



การพัฒนาวัสดุเชื่อมประสานจากกากอุตสาหกรรมเพื่อปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อน

กรุงเทพ



ธัญญ์ธัญ อินใจ

วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

การพัฒนาวัสดุเชื่อมประสานจากกากอุตสาหกรรมเพื่อปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อน
กรุงเทพ



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

วิทยานิพนธ์ เรื่อง "การพัฒนาวัสดุเชื่อมประสานจากกากอุตสาหกรรมเพื่อปรับปรุงคุณภาพดินเหนียว
อ่อนกรุงเทพ"

ของ ธีญญ์ธนัช อินเีย

ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จุฬพันธ์ทอง)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทงศักดิ์ โนไชยา)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัช สุริวงษ์)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สสิกรณณ์ เหลืองวิชเจริญ)

อนุมัติ

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.กรองกาญจน์ ชูทิพย์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การพัฒนาวัสดุเชื่อมประสานจากกากอุตสาหกรรมเพื่อปรับปรุง คุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ
ผู้วิจัย	ชญัญญ์ธนัช อินโย
ประธานที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จุฬพันธ์ทอง
ประเภทสารนิพนธ์	วิทยานิพนธ์ วศ.ม. วิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2564
คำสำคัญ	วัสดุเชื่อมประสาน, กากแคลเซียมคาร์ไบด์, ซิลิกาฟุ่ม, ปฏิกริยาปอซโซลานิก, ดินเหนียวกรุงเทพ, การปรับปรุงคุณภาพดิน

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้ประโยชน์กากอุตสาหกรรมเพื่อปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และซิลิกาฟุ่ม (SF) โดยศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและทางฟิสิกส์ของวัสดุด้วยเทคนิค Energy dispersive x-ray fluorescence (EDXRF), X-ray diffractometer (XRD), Thermogravimetric analysis (TGA) และ Scanning electron microscopy (SEM) อัตราส่วนระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และซิลิกาฟุ่มถูกออกแบบให้มีอัตราส่วนระหว่าง Ca/Si เท่ากับ 1.85, 1.55, 1.25, 0.95 และ 0.65 ในการออกแบบส่วนผสมนี้มีพื้นฐานจากองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ ตัวอย่างเพสต์ CCR-SF ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray diffractometer (XRD), Thermogravimetric analysis (TGA), Scanning electron microscopy (SEM) และศึกษากำลังรับแรงอัดของเพสต์และมอร์ตาร์ ผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ที่ให้ค่ากำลังอัดเพสต์และมอร์ตาร์ที่ระยะเวลา 91 วันสูงสุดคืออัตราส่วน Ca/Si เท่ากับ 1.55 ผลการทดสอบ TGA แสดงปริมาณการสูญเสียน้ำหนักของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตภายในเพสต์ CCR-SF โดยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บ่งชี้เฟสต่างๆที่เกิดขึ้นในเพสต์ CCR-SF ในอัตราส่วนต่างๆ ภาพ SEM แสดงถึงการก่อตัวของผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานงานวิจัยนี้ยังศึกษากำลังอัดแกนเดี่ยวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ปรับปรุงด้วยวัสดุเชื่อมประสาน CCR-SF ที่เหมาะสมในปริมาณ 10%, 15%, 20%, 25% และ 30% ของน้ำหนักดินแห้งที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน ผลการวิจัยพบว่ากำลังอัดของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมีการเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่ม และเมื่อปริมาณวัสดุเชื่อมประสาน CCR-SF เพิ่มขึ้น กำลังอัดของดินมีการเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นซีแคนต์ (Secant modulus of elasticity, E50) มีการเปลี่ยนแปลงแนวโน้มในลักษณะเดียวกันกับกำลังอัดของดินที่ถูกปรับปรุง



Title	DEVELOPMENT OF CEMENTITIOUS MATERIALS FROM INDUSTRIAL WASTES FOR USING AS STABILIZING SOFT BANGKOK CLAY
Author	THUNTHANUT INYAI
Advisor	Assistant Professor Phongthorn Julphunthong, Ph.D.
Academic Paper	M.Eng. Thesis in Civil Engineering, Naresuan University, 2021
Keywords	cementitious materials, calcium carbide residue, silica fume, pozzolan reaction, Bangkok clay, soil stabilized

ABSTRACT

This study investigated the utilization of industrial wastes for stabilization of soft Bangkok clay by using calcium carbide residue (CCR) and silica fume (SF). The chemical composition and physical properties of raw materials were analyzed by the energy dispersive x-ray fluorescence (EDXRF), x-ray diffractometer (XRD), scanning electron microscopy (SEM) and thermogravimetric analysis (TGA). The fraction of calcium carbide residue and silica fume was decided to Ca/Si ratio of 1.85, 1.55, 1.25, 0.95 and 0.65 based on their chemical composition. CCR-SF pastes were studied by x-ray diffractometer (XRD), thermogravimetric analysis (TGA), scanning electron microscopy (SEM). The compressive strength of CCR-SF pastes and mortars also investigated. The test results showed that the mixture with Ca/Si ratio of 1.55 achieved highest compressive strength in CCR-SF paste and mortar for 91 days after casted. The TGA-DTG curves indicated the weight loss of calcium silicate hydrate in CCR-SF pastes. The XRD patterns were used to identified phase formation in the CCR-SF pastes at various compositions. The SEM images illustrated the formation of cementitious products in pastes. This research also investigated the unconfined compressive strength of the stabilized soft Bangkok clay. The CCR-SF binder with highest performance composition was applied for 10%, 15%, 20%, 25% and 30% by weight of dried soil for soil stabilization. The strength development of stabilized soft Bangkok clay with CCR-SF binder is influenced by the binder contents and curing times.

Otherwise, the secant modulus of elasticity (E_{50}) varied in a similar trend as that of the unconfined compressive strength.



ประกาศคุณูปการ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จุฬพันธ์ทอง ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทงศักดิ์ โนไชยา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สสิกรณณ์ เหลืองวิซชเจริญ และรองศาสตราจารย์ ดร.ธวัช สุริวงษ์ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางในการทำวิจัย สนับสนุนการดำเนินงานวิจัย แก่ไขข้อบกพร่อง ด้วยความเอาใจใส่อย่างยิ่งตลอดจนผลักดันให้งานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์และทรงคุณค่า

ขอขอบพระคุณทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ อาทิเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา และสาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่ได้ให้ความสะดวกในการยืมเครื่องมือในการทำวิจัยและขอบคุณนิสิตปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา ที่ได้ให้ความช่วยเหลืองานในห้องปฏิบัติการมา ณ ที่นี้

เหนือสิ่งอื่นใดผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ของผู้วิจัยที่ให้กำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกๆด้านอย่างดีที่สุดเสมอมา

คุณค่าและประโยชน์อันเกิดจากงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบและอุทิศให้ผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการช่วยเหลือสนับสนุนในทุกๆด้านอย่างดีที่สุดเสมอมา

ธัญญ์ธันช อินไย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
ประกาศคุณูปการ.....	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญภาพ.....	ฒ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	4
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์.....	6
2.1.1 สารประกอบหลักในซีเมนต์.....	6
2.1.2 สารประกอบรองในซีเมนต์.....	7
2.1.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ (Hydration of cement).....	7
2.2 แคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR).....	9
2.3 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan Material).....	11
2.3.1 ซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume).....	11

2.3.1.1 องค์ประกอบทางเคมี	12
2.3.1.2 คุณสมบัติทางกายภาพ.....	13
2.3.2 ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction).....	14
2.4 ดินเหนียว.....	15
2.4.1 Silica Tetrahedron	15
2.4.2 Alumina Octahedron.....	16
2.4.3 แร่ดินเหนียว.....	16
2.4.3.1 เกาลินไนท์ (Kaolinite).....	17
2.4.3.2 อิลไลต์ (Illite).....	17
2.4.3.3 มอนต์โมริลโลไนต์ (Montmorillonite).....	17
2.4.4 ดินที่มีความเชื่อมแน่น	18
2.5 เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสี (X-ray Diffractometer, XRD)	21
2.6 เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray Fluorescence XRF).....	23
2.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)	24
2.8 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคโดยวิธีการเลี้ยวเบนของแสงเลเซอร์ (Particle size analyzer by Laser diffraction method)	25
2.9 การวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเชิงความร้อน (Thermogravimetric Analysis, TGA)	27
2.10 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	30
2.10.1 การใช้ประโยชน์จากปูนขาว	30
2.10.1 การใช้ประโยชน์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และวัสดุปอซโซลาน	35

2.10.2 การปรับปรุงดินเหนียวอ่อนกรุงเทพด้วยซีเมนต์.....	44
2.10.3 การปรับปรุงดินเหนียวกรุงเทพด้วย CCR และวัสดุปอซโซลาน.....	51
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	58
3.1 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของวัสดุ.....	59
3.2 การออกแบบส่วนผสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และซิลิกาฟูม.....	59
3.3 การทดสอบซีเมนต์เพสต์.....	61
3.3.1 ขั้นตอนการเตรียม.....	61
3.4 การเตรียมตัวอย่างมอร์ตาร์และการทดสอบกำลังรับแรงอัด.....	62
3.4.1 การผสมมอร์ตาร์.....	62
3.4.2 การทดสอบหาค่าการไหล.....	63
3.4.3 การหล่อมอร์ตาร์ลงแบบ.....	63
3.4.4 การทดสอบกำลังอัด.....	64
3.5 การทดสอบดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ (Soft Bangkok clay, SBC).....	64
3.5.1 ขีดจำกัดของแอตเตอร์เบิร์ก (Atterberg's Limit).....	64
3.5.1.1 ขั้นตอนการเตรียม.....	64
3.5.1.2 วิธีการทดสอบ.....	64
การหาขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit).....	64
การหาขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit).....	65
3.6 การทดสอบดินซีเมนต์.....	66
3.6.1 การออกแบบส่วนผสมระหว่างดินเหนียวกรุงเทพกับวัสดุประสาน.....	66
3.6.2 การทดสอบ Unconfined compression test.....	66
3.6.1.1 ขั้นตอนการเตรียม.....	66

3.6.1.2 วิธีการทดสอบ	67
บทที่ 4.....	68
ผลการวิจัย.....	68
4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีและคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุ	68
4.1.1 ผลการวิเคราะห์ทางเคมีของวัสดุด้วยเทคนิค Energy dispersive x-ray fluorescence (EDXRF).....	68
4.1.2 ผลการวิเคราะห์วัสดุด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD).....	69
4.1.3 ผลการวิเคราะห์ Thermogravimetric analysis (TGA) ของวัสดุกาก แคลเซียมคาร์ไบด์และซิลิกาฟูม.....	70
4.1.4 โครงสร้างทางจุลภาคของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ซิลิกาฟูมและดินเหนียวอ่อน กรุงเทพ	72
4.1.5 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ (SBC)	72
4.2 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุเชื่อมประสาน CCR-SF	73
4.2.1 กำลังอัดของเพสต์กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR-SF paste)	73
4.2.2 ผลการทดสอบค่าการไหลของมอร์ตาร์ CCR-SF	75
4.2.3 กำลังอัดของมอร์ตาร์กากแคลเซียมคาร์ไบด์-ซิลิกาฟูม (CCR-SF mortar)	76
4.3 การทดสอบ TGA ของเพสต์ CCR-SF	78
4.4 ผลการทดสอบ XRD ของเพสต์ CCR-SF	81
4.5 SEM/EDS ของเพสต์ CCR-SF	87
4.6 Unconfined compressive strength ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ปรับปรุงด้วยวัสดุ เชื่อมประสาน	96
บทที่ 5.....	99
บทสรุป.....	99

บรรณานุกรม..... 100

ประวัติผู้วิจัย..... 106



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 แสดงชื่อย่อของสารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	6
ตาราง 2 แสดงปริมาณเฟสของสารประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	7
ตาราง 3 ตัวอย่างองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของวัสดุประสาน	13
ตาราง 4 ลักษณะค่าคุณสมบัติกายภาพพื้นฐานของดิน.....	20
ตาราง 5 สรุปผลการทดสอบ Unconfined compression test ของดิน.....	21
ตาราง 6 สัดส่วนผสมและสภาพการบ่มตัวอย่างของเพสต์ปูนขาว (NHL)-ซิลิกาฟูม (SF) - เถ้าลอย (FA) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน (w/b) เท่ากับ 0.35 [26]	33
ตาราง 7 องค์ประกอบเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์, เถ้าแกลบและซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	38
ตาราง 8 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่มีวัสดุประสานชนิดใหม่ (CCR+RHA).....	39
ตาราง 9 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์.....	40
ตาราง 10 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ.....	41
ตาราง 11 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ.....	42
ตาราง 12 สัดส่วนผสมของคอนกรีต	43
ตาราง 13 คุณสมบัติของดินเหนียวอะริเอเคะ (Ariake clay)	47
ตาราง 14 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุจากเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray Fluorescence XRF).....	52
ตาราง 15 องค์ประกอบทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และซิลิกาฟูมจากเทคนิค Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer (EDXRF)	59
ตาราง 16 อัตราส่วนระหว่างแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาที่แตกต่างกัน	60

ตาราง 17 แสดงปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และปริมาณซิลิกาฟุ่ม (SF) จากการ แก้สมการในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน.....	61
ตาราง 18 สัดส่วนระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และซิลิกาฟุ่มโดยน้ำหนัก.....	61
ตาราง 19 แสดงปริมาณวัสดุที่ใช้ในการผสมเพื่อหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์.....	62
ตาราง 20 ตารางสัดส่วนผสมของดินเหนียวปรับปรุงด้วยวัสดุเชื่อมประสาน OPC และ CCR-SF.....	66
ตาราง 21 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ CCR, SF และ SBC.....	68
ตาราง 22 แสดงค่ากำลังอัดของเพสต์ CCR-SF ที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ.....	73
ตาราง 23 ผลการทดสอบหาค่าการไหลของมอร์ตาร์ CCR-SF แต่ละส่วนผสม.....	75
ตาราง 24 แสดงค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ CCR-SF ที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ.....	76
ตาราง 25 แสดงค่ากำลังอัดของดินแต่ละส่วนผสมที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน, 14 วัน, 28 วัน, 56 วันและ 91 วัน.....	96

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพ 1 ชั้นดินย่อยทั่วไปของดินเหนียวกรุงเทพฯ.....	1
ภาพ 2 แผนที่ความหนาของของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ.....	2
ภาพ 3 แผนผังแสดงการก่อตัวและปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	9
ภาพ 4 พื้นที่กำจัดของกากแคลเซียมคาร์ไบด์.....	10
ภาพ 5 SEM ของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า.....	11
ภาพ 6 รูปแบบ XRD ของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) (C:Carbon.....	11
ภาพ 7 รูปถ่ายอนุภาคของซิลิกาฟุ่มควบแน่น.....	14
ภาพ 8 การจัดเรียงตัวของ Silica tetrahedron (a) แบบหน่วยเดี่ยว (b) หลากๆหน่วยเกาะ กลุ่ม.....	16
ภาพ 9 การจัดเรียงตัวของ Alumina Octahedron (a) แบบหน่วยเดี่ยว (b) หลากๆหน่วย เกาะกลุ่ม.....	16
ภาพ 10 โครงสร้างของ (a) เกาลินไนท์ (b) อิลไลต์ และ (c) มอนต์โมริลโลไนต์.....	16
ภาพ 11 เม็ดดินเกาลินไนท์ (Kaolinite) ขนาดประมาณ 6 ไมครอน (เล็กกว่าเหรียญบาท ประมาณ.....	17
ภาพ 12 แนวคิดของโครงสร้างดินแบบ Dispersed และ Flocculated.....	18
ภาพ 13 SEM ของดินเหนียวกรุงเทพฯที่กำลังขยาย 3000 เท่า.....	19
ภาพ 14 ผลการทดสอบดินเหนียวกรุงเทพฯ ด้วยเทคนิค XRD (C = Carbon, Cc = Calcite, Cr = Cristobolite, G = Gypsum, I = Illite, K = Kaolinite, M = Montmorillonite,)	19
ภาพ 15 รูปตัดชั้นดิน (Soil profile) และคุณสมบัติของดินเหนียวกรุงเทพฯในกรณีศึกษา...	20

ภาพ 16 การกระจายสเปกตรัมจากเหล็กที่มีคาร์บอน 0.4% ที่มีพีคสูงสุดเนื่องจาก BCC α -Fe แต่.....	22
ภาพ 17 แสดงตัวอย่างสเปกตรัมของตัวอย่างดินที่วัดด้วย EDXRF spectrometer.....	23
ภาพ 18 Scanning electron micrograph ของการแตกหักแบบเหนียวที่ผิวในโมลิบดีนัม ..	24
ภาพ 19 แผนภาพแสดงโครงสร้างพื้นฐานการวัดของเครื่องมือโดยวิธีการเลี้ยวเบนของเลเซอร์.....	25
ภาพ 20 แผนภาพแสดงผลการวัดการกระจายความเข้มการกระเจิงแสงโดยอนุภาคสีน้ำเงินซึ่งลำแสง.....	26
ภาพ 21 แผนภาพแสดงการกระจายขนาดอนุภาคที่คำนวณจากผลลัพธ์การวัดในภาพ 20.....	26
ภาพ 22 ขั้นตอนการสลายตัวของแคลเซียมออกซาลेटโมโนไฮเดรต : มวลตัวอย่าง 19 มิลลิกรัม,.....	27
ภาพ 23 เครื่องซึ่งสารเชิงความร้อนที่มีรูปแบบการบรรจุใส่ด้านบน, การแขวนและการจัดแนวราบ.....	28
ภาพ 24 เส้นโค้ง TGA และ SDTA แสดงการขจัดน้ำของการตกผลึกจากคอปเปอร์ซัลเฟตเพนตะไฮเดรต เส้นโค้งสีแดงที่วัดด้วยผลึกที่ค่อนข้างหยาบ เส้นโค้งสีดำที่วัดด้วยผลึกที่มีละเอียด ขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 3 ในเส้นโค้งของผลึกที่บดละเอียดมีการเลื่อนมากกว่า 10 เคลวินไปที่อุณหภูมิต่ำลง.....	29
ภาพ 25 ผลการทดสอบ TEM photomicrograph ของพอร์ตแลนด์ไดต์ไน (a)ปูนขาว 1 ปี (b) ปูนขาว 14 ปี (c) ปูนขาวใหม่ [25].....	30
ภาพ 26 รูปแบบ XRD ของพอร์ตแลนด์ไดต์ไน (a)ปูนขาว 1 ปี (b) ปูนขาว 14 ปี (c) ปูนขาวใหม่ (P : Portlandite และ CC : Calcite) [25].....	31
ภาพ 27 แสดง SEM ของ (a) มอร์ตาร์ปูนขาวที่ถูกเก็บภายใต้ความชื้น 1 ปี (b) มอร์ตาร์ปูนขาวที่ถูกเก็บภายใต้ความชื้น 14 ปี ที่พื้นผิวเป็นพื้นที่ของการเกิดปฏิกิริยา carbonated (c)	

มอร์ตาร์ปูนขาวใหม่ และเสริมด้วยฮิสโตแกรมแสดงขนาดของแคลไซต์ (S, ในหน่วย μm) กับความถี่ (F, ในหน่วยเปอร์เซ็นต์) [25].....	32
ภาพ 28 อิทธิพลจากความละเอียดของปูนขาวต่อกำลังอัดของเพสต์ที่มีปริมาณซิลิกาฟุ่ม 10% เถ้าลอย 30% และปูนขาว 60% ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน (w/b) เท่ากับ 0.35 โดยที่บ่มตัวอย่างในน้ำภายใต้อุณหภูมิห้อง [26].....	33
ภาพ 29 แสดงผลกระทบจากสภาพการบ่มต่อกำลังอัดของเพสต์ที่มีส่วนผสมด้วยซิลิกาฟุ่ม 10% เถ้าลอย 30% และปูนขาว 60% ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน (w/b) เท่ากับ 0.35 [26].....	34
ภาพ 30 รูปถ่ายโครงสร้างจุลภาคของเพสต์กากแคลเซียมคาร์ไบด์-เถ้าลอยบด (CCR-GFA paste) ที่อัตราส่วนน้ำต่อส่วนผสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์-เถ้าลอย (Water-to- binder, W/B) เท่ากับ.....	36
ภาพ 31 รูปแบบ X-ray diffraction ของ CCR, GFA และเพสต์ CCR-GFA.....	37
ภาพ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ CCR-RHA และอายุ.....	40
ภาพ 33 รูปถ่ายอนุภาค (Particle images) ของ (a) เถ้าชานอ้อยและ (b) กาก แคลเซียมคาร์ไบด์.....	41
ภาพ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์และการแทนที่ของเถ้าชานอ้อย (BA) ในกาก.....	42
ภาพ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและอายุของคอนกรีต.....	43
ภาพ 36 แผนภาพของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างดินซีเมนต์ระหว่างการบ่ม.....	45
ภาพ 37 การใช้ปูนขาว (Lime) ปรับปรุงค่า Unconfined compressive strength ของดิน..	46
ภาพ 38 (a) ตัวอย่างดินเหนียว 1 ที่เตรียมขึ้นมาที่ปริมาณน้ำ 185% และ (b) ตัวอย่างดิน เหนียว 2.....	47
ภาพ 39 (a) ตัวอย่างดินเหนียว 1 ผสมปูนขาวที่ปริมาณ 10% ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน และ (b).....	48

ภาพ 40 (a) ตัวอย่างดินเหนียว 1 ผสมปูนขาวที่ปริมาณ 20% ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน และ (b).....	48
ภาพ 41 (a) กำลังอัดของดินเหนียว 1 ที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และ (b) กำลังอัดของดิน.....	49
ภาพ 42 โซนพื้นที่ปฏิกิริยาของดินเหนียวซีเมนต์.....	51
ภาพ 43 การพัฒนา กำลังของดินเหนียวปรับปรุงด้วย CCR และ BA ที่ปริมาณน้ำและปริมาณ.....	53
ภาพ 44 การพัฒนาการกำลังของดินเหนียวปรับปรุงด้วยอัตราส่วน CCR:BA แตกต่างกัน.....	53
ภาพ 45 การพัฒนา กำลังของดินเหนียวที่ปรับปรุงด้วย CCR และ BA ที่ปริมาณส่วนประสานต่างกัน.....	54
ภาพ 46 รูปดินเหนียวที่ปรับปรุงจากเทคนิค SEM (a) ส่วนประสาน 10% ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน.....	55
ภาพ 47 แสดงผล SEM ด้วยเทคนิค EDS ของดินเหนียวปรับปรุงด้วยส่วนประสาน 30% ที่.....	56
ภาพ 48 XRD ของดินเหนียวที่ปรับปรุงที่ระยะเวลาการบ่ม 28, 90 และ 150 วัน (1:quartz,.....	57
ภาพ 49 โครงสร้างผลึกจากการทดสอบ XRD ของ a) ซิลิกาฟุ่ม (SF) , b) กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และ c) ดินเหนียวกรุงเทพฯ (SBC).....	69
ภาพ 50 ผล TGA-DTG ของวัสดุ (a) กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และ (b) ซิลิกาฟุ่ม (SF).....	71
ภาพ 51 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของ a) กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR), b) ซิลิกาฟุ่ม (SF) และ c) ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (BA).....	72
ภาพ 52 ผลกำลังอัดของเพสต์ CCR-SF ที่อัตราส่วน Ca/Si ต่างกันที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน ด้วยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน (w/b) เท่ากับ 0.65.....	73

ภาพ 53 อัตราการเพิ่มกำลังอัดของเพสต์ CCR-SF แต่ละอัตราส่วน Ca/Si ที่ระยะเวลาบ่ม
ต่างๆเทียบกับค่ากำลังอัดที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน74

ภาพ 54 ผลทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ CCR-SF ที่อัตราส่วน CaO/SiO₂ เท่ากับ 1.85,
1.55, 1.25, 0.95, 0.65 ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน76

ภาพ 55 อัตราการเพิ่มกำลังอัดของมอร์ตาร์ CCR-SF แต่ละอัตราส่วน Ca/Si ตามระยะเวลา
บ่มที่เปรียบเทียบกับระยะเวลาบ่ม 7 วัน77

ภาพ 56 การสูญเสียน้ำหนักของเพสต์ CCR-SF แต่ละอัตราส่วน Ca/Si ที่ระยะเวลาบ่ม 56
วัน79

ภาพ 57 แสดงปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตจากการสลายมวลจากผล TGA และค่า
กำลังอัดของเพสต์ CCR-SF แต่ละอัตราส่วน Ca/Si ที่ระยะเวลาบ่ม 56 วัน79

ภาพ 58 แสดงผล DTG ของเพสต์ Ca/Si เท่ากับ 1.85, 1.55, 1.25, 0.95 และ 0.65 ที่
ระยะเวลา 56 วัน80

ภาพ 59 รูปแบบ XRD ของเพสต์ Ca/Si -1.85 ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน 81

ภาพ 60 รูปแบบ XRD ของเพสต์ Ca/Si -1.55 ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน 82

ภาพ 61 รูปแบบ XRD ของเพสต์ Ca/Si -1.25 ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน 84

ภาพ 62 รูปแบบ XRD ของเพสต์ Ca/Si -0.95 ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน 85

ภาพ 63 รูปแบบ XRD ของเพสต์ Ca/Si -0.65 ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน 86

ภาพ 64 แสดงภาพ SEM ของเพสต์ CCR-SF ที่อัตราส่วน Ca/Si -1.85 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน
ด้วย (a) กำลังขยาย 1,000x (b) กำลังขยาย 5,000x , ระยะเวลาบ่ม 28 วันด้วย (c)
กำลังขยาย 1,000x (d) กำลังขยาย 5,000x , ระยะเวลาบ่ม 56 วันด้วย (e) กำลังขยาย
1,000x และ (f) กำลังขยาย 5,000x87

ภาพ 65 แสดงภาพ SEM ของเพสต์ CCR-SF ที่อัตราส่วน Ca/Si -1.55 ที่ระยะเวลาบ่ม 7
วันด้วย (a) กำลังขยาย 1,000x (b) กำลังขยาย 5,000x , ระยะเวลาบ่ม 28 วันด้วย (c)

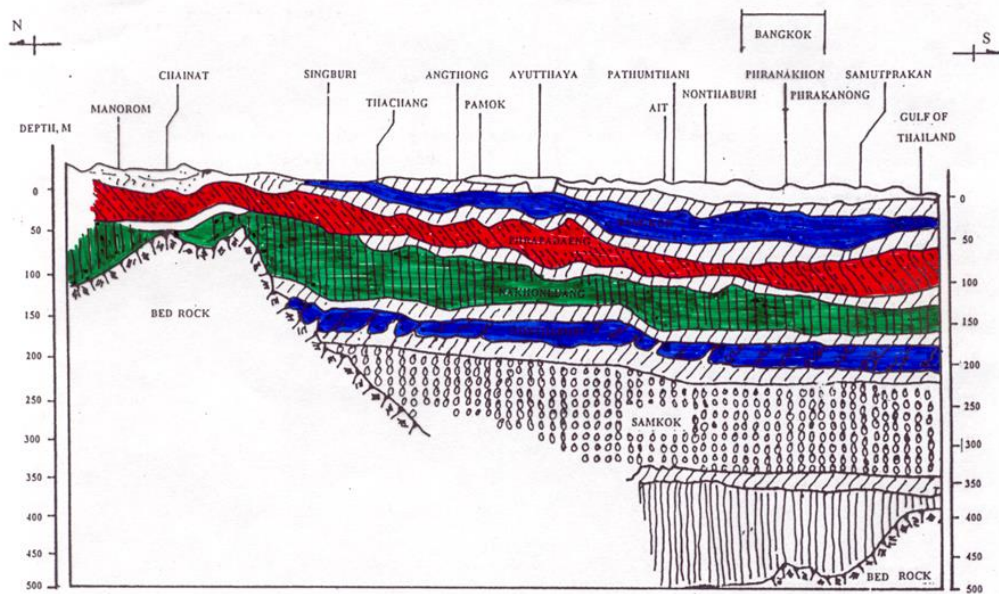
กำลังขยาย 1,000x (d) กำลังขยาย 5,000x , ระยะเวลาบ่ม 56 วันด้วย (e) กำลังขยาย 1,000x และ (f) กำลังขยาย 5,000x.....	89
ภาพ 66 แสดงภาพ SEM ของเพสต์ CCR-SF ที่อัตราส่วน Ca/Si -1.25 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน ด้วย (a) กำลังขยาย 1,000x (b) กำลังขยาย 5,000x , ระยะเวลาบ่ม 28 วันด้วย (c) กำลังขยาย 1,000x (d) กำลังขยาย 5,000x , ระยะเวลาบ่ม 56 วันด้วย (e) กำลังขยาย 1,000x และ (f) กำลังขยาย 5,000x.....	91
ภาพ 67 แสดงภาพ SEM ของเพสต์ CCR-SF ที่อัตราส่วน Ca/Si -0.95 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน ด้วย (a) กำลังขยาย 1,000x (b) กำลังขยาย 5,000x , ระยะเวลาบ่ม 28 วันด้วย (c) กำลังขยาย 1,000x (d) กำลังขยาย 5,000x , ระยะเวลาบ่ม 56 วันด้วย (e) กำลังขยาย 1,000x และ (f) กำลังขยาย 5,000x.....	93
ภาพ 68 แสดงภาพ SEM ของเพสต์ CCR-SF ที่อัตราส่วน Ca/Si -0.65 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน ด้วย (a) กำลังขยาย 1,000x (b) กำลังขยาย 5,000x , ระยะเวลาบ่ม 28 วันด้วย (c) กำลังขยาย 1,000x (d) กำลังขยาย 5,000x , ระยะเวลาบ่ม 56 วันด้วย (e) กำลังขยาย 1,000x และ (f) กำลังขยาย 5,000x.....	95
ภาพ 69 แสดงค่า unconfined compressive strength ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯที่ปรับปรุงวัสดุเชื่อมประสาน CCR-SF และซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	97
ภาพ 70 แสดงการพัฒนาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นซีแคนต์ (E_{50}) ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯที่ปรับปรุงด้วยวัสดุเชื่อมประสาน CCR-SF อัตราส่วน Ca/Si -1.55 และซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน.....	98

บทที่ 1

บทนำ

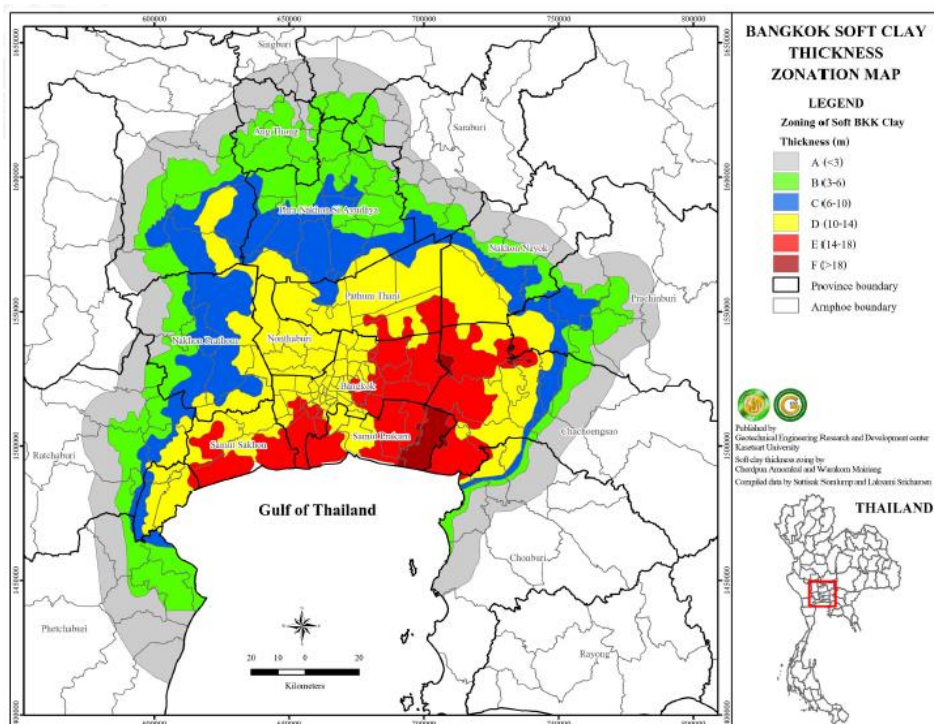
1.1 ความเป็นมาของปัญหา

ดินเหนียวกรุงเทพฯ ซึ่งเป็นชั้นดินบนสุดของโครงสร้างทางธรณีวิทยาที่ราบภาคกลางตอนล่างในประเทศไทย ซึ่งตั้งอยู่บริเวณอ่าวไทยตอนบน ซึ่งเกิดจากการท่วมของระดับน้ำทะเลในยุคโฮโลซีน (Holocene) เมื่อประมาณ 8,000 ปีก่อนจนมาถึงจุดสูงสุดที่ประมาณ 6,000 ปีก่อน คือปัจจัยสำคัญที่สุดของการสร้างลักษณะภูมิประเทศ การสะสมตะกอนอย่างรวดเร็วบริเวณแม่น้ำเจ้าพระยาที่มีปฏิสัมพันธ์กับน้ำทะเลก่อให้เกิดการชะลอตัวของตะกอนจำนวนมากทำให้เกิดพื้นที่สามเหลี่ยมปากแม่น้ำขนาดใหญ่ ซึ่งพื้นที่สามเหลี่ยมนี้ประกอบด้วยดินเหนียวทะเล (Marine clay) หรือดินเหนียวกรุงเทพฯ (Bangkok clay) ภายใต้ที่ราบน้ำทะเลและน้ำกร่อยขยายไปทางทิศเหนือ



ภาพ 1 ชั้นดินย่อยทั่วไปของดินเหนียวกรุงเทพฯ [1]

โดยดินเหนียวกรุงเทพฯ มีลักษณะสีเทาและเทาอมเขียว มีแร่ดินเหนียวประกอบด้วยมอนต์โมริลโลไนต์ (Montmorillonite) ประมาณ 60%, เคโอลิไนต์ (Kaolinite) ประมาณ 25% และอิลไลต์ (Illite) ประมาณ 15% จัดเป็นดินเหนียวประเภทที่มีการขยายตัวสูง มีค่าขีดจำกัดเหลวและความไวกว้าง ซึ่งการบีบอัดตัวของดินเหนียวกรุงเทพฯ จะขึ้นอยู่กับแร่ดินเหนียว เช่นเดียวกับค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid limit) ที่สูงการบีบอัดตัวก็จะสูงเช่นเดียวกัน ให้เกิดการทรุดตัวและมีกำลังรับแรงเฉือนต่ำโดยธรรมชาติอยู่ในช่วง 0.6 – 1.5 ตันต่อลูกบาศก์เมตร ทำให้ในงานก่อสร้างที่มีสภาพดินเป็นดินเหนียวอ่อนหรือดินเหนียวกรุงเทพฯ ต้องใช้กระบวนการปรับปรุงคุณภาพของดิน [1]



ภาพ 2 แผนที่ความหนาของของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ [2]

การปรับปรุงคุณภาพดินสามารถทำได้หลายวิธี สามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทกว้างๆ วิธีการแรกคือการปรับปรุงคุณภาพดินเชิงกล (Mechanical stabilization) ด้วยกระบวนการปรับเปลี่ยนลักษณะทางกายภาพของอนุภาคดินด้วยการให้พลังงานจากการสั่นสะเทือน (Vibration) และการบดอัด (Compaction) อีกวิธีการหนึ่งคือการปรับปรุงคุณภาพดินเชิงเคมี (Chemical stabilization) ซึ่งวิธีนี้ส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างวัสดุปรับปรุงคุณภาพ (Stabilizer) หรือวัสดุเชื่อมประสาน (Cementitious material) และองค์ประกอบทางแร่ในดิน (Soil minerals) [3]

โดยทั่วไปมีการนำซีเมนต์มาผสมเพิ่มเข้าไปในดินเหนียวเพื่อปรับปรุงและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียว อย่างไรก็ตามส่งผลต่อต้นทุนการก่อสร้างที่สูงขึ้น รวมถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทางอ้อมในด้านการบริโภคซีเมนต์ปัจจุบันในประเทศ [4, 5] เพื่อให้สอดคล้องกับการใช้วัสดุในงานก่อสร้างที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมให้มากขึ้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งไปที่การนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) กับซิลิกาฟุ้ง (Silica fume, SF) เพื่อเป็นวัสดุเชื่อมประสานแทนที่ใช้ซีเมนต์ เนื่องจากวัสดุทั้งสองที่กล่าวมาความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction) เกิดผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate, C-S-H) ที่เป็นผลิตภัณฑ์หลักที่มีคุณสมบัติให้กำลังรับแรงอัดในส่วนผสมคล้ายกับในปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์

Chai Jaturapitakkul และคณะ [6] ได้ศึกษาวัสดุเชื่อมประสานจากการใช้ประโยชน์กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) และเถ้าแกลบ (Rice husk ash, RHA) ซึ่งเถ้าแกลบเป็นผลพลอยได้จากการเผาแกลบข้าวโดยมีองค์ประกอบทางเคมีเป็นแหล่งให้ซิลิกา (SiO_2) ที่สูงถึง 78.22% และกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เท่ากับ 51.94% โดยทำการออกแบบมอร์ตาร์ที่มีสัดส่วนระหว่าง CCR : RHA เท่ากับ 20 : 80 (20C80R), 35 : 65 (35C65R), 50 : 50 (50C50R), 65 : 35 (65C35R) และ 80 : 20 (80C20R) พบว่าค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ขึ้นอยู่กับสัดส่วนใช้ผสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) และเถ้าแกลบ (Rice husk ash, RHA) ซึ่งมอร์ตาร์ที่มีสัดส่วนผสมระหว่าง CCR : RHA (50C50R) ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 15.6 MPa และ 19.1 MPa ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วันและ 180 วันตามลำดับ

Chaiyanunt Rattanasotinunt และคณะ [7] ได้นำกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) ที่มีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์สูงและเถ้าขานอ้อย (Bagasse ash, BA) ที่เป็นวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan material) ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่ให้ผลิตภัณฑ์คล้ายกับผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์มาใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานแทนที่ซีเมนต์ในคอนกรีต โดยพบว่าส่วนผสมมอร์ตาร์ที่เหมาะสมคือส่วนผสมที่ใช้สัดส่วนระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) และเถ้าขานอ้อย (Bagasse ash, BA) เท่ากับ 50:50 โดยน้ำหนัก เนื่องจากให้ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์สูงสุดเท่ากับ 4.9 MPa ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน และ 12.5 MPa ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

Songsuda Vichan และคณะ [8] ได้ปรับปรุงดินเหนียวกรุงเทพฯด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) และเถ้าชีวมวล (Biomass ash, BA) โดยอัตราการผสมของวัสดุ CCR : BA เท่ากับ 60:40 เป็นการผสมที่เหมาะสมสำหรับปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯจากปริมาณของวัสดุเชื่อมประสานต่อดินเหนียวที่ 5-15% กำลังของดินเหนียวมีการเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนจากค่า Unconfined compressive strength ของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพโดยวิธี Unconfined compression test ซึ่งปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดขึ้นเมื่อกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) ทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอลูมินาที่ละลายจากดินเหนียวและเถ้าชีวมวล (Biomass ash, BA) เมื่อปริมาณผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาปอซโซลานิกเพิ่มสูงขึ้นทำให้เกิดพันธะระหว่างอนุภาคดินเหนียวและผลทดสอบทางโครงสร้างจุลภาคบ่งชี้ว่าโครงสร้างผลึกที่มีความหนาแน่นเกิดขึ้นจากผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาปอซโซลานิกเติมช่องว่างส่งผลให้คุณสมบัติทางวิศวกรรมเพิ่มขึ้น

ถึงแม้ว่าในปัจจุบันมีงานวิจัยจำนวนหนึ่งศึกษาการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) และวัสดุปอซโซลานิกที่มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction) ให้ผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ที่มีลักษณะเหมือนกับ

ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสานเพื่อปรับปรุงคุณภาพของดิน โดยการออกแบบสัดส่วนผสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) และวัสดุปอซโซลาน (CCR : Pozzolan Material) ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันเพื่อวิเคราะห์การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของวัสดุเชื่อมประสานจากค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์หรือในด้านการใช้เป็นวัสดุปรับปรุงค่า Unconfined compressive strength ของดิน แต่ถ้าหากพิจารณาสมการทางเคมีของการเกิดผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate, C-S-H) ในสมการที่ 1.1 [9]



จากสมการ 1.1 มวลอะตอมของสารตั้งต้นที่ทำปฏิกิริยากันระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) 222 ส่วนต่อซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) 120 ส่วน คิดเป็นอัตราส่วนระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์และซิลิกอนไดออกไซด์เท่ากับ 1.85 เพื่อทำให้เกิดผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่มีมวลอะตอมเท่ากับ 342 ซึ่งในงานวิจัยที่ศึกษาค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) และวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan Material) มีอัตราส่วนระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์และซิลิกาออกไซด์ของส่วนผสมที่ให้ค่ากำลังอัดมอร์ตาร์สูงสุดไม่สอดคล้องกับสมการที่ 1.1 [6, 7] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษ้อัตราส่วนผสมโดยยึดสมการที่ 1.1 เป็นหลักในการออกแบบส่วนผสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) และซิลิกาฟุ้ง (Silica fume, SF) โดยศึกษาคุณสมบัติของวัสดุเชิงลึกเพื่อใช้ในการออกแบบส่วนผสม ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของเพสต์และศึกษาค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ให้กำลังอัดสูงสุดและโครงสร้างทางจุลภาคของเพสต์เพื่อพิจารณาความเกี่ยวข้องระหว่างอัตราส่วนของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) จากสมการการเกิดปฏิกิริยาของทั้งสองวัสดุ นอกจากนี้ยังเป็นการนำวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์ในด้านงานก่อสร้างและแทนที่ซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยกระบวนการเชิงเคมี (Chemical stabilization)

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างจุลภาคของวัสดุกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) และซิลิกาฟุ้ง (Silica fume) รวมทั้งสารเชื่อมประสานที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์-ซิลิกาฟุ้ง
2. ศึกษาผลของอัตราส่วนกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อซิลิกาฟุ้ง (CCR/SF) จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดของมอร์ตาร์

3. ศึกษาอิทธิพลของวัสดุกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อซิลิกาฟูม (CCR/SF) ต่อการเป็นวัสดุเชื่อมประสานเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างจุลภาคของวัสดุกากแคลเซียมคาร์ไบด์และซิลิกาฟูมรวมทั้งสารเชื่อมประสานที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์-ซิลิกาฟูม

2. ทราบผลของอัตราส่วนของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อซิลิกาฟูม (CCR/SF) ต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดของมอร์ตาร์

3. ทราบถึงอิทธิพลของวัสดุกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อซิลิกาฟูม (CCR/SF) ที่เหมาะสมนำมาแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในสัดส่วนต่างๆต่อการเปลี่ยนแปลงค่า Unconfined compressive strength ของดินเหนียวกรุงเทพ

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างจุลภาคของวัสดุกากแคลเซียมคาร์ไบด์และซิลิกาฟูมรวมทั้งสารเชื่อมประสานที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์-ซิลิกาฟูมด้วยเทคนิคเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray Fluorescence, XRF), เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสี (X-ray Diffractometer, XRD) , กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) และเทคนิคการวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเชิงความร้อน (Thermogravimetric Analysis, TGA)

2. ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อซิลิกาฟูม (CCR/SF) จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดของเพสต์ซีเมนต์และมอร์ตาร์ซีเมนต์ที่สัดส่วน CaO : SiO₂ เท่ากับ 1.85, 1.55, 1.25, 0.95, 0.65

3. ทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ระยะเวลา 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน พร้อมทั้งศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างที่ระยะเวลาบ่ม 7, 28, 56 และ 91 วัน

4. ทดสอบหาค่า Unconfined compressive strength ของดินที่ปรับปรุงจากสัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อซิลิกาฟูม (CCR/SF) ในปริมาณร้อยละ 10%, 15%, 20%, 25% และ 30% โดยน้ำหนักแห้งของดินที่ระยะเวลา 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์

ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Ordinary Portland cement) เกิดขึ้นจากการผสมร้อนระหว่างหินปูน (Limestone) และดินเหนียว (Clay) หรือวัสดุอื่น ๆ ที่มีองค์ประกอบคล้ายกันและมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาที่เพียงพอ

2.1.1 สารประกอบหลักในซีเมนต์

สารประกอบหลักที่สำคัญแท้จริงมี 4 ตัว แต่อาจรวมถึงอีกหนึ่งสารประกอบหลักนั่นคือยิปซั่ม (Gypsum, CSH_2) ทั้งนี้ปริมาณของสารประกอบหลักขึ้นอยู่กับปริมาณของวัสดุพื้นฐานที่แต่ละโรงงานใช้ใช้สร้างเม็ดปูน ดังตารางที่ 2.2 โดยใช้สัญลักษณ์ย่อโดยนักเคมีซีเมนต์ที่อธิบายแต่ละออกไซด์แต่ละตัว เช่น $CaO = C$, $SiO_2 = S$, $Al_2O_3 = A$, $Fe_2O_3 = F$, $SO_3 = \bar{S}$ และ H_2O ในปฏิกิริยาไฮเดรชันซีเมนต์แสดงโดยใช้ H

ตาราง 1 แสดงชื่อย่อของสารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [10]

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียมซิลิเกต	$3CaO \cdot SiO_2$	C_3S
ไดแคลเซียมซิลิเกต	$2CaO \cdot SiO_2$	C_2S
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต	$3CaO \cdot Al_2O_3$	C_3A
เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	C_4AF

นอกจากนี้ ยังมีสารประกอบอื่น ๆ ที่ได้จากการเผา เช่น MgO , Na_2O , TiO_2 , Mn_2O_3 และ K_2O ซึ่งปะปนอยู่เป็นจำนวนน้อย เมื่อเทียบกับน้ำหนักของปูนซีเมนต์

ตาราง 2 แสดงปริมาณเฟสของสารประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [11]

Cement type	Average composition (%)				Total
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	
I	55	20	12	9	96
II	45	30	7	12	94
III	65	10	12	8	95
IV	25	50	5	13	93
V	40	35	3	14	92

* เปอร์เซ็นต์รวมไม่เท่ากับ 100 เนื่องจากไม่รวมสารประกอบอื่นๆ เช่น แคลเซียมซัลเฟต (Ca(SO)₄), แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO), อัลคาไลซัลเฟต, ฯลฯ

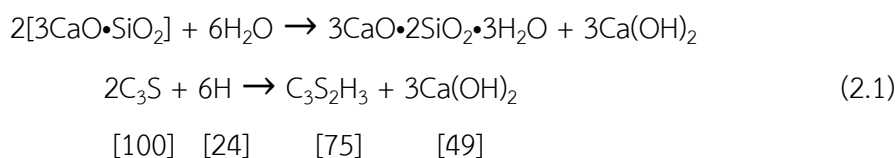
2.1.2 สารประกอบรองในซีเมนต์

นอกจากสารประกอบหลักทั้ง 4 (+1) แล้ว ซีเมนต์ยังประกอบด้วยสารประกอบรอง (Minor compounds) ซึ่งมีอยู่ประมาณ 2-3% เช่น แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) รวมถึง (K₂O) และ (Na₂O) ซึ่งมีฤทธิ์เป็นด่าง (Alkalis) ซึ่งมีประเด็นน้อยกว่า K₂O และ Na₂O มักไปทำปฏิกิริยากับมวลรวมบางชนิด ก่อให้เกิดการขยายตัว/แตกร้าว ที่เรียกว่าปฏิกิริยาระหว่างด่างและมวลรวม (Alkali-Aggregate Reaction, AAR) ได้ [10]

2.1.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ (Hydration of cement)

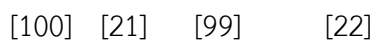
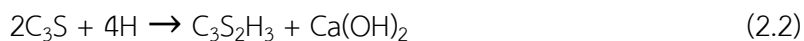
ผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C₃S มีโครงสร้างผลึกเป็น C₃S₂H₃ กับส่วนที่แยกตัวออกมาเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) โดยที่ C₂S มีลักษณะเดียวกันแต่ปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) น้อยลงอย่างชัดเจน ในปัจจุบันแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตได้อธิบายเป็น C-S-H (ก่อนหน้ามีการอ้างว่าเป็นเจล tobermorite) โดยอธิบายปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ดังนี้ [12]

สำหรับ C₃S



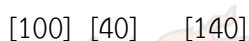
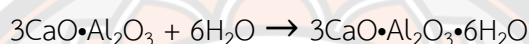
สำหรับ C₂S



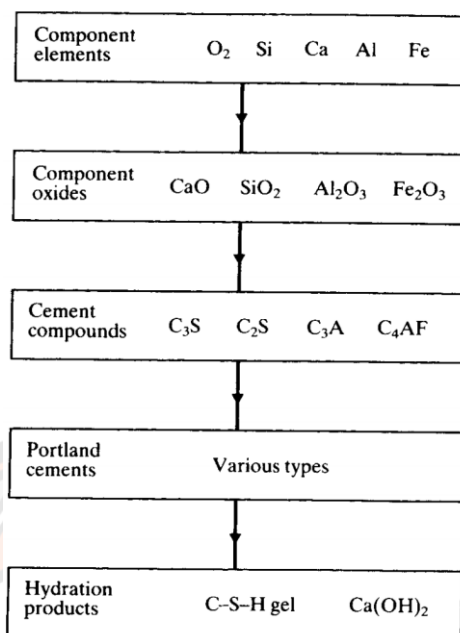


เลขในปีกกาสี่เหลี่ยมเป็นมวลที่สอดคล้องกันและบนพื้นฐานนี้ของซิลิเกตทั้งสอง (C_3S และ C_2S) ปริมาณน้ำที่ต้องการโดยประมาณเท่ากันสำหรับปฏิกิริยาไฮเดรชัน เพียงแต่ C_3S ทำให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ได้มากกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_2S ถึง 2 เท่า

ปริมาณของ C_3A ในซีเมนต์ส่วนใหญ่มีค่อนข้างน้อย ผลกระทบปฏิกิริยาไฮเดรชันมีโครงสร้างผลึกทรงลูกบาศก์ (Cubic crystalline) โดยมีแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตก่อตัวล้อมรอบ ปฏิกิริยาของ C_3A กับน้ำนั้นรวดเร็วมากจึงนำไปสู่การเกิด flash set ซึ่งสามารถป้องกันโดยการเติมยิปซัม ($Gypsum, CSH_2$) ในเม็ดปูนซีเมนต์ สามารถแสดงปฏิกิริยาได้ดังนี้



มวลอะตอมภายในวงเล็บเหลี่ยมแสดงให้เห็นถึงสัดส่วนปริมาณน้ำที่ต้องการสำหรับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันสูงกว่าของซิลิเกต ในขั้นตอนการสรุปรูปแบบการก่อตัวและปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ได้แสดงดังภาพ 3



ภาพ 3 แผนผังแสดงการก่อตัวและปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [12]

2.2 แคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR)

กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตก๊าซอะเซทิลีน (acetylene gas) ซึ่งเป็นก๊าซที่ใช้กันทั่วโลกไม่ว่าจะเป็นงานแสงสว่าง งานเชื่อมหรือตัดโลหะเป็นต้น โดยกากแคลเซียมคาร์ไบด์เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมคาร์ไบด์ (CaC_2) กับน้ำ (H_2O) ก่อให้เกิดก๊าซอะเซทิลีน (C_2H_2) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ดังสมการต่อไปนี้



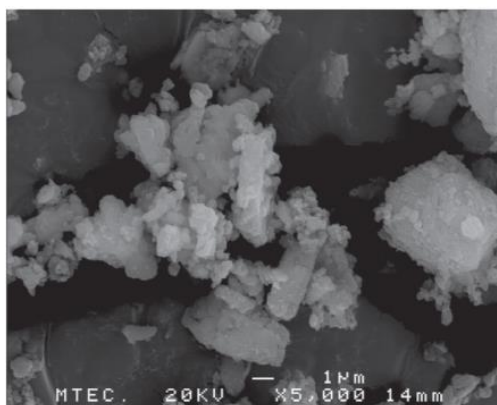
กากแคลเซียมคาร์ไบด์ส่วนใหญ่ประกอบด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ในรูปแบบของสารละลาย ในประเทศไทยมีปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่สูง เป็นผลมาจากโรงงานก๊าซอะเซทิลีนที่มีการสะสมกากอยู่ตลอดเวลา จากปี ค.ศ. 2002 ถึง 2007 โรงงานก๊าซอะเซทิลีนได้ผลิตกากแคลเซียมคาร์ไบด์ประมาณ 1,000 ตัน/เดือน หรือประมาณ 12,000 ตัน/ปี และมีการนำกากเหล่านี้ไปใช้ได้น้อยมาก ด้วยเหตุนี้กากส่วนใหญ่จะถูกฝังกลบทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม เช่น ฝุ่นละอองและความเป็นด่างสูงของพื้นที่ที่นำกากไปกำจัด [13]



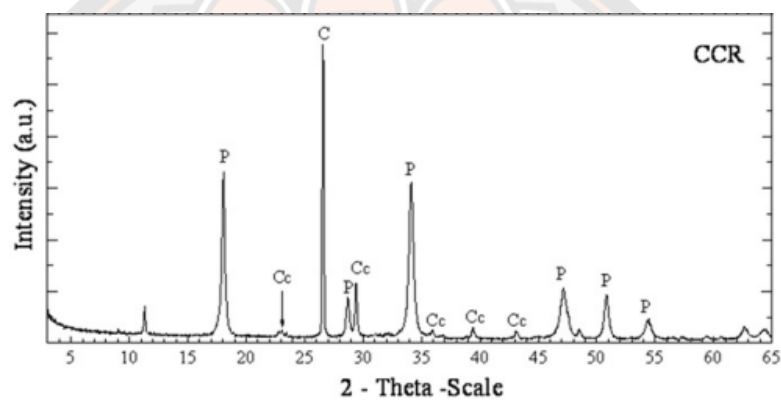
ภาพ 4 พื้นที่กำจัดของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ [13]

นอกจากนี้ Songsuda Vichan และคณะ [8] ยังอธิบายการเกิดผลิตภัณฑ์ของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) ดังนี้ $\text{CaC}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_2\text{H}_2 + \text{Ca(OH)}_2$ ซึ่งแคลเซียมคาร์ไบด์ (CaC_2) 64 g ให้แก๊สอะเซทิลีน (C_2H_2) 26 g และแคลเซียมคาร์ไบด์ที่อยู่ในรูปแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) เมื่อเปรียบเทียบกับปูนขาว (Hydrate lime) กับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) ที่มีองค์ประกอบทางเคมีและองค์ประกอบทางแร่เหมือนกันไว้ แต่การมีคาร์บอนในกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) (ประมาณ 2%) ซึ่งบทบาทของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) และปูนขาว (Hydrate lime) ในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวคล้ายคลึงกัน

Songsuda Vichan และคณะ [14] ได้ทำการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning electron microscope, SEM) และเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffracton, XRD) ดังภาพ 5 และภาพ 6 ตามลำดับ พบว่าเฟสหลักของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) ที่มีความเป็นผลึกคือพอร์ตแลนด์ไธท์ (Portlandite) แคลไซต์ (Calcite, CaCO_3) และคาร์บอน (Carbon)



ภาพ 5 SEM ของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า [14]



ภาพ 6 รูปแบบ XRD ของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) (C:Carbon , Cc:Calcite, P:Portlandite, Cr:Cristobolite และ Q:Quartz) [14]

2.3 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan Material)

ปอซโซลาน (Pozzolan) เป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์หรือคอนกรีต โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนของคอนกรีตหรือเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น โดยวัสดุปอซโซลานที่ใช้กันและมีอยู่ในประเทศไทยมาก ได้แก่ เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ ซิลิกาฟุ่ม ตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น [15]

2.3.1 ซิลิกาฟุ่ม (Silica Fume)

ซิลิกาฟุ่ม (Silica fume) หรือไมโครซิลิกา (Microsilica) เป็นวัสดุปอซโซลานที่มนุษย์สร้างขึ้นชนิดหนึ่งที่มีศักยภาพในอุตสาหกรรมคอนกรีต อนุภาคของซิลิกาฟุ่มมีความละเอียดสูงจนสามารถประมาณได้ว่าเป็นอนุภาคของแข็งที่ลอยอยู่ภายในฝุ่นควีน บางครั้งถูกเรียกว่าไมโครซิลิกา

(Microsilica) และซิลิกาควบแน่น (Condensed silica fume) ซึ่งซิลิกาฟุ้ง (Silica fume, SF) เป็นผลพลอยได้ของโรงงานผลิตซิลิกอนเมทัล (Silicon metal) และเฟอร์โรซิลิกอนอัลลอยด์ (Ferrosilicon alloy) ด้วยเตาอาร์คไฟฟ้า (Electric arc furnace) ที่อุณหภูมิสูงถึง 2,000 องศาเซลเซียส เป็นกระบวนการรีดักชัน (Reduction) จากควอร์ต (Quartz, SiO₂) ไปเป็นซิลิกอนและก๊าซซิลิกอนมอนออกไซด์ ซึ่งต่อมากจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (Oxygen, O₂) ภายในอากาศดังสมการที่ 2.5a - 2.5c ต่อไปนี้



เนื่องจากขนาดที่เล็กมากของซิลิกาฟุ้งทำให้ต้องแยกซิลิกาฟุ้งออกจากก๊าซเหลือทิ้งด้วยอุปกรณ์เก็บฝุ่นที่มีความซับซ้อน โดยที่ขนาดอนุภาคเล็กมากประมาณหนึ่งในร้อยของขนาดอนุภาคซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และไม่เป็นผลึก รูปทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคซิลิกาฟุ้งประมาณ 0.1 ไมโครเมตร มีองค์ประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์ถึง 86 - 98% และเนื่องจากมีความละเอียดและปริมาณซิลิกาที่มีความไม่เป็นผลึกสูงจึงเป็นวัสดุพิษโซลานที่มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาได้สูง [11]

2.3.1.1 องค์ประกอบทางเคมี

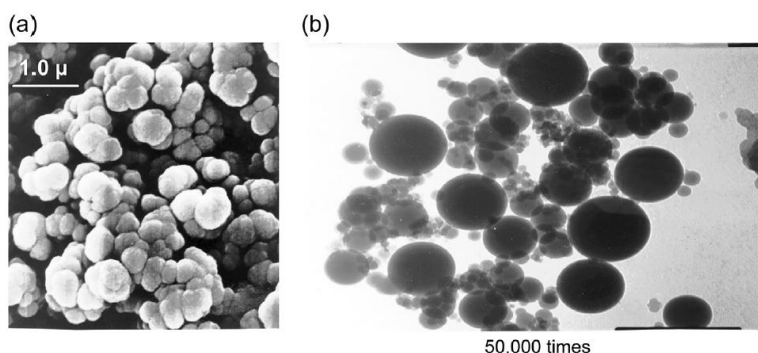
องค์ประกอบหลักทางเคมีของซิลิกาฟุ้งคือ SiO₂ ซึ่งควรจะอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึกเป็นส่วนใหญ่ ซิลิกาฟุ้งที่มีจำหน่ายในท้องตลาดมี SiO₂ มากกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไป ส่วนที่เหลือจะเป็นองค์ประกอบของ Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, K₂O และออกไซด์อื่นๆอีกร้อยละ 1 หรือ 2 ซึ่งออกไซด์เหล่านี้ถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณของ SiO₂ หากนำค่าออกไซด์ของซิลิกาฟุ้งมาเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ ถ้าถ่านหิน ตะกรันเตาถลุงเหล็ก และดินขาวเผา จะพบว่ามีส่วนประกอบที่แตกต่างกันค่อนข้างมากดังแสดงในตารางที่ 3 [15]

ตาราง 3 ตัวอย่างองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของวัสดุประสาน [15]

ออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%)					
	ปูนซีเมนต์ ประเภท 1	เถ้าถ่านหิน แม่เมาะ	ตะกรันเตา ถลุงเหล็ก	ซิลิกาฟุ่ม	เถ้าแกลบ	ดินขาวเผา
SiO ₂	20	48	37	92	90	55
Al ₂ O ₃	5	26	11	0.7	0.5	40
Fe ₂ O ₃	3	10	0.3	1.2	2.0	0.5
CaO	60	5	40	0.2	0.5	-
MgO	1.1	2	7	0.2	0.2	-
SO ₃	2.4	0.7	0.3	-	1.5	-
ออกไซด์อื่นๆ	1.5	1.3	2.3	2.6	-	-
LOI	2	3	-	-	4.7	

2.3.1.2 คุณสมบัติทางกายภาพ

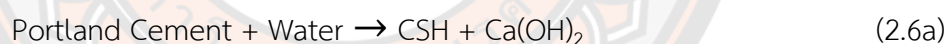
คุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟุ่มที่เห็นชัดเจน คือเป็นฝุ่นผงที่ละเอียดมากสีเทา เทาดำ หรือเทาอมขาว แต่ถ้าเป็นซิลิกาฟุ่มควบแน่นจะมีขนาดของอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นเนื่องจากการรวมตัวของซิลิกาฟุ่มหลายๆอนุภาคเข้าด้วยกัน ความถ่วงจำเพาะของซิลิกาฟุ่มมีค่าประมาณ 2.2 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.1 ไมโครเมตร มีพื้นที่ผิวประมาณ 200,000 ถึง 250,000 ซม²/ก ซึ่งใช้การทดสอบโดยวิธีดูดซับก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen absorption test) และถือว่ามีค่าสูงมาก (ขณะที่เถ้าถ่านหินมีค่าประมาณ 3,000 ถึง 7,000 ซม²/ก ซึ่งทดสอบโดยวิธีเบลน) ขนาดอนุภาคของซิลิกาฟุ่มเป็นขนาดที่เล็กมากเพราะมีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กว่า 15 เท่าเพราะปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 15 ไมโครเมตร เนื่องจากซิลิกาฟุ่มมีขนาดเล็กมากจึงมีปัญหาในการขนย้าย เพื่อแก้ปัญหานี้จึงมีการนำซิลิกาฟุ่มมาอัดรวมกันเพื่อให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเรียกว่าซิลิกาฟุ่มควบแน่นดังแสดงในภาพ 7 [15]



ภาพ 7 รูปถ่ายอนุภาคของซิลิกาฟุ่มควบแน่น [15]

2.3.2 ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction)

เมื่อปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้เกิดผลิตภัณฑ์จำนวนหนึ่งขึ้น แต่มีเพียงสองผลิตภัณฑ์ที่สำคัญที่จะกล่าวถึงคือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate, CSH) โดยที่แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate, CSH) เป็นตัวยึดวัสดุเข้าไว้ด้วยกัน เมื่อมีวัสดุปอซโซลานอยู่ในส่วนผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์จะเกิดปฏิกิริยากับส่วนที่ไม่เป็นผลึก (Active or glassy) ของวัสดุปอซโซลาน ซึ่งสมการเคมีของการก่อตัวของทั้งสองผลิตภัณฑ์สามารถแสดงได้ดังนี้ [15]



Edwin R. Dunstan Jr., และคณะ [9] ได้กล่าวถึงปฏิกิริยาปอซโซลานิก เช่นในคอนกรีตที่มีวัสดุปอซโซลานทำให้สามารถลดปริมาณซีเมนต์ที่ใช้งานโดยที่ยังได้ค่ากำลังอัดที่ต้องการ ซึ่งการลดลงของปริมาณซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกของวัสดุ ซึ่งวัสดุปอซโซลานที่ทำปฏิกิริยาได้สูงจะให้ค่ากำลังเชื่อมประสานที่สูงกว่าวัสดุปอซโซลานที่ทำปฏิกิริยาได้ต่ำ ความหมายของวัสดุปอซโซลานตาม ACI คือวัสดุที่มีความเป็นซิลิกาและอลูมินา โดยมีการทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) เพื่อก่อตัวเป็นสารประกอบที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสานที่อุณหภูมิต่ำไป

ปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่เป็นผลิตภัณฑ์ระหว่างการไฮเดรชันของซีเมนต์ขึ้นอยู่กับปริมาณของเอลิต์ (Alite, C_3S) และเบลิต์ (Belite, C_2S) ในซีเมนต์ แต่ละสารประกอบเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับน้ำเพื่อก่อตัวเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต

(CSH) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) โดยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับบอลูมินาและซัลเฟตที่เป็นส่วนน้อยในซีเมนต์ก่อตัวเป็นสารประกอบเช่น ettringite ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$) ดังนั้นไม่ใช่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ทั้งหมดที่จะทำปฏิกิริยากับวัสดุปอซโซลาน

ผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันที่โดดเด่นสำหรับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และปฏิกิริยาของวัสดุปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันเช่นเดียวกับในซีเมนต์สามารถพิจารณาดังสมการต่อไปนี้



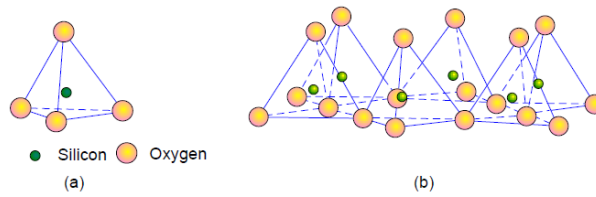
มวลอะตอมของ 3Ca(OH)_2 เท่ากับ 222 และมวลอะตอมของ 2SiO_2 เท่ากับ 120 ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ $3(\text{CaO})\cdot 2(\text{SiO}_2)\cdot 3(\text{H}_2\text{O})$ ซึ่งมีมวลอะตอมเท่ากับ 342 ในปฏิกิริยานี้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) 222 ส่วน จะทำปฏิกิริยากับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) 120 ส่วน เมื่อคิดเป็นอัตราส่วนระหว่างมวลอะตอมของแคลเซียมไฮดรอกไซด์และซิลิกอนไดออกไซด์จะเท่ากับ $222/120 = 1.85$ ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าค่าที่เกิดขึ้นในผลรายงานจะอยู่ในช่วงประมาณ 0.20 ถึง 1.0 อย่างไรก็ตามค่าในผลรายงานขึ้นอยู่กับมวลรวม (Total mass) ของวัสดุปอซโซลานซึ่งรวมส่วนที่ทำปฏิกิริยาและส่วนที่เฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยา [9]

2.4 ดินเหนียว

แร่ดินเหนียวเป็นผลจากกระบวนการผุพังทางเคมี (Chemical Weathering) ซึ่งเม็ดดินจะเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก มีขนาดไม่เกิน 0.002 มิลลิเมตร หรืออาจเล็กกว่านี้มาก ส่วนใหญ่จะมีรูปร่างเป็นแผ่นบาง (Flat plates), เข็ม (Needles), ท่อ (Tubes) หรือ แท่ง (Rods) หรือในบางครั้งก็เป็นเพียงชิ้นส่วนที่มีความหนาไม่กี่ไมโครเมตร แร่ดินเหนียวส่วนใหญ่จะมีการจัดเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งก่อให้เกิดเป็นโครงผลึก ซึ่งความหนาของผลึกอาจเล็กถึง 15 อังสตรอม และความกว้างอยู่ในระดับไมครอน ดังนั้นในการจำแนกจึงใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffracton, XRD) ในการจำแนกผลึกพื้นฐาน แร่ดินเหนียวนั้นเป็นองค์ประกอบ Aluminum silicates ซึ่งประกอบด้วยหน่วยย่อยพื้นฐานได้แก่ Silica tetrahedron และ Alumina octahedron [16]

2.4.1 Silica Tetrahedron

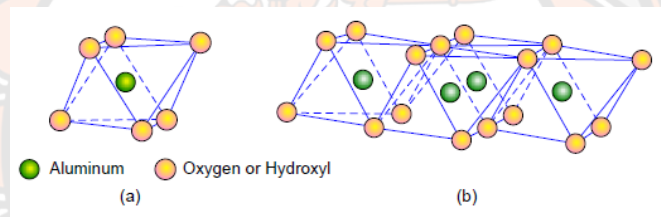
แต่ละหน่วยของ Tetrahedron จะประกอบด้วย Oxygen 4 อะตอม อยู่รอบ ๆ Silicon 1 อะตอม ถ้านำเอาแต่ละหน่วยมาประกอบกันจะเรียกว่า Silica Sheet



ภาพ 8 การจัดเรียงตัวของ Silica tetrahedron (a) แบบหน่วยเดี่ยว (b) หลากหลายหน่วยเกาะกลุ่มกันเป็นแผ่น Silica [16]

2.4.2 Alumina Octahedron

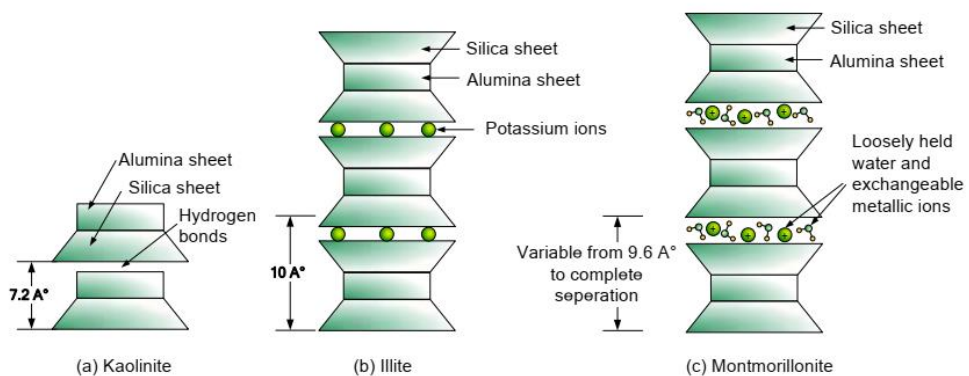
หน่วยของ Octahedron ประกอบด้วย hydroxyl 6 ตัวรอบ ๆ Aluminum 1 อะตอม ถ้ามี Aluminum hydroxyl หลาก หลายหน่วยมารวมกันจะกลายเป็น octahedral sheets (อาจเรียกว่า Gibbsite sheet) ถ้าแทนอะตอมของ Aluminum ด้วยอะตอมของ Magnesium ใน Octahedron unit จะเรียกว่า Brucite sheet



ภาพ 9 การจัดเรียงตัวของ Alumina Octahedron (a) แบบหน่วยเดี่ยว (b) หลากหลายหน่วยเกาะกลุ่มกันเป็นแผ่น [16]

2.4.3 แร่ดินเหนียว

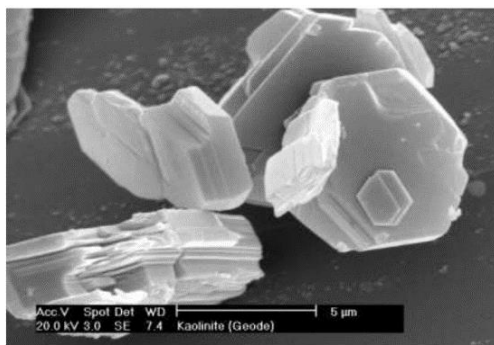
แร่ดินเหนียวจะประกอบไปด้วย Basic sheet structure มาเรียงซ้อนกันโดยมีพันธะการเชื่อมประสาน (Bonding) ต่างกันไปในแร่ดินเหนียวแต่ละชนิด แร่ดินเหนียวที่พบส่วนใหญ่มีดังต่อไปนี้



ภาพ 10 โครงสร้างของ (a) เกาลินไนท์ (b) อิลไลต์ และ (c) มอนต์โมริลโลไนต์ [16]

2.4.3.1 เกาลินไนท์ (Kaolinite)

สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเกาลินไนท์ (Kaolinite) นั้นจะประกอบด้วย Silica tetrahedron 1 แผ่นและ Alumina Octahedron 1 แผ่น และยึดไว้ด้วยพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding) ดังภาพ 10 แร่เกาลินไนท์ (Kaolinite) มีความคงตัวมาก การเรียงตัวอาจมีการเรียงซ้อนกันมากกว่า 100 ชั้น



ภาพ 11 เม็ดดินเกาลินไนท์ (Kaolinite) ขนาดประมาณ 6 ไมครอน (เล็กกว่าเหรียญบาทประมาณ 3,333 เท่า) [16]

2.4.3.2 อิลไลต์ (Illite)

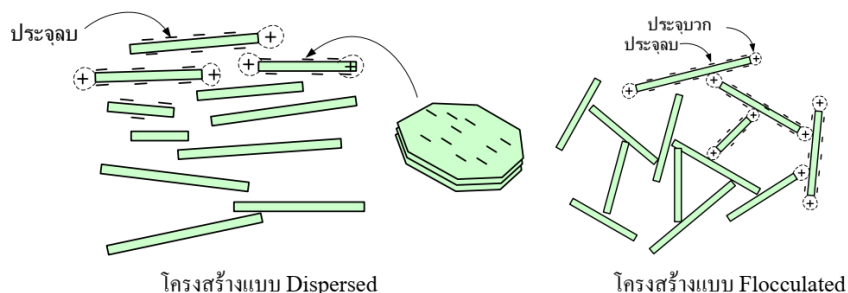
โครงสร้างพื้นฐานประกอบด้วย Alumina octahedral 1 แผ่นประกบด้วย Silica tetrahedron 2 แผ่น ดังภาพ 10 ใน Octahedral sheet อะตอมของแมกนีเซียม (Magnesium) และเหล็กจะมาแทนที่อะตอมอลูมิเนียม (Aluminum) บางส่วน ส่วนใน Tetrahedron sheet อะตอมของอลูมิเนียม (Aluminum) จะแทนที่อะตอม Silicon บางส่วนเช่นกัน ระหว่างชุดของโครงสร้างพื้นฐานจะยึดไว้ด้วยกัน ด้วยแรงยึดเหนี่ยวที่ไม่แข็งแรงนักจากอะตอมของโพแทสเซียม (Potassium) (Non-exchangeable)

2.4.3.3 มอนต์โมริลโลไนต์ (Montmorillonite)

โครงสร้างพื้นฐานจะเหมือนกับอิลไลต์ (Illite) แต่อะตอมของแมกนีเซียม (Magnesium) จะแทนที่อะตอมของอลูมิเนียม (Aluminum) บางส่วนของ Octahedral sheet ระหว่างโครงสร้างพื้นฐานจะมีโมเลกุลของน้ำและ Exchangeable Cation ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นจะต่ำมากทำให้มีสภาพไม่เสถียร (Unstable) มอนต์โมริลโลไนต์ (Montmorillonite) สามารถดูดน้ำได้มากและทำให้เกิดมีการบวมตัวปริมาณสูง แร่ดินเหนียวชนิดนี้จะรู้จักกันดีในชื่อเบนโทไนท์ (Bentonite) เมื่อนำไปผสมกับน้ำแล้วจะเป็นสารแขวนลอยที่มีความหนืดลักษณะคล้ายน้ำโคลน มีความหนาแน่นสูงซึ่งส่วนใหญ่จะนำไปใช้ในงานก่อสร้างเสาเข็มเจาะ หลุมเจาะสำรวจ โดยจะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ผนังหลุมเจาะพังทลาย [16]

2.4.4 ดินที่มีความเชื่อมแน่น

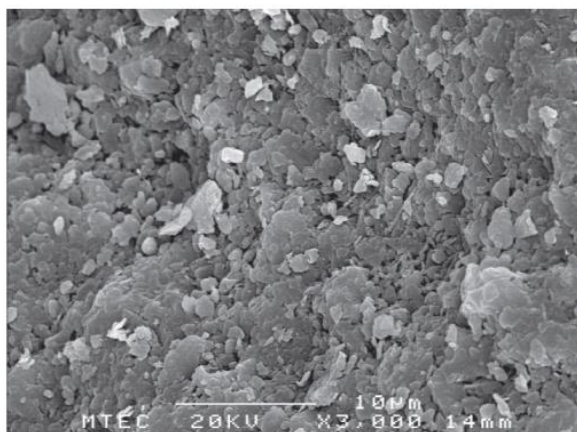
ได้แก่ดินที่มีขนาดเม็ดดินเล็กกว่า 0.074mm เช่นดินเหนียว (Clay) และดินทรายแป้งที่มีสภาพเป็นพลาสติก (Plastic silt) โครงสร้างของดินชนิดนี้จะมีอยู่ 2 ลักษณะดังภาพ 12



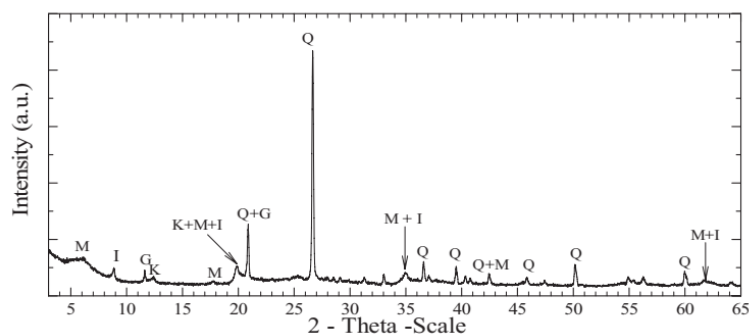
ภาพ 12 แนวคิดของโครงสร้างดินแบบ Dispersed และ Flocculated [16]

โครงสร้างดินที่เป็นแบบ Dispersed นั้นเกิดจากการที่อนุภาคดินเหนียวแขวนลอยอยู่ในน้ำ และมีไอออนบวกที่ล้อมรอบด้วยโมเลกุลของน้ำและมีขนาดโตล้อมรอบอยู่ และเนื่องจากเม็ดดินยังมีประจุลบค้างอยู่เป็นจำนวนมากทำให้เกิดแรงผลักระหว่างเม็ดดินจนทำให้เม็ดดินไม่เกาะกันเป็นอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นและตกตะกอนซึ่งการที่ดินตกตะกอนนี้จะเห็นได้จากการที่น้ำขุ่นเป็นระยะเวลานาน แต่ถ้าขนาดของไอออนบวกที่ล้อมรอบด้วยโมเลกุลของน้ำมีขนาดเล็กจะทำให้อนุภาคดินมีโอกาสเกาะกันได้โดยชอบของเม็ดดินที่มีประจุบวกจะดึงดูดกับ ผิวของเม็ดดินที่มีประจุลบและเมื่อตกตะกอนและทับถมจนเกิดเป็นดินแล้วจะได้ดินที่มีโครงสร้างแบบ Flocculated [16]

Runglawun Rachan และคณะ [8, 17] ได้ทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างทางจุลภาคของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ถ้ำชีวมวลและดินเหนียวกรุงเทพ ซึ่งจากรูปถ่าย SEM พบว่าดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมีรูปร่างลักษณะไม่แน่นอน เกาะกลุ่มและซ้อนเป็นแผ่น รวมถึงเทคนิคการวิเคราะห์ผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสี (X-ray Diffractometer, XRD) พบว่าดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมีองค์ประกอบหลักคือซิลิกา (SiO_2) ในรูปของควอตซ์ (Quartz) และมีแร่ดินเหนียวชนิดกาลินไนท์ (Kaolinite), มอนต์โมริลโลไนต์ (Montmorillonite), อิลไลต์ (Illite) และมีออกไซด์ของ S ในรูปของสารประกอบยิปซัม (Gypsum, CaSO_4) ดังภาพ 13 และภาพ 14 ตามลำดับ

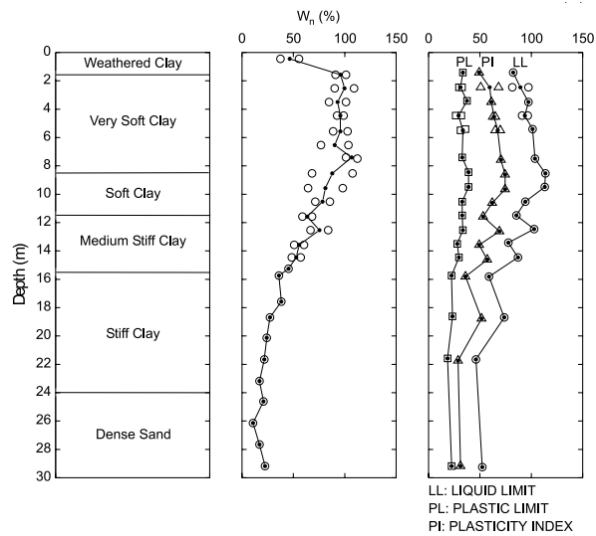


ภาพ 13 SEM ของดินเหนียวกรุงเทพฯที่กำลังขยาย 3000 เท่า [17]



ภาพ 14 ผลการทดสอบดินเหนียวกรุงเทพฯ ด้วยเทคนิค XRD (C = Carbon, Cc = Calcite, Cr = Cristobolite, G = Gypsum, I = Illite, K = Kaolinite, M = Montmorillonite, P =Portlandite, Q = Quartz) [8, 17]

Sayed M. Ahmed และคณะ [18] ได้ศึกษาดินเหนียวที่ได้จากระยะทางประมาณ 30 กิโลเมตรทางตะวันออกของกรุงเทพฯ ลักษณะของดินค่อนข้างสม่ำเสมอประกอบด้วยชั้นดินเหนียวหนา 2 เมตรที่เกิดจากการผุกร่อน (Weathered crust) ทับอยู่บนชั้นของดินเหนียวอ่อน (Soft clay) ถึงอ่อนมาก (Very soft clay) ที่มีความหนาประมาณ 10 เมตร ถัดไปเป็นชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง (Medium stiff clay) ที่มีความหนาประมาณ 4 เมตรและตามด้วยชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) ที่ลึกลงไปถึง 24 เมตรที่ทับอยู่บนชั้นดินทรายแน่น (Dense sand) โดยรูปตัดชั้นดิน (Soil profile) แสดงขีดจำกัดเหลว (Liquid limit, LL) , ขีดจำกัดพลาสติก (Plastic limit, PL), ปริมาณความชื้นตามธรรมชาติ (Natural moisture content, w_n) ดังภาพ 15



ภาพ 15 รูปตัดชั้นดิน (Soil profile) และคุณสมบัติของดินเหนียวกรุงเทพในกรณีศึกษา [19]

K. Uddin และคณะ [20] ได้ทำการศึกษาลักษณะของดินเหนียวกรุงเทพฯที่ได้จากการเจาะสำรวจบริเวณวิทยาเขตของสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (Asian Institute of Technology, AIT) ซึ่งคุณสมบัติทางกายภาพพื้นฐานของดินแสดงดังตาราง 4

ตาราง 4 ลักษณะค่าคุณสมบัติกายภาพพื้นฐานของดิน [20]

PROPERTIES	CHARACTERISTICS VALUES
Liquid Limit, LL, (%)	103
Plastic Limit, PL, (%)	43
Plasticity Index, PI, (%)	60
Water Content, w (%)	76-84
Liquidity Index, LI	0.62
Grain Size Distribution:	
Clay (%)	69
Silt (%)	28
Sand (%)	3
Total Unit Wt., γ_t (kN/m ³)	14.3
Dry Unit Wt., γ_d (kN/m ³)	7.73
Initial Void Ratio, e	2.2
Colour	Dark Gray
Activity	0.87
Sensitivity	7.3

นอกจากนี้ลักษณะของกำลัง-การเสียรูป (Strength-deformation) ของดินเหนียวโดยวิธี Unconfined compression test) ทั้งหมด 5 ตัวอย่าง โดยที่ 3 ตัวอย่างถูกนำมาทดสอบหลังจากเก็บตัวอย่างดินขึ้นมาจาก การเจาะสำรวจทันที อีก 2 ตัวอย่างจะถูกทดสอบภายหลังจากบ่มเป็นระยะเวลา 1 เดือนและ 3 เดือน ดังตาราง 5

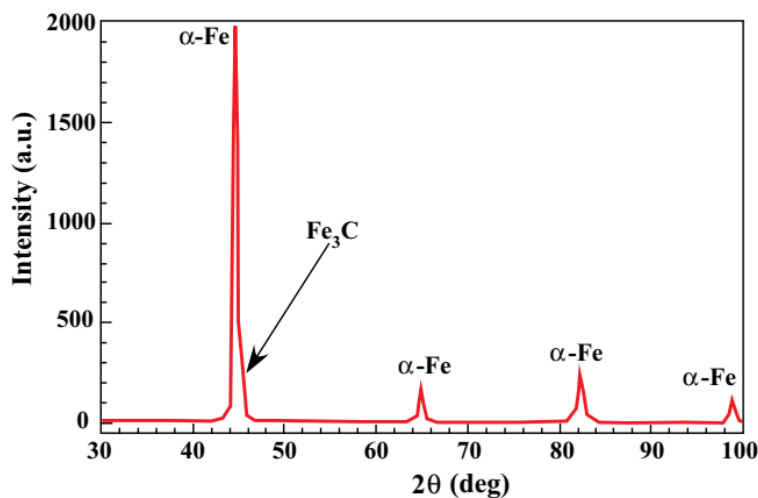
ตาราง 5 สรุปผลการทดสอบ Unconfined compression test ของดิน [20]

Test No.	Type of Sample	Lime Content (%)	Curing Time (week)	Water Content, w_r (%)	Total Unit Weight, γ_t (kN/m ³)	Dry Unit Weight, γ_d (kN/m ³)	E_u (MPa)	S_u (kPa)	Failure Strain, ϵ_r (%)
1	Natural	0	0	84.1	14.3	7.74	1.70	16.8	3.4
2	Natural	0	0	82.3	14.1	7.73	1.55	16.1	4.5
3	Natural	0	0	81.9	14.4	7.91	1.60	16.5	5.2
4	Natural	0	1	82.1	14.5	7.95	1.57	16.9	3.8
5	Natural	0	3	81.9	14.6	8.02	1.61	17.1	3.1

2.5 เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสี (X-ray Diffractometer, XRD)

เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer : XRD) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์วัสดุขั้นพื้นฐาน ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง (Non-destructive analysis) เพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างผลึก การจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่าง ๆ ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอกซ์ และความรู้เกี่ยวกับวิชาระบบโครงสร้างผลึก เครื่องมือชนิดนี้มีความสำคัญมากในกระบวนการควบคุมคุณภาพ การผลิต ใช้สำหรับตรวจสอบสมบัติของวัสดุดิบและผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิตตามขั้นตอนต่าง ๆ ทฤษฎีพื้นฐานของ XRD อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของลำรังสีเอกซ์ เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของลำแสงรังสีที่สะท้อนทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบ ในปี ค.ศ. 1912 นาย W.L.Bragg ได้นำทฤษฎีดังกล่าวมาศึกษาในรูปแบบโครงสร้างผลึกของแร่ต่างๆ ต่อมาได้มีการประดิษฐ์คิดค้น เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ขึ้นในปี ค.ศ. 1948 และมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งสามารถนำคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการทำงาน และวิเคราะห์ประมวลผลเพื่อให้เกิดความรวดเร็วแม่นยำยิ่งขึ้น [21]

การฉายรังสีกระทบไปยังวัตถุอาจเกิดการกระเจิงหรือดูดซับ เมื่อเกิดการกระเจิงแบบอีลาสติกจะไม่มี การสูญเสียพลังงาน และความยาวคลื่นที่กระเจิงจากการฉายรังสีจะยังคงไม่มีการเปลี่ยนแปลง ปกติการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในผลึกที่มีรูปทรง 3 มิติ (Crystal lattice) จะมีปฏิกิริยากับความยาวคลื่นที่สั้นเพียงพอเพื่อให้เกิดการเลี้ยวเบนสเปกตรัม (Diffraction spectrum) ซึ่งความเข้มของรังสีที่กระจายออกไปจากลำแสงตกกระทบจะถูกพล็อตเป็นฟังก์ชันของมุมกระเจิงดังภาพ 16



ภาพ 16 การกระจายสเปกตรัมจากเหล็กที่มีคาร์บอน 0.4% ที่มีพีคสูงสุดเนื่องจาก BCC α -Fe แต่เป็นพีคที่ไม่สมมาตรซึ่งเกี่ยวข้องกับการทับซ้อนกันของพีค Fe_3C [21]

มุมมองของการกระเจิงจะเป็นสองเท่าของมุมการเลี้ยวเบน ทั้งมุมการเลี้ยวเบนและความเข้มของแต่ละการเลี้ยวเบนของรังสีขึ้นเป็นการไวต่อแสงของโครงสร้างผลึก มุมการเลี้ยวเบนจะขึ้นอยู่กับจุดที่แทนตำแหน่งของอนุภาคในผลึก (Bravais lattice point) และขนาดของหน่วยเซลล์ ขณะที่ความเข้มของการเลี้ยวเบนขึ้นอยู่กับเลขอะตอม (Atomic number) ที่เป็นส่วนประกอบของอะตอม (The chemical species) และรูปทรงที่สัมพันธ์กับจุดที่แทนตำแหน่งของอนุภาคในผลึก

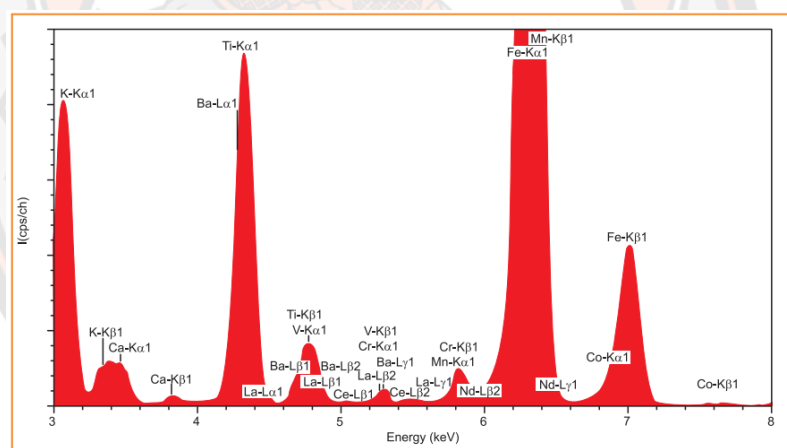
รูปแบบของการเลี้ยวเบนหรือ สเปกตรัมอาจวิเคราะห์ได้ 2 ระดับ โครงสร้างผลึกของวัสดุอาจระบุได้จากการเลี้ยวเบนสเปกตรัมของวัสดุโดยเปรียบเทียบกับมุมเลี้ยวเบนถึงความสอดคล้องกับพีคในสเปกตรัมและการเลี้ยวเบนมีความสัมพันธ์กับการเลี้ยวเบนมาตรฐาน (สำหรับตัวอย่าง, ไฟล์ที่ตรวจวัดจากองค์กร Joint Committee on Powder Diffraction Standard หรือ JCPDS)

ในกระบวนการการเลี้ยวเบนสเปกตรัมถือเป็นลายนิ้วมือ (Fingerprint) ของโครงสร้างผลึก เพื่อที่จะระบุโครงสร้างผลึกอย่างชัดเจนที่สุด หรือการเลี้ยวเบนสเปกตรัมอาจเปรียบเทียบกับค่ามวลสเปกตรัมที่ได้รับจากรูปแบบทางสมมติฐานของโครงสร้างผลึก ขอบเขตการทำนายสเปกตรัมให้พอดีกับข้อมูล ระดับความพอดี เมื่อวัดความเชื่อมั่นรูปแบบที่เลือกเป็นตัวแทนโครงสร้างผลึก โดยทั่วไปการวัดสเปกตรัมใดๆจะถูกเปรียบเทียบกับข้อมูลที่มีอยู่ก่อน แต่ถ้าหากมีความคลาดเคลื่อนอย่างมากกับสเปกตรัมมาตรฐานแล้วอาจจำเป็นต้องหารูปแบบจำลองของโครงสร้างผลึกใหม่เพื่อที่จะอธิบายผลลัพธ์ ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมากระบวนการทางคอมพิวเตอร์ได้พัฒนาขึ้นเพื่อช่วยตีความข้อมูลทางผลึกศาสตร์ซึ่งทำให้ขั้นตอนที่มีความไม่แน่นอนและความยุ่งยากก่อนหน้านี้ถูกกำจัดไป [21]

2.6 เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray Fluorescence XRF)

เป็นวิธีการวิเคราะห์เพื่อหาองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุทุกชนิด วัสดุสามารถเป็นของแข็ง, ของเหลว, ผงหรือรูปแบบอื่นๆ ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบที่รวดเร็วมีความแม่นยำ ไม่ทำลายตัวอย่างและตัวอย่างที่ต้องเตรียมเพื่อทดสอบน้อยมาก การประยุกต์ใช้งานกว้างขวางประกอบด้วยโลหะ, ซีเมนต์, น้ำมัน, โพลีเมอร์, พลาสติกและอุตสาหกรรมอาหาร รวมไปถึงแร่วิทยาและธรณีวิทยา และการวิเคราะห์เกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมเช่น น้ำและกากอุตสาหกรรมต่างๆ [22]

ระบบสเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer system) สามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่มหลักๆ คือระบบ energy dispersive (EDXRF) และระบบ wavelength dispersive systems (WDXRF) องค์ประกอบที่วิเคราะห์ได้และระดับการตรวจจับจะขึ้นอยู่กับระดับของ spectrometer ที่ใช้ ช่วงองค์ประกอบสำหรับระบบ EDXRF เริ่มตั้งแต่โซเดียม (Sodium, Na) ถึงยูเรเนียม (Uranium, U) สำหรับระบบ WDXRF จะมีช่วงองค์ประกอบที่กว้างกว่าตั้งแต่เบริลเลียม (Beryllium, Be) ถึงยูเรเนียม (uranium, U) โดยทั่วไปธาตุที่มีเลขอะตอมสูงจะมีการตรวจจับได้ดีกว่าธาตุที่ค่อนข้างเบา [22]

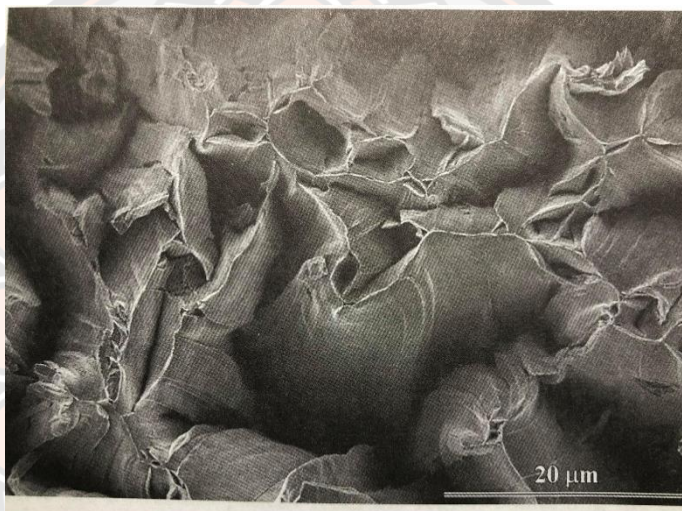


ภาพ 17 แสดงตัวอย่างสเปกตรัมของตัวอย่างดินที่วัดด้วย EDXRF spectrometer [22]

ภาพ 17 แสดงสเปกตรัมของตัวอย่างดินที่วัดด้วยระบบสเปกโตรมิเตอร์แบบ EDXRF ซึ่งจะเห็นพีคได้อย่างชัดเจน ตำแหน่งของพีคเป็นตัวกำหนดธาตุหรือองค์ประกอบที่มีอยู่ในตัวอย่างขณะที่ความสูงของพีคเป็นตัวกำหนดความเข้มข้น โดยภายในเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray Fluorescence XRF) จะมีรังสีเอกซ์ที่เกิดจากแหล่งกำเนิดจะฉายไปยังตัวอย่าง ในกรณีส่วนใหญ่แหล่งกำเนิดจะเป็นหลอดรังสีเอกซ์แต่อาจเป็นซินโครตรอนหรือวัสดุกัมมันตภาพรังสี ธาตุที่อยู่ในตัวอย่างจะเปล่งแสงรังสีเอกซ์ด้วยพลังงานที่ไม่ต่อเนื่อง (เทียบเท่ากับสีในแสงที่สามารถมองเห็น)ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของธาตุเหล่านี้ พลังงานที่ต่างกันก็เท่ากับมีสีที่แตกต่างกัน โดยการวัดพลังงาน (การวัดสี) ที่ปล่อยออกมาจากตัวอย่างทำให้สามารถระบุได้ว่ามีธาตุใดบ้าง [22]

2.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์ให้ภาพที่ใกล้เคียงกับสรีรวิทยาของตาและสมองได้รับ เนื่องจากระยะชัดลึกในแต่ละรายละเอียดที่ได้รับจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) นั้นสูงกว่าความละเอียดจากในมุมของการมองภาพมาก นั้นเป็นวิธีที่ชัดเจนกว่าดวงตาของเราและการมองเห็นแค่เปลือกนอกของเรา จึงต้องวิวัฒนาการเพื่อที่จะรับรู้สามมิติของวัตถุจริง ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) โดยรูปภาพที่ปรากฏมีลักษณะคล้ายกับการเล่นแสงและเงาบนเนินเขาและหุบเขา ซึ่งคุณลักษณะเหล่านี้ของวัตถุจริงมีลักษณะเหมือนโพรงและส่วนที่ยื่นออกมาอย่างชัดเจนดังแสดงภาพ 18 [21]

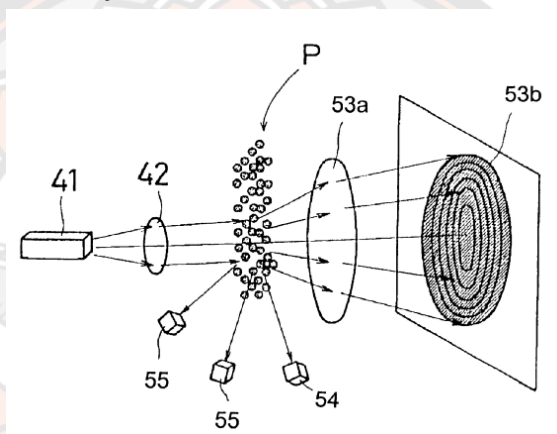


ภาพ 18 Scanning electron micrograph ของการแตกหักแบบเหนียวที่ผิวในโมลิบดีนัม (Molybdenum) [21]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาลักษณะ และรายละเอียดโครงสร้างขนาดเล็กของวัสดุ เนื่องจากมีกำลังขยายสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ทั่วไป ซึ่งการสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่าง นิยมนำมาตรวจสอบลักษณะผิวภายนอกของตัวอย่าง และ ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของตัวอย่าง ซึ่งกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสามารถตรวจสอบการเรียงตัวของผลึกด้วยระบบการรับสัญญาณลิ้นเบนของอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ [21]

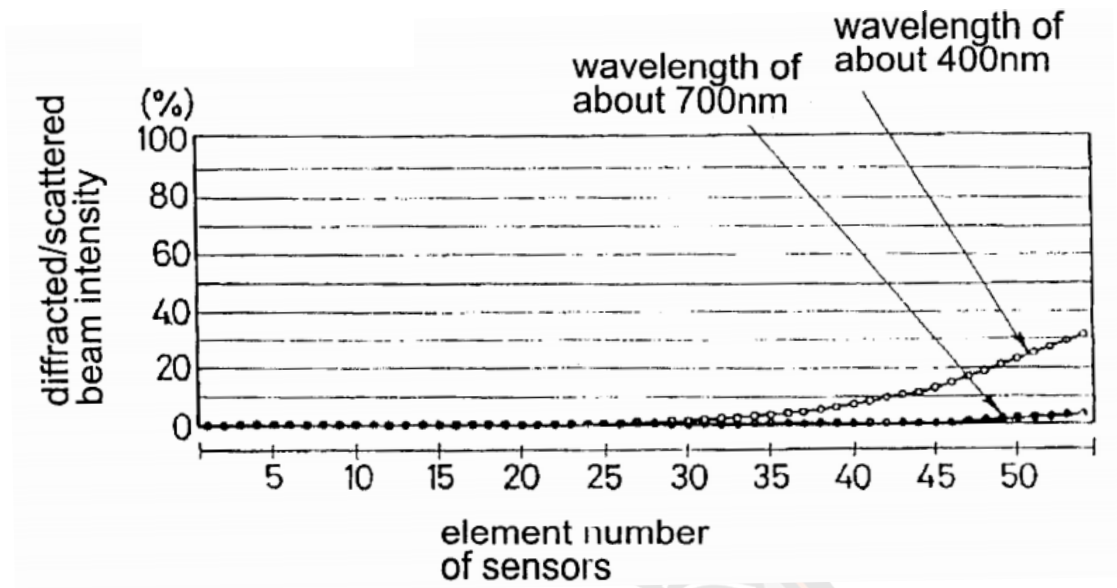
2.8 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคโดยวิธีการเลี้ยวเบนของแสงเลเซอร์ (Particle size analyzer by Laser diffraction method)

การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของแสงเลเซอร์เกิดจากการฉายลำแสงเลเซอร์ไปยังอนุภาคซึ่งระบบการวัดจะวัดความเข้มของช่องว่างจากการรับแสงที่หักเห/กระเจิงจากอนุภาคจากลำแสงเลเซอร์จากระบบการฉายรังสีและผลลัพธ์ของการกระจายตัวของอนุภาคจะได้จากระบบการวัดแสง (Optical system) การฉายรังสีของระบบ optical จะมีแสงเลเซอร์กึ่งตัวนำ (Semiconductor laser) โดยภายในลำแสงที่ออกมามีความยาวคลื่นตามแหล่งกำเนิดแสง ดังนั้นจะสามารถวัดอนุภาคได้หลากหลายตั้งแต่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระดับไมครอนตั้งแต่ 0.1 ไมครอนเมตร ไปจนถึงขนาดอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ระดับหลายพัน [23]

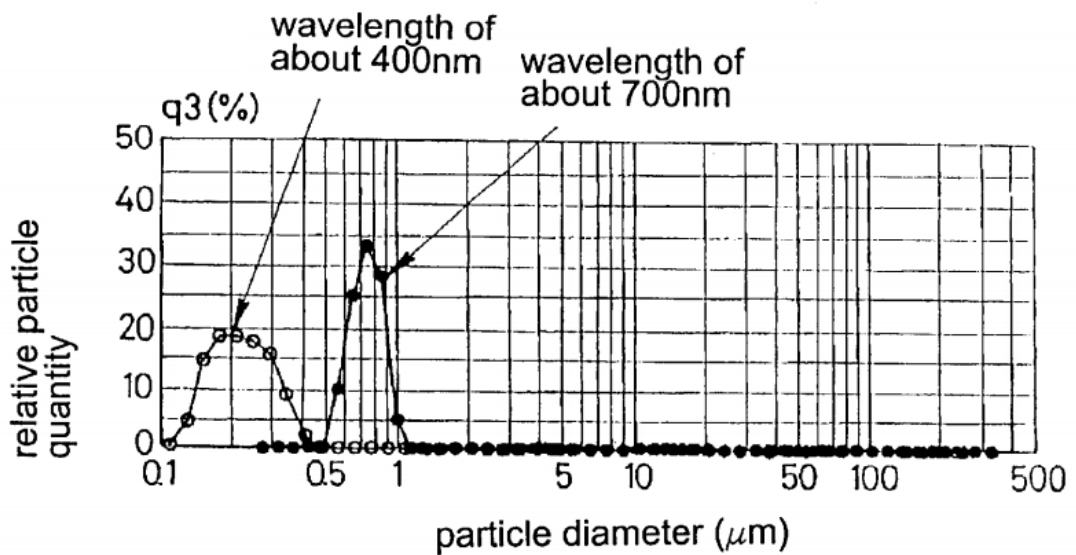


ภาพ 19 แผนภาพแสดงโครงสร้างพื้นฐานการวัดของเครื่องมือโดยวิธีการเลี้ยวเบนของแสงเลเซอร์ [23]

เมื่อลำแสงเลเซอร์จากแหล่งกำเนิดแสง (41) ฉายไปยังกลุ่มอนุภาค (P) ผ่านเลนส์ (42) เพื่อให้จัดลำแสงขนานกัน เมื่อลำแสงเลเซอร์มีการหักเหหรือกระเจิงจากการชนกับกลุ่มอนุภาค (P) จะถูกทำการตรวจวัดจากรูปแบบการกระจายความเข้มแสง ท่ามกลางการหักเห/กระเจิงของแสงที่กระเจิงไปข้างหน้าจะถูกเลนส์ (53a) เบนเพื่อสร้างรูปแบบการกระจายทรงวงแหวน (Ring-shape) บนระนาบที่ตรวจจับที่ตำแหน่งระยะโฟกัส รูปแบบการกระจายความเข้มแสงที่กระเจิงไปข้างหน้าจะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์วงแหวนตรวจจับ (Ring detector, forward scattered light sensor) (53b) เกิดจากชิ้นจากองค์ประกอบของเซนเซอร์แสงจำนวนมาก โดยที่เซนเซอร์แสงประกอบด้วยแสงที่มีรูปทรงวงแหวน (Ring-shape) ที่เกิดจากพื้นผิวที่มีรัศมีแตกต่างกันมาจัดเรียงเป็นศูนย์กลาง นอกจากนี้แสงที่กระเจิงไปด้านข้างและด้านหลังจะถูกตรวจจับด้วยเซนเซอร์แสงด้านข้างและเซนเซอร์แสงด้านหลัง รูปแบบการกระจายความเข้มของการกระเจิงแสงที่มาจากส่วนการวัดโดยเซนเซอร์แสงจำนวนมากจะถูกแปลงเป็นข้อมูลดิจิทัลด้วยตัวแปลง A/D converter และป้อนข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์เป็นข้อมูลการกระจายความเข้มการกระเจิงแสง [23]



ภาพ 20 แผนภาพแสดงผลการวัดการกระจายความเข้มการกระเจิงแสงโดยอนุภาคสีน้ำเงินซึ่งลำแสงที่ฉายรังสีมีความยาวคลื่นประมาณ 400 นาโนเมตรและ 700 นาโนเมตร [23]



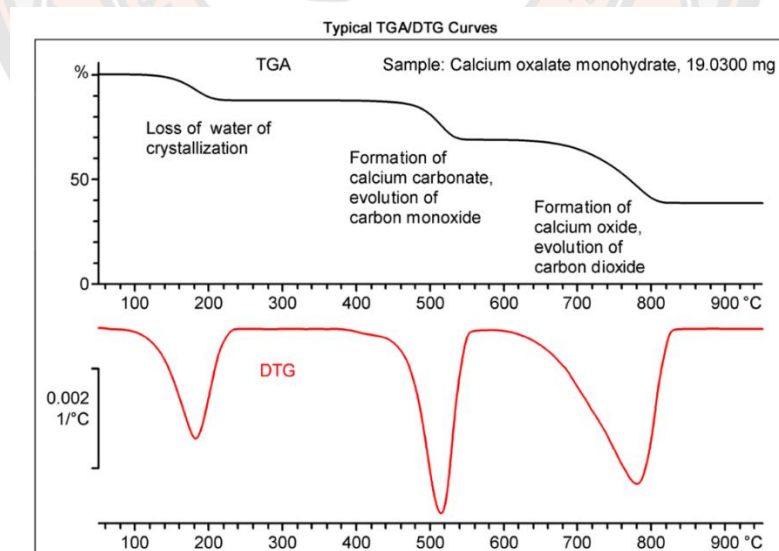
ภาพ 21 แผนภาพแสดงการกระจายขนาดอนุภาคที่คำนวณจากผลลัพธ์การวัดในภาพ 20 [23]

2.9 การวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเชิงความร้อน (Thermogravimetric Analysis, TGA)

เป็นเทคนิคการทดสอบที่ตรวจวัดมวลของตัวอย่างที่เป็นฟังก์ชันอุณหภูมิของตัวอย่างหรือเป็นฟังก์ชันเวลาในการทดสอบในกระบวนการทดสอบทางความร้อน ผลการทดสอบของเทคนิคการวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเชิงความร้อน (Thermogravimetric Analysis, TGA) โดยทั่วไปแสดงผลเป็นเส้นโค้ง (TGA curve) ที่พล็อตมวลกับอุณหภูมิหรือเวลา อีกหนึ่งการใช้ประโยชน์คืออนุพันธ์อันดับหนึ่งของเส้นโค้ง (TGA curve) เทียบกับอุณหภูมิหรือเวลา ซึ่งเป็นการแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลหรือเป็นที่รู้จักกันคือ Differential thermogravimetric หรือ DTG curve

การเปลี่ยนแปลงมวลเกิดขึ้นเมื่อตัวอย่างสูญเสียวัดด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งหรือทำปฏิกิริยากับบรรยากาศโดยรอบ ทำให้เกิดระดับที่แตกต่างกันใน TGA curve หรือจุดสูงสุดใน DTG curve ซึ่งรวมถึงสิ่งต่อไปนี้ [24]

- การระเหยของสารระเหย, การอบแห้ง, การดูดซับและคายก๊าซ, ความชื้นและการระเหยของสาร, การสูญเสียน้ำของการกลายเป็นผลึก
- การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะในอากาศ
- การย่อยสลายจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์ในอากาศ
- การสลายตัวด้วยความร้อนในบรรยากาศเฉื่อย (Inert atmosphere) ด้วยการก่อตัวของผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซ โดยสารประกอบอินทรีย์ในกระบวนการเหล่านี้เรียกว่าไพโรไลซิส (Pyrolysis)

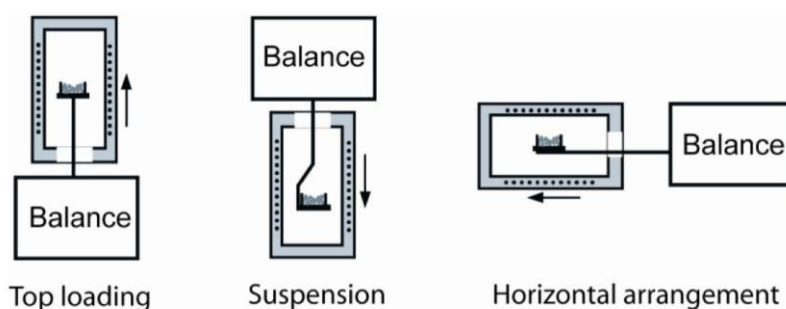


ภาพ 22 ขั้นตอนการสลายตัวของแคลเซียมออกซาลेटโมโนไฮเดรต : มวลตัวอย่าง 19 มิลลิกรัม, อัตราการให้ความร้อน 30 เคลวิน/นาที, บรรยากาศภายในเป็นก๊าซไนโตรเจน [24]

เครื่องชั่งความร้อนที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบแสดงดังภาพ 23 ในปัจจุบันใช้เครื่องชั่ง compensation เป็นหลัก ด้วยเครื่องชั่งประเภทนี้ตำแหน่งของตัวอย่างในเตาเผายังคงเหมือนเดิม แม้ว่ามวลจะมีการเปลี่ยนแปลง ในขณะเดียวกัน เราสามารถสังเกตระหว่างการเคลื่อนที่ขดลวดเดี่ยวของระบบการตรวจวัดและเซลล์ของการชั่งน้ำหนักที่มีซับซ้อน ในการตรวจวัดแบบจัดเรียงแนวราบ (Horizontal arrangement) ระบบการเคลื่อนที่ขดลวดเดี่ยวมีข้อเสียที่ตัวอย่างที่เคลื่อนที่ในแนวราบระหว่างการให้ความร้อนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมวลอย่างชัดเจน

มาตรการการตรวจวัดของโครงสร้างเครื่องชั่งและอุปกรณ์ให้ความร้อนต้องมีการป้องกันเครื่องชั่งในภาชนะเครื่องชั่งจากผลกระทบของการแผ่ความร้อนและการสัมผัสผลิตภัณฑ์ที่มีฤทธิ์กัดกร่อน กรณีส่วนใหญ่ภายในภาชนะเครื่องชั่งจะถูกปรับปรุงด้วยก๊าซป้องกัน (Protective gas)

เครื่องชั่งจะถูกจัดประเภทเป็นเครื่องชั่งเซมิไมโคร (semimicro, 10 μg), ไมโคร (micro, 1 μg) หรืออัลตราไมโคร (ultramicro, 0.1 μg) ขึ้นอยู่กับความละเอียดเครื่องชั่ง นอกจากความละเอียดแล้วความจุสูงสุดของเครื่องชั่งก็เป็นปัจจัยที่สำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อทำการตรวจวัดวัสดุที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Inhomogeneous materials) ซึ่งมักจะมีเพียงไม่กี่มิลลิกรัมที่ไม่สามารถเป็นตัวแทนของวัสดุและต้องการมวลตัวอย่างที่มากขึ้น

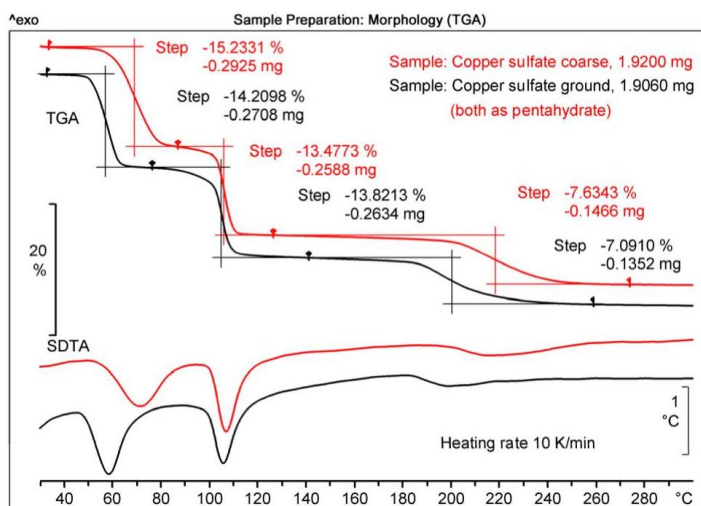


ภาพ 23 เครื่องชั่งสารเชิงความร้อนที่มีรูปแบบการบรรจุใส่ด้านบน, การแขวนและการจัดแนวราบ

โดยที่ลูกศรแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของเตาสำหรับการบรรจุตัวอย่าง [24]

- หลากหลายปัจจุบันที่ควรพิจารณาเมื่อทำการเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเชิงความร้อน (Thermogravimetric Analysis, TGA)
- ตัวอย่างควรเป็นตัวแทนของวัสดุที่จะทำการวิเคราะห์
- มวลของตัวอย่างควรเพียงพอที่จะทำให้เกิดความแม่นยำสำหรับการทดสอบ
- ตัวอย่างควรมีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดจากกระบวนการเตรียมตัวอย่าง
- ตัวอย่างไม่ควรมีการปนเปื้อนจากกระบวนการเตรียมตัวอย่าง

สัณฐานวิทยาของตัวอย่างมีผลต่ออัตราการแพร่ของผลิตภัณฑ์ที่เกิดปฏิกิริยาและลำดับเวลาของการเกิดปฏิกิริยา ในขณะที่เดียวกันสัณฐานวิทยาก็ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนภายในตัวอย่างเช่นกัน มวลที่ใช้ในการทดสอบยังมีอิทธิพลต่ออัตราการสูญเสียมวลเนื่องจากการแพร่กระจายและกระบวนการถ่ายโอนความร้อน จึงเป็นเรื่องสำคัญในการควบคุมคุณภาพการตรวจวัดที่จะใช้เทคนิคในการเตรียมตัวอย่างให้มีความสม่ำเสมอซึ่งการใช้มวลตัวอย่างที่มีความสม่ำเสมอมีความสำคัญมากในการทำให้เกิดการเปรียบเทียบข้อมูลจากผลการทดสอบการวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเชิงความร้อน (Thermogravimetric Analysis, TGA) ได้ ในภาพ 24 การสลายตัวของเพนตะไฮเดรตคอปเปอร์ซัลเฟต (Copper sulfate pentahydrate) บดละเอียดเปรียบเทียบกับการสลายตัวของผลึกที่มีความหยาบมากกว่า ตัวอย่างที่เป็นผงละเอียดเกิดปฏิกิริยารวดเร็วกว่าเนื่องจากก๊าซที่เป็นผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาไปถึงพื้นผิวของแต่ละเม็ดที่มีความละเอียดได้รวดเร็วกว่า ตัวอย่างนี้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการเตรียมตัวอย่างในการตรวจวัดการวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเชิงความร้อน (Thermogravimetric Analysis, TGA)

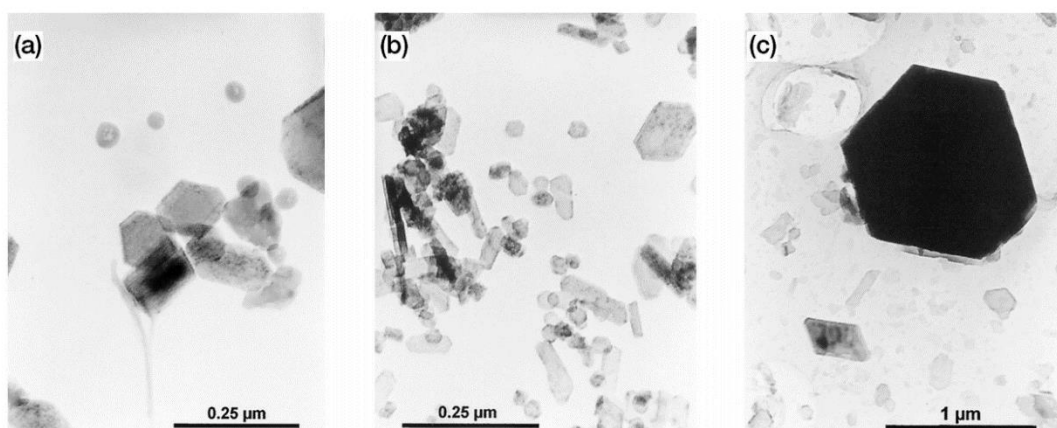


ภาพ 24 เส้นโค้ง TGA และ SDTA แสดงการขจัดน้ำของการตกผลึกจากคอปเปอร์ซัลเฟตเพนตะไฮเดรต เส้นโค้งสีแดงที่วัดด้วยผลึกที่ค่อนข้างหยาบ เส้นโค้งสีดำที่วัดด้วยผลึกที่มีละเอียด ขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 3 ในเส้นโค้งของผลึกที่บดละเอียดมีการเลื่อนมากกว่า 10 เคลวินไปที่อุณหภูมิต่ำลง อัตราการทำความร้อนคือ 10 เคลวิน/นาที [24]

2.10 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

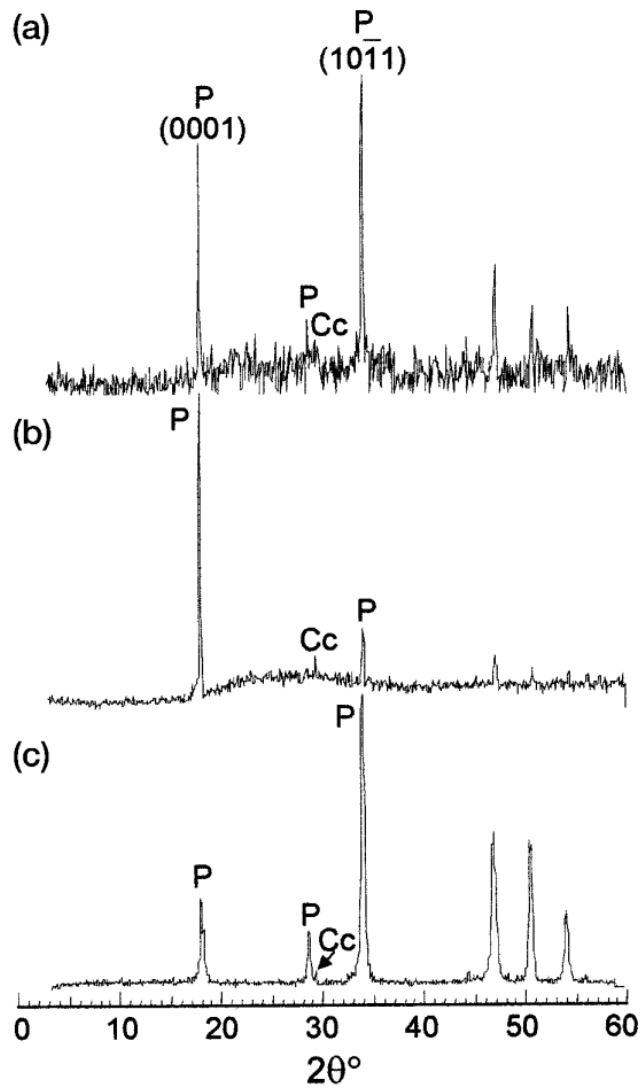
2.10.1 การใช้ประโยชน์จากปูนขาว

Olga Cazalla และคณะ [25] ได้ศึกษาคุณสมบัติของปูนขาวที่ถูกเก็บไว้ภายใต้ความชื้น (aging of lime) โดยนำมาใช้เป็นส่วนผสมในมอร์ตาร์โดยปราศจากปูนซีเมนต์โดยพบว่าพฤติกรรมของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) ที่เป็นองค์ประกอบหลักของปูนขาว (Lime) มีการเปลี่ยนแปลง เช่น ขนาดของอนุภาคและรูปร่างของอนุภาค ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติการจับน้ำ (water retention), ความเป็นพลาสติก (plasticity) และความสามารถในการทำงาน (workability) ในภายหลังจากการเก็บปูนขาวภายใต้ความชื้น Ca(OH)_2 เกิดการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยา (morphologic) จากโครงสร้างผลึกปริซึม (prismatic crystals) เป็นโครงสร้างผลึกที่มีลักษณะเป็นแผ่นเกล็ด (platelike crystals) และยังเกิดการลดขนาดของอนุภาค



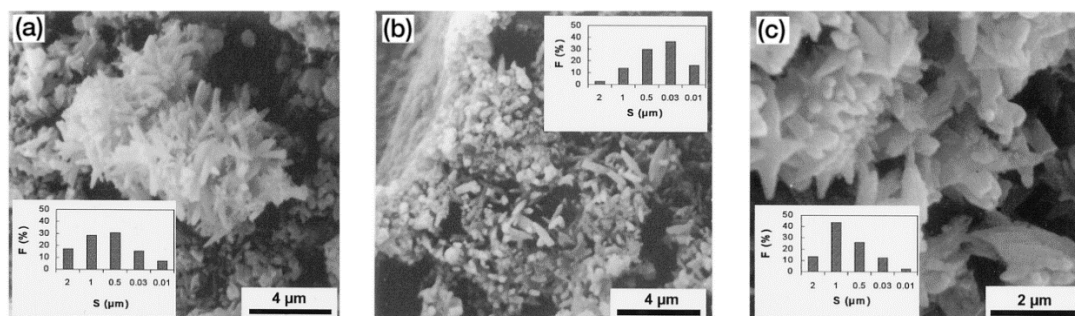
ภาพ 25 ผลการทดสอบ TEM photomicrograph ของพอร์ตแลนด์ไดต์ในปูนขาว 1 ปี (a) ปูนขาว 14 ปี (b) ปูนขาวใหม่ [25]

จากภาพ 25 แสดงผลึกรูปทรงปริซึมขนาดใหญ่ของพอร์ตแลนด์ไดต์ในปูนขาวใหม่ (ภาพ 25(c)) ในขณะที่ผลึกของพอร์ตแลนด์ไดต์ขนาดเล็กที่มีลักษณะเป็นเกล็ดมากขึ้นโดยเฉพาะในปูนขาวอายุ 14 ปี นอกจากนี้รูปแบบ XRD แสดงเฟสแคลไซต์ (CC) ในทุกตัวอย่างดังภาพ 26



ภาพ 26 รูปแบบ XRD ของพอร์ตแลนด์เดตโน (a)ปูนขาว 1 ปี (b) ปูนขาว 14 ปี (c) ปูนขาวใหม่ (P : Portlandite และ CC : Calcite) [25]

สำหรับขนาดผลึกเท่ากัน platelike crystals มีพื้นที่ผิวมากกว่าประมาณ 5 เท่าของพื้นผิว prismatic crystals โดยที่ platelike crystals มีพื้นที่ผิว $102.6 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ขณะที่ prismatic crystals มีพื้นที่ผิว $22.2 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$



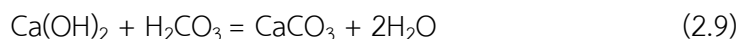
ภาพ 27 แสดง SEM ของ (a) มอร์ตาร์ปูนขาวที่ถูกเก็บภายใต้ความชื้น 1 ปี (b) มอร์ตาร์ปูนขาวที่ถูกเก็บภายใต้ความชื้น 14 ปี ที่พื้นผิวเป็นพื้นที่ของการเกิดปฏิกิริยา carbonated (c) มอร์ตาร์ปูนขาวใหม่ และเสริมด้วยฮิสโตแกรมแสดงขนาดของแคลไซต์ (S, ในหน่วย μm) กับความถี่ (F, ในหน่วย เปอร์เซ็นต์) [25]

จากผลการทดสอบ SEM ของมอร์ตาร์ปูนขาวดังภาพ 27 แสดงปริมาณช่องว่างและการพัฒนาของรอยร้าวจากการแห้ง ซึ่งรอยต่อระหว่างวัสดุเชื่อมประสานกับมวลรวม (binder-aggregate contact zone) แสดงความไม่ต่อเนื่องจากการพรอยแยก (fissures) โดยทั่วไปการเกิดปฏิกิริยา carbonation เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาส่งผลให้ความพรุน (porosity) ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ solid volume เพิ่มขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของ portlandite (CH, $\rho = 2.24 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 33.0 cm^{-3} molar volume) เป็น calcite (CC, $\rho = 2.70 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 36.9 cm^{-3} molar volume)

ปฏิกิริยา carbonation ของมอร์ตาร์ปูนขาวเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของ portlandite (CH) เป็น calcite (CC) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่มี 2 กระบวนการเกิดขึ้นโดยเริ่มจากคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ละลายในน้ำได้กรดคาร์บอนิก (carbonic acid) ตามสมการ (2.8)



จากนั้นแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับกรดคาร์บอนิกในสารละลายดังสมการที่ (2.9)



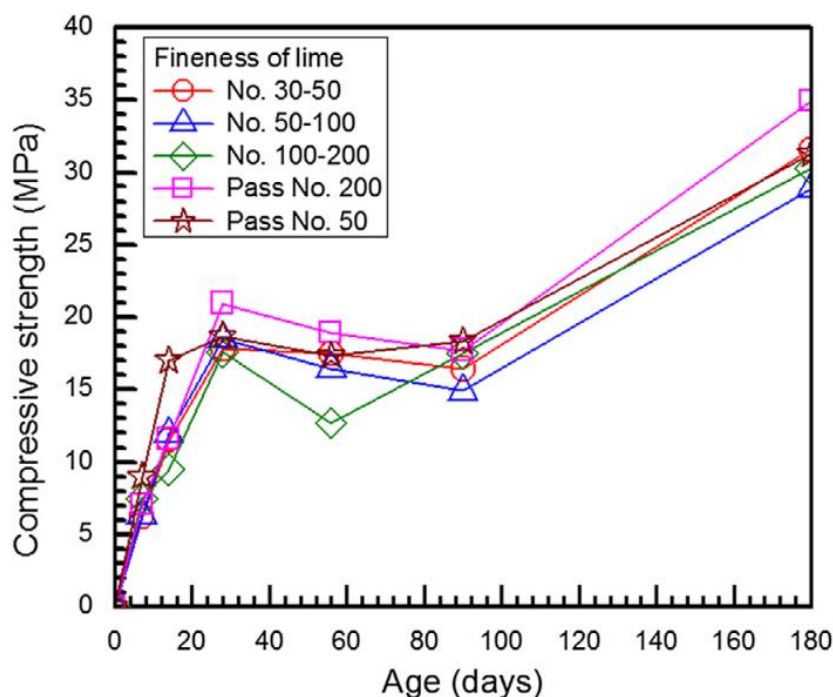
จะพบว่าน้ำเป็นสิ่งจำเป็นที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาโดยความชื้นสัมพัทธ์ต่ำจะส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยา carbonation ช้า ในขณะที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงจะส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาเกิดปฏิกิริยา carbonation เร็ว [25]

David O. Koteng และคณะ [26] ได้ทำการศึกษาการพัฒนากำลังของเพสต์โดยใช้ปูนขาวและวัสดุปอซโซลานเป็นส่วนผสม โดยออกแบบสัดส่วนผสมระหว่างปูนขาวกับวัสดุปอซโซลานที่มีความแตกต่างกันในด้านปริมาณและสภาพการบ่มตัวอย่าง ดังตาราง 6 [26]

ตาราง 6 สัดส่วนผสมและสภาพการบ่มตัวอย่างของเพสต์ปูนขาว (NHL)-ซิลิกาฟูม (SF) -เถ้าลอย (FA) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน (w/b) เท่ากับ 0.35 [26]

Pozzolana content (%)	Paste composition by weight (%)				Curing conditions	
	SF	FA	NHL	0-7 days	7-28 days	28-180 days
25	10	15	75	Mold	Water, RT	Water, RT
30	10	20	70	Mold	Water, RT	Water, RT
35	10	25	65	Mold	Water, RT	Water, RT
40	10	30	60	Mold	Water, RT	Water, RT
40	00	40	60	Mold	Water, RT	Water, RT
40	10	30	60	Mold	Water, RT	Air, RT
40	10	30	60	Mold	Air, RT	Air, RT
40	10	30	60	Mold	Water, 60 °C	Air, RT

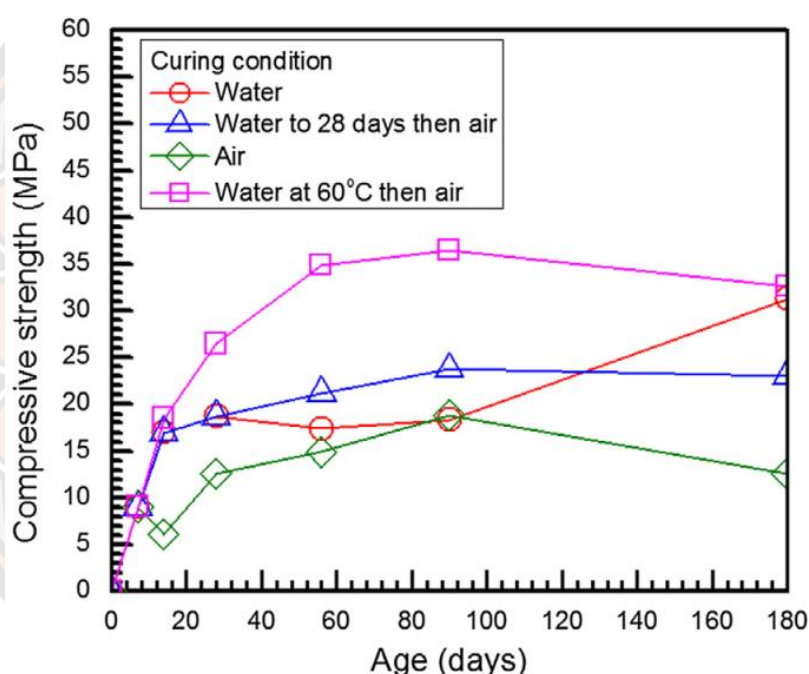
Note: RT = room temperature.



ภาพ 28 อิทธิพลจากความละเอียดของปูนขาวต่อกำลังอัดของเพสต์ที่มีปริมาณซิลิกาฟูม 10% เถ้าลอย 30% และปูนขาว 60% ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน (w/b) เท่ากับ 0.35 โดยที่บ่มตัวอย่างในน้ำภายใต้อุณหภูมิห้อง [26]

จากภาพ 28 จะพบว่ากำลังของตัวอย่างที่ใช้ปูนขาว (NHL) ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 สูงกว่าส่วนผสมอื่นๆ หลัง 28 วัน โดยตัวอย่างที่ใช้ NHL ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มีกำลังเพิ่มขึ้น 11.8% และ 11.5% ที่อายุ 28 วัน และ 180 วันตามลำดับ และช่วงอายุระหว่าง 28 วันถึง 90 วันที่

กำลังของทุกตัวอย่างมีการลดลง กำลังของตัวอย่างที่ลดลงในช่วง 28 วันถึง 90 วันเกิดจากการบ่มของปูนขาวอิสระ (free lime) ภายในตัวอย่างเพสต์ซึ่งถูกพบในทุกตัวอย่างที่มีการบ่มในน้ำจากการที่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) อยู่ภายใต้ความเปียกชื้นอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพคือแต่ละโครงสร้างผลึกปริซึมของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (single prismatic crystals) แตกตัวเป็นผลึกที่มีลักษณะเป็นเกล็ด (platelike crystals) ขนาดเล็กจำนวนมากส่งผลให้ความหนืด (viscosity) และความเป็นพลาสติก (plasticity) ของตัวอย่างเพิ่มขึ้นในช่วงต้น แต่ความหนืด (viscosity) และความเค้นคราก (yield stress) จะลดลงตามระยะเวลาเมื่อแต่ละ platelike crystals ที่มีการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม (random alignment) เปลี่ยนเป็นวางตัวในระนาบเดียวกัน (face to face)



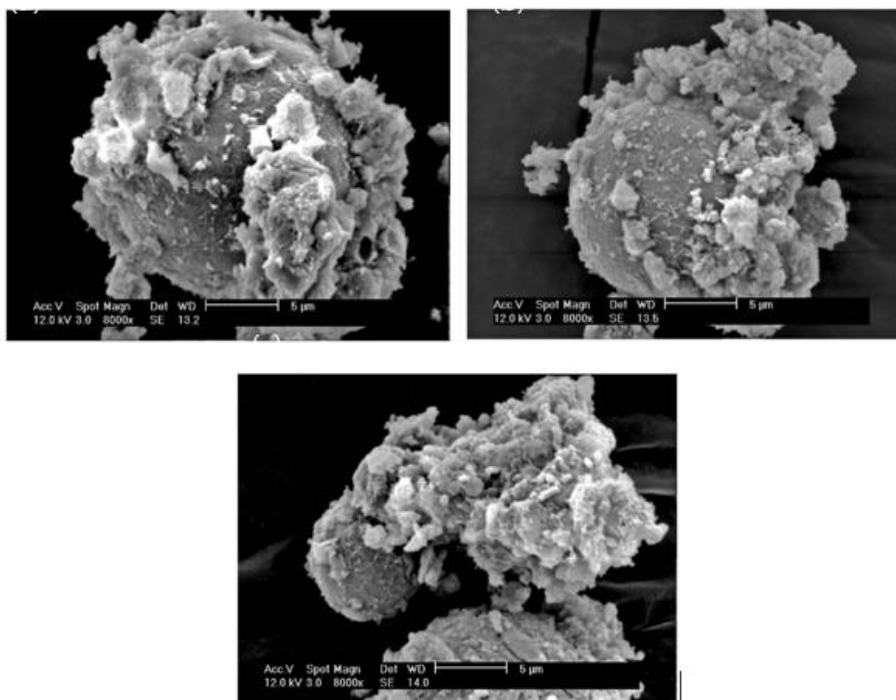
ภาพ 29 แสดงผลกระทบบนสภาพการบ่มต่อกำลังอัดของเพสต์ที่มีส่วนผสมด้วยซิลิกาฟุ่ม 10% แล้วย 30% และปูนขาว 60% ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน (w/b) เท่ากับ 0.35 [26]

ภาพ 29 แสดงค่ากำลังอัดของกลุ่มตัวอย่างบ่มน้ำที่อุณหภูมิห้องที่ระยะเวลา 28 วัน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 18.7 MPa และกลุ่มตัวอย่างที่บ่มในน้ำอุณหภูมิ 60 C มีค่ากำลังอัดที่ 28 วัน เท่ากับ 26.5 MPa ในกลุ่มตัวอย่างที่บ่มในอากาศที่ 28 วัน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 12.6 MPa ในกลุ่มตัวอย่างที่บ่มในน้ำอย่างต่อเนื่องเกิน 28 วันมีการลดลงของค่ากำลังอัดเล็กน้อยในช่วง 28 วันถึง 90 วันโดยมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 17.4 Mpa ก่อนที่ค่ากำลังอัดที่ระยะเวลา 180 วันเพิ่มขึ้นเป็น 31.3 MPa นอกจากนี้ตัวอย่างที่บ่มในอากาศมีการลดลงของค่ากำลังอัดจาก 9.0 MPa เป็น 6.1 MPa ที่ระยะเวลา 7 วัน และ 14 วันตามลำดับซึ่งสอดคล้องกับการพบรอยร้าวขนาดเล็กที่บริเวณผิวของตัวอย่างที่ระยะเวลา

14 วัน เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นรอยร้าวมีการลดลงจนไม่ปรากฏ การบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงเพิ่มอัตรา การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction) และเพิ่มกำลังอัดในช่วงต้น ในกลุ่มตัวอย่างที่มีเปลี่ยนสภาพการบ่มจากในน้ำเป็นอากาศยังคงมีการพัฒนากำลังจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกและ เกิดปฏิกิริยา carbonation ของปูนขาวอิสระด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ ส่วนในกลุ่ม ตัวอย่างที่บ่มในอากาศแสดงการพัฒนากำลังอัดที่ต่ำเนื่องจากตัวอย่างเกิดรอยร้าวจากการหดตัว (drying shrinkage) ที่มาจากการสูญเสียความชื้นซึ่งจากการสูญเสียความชื้นและการเปลี่ยนแปลง ปริมาตรส่งผลให้เกิดรอยร้าวขนาดเล็ก [26]

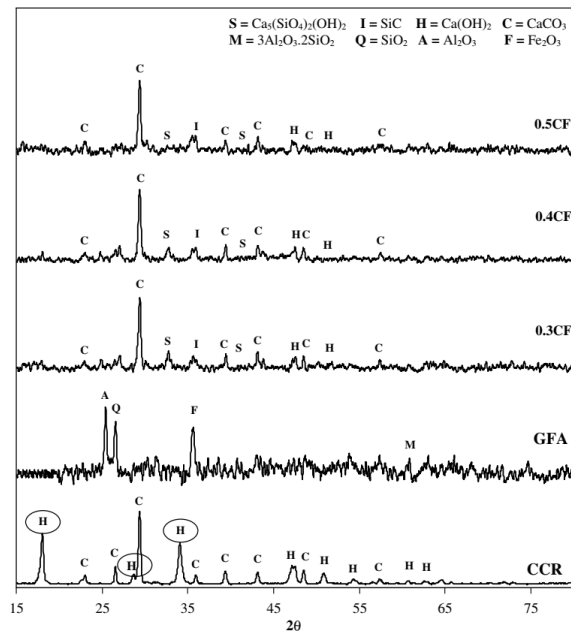
2.10.1 การใช้ประโยชน์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และวัสดุปอซโซลาน

Kiatsuda Somna และคณะ [27] ได้ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของเพสต์ที่เป็นส่วนผสม ระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) และเถ้าลอยบด (Ground fly ash, GFA) โดยไม่มีซีเมนต์พอร์ตแลนด์ในส่วนผสม โดยอัตราส่วนของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) ต่อเถ้าลอยบด (Ground fly ash, GFA) เท่ากับ 30 : 70 โดย น้ำหนัก โดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM), เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD), เทคนิคฟูเรียร์ ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) เพื่อให้เกิด ความเข้าใจวัสดุเชื่อมประสานใหม่ที่เกิดขึ้น เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาดอนุภาคค่อนข้าง ใหญ่จึงนำไปบดด้วย ball milling จนกระทั่งขนาดเม็ดอนุภาคของวัสดุค้างบนตะแกรงขนาด 45 ไมโครเมตรน้อยกว่า 2% โดยน้ำหนัก เพื่อเพิ่มการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเถ้าลอย (Fly ash, FA) และ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR)



ภาพ 30 รูปถ่ายโครงสร้างจุลภาคของเพสต์กากแคลเซียมคาร์ไบด์-เถ้าลอยบด (CCR-GFA paste) ที่อัตราส่วนน้ำต่อส่วนผสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์-เถ้าลอย (Water-to-binder, W/B) เท่ากับ (a) 0.3, (b) 0.4 และ (c) 0.5 (0.3CF, 0.4CF และ 0.5CF ตามลำดับ) [27]

หลังจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) ทำปฏิกิริยากับเถ้าลอยบด (Ground fly ash, GFA) ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งคล้ายกับที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานิก แม้ว่าตัวอย่างมีอัตราส่วน W/B ที่แตกต่างกัน แต่สัณฐานวิทยาไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ในภาพ 25 แสดงอนุภาคทรงกลมขนาดใหญ่ที่ไม่ทำปฏิกิริยาซึ่งเป็นเถ้าลอยที่เป็นทรงกลมที่มีการก่อตัวของวัสดุอื่นที่หิวรอบ สัณฐานวิทยาที่พบยังประกอบด้วยอนุภาคที่มีความเป็นเจลที่มีขนาดแตกต่างกันบนพื้นผิวทรงกลมและอนุภาคกลุ่มใหญ่ในภาพบริเวณที่มีความสว่าง ซึ่งจากผลการทดสอบ EDS พบว่าทั้งอนุภาคที่มีความเป็นเจลและอนุภาคที่มีความสว่างส่วนประกอบหลักเป็นอะตอมของ Si และ Ca โดยที่อะตอมของ Al มีปริมาณน้อยมาก มีความเป็นไปได้ว่าเป็น Si และ Al ที่มาจากเถ้าลอยซึ่งรูปร่างเหล่านี้อาจเป็นรูปแบบของเจลแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H)



ภาพ 31 รูปแบบ X-ray diffraction ของ CCR, GFA และเพสต์ CCR-GFA [27]

เฟสหลักในตัวอย่างแฉ่ำลอยบด (GFA) พบเฟสที่มีขนาดเล็กของควอตซ์ (Quartz, SiO_2), มัลไลต์ (Mullite, $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), เฮมาไทต์ (Hematite, Fe_3O_4) และอลูมินิต (Aluminite, Al_2O_3) นอกจากนี้ตัวอย่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) พบพีคของพอร์ตแลนด์ไดต์ (Portlandite) หรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) และแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3)

เพสต์กากแคลเซียมคาร์ไบด์-แฉ่ำลอยบด (CCR-GFA paste) มีการเปลี่ยนแปลงหลังจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) ทำปฏิกิริยากับแฉ่ำลอยบด (GFA) เห็นได้ชัดว่ามีการก่อตัวของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ในรูปของ $\text{Ca}_5(\text{SiO}_4)_2(\text{OH})_2$ ที่พบในทุกเพสต์ ในทำนองเดียวกันหลังจากการปฏิกิริยาของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และแฉ่ำลอยบด (GFA) จะเห็นว่าเฟสหลักของ Al_2O_3 และ SiO_2 หายไปจากผลิตภัณฑ์ ในทางตรงกันข้ามความเข้มเฟสของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ในส่วนผสม 0.3CF ถึง 0.5CF มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเท่ากันเมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มเฟสเดิมจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) การก่อตัวเหล่านี้เกิดจากการก่อตัวของผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ที่มาจากปฏิกิริยาระหว่างซิลิกา (SiO_2) จากแฉ่ำลอยบด (GFA) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR)

Chai Jaturapitakkul และคณะ [6] ได้ศึกษาวัสดุเชื่อมประสานจากการใช้ประโยชน์กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) และเถ้าแกลบ (Rice husk ash, RHA) ซึ่งเถ้าแกลบเป็นผลพลอยได้จากการเผาแกลบข้าวจากองค์ประกอบทางเคมีเถ้าแกลบมีปริมาณซิลิกา (SiO_2) ที่สูงถึง 78.22% และกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เท่ากับ 51.94% ดัง

ตาราง 6 โดยทั่วไปเมื่อซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ผลิตภัณฑ์หลักคือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate, CSH), แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (Calcium aluminate hydrate, CAH) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ซึ่งแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนต (CAH) เป็นวัสดุเชื่อมประสานในส่วนผสมและมีส่วนร่วมในการให้กำลังอัดของคอนกรีต อย่างไรก็ตามแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าแคลเซียมอลูมิเนต (CAH) ขณะที่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) สามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) จากวัสดุปอซโซลานส่งผลให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ในส่วนผสมเพิ่มขึ้น ซึ่งคุณสมบัติที่เพิ่มขึ้นยังรวมถึงความทนทานกรดที่เพิ่มขึ้น ลดการเยิ้ม น้ำ และลดอัตราการซึมผ่านของคอนกรีต

ตาราง 7 องค์ประกอบเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์, เถ้าแกลบและซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [6]

Material	Chemical composition (%)								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	NaO_2	K_2O	SO_3	LOI
Calcium carbide residue	3.36	2.56	0.33	51.94	0.46	0.03	0.03	0.22	41.72
Rice husk ash	78.22	1.48	1.98	4.59	0.62	0.22	2.56	0.43	8.97
Cement	20.42	5.78	3.35	63.94	1.06	0.17	0.31	2.29	2.92

การเตรียมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) ห่างจากการฝั่งแฉดให้ปริมาณความชื้นต่ำกว่า 3% จากนั้นนำไปดโดยเครื่อง Los Angeles abrasion จนกระทั่งขนาดเม็ดค้ำอยู่บนตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่า 10% โดยน้ำหนัก โดยที่การเตรียมเถ้าแกลบ (rice husk ash, RHA) นำไปดด้วยเครื่อง Los Angeles abrasion จนกระทั่งขนาดเม็ดค้ำอยู่บนตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่า 10% โดยน้ำหนักเช่นเดียวกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR)

ในงานวิจัยนี้มอร์ตาร์มาตรฐานที่ใช้ควบคุมสำหรับเปรียบเทียบจะผสมด้วยซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุเชื่อมประสาน โดยส่วนที่เหลือเป็นการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) และเถ้าแกลบ (Rice husk ash, RHA) ผสมเป็นวัสดุเชื่อมประสาน ซึ่งสัดส่วนของ CCR : RHA ที่แตกต่างกันดังนี้ 20:80, 36:65, 50:50, 65:35 และ 80:20 โดยน้ำหนัก มอร์ตาร์มี 1.0 ส่วนของวัสดุเชื่อมประสานต่อ 2.75 ส่วนของทรายแม่น้ำโดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน (Water-Cementitious material ratio, W/C) จะคงที่ไว้ 0.65 ในทุกส่วนผสม และใช้สารลดน้ำพิเศษ superplasticizer เพื่อทำให้มอร์ตาร์มีค่าการไหลอยู่ที่ 110 ± 5 เนื่องจากส่วนผสมของ CCR-RHA มอร์ตาร์ ต้องการน้ำมากขึ้นเพื่อให้ค่าการไหลเป็นไปตามเป้า ดังตาราง 7

ตาราง 8 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่มีวัสดุประสานชนิดใหม่ (CCR+RHA) [6]

Mortar	Mix proportion (by weight)						
	Calcium carbide residue	Rice husk ash	Cement	Sand	Water	Super-plasticizer	Flow
Control	—	—	100	275	65	—	114
20C80R	20	80	—	275	65	5.88	107
35C65R	35	65	—	275	65	4.01	108
50C50R	50	50	—	275	65	3.89	113
65C35R	65	35	—	275	65	3.25	108
80C20R	80	20	—	275	65	1.75	110

หมายเหตุ : ตัวเลข 20, 35, 50, 65, 85 หน้าอักษร C และ R หมายถึงเปอร์เซ็นต์ของ CCR และ RHA ในส่วนผสมมอร์ตาร์ตามลำดับ

ค่าความชื้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 23.9% ขณะที่ค่าความชื้นเหลวปกติของเพสต์กากแคลเซียมคาร์ไบด์-เถ้าแกลบ (CCR-RHA paste) อยู่ระหว่าง 43.7% ถึง 62.0% ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณเถ้าแกลบ (Rice husk ash, RHA) โดยเพสต์ 80C20R (CCR เท่ากับ 80% และ RHA เท่ากับ 20%) มีค่าความชื้นเหลวปกติเท่ากับ 43.7% และมีเพิ่มขึ้นไปถึง 62.0% ในเพสต์ 20C80R (CCR เท่ากับ 20% และ RHA เท่ากับ 80%) เพสต์กากแคลเซียมคาร์ไบด์-เถ้าแกลบ (CCR-RHA paste) ต้องการน้ำมากกว่าซีเมนต์เพสต์เนื่องจากวัสดุทั้งสองที่ใช้มีความพรุนสูง [6] [6]

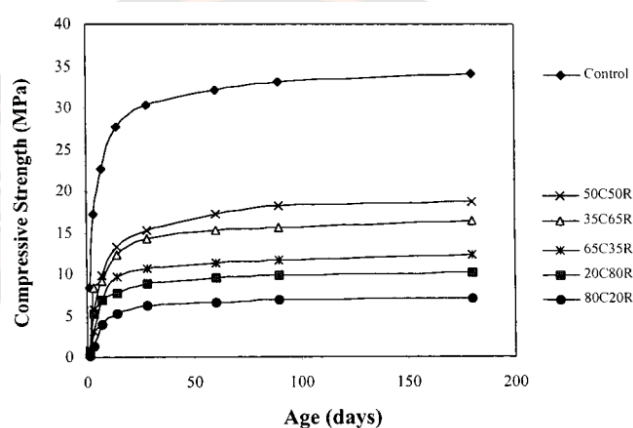
ระยะเวลาก่อตัวช่วงต้นและระยะก่อตัวช่วงปลายของซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 107 นาทีและ 195 นาทีตามลำดับ ระยะก่อตัวของที่สั้นที่สุดของเพสต์กากแคลเซียมคาร์ไบด์-เถ้าแกลบ (CCR-RHA paste) เป็นของเพสต์ 50C50R และระยะก่อตัวที่ยาวที่สุดเป็นของเพสต์ 80C20R ระยะก่อตัวช่วงต้นและช่วงปลายของเพสต์ 50C50R เท่ากับ 345 นาทีและ 635 นาทีตามลำดับ ขณะที่เพสต์ 80C20R มีระยะก่อตัวช่วงต้นและช่วงปลายเท่ากับ 502 นาทีและ 680 นาทีตามลำดับ ซึ่งในเพสต์กากแคลเซียมคาร์ไบด์-เถ้าแกลบ (CCR-RHA paste) ที่มีแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) ทำปฏิกิริยากับซิลิกา (SiO_2) จากเถ้าแกลบ (RHA) ก่อตัวเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ขณะที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ทำปฏิกิริยากับน้ำก่อตัวเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) โดยตรง สาเหตุของระยะเวลาก่อตัวที่ยาวนานของเพสต์ CCR-RHA เพราะว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิกระหว่างวัสดุปอซโซลานและปูนขาว (lime) โดยปกติจะช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์มาก

กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ CCR-RHA มีการค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่ม โดยที่ระยะเวลาบ่ม 1 วัน ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ CCR-RHA ค่อนข้างต่ำ โดยอยู่ในช่วง 0.1 MPa ถึง 0.9 MPa ขณะที่มอร์ตาร์มาตรฐานควบคุมมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 8.5 MPa ส่วนผสมที่ให้กำลังรับแรงอัด

สูงสุดคือ 50C50R เท่ากับ 0.9, 10.0, 15.6, 18.6 และ 19.1 MPa ที่ระยะเวลาบ่ม 1, 7, 28, 90 และ 180 วันตามลำดับ แสดงในตาราง 8

ตาราง 9 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ [6]

Mortar	Compressive strength (MPa)							
	1 day	3 days	7 days	14 days	28 days	60 days	90 days	180 days
Control	8.5	17.6	23.0	28.3	30.9	32.8	33.7	34.7
20C80R	0.7	5.4	7.0	7.9	9.0	9.7	10.1	10.4
35C65R	0.4	5.8	9.4	12.6	14.6	15.6	15.8	16.7
50C50R	0.9	5.8	10.0	13.6	15.6	17.5	18.6	19.1
65C35R	0.4	3.1	7.0	9.9	10.9	11.5	11.9	12.6
80C20R	0.1	1.3	4.0	5.4	6.3	6.7	7.0	7.2



ภาพ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ CCR-RHA และอายุ [6]

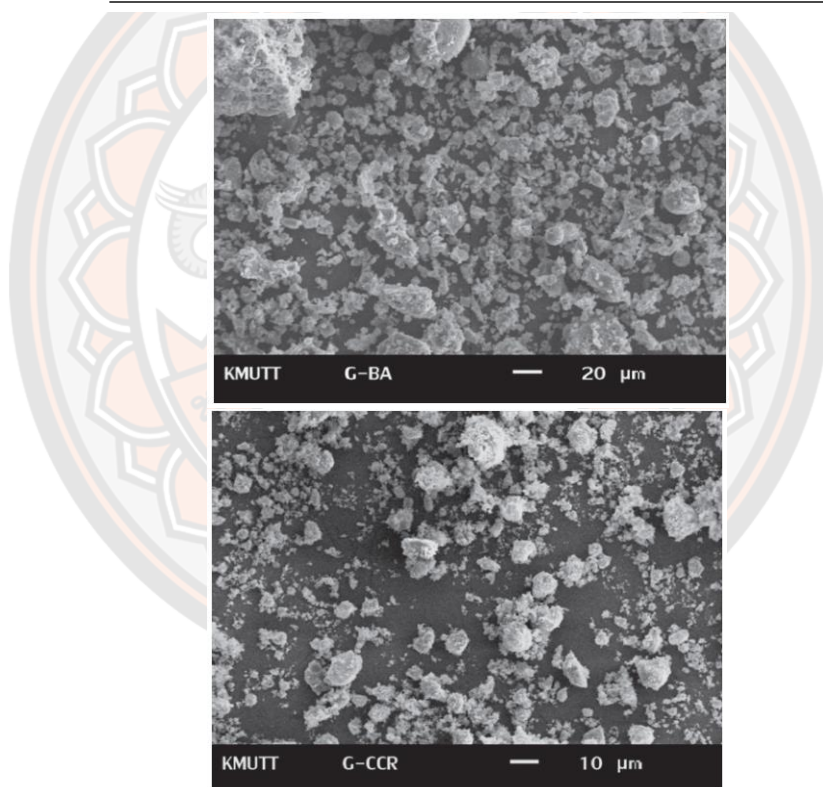
ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ CCR-RHA และอายุ ในภาพ 27 พล็อตมาจากตาราง 8 ที่ระยะเวลา 1 ถึง 14 วัน มีอัตราการเพิ่มกำลังรับแรงอัดอย่างรวดเร็วและเริ่มช้าลงจนเกือบจะคงที่หลังจากระยะเวลา 60 วัน โดยอัตราการเพิ่มกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ CCR-RHA นี้มีพฤติกรรมคล้ายคลึงกับมอร์ตาร์มาตรฐานควบคุมยกเว้นค่ากำลังรับแรงอัดที่มีค่าสูงกว่ามอร์ตาร์ CCR-RHA ในทุกส่วนผสม [6]

Chaiyanunt Rattanashotinunt และคณะ [7] ได้นำกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) ที่มีปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์สูงและเถ้าขานอ้อย (Bagasse ash, BA) ที่เป็นวัสดุพอซโซลาน (Pozzolan material) ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาพอซโซลานิกที่ให้ผลิตภัณฑ์คล้ายกับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์มาใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานแทนที่ซีเมนต์ในคอนกรีต ซึ่งนำเถ้าขานอ้อยเข้าเครื่องบดจนกระทั่งขนาดอนุภาคข้างบนตะแกรงขนาด 45 ไมโครเมตร (No. 325) น้อยกว่า 3% โดยน้ำหนัก กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) ที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตก๊าซอะเซทิลีน (Acetylene gas) จะมีปริมาณน้ำสูงจึงต้องตาก

ให้แห้งประมาณ 3-4 วันเพื่อลดความชื้นให้เหลือประมาณ 1-2% จากนั้นนำมาเข้าเครื่องบดจนกระทั่งขนาดอนุภาคข้างบนตะแกรง 45 ไมโครเมตร (No. 325) น้อยกว่า 3% โดยน้ำหนัก โดยคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าชานอ้อย (Bagasse ash, BA) และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) แสดงในตาราง 9 และรูปถ่ายอนุภาคของเถ้าชานอ้อย (Bagasse ash, BA) และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) แสดงดังภาพ 28(a), 28(b) ตามลำดับ

ตาราง 10 คุณสมบัติทางกายภาพขอวัสดุ [7]

Sample	Specific gravity	Retained on a 45 μm sieve (No. 325) (%)	Median particle size, d_{50} (μm)
OPC	3.15	13.5	14.6
Ground BA	2.27	0.5	5.7
Ground CCR	2.42	2.1	4.4



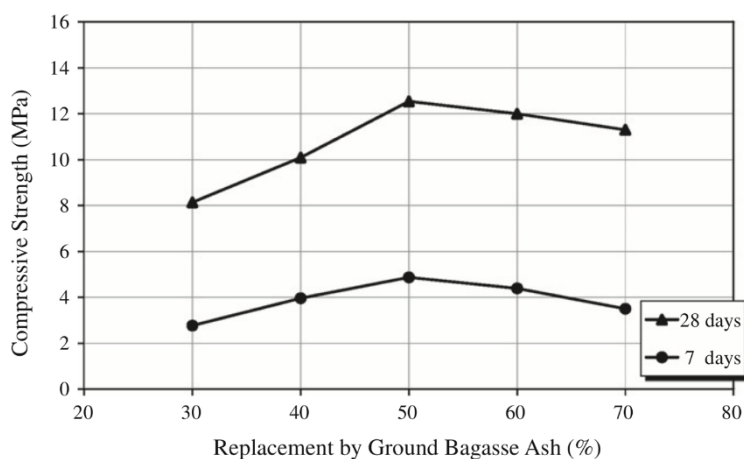
ภาพ 33 รูปถ่ายอนุภาค (Particle images) ของ (a) เถ้าชานอ้อยและ (b) กากแคลเซียมคาร์ไบด์ [7]

จะสังเกตว่าภาพ 28(a) เถ้าชานอ้อยมีรูปร่างที่ไม่สม่ำเสมอและเป็นเศษเล็กๆเช่นเดียวกับภาพ 28(b) กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) มีอนุภาคไม่สม่ำเสมอและเป็นเศษเล็กๆเนื่องจากผ่านการบด องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อย กากแคลเซียมคาร์ไบด์ และซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แสดงในตาราง 10

ตาราง 11 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ [7]

Chemical composition (%)	OPC	Ground BA	Ground CCR
Silicon dioxide (SiO ₂)	20.9	55.0	4.3
Aluminum oxide (Al ₂ O ₃)	4.7	5.1	0.4
Iron oxide (Fe ₂ O ₃)	3.4	4.1	0.9
Calcium oxide (CaO)	65.4	11.0	56.5
Magnesium oxide (MgO)	1.2	0.9	1.7
Sodium oxide (Na ₂ O)	0.2	0.2	0.0
Potassium oxide (K ₂ O)	0.3	1.2	0.0
Sulfur trioxide (SO ₃)	2.7	2.2	0.1
Loss on Ignition (LOI)	0.9	19.6	36.1

นอกจากนี้ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถูกผสมปริมาณ 10% และ 20% โดยน้ำหนักของส่วนผสม (CCR+BA+OPC) เพื่อเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง CCR และ BA เพื่อหาสัดส่วนผสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) และเถ้าชานอ้อย (Bagasse ash, BA) จึงทำการหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 50x50x50 mm³ โดยใช้สัดส่วนระหว่างส่วนผสมกับทรายเท่ากับ 1 : 2.75 โดยน้ำหนัก โดยที่ปริมาณน้ำที่ใช้ได้จากการทดสอบค่าการไหลของมอร์ตาร์ที่มีค่าการไหลเท่ากับ 105 ถึง 115% โดยสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่าง CCR ต่อ BA เท่ากับ 50 : 50 โดยน้ำหนัก จากกำลังอัดมอร์ตาร์ส่วนผสมนี้ (CCR 50% และ BA 50%) ที่ให้กำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 4.9 MPa ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน และ 12.5 MPa ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน ดังภาพ 29



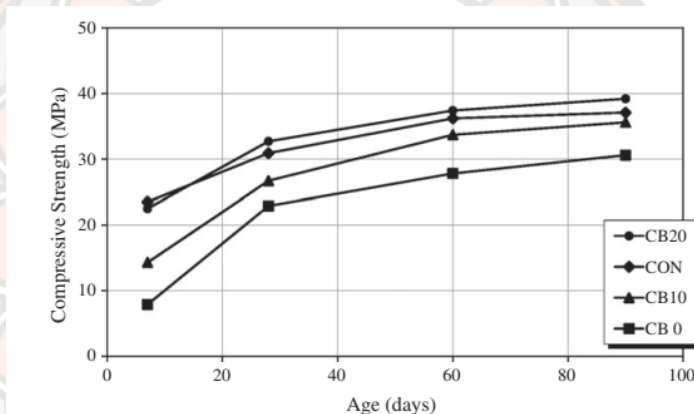
ภาพ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์และการแทนที่ของเถ้าชานอ้อย (BA) ในกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) ในส่วนผสม [7]

สัดส่วนในการผสมนี้จะถูกใช้ในการหล่อคอนกรีต CB (OPC+CCR+BA) ซึ่งคอนกรีต CB มีปริมาณส่วนผสม (Binder) เท่ากับ 450 kg/m³ และมีอัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมหยาบเท่ากับ 45:55 โดยปริมาตร อัตราส่วนน้ำต่อส่วนผสม (Water/Binder, W/B) คงที่ไว้เท่ากับ 0.40

สำหรับคอนกรีต CB และมีการใช้สารผสมเพิ่มชนิดลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer, type F) ประเภท F เพื่อให้ค่าการยุบตัว (Slump) มีค่าอยู่ระหว่าง 50 mm. และ 100 mm. ซึ่งมีการใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อแทนที่ส่วนผสมในคอนกรีต CB เป็นอัตรา 0%, 10% และ 20% โดยน้ำหนักรวมส่วนผสม (CCR+BA+OPC) ตามลำดับ คอนกรีตจะถูกทดสอบที่ระยะเวลาบ่ม 7, 28, 60 และ 90 วัน ซึ่งส่วนผสมสำหรับคอนกรีตในงานนี้ได้สรุปไว้ในตาราง 11

ตาราง 12 สัดส่วนส่วนผสมของคอนกรีต [7]

Concrete	Mix proportions (kg/m ³)							W/B	Slump (mm)
	OPC	BA	CCR	Sand	Limestone	Super P.	Water		
CON	300	-	-	810	1035	-	210	0.70	75
CB0	-	225	225	735	942	17.2	180	0.40	80
CB10	45	202.5	202.5	741	949	16.7	180	0.40	90
CB20	90	180	180	747	956	16.2	180	0.40	80



ภาพ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและอายุของคอนกรีต [7]

จากภาพ 30 แสดงการพัฒนา กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต CB เปรียบเทียบกับคอนกรีต CON โดยค่ากำลังอัดของคอนกรีต CON มีค่าเท่ากับ 30.9 MPa ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วันและเพิ่มขึ้นเป็น 36.2 และ 37.1 MPa ที่ระยะเวลาบ่ม 60 และ 90 วันตามลำดับ ค่ากำลังอัดคอนกรีต CB0 เท่ากับ 22.9 MPa หรือ 74% ของคอนกรีต CON ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วันและพัฒนาไปถึง 27.8 MPa หรือ 77% ของคอนกรีต CON ที่ระยะเวลาบ่ม 60 วัน คอนกรีต CB0 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 30.6 MPa ที่ระยะเวลาบ่ม 90 วัน หรือ 82% ของคอนกรีต CON ซึ่งผลลัพธ์บ่งชี้ว่าการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และเถ้าขานอ้อย (BA) เป็นส่วนผสมทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงประมาณ 18-26 % เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีต CON อาจเป็นเพราะสัดส่วนส่วนผสมของคอนกรีต CB0 ไม่มีซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และค่ากำลังอัดของคอนกรีตได้มาจากปฏิกิริยาปอซโซลานีกระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และเถ้าขานอ้อย (BA) แต่ที่ระยะเวลาบ่ม 90 วัน กำลังอัดของคอนกรีต CB0 มีค่ามากกว่า 80% ของคอนกรีต CON ผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นว่าเถ้าขานอ้อย (BA) เป็นวัสดุปอซโซลานที่ดีและมีปริมาณซิลิกา

ที่สูง นอกจากนี้ค่ากำลังอัดของคอนกรีต CB20 (Replacement by OPC 20%) มีค่าสูงกว่าคอนกรีต CON ทุกกระยะการบ่ม

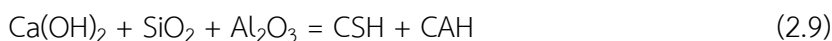
2.10.2 การปรับปรุงดินเหนียวอ่อนกรุงเทพด้วยซีเมนต์

การพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์เกิดจากซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Cement hydration) เป็นหลัก ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ที่เกิดขึ้นในดินซีเมนต์จะคล้ายกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ที่เกิดในคอนกรีต กล่าวคือเมื่อน้ำซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และวัสดุปอซโซลานชนิดต่างๆ ผสมเข้ากันกับดินและน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งทำให้เกิดการสลายตัวของ CaO ในซีเมนต์และวัสดุปอซโซลาน โดยซิลิกา (SiO₂) และอลูมินา (Al₂O₃) ละลายด้วยแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่มีความเข้มข้นสูง C₃S, C₂S และ C₃A เกิดการก่อตัวของวัสดุเชื่อมประสานและเจลปอซโซลานิก ได้แก่ เจลแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และเจลแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ซึ่งมีความสามารถเกาะยึดมวลเม็ดดินเข้าด้วยกันเป็นมวลดินขนาดใหญ่ที่มีความแข็งแรงสูง ปฏิกิริยาปอซโซลานิกเป็นปฏิกิริยารองที่เกิดขึ้นทันทีภายหลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามความชุ่มชื้นของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยที่ซิลิกา (SiO₂) และอลูมินา (Al₂O₃) จากวัสดุปอซโซลานิกจะค่อยๆ ดูดซับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ที่เหลืออยู่หลังจากก่อตัวเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ทำให้เกิดเจลแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและเจลแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตเพิ่มเติมจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ ปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะเป็นปฏิกิริยาต่อเนื่องภายหลัง โดยจะเกิดขึ้นภายใต้ระยะเวลาที่ยาวนาน ส่งผลให้กำลังของดินซีเมนต์ผสมวัสดุปอซโซลานิกมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ปฏิกิริยาเหล่านี้แสดงในสมการ (2.8) และ (2.9) ตามลำดับ [28]

ปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชัน

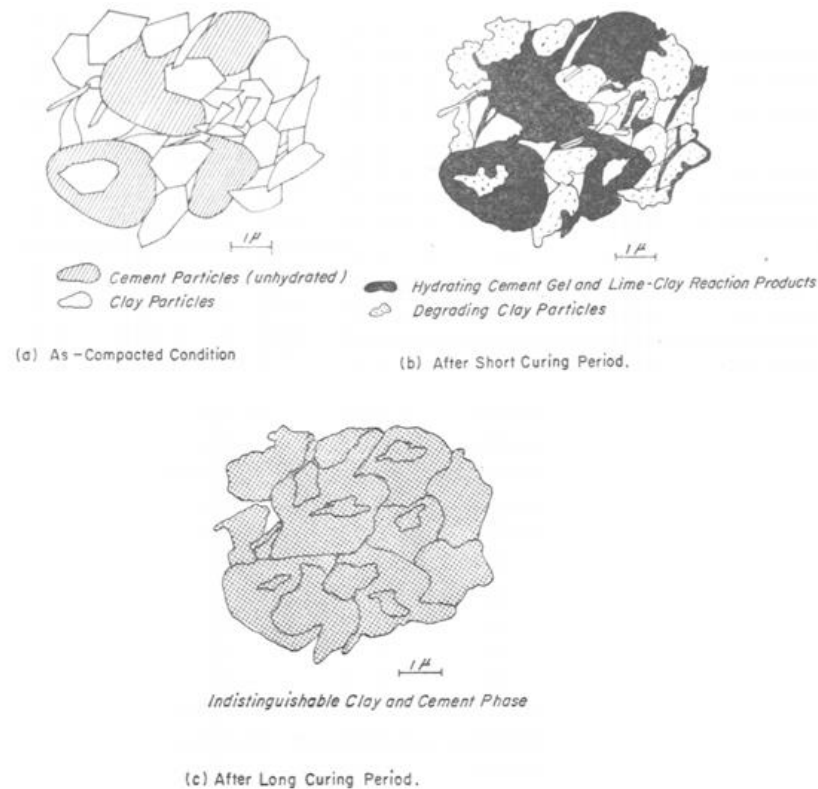


ปฏิกิริยาปอซโซลานิก



James K.Mitchell [29] และคณะ ได้ทำการศึกษาการจัดเรียงอนุภาคและการก่อตัวของดินซีเมนต์ ซึ่งช่วงแรกของการบ่มตัวอย่างที่อัตราส่วนของแคลเซียมต่อซิลิกา (Ca : Si ratio) ต่ำจะมีแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) เริ่มก่อตัวขึ้น ปูนขาว (Lime) ที่แยกตัวออกมาระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับอนุภาคของดินเหนียวส่งผลให้มีการบริโภคปูนขาวอย่างรวดเร็วและสลายตัวของดินเหนียว เมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นทำให้ความ

สมบูรณ์ของการไฮเดรตซีเมนต์เพิ่มขึ้น อนุภาคของดินบางส่วนจะกลายเป็นผลึกที่ไม่สมบูรณ์และสูญเสียเอกลักษณ์ไปโดยสิ้นเชิง

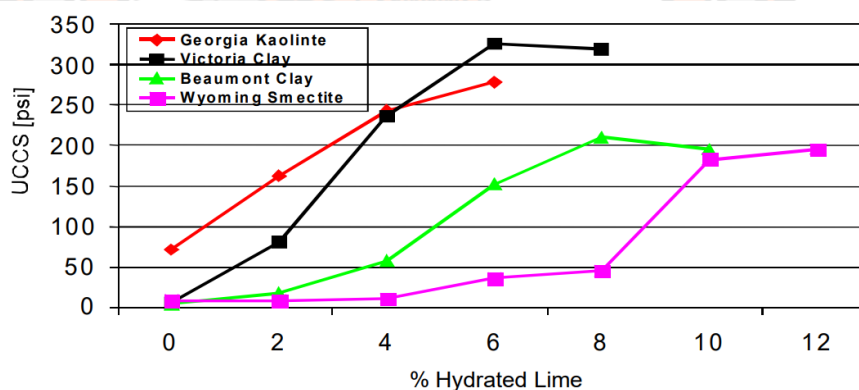


ภาพ 36 แผนภาพของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างดินซีเมนต์ระหว่างการบ่ม [29]

ภาพ 31 แสดงถึงแผนภาพลำดับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเมื่อซีเมนต์เริ่มเกิดการไฮเดรตขึ้น ทำให้เจลซีเมนต์ก่อตัวขึ้นรอบๆของกลุ่มอนุภาค อาจกระจายออกไปจากอนุภาคซีเมนต์ที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา ในขณะเดียวกันปูนขาวที่เกิดจากปฏิกิริยาของซีเมนต์ทำให้อนุภาคของดินเริ่มสลายตัว ซึ่งแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) สามารถก่อตัวจากการสลายตัวของบริเวณของอนุภาคดินที่เพิ่มขึ้นและแคลเซียมอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (C-A-S-H) อาจมีการพัฒนาที่บริเวณขอบของอนุภาค เมื่อกระบวนการเหล่านี้ดำเนินต่อไปโครงสร้างจะเริ่มประสานกับเจลซีเมนต์มากขึ้นทำให้ผิวของอนุภาคดินก็จะเริ่มมีความไม่สม่ำเสมอมากขึ้นซึ่งส่วนผสมแสดงถึงความแข็งที่มากขึ้น จนในที่สุดการสลายตัวของอนุภาคดินและการแพร่กระจายของเจลซีเมนต์จะดำเนินไปถึงจุดที่เฟสทั้งสองเฟสนั้นแทบจะไม่สามารถแยกกันได้อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบและการจัดเรียงโครงสร้างนี้จะถูกสะท้อนให้เห็นโดยคุณสมบัติของดินซีเมนต์ในแง่ของกำลังและความทนทานเพิ่มขึ้นในขณะที่การบ่มดำเนินต่อไป กระบวนการไฮเดรตขึ้นต่างๆอาจดำเนินต่อไปเป็นระยะเวลาที่นานมากแต่ในอัตราในค่อยๆลดลงอย่างต่อเนื่อง [29]

Suksun Horpibulsuk และคณะ [4] ได้กล่าวถึงผลิตภัณฑ์หลักจากปฏิกิริยาไฮเดรชันคือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH), แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH), แคลเซียมอลูมิเนียมซิลิเกต (CASH) และปูนขาว ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) การไฮเดรชันนี้ทำให้น้ำในช่องว่างมีค่า pH สูงขึ้นเนื่องจากการแยกตัวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) เบสที่รุนแรงจะละลายซิลิกาและอลูมินาจากวัสดุปอซโซลานในลักษณะที่คล้ายกับปฏิกิริยาระหว่างกรดอ่อนกับเบสที่รุนแรง จากนั้นซิลิกาและอลูมินาจะค่อยๆทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ปล่อยออกมาจากการย่อยสลายสารประกอบของซีเมนต์ที่ไม่ละลาย (ผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานรอง) ซึ่งแข็งขึ้นตามระยะเวลา

National lime association [30] ได้กล่าวถึงการใช้ปูนขาว (Lime) ปรับปรุงคุณสมบัติของดินเหนียว เมื่อปริมาณของปูนขาว (Lime) และน้ำที่ใช้เพียงพอ ค่า pH ของดินจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้อนุภาคของดินเหนียวแตกออกมาซึ่งประกอบด้วยซิลิกาและอลูมินาทำปฏิกิริยากับแคลเซียมจากปูนขาว (Lime) เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) สารประกอบเหล่านี้เกิดเป็นเนื้อวัสดุผสม (matrix) ที่ก่อให้เกิดความแข็งแรงของดินที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพดังภาพ 32



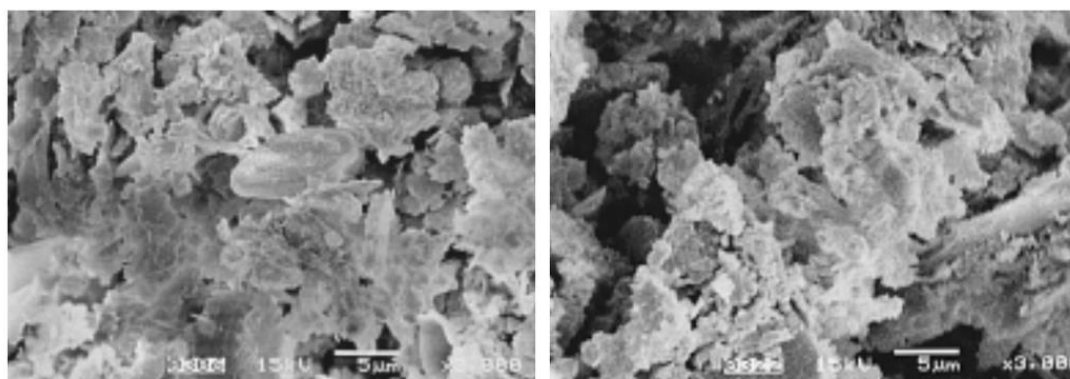
ภาพ 37 การใช้ปูนขาว (Lime) ปรับปรุงค่า Unconfined compressive strength ของดิน [30]

Katsutada Onitsuka และคณะ [31] ได้ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและกำลังของดินเหนียวอ่อนปรับปรุงด้วยปูนขาวและปูนซีเมนต์ โดยดินในงานวิจัยคือดินเหนียวอ่อนอะริเอเคะ (Ariake clay) จากพื้นที่โอกาวาในจังหวัดฟุกุโอกะและดินเหนียวจากพื้นที่อาชิคาริในจังหวัดซากะโดยกำหนดให้เป็นดินเหนียว 1 (Clay 1) และดินเหนียว 2 (Clay 2) ตามลำดับ ซึ่งดินเหนียว 1 (Clay 1) เก็บที่ความลึก 1.0 เมตรจากกันแม่น้ำ ดินเหนียว 2 (Clay 2) เก็บตัวอย่างที่ความลึก 3.0 เมตรจากระดับผิวดิน โดยคุณสมบัติของตัวอย่างดินเหนียว 1 และตัวอย่างดินเหนียว 2 แสดงได้ดังตาราง 12

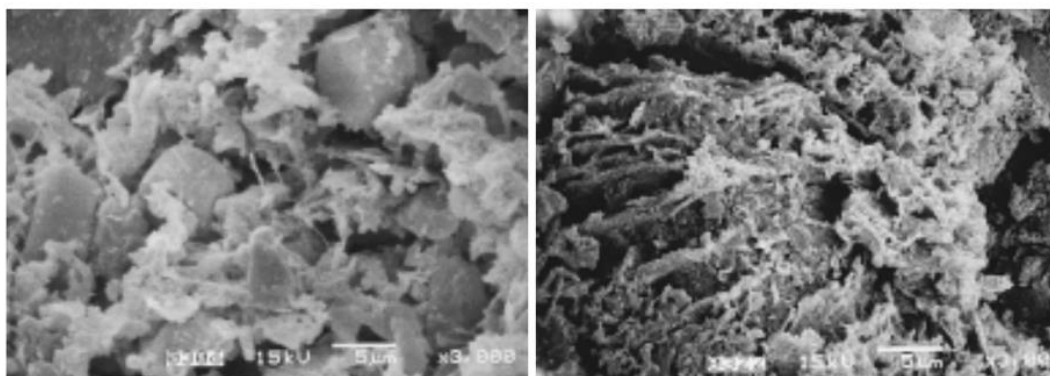
ตาราง 13 คุณสมบัติของดินเหนียวอะริเอเคะ (Ariake clay) [31]

Sample	Clay 1 Okawa Area	Clay 2 Ashikari Area
Natural water content, %	185.0	150.0
Liquid limit, %	142.7	133.0
Plasticity index	89.1	71.4
Specific gravity	2.48	2.62
Particle size distribution, %		
(2.000—0.075 mm) Sand	3	1
(0.075—0.005 mm) Silt	52	44
(<0.005 mm) Clay	45	55
Salt concentration (g/l)	0.0	8.0
pH	6.0	7.6
Organic content, %	1.0	1.0

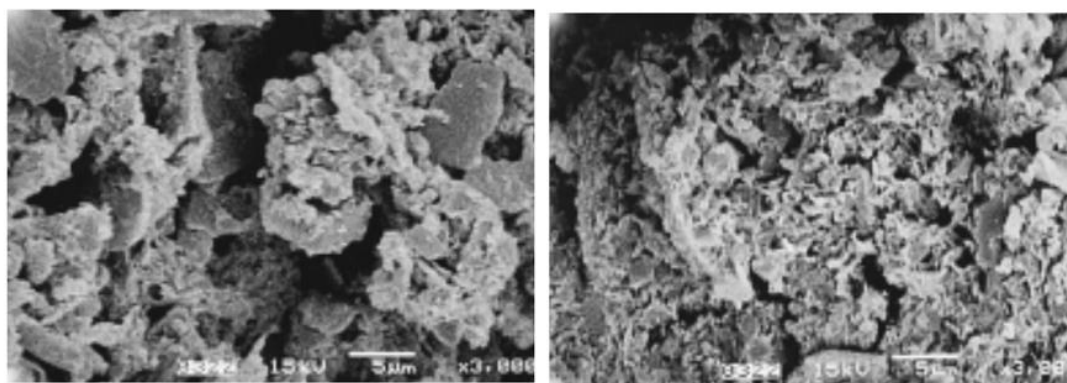
การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวโดยใช้ปูนขาวเท่ากับ 5, 10, 20% โดยน้ำหนักดินเหนียวแห้ง และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เท่ากับ 10, 20, 30% โดยน้ำหนักดินเหนียวแห้ง ปริมาณน้ำในทุกตัวอย่างเท่ากับ 185% และใช้เครื่องมือบดอัดชนิดสั่นสะเทือน (Hand vibrating) เพื่อกำจัดอากาศในช่องว่าง (Entrapped air) ทุกตัวอย่างบ่มที่อุณหภูมิประมาณ 20 องศาเซลเซียส ความชื้น 90% ในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm. ความสูง 100 mm. เพื่อทดสอบ Unconfined compression tests ที่ระยะการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน



ภาพ 38 (a) ตัวอย่างดินเหนียว 1 ที่เตรียมขึ้นมาที่ปริมาณน้ำ 185% และ (b) ตัวอย่างดินเหนียว 2 ที่ปรับแก้ปริมาณน้ำเป็น 185% [31]



ภาพ 39 (a) ตัวอย่างดินเหนียว 1 ผสมปูนขาวที่ปริมาณ 10% ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน และ (b) ตัวอย่างดินเหนียว 2 ผสมปูนขาวที่ปริมาณ 10% ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน [31]

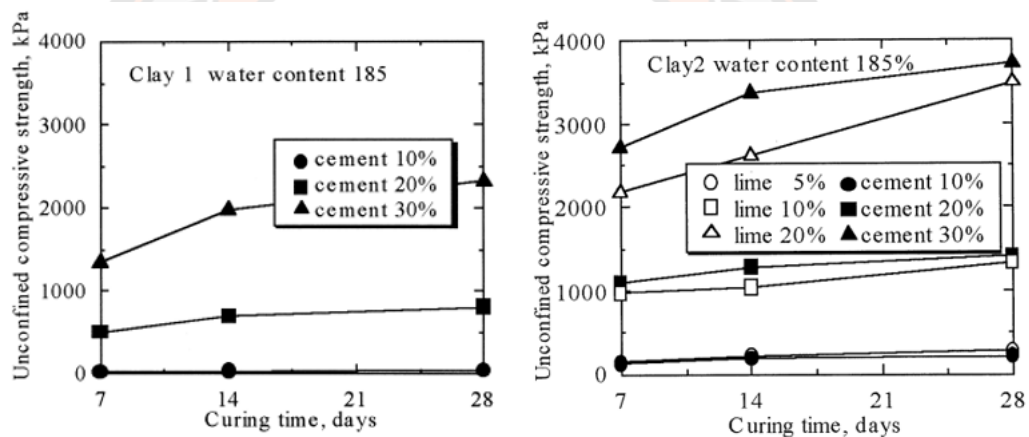


ภาพ 40 (a) ตัวอย่างดินเหนียว 1 ผสมปูนขาวที่ปริมาณ 20% ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน และ (b) ตัวอย่างดินเหนียว 2 ผสมปูนขาวที่ปริมาณ 20% ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน [31]

ในด้านการจัดเรียงตัวของอนุภาค (Fabric) พบว่ามีการรวมกลุ่มของอนุภาคหรือมวลรวมให้มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยภาพ 33(a) และ 33(b) แสดงให้เห็นดินเหนียว 2 มีช่องว่างในการจัดเรียงอนุภาคมากกว่าดินเหนียว 1 ที่ปริมาณน้ำ 185% เท่ากัน ซึ่งเป็นสภาวะที่ดัชนีสภาพเหลว (Liquidity index, LI) ของดินเหนียว 2 ที่มีค่าสูงกว่าดินเหนียว 1 ในภาพ 34(b) ดินเหนียว 2 ที่ปรับปรุงด้วยปูนขาว (lime) 10% แสดงให้เห็นการมีผลิตภัณฑ์เชื่อมประสาน ($\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$, $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$) กันในช่องว่างระหว่างอนุภาคอย่างชัดเจน เหมือนเป็นสะพานที่พันธะเชื่อมระหว่างกลุ่มก้อนอนุภาคซึ่งเรียกว่า “bound bridge” ในภาพ 34(a) แสดงรูปของดินเหนียว 1 ปรับปรุงด้วยปูนขาว 10% ที่แทบจะไม่เห็นผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานแม้ช่องว่างระหว่างอนุภาคของดินเหนียว 1 ที่ปรับปรุงด้วยปูนขาว 10% น้อยกว่าตัวอย่างดินเหนียว 1 ที่เตรียมขึ้นมาเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและการแลกเปลี่ยนไอออนบวกทำให้อนุภาคของดินเหนียวใหญ่ขึ้น

ภาพ 35(b) แสดงดินเหนียว 2 ปรับปรุงด้วยปูนขาว 20% แสดงให้เห็นมวลรวมที่เกิดขึ้นหลายตำแหน่งภายในดินเหนียว การก่อตัวของมวลรวมนี้มาจากการทำปฏิกิริยาของปูนขาวกับอนุภาคของดินเหนียว ในกรณีที่ใช้ปูนขาว 20% ปรับปรุงดินเหนียว 1 ในรูป 35(a) แสดงการจัดเรียงตัวขึ้นส่วนที่มีช่องว่างที่ค่อนข้างเยอะในโครงสร้างดินโดยที่ไม่มีพันธะเชื่อมประสาน (Bound bridge) ระหว่างกลุ่มอนุภาค

ในด้านกำลังและความสามารถในการรับกำลังอัดของตัวอย่างดินที่ปรับปรุงด้วยปูนขาว 20% มีค่าต่ำอยู่ที่ประมาณ 5 kPa ซึ่งในภาพ 36(b) แสดงการพัฒนากำลังของดินเหนียว 2 ที่ปรับปรุงด้วยปูนขาวและซีเมนต์พอร์ตแลนด์ การใช้ปูนขาวมีประสิทธิภาพในการปรับปรุงดินเหนียว 2 มากกว่าการใช้ซีเมนต์พอร์ตแลนด์เนื่องจากกำลังของดินเหนียว 2 ปรับปรุงด้วยปูนขาวมีค่าสูงกว่ากำลังของดินเหนียว 2 ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอร์ตแลนด์โดยที่ปริมาณการใช้ปูนขาวและซีเมนต์พอร์ตแลนด์เท่ากัน



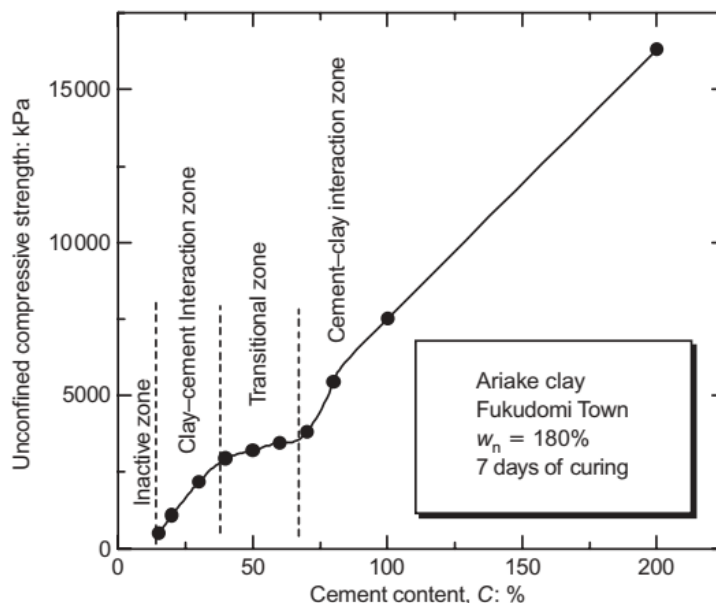
ภาพ 41 (a) กำลังอัดของดินเหนียว 1 ที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอร์ตแลนด์และ (b) กำลังอัดของดินเหนียว 2 ที่ปรับปรุงด้วยปูนขาวและซีเมนต์พอร์ตแลนด์ [31]

กำลังอัดของดินเหนียว 2 ที่ปรับปรุงด้วยปูนขาวและพอร์ตแลนด์ซีเมนต์เพิ่มขึ้นตามปริมาณส่วนผสมเพิ่มและระยะเวลาบ่ม โดยที่กำลังอัดของดินเหนียวเพิ่มขึ้นในช่วง 7 ถึง 14 วันได้รวดเร็วกว่าช่วง 14 ถึง 28 วันเนื่องจากกำลังของดินเหนียวได้รับมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงต้นเป็นหลัก ซึ่งมีความแตกต่างกับดินเหนียวที่ปรับปรุงด้วยปูนขาวเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่เกิดขึ้นในดินเหนียวที่ปรับปรุงด้วยปูนขาวเป็นปฏิกิริยาที่เกิดค่อนข้างช้า

Sunsun Horpibulsuk และคณะ [4] ทำการศึกษาการพัฒนากำลังของส่วนผสมที่ใช้ซีเมนต์ร่วมกับเถ้าลอยและเถ้าชีวมวลชีวภาพได้ทำการเตรียมวัสดุโดยดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครนำมาผ่านตะแกรงขนาด 2 mm. (No. 10) เพื่อกำจัดอนุภาคขนาดใหญ่ โดยที่ปริมาณน้ำถูกปรับอยู่ในช่วงของค่าดัชนีสภาพเหลว (Liquidity index, LI) เท่ากับ 1.0, 1.5, และ 2.0 ซึ่งเป็นการตรวจสอบเพื่อเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณน้ำเริ่มต้น (Initial water content) ของดินเหนียวที่สัมพันธ์กับลักษณะความเป็นพลาสติกของดินเหนียวก่อนถูกผสมด้วยซีเมนต์ จุดประสงค์ในการเพิ่มปริมาณน้ำเพื่อจำลองปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นในการผสมซีเมนต์แบบเปียก (Wet method) ในการผสมลึก (Deep mixing) ดินเหนียวที่มีปริมาณน้ำสอดคล้องกับระดับค่าดัชนีสภาพเหลว (Liquidity index, LI) ข้างต้นจะถูกผสมด้วยส่วนผสมของซีเมนต์กับเถ้าลอยและส่วนผสมของซีเมนต์กับเถ้าชีวมวลด้วยเครื่องผสม

ปริมาณซีเมนต์ (Cement content, C) ที่ใช้มีปริมาณตั้งแต่ 0% ถึง 30% ซึ่งเป็นปริมาณที่ใช้กันทั่วไปในการผสมลึก (Deep mixing) ในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ปริมาณของเถ้าลอย (Fly ash, FA) และเถ้าชีวมวล (Biomass, BA) ที่ใช้แตกต่างกันตั้งแต่ 0% ถึง 60% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ระยะเวลาในการผสมเท่ากับ 10 นาทีในทุกส่วนผสมซึ่งอยู่ในรูปแบบเดียวกับเพสต์จะถูกนำไปบรรจุในแบบทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 50 mm. และสูง 100 mm. โดยไม่ให้มีอากาศอยู่ภายใน จากการที่ดินเหนียวทดสอบมีปริมาณน้ำสูงและมีส่วนผสมซีเมนต์ในตัวอย่างทำให้เมื่อตัวอย่างแข็งตัวจะเป็นวัสดุทางวิศวกรรมโดยปราศจากพลังงานจากการบดอัดใดๆ ในทางปฏิบัติการผสมลึก (Deep mixing) ของเสาจะเริ่มแข็งและทำหน้าที่เป็นเสาเข็มกึ่งแข็ง (Semi-regid pile) ภายในช่วงเวลาสั้นๆหลังจากการดำเนินการ นำตัวอย่างออกจากแบบทรงกระบอกหลังจากตัวอย่างอยู่ในแบบครบ 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการห่อด้วยพลาสติกใสและเก็บไว้ในห้องควบคุมความชื้นและอุณหภูมิอยู่ที่ 20 ± 2 องศาเซลเซียส จนกระทั่งถึงระยะเวลาบ่มที่กำหนดเพื่อนำไปทดสอบ Unconfined compression test ที่ 7, 14, 28, 60, 90 และ 120 วัน ตามมาตรฐาน American Society for Testing and Materials, ASTM โดยที่อัตราการเคลื่อนที่แนวตั้งในการทดสอบ Unconfined compression test เท่ากับ 1 mm/min. [4]

จากการศึกษาของ Suksun Horpibulsuk [32] พบว่าปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบการพัฒนากำลังของดินเหนียวอ่อนอยู่ในช่วง 5-30 % โดยน้ำหนักของดินเหนียวแห้งซึ่งสามารถอธิบายเป็นโชนพื้นที่ดังภาพ 37



ภาพ 42 โซนพื้นที่ปฏิกริยาของดินเหนียวซีเมนต์ [32]

เมื่อปริมาณซีเมนต์ต่ำ ซีเมนต์ที่ทำปฏิกริยากับแต่ละก้อนกลุ่มดินนั้นต่ำเกินกว่าที่จะเปลี่ยนแปลงกำลังของดิน โดยโซนนี้กำหนดเป็นโซนที่ 1 คือเฉื่อยต่อปฏิกริยา (zone 1 : inactive zone) เมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์มากขึ้นทำให้ปริมาณซีเมนต์ต่อกลุ่มก้อนของดินเพียงพอที่จะทำให้เกิดพันธะเชื่อมประสานภายในโครงสร้างดิน โดยพื้นที่โซนนี้กำหนดเป็นโซนที่ 2 (zone 2 : clay-cement interact zone) คือมีการปฏิสัมพันธ์หรือเกิดปฏิกริยาระหว่างดินเหนียวและซีเมนต์ โซนที่ 3 (zone 3 : transitional zone) คือโซนที่มีการเพิ่มขึ้นของกำลังเพียงเล็กน้อยและไม่เกิดการใช้ประโยชน์ของซีเมนต์อย่างเต็มที่ ในโซนที่ 4 เมื่อมีการเพิ่มปริมาณซีเมนต์มากขึ้นจนโครงสร้างของดินเหนียวสูญเสียเอกลักษณ์และกำลังที่เพิ่มขึ้นจากการแข็งตัวต่อเนื่องในรูปแบบโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ [32]

2.10.3 การปรับปรุงดินเหนียวกรุงเทพฯด้วย CCR และวัสดุพอชโซลาน

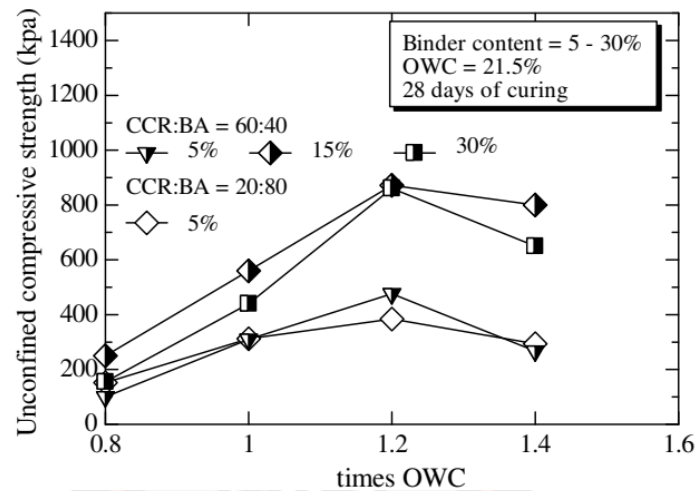
Songsuda Vichan และคณะ [8] ได้ทำการศึกษากำลังและโครงสร้างทางจุลภาคของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯที่ปรับปรุงคุณภาพโดยใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) และเถ้าชีวมวล (Biomass ash, BA) เป็นวัสดุเชื่อมประสาน โดยส่วนผสมที่เหมาะสมของ CCR และ BA เท่ากับ 60 : 40 (CCR : BA) ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุได้สรุปไว้ในตาราง 13

ตาราง 14 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุจากเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray Fluorescence XRF)

[8]

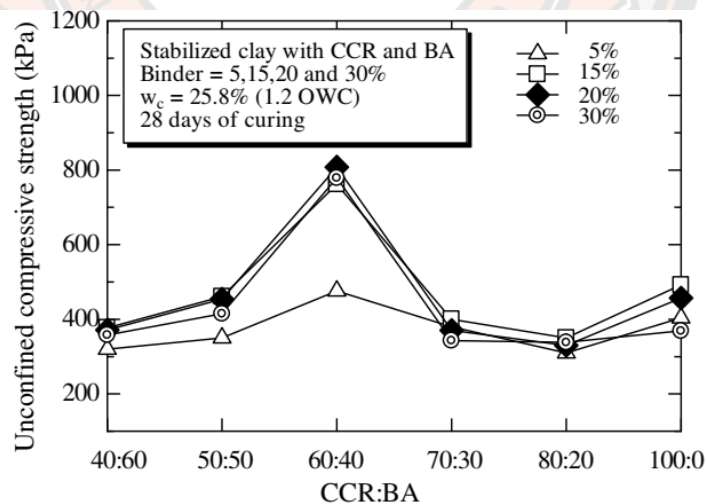
	Chemical composition (%)		
	Bangkok clay	CCR	BA
SiO ₂	63.83	5.46	74.12
Al ₂ O ₃	21.34	2.48	0.57
Fe ₂ O ₃	8.41	0.69	0.88
CaO	0.94	80.10	5.91
MgO	1.54	0.75	1.54
SO ₃	1.22	0.88	0.50
Na ₂ O	0.28	0.05	3.33
K ₂ O	2.45	0.08	1.71
LOI	–	–	7.45

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) 80% ซึ่งใกล้เคียงกับปูนขาว (Hydrated lime) เถ้าชีวมวล (Biomass ash, BA) ส่วนประกอบหลักคือซิลิกา (SiO₂) แต่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ต่ำ ซึ่งขั้นตอนการทดสอบสำหรับงานวิจัยนี้จะใช้ปริมาณน้ำเริ่มต้น, ปริมาณส่วนผสมและสัดส่วนของ CCR และ BA ที่แตกต่างกัน ปริมาณน้ำปรับจาก 0.8 ถึง 1.4 เท่าของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content, OWC) , ปริมาณส่วนผสมที่ต่างกันตั้งแต่ 5-30% และสัดส่วนที่แตกต่างกันของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) และเถ้าชีวมวล (Biomass ash, BA) 5 สัดส่วน (CCR:BA เท่ากับ 40:60, 50:50, 60:40, 70:30 และ 80:20) บดอัดด้วยการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor energy) ในแบบทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm. สูง 100 mm. โดยใช้เวลาในการผสมทั้งหมดไม่เกิน 10 นาทีสำหรับทุกตัวอย่าง จากนั้นจะถูกห่อด้วยแผ่นพลาสติกควบคุมอุณหภูมิที่ 20±1 องศาเซลเซียสจนถึงระยะเวลาบ่มกำหนดที่ 7, 28, 90 และ 150 วัน อัตราการเคลื่อนที่ในแนวตั้งคงที่ไว้ที่ 1 mm/min. จากนั้นตัวอย่างที่ปรับปรุงโดยมีสัดส่วนและระยะเวลาการบ่มที่แตกต่างกัน จะถูกทำให้แตกเป็นเศษชิ้นเล็กจากนั้นจะนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ความชื้นที่ตกค้างระเหยออกและนำไปเก็บในภาชนะที่ปิดมิดชิดเพื่อนำไปทดสอบ SEM, EDS สำหรับระบุการก่อตัวของผลิตภัณฑ์ปอซโซลานิก



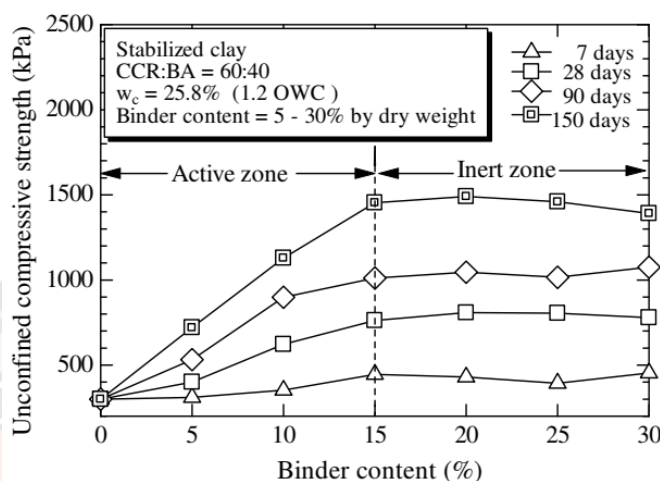
ภาพ 43 การพัฒนากำลังของดินเหนียวปรับปรุงด้วย CCR และ BA ที่ปริมาณน้ำและปริมาณ ส่วนผสมแตกต่างกันที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน [8]

อิทธิพลของปริมาณน้ำต่อการเปลี่ยนแปลงค่า Unconfined compressive strength ของดินเหนียวที่ปรับปรุงดังภาพ 38 ซึ่งแตกต่างกับดินเหนียวที่ไม่ได้ปรับปรุง ปริมาณน้ำเริ่มต้นที่ 1.2 OWC (25.8%) ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด เนื่องจากปริมาณน้ำที่น้อยจะไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกขณะที่มีปริมาณน้ำที่สูงกว่าทำให้อัตราส่วนน้ำต่อส่วนผสม (Water/Binder, W/B) สูงกว่าซึ่งมีลักษณะเดียวกันกับการใช้ซีเมนต์ปรับปรุงดินเหนียว



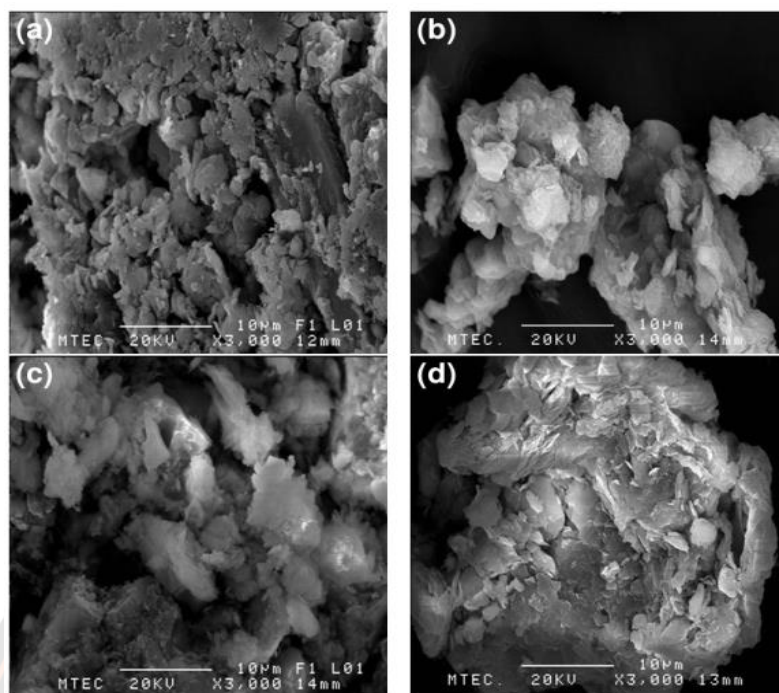
ภาพ 44 การพัฒนาการกำลังของดินเหนียวปรับปรุงด้วยอัตราส่วน CCR:BA ต่างกัน [8]

จากภาพ 39 การพัฒนาการกำลังของดินเหนียวปรับปรุงที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน โดยอัตราส่วน CCR:BA เท่ากับ 60:40 (CCR:BA) ให้กำลังสูงสุดในทุกปริมาณส่วนผสม (Binder content) บทบาทของปริมาณส่วนผสมที่ระยะเวลาบ่มต่างกันในการพัฒนาการกำลังที่ปริมาณน้ำเหมาะสม (1.2 OWC) แสดงในภาพ 40



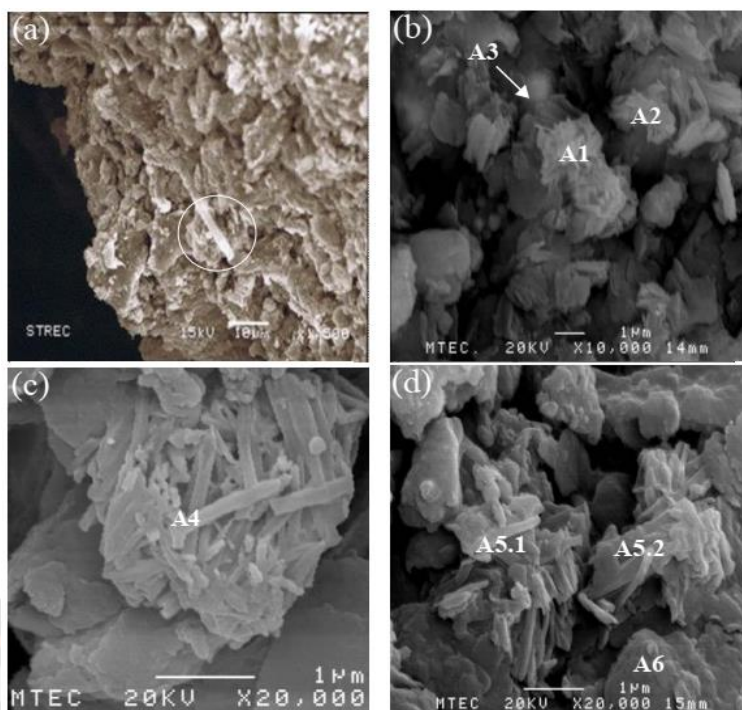
ภาพ 45 การพัฒนาการกำลังของดินเหนียวที่ปรับปรุงด้วย CCR และ BA ที่ปริมาณส่วนประสมต่างกัน ที่ระยะเวลาบ่มเท่ากับ 7, 28, 90 และ 150 วัน [8]

กำลังของดินเหนียวที่ปรับปรุงมีการเพิ่มขึ้นอย่างมากที่ส่วนประสมเท่ากับ 5 – 15% และกำลังค่อยๆลดลงเมื่อปริมาณส่วนประสมเกิน 15% ซึ่งการเพิ่มขึ้นโดยการผสมส่วนประสมสามารถจำแนกออกเป็น 2 โซน : active (ปริมาณส่วนประสมเท่ากับ 5-15%) และ inert (ปริมาณส่วนประสมมากกว่า 15%) ในโซน active ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่สูงจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) และปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้นจากเถ้าชีวมวล (Biomass ash, BA) ทำให้มีการเพิ่มขึ้นของกำลังอย่างชัดเจน เมื่อเพิ่มปริมาณส่วนประสมมากขึ้น (ส่วนประสมมากกว่า 15%) การพัฒนาการกำลังมีการเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ



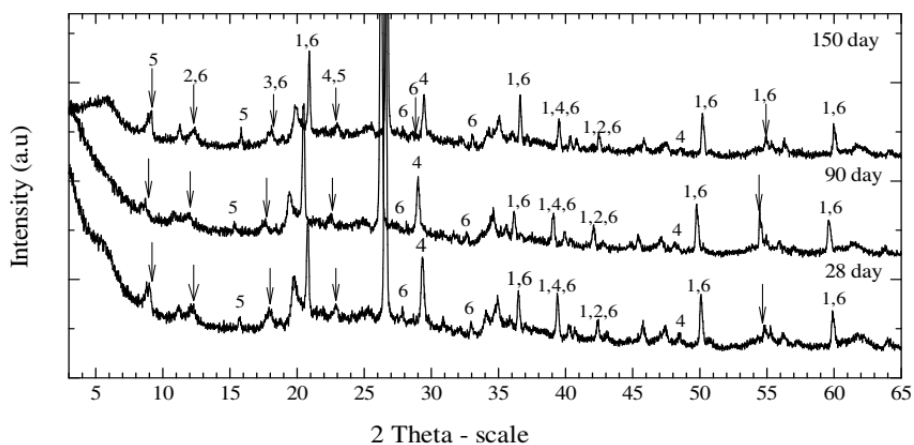
ภาพ 46 รูปดินเหนียวที่ปรับปรุงจากเทคนิค SEM (a) ส่วนประสาน 10% ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน , (b) ส่วนประสาน 10% ที่ระยะเวลาการบ่ม 90 วัน, (c) ส่วนประสาน 20% ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน (d) ส่วนประสาน 20% ที่ระยะเวลาการบ่ม 90 วัน [8]

ภาพ 41 แสดงพื้นผิวทางสัณฐานวิทยาของดินเหนียวกรุงเทพที่ปรับปรุงด้วยส่วนประสานที่ 10% และ 20% ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 และ 90 วัน ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน ตัวอย่างที่ใช้ส่วนประสาน 20% มีการพัฒนามวลรวมมากกว่าในตัวอย่างที่ใช้ส่วนประสาน 10% ซึ่งหมายถึงปริมาณผลิตภัณฑ์ปอซโซลานิกที่สูงกว่าทำให้เกิดพันธะระหว่างอนุภาคของดินเหนียว สัณฐานวิทยาที่ระยะเวลาการบ่ม 90 วันในภาพ 41(b) และ 41(d) มีความแน่นมากกว่าตัวอย่างที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วันเกิดจากการเติมช่องว่างด้วยของผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกด้วยระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังของดินเหนียวเพิ่มขึ้น



ภาพ 47 แสดงผล SEM ด้วยเทคนิค EDS ของดินเหนียวปรับปรุงด้วยส่วนประสาน 30% ที่ระยะเวลาการบ่ม (a) 28 วัน, (b) 90 วัน, (c) และ (d) 150 วัน [8]

ซึ่งพบโครงสร้างผลึกรูปทรงเหลี่ยมยาวในตัวอย่างที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน (ภาพ 42(a)) ผลจาก EDS ยืนยันว่าประกอบด้วยผลึกของ Si, Ca, Al และ O รูปถ่าย SEM ของตัวอย่างที่ระยะการบ่ม 90 วัน (ภาพ 42(b)) แสดงถึงอนุภาคของดินเหนียวที่ปรับปรุงปกคลุมไปด้วยกลุ่มเส้นของแคลเซียมอลูมิเนตซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) ในพื้นที่ A1 และ A2 นอกจากนี้ยังมีผลึกแคลเซียมอลูมิเนตซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) ทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าเล็กๆติดอยู่ตามขอบในพื้นที่ A3 ภายหลังจากระยะเวลาการบ่มครบ 150 วัน จะพบผลึกมวลรวมขนาดใหญ่ (พื้นที่ A4) ที่ด้านหลังมีกลุ่มก้อนแผ่นที่เป็นโครงสร้างของดินเหนียว (รูป 42(c)) ภาพที่ระยะนี้ยังแสดงให้เห็นถึงผลึกรูปทรงพีระมิดหลายหน้า โดยสงสัยว่าเป็น gismondine และในภาพ 42(d) แสดงการเติมช่องว่างของผลิตภัณฑ์แคลเซียมอลูมิเนตซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) (พื้นที่ A5.1 และ A5.2) ในช่องว่างระหว่างผลึกที่มีปริมาณ Ca ต่ำ (พื้นที่ A6) ซึ่งควรจะเป็นอนุภาคของดินเหนียว การเกิดสารประกอบแคลเซียมอลูมิเนตซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) เหล่านี้เป็นหลักฐานที่แสดงถึงปฏิกิริยาปอซโซลานิกในการผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (calcium carbide residue, CCR) และวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ

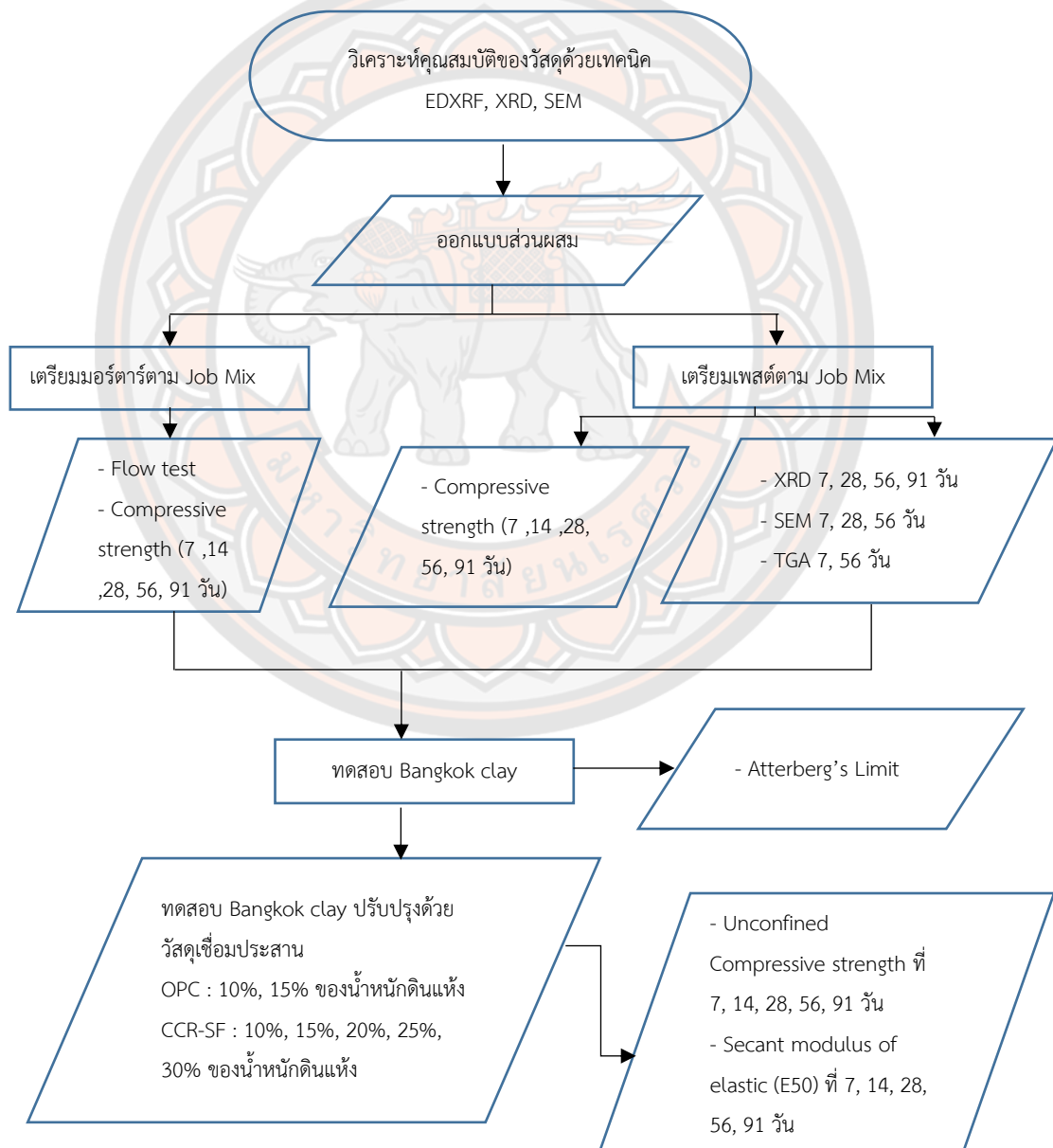


ภาพ 48 XRD ของดินเหนียวที่ปรับปรุงที่ระยะเวลาการบ่ม 28, 90 และ 150 วัน (1:quartz, 2:kaolinite, 3:portlandite, 4:calcite, 5:ettringite, 6:gismondite) [8]

ผลจากเทคนิค XRD ของตัวอย่างที่มีส่วนประสาน 30% แสดงในภาพ 43 ซึ่งมีลักษณะคล้ายกันที่ระยะเวลาการบ่ม 28, 90 และ 150 วัน เห็นได้ชัดเจนจากรูปแบบของ XRD ที่มีผลิตภัณฑ์ปอซโซลานิกคือผลึกของ ettringite ($\text{Ca}_2\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และ gismondine ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) การพบผลึกแคลเซียมอลูมิเนียมซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) ทรงพีรามิดคู่จากรูปถ่าย SEM (ภาพ 42c) ยืนยันลักษณะของ gismondine โดยการตรวจสอบจากเทคนิค XRD ซึ่งผลลัพธ์เหล่านี้เป็นหลักฐานในการปรับปรุงดินโดยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) และเถ้าชีวมวล (Biomass ash, BA) ด้วยสัดส่วนที่เหมาะสม (60:40) สามารถเพิ่มระดับค่า pH และเร่งปฏิกิริยาปอซโซลานิก ซึ่งก่อตัวเป็นสารประกอบแคลเซียมอลูมิเนียมซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H)

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

บทนี้เป็นการบรรยายรายละเอียดเพื่อศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมและปฏิกริยาระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และซิลิกาฟุ่มในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ โดยทำการออกแบบส่วนผสมและทำการทดสอบตัวอย่างที่เป็นซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ในสัดส่วนต่างๆเพื่อเลือกส่วนผสมที่มีเหมาะสมไปผสมกับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพเพื่อทดสอบหาการเปลี่ยนแปลงค่า Unconfined compressive strength และโมดูลัสยืดหยุ่นซีแคนต์ (Secant modulus of elastic, E50) ของดิน



3.1 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของวัสดุ

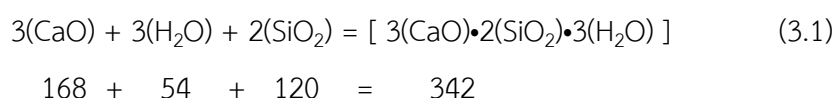
จากการวิเคราะห์ธาตุด้วยการเรืองแสงรังสีเอ็กซ์แบบ Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer (EDXRF) พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และซิลิกาฟุ้ง (SF) แสดงดังตาราง 15

ตาราง 15 องค์ประกอบทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และซิลิกาฟุ้งจากเทคนิค Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer (EDXRF)

Sample Designation	Calcium carbide residue (CCR)	Silica fume (SF)
Sample Description	Grey Power	Grey Powder
Item (Chemical)		
SiO ₂ (%)	1.84	93.51
Al ₂ O ₃ (%)	-	0
Fe ₂ O ₃ (%)	-	0.22
CaO (%)	96.70	2.06
MgO (%)	-	0.4
K ₂ O (%)	-	0.34
Na ₂ O (%)	-	0.05
SO ₃ (%)	0.85	0.56

3.2 การออกแบบส่วนผสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และซิลิกาฟุ้ง

ปฏิกิริยาปอซโซลานิกระหว่างแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาแสดงดังสมการ (3.1)



มวลโมลาร์ของแคลเซียมออกไซด์ 168 ต่อมวลโมลาร์ของซิลิกา 120 ที่มีอัตราส่วน 168/120 เท่ากับ 1.40 ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่มีมวลโมลาร์เท่ากับ 342 คณะผู้วิจัยจึงออกแบบอัตราส่วนของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 1.85, 1.55, 1.25, 0.95, 0.65 เพื่อให้ครอบคลุมอัตราส่วนทางทฤษฎีตามสมการ 3.1 โดยใช้ปริมาณแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาจากองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุในการออกแบบสัดส่วนผสมของวัสดุเชื่อมประสานจากการทำปฏิกิริยา

ปอซโซลานิกตามสมการทางเคมีเพื่อเกิดเป็นผลิตภัณฑ์และเป็นการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดจากอัตราส่วนที่ให้ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์สูงสุดจากการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ (Compression test)

จากนั้นจึงคำนวณหาปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) โดยเลือกควบคุมปริมาณแคลเซียมออกไซด์ไว้เท่ากับ 168 และเพิ่มปริมาณซิลิกาขึ้น ดังตาราง 16

ตาราง 16 อัตราส่วนระหว่างแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาที่แตกต่างกัน

Ratio Ca/Si	1.85	1.55	1.25	0.95	0.65
3CaO	168	168	168	168	168
2SiO ₂	91	108	134	177	258

หลังจากได้อัตราส่วนมวลโมลาร์ระหว่างแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาตาราง 16 ทางคณะผู้วิจัยได้เสนอความสัมพันธ์ในการหาปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) ที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูงและซิลิกาฟุ่ม (SF) ที่มีปริมาณซิลิกาสูง โดยใช้ข้อมูลจากการทดสอบบดประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ EDXRD ในตาราง 15 มาทำการคำนวณดังสมการ (3.2) และ (3.3)

$$\text{CaO} = x_1 \cdot C_{\text{CCR}} + x_2 \cdot C_{\text{SF}} \quad (3.2)$$

$$\text{SiO}_2 = x_1 \cdot S_{\text{CCR}} + x_2 \cdot S_{\text{SF}} \quad (3.3)$$

- โดยที่ x_1 คือ ปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) ในหน่วยมวล
 x_2 คือ ปริมาณซิลิกาฟุ่ม (SF) ในหน่วยมวล
 C_{CCR} คือ ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (%CaO) ของ CCR
 C_{SF} คือ ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (%CaO) ของ SF
 S_{CCR} คือ ปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (%SiO₂) ของ CCR
 S_{SF} คือ ปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (%SiO₂) ของ SF

เมื่อทำการแก้สมการ 2 ตัวแปร จะได้ค่าปริมาณของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และซิลิกาฟุ่ม (SF) ดังตาราง 17 จากนั้นนำปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และซิลิกาฟุ่ม (SF) เทียบเป็นร้อยละโดยมวล (wt.%) ดังแสดงในตาราง 18

ตาราง 17 แสดงปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และปริมาณซิลิกาฟุ่ม (SF) จากการแก้สมการในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

Ratio Ca/Si	1.85	1.55	1.25	0.95	0.65
CCR (x_1)	226.93	226.40	225.61	224.34	221.88
SF (x_2)	123.86	148.71	185.49	245.49	360.88
Total (x_1+x_2)	350.79	375.11	411.10	469.82	582.75

ตาราง 18 สัดส่วนระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และซิลิกาฟุ่มโดยน้ำหนัก

Ratio Ca/Si	1.85	1.55	1.25	0.95	0.65
CCR (wt.%)	65.0	60.0	55.0	48.0	38.0
SF (wt.%)	35.0	40.0	45.0	52.0	62.0

3.3 การทดสอบซีเมนต์เพสต์

3.3.1 ขั้นตอนการเตรียม

1. ชั่งวัสดุกากแคลเซียมคาร์ไบด์และซิลิกาฟุ่มตามปริมาณที่กำหนดดังตารางที่ 18 ผสมกันด้วย ball milling เป็นระยะเวลา 5 นาที เพื่อเป็นวัสดุเชื่อมประสานในการหล่อเพสต์ที่อัตราส่วน CaO/SiO₂ ต่างๆ
2. ประกอบหม้อผสมที่แห้งและใบผสมที่แห้งเข้ากับเครื่องผสม
3. ใส่ น้ำด้วยปริมาณที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน (w/b) เท่ากับ 0.65 ที่จะผสมเข้าในหม้อผสมจนหมด
4. ใส่วัสดุเชื่อมประสานลงในหม้อผสมเพื่อสัมผัสกับน้ำ และปล่อยให้ น้ำซึมเข้าไป 30 วินาที
5. เมื่อครบ 30 วินาทีจึงเดินเครื่องผสมเพื่อให้ใบผสมกวนส่วนผสมอย่างช้าๆโดยใช้อัตราช้า (140±5 รอบต่อนาที) เป็นเวลา 30 วินาที
6. หยุดเครื่องผสมเป็นเวลา 15 วินาที ระหว่างที่หยุดนี้ให้ปาดเพสต์ที่ติดข้างหม้อผสมลงยังกันหม้อ
7. เดินเครื่องผสมด้วยอัตราปานกลาง (285±10 รอบต่อนาที) เป็นเวลา 1 นาที
8. นำเพสต์ทั้งหมดออกจากหม้อผสมใส่แบบหล่อรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 25x25x25 ลูกบาศก์มิลลิเมตร จากนั้นนำไปวางบน vibration plate เป็นระยะเวลา 1 นาทีและวางไว้ในพื้นที่ที่มีความชื้นเพียงพอเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง

9. หลังจากครบ 24 ชั่วโมง นำพลาสติกหุ้มทั้งแบบหล่อเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นของตัวอย่างเป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นถอดแบบและทำการหุ้มด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นและบ่มต่อไปจนถึงระยะเวลาครบกำหนดทดสอบ

3.4 การเตรียมตัวอย่างมอร์ตาร์และการทดสอบกำลังรับแรงอัด

ตาราง 19 แสดงปริมาณวัสดุที่ใช้ในการผสมเพื่อหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์

Mixes	CCR (kg/m ³)	SF (kg/m ³)	Cement (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	SP (kg/m ³)	Flow (%)
OPC	-	-	500	1375	330	-	109
Ca/Si -1.85	325	175	-	1375	330	31.55	108
Ca/Si -1.55	300	200	-	1375	330	40.65	109
Ca/Si -1.25	275	225	-	1375	330	45.00	108
Ca/Si -0.95	240	260	-	1375	330	41.90	112
Ca/Si -0.65	190	310	-	1375	330	43.35	109

3.4.1 การผสมมอร์ตาร์

- ประกอบเครื่องผสมมอร์ตาร์
- ใส่น้ำที่ผสมในหม้อจนหมด
- ใส่กากแคลเซียมคาร์ไบด์และซิลิกาฟุ่มที่ถูกผสมแห้งให้เข้ากันไว้ก่อนหน้าลงในหม้อจนหมด จากนั้นเดินเครื่องผสมเพื่อกวนส่วนผสมให้เข้ากัน โดยใช้อัตราช้า (140±5 รอบต่อนาที) เป็นเวลา 30 วินาที
- เมื่อวัสดุกากแคลเซียมคาร์ไบด์และซิลิกาฟุ่มผสมกับน้ำได้ 30 วินาที จึงใส่ทรายลงในหม้อผสมอย่างช้าๆภายในเวลา 30 วินาที แต่ยังคงใช้อัตราการผสมแบบช้าๆ
- หยุดเครื่องผสม จากนั้นเปลี่ยนอัตราการผสมเป็นอัตราปานกลาง ซึ่งมีความเร็วในการกวนเท่ากับ (285±10 รอบต่อนาที) และผสมด้วยอัตรานี้เป็นเวลา 30 วินาที
- หยุดเครื่องผสมและปล่อยมอร์ตาร์ทิ้งไว้เป็นเวลา 90 วินาที และในระหว่างเวลา 15 วินาทีแรกให้ทำการปาดมอร์ตาร์ที่ติดข้างหม้อผสมลงในหม้อ จากนั้นนำภาชนะมาปิดปากหม้อผสมเพื่อไม่ให้ความชื้นระเหยออกจากหม้อผสมจนครบ 90 วินาที

7. เดินเครื่องผสมต่อด้วยอัตราปานกลาง (285 ± 10 รอบต่อนาที) เป็นเวลา 1 นาที เป็นอันเสร็จสิ้นการผสมมอร์ตาร์

3.4.2 การทดสอบหาค่าการไหล

1. ทำความสะอาดผิวหน้าของโตะการไหลให้สะอาด ก่อนวางแบบทดสอบ
2. ตักมอร์ตาร์ใส่ในแบบทดสอบให้มีความสูงประมาณ 25 มม. และกระทุ้งด้วยไม้กระทุ้งจำนวน 20 ครั้ง ให้ทั่วตลอดหน้าตัด เพื่อให้มอร์ตาร์สม่ำเสมอในแบบ
3. ตักมอร์ตาร์ใส่ในแบบอีก 1 ชั้นและทำเช่นเดียวกันกับครั้งแรก
4. ภายหลังกะทุ้งชั้นที่ 2 เสร็จให้นำเกรียงปาดหน้าผิวหน้า โดยการลากเกรียงให้ตั้งฉากกับผิวหน้าของแบบ หากมีน้ำไหลออกมาให้ทำความสะอาดและเก็บเศษมอร์ตาร์ที่ล้นออกจากแบบทดสอบ
5. ยกแบบขึ้นอย่างช้าๆ ซึ่งเวลาที่ใช้ตั้งแต่ใส่มอร์ตาร์ลงแบบจนถึงเวลาที่ยกแบบออกมาประมาณ 1 นาที
6. ภายหลังกการยกแบบออก ให้ทำการหมุนที่หมุนของโตะแบบไหล ซึ่งจะยกจานของโตะแบบไหลขึ้นสูง 13 มม. และปล่อยให้ตกลงอย่างอิสระจำนวน 25 รอบใน 15 วินาที โดยระหว่างการทดสอบโตะทดสอบต้องไม่เกิดการเคลื่อนไหวและมั่นคง
7. เมื่อเสร็จสิ้นการเคาะของเครื่อง มอร์ตาร์จะแผ่ออกบนจานเกือบเป็นวงกลม ให้ใช้เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์วัดศูนย์กลางของมอร์ตาร์จำนวน 4 ครั้ง

3.4.3 การหล่อมอร์ตาร์ลงแบบ

1. ภายหลังจากการทดสอบหาค่าการไหล ให้นำมอร์ตาร์ที่อยู่บนการทดสอบค่าการไหลใส่คืนหม้อผสมปาดมอร์ตาร์ที่ติดอยู่ข้างหม้อลงไปก้นกลางหม้อ ก่อนนำไปกวนในหม้อผสมในอัตราปานกลาง เป็นเวลา 15 วินาที
2. ทำการหล่อมอร์ตาร์ทั้งหมดลงในแบบหล่อโดยใช้เวลาทั้งหมดในการหล่อลงแบบไม่เกิน 2 นาที 30 วินาที ภายหลังจากการผสมมอร์ตาร์เสร็จสิ้น เพื่อลดปัญหาการระเหยของน้ำออกจากส่วนผสม
3. ใช้เกรียงตักมอร์ตาร์ลงในแบบหล่อชั้นแรกโดยมีความหนาประมาณ 25 มม. ซึ่งเป็นความหนาครึ่งหนึ่งของตัวอย่าง โดยใส่มอร์ตาร์ลงในแบบหล่อทุกแบบที่ต้องการหล่อและกระทุ้งมอร์ตาร์ด้วยไม้กระทุ้งจำนวน 32 ครั้ง ต่อ 1 ตัวอย่างภายใน 10 วินาที โดยแบ่งกระทุ้งเป็น 4 รอบๆละ 8 ครั้ง ทำแบบนี้ทั้ง 2 ชั้น

4. เมื่อเสร็จสิ้นการกระทุ้งทั้ง 2 ชั้นแล้วให้ใช้เกรียงปาดและตกแต่งตัวอย่างให้เรียบร้อยและจากนั้นให้ทำการปิดตัวอย่างเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นของมอร์ตาร์เป็นเวลา 30 นาที จนมอร์ตาร์แข็งก่อนจะนำไปบ่มตามมาตรฐาน

3.4.4 การทดสอบกำลังอัด

1. นำมอร์ตาร์ออกจากการบ่มด้วยน้ำตามเวลาที่กำหนด ในกรณีที่ทดสอบมากกว่า 1 ตัวอย่าง ให้ใช้ผ้าชุบน้ำคลุมตัวอย่างที่รอการทดสอบไว้จนกว่าจะได้ทดสอบ
2. ก่อนนำตัวอย่างทดสอบให้ใช้ผ้าเช็ดตัวอย่างให้แห้ง(ชื้น) เพื่อขจัดเม็ดยาที่ผิวของตัวอย่างออก แล้วเลือกด้านที่เรียบที่สุด 2 ด้านที่อยู่ตรงข้ามกันเพื่อรับแรงจากเครื่องทดสอบ
3. ทดสอบการรับน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ โดยวางตัวอย่างมอร์ตาร์บนเครื่องทดสอบ นำแผ่นเบริงวางบนตัวอย่างมอร์ตาร์ให้อยู่ตรงศูนย์กลางเครื่อง และให้แน่ใจว่าวงส่วนของแผ่นให้แรงที่ติดอยู่กับเครื่องสามารถเคลื่อนไหวได้ เพื่อปรับระดับให้เป็นระนาบขณะทำการทดสอบ
4. ให้น้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่อัตราคงที่ประมาณ 90-180 กิโลกรัมต่อนาที จนตัวอย่างวิบัติ

3.5 การทดสอบดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ (Soft Bangkok clay, SBC)

3.5.1 ขีดจำกัดของแอตเตอร์เบอร์ก (Atterberg's Limit)

3.5.1.1 ขั้นตอนการเตรียม

นำดินตัวอย่างมาตากแห้งที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำมาทุบด้วยค้อนยาง ให้ดินแยกออกจากกัน แล้วนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 โดยใช้ปริมาณตัวอย่างตามการทดสอบดังนี้

การทดสอบ Liquid Limit ใช้ปริมาณตัวอย่างประมาณ 100 กรัม

การทดสอบ Plastic Limit ใช้ปริมาณตัวอย่างประมาณ 20 กรัม

3.5.1.2 วิธีการทดสอบ

การหาขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit)

1. นำดินที่เตรียมไว้ใส่ในถ้วยเคลือบ ใส่น้ำประมาณ 15-20 มิลลิลิตร โดยไม่ให้ความเหนียวจนเกินไป แล้วผสมให้เข้ากัน
2. เตรียมอุปกรณ์ชุดทดสอบให้ความสูงของกันจานอยู่สูงกว่าพื้นรอง 1 ± 0.2 เซนติเมตร โดยใช้ค้อน Grooving Tool วัด ทำการปรับป้อนต่างๆให้แน่น
3. ใช้มีดปาดดิน (Spatula) ตักดินใส่ลงในจาน แล้วปาดให้เรียบ โดยให้มี

หนาของดินตรงกลางประมาณ 1 เซนติเมตร

4. บากดินในงานให้ดินแบ่งเป็น 2 ช้างเท่า ๆกัน โดย Grooving Tool ให้เป็นร่องจนเห็นพื้นงาน (ในการบากดินควรทำครั้งเดียว) รอยบากประมาณ 1 เซนติเมตร

5. หมุนให้งานกระทบกับพื้นรอง โดยใช้ความเร็วในการหมุน 1.9 – 2.1 ครั้งต่อ 1 วินาที โดยนับจำนวนครั้งไว้ด้วยทำการหมุนจนกระทั่งดินที่บากไว้ไหลเข้าชนกันเป็นระยะ $\frac{1}{2}$ นิ้ว (12.7 มิลลิเมตร)

6. ในการเคาะจะนับการเคาะที่ 25 – 35 ครั้ง แล้วดินไหลมาชนกันที่ระยะทาง $\frac{1}{2}$ นิ้ว (12.7 มิลลิเมตร) ในมาตรฐาน ASTM D4318 มีการกำหนดจำนวนครั้งเพื่อความสะอาดดังนี้

จำนวนการเคาะครั้งที่ 1 ประมาณ 25 – 35 ครั้ง

จำนวนการเคาะครั้งที่ 2 ประมาณ 20 – 30 ครั้ง

จำนวนการเคาะครั้งที่ 3 ประมาณ 15 – 25 ครั้ง

7. ใช้ Spatula ตักดินเฉพาะตรงที่ดินไหลมาชนกัน โดยปาดขนานกันให้ระยะห่างพอดีกับระยะที่ดินไหลมาชนกัน นำดินที่ตักใส่กระป๋องบรรจุตัวอย่าง แล้วนำไปอบเพื่อหาปริมาณความชื้น

8. นำดินที่เหลือในงานกลับไปผสมกับดินที่อยู่ในถ้วยกระเบื้อง เติมน้ำที่ละน้อยผสมเข้ากันให้ทั่ว ทำความสะอาดงานของชุดทดสอบ Grooving Tool, Spatula โดยไม่ให้มีเศษดินเหลืออยู่

9. ทำการทดสอบซ้ำขั้นตอนที่ 3 – 8 จนครบ 3 ตัวอย่าง

การหาขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit)

1. นำดินที่เตรียมไว้จากการหา Liquid Limit ประมาณ 20 กรัม ผสมกับน้ำให้หมาดที่สุด ปั้นเป็นก้อนกลม เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 มิลลิเมตร

2. นำไปคลึงบนแผ่นกระจกในอัตรา 80 – 90 ครั้ง / นาที จนกระทั่งเป็นกลมยาว เส้นผ่านศูนย์กลาง $\frac{1}{8}$ นิ้ว (3.2 มิลลิเมตร) ให้เกิดรอยแตกเล็กๆจึงนำตัวอย่างที่ได้ใส่กระป๋องบรรจุตัวอย่างเพื่อหาปริมาณความชื้น (Water Content)

3. ทำซ้ำจนครบ 3 ตัวอย่าง

3.6 การทดสอบดินซีเมนต์

3.6.1 การออกแบบส่วนผสมระหว่างดินเหนียวกรุงเทพฯกับวัสดุประสาน

การออกแบบส่วนผสมสำหรับการปรับปรุงดินเหนียวกรุงเทพฯด้วยวัสดุเชื่อมประสานโดยการนำดินเหนียวกรุงเทพฯผสมด้วยวัสดุเชื่อมประสานปริมาณ 10%, 15%, 20%, 25% และ 30% โดยน้ำหนักดินแห้ง เพื่อทดสอบ Unconfined compression test ในการหาค่า Unconfined compressive strength ของดินที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน ดังตาราง 20

ตาราง 20 ตารางสัดส่วนผสมของดินเหนียวปรับปรุงด้วยวัสดุเชื่อมประสาน OPC และ CCR-SF

Mixes	SBC (kg/m ³)	OPC (kg/m ³)	CCR-SF binder (kg/m ³)	Water (1.0 LL + w/b = 0.6)
Untreated clay	1049	-	-	619 kg/m ³
C10	961	96	-	625 kg/m ³
S15	908	136	-	618 kg/m ³
S10	939	-	94	610 kg/m ³
S15	893	-	134	607 kg/m ³
S20	863	-	173	613 kg/m ³
S25	824	-	206	610 kg/m ³
S30	795	-	238	612 kg/m ³

3.6.2 การทดสอบ Unconfined compression test

3.6.1.1 ขั้นตอนการเตรียม

1. นำดินมาร่อนผ่านตะแกรง No.10
2. เตรียมน้ำที่ปริมาณ 1.0 เท่าของขีดจำกัดเหลวเพื่อผสมกับดินเหนียว
3. เตรียมน้ำโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานเท่ากับ 0.6 สำหรับการผสมกับวัสดุเชื่อมประสานก่อนนำไปผสมกับดินเหนียวในสภาพของเหลว
4. หลังจากได้ปริมาณความชื้นตามต้องการแล้วทำการผสมดินเหนียวกับน้ำด้วยเครื่องผสมโดยใช้ใบกวน ในขณะที่วัสดุเชื่อมประสานจะถูกผสมกับน้ำด้วยเครื่องผสมในลักษณะของเพสต์

5. เทวีสตุเชื่อมประสานที่อยู่ในรูปแบบของเพสต์ลงไปดินเหนียวเพื่อผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นใส่แบบหล่อทรงกระบอกขนาดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร สูง 100 มิลลิเมตร ให้เสร็จภายในเวลา 45 นาที (ก่อนที่ส่วนผสมจะเริ่มทำปฏิกิริยา)

6. ส่วนผสมที่ถูกห่อด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น และเก็บไว้ในห้องที่ตัวอย่างไม่ถูกรบกวนจนถึงระยะเวลาที่ทำการทดสอบตามระยะเวลาปม 7, 28, 56 และ 91 วัน และทำการทดสอบ unconfined compression test

3.6.1.2 วิธีการทดสอบ

1. นำตัวอย่างดินที่ปรับปรุงคุณภาพ มาตัดแต่งให้ด้วยเลื่อยเส้นลวดและเครื่องมือตัดแต่งดินให้เป็นรูปทรงกระบอก

2. ใช้กระบอกผ่าหุ้มตัวอย่างเพื่อตัดส่วนบนและส่วนล่างของตัวอย่างให้ได้ความสูงตามต้องการ โดยความสูงต้องมากกว่า 2 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier Caliper) วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูง

3. นำตัวอย่างวางลงบนเครื่องทดสอบโดยจัดให้ตัวอย่างอยู่ศูนย์กลางของเครื่องปรับ Dial Gauge ให้เริ่มต้นที่ศูนย์และแป้นกดเครื่องสัมผัสพอดีกับตัวอย่าง

4. เริ่มการกดโดยใช้อัตราคงที่คงที่การเคลื่อนที่แนวตั้งอยู่ที่ 1 มิลลิเมตรต่อนาที

5. เมื่อแรงกดเพิ่มขึ้นจนสูงสุดแล้วลดลง หมายถึงจุดสูงสุดของกำลังรับแรงของดิน

6. อ่านค่าจนเห็นระนาบรอยเฉือน (Failure Plane) หากไม่ปรากฏให้ทดสอบจนการหดถึงประมาณ 20 % ของตัวอย่าง

7. นำตัวอย่างที่ทดสอบเสร็จไปชั่งและเข้าเตาอบเพื่อหาปริมาณความชื้น (Water Content)

บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีและคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุ

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ทางเคมีของวัสดุด้วยเทคนิค Energy dispersive x-ray fluorescence (EDXRF)

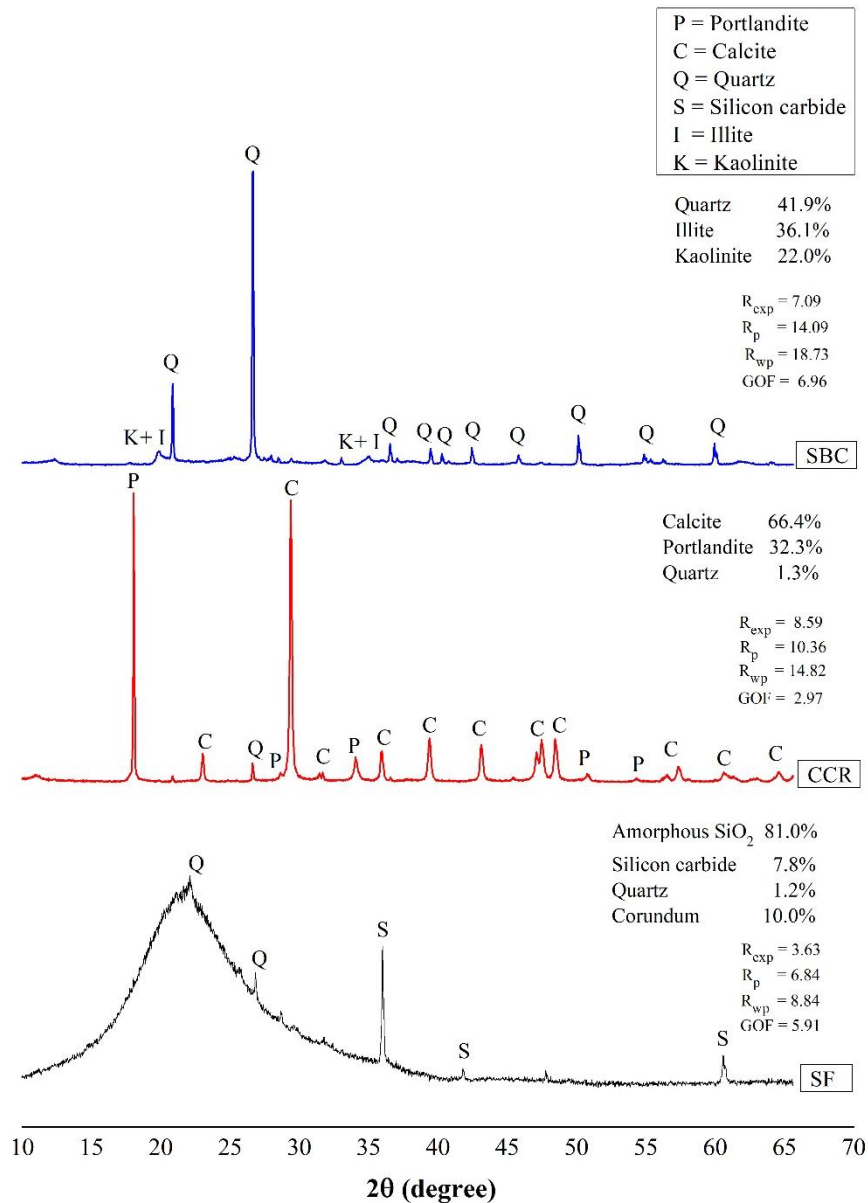
การทดสอบคุณสมบัติทางด้านเคมีของวัสดุด้วยเทคนิค EDXRF (Energy Dispersive X-ray Fluorescence) สำหรับปริมาณธาตุต่างๆในวัสดุแสดงดังตาราง 20

ตาราง 21 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ CCR, SF และ SBC

Chemical composition	Calcium carbide residue (CCR)	Silica fume (SF)	Soft Bangkok clay (SBC)
SiO ₂ (%)	1.84	93.51	66.79
Al ₂ O ₃ (%)	-	-	17.42
Fe ₂ O ₃ (%)	-	0.22	9.01
CaO (%)	96.70	2.06	1.42
MgO (%)	-	0.4	1.32
K ₂ O (%)	-	0.34	2.11
Na ₂ O (%)	-	0.05	2.11
SO ₃ (%)	0.85	0.56	1.93

จากตาราง 21 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR), ซิลิกาฟุ้ง (SF) และดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ (SBC) ด้วยเทคนิค EDXRF พบว่ากากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) มีองค์ประกอบหลักเป็นแคลเซียมออกไซด์โดยมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์เท่ากับ 96.7% ในขณะที่ซิลิกาฟุ้ง (SF) มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกาโดยมีปริมาณซิลิกาเท่ากับ 93.51% และดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ (SBC) มีองค์ประกอบหลักคือซิลิกา (SiO₂) และอลูมินา (Al₂O₃) โดยมีปริมาณซิลิกาเท่ากับ 66.79% และมีปริมาณอลูมินาเท่ากับ 17.42%

4.1.2 ผลการวิเคราะห์วัสดุด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD)



ภาพ 49 โครงสร้างผลึกจากการทดสอบ XRD ของ a) ซิลิกาฟุ่ม (SF) , b) กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และ c) ดินเหนียวกรุงเทพฯ (SBC)

ภาพ 49 แสดงกราฟ XRD ของซิลิกาฟุ่ม (SF), กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (SBC) จากรูปแบบ XRD ของซิลิกาฟุ่ม (SF) พบเฟสออสซิลิโคนที่เป็นองค์ประกอบหลักของซิลิกาฟุ่ม (SF) ในลักษณะเป็นเนินโค้งช่วง 2θ เท่ากับ 17.5 ถึง 25° เท่ากับ 81.0% ซึ่งบ่งชี้ความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาของซิลิกาฟุ่ม (SF) และพบเฟสผลึกของควอตซ์ (Quartz) และซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide) เพียงเล็กน้อย ในส่วนของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) มีพีคหลักคือพอร์ต

แลนไดต์ (Portlandite) และแคลไซต์ (Calcite) ในปริมาณ 32.3% และ 66.4% ตามลำดับ โดยพีคแคลไซต์ที่มีความเข้มสูงเนื่องจากที่แคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) ที่ถูกเก็บเป็นระยะเวลาอันยาวนานสัมผัสกับอากาศโดยรอบจึงเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน (carbonation) และรูปแบบ XRD ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ (SBC) แสดงพีคหลักเป็นควอตซ์ (Quartz) เท่ากับ 41.9% และกลุ่มแร่ดินเหนียวคือพีคของอิลไลต์ (illite) และเกาลินไนท์ (Kaolinite) ในปริมาณ 36.1% และ 22.0% ตามลำดับ

4.1.3 ผลการวิเคราะห์ Thermogravimetric analysis (TGA) ของวัสดุกากแคลเซียมคาร์ไบด์และซิลิกาฟุ่ม

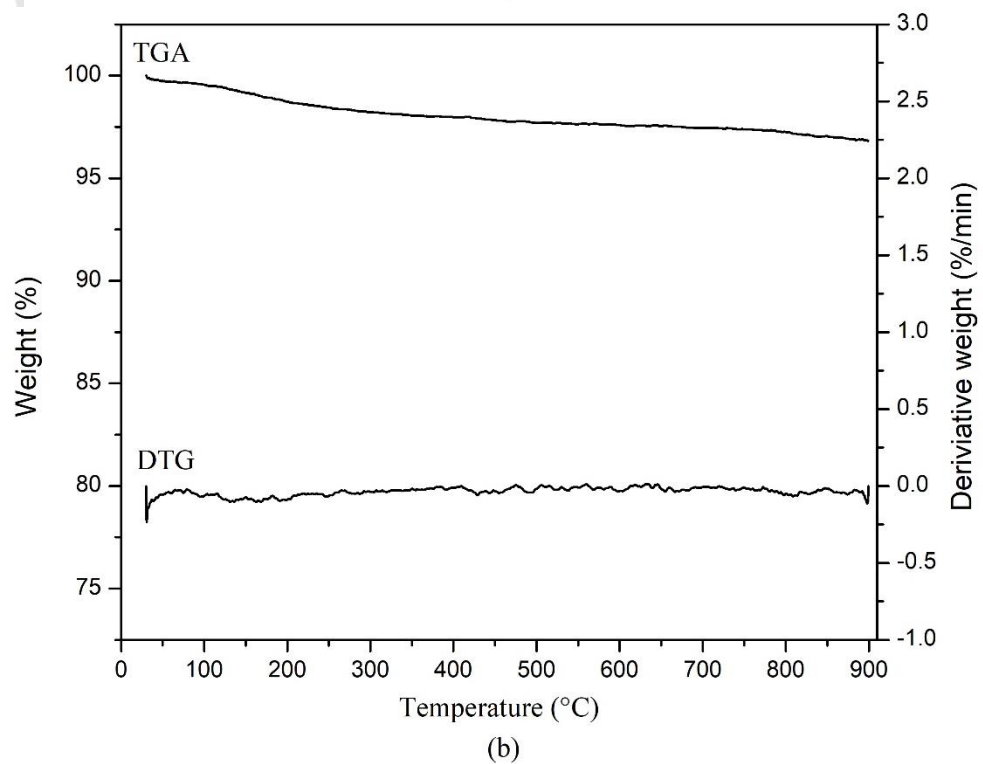
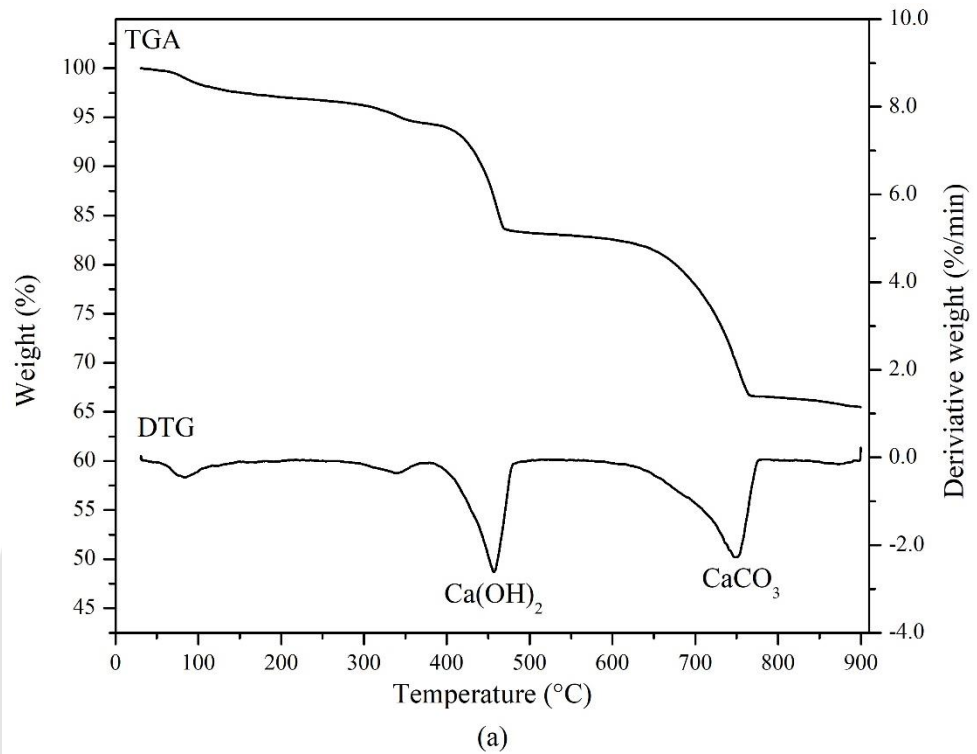
จากกราฟ TGA ในภาพ 50(a) พบว่า CCR มีการสูญเสียน้ำหนักในปริมาณมากในช่วงอุณหภูมิ 400 - 495 °C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่เกี่ยวข้องกับการสูญเสียน้ำหนักของพอร์ตแลนไดต์ (Ca(OH)₂) จากกระบวนการคายน้ำ (dehydration) ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์กลายเป็นแคลเซียมออกไซด์ดังสมการ (4)

จากนั้นการสูญเสียน้ำหนักค่อนข้างคงที่จนถึงช่วงอุณหภูมิ 600 - 800 °C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่เกี่ยวข้องกับการสูญเสียน้ำหนักของแคลไซต์ที่เกิดจากกระบวนการคายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (decarbonation) จากแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นแคลเซียมออกไซด์ดังสมการ (5)



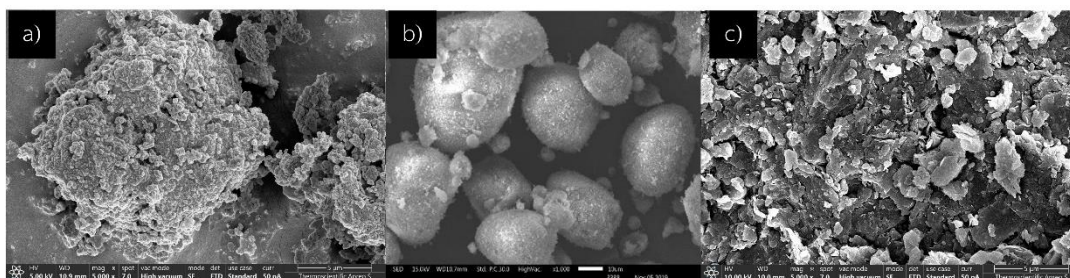
นอกจากนี้กราฟ DTG ของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในภาพ 50(a) ที่มีการแสดงรูปแบบพีค endothermic ทั้ง 3 พีค โดยพีคแรกที่มีขนาดเล็กที่บริเวณอุณหภูมิ 60 - 110 °C ซึ่งเกิดจากการระเหยของน้ำที่ถูกดูดซับโดยอนุภาคของตัวอย่าง [33] พีคที่สองเกี่ยวข้องกับการสูญเสียน้ำหนักของแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยมีจุดเริ่มต้นพีคอยู่ที่อุณหภูมิ 375 °C และสิ้นสุดที่บริเวณ 495 °C ทำให้สามารถคำนวณปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากความแตกต่างของร้อยละน้ำหนักในช่วงอุณหภูมิ 375 °C - 495 °C คูณด้วยอัตราส่วนระหว่างมวลโมลาร์ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (74 g/mol) ต่อมวลโมลาร์ของน้ำ (18 g/mol) จะพบว่าในกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) เท่ากับ 45.66% ของน้ำหนักโดยรวม รวมถึงพีคที่เกี่ยวข้องกับการสูญเสียน้ำหนักของแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีจุดเริ่มต้นพีคอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 590 °C - 780 °C เมื่อนำความแตกต่างของร้อยละน้ำหนักในช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตคูณด้วยอัตราส่วนระหว่างมวลโมลาร์ของแคลเซียมคาร์บอเนต (100 g/mol) ต่อมวลโมลาร์ของ CO₂ (44 g/mol) จะพบว่ากากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) มีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเท่ากับ 36.58% ของน้ำหนักโดยรวม ในขณะที่

ที่กราฟ TGA ของซิลิกาฟุ้ง (Silica fume) ในภาพ 50(b) มีการสูญเสียน้ำหนักค่อนข้างน้อยโดยมีน้ำหนักคงเหลือหลังจากทดสอบเท่ากับ 96.8% เมื่อสังเกตผล DTG ของซิลิกาฟุ้ง (SF) ในช่วงอุณหภูมิก่อน 100 °C แสดงพีคที่เกิดจากการระเหยของความชื้นภายในตัวอย่าง



ภาพ 50 ผล TGA-DTG ของวัสดุ (a) กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และ (b) ซิลิกาฟุ้ง (SF)

4.1.4 โครงสร้างทางจุลภาคของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ซิลิกาฟุ้งและดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ



ภาพ 51 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของ a) กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR), b) ซิลิกาฟุ้ง (SF) และ c) ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ (BA)

ภาพ 51a) แสดงอนุภาคของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) เป็นลักษณะกลุ่มก้อนที่ประกอบด้วยเกล็ดแผ่นเล็กจำนวนมาก พื้นผิวอนุภาคขรุขระ มีช่องว่างเนื่องจากการเรียงตัวของอนุภาคแบบไม่มีรูปแบบ (random alignment) ภาพ 51b) แสดงรูปถ่าย SEM อนุภาคของซิลิกาฟุ้ง (SF) ที่ประกอบด้วยรูปทรงค่อนข้างกลมที่มีขนาดอนุภาคค่อนข้างหลากหลายขนาด และเป็นซิลิกาฟุ้งควบแน่น (Condensed silica fume) อนุภาคของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ (SBC) มีลักษณะเป็นเกล็ดหรือแผ่นเป็นกลุ่มก้อนที่มีการเรียงตัวแบบไม่มีรูปแบบดังแสดงในภาพ 51c)

4.1.5 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ (SBC)

ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่เก็บมาจากภาคสนามถูกนำมาทดสอบขีดจำกัดของแอตเตอร์เบิร์ก (Atterberg's limit) ตามมาตรฐาน ASTM D4318-93 เพื่อหาค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit, L.L.) , ขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit, P.L.) ซึ่งดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ (SBC) มีค่าขีดจำกัดเหลว (L.L.) , ค่าขีดจำกัดพลาสติก (P.L.) และค่า Plasticity Index (P.I.) เท่ากับ 59% , 22.62% และ 36.4% ตามลำดับ เมื่อจำแนกดินตามระบบ Unified soil classification ตาม ASTM D-2487 พบว่าดินเหนียวอ่อนกรุงเทพในงานวิจัยนี้จัดอยู่กลุ่ม CH คือดินเหนียวอนินทรีย์ที่มีความเหนียวและหนืดสูง (Inorganic clays of high plasticity)

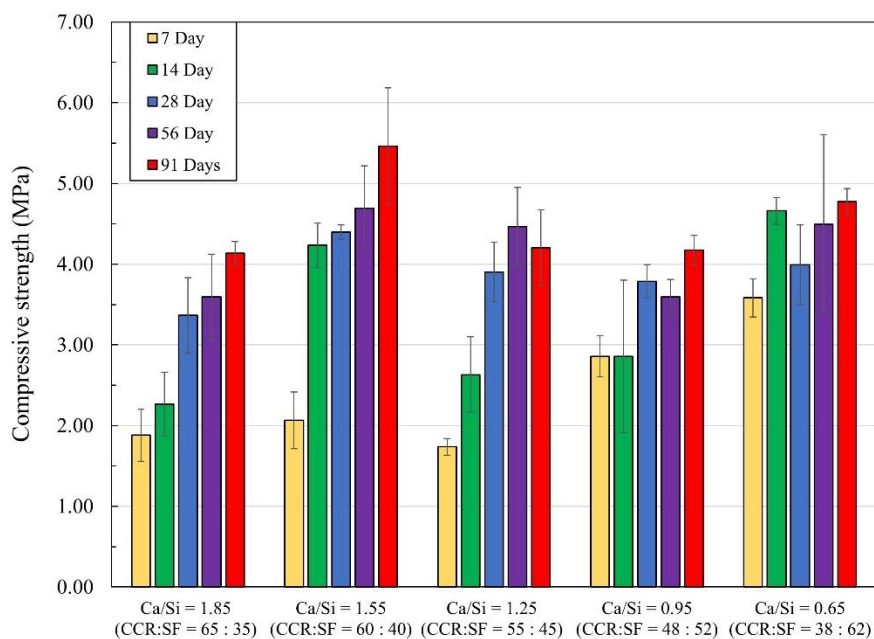
4.2 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุเชื่อมประสาน CCR-SF

4.2.1 กำลังอัดของเพสต์กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR-SF paste)

ตาราง 22 แสดงค่ากำลังอัดของเพสต์ CCR-SF ที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ

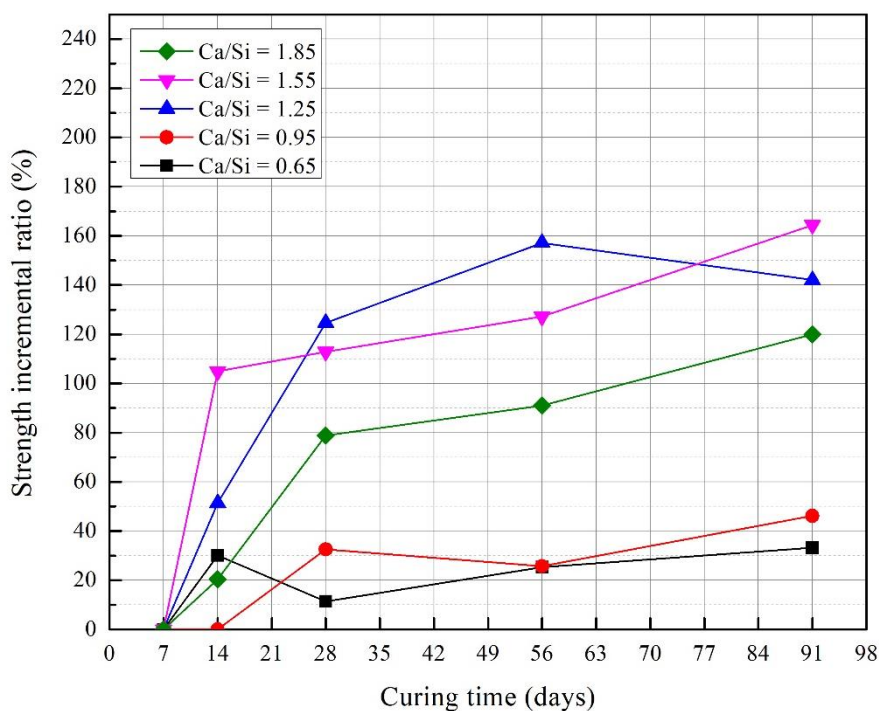
CCR-SF Paste mixtures	Compressive strength in various curing period (MPa)				
	7 Days	14 Days	28 Days	56 Days	91 Days
Ca/Si -1.85	1.88	2.27	3.36	3.59	4.14
Ca/Si -1.55	2.07	4.23	4.40	4.69	5.46
Ca/Si -1.25	1.74	2.63	3.90	4.47	4.20
Ca/Si -0.95	2.86	2.86	3.79	3.59	4.18
Ca/Si -0.65	3.58	4.66	3.99	4.49	4.77

The compressive strength of CCR-SF paste



Mixed proportion

ภาพ 52 ผลกำลังอัดของเพสต์ CCR-SF ที่อัตราส่วน Ca/Si ต่างกันที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน ด้วยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน (w/b) เท่ากับ 0.65



ภาพ 53 อัตราการเพิ่มกำลังอัดของเพสต์ CCR-SF แต่ละอัตราส่วน Ca/Si ที่ระยะเวลาบ่มต่างๆเทียบกับค่ากำลังอัดที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน

ภาพ 52 แสดงการพัฒนากำลังรับแรงอัดของเพสต์ CCR-SF ในแต่ละส่วนผสมที่อัตราส่วน w/b คงที่เท่ากับ 0.65 โดยเพสต์ CCR-SF แต่ละส่วนผสมแสดงถึงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดตามระยะเวลาบ่ม ในช่วงระยะเวลาบ่ม 7 วัน เพสต์ CCR-SF ที่อัตราส่วน Ca/Si -1.85, Ca/Si -1.55 และ Ca/Si -1.25 มีค่ากำลังอัดอยู่เท่ากับ 1.89, 2.07 และ 1.74 MPa ตามลำดับ ในขณะที่เพสต์ CCR-SF ที่อัตราส่วน Ca/Si -0.95 และ Ca/Si -0.65 มีค่ากำลังสูงสุดเท่ากับ 2.86 และ 3.58 MPa ตามลำดับ เป็นไปได้ว่าในเพสต์ CCR-SF ที่มีปริมาณซิลิกาฟุ่มสูงในส่วนผสมมีผลต่อกำลังอัดในช่วงต้นเนื่องจากซิลิกาฟุ่มมีขนาดอนุภาคขนาดเล็กและความสามารถในการละลาย จึงเป็นประโยชน์ต่อการเกิดปฏิกิริยาและส่งผลต่อความหนาแน่นของตัวอย่าง แต่จะพบว่ามีการลดลงกำลังอัดในเพสต์ CCR-SF ที่อัตราส่วน Ca/Si -1.25, Ca/Si -0.95 และ Ca/Si -0.65 ระหว่างในบางช่วงระยะเวลาบ่มเนื่องจากเกิดจากการแตกร้าวจากผลของการหดตัวแห้ง (drying shrinkage) ในเพสต์ CCR-SF เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจากการหดตัวเนื่องมาจากการสูญเสียความชื้น [26]

นอกจากนี้อัตราการเพิ่มกำลังอัดของเพสต์ CCR-SF ในแต่ละอัตราส่วน Ca/Si ตามระยะเวลาบ่มต่างๆที่เปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดที่ระยะเวลา 7 วันดังภาพ 53 แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเพิ่มกำลังอัดของเพสต์ที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่มโดยที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน เพสต์ Ca/Si -1.25, 1.55 และ 1.85 มีอัตราการเพิ่มขึ้นในปริมาณที่สูงเท่ากับ 124.7%, 112.9% และ

78.9% ตามลำดับ ในขณะที่เพสต์ Ca/Si -0.95 และ 0.65 มีอัตราการเพิ่มขึ้นที่ค่อนข้างต่ำเท่ากับ 32.6% และ 11.37% ตามลำดับ เมื่อระยะเวลาบ่มเพิ่มเป็น 91 วัน เพสต์ Ca/Si 1.55, 1.85 มีการเพิ่มกำลังอัดอย่างต่อเนื่องส่งผลให้อัตราการเพิ่มกำลังอัดของเพสต์ Ca/Si 1.55 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 164.4% ในขณะที่เพสต์ Ca/Si -0.95 และ 0.65 มีอัตราการเพิ่มกำลังอัดค่อนข้างต่ำที่ระยะเวลาบ่ม 91 เท่ากับ 46.2% และ 33.2% ตามลำดับ

4.2.2 ผลการทดสอบค่าการไหลของมอร์ตาร์ CCR-SF

ตาราง 23 ผลการทดสอบค่าการไหลของมอร์ตาร์ CCR-SF แต่ละส่วนผสม

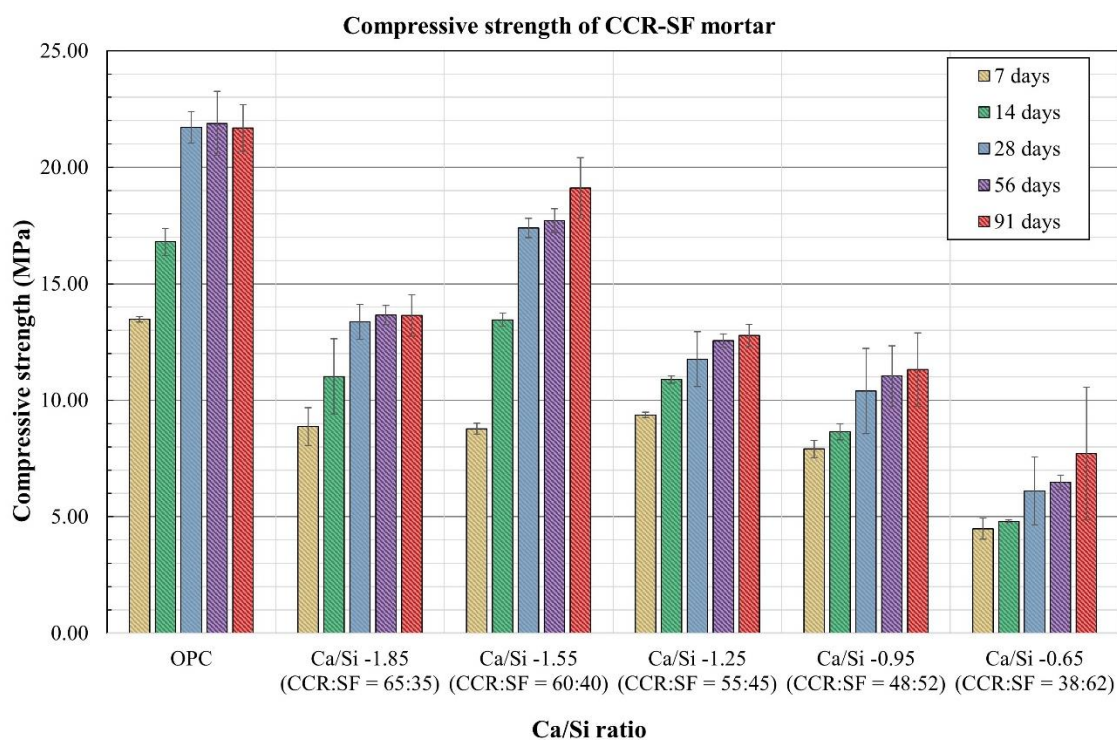
Mix	CCR (kg/m ³)	SF (kg/m ³)	Cement (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	SP (kg/m ³)	Flow (%)
OPC	-	-	500	1375	330	-	109
Ca/Si -1.85	325	175	-	1375	330	31.55	108
Ca/Si -1.55	300	200	-	1375	330	40.65	109
Ca/Si -1.25	275	225	-	1375	330	45.00	108
Ca/Si -0.95	240	260	-	1375	330	41.90	112
Ca/Si -0.65	190	310	-	1375	330	43.35	109

จากผลการทดสอบการไหลของมอร์ตาร์ควบคุม (M-OPC) และมอร์ตาร์ CCR-SF ในตาราง 23 ตามมาตรฐาน ASTM-C230 พบว่ามอร์ตาร์ซีเมนต์ OPC มีค่าการไหลตามมาตรฐานด้วยอัตราส่วนน้ำต่อปริมาณซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.68 โดยไม่ใช้สารลดน้ำ (Superplasticizer, SP) ในขณะที่มอร์ตาร์ CCR-SF ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานเท่ากับ 0.68 โดยมีการใช้สารลดน้ำ (Superplasticizer, SP) เพิ่มค่าการไหลอยู่ในช่วง 6.31 – 9.00 % โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน

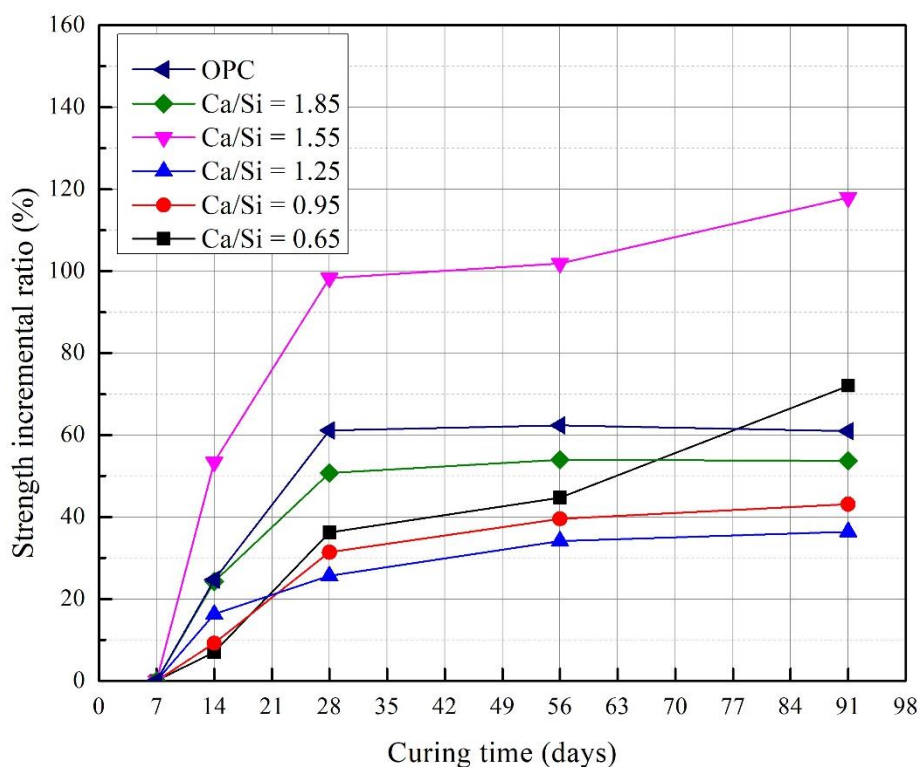
4.2.3 กำลังอัดของมอร์ตาร์ภาคแคลเซียมคาร์ไบด์-ซิลิกาฟวม (CCR-SF mortar)

ตาราง 24 แสดงค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ CCR-SF ที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ

Mortar mixtures	Compressive strength in various curing period (MPa)				
	7 Days	14 Days	28 Days	56 Days	91 Days
OPC	13.48	16.80	21.72	21.88	21.69
Ca/Si -1.85	8.87	11.02	13.37	13.66	13.64
Ca/Si -1.55	8.77	13.46	17.40	17.71	19.12
Ca/Si -1.25	9.37	10.89	11.77	12.56	12.78
Ca/Si -0.95	7.91	8.64	10.39	11.04	11.32
Ca/Si -0.65	4.48	4.80	6.11	6.49	7.71



ภาพ 54 ผลทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ CCR-SF ที่อัตราส่วน CaO/SiO_2 เท่ากับ 1.85, 1.55, 1.25, 0.95, 0.65 ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน



ภาพ 55 อัตราการเพิ่มกำลังอัดของmortar CCR-SF แต่ละอัตราส่วน Ca/Si ตามระยะเวลาบ่มที่เปรียบเทียบกับระยะเวลาบ่ม 7 วัน

ภาพ 54 แสดงผลกำลังอัดของmortarทั่วไปที่มีส่วนผสมจากซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) ซึ่งเป็นตัวอย่างควบคุม (Control mortar) เพื่อเป็นการเปรียบเทียบกับmortar CCR-SF ทั้ง 5 ส่วนผสมพบว่าmortarควบคุมมีกำลังอัดสูงกว่าmortar CCR-SF ทุกระยะเวลาบ่ม โดยที่mortarควบคุมและmortar CCR-SF มีแนวโน้มการพัฒนากำลังอัดเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาบ่ม โดยที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน mortar CCR-SF ที่มีกำลังอัดสูงสุดคืออัตราส่วน Ca/Si -1.25 โดยมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 9.37 MPa คิดเป็น 69.52% ของmortarควบคุม ในขณะที่mortar CCR-SF ที่มีกำลังอัดสูงสุดที่ระยะเวลาบ่ม 14, 28, 56 และ 91 วัน คือmortar Ca/Si -1.55 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 13.46 MPa, 17.40 MPa, 17.71 MPa และ 19.12 MPa ตามลำดับ หรือเท่ากับ 80.10%, 80.11%, 80.94% และ 87.37% ของmortarควบคุม

อัตราการเพิ่มกำลังอัดของmortar CCR-SF ในแต่ละอัตราส่วน Ca/Si ตามระยะเวลาบ่มต่างๆที่เปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดที่ระยะเวลา 7 วันดังแสดงในภาพ 55 mortar CCR-SF แต่ละอัตราส่วนมีอัตราการเพิ่มกำลังอัดในระยะเวลาบ่ม 28 วันเพิ่มขึ้นชัดเจน หลังจากนั้นอัตราการเพิ่มกำลังอัดค่อนข้างคงที่ไปจนถึงระยะเวลาบ่ม 91 วัน ซึ่งแนวโน้มของอัตราการเพิ่มกำลังอัดของmortar CCR-SF มีลักษณะเดียวกันกับmortar OPC หรือmortarควบคุม นอกจากนี้mortar CCR-SF ที่มี

อัตราส่วน Ca/Si -1.55 แสดงอัตราการเพิ่มกำลังอัดที่สูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมในทุกระยะเวลาบ่ม โดยเฉพาะที่ระยะเวลาบ่ม 91 วัน มอร์ตาร์ CCR-SF แสดงอัตราการเพิ่มกำลังอัดสูงถึง 117.9% ในขณะที่อัตราการเพิ่มกำลังอัดของมอร์ตาร์ควบคุมมีค่าเท่ากับ 60.95% ซึ่งบ่งชี้ถึงความสามารถในการพัฒนา กำลังอัดของมอร์ตาร์ CCR-SF ที่อัตราส่วน Ca/Si -1.55

4.3 การทดสอบ TGA ของเพสต์ CCR-SF

Gallucci [34] ได้รายงานกราฟ TGA ที่มีการสูญเสียน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในซีเมนต์เพสต์ (cement paste) ในแต่ละช่วงอุณหภูมิดังนี้

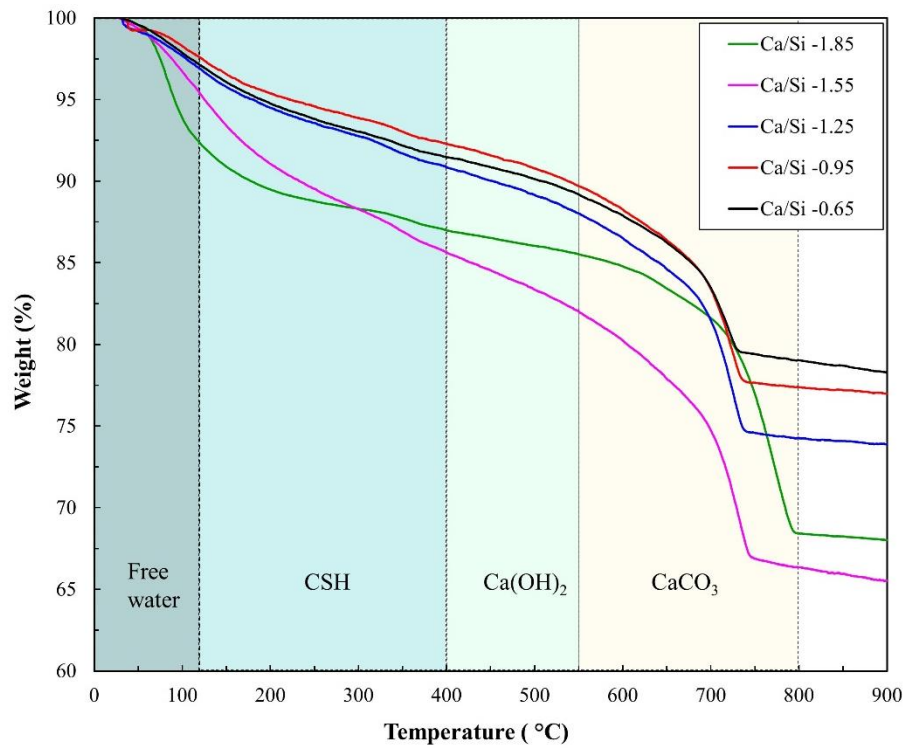
- ในช่วงอุณหภูมิ 80 – 420 °C เป็นการสูญเสียน้ำหนักที่เกิดจากการ dehydration ของผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) รวมถึงเฟสของ ettringite (Aft) และ monosulfate (AFm)

- ในช่วงอุณหภูมิ 420 – 550 °C เป็นการสูญเสียน้ำหนักที่เกิดจากการ dehydration ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂)

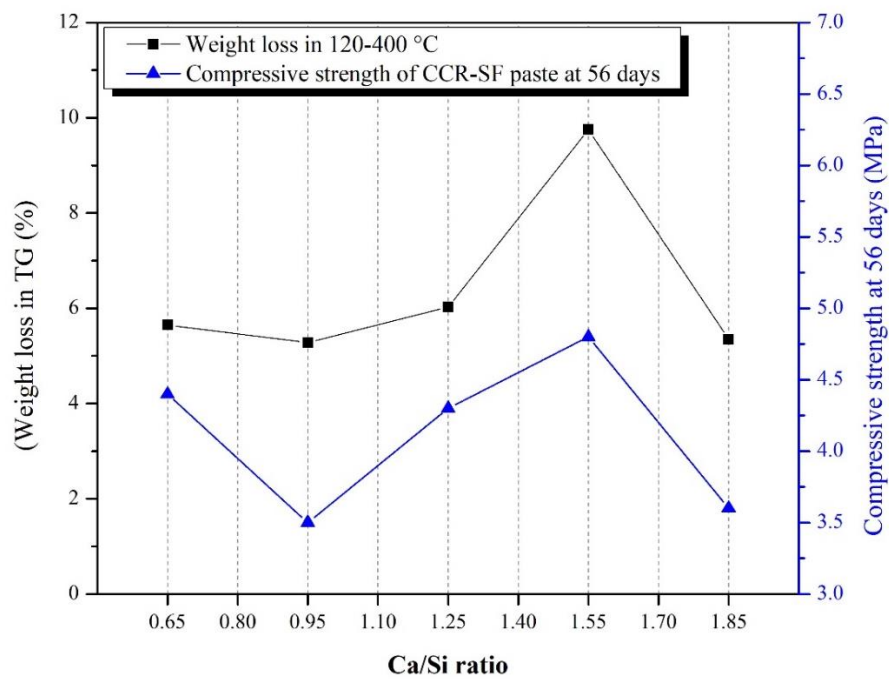
- การสูญเสียน้ำหนักที่เกิดจากการ decarbonation ของแคลไซต์ (CaCO₃) จะอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 600 – 780 °C

ภาพ 56 แสดงกราฟ TGA ของเพสต์ CCR-SF ในแต่ละอัตราส่วน Ca/Si ที่ระยะเวลาบ่ม 56 วัน ที่มีการสูญเสียน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ในแต่ละช่วงอุณหภูมิโดยที่การสูญเสียน้ำหนักในช่วงอุณหภูมิ 70-120 °C เกิดจากการระเหยของน้ำภายในตัวอย่าง โดยเฉพาะเพสต์ Ca/Si -1.85 [35, 36] ในขณะที่เพสต์ Ca/Si -1.55 มีการสูญเสียน้ำหนักในช่วงอุณหภูมิ 120-400 °C มากที่สุดจากการสังเกตความชันของเส้นการสูญเสียน้ำหนักซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เกี่ยวข้องกับการสลายตัวของผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน จากนั้นตัวอย่างเพสต์ CCR-SF แต่ละอัตราส่วน Ca/Si มีการสูญเสียน้ำหนักค่อนข้างชัดเจนในช่วงอุณหภูมิ 650-800 °C ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของแคลไซต์ (CaCO₃) [34, 36, 37]

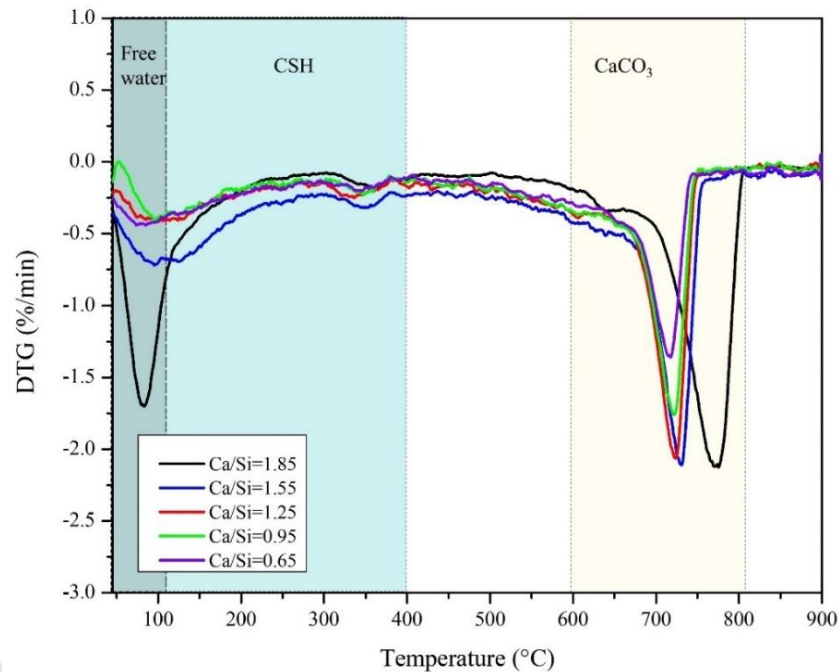
ปริมาณการสูญเสียน้ำหนักที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตในช่วงอุณหภูมิ 120-400 °C ถูกนำมาแสดงในภาพ 57 เพื่อบ่งชี้ถึงปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตในเพสต์ CCR-SF แต่ละอัตราส่วน Ca/Si ที่ระยะเวลาบ่ม 56 วัน จะเห็นว่าเพสต์ Ca/Si -1.55 มีปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) สูงสุด นอกจากนี้เมื่อนำผลกำลังอัดของเพสต์ CCR-SF แต่ละอัตราส่วน Ca/Si ที่ระยะเวลาบ่ม 56 วัน มาแสดงคู่กับปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ดังภาพ 57 พบว่าปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตในเพสต์ CCR-SF แต่ละอัตราส่วน Ca/Si มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับค่ากำลังอัดของเพสต์



ภาพ 56 การสูญเสียน้ำหนักของพาสต์ CCR-SF แต่ละอัตราส่วน Ca/Si ที่ระยะเวลาบ่ม 56 วัน



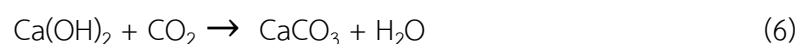
ภาพ 57 แสดงปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตจากการสลายมวลจากผล TGA และค่ากำลังอัดของพาสต์ CCR-SF แต่ละอัตราส่วน Ca/Si ที่ระยะเวลาบ่ม 56 วัน



ภาพ 58 แสดงผล DTG ของเพสต์ Ca/Si เท่ากับ 1.85, 1.55, 1.25, 0.95 และ 0.65 ที่ระยะเวลา 56 วัน

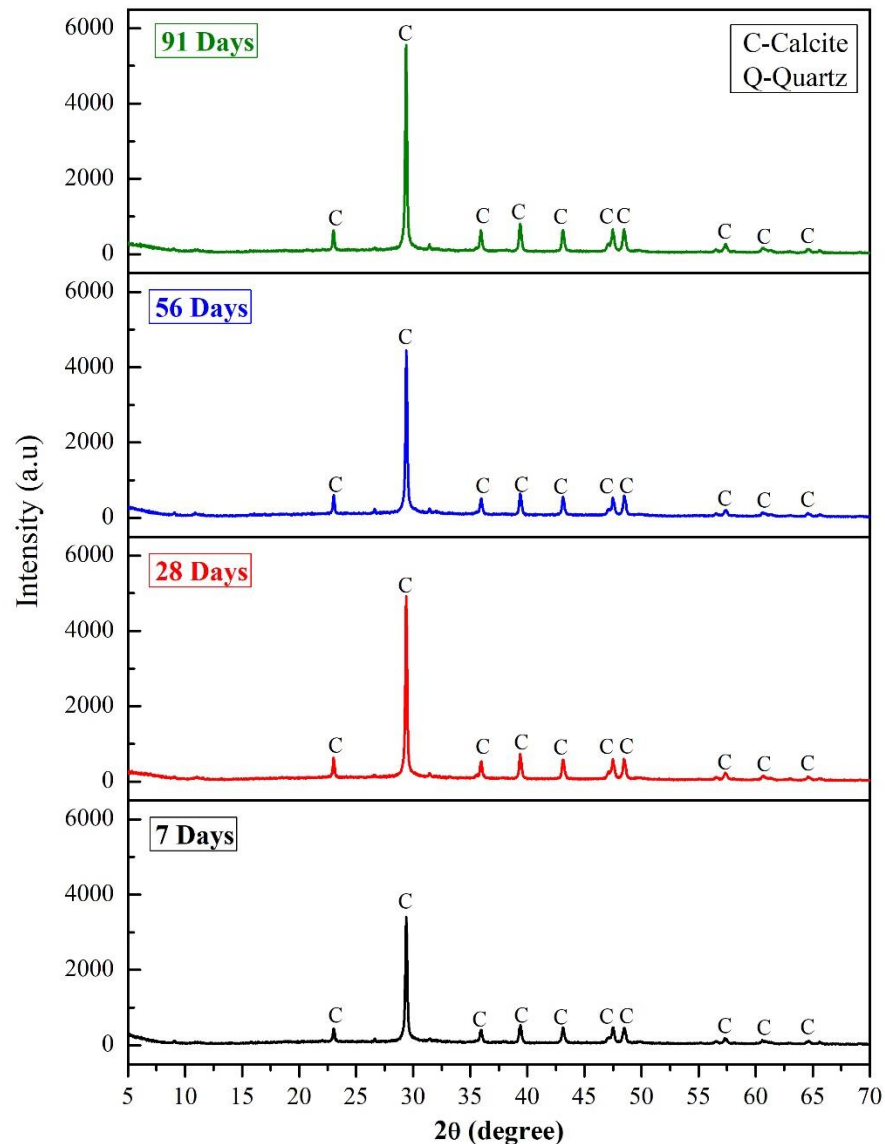
นอกจากนี้เมื่อพิจารณากราฟ DTG ดังภาพ 58 แสดงอัตราการสูญเสียน้ำหนักในแต่ละช่วงอุณหภูมิของเพสต์ CCR-SF ที่อัตราส่วน Ca/Si ต่างๆที่ระยะเวลาบ่ม 56 วัน พบว่าพีคช่วงอุณหภูมิ 50-100 °C เป็นพีคที่เกิดจากอัตราการสูญเสียน้ำหนักของน้ำภายในตัวอย่าง [35, 38] ในขณะที่พีคที่เกิดจากอัตราการสูญเสียน้ำหนักของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) อยู่ที่อุณหภูมิ 124.5 °C ในลักษณะพีคที่ค่อนข้างกว้างไปจนถึงอุณหภูมิ 400 °C สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้า [39-43] และพีคที่เกิดจากอัตราการสูญเสียน้ำหนักของแคลไซต์ในช่วงอุณหภูมิ 700 -780 °C [40]

จากการสังเกตพบว่าเพสต์ CCR-SF ในแต่ละอัตราส่วน Ca/Si มีลักษณะคล้ายกันในทุกอัตราส่วน Ca/Si คือไม่ปรากฏพีคที่เกิดจากอัตราการสูญเสียน้ำหนักของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ในช่วงอุณหภูมิ 400-500 °C [40] เนื่องจากถูกบริโภคเพื่อเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกก่อตัวเป็นผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) [43] โดยที่ Ca/Si -1.55 แสดงพีคของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตที่อุณหภูมิ 124.5 °C โดยมีความเข้มสูงสุดสอดคล้องกับปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) ในภาพ 57 ในขณะที่เพสต์ Ca/Si -1.85 มีการแสดงพีคที่เกิดขึ้นจากการสูญเสียน้ำเป็นหลักที่ตำแหน่งอุณหภูมิ 86 °C เนื่องจากน้ำในตัวอย่างและน้ำที่ปล่อยออกมาจากการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ดังสมการ (6) [44, 45]



นอกจากนี้ตำแหน่งพีกของอัตราการสูญเสียน้ำหนักจากการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอนเนชัน (decarbonation) ของแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 780 °C บ่งชี้ถึงปริมาณและ degree of crystallised ของแคลไซต์ [46, 47]

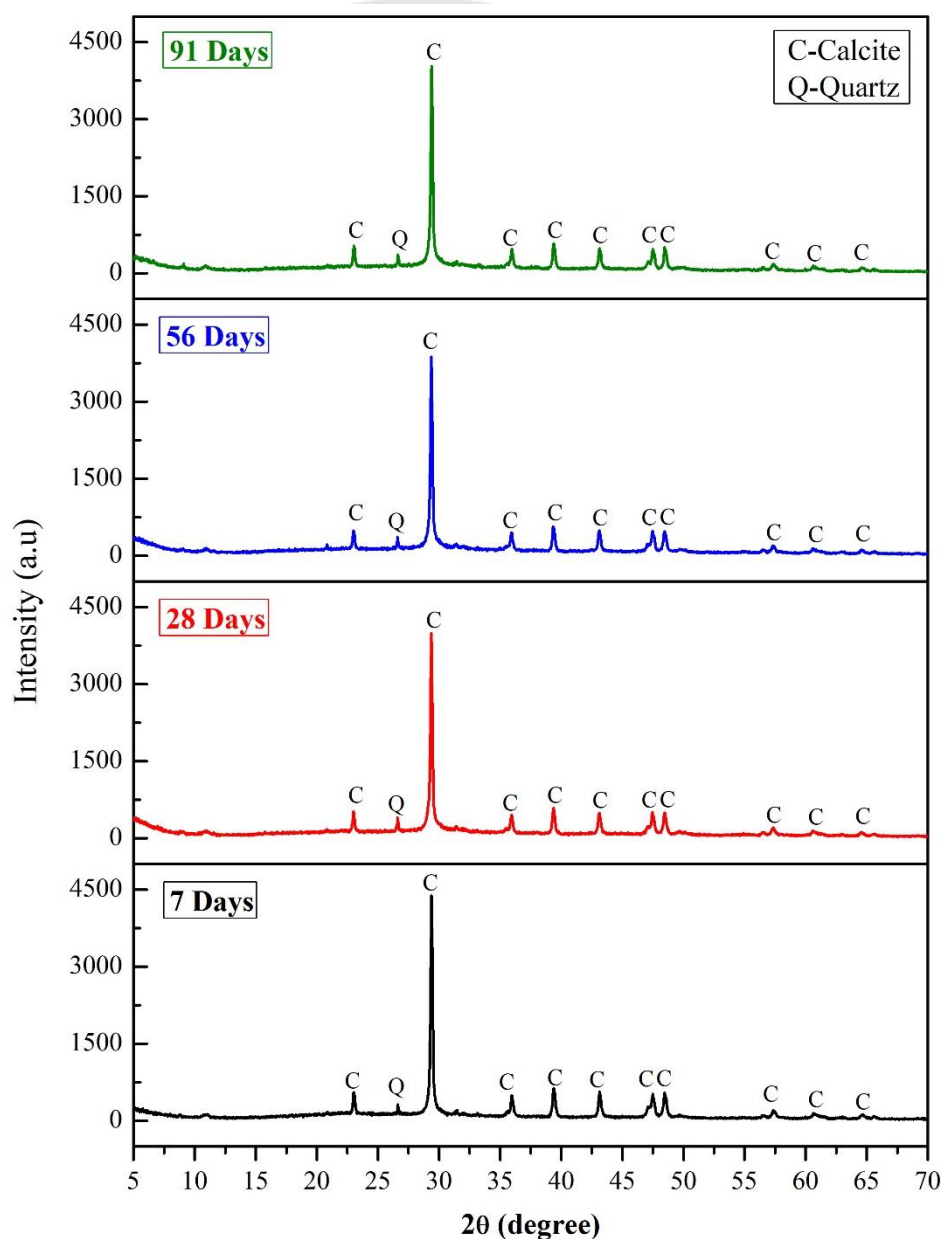
4.4 ผลการทดสอบ XRD ของเพสต์ CCR-SF



ภาพ 59 รูปแบบ XRD ของเพสต์ Ca/Si -1.85 ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน

ผลการทดสอบ XRD ของเพสต์ Ca/Si -1.85 ในภาพ 59 แสดงพีกของแคลไซต์ (CaCO_3) เป็นพีกหลัก โดยที่ไม่พบพีกของพอร์ตแลนด์ (Ca(OH)₂) ที่บริเวณ 2θ เท่ากับ 18° และส่วนเนินโค้งออสัญฐาน (Amorphous hump) ของซิลิกาฟุ่มในช่วงบริเวณ 2θ เท่ากับ 22.5° ในทุกระยะเวลาบ่ม เป็นไปได้ว่าการหายไปของเฟสหลักอย่างพอร์ตแลนด์ (Ca(OH)₂) เกิดจากการถูกบริโภคเพื่อทำ

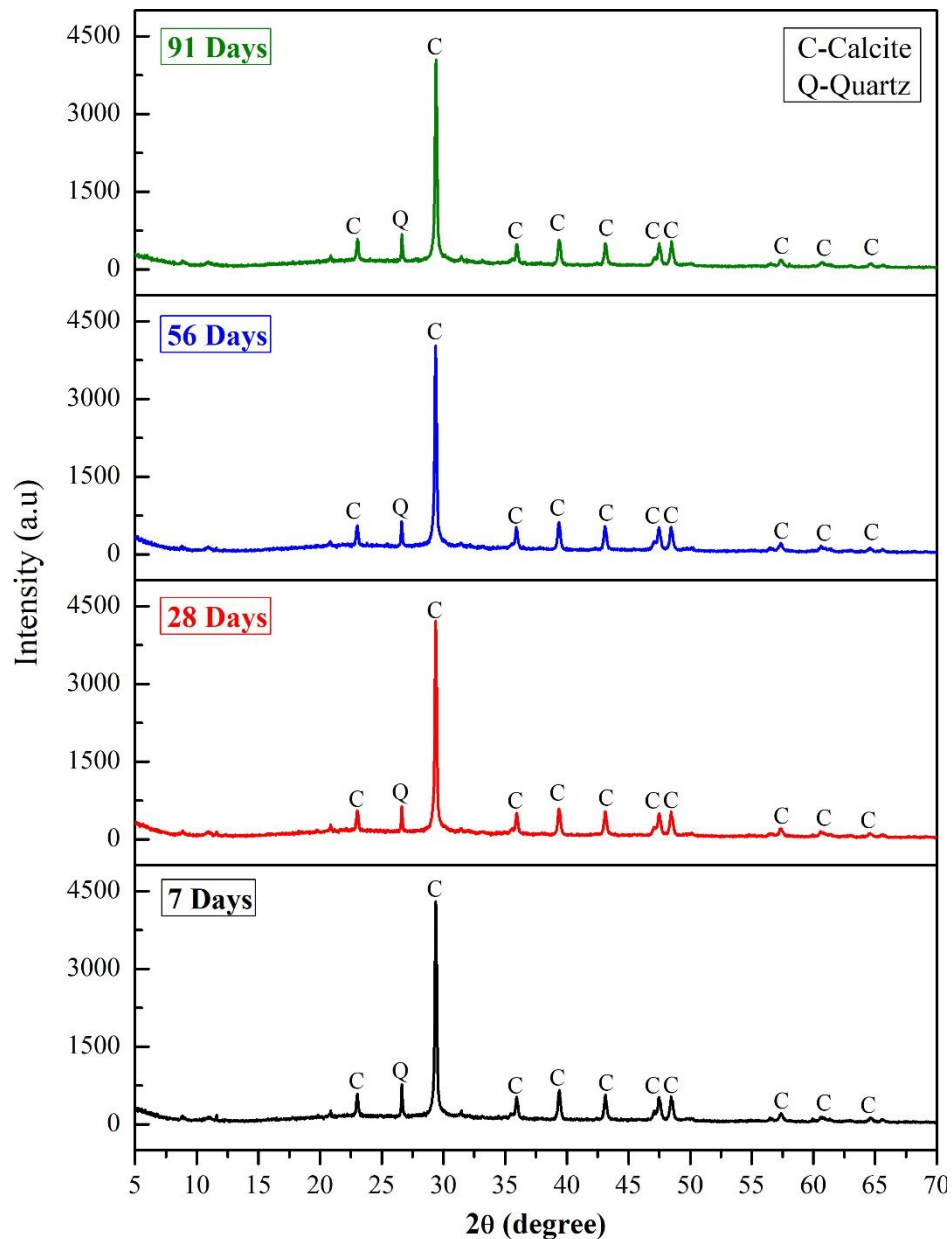
ปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับเฟสอสัณฐานของซิลิกา (Amorphous SiO₂) เกิดผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานที่คล้ายกับปฏิกิริยาไฮดรอกซิลที่มีพีคหลักอยู่ในช่วง 2θ เท่ากับ 29-30° (ICDD 00-033-0306) ซึ่งตรงกับตำแหน่งของฟิแคไลต์ที่มีความเข้มสูง นอกจากนี้มีข้อสังเกตของฟิแคไลต์ในช่วงระยะเวลาบ่ม 91 วัน ที่มีความเข้มสูงขึ้นเนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์บางส่วนเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน (carbonation) จะสังเกตเห็นได้ดังภาพ 60 เมื่อเปรียบเทียบความเข้มของฟิแคไลต์จากรูปแบบ XRD ของเฟส Ca/Si -1.85 ในระยะเวลาช่วงต้นกับช่วงปลายที่มีการเพิ่มความเข้มของฟิแคไลต์ (Calcite) ซึ่งแสดงถึงระดับความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) ที่เพิ่มมากขึ้น



ภาพ 60 รูปแบบ XRD ของเฟส Ca/Si -1.55 ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน

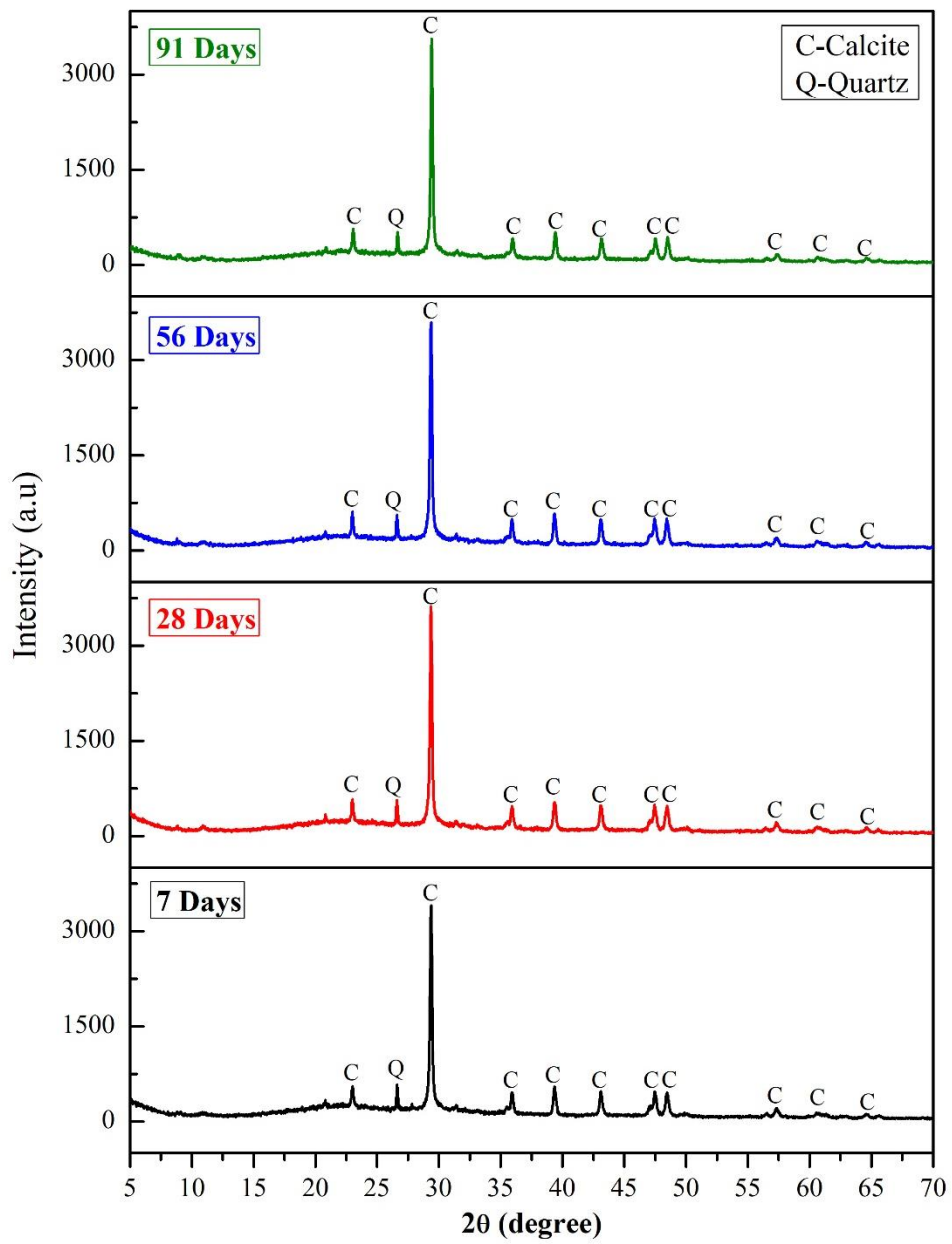
ภาพ 60 แสดงผลการทดสอบ XRD ของเฟส $\text{Ca/Si} - 1.55$ พบเฟสแคลไซต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นพีคหลักและมีพีคของควอตซ์จากซิลิกาฟวมเนื่องจากเมื่อลดอัตราส่วน Ca/Si ต่ำลงทำให้ปริมาณซิลิกาฟวม (SF) เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้รูปแบบ XRD ของเฟส $\text{Ca/Si} - 1.55$ ไม่พบพีคพอร์ตแลนด์ไดต์ในทำนองเดียวกันกับรูปแบบ XRD ของเฟส $\text{Ca/Si} - 1.85$ แต่ในเฟส $\text{Ca/Si} - 1.55$ ไม่แสดงถึงการเพิ่มความเข้ม (Intensity) ของเฟสแคลไซต์เมื่อระยะเวลาบ่มเพิ่มมากขึ้น เป็นไปได้ว่าในเฟส $\text{Ca/Si} - 1.55$ มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่เหมาะสมกับปริมาณของซิลิกา (SiO_2) ในการเกิดปฏิกิริยาเป็นผลิตภัณฑ์วัสดุเชื่อมประสาน (Cementitious materials) ในสภาวะอุณหภูมิห้องเนื่องจากไม่ปรากฏการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั้นที่เกิดจากการมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์มากเกินไปในเฟส $\text{Ca/Si} - 1.55$



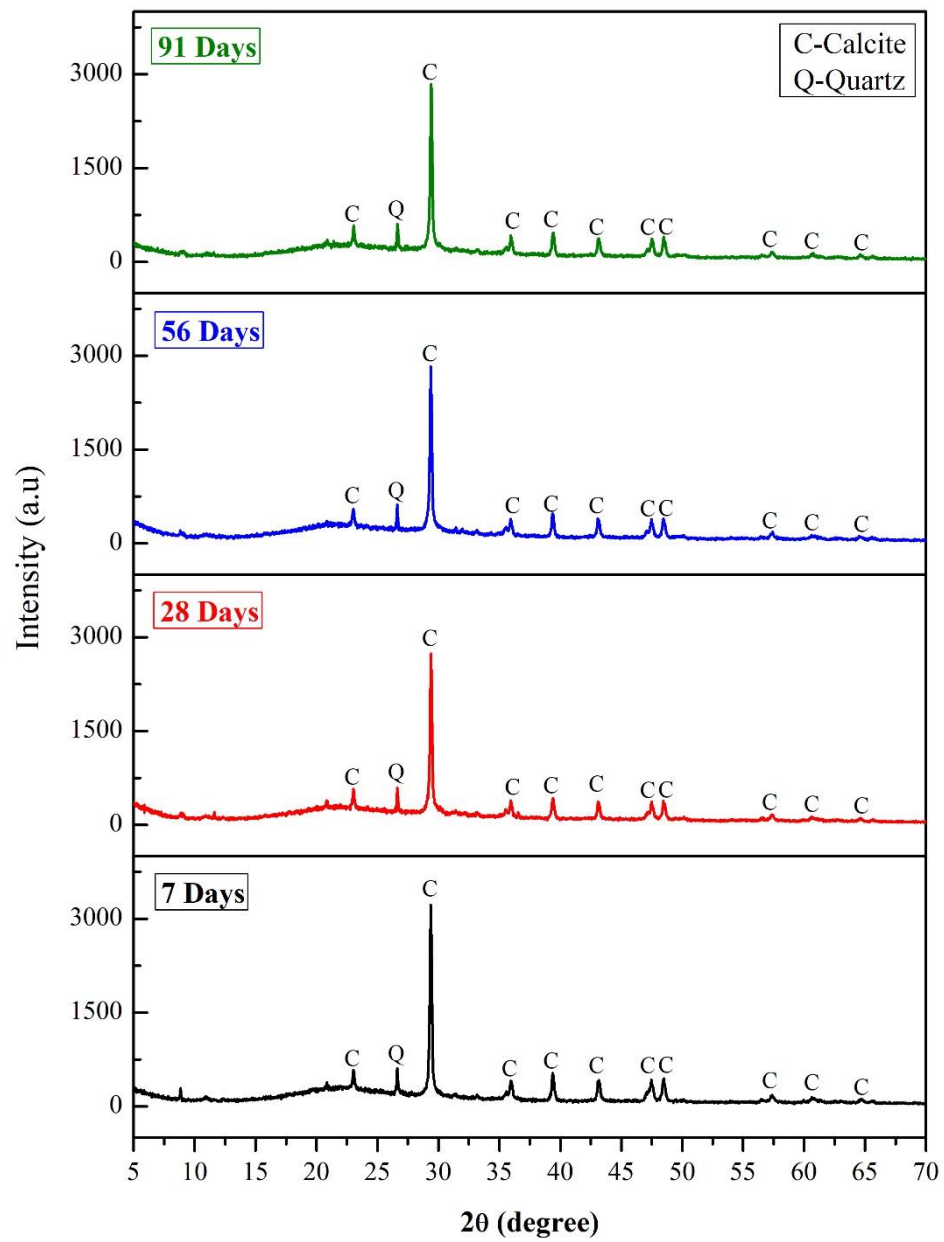


ภาพ 61 รูปแบบ XRD ของเฟส $\text{Ca/Si} -1.25$ ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน

ภาพ 61 แสดงรูปแบบ XRD ของเฟส $\text{Ca/Si} -1.25$ ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน ซึ่งในแต่ละระยะเวลาบ่มมีเฟสหลักเป็นฟิสิกัลไฮดรอกไซด์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และฟิสิกัลของควอตซ์จากซิลิกาฟุ้ง โดยฟิสิกัลของควอตซ์มีการเพิ่มความเข้มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเฟส $\text{Ca/Si} -1.85$ และ 1.55 เนื่องจากการลดอัตราส่วน $\text{Ca/Si} -1.25$ ต่ำลงส่งผลให้ปริมาณซิลิกาฟุ้งมากขึ้น ซึ่งสามารถพบข้อสังเกตความชัดเจนของเฟสควอตซ์และโค้งออสัญฐาน (Amorphous hump) ในซิลิกาฟุ้งจากการลดอัตราส่วน Ca/Si ได้ชัดเจนขึ้นในรูปแบบ XRD ของเฟส $\text{Ca/Si} -0.95$ และเฟส $\text{Ca/Si} -0.65$ ดังภาพ 62 และ 63 ตามลำดับ

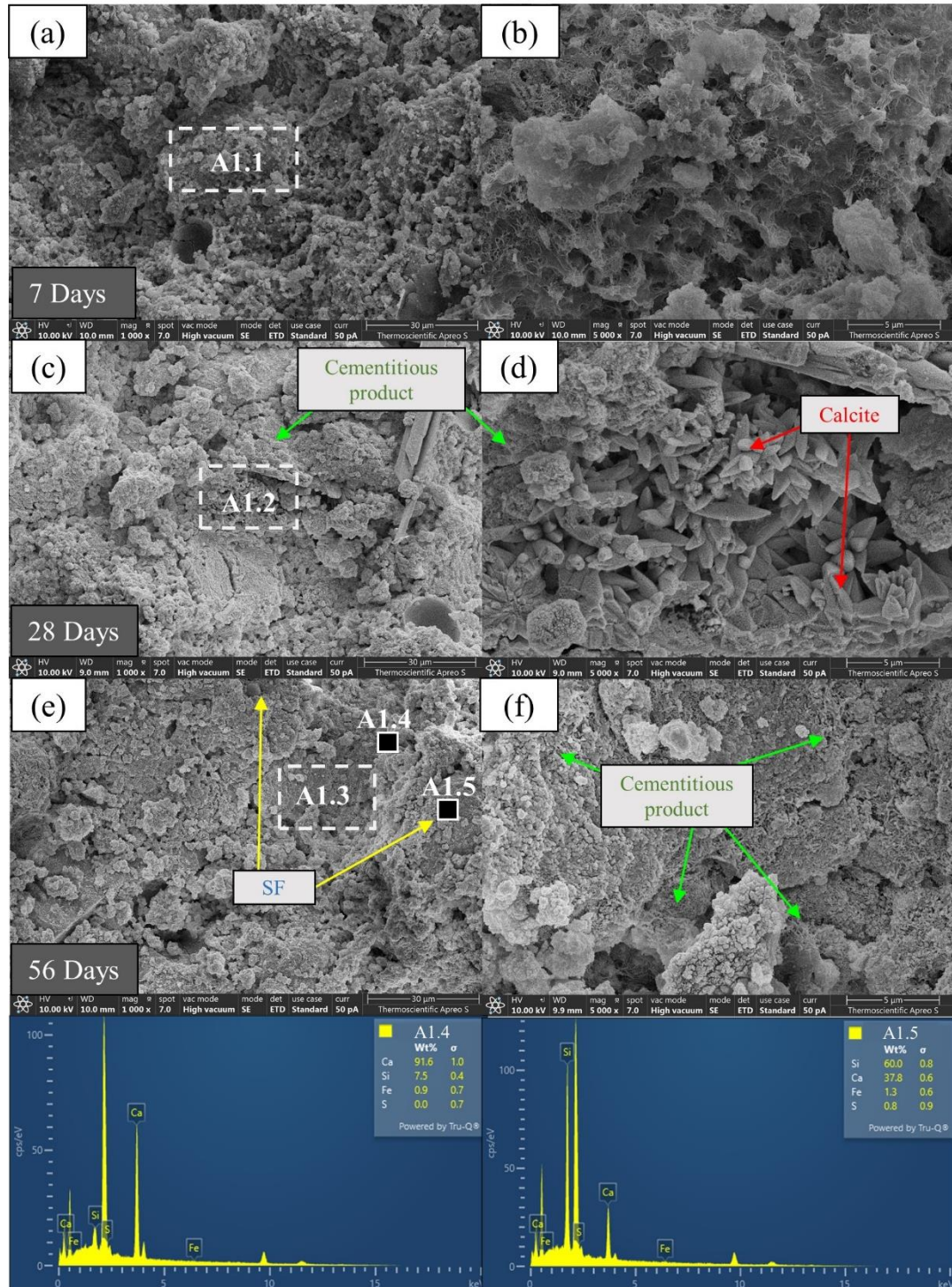


ภาพ 62 รูปแบบ XRD ของเฟส $\text{Ca/Si} -0.95$ ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน



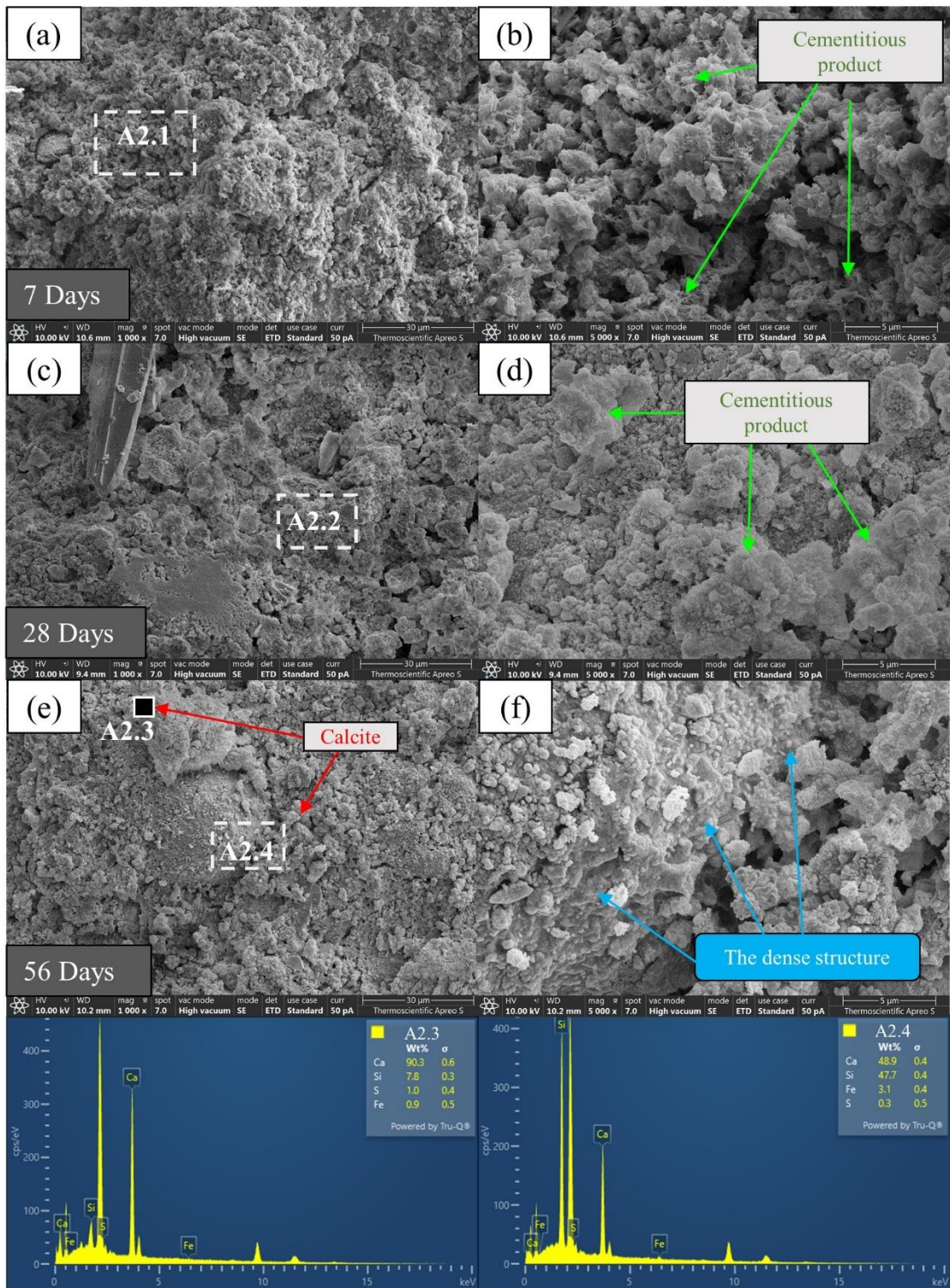
ภาพ 63 รูปแบบ XRD ของเฟส $\text{Ca/Si} -0.65$ ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน

4.5 SEM/EDS ของเฟสซี CCR-SF



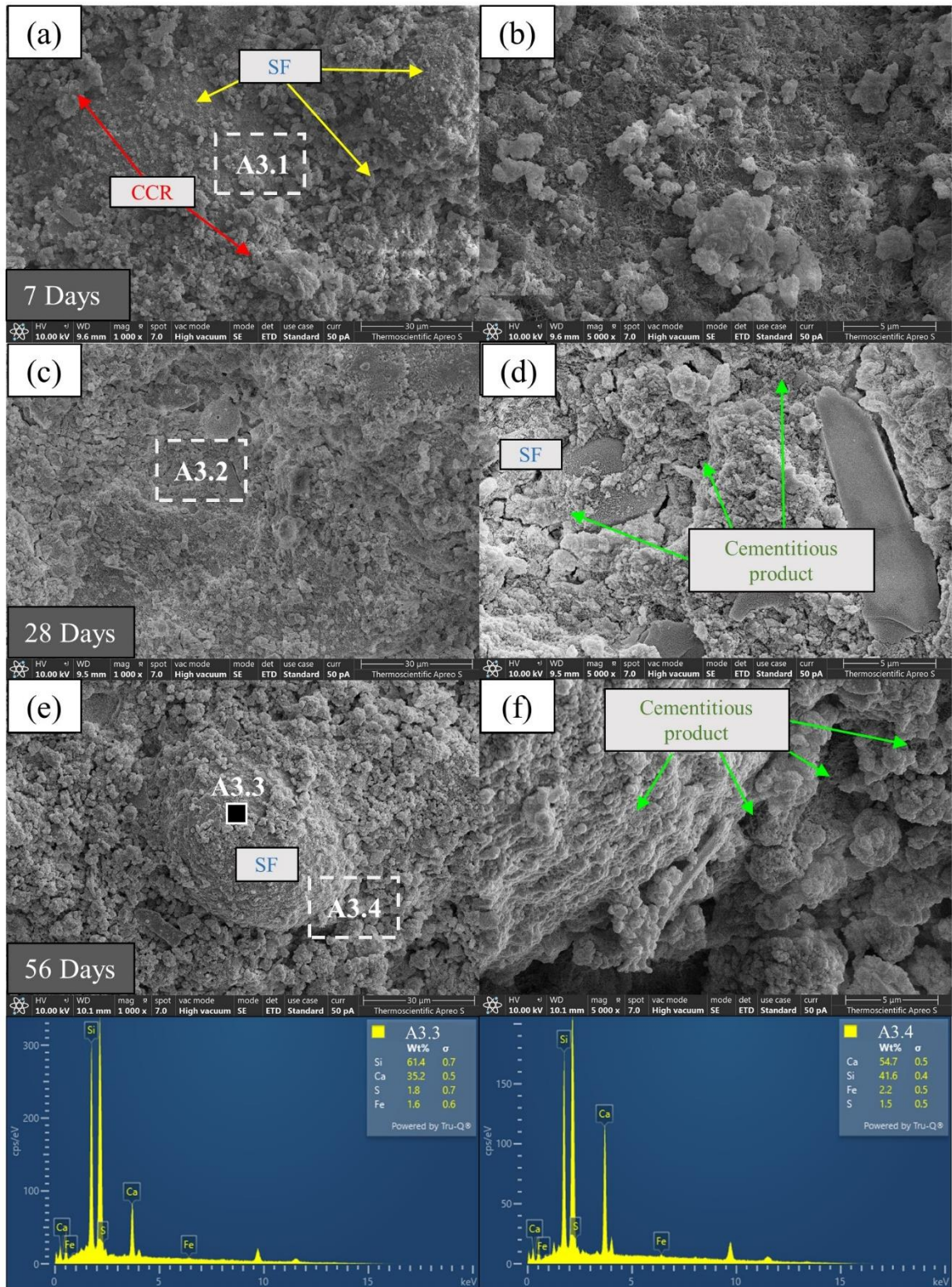
ภาพ 64 แสดงภาพ SEM ของเฟสซี CCR-SF ที่อัตราส่วน Ca/Si -1.85 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วันด้วย (a) กำลังขยาย 1,000x (b) กำลังขยาย 5,000x , ระยะเวลาบ่ม 28 วันด้วย (c) กำลังขยาย 1,000x (d) กำลังขยาย 5,000x , ระยะเวลาบ่ม 56 วันด้วย (e) กำลังขยาย 1,000x และ (f) กำลังขยาย 5,000x

ภาพ 64(a) แสดง SEM ของเพสต์ CCR-SF ที่อัตราส่วน Ca/Si -1.85 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน ด้วยกำลังขยาย 1,000x ในลักษณะกลุ่มอนุภาคที่ประกอบด้วยพื้นผิวคล้ายกับวัสดุจากแคลเซียมคาร์ไบด์ เมื่อดูในบริเวณ A1.1 ในภาพ 64(b) ด้วยกำลังขยาย 5,000x จะพบว่าบนพื้นผิวของเพสต์ Ca/Si -1.85 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วันมีลักษณะของผลิตภัณฑ์ก่อตัวเป็นชั้นเส้นใยบนผิวอนุภาค ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วันพบว่าเพสต์ Ca/Si -1.85 ที่กำลังขยาย 1,000x ในภาพ 64(c) มีลักษณะที่มีความแตกต่างจากระยะเวลาบ่ม 7 วันเพียงเล็กน้อยในภาพรวมแต่ในภาพ 64(d) ที่กำลังขยาย 5,000x จะพบโครงสร้างของผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) และโครงสร้างของอนุภาคที่เป็นแคลไซต์ (CaCO_3) ที่เกิดจากปฏิกิริยา carbonation ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) บางส่วนในเพสต์ Ca/Si -1.85 [25] นอกจากนี้ภาพ 64(e) แสดงอนุภาคของแคลไซต์ในบางพื้นที่โดยมีผล EDS ในพื้นที่ A1.4 ที่ประกอบด้วยน้ำหนักอะตอมของ Ca สูงถึง 91.6% และยังพบอนุภาคของซิลิกาฟุ่มส่วนน้อยถูกล้อมรอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กเมื่อดูผล EDS ในพื้นที่ A1.5 ที่ประกอบไปด้วยน้ำหนักอะตอมของ Si และ Ca เท่ากับ 60.0% และ 37.8% ตามลำดับ คิดเป็นอัตราส่วน Ca/Si เท่ากับ 0.63 ซึ่งต่ำกว่าอัตราส่วนของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) ที่มีอัตราส่วน Ca/Si อยู่ในช่วง 0.8 – 2.25 [48] ในขณะที่ภาพ 64(f) ยังแสดงให้เห็นโครงสร้างของผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานที่มีลักษณะเป็นเส้นใยจำนวนมากระหว่างอนุภาคและบริเวณพื้นผิวที่มีความหนามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นผิวที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน



ภาพ 65 แสดงภาพ SEM ของพาสต์ CCR-SF ที่อัตราส่วน Ca/Si -1.55 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วันด้วย (a) กำลังขยาย 1,000x (b) กำลังขยาย 5,000x, ระยะเวลาบ่ม 28 วันด้วย (c) กำลังขยาย 1,000x (d) กำลังขยาย 5,000x, ระยะเวลาบ่ม 56 วันด้วย (e) กำลังขยาย 1,000x และ (f) กำลังขยาย 5,000x

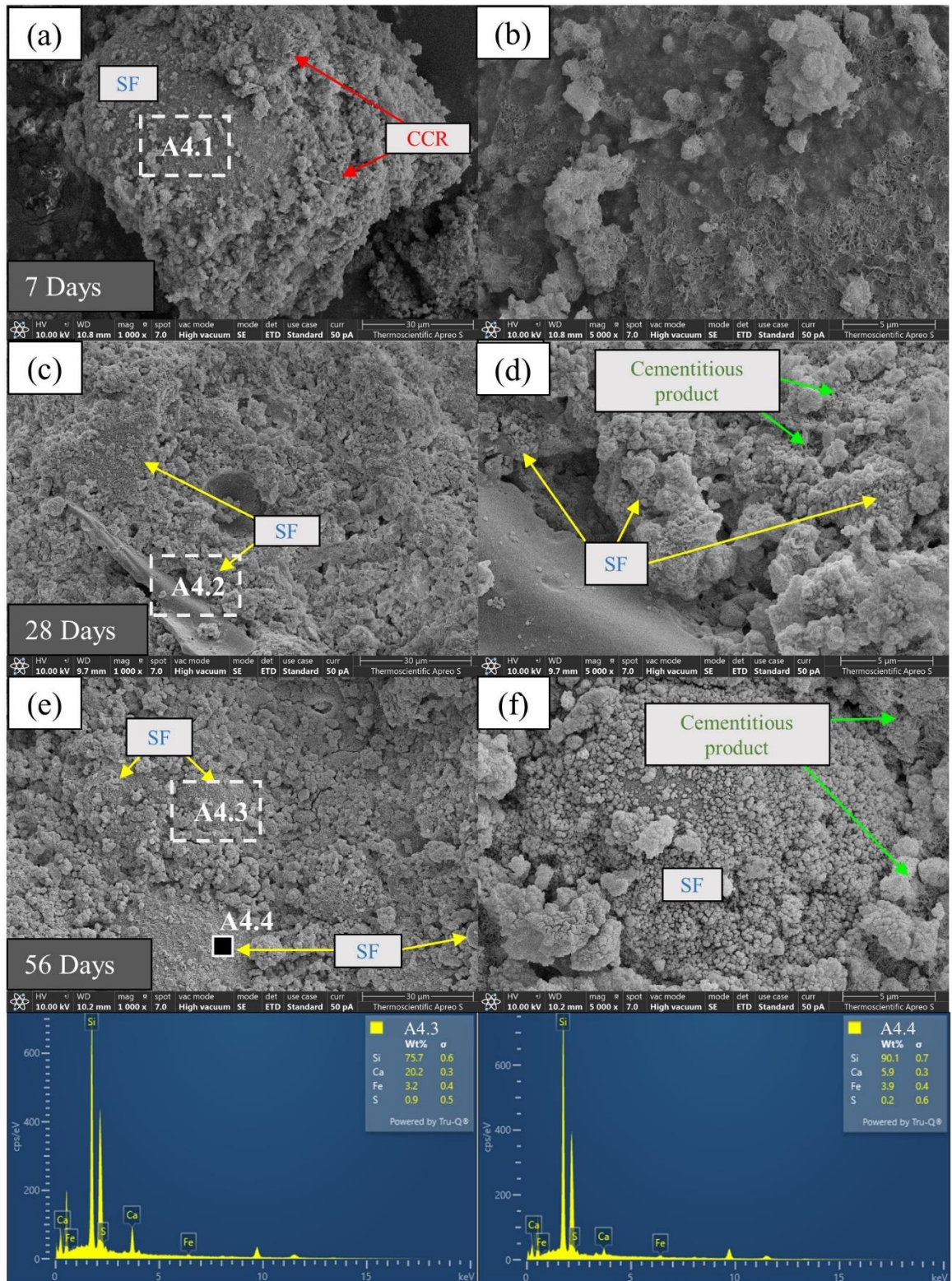
ภาพ 65(a) แสดงภาพ SEM เฟสต์ CCR-SF ที่อัตราส่วน Ca/Si -1.55 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน ซึ่งประกอบด้วยกลุ่มอนุภาคคล้ายกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) แต่ในพื้นที่ A2.1 พบโครงสร้างเส้นใย (Needle-like products) [49] ของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) ในลักษณะของเส้นใยที่เริ่มก่อตัวบนผิวอนุภาคและระหว่างช่องว่างที่สังเกตได้ด้วยกำลังขยาย 5,000x ดังภาพ 65(b) หลังจากนั้นเมื่อระยะเวลาบ่ม 28 วัน เฟสต์ CCR-SF ที่อัตราส่วน Ca/Si -1.55 แสดงผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานที่สังเกตได้ในลักษณะพื้นผิวที่ค่อนข้างทึบในภาพ 65(c) เมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 5,000x ดังภาพ 65(d) จะสังเกตเห็นกลุ่มอนุภาคที่ค่อนข้างหนาแน่น จากนั้นที่ระยะเวลา 56 วัน (ภาพ 65(e)) CCR-SF ที่อัตราส่วน Ca/Si -1.55 แสดงอนุภาคลักษณะคล้ายซิลิกาฟุ้งถูกล้อมรอบด้วยกลุ่มอนุภาคของ CCR ซึ่งยืนยันด้วยผลการทดสอบ EDS ในพื้นที่ A2.3 ที่มีน้ำหนักอะตอมสูงถึง 90.3% จากนั้นเมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 5000x ดังภาพ 65(f) จะพบว่าพื้นผิวของเฟสต์ CCR-SF ที่อัตราส่วน Ca/Si -1.55 มีชั้นโครงสร้างของแข็งที่ก่อตัวให้เห็นอย่างชัดเจนและเมื่อสังเกตอัตราส่วนน้ำหนักอะตอมจากผล EDS จะพบว่าพื้นที่ A2.4 มีอัตราส่วนน้ำหนักอะตอม Ca/Si เท่ากับ 1.02 ซึ่งเป็นอัตราส่วนน้ำหนักอะตอม Ca/Si ที่บ่งชี้ถึงการก่อตัวของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต [48, 50]



ภาพ 66 แสดงภาพ SEM ของพาสต์ CCR-SF ที่อัตราส่วน Ca/Si -1.25 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วันด้วย (a) กำลังขยาย 1,000x (b) กำลังขยาย 5,000x, ระยะเวลาบ่ม 28 วันด้วย (c) กำลังขยาย 1,000x (d) กำลังขยาย 5,000x, ระยะเวลาบ่ม 56 วันด้วย (e) กำลังขยาย 1,000x และ (f) กำลังขยาย 5,000x

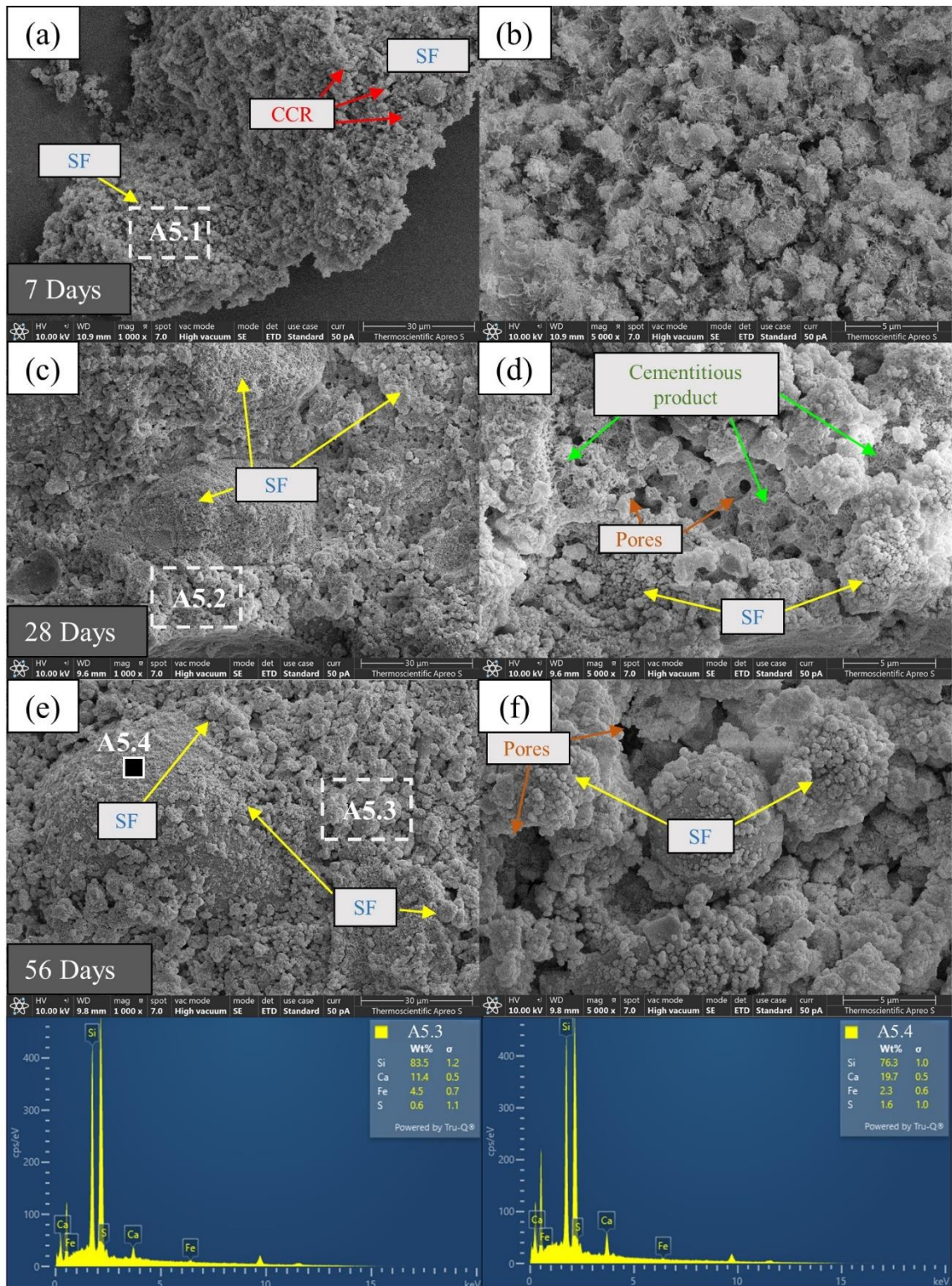
ภาพ 66(a) แสดงภาพ SEM ของเพสต์ CCR-SF ที่อัตราส่วน Ca/Si -1.25 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคของซิลิกาฟุ่มที่ถูกล้อมด้วยอนุภาคที่ขนาดเล็กกว่าในลักษณะคล้ายกาก แคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) เมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 5,000x ในบริเวณพื้นที่ A3.1 พบโครงสร้าง แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเริ่มก่อตัวขึ้นบนผิวของอนุภาคดังภาพ 66(b) จากนั้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาบ่ม เป็น 28 วัน ที่กำลังขยาย 1,000x ดังภาพ 66(c) ที่แสดงอนุภาคของซิลิกาฟุ่ม (SF) ฝังอยู่บนพื้นผิว ของเพสต์ Ca/Si -1.25 เมื่อเพิ่มกำลังขยายบริเวณพื้นที่ A3.2 เป็น 5,000x ดังภาพ 66(d) สังเกตเห็น โครงสร้างเส้นใยขนาดเล็กของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ระหว่างกลุ่มก้อนอนุภาค หลังจาก ระยะเวลาบ่ม 56 วัน เพสต์ Ca/Si -1.25 มีอนุภาคของซิลิกาฟุ่ม (SF) ที่ยืนยันด้วยผลทดสอบ EDS ใน พื้นที่ A3.3 ที่มีน้ำหนักอะตอมของ Si เท่ากับ 61.4% เมื่อทำการเพิ่มกำลังขยายในบริเวณพื้นที่ A3.4 ดังภาพ 66(f) ที่แสดงชั้นโครงสร้างของแข็งที่ก่อตัวบนพื้นผิวของอนุภาคซิลิกาฟุ่มในลักษณะคล้ายกัน กับ เพสต์ Ca/Si -1.55 เมื่อพิจารณาร่วมกับผล EDS ในพื้นที่ A3.4 พบว่าอัตราส่วนน้ำหนักของ Ca/Si เท่ากับ 1.31 ซึ่งบ่งชี้ถึงผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) [48, 50]





ภาพ 67 แสดงภาพ SEM ของเพสต์ CCR-SF ที่อัตราส่วน Ca/Si -0.95 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วันด้วย (a) กำลังขยาย 1,000x (b) กำลังขยาย 5,000x, ระยะเวลาบ่ม 28 วันด้วย (c) กำลังขยาย 1,000x (d) กำลังขยาย 5,000x, ระยะเวลาบ่ม 56 วันด้วย (e) กำลังขยาย 1,000x และ (f) กำลังขยาย 5,000x

จากภาพ 67(a) แสดงให้เห็นเฟส CCR-SF ที่อัตราส่วน Ca/Si -0.95 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน มีกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) ล้อมรอบอนุภาคของซิลิกาฟุ้ง (SF) เมื่อเพิ่มกำลังขยายบริเวณพื้นที่ A4.1 เป็น 5,000x ดังภาพ 67(b) จะแสดงให้เห็นว่าบริเวณผิวของอนุภาคซิลิกาฟุ้ง (SF) มีโครงสร้างของผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานเพียงเล็กน้อย เมื่อเพิ่มระยะเวลาบ่มเป็น 28 วันดังภาพ 67(c) ที่กำลังขยาย 1,000x เฟส Ca/Si -0.95 มีองค์ประกอบหลักเป็นอนุภาคของซิลิกาฟุ้งเมื่อเพิ่มกำลังขยายในบริเวณ A4.2 เป็น 5,000x จะพบโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ที่อยู่ระหว่างก้อนอนุภาคดังภาพ 67(d) หลังจากระยะเวลาบ่ม 56 วัน แสดงอนุภาคของซิลิกาฟุ้งที่ฝังตัวอยู่ในพื้นผิวของเฟส Ca/Si -0.95 ดังภาพ 67(e) ซึ่งยืนยันด้วยผล EDS ในพื้นที่ A4.3 และ A4.4 ที่มีน้ำหนักอะตอมของ Si สูงถึง 75.7% และ 90.1% ตามลำดับ เมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 5,000x ดังภาพ 67(f) จะพบว่าอนุภาคซิลิกาฟุ้ง (SF) ขนาดใหญ่ประกอบไปด้วยอนุภาคซิลิกาฟุ้ง (SF) ขนาดเล็กจำนวนมากซึ่งเป็นคุณสมบัติของซิลิกาฟุ้งควบแน่น (Condensed silica fume) การที่อนุภาคของซิลิกาฟุ้ง (SF) บางส่วนในเฟส Ca/Si -0.95 อยู่ในสภาพค่อนข้างสมบูรณ์บ่งชี้ถึงปริมาณซิลิกาฟุ้ง (SF) ที่ไม่ได้ถูกบริโภคเพื่อเกิดปฏิกิริยาสอดคล้องกับรูปแบบ XRD ของเฟสที่มีการลดอัตราส่วน Ca/Si ทำให้มีการเพิ่มปริมาณซิลิกาฟุ้ง (SF) มากขึ้น



ภาพ 68 แสดงภาพ SEM ของพาสต์ CCR-SF ที่อัตราส่วน Ca/Si -0.65 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วันด้วย (a) กำลังขยาย 1,000x (b) กำลังขยาย 5,000x , ระยะเวลาบ่ม 28 วันด้วย (c) กำลังขยาย 1,000x (d) กำลังขยาย 5,000x , ระยะเวลาบ่ม 56 วันด้วย (e) กำลังขยาย 1,000x และ (f) กำลังขยาย 5,000x

จากภาพ 68(a) แสดงภาพ SEM ของเพสต์ CCR-SF ที่อัตราส่วน Ca/Si -0.65 ที่ระยะเวลา 7 วัน มีอนุภาคของ CCR และ SF เมื่อเพิ่มกำลังขยายในบริเวณพื้นที่ A5.1 เป็น 5,000x ดังภาพ 68(b) พบอนุภาคของซิลิกาฟุ่ม (SF) ขนาดเล็กจำนวนมากและพื้นผิวมีผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานเป็นเส้นใย จากนั้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาบ่มเป็น 28 วัน พื้นผิวของเพสต์ Ca/Si -0.65 จะพบสังเกตเห็นอนุภาคซิลิกาฟุ่มได้ค่อนข้างชัดเจนในหลายบริเวณดังภาพ 68(c) ในส่วนบริเวณ A5.2 ที่เพิ่มกำลังขยายเป็น 5,000x ดังภาพ 68(d) ที่แสดงให้เห็นถึงบริเวณโดยรอบของอนุภาคซิลิกาฟุ่มขนาดใหญ่ที่ประกอบด้วยอนุภาคซิลิกาฟุ่มขนาดเล็กและช่องว่างและผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ระหว่างก้อนอนุภาค หลังจากระยะเวลาบ่ม 56 วัน เพสต์ Ca/Si -0.65 ในภาพ 68(e) พบอนุภาคของซิลิกาฟุ่มชัดเจนโดยผล EDS มีน้ำหนักอะตอมของ Si สูงถึง 83.5% และ 76.3% ในพื้นที่ A5.3 และ A5.4 ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อเพิ่มกำลังขยายบริเวณพื้นที่ A5.3 เป็น 5,000x ดังภาพ 68(f) พบว่าซิลิกาฟุ่ม (SF) ขนาดเล็กเกาะกลุ่มเป็นก้อนอยู่ในสภาพค่อนข้างสมบูรณ์ในลักษณะเดียวกันกับเพสต์ Ca/Si -0.95

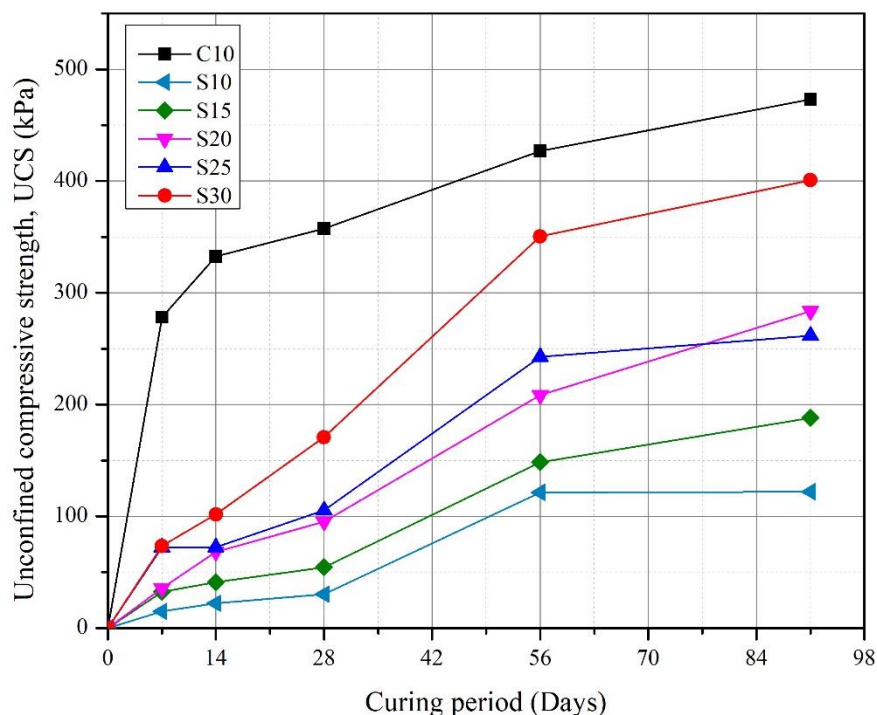
4.6 Unconfined compressive strength ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ปรับปรุงด้วยวัสดุเชื่อมประสาน

ตาราง 25 แสดงค่ากำลังอัดของดินแต่ละส่วนผสมที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน, 14 วัน, 28 วัน, 56 วันและ 91 วัน

Soil-binder mixtures	Unconfined compressive strength in various curing period (kPa)				
	7 Days	14 Days	28 Days	56 Days	91 Days
C10	278.12	332.58	357.49	426.76	473.25
S10	14.87	22.04	30.18	121.35	122.05
S15	32.44	41.05	54.36	148.49	188.07
S20	35.80	68.05	95.20	208.35	283.70
S25	72.41	72.43	105.46	242.76	261.58
S30	73.41	101.64	170.74	350.52	400.77

หมายเหตุ : C10 คือดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ในปริมาณ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง

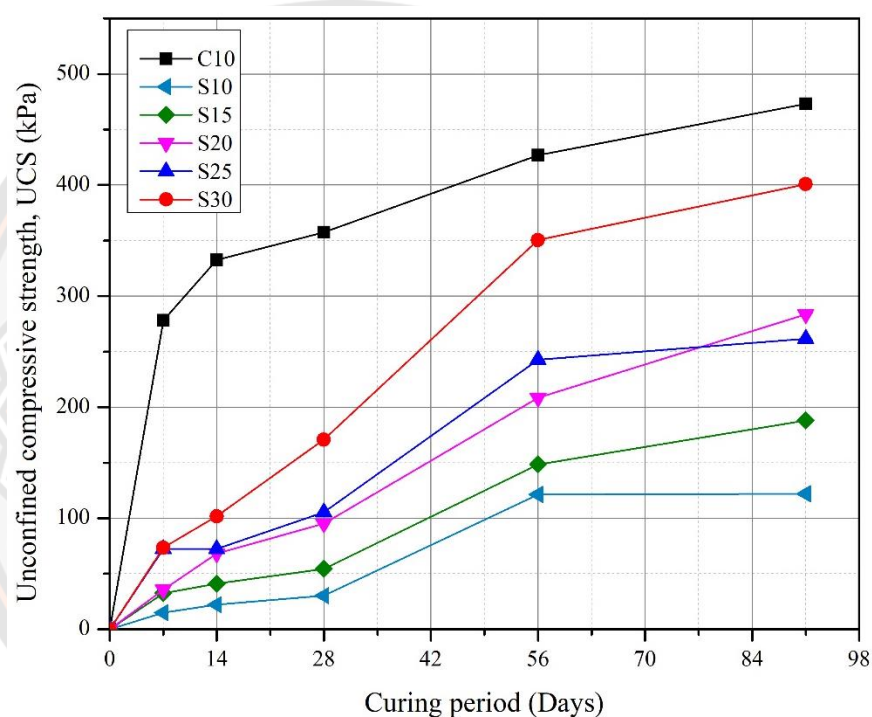
S10, S15, S20, S25, S30 คือดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ปรับปรุงด้วยวัสดุเชื่อมประสาน CCR-SF ในปริมาณ 10%, 15%, 20%, 25% และ 30% ของน้ำหนักดินแห้ง ตามลำดับ



ภาพ 69 แสดงค่า unconfined compressive strength ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯที่ปรับปรุงวัสดุเชื่อมประสาน CCR-SF และซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ภาพ 69 แสดงค่า unconfined compressive strength ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯที่ปรับปรุงวัสดุเชื่อมประสาน โดย C10 คือดินเหนียวอ่อนที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณ 10% ของน้ำหนักดินแห้งเพื่อใช้เป็นส่วนผสมอ้างอิง ในส่วนของ S10, S15, S20, S25 และ S30 เป็นดินเหนียวอ่อนที่ปรับปรุงด้วยวัสดุเชื่อมประสาน CCR-SF ในปริมาณ 10%, 15%, 20%, 25% และ 30% ของน้ำหนักดินแห้งตามลำดับ ในส่วนของดินเหนียวที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีการพัฒนากำลังอย่างรวดเร็วในช่วง 7 วันจากนั้นมีแนวโน้มการพัฒนากำลังที่ลดลง ในขณะที่ดินเหนียวปรับปรุงด้วยวัสดุเชื่อมประสาน CCR-SF มีแนวโน้มการพัฒนากำลังที่ต่ำในช่วงต้นจากนั้นมีแนวโน้มการพัฒนากำลังที่สูงขึ้นหลังจากระยะเวลา 14 วัน โดยหลังจาก 28, 56 และ 91 วัน C10P มีการเพิ่มกำลังอัดของดินขึ้นเป็น 31.19%, 56.61% และ 73.67% ตามลำดับเมื่อเทียบกับกำลังอัดของดิน C10P ที่ระยะเวลา 7 วัน ในส่วนกำลังอัดของดิน C30S ที่ระยะเวลา 28, 56 และ 91 วัน มีการพัฒนาเพิ่มขึ้นเป็น 132.58%, 377.47% และ 445.92% ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับ 7 วัน จากอัตราการเพิ่มกำลังของดินบ่งชี้ความสามารถในการพัฒนากำลังอัดของดินที่ปรับปรุงด้วยวัสดุเชื่อมประสาน CCR-SF ที่อัตราส่วน Ca/Si -1.55 ที่สูงกว่ากำลังอัดของดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ที่ระยะเวลาบ่มช่วงปลาย

นอกจากนี้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นซีแคนต์ (Secant modulus of elasticity, E_{50}) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่มที่เพิ่มขึ้น โดยโมดูลัสยืดหยุ่นซีแคนต์ (Secant modulus of elasticity, E_{50}) ของ C10 มีการพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็วที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน ในขณะที่ตัวอย่าง S30 มีการพัฒนาโมดูลัสยืดหยุ่นซีแคนต์ (Secant modulus of elasticity, E_{50}) เพิ่มมากขึ้นอย่างชัดเจนที่ระยะเวลา 28 วัน และโมดูลัสยืดหยุ่นซีแคนต์ (Secant modulus of elasticity, E_{50}) ในตัวอย่างดินเหนียว S10, S15, S20 และ S25 มีการพัฒนาเพิ่มขึ้นในช่วงระยะเวลา 56 และ 91 วันดังภาพ 70 ซึ่งมีลักษณะการพัฒนาไปในทิศทางเดียวกับค่า unconfined compressive strength



ภาพ 70 แสดงการพัฒนา ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นซีแคนต์ (E_{50}) ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ที่ปรับปรุงด้วยวัสดุเชื่อมประสาน CCR-SF อัตราส่วน Ca/Si -1.55 และซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน

บทที่ 5

บทสรุป

1. กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) ที่ได้จากกระบวนการผลิตก๊าซอะเซทิลีนมีองค์ประกอบหลักเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) และแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เมื่อใช้เป็นส่วนผสมร่วมกับซิลิกาฟูม (SF) ที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตซิลิกอนคาร์ไบด์และเฟอร์โรซิลิกอนอัลลอยด์ โดยมีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกาที่มีเฟสอสัณฐาน (Amorphous phase) สูงถึง 81.0% สามารถทำปฏิกิริยาก่อตัวเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่มีการพัฒนามากขึ้นตามระยะเวลาบ่มที่มากขึ้น ในส่วนของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯมีองค์ประกอบหลักเป็นควอตซ์ (Quartz) และแร่ดินเหนียวที่พบคืออิลไลต์ (Illite) และเกาลินไนท์ (Kaolinite)

2. เพสต์ CCR-SF แต่ละอัตราส่วน Ca/Si แสดงการลดลงของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากการถูกบริโภคเพื่อเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction) เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ด้วยรูปแบบอัตราการสูญเสียน้ำหนัก (DTG) และรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) รวมถึงภาพ SEM ของเพสต์ CCR-SF แสดงการก่อตัวของ C-S-H ประกอบด้วยน้ำหนักอะตอมของ Ca/Si ที่อยู่ในช่วง 0.83 – 2.25 บ่งชี้การก่อตัวของโครงสร้าง C-S-H นอกจากนี้เพสต์ CCR-SF อัตราส่วน Ca/Si เท่ากับ 1.55 มีปริมาณการสูญเสียน้ำหนักของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตสูงสุด

3. ผลกำลังอัดของเพสต์และมอร์ตาร์ CCR-SF ที่อัตราส่วน Ca/Si -1.55 มีกำลังอัดสูงสุดที่ระยะเวลา 91 วัน โดยที่ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ CCR-SF ที่มีอัตราส่วน Ca/Si -1.55 ให้กำลังอัดสูงคิดเป็นประมาณ 83.51% ของกำลังอัดมอร์ตาร์ควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุเชื่อมประสานและถูกเลือกนำมาประยุกต์ใช้ปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

4. ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯที่ปรับปรุงด้วยวัสดุเชื่อมประสาน CCR-SF อัตราส่วน Ca/Si -1.55 มีการพัฒนาค่ากำลังอัดมากขึ้นตามระยะเวลาบ่มและการเพิ่มขึ้นของปริมาณวัสดุเชื่อมประสาน โมดูลัสยืดหยุ่นซีแคนต์มีการเปลี่ยนแปลงแนวโน้มในลักษณะเดียวกันกับกำลังอัดของดินที่ถูกปรับปรุง

บรรณานุกรม

1. Soralump, S., *Geotechnical Engineering Problems and tentative solutions in Thailand*.
2. ศรีลัมพ์, ร.ด.ส., พฤติกรรมดินถมและการสำรวจดินถม, หน่วยวิจัยดินถม ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก. 2557.
3. Makusa, G.P., *Soil stabilization methods and materials in engineering practice: State of the art review*. 2013.
4. Horpibulsuk, S., R. Rachan, and A. Suddeepong, *Assessment of strength development in blended cement admixed Bangkok clay*. *Construction and Building Materials*, 2011. **25**(4): p. 1521-1531.
5. Horpibulsuk, S., et al., *Strength development in cement admixed Bangkok clay: laboratory and field investigations*. *Soils and Foundations*, 2011. **51**(2): p. 239-251.
6. Jaturapitakkul, C. and B. Roongreung, *Cementing material from calcium carbide residue-rice husk ash*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2003. **15**(5): p. 470-475.
7. Rattanashotinunt, C., et al., *Use of calcium carbide residue and bagasse ash mixtures as a new cementitious material in concrete*. *Materials & Design*, 2013. **46**: p. 106-111.
8. Vichan, S., R. Rachan, and S. Horpibulsuk, *Strength and microstructure development in Bangkok clay stabilized with calcium carbide residue and biomass ash*. *Science Asia*, 2013. **39**(2): p. 186-193.
9. Dunstan, E. *How does pozzolanic reaction make concrete green*. in *2011 World of Coal Ash Conference, May*. 2011.
10. ผศ.ดร.พงษ์ธร จุฬพันธ์ทอง, ผ.ด.ภ.จ., เทคโนโลยีคอนกรีตขั้นสูง; *Advanced Concrete Technology*. 2563. 484.
11. Dodson, V.H., *Concrete admixtures*. 2013: Springer Science & Business Media.
12. Neville, A. and J. Brooks, *Concrete technology second edition*. British library, England, 2010: p. 6-20.

13. Makaratat, N., C. Jaturapitakkul, and T. Laosamathikul, *Effects of calcium carbide residue–fly ash binder on mechanical properties of concrete*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010. **22**(11): p. 1164-1170.
14. Vichan, S. and R. Rachan, *Chemical stabilization of soft Bangkok clay using the blend of calcium carbide residue and biomass ash*. Soils and Foundations, 2013. **53**(2): p. 272-281.
15. จินดาประเสริฐ, ป., ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต, ed. จ. ชัย. 2547, กรุงเทพฯ: ราชบัณฑิตยสถาน.
16. ต้นเส็ง, พ., ปฐพีกลศาสตร์; *Soil Mechanics*. 2554.
17. Rachan, R. and S. Vichan, *Unconfined compressive strength development and microstructure of calcium carbide residue and biomass ash admixed in compacted soft Bangkok clay*. KMUTT Research and Development Journal, 2013. **36**(1): p. 51-71.
18. Ahmed, S.M., *Assessment of clay stiffness and strength parameters using index properties*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018. **10**(3): p. 579-593.
19. Bergado, D.T., et al., *Prefabricated vertical drains (PVDs) in soft Bangkok clay: a case study of the new Bangkok International Airport project*. Canadian Geotechnical Journal, 2002. **39**(2): p. 304-315.
20. Uddin, K., A. Balasubramaniam, and D. Bergado, *Engineering behavior of cement-treated Bangkok soft clay*. Geotechnical Engineering, 1997. **28**: p. 89-119.
21. Brandon, D. and W.D. Kaplan, *Microstructural characterization of materials*. 2013: John Wiley & Sons.
22. Brouwer, P., *Theory of XRF: Getting acquainted with the principles*. Almelo: PAN-alytical BV, 2010.
23. Shimaoka, H., *Particle size analyzer based on laser diffraction method*. 2002, Google Patents.
24. Wagner, M., *Thermal analysis in practice: fundamental aspects*. 2017: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.
25. Cazalla, O., et al., *Aging of lime putty: effects on traditional lime mortar carbonation*. Journal of the American Ceramic Society, 2000. **83**(5): p. 1070-1076.

26. Koteng, D.O. and C.-T. Chen, *Strength development of lime–pozzolana pastes with silica fume and fly ash*. *Construction and Building Materials*, 2015. **84**: p. 294-300.
27. Somna, K., C. Jaturapitakkul, and P. Kajitvichyanukul, *Microstructure of calcium carbide residue–ground fly ash paste*. *Journal of materials in civil Engineering*, 2011. **23**(3): p. 298-304.
28. แจ่มสว่าง, พ., การประยุกต์ใช้ดินซีเมนต์ในงานวิศวกรรมโยธา = *Applications of soil cement in civil engineering works*. 2561, กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
29. Mitchell, J.K. and S.A. El Jack, *The fabric of soil-cement and its formation*, in *Clays and Clay Minerals*. 1966, Elsevier. p. 297-305.
30. Association, N.L., *Lime Treated Soils Save Time and Money*. Lime, the Versatile Chemical-Technical Digest, 2005.
31. Masakazu, K., M. Chirdchanin, and O. Katsutada, *Investigation on microstructure and strength of lime and cement stabilized Ariake clay*. **佐賀大学工学部集報/佐賀大学工学部**, 2001. **30**(1): p. 49-63.
32. Horpibulsuk, S., N. Miura, and T. Nagaraj, *Assessment of strength development in cement-admixed high water content clays with Abrams' law as a basis*. *Geotechnique*, 2003. **53**(4): p. 439-444.
33. Cardoso, F.A., et al., *Carbide lime and industrial hydrated lime characterization*. *Powder Technology*, 2009. **195**(2): p. 143-149.
34. Gallucci, E., X. Zhang, and K.L. Scrivener, *Effect of temperature on the microstructure of calcium silicate hydrate (CSH)*. *Cement and Concrete Research*, 2013. **53**: p. 185-195.
35. Luz, A. and V. Pandolfelli, *Halting the calcium aluminate cement hydration process*. *Ceramics International*, 2011. **37**(8): p. 3789-3793.
36. Kim, M.S., et al., *Use of CaO as an activator for producing a price-competitive non-cement structural binder using ground granulated blast furnace slag*. *Cement and concrete research*, 2013. **54**: p. 208-214.

37. Tironi, A., et al., *Thermal analysis to assess pozzolanic activity of calcined kaolinitic clays*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2014. **117**(2): p. 547-556.
38. Ma, B., et al., *Effect of TIPA on chloride immobilization in cement-fly ash paste*. Advances in Materials Science and Engineering, 2018. **2018**.
39. Schöler, A., et al., *Hydration of quaternary Portland cement blends containing blast-furnace slag, siliceous fly ash and limestone powder*. Cement and Concrete Composites, 2015. **55**: p. 374-382.
40. Scrivener, K., R. Snellings, and B. Lothenbach, *A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials*. Vol. 540. 2016: Crc Press Boca Raton, FL, USA:.
41. du Toit, G., et al., *Characterisation of the Hydration Products of a Chemically and Mechanically Activated High Coal Fly Ash Hybrid Cement*. Minerals, 2022. **12**(2): p. 157.
42. Hidalgo, S., et al., *Evaluation of Rice Straw Ash as a Pozzolanic Addition in Cementitious Mixtures*. Applied Sciences, 2021. **11**(2): p. 773.
43. Wilińska, I. and B. Pacewska, *Influence of selected activating methods on hydration processes of mixtures containing high and very high amount of fly ash*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2018. **133**(1): p. 823-843.
44. Pham, S.T. and W. Prince, *Effects of carbonation on the microstructure of cement materials: influence of measuring methods and of types of cement*. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2014. **8**(4): p. 327-333.
45. Poursaei, A., *Corrosion of steel in concrete structures*, in *Corrosion of steel in concrete structures*. 2016, Elsevier. p. 19-33.
46. Torréns-Martín, D., L. Fernández-Carrasco, and M. Blanco-Varela, *Thermal analysis of blended cements*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2015. **121**(3): p. 1197-1204.

47. Vogler, N., et al., *Description of the concrete carbonation process with adjusted depth-resolved thermogravimetric analysis*. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2021: p. 1-14.
48. Taylor, H.F., *Proposed structure for calcium silicate hydrate gel*. *Journal of the American Ceramic Society*, 1986. **69**(6): p. 464-467.
49. Liu, S., et al., *Pressed recycled fly ash and carbide slag: Hydration of entirely waste-stream building components*. *Construction and Building Materials*, 2020. **265**: p. 120282.
50. Taylor, H., *Nanostructure of C_3S/H : Current status*. *Advanced cement based materials*, 1993. **1**(1): p. 38-46.

