

การเตรียมเซรามิกแคลเซียมซิลิเกตความหนาแน่นต่ำสำหรับงานฉนวนความร้อนไฟโดยใช้เถ้า
แกลบ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF LOW-DENSITY CALCIUM SILICATE CERAMICS FOR INSULATING
REFRACTORY APPLICATIONS USING RICE HUSK ASH



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Ceramic Technology

Department of Materials Science

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมเซรามิกเคลือบเชื่อมซิลิเกตความหนาแน่นต่ำ
โดย	สำหรับงานคำนวณความร้อนไฟโดยใช้ถ้ำเกลือ
สาขาวิชา	น.ส.ชญานิน นิสัยมัน
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	เทคโนโลยีเซรามิก
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์
	ดร.จรัสพร มงคลขจิต

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์)	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
.....	
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์)	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
.....	
(ดร.จรัสพร มงคลขจิต)	กรรมการ
.....	
(รองศาสตราจารย์ ดร.วันทนี พุกกะคุปต์)	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
.....	
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิพันธ์ ท่อแก้ว)	

ชฎานิน นิสัยมัน : การเตรียมเซรามิกแคลเซียมซิลิเกตความหนาแน่นต่ำสำหรับงาน
 ฉนวนความร้อนไฟฟ้โดยใช้เ้า้แกลบ. (PREPARATION OF LOW-DENSITY
 CALCIUM SILICATE CERAMICS FOR INSULATING REFRACTORY APPLICATIONS
 USING RICE HUSK ASH) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์, อ.ที่
 ปรึกษาาร่วม : ดร.จรัสพร มงคลขจิต

งานวิจัยนี้สนใจการนำของเสียจากอุตสาหกรรมมาใช้เป็นวัสดุทดแทนวัตถุดิบดั้งเดิมใน
 การเตรียมผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกต ได้แก่ เ้า้แกลบ ซึ่งเป็นวัตถุดิบทางเลือกที่ให้ซิลิกาอัญฐาน
 เปรียบเทียบกับการใช้ทรายบดที่เป็นวัตถุดิบดั้งเดิม และยิปซัมจากแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้ว
 การเตรียมผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตโดยทั่วไปจะเตรียมโดยการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาและ
 แคลเซียมออกไซด์ภายใต้สภาวะไฮโดรเทอร์มัลที่มีแรงดันสูง งานวิจัยนี้จะศึกษาผลของการเติม
 ยิปซัมต่อการเกิดเฟสในชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกต โดยใช้เ้า้แกลบและทรายบดเป็นวัตถุดิบตั้งต้นที่
 ให้ซิลิกา นอกจากนี้ยังศึกษาผลของเวลาในการนึ่งอัดไอและผลการเติมปูนซีเมนต์ขาวเพิ่มเติมด้วย
 การเตรียมชิ้นงานเตรียมโดยการผสมวัตถุดิบตั้งต้นในอัตราส่วนแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ
 1:1 โดยโมล ใส่เส้นใยเซรามิก ร้อยละ 2.5 และเส้นใยกระดาษยูคาลิปตัส ร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนัก
 เพื่อเป็นตัวช่วยเสริมแรงผสมกับน้ำ จากนั้นนำไปหล่อและบ่มเป็นเวลา 2 วัน และนำไปบ่มในหม้อ
 นึ่งอัดไอที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 10 และ 20 ชั่วโมง อบแห้งชิ้นงานที่อุณหภูมิ
 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติทางกายภาพ วิเคราะห์
 องค์ประกอบเฟส และวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค พบว่า การเติมยิปซัมสามารถช่วยในการเกิดเฟส
 โทเบอร์โมไรต์ได้ แต่ทำให้โครงสร้างจุลภาคของโทเบอร์โมไรต์เกิดการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับผล
 ของการเติมปูนซีเมนต์ อีกทั้งเ้า้แกลบสามารถใช้เป็นวัตถุดิบทางเลือกที่ให้ซิลิกาได้ โดยในงานวิจัย
 นี้สูตรที่ดีที่สุดคือสูตร RHA0 อุณหภูมิการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง มีค่า
 ความหนาแน่น 0.19 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าความแข็งแรงต่อการดัดโค้ง 737 กิโลพาสคัล
 ค่าการหดตัวหลังเผาของชิ้นงานที่ 649 องศาเซลเซียส ร้อยละ 0.65 ค่าการนำความร้อน 0.063
 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน

สาขาวิชา เทคโนโลยีเซรามิก

ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6270020023 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEYWORD: calcium silicate, gypsum, tobermorite

Chayanin Nisaimun : PREPARATION OF LOW-DENSITY CALCIUM SILICATE CERAMICS FOR INSULATING REFRACTORY APPLICATIONS USING RICE HUSK ASH. Advisor: Asst. Prof. THANAKORN WASANAPIARNPONG, Ph.D. Co-advisor: Charusporn Mongkolkachit, Ph.D.

This study focuses on using an industrial waste as a substitute material for the conventional raw materials in calcium silicate insulating board, i.e., rice husk ash (RHA) as an alternative silica source for amorphous silica compared with milled sand and gypsum from the waste plaster mold. Traditionally, a calcium silicate product is prepared via the reaction between silica and calcia sources, such as silica sand and lime, in high pressure hydrothermal conditions. The influence of gypsum waste addition on the phase formation of calcium silicate product using rice husk ash and milled sand during autoclave was investigated. Furthermore, curing time in autoclave and white Portland cement addition were studied too. The samples were prepared by mixing the raw materials with a molar ratio of CaO/SiO_2 as 1:1. Ceramic fiber of 2.5 wt% and eucalyptus paper pulp of 2.5 wt% were added as the fiber reinforcement with water added to form slurry. Then, the samples were casted and cured in plastic molds for 2 days. They were demolded and placed in an autoclave for hydrothermal reaction at 200 °C for 2, 10 and 20 hours. Finally, they were dried at 60 °C for 24 hours. The samples were observed physical properties and characterized by XRD and SEM. The addition of gypsum waste offered the tobermorite phase formation but changed the microstructure of tobermorite that resembled white Portland cement addition. The rice husk ash could be an alternative silica source. The optimal condition is RHA0 autoclave 200 °C for 10 hours. The results showed that RHA0 sample had a density of 0.19 g/cm³, bending strength of 737 kPa, firing shrinkage at 649 °C of 0.65% and thermal conductivity of 0.063 W/mK.

Field of Study: Ceramic Technology

Student's Signature

Academic Year: 2021

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

สำหรับงานวิจัยและการเขียนเล่มวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ข้าพเจ้า นางสาวชญานิน นิสัยมัน ได้รับ ความเมตตากรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร.จรัสพร มงคลขจิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษาแนะนำและอบรมสั่งสอน ตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และคณาจารย์ทุกท่าน สำหรับการตรวจแก้ไขข้อบกพร่องของรูปเล่มวิทยานิพนธ์และคำแนะนำต่าง ๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้ มีความถูกต้องและสมบูรณ์

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (NSTDA) ระดับปริญญาโท ปี 2562 ภายใต้สัญญา เลขที่ SCA-CO-2562-9749-TH เป็นระยะเวลา 2 ปี และ ทุนจากโครงการ GAICCE Research Grant from ASEAN University Network/Southeast Asia Engineering Education Development Network (AUN/SEED-net)

ผู้วิจัยขอขอบคุณ หน่วยปฏิบัติการวิจัยเซรามิกขั้นสูง ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับเครื่องมือและอุปกรณ์การทำวิจัย ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ที่ให้ความช่วยเหลือในการวิเคราะห์ทดสอบ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ฝ่ายธุรการที่ให้ความอนุเคราะห์ ช่วยเหลือด้านเอกสารธุรการเป็นอย่างดีตลอดการวิจัย

ผู้วิจัยขอขอบคุณพี่น้องและเพื่อนสาขาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะ วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยเป็นกำลังใจ ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือมาโดยตลอด สุดท้ายขอขอบพระคุณครอบครัวของผู้วิจัย ที่คอยให้การสนับสนุนทางด้านทุนทรัพย์ และเป็นกำลังใจให้ ผู้วิจัยมาโดยตลอด

ชญานิน นิสัยมัน

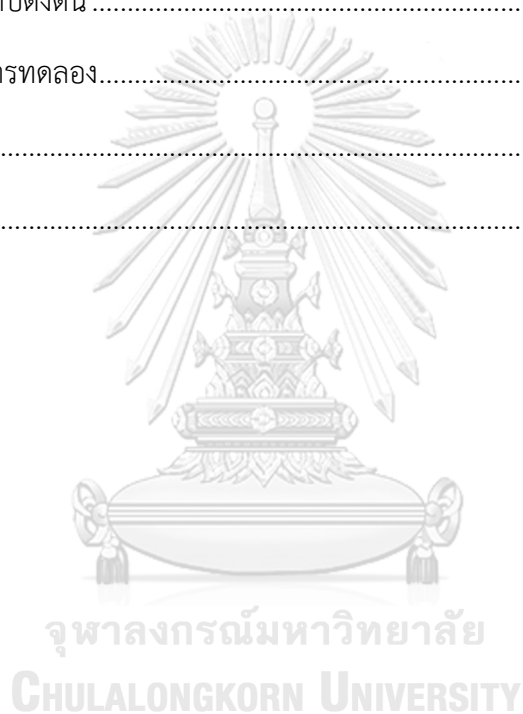
สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญภาพ	ญ
สารบัญตาราง.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิติเกต.....	3
2.2 ฉนวนความร้อนแคลเซียมซิติเกต	3
2.2.1 โทเบอร์โมไรต์.....	4
2.2.2 โซโนตไลต์.....	5
2.3 การแทนที่ในโครงสร้างของโทเบอร์โมไรต์	6
2.4 มาตรฐานอุตสาหกรรมของฉนวนแคลเซียมซิติเกต	7
2.5 แก้วกลบ	7
2.6 ยิปซัมจากแบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้ว	8
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	20
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี เครื่องมือและอุปกรณ์.....	20
3.2 การวิเคราะห์ของวัตถุประสงค์ตั้งต้น.....	22
3.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี.....	22
3.2.2 โครงสร้างจุลภาค.....	22
3.2.3 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาค	22
3.3 การเตรียมวัตถุประสงค์และการออกแบบสูตรส่วนผสม	22
3.3.1 การเตรียมวัตถุประสงค์.....	22
3.3.2 การออกแบบส่วนผสม	23
3.4 การขึ้นรูปชิ้นงาน การอบชิ้นงานในหม้อนึ่งอัดไอ และอบแห้งชิ้นงาน	25
3.4.1 การขึ้นรูปชิ้นงาน	25
3.4.2 การอบชิ้นงานในหม้อนึ่งอัดไอ	25
3.4.3 การอบแห้งชิ้นงาน	25
3.4.4 การทดลองเพิ่มเติม.....	25
3.5 การทดสอบสมบัติของชิ้นงาน.....	25
3.5.1 ความหนาแน่น.....	25
3.5.2 ความแข็งแรงต่อการดัดโค้ง	26
3.5.3 ค่าการหดตัวหลังเผา.....	26
3.5.4 ค่าการนำความร้อน	26
3.5.5 องค์ประกอบเฟส	27
3.5.6 โครงสร้างจุลภาค.....	27
3.6 แผนผังการดำเนินการวิจัย	28
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย.....	31
4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุประสงค์ตั้งต้น	31

4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของวัตถุบดตั้งต้น	32
4.3 ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของวัตถุบดตั้งต้น	33
4.4 ผลการวิเคราะห์และทดสอบผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิติลิตตามท้องตลาด	33
4.5 ผลของการเติมยิปซัมในกลุ่มที่ 1 กลุ่มแก้วแกลบ และกลุ่มที่ 2 กลุ่มทรายบด	38
4.5.1 ความหนาแน่น.....	38
4.5.2 ความแข็งแรงต่อการตัดโค้ง	39
4.5.3 การหดตัวหลังเผาของชิ้นงาน.....	40
4.5.4 การนำความร้อน.....	44
4.5.5 ผลการวิเคราะห์ห้องค้ประกอบเฟส.....	45
4.5.6 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค.....	48
4.6 ผลของเวลาในการนึ่งอัดไอในกลุ่มที่ 1 กลุ่มแก้วแกลบ และกลุ่มที่ 2 กลุ่มทรายบด.....	51
4.6.1 ความหนาแน่น.....	51
4.6.2 ความแข็งแรงต่อการตัดโค้ง	52
4.6.3 การหดตัวหลังเผาของชิ้นงาน.....	53
4.6.4 การนำความร้อน.....	57
4.6.5 ผลการวิเคราะห์ห้องค้ประกอบเฟส.....	58
4.6.6 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค.....	60
4.7 ผลของการเติมปูนซีเมนต์ขาว.....	62
4.7.1 ความหนาแน่น.....	62
4.7.2 การหดตัวหลังเผาของชิ้นงาน.....	63
4.7.3 ผลการวิเคราะห์ห้องค้ประกอบเฟส.....	64
4.7.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค.....	66
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	67
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	67

5.1.1 ผลของการเติมยิปซัม.....	67
5.1.2 เวลาในการนึ่งอัดไอ.....	67
5.1.3 การเติมปูนซีเมนต์ขาว.....	67
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	68
ภาคผนวก.....	69
ภาคผนวก ก การทดลองเตรียมชิ้นงาน.....	70
ภาคผนวก ข วัตถุประสงค์ตั้งต้น.....	72
ภาคผนวก ค ผลการทดลอง.....	73
บรรณานุกรม.....	87
ประวัติผู้เขียน.....	92



สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1	แผนผังเฟสของระบบ $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$	4
ภาพที่ 2.2	ก) ระนาบ bc ของเฟสโทเบอร์โมไรต์ และ ข) ระนาบ ac ของเฟสโซโนต์ไลต์	6
ภาพที่ 2.3	โครงสร้างจุลภาคของแก้วแกลบที่กำลังขยาย ก) 500X และ ข) 1000X	8
ภาพที่ 2.4	ความแข็งแรงต่อการโค้งงอของชิ้นงานแต่ละสูตร	10
ภาพที่ 2.5	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานแต่ละสูตร	10
ภาพที่ 2.6	การวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบเฟส ก) 170 องศาเซลเซียส ข) และ 190 องศาเซลเซียส.....	12
ภาพที่ 2.7	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน ก) D170 และ ข) S170	12
ภาพที่ 2.8	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เม็ดแตกต่างกัน	13
ภาพที่ 2.9	ผลของปริมาณปูนซีเมนต์เม็ดต่อความแข็งแรงต่อการตัดโค้ง	13
ภาพที่ 2.10	พฤติกรรมทางความร้อนของชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกต	14
ภาพที่ 2.11	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มีปริมาณยิปซัมแตกต่างกัน ก) ร้อยละ 0 ข) ร้อยละ 3 ค) ร้อยละ 5 และ ง) ร้อยละ 10.....	15
ภาพที่ 2.12	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มีปริมาณยิปซัม ก) ร้อยละ 0 และ ข) ร้อยละ 5.....	16
ภาพที่ 2.13	ร้อยละการหดตัวของชิ้นงานที่มีปริมาณยิปซัม ก) ร้อยละ 0 และ ข) ร้อยละ 5	17
ภาพที่ 2.14	พฤติกรรมทางความร้อนของชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกต.....	17
ภาพที่ 2.15	โครงสร้างจุลภาคของ ก) โทเบอร์โมไรต์ และ ข) โซนอต์ไลต์	18
ภาพที่ 2.16	การกัดกร่อนของชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกต	19
ภาพที่ 3.3	แผนผังการดำเนินการวิจัย	28
ภาพที่ 4.1	โครงสร้างจุลภาคของวัตถุดิบตั้งต้น ก) แก้วแกลบ และ ข) ทรายบด.....	32
ภาพที่ 4.2	การวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบเฟสของผลิตภัณฑ์แผ่นแคลเซียมซิลิเกตตามท้องตลาด	35
ภาพที่ 4.3	โครงสร้างจุลภาคของของผลิตภัณฑ์แผ่นแคลเซียมซิลิเกตตามท้องตลาด	36
ภาพที่ 4.4	ชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกตตามท้องตลาดที่อุณหภูมิต่างๆ	37

ภาพที่ 4.5 ความหนาแน่นของชิ้นงานแคลเซียมซิติเกตกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	38
ภาพที่ 4.6 ความแข็งแรงต่อการดัดโค้งของชิ้นงานแคลเซียมซิติเกตกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	39
ภาพที่ 4.7 การหดตัวหลังเผาของชิ้นงานแคลเซียมซิติเกตกลุ่มที่ 1 เถ้าแกลบ อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	40
ภาพที่ 4.8 การหดตัวหลังเผาของชิ้นงานแคลเซียมซิติเกตกลุ่มที่ 2 ทราบุด โดยที่อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	41
ภาพที่ 4.9 ชิ้นงานกลุ่มที่ 1 กลุ่มเถ้าแกลบที่อุณหภูมิต่างๆ โดยที่อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	42
ภาพที่ 4.10 ชิ้นงานกลุ่มที่ 2 กลุ่มทราบุดที่อุณหภูมิต่างๆ โดยที่อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	43
ภาพที่ 4.11 การนำความร้อนของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 โดยที่อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	44
ภาพที่ 4.12 องค์ประกอบเฟสของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 กลุ่มเถ้าแกลบ	46
ภาพที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของชิ้นงานกลุ่มที่ 2 กลุ่มทราบุด	47
ภาพที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคของของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 กลุ่มเถ้าแกลบ	49
ภาพที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคของของชิ้นงานกลุ่มที่ 2 กลุ่มทราบุด	50
ภาพที่ 4.16 ความหนาแน่นของชิ้นงานแคลเซียมซิติเกตกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 โดยที่อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 10 และ 20 ชั่วโมง	51
ภาพที่ 4.17 ความแข็งแรงต่อการดัดโค้งของชิ้นงานแคลเซียมซิติเกตกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2.....	52
ภาพที่ 4.18 การหดตัวหลังเผาของชิ้นงานแคลเซียมซิติเกตกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 โดยที่อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 10 และ 20 ชั่วโมง	54
ภาพที่ 4.19 ชิ้นงานกลุ่มที่ 1 และ กลุ่มที่ 2 ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยที่อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง	55

ภาพที่ 4.20 ชิ้นงานกลุ่มที่ 1 และ กลุ่มที่ 2 ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยที่อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง.....	56
ภาพที่ 4.21 การนำความร้อนของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 10 และ 20 ชั่วโมง.....	57
ภาพที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง	59
ภาพที่ 4.23 โครงสร้างจุลภาคของของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 กลุ่มแก้วเคลือบ นึ่งอัดไอที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส 10 ชั่วโมง	60
ภาพที่ 4.24 โครงสร้างจุลภาคของของชิ้นงานกลุ่มที่ 2 กลุ่มทรายบด นึ่งอัดไอที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส 10 ชั่วโมง	61
ภาพที่ 4.25 ความหนาแน่นของชิ้นงานสูตร RHA10WC และ SAND10WC โดยที่อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง	62
ภาพที่ 4.26 การหดตัวหลังเผาของชิ้นงานสูตร RHA10WC และ SAND10WC อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง.....	63
ภาพที่ 4.27 ชิ้นงานสูตร RHA10WC และ SAND10WC ที่อุณหภูมิต่างๆ อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง.....	64
ภาพที่ 4.28 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของชิ้นงาน ก) RHA10WC และ ข) SAND10WC อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง.....	65
ภาพที่ 4.29 โครงสร้างจุลภาคของของชิ้นงาน RHA10WC และ SAND10WC นึ่งอัดไอที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส 10 ชั่วโมง	66
ภาพที่ ก.1 เครื่องนึ่งอัดไอที่ใช้ในการทดลอง	70
ภาพที่ ก.2 ความหนาแน่นของชิ้นงานสูตร RHA10	70
ภาพที่ ก.3 ชิ้นงานหลังอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส.....	71
ภาพที่ ข.1 องค์ประกอบเฟสของวัตถุดิบตั้งต้น.....	72

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพที่ต้องการตามมาตรฐานอเมริกัน ASTM C533	7
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของวัสดุดิบและสารเคมี	20
ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของเครื่องมือและอุปกรณ์	21
ตารางที่ 3.3 รายละเอียดของสูตรส่วนผสม	23
ตารางที่ 3.4 รายละเอียดของสูตรส่วนผสมสูตรเก่าแก่กลับ.....	24
ตารางที่ 3.5 รายละเอียดของสูตรส่วนผสมสูตรทรายบด.....	24
ตารางที่ 3.6 รายละเอียดของสูตรที่ใส่สารตัวเติมปูนซีเมนต์ขาว	25
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเก่าแก่กลับ ทรายบด แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ยิปซัมจากปูน ปลาสเตอร์ใช้แล้ว ปูนซีเมนต์ขาว และเส้นใยเซรามิก.....	31
ตารางที่ 4.2 ขนาดอนุภาคของวัสดุดิบ	33
ตารางที่ 4.3 การหดตัวหลังเผาผลิตภัณฑ์แผ่นแคลเซียมซิลิเกตตามท้องตลาด	36
ตารางที่ 5.1 สมบัติของชิ้นงานสูตร RHA0 อุณหภูมิการนั่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง..68	
ตารางที่ ค.1 ความหนาแน่นของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 เก้าแก่กลับและกลุ่มที่ 2 ทรายบด อุณหภูมิ ในการนั่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	73
ตารางที่ ค.2 ความหนาแน่นของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 เก้าแก่กลับและกลุ่มที่ 2 ทรายบด อุณหภูมิในการนั่ง อัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 และ 20 ชั่วโมง.....	74
ตารางที่ ค.3 ความหนาแน่นของชิ้นงานสูตรที่เติมปูนซีเมนต์ขาว อุณหภูมิในการนั่งอัดไอ 200 องศา เซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง	76
ตารางที่ ค.4 ความแข็งแรงต่อการดัดโค้งของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 เก้าแก่กลับและกลุ่มที่ 2 ทรายบด อุณหภูมิในการนั่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	76
ตารางที่ ค.5 ความแข็งแรงต่อการดัดโค้งของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 เก้าแก่กลับและกลุ่มที่ 2 ทรายบด อุณหภูมิในการนั่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 และ 20 ชั่วโมง.....	78
ตารางที่ ค.6 การหดตัวหลังเผาของชิ้นงานของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 เก้าแก่กลับและกลุ่มที่ 2 ทรายบด อุณหภูมิในการนั่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	80

ตารางที่ ค.7 การหัดตัวหลังเผาของชิ้นงานของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 แก้วกลมและกลุ่มที่ 2 ทราบายด อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 และ 20 ชั่วโมง.....	81
ตารางที่ ค.8 การหัดตัวหลังเผาของชิ้นงานสูตรที่เติมปูนซีเมนต์ขาว อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง.....	83
ตารางที่ ค.9 การนำความร้อนของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 แก้วกลมและกลุ่มที่ 2 ทราบายด อุณหภูมิในการ นึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	84
ตารางที่ ค.10 การนำความร้อนของชิ้นงานของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 แก้วกลมและกลุ่มที่ 2 ทราบายด อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 และ 20 ชั่วโมง.....	85



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

แผ่นฉนวนกันความร้อนแคลเซียมซิลิเกต นิยมใช้งานเป็นวัสดุกันความร้อนสำหรับงานฝ้าและผนังของอาคารงานก่อสร้างป้องกันความร้อนจากภายนอกเข้าสู่ในอาคาร^{1,2} และวัสดุทนไฟที่มีสมบัติป้องกันการสูญเสียความร้อนออกจากเตาเผาได้ดี เนื่องจากมีความหนาแน่นต่ำ ใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 600-1000 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับคุณภาพและการใช้งาน³ ติดตั้งง่าย และมีราคาไม่สูงนัก แผ่นแคลเซียมซิลิเกตแบ่งตามความหนาแน่นออกเป็น 3 ประเภท⁴ คือ ความหนาแน่นต่ำ ความหนาแน่นปานกลาง และความหนาแน่นสูง โดยงานวิจัยนี้จะสนใจที่แคลเซียมซิลิเกตความหนาแน่นต่ำ ซึ่งมีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 250-500 kg/m³

วิธีการเตรียมแผ่นแคลเซียมซิลิเกตมี 3 วิธีหลัก^{5,6} คือ วิธีแรกจะผลิตจากส่วนผสมของแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับทรายบด ผสมกันให้เป็นสารแขวนลอยในน้ำ มักใส่เส้นใยเซลลูโลสหรือเส้นใยเซรามิกเพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรง แล้วขึ้นรูปด้วยการหล่อลงในแม่พิมพ์จากนั้นนำไปอบด้วยไอน้ำ ความดันสูงที่อุณหภูมิประมาณ 160-200 องศาเซลเซียส ทรายกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะเปลี่ยนเป็นผลึกแคลเซียมซิลิเกต วิธีที่สอง เมื่อได้สารแขวนลอยแคลเซียมซิลิเกตแล้ว นำไปอบให้ความร้อนความดันสูงเพื่อให้สารแขวนลอยดังกล่าวเกิดเจล จากนั้นกรองโดยใช้แรงดูดสุญญากาศช่วยอัดให้เป็นชิ้นงานขนาดและความหนาตามที่ต้องการ ชิ้นงานที่ได้จะมีความแข็งแรงพอที่จะเคลื่อนย้ายได้ จากนั้นนำไปอบด้วยไอน้ำความดันสูงที่อุณหภูมิประมาณ 160-200 องศาเซลเซียส และวิธีที่สาม คือนำสารแขวนลอยแคลเซียมซิลิเกตให้ความร้อนเพื่อให้เกิดเจลของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกต จากนั้นหล่อในแม่พิมพ์ที่ให้ความร้อนเพื่อที่จะให้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตเซตตัวและสามารถแกะออกจากแม่พิมพ์และเคลื่อนย้ายได้ จึงนำไปอบด้วยไอน้ำความดันสูงที่อุณหภูมิประมาณ 160-200 องศาเซลเซียส จะได้เป็นแผ่นบอร์ดที่ต้องการ

ปัจจุบันในประเทศไทยมีเพียงการผลิตวัสดุที่คล้ายกันคือไฟเบอร์ซีเมนต์ แต่เป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นที่สูงกว่าวัสดุแคลเซียมซิลิเกต จึงไม่มีสมบัติเป็นฉนวนความร้อนที่ดี อีกทั้งยังไม่สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงในเตาเผาได้ จำเป็นต้องสั่งซื้อนำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งเป็นการสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรมในประเทศ การพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตวัสดุแคลเซียมซิลิเกตความหนาแน่นต่ำขึ้นในประเทศจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงศึกษาการพัฒนาวัสดุเซรามิกแคลเซียมซิลิเกตความหนาแน่นต่ำ โดยการนำวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมกลับมาใช้เป็นวัสดุทดแทนวัตถุดิบหลัก เช่น ถ้ำกลบ ยิปซัมจากเศษแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้ว ซึ่งจากการศึกษาค้นคว้าข้อมูลพบว่า

หากใช้วัตถุดิบตั้งต้นที่ให้ซิลิกาในกลุ่มที่ไม่เป็นผลึก หรืออสัณฐาน (amorphous) จะช่วยให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็วขึ้น⁷ จะช่วยให้เกิดปฏิกิริยาได้เฟสแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตเจล (C-S-H gel) ที่อุณหภูมิต่ำได้ดีกว่าซิลิกาที่เป็นผลึก โดยที่เฟสแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตเจลมีสมบัติหลัก คือ มีความหนาแน่นต่ำ การนำความร้อนต่ำ สามารถรับแรงได้ดี และมีการหดตัวเมื่อได้รับความร้อนต่ำ ซึ่งจะสามารถเปลี่ยนเป็นเฟสที่แข็งแรงขึ้นได้ภายใต้แรงดันไอน้ำที่อุณหภูมิสูงโดยที่ความหนาแน่นยังคงต่ำอยู่ แต่การใช้ซิลิกาอสัณฐานที่เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมถลุงโลหะซิลิคอนที่เรียกว่าซิลิกาฟูมก็ยังมีราคาต้นทุนที่ค่อนข้างสูง ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาการใช้งานซิลิกาอสัณฐานจากเถ้าแกลบที่มีปริมาณซิลิกาสูงมาก ซึ่งมีมากมายในประเทศไทยและมีราคาที่ต่ำมาก⁸ รวมไปถึงการใช้แม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ที่ใช้แล้วจะมีส่วนประกอบหลักคือยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) โดยที่ในงานคอนกรีตมักจะใช้ยิปซัมเป็นสารตัวเติมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและเร่งปฏิกิริยาให้แคลเซียมซิลิเกตไฮดรตเจลเปลี่ยนเป็นเฟสโทเบอร์โมไรต์ซึ่งเป็นเฟสหลักที่พบในผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกต

งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะศึกษาการพัฒนาวัสดุเซรามิกแคลเซียมซิลิเกตความหนาแน่นต่ำที่มีสมบัติเป็นฉนวนความร้อน และพัฒนาโดยการนำวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมกลับมาใช้เป็นวัสดุทดแทนวัตถุดิบหลัก

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาวัสดุเซรามิกแคลเซียมซิลิเกตความหนาแน่นต่ำที่มีสมบัติเป็นฉนวนความร้อน สำหรับงานฉนวนความร้อนทนไฟโดยใช้เถ้าแกลบ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

เตรียมวัสดุแคลเซียมซิลิเกตด้วยวิธีการหล่อในแม่พิมพ์ ด้วยอัตราส่วนแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกา 1:1 โดยโมล โดยใช้ทราย เถ้าแกลบ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ยิปซัมจากแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้ว ปูนซีเมนต์ขาวเป็นวัตถุดิบหลัก ทดสอบสมบัติทางกายภาพและวิเคราะห์สมบัติของชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกต อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C533

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้วัสดุเซรามิกแคลเซียมซิลิเกตที่เตรียมจากเถ้าแกลบ ที่มีความหนาแน่นต่ำ และมีสมบัติความเป็นฉนวนกันความร้อนที่ใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 1100 องศาเซลเซียส

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

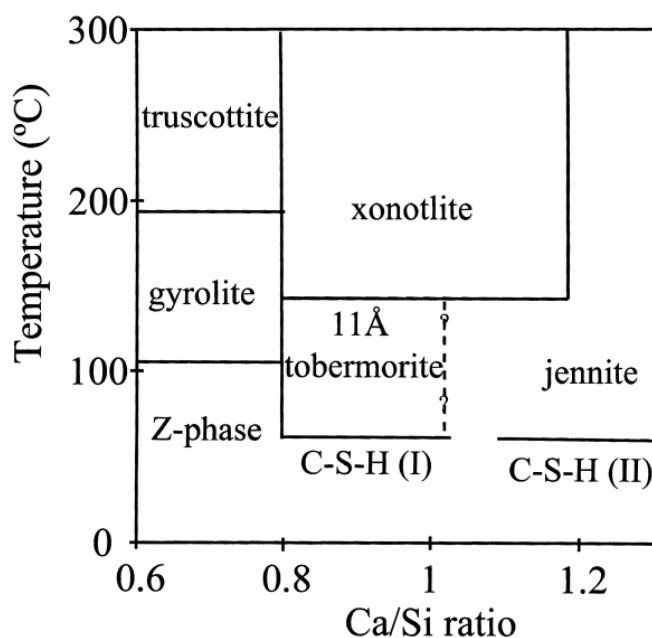
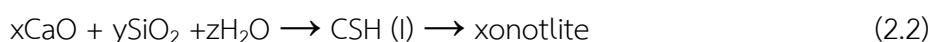
2.1 ผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิริลิกเกต

แผ่นแคลเซียมซิริลิกเกตเป็นวัสดุฉนวนกันความร้อน สามารถนำไปใช้กับงานฝ้าและผนังของอาคาร อีกทั้งยังนิยมนำไปใช้ในเตาอบ เตาหลอมในโรงงานหรือในงานที่มีอุณหภูมิสูง เนื่องจากมีน้ำหนักเบา ความแข็งแรงสูง ไม่ก่อให้เกิดการกัดกร่อน ไม่ติดไฟ ป้องกันการสูญเสียความร้อนออกจากเตาเผาได้ดี ใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 600-1000 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับคุณภาพและการใช้งาน ผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิริลิกเกตในท้องตลาดมีจำหน่ายอยู่ 3 รูปแบบหลัก คือ แบบบล็อก แบบท่อ และแบบแผ่น ฉนวนความร้อนแคลเซียมซิริลิกเกตแบ่งตามอุณหภูมิการใช้งานได้ 2 ประเภท คือ ประเภทที่ 1 มีอุณหภูมิการใช้งานสูงสุดที่ 649 องศาเซลเซียส ประเภทที่ 2 มีอุณหภูมิการใช้งานสูงสุดที่ 927 องศาเซลเซียส อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C533

2.2 ฉนวนความร้อนแคลเซียมซิริลิกเกต⁹⁻¹⁷

ฉนวนความร้อนแคลเซียมซิริลิกเกตผลิตได้โดยการทำปฏิกิริยากันระหว่างแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง อุณหภูมิประมาณ 160-200 องศาเซลเซียส แรงดันประมาณ 1 เมกะพาสคัล เวลาตั้งแต่ 0.5-20 ชั่วโมง ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้แคลเซียมออกไซด์และทรายบดเป็นวัตถุดิบหลัก ในผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิริลิกเกตสามารถพบได้หลากหลายเฟส ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างแคลเซียมออกไซด์และซิลิกา ระบบ $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ (C-S-H system) ซับซ็อนเป็นอย่างมาก สามารถเกิดเฟสต่างๆ ได้มากกว่า 30 เฟส แต่เฟสที่พบเป็นส่วนใหญ่ แสดงในภาพที่ 2.1 มีเฟสที่การจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ เช่น แคลเซียมซิริลิกเกตไฮเดรตเจล (C-S-H gel) และเฟสกึ่งเสถียรอื่นๆ เช่น Z-phase ซึ่งเฟสกึ่งเสถียรเหล่านี้สามารถเกิดได้เองที่อุณหภูมิห้องและความดันปกติ¹⁸ อีกทั้งยังสามารถเร่งให้เกิดได้โดยใช้อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส ในการผลิตในอุตสาหกรรม^{13,19} และในส่วนของสารประกอบที่เป็นแร่ ได้แก่ เฟสโทเบอร์โมไรต์ จะเสถียรที่องค์ประกอบสัดส่วน CaO/SiO_2 เท่ากับ 0.8-1 โดยโมล จะเกิดขึ้นได้เนื่องจากการแปรผันการจัดเรียงของอะตอมในโครงสร้าง และ เฟสโซโนต์ไลต์จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่าเฟสโทเบอร์โมไรต์ มีอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสประมาณ 140 องศาเซลเซียส ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะพบเฟสโทเบอร์โมไรต์ ($5\text{CaO}\cdot 6\text{SiO}_2\cdot 5\text{H}_2\text{O}$) และโซโนต์ไลต์ ($6\text{CaO}\cdot 6\text{SiO}_2\cdot \text{H}_2\text{O}$) ในผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิริลิกเกตที่จำหน่ายในท้องตลาด

หลังจากที่ผสมแคลเซียมออกไซด์กับซิลิกากับน้ำ ได้เป็นสารแขวนลอยแคลเซียมซิริลิกเกต ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถเกิดขึ้นได้ตามสมการ 2.1 และ 2.2 ดังนี้



ภาพที่ 2.1 แผนผังเฟสของระบบ CaO-SiO₂-H₂O⁹

ภายใต้เงื่อนไขไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิต่ำ มักจะเกิดเป็นเฟสโทเบอร์โมไรต์ชนิด 11 อังสตรอม ต่อมาที่อุณหภูมิประมาณ 140 องศาเซลเซียส จะเป็นช่วงการเปลี่ยนแปลงจากเฟสโทเบอร์โมไรต์ชนิด 11 อังสตรอมไปเป็นเฟสโซโนตไลต์ การเกิดเฟสโซโนตไลต์มักจะได้ที่สัดส่วน Ca/SiO₂ ประมาณ 1 โดยโมล ได้เช่นเดียวกับเฟสโทเบอร์โมไรต์ แต่เกิดที่อุณหภูมิสูงเกิน 180 องศาเซลเซียส จะเกิดได้ อยู่ในช่วง 180-300 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาานานกว่า และเนื่องด้วยลักษณะโครงสร้างที่คล้ายกัน การเปลี่ยนจากเฟสโทเบอร์โมไรต์เป็นเฟสโซโนตไลต์จึงไม่ได้เปลี่ยนสัณฐานวิทยามากนัก⁹

2.2.1 โทเบอร์โมไรต์

เฟสโทเบอร์โมไรต์มักจะพบเป็นชนิด 9, 11 และ 14 อังสตรอม ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่า ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก ความยาวด้านแกน c จะขึ้นอยู่กับน้ำในโครงสร้างเฟสโทเบอร์โมไรต์ เฟสโทเบอร์โมไรต์ชนิด 11 อังสตรอม โดยปกติจะพบได้เป็นผลึกออร์โธโรมบิก โครงสร้างของเฟส โทเบอร์โมไรต์ชนิด 11 อังสตรอม ประกอบด้วยชั้นของแคลเซียมออกตะฮีดรารอยู่ตรงกลาง ประกบ ด้วยชั้นของแผ่นซิลิเกตในแต่ละด้าน โดยที่แผ่นซิลิเกตจะเป็นสายโซ่ของซิลิเกตเตตระฮีดรารต่อกันไป เรื่อยๆ ตามแนวแกน b เรียกว่า dreierketten ซ้ำกันไป คล้ายกับสายโซ่ในเฟสวอลลาสโตไนต์ และ

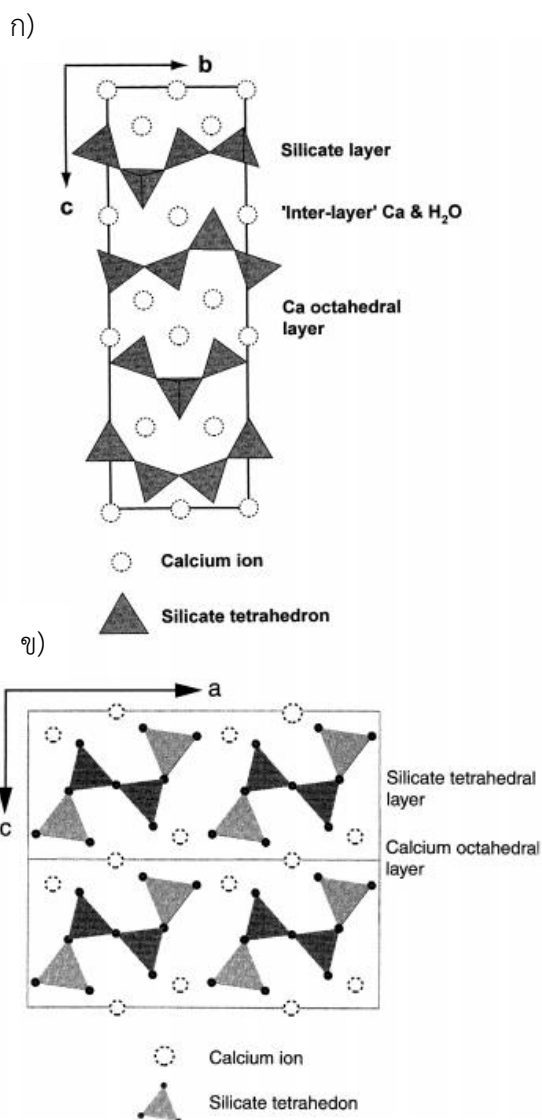
แคลเซียมออกไซด์ตราใช้ออกซิเจนร่วมกับซิลิกาเกิดเตตระไฮดรอกไซด์ ดังนั้น ชั้นคอมโพสิตนี้ประกอบด้วยชั้นของแคลเซียมหนึ่งชั้นและชั้นของซิลิกาสองชั้น โดยมีแคลเซียมไฮดรอกไซด์และโมเลกุลของน้ำอยู่ตรงกลางระหว่างชั้น ดังภาพที่ 2.2 ก)

เฟสโทเบอร์โมไรต์ที่พบในธรรมชาติโดยส่วนใหญ่มักจะเป็นชนิด 11 อังสตรอม เรียกว่า ‘normal’ หรือ ‘anomalous’ ขึ้นอยู่กับพฤติกรรมการสูญเสียโมเลกุลของน้ำในโครงสร้าง เช่น ที่อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส จะเกิดการสูญเสียน้ำในโครงสร้าง ทำให้เฟสโทเบอร์โมไรต์ชนิด 11 อังสตรอม เปลี่ยนเป็นเฟสโทเบอร์โมไรต์ชนิด 9 อังสตรอม แต่ระยะตามแกน c ไม่ได้ลดลงมากนัก เฟสโทเบอร์โมไรต์เป็นหนึ่งในสารประกอบกลุ่มแคลเซียมซิลิกาที่สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิและความดันต่ำ เป็นเฟสที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับซีเมนต์ เนื่องจากมีลักษณะผลึกเป็นแท่ง การใช้งานเฟสโทเบอร์โมไรต์ใช้งานได้ที่ไม่เกิน 850 องศาเซลเซียส เนื่องจากเมื่อถึงอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เฟสโทเบอร์โมไรต์จะเกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นวอลลาสโตไนต์ ดังภาพที่ 2.10 แสดงพฤติกรรมทางความร้อนของซีเมนต์แคลเซียมซิลิกา ในโครงสร้างของเฟสโทเบอร์โมไรต์มีโมเลกุลของน้ำอยู่ 5 โมเลกุล สูตรเคมี $5\text{CaO}\cdot 6\text{SiO}_2\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ เมื่อโมเลกุลของน้ำออกจากโครงสร้างทำให้รูปร่างของซีเมนต์เปลี่ยนแปลงไป เกิดการหดตัว ความแข็งแรงของซีเมนต์ลดลง^{20,21}

2.2.2 โซโนตไลต์

โครงสร้างของเฟสโซโนตไลต์คล้ายคลึงกับโครงสร้างของเฟสโทเบอร์โมไรต์เป็นอย่างมาก แต่จะมีสายโซ่สองสายในแนวแกน b ซึ่งจะมีชั้นของสายโซ่ในระนาบ ab มากกว่าหนึ่งชั้นที่พบในโครงสร้างของเฟสโทเบอร์โมไรต์. ดังแสดงในภาพที่ 2.2 ข)

เฟสโซโนตไลต์เป็นหนึ่งในสารประกอบกลุ่มแคลเซียมซิลิกาที่สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิและความดันสูง เสถียรที่อุณหภูมิ 200-600 องศาเซลเซียส ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโซโนตไลต์จะมีลักษณะเป็นแท่งเข็มซึ่งจะคล้ายคลึงกับวอลลาสโตไนต์ สามารถเรียกได้ว่าเป็นไฮเดรตวอลลาสโตไนต์ (wollastonite-type hydrated calcium silicate)²² เนื่องจากเฟสโซโนตไลต์มีสูตรเคมี $6\text{CaO}\cdot 6\text{SiO}_2\cdot \text{H}_2\text{O}$ ประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำเพียงโมเลกุลเดียว เมื่อถึงอุณหภูมิประมาณ 800-850 องศาเซลเซียส ถึงแม้ว่าจะเกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสวอลลาสโตไนต์แต่จะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของซีเมนต์²⁰ ดังนั้น โซโนตไลต์สามารถนำมาใช้เป็นฉนวนกันความร้อนและกันไฟได้²³



ภาพที่ 2.2 ก) ระนาบ bc ของเฟสโทเบอร์โมไรต์ และ ข) ระนาบ ac ของเฟสโซโนตไลต์⁹

2.3 การแทนที่ในโครงสร้างของโทเบอร์โมไรต์

โครงสร้างของโทเบอร์โมไรต์ปกติจะประกอบไปด้วยชั้นของแผ่นซิลิเกตและแคลเซียม ออกไซด์ประกบกันเป็นชั้นๆ ซึ่งจะมีไอออนบางชนิดที่สามารถเข้าไปแทนที่ที่ตำแหน่งของ Si ในซิลิเกตเตตระฮีดรอนได้ เช่น อะลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) หรือ ซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) ซึ่งจะพบในรูปของซัลเฟอร์ไอออน (S^{6+}) แทนที่ ($Si^{4+} + 2H^+$) ช่วยเร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนเฟสจากแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตเจลเป็นเฟสโทเบอร์โมไรต์ได้²⁴

2.4 มาตรฐานอุตสาหกรรมของฉนวนแคลเซียมซิลิเกต

ผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตมีการกำหนดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม โดยยกตัวอย่างมาตรฐานอเมริกัน ASTM C533 ที่มีการจำแนกผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตตามอุณหภูมิการใช้งาน แสดงในตารางที่ 2.1 มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพที่ต้องการตามมาตรฐานอเมริกัน ASTM C533²⁵

สมบัติทางกายภาพ	ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2
อุณหภูมิการใช้งานสูงสุด, °F (°C)	1200 (649)	1700 (927)
ความหนาแน่นสูงสุด, kg/m ³	240	352
ความแข็งแรงต่อการตัดโค้งต่ำสุด, kPa	344	344
การหดตัวเมื่อได้รับความร้อนสูงสุด, %	2	2
ค่าการนำความร้อนที่ 38 °C, W/m·K	0.059	0.072

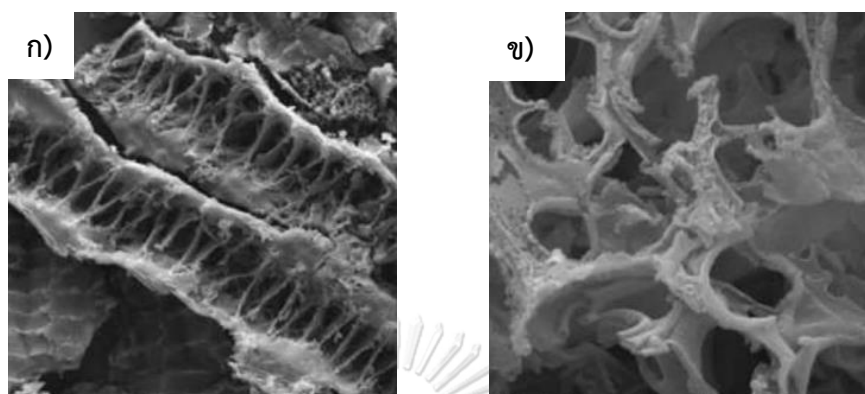
2.5 เถ้าแกลบ²⁶⁻²⁸

เถ้าแกลบ (Rice husk ash) เป็นส่วนที่เหลือทิ้งจากกระบวนการเผาแกลบข้าวที่เป็นวัสดุชีวมวลที่สำคัญใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อให้ความร้อนในการอบข้าวและใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าชีวมวล เถ้าแกลบมีลักษณะเป็นอนุภาคสีขาวถึงสีดำ ต่างกันที่ความสมบูรณ์ของการเผาไหม้ ปัจจุบันเถ้าแกลบจัดเป็นปัญหาสำคัญสำหรับโรงสีและโรงไฟฟ้าที่ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง เนื่องจากการบดและการบำบัดและก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ อย่างไรก็ตามเถ้าแกลบสามารถนำไปใช้ทำปุ๋ยและวัสดุเสริมแรงคอนกรีต แต่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับมูลค่าของธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักในเถ้าแกลบ

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบพบว่าปริมาณซิลิกา (Silica, SiO₂) เป็นองค์ประกอบหลัก ร้อยละ 70-90 แกลบที่เผาในระบบเปิดจำแนกได้ 2 ชนิด คือ เถ้าแกลบขาว (White Rice Husk Ash) และเถ้าแกลบดำ (Black Rice Husk Ash) ซึ่งเถ้าแกลบดำจะเกิดจากการเผาที่ไม่สมบูรณ์ มีสัดส่วนซิลิกาและคาร์บอนเป็นองค์ประกอบใกล้เคียงกัน ในขณะที่เมื่อใช้อุณหภูมิในการเผาที่สูงขึ้นจะให้เถ้าแกลบขาวเพิ่มมากขึ้น สามารถพบปริมาณซิลิกาสูงถึง ร้อยละ 96²⁸

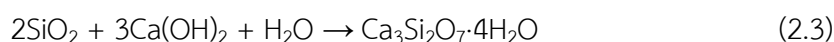
ภายใต้กระบวนการเผา สารอินทรีย์ เช่น เซลลูโลส และ ลิกนิน ในแกลบจะถูกเผาไหม้ออกไป เหลือเป็นซิลิกาอสัณฐานที่มีรูปร่างคล้ายรูปร่างของเซลลูโลส มีรูพรุนสูง ดังภาพที่ 2.3 เพราะ

เนื่องจากมีรูพรุนสูง จึงมีพื้นที่ผิวสูงมาก จากการทดสอบพื้นที่ผิวด้วยวิธี Brunauer-Emmett-Teller (BET) พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 20 ถึง 270 m^2/g ในขณะที่ซิลิกาฟูมมีค่าอยู่ในช่วง 18-23 m^2/g ²⁶



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างจุลภาคของเถ้าแกลบที่กำลังขยาย ก) 500X และ ข) 1000X²⁶

การใช้งานเถ้าแกลบมักจะใช้ในงานเป็นวัสดุปอซโซลานในอุตสาหกรรมก่อสร้าง เช่น ใช้เป็นสารตัวเติม สารขัดสี สารดูดซับน้ำมัน สารช่วยแขวนตะกอนสำหรับเคลือบพอร์ซเลน อีกทั้งยังสามารถใช้เป็นวัสดุทดแทนวัสดุหลักในงานซีเมนต์ได้อีกด้วย เถ้าแกลบที่ใส่เข้าไปจะช่วยลดแคลเซียมอิสระหรือแคลเซียมที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา โดยที่ซิลิกาอสัณฐานในเถ้าแกลบจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล ซึ่งมีลักษณะกลมฟูคล้ายขนสัตว์ มีรูพรุนและพื้นที่ผิวสูง การเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลกระจายอยู่ในเนื้อคอนกรีตจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความคงทนของคอนกรีตได้ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นตามสมการที่ 2.3 ดังนี้



2.6 ยิปซัมจากแบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้ว^{29,30}

ปูนปลาสเตอร์ คือ วัสดุชนิดหนึ่งที่มีลักษณะเป็นผงสีขาวละเอียด เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดความร้อนและแข็งตัว สามารถดูดซับน้ำ ความชื้นได้ ปูนปลาสเตอร์มักจะผลิตจากแร่อยิปซัม ที่มีสูตรเคมี $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ประกอบด้วยแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 32.6 ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_3) ร้อยละ 46.5 และน้ำ (H_2O) ร้อยละ 20.9 มีน้ำหนักโมเลกุล 172.18 ซึ่งมีน้ำในโครงสร้างอยู่ 2 โมเลกุล ลักษณะทั่วไปมักจะมีสีขาวหรือไม่มีสี หรือมีโทนสีอ่อนอื่นๆได้หลายสีตามชนิดและปริมาณของมลทินที่ปะปนอยู่ ลักษณะเด่นของแร่อยิปซัมคือมีความแข็ง 2 โมห์สเกล สามารถใช้เล็บขีดเป็นรอย

ได้ง่ายการผลิตปูนปลาสเตอร์โดยนำแรยิปซัมไปเผาที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส จะเกิดปฏิกิริยาเคมี ตามสมการที่ 2.4 ดังนี้



โดยน้ำที่มีอยู่ในแร่ธรรมชาติจะระเหยออกไป จากนั้นทำให้เย็นตัว นำมาบดและสามารถเก็บไว้ใช้งานได้ เมื่อนำปูนปลาสเตอร์มาใช้งานโดยผสมกับน้ำอีกครั้ง จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกลับเป็นแรยิปซัมอีกครั้ง ตามสมการที่ 2.5 ดังนี้

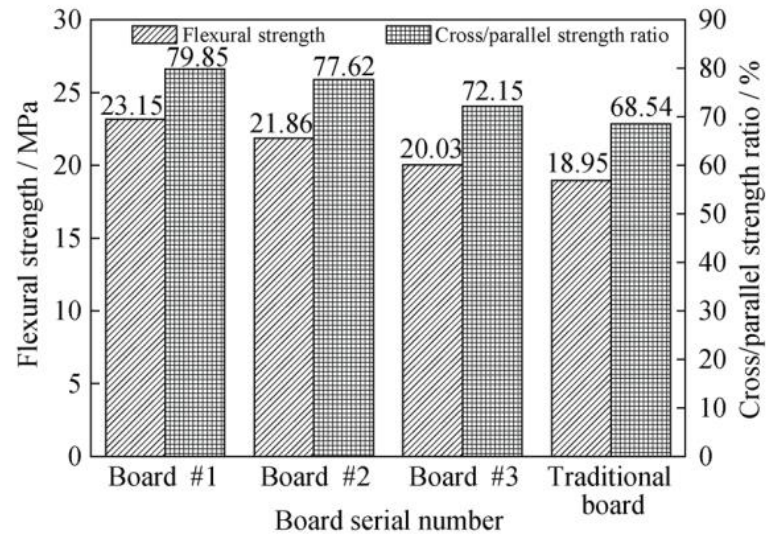


จากข้อมูลของกระทรวงอุตสาหกรรมไทยพบว่าปริมาณยิปซัมจากวัสดุปูนปลาสเตอร์ที่เป็นแบบหล่อที่ไม่ใช้งานแล้วจากอุตสาหกรรมเซรามิกมีปริมาณไม่น้อยกว่า 38,000 ตันต่อปี ซึ่งมีการกำจัดโดยการนำไปถมที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม มีความเสี่ยงในการสร้างสารไฮโดรเจนซัลไฟด์ เป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดสภาวะโลกร้อนได้ จึงได้มีการผลักดันการนำปูนปลาสเตอร์ใช้แล้ว (ยิปซัม) กลับมาใช้ใหม่ ในปัจจุบันมีการนำวัสดุเหล่านี้มาใช้เติมในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์หรือการผลิตยิปซัมบอร์ดบ้าง และมีงานวิจัยที่เกี่ยวกับการนำแบบปูนปลาสเตอร์ใช้แล้วกลับมาใช้มากมาย เช่น การศึกษาสมบัติการแข็งตัวของปูนปลาสเตอร์ใช้แล้วจากอุตสาหกรรมเซรามิก การศึกษาการใช้แบบพิมพ์ที่หมดอายุผสมกับทราย ซิลิกา และซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อผลิตผนังสำเร็จรูป³⁰ เป็นต้น ดังนั้นปูนปลาสเตอร์ใช้แล้วที่เปลี่ยนกลับมาเป็นแรยิปซัมสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

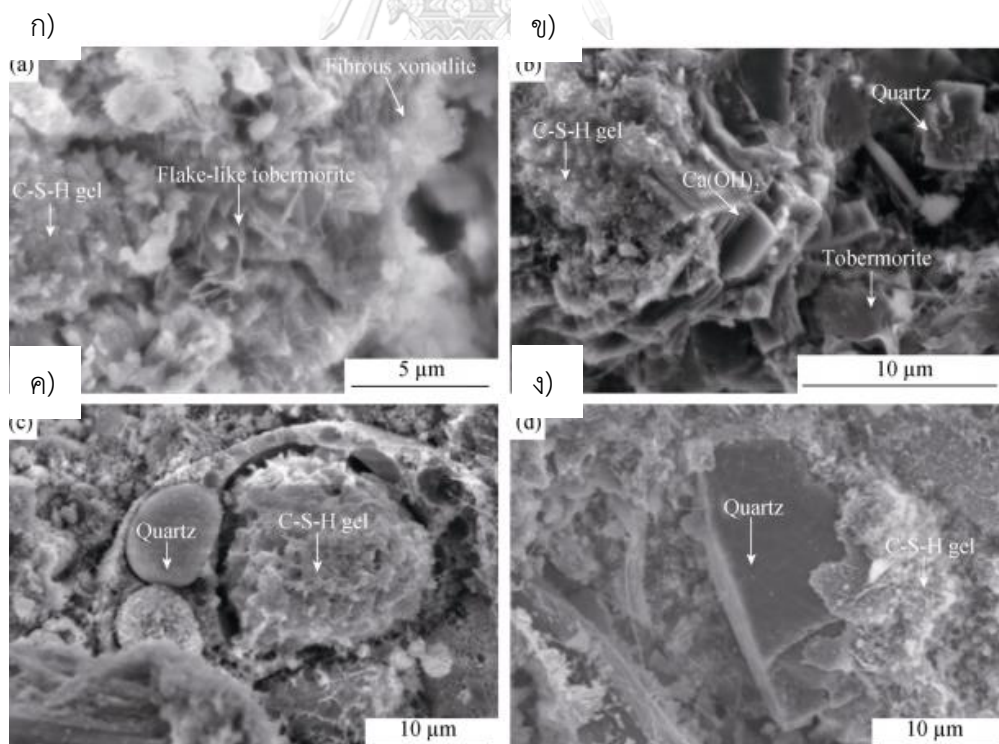
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Cao Z. และคณะ³¹ ได้ศึกษาการเตรียมแคลเซียมซิลิเกตบอร์ดความแข็งแรงสูงจากของเสียอุตสาหกรรมถ่านหิน วัสดุดิบที่ใช้ ได้แก่ ตะกรันแคลเซียมซิลิเกต เถ้าลอย ยิปซัมที่เป็นผลพลอยได้จากการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (FGD gypsum) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผงควอตซ์ ปูนขาว และใช้วัสดุเสริมแรงเป็นแร่ใยหิน เตรียมชิ้นงานโดยผสมวัสดุดิบกับน้ำในอัตราส่วน น้ำต่อน้ำวัสดุดิบเท่ากับ 0.3 โดยมวล เป็นเวลา 3 นาที ในเครื่องผสมซีเมนต์ จากนั้นอัดใส่ในแม่พิมพ์โลหะขนาด 150x150x10 มิลลิเมตร ใช้แรงดันในการขึ้นรูปเป็นเวลา 3 นาที บ่มชิ้นงานที่อุณหภูมิห้อง 5 ชั่วโมง จากนั้นถอดออกจากแม่พิมพ์แล้วบ่มในหม้อนึ่งอัดไอที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส 1.05 เมกะพาสคัล เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จะได้ชิ้นงานแผ่นแคลเซียมซิลิเกต พบว่า สามารถเตรียมแผ่นแคลเซียมซิลิเกตความแข็งแรงสูงได้ตรงตามมาตรฐาน JC/T 564.2—2008 และพบว่า ควอตซ์ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตเจล จากนั้นค่อยๆ เปลี่ยนเป็นเฟสโทเบอร์โมไรต์และเฟสโซโนไตต์ ตามลำดับ ทั้งสองเฟสนี้ยังเป็นตัวช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับแผ่น

แคลเซียมซิลิเกตด้วย ในขณะที่ควอซที่ทำปฏิกิริยาไม่หมดส่งผลเสียต่อความแข็งแรง ดังภาพที่ 2.4 และ 2.5



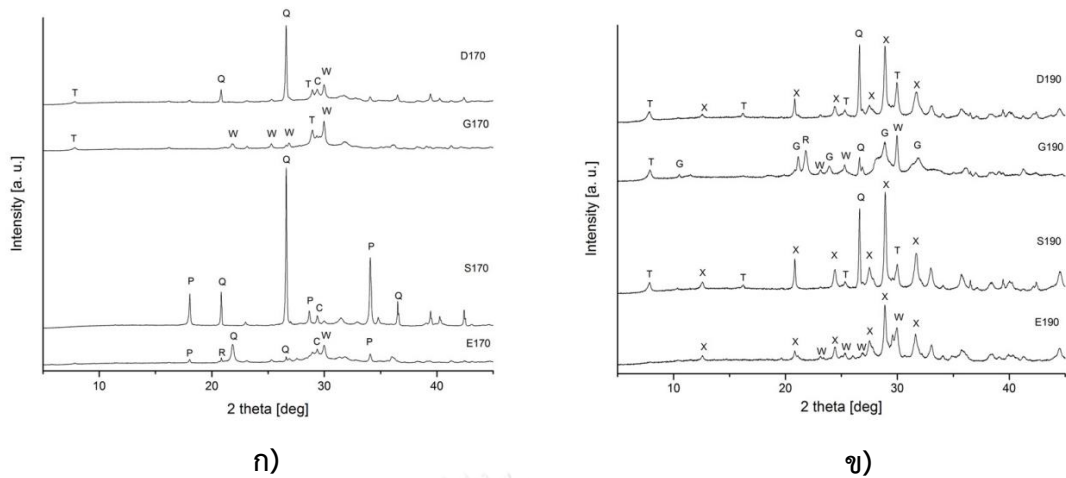
ภาพที่ 2.4 ความแข็งแรงต่อการโค้งงอของชิ้นงานแต่ละสูตร³¹



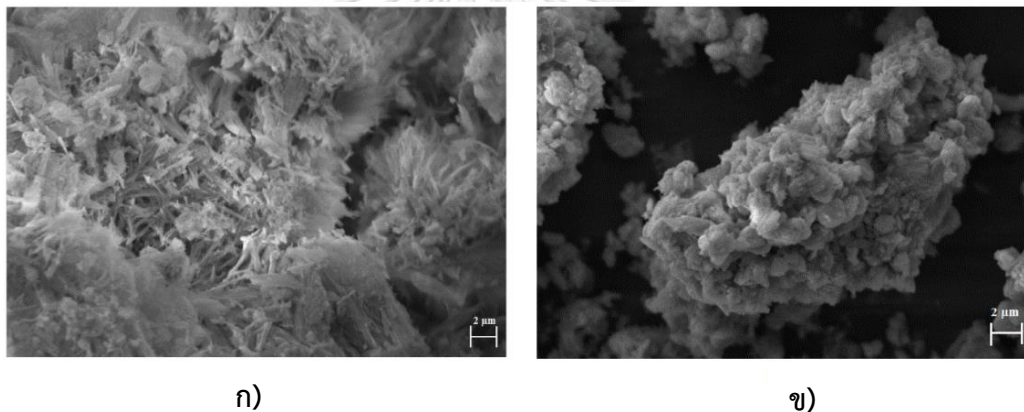
ภาพที่ 2.5 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานแต่ละสูตร³¹

โดยที่ ก) Board#1 ข) Board#2 ค) Board#3 ง) Traditional board Yue HZ. และคณะ³² ได้ศึกษาการสังเคราะห์โซโนตไลต์ความหนาแน่นต่ำซึ่งมีสมบัติเป็นฉนวนความร้อนที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูงที่สุด จากปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลแบบไดนามิก การสังเคราะห์ โซโนตไลต์โดยใช้วิธีนี้จะได้โซโนตไลต์ที่มีลักษณะเป็นเส้นใย โดยศึกษาผลของขนาดอนุภาคของควอตซ์ สัดส่วนโดยมวลระหว่างน้ำกับสารตั้งต้น และผลของการใส่สารเติมแต่ง ทดลองโดยใช้ผงควอตซ์ ($\text{SiO}_2 \geq 98\%$) และแคลเซียมคาร์บอเนต ($\text{CaCO}_3 \geq 98\%$) เป็นสารตั้งต้น เซอร์โคเนียม ออกซีคลอไรด์ ($\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O} \geq 98\%$) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นสารควบคุมค่า pH เตรียมชิ้นงานโดย แคลเซียมคาร์บอเนตเผาแคลไซด์ เพื่อให้ได้แคลเซียมออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นผสมกับน้ำกลั่นได้เป็นสารแขวนลอยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ส่วนผงควอตซ์นำไปบดด้วยเวลาต่าง ๆ กัน ผสมสารตั้งต้นเข้าด้วยกัน สัดส่วน CaO/SiO_2 เท่ากับ 1 โดยโมล นำไปสังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มัล ที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และคนด้วยความเร็ว 450 รอบต่อนาที จากนั้นอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส จะได้ผงโซโนตไลต์ จากการศึกษาพบว่า ขนาดอนุภาคของควอตซ์ลดลง ช่วยเพิ่มปริมาณเฟสโซโนตไลต์ภายใต้การทดลองเติมสารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และเซอร์โคเนียมออกซีคลอไรด์

Galvánková L. และคณะ³³ ได้ศึกษาผลของไฮโดรเทอร์มัลและวัตถุดิบตั้งต้นในการเตรียมเฟสโทเบอร์โมไรต์ วัตถุดิบตั้งต้นใช้เป็นวัตถุดิบที่ให้ซิลิกา 4 ชนิด ที่มีขนาดอนุภาค 21.11 ไมโครเมตร (E), 8.62 ไมโครเมตร (G), 28.33 ไมโครเมตร (S) and 3.53 ไมโครเมตร (D) ตามลำดับ จากนั้นผสมกับแคลเซียมคาร์บอเนตที่นำไปเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที สัดส่วน CaO/SiO_2 เท่ากับ 0.83 โดยโมล สัดส่วนน้ำต่อสารตั้งต้น เท่ากับ 2.5 จากนั้นไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน 170 และ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-10 วัน พบว่า ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบที่ให้ซิลิกายังมีขนาดเล็กยิ่งที่ง่ายต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัล ตามภาพที่ 2.6 ก) และยิ่งอุณหภูมิสูงขึ้นช่วยให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลได้ดีขึ้น ตามภาพที่ 2.6 ข) ส่วนชิ้นงานที่มีเฟสหลักที่พบคือควอตซ์ (S170) แสดงว่าอุณหภูมิที่ใช้ไฮโดรเทอร์มัลต่ำเกินไปที่จะเกิดเฟสโทเบอร์โมไรต์ เพราะเงื่อนไขการทดลองไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างควอตซ์และ แคลเซียมคาร์บอเนต และจากภาพที่ 2.7 ก) D170 แสดงให้เห็นถึงเฟสโทเบอร์โมไรต์ที่มีลักษณะเป็นแท่งเข็มปกคลุมพื้นผิวอนุภาคควอตซ์ ผลของเวลาในการเกิดปฏิกิริยา ทดลองที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 3 5 และ 10 วัน พบว่า เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น การเกิดเฟสโทเบอร์โมไรต์เพิ่มขึ้น และมีโอกาสที่เฟสโทเบอร์โมไรต์จะเปลี่ยนเป็นเฟสโซโนตไลต์ได้เช่นกัน



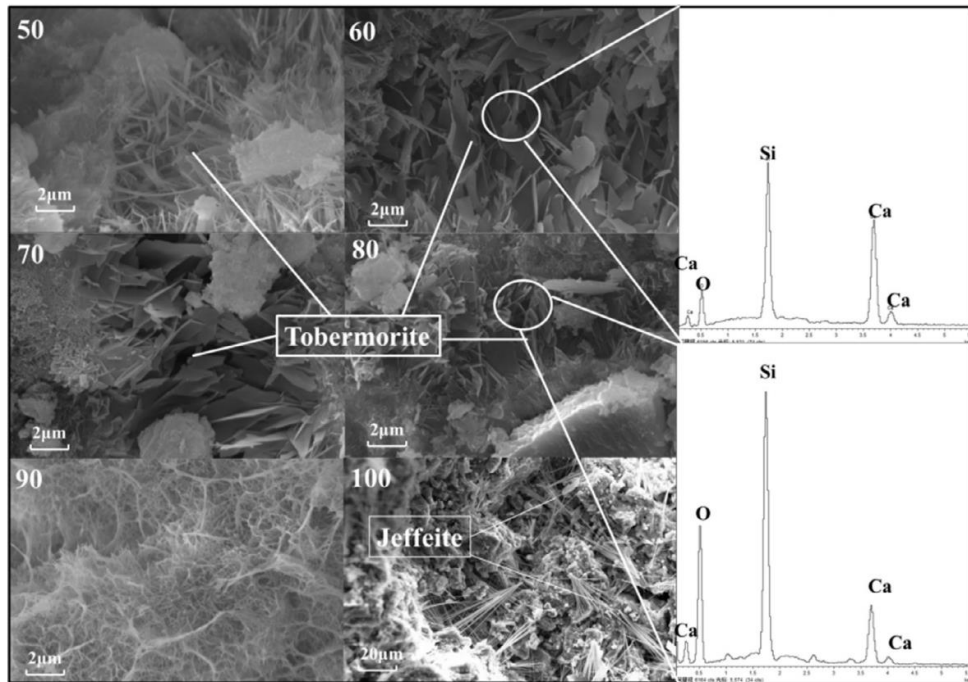
ภาพที่ 2.6 การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบเฟส ก) 170 องศาเซลเซียส ข) และ 190 องศาเซลเซียส³³



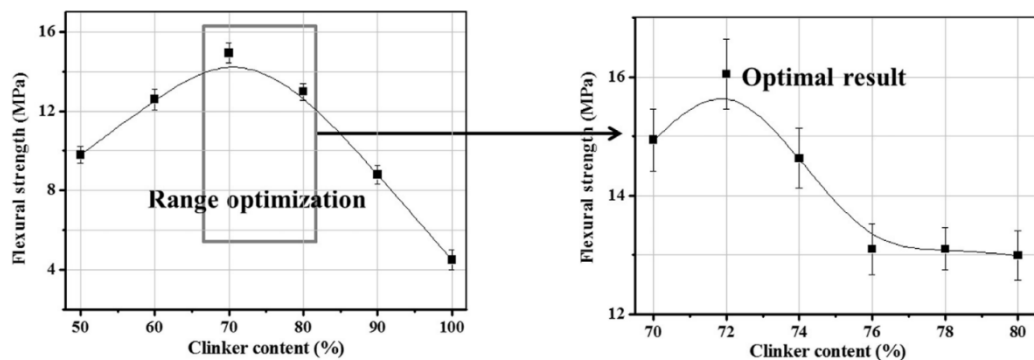
ภาพที่ 2.7 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน ก) D170 และ ข) S170³³

Chen M และคณะ³⁴ ได้ศึกษาการเกิดเฟสโทเบอร์โมไรต์ในแคลเซียมซิลิเกตบอร์ดและปัจจัยในการนึ่งอัดไอน้ำ โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เม็ดและควอตซ์เป็นวัตถุดิบหลัก ผสมตามอัตราส่วนต่างๆ อัตราส่วนน้ำต่อน้ำปูนเท่ากับ 0.2 เตรียมชิ้นงานโดยการอัดขึ้นรูปภายใต้แรงอัดที่แตกต่างกัน หลังจากนั้นนำไปบ่มในหม้อนึ่งอัดไอน้ำที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆกัน และอบแห้งชิ้นงานที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากการทดลองพบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เม็ดและควอตซ์มีผลต่อรูปร่างของผลึกโทเบอร์โมไรต์และความแข็งแรง ดังภาพที่ 2.8 และ 2.9 อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอน้ำที่เกิดเฟสโทเบอร์โมไรต์ ประมาณ 190-195 องศาเซลเซียส และเวลาประมาณ 4-8 ชั่วโมง ในการทดลองนี้ได้อธิบายพฤติกรรมทางความร้อนของชิ้นงานด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC) ดังภาพที่ 2.10 ที่อุณหภูมิ 50-150 องศาเซลเซียส ปรากฏเอนโดเทอร์มิกพีค

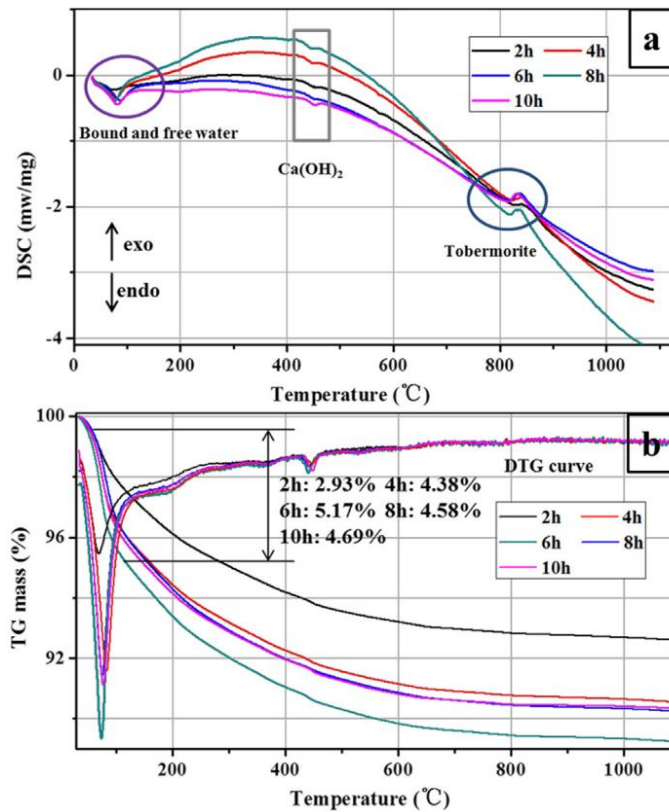
และน้ำหนักหายไป เนื่องจากสูญเสียน้ำในชั้นงาน ที่อุณหภูมิประมาณ 460 องศาเซลเซียส ปรากฏเอนโดเทอร์มิกพีคเล็กๆ เนื่องจากการสลายตัวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และที่ 800-830 องศาเซลเซียส ปรากฏเอนโดเทอร์มิกพีคและเกิดเอกโซเทอร์มิกพีคต่อมา เนื่องจากเกิดการสลายตัวของโทเบอร์โมไรต์เปลี่ยนเป็นเฟสอื่น



ภาพที่ 2.8 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เม็ดแตกต่างกัน³⁴

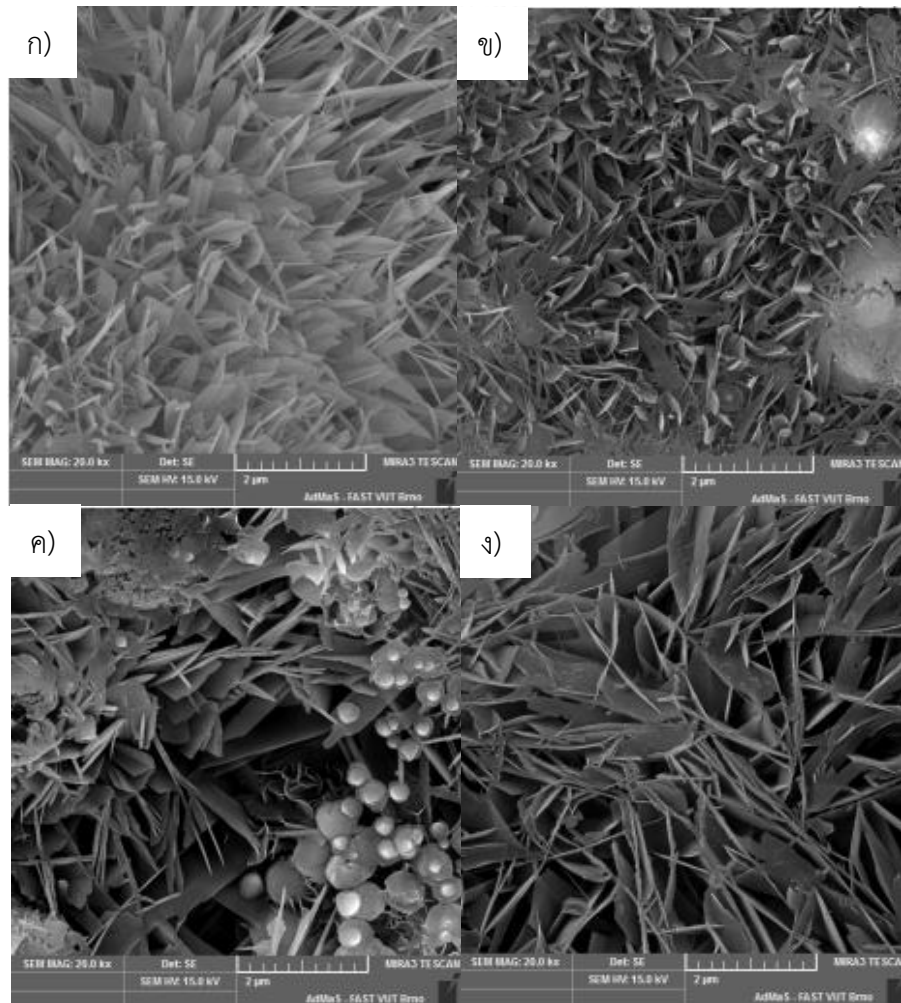


ภาพที่ 2.9 ผลของปริมาณปูนซีเมนต์เม็ดต่อความแข็งแรงต่อการตัดโค้ง³⁴



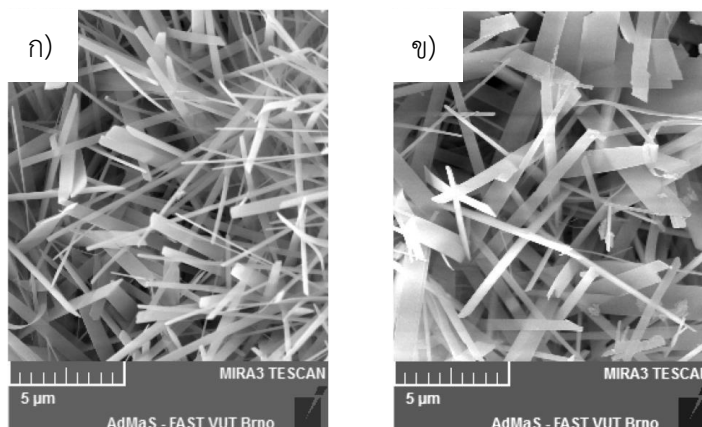
ภาพที่ 2.10 พฤติกรรมทางความร้อนของชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกต³⁴

Helanova E. และคณะ³⁵ ได้ศึกษาผลของการเติมยิปซัมต่อการเกิดเฟสโทเบอร์โมไรต์ในอิฐมวลเบาอบไอน้ำ โดยจะมีปริมาณยิปซัมแตกต่างกัน คือ ร้อยละ 0 (0S) ร้อยละ 3 (3S) ร้อยละ 5 (5S) และร้อยละ 10 (10S) นำไปนึ่งอัดไอน้ำเป็นเวลา 8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 174 องศาเซลเซียส ความดัน 0.8 เมกะพาสคัล จากผลการวิเคราะห์เฟสพบว่าปริมาณของเฟสแอนไฮไดรต์จะมากขึ้นตามปริมาณยิปซัมที่เพิ่มขึ้น และผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคพบว่ายิปซัมมีผลต่อโครงสร้างผลึกเฟสโทเบอร์โมไรต์ ดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มีปริมาณยิปซัมแตกต่างกัน ก) ร้อยละ 0 ข) ร้อยละ 3 ค) ร้อยละ 5 และ ง) ร้อยละ 10^{35}

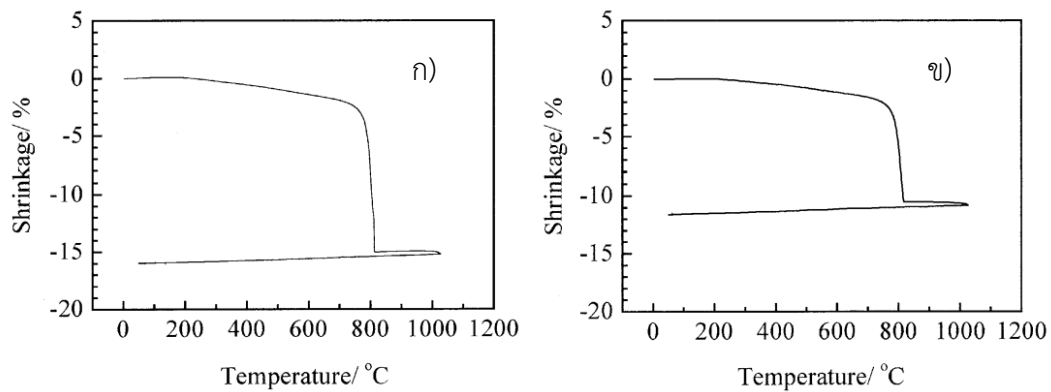
Cerný V. และคณะ³⁶ ได้ศึกษาผลของซิลเฟตต่อการเกิดโทเบอร์โมไรต์ เตรียมชิ้นงานโดยใช้ ใก้าลอย แคลเซียมออกไซด์ และยิปซัม ผสมกับน้ำในอัตราส่วน CaO/SiO_2 เท่ากับ 0.73 และ 1 โดยโมล นึ่งอัดไอที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่า อัตราส่วน CaO/SiO_2 เท่ากับ 1 โดยโมลพบปริมาณเฟสโทเบอร์โมไรต์ที่มากกว่า และผลของการเติมยิปซัม ร้อยละ 5 พบว่า การใส่ยิปซัมช่วยให้เกิดเฟสโทเบอร์โมไรต์ได้ดีกว่าและมีผลต่อโครงสร้างผลึกโทเบอร์โมไรต์ด้วย ดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มีปริมาณยิปซัม ก) ร้อยละ 0 และ ข) ร้อยละ 5³⁶

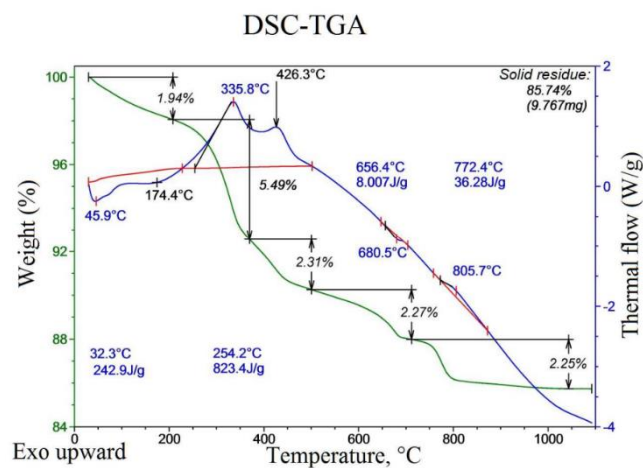
Haastруп S. และคณะ⁷ ศึกษาผลของซิลิกาอสัญฐานต่อการเกิดเฟสแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลโดยใช้ซิลิกาอสัญฐานที่มีปริมาณซิลิกาแตกต่างกัน คือ ร้อยละ 97.5 และร้อยละ 92.8 ผสมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วน CaO/SiO_2 เท่ากับ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัตถุดิบ เท่ากับ 1:10 พบว่าซิลิกาอสัญฐาน ร้อยละ 97.5 ทำปฏิกิริยาได้เร็วกว่าซิลิกาอสัญฐาน ร้อยละ 92.8 เพราะเนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลมากกว่า ซึ่งเป็นประจวบเหมาะที่จะจับคู่ประจุลบของหมู่ไฮดรอกซิลได้

Yanagisawa K. และคณะ³⁷ ได้ศึกษาผลของการเติมยิปซัมต่อการหดตัวของเฟสโทเบอร์โมไรต์ที่อุณหภูมิสูง โดยใช้วัตถุดิบตั้งต้นเป็นทรายควอตซ์ ยิปซัม และ แคลเซียมออกไซด์ และใช้เส้นใยเป็นเยื่อกระดาษ เตรียมแบบผงโทเบอร์โมไรต์และชิ้นงานที่อัดแล้ว ทดลองโดยการเติมยิปซัม ร้อยละ 5 ไฮโดรเทอมัลที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ใช้อัตราส่วน CaO/SiO_2 เท่ากับ 0.8 โดยโมล การเตรียมแบบผงโทเบอร์โมไรต์ นำวัตถุดิบตั้งต้นใส่ในหม้อนึ่งอัดไอบนที่มีการคนสารตลอดเวลาผสมกับน้ำ ส่วนแบบชิ้นงานที่อัดขึ้นรูปนำไปอัดด้วยแรงดัน 40 เมกะพาสคัล จากนั้นชิ้นงานใส่ในหม้อนึ่งอัดไอบนชิ้นงานทั้งสองแบบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากผลการวิเคราะห์เฟสพบว่ายิปซัมสามารถช่วยให้เกิดเฟสโทเบอร์โมไรต์ได้ดีขึ้น และการเตรียมตัวอย่างแบบผงจะเกิดเฟสโทเบอร์โมไรต์ได้ดีกว่า จากผลการวิเคราะห์การหดตัวเมื่อโดนความร้อน พบว่า ชิ้นงานที่เติมยิปซัม ร้อยละ 5 จะหดตัวน้อยกว่าชิ้นงานที่ไม่เติมยิปซัม ดังภาพที่ 2.13



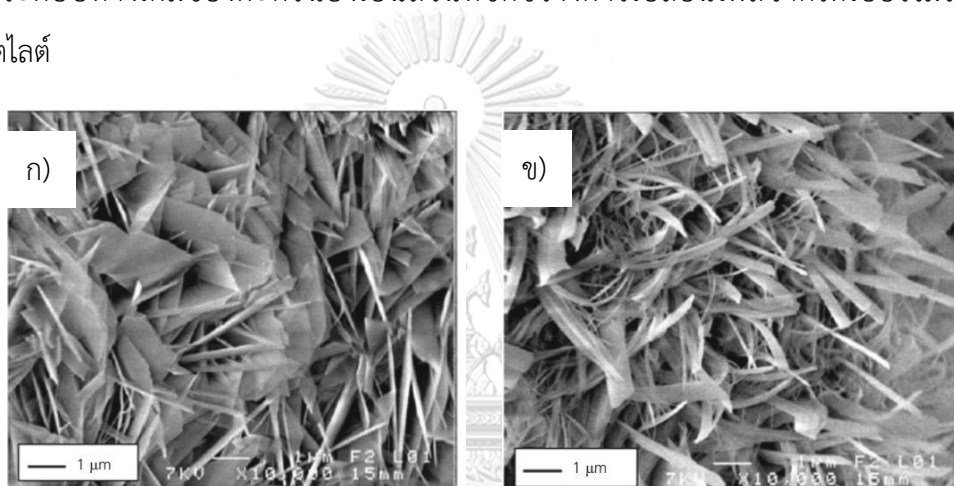
ภาพที่ 2.13 ร้อยละการหดตัวของชิ้นงานที่มีปริมาณยิปซัม ก) ร้อยละ 0 และ ข) ร้อยละ 5³⁷

Pugovkina Y และคณะ²⁰ ได้ศึกษาสมบัติของผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตในท้องตลาด พบว่า ผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตในท้องตลาดที่นำมาทดสอบ ซึ่งมีอุณหภูมิการใช้งานที่อุณหภูมิสูง (ประมาณ 1000 องศาเซลเซียส) จากการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟส พบเฟสโซโนโตไลต์เป็น องค์ประกอบหลักในชิ้นงาน ปริมาณเล็กน้อยแตกต่างกันไป และทดสอบพฤติกรรมทางความร้อนด้วย เทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC) ดังภาพที่ 2.14 พบว่า ที่อุณหภูมิ 333.5 องศาเซลเซียส จะค่อยๆ สูญเสียน้ำออกจากชิ้นงาน ที่อุณหภูมิ 450-700 องศาเซลเซียส สารประกอบ อินทรีย์สลายตัว และที่อุณหภูมิ 805 องศาเซลเซียส โซโนโตไลต์เปลี่ยนเฟสเป็นวอลลาสโตไนต์



ภาพที่ 2.14 พฤติกรรมทางความร้อนของชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกต²⁰

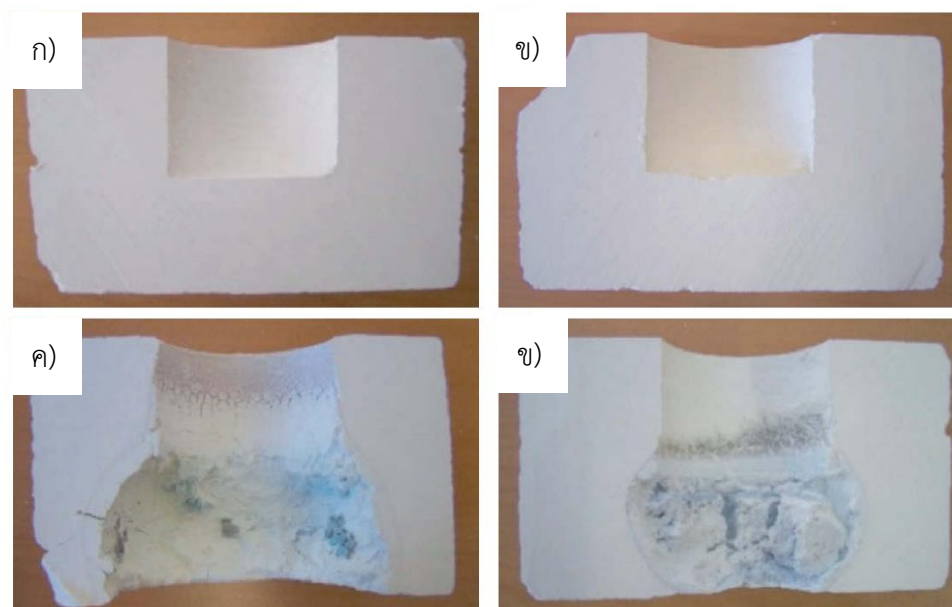
Arabi N. และคณะ³⁸ ได้ศึกษาการเกิดเฟสแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตในการนึ่งอัดไอ โดยใช้ตะกรันจากเตาหลอม แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และควอซต์ ในอัตราส่วนต่างๆ ขึ้นรูปเตรียมชิ้นงานด้วยแรงอัด 20 เมกะพาสคัล จากนั้นนำไปสังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มัล อุณหภูมิ 176 190 และ 204 องศาเซลเซียส ความดัน 1.0 1.5 และ 1.8 เมกะพาสคัล ตามลำดับ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่าอุณหภูมิและความดันในการนึ่งอัดไอสูงขึ้น ความแข็งแรงของชิ้นงานจะสูงขึ้นตาม และมีโอกาสที่จะเกิดการเปลี่ยนเฟสจากโทเบอร์โมไรต์เป็นโซนอโตไลต์ได้ ซึ่งโซนอโตไลต์ที่มีลักษณะเป็นแท่งเข็มนี้จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกตได้ ดังภาพที่ 2.15 และอะลูมินาที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของตะกรันยังเป็นส่วนที่ขัดขวางการเปลี่ยนเฟสจากโทเบอร์โมไรต์เป็นโซนอโตไลต์



ภาพที่ 2.15 โครงสร้างจุลภาคของ ก) โทเบอร์โมไรต์ และ ข) โซนอโตไลต์³⁸

Schlegel E. และคณะ³⁹ ได้ศึกษาการกัดกร่อนของเกลืออัลคาไลน์ต่อแคลเซียมซิลิเกต โดยปกติวัสดุแคลเซียมซิลิเกตที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูงจะไม่ใช้งานในบรรยากาศที่มีอัลคาไลน์สูง งานวิจัยนี้จะทดลองใช้แคลเซียมซิลิเกตครุซิบิล ยี่ห้อ Silcal 1100 ทดลองกับเกลือโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) โพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) และ โพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) เริ่มทดสอบที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิการหลอมของเกลืออัลคาไลน์ จนถึงอุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิสูงสุดที่จะใช้งานวัสดุแคลเซียมซิลิเกต พบว่า มีเพียงโพแทสเซียมคาร์บอเนตเท่านั้นที่เกิดการกัดกร่อนชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกตอย่างรุนแรง เริ่มทำปฏิกิริยากัดกร่อนกับเฟสวอลลาสโตไนต์ที่อุณหภูมิประมาณ 650 องศาเซลเซียส ซึ่งไม่เคยพบในการวิเคราะห์การใช้งานแคลเซียมซิลิเกตในเตาเผาซีเมนต์ ส่วนโพแทสเซียมคลอไรด์และโพแทสเซียมซัลเฟตไม่เกิดการทำปฏิกิริยาใดๆ ดังภาพที่ 2.16 ซึ่งจากผลการสำรวจและทดลองของงานวิจัยนี้ ผลิตภัณฑ์แคลเซียม

ซิลิเกตสามารถใช้เป็นฉนวนกันความร้อนที่อุณหภูมิสูงได้โดยที่ไม่ถูกทำลายจากเกลืออัลคาไลน์ส่วนใหญ่



ภาพที่ 2.16 การกัดกร่อนของชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกต³⁹

ก) KCl ข) K_2SO_4 ค) K_2CO_3 และ ง) $KCl+K_2SO_4+K_2CO_3$

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการขึ้นรูปชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกต โดยออกแบบสูตรจากการกำหนดสัดส่วนของวัตถุดิบตั้งต้นในอัตราส่วนที่ต่างกัน เช่น เถ้าแกลบ ทราบุด แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ยิปซัม จากแบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้ว และปูนซีเมนต์ขาว เป็นต้น เพื่อศึกษาผลของการเติมยิปซัมและผลของการเติมปูนซีเมนต์ขาว อีกทั้งยังมีการใส่วัสดุเสริมแรง เช่น เส้นใยกระดาษยูคาลิปตัส เส้นใยเซรามิก เพื่อช่วยเสริมสร้างความแข็งแรงให้แก่ชิ้นงาน ประกอบกับการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและองค์ประกอบเฟสของวัตถุดิบตั้งต้น ออกแบบวิธีการขึ้นรูปเพื่อให้ได้ชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกตที่มีความหนาแน่นต่ำ เมื่อได้ชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกตจะนำไปทดสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ASTM C533 ได้แก่ ความหนาแน่น ความแข็งแรง การหดตัวหลังเผา การนำความร้อน อีกทั้งทดสอบองค์ประกอบเฟสและโครงสร้างจุลภาค

3.1 วัตถุดิบและสารเคมี เครื่องมือและอุปกรณ์

วัตถุดิบและสารเคมี เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกตแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.1 และ 3.2 มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของวัตถุดิบและสารเคมี

วัตถุดิบและสารเคมี	ชื่อทางการค้า	แหล่งที่มา
เถ้าแกลบ	-	โรงไฟฟ้าพลังงานชีวมวล จังหวัดพิจิตร เอ.ที.ไบโอพาวเวอร์
ทราบุด	CeraSil 325	บริษัท ชิเบลโก้ มิเนอร์ลส์ (ประเทศไทย)
แคลเซียมไฮดรอกไซด์	-	บริษัท วิริยะอินเตอร์เคม จำกัด
ยิปซัมจากแบบพิมพ์ปูน ปลาสเตอร์ใช้แล้ว	-	บริษัท คริสตัล เซรามิก จำกัด
ปูนซีเมนต์ขาว	ปูนซีเมนต์ขาว ตราเสือเดคคอร์	บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน)
เส้นใยกระดาษยูคาลิปตัส	-	-
เส้นใยเซรามิก	Isowool 1430 bulk	Isolite insulating products company

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของเครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องมือและอุปกรณ์	ผู้ผลิต	แบบ/รุ่น
หม้ออบคอปอร์ชเลน	-	-
เครื่องบดละเอียด	-	-
ปีกเกอร์แก้ว	Pyrex	-
ไม้พาย	-	-
เครื่องปั่นน้ำผลไม้	-	-
แบบพิมพ์ซิลิโคนขนาด 5x5x2 เซนติเมตร	-	-
กล่องสำหรับเก็บบ่มชิ้นงาน	-	-
เครื่องกวนสารละลายพร้อมให้ความร้อน	IKA	C-MAG HS7
หม้อนิ่งอัดไอ	Pressure Products Industries (PPI)	-
เตาเผาไฟฟ้า (อุณหภูมิสูงสุด 1250 องศาเซลเซียส)	AMACO	67EFC
ตู้อบไฟฟ้า (อุณหภูมิสูงสุด 300 องศาเซลเซียส)	Memmert	UN-75
เครื่องชั่งน้ำหนักแบบไฟฟ้า (ทศนิยม 3 ตำแหน่ง) ชุดทดสอบอาร์คิมิดีส (Archimedes test equipment)	ALFA MIRAGE	- MDS- 300
เครื่องชั่งน้ำหนักแบบไฟฟ้า (ทศนิยม 2 ตำแหน่ง)	Sartorius	ED3202S
เวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier caliper) (ความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร)	Mitutoyo	-

3.2 การวิเคราะห์ของวัตถุดิบตั้งต้น

ในขั้นตอนการวิเคราะห์วัตถุดิบตั้งต้น มีการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

3.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี โดยวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบตั้งต้น ได้แก่ เถ้าแกลบ ทรายบด แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ยิปซัมจากแบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้ว และปูนซีเมนต์ขาว ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray fluorescence) ผลิตโดยบริษัท Philips รุ่น PW2400

3.2.2 โครงสร้างจุลภาค วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของวัตถุดิบที่ให้ซิลิกา ได้แก่ เถ้าแกลบ และ ทรายบด ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลิตโดยบริษัท JEOL รุ่น JSM-6480 LV โดยเตรียมชิ้นงานตัวอย่างนำไปติดเทปคาร์บอนและเคลือบด้วยทองแล้วนำไปวิเคราะห์ดูโครงสร้างจุลภาค

3.2.3 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาค โดยวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบตั้งต้น ได้แก่ เถ้าแกลบ ทรายบด แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ยิปซัมจากแบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้ว และปูนซีเมนต์ขาว วัตถุดิบข้างต้นที่กระจายตัวในน้ำกลั่นขณะที่ทำการวิเคราะห์ โดยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Dynamic laser light scattering techniques รุ่น Mastersizer2000 ผลิตโดยบริษัท Malvern Instruments

3.3 การเตรียมวัตถุดิบและการออกแบบสูตรส่วนผสม

ในการเตรียมวัตถุดิบและการออกแบบสูตรส่วนผสม มีรายละเอียดดังนี้

3.3.1 การเตรียมวัตถุดิบ นำวัตถุดิบตั้งต้น ได้แก่ เถ้าแกลบ ทรายบด มาบดด้วยน้ำ อัตราส่วนน้ำต่อสารตั้งต้น คือ 1:1 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 60 นาที บดโดยใช้หม้อบดปอร์ซเลน ลูกบดอะลูมินา ด้วยเครื่องบดละเอียด (high speed ball mill) ดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 เครื่องบดละเอียด

3.3.2 การออกแบบส่วนผสม ในการออกแบบสูตรการเตรียมชิ้นงานเคลือบซีลิกเกต ได้ ออกแบบสูตรจากการคำนวณองค์ประกอบทางเคมีจากตารางที่ 4.1 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบตั้งต้น ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบสูตรส่วนผสมออกเป็น 2 กลุ่ม จำแนกตามวัตถุดิบหลักที่ให้ซิลิกา ได้แก่ กลุ่มที่ 1 แก้วแอลบ กลุ่มที่ 2 ทราาย โดยที่กำหนดสัดส่วน CaO/SiO_2 เท่ากับ 1 โดยโมล ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดของสูตรส่วนผสม

วัตถุดิบ	กลุ่มที่ 1 แก้วแอลบ	กลุ่มที่ 2 ทราาย
แก้วแอลบ	40-50 wt%	-
ทราายบดละเอียด	-	40-50 wt%
แคลเซียมไฮดรอกไซด์	40-50 wt%	40-50 wt%
ยิปซัม	0, 1, 3, 10 wt%	0, 1, 3, 10 wt%
ปูนซีเมนต์ขาว	0, 10 wt%	0, 10 wt%
เส้นใยกระดาษยูคาลิปตัส	2.5 wt%	2.5 wt%
เส้นใยเซรามิก	2.5 wt%	2.5 wt%
อัตราส่วนน้ำต่อสารตั้งต้น	5:1	5:1

1) สูตรส่วนผสมกลุ่มที่ 1 กลุ่มเถ้าแกลบ เป็นสูตรที่ประกอบด้วย เถ้าแกลบ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และยิปซัม แสดงในชื่อสูตร RHA0 RHA1 RHA3 RHA10 ดังตารางที่ 3.4 เพื่อศึกษาผลของการเติมปูนปลาสเตอร์ตั้งแต่ ร้อยละ 0 1 3 และ 10 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 3.4 รายละเอียดของสูตรส่วนผสมสูตรเถ้าแกลบ

วัตถุดิบ	กลุ่มที่ 1 เถ้าแกลบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	RHA0	RHA1	RHA3	RHA10
เถ้าแกลบ	45.09	44.64	43.74	40.58
แคลเซียมไฮดรอกไซด์	54.91	54.36	53.26	49.42
ยิปซัม	0	1	3	10

2) สูตรส่วนผสมกลุ่มที่ 2 กลุ่มทรายบด เป็นสูตรที่ประกอบด้วย ทรายบด แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และยิปซัม แสดงในชื่อสูตร SAND0 SAND1 SAND3 SAND10 ดังตารางที่ 3.5 เพื่อศึกษาผลของการเติมปูนปลาสเตอร์ตั้งแต่ ร้อยละ 0 1 3 และ 10 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 3.5 รายละเอียดของสูตรส่วนผสมสูตรทรายบด

วัตถุดิบ	กลุ่มที่ 2 ทรายบด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	SAND0	SAND1	SAND3	SAND10
ทรายบด	44.12	43.68	42.80	39.71
แคลเซียมไฮดรอกไซด์	55.88	55.32	54.20	50.29
ยิปซัม	0	1	3	10

3) ทดลองเพิ่มเติม สูตรส่วนผสมใส่สารตัวเติมปูนซีเมนต์ขาว เป็นสูตรที่เปลี่ยนจากการเติมยิปซัมเป็นปูนซีเมนต์ขาว ทั้งในกลุ่มเถ้าแกลบและทรายบด แสดงในชื่อสูตร RHA10WC และ SAND10WC ดังตารางที่ 3.6 เพื่อศึกษาผลของการเติมปูนซีเมนต์ขาว ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 3.6 รายละเอียดของสูตรที่ใส่สารตัวเติมปูนซีเมนต์ขาว

วัตถุดิบ	กลุ่มที่ 3 ทดลองเพิ่มเติม (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	
	RHA10WC	SAND10WC
เถ้าแกลบ	43.76	-
ทรายบด	-	42.88
แคลเซียมไฮดรอกไซด์	46.24	47.12
ปูนซีเมนต์ขาว	10	10

3.4 การขึ้นรูปชิ้นงาน การอบชิ้นงานในหม้อนึ่งอัดไอ และอบแห้งชิ้นงาน

3.4.1 การขึ้นรูปชิ้นงาน มีรายละเอียด ดังนี้

- 1) บดผสมวัตถุดิบตั้งต้นตามอัตราส่วนแต่ละสูตรกับน้ำเพื่อให้ได้อัตราส่วนน้ำต่อวัตถุดิบ เท่ากับ 5 โดยน้ำหนัก ปั่นผสมเป็นเวลา 30 นาที
- 2) เติมเส้นใยกระดาษยูคาลิปตัส ร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนัก และ เส้นใยเซรามิก ร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนัก
- 3) ปั่นผสมพร้อมให้ความร้อน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง บนเครื่องกวนสารละลายพร้อมให้ความร้อน
- 4) หล่อในแม่พิมพ์พลาสติกและบ่มไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 วัน

3.4.2 การอบชิ้นงานในหม้อนึ่งอัดไอ นำชิ้นงานในแต่ละสูตรไปอบในหม้อนึ่งอัดไอที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.4.3 การอบแห้งชิ้นงาน ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.4.4 การทดลองเพิ่มเติม โดยการเลือกสูตรชิ้นงานที่ดีที่สุดมาทดสอบเพิ่มเวลาในการนึ่งอัดไอเป็นเวลา 10 และ 20 ชั่วโมง และทดลองใส่สารตัวเติมอื่นๆ เช่น ปูนซีเมนต์ขาว

3.5 การทดสอบสมบัติของชิ้นงาน

ชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกตในแต่ละสูตรมีการทดสอบองค์ประกอบเฟส โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่น ความแข็งแรง การหดตัวหลังเผาการนำความร้อน จำนวนตัวอย่างทดสอบอย่างน้อย 4 ตัวอย่าง โดยการทดสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกตอ้างอิงตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแคลเซียมซิลิเกต ASTM C533 มีการทดสอบดังนี้

3.5.1 ความหนาแน่น สามารถทดสอบด้วยวิธีดังนี้

- 1.) นำชิ้นงานไปอบแห้งเพื่อไล่ความชื้นในชิ้นงาน อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก (m) หน่วยเป็นกรัม
- 2.) วัดขนาดชิ้นงาน กว้าง x ยาว x สูง คำนวณปริมาตรชิ้นงาน (v) หน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร
- 3.) แทนค่าในสมการ (3.1) เพื่อคำนวณค่าความหนาแน่น

$$D = \frac{m}{v} \quad (3.1)$$

3.5.2 ความแข็งแรงต่อการดัดโค้ง ทดสอบความแข็งแรงต่อการดัดโค้งด้วยเครื่องทดสอบแรงดัดโค้งแบบ 3 จุด มีรายละเอียดการทดสอบ ดังนี้

- 1) วัดขนาดความกว้าง (b) และ ความหนาของชิ้นงาน (d) หน่วยเป็นเซนติเมตร
- 2) ตั้งค่าระยะห่างระหว่างจุดรองรับที่ปลายทั้งสองด้าน (L) หน่วยเป็นเซนติเมตร
- 3) ทดสอบชิ้นงานด้วยเครื่องทดสอบแรงดัดโค้งแบบ 3 จุด บันทึกค่าแรงกด (P) ในหน่วยกิโลกรัม
- 4) แทนค่าในสมการ (3.2) เพื่อคำนวณค่าโมดูลัสของการแตกหัก (MOR; Modulus of rupture)

$$MOR = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3.2)$$

3.5.3 ค่าการหดตัวหลังเผา วัดการหดตัวเชิงเส้นหลังเผาของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 649 และ 927 องศาเซลเซียส ยืนไฟเป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยใช้เวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์ ที่มีความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร มีรายละเอียดการทดสอบดังนี้

- 1) วัดความยาวของชิ้นงานก่อนการเผา (l_0) หน่วยเป็นเซนติเมตร
- 2) วัดความยาวของชิ้นงานหลังเผา (l_1) หน่วยเป็นเซนติเมตร
- 3) แทนค่าในสมการที่ 3.3 เพื่อหาร้อยละของการหดตัวหลังเผาของชิ้นงาน (firing shrinkage, %)

$$\text{firing shrinkage (\%)} = \frac{l_0 - l_1}{l_0} \times 100 \quad (3.3)$$

3.5.4 ค่าการนำความร้อน วัดค่าการนำความร้อนของชิ้นงานด้วยเทคนิคฮอตดิสก์ (Hot-disk method) ของชิ้นงาน ผลิตโดยบริษัท Linseis รุ่น THB-1 มีรายละเอียดการทดสอบ ดังนี้

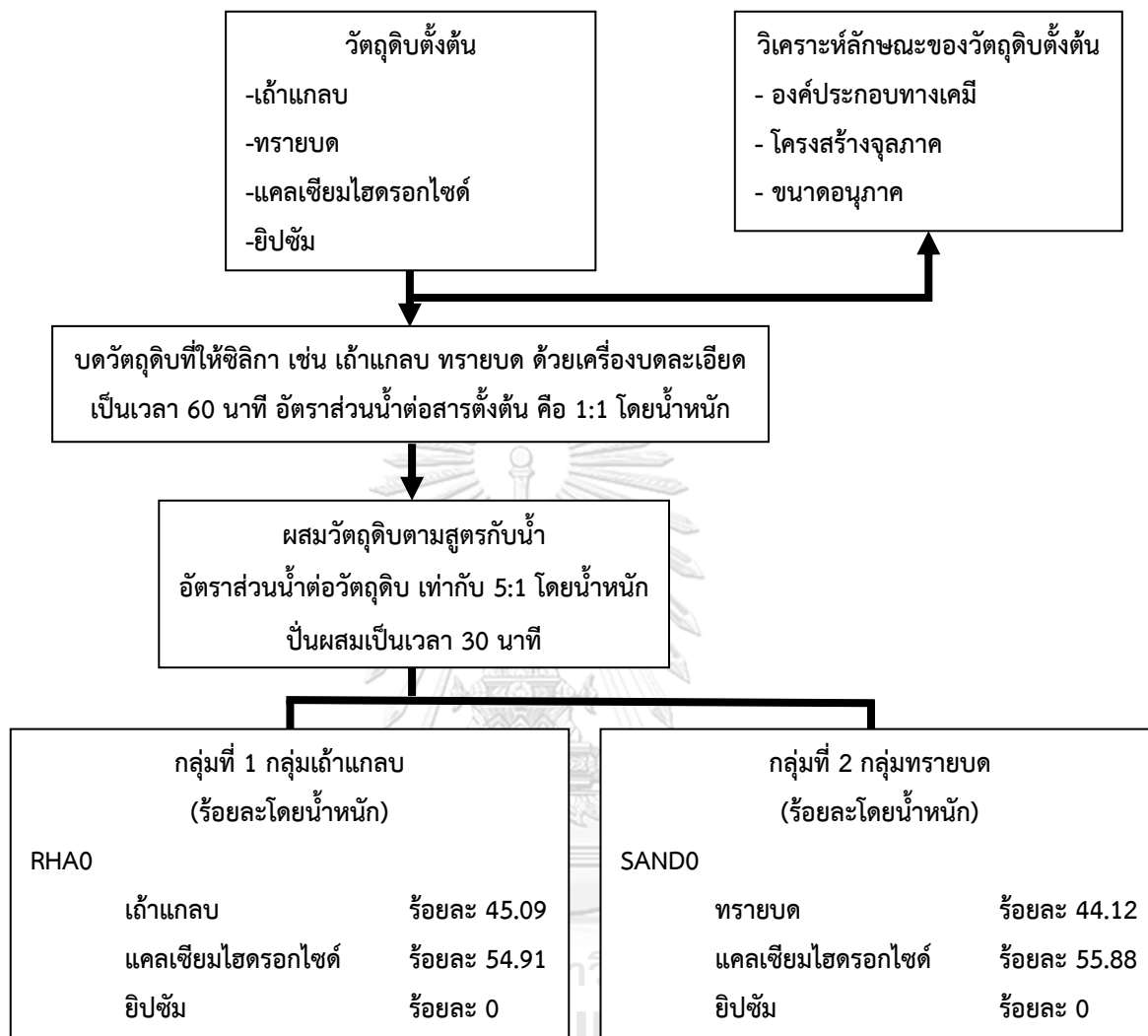
- 1) ชิ้นรูปชิ้นงาน ขนาด 5X5x2 เซนติเมตร จำนวนสุตรละ 2 ชิ้น

- 2) วิเคราะห์การนำความร้อนโดยให้ชิ้นงานทั้งสองชิ้นประกบกันให้สนิท มีโพรบ (Probe) วัดค่า คั่นอยู่ตรงกลาง
- 3) บันทึกค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) หน่วยวัตต์ต่อเมตรเคลวิน

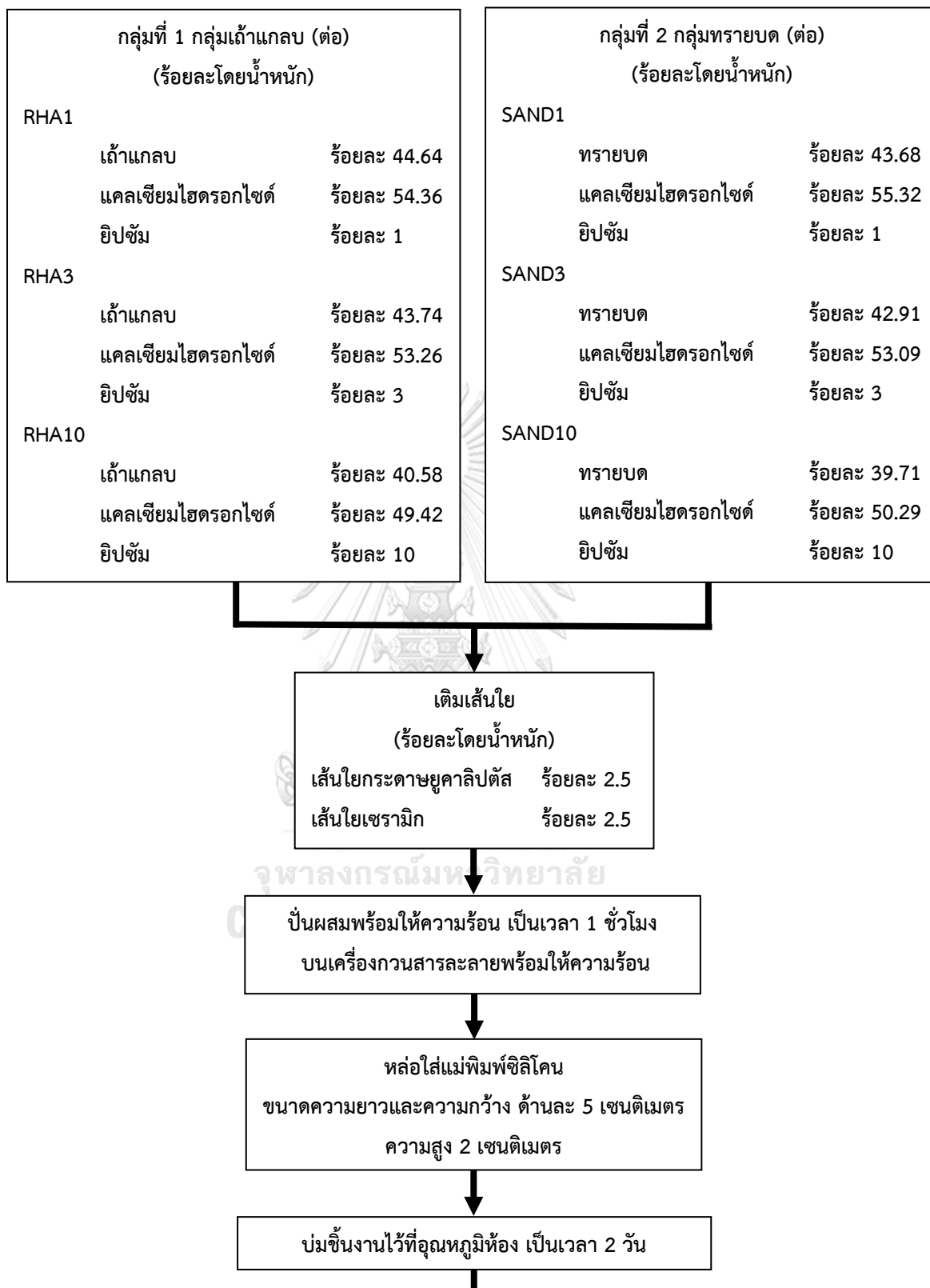
3.5.5 องค์ประกอบเฟส การวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) ของชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกตในแต่ละสูตร ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer) ผลิตโดยบริษัท Bruker รุ่น D8 Advanced โดยใช้ $\text{Cu-K}\alpha$ radiation ช่วง 2-theta เท่ากับ $5\text{-}80$ องศา โดยเตรียมตัวอย่างเป็นผงบดละเอียดด้วยโกร่ง ก่อนนำไปวิเคราะห์

3.5.6 โครงสร้างจุลภาค วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลิตโดยบริษัท JEOL รุ่น JSM-6480 LV ดังภาพที่ 3.10 โดยเตรียมชิ้นงานตัวอย่างไปติดเทปคาร์บอนและเคลือบด้วยทองแล้วนำไปวิเคราะห์ดูโครงสร้างจุลภาคภายในชิ้นงานที่กำลังขยาย $5000\times$ และ $10000\times$

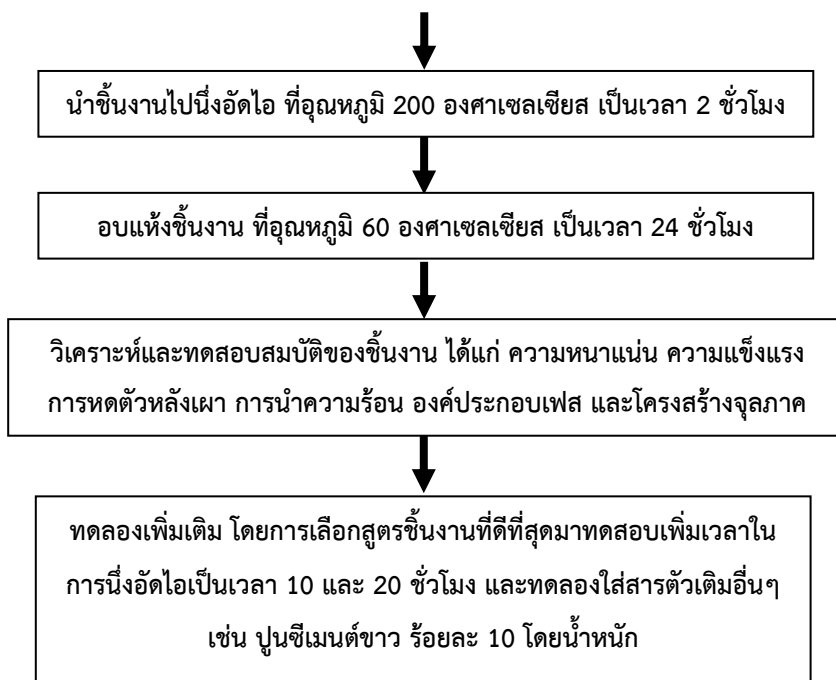
3.6 แผนผังการดำเนินการวิจัย



ภาพที่ 3.1 แผนผังการดำเนินการวิจัย



ภาพที่ 3.3 แผนผังการดำเนินการวิจัย (ต่อ)



ภาพที่ 3.3 แผนผังการดำเนินการวิจัย (ต่อ)



บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบตั้งต้น

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบตั้งต้น ได้แก่ เถ้าแกลบ ทรายบด แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ยิปซัมจากปูนปลาสเตอร์ใช้แล้ว ปูนซีเมนต์ขาว และเส้นใยเซรามิกที่ใช้ในการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า วัตถุดิบที่ให้ซิลิกา เช่น เถ้าแกลบมีองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วย ซิลิกา (SiO_2) ร้อยละ 95.79 เป็นหลัก ยังมีองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ เล็กน้อย ได้แก่ โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ร้อยละ 0.16 โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) ร้อยละ 2.58 แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ร้อยละ 0.35 แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 0.58 อะลูมินา (Al_2O_3) ร้อยละ 0.08 เฟอริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ร้อยละ 0.05 และอื่นๆ อีกร้อยละ 0.41 และทรายบดมีองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วย ซิลิกา (SiO_2) ร้อยละ 99.62 เป็นหลัก ส่วนวัตถุดิบที่ให้แคลเซียมออกไซด์ คือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์มีองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วย แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 73.41 เป็นหลัก ส่วนยิปซัมจากปูนปลาสเตอร์ใช้แล้วมีองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วย แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 31.15 และและซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ร้อยละ 45.42 เป็นองค์ประกอบหลัก ปูนซีเมนต์ขาวมีองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วย แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 81.23 และซิลิกา (SiO_2) ร้อยละ 11.62 อีกทั้งยังประกอบด้วยซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ร้อยละ 4.02 และอะลูมินา (Al_2O_3) ร้อยละ 1.83 อีกด้วย

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ ทรายบด แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ยิปซัมจากปูนปลาสเตอร์ใช้แล้ว ปูนซีเมนต์ขาว และเส้นใยเซรามิก

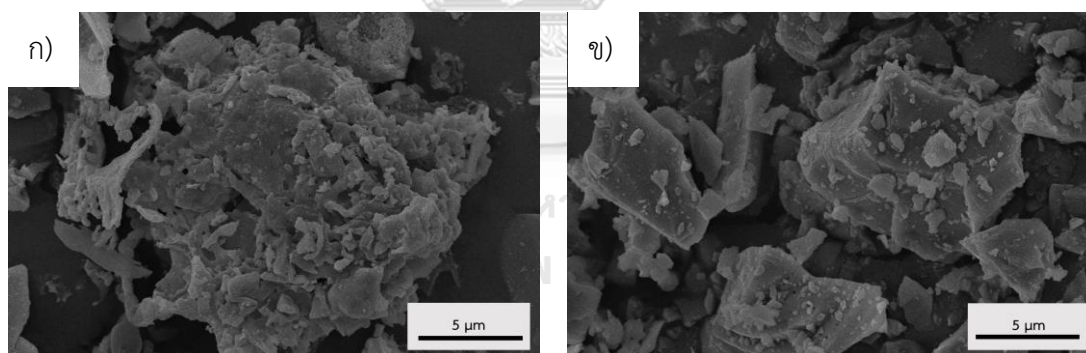
วัตถุดิบ	องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)									
	SiO_2	Na_2O	K_2O	MgO	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	SO_3	ZrO_2	อื่นๆ
เถ้าแกลบ	95.79	0.16	2.58	0.35	0.58	0.08	0.05	-	-	0.41
ทรายบด	99.62	-	-	0.02	0.15	0.06	0.07	-	-	0.08
แคลเซียมไฮดรอกไซด์	2.06	0.12	0.03	0.51	73.41	0.27	0.03	-	-	-
ยิปซัมจากปูนปลาสเตอร์ใช้แล้ว	2.18	0.74	0.11	-	31.15	0.13	0.09	45.42	-	-

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) องค์ประกอบทางเคมีของแก้วเคลือบ ทราายบด แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ปูนปลาสเตอร์ ใช้แล้ว ปูนซีเมนต์ขาว และเส้นใยเซรามิก

วัตถุดิบ	องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)									
	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	ZrO ₂	อื่นๆ
ปูนซีเมนต์ขาว	11.62	-	0.14	0.90	81.23	1.83	0.26	4.02	-	-
เส้นใยเซรามิก	49	-	-	-	-	35.4	-	-	15.2	0.4

4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของวัตถุดิบตั้งต้น

จากการนำวัตถุดิบตั้งต้นที่ให้ซิลิกา ได้แก่ แก้วเคลือบและทราายบด ไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า โครงสร้างจุลภาคของแก้วเคลือบมีลักษณะพรุน ไม่มีรูปร่างที่ชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 4.1 ก) ส่วนทราายบด พบว่า โครงสร้างจุลภาคของทราายบดมีลักษณะเป็นผลึก มีรูพรุนน้อยมาก ดังแสดงในภาพที่ 4.1 ข)



ภาพที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของวัตถุดิบตั้งต้น ก) แก้วเคลือบ และ ข) ทราายบด

4.3 ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบตั้งต้น

จากผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบตั้งต้น ได้แก่ เถ้าแกลบ ทรายบด แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ยิปซัมจากปูนปลาสเตอร์ใช้แล้ว และปูนซีเมนต์ขาว ด้วยเครื่อง Dynamic laser light scattering techniques พบว่า เถ้าแกลบมีขนาดอนุภาค 34 ไมโครเมตร ทรายบดมีขนาดอนุภาค 12 ไมโครเมตร แคลเซียมไฮดรอกไซด์มีขนาดอนุภาค 1136 ไมโครเมตร ยิปซัมมีขนาดอนุภาค 769 ไมโครเมตร ปูนซีเมนต์ขาวมีขนาดอนุภาค 34 ไมโครเมตร และหลังบดวัตถุดิบที่ให้ซิลิกาเป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่า เถ้าแกลบมีขนาดอนุภาค 7 ไมโครเมตร และทรายบดมีขนาดอนุภาค 5 ไมโครเมตร นอกจากนี้ยังนำแคลเซียมซิลิเกตสเลอร์รี่ทั้ง 2 กลุ่มที่ผสมวัตถุดิบทั้งหมดแล้ว นำมาวัดขนาดอนุภาค พบว่า ทั้ง 2 กลุ่มมีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกัน กลุ่มเถ้าแกลบมีขนาดอนุภาค 8 ไมโครเมตร และกลุ่มทรายบดมีขนาดอนุภาค 9 ไมโครเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบ

วัตถุดิบ	ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)
เถ้าแกลบ	34
ทรายบด	12
แคลเซียมไฮดรอกไซด์	1136
ยิปซัม	769
ปูนซีเมนต์ขาว	890
เถ้าแกลบหลังการบด 1 ชั่วโมง	7
ทรายหลังการบด 1 ชั่วโมง	5
แคลเซียมซิลิเกตสเลอร์รี่กลุ่มเถ้าแกลบ	8
แคลเซียมซิลิเกตสเลอร์รี่กลุ่มทรายบด	9

4.4 ผลการวิเคราะห์และทดสอบผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตตามท้องตลาด

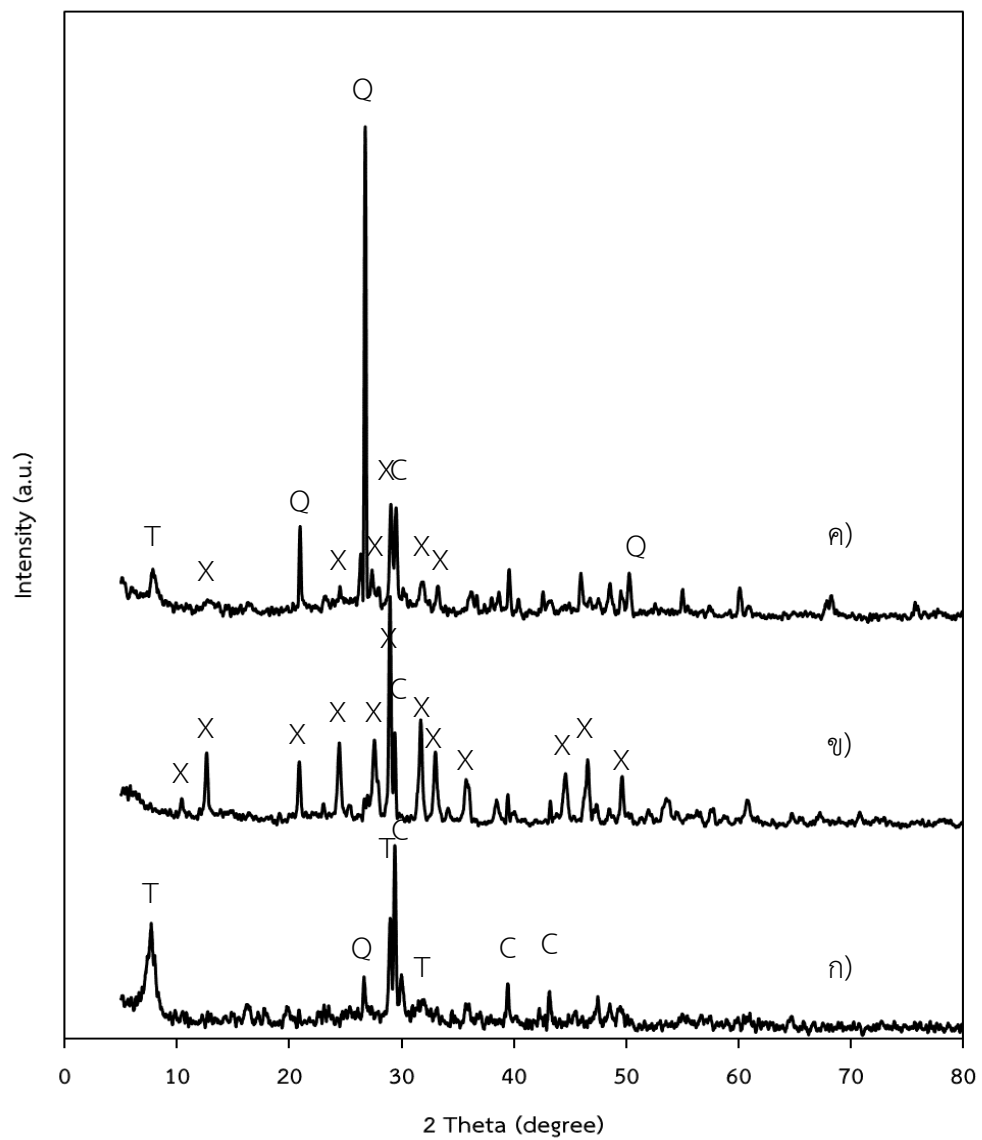
จากนำผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตที่หาได้ตามท้องตลาดมาวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ ซึ่งได้แก่ยี่ห้อ MIG Silcal และ Centralwool

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตที่หาได้ตามท้องตลาด พบว่า ยี่ห้อ MIG พบเฟสโทเบอร์โมไรต์ ควอซต์ และแคลไซต์ ดังภาพที่ 4.2 ก) ยี่ห้อ Silcal พบเฟสโซนอตไลต์และแคลไซต์เป็นองค์ประกอบ ดังภาพที่ 4.2 ข) และยี่ห้อ Centralwool พบเฟสโทเบอร์โมไรต์ โซนอตไลต์ ควอซต์ และแคลไซต์เป็นองค์ประกอบ ดังภาพที่ 4.2 ค)

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตที่หาได้ตามท้องตลาด พบว่า ยี่ห้อ MIG ผลิตภัณฑ์มีลักษณะเป็นแท่ง ดังภาพที่ 4.3 ก) ส่วนยี่ห้อ Silcal ผลิตภัณฑ์ของโซนอตไลท์มีลักษณะเป็นแท่งเข็มชัดเจน ดังภาพที่ 4.3 ข) และยี่ห้อ Centralwool ผลิตภัณฑ์และโซนอตไลท์มีลักษณะเป็นแท่งเข็มขนาดเล็กคล้ายกัน เกิดอยู่ปะปนกัน ดังภาพที่ 4.3 ค) จะเห็นได้ว่าทั้งโทเบอร์โมไรต์และโซนอตไลท์ที่พบในผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตที่หาได้ตามท้องตลาดจะมีลักษณะเป็นแท่งที่คล้ายกัน

ผลการทดสอบการหดตัวหลังเผาของผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตที่หาได้ตามท้องตลาด พบว่า ทั้ง 3 ยี่ห้อ สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำ (649 องศาเซลเซียส) ซึ่งค่าการหดตัวหลังเผาไม่เกินร้อยละ 2 ตามมาตรฐาน ASTM C533 ส่วนที่อุณหภูมิสูง 927 องศาเซลเซียส พบว่า ยี่ห้อ MIG มีค่าการหดตัวหลังเผาสูงที่สุด คือ ร้อยละ 45.76 ส่วนยี่ห้อ Silcal และ Centralwool มีค่าการหดตัวหลังเผาไม่เกินร้อยละ 2 คือ ร้อยละ 0.67 และ 1.66 ตามลำดับ เป็นแคลเซียมซิลิเกตชนิดที่ 2 สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูง ดังตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.4

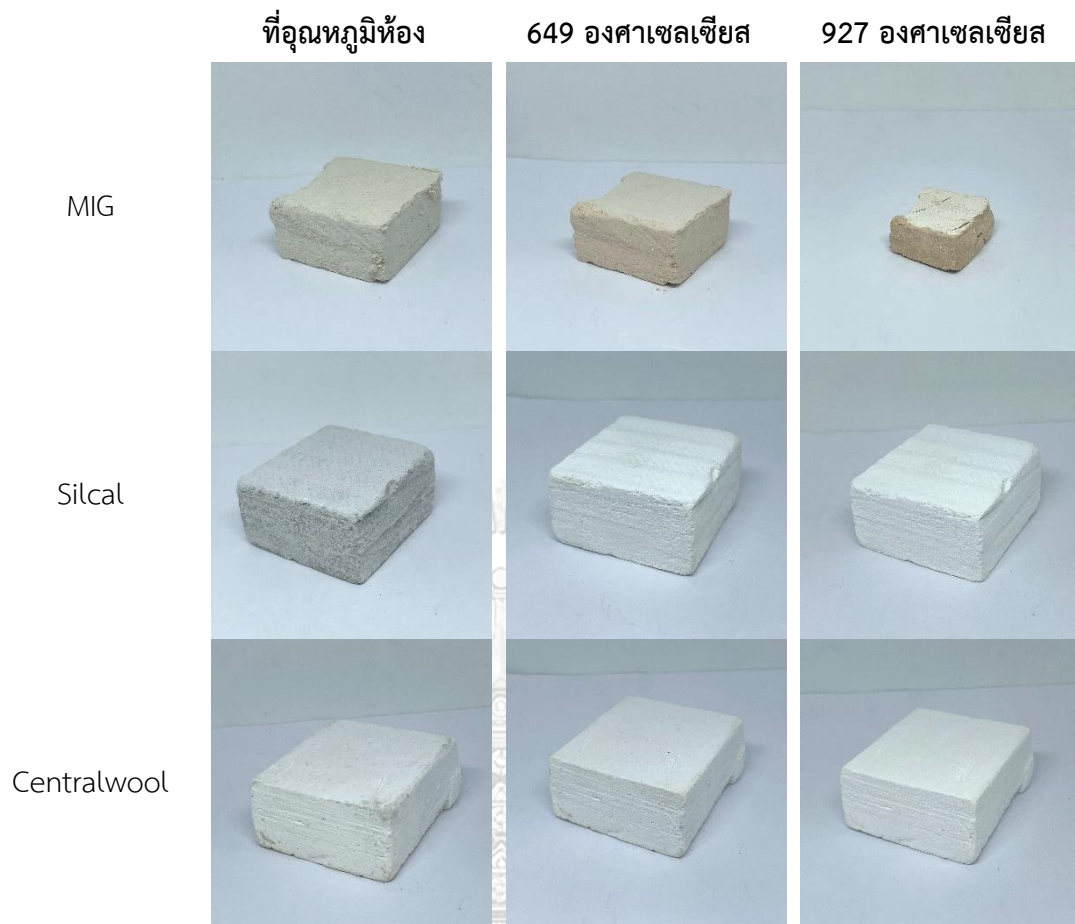
จากการวิเคราะห์ พบว่า ผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตที่มีเฟสโซนอตไลท์เป็นองค์ประกอบจะทำให้ชิ้นงานมีค่าการหดตัวหลังเผาน้อยกว่าชิ้นงานที่มีเฟสโทเบอร์โมไรต์ และใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิสูง (927 องศาเซลเซียส)



ภาพที่ 4.2 การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบเฟสของผลิตภัณฑ์แผ่นแคลเซียมซิลิเกตตามท้องตลาด

ก) MIG ข) Silcal และ ค) Centralwool

(T=Tobermorite X=Xonotlite C=Calcite Q=Quartz)



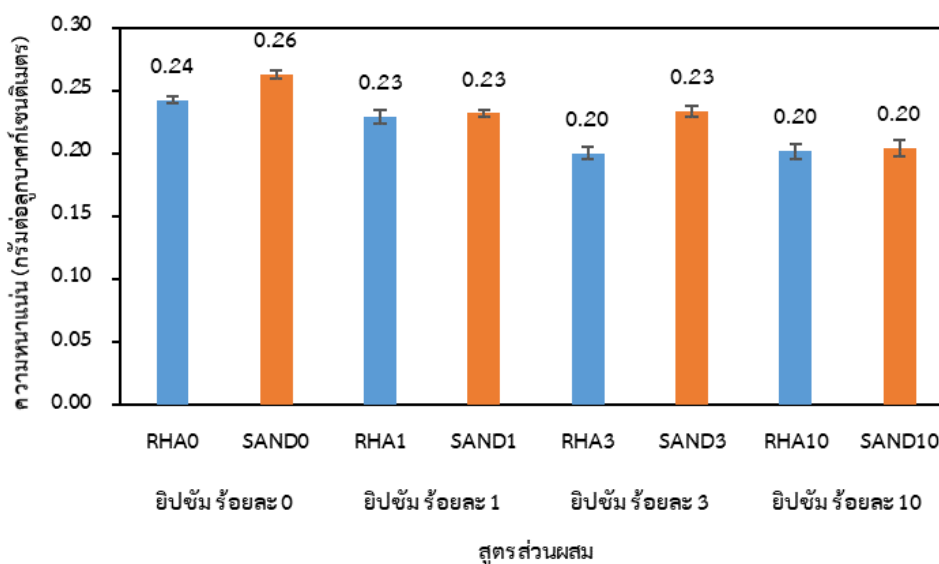
ภาพที่ 4.4 ชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกตตามห้องตลาดที่อุณหภูมิต่างๆ

4.5 ผลของการเติมยิปซัมในกลุ่มที่ 1 กลุ่มเถ้าแกลบ และกลุ่มที่ 2 กลุ่มทรายบด

การศึกษาผลของการเติมยิปซัมในกลุ่มที่ 1 กลุ่มเถ้าแกลบและกลุ่มที่ 2 กลุ่มทรายบด ทดลอง โดยการเติมยิปซัมในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ ร้อยละ 0 1 3 และ 10 ตามลำดับ อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

4.5.1 ความหนาแน่น

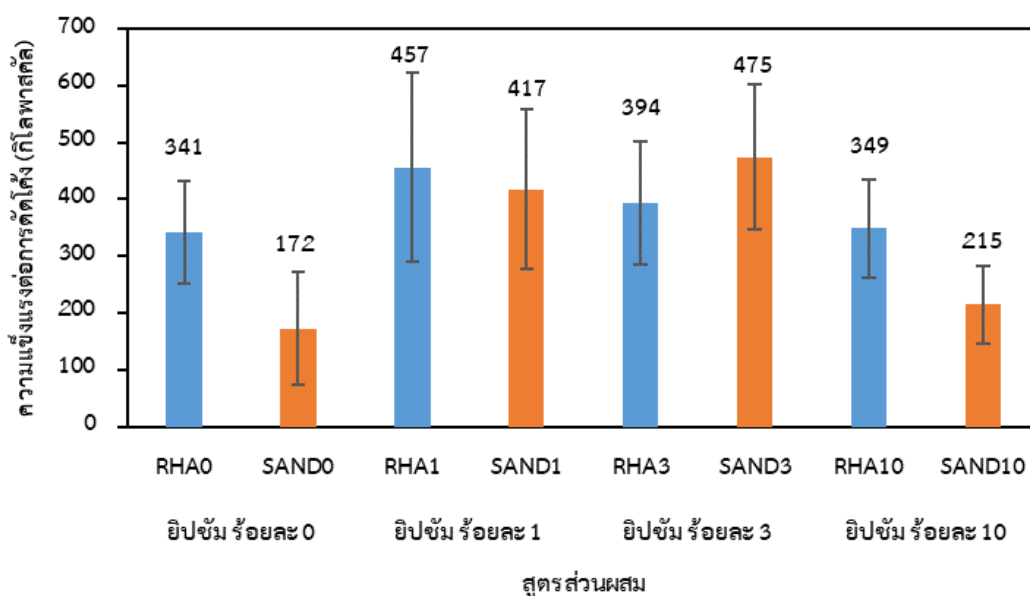
การทดสอบความหนาแน่นของชิ้นงาน คำนวณค่าความหนาแน่นจากสมการที่ 3.1 และจาก ภาพที่ 4.5 แสดงความหนาแน่นของชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกตกลุ่มที่ 1 กลุ่มเถ้าแกลบ และกลุ่มที่ 2 กลุ่มทรายบด ทดลองโดยการเติมยิปซัมในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ ร้อยละ 0 1 3 และ 10 ตามลำดับ อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่า ความหนาแน่นของ ชิ้นงานในสูตร RHA0 และ SAND0 ที่ไม่มีการเติมยิปซัมมีความหนาแน่นสูงกว่าสูตรอื่นๆ ในกลุ่ม เดียวกัน และชิ้นงานมีความหนาแน่นลดลงตามปริมาณของยิปซัมที่เพิ่มขึ้น และเมื่อปริมาณยิปซัมมี มากเกินพอ เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์เฟส ดังภาพที่ 4.12 ในสูตร RHA3 และ RHA10 ความหนาแน่นของชิ้นงานมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากการเติมยิปซัมช่วยเร่งการเกิดเฟสโทเบอร์โมไรต์ ที่มีลักษณะเป็นแท่ง มีรูพรุนในโครงสร้างมาก ดังภาพที่ 4.14 จึงเป็นสาเหตุให้ชิ้นงานมีความหนาแน่น ต่ำลง และเมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นของชิ้นงานในกลุ่มที่ 1 เถ้าแกลบ และ กลุ่มที่ 2 ทรายบด พบว่า กลุ่มเถ้าแกลบมีความหนาแน่นโดยรวมต่ำกว่ากลุ่มทรายบด เนื่องจากเถ้าแกลบเป็นซิลิกา อสัณฐานจึงทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าทรายบดที่เป็นซิลิกาผลึก^{7,26,40}



ภาพที่ 4.5 ความหนาแน่นของชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกตกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

4.5.2 ความแข็งแรงต่อการตัดโค้ง

การทดสอบความแข็งแรงต่อการตัดโค้งของชิ้นงาน คำนวณจากสมการที่ 3.2 และจากภาพที่ 4.6 แสดงความแข็งแรงต่อการตัดโค้งของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 กลุ่มแก้วและกลุ่มที่ 2 ทราวยบดทดลองโดยการเติมยิปซัมในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ ร้อยละ 0 1 3 และ 10 ตามลำดับ อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่า ค่าความแข็งแรงต่อการตัดโค้งของชิ้นงานทั้งกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 มีค่าขึ้นอยู่กับเกิดการโทเบอร์โมไรต์และลักษณะโครงสร้างจุลภาค จะเห็นได้จากแนวโน้มของค่าความแข็งแรงต่อการตัดโค้งจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเติมยิปซัมเข้าไปเพื่อช่วยในการเกิดเฟสโทเบอร์โมไรต์ เมื่อพิจารณาประกอบกับผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบเฟส เปรียบเทียบระหว่าง RHA0 กับ RHA1 และ SAND0 และ SAND1 ดังภาพที่ 4.12 และ ภาพที่ 4.13 พีคของเฟสโทเบอร์โมไรต์สูงขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเติมยิปซัม ร้อยละ 1 และค่าความแข็งแรงจะสูงขึ้นจนถึงจุดๆหนึ่งจึงลดต่ำลง เนื่องจากการเติมยิปซัมส่งผลถึงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโทเบอร์โมไรต์ในชิ้นงาน ดังภาพที่ 4.14 และ ภาพที่ 4.15 จึงส่งผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงานด้วย³¹ เปรียบเทียบผลของ RHA0 และ SAND0 ที่ไม่มีการเติมยิปซัม พบว่า ความแข็งแรงของสูตร RHA0 ที่ใช้แก้วกลายเป็นแหล่งซิลิกา มีค่าสูงกว่าสูตร SAND0 ที่ใช้ทรายบดเป็นแหล่งซิลิกา เนื่องจากแก้วกลบทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าทรายบดจึงเกิดเฟสโทเบอร์โมไรต์ที่มีลักษณะเป็นแท่ง (Lath-like crystal) ได้มากกว่า ดังภาพที่ 4.14 ก) และ ภาพที่ 4.15 ก)

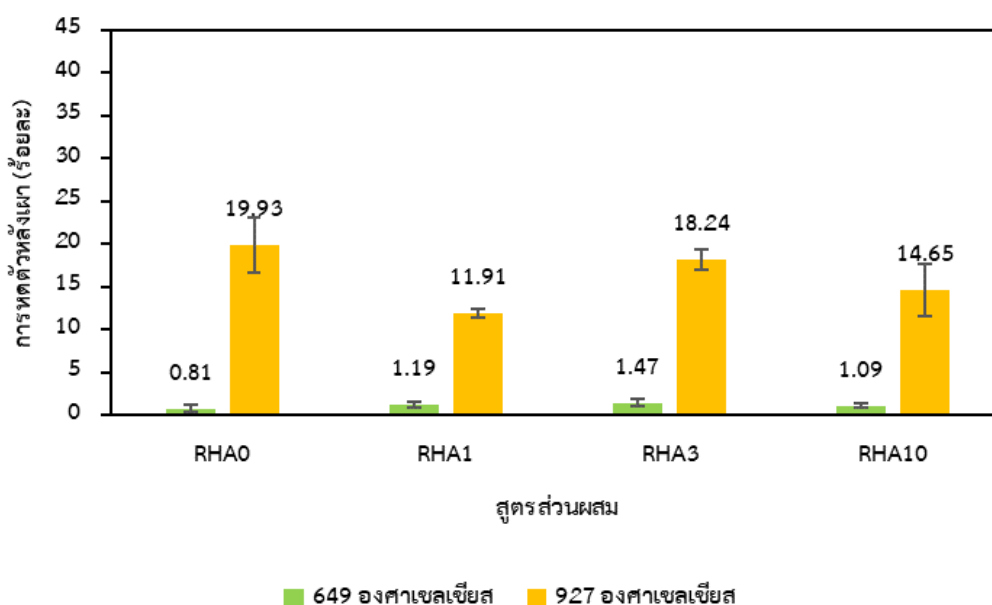


ภาพที่ 4.6 ความแข็งแรงต่อการตัดโค้งของชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกตกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

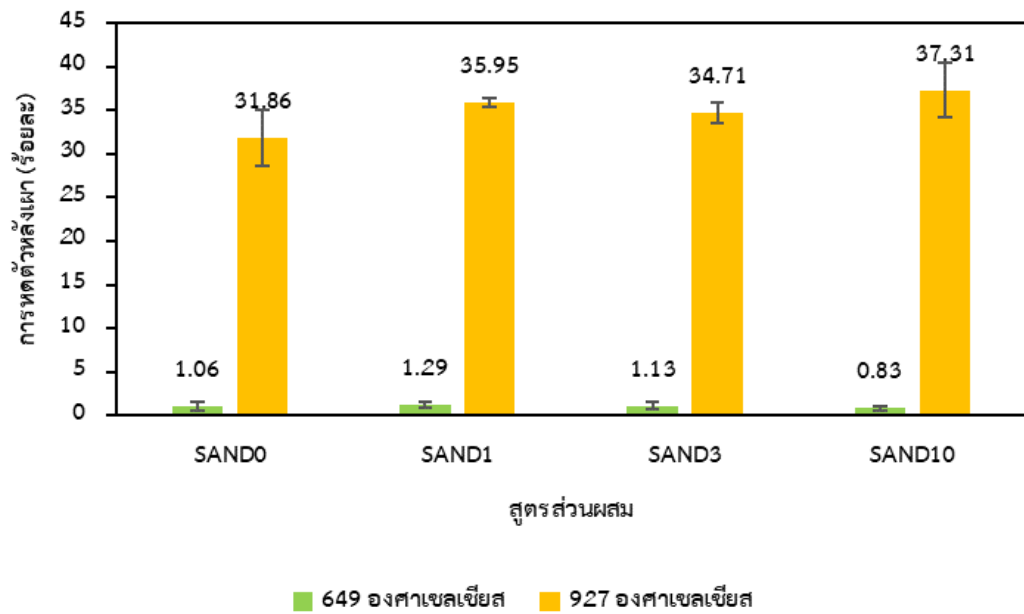
4.5.3 การหัดตัวหลังเผาของชิ้นงาน

การทดสอบการหัดตัวหลังเผาของชิ้นงาน คำนวณเป็นร้อยละของการหัดตัวเชิงเส้นจากสมการที่ 3.3 และจากภาพที่ 4.7 และ ภาพที่ 4.8 แสดงการหัดตัวหลังเผาของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 กลุ่มแก้วกลมและกลุ่มที่ 2 ทราวยบด โดยการเติมยิปซัมในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ ร้อยละ 0 1 3 และ 10 ตามลำดับ อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าทั้งสองกลุ่มที่ค่าการหัดตัวหลังเผาที่ 649 องศาเซลเซียส ใกล้เคียงกัน และไม่เกินตามมาตรฐาน ASTM C533 ที่กำหนดให้ค่าการหัดตัวหลังเผาไม่เกิน ร้อยละ 2 เป็นแคลเซียมซิลิเกตชนิดที่ 1 และเมื่อพิจารณาการหัดตัวหลังเผาที่ 927 องศาเซลเซียส ในกลุ่มที่ 1 กลุ่มแก้วกลม เมื่อปริมาณยิปซัมเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าการหัดตัวหลังเผาตกลงเล็กน้อย ซึ่งจะสอดคล้องกับผลการทดลองของ Yanagisawa K. และคณะ³⁷ เนื่องจากการเติมยิปซัมทำให้ผลึกโทเบอร์โมไรต์มีขนาดใหญ่ขึ้นและเพิ่มปริมาณรูพรุนในชิ้นงาน รูพรุนเหล่านี้เป็นส่วนช่วยให้หัดตัวน้อยลง สูตร RHA1 มีค่าการหัดตัวหลังเผาต่ำสุด ส่วนในกลุ่มที่ 2 กลุ่มทราวยบดมีค่าการหัดตัวหลังเผาที่ใกล้เคียงกัน และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการหัดตัวหลังเผาของสูตรกลุ่มที่ 1 กับ สูตรกลุ่มที่ 2 พบว่า กลุ่มที่ 1 กลุ่มแก้วกลมมีค่าการหัดตัวโดยรวมน้อยกว่ากลุ่มที่ 2 กลุ่มทราวยบด

ลักษณะการหัดตัวหลังเผาของชิ้นงานที่ 649 องศาเซลเซียส และ 927 องศาเซลเซียส แสดงได้ดังภาพที่ 4.9 และ ภาพที่ 4.10

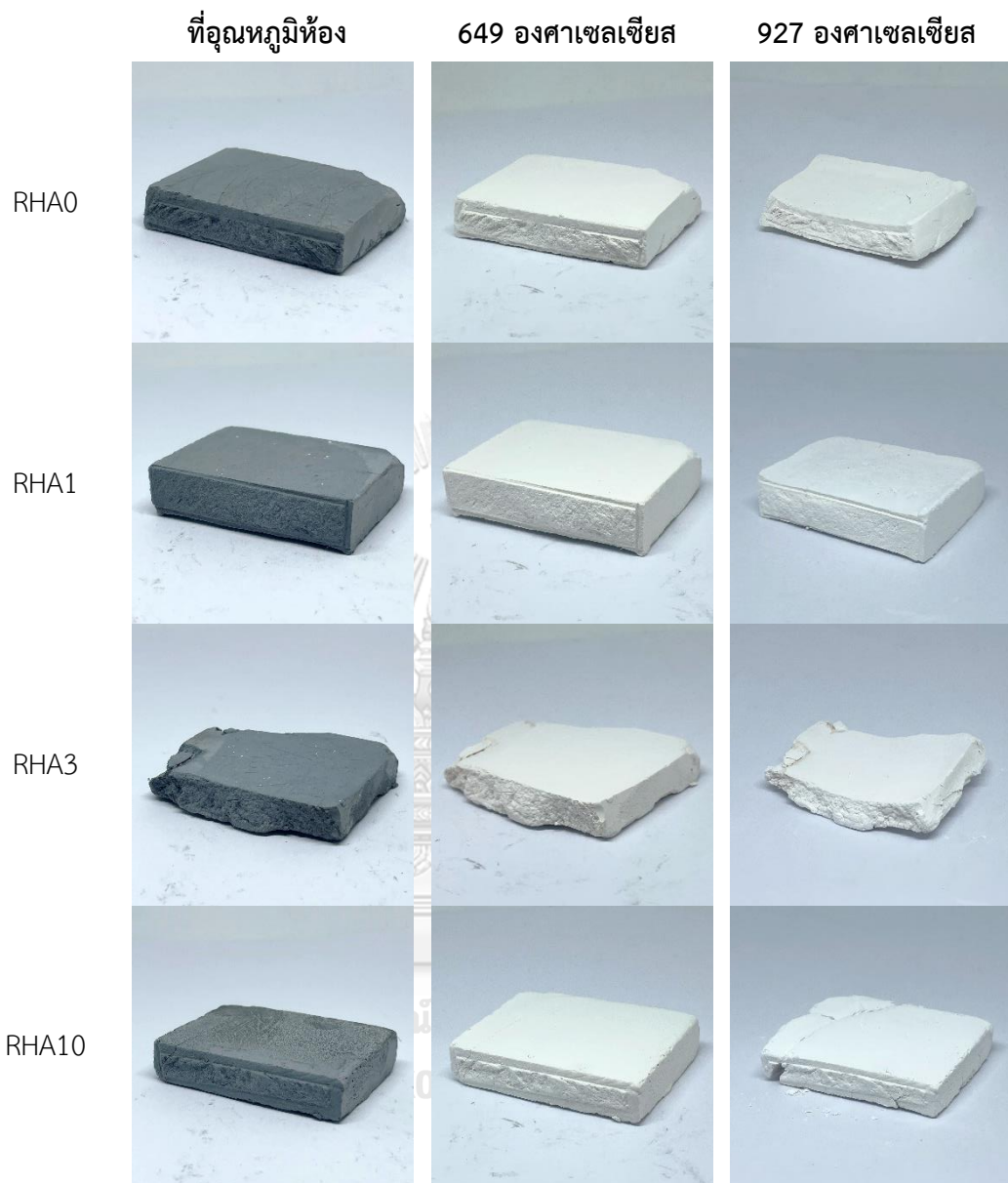


ภาพที่ 4.7 การหัดตัวหลังเผาของชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกตกลุ่มที่ 1 แก้วกลม อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

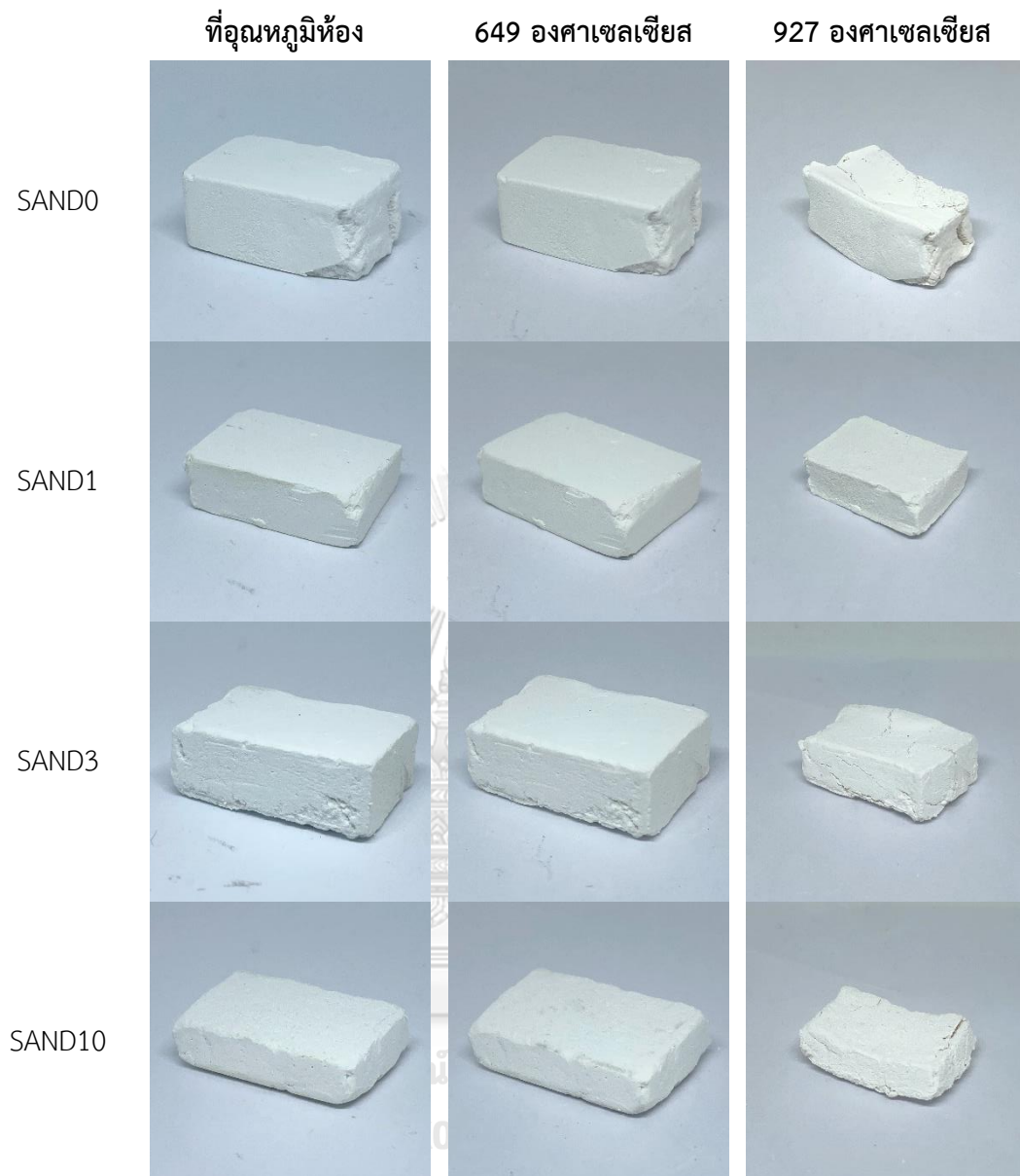


ภาพที่ 4.8 การหัดตัวหลังเผาของชิ้นงานเคลือบซีเมนต์กลุ่มที่ 2 ทราบโดยที่อุณหภูมิในการนี้
อัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง





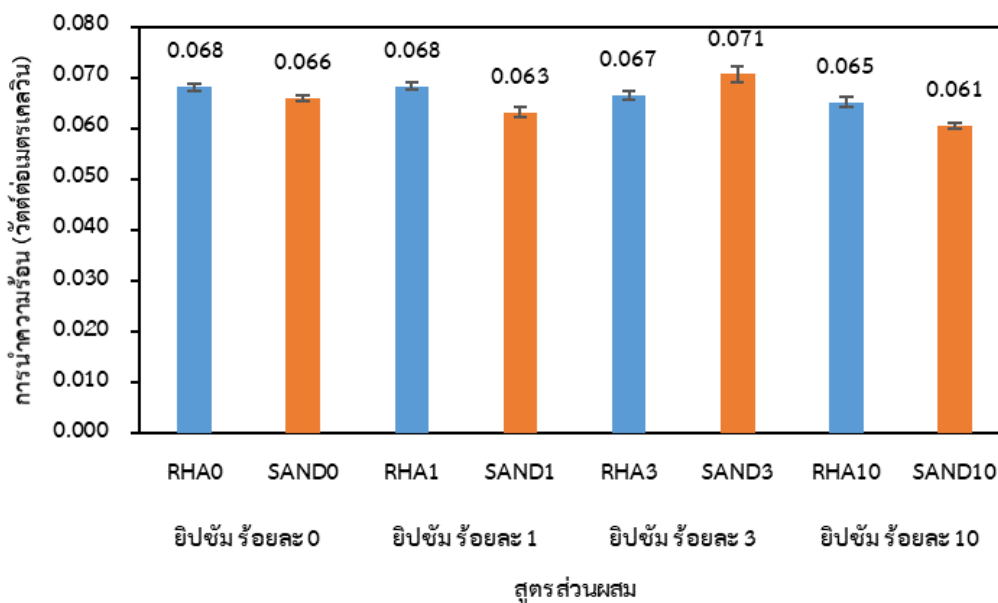
ภาพที่ 4.9 ชิ้นงานกลุ่มที่ 1 กลุ่มแก้วเคลบที่อุณหภูมิต่างๆ โดยที่อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.10 ชิ้นงานกลุ่มที่ 2 กลุ่มทรายบดที่อุณหภูมิต่างๆ โดยที่อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

4.5.4 การนำความร้อน

การนำความร้อนของชิ้นงานแสดงถึงสมบัติความเป็นฉนวนกันความร้อน วัดค่าที่อุณหภูมิห้อง ด้วยเทคนิคฮอตดิสก์ (Hot-disk method) การนำความร้อนเป็นสมบัติที่สามารถอธิบายได้ถึงสมบัติความเป็นฉนวนกันความร้อนของวัสดุได้ ซึ่งวัสดุที่มีการนำความร้อนต่ำจะมีสมบัติความเป็นฉนวนกันความร้อนสูง อีกทั้งการนำความร้อนยังมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นหรือปริมาตรรูพรุนของวัสดุ ถ้าความหนาแน่นต่ำ มีปริมาตรรูพรุนในชิ้นงานสูง อากาศถูกกักอยู่ในรูพรุนภายในชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานได้รับความร้อน การนำความร้อนผ่านชิ้นงานจะลดลง เนื่องจากความร้อนต้องเดินทางผ่านตัวกลางที่เป็นอากาศเพิ่มขึ้น⁴¹ จากภาพที่ 4.11 แสดงค่าการนำความร้อนของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 กลุ่มแก้วและกลุ่มที่ 2 ทรายบด โดยการเติมยิปซัมในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ ร้อยละ 0 1 3 และ 10 ตามลำดับ อุณหภูมิในการนั่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าทั้ง 2 กลุ่มมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำมากและมีค่าใกล้เคียงกัน มีค่าการนำความร้อนอยู่ในช่วง 0.06-0.07 กิโลวัตต์ต่อเมตรเคลวิน

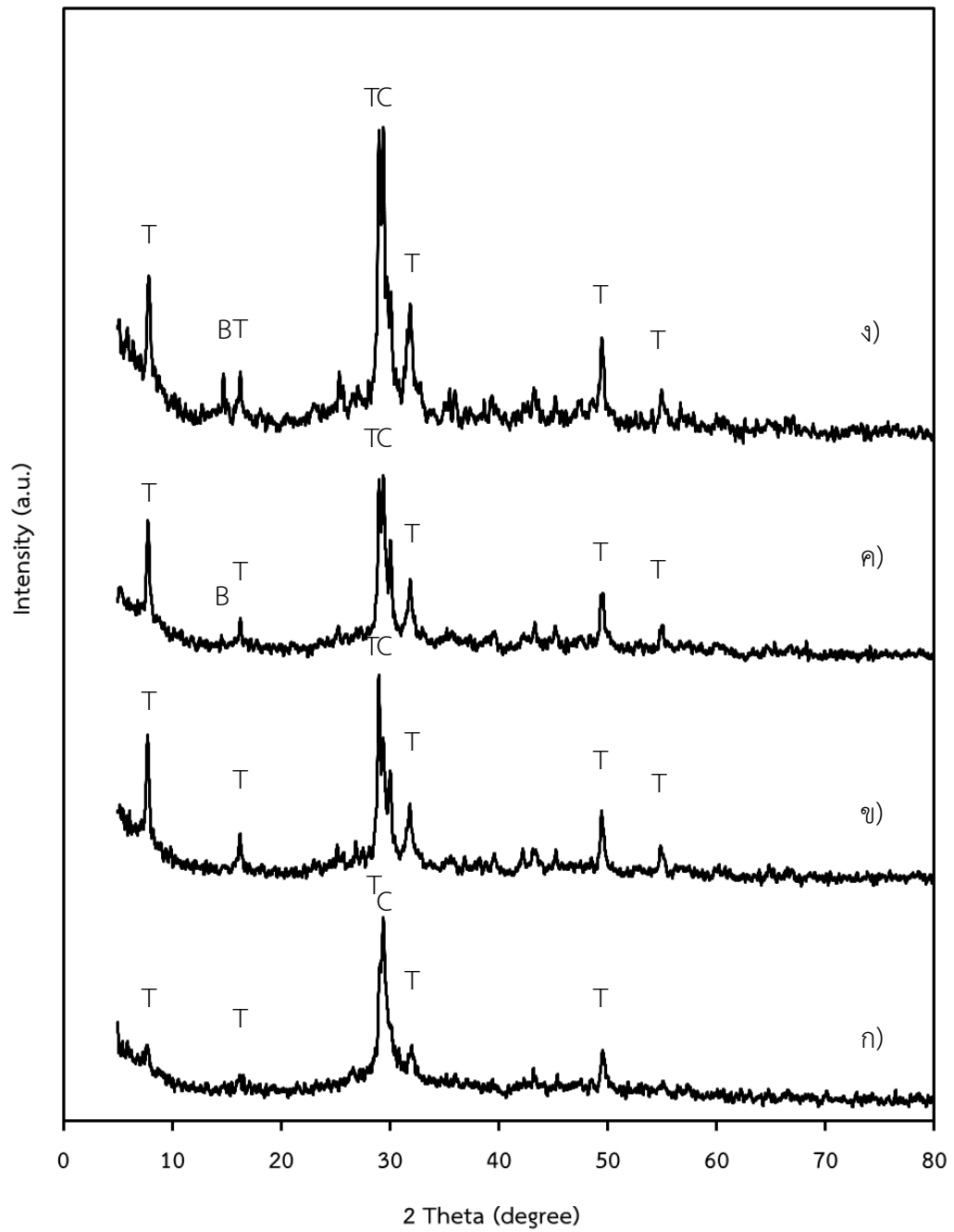


ภาพที่ 4.11 การนำความร้อนของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 โดยที่อุณหภูมิในการนั่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

4.5.5 ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบเฟส

การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) ของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 กลุ่มแก้วแกลบ และกลุ่มที่ 2 กลุ่มทรายบด อุณหภูมิในการนั่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากภาพที่ 4.12 แสดงผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบเฟสของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 กลุ่มแก้วแกลบ พบว่า ทั้ง RHA0 RHA1 RHA3 และ RHA10 มีปรากฏพีคของโทเบอร์โมไรต์ (Tobermorite; $5\text{CaO}\cdot 6\text{SiO}_2\cdot 5\text{H}_2\text{O}$) และแคลไซต์ (Calcite; CaCO_3) เป็นเฟสหลัก ซึ่งเป็นเฟสที่สามารถพบได้ในผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตตามท้องตลาด เมื่อเปรียบเทียบผลการเติมยิปซัม พบว่า การเติมยิปซัมมีผลต่อการเกิดเฟสโทเบอร์โมไรต์ เนื่องจากที่พีคของโทเบอร์โมไรต์ปรากฏชัดเจนขึ้นอย่างมาก และเมื่อพิจารณาในสูตร RHA1 RHA3 และ RHA10 พบว่า ปรากฏพีคของเฟสบาซาไนต์ ($\text{CaSO}_4\cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งเป็นสารประกอบแคลเซียมซัลเฟต ในสูตร RHA3 และจะเห็นได้ชัดเจนในสูตร RHA10 แสดงถึงการเติมยิปซัมที่มากเกินไป

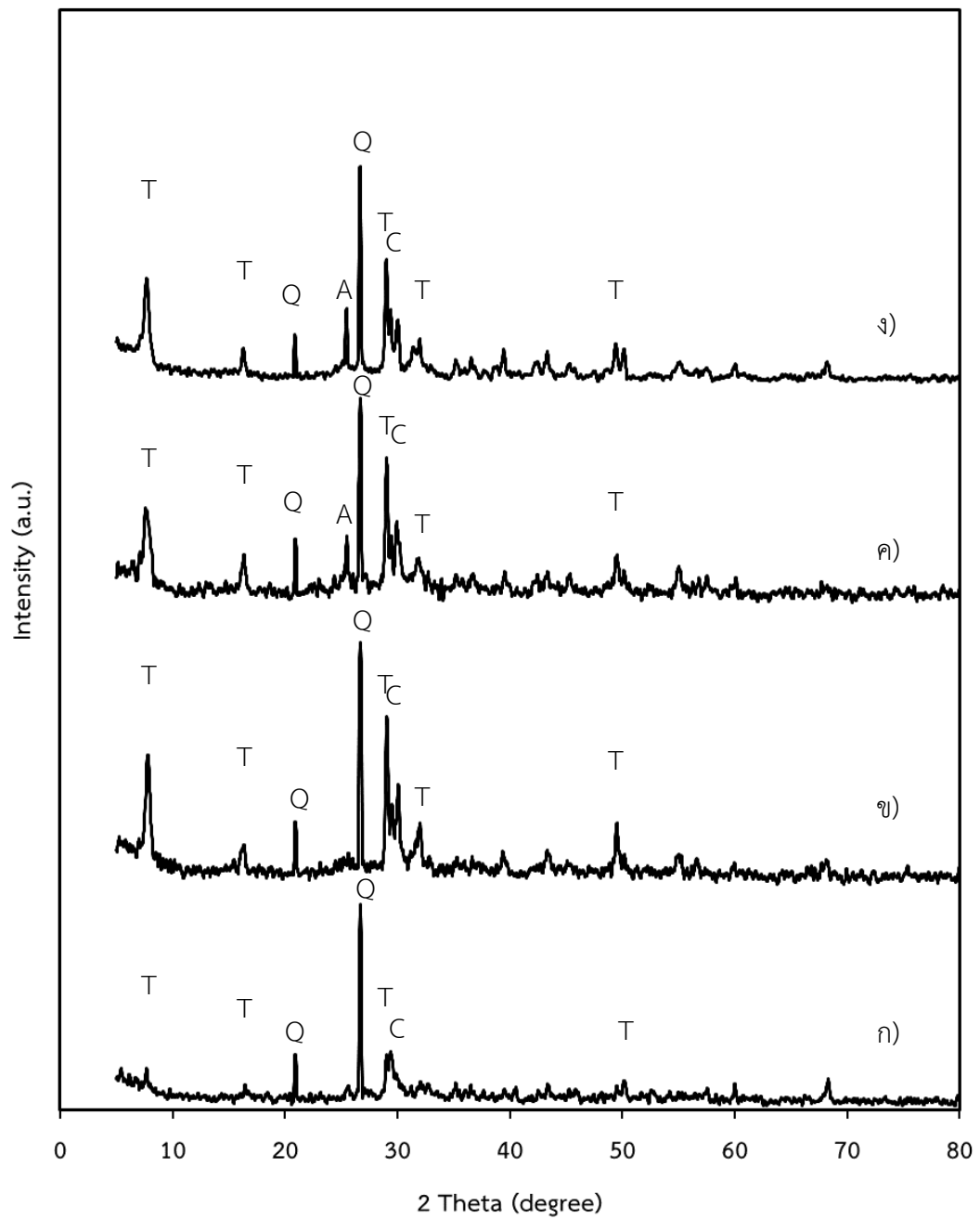
จากภาพที่ 4.13 แสดงผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบเฟสของชิ้นงานกลุ่มที่ 2 กลุ่มทรายบด พบว่า ทั้ง SAND0 SAND1 SAND3 และ SAND10 มีปรากฏพีคของโทเบอร์โมไรต์ (Tobermorite; $5\text{CaO}\cdot 6\text{SiO}_2\cdot 5\text{H}_2\text{O}$) แคลไซต์ (Calcite; CaCO_3) และควอตซ์ (Quartz; SiO_2) เป็นเฟสหลัก ซึ่งเป็นเฟสที่สามารถพบได้ในผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตตามท้องตลาด เช่นเดียวกับกลุ่มที่ 1 แตกต่างกันในสูตรที่ใช้ทรายบดเป็นวัตถุดิบที่ให้ซิลิกา มีเฟสควอตซ์ปรากฏขึ้นมา แสดงว่าทรายบดยังคงเหลือจากการทำปฏิกิริยา และเมื่อพิจารณาการเติมยิปซัมในสูตร SAND1 SAND3 และ SAND10 พบว่า การเติมยิปซัมที่มากเกินไปจะปรากฏพีคของเฟสแอนไฮไดรต์ (CaSO_4) ซึ่งเป็นสารประกอบแคลเซียมซัลเฟตเช่นเดียวกับเฟสบาซาไนต์ และจะเห็นได้ชัดเจนในสูตร RHA3 และ RHA10 โดยที่แอนไฮไดรต์ (CaSO_4) มีอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ประมาณ 1200 องศาเซลเซียส⁴² ซึ่งอุณหภูมินี้สูงกว่าอุณหภูมิการใช้งานผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกต จึงไม่ส่งผลต่อการใช้งาน



ภาพที่ 4.12 องค์ประกอบเฟสของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 กลุ่มเถ้าแกลบ

ก) RHA0 ข) RHA1 ค) RHA3 และ ง) RHA10

(B=Basanite, C=Calcite, T=Tobermorite)



ภาพที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของชิ้นงานกลุ่มที่ 2 กลุ่มทรายบด

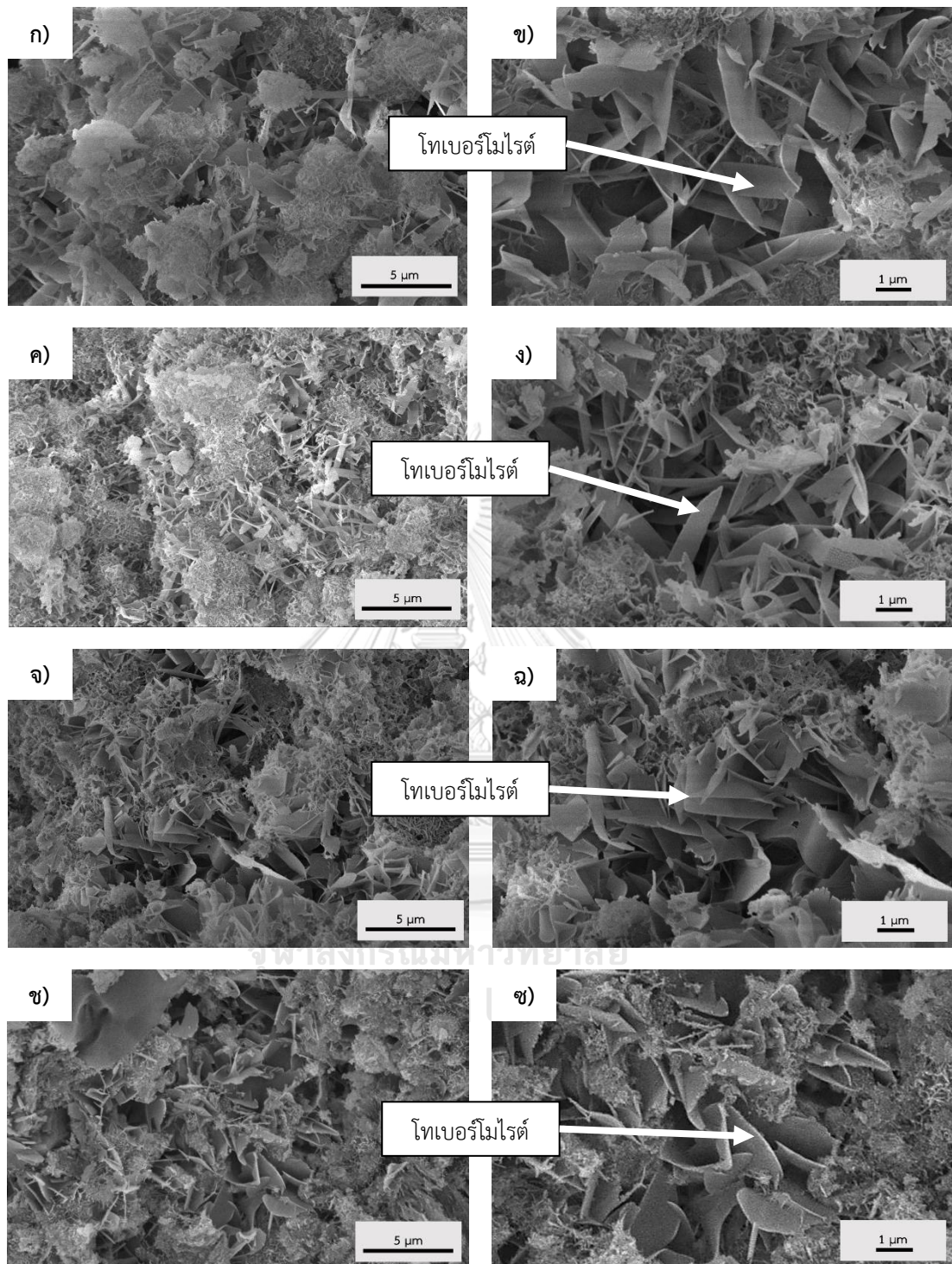
ก) SAND0 ข) SAND1 ค) SAND3 และ ง) SAND10

(A=Anhydrite, C=Calcite, T=Tobermorite, Q=Quartz)

4.5.6 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

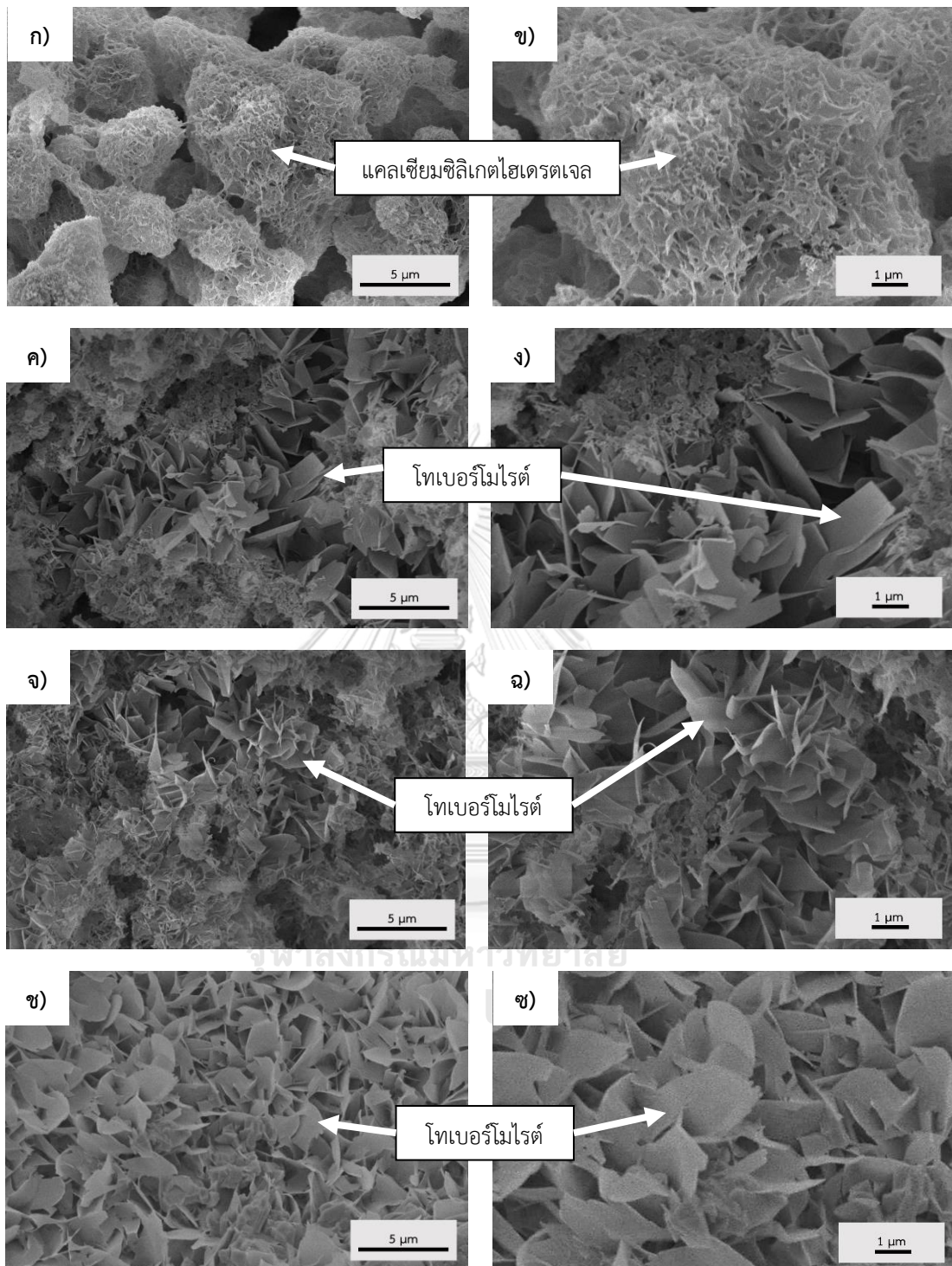
การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 กลุ่มแก้วกลบ และ กลุ่มที่ 2 กลุ่มทรายบด อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 5000X และ 10000X ดังแสดงในภาพที่ 4.14 และภาพที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกตมีรูพรุนจำนวนมาก จากโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลเมื่อได้รับความร้อนและความดันจากเงื่อนไขไฮโดรเทอร์มัลจะเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสโทเบอร์โมไรต์ เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคบริเวณภายในของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 แก้วกลบ จะเห็นได้ว่า เมื่อมีปริมาณยิปซัมเพิ่มมากขึ้นลักษณะผลึกของโทเบอร์โมไรต์จะมีลักษณะแบนเป็นแผ่นมากขึ้น (Plate-like crystal) ดังภาพที่ 4.14 และจะเห็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างผลึกโทเบอร์โมไรต์ได้ชัดเจนในสูตร RHA10 ดังภาพที่ 4.14 (ข) และ (ค) เปรียบเทียบกันสูตรที่ไม่เติมยิปซัม RHA0 มีลักษณะผลึกเป็นแท่ง (Lath-like crystal) ดังภาพที่ 4.14 (ก) และ (ข) และพิจารณาเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานกลุ่มที่ 2 กลุ่มทรายบด จะเห็นได้ว่า เมื่อมีปริมาณยิปซัมเพิ่มมากขึ้นลักษณะผลึกของโทเบอร์โมไรต์จะมีลักษณะแบนเป็นแผ่นมากขึ้นเช่นเดียวกับกลุ่มที่ 1 ดังภาพที่ 4.15 แต่ในสูตร SAND0 ส่วนใหญ่ที่พบจะมีลักษณะโครงสร้างจุลภาคไม่เป็นผลึกที่ชัดเจน ซึ่งเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลล้อมรอบผลึกควอตซ์ แสดงถึงว่าระยะเวลาและอุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัลยังไม่เพียงพอในการเกิดเฟสโทเบอร์โมไรต์ แสดงในภาพที่ 4.15 (ก) และ (ข) อีกทั้งเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง RHA0 และ SAND0 พบว่า แก้วกลบทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าทรายบด ดังภาพที่ 4.14 (ก) และ 4.15 (ก)

จากผลการศึกษาผลของการเติมยิปซัมในกลุ่มที่ 1 แก้วกลบ และกลุ่มที่ 2 ทรายบด อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่า ยิปซัมช่วยเร่งการเกิดเฟสโทเบอร์โมไรต์ได้ดี แต่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผลึกโทเบอร์โมไรต์ในชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกต ซึ่งมีความสัมพันธ์กับสมบัติอื่นๆ เช่น ความหนาแน่น ความแข็งแรง เป็นต้น ดังนั้น จากผลการศึกษาผลของการเติมยิปซัมสูตรที่ดีที่สุดในการทดลองนี้ คือ สูตรที่ใส่ยิปซัม ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (RHA1 และ SAND1)



ภาพที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคของของขึ้นงานกลุ่มที่ 1 กลุ่มแก้วแคลส

ก) RHA0 กำลังขยาย 5000X ข) RHA0 กำลังขยาย 10000X ค) RHA1 กำลังขยาย 5000X
 ง) RHA1 กำลังขยาย 10000X จ) RHA3 กำลังขยาย 5000X ฉ) RHA3 กำลังขยาย 10000X
 ช) RHA10 กำลังขยาย 5000X และ ซ) RHA10 กำลังขยาย 10000X



ภาพที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคของของขึ้นงานกลุ่มที่ 2 กลุ่มทรายบด

ก) SAND0 กำลังขยาย 5000X ข) SAND0 กำลังขยาย 10000X ค) SAND1 กำลังขยาย 5000X

ง) SAND1 กำลังขยาย 10000X จ) SAND3 กำลังขยาย 5000X ฉ) SAND3 กำลังขยาย 10000X

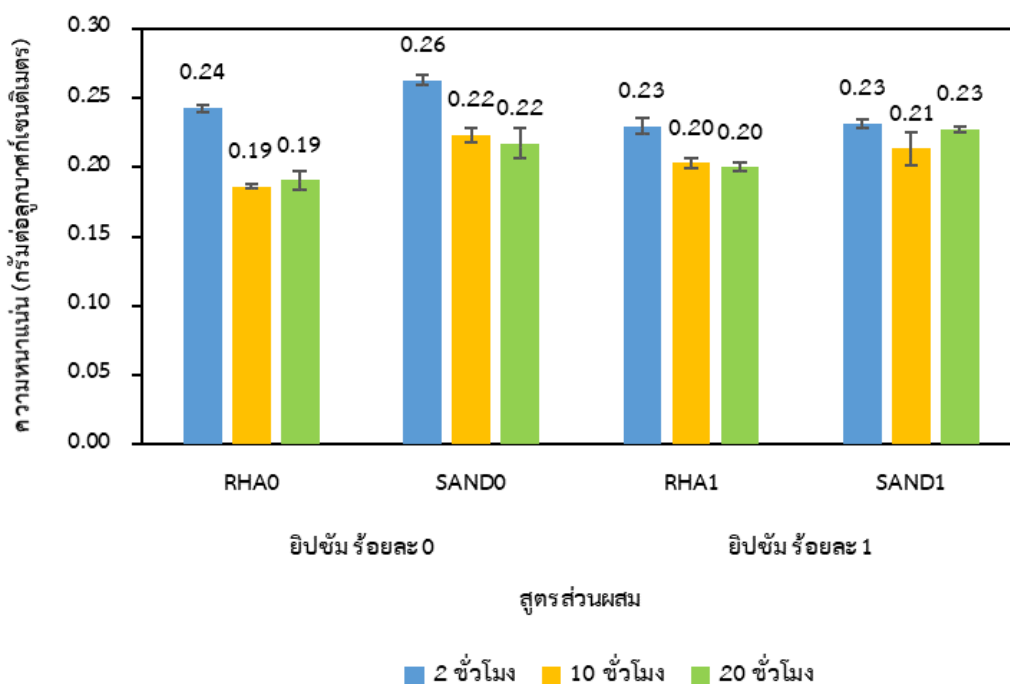
ช) SAND10 กำลังขยาย 5000X และ ซ) SAND10 กำลังขยาย 10000X

4.6 ผลของเวลาในการนึ่งอัดไอในกลุ่มที่ 1 กลุ่มเก้าแกลบ และกลุ่มที่ 2 กลุ่มทรายบด

การศึกษาผลของเวลาในการนึ่งอัดไอในกลุ่มที่ 1 กลุ่มเก้าแกลบและกลุ่มที่ 2 กลุ่มทรายบด เลือกลูสตรที่ไม่เติมยิปซัมและเติมยิปซัม ร้อยละ 1 มาทดลองเพิ่มเติม โดยทดลองที่อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 10 และ 20 ชั่วโมง

4.6.1 ความหนาแน่น

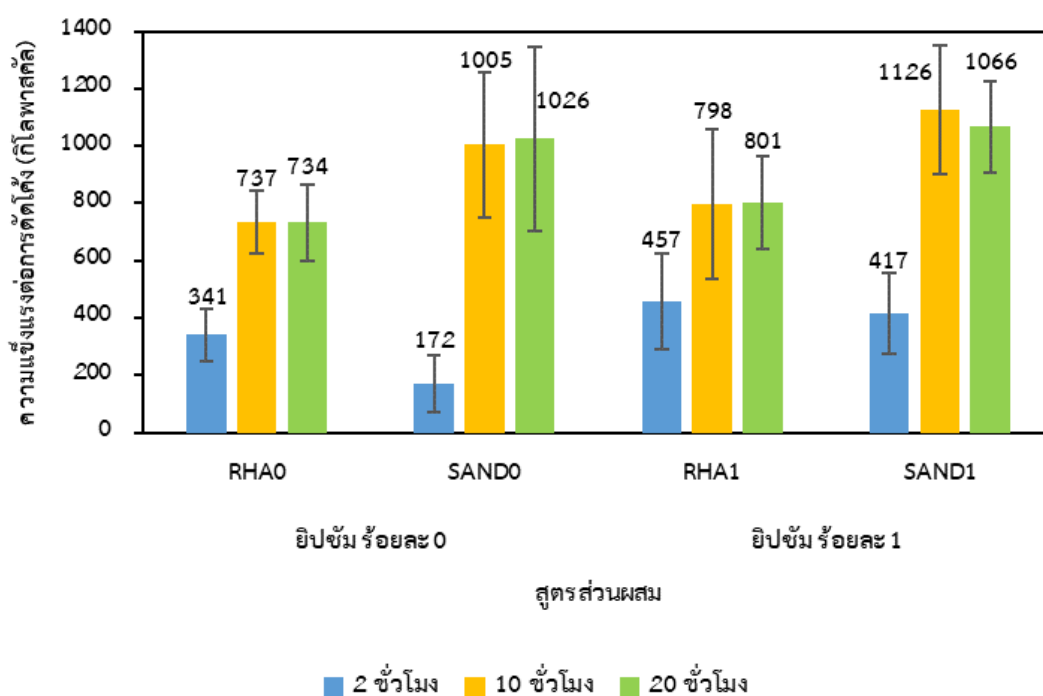
การทดสอบความหนาแน่นของชิ้นงานคำนวณค่าความหนาแน่นจากสมการที่ 3.1 จากภาพที่ 4.16 แสดงความหนาแน่นของชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกตกลุ่มที่ 1 กลุ่มเก้าแกลบ และกลุ่มที่ 2 กลุ่มทรายบด ทดลองที่อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 10 และ 20 ชั่วโมง พบว่าแนวโน้มค่าความหนาแน่นของชิ้นงานที่เวลา 10 และ 20 ชั่วโมงมีค่าลดลง เมื่อเทียบกับเวลาที่ 2 ชั่วโมง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ห่อหุ้มประกอบเฟส พีคของโทเบอร์โมไรต์สูงชันอย่างชัดเจนในสตร RHA0 และ SAND0 ดังแสดงในภาพที่ 4.22 ก) และ ค) และที่เวลา 10 และ 20 ชั่วโมง ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานมีค่าใกล้เคียงกันในชิ้นงานทั้ง 2 สตร



ภาพที่ 4.16 ความหนาแน่นของชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกตกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 โดยที่อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 10 และ 20 ชั่วโมง

4.6.2 ความแข็งแรงต่อการตัดโค้ง

จากการทดสอบความแข็งแรงต่อการตัดโค้งของชิ้นงานโดยคำนวณจากสมการที่ 3.2 ดังแสดงในภาพที่ 4.17 แสดงความแข็งแรงต่อการตัดโค้งของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 กลุ่มเก้าแถบ และกลุ่มที่ 2 ทราบยอด ทดลองที่อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 10 และ 20 ชั่วโมง พบว่าเมื่อเวลาในการนึ่งอัดไอเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงต่อการตัดโค้งของชิ้นงานทั้งกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากความแข็งแรงต่อการตัดโค้งของชิ้นงานขึ้นอยู่กับเฟสโทเบอร์โมไรต์ ดังที่ได้กล่าวถึงไว้ในบทก่อนหน้า ดังนั้นเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจึงเกิดเฟสโทเบอร์โมไรต์ได้มากขึ้น ความแข็งแรงต่อการตัดโค้งที่เวลา 10 และ 20 ชั่วโมงมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสูตรกลุ่มที่ 1 และ 2 พบว่า กลุ่มที่ 2 ที่ใช้ทราบยอด มีความแข็งแรงมากกว่า เนื่องจากมีค่าความหนาแน่นมากกว่า

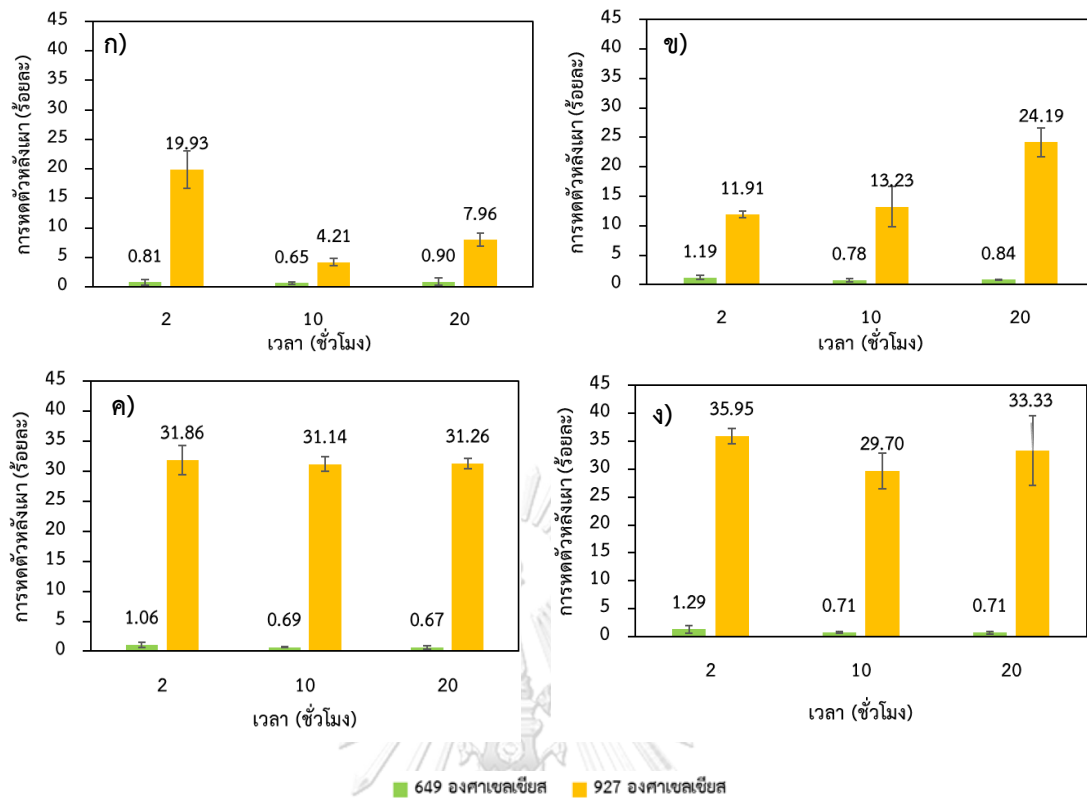


ภาพที่ 4.17 ความแข็งแรงต่อการตัดโค้งของชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกตกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 10 และ 20 ชั่วโมง

4.6.3 การหัดตัวหลังเผาของชิ้นงาน

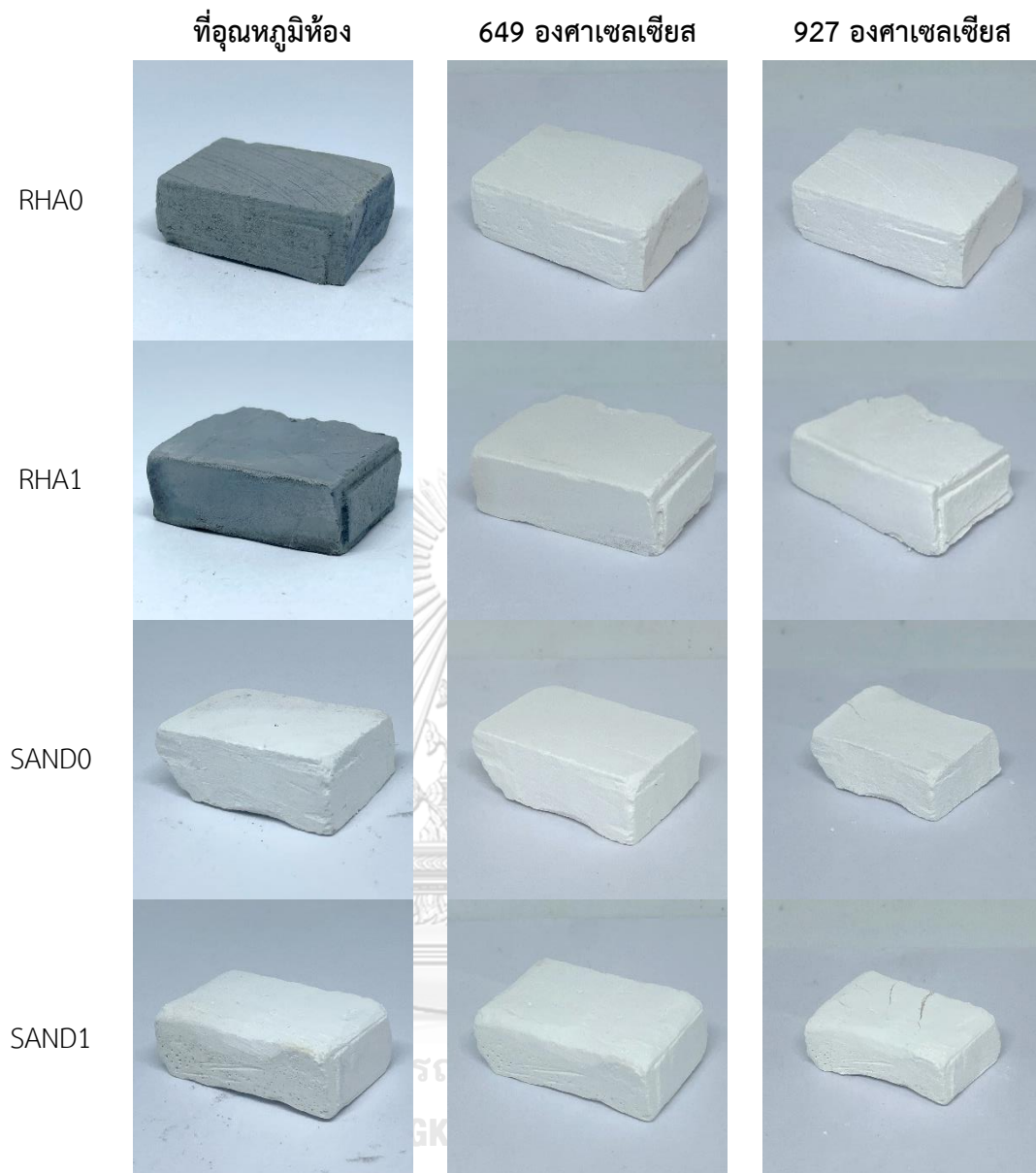
จากการทดสอบการหัดตัวหลังเผาของชิ้นงานโดยคำนวณเป็นร้อยละของการหัดตัวเชิงเส้น จากสมการที่ 3.3 ดังแสดงในภาพที่ 4.18 แสดงการหัดตัวหลังเผาของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 กลุ่มแก้วแกลบ และกลุ่มที่ 2 ทราบบด อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 10 และ 20 ชั่วโมง พบว่า ที่อุณหภูมิ 649 องศาเซลเซียส ชิ้นงานทั้งหมดมีค่าการหัดตัวน้อยกว่าร้อยละ 2 ตามมาตรฐานอเมริกัน ASTM C533 สามารถใช้งานเป็นแคลเซียมซิลิเกตชนิดที่ 1 ได้ ส่วนที่อุณหภูมิ 927 องศาเซลเซียส ยังคงมีค่าการหัดตัวมากกว่าร้อยละ 2 และเมื่อพิจารณาในกลุ่มที่ 1 กลุ่มแก้วแกลบ RHA0 ดังแสดงในภาพที่ 4.18 ก) เมื่อเวลาในการนึ่งอัดไอเพิ่มขึ้น ค่าการหัดตัวหลังเผาลดลง เนื่องจากลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเฟสโทเบอร์โมไรต์มีลักษณะเป็นแท่ง (Lath-like crystal) ดังภาพที่ 4.23 ก) และ ข) ส่วนสูตร RHA1 ดังแสดงในภาพที่ 4.18 ข) เป็นสูตรที่เติมยิปซัม ร้อยละ 1 เมื่อเวลาในการนึ่งอัดไอเพิ่มขึ้น ค่าการหัดตัวหลังเผาเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการที่ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเฟสโทเบอร์โมไรต์เปลี่ยนไปมีลักษณะเป็นแผ่นแบนมากขึ้นและเกิดริ้วที่ปลายผลึก ดังภาพที่ 4.23 ค) และ ง) และในส่วนกลุ่มที่ 2 กลุ่มทราบบด SAND0 และ SAND1 มีค่าการหัดตัวสูงมากกว่ากลุ่มที่ 1 และมีค่าใกล้เคียงกัน

ลักษณะการหัดตัวหลังเผาของชิ้นงานที่ 649 องศาเซลเซียส และ 927 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพที่ 4.19 และ ภาพที่ 4.20

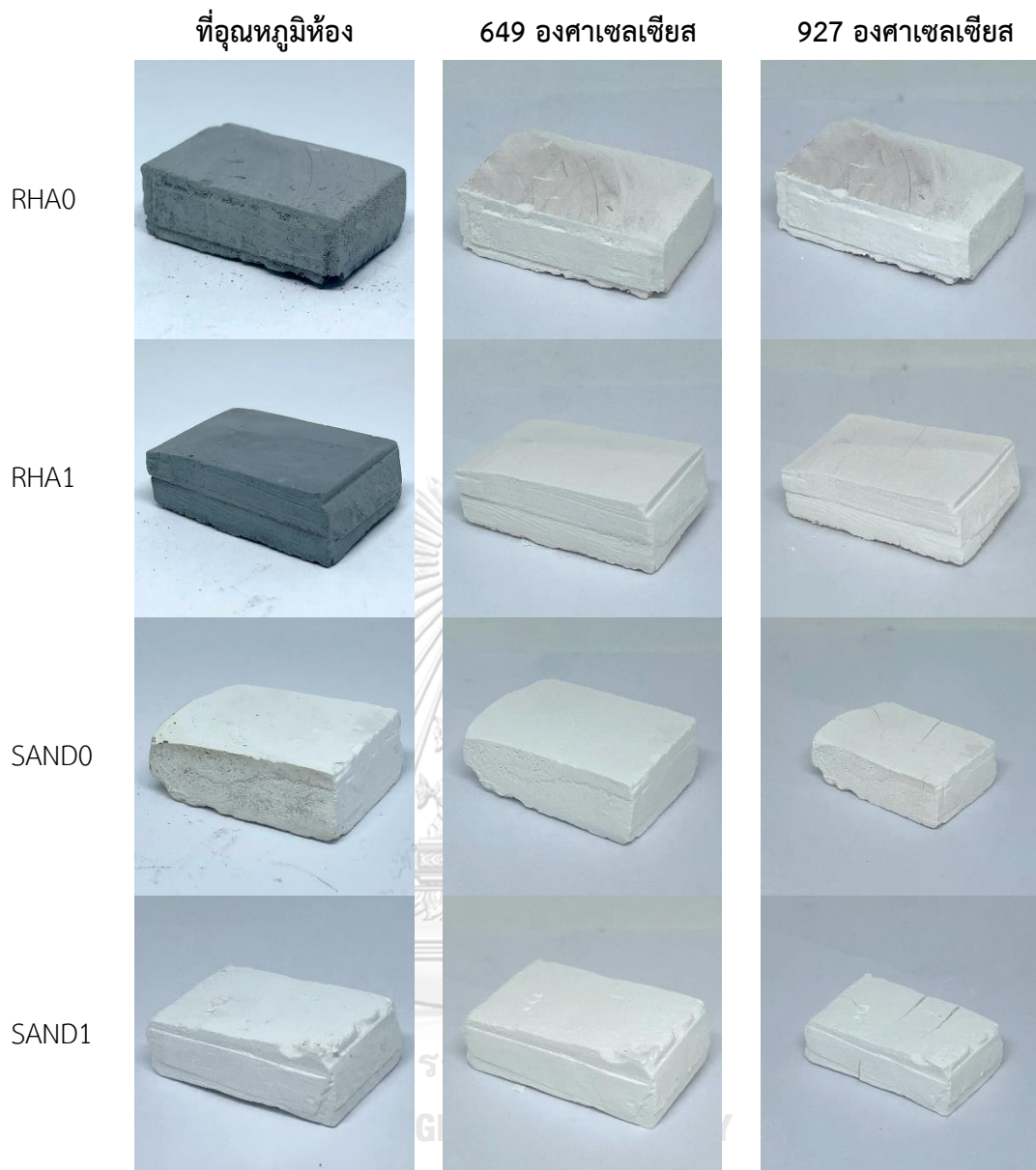


ภาพที่ 4.18 การหัตถ์หลังเผาของชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกตกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 โดยที่อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 10 และ 20 ชั่วโมง

ก) RHA0 ข) RHA1 ค) SAND0 และ ง) SAND1



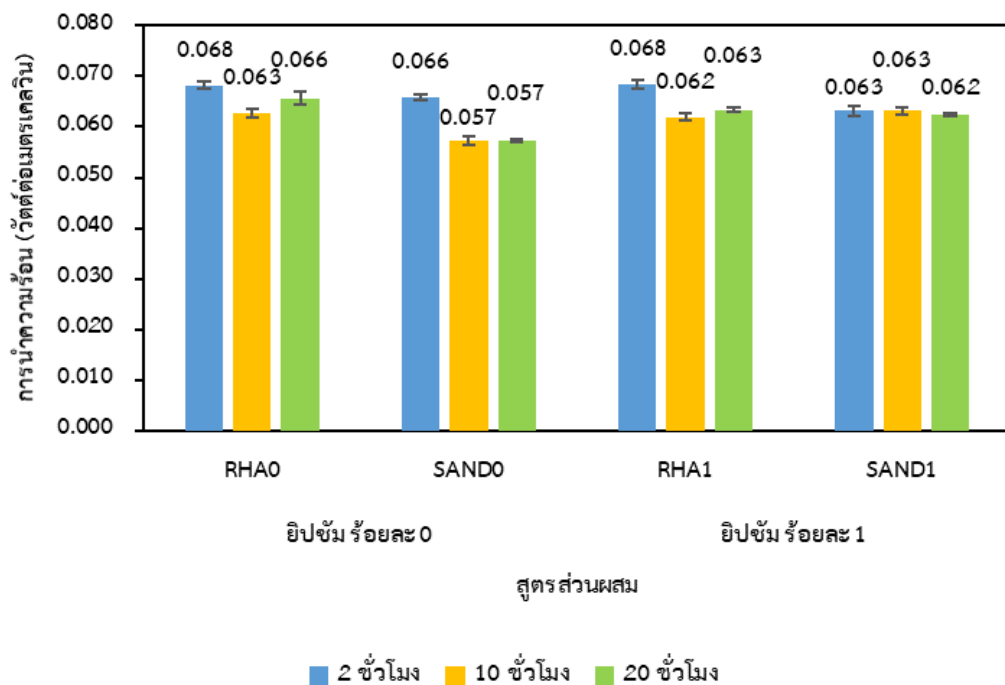
ภาพที่ 4.19 ชิ้นงานกลุ่มที่ 1 และ กลุ่มที่ 2 ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยที่อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.20 ชิ้นงานกลุ่มที่ 1 และ กลุ่มที่ 2 ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยที่อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง

4.6.4 การนำความร้อน

การนำความร้อนของชิ้นงานเพื่อแสดงสมบัติความเป็นฉนวนกันความร้อน วัดค่าที่อุณหภูมิห้อง ด้วยเทคนิคฮอตดิสก์ (Hot-disk method) ดังแสดงในภาพที่ 4.21 แสดงผลทดสอบการนำความร้อนของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 กลุ่มเก้าแกลบและกลุ่มที่ 2 ทราบบด อุณหภูมิในการนั่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 10 และ 20 ชั่วโมง พบว่า ทั้งสองกลุ่มมีแนวโน้มค่าการนำความร้อนที่ต่ำลงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาที่นั่งอัดไอ 10 และ 20 ชั่วโมง พบว่า ค่าการนำความร้อนมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากค่าการนำความร้อนมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นหรือรูพรุนในชิ้นงาน เมื่อความหนาแน่นลดลง ค่าการนำความร้อนจึงลดลงด้วยเช่นกัน

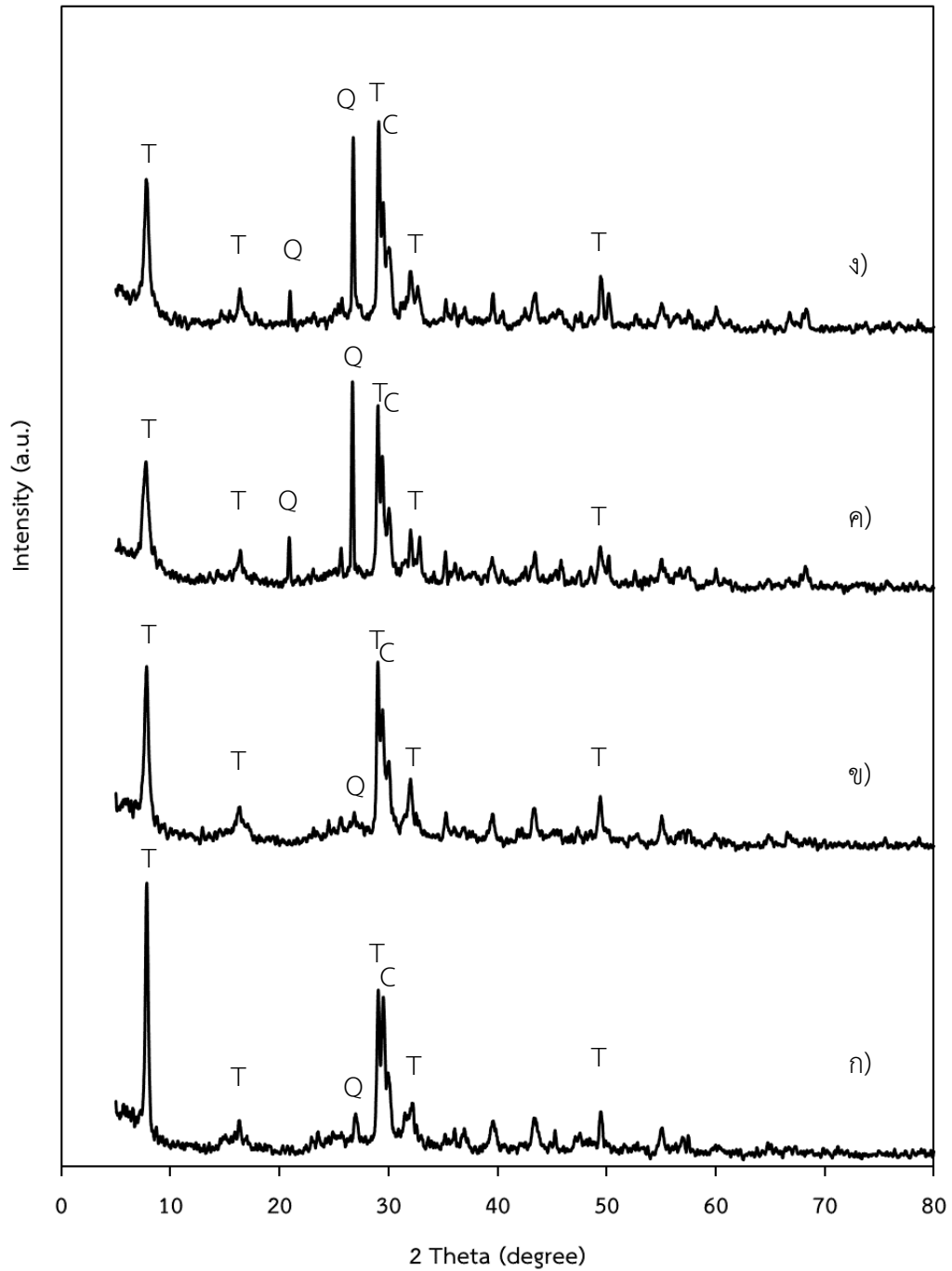


ภาพที่ 4.21 การนำความร้อนของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 อุณหภูมิในการนั่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 10 และ 20 ชั่วโมง

4.6.5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟส

การวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสนี้ได้เลือกจากสูตรกลุ่มที่ 1 กลุ่มเก้าแกลบ และกลุ่มที่ 2 กลุ่มทรายบด อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง มาทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 4.22 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 กลุ่มเก้าแกลบ และชิ้นงานกลุ่มที่ 2 ทรายบด ปรากฏพีคของโทเบอร์โมไรต์ (Tobermorite; $5\text{CaO}\cdot 6\text{SiO}_2\cdot 5\text{H}_2\text{O}$) และแคลไซต์ (Calcite; CaCO_3) เป็นเฟสหลักทั้งสองสูตร ในสูตรกลุ่มที่ 1 เก้าแกลบ พบว่ามีเฟสของซิลิกาเริ่มปรากฏขึ้นมา แสดงว่าเก้าแกลบที่เป็นซิลิกาอสัณฐานเริ่มมีการเปลี่ยนเป็นผลึกซิลิกา และที่สูตร RHA0 ที่ประมาณ 8 องศา ปรากฏพีคของเฟสโทเบอร์โมไรต์สูงขึ้นมาอย่างชัดเจน ดังภาพที่ 4.22 ก) อนุมานได้ว่าเฟสโทเบอร์โมไรต์มีปริมาณมากขึ้น ส่วนกลุ่มที่ 2 ทรายบดนั้นทั้งสูตร SAND0 และ SAND1 ปรากฏเฟสควอตซ์ขึ้นมา แสดงว่า ทรายบดยังคงทำปฏิกิริยาไม่หมดเหลืออยู่ในชิ้นงาน ดังภาพที่ 4.22 ค) และ ง)

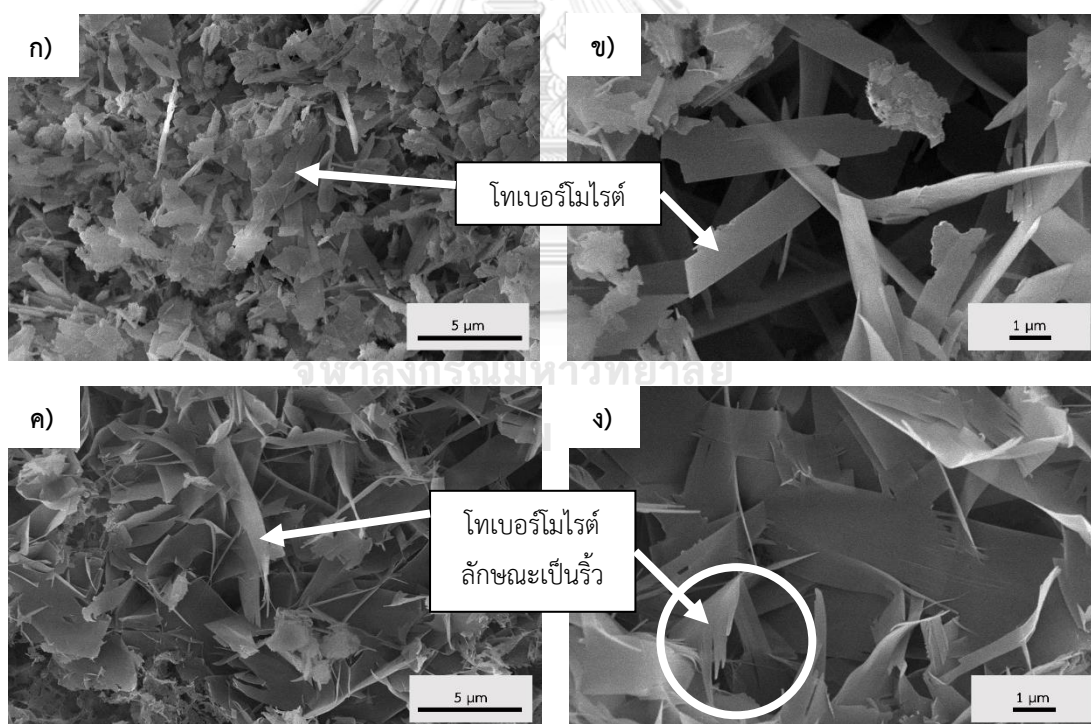




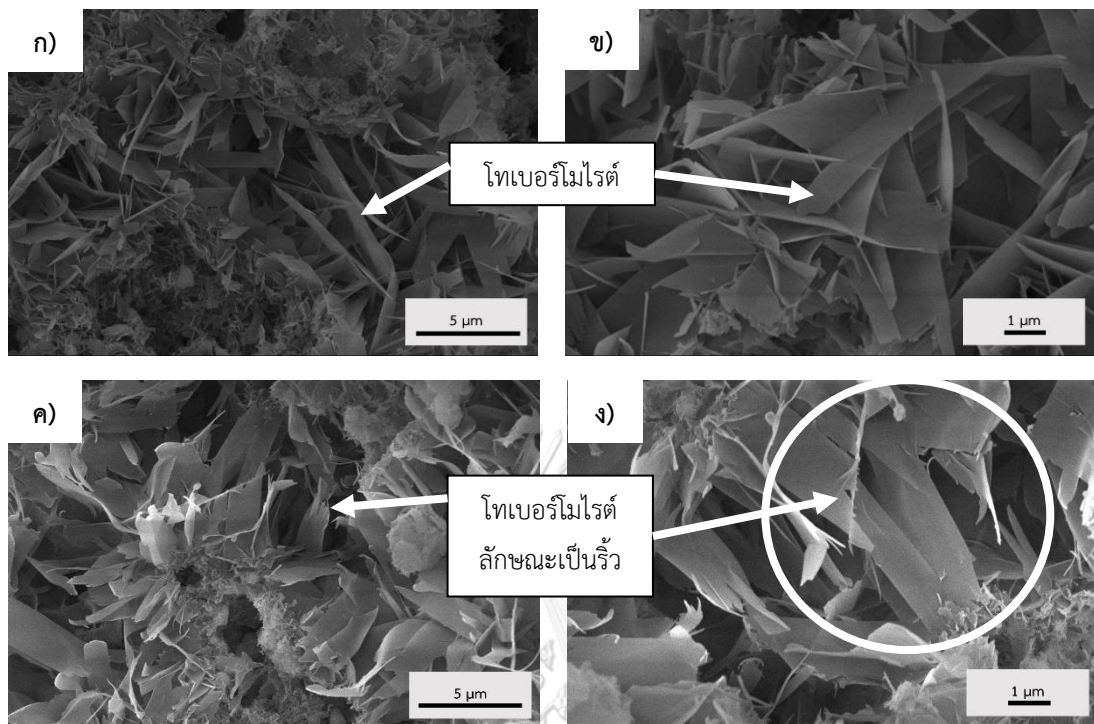
ภาพที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอน้ำ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ก) RHA0 ข) RHA1 ค) SAND0 และ ง) SAND1 (C=Calcite, T = Tobermorite, Q=Quartz)

4.6.6 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคนี้ได้เลือกจากสูตรกลุ่มที่ 1 กลุ่มแก้วเคลือบ และกลุ่มที่ 2 กลุ่มทรายบด อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง มาทดสอบที่กำลังขยาย 5000X และ 10000X ดังแสดงในภาพที่ 4.23 และ 4.24 พบว่า เมื่อเวลานึ่งอัดไอเพิ่มมากขึ้น โทเบอร์โมไรต์มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น เปรียบเทียบกับเวลาที่ 2 ชั่วโมง ดังภาพที่ 4.14 ก) และ 4.15 ก) จะเห็นได้ชัดเจนในสูตร SANDO และพิจารณาเปรียบเทียบการเติมยิปซัมในสูตร RHA0 และ RHA1 ดังภาพที่ 4.23 ก) และ ค) พบว่า เมื่อเวลาในการนึ่งอัดไอมากขึ้น ยิปซัมส่งผลต่อลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผลึกโทเบอร์โมไรต์มากขึ้น กล่าวคือผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้น โค้งงอและมีลักษณะแตกเป็นริ้วที่ส่วนปลายของผลึก ดังภาพที่ 4.23 ง) เช่นเดียวกับสูตร SAND0 และ SAND1 ดังภาพที่ 4.24 ก) และ ค) และจะเห็นได้ลักษณะริ้วที่เกิดขึ้นได้ชัดเจนในภาพที่ 4.24 ง) และพิจารณาการเกิดเฟสโทเบอร์โมไรต์ที่จะเริ่มจากที่เกิดล้อมรอบผลึกควอตซ์ เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลบนผิวหน้าของควอตซ์⁴⁰ ผลึกของโทเบอร์โมไรต์จึงเริ่มก่อตัวบริเวณนั้น ดังภาพที่ 4.24



ภาพที่ 4.23 โครงสร้างจุลภาคของของขึ้นงานกลุ่มที่ 1 กลุ่มแก้วเคลือบ นึ่งอัดไอน้ำที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส 10 ชั่วโมง โดยที่ ก) RHA0 กำลังขยาย 5000X ข) RHA0 กำลังขยาย 10000X ค) RHA1 กำลังขยาย 5000X และ ง) RHA1 กำลังขยาย 10000X



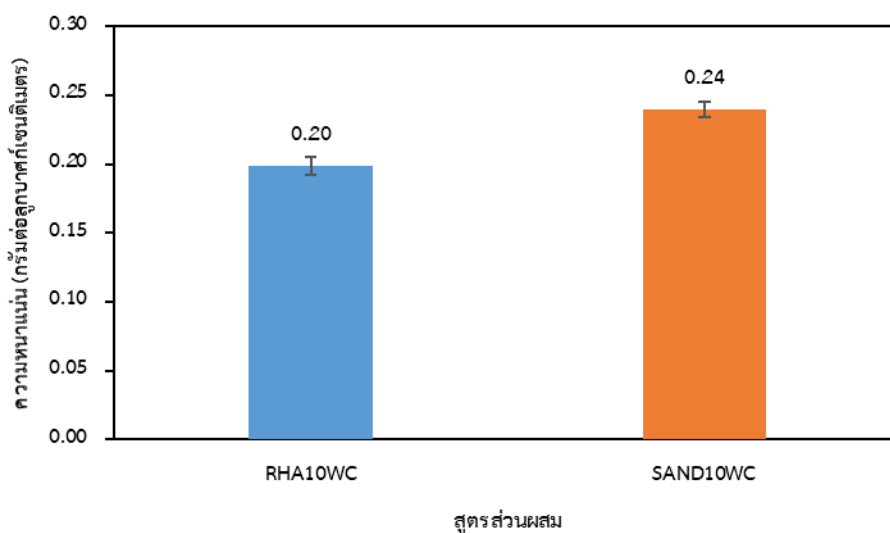
ภาพที่ 4.24 โครงสร้างจุลภาคของของชิ้นงานกลุ่มที่ 2 กลุ่มทรายบด นิ่งอัดไอที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส 10 ชั่วโมง โดยที่ ก) SAND0 กำลังขยาย 5000X ข) SAND0 กำลังขยาย 10000X ค) SAND1 กำลังขยาย 5000X และ ง) SAND1 กำลังขยาย 10000X

4.7 ผลของการเติมปูนซีเมนต์ขาว

การศึกษาผลของการเติมปูนซีเมนต์ขาวในกลุ่มที่ 1 กลุ่มเก้าแกลบและกลุ่มที่ 2 กลุ่มทรายบดเติมปูนซีเมนต์ขาว ร้อยละ 10 โดยทดลองที่อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

4.7.1 ความหนาแน่น

จากการทดสอบความหนาแน่นของชิ้นงานโดยคำนวณค่าความหนาแน่นจากสมการที่ 3.1 ดังแสดงในภาพที่ 4.25 แสดงค่าความหนาแน่นของชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกตกลุ่มที่ 1 เก้าแกลบ และกลุ่มที่ 2 ทรายบด โดยเติมปูนซีเมนต์ขาว ร้อยละ 10 ทดลองที่อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง พบว่า ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานมีค่าใกล้เคียงกันกับชิ้นงานในสูตรอื่นๆ และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสูตร RHA10WC และ SAND10WC พบว่า สูตร SAND10WC มีค่าความหนาแน่นมากกว่าเล็กน้อย

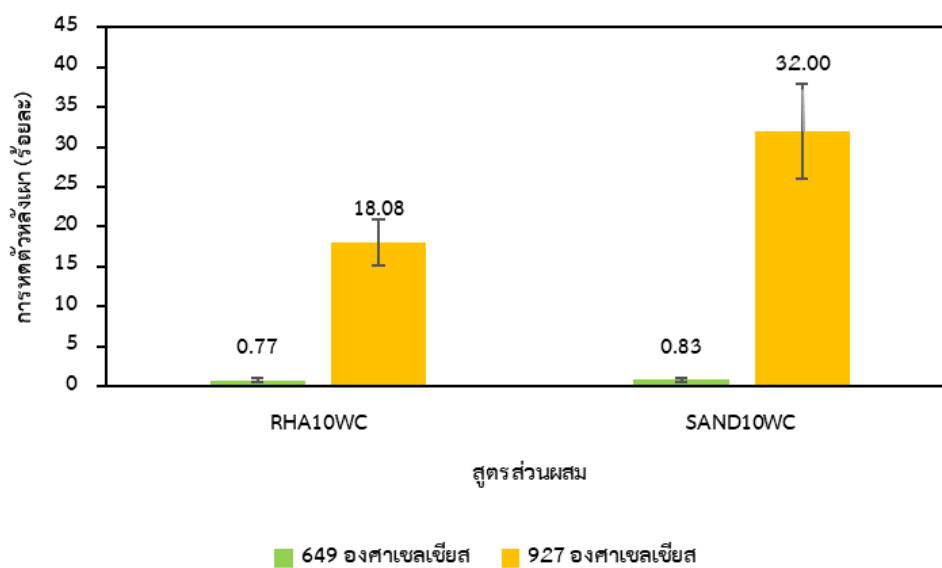


ภาพที่ 4.25 ความหนาแน่นของชิ้นงานสูตร RHA10WC และ SAND10WC โดยที่อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

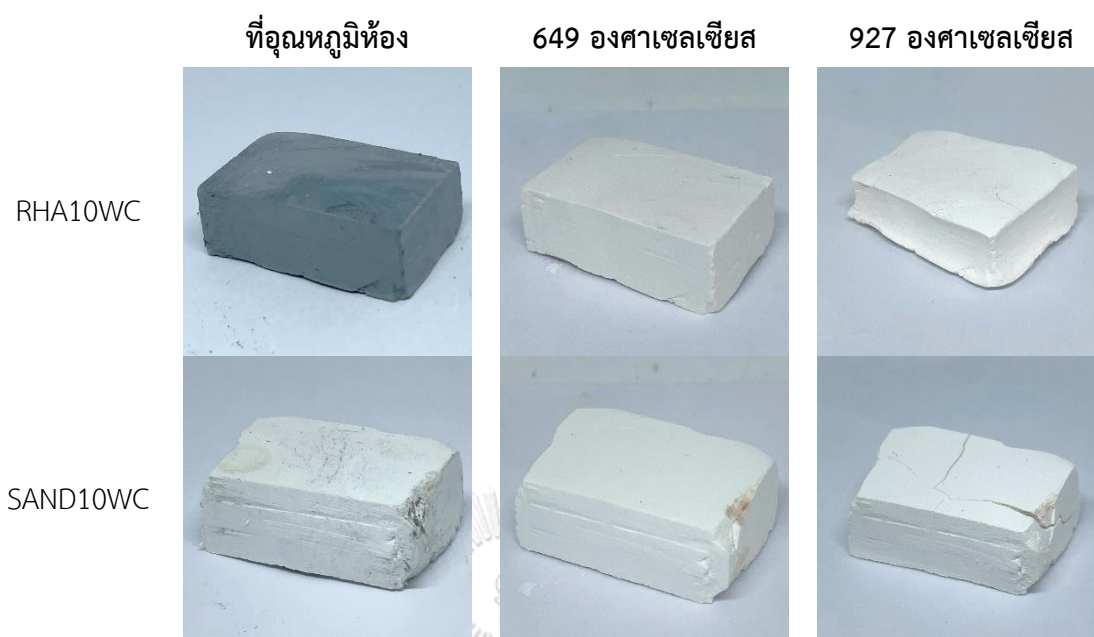
4.7.2 การหัดตัวหลังเผาของชิ้นงาน

จากการทดสอบการหัดตัวหลังเผาของชิ้นงานโดยคำนวณเป็นร้อยละของการหัดตัวเชิงเส้น จากสมการที่ 3.3 ดังภาพที่ 4.26 แสดงค่าการหัดตัวหลังเผาของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 แก้วแกลบและ กลุ่มที่ 2 ทราบยอด โดยการเติมปูนซีเมนต์ขาว ร้อยละ 10 อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง พบว่า ที่อุณหภูมิ 649 องศาเซลเซียส ชิ้นงานทั้ง 2 กลุ่มมีค่าการหัดตัวหลังเผาใกล้เคียงกันและมีค่าใกล้เคียงกับสูตรอื่นๆ ซึ่งไม่เกินตามมาตรฐานอเมริกัน ASTM C533 ที่กำหนดให้ค่าการหัดตัวหลังเผาไม่เกิน ร้อยละ 2 แต่เมื่อพิจารณาการหัดตัวหลังเผาที่อุณหภูมิ 927 องศาเซลเซียส ค่าการหัดตัวของทั้ง 2 สูตร RHA10WC และ SAND10WC ยังคงมีค่าสูงเกินมาตรฐาน สูตร RHA10WC มีค่าการหัดตัวน้อยกว่าสูตร SAND10WC

ลักษณะการหัดตัวหลังเผาของชิ้นงานที่ 649 องศาเซลเซียส และ 927 องศาเซลเซียส แสดงได้ดังภาพที่ 4.27



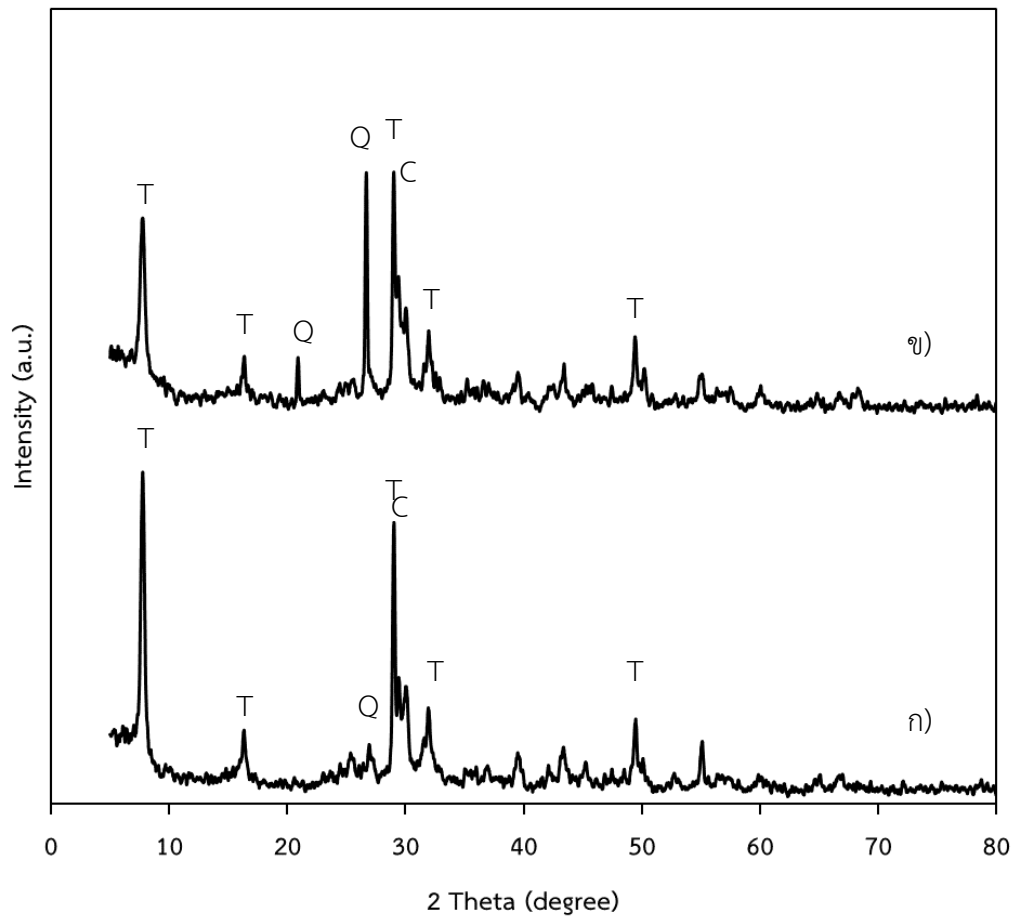
ภาพที่ 4.26 การหัดตัวหลังเผาของชิ้นงานสูตร RHA10WC และ SAND10WC อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.27 ชิ้นงานสูตร RHA10WC และ SAND10WC ที่อุณหภูมิต่างๆ อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

4.7.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟส

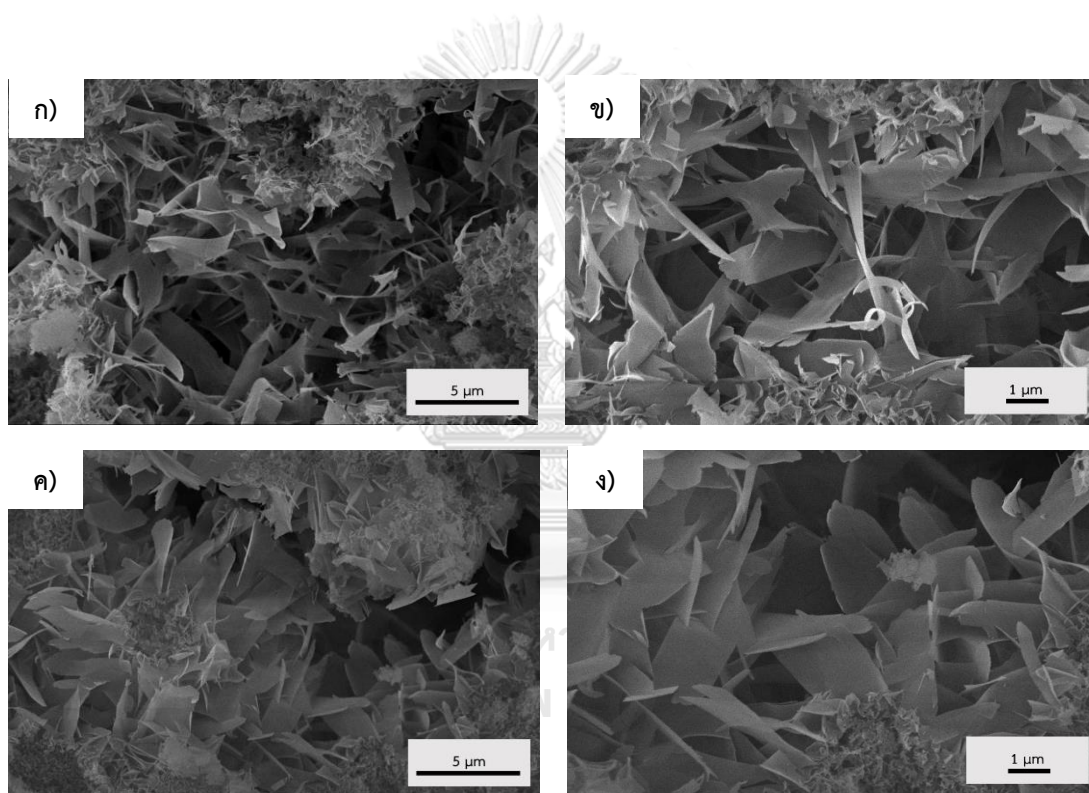
การวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสจากสูตร RHA10WC และ SAND10WC ที่เติมปูนซีเมนต์ขาว ร้อยละ 10 อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 4.28 พบว่า ชิ้นงานสูตร RHA10WC มีเฟสที่ปรากฏคล้ายกับชิ้นงานสูตร RHA0 และ RHA1 กล่าวคือมีเฟส โทเบอร์โมไรต์ แคลไซต์ และซิลิกาที่เริ่มเป็นผลึกจากซิลิกาอสัณฐานจากเถ้าแกลบ ดังภาพที่ 4.28 ก) และในสูตร SAND10WC ก็มีเฟสที่ปรากฏคล้ายกับชิ้นงานสูตร SAND0 และ SAND1 กล่าวคือมีเฟส โทเบอร์โมไรต์ แคลไซต์ และควอตซ์จากทรายบดที่ทำปฏิกิริยาไม่หมด ดังภาพที่ 4.28 ข)



ภาพที่ 4.28 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของชั้นงาน ก) RHA10WC และ ข) SAND10WC
 อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง
 (C=Calcite, T=Tobermorite, Q=Quartz)

4.7.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคสูตร RHA10WC และ SAND10WC อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมงที่กำลังขยาย 5000X และ 10000X ดังแสดงในภาพที่ 4.29 พบว่าลักษณะโครงสร้างจุลภาคของ RHA10WC และ SAND10WC มีลักษณะคล้ายกับสูตรที่เดิม ยิปซัม RHA1 และ SAND1 กล่าวคือ ผลึกโทเบอร์โมไรต์มีขนาดใหญ่ขึ้น โค้งงอและมีลักษณะแตกเป็น ริวที่ส่วนปลายของผลึก ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Mostafa NY และคณะ²⁴ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์และซิลิเกตไฮดรอกไซด์ที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ขาวและยิปซัม สามารถเข้าไปแทนที่ในโครงสร้างของ โทเบอร์โมไรต์ได้ ทำให้โครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนแปลงไป



ภาพที่ 4.29 โครงสร้างจุลภาคของของชิ้นงาน RHA10WC และ SAND10WC นึ่งอัดไอที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส 10 ชั่วโมงโดยที่ ก) RHA10WC กำลังขยาย 5000x ข) RHA10WC กำลังขยาย 10000x ค) SAND10WC กำลังขยาย 5000x และ ง) SAND10WC กำลังขยาย 10000x

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองเตรียมชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกตในงานวิจัยนี้ ด้วยวิธีการหล่อในแม่พิมพ์ จากนั้นนำชิ้นงานไปนึ่งอัดไอที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส แรงดัน 190-200 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่ระยะเวลาการนึ่งอัดไอแตกต่างกัน 2 10 และ 20 ชั่วโมง โดยเฟสแคลเซียมซิลิเกตที่พบในชิ้นงานทั้งหมดเป็นเฟสโทเบอร์โมไรต์ และจากการทดสอบสมบัติทางกายภาพและวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกต สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ผลของการเติมยิปซัม การเติมยิปซัมช่วยเร่งการเกิดเฟสโทเบอร์โมไรต์ได้ในช่วงระยะเวลาการนึ่งอัดไอสั้น (2 ชั่วโมง) แต่จะมีผลต่อโครงสร้างจุลภาคของโทเบอร์โมไรต์ ซึ่งยิปซัมจะทำให้เกิดความผิดปกติของผลึกโทเบอร์โมไรต์ กล่าวคือ มีลักษณะแบนมากขึ้นและมีขนาดใหญ่ขึ้น จะไม่ส่งผลดีต่อชิ้นงาน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงไปของรูปร่างผลึกลักษณะนี้ทำให้ค่าค่าความแข็งแรงต่อการดัดโค้งมีค่าลดลง ถึงแม้ว่าค่าความหนาแน่นจะลดลง เนื่องจากการเกิดของเฟสโทเบอร์โมไรต์ และเมื่อระยะเวลาในการนึ่งอัดไอเพิ่มมากขึ้น การเติมยิปซัมจะทำให้ผลึกโทเบอร์โมไรต์เป็นริ้วที่ปลายผลึกมากขึ้นด้วย สามารถเติมยิปซัมเพื่อช่วยเร่งปฏิกิริยาได้ในกรณีที่ต้องการเตรียมชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกตชนิดที่ 1 ใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ ในทางกลับกันในกรณีที่ต้องการเตรียมชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกตชนิดที่ 2 ใช้งานที่อุณหภูมิสูง การเติมยิปซัมจะไม่ส่งผลดีต่อชิ้นงาน

5.1.2 เวลาในการนึ่งอัดไอ ระยะเวลาในการนึ่งอัดไอมีผลต่อการเกิดเฟสโทเบอร์โมไรต์ ยิ่งระยะเวลาในการนึ่งอัดไอเพิ่มมากขึ้น เกิดเฟสโทเบอร์โมไรต์มากขึ้นตาม ในทางกลับกันถ้าระยะเวลาในการนึ่งอัดไอน้อยจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ในชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกต

5.1.3 การเติมปูนซีเมนต์ขาว ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) และอะลูมินา (Al_2O_3) ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ขาวสามารถแทนที่เข้าไปในโครงสร้างของโทเบอร์โมไรต์ได้เช่นเดียวกับยิปซัม ดังนั้น ผลของการเติมปูนซีเมนต์ขาวจึงคล้ายคลึงกับการเติมยิปซัมในแคลเซียมซิลิเกต

สมบัติทางกายภาพของชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกตมีความสัมพันธ์กัน เช่น ความหนาแน่นของชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกตจะมีความสัมพันธ์กับการเกิดเฟสโทเบอร์โมไรต์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มที่ 1 แก้วแกลบและกลุ่มที่ 2 ทรายบด แก้วแกลบเป็นซิลิกาอสัญฐานจึงทำปฏิกิริยาเกิดเฟสโทเบอร์โมไรต์ได้มากกว่า เกิดรูพรุนในโครงสร้างมากกว่า จึงส่งผลให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นน้อยกว่า และความหนาแน่นยังมีความสัมพันธ์กับค่าการนำความร้อน ซึ่งค่าการนำความร้อนบ่งบอกถึงสมบัติความเป็นฉนวนกันความร้อนของชิ้นงาน โดยชิ้นงานที่มีการนำความร้อนต่ำจะแสดงสมบัติความเป็น

ฉนวนกันความร้อนสูง ซึ่งชิ้นงานที่มีความพรุนตัวสูงจะมีค่าการนำความร้อนต่ำ ดังนั้น ชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกตที่มีความพรุนตัวสูงจึงมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำมาก

การหดตัวหลังเผาของชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกตมีสาเหตุหลักมาจากการเปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิสูง เฟสโทเบอร์โมไรต์จะเปลี่ยนเฟสที่ประมาณ 850 องศาเซลเซียส เฟสโทเบอร์โมไรต์ที่มีลักษณะเป็นแท่ง (Lath-like crystal) ซึ่งจะใกล้เคียงกับรูปร่างผลึกของวอลลาสโตไนต์มากกว่าโทเบอร์โมไรต์ที่มีลักษณะแบนคล้ายจาน (Plate-like crystal) จึงหดตัวน้อยกว่า

สรุปได้ว่า การเตรียมชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกตจากเถ้าแกลบสามารถทดแทนการใช้ทรายบดเป็นวัตถุดิบที่ให้ซิลิกาได้ และในงานวิจัยนี้สามารถเตรียมชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกตชนิดที่ 1 ได้ แต่ยังคงไม่สามารถใช้งานเป็นแคลเซียมซิลิเกตชนิดที่ 2 ได้ เนื่องจากค่าการหดตัวหลังเผาที่ 927 องศาเซลเซียส มีค่ามากกว่า ร้อยละ 2 ตามมาตรฐาน ASTM C533 โดยสูตรที่ดีที่สุด คือ สูตร RHA0 อุณหภูมิการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง มีสมบัติดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สมบัติของชิ้นงานสูตร RHA0 อุณหภูมิการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

สมบัติทางกายภาพ	RHA0/10 ชั่วโมง
ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.19
ความแข็งแรงต่อการตัดโค้ง (กิโลพาสคัล)	737
การหดตัวเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 649 องศาเซลเซียส (ร้อยละ)	0.65
ค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิห้อง (วัตต์ต่อเมตรเคลวิน)	0.063

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาการนึ่งอัดไอเพิ่มเติม โดยอาจจะเพิ่มระยะเวลาหรือเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น

2) ศึกษาการเกิดเฟสโทเบอร์โมไรต์หรือโซนอตไลต์เชิงปริมาณ

ภาคผนวก

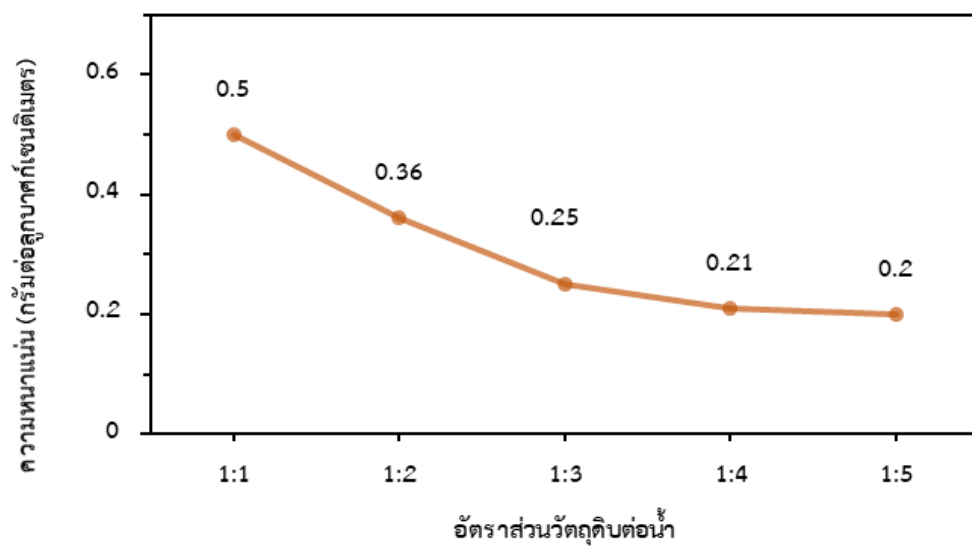


จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก การทดลองเตรียมชิ้นงาน



ภาพที่ ก.1 เครื่องนึ่งอัดไอที่ใช้ในการทดลอง



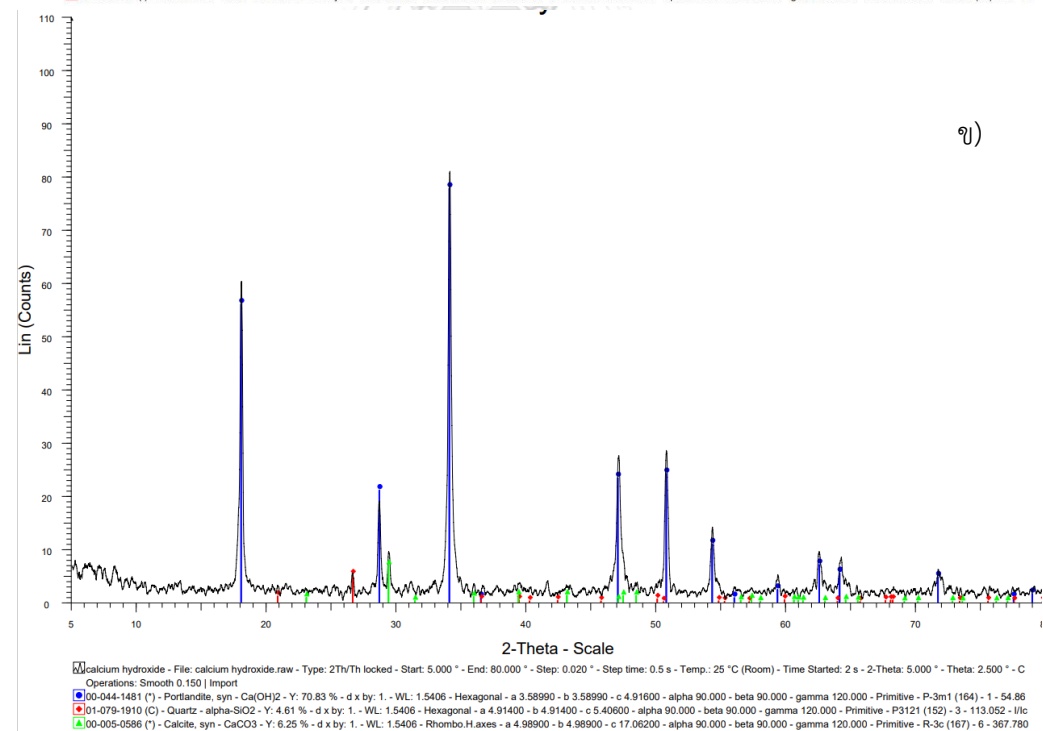
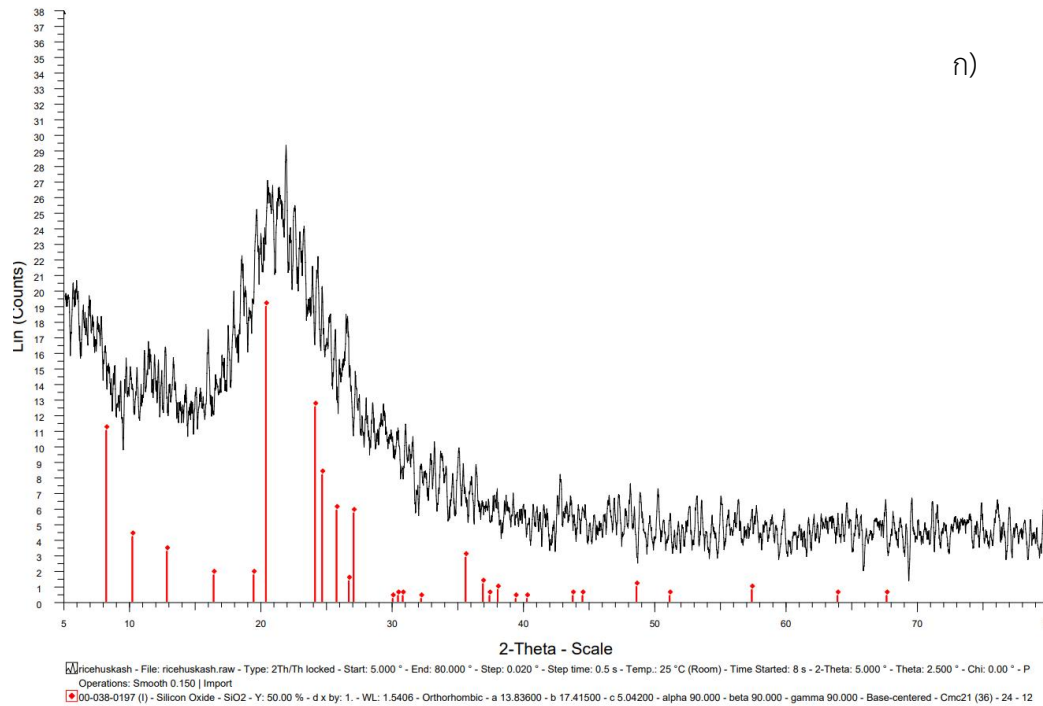
ภาพที่ ก.2 ความหนาแน่นของชิ้นงานสูตร RHA10



ภาพที่ ก.3 ชิ้นงานหลังอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส



ภาคผนวก ข วัตถุบิตั้งต้น



ภาพที่ ข.1 องค์ประกอบเฟสของวัตถุบิตั้งต้น

ก) แก้วแกลบ และ ข) แคลเซียมไฮดรอกไซด์

ภาคผนวก ค ผลการทดลอง

ตารางที่ ค.1 ความหนาแน่นของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 แก้วแกลบและกลุ่มที่ 2 ทรายบด อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอน้ำ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

สูตร		ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
กลุ่มที่ 1 แก้วแกลบ	RHA0	0.24	0.24±0.00
		0.24	
		0.24	
		0.24	
	RHA1	0.23	0.23±0.01
		0.23	
		0.23	
		0.24	
	RHA3	0.21	0.20±0.00
		0.20	
		0.20	
		0.20	
	RHA10	0.19	0.20±0.01
		0.21	
		0.20	
		0.21	
กลุ่มที่ 2 ทรายบด	SAND0	0.27	0.26±0.00
		0.27	
		0.26	
		0.26	
	SAND1	0.23	0.23±0.00
		0.23	
		0.23	
		0.23	

ตารางที่ ค.1 (ต่อ) ความหนาแน่นของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 ถ้ำแกลบและกลุ่มที่ 2 ทรายบด อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

สูตร		ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
กลุ่มที่ 2 ทรายบด (ต่อ)	SAND3	0.24	0.23±0.00
		0.23	
		0.24	
		0.23	
	SAND10	0.21	0.20±0.01
		0.20	
		0.21	
		0.20	

ตารางที่ ค.2 ความหนาแน่นของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 ถ้ำแกลบและกลุ่มที่ 2 ทรายบด อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 และ 20 ชั่วโมง

สูตร		ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
10 ชั่วโมง			
กลุ่มที่ 1 ถ้ำแกลบ	RHA0	0.19	0.19±0.00
		0.19	
		0.18	
		0.19	
	RHA1	0.20	0.20±0.00
		0.20	
		0.20	
		0.21	

ตารางที่ ค.2 (ต่อ) ความหนาแน่นของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 เถ้าแกลบและกลุ่มที่ 2 ทรายบด อุนหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 และ 20 ชั่วโมง

สูตร		ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
10 ชั่วโมง (ต่อ)			
กลุ่มที่ 2 ทรายบด	SANDO	0.22	0.22±0.00
		0.22	
		0.22	
		0.23	
	SAND1	0.22	0.21±0.01
		0.22	
		0.21	
		0.20	
20 ชั่วโมง			
กลุ่มที่ 1 เถ้าแกลบ	RHA0	0.19	0.19±0.01
		0.19	
		0.18	
		0.20	
	RHA1	0.20	0.20±0.00
		0.20	
		0.20	
		0.20	
กลุ่มที่ 2 ทรายบด	SANDO	0.22	0.22±0.01
		0.22	
		0.22	
		0.20	
	SAND1	0.23	0.23±0.00
		0.23	
		0.23	
		0.23	

ตารางที่ ค.3 ความหนาแน่นของชิ้นงานสูตรที่เติมปูนซีเมนต์ขาว อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

สูตร		ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
กลุ่มที่ 1 เถ้าแกลบ	RHA10WC	0.20	0.20±0.01
		0.19	
		0.20	
		0.20	
กลุ่มที่ 2 ทรายบด	SAND10WC	0.24	0.24±0.01
		0.24	
		0.24	
		0.23	

ตารางที่ ค.4 ความแข็งแรงต่อการตัดโค้งของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 เถ้าแกลบและกลุ่มที่ 2 ทรายบด อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

สูตร		ความแข็งแรงต่อการตัดโค้ง (กิโลพาสคัล)	ความแข็งแรงต่อการตัดโค้ง เฉลี่ย (กิโลพาสคัล)
กลุ่มที่ 1 เถ้าแกลบ	RHA0	498	341±90
		319	
		298	
		268	
		323	
	RHA1	201	457±166
		462	
		462	
		494	
		664	

ตารางที่ ค.4 (ต่อ) ความแข็งแรงต่อการตัดโค้งของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 เถ้าแกลบและกลุ่มที่ 2 ทราบยอด
อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

สูตร		ความแข็งแรงต่อการตัดโค้ง (กิโลพาสคัล)	ความแข็งแรงต่อการตัดโค้ง เฉลี่ย (กิโลพาสคัล)
กลุ่มที่ 1 เถ้าแกลบ (ต่อ)	RHA3	399	394±109
		301	
		552	
		434	
		283	
	RHA10	272	349±87
		276	
		310	
		442	
		443	
กลุ่มที่ 2 ทราบยอด	SAND0	350	172±100
		119	
		123	
		138	
		132	
	SAND1	471	417±140
		340	
		221	
		501	
		353	
	SAND3	617	475±129
		511	
		560	
		567	
		253	

ตารางที่ ค.4 (ต่อ) ความแข็งแรงต่อการตัดโค้งของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 เถ้าแกลบและกลุ่มที่ 2 ทราบบด
อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

สูตร		ความแข็งแรงต่อการตัดโค้ง (กิโลพาสคัล)	ความแข็งแรงต่อการตัดโค้ง เฉลี่ย (กิโลพาสคัล)
กลุ่มที่ 2 ทราบบด (ต่อ)	SAND10	148	215±68
		134	
		269	
		271	
		253	

ตารางที่ ค.5 ความแข็งแรงต่อการตัดโค้งของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 เถ้าแกลบและกลุ่มที่ 2 ทราบบด
อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 และ 20 ชั่วโมง

สูตร		ความแข็งแรงต่อการตัดโค้ง (กิโลพาสคัล)	ความแข็งแรงต่อการตัดโค้ง เฉลี่ย (กิโลพาสคัล)
10 ชั่วโมง			
กลุ่มที่ 1 เถ้าแกลบ	RHA0	565	737±110
		788	
		862	
		751	
		719	
	RHA1	432	798±256
		1158	
		846	
		811	
		742	
กลุ่มที่ 2 ทราบบด	SAND0	681	1005±253
		1302	
		1130	
		810	
		1104	

ตารางที่ ค.5 (ต่อ) ความแข็งแรงต่อการตัดโค้งของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 เถ้าแกลบและกลุ่มที่ 2 ทราบด
อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 และ 20 ชั่วโมง

สูตร		ความแข็งแรงต่อการตัดโค้ง (กิโลพาสคัล)	ความแข็งแรงต่อการตัดโค้ง เฉลี่ย (กิโลพาสคัล)
กลุ่มที่ 2 ทราบด (ต่อ)	SAND1	928	1126±223
		1420	
		1274	
		900	
		1107	
20 ชั่วโมง			
กลุ่มที่ 1 เถ้าแกลบ	RHA0	581	734±133
		926	
		735	
		782	
		644	
	RHA1	634	801±163
		1050	
		683	
		852	
		788	
กลุ่มที่ 2 ทราบด	SAND0	780	1026±320
		756	
		1515	
		1176	
		904	
	SAND1	1021	1066±162
		1339	
		1063	
		915	
		994	

ตารางที่ ค.6 การหัดตัวหลังเผาของชิ้นงานของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 เถ้าแกลบและกลุ่มที่ 2 ทรายบด
อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

สูตร		649 องศาเซลเซียส		927 องศาเซลเซียส	
		การหัดตัว หลังเผา (ร้อยละ)	การหัดตัว หลังเผาเฉลี่ย (ร้อยละ)	การหัดตัว หลังเผา (ร้อยละ)	การหัดตัว หลังเผาเฉลี่ย (ร้อยละ)
กลุ่มที่ 1 เถ้าแกลบ	RHA0	0.51	0.81±0.49	18.78	19.93±3.18
		1.07			
		1.35			
		0.3			
	RHA1	0.99	1.19±0.35	12.32	11.91±0.51
		1.44			
		1.54			
		0.80			
	RHA3	1.32	1.47±0.41	19.43	18.24±1.15
		1.45			
		2.04			
		1.08			
	RHA10	0.73	1.09±0.27	13.41	14.65±3.12
		1.08			
		1.36			
		1.18			
กลุ่มที่ 2 ทรายบด	SANDO	1.31	1.06±0.41	30.48	31.86±2.38
		0.45			
		1.33			
		1.14			
	SAND1	0.80	1.29±0.66	36.87	35.95±1.41
		2.22			
		0.83			
		1.32			

ตารางที่ ค.6 (ต่อ) การหัดตัวหลังเผาของชิ้นงานของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 แก้วแกลบและกลุ่มที่ 2 ทราบายด์ อุดมภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

สูตร		649 องศาเซลเซียส		927 องศาเซลเซียส	
		การหัดตัว หลังเผา (ร้อยละ)	การหัดตัว หลังเผาเฉลี่ย (ร้อยละ)	การหัดตัว หลังเผา (ร้อยละ)	การหัดตัว หลังเผาเฉลี่ย (ร้อยละ)
กลุ่มที่ 2 ทราบายด์ (ต่อ)	SAND3	1.50	1.13±0.56	37.75	34.71±2.25
		1.54			
		0.32			
		1.16			
	SAND10	1.10	0.83±0.32	37.80	37.31±1.37
		0.37			
		0.97			
		0.89			

ตารางที่ ค.7 การหัดตัวหลังเผาของชิ้นงานของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 แก้วแกลบและกลุ่มที่ 2 ทราบายด์ อุดมภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 และ 20 ชั่วโมง

สูตร		649 องศาเซลเซียส		927 องศาเซลเซียส	
		การหัดตัว หลังเผา (ร้อยละ)	การหัดตัว หลังเผาเฉลี่ย (ร้อยละ)	การหัดตัว หลังเผา (ร้อยละ)	การหัดตัว หลังเผาเฉลี่ย (ร้อยละ)
10 ชั่วโมง					
กลุ่มที่ 1 แก้วแกลบ	RHA0	0.75	0.65±0.18	5.01	4.21±0.59
		0.38			
		0.75			
		0.71			
	RHA1	0.51	0.78±0.25	15.40	13..23±3.42
		1.10			
		0.72			
		0.78			

ตารางที่ ค.7 (ต่อ) การหัดตัวหลังเผาของชิ้นงานของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 เถ้าแกลบและกลุ่มที่ 2 ทราบบด
อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 และ 20 ชั่วโมง

สูตร		649 องศาเซลเซียส		927 องศาเซลเซียส	
		การหัดตัว หลังเผา (ร้อยละ)	การหัดตัว หลังเผาเฉลี่ย (ร้อยละ)	การหัดตัว หลังเผา (ร้อยละ)	การหัดตัว หลังเผาเฉลี่ย (ร้อยละ)
กลุ่มที่ 2 ทราบบด	SANDO	0.80	0.69±0.09	31.03	31.14±1.22
		0.59			
		0.72			
		0.66			
	SAND1	0.52	0.67±0.26	30.23	31.26±0.81
		1.01			
		0.70			
		0.44			
20 ชั่วโมง					
กลุ่มที่ 1 เถ้าแกลบ	RHA0	1.23	0.90±0.67	8.40	7.96±1.10
		1.55			
		0.00			
		0.80			
	RHA1	0.99	0.84±0.11	22.96	24.19±2.47
		0.74			
		0.77			
		0.87			
กลุ่มที่ 2 ทราบบด	SANDO	0.51	0.71±0.13	29.23	29.70±3.17
		0.75			
		0.77			
		0.80			

ตารางที่ ค.7 (ต่อ) การหัดตัวหลังเผาของชิ้นงานของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 แก้วแกลบและกลุ่มที่ 2 ทรายบด อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 และ 20 ชั่วโมง

สูตร		649 องศาเซลเซียส		927 องศาเซลเซียส	
		การหัดตัว หลังเผา (ร้อยละ)	การหัดตัว หลังเผาเฉลี่ย (ร้อยละ)	การหัดตัว หลังเผา (ร้อยละ)	การหัดตัว หลังเผาเฉลี่ย (ร้อยละ)
กลุ่มที่ 2 ทรายบด (ต่อ)	SAND1	1.00	0.71±0.25	30.00	33.33±6.27
		0.39		28.02	
		0.78		42.19	
		0.66		33.11	

ตารางที่ ค.8 การหัดตัวหลังเผาของชิ้นงานสูตรที่เติมปูนซีเมนต์ขาว อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

สูตร		649 องศาเซลเซียส		927 องศาเซลเซียส	
		การหัดตัว หลังเผา (ร้อยละ)	การหัดตัว หลังเผาเฉลี่ย (ร้อยละ)	การหัดตัว หลังเผา (ร้อยละ)	การหัดตัว หลังเผาเฉลี่ย (ร้อยละ)
กลุ่มที่ 1 แก้วแกลบ	RHA10WC	0.50	0.77±0.22	17.79	18.08± 2.92
		0.73		14.65	
		1.04		21.80	
		0.83		18.09	
กลุ่มที่ 2 ทรายบด	SAND10WC	1.06	0.83±0.23	35.54	32.00±5.89
		0.61		23.22	
		0.99		33.99	
		0.67		35.25	

ตารางที่ ค.9 การนำความร้อนของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 แก้วแกลบและกลุ่มที่ 2 ทรายบด อุณหภูมิในการ
 นิ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

สูตร		การนำความร้อน (วัตต์ต่อเมตรเคลวิน)	การนำความร้อนเฉลี่ย (วัตต์ต่อเมตรเคลวิน)
กลุ่มที่ 1 แก้วแกลบ	RHA0	0.068	0.068± 0.001
		0.069	
		0.068	
		0.067	
	RHA1	0.068	0.068± 0.001
		0.069	
		0.068	
		0.068	
	RHA3	0.066	0.067± 0.001
		0.066	
		0.068	
		0.066	
RHA10	0.066	0.065± 0.001	
	0.066		
	0.064		
	0.065		
กลุ่มที่ 2 ทรายบด	SAND0	0.066	0.066± 0.001
		0.066	
		0.065	
		0.066	
	SAND1	0.064	0.063±0.001
		0.064	
		0.062	
		0.063	

ตารางที่ ค.9 (ต่อ) การนำความร้อนของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 เถ้าแกลบและกลุ่มที่ 2 ทราบบด อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

สูตร		การนำความร้อน (วัตต์ต่อเมตรเคลวิน)	การนำความร้อนเฉลี่ย (วัตต์ต่อเมตรเคลวิน)
กลุ่มที่ 2 ทราบบด (ต่อ)	SAND3	0.066	0.066± 0.001
		0.066	
		0.065	
		0.066	
	SAND10	0.064	0.063±0.001
		0.064	
		0.062	
		0.063	

ตารางที่ ค.10 การนำความร้อนของชิ้นงานของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 เถ้าแกลบและกลุ่มที่ 2 ทราบบด อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 และ 20 ชั่วโมง

สูตร		การนำความร้อน (วัตต์ต่อเมตรเคลวิน)	การนำความร้อนเฉลี่ย (วัตต์ต่อเมตรเคลวิน)
10 ชั่วโมง			
กลุ่มที่ 1 เถ้าแกลบ	RHA0	0.062	0.063±0.001
		0.063	
		0.063	
		0.062	
	RHA1	0.061	0.062±0.001
		0.062	
		0.063	
		0.062	
กลุ่มที่ 2 ทราบบด	SAND0	0.057	0.057±0.001
		0.056	
		0.058	
		0.057	

ตารางที่ ค.10 (ต่อ) การนำความร้อนของชิ้นงานของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 เถ้าแกลบและกลุ่มที่ 2 ทรายบด
อุณหภูมิในการนึ่งอัดไอ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 และ 20 ชั่วโมง

สูตร		การนำความร้อน (วัตต์ต่อเมตรเคลวิน)	การนำความร้อนเฉลี่ย (วัตต์ต่อเมตรเคลวิน)
กลุ่มที่ 2 ทรายบด (ต่อ)	SAND1	0.063	0.063± 0.001
		0.064	
		0.064	
		0.062	
20 ชั่วโมง			
กลุ่มที่ 1 เถ้าแกลบ	RHA0	0.067	0.066±0.001
		0.064	
		0.066	
		0.066	
	RHA1	0.063	0.063±0.000
		0.063	
		0.063	
		0.064	
กลุ่มที่ 2 ทรายบด	SAND0	0.057	0.057±0.000
		0.058	
		0.057	
		0.057	
	SAND1	0.062	0.062±0.000
		0.062	
		0.062	
		0.063	

บรรณานุกรม

1. Kristanto L, Sugiharto H, Agus SWD, Pratama SA. Calcium Silicate Board as Wall-facade. *Procedia Engineering*. 2017;171:679-688.
2. Industry Production, Trends, Sales, Supply, Demand, Analysis & Forecast to 2025. <https://www.marketresearchstore.com/report/global-calcium-silicate-boards-market-2018-industry-production-298134>. Accessed 27 Mar., 2019.
3. Ebert H-P, Hemberger F. Intercomparison of thermal conductivity measurements on a calcium silicate insulation material. *International Journal of Thermal Sciences*. 2011;50(10):1838-1844.
4. PROMAT. Calcium Silicate Insulation. <https://www.promat-hpi.com/downloads/get/en/8D778F21B04244AEA2A141C9F5E3DD46#>. Accessed 27 Mar., 2019.
5. Shannon RF, Inventor. Method of producing calciumsilicate type high temperature thermal insulation materials. US patent 3,574,113. 6 Apr., 1971.
6. Harper S. Developing asbestos-free calcium silicate building boards. *Composites*. 1982;13(2):123-128.
7. Haastrup S, Bødker MS, Hansen SR, Yu D, Yue Y. Impact of amorphous micro silica on the C-S-H phase formation in porous calcium silicates. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2018;481:556-561.
8. Wada S, and Wasanapiampong, T. Industrial Furnace Burning Rice Husk in Thailand and Quality of Silica in the Ash. Paper presented at: The 1st International Conference on the Utilization of Rice Husk and Rice Husk Silica; September 21-22, 2009; Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand.
9. S. Shaw SMC, C.M.B. Henderson. Hydrothermal formation of the calcium silicate hydrates, tobermorite ($\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) and xonotlite ($\text{Ca}_6\text{Si}_6\text{O}_{17}(\text{OH})_2$). *Chemical Geology*. 2000;167:129-140.
10. Hong SY, Glasser FP. Phase relations in the $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ system to 200 °C at saturated steam pressure. *Cement and Concrete Research*. 2004;34(9):1529-

1534.

11. Meller N, Hall C, Phipps JS. A new phase diagram for the $\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{SiO}_2\text{H}_2\text{O}$ hydroceramic system at 200°C . *Materials Research Bulletin*. 2005;40(5):715-723.
12. Diamond S, Dolch WL, White JL. Studies on tobermorite-Like calcium silicate hydrates. 1963.
13. Kulprathipanja A, Dolin RL, Camp N, Inventors. High temperature calcium silicate insulation. US patent 9,670,098. 6 Jun., 2017.
14. Krijgsman P, Inventor. Method for the formation of calcium silicate and the resulting structure. US patent 4,545,970. 8 Oct., 1985.
15. Helser JL, Inventor. Method for making xonotlite insulation by foaming an aqueous slurry of calcareous and siliceous reactants and cellulosic and glass fibers. US patent 4,402,892. 6 Sep., 1983.
16. Whitaker TE, Myles S, Gardner IP, Inventors. Process for the manufacture of calcium silicate hydrate objects. US patent 4,131,638. 26 Dec., 1978.
17. Helser JL, Shannon RF, Inventors. Method of producing hydrous calcium silicate products and the products thereof. US patent 3,895,096. 15 Jul., 1975.
18. Chen JJ, Thomas JJ, Taylor HFW, Jennings HM. Solubility and structure of calcium silicate hydrate. *Cement and Concrete Research*. 2004;34(9):1499-1519.
19. Laidler T, Booth D, Inventors. Method of producing calcium silicate products. US patent 3,804,652. 16 Apr., 1974.
20. Pugovkina Y, Kutugin V, Ostroumova A, Rymanova I. High Temperature and Heat Insulated Calcium Silicate Materials. *Key Engineering Materials*. 2016;683:209-214.
21. Snell D. Review of Synthesis and Properties of Tobermorite, C-S-H (I), and C-S-H Gel. *Journal of the American Ceramic Society*. 1975;58(7-8):292-295.
22. Liu F, Wang XD, Cao JX. Effect of Hydrothermal Process on Xonotlite Crystal. *Advanced Materials Research*. 2011;382:379-383.
23. Milestone NB, Ahari GK. Hydrothermal processing of xonotlite based compositions. *Advances in Applied Ceramics*. 2013;106(6):302-308.
24. Mostafa NY, Shaltout AA, Omar H, Abo-El-Enein SA. Hydrothermal synthesis and

- characterization of aluminium and sulfate substituted 1.1nm tobermorites. *Journal of Alloys and Compounds*. 2009;467(1-2):332-337.
25. American Society for Testing and Materials. Standard Specification for Calcium Silicate Block and Pipe Thermal Insulation. *ASTM C533*. United States: ASTM International.
 26. Singh B. Rice husk ash. *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete* 2018:417-460.
 27. จิวราภรณ์ อินทร์เกลี้ยง และ ธัญญา เสาวภาคย์. การนำเถ้าแกลบข้าวมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ. Paper presented at: The 7th NPRU National Academic Conference Nakhon Pathom Rajabhat University; 30-31 Mar., 2015; Nakhon Pathom, Thailand.
 28. รสิมา จันทร์จำปา และ อิทธิพล แจ่มชัด. การศึกษาเถ้าแกลบดำเพื่อใช้เป็นสารตัวเติมในยาง. https://kukr.lib.ku.ac.th/proceedings/index.php?/KUCON2/search_detail/result/12991 Accessed 23 Mar., 2019
 29. ปูนปลาสเตอร์. <http://elearning.psu.ac.th/courses/267/%E0%B8%9A%E0%B8%97%E0%B8%97%E0%B8%B5%E0%B9%88%20%20%E0%B8%9B%E0%B8%B9%E0%B8%99%E0%B8%9B%E0%B8%A5%E0%B8%B2%E0%B8%AA%E0%B9%80%E0%B8%95%E0%B8%AD%E0%B8%A3%E0%B9%8C.pdf>. Accessed 6 Mar., 2021.
 30. ลดา พันธุ์สุขุมธนา. ปูนปลาสเตอร์กับการนำกลับมาใช้. วารสารเซรามิกส์. Vol 312552:34-36.
 31. Cao Z, Cao Y-d, Zhang J-s, Sun C-b, Li X-l. Preparation and characterization of high-strength calcium silicate boards from coal-fired industrial solid wastes. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. 2015;22(8):892-900.
 32. Yue HZ, Wang X, Yang ZZ, Wei CC. Dynamic Hydrothermal Synthesis of Super-Low Density Xonotlite Thermal Insulation Materials from Industrial Quartz Powder. *Key Engineering Materials*. 2017;726:569-575.
 33. Galvankova L, Masilko J, Solny T, Stepankova E. Tobermorite Synthesis Under Hydrothermal Conditions. *Procedia Engineering*. 2016;151:100-107.
 34. Chen M, Lu L, Wang S, Zhao P, Zhang W, Zhang S. Investigation on the formation of tobermorite in calcium silicate board and its influence factors under autoclaved curing. *Construction and Building Materials*. 2017;143:280-288.
 35. Helanova E, Drochytka R, Cerný V. Influence of Gypsum Additive on the

- Formation of Tobermorite in Autoclaved Aerated Concrete. *Key Engineering Materials*. 2016;714:116-121.
36. Cerný V, Melichar J, Fleischhacker J, Drochytka R. The Influence of Sulfates on Tobermorite Formation in Lime-Ash Composite. *Materials Science Forum*. 2018;916:179-183.
37. Yanagisawa K, Zhu K, Onda A, Kajiyoshi K, Kori T, Feng Q. Decrease of Thermal Shrinkage of Tobermorite Compacts at High Temperatures by Addition of Gypsum. *the Society of Inorganic Materials*,. 2003;10:363-369.
38. Arabi N, Jauberthie R, Chelghoum N, Molez L. Formation of C-S-H in calcium hydroxide–blast furnace slag–quartz–water system in autoclaving conditions. *Advances in Cement Research*. 2015;27(3):153-162.
39. Schlegel E, Hölscher T, Schneider HJ, Aneziris CG. Alkali Salt Corrosion of Calcium Silicate Thermal Insulation Materials. *Interceram-International Ceramic Review*. 2015;64(4):188-192.
40. Oertel T, Hutter F, Helbig U, SEXTL G. Amorphous silica in ultra-high performance concrete: First hour of hydration. *Cement and Concrete Research*. 2014;58:131-142.
41. Kingery WD. *Introduction to ceramics*: New York, Wiley; 1960.
42. Newman ES. Behavior of calcium sulfate at high temperatures. *Journal of research of the national bureau of standards*. 1941;27:191-196.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ชญานิน นิสัยมัน
วัน เดือน ปี เกิด	5 มีนาคม 2540
สถานที่เกิด	ระยอง
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต จากภาควิชาวัสดุศาสตร์ สาขาเซรามิกและวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2561
ที่อยู่ปัจจุบัน	95/4 ถนนญาณวิโรจน์ ตำบลเกาะขวาง อำเภอเมือง จังหวัดจันทบุรี
ผลงานตีพิมพ์	การนำเสนอผลงานทางวิชาการระดับนานาชาติแบบโปสเตอร์ ในหัวข้อ "EFFECT OF GYPSUM WASTE ADDITIONS ON THE LOW-DENSITY CALCIUM SILICATE INSULATING BOARD USING RICE HUSK ASH AS SiO ₂ SOURCE" ในการประชุมวิชาการ The 47th International Congress on Science, Technology and Technology-based Innovation (STT 47) ระหว่างวันที่ 5-7 ตุลาคม พ.ศ. 2564 แบบออนไลน์