

ผลของซีลีกาจากแก้วเคลบต่อสมบัติทางกลของมอร์ต้าเมื่อสัมผัสอุณหภูมิสูง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการและวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF RICE HUSK ASH SILICA ON MECHANICAL PROPERTIES OF MORTAR  
SUBJECTED TO HIGH TEMPERATURE



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Metallurgical and Materials Engineering  
Department of Metallurgical Engineering  
FACULTY OF ENGINEERING  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2020  
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของซิลิกาจากแก้วเคลบต่อสมบัติทางกลของมอร์ต้าเมื่อสัมผัสอุณหภูมิสูง
โดย	นายกันตพงศ์ บุญทวี
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการและวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ธำชาย เหลืองวรานันท์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปฐม วิสุทธิพิทักษ์กุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธำชาย เหลืองวรานันท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มาวิน สุประดิษฐ์ ณ อยุธยา)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภัควัฒน์ แสนเจริญ)

กัณฑ์พงศ์ บุญทวี : ผลของซิลิกาจากเถ้าแกลบต่อสมบัติทางกลของมอร์ต้าเมื่อสัมผัส  
อุณหภูมิสูง. ( EFFECT OF RICE HUSK ASH SILICA ON MECHANICAL  
PROPERTIES OF MORTAR SUBJECTED TO HIGH TEMPERATURE) อ.ที่ปรึกษา  
หลัก : รศ. ดร.ธำชย เหลืองวรรณันท์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ. ดร.วิฑิต ปานสุข

งานวิจัยนี้เป็นการนำเถ้าแกลบ ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการนำแกลบข้าวเผาเป็นเชื้อเพลิงใน  
โรงสีข้าว โดยนำมาประยุกต์ใช้ในการเป็นวัสดุเติมสำหรับทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ เพื่อผลิตเป็น มอร์ต  
ต้า สำหรับทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูง ซึ่งงานวิจัยนี้แบ่ง  
ออกเป็น สอง ส่วน ส่วนที่หนึ่ง เป็นการศึกษาคุณลักษณะและเตรียมเถ้าแกลบที่ได้จากโรงสีข้าว  
สำหรับในการนำไปผสมปูนซีเมนต์ โดยจะตรวจสอบสารประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ ด้วย เครื่องวิ  
เคาะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRF) ผลที่ได้เถ้าแกลบมีปริมาณ ซิลิกาสูงถึง 93.5 เปอร์เซ็นต์ของ  
น้ำหนัก ซึ่งจะเตรียมเถ้าแกลบผ่านตระแกรงร่อนทั้งหมด 3 เบอร์ โดยจะผสมกับปูนซีเมนต์ที่ปริมาณ  
5% 10% และ 15% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ส่วนที่สอง เป็นการศึกษาสมบัติทางกลและคุณลักษณะ  
ของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบก่อนและหลังผ่านอุณหภูมิสูง ที่อายุบ่ม 28 วัน ด้วย กล้องจุลทรรศน์  
อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) และเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) โดยจะให้  
ความร้อนขึ้นงานที่ 400°C และ 800°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และ ตรวจสอบกำลังอัด กับคุณลักษณะ  
ของมอร์ต้า ผลที่ได้มอร์ต้าผสมเถ้าแกลบกำลังอัดมีค่ามากกว่ามอร์ต้าแบบไม่ผสมเถ้าแกลบ ที่  
อุณหภูมิ 400°C แต่ที่อุณหภูมิ 800°C จะมีกำลังอัดใกล้เคียงกัน แต่กำลังอัดโดยรวมที่สูญเสียไปจาก  
การได้รับความร้อน มอร์ต้าที่ผสมเถ้าแกลบมีการสูญเสียกำลังอัดน้อยกว่ามอร์ต้าแบบไม่ผสมเถ้า  
แกลบ และ จากผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าผสมเถ้าแกลบที่อายุบ่ม 200 วัน พบว่ามีกำลังอัด  
เพิ่มขึ้นจากการบ่ม 28 วัน ส่วนแนวโน้มของความสามารถในการทนความร้อนเป็นลักษณะเดียวกันกับ  
มอร์ต้าที่บ่ม 28 วัน

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการและวัสดุ

ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

## 6070118621 : MAJOR METALLURGICAL AND MATERIALS ENGINEERING

KEYWORD: Rice husk ash silica, Portland cement, Hydration, Pozzolan material

Kantapong Boontawee : EFFECT OF RICE HUSK ASH SILICA ON MECHANICAL PROPERTIES OF MORTAR SUBJECTED TO HIGH TEMPERATURE. Advisor: Assoc. Prof. TACHAI LUANGVARANUNT, Ph.D. Co-advisor: Assoc. Prof. WITHIT PANSUK, Ph.D.

This research was to apply rice husk ash which is a by-product material from the burning of rice husk as fuel in rice mill for used as a substitute or an alternative source of cement for producing mortar mixture. We will be exploring the performance of compressive strength at high temperature. In first experiment rice husk mixed with cement is prepared for investigating chemical composition by X-Ray fluorescence (XRF) method. The result shows silica dioxide ( $\text{SiO}_2$ ) is act over at 93.5% by weight. The parameters studied are three difference particle size of rice husk ash blended with cement percentage at 5 ,10 and 15 by weight of cementitious material. In the second experiment we investigate mechanical properties and characteristics of rice husk ash cement mortar before and after heated at high temperature. The samples were cured at room temperature for 28 days scanning electron microscope (SEM) and X-Ray Diffractometer (XRD) were used to investigate mortar heated at  $400^\circ\text{C}$  and at  $800^\circ\text{C}$  at one hour. Test result showed that rice husk ash cement mortar samples have higher compressive strength compared with sample cement mortar without rice husk ash at  $400^\circ\text{C}$ . At temperature  $800^\circ\text{C}$ , cement mortar samples with and without rice husk ash do not have significant different compressive strength. The total compressive strength loss when heated rice husk ash cement mortar sample is loss compared to sample without rice husk ash. The compressive test for samples after aging for 200 day show a higher strength than the simple aged for 28 day. The heat resistant has the same trend as the sample aged for 28 days.

Field of Study: Metallurgical and Materials      Student's Signature .....

Engineering

Academic Year: 2020      Advisor's Signature .....

Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยคำแนะนำและความช่วยเหลือของ รองศาสตราจารย์ ดร.ธัชชาย เหลืองวรานันท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร. วิฑิต ปานสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ท่านได้อบรมสั่งสอน ถ้ายกถอดความรู้ ให้คำแนะนำและวิธีการแก้ปัญหาที่พบในงานวิจัย รวมทั้งตรวจสอบวิทยานิพนธ์ จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ปฐมมา วิสุทธิพิทักษ์กุล ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มาวิน สุประดิษฐ์ ณ อยุธยา กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภักดีวัฒน์ แสนเจริญ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ภายนอกมหาวิทยาลัย ที่สละเวลาเพื่อเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้ ขอขอบคุณอาจารย์ที่ภาควิชาวิศวกรรมโลหการและวัสดุทุกท่านที่ให้ความรู้และสนับสนุนในงานวิจัยนี้ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ลุล่วง และ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาโลหการ และ ภาควิชา รวมถึงภาควิชาเหมืองแร่ ที่ให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกแก่ข้าพเจ้ามาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวขอข้าพเจ้า ที่คอยให้คำปรึกษาและให้กำลังใจมาโดยตลอดจนกระทั่งสามารถทำให้งานสำเร็จไปด้วยดี และขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ ที่ร่วมศึกษาในปริญญาโทมาหาบัณฑิต ที่ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีเสมอมา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

กันตพงศ์ บุญทวี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ .....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญภาพ .....	ญ
บทที่ 1    บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	1
1.3 ขอบเขตของการศึกษา .....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	2
บทที่ 2    ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	3
2.1 แกลบข้าว ( Rice Husk ) .....	3
2.1.1 ลักษณะทางกายภาพของแกลบข้าว และ ที่มาของแกลบข้าว.....	3
2.1.2 ส่วนประกอบของแกลบข้าว .....	4
2.1.3 การเผาแกลบข้าว.....	5
2.1.4 ส่วนประกอบของเถ้าแกลบ .....	6
2.1.5 การใช้งานแกลบและเถ้าแกลบ .....	6
2.1.6 ซิลิกาในแกลบข้าว .....	7
2.1.7 ประโยชน์ของซิลิกา .....	9
2.1.8 การสะสมซิลิกาในพืช .....	9

2.2 ปูนซีเมนต์ (cement) [3].....	10
2.2.1 องค์ประกอบของปูนซีเมนต์.....	10
2.2.2 กรรมวิธีผลิตปูนซีเมนต์.....	11
2.2.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	13
2.3 ปฏิกริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ .....	16
2.3.1 ปฏิกริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) .....	16
2.3.2 กระบวนการเกิดปฏิกริยาไฮเดรชัน [4].....	18
2.4 วัสดุเติมแต่งปูนซีเมนต์ .....	19
2.4.1 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan Material) .....	19
2.4.2 ปฏิกริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic) [5] .....	20
2.5 ผลกระทบของซีเมนต์เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูง .....	21
2.6 วรรณกรรมปริทรรศน์.....	22
2.6.1 ศึกษาผลของเถ้าแกลบผสมปูนซีเมนต์.....	22
2.6.2 ศึกษาผลปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบเมื่อได้รับความร้อน .....	24
2.6.3 ศึกษาผลของปฏิกริยาปอซโซลานิกของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ .....	27
บทที่ 3      ระเบียบวิธีการทดลอง .....	29
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง .....	29
3.1.1 เถ้าแกลบ.....	29
3.1.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 .....	29
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	30
3.3 ขั้นตอนการทดลอง .....	30
3.3.1 การเตรียมและศึกษาคุณลักษณะเถ้าแกลบ .....	32
3.3.2 ทดสอบและตรวจสอบคุณลักษณะปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ.....	33



3.4	ประเภทชิ้นงานตัวอย่างของงานวิจัย .....	36
บทที่ 4	ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล .....	38
4.1	ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมของมอร์ต้า .....	39
4.1.1	ขนาดอนุภาคของส่วนผสมของมอร์ต้า .....	39
4.1.2	สารประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ .....	40
4.2	ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของมอร์ต้าก่อนและหลังได้รับความร้อน .....	40
4.2.1	ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว .....	40
4.2.2	ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบเคมี .....	43
4.2.3	ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของมอร์ต้า .....	46
4.2.4	ผลการวิเคราะห์กำลังอัดมอร์ต้า .....	49
บทที่ 5	สรุปผลการทดลอง .....	63
5.1	ซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบเมื่อไม่ผ่านความร้อน .....	63
5.2	ซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบเมื่อผ่านความร้อน .....	63
5.3	ข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนาในอนาคต .....	64
บรรณานุกรม	.....	65
ประวัติผู้เขียน	.....	67

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของข้าวเปลือก .....	4
ตารางที่ 2 ส่วนประกอบของแกลบข้าว .....	5
ตารางที่ 3 ตารางส่วนประกอบทางเคมีของแกลบ [2] .....	6
ตารางที่ 4 สารประกอบพื้นฐานของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [3] .....	13
ตารางที่ 5 ปริมาณสารประกอบพื้นฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [3] .....	14
ตารางที่ 6 คุณสมบัติของสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ .....	16
ตารางที่ 7 เวลาที่ใช้ให้บรรลุ 80% ของปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบซีเมนต์ [3].....	18
ตารางที่ 8 ผลกระทบของปูนซีเมนต์เมื่อรับความร้อน ณ อุณหภูมิต่าง ๆ [7] .....	21
ตารางที่ 9 ขั้นตอนการทดลอง .....	31
ตารางที่ 10 ขนาดตะแกรงคัดแยกแกลบ .....	32
ตารางที่ 11 จำนวนชิ้นงานมอร์ต้า บ่ม 28 วัน .....	36
ตารางที่ 12 จำนวนชิ้นงานมอร์ต้า บ่ม 60 วัน .....	37
ตารางที่ 13 จำนวนชิ้นงานมอร์ต้า บ่ม 200 วัน .....	37
ตารางที่ 14 ชื่อย่อตัวอย่างในงานวิจัย .....	37
ตารางที่ 15 ขนาดอนุภาคของส่วนผสมของมอร์ต้า .....	39
ตารางที่ 16 สารประกอบทางเคมีของแกลบ .....	40
ตารางที่ 17 ภาพถ่ายมอร์ต้า ก่อนและหลังได้รับความร้อน ที่กำลังขยาย 1500 เท่า .....	41
ตารางที่ 18 ภาพถ่ายมอร์ต้าผสมแกลบ ที่กำลังขยาย 1500 เท่า .....	42
ตารางที่ 19 สารประกอบเคมีของมอร์ต้า .....	45
ตารางที่ 20 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้า บ่ม 28 วัน .....	49

## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 การเรียกชื่อส่วนผสมของปูนซีเมนต์ .....	10
รูปที่ 2 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน.....	18
รูปที่ 3 แก้วแกลบที่ได้จากการเผาแกลบข้าวเพื่อเป็นเชื้อเพลิงที่โรงสีข้าว .....	29
รูปที่ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 .....	29
รูปที่ 5 เครื่องหม้อบด ( Pot mill ) .....	32
รูปที่ 6 เครื่องร่อนตะแกรง .....	32
รูปที่ 7 เตาควบคุมอุณหภูมิ.....	34
รูปที่ 8 ปริมาณความหนาแน่นของขนาดอนุภาค แก้วแกลบ และ ซีเมนต์ .....	39
รูปที่ 9 มอร์ต้าได้รับความร้อนที่ อุณหภูมิห้อง(ซ้าย) 400°C (กลาง) และ 800°C (ขวา) .....	40
รูปที่ 10 ผล XRD ซีเมนต์เพสต์ไม่ผสมแก้วแกลบ บ่ม 28 วัน ณ อุณหภูมิต่าง ๆ .....	43
รูปที่ 11 ผล XRD ซีเมนต์เพสต์ผสมแก้วแกลบ 15% บ่ม 28 วัน ณ อุณหภูมิต่าง ๆ.....	43
รูปที่ 12 เสถียรภาพทางความร้อนของ มอร์ต้าไม่ผสมแก้วแกลบ .....	46
รูปที่ 13 เสถียรภาพทางความร้อนของ มอร์ต้า ผสมแก้วแกลบที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 270 5%.....	47
รูปที่ 14 เสถียรภาพทางความร้อนของ มอร์ต้า ผสมแก้วแกลบที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 270 10%.....	47
รูปที่ 15 เสถียรภาพทางความร้อนของ มอร์ต้า ผสมแก้วแกลบที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 270 15%.....	48
รูปที่ 16 กำลังอัดของมอร์ต้า บ่ม 28 วัน .....	50
รูปที่ 17 กำลังอัดของมอร์ต้า บ่ม 28 และ 200 วัน.....	52
รูปที่ 18 กำลังอัดของมอร์ต้า บ่ม 28 และ 200 วัน ที่ได้รับความร้อน 400°C .....	53
รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด และ ปริมาณแก้วแกลบผ่านตะแกรงเบอร์ 150 ( แบบ C ) .....	54

รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด และ ปริมาณเถ้าแกลบผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ( แบบ B ) .....	54
รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด และ ปริมาณเถ้าแกลบผ่านตะแกรงเบอร์ 270 ( แบบ A ) .....	55
รูปที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอุณหภูมิที่ให้ความร้อนของ มอร์ต้า C .....	56
รูปที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอุณหภูมิที่ให้ความร้อนของ มอร์ต้า B.....	56
รูปที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอุณหภูมิที่ให้ความร้อนของ มอร์ต้า A.....	57
รูปที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\text{SiO}_2$ กับ $\text{CaO}$ ของมอร์ต้าไม่ผสมเถ้าแกลบ.....	58
รูปที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\text{SiO}_2$ กับ $\text{CaO}$ ของมอร์ต้าผสมเถ้าแกลบ 15 % .....	59
รูปที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณ $\text{SiO}_2$ ของมอร์ต้าไม่ผสมเถ้าแกลบ .....	60
รูปที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณ $\text{SiO}_2$ ของมอร์ต้าผสมเถ้าแกลบ 15 %.....	60
รูปที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณ $\text{CaO}$ ของมอร์ต้าไม่ผสมเถ้าแกลบ.....	61
รูปที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณ $\text{CaO}$ ของ มอร์ต้าผสมเถ้าแกลบ 15 % .....	62

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

ข้าวเป็นผลผลิตที่สำคัญของประเทศไทย ด้วยมาตรฐานที่ขึ้นชื่อทำให้ประเทศไทยสามารถส่งออกข้าวได้มากเป็นอันดับต้นๆ ของโลก มีการส่งออกข้าว ประมาณ 10 ล้านตัน โดยมีปริมาณส่วนแบ่งการตลาดมากถึงร้อยละ 35 ดังนั้นอุตสาหกรรมผลิตข้าวจึงเป็นอุตสาหกรรมที่มีแถบเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมาก ปัจจุบันมีการใช้แถบเป็นเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น โรงงานกระดาษ โรงงานเผาอิฐ โรงงานสีข้าว เป็นต้น และการนำแถบไปใช้ประโยชน์ในปัจจุบันยังทำได้น้อยมากส่งผลให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม แถบที่เหลือจากการเผาไหม้แล้วมีปริมาณคิดเป็นร้อยละ 15 – 20 ของข้าวแถบ

ดังนั้นแนวคิดในการนำแถบมาผสมปูนซีเมนต์ เป็นการนำแถบซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการสีข้าว ซึ่งนำแถบข้าวมาทำให้เกิดประโยชน์อย่างคุ้มค่ามากที่สุด และยังเป็นการพัฒนาวัสดุก่อสร้าง และเป็นแนวทางช่วยเหลือนสิ่งแวดล้อมจากวัสดุเหลือทิ้งที่อาจเป็นภัยต่อสิ่งแวดล้อม

### 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาสมบัติทางกลของซีเมนต์ผสมแถบเมื่อได้รับความร้อน
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลของซิลิกาจากแถบต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์

### 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.3.1 ศึกษาคุณลักษณะของซิลิกาที่ได้จากการเผาเคลือบข้าวจากโรงสีข้าวที่นำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง
- 1.3.2 ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ทราयประเภทหยาบ และ น้ำประปาทั่วไป
- 1.3.3 ส่วนผสม ปูนซีเมนต์ : ทราย : น้ำ 1 : 1 : 0.5 (มอร์ต้า) และ บ่ม 28 60 และ 200 วัน
- 1.3.4 ผสมเถ้าเคลือบแทนที่ซีเมนต์ ปริมาณ 5% 10% และ 15% ของน้ำหนักซีเมนต์
- 1.3.5 ขนาดเถ้าเคลือบที่ใช้ผ่านตะแกรงเบอร์ 150(106 $\mu$ ) ,200(75  $\mu$ ) ,270(53  $\mu$ )
- 1.3.6 ทดสอบการทนความร้อนที่ อุณหภูมิ 400 $^{\circ}$ C และ 800 $^{\circ}$ C
- 1.3.7 ทดสอบการรับแรงอัด ของ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ไม่ผสมเถ้าเคลือบ และ ผสมเถ้าเคลือบ ตามส่วนผสมและขนาดอนุภาคที่กำหนด และ เปรียบเทียบระหว่างซีเมนต์ที่ไม่ผ่านความร้อนกับผ่านความร้อนตามอุณหภูมิที่กำหนด ที่อายุ บ่ม 28 และ 60 วัน
- 1.3.8 ทดสอบแรงอัดของมของ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ไม่ผสมเถ้าเคลือบและ ผสมเถ้าเคลือบ ที่อายุบ่ม 200 วัน

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำซิลิกาที่ได้จากการเผาเคลือบข้าวมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดรวมถึงได้เรียนรู้ถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของเถ้าเคลือบ และ ยังทราบถึงกระบวนการของปูนซีเมนต์ในรูปแบบต่าง ๆ ที่ขึ้นอยู่กับ การผสมวัสดุกับปูนซีเมนต์ และสามารถเปรียบเทียบสมบัติทางกลของปูนซีเมนต์เมื่อผ่าน ความร้อนที่อุณหภูมิสูง

เพื่อนำข้อมูลวิจัย พัฒนา ส่งเสริมในการพัฒนาวัสดุในงานก่อสร้าง ให้ดียิ่งขึ้น และ ใช้ วัสดุเหลือใช้ให้คุ้มค่ามากที่สุด

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แกลบข้าว ( Rice Husk )

ประเทศไทยส่งออกข้าวเป็นรายใหญ่ของโลกโดยเฉลี่ยประมาณ 25 ล้านตันต่อปี ผลผลิตที่เหลือจากการสีข้าวก็คือ แกลบ โดยปกติจากกระบวนการสีข้าว ข้าวเปลือก 100 ตัน จะได้แกลบ 23 ตัน แกลบสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น ด้านการเกษตร ด้านการก่อสร้าง ด้านพลังงานและอุตสาหกรรม ฯลฯ และบางส่วนถูกนำไปเผาเป็นถ่านแกลบคุณภาพต่ำส่งออกไปต่างประเทศในราคาถูกปริมาณมาก

##### 2.1.1 ลักษณะทางกายภาพของแกลบข้าว และ ที่มาของแกลบข้าว

แกลบ เป็นส่วนผสมของเปลือกเมล็ดหาง กลีบเลี้ยง และข้าวเมล็ด มีอยู่ประมาณ 20 – 24 ของข้าวเปลือก ถือเป็นผลพลอยได้จากการสีข้าว

##### 2.1.1.1 กระบวนการสีข้าว

ข้าวเปลือกจะถูกกะเทาะเปลือกด้วยเครื่องกะเทาะ เครื่องกะเทาะที่นิยมใช้ คือ แบบไม้หิน (Under Runner Disc) และแบบลูกยาง (Rubber Rolls)

เครื่องกะเทาะแบบไม้หิน จะกะเทาะเปลือกโดยใช้ลักษณะที่ปลายเมล็ดข้าวทั้งสองด้านมีช่องว่างระหว่างเมล็ดและเปลือก และลักษณะการขบกันของเปลือก ในระหว่างการกะเทาะเมล็ดข้าวเปลือกจะถูกกดที่ปลายทั้งสองด้าน ทำให้เปลือกที่ขบกันอยู่แตกออกจากกันและทำให้เมล็ดข้าวกลิ้งหลุดจากเปลือก การกะเทาะลักษณะนี้จะมีต้นอ่อนและจมูกข้าว (ส่วนปลายของเมล็ดที่ติดกับต้นอ่อน) ที่แตกหักระหว่างการกะเทาะหลุดติดมากับเปลือกด้วย

เครื่องกะเทาะด้วยลูกยางกะเทาะจะใช้ลักษณะการขบตัวของเปลือกเป็นหลักโดยมี ลูกยาง 2 ลูกหมุนด้วยความเร็วไม่เท่ากัน ทำหน้าที่ฉีกเปลือกของเมล็ดดอก การกะเทาะในลักษณะนี้จึงไม่มีจมูกข้าวและต้นอ่อนมากับเปลือก ข้าวกล้องเมื่อผ่านการกะเทาะและแยกเปลือกออกแล้ว จะถูกนำมาขัดขาวซึ่งเป็นการขัดเอาชั้นรำที่ประกอบด้วยเนื้อเยื่อ 5 ชั้น ออกให้เหลือแต่ชั้นแป้ง เพื่อใช้สำหรับบริโภค ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียคุณค่าทางอาหารไป

#### 2.1.1.2 ลักษณะทางกายภาพของแกลบข้าว[1]

แกลบทำหน้าที่ห่อหุ้มเมล็ดข้าวอยู่ภายนอก ซึ่งได้จากการสีข้าว เมื่อพิจารณาแกลบให้ชัดขึ้น โดยการนำมาส่องกล้องจุลทรรศน์ จะมีลักษณะผิวเป็นร่องเรียงกันและผิวแกลบมีปริมาณความพรุนมาก

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของข้าวเปลือก

คุณสมบัติ	
สี	เหลือง/ทอง
ความยาว (มิลลิเมตร)	5 – 10
ความกว้าง (มิลลิเมตร)	2.5 – 5.0
ความแข็ง ( Moh scale)	5.5 – 6.5
ความหนาแน่น (กิโลกรัม/เมตร <sup>3</sup> )	96 - 160

#### 2.1.2 ส่วนประกอบของแกลบข้าว

ส่วนประกอบที่สำคัญของแกลบข้าวขึ้นอยู่กับวิธีทางการเกษตร ลักษณะภูมิประเทศและลักษณะภูมิอากาศ จากข้อมูลนี้มีผลต่อการเตรียมและศึกษาคุณลักษณะของแกลบและวิธีการวิเคราะห์ ส่วนประกอบสำคัญของแกลบข้าว



ตารางที่ 2 ส่วนประกอบของแกลบข้าว

ส่วนประกอบ	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
เซลลูโลส	34-44
ลิกนิน	19-47
น้ำตาล**	17-26
เถ้าแกลบ	13-29
ความชื้น	8.5-11.0

\*\* ดี-ไซโรส , แอล-อะราบิโนส , ดี-กาแลคโตส , กรดเมธิลกลูคูโรนิก

ส่วนประกอบของแกลบข้าวที่เป็นสารอินทรีย์ เมื่อแยกสลายเป็นธาตุพื้นฐานจะประกอบด้วย คาร์บอน(C) 51.2 % ไฮโดรเจน(H) 6.9 % และ ออกซิเจน(O) 41.9 % โดยน้ำหนัก

### 2.1.3 การเผาแกลบข้าว

แกลบจัดเป็นเชื้อเพลิงแข็งและมีน้ำหนักเบามาก มีลักษณะการเผาไหม้จะเป็นการเผาไหม้แบบแพร่ (Diffusion) คือแกลบจะติดไฟที่ผิวหน้าออกก่อนแล้วจึงค่อยๆลามเข้าไปข้างในของแกลบข้างในและเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไปก่อนก็จะกลายเป็น เถ้าแกลบ (Ash) โดยการเผาแกลบนิยมใช้ 4 วิธี

1. การเผาแกลบผสมดินเหนียวหรือปูนขาวที่เหลือจากอุตสาหกรรม
2. การเผาเป็นเชื้อเพลิงในโรงสี
3. การเผาในที่โล่ง
4. การเผาแบบควบคุม

แกลบเมื่อได้รับความร้อนจะสูญเสียความชื้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลหากเกิดการเผาไหม้และถ้ามีอากาศเพียงพอจะกลายเป็นเถ้าสีขาว การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจาก (LOI) ต่ำ แต่ว่าการเผาแกลบในที่ที่มีอากาศไม่เพียงพอและที่อุณหภูมิต่ำแกลบจะกลายเป็นเถ้าสีดำและการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจาก (LOI) สูง ดังนั้นแกลบที่มีการเผาที่สมบูรณ์จะได้เถ้าแกลบเป็นสีขาว

### 2.1.4 ส่วนประกอบของเถ้าแกลบ

เถ้าแกลบที่ได้จากการเผาอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิสูง ภายใต้สภาวะออกซิเจนที่มีเกินพอ ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ โดยส่วนมากมักจะเกิดเปลวไฟขณะเผาไหม้หากเผาในที่โล่งที่มีอากาศกระจายสู่พื้นผิวขณะเผาไหม้ที่เพียงพอ แกลบข้าวจะประกอบด้วยเถ้าแกลบ 10 % - 12 % โดยน้ำหนัก ซึ่งจะพบว่าเถ้าแกลบจะมีส่วนประกอบของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) สูงถึง 87- 97 % -ของน้ำหนัก โดยมีการแตกต่างกันตามแหล่งเพาะปลูก

ตารางที่ 3 ตารางส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ [2]

ส่วนประกอบ	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
$\text{SiO}_2$	86.7 - 97.3
$\text{K}_2\text{O}$	0.6 - 2.5
$\text{Na}_2\text{O}$	0 - 1.5
$\text{CaO}$	0.2 - 1.5
$\text{MgO}$	0.12 - 1.96
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0 - 0.6
$\text{P}_2\text{O}_5$	0.2 - 2.9
$\text{SO}_3$	0.1 - 1.1
$\text{Cl}$	0 - 0.4

### 2.1.5 การใช้งานแกลบและเถ้าแกลบ

แกลบโดยทั่วไปมักจะใช้เป็นแหล่งในการสกัดซิลิกา ซึ่งมีข้อมูลงานวิจัยมานานหลายสิบปี เนื่องจากปริมาณแกลบที่เพิ่มขึ้น ทำให้มีแนวทางการใช้งานแกลบและเถ้าแกลบให้หลากหลาย โดยสามารถจำแนกการใช้งานแกลบและเถ้าแกลบได้ 7 ประเภท [1]

- ประเภทที่ 1      การใช้งานแถบเพื่อเป็นแหล่งพลังงาน
- ประเภทที่ 2      การใช้งานแถบเพื่อเป็นแหล่งซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ )
- ประเภทที่ 3      การใช้งานซิลิกาจากแถบเพื่อเป็นวัตถุดิบในงานเซรามิกส์
- ประเภทที่ 4      การใช้งานซิลิกาจากแถบเพื่อผลิตซิลิกอน ( $\text{Si}$ )
- ประเภทที่ 5      การใช้งานแถบเพื่อผลิตซิลิกอนคาร์ไบด์ ( $\text{SiC}$ ) และ ซิลิกอนไนไตรด์ ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )
- ประเภทที่ 6      การใช้งานแก้วแถบในอุตสาหกรรมเหล็กกล้า
- ประเภทที่ 7      การใช้งานแถบในอุตสาหกรรมคอนกรีต

### 2.1.6 ซิลิกาในแถบข่าว

ซิลิกาเป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างพื้นฐานทางเคมี  $\text{SiO}_2$  ซิลิกามีหลายชนิดแตกต่างกันตามลักษณะของอนุภาคเนื้อสาร ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ [1] ได้แก่

#### 2.1.6.1 ซิลิกาผลึก (Crystalline)

ซิลิกาผลึกสามารถแบ่งย่อยเป็นหลายชนิดตามความแตกต่างของรูปร่าง ลักษณะผลึกและความหนาแน่นของซิลิกา รูปร่างของผลึกมีหลายแบบ เช่น สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม หกเหลี่ยม สี่เหลี่ยมลูกบาศก์ และเส้นยาว เช่น low-temperature quartz มีรูปร่างแบบสามเหลี่ยม High-temperature quartz มีรูปร่างผลึกแบบหกเหลี่ยม low-temperature cristobalite มีรูปร่างผลึกแบบสี่เหลี่ยม High-temperature cristobalite มีรูปร่างผลึกเป็นแบบทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ low-temperature tridamite มีรูปร่างผลึกแบบเส้นยาว เป็นต้น

### 2.1.6.2 ซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous silica หรือ Non-crystalline silica)

ซิลิกาอสัณฐานมีอนุภาคส่วนประกอบรูปร่างไม่เป็นผลึก ซึ่งแบ่งเป็น 3กลุ่ม คือ

1. วิเทรียสซิลิกา (vitreous silica) หรือ ซิลิกาแก้ว (silica glass) เป็นของแข็ง ไม่มีรูพรุน ผลิตได้จาก หลอมเหลวผลึกซิลิกาอสัณฐานแล้วปล่อยให้เย็นตัว
2. ซิลิกาเจล (silica gel) มีลักษณะแข็ง มีรูพรุนขนาดเล็กอยู่เป็นจำนวนมาก มีโครงสร้างรูพรุนแบบเปิด และมีพื้นที่ผิวสูง แบ่งออกเป็น 4 ชนิดคือ
  - 2.1 อะควาเจล (aquagel) มีลักษณะเป็นเจลเหลว ภายในมีน้ำมาก
  - 2.2 อัลโคเจล (alcogel) มีลักษณะเป็นเจล เตรียมได้จากอัลคอกซี-ไฮเลน
  - 2.3 เซโรเจล (xerogel) มีลักษณะเป็นเจลแห้ง จากการกำจัดน้ำออกด้วยการระเหย มีโครงสร้างไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม
  - 2.4 แอโรเจล (aerogel) มีลักษณะเป็นเจลแห้ง น้ำหรือตัวทำละลายถูกกำจัดด้วยวิธีสกัดแบบซูเปอร์คริติคอลล เตรียมได้จากกระบวนการทำแห้ง ณ อุณหภูมิเหนือจุดวิกฤต
3. ซิลิกาผง (Silica powder) เป็นซิลิกาที่มีส่วนประกอบของโครงสร้างที่มีขนาดเล็กมากในระดับ ไมโครเมตร ถึง นาโนเมตร ตัวอย่างของซิลิกาชนิดนี้ เช่น อะควาจีนิก (aquagenic) เตรียมได้จากการตกตะกอนของสารละลาย ไพโรจีนิก (pyrogenic) เตรียมได้จากการระเหยของซิลิกาโดยใช้ความร้อน ในสถานะที่ไม่มีก๊าซออกซิเจน ไบโอจีนิก (biogenic) เป็นประเภทของอะควาจีนิกชนิดชนิดพิเศษประเภทหนึ่งที่พบในพืช และไดอะตอม

### 2.1.7 ประโยชน์ของซิลิกา

ซิลิกาได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างมากในทางอุตสาหกรรม สำหรับผลิตสินค้า ใช้ในการผลิตวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม ตลอดจนงานทางด้านวิทยาศาสตร์ทั้งนี้ประโยชน์ของซิลิกาโดยทั่วไปสรุปได้ดังนี้

1. เป็นสารเพิ่มความแข็งและความหนาแน่นแก่สารอื่น ๆ ได้แก่ยาง สารพอลิเมอร์
2. เป็นสารลดแรงยึดระหว่างผิวของแข็ง เช่น ป้องกันการแตกร้าว หรือการกัดตัวของวัสดุ
3. เป็นสารเพิ่มแรงยึดติดโดยเฉพาะกาว
4. เป็นสารเพิ่มความเงา(Optical effects)
5. เป็นสารช่วยเพิ่มการกันน้ำ(Hydrophobic หรือ water-repellent)
6. เป็นสารดูดซับ (Absorbent) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง silica gel
7. เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาใช้เฉพาะซิลิกา Reactive
8. ใส่ในสีที่ฉูดพ่นเพื่อป้องกันการอุดตันของหัวฉีด
9. ใช้เป็นส่วนผสมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูง

### 2.1.8 การผสมซิลิกาในพีช

การผสมซิลิกาในพีชเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน โดยพีชจะดูดซิลิกาที่เป็นอนุภาคเล็ก ๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำสู่ลำต้น โดยผ่านทางรากแก้วแล้วเข้าไปผสมในส่วนต่าง ๆ ของพีชทำให้ได้ซิลิกาที่บริสุทธิ์เข้าไปผสมในส่วนต่าง ๆ ของพีชและจัดอยู่ในรูปซิลิกาชนิดผง (Silica powders) ซึ่งหากมีวิธีใดกำจัดส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ ชนิดอนุโมลของประจุบวกออกไปโดยไม่ทำลายความบริสุทธิ์และโครงสร้างของซิลิกาแล้วสามารถเตรียมซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์สูงมากได้

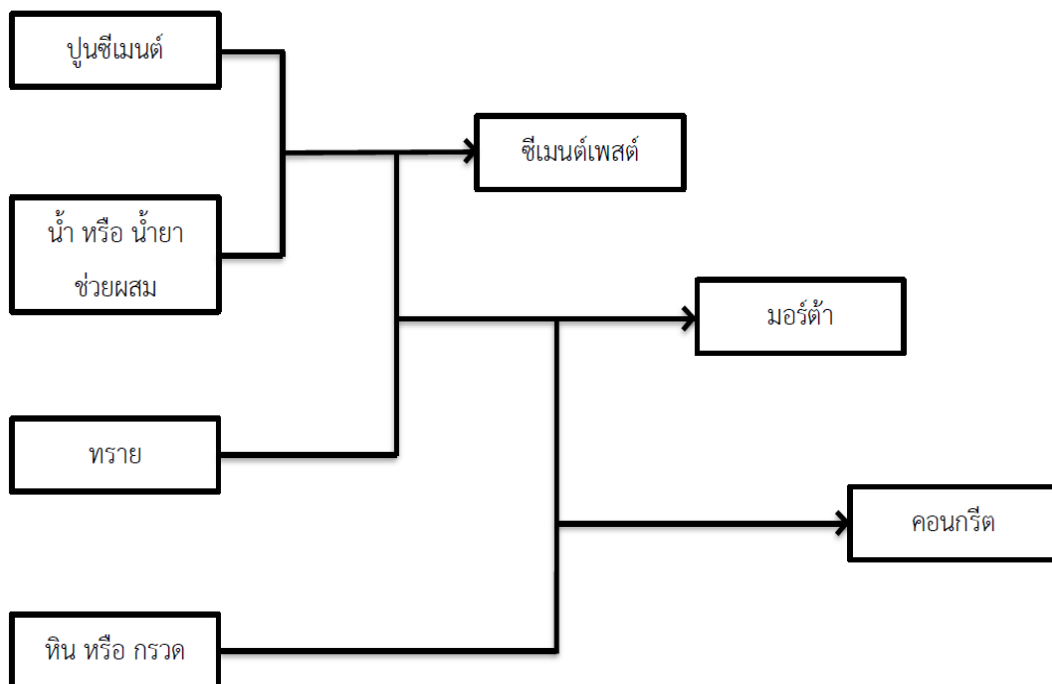
## 2.2 ปูนซีเมนต์ (cement) [3]

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุหลักที่ใช้ในการก่อสร้างอาคารบ้านเรือนตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน นอกจากไม้ และ เหล็กแล้วยังนิยมใช้ปูนซีเมนต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปัจจุบันนี้ การใช้ปูนซีเมนต์เพื่อการก่อสร้างมีความนิยมอย่างแพร่หลาย ทั้งสิ่งก่อสร้างที่มีขนาดใหญ่ เช่น อาคาร ถนน สะพาน เขื่อน

ซีเมนต์ (cement) เป็นสารเคมีหรือวัสดุเซรามิก ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาทางเคมีเกิดการรวมตัวกันระหว่างอนุภาคเกิดเป็นโครงสร้างที่ขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาเคมีที่พบ คือ ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration) และปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic) หรือ ซีเมนต์อาจหมายถึงสารที่สามารถยึดประสานของแข็งให้เกิดเป็นขึ้นเดียวกัน

### 2.2.1 องค์ประกอบของปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์เมื่อนำไปใช้งานต้องผสมกับวัสดุต่าง ๆ เช่น หิน ทราย และ น้ำ หรือ น้ำยาช่วยผสม โดยการนำวัสดุเหล่านี้มาผสมกับปูนซีเมนต์ จะสามารถเรียกชื่อแตกต่างกันไป ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การเรียกชื่อส่วนผสมของปูนซีเมนต์

## 2.2.2 กรรมวิธีผลิตปูนซีเมนต์

กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์ สามารถแบ่งออกตามลักษณะของวัตถุดิบเป็น 2 แบบ คือ แบบเปียก (Wet Process) และแบบแห้ง (Dry Process) โดยส่วนใหญ่ในปัจจุบัน จะเป็นการผลิตแบบแห้งซึ่งเป็นกรรมวิธีที่ประหยัดและไม่ซับซ้อนและยังไม่สิ้นเปลืองพลังงานเหมือนกับแบบเปียก

### 2.2.2.1 วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ แบ่งออกเป็น 3 ชนิด

1. วัตถุดิบที่มีส่วนประกอบของปูนขาว (Line Component) เป็นวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบทางเคมีเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate,  $\text{CaCO}_3$ ) ซึ่งมีความบริสุทธิ์ประมาณ 85 – 95 % ตัวอย่างวัตถุเหล่านี้ตามธรรมชาติ ได้แก่ หินปูน (Limestone) ชอล์ก (Chalk) และดินขาว (Marl)
2. วัตถุดิบที่มีส่วนประกอบของดินดำ (Clay) เป็นวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบทางเคมีของซิลิคอนไดออกไซด์ (Silicon Dioxide,  $\text{SiO}_2$ ) อลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminum Oxide,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric Oxide,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ตัวอย่างวัตถุเหล่านี้ตามธรรมชาติ ได้แก่ ดินดำ (Clay) และดินดาน (Shale)
3. วัตถุดิบปรับแต่งคุณสมบัติ (Corrective Materials) เป็นวัตถุดิบที่ใช้สำหรับเพิ่มเติมสารประกอบบางตัว ซึ่งมีไม่เพียงพอในดินดำ หรือดินดาน วัตถุดิบเหล่านี้ได้แก่ ททราย (ในกรณีที่ต้องการซิลิคอนไดออกไซด์) แร่เหล็กหรือดินลูกรัง (ในกรณีที่ต้องการเฟอร์ริกออกไซด์) และดินอะลูมินา (ในกรณีที่ต้องการอะลูมินัมออกไซด์) เป็นต้น

### 2.2.2.2 การผลิตปูนซีเมนต์แบบเปียก (Wet Process)

วัตถุดิบที่ใช้ได้แก่ ดินสอพองและดินเหนียวถูกนำมาผสมกันให้ได้สัดส่วนเหมาะสมตามที่ต้องการ โดยเติมน้ำลงไปผสมแล้วนำไปบดให้ละเอียดก่อนที่จะบ้อนเข้าไปในหม้อเผา(Kiln)

### 2.2.2.3 การผลิตปูนซีเมนต์แบบแห้ง (Dry Process)

วัตถุดิบที่ใช้ส่วนใหญ่ได้แก่ หินปูนหินดินดาน จะถูกนำมาผสมกันในสภาพแห้งให้ได้สัดส่วนที่ต้องการแล้วนำไปบดให้ละเอียดก่อนที่จะบ้อนเข้าไปในหม้อเผา

เมื่อส่วนผสมของวัตถุดิบบดได้แล้วก็จะบ้อนเข้าสู่หม้อเผาแบบหมุน (Rotary kiln) อุณหภูมิที่ใช้ในเตาเผา 1200 – 1400 องศาเซลเซียส ณ อุณหภูมินี้วัตถุดิบต่าง ๆ จะถูกหลอมรวมกันเป็น Clinker ที่ยังให้เย็นลงจากนั้นนำปูนเม็ดที่เย็นตัวลงนี้มาบดให้ละเอียดอีกครั้งหนึ่งในขณะทำการบดจะมีการเติมยิปซัมลงไปเล็กน้อย ประมาณ 3 ถึง 6 เปอร์เซ็นต์เพื่อหน่วงเวลาการแข็งตัวของปูนซีเมนต์อันจะเป็นผลทำให้สะดวกต่อการนำไปใช้งานต่อไป

ข้อแตกต่างระหว่างการผลิตปูนซีเมนต์แบบเปียก (Wet Process) และ แบบแห้ง (Dry Process)

- การผลิตปูนซีเมนต์แบบเปียกนี้ไม่เป็นที่นิยมในปัจจุบัน เนื่องจากต้องใช้เชื้อเพลิงปริมาณมากในการผลิตปูนเม็ด และยังมีอัตราการผลิตต่ำ ซึ่งทำให้ต้นทุนการผลิตสูง ส่วน การผลิตปูนซีเมนต์แบบแห้ง ไม่ต้องใช้น้ำในการผสมวัตถุดิบ ดังนั้น จึงประหยัดค่าใช้จ่ายในการผลิต โดยเฉพาะค่าเชื้อเพลิง และเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน
- สำหรับกรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์ในประเทศไทยปัจจุบันนิยมผลิตแบบแห้งซึ่งจัดเป็นกรรมวิธีที่ทันสมัยที่สุดเนื่องจากกรรมวิธีการผลิตไม่ยุ่งยาก และสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงน้อยหม้อเผาปูนซีเมนต์ที่ทันสมัยที่สุดในปัจจุบันสามารถผลิตปูนซีเมนต์ได้ถึง 10,000 ตันต่อวัน



### 2.2.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นซีเมนต์ที่ใช้กันแพร่หลายมาก ที่มีชื่อเรียกเช่นนี้เพราะกำเนิดขึ้น ณ เมืองปอร์ตแลนด์ ประเทศอังกฤษ ซีเมนต์ชนิดนี้มีสารประกอบรวมกันอยู่หลายชนิด แต่มีสารประกอบพื้นฐานทั้งหมด 4 ชนิด ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สารประกอบพื้นฐานของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [3]

ชื่อสารประกอบ	สูตรเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียม ซิลิเกต	$3 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
ไดแคลเซียม ซิลิเกต	$2 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
ไตรแคลเซียม อะลูมิเนต	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
เตตระแคลเซียม อะลูมิโนเฟอร์ไรต์	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

#### 2.2.3.1 ประเภทปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ตามมาตรฐานทั่วไป ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถแบ่งออกเป็น 5 ประเภท

ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ผลิตใช้มากที่สุด เหมาะสำหรับผลิตคอนกรีตทั่วไป ที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดา เช่น ปูนตราช้าง ตราเพชร

ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) เหมาะสำหรับใช้ในงานคอนกรีตที่เกิดความร้อนและทนซัลเฟตได้ปานกลาง ซึ่งในปัจจุบันไม่มีการผลิตใช้ในประเทศไทย

ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทใช้กำลังอัดเร็ว (High Strength Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ให้กำลังอัดสูงในระยะแรก เพราะมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา เหมาะสำหรับการทำคอนกรีตที่ต้องการจะใช้งานเร็ว ข้อควรระวัง ไม่ควรใช้ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ในงานโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่เพราะเนื่องจากความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะเกิดสูงมากในช่วงต้นอาจทำให้โครงสร้างแตกร้าวได้

ประเภทที่ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) เหมาะสำหรับงานคอนกรีตหนา (Mass Concrete) เช่น การสร้างเขื่อน เนื่องจากทำให้อุณหภูมิของคอนกรีตขณะก่อตัวต่ำกว่าปูนซีเมนต์ชนิดอื่นซึ่งเป็นการลดปัญหาความเสี่ยงจากการแตกร้าว

ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภททนซัลเฟตได้สูง (Sulphate Resistance Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้มี  $C_3A$  ต่ำ เพื่อจะป้องกันไม่ให้ซัลเฟตจากภายนอกมาทำลายเนื้อคอนกรีต เหมาะสำหรับโครงสร้างที่มีการกระทำของซัลเฟต ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ให้กำลังอัดช้าและให้ความร้อนต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ได้แก่ ปูนตราช้างฟ้า ตราปลาฉลาม

ตารางที่ 5 ปริมาณสารประกอบพื้นฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [3]

มาตรฐาน(ASTM)	ชนิด	องค์ประกอบ (%)			
		$C_3S$	$C_2S$	$C_3A$	$C_4AF$
I	ปกติ	49	25	12	8
II	ดัดแปลง	46	29	6	12
III	กำลังอัดเร็ว	56	15	12	8
IV	เกิดความร้อนต่ำ	30	46	5	13
V	ต้านทานซัลเฟต	43	36	4	12

### 2.2.3.2 คุณสมบัติของสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์มีสารประกอบหลักอยู่ 4 ประเภท ดังตารางที่ 6 ซึ่งสารประกอบทั้งหมดเมื่อเจอน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งจะทำให้เกิดการแข็งตัวของซีเมนต์เฟสท์ โดยสารประกอบหลักมีคุณสมบัติดังนี้

1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate ,  $C_3S$ )

ไตรแคลเซียมซิลิเกต โดยทั่วไปปูนซีเมนต์จะมีปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกตมากที่สุดถึง 55 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและมีรูปร่างลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมสีเทา ดำมีจุดหลอมเหลว  $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดย ไตรแคลเซียมซิลิเกตจะเกิดปฏิกิริยาไปเรื่อยๆ ถ้าอัตราการลดอุณหภูมิไม่ช้าจนเกินไป

2. ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate ,  $C_2S$ )

ไดแคลเซียมซิลิเกต มีปริมาณในปูนซีเมนต์ 12 -40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีรูปร่างลักษณะเป็นเม็ดกลม เมื่อไดแคลเซียมซิลิเกตสัมผัสกับน้ำจะเกิดการคายความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่พลังงานความร้อนของ ไดแคลเซียมซิลิเกตจะน้อยกว่าไตรแคลเซียมซิลิเกต

3. ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (Tricalcium Aluminate ,  $C_3A$ )

ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต มีปริมาณในปูนซีเมนต์ 5 – 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีรูปร่างลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมสีเทาใส สารประกอบประเภทนี้มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเมื่อสัมผัสกับน้ำ ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการก่อตัวแบบทันที เนื่องจากมีความไวในเกิดปฏิกิริยาจึงมีการคายความร้อนที่สูงมาก แต่ ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต จะให้กำลังที่ต่ำกว่า ไตรแคลเซียมซิลิเกต( $C_3S$ ) และ ไดแคลเซียมซิลิเกต( $C_2S$ )

4. เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium Aluminoferrite,  $C_4AF$ )

เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ มีปริมาณในปูนซีเมนต์ 8 - 14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งอยู่ในสภาพสารละลายของแข็ง และมีคุณสมบัติคล้ายไตรแคลเซียมอะลูมิเนต( $C_3A$ ) แต่ความรุนแรงการเกิดปฏิกิริยาเมื่อสัมผัสกับน้ำน้อยกว่า ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต( $C_3A$ ) แต่มากกว่า ไตรแคลเซียมซิลิเกต( $C_3S$ ) และ ไดแคลเซียมซิลิเกต( $C_2S$ )

ตารางที่ 6 คุณสมบัติของสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

คุณสมบัติ	สารประกอบ			
	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน	เร็ว (ชม.)	ช้า(ชม.)	ทันทีทันใด	เร็วมาก(ชม.)
การพัฒนากำลัง	เร็ว(วัน)	เร็ว(สัปดาห์)	เร็วมาก(วัน)	เร็วมาก(วัน)
กำลังประลัย	สูง	สูง	ต่ำ	ต่ำ
ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน	ปานกลาง	สูง	ต่ำ	ต่ำ

### 2.3 ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ

การเกิดปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำนั้นเกิดขึ้นได้จากสารประกอบทั้ง 4 ของปูนซีเมนต์ ตามตารางที่ 4 เมื่อสัมผัสกับน้ำแล้วทำให้เกิดการแข็งตัวของซีเมนต์เฟสที่เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

#### 2.3.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction)

ปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัวปฏิกิริยานี้ขึ้นอยู่กับตัวประกอบในปูนซีเมนต์ สารประกอบเหล่านี้เมื่อเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่มีความแตกต่างกันออกไป โดยระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังตารางที่ 7 และสามารถจำแนกปฏิกิริยาไฮเดรชันกับสารประกอบ ได้ 4 ชนิด ดังนี้

##### 2.3.1.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน ไตรแคลเซียมซิลิเกต และ ไดแคลเซียมซิลิเกต

(C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S)

ไตรแคลเซียมซิลิเกต และ ไดแคลเซียมซิลิเกต จะทำปฏิกิริยากับน้ำ ก่อให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>) และ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวประสานและสมการการเกิดปฏิกิริยามีดังนี้





สารประกอบที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยานี้มีผลทางด้านกำบัง โดยเฉพา แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ที่เกิดขึ้นจะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานวัสดุรวมในคอนกรีต ซึ่ง (C-S-H) ที่ได้จากปฏิกิริยาจะเกิดประมาณร้อยละ 50 – 75 และ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ได้จากปฏิกิริยาจะเกิดประมาณร้อยละ 25 – 30 ของปริมาณซีเมนต์โพสต์

### 2.3.1.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน ไตรแคลเซียม อะลูมิเนต ( $\text{C}_3\text{A}$ )

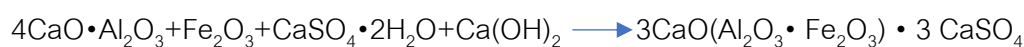
ปฏิกิริยาไฮเดรชัน ไตรแคลเซียม อะลูมิเนต ( $\text{C}_3\text{A}$ ) จะเกิดขึ้นทันที และ ก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์โพสต์ ซึ่งมีสมการดังนี้



เพื่อหน่วงไม่ให้เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วจึงใส่ยิบซั่ม ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) เข้าไปในระหว่างขบวนการบดซีเมนต์ ยิบซั่มจะทำ ปฏิกิริยา ไตรแคลเซียม อะลูมิเนต ( $\text{C}_3\text{A}$ ) ก่อให้เกิดชั้นของ Ettringite บนผิวของอนุภาคไตรแคลเซียม อะลูมิเนต ( $\text{C}_3\text{A}$ ) ชั้นของ Ettringite จะเป็นตัวชะลอการก่อตัวของ ( $\text{C}_3\text{A}$ )

### 2.3.1.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน เตตระแคลเซียม อะลูมิโนเฟอร์ไรต์ ( $\text{C}_4\text{AF}$ )

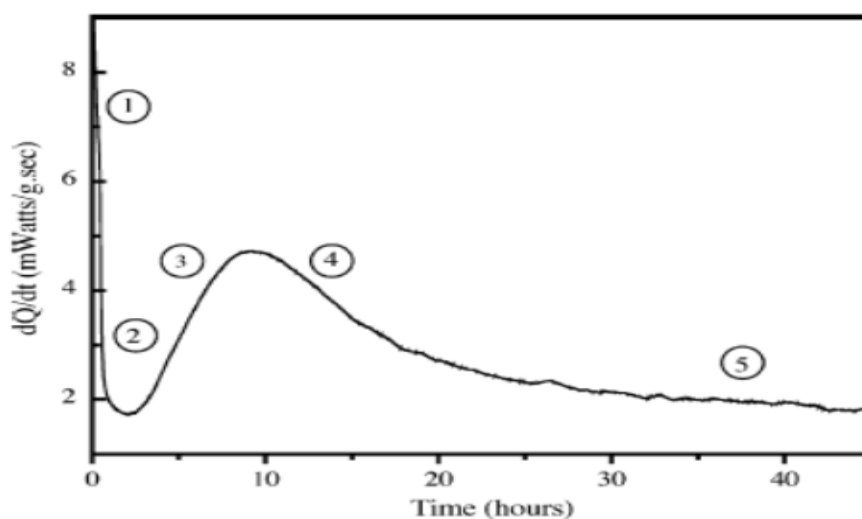
ปฏิกิริยาไฮเดรชัน เตตระแคลเซียม อะลูมิโนเฟอร์ไรต์ ( $\text{C}_4\text{AF}$ ) จะเกิดในช่วงต้น โดย  $\text{C}_4\text{AF}$  จะทำปฏิกิริยากับยิบซั่ม และ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือนเข็ม คือ แคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนต (Calcium Sulfoaluminate) และ แคลเซียมซัลโฟเฟอร์ไรต์ (Calcium Sulfoferrite) ดังสมการนี้



ตารางที่ 7 เวลาที่ใช้ให้บรรลุ 80% ของปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบซีเมนต์ [3]

สารประกอบ	เวลา(วัน)
C <sub>3</sub> S	10
C <sub>2</sub> S	100
C <sub>3</sub> A	6
C <sub>4</sub> AF	50

### 2.3.2 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน [4]



รูปที่ 2 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

กระบวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันนั้นสามารถแบ่งออกได้ทั้งหมด 5 ขั้นตอน

ขั้นที่ 1 เกิดเมื่อปูนซีเมนต์ผสมน้ำจะเกิดปฏิกิริยาขึ้นทันทีซึ่งเป็นผลทำให้เกิดพลังงานความร้อนสูง เนื่องจาก C<sub>3</sub>S และ C<sub>2</sub>S ถูกนำไปใช้เพื่อเปลี่ยนเป็น CSH ขั้นตอนนี้จะใช้ระยะเวลาไม่มากนัก C<sub>3</sub>S ถูกนำไปใช้เกือบหมด และเป็นขั้นที่เกิดเอททริงไกต์ (Ettringite) อย่างรวดเร็ว โดยจะเกิดขึ้นรอบ C<sub>3</sub>A เพื่อหน่วงเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C<sub>3</sub>A ขั้นนี้คือการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ครั้งที่ 1

- ขั้นที่ 2 เป็นช่วงที่เกิดการหน่วงของปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นผลจากการเติมยิปซัมในปูนซีเมนต์ ในช่วงนี้ซีเมนต์เฟสจะอยู่ในสภาพพลาสติก หลังจากเวลาผ่านไป 2 – 3 ชั่วโมง จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ของ  $C_3S$  อีกครั้ง
- ขั้นที่ 3 เป็นการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ครั้งที่ 2 เป็นช่วงที่ซีเมนต์เฟสเริ่มก่อตัวในระยะต้น ซึ่งจะ เป็นช่วงที่เกิดพลังงานความร้อนต่อเนื่องและตลอดเวลา
- ขั้นที่ 4 เป็นช่วงอัตราการเกิดความร้อนจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันมากที่สุด และหลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชันนั้นจะค่อยๆลดลงจน ซึ่งอาจจะใช้เวลา 8 – 20 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับประเภทและปริมาณของสารประกอบ หลัก
- ขั้นที่ 5 เป็นช่วงอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะค่อยๆลดลง (น้อยกว่าขั้นที่ 4) เรื่อย ๆ แต่ยังคงเกิดไม่หมดและยังคงเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างต่อเนื่องและคายความร้อนออกมา

## 2.4 วัสดุเติมแต่งปูนซีเมนต์

สารเติมแต่งหมายถึง สารอินทรีย์ หรือ อนินทรีย์ อื่นๆ ที่นอกเหนือจากปูนซีเมนต์ มวลรวม และ น้ำ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้น ซึ่งจะเป็นการเติมก่อนผสม หรือ ระหว่างผสม ก็ได้

### 2.4.1 วัสดุปอซโซลาน ( Pozzolan Material )

วัสดุปอซโซลาน เป็นสารผสมเพิ่มแบบแร่ธาตุ ( Mineral Admixture ) ซึ่งมีองค์ประกอบของธาตุที่สำคัญเหมือนปูนซีเมนต์ เช่น ซิลิกา ( $SiO_2$  ) และ อลูมินา ( $Al_2O_3$  ) ในปัจจุบันวัสดุปอซโซลานที่นำมาผสมกับผงซีเมนต์มีมากมาย ซึ่งทำให้มีคุณสมบัติในการยึดประสานเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่เมื่อนำไปบดละเอียด สามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $Ca(OH)_2$  ) ที่เป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดีขึ้น

## 2.4.2 ปฏิกริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic) [5]

เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำ จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) จะทำปฏิกิริยากับ ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) หรือ อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ซึ่งได้จากสารปอซโซลาน ซึ่งจะทำให้เกิดสารที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เพิ่มขึ้น เรียกปฏิกิริยานี้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิก

วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมี เป็น ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ปฏิกริยาปอซโซลานิกสามารถเขียนสมการเคมี ได้ดังนี้



วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ปฏิกริยาปอซโซลานิกสามารถเขียนสมการเคมี ได้ดังนี้



เมื่อพิจารณาจะพบว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิกใช้ ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และ อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) จากวัสดุปอซโซลาน และ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ซึ่งเมื่อใช้วัสดุปอซโซลานทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนจะทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันนั้นลดลง แต่เมื่อความต้องการของปริมาณ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เพื่อใช้ในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกเพิ่มสูงขึ้น และหากมีปริมาณวัสดุปอซโซลานมากเกิดไปกว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) จำนวนมาก จะส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ ซึ่งจะส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลของปูนซีเมนต์ลดลง



## 2.5 ผลกระทบของซีเมนต์เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูง

เนื่องจากปูนซีเมนต์เป็นวัสดุที่ไม่ติดไฟ และยังเป็นฉนวนกันไฟที่ดี ดังนั้นจากเหตุผลที่กล่าวมา จึงเป็นสาเหตุที่ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุที่เหมาะสมแก่การใช้งานด้านการป้องกันอัคคีภัยของสิ่งก่อสร้าง เมื่อเทียบกับ วัสดุไม้ หรือ พลาสติก แต่ ความร้อนที่ ณ อุณหภูมิต่าง ๆ ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ [6] ตามตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ผลกระทบของปูนซีเมนต์เมื่อได้รับความร้อน ณ อุณหภูมิต่าง ๆ [7]

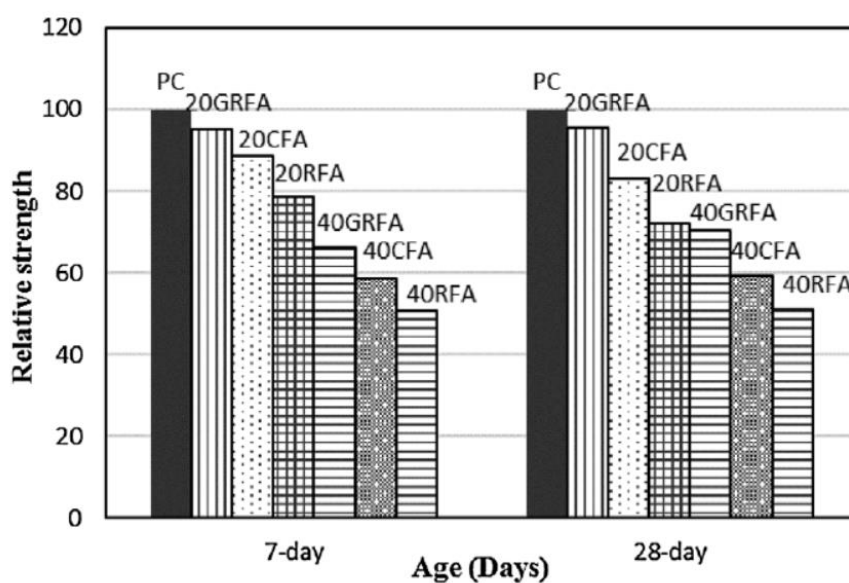
Temperature range	Changes
20–200°C	slow capillary water loss and reduction in cohesive forces as water expands; 80–150°C ettringite dehydration; C-S-H gel dehydration; 150–170°C gypsum decomposition ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ); physically bound water loss;
300–400°C	approx. 350°C break up of some siliceous aggregates (flint); 374°C critical temperature of water;
400–500°C	460–540°C portlandite decomposition $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ ;
500–600°C	573°C quartz phase change $\beta - \alpha$ in aggregates and sands;
600–800°C	second phase of the C-S-H decomposition, formation of $\beta\text{-C}_2\text{S}$ ;
800–1000°C	840°C dolomite decomposition; 930–960°C calcite decomposition $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ , carbon dioxide release; ceramic binding initiation which replaces hydraulic bonds;
1000–1200°C	1050°C basalt melting;
1300°C	total decomposition of concrete, melting.

ปูนซีเมนต์ที่ได้รับความร้อน อุณหภูมิสูง ไม่เกิน 200°C ปูนซีเมนต์จะไม่เป็นอันตรายจากความร้อนที่ได้รับมากนัก แต่หากอุณหภูมิสูงเกินกว่า 300°C ซีเมนต์จะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีที่สำคัญต่าง ๆ อย่างชัดเจน ซึ่งการแตกตัวของปูนซีเมนต์ภายใต้อุณหภูมิสูงเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของซีเมนต์เฟสดี เนื่องจากซีเมนต์เฟลเกิดการสูญเสียน้ำ ทำให้เกิดการหดตัวลง และ เกิดการขยายตัวที่ไม่สัมพันธ์กันของ มวลรวม (Aggregate) ซึ่งเป็นเหตุที่ทำให้กำลังอัดมีค่าลดลงอย่างมาก ความเสียหายของคอนกรีตที่ได้รับความร้อนนั้น จะมีความเสียหายแบบถาวร ถึงแม้อุณหภูมิของคอนกรีตจะกลับสู่อุณหภูมิห้องแล้ว ก็ยังมีความเสียหายหลังจากได้รับความร้อนอยู่

## 2.6 วรรณกรรมปริทรรศน์

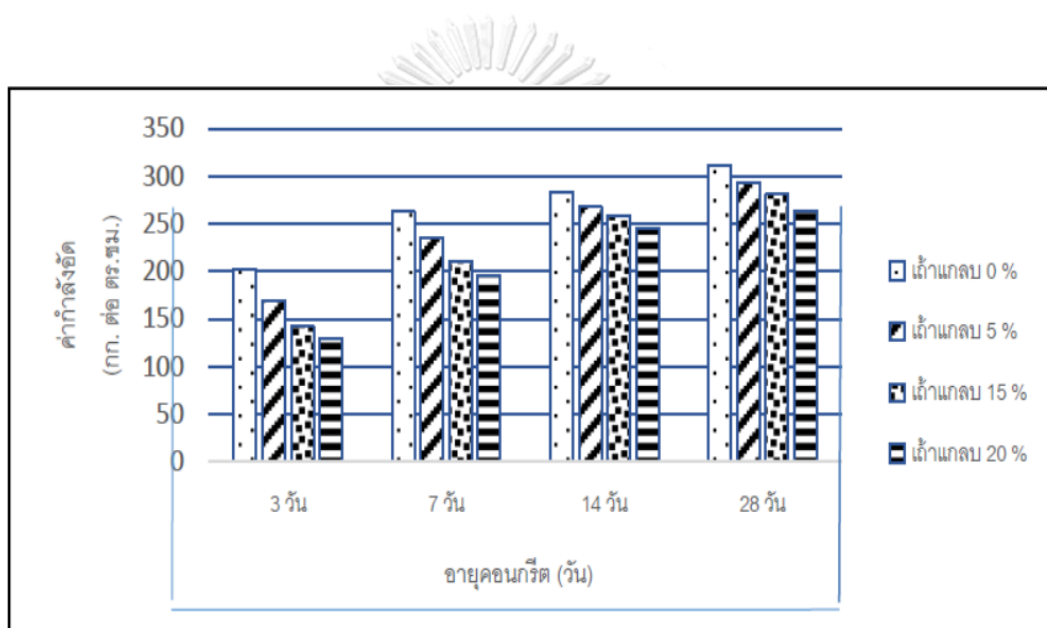
### 2.6.1 ศึกษาผลของเถ้าแกลบผสมปูนซีเมนต์

Farzad Moghaddam [8] ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของเถ้าลอยละเอียดเมื่อผสมปูนซีเมนต์เพื่อทดสอบความต้านทานแรงอัด ซึ่งเถ้าลอยเป็นเถ้ามาจากโรงไฟฟ้า โดยงานวิจัยนี้จะใช้เถ้าลอยขนาด 17.4 11.3 และ 5.7 ไมโครเมตร และใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในปริมาณ 20 กับ 40 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ จากการศึกษาพบว่ากำลังแรงอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแบบละเอียดมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับการผสมกับเถ้าอบแบบหยาบ



รูปผลการทดลอง ผลของเถ้าลอยต่อกำลังอัดของคอนกรีต

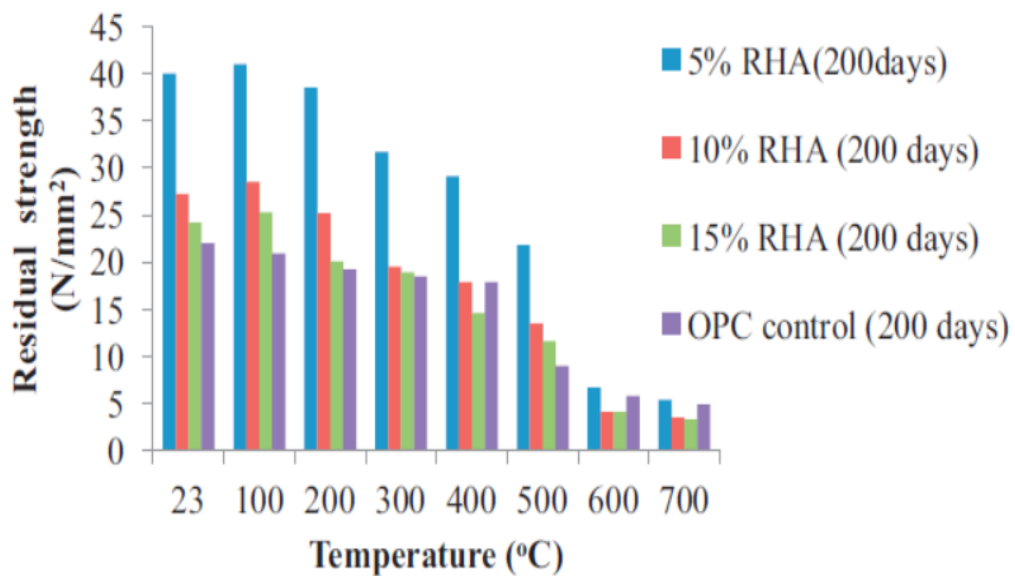
พิทยา สุขจินดา (2016) [9] ศึกษากำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบดำที่เหมาะสมสำหรับงานคอนกรีตโครงสร้างทั่วไป โดยมีปริมาณเถ้าแกลบดำผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 5 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ โดยน้ำหนักของวัสดุประสานเป็นตัวหลักในการทดสอบ เปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมที่ทำจากปูนซีเมนต์ล้วน โดยทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 ถึง 28 วัน จากผลการทดลองพบว่า การแทนที่ของเถ้าแกลบดำในปริมาณที่เพิ่มขึ้นทำให้กำลังอัดคอนกรีตลดลง แต่อย่างไรก็ตามปริมาณเถ้าแกลบดำที่เหมาะสม คือ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ซึ่งค่ากำลังอัดของคอนกรีต ใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม ที่อายุ 28 วัน



รูปที่ผลการทดลอง ผลของกำลังอัดต่ออายุคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ

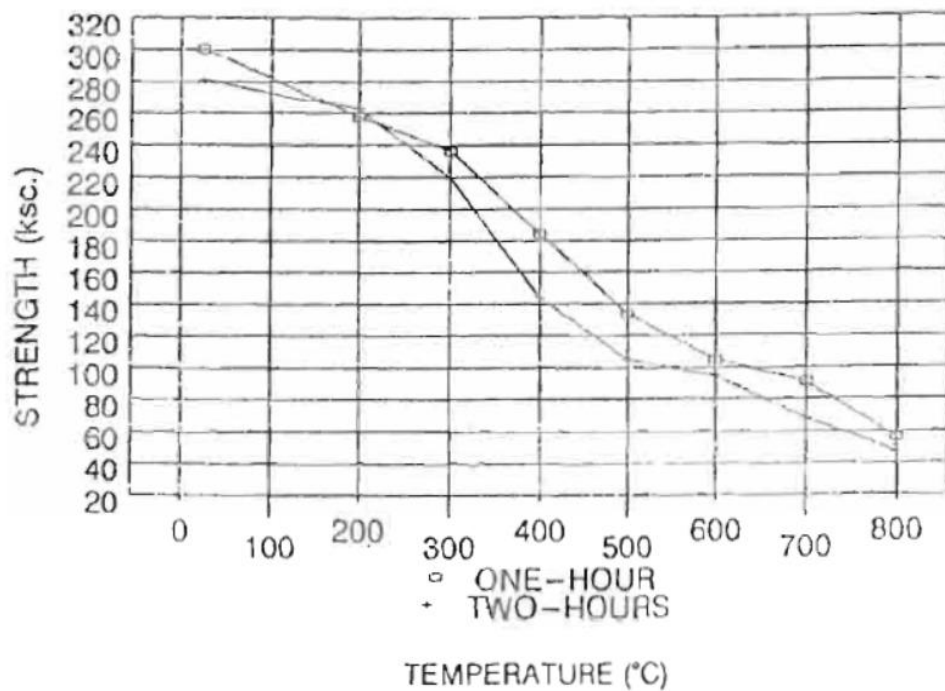
## 2.6.2 ศึกษาผลปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบเมื่อได้รับความร้อน

R. I. Umasabor และ J. O. Okovido (2018) [10] ได้ศึกษาความสามารถในการทนไฟของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ ป่ม 200 วัน พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตลดลงตามปริมาณ เถ้าแกลบ ที่เพิ่มเข้าไปทดแทนซีเมนต์ ซึ่งคอนกรีตผสมเถ้าแกลบมีค่ากำลังอัด มากกว่า แบบไม่ผสม เนื่องจากคอนกรีตมีการป่มเป็นเวลานาน ซึ่งเป็นผลจากการเกิดการผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เพิ่มเติม จากปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งช่วยในการเพิ่มกำลังอัดให้คอนกรีต โดยคอนกรีตสามารถทนได้สูงสุดที่ค่ากำลังอัดยังมากกว่า OPC คือคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ 5% ที่ อุณหภูมิ 500 °C



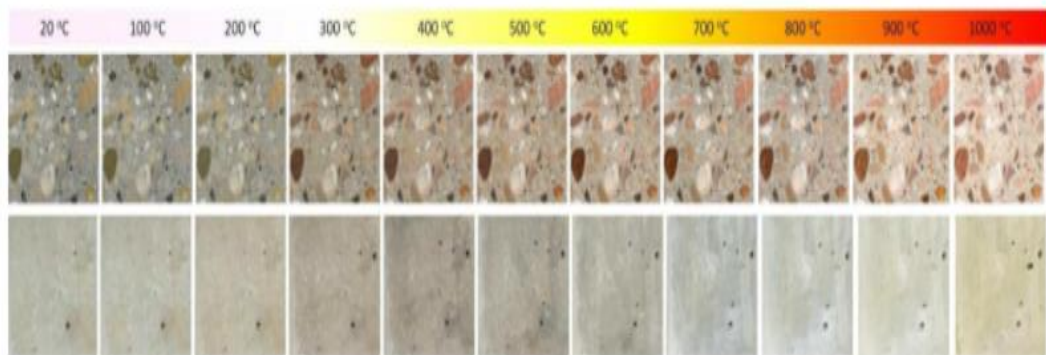
รูปผลการทดลอง กำลังอัดที่อายุป่ม 200 วันของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบที่ อุณหภูมิต่าง ๆ

ธนาบัติ ร้อยศรี, ประยงค์ กิรติอุไร, พิเชษฐ์ คมสัน, สมชาย อารีย์สมบูรณ์ (1995)  
 [6] ศึกษาถึงผลของความร้อนที่มีต่อกำลังของคอนกรีตเฉพาะผลระยะสั้น โดยนำตัวอย่างไปเผาที่อุณหภูมิ 200°C ถึง 800°C เป็นเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง ซึ่งจากการศึกษานี้พบว่าการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างชิ้นงานที่ 400°C ถึง 500°C เป็นเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง จะทำให้กำลังของคอนกรีตลดลงครึ่งหนึ่ง

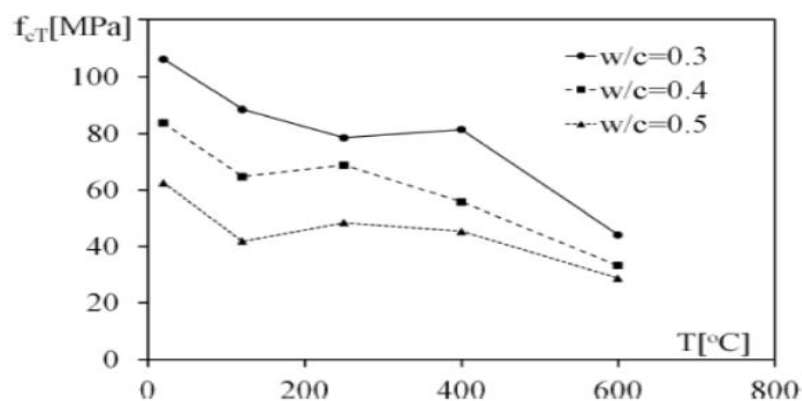


รูปผลการทดลอง แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของตัวอย่างที่ผ่านความร้อนและเวลา

Hager [7] ศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตเมื่อได้รับความร้อน จากงานวิจัย ได้บ่งบอกถึงการดูและวิเคราะห์ความเสียหายโดยง่ายจากการดูสีคอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อได้รับความร้อน และ จากผลการวิจัยเมื่อคอนกรีตได้รับความร้อนสูงมากขึ้นทำให้เกิดการระเหยของน้ำในคอนกรีต และเกิดการสลายตัวของสารประกอบภายใน จึงทำให้สมบัติทางกลของคอนกรีตมีปริมาตรลดลงตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น และ คอนกรีตจะมีกำลังลดลงตามปริมาณอุณหภูมิที่ได้รับสูงขึ้น หากมีปริมาณน้ำต่อซีเมนต์มากจะยังมีกำลังอัดที่น้อยลงไปอีก เนื่องจากยิ่งสูญเสียน้ำจากการได้รับความร้อน



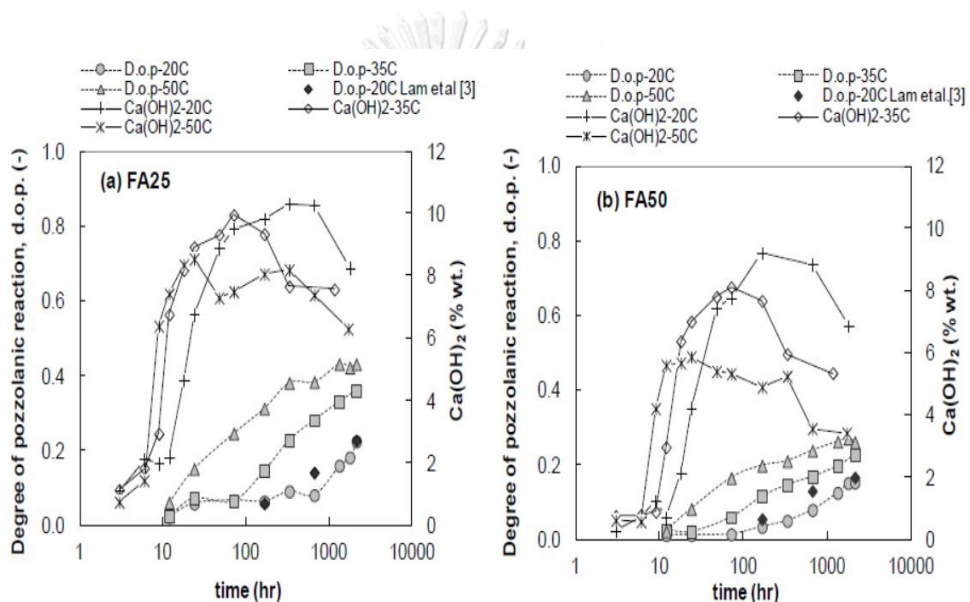
รูปผลการทดลอง ผลของการเปลี่ยนแปลงสีคอนกรีตเมื่อได้รับอุณหภูมิความร้อน



รูปผลการทดลอง การเปลี่ยนแปลงกำลังอัดคอนกรีตที่อุณหภูมิต่าง ๆ

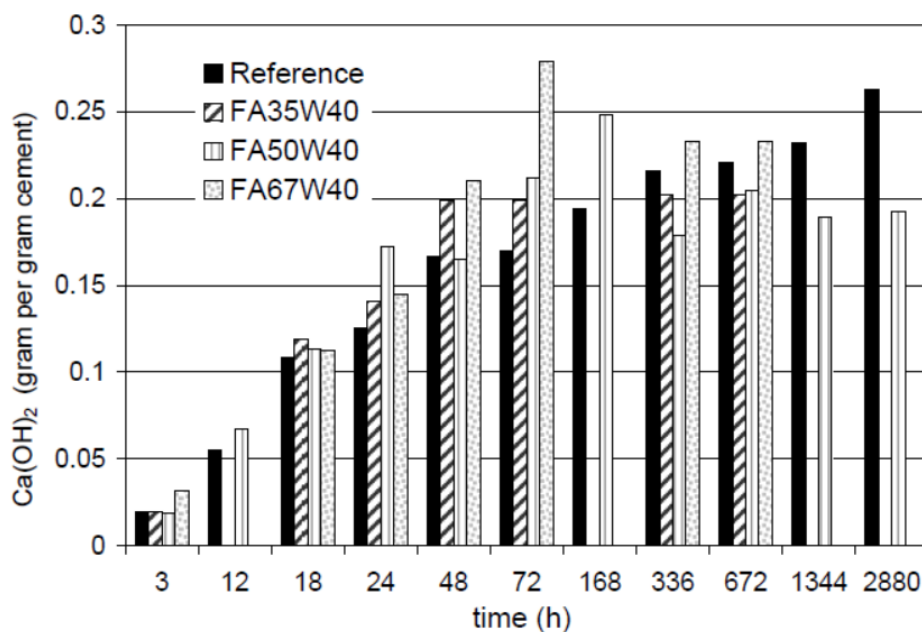
### 2.6.3 ศึกษาผลของปฏิกิริยาปอซโซลานิกของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย

Mongkhon Narmluk and Toyoharu Nawa [11] ศึกษาผลของอุณหภูมิในการบ่มต่อปฏิกิริยาปอซโซลานิกของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย จากผลการศึกษาอุณหภูมิในการบ่มส่งผลกับการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอย โดยเถ้าลอยปริมาณที่เหมาะสมกับอุณหภูมิในการบ่ม จะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกมากขึ้น โดยวัดจากปริมาณของ  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่หายไปเมื่อเวลาผ่านไป ที่ช่วง  $50^\circ$  ถึง  $70^\circ$



รูปผลการทดลอง จลนศาสตร์ของปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยที่บ่มอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

G. Baert [12] ศึกษาปฏิกิริยาระหว่างปอซโซลานิกของเถ้าลอยกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ซึ่งการยึดประสานมวลรวมของคอนกรีตเกิดจาก 2 แบบ คือ ปฏิกิริยาไฮเดรชันจากปูนซีเมนต์ และ ปฏิกิริยาปอซโซลานิกจากการเติมเถ้าลอย ซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานิก งานวิจัยนี้ได้เติมเถ้าลอยตั้งแต่ 0.0 – 6.7 จากผลการทดลอง การเริ่มเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก จะเริ่มต้นเมื่อ calcium hydroxide ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) เริ่มมีปริมาณลดลง



รูปผลการทดสอบ ปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  ของตัวอย่างเมื่อเวลาผ่านไป  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
 CHULALONGKORN UNIVERSITY



## บทที่ 3

### ระเบียบวิธีการทดลอง

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.1.1 ถั่วแกลบ

วัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นวัสดุดิบที่มีปริมาณซิลิกาสูงเพื่อใช้สำหรับผสมปูนซีเมนต์ คือ ถั่วแกลบ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากการนำไปเป็นเชื้อเพลิงในโรงสีข้าว



รูปที่ 3 ถั่วแกลบที่ได้จากการเผาแกลบข้าวเพื่อเป็นเชื้อเพลิงที่โรงสีข้าว

##### 3.1.2 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ผลิตใช้มากที่สุด เหมาะสำหรับ ที่จะนำไปใช้กับงานก่อสร้างงานคอนกรีตที่ต้องการกำลังอัดสูง และงานคอนกรีตทั่วไป เช่น งานอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กทุกชนิด สะพาน ถนน



รูปที่ 4 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

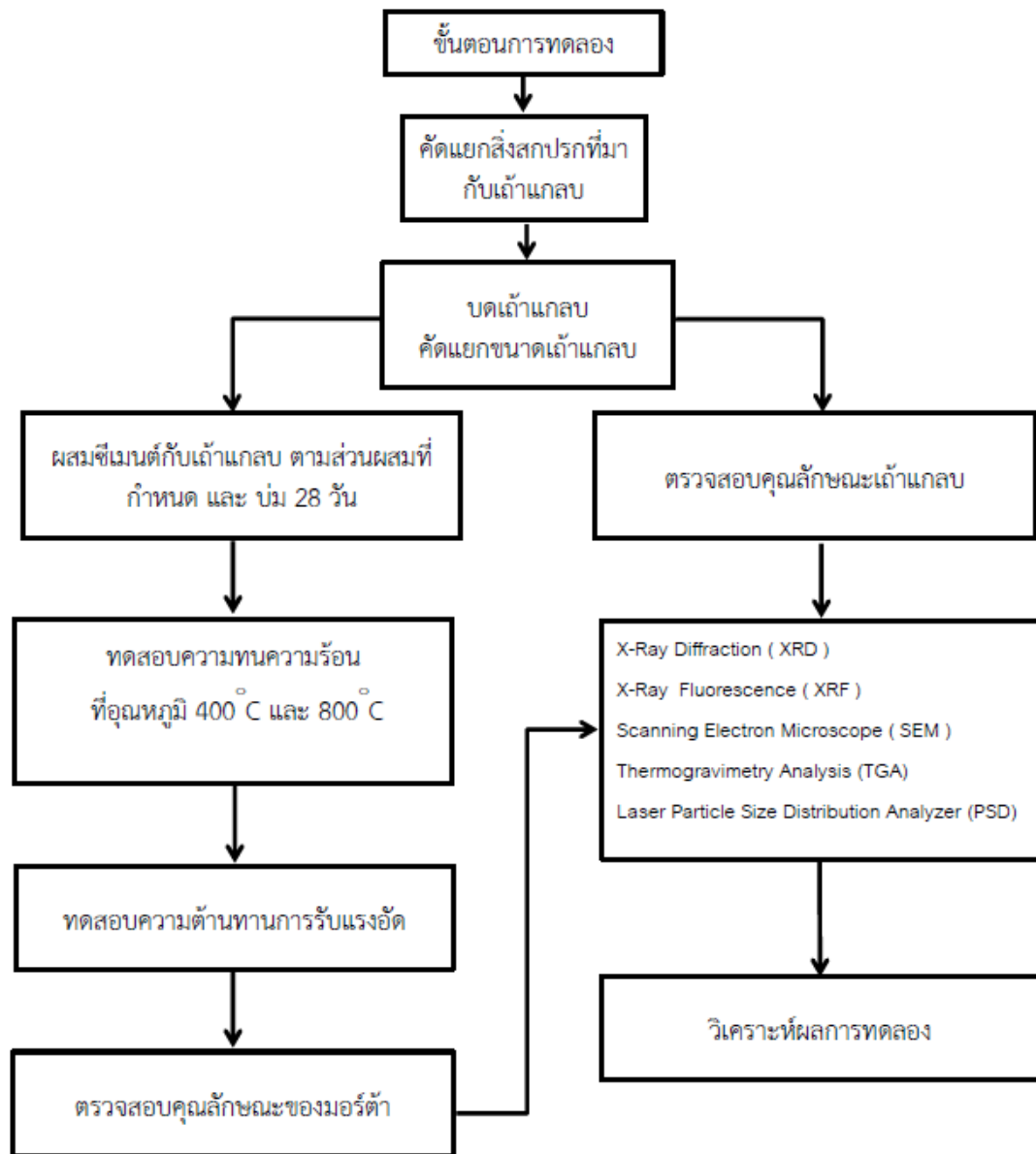
### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ชุดอุปกรณ์สำหรับผสมซีเมนต์กับเถ้าแกลบ
2. กล้องจุลทรรศน์แบบแสง
3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope, SEM)
4. X-Ray Diffraction ( XRD )
5. X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF)
6. Thermogravimetry Analysis (TGA)
7. Laser Particle Size Distribution Analyzer (PSD)
8. เครื่องทดสอบความต้านทานการรับแรงอัด
9. เตาเผาควบคุมอุณหภูมิสำหรับให้ความร้อน

### 3.3 ขั้นตอนการทดลอง

งานวิจัยนี้การทดลองแยกออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน ส่วนแรก การเตรียมและศึกษาคุณลักษณะของเถ้าแกลบ เริ่มต้น โดย นำไปตรวจสอบคุณลักษณะด้วยการศึกษาองค์ประกอบเคมี และ นำเถ้าแกลบไปคัดแยกขนาดอนุภาค ส่วนที่สอง นำเถ้าแกลบที่แยกขนาดอนุภาค จากส่วนที่ 1 มาผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ตามอัตราส่วนที่กำหนด จากนั้นนำไปทดสอบความต้านทานความร้อน และ ตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ กับ สมบัติทางกล ตามตารางที่ 9 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 9 ขั้นตอนการทดลอง



### 3.3.1 การเตรียมและศึกษาคุณลักษณะถ้ำแกลบ

#### 3.3.3.1 การบดถ้ำแกลบ

การเตรียมถ้ำแกลบที่ได้จากโรงสีข้าว โดยทำการแยกวัสดุที่ไม่ต้องการโดยการ  
ใช้ตะแกรงร่อนแบบหยาบจากนั้นนำถ้ำแกลบที่ได้ตัดแยกแล้ว มาบดด้วย หม้อบด ( Pot mill ) ขนาดความจุ 1 กิโลกรัม เป็นเวลา 60 นาที ต่อหนึ่งครั้ง ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 เครื่องหม้อบด ( Pot mill )

#### 3.3.3.2 การคัดแยกขนาดอนุภาคถ้ำแกลบ

คัดแยกขนาดอนุภาคถ้ำแกลบด้วย เครื่องร่อน (รูปที่ 6) โดยใช้ตะแกรงร่อน  
ตามมาตรฐาน ASTM E11 โดยงานวิจัยได้ใช้เบอร์ตะแกรงร่อน ดังตารางที่ 10



รูปที่ 6 เครื่องร่อนตะแกรง

ตารางที่ 10 ขนาดตะแกรงคัดแยกถ้ำแกลบ

เบอร์	ช่องขนาดตะแกรง(ไมครอน)	ชนิดถ้ำแกลบ
150	106	C
200	75	B
270	53	A

### 3.3.1.3 ตรวจสอบคุณลักษณะแก้วเกลบ

#### 1. การตรวจสอบเชิงคุณภาพและปริมาณสารประกอบทางเคมี

การวิเคราะห์ด้วย X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) ซึ่งสามารถตรวจหาองค์ประกอบทางเคมีได้ทั้งเชิงปริมาณของธาตุและเชิงคุณภาพของธาตุแต่ละชนิดที่ประกอบอยู่ในแก้วเกลบ เพื่อวิเคราะห์หาความบริสุทธิ์ของซิลิกาและสารเจือปนที่อยู่ในแก้วเกลบ

#### 2. วิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาค

การตรวจสอบหาอนุภาคของเกลบขาวหลังจากผ่านกระบวนการเผามาด้วยเครื่อง Laser Particle Size Distribution Analyzer ซึ่งขนาดของอนุภาคเป็นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งที่น่าไปใช้ในการศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ซึ่งเป็นการกระจายตัวของอนุภาคตั้งแต่ 0.01 ถึง 3500 ไมครอน โดยอาศัยหลักการการดูดกลืนรังสีแสงเลเซอร์ในการหาปริมาณอนุภาคที่มีขนาดหรือเส้นผ่านศูนย์กลางนั้น

### 3.3.2 ทดสอบและตรวจสอบคุณลักษณะปูนซีเมนต์ผสมแก้วเกลบ

#### 3.3.2.1 การผสมซีเมนต์กับแก้วเกลบ

นำแก้วเกลบที่ได้คัดแยกขนาดอนุภาคตามที่กำหนด ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 และ น้ำ ตาม อัตราส่วนผสม ซีเมนต์ : ททราย : น้ำ 1 : 1 : 0.5 โดยผสมแก้วเกลบแทนที่ซีเมนต์ด้วยปริมาณร้อยละ 5 10 และ 15 ของน้ำหนักซีเมนต์ โดยมีขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1. นำปูนซีเมนต์ผสม แก้วเกลบ ททรายและ น้ำ ตามลำดับ ตามอัตราส่วนที่กำหนด
2. ทำการผสมเนื้อ มอร์ต้า (Mortar) ให้เข้ากัน
3. ทำการ เท มอร์ต้าที่ผสมเข้ากันแล้ว ลงแบบ ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร
4. ทำการ บ่ม มอร์ต้า เป็นเวลา 28, 60 และ 200 วัน ก่อนนำไปทำการทดสอบ

### 3.3.3.2 ทดสอบความทนความร้อน

ทดสอบการทนความร้อน โดยเตาควบคุมอุณหภูมิ ที่ อุณหภูมิ 400°C และ 800°C โดยให้ความร้อนด้วยอัตราเร็วที่ 5 °C ต่อ นาที จนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ จากนั้น ให้อุณหภูมิคงที่ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และ เย็นตัวภายในเตาจนถึงอุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 7 เตาควบคุมอุณหภูมิ

### 3.3.2.3 ทดสอบความต้านทานการรับแรงอัด

ทดสอบหาค่ากำลังอัด มอร์ต้า (Mortar) ตาม ASTM C109/C109M

โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. วัดขนาดและน้ำหนัก มอร์ต้า (กว้าง x ยาว x สูง)
2. นำชิ้นงานเข้าเครื่องทดสอบเพื่อหาค่ากำลังอัดโดยอัตราเพิ่มแรงอัดประมาณ 100 กก./ตร.ซม จนกระทั่งพังทลาย แล้วบันทึกค่ากำลังอัดสูงสุด
3. คำนวณค่ากำลังอัด โดยใช้สูตรดังนี้

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

$\sigma$  = กำลังอัด (กก./ตร.ซม)

F = แรงกดที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการวิบัติ (กก.)

A = พื้นที่รับแรงอัด (ตร.ซม)

### 3.3.2.4 ตรวจสอบคุณลักษณะ ก่อนและหลัง ผ่านความร้อน

#### 1. การตรวจสอบเชิงคุณภาพและปริมาณสารประกอบทางเคมี

การวิเคราะห์ด้วย X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) ซึ่งสามารถตรวจหาองค์ประกอบทางเคมีได้ทั้งเชิงปริมาณของธาตุและเชิงคุณภาพของธาตุแต่ละชนิดที่ประกอบอยู่ในมอร์ต้า ก่อน และ หลัง ผ่านความร้อน เพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางกลของมอร์ต้าการวิเคราะห์

#### 2. การตรวจสอบปริมาณสารประกอบและโครงสร้างผลึก

การวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffraction (XRD) ซึ่งเป็นเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เป็นเทคนิคที่นำรังสีเอกซ์(X-ray) มาใช้วิเคราะห์และระบุชนิดสารประกอบ โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง ทั้งในเชิงคุณภาพ (Qualitative)และ เชิงปริมาณ (Quantitative) เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบ ก่อน และ หลังได้รับความร้อน

#### 3. การวิเคราะห์พื้นผิว

การวิเคราะห์ลักษณะสภาพผิวของ มอร์ต้าก่อนและหลังได้รับความร้อน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด(Scanning Electron Microscope ,SEM) เพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางกายภาพของมอร์ต้า และเพื่อประสิทธิภาพในการมองเห็นของกล้องจุลทรรศน์ใช้ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ(Backscattering electron) เพื่อให้เกิดสัญญาณภาพของวัสดุที่ใช้วิเคราะห์ได้ละเอียดมากขึ้น

#### 4. การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

ตรวจสอบเสถียรภาพทางความร้อน โดยทำการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้า ตรวจสอบวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Thermo gravimetric Analyzer (TGA) ซึ่งใช้มอร์ต้าที่ผสมเถ้าแกลบ ในปริมาณต่างๆ กับ แบบไม่ผสมเถ้าแกลบ เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่าง

#### 5. วิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาค

การตรวจสอบหาขนาดอนุภาคของแกลบข้าวหลังจากผ่านกระบวนการเผา มาด้วยเครื่อง Laser Particle Size Distribution Analyzer ซึ่งขนาดของอนุภาคเป็นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งที่น่าไปใช้ในการศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ซึ่งเป็นการกระจายตัวของอนุภาคตั้งแต่ 0.01 ถึง 3500 ไมครอน โดยอาศัยหลักการการดูดกลืนแสงเลเซอร์ในการหาปริมาณอนุภาคที่มีขนาดหรือเส้นผ่านศูนย์กลางนั้น

#### 3.4 ประเภทชิ้นงานตัวอย่างของงานวิจัย

มอร์ต้า แต่ละชิ้นงานมีความแตกต่างกัน ตามอัตราส่วนผสม ของเถ้าแกลบ และ ขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบ และ อายุการบ่มมอร์ต้า ตามตารางที่ 11 ถึง 13

ตารางที่ 11 จำนวนชิ้นงานมอร์ต้า บ่ม 28 วัน

ส่วนผสม	ซีเมนต์ : ทราย : น้ำ ( 1 : 1 : 0.5 ) บ่ม 28 วัน								
	อุดมภูมิห้อง			400 องศาเซลเซียส			800 องศาเซลเซียส		
อุดมภูมิให้ความร้อน	อุดมภูมิห้อง			400 องศาเซลเซียส			800 องศาเซลเซียส		
เบอร์ตะแกรง (ASTM E11)	150	200	270	150	200	270	150	200	270
ปริมาณเถ้าแกลบ 0%	5			5			5		
ปริมาณเถ้าแกลบ 5%	5	5	5	5	5	5	5	5	5
ปริมาณเถ้าแกลบ 10%	5	5	5	5	5	5	5	5	5
ปริมาณเถ้าแกลบ 15%	5	5	5	5	5	5	5	5	5

จำนวนตัวอย่างชิ้นงานทั้งหมด 150 ชิ้น รูปแบบทั้งหมด 30 แบบ แต่ละแบบมีตัวอย่าง 5 ชิ้น



ตารางที่ 12 จำนวนชิ้นงานมอร์ต้า ป่ม 60 วัน

ส่วนผสม	ซีเมนต์ : ทราย : น้ำ ( 1 : 1 : 0.5 ) ป่ม 60 วัน								
คุณสมบัติให้ความร้อน	คุณสมบัติห้อง			400 องศาเซลเซียส			800 องศาเซลเซียส		
เบอร์ตีแ่ง (ASTM E11)	150	200	270	150	200	270	150	200	270
ปริมาณเ้าแกลบ 0%	3			3			-		
ปริมาณเ้าแกลบ 5%	3	3	3	3	3	3	-	-	-
ปริมาณเ้าแกลบ 10%	3	3	3	3	3	3	-	-	-
ปริมาณเ้าแกลบ 15%	3	3	3	3	3	3	-	-	-

จำนวนตัวอย่างชิ้นงานทั้งหมด 60 ชิ้น รูปแบบทั้งหมด 20 แบบ แต่ละแบบมีตัวอย่าง 3 ชิ้น

ตารางที่ 13 จำนวนชิ้นงานมอร์ต้า ป่ม 200 วัน

ส่วนผสม	ซีเมนต์ : ทราย : น้ำ ( 1 : 1 : 0.5 ) ป่ม 200 วัน								
คุณสมบัติให้ความร้อน	คุณสมบัติห้อง			400 องศาเซลเซียส			800 องศาเซลเซียส		
เบอร์ตีแ่ง (ASTM E11)	150	200	270	150	200	270	150	200	270
ปริมาณเ้าแกลบ 0%	3			-			-		
ปริมาณเ้าแกลบ 5%	3	3	3	-	-	-	-	-	-
ปริมาณเ้าแกลบ 10%	3	3	3	-	-	-	-	-	-
ปริมาณเ้าแกลบ 15%	3	3	3	-	-	-	-	-	-

จำนวนตัวอย่างชิ้นงานทั้งหมด 30 ชิ้น รูปแบบทั้งหมด 10 แบบ แต่ละแบบมีตัวอย่าง 3 ชิ้น

ตารางที่ 14 ซึ่ย่อตัวอย่างในงานวิจัย

ส่วนผสม	ซีเมนต์ : ทราย : น้ำ ( 1 : 1 : 0.5 ) ผสม เ้าแกลบ		
คุณสมบัติให้ความร้อน	คุณสมบัติห้อง		
เบอร์ตีแ่ง (ASTME11)	270	200	150
ปริมาณเ้าแกลบ 0%	OPC		
ปริมาณเ้าแกลบ 5%	5A	5B	5C
ปริมาณเ้าแกลบ 10%	10A	10B	10C
ปริมาณเ้าแกลบ 15%	15A	15B	15C

## บทที่ 4

### ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

การผสมแก้วเคลือบที่มีซิลิกาเป็นสารประกอบหลัก และ นำไปผ่านความร้อนที่อุณหภูมิสูง ซึ่งผลของสมบัติทางกลของ มอร์ต้าที่ผสมแก้วและผ่านความร้อน มีกำลังอัด (Compressive Strength) ลดลง ตามปริมาณความร้อนที่ได้รับ และ ได้ทำการศึกษา และ เปรียบเทียบความแตกต่างของมอร์ต้าที่ผสมแก้วเคลือบ และ ไม่ผสมแก้วเคลือบ เมื่อผ่านความร้อนที่อุณหภูมิสูง ซึ่งได้มี ตรวจสอบคุณลักษณะของแก้วเคลือบ และ มอร์ต้าก่อน และ หลัง ได้รับความร้อน ดังนี้

การตรวจสอบคุณลักษณะของแก้วเคลือบ ดังนี้

1. การวิเคราะห์หาส่วนประกอบทางเคมี X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF)
2. การวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคด้วย Laser Particle Size Distribution Analyzer (PSD)

การตรวจสอบคุณลักษณะของมอร์ต้าทั้งก่อนและหลังได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูง ดังนี้

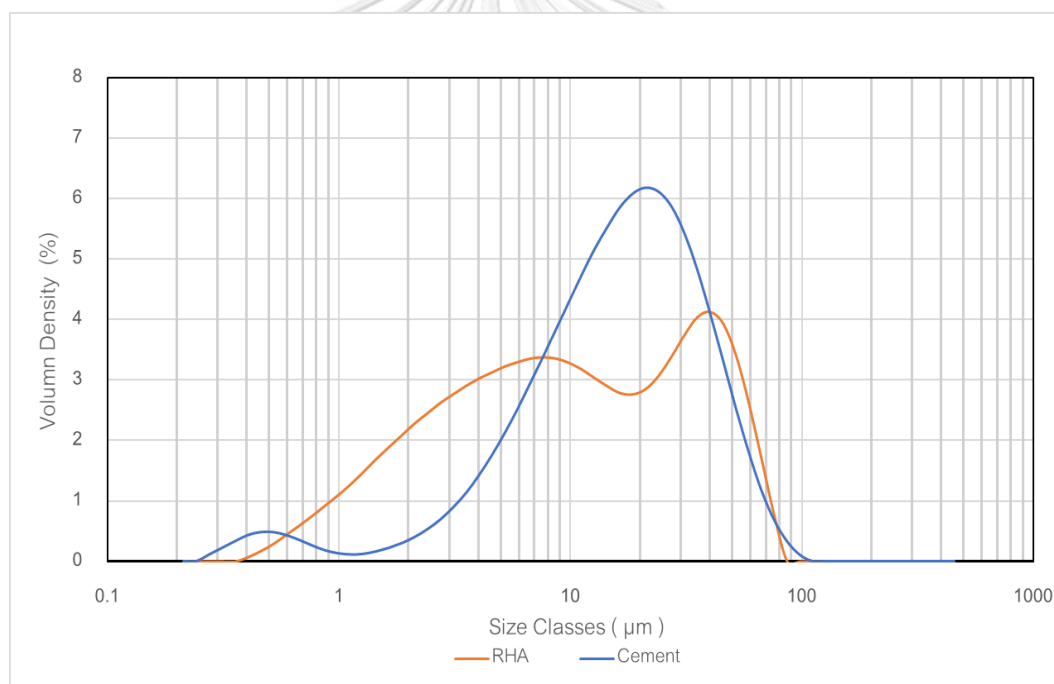
1. การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)
2. การวิเคราะห์หาสารประกอบและโครงสร้างผลึก X-Ray Diffraction ( XRD )
3. การวิเคราะห์หาส่วนประกอบทางเคมี X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF)
4. การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อน Thermogravimetric Analyzer (TGA)

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมของมอร์ต้า

##### 4.1.1 ขนาดอนุภาคของส่วนผสมของมอร์ต้า

ตารางที่ 15 ขนาดอนุภาคของส่วนผสมของมอร์ต้า

ค่าเฉลี่ยอนุภาค	ประเภทตัวอย่าง	
	เถ้ากลบ	ซีเมนต์
D10	1.79	4.81
D50	10.5	18.1
D90	49.3	45.5
D [4,3]	18.9	22.2
D [3,2]	4.72	6.93



รูปที่ 8 ปริมาณความหนาแน่นของขนาดอนุภาค เถ้ากลบ และ ซีเมนต์

จากผลการตรวจสอบขนาดอนุภาคของส่วนผสมของมอร์ต้าด้วยวิธีการ Laser Particle Size Distribution Analyzer (PSD) เถ้ากลบ ซีเมนต์ ได้แสดงในตารางที่ 15 และ รูปที่ 8 เถ้ากลบนั้นจะความละเอียดมากกว่าซีเมนต์ แต่ปริมาณเฉลี่ยของเถ้ากลบส่วนใหญ่จะมีขนาดใกล้เคียงซีเมนต์ โดยหากขนาดเถ้ากลบและซีเมนต์มีค่าใกล้เคียงกันจะส่งผลต่อกำลังอัดได้ดีขึ้น เนื่องจากขนาดใกล้เคียงกันส่งผล ต่อปริมาณช่องว่างที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่น้อยลง

#### 4.1.2 สารประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ

ตารางที่ 16 สารประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ

ธาตุ	สารประกอบทางเคมีหลัก (%)								
	SiO <sub>2</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	SO <sub>3</sub>
RHA	93.54	1.05	2.31	1.12	0.68	0.52	0.26	0.13	0.10

จากการตรวจสอบสารประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบด้วยเครื่องมือ X-Ray Fluorescence Spectrometer(XRF) พบว่าเถ้าแกลบมีซิลิกาสูงถึงร้อยละ 93.54 ของน้ำหนัก ดังตารางที่ 16

#### 4.2 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของมอร์ต้าก่อนและหลังได้รับความร้อน

##### 4.2.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว

##### 4.2.1.1 ผลวิเคราะห์ผิวมอร์ต้าหลังจากได้รับความร้อน



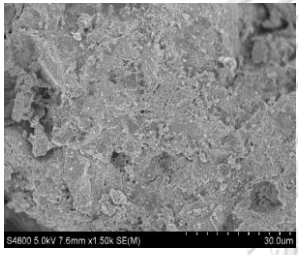
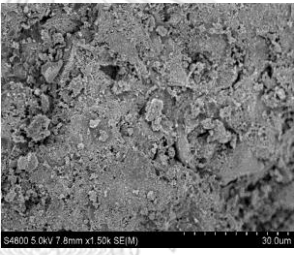
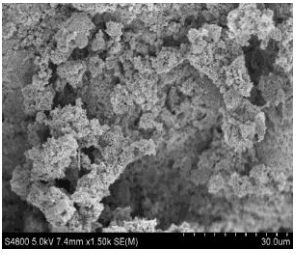
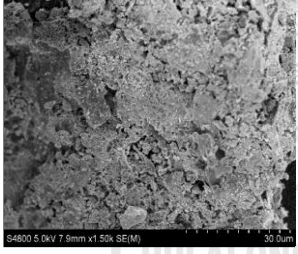
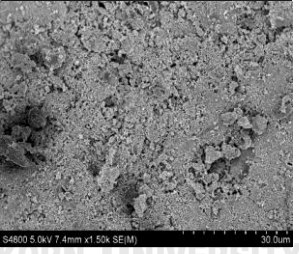
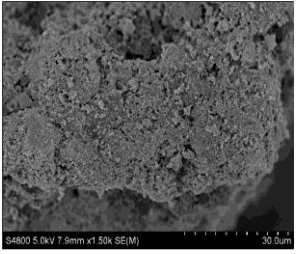
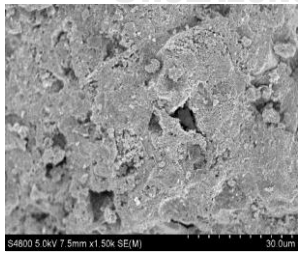
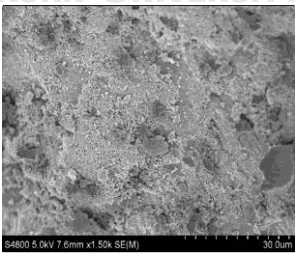
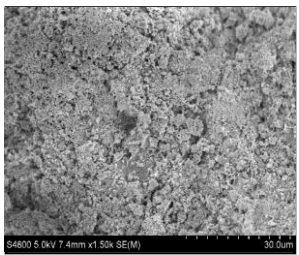
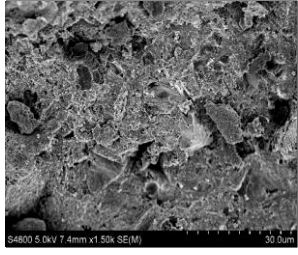
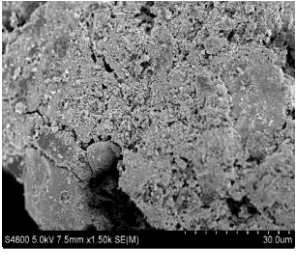
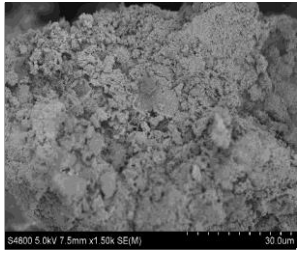
รูปที่ 9 มอร์ต้าได้รับความร้อนที่ อุณหภูมิห้อง(ซ้าย) 400°C (กลาง) และ 800°C (ขวา)

มอร์ต้าที่มีการเติมปริมาณเถ้าแกลบที่แตกต่างกัน จะมีสีผิวที่แตกต่างกันด้วย โดยหากมีการเติมปริมาณเถ้าแกลบมากมอร์ต้าจะมีสีเข้มขึ้นไปในทางสีดำ เมื่อเทียบกับมอร์ต้าปกติ และจากรูปที่ 9 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของ ลักษณะของผิว และ สีผิวมอร์ต้าผสมเถ้าแกลบ เมื่อได้รับความร้อน ที่ 400°C และ 800°C พบรอยแตกร้าวบริเวณผิว มอร์ต้า ซึ่งรอยแตกร้าวจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับอุณหภูมิที่สูงขึ้น และ สีผิวของมอร์ต้ามีสีเปลี่ยนเป็นสีเทาอ่อน ผลที่เกิดขึ้นเนื่องจาก เมื่อได้รับความร้อนเนื้อซีเมนต์เฟสท์ของมอร์ต้า เกิดการสูญเสีย น้ำ ทำให้เนื้อซีเมนต์เฟสท์เกิดการหดตัว จึงทำให้เกิดรอยแตกร้าว และ ยังทำให้มวลรวมของมอร์ต้าเสียสภาพการยึดเกาะ ซึ่งผลเหล่านี้ มีผลกระทบต่ออย่างมากกับคุณสมบัติทางกลของมอร์ต้า

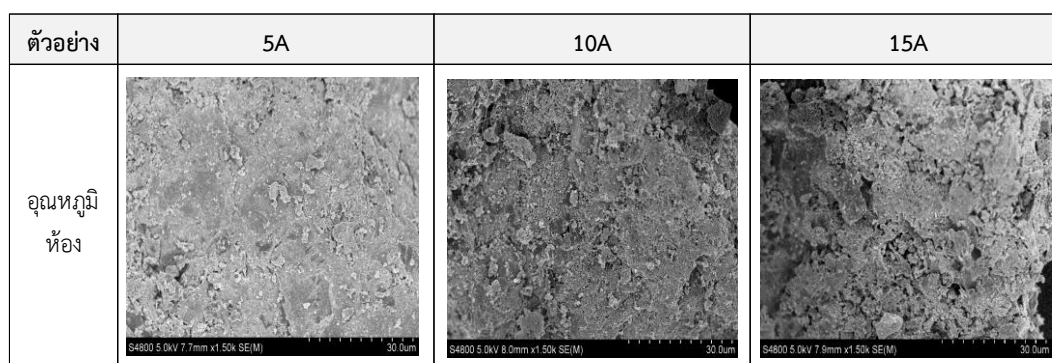
#### 4.2.1.2 ผลวิเคราะห์คุณลักษณะผิวของมอร์ต้าด้วย SEM

จากการตรวจสอบพื้นผิวของมอร์ต้าผสมเถ้าแกลบ ที่ผ่านความร้อน และไม่ผ่านความร้อน ที่กำลังขยาย 1500 เท่า ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด(SEM) ซึ่งจะเห็นได้จากตารางที่ 17 ผลของความร้อนที่มอร์ต้าได้รับ ทำให้พื้นผิวมีลักษณะคล้ายการเป็นขุย และมีช่องว่างระหว่างเนื้อซีเมนต์เฟสท์ของมอร์ต้า เนื่องจากเกิดการสูญเสียน้ำของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และ การระเหยของน้ำตามโพรงช่องว่างภายใน โดยจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิความร้อนที่ได้รับมากขึ้น

ตารางที่ 17 ภาพถ่ายมอร์ต้า ก่อนและหลังได้รับความร้อน ที่กำลังขยาย 1500 เท่า

ชนิด	อุณหภูมิห้อง	ผ่านความร้อน 400 °C	ผ่านความร้อน 800 °C
OPC			
15A			
15B			
15C			

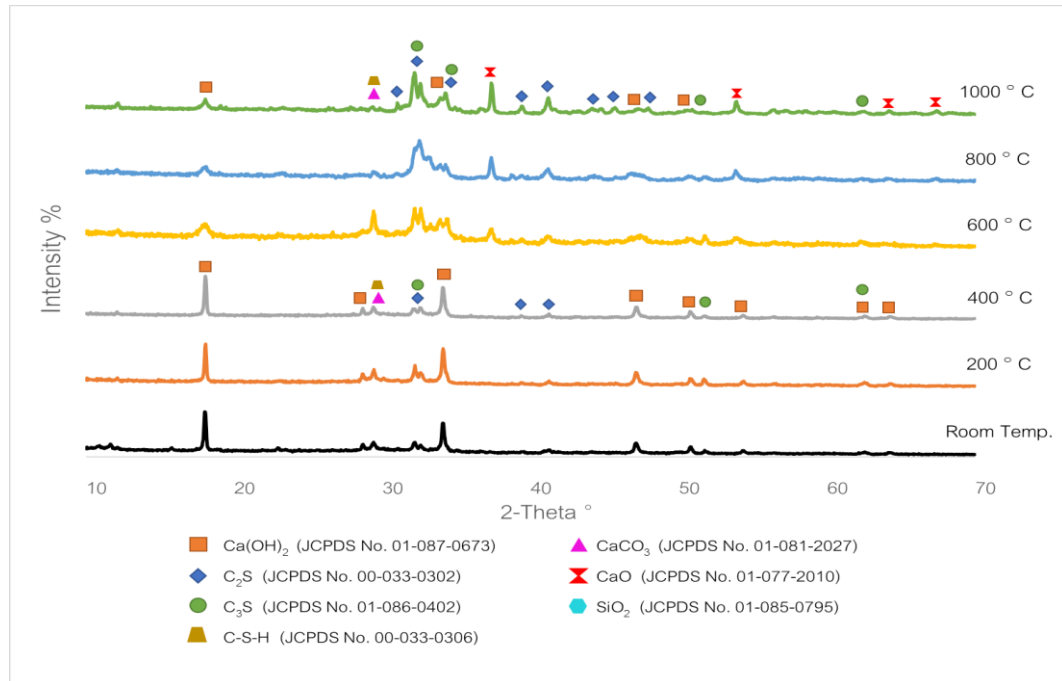
ตารางที่ 18 ภาพถ่ายมอร์ต้าผสมเถ้าแกลบที่กำลังขยาย 1500 เท่า



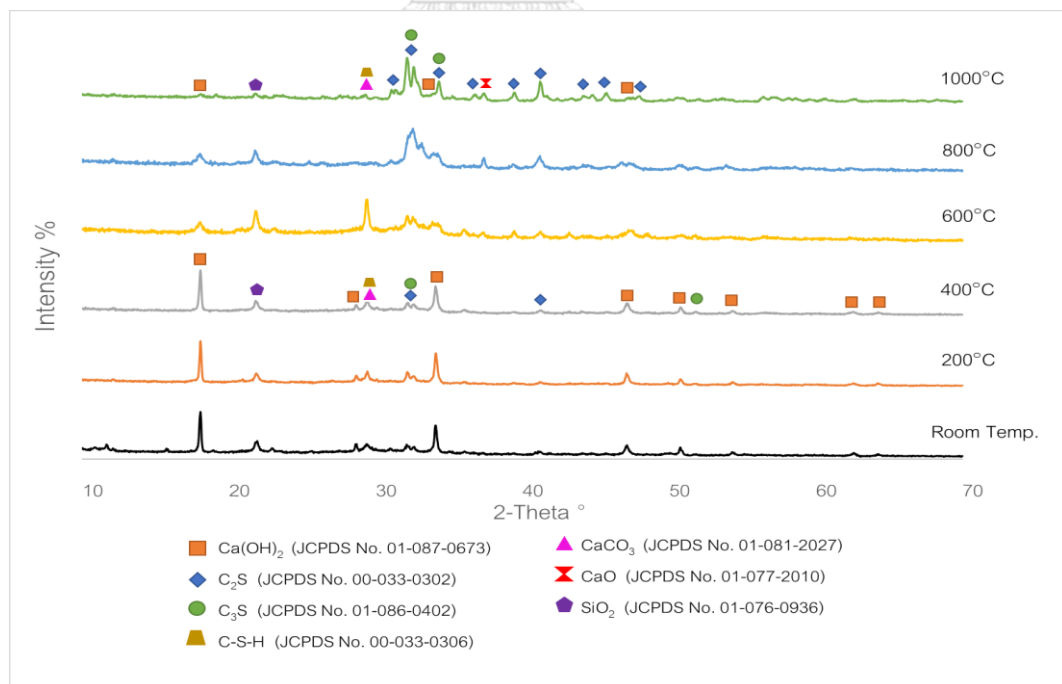
จากตารางที่ 18 ภาพถ่ายทางกายภาพเปรียบเทียบกันของมอร์ต้าแบบไม่ผสมเถ้าแกลบ และ แบบผสมเถ้าแกลบ โดยมอร์ต้าที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบจะมีลักษณะผิวที่เป็นเนื้อเดียวกันมากกว่ามอร์ต้าที่ผสมเถ้าแกลบ โดยมอร์ต้าที่ผสมเถ้าแกลบนั้นจะพบช่องว่างระหว่างเนื้อซีเมนต์เฟสต์มากกว่าอย่างเห็นได้ชัด และ ยิ่งมอร์ต้ามีปริมาณเถ้าแกลบผสมมากขึ้นก็ยิ่งเห็นได้ชัดยิ่งขึ้น เนื่องจากเถ้าแกลบนั้นเป็นวัสดุปอซโซลานที่มีปริมาณรูพรุนเป็นจำนวนมากและหากขนาดอนุภาคซีเมนต์กับเถ้าแกลบที่ผ่านการร่อนตะแกรงคนละเบอร์กัน จะเห็นความแตกต่างว่า เถ้าแกลบที่ผ่านตะแกรงช่องขนาดเล็กกว่าเนื้อซีเมนต์เฟสต์จะเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่า และ พบช่องว่างปริมาณน้อยกว่าแบบที่ผ่านตะแกรงเบอร์ใหญ่กว่า แต่จะไม่เป็นเนื้อเดียวกันเหมือนกับมอร์ต้าที่ไม่ผสมเถ้าแกลบ

จากตารางที่ 17 เมื่อมอร์ต้าได้รับอุณหภูมิความร้อน พื้นผิวของมอร์ต้าจะได้รับผลกระทบกับความร้อนนี้โดยตรง ซึ่ง ณ ที่อุณหภูมิห้อง เนื้อซีเมนต์เฟสต์มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันเป็นผลึกแผ่น แต่เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิที่  $400^{\circ}\text{C}$  เนื้อซีเมนต์เฟสต์เริ่มพบปริมาณช่องว่างมากขึ้น และ ถ้าหากมอร์ต้าได้รับความร้อนจนถึง อุณหภูมิ  $800^{\circ}\text{C}$  ปริมาณช่องว่างที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยที่ มอร์ต้าที่ผ่านความร้อนและผสมเถ้าแกลบที่ผ่านตะแกรงเบอร์เล็กกว่าจะพบปริมาณช่องว่างตามพื้นผิวของซีเมนต์เฟสต์น้อยกว่า แบบที่ผสมเถ้าแกลบที่ผ่านตะแกรงเบอร์ใหญ่กว่า แต่จะมีช่องว่างที่เกิดขึ้นนั้นไม่เท่ากับมอร์ต้าที่ไม่ผสมเถ้าแกลบ ซึ่งการเกิดผิวลักษณะนี้เกิดจากการสูญเสียน้ำจากความร้อน หรือ การสลายตัวของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เมื่อได้รับความร้อนและการระเหยของน้ำอิสระภายในโพรงของตัวมอร์ต้า

#### 4.2.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบเคมี



รูปที่ 10 ผล XRD ซีเมนต์พาสต์ไม่ผสมเถ้าแกลบ ป่ม 28 วัน ณ อุณหภูมิต่าง ๆ



รูปที่ 11 ผล XRD ซีเมนต์พาสต์ผสมเถ้าแกลบ 15% ป่ม 28 วัน ณ อุณหภูมิต่าง ๆ

จากผลการวิเคราะห์ตรวจสอบปริมาณสารประกอบของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าแกลบ และแบบไม่ผสมเถ้าแกลบ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction ( XRD ) ดังรูปที่ 10 และ 11 จะเห็นว่าซีเมนต์เพสต์แบบผสมเถ้าแกลบ และ แบบไม่ผสมเถ้าแกลบ มีแนวโน้มเพิ่มและลดของปริมาณสารประกอบในลักษณะที่คล้ายกัน ซึ่งสามารถวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโดยอ้างอิงจากตารางที่ 8 [7] ดังนี้

เมื่อซีเมนต์เพสต์ ได้รับความร้อนมากขึ้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารประกอบต่าง ๆ โดยสารประกอบที่เห็นได้ชัดเจน คือ ปริมาณ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ซึ่งจะลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อได้รับความร้อนสูงขึ้น เนื่องจากความร้อนที่ได้รับทำให้เกิดการแตกตัวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) แต่ที่ซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบนั้น จะมีปริมาณที่น้อยกว่าเนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) จะไปจับตัวกลับ ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก ได้ผลิตภัณฑ์เป็น แคลเซียมซิลิเกตไฮ-เดรต (C-S-H)

ในช่วงอุณหภูมิห้อง จนถึง อุณหภูมิ  $600^\circ\text{C}$  แคลเซียมไฮดรอกไซด์ มีปริมาณลดลงอย่างต่อเนื่องตามอุณหภูมิที่ได้รับ เกิดการแตกตัวได้แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ซึ่งแคลเซียมออกไซด์นั้นสามารถจับตัวกับ คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) กลายเป็น แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) จึงเห็นได้ว่าปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต มีการเพิ่มขึ้นจนถึง อุณหภูมิ  $600^\circ\text{C}$  จนกระทั่งอุณหภูมิ  $800^\circ\text{C}$  แคลเซียมคาร์บอเนต เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับจากการได้รับความร้อนสูง ทำให้ปริมาณ  $\text{CaO}$  มีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อซีเมนต์เพสต์ ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิมากกว่า  $800^\circ\text{C}$

สารประกอบอีกชนิดหนึ่งที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด คือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต และ ไดแคลเซียมซิลิเกต ( $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ ) ซึ่งปริมาณของสารประกอบทั้งสองนั้น มีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อซีเมนต์เพสต์ได้รับความร้อนที่สูงขึ้น ปริมาณที่เพิ่มขึ้นนั้นมาจากการที่ แคลเซียมซิลิเกตไฮ-เดรต (C-S-H) เกิดปฏิกิริยาคายน้ำ (dehydration) ทำให้ได้สารประกอบทั้งสองอย่างนี้ แต่ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าแกลบนั้นจะมีปริมาณ  $\text{C}_3\text{S}$  และ  $\text{C}_2\text{S}$  มากกว่าเพราะตัวซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าแกลบจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก ทำให้มีแคลเซียมซิลิเกตไฮ-เดรต ปริมาณมากกว่าแบบซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบ ดังนั้นเวลาเกิดปฏิกิริยาคายน้ำ (dehydration) จะมี  $\text{C}_3\text{S}$  และ  $\text{C}_2\text{S}$  ปริมาณมากกว่านั่นเอง และ ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าแกลบนั้น จะมี ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ที่มากกว่าแบบไม่ผสมเถ้าแกลบอย่างเห็นได้ชัดจากรูปที่ 11 ซึ่ง  $\text{SiO}_2$  จะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเมื่อได้รับความร้อน ที่อุณหภูมิ



600 °C เนื่องจากเกิดการสลายตัวของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) จากปฏิกิริยาปอซโซลานิก และ  $\text{SiO}_2$  ที่เกิดมากขึ้นจะไปจับตัวกับแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็น  $\text{C}_3\text{S}$  และ  $\text{C}_2\text{S}$  เป็นผลทำให้ช่วงอุณหภูมิสูงกว่า 600°C ปริมาณ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ลดลง ซึ่งจะแตกต่างกับแบบไม่ผสมเถ้าแกลบ

จากการทดลองหาปริมาณสารประกอบของซีเมนต์เพสต์แบบผสมเถ้าแกลบนั้น ยังไม่สามารถบ่งบอกการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้อย่างชัดเจน เนื่องจากอายุการบ่มน้อยจึงทำให้การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกยังไม่ชัดเจนเพียงพอ จากงานวิจัยของ Umasabor, R. I. [10] จะเห็นได้ว่าการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้อย่างชัดเจนต้องใช้เวลาบ่มนานกว่าปกติ

ตารางที่ 19 สารประกอบเคมีของมอร์ต้า

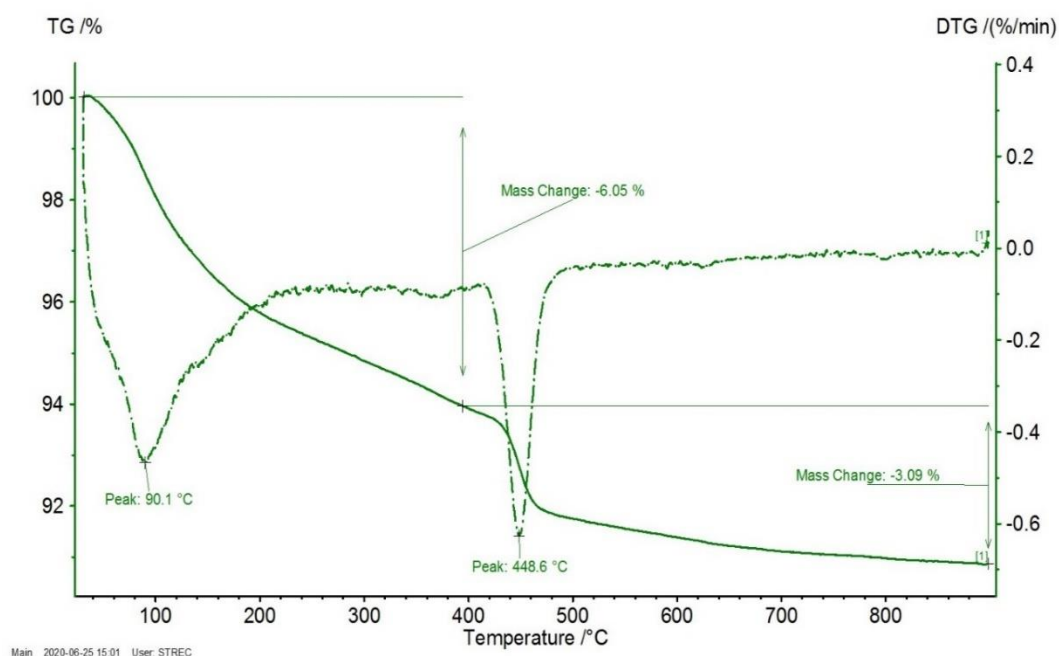
ธาตุ	สารประกอบทางเคมีหลัก									
	อุณหภูมิ	$\text{SiO}_2$	CaO	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	MgO	$\text{Al}_2\text{O}_3$	MnO	$\text{SO}_3$
OPC	25°C	40.03	45.99	1.79	0.71	2.85	1.50	5.09	0.06	1.82
	400°C	43.92	42.29	1.76	0.72	2.66	1.41	5.19	0.05	1.76
	800°C	56.29	32.89	1.26	0.08	1.81	0.73	4.72	0.03	1.18
15A	25°C	53.39	35.45	1.33	0.11	2.15	0.74	4.59	0.03	1.54
	400°C	60.16	29.28	1.44	0.15	1.75	0.70	4.54	0.04	1.25
	800°C	63.20	26.67	1.39	0.14	1.61	0.64	4.43	0.04	1.18
10A	25°C	54.68	33.82	1.35	0.14	2.00	0.74	4.50	0.04	1.60
5A	25°C	56.68	32.50	1.41	0.17	2.01	0.71	4.36	0.04	1.43
5B	25°C	56.77	32.07	1.41	0.10	1.92	0.72	4.80	0.04	1.37
5C	25°C	49.48	39.14	1.28	0.11	2.24	0.79	4.54	0.04	1.64

จากผลการวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบออกไซด์ของมอร์ต้าที่ผ่านความร้อน และไม่ผ่านความร้อน ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) ดังตารางที่ 19 ซึ่งพบว่า มีสารประกอบออกไซด์หลัก 2 ชนิด ที่มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดเมื่อได้รับความร้อน คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) โดยพบว่า มอร์ต้าที่มีเถ้าแกลบผสมอยู่นั้น จะมีปริมาณ  $\text{SiO}_2$  มากกว่า มอร์ต้าแบบไม่ผสมเถ้าแกลบ เนื่องจากการเติมเถ้าแกลบ ซึ่งเถ้าแกลบนั้นมีสารประกอบเป็นซิลิกา และ จากการให้ความร้อนกับมอร์ต้าที่ไม่ผสมเถ้าแกลบและผสมเถ้าแกลบนั้น จะเห็นว่าปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) มีความผกผันกัน โดยเมื่อมอร์ต้าได้รับอุณหภูมิความร้อนสูง ปริมาณ  $\text{SiO}_2$  จะมีค่าเพิ่มขึ้น และ ปริมาณ CaO มีค่าลดลง

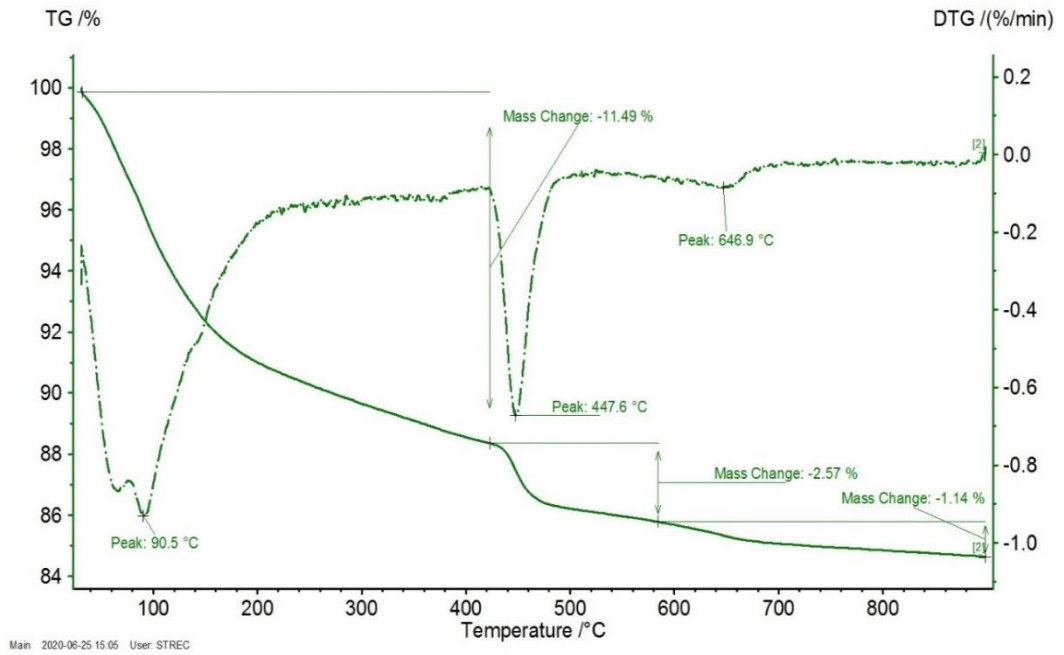
โดย มอร์ต้าผสมเถ้าแกลบจะมี ปริมาณเพิ่มลดของสารประกอบ  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{CaO}$  ที่ อุณหภูมิ  $800^\circ\text{C}$  มากกว่าที่อุณหภูมิ  $400^\circ\text{C}$  และส่วนของมอร์ต้าปกติ ปริมาณเพิ่มลดของสารประกอบ  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{CaO}$  ที่ อุณหภูมิ  $400^\circ\text{C}$  มีค่ามากกว่า ที่อุณหภูมิ  $800^\circ\text{C}$

จากผลการทดสอบหาปริมาณสารเคมีของมอร์ต้าที่ผ่านความร้อน และ ไม่ผ่านความร้อน ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) ดังตารางที่ 19 ซึ่งจากผลการทดสอบยังไม่สามารถหาข้อสรุปของการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเคมีที่มีการเพิ่มและลดได้ เนื่องจากได้ทำการทดสอบเพียงครั้งเดียว ซึ่งการทดสอบเพียงครั้งเดียวยังไม่สามารถสรุปผลได้อย่างชัดเจนว่า ปริมาณที่ เพิ่มและลดของปริมาณ Si และ Ca เมื่อได้รับความร้อนนั้นเป็นจริงหรือไม่ ผลการทดลองนี้เป็นเพียงแค่แนวโน้มจากการตรวจสอบครั้งเดียวเท่านั้น ซึ่งตามกฎหมายของสสาร คือ ผลรวมของมวลสารทั้งหมดภายในระบบปิดมีค่าคงตัว จากผลการทดสอบเป็นข้อขัดแย้งกับกฎหมายมวล จึงยังไม่สามารถหาข้อสรุปได้ชัดเจนจากการทดสอบเพียงครั้งเดียว

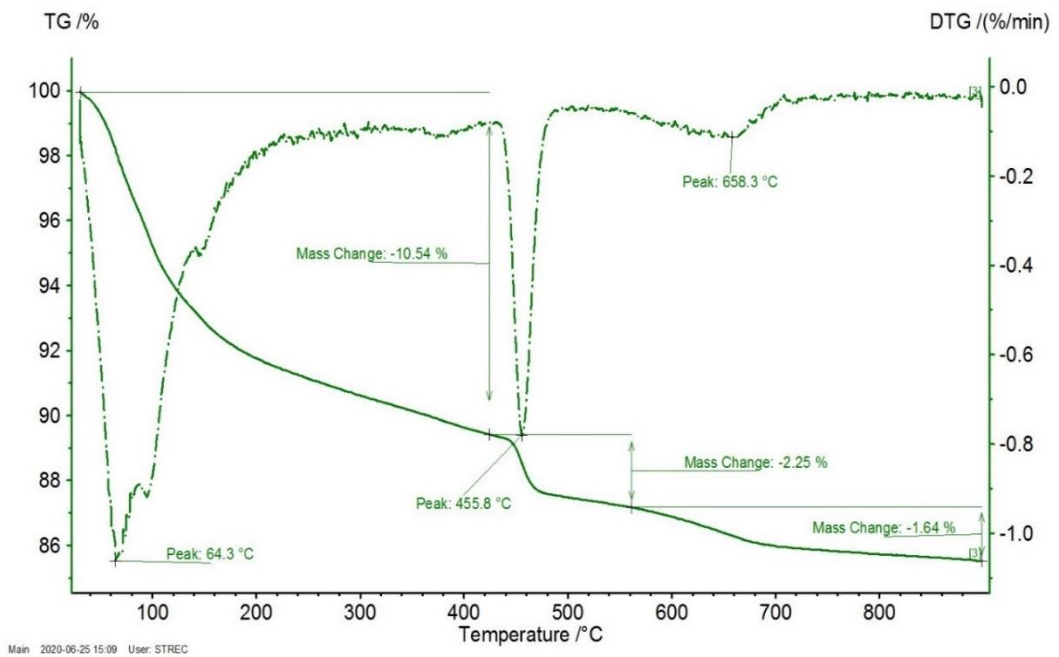
#### 4.2.3 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของมอร์ต้า



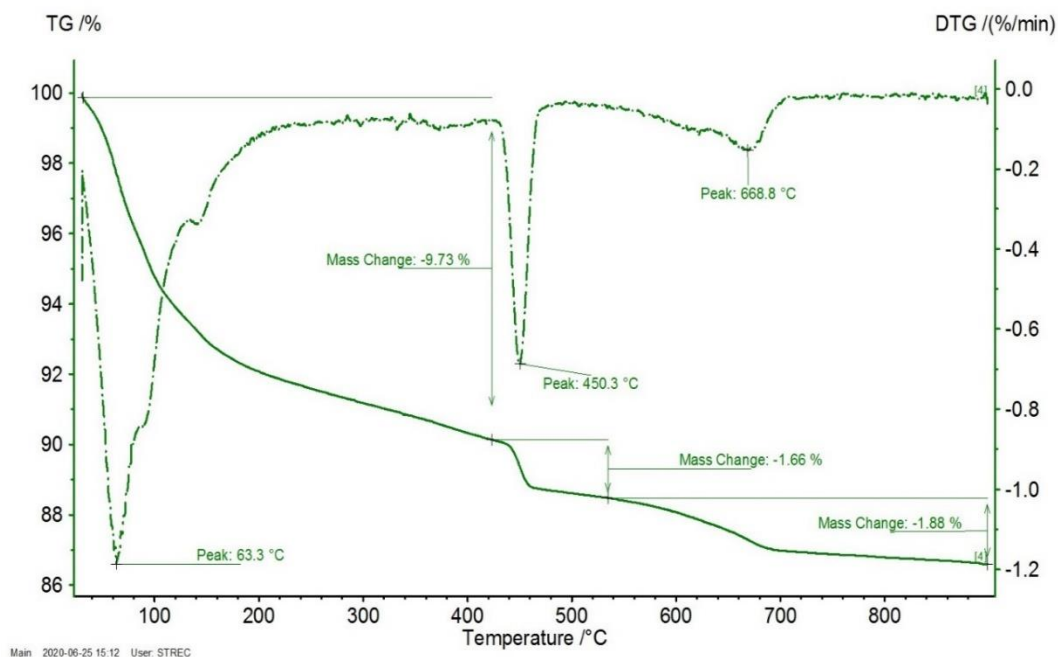
รูปที่ 12 เสถียรภาพทางความร้อนของ มอร์ต้าไม่ผสมเถ้าแกลบ



รูปที่ 13 เสร็จภาพทางความร้อนของ มอร์ต้า ผสมเถ้าแกลบที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 270 5%



รูปที่ 14 เสร็จภาพทางความร้อนของ มอร์ต้า ผสมเถ้าแกลบที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 270 10%



รูปที่ 15 เสาถียรภาพทางความร้อนของ มอร์ต้า ผสมเถ้าแกลบที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 270 15%

จากกราฟการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของมอร์ต้าแบบไม่ผสมเถ้าแกลบ และแบบที่ผสมเถ้าแกลบ จากรูปที่ 12 ถึง 15 แสดงให้เห็นมีการสูญเสียน้ำหนักอยู่ 3 ช่วงความชัน ซึ่งในช่วงแรก ที่ช่วงอุณหภูมิ 60°C จนถึง 450°C เป็นการสูญเสียน้ำหนัก เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาคายน้ำ (dehydration) ของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (C-S-H) ซึ่งเป็นช่วงที่มีการสูญเสียน้ำหนักมากที่สุด ช่วงที่ 2 ที่ช่วงอุณหภูมิ 450°C จนถึง 650°C เป็นการสูญเสียน้ำหนัก เนื่องจากการสลายตัวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) และ ช่วงที่ 3 ที่ช่วงอุณหภูมิ 650°C เป็นต้นไป เป็นการสูญเสียน้ำหนัก เนื่องจากเกิดการสลายตัวของ แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ )

จากกราฟระหว่างมอร์ต้าที่ไม่ผสมเถ้าแกลบ กับ ผสมเถ้าแกลบจะเห็นว่า ช่วงที่ 1 และ ช่วงที่ 2 มอร์ต้าที่ไม่ผสมเถ้าแกลบ มีการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่ามอร์ต้าที่ผสมเถ้าแกลบ ซึ่งมีค่าการสูญเสียน้ำหนักโดยรวมร้อยละ 9.14 โดยมวล และ มอร์ต้าที่ผสมเถ้าแกลบในปริมาณที่แตกต่างกันพบว่า มอร์ต้าที่ผสมเถ้าแกลบปริมาณมากกว่า จะมีปริมาณการสูญเสียน้ำหนัก ทั้ง 2 ช่วง น้อยกว่า ซึ่งมอร์ต้าผสมเถ้าแกลบ 15 % มีค่าการสูญเสียน้ำหนักโดยรวมร้อยละ 13.27 โดยมวล ส่วนมอร์ต้าที่ผสมเถ้าแกลบ 10% ซึ่งมีค่าการสูญเสียน้ำหนักโดยรวมร้อยละ 14.43 โดยมวล และ มอร์ต้าที่ผสมเถ้าแกลบ 5% มีค่าการสูญเสียน้ำหนักโดยรวม 15.20 เปอร์เซ็นต์โดยมวล ซึ่งเป็นค่าที่มากที่สุด

จากการสูญเสียน้ำในมอร์ต้าออกไปสู่สิ่งแวดล้อมผ่านช่องว่างภายในเนื่องจากได้รับความร้อน ซึ่งจากลักษณะของเถ้าแกลบที่มีปริมาณรطوبةสูง ทำให้เถ้าแกลบสามารถกักเก็บน้ำอิสระในอนุภาคได้ในปริมาณมาก ซึ่งทำให้การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าแบบผสมเถ้าแกลบมีการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าเนื่องจากการสูญเสียน้ำจากเถ้าแกลบที่ดูดซับน้ำไว้ และ มอร์ต้าที่มีปริมาณเถ้าแกลบที่เพิ่มมากขึ้นจะมีการสูญเสียน้ำหนักที่น้อยกว่า เพราะการเพิ่มปริมาณเถ้าแกลบนั้นทำให้มีโอกาสที่อนุภาคเถ้าแกลบทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งทำให้เพสต์มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ทำให้เกิดการลดลงของปริมาณช่องว่างภายใน ดังนั้นการสูญเสียน้ำจึงมีปริมาณลดลงตามไปด้วย จึงเป็นเหตุที่การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าที่มีปริมาณเถ้าแกลบมากกว่านั้นมีค่าน้อยกว่า

#### 4.2.4 ผลการวิเคราะห์กำลังอัดมอร์ต้า

ตารางที่ 20 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้า บ่ม 28 วัน

กำลังอัด ( นิวตัน / ม. <sup>2</sup> ) X10 <sup>6</sup> - ( ร้อยละกำลังอัด ) บ่ม 28 วัน			
ประเภทมอร์ต้า	อุณหภูมิให้ความร้อน		
	อุณหภูมิห้อง	400°C	800°C
OPC	63.52 - (100)	46.8 - (74)	19.97 - (31)
5A	60.70 - (96)	52.71 - (83)	17.42 - (27)
10A	58.20 - (92)	51.58 - (81)	18.36 - (29)
15A	56.40 - (89)	48.17 - (76)	20.77 - (33)
5B	54.90 - (86)	49.17 - (77)	15.72 - (25)
10B	51.69 - (81)	45.48 - (72)	16.17 - (25)
15B	52.75 - (83)	44.01 - (69)	18.65 - (29)
5C	56.88 - (90)	47.90 - (75)	18.78 - (30)
10C	54.02 - (85)	47.69 - (75)	19.24 - (30)
15C	53.61 - (84)	48.18 - (76)	19.06 - (30)

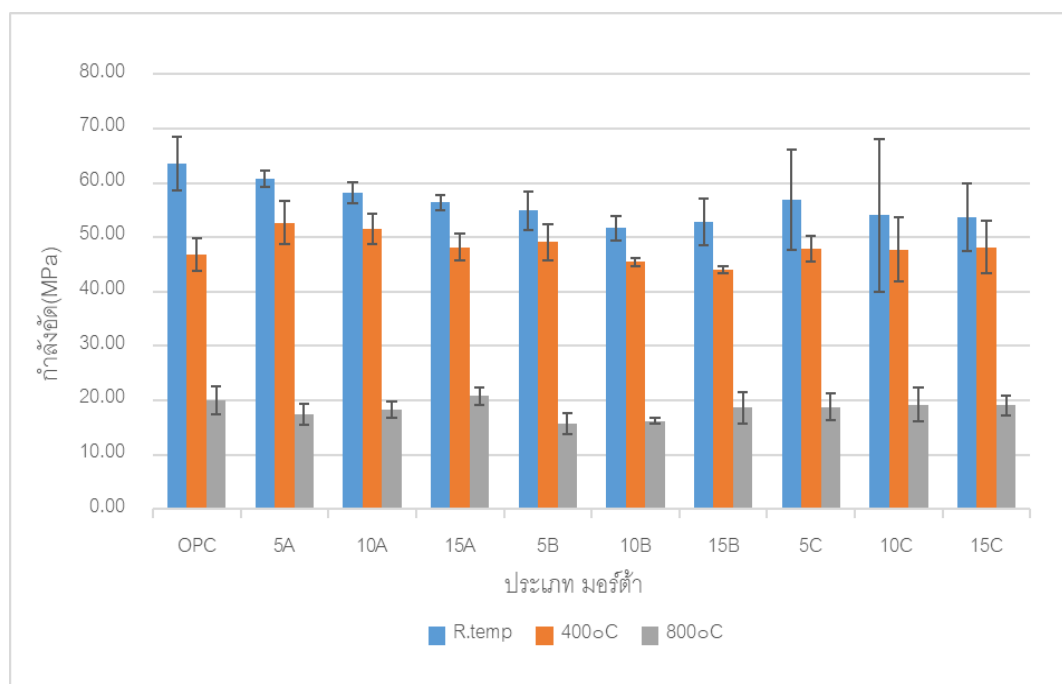
หมายเหตุ ตารางที่ 20

OPC หมายถึง มอร์ต้าธรรมดา

ตัวเลข บ่งบอกถึง ปริมาณเถ้าแกลบ ( ดูที่ตาราง 14 )

ตัวอักษร บ่งบอกถึง ประเภทเถ้าแกลบ ( ดูที่ตาราง 14 )

ค่าภายใน ( ) หมายถึง ค่าร้อยละของกำลังอัด เทียบกับ OPC คุณหมุมิห้อง



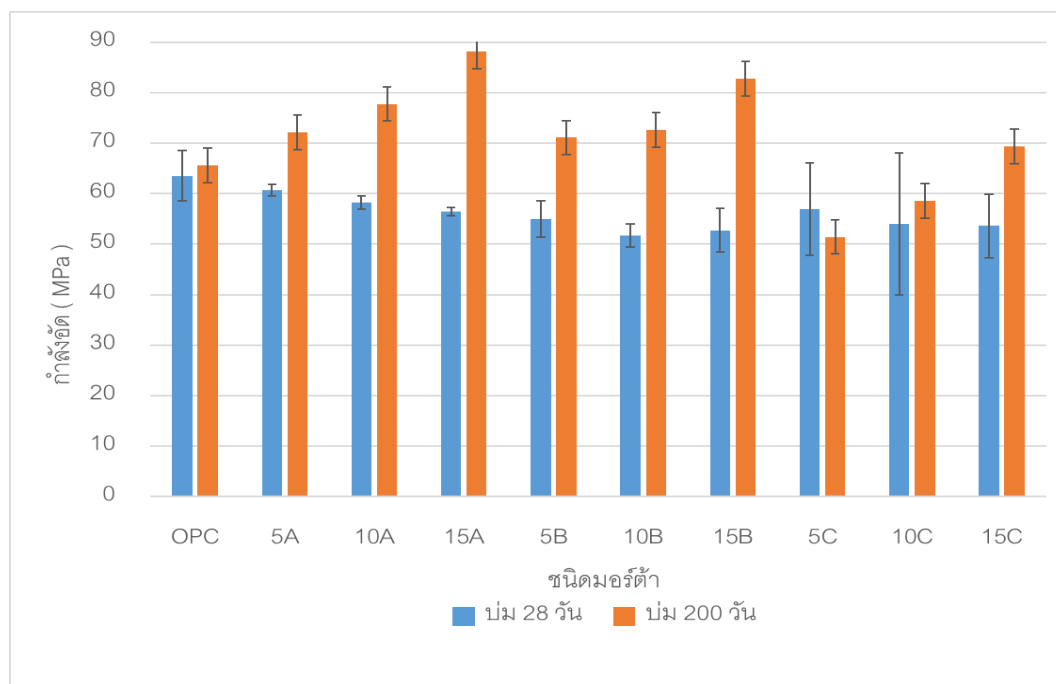
รูปที่ 16 กำลังอัดของมอร์ต้า ป่ม 28 วัน

จากผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าที่ป่ม 28 วัน ที่ผ่านความร้อนและไม่ผ่านความร้อนสูง ดังตารางที่ 20 และ รูปที่ 16 มอร์ต้าผสมเถ้าแกลบ จะมีกำลังอัดลดลง เมื่อเทียบกับมอร์ต้าที่ไม่ได้ผสม ซึ่งมีปริมาณลดลงตามปริมาณเถ้าแกลบที่เพิ่มขึ้น และ จะมีค่าลดลงอีกหากขนาดอนุภาคเถ้าแกลบมีขนาดใหญ่ เนื่องจากเถ้าแกลบนั้นมีความพรุนปริมาณมากซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เกิดช่องว่างภายในมอร์ต้า และ หากเถ้าแกลบมีขนาดอนุภาคใหญ่ เท่ากับว่าจะมีปริมาณพื้นผิวที่มากขึ้น จึงทำให้ปริมาณความพรุนเพิ่มขึ้นอีกด้วย

มอร์ต้าที่ผ่านความร้อน จะมีกำลังอัดลดลง เมื่อเทียบกับมอร์ต้าที่ไม่ได้ผ่านความร้อน ซึ่งปริมาณที่ลดลงตามปริมาณอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งกำลังอัดที่ลดลงนั้น เกิดจากการคายน้ำของแคลเซียมซิลิเกตไฮ-เดรต (C-S-H) ซึ่งเป็นสารประกอบหลักสำหรับเพิ่มความแข็งแรงให้กับมอร์ต้า ซึ่งการคายน้ำนี้ส่งผลต่อสมบัติทางกลของมอร์ต้า

มอร์ต้าที่มีการผสมเถ้าแกลบเมื่อผ่านความร้อนที่  $400^{\circ}\text{C}$  กำลังอัดมีค่ามากขึ้น เทียบกับมอร์ต้าที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบ ดังเช่น มอร์ต้าแบบ 5A จะมีค่ากำลังอัด 52.71 MPa ซึ่งเป็นค่าที่มากที่สุดที่อุณหภูมิ  $400^{\circ}\text{C}$  แต่จะมีปริมาณลดลงถ้าปริมาณเถ้าแกลบมากขึ้นและขนาดอนุภาคมากขึ้น เมื่อมอร์ต้าผสมเถ้าแกลบที่ผ่านความร้อนที่  $800^{\circ}\text{C}$  กำลังอัดจะมีค่าใกล้เคียงกับมอร์ต้าที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบ โดยประมาณ 19 MPa แต่หากมอร์ต้าผสมเถ้าแกลบปริมาณมากกว่า 5 % กำลังอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับมอร์ต้าที่ผสมเถ้าแกลบ 5%

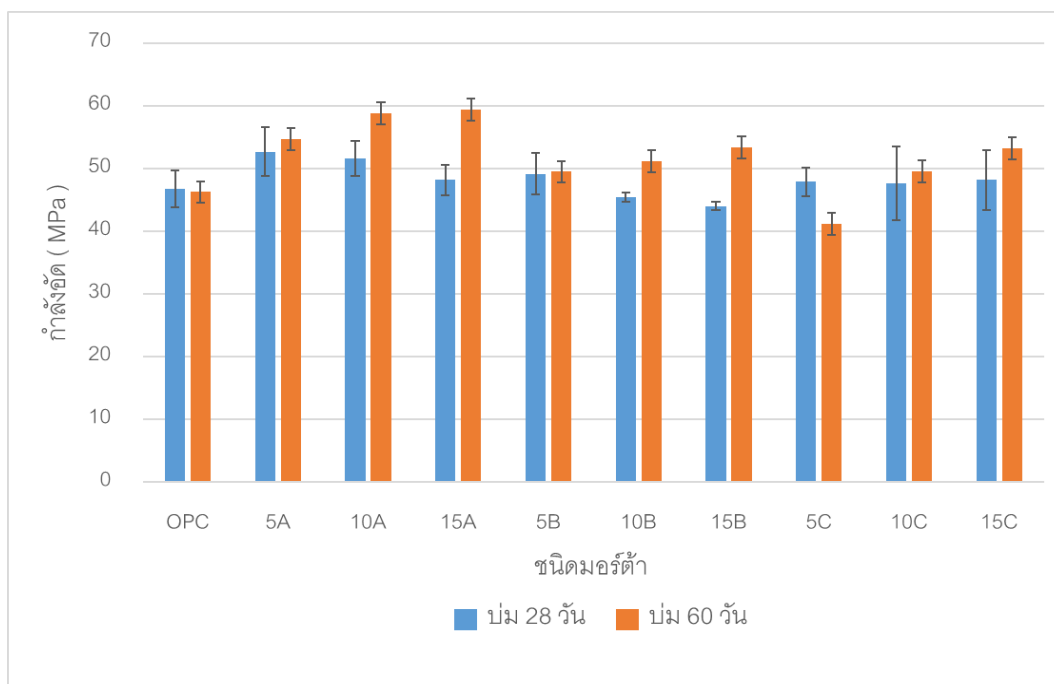
จากตารางที่ 20 สำหรับค่ากำลังอัด ณ อุณหภูมิห้อง มอร์ต้าที่ผสมเถ้าแกลบนั้นจะมีกำลังอัดเฉลี่ยร้อยละ 86 ของมอร์ต้าแบบไม่ได้ผสมเถ้าแกลบ มอร์ต้าผสมเถ้าแกลบที่มีค่ากำลังอัดมากที่สุดที่อุณหภูมิห้อง คิดเป็นร้อยละ 96 ซึ่งเป็นของมอร์ต้าแบบ 5A และ มอร์ต้าที่ผ่านความร้อนที่  $400^{\circ}\text{C}$  มอร์ต้าที่ผสมเถ้าแกลบมีกำลังอัด เฉลี่ยคิดเป็นร้อยละ 76 ของมอร์ต้าแบบไม่ได้ผสมเถ้าแกลบที่อุณหภูมิห้อง มอร์ต้าผสมเถ้าแกลบที่มีกำลังอัดมากที่สุดที่  $400^{\circ}\text{C}$  คิดเป็นร้อยละ 83 ของมอร์ต้าแบบไม่ได้ผสมเถ้าแกลบที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งเป็นของมอร์ต้าแบบ 5A ส่วนมอร์ต้าที่ผ่านความร้อนที่  $800^{\circ}\text{C}$  มอร์ต้าที่ผสมเถ้าแกลบมีกำลังอัด เฉลี่ยคิดเป็นร้อยละ 28.5 ของมอร์ต้าแบบไม่ได้ผสมเถ้าแกลบที่อุณหภูมิห้อง มอร์ต้าผสมเถ้าแกลบที่มีกำลังอัดมากที่สุดที่  $800^{\circ}\text{C}$  คิดเป็นร้อยละ 33 ซึ่งเป็นของมอร์ต้าแบบ 15A ซึ่งมีค่าใกล้เคียงมอร์ต้าแบบไม่ผสมเถ้าแกลบ (OPC)



รูปที่ 17 กำลังอัดของมอร์ต้า บ่ม 28 และ 200 วัน

จากผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าที่มีอายุบ่ม 200 วัน ดังแสดงที่รูป 17 มอร์ต้าที่มีอายุการบ่มที่มากขึ้นจะทำให้กำลังอัดมีค่ามากขึ้นและหากผสมเถ้าแกลบในปริมาณ 15 % ของน้ำหนักซีเมนต์ และ มีความละเอียดของเถ้าแกลบมากขึ้นจะทำให้สามารถเพิ่มกำลังอัดของมอร์ต้าได้มากขึ้น จากกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นของมอร์ต้าที่ผสมเถ้าแกลบนั้นมาจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิคซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ช่วยเพิ่มแคลเซียมซิลิเกตไฮ-เดรต (C-S-H) ซึ่งปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นก่อนช้าๆ หากเทียบกำลังของมอร์ต้าผสมเถ้าแกลบที่อายุบ่ม 28 วัน กำลังอัดจะมีความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเวลาบ่มมากขึ้น แต่มอร์ต้าที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบที่มีอายุบ่มมากขึ้นมีค่ากำลังอัดไม่แตกต่างกันมาก ดูได้จากรูปที่ 17 โดยมอร์ต้าที่มีกำลังอัดมากที่สุด คือ มอร์ต้าผสมเถ้าแกลบผ่านตระแกรงเบอร์ 270 ปริมาณ 15 % มีค่า 88 MPa คิดเป็นร้อยละ 134 ของมอร์ต้าแบบ OPC

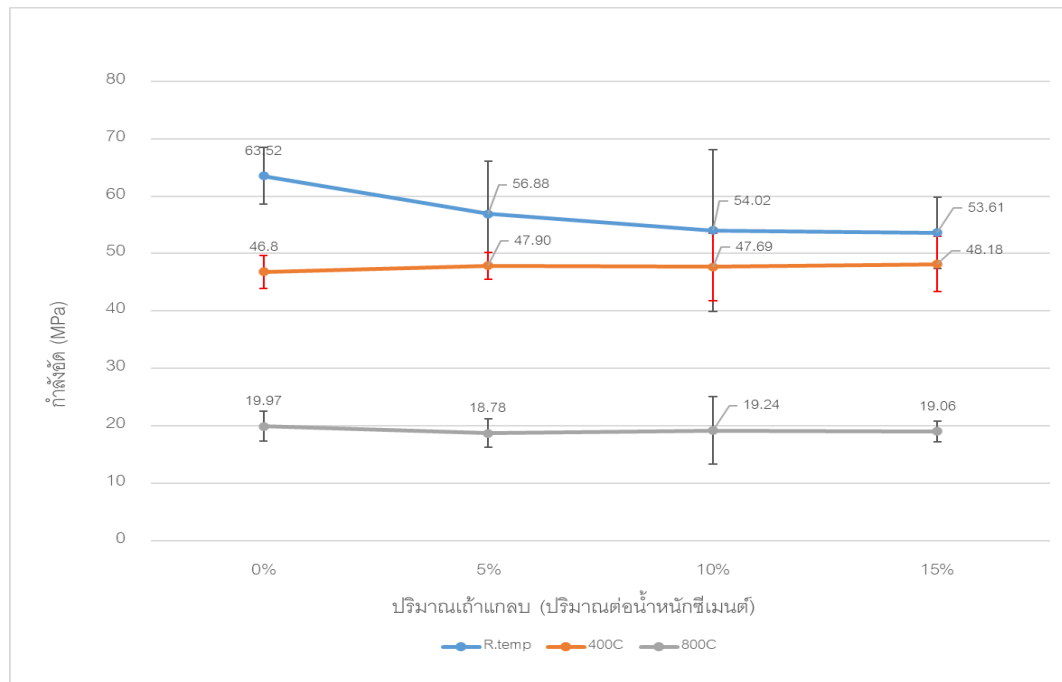




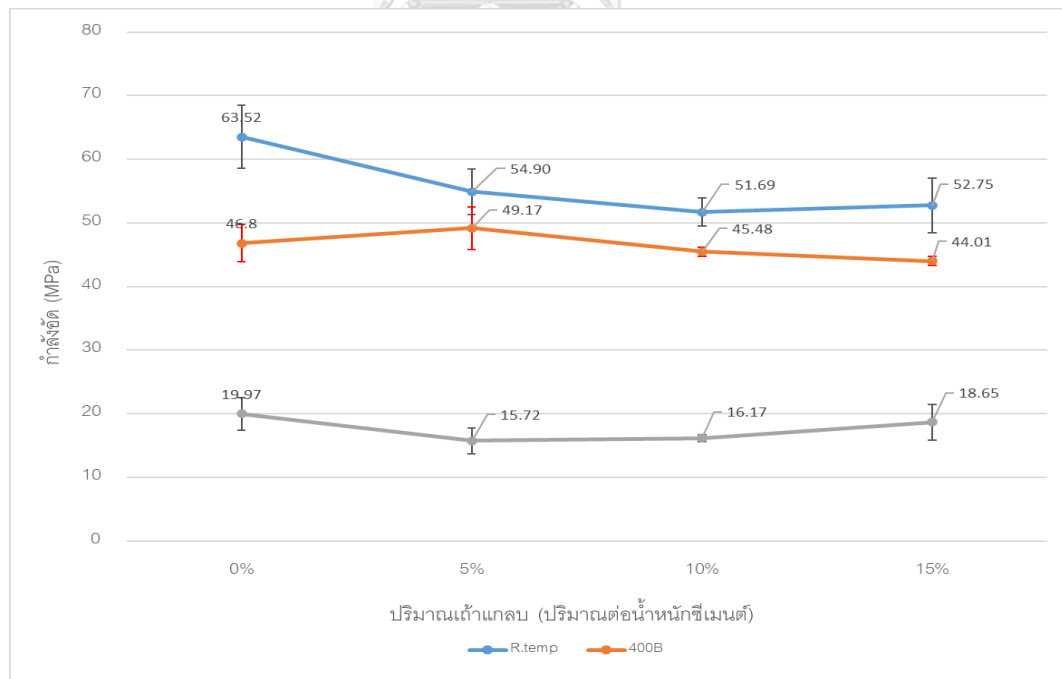
รูปที่ 18 กําลังอัดของมอร์ต้า บ่ม 28 และ 60 วัน ที่ได้รับความร้อน  $400^{\circ}\text{C}$

จากผลการทดสอบกําลังอัดของมอร์ต้าที่ผ่านความร้อน  $400^{\circ}\text{C}$  ดังแสดงที่รูป 18 มอร์ต้าที่มีปริมาณเถ้าแกลบ 15 % และมีอายุการบ่มมากขึ้น จะมีการกําลังอัดที่มากกว่ามอร์ต้าแบบไม่ผสมเถ้าแกลบ ซึ่งกําลังอัดที่มากกว่านั้น เนื่องจาก การบ่มที่ 60 วัน สามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ช่วยเพิ่มแคลเซียมซิลิเกตไฮ-เดรต (C-S-H) มากขึ้น เมื่อแคลเซียมซิลิเกตไฮ-เดรต (C-S-H) มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อได้รับความร้อนจะสามารถช่วยต้านทานการสูญเสียกําลังอัดได้ดีขึ้น ซึ่งหากผสมเถ้าแกลบปริมาณมากขึ้นยิ่งมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกมากขึ้น ซึ่งจะช่วยลดการสูญเสียกําลังอัดได้ยิ่งขึ้นไปอีก

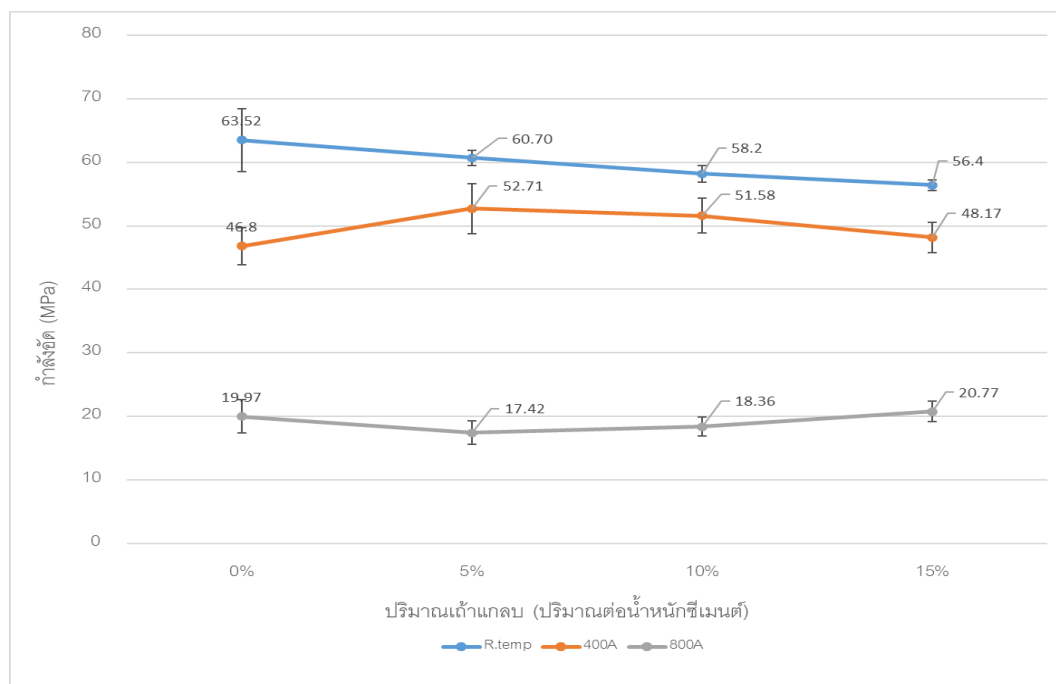
#### 4.2.4.1 ผลการวิเคราะห์กำลังอัด กับ ปริมาณเถ้ากลบ



รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด และ ปริมาณเถ้ากลบผ่านตะแกรงเบอร์ 150 (แบบ C)



รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด และ ปริมาณเถ้ากลบผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (แบบ B)

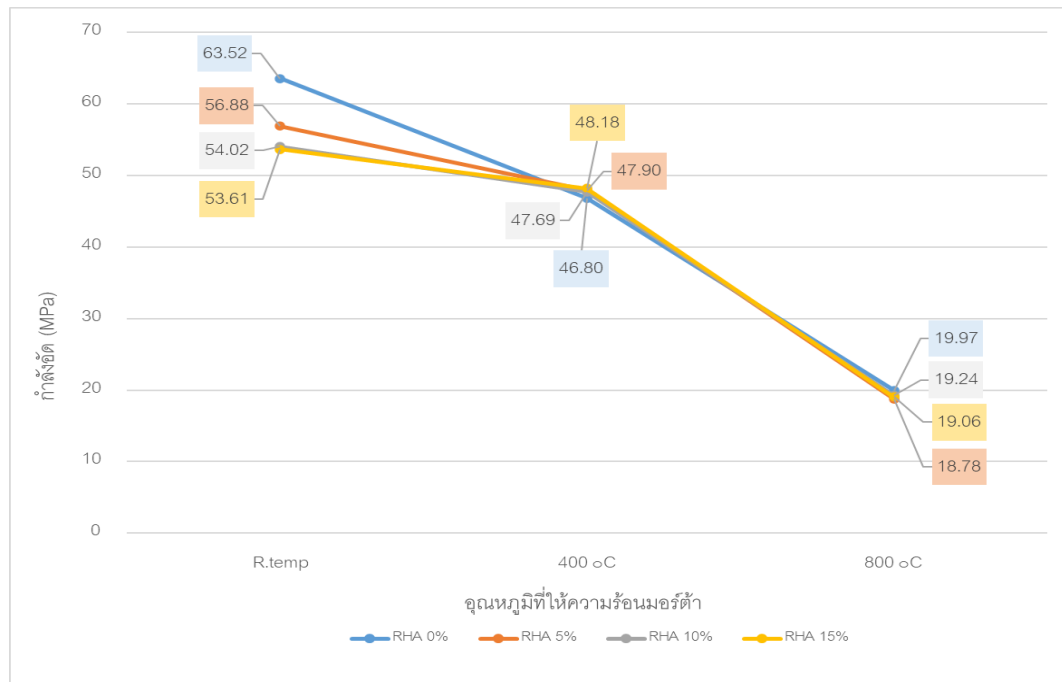


รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด และ ปริมาณแก้วแกลบผ่านตะแกรงเบอร์ 270 (แบบ A)

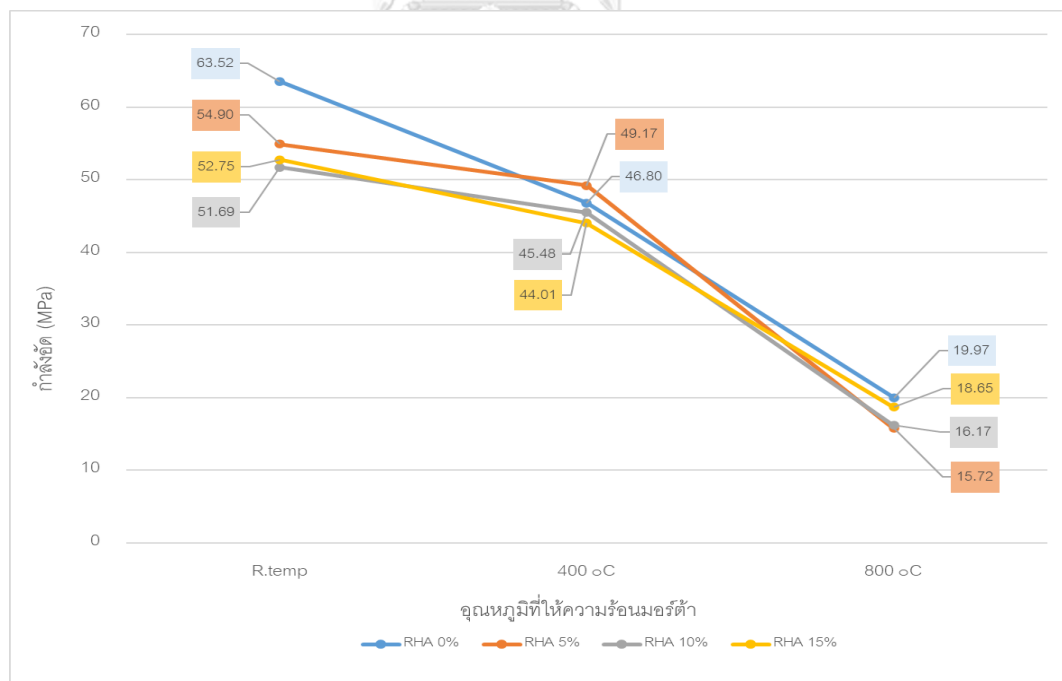
จากผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าที่ผสมแก้วแกลบและแบบไม่ได้ผสมแก้วแกลบ ซึ่งได้จากการนำข้อมูล ตารางที่ 20 มาเรียบเรียงให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับขนาดอนุภาคของแก้วแกลบที่ผ่านตะแกรงเบอร์ต่าง ๆ ดังรูปที่ 19 ถึง 21 กำลังอัดมีค่าลดลงตามปริมาณแก้วแกลบที่เพิ่มเข้าไปเพื่อทดแทนซีเมนต์ แต่ความเค้นนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแก้วแกลบมีความละเอียดขึ้นเมื่อเทียบกับมอร์ต้าที่ผสมแก้วแกลบเหมือนกัน แต่อย่างไรก็ตามมอร์ต้าที่ผสมแก้วแกลบนั้นยังมีกำลังอัดที่น้อยกว่ามอร์ต้าที่ไม่ผสมแก้วแกลบ ณ อุณหภูมิห้อง โดยกำลังอัดของมอร์ต้าที่ผสมแก้วแกลบผ่านตะแกรงเบอร์ 270 ปริมาณ 5 % (5A) จะมีปริมาณมากที่สุด ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 96 ของความเค้นมอร์ต้าที่ไม่ได้ผสมแก้วแกลบ และมีน้อยที่สุดที่ปริมาณแก้วแกลบผ่านตะแกรงเบอร์ 150 15% (15C) คิดเป็นร้อยละ 84 ของความเค้นมอร์ต้าที่ไม่ได้ผสมแก้วแกลบ

มอร์ต้าที่ผสมแก้วแกลบปริมาณต่าง ๆ เมื่อได้รับความร้อน ค่ากำลังอัดลดลง ตามปริมาณแก้วแกลบที่เพิ่มขึ้น โดยมอร์ต้าที่ผสมแก้วแกลบ จะมีปริมาณสูญเสียกำลังอัดจากความร้อนน้อยกว่ามอร์ต้าที่ไม่ผสมแก้วแกลบ และ ที่ความละเอียดของแก้วแกลบมากขึ้น การสูญเสียกำลังอัดจากความร้อนมีค่าน้อยลง

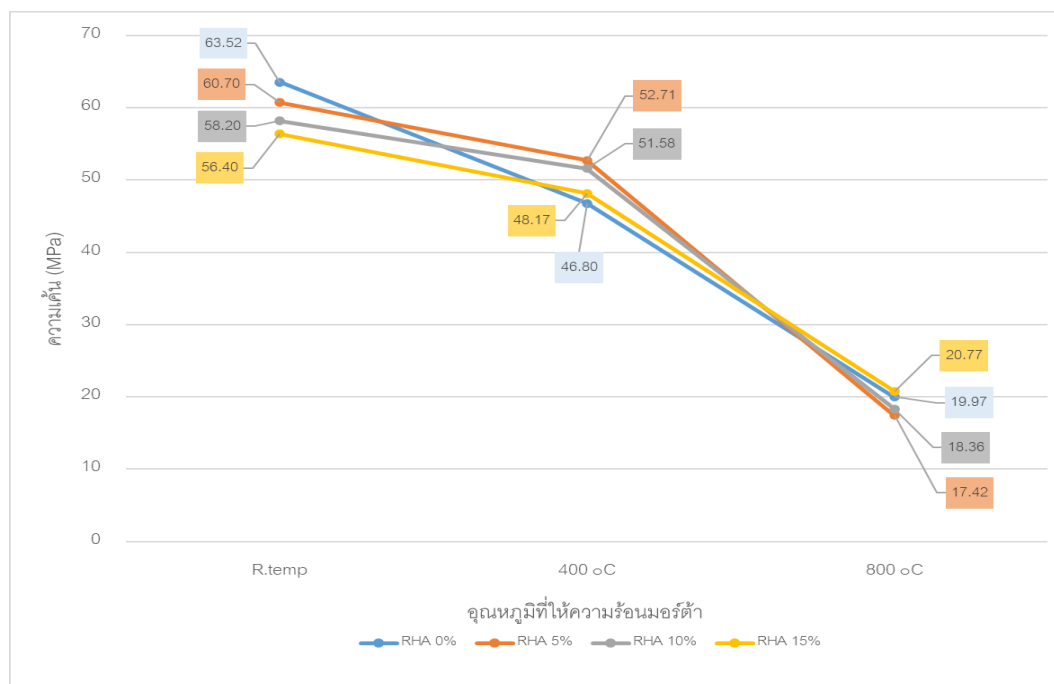
#### 4.2.4.2 ผลการวิเคราะห์ กำลังอัด กับ ปริมาณความร้อนที่ไหม้อร์ต่ำ



รูปที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอุณหภูมิที่ให้ความร้อนของ มอร์ต้า C



รูปที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอุณหภูมิที่ให้ความร้อนของ มอร์ต้า B



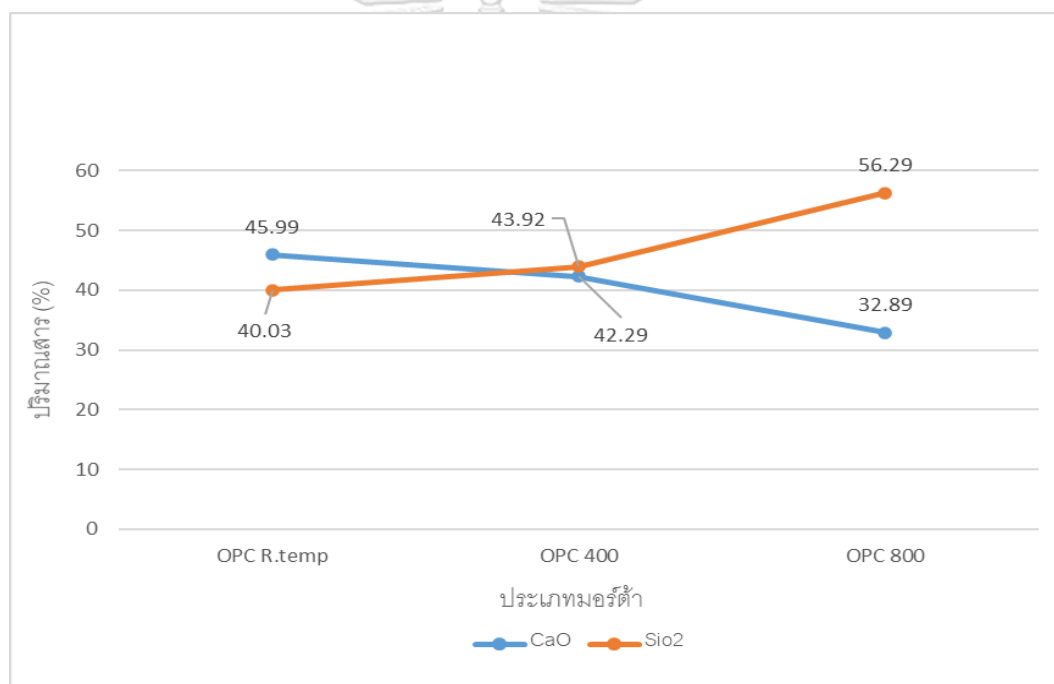
รูปที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอุณหภูมิที่ให้ความร้อนของ มอร์ต้า A

จากผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าที่ผ่านความร้อนโดยมีแบบผสมเถ้าแกลบและแบบไม่ได้ผสมเถ้าแกลบ ซึ่งได้จากการนำข้อมูล ตารางที่ 20 มาเรียบเรียงให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอุณหภูมิที่มอร์ต้าได้รับ ดังรูปที่ 22 ถึง 24 กำลังอัดของมอร์ต้ามีปริมาณลดลงตามความร้อนที่ได้รับยิ่งปริมาณอุณหภูมิความร้อนที่ได้รับสูงขึ้น กำลังอัดมอร์ต้ายังมีการสูญเสียมากขึ้น แต่หากความละเอียดของเถ้าแกลบที่ละเอียดขึ้นปริมาณกำลังอัดที่สูญเสียจากความร้อนนั้นจะมีปริมาณลดลง มอร์ต้าเมื่อได้รับความร้อนนั้น ความร้อนที่ได้รับจะส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลของมอร์ต้าเนื่องจากความร้อนทำให้เกิดการคายน้ำแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (C-S-H) ทำให้เกิดการหดตัว และ รอยแตกร้าว และยังเกิดการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบทางเคมีและ เฟสของมอร์ต้า

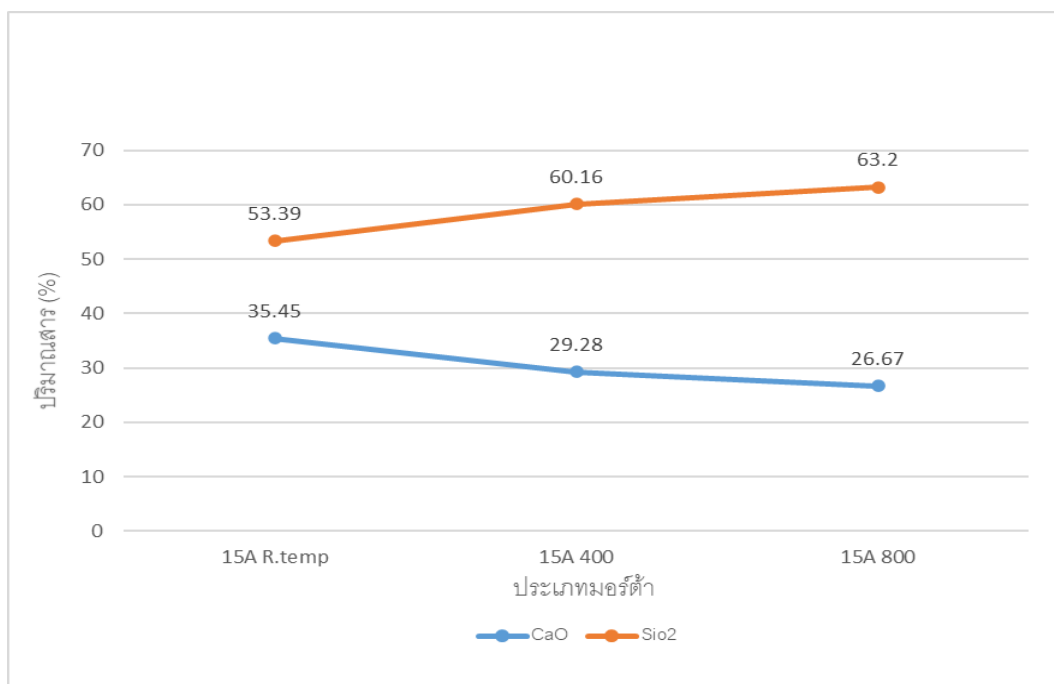
มอร์ต้าที่ได้รับอุณหภูมิความร้อนที่ 400°C กำลังอัดมอร์ต้าแบบที่ผสมเถ้าแกลบจะมีปริมาณมากกว่ากำลังอัดของมอร์ต้าแบบไม่ผสมโดยจะมีค่ามากขึ้นอีกหากเถ้าแกลบมีความละเอียดขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จาก รูปที่ 22 และ รูปที่ 24 ซึ่งปริมาณเถ้าที่เพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังอัดลดลงจากที่กล่าวมาข้างต้นแต่ที่ 400°C มอร์ต้าที่ผสมเถ้าแกลบทุกปริมาณ มีความเค้นมากกว่า มอร์ต้าแบบไม่ผสมเถ้าแกลบ และมีค่ากำลังอัดมากที่สุดเมื่อผสมเถ้าแกลบที่ปริมาณ 5 % มีค่า 52.71 MPa

มอร์ต้าที่ได้รับอุณหภูมิความร้อนที่  $800^{\circ}\text{C}$  กำลังอัดของมอร์ต้ามีค่าลดลงอย่างมาก เมื่อเทียบกับ มอร์ต้าที่ได้รับอุณหภูมิความร้อนที่  $400^{\circ}\text{C}$  โดยกำลังอัดของมอร์ต้าทั้งแบบผสมเถ้าแกลบและไม่ผสมเถ้าแกลบ นั้น มีค่าความเค้นไม่แตกต่างกันมาก และ ความละเอียดของเถ้าแกลบไม่ได้ส่งผลต่อกำลังอัดของมอร์ต้า ที่ได้รับอุณหภูมิความร้อนที่  $800^{\circ}\text{C}$  มากนัก หากเทียบกับแบบมอร์ต้าที่ได้ได้ผสมเถ้าแกลบ แต่มอร์ต้าที่ได้รับอุณหภูมิความร้อนที่  $800^{\circ}\text{C}$  ที่ผสมเถ้าแกลบปริมาณมากกว่าจะมีการสูญเสียกำลังอัดจากความร้อนน้อยกว่า โดยกำลังของมอร์ต้าที่ผสมเถ้าแกลบ 15% นั้นมีค่าใกล้เคียงกับมอร์ต้าไม่ผสมเถ้าแกลบที่สุด โดยประมาณ 19 MPa

#### 4.2.4.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ $\text{SiO}_2$ กับ $\text{CaO}$



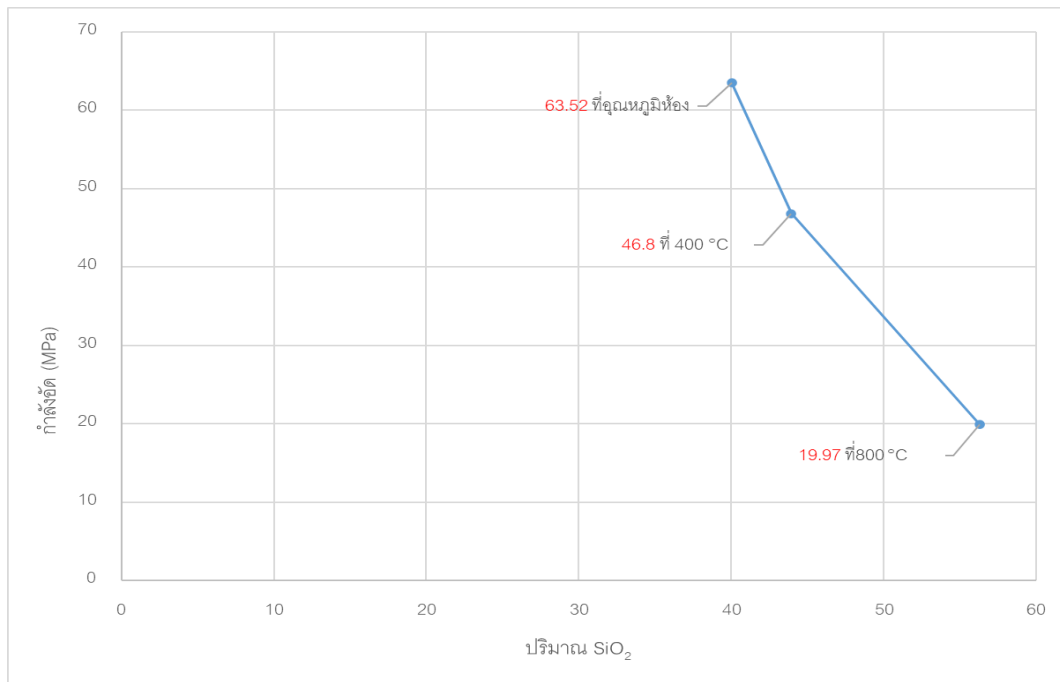
รูปที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\text{SiO}_2$  กับ  $\text{CaO}$  ของมอร์ต้าไม่ผสมเถ้าแกลบ



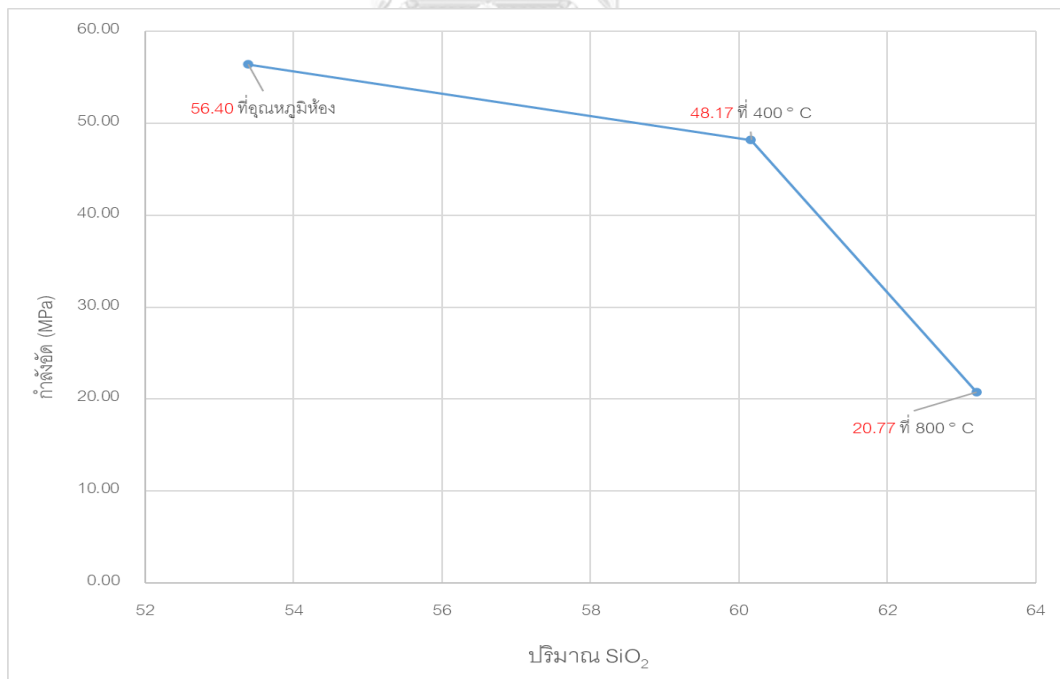
รูปที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่าง SiO<sub>2</sub> กับ CaO ของมอร์ต้าผสมเถ้าแกลบ 15 %

จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ SiO<sub>2</sub> กับ CaO ของมอร์ต้า ดังรูปที่ 25 ถึง 26 มอร์ต้าผสมเถ้าแกลบนั้นจะมี ปริมาณ SiO<sub>2</sub> มากกว่า มอร์ต้าแบบไม่ผสมเถ้าแกลบ ซึ่งเป็นผลจากการเติมเถ้าแกลบสำหรับทดแทนซีเมนต์นั่นเอง และ ปริมาณ CaO ของมอร์ต้าที่ผสมเถ้าแกลบนั้น จะมีค่าน้อยกว่า มอร์ต้าที่ไม่ผสมเถ้าแกลบ ณ ที่อุณหภูมิห้อง แต่เมื่อมอร์ต้าได้รับความร้อนที่ตั้งแต่ อุณหภูมิห้อง จนถึง 800 °C ปริมาณ SiO<sub>2</sub> จะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งตรงข้ามกับปริมาณ CaO ที่มีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น โดย ช่วงอุณหภูมิห้อง จนถึง 400 °C ปริมาณ SiO<sub>2</sub> และ CaO ของมอร์ต้าผสมเถ้าแกลบจะมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่ามอร์ต้าที่ไม่ผสมเถ้าแกลบ แต่ ช่วงอุณหภูมิที่มากกว่า 400 °C จนถึง 800 °C ปริมาณ SiO<sub>2</sub> และ CaO ของมอร์ต้าผสมเถ้าแกลบจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่ามอร์ต้าที่ไม่ผสมเถ้าแกลบ

#### 4.2.4.4 ผลการวิเคราะห์ความต้านทานแรงอัด กับ $\text{SiO}_2$



รูปที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณ  $\text{SiO}_2$  ของมอร์ต้าไม่ผสมเถ้าแกลบ

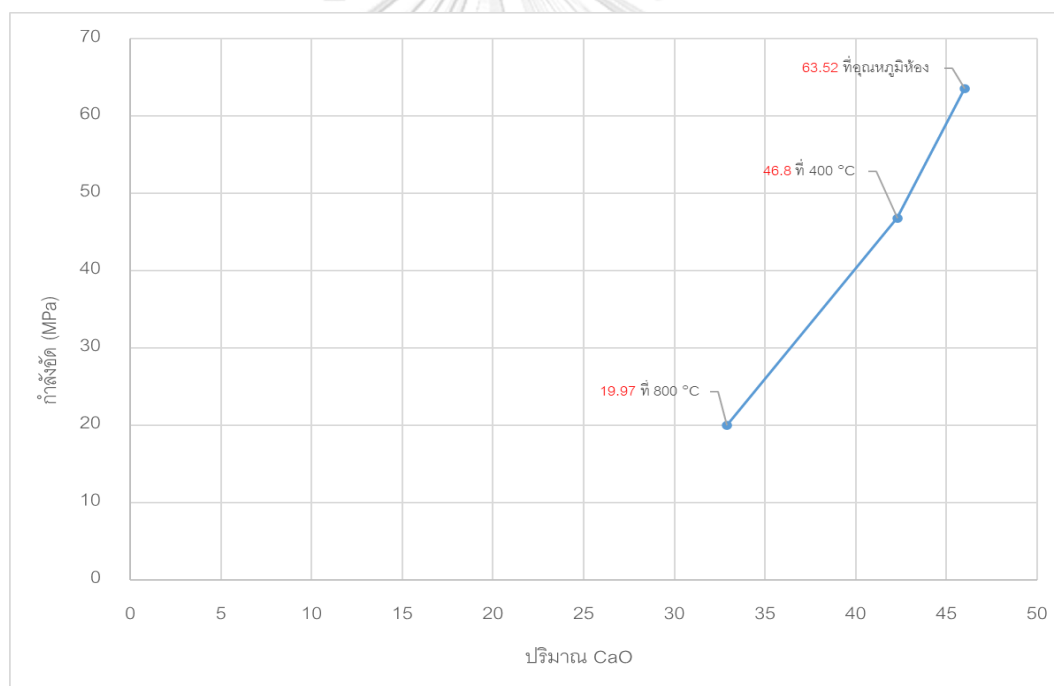


รูปที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณ  $\text{SiO}_2$  ของมอร์ต้าผสมเถ้าแกลบ 15 %

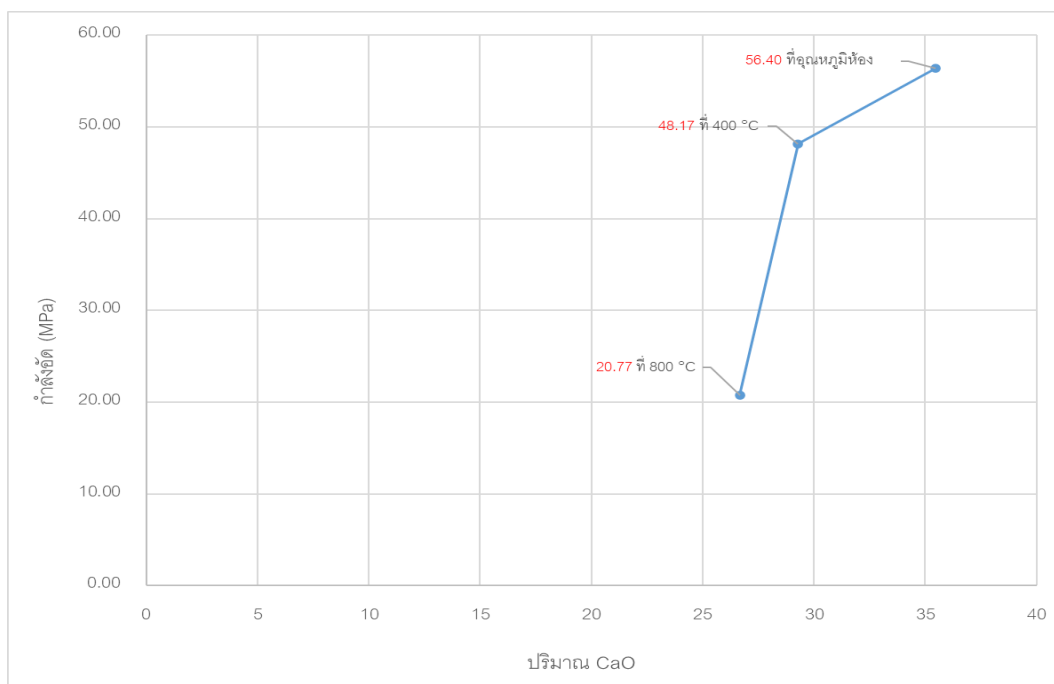


จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและปริมาณ  $\text{SiO}_2$  ของมอร์ต้า ดังรูปที่ 27 ถึง 28 จะเห็นได้ว่ามอร์ต้าที่ผสมเถ้าแกลบนั้นจะมีปริมาณ  $\text{SiO}_2$  มากกว่า มอร์ต้าที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบ เนื่องจากผลของการเติมเถ้าแกลบ ที่มีสารประกอบหลักเป็น  $\text{SiO}_2$  ซึ่งปริมาณ  $\text{SiO}_2$  มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณความร้อนที่มอร์ต้าได้รับมีปริมาณสูงขึ้น เป็นผลทำให้มอร์ต้าสูญเสียกำลังอัดจากความร้อนที่ได้รับมากขึ้น ซึ่งก็คือ เมื่อกำลังอัดลดลงจากการได้รับความร้อน ปริมาณ  $\text{SiO}_2$  จะเพิ่มขึ้น ช่วงอุณหภูมิห้อง จนถึง  $400^\circ\text{C}$  นั้น ปริมาณ  $\text{SiO}_2$  ของมอร์ต้าผสมเถ้าแกลบนั้นจะมีมากกว่ามอร์ต้าที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบ แต่เมื่อถึง ช่วงอุณหภูมิที่มากกว่า  $400^\circ\text{C}$  จนถึง  $800^\circ\text{C}$  ปริมาณ  $\text{SiO}_2$  ของมอร์ต้าผสมเถ้าแกลบจะน้อยกว่ามอร์ต้าที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบ

#### 4.2.4.5 ผลการวิเคราะห์ กำลังอัด กับ CaO



รูปที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณ CaO ของมอร์ต้าไม่ผสมเถ้าแกลบ



รูปที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณ CaO ของ มอร์ต้าผสมเถ้าแกลบ 15 %

จากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณ CaO ของมอร์ต้า ดังรูปที่ 29 ถึง 30 มอร์ต้าที่ผสมเถ้าแกลบนั้นจะมีปริมาณ CaO น้อยกว่า มอร์ต้าที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบ และ เมื่อมอร์ต้าได้รับความร้อนช่วงอุณหภูมิห้อง จนถึง 800 °C เมื่อได้รับอุณหภูมิที่สูงขึ้น จะมีปริมาณ CaO เพิ่มขึ้น และ อย่างที่กล่าวมาข้างต้น เมื่อมอร์ต้าได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นปริมาณการสูญเสียของกำลังอัดจะมากขึ้นด้วย ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณ กำลังอัดลดลงจากการได้รับความร้อน ปริมาณ CaO จะมีปริมาณลดลง แต่ ในช่วงอุณหภูมิห้อง จนถึง 400 °C ปริมาณ CaO ของมอร์ต้าผสมเถ้าแกลบนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่ามอร์ต้าที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบ แต่เมื่อถึง ช่วงอุณหภูมิที่มากกว่า 400 °C จนถึง 800 °C ปริมาณ CaO ของมอร์ต้าผสมเถ้าแกลบจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่ามอร์ต้าที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบ

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 ซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบเมื่อไม่ผ่านความร้อน

จากผลการทดสอบกำลังอัดแรงอัดของมอร์ต้าที่อายุการบ่ม 28 วัน มอร์ต้าที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบ มีค่า 63.52 MPa และ มอร์ต้าที่ผสมเถ้าแกลบที่มีผลดีที่สุด คือ มอร์ต้าที่ผสมเถ้าแกลบที่ผ่านตระแกรงเบอร์ 270 ซึ่งมีความละเอียดมากที่สุดของงานวิจัยนี้ โดยผสมปริมาณ 5 % ของน้ำหนักซีเมนต์ มีค่า 60.70 MPa โดยคิดเป็นร้อยละ 96 ของมอร์ต้าที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบ ซึ่งกำลังอัดจะลดลงเมื่อปริมาณเถ้าแกลบที่เพิ่มขึ้น และ ขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบที่เพิ่มขึ้น

มอร์ต้าที่ผสมเถ้าแกลบที่มีอายุการบ่มมากขึ้นจะทำให้ค่ากำลังอัดของมอร์ต้ามากขึ้นตามอายุการบ่ม ซึ่งกำลังอัดที่มากขึ้นนั้นเกิดจากการเติมเถ้าแกลบซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานและทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก โดยมอร์ต้าที่อายุการบ่ม 200 วัน สามารถมีกำลังอัดมากกว่ามอร์ต้าแบบไม่ผสมเถ้าแกลบ ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 134 ของมอร์ต้าแบบไม่ผสม

#### 5.2 ซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบเมื่อผ่านความร้อน

จากผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าที่อายุการบ่ม 28 วัน มอร์ต้าเมื่อผ่านความร้อนที่อุณหภูมิสูง เมื่อมอร์ต้าได้รับความร้อนจะทำให้กำลังอัดมีค่าลดลงตามปริมาณความร้อนที่ได้รับ ความร้อนยิ่งสูงกำลังอัดยิ่งมีการสูญเสียมากขึ้น ณ ที่อุณหภูมิ 400 °C กำลังอัดของมอร์ต้าที่ผสมเถ้าแกลบจะมีค่ามากกว่า มอร์ต้าที่ไม่ผสมเถ้าแกลบ นั่นคือ มอร์ต้าที่ผสมเถ้าแกลบที่ผ่านตระแกรงเบอร์ 270 ซึ่งมีความละเอียดมากที่สุดของงานวิจัยนี้ โดยผสมปริมาณ 5 % ของน้ำหนักซีเมนต์ ซึ่งเป็นค่าที่ดีที่สุด มีค่าเท่ากับ 52.71 MPa โดยคิดเป็นร้อยละ 83 ของมอร์ต้าที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบ และ มอร์ต้าที่ไม่ผสมเถ้าแกลบอยู่ที่ 46.80 MPa โดยคิดเป็นร้อยละ 74 ของมอร์ต้าที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบที่ อุณหภูมิห้อง

ณ ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นช่วงที่เกิดความสูญเสียกำลังอัดมากที่สุดของงานวิจัยนี้ โดยค่าความกำลังอัด ที่อุณหภูมิ 800 °C มอร์ต้าที่ผสมเถ้าแกลบ และ ไม่ผสมเถ้าแกลบจะมีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกัน ซึ่งมอร์ต้าที่มีค่าที่ดีที่สุด คือ มอร์ต้าที่ผสมเถ้าแกลบที่ผ่านตระแกรงเบอร์ 270 โดยผสมปริมาณ 15 % ของน้ำหนักซีเมนต์ มีค่าเท่ากับ 20.77 MPa โดยคิดเป็นร้อยละ 33 ของมอร์ต้าที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบที่อุณหภูมิห้อง และ มอร์ต้าที่ไม่ผสมเถ้าแกลบอยู่ที่ 19.77 MPa โดยคิดเป็นร้อยละ 30 ของมอร์ต้าที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบที่อุณหภูมิห้อง ส่วน มอร์ต้าที่ผ่านการบ่ม 60 วัน มีผลการทดสอบในลักษณะเดียวกันกับมอร์ต้าที่ผ่านการบ่ม 28 วัน

ความสูญเสียกำลังอัดโดยรวมของมอร์ต้าที่ผสมเถ้าแกลบจะมีการสูญเสียกำลังอัดน้อยกว่า มอร์ต้าที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบ และ ปริมาณเถ้าแกลบที่เพิ่มมากขึ้นและละเอียดขึ้นจะช่วยลดความสูญเสียกำลังอัดได้มากขึ้น ปฏิกริยาปอซโซลานิกในมอร์ต้าที่ผสมเถ้าแกลบช่วยลดปริมาณ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ได้สารประกอบ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งช่วยรักษาความแข็งแรงของมอร์ต้าได้ที่อุณหภูมิสูง

### 5.3 ข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนาในอนาคต

ซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นช้ากว่าซีเมนต์ปกติ และ เถ้าแกลบเป็นวัสดุเหลือใช้ที่ได้จากการเผาเถ้าแกลบข้าว ซึ่งในประเทศไทยนั้น มีปริมาณมาก แต่เถ้าแกลบมีปริมาณรุกรุ่นค่อนข้างมาก จึงทำให้ความแข็งแรงต่ำกว่าแบบไม่ผสม หากปรับปรุงแก้ไขข้อจำกัดเหล่านี้ได้น่าจะเป็นวัสดุก่อสร้างที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่งในอนาคต

ศึกษาสมบัติทางทางเคมีของ มอร์ต้า หรือ คอนกรีต เมื่อผ่านอุณหภูมิต่าง ๆ ในภาพแวดล้อมต่าง ๆ ซึ่งจะเป็นตัวช่วยในการพัฒนาและศึกษาทางด้านเทคโนโลยี คอนกรีตทนความร้อนได้อย่างดี โดยจากงานวิจัยได้ทำการทดสอบด้วยเครื่อง XRD ซึ่งถ้าต้องการเห็นผลอย่างชัดเจน ควรมีการบ่มมอร์ต้าที่ผสมเถ้าแกลบนานกว่า 28 วันเพื่อเห็นผลของปฏิกริยาปอซโซลานิกได้ชัดเจนขึ้น และ ควรตรวจ 3 ครั้งและควรมีฐานข้อมูลของสารประกอบนั้น ๆ อย่างครบถ้วน

## บรรณานุกรม

1. Jeareun, S., *The effect of humidity and environment to the flowability and compactability of metal powders*. 2006, chulalongkok University. p. 26 - 29.
2. Thomas, B.S., *Green concrete partially comprised of rice husk ash as a supplementary cementitious material – A comprehensive review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018. 82: p. 3913-3923.
3. The Concrete Product and Aggregate co., l., *Concrete technology*. 2000.
4. Mostafa, N.Y. and P.W. Brown, *Heat of hydration of high reactive pozzolans in blended cements: Isothermal conduction calorimetry*. *Thermochimica Acta*, 2005. 435(2): p. 162-167.
5. El-Dakrouy, A. and M.S. Gasser, *Rice husk ash (RHA) as cement admixture for immobilization of liquid radioactive waste at different temperatures*. *Journal of Nuclear Materials*, 2008. 381(3): p. 271-277.
6. Roisri, T., *The effect of heat on concrete strength*. *KKU Engineering*, 1995. 22.
7. Hager, I., *Behaviour of cement concrete at high temperature*. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*, 2013. 61.
8. Moghaddam, F., V. Sirivivatnanon, and K. Vessalas, *The effect of fly ash fineness on heat of hydration, microstructure, flow and compressive strength of blended cement pastes*. *Case Studies in Construction Materials*, 2019.
9. พิทยา สุขจินดา , ธนาคาร พรหมมณี , ณัทพงษ์ ชัยชีวิต, ปริมาณเถ้าแกลบดำที่เหมาะสมสำหรับงานคอนกรีตโครงสร้างทั่วไป, in *Bi.inno2016*. 2016: นครปฐม.
10. Umasabor, R.I. and J.O. Okovido, *Fire resistance evaluation of rice husk ash concrete*. *Heliyon*, 2018. 4(12): p. e01035.
11. Narmluk, M. and T. Nawa, *Effect of Curing Temperature on Pozzolanic Reaction of Fly Ash in Blended Cement Paste*. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 2014. 5: p. 31-35.
12. Baert., G., *Interaction between the Pozzolanic Reaction of Fly Ash and the Hydration of Cement*.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	กันตพงศ์ บุญทวี
วัน เดือน ปี เกิด	7 มกราคม 2537
สถานที่เกิด	จังหวัด กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมโลหการและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	21/31 ซอย รามคำแหง 76 แยก 3 หมู่บ้านปรีชาล้ำเพชร เขตบางกะปิ แขวงหัวหมาก กทม. 10240



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY