



การปรับปรุงคุณภาพดินลมหอบด้วยวัสดุเชื่อมประสานชนิดใหม่  
โดยใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย



ปภังกร มั่นพรม

วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร  
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
ปีการศึกษา 2564  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

การปรับปรุงคุณภาพดินลมหอบด้วยวัสดุเชื่อมประสานชนิดใหม่  
โดยใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร  
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
ปีการศึกษา 2564  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

วิทยานิพนธ์ เรื่อง "การปรับปรุงคุณภาพดินลมหอบด้วยวัสดุเชื่อมประสานชนิดใหม่  
โดยใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย"

ของ ปกัณธธร มั่นพรม

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

<b>ชื่อเรื่อง</b>	การปรับปรุงคุณภาพดินลมหอบด้วยวัสดุเชื่อมประสานชนิดใหม่ โดยใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย
<b>ผู้วิจัย</b>	ปภัณธธร มั่นพรม
<b>ประธานที่ปรึกษา</b>	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จุฬพันธ์ทอง
<b>ประเภทสารนิพนธ์</b>	วิทยานิพนธ์ วศ.ม. วิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยนครสวรรค์, 2564
<b>คำสำคัญ</b>	กากแคลเซียมคาร์ไบด์, เถ้าลอย, วัสดุเชื่อมประสาน, การปรับปรุงคุณภาพดิน, ดินลมหอบ

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการพัฒนาสารเชื่อมประสานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมชนิดใหม่ จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย ศึกษาหาอัตราส่วนระหว่าง  $\text{CaO}/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$  ที่เหมาะสมที่สุด เพื่อนำไปใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติดินลมหอบ โดยงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาคูณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของวัสดุกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR), เถ้าลอย (FA) และ ดินลมหอบ (Loess) ด้วยเทคนิค Particle Size Distribution, X-ray fluorescence, X-ray Diffractometer, Scanning Electron Microscopy และ Thermogravimetric Analysis และทำการออกแบบส่วนผสมวัสดุผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยที่มีอัตราส่วน  $\text{CaO}/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$  เท่ากับ 1.7, 1.5, 1.3, 1.1 และ 0.9 ศึกษาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมโดยทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของเพสต์ และมอร์ตาร์อัตราส่วน  $\text{CaO}/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$  ที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลา 91 วัน ของเพสต์และมอร์ตาร์สูงที่สุดในงานวิจัยนี้คือ 1.5 อัตราส่วน  $\text{CaO}/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$  เท่ากับ 1.5 ถูกเลือกมาใช้เป็นวัสดุประสานเพื่อปรับปรุงคุณภาพดินลมหอบ และได้ทำการศึกษากำลังอัดแบบไม่จำกัดของดิน, การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักระหว่างการทดสอบเปียกสลับแห้ง และการสูญเสียกำลังของดินตัวอย่างในสภาวะเปียกสลับแห้ง โดยออกแบบการใช้วัสดุเชื่อมประสานในอัตราร้อยละ 10-25 ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการใช้วัสดุกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าลอยเป็นวัสดุเชื่อมประสานสามารถลดการสูญเสียกำลังของดินตัวอย่างจากสภาวะเปียกสลับแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ

<b>Title</b>	LOESS STABILIZATION USING NEW BINDER SYSTEMS FROM CALCIUM CARBIDE RESIDUE AND FLY ASH
<b>Author</b>	PAPANTASORN MANPROM
<b>Advisor</b>	Assistant Professor Phongthorn Julphunthong, Ph.D.
<b>Academic Paper</b>	M.Eng. Thesis in Civil Engineering, Naresuan University, 2021
<b>Keywords</b>	Calcium carbide residue, Fly ash, Cementitious materials, Soil stabilized, Loess

### ABSTRACT

The development of an environmentally friendly binders from calcium carbide residue and fly ash wastes intensively investigated in this study. The effects of  $\text{CaO}/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$  ratio on binding performance were also studied for loess stabilization. The physical properties and chemical composition of calcium carbide residue (CCR), fly ash (FA) and Loess were investigated using laser diffraction particle size analyzer, X-ray fluorescence, X-ray diffraction, Scanning Electron Microscopy, and Thermogravimetric Analysis. The raw materials were designed for  $\text{CaO}/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$  ratios of 1.7, 1.5, 1.3, 1.1, and 0.9 to studying binding efficiency. The compressive strength test for pastes and mortars were demonstrated. The test results suggested that the mixture with  $\text{CaO}/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$  of 1.5 showed highest compressive strength at 91 days curing age. The  $\text{CaO}/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$  of 1.5 mixture was selected for using as soil stabilizer in range of 10-25 wt.%. The unconfined compressive strength and mass loss of stabilized soils in wet-dried condition were also studied. The results demonstrated significantly decreased losses of mass and strength of stabilized soils from wet-dried condition.

## ประกาศคุณูปการ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องได้รับความอนุเคราะห์ ความเมตตา ความกรุณาของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พงษ์ธร จุฬพันธ์ทอง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทนงศักดิ์ โนไชยา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สลิกรณณ์ เหลืองวิซชเจริญ และ รองศาสตราจารย์ ดร. ธวัช สุริวงษ์ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางในการทำวิจัย สนับสนุนการดำเนินงานวิจัย ตรวจสอบความถูกต้องของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนผลักดันให้ งานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์ และทรงคุณค่า

ขอขอบพระคุณทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ อาทิเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา และสาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่ได้ให้ความสะดวกในการยืมเครื่องมือในการทำงานวิจัย และขอบคุณนิสิตปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา ที่ได้ให้ความช่วยเหลืองานในห้องปฏิบัติการมา ณ ที่นี้

เหนือสิ่งอื่นใดผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และ ครอบครัว ที่ได้อบรม เลี้ยงดู ให้กำลังใจ และส่งเสริมการศึกษาด้วยดีมาตลอด คุณค่าและประโยชน์อันเกิดจากงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบและอุทิศให้ บิดา มารดา ครอบครัว ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการช่วยเหลือสนับสนุนในทุกๆด้านอย่างดีที่สุดเสมอมา

ปภัณธธร มั่นพรม

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
ประกาศศุภณูการ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาของงานวิจัย.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement).....	5
2.1.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตพอร์ตแลนด์ซีเมนต์(Portland Cement).....	6
2.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์(Portland Cement).....	6
2.1.2.1 สารประกอบหลัก.....	6
2.1.2.2 สารประกอบรอง.....	8
2.1.3 ปฏิกิริยาระหว่างพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement) กับน้ำ.....	10
2.1.3.1 แคลเซียมซิลิเกต.....	10
2.1.3.2 แคลเซียมอลูมิเนตและเฟอร์ไรต์.....	10
2.2 กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR).....	11

2.3	เถ้าลอย (Fly ash) .....	12
2.3.1	ชนิดของเถ้าลอย.....	13
2.3.2	ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของเถ้าลอย.....	17
2.4	ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction).....	18
2.5	ดินลมหอบ (Loess).....	19
2.6	ดินซีเมนต์ (Soil cement).....	21
2.7	ทฤษฎีและหลักการการวิเคราะห์ทางด้านเคมีและฟิสิกส์ของวัสดุ.....	21
2.7.1	X-ray Fluorescence (XRF).....	21
2.7.2	X-ray Diffractometer (XRD).....	23
2.7.3	Scanning Electron Microscopy (SEM).....	25
2.7.4	Thermogravimetric Analyzer (TGA).....	26
2.8	ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	29
2.8.1	การใช้ประโยชน์ของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และวัสดุปอซโซลาน.....	29
2.8.2	การปรับปรุงคุณภาพดินลมหอบ (Loess).....	38
บทที่ 3	วิธีดำเนินงานวิจัย.....	46
3.1	การออกแบบส่วนผสม.....	47
3.2	การทดสอบทางด้านวิศวกรรม.....	48
3.2.1	การทดสอบซีเมนต์เพสต์.....	48
3.2.1.1	การทดสอบหาความชื้นเหลว.....	48
3.2.1.2	การหล่อซีเมนต์เพสต์.....	50
3.2.2	การทดสอบมอร์ตาร์.....	51
3.2.2.1	การทดสอบหาค่าการไหล.....	51
3.2.2.1	การหล่อมอร์ตาร์.....	53
3.2.2.1	การทดสอบกำลังอัด.....	54



3.2.3 การทดสอบดินซีเมนต์.....	54
3.2.3.1 การทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test).....	54
3.2.3.2 การทดสอบความคงทนโดยวิธีเปียกสลับแห้ง (Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures).....	56
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล .....	57
4.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุ (CCR, FA และ ดินลมหอบ).....	57
4.1.1 กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) .....	57
4.1.1.1 ผลการทดสอบ Particle Size Distribution ของกากแคลเซียมคาร์ไบด์.....	57
4.1.1.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ด้วยเทคนิค XRF .....	57
4.1.1.3 ผลการวิเคราะห์กากแคลเซียมคาร์ไบด์ด้วยเทคนิค XRD .....	58
4.1.1.4 ผลการวิเคราะห์กากแคลเซียมคาร์ไบด์ด้วยเทคนิค SEM .....	58
4.1.1.5 ผลการวิเคราะห์กากแคลเซียมคาร์ไบด์ด้วยเทคนิค TGA .....	59
4.1.2 เถ้าลอย (Fly ash, FA) .....	60
4.1.2.1 ผลการทดสอบ Particle Size Distribution ของเถ้าลอย .....	60
4.1.2.2 ผลการวิเคราะห์เถ้าลอยด้วยเทคนิค XRF .....	60
4.1.2.3 ผลการวิเคราะห์เถ้าลอยด้วยเทคนิค XRD .....	61
4.1.2.4 ผลการวิเคราะห์เถ้าลอยด้วยเทคนิค SEM .....	62
4.1.2.5 ผลการวิเคราะห์เถ้าลอยด้วยเทคนิค TGA และ DTG.....	62
4.1.3 ดินลมหอบ (Loess).....	63
4.1.3.1 ผลการทดสอบ Particle Size Distribution ของดินลมหอบ .....	63
4.1.3.2 ผลการวิเคราะห์ดินลมหอบด้วยเทคนิค XRF .....	63
4.1.3.3 ผลการวิเคราะห์ดินลมหอบด้วยเทคนิค XRD.....	64
4.1.3.4 ผลการวิเคราะห์ดินลมหอบด้วยเทคนิค SEM .....	64

4.2 การวิเคราะห์เพสต์ .....	65
4.2.1 ผลการวิเคราะห์เพสต์ด้วยเทคนิค XRD.....	65
4.2.2 ผลการวิเคราะห์เพสต์ด้วยเทคนิค SEM .....	69
4.2.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ของเพสต์ .....	74
4.3 ผลการวิเคราะห์มอร์ตาร์ .....	76
4.3.1 ผลการทดสอบกำลังอัด (Compressive Strength) ของมอร์ตาร์.....	76
4.4 การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยปรับปรุงคุณภาพดินลมหอบ .....	79
4.4.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัด (Unconfined compressive strength) .....	79
4.4.2 ผลการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักระหว่างการทดสอบเปียกสลับแห้ง .....	81
4.4.3 ผลการทดสอบดินโดยวิธีเปียกสลับแห้งต่อกราฟความเค้นและความเครียด .....	83
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	85
บรรณานุกรม.....	86
ประวัติผู้วิจัย.....	92

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 องค์ประกอบทางเคมีของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement).....	5
ตาราง 2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย [14] .....	13
ตาราง 3 ข้อกำหนดทางเคมีสำหรับการจำแนกชนิดของเถ้าลอย [15] .....	14
ตาราง 4 ข้อกำหนดทางเคมีเพิ่มเติมสำหรับการจำแนกชนิดของเถ้าลอย [15].....	14
ตาราง 5 ข้อกำหนดทางกายภาพสำหรับการจำแนกชนิดของเถ้าลอย [15].....	15
ตาราง 6 ข้อกำหนดทางกายภาพเพิ่มเติมสำหรับการจำแนกชนิดของเถ้าลอย [15] .....	16
ตาราง 7 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ [34] .....	29
ตาราง 8 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ [34].....	30
ตาราง 9 อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ของวัสดุผสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าแกลบ [35] .....	32
ตาราง 10 องค์ประกอบทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ เถ้าแกลบ และปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 [35] .....	32
ตาราง 11 คุณสมบัติทางกายภาพของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ เถ้าแกลบ และปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 [35] .....	32
ตาราง 12 กำลังอัดของมอร์ตาร์ ณ ระยะเวลาการบ่มที่ 1, 3, 7, 14, 28, 60, 90 และ 180 วัน [35] .....	34
ตาราง 13 คุณสมบัติทางเคมีของ กากแคลเซียมคาร์ไบด์, เถ้าลอย, ปูนขาวและปูนซีเมนต์ [36] ....	35
ตาราง 14 สัดส่วนส่วนผสมสำหรับตัวอย่าง เถ้าลอย, กากแคลเซียมคาร์ไบด์ และหินฝุ่น [35] .....	36
ตาราง 15 การวิเคราะห์ต้นทุนสำหรับการผลิตอิฐจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าลอย เทียบกับ การผลิตอิฐจากปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ [35].....	38
ตาราง 16 คุณสมบัติทางกายภาพของดินลมหอบ (Loess) [3].....	38
ตาราง 17 คุณสมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ [3].....	38

ตาราง 18 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ [3].....	39
ตาราง 19 องค์ประกอบทางเคมีของดินลูกรัง (FLS) และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) [37].....	44
ตาราง 20 องค์ประกอบทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย.....	47
ตาราง 21 อัตราส่วนผสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย .....	48
ตาราง 22 องค์ประกอบทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ CCR .....	57
ตาราง 23 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย FA .....	60
ตาราง 24 องค์ประกอบทางเคมีของดินลมหอบ Loess.....	63
ตาราง 25 ส่วนผสมของเพสต์.....	65
ตาราง 26 ค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ของเพสต์ .....	74
ตาราง 27 ร้อยละค่ากำลังของ CCR-FA เพสต์เปรียบเทียบกับ OPC เพสต์ .....	75
ตาราง 28 ส่วนผสมของมอร์ตาร์ .....	76
ตาราง 29 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ .....	77
ตาราง 30 ร้อยละค่ากำลังของ CCR-FA มอร์ตาร์เปรียบเทียบกับ OPC มอร์ตาร์ .....	78
ตาราง 31 ส่วนผสมสำหรับขึ้นรูปตัวอย่างดิน .....	79
ตาราง 32 กำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดของดิน .....	80
ตาราง 33 ร้อยละค่ากำลังอัดแบบไม่จำกัดของดิน CCR-FA เปรียบเทียบกับดิน Control.....	81
ตาราง 34 กำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดที่ผ่านการทดสอบโดยวิธีเปียกสลับแห้ง.....	83

## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพ 1 พื้นที่บริเวณที่มีดินลมหอบทับถมอยู่ในประเทศไทย.....	1
ภาพ 2 บริเวณที่ทิ้งกากแคลเซียมคาร์ไบด์.....	11
ภาพ 3 โครงสร้างผลึกของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ .....	12
ภาพ 4 เชื้อ Hungry Horse ประเทศสหรัฐอเมริกา .....	12
ภาพ 5 ถ้ำลอย (Fly ash) .....	13
ภาพ 6 ถ้ำลอยที่มีขนาดใหญ่.....	17
ภาพ 7 ถ้ำลอยที่มีขนาดเล็ก .....	17
ภาพ 8 ซีโนสเฟีย (Cenosphere).....	18
ภาพ 9 พลีสเฟีย (Plerospheres) .....	18
ภาพ 10 ดินลมหอบ, วอชิงตัน สหรัฐอเมริกา .....	19
ภาพ 11 ดินลมหอบ, ที่ราบสูงประเทศจีน.....	20
ภาพ 12 ดินลมหอบ จังหวัดขอนแก่น ประเทศไทย .....	20
ภาพ 13 การเตรียมดินซีเมนต์ในสนามเพื่อใช้เป็นชั้นรองพื้นทาง.....	21
ภาพ 14 แผนภาพสเปกโตรมิเตอร์แบบกระจายความยาวคลื่น (WD).....	22
ภาพ 15 แผนภาพของสเปกโตรมิเตอร์แบบกระจายพลังงาน (ED) .....	22
ภาพ 16 การกระเจิงแบบยืดหยุ่น (Thomson Scattering).....	24
ภาพ 17 กระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (Compton Scattering) .....	24
ภาพ 18 ตัวอย่างผลการทดสอบ XRD .....	25
ภาพ 19 ผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	26
ภาพ 20 เครื่องทดสอบการวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเชิงความร้อน (TGA).....	27
ภาพ 21 หลักการทำงานของการ Thermogravimetric Analysis .....	28

ภาพ 22 รูปทรงอนุภาคของเถ้าชานอ้อย [34].....	29
ภาพ 23 รูปทรงอนุภาคของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ [34].....	30
ภาพ 24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์และการแทนที่เถ้าชานอ้อย(BA) ในกากแคลเซียมคาร์ไบด์(CCR) [34] .....	31
ภาพ 25 ภาพถ่ายรูปทรงอนุภาคของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (a), เถ้าแกลบ (b) และปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (c) [35] .....	33
ภาพ 26 กราฟแสดงค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ ณ ระยะเวลาการบ่มที่ 1, 3, 7, 14, 28, 60, 90 และ 180 วัน [35].....	34
ภาพ 27 ภาพถ่ายรูปทรงอนุภาคของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (a) และเถ้าลอย (b) [36].....	35
ภาพ 28 ผลการทดสอบ XRD ของปูนขาว (Hydrated lime) และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) [36] .....	36
ภาพ 29 ค่ากำลังอัดที่ระยะเวลา 7 วัน [35].....	37
ภาพ 30 ค่ากำลังอัดที่ระยะเวลา 14 วัน [35].....	37
ภาพ 31 การกระจายขนาดอนุภาคของดินลมหอบ (Loess) และเถ้าลอย (FA) [3].....	39
ภาพ 32 ภาพถ่ายรูปทรงอนุภาค (SEM) ของฟอสโฟยิปซัม (Phosphogypsum, PG) [3] .....	39
ภาพ 33 อิทธิพลของการใช้ซีเมนต์ (a), PG (b), FA (c) และปูนขาว (d) ต่อผลของค่า Unconfined compressive strength [3].....	40
ภาพ 34 ภาพถ่ายรูปทรงอนุภาค (SEM) มีการเติม PG ที่ 5%(a) และ 10%(b) ที่ 28 วัน [3].....	42
ภาพ 35 ภาพถ่ายรูปทรงอนุภาค (SEM) มีการเติม FA ที่ 15% ที่ระยะเวลา 7 วัน(a) และ 28 วัน(b) [3].....	43
ภาพ 36 การกระจายของขนาดเม็ดดินลูกรัง (FLS) และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) [37].....	44
ภาพ 37 ค่า Unconfined Compressive Strengths ของตัวอย่างแบบแช่น้ำ และไม่แช่น้ำ ที่ระยะเวลาการบ่ม 1, 7, 14 และ 28 วัน [37].....	45
ภาพ 38 แผนผังการทดลอง.....	46
ภาพ 39 การกระจายขนาดอนุภาคของกากแคลเซียมคาร์ไบด์.....	57
ภาพ 40 ผลการวิเคราะห์กากแคลเซียมคาร์ไบด์ด้วยเทคนิค X-Ray Diffractometer (XRD).....	58

ภาพ 41 ภาพถ่ายรูปทรงอนุภาคของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่กำลังขยาย3,000X .....	58
ภาพ 42 ผลการทดสอบ TGA ของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ .....	59
ภาพ 43 การกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าลอย.....	60
ภาพ 44 ผลการวิเคราะห์เถ้าลอยด้วยเทคนิค X-Ray Diffractometer (XRD).....	61
ภาพ 45 ผลวิเคราะห์เถ้าลอยเพื่อหาร้อยละของโครงสร้างแบบอสัณฐาน(Amorphous) ด้วยเทคนิค Rietveld Refinement .....	61
ภาพ 46 ภาพถ่ายรูปทรงอนุภาคของเถ้าลอยที่กำลังขยาย3,000X .....	62
ภาพ 47 ผลการทดสอบ TGA และ DTG ของเถ้าลอย.....	62
ภาพ 48 การกระจายขนาดอนุภาคของดินลมหอบ.....	63
ภาพ 49 ผลการวิเคราะห์ดินลมหอบเทคนิค X-Ray Diffractometer (XRD).....	64
ภาพ 50 ภาพถ่ายรูปทรงอนุภาคของดินลมหอบที่กำลังขยาย (a) 1,000X และ (b) 5,000X.....	64
ภาพ 51 ผลการวิเคราะห์ XRD ของเพสต์ส่วนผสม Ca/(Si+Al)-1.7.....	66
ภาพ 52 ผลการวิเคราะห์ XRD ของเพสต์ส่วนผสม Ca/(Si+Al)-1.5 ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 28, 56 และ 91 วัน .....	67
ภาพ 53 ผลการวิเคราะห์ XRD ของเพสต์ส่วนผสม Ca/(Si+Al)-1.3 ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 28, 56 และ 91 วัน .....	67
ภาพ 54 ผลการวิเคราะห์ XRD ของเพสต์ส่วนผสม Ca/(Si+Al)-1.1 ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 28, 56 และ 91 วัน .....	68
ภาพ 55 ผลการวิเคราะห์ XRD ของเพสต์ส่วนผสม Ca/(Si+Al)-0.9 ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 28, 56 และ 91 วัน .....	68
ภาพ 56 ผลการทดสอบ SEM ของเพสต์ Ca/(Si+Al)-1.7 ที่ระยะเวลาในการบ่มตัวอย่าง (a) 7 วัน,(b) 28 วัน และ (c) 91 วัน ที่กำลังขยาย 3,500X และผลการทดสอบ EDS ของเพสต์ Ca/(Si+Al)-1.7 (e) เถ้าลอย, (d) ปอร์ตแลนด์ไตต์ และ (f) C-S-H gel .....	69
ภาพ 57 ผลการทดสอบ SEM ของเพสต์ Ca/(Si+Al)-1.5 ที่ระยะเวลาในการบ่มตัวอย่าง (a) 7 วัน, (b) 28 วัน และ (c) 91 วัน ที่กำลังขยาย 3,500X และผลการทดสอบ EDS ของเพสต์ Ca/(Si+Al)-1.5 (e) เถ้าลอย, (d) ปอร์ตแลนด์ไตต์ และ (f) C-S-H gel.....	70

ภาพ 58 ผลการทดสอบ SEM ของเพสต์ Ca/(Si+Al)-1.3 ที่ระยะเวลาในการบ่มตัวอย่าง (a) 7 วัน, (b) 28 วัน และ (c) 91 วัน ที่กำลังขยาย 3,500X และผลการทดสอบ EDS ของเพสต์ Ca/(Si+Al)-1.3 (e) แก้วลอย, (d) ปอร์ตแลนด์ไตต์ และ (f) C-S-H gel.....	71
ภาพ 59 ผลการทดสอบ SEM ของเพสต์ Ca/(Si+Al)-1.1 ที่ระยะเวลาในการบ่มตัวอย่าง (a) 7 วัน, (b) 28 วัน และ (c) 91 วัน ที่กำลังขยาย 3,500X และผลการทดสอบ EDS ของเพสต์ Ca/(Si+Al)-1.1 (e) แก้วลอย, (d) ปอร์ตแลนด์ไตต์ และ (f) C-S-H gel.....	72
ภาพ 60 ผลการทดสอบ SEM ของเพสต์ Ca/(Si+Al)-0.9 ที่ระยะเวลาในการบ่มตัวอย่าง (a) 7 วัน, (b) 28 วัน และ (c) 91 วัน ที่กำลังขยาย 3,500X และผลการทดสอบ EDS ของเพสต์ Ca/(Si+Al)-0.9 (e) แก้วลอย, (d) แคลไซต์ และ (f) C-S-H gel .....	73
ภาพ 61 ค่ากำลังรับแรงอัดของเพสต์ .....	75
ภาพ 62 ร้อยละค่ากำลังของ CCR-FA เพสต์เปรียบเทียบกับ OPC เพสต์.....	76
ภาพ 63 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ .....	77
ภาพ 64 ร้อยละค่ากำลังของ CCR-FA มอร์ตาร์เปรียบเทียบกับ OPC มอร์ตาร์ .....	78
ภาพ 65 กำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดของดิน (Unconfined compressive strength) .....	80
ภาพ 66 ร้อยละค่ากำลังอัดแบบไม่จำกัดของดิน CCR-FA เปรียบเทียบกับดิน Control.....	81
ภาพ 67 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างดินที่เติมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และ แก้วลอย (FA) ลงไปในการขึ้นรูปตัวอย่างดินแบบแทนที่ (a) 10%, (b) 15%, (c) 20% และ (d) 25% ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน .....	82
ภาพ 68 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างดินที่เติมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และ แก้วลอย (FA) ลงไปในการขึ้นรูปตัวอย่างดินแบบแทนที่ (a) 10%, (b) 15%, (c) 20% และ (d) 25% ที่ระยะเวลาบ่ม 56 วัน .....	83
ภาพ 69 กำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดของดินที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน .....	84
ภาพ 70 กำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดของดินที่ระยะเวลาบ่ม 56 วัน .....	84



## บทที่ 1

### บทนำ

#### ความเป็นมาของงานวิจัย

ดินลมหอบ (Loess) เป็นดินทรายละเอียดปนทรายแป้ง (Silty sand) ปกคลุมเป็นบริเวณกว้างในพื้นที่ตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ดินลมหอบเกิดจากการพัดพาโดยลม ทับถมกันเป็นชั้น ๆ ความหนาเฉลี่ยของชั้นดินประมาณ 5-6 เมตร ดินลมหอบในประเทศไทย แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ Red loess (ดินลมหอบสีแดง) และ Yellow loess (ดินลมหอบสีเหลือง) จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่าดินลมหอบมีค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินน้อยมาก ความแข็งแรงหรือกำลังรับแรงเฉือนของดินจะมีค่าสูงมากเมื่อดินอยู่ในสภาพแห้ง แต่เมื่อดินมีปริมาณความชื้นสูงขึ้น กำลังรับแรงเฉือนของดินจะลดลงอย่างมาก [1]



ภาพ 1 พื้นที่บริเวณที่มีดินลมหอบทับถมอยู่ในประเทศไทย [1]

ดินลมหอบมีช่องว่างระหว่างเม็ดดินมากถึงร้อยละ 45 เมื่อเทียบกับปริมาตรดินทั้งก้อน ในสภาวะปกติดินลมหอบสามารถรับน้ำหนักได้มากกว่า 100 ตันต่อตารางเมตร แต่เมื่อความชื้นในดินเพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 5-6 โดยน้ำหนัก การทรุดตัวจะเกิดขึ้นอย่างเฉียบพลัน ดินลมหอบจัดเป็นดินทรายที่มีร้อยละของดินเหนียวต่ำมาก จนไม่สามารถยึดเกาะเม็ดทรายไว้ด้วยกันได้ แม้ว่าจะถูกบดอัดอย่างแน่น แต่เมื่อมีน้ำไหลผ่าน ดินจะถูกกัดเซาะได้ง่ายและถูกพัดพาไปกับกระแสน้ำ เป็นเหตุให้สิ่งก่อสร้างพังทลายในที่สุด แนวทางการแก้ไขอาจทำได้โดยการหลีกเลี่ยงการก่อสร้างในพื้นที่

บริเวณนั้น การขุดทิ้ง หรือการอัดดินน้ำปูนเพื่ออุดช่องว่าง ทั้งหมดที่กล่าวมานั้นทำให้การประยุกต์ใช้ดินลมหอบเพื่อเป็นวัสดุก่อสร้าง เช่น การประยุกต์ใช้เพื่อเป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางนั้นมีข้อจำกัดอย่างมาก [2]

งานวิจัยในอดีตได้ทำการศึกษาเพื่อที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวของดินลมหอบ Kang Gu [3] ได้ศึกษาเพื่อที่จะเพิ่มค่ากำลังอัดแกนเดียวให้กับดินลมหอบจึงมีการทดสอบโดยใช้ซีเมนต์เป็นสารเชื่อมประสาน โดยได้ใช้ซีเมนต์ลงไปเป็นปริมาณที่แตกต่างกัน โดยใส่ปูนซีเมนต์ 5% และ 10% ค่ากำลังอัดที่ได้เท่ากับ 1.30 MPa และ 2.77 MPa ตามลำดับ พบว่าการใช้ซีเมนต์เป็นสารเชื่อมประสาน สำหรับปรับปรุงคุณภาพเพื่อที่จะเพิ่มค่ากำลังอัดแกนเดียวให้กับดินลมหอบ นั้นสามารถเพิ่มค่ากำลังอัดแกนเดียวให้กับดินลมหอบได้ ในสภาวะการใช้งานจริงนั้นจะต้องใช้ซีเมนต์เป็นจำนวนมากในการปรับปรุงคุณภาพดิน การใช้ซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสานนั้นจึงมีค่าใช้จ่ายสูง Saofee Dueramae [4] ได้ทำการศึกษากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ และโครงสร้างทางจุลภาคของสารเชื่อมประสานที่ปราศจากซีเมนต์โดยวัสดุสองชนิดได้แก่ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) และเถ้าลอย (Fly ash, FA) พบว่าการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าลอยนำมาใช้เป็นสารเชื่อมประสาน นั้นมีผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม โดยสารเชื่อมประสานเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) จากแคลเซียมคาร์ไบด์ และซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) จากเถ้าลอย อย่างไรก็ตามผลของอัตราส่วนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ต่อซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) ต่อกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ยังไม่ได้ถูกพิจารณา

ผู้วิจัยสนใจการประยุกต์ใช้วัสดุที่เหลือทิ้งจากกากอุตสาหกรรมอันได้แก่ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) และวัสดุปอซโซลานอันได้แก่ เถ้าลอย (Fly ash, FA) มาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพและเพิ่มค่ากำลังอัดแกนเดียวให้กับดินลมหอบ เนื่องจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์มี แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) เป็นส่วนหนึ่งองค์ประกอบทางเคมี ส่วนเถ้าลอยมีซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) เป็นส่วนหนึ่งองค์ประกอบทางเคมี ซึ่งวัสดุทั้งสองนั้นมีองค์ประกอบทางเคมีที่สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ได้เช่นกัน โดยการศึกษาจะพิจารณาผลของอัตราส่วนแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ต่อซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และอะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ในวัตถุดิบต่อการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์ จากนั้นนำมาประยุกต์ใช้เป็นสารเชื่อมประสานสำหรับปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลมหอบ เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงคุณภาพของดิน และยังสามารถนำกากวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมมาใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อไปได้

### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุเชื่อมประสาน กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) และ เถ้าลอย (Fly ash, FA)
2. เพื่อศึกษาการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่าง กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) และ เถ้าลอย (Fly ash, FA)
3. เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนผสมระหว่าง กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) และ เถ้าลอย (Fly ash, FA) ต่อคุณสมบัติวิศวกรรมของสารเชื่อมประสาน
4. ศึกษาการใช้วัสดุเชื่อมประสาน ได้แก่ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) และ เถ้าลอย (Fly ash, FA) ในอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินลมหอบ

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุเชื่อมประสาน กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) และ เถ้าลอย (Fly ash, FA)
2. ทราบถึงการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่าง กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) และ เถ้าลอย (Fly ash, FA)
3. ทราบผลของอัตราส่วนผสมระหว่าง กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) และ เถ้าลอย (Fly ash, FA) ต่อคุณสมบัติวิศวกรรมของสารเชื่อมประสาน
4. ทราบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินลมหอบที่ปรับปรุงด้วยการเติมสารเชื่อมประสาน กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) และ เถ้าลอย (Fly ash, FA) ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

### ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติทางเคมี-ฟิสิกส์ ปฏิกริยาทางเคมี และคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของวัสดุเชื่อมประสาน เพื่อนำไปใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติดินลมหอบ

ขอบเขตการศึกษาการทำวิจัยจะแบ่งออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่

1. ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุเชื่อมประสาน ได้แก่ กากแคลเซียมคาร์ไบด์(Calcium carbide residue, CCR) และ เถ้าลอย(Fly ash, FA)
2. ออกแบบส่วนผสมที่จะทำการศึกษาโดยจะทำทั้งหมด โดยมีอัตราส่วน  $\text{CaO}/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$  เท่ากับ 1.85, 1.55, 1.25, 0.95 และ 0.65 ตามลำดับ
3. หล่อชิ้นงาน เพสต์ มอร์ตาร์ และดินซีเมนต์ เพื่อนำมาทดสอบคุณสมบัติทางด้านเคมี-ฟิสิกส์ และทางด้านวิศวกรรมวิศวกรรม ของชิ้นงานตัวอย่าง (ทดสอบ X-ray Diffractometer, XRD Scanning Electron Microscopy, SEM และ Thermogravimetric Analysis, TGA ของเพสต์ ทดสอบกำลังรับแรงอัด Compressive Strength ของมอร์ตาร์ และทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว Unconfined Compressive Strength ของดินซีเมนต์)
4. ศึกษาผลการทดสอบคุณสมบัติทางเคมี-ฟิสิกส์
5. ศึกษาผลการทดสอบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรม

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement)

พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่มีการนิยมใช้กันทั่วไปในโลก โดยที่พบมากที่สุดนั้นมีลักษณะเป็นผงสีขาว เนื่องจากส่วนมากถูกผลิตขึ้นจากหินปูน โดยมีองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงในตาราง 1 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement) นั้นเป็นส่วนผสมพื้นฐานของคอนกรีต ซึ่งเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ให้กำลังแก่คอนกรีต [5]

ตาราง 1 องค์ประกอบทางเคมีของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement)

องค์ประกอบทางเคมี		
ชื่อสารประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ค่าเฉลี่ย
CaO (Calcium oxide, or lime)	60-70	64.4
SiO <sub>2</sub> (Silicon dioxide, or silica)	17-25	20.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Aluminium oxide, or alumina)	3-8	5.8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Iron oxide)	0.5-6.0	3.2
MgO (Magnesium oxide)	0.1-4.0	0.5
Na <sub>2</sub> O (Sodium oxide)	0.1-1.3	0.5
K <sub>2</sub> O (Potassium oxide)	0.1-1.3	0.5
SO <sub>3</sub> (Sulfur trioxide)	0.5-3	2.6
สารประกอบอื่น	1-3	1.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากน้ำ	0.1-3.0	1.0
กากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง	0.2-0.8	0.5

### 2.1.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement)

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement) แบ่งเป็นออก 3 ชนิดหลัก ดังนี้

1. วัตถุดิบที่มีส่วนประกอบของปูนขาว (Lime Component) เป็นวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบทางเคมีเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate,  $\text{CaCO}_3$ ) ซึ่งมีความบริสุทธิ์ประมาณ 85 – 95 % ตัวอย่างวัตถุเหล่านี้ตามธรรมชาติ ได้แก่ หินปูน (Limestone) ชอล์ก (Chalk) และดินขาว (Marl)
2. วัตถุดิบที่มีส่วนประกอบของดินดำ (Clay) เป็นวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบทางเคมีของซิลิคอนไดออกไซด์ (Silicon Dioxide,  $\text{SiO}_2$ ) อะลูมินัมออกไซด์ (Aluminum Oxide,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric Oxide,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ตัวอย่างวัตถุเหล่านี้ตามธรรมชาติ ได้แก่ ดินดำ (Clay) และดินดาน (Shale)
3. วัตถุดิบปรับแต่งคุณสมบัติ (Corrective Materials) เป็นวัตถุดิบที่ใช้สำหรับเพิ่มเติมสารประกอบบางตัว เช่น ออกไซด์ของเหล็ก (Iron Oxide) ซึ่งได้จากดินลูกรัง (Laterite) ซึ่งออกไซด์ของอลูมิเนียมและเหล็กจะสามารถช่วยให้ปฏิกิริยาในเตาเผาเกิดขึ้นได้ง่าย นอกจากนี้ยังมีการเพิ่มเติม ยิปซัม (Gypsum) เพื่อหน่วงปฏิกิริยาทางเคมีของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement) ไม่ให้แข็งตัวเร็วเกินไป เป็นต้น

### 2.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement)

องค์ประกอบทางเคมีของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement) แบ่งออกเป็น 2 สารประกอบ ได้แก่

#### 2.1.2.1 สารประกอบหลัก

##### 1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate, $\text{C}_3\text{S}$ )

ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate,  $\text{C}_3\text{S}$ ) มีรูปร่างเป็นสีเหลี่ยม มีสีเทาแก่ จะพบมากถึงประมาณร้อยละ 45-55 ซึ่งเป็นปริมาณ ที่พบมากที่สุดไนพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement) เมื่อนำ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate,  $\text{C}_3\text{S}$ ) ไปผสมกับน้ำ พบว่าแข็งตัวรวดเร็วภายใน 2-3 ชั่วโมง ปฏิกิริยาระหว่าง ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate,  $\text{C}_3\text{S}$ ) กับน้ำจะก่อให้เกิดความร้อนที่ประมาณ 500 จูล/กรัม ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate,  $\text{C}_3\text{S}$ ) เป็นสารประกอบหลักที่สำคัญที่สุดในพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement) เนื่องจาก

ปริมาณของไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate,  $C_3S$ ) จะเป็นตัวกำหนดความแข็งแรงของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement)

## 2. ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate, $Ca_2SiO_4$ , $C_2S$ )

ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate,  $C_2S$ ) มีรูปร่างกลมจะพบในพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement) ประมาณร้อยละ 15-35 เมื่อนำไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate,  $C_2S$ ) ไปผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยจะก่อให้เกิดพลังความร้อนที่ประมาณ 250 จูล/กรัม ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate,  $C_2S$ ) เมื่อแข็งตัวจะค่อยๆ พัฒนากำลังอัดขึ้นเรื่อยๆ ในระยะยาวกำลังอัดของไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate,  $C_2S$ ) จะใกล้เคียงกับกำลังอัดของไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate,  $C_3S$ )

## 3. ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate, $Ca_3Al_2O_4$ , $C_3A$ )

ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate,  $C_3A$ ) มีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยม มีสีเทาอ่อน จะพบในพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement) ประมาณร้อยละ 7-15 เมื่อนำไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate,  $C_3A$ ) ไปผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิด Flash Set เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างรวดเร็ว ก่อให้เกิดความร้อนจำนวนมากประมาณ 880 จูล/กรัม การพัฒนากำลังของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate,  $C_3A$ ) นั้นสามารถพัฒนากำลังได้ภายในวันเดียว แต่กำลังอัดค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate,  $C_3S$ ) และไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate,  $C_2S$ )

4.เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium Aluminoferrite,  $AlCa_2FeO_5$ ,  $C_4AF$ )

เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium Aluminoferrite,  $C_4AF$ ) จะพบในพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement) ประมาณร้อยละ 5-10 เมื่อนำเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium Aluminoferrite,  $C_4AF$ ) ไปผสมกับน้ำน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นอย่างรวดเร็ว ก่อให้เกิดความร้อนประมาณ 420 จูล/กรัม ในช่วงต้นเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium Aluminoferrite,  $C_4AF$ ) พัฒนากำลังได้ดีมาก แต่กำลังอัดที่ได้นั้นมีค่าค่อนข้างต่ำ

### 2.1.2.2 สารประกอบรอง

1.ยิปซัม (Gypsum,  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) [6]

ยิปซัม (Gypsum,  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) จะถูกใส่เข้าไปในขั้นตอนการบดเม็ดปูน เพื่อทำหน้าที่ควบคุมเวลาในการแข็งตัวของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement) ปริมาณยิปซัมที่ใส่จะต้องเป็นปริมาณที่เหมาะสมเนื่องจากหากใส่ในปริมาณมากเกินไป จะทำให้เพสต์ที่แข็งตัวแล้วเกิดการขยายตัวและทำให้เกิดการแตกร้าวได้

2.ปูนขาวอิสระ (Free lime,  $CaO$ )

ปูนขาวอิสระ (Free lime,  $CaO$ ) อาจเกิดขึ้นเนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement) นั้นมีปริมาณของปูนขาวอิสระ (Free lime,  $CaO$ ) มากเกินไปสำหรับทำปฏิกิริยากับ  $SO_3$  (Sulfur trioxide),  $Al_2O_3$  (Aluminium oxide, or alumina) และ  $Fe_2O_3$  (Iron oxide) ในเตาเผา หรืออาจจะเกิดขึ้นเนื่องจากการเผาไหม้ที่เกิดปฏิกิริยาขึ้นแบบไม่สมบูรณ์จึงทำให้เหลือปริมาณของปูนขาวอิสระ (Free lime,  $CaO$ ) อยู่ในระบบ โดยทั่วไปแล้วจะพบปริมาณของปูนขาวอิสระ (Free lime,  $CaO$ ) ในพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement) อยู่ที่ประมาณร้อยละ 0.5-1.0 หากในพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement) มีปริมาณของปูนขาวอิสระ (Free lime,  $CaO$ ) มากเกินไปจะเป็นผลให้เพสต์ที่ก่อตัวแล้วขยายตัวและเกิดการแตกร้าวได้



### 3.แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide, MgO)

แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide, MgO) เกิดจากการสลายตัวของ วัสดุที่มีแมกนีเซียมคาร์บอเนต (Magnesium carbonate,  $MgCO_3$ ) ผสมอยู่ แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide, MgO) บางส่วนจะอยู่ในรูปผลึกอิสระ แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide, MgO) จะใช้เวลาในการรวมตัวกับน้ำเป็น เวลานานมาก อาจเป็นเวลานานนับปี ดังนั้นการที่มีแมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide, MgO) อยู่ในระบบจะส่งผลให้เกิดความไม่คงตัวของ ส่งผลเสียต่อปอร์ตแลนด์ ซีเมนต์ (Portland Cement)

### 4.ออกไซด์ของอัลคาไลน์ (Alkali Oxides)

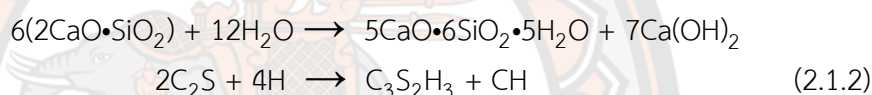
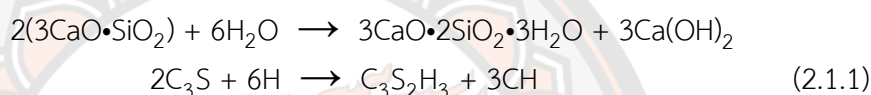
ออกไซด์ของอัลคาไลน์ (Alkali Oxides) ได้แก่  $Na_2O$  (Sodium oxide) และ  $K_2O$  (Potassium oxide) โดยทั่วไปแล้วในปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement) จะพบออกไซด์ของอัลคาไลน์ (Alkali Oxides) อยู่ประมาณร้อยละ 0.5-1.3 ออกไซด์ของอัลคาไลน์ (Alkali Oxides) ในปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement) จะส่งผลเสียในกรณีที่ใช้มวลรวมบางประเภทที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลน์มา ผสมเป็นคอนกรีต ผลจากการเกิดปฏิกิริยาจะทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวดันให้ คอนกรีตแตกร้าวได้

### 2.1.3 ปฏิกิริยาระหว่างปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement) กับน้ำ

ปฏิกิริยาระหว่างปอร์ตแลนด์ซีเมนต์กับน้ำ คือ ปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งปฏิกิริยาไฮเดรชันจะขึ้นอยู่กับสารประกอบในปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement) ปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเป็นตัวที่บ่งบอกถึงคุณสมบัติของซีเมนต์

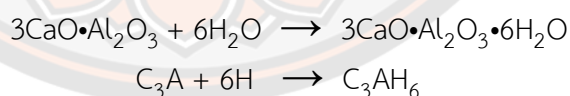
#### 2.1.3.1 แคลเซียมซิลิเกต

แคลเซียมซิลิเกต ได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต ( Tricalcium Silicate,  $C_3S$  ) และ ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate,  $C_2S$ ) ซึ่งทั้งสองตัวนี้เป็นสารประกอบหลักในปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement) สมการปฏิกิริยา ไฮเดรชันระหว่าง ไตรแคลเซียมซิลิเกตกับน้ำ แสดงดังสมการ 2.1.1 และสมการปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่าง ไดแคลเซียมซิลิเกตกับน้ำ แสดงดังสมการ 2.1.2

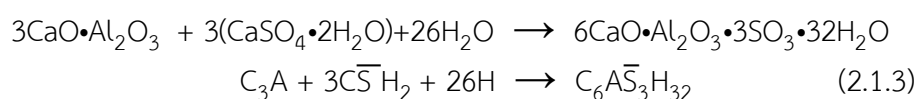


#### 2.1.3.2 แคลเซียมอลูมิเนตและเฟอร์ไรต์

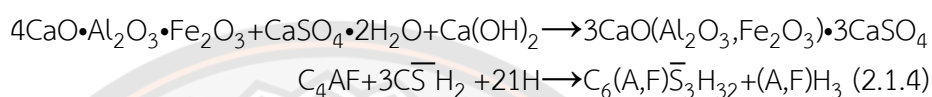
แคลเซียมอลูมิเนตและเฟอร์ไรต์ ได้แก่ ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate,  $C_3A$ ) เมื่อไตรแคลเซียมอลูมิเนตผสมกับน้ำจะทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างรวดเร็วทำให้เกิดแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (Calcium Aluminate Hydrate, CAH) ดังสมการต่อไปนี้



เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาการก่อตัวอย่างรวดเร็วจึงมีการใส่ยิปซัมเข้าไปเพื่อไปหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไตรแคลเซียมอลูมิเนตจะทำปฏิกิริยากับอิออนของซัลเฟตได้แคลเซียมซัลโฟลูมิเนตไฮเดรต หรือที่เรียกกันทั่วไปว่า เอทริงไกต์ (Ettringite) โดยมีสมการการเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ 2.1.3 ต่อไปนี้



เตตระแคลเซียมอลูมิเนียมเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium Aluminoferrite,  $C_4AF$ ) นั้นคล้ายกับการเกิดปฏิกิริยาคลายกับไตรแคลเซียมอลูมิเนต สารประกอบเหล็กออกไซด์ จะทำปฏิกิริยาคลายคลึงกับอลูมิเนียมออกไซด์ แต่ปฏิกิริยาจะเกิดช้ากว่า ยิปซัมจะหน่วงปฏิกิริยาของเตตระแคลเซียมอลูมิเนียมเฟอร์ไรต์มากกว่า ปฏิกิริยาระหว่างเตตระแคลเซียมอลูมิเนียมเฟอร์ไรต์กับยิปซัมทำให้เกิดแคลเซียมซัลโฟลูมิเนตและแคลเซียมซัลโฟเฟอร์ไรต์แสดงดังสมการ 2.1.4 ซึ่งผลิตผลนี้จะมีลักษณะเหมือนขี้มคล้ายกับเอทริงไกต์ (Ettringite)



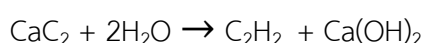
## 2.2 กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR)

กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตก๊าซอะเซทิลีน มีลักษณะเป็นผงสีเทาอ่อน ละเอียด กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุเหลือทิ้งที่จะถูกนำไปทิ้ง โดยมักจะทิ้งในหลุมฝังกลบ หรือกองทิ้งไว้ในบริเวณกว้าง [7] โดยปริมาณที่ถูกทิ้งนั้นมีมากถึงประมาณ 21,500 ตันต่อปี [8] ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีความเป็นด่างสูง



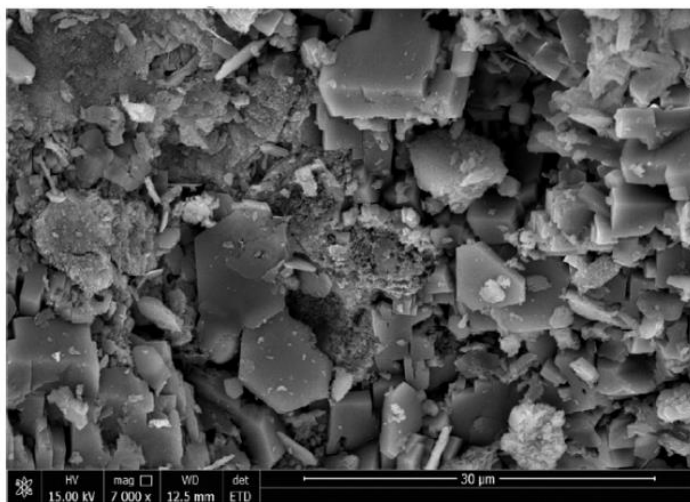
ภาพ 2 บริเวณที่ทิ้งกากแคลเซียมคาร์ไบด์ [9]

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ คือ  $Ca(OH)_2$  นั้นได้มากจากแคลเซียมคาร์ไบด์ ( $CaC_2$ ) ปฏิกิริยากับน้ำซึ่งจะให้ก๊าซอะเซทิลีน ( $C_2H_2$ ) และกากแคลเซียมคาร์ไบด์คือส่วนที่เหลือจากปฏิกิริยาดังสมการ



กากแคลเซียมคาร์ไบด์มีแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide,  $Ca(OH)_2$ ) เป็นองค์ประกอบหลักทางเคมี ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์ สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับซิลิกา ( $SiO_2$ ) แล้วได้

ผลิตภัณฑ์ที่คล้ายกับที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ จากงานวิจัยของ Yuyi Liu [10] ได้ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของกากแคลเซียมคาร์ไบด์โดยใช้เทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) จะแสดงให้เห็นว่า กากแคลเซียมคาร์ไบด์นั้นมีโครงสร้างผลึกเป็นลักษณะเหลี่ยมที่ไม่สม่ำเสมอ ดังแสดงในภาพ 3



ภาพ 3 โครงสร้างผลึกของกากแคลเซียมคาร์ไบด์

### 2.3 เถ้าลอย (Fly ash)

คำว่าเถ้าลอย (Fly ash) เริ่มใช้ราวปี ค.ศ.1930 [11] และมีการใช้เถ้าลอยในการก่อสร้างขึ้นแรกในประเทศสหรัฐอเมริกา คือการสร้างเขื่อน Hungry Horse (ภาพ 4) เมื่อปี ค.ศ. 1948 [12]



ภาพ 4 เขื่อน Hungry Horse ประเทศสหรัฐอเมริกา

ซึ่งงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้เถ้าลอยในไทยนั้นได้ถูกนำเสนอครั้งแรกในปี พ.ศ.2523 [13] เถ้าลอยเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหิน ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินที่บดละเอียดจะถูกเผาเพื่อเอาพลังงานความร้อนโดยเถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร จนถึง 200 ไมโครเมตรจะลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่า เถ้าลอย เถ้าลอยจะถูกจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิต เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศ

และเป็นมลภาวะต่อพื้นที่โดยรอบบริเวณโรงไฟฟ้า มีสี เทา เทาเข้ม หรือน้ำตาล (ภาพ 5) เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับสารแคลเซียมไฮดรอกไซด์และเกิดเป็นสารใหม่ที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน (Cementitious) โดยการทำให้ปฏิกิริยานั้นจะขึ้นอยู่กับประเภทของเถ้าลอย องค์ประกอบทางเคมีและลักษณะทางกายภาพ



ภาพ 5 เถ้าลอย (Fly ash)

โดยทั่วไปองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยนั้นจะประกอบด้วย ซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ), อะลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), เฟอริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) และ แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) เป็นองค์ประกอบหลัก และมี แมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ), ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ), โพแทสเซียมไดออกไซด์ ( $\text{K}_2\text{O}$ ) และ โซเดียมออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) เป็นองค์ประกอบรอง ดังแสดงในตาราง 2 ซึ่งเป็นตารางแสดงองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างเถ้าลอยจากงานวิจัยของ A. S. Tarasov [14]

ตาราง 2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย [14]

Materials	Chemical composition (wt.%)								
	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{MgO}$	$\text{SO}_3$	LOI
Fly ash	54.8	31.7	5.0	3.8	0.8	0.8	1.1	0.3	0.8

### 2.3.1 ชนิดของเถ้าลอย

เถ้าลอยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามมาตรฐาน ASTM C618 [15] ได้แก่

1) ชนิด F (Class F) เป็นเถ้าลอยที่มีปริมาณผลรวมของ ซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ), อะลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และ เฟอริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) มากกว่าร้อยละ 70 โดยเถ้าลอยชนิด F จะได้จากการเผ่าถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัสเป็นส่วนใหญ่ โดยทั่วไปแล้วเถ้าลอยชนิด F นั้นจะมีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ต่ำ

2) ชนิด C (Class C) เป็นแก้วลอยที่มีปริมาณผลรวมของ ซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ), อะลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และ เฟอร์ริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) มากกว่าร้อยละ 50 โดยแก้วลอยชนิด F จะได้จากการเผ่าถ่านหินลิกไนต์ และซัลฟิวไรต์เป็นส่วนใหญ่ และแก้วลอยชนิด C นี้จะมีปริมาณของ แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) สูง

โดยการจำแนกชนิดของแก้วลอยนั้นยังมีคุณสมบัติอื่นๆตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 ดังที่จะแสดงในตาราง 3-6

ตาราง 3 ข้อกำหนดทางเคมีสำหรับการจำแนกชนิดของแก้วลอย [15]

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด		
	N (ร้อยละ)	F (ร้อยละ)	C (ร้อยละ)
ผลรวมของ ซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ), อะลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และ เฟอร์ริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) อย่างต่ำ	70.0	70.0	50.0
มีปริมาณ ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) ไม่เกิน	4.0	5.0	5.0
ปริมาณความชื้นไม่เกิน	3.0	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไม่เกิน	10.0	6.0	6.0

หมายเหตุ

1. สารปอซโซลานชนิด N เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ
2. สามารถใช้แก้วลอยชนิด F ที่มีปริมาณการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาสูงถึงร้อยละ 12 ได้ถ้ามีผลของการใช้งานหรือการทดสอบที่เชื่อถือได้

ตาราง 4 ข้อกำหนดทางเคมีเพิ่มเติมสำหรับการจำแนกชนิดของแก้วลอย [15]

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด		
	N (ร้อยละ)	F (ร้อยละ)	C (ร้อยละ)
ปริมาณอัลคาไลน์สูงสุดเมื่อเทียบกับโซเดียมออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ )	1.5	1.5	1.5

หมายเหตุ ปริมาณนี้จะใช้ระบุสำหรับคอนกรีตที่มีมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาและต้องใช้น้ำซีเมนต์ที่มีอัลคาไลน์ไม่เกินกำหนด

ตาราง 5 ข้อกำหนดทางกายภาพสำหรับการจำแนกชนิดของเถ้าลอย [15]

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด		
	N (ร้อยละ)	F (ร้อยละ)	C (ร้อยละ)
<b>ความละเอียด</b> -ปริมาณคงค้างที่ตะแกรงเบอร์ 325 <sup>A</sup> ร่อนโดยใช้น้ำ ไม่เกิน	34	34	34
<b>ดัชนีกำลัง เมื่อผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์</b> -ที่อายุ 7 วัน อย่างต่ำร้อยละของส่วนผสมควบคุม -ที่อายุ 28 วัน อย่างต่ำร้อยละของส่วนผสมควบคุม -ความต้องการน้ำ, สูงสุดร้อยละของส่วนผสมควบคุม	75 <sup>B</sup> 75 <sup>B</sup> 115	75 <sup>B</sup> 75 <sup>B</sup> 105	75 <sup>B</sup> 75 <sup>B</sup> 105
<b>ความคงตัว (soundness)<sup>C</sup></b> -การขยายตัวหรือหดตัวออตเคลฟ, สูงสุดร้อยละ	0.8	0.8	0.8
<b>ข้อกำหนดด้านความสม่ำเสมอ<sup>D</sup></b> -ความหนาแน่น, ต่างจากค่าเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ -ร้อยละคงค้างตะแกรงเบอร์ 325, ต่างจากค่าเฉลี่ยไม่ เกินร้อยละ	5 5	5 5	5 5

หมายเหตุ

<sup>A</sup> ระวังไม่ให้มีผงละเอียดที่เกาะตัวกันเป็นก้อนค้างบนตะแกรง

<sup>B</sup> เป็นไปตามข้อกำหนดเมื่อดัชนีกำลังที่อายุ 7 และ 28 วันเป็นไปตามข้อกำหนด

<sup>C</sup> ถ้ามีสารปอซโซลานผสมเกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของสารซีเมนต์ในคอนกรีต ขึ้นส่วนสำหรับทดสอบการขยายตัวออตเคลฟควรมีสารปอซโซลานผสมอยู่ร้อยละของสารซีเมนต์ตามนั้น

<sup>D</sup> ความหนาแน่น และความละเอียดของตัวอย่างแต่ละตัวอย่างต้องไม่แตกต่างจากค่าเฉลี่ยของสิบตัวอย่างก่อนหน้าหรือค่าเฉลี่ยของตัวอย่างก่อนหน้าทั้งหมด (ในกรณีที่ไม่ถึงสิบตัวอย่าง)

ตาราง 6 ข้อกำหนดทางกายภาพเพิ่มเติมสำหรับการจำแนกชนิดของเถ้าลอย [15]

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด		
	N (ร้อยละ)	F (ร้อยละ)	C (ร้อยละ)
<b>Multiple Factor</b> ผลคูณของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผากับปริมาณคงค้างที่ตะแกรงเบอร์ 325 เมื่อร่อนโดยใช้น้ำไม่เกิน		255	
การหดตัวแห้งที่ 28 วัน ของมอร์ตาร์ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม ไม่เกิน	0.03	0.03	0.03
<b>ข้อกำหนดด้านความสม่ำเสมอ</b> เมื่อใช้สารกักกระจายฟองอากาศ ปริมาณสารกักกระจายฟองอากาศที่ทำให้มีปริมาณอากาศร้อยละ 18.0 จะต้องไม่แตกต่างจากค่าเฉลี่ยของสิบตัวอย่างที่ทดสอบก่อนหน้า หรือค่าเฉลี่ยของตัวอย่างทั้งหมดในกรณี que ทดสอบไม่ถึงสิบตัวอย่าง ไม่เกิน	20	20	20
<b>ประสิทธิภาพในการควบคุมปฏิกิริยาอัลคาไลน์</b> การขยายตัวของส่วนผสมควบคุมที่ทำด้วยปูนซีเมนต์อัลคาไลน์ต่ำ ไม่เกินร้อยละ	100	100	100
<b>ประสิทธิภาพในการช่วยต้านทานซัลเฟต<sup>1</sup></b> วิธีที่ 1 การขยายตัวของส่วนผสมทดสอบ -สภาวะซัลเฟสปานกลาง 6 เดือน สูงสุดไม่เกินร้อยละ -สภาวะซัลเฟตสูง 6 เดือน สูงสุดไม่เกินร้อยละ วิธีที่ 2 การขยายตัวของส่วนผสมทดสอบ -เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุมที่ทำจากปูนซีเมนต์ทนซัลเฟตในสภาวะซัลเฟต 6 เดือน สูงสุดไม่เกิน	0.1 0.05 100	0.1 0.05 100	0.1 0.05 100

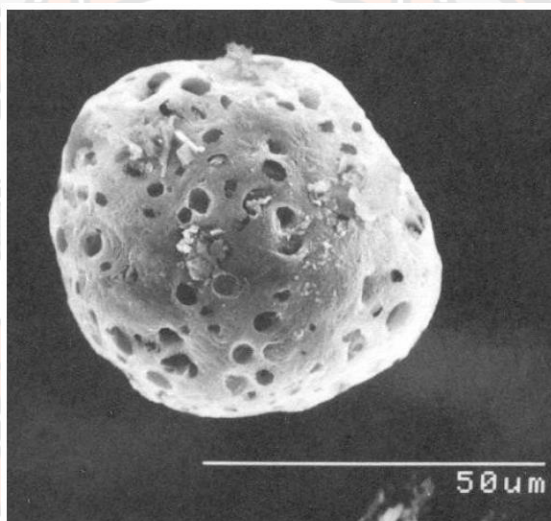
หมายเหตุ <sup>1</sup> ปริมาณปอซโซลานที่ถือว่ามีประสิทธิภาพในการช่วยต้านซัลเฟตจะต้องอยู่ภายในร้อยละ +2 ของการทดสอบ

หรือระหว่างสองค่าของการทดสอบที่อยู่ในเกณฑ์

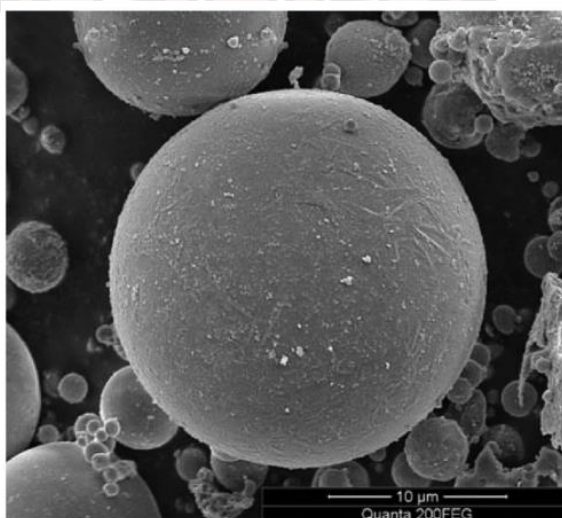


### 2.3.2 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของเถ้าลอย

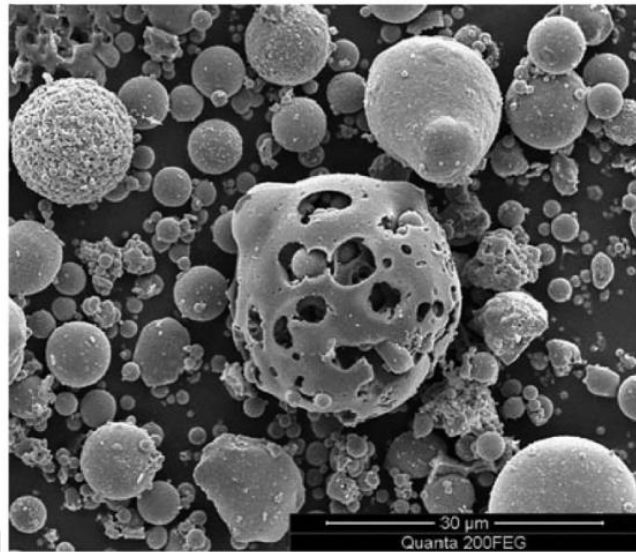
เถ้าลอยมีลักษณะเป็นทรงกลม โดยส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous) เถ้าลอยส่วนหนึ่งนั้นเกิดจากการรวมตัวกันของเถ้าถ่านหินขนาดเล็ก พื้นผิวของเถ้าลอยนั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดของเถ้าลอย เถ้าลอยที่มีขนาดใหญ่จะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ผิวขรุขระมีรูเล็กๆที่ผิว เนื่องจากมีปริมาณของคาร์บอนสูง (ภาพ 6) และเถ้าลอยที่มีขนาดเล็กจะมีรูปทรงเป็นทรงกลมและมีผิวที่เรียบ (ภาพ 7) เนื่องจากเถ้าลอยขนาดเล็กนั้นมีกระบวนการเผาไหม้ที่ดีกว่าเถ้าลอยที่มีขนาดใหญ่กว่า นอกจากนี้เถ้าลอยยังมีอนุภาคที่มีลักษณะเป็นโพรงข้างในที่เรียกว่า ซีโนสเฟีย (Cenospheres) (ภาพ 8) และยังมีเถ้าลอยที่มีลักษณะกลวงที่มีอนุภาคของเถ้าถ่านหินขนาดเล็กอยู่ภายในโดยจะเรียกชื่อกันว่า พลีโรสเฟีย (Plerospheres) (ภาพ 9)



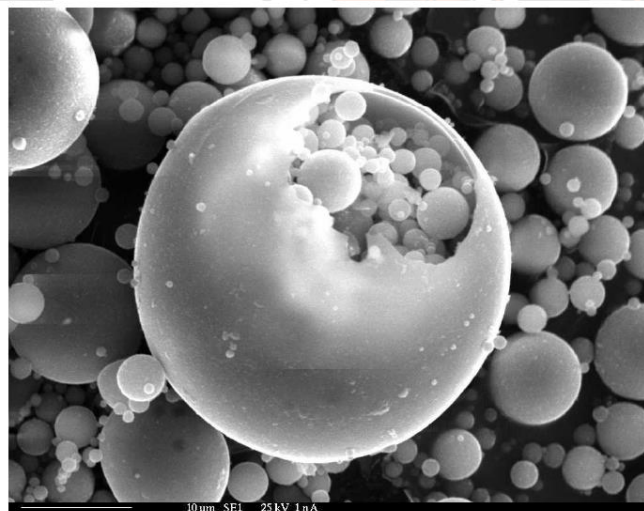
ภาพ 6 เถ้าลอยที่มีขนาดใหญ่ [16]



ภาพ 7 เถ้าลอยที่มีขนาดเล็ก [17]



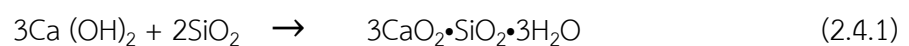
ภาพ 8 ซีโนสเฟีย (Cenosphere) [17]



ภาพ 9 พลีโรสเฟีย (Plerospheres) [16]

#### 2.4 ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction)

ปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดจากการทำปฏิกิริยาของซิลิกาออกไซด์และอะลูมินาออกไซด์ที่เป็นสารประกอบหลักในดินขาวกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์กับน้ำ สามารถเขียนในรูปสมการดังนี้



โดยในสมการ 2.4.1 นั้นเป็นสมการที่แสดงการทำปฏิกิริยากันระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับวัสดุปอซโซลานที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ ปฏิกิริยาปอซโซลานให้ผลิตภัณฑ์เดียวกับปฏิกิริยาไฮเดรชัน คือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( $3\text{CaO}_2 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) หรือที่เรียกกันว่า CSH gel

และในสมการ 2.4.2 นั้นเป็นสมการที่แสดงการทำปฏิกิริยากันระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับวัสดุปอซโซลานที่มีอะลูมินาออกไซด์เป็นองค์ประกอบ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนสุดท้ายของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน คือ แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต ( $3\text{CaO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ , CAH) [18]

## 2.5 ดินลมหอบ (Loess)

ดินลมหอบ (Loess) มีลักษณะเป็นฝุ่นละอองขนาดเล็กมีสีเหลือง, น้ำตาลอมแดง หรือแดง ขึ้นอยู่กับแต่ละพื้นที่ที่ถูพบ เกิดขึ้นในช่วงยุคควอเทอร์นารี (Quaternary) [19] โดยทั่วไปจะมีการสะสมของดินเหนียวร้อยละ 20 หรือน้อยกว่า มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous) ประกอบด้วยทรายและตะกอนโดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 20 ถึง 50 ไมโครเมตรต่ออนุภาค และมีโครงสร้างที่มีรูพรุนประกอบด้วยอนุภาคควอตซ์ (Quartz) และเฟลสปาร์ (Felspar) เป็นหลัก มักจะถูกยึดด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตอย่างหลวมๆ โดยทั่วไปมักเกิดขึ้นในบริเวณกว้าง (Blanket) ที่ครอบคลุมพื้นที่หลายร้อยตารางกิโลเมตรและหนาหลายสิบเมตร [20]



ภาพ 10 ดินลมหอบ, วอชิงตัน สหรัฐอเมริกา [21]



ภาพ 11 ดินลมหอบ, ที่ราบสูงประเทศจีน [22]

ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำดินลมหอบ จังหวัดขอนแก่น ประเทศไทย มาใช้ในงานวิจัย ดินลมหอบ นั้นมักพบในหลายพื้นที่ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ปกคลุมเป็นบริเวณกว้างและมีความหนาอยู่ที่ประมาณ 5-6 เมตร จากระดับผิวน้ำดิน สีของดินลมหอบที่พบมากในตอนบนของภาคตะวันออกเฉียงเหนือจะมีสีเป็นสีแดง และในพื้นที่ตอนล่างของภาคตะวันออกเฉียงเหนือจะมีสีเหลือง ซึ่งจังหวัดขอนแก่นนั้นเป็นจังหวัดในตอนบนของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ดินลมหอบของแก่นนั้น มีลักษณะเป็นดินทรายปนตะกอน และอาจจะมีอนุภาคของดินเหนียวปนอยู่เล็กน้อย [23] โครงสร้างดินจะเรียงตัวกันอยู่อย่างหลวมๆ และการที่ดินลมหอบนั้นมีอนุภาคของดินเหนียวปนอยู่เล็กน้อยนั้นทำให้ความสามารถในการยึดเกาะกันของอนุภาคเม็ดดินนั้นค่อนข้างต่ำ กำลังรับแรงเฉือนของดินลมหอบในขณะที่มีความชื้นในดินต่ำนั้นจะมีค่าค่อนข้างสูง แต่เมื่อความชื้นในดินเพิ่มขึ้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคจะลดลง และนั่นเป็นเหตุที่ทำให้เกิดการพังทลาย และยุบตัว ทำให้ดินลมหอบนั้นสูญเสียกำลังรับแรงเฉือนไป [24]



ภาพ 12 ดินลมหอบ จังหวัดขอนแก่น ประเทศไทย

## 2.6 ดินซีเมนต์ (Soil cement)

ดินซีเมนต์เป็นวัสดุหนึ่งที่ถูกเตรียมขึ้นจากปูนซีเมนต์และดิน ดินซีเมนต์เป็นวัสดุที่ปรับปรุงขึ้นมาจากปัญหาความต้านทานแรงเฉือนต่ำของดิน วัตถุประสงค์ของการสร้างดินซีเมนต์นั้นคือการปรับปรุงคุณภาพทางวิศวกรรมของดินที่ต่ำกว่ามาตรฐาน [25] โดยส่วนใหญ่แล้วจะทำขึ้นโดยการนำดินมาผ่านกระบวนการปั่นผสมกับปูนซีเมนต์ และบดอัดให้มีความหนาแน่นสูง โดยคุณสมบัติของดินซีเมนต์นั้นจะขึ้นอยู่กับ ชนิดของดิน คุณสมบัติทางธรรมชาติของดิน การผสมและบดอัดที่ได้มาตรฐาน และระยะเวลาในการบ่ม รวมทั้งระยะการเกิด cement hydration ด้วย ดินซีเมนต์จะเป็นดินที่มีความต้านทานแรงเฉือนเพิ่มขึ้นจากดินธรรมชาติ ดินซีเมนต์มักใช้เป็นวัสดุก่อสร้างสำหรับการก่อสร้างถนนเป็นชั้นรองพื้นทาง โดยความแข็งแรงของฐานดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามอายุทำให้มีประสิทธิภาพในระยะยาวที่ดี



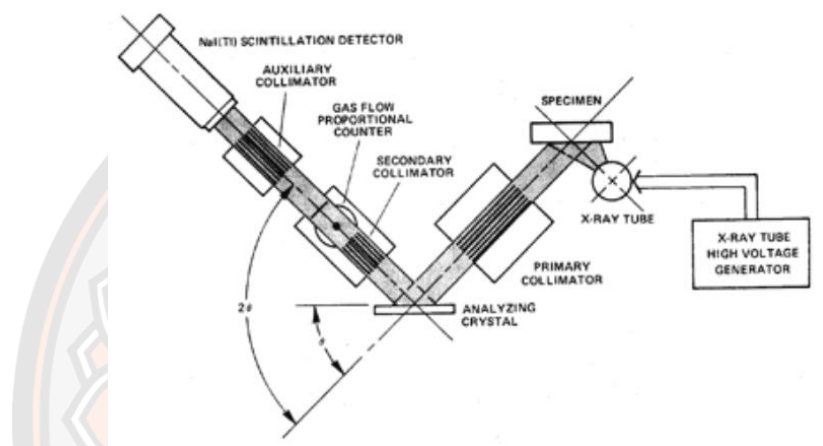
ภาพ 13 การเตรียมดินซีเมนต์ในสนามเพื่อใช้เป็นชั้นรองพื้นทาง [26]

## 2.7 ทฤษฎีและหลักการการวิเคราะห์ทางด้านเคมีและฟิสิกส์ของวัสดุ

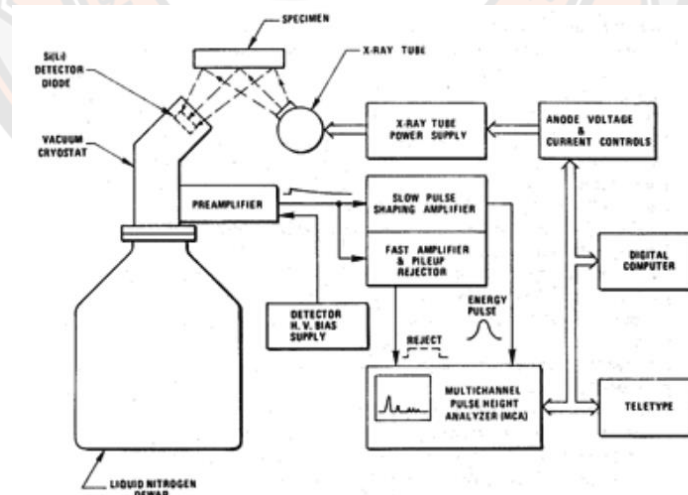
### 2.7.1 X-ray Fluorescence (XRF)

การวิเคราะห์ตัวอย่างโดยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ หรือเรียกอีกอย่างว่าเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence : XRF) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุที่มีการประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม XRF ตั้งอยู่บนหลักการที่ว่าอะตอมแต่ละตัวเมื่อถูกกระตุ้นโดยแหล่งพลังงานภายนอกจะปล่อยโฟตอนเอ็กซ์เรย์ที่มีพลังงานลักษณะเฉพาะหรือความยาวคลื่นออกมา โดยการนับจำนวนโฟตอนของพลังงานแต่ละอย่างที่ปล่อยออกมาจากตัวอย่างอาจจะระบุและหาปริมาณองค์ประกอบที่มีอยู่ของธาตุได้ [27] เครื่องมือ XRF ส่วนใหญ่ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ เครื่องสเปกโตรมิเตอร์แบบกระจายพลังงาน (ED) และเครื่องสเปกโตรมิเตอร์แบบกระจาย

ความยาวคลื่น (WD) ภายในสองประเภทนี้มีการกำหนดค่าที่แตกต่างกันแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์และเลนส์และเทคโนโลยีเครื่องตรวจจับที่แตกต่างกันมากมาย แผนภาพของระบบ WD แสดงในภาพ 14 เครื่องมือนี้ทำงานโดยอาศัยหลักการของการเลี้ยวเบนของแบร็กก์ของลำแสงเอ็กซ์เรย์โคลิเมตในกรณีนี้ลำแสงที่พุ่งออกมาจากตัวอย่าง เครื่องตรวจจับได้รับการสแกนเชิงมุมเทียบกับคริสตัลวิเคราะห์โดยลงทะเบียนสเปกตรัม สำหรับแผนภาพของสเปกโตรมิเตอร์แบบกระจายพลังงาน (ED) แสดงดังภาพ 15



ภาพ 14 แผนภาพสเปกโตรมิเตอร์แบบกระจายความยาวคลื่น (WD)

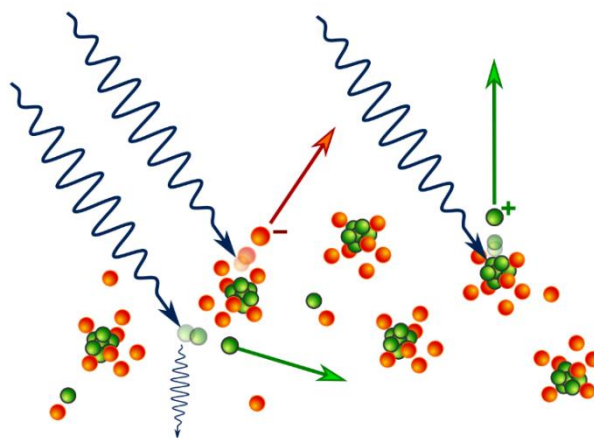


ภาพ 15 แผนภาพของสเปกโตรมิเตอร์แบบกระจายพลังงาน (ED)

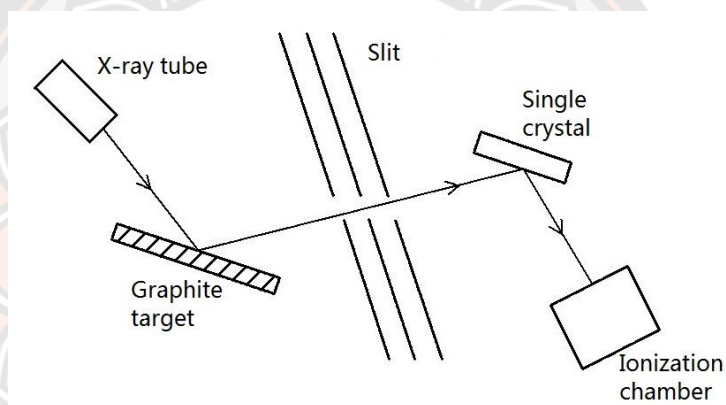
### 2.7.2 X-ray Diffractometer (XRD)

เอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer : XRD) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์วัสดุขั้นพื้นฐาน ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง (non-destructive analysis) เพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก การจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่าง ๆ ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอกซ์ และความรู้เกี่ยวกับบิวาาระบบโครงสร้างผลึก

ทฤษฎีพื้นฐานของ XRD อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของลำรังสีเอกซ์ เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาคจะเกิด การหักเหของลำรังสีที่สะท้อนทำมุมกับระนาบของอนุภาค เท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบ ในปี ค.ศ. 1912 นาย W.L.Bragg ได้นำทฤษฎีดังกล่าวมาศึกษารูปแบบโครงสร้างผลึกของแร่ต่าง ๆ ต่อมาได้มีการประดิษฐ์คิดค้นเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ขึ้นในปี ค.ศ. 1948 และมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งสามารถนำคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการทำงาน และวิเคราะห์ประมวลผล เพื่อให้เกิดความรวดเร็วแม่นยำยิ่งขึ้น รังสีเอกซ์คือรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานโฟตอนทั่วไปอยู่ในช่วง 100 eV (อิเล็กตรอนโวลต์ electronvolts) ถึง 100 keV (กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ kiloelectronvolt) สำหรับการใช้งานจะใช้เฉพาะรังสีเอกซ์ความยาวคลื่นสั้น ในช่วงไม่กี่อังสตรอมถึง 0.1 อังสตรอม (1 keV - 120 keV) เนื่องจากความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์เทียบได้กับขนาดของอะตอมจึงเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการตรวจสอบการจัดโครงสร้างของอะตอมและโมเลกุลในวัสดุหลากหลายประเภท รังสีเอกซ์ที่ทรงพลังสามารถเจาะลึกเข้าไปในวัสดุและให้ข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างจำนวนมากได้ เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบกับอิเล็กตรอนในอะตอม ทำให้โฟตอนเอ็กซ์เรย์ชนกับอิเล็กตรอนโฟตอนบางส่วนจาก ลำแสงตกกระทบจะถูกเบี่ยงเบนออกไปจากทิศทางที่พวกมันเคลื่อนที่ไปเหมือนกับลูกบิลเลียดที่กระเด็นออกจากอับล่องเรณู หากความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่กระจัดกระจายเหล่านี้ไม่เปลี่ยนแปลง (หมายความว่าโฟตอนของเอ็กซ์เรย์ไม่สูญเสียพลังงานใดๆ) กระบวนการนี้เรียกว่าการกระเจิงแบบยืดหยุ่น (Thomson Scattering) ทางกลับกันในกระบวนการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (Compton Scattering) รังสีเอกซ์จะถ่ายโอนพลังงานบางส่วนไปยังอิเล็กตรอนและรังสีเอกซ์ที่กระจัดกระจายจะมีความ ยาวคลื่นแตกต่างจากรังสีเอกซ์ตกกระทบ



ภาพ 16 การกระเจิงแบบยืดหยุ่น (Thomson Scattering) [28]

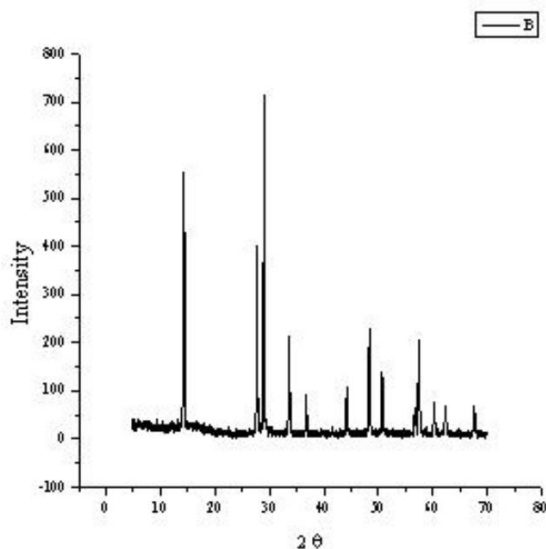


ภาพ 17 กระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (Compton Scattering) [29]

ความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่าง ๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดโดยองค์กร JCPDs (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิด มีรูปแบบโครงสร้างผลึกแตกต่างกัน และระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอม ที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบก็แตกต่างกันไปด้วย โดยที่ขนาดและประจุของอะตอม ของสารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบ (XRD pattern) เฉพาะตัว

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการหาลักษณะเฉพาะของวัสดุ โดยทั่วไปแล้วตัวอย่างจะอยู่ในรูปแบบผงซึ่งประกอบด้วยเม็ดละเอียดของวัสดุที่เป็นผลึกเดี่ยวที่ต้องการศึกษา เทคนิคนี้ยังใช้กันอย่างแพร่หลายในการศึกษาอนุภาคในสารแขวนลอยของเหลวหรือของแข็งโพลีคาร์บอนเนต รูปแบบการเลี้ยวเบนจะแสดงรูปแบบที่สอดคล้องกับรูปแบบต่างๆของผลึกจากข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดโดยองค์กร JCPDs ตำแหน่งและความเข้มของจุดสูงสุดใช้สำหรับระบุโครงสร้างพื้นฐาน หรือเฟสของวัสดุ [30]

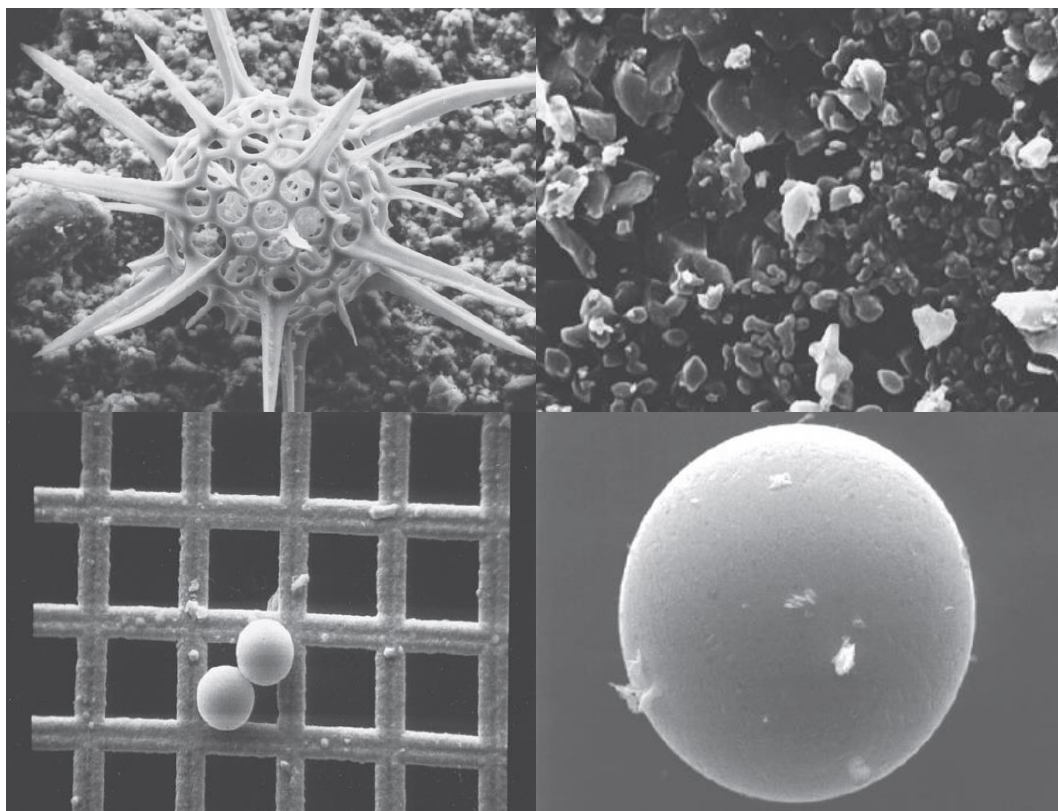




ภาพ 18 ตัวอย่างผลการทดสอบ XRD

### 2.7.3 Scanning Electron Microscopy (SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM) เป็นการวิเคราะห์เพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะของวัสดุอินทรีย์และอนินทรีย์ที่แตกต่างกันในระดับนาโนเมตร(nanometer) ถึงไมโครเมตร (micrometer) การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่าง ซึ่งกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสามารถตรวจสอบการเรียงตัวของผลึกด้วยระบบการรับสัญญาณเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ โดยอาศัยหลักการกราดไปบนพื้นผิวดูตัวอย่างด้วยลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงที่ถูกปล่อยจากแหล่งกำเนิด (Electron gun) เมื่ออิเล็กตรอนดังกล่าวกระทบกับผิวชิ้นงานที่ประกอบไปด้วยอะตอมต่างๆ จะปล่อยสัญญาณที่สามารถนำไปประมวลผลและให้ข้อมูลเป็นภาพพื้นผิวของวัตถุ, องค์ประกอบของพื้นผิว และคุณสมบัติอื่นๆ เช่น คุณสมบัติการนำไฟฟ้า เป็นต้น โดยผลการทดสอบที่ได้นั้นจะได้เป็นภาพลักษณะ 3 มิติ แสดงให้เห็นถึงพื้นผิวโครงสร้างการเรียงตัวของอนุภาคนาโนของวัสดุ [31] ดังภาพ 19



ภาพ 19 ผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

#### 2.7.4 Thermogravimetric Analyzer (TGA)

การวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเชิงความร้อน (TGA) เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุ [32] เป็นเครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อน โดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักและใช้เทอร์โมคัพเปิลวัดอุณหภูมิ เป็นเทคนิคทางความร้อนที่ใช้วิเคราะห์มวลวัตถุตัวอย่างที่อุณหภูมิและเวลาที่เปลี่ยนไป โดยวัตถุตัวอย่างนั้นจะถูกควบคุมภายใต้ช่วงอุณหภูมิและสภาวะที่กำหนดในการวิเคราะห์ตัวอย่าง ตัวอย่างจะถูกวางบนจานขนาดเล็กซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องชั่งละเอียดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง โดยที่ทั้งหมดจะอยู่ในเตาที่เป็นระบบปิดสามารถควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศได้บรรยากาศภายในอาจจะเป็นแก๊สเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน หรือแก๊สที่มีความว่องไว เช่น อากาศ หรือ ออกซิเจน โดยน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะของสารแต่ละชนิดโดยน้ำหนักที่หายไปนั้นเกิดมาจากการระเหย การย่อยสลาย หรือการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ผลการทดสอบจะถูกแสดงออกมาในรูปกราฟซึ่งมีแกน y แสดงน้ำหนักที่เปลี่ยนไป (weight% หรือ mg) และแกน x แสดงอุณหภูมิหรือเวลาตามที่กำหนด การวิเคราะห์ผลจำเป็นต้องทราบการทำปฏิกิริยาทางเคมีและอุณหภูมิการสลายตัวของวัตถุตัวอย่างอย่างคร่าวๆ หรือมีข้อมูลอุณหภูมิการสลายตัวของ

วัตถุดิบเชิงชนิดต่างๆก่อนเพื่อนำมาใช้เปรียบเทียบผลที่ได้ ในการวิเคราะห์สามารถทำได้ 3 รูปแบบ

1. แบบ Isothermal Thermogravimeter วิธีนี้จะเป็นการวัดมวลสารตัวอย่างกับเวลาที่อุณหภูมิคงที่
2. แบบ Quasi-Isothermal Thermogravimeter วิธีนี้จะเป็นการเผาสารตัวอย่างจนได้มวลที่คงที่ในแต่ละชุดเมื่อใช้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น
3. แบบ Dynamic thermogravimetry วิธีนี้สารตัวอย่างจะถูกเผาในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกันหลายหลายอุณหภูมิที่อัตราคงที่ศึกษามาก่อน



ภาพ 20 เครื่องทดสอบการวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเชิงความร้อน (TGA)

เครื่อง Thermogravimetric Analysis มีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน คือ เตาเผา เครื่องชั่ง และส่วนควบคุมการทำงานของระบบ

1. เตาเผา (Furnace)

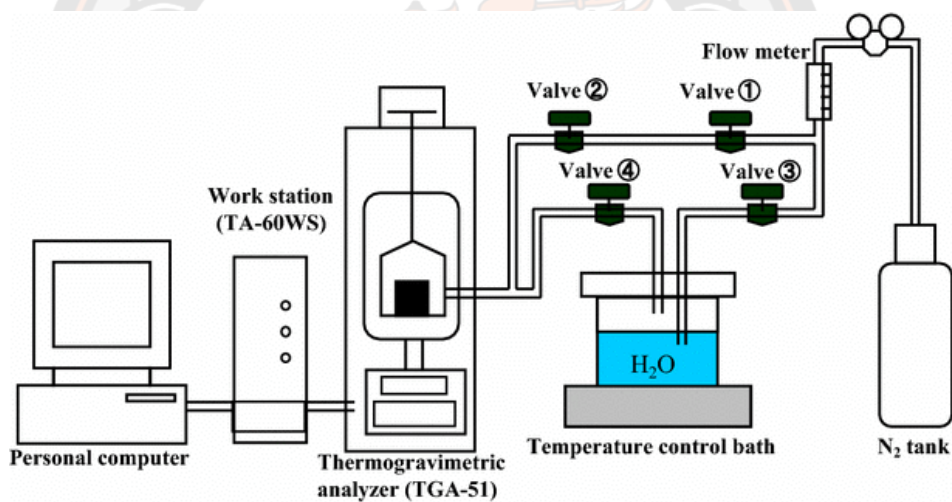
เตาเผาที่ใช้ในเครื่อง Thermogravimetric Analysis มี 2 ช่วงอุณหภูมิ ระหว่างช่วงอุณหภูมิห้อง -1000 องศาเซลเซียส และ ช่วงอุณหภูมิห้องถึง 1500 องศาเซลเซียส โดยขึ้นกับวัสดุที่นำมาเป็น 1 เตาเผา เตาเผาที่ดีมีสมบัติที่เอื้อต่อการทำปฏิกิริยาทุกช่วงอุณหภูมิ

## 2. เครื่องชั่ง (Balances)

เครื่องชั่งไฟฟ้าในระบบเครื่อง Thermogravimetric Analysis เป็นเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กที่มีสภาพไวต่อการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก เมื่อมีการเพิ่มหรือลดของน้ำหนักของสารตัวอย่าง โดยเครื่องชั่งมีความละเอียดถึง 1 ไมโครกรัม โดยทั่วไปมีการบรรจุสารตัวอย่างน้ำหนัก ในช่วง 5-50 มิลลิกรัม

## 3. ชุดควบคุมการทำงานและเครื่องบันทึกสัญญาณ

ปัจจุบันเครื่องบันทึกและแปลผลการวิเคราะห์ที่ใช้คอมพิวเตอร์ PC ที่ติดตั้งโปรแกรมการควบคุมการทำงานและบันทึกผลไว้ เพื่อจัดเก็บข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ โปรแกรมที่ถูกออกแบบมาให้มีความสามารถในการคำนวณผลการวิเคราะห์และแสดงผลในรูปแบบต่าง ๆ เช่น การทำ TG การหาค่ามวลหาร้อยละการสูญเสียโดยน้ำหนัก เป็นต้น [33]



ภาพ 21 หลักการทำงานของ Thermogravimetric Analysis

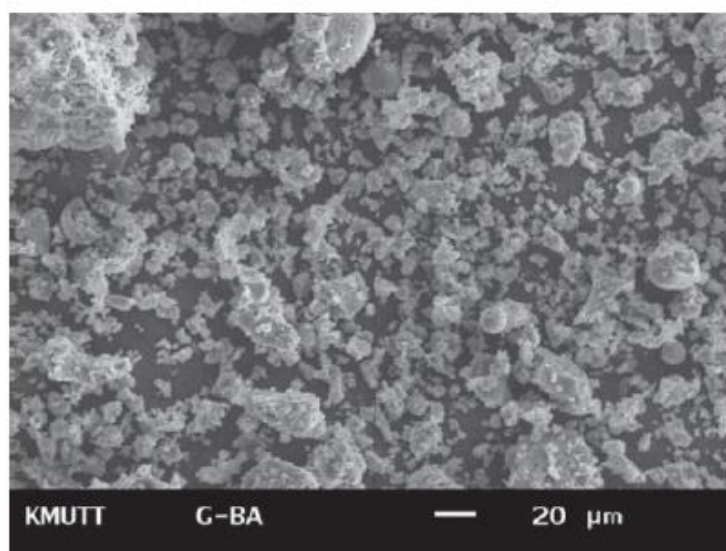
## 2.8 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

### 2.8.1 การใช้ประโยชน์ของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และวัสดุปอซโซลาน

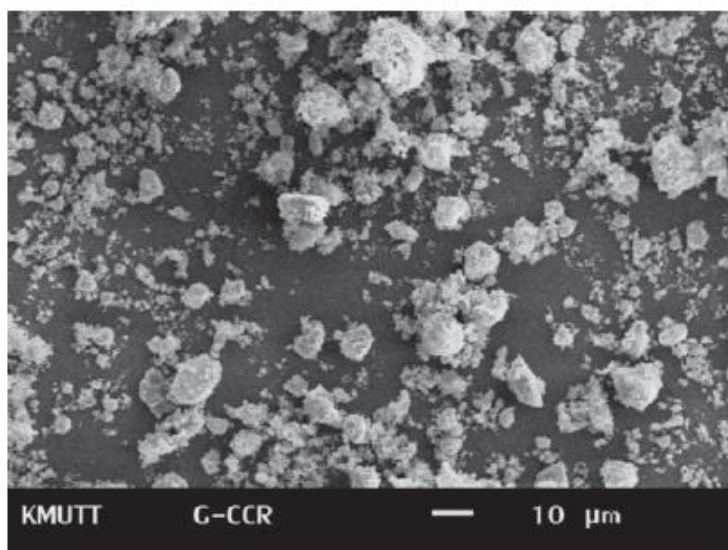
Chaiyanunt Rattanashotinunt [34] และคณะ ได้ทำการศึกษาการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) ร่วมกับเถ้าชานอ้อย (BA) เพื่อใช้เป็นวัสดุทดแทนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในคอนกรีต และศึกษาคูณสมบัติทางกายภาพของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าชานอ้อยผลการศึกษาแสดงดังตาราง 7 และภาพถ่ายอนุภาคของเถ้าชานอ้อยและ กากแคลเซียมคาร์ไบด์แสดงดังภาพ 22 และ 23 ตามลำดับ

ตาราง 7 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ [34]

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



ภาพ 22 รูปทรงอนุภาคของเถ้าชานอ้อย [34]



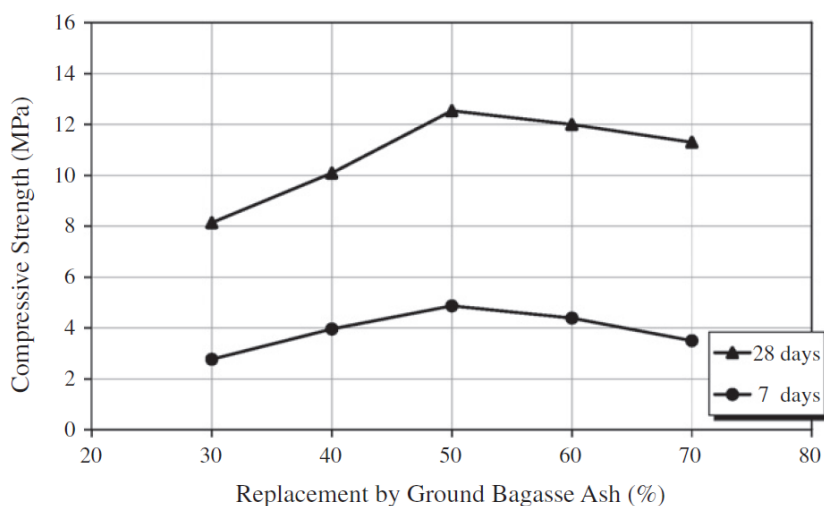
ภาพ 23 รูปทรงอนุภาคของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ [34]

กากแคลเซียมคาร์ไบด์(CCR) มีแคลเซียมไฮดรอกไซด์( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ในสัดส่วนที่สูงในขณะที่ เถ้าขานอ้อย(BA) เป็นวัสดุปอซโซลานิกสามารถสร้างปฏิกิริยาปอซโซลานิกทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่คล้ายกับที่ได้จากกระบวนการไฮเดรชันซีเมนต์ ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุแสดงดังตาราง 8

ตาราง 8 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ [34]

Chemical composition (%)	OPC	Ground BA	Ground CCR
Silicon dioxide ( $\text{SiO}_2$ )	20.9	55.0	4.3
Aluminum oxide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	4.7	5.1	0.4
Iron oxide ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	3.4	4.1	0.9
Calcium oxide ( $\text{CaO}$ )	65.4	11.0	56.5
Magnesium oxide ( $\text{MgO}$ )	1.2	0.9	1.7
Sodium oxide ( $\text{Na}_2\text{O}$ )	0.2	0.2	0.0
Potassium oxide ( $\text{K}_2\text{O}$ )	0.3	1.2	0.0
Sulfur trioxide ( $\text{SO}_3$ )	2.7	2.2	0.1
Loss on Ignition (LOI)	0.9	19.6	36.1

และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ และการแทนที่เถ้าชานอ้อย(BA) ในกากแคลเซียมคาร์ไบด์(CCR) ที่อัตรา 30%, 40%, 50%, 60% และ 70% โดยน้ำหนัก โดยจะใส่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1 ที่ปริมาณ 10% และ 20% โดยน้ำหนักของส่วนผสม การใส่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1 ใส่เพื่อเป็นเพียงตัวช่วยในการเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าชานอ้อย อัตราส่วนระหว่างส่วนผสมกับทรายอยู่ที่ 1:2.75 โดยน้ำหนัก



ภาพ 24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์และการแทนที่เถ้าชานอ้อย(BA) ในกากแคลเซียมคาร์ไบด์(CCR) [34]

จากการศึกษาพบว่าอัตราส่วนผสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าชานอ้อย ที่ 50:50 โดยน้ำหนัก เป็นอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม โดยค่ากำลังอัดสูงสุดที่ได้ เท่ากับ 4.9 MPa และ 12.5 MPa ที่ระยะเวลาบ่ม 7 และ 14 วัน ตามลำดับ (ภาพ 24) จากนั้นได้นำอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าชานอ้อยที่ 50:50

Chai Jaturapitakkul [35] ได้ทำการศึกษาการนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์มาผสมกับเถ้าแกลบ เพื่อใช้เป็นวัสดุประสานชนิดใหม่แทนปูนซีเมนต์โดยอาศัยปฏิกิริยาปอซโซลานิกของวัสดุทั้งสอง โดยวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ ประกอบด้วย กากแคลเซียมคาร์ไบด์, เถ้าแกลบ, ปูนซีเมนต์, ทรายแม่น้ำ และสารลดน้ำพิเศษประเภท F ชนิดสารเนฟทาไลน์ โดยการศึกษาในส่วนของการกำลังอัดของมอร์ตาร์ และได้ออกแบบส่วนผสมดังแสดงในตาราง 9

**ตาราง 9** อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ของวัสดุผสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าแกลบ [35]

Mortar	Mix proportion (by weight)						
	Calcium carbide residue	Rice husk ash	Cement	Sand	Water	Superplasticizer	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

และได้ทำการศึกษารองค้ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ เถ้าแกลบ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ดังแสดงในตาราง 10, 11 และภาพ 25 ตามลำดับ

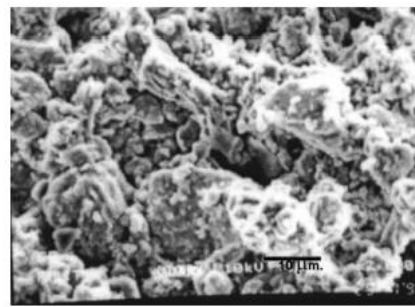
**ตาราง 10** องค์ประกอบทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ เถ้าแกลบ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 [35]

Material	Chemical composition (%)									
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	NaO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	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	

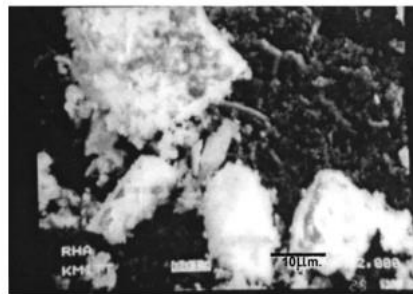
**ตาราง 11** คุณสมบัติทางกายภาพของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ เถ้าแกลบ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 [35]

Material	Specific gravity	Retained on sieve	Blaine fineness
		No. 325 (%)	(cm <sup>2</sup> /g)
Calcium carbide residue	2.21	2.52	9,630
Rice husk ash	2.18	8.64	18,050
Cement	3.13	9.58	3,230

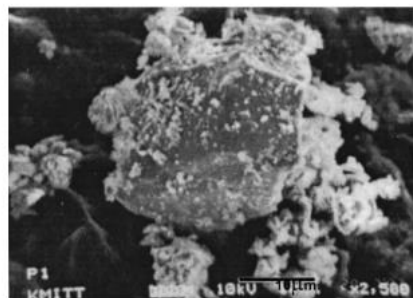




(a)



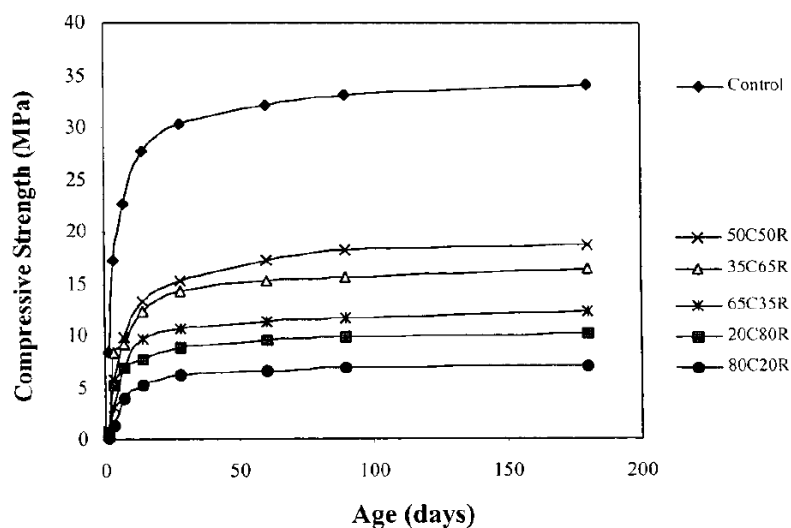
(b)



(c)

**ภาพ 25** ภาพถ่ายรูปทรงอนุภาคของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (a), เถ้าแกลบ (b) และปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (c) [35]

การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ ใช้อัตราส่วนระหว่างวัสดุประสานกับทรายอยู่ที่ 1:2.75 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานอยู่ที่ 0.65 สำหรับทุกอัตราส่วนผสม และมีการใส่สารลดน้ำพิเศษเป็นตัวปรับค่าร้อยละการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ให้มีค่าอยู่ที่  $110 \pm 5$  โดยใช้ระยะเวลาการบ่มอยู่ที่ 1, 3, 7, 14, 28, 60, 90 และ 180 วัน ซึ่งผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ ที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ แสดงในภาพ 26 และตาราง 12



ภาพ 26 กราฟแสดงค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ ณ ระยะเวลาการบ่มที่ 1, 3, 7, 14, 28, 60, 90 และ 180 วัน [35]

ตาราง 12 กำลังอัดของมอร์ตาร์ ณ ระยะเวลาการบ่มที่ 1, 3, 7, 14, 28, 60, 90 และ 180 วัน [35]

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

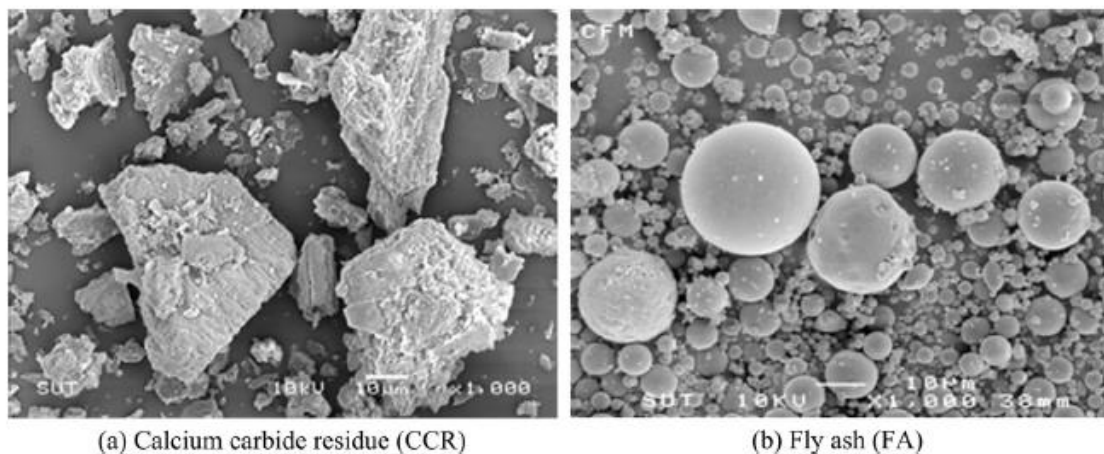
จากผลการศึกษา สามารถสรุปได้ว่าที่อัตราส่วนระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าแกลบที่ดีที่สุดคือ 50:50 โดยให้กำลังอัดเท่ากับ 15.6 และ 19.1 MPa ที่ระยะเวลา 28 และ 180 วันตามลำดับ จากการศึกษาที่กล่าวมาทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่ากากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าแกลบ สามารถใช้เป็นวัสดุประสานชนิดใหม่เพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ได้ เพราะให้กำลังอัดได้สูงในระดับหนึ่ง แต่ต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับงาน

Sakonwan Hanjitsuwan [36] และคณะ ได้ศึกษาวัสดุเชื่อมประสานชนิดใหม่ ได้แก่ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และเถ้าลอย (FA) เพื่อใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ ในการผลิตอิฐ พร้อมทั้งศึกษาเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าลอย ที่ให้กำลังอัดสูงที่สุดในงานวิจัยนี้ได้ใช้วัสดุทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ หินปูน กากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าลอย โดยหินปูนจะเป็นขนาดที่ไม่โตกว่า 3 มิลลิเมตร กากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าลอย ใช้ขนาด 0.01 และ 0.0035

มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยได้ทำการศึกษารูปทรงของวัสดุและลักษณะทางกายภาพของวัสดุ ดังแสดงในตาราง 13 และ ภาพ 2.27 ตามลำดับ

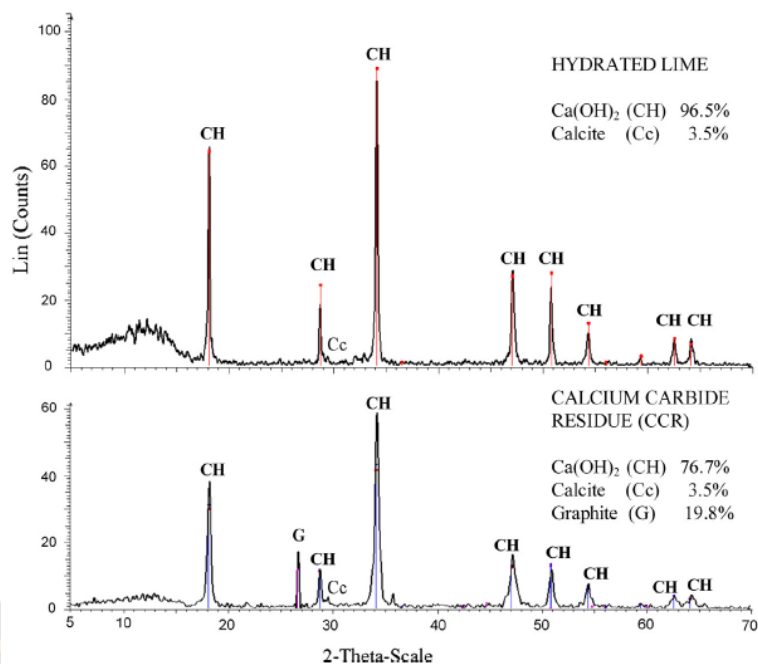
**ตาราง 13** คุณสมบัติทางเคมีของ กากแคลเซียมคาร์ไบด์, เถ้าลอย, ปูนขาวและปูนซีเมนต์ [36]

Chemical composition (%)	CCR	FA	Hydrated lime	Portland cement
CaO	70.78	11.30	90.13	65.41
SiO <sub>2</sub>	6.49	39.18	1.29	20.90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.55	22.64	0.24	4.76
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.25	15.45	0.49	3.41
MgO	0.69	1.69	0.22	1.25
SO <sub>3</sub>	0.66	4.29	0.86	2.71
Na <sub>2</sub> O	-	1.81	-	0.24
K <sub>2</sub> O	7.93	2.02	3.3	0.35
Loss of ignition, LOI	7.65	1.61	3.48	0.97



**ภาพ 27** ภาพถ่ายรูปทรงอนุภาคของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (a) และเถ้าลอย (b) [36]

และได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางเคมี-ฟิสิกส์ โดยใช้เทคนิค เอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer : XRD) ทำการศึกษาน้ำปูนขาวและกากแคลเซียมคาร์ไบด์ เพื่อเปรียบเทียบชนิดสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างทั้งในเชิงคุณภาพ และเชิงปริมาณ (ภาพ 28)

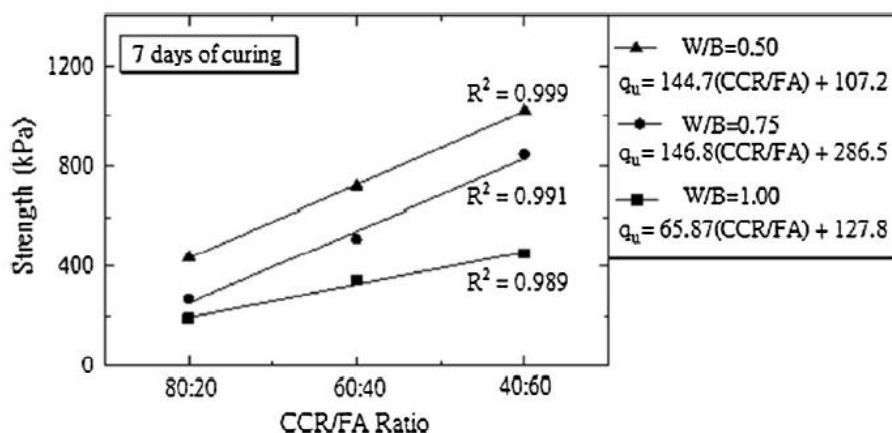


ภาพ 28 ผลการทดสอบ XRD ของปูนขาว (Hydrated lime) และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) [36] แสดงให้เห็นว่าในปูนขาว (Hydrated lime) มีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) อยู่ที่ 96.5% และในกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) มีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) อยู่ที่ 76.7% ปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) และฟิสิกของสารตัวอย่างทั้งสองมีความคล้ายคลึงกันเป็นอย่างมาก นั่นเป็นข้อบ่งชี้ได้ว่ากากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) นั้นจะสามารถทำปฏิกิริยากับวัสดุพอลิโพรพิลีนและสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทนซีเมนต์ได้เช่นกัน จากนั้นได้ทำการทดสอบทางด้านวิศวกรรมโดยการทดสอบหาค่ากำลังอัดของตัวอย่าง และได้ออกแบบส่วนผสมไว้ดังแสดงในตาราง 14

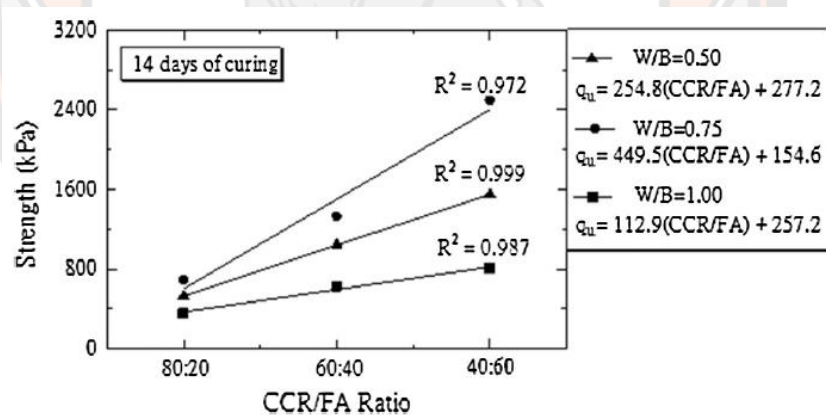
ตาราง 14 สัดส่วนส่วนผสมสำหรับตัวอย่าง ถ้าวลอย, กากแคลเซียมคาร์ไบด์ และหินฝุ่น [35]

W/B	CCR/FA	Mix proportion			
		CCR (g)	FA (g)	Stone dust (g)	Water (g)
0.5	80:20	80	20	800	50
	60:40	60	40	800	50
	40:60	40	60	800	50
0.75	80:20	80	20	800	75
	60:40	60	40	800	75
	40:60	40	60	800	75
1.00	80:20	80	20	800	100
	60:40	60	40	800	100
	40:60	40	60	800	100

โดยจะทำการศึกษา ที่อัตราส่วนน้ำต่อส่วนผสม ที่ 0.50, 0.75 และ 1.00 และสัดส่วนของกาก แคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าลอยที่ศึกษาคือ 80:20, 60:40 และ 40:60 อัตราส่วนผสมต่อหินฝุ่นคือ 1:8 โดยจะทำการหล่อตัวอย่างขนาด 150 ตารางเซนติเมตร และทำการบ่มที่ระยะเวลา 7 และ 14 วัน ผลการศึกษาแสดงดังภาพ 29 และ 30



ภาพ 29 ค่ากำลังอัดที่ระยะเวลา 7 วัน [35]



ภาพ 30 ค่ากำลังอัดที่ระยะเวลา 14 วัน [35]

จากผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าลอยที่เหมาะสมอยู่ที่ 40:60 และ ปริมาณของน้ำต่อส่วนผสมที่ 0.75 นั้นให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด ณ ระยะเวลาการบ่มที่ 14 วัน ซึ่งการใช้ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าลอยเพื่อใช้เป็นวัสดุประสานนั้นสามารถใช้ได้จริง และยังสามารถ ช่วยลดต้นทุนในการผลิตอิฐตั้งแสงในตาราง 15 ได้อีกด้วย

**ตาราง 15** การวิเคราะห์ต้นทุนสำหรับการผลิตอิฐจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าลอย เทียบกับ การผลิตอิฐจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [35]

Item	Amount	Unit	Cost estimate		
			Unit cost (baht/ kg)(USD\$/kg)	Cost (baht) (USD\$)	
Portland cement concrete block					
1	Portland cement	0.81	kg.	2.40 (0.08)	1.95 (0.07)
2	Stone dust	6.50	kg.	0.26 (0.01)	1.69 (0.06)
Total cost per a block					3.64 (0.12)
CCR and FA concrete block					
1	Calcium carbide residue	0.33	kg.	-	-
2	Fly ash	0.49	kg.	1.00 (0.03)	0.49 (0.02)
3	Stone dust	6.50	kg.	0.26 (0.01)	1.69 (0.06)
Total cost per a block					2.18 (0.07)
Cost difference					1.46 (0.05)

### 2.8.2 การปรับปรุงคุณภาพดินลมหอบ (Loess)

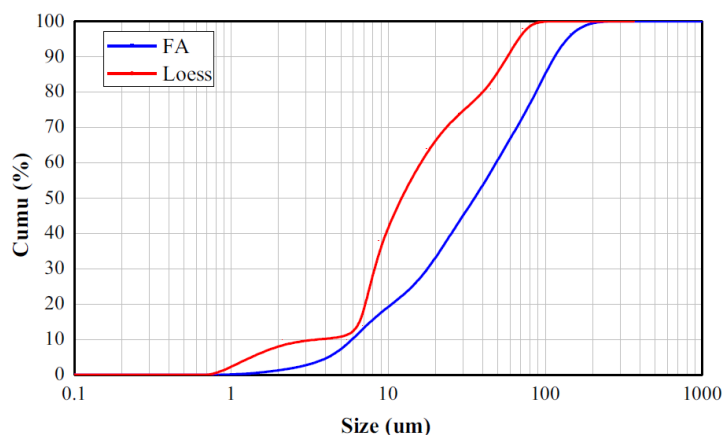
Kang Gu และ Bing Chen [3] ได้ศึกษาอิทธิพลของการใช้ ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย (FA) ฟอสโฟยิปซัม (Phosphogypsum, PG) และ ปูนขาว (Quicklime) เพื่อปรับปรุงคุณภาพของดินลมหอบ (Loess) ดินลมหอบที่ใช้ในการศึกษาเป็นดินลมหอบจาก มณฑลชานซี (Shaanxi) ประเทศจีน คุณสมบัติทางกายภาพของดินลมหอบแสดงดังตาราง 16 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้ในการศึกษาเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จากเซี่ยงไฮ้ ประเทศจีน และคุณสมบัติพื้นฐานแสดงในตาราง 17 ในส่วนของเถ้าลอยนั้นได้มาจากโรงไฟฟ้าเซี่ยงไฮ้หู่จิง ประเทศจีน การกระจายขนาดอนุภาคของดินและ FA แสดงในภาพ 31 ปูนขาวที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยแคลเซียมออกไซด์ (CaO) 99% และความละเอียดของปูนขาวอยู่ที่ 45–80 ไมครอน (μm.)

**ตาราง 16** คุณสมบัติทางกายภาพของดินลมหอบ (Loess) [3]

Specific gravity	Natural moisture content (%)	Liquid limit	Plastic limit	Plasticity index	Classification	Optimum moisture content (%)	Maximum dry density (g/cm <sup>3</sup> )
2.70	7.62	28.17	20.30	7.87	Silt	16.29	1.66

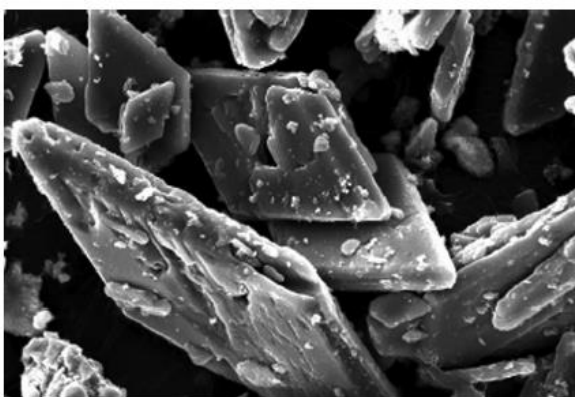
**ตาราง 17** คุณสมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [3]

Density/(g·cm <sup>-3</sup> )	Specific surface area/(m <sup>2</sup> /kg)	Setting time /min		Flexural strength/MPa		Compressive strength/MPa	
		Initial	Final	3 d	28 d	3 d	28 d
3.16	363	170	210	6.3	9.2	26.8	49.7



ภาพ 31 การกระจายขนาดอนุภาคของดินลมหอบ (Loess) และเถ้าลอย (FA) [3]

ฟอสโฟยิปซัม (Phosphogypsum, PG) เป็นผลพลอยได้จากการผลิตกรดฟอสฟอริก จากหินฟอสเฟต (Phosphate rocks) และกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid) ที่ใช้ในการผลิตปุ๋ย โดยในงานวิจัยนี้ได้รับฟอสโฟยิปซัม จากบริษัท Wengfu Limited Liability ในกู่โจวประเทศจีน ฟอสโฟยิปซัมมีลักษณะเป็นผงสีเทาอ่อน ปริมาณร้อยละของน้ำ 18-22% องค์ประกอบหลักของฟอสโฟยิปซัม คือ  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  และภาพถ่ายรูปทรงอนุภาค (SEM) ของฟอสโฟยิปซัม แสดงในภาพ 32 พื้นผิวเฉพาะของฟอสโฟยิปซัม เท่ากับ 81 ตร.ม/กก. และค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอเฉลี่ย ( $C_u$ ) คือ 2.20 โดยองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุทั้งหมดระบุไว้ในตาราง 18

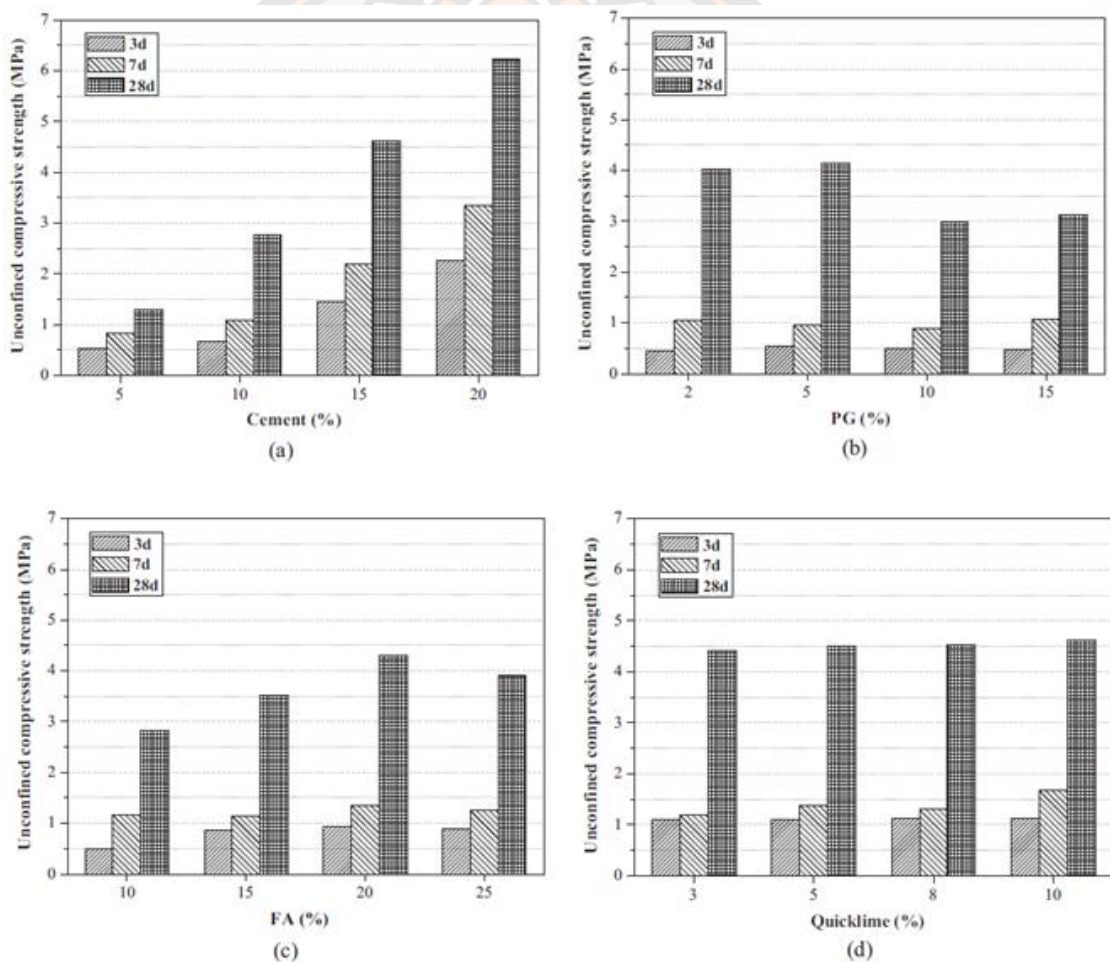


ภาพ 32 ภาพถ่ายรูปทรงอนุภาค (SEM) ของฟอสโฟยิปซัม (Phosphogypsum, PG) [3]

ตาราง 18 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ [3]

Item	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Loss
Loess	61.05	16.78	6.62	1.28	-	-	-	-	0.16	14.11
PG	5.65	0.80	0.33	34.31	0.066	0.89	-	-	47.30	9.96
FA	54.90	25.80	6.90	8.70	1.80	-	0.30	0.10	0.60	0.90
Cement	21.60	4.10	4.60	64.40	1.10	-	0.10	0.60	1.70	1.80

เพื่อศึกษาค่า Unconfined compressive strength จากการปรับปรุงคุณภาพดินจากการใช้ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย (FA) ฟอสโฟอิม (Phosphogypsum, PG) และ ปูนขาว (Quicklime) จึงได้ออกแบบอัตราส่วนผสมไว้ โดยค่าอัตราส่วนน้ำต่อดินลมหอบเท่ากับ 0.3 โดยจะแบ่งอัตราส่วนผสมออกเป็นสี่กลุ่ม กลุ่มที่1ได้รับการออกแบบโดยใช้ดินลมหอบ 100% และใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่แตกต่างกัน ที่ 5, 10, 15 และ 20% กลุ่มที่2 ได้รับการออกแบบโดยใช้ดินลมหอบ 100% ปูนซีเมนต์ 10% และปริมาณ PG ที่ 2, 5, 10 และ 15% กลุ่มที่3ได้รับการออกแบบโดยใช้ดินลมหอบ100% ปูนซีเมนต์ 10% PG 5% และปริมาณ FA ที่ 10, 15, 20 และ 25% และกลุ่มที่4ได้รับการออกแบบโดยใช้ดินเหนียว 100% ปูนซีเมนต์ 10%, PG 5%, FA 10% และปูนขาวที่ 3, 5, 8 และ 10% โดยใช้ระยะเวลาในการบ่มที่ 3, 7 และ 28 วัน



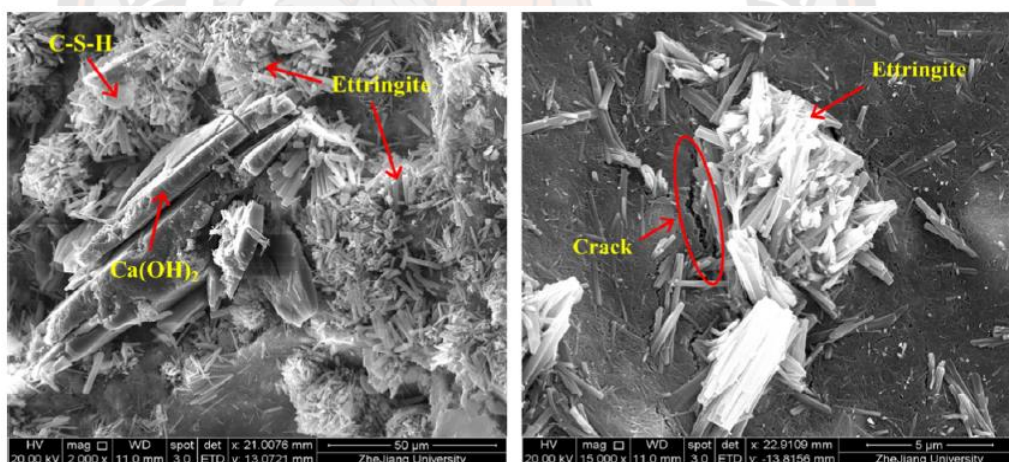
ภาพ 33 อิทธิพลของการใช้ซีเมนต์ (a), PG (b), FA (c) และปูนขาว (d) ต่อผลของค่า Unconfined compressive strength [3]



ผลที่ได้แสดงดังภาพ 33(a) ค่า Unconfined compressive strength เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นของปูนซีเมนต์ โดยปูนซีเมนต์นั้นเมื่อทำปฏิกิริยาแล้วจะทำให้เกิด CSH เจล ให้ความแข็งแรง และสามารถรวบรวมอนุภาคของดินไว้ให้ใกล้ชิดกันมากขึ้น และยังสามารถเพิ่มค่า Unconfined compressive strength ได้อีกด้วย ภาพ 33(b) แสดงค่า Unconfined compressive strength จะเห็นได้ว่าการเติมฟอสโฟยิปซัม (Phosphogypsum, PG) ที่ 10-15% ค่า Unconfined compressive strength นั้นไม่เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นของฟอสโฟยิปซัม (Phosphogypsum, PG) เนื่องจากฟอสโฟยิปซัม ที่ไม่ผ่านการทำปฏิกิริยากับ  $Ca^{2+}$  เกิดการก่อตัวเป็นฟิล์มบาง ๆ ปกคลุมอนุภาคเม็ดปูน และทำให้ปูนไม่สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำในช่วงต้นจึงทำให้ค่า Unconfined compressive strength ในช่วงต้นไม่ดีขึ้น แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปที่ระยะเวลาการบ่มที่ 28 วัน แสดงให้เห็นว่าค่า Unconfined compressive strength นั้นเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากการเติม PG ไม่เพียงแต่ส่งเสริมการสร้าง CSH เจล แต่ยังทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์และเกิด Ettringite ซึ่ง Ettringite จะเติมเต็มช่องว่างภายในของตัวอย่างและเพิ่มประสิทธิภาพค่า Unconfined compressive strength ของตัวอย่าง ภาพ 33(c) แสดงค่า Unconfined compressive strength สำหรับตัวอย่างที่เติม FA ที่การเติม FA ที่ 20% มีค่า Unconfined compressive strength ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน มีค่าเท่ากับ 4.21 MPa ซึ่งเป็นค่าที่มากที่สุดในชุดตัวอย่างของการเติม FA

FA เป็นวัสดุที่กระตุ้นด้วยอัลคาไล สามารถทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ผ่านปฏิกิริยา Pozzolanic และได้ผลผลิตเป็น CSH เจล แก๊ซออย (FA) มีอนุภาคเป็นทรงกลมสามารถช่วยเติมเต็มช่องว่างระหว่างอนุภาคและสามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาได้อีกด้วย และจะเห็นว่าที่การเติม FA ที่ 25% นั้นค่า Unconfined compressive strength ที่ระยะเวลา 28 วัน นั้นลดลงเล็กน้อย เนื่องจาก FA ที่มีอยู่ในระบบนั้นไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ ในภาพ 33(d) นั้นแสดงอิทธิของการเติมปูนขาว(Quicklime) เพื่อศึกษาว่าค่า Unconfined compressive strength จากกราฟแสดงให้เห็นว่าการเติมปูนขาวเข้าไปในระบบ ค่า Unconfined compressive strength เพิ่มขึ้นเล็กน้อยหรือแทบไม่เพิ่มขึ้น การเติมปูนขาวที่ 10% ให้ค่า Unconfined compressive strength เท่ากับ 4.42 MPa ซึ่งสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับค่า Unconfined compressive strength ที่ 10% (ภาพ 33(a)) ปูนขาวเป็นวัสดุอัลคาไลน์ ในขณะที่ FA และ PG เป็นวัสดุที่เป็นกรด ปูนขาวทำให้ค่า pH ของวัสดุเป็นกลางและจัดให้มีสภาพแวดล้อมที่เป็นด่างสำหรับการปฏิกิริยา ในขณะเดียวกันฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำได้ใน PG ทำปฏิกิริยากับส่วนหนึ่งของปูนขาว ได้เป็นการตกตะกอนของฟอสเฟต CSH เจล และอะลูมิเนียม แคลเซียมไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวกับ  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  จาก FA ซึ่งจะเกิดเป็น Ettringite จึงช่วยปรับปรุงความแข็งแรง และเพิ่มค่า Unconfined compressive strength ให้กับตัวอย่าง

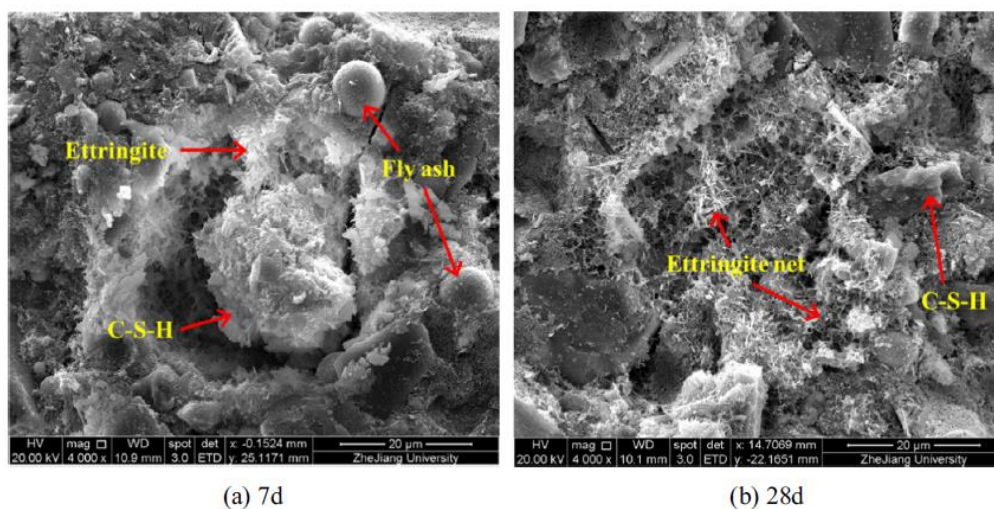
และในงานวิจัยนี้ได้นำตัวอย่างไปทดสอบ SEM เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างโดยนำตัวอย่างที่มีการเติม PG ที่ 5% และ 10% ที่ 28 วัน ไปทดสอบ ได้ผลดังภาพ 34 จะพบ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , Ettringite และ CSH เจล Ettringite มีลักษณะคล้ายเข็มและถูกล้อมรอบด้วย CSH เจล และ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ที่มีลักษณะเป็นแบบแผ่น ในภาพ 34(b) จะเห็นรอยแตกในวงสีแดงซึ่งเกิดจากการเพิ่มขึ้นของ PG จะมีการสร้าง Ettringite มากขึ้นนำไปสู่การขยายตัวของตัวอย่างเมื่อ Ettringite มีปริมาณมากเกินไป รอยแตกที่เกิดขึ้นนั้นเป็นผลให้ความแข็งแรงเชิงกลของตัวอย่างลดลง และได้ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างโดยนำตัวอย่างที่มีการเติม FA ที่ 15% ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน และ 28 วัน ผลแสดงดังภาพ 35 จะเห็นได้ว่าที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน (ภาพ 35(a)) จะเห็นมีลักษณะเป็นโพรง เนื่องจากเกลือยทำปฏิกิริยาเพียงบางส่วน จะเห็นอนุภาคของเกลือยมีลักษณะเป็นทรงกลม Ettringite เริ่มก่อตัวขึ้นในขณะที่อนุภาคของดินลมหอบถูกล้อมรอบด้วย CSH เจล และภาพ 35(b) เป็นภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน จะเห็นว่า Ettringite มีการก่อตัวเพิ่มขึ้นระหว่างอนุภาคของดิน และแทบไม่สามารถมองเห็นอนุภาคของเกลือยได้จากภาพ SEM ซึ่งบ่งชี้ว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันเสร็จสมบูรณ์



(a) 5% phosphogypsum

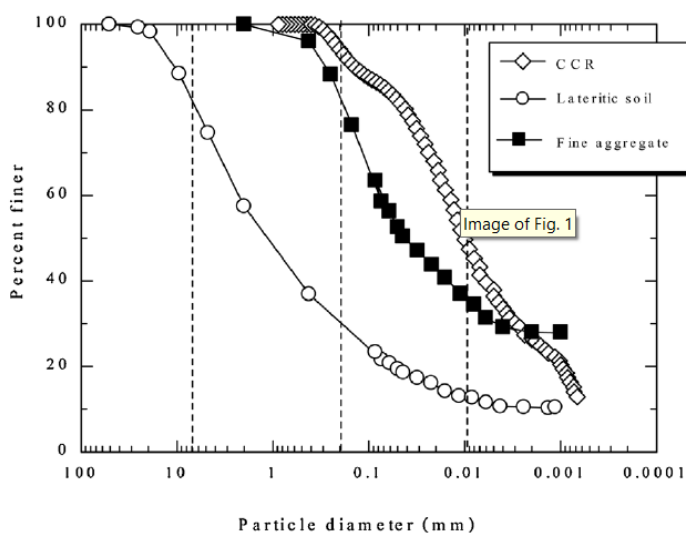
(b) 10% phosphogypsum

ภาพ 34 ภาพถ่ายรูปทรงอนุภาค (SEM) มีการเติม PG ที่ 5%(a) และ 10%(b) ที่ 28 วัน [3]



ภาพ 35 ภาพถ่ายรูปทรงอนุภาค (SEM) มีการเติม FA ที่ 15% ที่ระยะเวลา 7 วัน(a) และ 28 วัน(b) [3]

Prinya Chindaprasirt [37] และคณะ ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) ดินลูกรังที่ใช้ในการศึกษาเป็นดินลูกรังจากจังหวัดนครราชสีมา ประเทศไทย ที่ความลึกประมาณ 3 เมตร การกระจายของขนาดเม็ดดินแสดงในภาพ 36 ตัวอย่างดินลูกร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มม.) เพื่อกำจัดอนุภาคหยาบของดินออกไป ดินลูกรังละเอียด (fine lateritic soil, FLS) ประกอบด้วย ทราย 40% , ตะกอน 30% และดินเหนียว 30% มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.75 พิกัดเหลว (Liquid Limit) และพิกัดพลาสติก (Plastic Limit) ของ FLS คือ 27% และ 7% ตามลำดับ จากการจำแนกดินในระบบ Unified Soil Classification System (USCS) ดินลูกรังจากจังหวัดนครราชสีมา ประเทศไทย ถูกจัดอยู่ในกลุ่ม low plasticity silt (ML) และจากการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (modified proctor test) พบว่ามีปริมาณน้ำที่เหมาะสม (OWC) ที่ 17.7% และน้ำหนักหน่วยแห้งสูงสุดเท่ากับ 17.1 kN / m<sup>3</sup> ค่า CBR เท่ากับ 14.7% ที่ 95% ของน้ำหนักหน่วยแห้งสูงสุดและค่าการทดสอบหาค่าการสึกหรอของวัสดุอยู่ที่ 52.9% องค์ประกอบทางเคมีของดินลูกรัง(FLS) และกากแคลเซียมคาร์ไบด์(CCR) ที่วิเคราะห์โดยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF) แสดงในตาราง 19



ภาพ 36 การกระจายของขนาดเม็ดดินลูกรัง (FLS) และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) [37]

ตาราง 19 องค์ประกอบทางเคมีของดินลูกรัง (FLS) และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) [37]

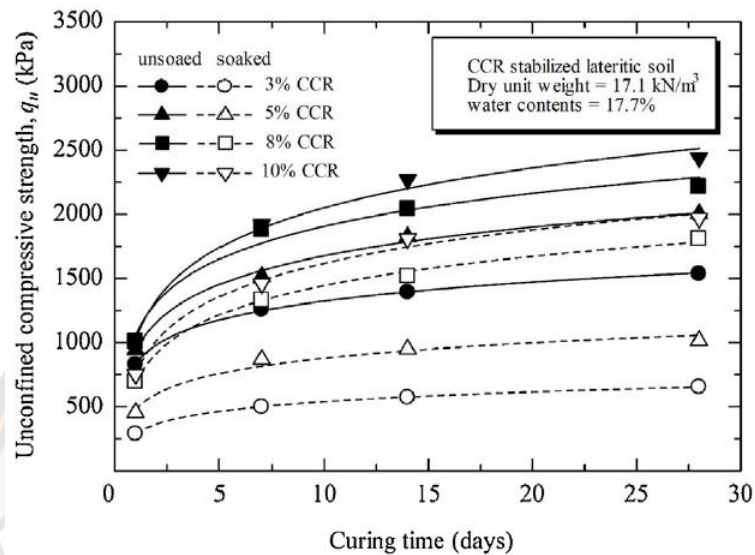
Chemical composition	FLS (%)	CCR (%)
SiO <sub>2</sub>	49.93	6.49
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	45.48	2.55
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.52	3.25
CaO	0.26	70.78
MgO	0.10	0.70
SO <sub>3</sub>	0.47	0.66
Na <sub>2</sub> O	N.D.	N.D.
K <sub>2</sub> O	0.42	7.94
LOI	3.44	1.35

หมายเหตุ N.D. = Not detected.

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) ที่งานวิจัยนี้นำมาศึกษาได้จาก บริษัท Sai 5 Gas Product Co. , Ltd. นครปฐม ประเทศไทย โดยทำการอบที่ 100 องศา เป็นระยะเวลา 24 ชม. และบดด้วยเครื่องมือทดสอบความสึกหรอลอสแองเจลิส แล้วนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 (0.425 มม.) ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.25 การกระจายของขนาดอนุภาคของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) แสดงในภาพ 36 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (d<sub>50</sub>) ของ CCR คือ 0.01 มม. ในขณะที่ d<sub>50</sub> ของ FLS เท่ากับ 0.06 มม.

ในส่วนของการทดสอบทางด้านวิศวกรรม การทดสอบ Unconfined Compressive Strengths (UCSs) จะทำการหล่อตัวอย่างทรงกระบอก (Cylindrical) ด้วยน้ำที่ค่าปริมาณน้ำที่

เหมาะสม (OWC) จากนั้นจะห่อหุ้มตัวอย่างด้วยพลาสติกที่มีความยืดหยุ่น (Plastic Wrap) แล้วเก็บตัวอย่างไว้ในอุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศา เป็นระยะเวลา 1, 7, 14 และ 28 วัน การทดสอบจะทำการทดสอบแบบแช่น้ำ และไม่แช่น้ำ สำหรับตัวอย่างแบบแช่น้ำจะต้องนำตัวอย่างมาแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชม. ที่อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศา ก่อนที่จะนำไปทดสอบ ผลของการทดสอบแสดงดังภาพ 37

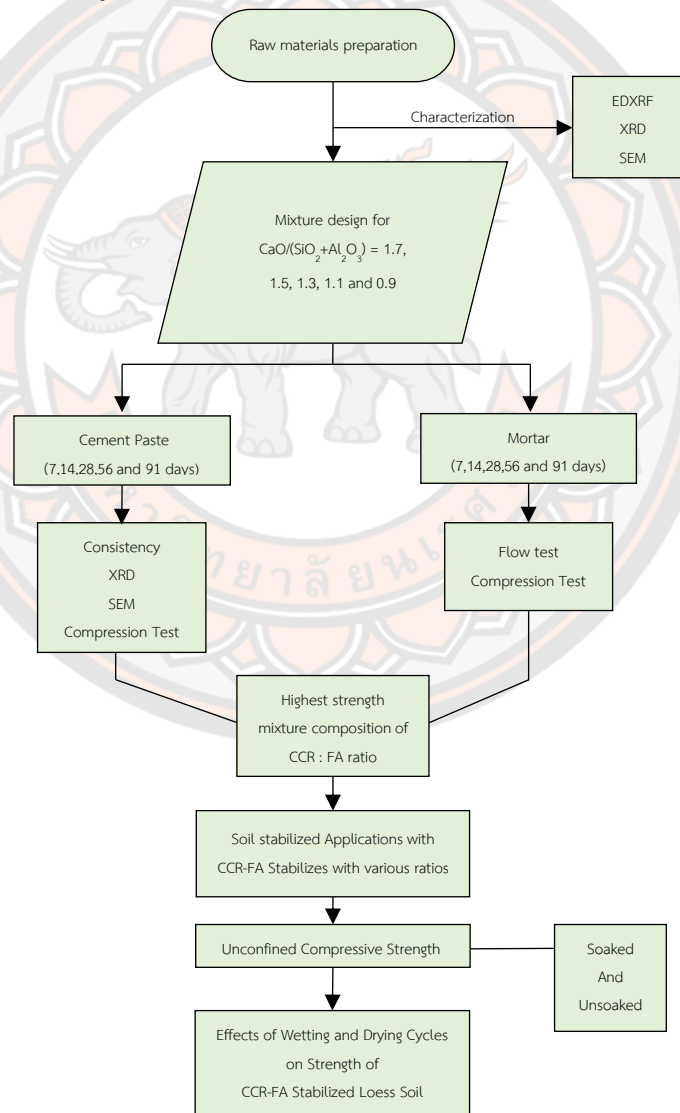


ภาพ 37 ค่า Unconfined Compressive Strengths ของตัวอย่างแบบแช่น้ำ และไม่แช่น้ำ ที่ระยะเวลาการบ่ม 1, 7, 14 และ 28 วัน [37]

จากผลการทดสอบแม้ว่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมของตัวอย่างที่แช่น้ำจะต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้แช่น้ำ แต่ CCR ก็ทำให้ดินลูกรังมีค่า Unconfined Compressive Strengths มากขึ้นตามปริมาณการใส่ CCR สำหรับทุก ๆ ตัวอย่างที่มีการเติม CCR ที่แตกต่างกันมีลักษณะการเพิ่มขึ้นของค่า Unconfined Compressive Strengths เป็นไปในทิศทางเดียวกันคือที่การเติมปริมาณ CCR และที่ระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นค่า Unconfined Compressive Strengths ก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน

### บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบอัตราส่วนผสม, วัสดุ, อุปกรณ์ และวิธีการดำเนินการทดสอบ โดยจะแบ่งออกเป็น การออกแบบส่วนผสม การทดสอบทางด้านเคมีและฟิสิกส์ และการทดสอบทางด้านวิศวกรรม ในส่วนของการทดสอบนั้นเป็นส่วนสำคัญในงานวิจัย ก่อนที่จะทำการทดลองได้มีการเตรียมการเกี่ยวกับวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองที่ดี เพื่อให้ผลการทดลองนั้นได้ประสิทธิภาพ และเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ โดยลำดับและการทดลองที่ได้ทำทั้งหมดจะแสดงผังแผนผังการทดลองแสดงในรูปที่ 38



ภาพ 38 แผนผังการทดลอง

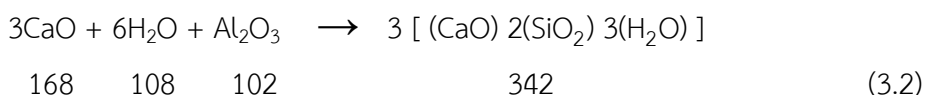
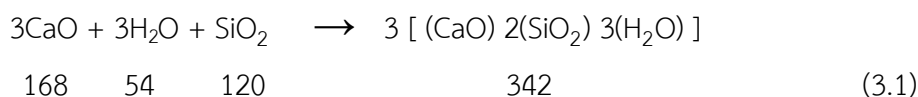
### 3.1 การออกแบบส่วนผสม

การออกแบบอัตราส่วนผสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย คำนวณจากส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุทั้งสอง องค์ประกอบทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย แสดงดังตาราง 20

ตาราง 20 องค์ประกอบทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย

Chemical composition	Fly Ash (% w/w)	Calcium carbide residue (% w/w)
SiO <sub>2</sub>	35.89	1.84
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.26	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.64	-
CaO	16.08	96.70
MgO	2.45	-
K <sub>2</sub> O	2.31	-
Na <sub>2</sub> O	1.05	-
SO <sub>3</sub>	4.08	0.85

เนื่องจากวัสดุตั้งต้นที่ใช้ คือเถ้าลอยและกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ในเถ้าลอยนั้นมีซิลิกาออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) เป็นองค์ประกอบทางเคมี วัสดุตั้งต้นทั้งสองตัวนี้สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่มีการทำปฏิกิริยากันระหว่าง แคลเซียมไฮดรอกไซด์กับวัสดุปอซโซลานิกที่มีซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) เป็นองค์ประกอบ (สมการที่ 3.1) และปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่มีการทำปฏิกิริยากันระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับวัสดุปอซโซลานิกที่มีอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) เป็นองค์ประกอบ ดังแสดงในสมการที่ 3.2



จากสมการที่ 3.1 และ 3.2 นำทั้งสองสมการมาคำนวณเพื่อหาอัตราส่วนโดยมวลของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาและอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{CaO}/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$ ) ตามทฤษฎีได้ค่าเท่ากับ 1.5 จากนั้นเราจึงทำการออกแบบส่วนผสมแสดงดังตาราง 21

**ตาราง 21** อัตราส่วนผสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย

ชุดตัวอย่าง	อัตราส่วน $\text{CaO}/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$	สัดส่วนโดยมวล (% w/w)	
		CCR	FA
Ca/(Si+Al)-1.7	1.7	45	55
Ca/(Si+Al)-1.5	1.5	41	59
Ca/(Si+Al)-1.3	1.3	36	64
Ca/(Si+Al)-1.1	1.1	31	69
Ca/(Si+Al)-0.9	0.9	26	74

### 3.2 การทดสอบทางด้านวิศวกรรม

#### 3.2.1 การทดสอบซีเมนต์เพสต์

##### 3.2.1.1 การทดสอบหาความชื้นเหลว

###### ● เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ [38]

1. เครื่องชั่ง ที่สามารถชั่งได้ละเอียดและแม่นยำในช่วงน้ำหนัก 1,000 กก.
2. ขวดแก้วเติมน้ำ มีความแม่นยำในช่วงใช้งานไม่เกิน  $\pm 2$  มล. ขวดแก้วตวงน้ำต้องมีขีดที่ใช้อ่านในช่วงไม่เกิน 5 มล. หรืออาจใช้ขวดแก้วตวงขนาด 250 มล.
3. เครื่องทดสอบไวแคต

###### ● ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างการทดสอบ

1. ชั่งวัสดุกากแคลเซียมคาร์ไบด์และซิลิกาพูนตามปริมาณที่กำหนด ปริมาณน้ำที่กำหนดเริ่มต้นเพื่อให้เข็มไวแคตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. ตกอย่างอิสระและจมลงในเพสต์น้อยกว่า 10 มม. จากนั้นจึงเพิ่มปริมาณน้ำขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเข็มไวแคตจมลงในเพสต์มากกว่า 10 มม. ปริมาณน้ำที่ใช้ในการทดลองอย่างน้อยต้องมี 3 ค่า
2. ประกอบหม้อผสมที่แห้งและใบผสมที่แห้งเข้ากับเครื่องผสม
3. ใส่ น้ำที่จะผสมเข้าในหม้อผสมจนหมด
4. ใส่วัสดุกากแคลเซียมคาร์ไบด์และซิลิกาพูนลงในหม้อผสมเพื่อสัมผัสกับน้ำ และปล่อยให้ น้ำซึมเข้าไป 30 วินาที



5. เมื่อครบ 30 วินาทีจึงเดินเครื่องผสมเพื่อให้ใบผสมกวนส่วนผสมอย่างช้าๆโดยใช้อัตราช้า ( $140 \pm 5$  รอบต่อนาที) เป็นเวลา 30 วินาที
6. หยุดเครื่องผสมเป็นเวลา 15 วินาที ระหว่างที่หยุดนี้ให้ปาดเพสต์ที่ติดข้างหม้อผสมลงยังก้นหม้อ
7. เดินเครื่องผสมด้วยอัตราปานกลาง ( $285 \pm 10$  รอบต่อนาที) เป็นเวลา 1 นาที
8. ให้ผู้ทดสอบใส่ถุงมือพลาสติกทั้ง 2 ข้าง นำเพสต์ทั้งหมดออกจากหม้อผสมจากนั้นป้อนให้เป็นก้อนลูกบอลกลมๆ โดยสลับมือในแนวราบเป็นระยะห่างกันประมาณ 15 ซม. จำนวน 6 ครั้ง
9. นำเพสต์ใส่ไปยังแบบกรวย G โดยใส่จากด้านฐาน (ด้านที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่กว่า) เพื่อให้ซีเมนต์ออกไปอีกด้านหนึ่ง

•วิธีการทดสอบ

1. เมื่อนำแบบรูปกรวย G ที่มีเพสต์วางบนเครื่องทดสอบไวแควแล้ว ให้เลื่อนก้านเข็มลงมา จนกระทั่งปลายเข็มของ C สัมผัสกับผิวหน้าของเพสต์ จากนั้นยึดก้านเข็มให้แน่นด้วยสกรู
2. ปรับสเกลบอกระยะ F ให้อ่านค่าที่ศูนย์
3. คลายสกรู E เพื่อให้ก้านเข็มตกอย่างอิสระและจมเข้าไปในเนื้อเพสต์ เป็นเวลา 30 วินาที เมื่อครบ 30 วินาที ให้หมุนสกรู E เพื่อหยุดการตกอย่างอิสระของก้านเข็ม อ่านค่าระยะจมของเข็มไวแคว
4. ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติ คือปริมาณน้ำที่ทำให้เข็มไวแควที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. จมลงในเพสต์ 10 มม. เป็นเวลา 30 วินาที
5. นำค่าอัตราส่วนน้ำต่อส่วนประสาน (%) และระยะจมของเข็มไวแคว (มม.) ไปสร้างความสัมพันธ์

### 3.2.1.2 การหล่อซีเมนต์เพสต์

#### ● เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. เครื่องชั่ง
2. ขวดแก้วเติมน้ำ มีความแม่นยำในช่วงใช้งานไม่เกิน  $\pm 2$  มล. ขวดแก้วตวงน้ำต้องมีขีดที่ใช้อ่านในช่วงไม่เกิน 5 มล. หรืออาจใช้ขวดแก้วตวงขนาด 250 มล.
3. แบบสำหรับหล่อเพสต์

#### 4. ซ้อนดัก เกรียงเหล็ก

#### 5. เครื่องผสมเพสต์

#### ● ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างการทดสอบ

1. ชั่งวัสดุจากแคลเซียมคาร์ไบด์และซิลิกาฟูมตามปริมาณที่กำหนด ผสมให้เข้ากันโดยใช้เครื่อง ball milling ในการผสม ที่ระยะเวลา 5 นาที
2. ประกอบหม้อผสมที่แห้งและใบผสมที่แห้งเข้ากับเครื่องผสม
3. ใส่ น้ำที่จะผสมเข้าในหม้อผสมจนหมด
4. ใส่วัสดุจากแคลเซียมคาร์ไบด์และซิลิกาฟูมลงในหม้อผสมเพื่อสัมผัสกับน้ำ และปล่อยให้ น้ำซึมเข้าไป 30 วินาที
5. เมื่อครบ 30 วินาทีจึงเดินเครื่องผสมเพื่อให้ใบผสมกวนส่วนผสมอย่างช้าๆโดยใช้อัตราช้า ( $140 \pm 5$  รอบต่อนาที) เป็นเวลา 30 วินาที
6. หยุดเครื่องผสมเป็นเวลา 15 วินาที ระหว่างที่หยุดนี้ให้ปาดเพสต์ที่ติดข้างหม้อผสมลงยังก้นหม้อ
7. เดินเครื่องผสมด้วยอัตราปานกลาง ( $285 \pm 10$  รอบต่อนาที) เป็นเวลา 1 นาที
8. นำเพสต์ออกจากหม้อผสม แล้วนำใส่แบบสำหรับหล่อเพสต์
9. นำเพสต์ที่ใส่แบบหล่อแล้วไปวางบนเครื่อง vibration plate เป็นระยะเวลา 1 นาที
10. จากนั้นนำไปเก็บไว้ในที่ที่มีความชื้นเพียงพอเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง
11. หลังจากครบ 24 ชั่วโมง ให้นำพลาสติกหุ้มทั้งแบบหล่อเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น และทำการบ่มตัวอย่างต่อไปจนถึงระยะเวลาที่ต้องการ

### 3.2.2 การทดสอบมอร์ตาร์

#### 3.2.2.1 การทดสอบหาค่าการไหล

● เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ [39]

1. โต๊ะเขย่า (Flow Table) ขนาด 70 x 70 ซม. ที่มีพื้นเรียบเป็นระนาบ
2. กรวยที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางด้านบน 13 ซม. ด้านล่าง 20 ซม. สูง 20 ซม. มีหูจับและแผ่นเหล็กยื่นออกมาให้เท้าเหยียบ
3. ไม้ตำหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 40 x 40 มม.
4. ช้อนตัก เกรียงเหล็ก
5. เครื่องผสมมอร์ตาร์

● ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างการทดสอบ

1. ประกอบหม้อผสมและใบผสมที่แห้ง เข้ากับเครื่องผสม
2. ใส่ น้ำที่ผสมในหม้อผสมจนหมด
3. ใส่ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ และ ฝ้า ลอยลงในหม้อผสมจนหมด จากนั้นเดินเครื่องผสม เพื่อกวนส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำให้เข้ากันโดยใช้อัตราซ้ำ (140 ± 5 รอบต่อนาที) เป็นเวลา 30 วินาที
4. เมื่อกวนส่วนผสมครบ 30 วินาที จึงใส่ทรายลงในหม้อผสมอย่างช้าๆ ภายในเวลา 30 วินาที ซึ่งขณะนี้ใบกวนยังคงกวนอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราซ้ำ (140 ± 50 รอบต่อนาที)
5. หยุดเครื่องผสมจากนั้นเปลี่ยนอัตราการผสมเป็นอัตราปานกลางซึ่งมีความเร็วในการกวน เท่ากับ 285 ± 10 รอบต่อนาที และผสมด้วยอัตรานี้เป็นเวลา 30 วินาที
6. หยุดการผสมและปล่อยมอร์ตาร์ทิ้งไว้เป็นเวลา 90 วินาที และในระหว่างเวลา 15 วินาทีแรกให้ทำการปาดมอร์ตาร์ที่ติดข้างหม้อผสมลงในหม้อ จากนั้นนำภาชนะมาปิดปากหม้อผสมเพื่อกันไม่ให้ความชื้นระเหยออกจากหม้อผสมจนครบเวลา 90 วินาที
7. เดินเครื่องผสมต่อด้วยอัตราปานกลาง (285 ± 10 รอบต่อนาที) เป็นเวลา 1 นาที เป็นอันเสร็จสิ้นการผสมมอร์ตาร์

•วิธีการทดสอบ

1. ทำความสะอาดผิวหน้าของโตะการไหลให้สะอาด และแห้งจากนั้นวางแบบทดสอบการไหลลงตรงกลาง
2. ตักมอร์ตาร์ใส่ในแบบทดสอบการไหลให้มีความสูงประมาณ 25 มม. และกระทุ้งด้วยไม้กระทุ้ง จำนวน 20 ครั้ง ให้ทั่วตลอดหน้าตัดเพื่อให้มอร์ตาร์มีความสม่ำเสมอในแบบไม่ต้องกักตุงให้แรงจนเกินไป
3. ตักมอร์ตาร์ใส่ ในแบบอีก 1 ชั้นซึ่งมีความสูงประมาณ 25 มม. และกระทุ้งมอร์ตาร์เช่นเดียวกับที่กระทุ้งชั้นที่ 1 สำหรับการใส่มอร์ตาร์ชั้นที่ 2 ให้มีความสูงกว่าแบบเล็กน้อยเพื่อทำการปาดหน้า
4. ภายหลังกะทุ้งเสร็จเรียบร้อยแล้ว ใช้เกรียงเหล็กปาดผิวหน้าโดยการลากเกรียงเหล็กที่เกือบตั้งฉากกับผิวหน้าของแบบและปาดมอร์ตาร์ส่วนเกินออกทิ้งไปโดยใช้วิธีการเลื่อนไป-มา คล้ายกับการเลื่อยไม้
5. หากมีน้ำไหลออกมาใต้ฐานของแบบให้เช็ดน้ำออกและนำส่วนของมอร์ตาร์ที่ตกข้างแบบออกให้หมด
6. ยกแบบขึ้นในแนวตั้งอย่างช้าๆซึ่งเวลาที่ใช้ตั้งแต่ใส่มอร์ตาร์ลงแบบจนถึงเวลาที่ยกแบบออกจากผิวหน้าโตะการไหลประมาณ 1 นาที
7. ภายหลังจากการยกแบบออกจากมอร์ตาร์ให้ทำการหมุนที่หมุนของโตะการไหล ซึ่งจะยกงานของโตะการไหลสูงขึ้น 13 มิลลิเมตร และปล่อยให้ตกลงอย่างอิสระจำนวน 25 รอบภายในเวลา 15 วินาที ในขณะที่ทำการหมุนที่หมุนของโตะการไหลให้ยึดโตะการไหลให้แน่นอย่าให้มีการเคลื่อนตัวเพราะจะทำให้ค่าการไหลที่ทดสอบผิดพลาด
8. มอร์ตาร์ที่อยู่บนงานของโตะการไหลจะแผ่ออกไปโดยเกือบเป็นวงกลมให้ใช้คาลิเปอร์วัดเส้นผ่าศูนย์กลางของมอร์ตาร์จำนวน 4 ครั้ง ตรงตำแหน่งซึ่งมีมุมห่างกัน 45 องศา หรือวัดตามแนวเส้นที่ขีดไว้บนงานของโตะการไหลบวกค่าที่อ่านจากคาร์ิปเปอร์จำนวน 4 ครั้งเข้าด้วยกันค่าที่อ่านได้คือค่าร้อยละของเส้นผ่านศูนย์กลางของมอร์ตาร์ที่เพิ่มขึ้นจากเดิม(เส้นผ่าศูนย์กลางของแบบทดสอบการไหลเท่ากับ 10 ซม.)
9. ให้ทำการทดสอบจนได้ค่าการไหลอยู่ระหว่าง  $110 \pm 5$  โดยการปรับปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมการทดสอบค่าการไหลให้ใช้มอร์ตาร์ที่ผสมใหม่ทุกครั้งในการทดสอบ

### 3.2.2.1 การหล่อมอร์ตาร์

#### •วิธีการทดสอบ [40]

1. ภายหลังจากการทดสอบค่าการไหล ให้นำมอร์ตาร์ที่อยู่บนการทดสอบค่าการไหลใส่คืนลงในหม้อผสมปาดมอร์ตาร์ที่ติดค้างข้างหม้อลงไปรวมกันที่กลางหม้อผสม และผสมมอร์ตาร์อีกครั้งเป็นเวลา 15 วินาทีด้วยอัตราการผสมปานกลางภายหลังจากการผสมเสร็จให้เขย่าใบกวนเพื่อให้มอร์ตาร์ที่ติดอยู่ตามใบกวนลงไปรวมกันที่ก้นหม้อผสม
2. ในกรณีที่ต้องทำการผสมมอร์ตาร์ที่ใช้ส่วนผสมเดิมเพื่อหล่อตัวอย่างจำนวนมาก เพราะไม่สามารถผสมครั้งเดียวโดยใช้หม้อผสมใบเดียวให้ทำการผสมมอร์ตาร์โดยไม่ต้องทดสอบค่าการไหลแต่ต้องเป็นการผสมมอร์ตาร์อย่างต่อเนื่องกันทันทีในกรณีที่ไม่มีกรทดสอบค่าการไหลของมอร์ตาร์เนื่องจากใช้ส่วนผสมเดียวกันและส่วนผสมอย่างต่อเนื่องให้ทั้งมอร์ตาร์ที่ผสมเสร็จในหม้อผสมเป็นเวลา 75 วินาที เพื่อใช้เวลาดังกล่าวในการชดเชยเวลาที่ใช้ทดสอบค่าการไหลภายหลังจาก 75 วินาที ให้ทำการปาดมอร์ตาร์ที่ติดอยู่ข้างหม้อลงในหม้อผสมโดยใช้เวลา 15 วินาที จากนั้นผสมหน้าต่ออีก 15 วินาทีด้วยอัตราการผสมปานกลาง
3. ทำการหล่อมอร์ตาร์ทั้งหมดลงในแบบหล่อโดยใช้เวลาทั้งหมดในการหล่อแบบไม่เกิน 2 นาที 30 วินาที ภายหลังจากการผสมมอร์ตาร์เสร็จสิ้นเพื่อลดปัญหาการระเหยออกของน้ำใช้เกรียงเหล็กตักมอร์ตาร์ใส่แบบหล่อชั้นแรกโดยมีความหนาประมาณ 25 มม. ซึ่งเป็นความหนาครึ่งหนึ่งของตัวอย่างมอร์ตาร์โดยใส่มอร์ตาร์ลงในแบบหล่อทุกแบบที่ต้องการหล่อกระทุ้งมอร์ตาร์ด้วยไม้กระทุ้งจำนวน 32 ครั้งต่อ 1 ตัวอย่างในเวลา 10 วินาที โดยการแบ่งกระทุ้งเป็น 4 รอบรอบละ 8 ครั้ง แต่ละรอบกระทุ้งจะตั้งฉากกันประมาณน้ำหนักที่ใช้กระทุ้งให้เพียงพอที่จะทำให้มอร์ตาร์มีความสม่ำเสมอแบบหล่อดังนั้นจึงไม่ต้องกระทุ้งแรงจนเกินไปให้กระทุ้ง 4 รอบจำนวน 32 ครั้ง ให้เสร็จสิ้นในแต่ละตัวอย่างของมอร์ตาร์จากนั้นจึงเริ่มกระทุ้งตัวอย่างต่อไปเมื่อกระทุ้งชั้นที่ 1 เสร็จสิ้นทุกตัวอย่าง แล้วจึงใส่มอร์ตาร์ชั้นที่ 2 ซึ่งมีความหนาประมาณ 25 มม. จากนั้นทำการกระทุ้งมอร์ตาร์และตัวอย่างจำนวน 4 รอบ 32 ครั้งเช่นเดียวกับกรณีของชั้นแรก เมื่อเสร็จสิ้นการกระทุ้งแล้วมอร์ตาร์ควรมีความสูงกว่าขอบด้านบนของแบบเล็กน้อยใช้มือดันมอร์ตาร์ที่ล้นแบบเนื่องจากการกระทุ้งรอบสุดท้ายเข้าไปอยู่ในแบบใช้เกรียงปาดผิวหน้ามอร์ตาร์ให้เรียบและเสมอกับขอบแบบหล่อซึ่งทำได้โดยใช้ขอบเกรียงวางในแนวเกือบตั้งฉากกับขอบแบบ

จากนั้นค่อยๆ เลื่อนเกรียงเติกในลักษณะของการเลื่อยไม้ไปมาตลอดความยาวของแบบหล่อ จึงจะได้มอร์ตาร์ที่ค่อนข้างเรียบและสูงเสมอกับขอบแบบหล่อ

### 3.2.2.1 การทดสอบกำลังอัด

#### •วิธีการทดสอบ [41]

1. นำมอร์ตาร์ออกจากการบ่มด้วยน้ำตามเวลาที่กำหนด ในกรณี que ทดสอบมากกว่าหนึ่งตัวอย่าง ให้ใช้ผ้าชุบน้ำคลุมตัวอย่างที่รอการทดสอบไว้จนกว่าจะได้ทดสอบ
2. ก่อนนำก้อนตัวอย่างเข้าเครื่องทดสอบ ให้ทำการเซ็ดตัวอย่างที่เปียกให้ผิวด้านนอกหมด เพื่อขจัดน้ำและเม็ดทรายหรือสิ่ง que เกาะติดผิวหน้ามอร์ตาร์ออก เลือกด้านที่เรียบที่สุด 2 ด้านที่อยู่ตรงข้ามกันเพื่อรับแรงจากเครื่องทดสอบ
3. ทดสอบการรับน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ โดยวางตัวอย่างมอร์ตาร์บนเครื่องทดสอบ นำแผ่นแบริงวางบนตัวอย่างมอร์ตาร์ให้อยู่ตรงศูนย์กลางเครื่อง และให้แน่ใจว่าส่วนของแผ่นให้แรง que ติดอยู่กับเครื่องทดสอบสามารถเคลื่อนไหวได้ เพื่อปรับระดับให้เป็นระนาบขณะทำการทดสอบ
4. ให้นำหนักแกตัวอย่างมอร์ตาร์ด้วยอัตราค que ที่ประมาณ 90-180 กิโลกรัมต่อวินาที จนตัวอย่างวิบัติ บันทึกค่าน้ำหนักประลัยของตัวอย่าง

### 3.2.3 การทดสอบดินซีเมนต์

#### 3.2.3.1 การทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test)

#### •เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ [41]

1. เครื่องทดสอบ Unconfined Compression Test Machine พร้อมด้วย Dial Gauge ที่อ่านค่าได้ละเอียด 0.01 มม.
2. เครื่องดันดิน ใช้ดันดินออกจากโมล
3. Deformation Indicator
4. Vernier Caliper
5. เครื่องมือตัดแต่งดิน
6. เตาอบ
7. เครื่องชั่ง ซึ่งอ่านได้ละเอียดถึง 0.1 กรัม
8. กระป๋องใส่ดิน

●ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างการทดสอบ

1. นำดินมาร่อนผ่านตะแกรง No.10
2. เติมน้ำตามปริมาณที่กำหนด
3. หลังจากได้ปริมาณความชื้นตามต้องการแล้ว ทำการผสมดินเหนียวกับวัสดุส่วนประสานตามสัดส่วนที่ได้ออกแบบไว้ด้วยเครื่องผสมด้วยเครื่องผสมดินเป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้ส่วนผสมผสมกันอย่างสม่ำเสมอ
4. เทส่วนผสมระหว่างดินเหนียวและวัสดุประสาน ใส่แบบหล่อทรงกระบอกขนาดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร สูง 100 มิลลิเมตร ให้เสร็จภายในเวลา 45 นาที (ก่อนที่ส่วนผสมจะเริ่มทำปฏิกิริยา)
5. ส่วนผสมที่ถูกห่ออย่างดีด้วยแผ่นพลาสติก และเก็บไว้ในห้องที่ควบคุมความชื้นที่มีอุณหภูมิ 21 องศา เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น ตามระยะเวลา บ่ม 3, 7, 28 และ 56 วัน และทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

●วิธีการทดสอบ

1. วางตัวอย่างลงบนเครื่องทดสอบ จัดให้ได้ศูนย์กลางของแนวกดปกติ แล้วจัด dial gauge สำหรับวัดการหดตัวให้เข้าที่ โดยเริ่มตั้งที่เลขศูนย์เพื่อสะดวกในการอ่าน
2. เริ่มการกดตัวอย่างโดยให้อัตราการกดคงที่(การเคลื่อนที่แนวตั้งของเครื่องให้อยู่ในช่วง 0.02 ถึง 0.1 นิ้วต่อวินาที ตามความเหมาะสม
3. บันทึกข้อมูลจากวงแหวนวัดแรงทุกๆการหดตัว 0.005 นิ้ว ของตัวอย่าง (อาจใช้ 0.02 นิ้วในกรณีตัวอย่างเป็นดินเปราะ)
4. เมื่อแรงในวงแหวนวัดแรงเพิ่มขึ้นไปสูงสุดแล้วจึงเริ่มลดลง ซึ่งแสดงว่าถึงจุดสูงสุดของกำลังของดิน ให้ยังอ่านผลต่อไปจนเห็นแนวเฉือน บนตัวอย่างได้ชัดเจน ในบางกรณีที่ไม่มีรอยเฉือนปรากฏชัด เช่น ตัวอย่างดินเปลี่ยนสภาพ ให้ทดสอบจนการหดตัวถึงประมาณ 20 % ของความสูงตัวอย่าง
5. นำตัวอย่างที่ทดสอบเสร็จไปชั่งและเข้าเตาอบเพื่อหาปริมาณความชื้น (Water Content)
6. โดยจะทำตัวอย่างเตรียมไว้สำหรับการทดสอบ Soaked และ Unsoaked

### 3.2.3.2 การทดสอบความคงทนโดยวิธีเปียกสลับแห้ง (Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures)

●เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ [42]

1. น้ำ
2. ภาชนะสำหรับใส่น้ำ
3. เครื่องชั่ง ซึ่งอ่านได้ละเอียดถึง 0.1 กรัม
4. เตาดอบ
5. ตัวอย่างดินลมหอบที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย

●วิธีการทดสอบ

1. ชั่งน้ำหนักดินก่อนทดสอบแล้วบันทึกค่าไว้
2. นำตัวอย่างดินแช่ในน้ำเป็นเวลา 5 ชั่วโมง
3. เมื่อครบเวลา 5 ชั่วโมงแล้ว นำตัวอย่างดินขึ้นจากน้ำแล้วทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างดิน แล้วบันทึกค่า
4. นำไปตัวอย่างดินเข้าเตาดอบ ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 42 ชั่วโมง
5. เมื่อครบเวลา 42 ชั่วโมงแล้วนำตัวอย่างดินออกจากเตาดอบ แล้วทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างดินแล้วบันทึกค่า
6. พักตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เป็นอันเสร็จสิ้น 1 รอบการทดสอบ (cycle)
7. เมื่อสิ้นสุดรอบการทดสอบทำการชั่งน้ำหนักของก้อนตัวอย่างและจดบันทึกค่า
8. ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1-6 จนครบจำนวนรอบการทดสอบที่เราต้องการ
9. โดยจะทำการทดสอบที่ 1 รอบ, 6 รอบ และ 12 รอบ
10. เมื่อตัวอย่างได้ผ่านการทดสอบเปียกสลับแห้งจนครบรอบที่ต้องการแล้ว จะนำตัวอย่างมาทดสอบหาค่าแรงอัดแกนเดียวต่อไป โดยขั้นตอนการทดสอบเป็นไปตามหัวข้อวิธีการทดสอบ 3.3.3.1
11. ตัวอย่างที่นำมาทดสอบ จะเป็นตัวอย่างที่มีระยะเวลาบ่มที่ 28 วัน และ 56 วัน



## บทที่ 4

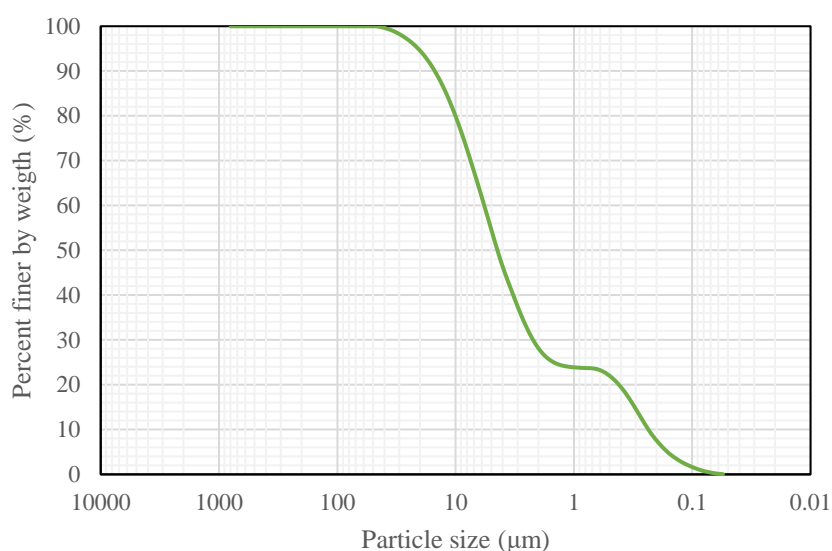
### ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

#### 4.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุ (CCR, FA และ ดินลมหอบ)

##### 4.1.1 กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR)

##### 4.1.1.1 ผลการทดสอบ Particle Size Distribution ของกากแคลเซียมคาร์ไบด์

ผลการทดสอบการกระจายขนาดอนุภาค (Particle Size Distribution) ของกากแคลเซียมคาร์ไบด์แสดงดังภาพ 39 กากแคลเซียมคาร์ไบด์มีค่า Coefficient of Uniformity เท่ากับ 1.06 มีขนาดคละเฉลี่ย (D[4,3]) เท่ากับ 6.38  $\mu\text{m}$  และมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.56  $\text{g}/\text{cm}^3$



ภาพ 39 การกระจายขนาดอนุภาคของกากแคลเซียมคาร์ไบด์

##### 4.1.1.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ด้วยเทคนิค XRF

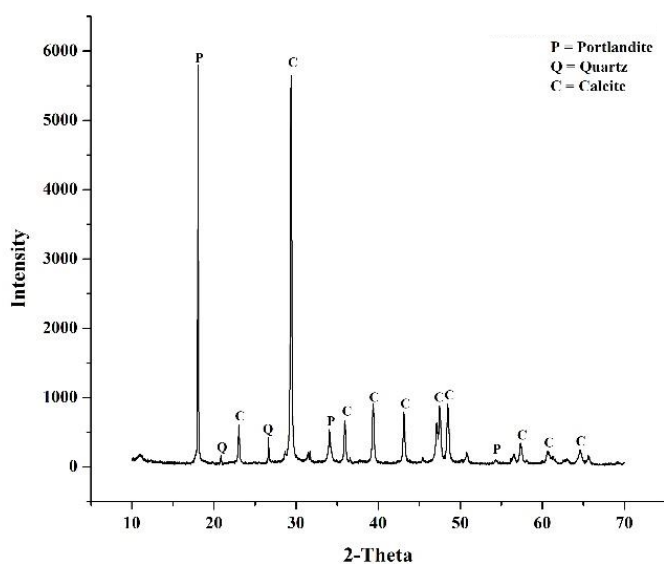
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ด้วยเทคนิค XRF แสดงดังตาราง 22 โดยกากแคลเซียมคาร์ไบด์มี  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  และ  $\text{SO}_3$  องค์ประกอบ โดยมี  $\text{CaO}$  เป็นองค์ประกอบหลัก

ตาราง 22 องค์ประกอบทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ CCR

Materials	Chemical composition (wt.%)							
	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{SO}_3$
CCR	1.84	-	-	96.70	-	-	-	0.85

#### 4.1.1.3 ผลการวิเคราะห์กากแคลเซียมคาร์ไบด์ด้วยเทคนิค XRD

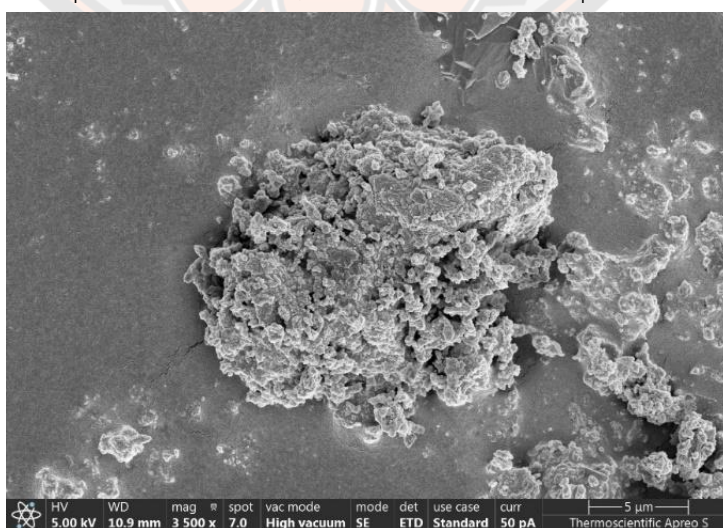
ผลการวิเคราะห์กากแคลเซียมคาร์ไบด์ด้วยเทคนิค X-Ray Diffractometer (XRD) แสดงดังภาพ 40 เมื่อพิจารณารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของที่มีอยู่ในวัสดุตั้งต้น พบว่าพีคหลักของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) คือ ปอร์ตแลนด์ไดต์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) และ แคลไซต์ ( $\text{CaCO}_3$ )



ภาพ 40 ผลการวิเคราะห์กากแคลเซียมคาร์ไบด์ด้วยเทคนิค X-Ray Diffractometer (XRD)

#### 4.1.1.4 ผลการวิเคราะห์กากแคลเซียมคาร์ไบด์ด้วยเทคนิค SEM

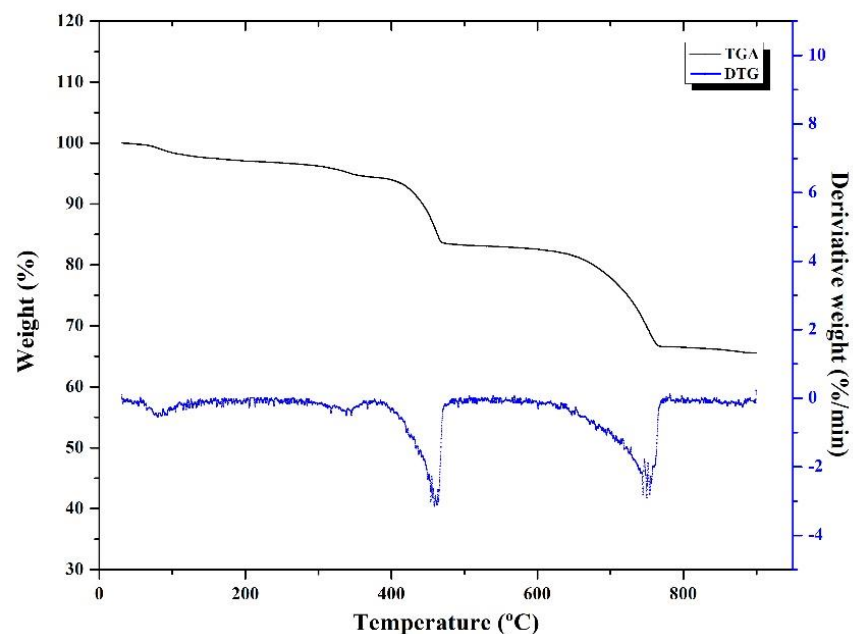
ผลการวิเคราะห์กากแคลเซียมคาร์ไบด์ด้วยเทคนิคภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงดังภาพ 41 พบว่ากากแคลเซียมคาร์ไบด์มีอนุภาคลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน เป็นกลุ่มก้อนและมีพื้นผิวขรุขระ มีขนาดเล็กใหญ่ปะปนกัน เกาะกันเป็นกลุ่มก้อน



ภาพ 41 ภาพถ่ายรูปทรงอนุภาคของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่กำลังขยาย 3,000X

#### 4.1.1.5 ผลการวิเคราะห์กากแคลเซียมคาร์ไบด์ด้วยเทคนิค TGA

ผลการทดสอบ TGA/DTG ของกากแคลเซียมคาร์ไบด์แสดงดังภาพ 42 จากกราฟการสลายตัวของสารประกอบของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ในระยะแรกที่อุณหภูมิ 60 - 120 °C การจากการสูญเสียน้ำในตัวอย่างง่าย [43] ระยะที่สองที่อุณหภูมิ 300 - 480 °C การสลายตัวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์หรือปอร์ตแลนด์ไดต์ ( $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ ) และระยะที่สามแสดงการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตหรือแคลไซต์ ( $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ ) ที่อุณหภูมิ 600 - 900 °C [44]

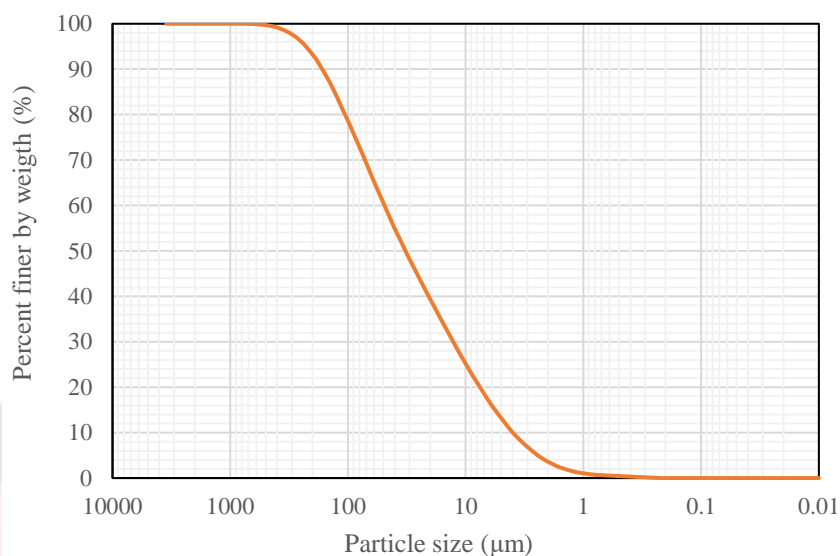


ภาพ 42 ผลการทดสอบ TGA ของกากแคลเซียมคาร์ไบด์

#### 4.1.2 เถ้าลอย (Fly ash, FA)

##### 4.1.2.1 ผลการทดสอบ Particle Size Distribution ของเถ้าลอย

ผลการทดสอบการกระจายขนาดอนุภาค (Particle Size Distribution) ของเถ้าลอยแสดงดังภาพ 43 เถ้าลอยมีค่า Coefficient of Uniformity เท่ากับ 1.59 และมีค่าขนาดอนุภาคเฉลี่ย ( $D[4,3]$ ) เท่ากับ  $63.60 \mu\text{m}$



ภาพ 43 การกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าลอย

##### 4.1.2.2 ผลการวิเคราะห์เถ้าลอยด้วยเทคนิค XRF

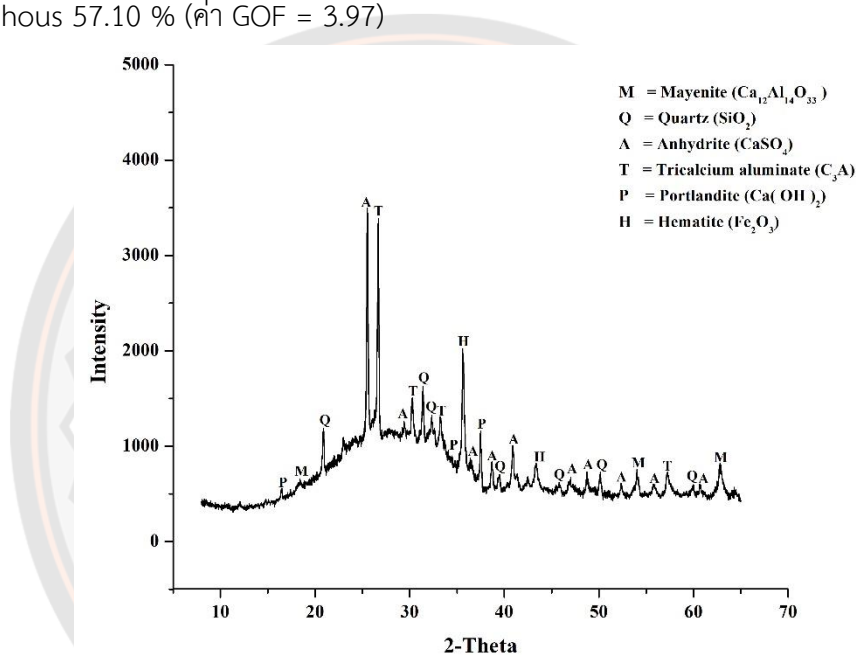
ผลการวิเคราะห์เถ้าลอยด้วยเทคนิค XRF แสดงดังตาราง 23 จากผลการทดสอบพบว่าเถ้าลอยมี  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ  $\text{CaO}$  เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งมีปริมาณของ  $\text{SiO}_2$  มากที่สุด และมี  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  และ  $\text{SO}_3$  เป็นองค์ประกอบรอง

ตาราง 23 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย FA

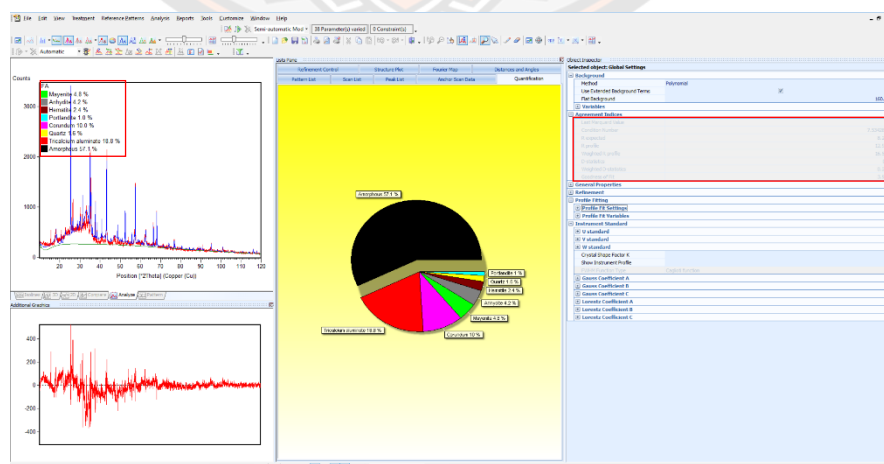
Chemical composition (wt.%)								
	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{SO}_3$
Chemical composition	35.89	19.26	10.64	16.08	2.45	1.05	2.31	4.08
Phase composition (wt.%)								
	Mayenite	Anhydrite	Portlandite	Quartz	Hematite	Tricalcium aluminate	Corundum	Amorphous
Phase composition	4.8	4.2	1.0	1.6	2.4	18.8	10.0	57.1

#### 4.1.2.3 ผลการวิเคราะห์เถ้าลอยด้วยเทคนิค XRD

ผลการวิเคราะห์เถ้าลอยด้วยเทคนิค X-Ray Diffractometer (XRD) แสดงดังภาพ 44 เมื่อพิจารณารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเถ้าลอย พบว่าพีคหลักของเถ้าลอย (FA) เป็นพีคของ แอนไฮไดรต์ ( $\text{CaSO}_4$ ), ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $\text{C}_3\text{A}$ ), ควอตซ์ ( $\text{SiO}_2$ ) และ เฮมาไทต์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) จากกราฟจะเห็นว่าผลการวิเคราะห์ XRD ของเถ้าลอยมีลักษณะโค้งที่ช่วงมุมหนึ่งแสดงให้เห็นว่าเถ้าลอยมีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous) ทางผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์เถ้าลอยเพื่อหาปริมาณเฟสด้วยเทคนิค Rietveld Refinement (ภาพ 45) โดยใส่ Corundum 10% พบว่ามีส่วนที่เป็น Amorphous 57.10 % (ค่า GOF = 3.97)



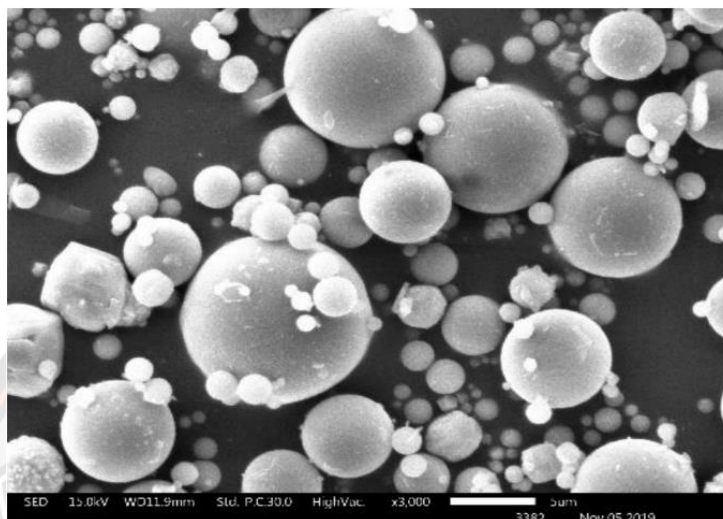
ภาพ 44 ผลการวิเคราะห์เถ้าลอยด้วยเทคนิค X-Ray Diffractometer (XRD)



ภาพ 45 ผลวิเคราะห์เถ้าลอยเพื่อหาร้อยละของโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous) ด้วยเทคนิค Rietveld Refinement

#### 4.1.2.4 ผลการวิเคราะห์เถ้าลอยด้วยเทคนิค SEM

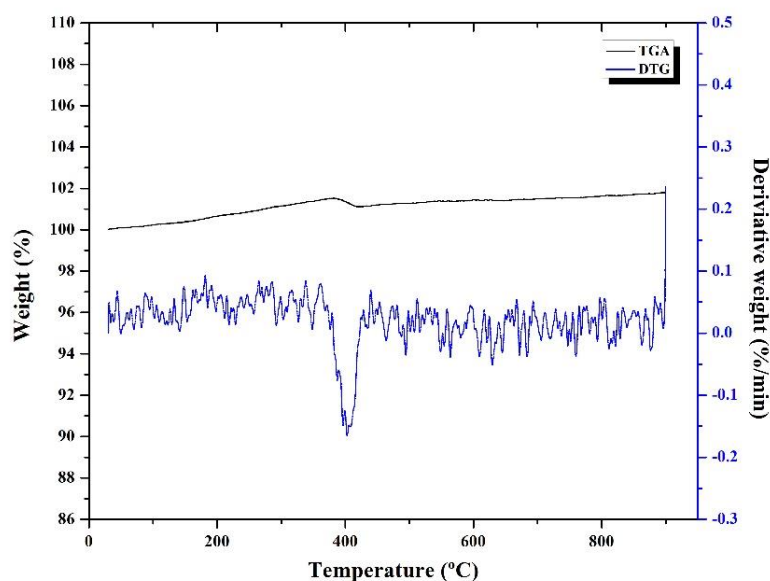
ผลการวิเคราะห์เถ้าลอยด้วยเทคนิคภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงดังภาพ 46 พบว่าเถ้าลอยมีอนุภาคลักษณะเป็นทรงกลมตัน ผิวเรียบ และมีอนุภาคขนาดเล็กและใหญ่ต่างกันออกไป



ภาพ 46 ภาพถ่ายรูปทรงอนุภาคของเถ้าลอยที่กำลังขยาย 3,000X

#### 4.1.2.5 ผลการวิเคราะห์เถ้าลอยด้วยเทคนิค TGA และ DTG

ผลการทดสอบ TGA/DTG ของเถ้าลอยแสดงดังภาพ 47 จากกราฟการสลายตัวของสารประกอบของเถ้าลอย แสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่อุณหภูมิ 350 – 450 °C ซึ่งสอดคล้องกับการสลายตัวของ  $\text{Ca(OH)}_2$  เป็น  $\text{CaO}$  และ  $\text{CO}_2$  ตามลำดับ [45]

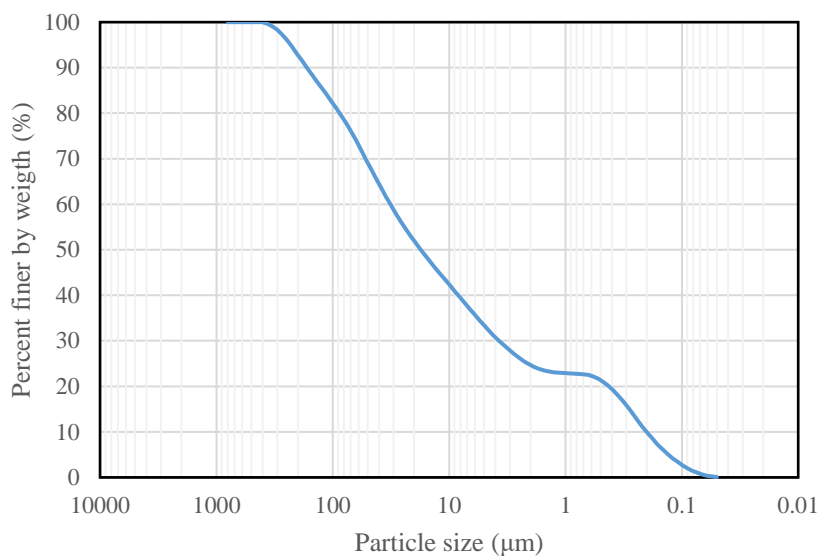


ภาพ 47 ผลการทดสอบ TGA และ DTG ของเถ้าลอย

### 4.1.3 ดินลมหอบ (Loess)

#### 4.1.3.1 ผลการทดสอบ Particle Size Distribution ของดินลมหอบ

ผลการทดสอบการกระจายขนาดอนุภาค (Particle Size Distribution) ของดินลมหอบ แสดงดังภาพ 48 ดินลมหอบมีค่า Coefficient of Uniformity เท่ากับ 2.72 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของ ดินลมหอบ (D[4,3]) เท่ากับ 51.82  $\mu\text{m}$  และมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.70  $\text{g}/\text{cm}^3$



ภาพ 48 การกระจายขนาดอนุภาคของดินลมหอบ

#### 4.1.3.2 ผลการวิเคราะห์ดินลมหอบด้วยเทคนิค XRF

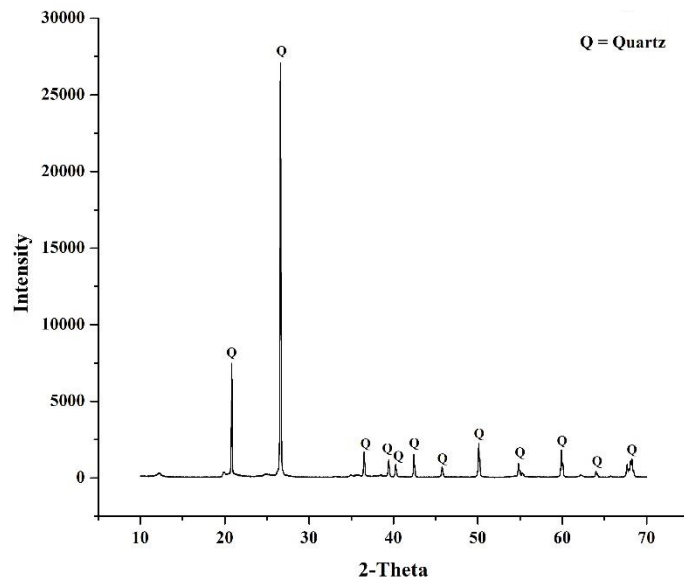
ผลการวิเคราะห์ดินลมหอบด้วยเทคนิค XRF แสดงดังตาราง 24 จากผลการทดสอบพบว่าดิน ลมหอบมี  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งมีปริมาณของ  $\text{SiO}_2$  มากที่สุด

ตาราง 24 องค์ประกอบทางเคมีของดินลมหอบ Loess

Materials	Chemical composition (wt.%)							
	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	CaO	MgO	NaO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
Loess	56.24	24.99	12.38	0.95	-	-	3.27	0.41

#### 4.1.3.3 ผลการวิเคราะห์ดินลมหอบด้วยเทคนิค XRD

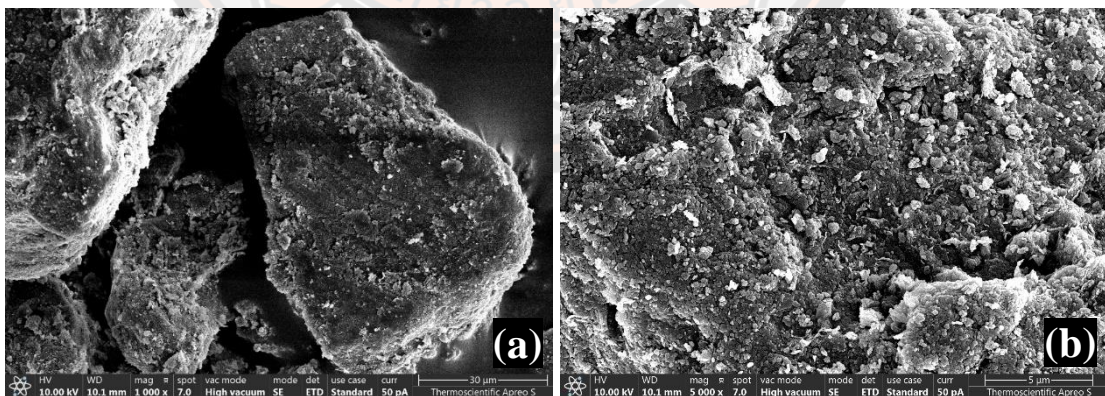
ผลการวิเคราะห์ดินลมหอบด้วยเทคนิค XRD แสดงดังภาพ 49 จากการทดสอบพบว่าดินลมหอบมีควอตซ์ ( $\text{SiO}_2$ ) เป็นพีคหลัก



ภาพ 49 ผลการวิเคราะห์ดินลมหอบเทคนิค X-Ray Diffractometer (XRD)

#### 4.1.3.4 ผลการวิเคราะห์ดินลมหอบด้วยเทคนิค SEM

ผลการวิเคราะห์ดินลมหอบด้วยเทคนิคภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าดินลมหอบมีลักษณะเป็นอนุภาคเล็ก ๆ เป็นเกร็ด ผิวก่อนข้างเรียบ แผ่นบาง รวมตัวเกาะกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ แสดงดังภาพ 50



ภาพ 50 ภาพถ่ายรูปทรงอนุภาคของดินลมหอบที่กำลังขยาย (a) 1,000X และ (b) 5,000X



## 4.2 การวิเคราะห์เพสต์

อัตราส่วนผสมของเพสต์ที่ใช้ซีเมนต์เพียงอย่างเดียว (Control) และเพสต์ที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยเป็นวัสดุเชื่อมประสาน ที่อัตราส่วน  $\text{CaO}/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$  ที่ 1.7, 1.5, 1.3, 1.1 และ 0.9 แสดงในตารางที่ 25

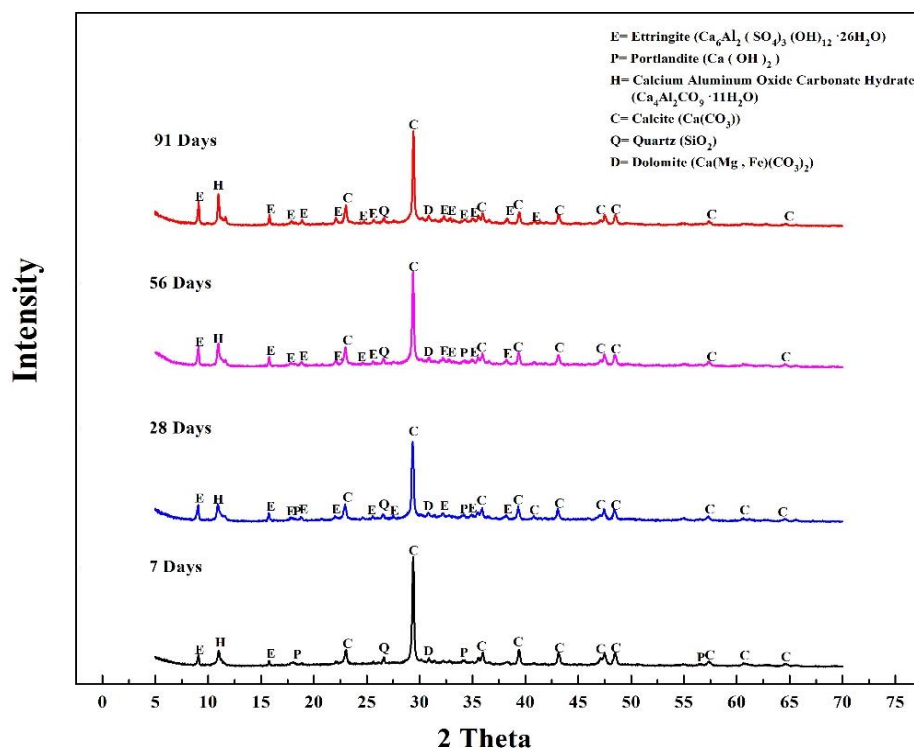
ตาราง 25 ส่วนผสมของเพสต์

Mix	Raito $\text{CaO}/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$	Water ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Cement ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	CCR ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	FA ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
Control	-	422.50	650	-	-
Ca/(Si+Al)-1.7	1.7	422.50	-	290.19	359.81
Ca/(Si+Al)-1.5	1.5	422.50	-	265.07	384.93
Ca/(Si+Al)-1.3	1.3	422.50	-	236.54	413.46
Ca/(Si+Al)-1.1	1.1	422.50	-	203.85	446.15
Ca/(Si+Al)-0.9	0.9	422.50	-	166.04	483.96

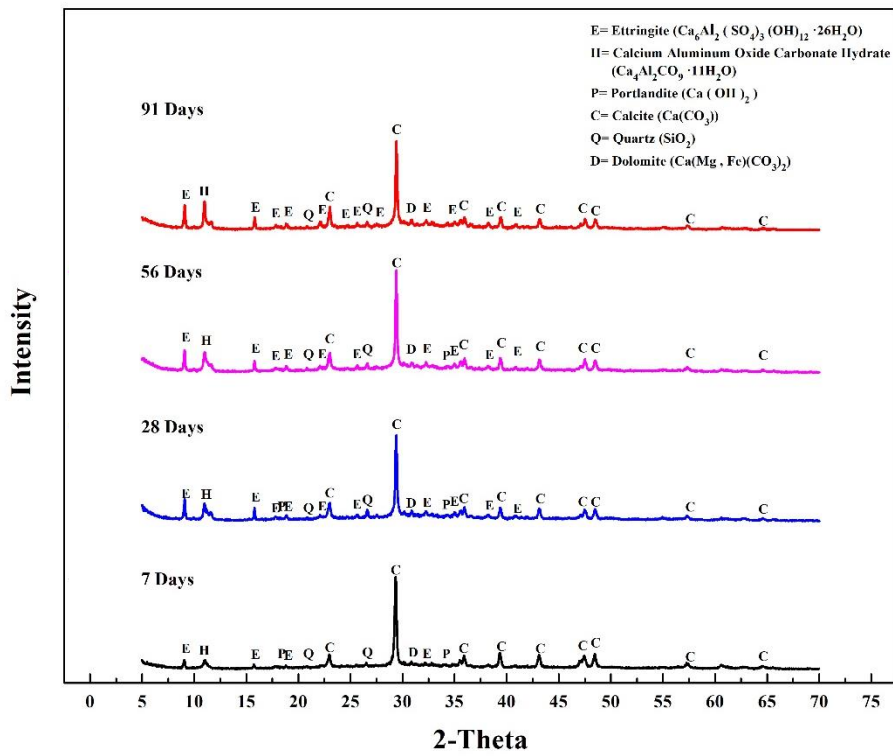
### 4.2.1 ผลการวิเคราะห์เพสต์ด้วยเทคนิค XRD

ผลการวิเคราะห์ XRD ของเพสต์ส่วนผสม Ca/(Si+Al)-1.7 ถึง Ca/(Si+Al)-0.9 แสดงดังภาพที่ 51 ถึง 55 ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าทุก ๆ ส่วนผสมพบพีคหลักเป็นพีคของ แคลไซต์ ( $\text{CaCO}_3$ ) และพบพีคของเอทริงไทด์ในทุกๆ ส่วนผสม โดยทั่วไปเอทริงไทด์นั้นเกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างไตรแคลเซียมอลูมิเนตกับน้ำ โดยมีสมการการเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ 2.1.3 การเกิดเอทริงไทด์นั้นเนื่องจากในเถ้าลอยนั้นมี  $\text{C}_3\text{A}$  เป็นองค์ประกอบทางเคมี อีกทั้งการก่อตัวของเอทริงไทด์นั้นมักจะขึ้นกับปริมาณของแอนไฮไดไรต์ ( $\text{CaSO}_4$ ) อีกด้วย [46] ผลการวิเคราะห์ XRD ของเพสต์ส่วนผสม Ca/(Si+Al)-1.7 (ภาพ 51) ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วันพบพีคของ เอทริงไทด์ ( $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ ), ปอร์ตแลนด์ไดต์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), แคลเซียมอะลูมิเนียมออกไซด์คาร์บอนไฮเดรต ( $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{CO}_9 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$ ), ควอตซ์ ( $\text{SiO}_2$ ), แคลไซต์ ( $\text{CaCO}_3$ ) และ โดโลไมต์ ( $\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe})\text{CO}_3$ ) เมื่อระยะเวลาในการบ่มตัวอย่างเพิ่มขึ้นพีคของปอร์ตแลนด์ไดต์ค่อยๆ ลดลง และพีคของปอร์ตแลนด์ไดต์ได้หายไปที่ระยะเวลาบ่ม 91 วัน ในส่วนของพีคของเอทริงไทด์นั้น พีคจะค่อยๆ สูงขึ้นตามระยะเวลาในการบ่มตัวอย่าง ส่วนผสมเพสต์ Ca/(Si+Al)-1.5 (ภาพ 52) และส่วนผสมเพสต์ Ca/(Si+Al)-1.3 (ภาพ 53) ผล XRD ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วันพีคที่พบนั้นเป็นพีคชนิดเดียวกันกับ Ca/(Si+Al)-1.7 พฤติกรรมเพิ่มขึ้นและลดลงของพีคมีลักษณะเดียวกันกับส่วนผสม Ca/(Si+Al)-1.7 สำหรับส่วนผสมเพสต์ Ca/(Si+Al)-1.1 (ภาพ 54) พีคที่พบที่ระยะเวลาการบ่มตัวอย่างที่ 7 วัน คือพีคของเอทริงไทด์

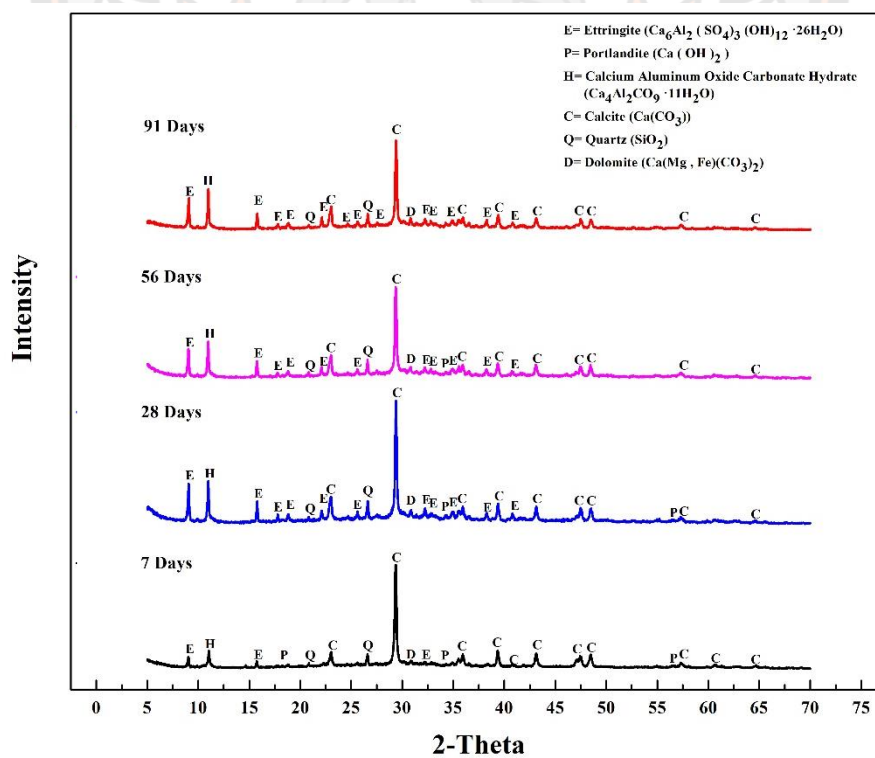
( $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ ), ปอร์ตแลนด์ไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), แคลเซียมอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์คาร์บอเนตไฮเดรต ( $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{CO}_9 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$ ), ควอตซ์ ( $\text{SiO}_2$ ), แคลเซียมซัลเฟต ( $\text{CaSO}_4$ ), แคลไซต์ ( $\text{CaCO}_3$ ) และ โดโลไมต์ ( $\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe})\text{CO}_3$ ) ที่ระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง 28 วัน พีคของแคลเซียมซัลเฟต ได้หายไป เมื่อถึงที่ระยะเวลาการบ่ม 56 วัน พีคของปอร์ตแลนด์ไฮดรอกไซด์ได้หายไป โดยพฤติกรรมของการเกิดพีคของสารประกอบเอททริงไคต์นั้นจะค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาในการบ่มตัวอย่าง ในส่วนของส่วนผสมเพสต์  $\text{Ca}/(\text{Si}+\text{Al})-0.9$  (ภาพ 55) ผล XRD ที่ระยะเวลาบ่มตัวอย่างที่ 7 วัน เป็นพีคของเอททริงไคต์ ( $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ ), ปอร์ตแลนด์ไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), แคลเซียมอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์คาร์บอเนตไฮเดรต ( $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{CO}_9 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$ ), ควอตซ์ ( $\text{SiO}_2$ ), แคลไซต์ ( $\text{CaCO}_3$ ) และ โดโลไมต์ ( $\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe})\text{CO}_3$ ) พีคของเอททริงไคต์นั้นเพิ่มขึ้น และพีคจะค่อยๆสูงขึ้นตามระยะเวลาในการบ่มตัวอย่าง พีคของปอร์ตแลนด์ไฮดรอกไซด์จะค่อยๆลดลงเมื่อระยะเวลาในการบ่มตัวอย่างเพิ่มขึ้น และหายไปทีที่ระยะเวลาการบ่มตัวอย่างที่ 91 วัน จากผลการทดสอบ XRD ของทุกส่วนผสมพีคที่พบนั้นเป็นพีคของสารประกอบที่เหมือนกันและมีพฤติกรรมการเพิ่มขึ้นและลดลงของพีคต่าง ๆ ไปในทิศทางเดียวกัน



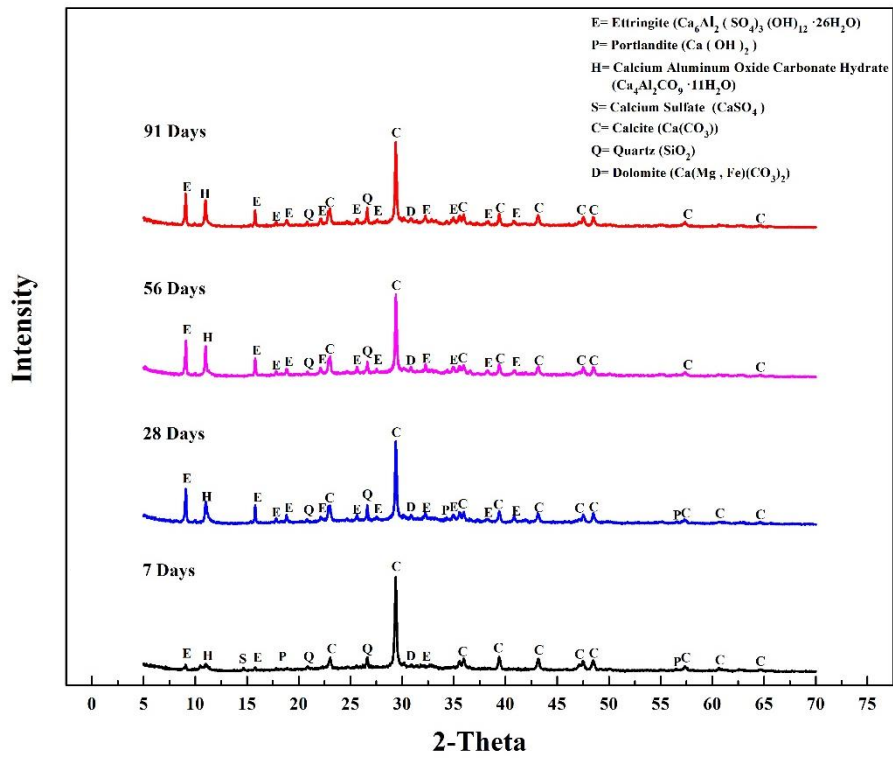
ภาพ 51 ผลการวิเคราะห์ XRD ของเพสต์ส่วนผสม  $\text{Ca}/(\text{Si}+\text{Al})-1.7$  ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 28, 56 และ 91 วัน



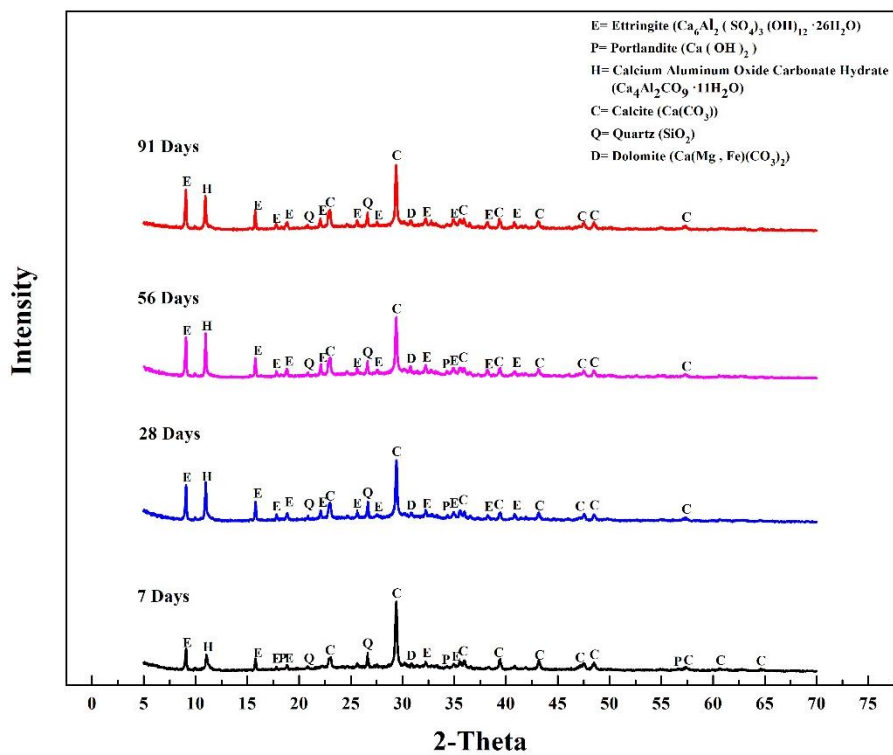
ภาพ 52 ผลการวิเคราะห์ XRD ของเพสต์ส่วนผสม Ca/(Si+Al)-1.5 ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 28, 56 และ 91 วัน



ภาพ 53 ผลการวิเคราะห์ XRD ของเพสต์ส่วนผสม Ca/(Si+Al)-1.3 ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 28, 56 และ 91 วัน



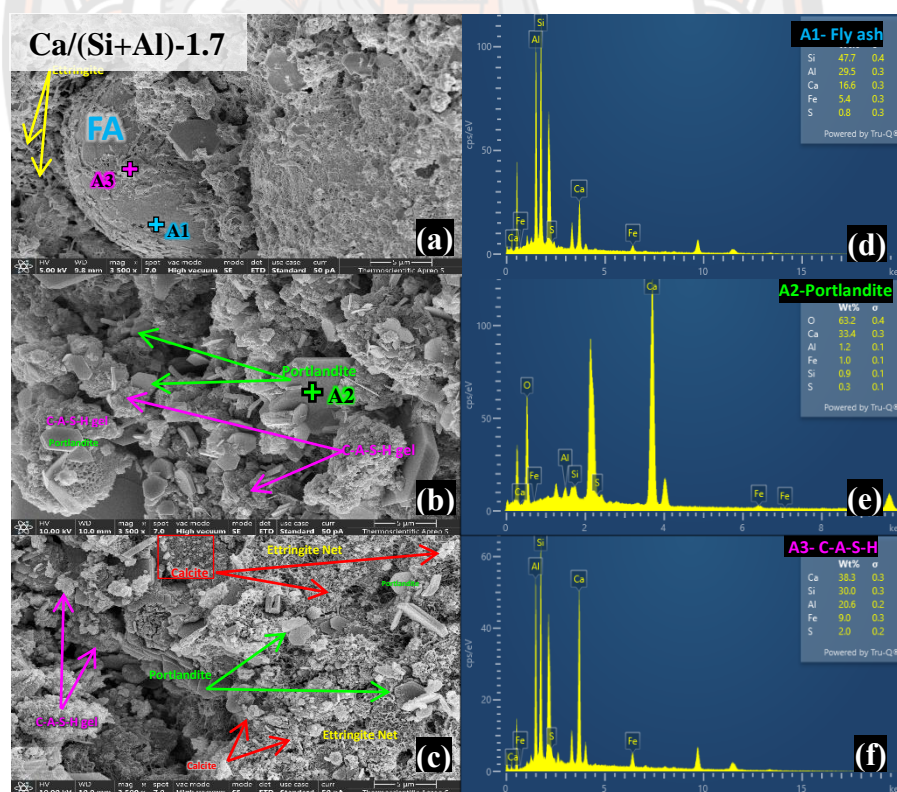
ภาพ 54 ผลการวิเคราะห์ XRD ของเพสต์ส่วนผสม Ca/(Si+Al)-1.1 ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 28, 56 และ 91 วัน



ภาพ 55 ผลการวิเคราะห์ XRD ของเพสต์ส่วนผสม Ca/(Si+Al)-0.9 ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 28, 56 และ 91 วัน

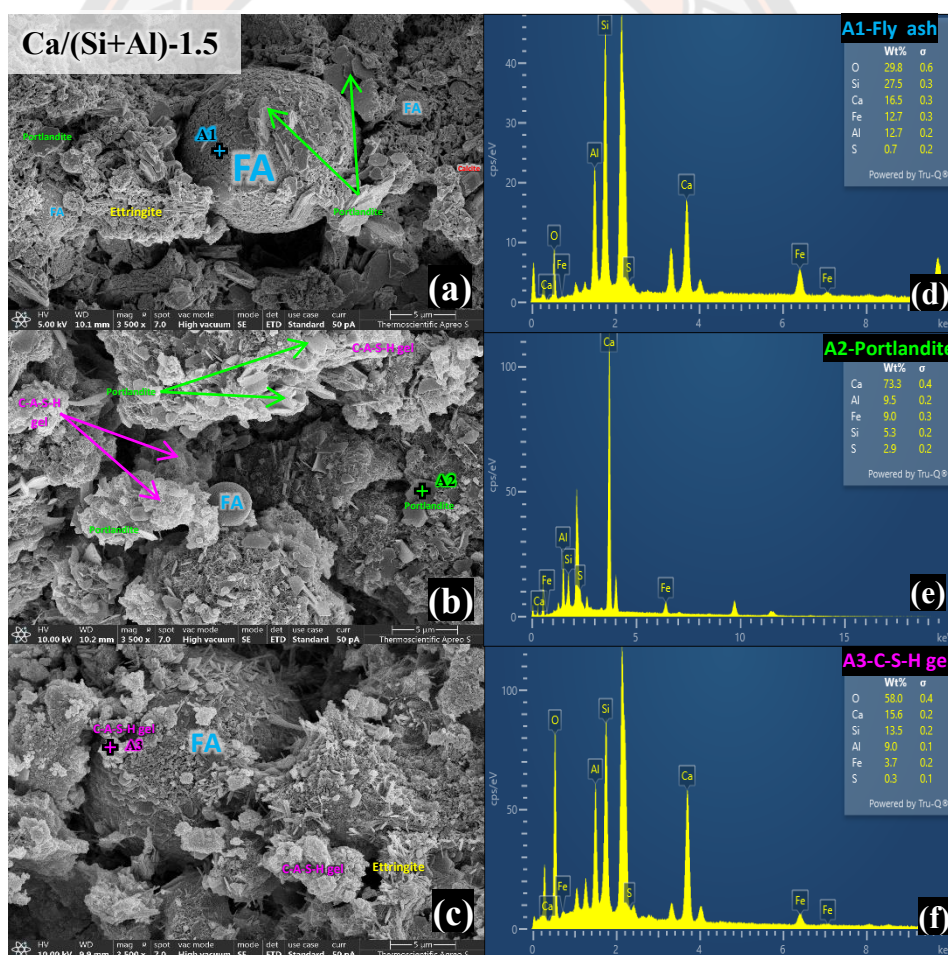
#### 4.2.2 ผลการวิเคราะห์เพสต์ด้วยเทคนิค SEM

ผลการทดสอบ SEM ของเพสต์ Ca/(Si+Al)-1.7 แสดงดังภาพ 56 เพสต์ที่ระยะเวลาในการบ่มตัวอย่าง 7 วัน (ภาพ 56(a)) จะพบอนุภาคของเถ้าลอย และพบสารเชื่อมประสานก่อตัวเกาะอยู่บริเวณรอบ ๆ พื้นผิวของเถ้าลอย เนื่องจากบริเวณพื้นผิวของเถ้าลอยกับปอร์ตแลนด์ไตต์นั้นมีการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก และได้ทำการทดสอบ EDS (ภาพ 56(f)) ผลการทดสอบแสดงร้อยละอัตราส่วนระหว่าง Ca/Si เท่ากับ 1.27, Al/Si เท่ากับ 0.68 และ Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.75 [47, 48] ซึ่งอัตราส่วนดังกล่าวนี้บ่งชี้ว่าสารเชื่อมประสานก่อตัวเกาะอยู่บริเวณรอบ ๆ พื้นผิวของเถ้าลอยนั้นคือ C-A-S-H gel และพบเอททริงไคต์มีลักษณะเป็นแท่งคล้ายเข็มมาความยาวประมาณ 2-3  $\mu\text{m}$  และกว้างประมาณ 0.1  $\mu\text{m}$  [49] เพสต์ Ca/(Si+Al)-1.7 ที่ระยะเวลาในการบ่มตัวอย่าง 28 วัน (ภาพ 56(c)) จากภาพ SEM ไม่พบอนุภาคของเถ้าลอย แต่จะเห็นว่ามีอนุภาคของปอร์ตแลนด์ไตต์และ C-A-S-H gel อยู่รวมกันแสดงให้เห็นว่าเถ้าลอยนั้นทำปฏิกิริยากับปอร์ตแลนด์ไตต์และเกิดเป็น C-A-S-H gel ที่ระยะเวลาบ่มตัวอย่าง 91 วัน (ภาพ 56(e)) ไม่พบอนุภาคของเถ้าลอย พบแคลไซต์, ปอร์ตแลนด์ไตต์, C-A-S-H gel และ เอททริงไคต์ โดยลักษณะของเอททริงไคต์นั้นมีการเชื่อมประสานกันคล้ายตาข่ายและพบช่องว่างระหว่าง



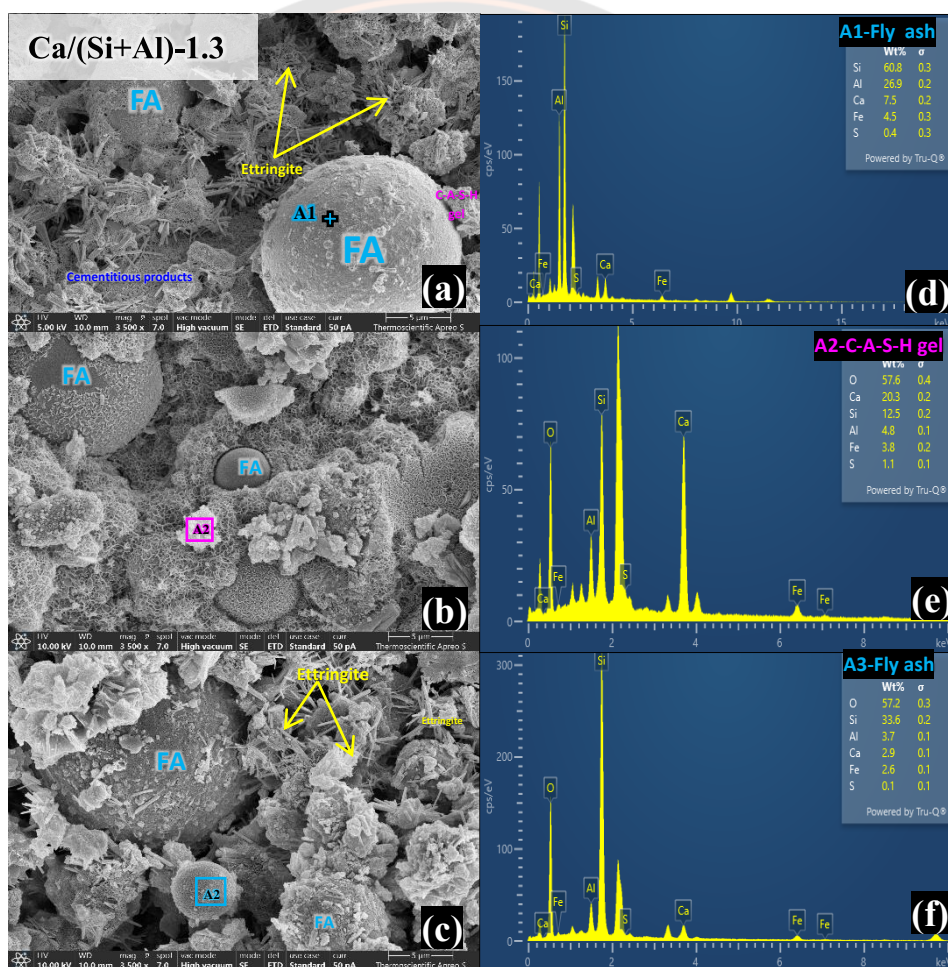
ภาพ 56 ผลการทดสอบ SEM ของเพสต์ Ca/(Si+Al)-1.7 ที่ระยะเวลาในการบ่มตัวอย่าง (a) 7 วัน, (b) 28 วัน และ (c) 91 วัน ที่กำลังขยาย 3,500X และผลการทดสอบ EDS ของเพสต์ Ca/(Si+Al)-1.7 (e) เถ้าลอย, (d) ปอร์ตแลนด์ไตต์ และ (f) C-S-H gel

ผลการทดสอบ SEM ของเพสต์ Ca/(Si+Al)-1.5 แสดงดังภาพ 57 เพสต์ Ca/(Si+Al)-1.5 ที่ระยะเวลาในการบ่มตัวอย่าง 7 วัน (ภาพ 57(a)) พบอนุภาคของเถ้าลอยที่ขนาดแตกต่างกัน โดยบริเวณพื้นผิวของเถ้าลอยจะพบอนุภาคของปอร์ตแลนด์ไดต์เกาะอยู่ บริเวณโดยรอบพบเอททริงไคต์ และแคลไซต์ โดยเอททริงไคต์จะมีลักษณะเป็นแท่งเข็มจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน เมื่อระยะเวลาบ่มผ่านไปจนถึงที่ระยะเวลา 28 วัน (ภาพ 57(b)) พบอนุภาคของเถ้าลอยในปริมาณที่น้อยลง และพบการก่อตัวของโครงสร้าง C-A-S-H gel เพิ่มขึ้น เมื่อถึงที่ระยะเวลาบ่ม 91 วัน (ภาพ 57(c)) จะพบว่าอนุภาคต่าง ๆ ในเพสต์มีการเชื่อมประสานกัน จากการก่อตัวของเอททริงไคต์และ C-A-S-H gel ผลการทดสอบ EDS ของ C-A-S-H gel (ภาพ 57(f)) [47, 48] แสดงร้อยละอัตราส่วนระหว่าง Ca/Si เท่ากับ 1.56, Al/Si เท่ากับ 0.67 และ Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.70 จึงทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคนั้นมีขนาดเล็กลง ซึ่งสอดคล้องกับค่ากำลังอัดของเพสต์ที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่ม และไม่พบอนุภาคของปอร์ตแลนด์ไดต์ซึ่งสอดคล้องกับผล XRD ของเพสต์ Ca/(Si+Al)-1.5 ที่ระยะเวลาการบ่ม 91 วัน



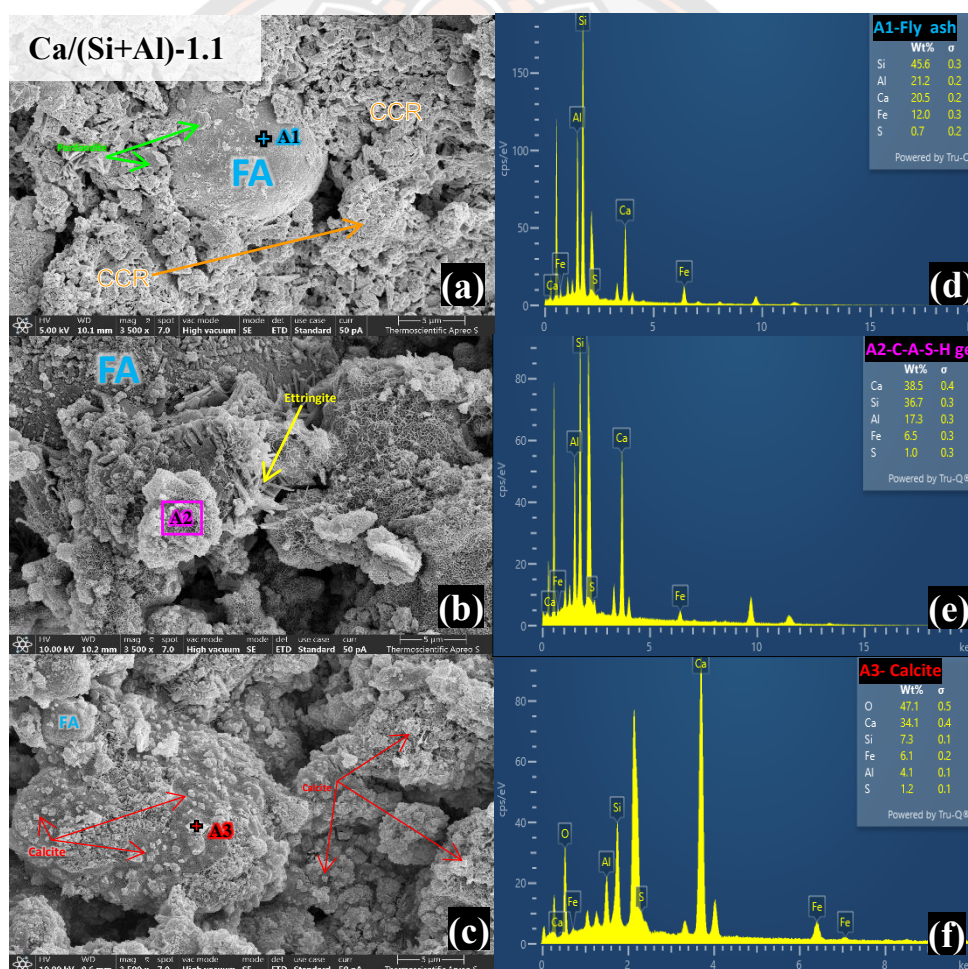
ภาพ 57 ผลการทดสอบ SEM ของเพสต์ Ca/(Si+Al)-1.5 ที่ระยะเวลาในการบ่มตัวอย่าง (a) 7 วัน, (b) 28 วัน และ (c) 91 วัน ที่กำลังขยาย 3,500X และผลการทดสอบ EDS ของเพสต์ Ca/(Si+Al)-1.5 (e) เถ้าลอย, (d) ปอร์ตแลนด์ไดต์ และ (f) C-S-H gel

ผลการทดสอบ SEM ของเพสต์ Ca/(Si+Al)-1.3 แสดงดังภาพ 58 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน (ภาพ 58(a)) พบอนุภาคของเถ้าลอย บริเวณโดยรอบอนุภาคของเถ้าลอย พบการก่อตัวของเอททริงไทต์และ C-A-S-H gel ใกล้กับอนุภาคของเถ้าลอย ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน (ภาพ 58(b)) พบอนุภาคของเถ้าลอย และการก่อตัวของโครงสร้าง C-A-S-H gel จากผลการทดสอบ EDS ของ C-A-S-H gel (ภาพ 58(e)) แสดงร้อยละอัตราส่วนระหว่าง Ca/Si เท่ากับ 1.62, Al/Si เท่ากับ 0.38 และ Ca/(Si+Al) เท่ากับ 1.17 [47, 48] โดย C-A-S-H gel นั้นได้เชื่อมประสานอนุภาคต่าง ๆ ไว้ด้วยกัน ที่ระยะเวลาบ่ม 91 วัน (ภาพ 58(c)) พบอนุภาคของเถ้าลอย โดยพบการก่อตัวของเอททริงไทต์บริเวณโดยรอบของเถ้าลอย



ภาพ 58 ผลการทดสอบ SEM ของเพสต์ Ca/(Si+Al)-1.3 ที่ระยะเวลาในการบ่มตัวอย่าง (a) 7 วัน, (b) 28 วัน และ (c) 91 วัน ที่กำลังขยาย 3,500X และผลการทดสอบ EDS ของเพสต์ Ca/(Si+Al)-1.3 (e) เถ้าลอย, (d) ปอร์ตแลนด์ไตต์ และ (f) C-S-H gel

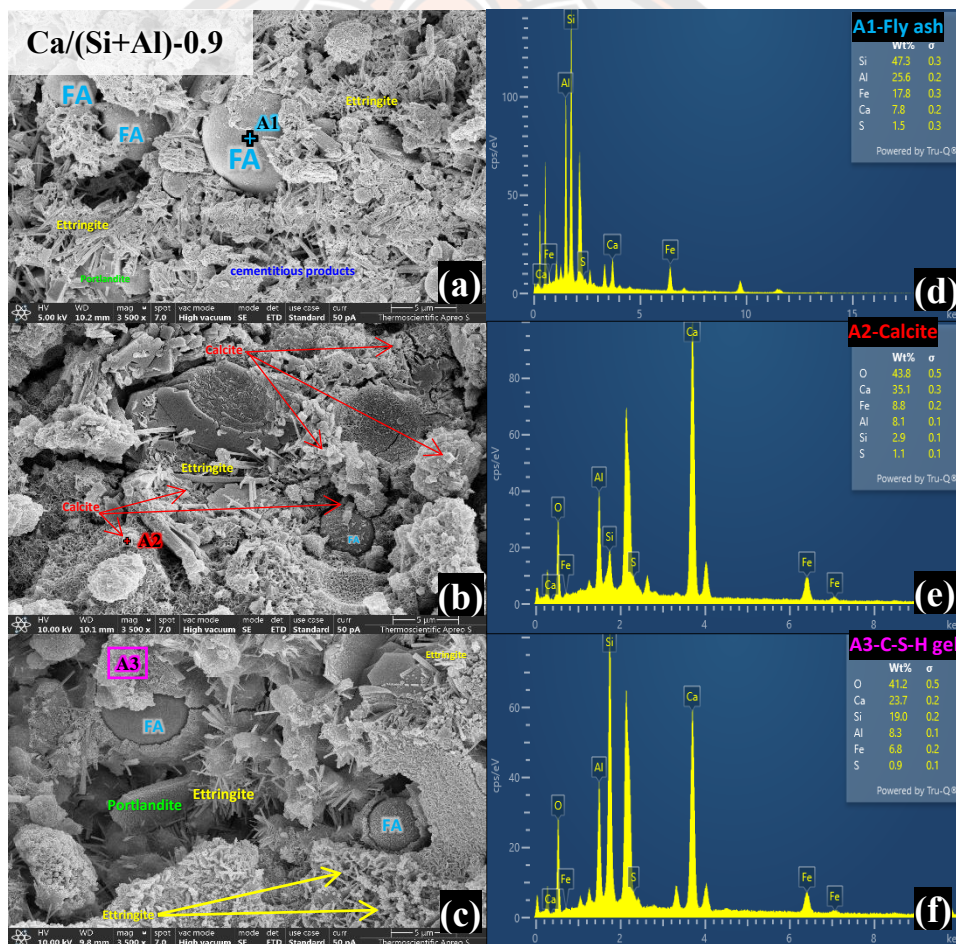
ผลการทดสอบ SEM ของเพสต์ Ca/(Si+Al)-1.1 แสดงดังภาพ 59 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน (ภาพ 59(a)) พบอนุภาคของเถ้าลอย ที่ล้อมรอบไปด้วยอนุภาคของกากแคลเซียมคาร์ไบไบต์ และพบอนุภาคของพอร์ตแลนด์ไดต์เพียงเล็กน้อย ผลการทดสอบ SEM ของเพสต์ Ca/(Si+Al)-1.1 ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน แสดงดังภาพ 59(b) พบอนุภาคของเถ้าลอย ที่บริเวณพื้นผิวของเถ้าลอยและบริเวณโดยรอบพบการก่อตัวของ C-A-S-H gel โดยระบุได้จากผลการทดสอบ EDS (ภาพ 59(e)) แสดงร้อยละอัตราส่วนระหว่าง Ca/Si เท่ากับ 1.04, Al/Si เท่ากับ 0.47 และ Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.71 [47, 48] และพบการก่อตัวของเอททริงไต์เพียงเล็กน้อย ที่ระยะเวลาบ่ม 91 วัน พบอนุภาคของเถ้าลอยเหลืออยู่เพียงเล็กน้อย ไม่พบอนุภาคของพอร์ตแลนด์ไดต์เหลืออยู่ ซึ่งสอดคล้องกับผล XRD ของเพสต์ Ca/(Si+Al)-1.1 และพบอนุภาคของแคลไซต์อยู่ทั่วบริเวณ



ภาพ 59 ผลการทดสอบ SEM ของเพสต์ Ca/(Si+Al)-1.1 ที่ระยะเวลาในการบ่มตัวอย่าง (a) 7 วัน, (b) 28 วัน และ (c) 91 วัน ที่กำลังขยาย 3,500X และผลการทดสอบ EDS ของเพสต์ Ca/(Si+Al)-1.1 (e) เถ้าลอย, (d) พอร์ตแลนด์ไดต์ และ (f) C-S-H gel



ผลการทดสอบ SEM ของเพสต์ Ca/(Si+Al)-0.9 แสดงดังภาพ 60 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน (60(a)) พบอนุภาคของเถ้าลอย, ปอร์ตแลนด์ และพบเอทริงไต์ โดยเอทริงไต์นั้นมีลักษณะเป็นแท่งที่มีการเชื่อมประสานกันคล้ายตาข่าย ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน (ภาพ 60(b)) พบอนุภาคของเถ้าลอย, แคลไซต์ และเอทริงไต์ โดยอนุภาคทั้งหมดเชื่อมประสานเข้าด้วยกัน และพบรอยแตกร้าวขนาดเล็กของเพสต์ ภาพถ่าย SEM ของเพสต์ Ca/(Si+Al)-0.9 ที่ระยะเวลาบ่ม 91 วัน แสดงดังภาพ 60(c) พบอนุภาคของเถ้าลอย และปอร์ตแลนด์ที่ขังไม่ได้ทำปฏิกิริยาหลงเหลืออยู่เพียงเล็กน้อย พบการก่อตัวของ C-S-H gel โดยระบุได้จากผลการทดสอบ EDS (ภาพ 60(f)) แสดงร้อยละอัตราส่วนระหว่าง Ca/Si เท่ากับ 1.25, Al/Si เท่ากับ 0.44 และ Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.88 [47, 48] และพบเอทริงไต์เพิ่มมากขึ้น



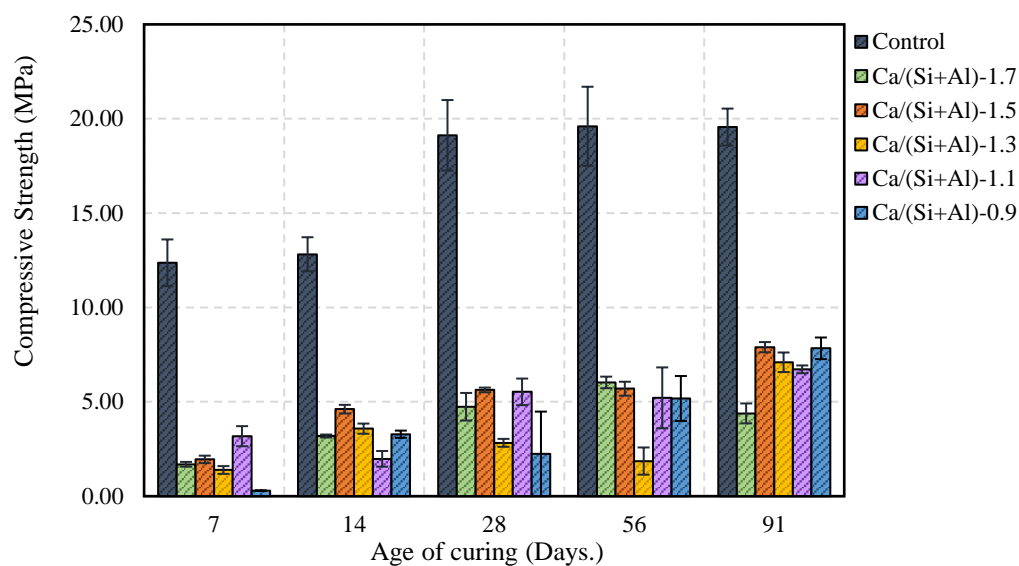
ภาพ 60 ผลการทดสอบ SEM ของเพสต์ Ca/(Si+Al)-0.9 ที่ระยะเวลาในการบ่มตัวอย่าง (a) 7 วัน, (b) 28 วัน และ (c) 91 วัน ที่กำลังขยาย 3,500X และผลการทดสอบ EDS ของเพสต์ Ca/(Si+Al)-0.9 (e) เถ้าลอย, (d) แคลไซต์ และ (f) C-S-H gel

#### 4.2.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ของเพสต์

ผลการทดสอบกำลังอัดของเพสต์แสดงดัง ตาราง 26 เมื่อดูจากภาพ 61 จะพบว่าค่ากำลังอัดของเพสต์นั้นมีรูปแบบที่ไม่แน่นอน โดยจะแบ่งออกเป็น ค่ากำลังอัดที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ อย่างต่อเนื่อง และมีบางส่วนผสมที่กำลังรับแรงอัดของเพสต์นั้นมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น โดยค่ากำลังรับแรงอัดที่น้อยลงนั้น เกิดจากการหดตัวของตัวอย่าง และรอยแตกร้าวที่เกิดการก่อตัวของสารเชื่อมประสาน ส่วนผสมเพสต์ Ca/(Si+Al)-1.7 ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงที่ระยะเวลาบ่ม 91 วัน ซึ่งสอดคล้องกับผล SEM เมื่อดูที่ผลการทดสอบ SEM จะพบว่าเพสต์ Ca/(Si+Al)-1.7 ที่ระยะเวลา 91 วันนั้นมีช่องว่างระหว่างอนุภาค และมีรอยแตกร้าวเกิดขึ้น เพสต์ Ca/(Si+Al)-1.5 ค่ากำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาในการบ่ม เพสต์ Ca/(Si+Al)-1.3 และ Ca/(Si+Al)-0.9 ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงระยะเวลาบ่ม 28 วันค่ากำลังรับแรงอัดได้ลดลง และกลับมาเพิ่มขึ้น ตามระยะเวลาบ่ม สำหรับเพสต์ Ca/(Si+Al)-1.1 มีค่ากำลังรับแรงอัดในช่วงต้นสูง และมีค่าลดลงที่ระยะเวลาบ่ม 14 วันและกลับมาลดลงอีกครั้งที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน หลังจากระยะเวลาบ่ม 28 วันค่ากำลังรับแรงอัดของเพสต์ Ca/(Si+Al)-1.1 กลับมาเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาบ่ม

ตาราง 26 ค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ของเพสต์

Mixes	Compressive Strength (MPa)				
	7 d	14 d	28 d	56 d	91 d
Control	12.37	12.82	19.12	19.60	19.56
Ca/(Si+Al)-1.7	1.69	3.19	4.74	6.03	4.39
Ca/(Si+Al)-1.5	1.95	4.61	5.63	5.70	7.89
Ca/(Si+Al)-1.3	1.39	3.58	2.83	1.86	7.10
Ca/(Si+Al)-1.1	3.18	1.98	5.53	5.21	6.72
Ca/(Si+Al)-0.9	0.29	3.28	2.24	5.18	7.84

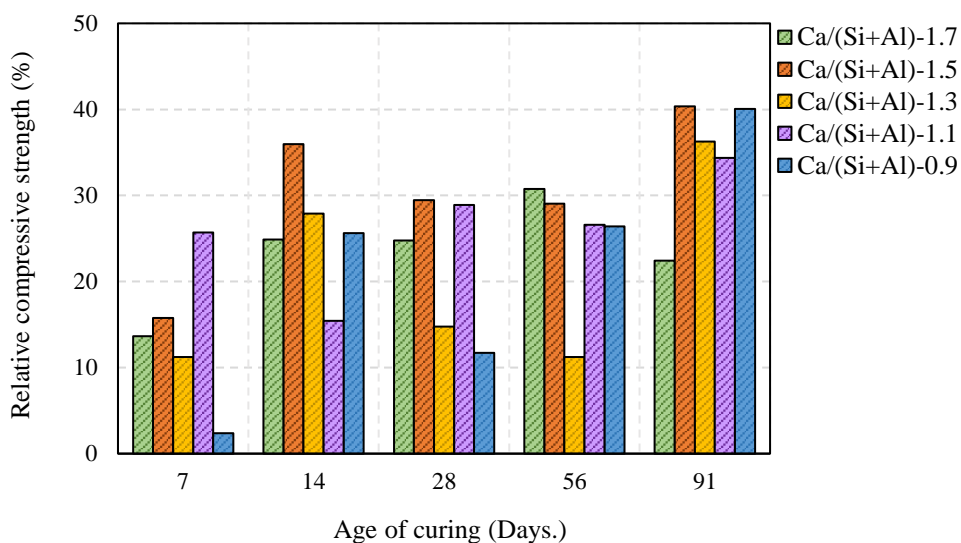


ภาพ 61 ค่ากำลังรับแรงอัดของเพสต์

ร้อยละค่ากำลังอัดของ CCR-FA เพสต์เปรียบเทียบกับ OPC เพสต์ แสดงในตาราง 27 และ ภาพ 62 ร้อยละค่ากำลังอัดของ CCR-FA เพสต์เปรียบเทียบกับ OPC เพสต์นั้นมีรูปแบบที่ไม่แน่นอน ร้อยละค่ากำลังอัดในช่วงต้นนั้นคิดเป็นประมาณ 2-25 % ของ OPC เพสต์ ค่ากำลังอัดของ CCR-FA เพสต์เปรียบเทียบกับ OPC เพสต์ที่ระยะเวลาการบ่ม 91 วันนั้นร้อยละค่ากำลังอัดคิดเป็นประมาณ 22-40 % ของ OPC เพสต์โดยจะเห็นว่าส่วนผสมเพสต์ Ca/(Si+Al)-1.5 เป็นส่วนผสมที่มีกำลังอัดคิดเป็นร้อยละที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนผสม control ของเพสต์ โดยคิดเป็น 40.36 %

ตาราง 27 ร้อยละค่ากำลังของ CCR-FA เพสต์เปรียบเทียบกับ OPC เพสต์

Mixes	Relative compressive strength (%)				
	7 d	14 d	28 d	56 d	91 d
Ca/(Si+Al)-1.7	13.66	24.87	24.78	30.75	22.42
Ca/(Si+Al)-1.5	15.75	35.96	29.44	29.05	40.36
Ca/(Si+Al)-1.3	11.22	27.91	14.78	11.22	36.28
Ca/(Si+Al)-1.1	25.69	15.43	28.91	26.58	34.36
Ca/(Si+Al)-0.9	2.37	25.61	11.72	26.40	40.06



ภาพ 62 ร้อยละค่ากำลังของ CCR-FA เฟสค์เปรียบเทียบกับ OPC เฟสค์

### 4.3 ผลการวิเคราะห์ห่มอร์ตาร์

#### 4.3.1 ผลการทดสอบกำลังอัด (Compressive Strength) ของมอร์ตาร์

อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ซีเมนต์เพียงอย่างเดียว (Control) และมอร์ตาร์ที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยเป็นวัสดุเชื่อมประสาน ที่อัตราส่วน  $\text{CaO}/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$  ที่ 1.7, 1.5, 1.3, 1.1 และ 0.9 แสดงในตารางที่ 28

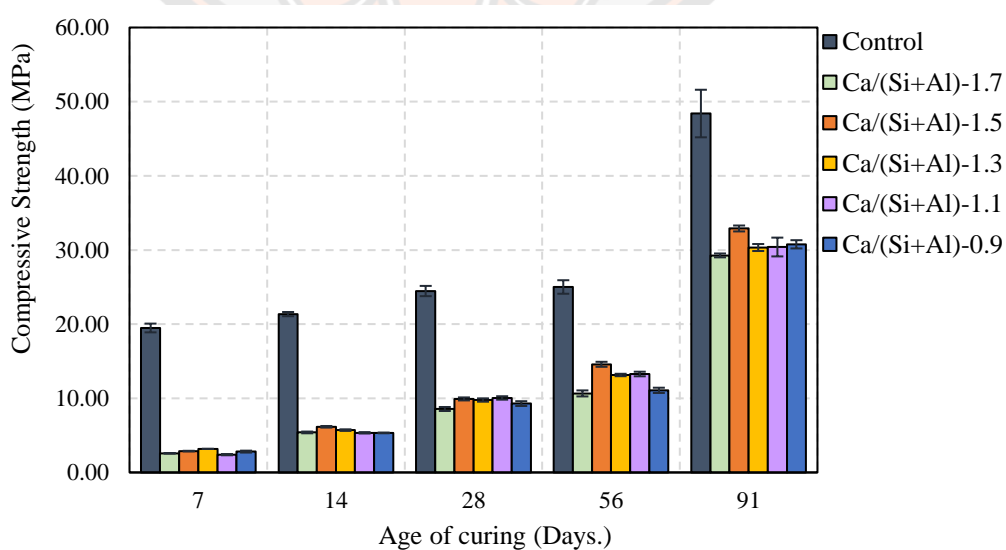
ตาราง 28 ส่วนผสมของมอร์ตาร์

Mix	CCR ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	FA ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Cement ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Sand ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Water ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	SP ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Flow (%)
Control	-	-	500	1375	290	17.50	111
Ca/(Si+Al)-1.7	223.22	276.78	-	1375	290	15.00	110
Ca/(Si+Al)-1.5	203.90	296.10	-	1375	290	11.90	107
Ca/(Si+Al)-1.3	181.95	318.05	-	1375	290	11.25	110
Ca/(Si+Al)-1.1	156.81	343.19	-	1375	290	6.55	109
Ca/(Si+Al)-0.9	127.72	372.28	-	1375	290	8.15	111

ผลการทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์แสดงดังตาราง 29 เมื่อดูจากภาพที่ 63 จะเห็นว่าค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ Ca/(Si+Al)-1.7 ถึง Ca/(Si+Al)-0.9 ในช่วง 7 วันแรกมีค่าต่ำและเพิ่มสูงขึ้น ตามระยะเวลาในการบ่ม ในส่วนของ Mixes OPC ถึงแม้กำลังอัดในช่วงต้นนั้นจะมีค่าสูงกว่าส่วนผสมอื่น ๆ แต่การพัฒนากำลังอัดมีแนวโน้มค่อยๆพัฒนาเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่มเช่นกัน เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง Ca/(Si+Al)-1.7 ถึง Ca/(Si+Al)-0.9 ซึ่งค่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มนั้นสอดคล้องกับผล XRD และ SEM จากผล XRD จะพบว่ามี การก่อตัวของวัสดุเชื่อมประสานเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาบ่ม ซึ่งแสดงในเห็นในผล SEM เช่นกัน เมื่อวัสดุเชื่อมประสานก่อตัวเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ วัสดุเชื่อมประสานนั้นจะไปช่วยอุดช่องว่างระหว่างอนุภาค ทำให้ตัวอย่างมีความแน่นมากขึ้น จึงเป็นผลให้ทำให้ค่ากำลังอัดนั้นมีค่าสูงขึ้น จะเห็นว่า Mixes 2 เป็นอัตราส่วนผสมที่ให้ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์สูงที่สุด ที่ระยะเวลาการบ่ม 91 วัน มีกำลังอัดสูงถึง 32.90 MPa

ตาราง 29 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์

Mixes	Compressive Strength (MPa)				
	7 d	14 d	28 d	56 d	91 d
Control	19.48	21.35	24.46	25.01	48.40
Ca/(Si+Al)-1.7	2.58	5.40	8.56	10.66	29.27
Ca/(Si+Al)-1.5	2.88	6.16	9.92	14.58	32.90
Ca/(Si+Al)-1.3	3.18	5.71	9.77	13.14	30.33
Ca/(Si+Al)-1.1	2.40	5.35	10.05	13.28	30.40
Ca/(Si+Al)-0.9	2.81	5.33	9.29	11.07	30.77

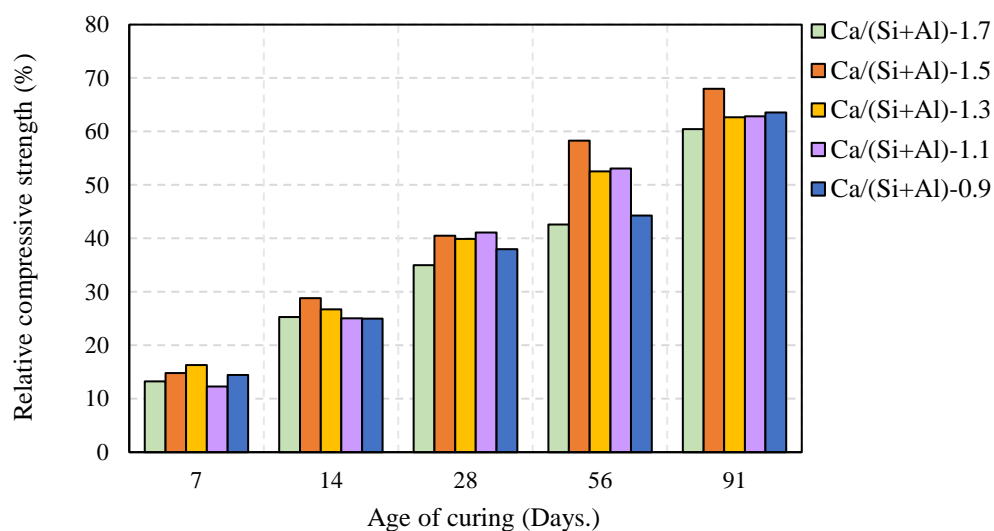


ภาพ 63 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์

ร้อยละค่ากำลังของ CCR-FA มอร์ตาร์เปรียบเทียบกับ OPC มอร์ตาร์ แสดงในตาราง 30 และภาพ 64 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วันนั้นค่ากำลังอัดของ CCR-FA มอร์ตาร์ คิดเป็นประมาณ 12 - 17 % ของ OPC มอร์ตาร์ เมื่อระยะเวลาบ่มตัวอย่างเพิ่มขึ้นเปอร์เซ็นต์ค่ากำลังของ CCR-FA มอร์ตาร์ เปรียบเทียบกับ OPC มอร์ตาร์ เพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยที่ระยะเวลาบ่ม 56 วันนั้นมีบางส่วนผสมที่มีค่ากำลังอัดของ CCR-FA มอร์ตาร์เปรียบเทียบกับ OPC มอร์ตาร์มากถึง 50 % และที่ระยะเวลาบ่ม 91 วันค่ากำลังอัดของ CCR-FA มอร์ตาร์เมื่อเปรียบเทียบกับ OPC มอร์ตาร์ ของทุก ๆ ส่วนผสมนั้นมีค่ามากถึงครึ่งของค่ากำลังอัดของ OPC มอร์ตาร์ คิดเป็นประมาณ 60 - 68 % ของ OPC มอร์ตาร์

ตาราง 30 ร้อยละค่ากำลังของ CCR-FA มอร์ตาร์เปรียบเทียบกับ OPC มอร์ตาร์

Mixes	Relative compressive strength (%)				
	7 d	14 d	28 d	56 d	91 d
Ca/(Si+Al)-1.7	13.25	25.27	34.98	42.62	60.47
Ca/(Si+Al)-1.5	14.78	28.84	40.53	58.31	67.98
Ca/(Si+Al)-1.3	16.31	26.74	39.92	52.55	62.67
Ca/(Si+Al)-1.1	12.32	25.04	41.07	53.08	62.81
Ca/(Si+Al)-0.9	14.44	24.96	37.96	44.27	63.57



ภาพ 64 ร้อยละค่ากำลังของ CCR-FA มอร์ตาร์เปรียบเทียบกับ OPC มอร์ตาร์

#### 4.4 การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยปรับปรุงคุณภาพดินลมหอบ

ผู้วิจัยได้เลือกอัตราส่วนที่ดีที่สุดระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยในการวิจัยนี้คือที่อัตราส่วน  $\text{CaO}/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$  เท่ากับ 1.5 โดยออกแบบการเติมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และเถ้าลอย (FA) ลงไปในการขึ้นรูปตัวอย่างดินแบบแทนที่ ที่ 10%, 15%, 20% และ 25% ดังแสดงไว้ในตาราง 31 โดยใช้หน้าที่ OWC (9.4%) ของดินโดยจะมีระยะเวลาในการบ่มตัวอย่างที่ 7, 14, 28 และ 56 วัน

ตาราง 31 ส่วนผสมสำหรับขึ้นรูปตัวอย่างดิน

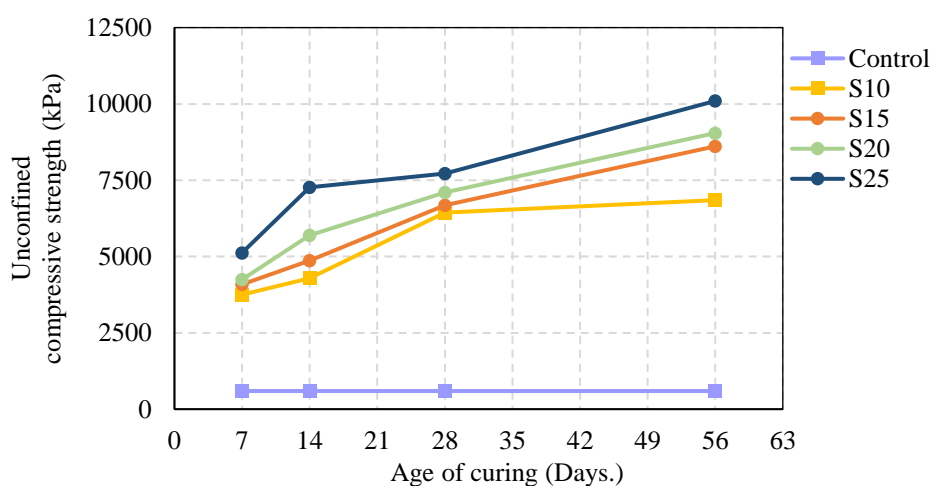
Mix	Loess ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	CCR ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	FA ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Water ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
Control	2160	-	-	203
S10	1944	89	127	203
S15	1836	133	191	203
S20	1728	177	255	203
S25	1620	221	319	203

##### 4.4.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัด (Unconfined compressive strength)

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัด (Unconfined compressive strength) ที่ตัวอย่างถูกบดอัดด้วยวิธีแบบสูงกว่ามาตรฐานแสดงในภาพ 65 จากการทดสอบพบว่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัด ในแต่ละอัตราส่วนวัสดุประสานจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่ม และพบว่าเมื่อมีการแทนที่ดินด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย ที่สัดส่วนมากขึ้น ค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดก็จะเพิ่มขึ้นตาม การแทนที่ดินด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยที่ 10%, 15%, 20% และ 25% ที่ระยะเวลาการบ่มที่ 7 วันนั้นมีค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดเท่ากับ 3,751 kPa, 4,008 kPa, 4,247 kPa และ 5,123 kPa ตามลำดับ โดยค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดที่ระยะเวลาบ่ม 7 วันนั้นของทุกส่วนผสมนั้นมีค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดไม่น้อยกว่า 1,724 kPa ซึ่งผ่านมาตรฐาน ทล.-ม. 204/2556 มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ กรมทางหลวง ประเทศไทย [50] โดยการแทนที่ดินด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยที่ 25 % ที่ระยะเวลาการบ่มที่ 56 วันนั้นมีค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดสูงถึง 10,096.31 kPa เนื่องจากงานอัตราส่วนระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยที่เราได้ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินลมหอบนั้น เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่จะช่วงส่งเสริม และส่งผลให้ค่ากำลังอัดแบบไม่จำกัดนั้นมีค่าที่สูงขึ้น ตามร้อยละการแทนที่ดินด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยที่สูงขึ้น

ตาราง 32 กำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดของดิน

Mixes	Unconfined compressive Strength (kPa)			
	7 d	14 d	28 d	56 d
Control	595	595	595	595
S10	3,751	4,289	6,442	6,849
S15	4,088	4,865	6,680	8,611
S20	4,247	5,693	7,099	9,045
S25	5,123	7,268	7,715	10,096



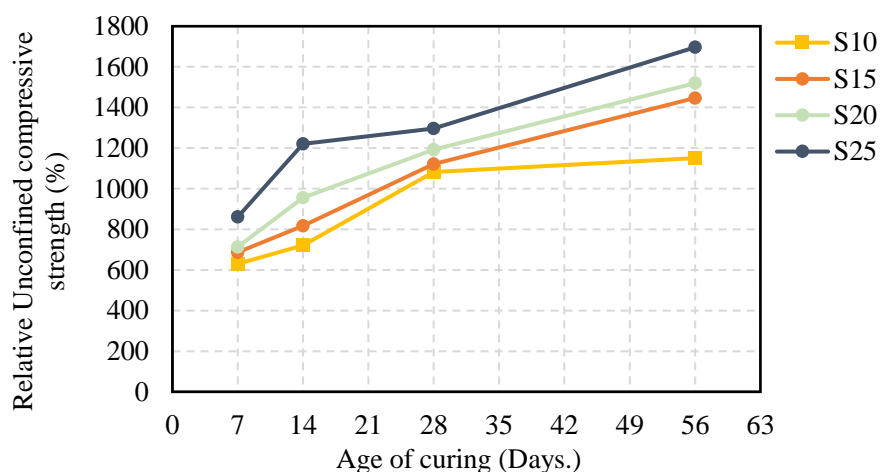
ภาพ 65 กำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดของดิน (Unconfined compressive strength)

ร้อยละค่ากำลังอัดแบบไม่จำกัดของดิน CCR-FA เปรียบเทียบกับดิน Control แสดงในตาราง 33 และภาพ 66 ระยะเวลาบ่ม 7 วันนั้นค่ากำลังอัดแบบไม่จำกัดของดิน CCR-FA คิดเป็นประมาณ 630-1150% ของดิน Control เมื่ออัตราการเติมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และ ถ้ำลอย (FA) เพิ่มมากขึ้น และระยะเวลาบ่มตัวอย่างเพิ่มขึ้นเปอร์เซ็นต์ค่ากำลังอัดแบบไม่จำกัดของดิน CCR-FA เมื่อเทียบกับดิน Control เพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยที่ระยะเวลาบ่ม 56 วันนั้นค่ากำลังอัดแบบไม่จำกัดของดิน CCR-FA คิดเป็นประมาณ 860-1696 % ของดิน Control



ตาราง 33 ร้อยละค่ากำลังอัดแบบไม่จำกัดของดิน CCR-FA เปรียบเทียบกับดิน Control

Mixes	Unconfined compressive Strength (kPa)			
	7 d	14 d	28 d	56 d
S10	630.11	686.78	713.48	860.72
S15	720.59	817.25	956.46	1221.06
S20	1082.22	1122.21	1192.57	1296.11
S25	1150.58	1446.70	1519.66	1696.21

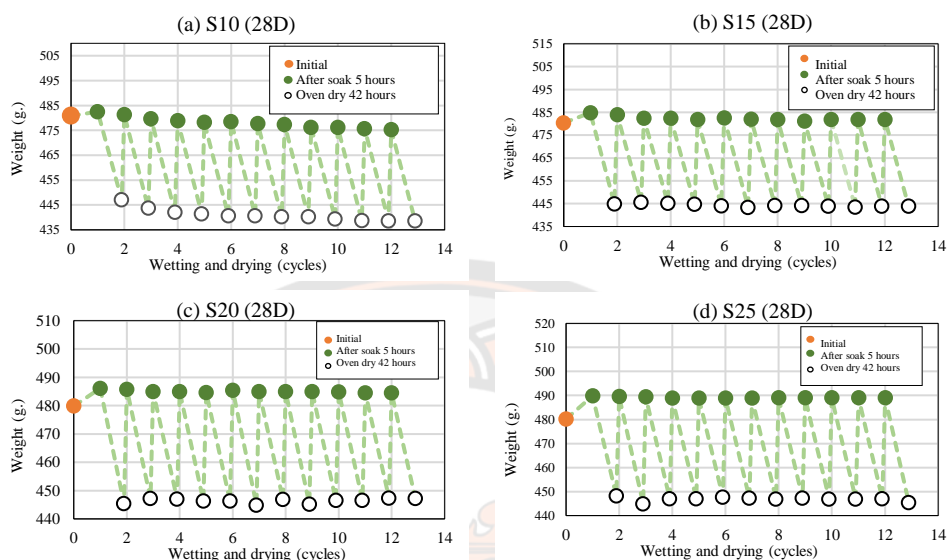


ภาพ 66 ร้อยละค่ากำลังอัดแบบไม่จำกัดของดิน CCR-FA เปรียบเทียบกับดิน Control

#### 4.4.2 ผลการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักระหว่างการทดสอบเปียกสลับแห้ง

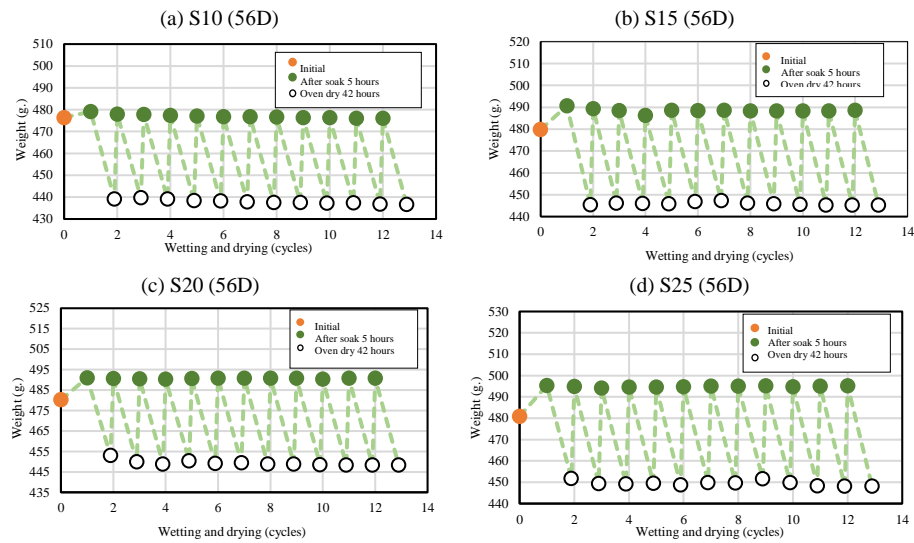
การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างดินที่ผ่านสภาวะเปียกสลับแห้ง ที่เติมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และ เถ้าลอย (FA) ลงไปในการขึ้นรูปตัวอย่างดินแบบแทนที่ ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน และ 56 วัน แสดงดังภาพ 67 และ 68 ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างดินที่ผ่านสภาวะเปียกสลับแห้ง ที่เติมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และ เถ้าลอย (FA) ลงไปในการขึ้นรูปตัวอย่างดินแบบแทนที่ 10% (ภาพ 67(a)), 15% (ภาพ 67(b)), 20% (ภาพ 67(c)) และ 25% (ภาพ 67(d)) ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน มีการสูญเสียน้ำหนักหลังผ่านสภาวะเปียกสลับแห้ง 12 รอบ เท่ากับ 8.80 กรัม, 7.60 กรัม, 6.98 กรัม และ 6.90 กรัม ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเติมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และ เถ้าลอย (FA) ลงไปในการขึ้นรูปตัวอย่างดินแบบแทนที่ ในสัดส่วนที่มากขึ้นนั้น ทำให้ตัวอย่างดินมีการสูญเสียน้ำหนักลดน้อยลง เนื่องจากตัวอย่างดินปรับปรุงด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และ เถ้าลอย (FA) นั้นทำให้ดินมีการเชื่อมประสานกันจากปฏิกิริยา

ปอซโซลานิกได้ตีมากขึ้นตามเปอร์เซ็นต์ในการเติมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และ เถ้าลอย (FA) ลงไปในการขึ้นรูปตัวอย่างดินแบบแทนที่



ภาพ 67 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างดินที่เติมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และ เถ้าลอย (FA) ลงไปในการขึ้นรูปตัวอย่างดินแบบแทนที่ (a) 10%, (b) 15%, (c) 20% และ (d) 25% ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

สำหรับตัวอย่างดินที่ผ่านสภาวะเปียกสลับแห้ง ที่เติมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และ เถ้าลอย (FA) ลงไปในการขึ้นรูปตัวอย่างดินแบบแทนที่ 10% (ภาพ 68(a)), 15% (ภาพ 68(b)), 20% (ภาพ 68(c)) และ 25% (ภาพ 68(d)) ที่ระยะเวลาบ่ม 56 วัน มีการสูญเสียน้ำหนักหลังผ่านสภาวะเปียกสลับแห้ง 12 รอบ เท่ากับ 8.33 กรัม, 7.22 กรัม, 6.63 กรัม และ 6.54 กรัม ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับ ตัวอย่างดินที่ผ่านสภาวะเปียกสลับแห้ง ที่เติมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และ เถ้าลอย (FA) ลงไปในการขึ้นรูปตัวอย่างดินแบบแทนที่ ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน จะพบว่าตัวอย่างดินที่ระยะเวลาบ่ม 56 วัน นั้นมีการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่า ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน และเมื่อเติมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และ เถ้าลอย (FA) ลงไปในการขึ้นรูปตัวอย่างดินแบบแทนที่ ที่สัดส่วนมากขึ้น ทำให้การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างดินลดลง นั้นแสดงให้เห็นว่าเมื่อระยะเวลาในการบ่มตัวอย่างเพิ่มขึ้นนั้น ทำให้ตัวอย่างดินเติมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และ เถ้าลอย (FA) ได้มีระยะเวลาการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกมากขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกนั้นจะเกิดขึ้นได้ช้า และเมื่อเติมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และ เถ้าลอย (FA) ลงไปในการขึ้นรูปตัวอย่างดินแบบแทนที่ ที่เปอร์เซ็นต์มากขึ้น นั้นทำให้เปอร์เซ็นต์ในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกมากขึ้น และทำให้ดินมีการเชื่อมประสานกันได้ดีมากขึ้น



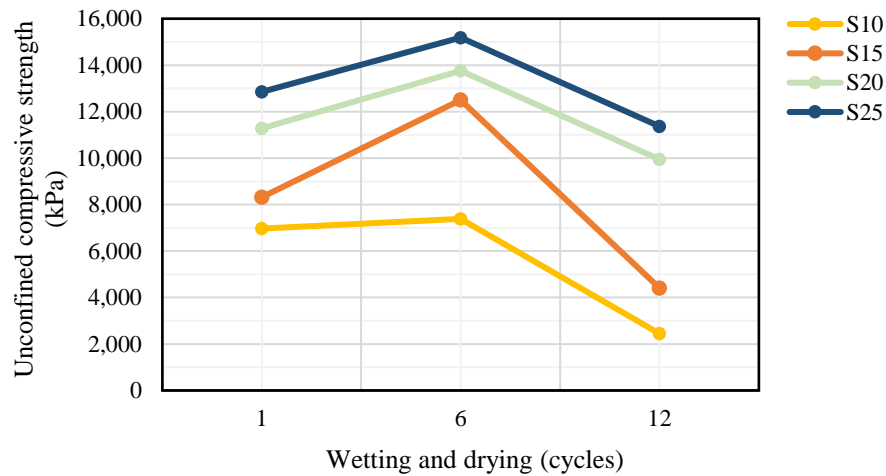
ภาพ 68 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างดินที่เติมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และ เถ้าลอย (FA) ลงไปในการขึ้นรูปตัวอย่างดินแบบแทนที่ (a) 10%, (b) 15%, (c) 20% และ (d) 25% ที่ระยะเวลาบ่ม 56 วัน

#### 4.4.3 ผลการทดสอบดินโดยวิธีเปียกสลับแห้งต่อกราฟความเค้นและความเครียด

ค่าผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดที่ผ่านการทดสอบโดยวิธีเปียกสลับแห้งแสดงดังตาราง 34 จากภาพ 69 แสดงพฤติกรรมความเค้นและความเครียดของตัวอย่างดินที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และเถ้าลอย (FA) ที่ 10%, 15%, 20% และ 25% ตามลำดับ ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน และ 56 วัน ที่รอบการทดสอบเปียกสลับแห้ง 1, 6 และ 12 รอบ จะเห็นว่าค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัด เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนร้อยละการแทนที่ดินด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และเถ้าลอย (FA) ที่เพิ่มขึ้น และเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบการทดสอบเปียกสลับแห้งโดยมีค่าสูงสุดที่จำนวน 6 รอบ หลังจากนั้นจะมีค่าลดลง

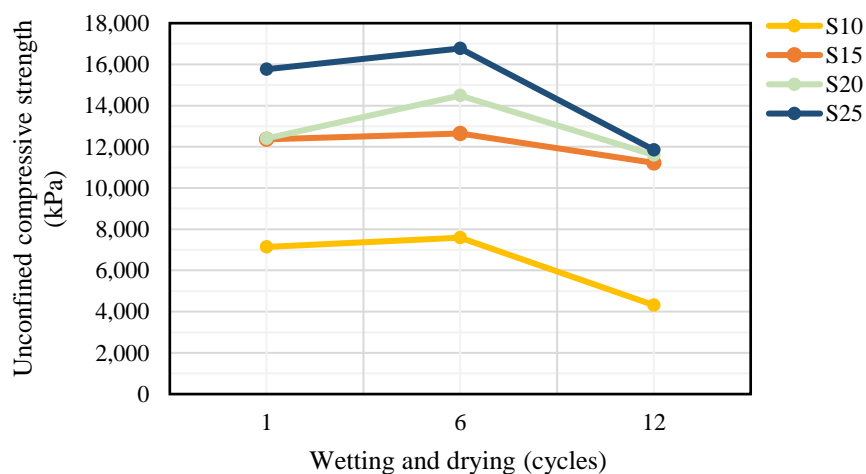
ตาราง 34 กำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดที่ผ่านการทดสอบโดยวิธีเปียกสลับแห้ง

Age of curing (Days.)	Cycles	Unconfined compressive strength (kPa)			
		S10	S15	S20	S25
28	1	6,962	8,324	11,281	12,845
	6	7,386	12,501	13,760	15,186
	12	2,448	4,412	9,949	11,368
56	1	7,137	12,365	12,411	15,766
	6	7,589	12,644	14,487	16,772
	12	4,315	11,219	11,602	11,850



ภาพ 69 กำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดของดินที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน  
ทดสอบในสภาวะเปียกสลับแห้ง

แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของกำลังของดินที่อายุการบ่มตัวอย่างดินที่ 28 วัน (ภาพ 69) และ 56 วัน (ภาพ 70) เกิดขึ้นเนื่องจาก CCR-FA ยังทำปฏิกิริยากันไม่หมด เมื่อตัวอย่างดินผ่านรอบอบแห้งน้ำ ในตัวอย่างถูกไล่ออกด้วยความร้อน และเมื่อผ่านการแช่น้ำ น้ำที่ซึมเข้าไปในตัวอย่างจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับ CCR-FA ที่เหลือทำให้ตัวอย่างดินมีความแน่นขึ้นและมีกำลังมากขึ้น แต่เมื่อตัวอย่างผ่านการทดสอบเปียกสลับแห้งมากกว่า 6 รอบแล้วนั้นค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดมีค่าลดลงเนื่องจากการทดสอบเปียกสลับแห้งเป็นจำนวนรอบมากขึ้นพันธะที่เชื่อมประสานระหว่างเม็ดดินเริ่มถูกทำลาย ตัวอย่างมีความพรุนมากขึ้นจึงส่งผลให้ค่ากำลังของตัวอย่างดินนั้นมีค่าลดลง



ภาพ 70 กำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดของดินที่ระยะเวลาบ่ม 56 วัน  
ทดสอบในสภาวะเปียกสลับแห้ง

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

1. วัสดุกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) มีองค์ประกอบหลักเป็น ปอร์ตแลนด์ไตต์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) และ แคลไซต์ ( $\text{CaCO}_3$ ) และมีโครงสร้างทางจุลภาคลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน เป็นกลุ่มก้อนและมีพื้นผิวขรุขระ ในส่วนของวัสดุเชื่อมประสานแก้วลอย (FA) นั้นมีควอตซ์ ( $\text{SiO}_2$ ), ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $\text{C}_3\text{A}$ ), แอนไฮไดรต์ ( $\text{CaSO}_4$ ) และ เฮมาไทต์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) เป็นองค์ประกอบหลัก มีส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) ร้อยละ 57 และมีโครงสร้างทางจุลภาคลักษณะเป็นทรงกลม
2. การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และ แก้วลอย (FA) ส่งผลให้เกิดสารเชื่อมประสาน
3. อัตราส่วนผสมระหว่าง กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และ แก้วลอย (FA) ที่ให้ค่ากำลังอัดของเพสต์ และมอร์ตาร์ที่มากที่สุด คือ ที่อัตราส่วนผสมที่มีอัตราส่วนของ  $\text{CaO}/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$  เท่ากับ 1.5
4. การปรับปรุงคุณภาพดินลมหอบนั้นส่งผลให้กำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัด เพิ่มขึ้นตามร้อยละของปริมาณวัสดุเชื่อมประสาน
5. วัสดุเชื่อมประสานกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และแก้วลอยที่มีสัดส่วน  $\text{CaO}/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$  เท่ากับ 1.5 สามารถลดการสูญเสียมวลและกำลังของดินเนื่องจากสภาวะเปียกสลับแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## บรรณานุกรม

1. Punrattanasin, P. and W. Gasaluck, *The bearing capacity of cement-treated loess: A case history of Khon Kaen Loess, Thailand*. 2008.
2. วีระศักดิ์ อุดมโชค, ดินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่มีปัญหาทางวิศวกรรม. *Kasetsart Engineering Journal (Thailand)*, 1992: p. 67-77.
3. Gu, K. and B. Chen, *Loess stabilization using cement, waste phosphogypsum, fly ash and quicklime for self-compacting rammed earth construction*. *Construction and Building Materials*, 2020. **231**: p. 117195.
4. Dueramae, S., et al., *Investigation of compressive strength and microstructures of activated cement free binder from fly ash-calcium carbide residue mixture*. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019. **8**(5): p. 4757-4765.
5. Courland, R., *Concrete planet: the strange and fascinating story of the world's most common man-made material*. 2011: Prometheus Books.
6. Bogue, R., *The Chemistry of Portland Cement*, Reinhold Pub. Corp., New York, 1955. **355**.
7. 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.
8. Tanalapsakul, A., *Document from M Thai industrial company limited*. M Thai Industrial Co., Ltd., Samutsakorn, Thailand, 1998.
9. Makaratat, N., et al., *Effects of binder and CaCl<sub>2</sub> contents on the strength of calcium carbide residue-fly ash concrete*. *Cement and Concrete Composites*, 2011. **33**(3): p. 436-443.
10. Liu, Y., et al., *Stabilization of expansive soil using cementing material from rice husk ash and calcium carbide residue*. *Construction and Building Materials*, 2019. **221**: p. 1-11.
11. Raymond E. Davis, R.W.C., J.W. Kelly, Harmer E. Davis, *Properties Of Cements And Concretes Containing Fly Ash*. *Journal Proceedings*, 1937. **33**(5): p. 577-612.
12. Bureau of Reclamtion. *Hungry Horse Dam*. 2022; Available from:

<https://www.usbr.gov/pn/hungryhorse/index.html>.

13. ประจิด จีระปภา. การศึกษาเพื่อใช้ประโยชน์ของเถ้าลอยจากการเผาถ่านหินแม่เมาะในโรงไฟฟ้า, การประชุมวิชาการเรื่อง เทคโนโลยีเหมาะสมเพื่อการพัฒนาชนบท, สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, หน้า 195-205. 2523.
14. Tarasov, A., et al., *Heat evolution due to cement hydration in foamed concrete*. Magazine of concrete research, 2010. **62**(12): p. 895-906.
15. standard, A., *Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete*. 1998.
16. Kaasik, M., et al., *SPHERICAL FLY ASH PARTICLES FROM OIL SHALE FIRED POWER PLANTS IN ATMOSPHERIC PRECIPITATIONS. POSSIBILITIES OF QUANTITATIVE TRACING*. Oil Shale, 2005. **22**(4).
17. Bachus, R., et al., *Characterization and engineering properties of dry and ponded class-F fly ash*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019. **145**(3): p. 04019003.
18. Dunstan, E. *How does pozzolanic reaction make concrete green*. in *2011 World of Coal Ash Conference, May*. 2011.
19. Li, Y., et al., *Loess genesis and worldwide distribution*. Earth-Science Reviews, 2020. **201**: p. 102947.
20. Neuendorf, K.K., *Glossary of geology*. 2005: Springer Science & Business Media.
21. Witmer, S. *Palouse Loess*. 2010; Available from: <https://epod.usra.edu/blog/2010/08/palouse-loess.html>.
22. Niemann, T. *Loess Plateau*. Available from: <https://www.britannica.com/place/Loess-Plateau>.
23. Phien-Wej, N., T. Pientong, and A. Balasubramaniam, *Collapse and strength characteristics of loess in Thailand*. Engineering Geology, 1992. **32**(1-2): p. 59-72.
24. Clevenger, W.A., *Experiences with loess as foundation material*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1956. **82**(3): p. 1-26.
25. Fan, J., D. Wang, and D. Qian, *Soil-cement mixture properties and design considerations for reinforced excavation*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018. **10**(4): p. 791-797.
26. Agri Plant Solution. *Cement Stabilisation Of A Building Formation*. Available from: <https://www.agriplantsolutions.com/services/cement-stabilisation-of-a->

[building-formation/18.](#)

27. Jenkins, R., *X-ray fluorescence spectrometry*. Handbook of Analytical Techniques, 2008.
28. *Thomson scattering*. Available from:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Thomson\\_scattering](https://en.wikipedia.org/wiki/Thomson_scattering).
29. *Compton scattering*. Available from:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Compton\\_scattering](https://en.wikipedia.org/wiki/Compton_scattering).
30. Als-Nielsen, J. and D. McMorrow, *Elements of modern X-ray physics*. 2011: John Wiley & Sons.
31. Goldstein, J.I., et al., *Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis*. 2017: Springer.
32. NANOTEC. *Thermogravimetric Analysis (TGA)*. Available from:  
<https://www.nanotec.or.th/th/%e0%b8%87%e0%b8%b2%e0%b8%99%e0%b8%9a%e0%b8%a3%e0%b8%b4%e0%b8%81%e0%b8%b2%e0%b8%a3/%e0%b8%ab%e0%b9%89%e0%b8%ad%e0%b8%87%e0%b8%9b%e0%b8%8f%e0%b8%b4%e0%b8%9a%e0%b8%b1%e0%b8%95%e0%b8%b4%e0%b8%81%e0%b8%b2%e0%b8%a3%e0%b8%a7%e0%b8%b4%e0%b9%80%e0%b8%84%e0%b8%a3%e0%b8%b2%e0%b8%b0%e0%b8%ab/thermogravimetric-analysis-tga>.
33. วิมลพร เอี่ยมอมพันซ์, คู่มือการปฏิบัติงานการใช้เครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงทางน้ำหนักและความร้อนของวัสดุต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ *Simultaneous Thermogravimetry Analyzer*. คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
34. 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.
35. 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.
36. Hanjitsuwan, S., et al., *Strength development and durability of alkali-activated fly ash mortar with calcium carbide residue as additive*. *Construction and Building Materials*, 2018. **162**: p. 714-723.
37. Chindaprasirt, P., P. Jitsangiam, and S. Horpibulsuk, *Performance and evaluation*



- of calcium carbide residue stabilized lateritic soil for construction materials. Case Studies in Construction Materials*, 2020. **13**: p. e00389.
38. ASTM, C., *Standard test method for amount of water required for normal consistency of hydraulic cement paste*. 2011.
  39. ASTM, C., *American Society for Testing and Materials, ASTM C230 / C230M-98e2, Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement*. 1999.
  40. Testing, A.S.f. and M.C.C.-o. Cement, *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*. 2013: ASTM International.
  41. ASTM C230 / C230M-98e2, *Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement*. 1999.
  42. ASTM, M., *Standard test methods for wetting and drying compacted soil-cement mixtures*. 2003.
  43. Tishchenko, I.Y., O. Ilchenko, and P. Kuzema, *TGA-DSC-MS ANALYSIS OF SILICON CARBIDE AND OF ITS CARBON-SILICA PRECURSOR*. Chemistry, Physics & Technology of Surface/Khimiya, Fizyka ta Tekhnologiya Poverhni, 2015. **6**(2).
  44. Chindaprasirt, P. and U. Rattanasak, *Characterization of the high-calcium fly ash geopolymer mortar with hot-weather curing systems for sustainable application*. Advanced Powder Technology, 2017. **28**(9): p. 2317-2324.
  45. Rodrigues, A.M., et al., *Development of Eco-Friendly Mortars Produced with Kaolin Processing Waste: Durability Behavior Viewpoint*. Sustainability, 2021. **13**(20): p. 11395.
  46. Tishmack, J., J. Olek, and S. Diamond, *Characterization of high-calcium fly ashes and their potential influence on ettringite formation in cementitious systems*. Cement, Concrete and Aggregates, 1999. **21**(1): p. 82-92.
  47. Garcia-Lodeiro, I., et al., *Compatibility studies between NASH and CASH gels. Study in the ternary diagram Na<sub>2</sub>O–CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O*. Cement and Concrete Research, 2011. **41**(9): p. 923-931.
  48. Pardal, X., I. Pochard, and A. Nonat, *Experimental study of Si–Al substitution in calcium-silicate-hydrate (CSH) prepared under equilibrium conditions*. Cement

- and Concrete Research, 2009. **39**(8): p. 637-643.
49. Dung, N.T., T.-P. Chang, and C.-T. Chen, *Engineering and sulfate resistance properties of slag-CFBC fly ash paste and mortar*. Construction and Building Materials, 2014. **63**: p. 40-48.
50. มาตรฐานที่ ทล.-ม. 204/2556, มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ (*Soil Cement Base*), สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ, กรมทางหลวง, กระทรวงคมนาคม.

