



โครงการ
การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ การเตรียมวัสดุแคลเซียมซิลิเกตความหนาแน่นต่ำสำหรับงานวัสดุทนไฟ
Preparation Low Density Calcium Silicate Materials for Refractory Application

ชื่อนิสิต	นางสาวณัชชา ปาลวัฒน์	เลขประจำตัว	5933223323
	นางสาวนปภา ทิพอุทัย	เลขประจำตัว	5933231323
	นางสาวพิชญ์สินี อาทระประชาชิต	เลขประจำตัว	5933242223
ภาควิชา	วัสดุศาสตร์ แขนงวิชาเซรามิกและวัสดุศาสตร์		
ปีการศึกษา	2562		

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โครงการวิจัยระดับปริญญาตรี

เรื่อง

การเตรียมวัสดุแคลเซียมซิลิเกตความหนาแน่นต่ำสำหรับงานวัสดุทนไฟ
(Preparation Low Density Calcium Silicate Materials for Refractory Application)

เสนอ

ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ตามระเบียบการศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

นางสาวณัชชา	ปาลวัฒน์	เลขประจำตัว	5933223323
นางสาวนปภา	ทิพอุทัย	เลขประจำตัว	5933231323
นางสาวพิชญ์สินี	อาหารประชาชิต	เลขประจำตัว	5933242223

อนุมัติโดย



.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนากร วาสนาเพียรพงศ์)
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

ปีการศึกษา 2562

หัวข้องานวิจัย	การเตรียมวัสดุเคลือบเซรามิกเคลือบซีลิกเกตความหนาแน่นต่ำสำหรับงานวัสดุทนไฟ		
โดย	นางสาวณัชชา	पालวัฒน์	เลขประจำตัว 5933223323
	นางสาวนปภา	ทิพอุทัย	เลขประจำตัว 5933231323
	นางสาวพิชญ์สินี	อาทรประชาชิต	เลขประจำตัว 5933242223
สาขาวิชา	วัสดุศาสตร์		
แขนงวิชา	เซรามิกและวัสดุศาสตร์		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนากร วาสนาเพียรพงศ์		
ปีการศึกษา	2562		

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาวัสดุเซรามิกเคลือบซีลิกเกตความหนาแน่นต่ำที่มีสมบัติเป็นฉนวนความร้อนสำหรับงานก่อสร้างเตาเผา โดยทำการทดลองทั้งหมด 3 สูตร ได้แก่ ซีเมนต์ ทรายบด และพลาสติก จึงเกิดแนวคิดลดต้นทุนจากการผลิตอิฐทนไฟ โดยใช้แม่แบบพลาสติกที่เสื่อมสภาพจากโรงงานเซรามิกที่มีหลายหมื่นตันต่อปี มาเป็นวัตถุดิบเริ่มต้นในการผลิตอิฐทนไฟเคลือบซีลิกเกต และลดการใช้พลังงานในการผลิตโดยการลดอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาในการสร้างเคลือบซีลิกเกตให้สามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำ โดยทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของอิฐทนไฟด้วย XRD และทำการคำนวณหาค่าความหนาแน่นของอิฐทนไฟ เพื่อให้ได้อิฐทนไฟที่มีองค์ประกอบของ Tobermolite เป็นหลัก และมีความหนาแน่นต่ำ โดยจากผลการวิจัยพบว่าการขึ้นรูปแบบวิธีที่ 2 ให้ความหนาแน่นที่ต่ำกว่าการขึ้นรูปวิธีที่ 1 เนื่องจากปริมาณน้ำที่ใช้ในการขึ้นรูปมีผลต่อความหนาแน่นของชิ้นงาน การใช้เยื่อกระดาษในปริมาณ 60 กรัม ให้ความหนาแน่นต่ำที่สุด และสูตรซีเมนต์XXเป็นสูตรที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทั้ง 3 สูตร โดยเป็นสูตรที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีที่สุด มีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกับชิ้นงานมาตรฐาน และมีค่าความหนาแน่นต่ำสุดโดยมีค่าประมาณ $0.230 \pm 0.021 \text{ g/cm}^3$

Title	Preparation Low Density Calcium Silicate Materials for Refractory Application		
Authors	Miss. Natcha Palawat	student ID	5933223323
	Miss. Naphapa Thiputhai	student ID	5933231323
	Miss. Pitsinee Arthonprachachit	student ID	5933242223
Department	Materials Science		
Field	Ceramics and Materials Science		
Advisor	Asst. Prof. Dr. Thanakorn Wasanapiarnpong		
Academic Year	2019		

Abstract

The purpose of this study is to develop the low density calcium silicate materials for refractory application. In which classify 3 mixtures ash, sand and plaster. Therefore, to reduce the cost of refractory production by the deteriorate plaster mold from ceramic industries, as a raw materials to produce the calcium silicate in lower thermal energy. Calcium silicate sample were analyzed the phases composition by X-ray diffraction (XRD) that tobermorite is the main composition and calculated the density by sample size and weight. The study shown that in second attempt has formed lower density than first attempt, because the water content to form the sample has effect on the density. Using 60 g of paper pulp in rice husk ash is the best mixture of all, which has the best reaction between raw materials in milling process, the chemical composition closest to the commercial product and has the lowest density approximately $0.230 \pm 0.021 \text{ g/cm}^3$.

กิตติกรรมประกาศ

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการวิจัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์ ที่ให้ความรู้ ความช่วยเหลือ และชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหาในการทำงานวิจัยและเรื่องต่าง ๆ ตลอดมา

คณาจารย์และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ให้ความรู้และคำชี้แนะตลอดจนอำนวยความสะดวกในด้านต่าง ๆ

คณะวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทุนสนับสนุนในการทำโครงการวิทยาศาสตร์

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่สนับสนุนให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน คอยช่วยเหลือ และให้กำลังใจผู้จัดทำตลอดการเรียน

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 การใช้งานแคลเซียมซิลิเกตในงานก่อสร้าง.....	3
2.2 การใช้งานแคลเซียมซิลิเกตในงานวัสดุทนไฟ.....	4
2.3 กระบวนการผลิต.....	4
2.4 งานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.4.1 The use of Solid Residues Derived from Different Industrial Activities to obtain Calcium Silicates for use as Insulating Construction Materials.....	5
2.4.2 Synthesis and Characterization of Calcium Silicate Insulating Material using Avian Eggshell Waste.....	8
2.4.3 Impact of amorphous micro silica on the C-S-H phase formation in porous calcium silicates.....	9
2.4.4 Investigation on the formation of tobermorite in calcium silicate board and its influence factors under autoclaved curing.....	10
2.4.5 Development of a New Calcium Silicate Board with Super Insulating Properties.....	11

2.4.6 Recycle of plaster mold waste via Solution process.....	12
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	14
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี.....	14
3.2 วัสดุดิบ.....	14
3.3 ส่วนผสมในการทดลอง.....	15
3.4 แผนภาพแสดงประกอบการทดลอง.....	17
3.5 การวิเคราะห์สมบัติของตัวอย่าง.....	18
3.5.1 ความหนาแน่นของชิ้นงาน.....	18
3.5.2 ค่าความแข็งแรง (Strength).....	19
3.5.3 องค์กรประกอบทางเฟส (X - ray Diffraction).....	20
3.5.4 โครงสร้างทางจุลภาค (Scanning Electron Microscope; SEM).....	21
3.5.5 ค่าการนำความร้อน (Hot disk method).....	21
3.5.6 การวัดความทนไฟของวัสดุทนไฟ (Refractoriness).....	22
3.5.7 เครื่องวัดสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน (Dilatometer).....	22
3.6 ระยะเวลาในการดำเนินงาน.....	23
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	24
4.1 ผลการทดลองค่าความหนาแน่น.....	24
4.2 ผลการทดลององค์กรประกอบทางเฟส.....	27
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	30
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	30
5.2 อุปสรรค.....	30
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	31
เอกสารอ้างอิง.....	32
ภาคผนวก.....	34
ภาคผนวก แผนผังการเตรียมวัสดุดิบ.....	35
การเตรียมวัสดุดิบสูตรซีเมนต์XX.....	35
การเตรียมวัสดุดิบสูตรทราย.....	35
การเตรียมวัสดุดิบสูตร Plaster.....	36
การเตรียมเยื่อกระดาษ.....	36

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ^[14]	5
ตารางที่ 2.2 ความหนาแน่นของชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ^[14]	6
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุดิบ ^[15]	9
ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของแคลเซียมซิลิเกตสังเคราะห์ ^[15]	9
ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีของ Micro Silica ^[16]	10
ตารางที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Ca/Si และเปอร์เซ็นต์โดยมวลของซีเมนต์ ^[17]	11
ตารางที่ 3.1 สูตรส่วนผสมสำหรับการเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง วิธีที่ 1	15
ตารางที่ 3.2 สูตรส่วนผสมสำหรับการเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง วิธีที่ 2	15
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลอง วิธีที่ 1	24
ตารางที่ 4.2 ผลการทดลอง วิธีที่ 2	26

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แคลเซียมซิลิเกตบอร์ด.....	3
รูปที่ 2.2 การใช้แผ่นแคลเซียมซิลิเกตทำผนังห้อง	4
รูปที่ 2.3 กราฟ XRD (ซ้าย), กราฟ TGA-DTA (ขวา) ของโครงสร้างซิลิเกตจากวัตถุดิบ (A) MARBLE และ BIOMASS ASH, (B) MUSSEL และ BIOMASS ASH, (C) COMMERCIAL HYDROXIDE และ CHAMOTTE ^[14]	6
รูปที่ 2.4 ค่าการดูดซึมน้ำของอิฐ (ซ้าย) ค่าความแข็งแรงในการรับแรงกดของอิฐ (ขวา) ^[14]	7
รูปที่ 2.5 SEM MICROGRAPHS ของซิลิเกตจากวัตถุดิบ (A) MARBLE และ BIOMASS ASH, (B) MUSSEL และ BIOMASS ASH, (C) COMMERCIAL HYDROXIDE และ CHAMOTTE ^[14]	7
รูปที่ 2.6 กราฟ XRD ของวัสดุแคลเซียมซิลิเกตสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส ^[15]	8
รูปที่ 2.7 กราฟ XRD ของ (A) CS97.5, (B) CS92.8 ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ในเวลาที่ต่างกัน ^[16]	10
รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะที่แตกต่างกันของ CEMENT CLINKER ในแคลเซียมซิลิเกตบอร์ด ^[17]	11
รูปที่ 2.9 กราฟ XRD แสดง CURING TEMPERATURE ที่ต่างกัน (ซ้าย), CURING TIME ที่ต่างกัน (ขวา) ^[17]	11
รูปที่ 2.10 โครงสร้างผลึก (A) CSH, (B) TOBERMORITE, (C) XONOTLITE ^[18]	12
รูปที่ 3.1 วัตถุดิบที่ใช้ (A.) ใยแก้วXX (B.) เส้นใยเซรามิก (CERAMIC FIBER).....	15
รูปที่ 3.2 แผนผังการเตรียมวัสดุแคลเซียมซิลิเกตความหนาแน่นต่ำ วิธีที่ 1.....	17
รูปที่ 3.3 แผนผังการเตรียมวัสดุแคลเซียมซิลิเกตความหนาแน่นต่ำ วิธีที่ 2.....	18
รูปที่ 3.4 เครื่องวัดความแข็งแรง.....	20
รูปที่ 3.5 X-RAY DIFFRACTION (XRD).....	20
รูปที่ 3.6 SCANNING ELECTRON MICROSCOPE (SEM).....	21
รูปที่ 3.7 HOT DISK METHOD.....	22
รูปที่ 3.8 PYROMETRIC CONE	22
รูปที่ 4.1 ผลการทดสอบองค์ประกอบเฟสของชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกตบอร์ด(COMMERCIAL CALCIUM SILICATE).....	28
รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบองค์ประกอบเฟสของชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกตสูตรใยแก้วXX.....	28
รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบองค์ประกอบเฟสของชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกตสูตรทราย.....	29
รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบองค์ประกอบเฟสของชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกตสูตรพลาสติก.....	29
รูปที่ 1 แผนผังการเตรียมวัตถุดิบสูตรใยแก้วXX.....	35
รูปที่ 2 แผนผังการเตรียมวัตถุดิบสูตรทราย.....	35
รูปที่ 3 แผนผังการเตรียมวัตถุดิบสูตร PLASTER.....	36
รูปที่ 4 แผนผังการเตรียมเยื่อกระดาษ.....	36

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แคลเซียมซิลิเกต (Calcium silicate) เป็นวัสดุทนไฟที่สามารถทนความร้อนได้ดี นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมที่มีการใช้ความร้อนสูงในเตาเพื่อเผาหรือหลอมวัสดุต่าง ๆ เป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา แต่สามารถทนแรงต่าง ๆ ได้ดี อีกทั้งในปัจจุบันมีการพัฒนาสมบัติของวัสดุทนไฟที่ทำจากแคลเซียมซิลิเกต ขึ้นมาเพื่อใช้เป็นวัสดุทนไฟภายในเตาเผาอุณหภูมิสูงในโรงงานอุตสาหกรรมอย่างต่อเนื่อง ใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 600-1100 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับคุณภาพและการใช้งาน ติดตั้งง่าย และมีราคาไม่สูงนัก

โดยปกติการผลิตวัสดุทนไฟแคลเซียมซิลิเกตนั้น จะต้องใช้เครื่องมือที่มีราคาสูง และสิ้นเปลืองพลังงาน มักผลิตจากส่วนผสมของแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับทรายบด ผสมกันให้เป็นสารแขวนลอยในน้ำ มักใส่เส้นใยเซลลูโลสหรือเส้นใยเซรามิกเพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรง แล้วขึ้นรูปด้วยการกรองโดยใช้แรงดูดสุญญากาศช่วยอัดให้เป็นชิ้นงานขนาดและความหนาตามที่ต้องการ หลังจากปล่อยให้เซตตัวในอากาศแล้วนำไปอบด้วยไอน้ำความดันสูงที่อุณหภูมิประมาณ 160-200 องศาเซลเซียส จะได้เป็นแผ่นบอร์ดที่ต้องการทำให้โรงงานอุตสาหกรรมมีต้นทุนในการผลิตที่สูง จึงเกิดแนวคิดลดต้นทุนจากการผลิตอิฐทนไฟ โดยใช้แม่แบบพลาสติกที่เสื่อมสภาพจากโรงงานเซรามิก ที่มีการใช้งานหล่อแบบน้ำดินที่มีมากหลายหมื่นตันต่อปี มาเป็นวัตถุดิบเริ่มต้นในการผลิตอิฐทนไฟแคลเซียมซิลิเกต โดยนำแม่แบบพลาสติกที่เป็นแคลเซียมซัลเฟต ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) มาผสมกับโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซิลิเกต (CaSiO_3) และลดการใช้พลังงานในการผลิตโดยการลดอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาในการสร้างแคลเซียมซิลิเกตให้สามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถลดปริมาณแม่แบบพลาสติกที่เสื่อมสภาพไม่ให้ถูกทิ้งโดยเปล่าประโยชน์

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อพัฒนาวัสดุเซรามิกแคลเซียมซิลิเกตความหนาแน่นต่ำที่มีสมบัติเป็นฉนวนความร้อนสำหรับงานก่อสร้างเตาเผา

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

ในการพัฒนาวัสดุเซรามิกแคลเซียมซิลิเกตความหนาแน่นต่ำ จะใช้วัตถุดิบที่เป็นแหล่งของแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาจากวัสดุต่าง ๆ ได้แก่ ปูนขาว และทรายบด สำหรับใช้เป็นวัตถุดิบมาตรฐาน ใช้ปูนซีเมนต์ขาว และซีเถ้าXX สำหรับใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนซิลิกาที่ไม่เป็นผลึก และยิปซัมจากเศษแม่พิมพ์ปูนพลาสติกใช้แล้วกับโซเดียมซิลิเกต สำหรับการทดลองเตรียมจากซิลิกาที่เป็นสารละลาย ทำการทดลองผสมกับน้ำแล้วบดด้วยหม้อบด เพื่อให้มีความสม่ำเสมอและมีขนาดอนุภาคที่เล็กลง แล้วนำไปขึ้นรูปด้วยการกรองและดูดน้ำออกด้วยปั๊มสุญญากาศ ในแม่พิมพ์สแตนเลสขนาด แล้วนำไปอบด้วยไอน้ำความดันสูงที่อุณหภูมิในช่วง 160 – 200 องศาเซลเซียส แล้วทำการวิเคราะห์สมบัติ

ทางกล ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ ความพรุนตัว ความแข็งแรง การนำความร้อน องค์กรประกอบเฟส และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้เทคโนโลยีการผลิตแผ่นแคลเซียมซิลิเกตที่มีความพรุนตัวสูง ความหนาแน่นต่ำ แต่คงความแข็งแรง และมีสมบัติความเป็นฉนวนกันความร้อนทนไฟขึ้นในประเทศไทย

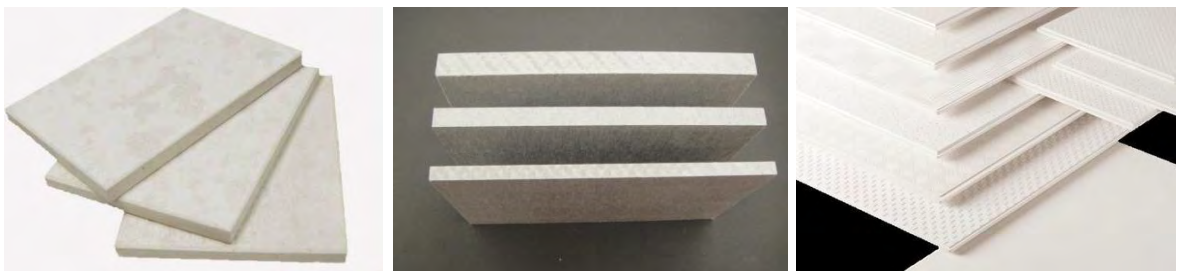
1.4.2 สามารถลดปริมาณขยะแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ที่ใช้แล้ว โดยการนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตแผ่นแคลเซียมซิลิเกตได้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แผ่นฉนวนกันความร้อนแคลเซียมซิลิเกตความหนาแน่นต่ำ (Calcium Silicate Board) นิยมใช้งานเป็นวัสดุกันความร้อนสำหรับงานฝ้าและผนังของอาคารงานก่อสร้างป้องกันความร้อนจากภายนอกเข้าสู่ในอาคาร^[1,2] และวัสดุทนไฟที่มีสมบัติป้องกันการสูญเสียความร้อนออกจากเตาเผาได้ดี เนื่องจากแผ่นฉนวนแคลเซียมซิลิเกต (Calcium Silicate Board) มีความพรุนสูง ประมาณ 40% ถึง 85% มีความหนาแน่นต่ำ โดยทั่วไปน้อยกว่า 1.5 g/cm^3 การนำความร้อนต่ำ ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1.0 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน ใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 600-1100 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับคุณภาพและการใช้งาน^[3,4,5] ติดตั้งง่าย มีราคาไม่สูงนัก มักใช้เป็นวัสดุฉนวนกันความร้อนของเตาในอุตสาหกรรมความร้อนสูง สามารถลดการสูญเสียความร้อน ลดน้ำหนักอุปกรณ์ภายในเตา และประหยัดพลังงาน มีความแข็งแรงเชิงกลในการทนต่อรอยขีดข่วนและตะกรันได้ไม่ดี ไม่ควรใช้สำหรับโครงสร้างที่มีการติดต่อดโดยตรงกับโลหะหลอมเหลวและส่วนอื่น ๆ แผ่นแคลเซียมซิลิเกตมักผลิตจากส่วนผสมของแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับทรายบด ผสมกันให้เป็นสารแขวนลอยในน้ำ มักใส่เส้นใยเซลลูโลสหรือเส้นใยเซรามิกเพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรง แล้วขึ้นรูปด้วยการกรองโดยใช้แรงดูดสุญญากาศช่วยอัดให้เป็นชิ้นงานขนาดและความหนาตามที่ต้องการ หลังจากปล่อยให้เซตตัวในอากาศแล้วนำไปอบด้วยไอน้ำความดันสูงที่อุณหภูมิประมาณ 160-200 องศาเซลเซียส^[6,7] จะได้เป็นแผ่นบอร์ดที่ต้องการ

2.1 การใช้งานแคลเซียมซิลิเกตในงานก่อสร้าง



รูปที่ 2.1 แคลเซียมซิลิเกตบอร์ด

แคลเซียมซิลิเกตบอร์ดนั้นเหมาะสำหรับการใช้งานภายในและพื้นที่ที่มีความชื้นสูงโดยเฉพาะบริเวณที่ต้องการเน้นในเรื่องของความเบา (Lightweight) และความแข็งแรงทนทาน (Durable) ตั้งแต่ฝ้า เพดาน ผนังภายใน ผนังห้องน้ำ ผนังกันเสียง กันไฟ ตลอดจน ฝ้าชายคาภายนอก บัวเชิงผนัง และคิ้วขอบฝ้า และเนื่องจากคุณสมบัติที่โดดเด่นของแผ่นแคลเซียมซิลิเกตบอร์ด จึงทำให้ได้รับความนิยมใช้อย่างแพร่หลายในประเทศแถบยุโรปและอเมริกาเหนือ โดยในแถบเอเชียเองแผ่นแคลเซียมซิลิเกตบอร์ดเองก็ได้รับการยอมรับมากขึ้นในประเทศที่มีการพัฒนาในการก่อสร้างสูงแล้ว

2.2 การใช้งานแคลเซียมซิลิเกตในงานวัสดุทนไฟ

แคลเซียมซิลิเกตบอร์ด เป็นแผ่นที่มีน้ำหนักเบา แข็งแรงทนทาน คำนวณความร้อนต่ำ กันชื้น ไม่ติดไฟ และไม่เสียรูปเมื่อโดนความร้อน ง่ายต่อการตัด เคลื่อนย้าย และติดตั้ง เหมาะกับการติดตั้งเป็นผนังเตาด้านในติดโครงสร้างเหล็ก เพื่อเป็นชั้น Back Up กันความร้อนไหลผ่านออกไปในเตาความร้อนอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ อาทิเช่น เตาอบ เตาหลอม หรืองานที่มีอุณหภูมิการใช้งานสูง โดยช่วยป้องกันการสูญเสียพลังงานได้เป็นอย่างดี

รูปที่ 2.2 การใช้แผ่นแคลเซียมซิลิเกตทำผนังห้อง

2.3 กระบวนการผลิต

ปัจจุบันในประเทศไทยมีเพียงการผลิตวัสดุที่คล้ายกันคือไฟเบอร์ซีเมนต์ แต่เป็นวัสดุที่มีความ



หนาแน่นที่สูงกว่าวัสดุแคลเซียมซิลิเกต จึงไม่มีสมบัติเป็นฉนวนความร้อนที่ดี อีกทั้งยังไม่สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงในเตาเผาได้ จำเป็นต้องสั่งซื้อนำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งเป็นการสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรมในประเทศ จึงมีความจำเป็นต้องมีการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตวัสดุแคลเซียมซิลิเกตความหนาแน่นต่ำขึ้นในประเทศ

การผลิตแผ่นแคลเซียมซิลิเกตโดยการปั่นผสมปูนขาวกับทรายบดละเอียด ผสมน้ำ และเส้นใยเซลลูโลสหรือเส้นใยเซรามิก แล้วกรองด้วยแผ่นกรองให้ได้เนื้อวัสดุส่วนผสมที่มีความหนาตามต้องการ ปูนขาวจะทำปฏิกิริยาปอซโซลานอย่างช้า ๆ กับทรายบดที่อุณหภูมิห้องแต่ความแข็งแรงจะยังต่ำอยู่จึงต้องนำไปอบด้วยไอน้ำความดันสูงอุณหภูมิสูงประมาณ 160-200 องศาเซลเซียส จะได้แผ่นวัสดุที่มีความแข็งแรงใช้งานได้^[6,7,8] จากการศึกษาค้นคว้าข้อมูลพบว่าหากใช้วัตถุดิบตั้งต้นที่ให้ซิลิกาในกลุ่มที่ไม่เป็นผลึกหรืออสัณฐาน (amorphous) จะช่วยให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็วขึ้น เช่น การใช้ไมโครซิลิกาหรือซิลิกาฟุ่ม ดังเช่นงานวิจัยของ Hastrup และคณะ (2018)^[9] ทดลองใช้ซิลิกาอสัณฐานจากการถลุงโลหะซิลิคอน 2 แหล่ง ซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร และมีปริมาณซิลิกาที่สูงกว่า 92% จะช่วยให้เกิดปฏิกิริยาได้เฟส C-S-H เจลที่อุณหภูมิต่ำได้ แต่การใช้ซิลิกาอสัณฐานที่เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมถลุงโลหะซิลิคอนก็ยังมีราคาต้นทุนที่ค่อนข้างสูง ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาการใช้งานซิลิกาอสัณฐานจากขี้เถ้าXXที่มีปริมาณซิลิกาที่สูงมาก ซึ่งมีมากมายในประเทศไทยและมีราคาต่ำมาก^[10]

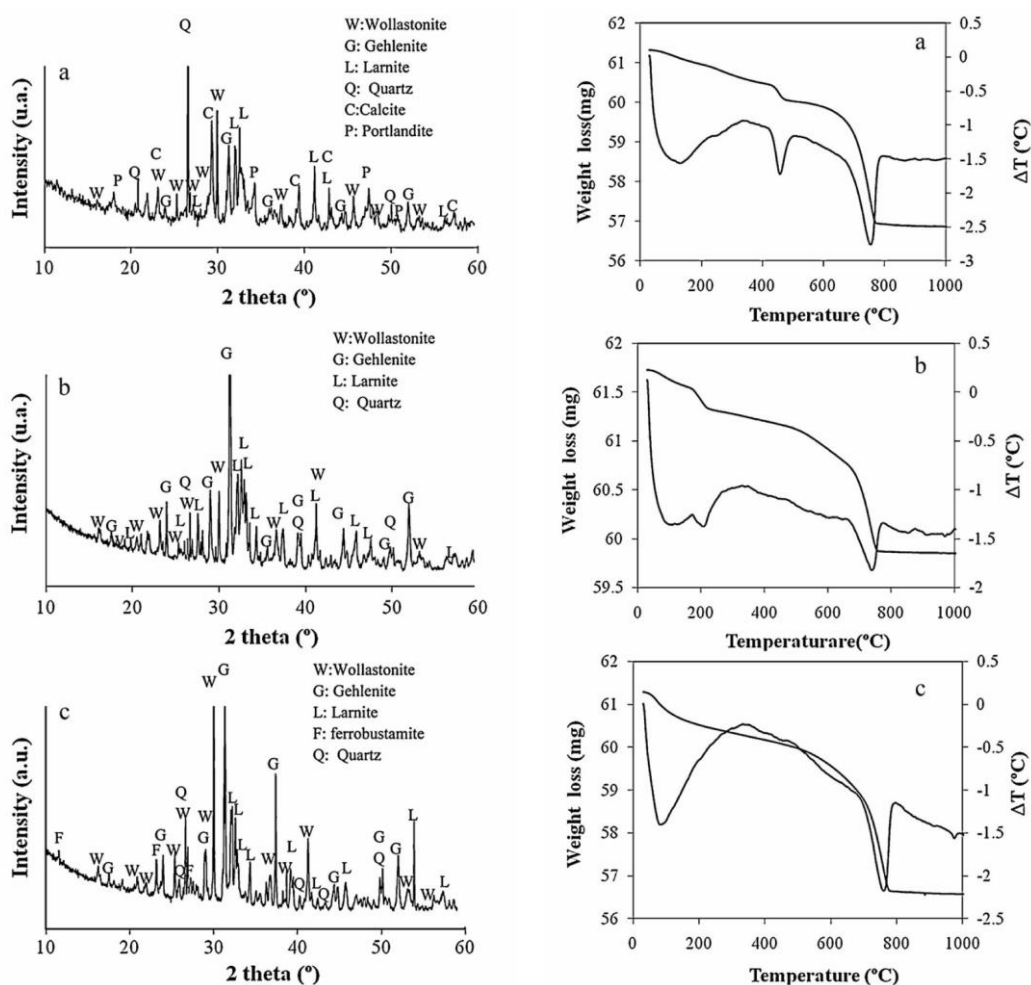
2.4 งานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 The use of Solid Residues Derived from Different Industrial Activities to obtain Calcium Silicates for use as Insulating Construction Materials.

Felipe-Sesé และคณะ^[14] ได้ศึกษาการนำกากจากโรงงานอุตสาหกรรมมาผลิตเป็นแคลเซียมซิลิเกตสำหรับการใช้งานเป็นวัสดุโครงสร้างฉนวนทนไฟ จากวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide) และวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบเป็นซิลิกา (Silica) นำมาบดผสมในอัตราส่วน 1:1 และนำไปเผาพูนที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซิลิเกต จากนั้นนำไปตรวจสอบลักษณะของโครงสร้างด้วยเครื่องมือ XRD, XRF และ TGA-DTA และทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ตามมาตรฐาน UNE สำหรับวัสดุโครงสร้างฉนวนอุณหภูมิต่ำ โดยวัสดุจะต้องสามารถรับแรงกดขนาด 81.7 MPa และมีขนาด 60 mm. x 30 mm. x 10 mm. มีค่าความสามารถในการนำความร้อน 0.10 W/m²K - 0.18 W/m²K และมีความแข็งแรงในการรับแรงกด 29.8 - 59.3 MPa

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม^[14]

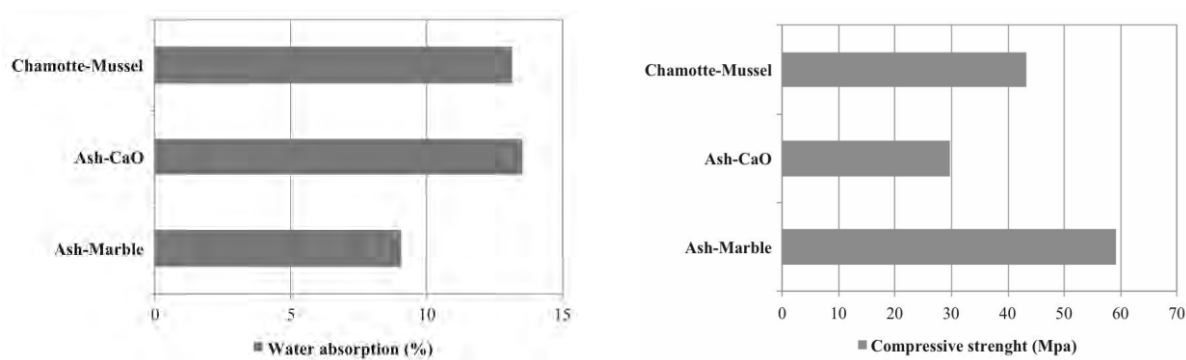
Oxide content (%)	Biomass ash	Chamotte	Marble	Mussel after firing at 1100 °C
SiO ₂	52.53	59.77	0.93	0.55
Al ₂ O ₃	6.88	20.10	0.36	0.03
Fe ₂ O ₃	4.92	8.74	0.16	0.05
MnO	0.10	0.08	–	–
MgO	2.62	2.27	1.25	0.49
CaO	14.95	1.73	55.3	87.21
Na ₂ O	1.19	0.22	–	0.50
K ₂ O	1.96	4.99	–	0.04
TiO ₂	2.59	0.89	–	0.02
P ₂ O ₅	0.62	0.14	–	0.09
Zr (ppm)	267.4	1261.5	7.05	–
LoI	11.64	0.67	42.0	–



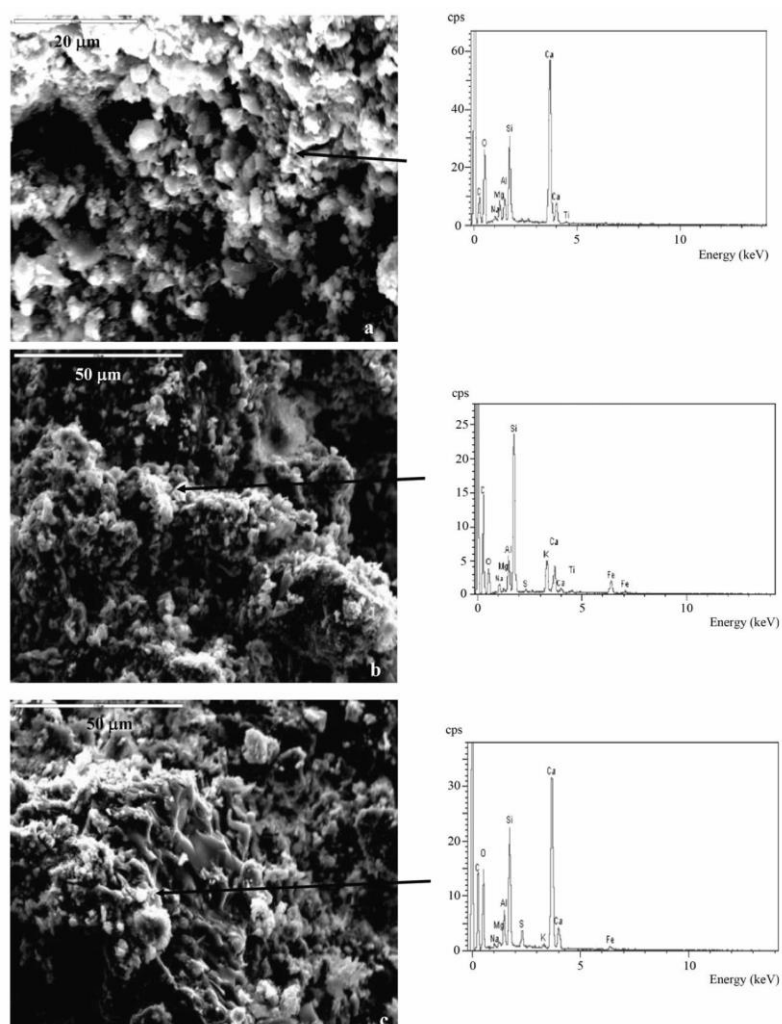
รูปที่ 2.3 กราฟ XRD (ซ้าย), กราฟ TGA-DTA (ขวา) ของโครงสร้างซิลิเกตจากวัสดุดิบ (a) marble และ biomass ash, (b) mussel และ biomass ash, (c) commercial hydroxide และ chamotte^[14]

ตารางที่ 2.2 ความหนาแน่นของชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส^[14]

Sample	Bulk density (g/cm ³)	Absolute density (kg/m ³)	Water suction (kg/m ² min)	Thermal conductivity (W/m K)
Ash-marble	2.05 ± 0.04	2120 ± 51	0.02 ± 0.01	0.18
Ash-CaO	1.70 ± 0.01	1970 ± 32	2.20 ± 0.11	0.10
Chamotte-mussel	1.95 ± 0.02	2030 ± 71	0.38 ± 0.07	0.12



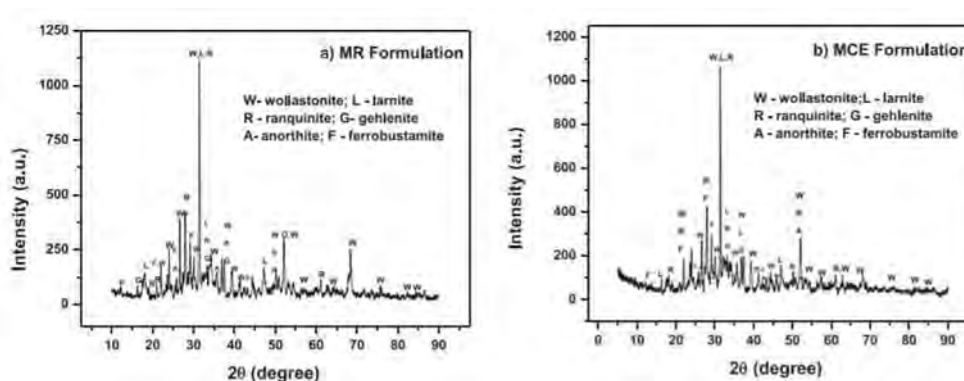
รูปที่ 2.4 ค่าการดูดซึมน้ำของอิฐ (ซ้าย) ค่าความแข็งแรงในการรับแรงกดของอิฐ (ขวา)^[14]



รูปที่ 2.5 SEM micrographs ของซีลีเกตจากวัสดุดิบ (a) marble และ biomass ash, (b) mussel และ biomass ash, (c) commercial hydroxide และ chamotte^[14]

2.4.2 Synthesis and Characterization of Calcium Silicate Insulating Material using Avian Eggshell Waste.

Holandaa และคณะ^[15] ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์วัสดุฉนวนแคลเซียมซิลิเกต โดยใช้เปลือกไข่เป็นแหล่งแคลเซียม ซึ่งสูตรแคลเซียมซิลิเกตถูกผสมในอัตราส่วนโมลของ $\text{SiO}_2 : \text{CaO}$ (1:1) และนำไปเผาที่ 1100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของแคลเซียมซิลิเกตด้วยเครื่องมือ XRD, TG-DTA, dilatometry, SEM / EDS และคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิก (แพร่กระจายความร้อน, ความจุความร้อนต่อหน่วยปริมาณและการนำความร้อน) การสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกตนั้นจะประกอบด้วย wollastonite เป็นส่วนใหญ่ และมี larnite กับ rankinite เป็นส่วนน้อย นอกจากนี้ยังพบว่าเศษเปลือกไข่ดิบและเศษเปลือกไข่ที่เผาแล้ว มีผลต่อคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิก โครงสร้างระดับจุลภาคจะทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ SEM ซึ่งผลการศึกษาพบว่าทั้งเปลือกไข่ดิบและเปลือกไข่ที่เผาแล้วสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งของแคลเซียมเพื่อใช้ในการทำแคลเซียมซิลิเกตได้และพบว่าชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกตที่ได้มีค่าการนำความร้อนต่ำ (0.252-0.293 W/m.K) ดังนั้นการพัฒนาวัสดุแคลเซียมซิลิเกตโดยใช้เปลือกไข่เป็นวัตถุดิบจะทำให้ได้ฉนวนกันความร้อนที่มีคุณภาพ



รูปที่ 2.6 กราฟ XRD ของวัสดุแคลเซียมซิลิเกตสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส^[15]

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุดิบ^[15]

Compounds	Raw eggshell waste	Calcined eggshell waste	Chamotte
CaO	52.51	90.61	0.64
SiO ₂	–	–	46.52
Al ₂ O ₃	–	–	36.37
Fe ₂ O ₃	–	–	9.09
K ₂ O	0.80	–	2.40
MnO	–	–	0.11
SrO	0.10	0.08	0.01
SO ₃	0.99	0.42	1.97
LoI ^a	45.60	8.91	1.20

^a LoI – loss on ignition.

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของแคลเซียมซิลิเกตสังเคราะห์^[15]

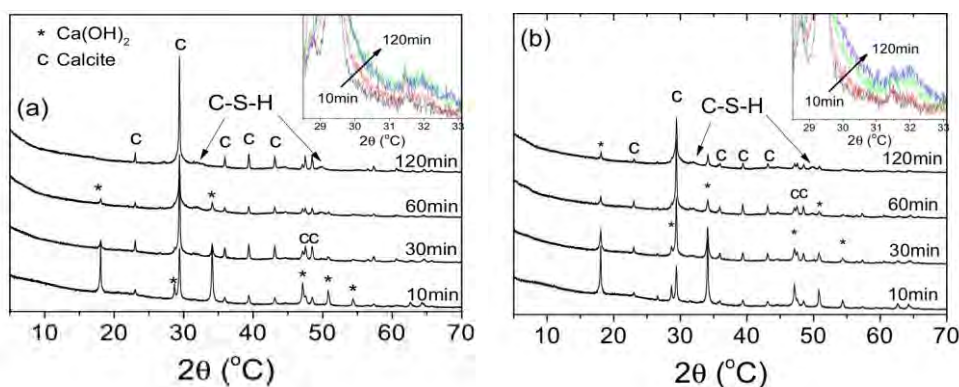
Property	Formulation	
	MR Formulation	MCE Formulation
Real density, g/cm ³	2.89 ± 0.01	2.87 ± 0.01
Apparent density, g/cm ³	1.88 ± 0.01	1.87 ± 0.01
Thermal conductivity, W/m. K	0.252 ± 0.01	0.293 ± 0.01

2.4.3 Impact of amorphous micro silica on the C-S-H phase formation in porous calcium silicates

Hastrup และคณะ^[16] ได้ทำการศึกษาวัสดุแคลเซียมซิลิเกตพอร์นั้ว ที่นิยมใช้เป็นวัสดุฉนวนความร้อนในการใช้งานอุณหภูมิสูง โดยใช้ Quicklime และ Micro Silica (MS) เป็นแหล่งของ CaO และ SiO₂ เพื่อทำให้เกิดแคลเซียมซิลิเกต (Calcium Silicate) โดยนำมาผสมกับน้ำ ทำปฏิกิริยาทางเคมีเกิดเป็นเป็น วัสดุอสัณฐาน C-S-H gel ที่มีคุณสมบัติหลักคือ มีความหนาแน่นต่ำ การนำความร้อนต่ำ สามารถรับแรงได้ดี และมีการหดตัวเมื่อได้รับความร้อนต่ำ โดยมีการทดลองในการใช้วัสดุดิบ Micro Silica จากแหล่งที่ต่างกัน 2 แหล่ง ที่มีปริมาณของซิลิกาในโครงสร้างต่างกัน คือ 97.5 และ 92.8% โดยน้ำหนัก และนำไปสังเคราะห์ร่วมกับ Quicklime ในอัตราส่วน 1:1 และนำไปทำปฏิกิริยาในอุณหภูมิที่แตกต่างกัน เพื่อนำไปศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ เช่น การนำไฟฟ้า พันธ์ของโครงสร้าง และโครงสร้างผลึก

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีของ Micro Silica^[16]

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O
MS92.8	92.8	0.81	0.36	2.24	1.40	0.98	0.41
MS97.5	97.5	0.20	0.20	0.10	0.49	0.20	0.20



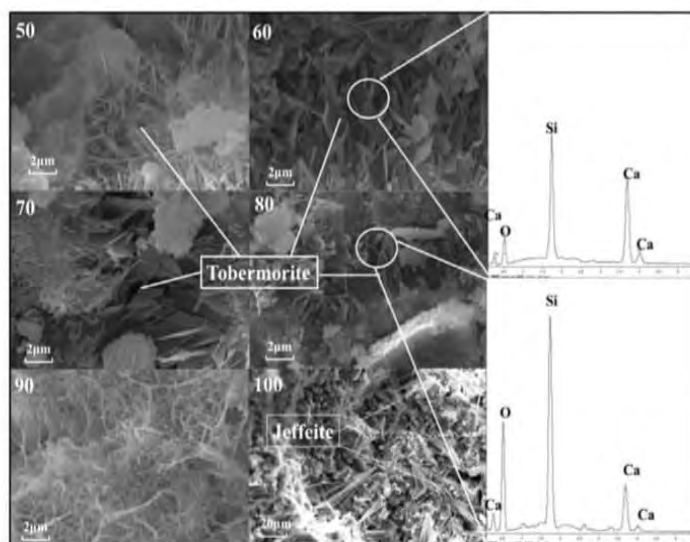
รูปที่ 2.7 กราฟ XRD ของ (a) CS97.5, (b) CS92.8 ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ในเวลาที่ต่างกัน^[16]

2.4.4 Investigation on the formation of tobermorite in calcium silicate board and its influence factors under autoclaved curing.

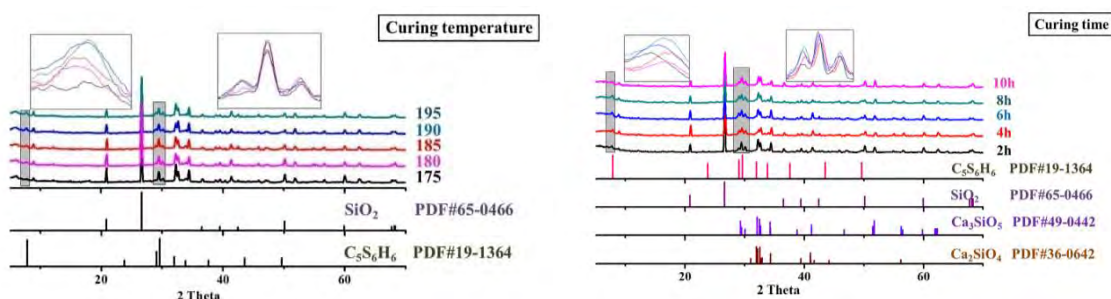
Lingchao และคณะ^[17] ได้ศึกษาการเปรียบเทียบระหว่างบอร์ดแบบดั้งเดิมกับแคลเซียมซิลิเกตบอร์ด คุณสมบัติที่เหนือกว่าของแคลเซียมซิลิเกตบอร์ดนั้นเกิดจากการก่อตัวของโทเบอร์มอร์ไรต์ ซึ่งการก่อตัวของโทเบอร์มอร์ไรต์ เกิดจากหลายปัจจัย และการศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วน Ca/Si และปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อการเตรียมและการก่อตัวของโทเบอร์มอร์ไรต์ในแคลเซียมซิลิเกตบอร์ด ผลการวิจัยพบว่าปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมคือ 72% และมีอัตราส่วนของ Ca/Si ในบอร์ดแคลเซียมซิลิเกต 1.22 ซึ่งโทเบอร์มอร์ไรต์จะค่อย ๆ ลดลงเมื่ออัตราส่วนของ Ca/Si เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และทำการวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่อง XRD และทดสอบหาความพรุนด้วยวิธี mercury intrusion porosimetry หลังจากนั้นไปขึ้นรูปแบบอัดจึงแสดงให้เห็นว่าความดันที่ใช้ในการขึ้นรูปไม่มีผลต่อการผลิตแบบไฮเดรชันและมีเพียงการปรับปรุงโครงสร้างของชิ้นงานเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของการผลิตแบบไฮเดรชันนั้นควรควบคุม curing time and curing temperature ใน autoclaved ในช่วง 4-8 ชั่วโมง และ 190-195 องศาเซลเซียส ตามลำดับ นอกจากนี้การทดสอบความแข็งแรงที่มีปัจจัยแตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่างานวิจัยนี้ได้รับยอมรับและมีแนวโน้มที่จะนำไปใช้ในการพัฒนาแคลเซียมซิลิเกตต่อไป

ตารางที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Ca/Si และเปอร์เซ็นต์โดยมวลของซีเมนต์^[17]

Cement content	50%	60%	70%	72%	74%	76%	78%	80%	90%	100%
Ca/Si ratio	0.60	0.83	1.15	1.22	1.30	1.39	1.49	1.60	2.30	3.56



รูปที่ 2.8 ลักษณะที่แตกต่างกันของ cement clinker ในแคลเซียมซิลิเกตบอร์ด^[17]

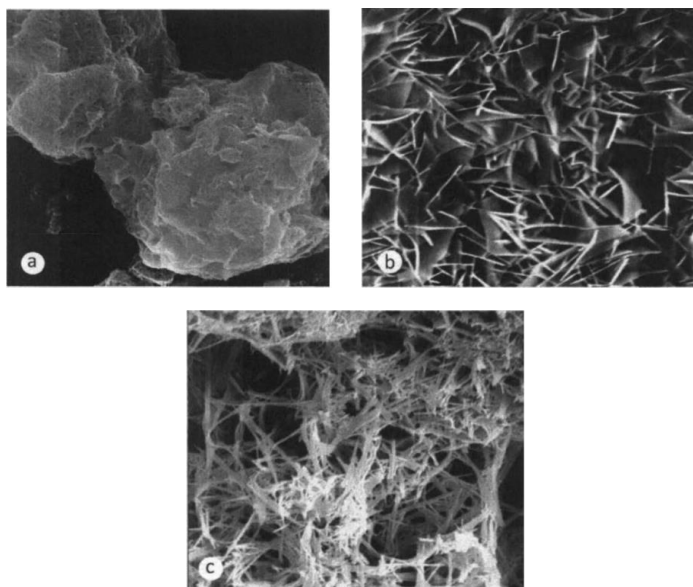


รูปที่ 2.9 กราฟ XRD แสดง Curing temperature ที่ต่างกัน (ซ้าย), Curing time ที่ต่างกัน (ขวา) ^[17]

2.4.5 Development of a New Calcium Silicate Board with Super Insulating Properties.

Krasselt และคณะ^[18] ได้ศึกษาพัฒนาคุณสมบัติของวัสดุฉนวนทนไฟเพื่อลดการสูญเสียพลังงานความร้อนในการทำงานที่มีอุณหภูมิสูง โดยวัสดุฉนวนแคลเซียมซิลิเกตนั้นเป็นวัสดุส่วนที่สำคัญในการสร้างเตาที่มีการใช้พลังงานสูง มีลักษณะที่โดดเด่นคือเป็นวัสดุที่มีรูพรุนสูง สามารถทนความร้อนสูงได้ มีการพัฒนาด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ เช่น MIP, SEM และ XRD ในกระบวนการทางเทคนิค มีการใช้วัสดุดิบบริสุทธิ์ผ่านกระบวนการเพื่อทำให้เกิดผลึก Xonotlite มีการวัดค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส โดยใช้ hot wire มีค่าเท่ากับ 0.10 W/m.K ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับสมบัติของวัสดุฉนวนรูพรุนสูง โดยการทดลองนี้ได้ทำการควบคุมการโตของผลึกที่อุณหภูมิที่เฟสมีความเสถียร ควบคุม

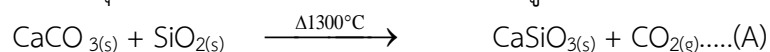
ความพรุนตัวของวัสดุ และความคุมการจัดเรียงตัวของผลึก เพื่อดูลักษณะโครงสร้างที่เปลี่ยนไปภายใต้กระบวนการ Autoclaved ที่ความดันและอุณหภูมิที่ต่างกัน เกิดเป็นโครงสร้าง Tobermorite และ Xonotlite โดยมีโครงสร้างพื้นฐานคือ $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ ที่เป็นโครงสร้างอัญฐาน



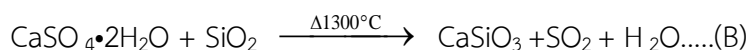
รูปที่ 2.10 โครงสร้างผลึก (a) CSH, (b) tobermorite, (c) xonotlite^[18]

2.4.6 Recycle of plaster mold waste via Solution process.

วรุตม์และทรงฉัตร^[19] ได้ศึกษาการสังเคราะห์ Wollastonite การนำแม่แบบพลาสติกอร์ที่เสื่อมสภาพจากโรงงานมาบดผสมกับโซเดียมซิลิเกต โดยใช้แม่แบบพลาสติกอร์ มาปั่นผสมกับน้ำ และเติมโซเดียมซิลิเกต จากนั้นนำไปกรองเพื่อแยก แคลเซียมซิลิเกตออกจาก โซเดียมซิลิเกตและนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ซึ่งโซเดียมซิลิเกตที่ได้หลังจากการสังเคราะห์ส่งผลต่อความบริสุทธิ์ของ Wollastonite เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ซึ่งวิธีที่จะลดปริมาณโซเดียมซิลิเกต ใน Wollastonite ต้องทำการล้าง Wollastonite ก่อนนำไปเผา ทำให้มีการปนเปื้อนลดลง โดยจะทำการสังเคราะห์ Wollastonite โดยใช้วัตถุดิบที่แตกต่างกัน ซึ่งตัวอย่างแรกจะใช้ปูนขาวผสมกับทรายบด ดังสมการ (A)



และอีกตัวอย่างจะใช้ยิปซัมผสมกับทรายบดดังสมการ(B)



นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาการใช้กากของเสียจากอุตสาหกรรมที่ให้แคลเซียม เช่น เปลือกหอย เปลือกไข่ แม่พิมพ์ปูนพลาสติกอร์ใช้แล้ว ที่น่าสนใจสำหรับนำมาเตรียมแผ่นแคลเซียมซิลิเกต ด้วยการผสมเส้นใยเซลลูโลส และเส้นใยเซรามิก แล้วนำไปอบไอน้ำเพื่อให้เกิดความแข็งแรง^[11,12,13] โดยแม่พิมพ์ปูนพลาสติกอร์ที่ใช้แล้วจะมีส่วนประกอบหลักคือ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมซิลิเกต จะได้เจลของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และสารละลายโซเดียมซิลิเกต ซึ่งจะถูกรอง

ออกไป เหลือเป็นเนื้อวัสดุแคลเซียมซิลิเกต เมื่อแห้งแล้วจะให้ความแข็งแรง และเมื่ออบด้วยไอน้ำจะได้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นได้

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเตรียมตัวอย่างชิ้นงานแผ่นฉนวนกันความร้อนแคลเซียมซิลิเกต ความหนาแน่นต่ำ โดยใช้วัตถุดิบประกอบด้วย ทรายบดXX ปูนขาวXX เยื่อกระดาษXX เส้นใยเซรามิก ซี้ไถ้าXX พลาสติกXX โซเดียมซิลิเกต และน้ำ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- ทรายบดXX
- ทรายบดXX
- ปูนขาวXX
- เยื่อกระดาษXX
- ซี้ไถ้าXX
- เส้นใยเซรามิก (Ceramic Fiber)
- โซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate)

3.2 วัตถุดิบ



(a.)



(b.)



(c.)



(d.)



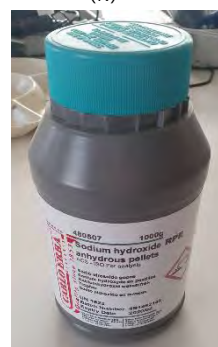
(e.)



(f.)



(g.)



รูปที่ 3.1 วัสดุที่ใช้ (a.) ซีเมนต์XX, (b.) เส้นใยเซรามิก (Ceramic Fiber), (c.) เยื่อกระดาษต้นยูคาลิปตัส, (d.) ทราวยบละเอียด (Milled Sand), (e.) ปูนขาว (Hydrated Lime), (f.) แม่แบบพลาสติกที่เสื่อมสภาพ, (g.) Sodium Silicate (Na_2SiO_3) และ Sodium Hydroxide (NaOH)

3.3 ส่วนผสมในการทดลอง

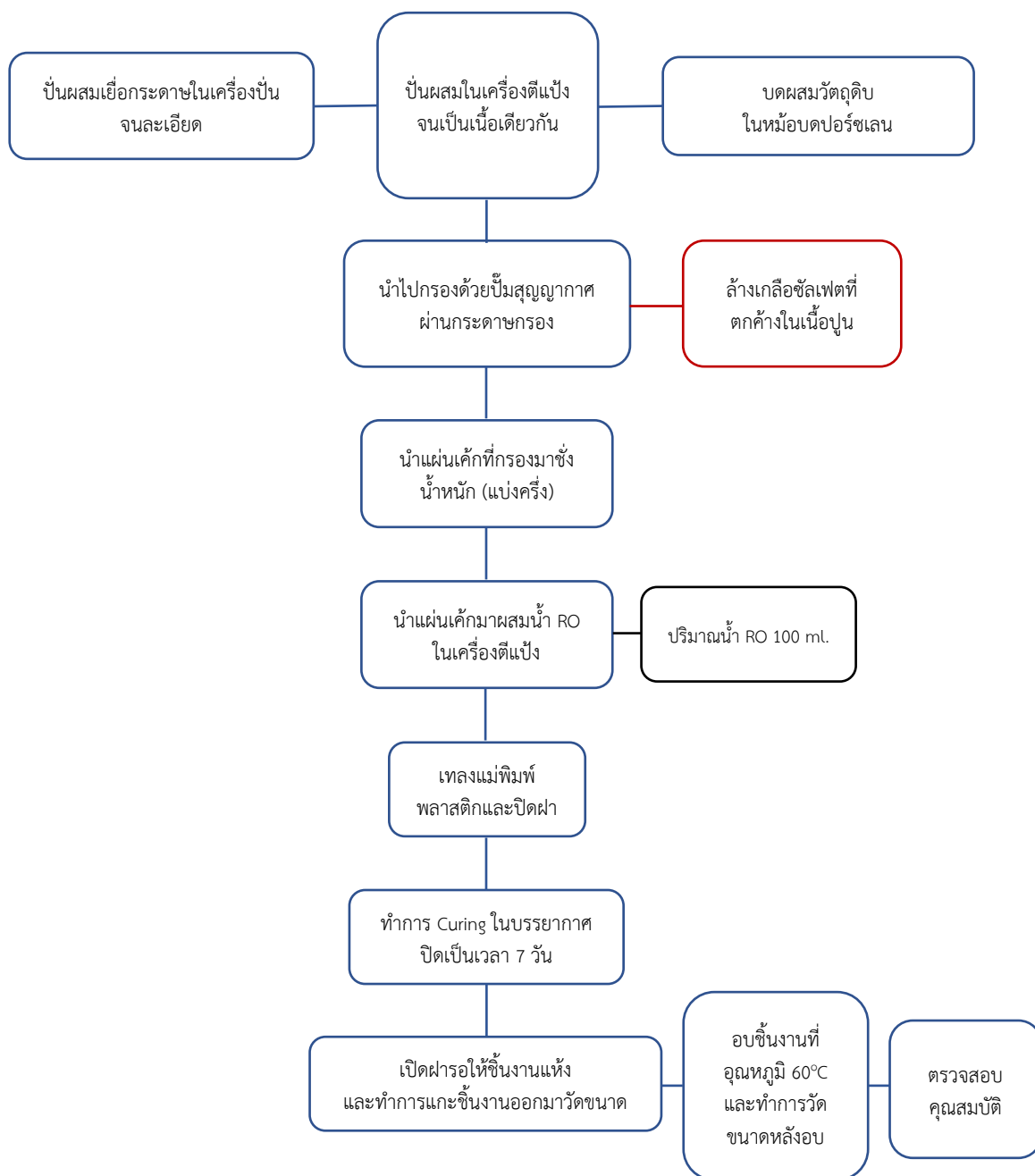
ตารางที่ 3.1 สูตรส่วนผสมสำหรับการเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง วิธีที่ 1

วัสดุ	ซีเมนต์	ทราย	plaster
ปูนขาว	150 g	150 g	-
Milled sand	-	120 g	-
Plaster	30 g	30 g	170 g
ซีเมนต์XX	120 g	-	-
โซเดียมซิลิเกต	-	-	190 g
โซเดียมไฮดรอกไซด์	-	-	30 g
เยื่อกระดาษ	60 g	30, 40, 60 g	40, 60 g
น้ำ (ปั่นขึ้นรูป)	100 g	100 g	100 g

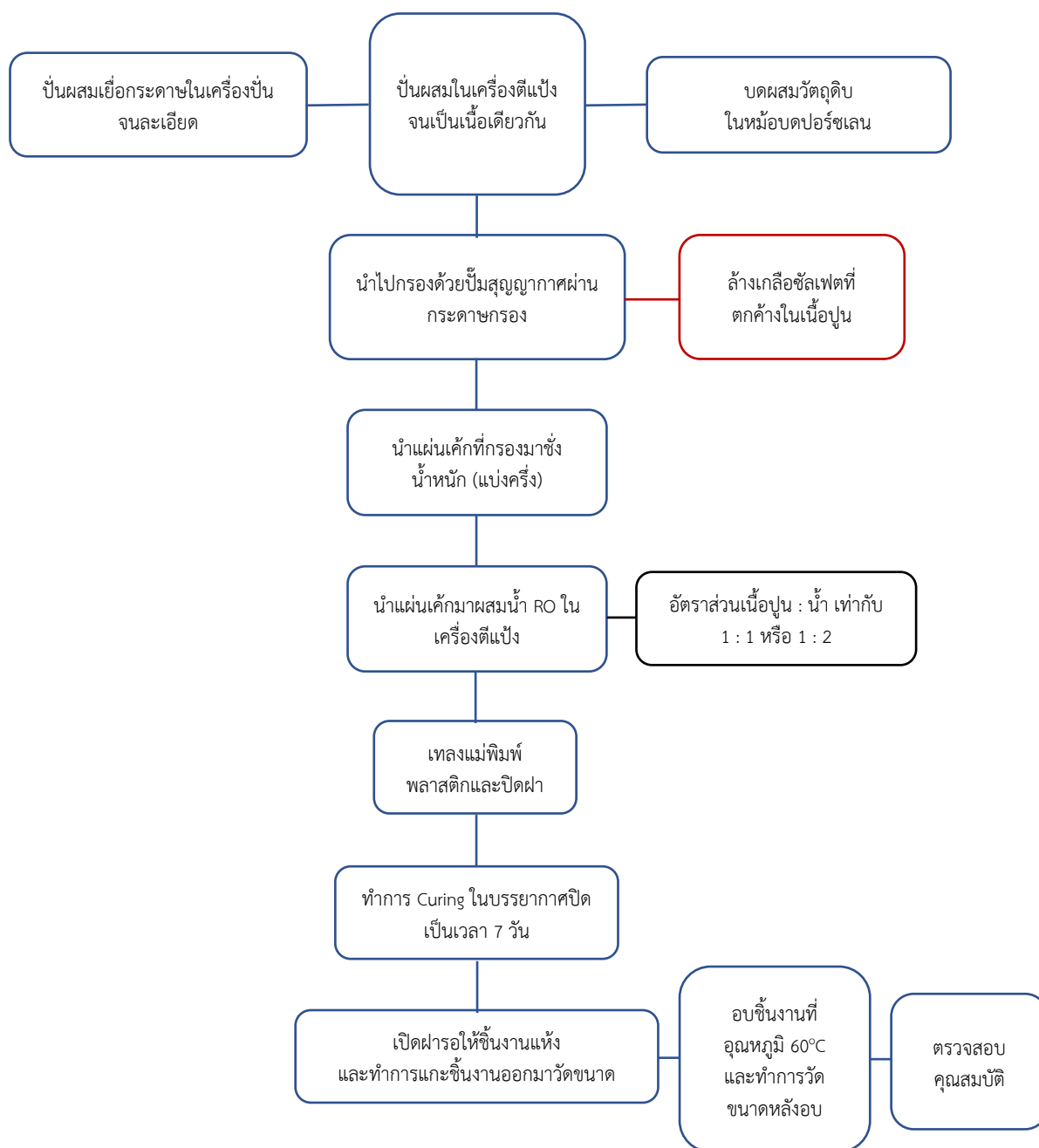
ตารางที่ 3.2 สูตรส่วนผสมสำหรับการเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง วิธีที่ 2

วัตถุดิบ	ซีเมนต์	ทราย	plaster
ปูนขาว	150 g	150 g	-
Milled sand	-	120g	-
Plaster	30 g	30 g	170 g
ซีเมนต์XX	120 g	-	-
โซเดียมซิลิเกต	-	-	190 g
โซเดียมไฮดรอกไซด์	-	-	30 g
เยื่อกระดาษ	60, 35 g	60 g	35 g
น้ำ (ปั่นขึ้นรูป)	500 g	500 g	500 g

3.4 แผนภาพแสดงประกอบการทำงานทดลอง



รูปที่ 3.2 แผนผังการเตรียมวัสดุแคลเซียมซัลเฟตความหนาแน่นต่ำ วิธีที่ 1



รูปที่ 3.3 แผนผังการเตรียมวัสดุแคลเซียมซิลิเกตความหนาแน่นต่ำ วิธีที่ 2

3.5 การวิเคราะห์สมบัติของตัวอย่าง

3.5.1 ความหนาแน่นของชิ้นงาน

อาร์คิมิดีสทำได้โดยนำชิ้นงานใส่ในบีกเกอร์ตม้ชิ้นงานตัวอย่างเป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างชิ้นงานชั่งน้ำหนักเปียก (W_{sat}) น้ำหนักของชิ้นงานตัวอย่างในน้ำ (W_{sus}) นำชิ้นงานอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส แล้วชั่งน้ำหนักแห้งของชิ้นงาน (W_{dry}) คำนวณความหนาแน่นรวม และปริมาณรูพรุนจริงที่ปรากฏ โดยวิธีการคำนวณหา มีดังนี้

$$1) \text{ Bulk density} = \frac{W_{dry}}{W_{sat} - W_{sus}} \times \rho_{water}$$

$$2) \text{ Apparent Porosity} = \left(\frac{W_{sat} - W_{dry}}{W_{sat} - W_{sus}} \right) \times 100$$

$$3) \text{ Relative Density} = \frac{\rho_{bulk}}{\rho_{th}} \times 100$$

3.5.2 ค่าความแข็งแรง (Strength)

ความแข็งแรง (Strength) หมายถึงความสามารถในการรับแรงในขณะที่เกิดความเค้น (Stress) ขึ้นภายในวัสดุ การศึกษาเกี่ยวกับความแข็งแรงของวัสดุจะศึกษาเกี่ยวกับแรงภายในวัสดุกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดของวัสดุนั้น หรืออาจกล่าวได้ว่าความแข็งแรงคือความสามารถที่จะต้านทานแรงที่มากระทำโดยไม่เกิดการแตกหักนั่นเอง

แรงที่เกิดขึ้นภายในของวัสดุ ที่พยายามต้านทานแรงภายนอกที่มากระทำเพื่อไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่าง เรียกว่า แรงเค้น (Stress) วัดเป็นแรงต่อหน่วยพื้นที่ ส่วนอัตราส่วนระหว่างความยาวของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไป ต่อความยาวเดิมก่อนถูกแรงมากระทำ เรียกว่า ความเครียด (Strain) ทั้งความเค้นและความเครียดนี้มีผลต่อความแข็งแรง ทั้งนี้เพราะการวัดความแข็งแรงจะได้รับการหาค่าความเค้นสูงสุดที่ทำให้เกิดการแตกหักเสียรูปทรง หรือจะออกมาในรูปของค่าโมดูลัสของการแตกหัก (Modulus) หน่วยที่ใช้คือ ปอนด์ต่อตารางฟุต (lb/ft^2) หรือ psf ในระบบอังกฤษ และใช้นิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2) หรือ ปาสคาล (Pascal (Pa)) ในระบบสากล โดยจะใช้เครื่องวัด Modulus of rupture ที่กดหนึ่งจุดที่จุดกึ่งกลางคานจะสามารถหาค่าโมดูลัสของการแตกหักได้จากสูตร

$$R = \frac{3PL}{2bd^2}$$

R = ค่าการรับแรงตัด

P = แรงสูงสุดที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบ

L = ช่วงคาน

b = ความกว้างเฉลี่ยที่หน้าตัดบริเวณรอยแตก

d = ความลึกเฉลี่ยที่หน้าตัดบริเวณรอยแตก



รูปที่ 3.4 เครื่องวัดความแข็งแรง

3.5.3 องค์ประกอบทางเฟส (X - ray Diffraction)

เครื่อง XRD เป็นเครื่องมือวิเคราะห์เลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในผลึกของตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการของ Bragg's law หรือ $2d\sin\theta = n\lambda$ ในการคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่ยิงผ่านชั้นผลึกที่อยู่ในตัวอย่าง โดยจะใช้ Detector รับความเข้มของรังสีเอกซ์ ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนในมุมต่าง ๆ ของการทดสอบ สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งในรูปแบบของแข็ง หรือตัวอย่างที่เป็น powder ได้



รูปที่ 3.5 X-ray Diffraction (XRD)

3.5.4 โครงสร้างทางจุลภาค (Scanning Electron Microscope; SEM)

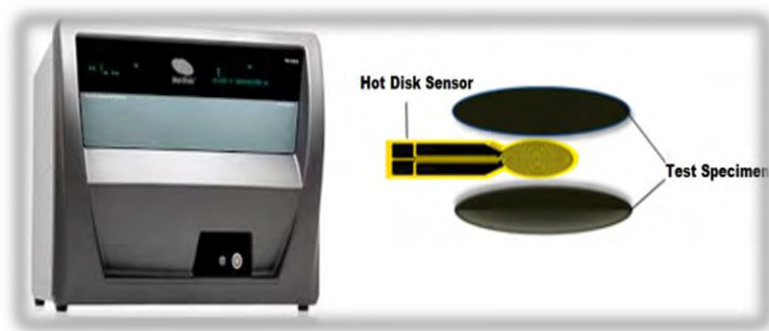
scanning electron microscope (SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายไม่สูงเท่ากับเครื่อง TEM (เครื่อง SEM มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร) การเตรียมตัวอย่างเพื่อที่จะดูด้วยเครื่อง SEM นี้ไม่จำเป็นต้องที่ตัวอย่างจะต้องมีขนาดบางเท่ากับเมื่อดูด้วยเครื่อง TEM ก็ได้ (เพราะไม่ได้ตรวจวัดจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง) การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าที่ดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น

รูปที่ 3.6 Scanning Electron Microscope (SEM)



3.5.5 ค่าการนำความร้อน (Hot disk method)

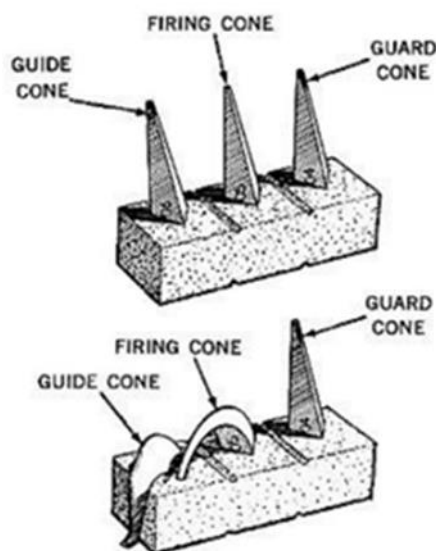
เครื่องวัดการไหลของความร้อนและวิธีการ Hot Disk TPS จะใช้เวลาทดสอบที่รวดเร็วแม่นยำ และมีความสามารถในการทดสอบขนาดตัวอย่างที่แตกต่างกันเนื่องจากความหลากหลายของเซ็นเซอร์ที่มีอยู่นั้นเป็นคุณสมบัติที่ต้องการ เนื่องจาก TPS วัดจุดข้อมูลที่แตกต่างกัน 200 จุดในระหว่างการทดสอบความต้านทานสัมผัสเริ่มต้นที่สร้างโดยการทำความร้อนเซ็นเซอร์สามารถลอกและป้องกันไม่ให้มีอิทธิพลต่อผลสุดท้าย อุปกรณ์ Hot Disk สามารถทดสอบค่าการนำความร้อนในช่วง 0.005 ถึง 1800 W/m.K และในช่วงอุณหภูมิ -160 ถึง 1000 องศาเซลเซียส สำหรับการวัดที่ทำกับเครื่องมือนี้ เซ็นเซอร์นิกเกิลแบนที่หุ้มด้วยระบบไฟฟ้ามีรัศมีตั้งแต่ 0.5 mm. (สำหรับตัวอย่างขนาดเล็ก) ถึง 30 mm. วางไว้ระหว่างสองส่วนที่เหมือนกันของตัวอย่างเดียวกัน เซ็นเซอร์ทำหน้าที่เป็นทั้งแหล่งความร้อนและหัววัดอุณหภูมิ



รูปที่ 3.7 Hot disk method

3.5.6 การวัดความทนไฟของวัสดุทนไฟ (Refractoriness)

ไพโรเมตริกโคน (Pyrometric Cone Equivalent: PCE) เป็นค่าของการวัดความทนไฟ (Refractoriness) เมื่อใช้ไพโรเมตริกโคน (Pyrometric Cone) ซึ่งเป็นแท่งวัสดุเซรามิก รูปทรงสูงเป็นสามเหลี่ยมพีระมิดมีฐานสามเหลี่ยมโตกว่ายอดบน เมื่อท่อนไฟถูกเผาถึงจุดอุณหภูมิหนึ่งท่อนไฟชนิดนี้จะเริ่มโค้งลง โดยแต่ละโคนจะมีหมายเลขกำกับ ซึ่งสามารถกำหนดอุณหภูมิที่ต้องการกับเบอร์โคน



รูปที่ 3.8 Pyrometric cone

3.5.7 เครื่องวัดสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน (Dilatometer)

Dilatometer เป็นเครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุที่ขยายตัวหรือหดตัวเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้แก่วัสดุเช่น แก้ว เซรามิก โลหะ ซึ่งเป็นเครื่องที่วัดการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุแบบแนวนอน (Horizontal design) เพื่อสะดวกต่อการใช้งาน สามารถวัดวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดน้อยมากโดยมีระบบวัดการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบ Inductive Transducer ซึ่งมี Digital resolution of the Displacement และมีความละเอียดสูงสุดไม่เกิน 8 นาโนเมตรต่อหน่วยอุณหภูมิของเตาเผาอยู่

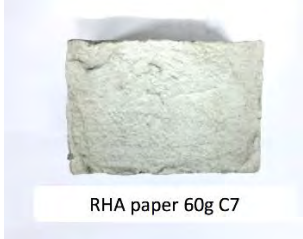


บทที่ 4



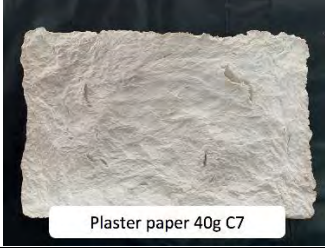
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองค่าความหนาแน่น

จากการทดลองเตรียมชิ้นงานตัวอย่างแคลเซียมซิลิเกตได้ทดลองเตรียมตัวอย่างที่มีการใส่เยื่อกระดาษปริมาณ 30, 35, 40 และ 60 กรัมเพื่อเตรียมชิ้นรูปเป็นชิ้นงาน ในการทดลองเตรียมชิ้นงานตัวอย่างแคลเซียมซิลิเกตมีทั้งหมด 3 สูตรที่มีส่วนผสมแตกต่างกัน ได้แก่ สูตรซีเมนต์XX สูตรทรายและสูตรพลาสติกโดยมีขั้นตอนการทดลอง 2 วิธี แตกต่างกันในขั้นตอนการบดผสมวัตถุดิบ โดยจะทำการเปรียบเทียบปริมาณการใช้เยื่อกระดาษจากต้นยูคาลิปตัสที่ล้มนำมาบดผสมกับส่วนผสมตามตารางที่ 3.2 และ 3.3 จนเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำมาขึ้นรูปเป็นชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกตแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ได้เป็นชิ้นงานที่ยังไม่ค่อยมีความแข็งแรงมากนัก ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2 ซึ่งชิ้นงานที่ได้จะมีผิวที่ไม่ค่อยเรียบ และสามารถสังเกตเห็นเศษชิ้นส่วนของเยื่อกระดาษได้ชัดเจนในสูตรซีเมนต์XX สูตรทราย และ สูตรพลาสติก โดยที่ชิ้นงานตัวอย่างยังไม่ค่อยมีความแข็งแรงมากนัก สามารถที่จะเคลื่อนย้ายได้ แต่ไม่สามารถรับแรงได้

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลอง วิธีที่ 1


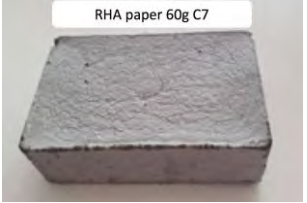

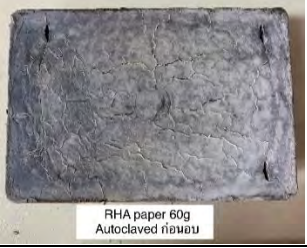
สูตร	ปริมาณเยื่อกระดาษ (g)	Apparent Density (g/cm ³)	รูป
ซีเมนต์	60	0.329	 RHA paper 60g C7
ซีเมนต์	60	0.306	 RHA paper 60g C7
ทราย	30	1.428	 Milledsand paper 30g C7

ทราย	40	1.027	
ทราย	60	0.591	
พลาสติกอร์	40	0.387	
พลาสติกอร์	60	0.365	-

จากตาราง ชิ้นงานที่ได้จากการบดผสม ทรายบดละเอียดหรือซีเมนต์XX ปูนขาว พลาสติกอร์และน้ำ ในปริมาณตามสูตรดังแสดงในตารางที่ 3.1 กับเยื่อกระดาษปริมาณ 30, 40 และ 60 กรัม ให้เป็นเนื้อเดียวกันเป็น 30 นาที จากนั้นทำการกรองเอาน้ำออกและปั่นผสมกับน้ำ 100 ml. เติงในแม่แบบเพื่อขึ้นรูป บ่มทิ้งไว้ 7 วันก่อนนำชิ้นงานตัวอย่างไปอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนชิ้นงานแห้งสนิทดีแล้ว จะสังเกตได้ว่า ชิ้นงานสูตรทรายที่ใส่เยื่อกระดาษปริมาณ 30, 40 กรัม จะมีความหนาแน่นประมาณ 1 g/cm^3 ส่วนชิ้นงานสูตรทรายที่ใส่เยื่อกระดาษ 60 กรัม จะมีความหนาแน่นประมาณ 0.5 g/cm^3 ส่วนชิ้นงานสูตรซีเมนต์จะมีความหนาแน่นประมาณ 0.3 g/cm^3 จากผลการทดลองทำให้ทราบว่า การใส่ปริมาณเยื่อกระดาษในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นลดลงและที่เยื่อกระดาษปริมาณ 60 กรัม ทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นต่ำสุด

จากตาราง ชิ้นงานสูตรพลาสติกอร์ที่ได้จากการบดผสม พลาสติกอร์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และน้ำเข้าด้วยกัน ทำการเติมโซเดียมซิลิเกต และเยื่อกระดาษลงในหม้อบดผสม 30 นาที จากนั้นนำไปกรองด้วยกระดาษกรอง 2 รอบ เพื่อจำกัดเกลือซิลิเกต และนำไปปั่นผสมกับน้ำ 100 ml. เติงในแม่แบบเพื่อขึ้นรูป บ่มทิ้งไว้ 7 วันก่อนนำชิ้นงานตัวอย่างไปอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนชิ้นงานแห้งสนิทดีแล้ว จะสังเกตได้ว่า ชิ้นงานสูตรพลาสติกอร์ที่ใส่เยื่อกระดาษปริมาณ 30, 60 กรัม จะมีความหนาแน่นลดลงตามลำดับ จากผลการทดลองทำให้ทราบว่าเมื่อเติมเยื่อกระดาษในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นลดลง

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดลอง วิธีที่ 2

สูตร	ปริมาณเยื่อกระดาษ (g)	Apparent Density (g/cm ³)	รูป
ซีเมนต์	60	0.259	-
ซีเมนต์	60	0.238	
ซีเมนต์	60	0.234	
ซีเมนต์	60	0.194	
ซีเมนต์	60	0.233	-
ซีเมนต์	60	0.222	-
ซีเมนต์	60 *Autoclaved 200°C ก่อนอบ	0.471	
ซีเมนต์	60 *Autoclaved 200°C หลังอบ	0.209	-
ซีเมนต์	35	0.258	-
ทราย	60	0.460	-
พลาสติกอร์	35	0.263	-

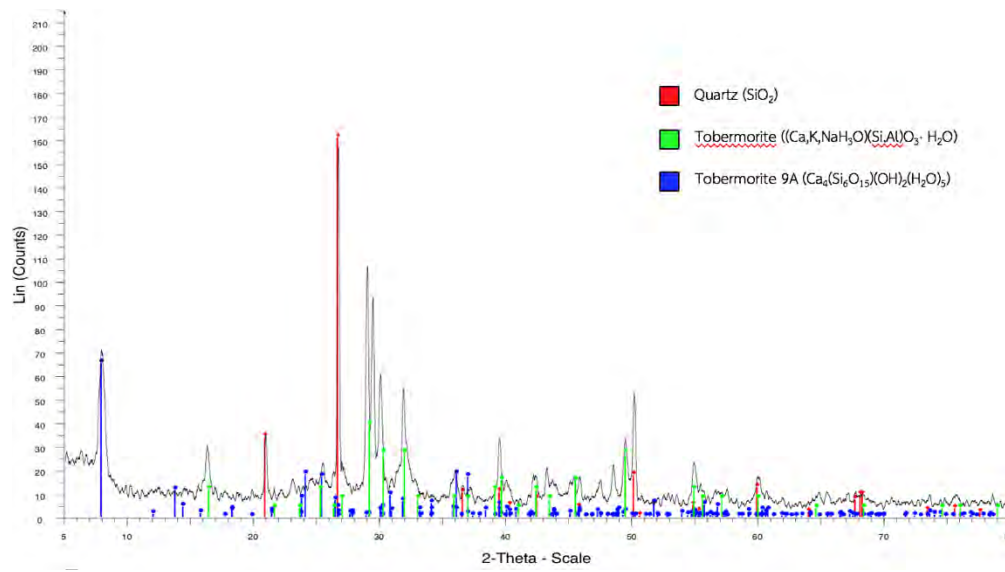
จากตาราง สูตรซีเมนต์ ขึ้นงานที่ได้จากการบดผสม ซีเมนต์XX ปูนขาว พลาสติกอร์และน้ำ ในปริมาณตามสูตรดังแสดงในตารางที่ 3.2 ให้เป็นเนื้อเดียวกันเป็น 30 นาที แล้วมีการปั่นผสมกับเยื่อกระดาษปริมาณ 60 กรัม จากนั้นทำการกรองเอาน้ำออกและปั่นผสมกับน้ำ 500 ml. เทลงในแม่แบบเพื่อขึ้นรูป ปั่นทิ้งไว้ 7 วันก่อนนำขึ้นงานตัวอย่างไปอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จน

ชิ้นงานแห้งสนิทดีแล้ว จะสังเกตได้ว่าชิ้นงานทั้ง 3 ชิ้นที่ใส่เยื่อกระดาษ 60 กรัม จะมีความหนาแน่นประมาณ 0.2 g/cm^3 และเมื่อนำชิ้นงานที่ใส่เยื่อกระดาษ 60 กรัม ไปทำการ autoclaved ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และที่ความดันประมาณ 15 bar พบว่าความหนาแน่นของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้น อีกทั้งเมื่อทำการทดลองลดปริมาณเยื่อกระดาษเป็น 35 กรัม ความหนาแน่นที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับ 0.2 g/cm^3 เช่นเดียวกันกับการทดลองที่ใส่เยื่อกระดาษปริมาณ 60 กรัม

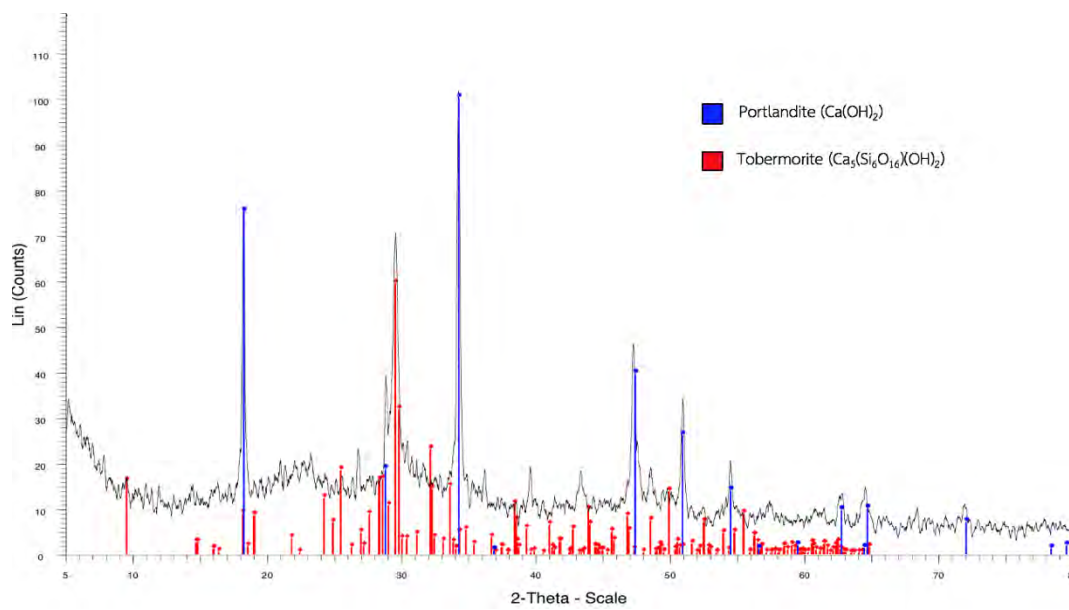
ชิ้นงานที่ได้จากการบดผสม ทรายบดละเอียดปูนขาว พลาสติกอร์และน้ำ ในปริมาณตามสูตรดังแสดงในตารางที่ 3.2 กับเยื่อกระดาษปริมาณ 60 กรัม ให้เป็นเนื้อเดียวกันเป็น 30 นาที จากนั้นทำการกรองเอาน้ำออกและปั่นผสมกับน้ำ 100 ml. เทลงในแม่แบบเพื่อขึ้นรูป บ่มทิ้งไว้ 7 วันก่อนนำชิ้นงานตัวอย่างไปอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนชิ้นงานแห้งสนิทดีแล้ว จะสังเกตได้ว่าชิ้นงานสูตรทรายที่ใส่เยื่อกระดาษ 60 กรัม จะมีความหนาแน่นประมาณ 0.46 g/cm^3 ส่วนชิ้นงานสูตรพลาสติกอร์จะมีความหนาแน่นประมาณ 0.26 g/cm^3 เมื่อทำการใส่เยื่อกระดาษปริมาณ 35 กรัมจากการทดลองพบว่า การใส่ปริมาณเยื่อกระดาษในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นลดลงและชิ้นงานที่ใส่เยื่อกระดาษปริมาณ 60 กรัม ทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นต่ำสุดทั้งสามสูตร

4.2 ผลการทดลององค์ประกอบทางเฟส

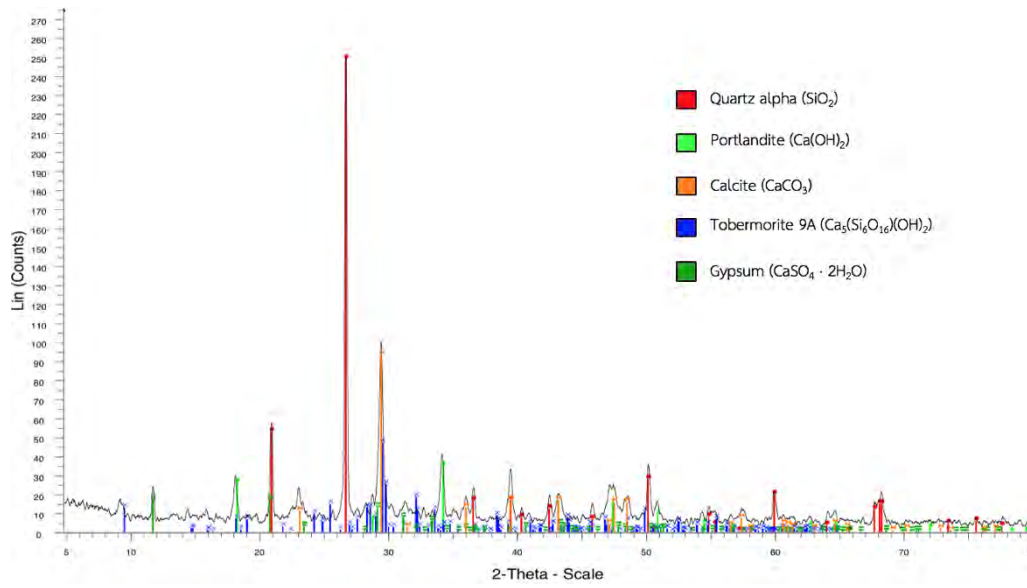
จากการศึกษาองค์ประกอบของเฟสด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) ของชิ้นงานตัวอย่างแคลเซียมซิลิเกตบอร์ด (Commercial Calcium Silicate Board) โดยมีผล XRD pattern ดังรูปที่ 4.1 พบว่ามีองค์ประกอบของ Quartz (SiO_2) และ Tobermorite จากนั้นทำการศึกษาองค์ประกอบเฟสของชิ้นงานที่ถูกบ่มที่อุณหภูมิห้องและผ่านการอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบว่าชิ้นงานสูตรซีเมนต์ XX จาก XRD pattern ดังรูปที่ 4.2 มีองค์ประกอบของ Tobermorite ตามที่ต้องการ แต่ยังคงพบองค์ประกอบของ Portlandite (Ca(OH)_2) หลงเหลืออยู่ในโครงสร้าง ต่อมาผล XRD pattern ของสูตรทราย และสูตรพลาสติกอร์ ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ซึ่งจะสังเกตได้ว่าเริ่มมีองค์ประกอบของ Tobermorite เกิดขึ้นแล้ว แต่ยังคงมีส่วนประกอบของวัสดุดิบเริ่มต้น เช่น Quartz (SiO_2), Portlandite (Ca(OH)_2) และ Gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาอยู่ในโครงสร้าง อีกทั้งยังพบเฟสของ Calcite (CaCO_3) ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างเนื่องจากชิ้นงานเกิดการทำปฏิกิริยากับอากาศก่อนนำไปวิเคราะห์



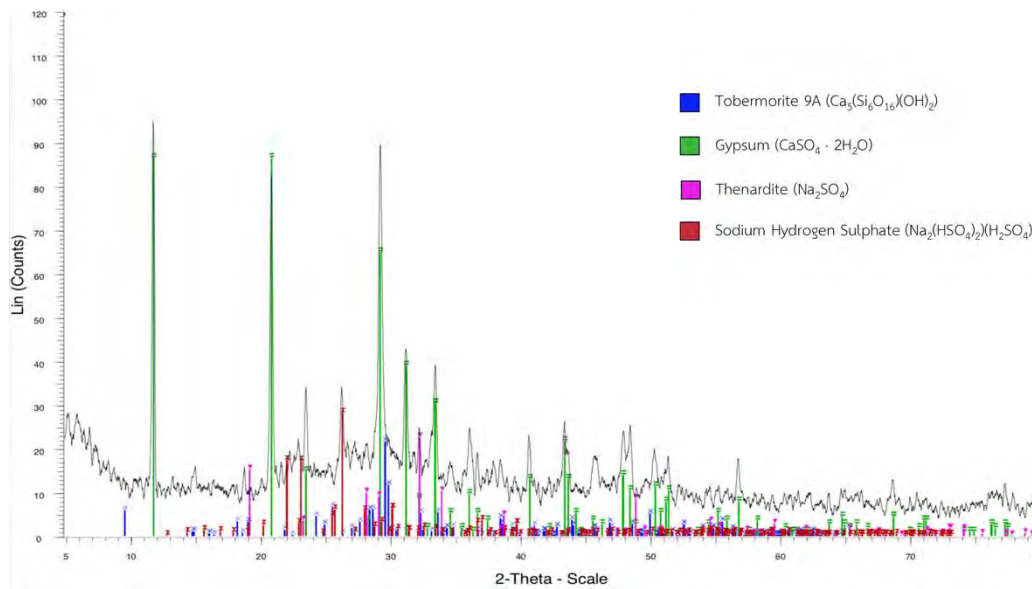
รูปที่ 4.1 ผลการทดสอบองค์ประกอบเฟสของชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกตบอร์ด (Commercial Calcium Silicate)



รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบองค์ประกอบเฟสของชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกตสูตรซีเมนต์



รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบองค์ประกอบเฟสของชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกตสูตรทราย



รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบองค์ประกอบเฟสของชิ้นงานแคลเซียมซิลิเกตสูตรพลาสติก

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

แม้ว่าการผลิตวัสดุทนไฟแคลเซียมซิลิเกตความหนาแน่นต่ำ จะมีกระบวนการขึ้นรูปที่ง่าย และใช้พลังงานในการขึ้นรูปต่ำแต่ก็ยังมีข้อบกพร่องบางประการ อาทิเช่น มีความยากต่อการทำให้อัฐทนไฟมีความหนาแน่นตามที่ ต้องการในบางสูตร ไม่ได้องค์ประกอบเฟสตามที่ต้องการเนื่องจากเมื่อขึ้นงานเจอกับอากาศแล้วทำให้องค์ประกอบเฟสเปลี่ยนแปลงไป และการนำวัตถุดิบมาผสมเข้าด้วยกัน มีความยากที่จะทำให้สารผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ ซึ่งส่วนที่ผสมไม่เข้ากันจะทำให้ไม่ได้เฟสและสมบัติที่ต้องการ และการอบเพื่อไล่น้ำออกจากชิ้นงานอาจทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียรูปได้

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การขึ้นรูปแบบวิธีที่ 2 ให้ความหนาแน่นที่ต่ำกว่าการขึ้นรูปวิธีที่ 1 เนื่องจากปริมาณน้ำที่ใช้ในการขึ้นรูปมีผลต่อความหนาแน่นของชิ้นงาน โดยการขึ้นรูปแบบที่ 2 นั้น จะใช้น้ำในปริมาณที่มากกว่าสูตรที่ 1

5.1.2 การใช้เยื่อกระดาษในปริมาณ 60 กรัม ให้ความหนาแน่นต่ำที่สุดและใกล้เคียงกับชิ้นงานมาตรฐานมากที่สุด

5.1.3 สูตรซีเมนต์ XX เป็นสูตรที่เกิดปฏิกิริยา และมีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกับชิ้นงานมาตรฐานมากที่สุด

ดังนั้น สูตรซีเมนต์ กับเยื่อกระดาษ 60 กรัม ที่ใช้วิธีการขึ้นรูปที่ 2 เป็นสูตรได้ผลดีที่สุด โดยชิ้นงานได้จากการบดผสม ซีเมนต์ XX ปูนขาว พลาสติก และน้ำ RO ในปริมาณตามตารางที่ 3.2 ให้เป็นเนื้อเดียวกันเป็นเวลา 30 นาที แล้วมีการบดผสมกับเยื่อกระดาษปริมาณ 60 กรัม ในเครื่องตีแป้ง จากนั้นทำการกรองเอาน้ำออกและปั่นผสมกับน้ำ 500 ml. เทลงในแม่แบบเพื่อขึ้นรูป บ่มทิ้งไว้ 7 วัน ก่อนนำชิ้นงานตัวอย่างไปอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนชิ้นงานแห้งดีแล้ว ค่าความหนาแน่นของสูตรซีเมนต์ นี้มีค่าประมาณ $0.230 \pm 0.021 \text{ g/cm}^3$ และเป็นสูตรที่มีองค์ประกอบเฟสใกล้เคียงกับที่ต้องการมากที่สุด

5.2 อุปสรรค

5.2.1 ความหนาแน่นที่มากเกินไปกว่าที่ต้องการในสูตรทราย ทำให้ผลที่ออกมาได้ค่าความหนาแน่นที่มากกว่า 0.2 g/cm^3

5.2.2 ปริมาณเยื่อกระดาษไม่เหมาะสม ทำให้เมื่อขึ้นรูปชิ้นงานออกมาแล้วบางสูตรไม่ได้ความหนาแน่นที่ต้องการ บางสูตรก็ได้ชิ้นงานที่ไม่มีความแข็งแรง จึงต้องใช้เวลาในการทดลองปรับปริมาณเยื่อกระดาษนาน

5.2.3 ไม่ได้เฟสตามที่ต้องการ เนื่องจากมีการวางชิ้นงานไว้ในอากาศภายนอกเป็นเวลานาน ทำให้เฟสเกิดการเปลี่ยนแปลง

5.2.4 การทำให้ส่วนผสมมีความเป็นเนื้อเดียวกันได้ยาก เนื่องจากว่าเวลาปั่นนั้นเยื่อกระดาษมักจะเกาะกัน ไม่กระจายตัว ทำให้ชิ้นงานไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกันทั้งชิ้น

5.2.5 การแกะออกจากแม่พิมพ์ทำได้ยาก เนื่องจากว่าตัวชิ้นงานเกาะติดกับแม่พิมพ์ค่อนข้างแน่น ทำให้เวลาแกะชิ้นงานออกมา ชิ้นงานมีความแตกร้าวจากแรงเคาะและแรงที่ใช้แกะออกจากแม่พิมพ์

5.3 ข้อเสนอแนะ

ถึงแม้ว่าจะไม่ได้อิฐทนไฟแคลเซียมซิลิเกตความหนาแน่นต่ำตามที่หวังไว้ แต่ว่าการศึกษากาการผลิตวัสดุทนไฟแคลเซียมซิลิเกตความหนาแน่นต่ำในครั้งนี้ สามารถนำไปต่อยอดได้ในอนาคต จึงมีข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

5.3.1 การศึกษาในงานวิจัยนี้สามารถพิสูจน์ได้ว่า แม่พิมพ์พลาสติกเกอร์เก่า สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนในการผลิตวัสดุทนไฟแคลเซียมซิลิเกตความหนาแน่นต่ำได้

5.3.2 การผสมส่วนผสมให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันมีความสำคัญต่อการผลิตวัสดุทนไฟแคลเซียมซิลิเกตความหนาแน่นต่ำอย่างมาก

5.3.3 ปริมาณน้ำที่ใช้ในการขึ้นรูปสำคัญต่อความหนาแน่นของอิฐทนไฟอย่างมาก

5.3.4 เวลาในการบดผสมในหม้อบด ส่งผลต่อการทำปฏิกิริยาระหว่างวัสดุบดเพื่อให้เกิดเฟสตามที่ต้องการ

5.3.5 ปริมาณเยื่อกระดาษส่งผลต่อความหนาแน่นและความแข็งแรงของอิฐทนไฟ

5.3.6 ควรนำวัสดุบดที่อาจมีสิ่งเจือปนไปทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีก่อนนำไปทำการทดลอง

5.3.7 หลังจากที่ทำการอบไล่ไอน้ำที่ 60 องศาเซลเซียสแล้ว ควรนำไปอบที่อุณหภูมิมากกว่า 100 องศาเซลเซียส

เอกสารอ้างอิง

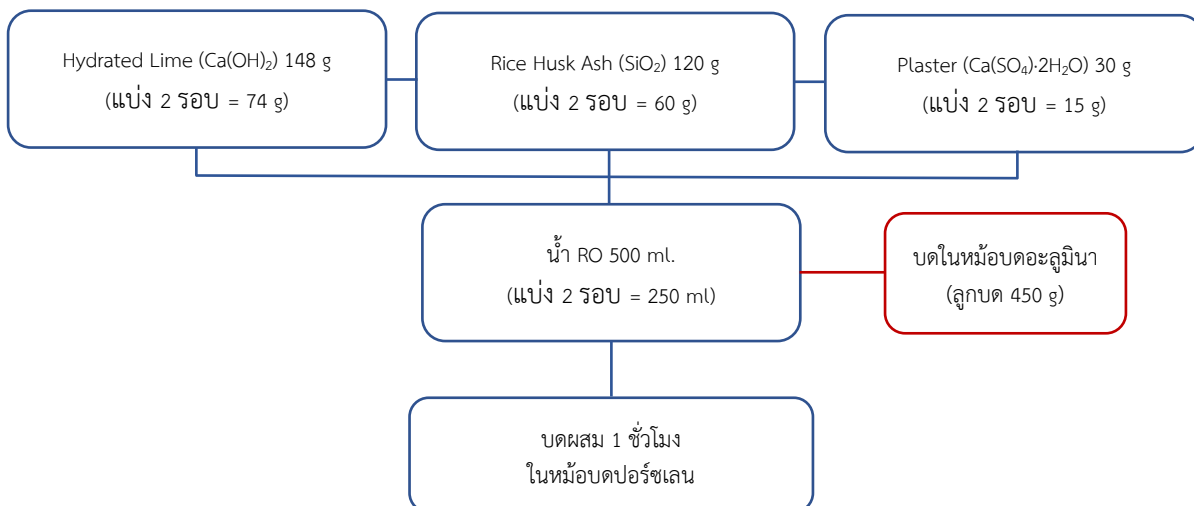
- [1] Kristanto, L., et al. (2017). "Calcium Silicate Board as Wall-facade" *Procedia Engineering* 171: 679-688.
- [2] **Global Calcium Silicate Boards Market 2018 - Industry Production, Trends, Sales, Supply, Demand, Analysis & Forecast to 2025**, accessed date March 27, 2019, available online : <https://www.marketresearchstore.com/report/global-calcium-silicate-boards-market-2018-industry-production-298134>
- [3] ASTM C533-09 **Standard Specification for Calcium Silicate Block and Pipe Thermal Insulation.**
- [4] ASTM C656-94 **Standard Specification for Structural Insulating Board, Calcium Silicate.**
- [5] Ebert, H.-P. and F. Hemberger (2011). "Intercomparison of thermal conductivity measurements on a calcium silicate insulation material." *International Journal of Thermal Sciences* 50(10): 1838-1844.
- [6] Sōmiya, S. (2003). "Handbook of Advanced Ceramics" Book Series, Elsevier Ltd.
- [7] **Calcium Silicate Board**, accessed date March 27, 2019, available online : https://www.rsrefractory.com/insulation_brick/ceramic_fiber/Calcium-Silicate-Board.html
- [8] Harper, S. (1982). "Developing asbestos-free calcium silicate building boards." *Composites* 13(2): 123-128.
- [9] Hastrup, S., et al. (2018). "Impact of amorphous micro silica on the C-S-H phase formation in porous calcium silicates." *Journal of Non-Crystalline Solids* 481: 556-561.
- [10] Wada, S. and Wasanapiarnpong T., "Industrial Furnace Burning Rice Husk in Thailand and Quality of Silica in the Ash", *Proceeding (CD) on The 1st International Conference on the Utilization of Rice Husk and Rice Husk Silica*, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, September 21-22, 2009. pp 1-8.
- [11] Fernández-Carrasco, L. (2014). "Autoclaved cellulose fibre reinforced cement: Effects of silica fume" *Construction and Building Materials* 66 : 138–145.
- [12] Leite, F.H.G. "Synthesis and characterization of calcium silicate insulating material using avian eggshell waste" *Ceramics International* 43 (2017) 4674–4679.
- [13] Wasanapiarnpong, T. (2015). "Fabrication of Fiber Cement Using Tobacco Stalk Pulp from Agricultural Residue ", *Key Engineering Materials* 65 : 9102-105

- [14] Felipe-Sesé, M., et al. (2011). "The use of solid residues derived from different industrial activities to obtain calcium silicates for use as insulating construction materials" *Ceramics International* 37: 3019–3028.
- [15] Holandaa, J.N.F., et al. (2017). "Synthesis and characterization of calcium silicate insulating material using avian eggshell waste" *Ceramics International* 43: 4674–4679.
- [16] Hastrup, S., et al. (2018). "Impact of amorphous micro silica on the C-S-H phase formation in porous calcium silicates" *Journal of Non-Crystalline Solids* 481: 556–561.
- [17] Lingchao, L., et al. (2017). "Investigation on the formation of tobermorite in calcium silicate board and its influence factors under autoclaved curing" *Construction and Building Materials* 143: 280–288.
- [18] Krasselt, V., et al. "DEVELOPMENT OF A NEW CALCIUM SILICATE BOARD WITH SUPER INSULATING PROPERTIES" Goski, D.G., Smith, J.D., editors. **Proceedings of the Unified International Technical Conference on Refractories (UNITECR 2013)**; 2013 Sep 10-13; The American Ceramic Society; 2014. p.339-344.
- [19] Waroot Saengnark, Songchat Padermparch. "Recycle of plaster mold waste via solution process" Senior Project, Program in Applied Chemistry (International Program), Department of Chemistry, Faculty of Science Chulalongkorn University, Academic Year 2010.

ภาคผนวก

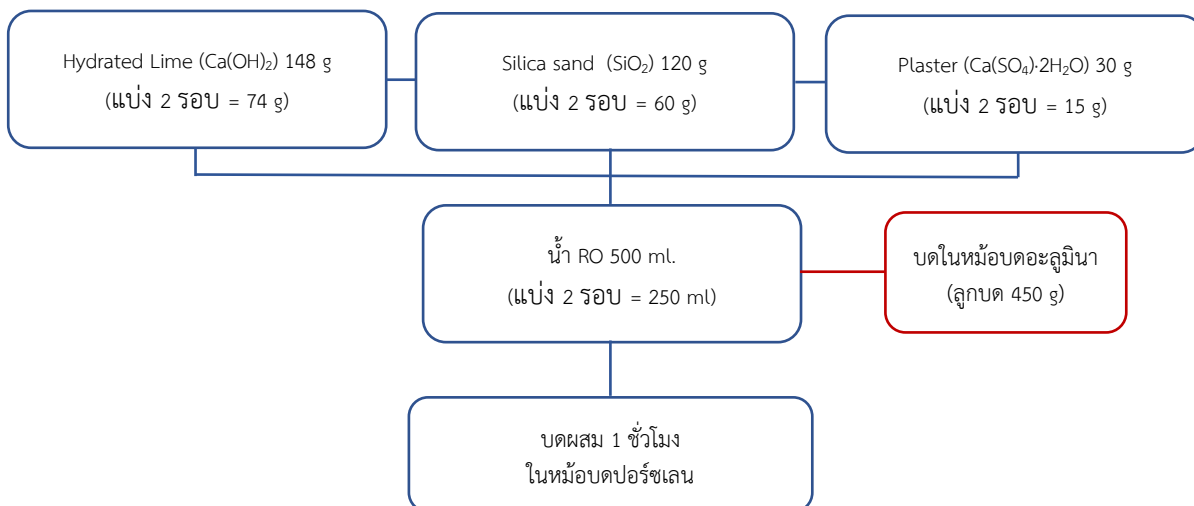
ภาคผนวก แผนผังการเตรียมวัสดุดิบ

- การเตรียมวัสดุดิบสูตรซีเมนต์XX



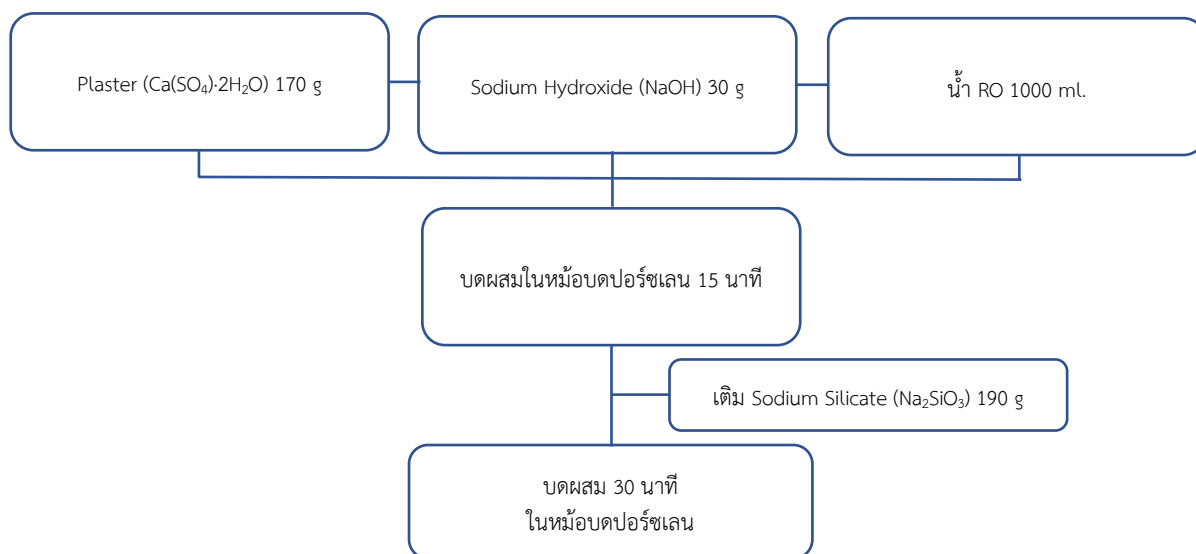
รูปที่ 1 แผนผังการเตรียมวัสดุดิบสูตรซีเมนต์XX

- การเตรียมวัสดุดิบสูตรทราย



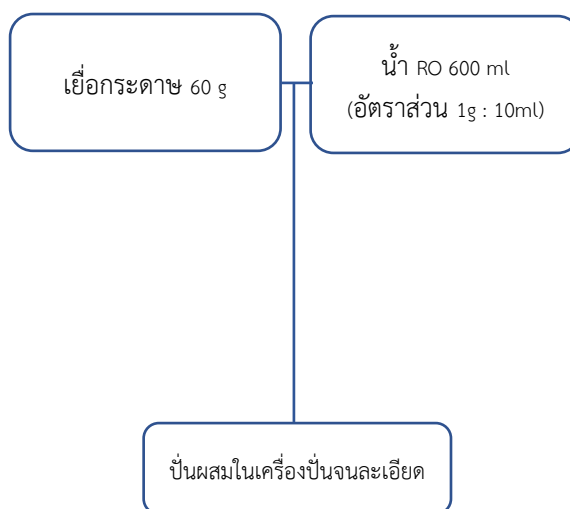
รูปที่ 2 แผนผังการเตรียมวัสดุดิบสูตรทราย

- การเตรียมวัสดุบิสซูต Plaster



รูปที่ 3 แผนผังการเตรียมวัสดุบิสซูต Plaster

- การเตรียมเยื่อกระดาษ



รูปที่ 4 แผนผังการเตรียมเยื่อกระดาษ