



ผลของการนำเถ้าแกลบมาใช้แทนควอทซ์ในเคลือบ
สำหรับผลิตภัณฑ์โตนแวร์

Effects of Quartz Substitution by Rice Husk Ash in Stoneware Glazes

นนทพงษ์ พลพวก

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเซรามิก

มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

2548

© ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

ผลของการนำเถ้าแกลบมาใช้แทนควอทซ์ในเคลือบ
สำหรับผลิตภัณฑ์สโตนแวร์

Effects of Quartz Substitution by Rice Husk Ash in Stoneware Glazes

นนทพงษ์ พลพวก

วิทยานิพนธ์นี้เสนอต่อมหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวงเพื่อเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเซรามิก

มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

2548

© ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

ผลของการนำเก้าอี้กลับมาใช้แทนควอทซ์ในเคลือบ
สำหรับผลิตภัณฑ์สโตนแวร์

นนทพงษ์ พลพวก

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเซรามิก
2548

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(อาจารย์ ดร. สุธี วัฒนศิริเวช)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร. ตรุณี วัฒนศิริเวช)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร. อภินันท์ นันทิยา)

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับความอนุเคราะห์ ให้คำแนะนำ แก้ไข ดูแล และให้กำลังใจอย่างดียิ่งจากอาจารย์ ดร. ตรุณี วัฒนศิริเวช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. สุธี วัฒนศิริเวช ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร. อภินันท์ นันทิยา กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมกับให้ข้อเสนอแนะ ข้อแก้ไขต่างๆ เพื่อให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แสงระวี เชาว์ปรีชา ที่กรุณาช่วยสอนภาษาอังกฤษ และช่วยให้คำแนะนำในการเขียนบทคัดย่อภาคภาษาอังกฤษจนกระทั่งวิทยานิพนธ์สำเร็จด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณเกียรติพงษ์ ได้การ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง ที่ให้ความช่วยเหลือในการวิเคราะห์และทดสอบตัวอย่างจนกระทั่งงานวิจัยสำเร็จด้วยดี

นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณ พี่ เพื่อน และน้อง ในสาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเซรามิก และวัสดุศาสตร์ รวมทั้งผู้ที่ไม่สามารถกล่าวนามได้ทั้งหมดที่มีส่วนช่วยเหลือ และสนับสนุนจนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยขอน้อมรำลึกถึงพระคุณของ บิดา มารดา พี่ชาย น้องชาย และญาติๆ ที่ให้กำลังใจ สนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยมาโดยตลอด ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

นนทพงษ์ พลพวก

ชื่อเรื่อง	ผลของการนำเถ้าแกลบมาใช้แทนควอทซ์ในเคลือบสำหรับผลิตภัณฑ์สโตนแวร์	
ชื่อผู้เขียน	นายณนทพงษ์ พลพวก	
หลักสูตร	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเซรามิก)	
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร. ดรุณี วัฒนศิริเวช	ประธานกรรมการ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเถ้าแกลบ (RHA2) เพื่อนำมาใช้เป็นส่วนผสมในเคลือบสำหรับผลิตภัณฑ์สโตนแวร์ โดยเปรียบเทียบกับการใช้เถ้าแกลบที่ได้จากโรงงานเผาอิฐ (RHA1) และควอทซ์ เถ้าแกลบที่เตรียมขึ้นเองในห้องทดลองได้ผ่านกระบวนการทดลองเพื่อศึกษาหาปริมาณของซิลิกา และลักษณะเฉพาะ ได้แก่ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย การกระจายตัวของขนาดอนุภาค และโครงสร้างทางผลึก การเตรียมเถ้าแกลบในห้องทดลองใช้กระบวนการเผาแบบออกซิเดชันที่อุณหภูมิตั้งแต่ 500-800 องศาเซลเซียส (ช.) เป็นเวลา 4 และ 8 ชั่วโมง ผลปรากฏว่าที่เวลาในการเผา 4 ชั่วโมง เมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มจาก 500 ช. เป็น 700 ช. ปริมาณซิลิกาในเถ้าแกลบเพิ่มขึ้นจาก 82 เป็น 95 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มเป็น 800 ช. ปริมาณซิลิกาในเถ้าแกลบเพิ่มขึ้นอีกเพียง 0.05 เปอร์เซ็นต์ และที่เวลาในการเผา 8 ชั่วโมง เมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้นจาก 500 ช. เป็น 800 ช. ปริมาณซิลิกาในเถ้าแกลบเพิ่มขึ้นจาก 93 เป็น 97 เปอร์เซ็นต์ จากการทดลองเมื่ออุณหภูมิหรือเวลาในการเผาเถ้าแกลบเพิ่มขึ้น ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถ้าแกลบกลับลดลง เนื่องจากเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ขึ้น เมื่อนำเถ้าแกลบไปบดเป็นระยะเวลาต่าง ๆ กันพบว่า ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถ้าแกลบเล็กลงเมื่อเวลาในการบดเพิ่มขึ้น จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเถ้าแกลบโดยใช้เทคนิค XRD พบว่า เถ้าแกลบทั้งหมดมีลักษณะเป็นแบบอสัณฐาน ในการทดลองใช้ควอทซ์เถ้าแกลบจากโรงงานเผาอิฐและเถ้าแกลบได้จากการเตรียมขึ้นเองในห้องทดลองเป็นส่วนผสมในเคลือบสูตรมาตรฐาน ซึ่งมีอัตราส่วนผสมของ หินฟันม้าชนิดโซดาเฟลด์สปาร์ อยู่ระหว่างร้อยละ 30-45 หินปูนหรือแคลเซียมคาร์บอเนต ร้อยละ 30-40 และควอทซ์หรือเถ้าแกลบ ร้อยละ 15-50 พบว่า หลังการเผาเคลือบที่อุณหภูมิ 1,250 ช. ลักษณะเคลือบที่มีส่วนผสมของเถ้าแกลบจากโรงงานเผาอิฐ โดยทั่วไปมีการร้าวแตร้าวที่ละเอียดมากที่สุด ในขณะที่เคลือบที่มีส่วนผสมของ

แก้วเคลือบที่ได้จากการเตรียมขึ้นเองในห้องทดลอง มีการรานตัวที่ละเอียดลงลงมา ส่วนควอทซ์มีการรานตัวแบบห่าง ๆ ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบบางสูตรพบว่า เคลือบที่ใช้แก้วเคลือบจากโรงงานเผาอิฐ มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนสูงสุดคือ 10.5×10^{-6} มม/มม.ซ. ส่วนแก้วเคลือบที่ได้จากการเตรียมขึ้นเองในห้องทดลองมีค่า 10.2×10^{-6} มม/มม.ซ. และควอทซ์มีค่า 9.85×10^{-6} มม/มม.ซ. สำหรับการหลอมตัวของเคลือบสูตรมาตรฐานพบว่า เคลือบที่มีปริมาณของควอทซ์หรือแก้วเคลือบน้อยกว่าร้อยละ 30 มีการหลอมตัวได้ดี ผิวเคลือบที่ได้มีลักษณะมันวาว ส่วนเคลือบที่มีปริมาณของควอทซ์หรือแก้วเคลือบสูงกว่าร้อยละ 50 เคลือบยังไม่หลอม ผิวเคลือบมีลักษณะด้าน และเมื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเคลือบทั้ง 3 แบบ พบว่า เคลือบที่ใช้แก้วเคลือบจากโรงงานเผาอิฐ มีฟองอากาศอยู่ชั้นในของผิวเคลือบอยู่เป็นจำนวนมาก ส่วนเคลือบที่ใช้แก้วเคลือบที่ได้จากการเตรียมขึ้นเองในห้องทดลอง และเคลือบที่ใช้ควอทซ์ พบฟองอากาศในชั้นของเคลือบที่น้อยกว่า นอกจากนี้ในเคลือบทั้ง 3 แบบยังพบผลึกรูปเข็มกระจายตัวทั้งบนผิวและภายในชั้นของเคลือบ การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเฟส (Phase) ของเคลือบทั้ง 3 แบบที่ผ่านการเผาในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 900-1,150 ซ. พบว่า ให้ผลคล้ายคลึงกันคือ ที่อุณหภูมิ 900 ซ. พบทั้งโซดาเฟลด์สปาร์ ควอทซ์ และแคลเซียมซิลิเกต (CaSiO_3) อยู่ร่วมกัน เมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้น ปริมาณของควอทซ์และโซดาเฟลด์สปาร์ลดลง ในขณะที่แคลเซียมซิลิเกตมีปริมาณเพิ่มขึ้น เมื่อนำควอทซ์และแก้วเคลือบไปใช้เป็นส่วนผสมในเคลือบสูตรอื่น ๆ พบว่า ลักษณะของเคลือบที่ได้หลังการเผาก็จะแตกต่างกันไปตามองค์ประกอบของเคลือบนั้น

คำสำคัญ : แก้วเคลือบ / ซิลิกาจากแก้วเคลือบ / เคลือบซีแก้วเคลือบ / สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน / การเปลี่ยนแปลงเฟสของเคลือบ / จุดหลอมเหลว / โครงสร้างทางจุลภาค

Title Effects of Quartz Substitution by Rice Husk Ash (RHA) in Stoneware Glazes

Author Mr. Nonthaphong Phonphuak

Degree Master of Science Program (Ceramic Industrial Technology)

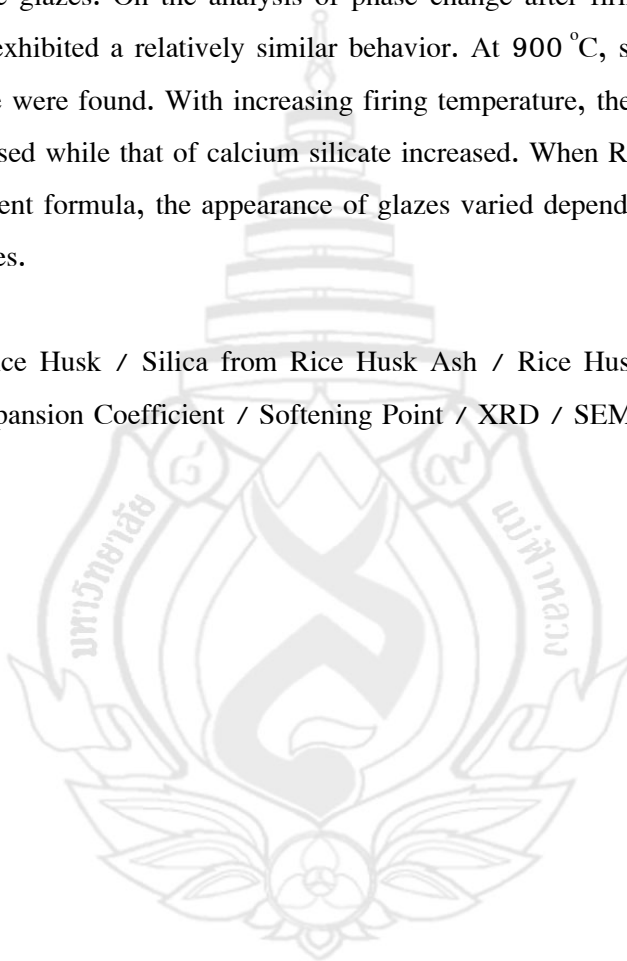
Supervisor Lecturer Dr. Darunee Wattanasiriwech Chairperson

ABSTRACT

The objective of this study was to determine the optimum conditions for preparation of RHA (RHA2) in order to be employed as a stoneware glaze composition in comparison with the employment of RHA obtained from a clay brick factory (RHA1) and quartz. Preparation of RHA2 was performed under an oxidation atmosphere at the temperature between 500–800 °C for 4 and 8 hours. The resulting RHA2 was undergone a series of experiments to determine the percentage of constituent silica and characteristic properties, e.g., the average particle size and particle size distribution as well as crystal structure. Soaking time 4 hours, when the temperature was increased from 500 °C to 700 °C, the quantity of silica in RHA2 increased from 82 % to 95%. However, when the temperature was increased to 800 °C the quantity of silica was only 0.05 % increase. At the soaking time 8 hours, when the temperature was increased from 500 °C to 800 °C, the quantity of silica increased from 93% to 97%. The average particle size of RHA2 became smaller with increasing soaking time or firing temperature due to a more complete oxidation of the rice husk. When subjected to milling, the average particle size of RHA2 decreased with an increase in milling time. RHA1, RHA2 and quartz were subsequently used in a standard glaze composition with the following formula, feldspar: calcium carbonate: quartz or RHA: 30–50: 30–40: 15–50. After firing at 1,250 °C, the RHA1 glaze in general, crazed with the finest pattern. The RHA2 glaze and the quartz glaze crazed with the larger pattern respectively. A study of thermal expansion of a selected glaze formula showed that the RHA1 had the highest thermal expansion coefficient of 10.5×10^{-6} mm/mm. °C, while

the thermal expansion coefficient values of the RHA2 and quartz glaze were 10.2×10^{-6} mm/mm. °C, and 9.8×10^{-6} mm/mm. °C, respectively. When the quantity of quartz or RHA was below 30 %, a complete melting and glossy surface was obtained but at above 50 %, a matted and incomplete melting surface was obtained. A micro-structural study revealed that the RHA2 glaze contained much higher amount of bubbles than the RHA2 and the quartz glaze. Besides, needle like shape crystals were observed both on the surface and in the layer of the glazes. On the analysis of phase change after firing between 900–1,150 °C, all glazes exhibited a relatively similar behavior. At 900 °C, soda feldspar, quartz and calcium silicate were found. With increasing firing temperature, the quantities of quartz and feldspar decreased while that of calcium silicate increased. When RHA was used in place of quartz in different formula, the appearance of glazes varied depending on the ingredients of individual glazes.

Keyword : Rice Husk / Silica from Rice Husk Ash / Rice Husk Ash Glaze / Thermal Expansion Coefficient / Softening Point / XRD / SEM



สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษา	3
1.4 นิยามศัพท์เฉพาะ	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 เคลือบและคุณสมบัติของเคลือบ	4
2.2 องค์ประกอบของเคลือบ	4
2.3 การจำแนกชนิดของเคลือบ	5
2.4 ขั้นตอนในการเตรียมน้ำเคลือบ และการเคลือบผลิตภัณฑ์	6
2.5 การเผาเคลือบ	7
2.6 ท่าหนิที่เกิดขึ้นกับเคลือบ	8
2.7 เคลือบซีเถ้าพีช	9
2.8 ซิลิกาจากแกลบข้าว	12
2.9 การเตรียมซิลิกาจากแกลบข้าว	13
3 วิธีการดำเนินการวิจัยและผลการทดลองในตอนที 1	21
3.1 การทดลอง	21
3.2 ผลการทดลอง	24

สารบัญ(ต่อ)

4 การเตรียม และศึกษาสมบัติของเคลือบ	53
4.1 การเตรียมน้ำเคลือบ การเคลือบและการเผาเคลือบ	55
4.2 ศึกษาค่าการขยายตัวของเคลือบ	55
4.3 ศึกษาจุดเริ่มหลอมเหลวของเคลือบ	56
4.4 ศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของเคลือบ	57
4.5 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฟสของเคลือบ	57
4.6 ลักษณะโดยทั่วไปของเคลือบสูตรต่างๆ หลังการเผา	59
4.7 ผลการศึกษาค่าการขยายตัวเชิงความร้อน	70
4.8 ผลการศึกษาจุดเริ่มหลอมเหลวของเคลือบ	75
4.9 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของเคลือบ	78
4.10 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฟสของเคลือบ	83
5 ผลการนำควอทซ์และเถ้ากลับไปใช้กับเคลือบสูตรอื่นๆ	87
6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	93
6.1 สรุปผลการวิจัย	93
6.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยในโอกาสต่อไป	94
บรรณานุกรม	95
ภาคผนวก	99
ภาคผนวก ก	99
ภาคผนวก ข	104
ภาคผนวก ค	107
ประวัติผู้เขียน	112

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ	9
2.2 ปริมาณเถ้าและซิลิกาในพีชชนิดต่าง ๆ	13
2.3 องค์ประกอบทางเคมีของแกลบก่อนเผาและหลังเผาที่ 700 ช. นาน 6 ชม.	15
3.1 น้ำหนักของแกลบก่อนเผาและเถ้าแกลบหลังเผาที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	32
3.2 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบที่เผาที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	34
3.3 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถ้าแกลบที่ยังไม่บด	38
3.4 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถ้าแกลบที่ผ่านการบดที่ 1-5 ซม. ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของควอทซ์ และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถ้าแกลบจากโรงเผาอิฐ	48
4.1 อัตราส่วนผสมของเคลือบ	54
4.2 ผลการทดลองเคลือบสูตรที่ 1 หลังจากการเผา	61
4.3 ผลการทดลองเคลือบสูตรที่ 2 หลังจากการเผา	63
4.4 อัตราส่วนผสมของเคลือบสูตรที่ 3, 4 และ 5	64
4.5 ผลการทดลองเคลือบสูตรที่ 3, 4 และ 5 หลังจากการเผา	65
4.6 ผลการทดลองเคลือบสูตรที่ 6 หลังจากการเผา	67
4.7 ค่าความแตกต่างของการขยายตัวเชิงความร้อนของเคลือบสูตรที่ 2 เปรียบเทียบกับเนื้อดินปั้นชนิดสโตนแวร์	71
4.8 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบสูตรที่ 2 เปรียบเทียบกับเนื้อดินปั้นชนิดสโตนแวร์	71
4.9 จุดเริ่มหลอมเหลวของเคลือบสูตรที่ 2	76

สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
3.1 ลำดับขั้นตอนของการทดลองในตอนที 1	23
3.2 ลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวของแกลบ	24
3.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวของเถ้าแกลบด้วยกล้องจุลทรรศน์ แบบแสง	25
3.4 ลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวของเถ้าแกลบถ่ายด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด	26
3.5 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของแกลบข้าว เมื่อวิเคราะห์ด้วย Thermogravimetric Analysis (TGA)	27
3.6 ลักษณะทางกายภาพของแกลบก่อนเผาและเถ้าแกลบ หลังเผาที่อุณหภูมิ 500–800 ช.เป็นเวลา 4 และ 8 ชม.	30
3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของเถ้าแกลบกับเวลาที่ใช้ใน การเผาแกลบที่อุณหภูมิ 500 ถึง 800 ช.เป็นเวลา 4 และ 8 ชม.	32
3.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของอุณหภูมิและเวลา ที่ใช้ในการเผาแกลบที่มีต่อเปอร์เซ็นต์ของซิลิกาในเถ้าแกลบ	34
3.9 การกระจายตัวขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบที่ยังไม่บดเผา ที่อุณหภูมิ 500–800 ช.เป็นเวลา 4 ชม.	36
3.10 การกระจายตัวขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบที่ยังไม่บดเผา ที่อุณหภูมิ 500–800 ช.เป็นเวลา 8 ชม.	37
3.11 กราฟแสดงขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถ้าแกลบที่ยังไม่บด ผ่านการเผาแกลบที่อุณหภูมิ 500–800 ช.เป็นเวลา 4 และ 8 ชม.	38
3.12 การกระจายตัวของขนาดอนุภาค (ก) ควอทซ์ (ข) เถ้าแกลบโรงงานเผาอิฐ	39
3.13 การกระจายตัวขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบที่ผ่านการเผา ที่อุณหภูมิ 500 ช.เป็นเวลา 4 ชม.	40
3.14 การกระจายตัวขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบที่ผ่านการเผา ที่อุณหภูมิ 500 ช.เป็นเวลา 8 ชม.	41
3.15 การกระจายตัวขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบที่ผ่านการเผา ที่อุณหภูมิ 600 ช.เป็นเวลา 4 ชม.	42

สารบัญภาพ (ต่อ)

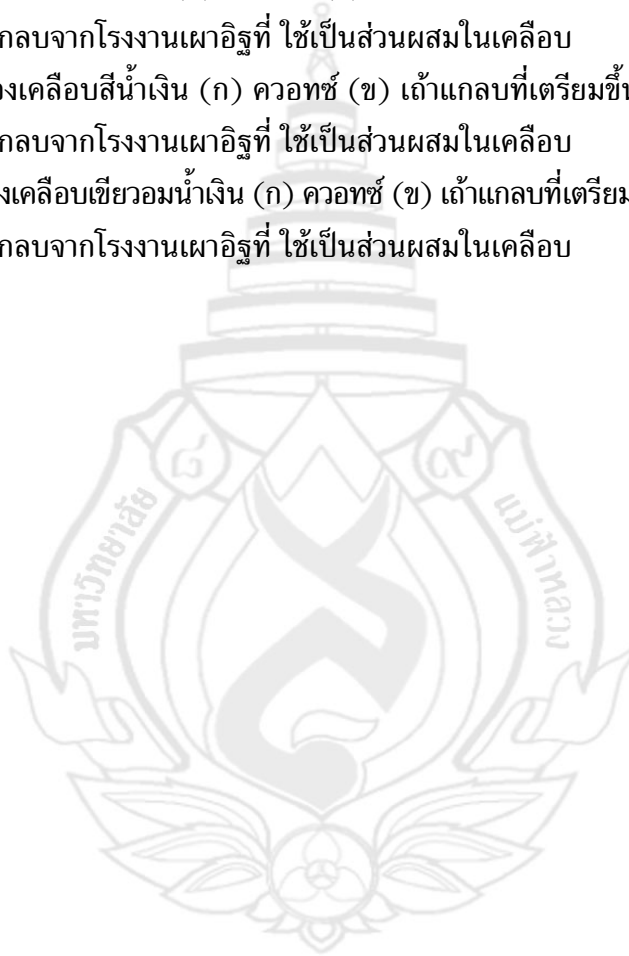
3.16	การกระจายตัวขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 ช.เป็นเวลา 8 ชม.	43
3.17	การกระจายตัวขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 700 ช.เป็นเวลา 4 ชม.	44
3.18	การกระจายตัวขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 700 ช.เป็นเวลา 8 ชม.	45
3.19	การกระจายตัวขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800 ช.เป็นเวลา 4 ชม.	46
3.20	การกระจายตัวขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800 ช.เป็นเวลา 8 ชม.	47
3.21	กราฟแสดงผลขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถ้าแกลบหลังการบดเป็นเวลา 1-5 ชม. หลังการเผาที่อุณหภูมิ 500-800 ช.เป็นเวลา 4 ชม.	49
3.22	กราฟแสดงผลขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถ้าแกลบหลังการบดเป็นเวลา 1-5 ชม. หลังการเผาที่อุณหภูมิ 500-800 ช.เป็นเวลา 8 ชม.	50
3.23	แสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเถ้าแกลบด้วย XRD เเผาที่อุณหภูมิ 500-800 ช.ที่ 4 และ 8 ชม.	52
3.24	แสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเถ้าแกลบด้วย XRD เเผาที่อุณหภูมิ 500-800 ช.ที่ 4 และ 8 ชม.	52
4.1	(ก) ผงควอทซ์ (ข) เถ้าแกลบจากโรงงานเผาอิฐ (ค) เถ้าแกลบหลังการเผาที่อุณหภูมิ 700 ช. เป็นเวลา 4 ชม.	53
4.2	ขั้นตอนการเตรียมชิ้นตัวอย่างเคลือบสำหรับ การทดสอบหาค่าการขยายตัวของเคลือบ	56
4.3	ลำดับขั้นตอนของการทดลองในการเตรียมและศึกษาสมบัติของเคลือบ	58
4.4	ลักษณะเคลือบสูตรที่ 1 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,250 ช. ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง	60
4.5	ลักษณะเคลือบสูตรที่ 2 หลังการเผาอุณหภูมิ 1,250 ช. ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง	62
4.6	ลักษณะเคลือบสูตรที่ 3,4 และ 5 หลังจากการเผาอุณหภูมิ 1,250 ช. ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

4.7	ลักษณะเคลือบสูตรที่ 6 หลังการเผาอุณหภูมิ 1,250 ช. ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง	66
4.8	ค่าความแตกต่างของการขยายตัวเชิงความร้อนของเคลือบสูตรที่ 2 ใช้ควอทซ์เป็นส่วนผสมในเคลือบ	72
4.9	ค่าความแตกต่างของการขยายตัวเชิงความร้อนของเคลือบสูตรที่ 2 ใช้เถ้าแกลบจากโรงงานเผาอิฐเป็นส่วนผสมในเคลือบ	73
4.10	ค่าความแตกต่างของการขยายตัวเชิงความร้อนของเคลือบสูตรที่ 2 ใช้เถ้าแกลบที่เตรียมเองเผา 700 ช. 4 ชม. บดที่ 4 ชม. เป็นส่วนผสมในเคลือบ	74
4.11	จุดเริ่มหลอมเหลวของเคลือบสูตรที่ 2 ใช้ควอทซ์เป็นส่วนผสมในเคลือบ	77
4.12	จุดเริ่มหลอมเหลวของเคลือบสูตรที่ 2 ใช้เถ้าแกลบที่ได้จากโรงงานเผาอิฐ เป็นส่วนผสมในเคลือบ	77
4.13	จุดเริ่มหลอมเหลวของเคลือบสูตรที่ 2 ใช้เถ้าแกลบเผาอุณหภูมิ 700 ช. เป็นเวลา 4 ชม. บดที่ 4 ชม. เป็นส่วนผสมในเคลือบ	78
4.14	ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของเคลือบที่ใช้ควอทซ์ เป็นส่วนผสมในเคลือบ	79
4.15	ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของเคลือบ ที่ใช้เถ้าแกลบจากโรงงานเผาอิฐ เป็นส่วนผสมในเคลือบ	80
4.16	ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของเคลือบที่ใช้เถ้าแกลบที่ได้จาก การเตรียมขึ้นเอง (เผาที่อุณหภูมิ 700 ช.เป็นเวลา 4 ชม. และบดเป็นเวลา 4 ชม.) เป็นส่วนผสมในเคลือบ	81
4.17	ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเฟสของเคลือบที่ใช้ควอทซ์ เป็นส่วนผสมในเคลือบ ด้วย XRD	84
4.18	ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเฟสของเคลือบที่ใช้เถ้าแกลบ ที่ได้จากโรงงานเผาอิฐ เป็นส่วนผสมในเคลือบ	85
4.19	ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเฟสของเคลือบที่ใช้เถ้าแกลบ ที่ได้จากการเตรียมขึ้นเอง เผาที่อุณหภูมิ 700 ช. เป็นเวลา 4 ชม. บด 4 ชม. ใช้เป็นส่วนผสมในเคลือบ	86
5.1	ลักษณะของเคลือบใส (ก) ควอทซ์ (ข) เถ้าแกลบที่เตรียมขึ้นเอง (ค) เถ้าแกลบจากโรงงานเผาอิฐ ใช้เป็นส่วนผสมในเคลือบ	88

สารบัญภาพ (ต่อ)

5.2	ลักษณะของเคลือบสนิมเหล็ก (ก) ควอทซ์ (ข) แก้วเคลือบที่เตรียมขึ้นเอง (ค) แก้วเคลือบจากโรงงานเผาอิฐ ใช้เป็นส่วนผสมในเคลือบ	89
5.3	ลักษณะของเคลือบสีม่วง (ก) ควอทซ์ (ข) แก้วเคลือบที่เตรียมขึ้นเอง (ค) แก้วเคลือบจากโรงงานเผาอิฐที่ใช้เป็นส่วนผสมในเคลือบ	90
5.4	ลักษณะของเคลือบสีน้ำเงิน (ก) ควอทซ์ (ข) แก้วเคลือบที่เตรียมขึ้นเอง (ค) แก้วเคลือบจากโรงงานเผาอิฐที่ใช้เป็นส่วนผสมในเคลือบ	91
5.5	ลักษณะของเคลือบเขียวอมน้ำเงิน (ก) ควอทซ์ (ข) แก้วเคลือบที่เตรียมขึ้นเอง (ค) แก้วเคลือบจากโรงงานเผาอิฐที่ใช้เป็นส่วนผสมในเคลือบ	92



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เคลือบ (Glazes) คือ ชั้นของแก้วที่ฉาบอยู่บนผิวของเนื้อดินปั้น (Body) อย่างต่อเนื่อง จุดประสงค์ของการเคลือบคือ เพื่อความแข็งแรง ทนต่อการขีดข่วน หรือทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีต่างๆ ป้องกันการซึมผ่านของของเหลว ทำให้ทำความสะอาดง่าย อีกทั้งเพื่อให้เกิดความสวยงาม

องค์ประกอบของเคลือบโดยทั่วไปคือ ฟลักซ์ ดิน และซิลิกา ที่ผสมกันในสัดส่วนที่พอเหมาะได้รับความร้อนที่เพียงพอจะทำให้เคลือบหลอมละลายและรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน (สุรศักดิ์ โกสิยพันธ์, 2534) ปุณณรัตน์ พิชญ์ไพบุลย์ (2538) กล่าวว่า ซิลิกา (Silica) เป็นวัตถุดิบในส่วนผสมของเคลือบ ซึ่งเป็นตัวหลักที่ทำให้เกิดเนื้อเคลือบ หรือเนื้อแก้ว (Glass Former) วัตถุดิบที่ให้ซิลิกา ได้แก่ หินทราย (Sand) ฟลินต์ (Flint) ควอตซ์ (Quartz) หรือหินเขี้ยวหนูมาน และขี้เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash) เป็นต้น หากในการทำเคลือบไม่มีซิลิกาอย่างใดอย่างหนึ่ง ก็จะไม่เกิดเป็นเนื้อเคลือบ หรือเนื้อแก้วขึ้นในเคลือบได้

ประเทศไทยเป็นประเทศหนึ่งในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ที่ปลูกข้าวได้มากและส่งออกจำหน่ายยังต่างประเทศมากเป็นลำดับต้นๆของบรรดาสินค้าที่ส่งออกด้วยกัน จากการสำรวจพื้นที่เพาะปลูกภายในประเทศโดย กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ปี 2540 พบว่าพื้นที่ทำการเกษตรจำนวน 62.4 ล้านไร่ใช้ในการทำนาปลูกข้าวคิดเป็นร้อยละ 58.23 ของพื้นที่การเกษตรทั้งหมด ผลผลิตที่ได้ใช้บริโภคภายในประเทศคิดเป็นอัตราส่วน 4 ต่อ 1 โดยเฉลี่ยแต่ละปี ประเทศไทยสามารถส่งออกข้าวได้ในปริมาณ 5,855,860 ตัน ซึ่งคิดเป็นมูลค่าปีละไม่ต่ำกว่า 50,753 ล้านบาท (สรินทร์ ลิ้มปนาท และคณะ, 2543) ในการสีข้าวเปลือกเพื่อที่จะให้ได้ข้าวสารนั้นย่อมจะได้แกลบเป็นวัสดุเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก (กนกอร หัสโรค์, 2534 อ้างอิงจาก อัจฉรา วิรัตน์พงษ์, 2542) จะเห็นได้ว่าในปีหนึ่งๆ แกลบข้าวซึ่งถือเป็นผลพลอยได้จากการสีข้าวมีปริมาณถึง 25 เพอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก หรือคิดเป็นข้าวเปลือกที่เหลือทิ้งในแต่ละปีประมาณ 1,463,965 ตัน ซึ่งหากนำมาใช้ก็จะเกิดประโยชน์อย่างมาก (สรินทร์ ลิ้มปนาท และคณะ, 2543)

แกลบข้าว (Rice Husk) ประกอบด้วยสารประกอบอินทรีย์ เช่น เซลลูโลส (Cellulose) เป็นส่วนประกอบหลัก แกลบข้าวเมื่อเผาไหม้จนสมบูรณ์แล้วจะให้เถ้า (Ash)

ประมาณ 13–25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยองค์ประกอบภายในถ้าจะมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักถึง 87–97 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (สมาคมเซรามิก, 2531) ซิลิกาเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้ประโยชน์ในงานด้านต่างๆ อย่างกว้างขวาง เช่น ใช้ในอุตสาหกรรมยา โดยใช้เป็นสารช่วยลดแรงตึงผิว และช่วยในการกระจายตัวของยาชนิดที่เป็นของเหลว ใช้สำหรับอุตสาหกรรมน้ำมัน และปิโตรเคมีโดยใช้เป็นสารช่วยเร่งปฏิกิริยาและใช้ทำตัวกรองน้ำดื่ม เป็นต้น (สรินทร์ ลิ้มปนาท และคณะ, 2543) การนำเถ้าแกลบมาใช้งานก็แตกต่างกันไปตามลักษณะเฉพาะของ ซิลิกาซึ่งขึ้นอยู่กับกระบวนการเตรียมและแหล่งในการผลิต

ดังนั้น การใช้เถ้าแกลบขาวเป็นวัตถุดิบที่ให้ซิลิกา จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจอีกทางหนึ่ง ซึ่ง आयुวัฒน์ สว่างผล (2534) ได้กล่าวว่า ในการเตรียมเนื้อดินปั้น หรือเคลือบผลิตภัณฑ์สโตนแวร์ (Stoneware) อาจใช้เถ้าแกลบแทนควอทซ์ หรือหินเขียวหนุมานได้ ทั้งนี้เนื่องจากจะช่วยให้อุณหภูมิของเนื้อดินและเคลือบต่ำลง เพราะว่าซิลิกาในเถ้าแกลบมีขนาดอนุภาคเล็กมากในระดับนาโนเมตร จึงทำให้มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยา (Reactivity) สูง ซึ่งช่วยให้ลดอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาได้ (กุลจิรา สุจิโรจน์ และปจรรย์ ถาวรนิต, 2542) สอดคล้องกับ Prasad และคณะ (2003) ได้ศึกษาพบว่า การผสมเถ้าแกลบ (Rice Husk Ash) และซิลิกาแบบฝุ่นละเอียด (Silica Fume) ในเนื้อดินปั้นไวท์แวร์ (Whiteware) ประมาณ 25–30 เปอร์เซ็นต์ สามารถลดอุณหภูมิของเนื้อดินได้ถึง 100 °C. ซึ่งเป็นการลดต้นทุนการผลิต และทำให้ประหยัดเชื้อเพลิงจากการเผาผลิตภัณฑ์ด้วย

ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเถ้าแกลบเพื่อนำไปใช้แทนควอทซ์ ในการทำเคลือบสำหรับผลิตภัณฑ์สโตนแวร์ ผลจากการทดลองครั้งนี้จะเป็นประโยชน์ต่อสถานประกอบการเซรามิกขนาดเล็กและขนาดกลาง ผู้สนใจทั่วไปสำหรับใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการศึกษา และสถานศึกษาที่มีการเรียนการสอนในรายวิชาเซรามิก ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางเพื่อประยุกต์ใช้งานด้านอื่นๆ และพัฒนาเคลือบสำหรับผลิตภัณฑ์เซรามิกต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเถ้าแกลบเพื่อใช้เป็นส่วนผสมในเคลือบ

1.2.2 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบเคลือบสำหรับผลิตภัณฑ์สโตนแวร์ที่ใช้เถ้าแกลบเตรียมขึ้นเองในห้องทดลอง เถ้าแกลบที่ได้จากโรงงานเผาอิฐ และควอทซ์

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษา

1.3.1 ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเถ้าแกลบ

1.3.2 การใช้ประโยชน์จากเถ้าแกลบที่ได้จากการเตรียมเอง และเถ้าแกลบจากโรงงานเผาอิฐ

1.3.3 เป็นแนวทางสำหรับอุตสาหกรรมเซรามิกขนาดเล็กที่ต้องการนำเถ้าแกลบไปใช้เป็นส่วนผสมในเคลือบแทนควอทซ์

1.4 นิยามศัพท์เฉพาะ

แกลบข้าว (Rice Husk) หมายถึง เปลือกนอกสุดของเมล็ดข้าวมีลักษณะเป็นทรงรีเหลี่ยมมีสีเหลืองทอง

เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash) หมายถึง แกลบข้าวที่นำไปเผาจะได้ซิลิกาหรือซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) หลงเหลืออยู่ และเมื่อนำเถ้าแกลบมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีพบว่าจะมี ซิลิกาอยู่ประมาณ 87–97 เปอร์เซ็นต์ (สมาคมเซรามิก, 2531)

เคลือบ (Glazes) หมายถึง วัสดุชนิดหนึ่งมีลักษณะคล้ายแก้วฉาบอยู่บนผิวผลิตภัณฑ์เซรามิกวัสดุนี้ประกอบด้วยสารประกอบซิลิเกต (Silicate) ผสมกับสารประกอบอื่นๆ ซึ่งเป็นตัวช่วยหลอมละลาย (Flux) (สุรศักดิ์ โกสิยพันธ์, 2534)

บรรยากาศออกซิเดชัน (Oxidation Atmosphere) หมายถึง เป็นการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์และใช้ออกซิเจน (Oxygen) มากเกินพอ ซึ่งเมื่อเกิดการเผาไหม้จะมีออกซิเจนเหลืออยู่ (ไพจิตร อิงศิริวัฒน์, 2537)

ลักษณะการหลอมตัวของเคลือบ หมายถึง ลักษณะของเคลือบที่สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า หรือกล้องจุลทรรศน์แบบแสงหลังการเผาเคลือบ ได้แก่ เคลือบไม่หลอมละลาย (Unfused) เคลือบด้าน (Mat) เคลือบกึ่งมันกึ่งด้าน (Semi - Matt) เคลือบมันแวววาว (Glossy)

เคลือบที่สมบูรณ์ของเคลือบ หมายถึง เคลือบที่ปราศจากตำหนิใดๆ หลังการเผาเคลือบเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า (โกมล รักรวงษ์, 2531)

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เคลือบและคุณสมบัติของเคลือบ

เคลือบคือ ชั้นบาง ๆ ของแก้วที่ฉาบอยู่บนผิวผลิตภัณฑ์เซรามิกอย่างต่อเนื่อง โดยทั่วไปแล้วเตรียมได้จากการหลอมของส่วนผสมของสารประกอบซิลิเกต เคลือบมีสมบัติทางฟิสิกส์ และเคมีคล้ายแก้วคือ มีความแข็ง ไม่ละลาย หรือละลายได้น้อยมากในสารละลายเคมี นอกจากกรดกัดแก้ว (HF) และด่างแก่ (Strong Basic) และไม่ยอมให้ของเหลวและก๊าซซึมผ่านได้ แต่เคลือบจะมีส่วนประกอบทางเคมีที่ซับซ้อนกว่าแก้ว วัตถุประสงค์ที่สำคัญของการเคลือบคือ เพื่อความสวยงาม นอกจากนั้นแล้วยังช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์ง่ายต่อการทำความสะอาด ช่วยป้องกันของเหลว และก๊าซซึมผ่าน เพิ่มความแข็งแรง ทนต่อการกัดกร่อน และช่วยปิดบังความไม่เรียบของผิวผลิตภัณฑ์ (วรรณ ต. แสงจันทร์, 2546)

2.2 องค์ประกอบของเคลือบ

องค์ประกอบของเคลือบ แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ (Nelson, 2002)

2.2.1 กลุ่มวัตถุดิบที่เป็นด่าง (Basic Group) ใช้สัญลักษณ์ RO และ R_2O มีคุณสมบัติเป็นตัวช่วยลดจุดหลอมเหลว หรือเรียกว่า ฟลักซ์ (Flux) วัตถุดิบกลุ่มนี้จะมีอยู่ 2 ประเภท คือ อัลคาไลน์ (Alkaline) มีคุณสมบัติเป็นฟลักซ์ที่ดี เพิ่มการไหลตัวของเคลือบ และเพิ่มความมันแวววาวในเคลือบ ซึ่งสารในกลุ่มนี้ ได้แก่ โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) ลิเทียมออกไซด์ (Li_2O) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีสารประกอบที่อยู่ในรูปของวัตถุดิบ เช่น โซดาเฟลด์สปาร์ ($Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$) โพแทสเซิลเฟลด์สปาร์ ($K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$) และวัตถุดิบในกลุ่มอัลคาไลน์เอิร์ท (Alkaline Earths) ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แบเรียมออกไซด์ (BaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เป็นต้น

2.2.2 กลุ่มวัตถุดิบที่เป็นกลาง (Amphoterics หรือ Neutral Group) ใช้สัญลักษณ์ R_2O_3 ทำหน้าที่ควบคุมความหนืด ให้เคลือบยึดเกาะกับชิ้นงานขณะหลอมตัว เพิ่มจุดสุกตัวของเคลือบ เพิ่มความแข็งแรงให้แก่เคลือบ และลดสัมประสิทธิ์การขยายตัวของเคลือบ วัตถุดิบใน

กลุ่มนี้ได้แก่ อะลูมินา (Al_2O_3) ดินขาว ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) นอกจากนี้ยังมีวัตถุดิบที่ให้อลูมินา เช่น โซดาเฟลด์สปาร์ ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$) โพแทสเฟลด์สปาร์ ($\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$) เป็นต้น

2.2.3 กลุ่มวัตถุดิบที่เป็นกรด (Acidic Group) ใช้สัญลักษณ์ RO_2 ทำหน้าที่เป็นตัวทำให้เกิดแก้ว (Glass Forming) เพิ่มความแข็งแรงให้กับเคลือบ ลดการไหลตัวของเคลือบที่จุดหลอมละลาย และลดสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน วัตถุดิบในกลุ่มนี้ได้แก่ ควอตซ์ (SiO_2) หรือ ซิลิกาทราย (Sand) ฟลินต์ (Flint) และนอกจากนี้ยังมีวัตถุดิบตัวอื่นที่ให้อลูมินา เช่น ดินขาว ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) โซดาเฟลด์สปาร์ ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$) โพแทสเฟลด์สปาร์ ($\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$) เป็นต้น

โดยปกติองค์ประกอบของเคลือบทั้งสามชนิดที่กล่าวมาเมื่อนำมาเผาที่อุณหภูมิที่พอเหมาะจะทำให้เคลือบหลอมรวมตัวกันมีลักษณะใส ซึ่งเราสามารถหาอัตราส่วนผสมที่พอเหมาะขององค์ประกอบของเคลือบทั้งสามชนิดได้ด้วยการกำหนดสัดส่วนของวัตถุดิบทั้งสามชนิดจากแผนภาพการคำนวณเคลือบแบบตารางสามเหลี่ยมด้านเท่า (Triaxial Diagram) ซึ่งจะมีวัตถุดิบหลักอยู่สามชนิดที่กล่าวมาจากข้างต้น หรืออาจจะมียาวัตถุดิบชนิดอื่น ๆ นอกเหนือจากวัตถุดิบหลักทั้งสามชนิดที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งอาจมีการเพิ่มเติมวัตถุดิบตัวอื่นนอกตารางก็ได้ ขึ้นอยู่กับการกำหนดสัดส่วนของวัตถุดิบในการทำเคลือบครั้งแรกอย่างไร แต่หลังจากนั้นผลที่ได้จากการเผาเคลือบเป็นอย่างไรแล้ว จึงค่อยปรับสูตรเคลือบหลังจากการเผาแล้วก็ได้ว่าจะปรับลดวัตถุดิบตัวไหน หรือเพิ่มวัตถุดิบตัวใดเข้าไปในสูตรเคลือบ ซึ่งการเกิดเคลือบนั้นขึ้นอยู่กับเงื่อนไขหลายอย่าง ไม่ว่าจะเป็น วัตถุดิบ การบด การชุบเคลือบ ความหนาของเคลือบ การเผา เวลาในการเผา บรรยากาศในการเผา สิ่งต่าง ๆ เหล่านี้ล้วนมีผลต่อลักษณะของการเกิดเคลือบได้

2.3 การจำแนกชนิดของเคลือบ

การจำแนกชนิดของน้ำเคลือบที่ใช้เคลือบผลิตภัณฑ์มีหลายชนิดด้วยกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเคลือบ เช่น เคลือบไฟสูง เคลือบไฟปานกลาง และเคลือบไฟต่ำ โดยการเผาเคลือบนั้นบางครั้งก็ได้เรียกชื่อตามที่ได้มีการนำวัตถุดิบนั้น ๆ มาใช้เป็นส่วนผสม เช่น เคลือบหินฟันม้า เคลือบแมกนีเซียม เคลือบหินปูน หรือเคลือบแบเรียม เป็นต้น ซึ่งหลังการเผาเคลือบก็จะมีชื่อเรียกตามลักษณะที่ปรากฏบนผิวเคลือบ คือ เคลือบใส เคลือบสี เคลือบราน เคลือบทึบ เคลือบผลึก เคลือบด้าน และนอกจากนี้ยังได้มีการเรียกชื่อเคลือบตามประเภทของเนื้อดินปั้นที่นำมาใช้เป็นผลิตภัณฑ์สำหรับเคลือบ เช่น เคลือบเอิร์ทเทินแวร์ เคลือบสโตนแวร์ และเคลือบพอร์ซเลน เป็นต้น

2.4 ขั้นตอนในการเตรียมน้ำเคลือบ และการเคลือบผลิตภัณฑ์

การที่จะเตรียมน้ำเคลือบสูตรใด ๆ สูตรนั้นควรจะได้ทำการทดลองจนได้ผลดีมาก่อน เพื่อป้องกันการผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้นได้ ทำให้สิ้นเปลืองวัสดุ ขั้นตอนในการเตรียมน้ำเคลือบ เริ่มจากซึ่งส่วนผสมของเคลือบ การบดผสมเคลือบ และถ้าเคลือบมีจำนวนมาก ควรใช้หม้อบด เพื่อให้มีความสม่ำเสมอดีกว่าการใช้โกร่งบดเคลือบ การบดน้ำเคลือบควรใส่น้ำไม่เกินร้อยละ 55 ของน้ำหนักส่วนผสม ถ้าใช้น้ำมากเกินไปจะทำให้การบดในหม้อบดไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร เนื่องจากจะทำให้อนุภาคของวัตถุดิบที่เป็นส่วนผสมเคลื่อนหนี และทำให้วัสดุกระจายในหม้อบด เกิดการสึกหรอ แต่ถ้าปริมาณของน้ำน้อยไปก็จะทำให้เคลือบหนืดสูงทำให้ประสิทธิภาพในการบดต่ำเช่นกัน เนื่องจากลูกบดมีการเคลื่อนตัวลำบาก ดังนั้นเวลาบดเคลือบควรใส่น้ำให้พอดี เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการบดสูงสุด ทั้งนี้ปริมาณของน้ำที่ใช้ขึ้นอยู่กับประเภทของน้ำเคลือบ ด้วย เมื่อน้ำเคลือบที่ผ่านการบดผสมเรียบร้อยแล้วจะต้องผ่านการกรองด้วยตะแกรง (Sieve) เบอร์ 80-100 เมช (Mesh) ในการกรองน้ำเคลือบควรมีตะแกรงสำหรับการกรอง 2 อัน เพื่อใช้กับเคลือบขาวอันหนึ่งและเคลือบสีอันหนึ่ง เพื่อไม่ให้เคลือบที่เป็นสีมีเม็ดสีตกค้างบนตะแกรง เพราะอาจทำให้เคลือบขาวเกิดตำหนิจุดสีต่าง ๆ ได้ (ไพจิตร อังศิริวัฒน์, 2537) นอกจากนี้ น้ำเคลือบแทบทุกชนิดถ้าเป็นการเก็บเปียกไว้จะเกิดการตกตะกอนของสาร ดังนั้นก่อนนำไปใช้ ควรจะคนให้ทั่วเสียก่อน หรือถ้ากรองใหม่ได้ก็จะดีมีฉะนั้นสารเคมีจะเกาะตัวเป็นเม็ดแฝงอยู่ในเนื้อเคลือบ เมื่อเผาเคลือบแล้วจะทำให้เกิดเป็นจุดตำหนิบนผิวเคลือบได้ (สุรศักดิ์ โกสิยพันธ์, 2534)

การเคลือบผลิตภัณฑ์ ควรเลือกวิธีที่เหมาะสม ทำได้รวดเร็ว สะดวก และให้ได้ผลดี เหมาะกับขนาดของผลิตภัณฑ์ ซึ่งการเคลือบสามารถแบ่งได้ 4 วิธี ดังนี้ (Daniel, 2000)

1. **เคลือบด้วยวิธีการทา (Painting)** วิธีนี้ใช้แปรงจุ่มเคลือบแล้วทาลงบนชิ้นงาน เหมาะสำหรับงานที่มีขนาดเล็ก

2. **เคลือบด้วยวิธีการจุ่ม (Dipping)** การเคลือบผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีนี้จะต้องมีน้ำเคลือบในปริมาณที่มากพอสำหรับชุบทั้งใบ การเคลือบในแต่ละครั้งจะต้องคนน้ำเคลือบตลอดเวลาเพื่อป้องกันการตกตะกอนของน้ำเคลือบ

3. **เคลือบด้วยวิธีเทราด (Pouring)** วิธีนี้เหมาะสำหรับเคลือบที่มีปริมาณน้อย โดยนำผลิตภัณฑ์ที่จะเคลือบไปวางบนภาชนะที่เตรียมเอาไว้ แล้วนำน้ำเคลือบมาเทราดให้รอบ ๆ ภาชนะให้ทั่ว

4. **เคลือบด้วยวิธีการพ่น (Spraying)** การเคลือบด้วยวิธีนี้นับว่าให้ผลดี ทำให้เคลือบได้สีที่สม่ำเสมอ เหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่ และผลิตจำนวนมาก โดยนำน้ำเคลือบที่เตรียมไว้ซึ่งค่อนข้างใส เพื่อสะดวกแก่การพ่น การพ่นเคลือบควรพ่นในตู้พ่น (Spray Booth) เพราะจะทำให้เคลือบไม่ฟุ้งกระจาย

2.5 การเผาเคลือบ

โดยทั่วไปการเผาเคลือบ ส่วนใหญ่จะเผาในบรรยากาศออกซิเดชัน และถ้าหากเคลือบต้องการลักษณะพิเศษก็จะเผาในบรรยากาศรีดักชัน การเผาเคลือบทั่วไป ถ้าเป็นเคลือบอุณหภูมิสูงจะเผาเคลือบเป็นเวลา 8-10 ชม. ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับชนิดของเคลือบและเนื้อดินปั้นเป็นสำคัญ ปัจจัยหนึ่งที่มีส่วนทำให้การเผาเคลือบใช้เวลามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เข้าเตา ต้องจัดให้มีระยะช่องว่างที่เหมาะสม ไม่นานหรือว่างจนเกินไปและการบรรจุผลิตภัณฑ์เข้าเตาเผาจะต้องให้ความสม่ำเสมอ ก็จะทำให้การเผาเป็นไปอย่างสะดวกสามารถควบคุมบรรยากาศและเวลาในการเผาเคลือบได้ (ทวี พรหมพฤษ, 2523) ซึ่งจากการเผาเคลือบสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของเคลือบในระหว่างการเผาเป็นดังนี้ (ปรีดา พิมพ์ขาว, 2539)

2.5.1 ระยะการอบแห้ง ผลิตภัณฑ์ดิบเมื่อชุบเคลือบ ส่วนผสมของเคลือบจะเกาะบนผิวผลิตภัณฑ์เป็นชั้นบาง ๆ ส่วนผสมของเคลือบอาจประกอบด้วย ฟrit หินแก้ว แคลเซียมคาร์บอเนต หินฟีนมา่ ดิน และน้ำ บางกรณีจะมีสารอินทรีย์ที่ช่วยให้เกิดความเหนียว เมื่อเริ่มเผา ความชื้นจะถูกจัดออกไป

2.5.2 จุดเริ่มต้นการเกิดแก้ว ที่อุณหภูมิประมาณ 700 ช. ในเคลือบที่มีฟrit เคลือบจะเริ่มแข็งตัว และละลายส่วนผสมอื่น ๆ ส่วนในเคลือบชนิดอื่น ๆ จุดเริ่มต้นของการเกิดแก้วจะเกิดที่อุณหภูมิสูงกว่า แต่ในทุกกรณีจะมีแก้วเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 1,100 ช. (Norton, 1974)

2.5.3 การละลายของวัตถุดิบที่ใช้ในส่วนผสมของเคลือบ เมื่อเริ่มเกิดแก้วขึ้นในเคลือบ ขณะที่อุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณของเนื้อแก้วจะมีมากขึ้น เนื่องจากวัตถุดิบอื่น ๆ ที่เป็นส่วนประกอบในเคลือบเริ่มละลายลงในเนื้อแก้วมีแต่ควอทซ์เท่านั้นที่ยังทนอยู่ได้ และสามารถทนอยู่ได้จนถึงจุดสุกตัวของเคลือบ

2.5.4 การกำจัดฟองอากาศ ชั้นของเคลือบขณะชุบเคลือบใหม่ ๆ จะมีรูพรุน 40-50 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ส่วนผสมของเคลือบหลอมตัวฟองอากาศบางส่วนจะหนีออกไปได้ แต่ส่วนใหญ่จะถูกกักอยู่ในเนื้อเคลือบ นอกจากนี้ก็ยังมีฟองอากาศที่เกิดจากการสลายตัวของพวกคาร์บอเนตในวัตถุดิบที่ใช้เป็นส่วนผสมของเคลือบ โดยปกติถ้าชั้นของเคลือบหนาการจัดฟองอากาศก็เป็นไปได้ช้า อีกประการหนึ่งคือ ถ้าเคลือบมีความหนืดสูง การจัดฟองอากาศก็จะเป็นไปได้ช้าเช่นกัน

2.5.5 ปฏิกริยาระหว่างเนื้อเคลือบกับเนื้อผลิตภัณฑ์ ระหว่างการหลอมตัวของเคลือบเกือบสิ้นสุดในขณะนั้น เนื้อเคลือบจะละลายเนื้อผลิตภัณฑ์ตรงบริเวณที่เคลือบ และเนื้อผลิตภัณฑ์สัมผัสกัน แต่การละลายของเนื้อเคลือบจะไม่เท่ากันทุกจุด หลังจากที่เผาเคลือบถึงจุดหลอมตัวแล้วระหว่างที่เคลือบเย็นตัวลง จะเกิดการตกผลึกขึ้นในเคลือบคือ ผลึกระหว่างรอยต่อ

ของเคลือบและเนื้อผลิตภัณฑ์ ซึ่งผลึกเหล่านี้อาจจะเกิดขึ้นระหว่างการเผา หรือระหว่างการควบคุมอุณหภูมิไดอูณหภูมิหนึ่ง แต่ผลึกส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นขณะที่ปล่อยให้เคลือบเย็นตัวลง

2.6 ตำหนิที่เกิดขึ้นกับเคลือบ

2.6.1 การเกิดรูเข็มบนผิวเคลือบ (Pinholes) มีลักษณะเป็นรอยรูตามดเป็นตำหนิรูเล็กไปถึงผิวเนื้อดินปั้นบางจุดก็ไม่ถึงเนื้อดินปั้น สาเหตุเกิดจากการคายแก๊สของวัตถุดิบที่เป็นองค์ประกอบในส่วนผสมของเคลือบจำพวกคาร์บอเนต เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต แบเรียมคาร์บอเนต แมกนีเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น นอกจากนี้สาเหตุของการเกิดรูเข็มอาจมาจากโพรงอากาศที่อยู่ในเนื้อดินปั้นจากการขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อน้ำดินก็ได้ (Hopper, 1984)

2.6.2 เคลือบตกผลึก (Devitrification) เป็นตำหนิที่เคลือบเกิดการด้านหรือเคลือบมีลักษณะขาวขุ่น โดยอาจเกิดจากการเย็นตัวของเคลือบได้เกิดการตกผลึกขึ้น ซึ่งจะพบผลึกขนาดเล็กเกิดขึ้นบริเวณผิวเคลือบ ผลึกที่เกิดขึ้นนี้ได้แก่ แคลเซียมซิงค์ซิลิเกต หรือแคลเซียมบอเรต (Fraser, 1986)

2.6.3 เคลือบราน (Crazing) เป็นตำหนิที่เคลือบเกิดเป็นรอยร้าวในผิวเคลือบเนื่องจากเคลือบมีแก้วเป็นองค์ประกอบจึงมีความทนทานต่อการหดตัวได้ดีกว่าการขยายตัว ถ้าหากเคลือบมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อน (Thermal Expansion Coefficient) สูงกว่าเนื้อดินเซรามิก ชิ้นงานนี้เมื่อนำไปเผาแล้วปล่อยให้เย็นตัวลงจะเกิดรอยแตกที่เชื่อมต่อกันเป็นร่างแหที่เรียกว่าการแตกราน และชิ้นงานนี้จะอยู่ภายใต้สภาวะที่มีความเค้นอัด ซึ่งมีโอกาสที่เคลือบจะหลุดร่อนออกจากเนื้อเซรามิก มักจะพบได้เสมอบริเวณมุมหรือขอบของชิ้นงานในบางครั้งถึงแม้ว่าเคลือบ และเนื้อดินเซรามิกติดกันดีแล้วการแตกรานก็สามารถเกิดขึ้นได้ถ้าหากว่าผลิตภัณฑ์ถูกทิ้งให้สัมผัสกับความชื้น เนื่องจากตัวชิ้นงานจะดูดซับน้ำเข้ามา และทำให้เคลือบอยู่ภายใต้แรงดึงการแตกรานเกิดได้ง่ายหากชิ้นงานมีความพรุนตัวสูง (สุธี วัฒนศิริเวช และคณะ, 2543)

2.6.4 เคลือบดิ่งตัว (Crawling) เป็นลักษณะตำหนิที่เคลือบรวมตัวกันเป็นกระจุกทำให้เกิดช่องว่างเห็นเนื้อผลิตภัณฑ์ สาเหตุเกิดจากมีสิ่งสกปรกบนผิวผลิตภัณฑ์ เช่น ฝุ่น คราบน้ำมัน บางครั้งลักษณะของเคลือบดิ่งตัวอาจเกิดจากการบดเคลือบละเอียดเกินไป หรือชุบเคลือบหนาไปจึงทำให้เคลือบเกิดการดิ่งตัวเป็นหย่อม ๆ หลังการเผาได้ (Daniel, 2000)

2.6.5 จุดสี (Specks) เกิดจากสิ่งปนเปื้อนที่ปรากฏหลังการเผา ซึ่งสามารถปะปนเข้ามาได้จากขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่งในกระบวนการผลิตชิ้นงานก็เป็นได้ เพราะฉะนั้นการตรวจสอบที่มาของจุดสี ควรจะกระทำโดยการตรวจสอบว่าจุดสีนั้นคือสารประกอบอะไร และปรากฏอยู่ในส่วนใดของชิ้นงานบ้าง ซึ่งบางครั้งอาจปรากฏทั้งในเนื้อดิน และผิวเคลือบ หรืออาจ

ปรากฏแค่ส่วนใดส่วนหนึ่ง ตัวอย่างจุดสีที่มักพบบ่อย คือ สีน้ำตาล หรือสีดำที่เกิดจากเกลือซัลไฟด์ หรือเกลือคาร์บอเนตของเหล็ก (FeS หรือ FeCO_3) ที่ปนเปื้อนอยู่ในเนื้อดิน หรืออาจเกิดจากสนิมเหล็กที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในกระบวนการผลิต เป็นต้น (สุธี วัฒนศิริเวช และคณะ, 2543)

2.6.6 เคลือบไหลตัวระหว่างการเผา (Running Glaze) เคลือบไหลตัวระหว่างการเผาเป็นผลทำให้เกิดความเสียหายกับแผ่นรองผลิตภัณฑ์ และผลิตภัณฑ์ สาเหตุของเคลือบไหลตัวนั้นเกิดจากในส่วนผสมของเคลือบมีวัตถุดิบจำพวกตัวหลอมละลายมีมากเกินไป หรือเผาเคลือบเกินจุดหลอมละลาย และมีการชุบเคลือบหนาเกินไป (โกมล รักช่วงศ์, 2538)

2.7 เคลือบซีเถ้าพืช (Ash Glazes)

เคลือบชนิดนี้จัดว่าเป็นเคลือบที่มีราคาถูก คือ นำสิ่งที่ไม่ใช่ประโยชน์แล้วนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ขึ้นมา ซีเถ้าพืชที่ใช้ได้แก่ ซีเถ้ากลบจากโรงสี ฟางข้าว หนุ่ยคา เศษใบไม้ หรือผักตบชวา เป็นต้น ซีเถ้าของพืชเหล่านี้ล้วนแล้วแต่นำมาใช้ผสมทำน้ำเคลือบได้ทั้งนั้น (สุรศักดิ์ โกสิยพันธ์, 2534) พืชทุกชนิดมีส่วนประกอบของไฮโดรเจนและคาร์บอน เมื่อถูกเผาไหม้หมดไปจะเหลือซีเถ้าปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งเป็นส่วนที่ทนไฟ สารเหล่านี้จะคงเหลือในกองซีเถ้าพืชซึ่งประกอบด้วยธาตุหลักได้แก่ CaO SiO_2 P_2O_5 Al_2O_3 MgO K_2O และธาตุอื่น ๆ ที่ปะปนมากับเถ้าในปริมาณเล็กน้อย ซึ่งได้แสดงองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างซีเถ้าพืชชนิดต่าง ๆ ตามตารางที่ 2.1 เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของซีเถ้าชนิดต่าง ๆ

ชนิดของซีเถ้า	องค์ประกอบทางเคมีของซีเถ้าชนิดต่าง ๆ (ร้อยละ)									
	CaO	SiO ₂	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	TiO ₂
ซีเถ้าทานตะวัน	47.71	34.60	3.93	4.38	0.49	5.99	2.51	0.06	0.33	–
ซีเถ้าต้นสน	39.79	24.39	2.78	9.71	3.41	4.45	8.98	3.77	2.74	–
ซีเถ้ากลบ	0.48	96.00	0.02	1.00	0.04	0.22	0.90	0.26	0.19	0.16
ซีเถ้าฟางข้าว	3.07	40.00	2.51	1.13	0.26	1.38	3.57	0.77	0.30	–

(สุรศักดิ์ โกสิยพันธ์, 2534 อ้างอิงจาก Herbert H. Sanders, 1980)

ปริมาณของสารเหล่านี้จะมีมาก หรือน้อยแตกต่างกันไปตามชนิดของพืช ซึ่งความแตกต่างจากซีเถ้าพืชในแต่ละชนิดเหล่านี้จะมีผลทำให้สี และลักษณะผิวของเคลือบ แตกต่างกันไป นอกจากนี้เสริมศักดิ์ นาคบัว (2536) ได้กล่าวไว้ว่า ลักษณะเด่นของเคลือบซีเถ้าพืชนั้น

เป็นความงามที่ให้ความรู้สึก สุขุม เงียบ ลึกซึ้ง ชล้ง ไม่ฉูดฉาดเหมือนเคลือบชนิดอื่น เป็นความงามที่เป็นเอกลักษณ์พิเศษซึ่งทำไม่ได้ด้วยเคลือบชนิดอื่น จึงทำให้เคลือบซี้เถ้าเป็นที่สนใจกันมากทั้งในและต่างประเทศ ซึ่งจากการทบทวนเอกสารก็ได้มีการศึกษาทดลองนำซี้เถ้าพืชมาทดลองทำน้ำเคลือบได้แก่

พิมพ์วัลค์ วัฒนภาส (ม.ป.ป.) ได้ทดลองทำเคลือบจากซี้เถ้าแกลบ วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองได้แก่ หินฟันม้า หินปูน ซี้เถ้าแกลบใช้บรรยากาศในการเผา 2 แบบคือ บรรยากาศออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1,230 ช. และบรรยากาศแบบรีดักชันที่อุณหภูมิ 1,250 ช. พบว่า เคลือบที่มีปริมาณแกลบสูงกว่าร้อยละ 40 ขึ้นไปเป็นฟองฟูบริเวณที่มีซี้เถ้าแกลบร้อยละ 0-30 จะเป็นเคลือบใสและแตกราน เมื่อนำไปเผาแบบรีดักชันที่อุณหภูมิ 1,250 ช. จะได้เคลือบแบบเซลาดอน (Celadon) บริเวณที่ดีที่สุดที่เหมาะสมจะนำมาทำเคลือบคือส่วนผสมที่มีหินฟันม้าร้อยละ 40-60 หินปูนร้อยละ 30-60 และ ซี้เถ้าแกลบร้อยละ 0-30

พิมพ์วัลค์ วัฒนภาส (ม.ป.ป.) ได้ทดลองทำเคลือบจากซี้เถ้าไม้แดง วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองได้แก่ หินฟันม้า หินปูน และซี้เถ้าไม้แดง ใช้บรรยากาศในการเผา 2 แบบคือ บรรยากาศออกซิเดชัน และบรรยากาศแบบรีดักชัน เผาเคลือบที่อุณหภูมิ 1,200 ช. การคำนวณหาส่วนผสมได้จากแผนภาพตารางสามเหลี่ยมด้านเท่าหลังจากการเผาเคลือบพบว่าเคลือบที่เผาในบรรยากาศแบบออกซิเดชัน ลักษณะกึ่งมันกึ่งด้าน สีเคลือบออกโทนน้ำตาล ส่วนเคลือบที่เผาในบรรยากาศแบบรีดักชัน เคลือบที่ได้มีผิวกึ่งมันกึ่งด้านเช่นกัน สีเคลือบมีสีเขียวอมเทา โดยมีอัตราส่วนผสมของเคลือบคือ หินฟันม้าปริมาณร้อยละ 30-60 หินปูนปริมาณร้อยละ 0-30 และซี้เถ้าไม้แดงปริมาณร้อยละ 10-40

พิมพ์วัลค์ วัฒนภาส (ม.ป.ป.) ได้ทดลองทำเคลือบจากซี้เถ้าไม้เต็ง วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองได้แก่ หินฟันม้า หินปูน ซี้เถ้าไม้เต็ง เผาเคลือบที่อุณหภูมิ 1,200 ช. ในบรรยากาศออกซิเดชัน และบรรยากาศแบบรีดักชัน ซึ่งคำนวณหาส่วนผสมได้จากแผนภาพตารางสามเหลี่ยมด้านเท่า จากการทดลองพบว่า เคลือบส่วนใหญ่เป็นเคลือบด้าน บริเวณที่ให้ผลดีคือ หินฟันม้าปริมาณร้อยละ 30-60 หินปูนปริมาณร้อยละ 0-30 ส่วนซี้เถ้าไม้เต็งปริมาณร้อยละ 40-60 เผาเคลือบในบรรยากาศออกซิเดชัน เคลือบที่ได้กึ่งด้านสีเนื้อ ส่วนเคลือบที่เผาบรรยากาศรีดักชันได้เคลือบด้านสีเทาฟ้าสวยงาม

สุจินดา โชติพานิช (ม.ป.ป.) ได้ทำการทดลองเคลือบสีจากเหล็กออกไซด์ในน้ำยาเคลือบซี้เถ้า วัตถุดิบที่ใช้ ได้แก่ หินฟันม้า ซี้เถ้าไม้เนื้ออ่อน ซี้เถ้าฟางข้าว โดยผสมเหล็กออกไซด์ร้อยละ 8 ในส่วนผสมของน้ำยาเคลือบทุกส่วนผสม การคำนวณหาส่วนผสมได้จากแผนภาพตารางสามเหลี่ยมด้านเท่า และเผาที่อุณหภูมิ 1,200 ช. พบว่า เคลือบส่วนใหญ่เป็นเคลือบเงามันใส แต่เคลือบที่มีส่วนผสมของซี้เถ้าไม้เนื้ออ่อนร้อยละ 40-70 เคลือบที่ได้จะมันใสมีผลึกด้านอยู่ตามขอบ สำหรับสีที่ได้ปรากฏว่า ในส่วนผสมที่มีปริมาณหินฟันม้าร้อยละ 50-80 เคลือบจะมีสีน้ำตาลเข้มถึงดำ และดำเป็นดวงแบบหยดน้ำมัน ในส่วนผสมที่มีหินฟันม้าร้อยละ 40 ซี้เถ้าไม้

เนื้ออ่อนร้อยละ 10-30 และซีเถ้าฟางข้าวร้อยละ 20-30 ได้สีของเคลือบเป็นสีน้ำตาลอมฟ้าเป็นเงามันแต่ทึบ ซึ่งเป็นสีที่ใกล้เคียงกับเซลาดอน

ไพจิตร อังศิริวัฒน์ (2537) ได้ทำการศึกษาทดลองเคลือบคอปเปอร์เรด (Copper Red Glaze) จากภาควิชาวิทยาศาสตร์ซิลิเกต และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยใช้เนื้อดินขาวพอร์ซเลน เผาที่อุณหภูมิ 1,280 ช. ในบรรยากาศรีดักชัน มีวัตถุดิบที่ใช้เป็นส่วนผสมในเคลือบคือ เฟลด์สปาร์ชนิดโพแทส ($K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$) ร้อยละ 38.8 แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) ร้อยละ 9.18 หินปูน ($CaCO_3$) ร้อยละ 11.6 ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ร้อยละ 15.13 ทัลคัม ($3MgO \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$) ร้อยละ 5.88 ดินขาว ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$) ร้อยละ 3.60 ควอทซ์ (SiO_2) ร้อยละ 16.95 เถ้ากระดูก หรือโบนแอช ($3CaO \cdot P_2O_5$) ร้อยละ 2 คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ร้อยละ 1 ดีบุกออกไซด์ (SnO_2) ร้อยละ 3 และซีเถ้าแกลบ ร้อยละ 10 พบว่าหลังการเผาเคลือบนั้นปรากฏว่าเคลือบหลอมละลายดี และได้สีของเคลือบเป็นสีแดงสด

สุรศักดิ์ โกสิยพันธ์ (2534) ได้ทำการทดลองทำเคลือบซีเถ้าจากผักตบชวา โดยหาอัตราส่วนผสมเคลือบจากการคำนวณเคลือบ จากแผนภูมิตารางสามเหลี่ยมด้านเท่า มีส่วนผสมดังนี้ ซีเถ้าผักตบชวา ร้อยละ 40 ดินขาวนาวิวาส ร้อยละ 10 หินฟันม้าชนิด โพแทสเฟลด์สปาร์ ร้อยละ 50 ทดลองเผาเคลือบที่อุณหภูมิ 1,240 ช. หลังการเผาพบว่า เคลือบที่ได้มีสีน้ำตาลดำ มีจุดสีเขียวหม่นแทรก เคลือบหลอมละลายตัวดี

ลดา พันธุ์สุขุมธนา และ ชลัย ศรีสุข (2546) ได้ทำการทดลองเคลือบซีเถ้าไม้ยางพาราผสมกับดินเลน หินปูนและ ซิงค์ออกไซด์ เผาที่อุณหภูมิ 1,150-1,200 ช. พบว่าลักษณะของเคลือบที่ได้หลังการเผา คือ เคลือบมีความมันวาว เป็นที่น่าสังเกตว่าจากการตรวจสอบผลวิเคราะห์ทางเคมีของวัตถุดิบที่เป็นส่วนผสมในเคลือบก็พบว่า ดินเลน มีเปอร์เซ็นต์ ซิลิกาสูงถึง 70.2 เปอร์เซ็นต์ และมีอะลูมินา 12.5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอัตราส่วนผสมของเคลือบที่เหมาะสม คือ ซีเถ้าไม้ยางพาราร้อยละ 21.7 ดินเลนร้อยละ 65.2 หินปูนร้อยละ 6.5 ซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 6.5 ทั้งนี้สาเหตุที่เคลือบหลอมละลายดีนั้นก็มาจากการส่วนผสมของเคลือบที่มีตัวช่วยหลอมละลายในสูตรเคลือบคือ หินปูนและซิงค์ออกไซด์

เสริมศักดิ์ นาคบัว (2536) ได้ทำการทดลองเคลือบโดยใช้วัตถุดิบ คือ หินฟันม้า ซีเถ้าแกลบ ซีเถ้าต้นมะขาม ดินดำสุราษฎร์ธานี และดินปากเกร็ด เผาที่อุณหภูมิ 1,250 1,280 และ 1,300 ช. ในบรรยากาศแบบออกซิเดชันและรีดักชันพบว่า ที่อุณหภูมิ 1,250 ช. เคลือบเริ่มหลอม มีผิวขรุขระ มีสีเทาอมเขียว ที่อุณหภูมิ 1,280 ช. เคลือบหลอมเกือบสมบูรณ์ ผิวมันเกือบเรียบ มีสีเทาอมเขียว รานเป็นเส้นเล็กๆ ส่วนเคลือบที่เผาอุณหภูมิ 1,300 ช. เคลือบหลอมสมบูรณ์ ผิวมัน มีสีเขียวมะกอกอมเทา รานเป็นเส้นเล็กๆ อัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดคือ หินฟันม้า ร้อยละ 34 ซีเถ้าแกลบ ร้อยละ 18 ซีเถ้าต้นมะขาม ร้อยละ 15 ดินดำสุราษฎร์ธานีและดินปากเกร็ด ร้อยละ 33

เสริมศักดิ์ นาคบัว (2536) ได้ทดลองทำเคลือบซีเมนต์โดยใช้วัตถุดิบคือ หินฟืนม้า ชนิดโพแทสเซิลต์สปาร์ ซีเมนต์จากฟางข้าว ซีเมนต์มะขาม และดินแดงปากเกร็ด เผาเคลือบที่อุณหภูมิ 1,250 °C. ในบรรยากาศแบบรีดักชัน ผลจากการเผาเคลือบพบว่า เคลือบหลอมตัวสมบูรณ์ดี ผิวมัน มีฟองอากาศเล็ก ๆ ทั่วผิว สีที่ได้สีเขียวมะกอก เคลือบรานตัว ซึ่งอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดคือ หินฟืนม้าปริมาณร้อยละ 34 ซีเมนต์จากฟางข้าวปริมาณร้อยละ 18 ซีเมนต์มะขามปริมาณร้อยละ 15 และดินแดงปากเกร็ดปริมาณร้อยละ 33

จากงานวิจัยเคลือบซีเมนต์ฟิชที่ได้ศึกษามานพบว่า การศึกษาเรื่องเคลือบซีเมนต์ฟิชในเชิงวิทยาศาสตร์อย่างเป็นระบบในประเทศไทยนั้นยังไม่แพร่หลายเท่าที่ควร ส่วนมากแล้วจะเป็นการศึกษานำซีเมนต์ฟิชมาใช้ประโยชน์สำหรับทำน้ำยาเคลือบเท่านั้น โดยที่การศึกษาในเบื้องต้นของการนำซีเมนต์ฟิชมาใช้ประโยชน์ที่พบโดยทั่วไปจะมีเพียงการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์ฟิชว่าประกอบไปด้วยอะไรบ้าง และผลที่ได้จากการวิเคราะห์ลักษณะของเคลือบที่เกิดขึ้นหลังการเผาเคลือบที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งถ้าหากมีการศึกษาเคลือบซีเมนต์ฟิชในเชิงวิทยาศาสตร์ที่ยังขาดการศึกษายูทิลิตี้ก็จะช่วยให้ค้นพบคำตอบหลายๆ อย่างที่เกี่ยวกับลักษณะของเคลือบซีเมนต์ฟิช เช่น สีของเคลือบที่เกิดจากเคลือบซีเมนต์ฟิชเกิดขึ้นจากองค์ประกอบตัวไหน ลักษณะผิวเคลือบที่ปรากฏจากเคลือบซีเมนต์ฟิชเช่น เคลือบมัน เคลือบกึ่งมันกึ่งด้าน และเคลือบด้านนั้นมีสาเหตุมาจากอะไร ซึ่งการศึกษาถึงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของเคลือบ หรือตำหนิที่เกิดจากเคลือบซีเมนต์ฟิชที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว การรานตัวของเคลือบ หรือตำหนิแบบอื่นๆ ของเคลือบที่เกิดขึ้น น่าจะเป็นประโยชน์อย่างมากต่ออุตสาหกรรมเซรามิกที่ต้องการใช้เคลือบจากวัสดุเหลือใช้อย่างซีเมนต์ฟิช เป็นต้น

2.8 ซิลิกาจากแกลบข้าว

แกลบข้าวเป็นอีกแหล่งหนึ่งที่พบซิลิกาจำนวนมากเกาะติดบนผิว เรียงตัวกันเป็นระเบียบคล้ายกับเม็ดข้าวโพด ซึ่งจะมีจำนวนซิลิกา 13 – 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเมื่อเผาแกลบข้าวที่อุณหภูมิสูงจนกลายเป็นเถ้าแกลบ จะพบว่าเถ้าแกลบจะมีซิลิกาอยู่ประมาณสูงกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ (ศรีเพ็ญ ท้าวตา และคณะ, 2531) นอกจากนี้จะพบในแกลบข้าวแล้วยังพบซิลิกาในฟิซบางชนิด เช่น เปลือกข้าวสาลี ใบข้าวโพด หรือส่วนที่เป็นใบหรือลำต้นของต้นทานตะวัน เมื่อนำฟิซพวกนี้ไปเผาที่อุณหภูมิสูงจนกลายเป็นเถ้า จะได้เถ้าประมาณ 11 – 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากตารางที่ 2.2 จะพบว่า ฟิซที่ให้ปริมาณของซิลิกาสูงสุดคือ แกลบ จะให้ซิลิกาประมาณ 93 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และฟิซที่ให้ซิลิกา รองลงมาคือ เปลือกข้าวสาลี ประมาณ 91 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนเถาต้นทานตะวันจะมีซิลิกิต่ำสุด ประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (นิยม บุญถนอม และคณะ, 2533) ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ปริมาณเถาและซิลิกาในพืชชนิดต่างๆ

ชนิดของพืช	ส่วน	ปริมาณเถา (ร้อยละ)	ปริมาณซิลิกา (ร้อยละ)
ข้าว	เปลือก	22	93
ข้าว	ฟาง	15	82
ข้าวสาลี	เปลือก	11	91
ข้าวโพด	ใบ	12	64
ไม้ไผ่	ลำต้น	2	57
ทานตะวัน	ใบและลำต้น	12	25

(นิยม บุญถนอม และคณะ, 2533 อ้างอิงจาก Sacher and Sprehsaal, 1988)

จากผลวิเคราะห์ทางเคมี พบว่าองค์ประกอบของแกลบข้าวประกอบด้วยสารอินทรีย์และความชื้น 73.87 เปอร์เซ็นต์ และซิลิกา 22.12 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนั้นเป็นสารประกอบอื่นๆ เช่น อะลูมินา เหล็กออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ และแมงกานีสไดออกไซด์ อีกเล็กน้อย ซึ่งส่วนประกอบของแกลบข้าวนี้ จะแตกต่างกันออกไปบ้างตามสถานที่ปลูกข้าวหรือสิ่งแวดล้อม แต่โดยเฉลี่ยแล้วในเปลือกข้าวจะประกอบด้วยเถาแกลบ 13–29 เปอร์เซ็นต์ เซลลูโลส 33–44 เปอร์เซ็นต์ ลิกนิน 19–47 เปอร์เซ็นต์ และอื่นๆ 17–26 เปอร์เซ็นต์ (นิยม บุญถนอม และคณะ, 2533 อ้างอิงจาก Sacher and Sprehsaal, 1988)

2.9 การเตรียมซิลิกาจากแกลบข้าว

การเตรียมซิลิกาจากแกลบข้าวสามารถเตรียมได้หลายวิธีเช่น การนำแกลบข้าวไปเผาและเตรียมแกลบก่อนการเผา โดยการรีฟลักซ์แกลบด้วยกรด หรือเบสที่สภาวะต่าง ๆ เพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ให้กับเถาแกลบซึ่งจากการทบทวนเอกสารพบว่า มีการเตรียมซิลิกาจากแกลบข้าวดังนี้

ก้องเกียรติ ภูเกิต (2531) ได้ศึกษาการเตรียมซิลิกา (SiO_2) ที่มีความบริสุทธิ์สูงจากแกลบ ในช่วงอุณหภูมิ 700–1,000 ช. จากการทดลองพบว่า ซิลิกาที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 1,000 ช. จะมีความบริสุทธิ์ 99.4 เปอร์เซ็นต์ สอดคล้องกับ ศรีเพ็ญ ท้าวตา และคณะ (2531) ที่ได้นำแกลบข้าวไปเผาโดยปรับอุณหภูมิของเตาให้เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิสูงสุดที่ 800 ช. การเผาที่สมบูรณ์จะสังเกตได้จากลักษณะของควันที่ออกจากเตาเผา หลังจากนั้นนำ

ถ้าเผาไปเผาอีกครั้งที่อุณหภูมิ 1,100 ช. ประมาณ 1 ชม. ซึ่งจะทำให้ได้ถ่านโค้กที่มีสีเทาขึ้น เมื่อวัดค่าปริมาณของซิลิกาพบว่า มีความบริสุทธิ์ถึง 99.4 เปอร์เซ็นต์

Nakata และคณะ (1989) ได้ศึกษาการเตรียมถ่านโค้ก และคุณสมบัติของซิลิกาที่ได้จากถ่านโค้ก โดยการเผาถ่านโค้กที่อุณหภูมิระหว่าง 400–1,500 ช. เมื่อตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่า ซิลิกาที่ได้จากถ่านโค้กที่เผาต่ำกว่าอุณหภูมิ 800 ช. มีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน และมีขนาดอนุภาคของถ่านโค้กมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยประมาณ 20 ไมโครเมตร ส่วนถ่านโค้กที่เผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 900 ช. ขึ้นไปลักษณะโครงสร้างหลักเป็น คริสทอลไลท์ (Cristobalite) และมีไตรดิมิต (Tridymite) ปะปนอยู่เล็กน้อย

Luan and Chou (1990) ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมซิลิกาจากถ่านโค้ก โดยการเผาถ่านโค้กด้วยเตาเผาแบบฟลูอิดไอเซชัน (Fluidization) อุณหภูมิในห้องเผาเป็น 500 ช. อัตราการป้อนถ่านโค้กเป็น 3 กิโลกรัมต่อชม. อัตราการไหลของอากาศเป็น 1.141 ตารางเมตรต่อวินาที อัตราการไหลของออกซิเจนเป็น 2.743 ลิตรต่อวินาที และอัตราการไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) เป็น 2.997 ลิตรต่อวินาที พบว่าเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมซิลิกาจากถ่านโค้ก โดยถ่านโค้กที่ได้จะมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบในปริมาณ 88.89 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก

Huang และคณะ (2001) ศึกษาองค์ประกอบและโครงสร้างของซิลิกาที่ได้จากการเผาถ่านโค้กในเตาระบบฟลูอิดไอเซชัน โดยมีอัตราเร็วของอากาศเป็น 0.180–0.316 m/s และอุณหภูมิในห้องเผาเป็น 973–1073 K ตามลำดับ ถ่านโค้กที่ได้มีลักษณะเป็นถ่านโค้กสีเทา มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบอยู่ประมาณ 97–99 เปอร์เซ็นต์ และวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่า ซิลิกาที่ได้มีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน

Della และคณะ (2002) ศึกษาการเตรียมซิลิกาจากถ่านโค้กขาวโดยนำถ่านโค้กขาวไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีก่อนเผาด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) พบว่า มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบประมาณ 72.10 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นได้นำถ่านโค้กขาวไปเผาที่อุณหภูมิ 700 ช. เป็นเวลา 6 ชม. พบว่าในถ่านโค้กมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบประมาณ 94.95 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อนำถ่านโค้กไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่าซิลิกาที่ได้มีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน ซึ่งผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของถ่านโค้กก่อนเผา และถ่านโค้กหลังเผาแสดงอยู่ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเกลบก้อนเผาและหลังเผาที่ 700 ช. นาน 6 ชม.

องค์ประกอบทางเคมีในเกลบ	เกลบก้อนเผา (ปริมาณร้อยละ)	เกลบหลังเผา (ปริมาณร้อยละ)
ซิลิกา (SiO_2)	72.10	94.95
อะลูมินา (Al_2O_3)	0.30	0.39
เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3)	0.15	0.26
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	0.43	0.54
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	0.50	0.25
โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	0.72	0.94
แมงกานีสออกไซด์ (MnO)	0.15	0.16
ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)	0.05	0.02
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	0.70	0.90
ฟอสฟอรัส (P_2O_5)	0.06	0.74
น้ำหนักสูญหายหลังการเผา	24.30	0.85

(Della และ คณะ, 2002)

นอกจากนี้นักวิจัยทั้งในประเทศและต่างประเทศได้ศึกษาการเตรียมซิลิกาจากเกลบให้บริสุทธิ์ โดยการฟลักซ์ด้วยกรด และเบสที่สภาวะต่าง ๆ ดังนี้

อุไรวรรณ ลีลาอดิศร (2535) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ และข้อจำกัดของการใช้เกลบเป็นวัตถุดิบสำหรับการเตรียมซิลิกาที่มีโครงสร้างแบบนาโน (Nanostructure) โดยนำเกลบมาผ่านกระบวนการด้วยสารเคมีโดยใช้เอนไซม์เซลลูโลส และกรดอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ จากนั้นนำเกลบที่ผ่านกระบวนการฟลักซ์แล้วมาเผาที่อุณหภูมิ 600 ช. เป็นเวลา 6 ชม. ในบรรยากาศของการเผาไหม้ปกติ นำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาศึกษาคุณลักษณะต่าง ๆ ได้แก่ ปริมาณซิลิกา การกระจายตัวขนาดอนุภาคที่ระดับต่าง ๆ กันของการเกาะรวมเป็นกลุ่มอนุภาค และพื้นที่ผิวจำเพาะโดยการดูดซับของแก๊สไนโตรเจนที่ผิว พบว่าเกลบที่ผ่านกระบวนการฟลักซ์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก ที่ความเข้มข้น 1 ต่อ 4 และกรดซัลฟูริก ที่ความเข้มข้น 1 ต่อ 4 จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติระหว่าง ฟุ้งซิลิกา (Fumed Silica) และซีโรเจล (Xerogel) พื้นที่ผิวจำเพาะของขนาดอนุภาคที่ระดับปฐมภูมิจึงสูงถึง 250 ตารางเมตรต่อกรัม และความบริสุทธิ์ของซิลิการ้อยละ 99.4

กนกอร หัสโรค์ (2543) ได้ศึกษาปัจจัยของกรด อุณหภูมิ และเวลาที่มีต่อกระบวนการผลิตซิลิกาขาวจากเกลบ พบว่าปริมาณซิลิกาสูงถึง 98.35 เปอร์เซ็นต์ ได้จากเกลบที่ผลิตโดยใช้ในสารละลายกรดไฮโดรโบรมิก ความเข้มข้น 5 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 25 ช. เป็นเวลา

1 ชั่วโมง ซึ่งการศึกษาโครงสร้างผลึกของเกลบที่ผ่านกระบวนการทางเคมี และให้ความร้อนแล้ว พบว่าซิลิกาที่ได้อยู่ในรูปอสัณฐาน สำหรับการศึกษาโครงสร้างผิวนอกของทั้งเกลบสดและเกลบที่ผ่านกระบวนการทางเคมีพบว่า เกลบสดไม่ปรากฏลักษณะรอยแตกที่ผิวนอกแต่เกลบที่ผ่านกระบวนการทางเคมีปรากฏรอยแตกกว้างที่ผิวนอก ซึ่งรอยแตกกว้างนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้นในขณะการศึกษาหาพื้นที่ผิว พบว่าซิลิกามีพื้นที่ผิวสูงสุด 371.4 ตารางเมตรต่อกรัม ได้จากเกลบที่ผ่านกระบวนการแช่ด้วยสารละลายไฮโดรโบรมิก และผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 490 ช. จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากพบซิลิกามีพื้นที่ผิวสูงที่สุด

ชีวลรัตน์ มาสิงบุญ (2546) ได้ทำการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมซิลิกาบริสุทธิ์จากเกลบ โดยการรีฟลักซ์เกลบด้วยกรดไฮโดรคลอริก ที่ภาวะต่างๆ และเผาเกลบที่ผ่านการรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ ตั้งแต่ 400-800 ช. และในแต่ละอุณหภูมิใช้ระยะเวลาในการเผาตั้งแต่ 1, 3 และ 5 ชม. พบว่า เกลบที่ผ่านการรีฟลักซ์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก เป็นเวลา 15 นาที เมื่อนำมาเผาที่อุณหภูมิ 600-800 ช. เป็นเวลา 5 ชม. เป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการสกัดซิลิกา โดยถ้าเกลบที่เตรียมได้สีขาวและถ้าเกลบเผาที่ 800 ช. เป็นเวลา 5 ชม. มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ 99.33 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นได้ศึกษาการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกของซิลิกาโดยนำเอาเกลบที่ผ่านการเผาที่ 800 ช. เป็นเวลา 5 ชม. มาเผาค่อยๆ ที่อุณหภูมิต่างๆ แล้ววิเคราะห์โครงสร้างผลึกซิลิกาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์และรามานสเปกโตรสโกปี (Raman Spectroscopy) พบว่าเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 800 ช. เป็นเวลา 10 ชม. ซิลิกาอสัณฐานจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจาก อัลฟา-ควอตซ์ เป็น อัลฟา-ไทรดิมท์ และเมื่อเผาค่อยๆ ที่อุณหภูมิ 1,100 ช. เป็นเวลา 10 ชม. พบว่าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจาก อัลฟา-ไทรดิมท์ เป็น อัลฟา-คริสโทบาไลท์ และเมื่อเผาค่อยๆ อีกครั้งที่อุณหภูมิ 1,200 ช. เป็นเวลา 10 ชม. พบว่า จะมีโครงสร้างผลึกเป็น อัลฟา-ไทรดิมท์ ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวของซิลิกาได้จากการเผาเกลบที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) พบว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการเผาสีขึ้นอนุภาคของซิลิกาจะเกิดการเกาะตัวกัน และมีขนาดอนุภาคเล็กลง

Andreoli และคณะ (2000) ศึกษาเปรียบเทียบซิลิกาที่สกัดจากเกลบที่ล้างด้วยน้ำกลั่น และเกลบที่ผ่านการรีฟลักซ์ ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 1 นอร์มอล ที่อุณหภูมิ 60 ช. เป็นเวลา 6 ชม. และนำเกลบที่เตรียมได้จากทั้ง 2 วิธีมาผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 300 500 และ 900 ช. เป็นเวลา 2 ชม. ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน (Ar) ทำการวิเคราะห์ปริมาณซิลิกา ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ พบว่าถ้าเกลบที่ได้จากการเผาด้วยการล้างด้วยน้ำกลั่นมีปริมาณซิลิกา 96 เปอร์เซ็นต์ ส่วนซิลิกาที่ได้จากการรีฟลักซ์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 1 นอร์มอล พบว่ามีซิลิกาเป็นองค์ประกอบในปริมาณ 99 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักตามลำดับ และวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่าถ้าเกลบที่ได้จากการเผาเกลบที่เตรียมโดยการล้างด้วยน้ำกลั่นเผาที่ 500 ช. เป็นเวลา 2 ชม. ภายใต้บรรยากาศอาร์กอนจะมีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน ส่วนถ้าเกลบที่เตรียมได้จากการรีฟลักซ์ที่

อุณหภูมิ 500 ช. เป็นเวลา 2 ชม. ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน จะมีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐานเพียงอย่างเดียว

Yalcin และคณะ (2001) ศึกษาซิลิกาที่สกัดจากแกลบที่เตรียมด้วยวิธีทางเคมีที่สภาวะต่างๆ ได้แก่ การรีฟลักซ์แกลบด้วยกรดไฮโดรคลอริก 3 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 2 ชม. การรีฟลักซ์แกลบด้วยกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) 10 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 2 ชม. และแช่แกลบทิ้งไว้ในโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 24 ชม. นำแกลบทั้ง 3 สภาวะไปเผาที่อุณหภูมิ 600 ช. ภายใต้บรรยากาศต่างๆ คือบรรยากาศคงที่ (Static Air) บรรยากาศของแก๊สอาร์กอนและบรรยากาศของแก๊สออกซิเจน (O_2) จากนั้นวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของซิลิกาที่เตรียมได้จากการเผาภายใต้บรรยากาศต่างๆ ดังกล่าวด้วยวิธีการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน พบว่าถ้าแกลบที่ได้จากการเผาแกลบที่อุณหภูมิ 600 ช. ภายใต้บรรยากาศของแก๊สอาร์กอน เป็นเวลา 3 ชม. แล้วเผาต่อที่อุณหภูมิเดียวกันภายใต้บรรยากาศของแก๊สออกซิเจน เป็นเวลา 1 ชม. มีปริมาณซิลิกาสูงถึง 99.66 เปอร์เซ็นต์ จากการวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกซิลิกาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่าซิลิกาที่ได้มีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน

Real และคณะ (1997) ได้ศึกษาการเตรียมซิลิกาจากแกลบ โดยนำแกลบไปรีฟลักซ์ด้วยกรดไฮโดรคลอริกก่อนนำไปเผาต่อ จากนั้นนำแกลบไปเผาที่อุณหภูมิ 600 ช. พบว่า ถ้าแกลบที่ได้มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบในปริมาณ 99.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก และมีพื้นที่ผิวจำเพาะ $260 \text{ m}^2/\text{g}$

Souza และคณะ (2000) ศึกษากระบวนการที่เหมาะสมในการเตรียมซิลิกาจากแกลบ โดยนำแกลบไปต้มในกรดไฮโดรคลอริก 20 เปอร์เซ็นต์ กรดซัลฟูริก 20 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 24 ชม. แล้วนำไปล้างด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำแกลบไปเผาที่อุณหภูมิ 550 ช. เป็นเวลา 2 ชั่วโมง วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่าซิลิกาที่ได้มีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน เมื่อวิเคราะห์ปริมาณของซิลิกาที่ได้ พบว่าถ้าแกลบที่ได้มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบในปริมาณ 99.69 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก และมีโลหะเจือปน เช่น เหล็กออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ ไททาเนียมไดออกไซด์ แมงกานีสไดออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ โซเดียมออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ และโพแทสเซียมออกไซด์ เป็นต้น และเมื่อนำแกลบมาวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ พบว่าซิลิกาที่ได้มีขนาดพื้นที่ผิวเป็น $480 \text{ m}^2/\text{g}$

Krishnarao และคณะ (2001) ศึกษาภาวะต่างๆ ต่อการก่อตัวของอนุภาคคาร์บอนใน ซิลิกาที่เตรียมได้จากการเผาแกลบ โดยการเผาแกลบและแกลบที่ผ่านการรีฟลักซ์ด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 3.0 และ 5.6 นอร์มอล เป็นเวลา 1 ชม. และเผาที่อุณหภูมิ 400–700 ช. เป็นเวลา 4 ชม. อัตราการเพิ่มอุณหภูมิในระหว่างการเผาแบบช้า (อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นโดยมีอัตราเร็ว 5 ช.ต่อนาที) และแบบเร็วพบว่า ซิลิกาที่เตรียมได้จากการเผาแกลบที่ไม่ผ่านการรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิสูงและใช้อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิในระหว่างการเผาเป็นแบบเร็วมีแนวโน้ม

การก่อกำของคาร์บอนสูงกว่าในซิลิกาที่เตรียมได้จากการเผาเถ้าผ่านการรีฟลักซ์ในการเผาเถ้าผ่านการรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิเดียวกันอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิในระหว่างการเผาไม่มีผลต่อการก่อกำของคาร์บอนในซิลิกาที่เตรียมได้ดังกล่าว และอัตราการเผาไหม้ของคาร์บอนในระหว่างการเผาเถ้าที่อุณหภูมิ 400 ช. มีอัตราสูงกว่าการเผาเถ้าผ่านการรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิเดียวกันเมื่อวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่าผลึกของซิลิกาที่เตรียมได้ทั้งจากการเผาเถ้าและเถ้าผ่านการรีฟลักซ์ด้วยอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิในระหว่างการเผาทั้งแบบช้าและแบบเร็วมีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน และวิเคราะห์ปริมาณโลหะเจือปนพบว่าซิลิกาที่เตรียมได้จากการเผาเถ้าที่ไม่ผ่านการรีฟลักซ์ มีปริมาณของโลหะเจือปนมากกว่าซิลิกาที่เตรียมได้จากการเผาเถ้าผ่านการรีฟลักซ์ โดยโลหะเจือปนที่มีปริมาณมากที่สุดคือ โพแทสเซียม (Potassium, K)

Kalapathy และคณะ (2002) ได้ศึกษาและปรับปรุงวิธีการในการสกัดซิลิกาซีโรเจลจากเถ้าโดยการละลายเถ้าเถ้าที่มีซิลิกาและคาร์บอน เป็นองค์ประกอบอยู่ในปริมาณ 61 และ 36 เปอร์เซ็นต์ ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้น 1 นอร์มอล และปรับค่าความเป็นกรดของสารละลายให้มีค่าเป็น 4.0 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก กรดซิตริก หรือกรดออกซาลิก (Oxalic Acid) ที่ทำให้ตกตะกอนจนตะกอนเกาะตัวกันเป็นซิลิกาซีโรเจล แล้วจึงล้างด้วยน้ำกลั่น จากนั้นอบให้แห้ง วิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่าซิลิกาซีโรเจลที่เตรียมได้จากการตกตะกอนในสารละลายทั้ง 3 ชนิด มีโครงสร้างเป็นซิลิกาแบบอสัณฐาน และวิเคราะห์ปริมาณซิลิกาและโซเดียม ด้วยเทคนิค X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) พบว่าซิลิกาซีโรเจล ที่เตรียมได้จากการตกตะกอนทั้ง 3 ชนิด มีปริมาณซิลิกาเป็นองค์ประกอบอยู่ประมาณ 89-91 เปอร์เซ็นต์ และซิลิกาซีโรเจลที่เตรียมได้จากการตกตะกอนในสารละลายกรดซิตริก และสารละลายกรดออกซาลิกมีโซเดียม (Na) เป็นองค์ประกอบในปริมาณ 0.52 และ 0.22 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งปริมาณของโซเดียมที่พบในการศึกษาด้วยวิธีนี้มีปริมาณน้อยกว่าวิธีการอื่น ๆ

จากวิธีการเตรียมซิลิกาจากเถ้าด้วยวิธีการเตรียมที่กล่าวมาข้างต้นแล้วยังได้นักวิจัยทั้งใน และต่างประเทศนำซิลิกาที่ได้จากเถ้าไปประยุกต์ใช้กับงานด้านต่าง ๆ เพื่อเพิ่มหรือปรับปรุงคุณสมบัติให้กับวัสดุผสมหลากหลายประเภทดังนี้

Della and Hotza (2001) ได้ศึกษาลักษณะเฉพาะของเถ้าเถ้าสำหรับใช้เป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตซิลิเซียสเซรามิก (Siliceous Ceramics) เช่น วัสดุที่ทนต่อความร้อน และทนต่อการกัดกร่อนของสารละลายจากการศึกษาพบว่า องค์ประกอบหลักของเถ้าเถ้าคือ ซิลิกาซึ่งอยู่ในรูปอสัณฐาน และมีสารพอลิซิลิกาเป็นองค์ประกอบอยู่ประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก จากลักษณะดังกล่าวเถ้าเถ้าจึงเหมาะที่จะเป็นวัตถุดิบสำหรับการใช้ผลิตสารเซรามิกได้

บุรฉัตร นัตรวีระ และพิชัย นิमितยงสกุล (2537) ได้ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติกำลังของคอนกรีตผสมซีเมนต์เถ้าเถ้าเมื่อถูกกระทบกับความร้อนทันที หลังจากทำการหล่อคอนกรีตเสร็จแล้ว กำลังอัดคอนกรีตผสมซีเมนต์เถ้าเถ้า และคอนกรีตธรรมดา บ่มในสภาพเดียวกัน นำมาทดสอบ

เมื่ออายุครบ 12 ชม. 3 วัน 10 วัน และ 28 วัน การบ่มคอนกรีตจะบ่มด้วยวิธีบ่มอากาศทั่วไปกับบ่มที่อุณหภูมิ 5 ช. ผลการทดสอบเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดาที่ใช้บ่มอากาศทั่วไป บ่งชี้ว่าอุณหภูมิในการบ่มมีผลกระทบต่อการพัฒนากำลังของคอนกรีตผสมซีเมนต์แก่กลบในช่วงระยะเริ่มต้น การให้คอนกรีตกระทบความร้อนทันทีผลทำให้กำลังเริ่มต้นมีค่าสูงขึ้น แต่ผลต่อกำลังในระยะยาวตรงกันข้าม นอกจากนี้ การบ่มคอนกรีตที่อุณหภูมิต่ำ จะเป็นการหน่วงการพัฒนา กำลังของคอนกรีตผสมซีเมนต์แก่กลบ

บุรฉัตร นัตรวีระ และณรงค์ศักดิ์ มาลากุล (2547) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิในการบ่มที่มีต่อคุณสมบัติเชิงกลของเพสต์ที่ใช้ซีเมนต์ผสมแก่กลบขาวเป็นวัสดุผงที่ได้จากโรงงานเผาอิฐมอญ โดยสมบัติที่ศึกษาได้แก่ ความชื้นเหลวปกติ ระยะเวลาการก่อตัว กำลังรับแรงอัดและแรงดึงแบบผ่าซีก ตัวแปรที่ใช้ คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (ปูนซีเมนต์ หรือปูนซีเมนต์ผสมแก่กลบขาว) เท่ากับ 0.45 และ 0.50 การแทนที่ของแก่กลบขาวในปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักที่ร้อยละ 20 และ 40 และอุณหภูมิของน้ำที่ใช้สำหรับทำการบ่มที่ 25 , 50 และ 75 ช. ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่า กำลังรับแรงอัดและแรงดึงแบบผ่าซีกของเพสต์จากซีเมนต์ผสมแก่กลบขาวขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการแทนที่ของแก่กลบขาว โดยกำลังรับแรงของเพสต์ซึ่งทำการแทนที่แก่กลบขาวในปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าการแทนที่แก่กลบขาวที่ร้อยละ 40 ที่ทุกอายุของการบ่ม และพัฒนากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ในช่วงแรกมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ทำการบ่มเพิ่มขึ้นจาก 25 เป็น 50 และ 75 ช. ตามลำดับ ในขณะที่การบ่มในช่วงหลังกำลังรับแรงอัดของเพสต์บ่มที่ 75 ช. ต่ำกว่ากำลังรับแรงอัดของเพสต์บ่มที่ 25 ช.

สรินทร ลิ้มปนาท (2543) ได้ศึกษากระบวนการเตรียมแผ่นกรองซิลิกาจากซีเมนต์แก่กลบ พบว่า สามารถเตรียมแผ่นกรองซิลิกา ด้วยกระบวนการ Gel Casting จากซิลิกาซึ่งสกัดจากซีเมนต์แก่กลบที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.8 เปอร์เซ็นต์ โดยแผ่นกรองดังกล่าว สามารถกรองยีสต์ซึ่งมีขนาดเฉลี่ยน้อยกว่า 10 ไมครอน ในอัตราเร็วเฉลี่ย 0.3 ml/min ความต้านทานการกรอง $1.32 \times 10^6 \text{ cm}^{-1}$

Prasad และคณะ (2003) ได้ศึกษาพบว่าส่วนผสมของไวท์แวร์ (Whiteware) ซึ่งใช้ซิลิกาจากแก่กลบและซิลิกาแบบฝุ่นละเอียด (Silica Fume) ในปริมาณ 5–15 เปอร์เซ็นต์ มาแทนที่ในควอทซ์ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิการสุกตัว (Vitrification) ลดลงจากอุณหภูมิ 1,250 ช. เป็น 1,200 ช. และพบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณแก่กลบและซิลิกาแบบฝุ่นละเอียด ไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของผลึกมัลไลต์ (Mullite) แต่จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของขนาดผลึกมัลไลต์ และเมื่อผสมแก่กลบ (Rice Husk Ash) และ ซิลิกาแบบฝุ่นละเอียด เป็น 20–25 เปอร์เซ็นต์ สามารถลดจุดสุกตัวได้ถึง 100 ช. แต่การหดตัวหลังการเผาจะเพิ่มขึ้น ซึ่งน่าจะเกิดจากการเกิดเฟสแก้ว (Glassy Phase) มากขึ้นในตัวชิ้นงาน นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณการดูดซึมน้ำต่ำมากและมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น จากการทดลองทั้งหมดพบว่า การเพิ่มแก่กลบ และซิลิกาแบบฝุ่นละเอียด

ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ทำให้คุณสมบัติของเนื้อดินปั้นไวท์แวร์ดีขึ้น ช่วยลดจุดสุกตัวทำให้ประหยัดพลังงานในการเผาผลิตภัณฑ์ไวท์แวร์ได้

จากการศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้องต่างๆ พบว่า สามารถสรุปขั้นตอนต่างๆที่เหมาะสมในการสกัดซิลิกาจากแกลบได้ ซึ่งประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ

1. การเตรียมแกลบก่อนเผาโดยการรฟลักซ์แกลบด้วยสารละลายชนิดต่างๆ เช่น กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟูริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น ซึ่งกรดไฮโดรคลอริก มีความสามารถในการชะโลหะเจือปนออกมาได้มากกว่าสารละลายชนิดอื่น และ
2. การเตรียมซิลิกาบริสุทธิ์ทำโดยนำแกลบไปเผาที่อุณหภูมิตั้งแต่ 500–800 ช. เป็นเวลา 1–6 ชม. จะได้แกลบซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐานและซิลิกาที่ได้จะมีความบริสุทธิ์สูงอยู่ระหว่าง 95–99 เปอร์เซ็นต์

จากวิธีการเตรียมซิลิกาจากแกลบข้าวที่ได้กล่าวมาข้างต้นสามารถเปรียบเทียบข้อแตกต่างจากทั้งสองวิธีเป็นดังนี้

1. การเตรียมซิลิกาจากแกลบข้าวโดยการรฟลักซ์นั้นสามารถที่จะชะล้างโลหะที่เจือปนมากับแกลบข้าวได้ดี และทำให้ได้ซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์ค่อนข้างสูง แต่การเตรียมด้วยวิธีนี้ค่อนข้างจะยุ่งยาก เนื่องจากจะต้องมีการเตรียมสารละลายให้ถูกต้อง และต้องมีความเข้าใจกับสารละลายแต่ละชนิดก่อนที่จะนำไปใช้งาน
2. การเตรียมซิลิกาจากแกลบข้าวด้วยวิธีการเผาโดยไม่ต้องใช้สารละลายนั้น เป็นวิธีที่ค่อนข้างง่าย เนื่องจากสามารถนำแกลบข้าวมาผ่านการล้างน้ำ จากนั้นก็นำแกลบข้าวไปอบให้แห้งแล้วนำไปเผาได้เลย แต่การเตรียมด้วยวิธีนี้ จะทำให้ได้ซิลิกาที่มีโลหะเจือปนค่อนข้างมากกว่าวิธีที่เตรียมโดยการรฟลักซ์แกลบข้าวด้วยสารละลายทั้งชนิดที่เป็นกรดและเบส

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัยและผลการทดลองในตอนที่ 1

การดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ตอนหลัก ๆ ดังนี้ ตอนที่ 1 การศึกษาการเตรียมถั่วเหลือง และการศึกษาลักษณะเฉพาะของถั่วเหลืองที่จะนำไปใช้ในเคลือบเทียบกับถั่วเหลืองจากโรงงานเผอิฐ และควอทซ์ ตอนที่ 2 เป็นการนำถั่วเหลืองที่เตรียมขึ้นเอง ถั่วเหลืองที่ได้จากโรงงานเผอิฐ และควอทซ์ไปใช้ในเคลือบสูตรมาตรฐานและศึกษาลักษณะเฉพาะของเคลือบที่ได้ และในตอนที่ 3 เป็นการศึกษาการนำถั่วเหลืองและควอทซ์ไปใช้ในเคลือบสูตรอื่น ๆ

เพื่อให้การทดลองครั้งนี้บรรลุวัตถุประสงค์ตามจุดมุ่งหมาย ผู้วิจัยได้กำหนดรายละเอียดสำหรับการทดลองในตอนที่ 1 ดังนี้

3.1 การทดลอง

การเตรียมขี้ลอกจากถั่วเหลือง และการศึกษาลักษณะเฉพาะของถั่วเหลืองและถั่วเหลือง

3.1.1 การทดลองนี้ใช้ถั่วเหลืองจากโรงสีข้าว อ.แม่จัน จ.เชียงราย ในการเลือกตัวอย่างถั่วเหลืองสำหรับการทดลองนี้ ผู้วิจัยไม่ได้เจาะจงถึงชนิดของพันธุ์ข้าวที่นำมาทดลองในครั้งนี้เนื่องจากโรงสีข้าวไม่ได้สีข้าวแยกชนิดของพันธุ์ข้าว จึงทำให้ผู้วิจัยได้ตัวอย่างของถั่วเหลืองเป็นชนิดผสมของถั่วเหลืองหลายชนิด

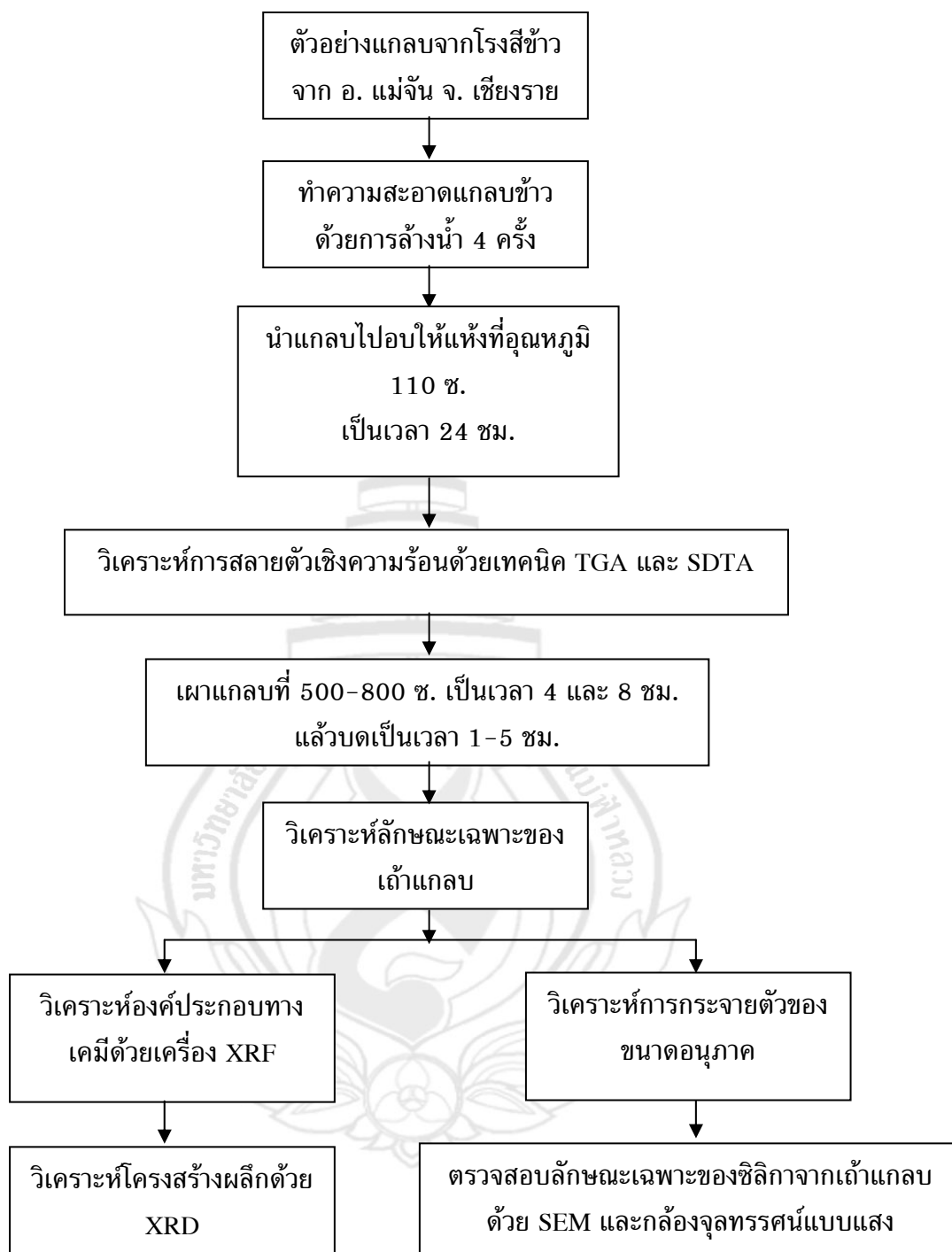
3.1.2 นำตัวอย่างของถั่วเหลืองที่ได้มาทำความสะอาดโดยการนำไปล้างด้วยน้ำสะอาดในถังพลาสติกขนาด 10 ลิตร ทั้งหมด 4 ครั้ง แล้วตักออกไว้บนภาชนะที่เป็นภาชนะสำหรับรองเพื่อรอให้น้ำหยดออก จากนั้นนำถั่วเหลืองที่ผ่านการล้างไปอบที่อุณหภูมิ 110 ช. เป็นเวลา 24 ชม. และศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานวิทยาของถั่วเหลืองและถั่วเหลืองด้วยกล้องอิมมูโนฟลูออเรสเซนซ์ส่องกราด

3.1.3 เมื่ออบถั่วเหลืองแห้งสนิทแล้วแบ่งออกมา 100 กรัม เพื่อนำไปบดแห้งด้วยหม้อบดเล็ก (Pot-mill) ขนาด 500 กรัม ใช้เวลาในการบด 3 ชม. จากนั้นคัดเอาเฉพาะผงของถั่วเหลืองที่ได้จากการบดไปวิเคราะห์การสลายตัวเชิงความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA) และ Simultaneous Differential Thermal Analysis (SDTA) ของบริษัท Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA 851^o โดยให้ความร้อนจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 1,000 ช. ด้วยอัตราการความร้อน 20 ช.ต่อนาที ในอากาศสังเคราะห์ (Synthetic Air)

3.1.4 แบ่งแกลบข้าวออกเป็นส่วนๆ ละ 300 กรัม ใส่ในภาชนะที่ทำจากเซรามิกที่เป็นขาม ขนาดกว้าง 35 เซนติเมตร ลึก 10 เซนติเมตร แล้วนำไปเผาในเตาเผาเซรามิกแบบไฟเบอร์ชนิดใช้แก๊สเป็นเชื้อเพลิง เผาที่อุณหภูมิ 500-800 ช. โดยยีนไฟ (Soaking) ที่อุณหภูมิสูงสุดของการเผาแต่ละครั้ง เป็นเวลา 4 และ 8 ชม. จากนั้นเมื่อเผาเสร็จแล้วปล่อยให้เตาเผาเย็นลงนำแกลบที่ได้จากการเผาไปชั่งน้ำหนัก เพื่อหาปริมาณของแกลบที่เหลืออยู่ด้วยเครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Mettler telodo รุ่น PB3002-S

3.1.5 นำแกลบที่ได้หลังการเผาที่อุณหภูมิตั้งแต่ 500-800 ช. เป็นเวลา 4 และ 8 ชม. บดแห้งในหม้อบดขนาด 500 กรัม เป็นเวลา 1-5 ชม.

3.1.6 หลังจากนั้นนำแกลบที่ได้จากการเผาไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence (XRF : Horiba รุ่น Mesa-500w) วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction : Bruker รุ่น D8 Advance) และวิเคราะห์หาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแกลบด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Partisizer: Malvern รุ่น Mastersizer 2000+Hydro 2000 MU) ร่วมกับการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด Scanning Electron Microscopy, SEM : LEO รุ่น 1460 และกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Olympus รุ่น Stemi 2000-C) การทดลองตอนที่ 1 ได้แสดงเป็นขั้นตอนการทดลองไว้ในแผนภาพที่ 3.1

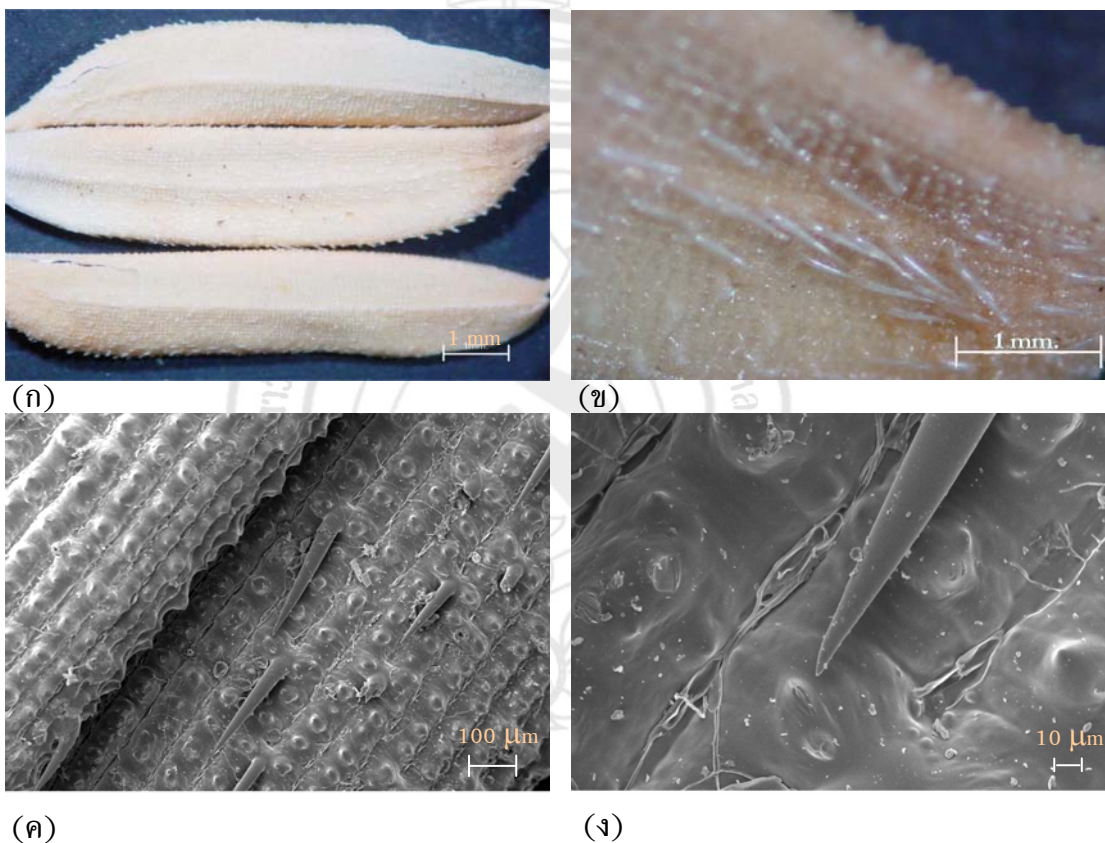


ภาพที่ 3.1 ลำดับขั้นตอนของการทดลองในตอนต้นที่ 1

3.2 ผลการทดลอง

3.2.1 ลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวของแกลบและเถ้าแกลบ วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

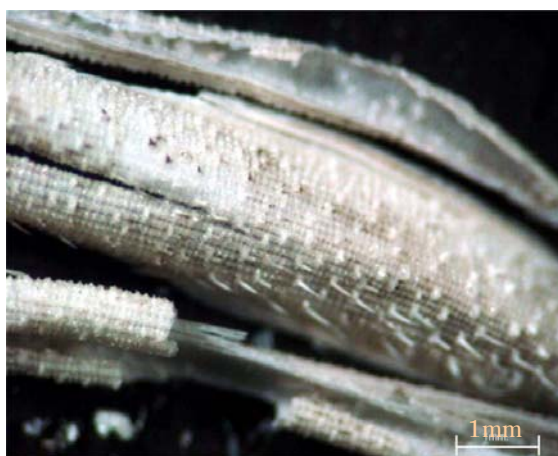
ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวของแกลบและเถ้าแกลบพบว่า ลักษณะของแกลบและเถ้าแกลบมีลักษณะเป็นร่องมีปุ่ม และมีเส้นใยคล้ายขนยื่นออกมาจากบริเวณผิวชั้นนอก (Outer Epidermis) โดยบริเวณพื้นผิวที่เป็นปุ่มดังกล่าว เป็นบริเวณที่พบองค์ประกอบของซิลิกาในปริมาณมาก และซิลิกาบางส่วนพบอยู่ในบริเวณพื้นผิวชั้นใน (Inner Epidermis) ของแกลบและเถ้าแกลบ (Krishnarao และคณะ, 2001) ซึ่งแสดงภาพลักษณะสัณฐานวิทยาของแกลบและเถ้าแกลบไว้ดังภาพที่ 3.2 ถึง ภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.2 ลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวของแกลบ

(ก) และ (ข) ภาพถ่ายลักษณะของเม็ดข้าวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง กำลังขยาย 10 เท่า และ 50 เท่า

(ค) และ (ง) ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของเม็ดข้าวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด กำลังขยาย 100 เท่า และ 500 เท่า



(ก) 500 ช.



(ข) 600 ช.



(ค) 700 ช.



(ง) 800 ช.

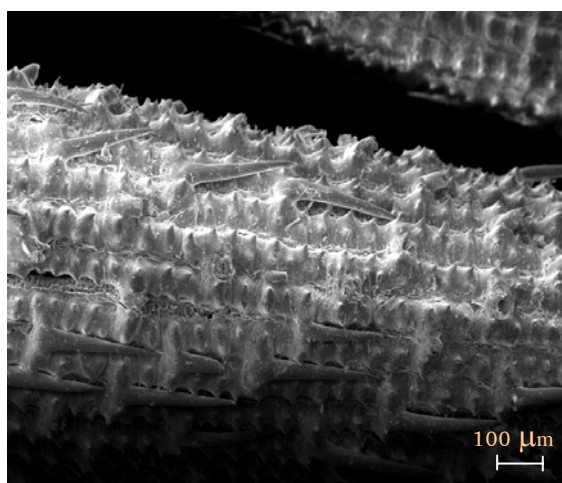
ภาพที่ 3.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวของเถ้าเคลือบด้วยกล่องจุลทรรศน์แบบแสง

(ก) ภาพถ่ายลักษณะเถ้าเคลือบเผาที่ 500 ช. กำลังขยาย 32 เท่า

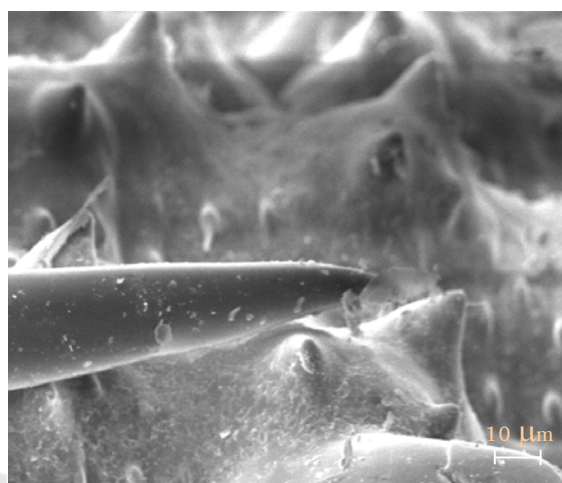
(ข) ภาพถ่ายลักษณะเถ้าเคลือบเผาที่ 600 ช. กำลังขยาย 32 เท่า

(ค) ภาพถ่ายลักษณะเถ้าเคลือบเผาที่ 700 ช. กำลังขยาย 32 เท่า

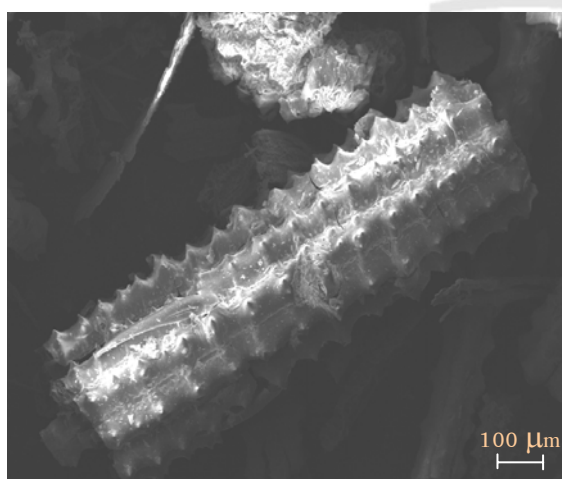
(ง) ภาพถ่ายลักษณะเถ้าเคลือบเผาที่ 800 ช. กำลังขยาย 32 เท่า



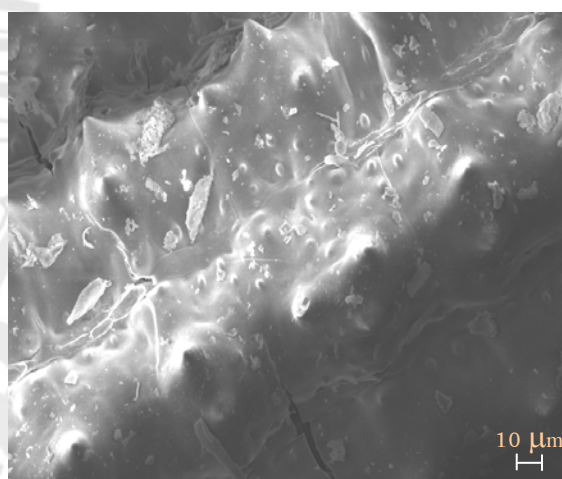
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 3.4 ลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวของเถาวัลย์กล้วยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

(ก) ภาพถ่ายพื้นผิวของเถาวัลย์กล้วย กำลังขยาย 100 เท่า

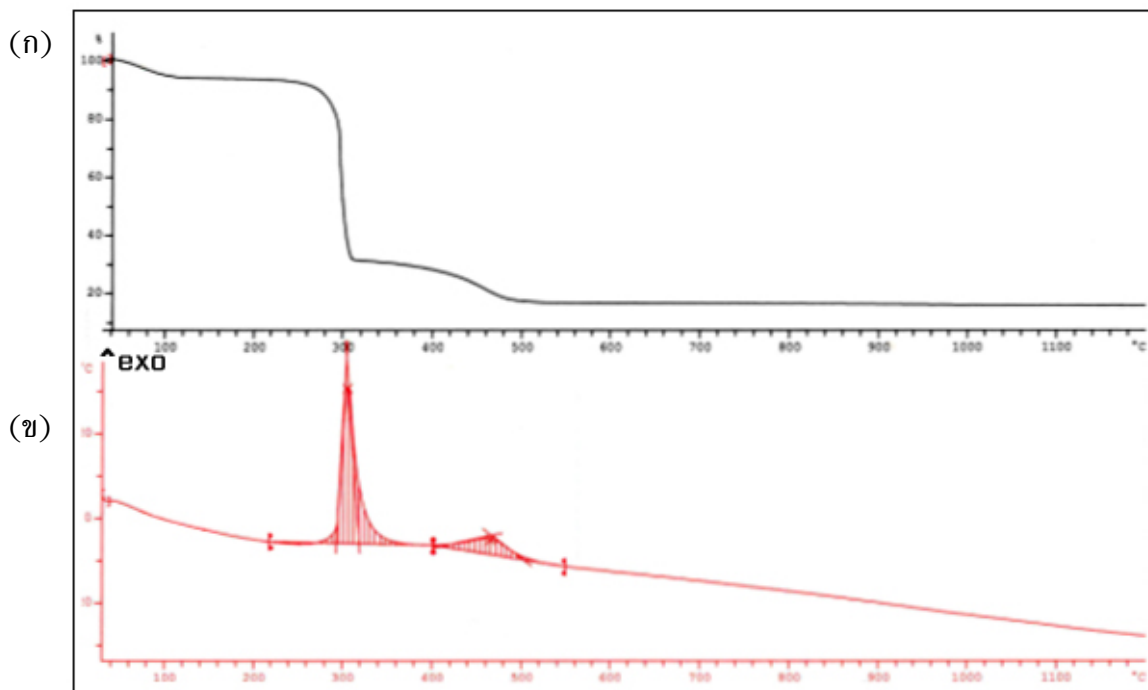
(ข) ภาพถ่ายพื้นผิวของเถาวัลย์กล้วย กำลังขยาย 1,000 เท่า

(ค) ภาพถ่ายพื้นผิวของเถาวัลย์กล้วย กำลังขยาย 100 เท่า

(ง) ภาพถ่ายพื้นผิวของเถาวัลย์กล้วยที่เป็นปุ่ม คือ ลักษณะการเรียงตัวของเม็ดซิลิกา กำลังขยาย 500 เท่า

3.2.2 ผลการวิเคราะห์ทางความร้อนของแกลบ

ผลจากการเผาแกลบโดยวิธี Thermogravimetric Analysis (TGA) ในช่วงอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 1,000 ช. โดยให้อัตราการเผาเป็น 20 ช.ต่อนาที ในอากาศสังเคราะห์ (Synthetic Air) ซึ่งผลการเผาแสดงในภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของแกลบ เมื่อวิเคราะห์ด้วย Thermogravimetric Analysis (TGA)

จากภาพที่ 3.5 (ก) และ (ข) แสดงถึงมวลของแกลบที่เกิดการสูญเสียที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่า แกลบมีช่วงของการเปลี่ยนแปลงอยู่ 2 ระยะ คือ ช่วงแรกที่อุณหภูมิที่ไม่เกิน 150 ช. เป็นการสูญเสียมวลเล็กน้อยเนื่องมาจากความชื้นที่ระเหยไป และในช่วงที่สอง เริ่มตั้งแต่อุณหภูมิประมาณ 250-500 ช. จะเกิดการสูญเสียของมวลอย่างมากอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งน่าจะเกิดจากการสลายตัวของสารอินทรีย์ในแกลบ จากการรายงานของ (H.-S. Kim และคณะ, 2004) พบว่า สารอินทรีย์ที่เป็นส่วนประกอบสำคัญของแกลบได้แก่ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) ซึ่งสารอินทรีย์เหล่านี้จะเกิดการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 150-500 ช. ยกตัวอย่างเช่น เฮมิเซลลูโลส จะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 150-350 ช. ในขณะที่เซลลูโลสจะอยู่ที่ 275-350 ช. และลิกนินจะอยู่ที่ 250-500 ช. จากการทดลองนี้ ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงขณะที่เผาแกลบ ซึ่งการเผาแกลบที่อุณหภูมิที่ 500 ช. ก็น่าจะสูงพอที่จะทำให้การเผาไหม้ของแกลบสมบูรณ์ แต่ต้องใช้ระยะเวลาในการเผานานกว่าการเผาที่

อุณหภูมิสูงผลที่ได้จากการทดลองนี้ พบว่าหลังการเผาไหม้ของแกลบประมาณ 83 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักที่หายไปใกล้เคียงกับการเผาแกลบในเตาแก๊สการทดลองเผาแกลบด้วยเตาแก๊สแสดงผลไว้ในตารางที่ 3.1

3.2.3 ผลจากการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเผาแกลบที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ

ผลการนำแกลบไปเผาที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ กัน เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมแกลบเพื่อนำไปใช้ในเคลือบพบว่าได้ผลดังนี้

1. อุณหภูมิ 500 ซ. 4 ซม.

ผลหลังการเผาแกลบพบว่า ซี้แกลบยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ จะสังเกตเห็นแกลบบางส่วนยังเป็นสีดำ เนื่องจากความร้อนและอากาศที่เป็นตัวช่วยให้การเผาไหม้เข้าไปไม่ถึงชั้นในของแกลบที่ใส่ไว้ในภาชนะ แต่บางส่วนของแกลบที่อยู่ด้านบนมีการเผาไหม้จนสังเกตเห็นแกลบที่อยู่ด้านบนเป็นสีขาว และเมื่อนำมาบดให้เป็นผงปรากฏว่าสามารถบดเป็นผงได้ง่ายและมีสีดำเนื่องจากคาร์บอนที่อยู่ตามแกลบที่เผาไหม้ยังไม่หมด

2. อุณหภูมิ 500 ซ. 8 ซม.

เมื่อเพิ่มเวลาในการเผาให้นานขึ้นจากการเผาพบว่า แกลบเริ่มมีการเผาไหม้เกือบหมดแต่ก็มีอยู่บางส่วนที่ยังเผาไหม้ยังไม่หมดสีของแกลบจะมีสีเทาปนขาวบ้างเมื่อนำมาบดก็จะเห็นว่ามียูดสีดำปน

3. อุณหภูมิ 600 ซ. 4 ซม.

ลักษณะของแกลบนั้นมีสีขาวปนดำอยู่บ้างเมื่อนำมาบดให้เป็นผง สีของแกลบจะมีสีเทาปนขาว

4. อุณหภูมิ 600 ซ. 8 ซม.

แกลบบางส่วนยังเผาไหม้ไม่หมดโดยเฉพาะตรงกลางของภาชนะที่ใส่แกลบเอาไว้แต่โดยภาพรวมแล้วสีของแกลบมีสีเทาอมชมพูและมียูดดำปนบ้าง

5. อุณหภูมิ 700 ซ. 4 ซม.

การเผาไหม้เกือบสมบูรณ์แกลบมีสีขาวปนเทาเหลืองเมื่อนำมาบดเป็นผง สีของผงแกลบมีสีขาวปนเทาเล็กน้อย

6. อุณหภูมิ 700 ซ. 8 ซม.

สีของแกลบมีสีขาวขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาการเผาให้นานขึ้นเนื่องจากอากาศและความร้อนสามารถเข้าไปทั่วถึงแกลบที่อยู่บริเวณตรงกลางของภาชนะ

7. อุณหภูมิ 800 ซ. 4 ซม.

สีของแกลบขาวขึ้นแสดงว่าการเผาไหม้นั้นค่อนข้างสมบูรณ์

8. อุณหภูมิ 800 ซ. 8 ซม.

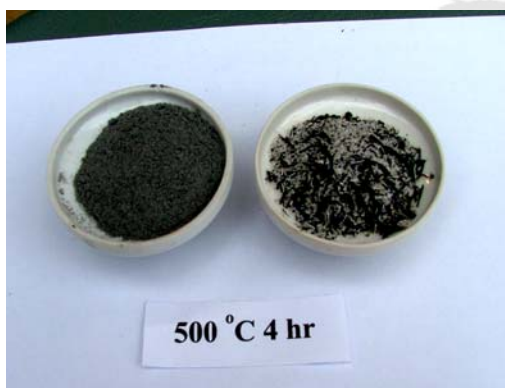
การเผาไหม้ที่นานขึ้นมีผลทำให้แกลบมีสีออกขาวอมชมพูสังเกตได้จากการเผาที่ผ่านมาพบว่าที่ 800 ซ. 8 ซม. สีของแกลบมีสีขาวอมชมพู

ซึ่งผลของอุณหภูมิและเวลาในการเผาเคลือบต่อลักษณะของเก้าอี้ที่ได้แสดงอยู่ในรูป 3.6 (ก)-(ง) จากข้อสังเกตเมื่อทำการเผาเคลือบที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ก็พบว่าในขณะที่เผาเคลือบเพื่อเตรียมซิลิกาจากเกลบนั้น ภาชนะที่ใช้สำหรับใส่เกลือบเพื่อเผานั้นถ้าหากเป็นภาชนะเซรามิกที่ปากกว้าง 35 เซนติเมตร และก้นภาชนะลึก 10 เซนติเมตร เถ้าเคลือบหลังการนั้นมีสีขาวแสดงว่าการเผาไหม้นั้นค่อนข้างสมบูรณ์ เพราะเมื่อเวลาที่เผาออกซิเจนสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาในขณะที่เผาได้ดี ซึ่งก่อนที่ผู้วิจัยได้ทำการทดลองจริงนั้น ได้ใช้ภาชนะที่ทำจากเซรามิกที่มีลักษณะปากภาชนะขนาด 20 เซนติเมตร และก้นลึก 17 เซนติเมตร จึงทำให้เมื่อเวลาที่เผาเกลบนั้นออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ไม่ทั่วถึงเกลือบที่อยู่ด้านล่างของภาชนะทำให้เมื่อเผาเกลือบออกมาได้เก้าเคลือบที่มีการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ โดยได้สังเกตจากการที่เก้าเคลือบมีสีดำของคาร์บอนปะปนดำ ทั้งนี้ปัจจัยที่เป็นสิ่งสำคัญอีกสองประการคือ อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผาถ้าเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 500 ช. จะทำให้การเผาไหม้ของเกลือบยังไม่สมบูรณ์นักและมีปริมาณคาร์บอนเหลือเป็นจำนวนมาก สำหรับเก้าเคลือบที่มีสีขาวเกิดจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของเกลือบ

ภาพที่ 3.6 เป็นภาพแสดงลักษณะของเกลือบและเก้าเคลือบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิตั้งแต่ 500-800 ช. เป็นเวลา 4 และ 8 ชม. ผลของอุณหภูมิและเวลาในการเผาเคลือบต่อน้ำหนักของเก้าเคลือบที่เปลี่ยนไปได้แสดงในตารางที่ 3.1 และเพื่อให้เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงชัดเจนขึ้นความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของเก้าเคลือบและสภาวะที่ใช้ในการเผาเคลือบได้แสดงในรูปของกราฟในภาพที่ 3.7



(ก) แกลบข้าว



(ข) แถ้แกลบเผา 500 ซ. 4 ชม.



(ค) แถ้แกลบเผา 500 ซ. 8 ชม.



(ง) แถ้แกลบเผา 600 ซ. 4 ชม.



(จ) แถ้แกลบเผา 600 ซ. 8 ชม.

ภาพที่ 3.6 ลักษณะทางกายภาพของแกลบก่อนเผาและแถ้แกลบหลังเผาที่อุณหภูมิ 500–800 ซ. เป็นเวลา 4 และ 8 ชม.



(จ) แก้วเคลือบเผา 700 ช. 4 ชม.



(ข) แก้วเคลือบเผา 700 ช. 8 ชม.



(ค) แก้วเคลือบเผา 800 ช. 4 ชม.

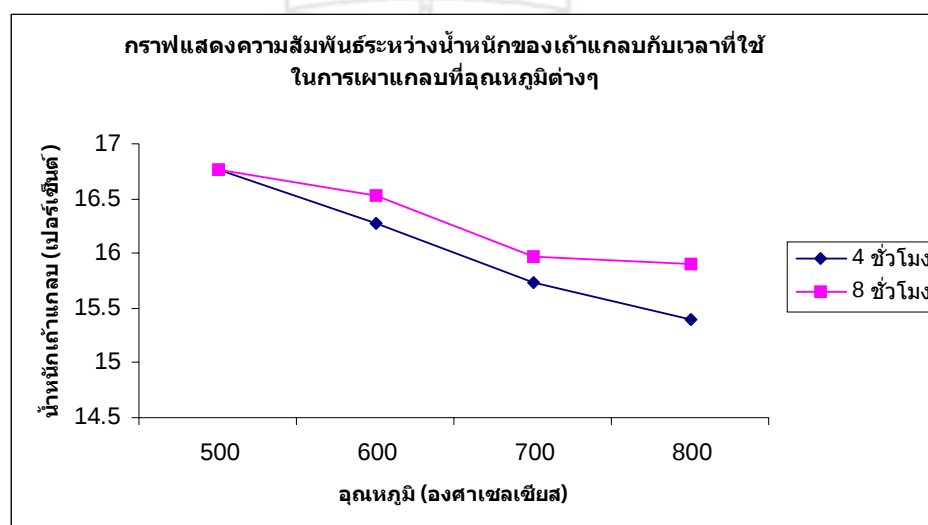


(ง) แก้วเคลือบเผา 800 ช. 8 ชม.

ภาพที่ 3.6 (ต่อ) ลักษณะทางกายภาพของเคลือบก่อนเผาและแก้วเคลือบหลังเผาที่อุณหภูมิ 500–800 ช. เป็นเวลา 4 และ 8 ชม.

ตารางที่ 3.1 น้ำหนักของแกลบก่อนเผาและเถ้าแกลบหลังเผาที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ

อุณหภูมิ (ซ.)	ระยะเวลา ในการเผา (ชม.)	น้ำหนักแกลบ ก่อนเผา (กรัม)	น้ำหนักเถ้าแกลบ (กรัม/เปอร์เซ็นต์)	น้ำหนักสูญหายหลังเผา (กรัม/เปอร์เซ็นต์)
500	4	300	50.30 g หรือ 16.76 %	249.70 g หรือ 83.24 %
	8	300	50.28 g หรือ 16.76 %	249.72 g หรือ 83.20 %
600	4	300	48.82 g หรือ 16.27 %	251.18 g หรือ 83.73 %
	8	300	49.81 g หรือ 16.53 %	250.19 g หรือ 83.47 %
700	4	300	47.22 g หรือ 15.74 %	252.78 g หรือ 84.26 %
	8	300	47.91 g หรือ 15.97 %	252.09 g หรือ 84.03 %
800	4	300	46.20 g หรือ 15.40 %	253.80 g หรือ 84.60 %
	8	300	47.75 g หรือ 15.91 %	252.25 g หรือ 84.09 %



ภาพที่ 3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของเถ้าแกลบกับเวลาที่ใช้ในการเผาแกลบที่อุณหภูมิ 500 ถึง 800 ซ. เป็นเวลา 4 และ 8 ชม.

จากภาพที่ 3.7 ผลจากการศึกษาน้ำหนักของเถ้าแกลบ เมื่อเผาแกลบที่อุณหภูมิตั้งแต่ 500–800 ซ. เป็นเวลา 4 และ 8 ชม. พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และระยะเวลาในการเผานานขึ้นน้ำหนักของเถ้าแกลบจะลดลงและเริ่มคงที่ในอุณหภูมิการเผาสูงกว่า 700 ซ. เป็นเวลา 8 ชม. สภาวะการเผาแกลบที่ทำให้น้ำหนักเถ้าแกลบคงที่เป็นสภาวะของการเผาไหม้ที่สมบูรณ์หรือเกือบสมบูรณ์ระหว่างคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบในแกลบกับออกซิเจนในบรรยากาศเป็นผล

ให้มีคาร์บอนตกค้างในถ้ำกลบในปริมาณที่ต่ำหรือไม่มีคาร์บอนตกค้างอยู่เลย ซึ่งจากผลงานวิจัยของ Bartha และ Huppertz (1974) รายงานว่า สารอินทรีย์ต่างๆ ได้ถูกกำจัดออกไปหมดคงเหลือเฉพาะสารอินทรีย์ที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักในถ้ำกลบ และนอกเหนือจากนั้นก็จะมีพวกโลหะเจือปนอื่นๆ เป็นองค์ประกอบในปริมาณเล็กน้อย เช่น อะลูมินา แคลเซียม เหล็ก แมกนีเซียม และโพแทสเซียม

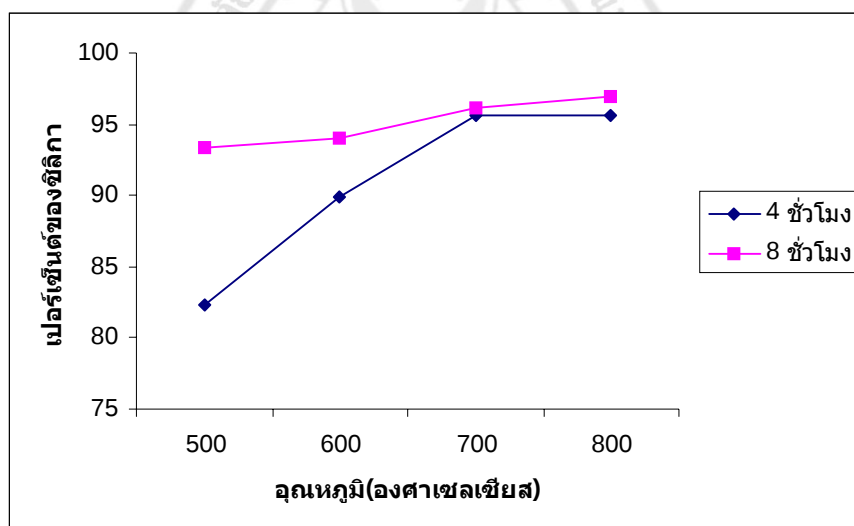
3.2.4 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำกลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

ผลจากการเผาถ้ำกลบที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ เมื่อได้ถ้ำกลบเรียบร้อยแล้ว นำถ้ำกลบไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ จากนั้นนำถ้ำกลบที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 500–800 ช. เป็นเวลา 4 และ 8 ชม. ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางความร้อน Thermogravimetric Analysis (TGA) ตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 1,000 ช. โดยให้อัตราการเผาเป็น 20 ช.ต่อนาที ในอากาศสังเคราะห์ (Synthetic Air) เพื่อหาปริมาณน้ำหนักที่สูญหายของถ้ำกลบหลังการเผาที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ทั้งนี้เนื่องจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำกลบในครั้งแรกด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ ไม่สามารถบอกปริมาณของสารอินทรีย์ที่สูญหายหลังการเผาได้ ซึ่งผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำกลบที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบเผาที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

อุณหภูมิ (ซ.)	เวลา (ชม.)	ผลวิเคราะห์ทางเคมีของเถ้าแกลบที่เผาอุณหภูมิและเวลาต่างๆ (ร้อยละ)							
		SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	MnO	SO ₃	LOI.	Total
500	4	82.38	0.05	0.39	0.80	0.13	0.29	15.97	100.00
	8	93.37	0.07	0.36	1.88	0.14	0.35	3.85	100.00
600	4	89.85	0.07	0.34	1.94	0.15	0.26	7.41	100.00
	8	94.02	0.14	0.39	2.04	0.17	0.34	2.91	100.00
700	4	95.59	0.25	0.94	1.53	0.19	0.51	0.99	100.00
	8	96.10	0.19	0.84	1.41	0.19	0.29	0.99	100.00
800	4	95.64	1.57	0.48	0.81	0.27	0.25	0.99	100.00
	8	97.00	0.08	0.52	0.97	0.15	0.29	0.99	100.00

จากตารางที่ 3.2 ผลของการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบสามารถนำมาเขียนกราฟซึ่งแสดงไว้ดังภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผาแกลบที่มีต่อเปอร์เซ็นต์ของซิลิกาในเถ้าแกลบ

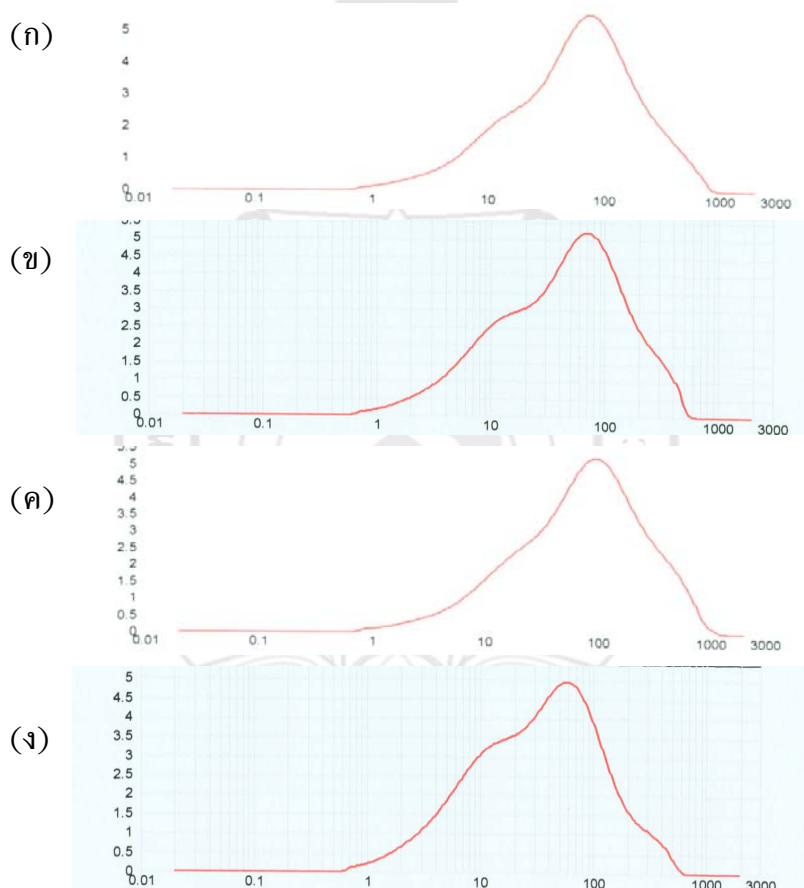
จากภาพที่ 3.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผาเคลบนั้นพบว่า ถ้าเคลบที่ได้จากการเผาเคลบแล้วที่อุณหภูมิ 500 ช. เป็นเวลา 4 ชม. จะพบซิลิกาประมาณ 82 เปอร์เซ็นต์ เมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มสูงขึ้นปริมาณของซิลิกาจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยเคลบที่เผาอุณหภูมิ 800 ช. 8 ชม. จะมีปริมาณซิลิกามากที่สุดถึงประมาณ 97 เปอร์เซ็นต์

จากผลของการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มเวลาในการเผาเคลบจาก 4 ชม. เป็น 8 ชม. ระยะเวลาในการเผานานขึ้นจะพบปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้นโดยที่อุณหภูมิการเผาที่ 500 ช. เป็นเวลา 4 ชม. เมื่อเปรียบเทียบกับการเผาเคลบที่อุณหภูมิ 800 ช. ที่เผาเป็นเวลา 4 ชม. พบว่ามีซิลิกาเพิ่มขึ้นประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนที่อุณหภูมิในการเผาเคลบที่ 500-800 ช. 8 ชม. พบว่ามีซิลิกาเพิ่มขึ้นโดยประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



3.2.5 ผลการศึกษาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบและควอทซ์

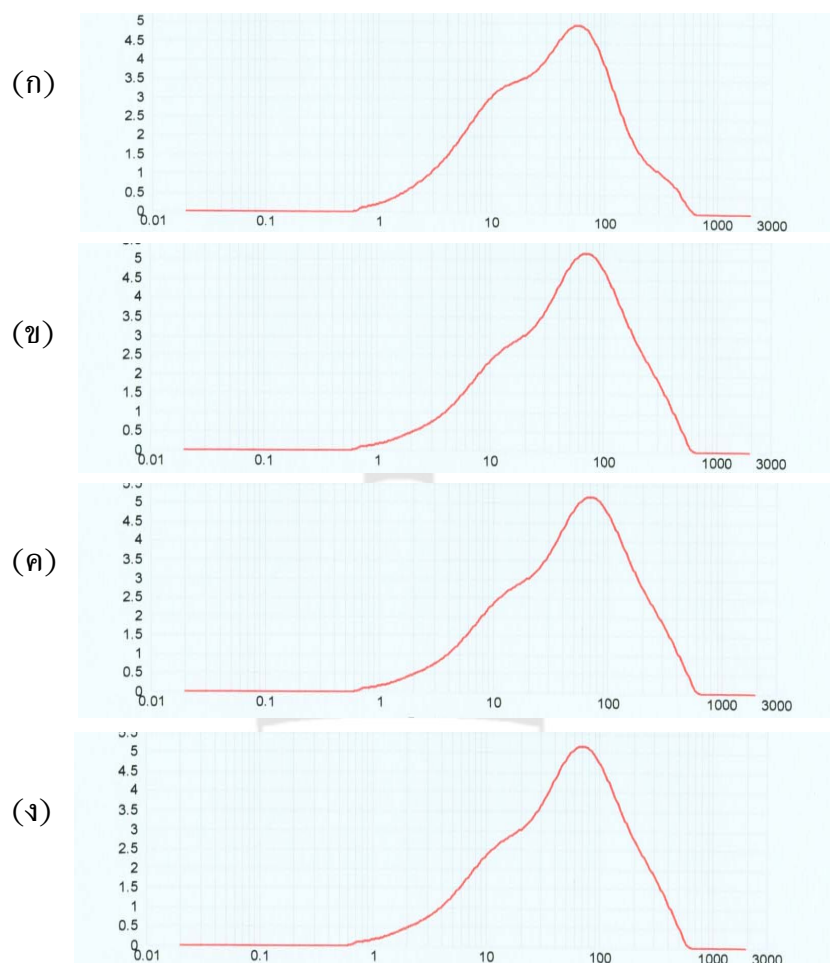
จากภาพที่ 3.9 และ 3.10 เป็นการแสดงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเฉลี่ย ($D_{[4,3]}$ หรือขนาดอนุภาคเฉลี่ยเทียบจากปริมาตร) ของเถ้าแกลบเผาที่อุณหภูมิ 500–800 ช. เป็นเวลา 4 และ 8 ชม. พบว่าเถ้าแกลบที่เผาที่อุณหภูมิ 500 ช. มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยค่อนข้างใหญ่ มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคตั้งแต่ 0.8–900 ไมโครเมตรทั้งนี้เพราะว่าการเผาไหม้ของแกลบยังไม่สมบูรณ์สังเกตได้จากเถ้าแกลบยังมีสีดำอยู่และลักษณะของเถ้าแกลบยังเป็นเม็ดของแกลบจึงทำให้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยค่อนข้างใหญ่ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาขึ้นพบว่าขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยจะเล็กลงและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคยังใกล้เคียงกัน ซึ่งผลของการกระจายตัวของขนาดอนุภาคได้แสดงไว้ดังภาพที่ 3.9 และ 3.10



ภาพที่ 3.9 การกระจายตัวขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบที่ยังไม่บดเผา ที่อุณหภูมิ 500–800 ช. เป็นเวลา 4 ชม.

(ก) 500 ช. (ข) 600 ช.

(ค) 700 ช. (ง) 800 ช.



ภาพที่ 3.10 การกระจายตัวขนาดอนุภาคของเถ้ากลบที่ยังไม่บดเผา
ที่อุณหภูมิ 500-800 ซ. เป็นเวลา 8 ชม.

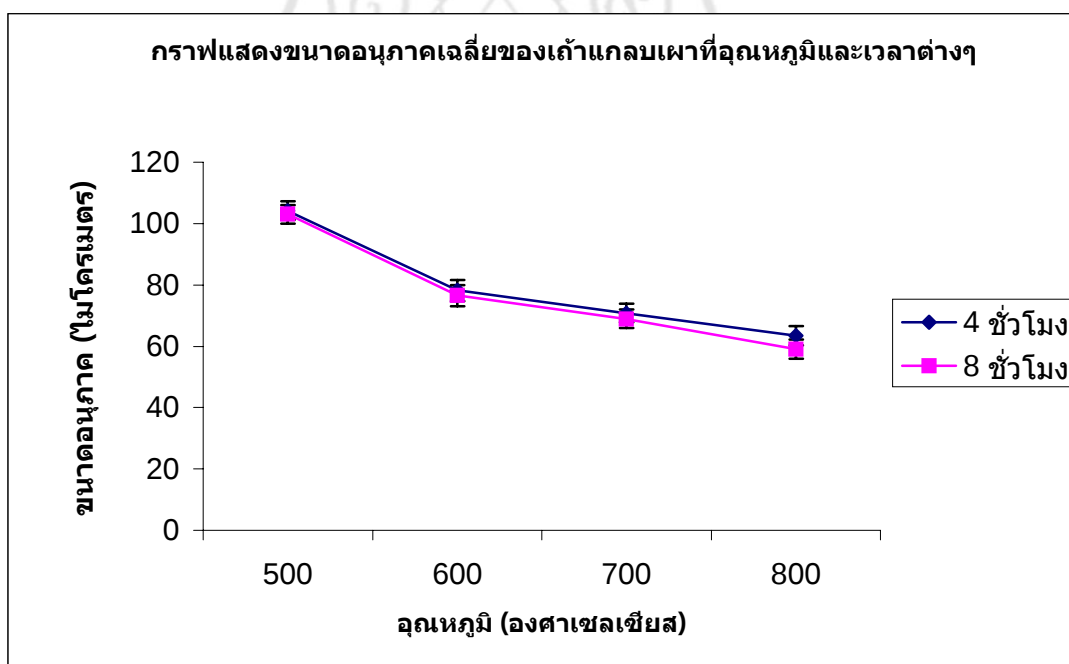
(ก) 500 ซ. (ข) 600 ซ.

(ค) 700 ซ. (ง) 800 ซ.

จากผลการทดลองในภาพที่ 3.9 และ 3.10 สามารถนำมาหาค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคมาแสดงในตารางที่ 3.3 ดังนี้

ตารางที่ 3.3 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถ้ากลบที่ยังไม่บด

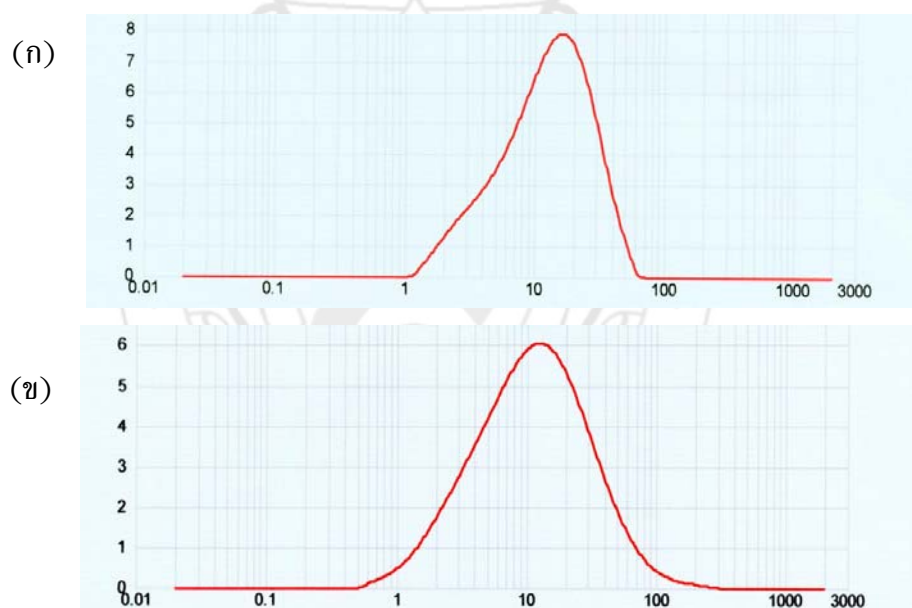
อุณหภูมิ (ซ.)	D [4,3] ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถ้ากลบที่ยังไม่บด (ไมโครเมตร)	
	เผาที่ 4 ชม.	เผาที่ 8 ชม.
500	104.20 $\pm$ 0.30	103.0 $\pm$ 0.29
600	78.20 $\pm$ 0.32	76.50 $\pm$ 0.30
700	70.80 $\pm$ 0.30	68.96 $\pm$ 0.28
800	63.45 $\pm$ 0.29	59.0 $\pm$ 0.27



ภาพที่ 3.11 กราฟแสดงขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถ้ากลบที่ยังไม่บดผ่านการเผาเถ้ากลบที่อุณหภูมิ 500–800 ซ. เป็นเวลา 4 และ 8 ชม.

จากภาพที่ 3.11 เป็นกราฟแสดงขนาดอนุภาคเฉลี่ยของถั่วแกลบซึ่งแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาถั่วกลบนั้นมีผลต่อขนาดอนุภาค โดยที่อุณหภูมิที่ 500 และ 600 ช. พบว่าขนาดอนุภาคของถั่วแกลบยังมีขนาดค่อนข้างใหญ่ มีการกระจายตัวตั้งแต่ 0.5–600 ไมโครเมตร และเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการเผาเพิ่มขึ้นพบว่า ที่อุณหภูมิ 700 และ 800 ช. ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของถั่วแกลบเริ่มมีขนาดอนุภาคลดลง ทั้งนี้เป็นเพราะว่าสภาวะการเผาไหม้ค่อนข้างสมบูรณ์โดยที่ถั่วที่ได้นั้นมีลักษณะเป็นผงที่ค่อนข้างละเอียดมีสีค่อนข้างขาว

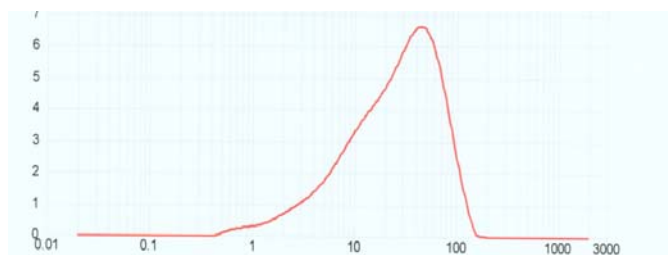
หลังจากนั้นผู้วิจัยได้ทำการศึกษาขนาดอนุภาคของถั่วแกลบต่อ โดยการนำถั่วแกลบที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 500–800 ช. เป็นเวลา 4 และ 8 ชม. ไปบดต่อด้วยหม้อบดขนาดเล็ก (Pot Mill) ขนาด 500 กรัม เป็นเวลา 1–5 ชม. แล้วนำไปวิเคราะห์เพื่อหาขนาดอนุภาคด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค เพื่อเปรียบเทียบกับขนาดอนุภาคเฉลี่ยของควอทซ์ และถั่วแกลบที่ได้จากโรงเผาอิฐ ซึ่งไม่สามารถระบุเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาได้ โดยได้แสดงขนาดอนุภาคเฉลี่ยของถั่วแกลบที่ผ่านการบดเป็นเวลา 1–5 ชม. (ภาพที่ 3.13–3.20) และแสดงขนาดอนุภาคเฉลี่ยของควอทซ์ และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของถั่วแกลบจากโรงเผาอิฐไว้ตามภาพที่ 3.12



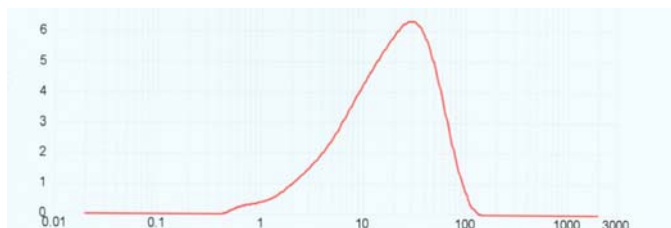
ภาพที่ 3.12 การกระจายตัวของขนาดอนุภาค
(ก) ควอทซ์ (ข) ถั่วแกลบจากโรงเผาอิฐ

จากภาพที่ 3.12 พบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของควอทซ์นั้นมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 15 ไมโครเมตร ส่วนขนาดอนุภาคเฉลี่ยของถั่วแกลบจากโรงงานเผาอิฐมีขนาด 36.55 ไมโครเมตร

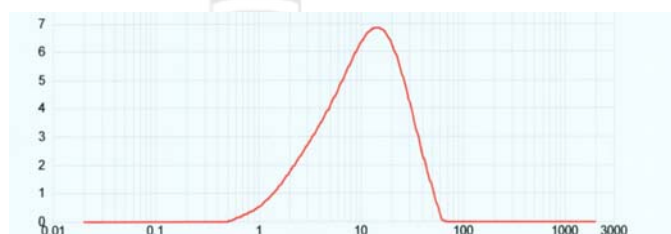
(ก)



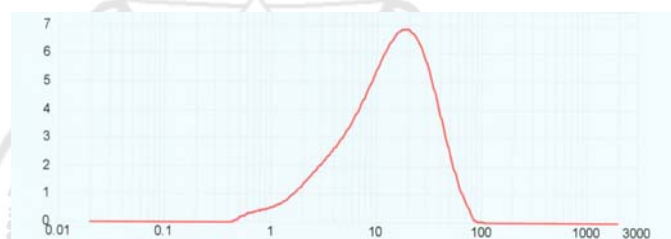
(ข)



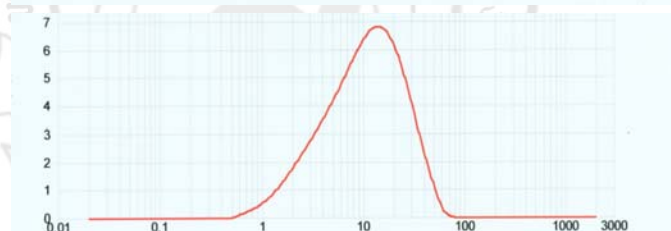
(ค)



(ง)



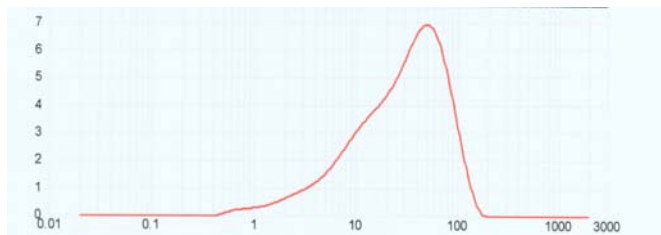
(จ)



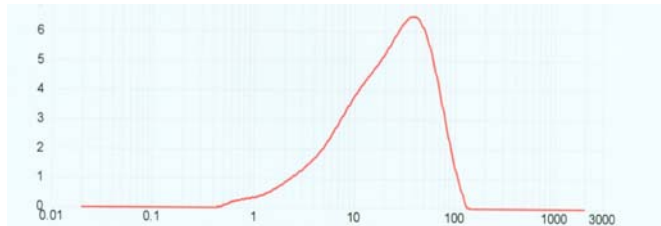
ภาพที่ 3.13 การกระจายตัวขนาดอนุภาคของแก้วเกลบที่ผ่านการเผา
ที่อุณหภูมิ 500 ช. เป็นเวลา 4 ชม.

(ก) บด 1 ชม. (ข) บด 2 ชม. (ค) บด 3 ชม. (ง) บด 4 ชม. (จ) บด 5 ชม.

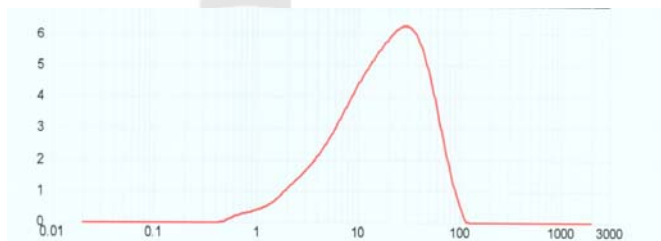
(ก)



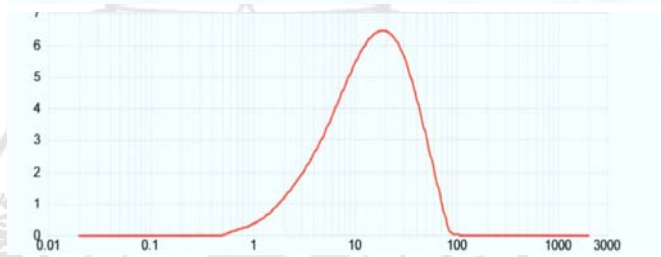
(ข)



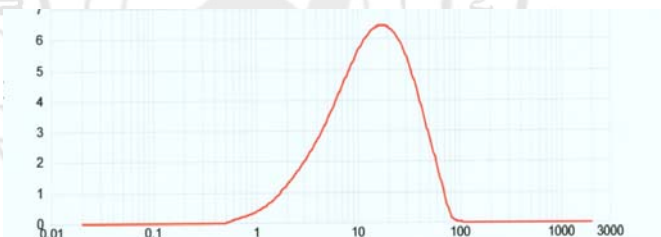
(ค)



(ง)



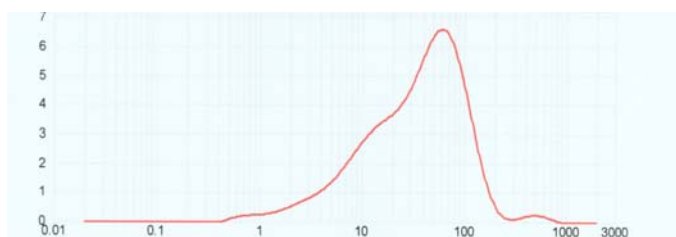
(จ)



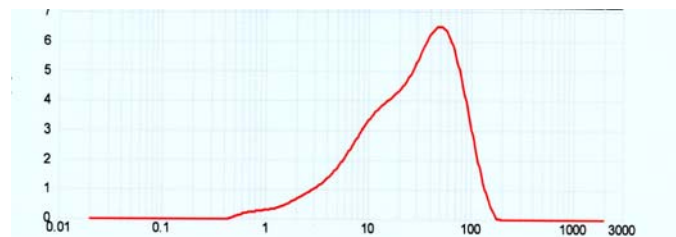
ภาพที่ 3.14 การกระจายตัวขนาดอนุภาคของแก้วเกลบที่ผ่านการเผา
ที่อุณหภูมิ 500 ช. เป็นเวลา 8 ชม.

(ก) บด 1 ชม. (ข) บด 2 ชม. (ค) บด 3 ชม. (ง) บด 4 ชม. (จ) บด 5 ชม.

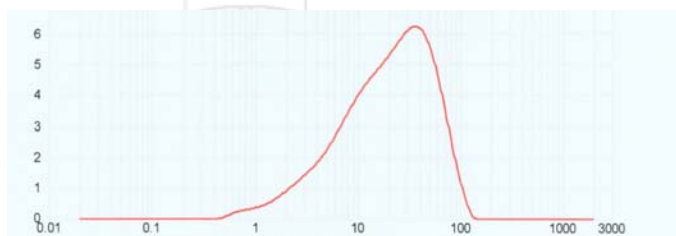
(ก)



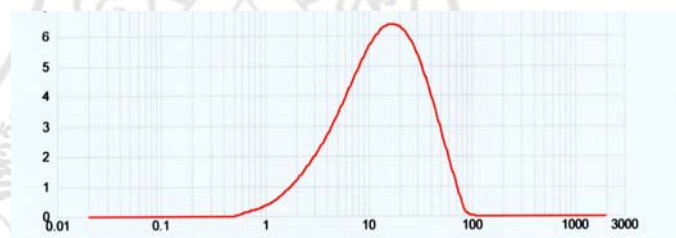
(ข)



(ค)



(ง)



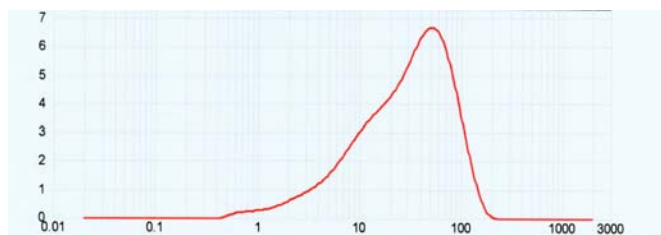
(จ)



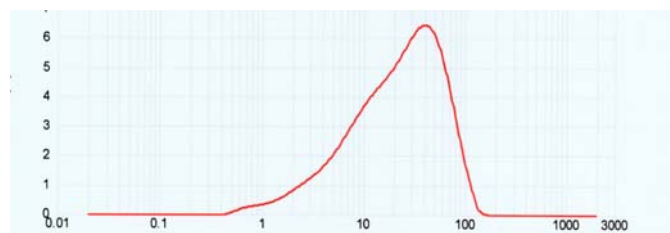
ภาพที่ 3.15 การกระจายตัวขนาดอนุภาคของเถ้ากลบที่ผ่านการเผา
ที่อุณหภูมิ 600 ช. เป็นเวลา 4 ชม.

(ก) บด 1 ซม. (ข) บด 2 ซม. (ค) บด 3 ซม. (ง) บด 4 ซม. (จ) บด 5 ซม.

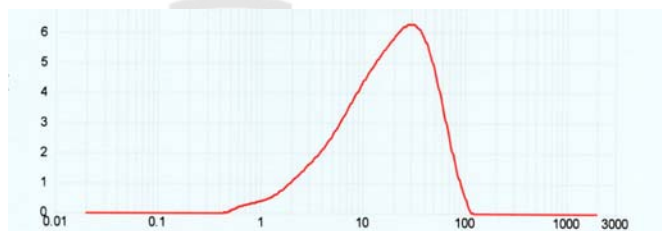
(ก)



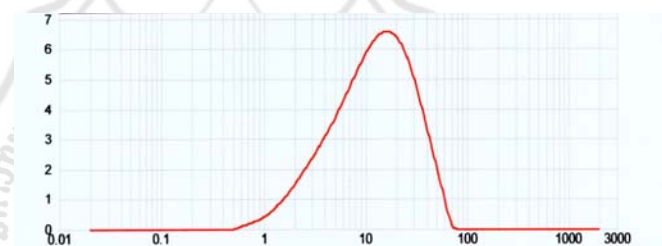
(ข)



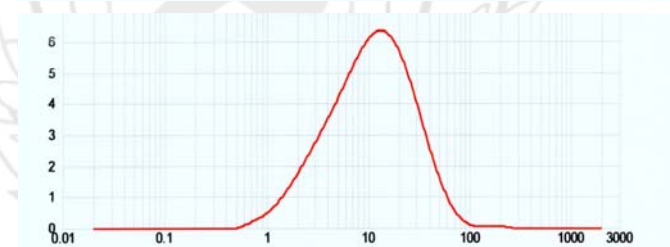
(ค)



(ง)

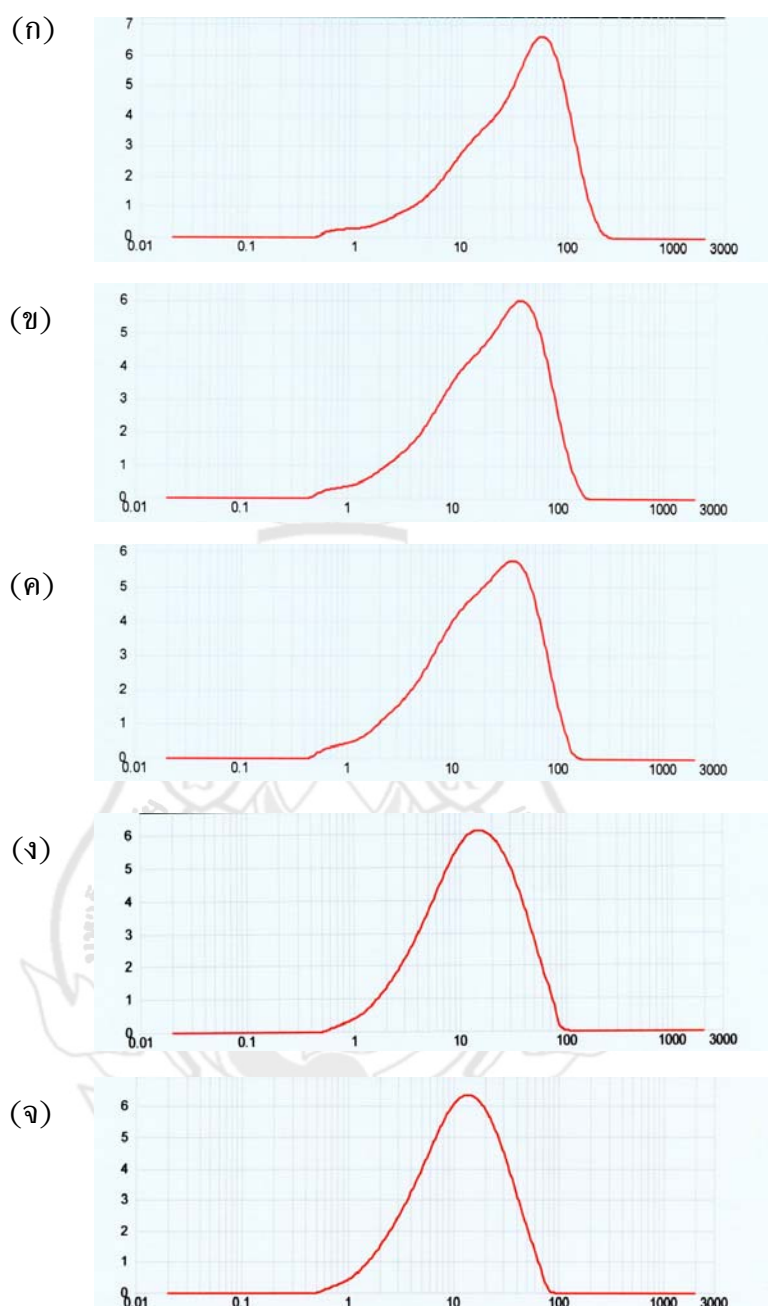


(จ)



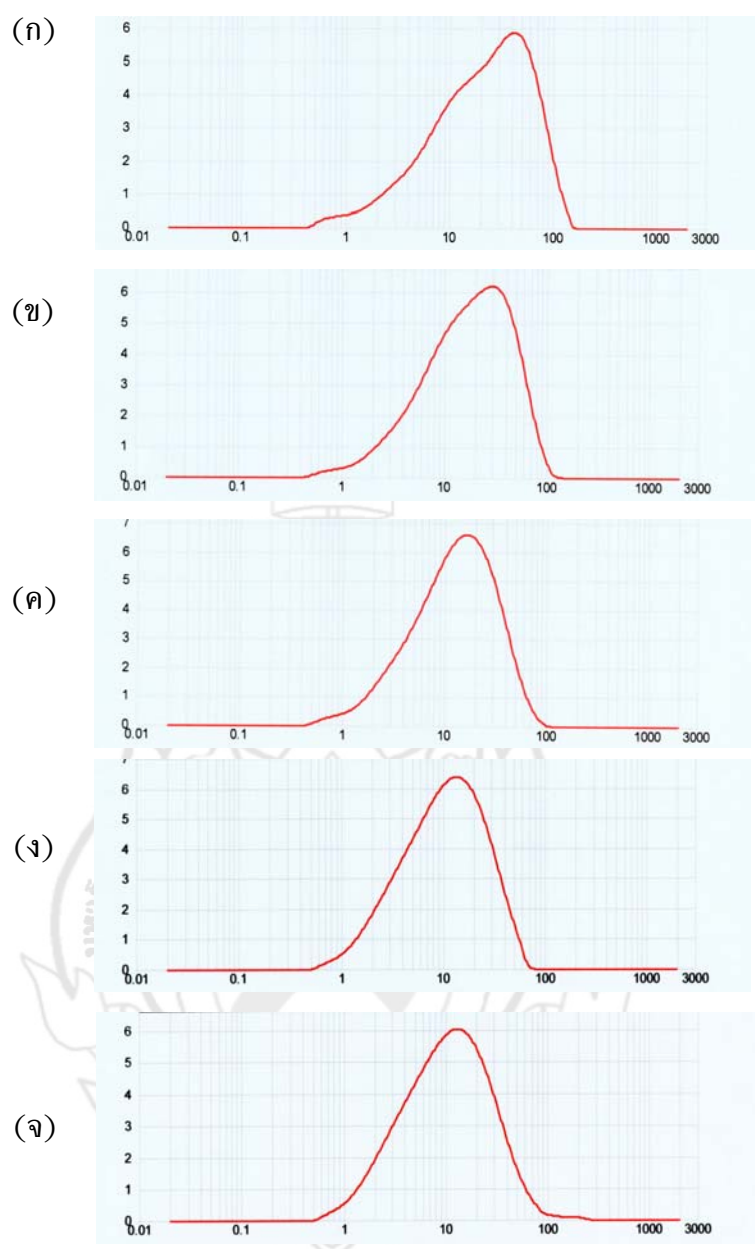
ภาพที่ 3.16 การกระจายตัวขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบที่ผ่านการเผา
ที่อุณหภูมิ 600 ช. เป็นเวลา 8 ชม.

(ก) บด 1 ชม. (ข) บด 2 ชม. (ค) บด 3 ชม. (ง) บด 4 ชม. (จ) บด 5 ชม.



ภาพที่ 3.17 การกระจายตัวขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบที่ผ่าน
การเผาที่อุณหภูมิ 700 ช. เป็นเวลา 4 ชม.

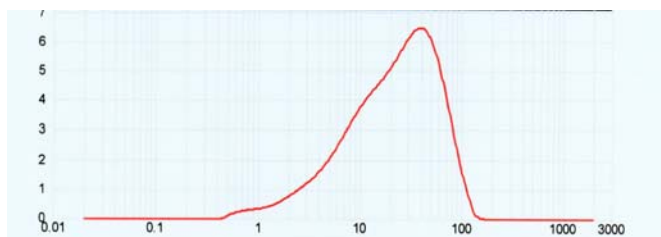
(ก) บด 1 ชม. (ข) บด 2 ชม. (ค) บด 3 ชม. (ง) บด 4 ชม. (จ) บด 5 ชม.



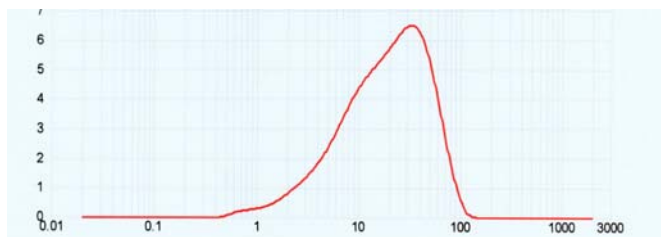
ภาพที่ 3.18 การกระจายตัวขนาดอนุภาคของแก้วเกลบที่ผ่าน
การเผาที่อุณหภูมิ 700 ช. เป็นเวลา 8 ชม.

(ก) บด 1 ชม. (ข) บด 2 ชม. (ค) บด 3 ชม. (ง) บด 4 ชม. (จ) บด 5 ชม.

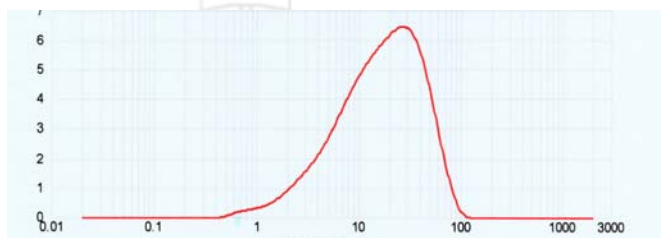
(ก)



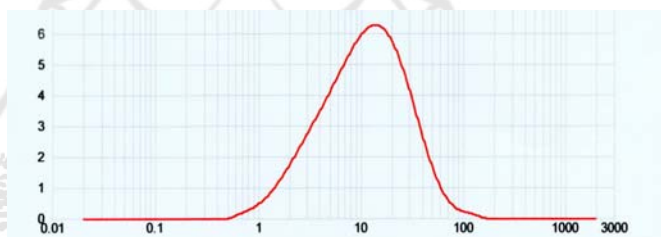
(ข)



(ค)



(ง)

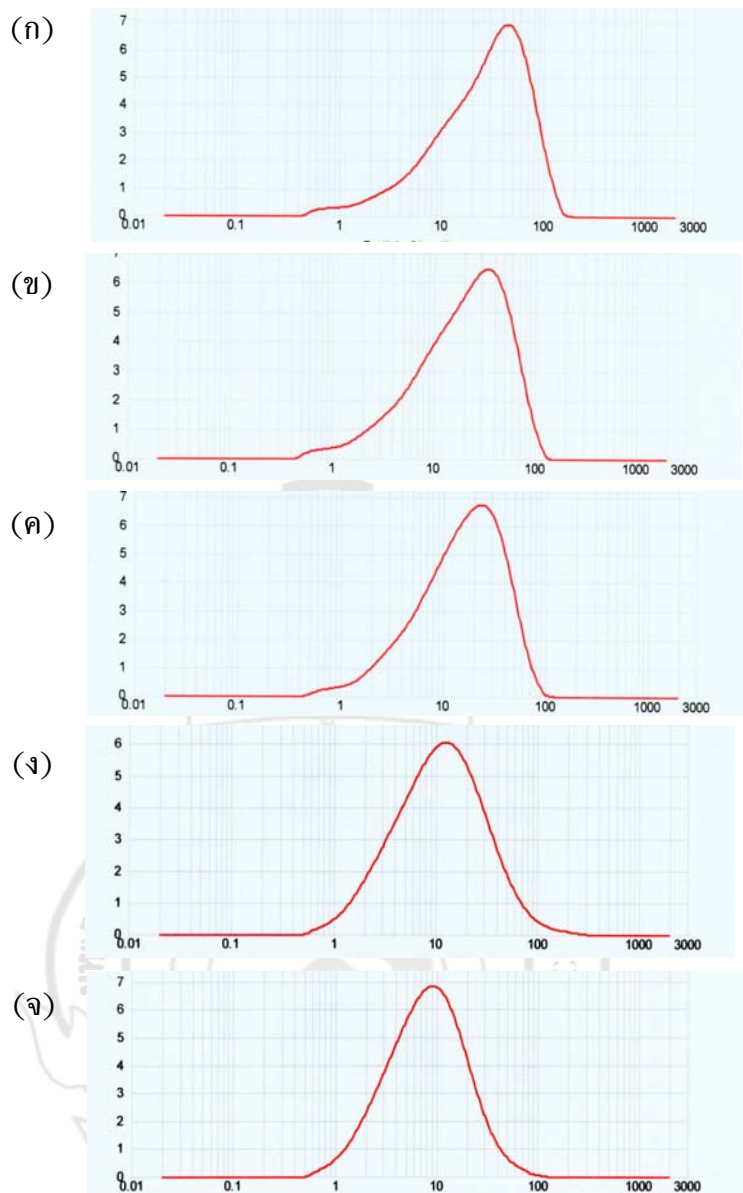


(จ)



ภาพที่ 3.19 การกระจายตัวขนาดอนุภาคของแก้วเคลือบที่ผ่าน
การเผาที่อุณหภูมิ 800 ช. เป็นเวลา 4 ชม.

(ก) บด 1 ชม. (ข) บด 2 ชม. (ค) บด 3 ชม. (ง) บด 4 ชม. (จ) บด 5 ชม.



ภาพที่ 3.20 การกระจายตัวขนาดอนุภาคของแก้วเคลือบที่ผ่าน
การเผาที่อุณหภูมิ 800 ช. เป็นเวลา 8 ชม.

(ก) บด 1 ชม. (ข) บด 2 ชม. (ค) บด 3 ชม. (ง) บด 4 ชม. (จ) บด 5 ชม.

จากภาพที่ 3.12–3.20 เป็นการแสดงการกระจายตัวขนาดอนุภาคเฉลี่ยของควอทซ์
 ถ้ำกลบจากโรงงานเผาอิฐและถ้ำกลบที่ผ่านการเผาที่ 500–800 ช. ที่ 4 และ 8 ชม. บด
 ตั้งแต่ 1–5 ซม. สามารถนำค่าเฉลี่ยมาสรุปได้ดังตารางที่ 3.4 ดังนี้

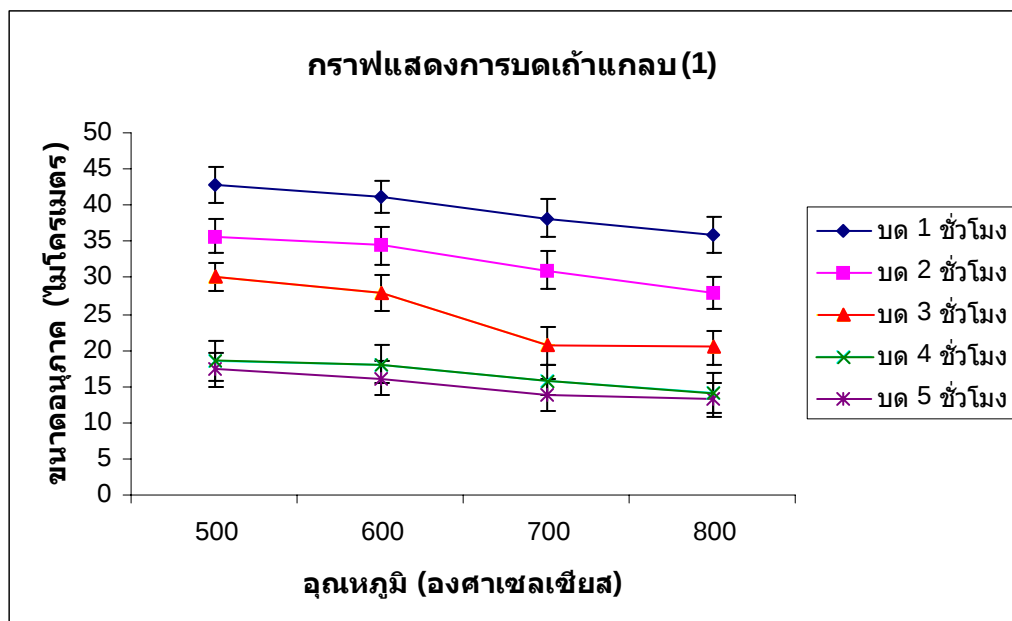
ตารางที่ 3.4 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของถ้ำกลบที่ผ่านการบดที่ 1–5 ซม. ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของ
 ควอทซ์ และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของถ้ำกลบจากโรงเผาอิฐ

อุณหภูมิ(ช.)	เวลาในการเผา (ชม.)	เวลาที่ใช้ในการบดถ้ำกลบ (ชม.) / D [4,3] ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมโครเมตร)				
		1	2	3	4	5
500	4	42.73±0.27	35.69±0.25	30.09±0.24	18.48±0.22	17.35±0.20
	8	35.03±0.25	25.26±0.23	17.93±0.20	19.01±0.22	18.31±0.22
600	4	41.20±0.25	34.43±0.25	27.96±0.23	18.06±0.21	16.04±0.19
	8	33.52±0.24	24.07±0.24	17.53±0.20	17.42±0.20	15.49±0.18
700	4	38.25±0.26	30.97±0.23	20.62±0.21	15.83±0.18	13.87±0.17
	8	37.41±0.25	24.07±0.24	17.22±0.20	16.06±0.19	14.18±0.18
800	4	35.98±0.25	27.82±0.23	20.35±0.24	13.99±0.17	13.15±0.17
	8	30.48±0.23	23.40±0.23	17.15±0.20	15.64±0.18	11.30±0.15
Q			15.55±0.17			
RHA 1			36.55±0.26			

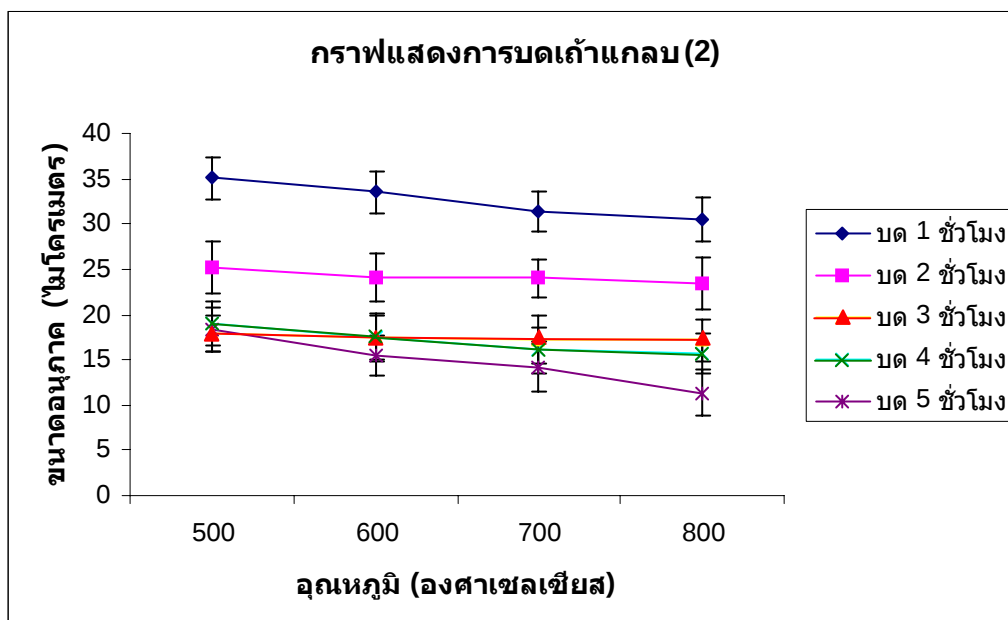
หมายเหตุ ควอทซ์ (Q) และถ้ำกลบจากโรงงานเผาอิฐไม่ได้บด (RHA 1)

จากตารางที่ 3.4 ผลจากการบดถ้ำกลบที่เวลาต่างๆ ของถ้ำกลบที่ผ่านการเผาที่
 อุณหภูมิ ตั้งแต่ 500–800 ช. เป็นเวลาที่ 4 และ 8 ชม. นั้น พบว่า ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของถ้ำ
 กลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800 ช. เป็นเวลา 8 ชั่วโมง มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่เล็กที่สุด คือ
 11.30 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นการบดที่ 5 ซม. เมื่อเทียบกับขนาดอนุภาคเฉลี่ยของควอทซ์ แล้ว
 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยนั้นเล็กกว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของควอทซ์ โดยขนาดอนุภาคเฉลี่ยของควอทซ์ที่
 พบเฉลี่ยมีขนาด 15.55 ไมโครเมตร และขนาดอนุภาคของถ้ำกลบจากโรงเผาอิฐมีขนาด
 อนุภาคเฉลี่ย 36.55 ไมโครเมตร จากการวิเคราะห์ข้างต้น ทำให้ทราบว่าเมื่อมีการเพิ่มเวลาที่ใช้
 ในการบดนานขึ้น จะทำให้ขนาดอนุภาคของถ้ำกลบที่ได้มีแนวโน้มที่จะมีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ
 และนอกจากนี้ยังได้แสดงขนาดอนุภาคเฉลี่ยของควอทซ์ กับถ้ำกลบที่ได้จากโรงเผาอิฐไว้ด้วย

จากภาพที่ 3.13 ถึง 3.20 เป็นภาพแสดงขนาดอนุภาคเฉลี่ยของถ้ำเกลบที่ผ่านการบดเป็นเวลา 1-5 ชม. เผาที่อุณหภูมิ 500-800 ซ. เป็นเวลา 4 และ 8 ชม. ซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาถ้ำเกลบและขนาดอนุภาคของถ้ำเกลบ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3.21 และภาพที่ 3.22 ดังนี้



ภาพที่ 3.21 กราฟแสดงผลขนาดอนุภาคเฉลี่ยของถ้ำเกลบหลังการบดเป็นเวลา 1-5 ชม. หลังการเผาที่อุณหภูมิ 500-800 ซ. เป็นเวลา 4 ชม.

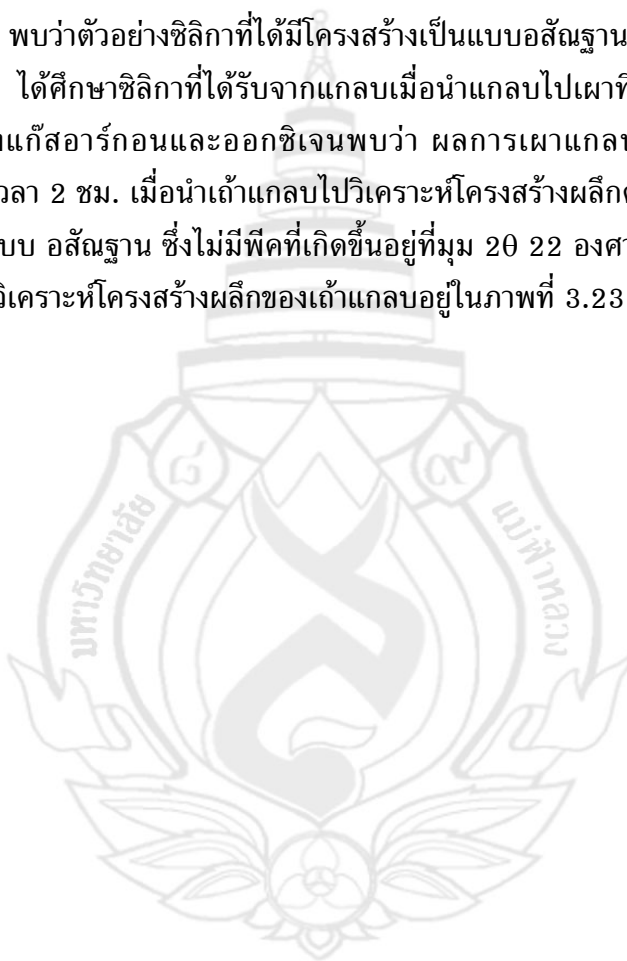


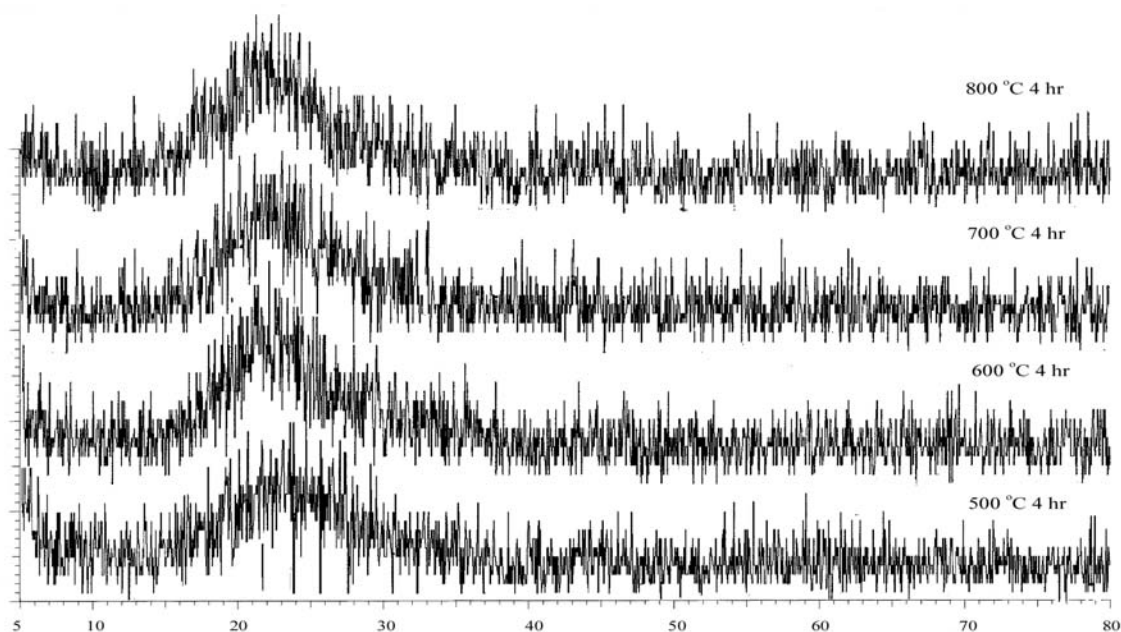
ภาพที่ 3.22 กราฟแสดงผลขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถ้าแกลบหลังการบดเป็นเวลา 1-5 ชม. หลังการเผาที่อุณหภูมิ 500-800 ซ. เป็นเวลา 8 ชม.

จากภาพที่ 3.21 และ 3.22 เป็นกราฟแสดงขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถ้าแกลบที่ผ่านการบดเป็นเวลา 1-5 ชม. ผลจากการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มเวลาที่ใช้ในการบดเถ้าแกลบนานขึ้นมีแนวโน้มของขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบก็จะเล็กลง ซึ่งถ้าเปรียบเทียบกับขนาดอนุภาคเฉลี่ยของควอทซ์แล้วนั้นขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบที่ผ่านการบดที่ 5 ชม. ค่อนข้างที่จะมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่เล็กกว่า

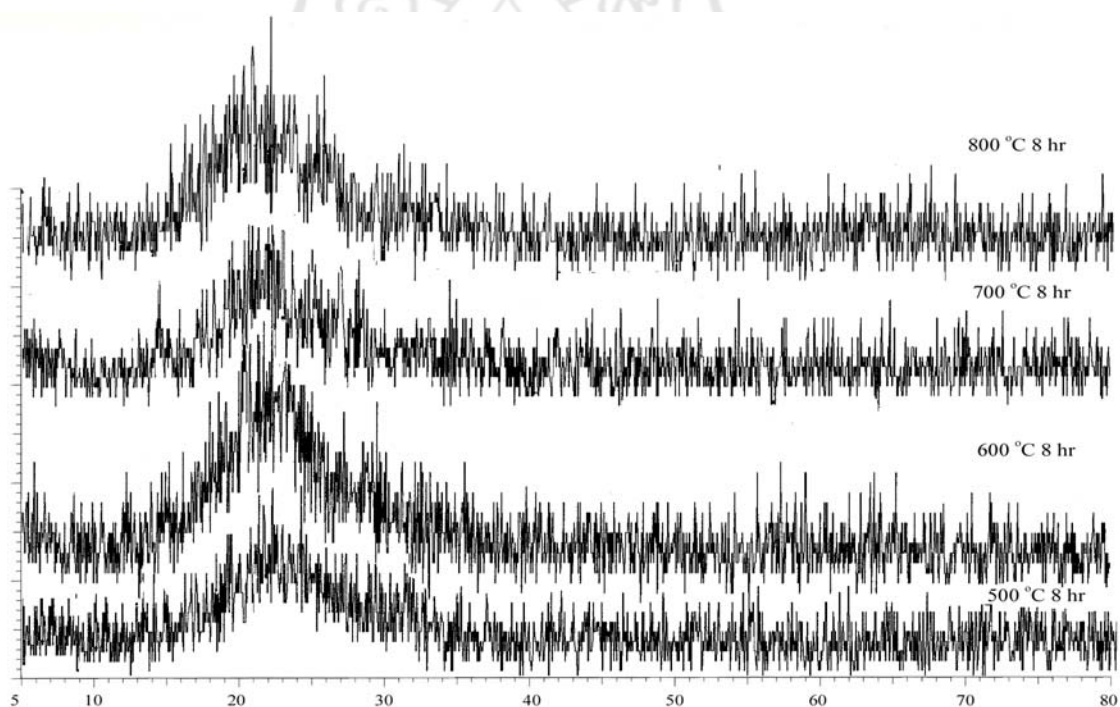
3.2.6 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแก้วเคลือบ

ผลการศึกษาผลึกวิทยาของแก้วเคลือบที่เผาอุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ กันเมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ผลจากการทดลองเตรียมซิลิกาที่ได้จากการเผาเคลือบที่อุณหภูมิ 500–800 ช. เป็นเวลา 4 และ 8 ชม. พบว่ามีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน (Amorphous) เนื่องจากไม่มีพีคที่เกิดขึ้นที่มุม 2θ มีลักษณะฐานกว้างตั้งแต่ 15–30 องศา ซึ่งผลการทดลองในครั้งนี้ให้ผลสอดคล้องกับ (Della และคณะ, 2002) ที่ได้ทำการทดลองนำเคลือบไปเผาที่อุณหภูมิ ตั้งแต่ 400–700 ช. ที่ใช้เวลาในการเผา 1, 3 และ 6 ชม. เมื่อนำซิลิกาที่ได้ไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย XRD พบว่าตัวอย่างซิลิกาที่ได้มีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน นอกจากนี้ (Yalcin และคณะ, 2001) ได้ศึกษาซิลิกาที่ได้รับจากเคลือบเมื่อนำเคลือบไปเผาที่อุณหภูมิ 600 ช. ภายใต้บรรยากาศของแก๊สอาร์กอนและออกซิเจนพบว่า ผลการเผาเคลือบภายใต้บรรยากาศแบบออกซิเจน เป็นเวลา 2 ชม. เมื่อนำแก้วเคลือบไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย XRD พบว่าตัวอย่างซิลิกาที่ได้เป็นแบบ อสัณฐาน ซึ่งไม่มีพีคที่เกิดขึ้นอยู่ที่มุม 2θ 22 องศา จากผลการทดลองผู้วิจัยได้แสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแก้วเคลือบอยู่ในภาพที่ 3.23 และ ภาพที่ 3.24





ภาพที่ 3.23 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของไข่ไก่ด้วย XRD
เผาที่อุณหภูมิ 500-800 °C. ที่ 4 และ 8 ชม.



ภาพที่ 3.24 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของไข่ไก่ด้วย XRD
เผาที่อุณหภูมิ 500-800 °C. ที่ 4 และ 8 ชม.

บทที่ 4

การเตรียม และศึกษาสมบัติของเคลือบ

การเตรียมน้ำเคลือบใช้วัตถุดิบ 3 ชนิดคือ หินฟืนม้าชนิดโซดาเฟลด์สปาร์ ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$) หินปูนหรือแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และควอทซ์ เถ้าแกลบที่ได้จากโรงงานเผาอิฐ หรือเถ้าแกลบที่ได้จากการเตรียมขึ้นเอง ซึ่งภาพของควอทซ์และเถ้าแกลบทั้งสองชนิดแสดงอยู่ในภาพที่ 4.1



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 4.1 (ก) ผงควอทซ์ (ข) เถ้าแกลบจากโรงงานเผาอิฐ
(ค) เถ้าแกลบหลังการเผาที่อุณหภูมิ 700 ช. เป็นเวลา 4 ชม.

เพื่อศึกษาถึงลักษณะการหลอมตัวของเคลือบที่อัตราส่วนผสมแตกต่างกันไป ผู้วิจัยได้ทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมของวัตถุดิบที่ใช้ในการทำเคลือบดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 อัตราส่วนผสมของเคลือบ

วัตถุดิบ	อัตราส่วนผสม					
	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3	สูตรที่ 4	สูตรที่ 5	สูตรที่ 6
หินฟันม้าชนิดโซดา						
เฟลด์สปาร์	30	40	35	40	45	30
หินปูน หรือ						
แคลเซียมคาร์บอเนต	40	30	40	40	40	40
ควอทซ์หรือเถ้าแกลบ	30*	30*	25*	20*	15*	50*

เงื่อนไข * เถ้าแกลบที่ใช้มี 2 แหล่งคือ เถ้าแกลบจากโรงงานเผาอิฐ และเถ้าแกลบที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 500–700 ช. เเผาเป็นเวลา 4 ชม. ที่บด 0, 4 และ 5 ชม.

เพื่อศึกษาผลของปริมาณซิลิกาในเถ้าแกลบต่อลักษณะของเคลือบ ผู้วิจัยจึงเลือกเถ้าแกลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500–700 ช. เป็นเวลา 4 ชม. เป็นองค์ประกอบในเคลือบเนื่องจากผลจากการทดลองในบทที่ 3 พบว่า ปริมาณของซิลิกาที่พบหลังการเผาในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 500–700 ช. มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาขึ้นเป็น 800 ช. 4 ชม. พบว่าปริมาณของซิลิกาที่ได้ไม่แตกต่างกันนักกับเถ้าแกลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 700 ช. เเผาเป็นเวลา 4 ชม. ส่วนสาเหตุที่ไม่เลือกเถ้าแกลบที่เผา 500–800 ช. เป็นเวลา 8 ชม. เพราะผลจากการทดลองพบว่า ปริมาณของซิลิกาที่ได้ในสภาวะดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกันกับสภาวะที่เลือก และนอกจากนี้เวลาที่ใช้ในการเผานานขึ้นก็ทำให้สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจากการเผาด้วย

เพื่อศึกษาผลของขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบต่อการหลอมตัวของเคลือบ การทดลองนี้จึงเลือกเถ้าแกลบที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 3 ช่วง คือ เถ้าแกลบที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าควอทซ์ (คือเถ้าแกลบที่ไม่บด) เถ้าแกลบที่มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับควอทซ์ (เถ้าแกลบบดที่ 4 ชม.) และเถ้าแกลบที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าควอทซ์ (เถ้าแกลบบดที่ 5 ชม.) ซึ่งวิธีการทดลองได้แสดงเป็นแผนภาพในภาพที่ 4.3 ส่วนการดำเนินการทดลองโดยละเอียดได้แสดงเป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

4.1 การเตรียมน้ำเคลือบ การเคลือบ และการเผาเคลือบ

4.1.1 ชั่งส่วนผสมเคลือบที่ได้กำหนดเอาไว้ตามตารางที่ 4.1 ด้วยเครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง (ผู้ผลิต Metler Telodo รุ่น PB3002-S) อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัตถุดิบคือ 1 ต่อ 1 โดยมวล ส่วนผสมละ 50 กรัม จากนั้นนำเคลือบที่ชั่งเรียบร้อยแล้วไปบดด้วยเครื่องบดเร็ว (Speed Mill) อัตราส่วนผสมละ 5 นาที

4.1.2 เตรียมชั้นทดสอบสำหรับชุบเคลือบโดยใช้เนื้อดินปั้นชนิดสโตนแวร์ ผสมสำเร็จของบริษัทคอมพาวด์เคลย์ โดยการกดอัดขึ้นรูปด้วยแบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ ที่มีลายบนชั้นทดสอบเพื่อดูความแตกต่างของการหลอมตัวของเคลือบ เผาขึ้นทดสอบ (Biscuit Firing) ที่อุณหภูมิ 850 ช.

4.1.3 นำชั้นทดสอบที่เตรียมเรียบร้อยแล้วมาชุบเคลือบด้วยวิธีการจุ่ม โดยใน 1 อัตราส่วนผสม เตรียมชั้นทดสอบจำนวน 3 ชิ้น จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1,250 ช. เป็นเวลา 8 ชม. ยืนไฟที่อุณหภูมิสูงสุดเป็นเวลา 30 นาที โดยใช้เตาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง (Lenton Thermal Designs LTD) เผาในบรรยากาศแบบออกซิเดชัน

4.1.4 หลังเผาชั้นทดสอบเรียบร้อยแล้วทำการวิเคราะห์ผลการเผาเคลือบหลังการเผา โดยดูจากลักษณะของเคลือบคือ การหลอมตัวของเคลือบและความสมบูรณ์ของเคลือบ วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและสีของเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

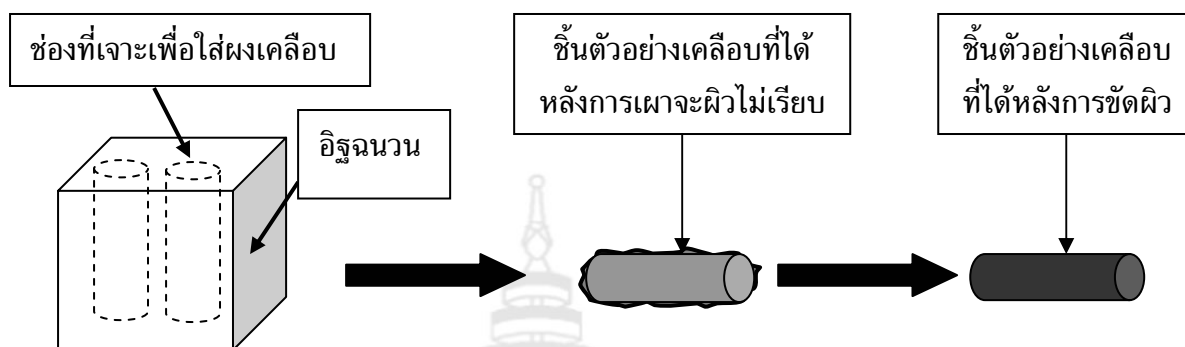
4.2 ศึกษาค่าการขยายตัวของเคลือบ

4.2.1 นำผงเคลือบซึ่งได้เตรียมไว้แล้วไปอัดลงในอิฐฉนวนซึ่งได้เจาะรูที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูปประมาณ 8 มิลลิเมตร ลึก 30 มิลลิเมตร จะได้ชั้นทดสอบเป็นแท่งดังรูปที่ 4.2

4.2.2 นำตัวอย่างของผงเคลือบที่ได้อัดขึ้นรูปเอาไว้แล้วไปเผาด้วยเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1,250 ช. ในบรรยากาศแบบออกซิเดชัน เป็นเวลา 8 ชม. ยืนไฟที่อุณหภูมิสูงสุดเป็นเวลา 30 นาที

4.2.3 จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างของเคลือบที่เผาเสร็จเรียบร้อยแล้วนำมาขัดด้วยเครื่องขัดตัวอย่าง (Mecapol รุ่น P 230) เพื่อให้ผิวเรียบ และให้ด้านหน้าตัดของชั้นทดสอบขนานกัน

4.2.4 นำชิ้นตัวอย่างของเคลือบไปทดสอบหาค่าการขยายตัวด้วยเครื่องทดสอบการขยายตัวเชิงความร้อน Dilatometer ผู้ผลิต Netzsch รุ่น DIL 402 C โดยใช้อุณหภูมิสำหรับการทดสอบการขยายตัวของเคลือบจากอุณหภูมิ 37 ถึง 1,250 ช. โดยให้อัตราความร้อน 5 ช. ต่อนาที ขั้นตอนการเตรียมชิ้นตัวอย่างเคลือบได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 ขั้นตอนการเตรียมชั้นตัวอย่างเคลือบสำหรับการทดสอบค่าการขยายตัวของเคลือบ

4.2.5 เลือกตัวแทนของเคลือบสูตรที่เหมาะสมจากทั้ง 6 สูตร เพื่อศึกษาค่าการขยายตัวของเคลือบ ผู้วิจัยได้อ้างอิงวิธีการหาค่าความแตกต่างเชิงความร้อนของเคลือบและเนื้อดินปั้นตามวิธีของ E. Kaisersberger, J. Blumm ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก (1) ส่วนการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบวัดในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 25–350 ช. ตามมาตรฐาน ASTM C 372–94 แสดงวิธีการคำนวณไว้ในภาคผนวก ก (2)

4.2.6 เตรียมชั้นทดสอบของเนื้อดินปั้นสำเร็จรูปชนิดสโตนแวร์ (จำหน่ายโดย บริษัท คอมพาวด์เคลย์) โดยการรีดเป็นเส้นด้วยเครื่องรีดดินแบบใช้มือกดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ยาว 25 มิลลิเมตร คล้ายกับชั้นทดสอบของเคลือบตามภาพที่ 4.2 แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1,250 ช. จากนั้นขัดผิวให้เรียบ และขัดด้านหน้าตัดของชั้นทดสอบทั้งสองด้านให้ขนานกัน เพื่อทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของเนื้อดินปั้น

4.3 การศึกษาจุดเริ่มหลอมเหลวของเคลือบ

การศึกษาจุดเริ่มหลอมเหลวของเคลือบเลือกเฉพาะเคลือบสูตรที่ 2 แล้วอัดผงเคลือบให้เป็นเม็ดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ขนาด 10 ตัน ด้วยแรงอัด 2,000 ปอนด์แล้วนำเม็ดเคลือบไปทดสอบหาจุดเริ่มหลอมเหลวของเคลือบด้วยเครื่องทดสอบ

การขยายตัวเชิงความร้อน (Dilatometer) โดยใช้อุณหภูมิสำหรับการทดสอบจุดเริ่มหลอมเหลวของเคลือบจากอุณหภูมิ 37 ถึง 1,250 ช. ให้อัตราความร้อน 5 ช. ต่อนาที

4.4 ศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของเคลือบ

4.4.1 เตรียมชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการเผาเคลือบโดยการนำไปตัดด้วยเครื่องตัดแบบตัดขวาง จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างขึ้นงานไปขัดหยาบ โดยแผ่นซิลิกอนคาร์ไบด์ เบอร์ 600 , 800 และ 1,200 เมช ตามลำดับ และทำการขัดชิ้นตัวอย่างขึ้นงานด้วยผงขัดเพชรที่มีความละเอียด 6 และ 3 ไมครอนเป็นลำดับสุดท้าย

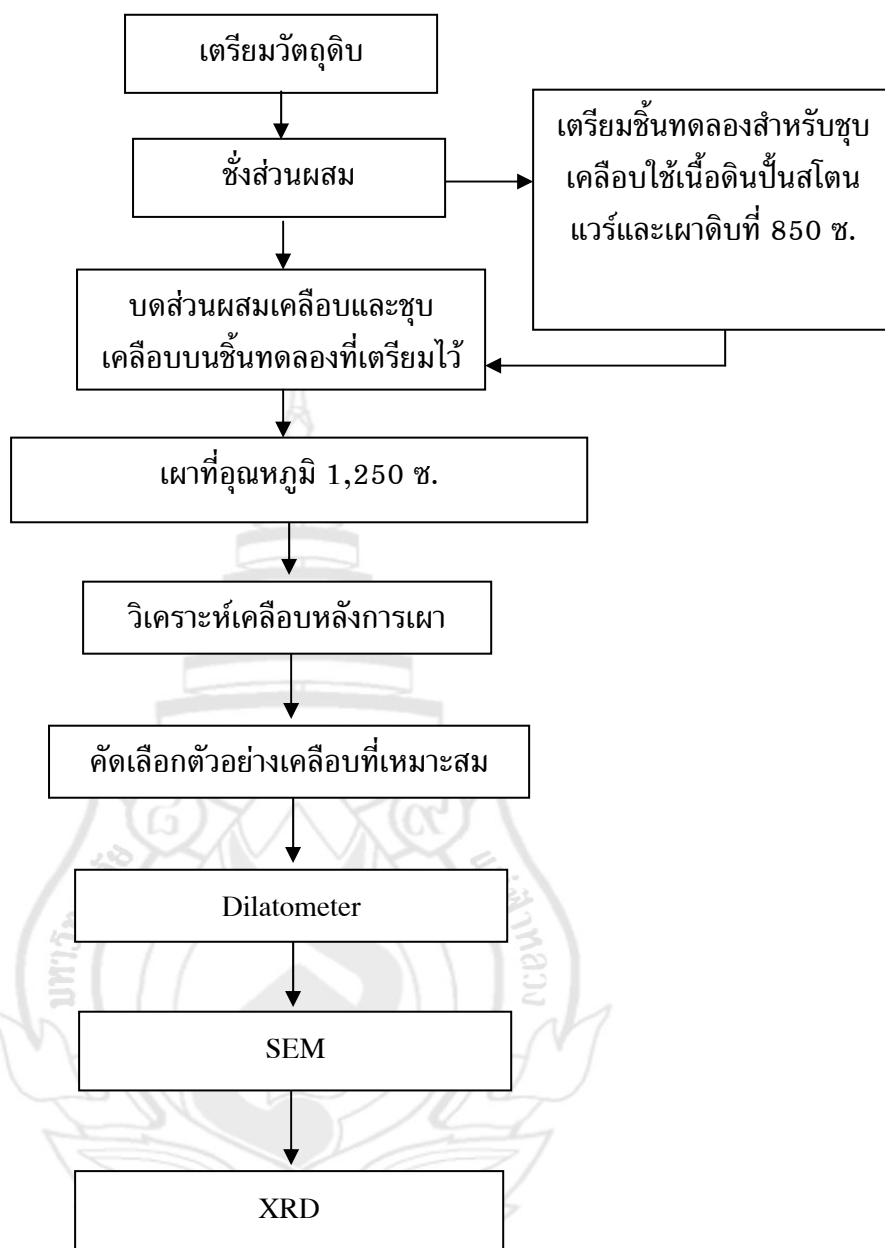
4.4.2 นำชิ้นตัวอย่างขึ้นงานที่ขัดเรียบเรียบร้อยแล้วไปตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Olympus รุ่น Stemi 2000-C) ร่วมกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (ผู้ผลิต LEO รุ่น 1460) โดยใช้อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Mode) แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ให้แก่ส่วนกำเนิดอิเล็กตรอน (EHT) เป็น 10 kV ขนาดลำอิเล็กตรอน (Spot Size) เป็น 350 ระยะแกน Z ระหว่างเลนส์วัตถุกับตัวอย่างให้อยู่ในระนาบที่เหมาะสม (WD) เป็น 17 มิลลิเมตร

4.5 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฟส (Phase) ของเคลือบ

ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฟสของเคลือบด้วย เครื่อง X-ray Diffraction, (XRD รุ่น X -Pert Pro MPD/PANalytical) โดยมีการเตรียมตัวอย่างดังนี้

4.5.1 นำตัวอย่างของเคลือบมาบดผสมแบบแห้งแล้วนำไปเผาโดยใส่เคลือบผงไว้ในถ้วยครุชิวีล (Crucible) แบบมีฝาปิด ที่อุณหภูมิ 900-1,150 ช. ด้วยเตาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง โดยเผาจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิสูงสุด เป็นเวลา 8 ชม. ยืนไฟที่อุณหภูมิสูงสุด 30 นาที

4.5.2 นำเคลือบที่เผาในแต่ละอุณหภูมิไปบดด้วยโกร่งบดมือเป็นเวลา 30 นาที กรองผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 120 เมช แล้วนำไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเฟสของเคลือบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ XRD โดยใช้มุม $20-35^{\circ} 2 \text{ Theta}$ ความละเอียดของการเพิ่มมุม (Step Size) เป็น 0.0167 เวลาในการรับสัญญาณในแต่ละมุม (Time/Step) เป็น 10.010 วินาที



ภาพที่ 4.3 ลำดับขั้นตอนของการทดลองในการเตรียมและศึกษาสมบัติของเคลือบ

4.6 ลักษณะโดยทั่วไปของเคลือบสูตรต่าง ๆ หลังการเผา

ผลจากการนำควอทซ์ แก้วเคลือบจากโรงเผาอิฐซึ่งไม่ได้บด และแก้วเคลือบที่เตรียมขึ้นเอง ซึ่งผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500–700 ช. เป็นเวลา 4 ชม. โดยแก้วเคลือบที่เตรียมขึ้นเองนี้มีทั้งที่ไม่บด และบดเป็นเวลา 4 และ 5 ชม. มาเป็นส่วนผสมในเคลือบทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมของวัตถุดิบที่ได้กำหนดเอาไว้ ตามตารางที่ 4.1 เพื่อศึกษาลักษณะการหลอมตัวของเคลือบที่อัตราส่วนแตกต่างกันไปหลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 1,250 ช. ผลจากการทดลองได้นำเสนอในภาพที่ 4.4–4.7 และผลของลักษณะของเคลือบสูตรต่าง ๆ หลังการเผาได้แสดงในตารางที่ 4.2–4.6 เป็นดังนี้



สูตรที่ 1 แสดงลักษณะของเคลือบเป็นดังนี้

ควอทซ์		วัตถุดิบ	อัตราส่วนผสม
		หินฟันม้าชนิดโซดา เฟลด์สปาร์	30
เถ้าแกลบจากโรงงาน เผาอิฐ		หินปูนหรือแคลเซียม คาร์บอเนต	40
		ควอทซ์หรือเถ้าแกลบ	30*
เถ้าแกลบเผาอุณหภูมิ 500 ช. 4 ซม.			
เถ้าแกลบเผาอุณหภูมิ 600 ช. 4 ซม.			
เถ้าแกลบเผาอุณหภูมิ 700 ช. 4 ซม.			
	ไม่บด	บด 4 ซม.	บด 5 ซม.

5 mm



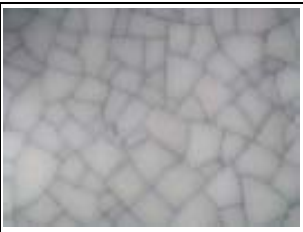
ภาพที่ 4.4 ลักษณะเคลือบสูตรที่ 1 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,250 ช.
ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

จากผลการเผาเคลือบสูตรที่ 1 สามารถสรุปลักษณะความแตกต่างของเคลือบดัง
แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองเคลือบสูตรที่ 1 หลังจากการเผา

แหล่งซิลิกา		สี และลักษณะของเคลือบที่ปรากฏหลังการเผา
ควอทซ์		สี ขาวขุ่น มีลักษณะทึบแสง เคลือบหลอมตัว ผิวกึ่งมันกึ่งด้าน รานเป็นเส้นห่าง
เถ้าแกลบจากโรงงานเผาอิฐ		สี ขาวขุ่น มีลักษณะทึบแสง เคลือบหลอมตัว ผิวกึ่งมันกึ่งด้าน รานละเอียด
เถ้าแกลบเผา 500 ช. 4 ซม.	ไม่บด	สี ขาวขุ่น มีลักษณะทึบแสง เคลือบหลอมตัว ผิวกึ่งมันกึ่งด้าน รานค่อนข้างละเอียด
	บด 4 ซม.	สี ขาวขุ่น มีลักษณะทึบแสง เคลือบหลอมตัว ผิวกึ่งมันกึ่งด้าน รานค่อนข้างละเอียด
	บด 5 ซม.	สี ขาวขุ่น มีลักษณะทึบแสง เคลือบหลอมตัว ลักษณะการรานตัวของเคลือบค่อนข้างละเอียด
เถ้าแกลบเผา 600 ช. 4 ซม.	ไม่บด	สี ขาวขุ่น มีลักษณะทึบแสง เคลือบหลอมตัว ผิวกึ่งมันกึ่งด้าน รานค่อนข้างละเอียด
	บด 4 ซม.	สี ขาวขุ่น มีลักษณะทึบแสง เคลือบหลอมตัว ผิวกึ่งมันกึ่งด้าน รานค่อนข้างละเอียด
	บด 5 ซม.	สี ขาวขุ่น มีลักษณะทึบแสง เคลือบหลอมตัว ผิวกึ่งมันกึ่งด้าน รานค่อนข้างละเอียด
เถ้าแกลบเผา 700 ช. 4 ซม.	ไม่บด	สี ขาวขุ่น มีลักษณะทึบแสง เคลือบหลอมตัว ผิวกึ่งมันกึ่งด้าน รานค่อนข้างละเอียด
	บด 4 ซม.	สี ขาวขุ่น มีลักษณะทึบแสง เคลือบหลอมตัว ผิวกึ่งมันกึ่งด้าน รานค่อนข้างละเอียด
	บด 5 ซม.	สี ขาวขุ่น มีลักษณะทึบแสง เคลือบหลอมตัว ผิวกึ่งมันกึ่งด้าน รานค่อนข้างละเอียด

สูตรที่ 2 แสดงลักษณะของเคลือบเป็นดังนี้

ควอทซ์		วัตถุดิบ	อัตราส่วนผสม
		หินพื้นน้ำชนิดโซดา เฟลด์สปาร์	40
		หินปูนหรือแคลเซียม คาร์บอเนต	30
เถ้าแกลบจากโรงงาน เผาอิฐ		ควอทซ์หรือเถ้าแกลบ	30*
เถ้าแกลบเผาอุณหภูมิ 500 ซ. 4 ซม.			
เถ้าแกลบเผาอุณหภูมิ 600 ซ. 4 ซม.			
เถ้าแกลบเผาอุณหภูมิ 700 ซ. 4 ซม.			
	ไม่บด	บด 4 ซม.	บด 5 ซม.

5 mm



ภาพที่ 4.5 ลักษณะเคลือบสูตรที่ 2 หลังการเผาอุณหภูมิ 1,250 ซ.
ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

จากผลการเผาเคลือบสูตรที่ 2 สามารถสรุปลักษณะความแตกต่างของเคลือบดัง
แสดงในตารางที่ 4.3

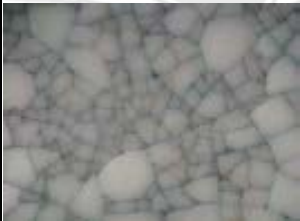
ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองเคลือบสูตรที่ 2 หลังจากการเผา

แหล่งชิลิกา ควอทซ์		สี และลักษณะของเคลือบที่ปรากฏหลังการเผา สี ขาวขุ่น มีลักษณะทึบแสงทึบแสง เคลือบหลอมตัวดี ผิวมัน รานเป็นเส้นห่าง
ถ้ำเกลบจากโรงงานเผาอิฐ		สี ขาวขุ่น มีลักษณะทึบแสงทึบแสง เคลือบหลอมตัวดี ผิวมัน รานเป็นเส้นห่าง
ถ้ำเกลบเผา 500 ช. 4 ซม.	ไม่บด	ใส มีฝ้าขาวบางส่วน เคลือบหลอมตัวดี ผิวมัน รานค่อนข้างละเอียด
	บด 4 ซม.	ใส มีฝ้าขาวบางส่วน เคลือบหลอมตัวดี ผิวมัน รานค่อนข้างละเอียด
	บด 5 ซม.	ใส มีฝ้าขาวบางส่วน เคลือบหลอมตัวดี ผิวมัน รานค่อนข้างละเอียด
ถ้ำเกลบเผา 600 ช. 4 ซม.	ไม่บด	ใส มีฝ้าขาวบางส่วนเล็กน้อย เคลือบหลอมตัวดี ผิวมัน รานค่อนข้างละเอียด
	บด 4 ซม.	ใส มีฝ้าขาวบางส่วนเล็กน้อย เคลือบหลอมตัวดี ผิวมัน รานค่อนข้างละเอียด
	บด 5 ซม.	ใส มีฝ้าขาวบางส่วนเล็กน้อย เคลือบหลอมตัวดี ผิวมัน รานค่อนข้างละเอียด
ถ้ำเกลบเผา 700 ช. 4 ซม.	ไม่บด	ใส มีฝ้าขาวบางส่วนเล็กน้อย เคลือบหลอมตัวดี ผิวมัน รานค่อนข้างละเอียด
	บด 4 ซม.	ใส มีฝ้าขาวบางส่วนเล็กน้อย เคลือบหลอมตัวดี ผิวมัน รานค่อนข้างละเอียด
	บด 5 ซม.	ใส มีฝ้าขาวบางส่วนเล็กน้อย เคลือบหลอมตัวดี ผิวมัน รานค่อนข้างละเอียด

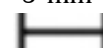
ตารางที่ 4.4 อัตราส่วนผสมของเคลือบสูตรที่ 3, 4 และ 5

วัตถุดิบ	อัตราส่วนผสม		
	สูตรที่ 3	สูตรที่ 4	สูตรที่ 5
หินพื้นม้าชนิดโซดา	35	40	45
เฟลด์สปาร์			
หินปูนหรือแคลเซียม	40	40	40
คาร์บอเนต			
ควอทซ์หรือแก้วกลบ	25*	20*	15*

สูตรที่ 3, 4 และ 5 แสดงลักษณะของเคลือบเป็นดังนี้

	สูตรที่ 3	สูตรที่ 4	สูตรที่ 5
ควอทซ์			
แก้วกลบจากโรงเผาอิฐ			
แก้วกลบเผาอุณหภูมิ 500 ซ. 4 ซม. ไม่บด			

5 mm



ภาพที่ 4.6 ลักษณะเคลือบสูตรที่ 3,4 และ 5 หลังการเผาอุณหภูมิ

1,250 ซ. ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

จากผลการเผาเคลือบสูตรที่ 3,4 และ 5 สามารถสรุปลักษณะความแตกต่างของเคลือบดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองเคลือบสูตรที่ 3, 4 และ 5 หลังจากการเผา

แหล่งซึลิกา	สี และลักษณะของเคลือบที่ปรากฏหลังการเผา
ควอทซ์	สี ขาวขุ่น มีลักษณะทึบแสง เคลือบหลอมตัว ผิวกึ่งมันกึ่งด้าน รานเป็นเส้นห่าง ลักษณะคล้ายกัน ทั้งสูตรที่ 3,4 และ 5
ถ้ำเกลบจากโรงงาน เผาอิฐ	สี ขาวขุ่น มีลักษณะทึบแสง เคลือบหลอมตัว ผิวกึ่งมันกึ่งด้าน รานละเอียด ลักษณะคล้ายกัน ทั้งสูตรที่ 3,4 และ 5
ถ้ำเกลบเผา 500 ซ. 4 ซม. ไม่บด	สี ขาวขุ่น มีลักษณะทึบแสง เคลือบหลอมตัว ผิวกึ่งมันกึ่งด้าน รานค่อนข้างละเอียด ลักษณะคล้ายกัน ทั้งสูตรที่ 3,4 และ 5



สูตรที่ 6 แสดงลักษณะของเคลือบเป็นดังนี้

ควอทซ์		วัตถุดิบ	อัตราส่วนผสม
		หินฟ้าน้ำชนิดโซดา เฟลด์สปาร์	30
เถ้าแกลบจากโรงงาน เผาอิฐ		หินปูนหรือแคลเซียม คาร์บอเนต	40
		ควอทซ์หรือเถ้าแกลบ	50*
เถ้าแกลบเผาอุณหภูมิ 500 ซ. 4 ซม.			
เถ้าแกลบเผาอุณหภูมิ 600 ซ. 4 ซม.			
เถ้าแกลบเผาอุณหภูมิ 700 ซ. 4 ซม.			
	ไม่บด	บด 4 ซม.	บด 5 ซม.

5 mm



ภาพที่ 4.7 ลักษณะเคลือบสูตรที่ 6 หลังการเผาอุณหภูมิ 1,250 ซ.
ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

จากผลการเผาเคลือบสูตรที่ 6 สามารถสรุปลักษณะความแตกต่างของเคลือบดัง
แสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองเคลือบสูตรที่ 6 หลังจากการเผา

แหล่งชิลิกา		สี และลักษณะของเคลือบที่ปรากฏหลังการเผา	
ควอทซ์		สี ขาว มีลักษณะทึบแสง เคลือบไม่หลอมละลาย	
เถ้าแกลบจากโรงงานเผาอิฐ		สี ขาวขุ่น มีลักษณะทึบแสง เคลือบหลอมตัว ผิวกึ่งมันกึ่งด้าน รานละเอียด	
เถ้าแกลบเผา 500 ช. 4 ซม.	ไม่บด	สี ขาว มีลักษณะทึบแสง เคลือบเริ่มหลอมตัว รานละเอียด	
	บด 4 ซม.	สี ขาว มีลักษณะทึบแสง เคลือบเริ่มหลอมตัว รานละเอียด	
	บด 5 ซม.	สี ขาว มีลักษณะทึบแสง เคลือบเริ่มหลอมตัว รานละเอียด	
	ไม่บด	สี ขาว มีลักษณะทึบแสง เคลือบเริ่มหลอมตัว รานละเอียด	
	บด 4 ซม.	สี ขาว มีลักษณะทึบแสง เคลือบเริ่มหลอมตัว รานละเอียด	
	บด 5 ซม.	สี ขาว มีลักษณะทึบแสง เคลือบเริ่มหลอมตัว รานละเอียด	
เถ้าแกลบเผา 700 ช. 4 ซม.	ไม่บด	สี ขาว มีลักษณะทึบแสง เคลือบเริ่มหลอมตัว รานละเอียด	
	บด 4 ซม.	สี ขาว มีลักษณะทึบแสง เคลือบเริ่มหลอมตัว รานละเอียด	
	บด 5 ซม.	สี ขาว มีลักษณะทึบแสง เคลือบเริ่มหลอมตัว รานละเอียด	
	ไม่บด	สี ขาว มีลักษณะทึบแสง เคลือบเริ่มหลอมตัว รานละเอียด	

จากผลการศึกษาลักษณะของเคลือบข้างต้นพบว่า เคลือบที่ได้ลักษณะโดยรวมที่เหมือนกัน คือ มีสีขาวขุ่น และทึบแสงในตัวเอง แต่อย่างไรก็ตาม ลักษณะผิวเคลือบที่ได้มีปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน 3 ลักษณะ คือ เคลือบที่มีผิวมัน เคลือบที่มีผิวกึ่งมันกึ่งด้าน และเคลือบที่ไม่หลอมละลาย สามารถอภิปรายผลได้ดังนี้

4.6.1 ผลของอัตราส่วนผสมของวัตถุดิบ

เคลือบที่ผิวมันแสดงถึงการหลอมของเคลือบตัวเกือบสมบูรณ์ เช่นในเคลือบสูตรที่ 2 ทั้งนี้สาเหตุน่าจะมาจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมของเคลือบ โดยในสูตรที่ 2 นั้นได้เพิ่มสัดส่วนของหินฟันม้า จากเดิม 30 เปอร์เซ็นต์ ในสูตรที่ 1 เป็น 40 เปอร์เซ็นต์ ในสูตรที่ 2 และได้ลดสัดส่วนของหินปูนหรือแคลเซียมคาร์บอเนต จากเดิม 40 เปอร์เซ็นต์ ในสูตรที่ 1 เหลือ 30 เปอร์เซ็นต์ ในสูตรที่ 2 แต่สัดส่วนของควอทซ์หรือแก้วกลบยังคงเท่าเดิม หลังการเผาเคลือบจึงทำให้เคลือบมีแนวโน้มของการหลอมตัวที่ดี เพราะการเพิ่มปริมาณของตัวหลอมละลายพวกหินฟันม้า หรือเฟลด์สปาร์นั้นจะช่วยทำให้เคลือบหลอมตัวดีขึ้น เนื่องจากหินฟันม้าที่ใช้ในสูตรเคลือบคือ เฟลด์สปาร์ชนิดโซดา ซึ่งเฟลด์สปาร์ชนิดนี้มีจุดหลอมตัวค่อนข้างต่ำประมาณ 1,100 ช. (Frank and Janet, 1975)

เคลือบสูตรที่ 3-5 มีลักษณะเคลือบกึ่งมันกึ่งด้านกล่าวคือ มีความวาวเล็กน้อย แต่ไม่ถึงกับมันวาว โดยที่เคลือบในสูตรที่ 3-5 นั้นได้มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมซึ่งได้กำหนดให้ปริมาณ หินปูน หรือแคลเซียมคาร์บอเนต คงที่ไว้ที่ 40 เปอร์เซ็นต์ เพื่อดูการหลอมตัวของเคลือบเปรียบเทียบกับเคลือบสูตรที่ 1 และ 2 แต่อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าเคลือบสูตรที่ 3-5 ได้มีการเพิ่มปริมาณของหินฟันม้า และลดปริมาณของควอทซ์หรือแก้วกลบลง (ตามตารางที่ 4.4) ลักษณะของเคลือบหลังการเผาผิวกึ่งมันกึ่งด้าน คล้ายกันทั้งสูตรที่ 3, 4 และ 5 ทั้งนี้สาเหตุที่ผิวเคลือบมีลักษณะกึ่งมันกึ่งด้านน่าจะเป็นเพราะว่าในอัตราส่วนผสมของเคลือบนั้นมีปริมาณของ หินปูนหรือแคลเซียมคาร์บอเนตค่อนข้างสูง ซึ่งเคลือบไฟสูง โดยทั่วไปจะใช้หินปูนหรือแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นส่วนผสมในเคลือบประมาณ 15-25 เปอร์เซ็นต์ โดยประมาณ ซึ่งถ้าหากมีมากเกินไปก็จะทำให้เคลือบค่อนข้างทนไฟสูง (ไพจิตร อังศิริวัฒน์, 2541) ซึ่งลักษณะของเคลือบจะคล้ายกับเคลือบสูตรที่ 1 โดยปกติแล้ว หินปูน หรือแคลเซียมออกไซด์จะมีจุดหลอมตัวประมาณ 2,570 ช. (Fraser, 1998)

เคลือบสูตรที่ 6 นั้นเมื่อใช้ควอทซ์เป็นส่วนผสมประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ แล้วเผาที่อุณหภูมิ 1,250 ช. ปรากฏว่าเคลือบยังไม่หลอมเหลว ทั้งนี้ น่าจะเป็นเพราะว่าในอัตราส่วนผสมของเคลือบมีปริมาณของควอทซ์ในเคลือบมากเกินไป เนื่องจากควอทซ์มีความทนไฟสูงถึง 1,723 ช. (Norton, 1973) จึงทำให้เคลือบมีจุดหลอมเหลวค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรเดียวกันแล้ว เคลือบที่ใช้แก้วกลบจากโรงงานเผาอิฐ และแก้วกลบที่เตรียมขึ้นเอง เคลือบที่ใช้มีแนวโน้มในการหลอมตัวดีกว่า ซึ่งอาจจะเป็นไปได้ว่ายังมีปัจจัยอีกหลายอย่างที่ทำให้เคลือบที่ใช้แก้วกลบเป็นส่วนผสมมีแนวโน้มของการหลอมตัวที่ดี เช่น องค์ประกอบทางเคมีของแก้วกลบ หรืออาจเป็นผลมาจากพื้นที่ผิวของแก้วกลบมีมากจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่า

4.6.2 ผลของแหล่งซิลิกาที่นำมาใช้เป็นส่วนผสมในเคลือบ

เมื่อเปรียบเทียบการนำควอทซ์มาใช้เป็นส่วนผสมในเคลือบ พบว่าลักษณะของเคลือบที่ใช้ควอทซ์เป็นส่วนผสมโดยทั่วไปการหลอมตัวของเคลือบยังน้อยกว่า แต่เมื่อใช้เถ้าแกลบจากโรงงานเผาอิฐ และเถ้าแกลบที่ได้จากการเตรียมเอง เมื่อนำมาใช้เป็นส่วนผสมในเคลือบพบว่า เคลือบมีการหลอมตัวดี ทั้งนี้ น่าจะเป็นเพราะเถ้าแกลบที่นำมาใช้ถึงแม้จะมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก แต่ในองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบยังมีองค์ประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นตัวช่วยหลอมละลายอยู่ เช่น โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และแมงกานีสออกไซด์ (MnO) ซึ่งในควอทซ์ก็มีออกไซด์ของโลหะปะปนอยู่เช่นกัน แต่ปริมาณของตัวช่วยหลอมละลายบางตัวน้อยกว่าเถ้าแกลบ (ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของควอทซ์แสดงไว้ในภาคผนวก ข (2) แต่อาจมีปัจจัยอย่างอื่นที่ทำให้เคลือบที่ใช้เถ้าแกลบหลอมตัวดีกว่าอาจเนื่องมาจากเถ้าแกลบมีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน หรือเถ้าแกลบมีพื้นที่ผิวมากจึงทำให้ไวต่อปฏิกิริยาได้ดีกว่า (กุลจิรา สุจิโรจน์ และ ปาจริย์ ถาวรนิต, 2542) จึงทำให้เคลือบที่ใช้เถ้าแกลบเป็นส่วนผสมในเคลือบมีการหลอมตัวค่อนข้างดีกว่า ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ อาจมีผลต่อการหลอมตัวก็เป็นได้

4.6.3 ผลของปริมาณของซิลิกาต่อลักษณะเคลือบ

ผลจากการทดลองในบทที่ 3 การเผาเถ้าแกลบที่อุณหภูมิตั้งแต่ 500–700 ซ. เป็นเวลา 4 ชม. นั้น พบว่า เถ้าแกลบที่เผาที่อุณหภูมิ 500–700 ซ. เป็นเวลา 4 ชม. มีปริมาณซิลิกาที่แตกต่างกัน โดยเถ้าแกลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 ซ. มีปริมาณของซิลิกาประมาณ 82 เปอร์เซ็นต์ ส่วนเถ้าแกลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 ซ. มีปริมาณของซิลิกาประมาณ 89 เปอร์เซ็นต์ และเถ้าแกลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 700 ซ. มีปริมาณของซิลิกาประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อนำมาใช้เป็นส่วนผสมในเคลือบหลังการเผาพบว่า ลักษณะของเคลือบที่ได้หลังการเผา มีลักษณะการหลอมตัวของเคลือบใกล้เคียงกันนั้น แสดงให้เห็นว่าปริมาณซิลิกาที่พบในเถ้าแกลบอาจจะไม่มีผลมากนัก แต่ทั้งนี้การที่เคลือบหลอมตัวได้ก็ต้องมีปัจจัยอย่างอื่น ๆ ที่มีผลต่อการหลอมตัวของเคลือบ ซึ่งก็ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้นตามหัวข้อที่ 4.6.2

4.6.4 ผลของขนาดอนุภาคของซิลิกาที่มีต่อการหลอมตัวของเคลือบ

การศึกษาผลของขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบต่อลักษณะการหลอมตัวของเคลือบ โดยใช้เถ้าแกลบที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 3 ช่วงคืออยู่ระหว่าง 85 ไมโครเมตร 18 ไมโครเมตร และ 14 ไมโครเมตร มาใช้เป็นส่วนผสมในเคลือบพบว่า เคลือบมีการหลอมตัวที่ใกล้เคียงกันจะนั้นผลของขนาดอนุภาคไม่มีผลต่อการหลอมละลายของเคลือบ

4.6.5 ปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะของเคลือบ

จากการทดลองพบว่า เคลือบทั้งหมดมีลักษณะขุ่นและทึบแสง ซึ่งจากการทบทวนเอกสารพบว่า การที่เคลือบมีลักษณะทึบแสงอาจเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น การตกผลึกของ แคลเซียมซิงค์ ซิลิเกต หรือแคลเซียมบอเรต (สุธี วัฒนศิริเวช และคณะ, 2543) หรืออาจ

เกิดจากพวกฟองก๊าซ (Gas Bubbles) ที่อยู่ในเนื้อเคลือบและอาจเกิดจากวัตถุดิบที่ใช้เติมลงในเคลือบก็เป็นได้ (Fraser, 1998) สาเหตุที่แท้จริงเคลือบนี้มีลักษณะ ชุ่น และทึบแสง จะมีการวิเคราะห์เพิ่มเติมในหัวข้อที่ 4.10 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฟสของเคลือบและแสดงผลในภาพที่ 4.23-4.25 ต่อไป

4.7 ผลการศึกษาค่าการขยายตัวเชิงความร้อน

ผลการหาค่าความแตกต่างของการขยายตัวเชิงความร้อนของเคลือบและเนื้อดินปืน ได้เลือกสูตรเคลือบที่เป็นตัวแทนคือ สูตรที่ 2 ลักษณะของผิวเคลือบมันวาวและใส การหลอมตัวของเคลือบดี ผู้วิจัยจึงได้เลือกเคลือบสูตรนี้มาเป็นตัวแทน โดยส่วนผสมของเคลือบสูตรที่ 2 ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ในการทดสอบหาค่าความแตกต่างของการขยายตัวเชิงความร้อนของเคลือบเปรียบเทียบกับเนื้อดินปืนชนิดสโตนแวร์ของเคลือบสูตรที่ 2 ได้แสดงผลการทดลองตามภาพที่ 4.8-4.10 เป็นดังนี้

จากภาพที่ 4.8-4.10 แสดงการวัดค่าความแตกต่างของการขยายตัวเชิงความร้อนระหว่างเคลือบ และเนื้อดินปืนจากภาพในเคลือบสูตรที่ 2 พบว่าเคลือบที่ใช้ควอทซ์เป็นส่วนผสมมีค่าการขยายตัวเชิงความร้อนแตกต่างจากเนื้อดินปืนประมาณ 2.4×10^{-3} / ช. เคลือบ มีลักษณะการร้าวเป็นเส้นห่าง ๆ ซึ่งเคลือบที่มีการร้าวแบบนี้เคลือบจะตกอยู่ภายใต้แรงเค้นที่ต่ำ (Low Stress) รอยร้าวที่พบบนผิวเคลือบจึงเป็นรอยร้าวแบบห่าง ๆ (Lawrence, 1916) ส่วนเคลือบที่ใช้แก้วจากโรงงานเผาอิฐ มีค่าการขยายตัวเชิงความร้อนแตกต่างจากเนื้อดินปืนประมาณ 4.0×10^{-3} / ช. เคลือบมีการร้าวละเอียดมากที่สุด และเคลือบที่ใช้แก้วจากที่ได้จากการเตรียมขึ้นเอง มีค่าการขยายตัวเชิงความร้อนแตกต่างจากเนื้อดินปืนประมาณ 2.6×10^{-3} / ช. เคลือบมีการร้าวละเอียดเช่นกัน และผลจากการหาค่าความแตกต่างของการขยายตัวเชิงความร้อนของเคลือบสูตรที่ 2 แสดงไว้ในตารางที่ 4.7

ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบทั้ง 3 แบบหาได้จากกราฟการขยายตัวทางความร้อนของเคลือบและเนื้อดินปืนตามภาพที่ 4.8-4.10 แสดงไว้ในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.7 ค่าความแตกต่างของการขยายตัวเชิงความร้อนของเคลือบสูตรที่ 2 เปรียบเทียบกับเนื้อดินปั้นชนิดสโตนแวร์

แหล่งซึลิกา	อุณหภูมิเปรียบเทียบ	$\frac{dL_G}{L_0}$	$\frac{dL_B}{L_0}$	$\frac{dL_G}{L_0} - \frac{dL_B}{L_0}$
Q	838.8 ซ.	7.6×10^{-3} ซ.	5.2×10^{-3} ซ.	2.4×10^{-3} ซ.
RHA1	925.3 ซ.	9.5×10^{-3} ซ.	5.5×10^{-3} ซ.	4.0×10^{-3} ซ.
RHA2	930.0 ซ.	8.2×10^{-3} ซ.	5.6×10^{-3} ซ.	2.6×10^{-3} ซ.

หมายเหตุ Q = ควอทซ์ RHA1 = แก้วจากโรงงานเผาอิฐ RHA2 = แก้วเคลือบที่เตรียมเองเผา 700 ซ. 4 ซม. บดที่ 4 ซม.

จากภาพที่ 4.8-4.10 ความหมายของตัวย่อแสดงไว้ในภาพ 4.8-4.10 ดังนี้
อุณหภูมิ คือ อุณหภูมิที่ทำการศึกษา

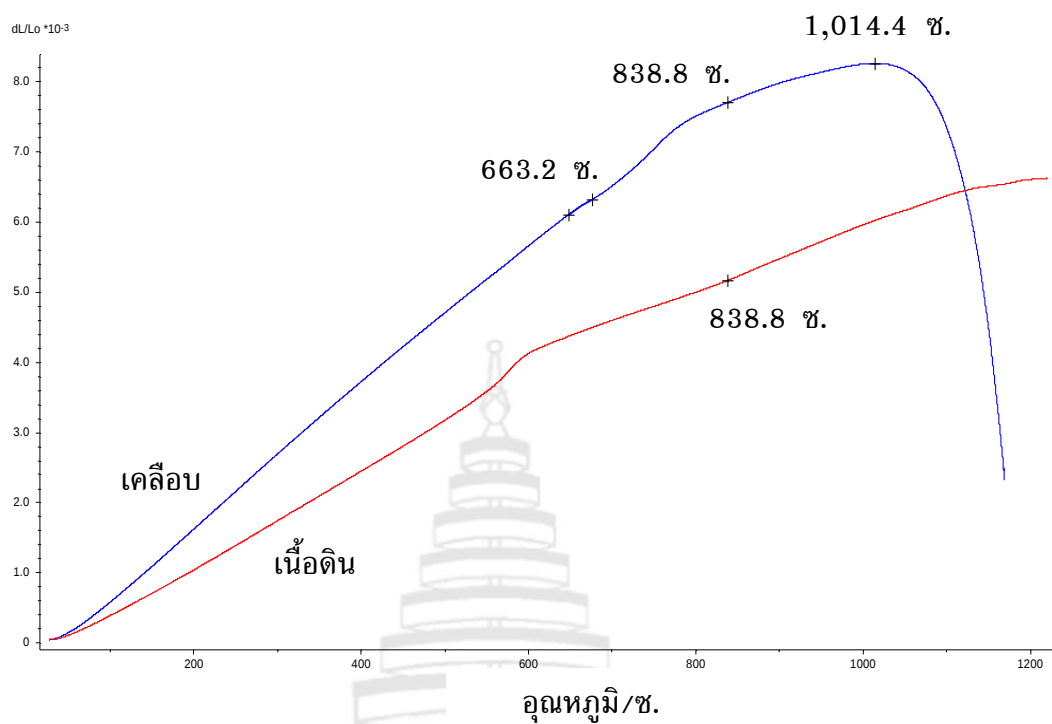
$\frac{dL_G}{L_0}$ คือ อัตราส่วนความยาวที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับความยาวเริ่มต้นของเคลือบ

$\frac{dL_B}{L_0}$ คือ อัตราส่วนความยาวที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับความยาวเริ่มต้นของเนื้อดินปั้น

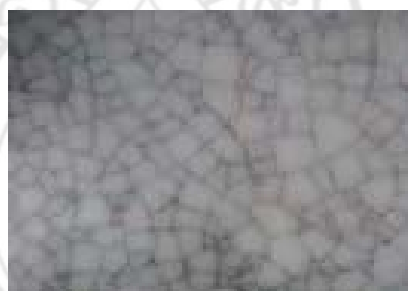
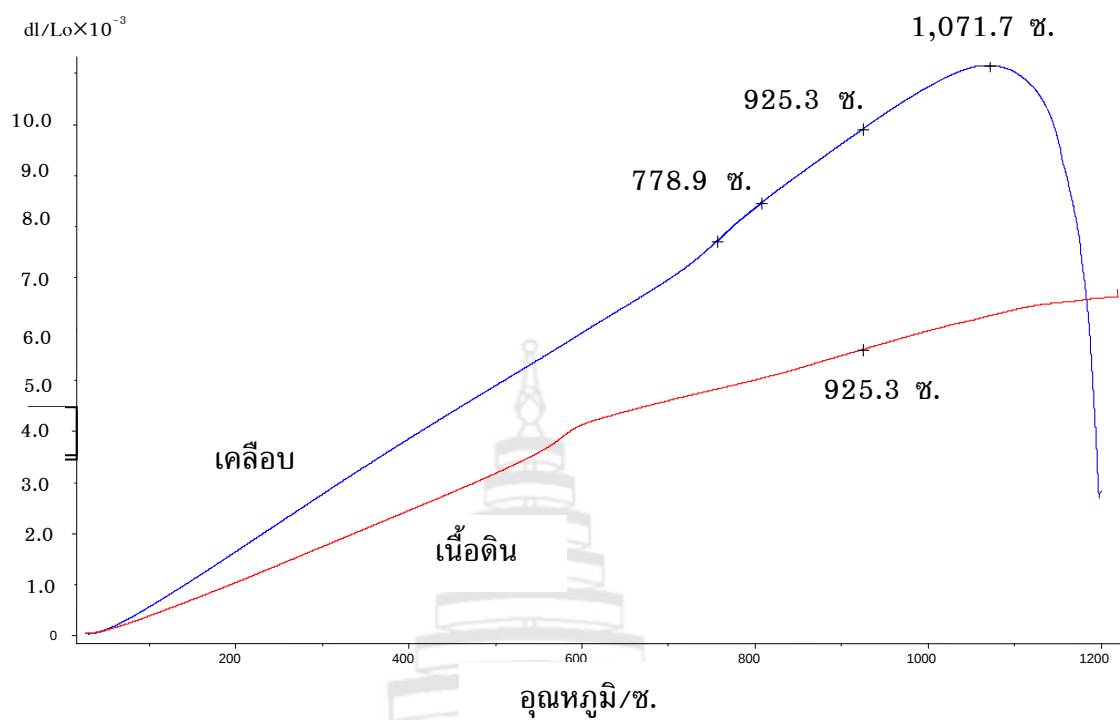
ตารางที่ 4.8 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบสูตรที่ 2 เปรียบเทียบกับเนื้อดินปั้นชนิดสโตนแวร์

เคลือบและเนื้อดิน	สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนวัดช่วง อุณหภูมิระหว่าง 25-350 ซ. ($\times 10^{-6}$ มม./มม. ซ.)
Q	9.8
RHA1	10.5
RHA2	10.2
เนื้อดิน	6.1

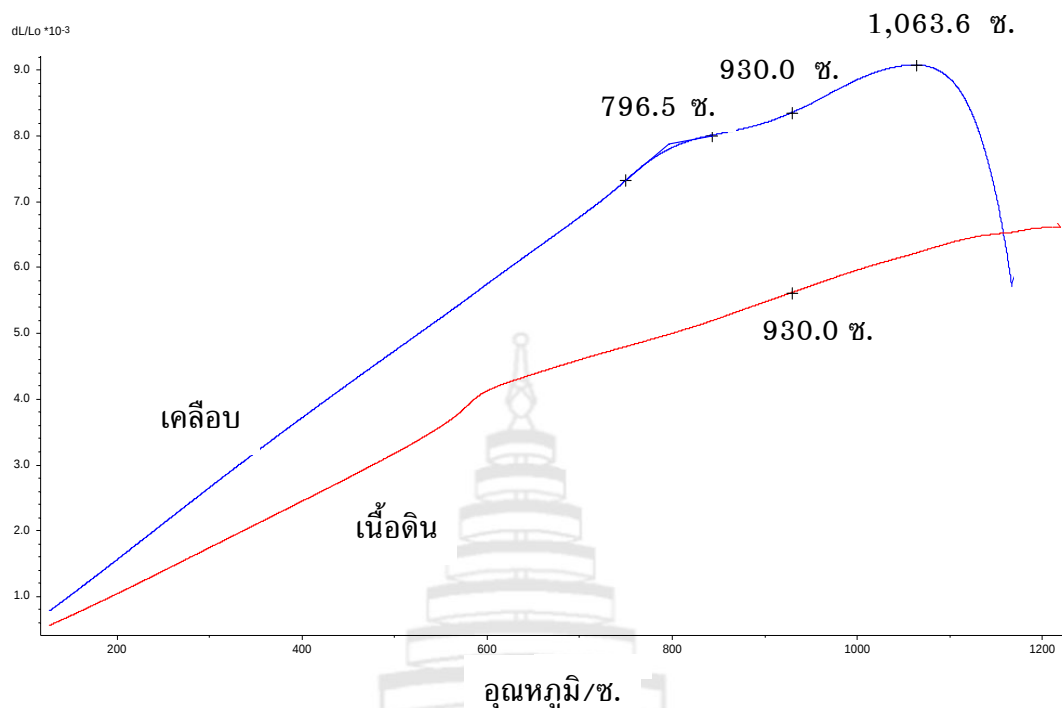
หมายเหตุ Q = ควอทซ์ RHA1 = แก้วจากโรงงานเผาอิฐ RHA2 = แก้วเคลือบที่เตรียมเองเผา 700 ซ. 4 ซม. บดที่ 4 ซม.



ภาพที่ 4.8 ค่าความแตกต่างของการขยายตัวเชิงความร้อนของเคลือบและเนื้อดินป้อนสูตรที่ 2 ใช้ควอทซ์เป็นส่วนผสมในเคลือบ



ภาพที่ 4.9 ค่าความแตกต่างของการขยายตัวเชิงความร้อนของเคลือบและเนื้อดินป็นสูตรที่ 2 ใช้ถ้ำเกลบจากโรงงานเผาอิฐเป็นส่วนผสมในเคลือบ



ภาพที่ 4.10 ค่าความแตกต่างของการขยายตัวเชิงความร้อนของเคลือบและเนื้อดินบนสูตรที่ 2 ใช้เถ้าแกลบที่เตรียมเองเผา 700 ซ. 4 ชม. บดที่ 4 ซม. เป็นส่วนผสมในเคลือบ

ผลการวัดค่าความแตกต่างของการขยายตัวเชิงความร้อนของเคลือบและเนื้อดินบน (ตามตารางที่ 4.7) พบว่า เคลือบที่ใช้ส่วนผสมของเถ้าแกลบจากโรงงานเผาอิฐ มีค่าการขยายตัวเชิงความร้อนของเคลือบสูงสุดอยู่ในช่วง 4.0×10^{-3} ซ. รองลงมาคือ เคลือบที่ใช้เถ้าแกลบที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 700 ซ. เป็นเวลา 4 ชม. บดที่ 4 ซม. มีค่าการขยายตัวเชิงความร้อนของเคลือบ 2.6×10^{-3} ซ. และค่าการขยายตัวเชิงความร้อนน้อยที่สุดคือ เคลือบที่ใช้ควอทซ์ มีค่าคือ 2.4×10^{-3} ซ. ซึ่งความแตกต่างของค่าการขยายตัวเชิงความร้อนของเคลือบคาดว่าเกิดจากเถ้าแกลบเกิดการหลอมละลายได้ดีกว่าหรือเกิดเป็นแก้วได้มากกว่าจึงทำให้มีค่าการขยายตัวเชิงความร้อนมากตามไปด้วย (Lawrence, 1916) และนอกจากนี้อาจมาจากองค์ประกอบของ

วัตถุดิบที่ใช้เป็นส่วนผสมในเคลือบก็เป็นได้ ส่วนการหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบและเนื้อดินปั้น ตามตารางที่ 4.8 พบว่าเคลือบที่ใช้ส่วนผสมของเถ้าแกลบจากโรงงานเผาอิฐ มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนสูงสุด คือ 10.5×10^{-6} มม/มม.ซ. รองลงมาคือเคลือบที่ใช้เถ้าแกลบเตรียมเอง มีค่า 10.2×10^{-6} มม/มม.ซ. ส่วนเคลือบที่ใช้ควอทซ์มีค่าน้อยสุดคือ 9.8×10^{-6} มม/มม.ซ.

4.8 ผลการศึกษาจุดเริ่มหลอมเหลวของเคลือบ

ผลการศึกษาจุดเริ่มหลอมเหลวได้เลือกสูตรเคลือบที่เป็นตัวแทนคือ สูตรที่ 2 ลักษณะของผิวเคลือบมันวาวและใส การหลอมตัวของเคลือบดี จึงได้เลือกเคลือบสูตรนี้มาเป็นตัวแทน โดยส่วนผสมของเคลือบสูตรที่ 2 ได้แสดงไว้ตามตารางที่ 4.1

ผลการหาจุดเริ่มหลอมเหลวของเคลือบ โดยใช้เครื่องวัดค่าการขยายตัวเชิงความร้อนในช่วงอุณหภูมิเริ่มตั้งแต่ 37-1,200 ซ. ที่อัตราความร้อน 5 ซ. ต่อนาที ผลจากการศึกษาจุดเริ่มหลอมเหลวของเคลือบในสูตรที่ 2 ได้แสดงไว้ตามภาพที่ 4.11-4.13 ดังนี้

ความหมายของตัวย่อที่ได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.11-4.13 ดังนี้

$\frac{dL}{L_0}$ คือ การเปลี่ยนแปลงความยาวของชิ้นทดสอบต่อความยาวเดิมเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป

Onset คือ ค่าแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงของวัตถุได้จากการลากเส้นตัดกันในแนวแกน ทั้งสอง

จากภาพที่ 4.11-4.13 แสดงจุดเริ่มหลอมเหลวของเคลือบสูตรที่ 2 ใช้ควอทซ์หรือเถ้าแกลบเป็นส่วนผสมในเคลือบ ผลปรากฏว่าเคลือบที่ใช้ควอทซ์หรือเถ้าแกลบเป็นส่วนผสมในเคลือบมีจุดเริ่มหลอมเหลวที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งผลจากการหาจุดเริ่มหลอมเหลวของเคลือบแสดงไว้ในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 จุดเริ่มหลอมเหลวของเคลือบสูตรที่ 2

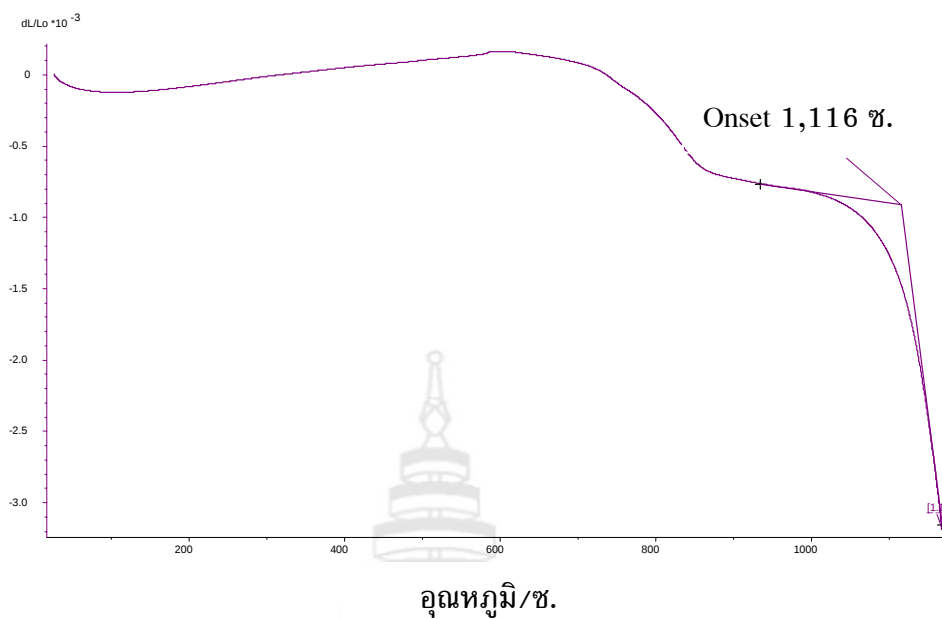
แหล่งซิลิกา	จุดเริ่มหลอมเหลวของเคลือบ
Q	1,116 ช.
RHA 1	1,117 ช.
RHA 2	1,113 ช.

หมายเหตุ Q = ควอทซ์ , RHA 1 = ถ้ำจากโรงงานเผาอิฐ, RHA 2 = ถ้ำเกลบที่เตรียมเอง
เผา 700 ช. 4 ชม. บดที่ 4 ชม.

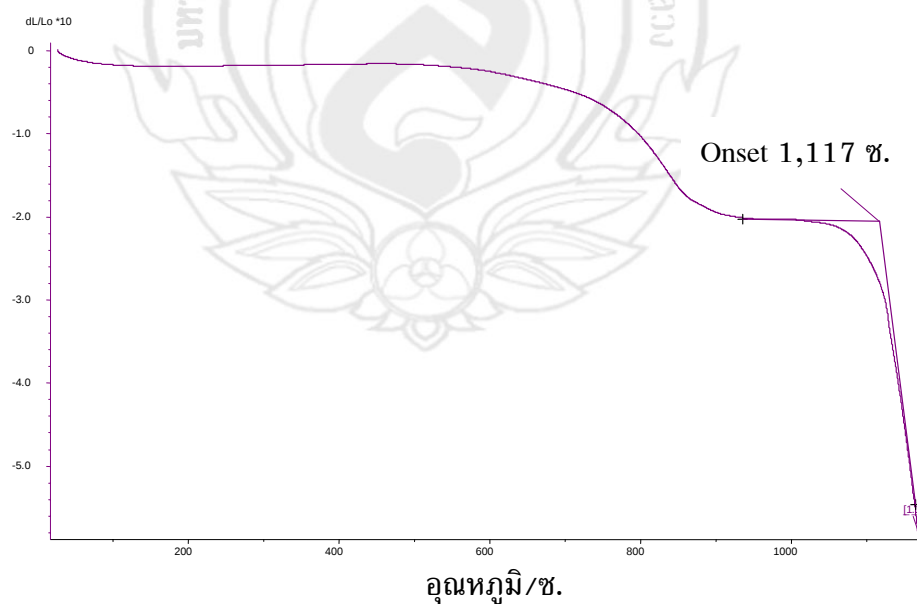
จากตารางที่ 4.9 เป็นการแสดงให้เห็นถึงจุดเริ่มหลอมเหลวของเคลือบที่ใช้ควอทซ์หรือถ้ำเกลบเป็นส่วนผสมในเคลือบพบว่า อุณหภูมิที่เคลือบเริ่มหลอมเหลวของเคลือบสูตรที่ 2 นั้นอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน และจากภาพที่ 4.11-4.13 นั้นสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของเคลือบในระหว่างการเผาดังนี้ ช่วงแรกของการเปลี่ยนแปลงของเคลือบยังไม่เกิดปฏิกิริยาใดจนกระทั่งอุณหภูมิช่วงประมาณ 800-950 ช. เคลือบเกิดการหดตัว เนื่องจากการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) กลายเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซึ่ง Frank and Janet (1975) กล่าวว่า แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เมื่อผ่านการเผาช่วงอุณหภูมิประมาณ 825 ช. แคลเซียมคาร์บอเนตจะเปลี่ยนสภาพเป็นแคลเซียมออกไซด์ ส่วนคาร์บอนไดออกไซด์จะสลายตัวกลายเป็นก๊าซไปแสดงดังสมการ



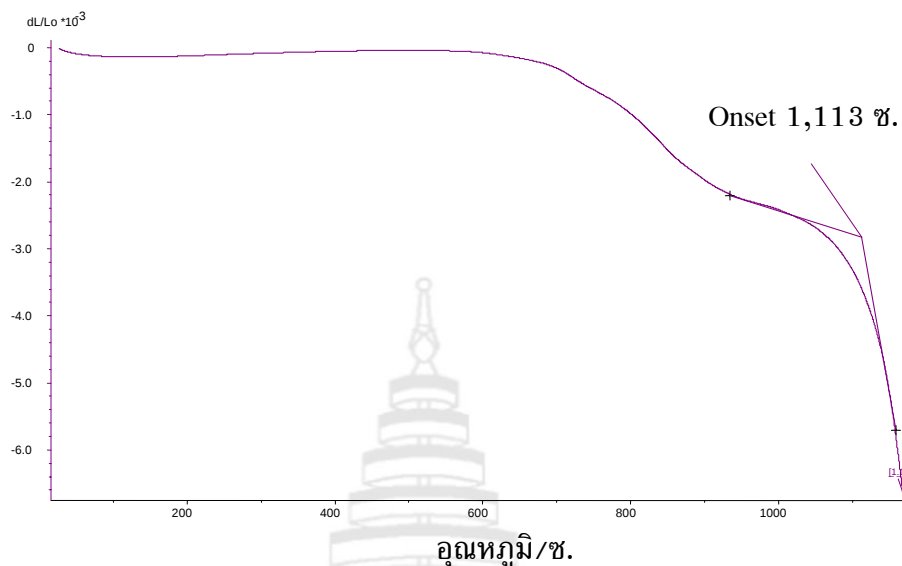
หลังจากนั้นในช่วงอุณหภูมิประมาณ 1,050-1,100 ช. ขึ้นไปหินฟืนม้าที่อยู่ในรูปของเฟลด์สปาร์เริ่มหลอมละลายและจะมีเนื้อแก้ว (Glassy Phase) เกิดขึ้น (Lawrence, 1916)



ภาพที่ 4.11 จุดเริ่มหลอมเหลวของเคลือบสูตรที่ 2 ใช้ควอทซ์เป็นส่วนผสมในเคลือบ



ภาพที่ 4.12 จุดเริ่มหลอมเหลวของเคลือบสูตรที่ 2 ใช้เถ้าแกลบที่ได้จากโรงงานเผาอิฐเป็นส่วนผสมในเคลือบ



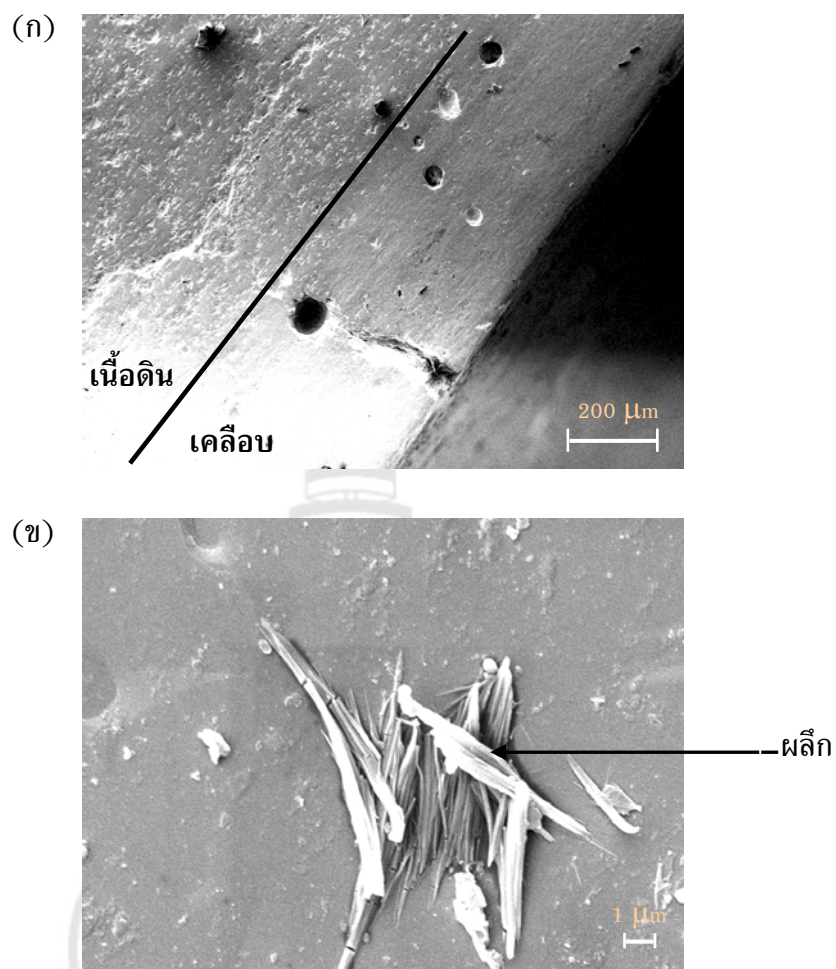
ภาพที่ 4.13 จุดเริ่มหลอมเหลวของเคลือบสูตรที่ 2 ใช้แก้วเคลือบเผาอุณหภูมิ 700 ซ.
เป็นเวลา 4 ชม. บดที่ 4 ซม. เป็นส่วนผสมในเคลือบ

4.9 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของเคลือบ

เนื่องจากตัวอย่างชิ้นงานมีจำนวนมากการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของเคลือบจึงเลือกเคลือบในสูตรที่ 2 มาศึกษาเปรียบเทียบเท่านั้น การศึกษาทำโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด ซึ่งผลจากการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของเคลือบได้แสดงไว้ตามภาพดังนี้

4.9.1 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของเคลือบที่ใช้ควอทซ์

ภาพที่ 4.14 แสดงภาพถ่ายบริเวณพื้นผิวของเคลือบจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด จากภาพจะเห็นว่า มีฟองอากาศภายใต้ชั้นผิวของเคลือบ (ภาพ ก) มีลักษณะเป็นหลุมกระจายอยู่ซึ่งฟองอากาศเหล่านี้อาจมีสาเหตุมาจากการสลายตัวของวัตถุดิบที่เป็นส่วนผสมในเคลือบ เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต หรืออาจเกิดจากพวกฟองอากาศในขณะชุบเคลือบ ซึ่งจะมีฟองอากาศอยู่เต็มขณะส่วนผสมของเคลือบหลอมตัวฟองอากาศบางส่วนหนีออกไปได้ แต่ส่วนใหญ่จะถูกกักอยู่ในเนื้อเคลือบ (Harry, 1998) นอกจากนี้ เมื่อตรวจบริเวณพื้นผิวของเคลือบและชั้นของเคลือบพบว่า มีลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะคล้ายรูปเข็ม (ตามภาพที่ 4.14 ภาพ ข) เกิดขึ้น และกระจุกตัวอยู่ในบางบริเวณพื้นผิวของเคลือบ



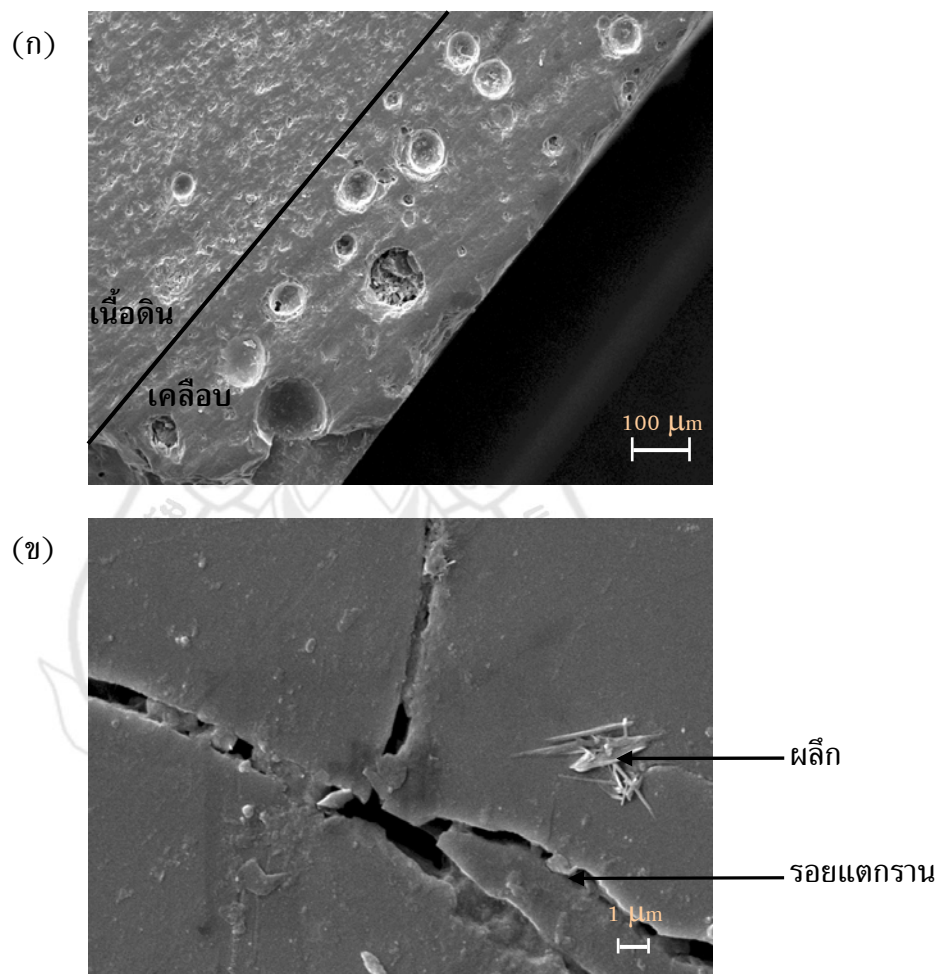
ภาพที่ 4.14 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของเคลือบที่ใช้ควอทซ์ เป็นส่วนผสมในเคลือบ

(ก) ภาพตัดขวางชั้นทดสอบถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด
 กำลังขยาย 100 เท่า

(ข) ภาพขยายพื้นผิวบริเวณที่พบผลึกถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิด
 ส่องกราด กำลังขยาย 5,000 เท่า

4.9.2 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของเคลือบที่ใช้เถ้าแกลบจากโรงงานเผาอิฐ

จากการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของเคลือบ ที่ใช้เถ้าแกลบจากโรงงานเผาอิฐ เป็นส่วนผสมในเคลือบพบว่า บริเวณในชั้นของเคลือบจะมีฟองอากาศอยู่เป็นจำนวนมากและเมื่อตรวจสอบบริเวณพื้นผิวของเคลือบจะพบผลึกลักษณะคล้ายกับที่พบในเคลือบตัวอย่างแรกที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของเคลือบ ซึ่งภาพแสดงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของเคลือบได้แสดงไว้ตามภาพที่ 4.15



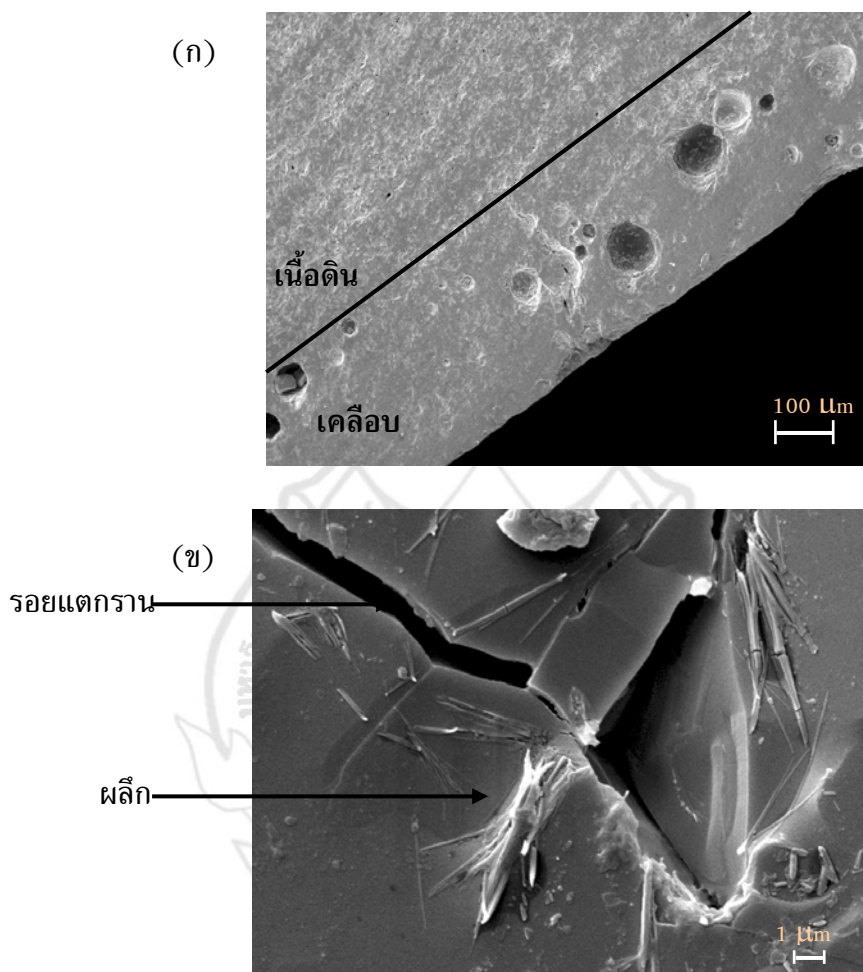
ภาพที่ 4.15 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของเคลือบที่ใช้เถ้าแกลบจากโรงงานเผาอิฐ
เป็นส่วนผสมในเคลือบ

(ก) ภาพตัดขวางชั้นทดสอบถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่อง
กราด กำลังขยาย 100 เท่า

(ข) ภาพขยายบริเวณพื้นผิวของเคลือบถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน
ชนิดส่องกราด กำลังขยาย 5,000 เท่า

4.9.3 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของเคลือบที่ใช้เถ้าแกลบที่เตรียมเอง

โดยทั่วไปในตัวอย่างนี้ พบว่ามีลักษณะคล้ายตัวอย่างเคลือบที่เตรียมโดยการควอทซ์ เป็นส่วนผสมในเคลือบ และเมื่อตรวจสอบบริเวณพื้นผิวของเคลือบจะพบผลึกลักษณะเดียวกันกับที่พบในเคลือบ 2 ตัวอย่างแรกที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของเคลือบ ซึ่งกระจายตัวอยู่ทั่วพื้นผิวเคลือบ โดยภาพแสดงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของเคลือบได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.16



ภาพที่ 4.16 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของเคลือบที่ใช้เถ้าแกลบ ที่ได้จากการเตรียมขึ้นเอง (เผาที่อุณหภูมิ 700 ช. เป็นเวลา 4 ชม. และบดเป็นเวลา 4 ชม.) เป็นส่วนผสมในเคลือบ

(ก) ภาพตัดขวางขึ้นทดสอบถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด กำลังขยาย 100 เท่า

(ข) ภาพขยายบริเวณพื้นผิวเคลือบถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด กำลังขยาย 5,000 เท่า

จากภาพแสดงโครงสร้างทางจุลภาคของเคลือบพบว่าลักษณะของเคลือบที่เกิดขึ้นนั้นมีลักษณะที่พบเป็นดังนี้

ฟองอากาศที่พบภายในชั้นของเคลือบ จากการตรวจสอบโดยภาพตัดขวางนั้นน่าจะมีสาเหตุมาจากชั้นของเคลือบ เมื่อมีการชุบเคลือบใหม่ๆ จะมีรูพรุนอยู่ซึ่งจะมีอากาศอยู่เต็ม ขณะที่ส่วนผสมของเคลือบหลอมตัวฟองอากาศบางส่วนจะหนีออกไปได้ แต่ส่วนใหญ่จะถูกกักอยู่ในชั้นของเคลือบ นอกจากนี้ยังมีฟองอากาศที่เกิดจากการสลายตัวของพวกคาร์บอเนตในวัตถุดิบที่ใช้เป็นส่วนผสมในเคลือบ และเมื่อเข้าใกล้จุดสุกตัวของเคลือบฟองแก๊สเล็กๆ ในเคลือบจะเริ่มเกิดการประสานกัน จนกระทั่งถึงจุดสุกตัว ไม่ว่าจะเป็นเนื้อผลิตภัณฑ์ หรือเคลือบจะกักขังแก๊สอยู่ในตัวเอง โดยปกติถ้าชั้นของเคลือบหนา การขจัดฟองอากาศก็จะเป็นไปอย่างช้า อีกประการหนึ่ง คือ ถ้าเคลือบมีความหนืดต่ำการขจัดฟองอากาศก็จะเป็นไปอย่างรวดเร็ว (ปริดา พิมพ์ขาวขำ, 2539) เมื่อเปรียบเทียบกับงานของผู้วิจัยก็พบว่า จากการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคที่ถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด จะพบฟองอากาศจำนวนมากในเคลือบที่ใช้เถ้าแกลบจากโรงงานเผาอิฐบริเวณชั้นในของเคลือบ เนื่องจากเถ้าแกลบจากโรงงานเผาอิฐจะมีอินทรีย์สารปะปนอยู่เป็นจำนวนมากเมื่อเผาจะเกิดการสลายตัวจึงเป็นสาเหตุทำให้เกิดฟองอากาศในชั้นเคลือบ ซึ่งจากสาเหตุดังกล่าวสามารถดูผลการหาค่าน้ำหนักสูญหายหลังการเผาของเถ้าแกลบจากโรงงานเผาอิฐได้ในภาคผนวก ข (1) ส่วนเคลือบที่ใช้เถ้าแกลบจากการเตรียมเอง และควอทซ์ จะพบฟองอากาศในชั้นของเคลือบค่อนข้างน้อย เนื่องจากเถ้าแกลบที่เตรียมขึ้นเอง และควอทซ์มีปริมาณของอินทรีย์สารที่พบน้อยกว่าเถ้าแกลบจากโรงงานเผาอิฐ

โดยทั่วไป ลักษณะเคลือบที่ขุ่น หรือทึบแสง มีสาเหตุมาจากพวกฟองอากาศ การตกผลึกที่พบในชั้นและพื้นผิวของเคลือบ จากการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด ของภาพตัดขวางชั้นทดสอบและพื้นผิวเคลือบพบว่า จะมีผลึกเกิดขึ้นทั้งในชั้นของเคลือบ และบริเวณพื้นผิวของเคลือบกระจายตัวกันอยู่ จึงทำให้บริเวณนั้นมีลักษณะขุ่น (สุธี วัฒนศิริเวช และคณะ, 2543) ซึ่งสอดคล้องกับ Richard and Douglas (2000) ที่กล่าวว่า เคลือบที่มีลักษณะด้าน หรือเคลือบทึบแสง อาจมีสาเหตุมาจากการตกผลึกในเคลือบระหว่างการเย็นตัวของเคลือบ จึงทำให้เคลือบมีลักษณะทึบ ผลึกที่พบในเคลือบ เช่น ซิงค์ซิลิเกต (Zinc Silicate) แคลเซียมซิลิเกต (Calcium Silicate or Wollastonite) หรือ อะนอร์ไทท์ (Anorthite) เพื่อศึกษาปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในเคลือบ ผู้วิจัยจึงทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเฟสของเคลือบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ผลของการทดลองได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.10

4.10 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฟสของเคลือบ

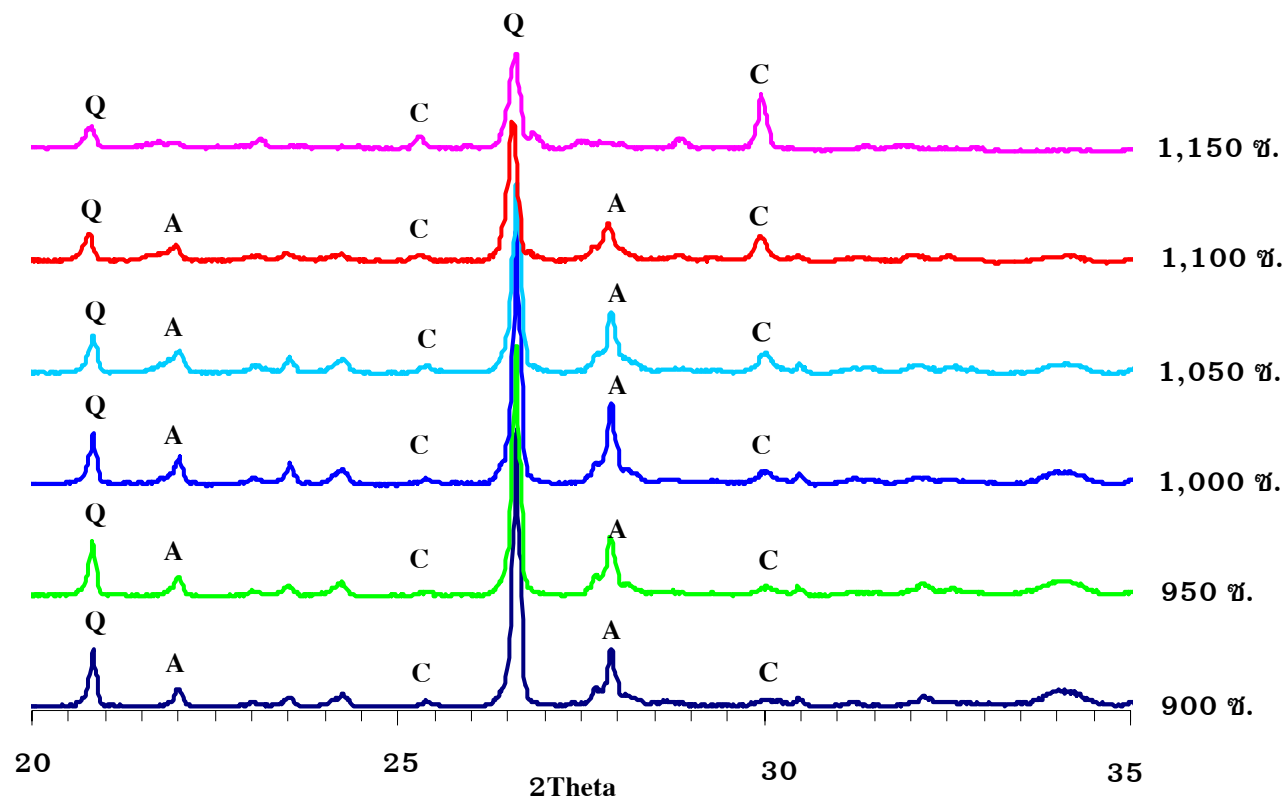
จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเฟสของเคลือบสูตรที่ 2 ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ของผงเคลือบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิตั้งแต่ 900–1,150 ช. ผลจากการศึกษาเป็นดังนี้

ที่อุณหภูมิ 900 ช. พบพีคของแร่ควอทซ์ (SiO_2) แร่โซดาเฟลด์สปาร์ ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$) และแคลเซียมซิลิเกต (CaSiO_3) ซึ่งเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จะสังเกตเห็นความสูงของพีคของแร่ควอทซ์ และแร่โซดาเฟลด์สปาร์ลดลงน่าจะเนื่องมาจากที่อุณหภูมิประมาณ 1,100 ช. แร่โซดาเฟลด์สปาร์จะเริ่มหลอมตัวและเกิดปฏิกิริยากับควอทซ์กลายเป็นโครงสร้างของแก้ว (Lawrence, 1916) ซึ่งเมื่อโครงสร้างดังกล่าวเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จะทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนในรูปของแคลเซียมซิลิเกต และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตจะสูงมากขึ้นด้วย ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเฟสของเคลือบที่ใช้ควอทซ์แสดงไว้ตามภาพที่ 4.17

จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเฟสของเคลือบที่ใช้เถ้าแกลบจากโรงงานเผาอิฐเป็นส่วนผสมพบว่า ให้ผลคล้ายคลึงกับการเปลี่ยนแปลงเฟสของเคลือบที่ใช้ควอทซ์เป็นส่วนผสม โดยที่อุณหภูมิตั้งแต่ 900 ช. จะพบพีคของแคลเซียมซิลิเกต แต่อย่างไรก็ตามจากภาพดังกล่าวก็ยังไม่พบพีคของแร่ควอทซ์อยู่ เมื่อพิจารณาจากผลวิเคราะห์แร่โซดาเฟลด์สปาร์ด้วย XRD ตามภาคผนวก ค จะพบพีคของแร่ควอทซ์ด้วยเช่นกัน ฉะนั้นพีคของควอทซ์ที่พบในเคลือบจึงน่าจะเกิดจากควอทซ์ที่ปะปนมากับแร่โซดาเฟลด์สปาร์ ซึ่งผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเฟสของเคลือบที่ใช้เถ้าแกลบจากโรงงานเผาอิฐเป็นส่วนผสมได้แสดงไว้ตามภาพที่ 4.18

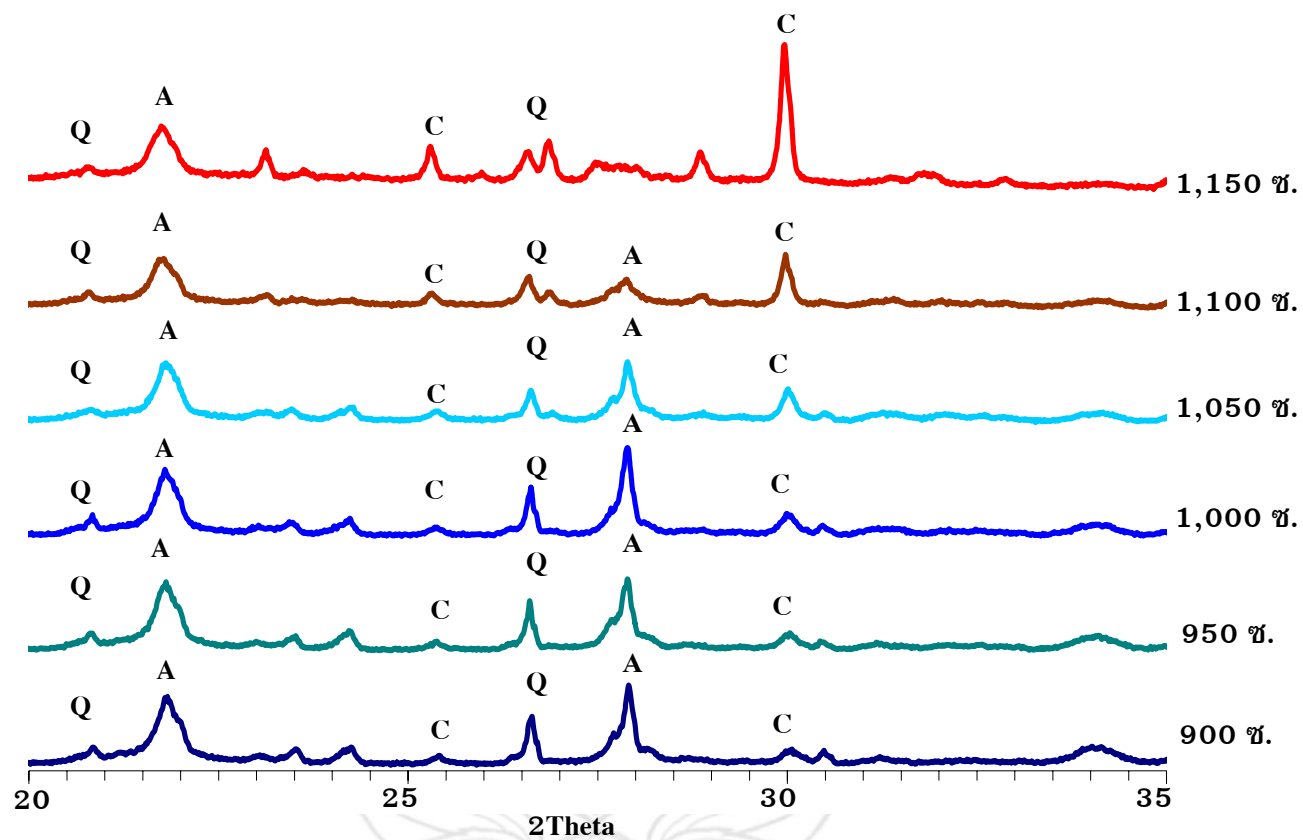
ผลจากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฟสของเคลือบที่ใช้เถ้าแกลบที่ได้จากการเตรียมเองเป็นส่วนผสมพบว่า ให้ผลคล้ายคลึงกับเคลือบที่ใช้เถ้าแกลบจากโรงงานเผาอิฐ และควอทซ์ ซึ่งผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเฟสของเคลือบที่ใช้เถ้าแกลบเตรียมเองได้แสดงไว้ตามภาพที่ 4.19

จากผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเฟสของเคลือบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่าเคลือบทั้ง 3 แบบจะมี แร่โซดาเฟลด์สปาร์ แร่ควอทซ์ และแคลเซียมซิลิเกต เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น แร่ควอทซ์และแร่โซดาเฟลด์สปาร์จะมีปริมาณลดลง แต่แคลเซียมซิลิเกต กลับมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ซึ่งสาเหตุที่ทำให้เคลือบมีสีขาวขุ่น และทึบแสง จึงน่าจะเกิดจากการตกผลึกในเคลือบระหว่างการเย็นตัวของเคลือบโดยผลึกที่พบในเคลือบน่าจะเป็นแคลเซียมซิลิเกต



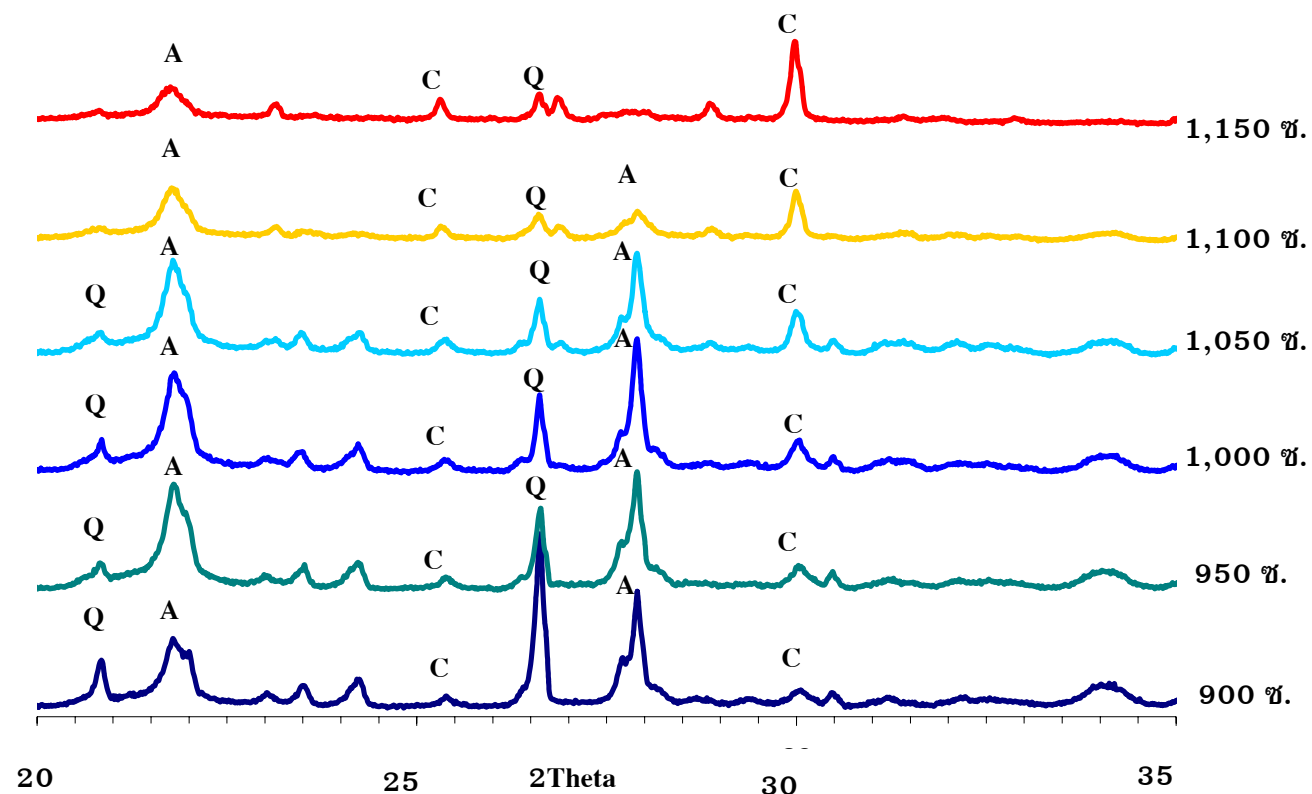
Q = แร่ควอตซ์ , A = แร่โซดาเฟลด์สปาร์ , C = แคลเซียมซิลิเกต

ภาพที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเฟสของเคลือบที่ใช้ควอตซ์ เป็นส่วนผสมในเคลือบด้วยเทคนิค XRD



Q = แร่ควอตซ์ , A = แร่โซดาเฟลด์สปาร์ , C = แคลเซียมซิลิเกต

ภาพที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเฟสของเคลือบที่ใช้แก้วเคลือบที่ได้จากโรงงานเผาอิฐ เป็นส่วนผสมในเคลือบด้วยเทคนิค XRD



Q = แร่ควอตซ์ , A = แร่โซดาเฟลด์สปาร์ , C = แคลเซียมซิลิเกต

ภาพที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเฟสด้วยเทคนิค XRD ของเคลือบที่ใช้ถ้าเกลบที่ได้จากการเตรียมขึ้นเอง เเผที่อุณหภูมิ 700 ซ. เป็นเวลา 4 ชม. บด 4 ชม. ใช้เป็นส่วนผสมในเคลือบ

บทที่ 5

การนำควอทซ์และแร่กลับไปใช้กับเคลือบสูตรอื่นๆ

จากการศึกษานำควอทซ์ หรือแร่กลับไปใช้เป็นส่วนผสมในเคลือบสูตรมาตรฐาน และสูตรอื่นๆ ซึ่งได้แก่ เคลือบใส และเคลือบที่มีการเติมออกไซด์ของโลหะให้สีลงในสูตรเคลือบคือ เคลือบสนิมเหล็ก เคลือบจุดสีม่วง เคลือบสีน้ำเงิน และเคลือบสีเขียวอมน้ำเงิน โดยนำน้ำเคลือบดังกล่าวไปชุบผลิตภัณฑ์ที่ทำจากเนื้อดินปั้นชนิดสโตนแวร์ จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ชุบเคลือบเสร็จแล้วไปเผาด้วยเตาแก๊ส ซึ่งเผาตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิสูงสุดคือ 1,250 ช. เป็นเวลา 8 ชม. และเย็นไฟที่อุณหภูมิสูงสุดเป็นเวลา 30 นาที เผาในบรรยากาศแบบออกซิเดชัน ผลหลังการเผาเคลือบพบว่า

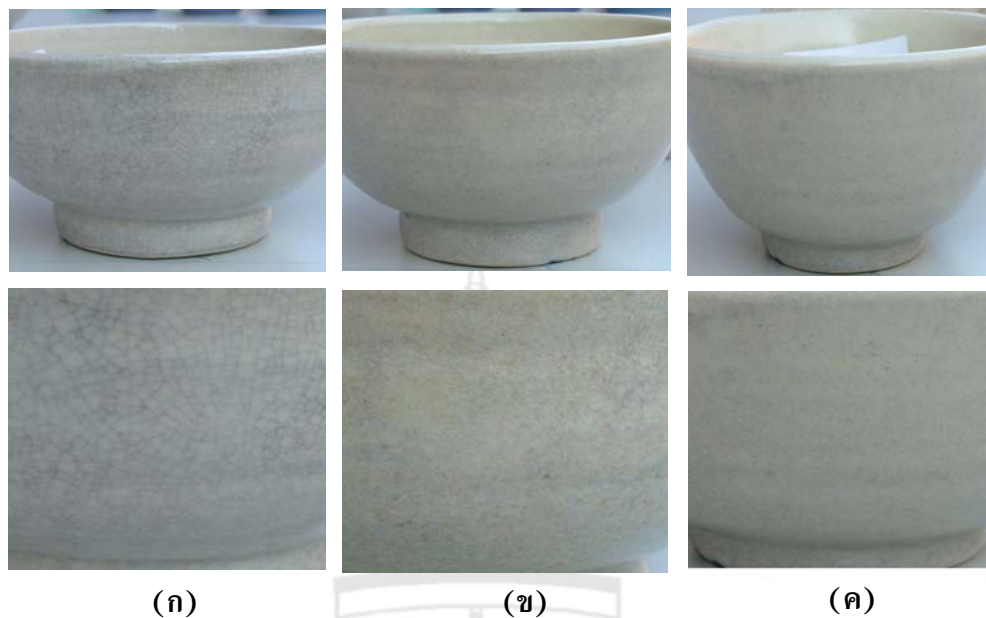
เคลือบใส (ภาพที่ 5.1) ลักษณะของเคลือบที่ใช้ควอทซ์เป็นส่วนผสม (ภาพ ก) ผิวเคลือบกึ่งมันกึ่งด้าน มีการแตกรานของเคลือบที่ละเอียด ส่วนเคลือบที่ใช้แร่กลับไปเตรียมเอง และแร่กลับไปจากโรงงานเผาอิฐ (ภาพ ข และ ค) พบว่าให้ผลคล้ายคลึงกัน คือ ผิวกึ่งมัน เคลือบแตกรานละเอียดมาก

เคลือบสนิมเหล็ก (ภาพที่ 5.2 ก-ค) ลักษณะของเคลือบทั้งสามมีความคล้ายคลึงกัน คือ ผิวมันวาว

เคลือบจุดสีม่วง (ภาพที่ 5.3 ก-ค) เคลือบทั้งสามแบบมีลักษณะคล้ายคลึงกัน คือ ผิวมันและมีจุดสีม่วงกระจายอยู่บนผิวเคลือบ

เคลือบสีน้ำเงิน (ภาพที่ 5.4) ลักษณะเคลือบที่ใช้ควอทซ์และแร่กลับไปจากโรงงานเผาอิฐ (ภาพ ก และ ค) เคลือบทั้งสองแบบผิวกึ่งมันกึ่งด้านเหมือนกัน ส่วนเคลือบที่ใช้แร่กลับไปเตรียมเอง (ภาพ ข) เคลือบมีผิวมันใสและมีผลึกเล็กๆ สีขาวเกิดขึ้นที่ผิวเคลือบ

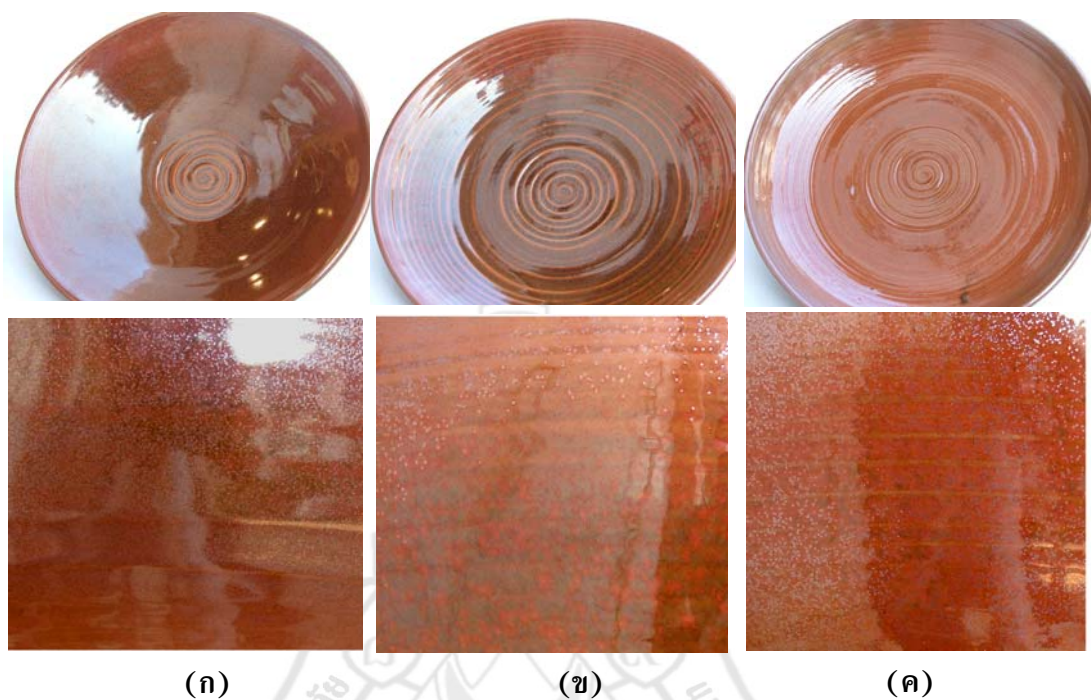
เคลือบสีเขียวอมน้ำเงิน (ภาพที่ 5.5) เคลือบที่ใช้ควอทซ์เป็นส่วนผสม (ภาพ ก) ผิวเคลือบมันวาวและมีผลึกสีเงินเกิดขึ้นบนผิวเคลือบเป็นจำนวนมาก ส่วนเคลือบที่ใช้แร่กลับไปจากโรงงานเผาอิฐและแร่กลับไปที่เตรียมเอง (ภาพ ข และ ค) ลักษณะเคลือบทั้งสองแบบคล้ายกัน ผิวเคลือบมันวาว มีผลึกสีเงินเกิดขึ้นบ้างเล็กน้อย ซึ่งภาพแสดงผลิตภัณฑ์ที่ใช้ควอทซ์หรือแร่กลับไปเป็นส่วนผสมในเคลือบได้แสดงไว้ตามภาพที่ 5.1-5.5 ดังนี้



ภาพที่ 5.1 ลักษณะของเคลือบใส (ก) ควอทซ์ (ข) เถ้าเกลบที่เตรียมขึ้นเอง
(ค) เถ้าเกลบจากโรงงานเผาอิฐใช้เป็นส่วนผสมในเคลือบ

สูตรเคลือบใส

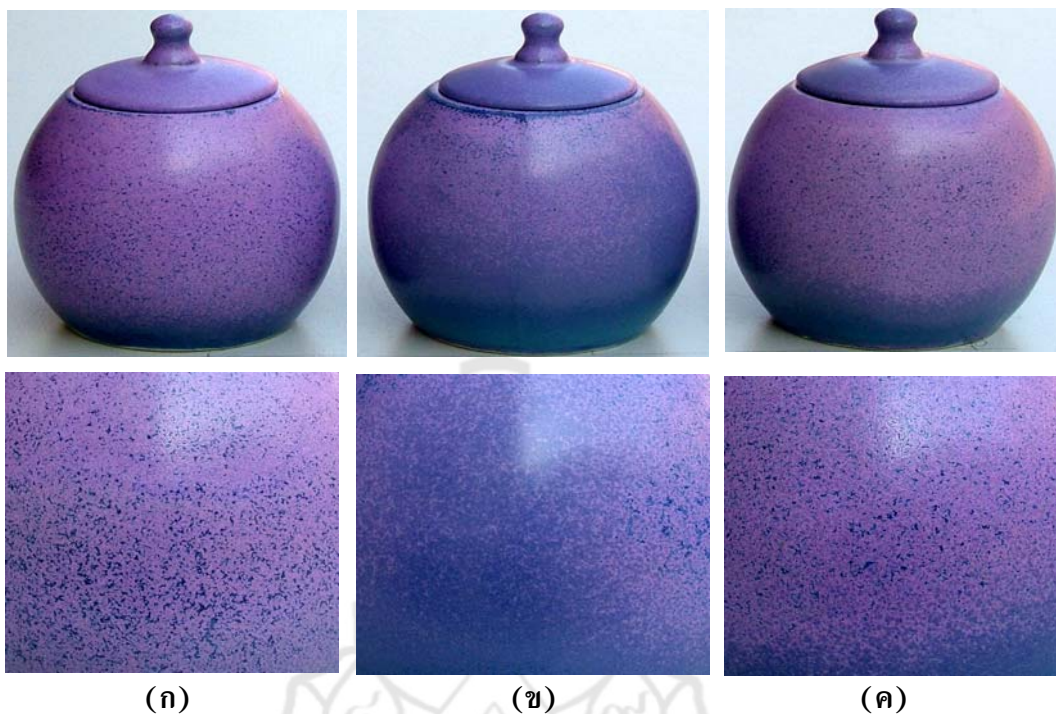
หินฟันม้าชนิดโซดาเฟลด์สปาร์	ร้อยละ 40
หินปูนหรือแคลเซียมคาร์บอเนต	ร้อยละ 30
ควอทซ์หรือเถ้าเกลบ	ร้อยละ 30



ภาพที่ 5.2 ลักษณะของเคลือบสนิมเหล็ก (ก) ควอทซ์ (ข) เถ้าแกลบที่เตรียมขึ้นเอง
(ค) เถ้าแกลบจากโรงงานเผาอิฐใช้เป็นส่วนผสมในเคลือบ

สูตรเคลือบสนิมเหล็ก

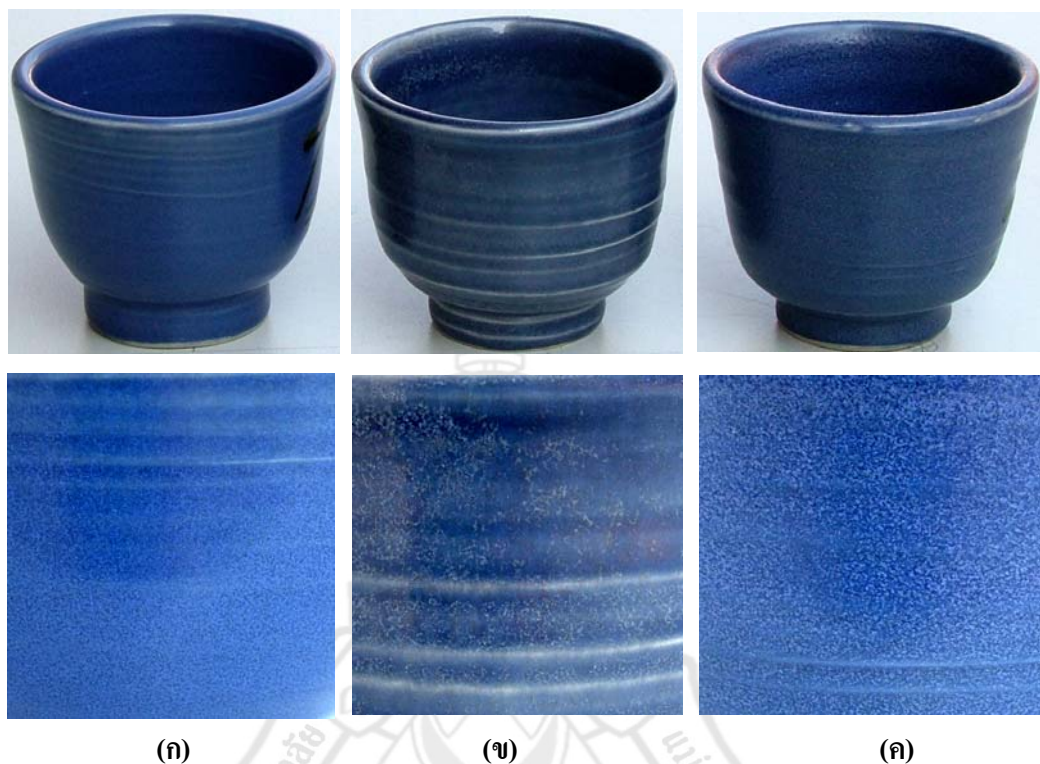
หินฟันม้า ชนิดโซดาเฟลด์สปาร์	ร้อยละ 30
แบเรียมคาร์บอเนต	ร้อยละ 12
ทัลค์	ร้อยละ 8
เถ้ากระดูก หรือโบนแอช	ร้อยละ 14
ดินขาวลำปาง	ร้อยละ 10
ดินเบนโทไนต์	ร้อยละ 5
ควอทซ์หรือเถ้าแกลบ	ร้อยละ 21
สารให้สี	
เหล็กออกไซด์ (เหล็กแดง)	ร้อยละ 12



ภาพที่ 5.3 ลักษณะของเคลือบสีม่วง (ก) ควอทซ์ (ข) ถ้ำเกลบที่เตรียมขึ้นเอง
(ค) ถ้ำเกลบจากโรงงานเผาอิฐใช้เป็นส่วนผสมในเคลือบ

เคลือบจุดสีม่วง

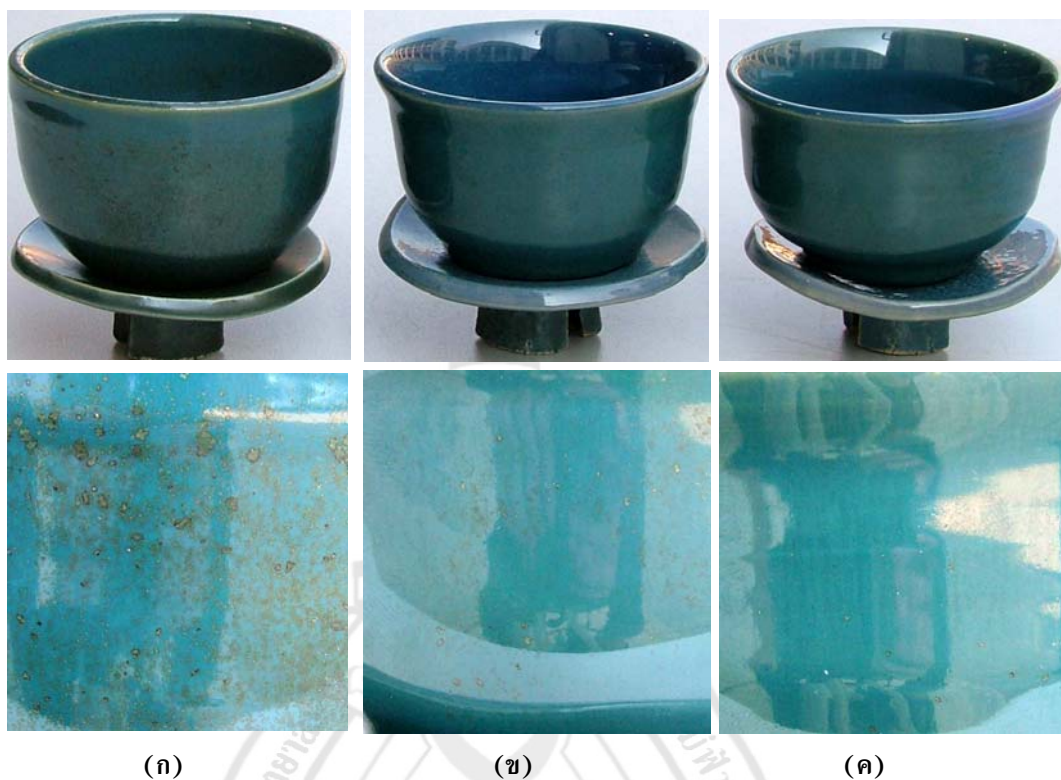
หินฟันม้า ชนิดโพแทสเซิลด์สปาร์	ร้อยละ 40
หินปูน หรือแคลเซียมคาร์บอเนต	ร้อยละ 9
แบเรียมคาร์บอเนต	ร้อยละ 8
โดโลไมต์	ร้อยละ 5
ทัลค์	ร้อยละ 17
ซิงค์ออกไซด์	ร้อยละ 5
ควอทซ์หรือถ้ำเกลบ	ร้อยละ 16
สารให้สี	
เซอร์โคเนียมซิลิเกต	ร้อยละ 15
โคบอลต์ออกไซด์	ร้อยละ 3
แมงกานีสไดออกไซด์	ร้อยละ 2



ภาพที่ 5.4 ลักษณะของเคลือบสีน้ำเงิน (ก) ควอทซ์ (ข) ถ้ำเกลบที่เตรียมขึ้นเอง (ค) ถ้ำเกลบจากโรงงานเผาอิฐใช้เป็นส่วนผสมในเคลือบ

สูตรเคลือบสีน้ำเงิน

หินฟันม้า ชนิดโซดาเฟลด์สปาร์	ร้อยละ 40
หินปูน หรือแคลเซียมคาร์บอเนต	ร้อยละ 30
ควอทซ์หรือถ้ำเกลบ	ร้อยละ 30
สารให้สี	
โคบอลต์ออกไซด์	ร้อยละ 1
แมงกานีสไดออกไซด์	ร้อยละ 3



ภาพที่ 5.5 ลักษณะของเคลือบเขียวอมน้ำเงิน (ก) ควอทซ์ (ข) ถ้ำเกลบที่เตรียมขึ้นเอง (ค) ถ้ำเกลบจากโรงงานเผาอิฐใช้เป็นส่วนผสมในเคลือบ

สูตรเคลือบเขียวอมน้ำเงิน

หินฟันม้า ชนิดโซดาเฟลด์สปาร์	ร้อยละ 40
หินปูน หรือแคลเซียมคาร์บอเนต	ร้อยละ 30
ควอทซ์ หรือถ้ำเกลบ	ร้อยละ 30
สารให้สี	
โคบอลต์ออกไซด์	ร้อยละ 1
คอปเปอร์ออกไซด์	ร้อยละ 2.5
ถ้ำกระตูกหรือโบนแอช	ร้อยละ 3

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ้ำกลบ เพื่อนำไปใช้เป็นส่วนผสมในเคลือบสำหรับผลิตภัณฑ์สโตนแวร์ โดยเปรียบเทียบกับการใช้ถ้ำกลบจากโรงงานเผาอิฐ และควอทซ์ จากการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

6.1 สรุปผลการวิจัย

6.1.1 การเตรียมถ้ำกลบและการศึกษาลักษณะเฉพาะ

1. ผลการวิเคราะห์ทางความร้อนของถ้ำกลบพบว่า ถ้ำกลบมีช่วงของการเปลี่ยนแปลงอยู่ 2 ระยะ คือ ช่วงแรกที่อุณหภูมิไม่เกิน 150 ช. เป็นการสูญเสียมวลเนื่องมาจากความชื้นที่ระเหยไป และในช่วงที่สองเริ่มตั้งแต่อุณหภูมิประมาณ 250 ช. จนถึงอุณหภูมิ 500 ช. เกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ในถ้ำกลบ หลังการเผาน้ำหนักของถ้ำกลบลดไปประมาณ 83 เปอร์เซ็นต์
2. ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเผาถ้ำกลบพบว่า ถ้ำกลบที่เผาอุณหภูมิ 500 ช. เป็นเวลา 4 ชม. มีปริมาณของซิลิกาต่ำสุดคือประมาณ 82 เปอร์เซ็นต์ และเมื่ออุณหภูมิและเวลาในการเผาเป็น 800 ช. เป็นเวลา 8 ชม. จะมีปริมาณซิลิกามากที่สุดประมาณ 97 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนั้นเป็นพวกอินทรีย์สารและออกไซด์ของโลหะที่เจือปนมากับถ้ำกลบ และจากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของถ้ำกลบพบว่า มีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐานทั้งหมด
3. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อขนาดอนุภาคของถ้ำกลบพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิหรือเวลาในการเผาถ้ำกลบ ขนาดของถ้ำกลบกลับลงเนื่องจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ เมื่อนำไปบดเป็นเวลาต่าง ๆ กันพบว่าขนาดอนุภาคของอนุภาคเฉลี่ยของถ้ำเล็กลงเมื่อเวลาในการบดเพิ่มขึ้น

6.1.2 ผลการนำเถ้าแกลบและควอทซ์มาใช้เป็นส่วนผสมในเคลือบสูตร

มาตรฐาน

ผลจากการศึกษาพบว่าเคลือบที่ได้มีความแตกต่างกันเป็นผลมาจากปัจจัยดังต่อไปนี้

1. แหล่งของซิลิกาที่นำมาใช้เป็นส่วนผสมในเคลือบ โดยเมื่อใช้ควอทซ์เป็นส่วนผสมในเคลือบ ลักษณะเคลือบที่ได้มักมีการหลอมตัวของเคลือบไม่สมบูรณ์ แต่เคลือบที่ใช้เถ้าแกลบเป็นส่วนผสมมีการหลอมตัวดีกว่า
2. ปริมาณซิลิกาในเถ้าแกลบและขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบไม่มีผลมากนักต่อลักษณะของเคลือบหลังการเผา
3. การศึกษาค่าการขยายตัวเชิงความร้อน เคลือบที่ใช้เถ้าแกลบจากโรงงานเผาอิฐเป็นส่วนผสม มีค่าการขยายตัวเชิงความร้อนของเคลือบสูงสุด รองลงมา คือ เคลือบที่ใช้เถ้าแกลบที่ได้จากการเตรียมเอง และเคลือบที่มีค่าการขยายตัวน้อยที่สุดคือ เคลือบที่ใช้ควอทซ์ ส่วนการศึกษาจุดหลอมเหลวของเคลือบพบว่า เคลือบเริ่มมีการอ่อนตัวของเคลือบที่อุณหภูมิใกล้เคียงกันคือ ประมาณ 1115 ช.
4. การศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคและการเปลี่ยนแปลงเฟสของเคลือบ จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเคลือบพบผลึกซึ่งมีผลึกเป็นรูปเข็มทั้งในชั้นของเคลือบ และบริเวณพื้นผิวของเคลือบทั้ง 3 แบบ ซึ่งจากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเฟสของเคลือบโดยนำผงเคลือบไปเผาตั้งแต่อุณหภูมิ 900–1150 ช. พบว่า ที่อุณหภูมิ 900 ช. พบฟีดของควอทซ์ โซดาเฟลด์สปาร์ และแคลเซียมซิลิเกตในเคลือบทั้ง 3 แบบ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นปริมาณของควอทซ์และโซดาเฟลด์สปาร์กลับลดลง แต่แคลเซียมซิลิเกตมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน
5. การนำควอทซ์และเถ้าแกลบมาใช้เป็นส่วนผสมในเคลือบสูตรอื่นๆ พบว่าลักษณะของเคลือบมีลักษณะแตกต่างกันออกไป ขึ้นกับสูตรเคลือบนั้นๆ

6.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยในโอกาสต่อไป

จากการศึกษาและทบทวนเอกสารในเบื้องต้นพบว่า ยังมีการศึกษานำเถ้าแกลบซึ่งเป็นแหล่งของซิลิกาไปใช้เป็นส่วนผสมในสีอะครีลิกสำหรับทำสีเซรามิกและเอนโกบน้อยอยู่ ดังนั้นหากมีการศึกษาและวิจัยเพิ่มเติมจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานด้านเซรามิก และยังเป็นการเพิ่มคุณค่าของแกลบให้มีมูลค่าทางเศรษฐกิจมากขึ้น

บรรณานุกรม

- กนกอร หัสโรค์. (2543). ปัจจัยของกรด อุณหภูมิและเวลาต่อกระบวนการผลิตซิลิกาขาวจาก
แคลบ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- กฤตยาวัลย์ พินิจดำรงกลาง. (2542). การทดลองทำสีได้เคลือบที่ใช้กับเคลือบใสอุณหภูมิ
1,230 องศาเซลเซียส บรรยากาศออกซิเดชันและรีดักชัน. ปริญญาการศึกษา
มหาบัณฑิต สาขาอุตสาหกรรมศึกษา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- กุลจิรา สุจิโรจน์ และ ปาจริย ถาวรนิต. (2542). การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตซิลิกอน
คาร์ไบด์จากแคลบ. กรุงเทพฯ : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- ก้องเกียรติ ภูเกิต. (2531). การเตรียมซิลิกอนไดออกไซด์จากแคลบขาว. การค้นคว้าแบบอิสระ
เชิงวิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาการสอนฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- โกมล รักษ์วงศ์. (2531). เอกสารประกอบการสอนงานสำเร็จรูป. กรุงเทพฯ : วิทยาลัยครูพระ
นคร.
- (2538). งานวิจัยเตาเผาและเครื่องปั้นดินเผาเตาเผาแม่น้ำน้อยเพื่อสืบสาน
และอนุรักษ์ศิลปวัตถุโบราณของจังหวัดสิงห์บุรี. กรุงเทพฯ : คณะเทคโนโลยี
อุตสาหกรรม สถาบันราชภัฏพระนคร.
- เคลือบเซรามิก เบื้องต้น. (2537). ลำปาง : ศูนย์พัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องเคลือบดินเผา
ภาคเหนือ.
- ชีวลรัตน์ มาสิงบุญ. (2546). การตกผลึกของซิลิกาที่เตรียมจากการเผาแคลบ. วิทยานิพนธ์
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ทวี พรหมพฤษ. (2523). เครื่องเคลือบดินเผาเบื้องต้น. กรุงเทพฯ : รุ่งเรืองรัตน์.
- นิยม บุญถนอม และคณะ. (2533). ศึกษาการนำไฟฟ้าของซิลิกอนไดออกไซด์ที่เตรียมจาก
แคลบได้ปด้วยสารลิเทียมออกไซด์ : รายงานการวิจัย. เชียงใหม่ : คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- บุรฉัตร ฉัตรวีระ และณรงค์ศักดิ์ มาลากุล. (2547). “ผลของอุณหภูมิในการบ่มที่มีต่อคุณสมบัติ
เชิงกลของเพสต์ที่ใช้ซีเมนต์ผสมเถ้าแคลบ.” วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. 27 , 1
(มกราคม-มีนาคม).

- บุรฉัตร ฉัตรวีระ และพิชัย นิमितยงสกุล. (2537). “อิทธิพลของความร้อนที่มีต่อการพัฒนา
กำลังของคอนกรีตผสมซีเมนต์.” ปทุมธานี : คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- บุญรัตน์ พิษณุไพบูลย์. (2538). เครื่องเคลือบดินเผาเทคนิคและวิธีการสร้างสรรค์.
กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปรีดา พิมพ์ขาวขา. (2539). เซรามิกส์. กรุงเทพฯ : อักษรเจริญทัศน์.
- (2530). เคลือบเซรามิกส์. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พิมพ์วัลค์ วัฒนภาส. (ม.ป.ป.). รายงานการวิจัยเรื่องน้ำยาเคลือบซีเมนต์จากวัสดุเหลือใช้.
กรุงเทพฯ : ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา กรมวิทยาศาสตร์
บริการ.
- ไพจิตร อังศิริวัฒน์. (2537). รวมสูตรเคลือบเซรามิกส์. กรุงเทพฯ : โอ.เอส.พรินติ้ง.แฮสส์
- ลดา พันธุ์สุขุมธนา และชลัย ศรีสุข. (2546). “การพัฒนาเคลือบซีเมนต์ไม่ย่ำพารา” วารสาร
เซรามิกส์. 7, 17 (กันยายน-ธันวาคม).
- วรรณดา ต. แสงจันทร์. (2546). “เคลือบดีเป็นสีส้นแ่งงาน” วารสารเซรามิกส์. 7, 16
(พฤษภาคม-สิงหาคม)
- ศรีเพ็ญ ท้าวตา และคณะ. (2531). การเตรียมซิลิกอนไดออกไซด์จากแกลบขาว : รายงาน
การวิจัย เชียงใหม่ : คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- สุจินดา โชติพานิช. (ม.ป.ป.). รายงานการวิจัยเคลือบสีจากเหล็กออกไซด์ในน้ำยาเคลือบ
ซีเมนต์. กรุงเทพฯ : ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา กรมวิทยาศาสตร์
บริการ.
- สมาคมเซรามิกส์. (2531). “ แกลบวัสดุเหลือใช้ทางเกษตร” วารสารเซรามิกส์. 5, 1
(มกราคม – มีนาคม).
- สรินทร ลิ้มปนาท และคณะ. (2543). “การเตรียมแผ่นกรองซิลิกาจากซีเมนต์แกลบ”. จุฬาลงกรณ์.
20, 6 (มิถุนายน)
- สุรศักดิ์ โกสียพันธ์. (2534). น้ำเคลือบเครื่องปั้นดินเผา. กรุงเทพฯ : ไทยวัฒนาพานิช.
- สุธี วัฒนศิริเวช และคณะ. (2543). รายงานการวิจัยการสำรวจด้านการจัดการและตำหนิใน
ผลิตภัณฑ์ของโรงงานเซรามิกในจังหวัดลำปางและเชียงใหม่. เชียงราย :
มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง.
- เสริมศักดิ์ นาคบัว. (2536). เคลือบซีเมนต์ฟิช. กรุงเทพฯ : เจ. ฟลิ้ม โปรเซส.
- อุไรวรรณ ลีลาอดิศร. (2535). การเตรียมและศึกษาคุณลักษณะของซิลิกาคุณภาพสูงจาก
แกลบ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย.

อายุวัฒน์ สว่างผล. (2543). **วัตถุดิบที่ใช้แพร่หลายในงานเซรามิกส์**. กรุงเทพฯ : โอ.เอส.พรี้น ตั้ง เฮ้าส์.

เอกสารข้อมูลทางเทคนิคผลวิเคราะห์และคุณสมบัติต่างๆ ของหินฟันม้าชนิดโซดา เฟลด์สปาร์ แคลเซียมคาร์บอเนต และควอทซ์. (ม.ป.ป.). กรุงเทพฯ : บริษัท อัมรินทร์ เซรามิกคอร์ปอเรชั่น จำกัด.

Andreoli M, Luca G.T., Miyamaru E.S. (2000). “Charateristics of rice husk for chlorination reaction”. **Materials Letters**. 44, 5(July). 294–298.

ASTM STANDARDS. (2002). **Standard test method for linear thermal expansion of porcelain enamel and glaze frits and fired ceramic whitware products by the dilatometer method**. Baltimore : ASTM international.

Bartha P, Huppertz E.A. (1974). **Structure and crystallization of silica in rice husk**. Oxford : Pergamon Press.

Della VP, Hotza IKD. (2001). “Characterization of rice husk ash for use as raw material in the manufacture of silica refractory”. 44, 24 (June).

Della V.P., I. Kuhn, D. Hotza. (2002). “Rice husk ash as an alternate source for active silica production” **Materials Letters**. 57, 4 (December).

Fraser, H. (1986). **Ceramic Faults and Their Remedies**. London : A&C Black.

..... (1998). **Glazes For The Craft Potter**, London : A & C Black.

Glenn C. Nelson. (2002). **Ceramics : a potter’ s hand book**. Fort Worth : Wadsworth/Thomson Learning.

Hamer. Frank and Janet. (1975). **The Potter’ s Dictionary of Materials and Techniques**. London : Pitman.

Hopper, Robin. (1984). **The Ceramic Spectrum**. Radnor : Chilton Book.

Huang S, Jing S, Wang J, Jin Y. (2001). “Silica white obtained from rice husk in a fluidized bed” **Powder Technology**. 117, 3 (25 June) :232–238.

Kaiserbrger E, Blumm J. (2005). **Dilatometer Evaluation for the Characterization of Ceramic Body and Glaze Combination**. Available www.benelux-scientific.com/foto/dileva.pdf (July 2005)

Kalapathy U, Proctor A, Shultz J. (2002). “An Improved method for products of silica from rice hull ash” **Bioresource Technology** .85, 3(December.): 285–289.

Kim, H-S., and et..al (2003). “Thermogravimetric analysis of rice husk flour filled thermoplastic polymer composites”. **Journal of Thermal Analysis and calorimetry**. 76, 9 (December) : 395–404.

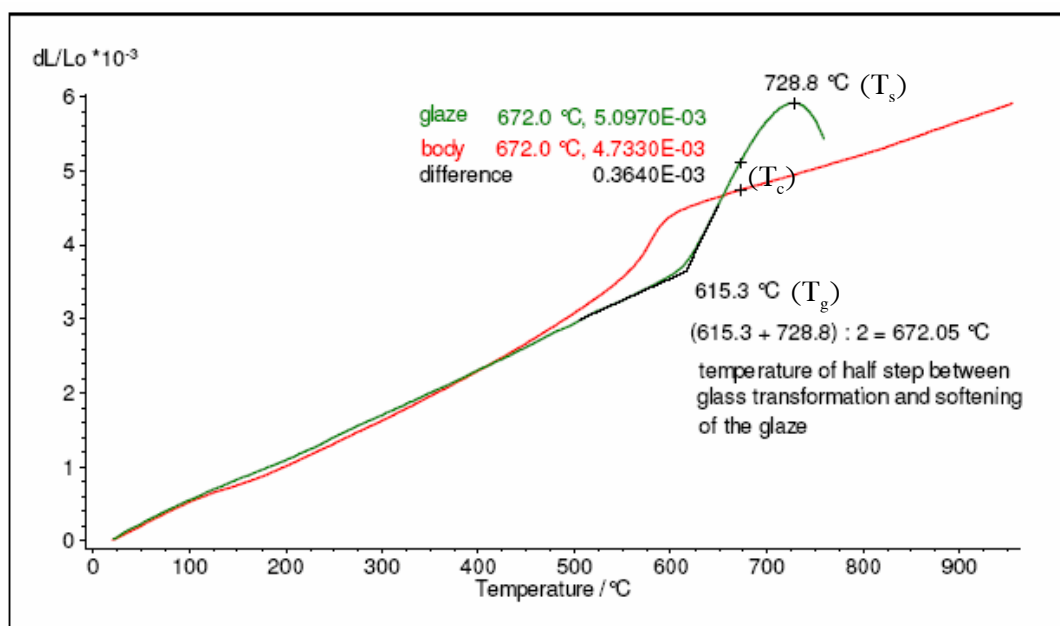
- Kirshnarao R.V., Subrahmanyam J, Kumar T.J. (2001). "Studies on the formation of black particles in rice husk silica ash" **Journal of the European Ceramic Society**. 27, 1 (January): 99–104.
- Lawrence, W.G. (1916). **Ceramic science for the potter**. Radnor : Chilton.
- Luna T.C., Chou T.C. (1990). "Recovery of silica from the gasification of rice husks/coal in the presence of a pilot flame in a modified fluidized bed". **Ind. Eng. Chem. Res.** 29 : 1922–1927.
- Nakata Y., Suzuki, M. and Okutami, T. (1989). "Preparation and properties of SiO₂ from rice hull". **Nippon Seramikkusu Kyokai Gakujutsu Ronbunshi**. 97 : 842–849.
- Norton, F.H. (1974). **Element of Ceramic**. 2nd Ed. Massachusetts : Addison–Wesley.
- Pamelee Cullen W. (1975). **Ceramic glazes**. 3rd ed. Boston : CBI.
- Peterson, Susan. (2002). "A Selection of smashing glazes". **Ceramics Monthly**. 50, 1 (January).
- Prasad C.S., Maiti K.N., Venugopal R. (2003). "Effect of substitution of quartz by rice husk ash and silica fume on the properties of white ware composition". **Ceramics International** . 29, 8 (Sep.–Dec.) 907–914.
- Real C, Alcala M.D, Munoz–Paez A, Criado JM. (1997). "XAFS analysis of the potassium silica interaction in rice husks". **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms**. 133, 2 (December).
- Richarc A. Eppler and Douglas R. Eppler. (2000). **Glazes and Glass Coating**. Ohio : The American Ceramic Society.
- Souza M.F., and et..al. (2000). " Rice Hull–Deriver Silica : Application in Portland Cement and Mullite Whhiskers". **Materials Research**. 3, 2.
- Yalcin N, Sevinc V. (2001). "Studies on silica obtained from rice husk". **Ceramics International**. 27, 2 (March).

ภาคผนวก ก

การหาค่าความแตกต่างของการขยายตัวเชิงความร้อนของ
เคลือบและเนื้อดิน



ภาคผนวก ก (1)
แสดงการคำนวณค่าความแตกต่างของการขยายตัวเชิงความร้อนของ
เคลือบและเนื้อดิน



แผนภาพที่ ก.1 แสดงการหาค่าความแตกต่างของการขยายตัวเชิงความร้อนของเคลือบและเนื้อดิน

ในการคำนวณค่าความแตกต่างของการขยายตัวเชิงความร้อนของเคลือบและเนื้อดินจะพิจารณาที่อุณหภูมิค่าเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิ Softening point T_s และอุณหภูมิ Glass Transformation T_g โดยเรียกอุณหภูมิ ณ จุดนี้ว่า Contact Temperature T_c

$$T_c = \frac{T_s + T_g}{2}$$

T_s หาจากค่าสูงสุดของกราฟความสัมพันธ์ dL/L_0 และอุณหภูมิ

T_g หาได้จากค่า Onset ของจุดที่มีการเปลี่ยนแปลง dL/L_0 สูงสุด

เมื่อได้ค่า Contact Temperature แล้วจึงทำการคำนวณหาค่าความแตกต่างของการขยายตัวเชิงความร้อนของเคลือบและเนื้อดิน

ตัวอย่างการคำนวณ จากแผนภาพ ก.1

$$T_s = 728.8 \text{ ซ.}$$

$$T_g = 615.3 \text{ ซ.}$$

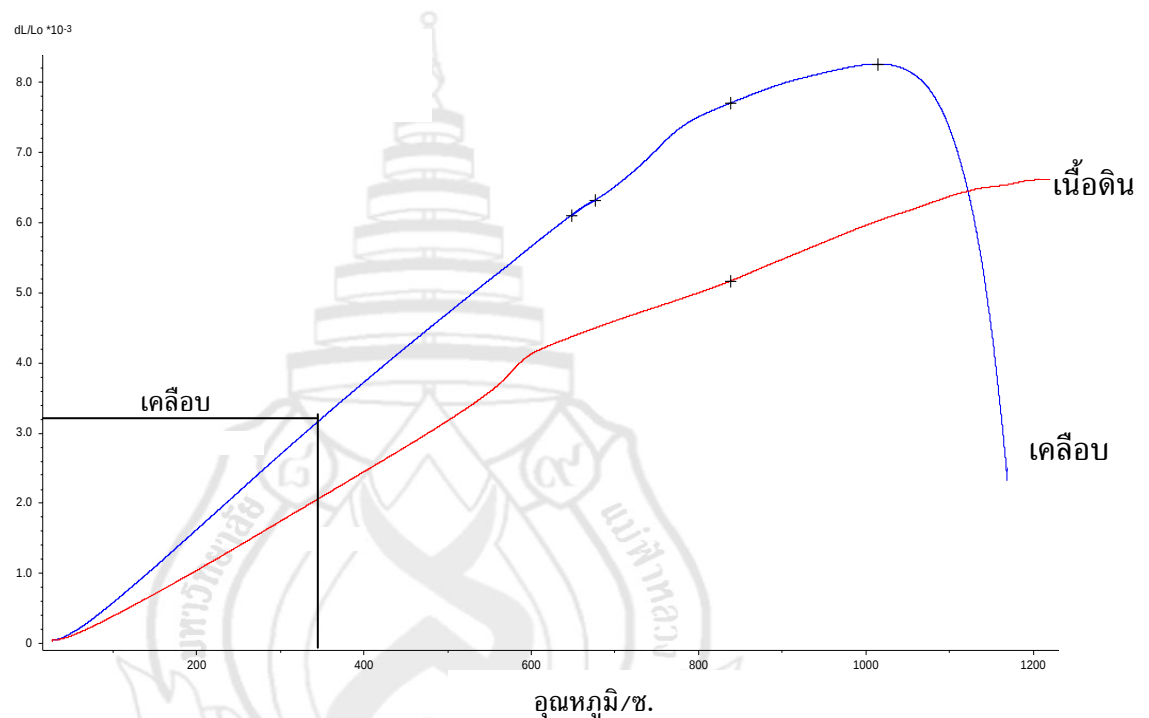
ดังนั้น $T_c = 728.8 + 615.3 / 2$

$$T_c = 672.0 \text{ ซ.}$$

จะนั้นจุด Contact Temperature (T_c) ความแตกต่างของค่าการขยายตัวระหว่างเคลือบ
และเนื้อดิน = 0.364×10^{-3} ซ.



ภาคผนวก ก (2)
แสดงวิธีการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน
(Thermal Expansion Coefficient) ของเคลือบและเนื้อดิน
ตามมาตรฐาน ASTM C 372-94 ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 25-350 ช.



แผนภาพที่ ก.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบและเนื้อดิน
 สามารถคำนวณได้ตามสมการดังนี้

$$\alpha = (\Delta L / L_0) / \Delta T$$

α = สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (มม./ มม.ช.)

ΔL = ความยาวที่เปลี่ยนไปของชิ้นทดสอบ (มม.)

L_0 = ความยาวเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ (มม.)

ΔT = ช่วงอุณหภูมิศึกษา (ช.)

ตัวอย่างการคำนวณ

จากแผนภาพ ก.2 ที่ช่วงอุณหภูมิ 25–350 ช. เคลือบมี $\Delta L/L_0$ เป็น 3.2×10^{-3} มม./มม.ช. ดังนั้น

$$\begin{aligned}\text{สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน } (\alpha) &= (3.2 \times 10^{-3} \text{ มม./มม.ช.}) / (350 - 25 \text{ ช.}) \\ &= (3.2 \times 10^{-3} \text{ มม./มม.ช.}) / (325 \text{ ช.}) \\ &= 9.8 \times 10^{-6} \text{ มม./มม.ช.}\end{aligned}$$

สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบมีค่าเท่ากับ 9.8×10^{-6} มม./มม.ช.



ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเก้าอี้จากโรงงานอิฐและ
วัตถุดิบที่ใช้เป็นส่วนผสมในเคลือบ

ภาคผนวก ข (1)

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบจากโรงงานเผาอิฐ

ตารางที่ ข.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบจากโรงงานเผาอิฐและค่าน้ำหนักสูญหาย

สูตรเคมี	น้ำหนัก (เปอร์เซ็นต์)
SiO ₂	71.41
Fe ₂ O ₃	0.09
CaO	0.72
K ₂ O	0.94
MnO	0.16
P ₂ O ₅	0.72
SO ₃	0.59
LOI.	25.37

ภาคผนวก ข (2)

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของควอทซ์

ตารางที่ ข.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของควอทซ์

สูตรเคมี	น้ำหนัก (เปอร์เซ็นต์)
SiO ₂	98.1
TiO ₂	0.07
Al ₂ O ₃	1.1
CaO	0.06
Fe ₂ O ₃	0.06
MgO	0.03
K ₂ O	0.14
Na ₂ O	0.06

ภาคผนวก ข (3)

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโซดา เฟลด์สปาร์ (731 N)

ตารางที่ ข.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของ โซดา เฟลด์สปาร์

สูตรเคมี	น้ำหนัก(เปอร์เซ็นต์)
SiO_2	66.50
TiO_2	18.10
Al_2O_3	0.15
CaO	0.24
Fe_2O_3	1.61
MgO	0.06
K_2O	1.20
Na_2O	8.81

ภาคผนวก ข (4)

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนต

ตารางที่ ข.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของ แคลเซียมคาร์บอเนต

สูตรเคมี	น้ำหนัก (เปอร์เซ็นต์)
CaCO_3	94.30
SiO_2	0.33
MgO	0.81
Fe_2O_3	0.02

ภาคผนวก ค

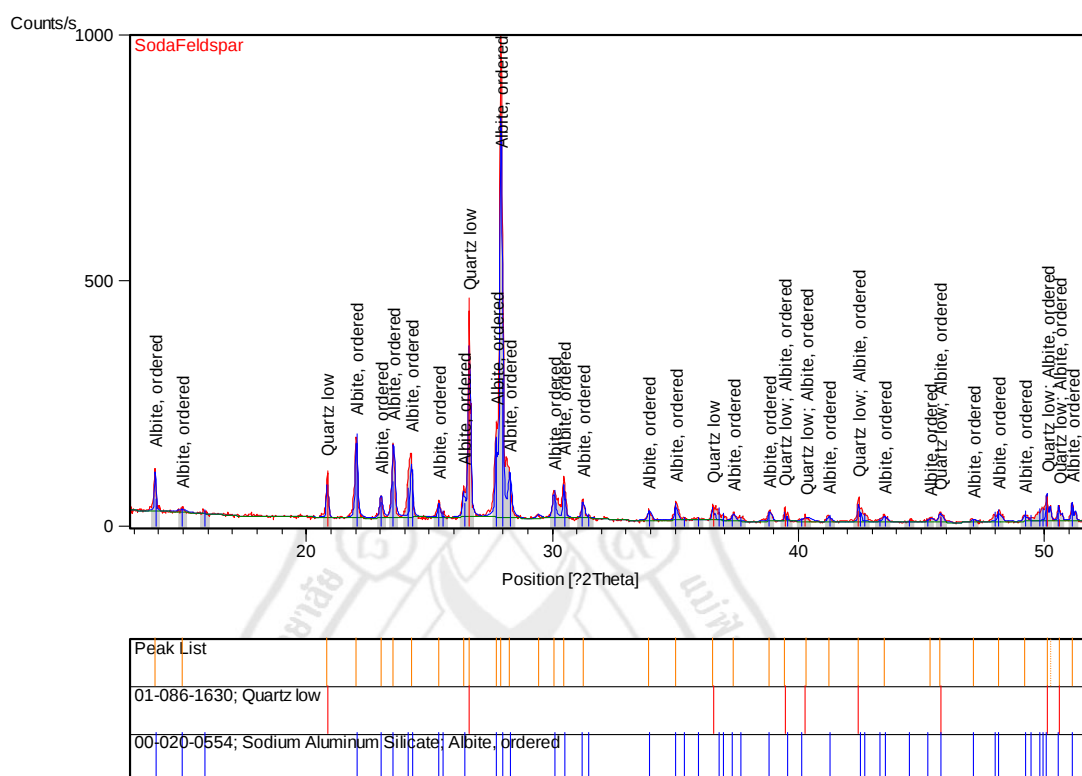
ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์



ภาคผนวก ค (1)

ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ของ แร่ Albite (Soda feldspar)

Graphic Scan & Identified Phases

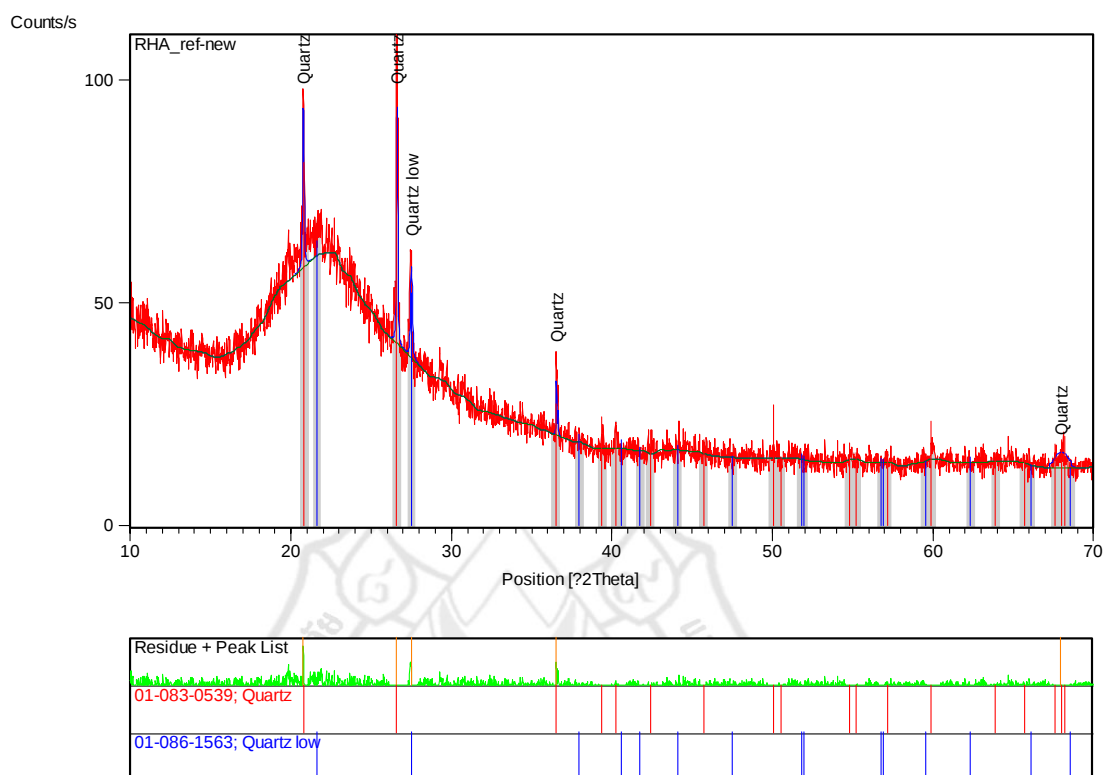


Identified Patterns List

No.	Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	Score
1	01-086-1630	Quartz low	SiO ₂	61
2	00-020-0554	Albite, ordered	Na Al Si ₃ O ₈	63

ภาคผนวก ค (2)
ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ของเถ้าแกลบจากโรงงาน

Graphic Scan & Identified Phases

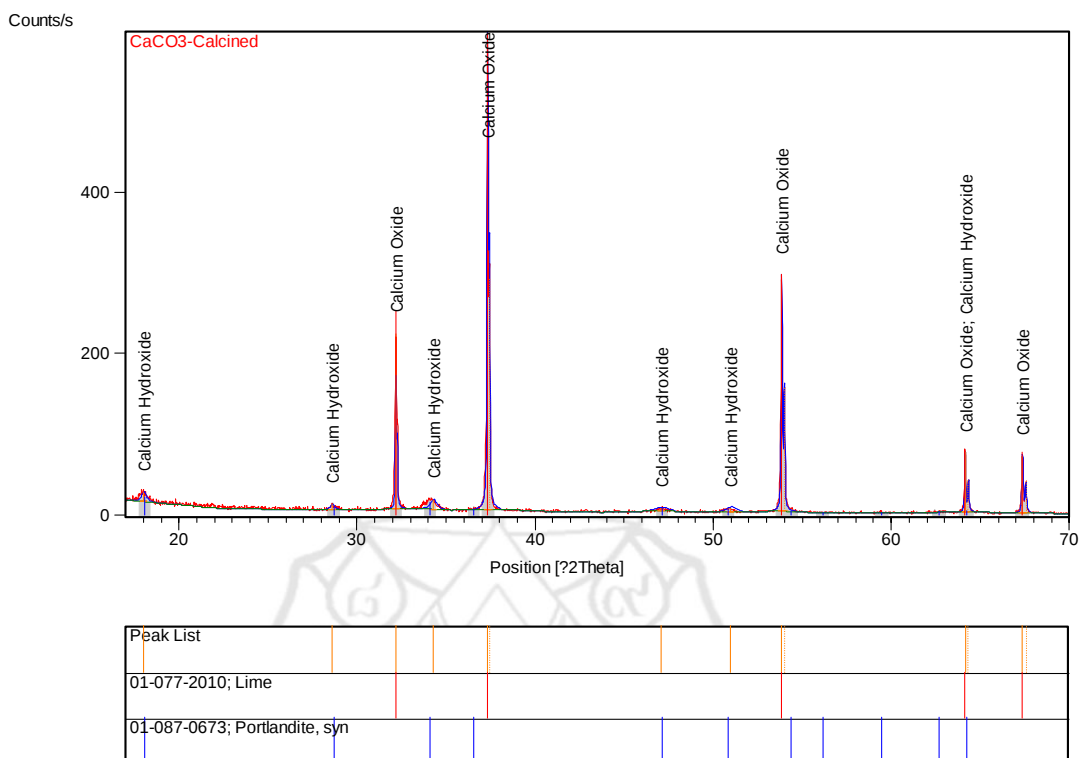


Identified Patterns List

No.	Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	Score
1	01-083-0539	Quartz	SiO ₂	50
2	01-086-1563	Quartz low	SiO ₂	20

ภาคผนวก ค (3)
ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ของ Calcium Carbonate

Graphic Scan & Identified Phases

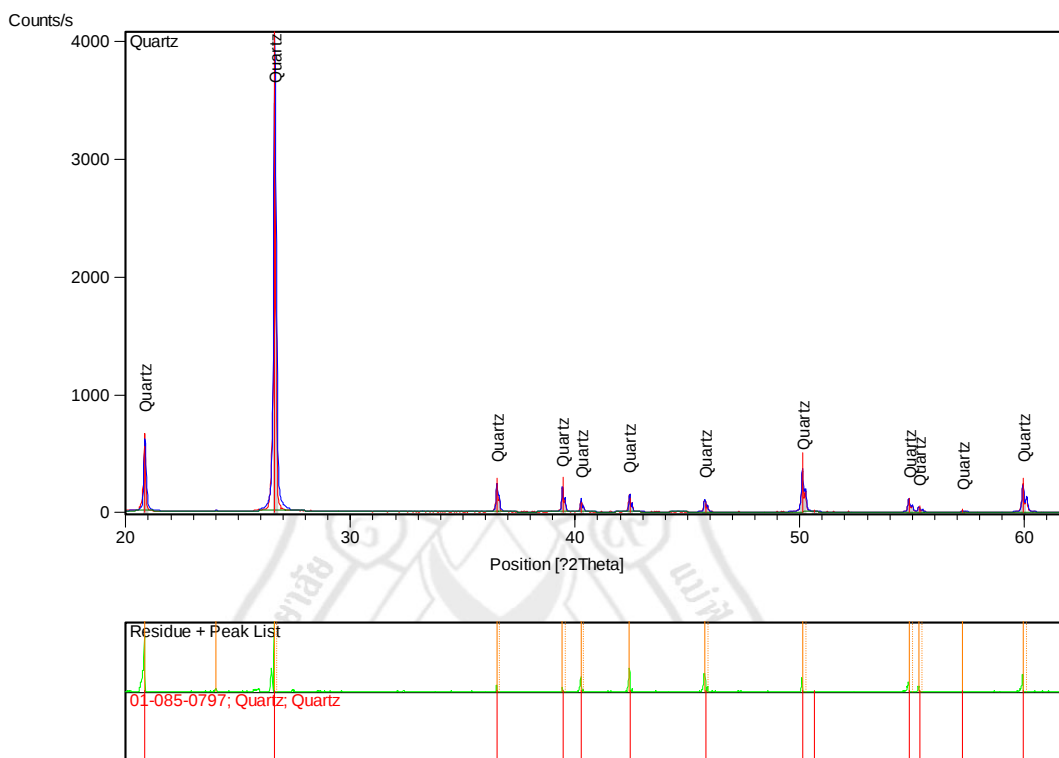


Identified Patterns List

No.	Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	Score
1	01-077-2010	Lime	CaO	87
2	01-087-0673	Portlandite, syn	Ca (OH) ₂	46

ภาคผนวก ค (4)
ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแร่ Quartz

Graphic Scan & Identified Phases



Identified Patterns List

No.	Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	Score
1	01-085-0797	Quartz	SiO ₂	85

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ

นายพนทพงษ์ พลพวก

วัน เดือน ปี เกิด

1 ธันวาคม 2520

ประวัติการศึกษา

ระดับมัธยมศึกษาตอนต้น

โรงเรียนศรีบุญเรืองวิทยาคาร จ.หนองบัวลำภู พ.ศ.2536

ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นต้น

ช่างกลโรงงาน วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี จ.อุดรธานี
พ.ศ.2539

ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง

ช่างเทคนิคการผลิต สาขาเครื่องมือกล วิทยาลัยเทคนิค
อุดรธานี จ.อุดรธานี พ.ศ.2541

ระดับอนุปริญญา

วิทยาศาสตร์ สาขาเซรามิกส์ สถาบันราชภัฏเลย จ.เลย
พ.ศ.2543

ระดับปริญญาตรี

วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเซรามิกส์ เกียรตินิยมอันดับ 2
สถาบันราชภัฏลำปาง จ.ลำปาง พ.ศ.2545

ประวัติการทำงาน

พ.ศ. 2545

รับราชการ แผนกออกแบบผลิตภัณฑ์
สำนักเทคโนโลยีชุมชน กรมวิทยาศาสตร์บริการ
กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

พ.ศ. 2545

ที่ปรึกษา บริษัท เอส.เอ.ซี เซรามิก
เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร