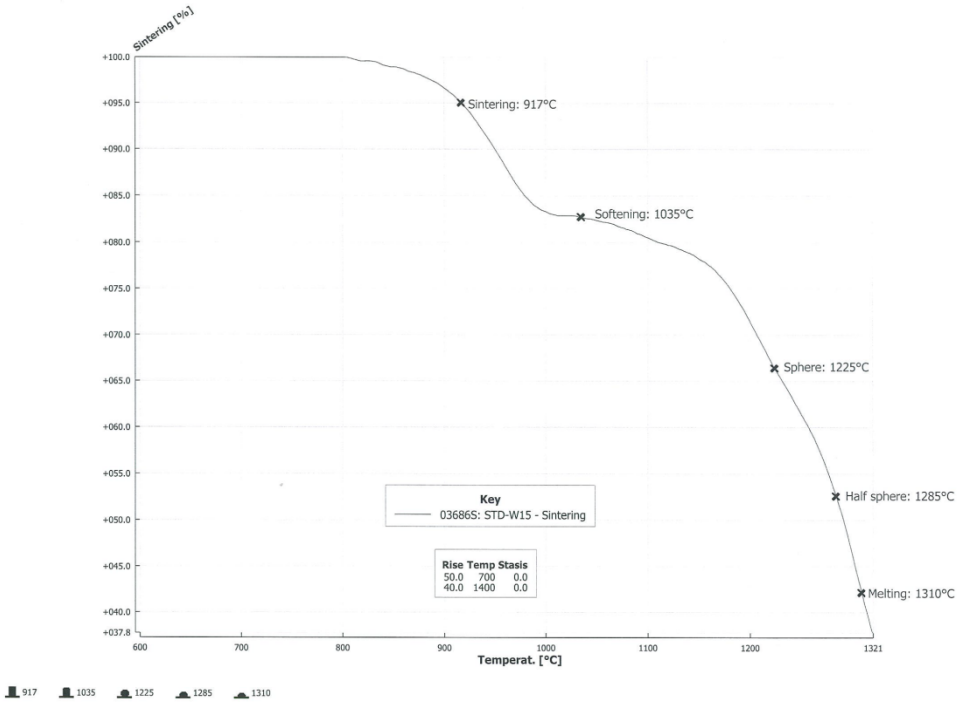
ภาพที่ ค.20 อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของฟริตสูตร T15 ที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้าเป็นตัวให้ความทึบแสงแทนที่เซอร์โคเนียมซิลิเกต



ภาพที่ ค.21 อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของฟริต W5 ที่มีการใช้กากของเสียทดแทนไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้าในสูตรฟริต T5



ภาพที่ ค.22 อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของฟริต W10 ที่มีการใช้กากของเสียทดแทนไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้าในสูตรฟริต T10

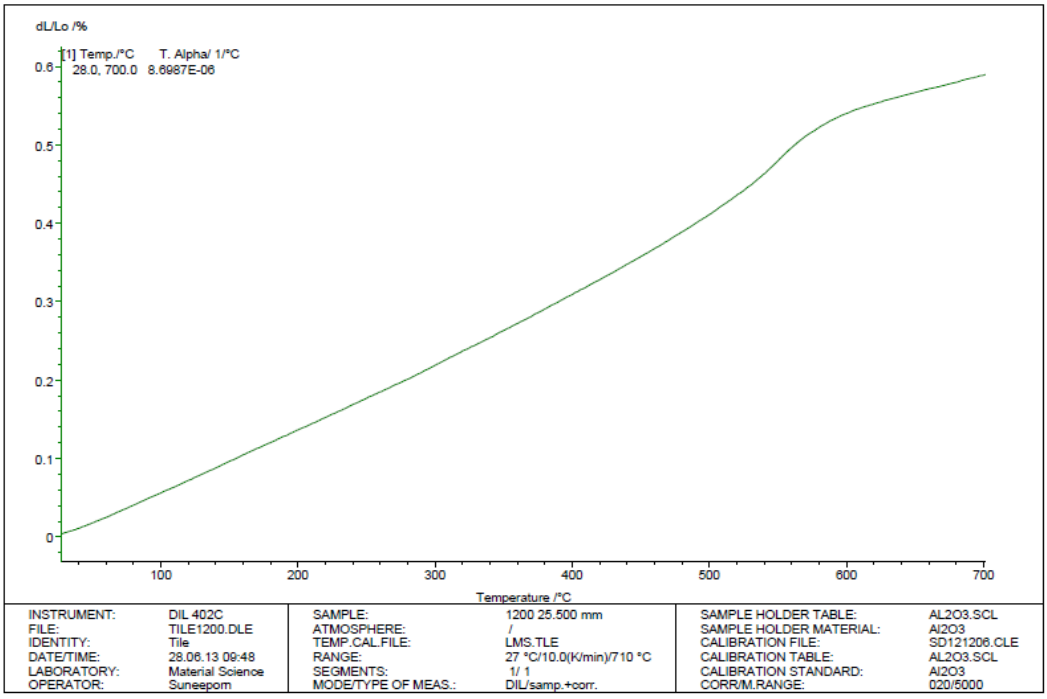


ภาพที่ ค.23 อุณหภูมิการหลอมตัวเฉพาะของฟริต W15 ที่มีการใช้กากของเสียทดแทนไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้าในสูตรฟริต T15

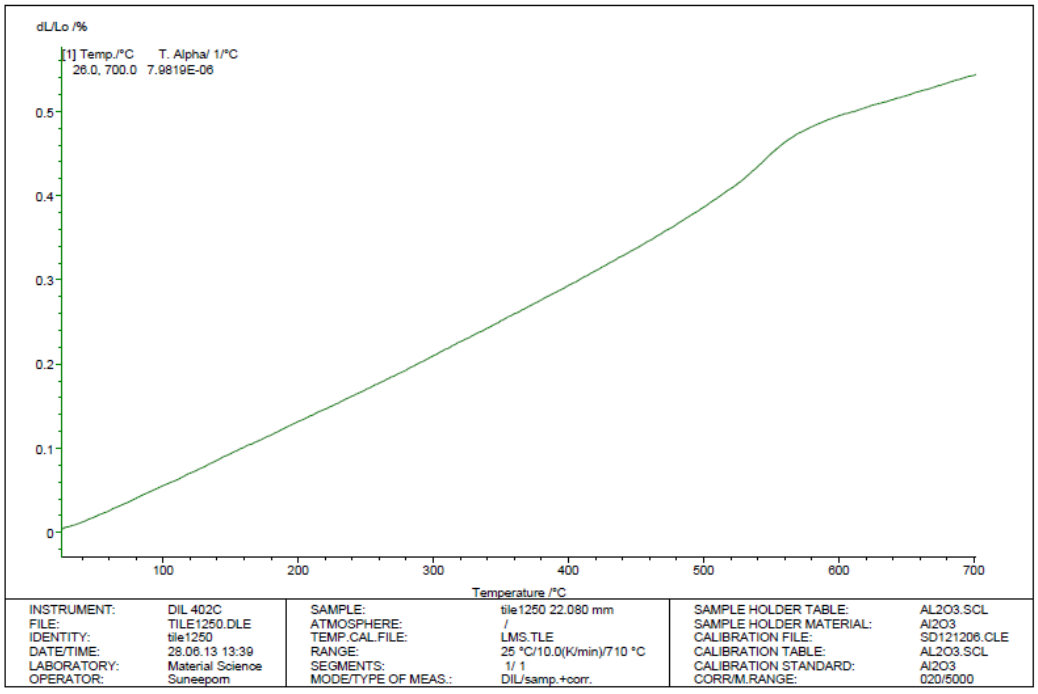
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ง

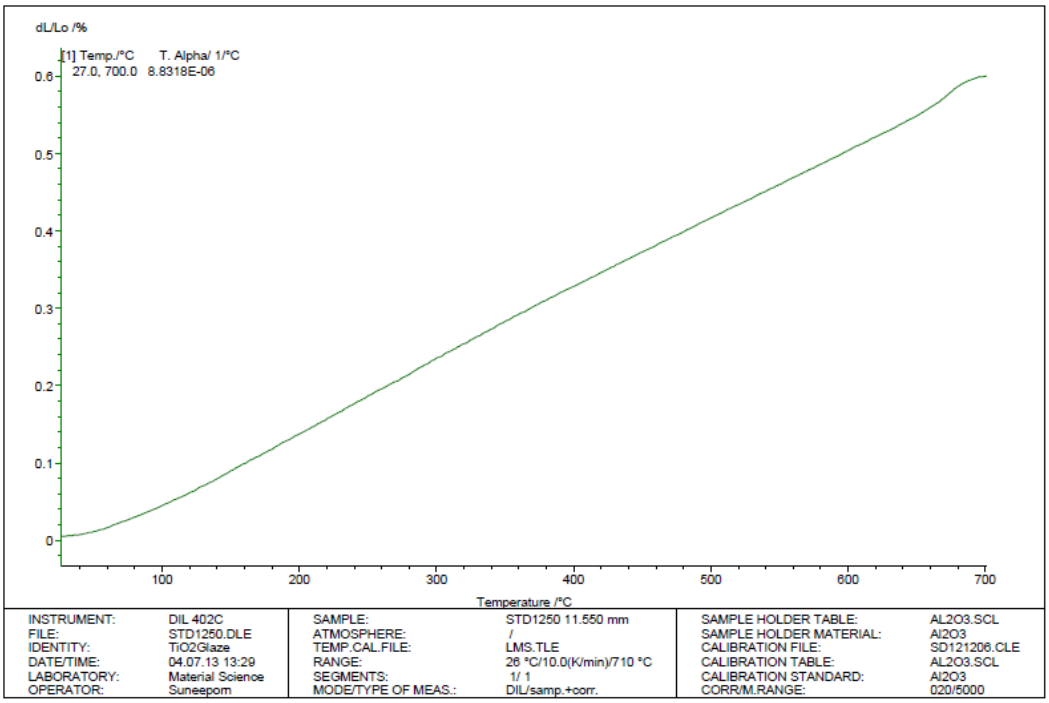
สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเนื้อกระเบื้องและเคลือบเซรามิก



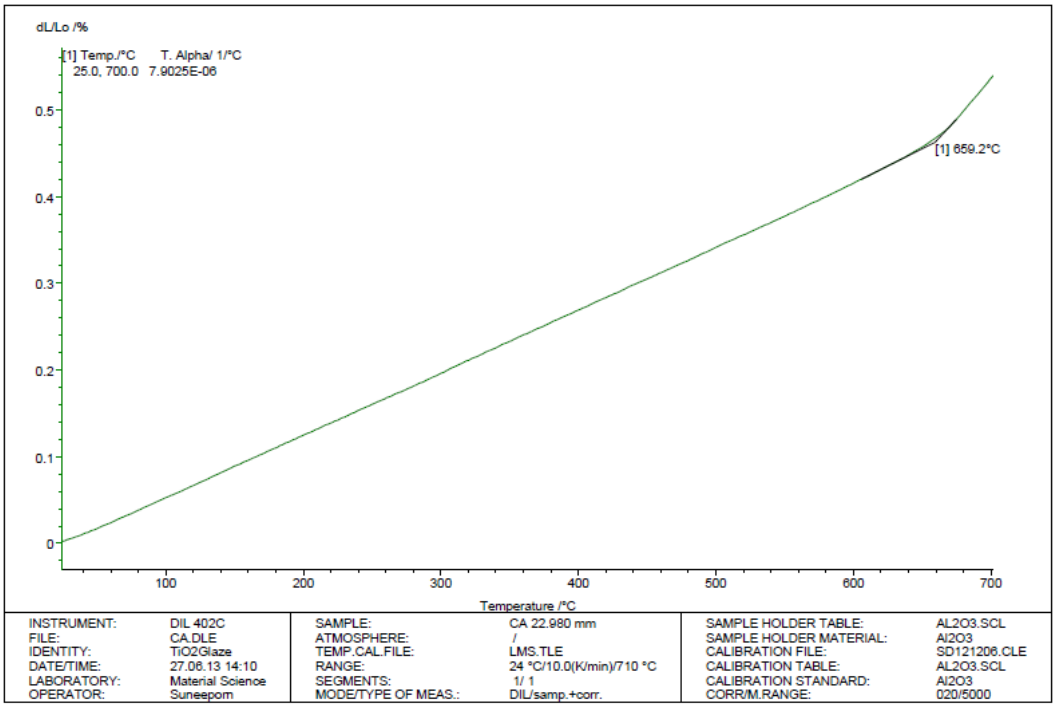
ภาพที่ ง.1 สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเนื้อกระเบื้องที่เผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส



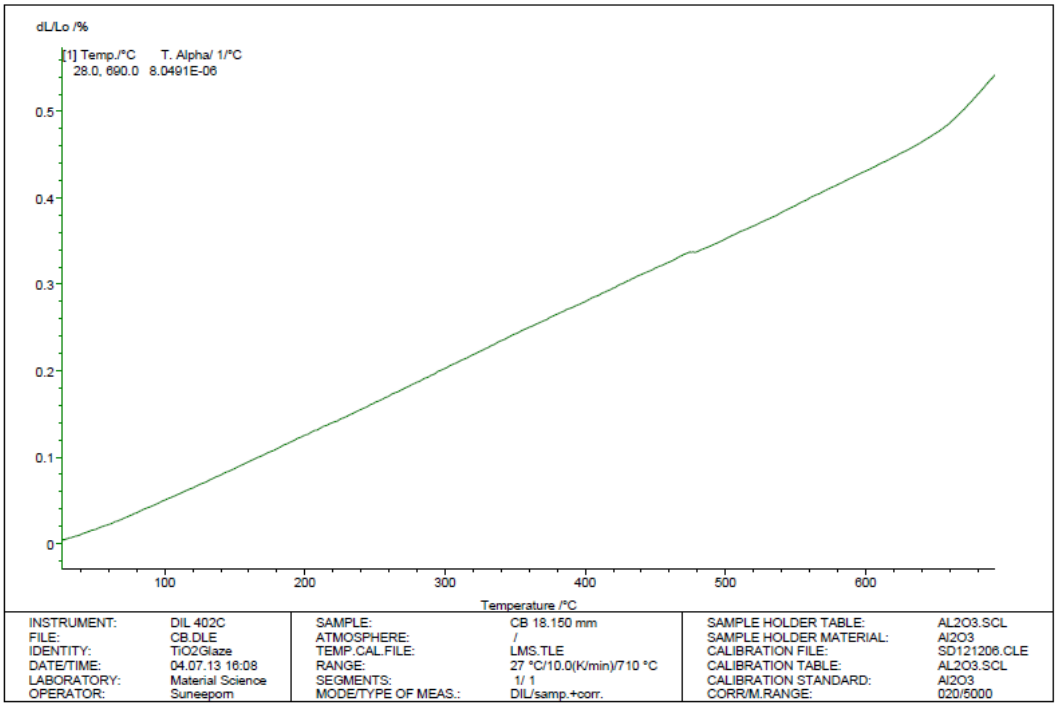
ภาพที่ ง.2 สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเนื้อกระเบื้องที่เผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส



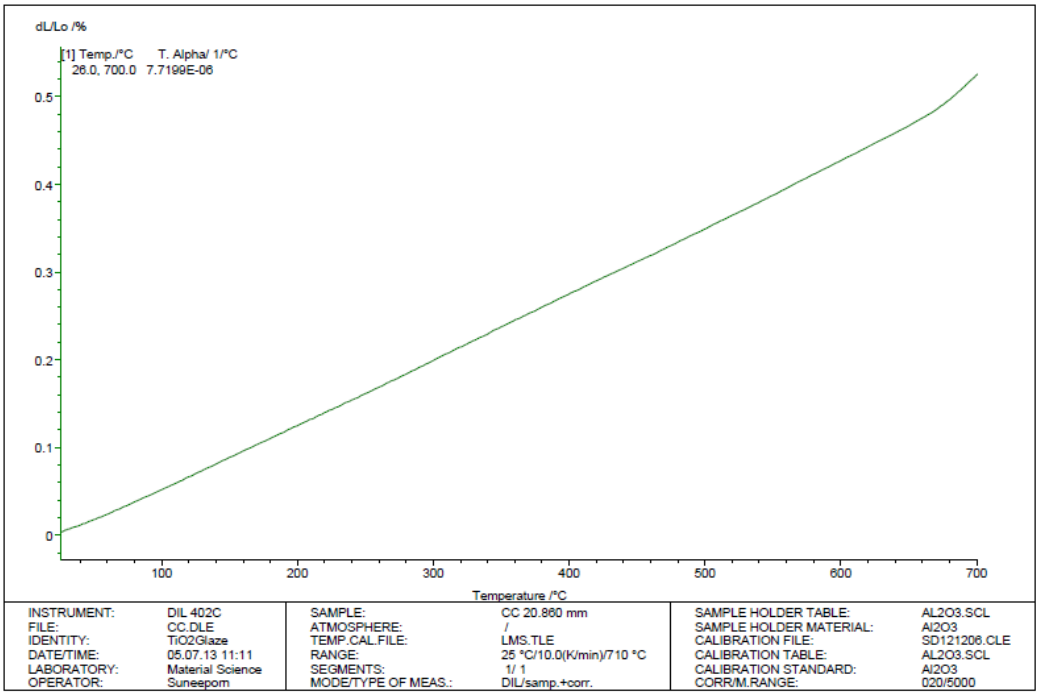
ภาพที่ ง.3 สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบสูตรมาตรฐาน STD ที่เผาที่อุณหภูมิ 1250 ℃



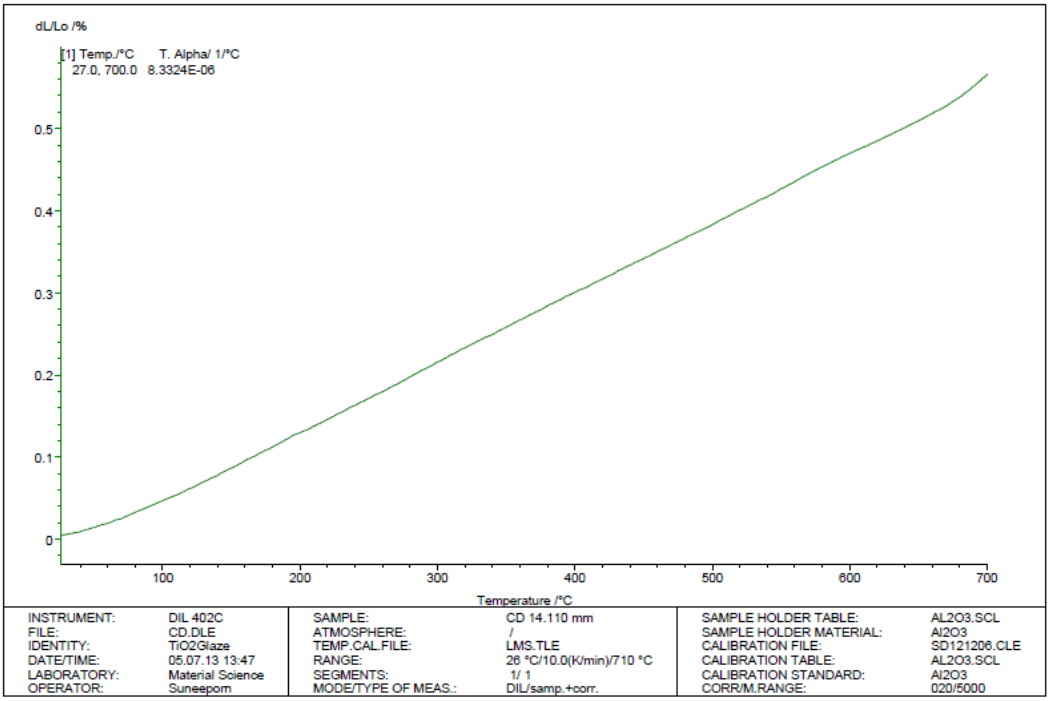
ภาพที่ ง.4 สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร A ที่เผาที่อุณหภูมิ 1200 ℃



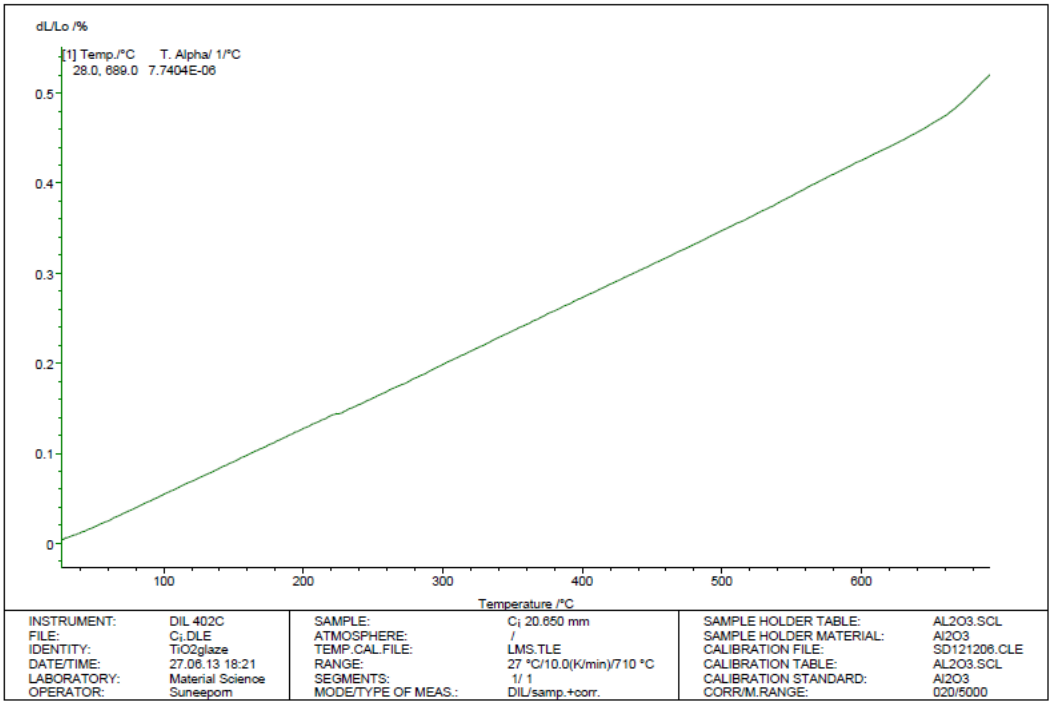
ภาพที่ ง.5 สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร B ที่เผาที่อุณหภูมิ 1200 °C



ภาพที่ ง.6 สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร C ที่เผาที่อุณหภูมิ 1200 °C



ภาพที่ ง.7 สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร D ที่เผาที่อุณหภูมิ 1200 °C



ภาพที่ ง.8 สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบที่มีการใช้กากของเสียเป็นวัตถุดิบสูตร a ที่เผาที่อุณหภูมิ 1200 °C

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสุนีย์พร โพธิ์แก้ว เกิดวันที่ 3 เมษายน พ.ศ. 2532 ที่จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิตเซรามิกส์และวัสดุศาสตร์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2554 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญามหาบัณฑิต วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต หลักสูตรเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในเดือนมิถุนายน พ.ศ.2554 และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษาปี 2556

การนำเสนอผลงานทางวิชาการระดับนานาชาติแบบ Poster presentation เรื่อง “The Use of Electric Arc Furnace Dust from Steel Recycling in Ceramic Glaze” ในการประชุมทางวิชาการ The 8th Mathematics and Physical Sciences Graduate Congress (MPSGC) ระหว่างวันที่ 8-10 ธันวาคม พ.ศ. 2555 จัดโดย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การนำเสนอผลงานทางวิชาการระดับนานาชาติแบบ Poster presentation เรื่อง “Effect of Waste from HDPE Catalyst Production on Melting Behaviour and Thermal Properties of White Opaque Glazes” และได้รับรางวัล Outstanding Poster Awards ในการประชุมทางวิชาการ International Conference on Traditional and Advanced Ceramics (ICTA2013) ระหว่างวันที่ 11-13 กันยายน พ.ศ. 2556 ณ ศูนย์ไบเทคบางนา และได้รับการตีพิมพ์ในวารสาร Key Engineering Materials Volume 608 ปี 2014 หน้า 97-102

การนำเสนอผลงานทางวิชาการระดับนานาชาติแบบ Poster presentation เรื่อง “Melting Characteristics of White Opaque Glaze Prepared from HDPE Catalyst Production By-product” ในการประชุมวิชาการ The 9th Mathematics and Physical Science Graduate Congress (MPSGC) ระหว่างวันที่ 8-10 มกราคม พ.ศ. 2557 ณ ประเทศมาเลเซีย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University