

อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าถ่านหินบิโวมินัสคัดขนาด



นางสาวนารีมาลย์ สุกุลดีเฝ้าะ

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REPLACEMENT RATIO OF PORTLAND CEMENT WITH CLASSIFIED BITUMINOUS FLY ASH



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าถ่าน

หินบิทูมินัสคัดขนาด

โดย

นางสาวนารีมาลย์ สุกุลดีเฝ้าะ

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. วิฑิต ปานสุข

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. พูลศักดิ์ เพียรสูสม)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร. วิฑิต ปานสุข)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. พิชนิตา ธรรมรงค์กิจ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีรชาติ ตั้งจิรภัทร)

นารีมาลย์ สกกุลดีเย้าะ : อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าถ่านหินบิทูมินัส คัดขนาด (REPLACEMENT RATIO OF PORTLAND CEMENT WITH CLASSIFIED BITUMINOUS FLY ASH) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. วิฑิต ปานสุข, 81 หน้า.

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาการพัฒนา กำลังของมอร์ตาร์โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยวัสดุปอซโซลาน ได้แก่ เถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาด เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ ในอัตราร้อยละ 20,40,60,80 โดยน้ำหนัก และซิลิกาฟุ่มในอัตราร้อยละ 5,7,9,11 โดยน้ำหนัก โดยเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ธรรมดา ศึกษาถึงคุณสมบัติทางกายภาพและส่วนประกอบทางเคมี รวมทั้งทำการทดสอบสมบัติของปูนซีเมนต์ผสมวัสดุปอซโซลานแต่ละชนิด เช่น ระยะเวลาก่อตัว การพัฒนา กำลังรับแรงอัด การใช้หลักการเลี้ยวเบนโดยรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction) เพื่อวิเคราะห์ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมวัสดุปอซโซลาน รวมทั้งศึกษาการเปลี่ยนแปลงความร้อนด้วยวิธีไอโซเทอร์มอลคอนตักชันแคลอริมิเตอร์

ผลการทดสอบสรุปได้ว่า เถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาด สามารถจัดเป็นวัสดุปอซโซลานตามข้อกำหนดใน ASTM C618 เป็น Class F มีลักษณะรูปร่างกลม มีผลึกเป็นแบบอสัณฐาน และเมื่อนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่า กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ลดลงในช่วงอายุต้นและมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น สามารถใช้แทนที่ได้ถึงร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก โดยใช้สัดส่วนระหว่างวัสดุประสานต่อทรายเท่ากับ 1 ต่อ 2.75 และปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.485 และปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง เนื่องจากถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผล Reitveld Refinement สนับสนุนว่าเกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตอยู่ในรูปอสัณฐานที่ส่งผลต่อความแข็งแรงและกำลังอัดที่มากกว่าซีเมนต์เพสต์ธรรมดา อีกทั้งการใช้เถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดสามารถลดความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ ช่วยเพิ่มระยะเวลาก่อตัวให้นานขึ้น เหมาะกับการงานโครงสร้างคอนกรีตหยาบ ที่ต้องการลดความร้อนเพื่อป้องกันการแตกร้าวของโครงสร้าง

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2560

5870410221 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS: POZZOLANIC REACTION / CLASSIFIED BITUMINOUS FLY ASH / COMPRESSIVE STRENGTH / HEAT OF HYDRATION

NAREEMAL SKULDIYOH: REPLACEMENT RATIO OF PORTLAND CEMENT WITH CLASSIFIED BITUMINOUS FLY ASH. ADVISOR: ASSOC. PROF. WITHIT PANSUK, Ph.D., 81 pp.

The aim of this study is to investigate the mechanism of mortar that has an effect on compressive strength development of mortar from partially substitution cement by pozzolan material such as Classified Bituminous fly ash, Lignite fly ash at 20, 40, 60, 80 by weight and Silica fume at 5, 7, 9, 11 by weight. By studying both physical and chemical characteristics of classified bituminous fly ash and properties of cement mixed with each type of pozzolan material were under investigate, including setting time, compressive strength, the development of hydration and pozzolanic reaction of each type of pozzolanic material-cement paste was also conducted using X-ray diffraction (XRD) analysis . Additionally, studying heat evolution of paste containing pozzolan material was measured using isothermal conduction calorimeter. The experimental result indicated that classified bituminous fly ash can be classified as a Class F pozzolanic material according to ASTM C618 requirements. Fly ash is spherical and amorphous phase. When replacing Portland cement with classified bituminous fly ash, the compressive strength of mortars were lower at early age and better than that of normal mortars at final age. Classified bituminous fly ash-cement mortars can be used to directly replace Portland cement up to 40 percent by weight with a 1:2.75 ratio of binder to sand and w/c of 0.485. The calcium hydroxide reduce due to pozzolanic reaction. The result from Reitveld Refinement support the CSH gel in amorphous phase . That the main effect mechanism which develop compressive strength. For heat evolution of paste containing classified bituminous fly ash can reduce heat from hydration reaction and prolong setting time of paste.

Department: Civil Engineering

Student's Signature

Field of Study: Civil Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. วิจิต ปานสุข ที่กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำอันเป็นประโยชน์อย่างมากในงานวิจัย จนสำเร็จลุล่วง นอกจากนั้นขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ สำหรับข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณบิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนในทุกเรื่องและเป็นกำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

ท้ายนี้ขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ในภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือ ทั้งในขณะศึกษาและทำงานวิจัยอย่างดี



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ฅ
สารบัญตาราง.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของการศึกษา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัย.....	4
2.1 ศัพท์และความหมาย.....	4
2.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [3].....	4
2.2.3 กลไกของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน [5].....	6
2.3 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan Material).....	7
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย.....	15
3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา.....	16
3.2 การทดสอบสมบัติพื้นฐานของวัสดุ.....	16
3.4 การทดสอบสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมวัสดุปอซโซลาน.....	18
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล.....	23
4.1 สมบัติพื้นฐานวัสดุ.....	23

4.1.1 ส่วนประกอบทางเคมี.....	23
4.1.2 ลักษณะอนุภาค.....	25
4.1.3 การกระจายขนาดของอนุภาค.....	30
4.1.4 ความละเอียด.....	32
4.1.5 ความถ่วงจำเพาะ.....	33
4.1.6 รูปแบบของสารประกอบในวัสดุ.....	33
4.2 สมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมวัสดุปอซโซลาน.....	36
4.2.1 ความชื้นเหลวปกติและระยะเวลาการก่อตัว.....	36
4.2.2 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์.....	38
4.2.3 การศึกษาการพัฒนากำลังรับแรงอัดโดยใช้ X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD).....	44
4.2.4 การศึกษาความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในซีเมนต์เพสต์ (Heat of Hydration).....	47
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	53
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	53
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	54
รายการอ้างอิง.....	55
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	81

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 การเกิดปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำ [4]	6
รูปที่ 2.2 แสดงการพัฒนาความร้อนในช่วงต่างๆ ของปูนซีเมนต์กับน้ำ [6].....	7
รูปที่ 2.3 ความร้อนของไฮเดรชันในปูนซีเมนต์ที่ถูกแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหิน [12].....	11
รูปที่ 2.4 อิทธิพลของซิลิกาฟุ่มต่อการเกิดความร้อนในซีเมนต์ [15].....	14
รูปที่ 3. 1 แสดงลำดับขั้นตอนการทดสอบ.....	15
รูปที่ 3.2 แสดงวัสดุสำหรับงานวิจัย.....	16
รูปที่ 3.3 เครื่อง JEOL, JSM-6400 Scanning Electron Microscope	17
รูปที่ 3.4 เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค MALVERN, Mastersizer 3000	18
รูปที่ 3.5 เครื่องวิเคราะห์สารประกอบ โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD).....	20
รูปที่ 3.6 เครื่อง Isothermal Calorimeter.....	21
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายลักษณะอนุภาคของเถ้าถ่านหินบิโทมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี	26
รูปที่ 4. 2 ภาพถ่ายลักษณะอนุภาคของเถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ	27
รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า	28
รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายลักษณะอนุภาคของซิลิกาฟุ่มควบแน่นที่กำลังขยาย 30 เท่า.....	29
รูปที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบเส้นโค้งการกระจายอนุภาคสะสมโดยปริมาตรของเถ้าถ่านหินบิโทมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ ซิลิกาฟุ่ม และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	30
รูปที่ 4.6 แสดงการกระจายตัวของอนุภาคทรายละเอียดที่ใช้ทดสอบ	31
รูปที่ 4.7 การวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ของเถ้าถ่านหินบิโทมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี	34
รูปที่ 4.8 การวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ของเถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ.....	35
รูปที่ 4.9 การวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ของซิลิกาฟุ่ม [26].....	35
รูปที่ 4.10 การวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ของปูนซีเมนต์ [27]	36

รูปที่ 4.11 การพัฒนากำลังรับแรงของมอร์ตาร์ผสมเถ้าถ่านหินบิโทมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี ...	39
รูปที่ 4.12 ร้อยละกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าถ่านหินบิโทมินัสคัดขนาดจากเยอรมนีเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ธรรมดา	39
รูปที่ 4.13 การพัฒนากำลังรับแรงของมอร์ตาร์ผสมเถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ	41
รูปที่ 4.14 ร้อยละกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ธรรมดา.....	41
รูปที่ 4.15 การพัฒนากำลังรับแรงของมอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟูม	43
รูปที่ 4. 16 ร้อยละกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟูมเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ธรรมดา.....	43
รูปที่ 4.17 แสดงรูปแบบ XRD ของซีเมนต์ธรรมดา และซีเมนต์เพสต์ผสมวัสดุปอซโซลานที่อายุการทดสอบ 7,14, 28 วัน.....	45
รูปที่ 4.18 แสดงอัตราความร้อนต่อกรัมของปูนซีเมนต์ในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินบิโทมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ และซิลิกาฟูม เปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ธรรมดา	49
รูปที่ 4.19 แสดงอัตราความร้อนสะสมต่อกรัมของปูนซีเมนต์ในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินบิโทมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ และซิลิกาฟูม เปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ธรรมดา	49
รูปที่ 4.20 แสดงอัตราความร้อนต่อกรัมของวัสดุประสานในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินบิโทมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ และซิลิกาฟูม เปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ธรรมดา	51
รูปที่ 4.21 แสดงอัตราความร้อนสะสมต่อกรัมของวัสดุประสานในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินบิโทมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ และซิลิกาฟูม เปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ธรรมดา	51
รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์(ที่อายุ 1, 7 วัน) กับความร้อนสะสมต่อกรัมของวัสดุประสานในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินบิโทมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก และซีเมนต์เพสต์ที่ผสมซิลิกาฟูมในปริมาณร้อยละ 9 โดยน้ำหนัก.....	52

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ออกไซด์หลักเกิดเป็นสารประกอบหลัก 4 อย่าง[3].....	5
ตารางที่ 2.2 การแบ่งชั้นคุณภาพของวัสดุผสมในคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C618 [7].....	8
ตารางที่ 2.3 ร้อยละองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของปูนซีเมนต์ เถ้าถ่านหิน และซิลิกาฟูม [2].....	12
ตารางที่ 2.4 แสดงผลของอัตราความร้อน (kcal/hr) ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน [15]	14
ตารางที่ 3.1 เกณฑ์การกำหนดค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนลูกบาศก์มอร์ตาร์ตามมาตรฐาน.....	21
ตารางที่ 3. 2 สัดส่วนผสมในการทำมอร์ตาร์ธรรมดา มอร์ตาร์ผสมเถ้าถ่านหินบิโวมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ และซิลิกาฟูมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.485.....	22
ตารางที่ 4.1แสดงองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าถ่านหินบิโวมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ และซิลิกาฟูม.....	24
ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินบิโวมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ กับมาตรฐานการแบ่งชั้นคุณภาพของวัสดุผสมในซีเมนต์ (ASTM C618).....	25
ตารางที่ 4.3 ขนาดอนุภาคของเถ้าถ่านหินบิโวมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ ซิลิกาฟูม และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	31
ตารางที่ 4.4 พื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าถ่านหินบิโวมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	32
ตารางที่ 4. 5 ค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าถ่านหินบิโวมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านลิกไนต์จากแม่เมาะ และซิลิกาฟูม	33
ตารางที่ 4.6 แสดงปริมาณที่ความชื้นเหลือปกติและระยะเวลาก่อตัวต้น-ระยะปลายของซีเมนต์เพสต์ในปริมาณต่างๆ	37
ตารางที่ 4.7 กำลังรับแรงอัดและร้อยละกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าถ่านหินบิโวมินัสคัดขนาดจากเยอรมนีเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ธรรมดา.....	38

ตารางที่ 4.8 กำลังรับแรงอัดและร้อยละกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ
เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ธรรมดา40

ตารางที่ 4.9 กำลังรับแรงอัดและร้อยละกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟุ่มเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์
ธรรมดา.....42

ตารางที่ 4.10 แสดงสารประกอบที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิค Reitveld Refinement ที่อายุ 28 วัน ..47



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของการศึกษา

ในปัจจุบันการศึกษาค้นคว้าและต่อยอดงานวิจัยเพื่อมุ่งเน้นพัฒนาวัสดุของงานโครงสร้างเป็นไปอย่างต่อเนื่องรวดเร็ว โดยเฉพาะคอนกรีตซึ่งเป็นวัสดุหลักที่ได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลายในการก่อสร้าง อาคาร บ้านเรือน ถนน ตลอดจนระบบสาธารณูปโภคพื้นฐานที่จำเป็นต่อการใช้ชีวิตของมนุษย์ ทำให้นักวิจัยและภาคอุตสาหกรรมหลายแห่งร่วมกันคิดค้นการนำวัสดุผสมเพิ่มที่มีคุณสมบัติปอซโซลานมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในบางส่วน และวัสดุดังกล่าวนั้นจะต้องสามารถพัฒนาคุณสมบัติพื้นฐานตลอดจนกำลังรับแรงของคอนกรีตให้ดีขึ้นได้ ทำให้สามารถลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์เพื่อลดต้นทุนการก่อสร้างให้ถูกลง วัสดุปอซโซลานที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย ได้แก่ เถ้าถ่านหิน ซิลิกาฟูม เถ้าแกลบ เป็นต้น สำหรับเถ้าถ่านหินในประเทศไทยนั้นเป็นวัสดุผลพลอยได้จากการเผา ถ่านหินเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตและเป็นวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมต่างๆ มีอนุภาคขนาดเล็ก ส่วนประกอบหลักทางเคมีคล้ายปูนซีเมนต์ คือ SiO_2 และ Al_2O_3 มีปริมาณร้อยละ 40 และ 20 ตามลำดับ ในปัจจุบันประเทศไทยได้นำเถ้าถ่านหินมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะการใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีต จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า เมื่อนำเถ้าถ่านหินมาใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มแทนที่ปูนซีเมนต์จะทำให้กำลังรับแรงลดลงในช่วงอายุต้นตามปริมาณเถ้าถ่านหินที่เพิ่มขึ้น เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าถ่านหินจะเกิดขึ้นเมื่ออายุของคอนกรีตมากขึ้น ดังนั้นจึงทำให้คอนกรีตที่ถูกผสมด้วยเถ้าถ่านหินมีกำลังรับแรงอัดได้ดีในระยะปลายและกำลังรับแรงอัดจะดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหิน อีกทั้งยังทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตสดดีขึ้น เช่นความต้องการน้ำลดลง ช่วยลดการเยิ้มน้ำเนื่องจากเถ้าถ่านหินมีรูปร่างเม็ดกลม ผิวเรียบมีการกระจายตัวดีสามารถช่วยอุดช่องว่างในคอนกรีตได้ จึงมีการเยิ้มน้ำลดลง ทำงานได้ง่ายขึ้น และยังทำให้ส่วนผสมเข้ากันได้ดีเป็นผลให้เกิดการแยกตัว (Segregation) น้อยลงอีก[1]

นอกจากเถ้าถ่านหินแล้ว อีกหนึ่งวัสดุที่ได้รับความนิยมเช่นเดียวกันคือ ซิลิกาฟูม เป็นวัสดุผสมเพิ่มชนิดหนึ่งซึ่งเป็นผลพลอยได้ของกระบวนการแปรงแร่ควอร์ตบริสุทธิเป็นซิลิคอนของโรงงานผลิตซิลิคอน มีอนุภาคขนาดเล็กมากประมาณ 0.1 ไมครอน กล่าวได้ว่าอนุภาคซิลิกาฟูมเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาก มีพื้นที่ผิวสูงมากๆ องค์ประกอบหลักทางเคมีของซิลิกาฟูมคือ SiO_2 มีปริมาณกว่าร้อยละ 90 ซึ่งจะพบได้ว่าซิลิกาฟูมมีปริมาณของ SiO_2 มากกว่าในเถ้าถ่านหินและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างมาก ส่งผลทำให้มีคุณสมบัติความเป็นปอซโซลานมากยิ่งขึ้น ทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็ว จึงมีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นแต่วัสดุผสมเพิ่มชนิดนี้นิยมนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์

ปอร์ตแลนด์ในการทำคอนกรีตกำลังสูง โดยใช้ร่วมกับสารลดน้ำพิเศษ จากงานวิจัยในอดีตพบว่า คอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมสามารถรับกำลังแรงอัดมากกว่าคอนกรีตธรรมดาได้มาก เนื่องจากซิลิกาฟูมมีอนุภาคที่เล็กมากสามารถเข้าไปอุดโพรงโครงสร้างของช่องว่างในไฮเดรตซีเมนต์เพสต์ไว้จึงช่วยเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อน การแทรกซึมจากสารเคมีได้ดี โดยทั่วไปมักมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมปริมาณร้อยละ 10 ของวัสดุประสานจะได้คอนกรีตที่ดีและคงทน อย่างไรก็ตามซิลิกาฟูมที่มีขนาดเล็กมาก เป็นฝุ่นผงละเอียด ทำให้มีความลำบากต่อการขนส่งในการใช้งาน ปลิวลมง่ายฝบฝบ และราคาของซิลิกาฟูมในท้องตลาดมีราคาแพงกว่าปูนซีเมนต์หลายเท่า อาจทำให้ราคาต้นทุนการก่อสร้างมีราคาสูงตามไปด้วย [2]

ในปัจจุบันนักวิจัยและภาคอุตสาหกรรมหลายแห่ง ได้ทำการศึกษาวิจัยเรื่องวัสดุปอซโซลานมากขึ้น เริ่มมีการศึกษาทดลองใช้เถ้าถ่านหินจากหลากหลายแหล่งผลิต หนึ่งในนั้นคือเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาไหม้ของถ่านหินบิทูมินัสในประเทศเยอรมนี ถูกคัดแยกขนาดให้เล็ก จึงอาจมีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับซิลิกาฟูม ซึ่งในประเทศไทยพบแหล่งการผลิตเถ้าถ่านหินจากถ่านหินบิทูมินัสที่จังหวัดระยอง ซึ่งอาจจะมีความเป็นไปได้สูงที่จะสามารถใช้เถ้าถ่านหินจากการเผาไหม้ถ่านหินชนิดนี้ในประเทศไทยได้ และเนื่องจากเถ้าถ่านหินดังกล่าวมีความแตกต่างกับเถ้าถ่านหินจากอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปางที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์พอสมควรจึงต้องทำการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นต่างๆ ก่อนการเลือกที่จะนำไปใช้เป็นวัสดุเพิ่มในคอนกรีต และการวิจัยในเรื่องเถ้าถ่านหินจากถ่านหินบิทูมินัสนี้พบว่ามีอยู่น้อย ดังนั้นการวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่การเปรียบเทียบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุผสมเพิ่มที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนทั้ง 3 ชนิดได้แก่ เถ้าถ่านหินลิกไนต์ในประเทศไทย ที่มีแหล่งการผลิตในอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี และซิลิกาฟูม โดยจะมีการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานเบื้องต้นต่างๆ ที่จำเป็นและหาสัดส่วนของการแทนที่ด้วยวัสดุผสมเพิ่มทั้งสามเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้เหมาะสมต่อการใช้งานต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานในด้านต่างๆ ของปูนซีเมนต์ผสมวัสดุประสานทั้ง 3 ชนิด (เถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ และซิลิกาฟูม)
2. เพื่อศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและผลจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ และซิลิกาฟูม ในสัดส่วนที่เหมาะสม

1.3 ขอบเขตของโครงการ

ในการศึกษาครั้งนี้ ทำการศึกษาด้วยการเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินบิทูมินัส คัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะและชิลิกาฟุ่ม ทั้งในส่วนของคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติเบื้องต้นต่างๆ

1. เถ้าถ่านหินที่นำมาใช้ทดสอบเป็นเถ้าถ่านหินลิกไนต์จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง, เถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากประเทศเยอรมนี และชิลิกาฟุ่มควบแน่น
2. ศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยาของเถ้าถ่านหินจากประเทศเยอรมนีชนิดโดยเทคนิค XRD (X-RAY Diffraction) และ SEM (Scanning Electron Microscopy)
3. ศึกษาคุณสมบัติและส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะ และชิลิกาฟุ่ม รวมถึงคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าถ่านหิน และชิลิกาฟุ่ม
4. ศึกษาความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ด้วยเครื่องไอโซเทอร์มอลคอนดักชันแคลลอรีมิเตอร์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบคุณสมบัติพื้นฐานในด้านต่างๆ ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ และชิลิกาฟุ่ม
2. ทราบกลไกเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ และชิลิกาฟุ่ม ในสัดส่วนที่เหมาะสมเพื่อที่จะนำไปเป็นทางเลือกในการใช้งานที่เกี่ยวข้องกับงานด้านโครงสร้างพื้นฐาน

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัย

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องนั้นโดยรวมจะกล่าวถึงความน่าจะเป็นที่สามารถใช้เถ้าถ่านหินมาเป็นวัสดุผสมเพิ่มในคอนกรีตได้ ศึกษาคุณสมบัติของเถ้าถ่านหิน คุณสมบัติของซิลิกาฟุ่ม ผลกระทบต่อการเกิดความร้อนของปูนซีเมนต์เมื่อใช้วัสดุผสมเพิ่ม และผลงานวิจัยที่เคยศึกษามาแล้วในอดีต

2.1 ศัพท์และความหมาย

ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกับน้ำ
มอร์ตาร์ (Mortar) หมายถึงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมน้ำและทราย

2.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [3]

ซีเมนต์ (Cement) หมายถึง วัสดุประสานซึ่งสามารถยึดติดวัสดุชิ้นเล็กๆเข้าด้วยกัน เป็นวัสดุผงละเอียดสีเทาเมื่อผสมกับน้ำจะสามารถใช้เป็นวัสดุประสานยึดหิน และทราย เข้าด้วยกัน โดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุก่อสร้างที่สำคัญ โดยเมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับทราย หิน น้ำในอัตราส่วนที่พอเหมาะจะได้คอนกรีตซึ่งเมื่อเกิดการแข็งตัวแล้วจะทำให้คอนกรีตแข็งแรงทนทาน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการผสมกันของสารออกไซด์ของเหล็กตามอัตราส่วนที่ต้องการแล้วนำส่วนผสมต่างๆไปเผาที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,400 – 1,500 องศาเซลเซียส จนทำปฏิกิริยาเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นจึงนำไปบดให้ละเอียด ส่วนประกอบของสารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

2.2.1 องค์ประกอบหลักทางเคมี

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะประกอบไปด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ คือ

- ออกไซด์หลัก ได้แก่ CaO_2 , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ซึ่งรวมกันประมาณร้อยละ 90 ของน้ำหนักซีเมนต์
- ออกไซด์รอง ได้แก่ MgO , Na_2O_2 , TiO_2 , P_2O_5 และยิปซัม

โดยออกไซด์หลักจะรวมตัวในระหว่างการเกิดปูนเม็ดเป็นสารประกอบที่สำคัญ 4 อย่างคือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต ไดแคลเซียมซิลิเกต ไตรแคลเซียมอลูมิเนต เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ออกไซด์หลักเกิดเป็นสารประกอบหลัก 4 อย่าง[3]

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียม ซิลิเกต (Tricalcium Silicate)	$3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
ไดแคลเซียม ซิลิเกต (Dicalcium Silicate)	$2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
ไตรแคลเซียม อลูมิเนต (Tricalcium Aluminate)	$3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
เตตราแคลเซียม อลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcium Aluminoferrite)	$4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

ปริมาณสารประกอบหลักทั้ง 4 อย่างในปูนซีเมนต์สามารถคำนวณหาได้โดยประมาณด้วยสมการของ Bogue Equation ดังนี้

$$\text{C}_3\text{S} (\%) = 4.07(\%\text{CaO}) - 7.60(\%\text{SiO}_2) - 6.72(\%\text{Al}_2\text{O}_3) - 1.43(\%\text{Fe}_2\text{O}_3) - 2.85(\%\text{SO}_3) \quad (1)$$

$$\text{C}_2\text{S} (\%) = 2.87(\%\text{SiO}_2) - 0.754(\%\text{C}_3\text{S}) \quad (2)$$

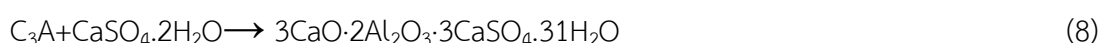
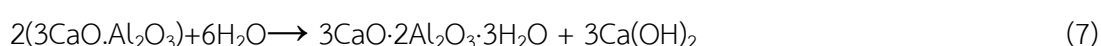
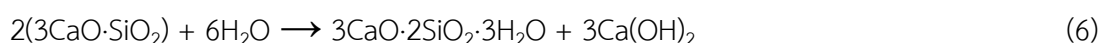
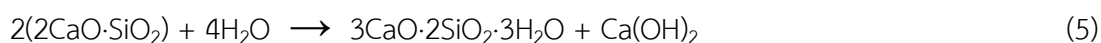
$$\text{C}_3\text{A} (\%) = 2.65(\%\text{Al}_2\text{O}_3) - 1.69(\%\text{Fe}_2\text{O}_3) \quad (3)$$

$$\text{C}_4\text{AF} (\%) = 3.04(\%\text{Fe}_2\text{O}_3) \quad (4)$$

2.2.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชันในปูนซีเมนต์

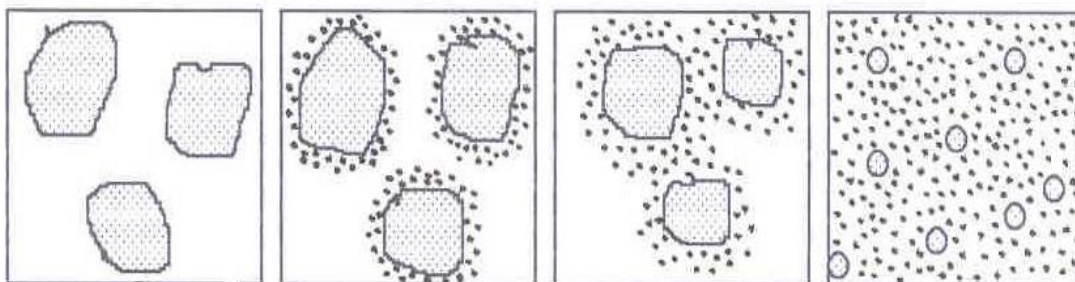
ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัว ปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับสารประกอบในปูนซีเมนต์ สารประกอบเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับน้ำ ทำให้ปฏิกิริยาของสารประกอบในปูนซีเมนต์ ส่วนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินประกอบด้วยปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดจากปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์และน้ำ ทำให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ รวมถึงปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) ของซิลิกอนออกไซด์และอลูมินาออกไซด์จากเถ้าถ่านหินกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้สารประกอบใหม่ที่มีคุณสมบัติคล้ายผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงในรูปสมการเคมีดังนี้

ปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำที่เกิดขึ้น



โดยปฏิกิริยาไฮเดรชันจะทำให้คอนกรีตที่ผิวนอกแข็งตัวก่อนเนื้อคอนกรีตภายใน และถึงแม้ว่าน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตจะแห้งก็ตาม แต่ปฏิกิริยาจะยังคงดำเนินต่อไปเพราะปูนซีเมนต์จะรับโมเลกุลของน้ำในอากาศเข้าไปทำปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งระยะนี้เป็นระยะที่สำคัญของคอนกรีตจึงจำเป็นต้องมี

การบ่มคอนกรีตในน้ำหรือหุ้มกระสอบชุบน้ำในกรณีที่เป็นเสาหรือคาน หากไม่บ่มด้วยน้ำแล้วซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาได้ ไม่สมบูรณ์ จากรูปที่ 2.1 เมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำทำให้ปูนซีเมนต์จะเริ่มเกิดปฏิกิริยากับน้ำที่ผิว และเมื่อเวลาผ่านไปปฏิกิริยาจะเพิ่มมากขึ้นแล้วทำให้เกิดผลึกของ CSH Gel ซึ่งเป็นตัวทำให้ปูนซีเมนต์แข็งแรงเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2. 1 การเกิดปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำ [4]

2.2.3 กลไกของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน [5]

กระบวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเริ่มต้นเมื่อโมเลกุลของปูนซีเมนต์กับน้ำทำปฏิกิริยาซึ่งกันและกัน โดยปกติสารประกอบที่เข้าไปทำปฏิกิริยา ได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต ไดแคลเซียมซิลิเกต ไตรแคลเซียมอลูมิเนต แคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ แคลเซียมออกไซด์อิสระ เป็นต้น โดยปฏิกิริยาของเพสต์ในปูนซีเมนต์ที่อุดมหมู่ไมเวตล้อมประกอบไปด้วย 5 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2.2

1. Rapid heat generation เป็นเวลาที่ความร้อนเกิดขึ้นในระยะเริ่มต้น เมื่อปูนซีเมนต์สัมผัสกับน้ำโดย C_3S จะแตกตัวอย่างต่อเนื่องและมีชั้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ไอออน มีการฟอร์มตัวของไฮเดรต ซัลเฟตของอัลคาไลด์แตกตัวอย่างสมบูรณ์ และจะมีชั้นของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเกิดขึ้นบนผิวอนุภาคปูนซีเมนต์ ปฏิกิริยาในสภาวะนี้จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ไอออน ในขณะที่แคลเซียมอลูมิเนตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ไอออนได้เป็นเอทริงไต์ (Ettringite)

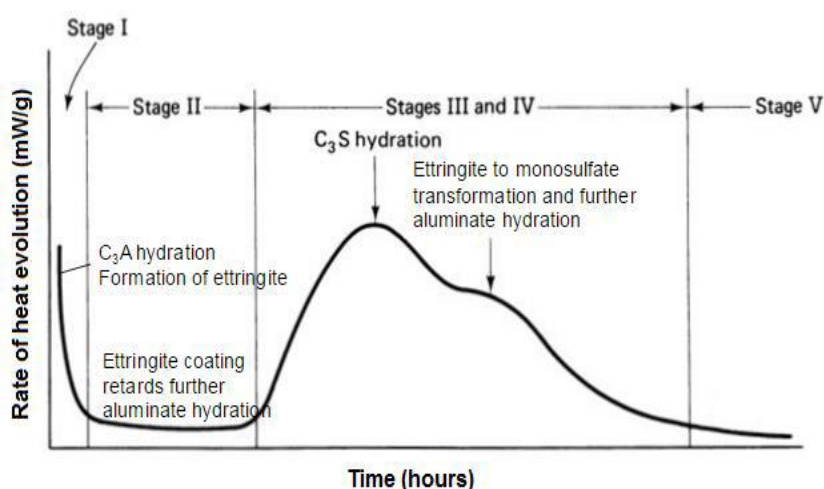
2. Dormant Period เป็นช่วงสั้นๆของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ผ่านไปอย่างรวดเร็ว โดยรวมแล้วอัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วงนี้จะช้าลง เนื่องจากความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง และของเหลวที่เริ่มเข้าสู่จุดสูงสุดและกำลังจะลดลง ในขณะที่ความเข้มข้นของเหลวซัลเฟตไอออนอยู่ในระดับคงที่ตามสัดส่วนที่ใช้ในการเกิดของเอทริงไต์ (Ettringite)

3. Acceleration Period เป็นช่วงนี้จะมีการพัฒนาของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่งโดยปฏิกิริยาจะถูกควบคุมจากการพัฒนาโครงสร้างของผลึกของไฮเดรชันผลึกของแคลเซียมไฮ

ดรอกไซด์จะเริ่มตกผลึกทำให้ความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง ในขณะที่ แคลเซียมซัลเฟตจะแตกตัวอีกครั้ง ทำให้ความเข้มข้นของซัลเฟตไฮดรอกไซด์น้อยลงเนื่องจากการฟอร์มตัวของเอพทริงไคต์

4. Deceleration Period เป็นช่วงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดช้าลงเรื่อยๆตามปริมาณสารตั้งต้น แต่แคลเซียมซิลิเกตมีฟอร์มตัวอย่างต่อเนื่อง

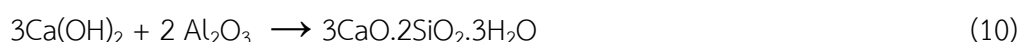
5. Steady Period ในสภาวะนี้ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันดำเนินไปอย่างคงที่ และอุณหภูมิจะมีผลน้อยมากในช่วงสภาวะคงที่นี้



รูปที่ 2.2 แสดงการพัฒนาความร้อนในช่วงต่างๆ ของปูนซีเมนต์กับน้ำ [6]

2.3 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan Material)

วัสดุปอซโซลาน คือวัสดุที่มีซิลิกาและอลูมินาเป็นสารประกอบหลักซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานตัววัสดุเอง (Cementitious) แต่สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และเกิดเป็นสารเชื่อมประสานได้ โดยสารปอซโซลานจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติเกิดเป็นสารประกอบที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสานซึ่งก็คือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ดังแสดงในสมการที่ (9) และ (10)



การจำแนกสารประกอบปอซโซลานสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทตามมาตรฐาน ASTM C618 ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การแบ่งชั้นคุณภาพของวัสดุผสมในคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C618 [7]

คุณสมบัติ		ประเภทของวัสดุผสม		
		N	F	C
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	%ต่ำสุด	70	70	50
SO_3	%สูงสุด	4	5	5
ปริมาณความชื้น	%สูงสุด	3	3	3
การสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้	%สูงสุด	10	6	6
ดัชนีความเป็นปอซโซลาน [8]	%สูงสุด	75	75	75

1. ชั้นคุณภาพ N คือ สารปอซโซลานที่ได้จากธรรมชาติที่เป็นผง (Natural Pozzolans) เช่น วัสดุที่เกิดจากการระเบิดของภูเขาไฟ (Volcanic Tuff) หินพูน (Pumicite) ซึ่งต้องผ่านกระบวนการแปรสภาพให้มีขนาดเล็กกลง เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการใช้งาน

2. ชั้นคุณภาพ F คือ สารปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial Pozzolans) ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้จากการผ่านกระบวนการทางความร้อน ได้แก่ แถ่ลอยที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินแอนทราไซต์หรือบิทูมินัส แถ่ที่เกิดจากการเผาแกลบ และกากตะกอนที่เหลือจากการหลอมโลหะ (Slag) เป็นต้น

3. ชั้นคุณภาพ C คือ สารปอซโซลานสังเคราะห์ ซึ่งผ่านกระบวนการทางความร้อนเช่นเดียวกับ ชั้นคุณภาพ F แต่มีสมบัติบางประการที่แตกต่างกัน เช่น ผลรวมปริมาณของซิลิกา อลูมินา เหล็กออกไซด์ มากกว่าร้อยละ 50 แต่ไม่ถึงร้อยละ 70 ของสารประกอบออกไซด์ทั้งหมดในวัสดุ ได้แก่ แถ่ลอยที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์หรือซบิทูมินัส เป็นต้น

2.3.1 แถ่ถ่านหิน (fly ash)

แถ่ถ่านหิน เป็นวัสดุปอซโซลานที่มีซิลิกาและอลูมินา เป็นส่วนประกอบทางเคมีหลักที่ทำให้ปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพื่อก่อตัวเป็นสารปอซโซลาน แถ่ถ่านหินเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินที่มีด้วยกัน 4 ประเภทคือ

- แอนทราไซต์ (Anthracite or hard coal) เป็นถ่านหินเกรดดีที่สุดประกอบด้วยคาร์บอนถึงร้อยละ 92-98 โดยน้ำหนัก แข็งและมีสีดำ
- บิทูมินัส (Bituminous coal or soft coal) เป็นถ่านหินที่มีเนื้อหนา มีสีน้ำตาลเข้มจนถึงดำ ไม่แตกง่ายเหมือน ถ่านหินซบิทูมินัส

- **ซับบิทูมินัส (Subbituminous coal)** มีสีดำ เป็นถ่านหินที่มีลักษณะร่วนซุย เกรดอยู่ระหว่าง ลิกไนต์และบิทูมินัส

- **ลิกไนต์ (Lignite and brown coal)** เป็นถ่านหินที่มีเกรดต่ำสุด มีความชื้นสูง ประกอบไปด้วย เศษไม้ที่ผุสลาย และซากพืชที่ทับถมกัน

เพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินที่มีขนาดใหญ่จะตกลงกันเตาเรียกว่า ถ่านก้นเตา (bottom ash) ส่วนถ่านหินที่มีขนาดเล็กจะลอยไปกับอากาศขึ้นไปติดกับที่ดักจับไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitator) เรียกว่า ถ่านก้นหิน (Fly ash) แบ่งได้เป็น 2 เกรด คือ เกรด F (Class F) เป็นถ่านหินที่ได้จากเผาถ่านหินแอนทราไซด์และบิทูมินัส ถ่านหินชนิดนี้มีปริมาณ ซิลิกาและอลูมินามากถึงร้อยละ 70 และปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide, CaO) ค่อนข้างต่ำ จึงมีชื่อเรียกว่าถ่านหินแคลเซียมต่ำ และอีกชนิดหนึ่งคือเกรด C (Class C) เป็นถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์และซับบิทูมินัสเป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณซิลิกาและอลูมินามากกว่าร้อยละ 50 และมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูง จึงมีชื่อเรียกว่า ถ่านหินแคลเซียมสูง

2.3.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน

โดยทั่วไปแล้วองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือ ประกอบด้วยซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลักทางเคมีของถ่านหิน ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินและคล้ายคลึงกับองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ในถ่านหินยังประกอบไปด้วย ความชื้นและการสูญเสียเนื่องจากการเผาด้วย

2.3.1.2 คุณสมบัติของเพสต์ มอร์ตาร์ ที่ผสมเพิ่มด้วยถ่านหิน

การใช้ถ่านหินเป็นวัสดุผสมเพิ่มแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในการทำคอนกรีตมีผลต่อ คุณสมบัติของคอนกรีตหลายประการ ตัวอย่างเช่น ความต้องการน้ำ ความสามารถทำงานได้ ระยะเวลาก่อตัวเป็นต้น และมีปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต อาทิเช่น ความละเอียด ขนาดอนุภาค ตลอดจนส่วนประกอบทางเคมีหลักในถ่านหิน

ผลของถ่านหินต่อระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time)

โดยทั่วไประยะเวลาการก่อตัวและแข็งตัวมีความสำคัญต่อการทำงาน เมื่อปูนซีเมนต์ถูกผสมกับน้ำและวัสดุผสมเพิ่มจะได้ซีเมนต์เพสต์ ลักษณะนุ่ม ง่ายต่อการขึ้นรูปแต่หากปล่อยให้โดยไม่มีรบกวน ซีเมนต์จะแข็งตัวในที่สุด ในการเทหรือผสมคอนกรีต ถ้าใช้เวลามากไปจะทำให้คอนกรีตนั้นเกิดการ แยกตัว ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตมี 2 ช่วงสำคัญคือระยะเวลาการก่อตัว เริ่มต้น และระยะก่อตัวปลาย

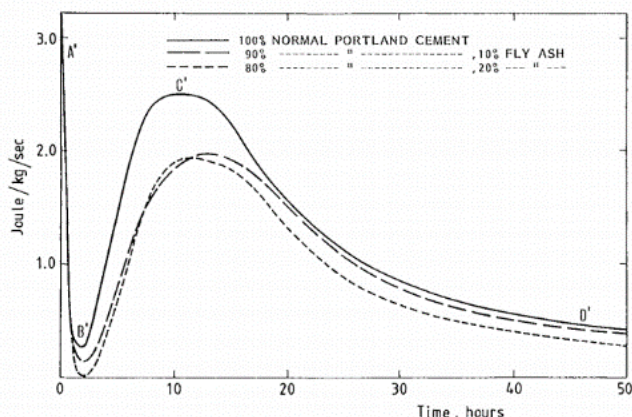
- ปริญญา จินดาประเสริฐ [9] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมด้วยถ่านหินแม่เมาะ พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านหินแม่เมาะไม่ค่อยส่งผลต่อการก่อตัวในระยะแรก

มากนัก โดยในระยะแรกนั้นคอนกรีตมีการคายน้ำน้อยลง กำลังรับแรงอัดลดลงตามปริมาณไถ่ถ่านหินที่เพิ่มขึ้น แต่กลับส่งผลต่อการก่อตัวในระยะปลายเพิ่มมากขึ้น กำลังรับแรงอัดจะดีขึ้นเพราะปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นต่อเนื่อง อีกทั้งยังเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกดีขึ้นด้วย

- ธีระพล แก้วคง [10] ได้ศึกษาคุณสมบัติของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ผสมไถ่ถ่านหินคัดขนาด ได้แก่ ไถ่ถ่านหินธรรมดา, ไถ่ถ่านหินผ่านร่งเบอร์ 200, ไถ่ถ่านหินผ่านร่งเบอร์ 300, และไถ่ถ่านหินละเอียดจากเครื่องแยกขนาดแรงลม โดยทดสอบคุณสมบัติในด้านต่างๆเช่น ระยะเวลาก่อตัว ความเข้มข้นเหลว กำลังรับแรงอัด การคายน้ำ เป็นต้น พบว่าการใช้ไถ่ถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์จะส่งผลต่อการก่อตัวในระยะต้น ระยะปลาย โดยเมื่อไถ่ถ่านหินละเอียดมากขึ้นและปริมาณเพิ่มขึ้นจะทำให้ระยะเวลาก่อตัวระยะต้นลดลง อีกทั้งยังทำให้การก่อตัวระยะปลายมีแนวโน้มลดลง

ผลของไถ่ถ่านหินต่อความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ความร้อนที่เกิดขึ้นขณะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันนั้น มีหลายปัจจัยที่เข้ามาเกี่ยวข้องเช่น ปริมาณปูนซีเมนต์ ความละเอียด อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ตลอดจนองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุผสมโดยปริมาณของส่วนประกอบทางเคมีจะให้ปริมาณความร้อนในระดับที่แตกต่างกันดังนี้ชนิดขนาดอนุภาค และองค์ประกอบทางเคมีของไถ่ถ่านหินจึงมีผลทำให้ได้ความร้อนที่แตกต่างกัน โดยจากการวิจัยในเรื่องของพฤติกรรมความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอซโซลานของคอนกรีตที่มีไถ่ถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งมีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคที่ 28.5 , 13.1 , 3.0 ไมครอน และไถ่ถ่านหินหยาบที่มีขนาดอนุภาค 15.3 และ 3.4 ไมครอน โดยใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20 , 40 , 60 โดยน้ำหนัก ใช้ W/B เท่ากับ 0.38 และวัดความร้อนด้วยเทอร์โมคัลเปิลซึ่งเป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิพบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยไถ่ถ่านหินในอัตราร้อยละ 40 และ 60 สามารถลดอุณหภูมิของคอนกรีตได้มากกว่าการแทนที่ด้วยอัตราร้อยละ 20 อีกทั้งเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยไถ่ถ่านหินที่มีความละเอียดมากขึ้น ทำให้อุณหภูมิของคอนกรีตเพิ่มขึ้นมากกว่าคอนกรีตที่ผสมด้วยไถ่ถ่านหินที่ละเอียดน้อยกว่า [11] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ I.Meland [12] ทำการศึกษาผลของความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยไถ่ถ่านหินในอัตราร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก โดยทำการวัดความร้อนเป็นเวลา 50 ชั่วโมง ด้วยอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส พบว่าไถ่ถ่านหินทำให้ความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงอย่างเห็นได้ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ความร้อนของไฮเดรชันในปูนซีเมนต์ที่ถูกแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหิน [12]

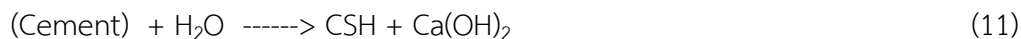
กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)

การใช้คอนกรีตผสมด้วยเถ้าถ่านหิน ทำให้ราคาต่อหน่วยคอนกรีตลดลง แต่การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนนั้น ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงต้นลดลง แต่เมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น ปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดมากขึ้น ทำให้คอนกรีตมีแนวโน้มของกำลังอัดเพิ่มขึ้นกว่าคอนกรีตธรรมดา - วาสนา สามห้วย [13] ได้ทำการทดสอบเพื่อทำการศึกษาคุณสมบัติและสัดส่วนผสมของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะ เกี่ยวกับกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน โดยพิจารณาสัดส่วนผสมปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ของเถ้าถ่านหินต่อซีเมนต์ที่อัตราต่างๆ และบ่มในอายุ 7 , 14 และ 28 วัน แล้วนำมาทดสอบหาลำลังอัด พบว่า ในช่วงอายุต้นของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินจะมีกำลังรับแรงอัดต่ำ แต่เมื่อผ่านการบ่มที่อายุมากขึ้นคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินจะพัฒนากำลังรับแรงสูงขึ้นจนเทียบเท่าหรือมากกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหิน และร้อยละของการแทนที่ปูนซีเมนต์ ด้วยเถ้าถ่านหินนั้นควรมีอัตราส่วนของเถ้าถ่านหินต่อปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักอยู่ในช่วงร้อยละ 0-35 ซึ่งเป็นปริมาณการแทนที่ที่ทำให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินอยู่ในช่วงที่เหมาะสมที่สุด

2.3.2 ซิลิกาฟุ้ง

ซิลิกาฟุ้ง (Silica fume) หรือเรียกอีกชื่อคือ ไมโครซิลิกา (Micro silica) เป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่งที่เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมโรงงานผลิต Silicon จากการแปลงแร่ควอร์ตเป็นซิลิคอน มีอนุภาคเล็กมากกว่าปูนซีเมนต์เกือบ 100 เท่า ไม่เป็นผลึก จึงทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็วมาก มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ ซิลิกาและอลูมิเนียมมากถึงร้อยละ 90 ขึ้นไป จึงนิยมใช้ซิลิกาฟุ้งในการทำคอนกรีตกำลังสูง และเมื่อนำค่าออกไซด์ของซิลิกาฟุ้งมาเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหิน พบว่ามีองค์ประกอบที่แตกต่างกันค่อนข้างมากดังตารางที่ 2.3 โดยปกติเมื่อนำเอาปูนซีเมนต์มาผสมกับน้ำจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งมีผลทำให้เกิดสารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งเป็น

ตัวการทำให้ส่วนผสมของเนื้อคอนกรีตจับตัวกันและสารแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Hydroxide , Ca(OH)_2) ดังสมการที่ (11)



Ca(OH)_2 ที่เกิดขึ้นจะมีประมาณ 20-25 % ซึ่งไม่ก่อให้เกิดประโยชน์ต่อเนื้อคอนกรีตแต่เมื่อใส่ซิลิกาฟูลงไปในส่วนผสมดังกล่าว พบว่าจะทำให้ SiO_2 ในการซิลิกาฟูลทำปฏิกิริยากับ Ca(OH)_2 อีกครั้งทำให้เกิดสาร CSH ขึ้นอีก ดังสมการที่ (12)



CSH ที่เพิ่มขึ้นและซิลิกาฟูลที่มีขนาดเล็กมาก จะมีผลทำให้เกิดตัวอุดช่องว่างในเม็ดซีเมนต์ที่ผสมกันรวมเป็นคอนกรีต ซึ่งทำให้เนื้อคอนกรีตมีความแน่นมากขึ้น อันมีผลโดยตรงกับกำลังอัดสูงชันของคอนกรีต และทนทานมากยิ่งขึ้น

ตารางที่ 2.3 ร้อยละองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของปูนซีเมนต์ เถ้าถ่านหิน และซิลิกาฟูล [2]

ออกไซด์	ปูนซีเมนต์	เถ้าถ่านหิน	ซิลิกาฟูล
SiO_2	20	48	92
Al_2O_3	5	26	0.7
Fe_2O_3	3	10	1.2
CaO	60	5	0.2
MgO	1.1	2	0.2
SO_3	2.4	0.7	-
ออกไซด์อื่นๆ	1.5	1.3	2.6
LOI.	2	3	-

2.3.2.1 คุณสมบัติของเพสต์ มอร์ตาร์ ที่ผสมเพิ่มด้วยซิลิกาฟุ่ม

การใช้ซิลิกาฟุ่มเป็นวัสดุผสมเพิ่มแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในการทำคอนกรีตมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตหลายประการ เนื่องจากซิลิกาฟุ่มมีขนาดเล็กละเอียดกว่าปูนซีเมนต์มากจึงช่วยอุดรูพรุนในช่องว่างของคอนกรีตได้ ตัวอย่างเช่น ความต้องการน้ำ ความสามารถทำงานได้ ระยะเวลาก่อตัว เป็นต้น

ระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time)

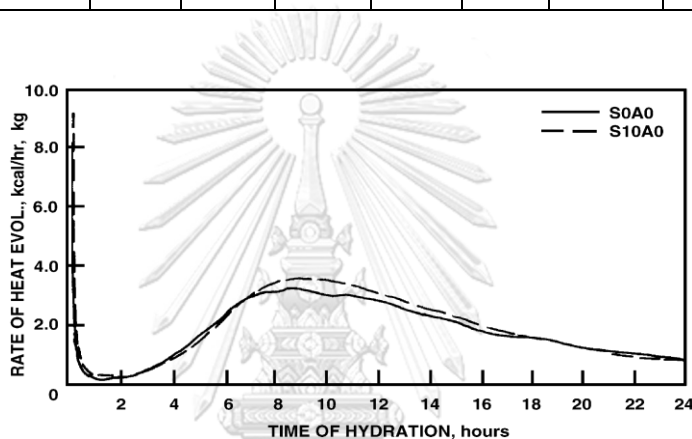
สัดส่วนผสมของซิลิกาฟุ่มจะส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของคุณสมบัติในคอนกรีตหลายประการ หนึ่งในนั้นคือเวลาที่ใช้ในการก่อตัวของคอนกรีต จากการวิจัยในอดีตได้มีการศึกษาการใช้นาโนซิลิกาฟุ่มและซิลิกาแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 8 พบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาฟุ่มและ ซิลิกาฟุ่มโดยเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ล้วนมีค่าการก่อตัวระยะต้นอยู่ที่ 12, 30, 65 นาที และการก่อตัวระยะปลายมีค่า 50, 90 และ 150 นาทีตามลำดับ จะสังเกตได้ว่าการใช้นาโนซิลิกาฟุ่มสามารถร่นระยะเวลาการก่อตัวที่ระยะต้นและระยะปลายได้มากขึ้น ส่วนการใช้นาโนซิลิกาฟุ่มจะทำให้ซีเมนต์เพสต์ก่อตัวในเวลาที่ยาวที่สุด เนื่องจากเวลาการก่อตัวที่มีนาโนซิลิกาฟุ่มจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ ซึ่งในนาโนซิลิกาฟุ่มจะมีปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์มากกว่าซิลิกาฟุ่ม อีกทั้งยังมีพื้นที่ผิวสูง ขนาดอนุภาคเล็กกว่าซิลิกาฟุ่มและปูนซีเมนต์ [14]

ความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชัน

เมื่อซิลิกาฟุ่มถูกนำไปใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในการผสมคอนกรีตจะเกิดการเปลี่ยนแปลงต่อคุณสมบัติภายในคอนกรีตหลายอย่าง แต่สำหรับความร้อนของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันนั้น พบว่า การใช้ซิลิกาฟุ่มโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตไม่ได้เป็นการลดอุณหภูมิของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของคอนกรีตให้ต่ำลง ซึ่งจากการศึกษาของ Langan [15] ได้วัดอัตราความร้อนอันเนื่องมาจากการไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟุ่มด้วยการแทนที่ซิลิกาฟุ่มในอัตราร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 พบว่า อัตราการเกิดความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันในซีเมนต์ที่ถูกผสมด้วยซิลิกาฟุ่มจะมีค่าใกล้เคียงเมื่อเทียบกับซีเมนต์ที่ไม่ถูกผสมด้วยซิลิกาฟุ่ม อีกทั้งในบางช่วงอาจจะมีอัตราเกิดความร้อนที่มากกว่าเล็กน้อยอีกด้วย ดังรูปที่ 2.4 และในตารางที่ 2.4 จะเห็นค่าอัตราการเกิดความร้อนโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35, 0.40 และ 0.50 ว่ามีความร้อนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตั้งแต่เริ่มผสมจนถึงมีค่าใกล้เคียงกันมากในช่วงหลังจาก 24 ชั่วโมง ดังนั้นหากต้องการจึงควรหลีกเลี่ยงการใช้ซิลิกาฟุ่มเพื่อวัตถุประสงค์ในการลดอุณหภูมิเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ตารางที่ 2.4 แสดงผลของอัตราความร้อน (kcal/hr) ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน [15]

	w/c	0.0- 0.5h	0.5- 2.0h	2.0- 0.8h	8.0- 24h	Total 1 Day	Total 3 Day
SOA0	0.35	2.6	0.4	11.7	31.3	45.9	56.9
S10A0	0.35	3.1	0.4	8.7	34.5	46.6	56.1
SOA0	0.4	2.6	0.5	11.8	31.8	46.7	-
S10A0	0.4	3.2	0.4	10.3	33.6	47.4	-
SOA0	0.5	2.6	0.4	10.2	33.3	46.4	-
S10A0	0.5	3.2	0.5	9.7	35.3	48.7	-



รูปที่ 2.4 อิทธิพลของซิลิกาฟุ่มต่อการเกิดความร้อนในซีเมนต์ [15]

กำลังรับแรงอัด

การใช้ซิลิกาฟุ่มยังคงได้รับความนิยมใช้เพื่อทำคอนกรีตกำลังรับแรงอัดสูง เนื่องจากการใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่คอนกรีตในบางส่วนนั้น จะทำให้สามารถเพิ่มกำลังของคอนกรีตได้เร็วมาก สามารถพัฒนากำลังในช่วงอายุต้นได้สูงกว่าคอนกรีตธรรมดา โดย Hoonton [16] ได้ทำการศึกษากำลังรับแรงอัดด้วยการแทนที่ซิลิกาฟุ่มในปูนซีเมนต์บางส่วนที่ปริมาณร้อยละ 0, 10, 15 และ 20 ของวัสดุประสาน พบว่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วันของคอนกรีตที่ถูกแทนที่ด้วยซิลิกาฟุ่มมีค่ามากกว่าคอนกรีตธรรมดาค่อนข้างมาก แต่เมื่อปล่อยให้คอนกรีตเหล่านี้มีอายุครบ 5 ปีกลับพบว่า คอนกรีตที่มีปริมาณซิลิกาฟุ่มในปริมาณมากๆ มีค่ากำลังลดลง และปริมาณซิลิกาฟุ่มที่ควรใช้แทนที่ในงานคอนกรีตที่ให้กำลังสูงทั้งระยะต้นและระยะปลายคือ ปริมาณร้อยละ 10 ของวัสดุประสานซึ่งจะให้ค่ากำลังที่ดีที่อายุ 28 วันและ 5 ปี

บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย

วิธีการศึกษาจะกล่าวถึง วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้การทดสอบ รายละเอียดการทดสอบ และสัดส่วนผสมของเพสต์ มอร์ตาร์ ที่ใช้ในการศึกษา มีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 3. 1 แสดงลำดับขั้นตอนการทดสอบ

3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับวัสดุที่จะนำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตรา ทีพีไอ ประเภทที่ 1
2. เถ้าถ่านหิน จำนวน 2 แหล่งผลิต ดังนี้
 - เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
 - เถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากประเทศเยอรมนี
3. ซิลิกาฟุ่มควบแน่น ตรา Elkem Microsilica ผ่านมาตรฐาน ASTM C1240 [17]
4. ทราย ที่ใช้เป็นทรายละเอียด มีสภาพผิวแห้งอิมตัว
5. น้ำ ใช้น้ำประปาในการทดสอบครั้งนี้



รูปที่ 3.2 แสดงวัสดุสำหรับงานวิจัย

3.2 การทดสอบสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

3.3.1 ส่วนประกอบทางเคมี

ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี และเถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ ทดสอบหาโดยวิธีการวิเคราะห์ X-ray Fluorescence (XRF) ด้วยเครื่อง JEOL, JSM-6610LV ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ ทำให้สามารถแยกได้ว่าในตัวอย่างประกอบด้วยธาตุใดบ้าง

3.3.2 ความละเอียด

ความละเอียดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แก้วถ่านหินปิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี แก้วถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ และซิลิกาฟูม หาใน 3 รูปแบบดังนี้

1.ลักษณะอนุภาค จะทำการทดสอบด้วยกล้องอิเล็กตรอนไมโครสโคปด้วยเครื่อง JEOL, JSM-6400 เพื่อศึกษารูปร่างและลักษณะผิวของอนุภาค โดยนำตัวอย่างที่ต้องการทดสอบยึดติดในแท่งอลูมิเนียมทรงกระบอกเล็ก และฉาบผิวด้วยโลหะผสมระหว่างทองกับพลาเดียม (gold-palladium alloy)



รูปที่ 3.3 เครื่อง JEOL, JSM-6400 Scanning Electron Microscope

2.พื้นที่ผิวจำเพาะ

ทดสอบโดยวิธีแอร์เพอร์มีอะบิลิตี้เบลน ตามมาตรฐาน ASTM C204 [18] (Standard Method for Finess of Portland Cement by Permeability Apparatus) ด้วยเครื่องมือแอร์เพอร์มีอะบิลิตี้ของเบลน (Air permeability apparatus) เป็นการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific Surface Area) ด้วยการวัดระยะเวลาที่อากาศไหลผ่านตัวอย่าง ซึ่งค่าที่ทดสอบได้มีหน่วยเป็น cm^2/g

3.การกระจายขนาดอนุภาค

ทดสอบโดยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค MALVERN, Mastersizer 3000 ซึ่งสามารถวัดขนาดตั้งแต่ 0.02 ไมโครเมตรถึง 2,000 ไมโครเมตร วัดได้ทั้งตัวอย่างที่เป็นผงแห้งและที่เป็นของเหลว โดยการวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างเป็นผงแห้ง เพื่อศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคและหาขนาดอนุภาคเฉลี่ย (d_{50})



รูปที่ 3.4 เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค MALVERN, Mastersizer 3000

3.3.3 ความถ่วงจำเพาะ

ทดสอบความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์และวัสดุประสาน ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C188 [19] (Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement) โดยขวดมาตรฐานชาเตอร์ลีเยร์ (Le Chatelier Flask) ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะเป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของวัสดุต่อน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่าวัสดุโดยปริมาตรของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และวัสดุประสานหาได้จากการที่ในน้ำมันก๊าด

3.4 การทดสอบสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมวัสดุปอซโซลาน

ตัวอย่างที่ทำการทดสอบ เป็นตัวอย่างของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าถ่านหินบิทุมินัส คัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ และซิลิกาฟูมโดยจะใช้เถ้าถ่านหินแต่ละชนิด แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในปริมาณร้อยละ 20, 40, 60, 80 โดยน้ำหนัก และใช้ซิลิกาฟูมแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณร้อยละ 5, 7, 9, 11 โดยน้ำหนัก ทำการทดสอบดังต่อไปนี้

3.4.1 ความชื้นเหลวปกติของเพสต์ (Normal consistency)

ตัวอย่างที่ทดสอบกระทำตามมาตรฐาน ASTM C187 [20] ด้วยเครื่องมือไวแคต (Vicat apparatus) เป็นวิธีการทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมสำหรับเพสต์ โดยพิจารณาการจมของเข็มมาตรฐานที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มม. เป็นระยะ 10 ± 1 มม. ภายในเวลา 30 วินาที

3.4.2 ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ (Setting time)

ตัวอย่างที่ทดสอบจะทำการทดสอบหาระยะเวลาในการก่อตัวระยะต้น (initial setting time) และระยะปลาย (Final setting time) ตามมาตรฐาน ASTM C191 [21] โดยใช้ปริมาณที่น้ำ

พอเหมาะจากการทดสอบความเข้มข้นเหลวปกติ โดยการวัดการจมของเข็มมาตรฐานขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มม. เป็นระยะ 25 มม. ในระยะเวลา 30 วินาที



รูปที่ 3.5 เครื่องมือไวแคต

3.4.3 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ (Compressive strength)

การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ใช้ตามมาตรฐาน ASTM C109 [22] ซึ่งกำหนดว่า ตัวอย่างที่ทำการทดสอบต้องมีค่าการไหลแผ่ที่ร้อยละ 100–115 เพื่อให้ส่วนผสมอยู่ในภาวะปั้นได้ (plastic consistency) วิธีทดสอบจึงต้องแปรเปลี่ยนอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (water/binder) ในแต่ละส่วนผสม เพื่อให้มีค่าการไหลแผ่เดียวกัน แต่การแปรเปลี่ยนอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานนั้นจะมีผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมวัสดุปอซโซลานและปฏิกิริยาที่เกิดในการผสม ดังนั้นในการทดสอบนี้จะให้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ โดยการผสมจะใช้แก้วถ่านหินปิทูมินัสคัตขนาดจากเยอรมนี แก้วถ่านหินลิกันต์จากแม่เมาะ แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในปริมาณร้อยละ 20, 40, 60, 80 โดยน้ำหนัก และใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในปริมาณร้อยละ 5, 7, 9, 11 โดยน้ำหนัก เพื่อหล่อตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด $5 \times 5 \times 5$ ซม.³ โดยมีอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.75 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.485 ตามมาตรฐาน ASTM C109

สำหรับลูกบาศก์มอร์ตาร์ที่ได้จะนำไปทดสอบหาลำลังรับแรงอัดหลังจากถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมงแล้วจะนำมอร์ตาร์ที่ได้บ่มในน้ำจนถึงอายุบ่มที่จะทำการทดสอบเป็นเวลา 1, 7, 14, 28, 45 และ 60 วัน ตามลำดับ

3.4.4 ร้อยละกำลังรับแรงอัด

ทำการหาเพื่อเทียบกำลังรับแรงอัดของลูกบาศก์มอร์ตาร์ผสมแก้วถ่านหินปิทูมินัสคัตขนาดจากเยอรมัน แก้วถ่านหินลิกันต์จากแม่เมาะ และซิลิกาฟุ่ม ต่อกำลังรับแรงอัดของลูกบาศก์มอร์ตาร์ธรรมดา

3.4.5 X-Ray Diffraction Spectrometry

เป็นการทดสอบเพื่อศึกษากระบวนการเกิดและผลของปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านลิกไนต์จากแม่เมาะ และซิลิกาฟูม การวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction (XRD) จะใช้ซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าถ่านหินและซิลิกาฟูม เพื่อจัดการแทรกแซงของ Diffraction Peak จากทราย โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าถ่านหินแต่ละชนิดในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก และใช้ซิลิกาฟูมแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณร้อยละ 9 โดยน้ำหนัก และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.485 จากนั้นบ่มเป็นระยะเวลา 7, 14, 28 วัน ตามลำดับ จึงนำไปทดสอบโดยสนใจสารประกอบที่เพิ่มขึ้นและลดลง ที่มีความสำคัญต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัด คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) , แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) , ไตแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) และไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S)



รูปที่ 3.5 เครื่องวิเคราะห์สารประกอบ โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD)

3.4.6 การศึกษาความร้อนที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Heat of Hydration Reaction)

เป็นการทดสอบในเพสต์ที่ถูกเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ และซิลิกาฟูมแทนที่ในปูนซีเมนต์ด้วยการใช้เครื่อง Isothermal calorimeter ตามมาตรฐาน ASTM C 186 [23]



รูปที่ 3.6 เครื่อง Isothermal Calorimeter

ตารางที่ 3.1 เกณฑ์การกำหนดค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนลูกบาศก์มอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C109[22] เมื่อใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

อายุและการบ่ม	กำลังรับแรงอัด (ksc)
1 วันในอากาศชื้น 2 วันในน้ำ	85
1 วันในอากาศชื้น 6 วันในน้ำ	150
1 วันในอากาศชื้น 27 วันในน้ำ	245

ตารางที่ 3. 2 สัดส่วนผสมในการทำมอร์ตาร์ธรรมดา มอร์ตาร์ผสมเถ้าถ่านหินบิทุมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ และซิลิกาฟูมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.485

ชื่อ ส่วนผสม	อัตราส่วน				
	(ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)				
	ปูนซีเมนต์	เถ้าถ่านหินบิทุมินัส คัดขนาด	เถ้าถ่านหินลิกไนต์ แม่เมาะ	ซิลิกาฟูม	ทราย
PC	100	0	0	0	275
FG20	80	20	-	-	275
FG40	60	40	-	-	275
FG60	40	60	-	-	275
FG80	20	80	-	-	275
FM20	80	-	20	-	275
FM40	60	-	40	-	275
FM60	40	-	60	-	275
FM80	20	-	80	-	275
SF5	95	-	-	5	275
SF7	93	-	-	7	275
SF9	91	-	-	9	275
SF11	89	-	-	11	275

FGXX : เถ้าถ่านหินบิทุมินัสคัดขนาดจากเยอรมนีแทนที่ในปริมาณ 20, 40, 60, 80 โดยน้ำหนัก

FMXX : เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะแทนที่ใน 20, 40, 60, 80 โดยน้ำหนัก

SFXX : ซิลิกาฟูมแทนที่ในปริมาณ 5, 7, 9, 11 โดยน้ำหนัก

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

4.1 สมบัติพื้นฐานวัสดุ

4.1.1 ส่วนประกอบทางเคมี

ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนีและเถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ หาโดยวิธี X-Ray fluorescence (XRF) ดังตารางที่ 4.1 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน บิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ ในรูปออกไซด์ อีกทั้งนำส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และซิลิกาฟูมมาแสดงเพื่อเปรียบเทียบกัน พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ถึงร้อยละ 57.7 โดยน้ำหนักซึ่งมากกว่าที่พบในเถ้าถ่านหินบิทูมินัส คัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ และซิลิกาฟูมที่มีอยู่เพียงร้อยละ 4.04, 26.2, 0.48 โดยน้ำหนักตามลำดับ ซึ่งแคลเซียมออกไซด์ (CaO) นี้จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำ (H₂O) นั่นก็คือปฏิกิริยาไฮเดรชัน เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) จะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสาน ทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัว ดังนั้นเถ้าถ่านหินและซิลิกาฟูม จึงมีการเชื่อมประสานภายในตัวเองเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์

สำหรับเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี มีปริมาณของ SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ เท่ากับ 81.6 ซึ่งมากกว่าร้อยละ 70 ขององค์ประกอบทั้งหมดที่กำหนดไว้ใน ASTM C618 เมื่อจำแนกตามมาตรฐานจึงสามารถจัดเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนีอยู่ใน Class F และสามารถจำแนกเถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะให้อยู่ใน Class C เพราะมีปริมาณของผลรวมของซิลิกา อลูมินา และเหล็ก (SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃) เท่ากับ 56.7 ซึ่งมากกว่าร้อยละ 50 ตามมาตรฐาน ASTM C618 ส่วนซิลิกาฟูมจะมีองค์ประกอบหลักคือ SiO₂ ที่สูงถึงร้อยละ 88.3 โดยน้ำหนัก ส่วนที่เหลือจะเป็นองค์ประกอบของออกไซด์อื่นๆ ซึ่งออกไซด์เหล่านี้ถือว่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ SiO₂ ที่เป็นองค์ประกอบหลัก โดยผลรวมซิลิกา อลูมินาและเหล็ก (SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) นั่นคือปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ที่เกิดขึ้นหลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชันดังนั้นเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ และซิลิกาฟูม มีศักยภาพในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานมาก

ปริมาณของซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีค่าเท่ากับร้อยละ 2.7 โดยน้ำหนัก และมีค่าเท่ากับ 0.9, 7.3 ในเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี และเถ้าถ่านหิน

ลิกไนต์จากแม่เมาะ จะเห็นว่าปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ของเถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะเกินกว่าที่มาตรฐาน ASTM C618[7] ซึ่งกำหนดให้มีปริมาณ SO_3 ไม่มากกว่าร้อยละ 5

ค่า LOI (Loss on Ignition) คือ ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา เกิดจากการสูญเสียความชื้น ธาตุคาร์บอนหรือซัลเฟอร์เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนีและเถ้าถ่านลิกไนต์จากแม่เมาะ มีค่า LOI เท่ากับร้อยละ 2.9 และ 1.5 โดยน้ำหนักตามลำดับ ซึ่งไม่เกินกว่าค่าตามมาตรฐานการแบ่งชั้นคุณภาพของวัสดุผสมในซีเมนต์ ASTM C618 ที่กำหนดชั้น Class F และ Class C ให้มีค่า LOI มากที่สุดไม่เกินร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และจากการศึกษาพบว่าค่า LOI มีผลต่อความต้องการใช้น้ำหรือเถ้าถ่านหินจะดูดน้ำเมื่อทำการผสมก่อนมอร์ตาร์ ซึ่งเถ้าถ่านหินที่มีค่า LOI สูงมีแนวโน้มว่ามีความต้องการใช้น้ำของมอร์ตาร์มากด้วย

ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ และซิลิกาฟูม

ส่วนประกอบทางเคมี	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	เถ้าถ่านหินบิทูมินัส	เถ้าถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะ	ซิลิกาฟูม [24]
SiO_2	23.6	51.7	28.2	88.3
Al_2O_3	5.3	24.3	14.9	1.17
Fe_2O_3	3.4	5.6	14.5	4.76
CaO	57.7	4.0	26.2	0.48
MgO	1.3	1.6	2.3	2.14
SO_3	2.7	0.9	7.3	1.05
Na_2O	0.3	0.9	1.8	-
ออกไซด์อื่นๆ	3.7	7.9	3.3	-
LOI	2	2.9	1.5	2.1

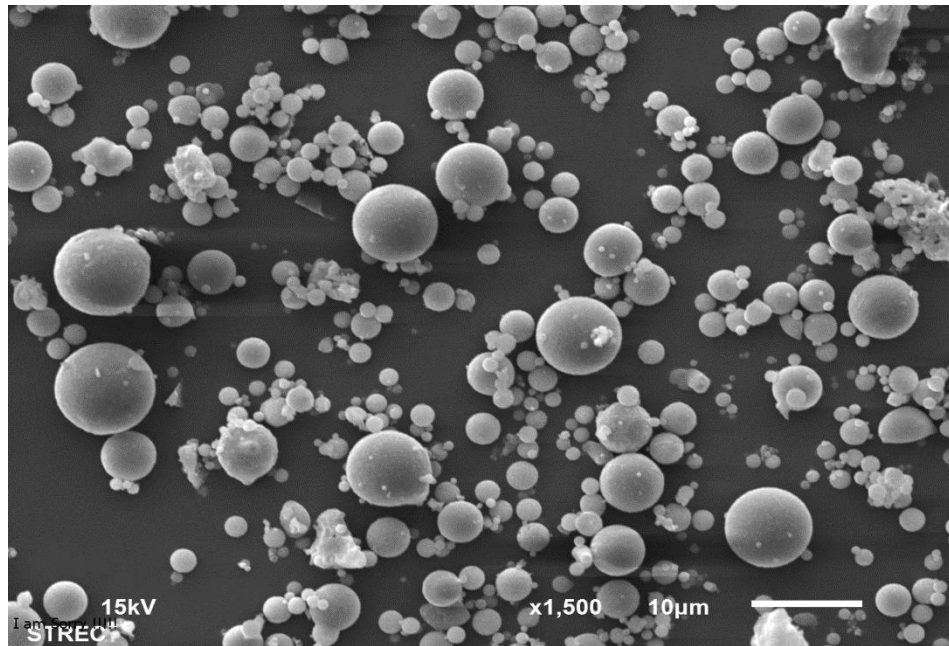
โดยเมื่อเปรียบเทียบส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ กับมาตรฐานการแบ่งชั้นคุณภาพของวัสดุผสมในซีเมนต์ตาม ASTM C618 จะเห็นว่าสามารถจัดวัสดุผสมเพิ่มทั้งสองชนิดอยู่ใน Class F และ Class C ตามลำดับ ดังรายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 4.2 สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาฟูมนั้นเป็นไปตาม ASTM C1240[17]

ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ กับมาตรฐานการแบ่งชั้นคุณภาพของวัสดุผสมในซีเมนต์ (ASTM C618)

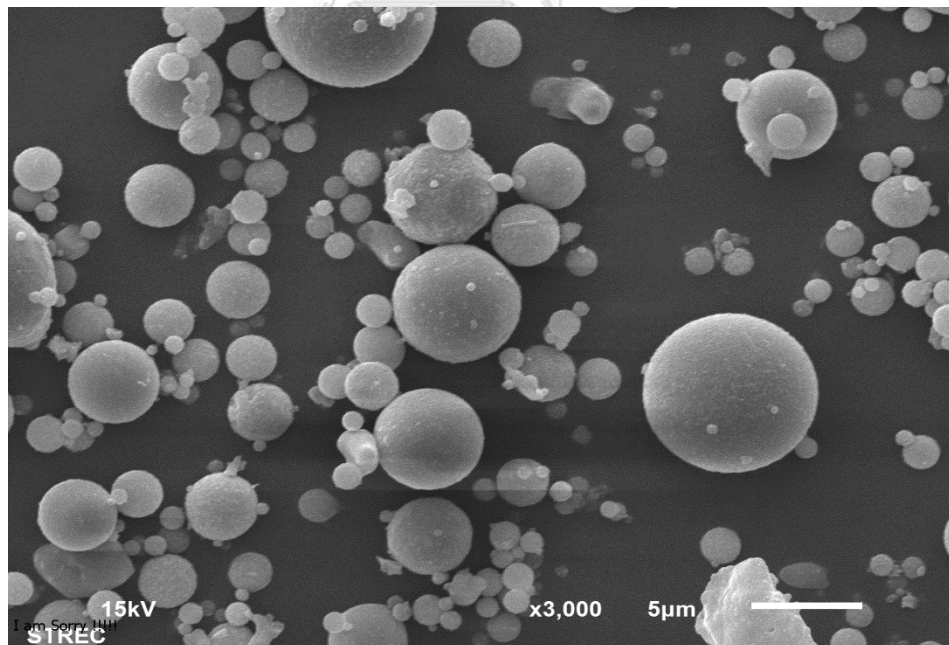
คุณสมบัติ	Class			เถ้าถ่านหิน บิทูมินัส	เถ้าถ่านหิน ลิกไนต์
	N	F	C		
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ %ต่ำสุด	70	70	50	81.6	57.6
SO ₃ %สูงสุด	4	5	5	0.9	7.3
LOI %สูงสุด	10	6	6	2.9	1.5
จำแนกตามมาตรฐาน				F	C

4.1.2 ลักษณะอนุภาค

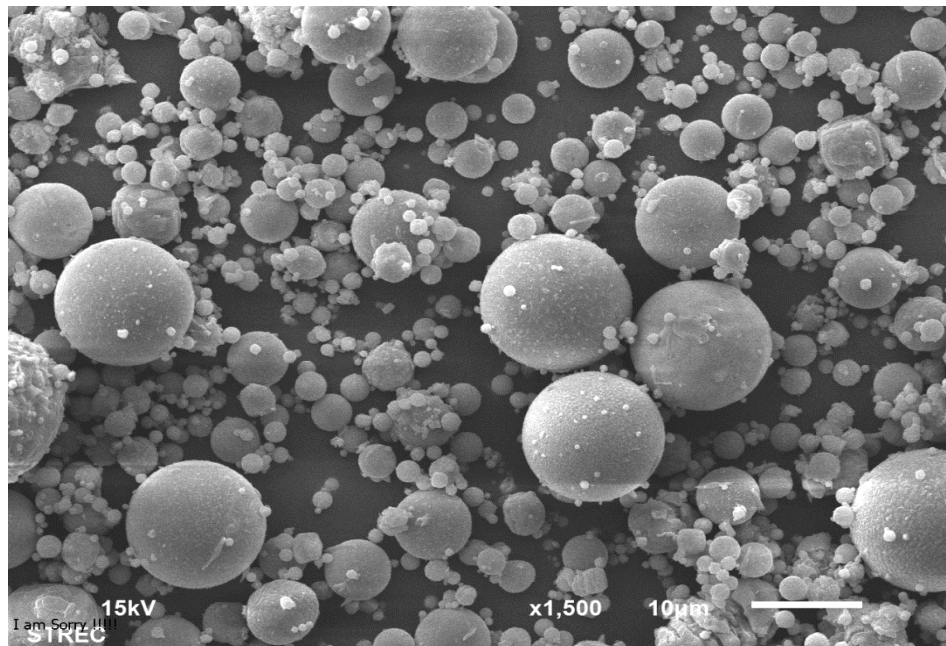
ลักษณะอนุภาค ได้จากการถ่ายภาพจากกล้องอิเล็กตรอนไมโครสโคป (Scanning Electron Microscope) ซึ่งภาพถ่ายลักษณะอนุภาคเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ และปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ที่กำลังขยาย 1500 เท่า และ 3,000 เท่า แสดงในรูปที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 ในส่วนของซิลิกาฟุ่มควบแน่น ซึ่งใช้กำลังขยายที่ 30 เท่าและ 100 เท่า แสดงในรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าลักษณะอนุภาคของเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนีมีลักษณะเป็นทรงกลม พื้นผิวเรียบ กระจายตัวดีขนาดเล็ก ซึ่งต่างจากลักษณะอนุภาคเถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ ในรูปที่ 4.1 (ข.) ที่มีขนาดใหญ่กว่าอย่างเห็นได้ชัดเจน มีรูปทรงกลม มีบางส่วนเหมือนมีก้อนกลมที่จับตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ ในขณะที่ปูนซีเมนต์ในรูปที่ 4.3 จะมีรูปทรงที่ไม่แน่นอน เป็นเหลี่ยมมุม พื้นผิวขรุขระ ในส่วนของลักษณะอนุภาคของซิลิกาฟุ่มนั้น จะมีลักษณะกลมขนาดใหญ่ กระจายตัวดี เนื่องจากขนาดเดิมของซิลิกาฟุ่มมีรูปร่างกลมผิวขรุขระ มีขนาดเล็กมาก เกิดการฟุ้งกระจายได้ง่าย ยากต่อการที่จะนำไปใช้งาน ดังนั้นจึงผลิตให้อยู่ในรูปของซิลิกาฟุ่มควบแน่น แต่เมื่อซิลิกาฟุ่มถูกน้ำจะเกิดการแตกตัวกลับเข้าสู่ขนาดเดิม ลักษณะและขนาดอนุภาคนั้นสำคัญต่อความสามารถทำงานได้ และกำลังการยึดเกาะของซีเมนต์เพสต์ เถ้าถ่านหินจะทำให้มอร์ตาร์ลื่นไหลได้ดี ส่งผลให้มีความต้องการน้ำลดลง ซึ่งจะตรงข้ามกับซิลิกาฟุ่มที่มีอนุภาคเล็กมากทำให้พื้นที่ผิวสูง จึงมีความต้องการน้ำมากเพื่อให้เกิดความลื่นไหลต่อซีเมนต์เพสต์



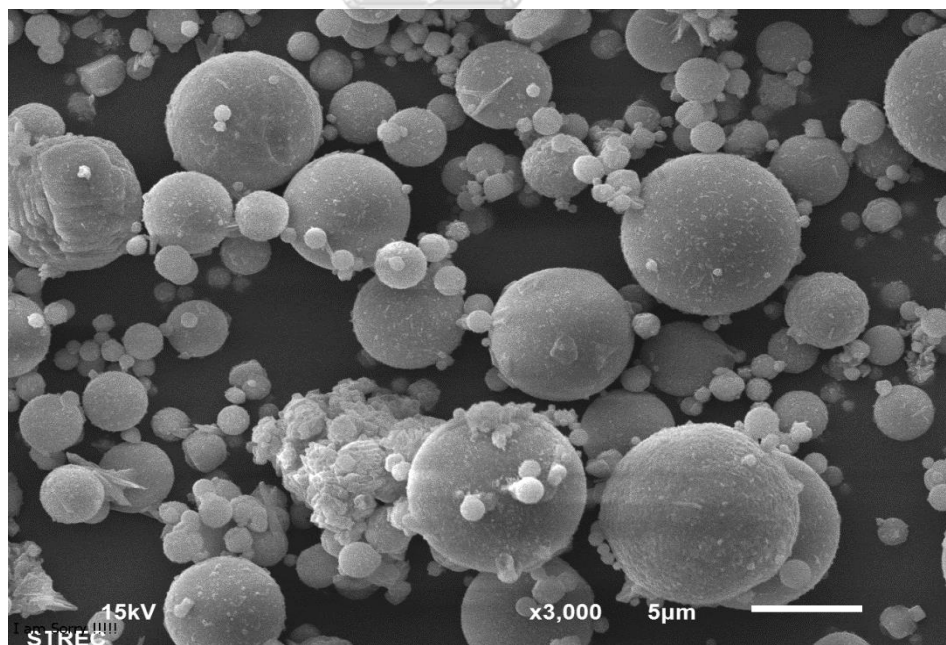
รูปที่ 4.1 (ก.) ภาพถ่ายลักษณะอนุภาคของเถ้าถ่านหินปิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี
ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า



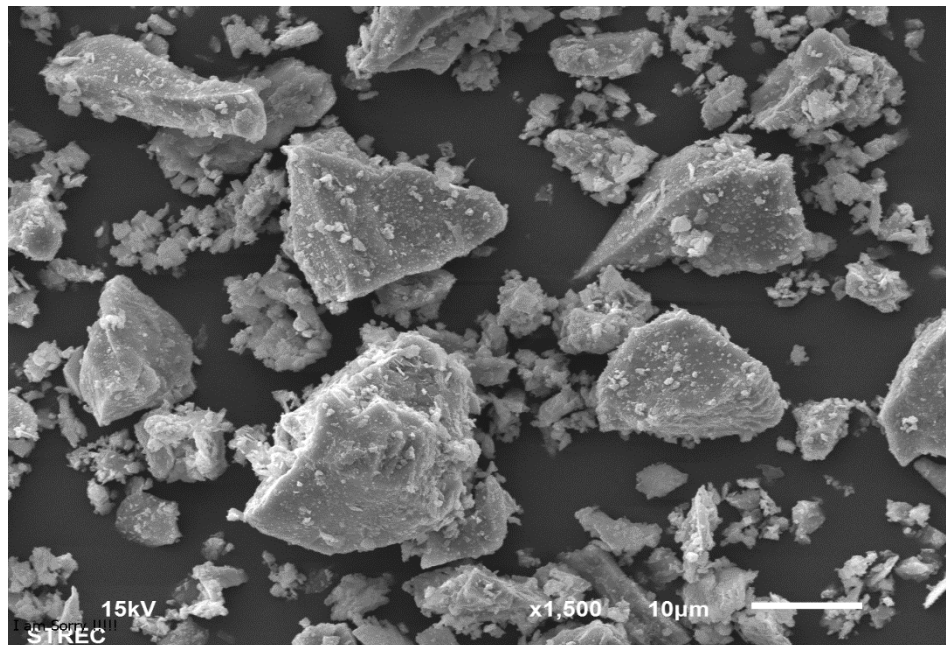
รูปที่ 4.1 (ข.) ภาพถ่ายลักษณะอนุภาคของเถ้าถ่านหินปิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี
ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า



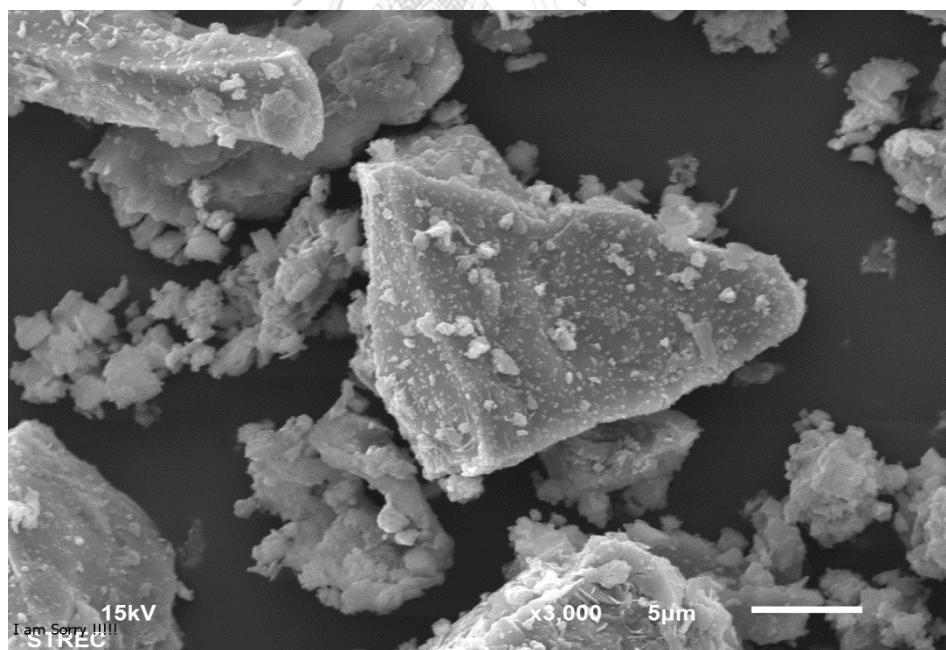
รูปที่ 4. 2 (ก.) ภาพถ่ายลักษณะอนุภาคของเถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ
ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า



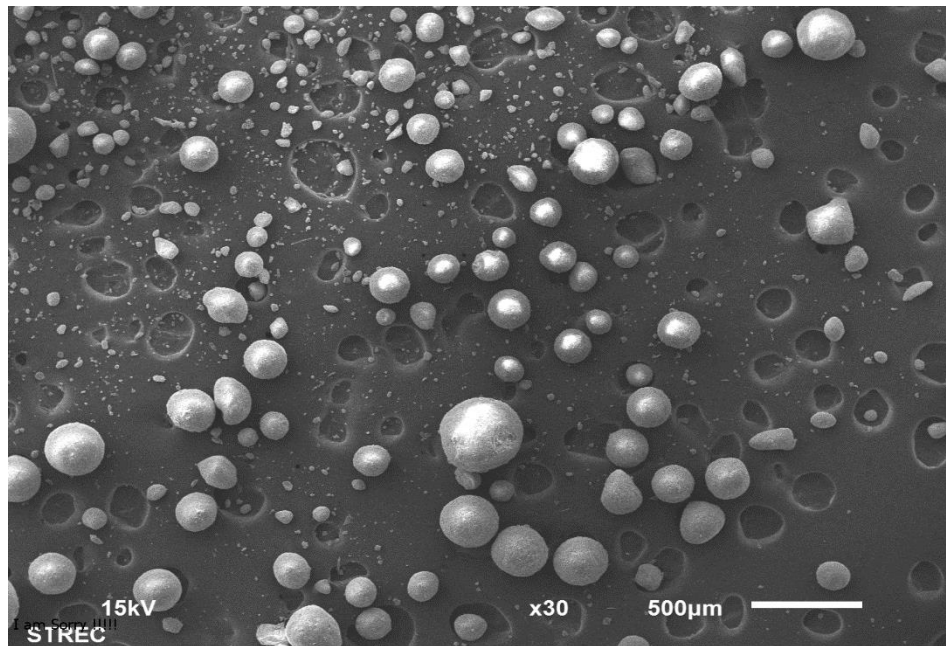
รูปที่ 4.2 (ข.) ภาพถ่ายลักษณะอนุภาคของเถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ
ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า



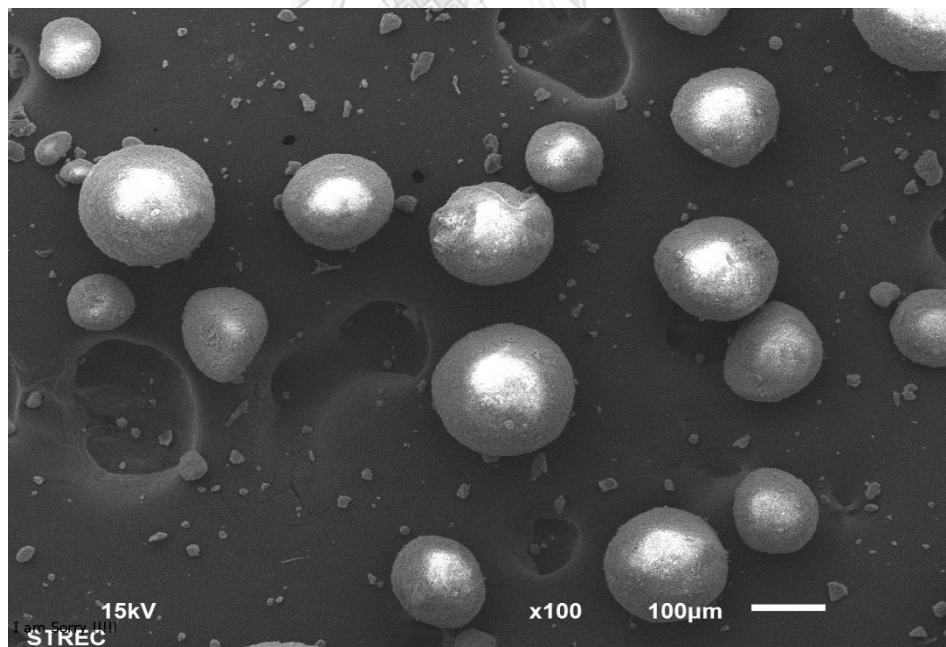
รูปที่ 4.3 (ก.) ภาพถ่ายลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า



รูปที่ 4.3 (ข.) ภาพถ่ายลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า



รูปที่ 4.4 (ก.) ภาพถ่ายลักษณะอนุภาคของซิริลิกาฟุ่มควบแน่นที่กำลังขยาย 30 เท่า

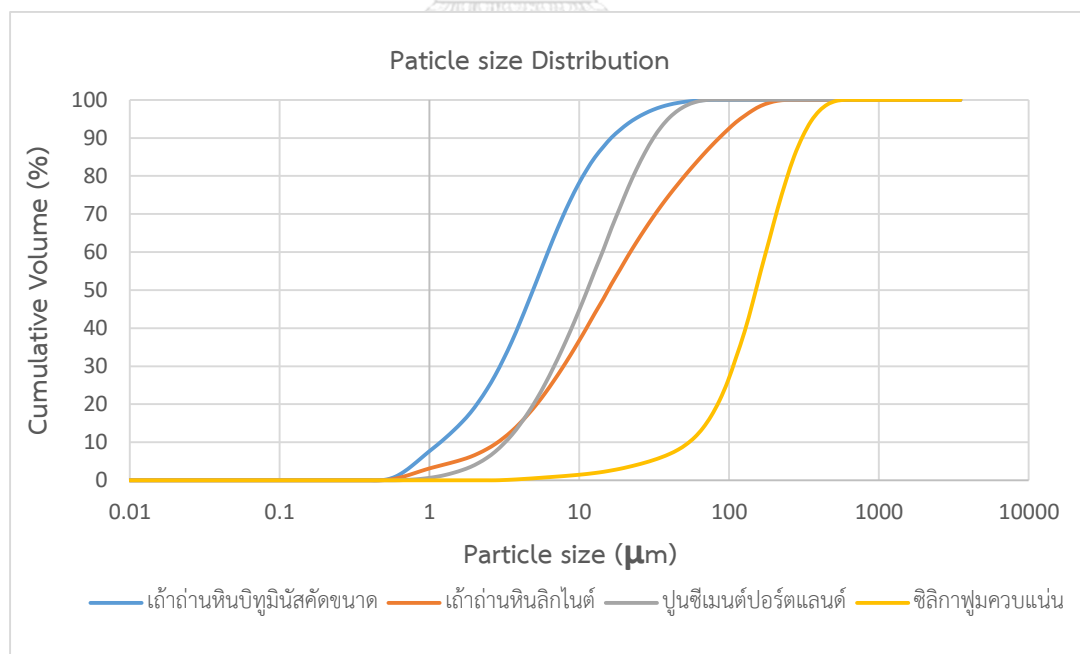


รูปที่ 4.4 (ข.) ภาพถ่ายลักษณะอนุภาคของซิริลิกาฟุ่มควบแน่นที่กำลังขยาย 100 เท่า

ลักษณะอนุภาคของเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ ที่แสดงดังรูปที่ 4.1 ถึง 4.4 อาจเป็นผลมาจากลักษณะของวัตถุดิบที่นำมาเผาและสภาพการเผาไหม้ที่เกิดขึ้น อนุภาคที่กลม ผิวเรียบ ขนาดเล็กมีผลต่อคุณสมบัติในการเพิ่มความสามารถของคอนกรีตสด (Workability) ของคอนกรีตได้

4.1.3 การกระจายขนาดของอนุภาค

การกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ ซิลิกาฟุ้งและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทำโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle Size Analyzer) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ขนาดอนุภาคได้ละเอียดถึง 0.02 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งแสดงเส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคกับเส้นโค้งการกระจายอนุภาคสะสมโดยปริมาตรของเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ ซิลิกาฟุ้ง และปูนซีเมนต์ จากรูปจะเห็นได้ชัดว่าขนาดของเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนีมีความละเอียดที่สุด รองลงมาคือปูนซีเมนต์ เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ และซิลิกาฟุ้ง ตามลำดับ โดยเมื่อพิจารณาจากกราฟจะเห็นว่า กราฟของซิลิกาฟุ้งจะมีความชันมาก มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ แต่ถึงอย่างไรก็ตามเมื่อซิลิกาฟุ้งควบแน่นถูกน้ำและมีแรงกระแทกอีกเล็กน้อยก็จะทำให้ซิลิกาฟุ้งควบแน่นแตกตัวไปสู่ขนาดเดิมประมาณ 0.1 ไมโครเมตรได้



รูปที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบเส้นโค้งการกระจายอนุภาคสะสมโดยปริมาตรของเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ ซิลิกาฟุ้ง และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

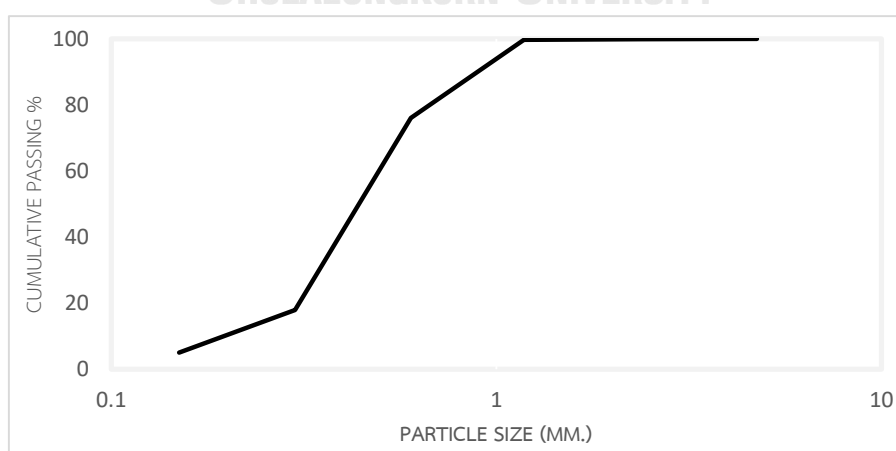
จากตารางที่ 4.3 ซึ่งแสดงขนาดอนุภาคที่ร้อยละสะสมเท่ากับ 10 ,50 และ 90 ของเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ ซิลิกาฟุ้ง และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่า ค่า Mean Particle Size (ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคที่มีจำนวนอนุภาคร้อยละ 50 ที่เล็กกว่าหรือใหญ่กว่าขนาดของอนุภาค) เมื่อพิจารณาจากตาราง 4.3 อนุภาคเฉลี่ยของเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ ซิลิกาฟุ้ง และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เท่ากับ 5.58 ,18.2 ,172 ,13.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ขนาดอนุภาคของเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ ซิลิกาฟุ้ง และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ชนิดของตัวอย่าง	d ₁₀ % (μm)	d ₅₀ % (μm)	d ₉₀ % (μm)
เถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาด	1.34	5.58	18.6
เถ้าถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะ	3.28	18.2	100
ซิลิกาฟุ้ง	63.1	172	351
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	3.69	13.2	36.3

คุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวมละเอียด

ทรายที่ใช้ในการทดสอบเป็นทรายละเอียด ที่ขนาดอนุภาคผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.60 และการกระจายตัวของมวลรวมละเอียดที่ทดสอบเป็นดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แสดงการกระจายตัวของอนุภาคทรายละเอียดที่ใช้ทดสอบ

4.1.4 ความละเอียด

การทดสอบพื้นที่ผิวจำเพาะ ซึ่งมีหน่วยเป็นพื้นที่ผิวต่อน้ำหนัก ทดสอบด้วยเครื่องหาความซึมอากาศเบลน (Blain Air Permeability Apparatus) ตามมาตรฐาน ASTM 204 เป็นอีกหนึ่งในวิธีมาตรฐานเพื่อหาความละเอียด และพิจารณาความละเอียดโดยการหาปริมาณอนุภาคที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ตะแกรงที่มีขนาดช่องเปิด 45 ไมครอน) ของเก้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เก้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ แสดงดังตารางที่ 4.4 พบว่าซิลิกาฟุ้งมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุด คือประมาณ 200,000 ตร.ซม./ก. และตามด้วยเก้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ และเก้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะเท่ากับ 6255 ,3255 ,2555 ตร.ซม./ก. ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวจำเพาะ ปรากฏว่ามีผลสอดคล้องกัน คือวัสดุที่มีอนุภาคขนาดเล็กน้อย (d_{50}) จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะมาก เนื่องจากซิลิกาฟุ้งที่ใช้ทดสอบเป็นชนิดควบแน่นแต่เมื่อซิลิกาฟุ้งสัมผัสกับน้ำจะมีการแตกตัวกลับไปสู่ขนาดเดิม ทั้งนี้พื้นที่ผิวจำเพาะมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา เมื่ออนุภาคมีความละเอียดมาก หมายถึงมีพื้นที่ผิวมาก ทำให้มีพื้นที่ทำปฏิกิริยาทางเคมีเพิ่มขึ้นไวต่อการทำปฏิกิริยา สำหรับปริมาณอนุภาคค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ของเก้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เก้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ มีค่าเท่ากับ 0.05 และ 34.16 ตามลำดับ เห็นได้ว่าปริมาณอนุภาคของเก้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนีที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 มีค่าอยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐาน ASTM C618 [7] กำหนดไว้คือไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก แต่เก้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะมีค่าปริมาณค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เกินกว่ากำหนดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ตารางที่ 4.4 พื้นที่ผิวจำเพาะของเก้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เก้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์

ชนิดของตัวอย่าง	พื้นที่จำเพาะ cm ² /g	ปริมาณค้างบนแรง (Retain on #325)
เก้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาด	6,255	0.05
เก้าถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะ	2,555	34
ซิลิกาฟุ้ง [25]	≈200,000	-
ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์	3,255	-

4.1.5 ความถ่วงจำเพาะ

ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าถ่านหินปิทูมินัสคัตขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ และซิลิกาฟูม หาโดยการแทนที่ในน้ำมันก๊าดตามมาตรฐาน ASTM C188 ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่า เถ้าถ่านหินปิทูมินัสคัตขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ ซิลิกาฟูม และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีค่าเท่ากับ 2.43 ,2.45 ,2.20 ,3.14 ตามลำดับ ค่าความถ่วงจำเพาะในแต่ละวัสดุที่แตกต่างกันนั้น เป็นผลอันเนื่องมาจากส่วนประกอบทางเคมีซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของแต่ละวัสดุนั้นแตกต่างกัน ออกไซด์ของธาตุที่มีความหนาแน่นสูง Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO และ CaO ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่มีอยู่มากในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่วนออกไซด์ธาตุที่มีความหนาแน่นต่ำ ได้แก่ SiO_2 , Na_2O , SO_3 ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักในเถ้าถ่านหินและซิลิกาฟูม จึงทำให้เถ้าถ่านหินปิทูมินัสคัตขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ และซิลิกาฟูม มีค่าความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

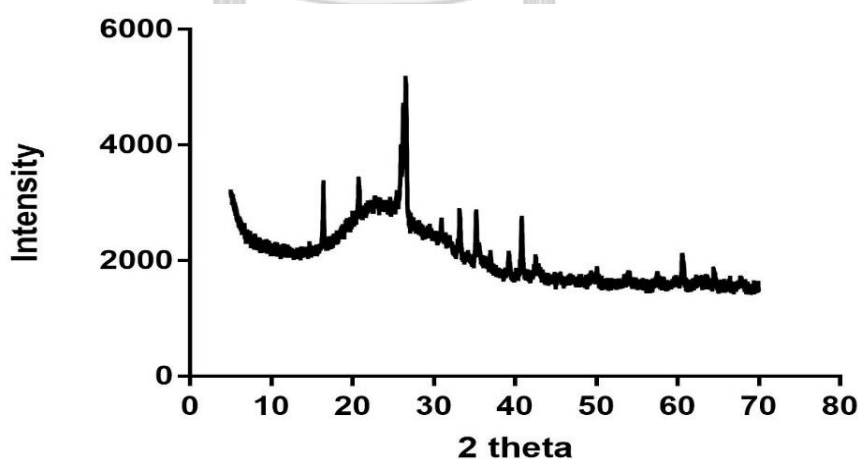
ตารางที่ 4. 5 ค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าถ่านหินปิทูมินัสคัตขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ และซิลิกาฟูม

ชนิดของตัวอย่าง	ความถ่วงจำเพาะ
	(Specific Gravity)
เถ้าถ่านหินปิทูมินัสคัตขนาด	2.43
เถ้าถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะ	2.45
ซิลิกาฟูม	2.20
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	3.14

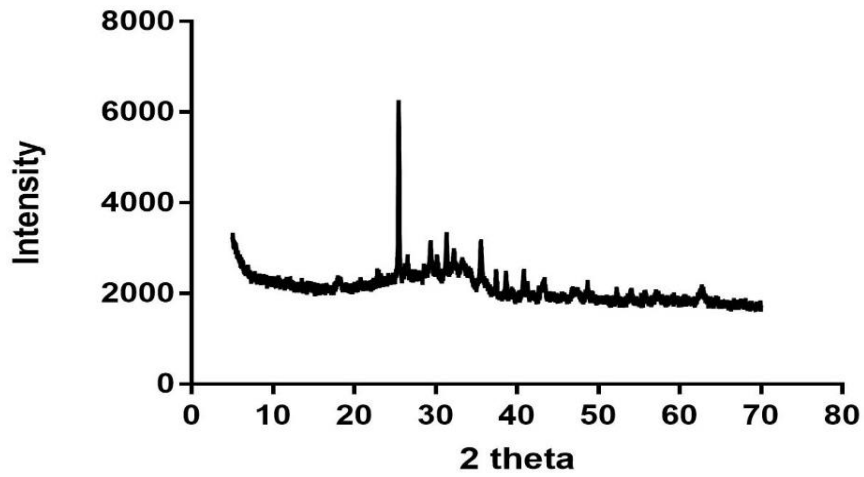
4.1.6 รูปแบบของสารประกอบในวัสดุ

การทดสอบรูปแบบของสารประกอบทางแร่ซึ่งแสดงในรูปผลึก (Crystalline Phases) ของเถ้าถ่านหินปิทูมินัสคัตขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) เพื่อศึกษาว่าวัสดุมีรูปแบบของโครงสร้างภายในเป็นแบบอสัณฐาน (Amorphous Phase หรือ Glassy Phase) หรือเป็นแบบผลึก (Crystalline Phase) โดยถ้าวัสดุมีสารประกอบเป็นแบบอสัณฐาน กราฟจะมีลักษณะเป็นเนินไม่มีจุดสูงสุด (Peak) สามารถวัดปริมาณของสารประกอบได้จากปริมาณพื้นที่ใต้กราฟ ส่วนโครงสร้างแบบผลึก (Crystalline Phase)

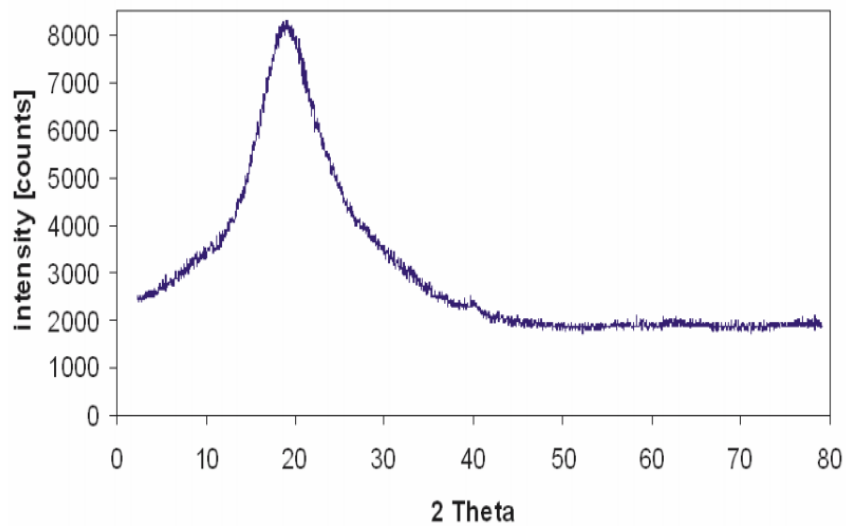
หรือ Quartz) กราฟจะมีลักษณะแหลมสูงชัดเจน สามารถวัดจากความสูงของกราฟ โดยทั่วไปแล้วสิ่งที่แสดงว่าเก้าชนิดใดเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานคอนกรีตนั้นคือ ความเป็นอสัณฐานของสารประกอบที่แสดงถึงความไม่เป็นระเบียบในการจัดเรียงตัวของโมเลกุลในเก้าถ่านหิน และบ่งบอกถึงความสามารถในการทำปฏิกิริยาทางเคมีที่ดี ใช้พลังงานในการสลายพันธะน้อยในการทำให้เกิดปฏิกิริยาหรือการสลายพันธะ ซึ่งลักษณะสัณฐานวิทยาจากการทดสอบของเก้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เก้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ แสดงในรูปที่ 4.7 และ รูปที่ 4.8 พบว่าลักษณะสัณฐานวิทยาของเก้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เก้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ มีโครงสร้างโมเลกุลภายในส่วนใหญ่เป็นรูปแบบอสัณฐาน (Amorphous) มีสารประกอบซิลิกาในรูปควอทซ์เป็นปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับพื้นที่ใต้กราฟของแบบอสัณฐานซึ่งแสดงว่าวัสดุปอซโซลานทั้งสามชนิดอาจสามารถนำไปใช้ในงานคอนกรีตได้ ส่วนลักษณะสัณฐานวิทยาของซิลิกาฟูนนั้นจะอยู่ในรูปแบบอสัณฐาน โดยแทบจะไม่มีความเป็นผลึกอยู่เลย ทำให้ซิลิกาฟูนสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ดีและรวดเร็ว ดังรูปที่ 4.9 และเมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะสัณฐานวิทยาของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ จะอยู่ในรูปควอทซ์ (Crystalline Phase) ได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) ซึ่งเป็นสารประกอบหลักจะเห็นได้จากกราฟที่มีจุดสูงสุดเด่นชัด และมีสารประกอบในรูปของอสัณฐานในปริมาณน้อยสังเกตได้จากพื้นที่ใต้กราฟ ดังรูปที่ 4.10 จากการวิจัยในอดีตพบว่าวัสดุที่จะนำไปใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้นั้นควรสารประกอบหลักเป็นซิลิกาและอลูมินาที่อยู่ในรูปแบบอสัณฐานหรือ Glassy Phase เพราะเป็นส่วนสำคัญที่ใช้ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานกับปูนซีเมนต์ได้ [9]



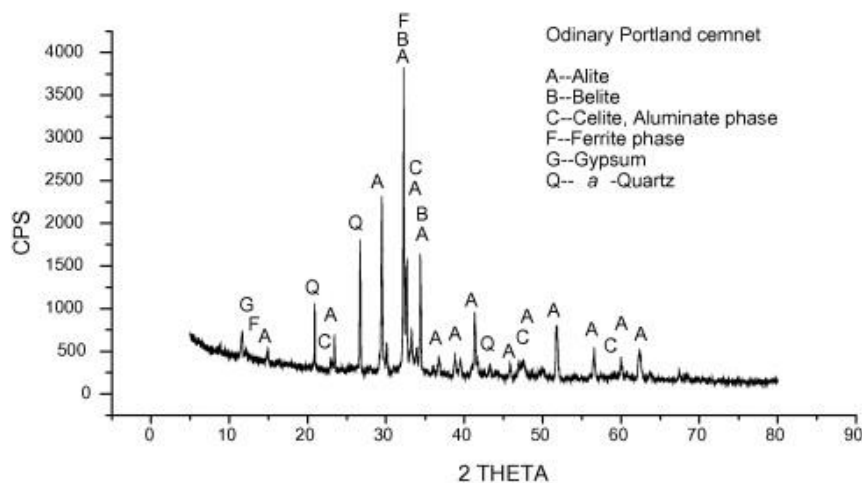
รูปที่ 4.7 การวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ของเก้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี



รูปที่ 4.8 การวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ของถ้ำถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ



รูปที่ 4.9 การวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ของซีลิกาฟูล์ม [26]



รูปที่ 4.10 การวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ของปูนซีเมนต์ [27]

4.2 สมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมวัสดุปอซโซลาน

4.2.1 ความชื้นเหลือปกติและระยะเวลาการก่อตัว

ความชื้นเหลือปกติและระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์ธรรมดา ซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าถ่านหินบิพูมินีสกัดขนาดจากเยอรมนี ซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ ซีเมนต์เพสต์ผสมซิลิกาฟูมในปริมาณต่างๆ หาโดยใช้ชุดทดสอบไวแคต ตามมาตรฐาน ASTM C187 และ ASTM C191 ตามลำดับ ตารางที่ 4.6 แสดงปริมาณที่ความชื้นเหลือปกติและระยะเวลาก่อตัวต้น-ระยะปลายของซีเมนต์เพสต์ในปริมาณต่างๆ ซึ่งจะเห็นว่าปริมาณน้ำที่ต้องการเพื่อให้ได้ความชื้นเหลือปกติที่เหมาะสมของเพสต์ผสมเถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเถ้าถ่านหินเพิ่มขึ้น เนื่องจากลักษณะอนุภาคที่กลมและมีปริมาณคาร์บอนอยู่น้อยจึงทำให้มีความต้องการน้ำน้อยกว่าปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติของซีเมนต์เพสต์ธรรมดาที่มีค่าเท่ากับร้อยละ 25.8 และพบว่าปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินบิพูมินีสกัดขนาดจากเยอรมนีและซีเมนต์เพสต์ผสมซิลิกาฟูมมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากขนาดอนุภาคของเถ้าถ่านหินบิพูมินีสกัดขนาดจากเยอรมนีและซิลิกาฟูมมีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์มากทำให้มีพื้นที่ผิวสัมพัทธ์มาก จึงมีความต้องการน้ำสูงไปด้วย

สำหรับผลของระยะก่อตัวเริ่มต้นตลอดจนระยะก่อตัวปลายของซีเมนต์เพสต์ที่มีเถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะและเถ้าถ่านหินบิพูมินีสกัดขนาดจากเยอรมนีผสมอยู่จะมีระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นนานกว่าซีเมนต์เพสต์ธรรมดา โดยระยะก่อตัวเริ่มต้นของซีเมนต์เพสต์ธรรมดามีค่าเท่ากับ 107 นาที ในขณะที่การตั้งระยะเริ่มต้นซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าถ่านหินบิพูมินีสกัดขนาดจากเยอรมนีและเถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ ในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนักมีค่าเท่ากับ 210 และ 158 นาที แต่จะมีค่า

ลดลงเหลือ 90 และ 80 นาทีตามลำดับ เมื่อมีการแทนที่ในปริมาณร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก การที่เถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนีมีแนวโน้มก่อตัวระยะต้นนานกว่าเถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ อาจเกิดจากองค์ประกอบทางเคมีและขนาดที่เล็กกว่า มีความละเอียดมาก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีตที่พบว่า[28] ในกรณีที่ใช้ซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณที่เท่ากันจะมีค่าระยะก่อตัวเริ่มต้นขึ้นอยู่กับความละเอียดของเถ้าถ่านหิน กล่าวคือเถ้าถ่านหินที่ละเอียดมาก เวลาการก่อตัวเริ่มต้นก็จะนานขึ้นด้วย สำหรับระยะก่อตัวเริ่มต้นและระยะปลายของซีเมนต์เพสต์ผสมซิลิกาฟุ่มที่ร้อยละ 9 โดยน้ำหนัก มีค่าเท่ากับ 90 และ 190 นาที ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับซีเมนต์เพสต์ธรรมดา เนื่องจากการในงานวิจัยใช้การแทนที่ซิลิกาฟุ่มในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปริมาณไม่มาก จึงไม่ส่งผลต่อการลดสารประกอบที่ใช้ก่อตัวในปูนซีเมนต์ ระยะเวลาในการก่อตัวจึงใกล้เคียงกัน และขนาดอนุภาคของซิลิกาฟุ่มมีความละเอียดมาก ทำปฏิกิริยาเคมีได้เร็ว มีการก่อตัวเร็ว

ตารางที่ 4.6 แสดงปริมาณที่ความชื้นเหลือปกติและระยะเวลาก่อตัวต้น-ระยะปลายของซีเมนต์เพสต์ในปริมาณต่างๆ

ตัวอย่างทดสอบ	initial Setting Time	Final Setting Time	Normal Consistency
	(นาที)	(นาที)	%
PC	107	180	25.8
FG20	170	250	26.1
FG40	210	315	27.5
FG60	150	225	28.3
FG80	90	180	30.5
FM20	150	235	25.0
FM40	158	245	23.5
FM60	120	280	22.5
FM80	80	186	20.0
SF5	110	185	28.5
SF7	105	195	29.3
SF9	90	190	30.5
SF11	80	170	32.0

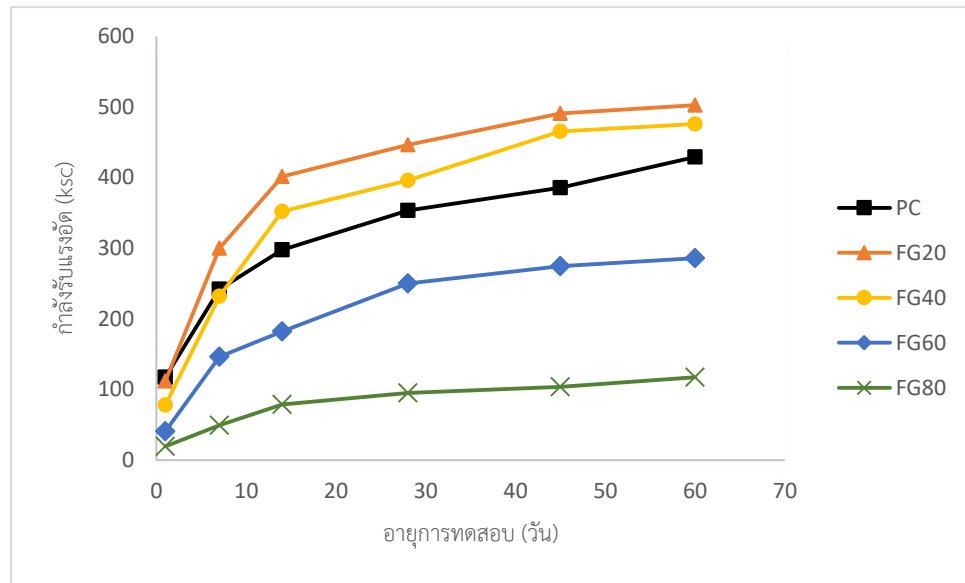
4.2.2 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์

การทดสอบกำลังรับแรงอัด จะทำการทดสอบด้วยการหล่อลูกบาศก์มอร์ตาร์ขนาด 5 เซนติเมตร โดยมีการแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าถ่านหินบิพูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ ในปริมาณร้อยละ 20, 40, 60, 80 โดยน้ำหนัก และแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยซิลิกาฟูมในปริมาณร้อยละ 5, 7, 9, 11 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.485 และทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 1, 7, 14, 28, 45, 60 วัน ตามลำดับ โดยกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ควบคุมเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดตามตารางที่ 3.1 ในส่วนของกำลังรับแรงอัดและร้อยละกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าถ่านหินบิพูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ และซิลิกาฟูม แสดงในตารางที่ 4.7, 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ ตารางที่ 4.7 กำลังรับแรงอัดและร้อยละกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าถ่านหินบิพูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนีเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ธรรมดา

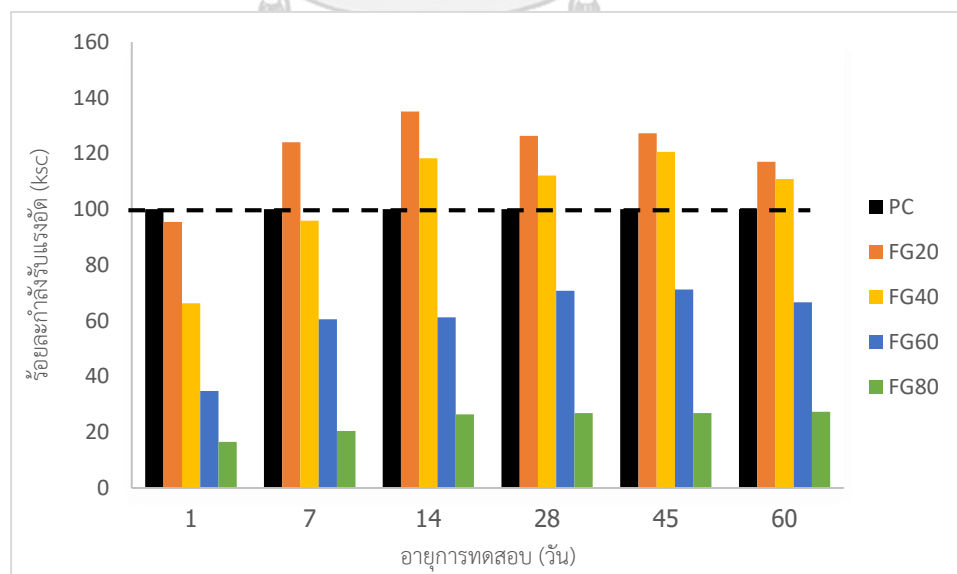
ตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัดและร้อยละกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ %											
	1 วัน		7 วัน		14 วัน		28 วัน		45 วัน		60 วัน	
	ksc	%	ksc	%	ksc	%	ksc	%	ksc	%	ksc	%
PC	117	100	242	100	298	100	353	100	386	100	429	100
FG20	112	95	300	124	402	135	446	126	491	127	502	117
FG40	78	66	232	96	352	118	396	112	465	121	476	111
FG60	41	35	146	60	182	61	250	71	275	71	286	67
FG80	19	16	49	20	79	26	95	27	104	27	117	27

จากตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.11 พบว่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์เถ้าถ่านหินบิพูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนีในช่วงอายุต้นจะมีค่าน้อยกว่ามอร์ตาร์ธรรมดากว่าคือหากมีการแทนที่เถ้าถ่านหินบิพูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนีในปริมาณที่มากขึ้นจะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดน้อยลงทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงแรกเกิดขึ้นไม่เพียงพอจึงทำให้กำลังรับแรงอัดต่ำลง แต่ภายหลังเมื่อมอร์ตาร์ผสมเถ้าถ่านหินบิพูมินัสคัดขนาดมีอายุมากขึ้นจะทำให้มีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากในช่วงอายุปลายปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ทำปฏิกิริยากับซิลิกาออกไซด์และอลูมินาออกไซด์ ในเถ้าถ่านหินเพิ่มขึ้น และพบว่ามอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ในปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินบิพูมินัสคัดขนาดในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักให้กำลังรับแรงอัดที่สูงตั้งแต่ 7 วัน อีกทั้งยังสามารถใช้แทนที่ได้ถึงปริมาณร้อยละ 40 ได้โดยที่มีกำลังอัดมากกว่าในมอร์ตาร์ธรรมดาแต่มีกำลังรับแรงอัดต่ำในช่วงแรก จึงเหมาะสำหรับโครงสร้างที่ไม่ต้องการรับน้ำหนักในช่วงแรก สำหรับการแทนที่ใน

ปริมาณร้อยละ 60 ,80 โดยน้ำหนักมีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ธรรมดาทุกอายุบ่ม เนื่องจาก การแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณมากเกินไปจะทำให้มีปริมาณปูนซีเมนต์น้อยลง ทำให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งเป็นสารประกอบที่ให้ความแข็งแรงกับมอร์ตาร์และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ในปริมาณที่น้อยลง จึงเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานกับเถ้าถ่านหินปริมาณที่ลดลง ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ธรรมดาที่ทั้งอายุต้นและปลาย



รูปที่ 4.11 การพัฒนากำลังรับแรงของมอร์ตาร์ผสมเถ้าถ่านหินปริมาณสัดส่วนจากเยอรมนี

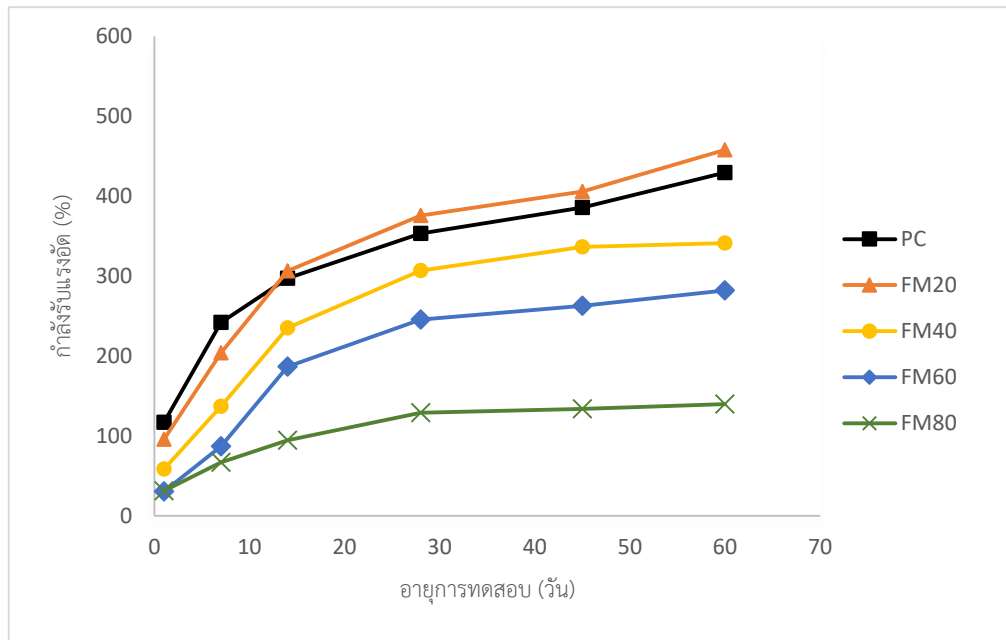


รูปที่ 4.12 ร้อยละกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าถ่านหินปริมาณสัดส่วนจากเยอรมนีเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ธรรมดา

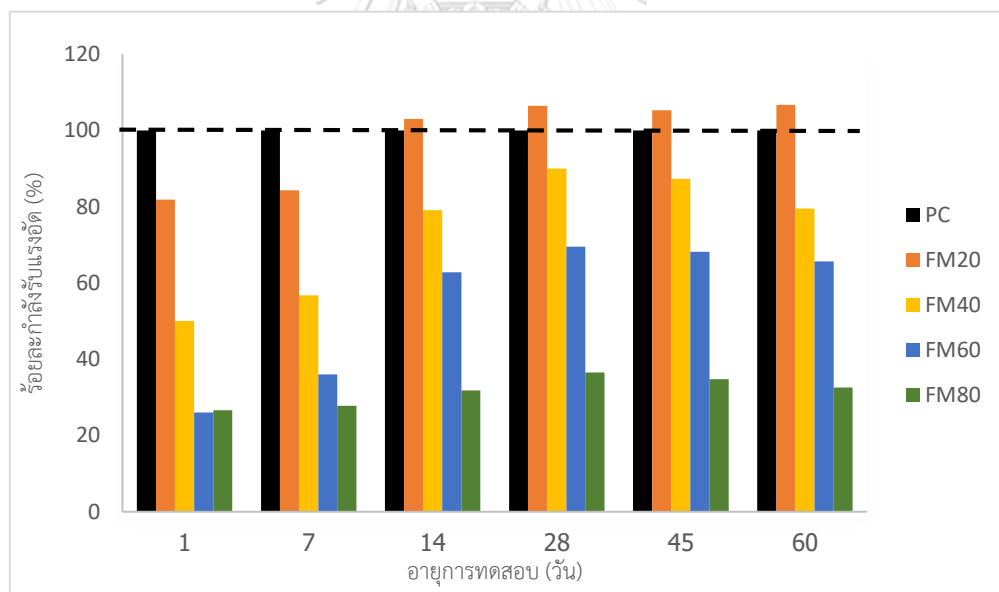
ตารางที่ 4.8 แสดงกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์แก่ถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะในอัตราร้อยละ 20, 40, 60 และ 80 โดยน้ำหนัก จะเห็นว่ามีแนวโน้มคล้ายกับแก่ถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี กล่าวคือกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้แก่ถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะในช่วงอายุต้นมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ธรรมดาในทุกปริมาณการแทนที่ และเมื่อมีการแทนที่ในปริมาณมากขึ้นจะมีกำลังรับแรงอัดลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยเฉพาะที่อัตราส่วนร้อยละ 60-80 โดยน้ำหนัก เนื่องจากการแทนที่ด้วยแก่ถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะในปริมาณที่มากเกินไปทำให้มีปริมาณปูนซีเมนต์น้อยลงจึงเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานน้อยลง แต่เมื่อมอร์ตาร์มีอายุมากขึ้นพบว่า กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากช่วงอายุปลายจะมีปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดจากแก่ถ่านหินทำปฏิกิริยาแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ทำให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [9] พบว่าแก่ถ่านหินแม่เมาะทำให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ลดลงในช่วงแรกแต่ส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้นที่อายุปลาย จากรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 พบว่าการแทนที่ด้วยปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนักให้กำลังรับแรงอัดที่มากกว่ามอร์ตาร์ธรรมดาที่อายุ 28 วัน โดยมีค่าร้อยละ 90 เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ธรรมดา และพบว่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมแก่ถ่านหินลิกไนต์มีค่าน้อยกว่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมแก่ถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนีอาจเนื่องมาจากแก่ถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนีมีขนาดเล็กกว่า มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าแก่ถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ จึงทำปฏิกิริยาเชื่อมประสานได้ดีกว่า จึงสามารถแทรกตัวเข้าไปอยู่ในช่องว่างและรูพรุน ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าในมอร์ตาร์ผสมแก่ถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ

ตารางที่ 4.8 กำลังรับแรงอัดและร้อยละกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมแก่ถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ธรรมดา

ตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัดและร้อยละกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ %											
	1 วัน		7 วัน		14 วัน		28 วัน		45 วัน		60 วัน	
	ksc	%	ksc	%	ksc	%	ksc	%	ksc	%	ksc	%
PC	117	100	242	100	298	100	353	100	386	100	429	100
FM20	96	82	204	84	307	103	376	106	406	105	458	107
FM40	59	50	137	57	235	79	318	90	337	87	341	80
FM60	31	26	87	36	187	63	246	69	263	68	282	66
FM80	31	27	67	28	95	32	129	37	134	35	140	32



รูปที่ 4.13 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของmortarผสมเถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ

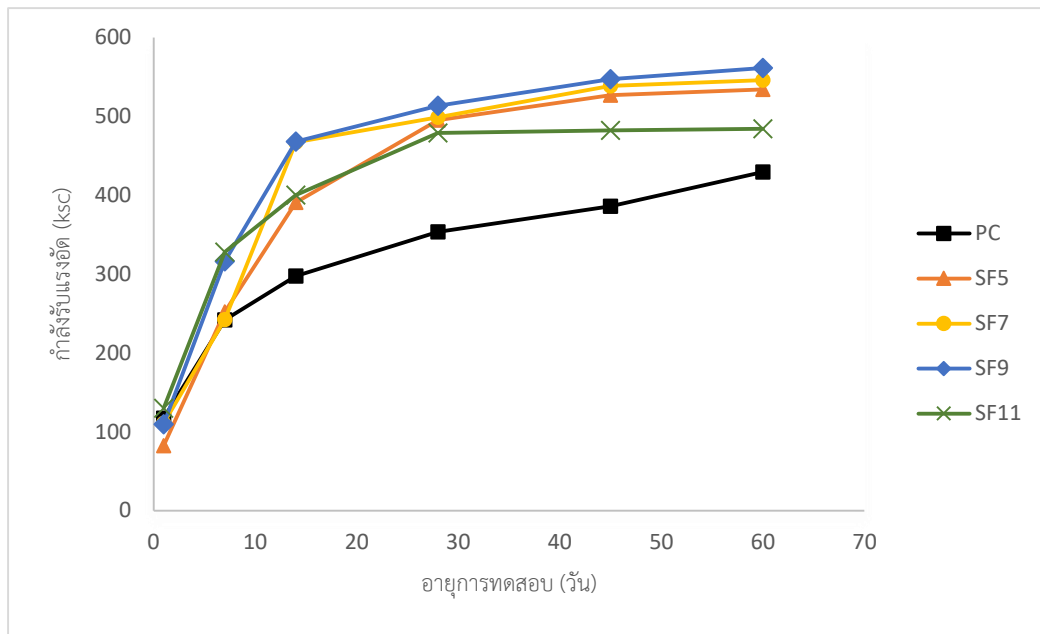


รูปที่ 4.14 ร้อยละกำลังรับแรงอัดของmortarผสมเถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะเมื่อเทียบกับmortarธรรมดา

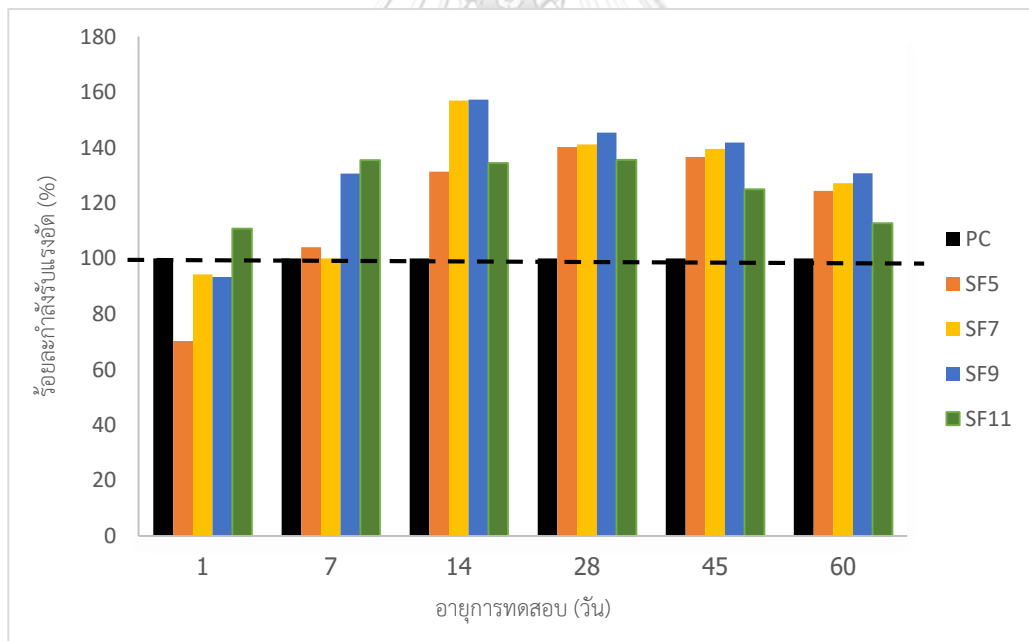
จากตารางที่ 4.9 แสดงกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟุ่มในปริมาณร้อยละ 5, 7, 9, 11 โดยน้ำหนัก พบว่าซิลิกาฟุ่มเพิ่มกำลังอัดของมอร์ตาร์ให้มากขึ้นทั้งที่ระยะต้นและระยะปลายค่อนข้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ธรรมดาที่อายุ 7 และ 28 วัน และมีค่าร้อยละกำลังอัดของมอร์ตาร์ตามรูปที่ 4.15 และ 4.16 มากกว่ามอร์ตาร์ธรรมดาในทุกปริมาณการแทนที่ โดยเฉพาะที่ร้อยละ 9 โดยน้ำหนัก การพัฒนากำลังที่ดีนี้เกิดจากการแทนที่ซิลิกาฟุ่มในปริมาณที่น้อย จึงไม่ได้ส่งผลต่อปริมาณ CaO ที่เป็นสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์มากนัก เมื่อปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดจากปูนซีเมนต์กับน้ำได้เป็นสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่จะทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับ ซิลิกาออกไซด์ที่มีอยู่ปริมาณมากในซิลิกาฟุ่มจึงทำให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) เพิ่มมากขึ้น แม้ซิลิกาฟุ่มที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นชนิดควบแน่น แต่เมื่อขณะทำปฏิกิริยาจะเกิดการแตกตัวเข้าสู่อนุภาคที่เล็กกว่าปูนซีเมนต์มาก มีพื้นที่ผิวมาก จึงทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้รวดเร็วสามารถแทรกตัวเข้าไปอยู่ในช่องว่างและรูพรุนในมอร์ตาร์อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้มีความหนาแน่นของมอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟุ่มมากขึ้นและกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นตั้งแต่ช่วงอายุต้น และการแทนที่ในปริมาณร้อยละ 11 โดยน้ำหนัก ถึงแม้ว่าจะให้กำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกับการแทนที่ในปริมาณร้อยละ 9 โดยน้ำหนัก แต่การแทนที่ซิลิกาฟุ่มในปริมาณที่มากเกินไปไม่ได้ส่งผลดีต่อกำลังรับแรงอัดเพราะจะทำให้มอร์ตาร์แข็งและเปราะได้

ตารางที่ 4.9 กำลังรับแรงอัดและร้อยละกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟุ่มเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ธรรมดา

ตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัดและร้อยละกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ %											
	1 วัน		7 วัน		14 วัน		28 วัน		45 วัน		60 วัน	
	ksc	%	ksc	%	ksc	%	ksc	%	ksc	%	ksc	%
PC	117	100	242	100	298	100	353	100	386	100	429	100
SF5	83	70	252	104	391	131	495	140	527	137	534	124
SF7	98	84	242	100	444	149	499	141	538	139	546	127
SF9	110	93	316	131	468	157	514	145	547	142	561	126
SF11	130	111	328	169	400	134	479	136	482	125	484	109



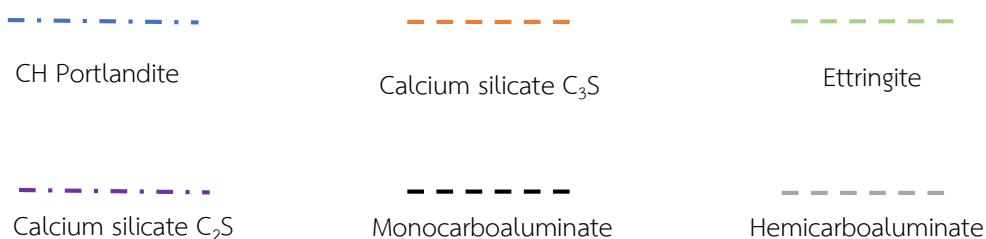
รูปที่ 4.15 การพัฒนากำลังรับแรงของมอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟวม

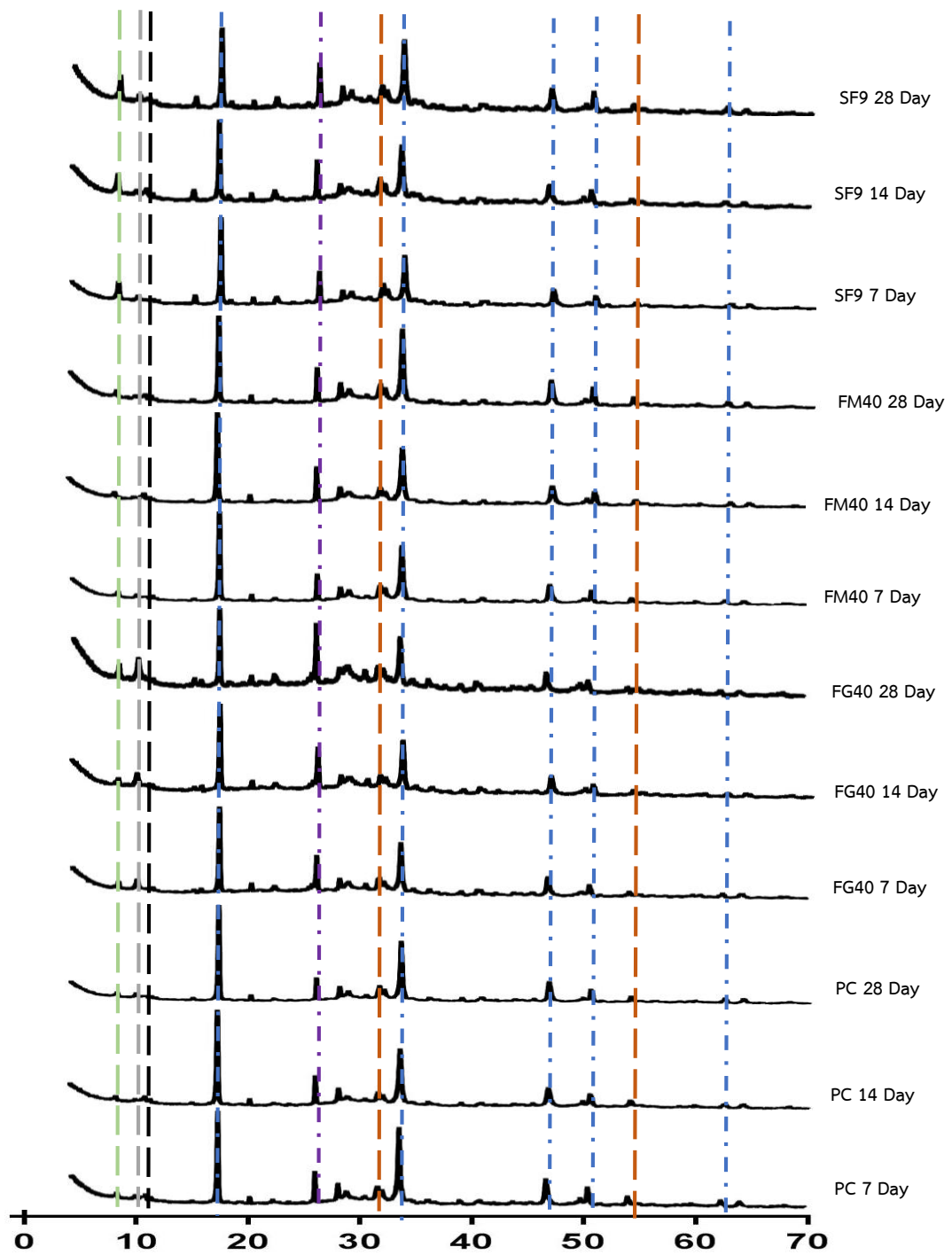


รูปที่ 4.16 ร้อยละกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟวมเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ธรรมดา

4.2.3 การศึกษาการพัฒนากำลังรับแรงอัดโดยใช้ X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD)

การทำปฏิกิริยาของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมด้วยเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ และซิลิกาฟูมสามารถทำการศึกษาโดยใช้การวิเคราะห์ X-Ray Diffraction เพื่อศึกษาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) เป็นปฏิกิริยาขั้นที่หนึ่งซึ่งเกิดจากสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยาน้ำเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) และปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolan Reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาขั้นที่สองที่เกิดจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ทำปฏิกิริยากับซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ที่มีอยู่ในเถ้าถ่านหินและซิลิกาฟูม แล้วเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมินาไฮเดรต (CAH) เนื่องจากปฏิกิริยาทั้งสองนี้มักไม่ได้เกิดขึ้นแยกกันอย่างอิสระ ดังนั้นสารประกอบต่างๆที่อยู่ในเถ้าถ่านหินหรือซิลิกาฟูมซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการสร้างผลึกในปฏิกิริยาไฮเดรชัน นอกจากนี้ปฏิกิริยาปอซโซลานยังขึ้นอยู่กับไอออนของแคลเซียม ซิลิกา อลูมินา เนื่องจากเรื่องเหล่านี้เป็นเรื่องที่ซับซ้อน การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาจากรูปที่ 4.17 แสดงผลของ X-Ray diffraction ของสารประกอบในซีเมนต์เพสต์ธรรมดา ซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี ซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก และซีเมนต์เพสต์ผสมซิลิกาฟูมในปริมาณร้อยละ 9 โดยน้ำหนัก ซีเมนต์เพสต์เหล่านี้จะนำมาทดสอบที่อายุการบ่ม 7, 14, 28 วัน โดยใช้ค่าความยาวคลื่น 1.5418740 Angstrom และค่า rotating stage อยู่ระหว่าง 5 ถึง 70 (2 theta) และ step size เท่ากับ 0.0199 (2 theta) จากรูปที่แสดงจะเห็นว่าสารประกอบหลักที่พบ ได้แก่ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) สำหรับไตรแคลเซียมซิลิเกต สำหรับสารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้แก่แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมินาไฮเดรต (CAH) จะไม่พบ Diffraction Peak เนื่องจากอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous)





รูปที่ 4.17 แสดงรูปแบบ XRD ของซีเมนต์ธรรมดา และซีเมนต์เพสต์ผสมวัสดุปอซโซลานที่อายุการ
ทดสอบ 7,14, 28 วัน

สำหรับซีเมนต์เพสต์ธรรมดาพบว่าการลดลงของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ (C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF) และมีการฟอร์มตัวเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Portlandite CH) ที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเมื่อระยะเวลาทดสอบมากขึ้น ส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้น สำหรับผลของ XRD ของซีเมนต์เพสต์ผสมวัสดุปอซโซลานได้แก่ ถ้าผ่านหินบิทุมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี ถ้าผ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ และซิลิกาฟุ่ม พบว่าเมื่ออายุการทดสอบมากขึ้นส่งผลให้มีปริมาณสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ (C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF) ลดลง อีกทั้งปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Portlandite CH) ซึ่งเป็นสารประกอบจากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง เนื่องจากซิลิกา อลูมินา ที่เป็นองค์ประกอบหลักทางเคมีของวัสดุปอซโซลานทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้มีแนวโน้มการพัฒนากำลังในช่วงปลายได้มากขึ้น

ในการวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิค Reitveld Refinement ทำการวิเคราะห์เชิงปริมาณของสารประกอบในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ที่เกิดขึ้นรวมถึงแสดงแนวโน้มของสารประกอบ ณ การทดสอบที่ 28 วัน ดังแสดงในตารางที่ 4.10 พบว่าปริมาณของ C_3S และ C_2S ในซีเมนต์เพสต์ธรรมดามีปริมาณมากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ผสมด้วยซิลิกาฟุ่ม ถ้าผ่านหินบิทุมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี ถ้าผ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ ตามลำดับ เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้น เช่นเดียวกับกับปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ในซีเมนต์ธรรมดามีจำนวนมากกว่าในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมด้วยซิลิกาฟุ่ม ถ้าผ่านหินบิทุมินัสคัดขนาดจากเยอรมัน ถ้าผ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ ตามลำดับ เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอลูมินาในถ้าผ่านหินและซิลิกาฟุ่มทำให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) ที่มากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าซีเมนต์เพสต์ที่ผสมด้วยถ้าผ่านหินบิทุมินัสคัดขนาดจากเยอรมนีมีสารประกอบ Al_2O_3 ที่มากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เมื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จึงทำให้เกิดสารประกอบแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ในเฟส AFm ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบสารประกอบในเฟส AFm อื่นอีกคือ สารประกอบเฮมิคาร์โบอลูมิเนต และโมนคาร์โบอลูมิเนต เนื่องจากในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีการใส่ผงหินปูน (Limestone powder) ซึ่งสารประกอบดังกล่าวล้วนเป็นสารประกอบที่ส่งผลถึงความแข็งแรงที่ดีในซีเมนต์เพสต์ด้วย

ตารางที่ 4.10 แสดงสารประกอบที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิค Reitveld Refinement ที่อายุ 28 วัน

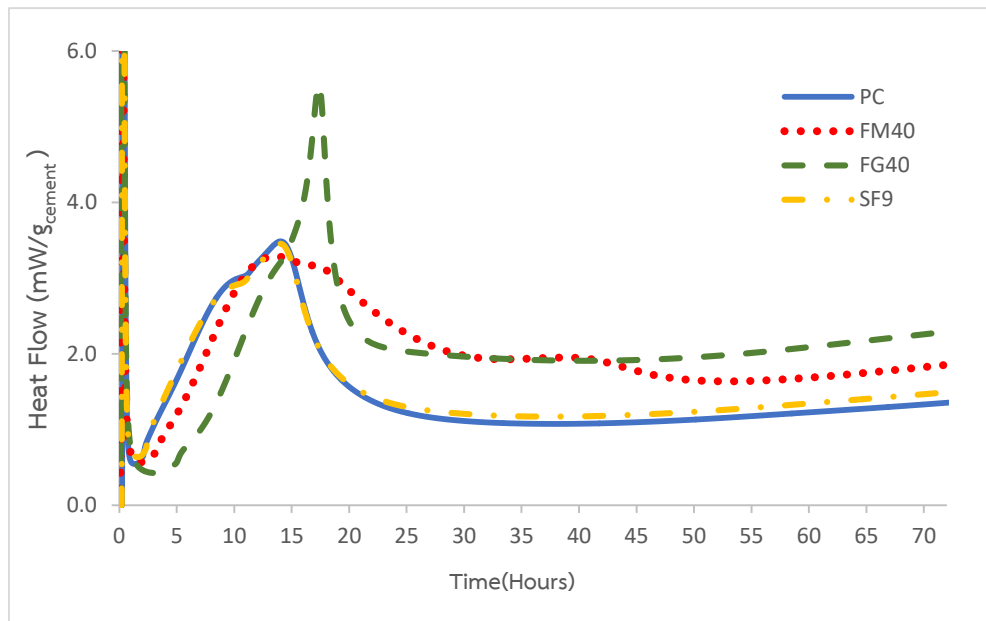
สารประกอบที่เกิดขึ้น (%)		PC	FG40	FM40	SF9
C3S	C3S-M3	2.30	0.41	1.70	0.36
	C3S-M1	0.33	0.42	0.35	0.39
C2S		5.15	3.87	5.59	3.07
C3A	C3A Cub.	0.13	0.00	0.22	0.29
	C3A Orht.	0.19	0.40	0.09	0.15
C4AF		8.97	3.43	8.75	3.07
Portlandite		10.05	3.20	3.41	2.13
Calcite		7.24	3.63	9.94	6.63
Ettringite		2.14	2.51	2.22	5.12
Monocarboaluminate		4.09	0.00	4.15	3.23
Hemicarboaluminate		0.03	5.04	0.08	0.13
Quartz		0.28	0.94	0.60	1.09
Amorphous		59.10	74.09	61.19	74.34

4.2.4 การศึกษาความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในซีเมนต์เฟส (Heat of Hydration)

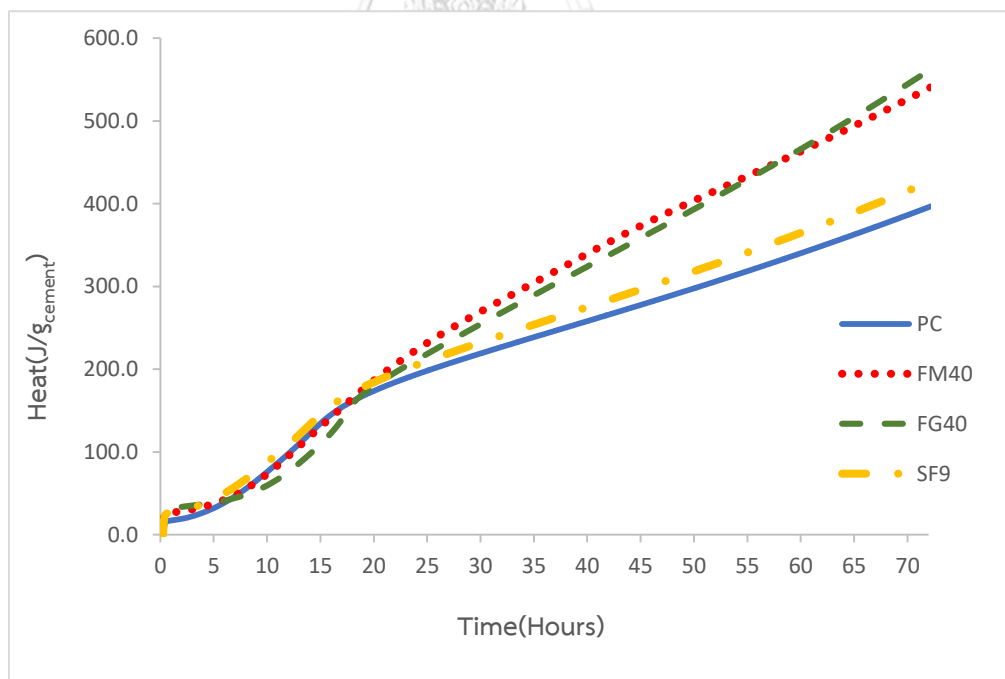
ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำมีความซับซ้อนและเป็นกระบวนการคายความร้อน ซึ่งกระบวนการเหล่านี้ส่งผลต่อ การก่อตัว การแข็งตัว กำลังรับแรงอัด เพื่อประเมินค่าการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน จึงทำการศึกษาในซีเมนต์เฟสที่แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ ในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก และซีเมนต์เฟสที่ถูกซิลิกาฟุ่มแทนที่ในปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 9 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.485 ด้วยการใช้เครื่อง Isothermal calorimeter (the TAM air calorimeter from TA instrument) ตามมาตรฐาน ASTM C 186 [14] ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ทำการวัดความร้อนตั้งแต่เริ่มผสมจนถึง 168 ชั่วโมง และวัสดุอ้างอิงการทดสอบที่ใช้คือ ทรายออตตาวา (Ottawa sand)

4.2.4.1 ผลของเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ ซิลิกาฟุ้งต่อปฏิกิริยาไฮเดรชัน

จากรูปที่ 4.18 จะเห็นว่าการผสมเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี และเถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ ในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ส่งผลต่ออัตราการความร้อนในช่วงแรกที่เกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ให้ลดลงกว่าซีเมนต์เพสต์ธรรมดาได้อย่างชัดเจน กล่าวคือปริมาณซีเมนต์ที่ลดลงส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง เมื่อรวมกับปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นค่อนข้างช้า จึงทำให้ซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ มีอัตราการเกิดความร้อนที่ต่ำในช่วงแรก ผลิตความร้อนออกมาในปริมาณที่ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ ช่วยยืดเวลาในช่วงระยะสงบ (Dormant Period) ให้นานขึ้นจึงทำให้มีเวลาการก่อตัวมากขึ้น โดยในซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนีเริ่ม Acceleration period ที่ประมาณ 4-5 ชั่วโมง ในขณะที่ซีเมนต์ธรรมดาและซีเมนต์เพสต์แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะมี Acceleration period ที่ประมาณ 1.5-2 ชั่วโมงและ 2.5-3 ชั่วโมงตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนีเริ่ม Acceleration period ที่นานกว่าและความร้อนในจุดสูงสุดครั้งที่ 2 (second Peak) ที่สูงกว่าเถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะเนื่องจากการก่อตัวของปริมาณอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ในองค์ประกอบทางเคมีที่มีมากกว่าเถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะทำให้เกิดความร้อนสูงขึ้น สำหรับการแทนที่ซีเมนต์เพสต์ด้วยซิลิกาฟุ้งในปริมาณร้อยละ 9 โดยน้ำหนักพบว่า ซิลิกาฟุ้งไม่ได้ลดความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันให้น้อยลง เนื่องจากซีเมนต์เพสต์มีการแทนที่ในปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนที่น้อยจึงทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นในซีเมนต์ธรรมดาและซีเมนต์เพสต์ผสมซิลิกาฟุ้งมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน และอาจจะสูงกว่าหลังจาก Acceleration period ในบางช่วงเวลาได้ และจากกราฟความร้อนสะสมของดังรูปที่ 4.19 ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงความร้อน ณ เวลาใดๆ พบว่าอัตราความร้อนของเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี และเถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ มีการเปลี่ยนแปลงความร้อนสูงกว่า ซิลิกาฟุ้งในช่วงเวลาประมาณชั่วโมงที่ 20 ซึ่งเนื่องมาจากปริมาณของซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ ในองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน



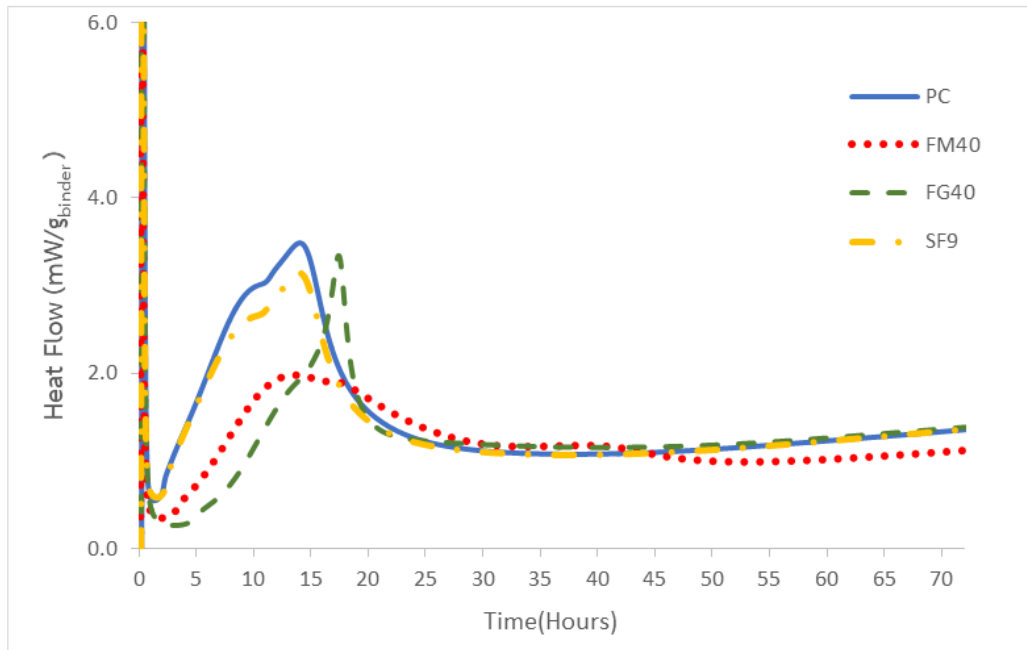
รูปที่ 4.18 แสดงอัตราการความร้อนต่อกรัมของปูนซีเมนต์ในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินปิทูมินัส คัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ และซิลิกาฟูม เปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ธรรมดา



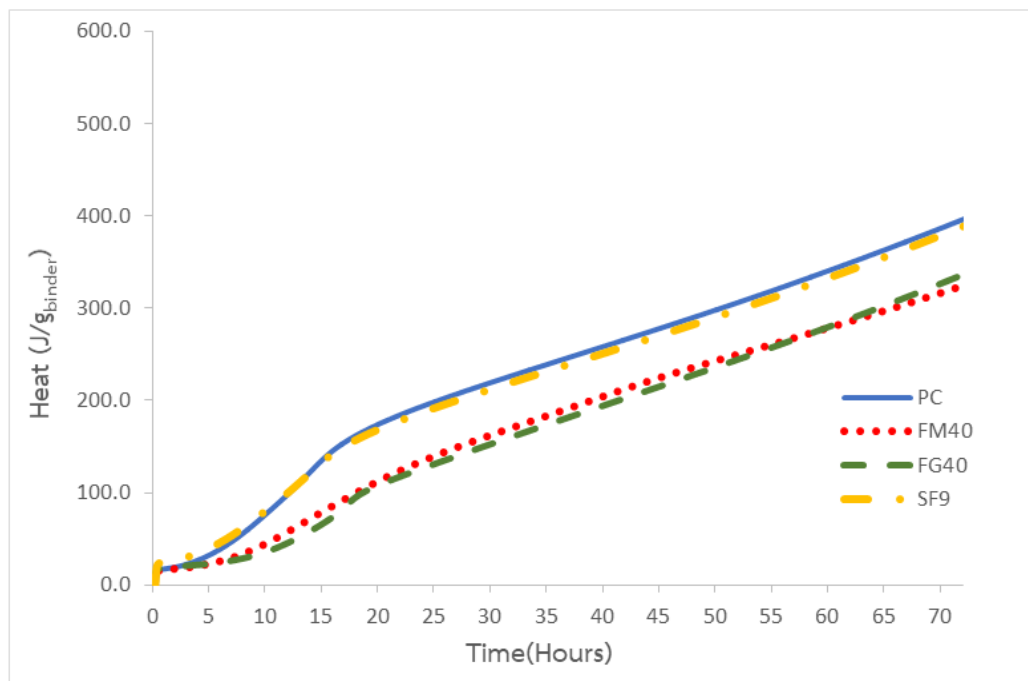
รูปที่ 4.19 แสดงอัตราการความร้อนสะสมต่อกรัมของปูนซีเมนต์ในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินปิทูมินัส คัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ และซิลิกาฟูม เปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ธรรมดา

4.2.4.2 ผลของซีเมนต์ผสมวัสดุปอซโซลาน

จากรูปที่ 4.20 แสดงอัตราความร้อนต่อกรัมของวัสดุประสานในซีเมนต์ผสมวัสดุปอซโซลาน และรูปที่ 4.21 แสดงความร้อนสะสมต่อกรัมของวัสดุประสานในซีเมนต์ผสมวัสดุปอซโซลาน พบว่าเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินบิทุมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ จะสามารถลดอัตราการเกิดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้มากกว่าซีเมนต์เพสต์ธรรมดา ซึ่งความร้อนที่ลดลงมีประโยชน์ต่องานก่อสร้างที่ใช้คอนกรีตหยาบหรือโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่ เช่น งานเขื่อน งานฐานรากที่มีความหนาค่อนข้างมาก หรืองานที่ต้องการลดความร้อนของคอนกรีตที่มีปริมาณมากในระหว่างก่อสร้าง ซึ่งหากคอนกรีตมีปริมาณความร้อนสะสมเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันสูงเกินไปจะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่แกนกลางกับที่ผิวของคอนกรีต เพราะคอนกรีตที่อยู่แกนกลางมีการคายความร้อนออกสู่ภายนอกได้ช้า เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายใน ภายนอก อาจทำให้แตกร้าวของโครงสร้างได้ ดังนั้นการใช้เถ้าถ่านหินจึงสามารถป้องกันความเสียหายจากการขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal expansion) ป้องกันการแตกร้าวที่ส่งผลต่อความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตในระยะยาวได้ ในขณะที่ความร้อนเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมนั้น ไม่ได้ลดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันให้ต่ำลงเห็นได้จากกราฟรูปที่ 4.21 พบว่าความร้อนสะสมมีค่าใกล้เคียงกันกับความร้อนในซีเมนต์เพสต์ธรรมดา เนื่องจากมีการแทนที่ในสัดส่วนที่ค่อนข้างต่ำ ประกอบกับซิลิกาฟูมมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์มาก และมีสัดส่วนของซิลิกาออกไซด์ที่สูงมาก ทำให้เกิดการทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานที่ค่อนข้างเร็ว ดังนั้นจึงไม่ควรใช้ซิลิกาฟูมในโครงสร้างคอนกรีตที่ต้องการลดอุณหภูมิ

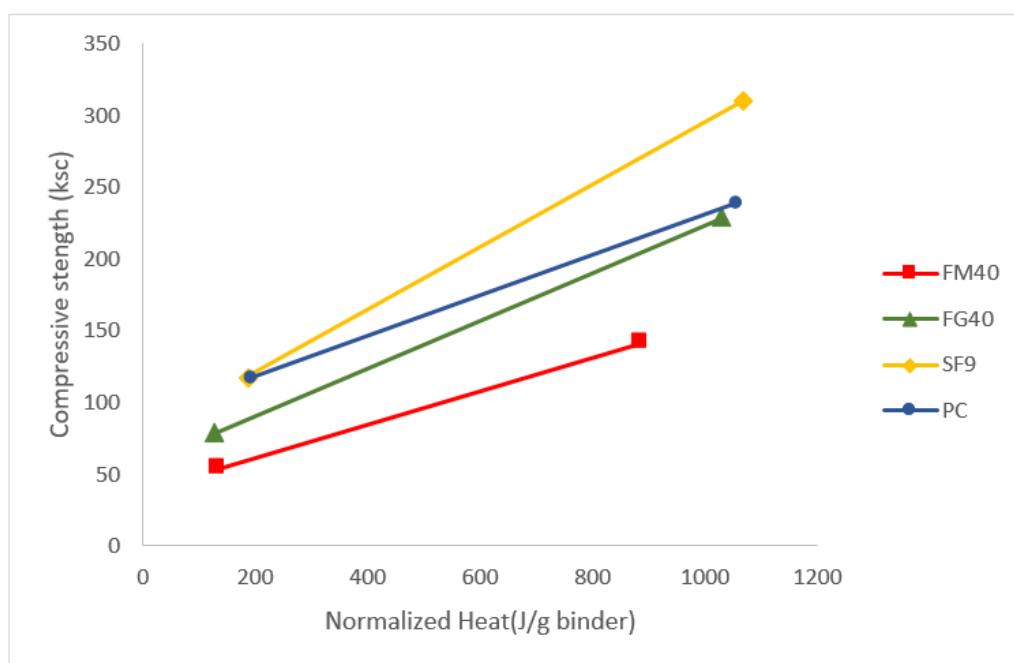


รูปที่ 4.20 แสดงอัตราความร้อนต่อกรัมของวัสดุประสานในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินบิทูมินัส คัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ และซิลิกาฟุ่ม เปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ธรรมดา



รูปที่ 4.21 แสดงอัตราความร้อนสะสมต่อกรัมของวัสดุประสานในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ และซิลิกาฟุ่ม เปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ธรรมดา

โดยทั่วไปแล้วยังไม่พบความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างกำลังรับแรงอัดในมอร์ตาร์กับอัตราการเกิดความร้อนในปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัด(ที่อายุ 1, 7 วัน) กับความร้อนสะสมจูลต่อกรัมของวัสดุประสานในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก และซีเมนต์เพสต์ที่ผสมซิลิกาฟูมในปริมาณร้อยละ 9 โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.22 พบว่า ความร้อนสะสมที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นสาเหตุหนึ่งของกำลังรับแรงอัดที่สูงขึ้น กล่าวคือในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมซิลิกาฟูมมีความร้อนสะสมมากจึงทำให้มีกำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าซีเมนต์ธรรมดาและซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าถ่านหิน ในขณะที่ซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนีมีความร้อนสะสมในช่วง 1 วันต่ำกว่าซีเมนต์ธรรมดาแต่ที่เวลา 7 วัน ความร้อนสะสมเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้มีแนวโน้มกำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกับเพสต์ธรรมดา สำหรับซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะความร้อนที่เกิดขึ้นมีค่าค่อนข้างน้อยส่งผลให้มีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยเช่นกัน



รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์(ที่อายุ 1, 7 วัน) กับความร้อนสะสมต่อกรัมของวัสดุประสานในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก และซีเมนต์เพสต์ที่ผสมซิลิกาฟูมในปริมาณร้อยละ 9 โดยน้ำหนัก

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้ได้ศึกษาอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยวัสดุ ปอชโซลาน ได้แก่ แก้วถ่านหินบิโทมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี แก้วถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ และซิลิกาฟูม ซึ่งมีผลต่อกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ โดยเปรียบเทียบกับซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ไม่มีการแทนที่ด้วยวัสดุปอชโซลาน (ซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม) โดยกลไกที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นกำลังรับแรงอัดได้แก่

1. ขนาดอนุภาคของวัสดุปอชโซลานเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่เพิ่มขึ้น โดยขนาดอนุภาคที่เล็กของวัสดุปอชโซลานจะสามารถแทรก ตามช่องว่างหรือรูพรุน ส่งผลให้จำนวนรูพรุนขนาดใหญ่ลดลง มีคุณสมบัติเป็นตัวเติมเต็ม (Filler Effect) ที่ดี จากการวิจัยพบว่า ขนาดอนุภาคของซิลิกาฟูม แก้วถ่านหินบิโทมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี มีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปกติ จึงส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์มากกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม ในขณะที่ขนาดอนุภาค แก้วถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะมีขนาดอนุภาคที่ใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปกติ จึงมีคุณสมบัติเป็นตัวเติมเต็มได้น้อย ดังนั้นกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยแก้วถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะ จึงน้อยกว่าและใกล้เคียงกับซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม

2. จากผลการวิเคราะห์ XRD พบว่ามีการเกิดปฏิกิริยาปอชโซลานเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วย แก้วถ่านหินบิโทมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี แก้วถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ และซิลิกาฟูม โดยซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ในวัสดุปอชโซลานที่มีมากกว่าซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปกติ ทำปฏิกิริยาแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) และน้ำเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งมีคุณสมบัติในการยึดประสาน และอยู่ในรูปแบบอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งผลจากการพิจารณาปริมาณของผลึกที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิครีฟิเนเมนต์ (Rietveld refinement) สนับสนุนว่ามีสารประกอบที่อยู่ในรูปแบบอสัณฐานที่มีการแทนที่ด้วยวัสดุปอชโซลานมากกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม ซึ่งสารประกอบ CSH (อยู่ในแบบอสัณฐาน) ที่มากส่งผลให้กำลังรับแรงอัดที่มากขึ้น อีกทั้งวัสดุปอชโซลานมีสารประกอบอลูมิเนียมไดออกไซด์ (Al_2O_3) ที่มากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปกติ เมื่อทำปฏิกิริยากับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) เกิดสารประกอบ แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ในเฟส AFm ที่เพิ่มมากขึ้นอีกด้วยซึ่งสารประกอบในเฟสนี้ มีผลทำให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์มากขึ้น นอกจากนี้ยังพบสารประกอบในเฟส AFm อื่นอีกคือ สารประกอบเฮมิคาร์โบอลูมิเนต และโมโนคาร์โบอลูมิเนต เนื่องจากในปูนซีเมนต์ปกติจะมีการใส่ผงหินปูน Limestone powder ซึ่งเป็นวัสดุที่

ทำให้เกิดการรวมตัวและเกิดสารประกอบดังกล่าวขึ้น ซึ่งเป็นสารประกอบดังกล่าวส่งผลต่อความแข็งแรงของซีเมนต์เพสต์

3. ความร้อนสะสมต่อกรัมของวัสดุประสานที่เกิดในซีเมนต์เพสต์ธรรมดาและซีเมนต์เพสต์ผสมซิลิกาฟุมจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มให้กำลังรับแรงอัดได้ดีในระยะต้น และในซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนีมีความร้อนสะสมมากกว่าซีเมนต์ผสมเถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เกาะจึงทำให้พัฒนากำลังอัดได้ดี สำหรับอัตราการเกิดความร้อนต่อกรัมซีเมนต์ของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี และซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เกาะสามารถห้วงปฏิกิริยาไฮเดรชันให้ช้าลง มีการก่อตัวต้นและการก่อตัวระยะปลายช้ากว่าซีเมนต์เพสต์ธรรมดา ทำให้สามารถลดความร้อนในช่วงต้นที่เกิดในปฏิกิริยาไฮเดรชันจึงเหมาะกับโครงสร้างขนาดใหญ่ที่ต้องการลดความร้อน เพื่อป้องกันการแตกร้าวในคอนกรีต ในขณะที่ซีเมนต์ผสมซิลิกาฟุมมีแนวโน้มของอัตราการเกิดความร้อนใกล้เคียงกับซีเมนต์ธรรมดา

5.2 ข้อเสนอแนะ

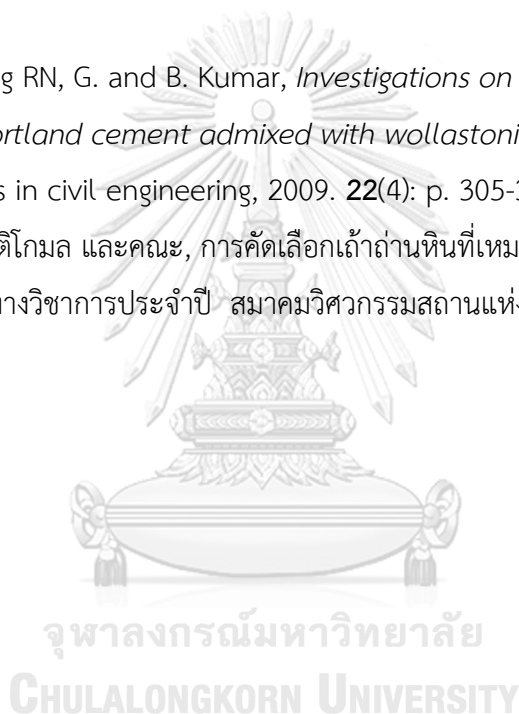
ในการวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นไปในการศึกษากำลังอัดตลอดจนโครงสร้างจุลภาคที่ใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์และซีเมนต์เพสต์ ดังนั้นวัสดุปอซโซลานที่นำมาใช้ในการศึกษาในอนาคตควรเป็นวัสดุที่มีค่าซิลิกอนไดออกไซด์ที่สูง เพื่อจะทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานขั้นที่สองเพิ่มมากขึ้นและเกิดสารยึดประสานที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งยังมีขนาดที่เล็กกว่าซิลิกาฟุม เพื่อให้เกิดการก่อตัวที่แน่น ความพรุนน้อย นอกจากนี้ยังต้องทำการศึกษาคูณสมบัติอื่นเพิ่มเติมที่จะมีผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักเมื่อจะนำไปใช้ในการทำโครงสร้างจริง เช่น การซึมผ่านน้ำ ความต้านทานต่อการรูดหรือคลอไรด์ ตลอดจนกำลังรับแรงดึง เป็นต้น โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตเพื่อให้สามารถเห็นผลได้ชัดเจนกว่า

รายการอ้างอิง

1. อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, ศักยภาพของเถ้าในการเป็นปอซโซลาน. วารสารคอนกรีต สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย. ฉบับที่ 23 ประจำเดือน ธันวาคม 2014.
2. ชัย จาตุรพิทักษ์, ซิลิกาฟูม. วารสารคอนกรีต สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, 2007. ฉบับที่ 1 ประจำเดือนสิงหาคม.
3. บวร อิศรางกูร ณ อยุธยา, คุณสมบัติและพฤติกรรมการรับแรงของคอนกรีต (*Properties and Behaviours of Concrete Subjected to Loading*). 2553.
4. สุพัตรา จินาวัฒน์, *Portland cement and concrete*. เอกสารประกอบการอบรมผลิตภัณฑ์เซรามิกส์, 2539.
5. Wadsö, L., *Isothermal calorimetry for the study of cement hydration*. 2002: Division of Building Materials, Lund University.
6. Kim Soo Geun, *Effect of heat generation from cement hydration on mass concrete placement*. 2010.
7. ASTM C618, *ASTM C618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcine Natural Pozzolan for Use in Concrete*. 2000, ASTM International West Conshohocken, Pa.
8. ASTM C311, *Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Portland-Cement Concrete*. 2000, ASTM International West Conshohocken, Pa.
9. ปริญา จินดาประเสริฐ และ อินทรชัย หอวิจิตร, การศึกษาปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเถ้าลอยแม่เมาะ. 2528: มหาวิทยาลัยขอนแก่น. คณะวิศวกรรมศาสตร์. สำนักงานเทคโนโลยีเพื่อพัฒนาชนบท.
10. ธีรพงศ์ แก้วคง, การศึกษาคูณสมบัติของมอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเถ้าลอยแม่เมาะคัดขนาด. 2540, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
11. สันดี ต้นชรากรณ์, ความร้อนของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดต่างกัน. 2543, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

12. Meland, I., *Influence of condensed silica fume and fly ash on the heat evolution in cement pastes*. Special Publication, 1983. **79**: p. 665-676.
13. วาสนา สามห้วย, การศึกษาสัดส่วนผสมของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะ. 2538, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
14. ศตวรรษ หลุณพงษ์, อิทธิพลของน้ำต่อวัสดุประสานต่อกำลังอัด โครงสร้างจุลภาคและปริมาณแทนที่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมนาโนซิลิกา. วารสารคอนกรีต, 2014.
15. Langan, B., K. Weng, and M. Ward, *Effect of silica fume and fly ash on heat of hydration of Portland cement*. Cement and Concrete research, 2002. **32**(7): p. 1045-1051.
16. Hooton, R., *Influence of silica fume replacement of cement on physical properties and resistance to sulfate attack, freezing and thawing, and alkali-silica reactivity*. materials Journal, 1993. **90**(2): p. 143-151.
17. ASTM C1240, *Standard specification for silica fume used in cementitious mixtures*, in *Annual Book of American Society for Testing Materials Standards*. 2010.
18. ASTM C204, *Standard Method for Finess of Portland Cement by Permeability Apparatus*. ASTM International West Conshohocken, Pa.
19. ASTM C188, *Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement*. 1997, ASTM International West Conshohocken, Pa.
20. ASTM C187, *Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement*. 1997, Annual Book of American Society for Testing Materials Standards.
21. ASTM C191, *Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle*. 1997, Annual Book of American Society for Testing Materials Standards.
22. ASTM C109, *C109/C109M-13 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*.
23. ASTM C186, *Standard test method for heat of hydration of hydraulic cement*. 2005, ASTM International West Conshohocken, PA, USA.

24. ศตวรรษ หฤหรรษ์พงศ์, การพัฒนากำลังอัดและโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์มอร์ตาร์โดยใช้ซิลิกาฟูมร่วมกับนาโนซิลิกา. 2553, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขา วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
25. Holland, T.C. and S.F. Association, *Silica Fume User's Manual*. 2005: Federal Highway Administration.
26. Friede, B. *Microsilica-characterization of an unique additive*. in *Proceedings of the 10th International Inorganic-Bonded Fiber Composites Conference (IIBCC 2006)*—Sao Paulo, Brazil, Universidade de Sao Paulo and University of Idaho. 2006.
27. Ransinchung RN, G. and B. Kumar, *Investigations on pastes and mortars of ordinary portland cement admixed with wollastonite and microsilica*. *Journal of materials in civil engineering*, 2009. **22**(4): p. 305-313.
28. ไกรวุฒิ เกียรติโกมล และคณะ, การคัดเลือกแก้ว่านหินที่เหมาะสมสำหรับงานคอนกรีต. การประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย 15-18 สิงหาคม 2539.





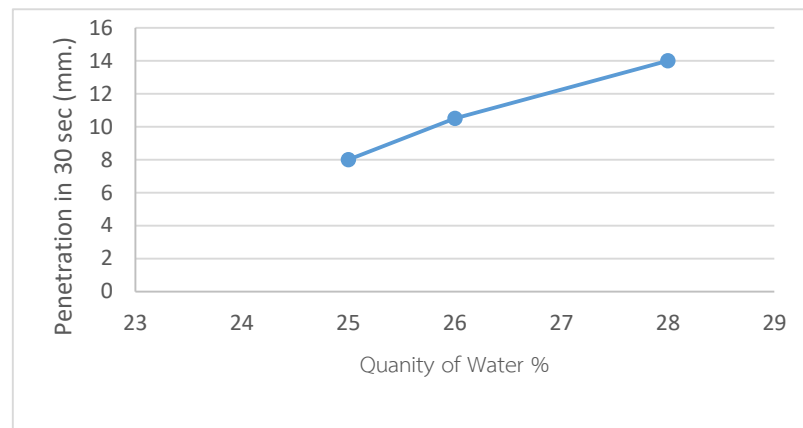
ภาคผนวก

ตารางและรูปแสดงการหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติและระยะก่อดัว

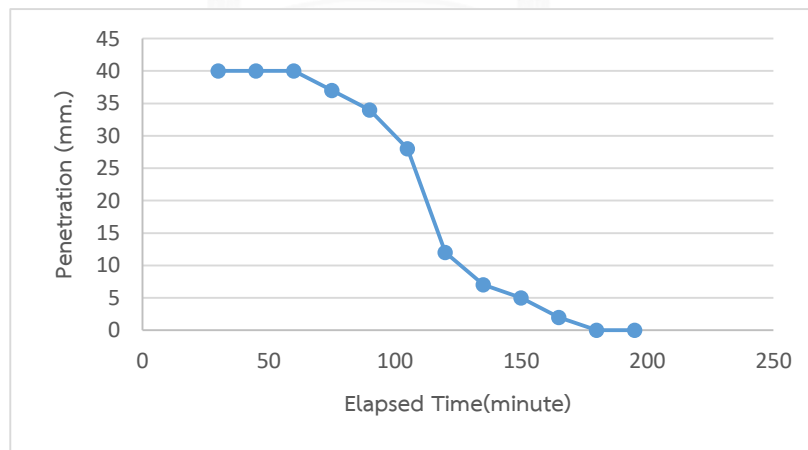
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก.1 การหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์ธรรมดา

การหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติ (PC)				
Trial No.	Cement g	Water		Penetration in 30 sec mm.
		%	g	
1	400	25	100	8
2	400	26	104	10.5
3	400	28	112	14



รูปที่ ก.1 กราฟหาค่าปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์
Normal Consistency (Penetration at 10 mm.) = 25.8 %

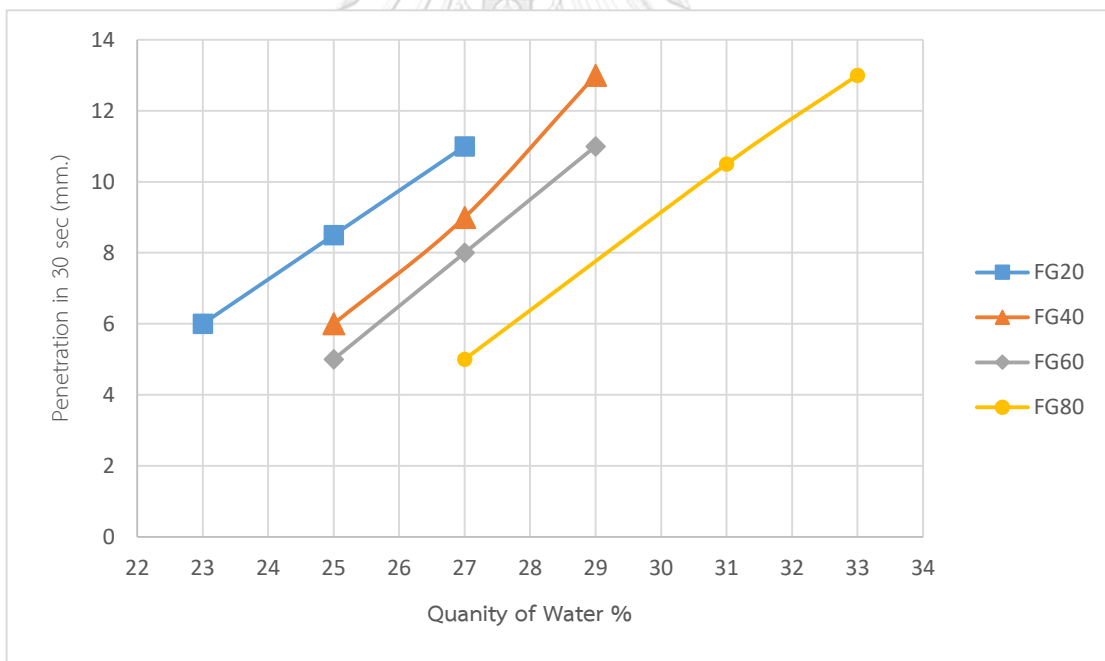


รูปที่ ก.2 ระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ธรรมดา

ตารางที่ ก.2 การหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์ผสมแก้ว่านหินปิทมินัสคัด
ขนาดจากเยอรมนี

FG20		FG40		FG60		FG80	
Penetration (mm.)	water %	Penetration (mm.)	water %	Penetration (mm.)	water %	Penetration (mm.)	water %
6	23	6	25	5	25	5	27
8.5	25	9	27	8	27	10.5	31
11	27	13	29	11	29	13	33
	26.1		27.5		28.3		30.5

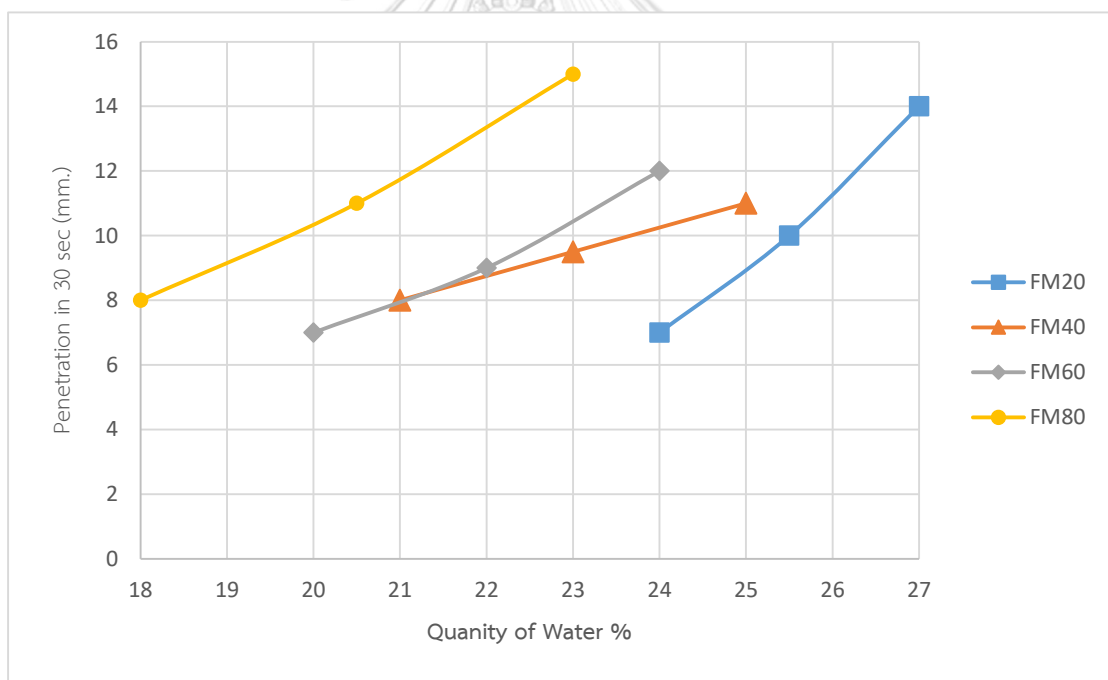
รูปที่ ก.3 กราฟหาค่าปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์ผสมแก้ว่านหินปิทมินัสคัด
ขนาดจากเยอรมนี



ตารางที่ ก.3 การหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าถ่านลิกไนต์จากแม่เมาะ

FM20		FM40		FM60		FM80	
Penetration (mm.)	water %	Penetration (mm.)	water %	Penetration (mm.)	water %	Penetration (mm.)	water %
7	24	8	21	7	20	15	23
10	25.5	9.5	23	9	22	11	20.5
14	27	11	25	12	24	8	18
	25		23.5		22.5		20

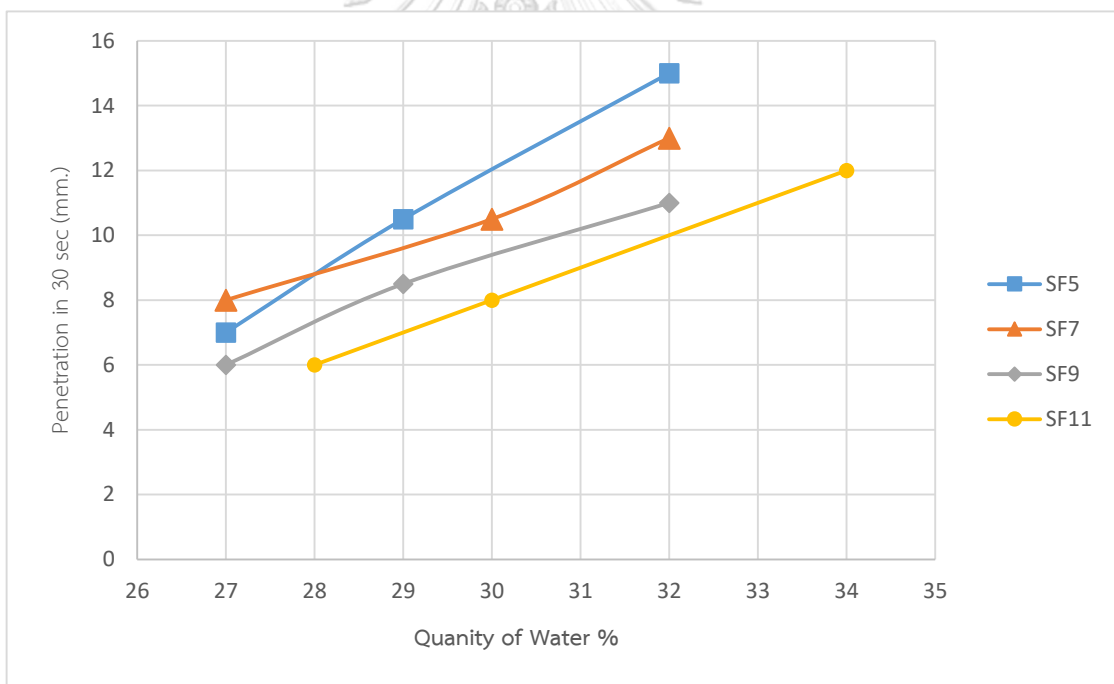
รูปที่ ก.4 กราฟหาค่าปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าถ่านลิกไนต์จากแม่เมาะ



ตารางที่ ก.4 การหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์ผสมซิลิกาฟูม

SF5		SF7		SF9		SF11	
Penetration (mm.)	water %	Penetration (mm.)	water %	Penetration (mm.)	water %	Penetration (mm.)	water %
7	27	8	27	6	27	6	28
10.5	29	10.5	30	8.5	29	8	30
15	32	13	32	11	32	12	34
	28.5		29.3		30.5		32

รูปที่ ก.4 กราฟหาค่าปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าถ่านลิกไนต์จากแม่เมาะ



ตารางที่ ก.5 แสดงระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนี

FG20		FG40		FG60		FG80	
เวลา	ระยะจม	เวลา	ระยะจม	เวลา	ระยะจม	เวลา	ระยะจม
40	40	30	40	30	40	30	40
55	40	45	40	55	38	45	32
70	40	60	40	80	26	60	27
85	40	75	40	95	18	80	20
100	40	90	40	110	14	95	13
115	38	105	40	125	11	105	8
135	35	120	40	140	8	125	3
160	27	135	38	175	5	140	2
180	16	150	35	185	4	150	1
195	7	165	32	195	2	180	0
210	4	180	30	210	1		
225	3	195	28	225	0		
240	1	210	24				
255	0	225	20				
270	0	240	13				
		255	8				
		270	4				
		285	2				
		300	1				
		315	0				
		330	0				

ตารางที่ ก.6 แสดงระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ

FM20		FM40		FM60		FM80	
เวลา	ระยะจมน	เวลา	ระยะจมน	เวลา	ระยะจมน	เวลา	ระยะจมน
30	40	30	40	45	40	40	40
65	40	45	40	65	36	55	37
80	40	60	40	90	30	70	34
85	40	75	40	110	25	85	20
100	40	90	40	120	23	90	14
115	35	105	40	135	20	120	2
130	28	120	40	155	13	150	1
145	24	135	36	195	5	165	0
165	12	150	26	235	3		
190	8	165	18	255	2		
215	3	180	10	265	1		
235	0	195	5	280	0		
250	0	210	3				
		225	0				

ตารางที่ ก.7 แสดงระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมชิลิกาฟูม

SF5		SF7		SF9		SF11	
เวลา	ระยะจมน	เวลา	ระยะจมน	เวลา	ระยะจมน	เวลา	ระยะจมน
30	40	30	40	35	40	30	40
45	40	45	40	50	40	45	40
60	40	60	38	60	40	65	38
75	38	75	35	75	38	80	32
90	32	90	30	90	27	90	22
105	27	105	25	105	15	100	20
120	20	135	13	120	8	110	15
135	15	150	10	135	5	120	10
160	4	165	5	150	3	130	5
175	1	180	2	165	2	140	3
185	0	195	0	180	1	155	2
				195	0	170	0
				210	0		



ตารางที่ ข.1 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ธรรมดา(PC)

ระยะเวลา บ่ม	กำลังรับแรงอัด (ksc)						
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5	ก้อนที่ 6	avg.
1	124.0	116.0	116.0	112.0	120.0	116.0	117.3
7	-	244.0	248.0	244.0	232.0	256.0	242.0
14	-	290.0	290.0	280.0	-	308.0	297.5
28	352.0	346.0	348.0	-	360.0	-	353.3
45	387.0	380.0	384.0	392.0	-	-	385.8
60	448.0	420.0	420.0	425.0	-	-	429.3

ตารางที่ ข.2 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมแกล่นหินบิฑูมินัสคัตขนาดจากเยอรมนีที่ปริมาณ
ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก (FG20)

ระยะเวลา การบ่ม	กำลังรับแรงอัด (ksc)						
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5	ก้อนที่ 6	avg.
1	108.00	116.00	112.00	-	-	112.00	112.00
7	300.0	-	308.0	292.0	-	-	300.00
14	400.0	412.0	380.0	-	408.0	408.0	401.60
28	460.0	440.0	428.0	448.0	456.0	-	446.40
45	500	492	480	492	-	-	491.00
60	-	480	512	528	500	492	502.40

ตารางที่ ข.3 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมแกล่นหินบิทุมินัสคัตขนาดจากเยอรมนีที่ปริมาณ ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก (FG40)

ระยะเวลา การบ่ม	กำลังรับแรงอัด (ksc)						
	(วัน)	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5	ก้อนที่ 6
1	80.0	80.0	78.0	76.0	80.0	72.0	77.67
7	240.0	224.0	232.0	228.0	236.0	-	232.00
14	352.0	-	-	360.0	-	344.0	352.00
28	388.0	404.0	396.0	384.0	408.0	-	396.00
45	464.0	476.0	456.0	465.0	-	-	465.33
60	480.0	484.0	484.0	476.0	472.0	460.0	476.00

ตารางที่ ข.4 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมแกล่นหินบิทุมินัสคัตขนาดจากเยอรมนีที่ปริมาณ ร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก (FG60)

ระยะเวลาการ บ่ม	กำลังรับแรงอัด (ksc)						
	(วัน)	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5	ก้อนที่ 6
1	42.0	-	38.0	40.0	40.0	44.0	40.80
7	140.0	148.0	156.0	148.0	140.0	-	146.40
14	176.0	180.0	188.0	184.0	-	-	182.00
28	252.0	240.0	248.0	260.0	-	-	250.00
45	284.0	276.0	268.0	270.0	-	-	274.50
60	284.0	280.0	292.0	284.0	290.0	-	286.00

ตารางที่ ข.5 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมถ่านหินบิพูมินัสคัดขนาดจากเยอรมนีที่ปริมาณ ร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก (FG80)

ระยะเวลา การบ่ม	กำลังรับแรงอัด (ksc)							
	(วัน)	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5	ก้อนที่ 6	avg.
1	20.00	19.00	-	18.00	20.00	-	-	19.33
7	48.0	50.0	49.0	50.0	-	-	-	49.33
14	80.0	76.0	80.0	96.0	-	-	-	78.67
28	100.0	92.0	98.0	96.0	-	92.0	-	95.00
45	112	108	100	106	100	-	-	103.50
60	116	116	117	120	-	-	-	117.33

ตารางที่ ข.6 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะที่ปริมาณ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก (FM20)

ระยะเวลา การบ่ม	กำลังรับแรงอัด (ksc)							
	(วัน)	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5	ก้อนที่ 6	avg.
1	92	100	96	-	100	92	-	96.0
7	-	205	198	207	210	-	-	204.0
14	316	-	280	312	318	-	-	306.5
28	380	-	380	376	372	372	-	376.0
45	408	400	396	420	-	-	-	406.0
60	436	456	460	468	472	456	-	458.0

ตารางที่ ข.7 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะที่ปริมาณ ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก (FM40)

ระยะเวลา การบ่ม	กำลังรับแรงอัด (ksc)						
	(วัน)	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5	ก้อนที่ 6
1	-	60	58	60	-	56	58.7
7	-	140	140	137	132	-	137.3
14	240	240	236	232	-	228	235.2
28	-	317	320	-	310	325	318.0
45	324	328	348	328	340	352	337.0
60	340	-	328	356	-	340	341.3

ตารางที่ ข.8 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะที่ปริมาณ ร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก (FM60)

ระยะเวลา การบ่ม	กำลังรับแรงอัด (ksc)						
	(วัน)	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5	ก้อนที่ 6
1	30	30	-	30	32	-	30.5
7	88	96	-	84	88	80	87.2
14	192	188	184	180	190	-	186.8
28	-	244	252	240	246	-	245.5
45	-	268	264	260	260	-	263.0
60	280	272	288	280	284	288	282.0

ตารางที่ ข.9 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะที่ปริมาณ ร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก (FM80)

ระยะเวลา การบ่ม	กำลังรับแรงอัด (ksc)						
	(วัน)	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5	ก้อนที่ 6
1	28.80	30.80	32.00	-	33.40	-	31.25
7	66.0	66.0	-	68.0	64.0	72.0	67.20
14	-	100.0	96.0	-	91.0	92.0	94.75
28	120.0	128.0	132.0	136.0	-	-	129.00
45	136	128	140	132	-	-	134.00
60	136	140	144	140	-	-	140.00

ตารางที่ ข.10 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟูมที่ปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (SF5)

ระยะเวลา การบ่ม	กำลังรับแรงอัด (ksc)						
	(วัน)	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5	ก้อนที่ 6
1	80.00	82.00	-	84.00	84.00	-	82.50
7	252.0	264.0	240.0	-	252.0	-	252.00
14	376.0	404.0	380.0	392.0	404.0	388.0	390.67
28	500.0	508.0	484.0	468.0	508.0	504.0	495.33
45	524	536	516	-	532	-	527.00
60	544	524	540	532	544.0	520.0	534.00

ตารางที่ ข.11 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟูมที่ปริมาณร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก (SF7)

ระยะเวลา การบ่ม	กำลังรับแรงอัด (ksc)						
	(วัน)	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5	ก้อนที่ 6
1	96.00	100.00	-	96.00	98.00	-	97.50
7	242.0	240.0	-	242.0	-	245.0	242.25
14	435.0	-	-	448.0	444.0	450.0	444.25
28	480.0	504.0	496.0	520.0	516.0	476.0	498.67
45	516	536	540	568	532	-	538.40
60	532	556	540	556	560.0	532.0	546.00

ตารางที่ ข.12 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟูมที่ปริมาณร้อยละ 9 โดยน้ำหนัก (SF9)

ระยะเวลา การบ่ม	กำลังรับแรงอัด (ksc)						
	(วัน)	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5	ก้อนที่ 6
1	118.00	-	120.00	104.00	104.00	102.00	109.60
7	-	308.0	324.0	-	320.0	312.0	316.00
14	-	484.0	476.0	452.0	448.0	480.0	468.00
28	516.0	508.0	500.0	524.0	520.0	-	513.60
45	536	552	540	560	-	-	547.00
60	568	560	552	572	556.0	560.0	561.33

;

ตารางที่ ข.13 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟุ่มที่ปริมาณร้อยละ 11 โดยน้ำหนัก (SF11)

ระยะเวลาการ บ่ม	กำลังรับแรงอัด (ksc)						
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5	ก้อนที่ 6	avg.
(วัน)							
1	-	132.00	126.00	124.00	130.00	138.00	130.00
7	332.00	320.00	316.00	348.00	320.00	332.00	328.00
14	380.0	420.0	372.0	432.0	396.0	-	400.00
28	500.0	480.0	472.0	464.0	-	-	479.00
45	468	500	484	476	-	-	482.00
60	480	484	480	492	-	-	484.00



ABBREVIATIONS

C_3S : $3CaO.SiO_2$ Tricalcium silicate (Alite)

C_2S : $2CaO.SiO_2$ Dicalcium silicate (Blite)

C_3A : $3CaO.Al_2O_3$ Tricalcium aluminate

C_4AF : $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ Ferrite

CSH : Calcium silicate hydrate

CAH : Calcium aluminate hydrate

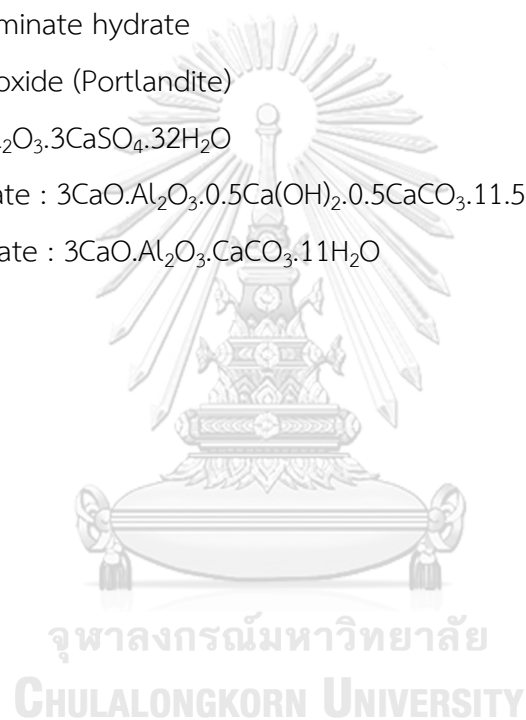
CH : Calcium hydroxide (Portlandite)

Ettringite : $3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O$

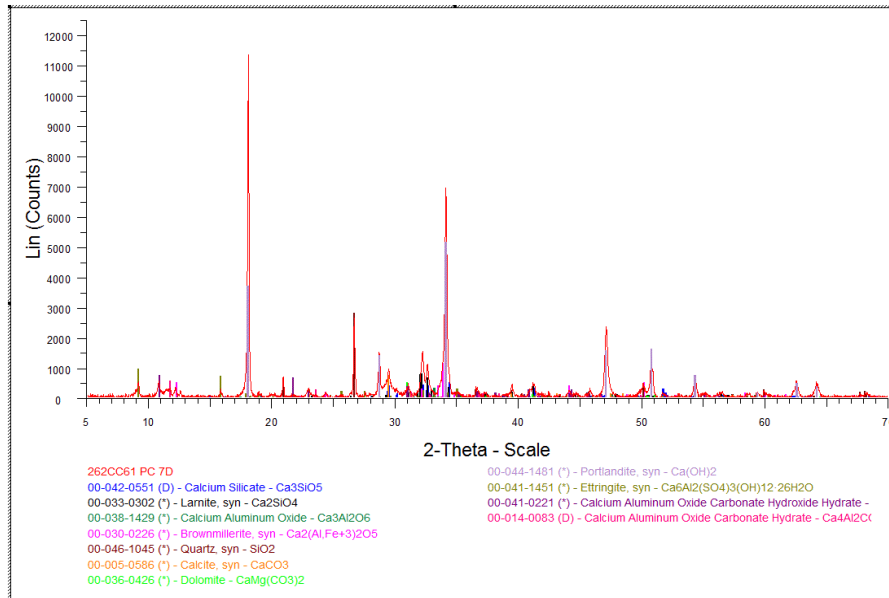
Hemicarboaluminate : $3CaO.Al_2O_3.0.5Ca(OH)_2.0.5CaCO_3.11.5H_2O$

Monocarboaluminate : $3CaO.Al_2O_3.CaCO_3.11H_2O$

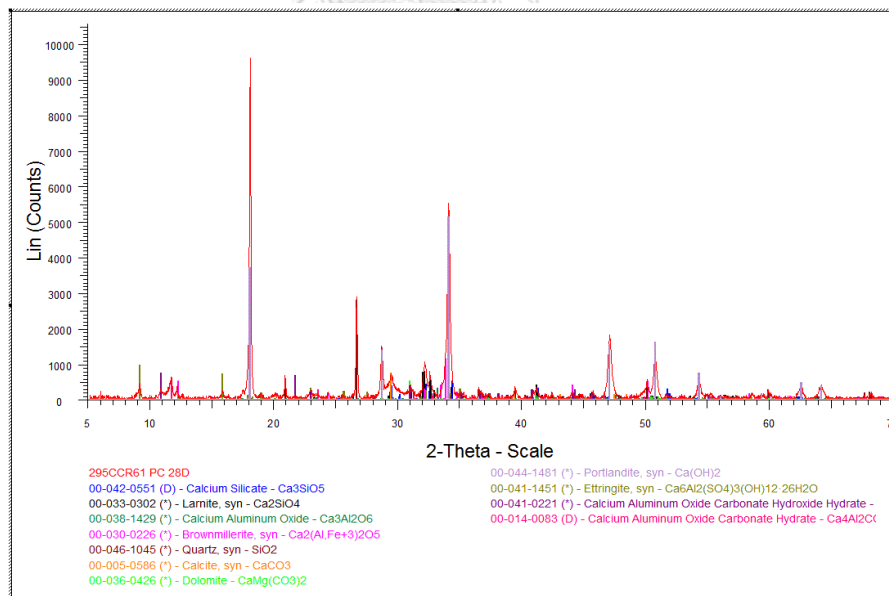
Quart : SiO_2



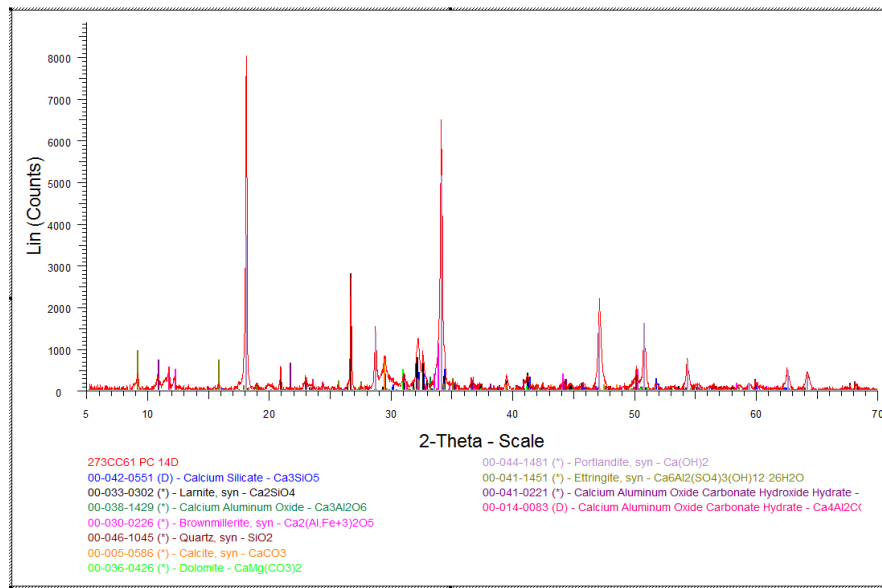
XRD Result



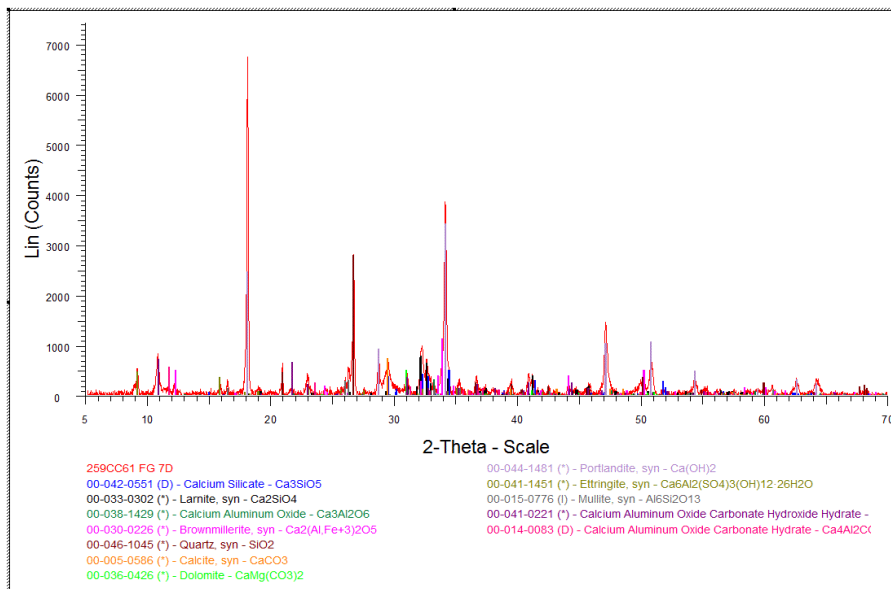
รูปที่ ค.1 XRD ของ PC ที่อายุ 7 วัน



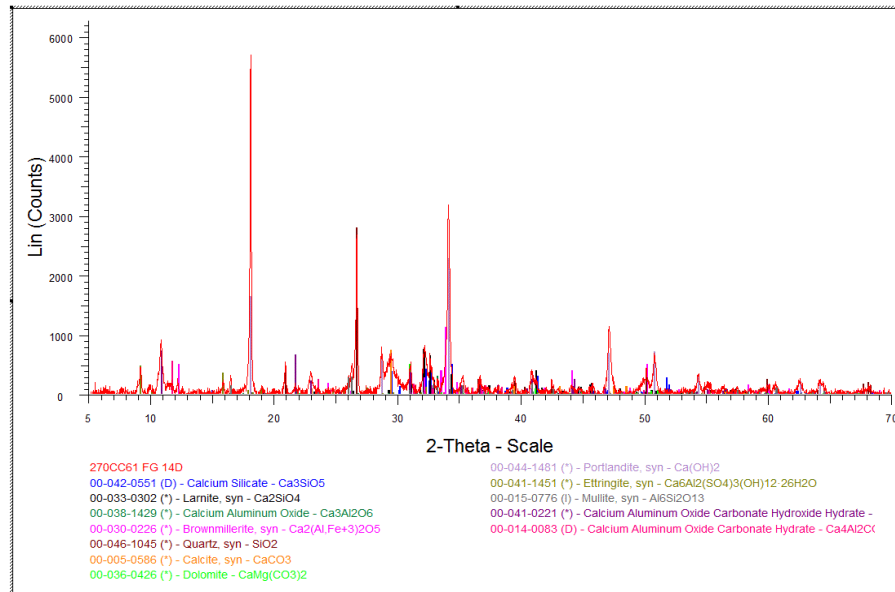
รูปที่ ค.2 XRD ของ PC ที่อายุ 14 วัน



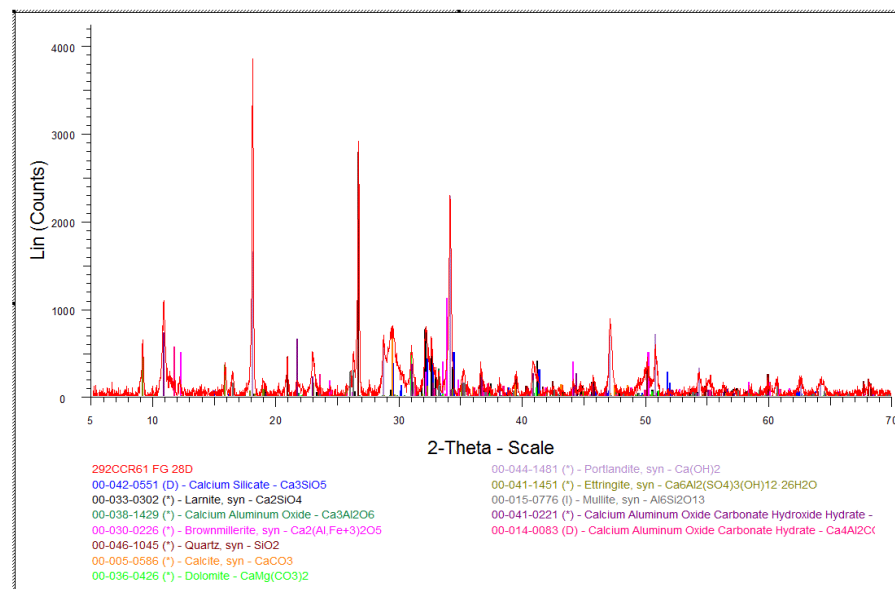
รูปที่ ค.3 XRD ของ PC ที่อายุ 28 วัน



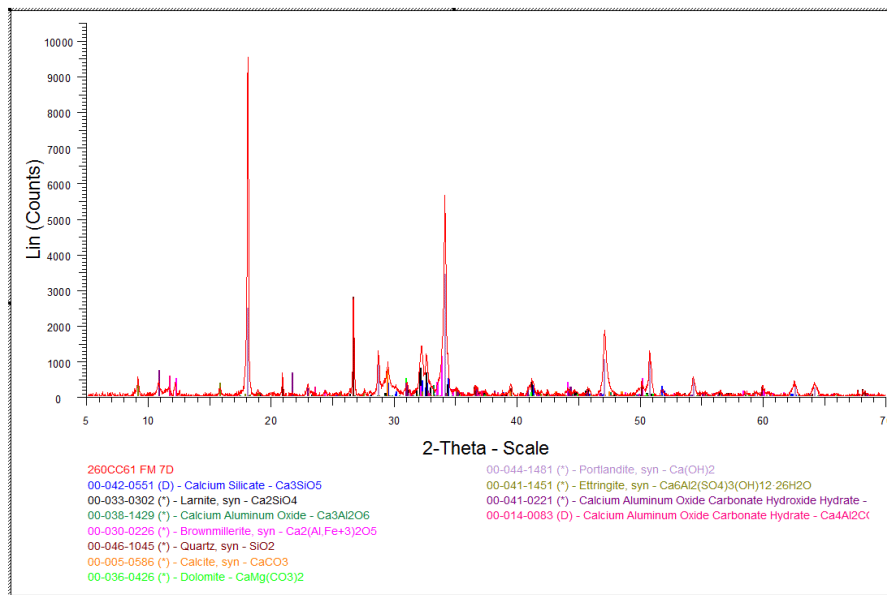
รูปที่ ค.4 XRD ของ FG ที่อายุ 7 วัน



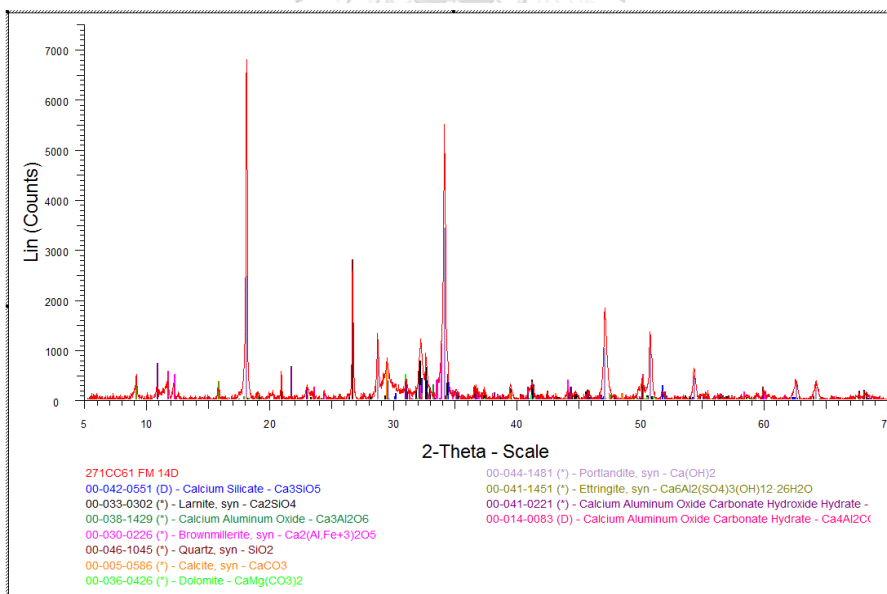
รูปที่ ค.5 XRD ของ FG ที่อายุ 14 วัน



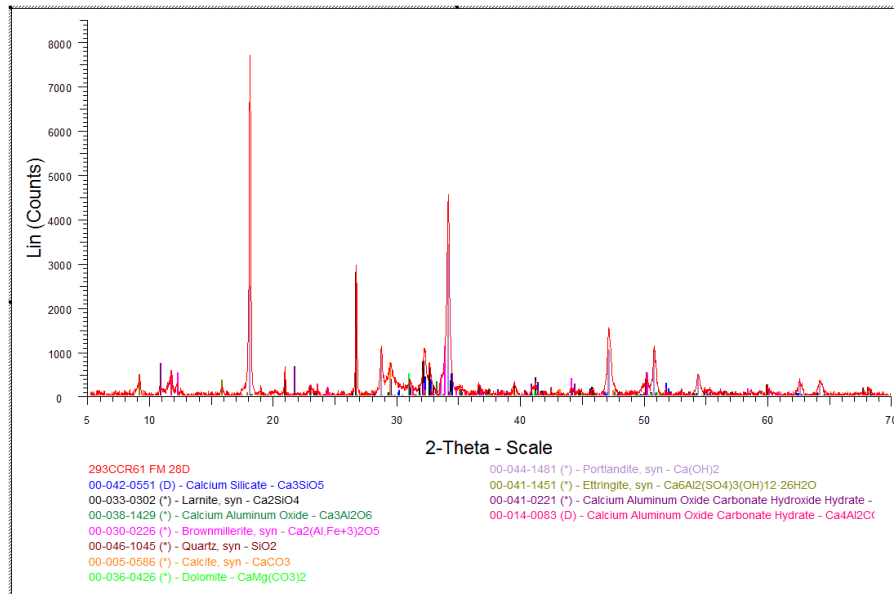
รูปที่ ค.6 XRD ของ FG ที่อายุ 28 วัน



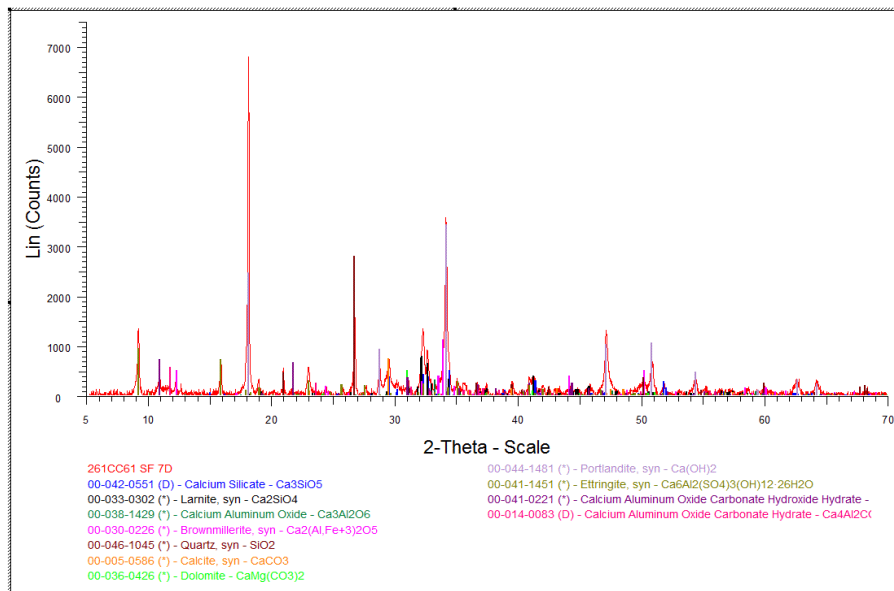
รูปที่ ค.7 XRD ของ FM ที่อายุ 7 วัน



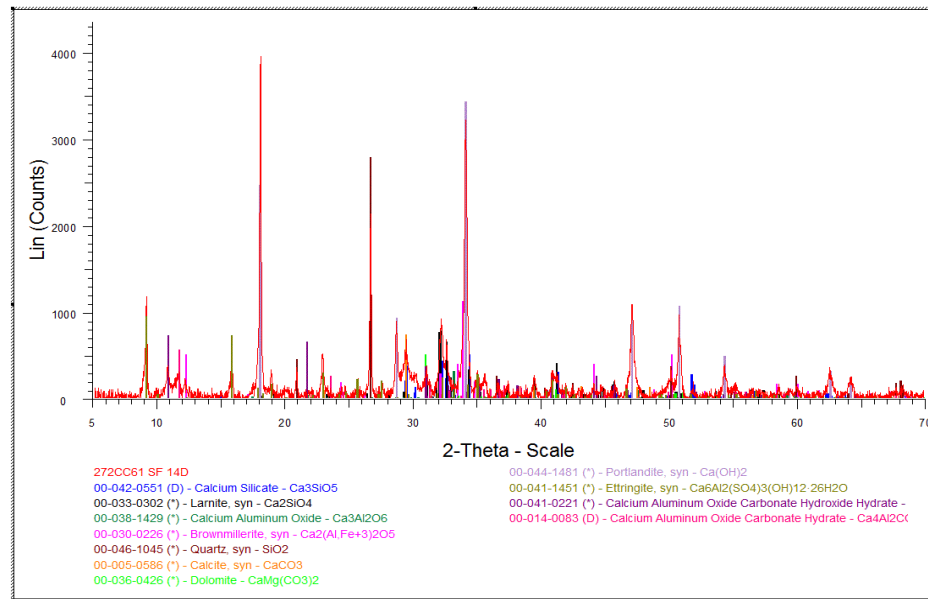
รูปที่ ค.8 XRD ของ FM ที่อายุ 14 วัน



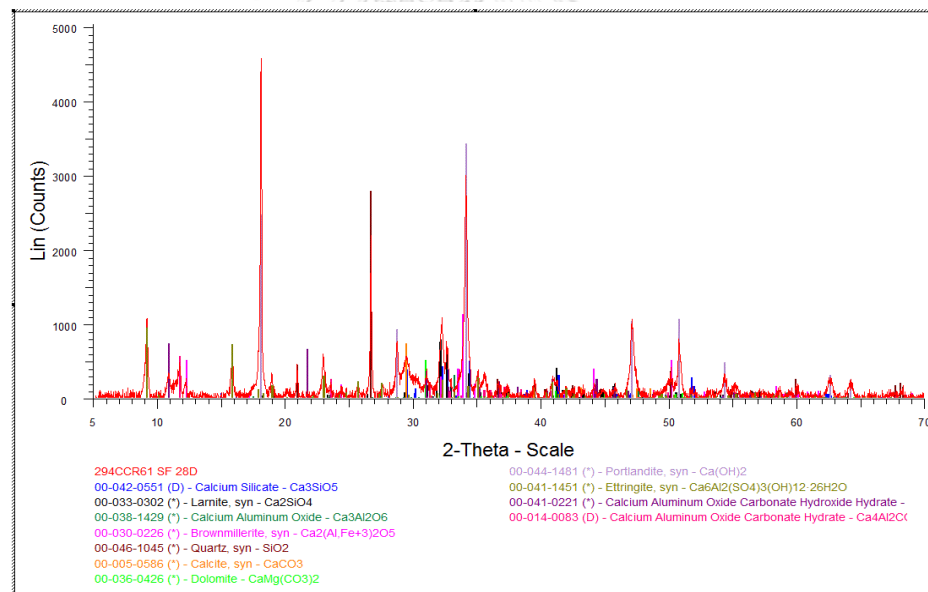
รูปที่ ค.9 XRD ของ FM ที่อายุ 28 วัน



รูปที่ ค.10 XRD ของ SF ที่อายุ 7 วัน



รูปที่ ค.11 XRD ของ SF ที่อายุ 14 วัน



รูปที่ ค.12 XRD ของ SF ที่อายุ 28 วัน

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวนารีมาลย์ สกฤติเฝ้าะ เกิดวันที่ 24 ตุลาคม 2534 ที่จังหวัดยะลา สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปี 2556 และศึกษาในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี 2558

