

การพัฒนาสูตรเคลือบเซรามิกอุณหภูมิต่ำโดยใช้วัสดุเหลือทิ้ง



นางสาวปวีณา เกตุบุญเรือง

ศูนย์วิทยพัทยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย


ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



5 1 7 2 5 9 6 0 2 3

DEVELOPMENT OF LOW TEMPERATURE CERAMIC GLAZES USING WASTE
MATERIALS



Miss Paveena Ketboonruang

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2010

Copyright of Chulalongkorn University

530431

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาสูตรเคลือบเซรามิกอุณหภูมิต่ำ
โดยใช้วัสดุเหลือทิ้ง

โดย

นางสาวปวีณา เกตุบุญเรือง

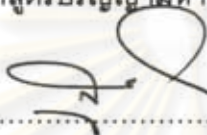
สาขาวิชา

เทคโนโลยีเซรามิก

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ


คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

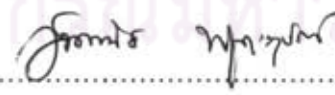

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

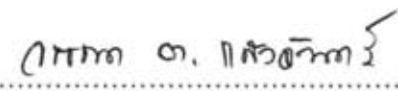
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุทัตตรา จินาวัดน์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.วันทนีย์ พุกกะคุปต์)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(นางวรรณดา ต.แสงจันทร์)

ปวีณา เกตุบุญเรือง : การพัฒนาสูตรเคลือบเซรามิกอุณหภูมิต่ำโดยใช้วัสดุเหลือทิ้ง.
 (DEVELOPMENT OF LOW TEMPERATURE CERAMIC GLAZES USING
 WASTE MATERIALS) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.
 ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ, 86 หน้า.

การพัฒนาเคลือบอุณหภูมิต่ำโดยใช้วัสดุเหลือทิ้ง งานวิจัยนี้จะนำของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมมาเป็นวัตถุดิบหลักในการทำเคลือบ โดยใช้ซีเมนต์เผาขยายจังหวัดภูเก็ตเศษแก้ว 2 ชนิดคือ เศษแก้วบอโรซิลิเกตและเศษแก้วโซดาไลม์ คำนวณสูตรเคลือบด้วยแผนภูมิสามเหลี่ยม นำเคลือบไปอบด้วยหม้ออบความเร็วสูงเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำไปวิเคราะห์สมบัติเคลือบ เช่น ความหนาแน่น กากค้างตะแกรง และอัตราการไหล ชุบเคลือบบนเนื้อดินสโตนแวร์ เผาที่ 1000 1150 และ 1200 °C คงไว้ที่อุณหภูมิสูงสุดเป็นเวลา 15 นาที วิเคราะห์สมบัติหลังเผาคือ การหลอมตัว การไหลตัว สมบัติทางความร้อน พฤติกรรม การหลอม ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน โครงสร้างจุลภาคเมื่อเผาที่ 1000 และ 1150 °C วิเคราะห์เฟสของเคลือบที่ผ่านการเผาที่ 1000 และ 1150 °C ความต้านทานสารเคมี เมื่อได้สูตรที่เคลือบสุกและมันเงาเมื่อนำไปเผาที่ 1000 °C แล้ว ทดลองชุบบนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำสูตร RCC-1-15-G1 และ LT-LPW1-G1 เผาที่ 1000 และ 1150 °C และนำเคลือบไปทดลองโดยการเพิ่มสีของผลิตภัณฑ์ให้สวยงามด้วยการเติมออกไซด์แล้วนำไปชุบเนื้อดินทั้งเนื้อดินสโตนแวร์และเนื้อดินอุณหภูมิต่ำ เผาที่ 950 และ 1000 °C จากการทดสอบพบว่าเคลือบที่ได้ผลดีคือสุกตัวและมันเงาทั้งสูตรที่ใช้เศษแก้วบอโรซิลิเกตและเศษแก้วโซดาไลม์เคลือบสูตรที่มีปริมาณบอแรกซ์มากกว่า 20% ขึ้นไป จากงานวิจัยนี้ได้เคลือบเซรามิกอุณหภูมิต่ำที่ไม่ใช้ฟrit วัตถุดิบประเภทตะกั่วหรือ สารเคมีที่มีราคาแพง มาเป็นส่วนประกอบ แต่จะใช้วัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมมาใช้เป็นวัตถุดิบหลัก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วัสดุศาสตร์ ลายมือชื่อนิสิต ปวีณา เกตุบุญเรือง
 สาขาวิชา เทคโนโลยีเซรามิก ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ
 ปีการศึกษา 2553

5172596023 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEYWORDS : CERAMIC GLAZES / LOW TEMPERATURE / MSW / CULLET

PAVEENA KETBOONRUANG : DEVELOPMENT OF LOW TEMPERATURE CERAMIC GLAZES USING WASTE MATERIALS. THESIS ADVISOR : ASST. PROF.SIRITHAN JIEMSIRILERS, Ph.D., 86 pp.

The low firing temperature glaze using industrial waste was developed. Selected Raw materials used in this research were waste materials from industry for example; Phuket Municipal Solid Waste (Phuket MSW), borosilicate cullet and soda lime cullet. The glaze compositions were designed using triaxial phase diagram to study the relationship between glass compositions and glaze properties. All glaze batches were ground in a high speed ball mill for 15 minutes. Properties of glaze slip; density, % residue and flow ability were measured. Stoneware body was glazed then fired at 1000, 1150 and 1200 °C for 15 minutes. Fired properties, for example melting and flowing property, thermal property, heating stage microscope, coefficient of thermal expansion were analyzed. Microstructure, phase, and chemical resistance of glazes fired at 1000 and 1150 °C were analyzed. Selected glaze formula which is matured after fired at 1000 °C were then glazed on low temperature firing ceramic body RCC-1-15-G1 and LT-LPW1-G1 fired at 1000 and 1150 °C. The effects of oxides on the appearance of low temperature glazes were observed. The glaze fired at 1000 and 1150 °C showed good surface. Low temperature body when fired at 950 and 1000 °C and the glaze were compatible and a matured clear and glossy for glazes using both borosilicate and soda lime cullet with 20 wt% borax.

Phuket MSW and cullet can be utilized as major raw materials for low temperature firing glazes without using commercial ceramic frit and high amount of expensive chemicals.

Department : Materials Science..... Student's Signature PAVEENA KETBOONRUANG
 Field of Study : Ceramic Technology..... Advisor's Signature *Sirithan J.*
 Academic Year : 2010.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ต้องขอขอบคุณ ความช่วยเหลือทั้งในด้านวิชาการ และการดำเนินการวิจัย จากบุคคลและหน่วยงานต่างๆ ดังนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์ สำหรับ คำแนะนำ แนวทางการดำเนินงานวิจัย และ คำปรึกษา

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่สละเวลาอันมีค่า มาให้ความรู้คำชี้แนะรวมทั้งการตรวจแก้ไขรูปเล่มวิทยานิพนธ์ ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบคุณ Prof.Dr.Reinhard Conradt สำหรับเครื่อง Heating stage microscope

ขอขอบคุณ ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง (National Center of Excellence for Petroleum, Petrochemicals and Advanced Materials) ที่ให้การสนับสนุนด้านทุนการศึกษาและทุนวิจัยตลอดระยะเวลาการศึกษา

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย อนุเคราะห์เนื้อดิน อุณหภูมิมาทดลอง

ขอขอบคุณ คุณธนากร เทพามาตย์ คุณอภิรัฐ อธิภาวิเศษพงษ์ เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับความช่วยเหลือในการทำการทดลอง

สุดท้าย กราบขอบพระคุณครอบครัว ที่อบรมสั่งสอนและให้กำลังใจมาโดยตลอด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3. ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1. ขยะและกระบวนการเผาขยะ	4
2.2. เศษแก้ว.....	4
2.3. การวิเคราะห์วัตถุติด.....	5
2.4. ความหมายของเคลือบ	5
2.5. เคลือบอุณหภูมิต่ำ.....	6
2.6. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	9
3.1. สารเคมีและวัตถุติดที่ใช้ในการทดลอง	9
3.2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	9
3.3. ขั้นตอนการเตรียมวัตถุติด	9
3.3.1. เตรียมเศษแก้วบอโรซิลิเกต และเศษแก้วโซดาไลม์.....	9
3.3.2. เตรียมซีเมนต์เผาขยะจังหวัดภูเก็ต	10
3.4. แผนผังการทดลอง.....	11
3.5. ขั้นตอนการวิเคราะห์วัตถุติด	12
3.5.1. เศษแก้วบอโรซิลิเกตและเศษแก้วโซดาไลม์	12
3.5.2. ซีเมนต์เผาขยะจังหวัดภูเก็ต.....	13

3.6.	การออกแบบการทดลอง	13
3.6.1.	คำนวณสูตรเคลือบด้วยตารางสามเหลี่ยม โดยมีวัตถุประสงค์คือ ซีเมนต์เทาเผาขยะจังหวัดภูเก็ต บอแรกซ์ และเศษแก้วบอโรซิลิเกต	14
3.6.2.	คำนวณสูตรเคลือบด้วยตารางสามเหลี่ยม โดยมีวัตถุประสงค์คือ ซีเมนต์เทาเผาขยะจังหวัดภูเก็ต บอแรกซ์ และเศษแก้วโซดาไลม์	15
3.7.	วิธีการเตรียมเคลือบ	16
3.8.	วิเคราะห์สมบัติเคลือบ	16
3.8.1.	วิเคราะห์ความหนาแน่นของน้ำเคลือบ	16
3.8.2.	วิเคราะห์การค้างตะแกรงของเคลือบ	17
3.8.3.	วิเคราะห์อัตราการไหลของเคลือบ	17
3.9.	เผาเคลือบที่อุณหภูมิต่างๆกัน	17
3.10.	วิเคราะห์เคลือบหลังเผา	18
3.10.1.	วิเคราะห์การหลอมตัวของเคลือบ	18
3.10.2.	วิเคราะห์การไหลตัวของเคลือบหลอม	18
3.10.3.	วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของเคลือบ	18
3.10.4.	วิเคราะห์พฤติกรรมการหลอมของเคลือบ	18
3.10.5.	วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบ	19
3.10.6.	วิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของเคลือบ	20
3.10.7.	วิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบ	20
3.10.8.	ศึกษาความต้านทานสารเคมี (ISO 10545-13: 1996)	20
3.10.9.	ศึกษาสมบัติทางความร้อนของเคลือบด้วย Differential thermal analysis	20
3.11.	วิเคราะห์สมบัติของเนื้อดินอุณหภูมิต่ำสูตร RCC-1-15-G1 และ LT-LPW-G1	20
3.11.1.	วิเคราะห์สมบัติของเนื้อดินอุณหภูมิต่ำ	20
3.11.2.	วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเนื้อดินอุณหภูมิต่ำ	21
3.12.	ทดลองเคลือบบนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำ	21
3.13.	ทดลองเติมออกไซด์เพื่อให้สีในเคลือบและเผาที่ 950 และ 1000°C	21
บทที่ 4	ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล	22
4.1.	ผลการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุเคลือบ	22
4.1.1.	เศษแก้วบอโรซิลิเกตและเศษแก้วโซดาไลม์	22
4.1.2.	ซีเมนต์เทาเผาขยะจังหวัดภูเก็ต	23

4.2. ออกแบบตารางส่วนผสมของเคลือบด้วยตารางสามเหลี่ยม มีวัตถุประสงค์คือ
 ชี้นำเตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ต เศษแก้วบอโรซิลิเกต และบอแรกซ์ 29

4.3. ผลการวิเคราะห์สมบัติของเคลือบสูตร B1-B10 30

4.4. ผลการวิเคราะห์สมบัติหลังเผาของเคลือบสูตร B1-B10..... 31

 4.4.1. ผลการเผาเคลือบสูตร B1-B10 บนเนื้อดินสโตนแวร์ที่อุณหภูมิต่างๆกัน 31

 4.4.2. ผลการหลอมตัวของเคลือบสูตร B1-B10 เผาที่อุณหภูมิต่างๆกัน 32

 4.4.3. ผลการไหลตัวของเคลือบสูตร B1-B10 เผาที่อุณหภูมิต่างๆกัน 34

 4.4.4. ผลการศึกษาพฤติกรรมการหลอมของเคลือบสูตร B3 B6 B9 และ B10
 ด้วย Heating stage microscope 35

 4.4.5. ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบ
 สูตร B3 B6 B9 และ B10 ด้วยเครื่อง Dilatometer 39

 4.4.6. ผลการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของเคลือบสูตร B3 B6 B9 และ B10
 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 41

 4.4.7. ผลการวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบของเคลือบสูตร B3 B6 B9 และ B10
 หลังเผาที่ 1000 °C ด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์
 Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) 43

 4.4.8. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของ เคลือบสูตร B3 B6 B9 และ B10
 หลังเผาที่ 1000 °C ด้วยเครื่อง X-ray Diffraction 47

 4.4.9. ผลการวิเคราะห์ความต้านทานสารเคมี (ISO 10545-13-1996) 48

4.5. ออกแบบตารางส่วนผสมของเคลือบด้วยตารางสามเหลี่ยม มีวัตถุประสงค์คือ
 ชี้นำเตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ต เศษแก้วโซดาไลม์ และบอแรกซ์ 49

4.6. ผลการวิเคราะห์สมบัติของเคลือบสูตร S1-S10..... 50

4.7. ผลวิเคราะห์สมบัติหลังเผาของเคลือบสูตร S1-S10 50

 4.7.1. ผลการเผาเคลือบสูตร S1-S10 บนเนื้อดินสโตนแวร์ที่อุณหภูมิต่างๆกัน 50

 4.7.2. ผลการหลอมตัวของเคลือบสูตร S1-S10 เผาที่อุณหภูมิต่างๆกัน 52

 4.7.3. ผลการไหลตัวของเคลือบสูตร S1-S10 เผาที่อุณหภูมิต่างๆกัน 54

 4.7.4. ผลการศึกษาพฤติกรรมการหลอมของเคลือบสูตร S6 S9 และ S10 ด้วย
 Heating stage microscope 55

 4.7.5. ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบ
 สูตร S6 S9 และ S10 ด้วยเครื่อง Dilatometer 58

4.7.6.	ผลการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของเคลือบสูตร S6 S9 และ S10 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	60
4.7.7.	ผลการวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบของเคลือบสูตร S6 S9 และ S10 หลังเผาที่ 1000 °C ด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ Energy Dispersive System (EDS)	62
4.7.8.	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบสูตร S6 S9 และ S10 หลังเผาที่ 1000 °C	65
4.7.9.	ผลการวิเคราะห์ความต้านทานสารเคมี (ISO 10545-13-1996)	66
4.8.	ผลการวิเคราะห์สมบัติของเนื้อดินอุณหภูมิต่ำ 2 สูตร	67
4.8.1.	วิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของเนื้อดินอุณหภูมิต่ำทั้ง 2 สูตร	67
4.8.2.	วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเนื้อดิน 2 สูตร	68
4.8.3.	ผลการเผาเคลือบสูตร B6 B9 และ B10 บนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำ สูตร RCC-1-15-G1 และ LT-LPW1-G1 เผาที่อุณหภูมิต่างๆกัน	68
4.8.4.	ผลการเผาเคลือบสูตร S1-S10 บนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำ RCC-1-15-G1 และ LT-LPW1-G1 เผาที่อุณหภูมิต่างๆกัน	69
4.9.	การทดลองเติมออกไซด์ชนิดต่างๆ ในเคลือบ	71
4.9.1.	ผลการเผาเคลือบออกไซด์ลงบนเนื้อดินสโตนแวร์	72
4.9.2.	ผลการเผาเคลือบสูตร B10 และ S10 บนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำทั้ง 2 ชนิด เผาที่ 1000 °C	73
4.9.3.	ผลการเผาเคลือบสูตร B9 B10 S9 และ S10 บนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำทั้ง 2 ชนิด เผาที่ 950 °C	74
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	77
5.1.	สรุปผลการวิจัย	77
5.2.	ข้อเสนอแนะ	77
	รายการอ้างอิง	78
	ภาคผนวก	80
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	86

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 ตารางส่วนผสมของเคลือบเมื่อเทียบเป็นปริมาณออกไซด์ (%).....	14
ตารางที่ 3.2 ตารางส่วนผสมของเคลือบเมื่อเทียบเป็นปริมาณออกไซด์ (%).....	15
ตารางที่ 4.1 ขนาดและอนุภาคของเศษแก้วบอโรซิลิเกตและเศษแก้วโซดาไลม์	22
ตารางที่ 4.2 ผลองค์ประกอบทางเคมีของเศษแก้วบอโรซิลิเกตและเศษแก้วโซดาไลม์ เมื่อเทียบกับทรายแก้วจังหวัดระยอง	23
ตารางที่ 4.3 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์เผาขยะจังหวัดภูเก็ต 4 lot	25
ตารางที่ 4.4 ตารางส่วนผสมของเคลือบสูตร B1-B10 (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	30
ตารางที่ 4.5 ผลวิเคราะห์สมบัติของเคลือบสูตร B1-B10	30
ตารางที่ 4.6 อุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาการหลอมของเคลือบสูตร B3, B6, B9 และ B10	35
ตารางที่ 4.7 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบสูตร B3, B6, B9 และ B10 เมื่อเทียบกับเนื้อดิน 3 ชนิด	41
ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบทางเคมีแต่ละจุดของเคลือบ B3 ด้วย EDS.....	44
ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบทางเคมีแต่ละจุดของเคลือบ B6 ด้วย EDS.....	45
ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบทางเคมีแต่ละจุดของเคลือบ B9 ด้วย EDS.....	46
ตารางที่ 4.11 การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบทางเคมีแต่ละจุดของเคลือบ B10 ด้วย EDS... ..	47
ตารางที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ความต้านทานสารเคมีของเคลือบสูตร B9 และ B10.....	49
ตารางที่ 4.13 ตารางส่วนผสมของเคลือบสูตร S1-S10 (ร้อยละโดยน้ำหนัก).....	49
ตารางที่ 4.14 ผลวิเคราะห์สมบัติของเคลือบสมบัติของเคลือบสูตร S1-S10	50
ตารางที่ 4.15 อุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาการหลอมของเคลือบสูตร S6, S9 และ S10	56
ตารางที่ 4.16 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบสูตร S6, S9 และ S10 เมื่อเทียบกับเนื้อดิน 3 ชนิด	60
ตารางที่ 4.17 การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบทางเคมีแต่ละจุดของเคลือบ S6	63
ตารางที่ 4.18 การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบทางเคมีแต่ละจุดของเคลือบ S9	64
ตารางที่ 4.19 การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบทางเคมีแต่ละจุดของเคลือบ S10	65
ตารางที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์ความต้านทานสารเคมีของเคลือบสูตร S9 และ S10	67
ตารางที่ 4.21 สมบัติของเนื้อดินอุณหภูมิต่ำสูตร LT-LPW1-G1	67
ตารางที่ 4.22 สมบัติของเนื้อดินอุณหภูมิต่ำสูตร RCC-1-15-G1.....	67
ตารางที่ 4.23 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเนื้อดินอุณหภูมิต่ำ 2 สูตร	68

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงาน.....	12
รูปที่ 3.2 ส่วนผสมของเคลือบที่ใช้ ซีเมนต์เตาเผาขยะ บอแรกซ์ และเศษแก้วบอโรซิลิเกต	14
รูปที่ 3.3 ส่วนผสมของเคลือบที่ใช้ ซีเมนต์เตาเผาขยะ บอแรกซ์ และเศษแก้วโซดาไลม์.....	15
รูปที่ 3.4 ถ้วยวัดความหนาแน่น.....	16
รูปที่ 3.5 เครื่องมือวัดอัตราการไหลของเคลือบ	17
รูปที่ 3.6 แท่นทดสอบการไหลตัวของเคลือบ	18
รูปที่ 3.7 อุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์พฤติกรรมกรรมการหลอมตัวของเคลือบ (Heating stage microscope)	19
รูปที่ 4.1 องค์ประกอบทางเฟสของซีเมนต์เตาเผาขยะทั้ง 4 lot.....	26
รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM ของการกระจายตัวของซีเมนต์เตาเผาขยะทั้ง 4 lot.....	27
รูปที่ 4.3 ขนาดและการกระจายตัวของซีเมนต์เตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ต lot 1-4	28
รูปที่ 4.4 สมบัติทางความร้อนของซีเมนต์เตาเผาขยะภูเก็ต lot 1-4	29
รูปที่ 4.5 ส่วนผสมของเคลือบที่ใช้ ซีเมนต์เตาเผาขยะ บอแรกซ์ และเศษแก้วบอโรซิลิเกต	29
รูปที่ 4.6 ทดสอบเคลือบสูตร B1-B10 บนเนื้อดินสโตนแวร์เผาที่ 1000 1150 และ 1200 °C	32
รูปที่ 4.7 การหลอมตัวของเคลือบสูตร B1-B10 เผาที่ 1000 1150 และ 1200 °C.....	33
รูปที่ 4.8 การไหลตัวของเคลือบสูตร B เผาที่ 1000 1150 และ 1200 °C.....	35
รูปที่ 4.9 พฤติกรรมการหลอมตัวของเคลือบสูตร B3 B6 B9 และ B10 ที่อุณหภูมิห้อง จนเกิดการหลอมตัว	39
รูปที่ 4.10 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบสูตร B3 B6 B9 และ B10 เทียบกับเนื้อดินทั้ง 3 ชนิด	40
รูปที่ 4.11 โครงสร้างทางจุลภาคของเคลือบสูตร B6 B9 และ B10 หลังเผาที่ 1000 °C.....	42
รูปที่ 4.12 โครงสร้างทางจุลภาคของเคลือบสูตร B6 B9 และ B10 หลังเผาที่ 1150 °C.....	42
รูปที่ 4.13 ธาตุและองค์ประกอบของเคลือบสูตร B3 เผาที่ 1000 °C	43
รูปที่ 4.14 ธาตุและองค์ประกอบของเคลือบสูตร B6 เผาที่ 1000 °C	44
รูปที่ 4.15 ธาตุและองค์ประกอบของเคลือบสูตร B9 เผาที่ 1000 °C	45
รูปที่ 4.16 ธาตุและองค์ประกอบของผิวเคลือบสูตร B10 เผาที่ 1000 °C	46
รูปที่ 4.17 องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบสูตร B3 B6 B9 และ B10 เผาที่ 1000 และ 1150 °C	48

รูปที่ 4.18 ส่วนผสมของเคลือบที่ใช้ ชี้ถ้าเตาเผาขยะ บอแรกซ์ และเศษแก้วโซดาไลม์..... 49

รูปที่ 4.19 เคลือบสูตร S1-S10 บนเนื้อดินสโตนแวร์เผาที่ 1000 1150 และ 1200 °C 52

รูปที่ 4.20 การหลอมตัวของเคลือบสูตร S1-S10 เผาที่ 1000 1150 และ 1200 °C 54

รูปที่ 4.21 การไหลตัวของเคลือบสูตร S1-S10 เผาที่ 1000 1150 และ 1200 °C 55

รูปที่ 4.22 พฤติกรรมการหลอมตัวของเคลือบสูตร S6 S9 และ S10 ที่อุณหภูมิห้อง
 จนเกิดการหลอมตัว 58

รูปที่ 4.23 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบสูตร S6 S9 และ S10
 เทียบกับเนื้อดินทั้ง 3 ชนิด 59

รูปที่ 4.24 โครงสร้างทางจุลภาคของเคลือบสูตร S6 S9 และ S10 หลังเผาที่ 1000 °C 61

รูปที่ 4.25 โครงสร้างทางจุลภาคของเคลือบสูตร S6 S9 และ S10 หลังเผาที่ 1150 °C 61

รูปที่ 4.26 ธาตุและองค์ประกอบของผิวเคลือบสูตร S6 เผาที่ 1000 °C 62

รูปที่ 4.27 ธาตุและองค์ประกอบของผิวเคลือบสูตร S9 เผาที่ 1000 °C 63

รูปที่ 4.28 ธาตุและองค์ประกอบของผิวเคลือบสูตร S10 เผาที่ 1000 °C 64

รูปที่ 4.29 องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบสูตร S6 S9 และ S10 เผาที่ 1000 และ 1150 °C 66

รูปที่ 4.31 เคลือบสูตร B บนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำทั้ง 2 ชนิด เผาที่ 1000 และ 1150 °C..... 69

รูปที่ 4.32 เคลือบสูตร S1-S10 บนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำสูตร RCC-1-15-G1 เผาที่ 1000 1150 °C 70

รูปที่ 4.33 เคลือบสูตร S1-S10 บนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำสูตร LT-LPW1-G1 เผาที่ 1000 1150 °C. 71

รูปที่ 4.34 เคลือบสูตร B9 S9 B10 และ S10 ที่เติมออกไซด์บนเนื้อดินสโตนแวร์เผาที่ 1000 °C. 72

รูปที่ 4.35 เคลือบสูตร B10 ที่เติมออกไซด์เคลือบบนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำทั้ง 2 สูตร
 เผาที่ 1000 °C..... 73

รูปที่ 4.36 เคลือบสูตร S10 ที่เติมออกไซด์บนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำทั้ง 2 สูตร เผาที่ 1000 °C 73

รูปที่ 4.37 เคลือบสูตร B9 ที่เติมออกไซด์บนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำทั้ง 2 สูตร เผาที่ 950 °C 74

รูปที่ 4.38 เคลือบสูตร B10 ที่เติมออกไซด์บนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำทั้ง 2 สูตร เผาที่ 950 °C 75

รูปที่ 4.39 เคลือบสูตร S9 ที่เติมออกไซด์บนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำทั้ง 2 สูตร เผาที่ 950 °C 75

รูปที่ 4.40 เคลือบสูตร S10 ที่เติมออกไซด์บนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำทั้ง 2 สูตร เผาที่ 950 °C 76

บทที่ 1

บทนำ

1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเผาไหม้เป็นกระบวนการในการผลิตเซรามิกที่ใช้พลังงานมากที่สุด ขณะนี้ปัจจุบันมีการตระหนักถึงปัญหาโลกร้อน การประหยัดพลังงาน การใช้ทรัพยากรอย่างประหยัด ประกอบกับการแข่งขันในท้องตลาดของอุตสาหกรรมเซรามิกทั้งในประเทศและต่างประเทศจึงทำให้ทั่วโลกมีการตื่นตัวในเรื่องการประหยัดพลังงาน การลดต้นทุนการผลิตและทำให้การผลิตเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ในกระบวนการเผาเคลือบทั่วไปมักใช้อุณหภูมิในการเผาสูงเพื่อให้วัตถุดิบหลอมเป็นเนื้อเดียวกัน ถ้าต้องการใช้อุณหภูมิในการเผาให้ต่ำลงโดยทั่วไปจะใช้วัตถุดิบประเภทตะกั่วบอแรกซ์ใส่เป็นส่วนประกอบหลักเพื่อเป็นตัวลดจุดสุกตัว ตะกั่วเป็นฟลักซ์ที่แรงมาก สามารถลดจุดสุกตัวและทำให้เคลือบแวววาวแต่เป็นอันตรายต่อมนุษย์จึงไม่ควรนำมาใช้ในสูตรเคลือบ แต่จะใช้บอแรกซ์แทน

เคลือบมีลักษณะเป็นชั้นฟิล์มบางคลุมบริเวณผิวเนื้อดินเพื่อให้ผลิตภัณฑ์เซรามิกมีความสวยงาม นอกจากนี้ยังสามารถป้องกันการซึมผ่านของของเหลวเข้าสู่เนื้อผลิตภัณฑ์ ทำให้ทำความสะอาดง่าย ช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงมากขึ้นและยังช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีความทนทานต่อการขัดสีเมื่อนำไปใช้งาน

วัตถุดิบที่จะนำมาทำเคลือบนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มหลักคือ (1) วัตถุดิบที่มีสมบัติเป็นด่างจำพวกอัลคาไลน์และอัลคาไลน์เอิร์ททำหน้าที่เป็นตัวช่วยลดอุณหภูมิในการเผา เช่น BaO Na₂O K₂O MgO และ CaO (2) วัตถุดิบที่มีสมบัติเป็นกลาง เช่น Al₂O₃ B₂O₃ และ (3) วัตถุดิบที่มีสมบัติเป็นกรดทำหน้าที่ให้เกิดโครงสร้างของแก้ว เช่น SiO₂

เคลือบสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้เผา คือ เคลือบอุณหภูมิต่ำ (ต่ำกว่า 1000 °C) อุณหภูมิปานกลาง (ระหว่าง 1000-1200 °C) และอุณหภูมิสูง (มากกว่า 1200 °C) เคลือบอุณหภูมิต่ำส่วนใหญ่จะมีส่วนผสมคือตะกั่วหรือบอแรกซ์เป็นหลักหรือทั้งสองตัวผสมกัน ซึ่งมีหน้าที่เป็นตัวหลอมละลายที่ดีแม้ในอุณหภูมิต่ำ ทำให้เมื่อเผาแล้วมีการไหลตัวของเคลือบมาก อย่างไรก็ตามตะกั่วเป็นอันตรายต่อชีวิตและสิ่งแวดล้อม จึงมีการวิจัยหาวัตถุดิบเพื่อที่จะนำมาทดแทนสารประเภทนี้

ขณะนี้ปัจจุบันมีขยะเกิดขึ้นทุกวันและยิ่งเพิ่มขึ้นโดยไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ การกำจัดขยะสามารถทำได้หลายวิธีเช่น นำไปทิ้งในทะเล นำไปฝังกลบ นำไปหมักเป็นปุ๋ยชีวภาพ รวมถึงนำไปเผา การเผาขยะเป็นวิธีการที่มีการนิยมใช้กันมาก โดยก่อนกระบวนการเผาจะเริ่มจะต้องมี

การแยกขยะแต่ละชนิดออกจากกันเช่น ขวดแก้ว พลาสติก กระป๋อง โลหะ กระดาษ ฯลฯ จากนั้นจึงนำขยะที่สามารถเผาได้ไปเข้าสู่กระบวนการเผา เมื่อเผาขยะเสร็จแล้วจะเกิดขี้เถ้าที่เหลือจากการเผาประมาณ 25-30 %โดยน้ำหนัก ขี้เถ้าจากเตาเผาขยะจะถูกนำไปใช้ประโยชน์เช่น ผสมในวัสดุก่อสร้าง นำไปถมที่ เป็นต้น เมื่อได้ทำการนำขี้เถ้าเตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ตไปวิเคราะห์องค์ประกอบพบว่า มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นส่วนประกอบหลัก และยังมีตัวช่วยหลอมตัวอื่นด้วยเช่น Na_2O และ K_2O

ในปกตินั้นมีขวดแก้วที่เราใช้กันอยู่แล้วมากมายเช่น ขวดยา ขวดเครื่องปรุงอาหาร ขวดน้ำอัดลม ขวดเหล้า ฯลฯ ขวดแก้วเป็นวัสดุที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ทั้งหมด การนำขวดแก้วมาหลอมใหม่ทำให้สามารถลดอุณหภูมิการหลอมได้ ขวดแก้วมีส่วนประกอบหลักเป็น SiO_2 แอลคาไลน์และแอลคาไลน์เอิร์ทจึงสามารถนำมาใช้เป็นตัวช่วยหลอมแทน เฟลด์สปาร์หรือฟrit ในสูตรเคลือบได้ เศษแก้วที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรมการผลิตแก้ว กระจก หรือเศษแก้วทั่วไป ก่อนนำมาใช้ในงานวิจัยจะต้องนำมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีก่อนการใช้งานเพื่อให้ทราบว่า เป็นเศษแก้วชนิดใด ในงานวิจัยนี้จะใช้เศษแก้วโซดาไลม์จากโรงงานผลิตขวดแก้ว และหลอดไฟชนิดพิเศษเป็นวัตถุดิบสำหรับเคลือบอุณหภูมิต่ำร่วมกับบอแรกซ์

เคลือบอุณหภูมิต่ำที่ใช้ในอุตสาหกรรมจะเป็นเคลือบที่ใช้ฟritเป็นองค์ประกอบถึง 90% ในส่วนผสมเพื่อที่จะต้องการให้สามารถเผาได้ที่อุณหภูมิประมาณ $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ เช่นเคลือบกระเบื้อง ผุผนัง เป็นต้น ในงานวิจัยนี้จะมุ่งพัฒนาสูตรเคลือบอุณหภูมิต่ำที่ใช้วัตถุดิบเหลือใช้ในปริมาณมาก จึงทำการเลือกวัตถุดิบจากของเหลือในอุตสาหกรรมที่มีส่วนประกอบของออกไซด์ที่ใช้เป็นวัตถุดิบในสูตรเคลือบ เช่น ขี้เถ้าเตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ต เศษแก้ว เพื่อช่วยให้อุณหภูมิในการเผาลดลง ช่วยลดต้นทุนการผลิต และสามารถนำของเหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้

1.2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อเตรียมเคลือบอุณหภูมิต่ำ โดยใช้วัสดุเหลือทิ้งช่วยในการลดอุณหภูมิการเผาเคลือบ
- 1.2.2 เพื่อศึกษากลไกการหลอมของเคลือบอุณหภูมิต่ำ
- 1.2.3 เพื่อลดปัญหาผลกระทบของเหลือทิ้งต่อธรรมชาติโดยการนำกลับมาใช้ใหม่

1.3. ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาสมบัติต่างๆของเคลือบอุณหภูมิต่ำที่มีส่วนประกอบหลักโดยวัสดุเหลือทิ้ง

1.4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

นำวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ช่วยลดปริมาณของเหลือทิ้งโดยการนำกลับมาใช้ใหม่ และช่วยประหยัดต้นทุนในการผลิตเคลือบ ใช้วัตถุดิบที่ไม่เป็นพิษและไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1. ขยะและกระบวนการเผาขยะ

ในปัจจุบันไม่ว่าทั้งการอุปโภคและบริโภค ทำให้เกิดขยะขึ้นมากมาย การกำจัดขยะสามารถทำได้หลายวิธีเช่น นำไปกลบฝัง นำไปถมที่ นำไปทำน้ำหมักชีวภาพ รวมทั้งการนำไปเผา การเผาขยะเป็นวิธีการกำจัดขยะอีกวิธีหนึ่ง เมื่อไม่มีสถานที่ฝังกลบเพียงพอหรือที่ดินมีราคาแพงไม่คุ้มที่จะนำขยะไปฝัง⁽¹⁾ เนื่องจากการเผาขยะจะช่วยลดปริมาตรขยะลงอย่างมาก

การใช้เตาเผาในการกำจัดขยะมูลฝอยเป็นการลงทุนที่สูงในระยะแรก ไม่เฉพาะกับตัวเตาเผาเท่านั้นแต่ที่สำคัญจะต้องมีระบบบำบัดอากาศเสียที่มีประสิทธิภาพสูง เพราะการเผาขยะมูลฝอยที่มีส่วนประกอบหลากหลายและมีสัดส่วนไม่คงที่อาจก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศได้ เทคโนโลยีนี้นิยมในทวีปยุโรปและประเทศญี่ปุ่น ส่วนประเทศไทยมีเตาเผาขยะมูลฝอยและระบบผลิตไฟฟ้าจากมูลฝอยเพียงแห่งเดียวที่จังหวัดภูเก็ต ทั้งนี้ถ้ามีการออกแบบและติดตั้งที่ถูกต้องเตาเผาขยะก็สามารถทำงานได้โดยไม่ก่อผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและชุมชนใกล้เคียงแต่อย่างใด

ก่อนกระบวนการเผาขยะจะเริ่มนั้นจะต้องมีการคัดแยกขยะแต่ละประเภทออกจากกันเช่น เศษแก้ว ขวด พลาสติก กระดาษ เป็นต้น จากนั้นจึงนำขยะที่สามารถเผาได้เข้าสู่กระบวนการเผา ซึ่งใช้ความร้อนประมาณ 1200-1300 °C จะทำให้การเผาไหม้เป็นไปอย่างสมบูรณ์ หลังจากกระบวนการเผาขยะสิ้นสุดลงแล้วจะเหลือปริมาณขยะที่เป็นขี้เถ้าไม่เกิน 10% (โดยน้ำหนัก) หรือประมาณ 25-30% (โดยปริมาตร)⁽²⁾ ซึ่งขี้เถ้าที่ได้จะถูกนำไปฝังกลบอย่างถูกวิธีหรืออาจจะนำไปใช้ประโยชน์ในส่วนอื่นๆ เช่น นำไปเป็นส่วนผสมในคอนกรีต นำไปถมที่ ฯลฯ และนอกจากนี้ในบางพื้นที่ที่มีปริมาณขยะอยู่มาก สามารถที่จะนำพลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาขยะมาใช้ในการผลิตไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าได้

2.2. เศษแก้ว

ในชีวิตประจำวันมีขวดแก้วที่เราใช้กันอยู่แล้วมากมายเช่น ขวดยา ขวดเครื่องปรุงอาหาร ขวดน้ำอัดลม ขวดสุรา เป็นต้น ขวดแก้วเป็นวัสดุที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ทั้งหมด โดยการนำขวดแก้วมาหลอมใหม่เป็นการลดขยะจากโรงงานอุตสาหกรรม ทำให้สามารถลดอุณหภูมิการหลอมได้ ขวดแก้วมีส่วนประกอบหลักเป็น SiO₂ แอลคาไลน์และแอลคาไลน์เอิร์ทจึงสามารถนำมาใช้เป็นตัวช่วยหลอมแทนเฟลด์สปาร์หรือฟrit ในสูตรเคลือบได้ H. Stirlinga⁽³⁾ ได้มีการใช้เศษแก้ว 10-20% นำมารีไซเคิลผลิตเป็นอิเล็กทรอนิกส์อล เศษแก้วนี้เมื่อนำมาใช้แล้วยังสามารถ

ช่วยลดค่าใช้จ่ายทั้งในด้านการลดพลังงานที่ใช้ในการหลอมแก้วและลดต้นทุนในการซื้อวัตถุดิบอื่นๆ อีกด้วย

2.3. การวิเคราะห์วัตถุดิบ

เมื่อนำซี้ได้จากเตาเผาขยะไปวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบทางเคมีพบว่ามีส่วนประกอบหลักคือ CaO Na_2O K_2O และมีออกไซด์อื่นๆ ปนอยู่ในปริมาณเล็กน้อย โดย CaO Na_2O และ K_2O นั้นเป็นส่วนผสมหลักในเคลือบที่ใช้กันทั่วไป วัตถุดิบประเภทนี้เป็นฟลักซ์คือช่วยลดจุดสุกตัวในเคลือบ โดยซี้ได้จากเตาเผาขยะจะมีเฟสที่เป็นทั้งในรูปผลึกและเฟสที่เป็นอสัณฐาน (amorphous) ปนกันอยู่ในเรื่องการลดจุดสุกตัวของเคลือบ SiO_2 เป็นองค์ประกอบที่มีจุดสุกตัวสูงมากที่อุณหภูมิประมาณ $1700\text{ }^{\circ}\text{C}$ จึงมีการใช้วัตถุดิบอื่นที่เป็นแหล่งให้ SiO_2 เช่น ใช้ ไดอะตอมไมต์ และบอแรกซ์ ในอัตราส่วน 50:50 เเผาที่อุณหภูมิ $950\text{-}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นส่วนผสมในใส่ลงในเคลือบแทน SiO_2 ซึ่งไดอะตอมไมต์ ช่วยทำให้เคลือบมีระยะเวลาในการสุกตัวที่ยาวขึ้น บอแรกซ์ยังช่วยทำให้เคลือบมีอุณหภูมิการหลอมที่ต่ำลง และสามารถปรับปรุงผิวของเคลือบให้ดีขึ้นด้วย นอกจากนี้เศษแก้วแล้วยังมีการนำ SiO_2 ในชนิดต่างๆ เช่น diatomaceous earth fused silica และ chalcedony มาใช้⁽⁴⁾

เมื่อนำเศษแก้วที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรมการผลิตแก้วหรือกระจกมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีพบว่าเศษแก้วทั้ง 2 ชนิดมีส่วนประกอบหลักคือ SiO_2 และมีส่วนประกอบเป็นออกไซด์อื่นๆอีกเช่น Na_2O CaO Al_2O_3 การใช้เศษแก้วสามารถช่วยลดอุณหภูมิในการหลอมได้ โดยเศษแก้วบอโรซิลิเกตนอกจากจะมี SiO_2 เป็นหลักแล้วยังมี B_2O_3 ในส่วนผสมซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวทำให้เกิดเนื้อแก้วและมีจุดหลอมตัวอยู่ที่ $410\text{ }^{\circ}\text{C}$ ⁽⁵⁾ จึงสามารถนำมาใช้ในเคลือบอุณหภูมิต่ำได้

ในงานวิจัยนี้จะใช้เศษแก้วโซดาไลม์จากโรงงานผลิตขวดแก้วที่ใช้กันทั่วไปเช่น ขวดกระปุก บานกระจก ฯลฯ เศษแก้วชนิดนี้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ 100% และเศษแก้วบอโรซิลิเกตจากโรงงานผลิตประเภทแก้ว PyrexTM และหลอดไฟชนิดพิเศษ โดยมีส่วนประกอบหลักคือ SiO_2 70-80% B_2O_3 7-13% Na_2O หรือ K_2O 4-8% Al_2O_3 2-7% ซึ่ง B_2O_3 นั้นช่วยทำให้แก้วมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ ทนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันได้ และมีความทนทานต่อสารเคมี

2.4. ความหมายของเคลือบ

เคลือบมีลักษณะเป็นชั้นฟิล์มบางของแก้วคลุมบริเวณผิวเนื้อดินเพื่อให้ผลิตภัณฑ์เซรามิกมีความสวยงาม นอกจากนี้ยังสามารถป้องกันการซึมผ่านของของเหลวเข้าสู่เนื้อผลิตภัณฑ์ ทำให้

สามารถทำความสะดวกง่าย ช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรงมากขึ้นและยังช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีความทนทานต่อการขัดสีเมื่อนำไปใช้งาน

โดยปกติแล้ววัตถุดิบที่จะนำมาทำเคลือบนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มหลักคือ (1) วัตถุดิบที่มีสมบัติเป็นต่างจำพวกแอลคาไลน์และแอลคาไลน์เอิร์ททำหน้าที่เป็นตัวช่วยลดอุณหภูมิในการเผา เป็นตัวช่วยหลอมละลาย เพิ่มการไหลของเคลือบ ตัวอย่างของวัตถุดิบประเภทนี้เช่น BaO Na₂O K₂O MgO และ CaO (2) วัตถุดิบที่มีสมบัติเป็นกลาง เช่น Al₂O₃ จะเป็นตัวช่วยปรับการไหลตัวของน้ำเคลือบ แต่ถ้าใส่มากเกินไปทำให้ได้เคลือบชนิดด้าน B₂O₃ ทำหน้าที่ช่วยเพิ่มความมันวาวให้กับเคลือบ และสามารถทำให้เคลือบเกิดการหลอมละลายได้ดีขึ้น และ (3) วัตถุดิบที่มีสมบัติเป็นกรด เช่น SiO₂ ซึ่งทำหน้าที่ช่วยลดการไหลของเคลือบ ลดสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน เพิ่มความแข็งแรงให้กับเคลือบ

เคลือบสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้เผา คือ เคลือบอุณหภูมิต่ำ (800-1100 °C) อุณหภูมิปานกลาง (ระหว่าง 1150-1200 °C) และอุณหภูมิสูง (1230-1300 °C)⁽⁶⁾

2.5. เคลือบอุณหภูมิต่ำ

เคลือบอุณหภูมิต่ำ (800-1100 °C) ส่วนใหญ่จะมีส่วนผสมคือตะกั่วหรือบอแรกซ์เป็นหลัก หรือทั้งสองตัวผสมกัน⁽⁶⁾ ซึ่งมีหน้าที่เป็นตัวหลอมละลายที่ดีแม้ในอุณหภูมิต่ำ ทำให้เมื่อเผาแล้วมีการไหลตัวของน้ำเคลือบมาก และมีอุณหภูมิในการสุกตัวต่ำอยู่ที่ประมาณ 800 °C หรือจะใช้ฟрит⁽⁷⁾ โดยที่ให้เป็นฟริตก่อนนั้นเพื่อลดความเป็นสารพิษที่อันตรายโดยการนำไปหลอมด้วยอุณหภูมิสูง แล้วจึงนำไปใช้ แต่จะต้องเสียค่าใช้จ่ายที่มากขึ้น อย่างไรก็ตามสารตะกั่วเมื่อถ้าอยู่ในเนื้อผลิตภัณฑ์แล้วเมื่อโดนความร้อน อาจทำให้สารตะกั่วแพร่ออกมาจากผลิตภัณฑ์ได้

การพัฒนาเคลือบอุณหภูมิต่ำและไร้สารตะกั่วจึงเป็นเป้าหมายที่สำคัญของงานวิจัยนี้ จากการวิจัยและทดสอบเคลือบอุณหภูมิต่ำโดยใช้วัสดุเหลือทิ้ง ข้อดีก็คือ วัตถุดิบที่นำมาใช้เป็นของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม เช่น ซีเมนต์เตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ต ซึ่งซีเมนต์ผ่านการเผามาแล้วในอุณหภูมิต่ำประมาณ 1200-1300 °C ฉะนั้นเมื่อนำมาใช้เป็นส่วนผสมในเคลือบ ก็จะทำให้กระบวนการเผาใหม่ลดลงไปได้จากเดิม ช่วยทำให้ใช้อุณหภูมิในการเผาลดลงได้

2.6. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Tkachev และคณะ⁽⁸⁾ มีการศึกษาเคลือบใสเพื่อการตกแต่ง ด้วยทราย บอแรกซ์ แร่เพกมาไทต์ ซีเมนต์ และ แคลเซียมบอเรต เมื่อใช้ แคลเซียมบอเรต ในปริมาณน้อยที่สุดคือ 50% เคลือบสามารถเผาได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1000 °C ได้เคลือบที่มีลักษณะมันวาวดี เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิ

900 °C จะได้เคลือบที่มีลักษณะเป็นฟองอากาศขนาดเล็กบนบริเวณผิว และถ้าทำการบด วัสดุดิบให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นก็สามารถลดอุณหภูมิการเผาลงได้เหลือประมาณ 900 °C

Resteiro และคณะ⁽⁹⁾ ได้ทำการวิเคราะห์ glass ceramics ที่ใช้พริตด้วยเครื่อง Heating stage microscope โดยทำการอัดผง glass-ceramics ขนาด 3x3x3 มิลลิเมตรจากนั้นนำไปเข้า เครื่อง Heating stage เริ่มให้ความร้อนจากอุณหภูมิห้องไปจนถึง 1400 °C ด้วยอัตราความร้อน 10 °C/นาที จากนั้นดูการเปลี่ยนแปลงของผง glass-ceramics ในแต่ละอุณหภูมิด้วยกล้องจุลทรรศน์ จึงสามารถบอก Softening point Sintering temperature ball point half ball point และ Flow point ได้ และทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Dilatometer เพื่อศึกษาการเกิดผลึกของ ceramic-glass

Shteinberg และคณะ⁽¹⁰⁾ ศึกษาเคลือบปอร์ซเลนโดยใช้ SiO₂ ชนิดต่างๆ เช่น ควอตซ์ ฟลินท์ ไดอะตอมไมต์ และ Si-stoff แทนเฟลด์สปาร์เคลือบบนผลิตภัณฑ์ปอร์ซเลน พบว่า ไดอะตอมไมต์ช่วยให้เคลือบมีลักษณะมันวาว สามารถปกปิดผิวเนื้อดินได้ดี

Salakhov และคณะ⁽¹¹⁾ ศึกษาเคลือบโดยใช้ไดอะตอมไมต์และบอแรกซ์ โดยมีอัตราส่วน 60:40 เผาที่อุณหภูมิ 900-950 °C และ อัตราส่วน 50:50 เผาที่อุณหภูมิ 950-1000 °C ใช้เคลือบ บนวัสดุโครงสร้างประเภทเซรามิกพบว่าเคลือบที่ได้มันเงา และสามารถประหยัดพลังงานในการเผาได้

Ferreira และคณะ⁽¹²⁾ ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้ซีเ็ก้าจากเตาเผาขยะปริมาณ 50% ใสแทน SiO₂ ในกระเบื้อง โดยให้ค่าความดัดโค้งที่ดีกว่าค่ามาตรฐาน

Gerasimov และคณะ⁽¹³⁾ ได้ตีพิมพ์บทความเกี่ยวกับเคลือบอุณหภูมิต่ำชนิดเคลือบ บอโรซิลิเกตสำหรับการใช้งานเฉพาะด้านของวัสดุก่อสร้างและได้รวบรวมสูตรเคลือบอุณหภูมิที่ใช้ เผา ลักษณะการใช้งานและอื่นๆ

Khizanishvili และคณะ⁽¹⁴⁾ ได้ศึกษาโดยใช้ไดอะตอมไมต์แทน SiO₂ และใช้เพอร์ไลต์แทน เฟลด์สปาร์ในสูตรเคลือบ ใช้เคลือบสุขภัณฑ์ประเภทเซมิปอร์ซเลนเผาที่อุณหภูมิ 1140-1200 °C ผลคือได้เคลือบมีลักษณะที่บดแสง เรียบและไม่มีข้อบกพร่องใดๆ

Yalçın และคณะ⁽¹⁵⁾ ได้ทำการศึกษาโดยใช้ของเสียจากบ่อขยะแทน Al₂O₃ เคลือบบน ผลิตภัณฑ์เช่น กระเบื้อง ปอร์ซเลน สุขภัณฑ์ โดยอุณหภูมิที่ใช้ต่างกันไป ผลที่ได้คือเคลือบสุกตัว ลักษณะมันเงา สามารถให้สีได้มากมายเช่น ครีม เหลือง เขียว แดง น้ำตาล ดำ เป็นต้น

Bogac Poyraz และคณะ⁽¹⁶⁾ ทำการศึกษาโดยใช้ฟิมิสแทนโซดาเฟลด์สปาร์ในเคลือบใส ใช้เคลือบบนกระเบื้องหลังคา โดยแทนที่เฟลด์สปาร์ตั้งแต่ 25 50 75 และ 100% วิเคราะห์ผลการ หลอมด้วย Heating microscope ผลที่ได้คือเคลือบเริ่มมีการหลอมที่อุณหภูมิ 879-881 °C

วิเคราะห์ด้วย Scanning electron microscope เคลือบมีความมันเงา และเมื่อนำไปวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบทางเคมีของเคลือบแต่ละจุดพบปริมาณ Al_2O_3 และ SiO_2 มากที่สุด



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะทำการพัฒนาเคลือบอนุกรมิต่ำโดยใช้วัสดุเหลือทิ้งเช่น ชี้้เถ้าจากเตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ต เศษแก้วบอโรซิลิเกตและเศษแก้วโซดาไลม์ สามารถนำวัสดุเหลือทิ้งที่ไม่มีประโยชน์ นำกลับมาใช้งานใหม่ โดยวัตถุดิบที่นำมาใช้ จะมีสมบัติที่ต่างกันไปเพื่อลดอนุกรมิต่ำในการเผาเคลือบให้ต่ำลง

3.1. สารเคมีและวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

ในงานวิจัยนี้จะเน้นการใช้วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเป็นส่วนประกอบหลักในการทำเคลือบอนุกรมิต่ำ วัตถุดิบที่นำมาใช้มีดังนี้

- 3.1.1 ชี้้เถ้าจากเตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ต จากโรงงานเตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ต
- 3.1.2 เศษแก้วบอโรซิลิเกต จากโรงงานกระจกไทยอาซาฮี
- 3.1.3 เศษแก้วโซดาไลม์ จากโรงงานบางกอกกล๊าส
- 3.1.4 บอแรกซ์ ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) Commercial Grade (U.S. Borax Inc.)
- 3.1.5 Sodium tripoly phosphate (STPP)
- 3.1.6 Sodium Carboxy Methyl Cellulose (CMC)
- 3.1.7 นิกเกิลออกไซด์ เฟอริกออกไซด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ แมงกานีสออกไซด์ คอปเปอร์ออกไซด์และโคบอลต์ออกไซด์

3.2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 ปีกเกอร์
- 3.2.2 ตะแกรงร่อน (Sieve) ขนาด 50 100 140 230 และ 325 เมช
- 3.2.3 ถ้วยฟอรัคัพหมายเลข 2
- 3.2.4 ภาชนะอะลูมิเนียมสำหรับหาความหนาแน่น
- 3.2.5 หม้ออบ Al_2O_3 ขนาด 1 กิโลกรัม

3.3. ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ

- 3.3.1. เตรียมเศษแก้วบอโรซิลิเกต และเศษแก้วโซดาไลม์

นำเศษแก้วที่เป็นของเหลือทิ้งจากโรงงาน มาแยกเศษกระดาษ โลหะ หรือของเจือปนออก แขน้ำเพื่อชำระล้างสิ่งสกปรก นำไปบดด้วยเครื่อง Vibratory mill ที่ทำด้วยถังสแตนคาร์ไบด์ กรอง

เพื่อคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อนขนาด 100 เมช เพื่อเป็นการช่วยลดระยะเวลาในการบดเคลือบลง ส่วนเศษแก้วที่มีขนาดใหญ่กว่า 100 เมช จะนำกลับไปบดใหม่อีกครั้ง จากนั้นนำไปใช้เป็น ส่วนผสมของเคลือบ

3.3.2. เตรียมซี้ถ้าเตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ต

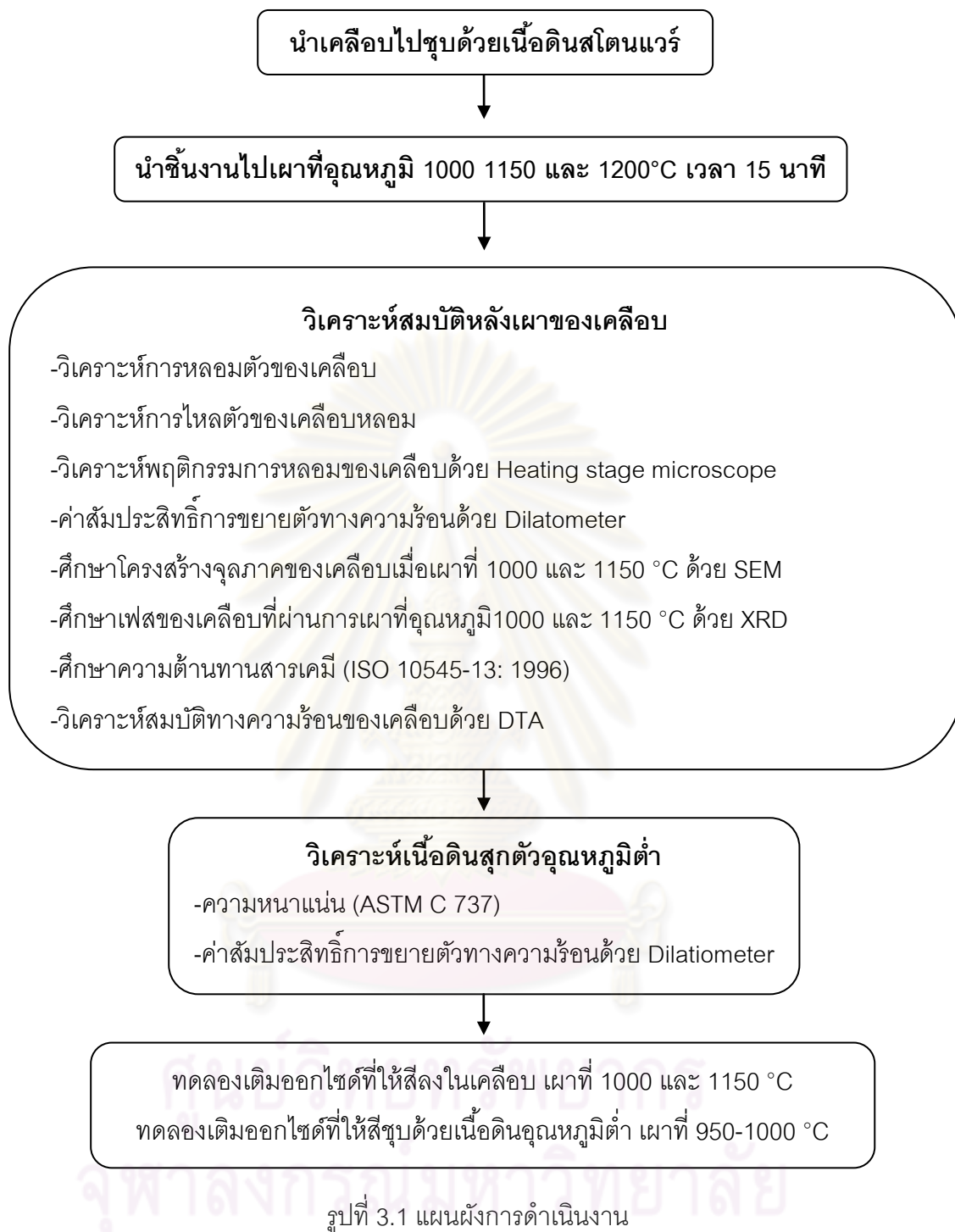
นำซี้ถ้าเตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ตไปอบที่อุณหภูมิ 80 °C จากนั้นจึงนำมาเป็นส่วนผสมในเคลือบ



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4. แผนผังการทดลอง





3.5. ขั้นตอนการวิเคราะห์วัตถุดิบ

3.5.1. เศษแก้วบอโรซิลิเกตและเศษแก้วโซดาไลม์

3.5.1.1. วิเคราะห์ขนาดอนุภาคของเศษแก้วแต่ละชนิดด้วยตะแกรงร่อนขนาด 50 100 140 230 325 เมช ซึ่งนำหนักตะแกรงร่อนแต่ละอันที่สะอาดและแห้งสนิท เทตัวอย่าง ปริมาณ 150 กรัม ในตะแกรงร่อนบนสุด โดยเรียงลำดับตะแกรงหมายเลขน้อยกว่าไว้ด้านบน

นำเข้าเครื่องสั่นเป็นเวลา 10 นาที นำออกมาซึ่งน้ำหนักตะแกรงร้อนแต่ละอันอีกครั้ง คำนวณ น้ำหนักตัวอย่างที่ค้างอยู่บนตะแกรงแต่ละอันเป็น %

$$\% \text{ ของสารตัวอย่าง} = \frac{\text{น้ำหนักที่ค้างตะแกรง}}{\text{น้ำหนักรวม}} \times 100$$

3.5.1.2. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเศษแก้วด้วย เครื่อง X-ray fluorescence XRF (S8 Tiger, Bruker AXS)

3.5.2. ซึ้แก้วเตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ต

3.5.2.1. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของซึ้แก้วเตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ต เตรียมตัวอย่างโดยนำซึ้แก้วเตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ตไปเผาที่อุณหภูมิ 1050 °C จากนั้นนำไปอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร ก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วย เครื่อง X-ray fluorescence

3.5.2.2. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของซึ้แก้วเตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ต ด้วยเครื่อง X-ray Diffraction XRD (D8, Bruker) โดยใช้ Cu K α radiation ที่ scanning speed 2.4 องศาต่อ นาที ในช่วงมุม 2 θ ตั้งแต่ 10-80 องศา

3.5.2.3. ศึกษาโครงสร้างของซึ้แก้วเตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ตด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope SEM (JSM-6480LV, JEOL) นำซึ้แก้วเตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ตไปทำให้เกิดการกระจายตัวโดยมีน้ำเป็นตัวช่วยกระจายตัว จากนั้นนำมาหยดลงบนแผ่นกระจก นำไปศึกษาโครงสร้างของซึ้แก้วเตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ต เพื่อตรวจสอบรูปร่างและการกระจายของอนุภาค วัสดุดิบ

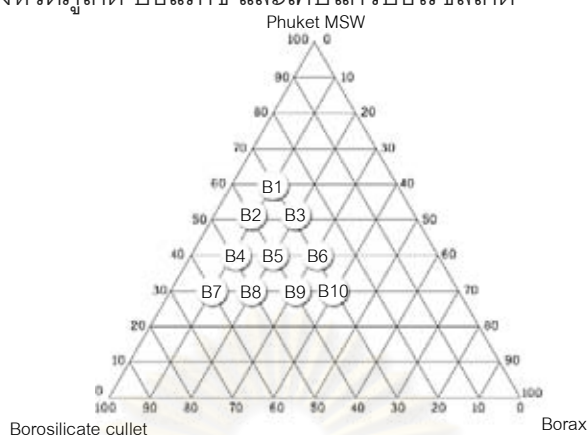
3.5.2.4. วิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาควัดด้วยเทคนิค Laser light scattering ด้วยเครื่อง Particle size analyzer PSD (Mastersizer 2000 Ver 2.19, Malvern)

3.5.2.5. วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วย Differential thermal analysis DTA (PERKIN ELMER, TAC7) เพื่อศึกษาสมบัติทางความร้อนของวัสดุดิบ นำซึ้แก้วเตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ตหลังจากอบแห้งใส่ลงใน Pt crucibles โดยใช้ Al₂O₃ เป็นตัวอ้างอิง จากนั้นให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 50 °C คงอุณหภูมิไว้ 5 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปจนถึง 1000 °C โดยให้ความร้อนที่ 20 °C ต่อนาที

3.6. การออกแบบการทดลอง

ในงานวิจัยนี้จะมีวัสดุดิบคือ ซึ้แก้วจากเตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ต บอแรกซ์ เศษแก้ว โดยจะแยกการทดลองออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ใช้เศษแก้วบอโรซิลิเกต และส่วนที่ใช้เศษแก้วโซดาไลม์

3.6.1. คำนวณสูตรเคลือบด้วยตารางสามเหลี่ยม โดยมีวัตถุประสงค์คือชี้เป้าเตาเผาขยะ
จังหวัดภูเก็ต บอแรกซ์ และเศษแก้วบอโรซิลิเกต

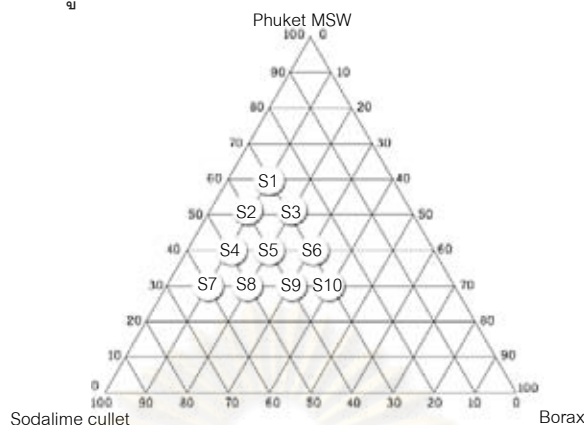


รูปที่ 3.2 ส่วนผสมของเคลือบที่ใช้ ชี้เป้าเตาเผาขยะ บอแรกซ์ และเศษแก้วบอโรซิลิเกต

ตารางที่ 3.1 ตารางส่วนผสมของเคลือบเมื่อเทียบเป็นปริมาณออกไซด์ (%)

ออกไซด์	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10
Na ₂ O	9.43	10.37	9.18	6.57	7.75	8.94	6.32	7.51	8.69	9.88
K ₂ O	3.99	3.33	3.36	2.81	2.77	2.74	2.18	2.15	2.11	2.08
MgO	0.55	0.46	0.46	0.37	0.37	0.37	0.28	0.28	0.28	0.28
Al ₂ O ₃	1.14	0.98	1.19	1.66	1.45	1.24	1.71	1.50	1.29	1.09
B ₂ O ₃	11.92	15.57	12.89	8.50	11.18	13.86	9.47	12.15	14.83	17.51
SiO ₂	9.32	9.06	16.85	39.95	32.16	24.38	47.48	39.69	31.91	24.12
P ₂ O ₅	0.58	0.48	0.48	0.38	0.38	0.38	0.29	0.29	0.29	0.29
SO ₃	4.22	3.52	3.52	2.81	2.81	2.81	2.11	2.11	2.11	2.11
Cl	15.30	12.75	12.76	10.23	10.22	10.21	7.68	7.68	7.67	7.67
CaO	27.56	22.97	22.97	18.38	18.37	18.37	13.79	13.78	13.78	13.78
TiO ₂	0.32	0.26	0.27	0.22	0.22	0.22	0.17	0.17	0.17	0.17
Fe ₂ O ₃	0.39	0.32	0.33	0.28	0.27	0.27	0.22	0.21	0.21	0.20
ZnO	0.31	0.26	0.26	0.21	0.21	0.21	0.16	0.16	0.16	0.16
Rb ₂ O	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
SnO ₂	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03
PbO	0.10	0.09	0.09	0.07	0.07	0.07	0.05	0.05	0.05	0.05
LOI	14.70	19.43	15.23	7.38	11.57	15.77	7.91	12.10	16.30	20.49
Total	99.93	99.93	99.93	99.93	99.93	99.93	99.93	99.94	99.94	99.95

3.6.2. คำนวณสูตรเคลือบด้วยตารางสามเหลี่ยม โดยมีวัตถุประสงค์คือซี้แก้วเตาเผาขยะ
จังหวัดภูเก็ต บอแรกซ์ และเศษแก้วโซดาไลม์



รูปที่ 3.3 ส่วนผสมของเคลือบที่ใช้ ซี้แก้วเตาเผาขยะ บอแรกซ์ และเศษแก้วโซดาไลม์

ตารางที่ 3.2 ตารางส่วนผสมของเคลือบเมื่อเทียบเป็นปริมาณออกไซด์ (%)

ออกไซด์	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
Na ₂ O	11.13	11.93	11.61	11.43	11.75	12.08	11.90	12.23	12.55	12.88
K ₂ O	2.09	1.75	1.76	1.45	1.44	1.42	1.11	1.10	1.09	1.08
MgO	1.01	0.88	1.13	1.74	1.50	1.25	1.86	1.62	1.37	1.12
Al ₂ O ₃	1.33	1.13	1.29	1.57	1.41	1.25	1.53	1.37	1.21	1.06
B ₂ O ₃	10.95	14.60	10.95	3.65	7.30	10.95	3.65	7.30	10.95	14.60
SiO ₂	9.99	9.52	16.71	37.79	30.60	23.42	44.50	37.32	30.14	22.95
P ₂ O ₅	0.70	0.59	0.59	0.47	0.47	0.47	0.35	0.35	0.35	0.35
SO ₃	3.37	2.81	2.83	2.32	2.30	2.29	1.78	1.76	1.75	1.73
Cl	9.13	7.61	7.61	6.09	6.09	6.09	4.58	4.57	4.57	4.57
CaO	12.41	10.52	11.58	12.87	11.81	10.75	12.04	10.98	9.92	8.86
TiO ₂	0.16	0.14	0.14	0.11	0.11	0.11	0.08	0.08	0.08	0.08
Fe ₂ O ₃	0.32	0.27	0.27	0.22	0.22	0.22	0.16	0.16	0.16	0.16
ZnO	0.08	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04
Rb ₂ O	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
SnO ₂	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
PbO	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
LOI	37.13	38.03	33.31	20.03	24.76	29.48	16.21	20.93	25.65	30.38
Total	99.91	99.94	99.93	99.95	99.90	99.92	99.88	99.90	99.92	99.94

3.7. วิธีการเตรียมเคลือบ

ซึ่งวัตถุดิบ โดยซึ่งตามอัตราส่วนผสมที่ได้จากการคำนวณจากตารางสามเหลี่ยม ใช้ น้ำ 70% โดยน้ำหนัก นำไปบดด้วยเครื่องบดความเร็วสูงเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นกรองด้วยตะแกรงขนาด 200 เมช จากนั้นนำไปวิเคราะห์สมบัติเคลือบ

3.8. วิเคราะห์สมบัติเคลือบ

3.8.1. วิเคราะห์ความหนาแน่นของน้ำเคลือบ

ซึ่งน้ำหนักภาชนะที่รู้ปริมาตร จากนั้นบันทึกน้ำหนักภาชนะเป็น W (กรัม) ใส่ตัวอย่างลงในภาชนะ บันทึกปริมาตรตัวอย่างเป็น V (ลูกบาศก์เซนติเมตร) ซึ่งน้ำหนักและบันทึกเป็น Ws (กรัม) คำนวณตามสูตร

$$\text{ความหนาแน่นของวัตถุ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)} = \frac{(W_s - W)}{V}$$

เมื่อ

Ws = น้ำหนักของตัวอย่างและภาชนะ (กรัม)

W = น้ำหนักของภาชนะที่รู้ปริมาตร (กรัม)

V = ปริมาตรของตัวอย่างในภาชนะขนาด 100 มิลลิลิตร (ลูกบาศก์เซนติเมตร)



รูปที่ 3.4 ถ้วยวัดความหนาแน่น

3.8.2. วิเคราะห์กากค้ำตะแกรงของเคลือบ

ซึ่งเคลือบ 100 กรัม (W1) นำไปกรองผ่านบนตะแกรงขนาด 325 เมช ใช้น้ำล้างตะแกรงจนกระทั่งสะอาด นำตะแกรงที่มีกากค้ำไปอบ จากนั้นนำออกมาชั่งน้ำหนัก (R1) คำนวณเป็น %

$$\% \text{ Residue on 325 Mesh} = \frac{R1}{A} \times 100$$

เมื่อ

R1 = น้ำหนักกากบนค้ำตะแกรง 325 เมช (กรัม)

A = (W1x100) x (%Dry)

W1 = น้ำหนักของน้ำเคลือบที่ใช้ทดสอบ (กรัม)

3.8.3. วิเคราะห์อัตราการไหลของเคลือบ

อัตราการไหลของเคลือบด้วย ถ้วยวัดอัตราการไหลตัวของเคลือบด้วยถ้วยฟอร์ดหมายเลข 2 ใช้ถ้วยอะลูมิเนียมปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่ก้นถ้วยมีทางออกเหมือนกรวย ถ้วยวัดความหนืดมีหลายขนาดขึ้นอยู่กับความหนืดของสารที่จะใช้ทดสอบ โดยวางเครื่องมือให้ได้ระดับ ใช้นิ้วปิด ท่อทางออกด้านล่างของถ้วย เติมสารลงไปจนล้น แล้วใช้พายปาดส่วนที่ล้นออก เปิดปลายท่อที่ใช้นิ้วปิดไว้ จับเวลาจนกระทั่งสารไหลออกจนหมด บันทึกเวลาการไหลเป็นวินาที



รูปที่ 3.5 เครื่องมือวัดอัตราการไหลของเคลือบ

3.9. เเผเคลือบที่อุณหภูมิต่างๆกัน

นำชิ้นงานที่ชุบเคลือบไปเผาด้วยเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ กันคือ 1000 1150 และ 1200 °C โดยใช้อัตราการให้ความร้อน 3 °C ต่อนาที และคงไว้ที่อุณหภูมิสูงสุดเป็นเวลา 15 นาที

3.10. วิเคราะห์เคลือบหลังเผา

3.10.1. วิเคราะห์การหลอมตัวของเคลือบ

นำผงเคลือบที่อบแห้งอัดขึ้นรูปเป็นทรงกรวย นำไปวางบนแผ่นกระเบื้องสโตนแวร์ เผาที่อุณหภูมิ 1000 1150 และ 1200 °C คงไว้ที่อุณหภูมิสูงสุดเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นดูการหลอมตัวของเคลือบ

3.10.2. วิเคราะห์การไหลตัวของเคลือบหลอม

นำผงเคลือบที่อบแห้งอัดขึ้นรูปเป็นทรงเม็ดกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร โดยใช้เครื่องอัดไฮดรอลิก (NT-100H, Uniaxial pressing) จากนั้นนำไปวางบนแท่นทดสอบที่มีความเอียง 45 องศา เผาที่ 1000 1150 และ 1200 °C คงอุณหภูมิสูงสุดไว้เป็นเวลา 15 นาที นำออกมาวัดระยะทางในการไหล



รูปที่ 3.6 แท่นทดสอบการไหลตัวของเคลือบ

3.10.3. วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของเคลือบ

นำผงเคลือบหลังอบแห้ง ชั่งน้ำหนักประมาณ 30 มิลลิกรัม ใส่ใน Pt crucibles โดยใช้ Al_2O_3 เป็นตัวอ้างอิง จากนั้นให้ความร้อนจากอุณหภูมิห้องไปจนถึง 1000 °C (ให้ความร้อน 20 °C ต่อนาที) ด้วยเครื่อง Differential thermal analysis (DTA)

3.10.4. วิเคราะห์พฤติกรรมของการหลอมของเคลือบ

การวิเคราะห์พฤติกรรมของการหลอมของเคลือบทำได้โดยใช้เครื่อง Heating stage ที่ต่อกับ Optical Microscope โดยมีขดลวดนำความร้อนชนิด Pt-Rd ที่สามารถให้ความร้อนได้ถึง 1400 °C โดยจะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนด้วย AC power supply ใช้อัตราความร้อนประมาณ 10 °C/นาที โดยวัดอุณหภูมิจาก Thermocouple จากนั้นสังเกตพฤติกรรมของการหลอมของเคลือบแต่ละสูตรด้วย optical microscope และบันทึกภาพการเกิดปฏิกิริยาของเคลือบ



รูปที่ 3.7 อุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์พฤติกรรมการหลอมตัวของเคลือบ (Heating stage microscope)

นำผงเคลือบที่อบแล้ว ปริมาณ 3 กรัม วางลงบนแผ่น Al_2O_3 ที่วางอยู่บริเวณภายใน Heating stage โดยเริ่มให้ความร้อนจากอุณหภูมิห้อง จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราความร้อนประมาณ $10\text{ }^{\circ}C$ ต่อนาทีจนเห็นความเปลี่ยนแปลงของเคลือบไปจนถึงจุดหลอมตัวของเคลือบ จากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับทดสอบการหลอมตัวของเคลือบ

3.10.5. วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบ

นำผงเคลือบไปอัด และเผาที่อุณหภูมิ $1000\text{ }^{\circ}C$ คงอุณหภูมิสูงสุดเป็นเวลา 15 นาที ตัดให้ได้ขนาดประมาณ $25 \times 5 \times 5$ มิลลิเมตร นำเข้าเครื่องวิเคราะห์โดยให้อัตราความร้อน $10\text{ }^{\circ}C$ ต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ $700\text{ }^{\circ}C$ โดยเปรียบเทียบกับวัสดุมาตรฐานที่ทำจาก Al_2O_3 จากนั้นนำไปวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิ $50-300\text{ }^{\circ}C$ $50-500\text{ }^{\circ}C$ และ $300-500\text{ }^{\circ}C$ ด้วยเครื่อง Dilatometer (402C, Netzsch)

คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนได้จากสมการนี้

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot \frac{1}{\Delta T}$$

เมื่อ

α = สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน

ΔT = ช่วงอุณหภูมิที่น่าสนใจ

L_0 = ความยาวของชิ้นงานที่อุณหภูมิห้อง

L = ความยาวของชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงสุด

3.10.6. วิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของเคลือบ

นำเคลือบหลังเผาที่ 1000 และ 1150 °C ศึกษาโครงสร้างจุลภาค เพื่อดูลักษณะผิวของเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ตัดชิ้นงานขัดด้วยเครื่องขัด Grinder & Polisher machine (Phoenix 4000, BUEHLER) จากนั้นเคลือบทอง นำไปวิเคราะห์ด้วย EDS

3.10.7. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบ

เตรียมตัวอย่างโดยตัดชิ้นเคลือบหลังจากเผาที่อุณหภูมิ 1000 และ 1150 °C จากนั้นนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส ด้วยเครื่อง X-ray Diffraction โดยใช้ Cu K α radiation ที่ scanning speed 2.4 องศาต่อนาที ในช่วงมุม 2θ ตั้งแต่ 10-80 องศา

3.10.8. ศึกษาความต้านทานสารเคมี (ISO 10545-13: 1996)

ทดสอบความทนต่อสารเคมีด้วย สารละลาย HCl 3% (โดยปริมาตร) และ สารละลาย NaOH 30 กรัม/ลิตร แช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 4 วัน โดยทุกๆ วันควรแกว่งเบาๆ และสังเกตระดับให้ได้ตามที่กำหนด และในวันที่ 2 เปลี่ยนสารละลายใหม่ เมื่อครบจำนวนวันตามที่กำหนด นำชิ้นงานไปล้างทำความสะอาดด้วยน้ำ และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ (110 \pm 5°C) การพิจารณาผล นำชิ้นเคลือบผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000 °C ที่ผ่านการอบแล้ว ชีดด้วยดินสอพอบนผิว บริเวณที่ทดสอบ เช็ดออกด้วยผ้าเปียก และทำการพิจารณาผลหลังทดสอบด้วยสารเคมีประเภทกรดและด่าง

3.10.9. ศึกษาสมบัติทางความร้อนของเคลือบด้วย Differential thermal analysis

เพื่อศึกษาสมบัติทางความร้อนของเคลือบ โดยนำผงเคลือบหลังจากอบแห้งใส่ลงใน Pt crucibles โดยใช้ Al $_2$ O $_3$ เป็นตัวอ้างอิง จากนั้นให้ความร้อนจนถึง 1000 °C โดยให้ความร้อนที่ 20 °C ต่อนาที

3.11. วิเคราะห์สมบัติของเนื้อดินอุณหภูมิต่ำสูตร RCC-1-15-G1 และ LT-LPW-G1

เนื้อดินอุณหภูมิต่ำที่นำมาทดลองกับสูตรเคลือบได้มีการคิดค้นและพัฒนาจากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย เป็นเนื้อดินอุณหภูมิต่ำที่มีช่วงอุณหภูมิในสุดตัวที่ 800-1150 °C เนื้อดินอุณหภูมิต่ำสูตร RCC-1-15-G1 จะมีสีน้ำตาล และสูตร LT-LPW-G1 จะมีสีขาว

3.11.1. วิเคราะห์สมบัติของเนื้อดินอุณหภูมิต่ำ

วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของเนื้อดินตามมาตรฐานเช่น ASTM C 737 โดยอบชิ้นงานให้แห้ง บันทึกค่าเป็น W_1 (กรัม) จากนั้นนำชิ้นงานไปต้มในน้ำเดือดนาน 5 ชั่วโมง และแช่ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักชิ้นงานในน้ำ บันทึกเป็นน้ำหนักแทนที่น้ำ W_2 (กรัม) จากนั้นเช็ดผิวชิ้นงานด้วยผ้าเปียกหมาดๆ ชั่งน้ำหนัก บันทึกเป็นน้ำหนักอิมมersion W_3 (กรัม)

$$\text{ก. Bulk density} = \frac{W_1}{(W_3 - W_2)}$$

$$\text{ข. Apparent density} = \frac{W_1}{(W_1 - W_2)}$$

$$\text{ค. \%Apparent porosity} = \frac{W_3 - W_1}{W_3 - W_2} \times 100$$

$$\text{ง. \%Water absorption} = \frac{W_3 - W_1}{W_1} \times 100$$

เมื่อ

W_1 = น้ำหนักของชิ้นงานแห้งในอากาศ (กรัม)

W_2 = น้ำหนักของชิ้นงานเมื่อชั่งแบบแขวนในน้ำ (กรัม)

W_3 = น้ำหนักของชิ้นงานที่อิ่มตัวด้วยน้ำและซับน้ำที่ผิวออกไป (กรัม)

3.11.2. วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเนื้อดินอุณหภูมิต่ำ

นำเนื้อดินไปเผาที่ 1000 °C คงอุณหภูมิสูงสุดเป็นเวลา 15 นาที ตัดให้มีขนาด 25x5x5 มิลลิเมตร นำเข้าเครื่องวิเคราะห์โดยใช้อัตราความร้อน 10 °C ต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 1000 °C โดยเปรียบเทียบกับวัสดุมาตรฐานที่ทำจาก Al_2O_3 จากนั้นนำไปวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิ 50-300 °C 50-500 °C และ 300-500 °C ด้วยเครื่อง Dilatometer

3.12. ทดลองเคลือบบนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำ

นำเนื้อดินอุณหภูมิต่ำทั้ง 2 สูตรคือ RCC-1-15-G1 และ LT-LPW1-G1 ชุบเคลือบ จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1000 และ 1150 °C คงไว้ที่อุณหภูมิสูงสุดเป็นเวลา 15 นาที

3.13. ทดลองเติมออกไซด์เพื่อให้สีในเคลือบและเผาที่ 950 และ 1000 °C

เมื่อได้สูตรที่สุกตัวและมันเงาแล้ว นำ นิกเกิลออกไซด์ เฟอริกออกไซด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ แมงกานีสออกไซด์ คอปเปอร์ออกไซด์และโคบอลต์ออกไซด์ ใส่ลงในสูตรเคลือบ จากนั้นนำชุบเคลือบบนเนื้อดินทั้ง 3 ชนิดคือ เนื้อดินสโตนแวร์ และเนื้อดินอุณหภูมิต่ำทั้ง 2 สูตร (RCC-1-15-G1 และ LT-LPW1-G1) แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 950 และ 1000 °C คงไว้ที่อุณหภูมิสูงสุดเป็นเวลา 15 นาที

บทที่ 4
ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

4.1. ผลการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุดิบ

4.1.1. เศษแก้วบอโรซิลิเกตและเศษแก้วโซดาไลม์

4.1.1.1. ผลการวิเคราะห์ขนาดและอนุภาคของเศษแก้วโดยตะแกรงร่อน

เมื่อนำเศษแก้วบอโรซิลิเกตและเศษแก้วโซดาไลม์ไปวิเคราะห์ขนาดและอนุภาคโดยตะแกรงร่อน แล้ววิเคราะห์กากต่างตะแกรงพบว่าค่าขนาดและอนุภาคของเศษแก้วบอโรซิลิเกตและเศษแก้วโซดาไลม์ช่วงที่มีปริมาณมากที่สุดอยู่ในช่วง >230 เมช และ >140 เมช คือ 41.75 และ 56.86 % ตามลำดับ โดยเศษแก้วโซดาไลม์จะมีช่วงที่ละเอียดมากกว่าเศษแก้วบอโรซิลิเกต

ตารางที่ 4.1 ขนาดและอนุภาคของเศษแก้วบอโรซิลิเกตและเศษแก้วโซดาไลม์

ขนาดตะแกรงร่อน (เมช)	เศษแก้วบอโรซิลิเกต (%)	เศษแก้วโซดาไลม์ (%)
>50	36.00	35.81
>100	33.58	35.38
>140	35.39	56.86
>230	41.75	18.96
>325	2.43	1.57
>325	0.56	1.42

4.1.1.2. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเศษแก้วเมื่อเทียบกับทรายแก้วด้วยเครื่อง X-ray fluorescence

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเศษแก้วเมื่อเทียบกับทรายแก้วระยองแสดงให้เห็นองค์ประกอบทางเคมีของเศษแก้วมี SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลัก โดยเศษแก้วทั้ง 2 ชนิดมีปริมาณ SiO_2 สูงมากกว่า 70 % ซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดเนื้อแก้วในผลิตภัณฑ์ เศษแก้วบอโรซิลิเกตมี B_2O_3 ทำหน้าที่เป็นตัวช่วยหลอมละลายและจะช่วยทำให้กลายเป็นเนื้อแก้วได้ง่าย ทำให้เกิดความมันวาว เศษแก้วโซดาไลม์มีปริมาณของ Na_2O CaO และ MgO (รวมกันประมาณ 25%) ที่

มากกว่าเศษแก้วบอโรซิลิเกต (รวมกันประมาณ 5%) ซึ่งออกไซด์เหล่านี้ทำหน้าที่เป็นฟลักซ์คือ ช่วยลดอุณหภูมิในการหลอม จึงทำให้เมื่อนำไปเผาแล้วสูตรเคลือบที่มีเศษแก้วโซดาไลม์จะเริ่มมีการหลอมที่อุณหภูมิต่ำกว่า รวมทั้งเกิดการหลอมได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าเศษแก้วบอโรซิลิเกต

ตารางที่ 4.2 ผลองค์ประกอบทางเคมีของเศษแก้วบอโรซิลิเกตและเศษแก้วโซดาไลม์เมื่อเทียบกับทรายแก้วจังหวัดระยอง

ออกไซด์	ทรายแก้วระยอง (%โดยน้ำหนัก)	เศษแก้วโซดาไลม์ (%โดยน้ำหนัก)	เศษแก้วบอโรซิลิเกต (%โดยน้ำหนัก)
SiO ₂	99.70	71.83	77.85
K ₂ O	0.03	0.12	0.34
Na ₂ O	0.05	13.00	4.40
CaO	0.03	10.61	0.01
MgO	0.06	2.47	-
PbO	-	0.02	-
B ₂ O ₃	-	-	9.69
Al ₂ O ₃	0.09	1.57	2.07
Fe ₂ O ₃	0.02	-	0.04
Cl	-	0.02	0.06
WO ₃	-	-	0.09
ZrO ₂	-	-	0.05

4.1.2. ซีเมนต์เตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ต

4.1.2.1. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์เตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ตด้วยเครื่อง X-ray fluorescence

สิ่งที่ต้องคำนึงถึงเมื่อนำวัสดุเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ก็คือความสม่ำเสมอของวัตถุดิบทั้งองค์ประกอบทางเคมี ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค ฯลฯ ดังนั้นจึงต้องนำวัตถุดิบหลายๆ lot มาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF เนื่องจากซีเมนต์เตาเผาขยะเป็นขยะเหลือทิ้ง โดยในแต่ละ lot จะมีปริมาณของออกไซด์ที่ต่างกันไป ก่อนนำซีเมนต์เตาเผาขยะมาใช้ จะต้องมีการวิเคราะห์ปริมาณออกไซด์ของซีเมนต์เตาเผาขยะเพื่อดูความสม่ำเสมอของปริมาณออกไซด์ของในแต่ละ lot เพื่อเลือก lot ที่มีปริมาณออกไซด์ที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในสูตรเคลือบ โดยถ้ามีปริมาณ CaO น้อยกว่า

15% จะไม่นำมาใช้ในสูตรเคลือบ จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ของซีเมนต์เตาเผาขยะ จังหวัดภูเก็ตทั้ง 4 lot พบว่า ซีเมนต์เตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ตมีส่วนประกอบหลักคือ CaO มีหน้าที่เป็นฟลักซ์ คือตัวช่วยลดอุณหภูมิในการหลอม ทำให้เคลือบเกิดความแข็ง ทนต่อการขีดข่วน รองลงมาคือ K_2O และ Na_2O ซึ่งเป็นฟลักซ์⁽⁶⁾ เช่นเดียวกัน คือทำหน้าที่เป็นตัวช่วยลดอุณหภูมิในการเผาเคลือบ นอกจากนี้ยังมีออกไซด์อื่นๆปนอยู่ในปริมาณเล็กน้อยเช่น MgO มีหน้าที่ช่วยเพิ่มการไหลตัว Al_2O_3 ช่วยทำให้เคลือบสามารถเกาะกับเนื้อดินได้ดีขึ้น และมี SiO_2 ช่วยเพิ่มจุดหลอมละลาย ลดการไหลตัว และเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนต่อสารเคมี และถ้าใส่ในปริมาณมาก จะช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน ในเคลือบได้อีกด้วย โดยออกไซด์ที่กล่าวมาแล้ว ปกติเป็นส่วนประกอบในเคลือบที่ใช้กันโดยทั่วไป และในซีเมนต์เตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ต lot 4 พบว่ามีปริมาณ B_2O_3 อยู่ถึง 27.75% ในขณะที่ซีเมนต์เตาเผาขยะ lot อื่น ไม่มีอยู่เลย ซึ่ง B_2O_3 ช่วยทำหน้าที่เป็นตัวช่วยหลอมละลายในเคลือบ แต่องค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์ lot 4 มีความแตกต่างจาก lot อื่นมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะไม่ใช้ซีเมนต์ lot 4



ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

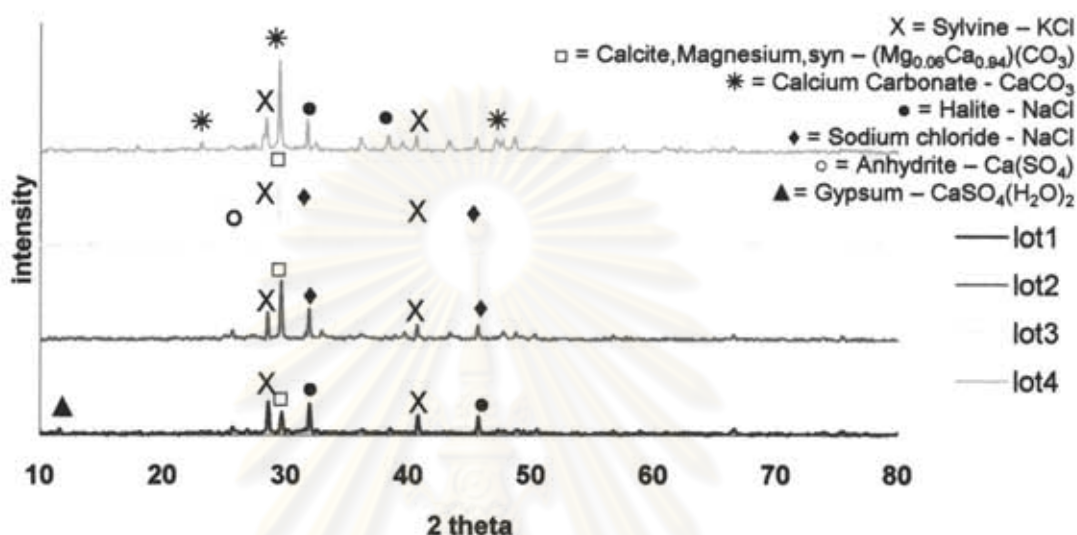
ตารางที่ 4.3 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์เตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ต 4 lot

ออกไซด์	MSW lot1 (%โดยน้ำหนัก)	MSW lot 2 (%โดยน้ำหนัก)	MSW lot 3 (%โดยน้ำหนัก)	MSW lot 4 (%โดยน้ำหนัก)
Na ₂ O	6.85	8.26	6.25	2.57
K ₂ O	6.59	3.47	4.49	1.64
MgO	0.92	1.27	1.18	0.47
Al ₂ O ₃	1.55	1.95	1.76	0.33
B ₂ O ₃	-	-	-	27.75
SiO ₂	2.55	4.68	4.51	1.04
P ₂ O ₅	0.96	1.17	1.28	0.21
SO ₃	7.03	5.58	4.6	2.41
Cl	25.49	15.21	15.28	7.57
CaO	45.93	18.92	31.26	17.65
TiO ₂	0.52	0.27	0.51	0.06
Fe ₂ O ₃	0.64	0.54	1.14	0.25
ZnO	0.52	0.14	0.27	0.16
Rb ₂ O	0.03	0.04	-	0.04
SrO	0.04	0.02	0.04	-
SnO ₂	0.1	0.05	0.07	0.02
PbO	0.17	0.04	0.11	0.04
LOI	-	38.27	-	37.81

4.1.2.2. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของ ซีเมนต์เตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ต

จากรูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของซีเมนต์เตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ตทั้ง 4 lot พบว่าซีเมนต์เตาเผาขยะนั้นประกอบด้วย Calcium carbonate, CaCO₃ (JCPDS 01-085-1108), Sylvite, KCl (JCPDS 00-041-1476), Halite, NaCl (JCPDS 00-005-0628), Calcium chloride hydroxide hydrate, CaCl₂·Ca(OH)₂·H₂O (JCPDS 00-002-1099), Gypsum, CaSO₄(H₂O)₂ (JCPDS 01-076-1764), Anhydrite, CaSO₄ (JCPDS 01-086-2270), Sodium chloride, NaCl (JCPDS 01-078-0757), Quartz, SiO₂ (JCPDS 01-079-1915), Kaolinite, Al₂Si₂O₅(OH)₄ (JCPDS 00-001-0527), Varite, CaCO₃ (JCPDS 00-033-0268) จะเห็นได้ว่ามี

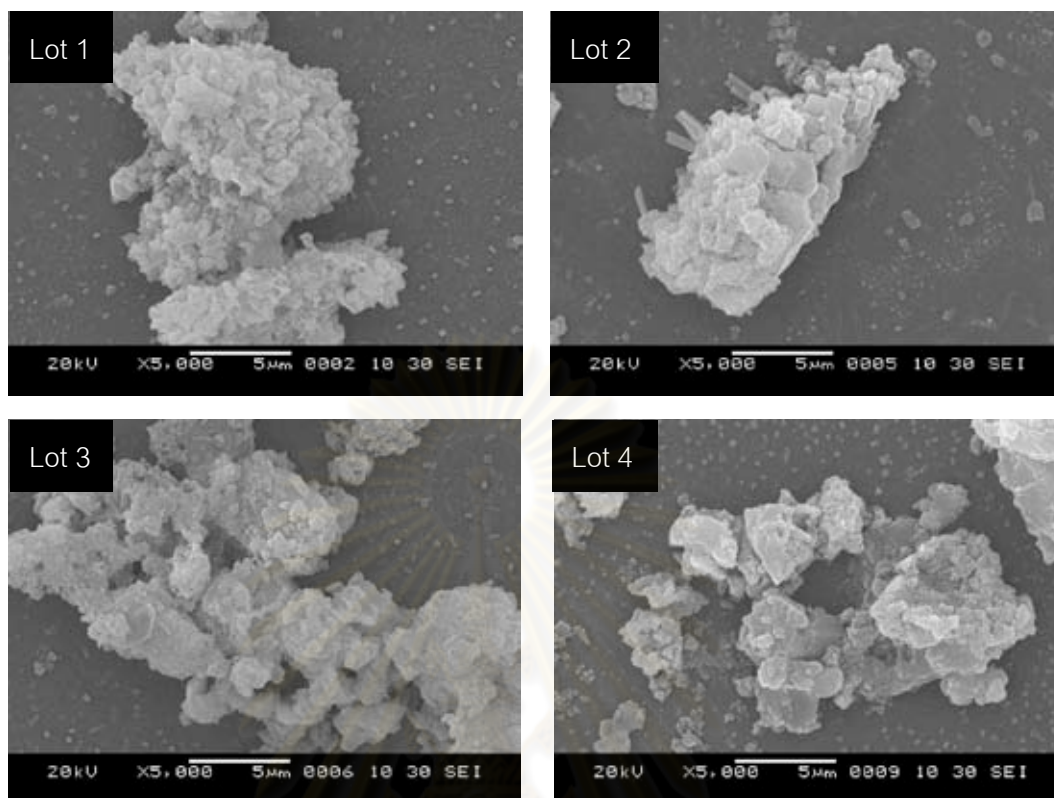
ปริมาณของออกไซด์หลายชนิด แต่ทุก lot ก็จะมีพบเฟสของ NaCl และ KCl ซึ่งเกลือพวกนี้เมื่อโดนความร้อนประมาณ 801 °C⁽⁵⁾ ก็จะเกิดการสลายตัวไป และยังพบ CaCO₃ เป็นหลัก ซึ่งเมื่อเผาแล้วก็จะเกิดสลายตัวกลายเป็น CaO ซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักที่จะมาใช้ในเคลือบ



รูปที่ 4.1 องค์ประกอบทางเฟสของซีเมนต์เตาเผาขยะทั้ง 4 lot

4.1.2.3. ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ต 4 lot ด้วย Scanning Electron Microscope

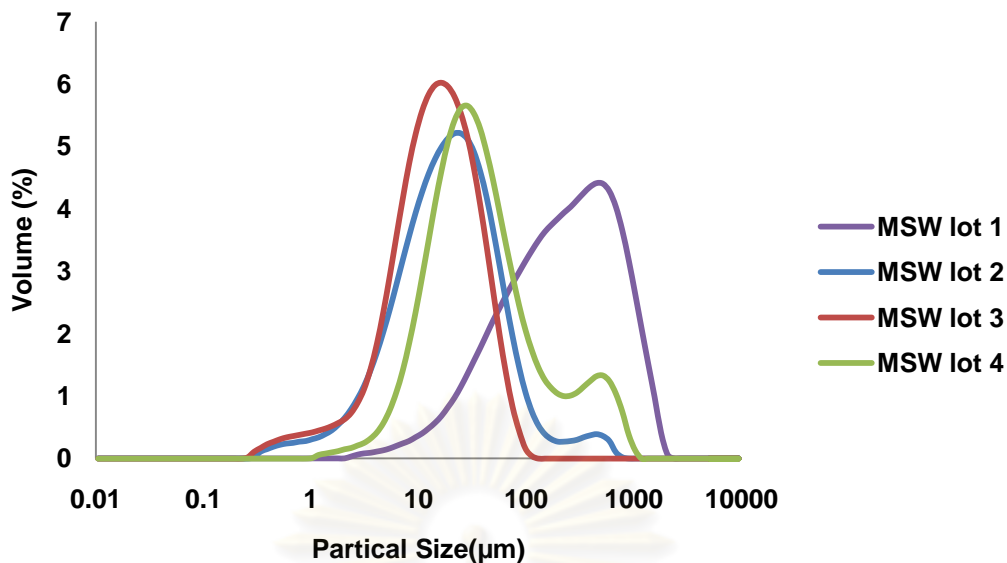
จากรูปที่ 4.2 วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เตาเผาขยะภูเก็ต 4 lot พบว่า ซีเมนต์เตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ตมีการกระจายตัวไม่ดี และมักจะเกาะรวมกันเป็นกลุ่มก้อน จากซีเมนต์เตาเผาขยะภูเก็ตทั้ง 4 lot นี้พบว่าซีเมนต์เตาเผาขยะภูเก็ต lot 4 มีการกระจายตัวที่มากที่สุด โดยสังเกตได้จาก ซีเมนต์เตาเผาขยะ lot 1 2 และ 3 เมื่อวางซีเมนต์เตาเผาขยะทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้อง ซีเมนต์เตาเผาขยะจะเกิดการรวมตัวกัน เพราะมีการดูดความชื้นค่อนข้างดี จึงทำให้มีปริมาณความชื้นมาช่วยทำให้เกิดการรวมตัวกันได้ง่าย ฉะนั้นควรจะนำไปอบแห้งก่อนจะนำมาใช้เป็นส่วนผสมในเคลือบ



รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM ของการกระจายตัวของซีต้าเตาเผาขยะทั้ง 4 lot

4.1.2.4. ผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาควัดด้วยเทคนิค Laser light scattering ด้วยเครื่อง Particle size analyzer

วิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยเทคนิค Laser light scattering ของซีต้าเตาเผาขยะทุกรัฐทั้ง 4 lot จากค่ากลางของข้อมูล (ค่า d 0.5) พบว่า ซีต้าเตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ต lot 3 และ lot 2 มีค่าเฉลี่ยน้อยกว่าซีต้าเตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ต lot 1 และ lot 4 โดยจากรูปที่ 4.3 พบว่าซีต้าเตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ต lot 3 มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงประมาณ 0.25 ถึง 112.46 ไมครอน ซึ่งเล็กกว่าขนาดอนุภาคของซีต้าเตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ต lot 2 ซึ่งมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงประมาณ 0.29 ถึง 778.10 ไมครอน ซึ่งมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าซีต้าเตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ต lot 3 คือมีขนาดอนุภาคมากกว่า 112.46 ไมครอนปนอยู่ จึงสรุปได้ว่าซีต้าเตาเผาขยะ lot 3 เป็น monomodal และ lot 2 เป็น bimodal ซึ่งมีการกระจายตัวที่กว้างมาก

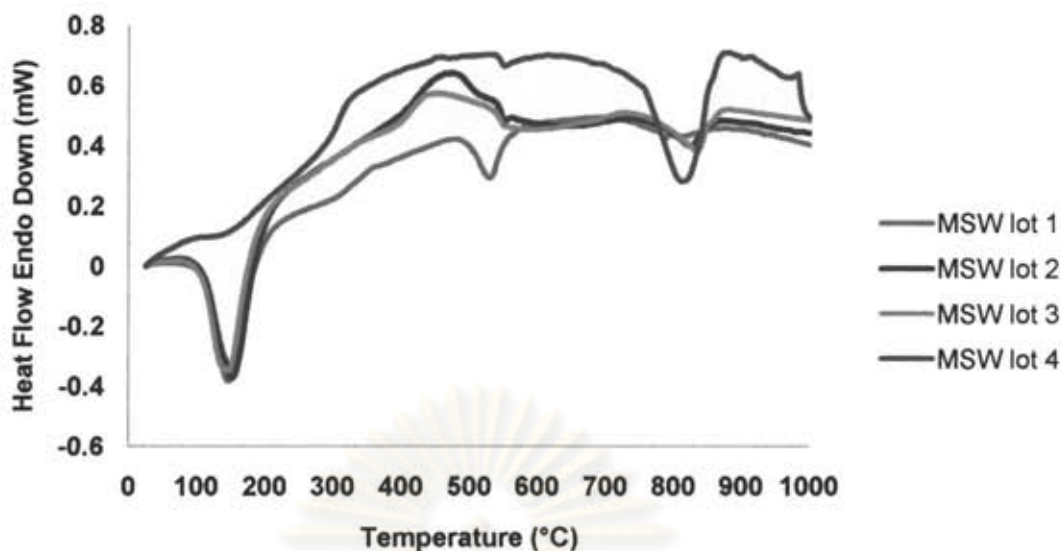


รูปที่ 4.3 ขนาดและการกระจายตัวของซีเมนต์เตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ต lot 1-4

4.1.2.5. ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วย Differential thermal analysis (DTA)

จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของซีเมนต์เตาเผาขยะทั้ง 4 lot จากรูปที่ 4.4 พบว่าวัสดุดิบจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับความร้อนจากอุณหภูมิห้องถึง 1000 °C โดยที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 100-200 °C เกิดปฏิกิริยาคูดพลังงานความร้อน เกิดกระบวนการไอน้ำภายนอกโมเลกุล เช่นพวกไอน้ำ หรือความชื้น ที่ 350-550 °C เกิดปฏิกิริยาคูดความร้อน SO₂ ถูกสลายออกไปที่ 450-550 °C เกิดปฏิกิริยาคูดพลังงานความร้อน เกิดกระบวนการไอน้ำภายในโมเลกุล ที่ 500-600 °C เกิดปฏิกิริยา quartz inversion และที่ 800-900 °C จะพบปฏิกิริยาคูดพลังงานความร้อน เกิดการสลายตัวของสารประกอบคาร์บอเนต เช่น CaCO₃ และ Ca Mg(CO₃)₂⁽¹⁷⁾

ศูนย์วิทยาศาสตร์พยากรณ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

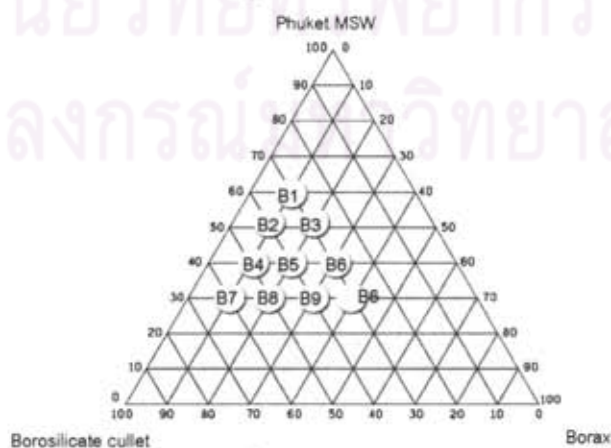


รูปที่ 4.4 สมบัติทางความร้อนของซี้เก่าเตาเผาขยะภูเก็ต lot 1-4

เมื่อวิเคราะห์วัตถุดิบที่จะนำมาใช้เป็นส่วนผสมในการทำเคลือบอุณหภูมิต่ำแล้ว ทำให้เราทราบถึงปริมาณออกไซด์ตลอดจนหน้าที่ของวัตถุดิบแต่ละชนิด จากนั้นคำนวณสูตรเคลือบที่จะนำไปทดลองด้วยการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมจากตารางสามเหลี่ยม โดยวัตถุดิบหลักที่จะนำมาใช้ในการทดลองมี 3 ชนิดคือ ซี้เก่าเตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ต บอแรกซ์ และเศษแก้ว โดยจะแยกออกเป็น เศษแก้วบอโรซิลิเกตและเศษแก้วโซดาไลม์ คือมีการแยกการทดลองออกเป็น 2 ส่วน

1. ซี้เก่าเตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ต บอแรกซ์ และเศษแก้วบอโรซิลิเกตดังรูปที่ 4.5
2. ซี้เก่าเตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ต บอแรกซ์ และเศษแก้วโซดาไลม์ดังรูปที่ 4.18

4.2. ออกแบบตารางส่วนผสมของเคลือบด้วยตารางสามเหลี่ยม มีวัตถุดิบคือ ซี้เก่าเตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ต เศษแก้วบอโรซิลิเกต และบอแรกซ์



รูปที่ 4.5 ส่วนผสมของเคลือบที่ใช้ ซี้เก่าเตาเผาขยะ บอแรกซ์ และเศษแก้วบอโรซิลิเกต

ตารางที่ 4.4 ตารางส่วนผสมของเคลือบสูตร B1-B10 (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

ส่วนผสม	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10
ซีเมนต์ขาวขุ่น	60	50	50	40	40	40	30	30	30	30
เศษแก้วบอโรซิลิเกต	30	40	30	50	40	30	60	50	40	30
บอแรกซ์	10	10	20	10	20	30	10	20	30	40

4.3. ผลการวิเคราะห์สมบัติของเคลือบสูตร B1-B10

จากตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์สมบัติของเคลือบ พบว่าทุกสูตรมีความหนาแน่นของน้ำเคลือบเฉลี่ยที่ 1.4 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จากการวิเคราะห์การกักค้างตะแกรงบน 325 เมช พบว่าสูตร B4 B7 และ B8 มีปริมาณการกักค้างตะแกรงมากที่สุดคือ 6.69 10.70 และ 11.81% ตามลำดับ โดยการกักค้างตะแกรงจะขึ้นอยู่กับปริมาณเศษแก้วที่มีในสูตร เทียบจากการทดลองซึ่งใช้เวลาในการบดที่เท่ากัน ฉะนั้นจึงมีปริมาณเศษแก้วมาก ทำให้การกักค้างตะแกรงมากตามไปด้วย แต่ถ้าต้องการลดปริมาณการกักค้างตะแกรงลง ก็ต้องนำเศษแก้วไปบดก่อนนำมาผสมรวมกับวัสดุบดตัวอื่นๆในเคลือบ และสูตร B4 มีอัตราการไหลตัวดีที่สุด


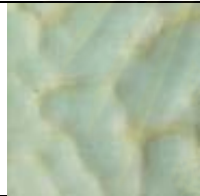

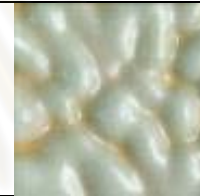
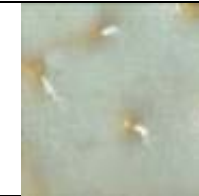

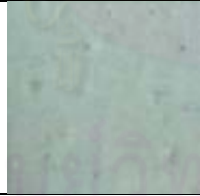



ตารางที่ 4.5 ผลวิเคราะห์สมบัติของเคลือบสูตร B1-B10

สูตร	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์ เซนติเมตร)	การกักค้างตะแกรง 325 เมช (%)	อัตราการไหล (วินาที)
B1	1.41	0.95	20
B2	1.43	1.54	23
B3	1.43	1.33	21
B4	1.48	6.69	30
B5	1.40	4.72	27
B6	1.40	1.94	25
B7	1.42	10.70	18
B8	1.39	11.81	16
B9	1.41	5.21	19
B10	1.43	1.83	22







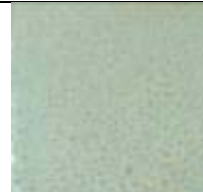
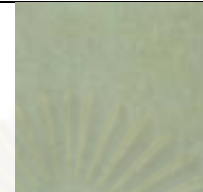


4.4. ผลการวิเคราะห์สมบัติหลังเผาของเคลือบสูตร B1-B10

4.4.1. ผลการเผาเคลือบสูตร B1-B10 บนเนื้อดินสโตนแวร์ที่อุณหภูมิต่างๆกัน


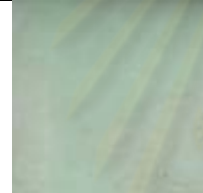
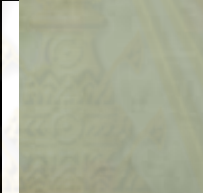
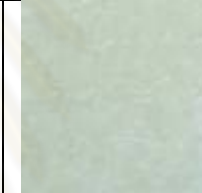
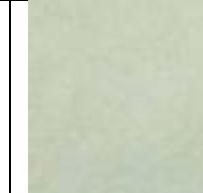


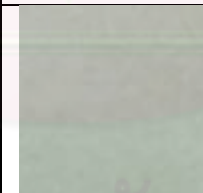
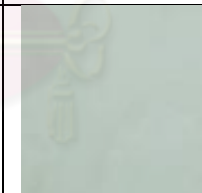
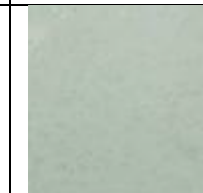
จากการทดลองเคลือบบนเนื้อดินสโตนแวร์เผาที่ 1000 °C พบว่า เคลือบสูตร B1 B2 B4 และ B5 เกิดการแยกตัวออกจากกันระหว่างเคลือบและเนื้อดิน สูตร B3 และ B7 พบว่าเกิดรูเข็มบนผิวเคลือบ พบว่าบนผิวเคลือบเกิดสภาพขุ่น คาดว่าเกิดจากปริมาณของออกไซด์ที่ทำให้เกิดเคลือบขุ่นมีผลึกขนาดเล็ก เช่น B_2O_3 TiO_2 SnO และ CaO ซึ่งทำให้เกิดผลึก⁽¹⁸⁾ และเคลือบบางสูตรอาจยังไม่สุกตัวจึงทำให้ดูคล้ายเป็นฝ้าบริเวณผิวเคลือบ ที่ 1150 °C เคลือบทุกสูตรมีการสุกตัวและมันเงากว้างสูตร 1 ที่มีลักษณะเคลือบปูดพอง ในการขึ้นรูปเนื้อดินอาจขึ้นรูปไม่ดี เกิดเป็นตำหนิฟองอากาศในเนื้อดิน เมื่อเผาออกมาแล้วจึงเกิดเป็นลักษณะปูดพอง เคลือบ B4 B5 และ B7 พบว่าเคลือบเกิดผลึกสีขาวกระจายอยู่บนเคลือบเช่นเดียวกับที่ 1000 °C และเมื่อเผาที่ 1200 °C พบว่าเคลือบทุกตัวมีการสุกตัวและพบผิวเคลือบที่เป็นฝ้า ดังนั้นเมื่อเผาเคลือบที่อุณหภูมิสูงขึ้นเคลือบที่ได้จะสุกตัว และเกิดความมันเงามากขึ้น ทำให้เคลือบมีผิวที่เรียบและสม่ำเสมอ

				
B1 ไม่สุก	B2 สุก-มันเงา-ร่น	B3 สุก-มันเงา-	B4 สุก-มันเงา-ร่น	B5 สุก-มันเงา
				
B6 สุก-มันเงา	B7 สุก-มันเงา-ฝ้า	B8 สุก-มันเงา-ฝ้า	B9 สุก-มันเงา-ฝ้า	B10 สุก-มันเงา

ก) ทดสอบเคลือบบนเนื้อดินสโตนแวร์เผาที่ 1000 °C

				
B1 ตึก-ฟองอากาศ	B2 ตึก-มันเงา	B3 ตึก-มันเงา	B4 ตึก-มันเงา-ฝ้า	B5 ตึก-มันเงา-ฝ้า
				
B6 ตึก-มันเงา	B7 ตึก-มันเงา-ฝ้า	B8 ตึก-มันเงา	B9 ตึก-มันเงา	B10 ตึก-มันเงา

ข) ทดสอบเคลือบบนเนื้อดินสโตนแวร์เผาที่ 1150 °C

				
B1 ตึก-มันเงา-ขาว	B2 ตึก-มันเงา-ขาว	B3 ตึก-มันเงา-ฝ้า	B4 ตึก-มันเงา-ฝ้า	B5 ตึก-มันเงา-ฝ้า
				
B6 ตึก-มันเงา-ฝ้า	B7 ตึก-มันเงา-ฝ้า	B8 ตึก-มันเงา-ฝ้า	B9 ตึก-มันเงา-ขาว	B10 ตึก-มันเงา-ฝ้า

ค) ทดสอบเคลือบบนเนื้อดินสโตนแวร์เผาที่ 1200 °C

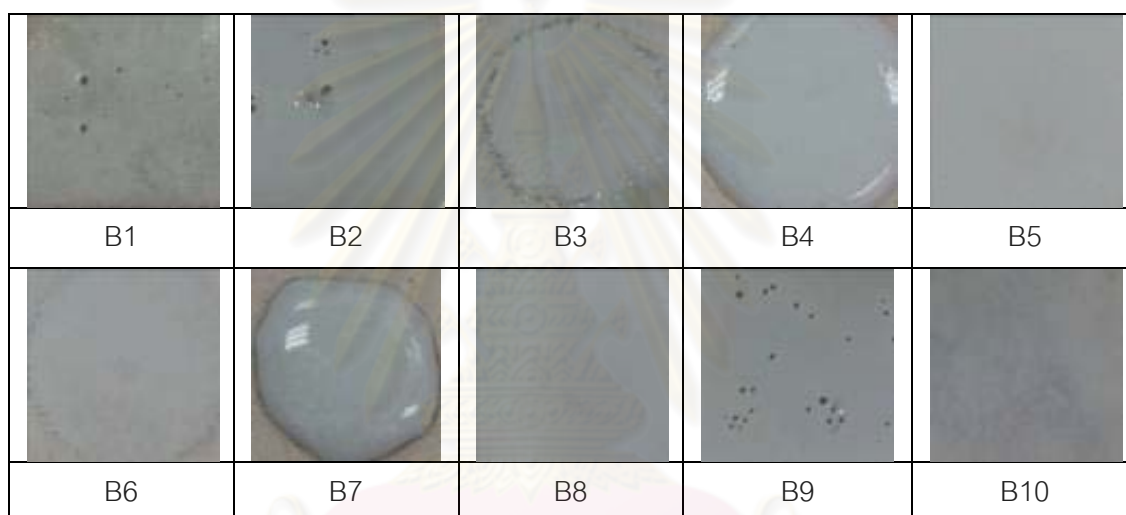
รูปที่ 4.6 ทดสอบเคลือบสูตร B1-B10 บนเนื้อดินสโตนแวร์เผาที่ 1000 1150 และ 1200 °C

4.4.2. ผลการหลอมตัวของเคลือบสูตร B1-B10 เผาที่อุณหภูมิต่างๆกัน

จากรูปที่ 4.10 วิเคราะห์การหลอมตัวของเคลือบโดยเผาที่ 1000 °C พบว่าเคลือบสูตร B3 B6 B9 และ B10 มีการหลอมตัวดี เผาที่ 1150 °C และ 1200 °C เคลือบทุกสูตรมีการหลอมตัวที่ดี



ก) การหลอมตัวของเคลือบเผาที่ 1000 °C



ข) การหลอมตัวของเคลือบเผาที่ 1150 °C

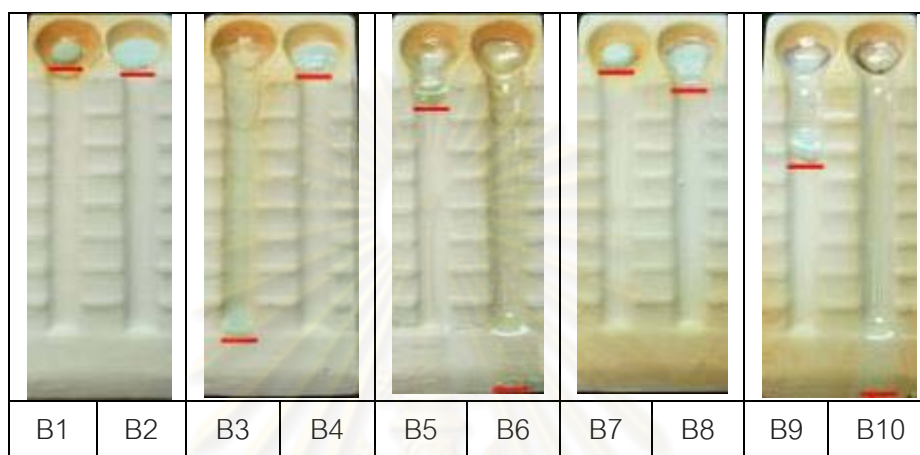


ค) การหลอมตัวของเคลือบเผาที่ 1200 °C

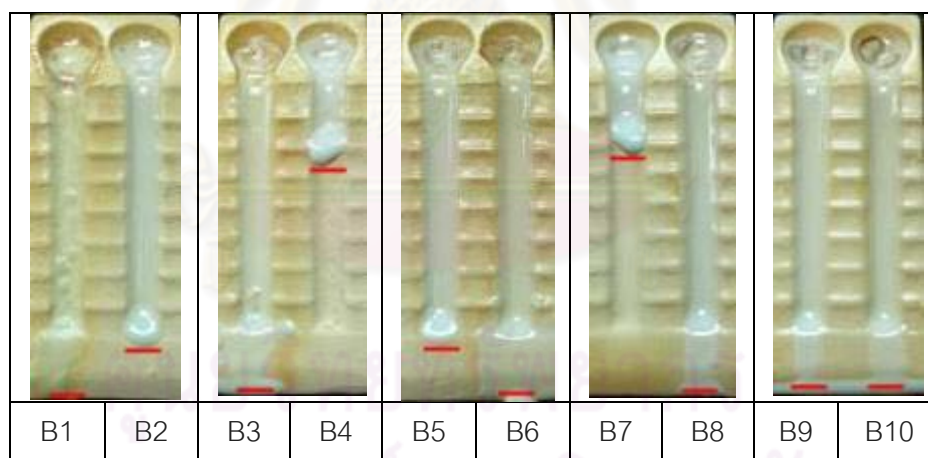
รูปที่ 4.7 การหลอมตัวของเคลือบสูตร B1-B10 เผาที่ 1000 1150 และ 1200 °C

4.4.3. ผลการไหลตัวของเคลือบสูตร B1-B10 เหนือที่อุณหภูมิต่างๆกัน

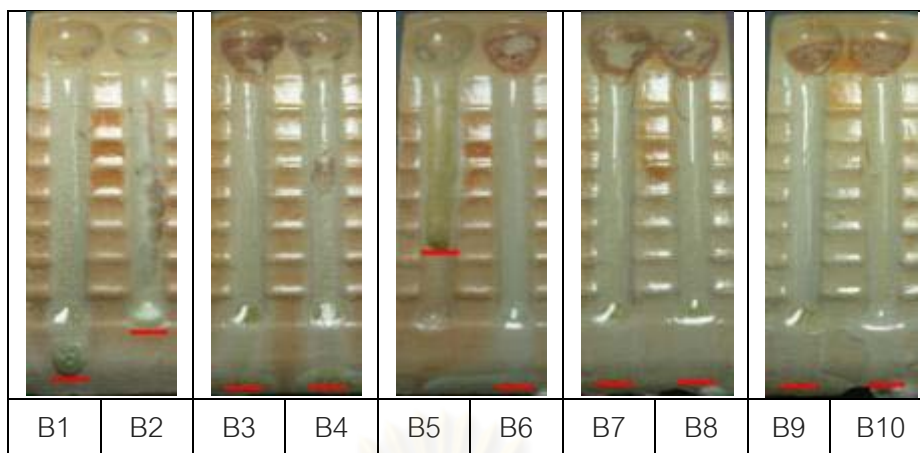
วิเคราะห์การไหลตัวของเคลือบเผาที่ 1000 °C พบว่า สูตร B3 B6 B10 และ B9 มีการไหลตัวที่ดีตามลำดับ เหนือที่ 1150 °C ทุกสูตรมีการไหลตัวที่ดีเช่นเดียวกัน ยกเว้นสูตร B4 และ B7 และเมื่อนำไปเผาที่ 1200 °C ทุกสูตรมีการไหลตัวที่ดี ซึ่งผลการทดสอบการไหลตัวนี้สอดคล้องกับการทดสอบการหลอมตัวของเคลือบเช่นกัน



ก) การไหลตัวของเคลือบเผาที่ 1000 °C



ข) การไหลตัวของเคลือบเผาที่ 1150 °C



ค) การไหลตัวของเคลือบเผาที่ 1200 °C



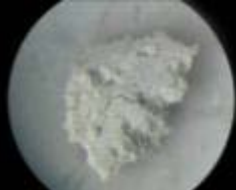







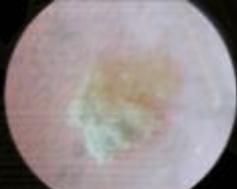
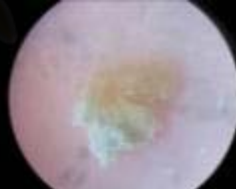

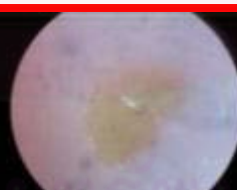

รูปที่ 4.8 การไหลตัวของเคลือบสูตร B เผาที่ 1000 1150 และ 1200 °C

4.4.4. ผลการศึกษาพฤติกรรมของการหลอมของเคลือบสูตร B3 B6 B9 และ B10 ด้วย Heating stage microscope








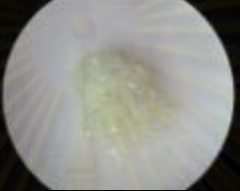


จากการศึกษาพฤติกรรมของการหลอมของเคลือบเมื่อให้ความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิที่เคลือบเริ่มเกิดปฏิกิริยาการหลอมตัว พบว่าเคลือบสูตร B3 B6 B9 และ B10 มีการหลอมตัวมากที่สุดที่อุณหภูมิ 1090 1030 1000 และ 890 °C ตามลำดับ โดยสูตรที่มีการหลอมดีที่สุดคือ สูตร B10 เคลือบเริ่มหลอมตัวที่อุณหภูมิ 850 °C และมีการหลอมตัวมากที่สุดที่อุณหภูมิ 890 °C เมื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของการหลอมตัวของเคลือบทั้ง 4 สูตรแล้วพบว่าเคลือบสูตรที่มีการหลอมตัวที่ดีที่สุดคือ B10 B9 B6 และ B3 เนื่องจากมีปริมาณบอแรกซ์ 40 30 30 และ 20% ในสูตรเคลือบตามลำดับ โดยบอแรกซ์เป็นตัวช่วยหลอมที่ดีมากในเคลือบทำให้อุณหภูมิในการเผา ลดลง เนื่องจากบอแรกซ์มีจุดหลอมเหลวที่ 735 °C⁽¹⁹⁾ โดยทั้ง 3 สูตร จะมีปฏิกิริยาการสลายตัวของออกไซด์ที่เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิใกล้เคียงกัน เช่น ช่วงอุณหภูมิการแตกตัวของบอแรกซ์ที่ประมาณ 150 °C มีการระเหยของน้ำในโมเลกุล จากนั้นที่ 410 °C⁽⁵⁾ มีการคายความร้อน หลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกับ SiO₂ เคลือบจะมีขนาดที่เล็กลง จากนั้นเคลือบจะเริ่มเกิดการหลอมตัวไปจนถึงอุณหภูมิที่เคลือบมีการหลอมตัวมากที่สุดคือวัตถุดิบมีการหลอมตัวลักษณะคล้ายน้ำ

ตารางที่ 4.6 อุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาการหลอมของเคลือบสูตร B3 B6 B9 และ B10

สูตร	ยังไม่มีการหลอม	เริ่มมีการหลอม	อุณหภูมิที่หลอมตัวมาก
B3	อุณหภูมิห้อง-1040 °C	1050 °C	1090 °C
B6	อุณหภูมิห้อง-850 °C	900 °C	1030 °C
B9	อุณหภูมิห้อง-890 °C	850 °C	1000 °C
B10	อุณหภูมิห้อง-800 °C	850 °C	890 °C







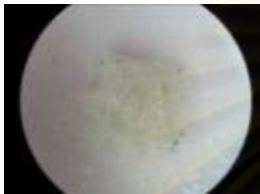



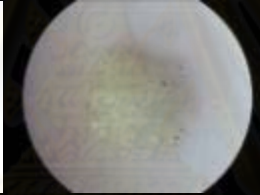


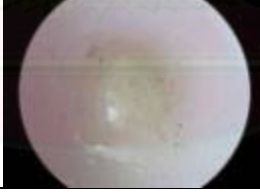

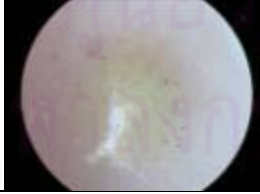

		
อุณหภูมิห้อง	500 °C	600 °C
		
700 °C	800 °C	900 °C
		
950 °C	1000 °C	1020 °C
		
1040 °C	1050 °C	1060 °C
		
1070 °C	1080 °C	1090 °C

ก) พฤติกรรมการหลอมตัวของเคลือบสูตร B3 ที่อุณหภูมิห้องจนเกิดการหลอมตัว

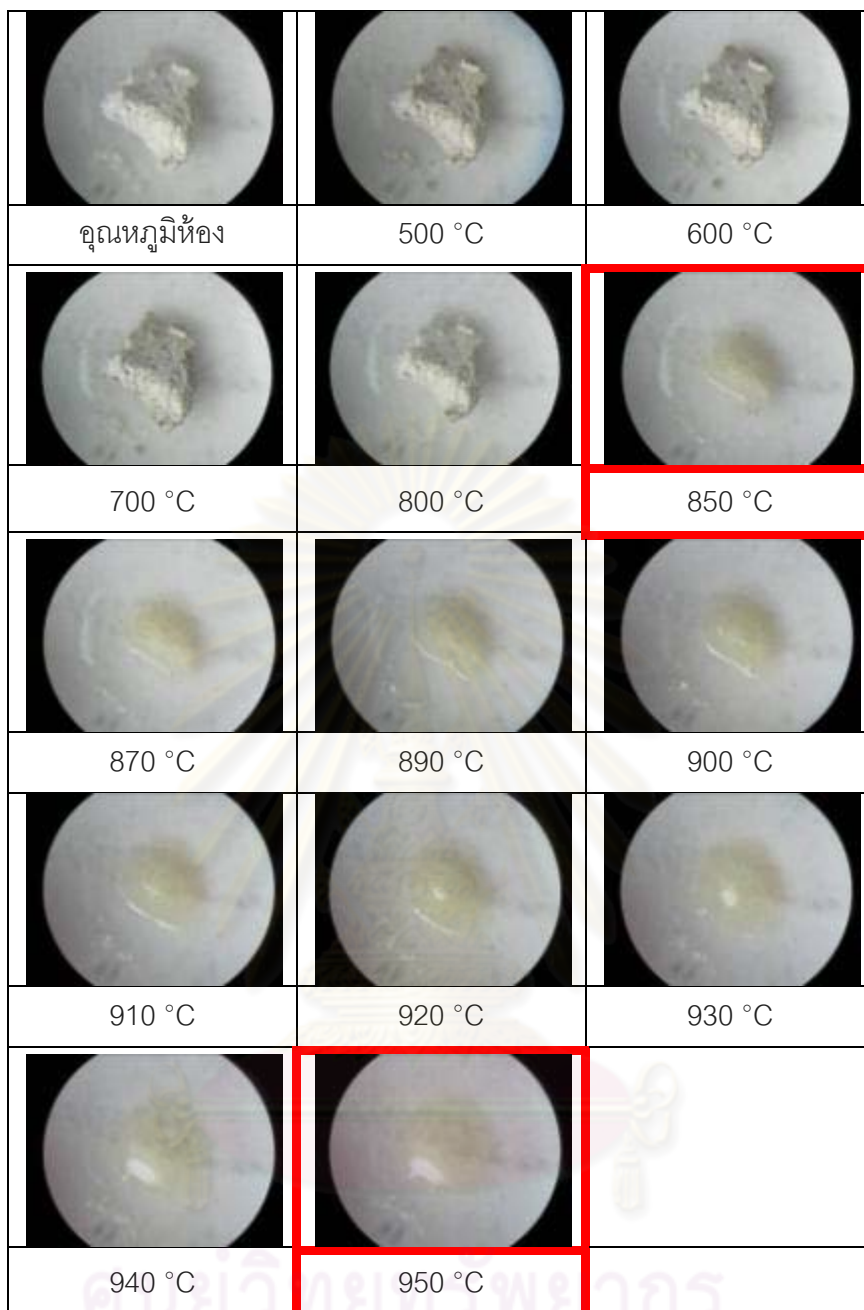
		
อุณหภูมิห้อง	500 °C	600 °C
		
700 °C	800 °C	850 °C
		
900 °C	950 °C	1000 °C
		
1030 °C		

ข) พฤติกรรมการหลอมตัวของเคลือบสูตร B6 ที่อุณหภูมิห้องจนเกิดการหลอมตัว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

		
อุณหภูมิห้อง	500 °C	600 °C
		
700 °C	800 °C	850 °C
		
900 °C	910 °C	920 °C
		
930 °C	940 °C	950 °C
		
960 °C	970 °C	980 °C
		
990 °C	1000 °C	

ค) พฤติกรรมการหลอมตัวของเคลือบสูตร B9 ที่อุณหภูมิห้องจนเกิดการหลอมตัว



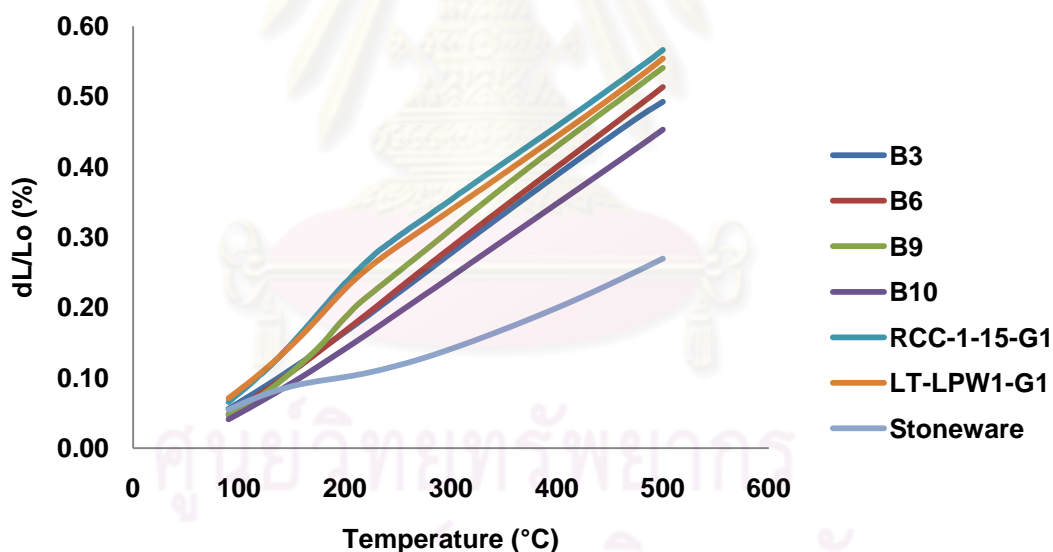
ง) พฤติกรรมการหลอมตัวของเคลือบสูตร B10 ที่อุณหภูมิห้องจนเกิดการหลอมตัว

รูปที่ 4.9 พฤติกรรมการหลอมตัวของเคลือบสูตร B3 B6 B9 และ B10 ที่อุณหภูมิห้องจนเกิดการหลอมตัว

4.4.5. ผลการศึกษาความสัมพันธ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบสูตร B3 B6 B9 และ B10 ด้วยเครื่อง Dilatometer

จากการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน(CTE) ของเคลือบเมื่อเทียบกับเนื้องินสโตนแวร์ และเนื้องินอุณหภูมิต่ำทั้ง 2 ชนิด จากตารางที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเทียบค่า

CTE เนื้อดินสโตนแวร์กับเคลือบแล้วพบว่า เนื้อดินสโตนแวร์และเคลือบอุณหภูมิต่ำมีค่า CTE ที่ต่างกันมาก จึงทำให้เมื่อเคลือบชิ้นงานออกมาแล้วเกิดการร้าวตัวเนื่องจากการหดตัวที่ไม่เท่ากัน⁽²⁰⁾ ในขณะที่เมื่อเทียบเนื้อดินอุณหภูมิต่ำกับเคลือบอุณหภูมิต่ำแล้วพบว่ามีค่าใกล้เคียงกันมากกว่า และเมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วย XRD พบเฟสของ Wollastonite, Cristobalite และ Quartz ซึ่งมี SiO_2 เป็นหลัก โดยมาจากปริมาณของเศษแก้วที่เกิดช่วง quartz inversion และเคลือบมีปริมาณออกไซด์หลายชนิด ซึ่งออกไซด์แต่ละชนิดมีค่า CTE ที่แตกต่างกันไปเช่น $\text{Na}_2\text{O}=0.1 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ $\text{Al}_2\text{O}_3=0.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ $\text{SiO}_2=0.08 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ และ $\text{CaO}=0.05 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ เมื่อนำมาคำนวณแล้วจะทำให้ได้เคลือบมีค่า CTE ที่สูง โดยปกติแล้วเคลือบมีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกาอสัณฐานซึ่งมีค่า CTE ที่ต่ำ แต่เมื่อเติมฟลักซ์ ทำให้เคลือบที่ค่า CTE ที่สูงขึ้นเนื่องจากมีออกซิเจน ไอออนเกินจากความต้องการในโครงสร้างตาข่ายทรงสี่หน้าของซิลิเกต ทำให้ตาข่ายแตกออก เพื่อให้ไอออนที่มีขนาดใหญ่กว่าเกิดการแทรกตัวภายในโครงสร้าง ทำให้เคลือบมีการขยายตัวมากขึ้นเมื่อโดนความร้อน



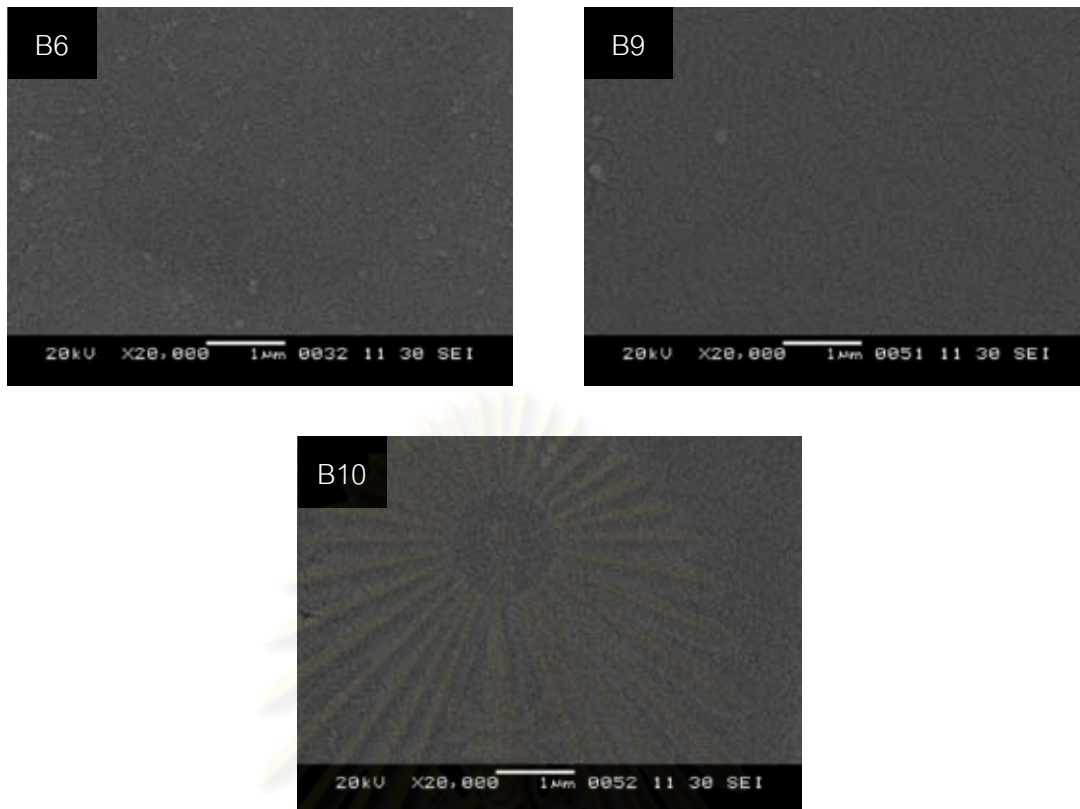
รูปที่ 4.10 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบสูตร B3 B6 B9 และ B10 เทียบกับเนื้อดินทั้ง 3 ชนิด

ตารางที่ 4.7 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบสูตร B3 B6 B9 และ B10 เมื่อเทียบกับเนื้อดิน 3 ชนิด

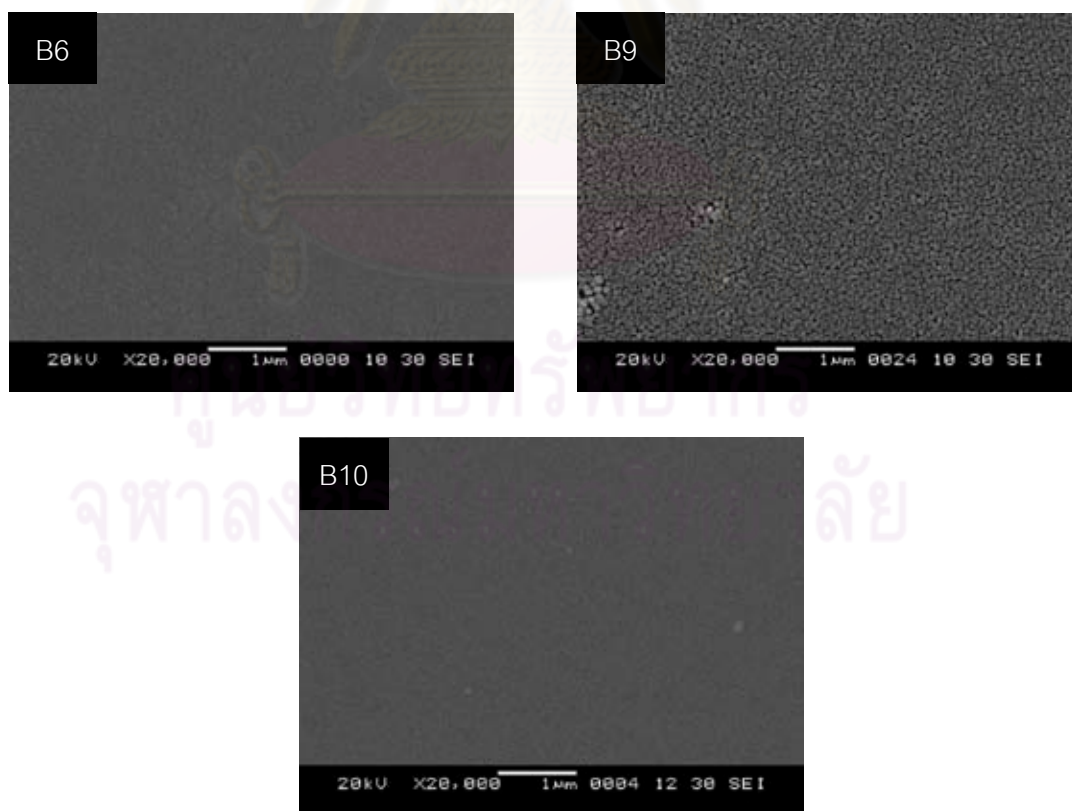
สูตร	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (CTE)		
	50-300 °C $\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	50-500 °C $\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	300-500 °C $\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
B3	10.22	10.46	10.77
B6	10.74	11.04	11.42
B9	11.72	11.61	11.5
B10	9.26	9.78	10.5
RCC-1-15-G1	13.10	12.00	10.64
LT-LPW1-G1	12.42	11.69	10.78
Stoneware	4.69	5.46	6.42

4.4.6. ผลการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของเคลือบสูตร B3 B6 B9 และ B10 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของเคลือบหลังเผาที่ 1000 และ 1150 °C พบว่าเคลือบมีพื้นผิวที่เรียบและเกิดผลึกเล็กๆ กระจายตัวอยู่เท่าๆ กันบนเนื้อแก้ว โดยผลึกที่ได้มีขนาดที่เท่าๆ กัน แสดงถึงเคลือบมีพื้นผิวที่เรียบและมีการหลอมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน⁽²¹⁾ และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 1150 °C เคลือบสูตร B10 จะเห็นว่าผลึกน้อยลง เมื่อเทียบกับทั้ง 3 สูตร เพราะในสูตร B10 มีออกไซด์ที่เป็นฟลักซ์มากที่สุด และมีปริมาณ SiO₂ มากด้วยเช่นกัน จึงสามารถช่วยหลอมและทำให้เกิดเนื้อเป็นแก้วได้มากกว่าสูตรอื่นๆ



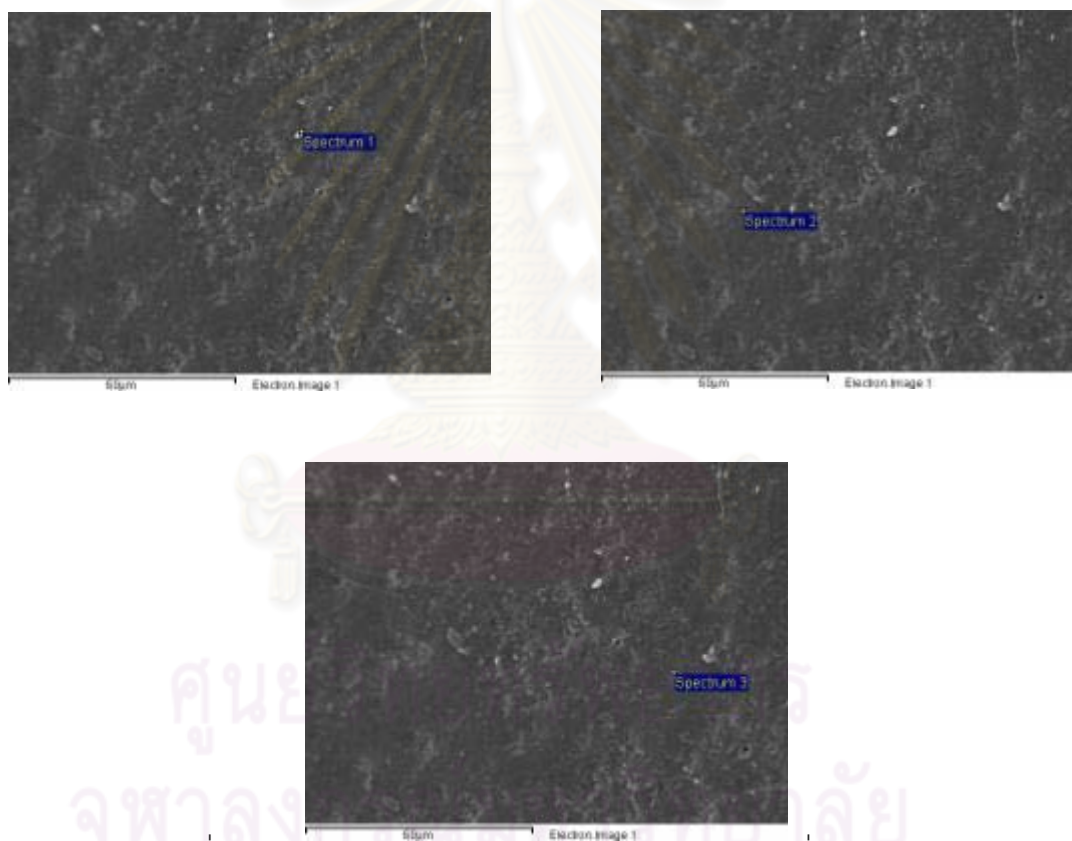
รูปที่ 4.11 โครงสร้างทางจุลภาคของเคลือบสูตร B6 B9 และ B10 หลังเผาที่ 1000 °C



รูปที่ 4.12 โครงสร้างทางจุลภาคของเคลือบสูตร B6 B9 และ B10 หลังเผาที่ 1150 °C

4.4.7. ผลการวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบของเคลือบสูตร B3 B6 B9 และ B10 หลังเผาที่ 1000 °C ด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)

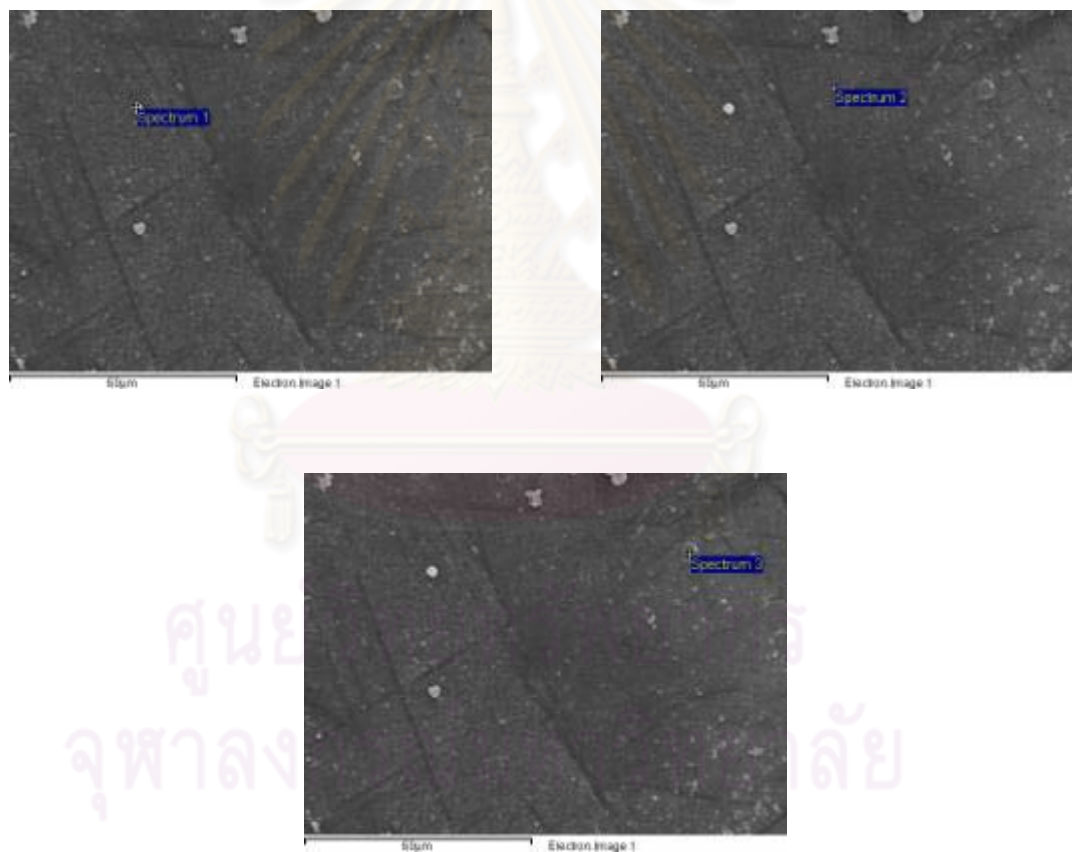
จากการวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบของเคลือบสูตร B3 B6 B9 และ B10 เมื่อเผาที่ 1000 °C พบว่า สูตร B3 มีปริมาณของ Ca และ Si มีอัตราส่วนเท่ากับ 1 : 3 ซึ่งเกิดเป็นเฟสของ Calcium silicate ซึ่งมีผลสอดคล้องกับผลของ XRD ที่พบเฟสของ Wollastonite (Ca_2SiO_3), สูตร B6 และ B9 มีปริมาณของ Si และ O มีอัตราส่วนเท่ากับ 1 : 2 ซึ่งเกิดเป็นเฟสของ SiO_2 และพบเป็น Quartz และ Cristobalite ในการวิเคราะห์ XRD ส่วน B10 นั้น มีปริมาณของ Si กับ O เป็นหลัก จึงพบเป็นเฟสของ Quartz



รูปที่ 4.13 ธาตุและองค์ประกอบของเคลือบสูตร B3 เผาที่ 1000 °C

ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบทางเคมีแต่ละจุดของเคลือบ B3 ด้วย EDS

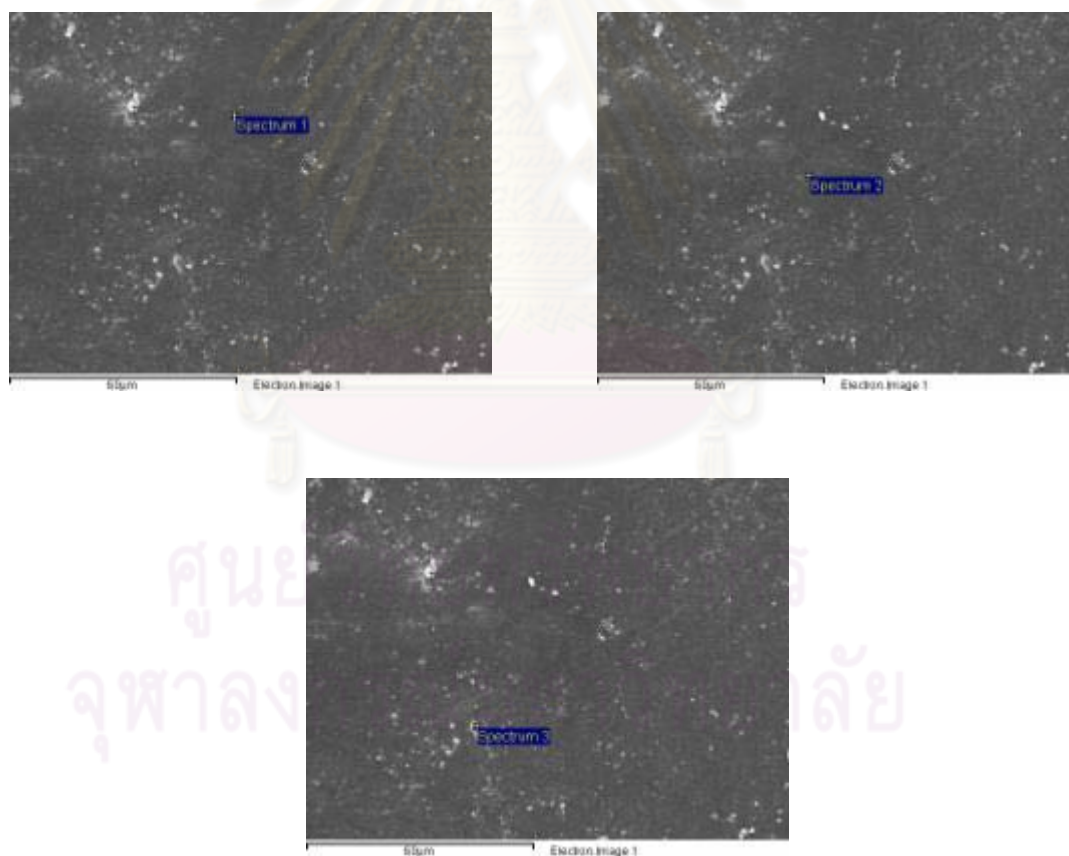
ธาตุ	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
	Weight%	Weight%	Weight%
C	14.13	14.11	13.44
O	40.77	42.55	44.14
Na	1.61	1.72	2.14
Al	6.72	2.77	3.38
Si	26.81	26.01	27.82
K	2.5	1.84	2.07
Ca	7.46	10.99	6.99



รูปที่ 4.14 ธาตุและองค์ประกอบของเคลือบสูตร B6 เผาที่ 1000 °C

ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบทางเคมีแต่ละจุดของเคลือบ B6 ด้วย EDS

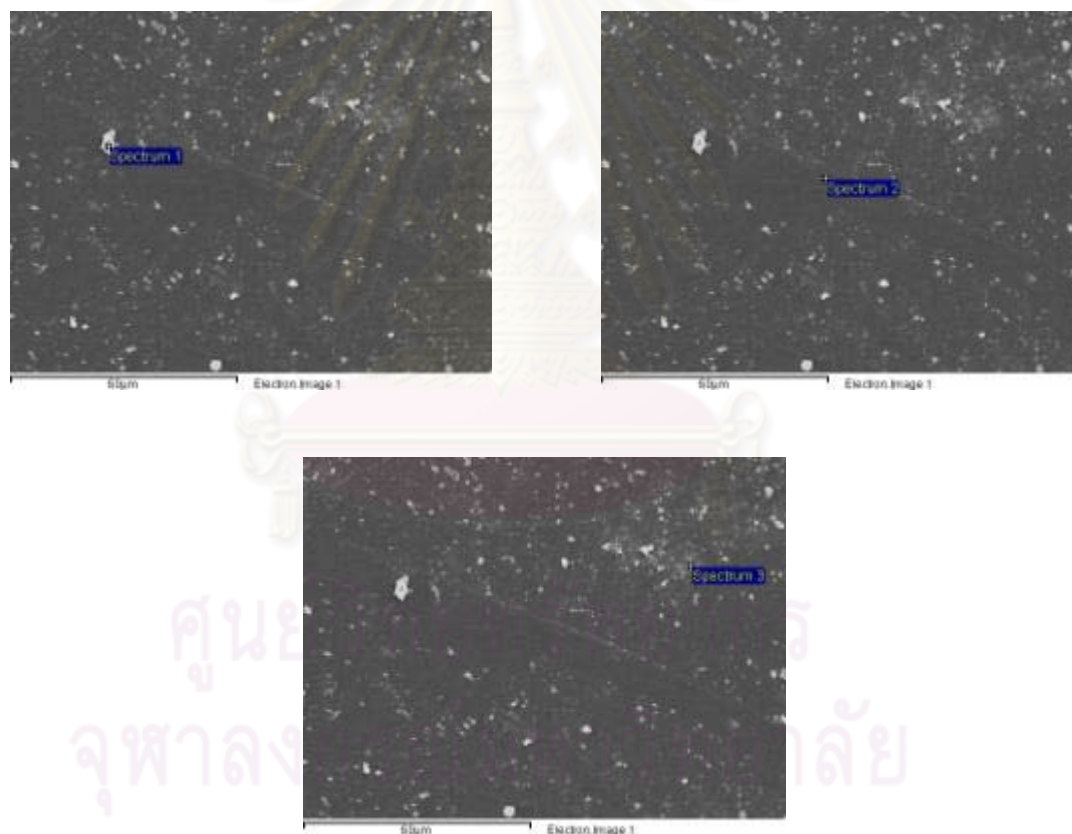
ธาตุ	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
	Weight%	Weight%	Weight%
C	40.9	22.96	-
N	-	-	11.07
O	39.04	32.4	29.58
Al	2.21	3.65	14.59
Si	15.68	35.45	37.39
K	2.16	3.1	3.96
Ca	-	2.44	3.41



รูปที่ 4.15 ธาตุและองค์ประกอบของเคลือบสูตร B9 เผาที่ 1000 °C

ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบทางเคมีแต่ละจุดของเคลือบ B9 ด้วย EDS

ธาตุ	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
	Weight%	Weight%	Weight%
C	-	20.15	14.01
O	37.52	33.75	38.74
Na	1.16	1.72	-
Al	2.36	2.35	2.26
Si	56.7	37.61	23.6
K	2.26	2.84	1.93
Ca	-	1.59	19.47



รูปที่ 4.16 ธาตุและองค์ประกอบของผิวเคลือบสูตร B10 เเผาที่ 1000 °C

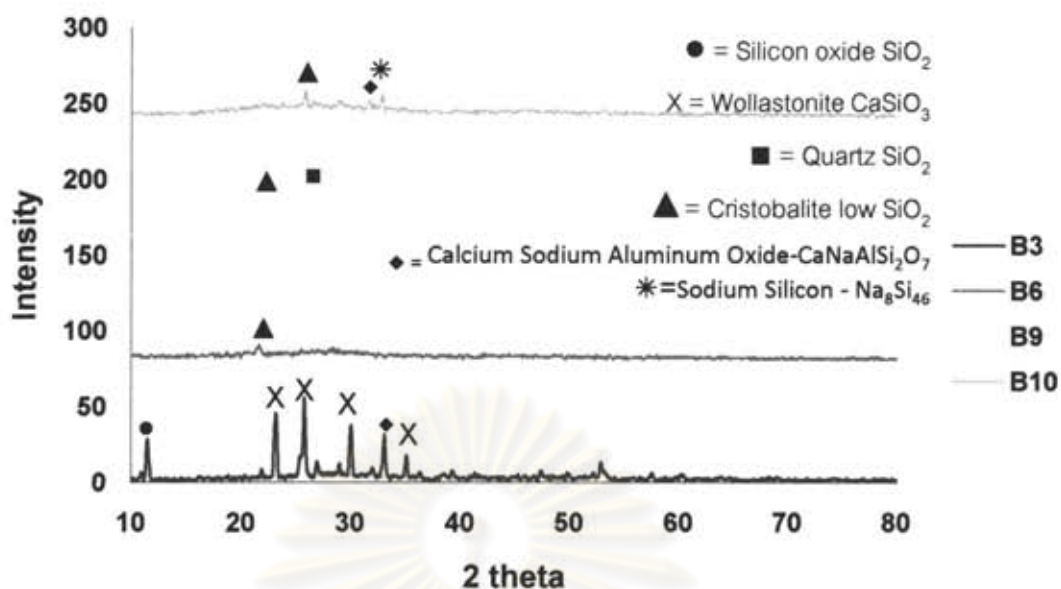
ตารางที่ 4.11 การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบทางเคมีแต่ละจุดของเคลือบ B10 ด้วย EDS

ธาตุ	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
	Weight%	Weight%	Weight%
O	59.45	34.74	37.55
Na	-	2.87	1.96
Al	1.45	4.37	3.35
Si	8.28	41.56	23.18
K	-	2.58	1.79
Ca	21.55	13.88	15.17

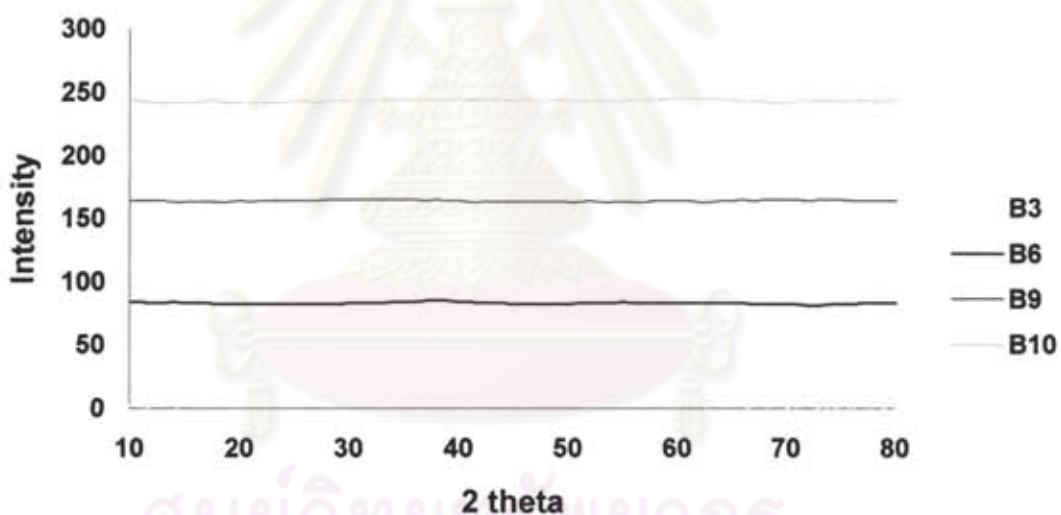
4.4.8. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของ เคลือบสูตร B3 B6 B9 และ B10 หลังเผาที่ 1000 °C ด้วยเครื่อง X-ray Diffraction

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบทั้ง 4 สูตร เผาที่ 1000 °C สูตร B3 พบเฟสของ Silicon oxide, SiO₂ (JCPDS 00-048-0476) Wollastonite, CaSiO₃ (JCPDS 00-027-1064) และ Calcium sodium aluminium, oxide Ca_{8.25}Na_{1.5}(Al₆O₁₈) (JCPDS 01-083-1360) สูตร B6 พบเฟสของ Cristobalite low, SiO₂ (JCPDS 01-076-0937) B9 พบเฟส Cristobalite low, SiO₂ (JCPDS 01-076-0937) และ Quartz, SiO₂ (JCPDS 01-085-0798) โดย B10 พบเฟสของ Cristobalite low, SiO₂ (JCPDS 01-076-0937) Calcium sodium aluminium, oxide Ca_{8.25}Na_{1.5}(Al₆O₁₈) (JCPDS 01-083-1360) และ Sodium Silicon - Na₈Si₄₆ (JCPDS 01-089-5534) จึงทำให้วัสดุดิบกลายเป็นเนื้อแก้วได้ดี และเมื่อเผาที่ 1150 °C พบว่าทุกสูตรไม่เกิดผลึก คือมีสภาพเป็นเนื้อแก้วทั้งหมด ดังรูป 4.17

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก) องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบสูตร B3 B6 B9 และ B10 เเผาที่ 1000°C



ข) องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบสูตร B3 B6 B9 และ B10 เเผาที่ 1150°C

รูปที่ 4.17 องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบสูตร B3 B6 B9 และ B10 เเผาที่ 1000 และ 1150°C

4.4.9. ผลการวิเคราะห์ความต้านทานสารเคมี (ISO 10545-13-1996)

จากการวิเคราะห์ความต้านทานสารเคมีของเคลือบสูตร B9 และ B10 พบว่าเคลือบทุกสูตรผ่านการทดสอบด้วย 1 ดินสอ HB และเคลือบสามารถทนทานต่อ HCl ได้ เมื่อทำการทดสอบแล้ว พบว่าบริเวณผิวเคลือบไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง แต่เมื่อนำไปทดสอบด้วยการแช่ NaOH ปรากฏว่าเคลือบเกิดเป็นผลิตภัณฑ์หลุตร้อนอยู่บนบริเวณผิวเคลือบ เกิดจาก NaOH ไปทำลายพันธะ Si-O-Si เลยทำให้มีแอลคาไลน์ออกมามากขึ้น จากนั้นจึงเกิดเป็นการกัดกร่อน SiO_2 ออก⁽²²⁾

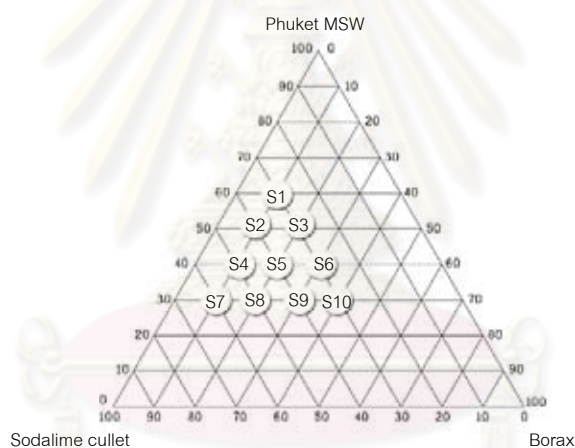
เนื่องจากเคลือบมีปริมาณ MgO , Al_2O_3 ในปริมาณน้อย จึงทำให้ไม่ทนทานต่อสารเคมีประเภทต่าง

ตารางที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ความต้านทานสารเคมีของเคลือบสูตร B9 และ B10

เนื้อดิน	สูตรเคลือบ	HCl	NaOH	ดินสอHB
RCC-1-15-G1	B9	✓	✗	✓
	B10	✓	✗	✓
LP-LPW1-G1	B9	✓	✗	✓
	B10	✓	✗	✓

✓ = ชิ้นงานผ่านการทดสอบด้วยสารเคมี, ✗ = ชิ้นงานไม่ผ่านการทดสอบด้วยสารเคมี

4.5. ออกแบบตารางส่วนผสมของเคลือบด้วยตารางสามเหลี่ยม มีวัตถุดิบคือ ซี้ถ้ำเตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ต เศษแก้วโซดาไลม์ และบอแรกซ์



รูปที่ 4.18 ส่วนผสมของเคลือบที่ใช้ ซี้ถ้ำเตาเผาขยะ บอแรกซ์ และเศษแก้วโซดาไลม์

ตารางที่ 4.13 ตารางส่วนผสมของเคลือบสูตร S1-S10 (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

ส่วนผสม	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
ซี้ถ้ำเตาเผาขยะภูเก็ต	60	50	50	40	40	40	30	30	30	30
เศษแก้วโซดาไลม์	30	40	30	50	40	30	60	50	40	30
บอแรกซ์	10	10	20	10	20	30	10	20	30	40

4.6. ผลการวิเคราะห์สมบัติของเคลือบสูตร S1-S10

จากการวิเคราะห์สมบัติของน้ำเคลือบทุกสูตร พบว่าเคลือบมีความหนาแน่นเฉลี่ยที่ 1.4 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อนำมาวิเคราะห์หักค้ำตะแกรงพบว่าสูตร S4 S7 และ S8 มีปริมาณหักค้ำตะแกรงมากที่สุดคือ 6.01 7.83 และ 6.40% ตามลำดับ เป็นเพราะปริมาณเศษแก้วมากทำให้มีหักค้ำตะแกรงมากตามไปด้วยเมื่อเทียบจากการทดลองที่ใช้เวลาในการอบเท่ากัน ดังนั้นยังมีปริมาณเศษแก้วมาก ทำให้หักค้ำตะแกรงมากตามไปด้วย ถ้าต้องการลดปริมาณหักค้ำตะแกรงลง ทำได้โดยนำเศษแก้วไปดกก่อนนำมาผสมรวมกับวัตถุดิบตัวอื่นๆ ในเคลือบ และสูตร S6 มีอัตราการไหลตัวดีที่สุด

ตารางที่ 4.14 ผลวิเคราะห์สมบัติของเคลือบสมบัติของเคลือบสูตร S1-S10




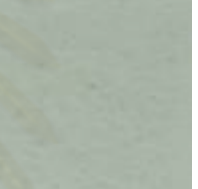

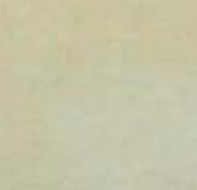
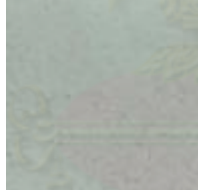



สูตร	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์ เซนติเมตร)	หักค้ำตะแกรง 325 เมช (%)	อัตราการไหล (วินาที)
S1	1.37	2.91	12
S2	1.38	4.26	14
S3	1.42	3.79	18
S4	1.37	6.01	13
S5	1.39	4.75	19
S6	1.34	1.00	34
S7	1.45	7.83	18
S8	1.43	6.40	18
S9	1.36	4.75	29
S10	1.40	2.15	28

4.7. ผลวิเคราะห์สมบัติหลังเผาของเคลือบสูตร S1-S10

4.7.1. ผลการเผาเคลือบสูตร S1-S10 บนเนื้อดินสโตนแวร์ที่อุณหภูมิต่างๆกัน




จากการทดลองเคลือบบนเนื้อดินสโตนแวร์ดังรูปที่ 4.20 เผาที่ 1000 °C พบว่าเคลือบสูตร S1 S2 S3 และ S5 เคลือบไม่สุกและร่น สูตร S4 S6 S7 S8 S9 และ S10 เคลือบสุกตัวและมันเงา และมีบางสูตรที่เคลือบเกิดเป็นเคลือบที่บอบอาจจะเกิดจากปริมาณของ TiO_2 , B_2O_3 หรือ CaO ที่ทำให้เกิดผลึกที่ขุ่นบริเวณผิวเคลือบ เผาที่ 1150 °C เคลือบทุกสูตรมีการสุกตัวยกเว้นสูตร S3 ที่เคลือบเดือด บริเวณผิวเคลือบเกิดเป็นฟองอากาศ อาจเกิดจากที่เคลือบเดือดจากนั้นเคลือบถูก

ทั้งตัวให้เย็นลงอย่างรวดเร็ว แก๊สที่อยู่ในเคลือบระบายออกไปไม่หมด เมื่อเคลือบเย็นตัวลงจึงเกิดฟองอากาศค้างอยู่บนผิวเคลือบ และเมื่อนำไปเผาที่ 1200 °C ทุกสูตรสุกตัวหมด และพบว่าสูตร S7 เคลือบหลุม หดตัวไม่เท่ากัน และสูตร S3 S5 S6 S7 S8 และ S9 เคลือบเกิดลักษณะเคลือบขุ่นเช่นเดียวกับที่อุณหภูมิ 1000 °C เพราะในสูตรเคลือบมีปริมาณออกไซด์ที่ทำให้เกิดสีขาวขุ่นเช่น CaO จึงทำให้เมื่อเผาแล้วเกิดคล้ายฝ้าอยู่ที่ผิวเคลือบ และเมื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้นพบว่าเคลือบที่ได้จะสุกตัว มีลักษณะมันเงามากขึ้น ลักษณะสีขาวขุ่นหรือเป็นฝ้าก็จะค่อยๆ หดไป และผิวเคลือบมีลักษณะที่เรียบขึ้นกว่าเดิม โดยรวมแล้วเคลือบสูตรที่มีเศษแก้วโซดาไลมนี่ เมื่อนำไปเผาแล้วจะเห็นลักษณะเคลือบที่บ้นน้อยกว่าสูตรเศษแก้วบอโรซิลิเกต เนื่องจากในสูตรเคลือบนี้มีปริมาณ CaO น้อยกว่าสูตรเคลือบที่มีเศษแก้วบอโรซิลิเกต ทำให้เกิดลักษณะเคลือบที่บ้นน้อยกว่า


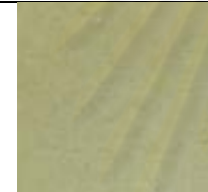
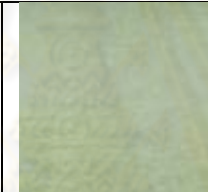
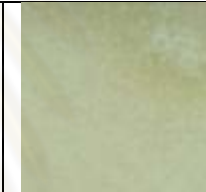

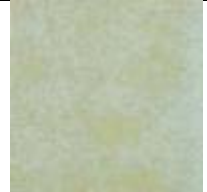

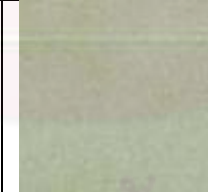


				
S1 ไม่สุก-ร่น	S2 ไม่สุก-ร่น	S3 ไม่สุก-ร่น	S4 สุก-ด้าน	S5 สุก-ด้าน-ร่น
				
S6 สุก-มันเงา-ทึบ	S7 สุก-มันเงา-ทึบ	S8 สุก-ทึบ	S9 สุก-มันเงา-ทึบ	S10 สุก-มันเงา-ใส

ก) เคลือบบนเนื้อดินสโตนแวร์เผาที่ 1000 °C

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

				
S1 ไม่สุก-ร่วน	S2 ไม่สุก-ร่วน	S3 ไม่สุก-ฟอง	S4 สุก-ที่บ	S5 สุก-มันเงา-ที่บ
				
S6 สุก-มันเงา-ที่บ	S7 สุก-มันเงา-ที่บ	S8 สุก-มันเงา-ที่บ	S9 สุก-มันเงา-ที่บ	S10 สุก-มันเงา

ข) เคลือบบนเนื้อดินสโตนแวร์เผาที่ 1150 °C

				
S1 สุก-มันเงา-ใส	S2 สุก-มันเงา-ใส	S3 สุก-มันเงา-ที่บ	S4 สุก-มันเงา	S5 สุก-มันเงา-ที่บ
				
S6 สุก-มันเงา-ที่บ	S7 สุก-มันเงา-หด	S8 สุก-มันเงา-ที่บ	S9 สุก-มันเงา-ที่บ	S10 สุก-มันเงา

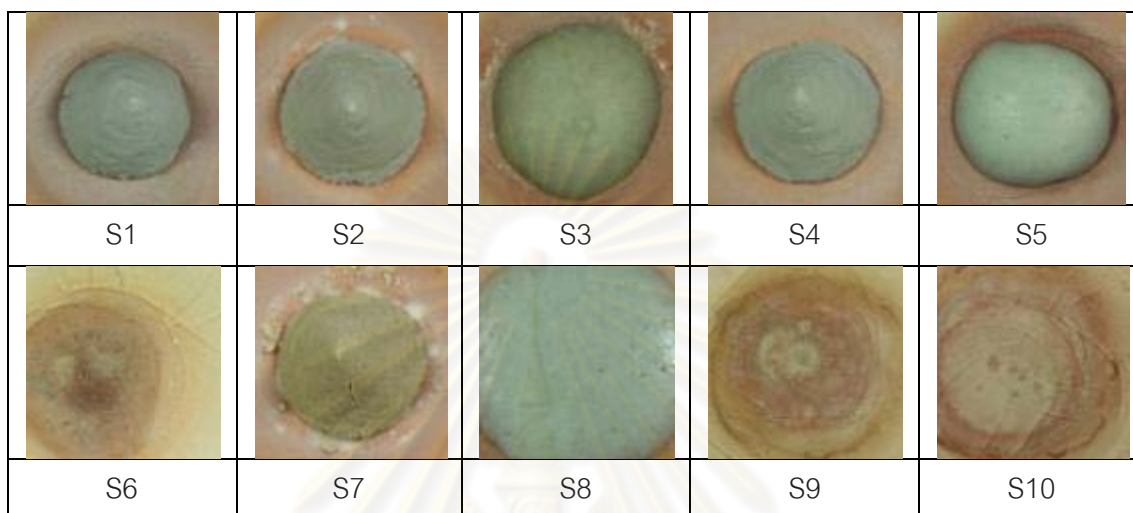
ค) เคลือบบนเนื้อดินสโตนแวร์เผาที่ 1200 °C

รูปที่ 4.19 เคลือบสูตร S1-S10 บนเนื้อดินสโตนแวร์เผาที่ 1000 1150 และ 1200 °C

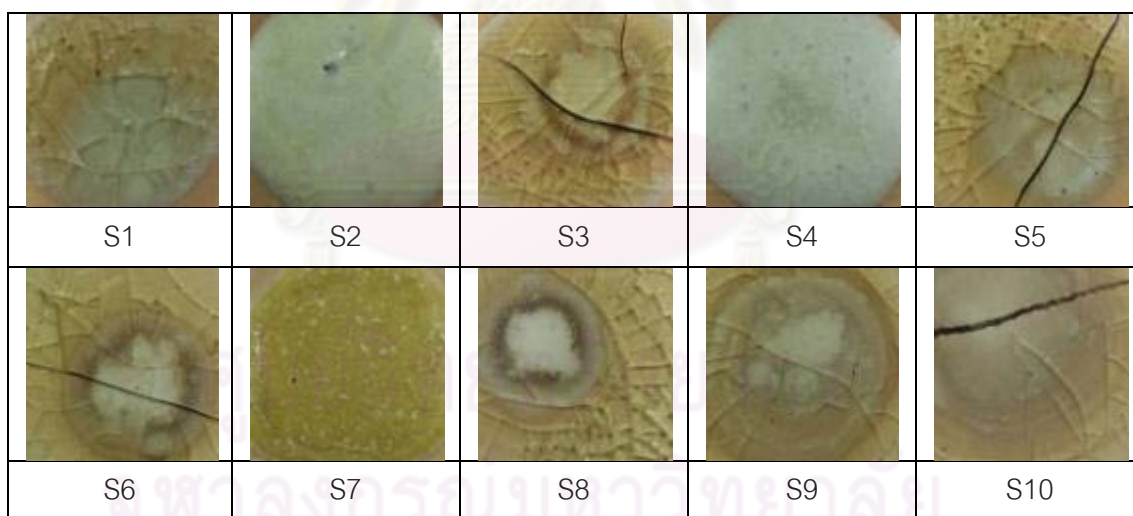
4.7.2. ผลการหลอมตัวของเคลือบสูตร S1-S10 เผาที่อุณหภูมิต่างกัน

จากการทดสอบการหลอมตัวของเคลือบโดยเผาที่ 1000 °C พบว่าเคลือบสูตร S6 S9 และ S10 มีการหลอมตัวดีมาก คือสามารถเห็นได้ว่าการหลอมเป็นเนื้อแก้ว เนื่องจากมีปริมาณบอแรกซ์ ซึ่งเป็นตัวช่วยหลอมละลายอยู่มากกว่า 20% ส่วนสูตรอื่นๆยังมีการหลอมตัวได้ไม่เต็มที่อุณหภูมิต่ำ

และเผาที่ 1150 และ 1200 °C เคลือบทุกสูตรมีการหลอมตัวที่ดีดังรูปที่ 4.21 ส่วนบางสูตรที่ยังหลอมตัวไม่ดี เคลือบมีลักษณะขุ่น เนื่องจากเนื้อวัสดุดิบยังไม่สุกตัว และยังไม่เกิดการหลอม แต่เมื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้น เคลือบมีระยะเวลาเกิดการหลอมตัวได้เต็มที่ ลักษณะขุ่นก็จะหายไปด้วย เนื่องจากในสูตรมีปริมาณ CaO ที่น้อยกว่า



ก) การหลอมตัวของเคลือบเผาที่ 1000 °C



ข) การหลอมตัวของเคลือบเผาที่ 1150 °C

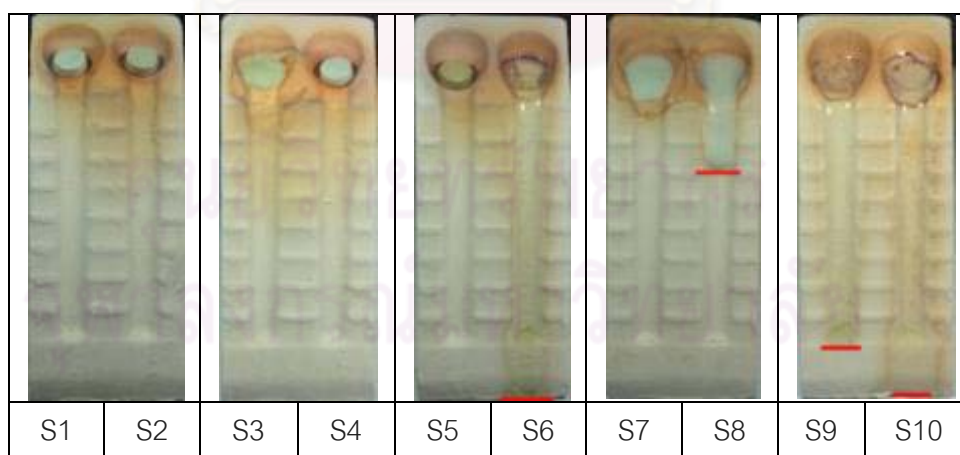


ค) การหลอมตัวของเคลือบเผาที่ 1200 °C

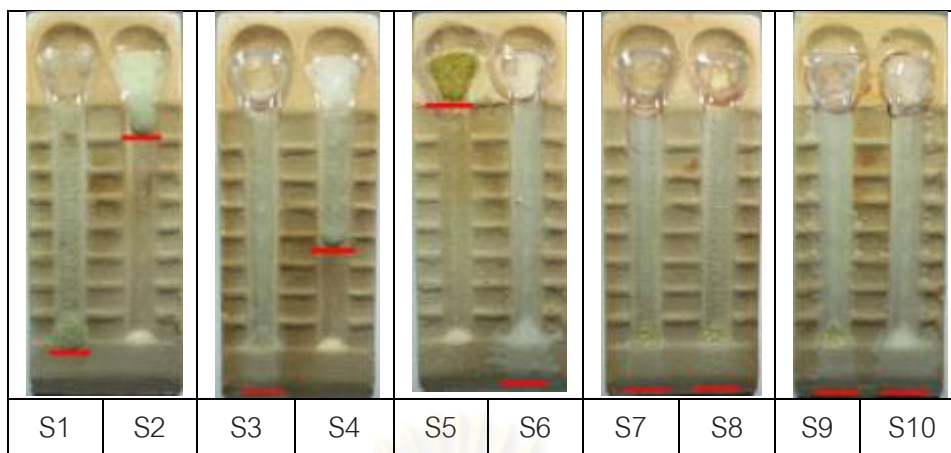
รูปที่ 4.20 การหลอมตัวของเคลือบสูตร S1-S10 เผาที่ 1000 1150 และ 1200 °C

4.7.3. ผลการไหลตัวของเคลือบสูตร S1-S10 เผาที่อุณหภูมิต่างๆกัน

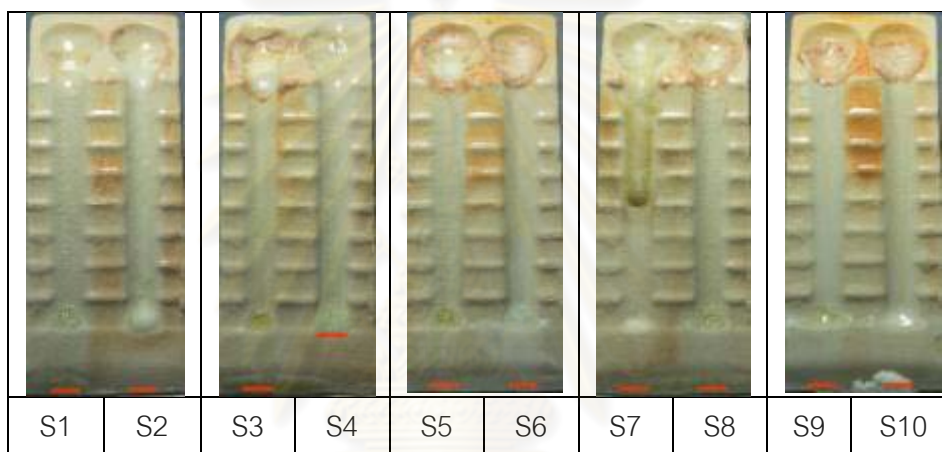
จากการทดสอบการไหลตัวของเคลือบเผาที่ 1000 °C พบว่า สูตร S6 S9 และ S10 มีการไหลตัวที่ดี เผาที่ 1150 °C ทุกสูตรมีการไหลตัวที่ดียกเว้นสูตร S2 S4 และ S5 มีการไหลตัวที่ไม่ดีนัก เนื่องจากในสูตรมีปริมาณบอแรกซ์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวช่วยหลอมละลายแค่เพียง 10% และเผาที่ 1200 °C ทุกสูตรมีการไหลตัวที่มาก ตามรูป 4.21 ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบการหลอมตัว



ก) การไหลตัวของเคลือบเผาที่ 1000 °C



ข) การไหลตัวของเคลือบเผาที่ 1150 °C



ค) การไหลตัวของเคลือบเผาที่ 1200 °C

รูปที่ 4.21 การไหลตัวของเคลือบสูตร S1-S10 เผาที่ 1000 1150 และ 1200 °C

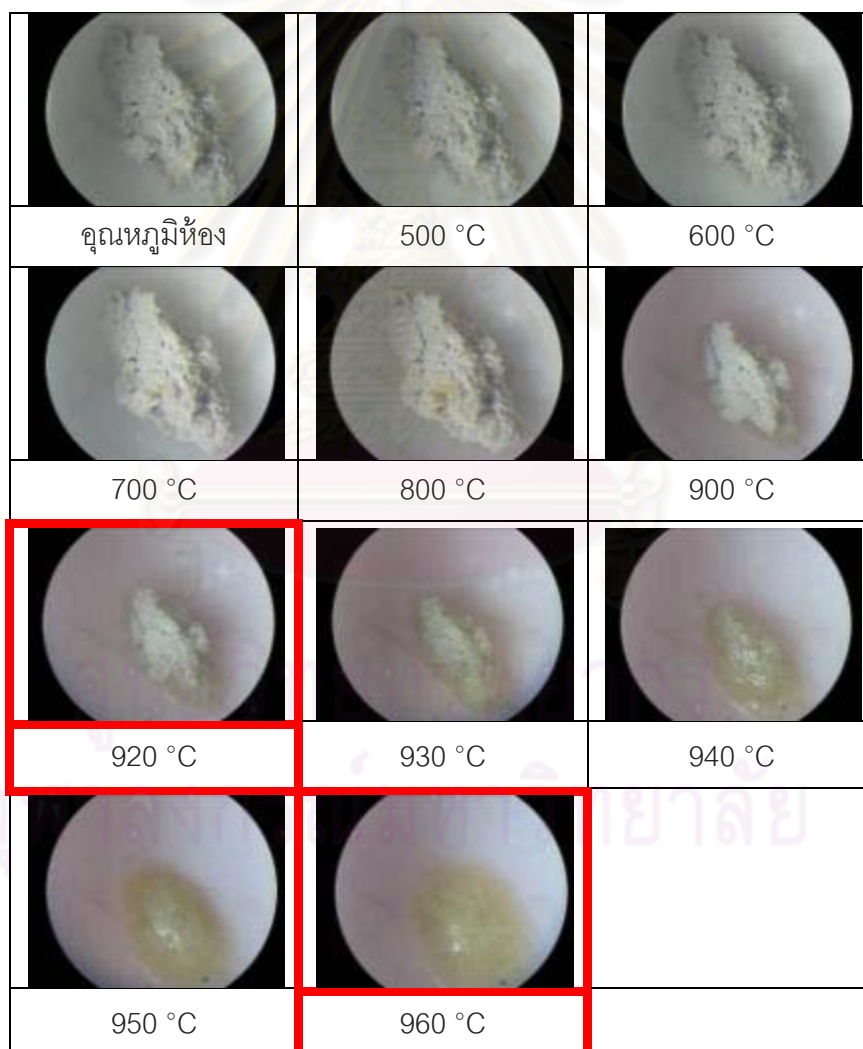
4.7.4. ผลการศึกษาพฤติกรรมการหลอมของเคลือบสูตร S6 S9 และ S10 ด้วย Heating stage microscope

จากการทดสอบพฤติกรรมการหลอมของเคลือบเมื่อให้ความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิที่เคลือบเกิดการหลอมตัว เคลือบสูตร S6, S9 และ S10 เกิดการหลอมตัวได้ที่อุณหภูมิ 960, 950 และ 890 °C ตามลำดับ โดยสูตรที่มีการหลอมดีและเร็วที่สุดคือ สูตร S10 เริ่มมีการหลอมตัวเร็วที่สุดคือที่ประมาณ 800 °C และมีการหลอมตัวมากที่สุดที่ 890 °C จากสูตร S10 นี้ เมื่อเทียบกับงานวิจัยของ H. Bogac Poyraz และคณะ⁽¹⁶⁾ โดยใช้พุ่มมิสแทนโซดาเฟลด์สปาร์ในเคลือบใสใช้เคลือบบนกระเบื้องหลังคาได้เคลือบที่มีเริ่มการหลอมที่อุณหภูมิ 879-881 °C และเมื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการหลอมของเคลือบด้วย Heating stage microscope แล้วพบว่า เคลือบ S10 S9 และ S6 มีการหลอมตัวที่ดีตามลำดับ เนื่องจากปริมาณของบอแรกซ์ที่มากกว่า 20%

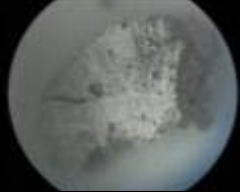
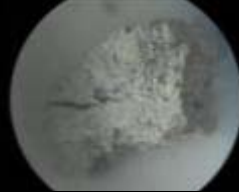
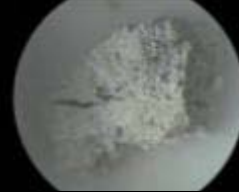



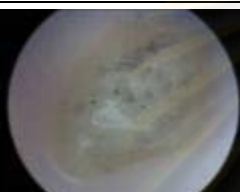



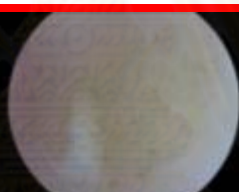
รวมทั้งมีปริมาณของฟลักซ์ที่มากกว่าสูตรอื่นๆ จึงทำให้เคลือบทั้ง 3 สูตร มีการหลอมในอุณหภูมิที่ต่ำลง

ตารางที่ 4.15 อุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาการหลอมของเคลือบสูตร S6 S9 และ S10

สูตร	ยังไม่มีอาการหลอม	เริ่มมีอาการหลอม	อุณหภูมิที่หลอมตัวมาก
S6	อุณหภูมิห้อง-900 °C	920 °C	960 °C
S9	อุณหภูมิห้อง-800 °C	900 °C	950 °C
S10	อุณหภูมิห้อง-750 °C	800 °C	890 °C

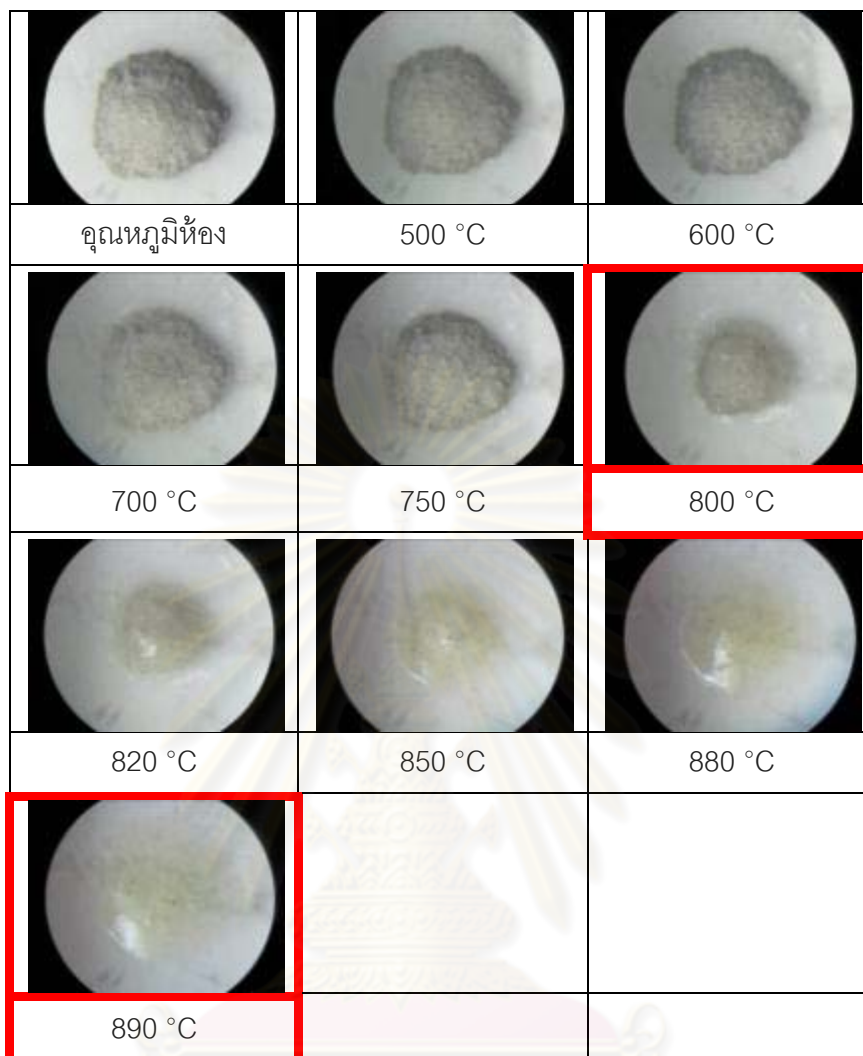


ก) พฤติกรรมการหลอมตัวของเคลือบสูตร S6 ที่อุณหภูมิห้องจนเกิดการหลอมตัว

		
อุณหภูมิห้อง	500 °C	600 °C
		
700 °C	800 °C	900 °C
		
910 °C	920 °C	930 °C
		
940 °C	950 °C	

ข) พฤติกรรมการหลอมตัวของเคลือบสูตร S9 ที่อุณหภูมิห้องจนเกิดการหลอมตัว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



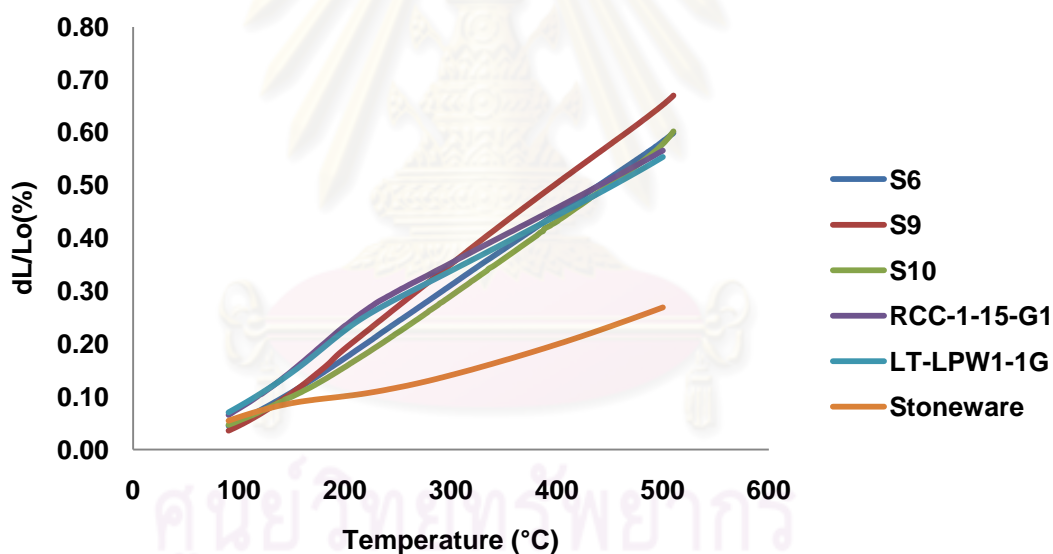
ค) พฤติกรรมการหลอมตัวของเคลือบสูตร S10 ที่อุณหภูมิห้องจนเกิดการหลอมตัว

รูปที่ 4.22 พฤติกรรมการหลอมตัวของเคลือบสูตร S6 S9 และ S10 ที่อุณหภูมิห้องจนเกิดการหลอมตัว

4.7.5. ผลการศึกษาความสัมพันธ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบสูตร S6 S9 และ S10 ด้วยเครื่อง Dilatometer

จากการทดสอบความสัมพันธ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบเมื่อเทียบกับเนื้อดินสโตนแวร์ และเนื้อดินอุณหภูมิต่ำทั้ง 2 ชนิด ตารางที่ 4.16 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเทียบค่า CTE ของเนื้อดินสโตนแวร์กับเคลือบอุณหภูมิต่ำแล้วพบว่า เนื้อดินสโตนแวร์และเคลือบอุณหภูมิต่ำมีค่า CTE ที่ต่างกันโดยที่เนื้อดินสโตนแวร์มีค่า CTE ที่ต่างกับเคลือบมาก เมื่อนำมาเคลือบแล้วจะทำให้เกิดปัญหาที่ผิวโดยเคลือบจะเกิดแรงดึงระหว่างเนื้อดินและเคลือบทำให้เคลือบเกิดการร้าวในขณะที่เมื่อเทียบค่า CTE ของเนื้อดินอุณหภูมิต่ำกับเคลือบอุณหภูมิต่ำแล้วพบว่ามีค่า CTE ที่

ใกล้เคียงกันมากกว่าเนื้อดินสโตนแวร์ เนื่องจากเคลือบนี้มีปริมาณออกไซด์หลายชนิด ซึ่งออกไซด์แต่ละชนิดมีค่า CTE ที่แตกต่างกันไป เช่น $\text{Na}_2\text{O}=0.1 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $\text{Al}_2\text{O}_3=0.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $\text{SiO}_2=0.08 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ และ $\text{CaO}=0.05 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ เมื่อนำมาคำนวณแล้วจะทำให้ได้เคลือบมีค่า CTE ที่สูง และค่า CTE ของเคลือบสูตรที่มีเศษแก้วโซดาไลม์ มีค่า CTE ที่มากกว่าสูตรที่มีเศษแก้วบอโรซิลิเกต เนื่องจากเคลือบสูตรที่มีเศษแก้วโซดาไลม์มีปริมาณ Na_2O และ K_2O มากกว่า ทำให้มีค่า CTE ที่มากขึ้นตามไปด้วย และจากผล XRD ทำให้เห็นว่าเคลือบสูตร S9 ในช่วงอุณหภูมิประมาณ $200\text{-}220^\circ\text{C}$ จากรูปที่ 4.23 เกิดพีคเล็กน้อย เนื่องจากช่วงนั้นเกิดช่วง Cristobalite ของ SiO_2 ในสูตรเคลือบ โดยปกติแล้วเคลือบมีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกาอสัณฐานซึ่งมีค่า CTE ที่ต่ำ แต่เมื่อเติมฟลักซ์ ทำให้เคลือบที่ค่า CTE ที่สูงขึ้นเนื่องจากมีออกซิเจน ไอออนเกินจากความต้องการในโครงสร้างตาข่ายทรงสี่หน้าของซิลิเกต ทำให้ตาข่ายแตกออก เพื่อให้ไอออนที่มีขนาดใหญ่กว่าเกิดการแทรกตัวภายในโครงสร้าง ทำให้เคลือบมีการขยายตัวมากขึ้นเมื่อโดนความร้อน



รูปที่ 4.23 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบสูตร S6 S9 และ S10 เทียบกับเนื้อดินทั้ง 3 ชนิด

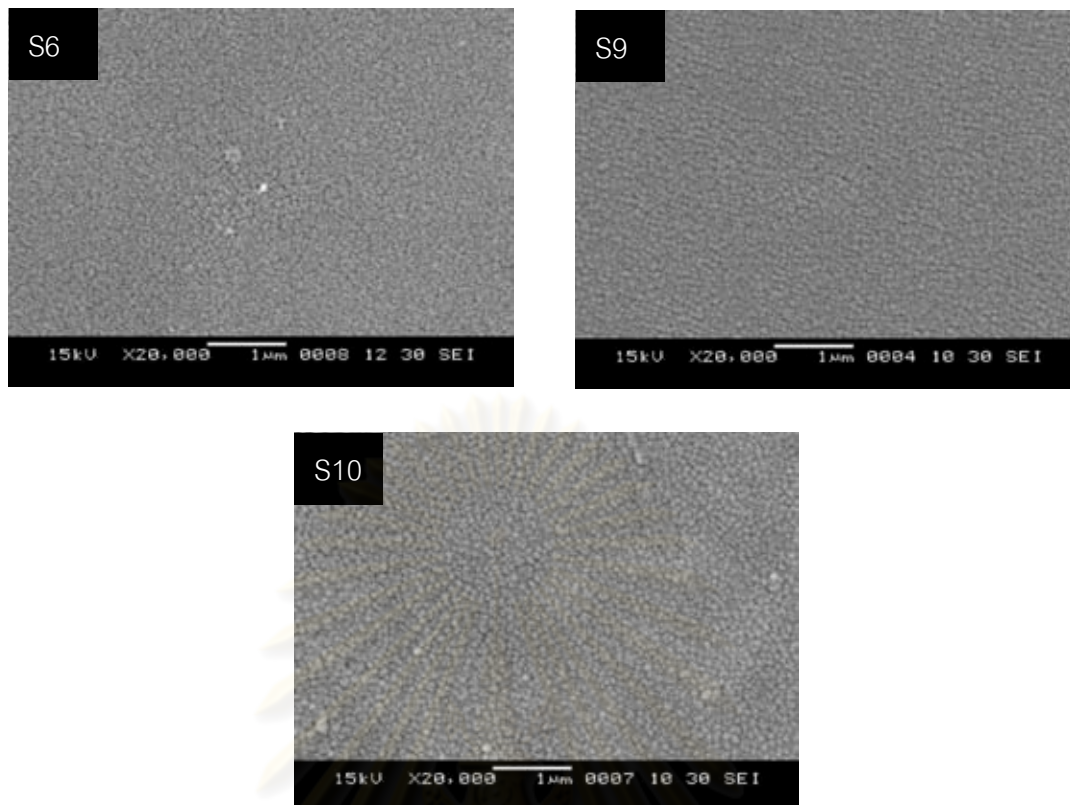
ตารางที่ 4.16 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบสูตร S6 S9 และ S10 เมื่อเทียบกับเนื้อดิน 3 ชนิด

สูตร	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (CTE)		
	50-300 °C $\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	50-500 °C $\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	300-500 °C $\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
S6	11.86	12.64	13.62
S9	13.69	14.31	15.1
S10	10.96	12.48	14.4
RCC-1-15-G1	13.10	12.00	10.64
LT-LPW1-G1	12.42	11.69	10.78
Stoneware	4.69	5.46	6.42

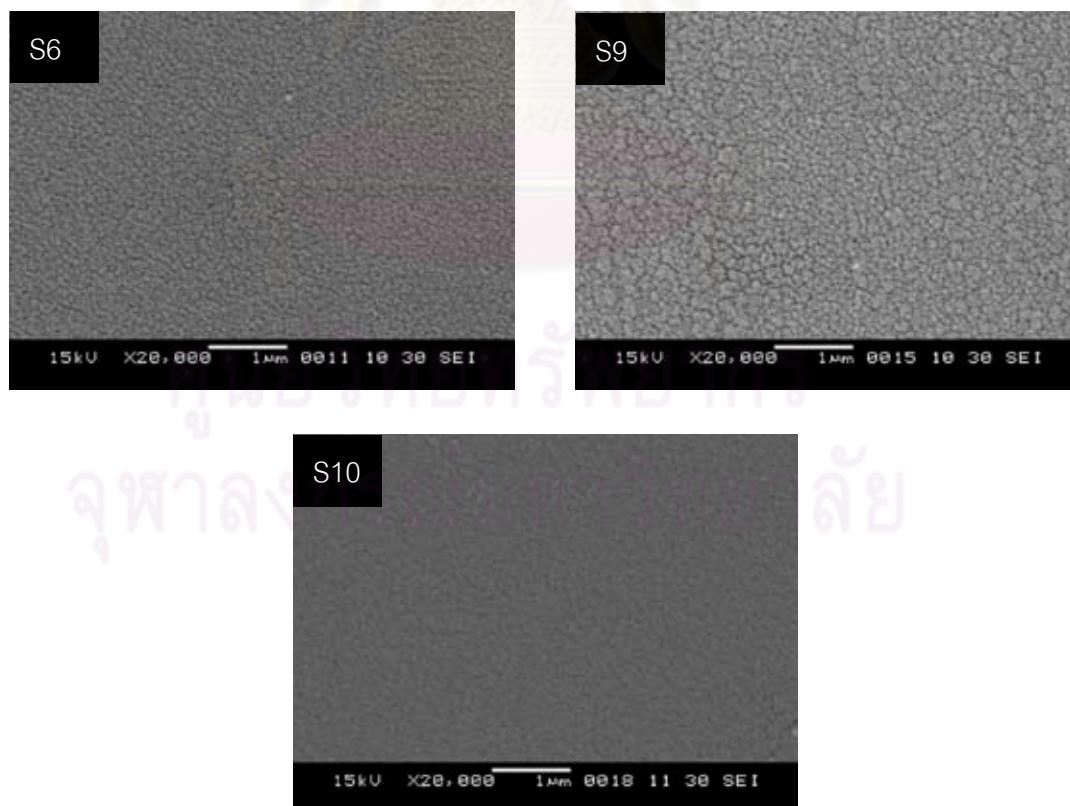
4.7.6. ผลการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของเคลือบสูตร S6 S9 และ S10 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของเคลือบเผาที่ 1000 °C พบว่าเคลือบทุกสูตรมีผิวที่เรียบและมีผลึกเล็กๆ และเท่าๆ กันบริเวณผิวเช่นเดียวกัน คาดว่าเกิดจาก CaO ถูกทิ้งให้เย็นตัวลงช้าๆ จึงเกิดเป็นผลึกบนผิวของเคลือบ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็น 1150 °C จะเห็นได้ว่าเคลือบมีขนาดผลึกที่ใหญ่ขึ้นจากอุณหภูมิ 1000 °C⁽²³⁾ และสูตร S10 ที่ 1150 °C เกิดผลึกน้อยที่สุด เพราะว่า มีปริมาณฟลักซ์ในสูตรเคลือบมาก และมีปริมาณเศษแก้วที่ช่วยหลอมและเกิดการเป็นเนื้อแก้วได้มากกว่าสูตรอื่นๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



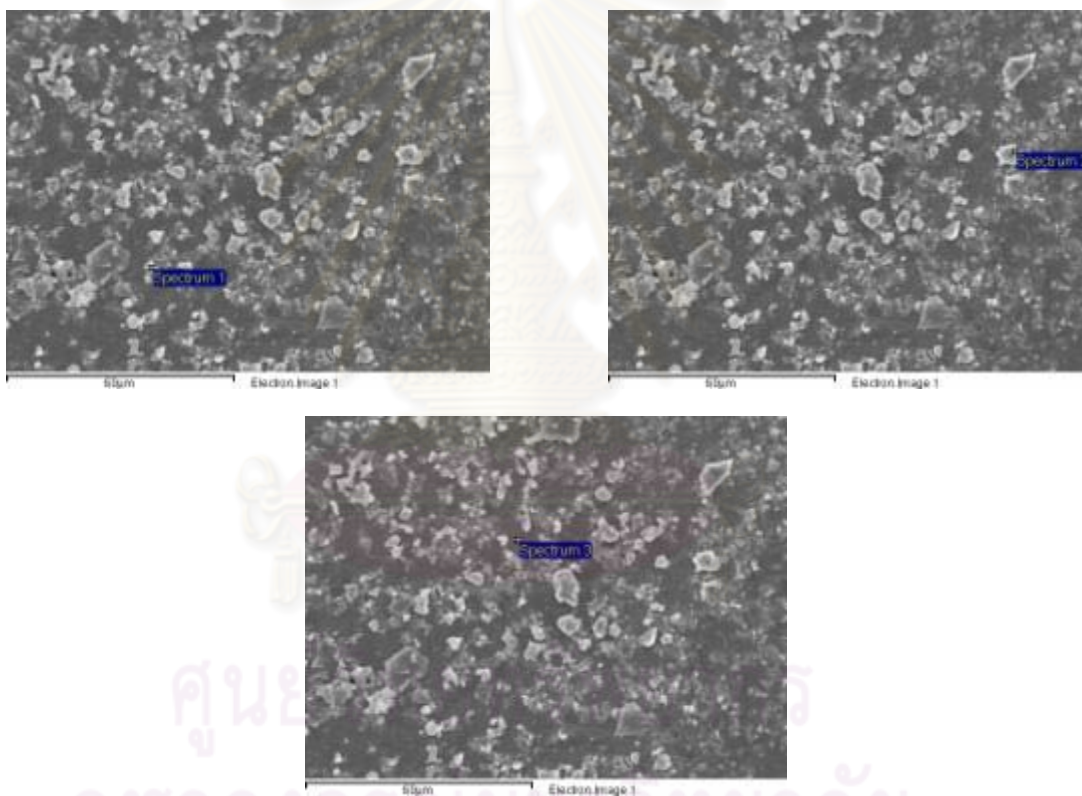
รูปที่ 4.24 โครงสร้างทางจุลภาคของเคลือบสูตร S6 S9 และ S10 หลังเผาที่ 1000 °C



รูปที่ 4.25 โครงสร้างทางจุลภาคของเคลือบสูตร S6 S9 และ S10 หลังเผาที่ 1150 °C

4.7.7. ผลการวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบของเคลือบสูตร S6 S9 และ S10 หลังเผาที่ 1000 °C ด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ Energy Dispersive System (EDS)

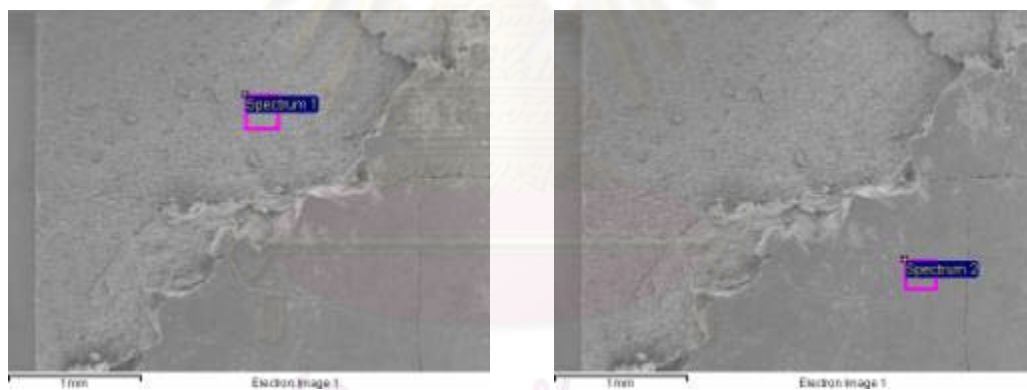
จากการวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบของเคลือบสูตร S6 S9 และ S10 เมื่อเผาที่ 1000 °C เคลือบสูตร S6 มีปริมาณของ Si และ O อยู่เป็นหลักจึงเกิดเป็น Cristobalite เคลือบสูตร S9 มีปริมาณของ Ca Si O จึงเกิดเป็น Wollastonite, Cristobalite และเคลือบสูตร S10 มีปริมาณของ Si และ O เป็นหลักจึงเกิดเป็นแก้ว ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางเฟสของเคลือบที่ไม่เกิดเป็นผลึก แสดงว่าเคลือบทั้งหมดเกิดการหลอมตัวกลายเป็นแก้ว



รูปที่ 4.26 ธาตุและองค์ประกอบของผิวเคลือบสูตร S6 เผาที่ 1000 °C

ตารางที่ 4.17 การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบทางเคมีแต่ละจุดของเคลือบS6

ธาตุ	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
	Weight%	Weight%	Weight%
C	-	7.46	11.54
O	49.76	38.2	38.6
Na	1.36	1.13	1.6
Al	4.93	12.43	3.39
Si	41.36	25.97	27.24
K	1.49	3.25	1.78
Ca	1.1	8.7	15.85
Fe	-	2.44	-

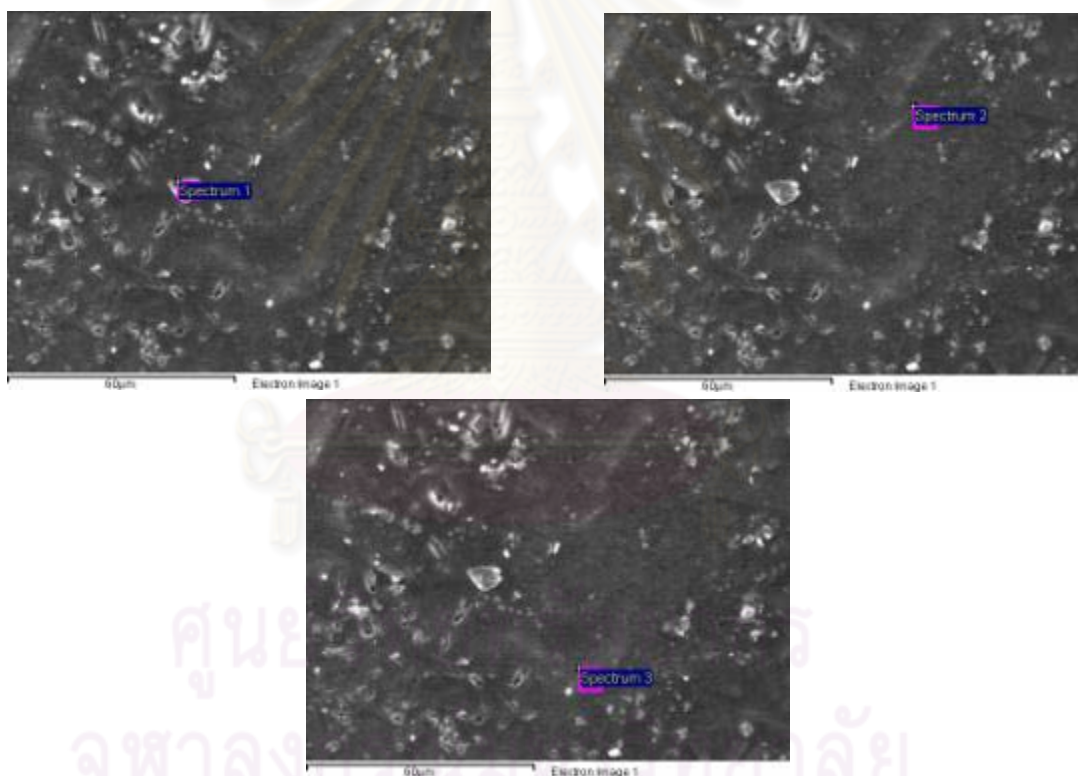


รูปที่ 4.27 ธาตุและองค์ประกอบของผิวเคลือบสูตร S9 เผาที่ 1000 °C

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.18 การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบทางเคมีแต่ละจุดของเคลือบ S9

ธาตุ	Spectrum 1	Spectrum 2
	Weight%	Weight%
O	41.05	32.78
Na	1.46	3.07
Al	12.41	3.58
Si	28.44	28.69
K	2.21	2.33
Ca	1.44	16.94



รูปที่ 4.28 ธาตุและองค์ประกอบของผิวเคลือบสูตร S10 เเผาที่ 1000 °C

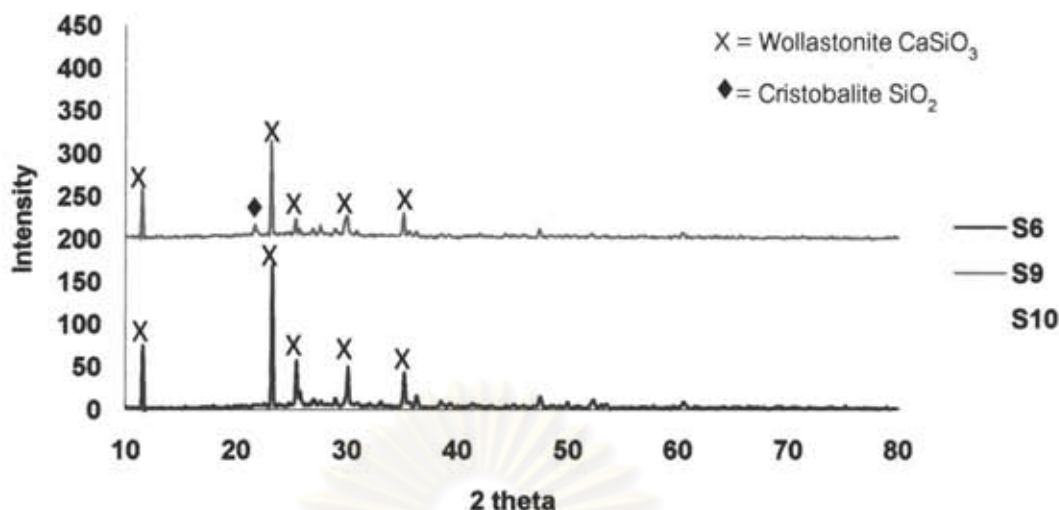
ตารางที่ 4.19 การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบทางเคมีแต่ละจุดของเคลือบ S10

ธาตุ	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
	Weight%	Weight%	Weight%
O	37.69	41.26	44.53
Na	1.16	1.91	1.76
Al	11.8	1.97	1.26
Si	22.98	24.61	21.13
P	-	-	0.42
K	5.48	1.67	1.14
Ca	6.51	18.39	19.3

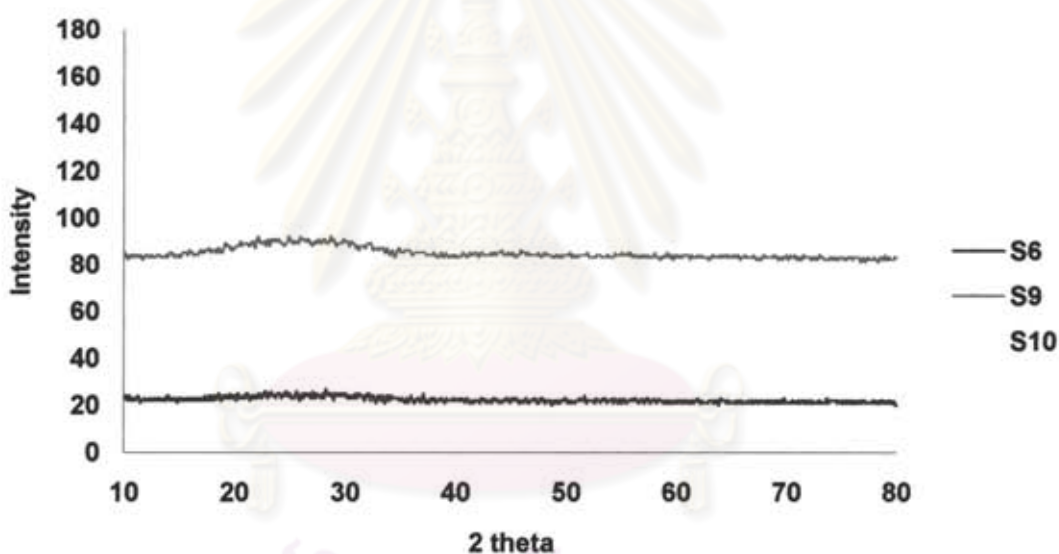
4.7.8. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบสูตร S6 S9 และ S10 หลังเผาที่ 1000 °C

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบสูตร S6 S9 และ S10 หลังเผาที่ 1000 °C ด้วยเครื่อง X-ray Diffraction โดยใช้ $\text{Cu}\alpha$ radiation ที่ scanning speed 2.4 องศาต่อนาที ในช่วงมุม 2θ ตั้งแต่ 10-80 องศา

วิเคราะห์เฟสของเคลือบสูตร S เผาที่ 1000 °C พบว่าสูตร S6 พบเฟส Wollastonite, CaSiO_3 (JCPDS 01-083-2198) ส่วนสูตร S9 พบทั้งเฟส Cristobalite, SiO_2 (JCPDS 00-002-0278) และ Wollastonite, CaSiO_3 (JCPDS 00-043-1460) ส่วนสูตร S10 ไม่พบผลึก เพราะเคลือบเกิดสภาพกลายเป็นแก้ว เนื่องจากมีปริมาณ SiO_2 และ K_2O Na_2O and CaO ซึ่งเป็นฟลักซ์ในปริมาณมาก⁽²⁴⁾ และเมื่อนำไปเผาที่ 1150 °C ทั้งสูตร S6 S9 และ S10 ไม่พบผลึกเพราะเคลือบกลายเป็นเนื้อแก้วหมดแล้ว ดังรูปที่ 4.30



ก) องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบสูตร S6 S9 และ S10 ที่อุณหภูมิ 1000 °C



ข) องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบสูตร S6 S9 และ S10 เหนือที่ 1150 °C

รูปที่ 4.29 องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบสูตร S6 S9 และ S10 เหนือที่ 1000 และ 1150 °C

4.7.9. ผลการวิเคราะห์ความต้านทานสารเคมี (ISO 10545-13-1996)

จากการวิเคราะห์ความต้านทานสารเคมีของเคลือบสูตร S9 และ S10 พบว่าเคลือบทุกสูตรผ่านการทดสอบด้วยดินสอ HB และเคลือบสามารถทนทานต่อการแช่ด้วย HCl ได้ โดยเมื่อทำการทดสอบ พบว่าบริเวณผิวเคลือบไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง แต่เมื่อนำไปทดสอบด้วยการแช่ NaOH ปรากฏว่าเคลือบเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ร่อนอยู่บนบริเวณผิวเคลือบ เกิดจาก NaOH ไปทำลายพันธะ Si-O-Si เลยทำให้มีแอลคาไลน์ออกมามากขึ้น จากนั้นจึงเกิดเป็นการกัดกร่อน SiO_2 ออก⁽²²⁾

เช่นเดียวกับสูตรที่มีเศษแก้วบอโรซิลิเกต เนื่องจากเคลือบมีปริมาณ MgO Al_2O_3 ในปริมาณน้อย จึงทำให้ไม่ทนทานต่อสารเคมีประเภทต่าง

ตารางที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์ความต้านทานสารเคมีของเคลือบสูตร S9 และ S10

เนื้อดิน	สูตรเคลือบ	HCl	NaOH	ดินสอ HB
RCC-1-15-G1	S9	✓	✗	✓
	S10	✓	✗	✓
LP-LPW1-G1	S9	✓	✗	✓
	S10	✓	✗	✓

✓ = ชิ้นงานผ่านการทดสอบด้วยสารเคมี, ✗ = ชิ้นงานไม่ผ่านการทดสอบด้วยสารเคมี

4.8. ผลการวิเคราะห์สมบัติของเนื้อดินอุณหภูมิต่ำ 2 สูตร

4.8.1. วิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของเนื้อดินอุณหภูมิต่ำทั้ง 2 สูตร

เมื่อทำการศึกษาความหนาแน่นของเนื้อดินทั้ง 2 สูตรคือ RCC-1-15-G1 และ LT-LPW1-G1 ตามมาตรฐาน ASTM C 737 ได้ผลดังตารางที่ 4.21 และ 4.22 จากการวิเคราะห์พบว่าเนื้อดินทั้ง 2 ชนิดมีค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ยประมาณ 0.0-0.1% ซึ่งถือว่าเป็นค่าการดูดซึมน้ำที่ต่ำมาก

ตารางที่ 4.21 สมบัติของเนื้อดินอุณหภูมิต่ำสูตร LT-LPW1-G1

สูตร LT-LPW1-G1	ค่าเฉลี่ย
Bulk density	2.356
Apparent density	2.359
%Apparent density	0.109
%Water absorption	0.046

ตารางที่ 4.22 สมบัติของเนื้อดินอุณหภูมิต่ำสูตร RCC-1-15-G1

สูตร RCC-1-15-G1	ค่าเฉลี่ย
Bulk density	2.408
Apparent density	2.414
%Apparent density	0.267
%Water absorption	0.111

4.8.2. วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเนื้อดิน 2 สูตร

นำเนื้อดินทั้ง 2 ชนิดไปวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนพบว่า เนื้อดินทั้ง 2 ชนิดมีค่า CTE สูงเมื่อเทียบกับเนื้อดินสโตนแวร์ และเมื่อนำเนื้อดินอุณหภูมิต่ำมาเคลือบด้วยเคลือบอุณหภูมิต่ำแล้วพบว่าเกิดการร้าวที่น้อยมาก หรือแทบจะไม่มีการร้าวเลย เพราะว่าเนื้อดินอุณหภูมิต่ำและเคลือบมีค่า CTE ที่ใกล้เคียงกันมาก

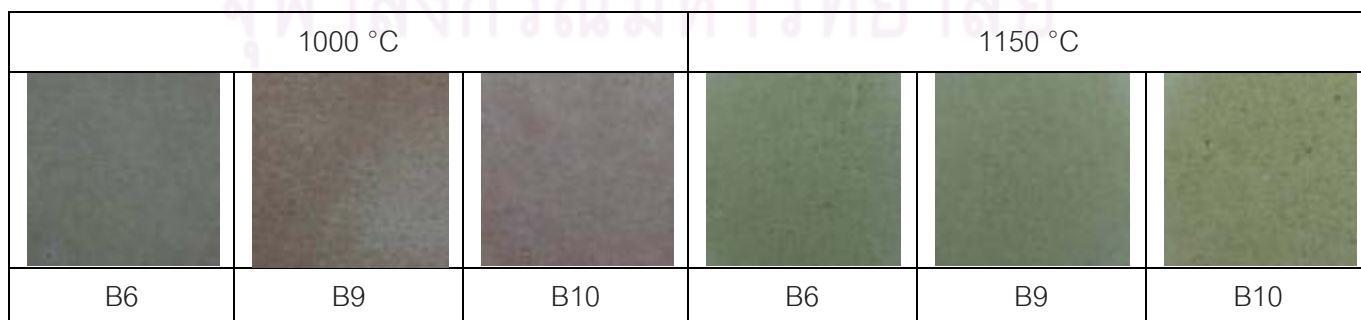
ตารางที่ 4.23 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเนื้อดินอุณหภูมิต่ำ 2 สูตร

สูตร	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (CTE)		
	50-300 °C x 10 ⁻⁶ /°C	50-500 °C x 10 ⁻⁶ /°C	300-500 °C x 10 ⁻⁶ /°C
RC-1-15-G1	13.10	12.00	10.64
LT-LPW1-G1	12.42	11.69	10.78
Stoneware	4.69	5.46	6.42

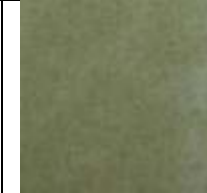
4.9 การทดลองเคลือบบนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำ 2 สูตร

4.8.3. ผลการเผาเคลือบสูตร B6 B9 และ B10 บนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำสูตร RCC-1-15-G1 และ LT-LPW1-G1 เผาที่อุณหภูมิต่างๆกัน

นำเคลือบสูตร B6 B9 และ B10 ที่สุกและมันเงาเมื่อเผาที่ 1000 °C ทดลองเคลือบบนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำทั้ง 2 สูตรคือ RCC-1-15-G1 และ LT-LPW1-G1 เผาที่ 1000 และ 1150 °C เมื่อเผาที่ 1000 °C เคลือบสุกมีลักษณะมันเงา และเนื่องจากสูตร RCC-1-15-G1 เป็นเนื้อดินที่มีสีน้ำตาล เคลือบที่ได้เป็นลักษณะเคลือบใส จึงทำให้สามารถมองเห็นเนื้อดินได้ และทดลองชุบเคลือบบนเนื้อดิน LT-LPW1-G1 เผาที่ 1000 และ 1150 °C ซึ่งได้ผลเช่นเดียวกับสูตร RCC-1-15-G1 คือสุกตัวและมีความมันเงาทั้ง 2 อุณหภูมิ และไม่เกิดการร้าวเพราะเนื้อดินอุณหภูมิต่ำและเคลือบมีค่า CTE ที่ใกล้เคียงกันมาก



ก) เคลือบบนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำสูตร RCC-1-15-G1 เผาที่ 1000 และ 1150 °C

1000 °C			1150 °C		
					
B6	B9	B10	B6	B9	B10









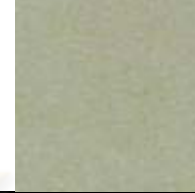
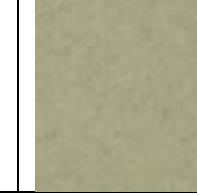
ข) เคลือบบนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำสูตร LT-LPW-G1 เผาที่ 1000 และ 1150 °C

รูปที่ 4.30 เคลือบสูตร B บนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำทั้ง 2 ชนิด เผาที่ 1000 และ 1150 °C

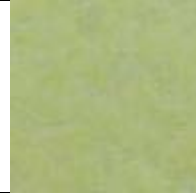
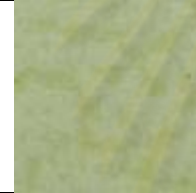




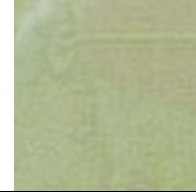
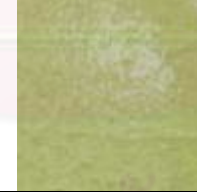


4.8.4. ผลการเผาเคลือบสูตร S1-S10 บนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำ RCC-1-15-G1 และ LT-LPW1-G1 เผาที่อุณหภูมิต่างๆกัน

จากการทดสอบชุบเคลือบด้วยเนื้อดินอุณหภูมิต่ำสูตร RCC-1-15-G1 และ LT-LPW1-G1 เผาที่ 1000 และ 1150 °C พบว่าเนื้อดิน RCC-1-15-G1 เมื่อเผาที่ 1000 °C เคลือบทุกสูตรสุกตัวแต่ไม่มันเงา แต่สูตร S3 S4 S6 S7 S9 และ S10 เคลือบมีการสุกตัวและมันเงา เผาที่ 1150 °C เคลือบทุกตัวมีการสุกตัวและสูตร S2 S3 S4 S5 และ S7 สีขาวขุ่นจากเคลือบอาจเป็นเพราะว่ามีปริมาณของ CaO, B₂O₃ อยู่ในเคลือบ ซึ่งทำให้ได้เคลือบที่มีลักษณะขุ่น และเคลือบที่ได้มีความมันเงาและเห็นสีของเนื้อดินเนื่องจากดินที่นำมาใช้ทดลองเคลือบนั้นเป็นดินแดง และเมื่อชุบเคลือบด้วยเนื้อดินสูตร LT-LPW1-G1 เมื่อเผาที่ 1000 และ 1150 °C พบว่าที่ 1000 °C เคลือบ สุกตัวทั้งหมด เคลือบสูตร S4 S6 S8 S9 และ S10 เคลือบสุกตัวและมีความมันเงา แต่เคลือบสูตร S1 S2 S3 S5 และ S7 สุกตัวแต่เป็นลักษณะด้าน และเผาที่ 1150 °C เคลือบทุกสูตรสุกตัวและมันเงา แต่สูตร S1 เคลือบเกิดเป็นผลึกขนาดใหญ่ลอยอยู่บนผิว S3 S4 และ S5 เคลือบมีลักษณะเป็นฝ้าที่ผิวเคลือบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




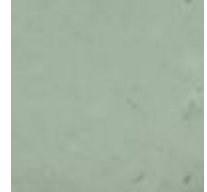
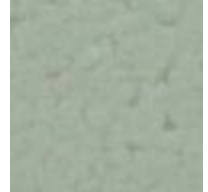
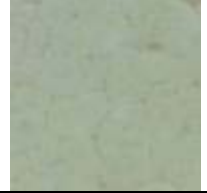

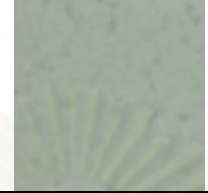

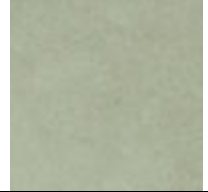
				
S1 สุก-ด้าน-ร่วน	S2 สุก-ด้าน-ร่วน	S3 สุก-มันเงา-ทึบ	S4 สุก-มันเงา-ทึบ	S5 สุก-ด้าน-ร่วน
				
S6 สุก-มันเงา-ทึบ	S7 สุก-มันเงา	S8 สุก-ด้าน-ร่วน	S9 สุก-มันเงา-ทึบ	S10 สุก-มันเงา

ก) เคลือบบนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำสูตร RCC-1-15-G1 เผาที่ 1000 °C


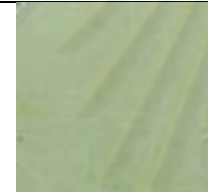
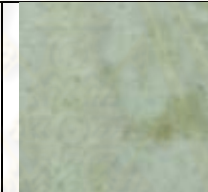



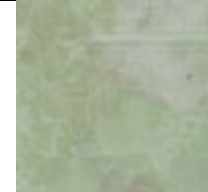
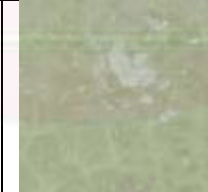
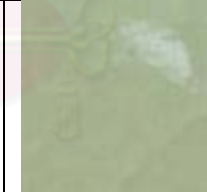

				
S1 สุก-มันเงา	S2 สุก-มันเงา-ทึบ	S3 สุก-มันเงา-ทึบ	S4 สุก-มันเงา-ทึบ	S5 สุก-มันเงา-ทึบ
				
S6 สุก-มันเงา	S7 สุก-มันเงา-ทึบ	S8 สุก-มันเงา	S9 สุก-มันเงา	S10 สุก-มันเงา

ข) เคลือบบนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำสูตร RCC-1-15-G1 เผาที่ 1150 °C

รูปที่ 4.31 เคลือบสูตร S1-S10 บนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำสูตร RCC-1-15-G1 เผาที่ 1000 1150 °C

				
S1 สุก-ด้าน-ร้อน	S2 สุก-ด้าน-ร้อน	S3 สุก-ด้าน-ร้อน	S4 สุก-ด้าน	S5 สุก-ด้าน-ร้อน
				
S6 สุก-ด้าน	S7 สุก-ด้าน	S8 สุก-ด้าน	S9 สุก-ด้าน	S10 สุก-มัน-ที่บ

ก) เคลือบบนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำสูตร LT-LPW1-G1 เผาที่ 1000 °C

				
S1 สุก-มันเงา-ที่บ	S2 สุก-มันเงา	S3 สุก-มันเงา-ที่บ	S4 สุก-มันเงา-ที่บ	S5 สุก-มันเงา-ที่บ
				
S6 สุก-มันเงา	S7 สุก-มันเงา	S8 สุก-มันเงา	S9 สุก-มันเงา	S10 สุก-มันเงา-ใส

ข) เคลือบบนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำสูตร LT-LPW1-G1 เผาที่ 1150 °C

รูปที่ 4.32 เคลือบสูตร S1-S10 บนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำสูตร LT-LPW1-G1 เผาที่ 1000 1150 °C



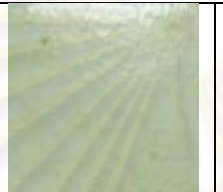





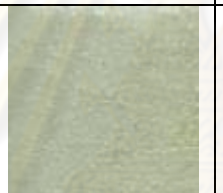

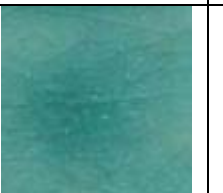

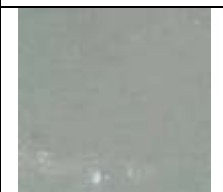

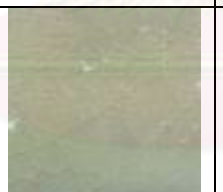

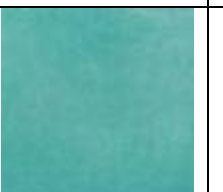


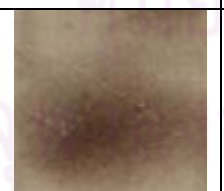



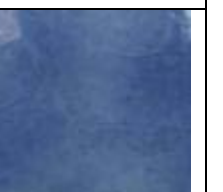
4.9. การทดลองเติมออกไซด์ชนิดต่างๆ ในเคลือบ

ทดลองเลือกเคลือบที่สุกตัวดี นำมาใส่ออกไซด์ชนิดต่างๆ นำไปเผาที่ 1000 °C ซึ่งในการทดลองนี้ได้้นำเคลือบสูตร B9 และ B10 มาทดลองเคลือบ และใส่ออกไซด์ชนิดต่างๆ เพื่อดูผลของ

เคลือบ โดยใช้ปริมาณออกไซด์ 0.5% โดยน้ำหนัก ยกเว้น Fe_2O_3 ที่ใช้ 1% โดยน้ำหนัก เนื่องจาก Fe_2O_3 ที่ได้ค่อนข้างมากเนื่องจากว่า Fe_2O_3 เมื่อใช้คู่กับ CaO แล้วจะให้สีเหลืองจนถึงสีเนื้อ⁽²⁵⁾

4.9.1. ผลการเผาเคลือบออกไซด์ลงบนเนื้อดินสโตนแวร์

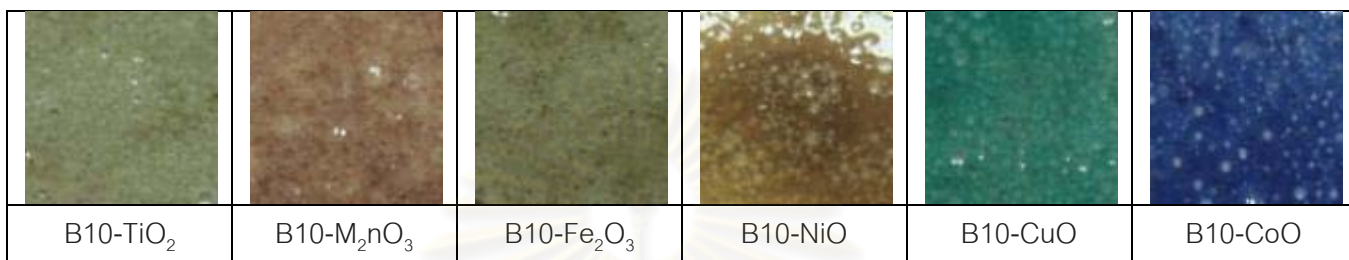
ทดลองใส่ออกไซด์ ชนิดต่างๆ TiO_2 Mn_2O_3 Fe_2O_3 NiO CuO และ CoO ลงในเคลือบที่มีการสุกตัวดีคือสูตร B9 B10 S9 และ S10 จากนั้นนำไปเคลือบบนเนื้อดินสโตนแวร์และเผาที่ $1000\text{ }^\circ\text{C}$ ได้ผลดังรูปที่ 4.34 เคลือบบางสูตรที่ได้เกิดการรานตัว เนื่องจากค่า CTE ของเนื้อดินสโตนแวร์และเคลือบไม่เท่ากัน เคลือบบางตัวสีไม่เท่ากันทั้งขึ้นทดสอบเนื่องจากสูตรเคลือบไม่มีตัวช่วยในการกระจายตัวเช่น ดินขาว ที่ทำให้เคลือบเกิดการกระจายตัวของสีที่เท่ากัน

					
B9- TiO_2	B9- Mn_2O_3	B9- Fe_2O_3	B9-NiO	B9-CuO	B9-CoO
					
S9- TiO_2	S9- Mn_2O_3	S9- Fe_2O_3	S9-NiO	S9-CuO	S9-CoO
					
B10- TiO_2	B10- Mn_2O_3	B10- Fe_2O_3	B10-NiO	B10-CuO	B10-CoO
					
S10- TiO_2	S10- Mn_2O_3	S10- Fe_2O_3	S10-NiO	S10-CuO	S10-CoO

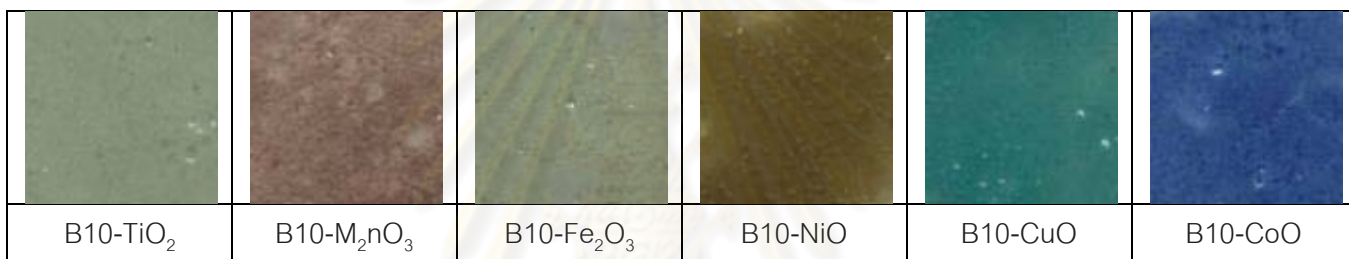
รูปที่ 4.33 เคลือบสูตร B9 S9 B10 และ S10 ที่เติมออกไซด์บนเนื้อดินสโตนแวร์เผาที่ $1000\text{ }^\circ\text{C}$

4.9.2. ผลการเผาเคลือบสูตร B10 และ S10 บนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำทั้ง 2 ชนิดเผาที่ 1000 °C

เมื่อเคลือบลงบนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำเผาที่ 1000 °C พบว่าเคลือบเกิดฟองอากาศ อาจเกิดจากเคลือบที่มีความหนาแน่นมากเกินไป และเมื่อนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้น และอุณหภูมิเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ทำให้ภายในเคลือบนั้นมีการถ่ายเทฟองอากาศออกไปจากผิวไม่หมดจึงเกิดเป็นฟองอากาศในชั้นเคลือบ และ Fe_2O_3 เมื่อใช้ร่วมกับ CaO จะให้สีเหลืองไปจนถึงสีเนื้อ

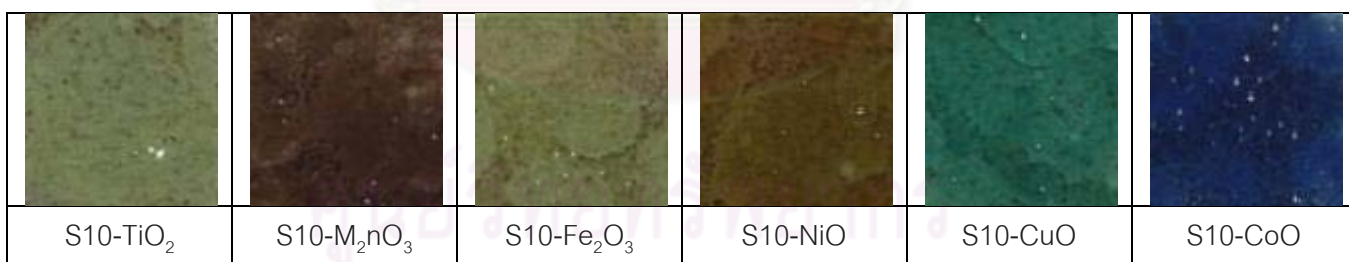


ก) เคลือบบนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำสูตร RCC-1-15-G1 เผาที่ 1000 °C

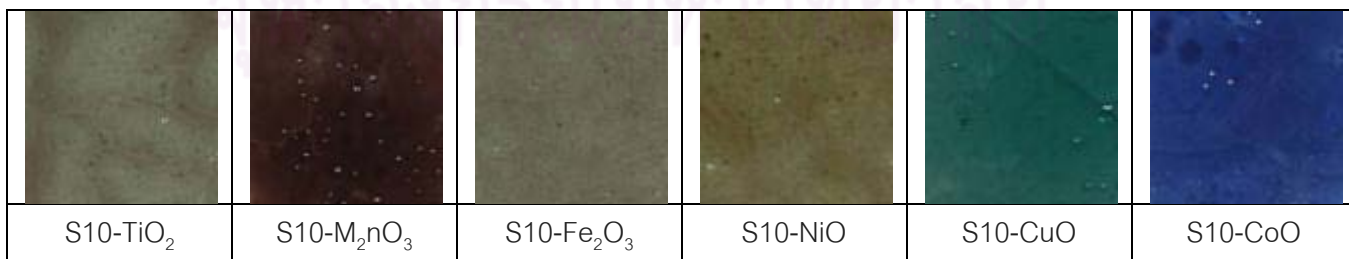


ข) เคลือบบนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำสูตร LT-LPW-G1 เผาที่ 1000 °C

รูปที่ 4.34 เคลือบสูตร B10 ที่เติมออกไซด์เคลือบบนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำทั้ง 2 สูตร เผาที่ 1000 °C



ก) เคลือบบนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำสูตร RCC-1-15-G1 เผาที่ 1000 °C

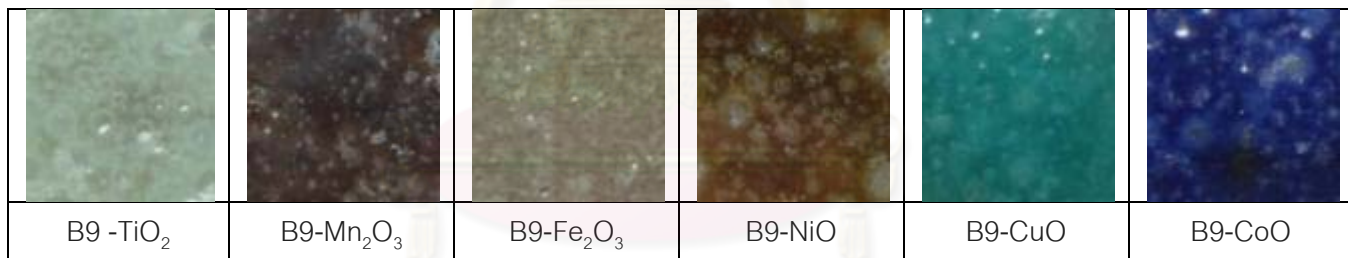


ข) เคลือบบนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำสูตร LT-LPW-G1 เผาที่ 1000 °C

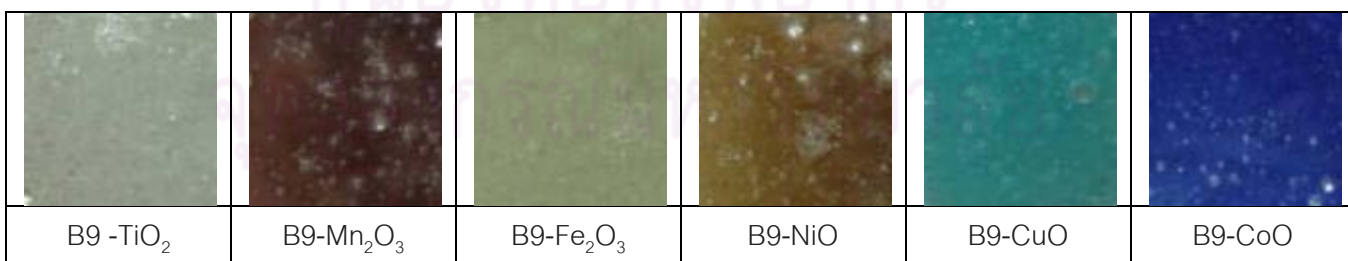
รูปที่ 4.35 เคลือบสูตร S10 ที่เติมออกไซด์บนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำทั้ง 2 สูตร เผาที่ 1000 °C

4.9.3. ผลการเผาเคลือบสูตร B9 B10 S9 และ S10 บนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำทั้ง 2 ชนิด เเผาที่ 950 °C

เมื่อเผาที่ 1000 °C พบว่าเคลือบทุกสูตรมีการสุกตัวและมันเงา จากนั้นจึงนำเคลือบสูตร B9 B10 S9 และ S10 มาทดลองเคลือบลงบนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำเผาที่ 1000 °C คือนำไปเผาที่ 950°C เคลือบสูตร B9 และ B10 พบว่าเคลือบเกิดฟองอากาศ อาจเกิดเนื้อดินอุณหภูมิต่ำยังมีการดูดซึมน้ำอยู่ เมื่อนำมาชุบเคลือบทำให้เกิดการดูดน้ำได้ง่าย ทำให้ได้เคลือบที่มีความหนา จึงทำให้เมื่อทำการเผาเคลือบที่อุณหภูมิ 950 °C จากนั้นอุณหภูมิจึงเกิดการเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ทำให้ภายในเคลือบนั้นมีการถ่ายเทฟองอากาศออกไปจากผิวไม่หมดจึงเกิดเป็นฟองอากาศในชั้นเคลือบ และ Fe_2O_3 เมื่อใช้ร่วมกับ CaO จะให้สีเหลืองไปจนถึงสีเนื้อ เคลือบสูตร S9 เมื่อเผาแล้วพบว่าเคลือบมีลักษณะที่สุกแต่ด้าน ส่วนเคลือบสูตร S10 พบว่า ทุกสูตรสุกและมันเงา ไม่เกิดฟองอากาศในเคลือบ เป็นเพราะสูตร S10 มีปริมาณบอแรกซ์มากกว่า 20% จึงทำให้ช่วยในการหลอมตัวได้ดีแม้ในอุณหภูมิต่ำ และสังเกตได้ว่าเคลือบบนเนื้อดิน RCC-1-15-G1 มีฟองอากาศที่มากกว่าสูตร LT-LPW1-G1 เนื่องจากเนื้อดินสูตร RCC-1-15-G1 มีความพรุนตัวที่มากกว่า จึงทำให้เมื่อนำไปชุบด้วยเคลือบแล้วเผาทำให้ฟองอากาศเกินดันขึ้นจากเนื้อดินสุบบริเวณเนื้อเคลือบแต่ไม่สามารถออกไปจากเนื้อเคลือบได้ เนื่องจากอุณหภูมิต่ำที่ไม่สูงพอ

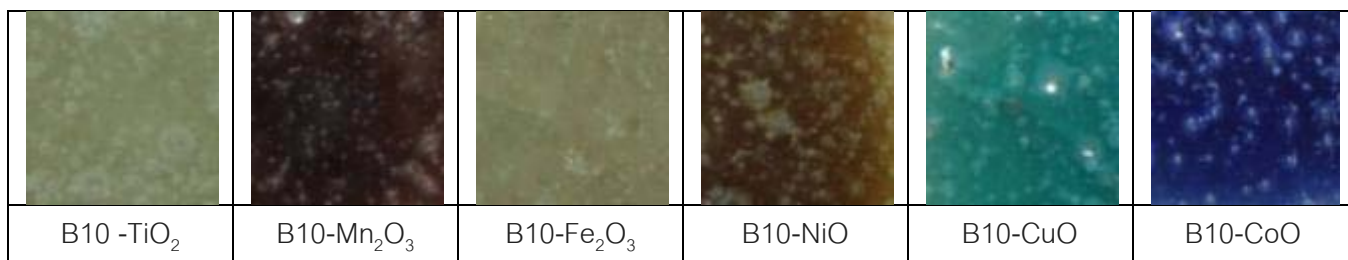


ก) เคลือบบนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำสูตร RCC-1-15-G1 เเผาที่ 950 °C

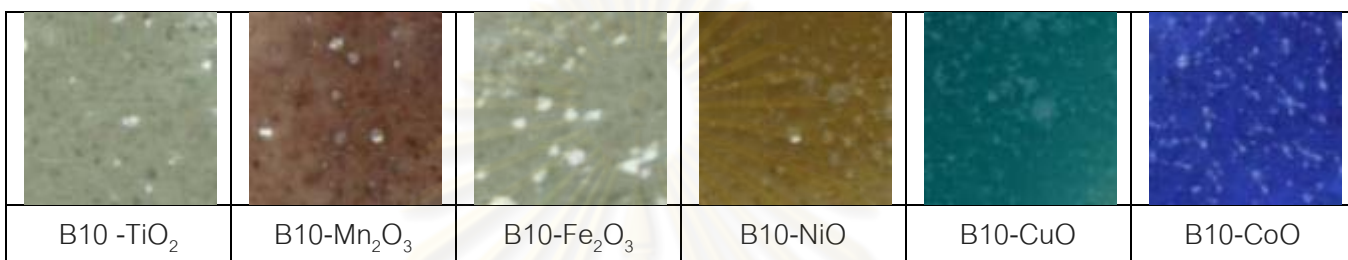


ข) เคลือบบนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำสูตร LT-LPW1-G1 เเผาที่ 950 °C

รูปที่ 4.36 เคลือบสูตร B9 ที่เติมออกไซด์บนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำทั้ง 2 สูตร เเผาที่ 950 °C

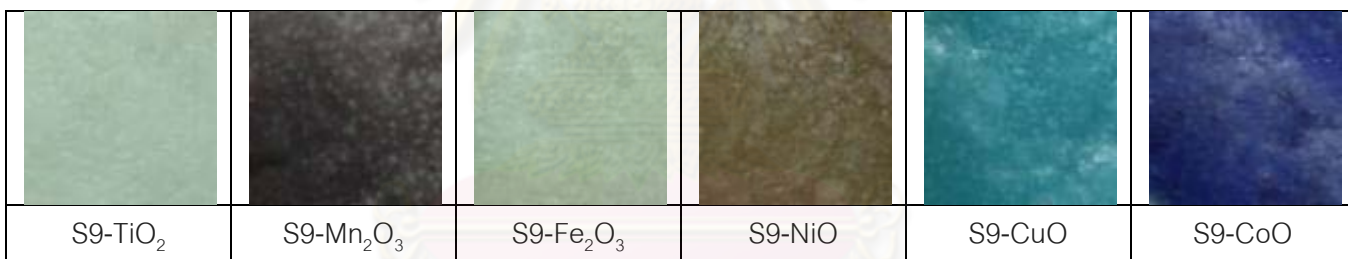


ก) เคลือบบนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำสูตร RCC-1-15-G1 เผาที่ 950 °C

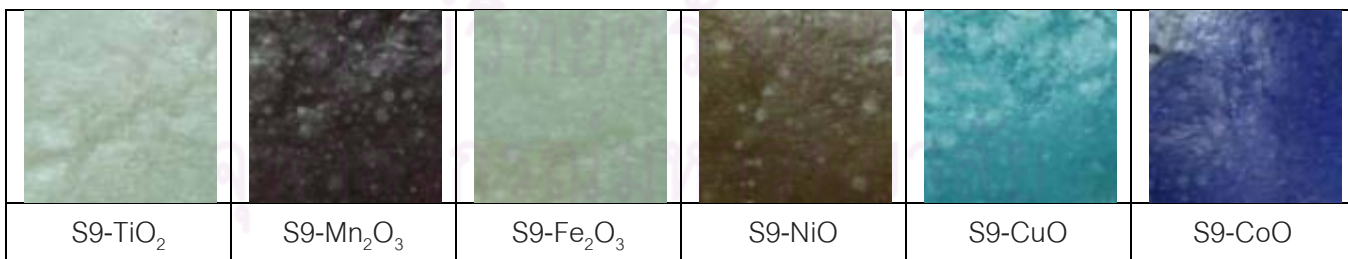


ข) เคลือบบนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำสูตร LT-LPW1-G1 เผาที่ 950 °C

รูปที่ 4.37 เคลือบสูตร B10 ที่เติมออกไซด์บนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำทั้ง 2 สูตร เผาที่ 950 °C

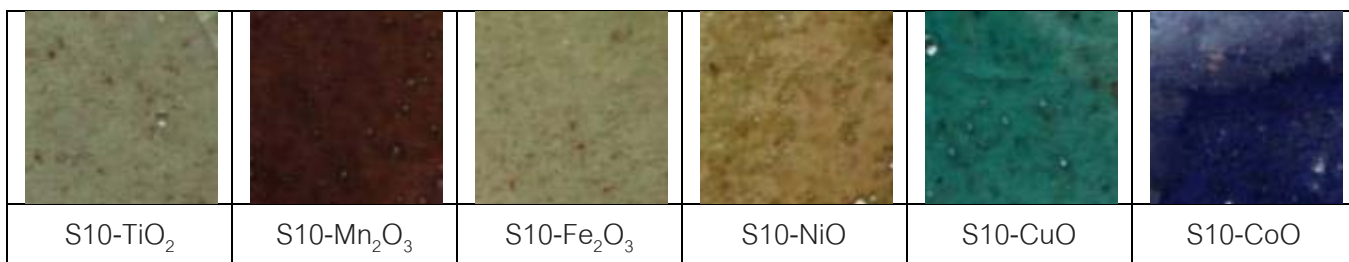


ก) เคลือบบนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำสูตร RCC-1-15-G1 เผาที่ 950 °C

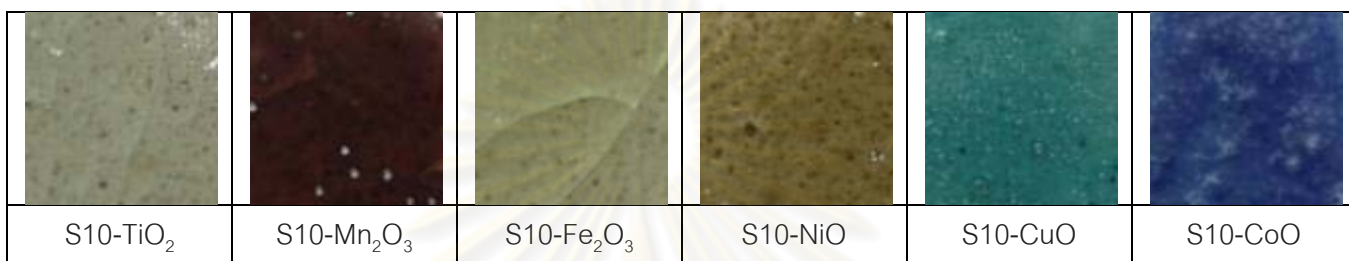


ข) เคลือบบนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำสูตร LT-LPW1-G1 เผาที่ 950 °C

รูปที่ 4.38 เคลือบสูตร S9 ที่เติมออกไซด์บนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำทั้ง 2 สูตร เผาที่ 950 °C



ก) เคลือบเนื้อดินอุณหภูมิต่ำสูตร RCC-1-15-G1 เผาที่ 950 °C



ข) เคลือบบนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำสูตร LT-LPW1-G1 เผาที่ 950 °C

รูปที่ 4.39 เคลือบสูตร S10 ที่เติมออกไซด์บนเนื้อดินอุณหภูมิต่ำทั้ง 2 สูตร เผาที่ 950 °C

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาวิจัยและพัฒนาเคลือบอุณหภูมิต่ำโดยใช้วัตถุดิบเหลือทิ้ง คือขี้เถ้าจากเตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ต เศษแก้วบอโรซิลิเกต และเศษแก้วโซดาไลม์ เพื่อลดอุณหภูมิในการเผาสรุปผลได้ว่า

(1) เมื่อใช้วัสดุเหลือทิ้งเป็นวัตถุดิบในสูตร พบว่าขี้เถ้ามีส่วนประกอบหลักคือ CaO K_2O และ Na_2O ซึ่งเป็นฟลักซ์ สามารถนำมาใช้แทนพวกแอลคาไลน์ หรือแอลคาไลน์เอิร์ธ และ เศษแก้วบอโรซิลิเกต เศษแก้วโซดาไลม์ ส่วนประกอบหลักคือ SiO_2 มากกว่า 70% ทำหน้าที่เป็นตัวช่วยทำให้เกิดแก้ว จึงสามารถนำวัตถุดิบทั้ง 2 ชนิดนี้มาทดแทนวัตถุดิบอื่นๆในสูตรเคลือบได้เคลือบ ผลคือได้เคลือบอุณหภูมิต่ำที่เผาได้ตั้งแต่ $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ ขึ้นไป

(2) เมื่อใช้บอแรกซ์ตั้งแต่ 20% ขึ้นไป ใช้ขี้เถ้าเตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ตตั้งแต่ 30% ขึ้นไป ทำให้สามารถลดอุณหภูมิลงมาถึง $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งนับเป็นการลดพลังงานได้มากเท่ากับ การเผาจากอุณหภูมิห้องไปถึงอุณหภูมิ $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$

(3) เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DTA และ Heating stage microscope ทำให้ทราบถึงการเกิดปฏิกิริยาของเคลือบในแต่ละอุณหภูมิ จึงทำให้สามารถนำมาออกแบบการเผาเคลือบได้ เช่น การเผาในช่วงแรกจะเพิ่มอุณหภูมิที่ละเล็กละน้อยเพื่อให้ให้น้ำนอกโมเลกุลระเหย หรือถ้าต้องการเคลือบที่ไม่มีฟลิก ไม่ควรที่จะคงอุณหภูมิไว้นานจนเกินไป

(4) สามารถนำของเหลือทิ้งมาใช้แทนวัตถุดิบอื่นๆที่มีราคาแพงและวัตถุดิบบางชนิดเป็นอันตราย ช่วยลดปริมาณขี้เถ้าเตาเผาขยะ และเศษแก้ว ทำให้ได้เคลือบอุณหภูมิต่ำที่ไม่ใช้ฟrit วัตถุดิบประเภทตะกั่วหรือ สารเคมีที่มีราคาแพงมาเป็นส่วนประกอบ แต่จะใช้วัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมมาใช้เป็นวัตถุดิบหลัก

5.2. ข้อเสนอแนะ

1. เพิ่มปริมาณขี้เถ้าจากเตาเผาขยะมากขึ้นกว่าเดิม และใช้ฟลักซ์ตัวอื่นมาผสม อาจจะทำให้ได้พื้นผิวที่ดีกว่า
2. ปรับเรื่องการไหลตัวของเคลือบ เช่นการเพิ่มดินในส่วนผสม
3. เพิ่มปริมาณต่างในสูตรเคลือบ เพื่อให้เคลือบมีการทนต่อสารเคมีประเภทต่างมากขึ้น

รายการอ้างอิง

- (1) Barbieri, L., Bonamartini, A. C., Lancellotti, I. Alkaline and alkaline-earth silicate glasses and glass-ceramics from municipal and industrial wastes. Journal of the European Ceramic Society 20 (2000): 2477-2483.
- (2) เดาเผาขยะ[Online]. Available from:
<http://www.efe.or.th/home.php?ds=preview&back=content&mid=QaThskHyxen7t4f1&doc=JZtaSWNqG1HgPVnB> [2009, April 16]
- (3) STIRLING, H. THE RECOVERY OF WASTE GLASS CULLET FOR RECYCLING PURPOSES BY MEANS OF ELECTRO-OPTICAL SORTERS. Conservation & Recycling 1 (1976): 209-219.
- (4) JR, R. R., Rowlands, R. R. Glaze Investigations: I, Effect of various Silicas in Typical Glazes. Journal of the American Ceramic Society 36 (1953):
- (5) GRIMSHAW, R. W. The chemistry and physics of clays and allied ceramic materials. Ernest benn limited, 1971.
- (6) ไพจิตร อังศิริวัฒน์. รวมสูตรเคลือบเซรามิกส์. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, 2547.
- (7) Romeroa, M., Rincona, J. M., Acostab, A. Crystallisation of a zirconium-based glaze for ceramic tile coatings. Journal of the European Ceramic Society 23 (2003): 1629-1635.
- (8) Tkachev, A. G., Tkacheva, O. N., Solov'eva, I. S. Production of low-melting glazes without melting. Glass and ceramics 59 (2002): 11-12.
- (9) Rasteiro, M. G., Gassman, T., Santos, R., Antunes, E. Crystalline phase characterization of galss-ceramic glazes. Ceramics international 33 (2007): 345-354.
- (10) Shteinberg, Y. G., Nikulina, L. N. Porcelain glazes with different forms of silica. Glass and ceramics 15 (1958): 57-61.
- (11) Salakhov, A. M., Spirina, O. V., Remiznikova, V. I., Khozin, V. G. Low-melting glaze for structural ceramics. Glass and ceramics 58 (2001): 5-6.
- (12) Ferreira, C., Ribeiro, A., Ottosen, L. Possible applications for municipal solid waste fly ash. Journal of Hazardous Materials B96 (2003): 201-216.
- (13) Gerasimov, V. V., Spirina, O. V. Low-melting borosilicate glazes for special-purpose and construction ceramic (A review). Glass and Ceramics 61 (2004): 11-12.
- (14) Khizanishvili, I. G., Mamaladze, E. R. A. Glaze for sanitary semiporcelain made by low-temperature firing. Tbilis Scientific-Research Institute of Building Materials 22 (1965): 33-34.
- (15) Yalçın, N., Sevinç, V. Utilization of bauxite waste in ceramic glazes. Ceramics International 26 (2000): 485-493.
- (16) Poyraz, H. B., Erginel, N., Ay, N. The use of pumice (pumicite) in transeparent roof tile glaze composition. Journal of the European Ceramic Society 26 (2006): 741-746.
- (17) Karamberi, A., Orkopoulos, K., Moutsatsou, A. Synthesis of glass-ceramics using glass cullet and vitrified industrial by-products. Journal of the European Ceramic Society 27 (2007): 629-636.
- (18) Torres, F. J., Alarcon, J. Effect of additives on the crystallization of cordierite-based glass-ceramics as glazes for floor tiles. Journal of the European Ceramic Society 23 (2003): 817-826.

- (19) J.J.Svec. CERAMIC GLAZES. Boston, Massachusetts: Cahners Publishing Company. Inc., 1973.
- (20) Hong, K. J., Kim, J. M., Kim, H. S. Microstructure and properties of CaO-ZrO₂-SiO₂ glass-ceramics prepared by sintering. Journal of the European Ceramic Society 23 (2003): 2193-2202.
- (21) Barbieri, L., Corradi, A., Lancellotti, I. Thermal and chemical behaviour of different glasses containing steel fly ash and their transformation into glass-ceramics. Journal of the European Ceramic Society 22 (2002): 1759-1765.
- (22) Kopar, T., Ducman, V. Low-vacuum SEM analyses of ceramic tiles with emphasis on glaze defects characterisation. Materials Characterization 58 (2007): 1133-1137.
- (23) Torres, F. J., Sola, E. R. d., Alarcon, J. Mechanism of crystallization of fast fired mullite-based glass-ceramic glazes for floor-tiles. Journal of Non-Crystalline Solids 352 (2006): 2159-2165.
- (24) Youssef, N. F., Abadir, M. F., 18, M. A. S. Utilization of Soda Glass (Cullet) in the Manufacture of Wall and Floor Tiles. Journal of the European Ceramic Society (1998): 1721-1727.
- (25) สุรศักดิ์ โกสิยพันธ์. น้ำเคลือบเครื่องปั้นดินเผา. กรุงเทพฯ: วัฒนาพานิช, 2531.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก 1 แสดงค่า 2θ , intensity และ hkl ของ Silicon oxide ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS-International Centre for Diffraction Data (PCPDFWIN) หมายเลข JCPDS 00-048-0476

Pattern : 00-048-0476		Radiation = 1.540598		Quality : Questionable		
SiO ₂		2θ	I	h	k	l
Silicon Oxide Also called: Octadecasil		11.471	98			
		18.765	51			
		22.033	100			
		23.052	6			
		25.560	3			
		26.639	29			
		28.967	9			
		29.137	8			
		29.856	27			
		32.784	4			
		34.812	6			
		37.689	8			
		40.497	2			
		42.096	2			
		44.404	4			
		46.560	7			
Lattice : Not assigned		Mol. weight = 60.08				
S.G. : (0)						
Sample preparation: Octadecasil, prepared using quinucidine and HF, was calcined at 500 C in air for 4 hours. Data collection flag: Ambient.						
Cautlet, P., Guth, J., Hazm, J., Lambin, J., Gies, H., Eur. J. Solid State Inorg. Chem., volume 28, page 345 (1991)						
Radiation : CuKα		Filter : Not specified				
Lambda : 1.54180		d-sp : Diffractometer				

ตารางที่ ก 2 แสดงค่า 2θ , intensity และ hkl ของ Wollastonite ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS-International Centre for Diffraction Data (PCPDFWIN) หมายเลข JCPDS 00-027-1064

Pattern : 00-027-1064		Radiation : 1.540598		Quality : Deleted		
CaSiO ₃		2θ	I	h	k	l
Calcium Silicate Wollastonite-1A		11.528	25	1	0	0
		16.251	8	-1	0	1
		23.205	85	2	0	0
		25.354	75	-2	0	1
		26.881	100	-1	0	2
		27.490	13	2	0	1
		28.809	80	1	0	2
		29.992	30	1	2	0
		31.937	5	-1	-2	1
		32.890	30	-2	0	2
		35.080	45	3	0	0
		36.237	25	1	-2	2
		38.439	30	-2	2	2
		39.099	50	1	-3	1
		40.778	6	0	1	3
		41.305	16	-2	3	1
		43.298	6	3	1	1
		44.810	8	1	3	1
		45.741	13	-1	2	3
		47.358	25	4	0	0
		47.969	2	2	2	2
		48.349	3	3	2	0
		48.376	2	2	-3	2
		49.127	2	-3	-2	1
		49.786	3	-3	1	3
		50.434	11	-2	-3	1
		50.795	4	2	-2	3
		51.942	35	0	0	4
		53.078	14	-2	-2	3
		53.245	17	0	4	1
		57.363	8	2	-3	3
		58.479	3	2	-4	2
		60.241	20	5	0	0
		62.775	6	3	-3	3
		67.307	6	-1	-3	4
		68.311	3	-3	5	1
		68.841	20	5	0	2
		69.639	7	-4	-3	1
		70.118	4	-3	-2	4
		78.809	5	0	4	4
		81.842	5	0	-6	1
		82.096	8	2	2	5
Lattice : Anorthic (triclinic) S.G. : P-1 (2) a = 7.93400 alpha = 89.95 b = 7.33400 beta = 95.26 c = 7.07500 gamma = 103.45 a/b = 1.08181 Z = 8 c/b = 0.90468		Mol. weight = 116.16 Volume [CD] = 398.61 Dv = 2.903 Dm = 2.890		Optical data: A=1.618, O=1.634, Signs-, 2V=38-39° Color: White Sample source or locality: Specimen from the Sampo mine, Chugoku Province, Japan. Analysis: Chemical analysis (wt.%): Si O2 51.32, Fe2 O3 0.28, FeO 0.69, CaO 46.22, H2 O+ 1.46, H2 O- 0.03, Ti O2, Al2 O3, MnO, MgO, Na2 O, K2 O: trace. Deleted and rejected by: Deleted by 29-372, lower F ₀ , MTG 5/92. Data collection flag: Ambient.		
Matsueda, H., Mineral. J., volume 7, page 160 (1973)						
Radiation : CuK α Lambda : 1.54180 SS/FOV : F30= 4(0.0440,166)		Filter: Beta d-sp : Not given Internal standard : Si				

ตารางที่ ก 3 แสดงค่า 2θ , intensity และ hkl ของ Quartz ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS-International Centre for Diffraction Data (PCPDFWIN) หมายเลข JCPDS 01-081-1665

Pattern : 01-081-1665		Radiation : 1.540598		Quality : Alternate		
β -SiO ₂		2θ	I	h	k	l
Silicon Oxide Quartz		20.371	198	1	0	0
		25.057	999	1	0	1
		35.871	31	1	1	0
		38.078	14	1	0	2
		39.212	1	1	1	1
		41.423	27	2	0	0
		44.580	36	2	0	1
		48.540	156	1	1	2
		*48.540	156	0	0	3
		53.162	19	2	0	2
		*53.162	19	1	0	3
		55.790	3	2	1	0
		58.355	51	2	1	1
		61.691	2	1	1	3
		64.078	11	3	0	0
		65.689	90	2	1	2
		*65.689	90	2	0	3
		66.448	8	3	0	1
		70.349	3	1	0	4
		73.330	15	3	0	2
		75.550	15	2	2	0
		77.052	24	2	1	3
		77.806	23	2	2	1
		*77.806	23	1	1	4
		79.222	6	3	1	0
		81.407	32	3	1	1
		*81.407	32	2	0	4
		84.305	1	2	2	2
		*84.305	1	3	0	3
		87.897	9	3	1	2
Lattice : Hexagonal S.G. : P6222 (180) a = 5.03000 c = 5.62000 Z = 3		Mol. weight = 60.08 Volume [CD] = 123.14 Dx = 2.431 Mcor = 5.08				
ICSD collection code: 073072 Hypothetical structure: Structure calculated theoretically. Test from ICSD: No R value given. Test from ICSD: At least one TF missing. Data collection flag: Ambient.						
Chelikowsky, J.R., Binggeli, N., Keskar, N.R., J. Alloys Compds., volume 197, page 137 (1993) Calculated from ICSD using POWD-12++ (1997)						
Radiation : CuK α 1 Lambda : 1.54060 SS/FOW : F24=158(0.0051,30)		Filter : Not specified d-sp : Calculated spacings				

ตารางที่ ก 4 แสดงค่า 2θ , intensity และ hkl ของ Cristobalite ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS-International Centre for Diffraction Data (PCPDFWIN) หมายเลข JCPDS 01-076-0937

Pattern : 01-076-0937		Radiation λ 1.540598		Quality : Alternate		
SiO ₂		2θ	I	h	k	l
Silicon Oxide Cristobalite low		21.892	999	1	0	1
		25.240	6	1	1	0
		28.339	81	1	1	1
		31.266	95	1	0	2
		35.996	119	2	0	0
		36.193	51	1	1	2
		38.309	1	2	0	1
		40.419	1	2	1	0
		42.528	24	2	1	1
		42.870	2	1	0	3
		44.838	21	2	0	2
		46.751	42	1	1	3
		48.408	43	2	1	2
		51.821	4	2	2	0
		52.409	6	0	0	4
		53.577	1	2	2	1
		53.865	21	2	0	3
		55.788	4	1	0	4
		56.907	31	3	0	1
		57.163	14	2	1	3
		58.490	3	3	1	0
		58.628	4	2	2	2
		59.033	1	1	1	4
		60.114	21	3	1	1
		61.778	22	3	0	2
		64.840	21	3	1	2
		65.224	13	2	0	4
		66.500	11	2	2	3
		67.701	1	3	2	0
		68.201	18	2	1	4
		69.203	9	3	2	1
		69.451	8	3	0	3
		69.845	14	1	0	5
		72.346	16	3	1	3
		72.831	1	1	1	5
		73.624	17	3	2	2
		76.336	1	4	0	0
		76.813	6	2	2	4
		77.769	9	4	0	1
		78.480	1	2	0	5
		79.135	12	4	1	0
		80.554	2	4	1	1
		80.789	11	3	2	3
		81.259	12	2	1	5
		81.909	3	3	3	0
		82.026	2	4	0	2
		82.377	6	3	1	4
		83.317	3	3	3	1
		84.779	1	4	1	2
		85.710	1	1	0	6
		87.521	4	3	3	2
		88.449	12	1	1	6
		88.802	10	4	2	1
		89.034	5	4	0	3
		89.498	2	2	2	5
ICSD collection code: 034929 Temperature factor: ATF Remarks from ICSD/ICSD: REM TEM 376 Sample source or locality: Specimen from Elora Caves, India. Additional pattern: See PDF 39-1425. Data collection flag: Non ambient temperature.						
Peacor, D.R., Z. Kristallogr., Kristallgeom., Kristallphys., Kristallchem., volume 138, page 274 (1973) Calculated from ICSD using POWD-12++ (1997)						
Radiation : CuK α 1 Lambda : 1.54060 SS/FOW : F30=1000(0.0002,30)		Filter : Not specified d-sp : Calculated spacings				

ตารางที่ ก 5 แสดงค่า 2θ , intensity และ hkl ของ Cristobalite ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS-International Centre for Diffraction Data (PCPDFWIN) หมายเลข JCPDS 00-002-0278

Pattern : 00-002-0278		Radiation = 1.540598		Quality : Deleted		
SiO ₂		2θ	I	h	k	l
Silicon Oxide Cristobalite		21.446	100	1	1	1
		30.591	5			
		35.452	80	2	2	0
		41.584	10	3	1	1
		43.693	30	2	2	2
		45.546	5			
		50.878	10	4	0	0
		54.233	5			
		56.029	70	3	3	1
		63.687	80	4	2	2
		67.861	20	5	1	1
		75.374	30	4	4	0
		79.079	50	5	3	1
		85.950	20	6	2	0
		88.934	10	5	3	3
		96.811	10	4	4	4
		101.039	10	5	5	1
		107.893	20	6	4	2
		112.211	10	7	3	1
		133.304	5	8	2	2
Lattice : Face-centered cubic		Mol. weight = 60.08				
S.G. : Fd-3m (227)		Volume [CD] = 360.94				
a = 7.12000		Dx = 2.211				
Z = 8						
Deleted and rejected by: NBS recommends delete this card. Color: Colorless Melting point: 1713 Optical data: B=1.466 General comments: Si O2 at 450 C. Data collection flag: Ambient.						
Wyckoff, G., Z. Kristallogr., volume 62, page 192 (1925)						
Radiation : MoKa		Filter : Not specified				
Lambda : 0.70900		d-sp : Not given				
SS/FOV : F17= 7(0.1130.22)						

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวปวีณา เกตุบุญเรือง เกิดวันที่ 8 เมษายน พ.ศ. 2529 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเทคโนโลยีเซรามิกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร ในปี 2551 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี 2551 และสำเร็จการศึกษาในปี 2553

การนำเสนอผลงานทางวิชาการระดับชาติแบบ Oral presentation เรื่อง “Development of Low Temperature Glazes using Municipal Solid Waste” ในการประชุมวิชาการ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 35 (วทท 35) มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี ระหว่างวันที่ 15-17 ตุลาคม 2552 จัดโดย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ร่วมกับคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

การนำเสนอผลงานทางวิชาการระดับนานาชาติแบบ Oral presentation เรื่อง “Development of low temperature ceramic glazes using MSW and borosilicate cullet” ในการประชุมทางวิชาการ Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON 2010) ระหว่างวันที่ 21-23 มกราคม พ.ศ. 2553 จัดโดย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย อุบลราชธานี และได้รับการตีพิมพ์ผลงานแบบ Proceeding

การนำเสนอผลงานทางวิชาการระดับนานาชาติแบบ Oral presentation เรื่อง “Characterization of Low Firing Temperature Ceramic Glaze Using Phuket MSW and Soda Lime Cullet” ในการประชุมวิชาการ 3rd International Congress on Ceramics (ICC3) ระหว่างวันที่ 14-18 พฤศจิกายน 2553 จัดโดย The Ceramic Society of Japan ณ เมืองโอซากา ประเทศญี่ปุ่น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย