

ผลของสารเติมแต่งต่อสมบัติของแก้วซิติกาจากเถ้าแกลบที่เตรียมโดยการเผาผนึก

นาย บวร วรเจษฎารมย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF ADDITIVES ON PROPERTIES OF SINTERED SILICA GLASS
FROM RICE HUSK ASH

Mr. Borworn Vorajesdarom

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Ceramic Technology
Department of Materials Science
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2010
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของสารเติมแต่งต่อสมบัติของแก้วซีลิกาจากเถ้าแกลบที่เตรียมโดยการเผาผนึก

โดย

นาย บวร วรเจษฎารมย์

สาขาวิชา

เทคโนโลยีเซรามิก

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนากร วาสนาเพียรพงศ์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

อาจารย์ ดร. สิริพรรณ นิลไพรัช

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(อาจารย์ ดร. สิริพรรณ นิลไพรัช)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรนภา สุจิตวรกุล)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.จรัสพร มงคลขจิต)

บวร วรเจษฎารมย์ : ผลของสารเติมแต่งต่อสมบัติของแก้วซิลิกาจากเถ้าแกลบที่เตรียมโดยการเผาผนึก. (EFFECTS OF ADDITIVES ON PROPERTIES OF SINTERED SILICA GLASS FROM RICE HUSK ASH) อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร.ชนากร วาสนา เพียรพงศ์, อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์ร่วม อาจารย์ ดร.สิริพรรณ นิลไพรัช, 78 หน้า.

เถ้าแกลบเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ได้จากการนำแกลบมาเผาเป็นเชื้อเพลิงในการให้พลังงานต่างๆ แต่เถ้าแกลบเป็นวัสดุที่น่าสนใจเนื่องจากประกอบด้วยซิลิกามากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ จึงมีความสนใจที่จะนำมาทดลองใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตภัณฑ์แก้วซิลิกา อย่างไรก็ตามในเถ้าแกลบยังมีสิ่งเจือปนจำพวกแอลคาไลน์ออกไซด์เป็นตัวเร่งให้เกิดการตกผลึกของซิลิกาเป็นคริสโตบาลิต์ ซึ่งผลึกคริสโตบาลิต์นี้มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนสูง และเป็นตัวที่ทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการแตกหักเสียหายได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน ในงานวิจัยนี้ได้นำเถ้าแกลบที่ไม่เป็นผลึกมาบดละเอียดโดยผสมน้ำกลั่นในขวดบดพอลิเอทิลีนที่บรรจุลูกบดเซอร์โคเนีย นำไปกรองผ่านกระดาษกรองเพื่อชะล้างสารที่ละลายน้ำได้ อบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ทำการเติมสารเติมแต่งอะลูมิเนียมไนเตรต ลิเทียมคาร์บอเนต กรดบอร์ริก และบอแรกซ์ ซึ่งใช้เป็นสารตั้งต้นที่ให้เฟสสปอคูมินและแก้วบอโรซิลิเกตเพื่อเป็นตัวช่วยเผาผนึกเนื่องจากเป็นสารตั้งต้นที่มีจุดหลอมเหลวต่ำและเป็นวัสดุมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ โดยการเติมในอัตราส่วน 5 10 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำการบดผสมและขึ้นรูปด้วยการอัดแห้งเป็นรูปเหรียญ เเผาที่อุณหภูมิระหว่าง 1000-1250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที พบว่าการนำเถ้าแกลบมาผสมกับสปอคูมินในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เเผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ทำให้ได้ชิ้นงานมีความหนาแน่นสูงที่สุดที่ 2.12 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ไม่เกิดเฟสของคริสโตบาลิต์ พบเพียงเฟสเพทาไลต์ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำเท่ากับ 2.70×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส ซึ่งทำให้ชิ้นงานมีความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันได้ แต่การที่นำเถ้าแกลบมาผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกตไม่ช่วยการเผาผนึก แต่จะเกิดคริสโตบาลิต์มาก ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนสูงและไม่สามารถนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ได้

ภาควิชา วัสดุศาสตร์..... ลายมือชื่อนิติศ.....
 สาขาวิชา เทคโนโลยีเซรามิก..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา 2553..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5172613023 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEYWORDS : RICE HUSK ASH / SILICA GLASS / SPODUMENE / BOROSILICATE GLASS

BORWORN VORAJESDAROM : EFFECTS OF ADDITIVES ON PROPERTIES OF SINTERED SILICA GLASS FROM RICE HUSK ASH. ADVISOR : ASST. PROF. THANAKORN WASANAPIARNPONG, Ph.D., CO-ADVISOR : SIRIPHAN NILPAIRACH, Ph.D., 78 pp.

Rice husk ash is a waste material from rice husk burning as a biomass energy resource. It is attracted to be used as a raw material for glass production because it contains more than 90 wt% of silica. However, the cristobalite crystal was promoted by alkaline oxide impurity in it and damages the product when cooling down after firing due to its high thermal expansion coefficient or thermal shock. In this research, the amorphous rice husk ash was fine ground by wet ball milling with zirconia ball and distilled water in a polyethylene bottle. Slurry was filtrated using suction filter and dried at 105 °C. Sintering aids addition such as aluminium nitrate, lithium carbonate, borax and boric acid were used as a spodumene and borosilicate glass precursors and as additive material for suppressing the formation of cristobalite crystal due to their low thermal expansion coefficient. To investigate the effects of the sintering additives on the physical properties and thermal expansion coefficient, the ratios of spodumene and borosilicate glass were varied from 5, 10, 25 and 50 wt%. Mixed powders were dry pressed into pellet shape and sintered at the temperature between 1000-1250 °C with soaking time of 30 min in an electrical furnace. It was found that when the spodumene was added at 50 wt% and sintered at 1250 °C, density of specimens was increased to 2.12 g/cm³. The cristobalite phase crystallization was inhibited with the formation of petalite phase. Moreover, low thermal expansion coefficient of at 2.7x10⁻⁶ °C⁻¹ was achieved with high thermal shock resistance. On the other hand, the borosilicate glass added in rice husk ash could not achieve to inhibit the cristallization of cristobalite phase and thermal expansion coefficient still remained high which not suitable to be used in production.

Department : Materials Science..... Student's Signature

Field of Study : Ceramic Technology..... Advisor's Signature

Academic Year : 2010..... Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ การสนับสนุนและความช่วยเหลือทั้งในด้านวิชาการ และการดำเนินการวิจัย จากท่านทั้งหลายและหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนากร วาสนาเพชรพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.สิริพรรณ นิลไพรัช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และการแก้ไขปัญหาตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และคณาจารย์ทุกท่าน ที่กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่า มาให้ความรู้ คำชี้แนะเกี่ยวกับแนวทางในงานวิจัย และแก้ไขข้อบกพร่องของรูปเล่มวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้อง และสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ทูนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภายใต้โครงการ เชื่อมโยงภาคการผลิตกับงานวิจัย ทูน สกว.- อุตสาหกรรม MAG Window I ปี 2553 ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัย ค่าใช้จ่ายต่างๆ และได้รับการสนับสนุนร่วมงานวิจัยและร่วมสนับสนุนเงินทุนวิจัยจากบริษัท ฉัตรวิบูลย์เครื่องเคลือบดินเผา จำกัด คุณเอกราช รุจิรกาโมทย์ ผู้จัดการฝ่ายผลิต

หน่วยปฏิบัติการวิจัยเซรามิกขั้นสูง ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง ที่ให้ทุนสนับสนุนด้านการศึกษา งานวิจัย และการนำเสนอผลงาน

โรงไฟฟ้าพลังงานแกลบ บริษัท เอ. ที. ไบโอฟาวเวอร์ จำกัด จังหวัดพิจิตร ที่กรุณาให้การอนุเคราะห์แกลบมาทำการทดลอง

นางสาวปราณี จันทร์ลา และเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือในการทดลองวิจัย

สุดท้ายขอขอบพระคุณครอบครัวผู้วิจัย ที่คอยให้การสนับสนุน และกำลังใจในทุกๆ ความสำเร็จมาโดยตลอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 แกลบ.....	3
2.1.1 การใช้งานแกลบ	3
2.1.2 องค์ประกอบของแกลบ	4
2.2 เถ้าแกลบ.....	4
2.3 การใช้ประโยชน์ต่างๆ จากเถ้าแกลบ	7
2.3.1 อุตสาหกรรมโลหะ	7
2.3.2 อุตสาหกรรมซีเมนต์และคอนกรีต.....	7
2.3.3 ด้านการเกษตร	8
2.3.4 ด้านวัสดุก่อสร้าง.....	8
2.3.5 อุตสาหกรรมเซรามิก	8
2.4 วัสดุที่ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน	9
2.4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน	10
2.4.2 การนำความร้อน	10
2.4.3 ความแข็งแรง	10
2.4.4 มอดุลัสของความยืดหยุ่น.....	10
2.5 ภาชนะเซรามิกใส่อาหารที่ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน.....	11

2.6 ซิลิกา	12
2.7 แก้วซิลิกา (Silica Glass)	13
2.8 สมบัติโดยทั่วไปของซิลิกา	13
2.9 การใช้งานทางด้านต่างๆ ของซิลิกา	14
2.10 สปอดูมีน (Spodumene)	14
2.11 แก้วบอโรซิลิเกต (Borosilicate glass).....	15
2.12 ผลงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง	17
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	19
3.1 สารเคมีและวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง.....	19
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	19
3.3 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ.....	19
3.3.1 การเตรียมผงแก้วแคลบละเอียด.....	19
3.3.2 การผสมสารเคมีต่างๆ	19
3.3.3 การขึ้นรูปชิ้นงาน	22
3.3.4 การเผาผนึก	23
3.4 แผนผังการทดลอง	24
3.5 การวิเคราะห์สมบัติของตัวอย่างชิ้นงาน	26
3.5.1 การวัดความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำ	26
3.5.2 การทดสอบการหดตัว.....	26
3.5.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงาน	28
3.5.4 การวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน	29
3.5.5 การวิเคราะห์พฤติกรรมกรรมการเผาผนึก	29
3.5.6 การวิเคราะห์ลักษณะ โครงสร้างจุลภาค	29
3.5.7 การทดสอบความต้านแรงดัดโค้ง	30
3.5.8 การทดสอบความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน	31
บทที่ 4 ผลการทดลอง	33
4.1 ลักษณะเฉพาะของวัตถุดิบ	33
4.2 องค์ประกอบทางเฟส	34
4.2.1 พฤติกรรมการเผาผนึก	35
4.2.2 การกระจายขนาดของอนุภาค	36

4.2.3 โครงสร้างจุลภาค.....	38
4.3 ผลของสารเติมแต่งสโปคูมินและ แก้วบอโรซิลิเกตต่อสมบัติต่างๆ	40
4.3.1 องค์ประกอบทางเฟส.....	40
4.3.2 ความหนาแน่น เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ และการหดตัว	45
4.3.3 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน	49
4.3.4 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างจุลภาค.....	52
4.3.5 ความต้านแรงคัดโค้ง (ความแข็งแรง).....	56
4.3.6 ความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน	56
4.3.7 ผลของการขึ้นรูปชิ้นงานเป็นผลิตภัณฑ์	57
4.4 ผลของแร่สโปคูมินธรรมชาติต่อสมบัติต่างๆ.....	58
4.4.1 องค์ประกอบทางเฟส.....	58
4.4.2 ความหนาแน่น เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ และการหดตัว	59
4.4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน	62
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	64
5.1 สรุปผลการวิจัย	64
5.2 ข้อเสนอแนะ	64
รายการอ้างอิง.....	65
ภาคผนวก.....	68
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	78

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 รายชื่อโรงไฟฟ้าพลังงานแกลบ ที่ตั้ง กำลังการผลิต และปริมาณแกลบที่ผลิตได้.....	6
ตารางที่ 2.2 วัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ	11
ตารางที่ 2.3 สมบัติต่างๆ ของซลิกาและแก้วซลิกา	13
ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบสมบัติของซลิกาในรูปแบบผลึกต่างๆ	14
ตารางที่ 2.5 สมบัติต่างๆ ของแก้วโบโรซลิกเกต.....	16
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีตั้งต้นของวัตถุดิบที่ใช้คำนวณ	20
ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมแกลบกับสโปคูมินในอัตราส่วนต่างๆ	20
ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมแกลบกับแก้วโบโรซลิกเกตในอัตราส่วนต่างๆ.....	21
ตารางที่ 3.4 องค์ประกอบทางเคมีของแร่สโปคูมิน	21
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีและความละเอียดของแกลบ	33
ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของวัสดุ	50
ตารางที่ 4.3 ค่าความต้านทานต่อการกัด โคง.....	56
ตารางที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของแกลบที่ผสมด้วยสโปคูมิน	62

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 แกลบ3

รูปที่ 2.2 a) ถ้ำแกลบจากบริษัท เอ.ที. ไปโอ พาวเวอร์ และ b) ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD5

รูปที่ 2.3 การผลิตเหล็กกล้ามีการใช้งานถ้ำแกลบเพื่อ โรยผิวหน้าป้องกันการการสูญเสียความร้อน7

รูปที่ 2.4 การใช้ถ้ำแกลบผสมคอนกรีต8

รูปที่ 2.5 อิฐทนไฟ9

รูปที่ 2.6 แผนผังการเปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิต่างๆ ของซิลิกา.....12

รูปที่ 2.7 แร่สปอดูมิน (Spodumene)15

รูปที่ 2.8 ภาชนะแก้วบอโรซิลิเกต (Borosilicate glass).....16

รูปที่ 3.1 เครื่อง Rotary Evaporator22

รูปที่ 3.2 เครื่องอัดไฮดรอลิก22

รูปที่ 3.3 เตาเผา Gradient.....23

รูปที่ 3.4 แผนผังการเตรียมถ้ำแกลบบดละเอียด.....24

รูปที่ 3.5 แผนผังการทดลอง25

รูปที่ 3.6 เครื่อง X-Ray Diffractometer28

รูปที่ 3.7 เครื่อง Dilometer.....29

รูปที่ 3.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด30

รูปที่ 3.9 เครื่อง Universal testing machine31

รูปที่ 4.1 องค์ประกอบทางเฟสของถ้ำแกลบบริสุทธิ์ ก่อนเผาและที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิต่างๆ .34

รูปที่ 4.2 พฤติกรรมการเผาของถ้ำแกลบบริสุทธิ์35

รูปที่ 4.3 การกระจายขนาดอนุภาคของถ้ำแกลบก่อนบดล้าง หลังบดล้าง ถ้ำแกลบที่ผสมด้วยสปอดูมิน และถ้ำแกลบที่ผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกต ในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 37

รูปที่ 4.4 การกระจายขนาดสะสมของอนุภาคถ้ำแกลบก่อนบดล้าง หลังบดล้าง ถ้ำแกลบที่ผสมด้วยสปอดูมิน และถ้ำแกลบที่ผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกตในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก37

รูปที่ 4.5 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผงวัดดูบิจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (a) ถ้ำแกลบก่อนบดล้าง (b) ถ้ำแกลบหลังบดล้าง (c) ถ้ำแกลบผสมด้วยสปอดูมิน 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (d) ถ้ำแกลบผสมด้วยสปอดูมิน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (e) ถ้ำแกลบผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกต 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (e) ถ้ำแกลบผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกต 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก39

- รูปที่ 4.20** ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของเถาเคลือบบริสุทธิ์ และเถาเคลือบที่ผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกตในอัตราส่วน 5, 10, 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิต่างๆ 49
- รูปที่ 4.21** การขยายตัวทางความร้อนของเถาเคลือบที่ผสมด้วยสปอคูมิน ในอัตราส่วน 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก50
- รูปที่ 4.22** การขยายตัวทางความร้อนของเถาเคลือบที่ผสมด้วยสปอคูมิน ในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก51
- รูปที่ 4.23** ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของผิวหน้าชิ้นงานที่หักของชิ้นงานเถาเคลือบที่ผสมด้วยสปอคูมินในอัตราส่วน 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส53
- รูปที่ 4.24** ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของผิวหน้าชิ้นงานที่หักของเถาเคลือบที่ผสมด้วยสปอคูมิน ในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส.....53
- รูปที่ 4.25** ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของผิวขัดหน้า และกัดผิวของชิ้นงานเถาเคลือบที่ผสมด้วยสปอคูมินในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส54
- รูปที่ 4.26** ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของผิวหน้าชิ้นงานที่หักของชิ้นงานเถาเคลือบที่ผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกตในอัตราส่วน 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส55
- รูปที่ 4.27** ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของผิวหน้าชิ้นงานที่หักของชิ้นงานเถาเคลือบที่ผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกตในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส55
- รูปที่ 4.28** ชิ้นงานทดสอบความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน a) ก่อนทดสอบ b) หลังทดสอบ57
- รูปที่ 4.29** ชิ้นงานรูปถ้วย a) เถาเคลือบที่ผสมด้วยสปอคูมิน (ก่อนเผา) b) เถาเคลือบที่ผสมด้วยสปอคูมิน (หลังเผา)58
- รูปที่ 4.30** องค์ประกอบทางเฟสของเถาเคลือบที่ผสมด้วยสปอคูมิน และเถาเคลือบที่ผสมด้วยแร่สปอคูมิน ในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส59
- รูปที่ 4.31** ความหนาแน่นของเถาเคลือบที่ผสมด้วยสปอคูมิน และเถาเคลือบที่ผสมด้วยแร่สปอคูมิน ในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิต่างๆ.....60

หน้า

- รูปที่ 4.32** เปอร์เซ็นต์การหดตัวของแก้วเคลือบที่ผสมด้วยสโปคูมิน และแก้วเคลือบที่ผสมด้วยแร่สโปคูมินในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิต่างๆ.....60
- รูปที่ 4.33** ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของแก้วเคลือบที่ผสมด้วยสโปคูมิน และแก้วเคลือบที่ผสมด้วยแร่สโปคูมินในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิต่างๆ61
- รูปที่ 4.34** การขยายตัวทางความร้อนของแก้วเคลือบที่ผสมด้วยสโปคูมินที่ได้จากการผสมระหว่างอะลูมิเนียมไนเตรต และลิเทียมคาร์บอเนต และแก้วเคลือบที่ผสมด้วยแร่สโปคูมินในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก63

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมซึ่งประชากรในประเทศส่วนใหญ่จะทำการปลูกข้าวเป็นอาชีพหลักเราจึงมีเกลบเหลือจากการสีข้าวเป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือใช้จากการผลิตข้าวสาร บางส่วนจะนำไปใช้ประโยชน์ในการเผาเพื่อเป็นเชื้อเพลิง ในครัวเรือน โรงสีข้าว โรงงานอุตสาหกรรม หรือโรงงานไฟฟ้าชีวมวล อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าจะได้พลังงานความร้อนจากการเผาเกลบ ก็จะคงเหลือ เถ้าเกลบซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในทางการเกษตรกรรม เช่น ผสมดินเพื่อใช้สำหรับเตรียมดินในแปลงเพาะชำพืชต่างๆ หรือนำไปใช้ทำปุ๋ยและบางส่วนที่ยังไม่ได้นำมาใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างคุ้มค่า ซึ่งส่วนใหญ่ยังคงเป็นวัสดุเหลือทิ้งเช่นเดิม

ปกติแล้วองค์ประกอบของเกลบข้าวจะประกอบไปด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) หรือซิลิกา ประมาณ 20-25 เปอร์เซ็นต์ สารอินทรีย์ประเภทเซลลูโลส 75-80 เปอร์เซ็นต์ และสิ่งเจือปนพวกโลหะ ออกไซด์อีกเล็กน้อย แต่เมื่อนำเกลบข้าวไปเผาจะได้เถ้าเกลบซึ่งประกอบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ [1] จึงมีงานวิจัยที่นำเถ้าเกลบมาเป็นส่วนผสมมากมาย อย่างไรก็ตามในเถ้า เกลบไม่ได้ประกอบไปด้วยซิลิกอนไดออกไซด์เพียงอย่างเดียวยังมีสิ่งเจือปนจำพวกแอลคาไลน์ปะปน อยู่ด้วย เช่น ออกไซด์ของโพแทสเซียม ที่มักพบในเถ้าเกลบโดยทั่วไปประมาณ 1-2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่ง แอลคาไลน์จำพวกนี้จะเป็นตัวเร่งให้เกิดการตกผลึกของซิลิกาเป็นคริสโตบาลิตได้ [2] จึงมักมี ผลึกคริสโตบาลิตปะปนอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งผลึกคริสโตบาลิตนี้เป็นตัวที่เราไม่ต้องการให้เกิดขึ้นใน ผลิตภัณฑ์เซรามิก เนื่องจากเป็นตัวที่ทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการแตกหักเสียหายได้ แต่จากการวิเคราะห์ เบื้องต้นของเถ้าเกลบจากโรงไฟฟ้าพลังงานเกลบ เอทีไบโอพาวเวอร์ จังหวัดพิจิตร พบว่ามีเพียงซิลิกา ในรูปของอสัณฐานไม่เป็นผลึก จึงมีความสนใจที่จะนำมาศึกษาการเผาผนึกให้เป็นผลิตภัณฑ์แก้วซิลิกา

แก้วซิลิกาเป็นวัสดุที่มีค่าการขยายตัวทางความร้อนต่ำเพียงประมาณ 0.5×10^{-6} ต่อองศา เซลเซียส จึงทำให้มีสมบัติที่ทนต่อการแตกร้าวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันเป็น อย่างดี และมีความแข็งแรงสูง สามารถนำไปผลิตเป็นภาชนะประกอบอาหารที่ทนต่อเปลวไฟหรือเตา อบ เตาไมโครเวฟได้ดี แต่เนื่องจากการผลิตแก้วซิลิกาจะต้องทำการหลอมสารประกอบซิลิกาที่อุณหภูมิ สูงกว่า 1800 องศาเซลเซียส ทำการขึ้นรูปแล้วทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว เพื่อไม่ให้เกิดการตกผลึก เป็นคริสโตบาลิต ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงและเกิดการหดตัวอย่างรุนแรงที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300 องศา เซลเซียส [3] อีกทั้งมีค่าการขยายตัวทางความร้อนสูงทำให้เกิดการแตกร้าวได้ แต่องค์ประกอบหลักที่เป็นซิลิกามีความทนไฟสูงยากต่อการเผาผนึก จึงต้องเติมตัวช่วยในการเผาผนึกที่เหมาะสมซึ่งเป็นการ ช่วยประหยัดพลังงาน และยังลดต้นทุนการผลิตอีกด้วย

ในวงการอุตสาหกรรมแก้วและเซรามิกนั้นวัสดุที่นิยมใช้เป็นตัวเติมช่วยในการเผาผลาญมีอยู่หลายชนิด เช่น หินฟันม้า (Feldspar) ทัลค์ (Talc) สปอดูมิน (Spodumene) หินผุ (Pottery Stone) และแก้วโบโรซิลิเกต (Borosilicate glass) วัสดุเหล่านี้เป็นตัวที่ช่วยลดอุณหภูมิในการเผาผลาญได้ ซึ่งวัสดุที่งานวิจัยนี้สนใจที่จะนำมาใช้เป็นตัวเติมช่วยในการเผาผลาญ คือสปอดูมิน และแก้วโบโรซิลิเกต เนื่องจากเป็นตัวเติมช่วยในการเผาผลาญ และยังเป็นวัสดุที่มีค่าการขยายตัวทางความร้อนต่ำด้วย

งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะทำการศึกษาผลของการเติมสปอดูมินและแก้วโบโรซิลิเกต ในปริมาณต่างๆ กัน โดยการเผาผลาญที่อุณหภูมิต่างๆ กัน ให้ได้ความหนาแน่นสูง และมีค่าการขยายตัวทางความร้อนต่ำ ซึ่งเหมาะกับการใช้งานที่ต้องการความทนทานต่อการแตกร้าวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาการเตรียมชิ้นงานแก้วซิลิกาจากเถ้าแกลบด้วยการเผาผลาญให้ได้ความหนาแน่นสูง และมีค่าการขยายตัวทางความร้อนต่ำ ซึ่งเหมาะกับการใช้งานที่ต้องการความทนทานต่อการแตกร้าวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน โดยการเติมสปอดูมินและแก้วโบโรซิลิเกต

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาสมบัติต่างๆ ของชิ้นงานแก้วซิลิกาจากเถ้าแกลบด้วยการเผาผลาญโดยการเติมสปอดูมินและแก้วโบโรซิลิเกต

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ชิ้นงานแก้วซิลิกาที่มีความหนาแน่นสูงจากเถ้าแกลบโดยการเผาผลาญ ซึ่งมีความทนทานต่อการแตกร้าวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีทรัพยากรทางธรรมชาติที่อุดมสมบูรณ์เหมาะแก่การเพาะปลูก ซึ่งประชากรส่วนใหญ่ในประเทศยังประกอบอาชีพเกษตรกรรมโดยเฉพาะการทำนาปลูกข้าว ซึ่งได้ผลผลิตสูงเพื่อบริโภคภายในประเทศและเพื่อการส่งออก ในแต่ละปีโดยเฉพาะในปี พ.ศ. 2553 ประเทศไทยผลิตข้าวเปลือกได้มากถึง 30-32 ล้านตัน และได้ส่งออกข้าวประมาณ 9.0 ล้านตันต่อปี [4] ในปัจจุบันจำนวนประชากรในประเทศเพิ่มมากขึ้นทุกๆ ปี ด้วยเหตุนี้เกษตรกรจึงจำเป็นต้องเพิ่มผลผลิตของข้าวให้เพียงพอต่อการบริโภค

2.1 แกลบ

แกลบ (rice husk) คือผลผลิตที่ได้จากการสีข้าวเป็นข้าวกล้องและแกลบ โดยมีส่วนผสมของเปลือกเมล็ด กลิบเลี้ยง ฟาง และข้าวเมล็ด ประมาณ 22.5-25.2 เปอร์เซ็นต์ [1] ของข้าวเปลือก ซึ่งจะมีปริมาณแกลบรวมทั้งประเทศประมาณ 6 ล้านตัน หากพิจารณาโครงสร้างจุลภาคจะพบว่าพื้นผิวของแกลบมีรูปร่างคล้ายข้าวโพด มีลักษณะเป็นเกล็ดขนาดเล็กเรียงเป็นแนวโครงสร้างภายในมีความพรุนตัวสูงเพื่อใช้เป็นทางลำเลียงน้ำและอาหาร [5] แกลบจะมีลักษณะของเมล็ดเป็นรูปทรงรี เม็ดยาวสีเหลืองอมน้ำตาล หรือเหลืองนวล [6] ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แกลบ

2.1.1 การใช้งานแกลบ

สามารถนำแกลบมาใช้เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนโดยตรง หรือแปรรูปเป็นพลังงานที่มีมูลค่าเพิ่มได้ เช่น การอัดให้เป็นแท่งเชื้อเพลิงแข็งเพื่อใช้แทนฟืนหรือถ่าน การแปรรูปโดยกรรมวิธีที่

เรียกว่าการกลั่นสลาย (pyrolysis) เพื่อให้ได้ก๊าซและน้ำมัน การแปรรูปเป็นก๊าซเชื้อเพลิง (synthetic gas) เนื่องจากแกลบมีปริมาณสารอินทรีย์อยู่สูง และมีค่าความร้อนสูงพอที่จะใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ดีจึงมีการนำมาเผาเป็นพลังงานสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้า แกลบยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น ผลิตวัสดุก่อสร้างหรือผงอัด นอกจากนี้แกลบยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ได้ เช่น

1. **ด้านการเกษตร** ใช้ผสมเพื่อปรับสภาพดิน ทำปุ๋ยหมัก ใช้กันความชื้นในคอกสัตว์โดยใช้เป็นวัสดุปูพื้นโรงเรือน
2. **ด้านการก่อสร้าง** เป็นส่วนผสมในการทำอิฐเพื่อใช้ในการก่อสร้าง หรือนำมาเป็นส่วนผสมในการสร้างที่พังก๊าซ เช่น บ้านดิน
3. **ด้านพลังงาน และอุตสาหกรรม** ใช้เป็นเชื้อเพลิง เช่น ทำถ่านอัดแท่งจากแกลบ ใช้เป็นส่วนผสมของสบู่ ยาระดม และน้ำยาล้างจาน หรือว่าใช้เป็นสารดูดซับก๊าซจากกระบวนการผลิตทางด้านอุตสาหกรรม

2.1.2 องค์ประกอบของแกลบ

องค์ประกอบของแกลบนั้นประกอบด้วยสารอินทรีย์อยู่ประมาณ 20-25 เปอร์เซ็นต์ เซลลูโลส 50-60 เปอร์เซ็นต์ และลิกนิน 22 เปอร์เซ็นต์ [7] โดยในส่วนของสารอินทรีย์นั้นองค์ประกอบหลักก็คือ ซิลิกา ซึ่งมีช่วงอยู่ตั้งแต่ 85-99% นอกจากนั้นยังมี อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และอื่นๆ ซึ่งปริมาณซิลิกาและมลทินเหล่านี้ขึ้นอยู่กับแหล่งที่เพาะปลูกข้าว ชนิดของข้าวและปุ๋ยที่ใช้ด้วย

2.2 เล้าแกลบ

ในปัจจุบัน แกลบมิได้เป็นวัสดุไร้ค่าอีกต่อไป เนื่องจากแกลบนั้น จัดเป็นวัสดุเชื้อเพลิงให้พลังงาน (Biomass) ใช้เป็นเชื้อเพลิงให้พลังงานความร้อน และผลิตกระแสไฟฟ้า โดยมีการใช้งานแกลบเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าทั้งประเทศไทย ที่ประมาณ 1.2-1.6 ล้านตัน และเหลือทิ้งตามท้องถิ่น หรือนำไปใช้งานอย่างอื่นอีกกว่า 4-5 ล้านตัน ในประเทศไทย มีโรงสีข้าว ที่ได้รับอนุญาตให้ประกอบกิจการสีข้าว และขึ้นทะเบียนโรงสีข้าว ทั้งสิ้นประมาณ 38,800 โรง เมื่อวันที่ 31 ธันวาคม 2553 โดยในจำนวนนี้มีเครื่องจักรที่มีกำลังแรงม้าสูงไม่น้อยกว่า 20 แรงม้าขึ้นไปอยู่ประมาณ 3,000 โรง จากการประมาณการ คาดว่าข้าวเปลือกจะเข้าสู่โรงสีต่างๆ ทั้งเล็กใหญ่ที่มีการจดทะเบียนเหล่านี้ประมาณ 25-26 ล้านตัน ส่วนที่เหลืออีกประมาณ 5-6 ล้านตัน เป็นการจำหน่ายในรูปของข้าวเปลือก หรือทำการสีแล้วบริโภคเองในครัวเรือน แกลบส่วนใหญ่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการให้พลังงานต่างๆ ซึ่งสิ่งที่หลงเหลือที่ได้จากการเผาของแกลบนั้นก็จะได้เป็นถ้ำแกลบ ซึ่งมีความพรุน (porosity) มาก น้ำหนักเบา มีพื้นที่ผิวมาก มีสมบัติดูดซับ (absorbent) ดีอีกทั้งมีสมบัติเป็นฉนวนด้วย โดยนักวิทยาศาสตร์ได้มีการทำการวิจัย พบว่า

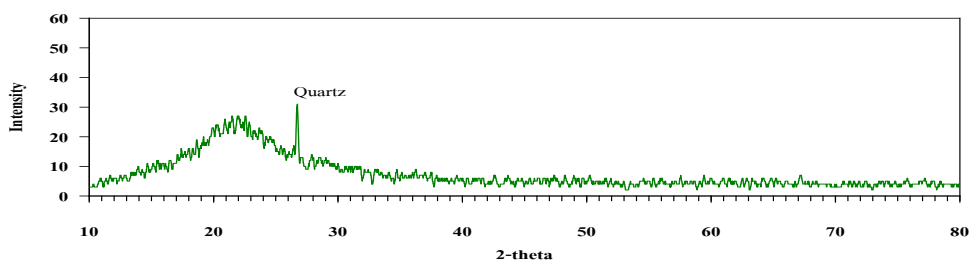
ในแก้วเคลือบมีซิลิกา (silica, SiO_2) เป็นองค์ประกอบมากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ และมีสิ่งเจือปนพวกโลหะออกไซด์อีกเล็กน้อย [8] ซึ่งแอลคาไลน์จำพวกนี้จะเป็นตัวเร่งให้เกิดการตกผลึกของซิลิกาเป็นคริสโตบาไลต์ได้ จึงมักมีผลึกคริสโตบาไลต์ปนอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งผลึกคริสโตบาไลต์นี้เป็นตัวที่ทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการแตกหักเสียหายได้

เคลือบผิวเมื่อนำมาเผาจะได้เป็นแก้วเคลือบ ซึ่งถ้านำไปเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 700 องศาเซลเซียส ซิลิกาที่ได้จะเป็นซิลิกาแบบอสัณฐาน (Amorphous silica) แต่หากเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 700 องศาเซลเซียส จะได้ซิลิกาแบบผลึก (Crystalline silica) [9] จากการสำรวจปริมาณการผลิตแก้วเคลือบของโรงไฟฟ้าพลังงานเคลือบดังแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท เอ.ที. ไบโอ พาวเวอร์ จำกัด จากจังหวัดพิจิตร ซึ่งมีกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้าถึง 22.5 เมกะวัตต์ แม้จะมีปริมาณแก้วเคลือบที่ผลิตออกมาไม่มาก คือเพียงปีละประมาณ 30,000 ตัน แต่เนื่องจากแก้วเคลือบจากโรงไฟฟ้าแห่งนี้มีความละเอียดกว่าจากที่อื่นๆ อีกทั้งยังมีความเป็นผลึกต่ำ โดยไม่มีผลึกของคริสโตบาไลต์อยู่เลย ดังแสดงในรูปที่ 2.2

a)



b)



รูปที่ 2.2 a) แก้วเคลือบจากบริษัท เอ.ที. ไบโอ พาวเวอร์ และ b) ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD

ตารางที่ 2.1 รายชื่อโรงไฟฟ้าพลังงานแกลบ ที่ตั้ง กำลังการผลิต และปริมาณแกลบที่ผลิตได้

โรงไฟฟ้า	ที่อยู่	กำลังการผลิตไฟฟ้า (MW)	ปริมาณแกลบ (ตัน / ปี)
บ. บัวใหญ่ ไบโอ เพาเวอร์ จก.	88 หมู่ 5 ถนนนิเวศน์ ตำบลด่านช้าง อ.บัวใหญ่ จ. นครราชสีมา 30120	7.5	9,750
บ. พีอาร์จี พีชผล จก. หรือ บ. ปทุมไรชมิล แอนด์ แกรนารี จก. (มหาชน)	88 ถนนติวานนท์ ตำบลบางกะดี อ.เมือง จ.ปทุมธานี 12000	9	11,700
บ. แอ็ดวานซ์ อะโกร จก. (มหาชน)	1 หมู่ 2 ถนนทางหลวง3079 ตำบลท่าคูม อ.ศรีมหาโพธิ์ จ.ปราจีนบุรี 25140	50	38,000
บ. บีดับบลิว เพาเวอร์ ซัพพลาย จก.	99 หมู่ 3 ถนนละโว้ง-กบินทร์บุรี ตำบลเขาหินซ้อน อ.บางปะกง จ.ฉะเชิงเทรา 24130	3	3,900
บ. บีทีเค เพาเวอร์ ซัพพลาย จก.	57/5-9 หมู่ 11 ถนนสุขุมวิท ตำบลบางปะกง อ.บางปะกง จ.ฉะเชิงเทรา 24130	10.4	13,520
บ. ไทยเพาเวอร์ ซัพพลาย จก. (1)	94/1 หมู่ 3 ถนนกบินทร์บุรี-ฉะเชิงเทรา ตำบลเขาหินซ้อน อ.พนมสารคาม จ.ฉะเชิงเทรา 24120	47.4	60,000
บ. ไบโอ-แมส เพาเวอร์ จก.	15 หมู่ 10 ตำบลมะขามเต่า อ.วัดสิงห์ จ.ชัยนาท	6	7,800
บ. พลังงานเพื่อการอนุรักษ์และสิ่งแวดล้อม จก.	198 ต.หนองบัว อ.วัดสิงห์ จ.ชัยนาท 17120	1.2	1,560
หสน. ัญญุกิจนครปฐม (2521)	80/5 หมู่ 4 ต.บางภาษี อ.บางเลน จ.นครปฐม 73130	0.6	780
บ. สติ๊กไบโอแมส จก.	111หมู่6 ซอยบ้านโนนกลาง ถนนบุรีรัมย์-สติ๊ก ตำบลนิคม อ.สติ๊ก จ.บุรีรัมย์ 31150	7.5	9,750
บ. เอ.ที. ไบโอ พาวเวอร์ จก.	หมู่2 ถนนตะพานหิน-บางมูลนาก ตำบลหอไกร อ.บางมูลนาก จ.พิจิตร 66120	22.5	30,000
โรงสีไฟจิตเสริมไทย	942 ถ.ริมถนน อ.ตะพานหิน จ.พิจิตร 66110	1	1,300
บ. บัวสมหมาย จก.(1)	228 หมู่ 10 ตำบลเหนือเมือง อ.เมือง จ.ร้อยเอ็ด 45000	6	7,800
บ. ร้อยเอ็ด กรีน จก.	222หมู่ 10 ซอยบ้านหนองนาสร้าง ถนนร้อยเอ็ด-กาฬสินธุ์ ต.เหนือเมือง อ.เมือง จ.ร้อยเอ็ด 45000	9.9	12,870
บ. อุ่ทองไบโอแมส จก.	145 หมู่ 3 ต.พลับพลาไชย อ.อุ่ทอง จ.สุพรรณบุรี 72160	7.5	9,750
บ. มุ่งเจริญกรีน เพาเวอร์ จก.	130 หมู่ 7 ถนนสุรินทร์-ศรีขรภูมิ ตำบลบุญญาติ อ.เมือง จ.สุรินทร์ 32000	9.9	12,870
รวม		199.4	231,350

* ข้อมูลจากสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน และมูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม

2.3 การใช้ประโยชน์ต่างๆ จากถ้ำกลบ

ถ้ำกลบหลังจากถูกเผาเพื่อนำพลังงานความร้อนไปใช้ประโยชน์แล้วก็จะกลายเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่หาได้ง่ายและมักไม่มีราคา จึงได้มีการพยายามนำถ้ำกลบไปใช้ประโยชน์ [1] เช่น

2.3.1 อุตสาหกรรมโลหะ

มีการใช้งานถ้ำกลบดำที่ไม่มีการบดละเอียดในอุตสาหกรรมโลหะ (Steel Industry) การผลิตแผ่นเหล็กกล้าคุณภาพสูงด้วยกระบวนการหล่อโลหะแบบต่อเนื่อง (continuous casting) โรงงานบางแห่งจะนำถ้ำกลบดำหยาบมาโรยลงบนผิวหน้าแอ่งรับน้ำโลหะ (tundish) ดังรูปที่ 2.3 เพื่อป้องกันการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของเหล็ก และเพื่อให้เหล็กแข็งตัวอย่างสม่ำเสมอ เพราะถ้ำกลบดำมีสมบัติเป็นฉนวนความร้อนที่ดี และมีจุดหลอมเหลวสูง



รูปที่ 2.3 การผลิตเหล็กกล้ามีการใช้งานถ้ำกลบดำเพื่อโรยผิวหน้าป้องกันการการสูญเสียความร้อน [1]

2.3.2 อุตสาหกรรมซีเมนต์และคอนกรีต

สำหรับอุตสาหกรรมซีเมนต์และคอนกรีต (Cement and Concrete) การใช้ถ้ำกลบดำในอุตสาหกรรมมีวัตถุประสงค์หลัก 2 อย่างคือ 1) ใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (portland) เพื่อลดต้นทุนในการผลิตอิฐก่อสร้างราคาถูก 2) ใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตความแข็งแรงสูง (high strength concrete) ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การใช้เถ้าแกลบผสมคอนกรีต [1]

2.3.3 ด้านการเกษตร

เราสามารถนำเถ้าแกลบเป็นวัสดุปลูก ใส่เป็นปุ๋ยเสริมให้ความร่วนซุยกับดิน และยังใช้ในการป้องกันแมลง นำเถ้าแกลบมาใช้ป้องกันผลผลิตทางการเกษตรจากแมลงศัตรูพืช โดยเกษตรกรจะคลุกเถ้าแกลบกับเมล็ดถั่วเหลืองเพื่อป้องกันด้วงแกรมบี้ (Graham bean beetle) โดยใช้เถ้าแกลบประมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์ ต่อน้ำหนักถั่ว ซึ่งปรากฏว่าได้ผลดี

2.3.4 ด้านวัสดุก่อสร้าง

วัสดุก่อสร้างน้ำหนักเบา (Lightweight Construction Materials) ด้วยเหตุที่เถ้าแกลบมีสมบัติเป็นฉนวนกันความร้อน ดังนั้นประเทศที่กำลังพัฒนาหลายประเทศจึงนำเถ้าแกลบมาใช้ผลิตฝ้ากันความร้อนน้ำหนักเบา

2.3.5 อุตสาหกรรมเซรามิก

การใช้งานเถ้าแกลบในงานเซรามิกนั้น มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องไม่มากนัก Prasad, C. S. และคณะ [8] ใช้เถ้าแกลบเติมลงไปเหนือดินที่จะผลิตเป็น whiteware ซึ่งเป็นการเติมทดแทน ซิลิกาที่เป็นองค์ประกอบหลักของเถ้าแกลบแทนที่ควอตซ์ ซึ่งการเติมเถ้าแกลบนั้นจะสามารถปรับปรุงสมบัติของชิ้นงาน whiteware ได้โดยจะลดการขยายตัวทางความร้อนและสามารถเพิ่มความแข็งแรงหลังเผาของชิ้นงานได้

นอกจากนี้ การใช้งานเถ้าแกลบในงานเซรามิกนั้น จะเป็นการสังเคราะห์ให้ได้ซิลิกาที่ค่อนข้างบริสุทธิ์แล้วยังสามารถนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตชิ้นงานเซรามิก เป็นสารดูดความชื้นและยังเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์สารตัวอื่นๆ เช่น ซีโอไลต์อีกด้วย

อุตสาหกรรมการผลิตอิฐทนไฟ (Refractory Bricks) การที่เถ้าแกลบมีสมบัติเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี และมีจุดหลอมเหลวสูง ดังนั้นจึงมีการนำเถ้าแกลบมาใช้ผลิตอิฐทนไฟ หรืออิฐทนความร้อนสูง ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 อัฐทไฟ [1]

2.4 วัสดุที่ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน

การแตกร้าวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน (thermal shock) เกิดจากการขยายตัวหรือหดตัวของวัสดุเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป วัสดุส่วนใหญ่จะเกิดการขยายตัว และจะหดตัวกลับเมื่อเย็นตัวลง ซึ่งในกรณีที่การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเป็นไปอย่างช้าๆ การขยายหรือหดตัวจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ และทั่วถึงทั้งชิ้น แต่หากวัสดุถูกกระทำให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว ผิวนอกของวัสดุที่สัมผัสกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงโดยตรงจะเกิดการขยายหรือหดตัวอย่างรุนแรงทันที ขณะที่เนื้อวัสดุที่อยู่ข้างในที่ยังไม่สัมผัสกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะยังคงไม่มีการขยายหรือหดตัวตามผิวนอก ผลก็คือเกิดความแตกต่างของการขยายหรือหดตัวระหว่างเนื้อวัสดุแต่ละส่วน ซึ่งจะทำให้เกิดความเค้นขึ้นในเนื้อวัสดุและเกิดการแตกร้าวขึ้นในที่สุด สมบัติของวัสดุที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันมี 4 ประการ ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้ [10]

$$R = \frac{\sigma \lambda}{\alpha E}$$

เมื่อ	R	คือ	ความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน (Thermal shock resistance)
	σ	คือ	ความแข็งแรง (Strength)
	λ	คือ	ความนำความร้อน (Thermal conductivity)
	α	คือ	สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Thermal expansion coefficient)
	E	คือ	มอดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus)

2.4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน

ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Thermal expansion coefficient) คือค่าของความแตกต่างของความยาวหรือปริมาตรของชิ้นงานที่เปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป 1 องศาเซลเซียส เมื่อเทียบกับความยาวหรือปริมาตรเริ่มต้น ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนนั้นเป็นคุณลักษณะเฉพาะของวัสดุต่างๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ โครงสร้างผลึก อุณหภูมิของจุดหลอมตัว ความหนาแน่นของชิ้นงาน อุณหภูมิในการเผา สำหรับวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำจะช่วยทำให้วัสดุนั้นมีสมบัติในด้านการทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยเฉียบพลันได้ดี การวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่นิยมใช้กันมากคือเครื่องมือที่เรียกว่าเครื่อง Dilatometer โดยตัวอย่างวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ [11-14] แสดงดังตารางที่ 2.2

2.4.2 การนำความร้อน

การนำความร้อน คือการส่งผ่านความร้อนจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า มีวัสดุเป็นตัวกลางโดยวัสดุจะอยู่กับที่ แต่ความร้อนจะค่อยๆ แผ่กระจายไปตามเนื้อวัสดุนั้น ซึ่งวัสดุที่นำความร้อนได้ จะเรียกว่าตัวนำความร้อนซึ่งมักเป็นวัสดุพวกโลหะ เช่น อะลูมิเนียม ทองแดง เหล็ก วัสดุที่ไม่นำความร้อน เรียกว่า ฉนวนความร้อน วัสดุที่เป็นฉนวนความร้อน คือ ตัวกลางที่ไม่ยอมให้พลังงานความร้อนไหลผ่านหรือไหลผ่านได้น้อยได้แก่ วัสดุเซรามิก เช่น กระจก แก้ว หรือพวกวัสดุพอลิเมอร์ เช่น ผ้า พลาสติก ซึ่งวัสดุที่นำความร้อนจะมีสมบัติทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยเฉียบพลันได้ดีกว่าวัสดุที่เป็นฉนวนความร้อน อย่างไรก็ตามวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนสูงที่สุดคือเพชร ซึ่งมีค่าการนำความร้อนสูงถึง 2000 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน

2.4.3 ความแข็งแรง

ความแข็งแรง (Strength) ของวัสดุ คือการบ่งบอกถึงความคงทนต่อการผิดรูปของวัสดุ จากผลของแรงที่มากระทำต่อวัสดุนั้น ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดจะมีความแข็งแรงที่แตกต่างกันออกไป เช่น โลหะมีความแข็งแรงมากกว่าเซรามิกและพลาสติก ในขณะที่พลาสติกกลับมีความยืดหยุ่นที่สูงกว่า นอกจากนี้ความแข็งแรงยังมีผลต่อสมบัติทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยเฉียบพลันด้วย ซึ่งวัสดุที่มีความแข็งแรงมากจะมีสมบัติทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยเฉียบพลันได้ดี ในขณะที่วัสดุที่มีความแข็งแรงต่ำจะมีสมบัติทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยเฉียบพลันได้น้อย

2.4.4 มอดูลัสของความยืดหยุ่น

มอดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) เป็นค่าที่ใช้กำหนดความแข็งแรงของวัสดุ มีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างความเค้นและความเครียด โดยมีมอดูลัสของความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ของวัสดุต่างชนิดกันจะมีค่าต่างกัน ซึ่งค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุจะมีผลต่อสมบัติทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยเฉียบพลันได้เนื่องจากวัสดุที่มีค่ามอดูลัสของยังสูงจะมีการ

เปลี่ยนแปลงขนาดเมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอกได้มาก จึงทำให้มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยเฉียบพลัน ได้ดีกว่าวัสดุที่มีค่ามอดุลัสของยังที่ต่ำกว่า

ตารางที่ 2.2 วัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ [11]

Material	($\times 10^6 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)
Silica glass (SiO_2)	0.5
β -Spodumene ($\text{Li}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 4\text{SiO}_2$)	0.9
β -Eucryptite ($\text{Li}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$)	-6.2
Petalite ($\text{Li}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 8\text{SiO}_2$)	0.01
Cordierite ($\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$)	1 to 2
Zirconium Phosphate ($\text{Zr}_2\text{P}_2\text{O}_9$)	0.6
Calcium Strontium Zirconium Phosphate ($\text{Ca}_{3/4}\text{Sr}_{1/4}\text{Zr}_4\text{P}_6\text{O}_{24}$)	0.05 to 0.3
Sodium Zirconium Phosphate ($\text{NaZr}_2\text{P}_3\text{O}_{12}$)	0 to -0.3
Niobium Oxide (Nb_2O_5)	0.3
Aluminum Titanate (Al_2TiO_5)	1.4
Beryl ($\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$)	-0.4
SiO_2 - TiO_2 glass	1.4
Cu_2O - Al_2O_3 - SiO_2 glass	0.4
Zerodur (Lithium Alumino Silicate Phosphate)	2
PMN, $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$	0.05 to 0.03
Pyroceram (Lithium Alumino Silicate + TiO_2)	1
Pyrex (Borosilicate glass)	3.25
Hercovit (Spodumene-Cordierite glass ceramic)	0 to 3
Zircon (ZrSiO_4)	4.5

2.5 ภาชนะเซรามิกที่ใส่อาหารที่ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน

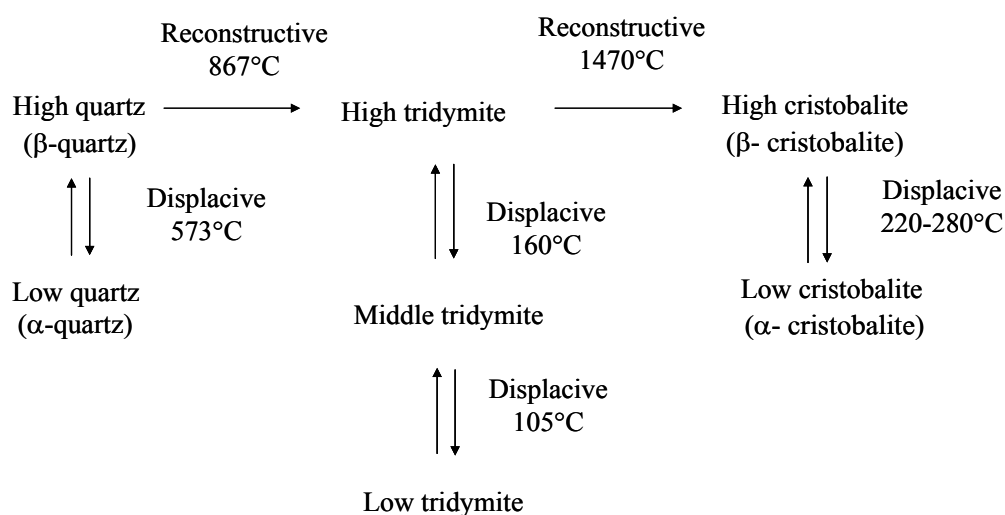
ปัจจุบันภาชนะบรรจุอาหารเป็นส่วนสำคัญอย่างหนึ่งในชีวิตประจำวันสำหรับคนเรา เนื่องจากการบริโภคอาหารทุกมื้อต้องใช้ภาชนะบรรจุอาหารเพื่อช่วยเพิ่มความสะดวกในการรับประทาน ภาชนะเซรามิกบรรจุอาหารที่ใช้น้อยอย่างแพร่หลาย ได้แก่ จาน ชาม หรือแก้ว ซึ่งการใช้ภาชนะบรรจุอาหารควร

เลือกให้เหมาะกับการใช้งาน การเลือกใช้ภาชนะบรรจุอาหารกับเตาไมโครเวฟควรเป็นภาชนะที่สามารถทนต่อความร้อนและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดี ภาชนะที่นิยมใช้กับเตาไมโครเวฟ เช่น ภาชนะพวกแก้ว หรือกลาสเซรามิก

กลาสเซรามิกเป็นแก้วที่ได้จากการนำไปหลอมแล้วปล่อยให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วเกินกว่าที่จะตกผลึก และนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อนอีกครั้ง ซึ่งถ้าสามารถควบคุมการตกผลึกของเนื้อแก้วให้ตกผลึกอย่างสม่ำเสมอ และมีขนาดที่เหมาะสม ก็จะได้กลาสเซรามิกที่มีสมบัติที่แตกต่างจากแก้วทั่วไป ซึ่งกลาสเซรามิกที่รู้จักกันดีก็คือ คอร์ดีไรต์ (Cordierite, $2\text{MgO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot \text{SiO}_2$) และสปอดูมิน (Spodumene, $\text{Li}_2\text{O}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3\cdot 4\text{SiO}_2$) โดยมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำหรือเกือบไม่ขยายตัวเลย จึงทำให้ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยเฉียบพลันได้ดี ดังนั้น คอร์ดีไรต์และสปอดูมิน จึงนิยมนำมาผลิตเป็นภาชนะที่ใช้งานที่สัมผัสกับความร้อนโดยตรง เช่น ภาชนะหุงต้ม หรือภาชนะใส่อาหาร

2.6 ซิลิกา

ซิลิกา (ซิลิกอนไดออกไซด์) คือสารประกอบระหว่างออกไซด์และซิลิกอนรวมตัวกันเป็นสูตรทางเคมีคือ SiO_2 ซิลิกามักพบได้ทั่วไปในธรรมชาติเป็นออกไซด์ที่พบมากที่สุดเปลือกโลกในแร่ต่างๆ อาจอยู่ในรูปของทรายหรือควอตซ์ และในผนังเซลล์ของไดอะตอม ทรายแก้วสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตแก้วและเซรามิกซิลิเกต โดยรูปแบบผลึกของซิลิกาที่สำคัญมี 3 รูปแบบ คือ ควอตซ์ (quartz) ทริดีไมต์ (tridymite) และคริสโตบาไลต์ (cristobalite) ซึ่งรูปผลึกทั้งสามแบบนี้มีสูตรทางเคมีเป็นสูตรเดียวกันคือ SiO_2 แต่จะแตกต่างกันในตำแหน่งการจัดเรียงอะตอมของซิลิกอน (Si atom) และออกซิเจน (Oxygen atom) ที่อยู่ในโครงสร้าง โดยซิลิกาจะมีการเปลี่ยนเฟสดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แผนผังการเปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิต่างๆ ของซิลิกา

จากแผนผังการเปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิต่างๆ ของซิลิกา จะพบว่าในช่วงเย็นตัวลง (cool down) ของคริสโตบาไลต์จาก บีตา-คริสโตบาไลต์ เป็น แอลฟา-คริสโตบาไลต์ ที่อุณหภูมิ 220-280 องศาเซลเซียส [15] จะเกิดการหดตัวอย่างรุนแรง ส่งผลให้เกิดการแตกร้าวในผลิตภัณฑ์ได้ นอกจากนี้ซิลิกายังมีรูปแบบที่เป็นอสัณฐานซิลิกา (Amorphous silica) ได้แก่พวก แก้วซิลิกา (silica glass) ที่ได้จากการหลอมขึ้นรูป และผงซิลิกา (silica particle)

2.7 แก้วซิลิกา (Silica Glass)

แก้วซิลิกา (Silica Glass) เป็นซิลิกาที่อยู่ในรูปแบบอสัณฐานซิลิกา (Amorphous silica) การหลอมแก้วชนิดนี้ใช้ความร้อนในการหลอมที่สูงมากโดยใช้อุณหภูมิที่สูงกว่า 1800 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีทรายเป็นส่วนประกอบหลัก หลังจากนั้นทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว เพื่อไม่ให้เกิดการตกผลึกเป็นคริสโตบาไลต์ ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนเฟสและเกิดการหดตัวอย่างรุนแรงที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300 องศาเซลเซียส อีกทั้งมีค่าการขยายตัวทางความร้อนสูงทำให้เกิดการแตกร้าวได้

แก้วซิลิกาเป็นวัสดุที่มีค่าการขยายตัวทางความร้อนต่ำเพียง 0.5×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส [11] จึงทำให้มีสมบัติที่ทนต่อการแตกร้าวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันเป็นอย่างดี และมีความแข็งแรงสูง นอกจากนี้ยังมีความคงทนทางเคมี มีความต้านทานที่ผิวดีมากและทนต่อไฟได้ดี

2.8 สมบัติโดยทั่วไปของซิลิกา

ตารางที่ 2.3 สมบัติต่างๆ ของซิลิกาและแก้วซิลิกา [16]

สมบัติต่างๆ ของซิลิกา	ซิลิการูปแบบผลึก (ควอตซ์)	ซิลิการูปแบบอสัณฐาน
ความหนาแน่น (g/cm^3)	2.65	2.2
ความต้านทานแรงดึง (MPa)	55	110
จุดหลอมตัว (Melt point, °C)	1730	1730
ความต้านแรงกดแตก (MPa)	2070	1108
ความต้านทานแรงดัด (MPa)	-	0.79
มอดูลัสยืดหยุ่น (GPa)	70	73
ความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	ไม่ดี	ดีเยี่ยม
ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน ($\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$)	12.3	0.55
ค่าการนำความร้อน ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)	1.3	1.4

ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบสมบัติของซิลิกาในรูปแบบผลึกต่างๆ [17]

เฟส	ความหนาแน่น (g/cm^3)	การขยายตัวทางความร้อน ($\times 10^6 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)
ควอตซ์	2.65	12.13
ทริคิมิต	2.3	21
คริสโตบาไลต์	2.2	10.3

2.9 การใช้งานทางด้านต่างๆ ของซิลิกา

ซิลิกาเป็นวัสดุเซรามิกที่นำมาใช้งานในด้านอุตสาหกรรมกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากซิลิกามีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า ทนความร้อนได้สูง และยังมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนจากสารเคมีได้ดี จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในวงการอุตสาหกรรมแก้ว เซรามิก และอิฐทนไฟได้

นอกจากนี้ซิลิกายังมีความสามารถในการดูดซับความชื้น และสารเคมีได้ดี จึงนิยมนำมาใช้เป็นสารดูดความชื้น ซึ่งใช้มากในอุตสาหกรรมอาหารและยา ใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงในอุตสาหกรรมการผลิตยางรถยนต์ ใช้เป็นสารช่วยเพิ่มแรงดึงผิวช่วยในการกระจายตัวของยาชนิดที่เป็นของเหลว ใช้เป็นตัวทำให้สารบริสุทธิ์ (refining agent) ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมและปิโตรเคมี และยังใช้ผลิตซิลิคอนบริสุทธิ์ เพื่อผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ได้ เช่น แผงวงจรรวม เซมิคอนดักเตอร์ (Semiconductor) วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric) เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell)

สำหรับแก้วซิลิกา ซึ่งเป็นแก้วที่มีสมบัติที่ทนต่อการแตกร้าวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันเป็นอย่างดี และมีความแข็งแรงสูง จึงเหมาะที่จะนำมาทำภาชนะที่ทนความร้อนได้ดีเช่น สามารถนำไปผลิตเป็นภาชนะประกอบอาหารที่ทนต่อเปลวไฟหรือเตาอบไมโครเวฟได้ดี นอกจากนี้ยังมีสมบัติให้แสงผ่านได้ดี [18] มักถูกใช้เป็นหน้าต่างของกระสวยอวกาศ และใช้ในอุปกรณ์เครื่องมือวัดค่าสี (spectrophotometer) เป็นต้น

2.10 สปอดูมิน (Spodumene)

สปอดูมินเป็นแร่ในกลุ่มลิเทียมอะลูมิโนซิลิเกต ($\text{Li}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 4\text{SiO}_2$) มีลักษณะดังรูปที่ 2.7 ซึ่งเป็นแร่ที่มีประโยชน์ โดยเฉพาะในกลุ่มอุตสาหกรรมเซรามิกและแก้ว เช่น เป็นตัวช่วยหลอมที่ดีกว่าเฟลด์สปาร์ ทำให้สามารถลดอุณหภูมิในการเผาได้ 30-50 องศาเซลเซียส ลดเวลาในการเผา (firing cycle) และมีสิ่งเจือปน (impurity) ต่ำกว่าเฟลด์สปาร์ทั่วไป ทำให้ชิ้นงานที่ได้มีความขรุขระมากขึ้น เมื่อใส่ลงไปใต้น้ำเคลือบช่วยลดความหนืดของเคลือบขณะหลอมตัว ทำให้ลดปัญหาการเกิดรูเข็ม (Pin hole) บนผิวเคลือบ และยังเพิ่มความทนทานต่อสารเคมีทำให้ผิวเคลือบแข็งขึ้น ในวงการแก้วเป็นตัวช่วยลดความหนืดของน้ำแก้ว ทำให้ลดปัญหาฟองอากาศในเนื้อแก้วและกระจก โดยเฉพาะเครื่องแก้วราคาสูงที่ต้องการความใส นอกจากนี้ ยังสามารถช่วยลดสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (thermal

expansion coefficient) ของเคลือบและเนื้อดินได้เนื่องจากมีค่าการขยายตัวทางความร้อนต่ำ โดยเฉพาะเฟสปีตา (β -spodumene) ($0.9 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) มีจุดหลอมที่อุณหภูมิ 1423 องศาเซลเซียส สำหรับการเติมสปอดูมินลงในกลาสเซรามิกนั้น พบว่า คุณสมบัติที่เฉพาะตัวของสปอดูมินตามที่ได้กล่าวมานั้นส่งผลให้กลาสเซรามิกที่ได้มีการขยายตัวทางความร้อนต่ำ ทนต่อปฏิกิริยาเคมี และมีความแข็งแรงเชิงกลที่ดี [19] นอกจากนี้สปอดูมินยังเป็นตัวเติมที่ช่วยในการเผาผนึกของอะลูมินา (Alumina) และ มัลไลต์ (Mullite) [20,21] ได้อีกด้วย



รูปที่ 2.7 แร่สปอดูมิน (Spodumene)

2.11 แก้วบอโรซิลิเกต (Borosilicate glass)

แก้วบอโรซิลิเกตมีชื่อทางการค้าว่า ไพเร็กซ์ (Pyrex) ประกอบไปด้วย ซิลิกา (SiO_2) 60-80 เปอร์เซ็นต์ โบรอนออกไซด์ (B_2O_3) 10-25 เปอร์เซ็นต์ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) 1-4 เปอร์เซ็นต์ มีลักษณะดังรูปที่ 2.8 ซึ่งเป็นแก้วที่มีซิลิกาอยู่ในส่วนผสมปริมาณที่ค่อนข้างสูง ส่วนโซเดียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์มีปริมาณที่น้อย และมีการเติมออกไซด์ของโบรอน (B_2O_3) ลงไป เพื่อให้สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนมีค่าลดลงทำให้เนื้อแก้วมีความแข็ง ทนทานต่อความร้อนหรือทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดี แก้วบอโรซิลิเกตมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่ต่ำคือ $(3.20-3.30) \times 10^{-6}$ ต่อองศาเซลเซียส (ตามมาตรฐาน ASTM E438-92 R01) จึงทำให้มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน และยังทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีต่างๆ ได้ดี [22] นอกจากนี้แก้วบอโรซิลิเกตยังใช้เป็นวัสดุเสริมแรงช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกล เช่น ความแข็งแรงและความเหนียว เพื่อนำไปใช้งานด้านโครงสร้าง [22] โดยค่าสมบัติต่างๆ [23] ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.5

แก้วชนิดนี้ใช้ประโยชน์ในการทำเครื่องแก้วสำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการทางเคมี เช่น บีกเกอร์ หรือนำมาเป็นภาชนะบรรจุที่ใช้ในเตาไมโครเวฟ ทำเทอร์โมมิเตอร์วัดที่อุณหภูมิสูง ทำเลนส์ของกล้องโทรทรรศน์ และทำระบบท่อในอุตสาหกรรม เป็นต้น



รูปที่ 2.8 ภาชนะแก้วบอโรซิลิเกต (Borosilicate glass)

ตารางที่ 2.5 สมบัติต่างๆ ของแก้วโบโรซิลิเกต

สมบัติต่างๆ ของแก้วโบโรซิลิเกต	
ความหนาแน่น (g/cm^3)	2.23 - 2.24
จุดบอบอ่อน (Annealing point, $^{\circ}\text{C}$)	560
จุดหลอมตัว (Softening point, $^{\circ}\text{C}$)	815 - 820
ความแข็งแบบวิกเกอร์ (H_v , GPa)	5.40 ± 0.10
ความทนทานต่อการแตกหัก (K_{IC} , $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)	0.76 ± 0.01
มอดูลัสของยัง (E, GPa)	63
มอดูลัสเฉือน (G, GPa)	26
มอดูลัสเชิงปริมาตร (K, GPa)	35
อัตราส่วนปัวส์ซอง (μ)	0.20
ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน ($\times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$)	3.20 - 3.30
ค่าการนำความร้อน (W/ m·K)	1.05

2.12 ผลงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง

Prasad, C. S. และคณะ [8] ศึกษาเกี่ยวกับผลของเถ้าแกลบในส่วนผสมของไวท์แวร์ (whiteware) โดยนำเถ้าแกลบไปบดเป็นเวลา 35 ชั่วโมง และทำการทดลองแทนที่ปริมาณเถ้าแกลบใน ส่วนของควอตซ์จาก 0 - 25 เปอร์เซ็นต์ นำไปเผาที่อุณหภูมิระหว่าง 1100 และ 1300 องศาเซลเซียส ผล การทดลองพบว่า การแทนที่ควอตซ์ด้วยเถ้าแกลบจะช่วยลดจุดสุกตัวและลดการขยายตัวทางความร้อน นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความแข็งแรงหลังเผาอีกด้วย ยกเว้นส่วนผสมที่เถ้าแกลบแทนที่ควอตซ์ทั้งหมด (25 เปอร์เซ็นต์) ค่าความแข็งแรงจะต่ำเนื่องจากมีปริมาณเฟสแก้วสูง

Pivinskii, Y. E. และคณะ [2] ศึกษาการเตรียมชิ้นงานแก้วซิลิกาที่มีความหนาแน่นสูง โดยใช้ ผงบดละเอียดของ fused-silica นำมาขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อแบบ โดยเผาที่อุณหภูมิ 1100-1300 องศา เซลเซียส ผลการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส ได้ชิ้นงานที่มีรูพรุนลดลงเหลือ 9-11 เปอร์เซ็นต์ ให้ค่าความแข็งแรงได้มากถึง 88.3 เมกะพาสคัล แต่การใช้ผงบดละเอียดของ fused-silica เป็นวัตถุดิบที่มีราคาแพงจึงไม่เป็นที่นิยม

Nayak, J. P. และคณะ [15] ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อพฤติกรรมเกิดการเกิดเฟส และสมบัติเชิงกลของ silica ceramic ที่เตรียมจากเถ้าแกลบ โดยมีวัตถุดิบ 3 ชนิด คือ เถ้าแกลบ (BA) ที่ได้จากการ นำแกลบมาเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เถ้าแกลบบริสุทธิ์ (WA) ที่ได้จากการ นำแกลบมาล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซิลิกาเจล (SG) ที่ได้จากการสังเคราะห์จากเถ้าแกลบ (BA) โดยการนำมาวัตถุดิบทั้ง 3 มาบดผสมเป็น เวลา 24 ชั่วโมง นำมาอัดเป็นเม็ด โดยใช้แรงดัน 2.5 ตัน และนำไปเผาที่อุณหภูมิระหว่าง 700-1400 องศาเซลเซียส ขึ้นไฟเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่า ซิลิกาเจล (SG) ให้ความหนาแน่น และ ความแข็งแรงดีที่สุด ความแข็งแรงจะลดลงเมื่อเกิดเฟสคริสโตบาลิตขึ้นมา

Shi, C. G. และคณะ [21] ศึกษาการใช้สโปคูมินเพื่อเป็น liquid phase sintering ของ อะลูมิเนียมไททานิด โดยการนำ อะลูมินา ไททานี และสโปคูมิน มาบดผสมในปริมาณต่างๆ และอัด ขึ้นรูปโดยใช้ความดัน 150 เมกะพาสคัล นำไปเผาที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ผล การทดลองพบว่า การเติมสโปคูมินจะไปช่วยเพิ่มความหนาแน่นและยังช่วยลดความพรุนตัวของ อะลูมิเนียมไททานิด

นุชนภา ตั้งบริบูรณ์ [24] ศึกษาการเผาผนึกอนุภาคด้วยความร้อนของแก้วซิลิกาจากเถ้าแกลบ โดยวิธีไฮโดรเจล โดยนำเถ้าแกลบมาล้างทำให้มีความบริสุทธิ์มากขึ้นด้วยน้ำประปาและกรดไฮโดร คลอริก นำไปเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำเถ้าแกลบมาผสมด้วย สารละลายกรดบอริกในอัตราส่วน 5 เปอร์เซ็นต์ และนำปรับความเป็นกรดและเบสด้วยกรดไฮโดรคลอ-ริกและแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ได้เป็นเจลและนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5-10 นาที ผลการทดลองพบว่าได้แก้วซิลิกาที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำมีความทนทาน

ต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน แต่มีแก้วซิลิกาที่มีความหนาแน่นต่ำกว่า 2.2 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะทำการศึกษานำแก้วกลับมาใช้ประโยชน์ นำมาใช้เป็นวัตถุดิบหลักที่ให้ซิลิกาอสังฐาน เพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์แก้วซิลิกา หรือภาชนะเซรามิกที่ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน โดยศึกษาผลของการเติมสปอคูมินและแก้วบอโรซิลิเกตที่เตรียมจากสารเคมีในกลุ่มที่ละลายน้ำได้ ในปริมาณต่างๆ กัน ทำการเผาพูนที่อุณหภูมิต่างๆ กัน เพื่อให้ได้ความหนาแน่นสูง และมีค่าการขยายตัวทางความร้อนต่ำ ซึ่งเหมาะกับการใช้งานที่ต้องการความทนทานต่อการแตกร้าวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันได้

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีและวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

- 1) เถ้าแกลบ จากโรงไฟฟ้าพลังงานแกลบ บริษัท เอ.ที. ไปโอ พาวเวอร์ จำกัด จังหวัดพิจิตร
- 2) อะลูมิเนียมไนเตรด ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, 98%, Wako Pure Chemical Industries, Japan)
- 3) ลิเทียมคาร์บอเนต (Li_2CO_3 , $\geq 99\%$, Fluka Analytical)
- 4) บอแรกซ์ ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, $\geq 99\%$, M&B)
- 5) แร่สปอดูมีน ($\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$, Ceramics R Us International trading company)
- 6) กรดบอริก (H_3BO_3 , 99.5%, Analytical Univar Reagent)
- 7) พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA, Wako Pure Chemical Industries, Japan)
- 8) คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC, บริษัท เซรามิกส์ อาร์ อัส จำกัด)

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) ปีกเกอร์
- 2) เครื่องชั่งตวงวัด 2 และ 4 ตำแหน่ง
- 3) ตะแกรงร่อน (Sieve) ขนาด 100 และ 325 เมช
- 4) ขวดพอลิเอทิลีน (Poly ethylene) และลูกบดชนิดเซอร์โคเนีย (ZrO_2)
- 5) โกร่งบด
- 6) กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 (ขนาดรูพรุน 2.5 ไมครอน)

3.3 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ

3.3.1 การเตรียมผงเถ้าแกลบละเอียด

นำเถ้าแกลบมาบดละเอียดโดยผสมน้ำกลั่นในขวดพอลิเอทิลีน ที่บรรจุลูกบดชนิดเซอร์โคเนีย เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมากรองผ่านตะแกรง 325 เมช (44 ไมครอน) นำไปกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 (ขนาดรูพรุน 2.5 ไมครอน) แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ได้เป็นผงเถ้าแกลบละเอียดตั้งต้น (Milled rice husk ash, milled-RHA) สำหรับใช้งานต่อไป

3.3.2 การผสมสารเคมีต่างๆ

ทำการบดผสมผงเถ้าแกลบที่เตรียมไว้กับตัวเติมในอัตราส่วน 5, 10, 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สารที่ช่วยในการเผาผนึก ได้แก่แร่สปอดูมีน (Spodumene) ซึ่งได้จากการผสมระหว่าง อะลูมิเนียมไนเตรด (Aluminium nitrate) และลิเทียมคาร์บอเนต (Lithium carbonate) ในส่วนของเถ้าแกลบที่ผสมแก้วบอโรซิลิเกต (Borosilicate glass) ซึ่งได้จากการผสมระหว่าง บอแรกซ์ (Borax) กรดบอริก (Boric acid) และในส่วนของเถ้าแกลบที่ผสมแร่สปอดูมีน (Spodumene mineral) ซึ่งแร่สปอดูมีนมี

องค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 3.4 โดยใช้ตัวเชื่อมประสาน PVA (Polyvinylalcohol) ปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง โดยมีอัตราส่วน ส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 3.2 และตารางที่ 3.3 โดยคำนวณจากข้อมูลองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบซึ่งมีซิลิกาอยู่ 90.05 เปอร์เซ็นต์ ตัวเติมสปอคูมิน และแก้วโบโรซิลิเกตที่ใช้สารเคมีเป็นสารตั้งต้น (ค่าทางทฤษฎี) [14,25] ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีตั้งต้นของวัตถุดิบที่ใช้คำนวณ

วัตถุดิบ	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Li ₂ O	B ₂ O ₃	Na ₂ O	Other
เถ้าแกลบบด (milled-RHA)	90.05	-	-	-	-	9.95
สปอคูมิน (ทฤษฎี)	64.58	27.39	8.03	-	-	-
แก้วโบโรซิลิเกต (ทฤษฎี)	80.60	-	-	12.60	4.20	2.60
Al-nitrate (Al(NO ₃) ₃ ·9H ₂ O)	-	13.59	-	-	-	86.41
Lithium carbonate (Li ₂ CO ₃)	-	-	40.44	-	-	59.56
Borax (Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O)	-	-	-	36.51	16.25	47.24
Boric acid (H ₃ BO ₃)	-	-	-	56.30	-	43.70

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมเถ้าแกลบกับสปอคูมินในอัตราส่วนต่างๆ

สูตร	RHA (milled) (กรัม)	Al-nitrate (กรัม)	Li ₂ CO ₃ (กรัม)	PVA (กรัม)
RHA	100.00	-	-	1
RHA+SP 5%	98.23	10.08	0.99	1.09
RHA+SP 10%	96.46	20.16	1.99	1.19
RHA+SP 25%	91.14	50.40	4.96	1.47
RHA+SP 50%	82.29	100.80	9.93	1.93

หมายเหตุ : เถ้าแกลบที่ผสมด้วยสปอคูมิน (RHA+SP)

ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมแก้วเคลือบกับแก้วบอโรซิลิเกตในอัตราส่วนต่างๆ

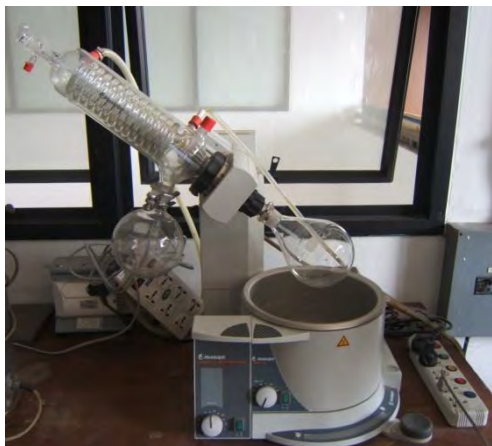
สูตร	RHA (milled) (กรัม)	Borax (กรัม)	Boric acid (กรัม)	PVA (กรัม)
RHA	100	-	-	1
RHA+BS 5%	99.03	1.29	0.09	1
RHA+BS 10%	98.06	2.58	0.18	1.01
RHA+BS 25%	95.15	6.46	0.45	1.02
RHA+BS 50%	90.30	12.92	0.89	1.04

หมายเหตุ : แก้วเคลือบที่ผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกต (RHA+BS)

ตารางที่ 3.4 องค์ประกอบทางเคมีของแร่สปอดูมิน

องค์ประกอบ (%)	แร่สปอดูมิน
Li ₂ O	7.60
Fe ₂ O ₃	0.07
MnO	0.02
Al ₂ O ₃	26.5
SiO ₂	64.5
Na ₂ O	0.15
K ₂ O	0.08
P ₂ O ₅	0.17
CaO	0.05
TiO ₂	0.01
L.O.I.	0.20

โดยนำมาบดผสมน้ำกลั่นในขวดพอลิเอทิลีน (Polyethylene) ที่บรรจุลูกบดเซอร์โคเนียเป็นเวลา 24 ชั่วโมงหลังจากนั้นนำไประเหยแห้งด้วยเครื่องระเหยแห้งแบบหมุน (Rotary Evaporator) ดังรูปที่ 3.1 ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส บดด้วยโกร่งแล้วนำไปร่อนผ่านตะแกรง 100 เมช (149 ไมครอน)



รูปที่ 3.1 เครื่อง Rotary Evaporator

3.3.3 การขึ้นรูปชิ้นงาน

นำผงตัวอย่างที่เตรียมได้มาอัดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานรูปเหรียญ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร โดยใช้เครื่องอัดไฮดรอลิก (Uniaxial pressing, NT-100H) ด้วยความดัน 20 เมกะพาสคัล ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องอัดไฮดรอลิก

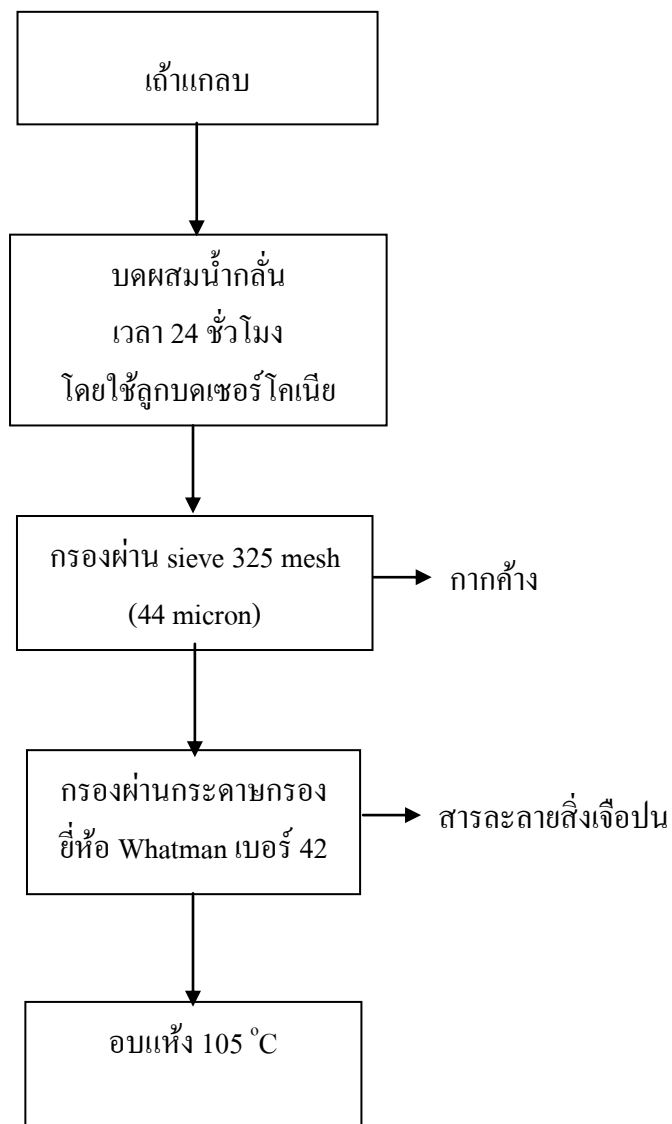
3.3.4 การเผาผืนึก

นำชิ้นงานที่ได้จากการอัดไปเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ดังนี้ 1000, 1050, 1100, 1150, 1200 และ 1250 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ยืนไฟไว้เป็นเวลา 30 นาที โดยใช้เตาเผา Gradient รุ่น GR 1330/13 ผลิตโดยบริษัท Nabertherm[®] Lilienthal (Germany) ดังรูปที่ 3.3 และนำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆ

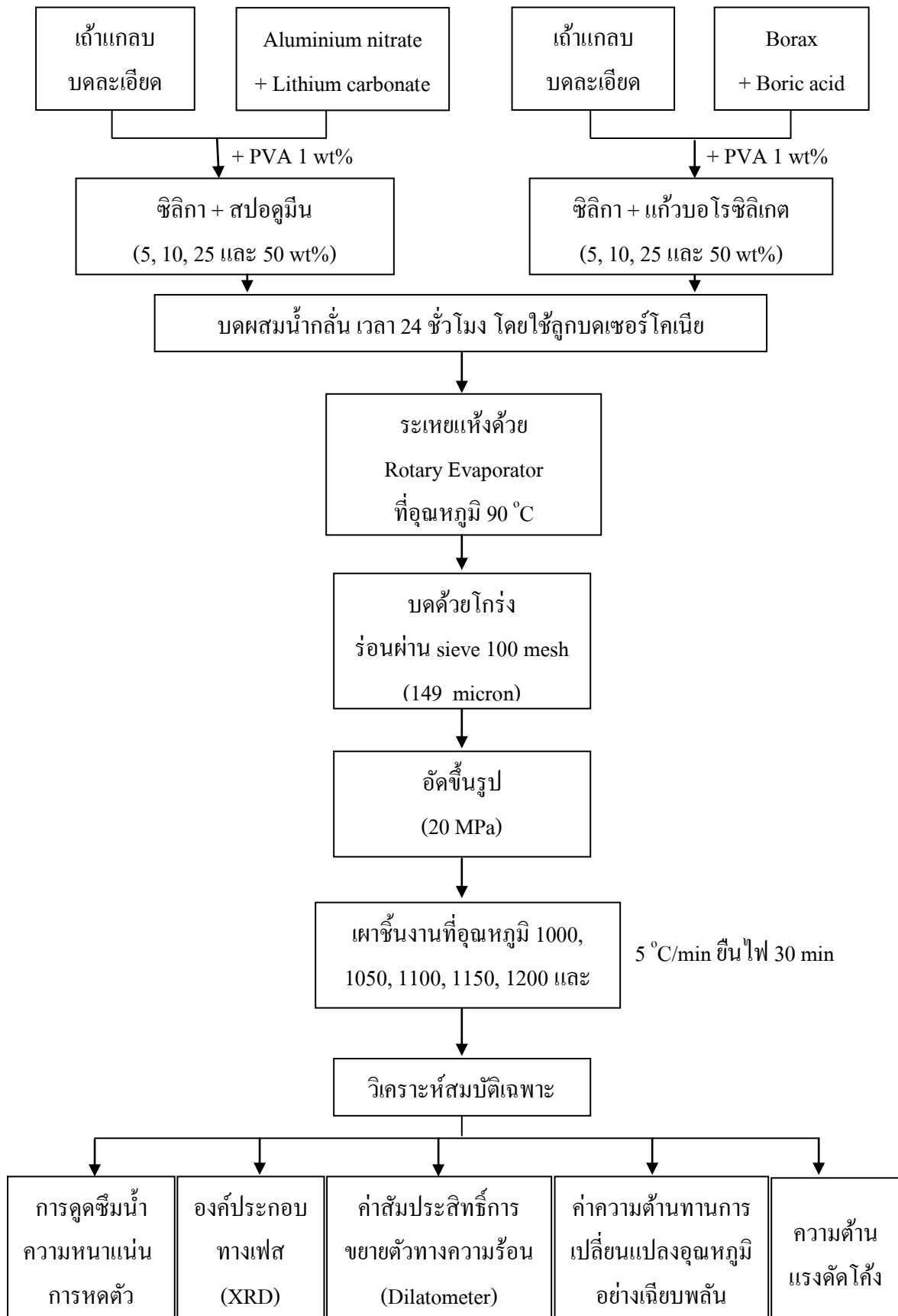


รูปที่ 3.3 เตาเผา Gradient

3.4 แผนผังการทดลอง



รูปที่ 3.4 แผนผังการเตรียมเม็ดแกลบบดละเอียด



รูปที่ 3.5 แผนผังการทดลอง

3.5 การวิเคราะห์สมบัติของตัวอย่างชิ้นงาน

3.5.1 การวัดความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำ

นำชิ้นงานที่เตรียมจากแก้วเคลือบดละเอียด แก้วเคลือบที่ผสมด้วยสปอคูมิน ซึ่งได้จากการผสมระหว่าง อะลูมิเนียมไนเตรต และลิเทียมคาร์บอเนต และแก้วเคลือบที่ผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกต ซึ่งได้จากการผสมระหว่าง บอแรกซ์ และกรดบอริก ในอัตราส่วน 5, 10, 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิ 1000, 1050, 1100, 1150, 1200 และ 1250 องศาเซลเซียส และแก้วเคลือบที่ผสมด้วยแร่สปอคูมิน ในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส หากค่าความหนาแน่นและค่าการดูดซึมน้ำวัดได้ด้วยวิธีการแทนที่น้ำ (Archimedes Method) ตามมาตรฐาน ASTM C830-00 (2000) โดยการนำชิ้นงานมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส จากนั้นชั่งน้ำหนักแห้งแล้วนำไปใส่หม้อสุญญากาศ ดูดอากาศออกประมาณ 30 นาที จึงเทน้ำให้ท่วมชิ้นงานแล้วทิ้งไว้อีก 5 นาที จึงนำชิ้นงานมาชั่งน้ำหนักในน้ำแล้วใช้ผ้าเปียกซับน้ำที่ผิวงานขึ้นออกแล้วนำไปชั่งอีกครั้งหนึ่ง จากนั้นคำนวณค่าความหนาแน่นและค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำดังสมการ

$$\text{Bulk Density} = \frac{W_d}{W_{\text{sat}} - W_{\text{sus}}}$$

$$\% \text{ Water absorption} = \frac{W_{\text{sat}} - W_d}{W_d} \times 100$$

โดยที่ Bulk Density = ความหนาแน่นของชิ้นงาน (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

% Water absorption = เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ

W_d = น้ำหนักของชิ้นงานแห้งในอากาศ (กรัม)

W_{sat} = น้ำหนักของชิ้นงานที่อิ่มตัวด้วยน้ำและซับน้ำที่ผิวออกไป (กรัม)

W_{sus} = น้ำหนักของชิ้นงานเมื่อชั่งแบบแขวนในน้ำ (กรัม)

3.5.2 การทดสอบการหดตัว

นำชิ้นงานที่เตรียมจากแก้วเคลือบดละเอียด แก้วเคลือบที่ผสมด้วยสปอคูมิน ซึ่งได้จากการผสมระหว่าง อะลูมิเนียมไนเตรต และลิเทียมคาร์บอเนต และแก้วเคลือบที่ผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกต ซึ่งได้จากการผสมระหว่าง บอแรกซ์ และกรดบอริก ในอัตราส่วน 5, 10, 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิ 1000, 1050, 1100, 1150, 1200 และ 1250 องศาเซลเซียส และแก้วเคลือบที่ผสมด้วยแร่สปอคูมิน ในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส มาทดสอบการหดตัวหลังเผา โดยใช้วิธีดังนี้

- 1) วัดความยาวของชิ้นงานก่อนเผา (L_1)
- 2) นำชิ้นงานมาเผาที่อุณหภูมิที่กำหนด

- 3) วัดความยาวของชิ้นงานหลังเผา (L_2)
- 4) นำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การหดตัวหลังเผาตามสูตร

$$\% \text{ Shrinkage} = \frac{L_1 - L_2}{L_1} \times 100$$

% Shrinkage = เปอร์เซ็นต์การหดตัวหลังเผา

3.5.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงาน

นำชิ้นงานที่เตรียมจากถ้ำกลบดินละเอียด ถ้ำกลบที่ผสมด้วยสปอคูมิน ซึ่งได้จากการผสมระหว่าง อะลูมิเนียมไนเตรด และลิเทียมคาร์บอเนต และถ้ำกลบที่ผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกต ซึ่งได้จากการผสมระหว่าง บอแรกซ์ และกรดบอริก ในอัตราส่วน 5, 10, 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิ 1000, 1050, 1100, 1150, 1200 และ 1250 องศาเซลเซียส และถ้ำกลบที่ผสมด้วยแร่สปอคูมิน ในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส มาศึกษาองค์ประกอบทางเฟสด้วยเครื่อง X-ray diffractometer รุ่น D8-Advance ผลิตโดยบริษัท Bruker โดยใช้ $\text{Cu-K}\alpha$ radiation ที่ scanning speed 2.4 องศาต่อนาที ในช่วงมุม 2θ ตั้งแต่ 10 ถึง 80 องศา ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่อง X-Ray Diffractometer

3.5.4 การวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน

การวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงานเก้าแกลบที่ผสมด้วยสปอคูมิน ซึ่งได้จากการผสมระหว่าง อะลูมิเนียมไนเตรด และลิเทียมคาร์บอเนต และเก้าแกลบที่ผสมด้วยแก้ว บอโรซิลิเกต ซึ่งได้จากการผสมระหว่าง บอแรกซ์ และกรดบอริก ในอัตราส่วน 5, 10, 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิ 1000, 1050, 1100, 1150, 1200 และ 1250 องศาเซลเซียส และเก้าแกลบที่ผสมด้วยแร่สปอคูมิน ในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง Dilotometer รุ่น 402C ผลิตโดยบริษัท Netzsch ดังรูปที่ 3.7 โดยทำการเตรียมตัวอย่างให้ได้ขนาดกว้าง 5 มิลลิเมตร ยาว 25 มิลลิเมตร นำเข้าเครื่องวิเคราะห์โดยให้อัตราความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส โดยเปรียบเทียบกับวัสดุมาตรฐานที่ทำมาจาก Al_2O_3



รูปที่ 3.7 เครื่อง Dilotometer

3.5.5 การวิเคราะห์พฤติกรรมกรรมการเผาผืนึก

ศึกษาพฤติกรรมกรรมการเผาผืนึกของเก้าแกลบบริสุทธิ์ โดยนำผงเก้าแกลบมาอัดเป็นทรงกระบอก ให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร ยาว 6 มิลลิเมตร ด้วยความดัน 20 เมกะพาสคัล นำเข้าเครื่องวิเคราะห์ Dilatometer รุ่น 402C ผลิตโดยบริษัท Netzsch ดังรูปที่ 3.7 โดยให้อัตราความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส

3.5.6 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างจุลภาค

ศึกษาพื้นผิวภาคตัดขวาง (cross-section) และผิวของชิ้นงานเก้าแกลบที่ผสมด้วยสปอคูมิน ซึ่งได้จากการผสมระหว่าง อะลูมิเนียมไนเตรด และลิเทียมคาร์บอเนต และเก้าแกลบที่ผสมด้วยแก้ว

บอโรซิลิเกต ซึ่งได้จากการผสมระหว่าง บอแรกซ์ และกรดบอริก ในอัตราส่วน 5, 10, 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิ 1000, 1050, 1100, 1150, 1200 และ 1250 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาลักษณะรูปร่างของอนุภาคและรูพรุนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) รุ่น JSM – 6480LV ผลิตโดยบริษัท JEOL ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(Scanning electron microscope, SEM)

การเตรียมตัวอย่างทำได้โดยนำตัวอย่างหลังเผาผนึกมาขัดด้วยกระดาษทรายซิลิคอนคาร์ไบด์ จากเบอร์หยาบไปหาเบอร์ละเอียดโดยใช้เบอร์ 120, 240, 600, 1200, 2500 หลังจากนั้นนำมาขัดด้วยผง เพชรขนาด 3 และ 1 ไมครอน โดยใช้เครื่องขัด Grinder & Polisher machine (Phoenix 4000, BUEHLER) แล้วนำมากัดผิวด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) หลังจากทำความสะอาดและอบแห้งแล้ว นำตัวอย่างมาปะติดกับแท่นรองที่มีเทปคาร์บอนติดอยู่แล้วนำไปเคลือบผิวด้วยทองคำด้วยเครื่อง Sputter เพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้า จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อทำการวิเคราะห์สมบัติทางจุลภาค

3.5.7 การทดสอบความต้านแรงดัดโค้ง

การทดสอบความต้านแรงดัดโค้งของชิ้นงานเก้าแกลบที่ผสมด้วยสปอคูมิน ซึ่งได้จากการผสมระหว่าง อะลูมิเนียมไนเตรด และลิเทียมคาร์บอเนต ในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส วัดด้วยวิธีการทดสอบแรงดัดโค้ง (Flexural strength) แบบ 3 จุด ตามมาตรฐาน ASTM C 1161-02c โดยใช้เครื่อง Universal testing machine (5843, Instron) ดังรูปที่ 3.9 โดยมีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดังนี้

1) เตรียมตัวอย่างรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดประมาณ กว้าง 8 มิลลิเมตร หนา 5.5 มิลลิเมตร ยาว 27 มิลลิเมตร โดยนำมาอัดด้วยความดัน 20 เมกะพาสคัล

- 2) นำชิ้นงานมาขัดให้ได้ขนาดด้วยแท่นขัดเพชรเบอร์ 170
- 3) ล้างทำความสะอาดชิ้นงานตัวอย่าง เพื่อขจัดอนุภาคที่จับเกาะผิวหน้าตัวอย่างออกด้วยเครื่องล้างทำความสะอาดความถี่สูง
- 4) นำตัวอย่างไปทดสอบโดยมีตัวแปรในการทดสอบดังต่อไปนี้

ความกว้างของจตุรกรรรมตัวอย่าง (L)	= 20 มิลลิเมตร
ความเร็วในการกดตัดโค้ง	= 0.2 มิลลิเมตรต่อนาที
จำนวนตัวอย่าง	= 5 ชิ้น
อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ	= อุณหภูมิห้อง

บันทึกค่าความหนา (t) และความกว้างของชิ้นงาน (w) ตลอดจนค่าแรงกระทำ (P_f) ที่ได้ขณะชิ้นงานแตกหักและคำนวณความต้านทานต่อการตัดโค้ง (σ_f) ดังสมการ

$$\text{Flexural strength } (\sigma_f) = \frac{3P_f L}{2wt^2}$$



รูปที่ 3.9 เครื่อง Universal testing machine

3.5.8 การทดสอบความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน

นำแก้วเคลือบที่ผสมด้วยสปอคูมิน ซึ่งได้จากการผสมระหว่าง อะลูมิเนียมไนเตรต และ ลิเทียมคาร์บอเนต ในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยนำผงตัวอย่างที่เตรียมได้มาอัดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานขนาดกว้าง 51 มิลลิเมตร ยาว 75 มิลลิเมตร หนา 6 มิลลิเมตร โดยใช้เครื่องอัดไฮดรอลิก

(Uniaxial pressing, NT-100H) ด้วยความดัน 20 เมกะพาสคัล นำชิ้นงานที่ได้จากการอัดขึ้นรูปแล้วมาเผา ณ อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียสต่อนาที ยืนไฟไว้เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นนำมาทดสอบความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน จำนวน 5 ชิ้น ตามมาตรฐาน ASTM C 554-93(2006) โดยนำชิ้นงานมาอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 20 นาที หลังจากนั้นนำชิ้นงานออกจากเตามาแช่น้ำที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที และนำมาแช่ด้วยสารละลายเมทิลีนบลู (Methylene blue) เพื่อตรวจพินิจรอยแตกร้าว หากไม่พบรอยแตกร้าวให้นำไปอบที่อุณหภูมิเดิมอีกครั้ง โดยทำซ้ำ 5 ครั้ง หากยังไม่พบรอยแตกร้าวแสดงว่าชิ้นงานตัวอย่างสามารถทนทานต่อการทดสอบได้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ลักษณะเฉพาะของวัตถุดิบ

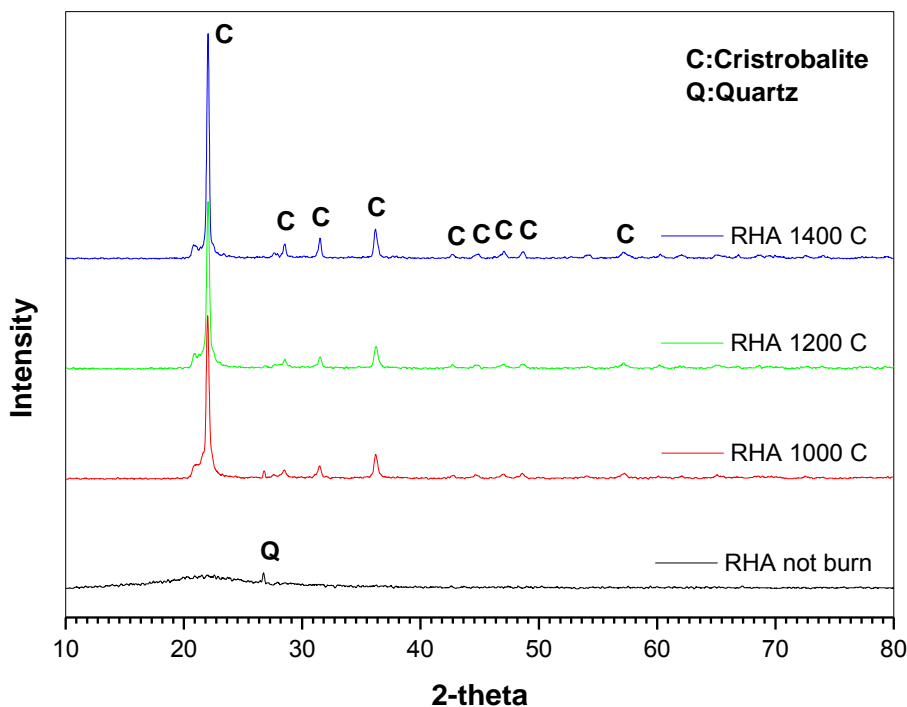
ผลองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบที่ได้จากโรงไฟฟ้าพลังงานแกลบ บริษัท เอ.ที. ไบโอบาวเวอร์ จำกัด จังหวัดพิจิตร ดังตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบก่อนบดล้าง พบว่าเถ้าแกลบก่อนบดล้าง มีซิลิกา (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก [26] โดยมีปริมาณซิลิกาเท่ากับ 82.19 เปอร์เซ็นต์ และมีออกไซด์ของสารประกอบประเภทแอลคาไลน์ เช่น โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) และ โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) ปนอยู่เท่ากับ 0.43 และ 0.92 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งออกไซด์ของสารประกอบประเภทแอลคาไลน์จะเป็นตัวเร่งให้เกิดการตกผลึกของซิลิกาเป็นคริสโตบาลิตได้ [2] และเมื่อนำเถ้าแกลบมาบดล้าง พบว่าสามารถเพิ่มปริมาณของซิลิกาเท่ากับ 90.05 เปอร์เซ็นต์ และลดปริมาณของ โซเดียมออกไซด์ และ โพแทสเซียมออกไซด์ลงได้เล็กน้อยเท่ากับ 0.40 และ 0.55 เปอร์เซ็นต์ ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีและความละเอียดของเถ้าแกลบ

องค์ประกอบ (%)	เถ้าแกลบก่อนบด	เถ้าแกลบหลังบด
SiO_2	82.19	90.05
Al_2O_3	0.25	0.26
Fe_2O_3	0.48	0.78
TiO_2	0.05	0.05
CaO	0.75	0.52
MgO	0.43	0.19
Na_2O	0.43	0.40
K_2O	0.92	0.55
MnO	0.16	0.40
P_2O_5	0.85	0.61
L.O.I	12.50	6.13
รวม	99.31	99.94
ขนาดอนุภาค (μm)		
>500	3.98	-
>300	2.71	-
>150	10.67	-
>106	10.70	-
>75	27.57	-
>44	35.51	-
<44	8.86	100.00
รวม	100.00	100.00

4.2 องค์ประกอบทางเฟส

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของเถ้าแกลบบริสุทธิ์หลังจากการบดละเอียดและกรอง ทำความสะอาดนำมาอัดขึ้นรูปแล้วเผาผนึก ดังรูปที่ 4.1 พบว่าเถ้าแกลบบริสุทธิ์ก่อนเผามีฟิสิกของเฟสของควอตซ์เพียงเฟสเดียวอาจเนื่องมาจากการปนเปื้อนของกรวดทรายในระหว่างการเก็บเกี่ยวข้าว และเป็นรูปของซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous silica) คือไม่มีโครงสร้างผลึกที่เป็นระเบียบ สังเกตได้จากกราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ที่บริเวณ 2-theta ที่ประมาณ 20-24 องศา

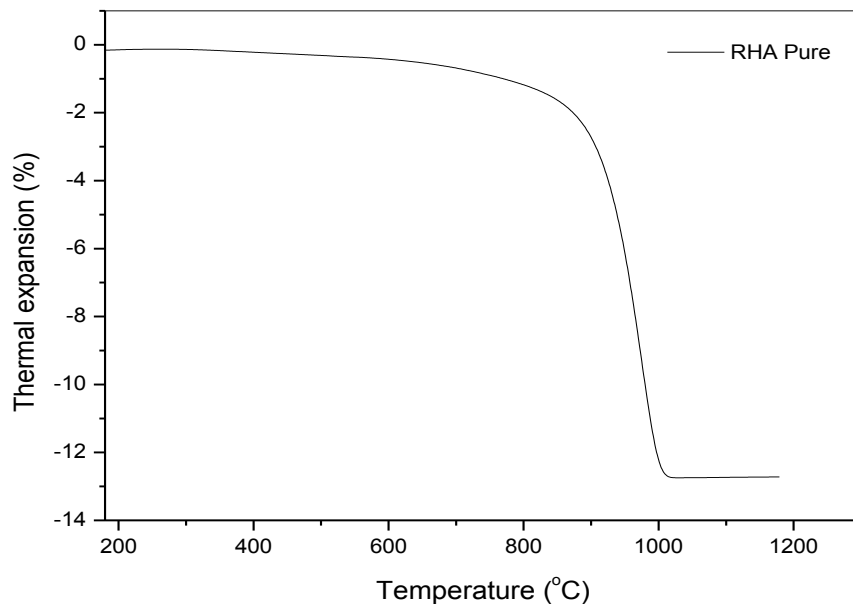
เมื่อทำการทดลองเบื้องต้นในส่วนเถ้าแกลบบริสุทธิ์โดยการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1000, 1200 และ 1400 องศาเซลเซียส จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเป็นจำนวนมากเนื่องจากในเถ้าแกลบที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก และมีโพแทสเซียมออกไซด์อยู่ถึง 0.55 เปอร์เซ็นต์ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ซิลิกาเกิดการตกผลึกของซิลิกาอสัณฐานเป็นคริสโตบาไลต์ ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยที่ว่า เถ้าแกลบจะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบจากอสัณฐานของซิลิกาไปเป็นรูปแบบผลึก ในช่วงอุณหภูมิ 900-1300 องศาเซลเซียส [15] นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะพบเฟสของคริสโตบาไลต์เกิดขึ้นมาเป็นจำนวนมาก ส่วนเฟสควอตซ์ที่พบในเถ้าแกลบตั้งต้นก็จะเปลี่ยนเฟสไปเป็นคริสโตบาไลต์[8,27] ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1000 องศาเซลเซียสด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4.1 องค์ประกอบทางเฟสของเถ้าแกลบบริสุทธิ์ ก่อนเผาและที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิต่างๆ

4.2.1 พฤติกรรมการเผาผนึก

การวิเคราะห์พฤติกรรมการเผาของเถ้าแกลบบริสุทธิ์ ทำโดยการนำผงเถ้าแกลบมาอัดเป็นทรงกระบอกให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร ยาว 6 มิลลิเมตร ด้วยความดัน 20 เมกะพาสคัล นำเข้าเครื่องวิเคราะห์ Dilometer โดยให้อัตราความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส พบว่าชิ้นงานเถ้าแกลบเกิดการหดตัวมากในช่วงอุณหภูมิ 900-1000 องศาเซลเซียส เนื่องจากในช่วงอุณหภูมินี้ ซิลิกาจากเถ้าแกลบที่อยู่ในรูปออสตรานได้เกิดการตกผลึกเป็นคริสโตบาลิตขึ้นทำให้ปริมาตรลดลง และสังเกตได้จากเส้นกราฟ ดังรูปที่ 4.2



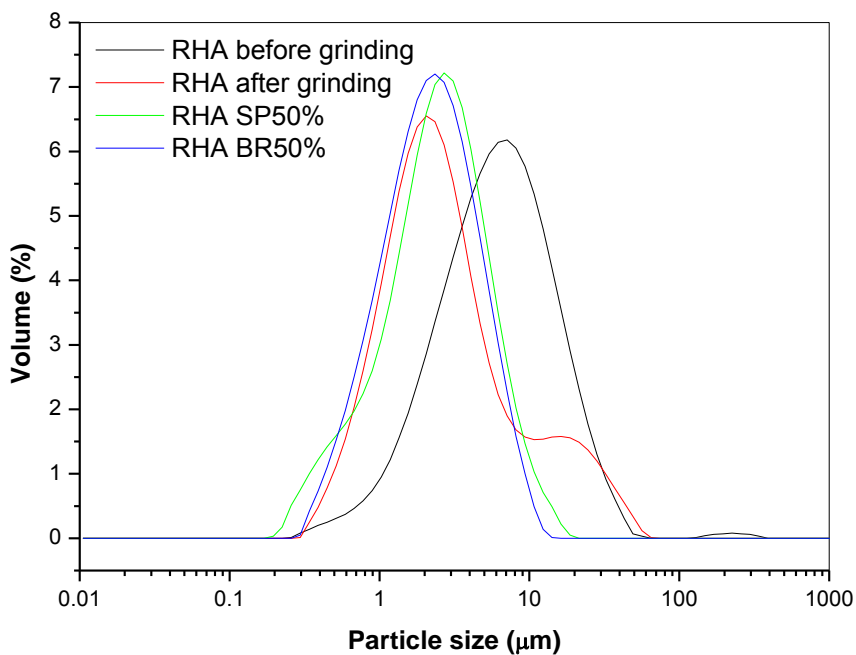
รูปที่ 4.2 พฤติกรรมการเผาของเถ้าแกลบบริสุทธิ์

4.2.2 การกระจายขนาดของอนุภาค

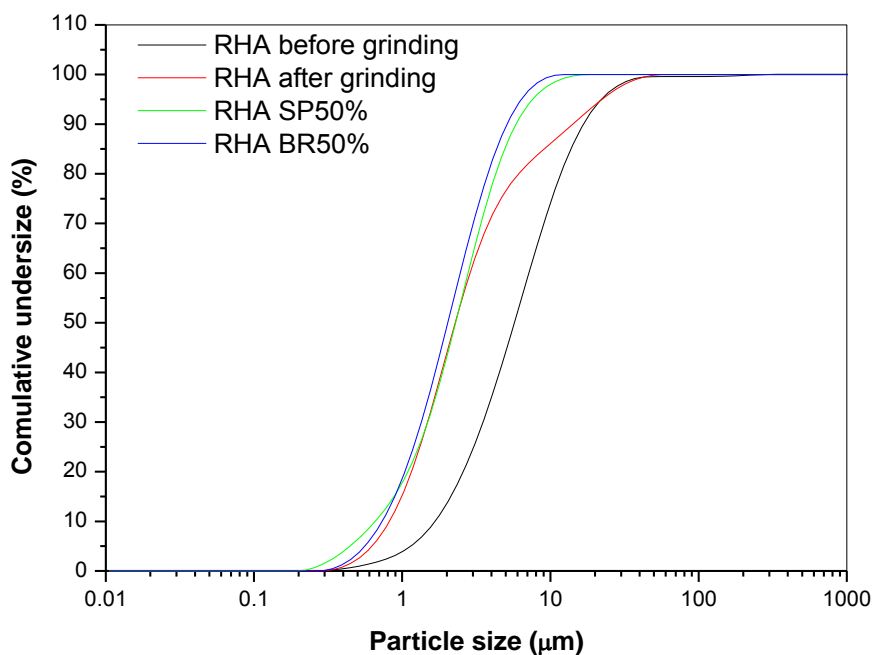
ผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยเทคนิค Laser light scattering ของแก้วเคลือบก่อนบดล้าง แก้วเคลือบหลังบดล้าง แก้วเคลือบที่ผสมด้วยสโปคูมินซึ่งได้จากการผสมอะลูมิเนียมไนเตรด และลิเทียมคาร์บอเนต และแก้วเคลือบที่ผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกตซึ่งได้จากการผสมบอแรกซ์ และกรดบอริก ในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 พบว่าจากค่ากลางของข้อมูล (ค่า $d_{0.5}$) แก้วเคลือบก่อนบดล้างที่มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 6.1 ไมครอน ซึ่งมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าแก้วเคลือบหลังบดล้างที่มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 2.4 ไมครอน การที่นำแก้วเคลือบมาบดล้างเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนต่างๆ ที่ติดมากับแก้วเคลือบ หรือส่วนของแก้วเคลือบที่ยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์สามารถช่วยลดขนาดของอนุภาค ทำให้ผสมรวมกับสโปคูมิน และแก้วบอโรซิลิเกตได้ดีขึ้นด้วย

ในกรณีของขนาดอนุภาคก่อนบดล้างเมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Laser light scattering ที่ได้ค่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ประมาณ 6.1 ไมครอน แต่เมื่อเทียบกับเทคนิคตะแกรงร่อนที่จะมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 80 ไมครอน ที่ใกล้เคียงกับที่สังเกตได้จากภาพถ่าย SEM ใน รูปที่ 4.5 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วย Laser light scattering จำเป็นต้องเตรียมให้ผงตัวอย่างกระจายตัวอย่างดีในสารละลายเป็นสารแขวนลอย อีกทั้งการสุ่มตัวอย่างสารแขวนลอยที่เตรียมได้ไปทดสอบ อนุภาคขนาดใหญ่ไม่สามารถแขวนลอยได้อย่างสมบูรณ์ จึงได้เฉพาะตัวอย่างอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ทำให้ได้ค่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ต่ำกว่าความเป็นจริงมาก แต่หลังจากการบดล้างแล้วจะเหลือแต่อนุภาคขนาดเล็กที่แขวนลอยได้อย่างสมบูรณ์ จึงไม่เกิดความคลาดเคลื่อน

แก้วเคลือบหลังบดล้าง แก้วเคลือบที่ผสมด้วยสโปคูมิน และแก้วเคลือบที่ผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกต ในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีการกระจายขนาดอนุภาคที่ใกล้เคียงกัน และเมื่อนำแก้วเคลือบมาบดผสมสโปคูมิน ในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 2.5 ไมครอน และนำแก้วเคลือบมาบดผสมกับแก้วบอโรซิลิเกต ในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีขนาดอนุภาค 2.2 ไมครอน พบว่าเมื่อเติมสโปคูมิน และ แก้วบอโรซิลิเกต ไม่ได้ช่วยทำให้อนุภาคเปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเทียบกับแก้วเคลือบหลังบดล้าง เนื่องจากสโปคูมิน และแก้วบอโรซิลิเกต จะเป็นตัวที่ช่วยในการเผาผนึกเมื่อนำมาเผาพร้อมกับวัตถุดิบแต่แก้วเคลือบที่ผสมสโปคูมิน และแก้วเคลือบที่ผสมแก้วบอโรซิลิเกต เป็นผงตัวอย่างที่ยังไม่ได้นำไปเผา จึงทำให้มีขนาดใกล้เคียงกับแก้วเคลือบหลังบดล้าง



รูปที่ 4.3 การกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบก่อนบดล้าง หลังบดล้าง เถ้าแกลบที่ผสมด้วยสปอดูมิน และเถ้าแกลบที่ผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกต ในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

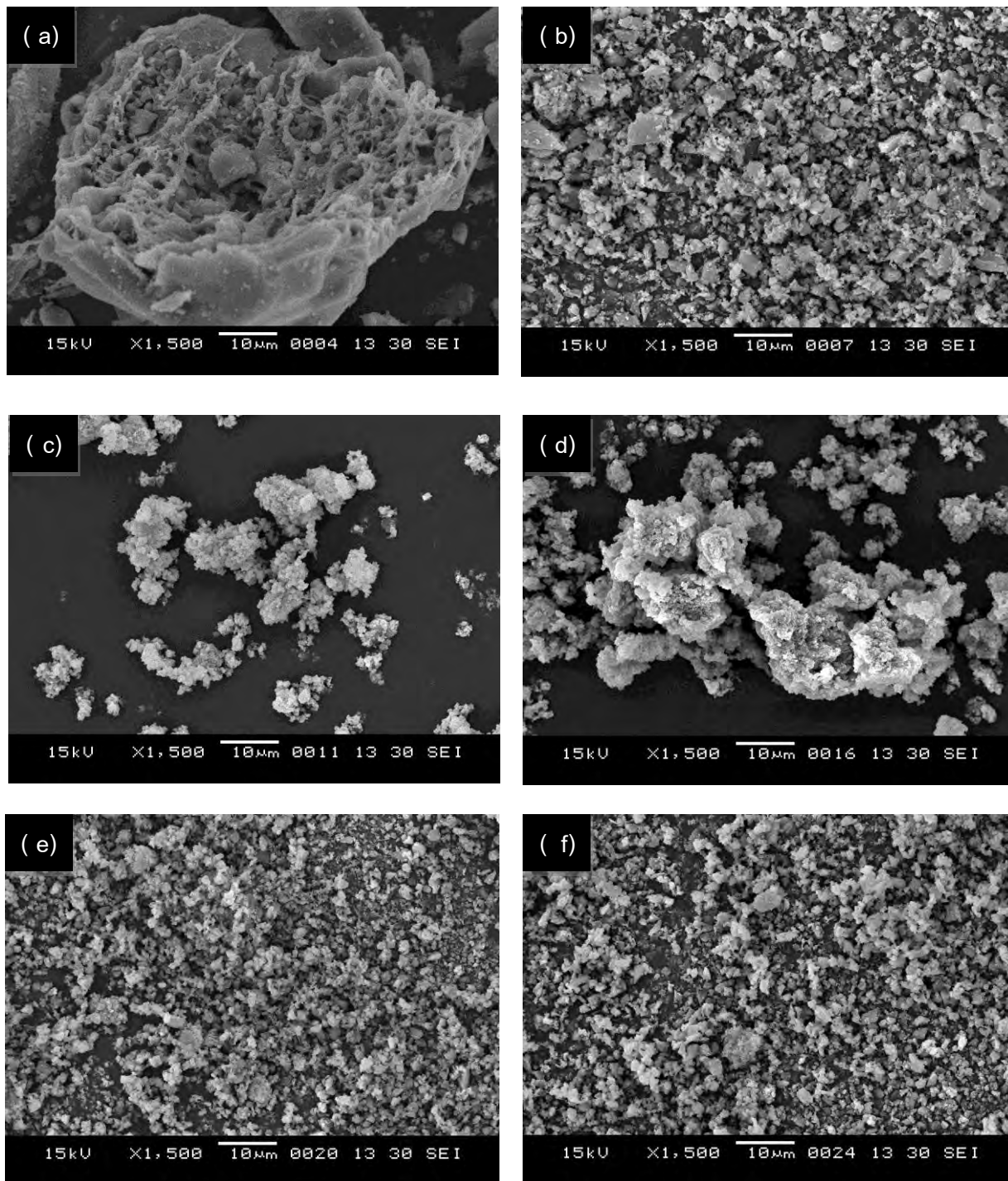


รูปที่ 4.4 การกระจายขนาดสะสมของอนุภาคเถ้าแกลบก่อนบดล้าง หลังบดล้าง เถ้าแกลบที่ผสมด้วยสปอดูมิน และเถ้าแกลบที่ผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกตในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

4.2.3 โครงสร้างจุลภาค

ลักษณะทางจุลภาคของเส้นใยก่อนบดล้าง เส้นใยหลังบดล้าง เส้นใยที่ผสมด้วยสไปดรูมินซึ่งได้จากการผสมอะลูมิเนียมไนเตรด และลิเทียมคาร์บอเนต และเส้นใยที่ผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกตซึ่งได้จากการผสมบอแรกซ์ และกรดบอริก ในอัตราส่วน 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก สังเกตได้จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าผนังของเส้นใยหลังบดล้าง เส้นใยที่ผสมด้วยสไปดรูมินในอัตราส่วน 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเส้นใยที่ผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกตในอัตราส่วน 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีขนาดอนุภาคเล็กกระจายปนอยู่กับอนุภาคขนาดใหญ่และส่วนใหญ่มีขนาดของอนุภาคเล็กกว่า 5 ไมครอน ส่วนเส้นใยก่อนบดล้าง พบว่ามีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า 5 ไมครอน ซึ่งสอดคล้องกับการกระจายขนาดอนุภาคที่วัดด้วยเทคนิค laser light scattering

นอกจากนี้ยังพบว่าเส้นใยที่ผสมด้วยสไปดรูมินในอัตราส่วน 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีลักษณะเกาะรวมตัวกันอยู่อาจเกิดจากสารพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ซึ่งเป็นตัวเชื่อมประสานจึงทำให้ผนังของเส้นใยที่ผสมด้วยสไปดรูมินเกิดการเกาะรวมตัวกันได้



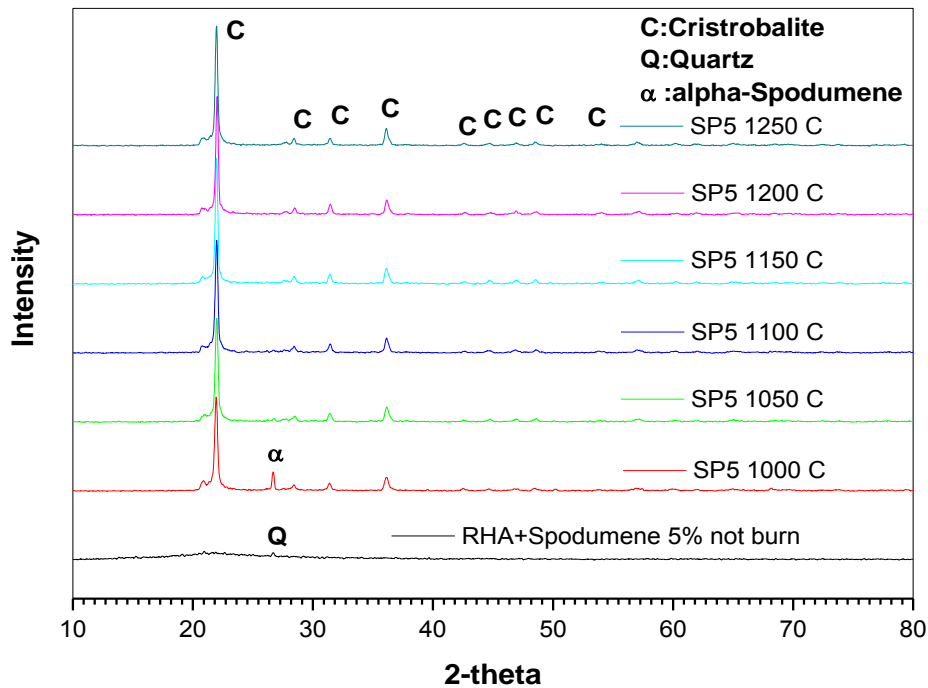
รูปที่ 4.5 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผงวัตุดิบจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (a) เยื่อแลกเปลี่ยนก่อนบดล้าง (b) เยื่อแลกเปลี่ยนหลังบดล้าง (c) เยื่อแลกเปลี่ยนผสมด้วยสปอดูมิน 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (d) เยื่อแลกเปลี่ยนผสมด้วยสปอดูมิน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (e) เยื่อแลกเปลี่ยนผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกต 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (f) เยื่อแลกเปลี่ยนผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกต 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

4.3 ผลของสารเติมแต่งสปอคูมินและ แก้วบอโรซิลิเกตต่อสมบัติต่างๆ

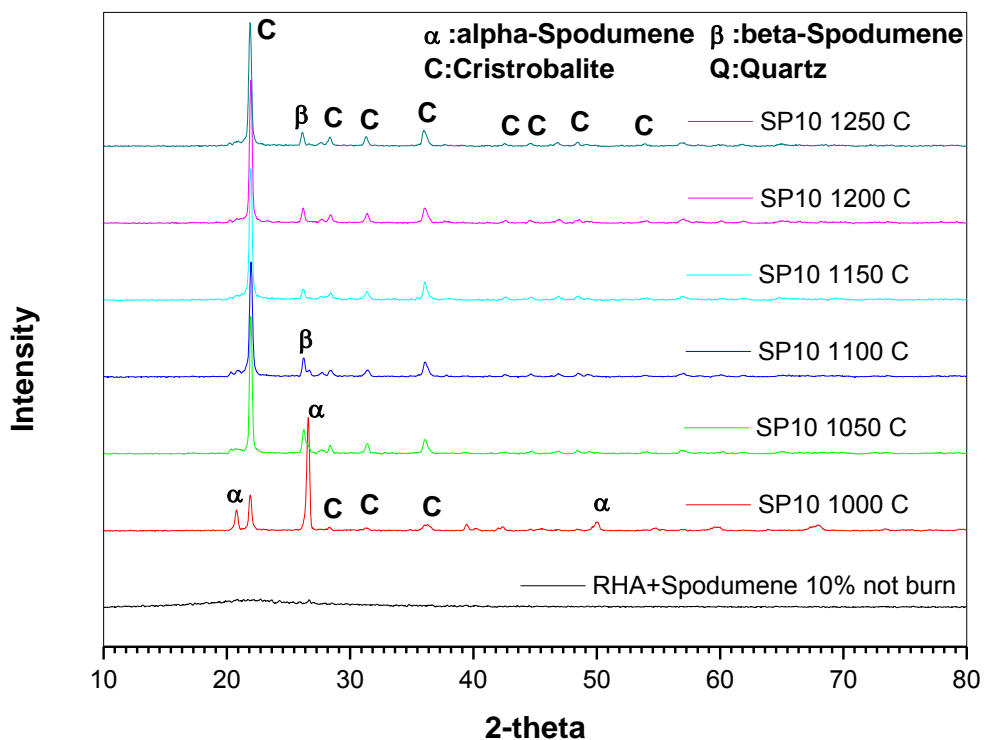
4.3.1 องค์ประกอบทางเฟส

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงานแก้วเคลือบที่ผสมด้วยสปอคูมิน ซึ่งได้จากการผสมอะลูมิเนียมไนเตรต และลิเทียมคาร์บอเนต และชิ้นงานแก้วเคลือบที่ผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกต ซึ่งได้จากการผสมบอแรกซ์ และกรดบอริก ในอัตราส่วน 5, 10, 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิ 1000, 1050, 1100, 1150, 1200 และ 1250 องศาเซลเซียส พบว่าแก้วเคลือบที่ผสมด้วยสปอคูมินในอัตราส่วน 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.6 ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส พบเฟสของแอลฟาสปอคูมินปนอยู่กับเฟสของคริสโตบาไลต์ แก้วเคลือบที่ผสมด้วยสปอคูมินในอัตราส่วน 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.7 เกิดเฟสของสปอคูมินปนอยู่กับเฟสของคริสโตบาไลต์มากขึ้น และพบว่าที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส เกิดการเปลี่ยนเฟสจากแอลฟา-สปอคูมินเป็นบีตาสปอคูมิน แก้วเคลือบที่ผสมด้วยสปอคูมินในอัตราส่วน 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.8 พบว่าเฟสของคริสโตบาไลต์ลดลง และเกิดการเปลี่ยนเฟสจากแอลฟาสปอคูมินเป็นบีตา-สปอคูมินมากขึ้น แก้วเคลือบที่ผสมด้วยสปอคูมินในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.9 ไม่พบเฟสของคริสโตบาไลต์และสปอคูมินแต่พบเฟสของเพทาไลต์เกิดขึ้นมาเพียงเฟสเดียว เนื่องจากแก้วเคลือบที่ผสมด้วยสปอคูมินในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เกิดการทำปฏิกิริยากันระหว่างซิลิกา กับสปอคูมินเกิดเป็นเพทาไลต์[28,29] ซึ่งแร่เพทาไลต์เป็นแร่ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำมีค่าประมาณ $0.3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ [11] โดยที่วัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ จะช่วยทำให้วัสดุมีสมบัติในด้านการทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยเฉียบพลันได้ดี

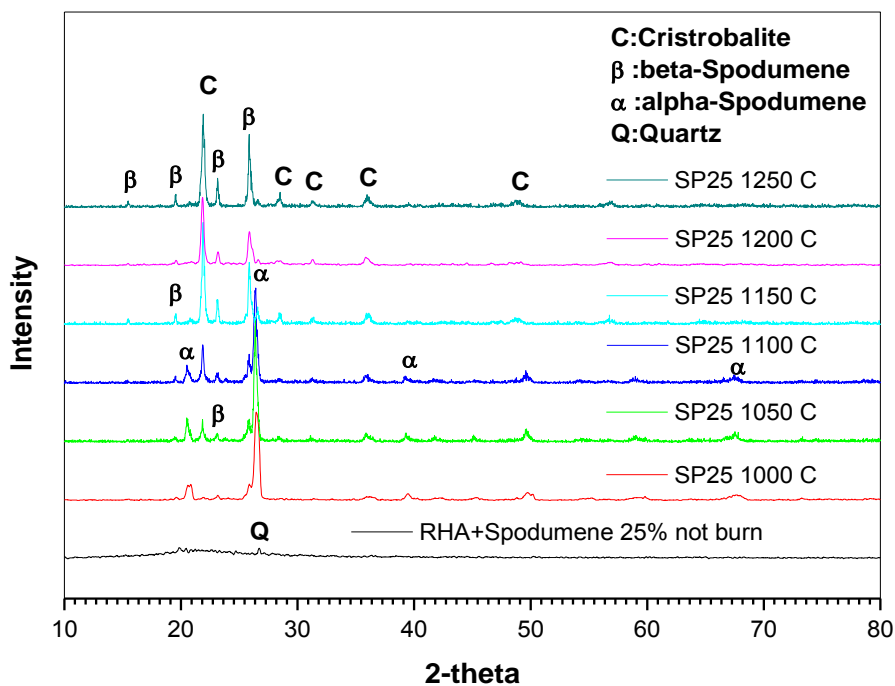
ในส่วนของแก้วเคลือบที่ผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกต ในอัตราส่วน 5, 10, 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิต่างๆ พบว่าการเติมแก้วบอโรซิลิเกตทำให้เกิดการตกผลึกเป็นคริสโตบาไลต์ได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ดังรูปที่ 4.10 -รูปที่ 4.12 เมื่อเพิ่มปริมาณแก้วบอโรซิลิเกต ในอัตราส่วน 5, 10 และ 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความเข้มฟลักของคริสโตบาไลต์เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากในแก้วบอโรซิลิเกตมีไดโบรอนไดรอกไซด์ (B_2O_3) และโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) เป็นส่วนผสมหลัก ซึ่งสารประกอบพวกนี้จะเป็นตัวเร่งให้เกิดการตกผลึกเป็นคริสโตบาไลต์ได้ ซึ่งสอดคล้องกับการรายงานของ Lima, M. M. และคณะ[22] พบว่าแก้วบอโรซิลิเกตที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนจะเกิดการตกผลึกของคริสโตบาไลต์ขึ้น ในทางกลับกันแก้วเคลือบที่ผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกต ในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าความเข้มฟลักของคริสโตบาไลต์ลดต่ำลง เนื่องจาก การเติม แก้วบอโรซิลิเกตลงไปปริมาณที่มาก ซึ่งจะไปแทนที่ซิลิกาจากแก้วเคลือบจึงทำให้ซิลิกาโดยรวมลดลง ส่งผลให้การตกผลึกของคริสโตบาไลต์ลดน้อยลง



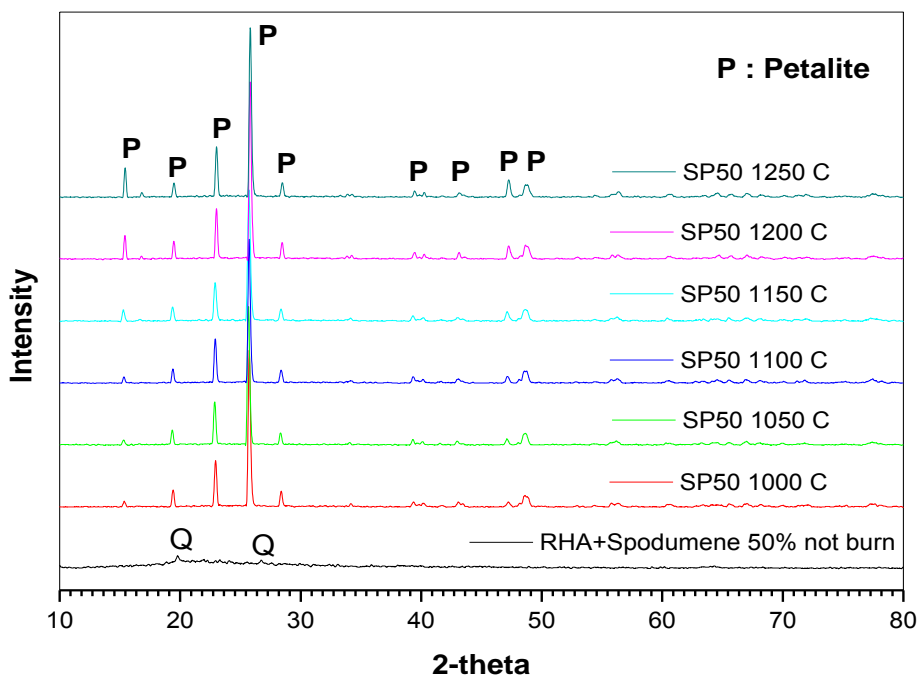
รูปที่ 4.6 องค์ประกอบทางเฟสของเถ้าแกลบที่ผสมด้วยสปอดูมินในอัตราส่วน 5 เปอร์เซ็นต์
โดยน้ำหนัก ก่อนเผาและที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิต่างๆ



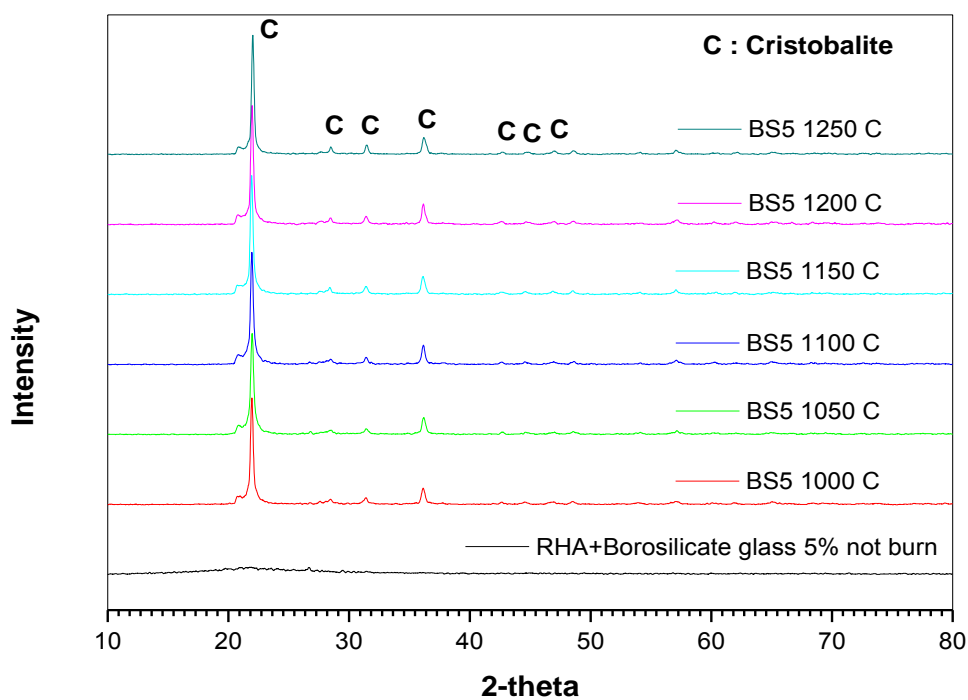
รูปที่ 4.7 องค์ประกอบทางเฟสของเถ้าแกลบที่ผสมด้วยสปอดูมินในอัตราส่วน 10 เปอร์เซ็นต์
โดยน้ำหนัก ก่อนเผาและที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิต่างๆ



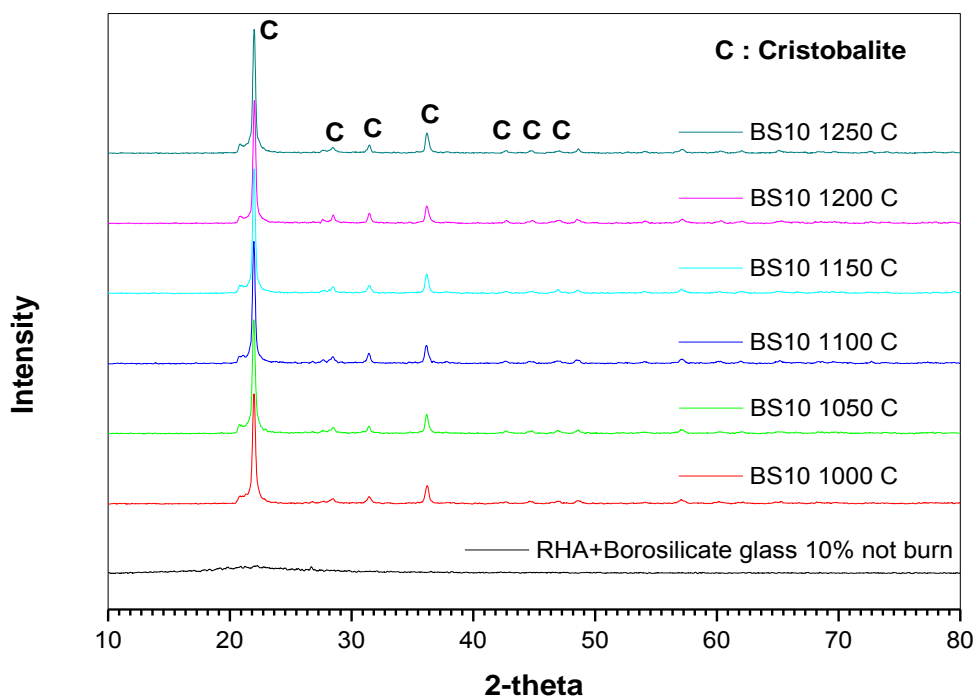
รูปที่ 4.8 องค์ประกอบทางเฟสของแก้วเคลือบที่ผสมด้วยสปอดูมินในอัตราส่วน 25 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ก่อนเผาและที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิต่างๆ



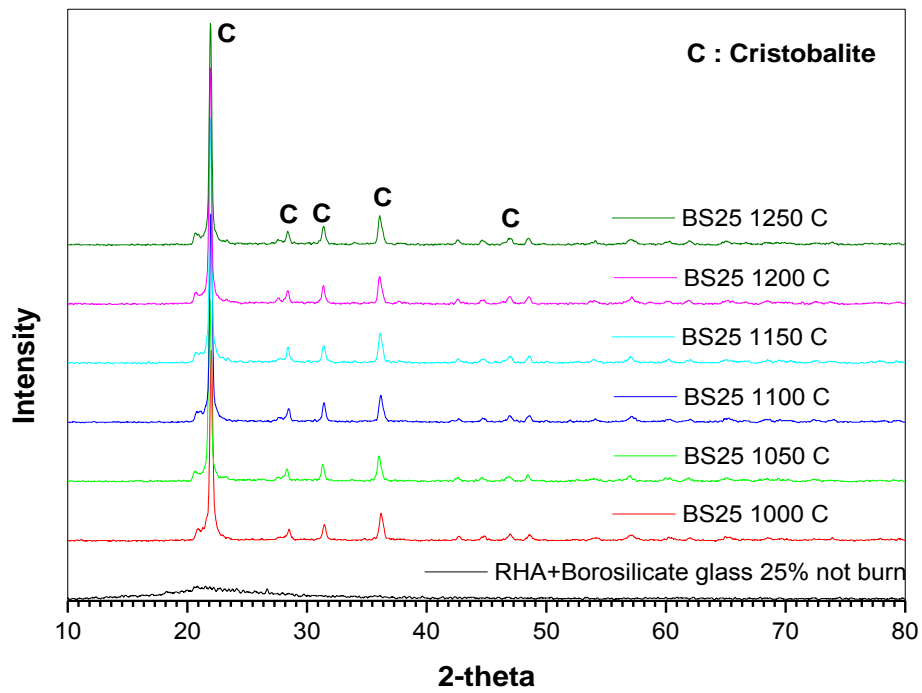
รูปที่ 4.9 องค์ประกอบทางเฟสของแก้วเคลือบที่ผสมด้วยสปอดูมินในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ก่อนเผาและที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิต่างๆ



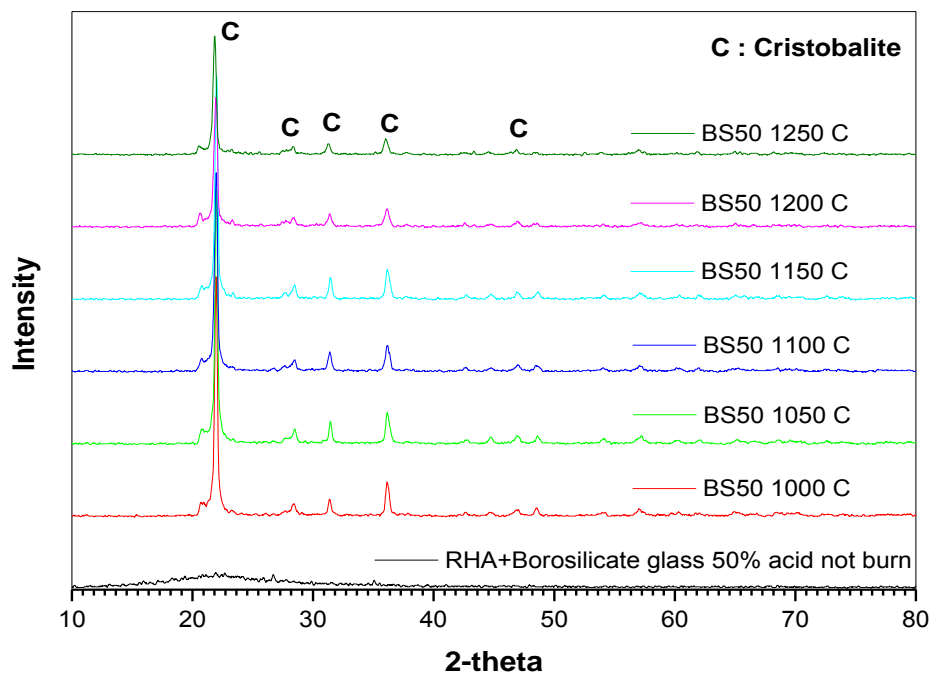
รูปที่ 4.10 องค์ประกอบทางเฟสของแก้วเคลือบที่ผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกตในอัตราส่วน 5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ก่อนเผาและที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.11 องค์ประกอบทางเฟสของแก้วเคลือบที่ผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกตในอัตราส่วน 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ก่อนเผาและที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิต่างๆ



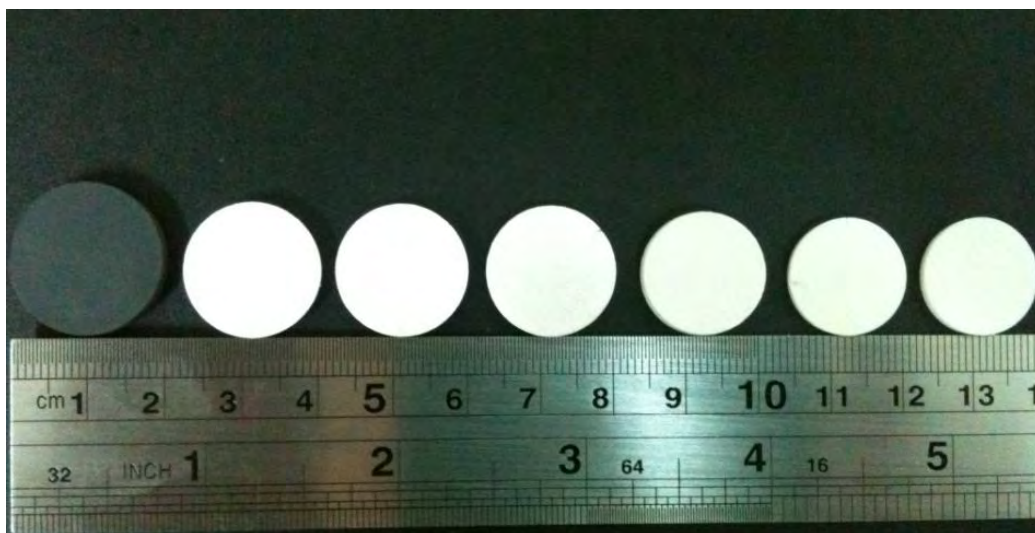
รูปที่ 4.12 องค์ประกอบทางเฟสของแก้วเคลือบที่ผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกตในอัตราส่วน 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ก่อนเผาและที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.13 องค์ประกอบทางเฟสของแก้วเคลือบที่ผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกตในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ก่อนเผาและที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิต่างๆ

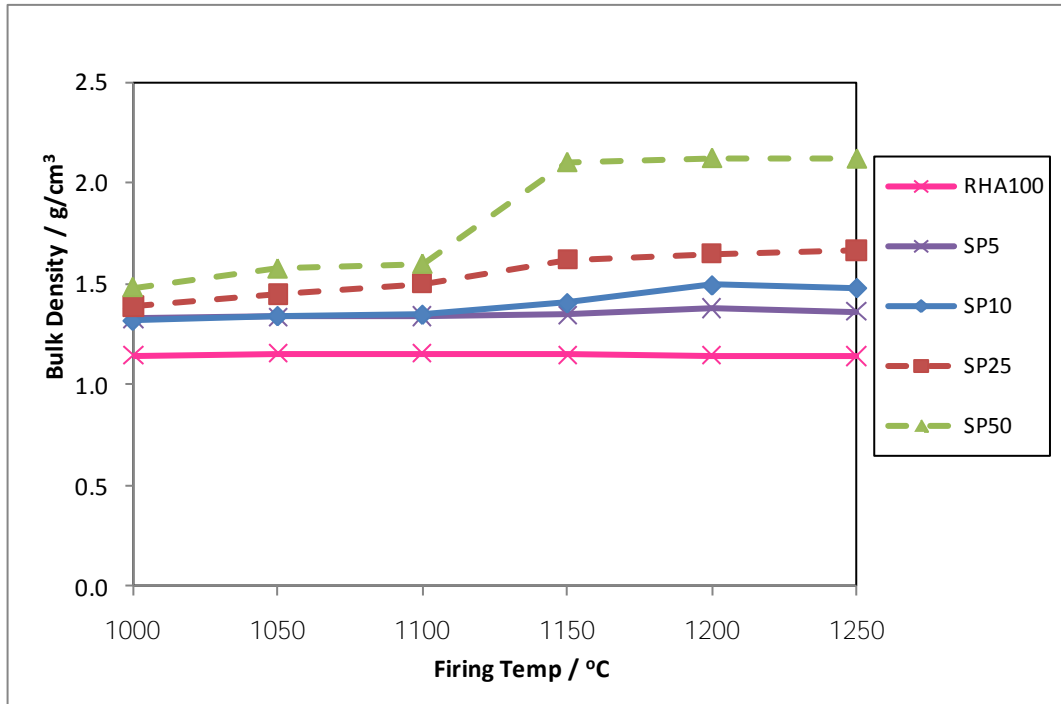
4.3.2 ความหนาแน่น เฟอร์เซนต์การดูดซึมน้ำ และการหดตัว

การเตรียมชิ้นงานถ้ำกลบบริสุทธิ์ ถ้ำกลบที่ผสมด้วยสปอดูมิน ซึ่งได้จากการผสม อะลูมิเนียมไนเตรด และลิเทียมคาร์บอเนต และถ้ำกลบที่ผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกต ซึ่งได้จากการ ผสมบอแรกซ์ และกรดบอริก ในอัตราส่วน 5, 10, 25 และ 50 เฟอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผาที่ อุณหภูมิ 1000, 1050, 1100, 1150, 1200 และ 1250 องศาเซลเซียส โดยมีลักษณะ ดังรูปที่ 4.14

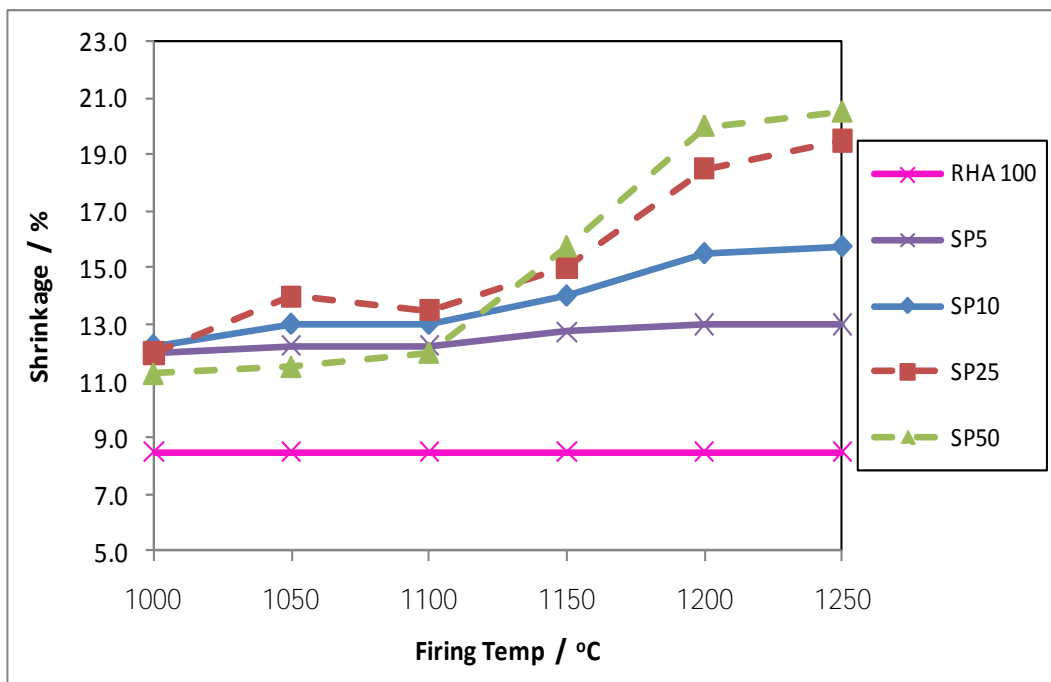


รูปที่ 4.14 ลักษณะชิ้นงานถ้ำกลบที่ผสมด้วยสปอดูมิน 50 เฟอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ก่อนเผาและที่เผา ณ อุณหภูมิ 1000, 1050, 1100, 1150, 1200 และ 1250 องศาเซลเซียส

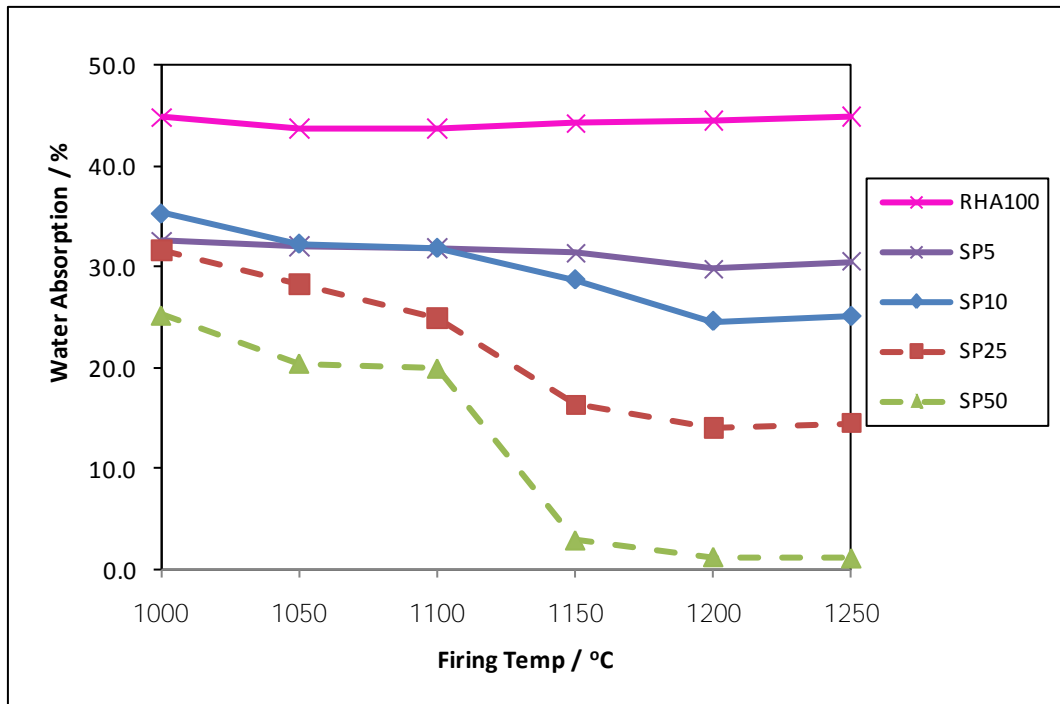
ความหนาแน่นของชิ้นงานถ้ำกลบที่ผสมด้วยสปอดูมิน มีความหนาแน่นที่มากกว่า ชิ้นงานถ้ำกลบที่ผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกต เมื่อพิจารณาชิ้นงานถ้ำกลบที่ผสมด้วยสปอดูมิน พบว่าความหนาแน่นของชิ้นงานถ้ำกลบที่ผสมด้วยสปอดูมินลงไปปริมาณที่มากขึ้น และเผาที่ อุณหภูมิสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.15 จะทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น เนื่องจากสปอดูมินเป็น liquid phase sintering[20,21,30] เป็นตัวที่ช่วยในการเผา ซึ่งเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะไปทำให้สปอดูมินเกิดการ หลอมและทำหน้าที่เป็นตัวที่เชื่อมอนุภาคเข้าด้วยกันในระหว่างการเผา ทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นที่ มากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าถ้ำกลบที่ผสมด้วยสปอดูมิน ในอัตราส่วน 50 เฟอร์เซนต์โดยน้ำหนัก มี ความหนาแน่นมากที่สุด เนื่องจากสปอดูมินเป็นตัวที่ช่วยในการเผา เมื่อทำการเติมสปอดูมินลงไป ใน ปริมาณที่มากขึ้นจึงทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นมากขึ้นด้วย เมื่อพิจารณาการหดตัว และการดูดซึมน้ำ พบว่าเมื่อทำการเติมสปอดูมินลงไปปริมาณที่มากขึ้นและเผาที่อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้ชิ้นงาน เกิดการหดตัวมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนาแน่น เนื่องจากเมื่อชิ้นงานเกิดการหดตัวที่มากขึ้น ก็จะทำให้ความหนาแน่นมีค่ามากขึ้น และทำให้ค่าการดูดซึมน้ำมีค่าน้อยลง ซึ่งสังเกตได้ดังรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 พบว่าถ้ำกลบที่ผสมด้วยสปอดูมินลงไปปริมาณ 50 เฟอร์เซนต์ โดยเผาที่ อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส ชิ้นงานเกิดการหดตัวมากที่สุด และมีค่าการดูดซึมน้ำน้อยที่สุด



รูปที่ 4.15 ค่าความหนาแน่นของเถ้าแกลบบริสุทธิ์ และเถ้าแกลบที่ผสมด้วยสปอดูมินในอัตราส่วน 5, 10, 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเถ้าแกลบที่ผสมด้วยแร่สปอดูมินในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิต่างๆ

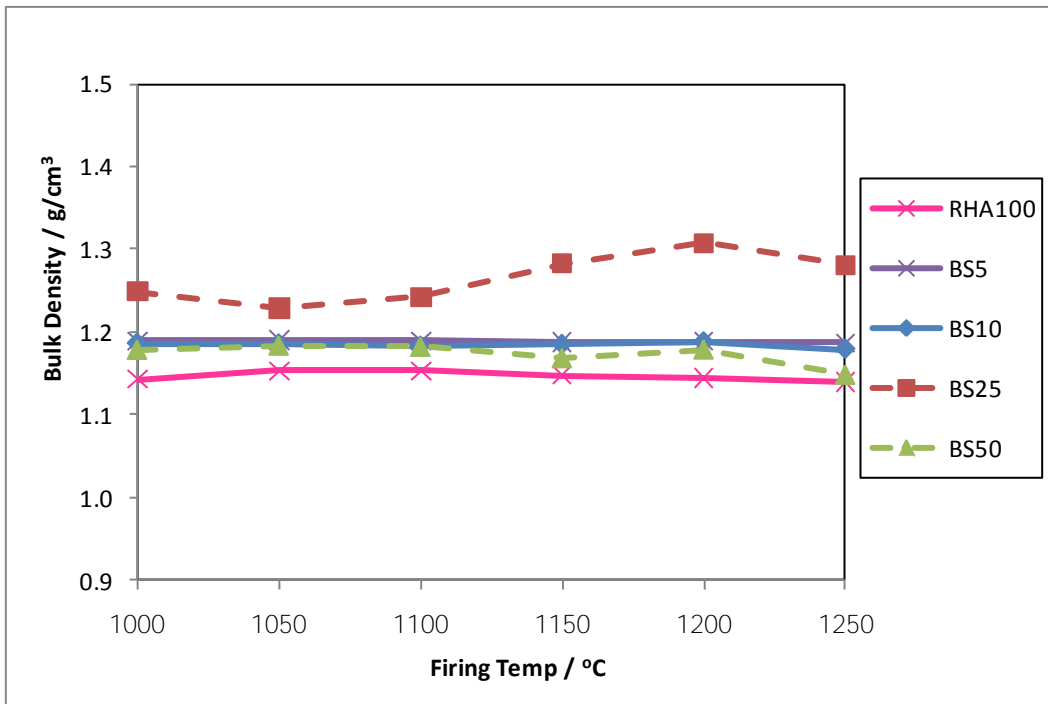


รูปที่ 4.16 ค่าการหดตัวของเถ้าแกลบบริสุทธิ์ และเถ้าแกลบที่ผสมด้วยสปอดูมินในอัตราส่วน 5, 10, 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิต่างๆ

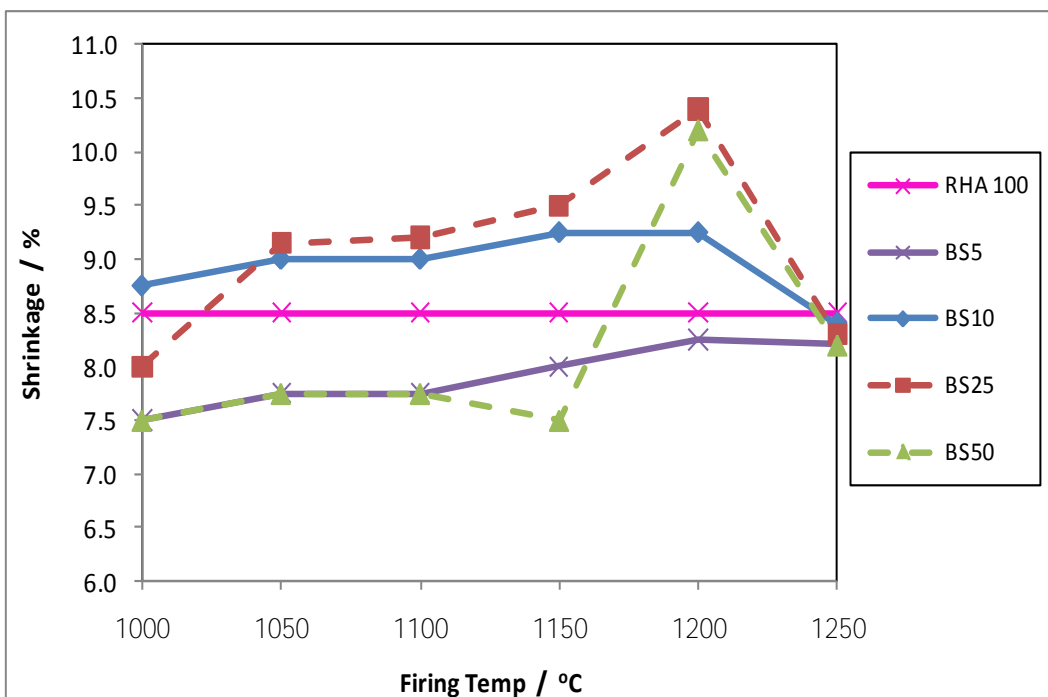


รูปที่ 4.17 ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของเถ้าเคลือบบริสุทธิ์ เถ้าเคลือบที่ผสมด้วยสโปคูมิน ในอัตราส่วน 5, 10, 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเถ้าเคลือบที่ผสมด้วยแร่สโปคูมิน ในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิต่างๆ

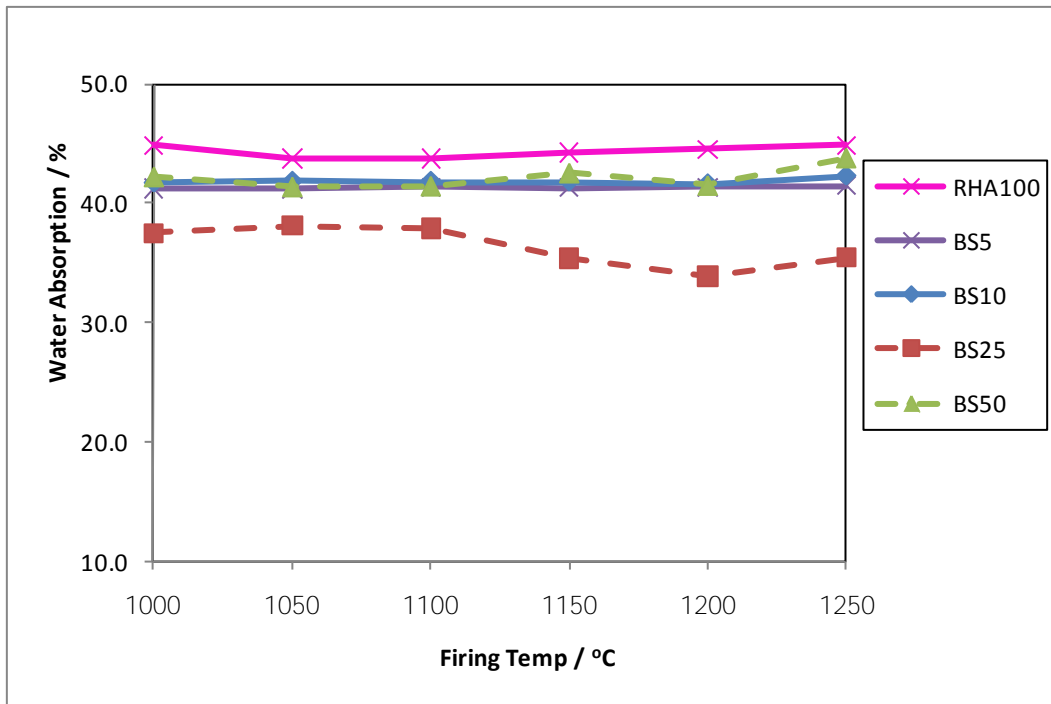
ในส่วนความหนาแน่นของชิ้นงานเถ้าเคลือบที่ผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกต ดังรูปที่ 4.18 พบว่าเมื่อทำการเติมแก้วบอโรซิลิเกตลงไป ปริมาณที่มากขึ้น ทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาการหดตัว และการดูดซึมน้ำ ดังรูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20 พบว่าเมื่อเติมแก้วบอโรซิลิเกตลงไป ปริมาณที่มากขึ้น ทำให้ชิ้นงานเกิดการหดตัวน้อย และค่าการดูดซึมน้ำมีค่าที่สูงเช่นเดิม โดยสังเกตได้จากองค์ประกอบทางเฟสของเถ้าเคลือบที่ผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกต ในอัตราส่วนต่างๆ พบว่าเกิดเฟสของคริสโตบาไลต์ขึ้นมา ซึ่งสอดคล้องกับการรายงานของ Lima, M. M. และคณะ[22] ที่ได้ทำการศึกษาลักษณะเฉพาะและพฤติกรรมทางความร้อนของแก้วบอโรซิลิเกต พบว่าแก้วบอโรซิลิเกตที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนจะเกิดการตกผลึกของคริสโตบาไลต์ขึ้น ทำให้ความหนาแน่นน้อยลงเนื่องจากการไหลตัวเกิดความหนืดและทำให้เกิดการหดตัวน้อย ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำมีค่าสูงเช่นเดิม



รูปที่ 4.18 ค่าความหนาแน่นของถ้ำเคลือบบริสุทธ์ และถ้ำเคลือบที่ผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกต ในอัตราส่วน 5, 10, 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.19 ค่าการหดตัวของถ้ำเคลือบบริสุทธ์ และถ้ำเคลือบที่ผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกต ในอัตราส่วน 5, 10, 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิต่างๆ



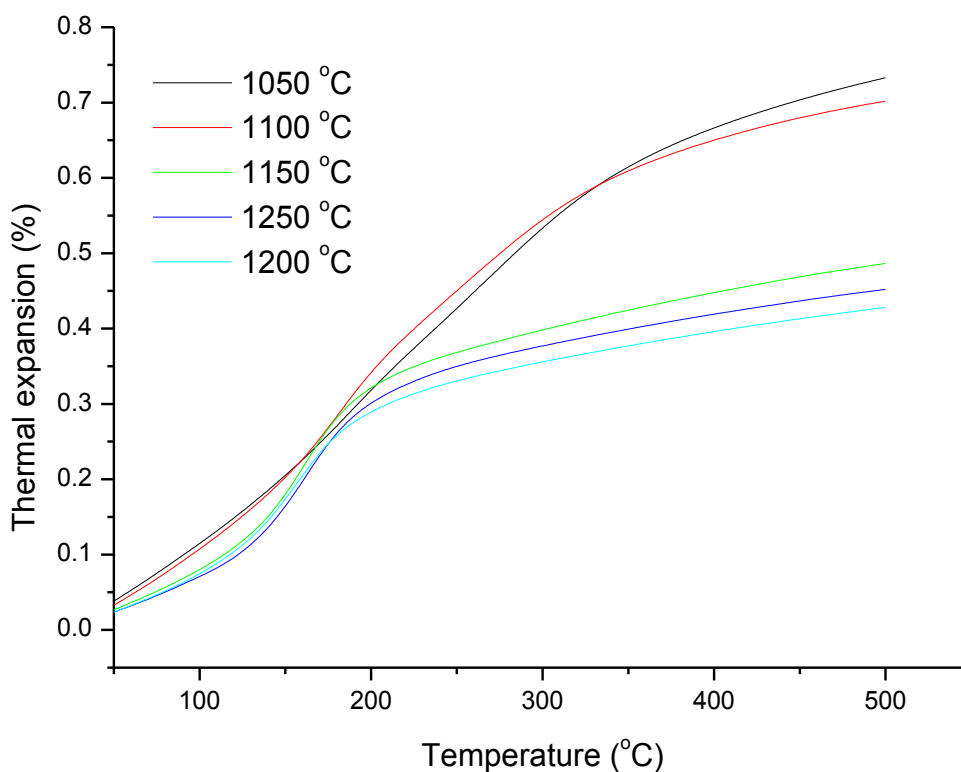
รูปที่ 4.20 ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของเถ้าแกลบบริสุทธิ์ และเถ้าแกลบที่ผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกตในอัตราส่วน 5, 10, 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิต่างๆ

4.3.3 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน

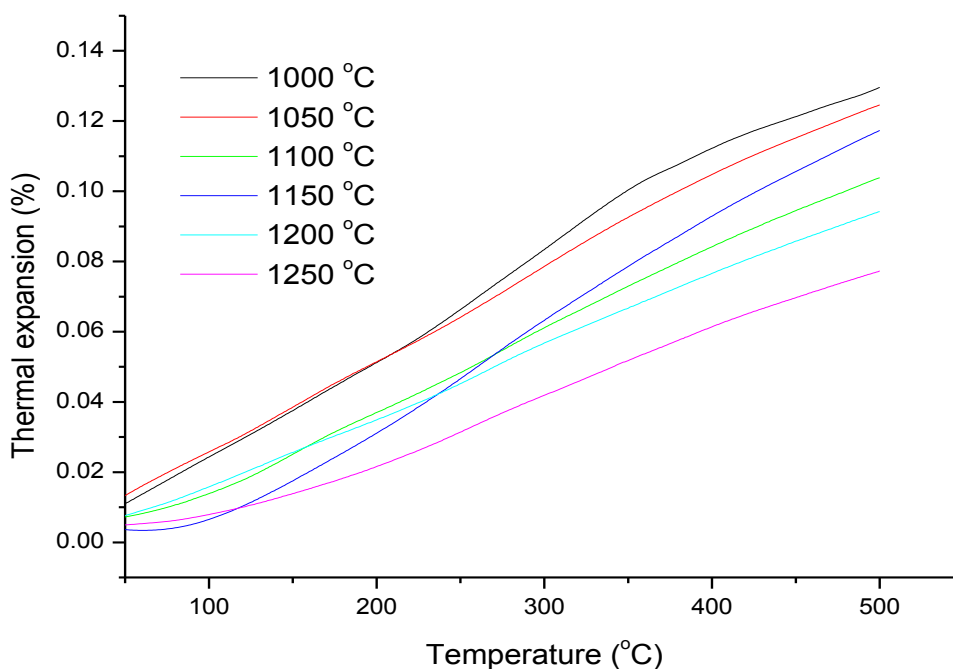
จากการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน(Coefficient of thermal expansion) ด้วยเครื่อง Dilatometer ของชิ้นงานเถ้าแกลบที่ผสมด้วยสปอคูมิน ซึ่งได้จากการผสมอะลูมิเนียมไนเตรด และลิเทียมคาร์บอเนต เมื่อเทียบกับชิ้นงานเถ้าแกลบที่ผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกต ซึ่งได้จากการผสมบอแรกซ์ และกรดบอริก ในอัตราส่วน 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิ 1000, 1050, 1100, 1150, 1200 และ 1250 องศาเซลเซียส ดังตารางที่ 4.2 และมีการขยายตัวทางความร้อน ของชิ้นงานเถ้าแกลบที่ผสมด้วยสปอคูมินดังรูปที่ 4.21 และรูปที่ 4.22

ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของวัสดุ

อุณหภูมิ (°C)	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (COE)			
	RHA+25% Spodumene (50-500)x10 ⁻⁶ /°C	RHA+50% Spodumene (50-500)x10 ⁻⁶ /°C	RHA+25% Borosilicate glass (50-500)x10 ⁻⁶ /°C	RHA+50% Borosilicate glass (50-500)x10 ⁻⁶ /°C
1000	-	3.74	-	-
1050	16.49	3.56	-	-
1100	15.92	3.23	-	-
1150	11.26	3.62	-	-
1200	10.05	3.01	33.05	-
1250	10.57	2.70	30.46	24.37



รูปที่ 4.21 การขยายตัวทางความร้อนของแก้วเคลือบที่ผสมด้วยสปอดูมิน
ในอัตราส่วน 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.22 การขยายตัวทางความร้อนของแก้วเคลือบที่ผสมด้วยสโปคูมิน ในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

พบว่าแก้วเคลือบที่ผสมด้วยสโปคูมินเมื่อทำการเติมสโปคูมินลงไปปริมาณที่เพิ่มขึ้นจาก 25 เป็น 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และใช้อุณหภูมิในการเผาที่มากขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนมีค่าลดลง เนื่องจากสโปคูมินซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่ต่ำ เมื่อเติมลงไปจะไปช่วยทำให้ชิ้นงานมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่ต่ำลง ซึ่งสังเกตได้จากรูปที่ 4.6 - รูปที่ 4.9 เมื่อเติมสโปคูมินลงไปปริมาณที่มากขึ้นเฟสของคริสโตบาไลต์จะลดลง และเกิดเฟส

อ ง สโปคูมินขึ้นมา จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนมีค่าต่ำลง และเมื่อเติมสโปคูมินลงไป ในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส พบว่าชิ้นงานมีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 2.70×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส ซึ่งสังเกตได้จากการขยายตัวพบว่ามีค่าต่ำที่สุด เนื่องจากรูปองค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงานแก้วเคลือบที่ผสมด้วยสโปคูมินในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส ไม่พบเฟสของคริสโตบาไลต์แต่พบเพียงเฟสของเพทาไลต์เพียงเฟสเดียว และจากตารางที่ 4.2 ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ที่ไม่ได้ทำการทดสอบ เนื่องจากชิ้นงานแตกในระหว่างทำการตัดซึ่งเกิดจากชิ้นงานมีความหนาแน่นต่ำ

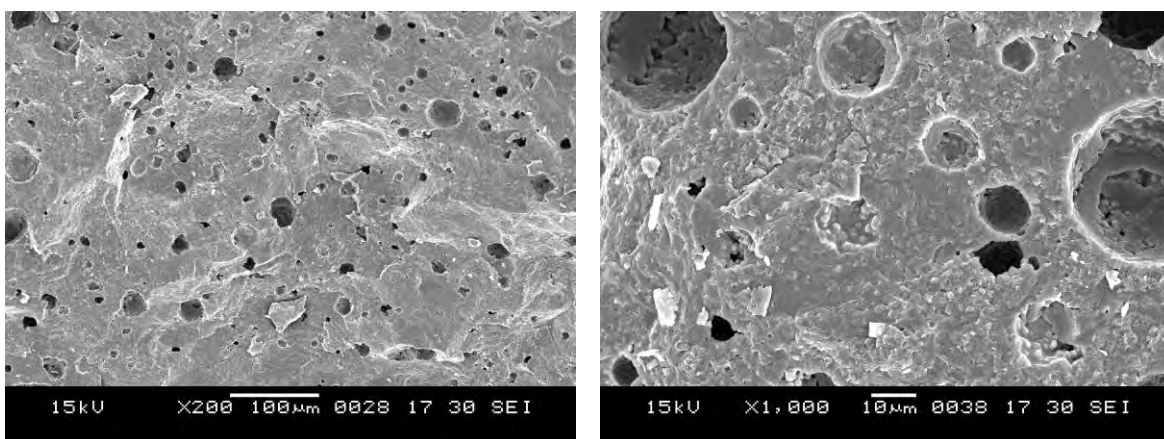
เมื่อพิจารณาการขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงานแก้วเคลือบที่ผสมด้วยสโปคูมินในอัตราส่วน 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.21 พบว่าช่วงอุณหภูมิประมาณ 150-200 องศาเซลเซียส จะเกิดการ

ขยายตัวอย่างรุนแรง เนื่องจากเกิดผลึกเป็นคริสโตบาลไลท์ขึ้น และเมื่อพิจารณาชิ้นงานเข้าแถบที่ผสมด้วยสปอคูมินในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.22 พบว่าเกิดการขยายตัวอย่างช้าๆ ซึ่งสอดคล้องกับองค์ประกอบทางเฟสที่ได้กล่าวมาข้างต้น จึงทำให้ชิ้นงานเข้าแถบที่ผสมด้วยสปอคูมินในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่ต่ำกว่า

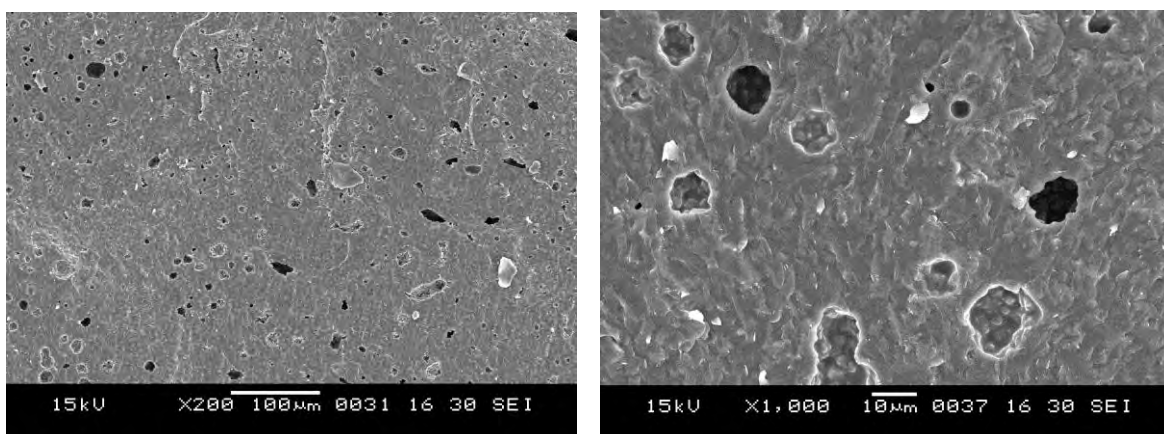
ในทางกลับกันงานเข้าแถบที่ผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกตเมื่อทำการเติมแก้วบอโรซิลิเกตลงไปในอัตราส่วนที่มากขึ้น พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงานมีค่าสูงเช่นเดิม เนื่องจากเมื่อสังเกตจากรูปองค์ประกอบทางเฟสของเข้าแถบที่ผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกตในอัตราส่วนต่างๆ พบเฟสของคริสโตบาลไลท์อยู่จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนมีค่าสูง และที่ทำการทดสอบเพียงชิ้นงานเข้าแถบที่ผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกต ในอัตราส่วน 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิ 1200 และ 1250 องศาเซลเซียส และในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส เนื่องจากตัวอย่างอื่นๆ ให้ค่าที่ไม่น่าสนใจ นอกจากนี้ชิ้นงานบางตัวแตกเสียหายเนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนสูง

4.3.4 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างจุลภาค

ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วย ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ของพื้นผิวหน้าชิ้นงานที่นำมาหักของเข้าแถบที่ผสมด้วยสปอคูมิน ซึ่งได้จากการผสมอะลูมิเนียมไนเตรต และลิเทียมคาร์บอเนต และชิ้นงานเข้าแถบที่ผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกต ซึ่งได้จากการผสมบอแรกซ์ และกรดบอริก ในอัตราส่วน 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส พบว่าเข้าแถบที่ผสมด้วยสปอคูมินในอัตราส่วน 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.23 ชิ้นงานมีขนาดรูพรุนที่ใหญ่และเล็กปนกันเป็นปริมาณมาก เมื่อทำการเพิ่มปริมาณสปอคูมินเป็นอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์น้ำหนัก ดังรูปที่ 4.24 พบว่าชิ้นงานมีรูพรุนลดน้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับความหนาแน่นของชิ้นงานเมื่อเพิ่มสปอคูมินลงไปปริมาณที่มากขึ้นทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นมากขึ้น ชิ้นงานเกิดการหดตัวสูง ส่งผลให้การดูดซึมน้ำมีค่าลดต่ำลง อย่างไรก็ตามรูพรุนพวกนี้เป็นตำหนิที่อาจส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงที่ต่ำได้



รูปที่ 4.23 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผิวหน้าชิ้นงานที่หักของชิ้นงานเส้นใยที่ผสมด้วยสโปดิวมินในอัตราส่วน 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส

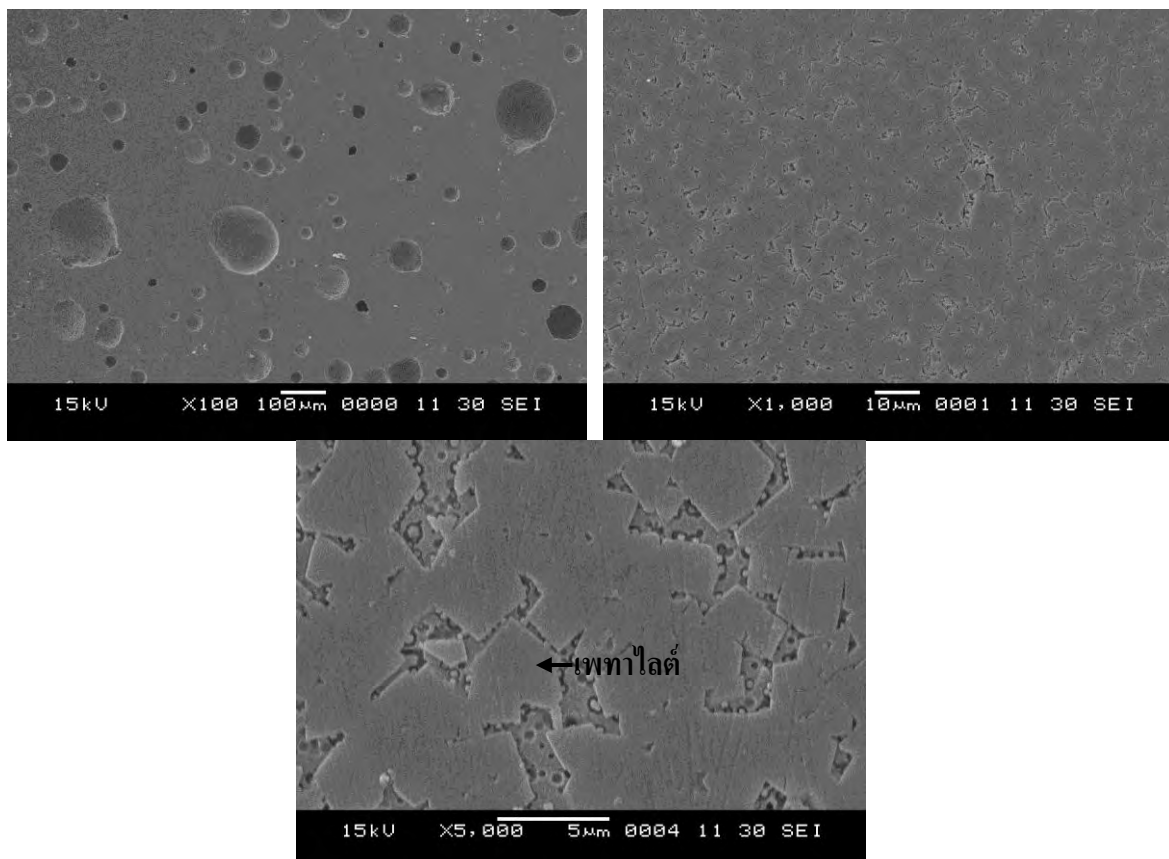


รูปที่ 4.24 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผิวหน้าชิ้นงานที่หักของเส้นใยที่ผสมด้วยสโปดิวมินในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส

เมื่อนำชิ้นงานเส้นใยที่ผสมด้วยสโปดิวมินในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและเผาผลึกที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส มาขัดผิวหน้าด้วยกระดาษทราย และผงเพชรขนาด 1 ไมครอน กัดผิวด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) เมื่อนำมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้อง SEM ที่ผิว พบว่าชิ้นงานมีรูพรุนซึ่งเป็นรูพรุนปิดขนาดต่างๆ ตั้งแต่ระดับ 10 ไมครอน จนถึงขนาดประมาณ 100 ไมครอน ดังรูปที่ 4.25 (กำลังขยาย x100) ซึ่งรูพรุนนี้จะเป็นตัวที่ลดความแข็งแรงของชิ้นงานทำให้มีความแข็งแรงต่ำ

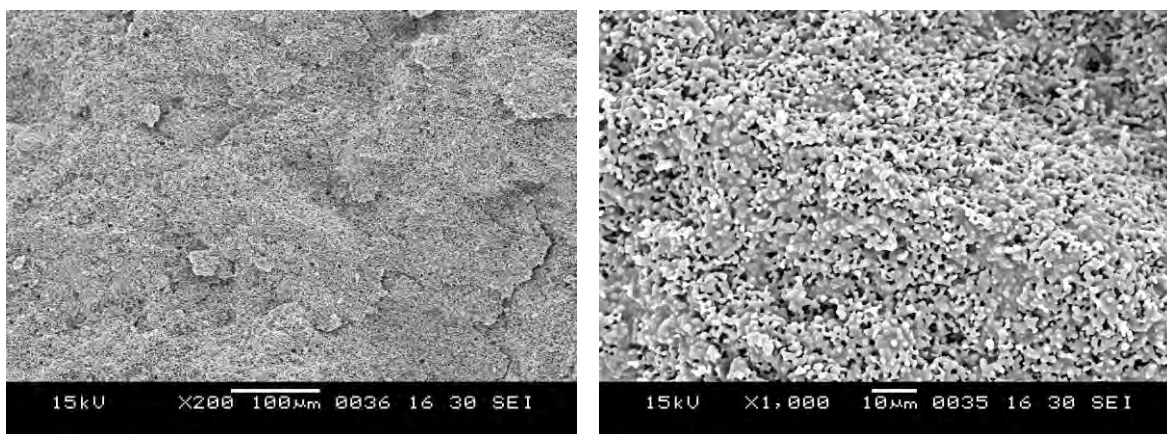
เมื่อวิเคราะห์ที่กำลังขยายสูงขึ้นจะพบว่าที่ผิวของชิ้นงานหลังจากการกัดด้วยกรดแล้ว มีลักษณะรูปผลึกเป็นทรงสี่เหลี่ยม (กำลังขยาย x1000) ซึ่งเป็นเกรนหรือผลึกของเพทาไลต์ แต่ที่

กำลังขยาย x5000 จะพบว่าบริเวณที่ถูกกัดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริกซึ่งเป็นบริเวณของเฟสเนื้อแก้ว-ซิลิกา ที่หลงเหลือจากการทำปฏิกิริยากับสปอคูมินไปเป็นเพทาไลต์

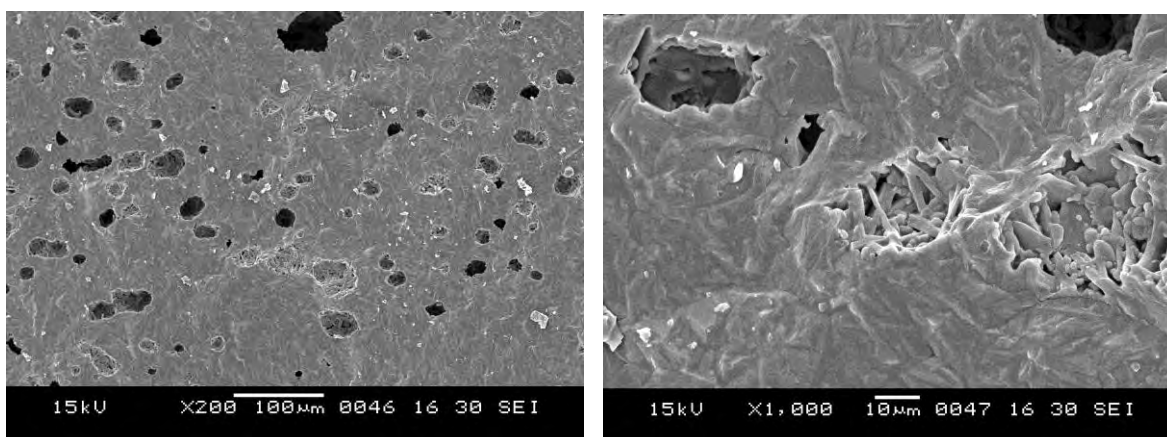


รูปที่ 4.25 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผิวขัดหน้า และกัดผิวของชิ้นงานแก้วเคลือบที่ผสมด้วยสปอคูมินในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส

ในส่วนของแก้วเคลือบที่ผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกตในอัตราส่วน 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.26 และรูปที่ 4.27 พบว่าชิ้นงานแก้วเคลือบที่ผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกตในอัตราส่วน 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบรูพรุนเป็นจำนวนมาก และเมื่อทำการเพิ่มปริมาณแก้วบอโรซิลิเกตเป็น 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบผลึกของคริสโตบาไลต์มีแนวโน้มที่ใหญ่ขึ้น แต่รูพรุนยังพบอยู่เช่นเดิม ซึ่งเมื่อสังเกตจากความหนาแน่นของชิ้นงานแก้วเคลือบที่ผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกต พบว่ามีความหนาแน่นต่ำ ส่งผลให้การดูดซึมน้ำมีค่าสูง



รูปที่ 4.26 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผิวหน้าชิ้นงานที่หักของชิ้นงานเก่าเคลือบที่ผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกตในอัตราส่วน 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.27 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผิวหน้าชิ้นงานที่หักของชิ้นงานเก่าเคลือบที่ผสมด้วยแก้วบอโรซิลิเกตในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส

จากการที่ได้ทำการทดลองมาพบว่าสปอคูมินเป็นตัวที่เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งที่ช่วยในการเผาได้ดีกว่าแก้วบอโรซิลิเกต เนื่องจากการผสมสปอคูมินลงไปในการเคลือบ ทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ช่วยลดเฟสของคริสโตบาไลต์ในชิ้นงาน และยังทำให้ชิ้นงานมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่ต่ำลงด้วย แต่การผสมแก้วบอโรซิลิเกตลงไปในการเคลือบทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นน้อยมาก ในชิ้นงานยังพบเฟสของคริสโตบาไลต์อยู่ในปริมาณมาก และยังทำให้ชิ้นงานมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่สูงเช่นเดิม ดังนั้นแก้วบอโรซิลิเกตจึงไม่เหมาะที่จะนำมาเป็นสารเติมแต่งเพื่อช่วยในการเผาผืนนี้

โดยส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดในการนำมาทำการทดลองต่อไป คือ เถ้าแกลบที่ผสมสโปคูมิน ในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส เนื่องจากชิ้นงานมีค่าความหนาแน่นมากที่สุด ไม่พบเฟสของคริสโตบาลไลต์ และมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำที่สุด

4.3.5 ความต้านแรงดัดโค้ง (ความแข็งแรง)

ความแข็งแรงของชิ้นงานเถ้าแกลบที่ผสมด้วยสโปคูมิน ซึ่งได้จากการผสมอะลูมิเนียมไนเตรต และลิเทียมคาร์บอเนต ในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส ใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ยืนไฟไว้เป็นเวลา 30 นาที ดังตารางที่ 4.3 พบว่าชิ้นงานมีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 20.55 เมกะพาสคัล ซึ่งมีค่าต่ำทั้งนี้เกิดจากการเผาไหม้ฟองอากาศของคาร์บอเนตที่ได้จากการผสมอะลูมิเนียมไนเตรต และลิเทียมคาร์บอเนตออกไม่ดีพอ จึงส่งผลให้ชิ้นงานมีค่าความแข็งแรงที่ต่ำ จึงได้ทำการปรับอัตราการเพิ่มอุณหภูมิใหม่โดยปรับเป็น 1 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่าชิ้นงานมีค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเป็น 36.14 เมกะพาสคัล ซึ่งค่าความแข็งแรงก็ยังมีค่าไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์สโตนแวร์ซึ่งมาค่าความแข็งแรงประมาณ 80-100 เมกะพาสคัล และเมื่อสังเกตจากลักษณะ โครงสร้างจุลภาคดังรูปที่ 4.25 พบว่าชิ้นงานเกิดรูพรุนปิดที่มีขนาดเล็กและใหญ่เป็นจำนวนมากซึ่งเป็นตำหนิทำให้ความแข็งแรงมีค่าต่ำ

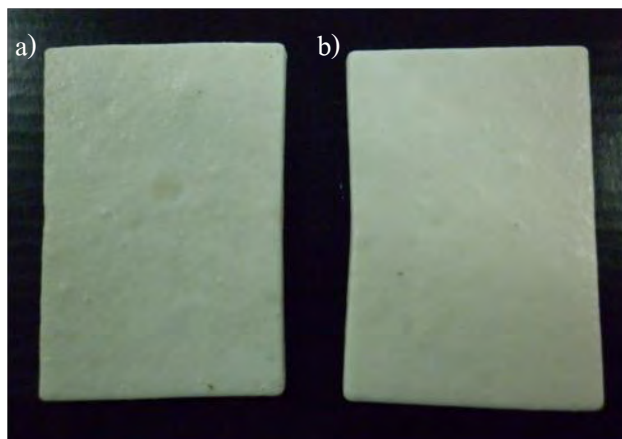
ตารางที่ 4.3 ค่าความต้านทานต่อการดัดโค้ง

สูตร	ความแข็งแรง (MPa)
RHA+SP50% (1250 °C heating rate 5 °/min soak 30 min)	20.55±0.91
RHA+SP50% (1250 °C heating rate 1 °/min soak 30 min)	36.14±2.86

4.3.6 ความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน

จากการทดสอบความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน โดยนำชิ้นงานเถ้าแกลบที่ผสมด้วยสโปคูมิน ซึ่งได้จากการผสมอะลูมิเนียมไนเตรต และลิเทียมคาร์บอเนต ในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส มาทดสอบพบว่าชิ้นงานผ่านการทดสอบทั้ง 5 ครั้ง มีลักษณะ ดังรูปที่ 4.28 โดยที่ไม่พบรอยแตกกร้าว เนื่องจากชิ้นงานที่นำมาทดสอบนี้เป็นชิ้นงานที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่ต่ำเท่ากับ 2.70×10^{-6} ต่อองศา

เซลเซียส ซึ่งวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำจะทำให้มีความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันได้ดี [11]



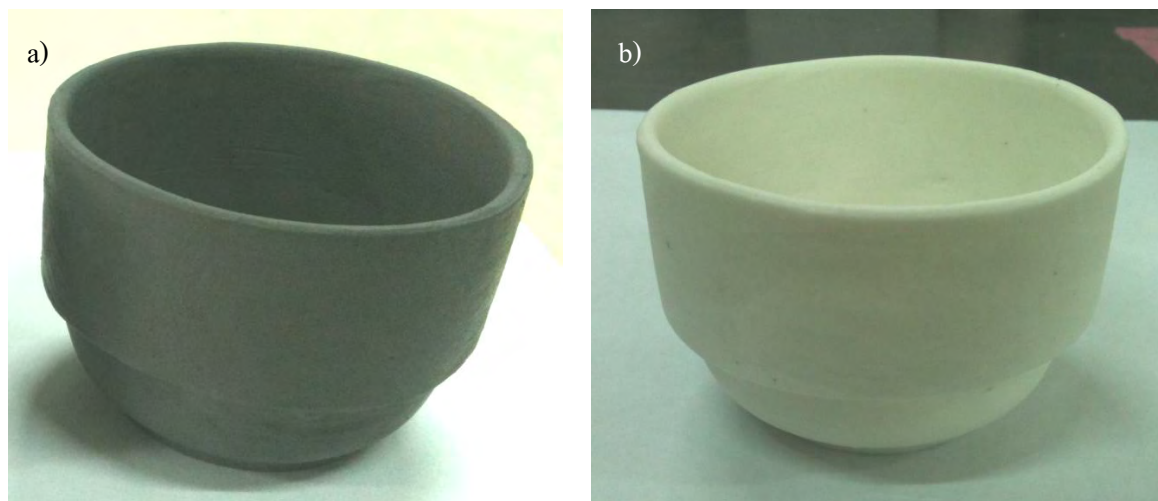
รูปที่ 4.28 ชิ้นงานทดสอบความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน a) ก่อนทดสอบ b) หลังทดสอบ

4.3.7 ผลของการขึ้นรูปชิ้นงานเป็นผลิตภัณฑ์

นำแก้วเคลือบที่ผสมด้วยสโปคูมิน ซึ่งได้จากการผสมระหว่างอะลูมิเนียมไนเตรต และลิเทียมคาร์บอเนต ในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยใช้ตัวเชื่อมประสานคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC, sodium carboxymethyl cellulose) ทำเป็นสารละลายความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เลือกใช้เนื่องจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เป็นกาวอินทรีย์ชนิดหนึ่งที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก เพื่อช่วยในการยึดเกาะอนุภาคของวัตถุดิบเข้าด้วยกันขณะขึ้นรูป โดยเฉพาะวัตถุดิบที่ไม่มีความเหนียว ส่วนผสมที่ใช้ในการขึ้นรูปมีดังนี้ ผงแก้วเคลือบที่ผสมด้วยสโปคูมิน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจำนวน 250 กรัม ผสมกับสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่เตรียมไว้จำนวน 110 กรัม (CMC 5.5 กรัม และ น้ำ 104.5 กรัม) แล้วเติมน้ำเพิ่มอีก 47 กรัม ผสมเข้าด้วยกัน หลังจากนั้นนำไปขึ้นรูปด้วยวิธีจิกเกอร์ริง ดังรูปที่ 4.29 พบว่า สามารถขึ้นรูปเป็นรูปทรงถ้วยได้ ซึ่งมีลักษณะสีค้ำก่อนเผาจากแก้วเคลือบที่มีปริมาณคาร์บอนหลงเหลืออยู่ หลังจากนั้นจึงนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส ใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียสต่อนาที ยืนไฟไว้เป็นเวลา 30 นาที ชิ้นงานที่ได้มีลักษณะเป็นสีขาวเนื่องจากคาร์บอนที่อยู่ในแก้วเคลือบได้ถูกกำจัดออกไป และชิ้นงานไม่เกิดการอ่อนตัวเสียรูปขณะเผา แต่เนื่องจากชิ้นงานเกิดการหดตัวรวมหลังเผาประมาณ 18.37 เปอร์เซ็นต์ จึงทำให้ชิ้นงานแตกหักเสียหาย

แต่ในการเตรียมผลิตภัณฑ์เซรามิกดังกล่าวข้างต้นที่ต้องใช้สารเคมีที่ให้องค์ประกอบทางเคมีเหมือนกับสโปคูมิน ผสมกับแก้วเคลือบ จะเกิดการหดตัวหลังเผาที่สูงมาก และชิ้นงานแตกหักเสียหายเป็นจำนวนมาก ซึ่งอาจจะเป็นปัญหาต่อการผลิตในระดับอุตสาหกรรมต่อไป จึงมีแนวคิดที่จะทดลองใช้

วัตถุประสงค์ตั้งต้นที่เป็นแร่สปอดูมินจากธรรมชาติเพื่อเป็นการศึกษาในลำดับต่อไป ที่อาจจะช่วยลดการหดตัวหลังเผา และเพื่อให้เหมาะสมกับการผลิตใช้งานจริง

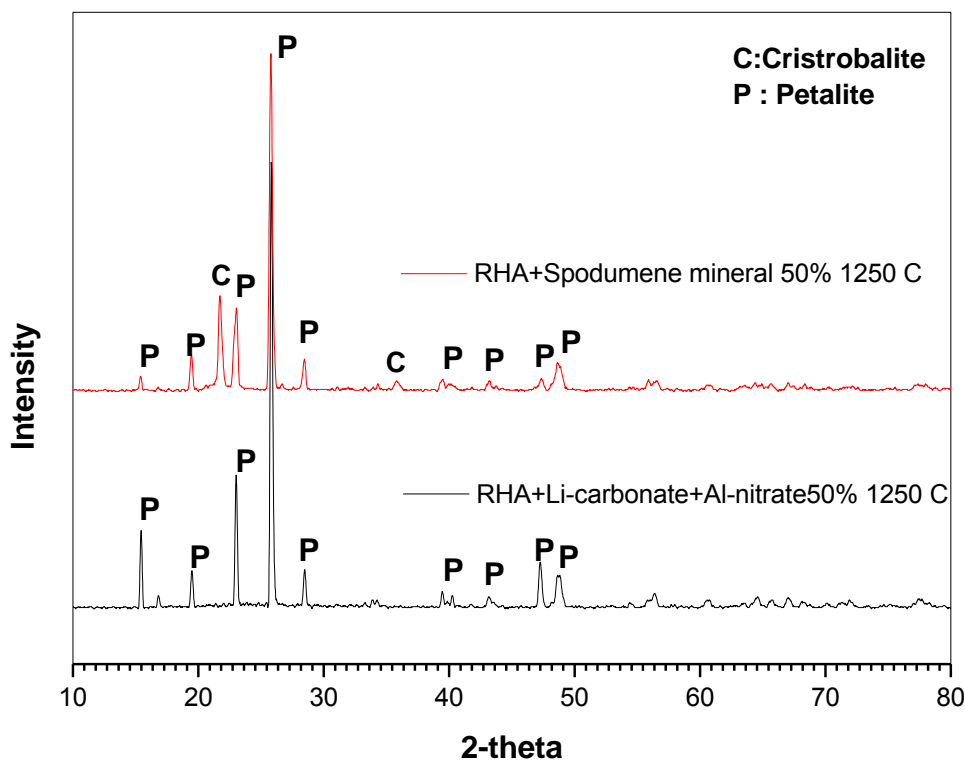


รูปที่ 4.29 ชิ้นงานรูปถ้วย a) ถ้วยเคลือบที่ผสมด้วยสปอดูมิน (ก่อนเผา)
b) ถ้วยเคลือบที่ผสมด้วยสปอดูมิน (หลังเผา)

4.4 ผลของแร่สปอดูมินธรรมชาติต่อสมบัติต่างๆ

4.4.1 องค์ประกอบทางเฟส

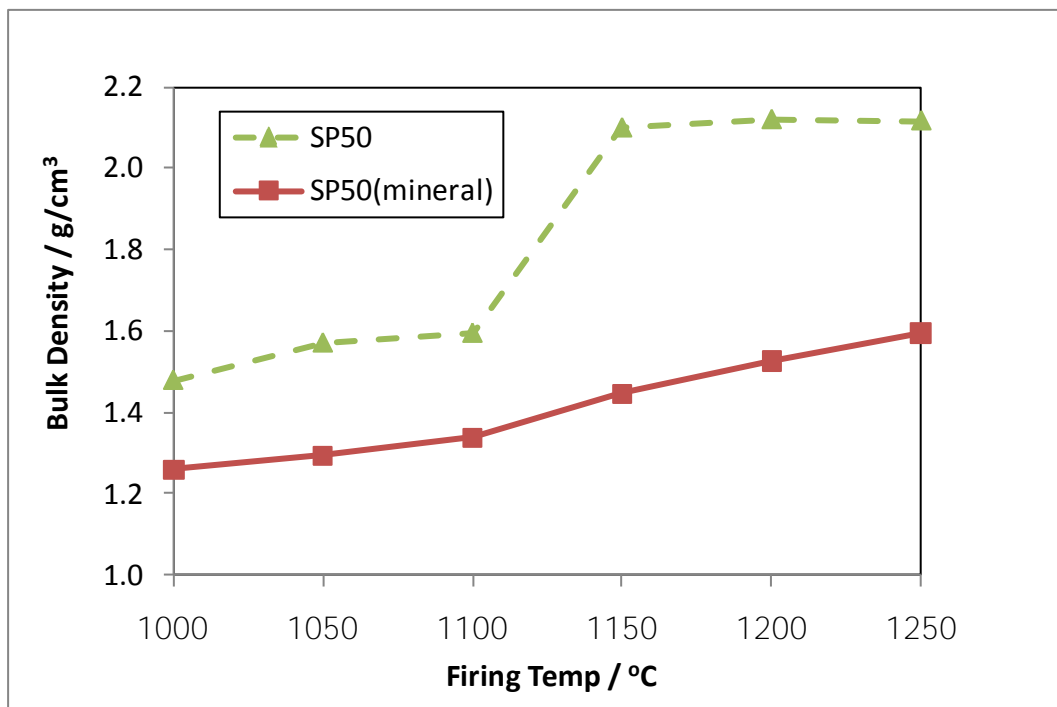
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของถ้วยเคลือบที่ผสมด้วยสปอดูมิน ซึ่งได้จากการผสมสารเคมีระหว่างอะลูมิเนียมไนเตรต และลิเทียมคาร์บอเนต มาเปรียบเทียบกับถ้วยเคลือบที่ผสมด้วยแร่สปอดูมินจากธรรมชาติ ดังรูปที่ 4.30 ในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส พบว่าถ้วยเคลือบที่ผสมด้วยแร่สปอดูมิน ในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ยังพบเฟสของคริสโตบาไลต์อยู่ เนื่องจากแร่สปอดูมินมีจุดหลอมเหลวที่สูงประมาณ 1421 องศาเซลเซียส จึงยากต่อการทำปฏิกิริยาจนเกิดการเผาผลาญ ส่งผลให้ถ้วยเคลือบที่ผสมด้วยแร่สปอดูมินเกิดการทำปฏิกิริยากันระหว่างซิลิกา กับสปอดูมินเกิดเป็นเพทาไลต์ [28,29] ได้ไม่สมบูรณ์ สังเกตได้จากผลวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ พบว่าถ้วยเคลือบที่ผสมด้วยแร่สปอดูมิน มีความเข้มของพีคของเพทาไลต์ที่ต่ำกว่าถ้วยเคลือบที่ผสมด้วยสปอดูมินที่ได้จากการผสมสารเคมี บางส่วนจึงเกิดเป็นเฟสของคริสโตบาไลต์ขึ้น



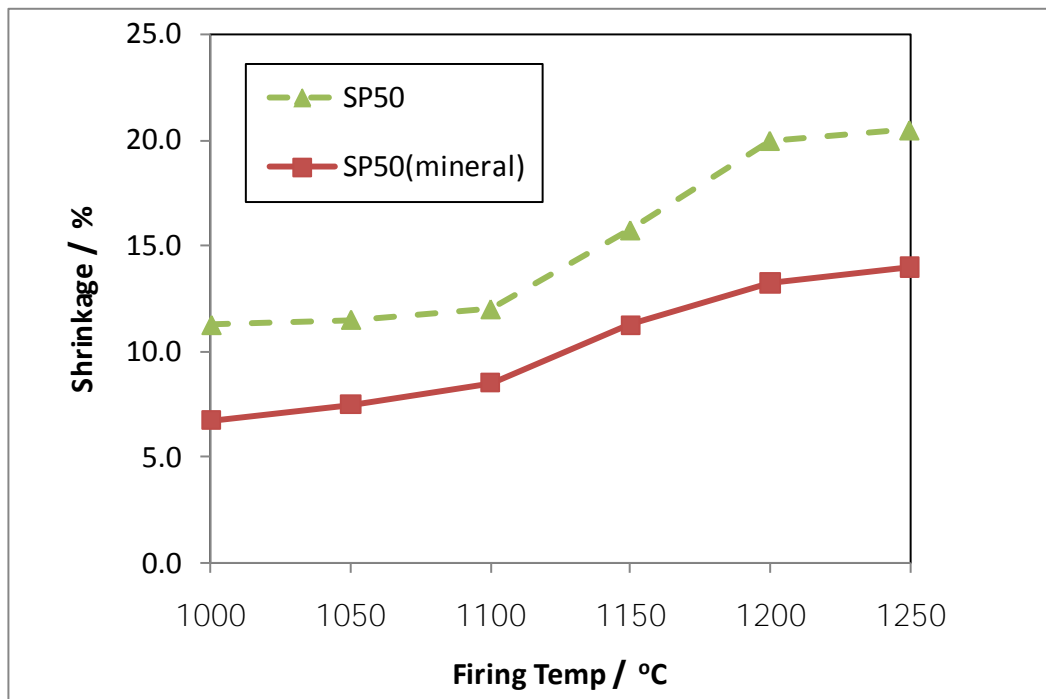
รูปที่ 4.30 องค์ประกอบทางเฟสของเถ้าแกลบที่ผสมด้วยสปอดูมิน และเถ้าแกลบที่ผสมด้วยแร่สปอดูมิน ในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส

4.4.2 ความหนาแน่น เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ และการหดตัว

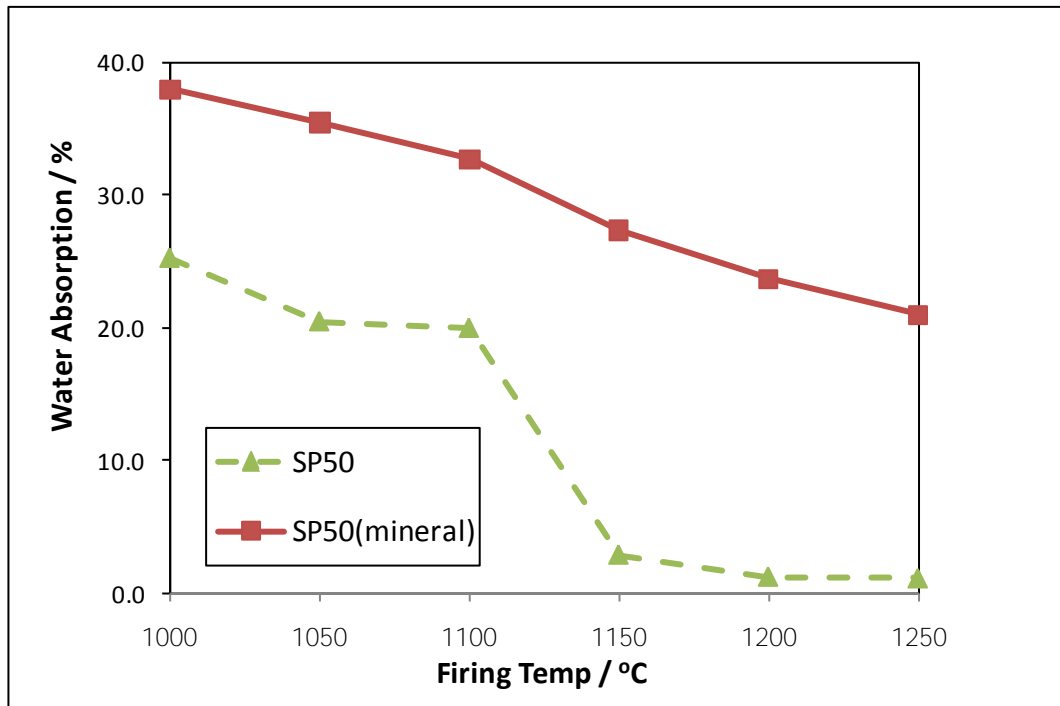
ความหนาแน่นของชิ้นงานเถ้าแกลบที่ผสมด้วยแร่สปอดูมิน โดยนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานเถ้าแกลบที่ผสมด้วยสปอดูมิน ซึ่งได้จากการผสมสารเคมีอะลูมิเนียมไนเตรด และลิเทียมคาร์บอเนต ดังรูปที่ 4.31 ความหนาแน่นของชิ้นงานเถ้าแกลบที่ผสมด้วยสปอดูมิน ซึ่งได้จากการผสมสารเคมีอะลูมิเนียมไนเตรด และลิเทียมคาร์บอเนต มีความหนาแน่นมากกว่าชิ้นงานเถ้าแกลบที่ผสมด้วยแร่สปอดูมิน เนื่องจากชิ้นงานเถ้าแกลบที่ผสมด้วยสปอดูมิน ซึ่งได้จากการผสมสารเคมีเกิดการหลอมตัวได้ง่าย โดยเฉพาะลิเทียมออกไซด์ที่สามารถเกิดการรวมตัวกันกับอะลูมินาและซิลิกาเกิดยูเทคติกเป็นเฟสของเหลว ซึ่งเฟสของเหลวนี้อาจช่วยเพิ่มความสามารถในการเผาผนึก ทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นมากขึ้น แต่ในกรณีของชิ้นงานเถ้าแกลบที่ผสมด้วยแร่สปอดูมินมีการหดตัวที่ต่ำกว่า เพราะแร่สปอดูมินทำปฏิกิริยากับเถ้าแกลบได้ยากกว่าเกิดเฟสของเหลวได้ยากกว่า การเผาผนึกจึงเกิดขึ้นได้น้อย ทำให้ค่าการดูดซึมน้ำมีมากกว่าชิ้นงานเถ้าแกลบที่ผสมด้วยสารเคมี ดังรูปที่ 4.32 และรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.31 ความหนาแน่นของเก้าเคลือบที่ผสมด้วยสปอดูมิน และเก้าเคลือบที่ผสมด้วยแร่สปอดูมิน ในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.32 เปอร์เซ็นต์การหดตัวของเก้าเคลือบที่ผสมด้วยสปอดูมิน และเก้าเคลือบที่ผสมด้วยแร่สปอดูมินในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิต่างๆ



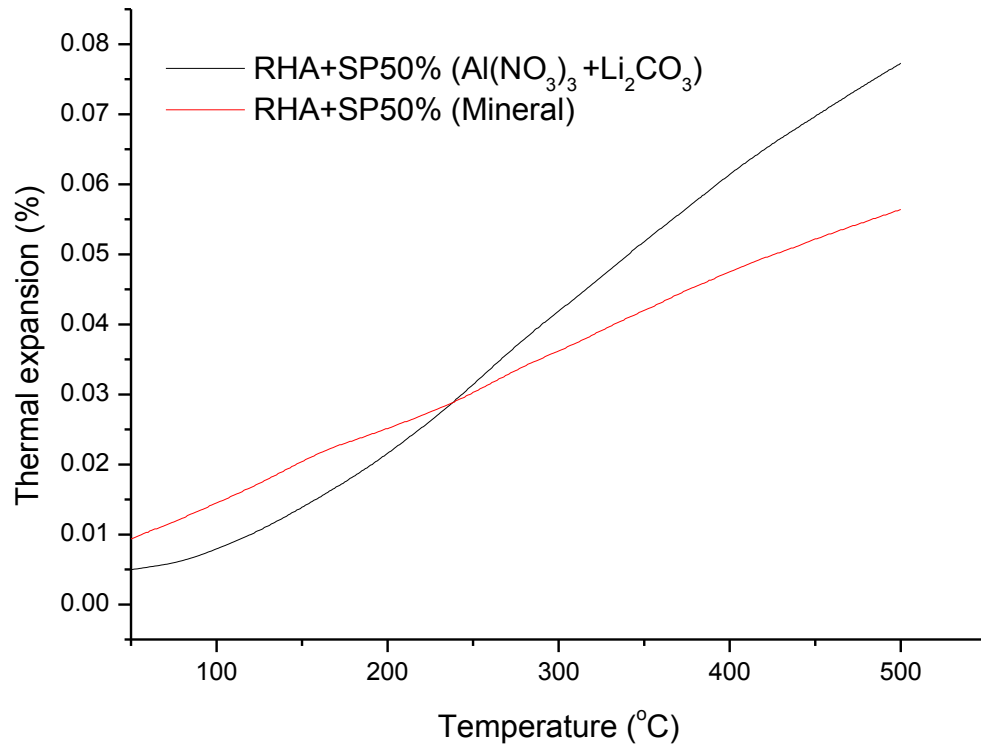
รูปที่ 4.33 ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของเต้าเคลือบที่ผสมด้วยสปอคูมิน และเต้าเคลือบที่ผสมด้วยแร่สปอคูมินในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิต่างๆ

4.4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน

จากการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเถ้าแกลบที่ผสมด้วยสปอดูมิน ซึ่งได้จากการผสมของสารเคมีอะลูมิเนียมไนเตรต และลิเทียมคาร์บอเนต เมื่อเทียบกับเถ้าแกลบที่ผสมด้วยแร่สปอดูมิน ในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส ดังตารางที่ 4.4 พบว่าเถ้าแกลบที่ผสมด้วยแร่สปอดูมิน มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่ต่ำกว่าเถ้าแกลบที่ผสมด้วยสปอดูมินที่ได้จากการผสมระหว่างสารเคมี เนื่องจากเถ้าแกลบที่ผสมด้วยแร่สปอดูมินมีความพรุนตัวที่มาก ส่งผลให้เกิดการหดและขยายตัวได้อย่างอิสระของผลึก ทำให้ชิ้นงานโดยรวมไม่เกิดการหดและขยายตัว ซึ่งเมื่อสังเกตการขยายตัวทางความร้อนในรูปที่ 4.34 ชิ้นงานตัวอย่างเถ้าแกลบที่ผสมด้วยแร่สปอดูมินมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่ต่ำกว่าเถ้าแกลบที่ผสมด้วยสปอดูมินจากสารเคมี

ตารางที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเถ้าแกลบที่ผสมด้วยสปอดูมิน

อุณหภูมิ	RHA+50%Spodumene($\text{Al}(\text{NO}_3)_3 + \text{Li}_2\text{CO}_3$) (50-500) $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$	RHA+50%Spodumene(Mineral) (50-500) $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$
1250	2.70	1.05



รูปที่ 4.34 การขยายตัวทางความร้อนของแก้วเคลือบที่ผสมด้วยสปอคูมินที่ได้จากการผสมระหว่าง อะลูมิเนียมไนเตรต และลิเทียมคาร์บอเนต และแก้วเคลือบที่ผสมด้วยแร่สปอคูมินในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาวิจัยผลของสารเติมแต่งต่อสมบัติของแก้วซิติกาจากเถ้าแกลบที่เตรียมโดยการเผาผนึกโดยสารเติมแต่งที่เลือกนำมาใช้ คือ สปอคูมินและแก้วบอโรซิติเกต ซึ่งเมื่อเติมสารเติมแต่งลงไปเถ้าแกลบ ชิ้นงานที่ได้เป็นวัสดุกลุ่มกลาสเซรามิกแทนที่จะเป็นแก้วซิติกาตามที่คาดหวังไว้แต่แรก และได้ผลสรุปดังต่อไปนี้

1. เถ้าแกลบที่ผสมสปอคูมินจากสารเคมีกลุ่มอะลูมิเนียมไนเตรต และลิเทียมคาร์บอเนต ให้ค่าความหนาแน่นที่มากกว่าเถ้าแกลบที่ผสมแก้วบอโรซิติเกต จากบอแรกซ์ และกรดบอริก โดยเถ้าแกลบที่ผสมสปอคูมิน ในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส ให้ค่าความหนาแน่นสูงที่สุดที่ 2.12 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

2. การเติมสปอคูมินที่ได้จากอะลูมิเนียมไนเตรต และลิเทียมคาร์บอเนต ลงไปในปริมาณที่มากขึ้นช่วยลดการตกผลึกของเฟสคริสโตบาลิต์ลงได้ ซึ่งเมื่อเติมสปอคูมินลงไปปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส จะไม่พบเฟสคริสโตบาลิต์แต่ได้เป็นเฟสของเพทาไลต์แทน แต่เถ้าแกลบที่ผสมแก้วบอโรซิติเกตไม่ได้ช่วยให้ปริมาณของคริสโตบาลิต์ลดลง

3. เถ้าแกลบที่ผสมสปอคูมินจากอะลูมิเนียมไนเตรต และลิเทียมคาร์บอเนต ในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส ให้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเท่ากับ 2.70×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส ซึ่งทำให้ชิ้นงานมีความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันได้ดี แต่เถ้าแกลบที่ผสมแก้วบอโรซิติเกต จากบอแรกซ์ และกรดบอริก ไม่ช่วยทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำลง

4. การเปรียบเทียบระหว่างเถ้าแกลบที่ผสมสปอคูมินจากสารเคมี อะลูมิเนียมไนเตรต และลิเทียมคาร์บอเนต กับเถ้าแกลบที่ผสมแร่สปอคูมิน ในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส พบว่าเถ้าแกลบที่ผสมสปอคูมินด้วยสารเคมี ให้ค่าความหนาแน่นสูงกว่า ค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่า และไม่พบเฟสคริสโตบาลิต์

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการเติมสารเติมแต่งชนิดอื่นๆ เช่นคอร์เคียวไรต์ เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีค่าความหนาแน่นที่สูงขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่ต่ำ

2. ทดลองพัฒนาการเตรียมผลิตภัณฑ์ให้ได้คุณภาพปราศจากการแตกร้าวเสียหาย อย่างมีประสิทธิภาพ ให้ได้ปริมาณที่มากขึ้นเหมาะกับการนำไปทดลองผลิตจริงในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

รายการอ้างอิง

- [1] บุญรักษา กาญจนวราวิชย์, **เถ้าแกลบ ของเหลือสารพัดประโยชน์** [ออนไลน์], แหล่งที่มา: http://www.mtec.or.th/index.php?option=com_content&task=view&id=865&Itemid=36. [2554, มีนาคม 8]
- [2] Pivinskii, Y. E. and Gorobets, F. T., **High-density fused-silica ceramics**, *Refractories and Industrial Ceramics*, Vol.9(7-8) pp. 509-516, (1968).
- [3] Kim, Y. J. et al., **Effect of Cristobalite and Quartz on the Properties of Gypsum Bonded Investment**, *J. Mater. Sci. Technol.*, Vol.24(1) pp. 143-144, (2008).
- [4] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรกระทรวงเกษตรและสหกรณ์, **สถิติการส่งออกข้าวรวม : ปริมาณ และมูลค่าการส่งออกรายเดือน** [ออนไลน์], แหล่งที่มา: http://www.oae.go.th/oae_report/export_import/export_result.php. [2554, มีนาคม 8]
- [5] กุลจิรา สุจิโรจน์, **รวบได้จากแกลบ** [ออนไลน์], แหล่งที่มา: http://www.mtect.or.th/index.php?option=com_content&task=view&id=93&Itemid=176. [2554, มีนาคม 8]
- [6] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี, **แกลบข้าว** [ออนไลน์], แหล่งที่มา: <http://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%81%E0%B8%81%E0%B8%A5%E0%B8%9A%E0%B8%82%E0%B9%89%E0%B8%B2%E0%B8%A7>. [2554, มีนาคม 8]
- [7] Liou, T. H., **Preparation and characterization of nano-structured silica from rice husk**, *Materials Science and Engineering A*, Vol.364(1-2) pp. 313-323, (2004).
- [8] Prasad, C. S., Maiti, K. N. and Venugopal, R., **Effect of rice husk ash in whiteware compositions**, *Ceramics International*, Vol.27(6) pp. 629-635, (2001).
- [9] Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C. and Rattanasak, U., **Influence of fineness of rice husk ash and additives on the properties of lightweight aggregate**, *Fuel*, Vol.88(1) pp. 158-162, (2009).
- [10] Kopeliovich, D., **Thermal properties of ceramics** [online], Available from: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=thermal_properties_of_ceramics. [2011, March 8]
- [11] Roy, R., Agrawal, D. K. and Mckinstry, H. A., **Very low thermal expansion coefficient materials**, *Annu. Rev. Mater. Sci.*, Vol.19 pp. 59-81, (1989).

- [12] Camerucci, M. A., Urretavizcaya, G. and Cavalieri, A. L., **Electrical properties and thermal expansion of cordierite and cordierite-mullite materials**, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol.21(16) pp. 2917-2923, (2001).
- [13] Mandal, S. et al., **Synthesis of low expansion ceramics in lithia-alumina-silica system with zirconia additive using the powder precursor in the form of hydroxyhydrogel**, *Ceramics International*, Vol.33(2) pp. 123-132, (2007).
- [14] ASTM C830-2000, **Standard Test Methods for Apparent Porosity Liquid Absorption Apparent Specific Gravity and Bulk Density of Refractory Shapes by Vacuum Pressure**.
- [15] Nayak, J. P. and Bera, J., **Effect of sintering temperature on phase-formation behavior and mechanical properties of silica ceramics prepared from rice husk ash**, *Phase Transitions*, Vol.82(12) pp. 879-888, (2009).
- [16] Accuratus, **Fused Silica** [online], Available from: <http://translate.google.co.th/translate?hl=th&sl=en&tl=th&u=http%3A%2F%2Faccuratus.com%2Ffused.html&anno=2>. [2011, March 8]
- [17] Ceram Research Ltd, **Silicon Dioxide** [online], Available from: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1114>. [2011, March 8]
- [18] Yong-Taega, O., Fujinob, S. and Morinagab, K., **Fabrication of transparent silica glass by powder sintering**, *Science and Technology of Advanced Materials*, Vol.3(4) pp. 297–301, (2002).
- [19] Tulyaganov, D. U. et al., **Synthesis of lithium aluminosilicate glass and glass-ceramics from spodumene material**, *Ceramics International*, Vol.30(3) pp. 1023-1030, (2004).
- [20] Shi, C. G. and Low, I. M., **Effect of Spodumene Additions on the Sintering and Densification of Aluminum Titanate**, *Materials Research Bulletin*, Vol.33(6) pp. 817-824, (1998).
- [21] Shi, C. G. and Low, I. M., **Use of spodumene for liquid-phase-sintering of aluminium titanate**, *Materials letters*, Vol.36(1-4) pp. 118-122, (1998).
- [22] Lima, M. M. and Monteiro, R., **Characterisation and thermal behaviour of a borosilicate glass**, *Thermochimica Acta*, Vol.373(1) pp. 69-74, (2001).
- [23] Hlavac, J., (1983) **The technology of glass and ceramics**, Elsevier scientific publishing company, New York.

- [24] นุชนภา ตั้งบริบูรณ์, การเตรียมและการเผาผนึกอนุภาคด้วยความร้อนของแก้วซิลิกาจากเถ้าแกลบ โดยวิธีไฮโดรเจล, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535.
- [25] Fishwick, J. H., (1974) **Applications of Lithium in Ceramics**. **Cahners Books**, A Division of Cahners Publishing Company, Inc. Boston, Massachusetts.
- [26] An, D. et al., **A study on the consecutive preparation of silica powders and active carbon from rice husk ash**, *Biomass and Bioenergy*, Vol.35(3) pp. 1227-1234, (2011).
- [27] Prasad, C. S., Maiti, K. N. and Venugopal, R., **Effect of substitution of quartz by rice husk ash and silica fume on the properties of whiteware compositions** *Ceramics International*, Vol.29(8) pp. 907-914, (2003).
- [28] Cerny, P. and London, D., (1983) **Crystal chemistry and stability of petalite**, *Mineralogy and Petrology*, Vol.31(1-2) pp. 81-96, (1983).
- [29] Wood, S. A. and Williamsjones, A. E., **Theoretical-studies of the alteration of spodumene, petalite, eucryptite and pollucite in granitic pegmatites - exchange-reactions with alkali feldspars**, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, Vol.114(2) pp. 255-263, (1993).
- [30] Low, I. M. and Shi, C. G., **Physical and thermal characteristics of aluminium titanate dispersed with β -spodumene and zirconia** *Journal of Materials Science*, Vol.35(24) pp. 6293-6300, (2000).

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ตารางมาตรฐานการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ JCPDS

ตารางที่ ก 1 แสดงค่า 2θ , intensity และ hkl ของ Petalite หมายเลข JCPDS 14-0090

14-0090		Wavelength= 1.5418									
α -LiAlSi ₄ O ₁₀		2 θ	Int	h	k	l	2 θ	Int	h	k	l
Lithium Aluminum Silicate		12.609	1	2	0	0	40.148	<1	5	1	1
		16.324	2	0	0	2	40.869	<1	3	1	3
		19.111	2	0	1	1	42.416	1	7	0	3
Petalite-2M		21.122	2	1	1	1	43.707	5	4	2	0
Rad.: CuK α λ : 1.5405 Filter: d-sp: Guinier 114.6		23.849	100	0	1	2	43.998	4	6	1	4
Cut off: 50.0 Int.: Film 1/teor.:		24.238	34	2	0	2	45.129	<1	1	2	3
Ref: de Wolff, P., Technisch Physische Dienst, Delft, The Netherlands, ICDD Grant in Aid		24.393	24	4	0	2	45.487	1	5	1	5
		24.709	2	3	1	1	46.098	1	7	1	3
		25.375	16	4	0	0	46.982	7	2	2	4
		26.257	1	1	1	2					
		28.837	4	2	1	3					
Sys.: Monoclinic S.G.: P2 ₁ /n (14)		29.203	2	3	1	1					
a: 15.18 b: 5.139 c: 11.75 A: 2.9539 C: 2.2864		29.892	2	2	1	2					
α : β : 112.4 γ : Z: 4 mp:		30.036	2	4	1	2					
Ref: Ibid.		30.276	2	3	1	3					
		32.966	1	4	1	3					
		33.142	1	4	0	4					
Dx: 2.400 Dm: 2.400 SS/FOM: F ₃₀ = 49(.0080 . 77)		34.536	2	5	1	1					
		34.911	6	0	2	0					
		35.336	2	4	0	2					
s ₀ : 1.504 η ₀ β : 1.510 ϵ ₀ : 1.516 Sign: +2V: 83-		35.524	1	1	2	0					
Ref: Quensel, Ark. Mineral. Geol., 2, 74 (1956)		35.921	1	1	2	1					
		36.618	1	5	1	3					
		37.056	1	1	2	1					
		37.263	2	2	2	0					
Color: White		37.440	2	0	1	4					
Specimen from Salisbury (?), South Rhodesia. A well-developed crystal had a=7.59 (Weissenberg), but powder diagrams of petalites from Elba and Varutrask, too, had reflections corresponding to a=15.18. PSC: mP64. To replace 12-451. Mwt: 306.26. Volume[CD]: 847.46.		37.586	1	4	1	4					
		38.487	1	6	0	0					
		39.326	1	3	2	1					
		39.889	1	2	0	4					

ICDD 2003 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved
PCPDFWIN v. 2.4

ตารางที่ ก 2 แสดงค่า 2θ , intensity และ hkl ของ α -Quartz หมายเลข JCPDS 89-8936

89-8936		Wavelength= 1.54056									
SiO ₂		2 θ	Int	h	k	l	2 θ	Int	h	k	l
Silicon Oxide		20.789	209	1	0	0	81.163	24	3	1	0
		26.565	999*	0	1	1	83.504	14	1	3	1
		36.421	60	1	1	0	84.716	2	2	0	4
Quartz Ipha		39.374	56	1	0	2	86.741	1	2	2	2
Rad.: CuK α λ : 1.54060 Filter: d-sp: Calculated		40.163	26	1	1	1	87.144	1	3	0	3
Cut off: 17.7 Int.: Calculated 1/teor.: 2.96		42.305	46	2	0	0					
Ref: Calculated from ICSD using POWD-12++		45.645	26	2	0	1					
Ref: Kihara, K., Eur. J. Mineral., 2, 63 (1990)		49.998	113	1	1	2					
		50.522	3	0	0	3					
		54.711	27	0	2	2					
		55.202	13	0	1	3					
Sys.: Hexagonal S.G.: P3 ₂ 21 (154)		57.026	2	2	1	0					
a: 4.9297(7) b: c: 5.4151(1) A:		59.749	73	1	2	1					
α : β : γ : Z: 3 mp:		63.866	12	1	1	3					
Ref: Ibid.		65.541	4	3	0	0					
		67.519	43	1	2	2					
		67.953	58	2	0	3					
		68.064	40	0	3	1					
Dx: 2.626 Dm:		73.298	15	1	0	4					
		75.394	21	3	0	2					
		77.366	12	2	2	0					
Peak height intensity. R-factor: 0.014. PSC: hP9. Mwt: 60.08. Volume[CD]: 113.97.		79.628	20	2	1	3					
		80.957	19	1	1	4					

ICDD 2003 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved
PCPDFWIN v. 2.4

ตารางที่ 3 แสดงค่า 2θ , intensity และ hkl ของ β -Spodumene หมายเลข JCPDS 76-0921

76-0921		Wavelength= 1.54056												
β -LiAlSi ₂ O ₆		2θ	Int	h	k	l	2θ	Int	h	k	l			
Lithium Aluminum Silicate														
Spodumene β , syn														
Rad.: CuK α λ : 1.54060		Filter: d-sp: Calculated												
Cut off: 17.7		Int.: Calculated		I/Corr.: 3.03										
Ref: Calculated from ICSD using POWD-12+, (1997)														
Ref: Li, C.T., Peacor, D.R., Z. Kristallogr., Kristallgeom., Kristallphys., Kristallchem., 126, 46 (1968)														
Sys.: Tetragonal		S.G.: P4 ₃ 2 ₁ 2 (96)												
a: 7.541(1)	b:	c: 9.156(2)	A:	C: 1.2142										
α :	β :	γ :	Z: 4	mp:										
Ref: Ibid.														
Dx: 2.374		Dm: 2.365												
Peak height intensity, R-factor: 0.062, PSC: LP40. See PDF 35-797. At least one TP implausible. Mwt: 186.09. Volume[CD]: 520.67.														
2θ	Int	h	k	l	2θ	Int	h	k	l	2θ	Int	h	k	l
57.195	5	2	1	5	76.474		5	3	2					
57.403	3	4	0	3	76.775	30	4	2	5					
58.262	1	4	2	2	76.775		6	1	0					
58.811	1	4	1	3	77.119	15	2	0	7					
59.852	30	3	2	4	77.342	12	3	2	6					
60.199	14	3	3	3	77.658	6	6	1	1					
61.368	1	2	2	5	78.343	9	2	1	7					
61.368	4	3	0	0	78.922	1	6	0	2					
61.995	6	1	0	6	80.138	3	6	1	2					
62.344	5	4	3	1	80.307	12	5	2	4					
62.722	17	3	0	5	80.613	12	5	3	3					
62.722	5	1	0	0	80.995	2	4	0	6					
62.919	12	4	2	3	81.307	1	6	2	1					
63.341	1	1	1	6	81.695	3	5	4	0					
63.686	13	5	1	1	81.994	2	2	2	7					
63.919	16	4	0	4	82.203	1	4	1	6					
64.059	15	3	1	5	82.515	1	5	4	1					
65.058	38	5	0	2	82.852	4	4	3	5					
65.243	22	4	1	4	83.189	4	3	0	7					
65.987	1	2	0	6	83.408	3	3	3	6					
66.370	21	5	1	2	83.929	5	4	4	4					
66.553	20	3	3	4	84.055	2	5	1	5					
66.744	8	5	2	0	84.232	3	6	1	3					
67.290	4	2	1	6	84.392	3	3	1	7					
67.624	22	5	2	1	84.602	5	0	0	8					
67.995	11	3	2	5	84.962	13	5	4	2					
69.135	2	4	2	4	85.810	1	1	0	8					
69.457	20	4	3	3	85.810		4	2	6					
70.232	1	5	2	2	86.329	1	5	3	4					
70.595	6	4	4	0	86.504	3	6	3	0					
70.728	9	5	1	3	87.001	1	1	1	8					
71.127	35	2	2	6	87.317	5	6	3	1					
72.386	1	3	0	6	87.653	3	5	2	5					
73.060	1	4	1	5	87.828	1	6	2	3					
73.060	1	5	3	0	87.987	3	3	2	7					
73.409	1	1	0	7	88.723	1	6	0	4					
73.636	1	3	1	6	89.024	3	5	4	3					
73.957	4	5	3	1	89.752	3	6	3	2					
73.957	4	4	4	2	89.918	2	6	1	4					
74.306	2	3	3	5										
74.488	19	5	2	3										
74.653	10	1	1	7										
75.414	1	5	0	4										
75.595	1	6	0	0										
76.474	17	6	0	1										

ตารางที่ ก 4 แสดงค่า 2θ , intensity และ hkl ของ Cristobalite low หมายเลข JCPDS 77-1316

77-1316		Wavelength= 1.54056					C				
SiO2	2θ	Int	h	k	l	2θ	Int	h	k	l	
Silicon Oxide	21.990	999*	1	0	1	60.328	22	3	1	1	
	25.317	7	1	1	0	62.038	25	3	0	2	
	29.451	83	1	1	1	65.111	19	3	1	2	
Cristobalite low, syn	31.452	103	1	0	2	65.650	13	2	0	4	
Rad.: CuK α λ : 1.54060 Filter: d-sp: Calculated	36.108	121	2	0	0	66.841	11	2	2	3	
Cut off: 17.7 Int.: Calculated I/ICor.: 4.91	36.385	42	1	1	2	67.933	1	3	2	0	
Ref: Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997)	38.447	1	2	0	1	68.637	18	2	1	4	
Ref: Pluth, J.J., Smith, J.V., Faber, J., J. Appl. Phys., 57, 1045 (1985)	40.546	1	2	1	0	69.454	9	3	2	1	
	42.680	24	2	1	1	69.802	6	3	0	3	
	43.160	2	1	0	3	70.497	15	1	0	5	
	44.846	21	2	0	2	72.708	18	3	1	3	
Sys.: Tetragonal S.G.: P4 ₁ 2 ₁ 2 (92)	47.045	44	1	1	3	73.392	1	1	1	5	
a: 4.9709(1) b: c: 6.9278(2) A: C: 1.3937	48.625	43	2	1	2	73.931	17	3	2	2	
	51.989	4	2	2	0	76.607	1	4	0	0	
	52.814	7	0	0	4	77.279	6	2	2	4	
Ref: Ibid.	53.766	1	2	2	1	78.060	9	4	0	1	
	54.170	22	2	0	3	79.060	1	2	0	5	
	56.195	4	1	0	4	79.421	12	4	1	0	
	57.108	30	3	0	1	80.085	1	3	0	4	
	57.496	12	2	1	3	80.859	2	4	1	1	
	58.684	4	3	1	0	81.190	11	3	2	3	
	58.875	4	2	2	2	81.850	11	2	1	5	
	59.446	1	1	1	4	82.209	4	3	3	0	

2θ	Int	h	k	l
82.374	3	4	0	2
82.867	6	3	1	4
83.636	3	3	3	1
85.142	1	4	1	2
86.453	1	1	0	6
87.899	4	3	3	2
89.207	15	4	2	1
89.207	1	1	1	6
89.479	10	4	0	3

2003 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved
PCPDFWIN v. 2.4

ตารางที่ ก 5 แสดงค่า 2θ , intensity และ hkl ของ Quartz low หมายเลข JCPDS 86-1565

86-1565		Wavelength= 1.54056					C				
SiO2	2θ	Int	h	k	l	2θ	Int	h	k	l	
Silicon Oxide	21.807	221	1	0	0	84.373					
	27.688	999*	0	1	1	86.00	29	3	1	0	
	38.249	120	1	1	0	88.465	5	1	3	1	
Quartz low	40.832	132	1	0	2	88.465	5	2	0	4	
Rad.: CuK α λ : 1.54060 Filter: d-sp: Calculated	42.066	53	1	1	1						
Cut off: 17.7 Int.: Calculated I/ICor.: 17.31	44.458	78	2	0	0						
Ref: Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997)	47.870	15	0	2	1						
Ref: Levien, I., Prewitt, C.T., Weidner, D.J., Am. Mineral., 65, 920 (1980)	52.156	86	1	1	2						
	52.156	0	0	0	3						
	57.184	79	2	0	2						
	57.184	79	0	1	3						
Sys.: Hexagonal S.G.: P3 ₂ 21 (154)	60.060	3	2	1	0						
a: 4.70219(3) b: c: 5.2561(2) A: C: 1.1178	62.862	91	2	1	1						
	66.500	23	1	1	3						
	69.147	1	3	0	0						
Ref: Ibid.	70.897	110	1	2	2						
	70.897	110	2	0	3						
	71.759	59	0	3	1						
	76.044	36	1	0	4						
	79.389	27	3	0	2						
	81.877	5	2	2	0						
	83.540	27	2	1	3						
	84.373	27	2	2	1						

2θ	Int	h	k	l
86.00	29	3	1	0
88.465	5	1	3	1
88.465	5	2	0	4

2003 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved
PCPDFWIN v. 2.4

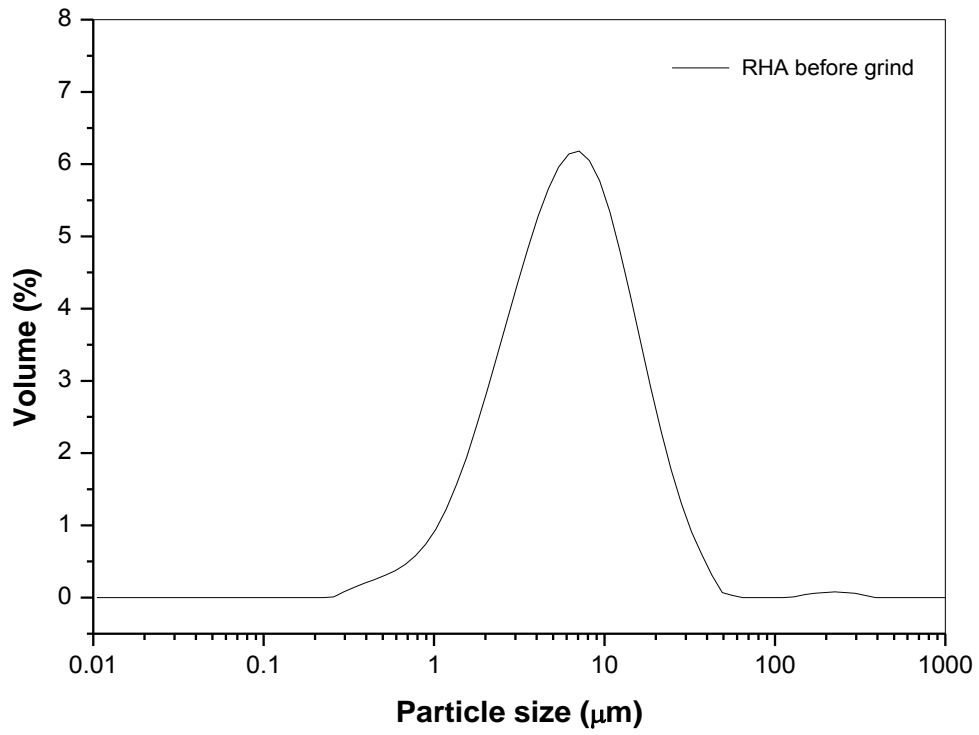
ตารางที่ 6 แสดงค่า 2θ , intensity และ hkl ของ α -Spodumene หมายเลข JCPDS 89-6662

89-6662		Wavelength= 1.54056						C						
α -LiAl(Si ₂ O ₆)		2θ	Int	h	k	l	2θ	Int	h	k	l			
Lithium Aluminum Silicate		14.510	175	1	1	0	44.592	37	3	3	0			
		19.979	129	2	0	0	44.592	1	4	0	2			
		20.364	277	1	1	1	46.221	1	4	2	0			
		21.156	417	0	2	0	47.079	92	0	4	1			
Spodumene		25.858	247	1	1	1	47.680	1	1	3	2			
Rad.: CuK α λ : 1.54060 Filter: d-sp: Calculated		27.971	283	0	2	1	47.916	2	2	4	0			
Cut off: 17.7 Int.: Calculated I/ teor.: 1.09		29.259	27	2	2	0	48.170	5	2	0	2			
Ref: Calculated from ICSD using POWD-1211		30.612	999*	2	2	1	48.820	177	2	4	1			
Ref: Kuntzinger, S., Ghermani, N.E., Acta Crystallogr., Sec. B: Structural Science, 55, 273 (1999)		31.266	111	3	1	1	49.332	66	5	1	1			
Sys.: Monoclinic S.G.: C2/c (15)		32.033	561	3	1	0	49.855	39	4	2	2			
a: 9.462(1) b: 8.392(1) c: 5.221(1) A: 1.1275 C: 0.6221		33.560	67	1	3	0	51.085	20	3	3	2			
α : β : 110.180(1) γ : Z: 4 mp:		35.173	86	2	0	2	52.625	45	3	3	1			
Ref: Ibid.		36.092	3	1	1	2	52.625	5	1	0	0			
Dx: 3.176 Dm:		36.645	371	1	3	1	53.164	14	2	2	2			
		36.645	0	0	2	2	53.271	14	1	3	2			
		38.244	132	2	2	1	53.271	5	1	2	0			
		40.086	2	1	3	1	54.325	10	2	4	1			
		40.274	2	3	1	2	54.562	13	1	1	3			
		40.599	25	4	0	0	55.087	18	3	1	3			
		41.408	16	2	2	2	55.443	3	4	2	1			
		42.107	56	3	1	1	55.687	29	1	5	0			
		42.697	19	0	2	2	56.783	24	2	4	2			
		42.876	166	1	1	2	57.278	146	2	2	3			
		43.948	95	3	3	1	57.505	97	3	1	2			
		44.134	55	4	2	1	57.809	59	1	5	1			
Peak height intensity. Specimen from Afghanistan. R-factor 0.021. C.D. Cell: a=9.094, b=8.392, c=5.221, β =102.43, a/b=1.0837, c/b=0.6221, S.G.=I2/a(15), PSC: mC40. See PDF 71-1063 and 89-6663. Mwt: 186.09. Volume[CD]: 389.12.														
2θ	Int	h	k	l	2θ	Int	h	k	l	2θ	Int	h	k	l
57.809		0	4	2	75.361	1	1	1	4	87.028	1	6	2	4
58.877	193	5	3	1	75.361		6	4	1	87.365	2	3	7	1
60.298	5	1	5	1	75.762	24	2	6	1	87.703	1	5	5	3
60.680	63	4	4	0	75.762	24	7	1	0	87.872	4	8	0	0
60.891	43	0	2	3	76.484	7	3	1	3	88.276	1	2	4	4
60.891		6	0	2	76.484		2	2	4	88.481	5	4	6	1
61.821	4	4	2	3	76.780	14	6	2	1	88.481		6	4	1
61.821		5	3	0	77.217	21	5	1	2	88.772	3	4	2	3
62.164	28	1	1	3	77.475	15	6	4	2	89.997	8	4	4	4
62.383	25	5	1	1	77.830	33	2	6	2	89.997		2	6	3
62.383		5	3	2	77.830		0	0	4					
62.717	17	6	0	0	78.309	21	5	5	0					
62.971	9	6	2	1	78.309		4	2	4					
63.233	5	3	5	1	78.711	79	7	1	3					
63.575	86	1	3	3	78.711		0	6	2					
63.575		5	1	3	78.848	44	7	3	1					
63.682	66	3	5	0	78.848	44	5	5	2					
63.682		4	4	2	79.118	21	6	4	0					
64.054	10	3	3	3	79.717	2	4	6	1					
65.224	9	6	2	2	79.897	3	7	3	2					
65.724	19	4	0	2	79.897		1	5	3					
66.270	4	1	5	2	80.332	3	3	5	3					
66.270		3	3	2	80.833	8	1	7	0					
66.833	55	0	6	0	81.217	5	4	6	0					
66.984	30	6	2	0	81.485	3	3	3	4					
68.591	5	4	4	1	81.863	7	4	4	2					
68.988	60	3	5	2	81.863	7	8	0	2					
69.895	42	0	6	1	82.367	51	3	5	2					
69.895		4	2	2	82.605	37	1	7	1					
70.223	60	2	4	3	83.151	19	6	0	4					
70.223		3	5	1	83.151		1	3	4					
70.601	13	1	3	3	83.533	8	2	4	3					
70.807	123	5	3	1	83.618	10	7	3	0					
70.807		7	1	1	83.942	6	4	6	2					
71.250	8	2	6	1	84.132	4	1	1	4					
71.650	32	2	2	3	84.323	10	3	3	3					
71.841	106	7	1	2	84.774	5	1	7	1					
71.960	42	5	3	3	85.040	3	5	3	2					
72.561	26	2	0	4	85.258	1	6	4	3					
73.401	8	0	4	3	85.939	8	8	2	1					
73.401		6	2	3	86.282	5	7	1	1					
73.568	32	3	1	4	86.476	15	7	3	3					
74.357	27	4	4	3	86.476	15	2	6	2					
74.357		4	0	4	86.684	8	5	3	4					

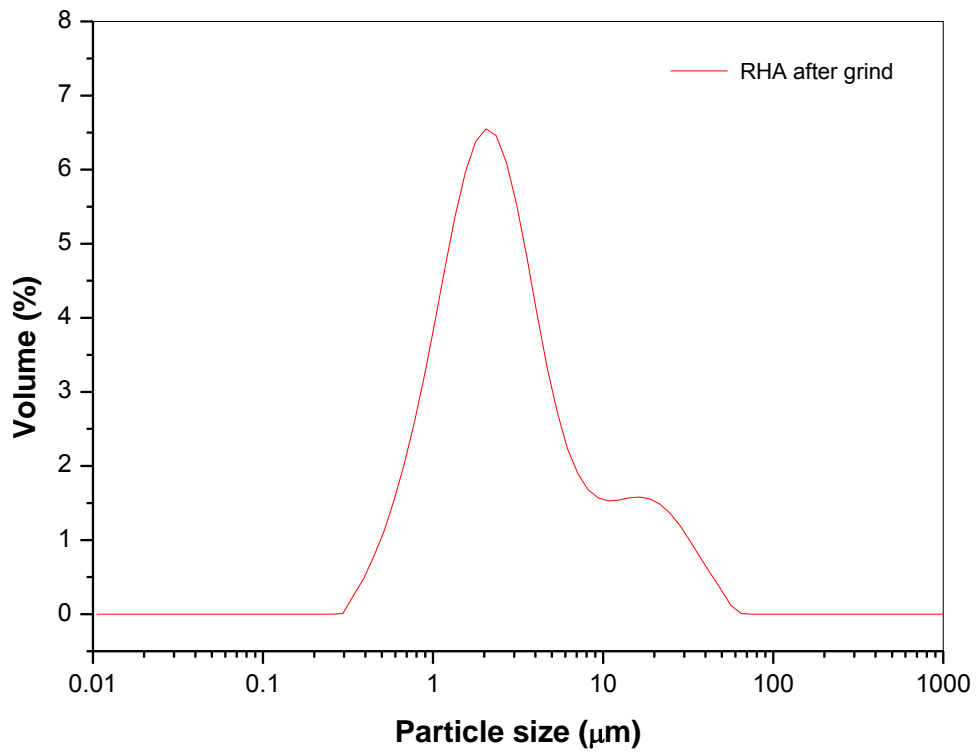
ICDD 2003 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved
PCPDFWIN v. 2.4

ภาคผนวก ข

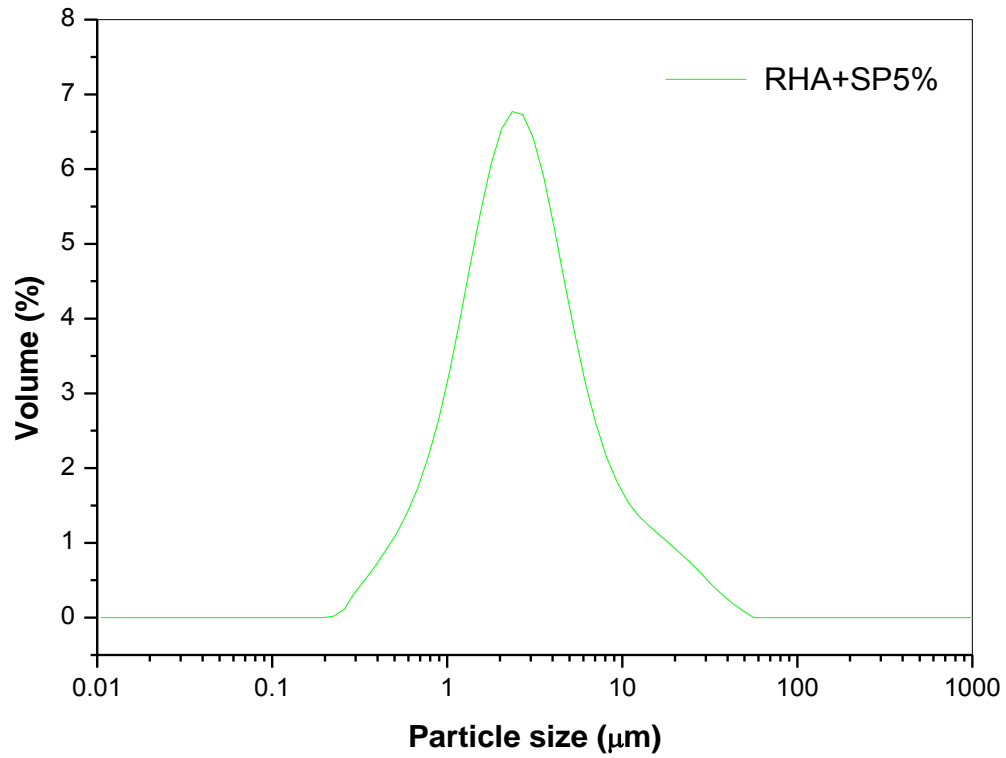
การกระจายขนาดอนุภาค



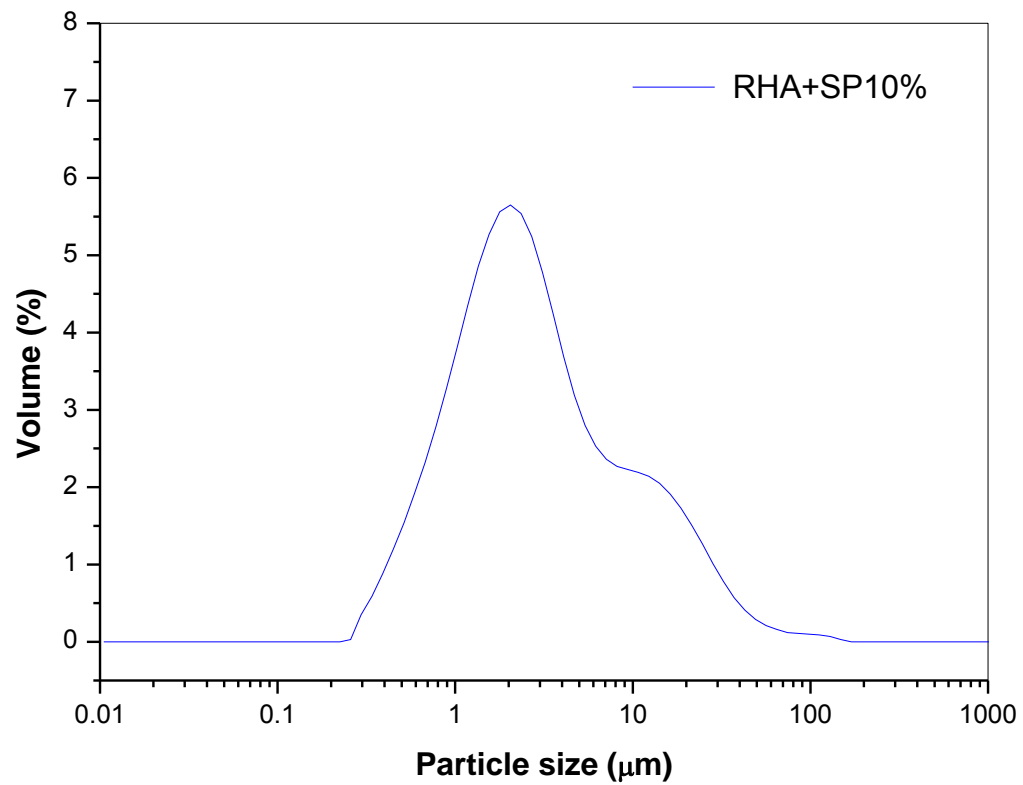
รูปที่ ข 1 การกระจายขนาดของเถ้าแกลบก่อนบดล้าง



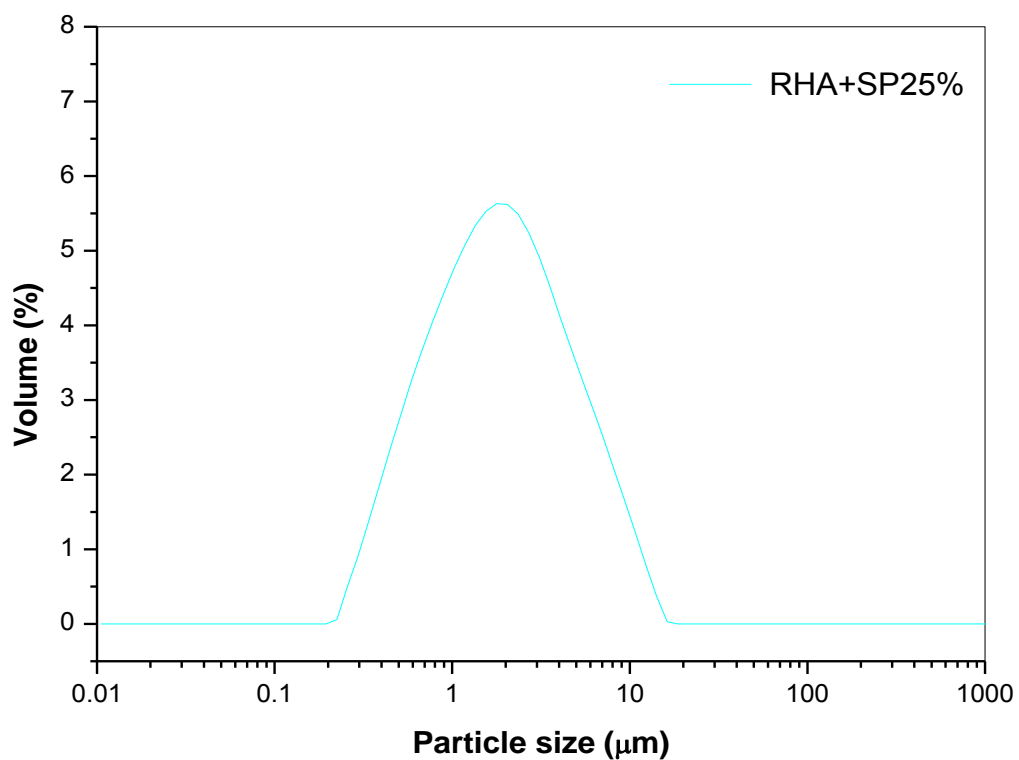
รูปที่ ข 2 การกระจายขนาดของเถ้าแกลบหลังบดล้าง



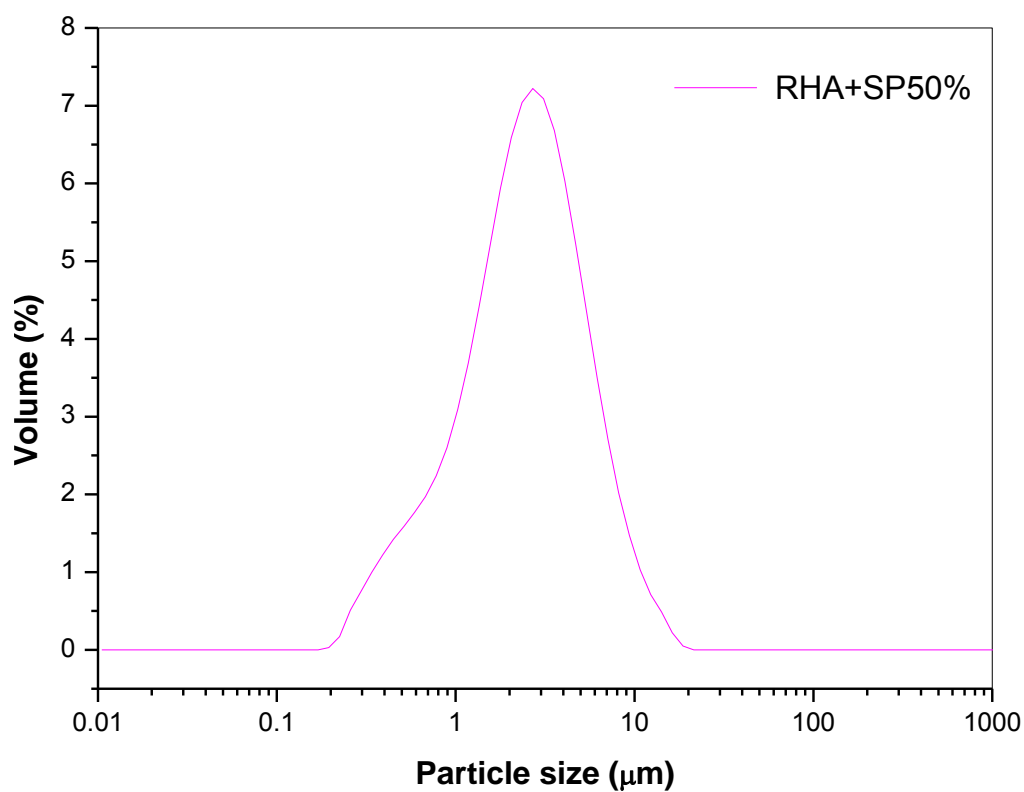
รูปที่ 3 การกระจายขนาดของเถ้าแกลบที่ผสมด้วย spodumene ในอัตราส่วน 5 % โดยน้ำหนัก



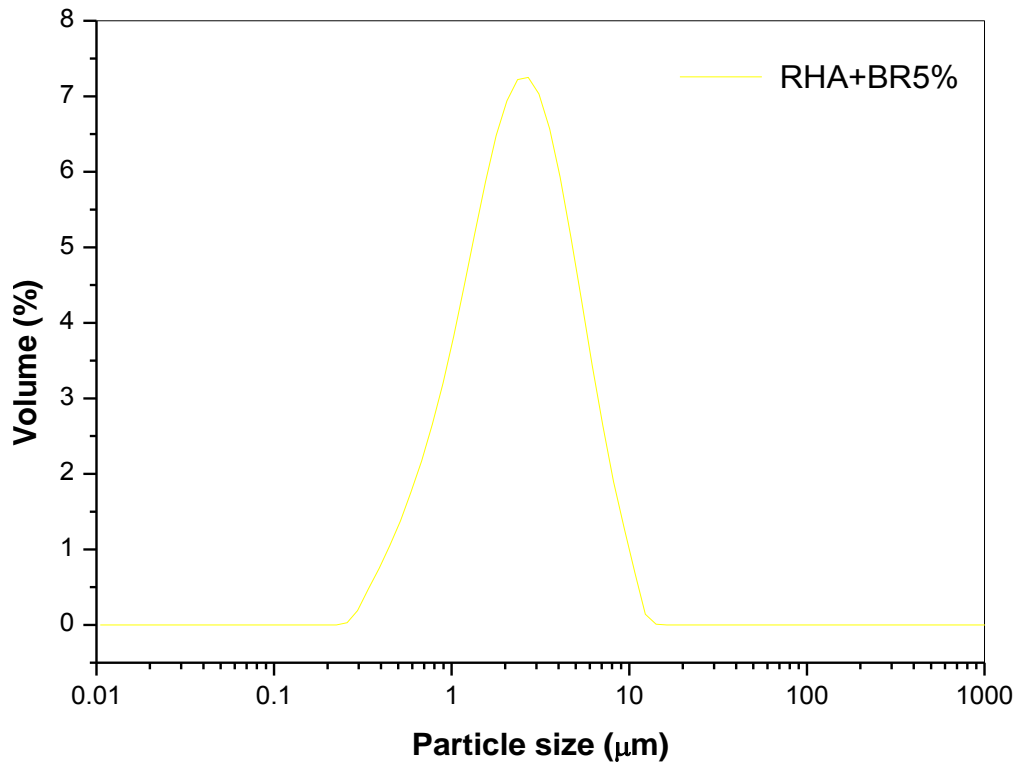
รูปที่ 4 การกระจายขนาดของเถ้าแกลบที่ผสมด้วย spodumene ในอัตราส่วน 10 % โดยน้ำหนัก



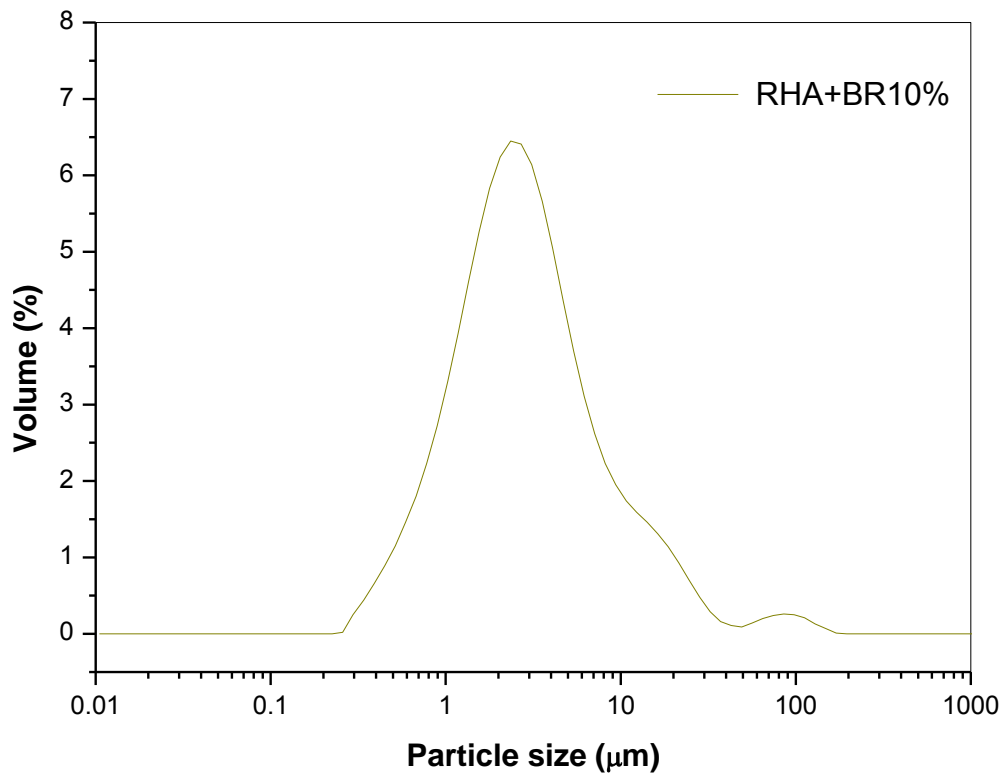
รูปที่ ๕ การกระจายขนาดของเถ้าแกลบที่ผสมด้วย spodumene ในอัตราส่วน 25 % โดยน้ำหนัก



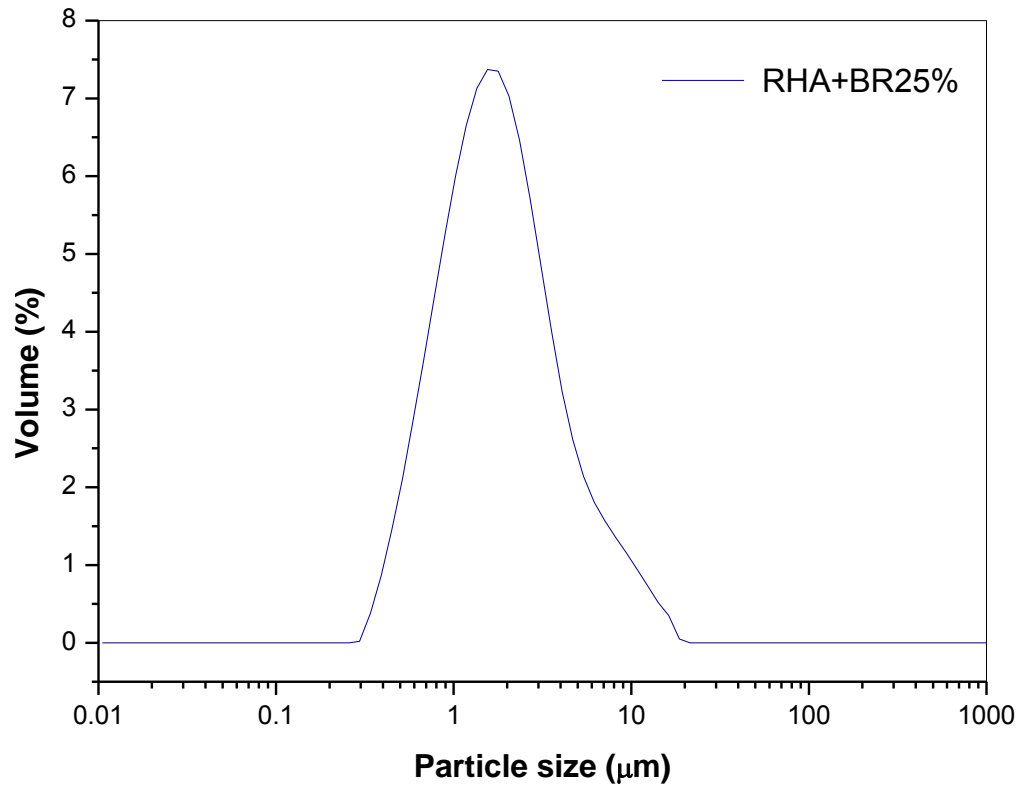
รูปที่ ๖ การกระจายขนาดของเถ้าแกลบที่ผสมด้วย spodumene ในอัตราส่วน 50 % โดยน้ำหนัก



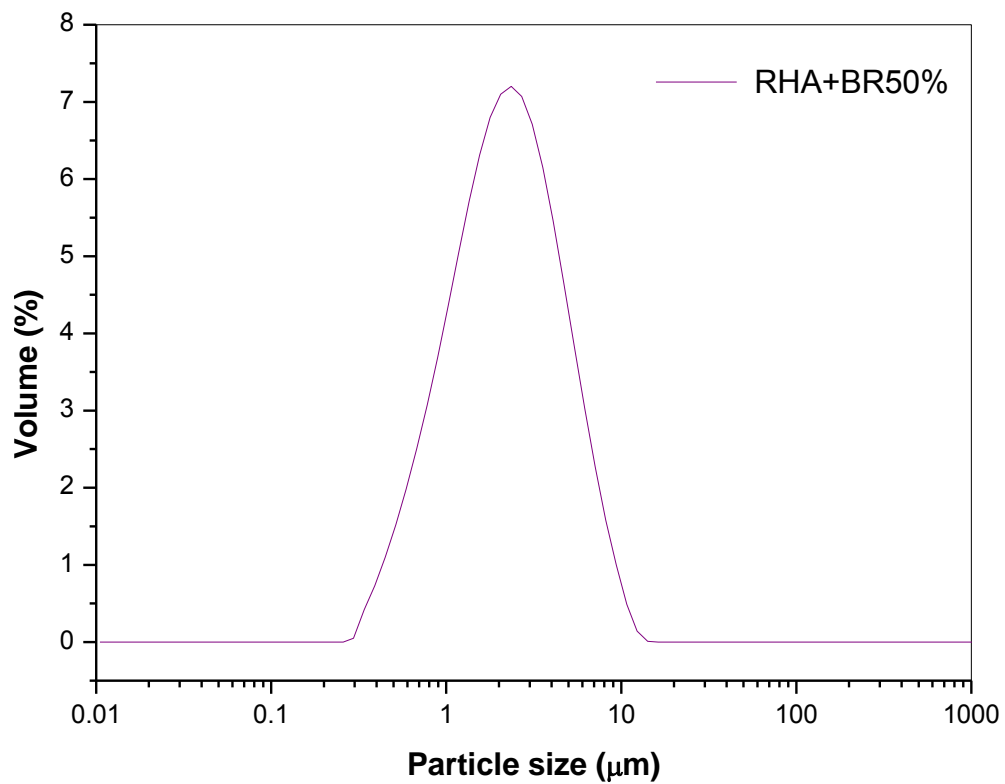
รูปที่ ๗ การกระจายขนาดของเถ้าแกลบที่ผสมด้วย borosilicate glass ในอัตราส่วน 5 % โดยน้ำหนัก



รูปที่ ๘ การกระจายขนาดของเถ้าแกลบที่ผสมด้วย borosilicate glass ในอัตราส่วน 10 % โดยน้ำหนัก



รูปที่ ๙ การกระจายขนาดของเถ้าแกลบที่ผสมด้วย borosilicate glass ในอัตราส่วน 25 % โดยน้ำหนัก



รูปที่ ๑๐ การกระจายขนาดของเถ้าแกลบที่ผสมด้วย borosilicate glass ในอัตราส่วน 50 % โดยน้ำหนัก

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย บวร วรเจษฎารมย์ เกิดวันที่ 8 สิงหาคม พ.ศ. 2526 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนสิงห์บุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน เดือนมีนาคม พ.ศ. 2549 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสำเร็จการศึกษาเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2554

การนำเสนอผลงานทางวิชาการ

1. “Preparation and Characterization of Silica Glass Ware Sintered from Rice Husk Ash” การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 35 (วทท 35) มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี ในระหว่างวันที่ 15-17 ตุลาคม พ.ศ. 2552
2. “Effects of Spodumene Addition on Sintering Properties of Silica Glass from Rice Husk Ash”. The 5th Mathematics and Physical Sciences Graduate Congress (MPSGC). Chulalongkorn University, Bangkok. ในระหว่างวันที่ 7-9 ธันวาคม พ.ศ. 2552
3. “Fabrication of Silica Glass Ware from Rice Husk Ash by Viscous Sintering with Spodumene Additions”. The 3rd International Congress on Ceramics (ICC3). Osaka, Japan. ในระหว่างวันที่ 14-18 พฤศจิกายน พ.ศ. 2553
4. “Sintering of Glass Ceramic from Rice Husk Ash by Spodumene and Borosilicate Glass Additions”. Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON 2011). Miracle Grand Hotel Bangkok, Thailand. ในระหว่างวันที่ 5-7 มกราคม พ.ศ. 2554

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานทางวิชาการ

1. Borworn Vorajesdarom, Siriphan Nilpairach, Ekaraj Rujirakamort, and Thanakorn Wasanapiarnpong, “**Sintering of Glass Ceramic from Rice Husk Ash by Spodumene and Borosilicate Glass Additions**”. *Proceeding on Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON 2011)*. Miracle Grand Hotel Bangkok, Thailand.
2. T Wasanapiarnpong, B Vorajesdarom, E Rujirakamort, S Nilpairach, and C Mongkolkachit, “**Fabrication of Silica Glass from Rice Husk Ash by Sintering with Spodumene**” accepted to publish in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.