



ผลของการเติมเถ้าแกลบที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์
THE EFFECT OF RICE HUSK ASH ADDITION ON
COMPRESSIVE STRENGTH OF CEMENT MORTAR

ทณงศักดิ์ ยืนนัยธรรม

หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

2550

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

ผลของการเติมเถ้าแกลบที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์
THE EFFECT OF RICE HUSK ASH ADDITION ON
COMPRESSIVE STRENGTH OF CEMENT MORTAR

ทณงศักดิ์ ยินนัยธรรม

วิทยานิพนธ์นี้เสนอต่อมหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวงเพื่อเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

2550

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

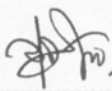
ผลของการเติมเส้นแกลบที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์

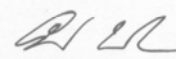
ทณงศักดิ์ ยินนัยธรรม

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์
2550

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..........ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดรุธิ วัฒนศิริเวช)

..........กรรมการ
(อาจารย์ ดร. สุธี วัฒนศิริเวช)

..........กรรมการ
(อาจารย์ ดร. อภินันท์ นันทิยา)

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาเวลาให้คำปรึกษา แนะนำแนวทาง และให้ความรู้ทางวิชาการอย่างยิ่ง จากอาจารย์ ดร. สุธี วัฒนศิริเวช ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ครุณี วัฒนศิริเวช ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะ แก้ไขต่างๆ เพื่อให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ สรรพพบ ศิริรัตนันตร์ อาจารย์ประจำภาควิชากรรมโยธา มหาวิทยาลัยรังสิต ที่ให้ความกรุณาเวลาให้คำปรึกษาและเอื้อเฟื้อสถานที่รวมถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดมอร์ต้า

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ สุจิตรา ศรีรอด ที่คอยผลักดันและให้กำลังใจในการศึกษา ทุกๆด้านตั้งแต่เริ่มจนถึงปัจจุบัน

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ทุกท่านและเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง ที่ให้ความช่วยเหลือในการวิเคราะห์และทดสอบตัวอย่าง จนกระทั่งงานวิจัยสำเร็จด้วยดี

นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ในสาขาวิศวกรรมศาสตร์และสาขา เทคโนโลยีอุตสาหกรรมเซรามิก ที่สนับสนุนจนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่สนับสนุน การศึกษาทุกๆด้านมาโดยตลอด ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ทณงศักดิ์ ยินนัยธรรม

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์ ผลของการเติมเถาเกลบที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์

ชื่อผู้เขียน นายทงศักดิ์ ยินัยธรรม

หลักสูตร วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาวัสดุศาสตร์)

คณะกรรมการที่ปรึกษา อาจารย์ ดร. สุธี วัฒนศิริเวช

ประธานกรรมการ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเติมเถาเกลบที่มีต่อค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ โดยใช้เถาเกลบจากโรงงานอิฐเผาในจังหวัดเชียงราย นำมาบดเพื่อลดขนาดอนุภาคให้แตกต่างกันโดยใช้เวลาในการบด 0.5 1 และ 1.5 ชั่วโมง จากการบดได้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยคือ 34 50 และ 78 ไมโครเมตร ตามลำดับ แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 0-40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและเพิ่มปริมาณครั้งละ 10 เปอร์เซ็นต์ แบ่งอายุสำหรับทดสอบออกเป็น 5 ช่วงเวลา คือ 1 7 14 28 และ 56 วัน ผลการทดสอบพบว่าปริมาณ(การแทนที่)เถาเกลบมีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์โดยที่อัตราส่วน 10-20 เปอร์เซ็นต์ ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงขึ้นตามลำดับและเมื่อเพิ่มปริมาณเป็น 30-40 เปอร์เซ็นต์ ค่ากำลังรับแรงอัดกลับลดต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ไม่มีการแทนที่ และการศึกษาผลของขนาดอนุภาคที่แตกต่างกันพบว่าเมื่อเถาเกลบมีขนาดอนุภาคลดลงจะส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงขึ้นโดยขนาดอนุภาค 34 ไมโครเมตร ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ที่ไม่มีการแทนที่ (ยกเว้นที่อัตราส่วน 40 เปอร์เซ็นต์) ส่วนเถาเกลบที่มีขนาดอนุภาค 78 ไมโครเมตร ให้ค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าทุกอัตราส่วนในการแทนที่ และหลังการบ่ม 56 วัน ปริมาณการเติมเถาเกลบ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้เถาเกลบขนาดอนุภาค 34 ไมโครเมตร พบว่าให้ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์สูงสุดที่ 162.8 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากผลการศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่าการเพิ่มปริมาณของเถาเกลบที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์

มีผลทำให้ความสูงของพีคพอร์ตแลนด์ไดท์ ลดลงเนื่องจาก ปอร์ตแลนด์ไดท์ ทำปฏิกิริยากับ
เถ้ากลบได้ผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งส่งผลให้ค่ากำลังอัดของปูนซีเมนต์เพิ่มสูงขึ้น

คำสำคัญ : ซีเมนต์ / ซีเมนต์-มอร์ตาร์ / เถ้ากลบ / การเติมเถ้ากลบ / ขนาดอนุภาคเถ้ากลบ



Thesis Title The Effect of Rice Husk Ash Addition on Compressive Strength of Cement Mortar

Author Mr. Thanongsak Yinnaitam

Degree Master of Science (Materials Science)

Supervisor Committee Dr. Suthee Wattanasiriwech Chairperson

ABSTRACT

This research aimed to study the effect of rice husk ash (RHA) addition on compressive strength of cement mortar using RHA from brick factory in Chiang Rai. Grinding RHA in a pot mill for 0.5 h and 1.5 h resulted in reduction of particle size to 78, 50 and 34 μm , respectively. These RHA powders were added into ordinary portland cement (OPC) mortar in the ratio of 0-40 wt% with 10 wt% interval and cured for 1, 7, 14, 28 and 56 days after casting. It was found that adding RHA by 10-20 wt% increased compressive strength of the cement mortar while further increase RHA to 30-40 wt% resulted in decreased compressive strength comparing with ordinary cement mortar. Decreasing particle size of RHA tended to increase compressive strength value of the modified cement mortar. Using 34 μm RHA, compressive strength of modified cement mortar was higher than that of OPC at all composition except at 40 wt%. The maximum compressive strength value of 162.8 kg/cm^2 was obtained from cement mortar added with 20 wt% RHA having particle size of 34 μm and cured for 56 days. X-ray diffraction analysis showed that increasing RHA content resulted in decreasing of Portlandite. This was probably due to the reaction

between Portlandite and RHA to obtain calcium silicate hydrate which contributed to the increasing of compressive strength of supplementary cement mortar.

Keywords: Cement / Cement-Mortar / Rice Husk Ash / Rice Hush Ash Addition / Particle size of Rice Hush Ash



สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษา	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย/การศึกษาค้นคว้า	4
1.5 นิยามศัพท์ที่ใช้ในงานวิจัย	4
2 ทบทวนวรรณกรรม ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	5
2.2 กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์	7
2.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน	9
2.4 วัสดุพอลิโพรไพลีน	15
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3 วิธีดำเนินงานวิจัย	23
3.1 การเตรียมและวิเคราะห์ทดสอบวัตถุคิ	23
3.2 การเตรียมชิ้นทดสอบ	34
3.3 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของมอร์ต้า	36
3.4 การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบ	38
4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	40
4.1 ผลการศึกษาลักษณะเฉพาะของวัตถุคิตั้งต้น	40
4.2 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพ	52
4.3 ผลการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์แข็งตัว	59
4.4 อภิปรายผลการทดลอง	72
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	74
5.1 สรุปผลการทดลอง	74
5.2 ข้อเสนอแนะ	76
บรรณานุกรม	77
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก การหาอัตราส่วนผสมของน้ำต่อซีเมนต์และการเตรียมตัวอย่างมอร์ต้า	79
ภาคผนวก ข การศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	84
ภาคผนวก ค การคำนวณหาปริมาณของเพสที่แตกต่างกันในภาพโดยใช้โปรแกรม	88
Motic Images Plus 2.0 ML	
ประวัติผู้เขียน	93

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 แสดงองค์ประกอบออกไซด์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	6
2.2 แสดงสารประกอบหลักที่สำคัญของปูนซีเมนต์	6
2.3 แสดงตัวอย่างองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบอื่นๆ	16
3.1 รหัสย่อของขั้นตอนทดสอบ	35
4.1 แสดงน้ำหนักสูญหายหลังการเผาของเถ้าแกลบ	43
4.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ	44
4.3 แสดงขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบที่ผ่านการบด	44
4.4 ตารางแสดงค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้า	53
4.5 แสดงค่าความหนาแน่นของมอร์ต้าที่ใช้ในการทดสอบ	58
4.6 แสดงปริมาณเฟสของ unreacted hydrate cement และเถ้าแกลบ ที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาในซีเมนต์เพสต์	70

สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
2.1 แผนภาพแสดงกรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์	8
2.2 แสดงลักษณะจุลภาคของเอีททริงไจต์	11
2.3 แสดงลักษณะจุลภาคของโมโนซัลโฟลูมิเนต	11
2.4 แผนภาพแสดงการพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ที่อายุต่างๆ	13
3.1 แผนภาพแสดงการเตรียมและวิเคราะห์ถ้ำเกลือ	24
3.2 แสดงที่บรรจุตัวอย่างในการทดสอบหาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	25
3.3 แสดงการนำถ้ำเกลือตัวอย่างบรรจุลงในที่ใส่ตัวอย่างทดสอบ (Holder Ring)	26
3.4 แสดงการกดตัวอย่างที่บรรจุในที่ใส่ตัวอย่าง	26
3.5 กราฟแสดงการปลดตัวอย่างส่วนเกินออกจากที่ใส่ตัวอย่าง	27
3.6 แสดงขึ้นตัวอย่างที่ทำความสะอาดเรียบร้อยแล้ว	27
3.7 แสดงขึ้นตัวอย่างทดสอบหลักจากนำออกจากฐานรองรับพร้อมนำไปใช้ในการทดสอบ	28
3.8 เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึก PANalytical รุ่น X' Pert PRO MPD	28
3.9 แสดงถ้ำใส่ตัวอย่างสำหรับทดสอบการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน	29
3.10 เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน Mettler toledo รุ่น STAR 851°	29
3.11 แสดงชุดอัดตัวอย่างทดสอบสำหรับใช้วิเคราะห์หาค่าประกอบทางเคมี	30
3.12 การนำถ้ำเกลือตัวอย่างบรรจุลงในที่ใส่ตัวอย่างทดสอบ	31
3.13 การประกอบชุดที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง	31
3.14 นำชุดที่ใช้เตรียมตัวอย่างบรรจุเข้าในเครื่องเตรียมและทำการเตรียมโดยการกด	32
3.15 ตัวอย่างทดสอบสำหรับใช้วิเคราะห์หาค่าประกอบทางเคมีที่เตรียมเรียบร้อยแล้ว	32
3.16 เครื่องวิเคราะห์หาค่าประกอบทางเคมี Horiba รุ่น Mesa-500w	33
3.17 แสดงแบบหล่อขึ้นมอร์ต้าทดสอบ	35
3.18 เครื่องทดสอบแรงกด SHIMADZU รุ่น UH-100A	37

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพ	หน้า
3.19 แสดงขั้นตอนทดสอบซีเมนต์เพสต์สำหรับศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	39
4.1 กราฟแสดงลักษณะโครงสร้างของซิลิกาเป็นแบบอสัณฐาน	41
4.2 แสดงความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของแก้วเคลือบที่ใช้เป็นวัสดุฉนวน	42
4.3 กราฟแสดงแนวโน้มของขนาดอนุภาคแก้วเคลือบที่ผ่านการบด	45
4.4 กราฟแสดงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคแก้วเคลือบ	47
4.5 แสดงลักษณะจุลภาคของแก้วเคลือบที่ไม่ผ่านการบดที่กำลังขยาย 100 เท่า	48
4.6 แสดงลักษณะจุลภาคของแก้วเคลือบที่ผ่านการบด 1.5 ชั่วโมงที่กำลังขยาย 3,000 เท่า	48
4.7 กราฟแสดงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	49
4.8 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	50
4.9 แสดงลักษณะโดยทั่วไปของผงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า	51
4.10 กราฟค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าอายุ 1 วัน	54
4.11 กราฟค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าอายุ 7 วัน	54
4.12 กราฟค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าอายุ 14 วัน	55
4.13 กราฟค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าอายุ 28 วัน	55
4.14 กราฟค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าอายุ 56 วัน	56
4.15 กราฟค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าขนาดอนุภาคเฉลี่ย 78 ไมโครเมตร	56
4.16 กราฟค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าขนาดอนุภาคเฉลี่ย 50 ไมโครเมตร	57
4.17 กราฟค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าขนาดอนุภาคเฉลี่ย 38 ไมโครเมตร	57
4.18 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของมอร์ต้าที่ผสมแก้วเคลือบในอัตราส่วนต่างกัน	58
4.19 กราฟแสดงลักษณะโครงสร้างผลึกของซีเมนต์เพสต์แข็งตัวที่อายุ 7 วัน	59
4.20 กราฟแสดงลักษณะโครงสร้างผลึกของซีเมนต์เพสต์แข็งตัวที่อายุ 28 วัน	60

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพ	หน้า
4.21 กราฟแสดงลักษณะโครงสร้างผลึกของซีเมนต์เพสต์แข็งตัว ที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบ 20 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุ 7 และ 28 วัน	61
4.22 กราฟแสดงลักษณะโครงสร้างผลึกของซีเมนต์เพสต์แข็งตัว ที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบ 0-40 เปอร์เซ็นต์ อายุ 28 วัน	63
4.23 แสดงลักษณะจุลภาควิทยาของซีเมนต์เพสต์แข็งตัวที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบ อายุ 3 วัน กำลังขยาย 7,500 เท่า	65
4.24 แสดงลักษณะจุลภาควิทยาของซีเมนต์เพสต์แข็งตัวที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบ อายุ 7 วัน กำลังขยาย 7,500 เท่า	65
4.25 แสดงลักษณะจุลภาควิทยาของซีเมนต์เพสต์แข็งตัวที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบ 20 เปอร์เซ็นต์ อายุ 3 วัน กำลังขยาย 7,500 เท่า	66
4.26 แสดงลักษณะจุลภาควิทยาของซีเมนต์เพสต์แข็งตัวที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบ 20 เปอร์เซ็นต์ อายุ 7 วัน กำลังขยาย 7,500 เท่า	66
4.27 แสดงลักษณะจุลภาควิทยาของซีเมนต์เพสต์แข็งตัวที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบ อายุ 28 วัน กำลังขยาย 3,000 เท่า	67
4.28 แสดงลักษณะจุลภาควิทยาของซีเมนต์เพสต์แข็งตัวที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบ 20 เปอร์เซ็นต์ อายุ 28 วัน กำลังขยาย 3,000 เท่า	67
4.29 แสดงลักษณะจุลภาควิทยาของซีเมนต์เพสต์แข็งตัว	68
4.30 การวิเคราะห์ด้วยพลังงานกระจายบริเวณเฟสสีขาว	69
4.31 การวิเคราะห์ด้วยพลังงานกระจายบริเวณเฟสสีเทา	70
4.32 แสดงลักษณะจุลภาควิทยาของซีเมนต์เพสต์แข็งตัวที่มีการแทนที่ ด้วยเถ้าแกลบ 20 เปอร์เซ็นต์ อายุ 7 วัน	71
4.33 แสดงลักษณะจุลภาควิทยาของซีเมนต์เพสต์แข็งตัวที่มีการแทนที่ ด้วยเถ้าแกลบ 20 เปอร์เซ็นต์ อายุ 14 วัน	71
4.34 แสดงลักษณะจุลภาควิทยาของซีเมนต์เพสต์แข็งตัวที่มีการแทนที่ ด้วยเถ้าแกลบ 20 เปอร์เซ็นต์ อายุ 28 วัน	72

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยได้มีนโยบายในการรณรงค์เพื่อการประหยัดพลังงานในทุกๆ ด้าน เนื่องจากแหล่งพลังงานของโลกเริ่มมีแนวโน้มที่จะขาดแคลนในอนาคต มนุษย์ใช้พลังงานไฟฟ้ามากที่สุดในชีวิตประจำวันหรือในภาคอุตสาหกรรมก็ใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นหลักในการขับเคลื่อนอุตสาหกรรมเช่นเดียวกัน อุตสาหกรรมภายในประเทศมีอยู่มากมายหลายชนิดซึ่งทุกชนิดต้องใช้ไฟฟ้าด้วยกันทั้งสิ้น ปูนซีเมนต์จัดเป็นวัสดุหลักสำคัญชนิดหนึ่งต่อการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานของประเทศ ในปีพ.ศ.2547 ประเทศไทยมีการผลิตปูนซีเมนต์โดยประมาณถึง 54.8 ล้านตัน และใช้สำหรับก่อสร้างภายในประเทศมากกว่า 28.6 ล้านตัน (สำนักงานวิจัยธุรกิจ บมจ.ธนาคารกรุงไทย, 2547) ความต้องการใช้ปูนซีเมนต์ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นส่งผลกระทบกับการใช้พลังงานไฟฟ้าของประเทศการผลิตปูนซีเมนต์ใช้พลังงานไฟฟ้าในปริมาณค่อนข้างสูง เพราะในขั้นตอนของการผลิตต้องใช้อุณหภูมิสูงประมาณ 1,400-1,500 องศาเซลเซียส (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2539) ฉะนั้นถ้าสามารถลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ลงได้ก็จะสามารถลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าลงด้วยเช่นเดียวกัน ส่งผลดีในการประหยัดไฟฟ้าและทรัพยากรในการผลิตไฟฟ้าที่มีโอกาสขาดแคลนในอนาคต(บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน), 2548)

ปูนซีเมนต์ในอุตสาหกรรมก่อสร้างเป็นส่วนผสมหลักที่ใช้ในการทำคอนกรีต (Concrete) หรือ การทำซีเมนต์มอร์ต้า (Mortar cement) ปูนซีเมนต์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานก่อสร้างคือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2539) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยทั่วไปมีสารประกอบออกไซด์หลักๆอยู่ 2 ประเภท คือแคลเซียมออกไซด์และซิลิกอนไดออกไซด์จากสารประกอบหลักที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์มีนักวิจัยหลายกลุ่มได้มีความพยายามที่จะพัฒนาการใช้ปูนซีเมนต์ให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยการศึกษาวิจัยเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆของซีเมนต์ให้ดีขึ้นและสามารถลดปริมาณการใช้และการผลิตให้ต่ำกว่าในปัจจุบัน

การเติมซิลิกาลงในปูนซีเมนต์เป็นวิธีการที่นิยมใช้ปรับปรุงคุณสมบัติ เช่น เพิ่มค่ากำลังของคอนกรีต เพิ่มระยะเวลาในการก่อตัวลดปริมาณการแตกร้าวที่ผิว เป็นต้น ซึ่งนอกจากจะช่วยให้ได้คอนกรีต(ซีเมนต์) มีคุณสมบัติใกล้เคียงหรือดีขึ้นอีกด้วย ซิลิกาที่ใช้เติมลงไปในส่วนผสมนั้นมีอยู่มากมายหลายชนิดเช่น ซิลิกาที่ได้จากเถ้าแกลบข้าว (rice husk ash) ดินไดอะตอม (diatomaceous earth) เถ้าลอย (fly ash) ซิลิกาฟุ้ง (Silica fume) เป็นต้น (Malhotra and Kumar, 1996)

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีการผลิตและบริโภคข้าวเป็นหลัก ข้าวเมื่อผ่านการสีเพื่อเอาเมล็ดจะเหลือแกลบข้าว (rice husk) ถึงประมาณ 1 ใน 4 ของน้ำหนักข้าว ในอดีตที่ผ่านมา ยังไม่มีการนำมาใช้ประโยชน์อย่างจริงจังมากนักและแกลบข้าวมักจะเป็นปัญหาในการกำจัด แต่ปัจจุบันได้มีการพัฒนากระบวนการนำแกลบข้าวไปใช้ประโยชน์ในหลายรูปแบบ เช่น การเผาไหม้เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมด้านเซรามิกหรือเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าพลังแกลบ (การไฟฟ้าฝ่ายผลิต, 2546) เป็นต้น คณะรัฐมนตรีสมัยนายอานันท์ ปันยารชุน เป็นนายกรัฐมนตรีได้เห็นชอบ การออกระเบียบการรับซื้อไฟฟ้าจากผู้ผลิตรายเล็ก หรือ SPP ที่ผลิตไฟฟ้าโดยใช้กากหรือเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและอื่นๆเป็นเชื้อเพลิง ในการผลิตไฟฟ้า และไอน้ำร่วมกัน (Cogeneration) อันเป็นการใช้พลังงานนอกแบบ และดันกำเนิดพลังงานพลอยได้ในประเทศให้เกิดประโยชน์มากยิ่งขึ้น อีกทั้งเป็นการช่วยแบ่งเบาภาระ ทางด้านการลงทุนของรัฐ ในระบบการผลิตและระบบจำหน่ายไฟฟ้าซึ่งคณะกรรมการประเมิน และคัดเลือกข้อเสนอการรับซื้อไฟฟ้าจากผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชนในปี พ.ศ.2546 ได้คัดเลือกโครงการจำนวน 14 โครงการ รวมกำลังการผลิตทั้งสิ้น 194 เมกะวัตต์ ซึ่งโครงการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กนี้มีจำนวนถึง 5 ราย จาก 14 รายที่ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง(สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2546) ดังนั้นถ้ามีการใช้พลังงานนอกแบบมากขึ้น ก็จะทำให้เกิดเถ้าที่เป็นขยะเหลือทิ้งหลังจากการนำไปเผาไหม้เพื่อให้ได้พลังงานเป็นปริมาณมาก และต้องมีการวางแผนจัดการกับเถ้าแกลบที่เกิดขึ้นนี้อย่างเหมาะสม (กองทุนส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน, 2546)

เถ้าแกลบที่ได้จากการเผาไหม้มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกา ซึ่งถ้ามีการควบคุมอุณหภูมิ และระยะเวลาในการเผาจะสามารถควบคุมให้เกิดซิลิกาในรูปแบบของผลึกหรือแบบอสัณฐานได้ ซึ่งจากเงื่อนไขที่ใช้ในการเผาเถ้าแกลบนั้นทำให้มีปริมาณซิลิกาในองค์ประกอบสูงถึง 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Malhotra and Kumar, 1996) ซิลิกาแบบอสัณฐานนั้นเป็นที่สนใจในการใช้เป็นวัตถุดิบหรือส่วนผสมเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ประเภทปูนซีเมนต์เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูงทำให้มีความไวต่อการทำปฏิกิริยา ดังนั้นจึงมีการนำเถ้าแกลบมาแทนที่ในส่วนผสมปูนซีเมนต์เพื่อศึกษาคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากมีการใช้ซิลิกาเข้ามาทดแทน และจากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

โดยผู้วิจัยพบว่าถ้าได้จากโรงงานอิฐเผาที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำกว่าถ้าได้จากโรงงานไฟฟ้าพลังกลบ ซึ่งปริมาณของคาร์บอนที่อยู่ในถ้ามีปริมาณมากจะทำให้คอนกรีตมีการหดตัวเพิ่มขึ้น (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2539) (Malhotra and Kumar, 1996)

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกถ้าจากโรงงานอิฐเผาเพื่อใช้เป็นส่วนผสมของมอร์ต้าสำหรับลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์โดยมุ่งเน้นในการศึกษาและวิเคราะห์ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลเชื่อมโยงกับการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของมอร์ต้าที่มีการแทนที่ด้วยถ้าจากโรงงานอิฐเผาเพื่อเป็นข้อมูลที่จะนำไปสู่การอธิบายถึงที่มาของการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของมอร์ต้าและสามารถที่จะนำถ้าที่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดเพื่อลดปริมาณขยะภายในประเทศ และลดต้นทุนการใช้ปูนซีเมนต์ในงานก่อสร้างขนาดเล็ก ตลอดจนการพัฒนาคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ให้ดียิ่งขึ้นต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อให้ทราบปริมาณที่เหมาะสมของการเติมถ้าเพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์
- 1.2.2 ศึกษาผลของขนาดอนุภาคของถ้าที่มีต่อค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้า
- 1.2.3 ศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของซีเมนต์เพสต์แข็งตัวเพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลของมอร์ต้าที่เติมถ้า

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษา

- 1.3.1 ได้พัฒนาซีเมนต์ปรับปรุงใหม่ที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าหรือเทียบเท่ากับซีเมนต์แบบเดิม
- 1.3.2 สามารถลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์และลดปริมาณขยะเหลือใช้ทางการเกษตรในประเทศ

1.4 ขอบเขตของการวิจัย/การศึกษาค้นคว้า

1.4.1 ศึกษาลักษณะเฉพาะของเถ้าแกลบที่ใช้เป็นส่วนผสมในซีเมนต์ เพื่อให้ทราบถึงองค์ประกอบและปริมาณของส่วนประกอบต่างๆในเถ้าแกลบ

1.4.2 นำเถ้าแกลบที่ได้จากโรงงานอิฐเผา (โรงงานอิฐเผาในอำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย) มาใช้เป็นส่วนผสมในมอร์ต้าด้วยอัตราส่วนที่แตกต่างกัน โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบที่ 10 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก แล้วเพิ่มขึ้นครั้งละ 10 เปอร์เซนต์ ไปจนถึง 40 เปอร์เซนต์ จากนั้นทำการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าที่มีอัตราส่วนของเถ้าแกลบต่างกัน

1.4.3 ศึกษาผลของขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบต่อค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้า

1.4.4 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ที่อายุต่างๆเพื่ออธิบายถึงค่ากำลังรับแรงอัดที่มีการเปลี่ยนแปลง

1.5 นิยามศัพท์ที่ใช้ในงานวิจัย

คอนกรีต หมายถึง ของผสมระหว่างปูนซีเมนต์ ก้อนกรวด (หิน) ทราย และน้ำ (ลักษณะเป็นของแข็ง)

ซีเมนต์มอร์ต้าสดหรือมอร์ต้าสด หมายถึง ของผสมระหว่างปูนซีเมนต์ทราย และน้ำ (ลักษณะเป็นของเหลว)

ซีเมนต์มอร์ต้าหรือมอร์ต้า หมายถึง ของผสมระหว่างปูนซีเมนต์ทราย และน้ำ (ลักษณะเป็นของแข็ง)

ซีเมนต์เพสต์ หมายถึง ของผสมระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำ (ลักษณะเป็นของเหลว)

ซีเมนต์เพสต์แข็งตัว หมายถึง ของผสมระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำ (ลักษณะเป็นของแข็ง)

กำลังรับแรงอัด หมายถึง ค่าความสามารถในการรับแรงกดหรือแรงอัดของมอร์ต้า

บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หมายถึง วัสดุที่มีสมบัติยึดเกาะส่วนต่างๆหรืออนุภาคที่เป็นของแข็งให้รวมตัวกันได้เมื่อผสมกับน้ำ ได้มีการคิดค้นจนประสบความสำเร็จที่เมืองปอร์ตแลนด์ ประเทศอังกฤษ จึงเรียกวัดนี้ว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2539) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาตรฐานทั่วไปในประเทศไทยแบ่งออกเป็นหลายประเภทโดยประเภทที่มีการผลิตและใช้งานกันอย่างแพร่หลายมากที่สุดคือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดานั้นเป็นปูนซีเมนต์ที่มีการผลิตมากที่สุด เหมาะสำหรับงานคอนกรีตทั่วไปที่ไม่อยู่ในภาวะอากาศที่รุนแรง เช่นในที่ที่มีอุณหภูมิสูงต่ำแตกต่างกันอย่างมากหรือในที่ที่มีผลกระทบจากซัลเฟตเป็นพิเศษ โดยทั่วไปใช้งานในลักษณะของการก่อสร้างเป็นจำนวนมาก ในที่จะขอกกล่าวถึงเฉพาะปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาเท่านั้น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีสารประกอบประเภทออกไซด์และสารประกอบหลักโดยประมาณดังรายละเอียดในตารางที่ 2.1 และ 2.2

ตารางที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบออกไซด์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ञच्चवाल्य ढरुधनुतुर, 2539)

องค์ประกอบทางเคมี		ร้อยละโดยน้ำหนัก
Calcium Oxide	CaO	63 - 65
Silicon Dioxide	SiO ₂	20 - 22
Aluminum Oxide	Al ₂ O ₃	5.1 - 6.0
Ferric Oxide	Fe ₂ O ₃	3.0 - 3.2
Sulfur Trioxide	SO ₃	2.0 - 1.6
Magnesium Oxide	MgO	1.4 - 1.5
Total Alkaline	NaOH+KOH	0.82 - 1.00
Loss on Ignition		0.6 - 2.0
Free Lime	Ca(OH) ₂	0.5 - 1.0
Insoluble residue		0.1 - 0.5

ตารางที่ 2.2 แสดงสารประกอบหลักที่สำคัญของปูนซีเมนต์ (ञच्चवाल्य ढरुधनुतुर, 2539)

สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์		ร้อยละโดยน้ำหนัก
Dicalcium Silicate	2CaO.SiO ₂ : (C ₂ S)	16.6 - 27.0
Tricalcium Silicate	3CaO.SiO ₂ : (C ₃ S)	45.0 - 54.1
Tricalcium Aluminate	3CaO.Al ₂ O ₃ : (C ₃ A)	10.8 - 11.0
Tetracalcium Aluminoferrit	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃ : (C ₄ AF)	8.0 - 9.1
Calcium Sulphate	CaSO ₄	3.1

2.2 กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์

การผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องใช้วัสดุที่มีส่วนผสมสำคัญหลายชนิด เช่น หินปูน ดินสองฟอง แร่เหล็ก ศิลาแลง ซิลิกาและอลูมินาในรูปแบบของดินเหนียวหรือดินดาน เป็นต้น

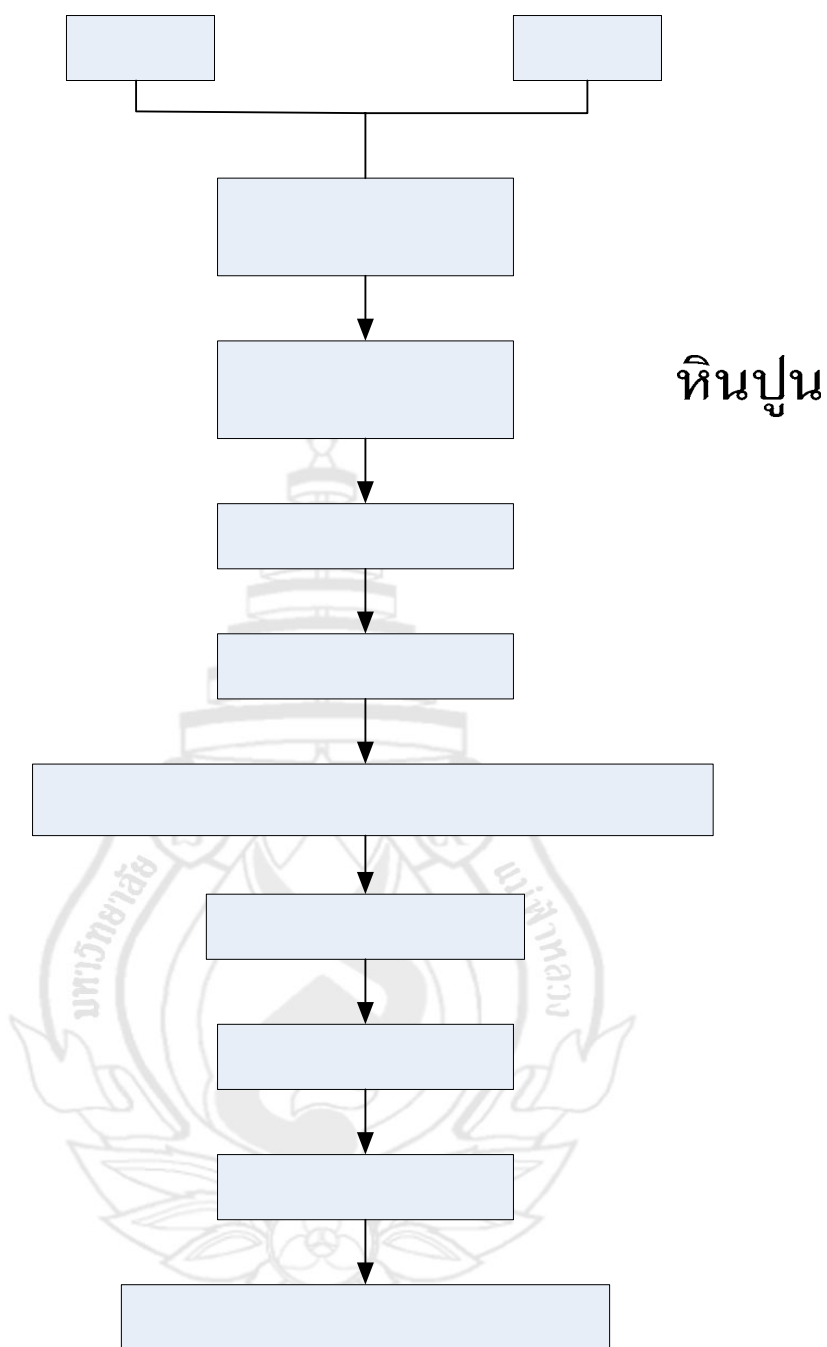
การผลิตปูนซีเมนต์ในประเทศไทยมีกรรมวิธีการผลิตจำแนกออกตามลักษณะของ วัตถุดิบที่นำมาใช้ได้เป็น 2 วิธีด้วยกันคือ

1. กรรมวิธีการผลิตแบบเปียก (Wet Process)
2. กรรมวิธีการผลิตแบบแห้ง (Dry Process)

กรรมวิธีการผลิตแบบเปียก วัตถุดิบที่ใช้ได้แก่ ดินสองฟองและดินเหนียว ถูกนำมา ผสมรวมกันให้ได้สัดส่วนที่พอเหมาะตามต้องการ โดยเติมน้ำลงไปช่วยผสมแล้วนำไปบดให้ละเอียด ก่อนที่จะป้อนเข้าไปในหม้อเผา (Kiln) ส่วนกรรมวิธีการผลิตแบบแห้งนั้นวัตถุดิบส่วนใหญ่ที่ใช้ ได้แก่ หินปูนและหินดินดาน จะถูกนำมาผสมกันในสภาพแห้ง ให้ได้สัดส่วนที่ต้องการ แล้วบดให้ ละเอียดก่อนที่จะป้อนเข้าไปในหม้อเผา (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2539)

เมื่อส่วนผสมของวัตถุดิบได้ตามต้องการก็จะป้อนเข้าสู่หม้อเผา ซึ่งส่วนใหญ่จะ เป็นหม้อแบบหมุน (Rotary Kiln) อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาประมาณ 1,400-1,500 องศาเซลเซียส ณ อุณหภูมิในช่วงดังกล่าววัตถุดิบต่างจะถูกหลอมรวมกันเกิดเป็น เม็ดปูนหรือ ตะกรันเม็ด (Clinker) ของปูนซีเมนต์และทิ้งไว้ให้เย็นตัวลง จากนั้นนำเม็ดปูนที่เย็นตัวแล้วไปทำการบดอีกครั้งโดยมี การเติมน้ำลงไปเล็กน้อย ประมาณ 3-6 เปอร์เซ็นต์ เพื่อหน่วงการแข็งตัวของปูนซีเมนต์

สำหรับการผลิตปูนซีเมนต์ในประเทศไทยในปัจจุบันนิยมผลิตโดยการผลิตแบบแห้ง ซึ่งเป็นวิธีที่ทันสมัยมีขั้นตอนการผลิตดังแสดงในภาพที่ 2.1 ซึ่งไม่ยุ่งยากและสามารถผลิตได้ ในปริมาณมาก (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2539)



ภาพที่ 2.1 แผนภาพแสดงกรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์ (จ้ชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2539)

2.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration)

เมื่อผสมปูนซีเมนต์กับน้ำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์กับน้ำจะเริ่มขึ้นเรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ซึ่งขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาอธิบายได้ดังนี้ (Sidney, Francis and David, 2003)

2.3.1 การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกต แบ่งออกเป็น 2 ส่วนที่มีความคล้ายคลึงกัน คือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$: (C_2S) และไดแคลเซียมซิลิเกต $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$: (C_3S) ที่อยู่ในผงปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำ (H_2O : H) ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2 : CH) บางครั้งถูกเรียกว่า Portlandite ซึ่งเป็นสารประกอบที่ไม่ได้ช่วยค้ำกำลังอัดในปูนซีเมนต์และบางครั้งทำให้ค่ากำลังอัดลดลงอีกด้วย สามารถแสดงปฏิกิริยาไฮเดรชันของการเกิดสารประกอบ ดังแสดงในสมการที่ 2.1 และ 2.2



Tricalcium water
Silicate
C-S-H
Calcium
Hydroxide

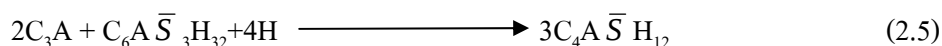
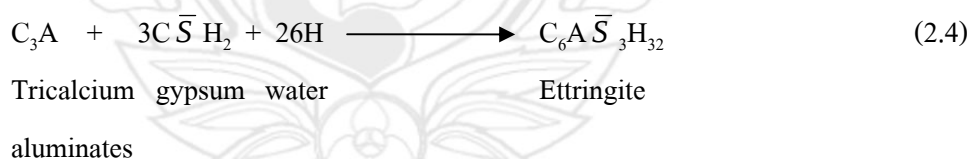


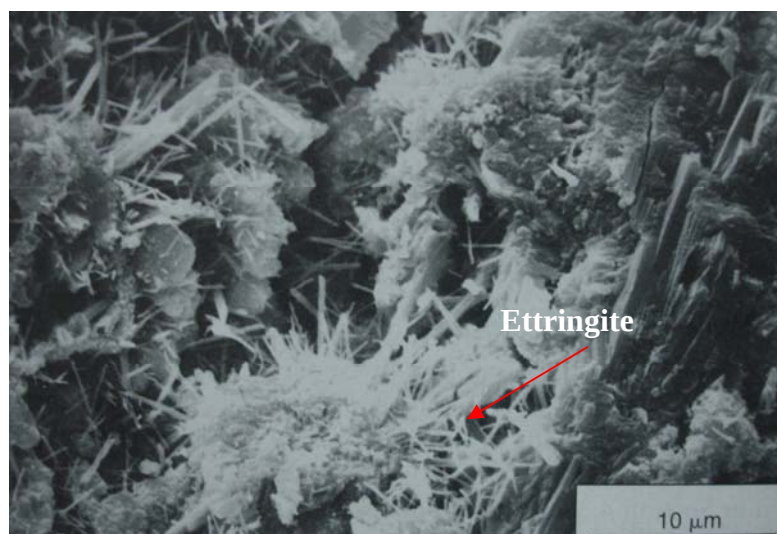
Dicalcium water
Silicate
C-S-H
Calcium
Hydroxide

การเกิดขึ้นของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ (C-S-H) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) ขึ้นอยู่กับ อายุ อุณหภูมิ และอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงเริ่มต้นเมื่อ C_3S ผสมกับน้ำ ไอออนของแคลเซียมและไฮดรอกไซด์จะเกิดการแตกตัวขึ้นอย่างรวดเร็ว ปฏิกิริยาจะเกิดมากในระยะแรกและจะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากไอออนของแคลเซียมและไฮดรอกไซด์แตกตัวเพิ่มขึ้น ทำให้สารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้นด้วย เมื่อไอออนในสารละลายมีความเข้มข้นมากพอ จะเกิดการตกผลึกของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ นอกจากนั้นในเวลาเดียวกันนี้ C_3S จะเริ่มทำปฏิกิริยากับน้ำอีกครั้งโดย

บริเวณผิวของ C_3S เกิดเป็น $C-S-H$ ล้อมรอบเม็ดปูน เมื่อเวลานานขึ้นชั้นของ $C-S-H$ จะหนาแน่นขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ยากขึ้น แต่ยังคงเกิดขึ้นต่อไปอย่างช้าๆ ในส่วนของ C_2S จะเกิดปฏิกิริยาคล้ายคลึงกับ C_3S แต่จะเกิดช้ากว่า เนื่องจาก C_2S มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์น้อยกว่า C_3S

2.3.2 การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) เมื่อสารประกอบไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) ทำปฏิกิริยากับน้ำจะได้แคลเซียมอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (CAH) ดังแสดงในสมการที่ 2.3 ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงต้องมีการเติมยิปซัมเพื่อหน่วงปฏิกิริยา เพราะไอออนของซัลเฟตในยิปซัมสามารถทำปฏิกิริยากับ C_3A เกิดเป็นแคลเซียมซัลโฟลูมิเนตไฮเดรตหรือ Ettringite ($C_6A\bar{S}_3H_{32}$) ดังแสดงในสมการที่ 2.4 ปฏิกิริยาของ C_3A กับน้ำเมื่อมีการเติมยิปซัมลงไป ไอออนของซัลเฟตในยิปซัมที่มากพอจะทำปฏิกิริยากับ C_3A เกิดเป็นชั้นของ Ettringite ขึ้นล้อมรอบ C_3A ทำให้ปฏิกิริยาระหว่างไอออนของซัลเฟตกับ C_3A เกิดยากขึ้น การเกิดขึ้นของ Ettringite มากขึ้นจะเกิดแรงดันเนื่องจากการเพิ่มปริมาณของแข็งที่มากขึ้น แรงดันนี้จะทำให้ชั้นของ Ettringite แตก ไอออนของซัลเฟตจึงทำปฏิกิริยากับ C_3A ได้อีกครั้ง ปฏิกิริยาจะเกิดเรื่อยๆ จนกระทั่งไอออนของซัลเฟตมีไม่มากพอที่จะทำปฏิกิริยากับ C_3A ได้ ทำให้ ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminates) จะทำปฏิกิริยากับ เอ็ททริงไจต์อย่างช้าๆ และเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันที่มีซัลเฟตลดลงเรียกผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในช่วงที่ 2 นี้ว่า โมโนซัลโฟลูมิเนต (Monosulfaluminate) ($C_4A\bar{S}H_{12}$) ดังแสดง ในสมการ 2.5



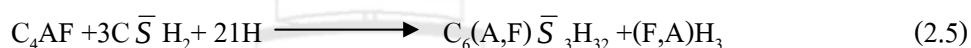


ภาพที่ 2.2 แสดงลักษณะจุลภาคของเอ็ททริงไจต์ (Sidney, Francis and David, 2003)



ภาพที่ 2.3 แสดงลักษณะจุลภาคของโมนอสัลโฟลูมินต (Sidney, Francis and David, 2003)

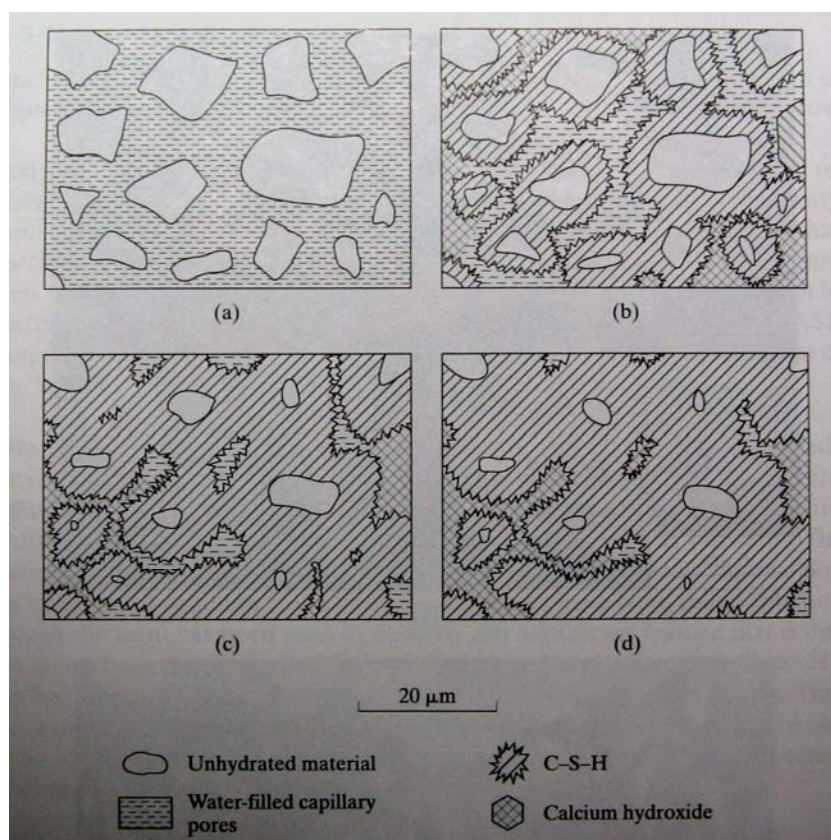
2.3.3 การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบเตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF) การเกิดปฏิกิริยานี้ มีลักษณะการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันคล้ายกับการเกิดปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมอลูนิเนต (C_3A) เนื่องจากสารประกอบหลักออกไซด์จะทำหน้าที่คล้ายอลูมิเนียมออกไซด์ ซึ่งสามารถแทนที่กันได้ แต่การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันใน C_4AF จะเกิดได้ช้ากว่าใน C_3A เพราะเมื่อเติมยิปซัมซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวหน่วงในปฏิกิริยาจะหน่วงปฏิกิริยาของ C_4AF ได้ดีกว่า C_3A เมื่อเตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcium Aluminoferrite: C_4AF) เข้าทำปฏิกิริยากับน้ำและยิปซัมเกิดเป็น $C_6(A,F)\bar{S}_3H_{32}$ ซึ่งเป็นรูปแบบของเอ็ททริงไจต์ที่มีไอออนของเหล็กหรืออลูมินาในองค์ประกอบ (F,A) เนื่องจากทั้งเหล็กและอลูมินามีสมบัติสามารถเกิดการแทนที่กันได้ในการเกิดปฏิกิริยานี้ สมการการเกิดปฏิกิริยาเคมีสามารถเขียนได้ดังนี้



การก่อตัวหรือการพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์สามารถสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันที่เพิ่มขึ้นและนำไปสู่การลดลงของระยะห่างระหว่างอนุภาคของซีเมนต์จนกระทั่งเกิดการยึดเกาะกันดังแสดงในภาพที่ 2.4 จากปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยรวมของสารประกอบหลักทั้ง 4 ในปูนซีเมนต์นั้น จะเกิด C-S-H และ Ettringite ในช่วงแรกของการเกิดปฏิกิริยาหลังจากซีเมนต์รวมตัวกับน้ำ การแตกตัวอย่างรวดเร็วของไอออนของแคลเซียมและไฮดรอกไซด์บริเวณผิวของอนุภาคซีเมนต์ ในช่วงนี้ซีเมนต์ยังคงเป็นของเหลวและมีความสามารถในการเทไหลอยู่ในช่วงประมาณ 1-2 ชั่วโมง ซึ่งเรียกว่าช่วง “Dormant Period” หลังสิ้นสุดช่วง “Dormant Period” ก็จะเริ่มเข้าสู่ช่วงการแข็งตัว การแข็งตัวแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงแข็งตัวเริ่มต้น (Initial Set) และช่วงแข็งตัวสุดท้าย (Final Set)

ช่วงเริ่มต้นของการแข็งตัวจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นส่งผลให้เกิดผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มขึ้นจะเข้าอุดช่องว่างระหว่างเม็ดซีเมนต์ เมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ซีเมนต์เพสต์เกิดการจำกัดการเคลื่อนที่คือ สามารถเคลื่อนที่ช้าลง เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 2 ชั่วโมง ซีเมนต์เพสต์จะเปลี่ยนสภาพกลายเป็นของแข็ง ซึ่งช่วงนี้เราจะเรียกว่าช่วงการแข็งตัวสุดท้าย หลังจากผ่านช่วงแข็งตัวสุดท้าย ซีเมนต์เพสต์ที่เปลี่ยน

สภาพไปเป็นของแข็งจะยังคงเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันต่อไป ในขณะที่ผลิตภัณฑ์จากการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มความพรุนของซีเมนต์เพสต์ลดลงและค่ากำลังรับแรงอัดเริ่มพัฒนาเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง



ภาพที่ 2.4 แผนภาพแสดงการพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ที่อายุต่างๆ

(Sidney, Francis and David, 2003)

(a) เมื่อเริ่มต้นผสมปูนซีเมนต์กับน้ำ, (b) อายุ 7 วัน, (c) อายุ 28 วัน, (d) อายุ 90 วัน

ในส่วนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาตรฐานทั่วไปในประเทศไทยแบ่งออกเป็น 5 ประเภทซึ่งได้ทำการกล่าวถึงประเภทที่ 1 ไปแล้วในข้างต้น ส่วนที่เหลืออีก 4 ประเภทแบ่งออกเป็นดังต่อไปนี้

ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) เหมาะสำหรับใช้ในงานคอนกรีตที่ทนซัลเฟตได้ปานกลางและปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ปัจจุบันไม่มีการผลิตแล้วภายในประเทศ

ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดเร็ว (High Early Strength Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะให้กำลังอัดสูงในระยะแรกและแข็งตัวได้เร็วโดยมีการปรับเปลี่ยนปริมาณองค์ประกอบของไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate) ให้เพิ่มสูงขึ้นเหมาะสำหรับงานคอนกรีตที่ต้องการการถอดแบบได้รวดเร็วขึ้นกว่าปกติ

ประเภทที่ 4 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับงานคอนกรีตหนา (คอนกรีตที่มีปริมาณในการเทหล่อต่อครั้งค่อนข้างสูง) เช่น งานทำการก่อสร้างเขื่อน เนื่องจากเป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนต่ำช่วยลดปัญหาการแตกร้าวของคอนกรีตที่ใช้งานในปริมาณมากๆต่อครั้งในการเทหล่อ

ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภททนซัลเฟตได้สูง (Sulphate Resistance Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้เหมาะสำหรับงานที่ต้องทนการกระทำจากซัลเฟตและจะให้กำลังอัดค่อนข้างสูงกว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เนื่องจากมี ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminates) ต่ำเหมาะสำหรับใช้กับโครงสร้างที่สัมผัสกับน้ำหรือดินที่มีด่าง (Alkaline) สูง

นอกจากนี้แล้วยังมีปูนซีเมนต์อีกชนิดที่ได้รับความนิยมคือ ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์พอซโซลาน เป็นปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ผสมกับสารพอซโซลาน สารพอซโซลานนี้เป็นสารที่มีส่วนประกอบของซิลิกาค่อนข้างสูงและสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium-Hydroxide: CH) ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานซึ่งสารพอซโซลานนี้ในธรรมชาติมีอยู่มากมายหลายประเภทในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงสารพอซโซลานเฉพาะสารพอซโซลานแบบธรรมชาติ (Natural Pozzolans) คือเถ้าแกลบ (Malhotra & Kumar, 1996) เถ้าแกลบมีปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) สูงแต่ถ้าไม่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาจะได้เถ้าแกลบที่มีโครงสร้างของซิลิกาที่มีความเป็นผลึกสูง (Highly Crystalline Silica) ซึ่งซิลิกาที่มีความเป็นผลึกสูงนอกจากจะมีความไวต่อการทำปฏิกิริยาดำแล้วยังเป็นอันตรายต่อร่างกายมนุษย์เพราะเป็นสารก่อมะเร็งชนิดหนึ่งดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องควบคุมกระบวนการเผาไหม้ของเถ้าแกลบเพื่อให้ได้เถ้าแกลบที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐานซึ่งเหมาะสมกับการนำไปใช้เป็นสารพอซโซลานในการผสมแทนที่ในปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์เพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพ (ปริญญาจินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2549)

2.4 วัสดุพอซโซลาน (Pozzolanic Materials)

วัสดุพอซโซลานมีองค์ประกอบหลักทางเคมี คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2 : S) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3 : A) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2 : CH) เกิดเป็นผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) จากสมการ 2.1 และ 2.2 ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ CH และ CSH ในขณะที่ CSH ที่ได้จะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสาน แต่ในส่วนของ CH ที่เกิดขึ้นโดยปกติไม่ก่อให้เกิดประโยชน์แล้วในบางครั้งอาจก่อให้เกิดผลเสียด้วย เช่น ทำให้เกิดฝ้าขาวที่ผิวหน้าของคอนกรีต หรือเกิดเป็นฟิล์มบนผิวของมวลรวม ทำให้การยึดเกาะตัวระหว่างมวลรวมกับซีเมนต์ไม่ดีนัก แต่ถ้ามีการนำวัสดุประเภทพอซโซลานมาเป็นส่วนผสมเพิ่มก็จะสามารถทำปฏิกิริยากับ CH ส่วนเกินที่ไม่ได้มีการใช้ประโยชน์ สามารถเขียนปฏิกิริยาเคมีระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับวัสดุพอซโซลาน (Pozzolanic Materials) ดังสมการที่ 2.7 และ 2.8



ผลิตภัณฑ์จากวัสดุประเภทพอซโซลานที่ได้จะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีต (ซีเมนต์) ให้ดีขึ้นเช่น เพิ่มกำลังในการรับแรงอัดในระยะหลังเทียบเท่าหรือมากกว่าค่ากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา หรือเพิ่มคุณสมบัติทนทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟตได้ เพราะช่วยลดปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันสามารถแบ่งตามระดับของความเป็นผลึกได้ 4 ส่วนดังต่อไปนี้ 1.CSH: มีความเป็นผลึกน้อยมากหรือเป็นโครงสร้างแบบอสัณฐาน, 2. CH: มีความเป็นผลึกสูง, 3. Ettringite: มีความเป็นผลึกค่อนข้างสูง, 4. Monosulfoaluminate: มีความเป็นผลึกปานกลาง (Sidney, Francis and David, 2003)

ดังนั้น เมื่อนำวัสดุประเภทพอซโซลานมาแทนที่ในปูนซีเมนต์ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นคือ CSH ซึ่ง CSH ที่ได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง CH ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและวัสดุประเภทพอซโซลานที่เติมเข้าไป ผลิตภัณฑ์ CH เมื่อถูกนำไปใช้ก็จะทำให้ปริมาณของ CH ในปูนซีเมนต์ลดลง โดยปฏิกิริยาพอซโซลานแต่ละชนิดจะมีองค์ประกอบทางเคมี และกายภาพที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.3 ดังนั้นก่อนที่จะมีการนำมาใช้จึงควรศึกษาลักษณะเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิดเพื่อให้ทราบองค์ประกอบต่างๆ เพื่อการเลือกใช้วัสดุนั้นๆ

ตารางที่ 2.3 แสดงตัวอย่างองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุชนิดอื่นๆ (Malhotra and Kumar, 1996)

ชนิดของ	องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุชนิด(ร้อยละ)						
วัสดุ	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Alkaline	LOI
Silica fume	94.00	0.06	0.03	0.50	1.10	0.10	2.50
Rice husk ash	92.15	0.41	0.21	0.41	0.45	2.39	2.77
Metakaoline	51.52	40.18	1.23	2.00	0.12	0.53	2.01

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนเอกสารงานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้อง แกลบข้าวเป็นอีกแหล่งหนึ่งที่พบซิลิกาในปริมาณสูงถึง 13 – 25 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก เมื่อเผาแกลบข้าวที่อุณหภูมิสูงจนกลายเป็นเถ้าแกลบ จะพบว่าเถ้าแกลบมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ (Malhotra and Kumar, 1996)

นนทพงษ์ พลพวก (2548) ได้ทำการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเผาแกลบ พบว่าเถ้าแกลบที่เผาอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง มีปริมาณของซิลิกาประมาณ 82 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการเผาเป็น 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จะมีปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้นเป็น 97 เปอร์เซ็นต์ และจากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเถ้าแกลบพบว่า มีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐานทั้งหมด

ในการศึกษาปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์จะได้ผลิตภัณฑ์ของ C-S-H และ CH โดย CH ที่เกิดขึ้น เมื่อทำปฏิกิริยากับวัสดุพอลิโพรพิลีนซึ่งเป็นวัสดุที่มีปริมาณของซิลิกาหรืออลูมินาสูง พบว่า CH จะรวมตัวกับสารประกอบหลักในวัสดุพอลิโพรพิลีน เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของ C-S-H ทำให้วัสดุมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ซึ่งมีนักวิจัยหลายกลุ่มศึกษาค่าความแข็งแรงที่สูงขึ้น เมื่อมีการแทนที่วัสดุพอลิโพรพิลีนในปูนซีเมนต์ ได้แก่

Ismail and Waliuddin (1996) ทำการศึกษาผลของเถ้าแกลบในคอนกรีตกำลังอัดสูง โดยใช้เถ้าแกลบที่หาได้ในท้องถิ่นมาเป็นส่วนผสมในคอนกรีต เพื่อศึกษาค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่กำหนดขึ้น โดยการทดสอบใช้เถ้าแกลบที่นำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 และ 325 และเติมเถ้าแกลบที่ได้ในซีเมนต์เป็นอัตราส่วน 10-30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยเพิ่มครั้งละ 10 เปอร์เซ็นต์ และนำตัวอย่างที่ได้ไปทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต จากผลการทดสอบที่ได้คอนกรีตมีค่ากำลังรับแรงอัดเป็นไปตามที่กำหนดไว้และสัดส่วนของเถ้าแกลบที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 10-20 เปอร์เซ็นต์

Nehdi, et al. (2003) ทำการศึกษาประสิทธิภาพของเถ้าแกลบที่ใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีต ต่อการเพิ่มค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดยได้ทำการศึกษาและทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีการเติมเถ้าแกลบ 7.5 , 10 และ 12.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากผลการทดสอบค่ากำลังที่ 28 วัน ค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างมาตรฐาน(ตัวอย่างที่ไม่มีการเติมเถ้าในส่วนผสม) และที่ 56 วัน ทุกสัดส่วนที่ใช้ผสมและทำการทดสอบมีค่ากำลังเพิ่มขึ้น 20-40 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับตัวอย่างมาตรฐาน

Gemma (2005) ศึกษาการพัฒนากำลังในการรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบที่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในประเทศไทย โดยการทดสอบค่ากำลังของคอนกรีตไปจนถึงอายุ 91 วันและศึกษาความสามารถในการซึมผ่านของอากาศที่ 28 วัน โดยคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบแบ่งออกเป็น 2 อัตราส่วน คือ แทนที่ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ และใช้อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ในการผสม 3 อัตราส่วน คือ 0.50, 0.40 และ 0.32 พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบ 10 เปอร์เซ็นต์ ให้ค่ากำลังสูงที่สุดและคอนกรีตที่มีการแทนที่ 20 เปอร์เซ็นต์ให้ค่ากำลังรองลงมา ซึ่งในการแทนที่ทั้งสองอัตราส่วนให้ค่ากำลังมากกว่าคอนกรีตที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบ สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.32 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุดและคอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบแทนที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านลดน้อยลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบ ดังนั้นเถ้าแกลบจึงเป็นวัสดุพอลิโพรพิลีนที่มีความสามารถในการเพิ่มค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญ

ปัจจุบันมีการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาวัสดุหลายชนิด ที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุพอลิเมอร์ ในการนำมาใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์ แล้วสามารถให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงขึ้น ซึ่งเป็นการพัฒนาคุณภาพปูนซีเมนต์ให้ดีขึ้นและทำให้วัสดุนั้นมีคุณค่ามากขึ้น โดยงานวิจัยของสมหวัง โสมนริทธิ์ (2541) ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตผสมเถ้าลอยลิกไนต์จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยนำเถ้าลอยลิกไนต์มาผสมทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ในอัตราส่วน 30 50 และ 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของซีเมนต์ คอนกรีตผสมเถ้าลอยลิกไนต์ที่มีสัดส่วนผสมไม่เกิน 50 เปอร์เซ็นต์ และมีอายุบ่มมากกว่า 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา 16 เปอร์เซ็นต์ ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นช้ากว่าคอนกรีตธรรมดาและระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายใกล้เคียงกับคอนกรีตธรรมดา ค่ากำลังรับแรงดัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา 20 เปอร์เซ็นต์ และ 16 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้การที่ใช้วัสดุผสมมาทดแทนปูนซีเมนต์และมีผลให้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีราคาค่อนข้างสูงลดลงถึง 18 เปอร์เซ็นต์ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 นั้นลดราคาค่อนข้างสูงไปได้ถึง 21 เปอร์เซ็นต์ ในการทดแทนด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ สัดส่วนผสม 300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ 350 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ

ณรงค์ชัย จันดาวัณ (2543) ทำการศึกษาความแข็งแรงของโครงสร้างถนนคอนกรีตผสมเถ้าลอยลิกไนต์ โดยเปรียบเทียบความแข็งแรงกับผิวถนนคอนกรีตทั่วไป ผลการศึกษาพบว่าค่ากำลังการรับแรงอัดของคอนกรีตทั่วไปมีค่ามากกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยลิกไนต์ เมื่อพิจารณาค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีตผสมเถ้าลอยลิกไนต์มีค่าน้อยกว่าคอนกรีตทั่วไป ร้อยละ 3 – 7 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยลิกไนต์มีระยะเวลาการก่อตัวช้ากว่าคอนกรีตทั่วไป ค่าหน่วยน้ำหนักมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตทั่วไป ร้อยละ 3 – 4 ถนนคอนกรีตผสมเถ้าลอยลิกไนต์ที่อัตราส่วนร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ มีความแข็งแรงตามมาตรฐานของกรมทางหลวงที่สามารถนำไปใช้ได้จริงในการก่อสร้าง

Nabil and Mohammed (2004) ทำการศึกษาคุณสมบัติของมอร์ตาร์ที่มีการเติมเถ้าที่ได้จากผลิตภัณฑ์ประเภทยางพบว่าคุณสมบัติของมอร์ตาร์ที่มีการผสมเถ้าที่ได้จากยางส่งผลกับสมบัติเชิงกลและอื่นๆเช่น ระยะเวลาในการก่อตัวเริ่มต้นและการก่อตัวสุดท้ายให้เพิ่มขึ้น ความสามารถในการเทไหลของมอร์ตาร์สูงขึ้น ค่ากำลังรับแรงอัดสูงขึ้น โดยมีการแทนที่ด้วยเถ้าจากยางมีอัตราส่วน 2.5-10 เปอร์เซ็นต์ โดยเพิ่มปริมาณครั้งละ 2.5 เปอร์เซ็นต์ ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าจากยาง 10 เปอร์เซ็นต์ ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด โดยที่อายุ 7 วันค่ากำลังเพิ่มขึ้น 35 เปอร์เซ็นต์ และที่อายุ 90 วัน ค่ากำลังเพิ่มขึ้น 45 เปอร์เซ็นต์

Olusola, et al. (2005) ทำการศึกษาเรื่องการใช้ดินปลวกและดินขาวแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในงานฉาบ ในงานวิจัยทำการศึกษาค่ากำลังรับแรงอัดและการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวและดินปลวก โดยการเตรียมตัวอย่างมอร์ตาร์ใช้ส่วนผสมคือปูนซีเมนต์ ทรายและส่วนผสมที่ต้องการใช้แทนที่ (ดินขาวและดินปลวก) อัตราส่วนของซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1:4 และ 1:6 และมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10-50 โดยน้ำหนัก การเพิ่มปริมาณของการแทนที่เพิ่มครั้งละ 10 โดยน้ำหนัก จากการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ซีเมนต์พบว่าเมื่ออายุเพิ่มขึ้นค่ากำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นด้วยตามอายุและค่ากำลังรับแรงอัดลดลงเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนในการแทนที่ อย่างไรก็ตามที่อัตราส่วน 1:6 ในการแทนที่ด้วยดินขาวและดินปลวกจากไม่มีการแทนที่ไปจนถึงแทนที่ร้อยละ 20 ในช่วงเริ่มต้นค่ากำลังรับแรงอัดทั้งสองส่วนผสมไม่มีความแตกต่างกันแต่ในระยะยาวซีเมนต์ที่มีการแทนที่ด้วยดินปลวกจะมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าที่อัตราส่วน 1:4 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยดินปลวกและดินขาวที่ร้อยละ 50 ก็มีค่ากำลังไม่แตกต่างกัน ค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่มีการผสมดินขาวมีค่าสูงกว่ามอร์ตาร์ที่มีการผสมดินปลวก (ที่อัตราส่วน 1:6 ดินขาว=18.10 เปอร์เซ็นต์, ดินปลวก=16.10 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราส่วน 1:4 ดินขาว=14.20 เปอร์เซ็นต์, ดินปลวก=13.02 เปอร์เซ็นต์) โดยการแทนที่ร้อยละ 50 และสรุปว่าดินปลวกมีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นวัสดุทางเลือกในการทำมอร์ตาร์ซีเมนต์ที่ใช้ในงานฉาบทั่วไป และในการแทนที่ปูนซีเมนต์ในทุกๆอัตราส่วนไม่ควรเกินร้อยละ 30 ของน้ำหนักซีเมนต์

อุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงขึ้นโดยงานวิจัยของบุรฉัตร ฉัตรวีระ และพิชัย นิมิตรยงสกุล (2537) ทำการศึกษาเกี่ยวกับกำลังของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบเมื่อถูกกระทำกับความร้อนทันทีโดยทำการหล่อคอนกรีตที่มีการผสมเถ้าแกลบและคอนกรีตแบบปกติที่ไม่มีการผสมเถ้าแกลบนำไปบ่มในสภาวะเดียวกันโดยแบ่งการบ่มเป็น 2 ลักษณะคือบ่มในอุณหภูมิห้องกับบ่มที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส แล้วนำมาทำการทดสอบเมื่ออายุครบ 12 ชั่วโมง 3 วัน 10 วันและ 28 วัน พบว่าอุณหภูมิในการบ่มมีผลกระทบต่อการพัฒนากำลังของคอนกรีตที่มีการผสมเถ้าแกลบในช่วงเริ่มต้น การให้คอนกรีตสัมผัสความร้อนโดยทันทีมีผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดเริ่มต้นมีค่าสูงขึ้น แต่ส่งผลตรงข้ามในระยะยาวนอกจากนี้การบ่มคอนกรีตที่อุณหภูมิต่ำจะเป็นการหน่วงการพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ

บุรฉัตร ฉัตรวีระ และณรงค์ศักดิ์ มาลากุล (2547) ทำการศึกษาลผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มซีเมนต์เพสต์ที่มีการผสมเถ้าแกลบขาวเป็นวัสดุผงที่ได้จากโรงงานเผาอิฐมอญ โดยสมบัติที่ศึกษาได้แก่ ความชื้นเหลวปกติ ระยะเวลาการก่อตัว กำลังรับแรงอัดและแรงดึงแบบผ่าซีก ตัวแปรที่ใช้คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (ปูนซีเมนต์ หรือปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบขาว) เท่ากับ 0.45 และ 0.50

การแทนที่ของเส้นใยแก้วในปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักที่ร้อยละ 20 และ 40 และอุณหภูมิของน้ำที่ใช้สำหรับทำการบ่มที่ 25 , 50 และ 75 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่า กำลังรับแรงอัดและแรงดึงแบบผ่าซีกของเพสต์จากซีเมนต์ผสมเส้นใยแก้วขาวขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการแทนที่ของเส้นใยแก้ว โดยกำลังรับแรงของเพสต์ซึ่งทำการแทนที่เส้นใยแก้วขาวในปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าการแทนที่เส้นใยแก้วขาวที่ร้อยละ 40 ที่ทุกอายุของการบ่ม และพัฒนาการรับแรงอัดของซีเมนต์ในช่วงแรกมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ทำการบ่มเพิ่มขึ้นจาก 25 เป็น 50 และ 75 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในขณะที่การบ่มในช่วงหลังกำลังรับแรงอัดของเพสต์บ่มที่ 75 องศาเซลเซียส ต่ำกว่ากำลังรับแรงอัดของเพสต์บ่มที่ 25 องศาเซลเซียส

การศึกษาค่ากำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ เมื่อแทนที่ด้วยวัสดุพอลิโพรพิลีนเป็นเป้าหมายหลักที่นักวิจัยพยายามพัฒนาให้ดีขึ้น ซึ่งค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงขึ้นมักพบปริมาณรูพรุนในโครงสร้างทางจุลภาคที่น้อย ดังนั้นการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคจึงเป็นอีกการทดสอบหนึ่งที่สำคัญ เพื่อที่จะทำให้นักวิจัยเข้าใจพฤติกรรมและการเปลี่ยนแปลงภายในโครงสร้างของวัสดุกับค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงขึ้น Mosquera, et al. (2004) ทำการศึกษาผลของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยปูนขาว จุดประสงค์ในการศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคกับความชื้นที่ซึมผ่านมอร์ตาร์ ในการเตรียมตัวอย่างใช้ปูนขาว 2 แบบคือ 1.ปูนขาวแบบแห้ง 2.ปูนขาวแบบเปียก โดยเพิ่มปริมาณปูนขาวในส่วนผสมของซีเมนต์และทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยใช้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนในวิธีแบบกระเจิงกลับ (Backscatter Electron) ผลการศึกษาพบว่าปริมาณและขนาดของรูพรุนลดลงเมื่อมีการแทนที่ปูนขาวในส่วนผสมของมอร์ตาร์ทุกอัตราส่วนที่ใช้ทดสอบ นอกจากนั้นสำหรับมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยปูนขาวแบบแห้งเมื่อใช้ปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้นในอัตราส่วนผสมจะทำให้ปริมาณรูพรุนลดลงประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์ และความหนาแน่นสูงขึ้น สำหรับมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยปูนขาว ปูนขาวแบบเปียกจะมีปริมาณรูพรุนต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยปูนขาวแบบแห้ง ลักษณะรูพรุนเกิดขึ้นมีการกระจายตัว 2 ขนาดคือ 15 ไมโครเมตร และ 0.15 ไมโครเมตร โดยเมื่ออัตราส่วนปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นรูพรุนขนาดใหญ่จะลดลงและที่อัตราส่วนในการแทนที่ปูนซีเมนต์สูงสุดจะไม่พบรูพรุนขนาดใหญ่

การศึกษาค่ากำลังรับแรงอัดเป็นปัจจัยที่น่าสนใจสำหรับการวิจัย เพื่อมุ่งเน้นพัฒนาสมบัติให้ดีขึ้น ซึ่งผลการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงอัดจะเกี่ยวข้องกับลักษณะทางจุลภาคในโครงสร้างของชิ้นงาน เช่น รูพรุน การเกิดเฟสต่างๆ ของปฏิกิริยา เพื่อหาเหตุผลที่อธิบายค่ากำลังรับแรงอัดที่เปลี่ยนแปลงในช่วงอายุการบ่มต่างกัันดังนี้

Salgueiro, et al. (2003) ทำการศึกษาการดูดซับน้ำและการเกิดรูพรุนในซีเมนต์เพสต์ โดยทำการศึกษาขั้นตอนของปฏิกิริยาไฮเดรชันและการเกิดรูพรุนในซีเมนต์เพสต์ในการศึกษาใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.24, 0.40 และ 0.60 ตามลำดับ และอายุที่ใช้ทดสอบคือ 3, 7, 28 และ 365 วัน แบ่งการศึกษาออกเป็นส่วนๆดังนี้ ศึกษาค่ากำลังรับแรงอัด, ศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และศึกษารูพรุนที่เกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ด้วยเทคนิค PALS (Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy) เพื่อตรวจสอบรูพรุนที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการศึกษาเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ผลการศึกษาพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ที่ใช้อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.24 ให้ค่ากำลังสูงที่สุดรองลงมาคือที่อัตราส่วน 0.40 และ 0.60 ตามลำดับ, ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์พบว่า ความสูงของพีคแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) เพิ่มขึ้นเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่มีค่าน้อย (0.24) จะขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สมบูรณ์ ในทางกลับกัน อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น (0.40 และ 0.60) เมื่ออัตราส่วนเพิ่มขึ้นมีความเป็นไปได้ ที่ปริมาณน้ำส่วนเกินจะทำให้ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดสมบูรณ์มากขึ้นเนื่องจากมีปริมาณน้ำเพียงพอที่ใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ทั้งนี้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ใช้ในการผสม, ในส่วนของการศึกษารูพรุนในซีเมนต์เพสต์พบว่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.24 มีรูพรุนมากกว่าที่อัตราส่วน 0.40 และ 0.60 เนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มีผลกับการเกิดผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันเนื่องจากถ้ามีปริมาณน้ำเพียงพอในการทำปฏิกิริยาจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันสมบูรณ์ เกิดการยึดเกาะเพิ่มขึ้นปริมาณรูพรุนมีแนวโน้มลดน้อยลง

Sidney Diamond (2004) ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์และคอนกรีต โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบกระเจิงกลับ ทดสอบโดยนำภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน มาวิเคราะห์เฟสที่เกิดขึ้นในภาพพบว่า ในภาพถ่ายมีเฟสที่มีลักษณะสว่าง (สีขาว) ขึ้นจากพื้นที่ที่มีสีดำหรือสีเทาซึ่งเป็นเฟสของซีเมนต์ที่เกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ (residual unhydrated cement) ส่วนพื้นที่ที่เป็นสีดำเป็นบริเวณที่เป็นเฟสของรูพรุน และบริเวณพื้นที่ที่เป็นสีเทาเป็นเฟสที่ซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ (fully hydrate cement) ซึ่งสอดคล้องกับ (Arandigoyen and Alvarez, 2005)

Arandigoyen and Alvarez (2005) ที่ทำการศึกษาการดูดซับน้ำและการดูดซึมน้ำของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมปูนขาว พบว่าโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมปูนขาวจะขึ้นกับปริมาณขององค์ประกอบที่ใช้ในการผสมเพื่อทำขึ้นทดสอบ ในส่วนของการศึกษาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) พบว่าปูนซีเมนต์มีองค์ประกอบหลักเป็น Calcite ส่วนปูนขาวมีองค์ประกอบหลักเป็น Portlandite ในการวิเคราะห์ขึ้นทดสอบที่มีการผสมปูนขาวกับปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน

20 เปอร์เซ็นต์ พบว่าฟลักของ Portlandite มีความสูงลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับชั้นทดสอบที่ไม่ผสมปูนขาว โดยความสูงของฟลักจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาว



บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

วิธีการดำเนินงานวิจัยแบ่งเป็น 4 ส่วน ดังนี้

- 3.1 การเตรียมและวิเคราะห์ทดสอบวัตถุดิบ
- 3.2 การเตรียมชิ้นทดสอบ
- 3.3 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของมอร์ตาร์
- 3.4 การตรวจสอบลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบ

3.1 การเตรียมและวิเคราะห์ทดสอบวัตถุดิบ

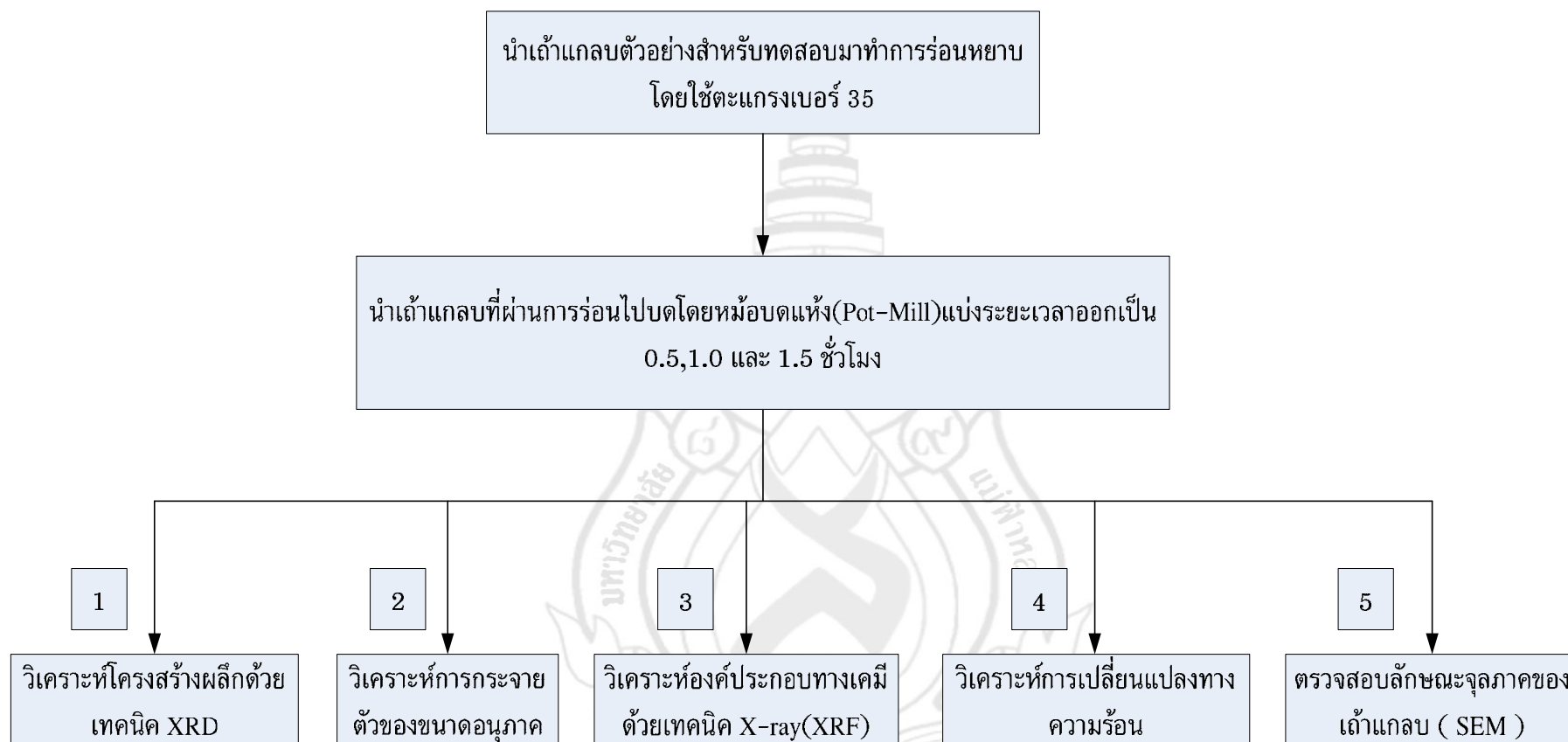
การเตรียมและวิเคราะห์วัตถุดิบสำหรับการวิจัยครั้งนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การเตรียมและวิเคราะห์เถ้าแกลบ และการวิเคราะห์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1.1 การเตรียมและวิเคราะห์เถ้าแกลบ

นำเถ้าแกลบตัวอย่างที่เก็บมาจากโรงงานอิฐเผามาทำการร่อนโดยใช้ตะแกรงร่อนเบอร์ 35 เพื่อกำจัดเศษวัสดุที่มีขนาดใหญ่และไม่ต้องการเช่น แกลบที่ยังเผาไหม้ไม่หมดทั้งชิ้น เศษหญ้าหรือเศษวัสดุอื่นๆที่ติดมาในระหว่างการเก็บรวบรวมเถ้าแกลบจากนั้นนำเถ้าแกลบที่ได้ไปทำการบดแบบแห้งด้วยหม้อบดพอร์ซเลน (Pot-mill) ขนาด 5 กิโลกรัม โดยกำหนดระยะเวลาในการบดเถ้าแกลบเป็น 0.5 1.0 และ 1.5 ชั่วโมง ตามลำดับเพื่อเปรียบเทียบขนาดเฉลี่ยของอนุภาคเมื่อบดในระยะเวลาต่างกัน

จากนั้นทำการวิเคราะห์เถ้าแกลบที่ได้ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์อีก 5 ขั้นตอน คือ

1. วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
2. วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน
3. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี
4. วิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาค
5. ตรวจสอบลักษณะจุลภาคของเถ้าแกลบ



ภาพที่ 3.1 แผนภาพแสดงการเตรียมและวิเคราะห์เถ้าเคลบ

1. วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
ทำการเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบดังต่อไปนี้

- 1) นำแผ่นกลมตัวอย่างที่บดเรียบร้อยบรรจุลงในที่ใส่ตัวอย่างทดสอบ (Holder Ring) ดังภาพที่ 3.3

- 2) นำแท่งสำหรับกดตัวอย่างทำการกดลงบนตัวอย่างดังภาพที่ 3.4

- 3) ใช้ใบมีดปาดตัวอย่างส่วนเกินออกจากที่ใส่ตัวอย่างดังภาพที่ 3.5

- 4) ทำความสะอาดขอบของที่ใส่ตัวอย่างทดสอบให้เรียบร้อยดังภาพที่ 3.6

- 5) นำตัวอย่างที่บรรจุในที่ใส่ตัวอย่างออกจากฐานรองรับตัวอย่างดังภาพที่ 3.7

จากนั้นนำไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ X-ray diffractometry (XRD: PANalytical รุ่น X'Pert PRO MPD) ซึ่งได้กำหนดช่วงของการวิเคราะห์เริ่มจากมุม 2θ เป็น 5 องศาและสิ้นสุดที่มุม 90 องศา ความละเอียดของการเพิ่มมุม (Step size) เป็น 0.0167 องศา เวลาในการรับสัญญาณในแต่ละมุม (Time/step) เป็น 10.16 วินาที



ภาพที่ 3.2 แสดงที่บรรจุตัวอย่างในการทดสอบหาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์



ภาพที่ 3.3 แสดงการนำเถ้าเคลือบตัวอย่างบรรจุลงในที่ใส่ตัวอย่างทดสอบ (Holder Ring)



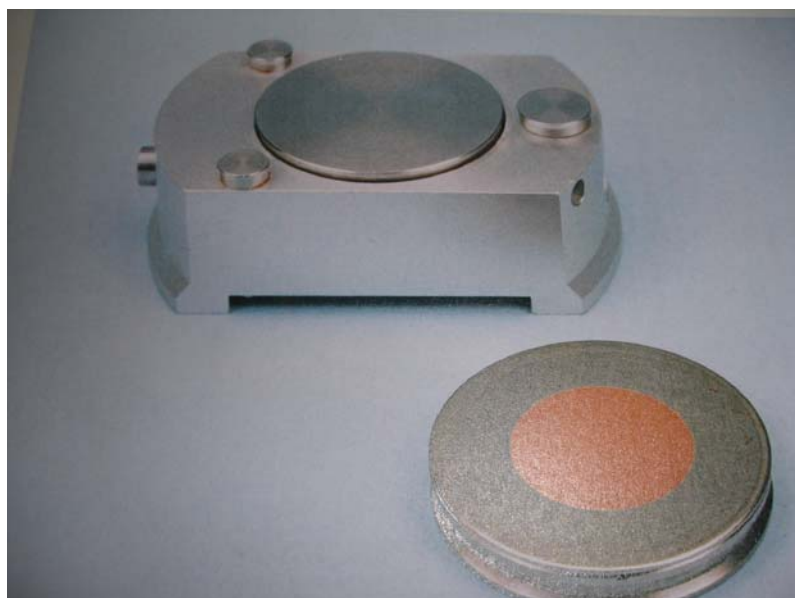
ภาพที่ 3.4 แสดงการกดตัวอย่างที่บรรจุในที่ใส่ตัวอย่าง



ภาพที่ 3.5 แสดงการปาดตัวอย่างส่วนเกินออกจากที่ใส่ตัวอย่าง



ภาพที่ 3.6 แสดงชิ้นตัวอย่างที่ทำความสะอาดเรียบร้อยแล้ว



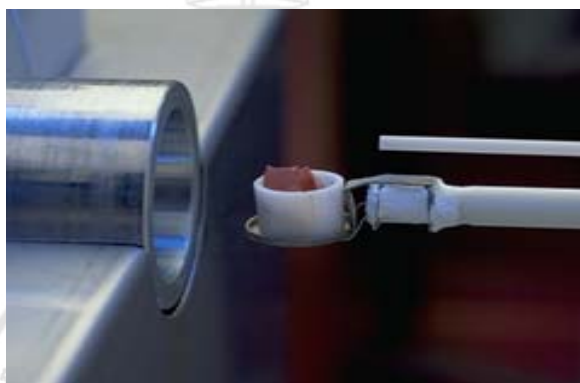
ภาพที่ 3.7 แสดงชิ้นตัวอย่างทดสอบหลังจากนำออกจากฐานรองรับพร้อมนำไปใช้ในการทดสอบ



ภาพที่ 3.8 เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึก PANalytical รุ่น X'Pert PRO MPD

2. การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน

วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermo gravimetric Analysis (TGA: Metler toledo รุ่น TGA/SDTA STAR 851°) เพื่อศึกษาถึงน้ำหนักที่หายไปหลังการเผา (LOI: Loss on Ignition) ของเถ้าแกลบที่ใช้เป็นวัตถุดิบโดยกำหนดให้ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการศึกษาอยู่ระหว่าง 50 ถึง 900 องศาเซลเซียส และกำหนดให้อัตราความร้อนที่ให้กับตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเป็น 20 องศาเซลเซียส ต่อนาที ในอากาศแบบสังเคราะห์ (Synthetic Air) ทั้งนี้เนื่องจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ไม่สามารถบอกปริมาณของสารอินทรีย์ที่สูญหายไปหลังการเผาได้ในการเตรียมตัวอย่างทดสอบได้นำเถ้าแกลบตัวอย่างบรรจุในถ้วยใส่ตัวอย่างดังภาพที่ 3.9 และนำไปทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน



ภาพที่ 3.9 แสดงถ้วยใส่ตัวอย่างสำหรับทดสอบการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน



ภาพที่ 3.10 เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน Metler toledo รุ่น STAR 851°

3. การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

นำถ้ำเกลบที่บระยะเวลา 0.5 1.0 และ 1.5 ชั่วโมง ไปขึ้นรูปเป็นแผ่นกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร เพื่อนำไปทดสอบ สำหรับการเตรียมขึ้นตัวอย่างมีขั้นตอน ดังนี้

1) นำตัวอย่างถ้ำเกลบที่ผ่านการบดบรรจุในแม่พิมพ์ขึ้นรูปสำหรับเตรียม ตัวอย่างทดสอบดังภาพที่ 3.12

2) ทำการประกอบชุดที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างดังภาพที่ 3.13

3) นำชุดที่ใช้เตรียมตัวอย่างบรรจุเข้าในเครื่องเตรียมและทำการเตรียมโดยการ กดดังภาพที่ 3.14 จนได้ตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีดังภาพที่ 3.15

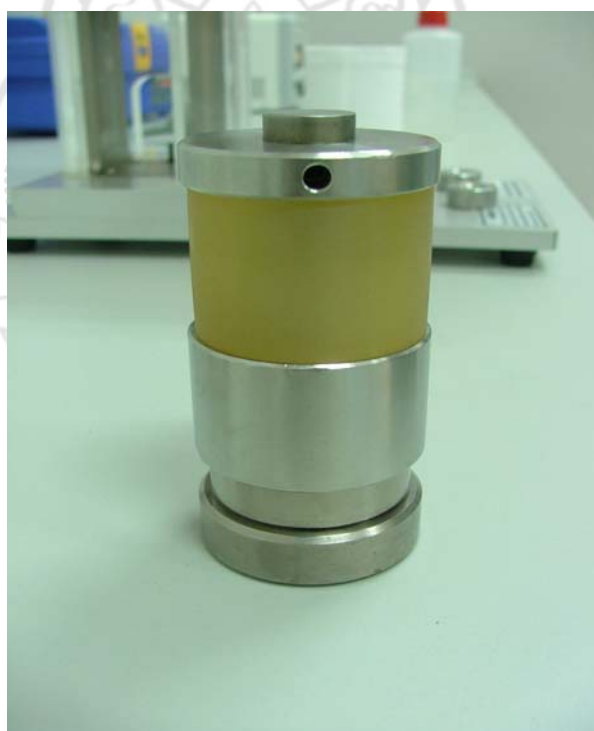
จากนั้นนำตัวอย่างไปทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence (XRF: Horiba รุ่น Mesa-500w) โดยกำหนดศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 15 kV และ 50 kV ใช้ ระยะเวลาในการทดสอบ 30 วินาที สำหรับการทดสอบ 1 ตัวอย่าง



ภาพที่ 3.11 แสดงชุดอัดตัวอย่างทดสอบสำหรับใช้วิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี



ภาพที่ 3.12 การนำแก้วเคลือบตัวอย่างบรรจุลงในที่ใส่ตัวอย่างทดสอบ



ภาพที่ 3.13 การประกอบชุดที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง



ภาพที่ 3.14 นำชุดที่ใช้เตรียมตัวอย่างบรรจุเข้าในเครื่องเตรียมและทำการเตรียมโดยการกด



ภาพที่ 3.15 ตัวอย่างทดสอบสำหรับใช้วิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีที่เตรียมเรียบร้อยแล้ว



ภาพที่ 3.16 เครื่องวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบทางเคมี Horiba รุ่น Mesa-500w

4. การวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาค

วิเคราะห์หาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเข้าแถบตัวอย่างที่ผ่านการบดในระยะเวลาที่แตกต่างกันคือ 0.5 1.0 และ 1.5 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Malvern รุ่น Mastersizer 2000+Hydro 2000 MU) ซึ่งใช้น้ำเป็นตัวกลาง ในการวิเคราะห์แต่ละครั้งใช้ผงเข้าแถบตัวอย่าง 5 กรัม ผสมกับน้ำ 50 กรัม คนให้เข้ากันแล้วใช้หลอดหยดค่อยๆหยดสารแขวนลอยของผงเข้าแถบลงไปในช่องสำหรับใส่ตัวอย่างจนได้สัญญาณตามที่กำหนด จากนั้นทำการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคและบันทึกค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคจากแต่ละตัวอย่าง

5. การตรวจสอบลักษณะจุลภาคของเข้าแถบ

นำเข้าแถบที่ต้องการตรวจสอบมาทำการเคลือบผิวด้วยทองด้วยเทคนิคสปัตเตอริง (Gold sputtering) จากนั้นนำตัวอย่างที่ผ่านการเคลือบผิวเรียบร้อยแล้วไปศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM: LEO รุ่น 1460) บันทึกภาพของตัวอย่างเข้าแถบที่บดและไม่บดเพื่อเปรียบเทียบลักษณะโดยทั่วไป

3.1.2 การวิเคราะห์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ในการวิเคราะห์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 3 ส่วนดังต่อไปนี้

1. วิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

วิเคราะห์หาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคปูนซีเมนต์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Malvern รุ่น Mastersizer 2000+Hydro 2000 MU) ซึ่งใช้เอธานอลเป็นตัวกลาง โดยนำปูนซีเมนต์ตัวอย่าง 5 กรัม ผสมกับเอธานอล 50 กรัม คนให้เข้ากันแล้วใช้หลอดหยดค่อยๆ หยดสารแขวนลอยของผงปูนซีเมนต์ลงไปในช่องสำหรับใส่ตัวอย่างจนได้สัญญาณตามที่กำหนด จากนั้นวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคและบันทึกค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาค

2. วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

โดยนำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ X-ray diffractometry (XRD: PANalytical รุ่น X'Pert PRO MPD) โดยทำการเตรียมและวิเคราะห์ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 1 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

3. ตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์

เพื่อศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคที่ได้จากภาพถ่าย การเตรียมตัวอย่างนำผงปูนซีเมนต์ที่ใช้ทดสอบมาทำการเคลือบผิวด้วยทองด้วยเทคนิคสปัตเตอริง (Gold sputtering) จากนั้นนำตัวอย่างที่ผ่านการเคลือบผิวเรียบร้อยแล้วไปศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM: LEO รุ่น 1460) บันทึกภาพของตัวอย่างเพื่อเปรียบเทียบลักษณะโดยทั่วไป

3.2 การเตรียมชิ้นทดสอบ

ในขั้นตอนของการเตรียมมอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดสอบนั้น อ้างอิงมาตรฐานการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ (ASTM C109, 1992) (มอก. 15 เล่มที่ 12, 2532) โดยใช้อัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1 : 2.75 โดยน้ำหนักลดการทดลองและทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ 10 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นทดสอบในแต่ละอัตราส่วนและเพิ่มปริมาณการแทนที่ครั้งละ 10 เปอร์เซ็นต์ ไปจนถึง 40 เปอร์เซ็นต์ โดยรายละเอียดของส่วนผสมและวิธีการหาปริมาณของน้ำที่เหมาะสมระบุไว้ในภาคผนวก ก ขนาดมอร์ตาร์สำหรับการทดสอบเป็นแบบลูกบาศก์โดยแต่ละด้านยาว 5 เซนติเมตร ขึ้นรูปโดย

การหล่อในแม่พิมพ์ทองเหลือง ดังภาพที่ 3.17 แล้วทำการบ่มโดยนำมอร์ต้าร์ที่เตรียมขึ้น ไปแช่ในน้ำ เพื่อบ่มตามอายุที่จะใช้ในการทดสอบคือ 7 14 28 และ 56 วัน จากนั้นนำมอร์ต้าร์ไปทำการศึกษา สมบัติทางกายภาพต่อไป



ภาพที่ 3.17 แสดงแบบหล่อขึ้นมอร์ต้าร์ทดสอบ

เพื่อให้ง่ายต่อการอธิบาย และเพื่อสื่อความหมายถึงส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการทดสอบผู้วิจัยได้กำหนดรหัสของชิ้นทดสอบตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงรหัสของชิ้นทดสอบที่เตรียมภายใต้สภาวะต่างๆ

รหัสย่อ	ปริมาณปูนซีเมนต์ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	ปริมาณเถ้ากลบ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	ระยะเวลาการบดเถ้า กลบ(ชั่วโมง)
Std.	100	-	-
L10	90	10	0.5
L20	80	20	0.5
L30	70	30	0.5
L40	60	40	0.5

ตารางที่ 3.1 แสดงรหัสของชั้นทดสอบที่เตรียมภายใต้สภาวะต่างๆ (ต่อ)

รหัสย่อ	ปริมาณปูนซีเมนต์ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	ปริมาณเถ้าแกลบ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	ระยะเวลาการบดเถ้า แกลบ(ชั่วโมง)
M10	90	10	1.0
M20	80	20	1.0
M30	70	30	1.0
M40	60	40	1.0
S10	90	10	1.5
S20	80	20	1.5
S30	70	30	1.5
S40	60	40	1.5

3.3 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของมอร์ต้าร์

ในการศึกษาสมบัติทางกายภาพจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนดังต่อไปนี้

3.3.1 การทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์

การทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ต้าร์ ใช้ตัวอย่างที่เตรียมขึ้นและมีอายุตามกำหนดเวลาที่ต้องการทดสอบดังกล่าวไว้ข้างต้น นำไปทดสอบโดยการให้รับน้ำหนักบรรทุกจากเครื่องทดสอบแรงกด (SHIMADZU รุ่น UH-100A) จนตัวอย่างเกิดการวิบัติ อ่านค่าแรงอัดสูงสุดและคำนวณหาค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ตามสมการดัง (3.1) คำนวณค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของแต่ละการทดลองจากตัวอย่างจำนวน 3 ชิ้น

$$\sigma_u = F/A \quad (3.1)$$

โดยที่ σ_u = ค่ากำลังรับแรงอัด (kg/cm^2)

F = แรงอัดประลัย (kg)

A = พื้นที่หน้าตัดของก้อนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ (cm^2)



ภาพที่ 3.18 เครื่องทดสอบแรงกด SHIMADZU รุ่น UH-100A

3.3.2 การทดสอบความหนาแน่นของมอร์ต้าร์

การทดสอบความหนาแน่นของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบโดยทำการชั่งมวลของตัวอย่างมอร์ต้าร์เปรียบเทียบกับปริมาตร ซึ่งในการทดสอบจะใช้การวัดขนาด (กว้างxยาวxสูง) ของตัวอย่างแล้วคำนวณหาปริมาตร จากนั้นนำตัวอย่างทดสอบซึ่งน้ำหนักและนำไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นโดยใช้สมการที่ 3.2 ส่วนค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของแต่ละอัตราส่วนคำนวณได้จากตัวอย่าง 3 ชิ้น

$$\rho = m/V \quad (3.2)$$

โดยที่ ρ =ความหนาแน่น (kg/m^3)
 m =มวลของตัวอย่าง (kg)
 V =ปริมาตรของตัวอย่าง (m^3)

3.4 การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของหินทดสอบ

หลังจากที่ทราบอัตราส่วนที่เหมาะสมของการเติมเถ้ากลบในปูนซีเมนต์เพื่อให้ได้ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่สูงสุดแล้ว จึงได้ใช้อัตราส่วนนั้นในการเตรียมตัวอย่างซีเมนต์เพสต์เพื่อการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค ในการศึกษาใช้ตัวอย่างที่เป็นซีเมนต์เพสต์ เนื่องจากสะดวกในการเตรียมและสามารถเตรียมหินทดสอบให้มีขนาดเล็กกว่าชิ้นตัวอย่างแบบมอร์ตาร์ ซึ่งขนาดหินทดสอบที่เล็กมีความเหมาะสมกับเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาและไม่มีอนุภาคของเม็ดทรายมารบกวนในการตรวจสอบทำให้พิจารณาลักษณะความแตกต่างระหว่างการตรวจสอบได้ดีขึ้น ในการหาอัตราส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ในการทดสอบโครงสร้างจุลภาคใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้ากลบเท่ากับ 36 เปอร์เซ็นต์ อ้างอิงการหาปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ที่น้อยที่สุดจากวิธีของ Diamond (Diamond, 2004) จากนั้นทำการคำนวณหาอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ของอัตราส่วนผสมอื่นๆ โดยนำค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างมอร์ตาร์มาทำการเทียบบัญญัติไตรยางศ์ดังตัวอย่างต่อไปนี้

การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้ากลบ 0 และ 20 เปอร์เซ็นต์ สำหรับเตรียมหินทดสอบมอร์ตาร์ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 86 และ 94 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สำหรับการเตรียมหินทดสอบซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้ากลบจะใช้ปริมาณน้ำเท่ากับ 36 เปอร์เซ็นต์ ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นดังนั้นหินทดสอบซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้ากลบ 20 เปอร์เซ็นต์ ต้องใช้ปริมาณน้ำเท่ากับ

$$((0.36 \times 0.94) / 0.86) \times 100 = 40 \text{ เปอร์เซ็นต์}$$

เมื่อได้ปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมแล้ว ทำการเตรียมหินทดสอบซีเมนต์เพสต์ตามขั้นตอนต่อไปนี้

1. ชั่งน้ำหนักส่วนผสมสำหรับเทหล่อตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ ตามอัตราส่วนแล้วทำการผสมเทลงในแบบหล่อซึ่งใช้ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว สูง 1 นิ้ว เป็นแบบหล่อหินทดสอบ หลังจากทำการเทหล่อเรียบร้อยแล้วปล่อยให้ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง นำหินทดสอบที่ได้ไปบ่มในน้ำเพื่อรอให้ได้อายุที่ต้องการศึกษา
2. นำหินทดสอบที่มีอายุครบกำหนดขึ้นจากน้ำ แล้วนำไปขัดด้วยเครื่องขัดหินงาน (Presi รุ่น Mecapol P 230) โดยใช้แผ่นขัดชนิดผงซิลิกอนคาร์ไบด์เบอร์ 240 320 400 600 800 และ 1,200 ตามลำดับ

หลังจากได้ชิ้นทดสอบซีเมนต์เพสต์ที่ผิวขัดเรียบรื้อแล้วทำการวิเคราะห์โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน ดังนี้

3.4.1 ศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ X-ray Diffraction

นำชิ้นทดสอบซีเมนต์เพสต์สำหรับการตรวจสอบบรรจุลงในที่ใส่ตัวอย่างทดสอบดังภาพที่ 3.19 จากนั้นทำการศึกษาโครงสร้างผลึกโดยวิธีการเช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 1 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์



ภาพที่ 3.19 แสดงชิ้นทดสอบซีเมนต์เพสต์สำหรับศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

3.4.2 ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

นำชิ้นทดสอบซีเมนต์เพสต์ที่ผ่านขั้นตอนการขัดผิวแล้วไปทำการเคลือบผิวด้วยทองด้วยเทคนิคสปัตเตอร์ริง และนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM: LEO รุ่น 1460) ในการตรวจจับสัญญาณภาพใช้การตรวจสอบอิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (Backscatter Electron) เพื่อให้สามารถจำแนกเฟสที่เกิดขึ้นในแต่ละตัวอย่างและการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแต่ละเฟส (Karen, 2004) (Sidney, 2004) (Igarashi, et al. 2004)

สำหรับการคำนวณหาปริมาณของเฟสที่แตกต่างกันในแต่ละตัวอย่าง ใช้การวิเคราะห์จากภาพถ่ายโดยการตรวจสอบอิเล็กทรอนิกส์แบบกระเจิงกลับ โดยใช้โปรแกรม Motic Images Plus 2.0 ML (Motic China Group Co., LTD) เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณของเฟสแต่ละเฟส ส่วนรายละเอียดวิธีการวิเคราะห์หาปริมาณของเฟสระบุไว้ในภาคผนวก ค



บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

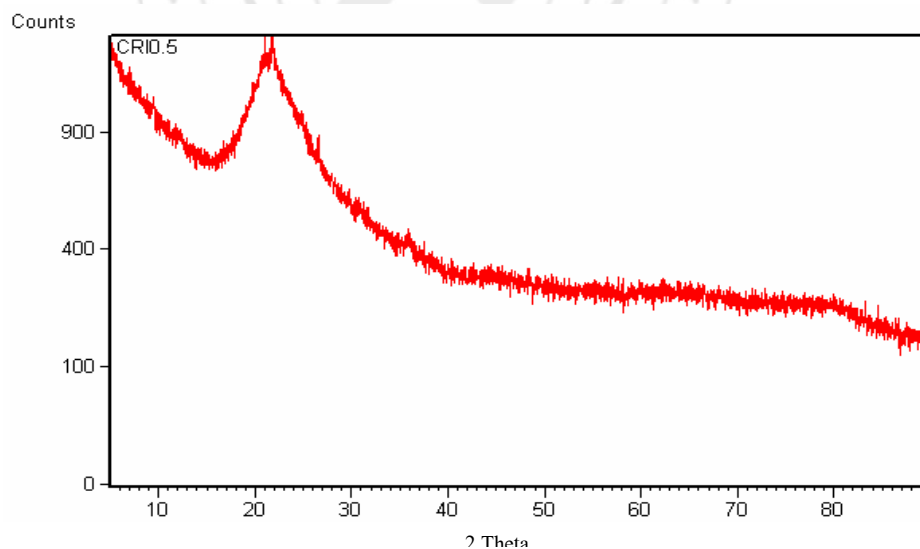
4.1 ผลการศึกษาลักษณะเฉพาะของวัตถุดิบตั้งต้น

ผลการศึกษาวัตถุดิบสำหรับใช้ในการทำการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

4.1.1 ผลการวิเคราะห์เถ้าแกลบ

1. ผลการศึกษาความเป็นผลึกของเถ้าแกลบ

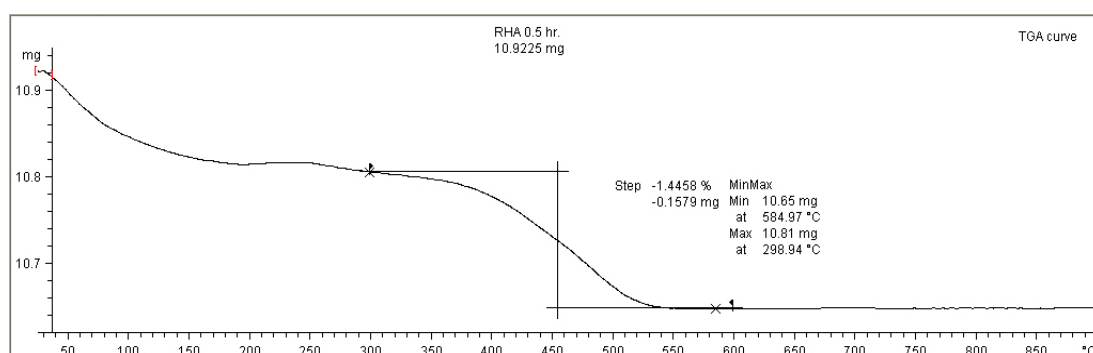
จากการทดสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction) เอกซ์เรย์สเปกตรัมแสดงพีคที่มุม 2θ ประมาณ 21 องศาเพียงตำแหน่งเดียวและมีลักษณะฐานที่กว้างดังภาพที่ 4.1 ซึ่งบ่งชี้ว่าเถ้าแกลบที่ใช้ในการศึกษาเป็นซิลิกาแบบอสัณฐาน (Amorphous Silica) ดังนั้นเถ้าแกลบที่ใช้จัดเป็นวัสดุประเภทพอซโซลานที่เหมาะสมสำหรับการแทนที่ในปูนซีเมนต์ (Malhotra and Kumar, 1996) ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2



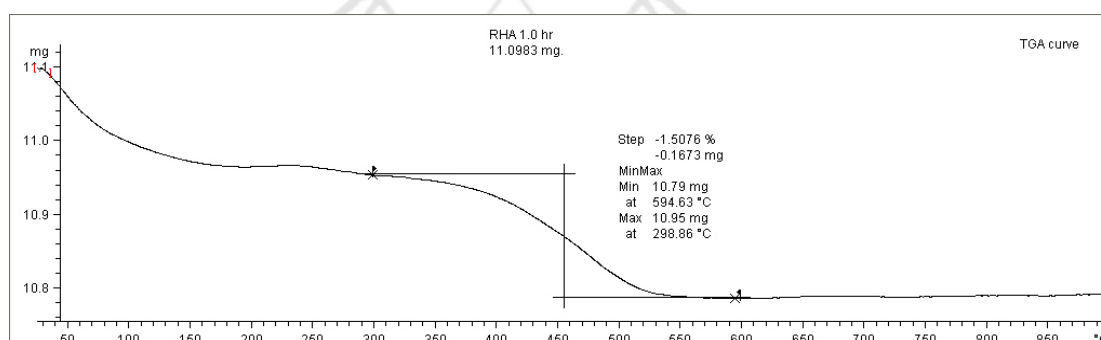
ภาพที่ 4.1 กราฟแสดงลักษณะโครงสร้างของซิลิกาเป็นแบบอสัณฐาน

2. ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน

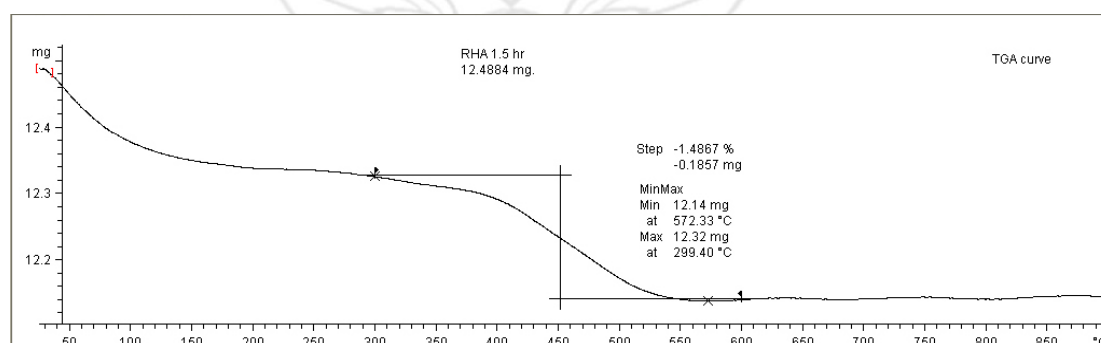
จากการทดสอบด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกอะนาไลซิส เพื่อหาค่าน้ำหนักที่สูญหายหลังการเผา (Loss on Ignition) ทำให้พบว่าจากตัวอย่างเถ้าแกลบที่นำมาใช้ทดสอบและมีระยะเวลาในการบดแตกต่างกันมีค่าน้ำหนักที่สูญหายหลังการเผาที่ใกล้เคียงกัน คือประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 4.1 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ดังภาพที่ 4.2



(a)



(b)



(c)

ภาพที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของเถ้าแกลบที่ใช้เป็นวัสดุดิบ

(a) บด 0.5 ชั่วโมง, (b) บด 1.0 ชั่วโมง, (c) บด 1.5 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.1 แสดงน้ำหนักที่สูญหายหลังการเผาของเถ้าแกลบ

ระยะเวลาการบด (ชั่วโมง)	น้ำหนักสูญหายหลังการเผาของเถ้าแกลบ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
0.5	1.44
1	1.50
1.5	1.48
ค่าเฉลี่ย	1.47

จากเทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลของเถ้าแกลบที่เกิดการสูญเสียที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าในช่วงอุณหภูมิเริ่มต้นไปจนถึงอุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส เถ้าแกลบมีการสูญเสียมวลเล็กน้อยเนื่องจากความชื้นที่อยู่ภายในเถ้าแกลบและในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 300-550 องศาเซลเซียส เถ้าแกลบเกิดการสูญเสียมวลอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากในช่วงอุณหภูมินี้เกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ในเถ้าแกลบ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Richard ในปี 1983 พบว่าในช่วงอุณหภูมิประมาณ 215 องศาเซลเซียส จะเริ่มมีการสลายตัวของสารอินทรีย์และในช่วงอุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส คาร์บอนซึ่งเป็นสารอินทรีย์ประเภทหนึ่งจะเริ่มสลายตัวถ้ามีการเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นอีกก็สามารถที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสได้

3. ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ

จากผลการทดสอบเถ้าแกลบด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence ดังตารางที่ 4.2 พบว่าเถ้าแกลบที่นำมาใช้ในการทดสอบมีซิลิกา (SiO_2) ในปริมาณสูงกว่า 91 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักขององค์ประกอบโดยรวมจากรายงานของ Malhotra & Kumar ในปี 1996 วัสดุประเภทพอลิซิลานจะต้องมีปริมาณของซิลิกาเป็นองค์ประกอบสูง

ตารางที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ

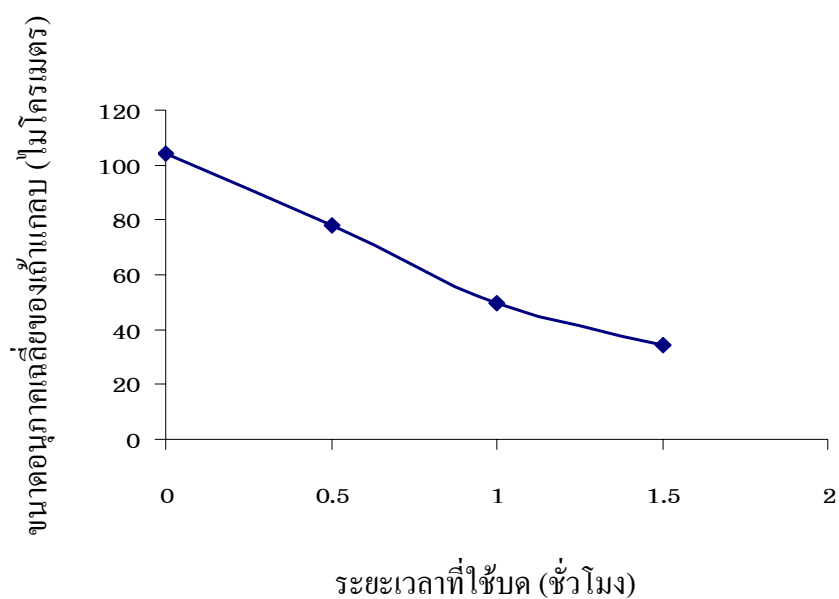
ระยะเวลา การบด (ชั่วโมง)	องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบที่ระยะเวลาการบดต่างๆ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)								
	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO ₂	Fe ₂ O ₃	ZnO	LOI
0.5	91.16	0.53	4.80	0.88	0.09	0.34	0.76	0.04	1.44
1	90.88	0.55	4.96	0.90	0.08	0.33	0.76	0.04	1.50
1.5	91.48	0.53	4.50	0.88	0.07	0.32	0.70	0.04	1.48
ค่าเฉลี่ย	91.17	0.54	4.75	0.88	0.08	0.33	0.74	0.04	1.47

4. ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบ

จากการทดลองพบว่าหลังจากการนำเถ้าแกลบมาทำการบดระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น คือ 0.5, 1.0 และ 1.5 ชั่วโมง เถ้าแกลบจะมีขนาดอนุภาคลดลงอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาที่ใช้ในการบดดังตารางที่ 4.3 และกราฟในภาพที่ 4.3

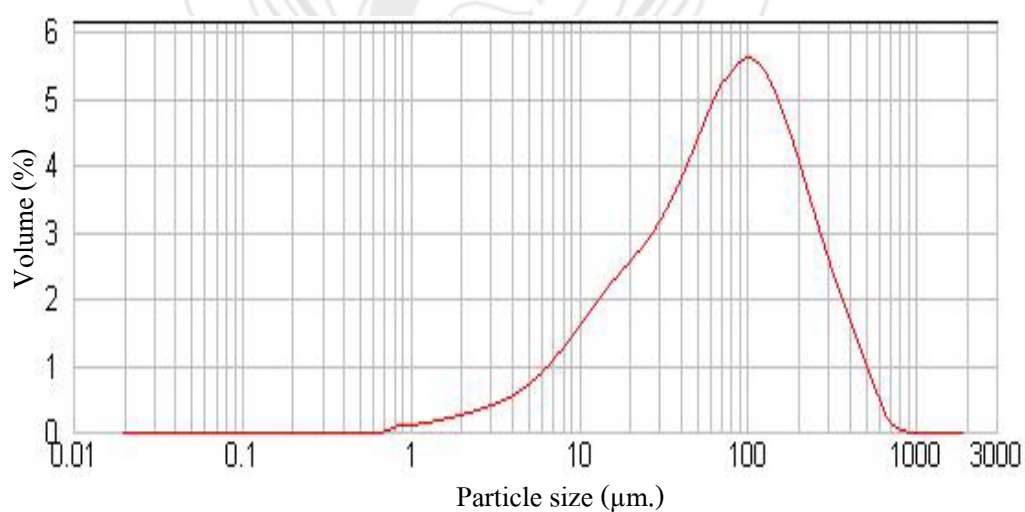
ตารางที่ 4.3 แสดงขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบที่ผ่านการบด

ระยะเวลาการบด (ชั่วโมง)	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย D[4,3] (ไมโครเมตร)	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย D[3,2] (ไมโครเมตร)
0(ไม่บด)	104.2	21.6
0.5	78.1	20.8
1.0	49.7	14.2
1.5	34.5	11.5

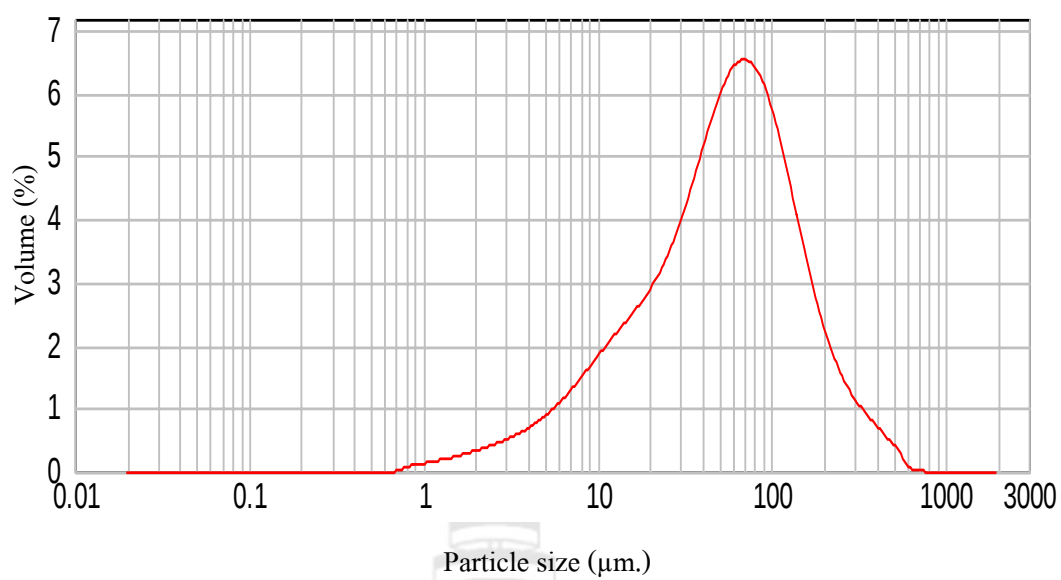


ภาพที่ 4.3 กราฟแสดงแนวโน้มของขนาดอนุภาคเถ้าเคลบที่ผ่านการบด

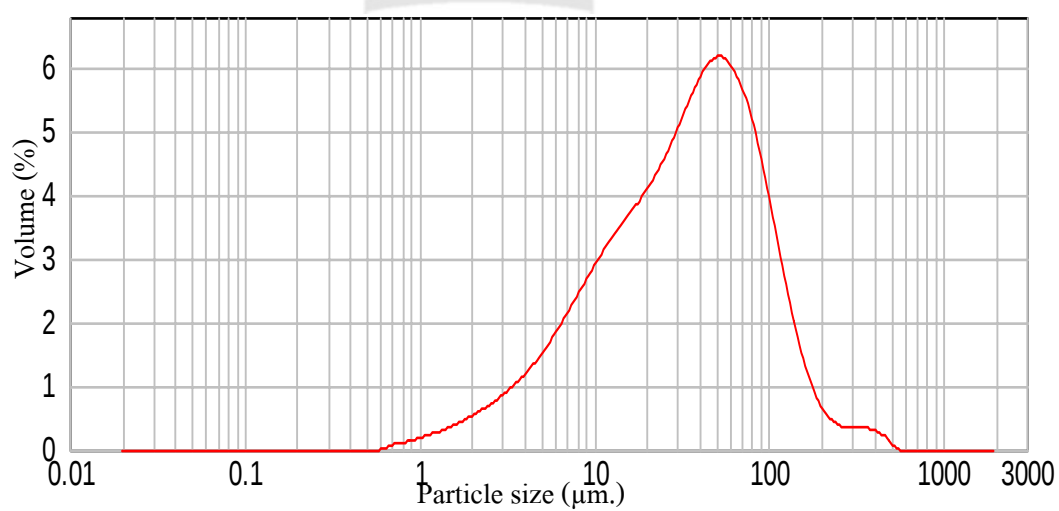
จากผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคพบว่าเมื่อระยะเวลาในการบดเถ้าเคลบเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณของอนุภาคขนาดใหญ่ที่อยู่ในช่วง 100-500 ไมโครเมตร มีสัดส่วนลดลงตามลำดับส่งผลให้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถ้าเคลบมีค่าลดลงตามระยะเวลาที่ใช้ในการบดดังภาพที่ 4.4 ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาที่ใช้ในการบดเถ้าเคลบจะทำให้เถ้าเคลบมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่แตกต่างกัน



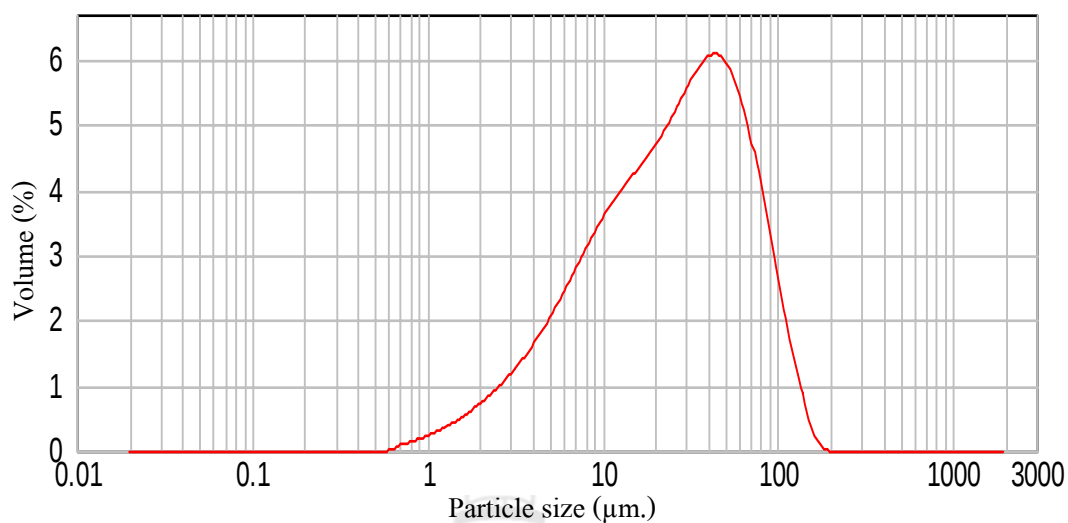
(a)



(b)



(c)

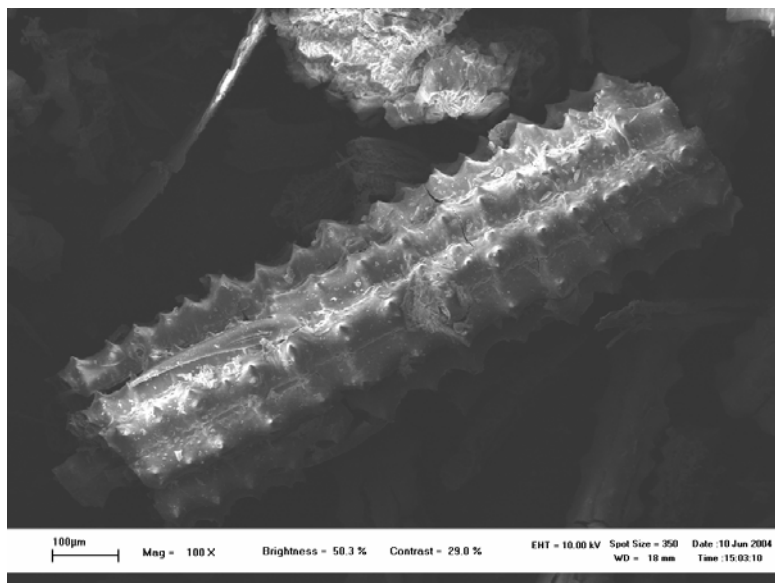


(d)

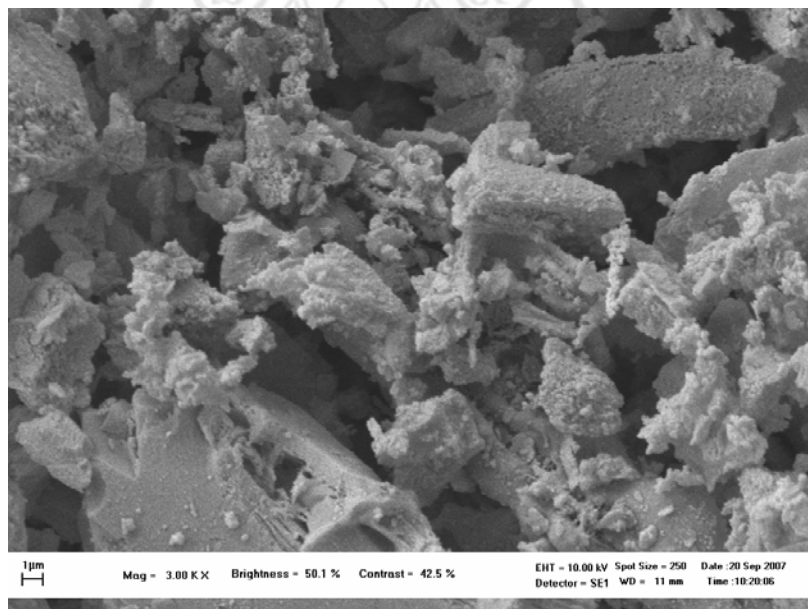
ภาพที่ 4.4 กราฟแสดงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเถ้าแกลบ (a) ไม่ผ่านการบด, (b) บด 0.5 ชั่วโมง, (c) บด 1.0 ชั่วโมง, (d) บด 1.5 ชั่วโมง

5. ผลการตรวจสอบลักษณะจุลภาคของเถ้าแกลบ

จากการศึกษาก่อนหน้านี้พบว่า ลักษณะจุลภาคของเถ้าแกลบที่ไม่ผ่านการบด มีขนาดอนุภาคค่อนข้างใหญ่ประมาณ 100-1000 ไมโครเมตร มีลักษณะเฉพาะแสดงดังภาพที่ 4.5 (นนทพญ์ พลพวก, 2548) ส่วนเถ้าแกลบที่ผ่านการบดเป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง มีขนาดของอนุภาคที่เล็กลงอย่างชัดเจนคือมีขนาดประมาณ 20-30 ไมโครเมตรและมีลักษณะการจัดเรียงแบบกระจายตัวไม่เกาะกันเป็นก้อน ดังภาพที่ 4.6 ซึ่งขนาดอนุภาคที่ได้สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคเถ้าแกลบในหัวข้อที่ผ่านมา



ภาพที่ 4.5 แสดงลักษณะจุลภาคของเปลือกที่ไม่ผ่านการบดที่กำลังขยาย 100 เท่า
(นนทพษ์ พลพวก, 2548)

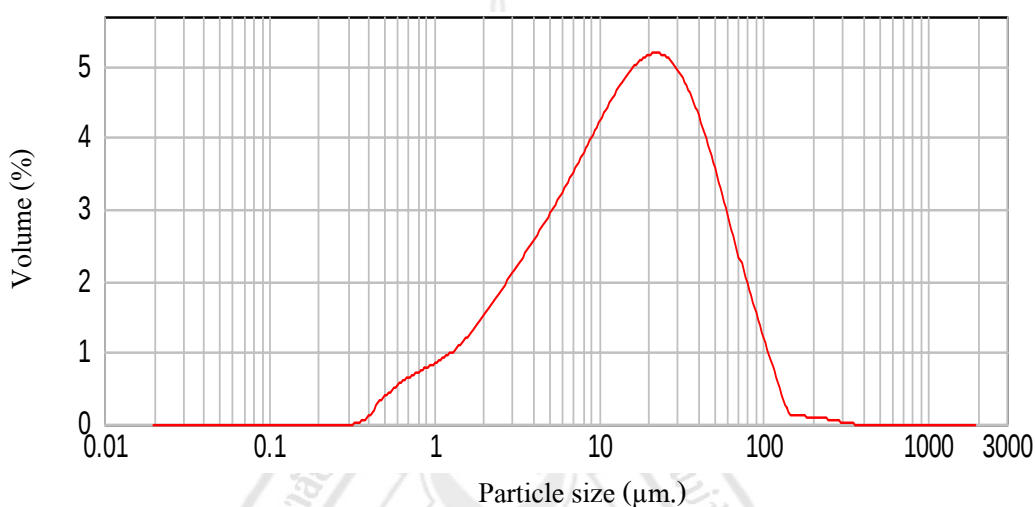


ภาพที่ 4.6 แสดงลักษณะจุลภาคของเปลือกที่ผ่านการบด 1.5 ชั่วโมงที่กำลังขยาย 3000 เท่า

4.1.2 ผลการวิเคราะห์ผงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

1. ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของผงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

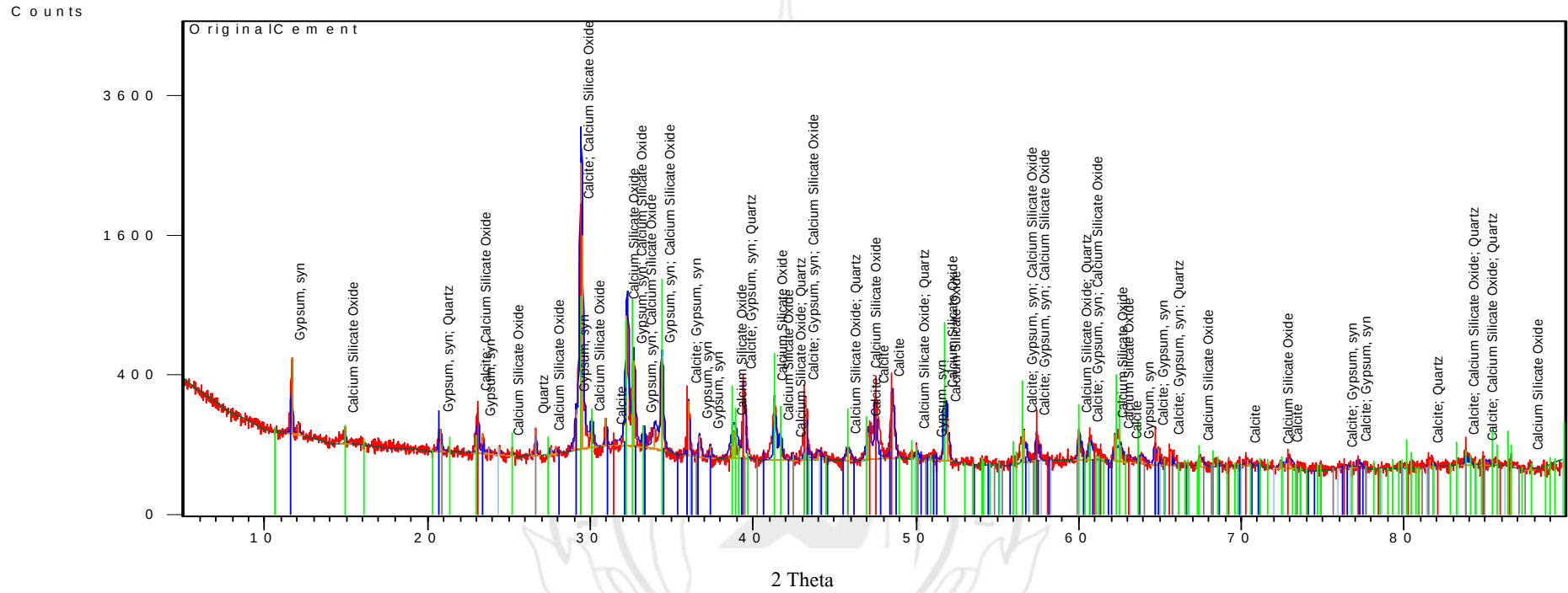
จากการวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 23.5 ไมโครเมตร และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.3 ไมโครเมตร ซึ่งขนาดอนุภาคเฉลี่ยของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีขนาดเล็กกว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถ้าแกลบที่ผ่านการบด แสดงดังภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.7 กราฟแสดงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

2. ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของผงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

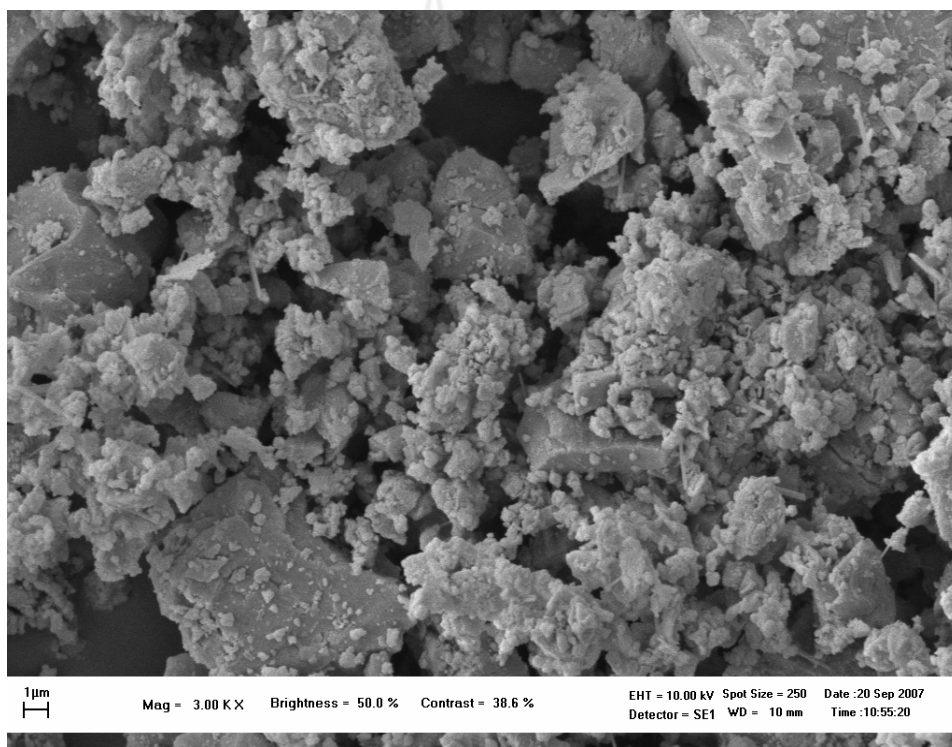
จากเอ็กซ์เรย์สเปกตรัมในภาพที่ 4.8 และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบพบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วย แคลไซต์และแคลเซียมซิลิเกต เป็นสารประกอบหลักซึ่งจะเป็นตัวทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำ ในการเตรียมซีเมนต์เพสต์ (Francis and David, 2002) นอกจากนี้ยังพบอิมพัลส์ที่ทำหน้าที่หน่วงการแข็งตัวเป็นตัวเติมในขั้นตอนของการผลิตปูนซีเมนต์ ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 เรื่องส่วนของสารประกอบของปูนซีเมนต์ (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2539)



ภาพที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

3. ผลการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผงปูนซีเมนต์

จากการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผงปูนซีเมนต์ที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนในภาพที่ 4.9 พบว่ามีขนาดอนุภาคประมาณ 10-30 ไมโครเมตรซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคในหัวข้อที่ 1 (หน้า 49) ที่ได้คำนวณขนาดอนุภาคเฉลี่ยเป็น 23.5 ไมโครเมตร และจากภาพจะเห็นว่าผงปูนซีเมนต์มีการจัดเรียงตัวกันเป็นกลุ่มหลวมๆ ยังไม่มีการเชื่อมประสานกัน



ภาพที่ 4.9 แสดงลักษณะโดยทั่วไปของผงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่กำลังขยาย 3000 เท่า

4.2 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพ

4.2.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบ

จากการทำการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ไม่มีการแทนที่สามารถแบ่งผลการทดสอบออกเป็นส่วนดังต่อไปนี้

ผลของขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบที่มีต่อค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์พบว่า เมื่อใช้ขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบขนาดเล็กในกลุ่ม S ในการทดสอบ ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์จะมีแนวโน้มสูงขึ้น การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบขนาดอนุภาคกลุ่ม L และ M ส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดในทิศทางตรงข้ามกับกลุ่มขนาดอนุภาคขนาด S โดยเมื่อใช้ขนาดอนุภาคกลุ่ม L แทนที่ทุกอัตราส่วนที่ใช้ผสมมอร์ตาร์ค่ากำลังรับแรงอัดจะลดลง ในส่วนขนาดอนุภาคกลุ่ม M นั้นค่ากำลังรับแรงอัดจะลดลงเช่นเดียวกับการใช้ขนาดอนุภาคในกลุ่ม L ยกเว้นที่อัตราส่วนการแทนที่ L10 เพียงอัตราส่วนเดียวที่ทำให้กำลังสูงกว่ามอร์ตาร์ที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบดังภาพที่ 4.10-4.14

ผลของอายุที่เพิ่มขึ้นที่มีต่อค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ในทุกอัตราส่วนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทั้งสิ้นเมื่ออายุของมอร์ตาร์เพิ่ม โดยในช่วงเริ่มต้นถึงอายุ 7 วันค่ากำลังรับแรงรับจะพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็วและหลังจากนั้นแนวโน้มของการพัฒนาจะเริ่มลดลงแต่ยังคงมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดอย่างต่อเนื่อง แสดงแนวโน้มดังภาพที่ 4.15-4.17

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์

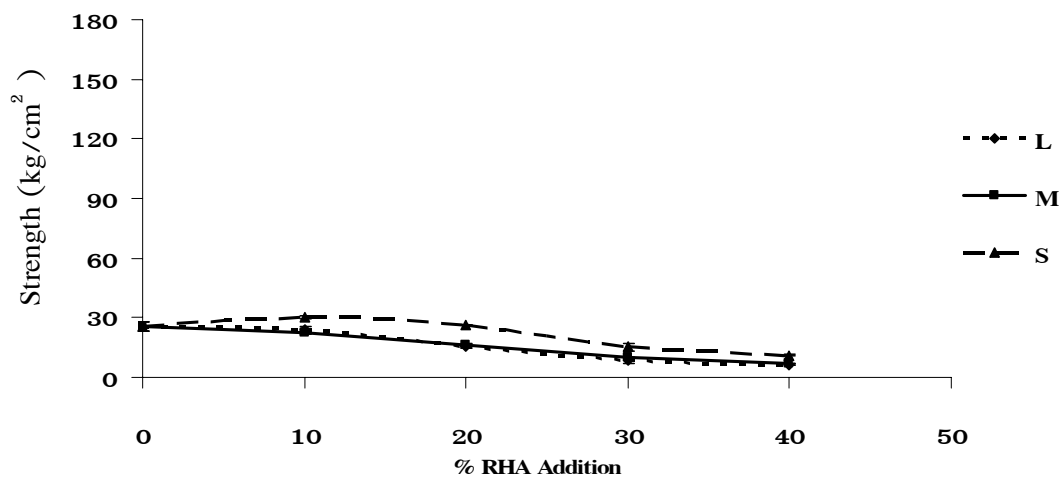
รหัสย่อ	1 วัน (kg/cm ²)	7 วัน (kg/cm ²)	14 วัน (kg/cm ²)	28 วัน (kg/cm ²)	56 วัน (kg/cm ²)
Std.	25.5	71.4	97.1	108.1	128.3
L10	24.4	66.0	82.3	105.4	118.7
L20	15.3	56.9	66.6	80.5	93.9
L30	8.6	38.6	56.1	71.6	85.4
L40	6.6	41.1	57.2	73.2	87.6
M10	22.2	88.3	113.0	128.3	146.1
M20	16.2	73.7	98.0	107.6	120.5
M30	9.9	70.6	89.6	111.1	127.3
M40	6.7	56.7	75.9	82.3	90.9
S10	30.4	105.0	130.8	139.5	161.3
S20	26.3	104.2	124.5	141.5	162.8
S30	15.4	82.1	106.8	116.3	153.5
S40	11.1	69.5	88.0	100.9	124.2

โดย

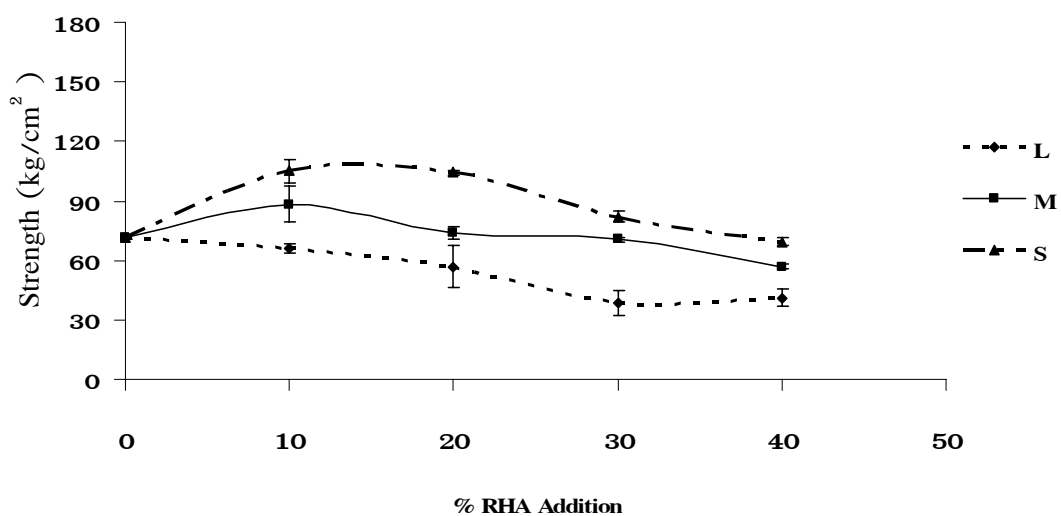
L : แทนมอร์ต้าร์ที่แทนที่เถ้าแกลบที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 78 ไมโครเมตร (บด 0.5 ชั่วโมง)

M: แทนมอร์ต้าร์ที่แทนที่เถ้าแกลบที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 50 ไมโครเมตร (บด 1.0 ชั่วโมง)

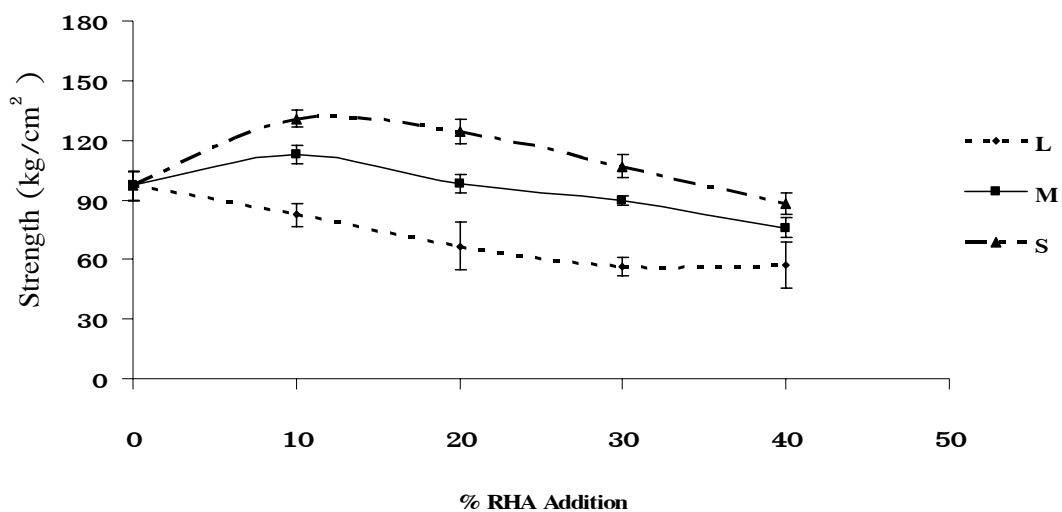
S : แทนมอร์ต้าร์ที่แทนที่เถ้าแกลบที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 34 ไมโครเมตร (บด 1.5 ชั่วโมง)



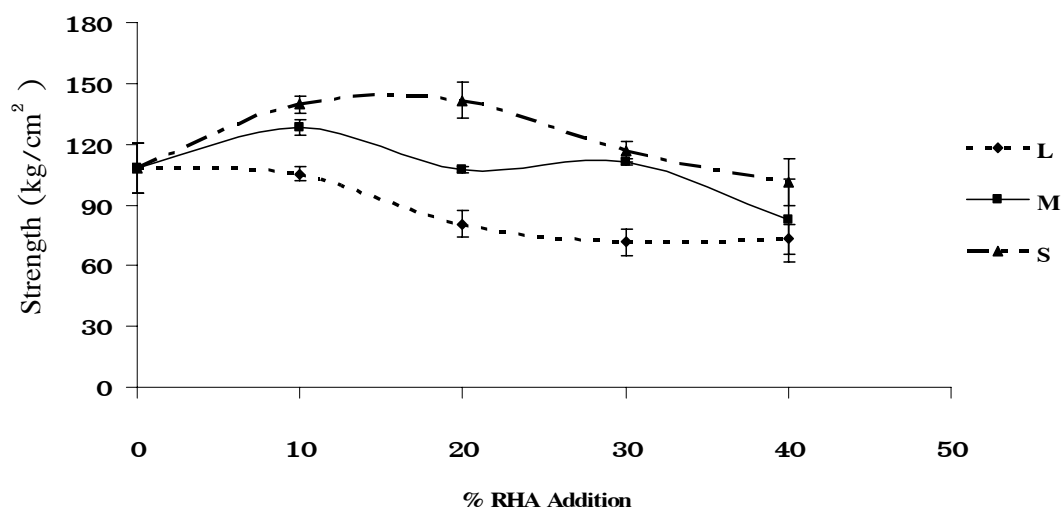
ภาพที่ 4.10 กราฟค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้ารอายุ 1 วัน



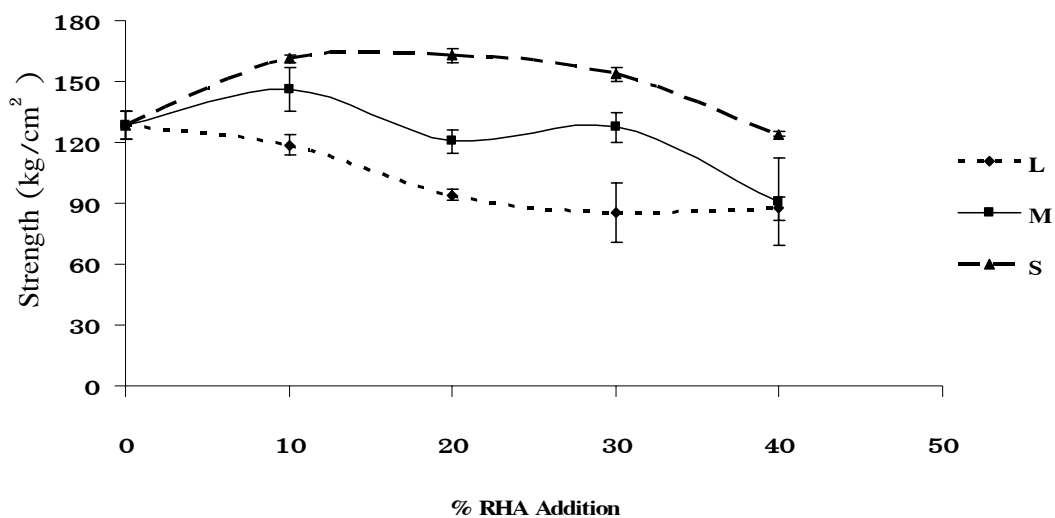
ภาพที่ 4.11 กราฟค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้ารอายุ 7 วัน



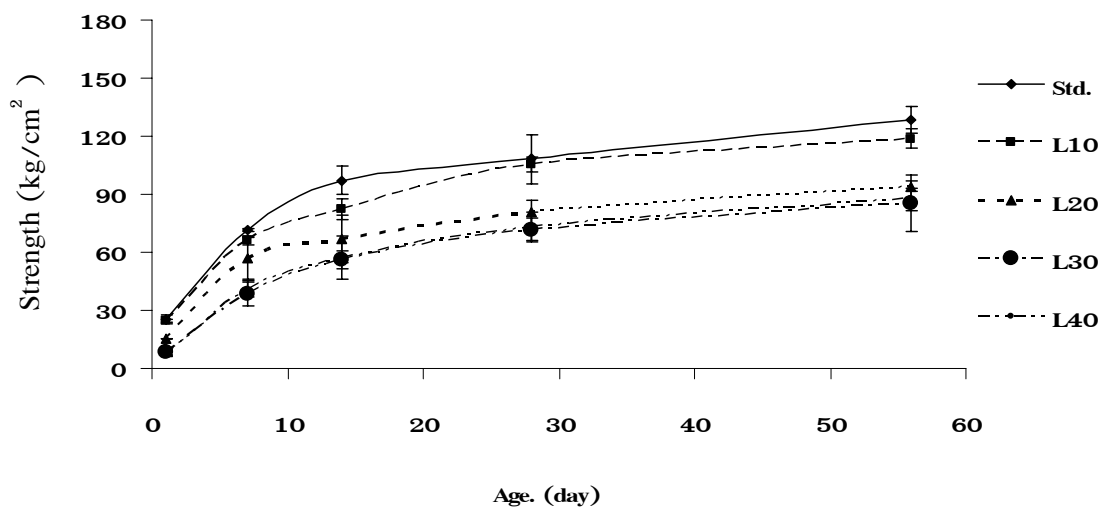
ภาพที่ 4.12 กราฟค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้ารอายุ 14 วัน



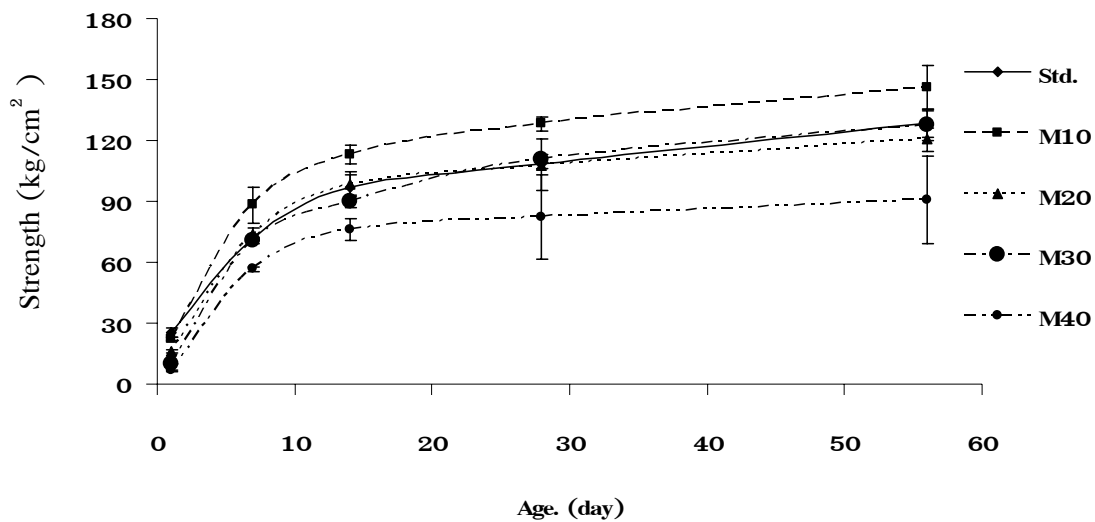
ภาพที่ 4.13 กราฟค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้ารอายุ 28 วัน



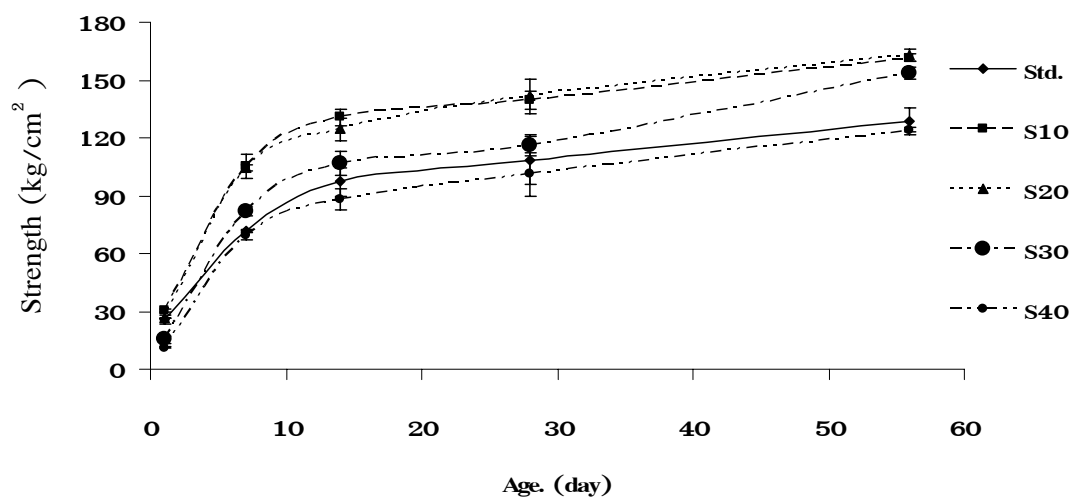
ภาพที่ 4.14 กราฟค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้ารอายุ 56 วัน



ภาพที่ 4.15 กราฟค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้ารขนาดอนุภาคเฉลี่ย 78 ไมโครเมตร



ภาพที่ 4.16 กราฟค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้ารขนาดอนุภาคเฉลี่ย 50 ไมโครเมตร



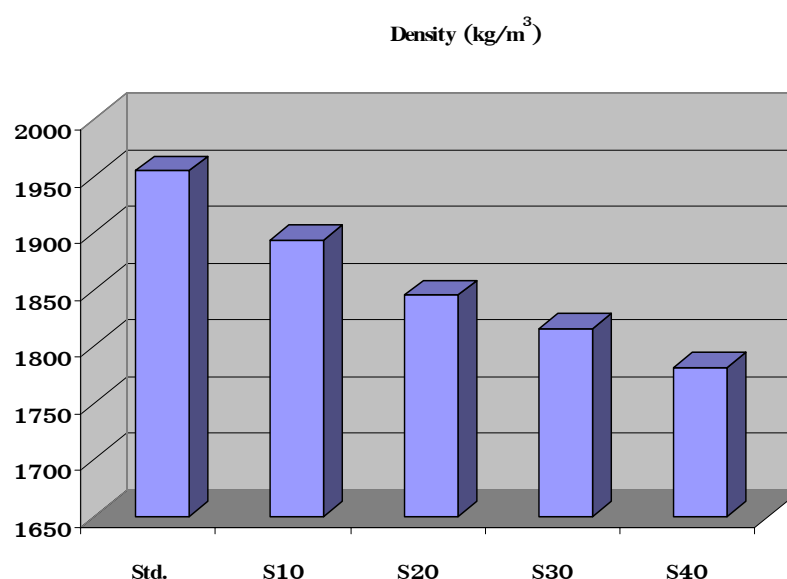
ภาพที่ 4.17 กราฟค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้ารขนาดอนุภาคเฉลี่ย 38 ไมโครเมตร

4.2.3 ผลการทดสอบค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ (Density)

การทดสอบค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์พบว่าเมื่อมีการแทนที่ส่วนผสมด้วยเถ้ากลบที่ใช้ในการทำชั้นทดสอบ พบว่าชั้นทดสอบมีความหนาแน่นลดลงเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้ากลบดังแสดงในตารางที่ 4.5 และจากภาพที่ 4.18 พบว่า ค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์มีแนวโน้มการลดลงเมื่ออัตราส่วนของเถ้ากลบเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเถ้ากลบที่ใช้แทนที่ในส่วนผสมมีความหนาแน่นน้อยกว่าปูนซีเมนต์ดังนั้นเมื่อใช้เถ้ากลบที่มีน้ำหนักเท่ากับปูนซีเมนต์จะทำให้ได้ปริมาตรเพิ่มขึ้นและเมื่อเพิ่มอัตราส่วนในการแทนที่มากขึ้นจึงทำให้ค่าความหนาแน่นของชั้นทดสอบลดลง

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดสอบ

รหัสย่อ	ความหนาแน่น(kg/m ³)
Std.	1954
S10	1893
S20	1844
S30	1815
S40	1780

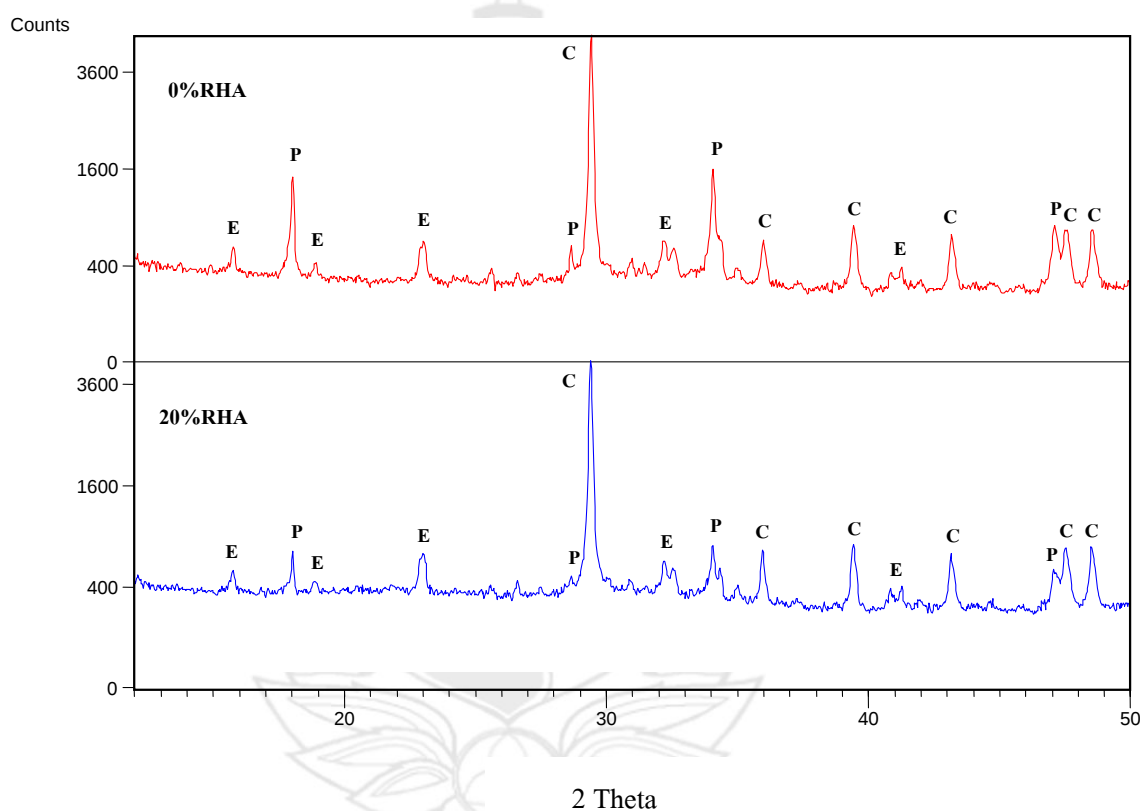


ภาพที่ 4.18 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้ากลบในอัตราส่วนต่างกัน

4.3 ผลการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์แข็งตัว

4.3.1 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

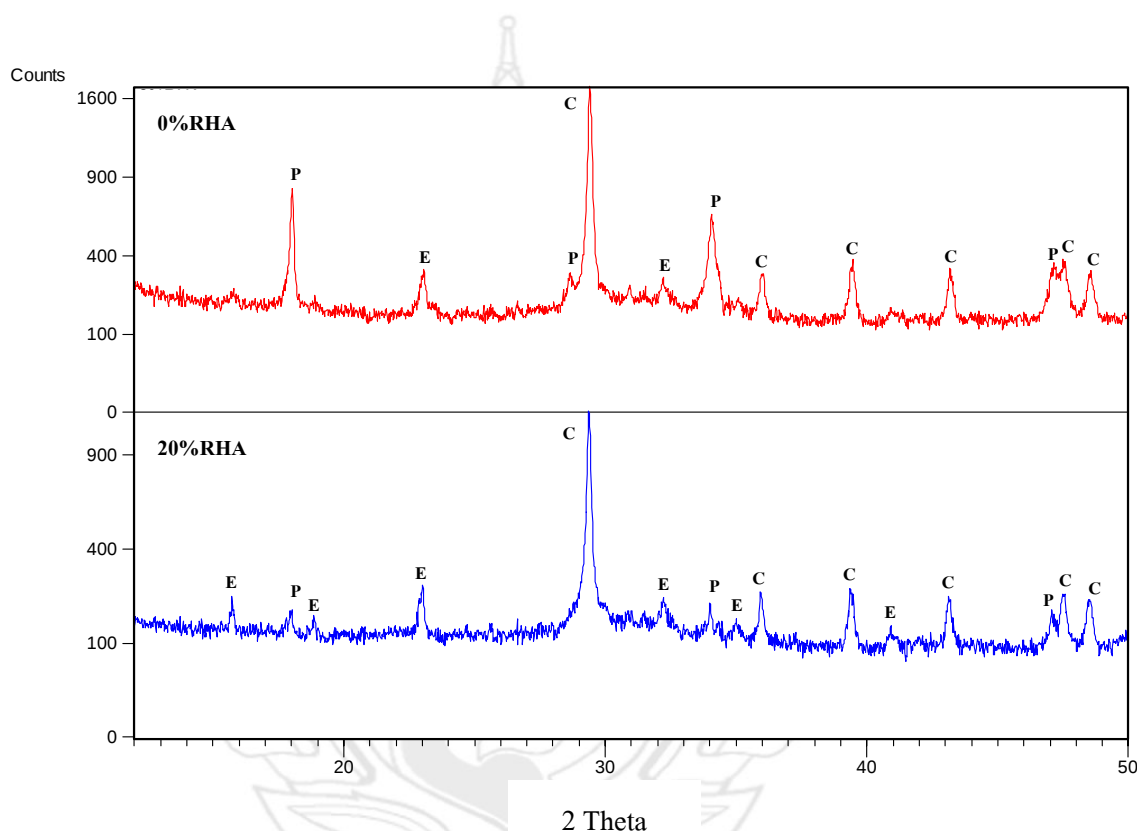
จากการทดสอบซีเมนต์เพสต์แข็งตัวด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึก พบว่า ตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการเติมเถ้าแกลบและตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่มีการเติมเถ้าแกลบแทนที่ 20 เปอร์เซ็นต์ (S20) ให้กราฟแสดงลักษณะการเกิดโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันดังแสดงในภาพที่ 4.19-4.22



ภาพที่ 4.19 กราฟแสดงลักษณะโครงสร้างผลึกของซีเมนต์เพสต์แข็งตัวที่อายุ 7 วัน

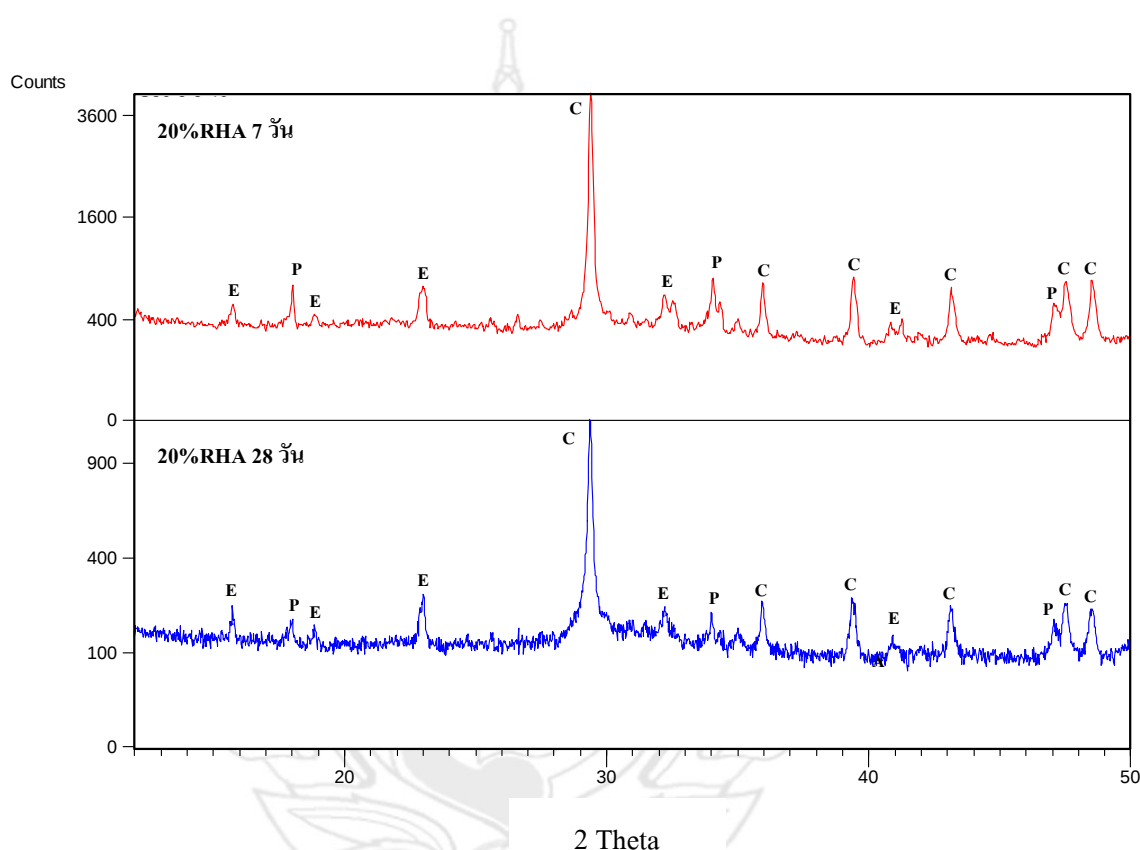
(C: Calcite, P: Portlandite, E: Ettringite)

จากกราฟแสดงลักษณะโครงสร้างผลึกของซีเมนต์เพสต์แข็งตัวพบว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบ และที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบ (S20) มีองค์ประกอบหลักของฟิสิกที่เกิดขึ้นคล้ายคลึงกันโดยประกอบไปด้วย C: Calcite, P: Portlandite และ E: Ettringite เมื่อพิจารณาตำแหน่งที่มุม 2 Theta เป็น 18 และ 34 องศา พบว่าฟิสิก Portlandite มีความสูงลดลงอย่างชัดเจนในตัวอย่าง S20 ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลในบทที่ 2 ที่กล่าวถึงการนำวัสดุประเภทพอสโซลานมาทำการแทนที่ในซีเมนต์เพื่อให้เกิดการทำปฏิกิริยากับ Portlandite ที่เหลืออยู่จากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน



ภาพที่ 4.20 กราฟแสดงลักษณะโครงสร้างผลึกของซีเมนต์เพสต์แข็งตัวที่อายุ 28 วัน
(C: Calcite, P: Portlandite, E: Ettringite)

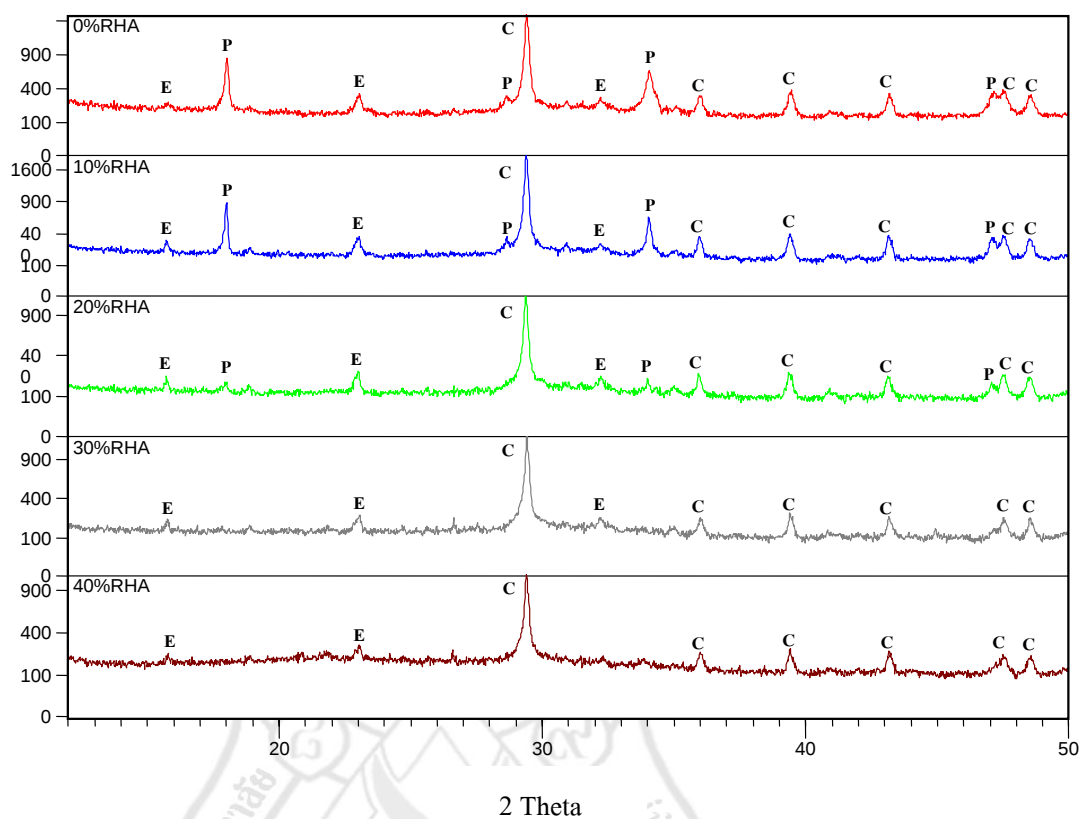
จากผลการทดสอบในส่วนของระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มซีเมนต์เพสต์ พบว่าซีเมนต์เพสต์ S20 ที่อายุ 7 และ 28 วัน ความสูงของพีค P: Portlandite ลดลงต่อไปอย่างชัดเจน โดยที่อายุ 7 วัน ความสูงของพีค Portlandite จะสูงกว่าที่อายุ 28 วัน ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาแล้วนำ Portlandite ที่เหลือมาใช้อย่างต่อเนื่องเพราะมีการเติมวัสดุประเภทพอซโซลานเข้ามาแทนที่จึงทำให้ ความสูงของพีคลดลง แต่ซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่ด้วยวัสดุประเภทพอซโซลานในอายุดังกล่าว ความสูงของพีค P เมื่อเทียบกับ C แทบไม่เปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 4.21 กราฟแสดงลักษณะโครงสร้างผลึกของซีเมนต์เพสต์แข็งตัวที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบ 20 เปอร์เซนต์ ที่อายุ 7 และ 28 วัน (C: Calcite, P: Portlandite, E: Ettringite)

ภาพที่ 4.22 เมื่อมีการเพิ่มปริมาณของเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ 10 เปอร์เซ็นต์ ในชั้นทดสอบมอร์ตาร์ พบว่าความสูงของฟิค Portlandite ใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบและเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบด้วยปูนซีเมนต์ 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่าความสูงของฟิค Portlandite ลดลงอย่างชัดเจน และเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบด้วยปูนซีเมนต์สูงขึ้นเป็น 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์ ความสูงของฟิค Portlandite ลดจนแทบไม่ปรากฏซึ่งน่าจะเป็นเพราะการทำปฏิกิริยาระหว่าง Portlandite กับ SiO_2 ได้ผลิตภัณฑ์ C-S-H ตามสมการที่ 2.7 ซึ่งสอดคล้องกับชัชวาล เศรษฐบุตร (2539) ปรินญา จินดาประเสริฐและชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2549) เนื่องจากปูนซีเมนต์ที่ทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ CSH และ CH CHที่เหลืออยู่ไม่ก่อให้เกิดประโยชน์ในบางครั้งอาจส่งผลเสียทำให้การจับยึดระหว่างมวลรวมและมอร์ตาร์หรือคอนกรีต ไม่ดีนัก แต่เมื่อมีการเติมเถ้าแกลบที่เป็นวัสดุพอสโซลานซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกา(SiO_2)ทำปฏิกิริยากับ CH ได้ผลิตภัณฑ์ CHS เพิ่มขึ้นดังที่กล่าวไปข้างต้น แต่เมื่อมีการเพิ่มปริมาณเถ้าแกลบเป็น 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์ ความสูงของฟิค Portlandite ลดจนแทบไม่ปรากฏนั้นเป็นเพราะเมื่อเติมซิลิกาเข้าไปแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่มากเกินไปปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เหลืออยู่ในองค์ประกอบส่วนที่สามารถทำปฏิกิริยาได้นั้นก็จะทำปฏิกิริยากันจนหมดจึงทำให้ความสูงของฟิค Portlandite ลดลง และส่วนที่มากเกินไปปริมาณที่จะทำปฏิกิริยาได้จะส่งผลเสียกับค่ากำลังรับแรงอัดเพราะไม่มีความสามารถที่จะรวมตัวและเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ที่ให้ความสามารถในการเชื่อมประสานได้จึงทำให้อัตราส่วนการแทนที่ 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์ มีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำ

Counts



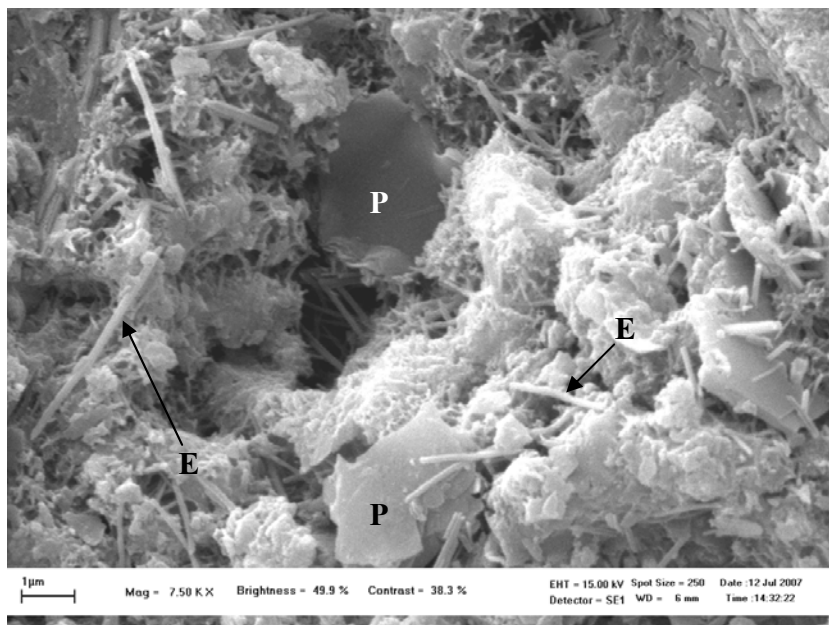
ภาพที่ 4.22 กราฟแสดงลักษณะโครงสร้างผลึกของซีเมนต์เพสต์แข็งตัวที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบ 0-40 เปอร์เซ็นต์ อายุ 28 วัน (C: Calcite, P: Portlandite, E: Ettringite)

4.3.2 ผลการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

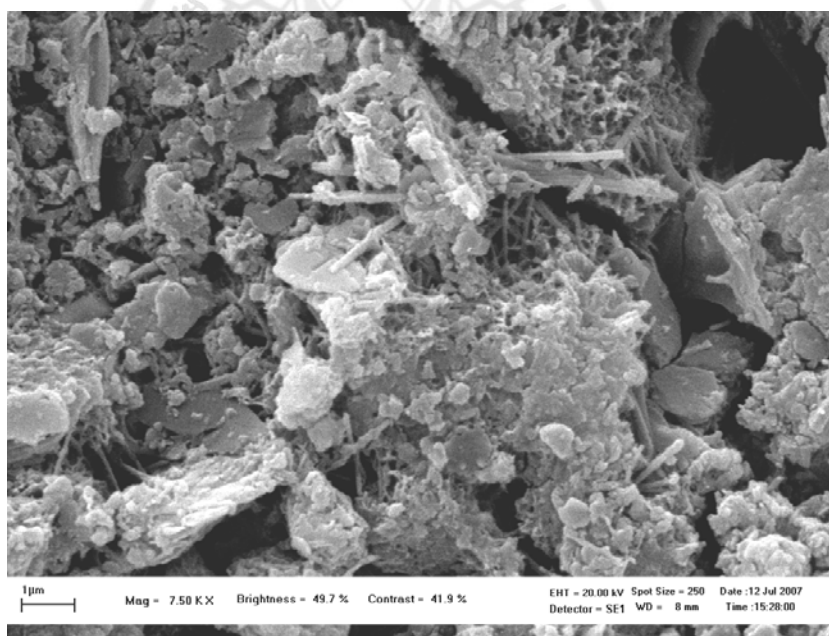
ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบ อายุ 3 วัน ดังภาพที่ 4.23 และ 7 วัน ดังภาพที่ 4.24 ในตัวอย่างที่อายุ 3 วัน พบผลึก Portlandite ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่น และ Ettringite ซึ่งมีผลึกรูปเข็ม กระจายตัวอยู่ทั่วไปและที่อายุ 7 วัน ผลึก Portlandite และ Ettringite มีปริมาณลดลงเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นและผลการศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคระหว่างซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบกับซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบ 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ที่เวลาการบ่ม 3 วัน โครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบ 20 เปอร์เซ็นต์มีผลึกของ Portlandite ลดลงดังแสดงในภาพที่ 4.25 เนื่องจาก Portlandite ได้ทำปฏิกิริยากับซิลิกาในเถ้าแกลบเกิดเป็น CSH ทำให้เกิดการเชื่อมประสานในโครงสร้างซีเมนต์เพสต์มากขึ้น ดังนั้นซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบ 20 เปอร์เซ็นต์จึงแสดงค่ากำลังรับแรงอัดที่ดีกว่าที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วันเท่ากัน

นอกจากนี้ยังสังเกตพบผลของระยะเวลาในการบ่มต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบ 20 เปอร์เซ็นต์ กล่าวคือ เมื่อบ่มเป็นเวลา 3 วัน พบผลึกของ Portlandite ซึ่งมีเป็นลักษณะเป็นแผ่น และ Ettringite ซึ่งมีผลึกรูปเข็ม ดังแสดงในภาพที่ 4.25 แต่เมื่อเวลาการบ่มนานขึ้นเป็นเวลา 7 วัน พบว่า ผลึกของ Portlandite ลดลง ดังแสดงในภาพที่ 4.26 เนื่องจากระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นปฏิกิริยาระหว่าง Portlandite กับเถ้าแกลบเกิดได้มากขึ้น ส่วนซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบยังคงมีผลึกของ Portlandite เหลืออยู่มากกว่า ดังนั้นจึงสามารถอธิบายได้ว่าภายในซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบเกิดปฏิกิริยาระหว่าง Portlandite กับเถ้าแกลบกลายเป็น CSH ซึ่งเป็นเฟสที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงและลดช่องว่างภายในโครงสร้าง

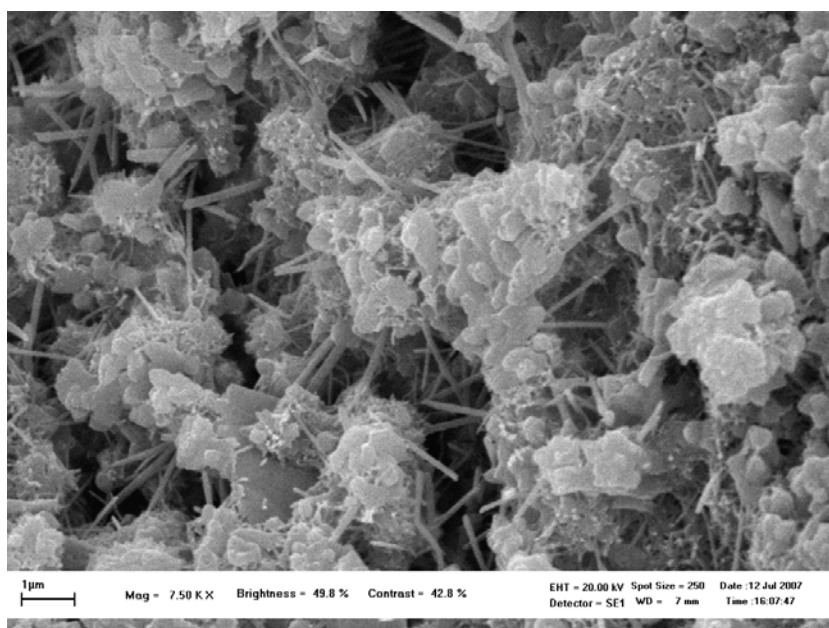
เมื่อเพิ่มระยะเวลาการบ่มจนถึง 28 วัน โครงสร้างจุลภาคของทั้งซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่ดังภาพที่ 4.27 และมีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบดังภาพที่ 4.28 มีลักษณะของการเชื่อมประสานกันเพิ่มมากขึ้นกว่าที่อายุ 3 วัน และ 7 วัน โดยลักษณะจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบ 20 เปอร์เซ็นต์ อายุ 28 วัน มีการเชื่อมประสานกันอย่างชัดเจนมากกว่าและผิวหน้าของร้อยหักมีลักษณะเรียบและต่อเนื่องแสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงของการยึดเกาะระหว่างอนุภาคที่ดีกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบ



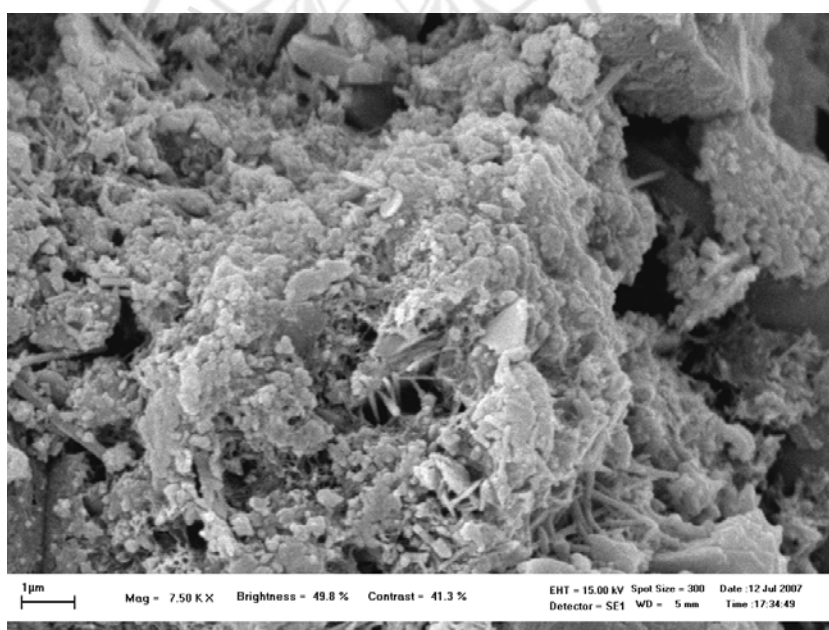
ภาพที่ 4.23 แสดงลักษณะจุลภาคของซีเมนต์เพสต์แข็งตัวที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้ากลบอายุ 3 วัน
กำลังขยาย 7500 เท่า (P: Portlandite, E: Ettringite)



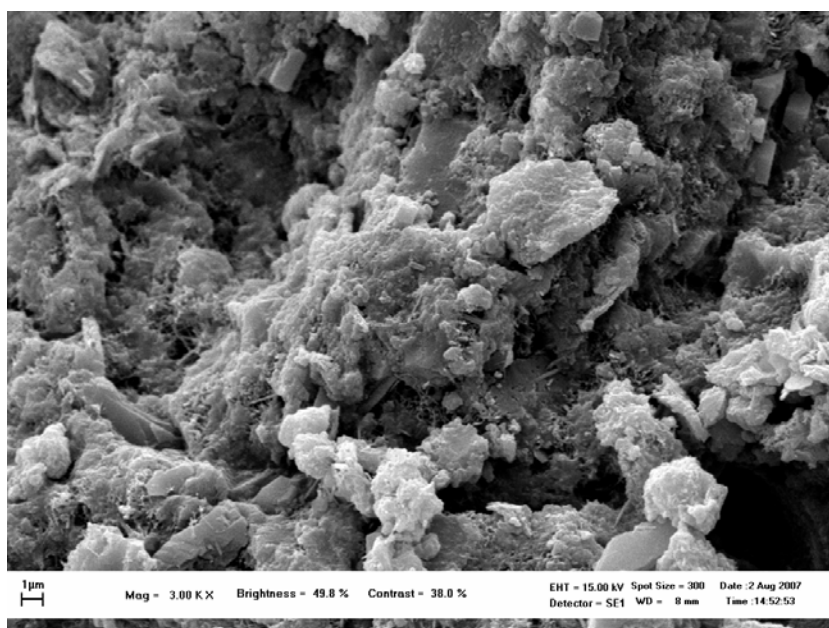
ภาพที่ 4.24 แสดงลักษณะจุลภาคของซีเมนต์เพสต์แข็งตัวที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้ากลบอายุ 7 วัน
กำลังขยาย 7500 เท่า



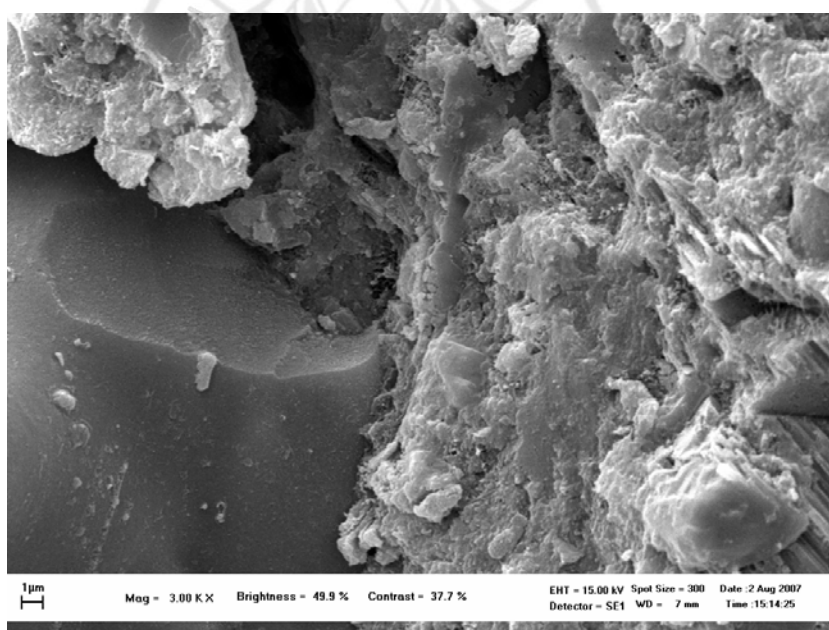
ภาพที่ 4.25 แสดงลักษณะจุลภาคของซีเมนต์เพสต์แข็งตัวที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบ 20 เปอร์เซ็นต์ อายุ 3 วัน กำลังขยาย 7500 เท่า



ภาพที่ 4.26 ลักษณะจุลภาคของซีเมนต์เพสต์แข็งตัวที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบ 20 เปอร์เซ็นต์อายุ 7 วัน กำลังขยาย 7500 เท่า

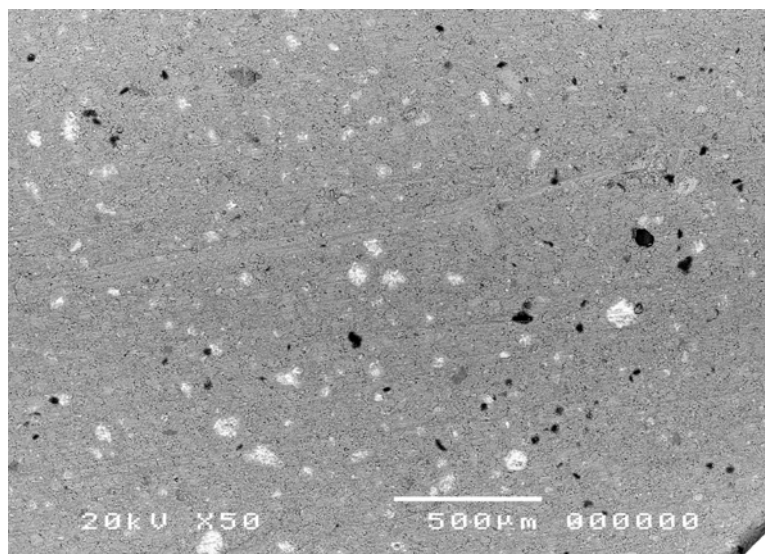


ภาพที่ 4.27 แสดงลักษณะจุลภาคของซีเมนต์เพสต์แข็งตัวที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้ากลบ อายุ 28 วัน กำลังขยาย 3000 เท่า

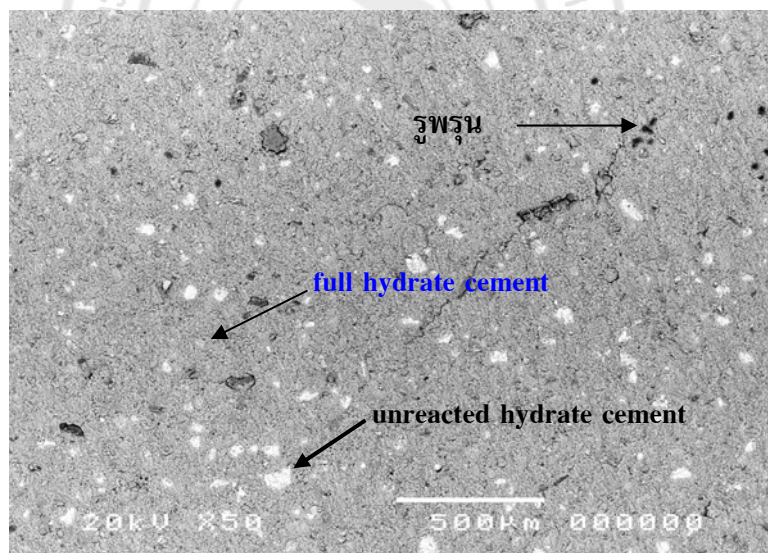


ภาพที่ 4.28 ลักษณะจุลภาคของซีเมนต์เพสต์แข็งตัวที่แทนที่ด้วยเถ้ากลบ 20 เปอร์เซ็นต์ อายุ 28 วัน กำลังขยาย 3000 เท่า

นอกจากนี้ยังมีการตรวจสอบปริมาณของสารประกอบต่างๆ ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์แข็งตัว พบว่าในแต่ละช่วงอายุโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ที่กำลังขยายตัวมีเฟสที่เกิดขึ้นแตกต่างกันซึ่งสามารถพิจารณาจากภาพถ่ายระหว่างซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่กับซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบ 20 เปอร์เซ็นต์ (S20) ดังภาพที่ 4.29



(a)



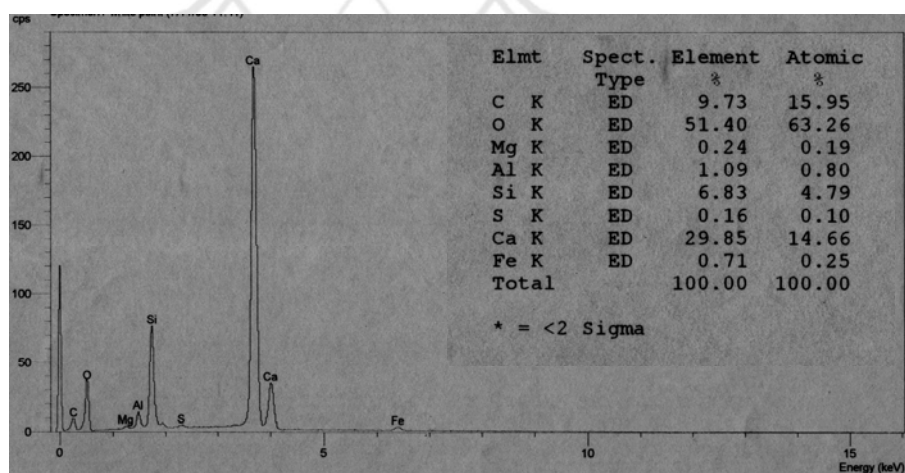
(b)

ภาพที่ 4.29 แสดงลักษณะจุลภาคของซีเมนต์เพสต์แข็งตัว(56 วัน)

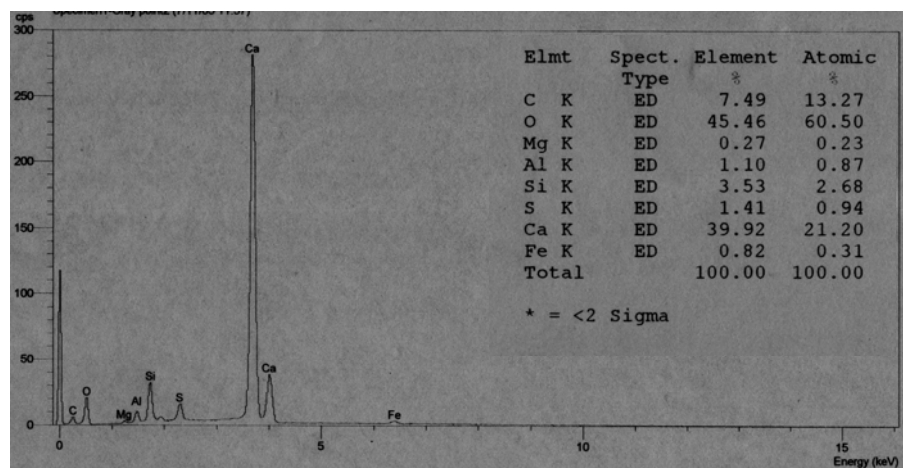
(a) ซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบ

(b) ซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบ 20 เปอร์เซ็นต์

จากภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยายต่ำสามารถจำแนกเฟสที่มีลักษณะแตกต่างกันออกเป็น 3 ลักษณะดังแสดงตัวอย่างดังภาพที่ 4.29(a) ประกอบด้วย พื้นที่เฟสที่เป็นสีดำ เป็นบริเวณที่เป็นเฟสของรูพรุน พื้นที่เฟสของ full hydrate cement พื้นที่ที่เป็นสีเทาเป็นเฟสที่ซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ และพื้นที่เฟสที่มีสีขาวสว่างเป็นเฟส unreacted hydrate cement ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ (Arandigoyen and Alvarez, 2005) ที่ปริมาณการเติมเถ้าแกลบ 20 เปอร์เซ็นต์ ดังภาพที่ 4.29(b) พบเฟสสีขาวมากกว่าในซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการเติมเถ้าแกลบ เนื่องจากเป็นเฟสของ unreacted hydrate cement และเถ้าแกลบที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา เฟสสีขาวนี้ยังมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดอนุภาคของเริ่มต้นของเถ้าแกลบ (34 μm) นอกจากนี้ผลการทดสอบเปรียบเทียบกับองค์ประกอบทางเคมีของเฟสที่มีสีขาวกับสีเทาด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยรังสีเอกซ์ระดับจุลภาค (Energy Dispersive X-ray Microanalysis) พบว่าบริเวณเฟสสีขาวแสดงปริมาณซิลิกามากกว่าเฟสสีเทาของ ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าเฟสสีขาวแสดงเฟสของเถ้าแกลบที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาและเฟสของ unreacted hydrate cement



ภาพที่ 4.30 การวิเคราะห์ด้วยพลังงานกระจายบริเวณเฟสสีขาว

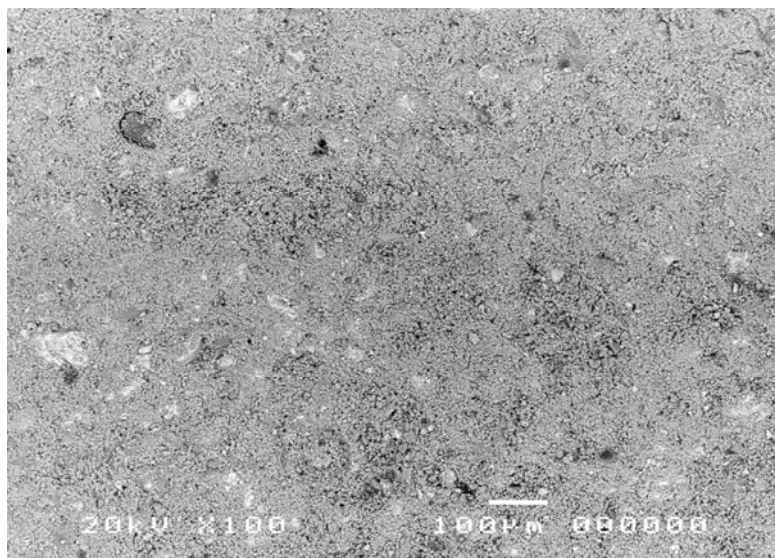


ภาพที่ 4.31 การวิเคราะห์ด้วยพลังงานกระจายบริเวณเฟสซีเทา

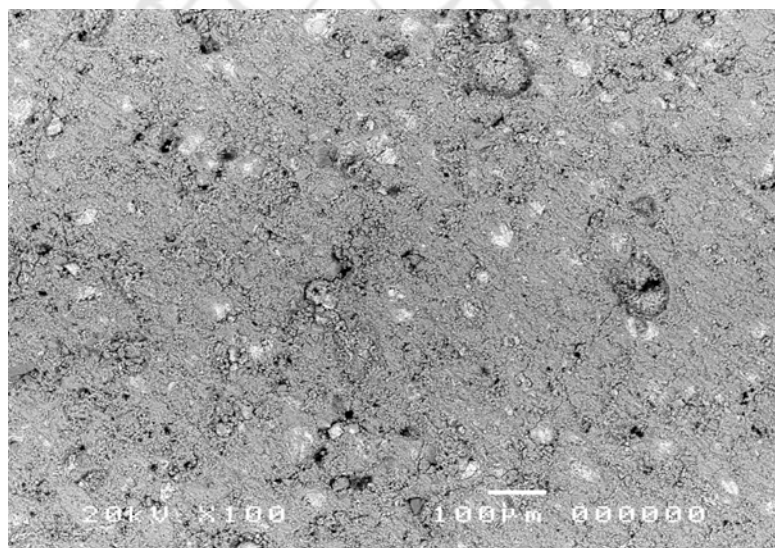
ผลจากการนำภาพที่ได้ไปทำการคำนวณหาปริมาณของเฟสที่แตกต่างกันในภาพโดยใช้โปรแกรม Motic Images Plus 2.0 ML ของบริษัท Motic China Group Co., LTD (2001-2004) แสดงในตารางที่ 4.6 พบว่าในซีเมนต์เพสต์ที่มีการเติมเถ้าแกลบ 20 เปอร์เซ็นต์ปริมาณเฟสซีเทาจะมีปริมาณลดลงเมื่ออายุในการบ่มมากขึ้น เนื่องจากเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเถ้าแกลบซึ่งเป็นวัสดุพอสโซลานจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เกิดเป็นผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่มีความสามารถในการเชื่อมประสานจึงทำให้ชั้นทดสอบ (มอร์ตาร์) มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงขึ้น

ตารางที่ 4.6 แสดงปริมาณเฟสของ unreacted hydrate cement และเถ้าแกลบที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาในซีเมนต์เพสต์

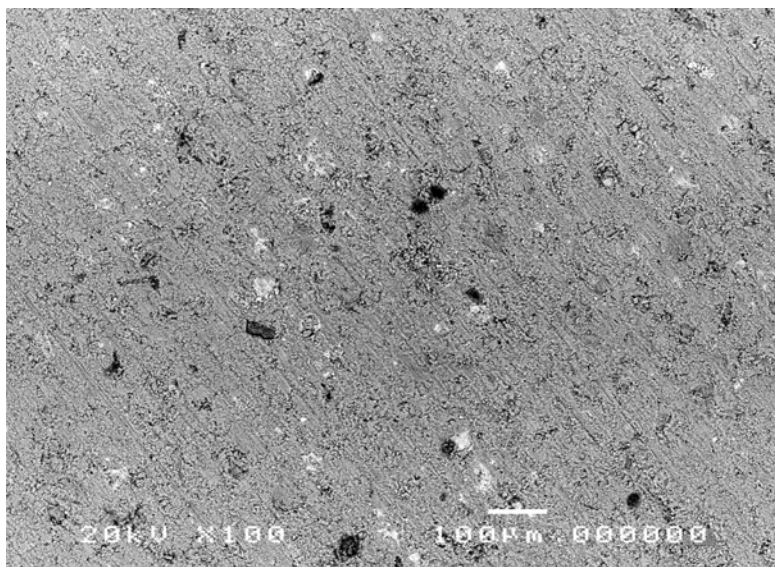
อายุมอร์ตาร์ (วัน)	ซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบ 20 เปอร์เซ็นต์(S20) (เปอร์เซ็นต์โดยพื้นที่)
7	36.52
14	32.45
28	28.13



ภาพที่ 4.32 แสดงลักษณะจุลภาควงซีเมนต์เพสต์แข็งตัวที่มีการแทนที่ด้วยเถ้ากลบ 20 เปอร์เซ็นต์ อายุ 7 วัน



ภาพที่ 4.33 แสดงลักษณะจุลภาควงซีเมนต์เพสต์แข็งตัวที่มีการแทนที่ด้วยเถ้ากลบ 20 เปอร์เซ็นต์ อายุ 14 วัน



ภาพที่ 4.34 แสดงลักษณะจุลภาคของซีเมนต์เพสต์แข็งตัวที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบ
20 เปอร์เซ็นต์ อายุ 28 วัน

4.4 อภิปรายผลการทดลอง

จากการทดลองเพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบ พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้นมากกว่ามอร์ตาร์ที่ไม่มีการผสมด้วยเถ้าแกลบ โดยอัตราส่วนการแทนที่ที่เหมาะสมคือ 20 เปอร์เซ็นต์ และเมื่ออายุของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้นค่ากำลังมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น

จากการศึกษาลักษณะเฉพาะของเถ้าแกลบที่นำมาใช้ในการทดสอบ โดยการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence พบว่าประกอบไปด้วย ซิลิกาในปริมาณสูงประมาณ 91 เปอร์เซ็นต์และการศึกษาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่า เถ้าแกลบมีลักษณะเป็นซิลิกาแบบอสัณฐาน จากผลการทดสอบข้างต้นเถ้าแกลบ จัดเป็นวัสดุประเภทพอลิเมอร์ที่เหมาะสมสำหรับการแทนที่ในปูนซีเมนต์เนื่องจากมีปริมาณซิลิกาที่สูงและมีโครงสร้างแบบ

อสัณฐานซึ่งสามารถนำมาเป็นวัสดุประเภทพอลิเมอร์เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการเชื่อมประสานหรือความแข็งแรงให้กับปูนซีเมนต์

ขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบเป็นปัจจัยสำคัญของการเพิ่มค่ากำลังรับแรงอัดเนื่องจากขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 ไมโครเมตร จะไม่แสดงคุณสมบัติเป็นสารประเภทพอลิเมอร์ที่ช่วยความสามารถในการเชื่อมประสานให้กับปูนซีเมนต์ แต่ในทางตรงข้าม

หากเถ้าเถ้าที่ใช้มีขนาดเล็กกว่า 50 ไมโครเมตร จะแสดงคุณสมบัติของสารพอซโซลานเนื่องจากพื้นที่ผิวจำเพาะสูงขึ้น สังเกตได้จากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าเถ้าที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 34 ไมโครเมตร ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์เพิ่มสูงขึ้นเกือบทุกอัตราส่วนที่ใช้เถ้าเถ้าแทนที่ โดยขึ้นทดสอบมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าเถ้า 20 เปอร์เซ็นต์ ให้ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์สูงขึ้นประมาณ 27 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเถ้าเถ้าเป็นสารพอซโซลานที่ดีและปริมาณการแทนที่ที่เหมาะสมสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาพอซโซลานและเพิ่มความสามารถในการเชื่อมประสานเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ซึ่งพบว่าฟิสิก Portlandite หรือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ มีความสูงลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเติมเถ้าเถ้าแทนที่ในปูนซีเมนต์อันเป็นผลมาจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เหลือจากปฏิกิริยาซึ่งโดยทั่วไปจะมีปริมาณ 20-25 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเติมเถ้าเถ้าซึ่งเป็นวัสดุพอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์เนื่องจากในเถ้าเถ้ามีองค์ประกอบที่เป็นซิลิกาในปริมาณสูงและซิลิกานี้สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เหลืออยู่ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเพิ่มขึ้นและเสริมให้โครงสร้างระดับจุลภาคมีความแข็งแรงในการเชื่อมประสานที่ดีขึ้นจึงทำให้ขึ้นทดสอบ (มอร์ตาร์) มีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้น

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ในการทำขึ้นทดสอบ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนพบการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างซีเมนต์เพสต์ที่ผสมด้วยเถ้าเถ้าโดยภายในโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้าเถ้าพบผลึกของ Portlandite ซึ่งมีเป็นลักษณะเป็นแผ่น และ Ettringite ซึ่งมีผลึกรูปเข็มกระจายอยู่ทั่วไป แต่เมื่อเติมเถ้าเถ้าลงในซีเมนต์เพสต์พบว่าผลึกของ Portlandite และ Ettringite ลดลง ช่องว่างภายในโครงสร้างลดลงและเกิดการเชื่อมประสานภายในโครงสร้างมากขึ้น เนื่องจากเถ้าเถ้าสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์และเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ CSH ที่เพิ่มความสามารถในการยึดเกาะ และจากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ พบเฟสที่กล่าวว่าเป็น unreacted hydrate cement และเถ้าเถ้า ในซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าเถ้า 20 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณลดลงเมื่ออายุเพิ่มขึ้น อันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งสอดคล้องกับค่ากำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การศึกษาผลของการเติมเถ้าแกลบที่มีต่อค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ มีวัตถุประสงค์เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของการเติมเถ้าแกลบเพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ และศึกษาผลของขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบที่มีต่อค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ และศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของซีเมนต์เพสต์แข็งตัวเพื่ออธิบายสมบัติเชิงกลของมอร์ตาร์ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การหาปริมาณที่เหมาะสมของการเติมเถ้าแกลบเพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์

จากผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์สรุปว่าอัตราส่วนผสมที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ 20 เปอร์เซ็นต์ เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม เนื่องจากให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ที่มีการเติมเถ้าแกลบในอัตราส่วนอื่นๆ ที่ระยะเวลาการทดสอบ 28 วัน ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้นตามอายุที่ใช้ในการบ่มโดยค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 1-14 วัน จากนั้นจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ส่วนมอร์ตาร์ที่เติมเถ้าแกลบสูงขึ้นจนถึง 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์ มีค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดต่ำลงตามลำดับและมีค่าต่ำกว่าในมอร์ตาร์ที่ไม่มีการเติมเถ้าแกลบ

5.1.2 ผลของขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบที่มีต่อค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์

จากผลของค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์สรุปว่าขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบที่มีความแตกต่างกันส่งผลกับค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้ เมื่อขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบลดลงแนวโน้มของค่ากำลังรับแรงอัดจะยิ่งสูงขึ้น มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบขนาดอนุภาคเฉลี่ย 78 ไมโครเมตร ให้ค่ากำลังรับแรงอัดต่ำสุดเท่ากับ 93.9 kg/cm^2 ส่วนมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบขนาดอนุภาค 34 ไมโครเมตร ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุดเท่ากับ 162.8 kg/cm^2 ที่อัตราส่วนการแทนที่ 20 เปอร์เซ็นต์ ระยะเวลา 56 วัน และขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 ไมโครเมตร

จะไม่แสดงคุณสมบัติของสารพอซโซลานเนื่องจากไม่ช่วยเพิ่มความสามารถในการเชื่อมประสานให้กับมอร์ตาร์แต่ในทางตรงข้ามถ้าใช้ขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า 50 ไมโครเมตร จะแสดงสมบัติของสารพอซโซลานออกมาโดยสังเกตได้จากค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ทดสอบที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน

5.1.3 การศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของซีเมนต์เพสต์แข็งตัวเพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลของมอร์ตาร์

จากผลการศึกษาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์สรุปว่าการเพิ่มปริมาณของเถ้าแกลบมีผลทำให้ Portlandite ในซีเมนต์เพสต์แข็งตัวมีปริมาณลดลงเนื่องจาก Portlandite ถูกนำไปใช้ในการทำปฏิกิริยากับวัสดุพอซโซลาน (เถ้าแกลบ) ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ CSH เพิ่มขึ้นซึ่งผลิตภัณฑ์ CSH นี้มีคุณสมบัติในการยึดเกาะและสร้างความแข็งแรงให้กับมอร์ตาร์เมื่อมีผลิตภัณฑ์ CSH เพิ่มขึ้นจึงทำให้ซีเมนต์เพสต์แข็งตัวหรือมอร์ตาร์มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นตามไปด้วย

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนพบว่าโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์มีการเปลี่ยนแปลงไปโดยผลึกของแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะลดลงเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบเนื่องจากเกิดการทำปฏิกิริยากันและได้ผลิตภัณฑ์ CSH เพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกันกับการลดลงของฟิสิกแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากการศึกษาด้วยเทคนิคเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นและจากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับปริมาณเฟส unreacted hydrate cement ในซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบ 20 เปอร์เซ็นต์มีปริมาณลดลงเมื่ออายุเพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่มีสมบัติในการเชื่อมประสาน จึงทำให้ซีเมนต์เพสต์ที่ผ่านการบ่มและมีอายุมากขึ้นสามารถทำปฏิกิริยาต่อเนื่องเป็นเฟส fully hydrate cement ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดพัฒนาขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบและศึกษาผลของขนาดอนุภาค ถ้ามีการส่งเสริมต่อเนื่องเพื่อศึกษาส่วนอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับงานก็จะส่งผลดีกับการศึกษาซึ่งอาจใช้เถ้าแกลบแหล่งอื่นๆมาทดแทนและสามารถลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ให้น้อยลงเช่น

1. การใช้เถ้าแกลบจากแหล่งอื่น เช่น โรงสีข้าว โรงไฟฟ้าพลังแกลบ ซึ่งอาจจะมีการเพิ่มขึ้นในการศึกษาในส่วนของการเตรียมวัตถุดิบที่ใช้แทนที่เนื่องจากเถ้าแกลบที่ได้มาอาจมีคุณสมบัติไม่เหมาะสมในการนำมาใช้งาน อาจมีสารอินทรีย์ผสมอยู่ในปริมาณมากจึงต้องเพิ่มขั้นตอนในการเผาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ออกจากวัตถุดิบ เช่น เถ้าแกลบที่ได้จากโรงไฟฟ้าอาจที่มีปริมาณคาร์บอนสูงจึงต้องนำมาเผาซ้ำเพื่อกำจัดคาร์บอนออกไป เป็นต้น
2. การบดเถ้าแกลบเพื่อลดขนาดอนุภาค ถ้ามีการเพิ่มระยะเวลาในการบดให้มากขึ้นเพื่อศึกษาผลของขนาดอนุภาคที่ลดลงต่อค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบจะทำให้ทราบว่าอนุภาคขนาดใดที่เหมาะสมและให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุด
3. อาจมีการนำวัสดุประเภทพอลิโพรพิลีนชนิดอื่นๆที่มีอยู่ภายในประเทศมาใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์ เช่น ดินไคอะตอม เพื่อศึกษาผลที่มีต่อค่ากำลังรับอัดของมอร์ตาร์หรือคอนกรีต
4. การนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ ต้องศึกษาปริมาณของวัตถุดิบในท้องถิ่นว่ามีมากเพียงพอในการนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อผลิตเป็นวัสดุในการก่อสร้างหรือไม่เช่น การนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตบล็อกก่อกำแพงเพื่อลดต้นทุนในการผลิต เป็นต้น

บรรณานุกรม

- โครงการโรงไฟฟ้าชีวมวล. กองทุนส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน [Online] 2547 มิถุนายน 16.
ที่มา: <http://www.eppo.go.th/>
- โครงการรับซื้อไฟฟ้ารายย่อย. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย [Online] 2547 มิถุนายน 16.
ที่มา: <http://www.egat.co.th/>
- ัชชาวลย์ เศรษฐบุตร. คอนกรีต เทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด; 2539.
- ณรงค์ชัย จันดาวงษ์. การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างถนนคอนกรีตผสมเถ้าลอย [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยรังสิต; 2543.
- นนทพงษ์ พลพวก. การศึกษาผลของการนำเถ้ากลับมาใช้แทนควอทซ์ในเคลือบสำหรับผลิตภัณฑ์สโตนแวร์ [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. เชียงราย: มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง; 2548.
- บุรฉัตร ฉัตรวีระ และณรงค์ศักดิ์ มาลากุล. ผลของอุณหภูมิในการบ่มที่มีต่อคุณสมบัติเชิงกลของเพสต์ที่ใช้ซีเมนต์ผสมเถ้ากลบ. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. 2547 ม.ค-มี.ค;27(1).
- บุรฉัตร ฉัตรวีระ และพิชัย นิมิตรยงสกุล. ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ผสมเถ้ากลบ เถ้าลอย และสารลดน้ำ. วารสารเทคโนโลยีสุรนารี; 2537.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. ปูนซีเมนต์ ปอซโซลานและคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตไทย (ส.ค.ท); 2549.
- พจนานุกรมศัพท์วัสดุศาสตร์และเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ: ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค); 2547.
- สมหวัง โสมนรินทร์. การศึกษาคุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของคอนกรีตผสมเถ้าลอยลิกไนต์ [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยรังสิต; 2541.
- สุภาพร ศรีสมบูรณ์. ปูนซีเมนต์อนาคดที่สดีเส. [Online] 2547 ตุลาคม 23. ที่มา: <http://www.scb.co.th/LIB/th/article/ktb/data/k8-38.html>
- Arandigoyen M, Alvarez JI. Blended pastes of cement and lime: Pore structure and capillary porosity. Applied Surface Science. 2006 Sept 30;252(23):8077-8085.

- Bensted J, Barnes P. Structure and Performance of Cements. 2nd ed. London: Spon Press; 2002.
- Igarashi S, Kawamura M, Watanabe A. Analysis of cement pastes and mortars by a combination of backscatter-based SEM image analysis and calculations based on the Powers model. *Cement and Concrete Composites*. 2004 Nov;26(8):977-985.
- Mehta PK. Cement Standard. Philadelphia: American society for testing and materials; 1986.
- Mosquera MJ, Silva B, Prieto B, Ruiz-Herrera E. Addition of cement to lime-based mortars: Effect on pore structure and vapor transport. *Cement and Concrete Research*. 2006 Sept; 36(9):1635-1642.
- Nabil M, Akhras A1, Smadi M. Properties of tire rubber ash mortar. *Cement and Concrete Composites*. 2004 Oct;26(7):821-826.
- Nehdi M, Duquette J, Damatty A. Performance of rice husk ash produced using a new technology as a mineral admixture in concrete. *Cement and Concrete Research*. 2003 Aug;33(8):1203-1210.
- Olusola KO, Olanipekun EA, Ata O, Olateju O.T. Studies on termite hill and lime as partial replacement for cement in plastering. *Building and Environment*. 2006 March;4(3): 302-306.
- Stutzman Paul. Scanning electron microscopy imaging of hydraulic cement microstructure. *Cement and Concrete Composites*. 2004 Nov;26(8):957-966.
- Scrivener L. Backscattered electron imaging of cementitious microstructures: understanding and quantification. *Cement and Concrete Composites*. 2004 Nov;26(8):935-945.
- Smith Ray. Rice Husk Ash Cement: Progress in development and application. London: Intermediate Technology Publications Limited.
- Taylor HFW. Cement chemistry. 2nd ed. London: Thomas Telford; 1997.
- Waliuddin AM. Effect of rice husk ash on high strength concrete. *Construction and Building Materials*. 1996 Oct;10(7):521-526.

ภาคผนวก ก

การหาอัตราส่วนผสมของน้ำต่อซีเมนต์และการเตรียมตัวอย่างมอร์ต้าร์



1. การหาอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์และการเตรียมตัวอย่างมอร์ตาร์

การเตรียมวัสดุขั้นต้นที่ใช้ในการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ โดยเตรียมปูนซีเมนต์สำหรับทดสอบ 200 กรัมและเตรียมทรายในอัตราส่วน 1:2.75 หรือเท่ากับ 550 กรัม

1.1 ในการทำการทดสอบจะต้องทำการหาปริมาณน้ำที่จะใช้ในการผสมมอร์ตาร์ ตามมาตรฐานการทดสอบจะต้องหาการไหลผ่านของมอร์ตาร์เพื่อให้ได้ปริมาณน้ำที่จะใช้ในการผสมโดยใช้อัตราส่วนปริมาณน้ำเริ่มต้น Water Cement Ratio = 0.5 หรือ เท่ากับ 100 มิลลิลิตร นำปูนซีเมนต์ทราย และน้ำ ผสมในหม้อผสมมาตรฐานหลังจากนั้นนำมอร์ตาร์ที่ได้ไปเทลงในแบบทดสอบการไหลผ่านมาตรฐานดังภาพที่ ก1 ชั้นแรกประมาณ 5 ซม. และทำการกระทุ้งด้วยแท่งกระทุ้งมาตรฐานประมาณ 20 ครั้ง ทำการเติมส่วนที่เหลือจนเต็มและทำการกระทุ้งเช่นเดิม ทำการปาดมอร์ตาร์ส่วนเกินด้วยเกรียงปาดให้ผิวหน้าสม่ำเสมอ ทำการยกแบบทดสอบขึ้นตรงๆในแนวตั้งเป็นระยะตามมาตรฐานคือ 12.7 มม. จากนั้นหมุนเครื่องมือให้แท่นตกกระทบกับฐานรองรับจำนวน 25 ครั้งในเวลา 15 วินาที วัดเส้นผ่าศูนย์กลางของมอร์ตาร์ที่กระจายบนแท่นทดสอบ โดยวัดแนวรัศมีการไหลผ่านทั้งหมด 4 แนวในทิศที่ทำมุมตั้งฉากกันแล้วนำมาคำนวณหาการไหลผ่านตามสูตรการคำนวณดังต่อไปนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ค่าการไหลผ่าน} = ((D_1 - D_0) / D_0) \times 100 \quad (\text{ก.1})$$

โดยค่า D_0 = เส้นผ่าศูนย์กลางที่ฐานของแบบ ($D_0 = 101.6$ มม.)

D_1 = เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของมอร์ตาร์ที่กระจายบนแท่น



ภาพที่ ก1 เครื่องทดสอบการไหลผ่าน



ภาพที่ ก2 เครื่องผสมมอร์ต้ามาตรฐาน

1.2 หลังจากทำการทดสอบค่าการไหลเผื่อจากการคำนวณค่าจะต้องอยู่ในช่วง 105-115 เปอร์เซ็นต์ หากไม่ได้ให้ทำการปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำจนได้ค่าการไหลเผื่อในช่วงที่กำหนด หลังจากนั้นให้นำค่า Water Cement Ratio ที่ได้ไปใช้ในการผสมมอร์ต้าเพื่อหล่อตัวอย่างทดสอบ เพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัด ผลการทดสอบหาอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์แสดงในตารางที่ ก1

ตารางที่ ก 1 แสดงอัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำต่อซีเมนต์ที่ใช้ในการหล่อมอร์ต้า

อัตราส่วนการแทนที่ (เปอร์เซ็นต์)	อัตราส่วนของ ผงปูนซีเมนต์ : ทราย : น้ำ
0	100 : 0 : 86
10	90 : 10 : 88
20	80 : 20 : 94
30	70 : 30 : 101
40	60 : 40 : 108

1.3 หลังจากได้อัตราส่วนของน้ำที่ใช้ในการผสมให้เตรียมส่วนผสมตามปริมาณของก้อนตัวอย่างที่ต้องการใช้ในการทดสอบดังตารางที่ ก2

ตารางที่ ก2 ปริมาณส่วนผสมสำหรับใช้ผสมตัวอย่างมอร์ตาร์

วัสดุ	ปริมาณวัสดุ(กรัม)	
	จำนวนก้อนตัวอย่าง	
	6 ก้อน	9 ก้อน
ปูนซีเมนต์	500	740
ทราย	1375	2035

1.4 นำปูนซีเมนต์และน้ำที่ชั่งน้ำหนักตามอัตราส่วนผสมกันในหม้อผสมมาตรฐานจากนั้นนำทรายที่เตรียมไว้เติมลงในหม้อผสมจนหมดในเวลา 30 วินาที ผสมให้เข้ากันโดยใช้เวลาไม่เกิน 150 วินาที นำมอร์ตาร์ที่ผสมเรียบร้อยแล้วลงในแบบหล่อมาตรฐานโดยแบ่งออกเป็น 2 ชั้น ชั้นแรกหนา 25 มม. ทำการกระทุ้งด้วยแท่งกระทุ้ง(Tamper) 32 ครั้ง เสร็จเรียบร้อยแล้วมอร์ตาร์ลงในแบบที่เหลือและทำการกระทุ้งเช่นเดียวกับครั้งแรก หลังจากนั้นทำการปาดผิวหน้าด้วยเกรียงปาดอีกครั้งให้ผิวหน้าเรียบ

1.5 หลังจากเทหล่อเรียบร้อยแล้วไม่ควรให้ชิ้นทดสอบสัมผัสกับหยดน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจาก 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบแล้วนำไปบ่มในน้ำสะอาดตามอายุที่ต้องการทดสอบ ยกเว้นชิ้นทดสอบที่อายุ 1 วัน สามารถนำไปใช้ทดสอบได้ทันที



ภาพที่ ก3 แสดงมอร์ตาร์ที่เทหล่อเสร็จเรียบร้อยแล้วพร้อมนำไปบ่ม

1.6 หลังบ่มมอร์ตาร์ได้ตามอายุที่ต้องการแล้วให้นำขึ้นจากน้ำให้ขึ้นทดสอบแห้งและทำความสะอาด ชั่งน้ำหนักและวัดขนาดของแต่ละชิ้น จากนั้นนำไปทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกด (SHIMADZU รุ่น UH-100A) โดยวางขึ้นทดสอบให้อยู่ได้จุดศูนย์กลางของแป้นกด แล้วทำการเพิ่มแรงกดอย่างสม่ำเสมอจนเกิดการวิบัติ



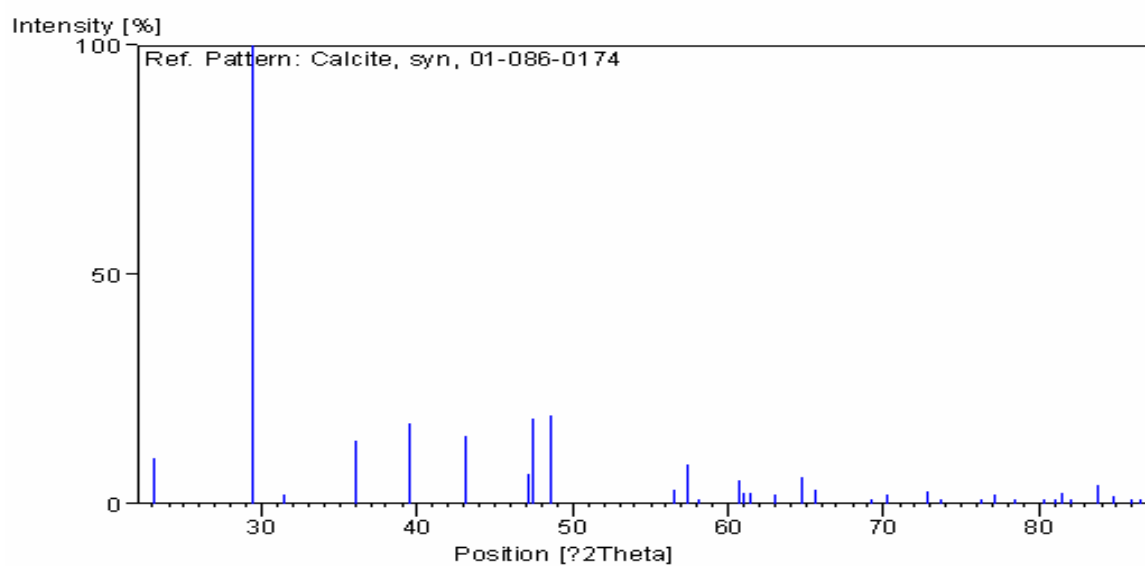
ภาคผนวก ข

การศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์



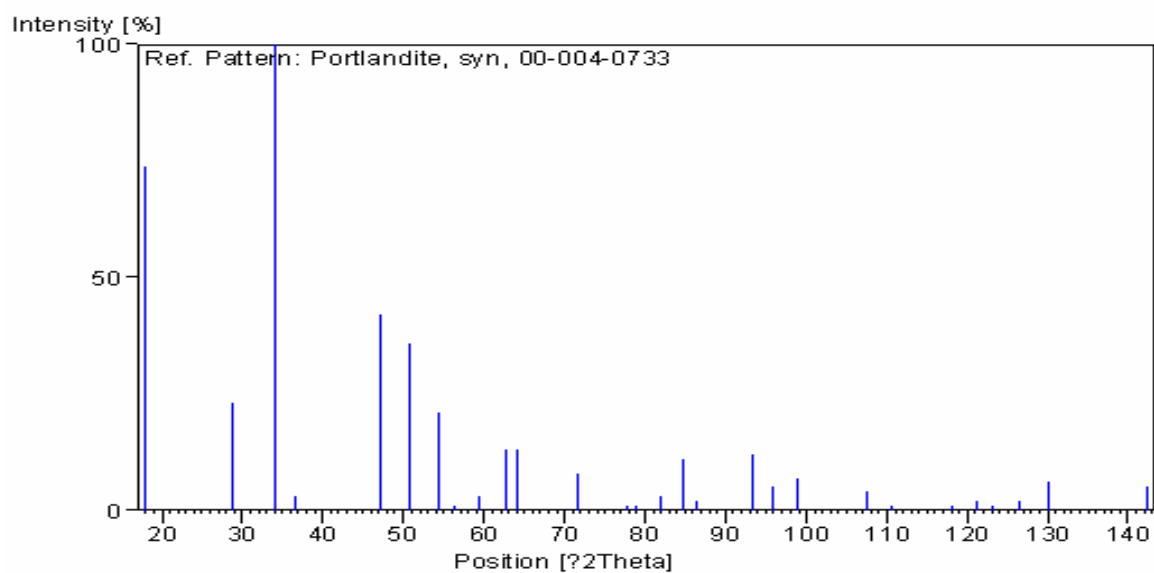
Name and formula

Reference code: 01-086-0174
Mineral name: Calcite, syn
ICSD name: Calcium Carbonate
Chemical formula: $\text{Ca}(\text{CO}_3)$

Stick Pattern

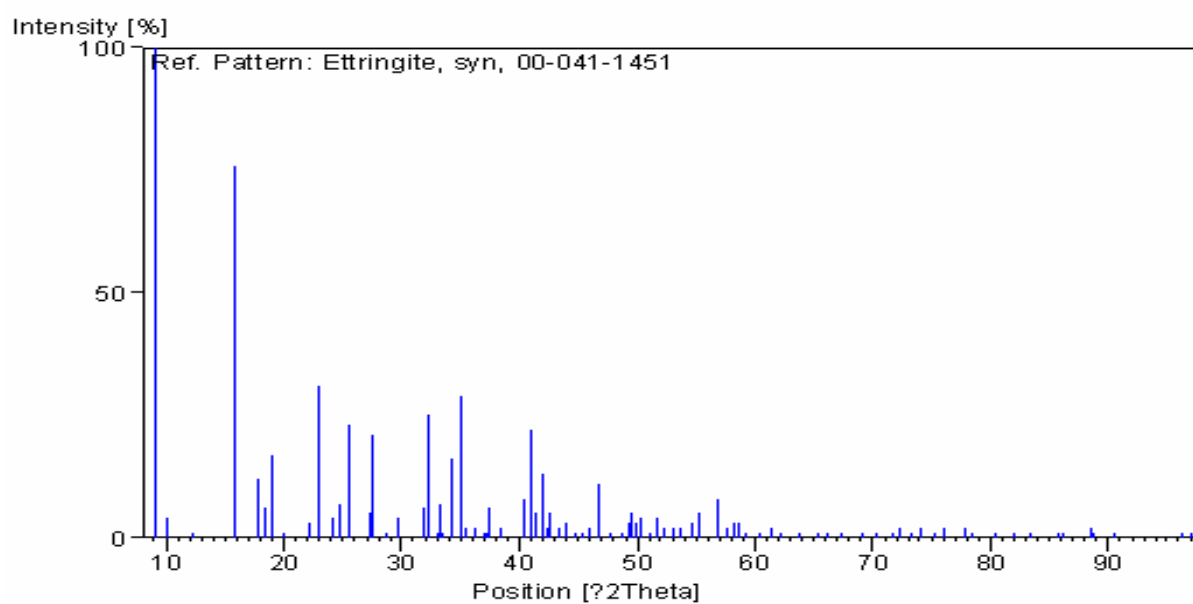
Name and formula

Reference code: 00-004-0733
Mineral name: Portlandite, syn
PDF index name: Calcium Hydroxide
Chemical formula: $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Stick Pattern

Name and formula

Reference code: 00-041-1451
Mineral name: Ettringite, syn
PDF index name: Calcium Aluminum Sulfate Hydroxide Hydrate
Chemical formula: $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$

Stick Pattern

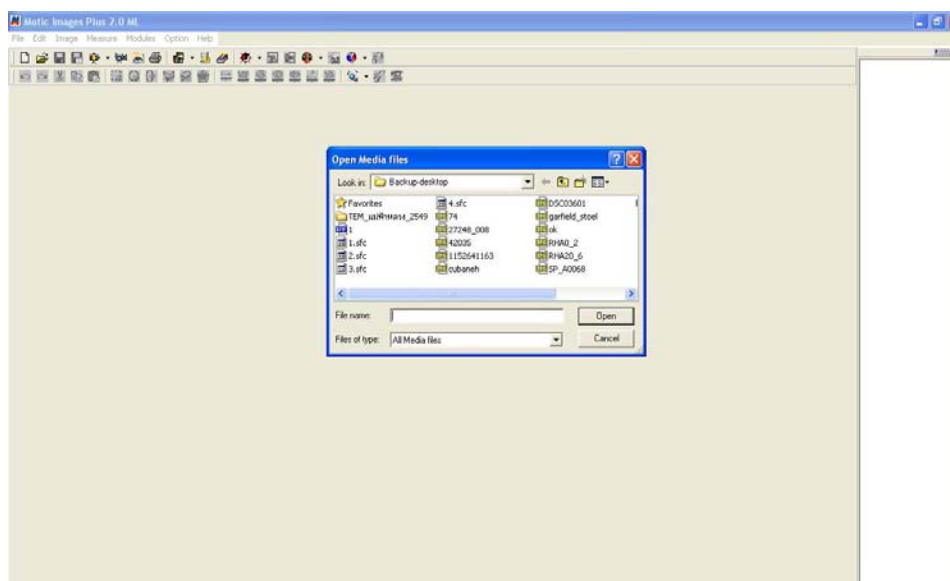
ภาคผนวก ค

การคำนวณหาปริมาณของเพลสที่แตกต่างกันในภาพโดยใช้โปรแกรม

Motic Images Plus 2.0 ML

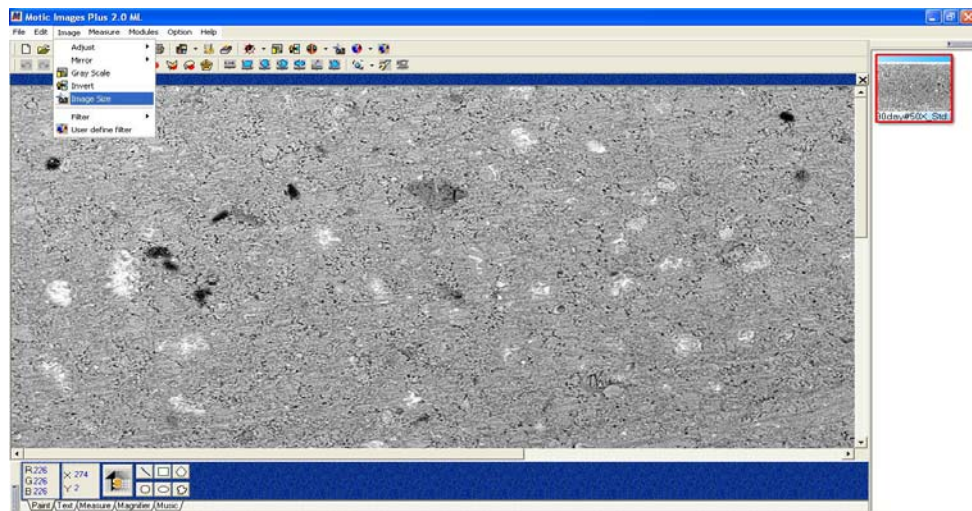
การหาปริมาณของเฟสที่แตกต่างกันในภาพโดยใช้โปรแกรม Motic Images Plus 2.0 ML ของบริษัท Motic China Group Co., LTD (2001-2004) มีขั้นตอนการหาปริมาณดังต่อไปนี้

1. เปิดโปรแกรม Motic Images Plus 2.0 ML และทำการเปิดภาพที่ต้องการหาปริมาณเฟสหรือพื้นที่ในภาพที่ต้องการ โดยเลือก File > open ดังภาพที่ ค1

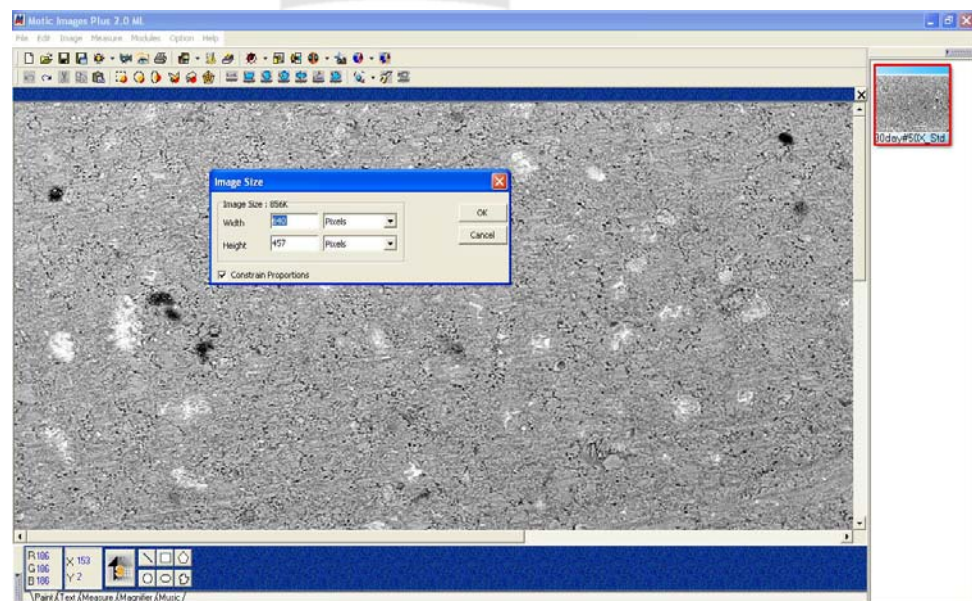


ภาพที่ ค1 การเปิดภาพที่ต้องการ

2. เมื่อเปิดภาพที่ต้องการแล้วถ้าขนาดภาพมีขนาดใหญ่ไปให้ทำการลดขนาดภาพโดยใช้คำสั่ง Image > Image Size ดังภาพที่ ค2 แล้วทำการกำหนดขนาดของภาพในที่นี่ใช้ขนาดภาพที่ลดขนาดเรียบร้อยแล้ว 640x457 ดังภาพที่ ค3



ภาพที่ ค2 การลดขนาดภาพ



ภาพที่ ค3 การกำหนดขนาดภาพที่ต้องการลด

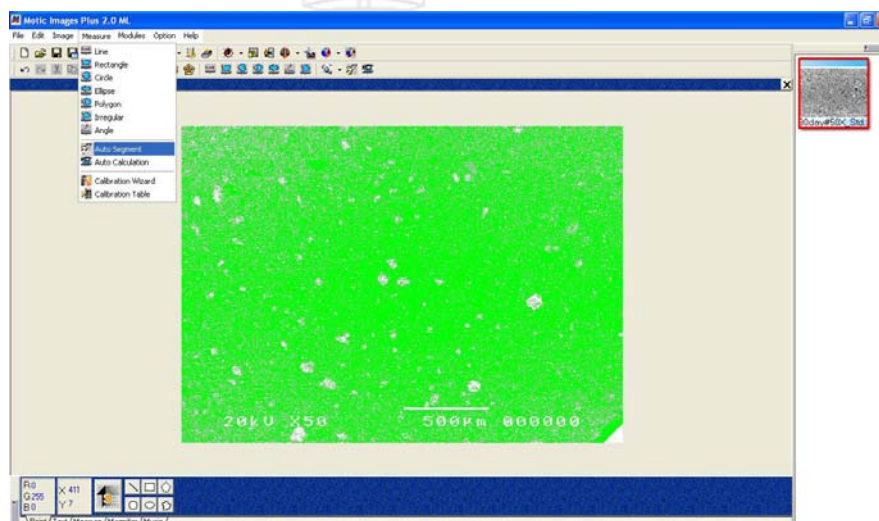
หลังจากที่ทำการลดขนาดได้ตามต้องการแล้วทำการหาพื้นที่ โดยเลือกพื้นที่ที่ต้องการโดยใช้คำสั่ง Measure > Auto Segment ดังภาพที่ ค4 โดยพื้นที่ที่ต้องการในภาพที่ได้จากการตรวจสอบอิเล็กทรอนิกส์แบบกระเจิงกลับนั้นสามารถพิจารณาเฟสที่แตกต่างกันแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะประกอบด้วย

พื้นที่เฟส unreacted hydrate cement (บริเวณที่มีสีขาว)

พื้นที่ของรูพรุน (บริเวณที่มีสีดำ)

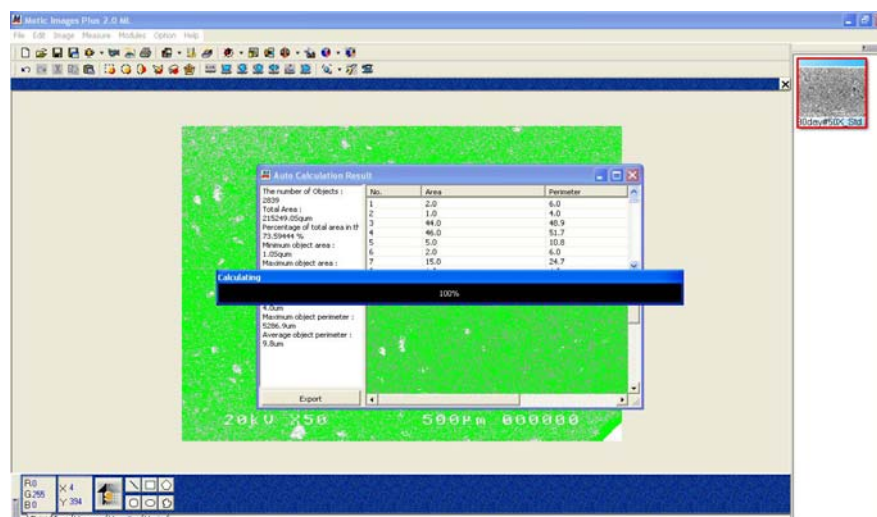
พื้นที่เฟส full hydrate cement (บริเวณที่มีสีเทา)

จากภาพที่ได้ต้องการพื้นที่เฟสของ unreacted hydrate cement คือบริเวณที่มีสีขาว จากคำสั่ง Measure > Auto Segment จะทำการเลือกพื้นที่ที่มีสีดำและสีเทาและเว้นบริเวณที่มีสีขาว



ภาพที่ ค4 การเลือกพื้นที่ที่ต้องการในภาพ

3. ทำการคำนวณปริมาณพื้นที่ที่ต้องการโดยใช้คำสั่ง Auto Calculation ดังภาพที่ ค5 การคำนวณของโปรแกรมจะได้พื้นที่ที่มีสีดำและสีเทาจากนั้นจึงนำค่าที่ได้จากโปรแกรมมาลบออกจากพื้นที่รวมคือ 100 เปอร์เซ็นต์ จะได้พื้นที่บริเวณที่เป็นสีขาวที่ต้องการ ตัวอย่างเช่น การคำนวณจากโปรแกรมได้ค่าเท่ากับ 73.02 แสดงว่าพื้นที่สีขาวจะเท่ากับ $100 - 73.02 = 26.98$ เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ ค5 แสดงขั้นตอนการคำนวณ

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นาย ทนงศักดิ์ ยืนนัยธรรม
วัน เดือน ปี เกิด	11 กุมภาพันธ์ 2521
ประวัติการศึกษา	
ระดับปริญญาตรี	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยรังสิต 2543
ประวัติการทำงาน	พ.ศ. 2547 - ปัจจุบัน วิศวกรที่ปรึกษา ห้างหุ้นส่วนจำกัด โชคชัยกิจเจริญ จังหวัดชลบุรี พ.ศ. 2546 - พ.ศ. 2547 เจ้าหน้าที่ส่วนอาคาร สถาบันบัณฑิตบริหารธุรกิจศศินทร์ แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2545 - พ.ศ. 2546 วิศวกรที่ปรึกษา บริษัท วิภาติ คอนกรีตเด่นที่ จำกัด กรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2544 - พ.ศ. 2545 วิศวกรสนาม โครงการรถไฟฟ้าใต้ดิน เฉลิมรัชมั่งคณา บริษัท กูมาโก กูมิ จำกัด