

การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ด้วยปูนซีเมนต์และ  
เถ้าปาล์มน้ำมัน

IMPROVEMENT OF BANGKOK SOFT CLAY WITH CEMENT AND  
PALM OIL FUEL ASH



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2562

KMITL-2019-EN-M-093-066

การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ด้วยปูนซีเมนต์และ  
เถ้าปาล์มน้ำมัน

IMPROVEMENT OF BANGKOK SOFT CLAY WITH CEMENT AND  
PALM OIL FUEL ASH



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2562

KMITL-2019-EN-M-xxx-xxx

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IMPROVEMENT OF BANGKOK SOFT CLAY WITH CEMENT AND  
PALM OIL FUEL ASH



Pusakorn Yooyen

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN CIVIL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2019

KMITL-2019-EN-M-xxx-xxx

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2019

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ด้วยปูนซีเมนต์และ เถ้าปาล์มน้ำมัน
นักศึกษา	นายภูสกร อยู่เย็น
รหัสประจำตัวนักศึกษา	57601369
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. ธนาตล คงสมบูรณ์

### บทคัดย่อ

การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯและปริมาตร ให้สามารถรับกำลังรับแรงอัด  
ได้มากขึ้น ในอดีตมีการปรับปรุงโดยการผสมปูนซีเมนต์กับดินเหนียว แม้ว่าปูนซีเมนต์เป็นวัสดุที่หาได้  
ง่ายในท้องตลาด แต่มีราคาที่สูง งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อหาวัสดุที่สามารถทดแทนปูนซีเมนต์ใน  
การปรับปรุงดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์โดยใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน (Palm oil fuel  
ash) เพื่อมุ่งเน้นศึกษาการพัฒนา กำลังรับแรงอัดแกนเดียวและศึกษาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินเหนียว  
ที่ผสมกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และเถ้าปาล์มน้ำมัน โดยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์ม  
น้ำมัน ร้อยละ 0, 15, 25, 35, 45 และบ่มแบบไม่แช่น้ำที่อายุบ่ม 1, 3, 7, 14, 28 วัน พบว่าอัตราส่วน  
การแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันที่ร้อยละ 25 มีแนวโน้มการพัฒนา กำลังรับแรงอัดแกนเดียว  
ดีที่สุด คือ 17.76 ksc ที่อายุการบ่ม 28 วัน และทดสอบความชื้นน้ำของดินที่ผสมปูนซีเมนต์และ  
เถ้าปาล์มน้ำมัน ที่ร้อยละ 0, 15, 25, 35, 45 ที่อายุการบ่ม 28 วัน รวมถึงศึกษาการหาปริมาณสาร  
ผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของดินเหนียวด้วยการวิเคราะห์แบบ XRD (X-ray  
diffraction) พบว่าสามารถทำนายปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น และการพัฒนา กำลังรับแรงอัดแกน  
เดียวอีกประการหนึ่ง

<b>Title</b>	Improvement of Bangkok Soft Clay with Cement And Palm Oil Fuel Ash
<b>Student</b>	Mr. Pusakorn Yooyen
<b>Student ID.</b>	57601369
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Civil Engineering
<b>Year</b>	2019
<b>Thesis Advisor</b>	Asst. Prof.Dr. Thanadol Kongsomboon

## ABSTRACT

This paper presents a soil improvement of bangkok soft clay and perimeter develop to increased the compressive strength. In the past, it was improved by mixing cement and clay. because cement is easily available in the market. But the price is high. This research aims to find materials that can replace cement. By replacing the cement with palm oil fuel ash to focus on the development unconfined compressive strength ,Modulus of elasticity of clay mixed with cement type 1 and palm oil fuel ash replacing cement with some palm oil fuel ash 0%, 15%, 25%, 35%, 45% and curing at 1, 3, 7, 14, 28 days.The result shown as 25% has develop of the unconfined compressive strength best. Measure indicating the permeability test of the soil with cement replace palm oil fuel ash 0%, 15%, 25%, 35%, 45% curing at 28 days and reaction product from cement hydration in soil cement was analysis by XRD (X-ray Diffraction) relationship of those results beneficial to explain that the how to strength development in soil cements and further strength prediction was applied.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่อาจสำเร็จได้ หากไม่ได้รับความช่วยเหลือและร่วมมือจากหลายๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลแรกที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จเสร็จสิ้นลงได้ก็คือ ผศ.ดร.ธนาตล คงสมบูรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความเอาใจใส่ แนะนำ และให้ความช่วยเหลือเสมอมา อีกทั้ง นายมนตรี บุปผาชาติ, นายสมบัติ เนตรสว่าง และนายธีรเดช คำวิไล เจ้าหน้าที่วิจัยประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธาที่ให้คำปรึกษาและอำนวยความสะดวกตลอดมา บริษัท ไฮบริด เอ็นเนอร์จี จำกัด และบริษัท สหโรจน์เท็กไทล์ 1991 จำกัด ที่สนับสนุนวัสดุดิบ(เก้าอี้ปาล์ม น้ำมัน) ซึ่งต้องขอขอบพระคุณอย่างยิ่ง

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา ครูบา อาจารย์ อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณท่านไว้ ณ โอกาสนี้

ภูสกร อยู่เย็น

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูปภาพ.....	VIII
<b>บทที่ 1 บทนำ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 วิธีการศึกษา.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....	<b>4</b>
2.1 ขอบเขตพื้นที่ดินอ่อน.....	4
2.2 ดินเหนียว.....	6
2.2.1 ดินเหนียวอ่อน (Soft Clayey Soil).....	7
2.2.2 โครงสร้างของแร่ดินเหนียว (Clay Mineral).....	12
2.3 หลักเกณฑ์พิจารณาคุณสมบัติความเป็นดินอ่อน.....	15
2.3.1 คุณสมบัติทั่วไปของดินเหนียวอ่อน.....	15
2.3.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties).....	16
2.3.1.2 คุณสมบัติทางวิศวกรรม (Engineering Properties).....	19
2.3.2 หลักเกณฑ์ทั่วไปที่ใช้ชี้วัดความเป็นดินอ่อน.....	19
2.4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	20
2.5 วัสดุปอซโซลาน.....	21
2.5.1 ชนิดของวัสดุปอซโซลาน.....	22
2.5.2 คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของสารปอซโซลาน.....	22
2.5.2.1 เถ้าลอย (Fly Ash หรือ Pulverized Fuel Ash).....	25
2.5.2.2 ซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume).....	27
2.5.2.3 เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash).....	29
2.5.2.4 เถ้าภูเขาไฟ (Volcanic Ash).....	29

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.2.5 เถ้าขยะ (Waste Ash).....	29
2.5.2.6 เถ้าชานอ้อย (Bagasse Ash).....	30
2.5.2.7 เถ้าปาล์มน้ำมัน (Palm Oil Fuel Ash).....	31
2.6 ดินซีเมนต์ (Soil Cement) .....	38
2.6.1 โครงสร้างของดินซีเมนต์.....	39
2.6.1.1 สถานะขณะบดอัดอนุภาค.....	40
2.6.1.2 สถานะภายใต้การบ่มระยะสั้น.....	40
2.6.1.3 สถานะภายใต้การบ่มระยะยาว.....	40
2.6.2 การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์.....	41
2.6.2.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction).....	41
2.6.2.2 การแลกเปลี่ยนอนุมูลบวก (Cat-ion Exchange).....	41
2.6.2.3 การเกิดคาร์บอเนต (Carbonation).....	41
2.6.2.4 ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolan Reaction).....	41
2.6.3 การเชื่อมประสาน (Cementation).....	41
2.6.4 องค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของดินซีเมนต์.....	42
2.6.4.1 คุณสมบัติของดินซีเมนต์.....	42
2.6.4.2 ปริมาณปูนซีเมนต์.....	43
2.6.4.3 ปริมาณน้ำในการผสม.....	45
2.6.4.4 ระยะเวลาในการผสม.....	46
2.6.4.5 การบ่มดินซีเมนต์.....	46
2.6.5 การนำดินซีเมนต์ไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ.....	47
2.6.5.1 เสาค้ำดินซีเมนต์.....	47
2.6.5.2 งานดินซีเมนต์สำหรับงานทาง.....	47
2.6.5.3 การประยุกต์ใช้งานดินซีเมนต์สำหรับสร้างบล็อกดิน.....	48
2.6.6 ข้อกำหนดในการออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์.....	49
2.7 Unconfined Compressive Strength Test.....	50
2.8 Permeability Test.....	51
2.9 X-ray Diffractomete (XRD).....	51

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 3 วิธีการศึกษา</b> .....	<b>54</b>
3.1 บทนำ .....	54
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยและทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ.....	54
3.3 วัสดุ.....	55
3.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	61
3.4.1 การเก็บตัวอย่างวัสดุและทดสอบคุณสมบัติของดิน.....	62
3.4.2 การผสมตัวอย่างดินเหนียวอ่อนกับสารเชื่อมประสาน.....	62
3.4.3 การปมตัวอย่าง.....	64
3.4.4 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินผสมสารเชื่อมประสาน.....	65
3.4.5 การทดสอบค่าการซึมน้ำของดินปรับปรุงคุณภาพ.....	66
3.4.6 การศึกษากลไกปฏิกิริยาเคมีและเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค.....	67
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง</b> .....	<b>68</b>
4.1 บทนำ.....	68
4.2 Unconfined Compressive Strength Test (Stress-Stain Curve).....	68
4.3 ผลการศึกษากำลังอัดแบบไม่จำกัดของดินซีเมนต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน.....	75
4.4 ค่าโมดูลัส (Modulus Of Elasticity , $E_{50}$ ).....	80
4.5 การทดสอบค่าการซึมน้ำของดินปรับปรุงซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน.....	83
4.6 อิทธิพลของปริมาณความชื้นที่มีต่อกำลังอัดดินซีเมนต์.....	83
4.7 การพิจารณาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม.....	85
4.8 รูปแบบการวิบัติตัวอย่าง.....	86
4.9 การวิเคราะห์สารผลิตภัณฑ์อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมีของดินซีเมนต์.....	88
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิเคราะห์และข้อเสนอแนะ</b> .....	<b>94</b>
5.1 สรุปผลการวิเคราะห์.....	94
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	95
<b>บรรณานุกรม</b> .....	<b>96</b>
<b>ประวัติผู้เขียน</b> .....	<b>99</b>

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติทั่วไปของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ.....	11
2.2 การหดตัวของดิน.....	17
2.3 ระดับความเป็นพลาสติกของดิน.....	18
2.4 ค่าพิกัดพลาสติก พิกัดของเหลว และแอมป์ตี้ของแร่ดินเหนียว.....	18
2.5 คุณสมบัติทั่วไปของชั้นดินเหนียวอ่อน.....	19
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง SPT-N ค่ากำลังรับแรงเฉือนในดินเหนียวอ่อน.....	20
2.7 สูตรองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติของปูนซีเมนต์.....	21
2.8 องค์ประกอบทางเคมีในเก้าอี้กันเตาเปรียบเทียบคุณภาพ F และ C .....	24
2.9 ข้อกำหนดทางเคมีของเก้าอี้ลอย.....	27
2.10 ตารางร้อยละส่วนผสมโดยน้ำหนักของซิลิกาฟูม.....	28
2.11 ตารางร้อยละส่วนผสมโดยน้ำหนักของเก้าอี้ปาล์มน้ำมัน.....	33
2.12 ตารางแสดงความละเอียดของเก้าอี้ปาล์มน้ำมัน.....	34
2.13 ตารางแสดง W/B ของเก้าอี้ปาล์มน้ำมัน ตามระยะเวลาการก่อตัว.....	34
2.14 ตารางแสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนผสมทางเคมีของเก้าอี้ปาล์มน้ำมัน.....	37
2.15 ตารางแสดงชนิดของ Cement-Treated Soil.....	38
2.16 ข้อกำหนดของการออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์.....	49
2.17 ข้อกำหนดในการออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์ของกรมทางหลวง.....	49
2.18 มาตรฐานวัสดุงานทาง.....	50
3.1 รายการการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวิศวกรรมของวัสดุ.....	54
3.2 คุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวอ่อนที่ทดสอบ.....	55
3.3 องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวที่ทดสอบ.....	56
3.4 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1.....	57
3.5 องค์ประกอบทางเคมีของเก้าอี้ปาล์มน้ำมัน.....	60
3.6 ตัวแปรและจำนวนตัวอย่างในการทดสอบ UCS .....	63

# สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1	แผนที่ความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ.....5
2.2	ขอบเขตของพื้นที่ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (รศ.ดร.วรากร ไม้เรียง, 2553).....6
2.3	รูปตัดสามมิติบริเวณที่ลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง.....7
2.4	รูปตัดตามแนวเหนือ-ใต้ ลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง.....7
2.5	โครงสร้างชั้นดินโดยทั่วไปของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (วสท., 2547).....9
2.6	แสดงลักษณะชั้นดินทั่วไปของกรุงเทพฯ ถึงระดับความลึกประมาณ 70 (ม.).....10
2.7	หน่วยพื้นฐานของแร่ดินเหนียว.....13
2.8	แผ่นซิลิกา (Silica Sheet) และแผ่นอ็อกตาไฮดรอล (Octahedral Sheet).....13
2.9	แผ่นซิลิกา-อ็อกตาไฮดรอล.....14
2.10	ลักษณะโครงสร้างของ (ก.) Kaolinite (ข.) Illite (ค.) Montmorillonite .....14
2.11	แสดงอนุภาคของดินเหนียวในสภาพสารละลาย.....15
2.12	ชั้นคู่ (Diffuse Double Layer).....16
2.13	สภาพดินขึ้นกับตำแหน่งปริมาณน้ำในดิน (Water Content) เทียบกับพิกัดออตเบิร์ก.....19
2.14	กากที่ได้จากผลปาล์ม.....33
2.15	เถ้าปาล์มน้ำมัน.....34
2.16	เถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด ขนาดใหญ่ ลักษณะกลมมนติดกันเป็นกลุ่มก้อน.....36
2.17	เถ้าปาล์มน้ำมันหลังบด ขนาดและความพรุนลดลง รูปร่างไม่แน่นอน.....36
2.18	โครงสร้างดินซีเมนต์
	(a) สถานะขณะบดอัดอนุภาค (Mitchell และ Jack,1966).....41
	(b) โครงสร้างของดินซีเมนต์ภายใต้การบ่มระยะสั้นๆ (Mitchell และ Jack, 1966).....42
	(c) โครงสร้างของดินซีเมนต์ภายใต้การบ่มระยะยาว (Mitchell และ Jack, 1966).....42
2.19	ผลของปริมาณซีเมนต์ต่อกำลังของดินชนิดต่าง ๆ ที่ปรับปรุงด้วยปอร์ตแลนด์.....47
2.20	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Compressive Strength กับปริมาณสารเชื่อมประสาน.....47
2.21	แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในผลึก.....53
2.21	XRD pattern ของเถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านขบวนการการเผาที่อุณหภูมิประมาณ 800.....54

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 Diffractogram ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ.....	56
3.2 ตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ใช้ในการวิจัย.....	57
3.3 รูปถ่ายจาก SEM แสดงอนุภาคของปูนซีเมนต์ ที่กำลังขยาย 1000 เท่า.....	57
3.4 ตัวอย่างเก้าปาล์มน้ำมันจากโรงงานโดยตรงที่ใช้ในงานศึกษา.....	58
3.5 รูปถ่ายจาก SEM แสดงอนุภาคของตัวอย่างเก้าปาล์มน้ำมันก่อนบดกำลังขยาย 500 เท่า.....	59
3.6 รูปถ่ายจาก SEM แสดงอนุภาคของตัวอย่างเก้าปาล์มน้ำมันหลังบดกำลังขยาย 500 เท่า.....	59
3.7 Diffractogram ของเก้าปาล์มน้ำมัน.....	60
3.8 การผสมดินปรับปรุงแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยเก้าปาล์มน้ำมัน.....	62
3.9 สัดส่วนการผสมปูนซีเมนต์และเก้าปาล์มน้ำมัน.....	63
3.10 แสดงตัวอย่างการบ่มแบบไม่แช่น้ำที่อุณหภูมิห้องของตัวอย่าง.....	64
3.11 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินปรับปรุงคุณภาพ.....	65
4.1 เส้นโค้งสัมพันธ์ Stress-strain curve ของตัวอย่าง	
(ก) เส้นโค้งสัมพันธ์ Stress-strain curve ที่อายุการบ่มต่างๆที่อายุการบ่ม 1 วัน.....	69
(ข) เส้นโค้งสัมพันธ์ Stress-strain curve ที่อายุการบ่มต่างๆที่อายุการบ่ม 3 วัน.....	69
(ค) เส้นโค้งสัมพันธ์ Stress-strain curve ที่อายุการบ่มต่างๆที่อายุการบ่ม 7 วัน.....	70
(ง) เส้นโค้งสัมพันธ์ Stress-strain curve ที่อายุการบ่มต่างๆที่อายุการบ่ม 14 วัน.....	70
(จ) เส้นโค้งสัมพันธ์ Stress-strain curve ที่อายุการบ่มต่างๆที่อายุการบ่ม 28 วัน.....	71
4.2 เส้นโค้งสัมพันธ์ Stress-strain curve ของตัวอย่าง	
(ก) เส้นโค้งสัมพันธ์ Stress-strain curve ที่อัตราส่วนเป็น CP0.....	72
(ข) เส้นโค้งสัมพันธ์ Stress-strain curve ที่อัตราส่วนเป็น CP15.....	72
(ค) เส้นโค้งสัมพันธ์ Stress-strain curve ที่อัตราส่วนเป็น CP25.....	73
(ง) เส้นโค้งสัมพันธ์ Stress-strain curve ที่อัตราส่วนเป็น CP35.....	73
(จ) เส้นโค้งสัมพันธ์ Stress-strain curve ที่อัตราส่วนเป็น CP45.....	74
4.3 เส้นโค้งสัมพันธ์ Stress-strain curve ของดินปรับปรุงแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยเก้าปาล์มน้ำมัน	
(ก) กำลังอัดของดินปรับปรุง อายุการบ่มต่าง ๆ.....	77
(ข) กำลังอัดของดินปรับปรุง อายุการบ่มต่าง ๆ โดยวิธี Fix Curve.....	77
4.4 กำลังอัดของดินปรับปรุงแทนที่ซีเมนต์ด้วยเก้าปาล์มน้ำมันด้วยร้อยละต่าง ๆ .....	78

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 โมดูลัส ( $E_{50}$ ) ของดินปรับปรุงแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันที่อายุการบ่ม	
(ก) โมดูลัส ( $E_{50}$ ) ของดินปรับปรุงที่อายุการบ่มต่างๆ.....	81
(ข) โมดูลัส ( $E_{50}$ ) ของดินปรับปรุงที่อายุการบ่มต่างๆ โดยวิธี Fix Curve.....	81
4.7 ค่าการซึมผ่านดินปรับปรุงของตัวอย่างที่อายุการบ่ม 28 วัน.....	83
4.8 ความสัมพันธ์ปริมาณการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมัน.....	84
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดแบบไม่จำกัดและปริมาณความชื้นตัวอย่างดินปรับปรุง.....	85
4.10 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน บ่มที่อุณหภูมิห้อง	
(ก) ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน ที่ 3 วัน.....	87
(ข) ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน ที่ 7 วัน.....	87
(ค) ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน ที่ 28 วัน.....	88
4.11 การวิเคราะห์ด้วยวิธี XRD ตัวอย่าง CP0 ที่อายุการบ่ม 3, 14 และ 28 วัน.....	91
4.12 การวิเคราะห์ด้วยวิธี XRD ตัวอย่าง CP28 ที่อายุการบ่ม 3, 14 และ 28 วัน.....	92

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

อัตราประชากรในเขตกรุงเทพมหานครและเขตปริมณฑลเพิ่มจำนวนมากขึ้นอย่างรวดเร็ว ประกอบกับความต้องการภาคธุรกิจรวมถึงระบบสาธารณูปโภค โครงข่ายคมนาคมขนส่ง เพื่อรองรับ การพัฒนาดังกล่าวจึงต้องมีการก่อสร้างเพิ่มมากขึ้น เช่น อาคารที่พักอาศัย ห้างสรรพสินค้า โรงแรม โรงงานอุตสาหกรรม ตลอดจนถึงระบบสาธารณูปโภค ระบบการขนส่งทางถนน ทางราง เนื่องด้วย กรุงเทพมหานครและเขตปริมณฑลตั้งอยู่บริเวณที่ราบลุ่มแม่น้ำตอนล่างใกล้กับอ่าวไทย ซึ่งเป็นดิน ตะกอนปากแม่น้ำที่บวมสะสมเป็นเวลานานจนเกิดเป็นชั้นดินเหนียวอ่อน ซึ่งมีอัตราการทรุดตัวสูง และรับกำลังรับแรงอัดต่ำ จึงเป็นสิ่งสำคัญที่วิศวกรผู้ออกแบบจะต้องคำนึงถึง ทำการออกแบบ ปรับปรุงชั้นดินที่มีอยู่ในพื้นที่ หรือนำดินเดิมมาเปลี่ยนคุณสมบัติให้กลายเป็นดินชนิดใหม่ที่มี เสถียรภาพตรงตามความต้องการ ซึ่งเทคนิควิธีต่างๆนั้นจะขึ้นอยู่กับความก้าวหน้าทางด้านวัสดุและ เทคโนโลยีการก่อสร้าง

ในระยะเวลา 30-40 ปีที่ผ่านมา ได้มีการทดลองใช้วิธีการปรับปรุงคุณภาพดินอ่อนในหลาย ๆ วิธีด้วยกัน ซึ่งแต่ละวิธีนั้นมีราคาก่อสร้างที่ค่อนข้างสูง นักวิจัยหลายๆท่านมีการเปลี่ยนแปลง คุณสมบัติเพื่อเพิ่มเสถียรภาพแก่ดินด้วยวิธีทางเคมี โดยใช้สารผสมเพิ่มลงไปผสมเพื่อเปลี่ยนแปลง คุณสมบัติของดิน การควบคุมอุณหภูมิเช่นการทำให้น้ำมันเยือกแข็งเพื่อสามารถขุดเจาะได้ การ ปรับปรุงเชิงกล เช่น การบดอัดให้แน่นเพื่อเพิ่มความสามารถรับแรงแบกทาน การปรับปรุงคุณภาพดิน นั้นจะต้องปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของดินเดิมให้เหมาะสมตามการใช้งานในแต่ละพื้นที่ การเลือกวิธีการ ปรับปรุงดินก็ขึ้นอยู่กับปริมาณมวลดินและประเภทของดินเป็นสำคัญ กำลังอัดสูงขึ้น และอัตราการ ทรุดตัวลดลง (Lorenzo และ Bergado, 2004; Lee และคณะ, 2005; Xiao และ Lee, 2008; Kamruzzaman และคณะ, 2009; Vilane B.R.T., 2010; Jongpradist และคณะ, 2011)

ในวิทยานิพนธ์นี้จะเสนอการปรับปรุงคุณภาพดินอ่อนด้วยวิธีทางเคมี (Chemical Stabilization) โดยการใช้สารเคมีผสมเข้ากับมวลดิน ผลของปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างสารเคมีกับมวลดินทำให้เพิ่ม คุณสมบัติแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลดิน รวมถึงกำลังอัดเพิ่มขึ้นและส่งผลให้ปริมาณการทรุดตัวลดลง สารเคมีที่นิยมในการปรับปรุงคุณภาพดิน ได้แก่ ปูนซีเมนต์ เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาได้ง่าย มีอยู่ทั่วไป โดยปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยาเคมีกับแร่ซิลิกาและอลูมินาในมวลดิน ผลของปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่าง ปูนซีเมนต์และน้ำ จะทำให้ดินสามารถรับกำลังอัดสูงขึ้นและอัตราการทรุดตัวลดลง

เนื่องจากปูนซีเมนต์เป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย กระบวนการผลิตมีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม ดังนั้นเพื่อเป็นการลดการใช้ปูนซีเมนต์ จึงมีแนวคิดที่จะนำวัสดุเหลือใช้มาแทนที่ปูนซีเมนต์ นักวิจัยหลายท่านพบว่าวัสดุที่มีคุณสมบัติปอซโซลาน (Pozzolan Material) ผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ช่วยเพิ่มกำลังอัดของดินซีเมนต์ได้ วัสดุปอซโซลานที่น่าสนใจชนิดหนึ่ง เช่น เถ้าปาล์มน้ำมัน (Palm Oil Fuel Ash) โดยเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นผลพลอยได้จากการนำกากของผลปาล์มน้ำมัน ได้แก่ เศษกะลา เส้นใย และทลายของปาล์มเปล่าของผลปาล์ม เผาเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิดไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า หลังจากการเผาพบว่าเถ้าปาล์มที่เกิดขึ้นมีปริมาณมาก มีลักษณะเป็นผงฝุ่นน้ำหนักเบา เถ้าปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นนำมาใช้ประโยชน์ได้ค่อนข้างน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณที่เกิดขึ้นในแต่ละปี ส่วนใหญ่ต้องนำไปทิ้ง ทำให้เกิดปัญหาในเรื่องการกำจัดทิ้งตามมา เช่น ปัญหาด้านสภาพแวดล้อม เป็นต้น

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพด้วยปูนซีเมนต์ (ดินซีเมนต์) และดินที่ทำการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน
2. ศึกษาพฤติกรรมด้านกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS) ของดินที่ทำการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันตามอายุการบ่ม
3. ศึกษาและวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของดินที่ทำการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันตามอัตราส่วนผสมต่างๆ ตามอายุการบ่ม
4. ศึกษากลไกปฏิกิริยาทางเคมีที่มีผลต่อการพัฒนากำลังอัด และศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างดินที่ทำการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันในระดับจุลภาคด้วยวิธี XRD ตามอายุการบ่ม

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ดินเหนียว โดยสภาพดินที่ทำการศึกษาเป็น ดินชนิดดินเหนียวกรุงเทพฯ (Bangkok Clay) เท่านั้น เก็บตัวอย่างจากพื้นที่ศึกษาในโครงการ The Line 101 ซอย สุขุมวิท 101 ถนนสุขุมวิท จังหวัดกรุงเทพมหานคร ประเทศไทย
2. เถ้าปาล์มน้ำมันเก็บตัวอย่างจากจังหวัดชุมพรโดย บริษัท สหโรจน์เท็กไพล์
3. ปูนซีเมนต์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C150
4. การทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D2166 ที่อายุการบ่ม 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 วิธีการศึกษา

1. กำหนดหัวข้อการวิจัยและวัตถุประสงค์ในการวิจัย
2. กำหนดพื้นที่และขอบเขตในการศึกษา
3. รวบรวมและศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง
4. ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
5. ศึกษา วิเคราะห์ ประเมินและสรุปผล
6. จัดทำเล่มรายงาน

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

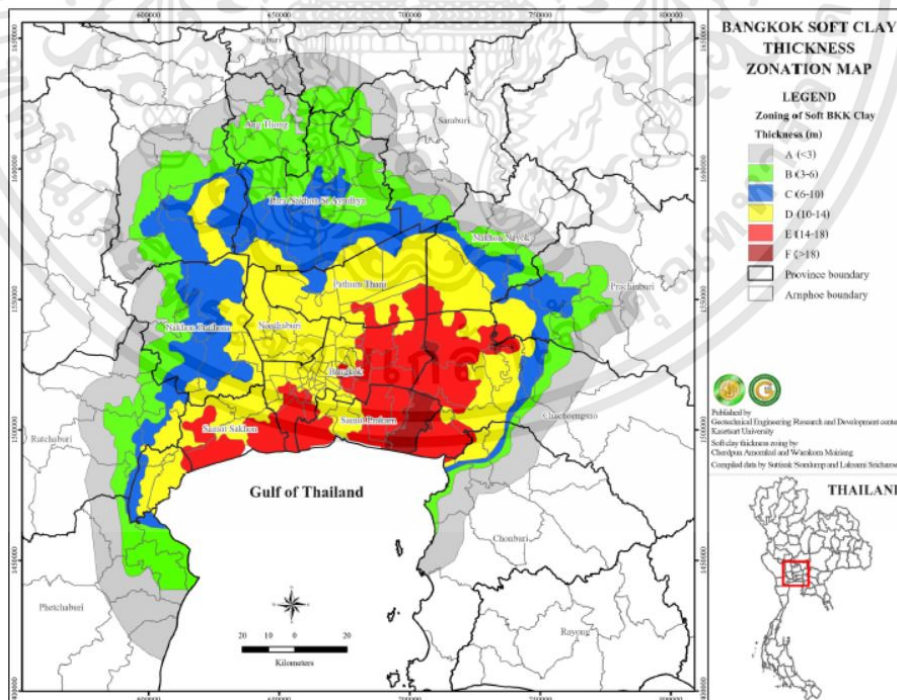
1. สามารถทราบถึงกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ผสมปูนซีเมนต์ล้วน และทราบกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ผสมปูนซีเมนต์ โดยแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันบางส่วนได้
2. สามารถทราบถึงอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมจากกำลังอัดแกนเดียวที่มากที่สุด และสามารถทำนายพฤติกรรมด้านกำลังอัดของดินซีเมนต์ตามอายุการบ่ม และส่วนผสม
3. สามารถทราบถึงกลไกการพัฒนากำลังอัดดินซีเมนต์ ซึ่งเป็นประโยชน์ในการศึกษาเชิงลึกด้านการพัฒนากำลังอัดให้เพิ่มสูงขึ้นมากกว่าเดิมได้
4. การลดปริมาณปูนซีเมนต์ ช่วยลดต้นทุนราคาการก่อสร้างได้ เนื่องจากการแทนที่ของซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน
5. เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเถ้าปาล์มน้ำมันและยังช่วยบรรเทาปัญหาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากเถ้าปาล์มน้ำมัน เช่น การฟุ้งกระจาย และการกองเก็บ เป็นต้น

## บทที่ 2

# ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ขอบเขตพื้นที่ดินอ่อน

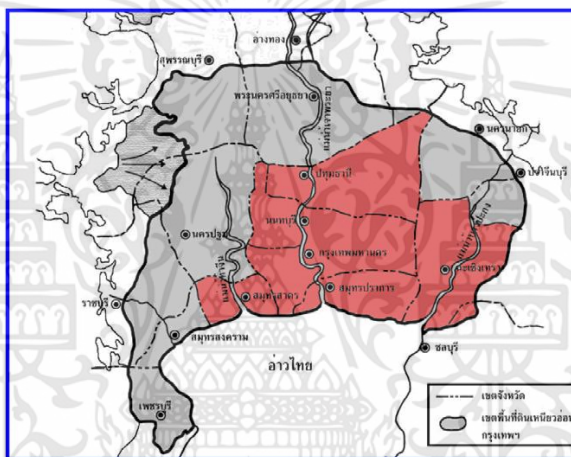
ชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ส่วนใหญ่เป็นดินตะกอนปากแม่น้ำที่เกิดในยุค (Holocene epoch) เป็นพื้นที่ราบลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่างตั้งแต่จังหวัดอ่างทองลงมาถึงอ่าวไทย ทางตะวันตกตั้งแต่อ. บางเลน จ. นครปฐม มาสุดฝั่งตะวันออกที่ บางปะกง จ.ชลบุรี พื้นที่ขนาด 100x100 ตารางกิโลเมตร โดยประมาณ เป็นพื้นที่ดินถูกปกคลุมด้วยชั้นดินเหนียวอ่อนความหนาเฉลี่ย 8-12 เมตร ซึ่งถูกเรียกว่า ชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ดินเหนียวอ่อนดังกล่าวกำเนิดจากการตกตะกอนของดินเหนียวในทะเล ตั้งแต่ยุคประมาณ 10,000 ปี ก่อนหน้านี้ โดยพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล รวมทั้งพื้นที่ในบาง เป็นทะเลโดยทั้งหมด การตกตะกอนของดินเม็ดละเอียดในน้ำทะเลทำให้เกิดชั้นดินที่อึดตัวและมี โครงสร้างของเม็ดดินที่มีช่องว่างมาก ทำให้มีความแข็งแรงต่ำและทรุดตัวได้สูงเมื่อถูกน้ำหนักมา กระทำทั้งนี้จาก 10,000 ปีที่แล้วจนถึงปัจจุบันระดับน้ำทะเลได้ค่อยๆ ลดลงทำให้ผิวหน้าของชั้นดิน เหนียวอ่อนนี้แห้งไปเป็นชั้นแข็ง แต่ส่วนล่างต่ำลงไปประมาณหนึ่งเมตรยังคงเป็นดินเหนียวที่อ่อนและ อึดตัวอยู่



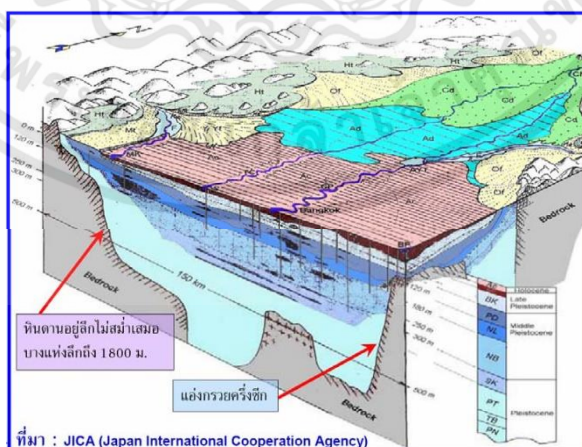
รูปที่ 2.1 แผนที่ความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอร์ (Moh) และคณะ (1969) เป็นผู้ขนานนามเฉพาะชั้นดินส่วนที่เป็นดินเหนียวอ่อนที่วางตัวอยู่ตอนบนสุดของดินตะกอนในพื้นที่ราบลุ่มภาคกลางตอนล่างว่า “Bangkok Clay” รูปลักษณะของชั้นดินนี้เป็นรูปคล้ายแอ่งกระทะค่อนข้างลึก ดังแสดงใน รูปที่ 2.2 และ รูปที่ 2.3 ท้องของแอ่งจะค่อนข้างมาทางปากอ่าวไทย ความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนส่วนใหญ่ประมาณ 10-18 เมตร ยกเว้นพื้นที่ทางตอนเหนือตั้งแต่จังหวัดปทุมธานีขึ้นไปจนถึงที่บริเวณจังหวัดพระนครศรีอยุธยา สำหรับขอบของแอ่งด้านตะวันออกและตะวันตกมีความชันและความหนาลดลงรวดเร็วมากกว่าด้านทิศเหนือ ดินเหนียวอ่อนซึ่งครอบคลุมอยู่ภายในพื้นที่ 6 จังหวัด ได้แก่ กรุงเทพฯ นนทบุรี สมุทรปราการ ปทุมธานี ฉะเชิงเทรา และสมุทรสาคร ดังแสดงใน รูปที่ 2.1 พื้นที่ดังกล่าวถูกปกคลุมด้วยดินเหนียวอ่อนที่มีความหนาเฉลี่ยมากกว่า 12 เมตร และมีความอ่อนมากกว่าบริเวณอื่น ๆ พื้นที่ดังกล่าวเพื่อใช้เป็นแนวทางในการพิจารณาคุณสมบัติของชั้นดินที่มีความเสี่ยงต่อการพิบัติบนถนนเลียบรินคลอง



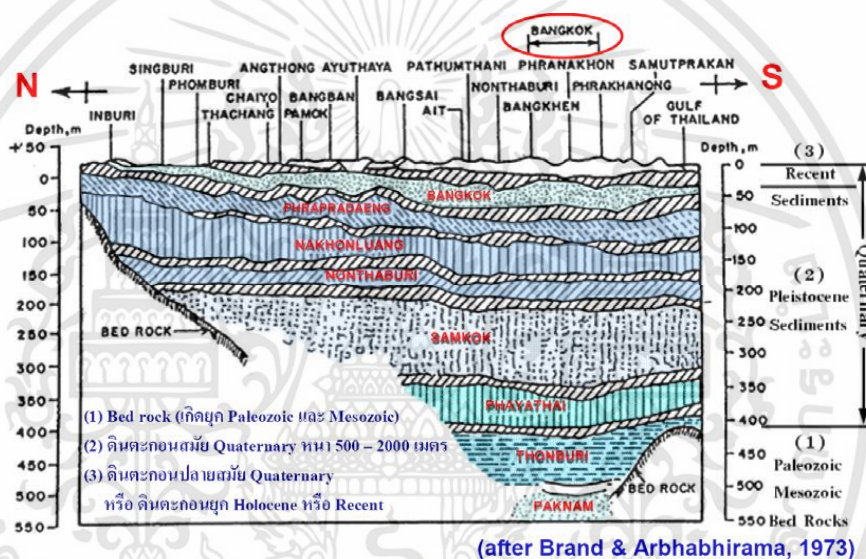
รูปที่ 2.2 ขอบเขตของพื้นที่ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ



รูปที่ 2.3 รูปตัดสามมิติบริเวณที่ลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาพทางธรณีวิทยาในบริเวณพื้นที่ราบลุ่มภาคกลางตอนล่าง หากพิจารณาตั้งแต่ชั้นหินดานล่างสุด ไล่ขึ้นมาจนถึงชั้นดินตอนบนที่เป็นอยู่ในปัจจุบัน มีประวัติการเกิดที่ยาวนานก่อนจะถึงปัจจุบัน โดยมีลำดับการกำเนิดซึ่งได้มาจากการศึกษาที่ยังไม่สู้จะสมบูรณ์นัก แต่สามารถประมาณโครงสร้างทางธรณีวิทยาได้ว่าจะสามารถแบ่งองค์ประกอบที่สำคัญได้ดังแสดงใน รูปที่ 2.3 ชั้นดิน ส่วนที่ (3) เป็นชั้นดินตะกอนตอนปลายของ(Quaternary Period) เป็นดินตะกอนที่เกิดในยุค (Holocene Epoch) (Epoch สุดท้ายของ Quaternary Period) เป็น Epoch ที่มีอายุตั้งแต่ประมาณ 11,000 ปีที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบัน ชั้นดินเหนียวอ่อนนี้ได้รับการขนานนามว่า “Bangkok Clay” มีความหนาประมาณ 10-18 เมตรวางตัวอยู่ชั้นบนสุดครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 14,000 ตารางกิโลเมตร ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 รูปตัดตามแนวเหนือ-ใต้ ลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง

## 2.2 ดินเหนียว

คำว่า ดิน หมายถึง ส่วนประกอบของเม็ดดิน ของเหลว และแก๊ส เม็ดดิน คือ ส่วนประกอบของแร่ธาตุต่างชนิดกัน ประกอบขึ้นเป็นก้อนแข็ง ดินอาจจะมีสารอินทรีย์ปะปนอยู่ด้วย ขนาดของเม็ดดินมีตั้งแต่คอลลอยด์ (Colloid) คือประมาณ 0.002 มม. จนถึงขนาดก้อน Boulder คือ ประมาณ 80 มม.

ในแต่ละองค์การมีเกณฑ์การแบ่งขนาดของดินที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ แล้วแต่ความเหมาะสมของแต่ละงาน ดินดังกล่าวแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่ต่างกันอย่างออกไป อย่างไรก็ตาม ดินที่มีอยู่ในธรรมชาติมักประกอบไปด้วยดินหลาย ๆ ชนิดปะปนกันจึงมีคุณสมบัติที่ไม่แน่นอน คุณสมบัติดินที่เป็นประโยชน์เกี่ยวข้องกับงานด้านวิศวกรรมทั่ว ๆ ไปแสดงไว้ในหัวข้อที่ 2.2.3

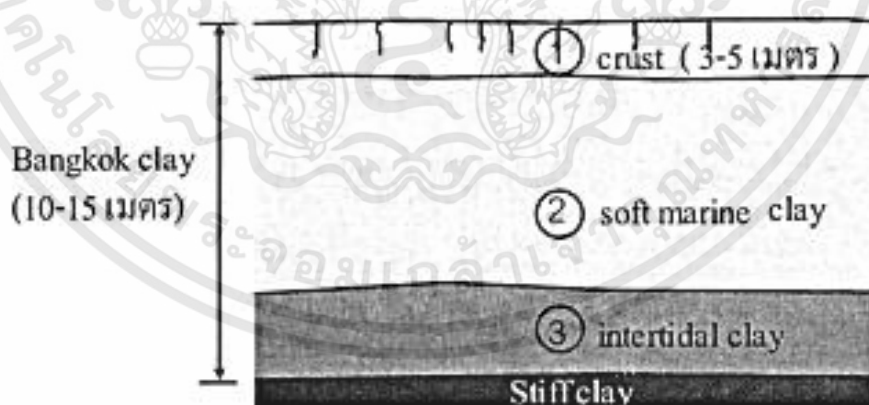
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.1 ดินเหนียวอ่อน (Soft Clayey Soil)

ดินเหนียวอ่อน หมายถึงดินที่มีขนาดอนุภาคเป็นเม็ดละเอียด มีปริมาณความชื้นสูง และมีสารอินทรีย์ปะปนอยู่ในปริมาณมาก แร่ที่พบในดินเหนียวอ่อนส่วนใหญ่มักเป็นแร่จำพวก Kaolinite, Illite และ Montmorillonite ซึ่งเป็นแร่ประเภท Hydrus Aluminum Silicate ดินเหนียวอ่อนแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ตามชนิดของแร่ที่เป็นองค์ประกอบ

ดินเหนียวอ่อน โดยทั่วไปเป็นดินที่ตกตะกอนอยู่บริเวณปากแม่น้ำ ลักษณะการเกิดของดินเหนียวอ่อนบริเวณนี้ เม็ดดินจะถูกพัดพาจากแม่น้ำลงสู่ทะเล และน้ำทะเลจะหมุนกลับเข้ามาตกตะกอน ทำให้ดินเหนียวอ่อนมีทั้งแบบตกตะกอนในแม่น้ำและในทะเล ซึ่งเป็นลักษณะการเกิดของดินเหนียวอ่อนบริเวณลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง หรือที่เรียกว่า ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ (Soft Bangkok Clay) โดยมีลักษณะเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนหนาประมาณ 10-15 เมตร เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรม พบว่า ดินเหนียวอ่อนเป็นดินที่มีกำลังต่ำ (Low Strength) และมีการยุบตัวสูง (High Compressibility) ซึ่งถือเป็นปัญหาสำคัญทางวิศวกรรม ได้แก่ เมื่อก่อสร้างบนชั้นดินเหนียวอ่อนจะเกิดปัญหาการทรุดตัวของโครงสร้าง ซึ่งเป็นผลมาจากการรับน้ำหนักของดินเหนียวอ่อน ทำให้ดินเหนียวอ่อนเกิดการยุบตัวคายน้ำ (Consolidation) ส่งผลให้มีปริมาณการทรุดตัวสูง นอกจากนี้ยังมีปัญหาด้านเสถียรภาพ และด้านความมั่นคง เช่น งานก่อสร้างถนน หรืองานชุดและถมดิน ซึ่งอาจเกิดการเลื่อนพังได้ เป็นผลมาจากดินมีค่าการรับกำลังต่ำ ไม่เพียงพอที่จะรับน้ำหนักบรรทุกที่เกิดขึ้นได้

ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ มีองค์ประกอบที่สำคัญอยู่ 3 ส่วน แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างชั้นดินโดยทั่วไปของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ (วสท., 2547)

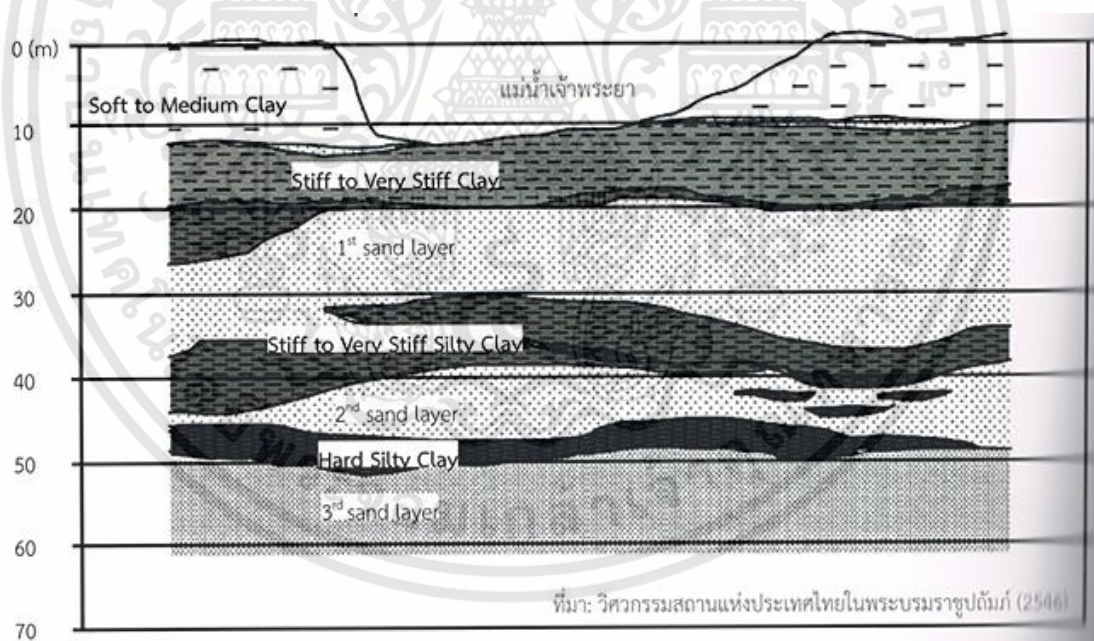
ส่วนที่ 1 Crust คือ ดินเหนียวอ่อนประเภทดินตะกอนน้ำกร่อยชายฝั่ง (Intertidal Clay)

ภายหลังถูกแดดและฝนแปรสภาพดังกล่าวข้างต้นจนแห้งและแข็งปานกลาง หนาประมาณ 3 - 5 ม. เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดินในชั้นนี้จะแข็งที่สุดที่ผิวบน กำลังของดินจะลดลงตามความลึกจนถึงค่าต่ำที่สุด ซึ่งเป็นรอยต่อระหว่าง Crust กับดิน Marine Clay ซึ่งอยู่ถัดไป สิ่งที่น่าสังเกตประการหนึ่งคือตรงรอยต่อระหว่างดินเหนียวทั้งสองส่วนนี้มักจะมีเกลือผสมอยู่ในปริมาณที่สูงและกำลังของดินจะต่ำมากผิดปกติ ดินจะอยู่ในสภาพ Overconsolidated

ส่วนที่ 2 Marine Clay คือ ดินเหนียวอ่อนที่ตกตะกอนในท้องทะเลและยังไม่ถูกแปรสภาพจากแดด ฝน และน้ำใต้ดิน ดินส่วนนี้จึงยังคงสภาพเป็นดินอ่อนมีสถานะเป็น Normally Consolidated แต่อาจเกิด Delay Compression จนมีลักษณะ Overconsolidated เล็กน้อย อย่างไรก็ตามกำลังดินก็ยังคงต่ำตามเกณฑ์ของดินเหนียวอ่อน กำลังของดินเหนียวอ่อนส่วนนี้จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามความลึกจนถึงระดับความลึกอันหนึ่งที่กำลังของดินเพิ่มขึ้นตามความลึกในสัดส่วนที่สูงกว่า ก็ถือว่าเป็นการสิ้นสุดของดินส่วนนี้

ส่วนที่ 3 Medium Clay คือ ดินเหนียวอ่อนชายฝั่งที่เกิดในช่วงน้ำทะเลยกกระด้าง (Transgression Period) จึงวางตัวอยู่ใต้ Soft marine Clay เนื่องจากดินส่วนนี้เป็นดินตะกอนชายฝั่งทะเล จึงมีโอกาที่จะถูกตากแห้งได้ดินจึงอยู่ในสภาพของ Medium Clay ที่มีกำลังสูงกว่า Marine Clay ที่ทับอยู่ด้านบน ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะชั้นดินทั่วไปของกรุงเทพฯ ถึงระดับความลึกประมาณ 70 ม. (วสท., 2547)

### 2.2.1.1 คุณสมบัติทั่วไปของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ

โดยทั่วไปจะมีสีเทาอ่อนถึงสีเทาเข้มและอาจมีสีเขียวปะปน ซึ่งประกอบไปด้วยชั้นดินเหนียวอ่อนหนาประมาณ 13.5 ม. จากนั้นจะพบชั้นดินเหนียวแข็งจนถึงประมาณ 24 - 25 ม. จึงพบชั้นทรายแน่นชั้นที่ 1 (First Silty Sand Layer) และพบชั้นดินเหนียวแข็งดินดานและชั้นทรายชั้นที่ 2 (Second Sand Layer) ที่ความลึกประมาณ 45 - 50 ม. และพบชั้นดินเหนียวแข็งมากชั้นที่ 3 ที่ความลึกประมาณ 60 - 70 ม. รูปตัดลักษณะชั้นดินของกรุงเทพ แสดงดังภาพที่ 2-6 ถึงระดับความลึกประมาณ 70 ม. เม็ดดินเหนียว (Clay Particle) มีขนาดไม่เกิน 0.002 มม. (หรือ 2  $\mu\text{m}$ ) และต้องมีความเหนียวเมื่อผสมกับน้ำ เม็ดดินเหนียวที่แท้จริง ต้องประกอบด้วยแร่ดินเหนียว (Clay Mineral) จับตัวกันเป็นดินเหนียว แร่ประกอบดินเหนียวที่สำคัญได้แก่ (Kaolinite, Illite, Montmorillonite, Halloysite, Chlorite, Muscovite, Serpentine และ Vermiculite) เป็นต้น เป็นที่น่าสังเกตว่า เม็ดดิน แม้มีขนาดไม่เกิน 0.002 มม. อาจไม่ใช่เม็ดดินเหนียวแท้ ตัวอย่างเช่น เม็ด (Quartz, Feldspar หรือ Mica) ซึ่งมีแรงดึงดูดจากประจุไฟฟ้าไม่มาก ทำให้แตกตัวได้ง่ายเมื่อถูกน้ำ

ดินเหนียวถูกจัดให้อยู่ในดินประเภทเชื่อมแน่น (Cohesive Soil) เพราะมีความเหนียวที่เกิดจากแรงดึงดูดของประจุไฟฟ้า กำลังของดินจึงเกิดจากแรงสองประเภทคือ (1) กำลังที่เกิดจากแรงดึงดูดของประจุไฟฟ้าระหว่างเม็ดดิน เรียกว่า “Cohesion” (c) และ (2) แรงเสียดทานระหว่างเม็ดดิน เรียกว่า “Interparticle Friction” ( $\phi$ ) ในธรรมชาติ เม็ดดินเหนียวมักปะปนอยู่กับเม็ดดินขนาดอื่น ๆ เช่น เม็ดดินแป้งและเม็ดดินทราย คำว่า “ดินเหนียว” ที่มีอยู่ในธรรมชาติจึงไม่ได้เป็นดินที่มีเม็ดดินเหนียวอยู่เพียงอย่างเดียว แต่เป็นดินที่มีเม็ดดินเหนียวปะปนอยู่กับเม็ดดินขนาดอื่น หากมีเม็ดดินเหนียวอยู่มากพอจึงทำให้มวลดินเกิดความเหนียวได้ ความเหนียวของดินดูได้จากค่าความเชื่อมแน่นของดิน นอกจากนี้ ยังสามารถดูได้จากค่าดัชนีพลาสติกที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณของเม็ดดินเหนียวที่ปนอยู่ในดินด้วย

คุณสมบัติที่สำคัญของดินเหนียว คือ มีความเหนียวจากแรงดึงดูดของประจุไฟฟ้าที่ทำให้เม็ดดินเกาะยึดกันได้คล้ายยึดด้วยกาว ดินเหนียวที่มีความคงตัวสูง ก้อนดินเหนียวที่แห้งจะไม่แตกตัวง่ายเมื่อถูกน้ำ จึงจัดว่าเป็นดินประเภท (Cohesive Soil) และ (Non-Dispersive Soil) ดินเหนียวที่มีค่าดัชนีพลาสติกสูงเนื่องจากเม็ดดินมีขนาดเล็ก ทำให้ช่องว่างระหว่างเม็ดดินก็เล็กตามไปด้วย น้ำจึงซึมผ่านได้ยาก และมีค่าการไหลซึมต่ำ ส่วนกำลังของดินเหนียว (Clay Strength) ประกอบด้วย ความเชื่อมแน่นและการขบกันของมูมภายใน เมื่อถูกแรงเฉือน (Shear) ดินเหนียวจะสูญเสียกำลัง แต่กำลังของดินที่สูญเสียไปจะสามารถคืนตัวกลับมาได้ระดับหนึ่งตามระยะเวลาที่ปล่อยทิ้งไว้ นอกจากนั้นเมื่อถูกแรงอัด (Compression) และมีการยุบตัวเนื่องจากกระบวนการทรุดตัว ดินจะแน่นขึ้น และมีกำลังสูงขึ้นตามไปด้วย ดินเหนียวในธรรมชาติปรากฏอยู่ในหลายสภาวะ เช่น ดินเหนียวอ่อน (Soft Clay)

ดินเหนียวปานกลาง (Medium Clay) ดินเหนียวแข็ง (Stiff Clay) ดินเหนียวแข็งมาก (Very Stiff Clay) เป็นต้น ดินเหนียวเป็นดินที่ดูดซับน้ำได้มาก จึงมักเกิดการบวมตัว (Swelling) เมื่อดูน้ำเข้าไป และเกิดการหดตัว (Shrinkage) ได้มากเมื่อสูญเสียน้ำออกไปโดยการทำให้แห้ง

ESCAP Secretariat (1988) ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ มีเนื้อดินเป็นแร่ Clay ซึ่งประกอบไปด้วย แร่ Kaolinite ประมาณ 25% , Illite ประมาณ 15% และ Montmorillonite ประมาณ 60% มีน้ำปะปนอยู่ในเนื้อดินประมาณ 24 – 30 % มีค่าความเป็นกรดต่างประมาณ 5.5 มีค่าความเหนียวนำไฟฟ้าสูงมาก จากการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม พบว่าดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯมีเนื้อนิ่มจึงรับกำลังได้ต่ำ ความยืดหยุ่นสูงมาก จึงสามารถหดตัวและขยายตัวได้มาก มีค่าดัชนีพลาสติคสูง แต่ความไวในการทำปฏิกิริยาต่อน้ำค่อนข้างต่ำ น้ำซึมผ่านได้ยาก มี Shear Strength ประมาณ 20 – 40 kPa

สำหรับคุณสมบัติทั่วไป หรือคุณสมบัติเบื้องต้นทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ มีนักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาถึง ปริมาณความชื้นตามธรรมชาติ ( $w_n$ ), หน่วยน้ำหนักกรม ( $\gamma_s$ ), ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity,  $G_s$ ) และพิกัด Atterberg (Atterberg Limit) ทั้งในส่วนของ Weather Crust, Soft to Medium Clay และ Stiff to Very Stiff Clay ดังแสดงในตารางที่ 2.1

#### 2.2.1.2 คุณสมบัติการไหลซึมของน้ำผ่านดิน (Permeability) ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

โดยปกติค่า  $k_v$  ของดินเหนียวอ่อน มีค่าเฉลี่ยประมาณ  $1 \times 10^{-9}$  m/s และดินเหนียวอ่อนส่วนมากค่า  $k_v$  จะอยู่ในช่วง  $5 \times 10^{-5}$  m/s ถึง  $5 \times 10^{-9}$  m/s (Terzaghi และคณะ, 1996)

Shibuya and Tamrakar (2003) รายงานค่า  $k_v$  จากการทดสอบ Permeability ในห้องปฏิบัติการของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เก็บที่ความลึก 4.8 ถึง 13.8 m อยู่ในช่วง  $1.3 \times 10^{-9}$  ถึง  $5 \times 10^{-11}$  m/s

รสสุคนธ์ (2546) ได้ทำการทดสอบหาค่า  $k_v$  จากดินตัวอย่างแบบคงสภาพที่ระดับความลึก 3 - 16 m ในเขตกรุงเทพฯ และพบว่า  $k_v$  มีค่าอยู่ในช่วง  $1.2 \times 10^{-10}$  ถึง  $6.3 \times 10^{-10}$  m/s

Abuel-Naga และคณะ (2006) ทำการทดสอบ Constant-Head Permeability ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ พบว่าค่า  $k_v$  อยู่ในช่วง  $9 \times 10^{-9}$  ถึง  $5 \times 10^{-10}$  m/s

#### 2.2.1.3 คุณสมบัติกำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength) ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

โดยทั่วไปพฤติกรรมกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของ Weather Crust, Soft Clay และ Stiff Clay มีลักษณะดังนี้

Weather Crust มีกำลังรับแรงเฉือนลดลงเมื่อเทียบกับความลึก เนื่องจากดินชั้นบนได้รับผลกระทบจากกระบวนการผุพังสลายตัวมากกว่าดินชั้นล่าง, Soft Clay มีกำลังรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามความลึก ซึ่งมีค่าประมาณ  $0.445 \text{ t/m}^3$  แสดงให้เห็นว่า Soft Clay มีพฤติกรรมเป็น Normally Consolidated Clay และ Stiff Clay มีค่าสูงกว่าทั้ง Weather Crust และ Soft Clay (Wu, 1973)

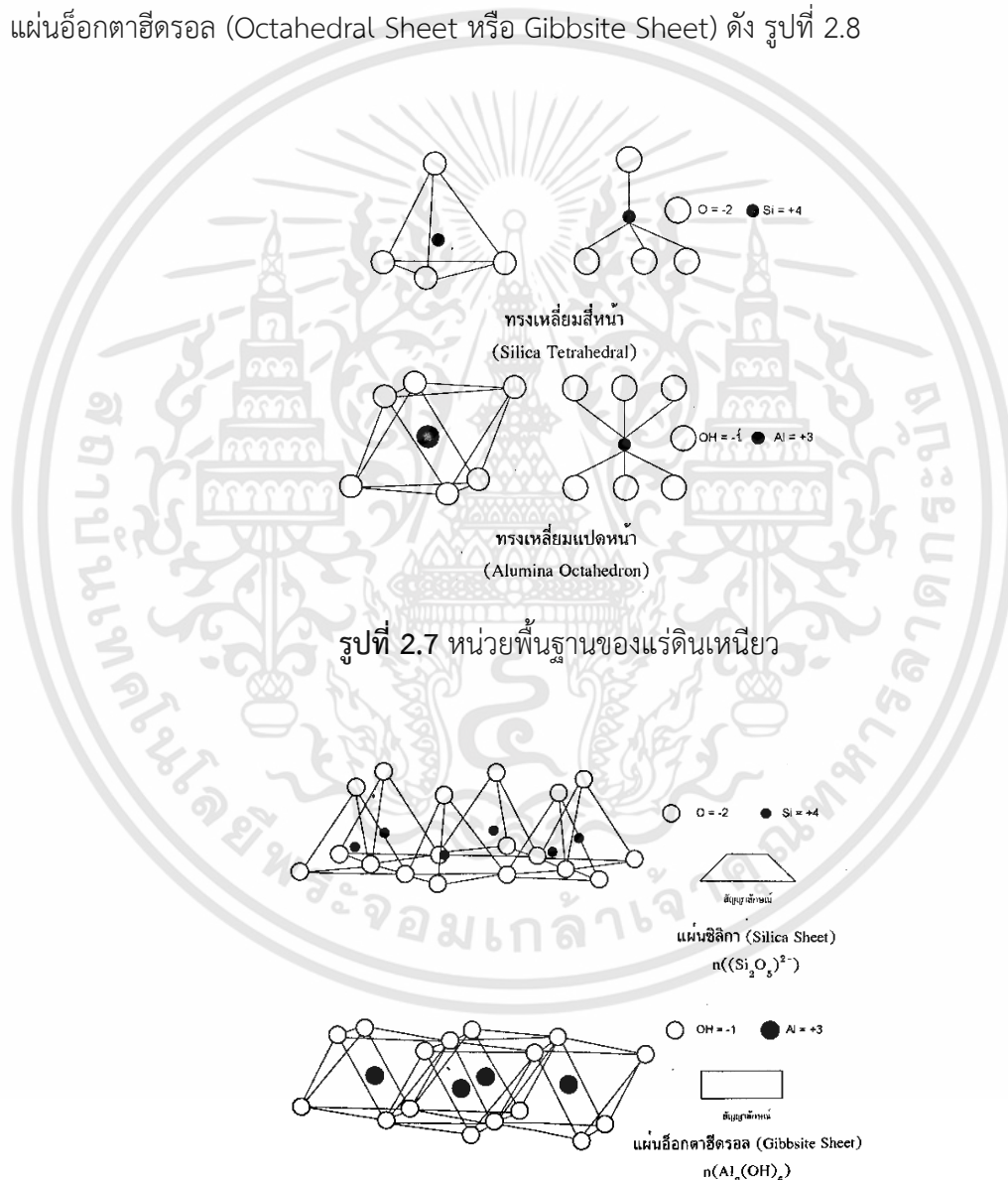
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทั่วไปของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ

พารามิเตอร์	wn (%)	LL (%)	PL (%)	LI	$\gamma_t$ (t/m <sup>3</sup> )	Gs
Gulachol (1970) 1.5 -3.6 m	51.2±6.9	74.4±2.1	33.9±0.5	0.4		2.71±0.1
Weathered Clay	Phuong (1973) Weathered Clay	50-90	80-100	30-45	0.60-1.0	2.66-2.70
	TASNEENART(1984) Weather Clay	30-100	30-90	20-35	0.2-2.0	1.55-1.9
Phuong (1973) (AIT) 4.5-9.0 m	50-120	80-120	25-65	0.6-1.0		2.66-2.72
TSAI (1982) (AIT)	85-70	79-95	30-34	0.91-0.76		
TSAI (1982) (Nong Ngoo Hao)	65-125	80-122	25-52	0.92-1.1		
Soft to Medium Clay	TSAI (1982) (Pathumwan)	48-65	58-72	26-33	0.68-0.78	
	TSAI (1982) (Pom Prachul)	62-82	75-110	26-40	0.67-0.88	
	Tasneenart (1984) Soft Clay	40-90	40-90	20-40	0.2-2.0	1.5-1.75
	กวีวงศ์ (2530) 0-14 m	57-63	62-68	28-30	0.8-1.0	1.6-1.7
อาคม (2542)	93.9	31.7	1.5	2.57		2.57
Muktabhan et al.(1966) 23 – 63 ft	20-40	45-70	23-30		1.54±1.6	2.7-2.8
Hengchaovanich (1969) 36 ft	20-30	59.5±5.9	22.6±1.6		1.61	2.74±0.02
Tasneenart (1984) First Stiff Clay	15-40	25-90	15-40	-0.25-0.5	1.8-2.15	
Tasneenart (1984) Second Stiff Clay	15-35	30-70	15-35	-0.35-0.75	1.8-2.25	
กวีวงศ์ (2530) 14-23 m	27-30	52-58	23-26	0.1-0.2	1.9-2.0	2.65-2.71

ที่มา : กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2555

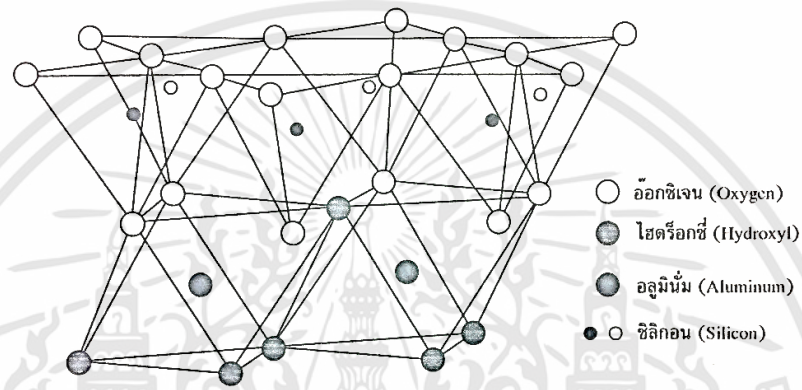
## 2.2.2 โครงสร้างของแร่ดินเหนียว (Clay mineral)

แร่ดินเหนียวเป็นแร่ที่เกิดขึ้นโดยการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของปฏิกิริยาต่อดินฟ้าอากาศของหินแม่เป็นส่วนใหญ่ มีส่วนประกอบที่มีหน่วยพื้นฐานคือ ทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Silica Tetrahedron) และทรงเหลี่ยมแปดหน้า (Alumina Octahedron) การก่อตัวเป็นลักษณะโมเลกุลนี้เชื่อมแน่นต่อกันด้วยพันธะไอออนิก (Ionic Bond) และพันธะโควาเลนต์ (Covalent Bond) ซึ่งแข็งแรงมาก ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของหน่วยพื้นฐานทั้งสองแสดงใน รูปที่ 2.7 ลักษณะของหน่วยพื้นฐานที่เชื่อมต่อกันโดยใช้อะตอมรวมกันทำให้เกิดลักษณะโครงสร้างที่เป็นแผ่น คือ แผ่นซิลิกา (Silica Sheet) และแผ่นออกตาฮีตรอล (Octahedral Sheet หรือ Gibbsite Sheet) ดัง รูปที่ 2.8



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

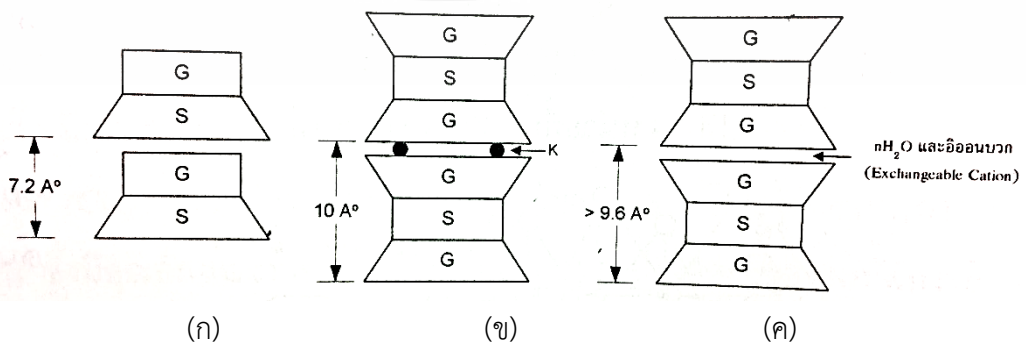
จากการก่อตัวเป็นโครงสร้างของแผ่นซิลิกาจะพบว่าอะตอมของออกซิเจนตรงจุดยอดของทรงเหลี่ยมสี่หน้าจะต้องมีประจุเท่ากับหนึ่งในการยึดเกาะกับอะตอมของซิลิกาตรงกลาง โดยทั่วไปแล้วจะไม่พบแผ่นซิลิกาอย่างเดียวในสภาพธรรมชาติ ส่วนใหญ่จะรวมกับแผ่นแอตธาฮีตรอลโดยที่อะตอมของออกซิเจนตรงจุดยอดของทรงเหลี่ยมสี่หน้าจะแทนที่ไฮโดรเจนในแผ่นแอตธาฮีตรอลกลายเป็นแผ่นซิลิกา-แอตธาฮีตรอล ดังแสดงใน รูปที่ 2.9 แร่ดินเหนียวจะเกิดจากการวางซ้อนยึดเกาะกันระหว่างแผ่นซิลิกากับแผ่นแอตธาฮีตรอล นั่นเอง



รูปที่ 2.9 แผ่นซิลิกา-แอตธาฮีตรอล

ตัวอย่างของแร่ดินเหนียวที่สำคัญ คือ

1. Kaolinite เกิดจากการวางซ้อนยึดเกาะระหว่างแผ่นซิลิกา-แอตธาฮีตรอลด้วยพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bond) ระหว่างอะตอมออกซิเจนของแผ่นหนึ่งและอะตอมของไฮโดรเจนของไฮดรอกซิลของอีกแผ่นหนึ่งที่มาซ้อน พันธะไฮโดรเจนนี้ถ้าเทียบกับพันธะโควาเลนต์และพันธะไอออนิกจะมีค่าน้อยกว่ามากจึงมีแนวโน้มที่จะถูกทำลายได้ง่ายกว่า ในสภาพธรรมชาตินั้นจะพบแร่ชนิดนี้ในลักษณะที่เกิดการซ้อนกันของแผ่นซิลิกา-แอตธาฮีตรอลเป็นจำนวนหลาย ๆ ชั้น โดยทั่วไปมีระยะห่างระหว่างชั้นเท่ากับ 7.2 Å องศา มีพื้นที่ผิวต่อหน่วยมวล (Specific Surface Area) ประมาณ 15 m<sup>2</sup>/g



รูปที่ 2.10 ลักษณะโครงสร้างของ (ก.) Kaolinite (ข.) Illite (ค.) Montmorillonite

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

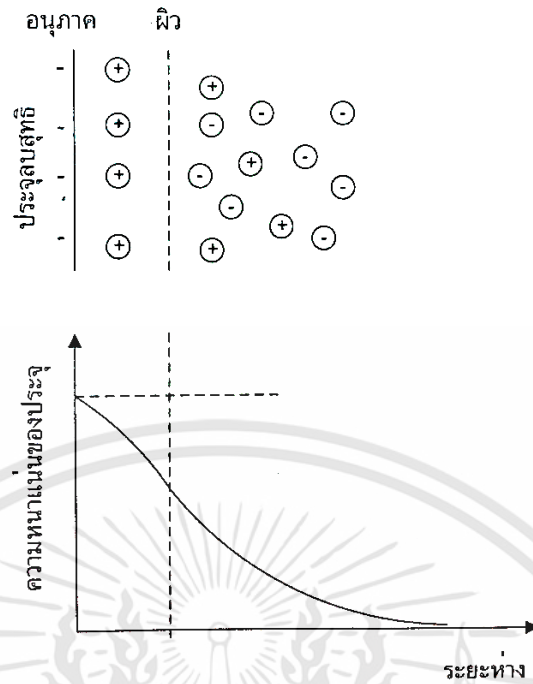
2. Illite เกิดจากการยึดกันของแผ่นซิลิกากับแผ่นอ็อกตาไฮดรอล ในลักษณะที่เป็นแซนวิชกลายเป็นแผ่นซิลิกา-อ็อกตาไฮดรอล-ซิลิกา หรือเรียกว่าไมก้า (Clay Mica) เมื่ออะตอมบางตัวของซิลิกาในแผ่นซิลิกาของแผ่นซิลิกา-อ็อกตาไฮดรอล-ซิลิกา ถูกแทนด้วยอะตอมของอลูมิเนียมโดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผลึก (Isomorphous Substitution) จึงเกิดประจุลบในบางหน่วยของซิลิกา ซึ่งจะเกาะกับประจุบวกของโปรแตสเซียมไอออนทำให้เกิดการซ้อนทับเกาะเป็นชั้นดังรูปที่ 2.10 Illite มีพื้นที่ผิว ต่อ หน่วยมวล (Specific Surface Area) ประมาณ  $80 \text{ m}^2/\text{g}$

3. Montmorillonite มีลักษณะคล้าย Illite แต่ประจุลบเกิดจากอะตอมของแมกนีเซียมจะเข้ามาแทนที่อะตอมของอลูมิเนียมในแผ่นอ็อกตาไฮดรอลของแผ่นซิลิกา-อ็อกตาไฮดรอล-ซิลิกา การยึดเกาะระหว่างชั้นโดยอาศัยประจุบวกไม่ได้เกิดจากโปรแตสเซียมไอออน และยึดเกาะกันไม่แข็งแรงเท่ากับกรณีของ (Illite) ทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถแทรกเข้าไปได้ง่าย ดินเหนียวชนิดนี้จะเกิดการบวมตัว (Swelling) ได้ง่าย โดยทั่วไป (Montmorillonite) มีพื้นที่ผิวต่อ หน่วยมวล (Specific Surface Area) ประมาณ  $800 \text{ m}^2/\text{g}$

แร่ดินเหนียวมีลักษณะเป็นแผ่นแบน โดยมีประจุลบโดยรอบผิวอนุภาคซึ่งเกิดจากกระบวนการแทนที่อะตอมโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผลึก (Isomorphous Substitution) และการทำลายพันธะยึดเกาะระหว่างชั้น ส่วนประจุบวกมีมากบริเวณขอบ จึงมีแนวโน้มที่จะดึงดูดประจุบวกที่มีโมเลกุลของน้ำ ลักษณะโครงสร้างการดึงดูดของโมเลกุลดังกล่าว มีการกระจายตัวของประจุบวกรอบผิวของอนุภาคดินเหนียวโดยลดลงตามระยะห่างจากพื้นผิว โดยผิวของประจุบวกที่ซ้อนขึ้นมาอีกชั้นนี้ ทำให้เสมือนว่ามีลักษณะคล้ายเป็นสองชั้น จึงนิยมเรียกว่าชั้นคู่ (Diffuse Double Layer) ดังรูปที่ 2.11 และรูป 2.12



รูปที่ 2.11 แสดงอนุภาคของดินเหนียวในสภาพสารละลาย



รูปที่ 2.12 ชั้นคู่ (Diffuse Double Layer)

### 2.3 หลักเกณฑ์พิจารณาคุณสมบัติความเป็นดินอ่อน

โดยทั่วไปคำว่า “ดินอ่อน” จะมีความหมายครอบคลุมถึง ดินเหนียวอ่อน (Soft Clay Soil) ดินที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นดินจำพวก ดินแป้ง (Silty Soil) หรือดินเหนียว (Clayey Soil) ที่มีความชื้นในมวลดิน (Natural Water Content,  $W_n$ ) สูง ดินที่ประกอบด้วยวัสดุจำพวกอินทรีย์สาร (Peat) หรือทรายหลวมที่ตกตะกอนใกล้หรือใต้ระดับน้ำ (Kamon และ Bergado 1991)

สำหรับพื้นที่ในการศึกษาครั้งนี้ (พื้นที่ 6 จังหวัด ได้แก่ กรุงเทพฯ นนทบุรี สมุทรปราการ ปทุมธานี ฉะเชิงเทรา และสมุทรสาคร) ถูกปกคลุมด้วยดินเหนียวอ่อนที่มีความหนาเฉลี่ยมากกว่า 12 เมตร ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้ คำว่าดินอ่อนจะหมายถึง ดินเหนียวอ่อนเพียงอย่างเดียว

#### 2.3.1 คุณสมบัติทั่วไปของดินเหนียวอ่อน

ดินเหนียวอ่อนคือ ดินเหนียวเกิดใหม่ที่ยังมีปริมาณน้ำในดินอยู่สูง กำลังของดินจึงต่ำ ดินเหนียวอ่อนจะเสียรูปได้ง่าย ยุบตัวมากและสูญเสียกำลังได้ง่ายเมื่อมีน้ำหนักภายนอกมากกระทำ นั่นคือมีความไวต่อการสูญเสียกำลัง (Sensitivity) สูง ดินเหนียวอ่อนมีความสามารถในการซึมผ่านได้ (Permeability) ต่ำ ถึงแม้ว่าจะมีสัดส่วนช่องว่างในมวลดิน (Void Ratio) สูงก็ตาม ทั้งนี้เพราะช่องว่างในมวลดินเมื่อน้ำอึดตัว โมเลกุลของน้ำก็จะจับตัวรอบเม็ดดินซึ่งเรียกว่า Double Layer Water ทำให้ช่องว่างระหว่างเม็ดดินเล็กลง นั่นคือ เหตุผลที่ทำให้ดินเหนียวอ่อนมีค่าการไหลซึมต่ำ (Permeability) กำลังของดินเหนียวเกือบทั้งหมดจะขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของเม็ดดิน (Cohesion) ส่วนในของความฝืดที่ผิวของเม็ดดิน (Internal Friction) จะมีอยู่ไม่สูงมากเพราะเม็ดดินจะถูกปกคลุมด้วยโมเลกุลของน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากที่กล่าวมาทั้งหมดเป็นคุณสมบัติเฉพาะของดินเหนียวอ่อนที่พบโดยทั่วไป ซึ่งสามารถสรุปคุณสมบัติดังกล่าวได้เป็น 2 ชนิดใหญ่ๆคือ

### 2.3.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties)

คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญ ได้แก่

1. ความชื้นในมวลดิน (Natural Water Content,  $W_n$ ) คือ อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของน้ำต่อน้ำหนักของส่วนที่เป็นเม็ดดินในมวลดินนั้นแสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ ค่าความชื้นในมวลดิน นี้เป็นคุณสมบัติของดินในลักษณะที่คล้ายคลึงกับ degree of saturation คือแสดงถึงระดับของปริมาณน้ำในมวลดิน แต่แสดงออกแตกต่างกันในรูปแบบของการเปรียบเทียบในเทอมของการน้ำหนัก

2. หน่วยน้ำหนักของดิน (Unit Weight,  $\gamma_t$ ) คืออัตราส่วนระหว่างน้ำหนักรวมของเม็ดดินและน้ำในมวลดิน ( $W = W_s + W_w$ ) ต่อปริมาตรรวมของเม็ดดิน น้ำ และ อากาศในมวลดินนั้น ( $V = V_s + V_w + V_a$ )

3. พิกัดออตเบิร์ก (Atterberg's Limits) เช่น ค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit, LL), ค่าพิกัดพลาสติก (Plastic Limit, PL), ค่าดัชนีพลาสติก (Plastic Index, PI), ค่าดัชนีเหลว (Liquidity Index, LI) พิกัดออตเบิร์ก ถูกคิดขึ้นโดยนักปฐพีวิทยา (Soil Scientist) นามว่า Atterberg ชาวสวีเดน ซึ่งได้พัฒนาวิธีการบ่งชี้ความชื้นเหลว (Consistency) ของดินเม็ดละเอียด (เฉพาะเม็ดดินส่วนที่เล็กกว่าตะแกรง #40) ที่แปรผันตามน้ำในดิน (Water Content) ที่สามารถระบุเป็นค่าตัวเลขและเป็นขีดแบ่งระหว่างสถานะต่าง ๆ โดยเขาได้จำแนกสถานะความชื้นเหลวของดินเป็นสี่สถานะโดยใช้ขีดแบ่งของแต่ละสถานะดังนี้

- ค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit, LL) คือ ค่าความชื้นในมวลดิน ซึ่งเป็นขีดแบ่งระหว่างสถานะพลาสติก (Plastic) และสถานะเหลว (Liquid) ของดิน อธิบายได้คือ ดินใด ๆ ก็ตามถ้ามีปริมาณน้ำอยู่ในมวลดินนั้นเท่ากับค่าพิกัดเหลว ดินนั้นจะอยู่ในสภาพที่กำลังจะเปลี่ยนจากพลาสติก ไปเป็น ของเหลว ถ้าปริมาณน้ำในดินเพิ่มขึ้นเกินกว่าค่าพิกัดเหลว ดินจะเปลี่ยนสภาพเป็นของเหลว แต่ถ้าปริมาณน้ำในดินลดลงจากค่านี้ ดินก็จะแห้งขึ้นและแปรสภาพเป็นพลาสติก กล่าวคือเป็นปริมาณน้ำที่น้อยที่สุดในดิน ที่ทำให้ดินเริ่มเหลวและไหลได้ ดินเหนียวมีค่าพิกัดเหลว ประมาณ 30 - 160% และค่าพิกัดเหลวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการยุบตัวของดิน

- ค่าพิกัดพลาสติก (Plastic Limit, PL) คือ ค่าความชื้นในมวลดินซึ่งเป็นขีดแบ่งระหว่างสถานะพลาสติกกับสถานะกึ่งของแข็ง (Semi-Solid) เมื่อปริมาณน้ำในมวลดินลดลงต่ำกว่าค่านี้ดินจะเสียสภาพความเป็นพลาสติก เริ่มมีสภาพเหมือนก้อนแข็งและมีรอยแตกร้าวบนผิว ค่าพิกัดพลาสติกนี้จะต่ำกว่าค่าพิกัดเหลวเสมอ กล่าวคือเป็นปริมาณน้ำที่น้อยที่สุดในดิน โดยที่ดินยังคงความเป็นพลาสติก (เหนียวหนืด) สามารถปั้นเป็นรูปร่างได้โดยไม่เกิดรอยแตกที่ผิวค่าพิกัดพลาสติก ส่วนใหญ่มีค่าประมาณ 20 - 50 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 โอกาสที่จะเกิดการหดตัวของดิน BRE Digest, 1980 (คัดลอกจาก (Barnes 2000))

Plastic Index (%)	Clay Fraction (%)	โอกาสที่ดินจะหดตัว
>35	>95	สูงมาก
22-48	60-95	สูง
12-32	30-60	ปานกลาง
<18	<30	ต่ำ

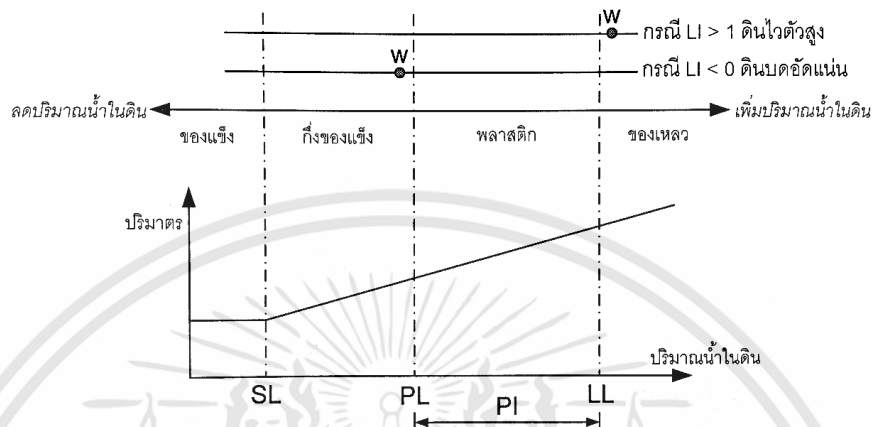
- พิกัดหดตัว (Shrinkage Limit, SL) คือ ค่าความชื้นในมวลดินซึ่งเป็นขีดแบ่งระหว่างสถานะกึ่งของแข็ง กับสถานะของแข็ง (Solid) ของดิน หรือ คือ ปริมาณน้ำที่เข้าไปอยู่ในมวลดินที่แห้งได้เต็มช่องว่างพอดิ แม้ปริมาณน้ำในดินจะลดน้อยลงกว่าพิกัดหดตัวนี้ ก็จะไม่ทำให้มวลดินหดตัวลดปริมาตรโดยรวมลงได้อีกต่อไป กล่าวคือเป็นปริมาณน้ำที่มากสุดในดิน ซึ่งแม้ว่าจะมีการสูญเสียความชื้นต่อไป ก็จะไม่ทำให้ดินหดตัวหรือลดปริมาตรลง อนึ่ง พิกัดหดตัวไม่ค่อยได้ใช้ในทางปฏิบัติ

- ค่าดัชนีพลาสติก (Plastic Index, PI = LL - PL) คือ ค่าผลต่างระหว่าง พิกัดเหลวกับพิกัดพลาสติกแสดงให้เห็นถึงปริมาณน้ำที่ต้องเพิ่มเข้าไปในมวลดิน เพื่อให้มวลดินเปลี่ยนสถานะจากจุดเริ่มเป็นพลาสติกไปจนถึงจุดที่เริ่มเป็นของเหลว โดยปกติมวลดินที่มีปริมาณเม็ดดินขนาดเล็กกว่าปนอยู่มากกว่าจะมีค่าดัชนีพลาสติกสูงกว่า ค่าดัชนีพลาสติกสามารถใช้บอกช่วงความเป็นพลาสติกของดิน หากค่าดัชนีพลาสติกมีค่าต่ำ แสดงว่าดินมีความเป็นพลาสติกต่ำ และกำลังของดินจะขึ้นอยู่กับมุมเสียดทานมากกว่า หากค่าดัชนีพลาสติกสูง แสดงว่าดินมีปริมาณแร่ดินเหนียว (Clay Minerals) ปะปนอยู่มากจึงปั้นได้ดี กล่าวง่าย ๆ ก็คือ ดินที่มีค่าดัชนีพลาสติกสูงคือ ดินที่มีความเป็นดินเหนียวสูงนั่นเอง

- ค่าดัชนีเหลว (Liquid Index, LI =  $\frac{w-PL}{LL-PL}$ ) คือ อัตราส่วนระหว่างผลต่างความชื้นในธรรมชาติของมวลดินและพิกัดพลาสติกกับผลต่างของพิกัดเหลว และพิกัดพลาสติก ค่านี้จะแสดงให้เห็นว่ามวลดินในธรรมชาติมีสถานะเป็นของเหลวหรือไม่ ถ้าค่าดัชนีเหลวน้อยกว่า 1 แสดงว่ามวลดินไม่อยู่ในสภาพของของเหลวแต่จะอยู่ในสภาพพลาสติก แต่ถ้าค่าดัชนีเหลวมีค่ามากกว่า 1 แสดงว่ามวลดินอยู่ในสภาพของเหลว ธรรมชาติความเหลวใช้บอกกำลังของดินคร่าว ๆ ได้ หากค่าดัชนีเหลว < 1 แสดงว่าดินอยู่ในสภาพกึ่งของแข็ง (Semi-Solid) มีกำลังรับน้ำหนักสูง และมีพฤติกรรมแบบเปราะ (Brittle) ซึ่งได้แก่ดินบดอัดแน่น (Compacted Soil) ถ้า  $0 < \text{ค่าดัชนีเหลว} < 1$  แสดงว่าดินอยู่ในสภาพพลาสติก และถ้า ค่าดัชนีเหลว > 1 แสดงว่าดินอยู่ในสภาพเหลวมากถือเป็นดินไวตัวสูง (Sensitive Soil) มีกำลังรับน้ำหนักต่ำมาก

ดินเม็ดละเอียดที่มีปริมาณน้ำมากกว่าพิกัดเหลว จะมีลักษณะคล้ายเหนียว ดินเม็ดละเอียดที่มีปริมาณน้ำระหว่างพิกัดพลาสติกและพิกัดเหลว (PL-LL) จะมีลักษณะคล้ายดินน้ำมัน ดินที่มีปริมาณ

น้ำระหว่างพิกัดหุดตัวและพิกัดพลาสติก (SL-PL) จะมีลักษณะคล้ายเนยแข็ง และดินเม็ดละเอียดที่มีปริมาณน้ำต่ำกว่าพิกัดหุดตัวจะมีลักษณะคล้ายลูกกวาดแข็ง รูปที่ 2.13 แสดงระดับความเป็นพลาสติกของดิน



รูปที่ 2.13 สภาพดินขึ้นกับตำแหน่งปริมาณน้ำในดิน (Water Content) เทียบกับพิกัดออตตเบิร์ก

ตารางที่ 2.3 ระดับความเป็นพลาสติกของดิน (Burmister, 1949)

ดัชนีพลาสติก (PI)	คำบรรยาย
0	ไม่มีความเป็นพลาสติก
1-5	มีความเป็นพลาสติกนิดเดียว
5-10	มีความเป็นพลาสติกต่ำ
10-20	มีความเป็นพลาสติกปานกลาง
20-40	มีความเป็นพลาสติกสูง
>40	มีความเป็นพลาสติกสูงมาก

ตารางที่ 2.4 ค่าพิกัดพลาสติก พิกัดเหลว และแอกติวิตี้ของแร่ดินเหนียวบางชนิด (Das, 2006)

แร่ดินเหนียว	PL	LL	A
Kaolinite	20-40	35-100	0.3-0.5
Illite	35-60	60-120	0.5-1.02
Montmorillonite	50-100	100-900	1.5-7.0
Halloysite(hydrated)	40-60	50-70	0.1-0.2
Halloysite(dehydrated)	30-45	40-55	0.4-0.6
Attapulgite	100-125	150-250	0.4-1.3
Allophane	120-150	200-250	0.4-1.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 แสดงคุณสมบัติโดยทั่วไปของชั้นดินเหนียวอ่อน และชั้นดินเหนียวในเขต กรุงเทพฯ

Soil Properties	Soft Clay	Stiff Clay
Natural Water Content, %	40-90	15-40
Liquid Limit, %	40-90	25-90
Plastic Limit, %	20-40	15-40
Plastic Index, %	20-60	10-50
Liquid Index	0.2-2.0	(-0.25)-0.5
Total Unit Weight, (kN/m <sup>3</sup> )	14.5-17.5	18.0-21.5
Plastic Index Equation	PI = 0.74(LL-15.5)	PI = 0.73(LL-12.0)

### 2.3.1.2 คุณสมบัติทางวิศวกรรม (Engineering Properties)

คุณสมบัติทางวิศวกรรมที่สำคัญ ได้แก่

1. กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength,  $S_u$ ) ซึ่งโดยทั่วไป กำลังรับแรงเฉือนชนิดนี้สามารถหาได้จากค่า Unconfined Compressive Strength,  $q_u$  ( $S_u = q_u/2$ ) หรือจากการทดสอบในสนามโดยการแปลงจากค่าการตอกแบบมาตรฐาน (Standard Penetration Number, SPT-N) ซึ่งวิธีนี้จะเหมาะสมเฉพาะกับดินเหนียวแข็ง ส่วนดินเหนียวอ่อนควรใช้การหาค่ากำลังรับแรงเฉือนโดยใช้ใบพัด (Field Vane Shear Test)

2. ความสามารถในการยุบตัว (Compressibility) ซึ่งจะพิจารณาค่าที่ได้จากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) เพื่อหาค่าสัดส่วนการอัดตัว (Compression Ratio, CR) หรือ ค่าดัชนีการอัดตัว (Compression Index,  $C_c$ ) และค่าสัดส่วนการคืนตัว (Recompression Ratio, RR) หรือค่าดัชนีการคืนตัว (Recompression Index,  $C_r$ ) ตารางที่ 2.5 แสดงค่าคุณสมบัติการยุบตัวทั่วไปของชั้นดินกรุงเทพฯ และตารางที่ 2.6 แสดงสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าคุณสมบัติการยุบตัวและค่าคุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียว

### 2.3.2 หลักเกณฑ์ทั่วไปที่ใช้ชี้วัดความเป็นดินอ่อน

ในงานทางวิศวกรรม เช่น งานถนน การออกแบบคันทางและโครงสร้างชั้นทางจำเป็นต้องคำนึงถึงว่า ชั้นฐานรากมีกำลังเพียงพอหรือไม่ที่จะรับน้ำหนักภายนอกที่มากกระทำ (น้ำหนักของตัวโครงสร้างชั้นทางเองและน้ำหนักจากการจราจร) และการทรุดตัวจะต้องไม่มากเกินไปที่จะก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างชั้นทาง ด้วยเหตุนี้เองคุณสมบัติที่ใช้ชี้วัดความเป็นดินอ่อนจึงใช้คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเป็นหลัก ซึ่งโดยทั่วไปค่ากำลังรับแรงเฉือนจะถูกใช้เป็นเกณฑ์ในการแบ่งระดับความเป็นดินอ่อนดัง ตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตอกแบบมาตรฐาน (SPT-N) กับค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินและเกณฑ์ในการแบ่งระดับความเป็นดินอ่อน (Terzaghi และ Peck, 1967)

SPT-N (blows/ft)	Undrained Shear Strength, $S_u$ (T/m <sup>2</sup> )	Consistency
< 2	0-1.25	very soft
2 - 4	1.25-2.50	soft
4 - 8	2.50-5.00	medium stiff, firm
8 - 15	5.00-10.0	stiff
15 - 30	10.0-20.0	very stiff
> 30	> 20.0	hard

อย่างไรก็ตาม นอกจากการใช้คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน เช่น ค่ากำลังรับแรงเฉือนเป็นเกณฑ์ในการแบ่งระดับความเป็นดินอ่อนแล้ว การใช้คุณสมบัติทางกายภาพก็อาจเป็นดัชนีอย่างหนึ่งที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการแบ่งระดับความเป็นดินอ่อน

## 2.4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งจะทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัว โดยจะขึ้นอยู่กับปริมาณสารประกอบในปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์แต่ละชนิดประกอบด้วยแคลเซียมออกไซด์ซิลิกา อลูมินา และเฟอร์ร็อกไซด์ และเกิดเป็นสารเชื่อมประสานเรียกว่า วัณปูนซีเมนต์ (cement gel) ซึ่งจะจับตัวแข็งเมื่อมีอายุเพิ่มขึ้นและ ปริมาณสารประกอบในปูนซีเมนต์มีหลายชนิดองค์ประกอบทางเคมีของสารประกอบหลักและคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ ดังนั้นปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำสามารถเริ่มต้นด้วยปฏิกิริยาของแต่ละสารประกอบในปูนซีเมนต์ ดังแสดงในตารางที่ 2.7

ก.) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต ( $C_3S$ ,  $C_2S$ )

แคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำ ก่อให้เกิด  $Ca(OH)_2$  และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, C-S-H) ดังสมการที่ (2-1)



ข.) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนตและยิปซัม

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ( $C_3A$ ) จะเกิดทันทีทันใด และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ ดังสมการที่ (2-2)

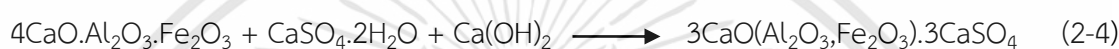


เพื่อหน่วงไม่ให้ปฏิกิริยาเกิดอย่างรวดเร็ว จึงใส่ยิปซัมเข้าไปในระหว่างขบวนการบดปูนเม็ดยิปซัมจะทำให้ปฏิกิริยากับก่อให้เกิดชั้นของเอ็ททริงไกต์ (Ettringite) บนผิวของอนุภาค  $C_3A$  ดังสมการที่ (2-3)



ค.) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียม อะลูมิโนเฟอร์ไรต์ ( $C_4AF$ )

ปฏิกิริยาของ  $C_4AF$  คล้ายกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นใน  $C_3A$  แต่ปฏิกิริยาจะเกิดช้ากว่าจะมีความร้อนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาที่น้อยกว่า ยิปซัมจะหน่วงปฏิกิริยาของ  $C_4AF$  มากกว่าที่หน่วงใน  $C_3A$  ปฏิกิริยาระหว่าง  $C_4AF$  และยิปซัมจะทำให้เกิดแคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนต (Calcium Sulfoaluminate) และแคลเซียมซัลโฟเฟอร์ไรต์ (Calcium Sulfoferrite) ดังสมการที่ (2-4)



ตารางที่ 2.7 สรุปรูปประกอบทางเคมีและคุณสมบัติของปูนซีเมนต์

คุณสมบัติ	$C_3S$	$C_2S$	$C_3A$	$C_4AF$
ชื่อสารประกอบ	Tricalcium Silicate	Dicalcium Silicate	Tricalcium Aluminate	Tetracalcium Aluminoferrite
องค์ประกอบทางเคมี	$3CaO \cdot SiO_2$	$2CaO \cdot SiO_2$	$3CaO \cdot Al_2O_3$	$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$
อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน	เร็ว (ชม.)	ช้า (วัน)	ทันที	เร็วมาก (นาทีก่อน)
การพัฒนากำลังอัด	เร็ว (วัน)	ช้า (อาทิตย์)	เร็วมาก (สัปดาห์)	เร็วมาก (สัปดาห์)
กำลังอัดประลัย	ปานกลาง	น้อย	ต่ำ	ต่ำ
ความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน	ปานกลาง (500 J/g)	น้อย (250 J/g)	สูงมาก (850 J/g)	ปานกลาง (420 J/g)

ที่มา : กลุ่มงานตรวจสอบและแนะนำวัสดุสร้างทาง

## 2.5 วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) เป็นสารผสมเพิ่มแบบแร่ธาตุ (Mineral Admixture) ซึ่งมีองค์ประกอบของธาตุที่สำคัญเหมือนปูนซีเมนต์ เช่น ซิลิกา ( $SiO_2$ ) อลูมินา ( $Al_2O_3$ ) และเฟอร์ริกออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ ) รวมกันเป็นปริมาณไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุนั้นๆ อาจจะมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไม่ก็ได้ แต่ต้องสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไซด์ แล้วเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) หรือแคลเซียมแคลเซียมอลูมิเนตไฮดรต (CAH) และถึงแม้ว่าปอซโซลานนั้นมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาทางเคมี แต่ในสัดส่วนผสมใดๆ ก็ตามบางครั้งปอซโซลานบางส่วนไม่สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมี ได้เนื่องจากองค์ประกอบในการทำปฏิกิริยาไม่เพียงพอต่อขบวนการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM 618 (2012) ในปัจจุบันมีการใช้วัสดุปอซโซลานอย่างแพร่หลาย โดยทั่วไปวัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติยึดประสานแต่ถ้าวัสดุปอซโซลานมีความละเอียดมากและมีน้ำหรือความชื้นเพียงพอจะทำปฏิกิริยากับจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ที่อุณหภูมิปกติ ทำให้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานคล้ายกับปูนซีเมนต์ เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานิก

### 2.5.1 ชนิดของวัสดุปอซโซลาน (Natural pozzolan)

ปอซโซลานมีสองชนิด คือ ชนิดที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และ ปอซโซลานดัดแปลง (Modify pozzolan) มีรายละเอียดดังนี้

ก. ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural pozzolan) ได้แก่ หินดินดาน (Shales) เศษหินภูเขาไฟ (Tuff) ภูเขาไฟ (Volcanic ash) หินภูมิไซท์ (Pumisite) หินโอเพิลเหลือง (Opaline) หินชั้น (Shale) หินเชิร์ต (Chert) หินปูน (Limestone) ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติเมื่อต้องการนำไปใช้งาน จะต้องนำมาบดก่อน

ข. ปอซโซลานดัดแปลง (Modify pozzolan) เป็นวัสดุปอซโซลานดัดแปลงเกิดจากขบวนการผลิตโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งเป็นผลพลอยได้ (By Product) หรือเกิดจากการตั้งใจที่จะนำปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองมาปรับปรุงคุณภาพโดยผ่านขบวนการผลิตที่ซับซ้อนขึ้นซึ่งโดยมากจะเป็นขบวนการเผาไหม้ ปัจจุบันปอซโซลานดัดแปลงที่พบได้แก่ ฝ้ายลอย (Fly ash) ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซิลิกาฟุ้ง (Silica fume) จะได้มาจากการผลิตโลหะอัลลอยด์ และตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Slag) ได้จากการถลุงเหล็ก เป็นต้น

### 2.5.2 คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของสารปอซโซลาน

ส่วนประกอบทางเคมีของสารปอซโซลาน คือซิลิกาไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ), อลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) โดยองค์ประกอบหลักเหล่านี้จะต้องมีอยู่มากกว่าร้อยละ 70 โดยเป็นค่าร้อยละต่ำสุดที่กำหนดโดยมาตรฐาน ASTM C618

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า คุณภาพของสารปอซโซลานไม่ได้ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบทางเคมีเพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตามสารปอซโซลานต้องมีส่วนประกอบซิลิกาที่อยู่ในรูปอสัณฐาน ซึ่งเป็นซิลิกาที่มีประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิปกติ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาว่าการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบทางเคมีของสารปอซโซลาน ไม่สามารถที่จะบอกถึงพฤติกรรมในการปรับปรุงคุณภาพได้ เช่น ผลึกควอตซ์ (Quartz) ซึ่งเป็นสารที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบเพียงร้อยละ 40 ที่อุณหภูมิปกติ

อภิสิทธิ์ (2547) กล่าวว่าปฏิกิริยาเคมีของสารปอซโซลานที่ทำให้เกิดการเชื่อมประสานเพื่อปรับปรุงคุณภาพของดินสามารถแบ่งออกเป็น 3 ปฏิกิริยาดังนี้

1) ปฏิกริยาการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้า (Ion Exchange) เป็นปฏิกริยาการแทนที่ของแคตไอออนซึ่งมีวาเลนซ์สูงกว่าหรือมีขนาดใหญ่กว่าแคตไอออนที่มีวาเลนซ์ต่ำกว่าหรือมีขนาดเล็กกว่า เช่น  $\text{Ca}^{2+}$  แทนที่  $\text{Na}^+$  ที่มีอยู่ในดิน ทำให้อนุภาคของเม็ดดินสามารถจับตัวกันดีขึ้นเป็นผลให้ดินมีเสถียรภาพดีขึ้น โดยมากมักเกิดจาก  $\text{CaO}$  ในสารปอซโซลานทำให้มี  $\text{Ca}^{2+}$  ไปแทนที่ไอออนที่มีวาเลนซ์ต่ำกว่าได้

2) ปฏิกริยาการจับตัวของเม็ดดิน (Flocculation Agglomeration) เป็นปฏิกริยาซึ่งทำให้อนุภาคดินเหนียวเกิดการรวมตัวเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนและมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยแคตไอออนจากถ้าละลายเข้าไปในมวลดินจะเข้าไปจับตัวบนผิวอนุภาคดินเหนียว และเมื่อความเข้มข้นของไอออนสูงขึ้นจะเกิดการและเปลี่ยนประจุไฟฟ้าของแร่ดิน ซึ่งจะทำให้ชั้นคู่ (Double Layer) หดตัวแคบเข้า ทำให้อนุภาคดินเหนียวจะเคลื่อนตัวเข้าหากันและเกิดการดึงดูดอนุภาคของดินรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ทำให้โครงสร้างของดินมั่นคงขึ้น

3) ปฏิกริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic) คือ ปฏิกริยาของซิลิคอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และ/หรืออะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ในสารปอซโซลานทำปฏิกริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากการไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต และไดแคลเซียมซิลิเกต โดยที่ผลิตภัณฑ์ของปฏิกริยาปอซโซลานิกของซิลิคอนไดออกไซด์ได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ในขณะที่ปฏิกริยาปอซโซลานิกของอะลูมิเนียมออกไซด์ ได้แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต ( $\text{C}_3\text{A}_2\text{H}_3$ ) แสดงดังสมการที่ (2-5) และ (2-6)



การที่ปริมาณ CSH เพิ่มขึ้น มีส่วนช่วยปรับปรุงโครงสร้างภายในของคอนกรีตให้ทึบแน่นมากขึ้น มีความทึบน้ำสูง ช่วยเพิ่มกำลังให้แก่คอนกรีตและมอร์ต้า และส่งผลถึงความทนทานของคอนกรีตตาม ASTM C618 ได้จำแนกปอซโซลานออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพ ได้แก่

1) ชั้นคุณภาพ N (Class N) เป็นปอซโซลานจากธรรมชาติหรือปอซโซลานจากธรรมชาติที่ผ่านขบวนการเผาแล้วเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ

2) ชั้นคุณภาพ F (Class F) เป็นถ่านล้อยที่ได้จากการเผากถ่านหินแอนทราไซต์ (Anthracite) หรือบิทูมินัส (Bituminous) โดยมีปริมาณผลรวมของซิลิกาออกไซด์ (Silica Oxide,  $\text{SiO}_2$ ) อลูมินาออกไซด์ (Alumina Oxide,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric Oxide,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 แสดงดังตารางที่ 2.3 ซึ่งโดยทั่วไปถ่านล้อย ชั้นคุณภาพ F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide,  $\text{CaO}$ ) ที่ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าถ่านล้อยแคลเซียมต่ำ สำหรับ  $\text{SiO}_2$  มาจากแร่ดินเหนียวและควอร์ตซ์ เนื่องจากถ่านหิน

แอสตาซีต์และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูงจึงให้เถ้าลอยที่มี  $\text{SiO}_2$  สูง สำหรับวิธีการเก็บตัวอย่างและการทดสอบให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C311

3) ชั้นคุณภาพ C (Class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ (lignite) หรือซับบิทูมินัส (subbituminous) เป็นส่วนใหญ่ โดยมีปริมาณผลรวมของ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  มากกว่าร้อยละ 50 มีปริมาณ  $\text{CaO}$  สูง และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 แสดงดังตารางที่ 2.3 เถ้าลอยชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่าเถ้าลอยแคลเซียมสูง สำหรับ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ต่ำ ทำให้เถ้าลอย Class C นอกจากมี  $\text{SiO}_2$  ต่ำแล้ว ยังมี  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ต่ำด้วย (ACI 232.2R-96, 2000)

สำหรับปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์กำหนดให้ไม่เกินร้อยละ 5 ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณซัลเฟตมีผลต่อการพัฒนาความสามารถในการรับน้ำหนัก/แรงอัด และเวลาในการก่อตัวได้ ทั้งยังมีผลเสียต่อคอนกรีตที่แข็งตัวอีกด้วย อย่างไรก็ตามยังมีส่วนช่วยเสริมในการเกิด Sulfate Attack

นอกจากนี้ยังมีการกำหนดค่าของน้ำหนักระเหยเนื่องจากจากการเผาไหม้ไม่เกินร้อยละ 6 ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ หากมีค่าของน้ำหนักระเหยเนื่องจากจากการเผาไหม้จะทำให้ความต้องการน้ำในคอนกรีตเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปแล้วเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าจะมีค่าของน้ำหนักระเหยเนื่องจากจากการเผาต่ำกว่าร้อยละ 6 ส่วนปริมาณอัลคาไลในรูปของไดโซเดียมออกไซด์มากที่สุดไม่เกินร้อยละ 1.5 เนื่องจากมีปริมาณปูนขาวอิสระสูงจะมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาของ Alkali Aggregate ขึ้นได้ อย่างไรก็ตามเถ้าลอยที่มีปริมาณของไดโซเดียมออกไซด์มากกว่าร้อยละ 1.5 จะนำมาใช้กับมวลรวมที่ไวต่อปฏิกิริยาได้ก็ต่อเมื่อผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการไม่ปรากฏการขยายตัวจนเกิดความเสียหาย

ตารางที่ 2.8 องค์ประกอบทางเคมีในเถ้าถ่านเตาเปรียบเทียบกับเถ้าลอยชั้นคุณภาพ F และ C

องค์ประกอบทางเคมี	ชั้นคุณภาพเถ้าลอย	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินา และเฟอร์ริกออกไซด์ ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ )	>70	>50
ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ), max %	<10	>10
ปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ), max %	5	5
ปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ), max %	-	-
ปริมาณความชื้น, max %	3	3
ปริมาณคาร์บอนเผาไหม้ไม่หมด (Loss on Ignition % , LOI), max %	6	6
อัลคาไลในรูปของไดโซเดียมออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), max %	1.5	1.5

ที่มา : ASTM C618-92a (1994)

นอกจากจะแบ่งแยกชนิดของเถ้าถ่านออกเป็น 2 ชนิด ดังกล่าวมา ยังสามารถพิจารณาจากความแตกต่างของส่วนประกอบและคุณสมบัติในด้านความเป็นซีเมนต์ (Cementitious) และความเป็นปอซโซลาน (Pozzolan) ได้ด้วย เนื่องจากเถ้าลอย Class C โดยทั่วไปจะมีคุณสมบัติการเป็นซีเมนต์เพิ่มขึ้น จากคุณสมบัติปอซโซลาน เพราะเถ้าถ่านหิน Class C มักจะมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงกว่าร้อยละ 10 ส่วน Class F มีแคลเซียมออกไซด์ต่ำกว่าร้อยละ 10 ดังนั้นการนำเถ้าถ่านหินมาใช้ในงานคอนกรีตธรรมดาทั่วไป ACI 226 (1987) ได้แนะนำ ควรใช้เถ้าถ่านหิน Class F ในปริมาณร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และสามารถเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 15 ถึง 35 ได้ในกรณีที่ใช้เถ้าถ่านหิน Class C เนื่องจากพบว่า เถ้าถ่านหิน Class C จะมีลักษณะความเป็นซีเมนต์มากกว่า เพราะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ สูงกว่าเถ้าถ่านหิน Class F ดังในตาราง 2.8

มาตรฐานผลิตภัณฑ์ (มอก.) กำหนดรายละเอียดเกี่ยวกับเถ้าลอยถ่านหินใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มเพื่อใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานหลัก โดยแบ่งชั้นคุณภาพและชนิดตามคุณลักษณะทางเคมีได้เป็น 3 ชั้นคุณภาพ

อภิสิทธิ์ (2547) กล่าวว่าปฏิกิริยาเคมีของสารปอซโซลานที่ทำให้เกิดการเชื่อมประสานเพื่อปรับปรุงคุณภาพของดินสามารถแบ่งออกเป็น 3 ปฏิกิริยาดังนี้

4) ปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้า (Ion Exchange) เป็นปฏิกิริยาการแทนที่ของแคตไอออนซึ่งมีวาเลนซ์สูงกว่าหรือมีขนาดใหญ่กว่าแคตไอออนที่มีวาเลนซ์ต่ำกว่าหรือมีขนาดเล็กกว่า เช่น  $Ca^{2+}$  แทนที่  $Na^+$  ที่มีอยู่ในดิน ทำให้อนุภาคของเม็ดดินสามารถจับตัวกันดีขึ้นเป็นผลให้ดินมีเสถียรภาพดีขึ้น โดยมากมักเกิดจาก CaO ในสารปอซโซลานทำให้มี  $Ca^{2+}$  ไปแทนที่ไอออนที่มีวาเลนซ์ต่ำกว่าได้

5) ปฏิกิริยาการจับตัวของเม็ดดิน (Flocculation Agglomeration) เป็นปฏิกิริยาซึ่งทำให้อนุภาคดินเหนียวเกิดการรวมตัวเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนและมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยแคตไอออนจากเถ้าลอยเข้าไปในมวลดินจะเข้าไปจับตัวบนผิวอนุภาคดินเหนียว และเมื่อความเข้มข้นของไอออนสูงขึ้นจะเกิดการและเปลี่ยนประจุไฟฟ้าของแร่ดิน ซึ่งจะทำให้ชั้นคู่ (Double Layer) หดตัวแคบเข้า ทำให้อนุภาคดินเหนียวจะเคลื่อนตัวเข้าหากันและเกิดการดึงดูดอนุภาคของดินรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ทำให้โครงสร้างของดินมั่นคงขึ้น

#### 2.5.2.1 เถ้าลอย (fly ash หรือ pulverized fuel ash)

เถ้าลอย เกิดจากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าถ่านหินจะถูกพัดออกมาตามลมร้อนเพื่อออกไปสู่ปล่องควัน จากนั้นตัวดักจับ (electrostatic precipitator) จะรวบรวมเถ้าถ่านหินเพื่อเก็บไว้ในไซโลต่อไป ในการผลิตกระแสไฟฟ้า จะเหลือกากจากการเผาถ่านหิน ประมาณร้อยละ 80 เป็นเถ้าลอยและอีกร้อยละ 20 เป็นเถ้าก้นเตา นิยมนำเถ้าลอยไปใช้ในงานคอนกรีตมากกว่าในงานชนิดอื่นด้วยเหตุผล 2 ประการ คือ ประการแรก พบว่าเถ้าลอยมีออกไซด์ของธาตุซิลิกา, อะลูมินา, และเหล็ก ซึ่งออกไซด์ของธาตุเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีและเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตให้สูงขึ้น โดยเฉพาะเมื่อใช้เถ้าลอยที่มีคุณภาพดีและในปริมาณที่เหมาะสม ประการที่สอง เนื่องจากเถ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลอยมีอนุภาคที่ค่อนข้างเล็กและส่วนใหญ่เป็นเม็ดกลม เมื่อผสมในคอนกรีต เถ้าลอยจะเข้าไปอุดช่องว่างเล็ก ๆ ระหว่างปูนซีเมนต์และหินหรือทรายทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น และลักษณะทรงกลมของเถ้าลอยจะช่วยให้คอนกรีตมีการลื่นไหลได้ดีขึ้นทำให้การสูบล่งคอนกรีตหรือเทคอนกรีตลงในแบบทำได้สะดวกและง่ายขึ้น นอกจากนี้คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยยังสามารถผสมได้ง่ายและลดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในเครื่องผสมลงได้เนื่องจากรูปร่างที่กลมและผิวสัมผัสที่ลื่นของเถ้าลอยทำให้แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคต่ำลง การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีตมีข้อดีหลายประการได้แก่ เพิ่มความสามารถในการเทได้, เพิ่มต้านทานต่อการกัดกร่อนของคอนกรีต, ลดผลกระทบจากการแยกตัว, ลดความร้อนที่เกิดขึ้นในคอนกรีต, ลดการหดตัว, ลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต, และที่สำคัญคือเพิ่มกำลังอัดและกำลังดึงประลัยของคอนกรีตเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น ส่วนข้อเสีย คือ ทำให้อัตราการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตต่ำลงในช่วงอายุต้น, ลดความต้านทานต่อสภาวะการแข็งตัวและละลายของน้ำสลับกันไป, และทำให้ต้องใช้สารเพื่อเพิ่มฟองอากาศมากขึ้นเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีปริมาณฟองอากาศตามต้องการในระดับเดียวกับคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าถ่านหินผสมอยู่ องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน แต่โดยทั่วไปองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือประกอบด้วย ซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) อลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) เป็นองค์ประกอบหลัก และมีแมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) ออกไซด์ของอัลคาไล ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) เป็นองค์ประกอบรอง นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วย ความชื้น ( $\text{H}_2\text{O}$ ) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (loss on ignition : LOI)  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ  $\text{CaO}$  เป็นองค์ประกอบหลักมีปริมาณถึงร้อยละ 80-90 จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของเถ้าถ่านหิน ตามมาตรฐาน ASTM C618 กำหนดผลรวมของ  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  ของเถ้าลอยไว้อย่างต่ำร้อยละ 50 ถึงจะอยู่ในเกณฑ์นำไปใช้งานได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 แสดงข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอย

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด			
	ชั้น คุณภาพ 1	ชั้นคุณภาพ 2		ชั้นคุณภาพ 3
		ชนิด ก	ชนิด ข	
ปริมาณซิลิกาออกไซด์ (SiO <sub>2</sub> ) อย่างต่ำ , ร้อยละ	30.0	30.0	30.0	30.0
ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) , ร้อยละ	-	น้อยกว่า	น้อยกว่า	-
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO <sub>3</sub> ) อย่างมาก , ร้อยละ	5.0	10.0	10.0	5.0
ปริมาณความชื้นสูงสุด อย่างมาก , ร้อยละ	3.0	5.0	5.0	2.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจาก การเผา (LOI) , ร้อยละ	6.0	3.0 6.0	2.0 6.0	6.0

ที่มา : ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามเถ้าลอยตามมาตรฐาน มอก. 2135-2546 [14]

#### 2.5.2.2 ซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume)

ซิลิกาฟุ้ง (silica fume) หรือไมโครซิลิกา (microsilica) หรือซิลิกาฟุ้งควบแน่น (condensed silica fume) เป็นชื่อเรียกวัสตุดผสมเพิ่มชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นผลพลอยได้ของโรงงานการผลิตซิลิกอนเมททัลและเฟอร์โรซิลิกอนอัลลอยด์เป็นกระบวนการรีดักชันจากควอร์ต (quartz) ที่บริสุทธิ์ไปเป็นซิลิกอนโดยวิธี electric arc ที่อุณหภูมิสูงถึง 2,000 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดไอ (fume) ของ SiO ซึ่งต่อมาจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและกลั่นตัวที่อุณหภูมิต่ำได้เป็นอนุภาคของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) ขนาดเล็กมากที่ไม่เป็นผลึกและมีรูปร่างกลม ซิลิกาฟุ้งจะถูกดักจับในตัวดักจับเพื่อบรรจุใส่ถุงไว้

เนื่องจากซิลิกาฟุ้งมีอนุภาคที่เล็กมาก มีพื้นที่ผิวสูงมาก และอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึก จึงสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้อย่างรวดเร็ว ปัญหาของการใช้ซิลิกาฟุ้งในงานคอนกรีตคือส่วนผสมคอนกรีตต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น เพื่อให้ได้ความชื้นเหลวเท่าเดิมเนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กมากของซิลิกาฟุ้ง ทำให้มีพื้นที่ผิวสูงมากจึงต้องการปริมาณน้ำในการหล่อลื่นพื้นที่ผิวของอนุภาคสูงขึ้นด้วยซิลิกาฟุ้งจากโรงงานโลหะซิลิกอนและเฟอร์โรซิลิกอนอัลลอยด์เป็นซิลิกาฟุ้งที่มีในรูปไม่เป็นผลึกหรืออสัณฐานซึ่งมีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา ส่วนซิลิกาฟุ้งที่ได้จากโรงงานเฟอร์โรซิลิกอน มีคุณภาพต่ำกว่าโดยมีซิลิกอนเพียงประมาณร้อยละ 50 และอยู่ในรูปของผลึกค่อนข้างมาก ซึ่งส่งผลให้การใช้ซิลิกาฟุ้งเหล่านี้ในงานคอนกรีตไม่คืนัก คุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟุ้งที่เห็นชัดเจน คือ เป็นฝุ่นผงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ละเอียดมากสีเทา เทาดำหรือเทาอมขาวแต่ถ้าเป็นซิลิกาฟูมควบแน่นจะมีขนาดของอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น เนื่องจากการรวมตัวของซิลิกาฟูมหลายอนุภาคเข้าด้วยกัน ความถ่วงจำเพาะของซิลิกาฟูมมีค่าประมาณ 2.2 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.1 ไมโครเมตร มีพื้นที่ผิวประมาณ 200,000 ถึง 250,000 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ซึ่งใช้การทดสอบโดยวิธีดูดซับก๊าซไนโตรเจน (nitrogen absorption test) และถือว่ามีค่าสูงมาก(ขณะที่ถ่านหินมีค่าประมาณ 3,000 ถึง 7,000 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ซึ่งทดสอบโดยวิธีเบลน) ขนาดอนุภาคของซิลิกาฟูมเป็นขนาดเล็กมากเพราะมีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถึงกว่า 150 เท่าเพราะปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 15 ไมโครเมตร เนื่องจากซิลิกาฟูมมีขนาดเล็กมากจึงมีปัญหาในการขนย้าย เพื่อแก้ปัญหาจึงมีการนำซิลิกาฟูมมาอัดรวมกันเพื่อให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเรียกว่าซิลิกาฟูมควบแน่น การใช้ซิลิกาฟูมในคอนกรีตช่วยเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟต การแทรกซึมของคลอไรด์ การกัดกร่อนเนื่องจากน้ำเค็มหรือน้ำทะเลรวมถึงการเพิ่มความทนทานของคอนกรีตต่อสภาวะการแข็งตัวและละลายของน้ำสลับกันได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา การที่คอนกรีตผสมซิลิกาฟูมมีคุณสมบัติดังกล่าวดีขึ้นอาจเนื่องมาจากซิลิกาฟูมทำให้คอนกรีตมีการซึมผ่านน้ำต่ำและโพรงของซีเมนต์เฟสมีขนาดเล็ก การใช้ซิลิกาฟูมร้อยละ 5 หรือ 10 สามารถลดค่าความพรุนและเพิ่มปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตได้อย่างมีประสิทธิภาพและยังทำให้เฟสที่ผสมซิลิกาฟูมมีคุณภาพดีขึ้นกว่าซีเมนต์เฟสธรรมดา การใช้ซิลิกาฟูมจะช่วยลดการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกาในคอนกรีต การใช้ซิลิกาฟูมในปริมาณร้อยละ 15 ช่วยลดการขยายตัวของปฏิกิริยาของอัลคาไลซิลิกาได้ดีเช่นเดียวกับการใช้ถ่านหินร้อยละ 30 หรือใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กร้อยละ 50 การใช้ซิลิกาฟูมร้อยละ 20 สามารถลดการขยายตัวได้มากกว่าการใช้ร้อยละ 10 ถึง 15 แต่การใช้เพียงร้อยละ 10 ก็เพียงพอที่จะลดปัญหาการขยายตัวของปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกา

ปัจจุบันนิยมใช้ซิลิกาฟูมในการทำคอนกรีตกำลังสูงและเพื่อเพิ่มความทนทานของคอนกรีตเป็นหลัก สิ่งที่ควรระมัดระวังให้มากคือการผสมซิลิกาฟูมในคอนกรีตควรมีความสม่ำเสมอตลอดทั่วทั้งคอนกรีต ควรทำการตรวจสอบว่าซิลิกาฟูมสามารถใช้ร่วมกับสารลดน้ำพิเศษที่ใช้อยู่เป็นประจำได้ดีเพื่อที่จะได้ไม่ต้องใช้ปริมาณน้ำในการผสมคอนกรีตมากเกินไป ข้อสำคัญอีกข้อหนึ่งคือควรทำการตรวจสอบทางด้านเศรษฐศาสตร์ด้วย เพราะซิลิกาฟูมมีราคาแพงกว่าปูนซีเมนต์มากเพราะยังไม่สามารถผลิตขึ้นใช้ได้ภายในประเทศไทย กล่าวคือ ในประเทศไทยราคาของซิลิกาฟูมสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ประมาณ 10 ถึง 15 เท่า

**ตารางที่ 2.10** ตารางร้อยละส่วนผสมโดยน้ำหนักของซิลิกาฟูม

ร้อยละโดยน้ำหนัก (%)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	ออกไซด์อื่นๆ
ซิลิกาฟูม	92.00	0.70	1.20	0.50	0.20	-	2.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.2.3 เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash)

เถ้าแกลบ ได้จากการถั่วแกลบข้าวเป็นผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรที่สำคัญมาก ในปีหนึ่งจะมีการเก็บเกี่ยวข้าวได้ทั่วโลกประมาณ 600 ล้านตัน ประเทศไทยเป็นประเทศที่ส่งออกข้าวมากที่สุด มีกำลังการผลิตข้าวปีละประมาณ 25 ล้านตัน ในปีหนึ่งๆ ประเทศไทยได้แกลบจากการสีข้าวประมาณ 5 ล้านตัน ในแต่ละตัน(1000 กิโลกรัม) ของข้าวเปลือกเมื่อสีแล้วจะมีแกลบอยู่ประมาณ 200 กิโลกรัม และเมื่อนำแกลบไปเผาจะได้เถ้าแกลบ (rice husk ash) ประมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักของแกลบ หรือประมาณ 40 กิโลกรัม เนื่องจากเถ้าแกลบมีปริมาณซิลิกา (silica) สูง จึงเป็นผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรที่เหมาะสมสำหรับการนำมาพัฒนาทำเป็นวัสดุพอลิโอสโหลน

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ ซึ่งพบว่าเถ้าแกลบมี  $\text{SiO}_2$  สูงมากถึงประมาณร้อยละ 90 ทำนองเดียวกัน บอรัลและ พิชัย บอรัล และ เชิดพงศ์ และสาโรจน์ และคณะ พบว่าเถ้าแกลบที่เผาในประเทศไทยมี  $\text{SiO}_2$  อยู่ร้อยละ 92.28, 95.36, และ 91.84 ตามลำดับ ส่วนที่เหลือเป็นออกไซด์ของโซเดียม โปแตสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็กฟอสฟอรัส และ ซัลเฟอร์ และค่าการสูญเสีย น้ำหนักเนื่องจากการเผา (loss on ignition หรือ LOI) ซึ่งตามปกติมี LOI อยู่ประมาณร้อยละ 2-5 อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแกลบมีผลต่อค่า LOI เพราะการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์จะทำให้เถ้าแกลบมี LOI สูงขึ้น LOI ที่อยู่ในเถ้าแกลบส่วนใหญ่จะเป็นธาตุถ่านตูดน้ำสูง และถ้ามีจำนวนมากจะทำให้กำลังของคอนกรีตลดลงได้

### 2.5.2.4 เถ้าภูเขาไฟ (Volcanic Ash)

เถ้าภูเขาไฟ เป็นวัสดุพอลิโอสโหลนธรรมชาติ และมีการนำมาใช้ก่อสร้างอาคารตั้งแต่สมัยกรีกและโรมันโบราณ เถ้าภูเขาไฟเกิดจากหินและแมกมาที่ระเบิดออกจากภูเขาไฟและแตกตัวเป็นหินขนาดเล็ก ซึ่งเมื่อนำมาบดละเอียดจะทำให้มีความเป็นวัสดุพอลิโอสโหลนที่ดี องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าภูเขาไฟส่วนใหญ่ประกอบด้วย ออกไซด์ของซิลิกา อลูมินา และเหล็กเป็นองค์ประกอบหลักซึ่งเหมือนกับวัสดุพอลิโอสโหลนโดยทั่วไป การศึกษาการใช้เถ้าภูเขาไฟเป็นวัสดุพอลิโอสโหลนส่วนใหญ่เป็นการศึกษาในต่างประเทศเนื่องจากมีวัตถุดิบ ซึ่งพบว่าเถ้าภูเขาไฟสามารถนำมาใช้ในงานคอนกรีตเพื่อลดความร้อนที่เกิดขึ้นในคอนกรีตได้ นอกจากนี้ด้านความคงทนของคอนกรีต พบว่าการใช้เถ้าภูเขาไฟในส่วนผสมคอนกรีตสามารถเพิ่มความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ขึ้น อย่างไรก็ตามสำหรับประเทศไทยยังไม่มีการศึกษาวัสดุพอลิโอสโหลนชนิดนี้จริงจั้งเนื่องจากไม่มีแหล่งของวัตถุดิบ

### 2.5.2.5 เถ้าขยะ

เถ้าขยะ เกิดจากการเผาขยะซึ่งได้แก่ เศษกระดาษ ใบไม้ เศษอาหาร และ ขยะอื่น ๆ เนื่องจากขยะที่มีการทิ้งในแต่ละปีมีปริมาณมากและมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นทุกปี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเมืองใหญ่ เช่น กรุงเทพมหานคร ขยะเหล่านี้นอกจากนำไปฝังกลบแล้ว ยังมีการนำไปเผาเพื่อกำจัดหรือใช้เป็นเชื้อเพลิง และหลังจากการเผาแล้วจะมีเถ้าที่เกิดขึ้นประมาณร้อยละ 10 การศึกษาเถ้าขยะเพื่อใช้ในงานคอนกรีตยังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนักทั้งในและต่างประเทศ เนื่องจากความสม่ำเสมอขององค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขยะที่แปรเปลี่ยนไปอย่างมากตามขยะที่ใช้เผา นอกจากนี้ขนาดของเถ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขยะยังแตกต่างกันอย่างมากเพราะขึ้นอยู่กับลักษณะของขยะที่นำมาเผา ชนิดของเตาเผา รวมถึงอุณหภูมิของการเผาขยะด้วย ดังนั้นการนำเถ้าขยะไปใช้งานจึงต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อให้ได้ข้อมูลในการกำหนดลักษณะที่เหมาะสมของเถ้าขยะที่สามารถนำไปใช้ในงานคอนกรีตได้โดยไม่ส่งผลเสียต่อคอนกรีตนั้น

#### 2.5.2.6 เถ้าชานอ้อย (Bagasse Ash)

เถ้าชานอ้อย (bagasse ash) เป็นวัสดุพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล ซึ่งใช้ชานอ้อยและใบอ้อย เผาเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า โดยกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จะนำไปใช้สำหรับอุตสาหกรรมภายในโรงงานและส่วนที่เหลือสามารถขายให้แก่การไฟฟ้าที่ฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ปี พ.ศ. 2545 พบว่าประเทศไทยมีผลผลิตอ้อยทั้งหมดประมาณ 74 ล้านตัน และหลังจากกระบวนการผลิตน้ำตาลมีกากอ้อยประมาณ 21 ล้านตัน และหลังจากการเผากากอ้อยเหล่านี้เพื่อเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าแล้วพบว่าได้เถ้าชานอ้อยประมาณ 0.8 ล้านตัน เถ้าชานอ้อยที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้ามีการนำไปใช้ประโยชน์ค่อนข้างน้อย เช่น เกษตรกรนำไปใช้เป็นปุ๋ยเพื่อปรับสภาพดินในงานเกษตรกรรม แต่ส่วนใหญ่ของเถ้าชานอ้อยต้องนำไปทิ้งโดยไม่เกิดประโยชน์

ลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าชานอ้อยเถ้าชานอ้อยมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม ไม่แน่นอน ผิวขรุขระ และมีรูพรุนสูง โดยมีขนาดของอนุภาคใหญ่กว่า 30 ไมครอนขึ้นไป เมื่อบดเถ้าชานอ้อยให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นลักษณะอนุภาคคล้ายกันกับเถ้าแกลบหรือเถ้าแกลบหรือเถ้าปาล์มน้ำมันหลังการบดทั่วไป คือ เป็นเหลี่ยมมุม รูปร่างไม่แน่นอน อนุภาคมีขนาดและความพรุนลดลงเมื่อเทียบกับเถ้าชานอ้อยก่อนบด สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อยพบว่าเถ้าชานอ้อยมี  $\text{SiO}_2$  เป็นองค์ประกอบหลักเหมือนกับเถ้าแกลบบดละเอียดและเถ้าปาล์มน้ำมันโดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 65-75 มีปริมาณ  $\text{SO}_3$  ต่ำ แต่ปริมาณของ LOI ค่อนข้างสูงซึ่งอาจสูงถึงร้อยละ 20-30 การที่ LOI ของเถ้าชานอ้อยมีค่าค่อนข้างสูงมักเกิดขึ้นเช่นเดียวกับเถ้าชีวมวลทั่วไป เป็นองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อยในประเทศไทย ที่มี LOI สูง และ LOI ต่ำ หากเถ้าชานอ้อยมี LOI สูง มักจะมี  $\text{SiO}_2$  ต่ำกว่าเถ้าชานอ้อยที่มี LOI ต่ำ อย่างไรก็ตาม LOI ที่ค่อนข้างสูงของเถ้าชานอ้อยไม่ได้เป็นคาร์บอน (หรือกากชานอ้อยที่เผาไหม้ไม่หมด) แต่เป็นสารประกอบอื่นที่ละลายภายใต้การเผาที่อุณหภูมิสูงๆ เพราะการทดสอบ LOI ใช้อุณหภูมิในการเผาตัวอย่างที่ 750 องศาเซลเซียส ดังนั้น LOI ที่ค่อนข้างสูงของเถ้าชานอ้อยหากไม่ใช่กากชานอ้อยที่เผาไหม้ไม่หมดแล้ว พบว่า LOI ที่มีค่าสูงไม่ได้ส่งผลอย่างรุนแรงต่อการลดกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าชานอ้อยมากนัก

การแทนที่เถ้าชานอ้อยในรูปปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ผสมเถ้าชานอ้อยเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับใช้วัสดุปอซโซลานชนิดอื่นๆ คอนกรีตที่ใช้เถ้าชานอ้อยแทนที่มวลรวมละเอียดมีความสามารถในการทำงาน (workability) และการเยิ้มที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดา คอนกรีตผสมเถ้าชานอ้อย มีความสามารถต้านทานการสึกกร่อน การซึมผ่านน้ำ การต้านทานคลอไรด์ และการเกิดคาร์บอนเนชันเหมือนกับคอนกรีตธรรมดา นอกจากนี้ความพรุนของเถ้าชานอ้อยทำให้คอนกรีตมีความต้านทานการแข็งตัวและละลายของน้ำ (freezing and thawing)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สลักกัน ได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา สำหรับประเทศไทยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเถ้าชานอ้อยในงานคอนกรีตไม่มากนัก เช่น สุวิมล และ อาทิตยา พบว่าเถ้าชานอ้อยที่ผ่านการบดมีปริมาณวัสดุข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 0 ถึง 12 เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ในร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีความต้องการปริมาณน้ำมากกว่าปูนซีเมนต์ล้วนร้อยละ 13 และดัชนีความเป็นปอซโซลานที่อายุ 28 วันเท่ากับร้อยละ 102 ถึง 108 ของมอร์ตาร์ควบคุม คุณสมบัติทางด้านความคงทนของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยมีการศึกษาโดย สุชีรา และ ชูชัย ซึ่งพบว่าสามารถแทนที่เถ้าชานอ้อยในปูนซีเมนต์มากถึงร้อยละ 30 โดยไม่สูญเสียกำลังอัดที่อายุ 28 วัน นอกจากนี้การแทนที่เถ้าชานอ้อยในปูนซีเมนต์ยังช่วยเพิ่มสมรรถนะในการต้านทานกรดซัลฟูริกและการต้านทานต่อสารละลายซัลเฟต อย่างไรก็ตามคอนกรีตที่ผสมเถ้าชานอ้อยมีแนวโน้มให้ค่าการหดตัวสูงขึ้น และอาจหน่วงการก่อตัวของคอนกรีตได้อย่างมากหากเถ้าชานอ้อยยังมีน้ำตาลหลงเหลืออยู่ การศึกษาของคาวีและคณะ[9]ที่ทำการศึกษาร้อนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าชานอ้อย พบว่าการใช้เถ้าชานอ้อยที่มีปริมาณ LOI และ CaO ต่ำแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 20 ถึง 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตลดลง 4.1 ถึง 11.2 องศาเซลเซียสจากคอนกรีตควบคุมและไม่ส่งผลกระทบต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตมากนักการศึกษาเถ้าชานอ้อยเพื่อนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในการทำคอนกรีตที่ผ่านมาทำให้ทราบว่า เถ้าชานอ้อยมีศักยภาพสูงที่จะนำมาใช้ในงานคอนกรีตได้ และมีปริมาณมากพอที่อาจสามารถพัฒนาในเชิงพาณิชย์ได้เช่นกัน แต่อย่างไรก็ตามความรู้เกี่ยวกับเถ้าชานอ้อยยังคงค่อนข้างจำกัด เช่น ในด้านความคงทน รวมถึงคุณสมบัติของเถ้าชานอ้อยในแต่ละแหล่งผลิต ซึ่งมีคุณสมบัติของเถ้าชานอ้อยที่แตกต่างกัน อาจทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตเปลี่ยนไป จึงจำเป็นต้องทำการศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติม เพื่อนำข้อมูลเหล่านั้นมาใช้ในการกำหนดคุณสมบัติของเถ้าชานอ้อยที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในในงานคอนกรีตต่อไป

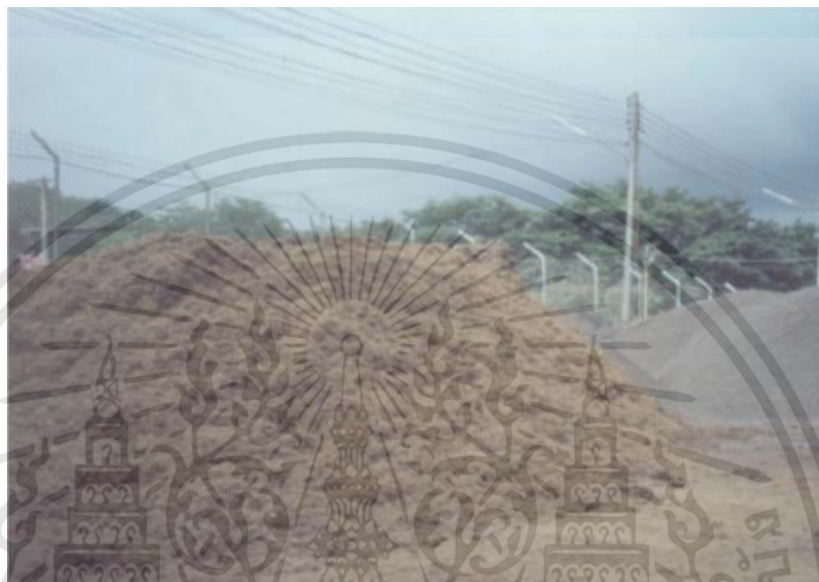
#### 2.5.2.7 เถ้าปาล์มน้ำมัน (Palm Oil Fuel Ash)

เถ้าปาล์มน้ำมัน (palm oil fuel ash) เป็นวัสดุพลอยได้จากการนำกากของผลปาล์มน้ำมัน ได้แก่ เศษกะลา เส้นใย และทลายปาล์มเปล้าของผลปาล์ม (ดังแสดงในรูปที่ 2.14) เผาเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิดไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า มีคุณสมบัติที่ใช้ในการเผาไหม้ประมาณ 800-900 องศาเซลเซียส ข้อมูลจากสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรและสหกรณ์ พบว่าในปี พ.ศ.2544 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกปาล์มประมาณ 1,457,000 ไร่ และมีผลผลิตเป็นอันดับ 4 ของโลกประมาณ 4,089,000 ตันต่อปี ทำให้กากของผลปาล์มมีปริมาณที่สูงตามผลการผลิตปาล์มหรือประมาณ 2,147,000 ตันต่อปี แต่หลังจากการเผาพบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นมีปริมาณสูงถึง 107,000 ตันต่อปี เถ้าปาล์มน้ำมันมีลักษณะเป็นผงฝุ่นน้ำหนักเบาสามารถฟุ้งกระจายได้ง่าย เถ้าปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นมีการนำมาใช้ประโยชน์น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณที่เกิดขึ้นในแต่ละปี ส่วนใหญ่ต้องนำไปทิ้ง ทำให้เกิดปัญหาในเรื่องการกำจัดทิ้งตามมา เช่น ปัญหาทางด้านสภาวะแวดล้อม เป็นต้น

นอกจากนี้นโยบายของรัฐที่จะนำน้ำมันปาล์มมาใช้เป็นพลังงานทดแทน เช่น ไบโอดีเซล ซึ่งทำให้ต้องมีการขยายพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้น ซึ่งคาดว่าจะใช้พื้นที่ในการปลูกปาล์มน้ำมันถึง 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ล้านไร่ จึงจะเพียงพอต่อการนำมาใช้ในไบโอดีเซลได้ ซึ่งหากโครงการดังกล่าวเป็นไปตามแผนงานที่ตั้งไว้จะส่งผลให้เกิดเถ้าปาล์มน้ำมันจำนวนมากขึ้นกว่าปัจจุบันถึง 6 เท่าต่อปี และย่อมสร้างปัญหาในเรื่องการกำจัดทิ้งให้มากยิ่งขึ้น ดังนั้นการศึกษาเถ้าปาล์มน้ำมัน ซึ่งเป็นผลพลอยได้ชนิดหนึ่งของโรงงานชีวมวล จึงเป็นเรื่องที่จำเป็นและทวีความสำคัญมากขึ้นในอนาคตอันใกล้



รูปที่ 2.14 กากที่ได้จากผลปาล์ม



รูปที่ 2.15 เถ้าปาล์มน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบทางเคมีของเก้าอี้ปาเลียมน้ำมัน พบว่ามีปริมาณ  $\text{SiO}_2$  เป็นองค์ประกอบหลัก เช่นเดียวกับเก้าอี้เคลือบและเก้าอี้เคลือบเปลือกไม้ แต่มีปริมาณที่น้อยกว่า คือประมาณร้อยละ 60-70 มีผลรวมของ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ประมาณร้อยละ 70 มีปริมาณ  $\text{SO}_3$  ต่ำกว่าร้อยละ 4 และปริมาณ LOI ร้อยละ 10 ซึ่งถือว่าค่อนข้างสูง (ดูตารางที่ 2.11) ซึ่งปริมาณ LOI ที่สูงนี้อาจเนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไม่สูงมากและระยะเวลาที่ใช้ในการเผาที่สั้น เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของเก้าอี้ปาเลียมน้ำมันตามมาตรฐาน ASTM C618 พบว่าเก้าอี้ปาเลียมน้ำมันมีองค์ประกอบทางเคมีที่ตรงกับข้อกำหนดของวัสดุพอลิไซลัน Class N ได้ แม้ว่าเก้าอี้ปาเลียมน้ำมันจะถือได้ว่าเป็นวัสดุพอลิไซลันสังเคราะห์ (เพราะได้จากการเผาของผลปาเลียมน้ำมัน) ซึ่งแตกต่างจาก ASTM C618 ที่ระบุว่าวัสดุพอลิไซลัน Class N เป็นวัสดุพอลิไซลันจากธรรมชาติ ดังรูปที่ 2.14 และรูปที่ 2.15

องค์ประกอบทางเคมีของเก้าอี้ปาเลียมน้ำมันจาก 2 แหล่งผลิตในประเทศไทยแสดงในตารางที่ 2.11 มีค่าแตกต่างกันน้อยมาก และในแต่ละแหล่งจะมี LOI ในปริมาณที่ค่อนข้างสูง คือประมาณร้อยละ 10 ซึ่ง LOI ที่อยู่ในเก้าอี้ปาเลียมน้ำมันส่วนใหญ่จะเป็นถ่านที่คุดน้ำมาก ทำให้ต้องการน้ำในส่วนผสมคอนกรีตหรือมอร์ตาร์มากขึ้น และหาก LOI มากๆ (มากกว่าร้อยละ 20) จะส่งผลให้คอนกรีตที่ผสมเก้าอี้ปาเลียมน้ำมันมีการรับกำลังต่ำลงได้

**ตารางที่ 2.11** ตารางร้อยละส่วนผสมโดยน้ำหนักของเก้าอี้ปาเลียมน้ำมัน

องค์ประกอบทางเคมี (%)	เก้าอี้ปาเลียมน้ำมัน	
	จ. ชุมพร	จ. กระบี่
Silicon Dioxide ( $\text{SiO}_2$ )	57.70	65.30
Aluminium Oxide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	4.50	2.50
Iron Oxide ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	3.30	1.90
Calcium Oxide ( $\text{CaO}$ )	6.50	6.40
Magnesium Oxide ( $\text{MgO}$ )	4.20	3.00
Sodium Oxide ( $\text{Na}_2\text{O}$ )	0.50	0.30
Potassium Oxide ( $\text{K}_2\text{O}$ )	8.20	5.70
Sulfur Trioxide ( $\text{SO}_3$ )	0.20	0.40
Loss On Trioxide (LOI)	10.50	10.00

คุณสมบัติทางกายภาพของเก้าอี้ปาเลียมน้ำมันลักษณะอนุภาคของเก้าอี้ปาเลียมน้ำมันก่อนและหลังบดแสดงในตารางที่ 2.12 และ พบว่าเก้าอี้ปาเลียมน้ำมันก่อนบดมีขนาดค่อนข้างใหญ่ ผิวขรุขระ ความพรุนสูง รูปร่างกลมมนติดต่อกันเป็นกลุ่มก้อน และขนาดไม่สม่ำเสมอ ส่วนเก้าอี้ปาเลียมน้ำมันหลังบดมีลักษณะอนุภาคเป็นเหลี่ยมมุม รูปร่างไม่แน่นอน อนุภาคมีขนาดและความพรุนลดลงเมื่อเทียบกับเก้าอี้ปาเลียมน้ำมันก่อนบด

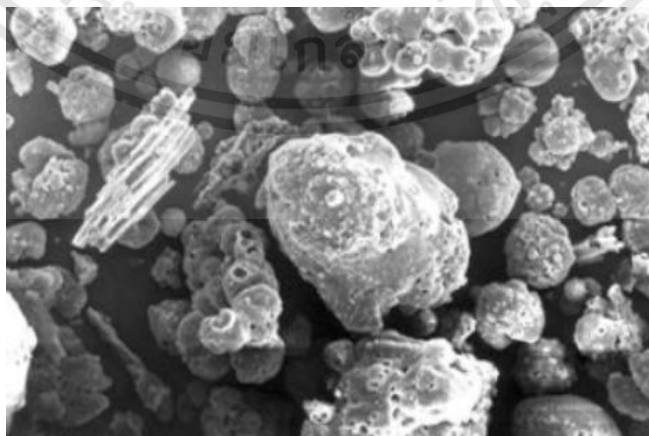
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้จากโรงงานโดยตรงมีความละเอียดต่ำและมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่มาก ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้น้อย การบดจึงเป็นการเพิ่มความละเอียดของถ้าปาล์มน้ำมัน และเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานของถ้าปาล์มน้ำมัน การบดไม่เพียงเพิ่มความละเอียดของถ้าปาล์มน้ำมันแต่ยังเป็นการลดความพรุนของถ้าปาล์มน้ำมันด้วย ซึ่งสังเกตได้จากค่าความถ่วงจำเพาะของถ้าปาล์มน้ำมันที่มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นค่อนข้างมากคือจาก 1.97 เป็น 2.33 เมื่อน้ำหนักของวัสดุที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 40 ลดลงจากร้อยละ 41.20 เหลือร้อยละ 1.50 ดังตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.12 ตารางแสดงความละเอียดของถ้าปาล์มน้ำมัน

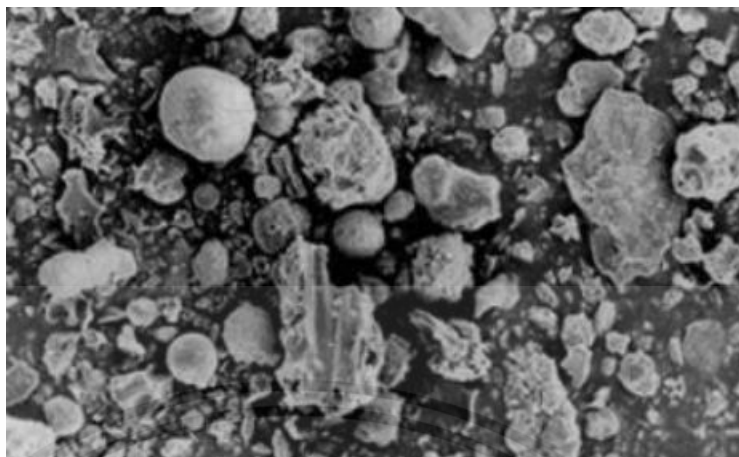
ระยะเวลาบด ถ้าปาล์มน้ำมัน (นาท)	ความถ่วงจำเพาะ	ความละเอียดโดยร่อน ร่อนเบอร์ 40 (%)	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมครอน)
0	1.97	41.20	62.50
40	2.17	17.10	19.90
180	2.33	1.50	10.20

ถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดมีความพรุนน้อยกว่าถ้ากลบดละเอียดที่มีขนาดเท่ากัน ดังนั้นการใช้ถ้าปาล์มน้ำมันในการแทนที่ปูนซีเมนต์ไม่ทำให้ความต้องการน้ำในส่วนผสมเปลี่ยนแปลง หรืออาจเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม หรือในกรณีของการใช้ถ้ากลบดละเอียดที่มีความต้องการน้ำในส่วนผสมคอนกรีตที่เพิ่มมากกว่า อย่างไรก็ตาม การใช้ถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้จากโรงงานโดยตรง (ไม่มีการบดให้ละเอียดขึ้น) ในการผสมคอนกรีตจะใช้ปริมาณน้ำที่มากเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมเนื่องจากการดูดน้ำของถ้าปาล์มน้ำมัน นอกจากนี้การใช้ถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูงในส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูง ทำให้ต้องใช้สารลดน้ำพิเศษในส่วนผสมคอนกรีตเพิ่มขึ้นด้วย ดังรูปที่ 2.16 และรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.16 ถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด ขนาดใหญ่และไม่สม่ำเสมอความพรุนสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 เถ้าปาล์มน้ำมันหลังบด ขนาดและความพรุนลดลง รูปร่างไม่แน่นอน

ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะเป็นเช่นเดียวกับกรณีของการใช้วัสดุปอซโซลานทั่วไป คือทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดยาวนานกว่ากรณีของคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมันประมาณ 15-20 นาที เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 10-20 และระยะเวลาการก่อตัวจะยาวนานกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันประมาณ 40-60 นาที เมื่อใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30/40

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์เถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีตเริ่มขึ้นในปี ค.ศ.1990 โดย Tay ได้ศึกษาการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 10 ถึง 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานเพื่อทำคอนกรีต พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานต่ำ และคอนกรีตที่แทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันมากกว่าร้อยละ 10 มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาใช้มีอนุภาคขนาดใหญ่ ต่อมาในปี ค.ศ.1996 Hussin และ Awai นักวิจัยชาวมาเลเซียได้ศึกษาการนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน โดยบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ และแทนที่ในอัตราร้อยละ 10-60 พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ให้กำลังอัดสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการแทนที่อื่นๆ และกำลังอัดในช่วงอายุก่อน 28 วัน มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม แต่หลังจากนั้นกำลังอัดมีการพัฒนาสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมได้

การศึกษาเถ้าปาล์มน้ำมันในประเทศไทย วีรชาติ และคณะ พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้จากโรงงานโดยตรงไม่เหมาะสมนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน เนื่องจากให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำ ส่วนการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียด มีปริมาณข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เป็นส่วนผสมมอร์ตาร์ในอัตราร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถให้กำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์มาตรฐานที่อายุ 90 วัน โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 104 และ 101 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันในส่วนผสมคอนกรีต พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดจนมีขนาดอนุภาคประมาณ 7.3 ไมโครเมตร แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 และ 20 สามารถให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมันที่อายุ 7 และ 60 วัน ตามลำดับ โดยที่การแทนที่ร้อยละ 30 ยังสามารถให้กำลังอัดได้ถึงร้อยละ 99 ที่อายุ 90 วัน แสดงให้เห็นว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมีคุณสมบัติทางปอซโซลานที่ดีเมื่อมีความละเอียดสูงขึ้น

เถ้าปาล์มน้ำมันที่บดจนมีความละเอียดยังสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ในการทำคอนกรีตกำลังสูงได้ โดยสามารถแทนที่ได้สูงถึงร้อยละ 30 และคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 ยังมีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 5 ด้วย โดยมีกำลังอัดสูงถึง 88 เมกะปาสกาลเมื่อใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่ขนาด 10.1 ไมโครเมตรแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 10-30

ความทนทานต่อสารละลายซัลเฟตของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมีการขยายตัวเนื่องจากสารละลายซัลเฟตต่ำกว่าแท่งคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม และมีการขยายตัวใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 นอกจากนี้คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 และ 20 ยังมีการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากการกัดกร่อนของสารละลายซัลเฟตลดลง

ในปัจจุบันประเทศไทยไม่มีข้อกำหนดหรือมาตรฐานสำหรับกำหนดคุณสมบัติของเถ้าปาล์มน้ำมัน เนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดใหม่ และมีการวิจัยที่ยังไม่แพร่หลายการวิจัยเกี่ยวเถ้าปาล์มน้ำมันยังมีน้อยมากเมื่อเทียบกับการวิจัยเถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบหรือซิลิกาฟูม ดังนั้นการพัฒนาหรือศึกษาวิจัยยังต้องทำอีกมาก อย่างไรก็ตามมาตรฐานของ ASTM C618 ซึ่งเป็นมาตรฐานสำหรับกำหนดคุณสมบัติของวัสดุปอซโซลาน อาจนำมาใช้ในการพิจารณาได้โดยพิจารณาถึงคุณสมบัติที่กำหนดใน class N ได้แก่ มีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ไม่เกินร้อยละ 10 มีค่าดัชนีกำลังที่อายุ 7 และ 28 วัน ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 75 เป็นต้น นอกจากนี้ความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันก็เป็นปัจจัยหลักที่ต้องนำมาพิจารณาด้วย รวมถึงความต้องการน้ำของมอร์ตาร์หรือคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ เพราะอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) จะส่งผลโดยตรงต่อกำลังอัดและความทนทานของคอนกรีต ตามตารางที่ 2.13

ตารางที่ 2.13 ตารางแสดง W/B ของเถ้าปาล์มน้ำมัน ตามระยะเวลาการก่อตัว

ร้อยละการแทนที่ เถ้าปาล์มน้ำมัน	W/B	ค่ายุบตัว (มม.)	ระยะเวลาการก่อตัว (ชั่วโมง : นาที)	
			ระยะต้น	ระยะปลาย
0	0.70	65	4 : 10	6 : 30
10	0.68	55	4 : 25	6 : 35
20	0.70	60	4 : 35	7 : 00
30	0.71	60	4 : 50	7 : 25
40	0.72	60	5 : 10	7 : 40

ในปี ค.ศ. 1990 เริ่มมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์เถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีต (Tay and Show, 1995) ด้วยการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ในปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 ถึง 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุปอซโซลานต่ำและคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมากกว่าร้อยละ 10 มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่มีส่วนผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน ทั้งนี้ เนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้มีอนุภาคขนาดใหญ่ นอกจากนี้คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันยังมีความหนาแน่นน้อยกว่า และการดูดซึมน้ำมีมากกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม

Hussin and awal (1997) ได้ศึกษานำเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานโดยบดเถ้าให้มีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์และแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 10 ถึง 60 พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ให้กำลังอัดสูงสุดที่อายุ 28 วัน โดยกำลังอัดในช่วงอายุก่อน 28 วัน มีค่ากำลังอัดที่ต่ำแต่หลังจากนั้นกำลังอัดมีการพัฒนาสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม นอกจากนี้คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันยังมีสมบัติต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากการละลายกรดไฮดรอกซิดริกได้ดีกว่าคอนกรีตที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว

**ตารางที่ 2.14** ตารางแสดง การเปรียบเทียบอัตราส่วนผสมทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน

สารตั้งต้น	Tay (1995)	Awal and Hussin (1997)	دنۇفلە ۋە ئىنرۇت (2551)	ديشۇر ۋە دنۇفل (2551)	الگىرىش ۋە دنۇفل (2551)	چۇمپۇر	گرەبى
SiO <sub>2</sub>	21.30	43.60	33.99	58.14	50.52	57.70	65.30
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	36.20	11.40	2.24	1.54	1.82	4.50	2.50
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.90	4.70	1.65	3.16	4.27	3.30	1.90
CaO	16.43	8.40	16.43	12.04	10.84	6.50	6.40
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.23	-	3.88	3.32	5.19	-	
K <sub>2</sub> O	24.70	3.50	11.30	11.49	5.93	8.20	5.70
Na <sub>2</sub> O	2.00	0.39	-	-	0.42	0.50	0.30
MgO	5.90	4.80	7.50	3.22	3.42	4.20	3.00
TiO <sub>2</sub>	-	-	-	0.26	0.22	-	
SO <sub>3</sub>	-	2.800	1.23	1.86	0.42	0.20	0.40
LOI	13.59	18.00	1.02	3.73	0.72	10.50	10.00

ที่มา : ส่วนประกอบของเถ้าปาล์มน้ำมัน

## 2.6 ดินซีเมนต์ (Soil Cement)

Highway Research Board's Committee on Soil-Portland Cement Stabilization ได้ให้คำจำกัดความของ Cement-treated soil คือ การนำปูนซีเมนต์และดินเหนียวปริมาณที่เหมาะสมมาผสมกับน้ำให้เข้ากันแล้วผสมให้เข้ากัน ให้ได้ความหนาแน่นที่สูงที่สุดและป้องกันความชื้นไม่ให้สูญเสียระหว่างการบ่มดินซีเมนต์เป็นประเภทต่างๆ ได้ 5 ประเภท ดังตารางที่ 2.14

ตารางที่ 2.15 ตาราง แสดงชนิดของ Cement-Treated Soil

ประเภท	ลักษณะของดินที่ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์	ร้อยละปูนซีเมนต์ที่ใช้โดยประมาณ	การใช้งานและการประยุกต์
Cement Modified Silty Clay Soil	ดินอ่อนที่มีลักษณะเปียกแฉะชุ่มน้ำ (Silty Clay)	1 – 3	ปรับปรุงดินให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้
Cement Modified Granular Soil Mixture	ดินที่มีค่า Plasticity สูง เช่น กรวดและทราย	1 – 3	ใช้ปรับปรุงคุณสมบัติชั้นรองพื้นทางให้สามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้น
Soil-Cement	ดินทุกชนิด ที่ต้องการปรับปรุงคุณภาพให้มีกำลังรับแรงมากขึ้น ตาม มาตรฐาน PCA หรือ AASHTO	5 – 7	ขึ้นอยู่กับลักษณะงานให้ได้ตามมาตรฐาน AASHTO หรือ PCA
Plastic Soil Cement	ดินทรายหรือน้ำ โดยปริมาณของน้ำสูง	2	ขึ้นอยู่กับลักษณะงานให้ได้ตามมาตรฐาน AASHTO หรือ PCA
Cement-Treated Soil Slurries and Grouts	ดินทรายและน้ำ ส่วนประกอบน้ำสูง	5	ใช้กับงานบำรุงรักษา การหลุดตัวของคันทาง (Mud Jetting)

หมายเหตุ PCA = Portland Cement Association

Lambe และคณะ (1959) และ Moh (1962) ได้กล่าวไว้ว่า เมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำจะทำให้เกิดสารประกอบหลัก 4 ชนิด คือ  $C_3S$   $C_2S$   $C_3A$  และ  $C_4AF$  ซึ่งจะเป็นตัวกระตุ้นที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชัน ทำให้เกิดสารประกอบ CSH และ CAH ซึ่งสารทั้งสองชนิดนี้จะมีคุณสมบัติยึดเกาะส่งผลให้เม็ดดินยึดเกาะเข้าด้วยกัน ทำให้เม็ดดินมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและมีขนาดใหญ่ขึ้น โดย  $Ca^{2+}$  จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอลูมินา ทำให้ดินเกิดสาร CSH และ CAH โดยจะเกิดปฏิกิริยาโดยตรงกับซีเมนต์ เมื่อซีเมนต์เพส (Cement Paste) แข็งตัว โครงสร้างของดินจะเปลี่ยนทำให้ดินแข็งตัวไปด้วย โดย Moh (1965) เขียนสมการของดินซีเมนต์เป็นดังนี้



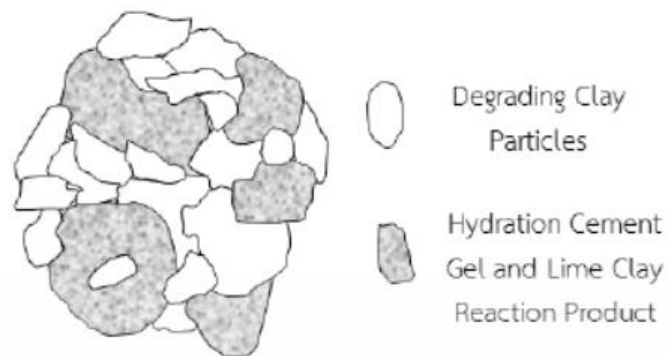
### 2.6.1 โครงสร้างของดินซีเมนต์

Mitchell และ Jack (1966) ได้อธิบายการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินภายหลังจากผสมปูนซีเมนต์ โดยการเปลี่ยนแปลงสามารถแบ่งออกได้ 3 ชนิด ดังนี้

2.6.1.1 สถานะขณะบดอัดอนุภาค ขั้นตอนนี้เป็นช่วงเวลาที่อนุภาคดินผสมกับปูนซีเมนต์ ซึ่งสถานะนี้ดินซีเมนต์ยังไม่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังรูปที่ 2.18 (ก)

2.6.1.2 สถานะภายใต้การบ่มระยะสั้น อนุภาคของซีเมนต์เริ่มปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งจะเกิดเป็น Cement Jel เข้าแทรกระหว่างอนุภาคของดิน ปูนขาวจะทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอลูมินาในดิน Cement Jel และสารที่ได้จากปฏิกิริยาจะแพร่กระจายไปตามอนุภาคดิน ดังรูปที่ 2.18 (ข)

2.6.1.3 สถานะภายใต้การบ่มระยะยาว อนุภาคของซีเมนต์จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างสมบูรณ์โดย Cement Jel จะเข้าไปแทรกซึมทั่วดินซีเมนต์ ซึ่งทำให้เกิดการพัฒนากำลังของดินเมื่ออายุการบ่มสูงขึ้น ดังรูปที่ 2.18 (ค)



รูปที่ 2.18 (a) สถานะขณะบดอัดอนุภาค (Mitchell และ Jack, 1966)



รูปที่ 2.18 (b) โครงสร้างของดินซีเมนต์ภายใต้การบ่มระยะสั้นๆ (Mitchell และ Jack, 1966)



รูปที่ 2.18 (c) โครงสร้างของดินซีเมนต์ภายใต้การบ่มระยะยาว (Mitchell และ Jack, 1966)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติดินหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ (กลุ่มงานตรวจสอบและแนะนำวัสดุสร้างทาง)

## 2.6.2 การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์ จะประกอบไปด้วยกลไก 4 ประการ คือ

2.6.2.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) เป็นกระบวนการที่สำคัญที่สุด โดยขณะที่ซีเมนต์รวมตัวกับน้ำ จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้เกิดการเชื่อมประสานระหว่างอนุภาคดินและก่อรูปร่างเป็นโครงข่ายที่แข็งแรงต่อเนื่องกัน ทำให้เม็ดดินที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาเข้ามาใกล้ชิดกัน โครงข่ายที่กล่าวมาข้างต้น นอกจากจะเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุที่ถูกปรับปรุงแล้วยังแทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างของเม็ดดิน ทำให้ลดการซึมผ่านและการบวมตัวของมวลดินรวม ทั้งเพิ่มความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ เนื่องจากสภาวะการเปลี่ยนแปลงความชื้นรอบ ๆ อีกด้วย

2.6.2.2 การแลกเปลี่ยนอนุมูลบวก (Cat-ion Exchange) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นการผสมซีเมนต์กับดินเหนียว (Cohesive Soil) ที่มีความชื้นอยู่ ซึ่งทำให้ค่าความเป็นพลาสติก (Plastic) ของดินลดลง เป็นผลมาจากการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Cat-ion) บนผิวของอนุภาคดิน ปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาที่สำคัญรองลงมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction)

2.6.2.3 การเกิดคาร์บอเนต (Carbonation) เกิดจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) หรือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ เกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนตทำให้เกิดสารเชื่อมแน่นเพิ่มมากขึ้น

2.6.2.4 ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) เกิดจากการปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวอิสระ (Free Lime) ที่ถูกปล่อยออกมาระหว่างการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับซิลิกา หรืออลูมินา ทำให้เกิดการเชื่อมประสานและการยึดเกาะในวัสดุที่ถูกปรับปรุงคุณภาพ แต่ปฏิกิริยานี้ใช้เวลานานและมีผลทำให้กำลังของวัสดุสูงขึ้น

Terrel และคณะ (1979) กล่าวถึงปฏิกิริยาของดินซีเมนต์ว่าการผสมซีเมนต์กับดินเม็ดหยาบซีเมนต์เพสต์จะทำหน้าที่ยึดอนุภาคดินเข้าด้วยกัน โดยทำการยึดเกาะที่ผิวระหว่างซีเมนต์เจลและผิวอนุภาค ส่วนดินเม็ดละเอียดเรตินเหนียวที่สลายออกมาในสภาวะแวดล้อมที่มีค่า pH สูง จะทำปฏิกิริยากับ Free Lime หรือ Hydrate Lime ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้เกิด CSH และ CAH

## 2.6.3 การเชื่อมประสาน (Cementation)

ในการบดอัดดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ ส่วนประกอบต่าง ๆ ของซีเมนต์จะทำให้เกิดปฏิกิริยา Hydration ในอัตราที่แตกต่างกัน เม็ดดินจะเกิดการยึดเกาะกันเป็นก้อนและสามารถรับแรงอัดได้ การยึดเกาะนี้จะเกิดขึ้นทั้งระหว่างเม็ดดินกับซีเมนต์ และซีเมนต์กับซีเมนต์เอง ซึ่งแยกประเภทสำหรับดินเม็ดละเอียดและดินเม็ดหยาบ ดังนี้

- ดินเม็ดละเอียด ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้จะสูงกว่าดินเม็ดหยาบเพราะว่าดินเม็ดละเอียดจะมีพื้นที่ผิวและจุดสัมผัสมากกว่า ซีเมนต์จะเป็นตัวช่วยให้การเกาะตัวของเม็ดดินแข็งแรงขึ้น ดังนั้นนอกจากซีเมนต์จะทำให้ค่าของคุณสมบัติด้านความเหนียวลดลงแล้วยังสามารถเพิ่มค่ากำลังรับแรงเฉือนด้วย

เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีของซีเมนต์ที่เกิดขึ้นจะเกิดตามผิวเม็ดดินจะไปไล่น้ำที่เกาะอยู่รอบผิวเม็ดดินออกไปและซีเมนต์จะเข้าไปอยู่แทนที่ ทำให้ลดการอ่อนตัวของดินเมื่อน้ำภายนอกซึมเข้าไปอีก

- ดินเม็ดหยาบ ในกรณีของดินเม็ดหยาบ ปฏิกิริยาของซีเมนต์จะทำหน้าที่คล้ายกบการผสมคอนกรีต เว้นแต่ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) จะไม่ไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดดิน อนุภาคของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์จะขัดตัวกันด้วย Mechanical Interlock และยึดเกาะกันด้วย Chemical Cementation กรณีของทรายการยึดเกาะกันจะมีตรงบริเวณผิวที่สัมผัสกัน เมื่อทรายมีการบดอัดแน่นช่องว่างเม็ดทรายจะมีน้อยพื้นที่สัมผัสมีมากขึ้น การยึดเกาะกันจะแข็งแรงขึ้นด้วยแต่ถ้าเป็นทรายที่มีขนาดเดียวกันจะมีพื้นที่สัมผัสน้อยปริมาณซีเมนต์ที่ใช้จะมากกว่าชนิดที่ขนาดคละกันดี

#### คุณสมบัติด้านความเหนียว (Plasticity)

เนื่องจากวัสดุผสมเพิ่มเมื่อเติมลงไปดินจะทำให้ความเหนียวของดินเปลี่ยนแปลง โดยคุณสมบัติด้านความเหนียวจะลดลง เนื่องจากปฏิกิริยา Hydration จะทำให้เกิด Calcium Ions แล้วมีการแลกเปลี่ยนหรือรวมตัวกันของประจุไฟฟ้ารอบเม็ดดิน ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างกัน เม็ดดินจะจับตัวเป็นก้อน ค่าคุณสมบัติด้านความเหนียวจึงลดลง

#### คุณสมบัติด้านกำลัง (Compressive Strength)

กำลังของส่วนผสมขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่างเช่น ชนิดของดิน ปริมาณ และชนิดของวัสดุผสมเพิ่มที่ใช้ ความหนาแน่นของการบดอัดปริมาณความชื้น ระยะเวลาในการผสม อุณหภูมิในการบ่ม และปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้น

#### คุณสมบัติด้านการบดอัด (Compaction)

เมื่อผสมวัสดุผสมเพิ่มลงไปดินจะทำให้คุณสมบัติของดินทางการบดอัดเปลี่ยนแปลงไป โดยจะทำให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) ลดลง และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคุณลักษณะของดินเดิม

#### ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นของดินซีเมนต์ปกติแล้วจะวัดในเทอมของความหนาแน่นแห้ง (Dry Density) ซึ่งในการทำงานในสนามจะต้องควบคุมความชื้นให้ดีขึ้นทำการบดอัด แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์มีค่าสูงกว่าของดิน ทำให้ความหนาแน่นสูงขึ้นได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณซีเมนต์ที่ผสม เมื่อความหนาแน่นของดินซีเมนต์สูงกำลังของดินซีเมนต์ก็จะสูงขึ้น

การออกแบบดินซีเมนต์

### 2.6.4 องค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของดินซีเมนต์

#### 2.6.4.1 คุณสมบัติของดิน

ดินตามธรรมชาติจะมีคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและทางเคมีของดินที่ไม่เหมือนกัน ซึ่งมีผลต่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น เมื่อผสมกับซีเมนต์และน้ำ ซึ่งส่งผลกระทบต่อกระบวนการรับน้ำหนัก และความคงทนของดินซีเมนต์ รวมไปถึงปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมในการปรับปรุง ดินที่มีสารอินทรีย์ปน (Organic Soil)

จะทำให้การพัฒนากำลังของดินต่ำทั้งการผสมกับปูนขาวและปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ปริมาณน้ำในดินจะทำให้การพัฒนากำลังของดินต่ำทั้งการผสมปูนขาวและปูนซีเมนต์เช่นกัน

Davidson (1961) ได้กล่าวว่าส่วนประกอบทางเคมีของดินจะทำให้เกิดปฏิกิริยากับซีเมนต์แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับประจุลบที่มีอยู่ในเม็ดดิน ซึ่งมีผลกระทบต่อความแข็งแรงของดินซีเมนต์ โดยเฉพาะดินที่มีสารอินทรีย์อยู่ด้วยจะทำให้ปฏิกิริยาเปลี่ยนไป เช่นเกิดการแข็งตัวช้าขึ้นหรือมีการบวมตัวเมื่อมีพวก Sulphate ผสมซึ่งจะทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง

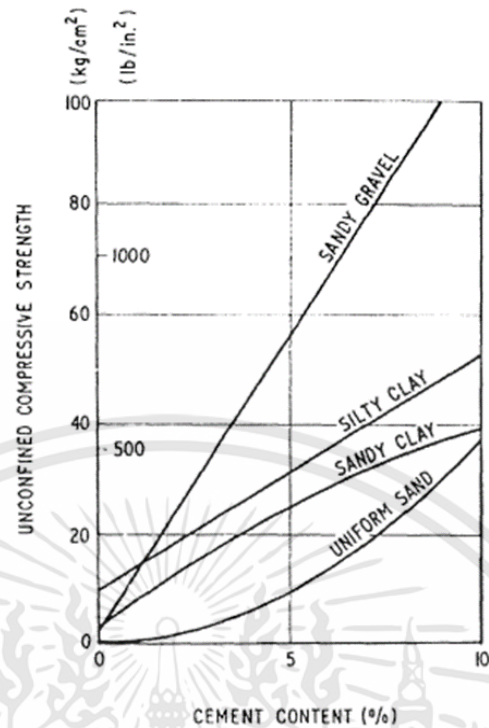
Diamond และ Kinter (1958) ได้ศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวของเม็ดดินกับปริมาณซีเมนต์ พบว่า ปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมในการปรับปรุงมากขึ้นด้วย

กรมทางหลวงได้เลือกค่าในการออกแบบดินซีเมนต์ที่สามารถรับกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS) ที่บ่มดินซีเมนต์ครบอายุ 7 วัน ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 1,725 kPa สำหรับชั้นพื้นทางมีค่าไม่น้อยกว่า 360 kPa สำหรับชั้นรองพื้นทาง และสำหรับชั้นคันทางเลือกใช้ CBR เพื่อนำไปออกแบบโดยค่าไม่น้อยกว่า 95%

#### 2.6.4.2 ปริมาณปูนซีเมนต์และประเภทปูนซีเมนต์

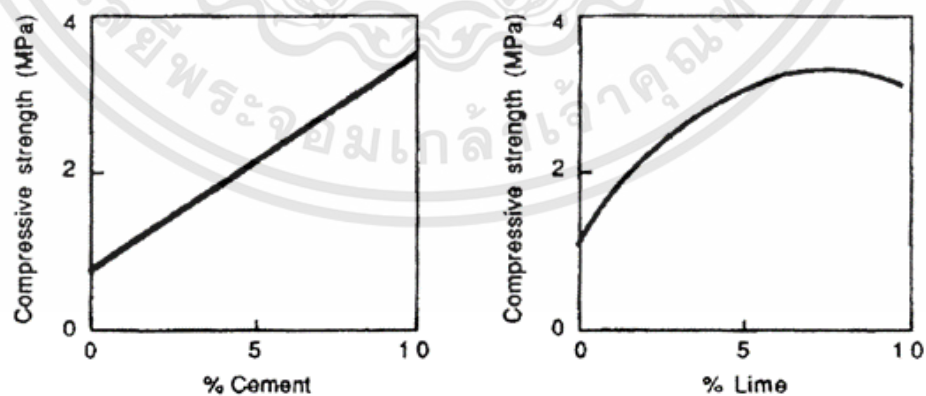
Felt (1955) ศึกษาอิทธิพลของปริมาณซีเมนต์โดยนำดินสามชนิดคือ Loamy sand, Medium clay และ Silty clay loam มาทดลองผสมซีเมนต์ ตั้งแต่ร้อยละ 6 ถึง 30 โดยปริมาตร ที่อายุการบ่มตั้งแต่ 2 วันจนถึง 1 ปีและผ่านสภาพภูมิอากาศ 2 แบบ คือ Wet-dry และ Freeze-thaw ตั้งแต่ 12 รอบถึง 96 รอบ ผลการศึกษาสรุปได้ว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ ดินที่มีขนาดเม็ดใหญ่จะมีกำลังรับแรงอัดได้สูงกว่าดินที่มีขนาดเม็ดเล็ก ดินที่มีปริมาณดินเหนียวผสมอยู่สูงจะมีกำลังรับแรงอัดน้อยกว่าดินที่มีปริมาณดินเหนียวต่ำ และค่าความคงทนของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ นอกจากนี้ Felt ยังได้ศึกษาอิทธิพลของประเภทซีเมนต์โดยนำดินสองชนิดคือ Silty clay loam และ Sandy loam มาผสมกับซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 3 พบว่า ดินที่ผสมด้วยซีเมนต์ประเภทที่ 3 จะให้กำลังสูงกว่าดินที่ผสมซีเมนต์ประเภทที่ 1 แต่ซีเมนต์ประเภทที่ 3 จะไม่มีผลต่อกำลังอัดของดินทุกชนิดเช่น ดิน Sandy loam ผสมกับซีเมนต์ประเภทที่ 3 จะให้กำลังอัดเป็นสองเท่าของดินที่ผสมกับซีเมนต์ประเภทที่ 1 ที่อายุการบ่ม 7 วัน และเป็น 1.4 เท่าที่อายุการบ่ม 28 วัน แต่สำหรับดิน Silty clay loam เมื่อผสมกับซีเมนต์ประเภทที่ 3 จะให้กำลังสูงกว่าดินที่ผสมกับซีเมนต์ประเภทที่ 1 เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

Ingles และ Metcalf (1972) กล่าวว่า โดยทั่วไปกำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ โดยมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง แต่จะมีอัตราการเพิ่มขึ้นที่แตกต่างกันตามชนิดของดิน แสดงดังภาพที่ 2-17



ภาพที่ 2-17 ผลของปริมาณซีเมนต์ต่อกำลังของดินชนิดต่าง ๆ ที่ปรับปรุงด้วยพอร์ตแลนด์ ที่อายุการบ่ม 7 วัน (Ingles และ Metcalf, 1972)

Mitchell (1976) พบว่าค่า Unconfined Compressive Strength ของดินเหนียวผสมซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นในลักษณะที่เป็นเส้นตรง ซึ่งต่างจากดินเหนียวผสมปูนขาวจะได้รับความสัมพันธ์ในลักษณะโค้งคว่ำ แสดงดังภาพที่ 2-18



ภาพที่ 2-18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Compressive Strength กับปริมาณสารเชื่อมประสาน (Mitchell, 1976)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pasupuleti และคณะ (2015) ศึกษาผลของระยะเวลาบ่มที่มีต่อพฤติกรรมและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญกับปริมาณซีเมนต์ และระยะเวลาในการบ่ม

Grytan และคณะ (2012) ศึกษาคุณสมบัติทางธรณีเทคนิคของดินเม็ดละเอียดผสมปูนซีเมนต์ พบว่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ โดยช่วงเริ่มแรกความเค้นและความเครียดของตัวอย่างดินที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ในกรณีของตัวอย่างดินก่อนปรับปรุงที่บ่มด้วยวิธีแช่น้ำความเค้นค่อย ๆ เพิ่มขึ้นกับการเพิ่มขึ้นของความเครียด

คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของดินซีเมนต์ได้รับการศึกษาอย่างจริงจังโดย Terashi และคณะ (1979) และต่อมาก็มีการศึกษาด้านนี้มากขึ้นเรื่อย ๆ เช่น Kawasaki และคณะ (1981) และ Nontanandh และ Yupakorn (2002) ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้สรุปว่า ปัจจัยหลักที่มีผลต่อกำลังของดินซีเมนต์คือ ปริมาณน้ำและปริมาณซีเมนต์ สำหรับงานวิจัยในประเทศไทย Ruenkairergsa (1982) อธิบายว่าปริมาณซีเมนต์เป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ อัตราการเพิ่มกำลังอัดของดินซีเมนต์ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน พันธะเชื่อมประสานในดินเม็ดหยาบจะแข็งแรงกว่าในดินเม็ดละเอียด ดินที่มีดินเหนียวมากจะให้กำลังอัดต่ำ ดังนั้นปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมจึงควรหาจากการทดลองในห้องทดลอง

#### 2.6.4.3 ปริมาณน้ำในการผสม

น้ำ (Water) เป็นองค์ประกอบที่สำคัญอันหนึ่งในการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยวิธีทางเคมี เพราะน้ำจะเป็นตัวควบคุมการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และการเพิ่มกำลังของดิน ปริมาณความชื้นในดินที่น้อยเกินไปอาจทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปได้ไม่สมบูรณ์ หรือถ้าปริมาณความชื้นมากเกินไป น้ำส่วนเกินจากปฏิกิริยา จะยังคงเหลือกระจายอยู่ทั่วไปในโครงสร้างของดินที่แข็งตัวแล้ว และเป็นตัวทำให้พื้นผิวลื่นเมื่อมีแรงกระทำเป็นผลทำให้ได้ค่ากำลังของดินต่ำกว่าความเป็นจริง

Chinkulkijniwat และคณะ (2010) การบดอัดดินเมื่อมีปริมาณกรวดเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินบดอัดจะเพิ่มขึ้นและค่าความชื้นที่เหมาะสมของดินบดอัดจะลดลงในการบดอัดดินที่มีปริมาณกรวดไม่เกินร้อยละ 20 สามารถบดอัดได้ดีโดยไม่มีผลกระทบจากปริมาณกรวด เมื่อปริมาณกรวดเพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 20 กรวดจะขัดขวางการบดอัดซึ่งอิทธิพลของกรวดต่อผลการทดสอบบดอัดพลังงานบดอัดสามารถถ่ายทอดไปสู่ส่วนละเอียดได้ดีในการบดอัดดินที่มีปริมาณกรวดผสมอยู่ไม่เกินร้อยละ 20 เมื่อปริมาณกรวดเพิ่มขึ้นมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ พลังงานที่ถ่ายทอดไปสู่ส่วนละเอียดจะมีค่าลดลงตามปริมาณกรวดที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการบดอัดดินที่มีปริมาณกรวดผสมมากกว่าร้อยละ 20 เม็ดกรวดจะขัดกันทำให้ขัดขวางการเรียงตัวของเม็ดดินและกรวดยังดูดซับพลังงานบดอัดที่ถ่ายทอดไปสู่ส่วนละเอียด ทำให้ความหนาแน่นแห้งของดินบดอัดคัดกรวดมีค่าลดลงและความชื้นของดินบดอัดคัดกรวดมีค่าเพิ่มขึ้น และ Chinkulkijniwat และคณะ (2010) ยังได้สร้างสมการที่สามารถประมาณค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและความชื้นที่เหมาะสมของดินปนกรวด

วันชัย ศิริเลิศวัฒนา (2546) ได้เสนอว่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณความชื้นของดินซีเมนต์บดอัดมีลักษณะเป็นระฆังคว่ำในช่วง 80 ถึง 120 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณความชื้นเหมาะสม โดยมีค่ากำลังอัดสูงสุดที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม

Omotola และคณะ (2011) ได้ศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ในการรับแรงอัดและความสามารถทำงานของคอนกรีตและคอนกรีตผสมดินลูกรัง โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) 0.55, 0.6, 0.65, 0.7 และ 0.8 ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน จากผลการทดสอบกำลังอัดแบบไม่ถูกจำกัดของคอนกรีตและคอนกรีตผสมดินลูกรัง พบว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วัน ให้ค่ากำลังอัดมากที่สุด โดยที่ w/c เท่ากับ 0.55 ให้ค่ากำลังอัดมากกว่า w/c อื่น ๆ

#### 2.6.4.4 ระยะเวลาในการผสม

Felt (1955) ศึกษาอิทธิพลของการหน่วงเวลาต่อกำลังอัด และความคงทนโดยผสมให้นานขึ้นแล้วทิ้งไว้ก่อนบดอัด ศึกษาดิน 3 ชนิด คือ ดินกลุ่ม A-2 (LL= 26, PI = 11) ดินกลุ่ม A-4 (LL= 35, PI = 12) A-6-7 (LL= 47, PI = 26) พบว่าดินทุกชนิดจะมีค่ากำลังอัดลดลงเมื่อหน่วงเวลาการผสมให้นานขึ้น การหน่วงเวลาการผสมแบบหยุดเป็นครั้งคราว จะมีผลเสียน้อยกว่าแบบหยุดผสมเลย

#### 2.6.4.5 การบ่มดินซีเมนต์

Clare and Pollard (1954) สรุปถึงอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ว่า ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 25 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของการบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 60 องศาเซลเซียส กำลังอัดของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่ม 7 วันจะสูงขึ้น 2-2.5 เปอร์เซ็นต์ต่ออุณหภูมิการบ่มที่เพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส การก่อสร้างที่ใช้ดินซีเมนต์ในพื้นที่ที่อากาศอบอุ่นจะให้กำลังอัดที่อายุ 3 เดือนแรกหลังการก่อสร้างสูงกว่าการก่อสร้างในพื้นที่ที่มีอากาศหนาวกว่าร้อยละ 50-100

Leadabrand (1956) นำดิน 2 ชนิด คือ Clayey sandy soil และ Silty soil มาผสมกับซีเมนต์ร้อยละ 10 ของน้ำหนักดินแห้ง แล้วทำการบดอัดในห้องปฏิบัติการ เพื่อหา กำลังอัดที่อายุการบ่มตั้งแต่ 2 วันจนถึง 5 ปี พบว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์จะคล้ายกับกำลังอัดของคอนกรีต กล่าวคือ กำลังอัดจะเพิ่มขึ้นตามอายุของดินซีเมนต์ และยังได้ทำการเจาะตัดดินซีเมนต์ในสนามจากโครงการก่อสร้างของรัฐต่าง ๆ 4 รัฐ ในประเทศสหรัฐอเมริกาโดยมีช่วงอายุตั้งแต่ 1 ปีถึง 20 ปี มาทดสอบหา กำลังอัดพบว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์ในสนามจะสอดคล้องกับกำลังอัดของดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ

Ng (1966) พบว่ากำลังอัดของดินลูกรังผสมซีเมนต์จะแปรผันกับอุณหภูมิที่ใช้บ่ม กล่าวคือ อุณหภูมิการบ่มเพิ่มขึ้น จาก 70 °F เป็น 100 °F กำลังอัดของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 20

Wang และ Huston (1972) พบว่าการลดอุณหภูมิในการบ่ม ทำให้กำลังอัดลดลงแต่จะเพิ่มความเครียด ที่จุดวิบัติ ไม่ว่าจะทดสอบแรงดึง หรือแรงอัด

## 2.6.5 การนำดินซีเมนต์มาประยุกต์ใช้ในงานต่าง ๆ

### 2.6.5.1 เสาค้ำดินซีเมนต์ (Cement Column)

เสาค้ำดินซีเมนต์ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวอ่อน การก่อสร้างเป็นการผสมดินเดิมกับปูนซีเมนต์เชิงลึก ซึ่งนิยมเรียกว่า การผสมลึก (Deep cement mixing) โดยสามารถทำการผสมได้ 2 วิธีการด้วยกันได้แก่ การผสมแบบเชิงกล (Mechanical mixing) และ การผสมแบบแรงดัน (Jet mixing) วิธีการแรกใช้เครื่องจักรโดยมีใบพัดเป็นตัวผสมดินกับปูนซีเมนต์ให้เข้ากัน (Porbaha, 1999) ส่วนวิธีหลังเป็นการผสมโดยใช้แรงดันน้ำ สาเหตุที่เสาค้ำดินซีเมนต์เป็นที่นิยมใช้เนื่องจากมีข้อดีหลายประการได้แก่

- ทำการก่อสร้างได้รวดเร็วเนื่องจากการเป็นการผสมในที่ไม่จำเป็นต้องมีการขุดดินออกเหมือนกับเสาค้ำเจาะจึงทำงานได้รวดเร็วกว่าเหมาะสมกับในพื้นที่ในเมืองที่มีปัญหาเรื่องการจราจร อีกทั้งยังมีข้อดีกว่าเสาค้ำตอกเนื่องจากไม่มีปัญหาการสั่นสะเทือน

- มีความน่าเชื่อถือ ในการก่อสร้างใช้เครื่องจักรที่มีความทันสมัยและระบบควบคุมคุณภาพที่ดี ดังนั้นจึงเป็นเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพที่เชื่อถือได้และมีความคุ้มค่า (Ando และคณะ, 1995)

- มีความหลากหลายในการใช้งาน สำหรับประเทศไทยเสาค้ำดินซีเมนต์มักนำไปใช้ในงานฐานรากของคันทางเพื่อลดการทรุดตัว (Bergado และคณะ, 1999; Lai และคณะ, 2006)

### 2.6.5.2 งานดินซีเมนต์สำหรับงานทาง (Pavement Applications)

ในปัจจุบันการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุชั้นทางเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย โดยการผสมด้วยปูนซีเมนต์กับวัสดุรวมรวม (soil aggregate) จะได้ชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์หรือชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ วัตถุประสงค์ของการผสมซีเมนต์เพื่อทำให้มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ดีขึ้น วัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างพื้นทางมักจะเป็นดินลูกรัง (lateritic soil) ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

ชั้นทางดินซีเมนต์ใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งถนนในตัวเมือง ,ทางหลวง ,ลานจอดรถ หรือพื้นรันเวย์สนามบิน โดยสามารถแบ่งประเภทตาม Portland Cement Association (PCA) ที่ได้จำแนกชนิดของดินซีเมนต์ตามส่วนประกอบออกเป็น 3 ชนิด ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ (<http://www.cement.org/think-harder-concrete-/paving/soil-cement>)

1. Cement – Modified Soils (CMS) ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินประเภทนี้จะน้อยมาก จุดประสงค์ของการปรับปรุงเพื่อแก้ไขคุณสมบัติที่เป็นปัญหาของดิน หรือวัสดุที่มีคุณสมบัติต่ำกว่ามาตรฐาน ให้มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับการก่อสร้าง โดยดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพแล้วจะก่อตัวเป็นก้อนหรือแข็งขึ้นเล็กน้อย แต่จะยังคงคุณสมบัติหลักเหมือนดินอยู่เนื่องมาจากปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในการปรับปรุงมีปริมาณน้อย อย่างไรก็ตามระดับของการปรับปรุงคุณภาพขึ้นอยู่กับปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ และชนิดของดิน คุณสมบัติของดินที่ได้รับการปรับปรุงสามารถสรุปได้ดังนี้ คุณสมบัติด้านความเหนียวของดินลดลง ,ปริมาณอนุภาคขนาด Silt และ Clay ลดลง, เพิ่ม CBR (California Bearing Ratio), เพิ่มกำลังรับแรงเฉือนและคุณสมบัติในการเปลี่ยนแปลงปริมาตรลดลง

2. Cement – Treated Base (CTB) ดินซีเมนต์ประเภทนี้จะต้องออกแบบส่วนผสมให้มีกำลังรับแรงอัดหรือความแข็งแรงทนทาน ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ผสมกับดินจะต้องมากพอที่จะทำให้ได้กำลังรับแรงอัดหรือกำลังแบกทานได้ตามที่กำหนด โดยทำการผสมวัสดุรวมหรือดินกับซีเมนต์และน้ำตามปริมาณที่ได้ออกแบบไว้ แล้วทำการบดอัดให้ได้ความแน่นสูงสุด และต้องมีระยะเวลาการบ่มที่เพียงพอ ให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ได้วัสดุที่แข็งแรงขึ้น ปัจจุบันพื้นฐานที่จะควบคุมคุณภาพมีดังนี้ สัดส่วนปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสม, ปริมาณความชื้นที่เพียงพอ, การผสมให้ทั่วถึง, การบดอัดที่เพียงพอ, ระยะเวลาและวิธีการบ่มที่เหมาะสม ชั้นพื้นทางจากดินซีเมนต์ประเภทนี้จะมีความหนาน้อยกว่าชั้นพื้นทาง เพราะ CTB มีซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานให้วัสดุแข็งแรง (Rigid) ซึ่งสามารถกระจายน้ำหนักบรรทุกได้เป็นบริเวณกว้าง คล้ายคุณลักษณะของแผ่นพื้นและคาน ซึ่งแตกต่างจากพื้นทาง ที่จะเกิดความเสียหายทันทีเมื่อสูญเสีย Interlock ไป ชั้น CTB ที่แข็งแรงจะเป็นชั้นที่รับน้ำหนักทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะอากาศ และสามารถพัฒนากำลังอย่างต่อเนื่องตามอายุการใช้งานที่มากขึ้นแม้ยู่ใต้สภาวะรองรับการจราจรก็ตาม การผสมส่วนผสมทั้งหมดโดยทั่วไปจะทำการผสมในโรงผสม ซึ่งอาจจะเป็นโรงผสมแบบต่อเนื่องโดยใช้สายพาน (Continuous – Flow) หรืออาจจะเป็นโรงผสมแบบชุด (Batch – Type Pugmill Mixer) CTB สามารถผสมในที่ใดโดยใช้ Transverse – Shaft Pulvermixers หรือโรงผสมแบบเคลื่อนที่

3. Full – Depth Reclamation (FDR) การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ (Pavement Recycling) โดยนำวัสดุผิวทางแอสฟัลต์และพื้นทางข้างใต้ผิวทางเก่าที่เสียหาย มาทำให้แข็งแรงขึ้นด้วยการผสมกับซีเมนต์เพื่อให้มีคุณสมบัติเหมาะสมจะใช้เป็นพื้นทางสำหรับถนนใหม่ กระบวนการนี้จะใช้กับถนนลาดยาง โดยผิวทางแอสฟัลต์เก่าและวัสดุพื้นทางจะถูกขุดรื้อและย่อย ก่อนที่จะถูกผสมด้วยซีเมนต์และน้ำ แล้วทำการบดอัดให้แน่นเพื่อใช้เป็นพื้นทางสำหรับรองรับผิวทางแอสฟัลต์ใหม่ หรือผิวทางคอนกรีต

Full-Depth Reclamation จะใช้ผิวทางแอสฟัลต์เก่าและวัสดุพื้นทาง ทำให้สามารถลดปริมาณจราจรของรถบรรทุกในการขนส่งวัสดุ และลดการสูญเสียทรัพยากร ช่วยประหยัดเงิน เนื่องจากไม่ต้องมีการขนวัสดุผิวทางเก่าไปกำจัด และไม่ต้องมีการขนวัสดุใหม่มาเพิ่ม อีกทั้งยังสามารถใช้ทรัพยากรธรรมชาติมาก่อสร้างเป็นถนนใหม่ พื้นทางที่ได้รับการปรับปรุงจะแข็งแรงขึ้นมากกว่าเดิม และเพิ่มการต้านทานต่อความชื้นมากกว่าเดิม ผลที่ได้จะช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของถนน ลดการซ่อมบำรุง และสิ่งที่สำคัญที่สุดคือราคาในการทำ Recycling

#### 2.6.5.3 การประยุกต์ใช้งานดินซีเมนต์สำหรับการสร้างบล็อกดิน

บล็อกประสานผลิตจาก ดินลูกรัง ทราย และนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสม แล้วนำมาอัดเป็นก้อนด้วยเครื่องอัดบล็อกประสานด้วยมือ เมื่อได้บล็อกประสานสำเร็จรูปออกมา ก็นำมาผึ่งลมและแดด และหล่อเลี้ยงด้วยน้ำเป็นช่วง ๆ เก็บไว้ประมาณ 10-15 วัน เนื้ออิฐจะจัดตัวกันแน่น จนมีความแข็งแรงใช้เป็นวัสดุก่อสร้างอาคารในระบบโครงสร้างผนังรับน้ำหนัก รูปร่างและขนาดของบล็อกดินซีเมนต์ได้รับการปรับปรุงพัฒนามาเรื่อย ๆ ตั้งแต่การใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บล็อกที่เป็นรูปร่างสี่เหลี่ยมทั่วไปมาเป็นการใช้จุดเชื่อมต่อภายในบล็อกเพื่อเพิ่มความแข็งแรงในการใช้งาน

บล็อกประสานมีความสวยงามตามธรรมชาติ โดยไม่ต้องทาสี ในการผลิตสามารถใช้วัสดุที่หาได้ในท้องถิ่น คุณสมบัติที่ได้มีความแข็งแรง ทนทาน การก่อสร้างทำได้ง่าย รวดเร็ว โดยไม่ต้องใช้ทั้งเสาไม้แบบ และการฉาบปูน ทำให้ประหยัดราคาและค่าแรงงานในการก่อสร้าง สร้างงานและอาชีพเสริมให้แก่ประชาชนทั้งในเมืองและในชนบท ช่วยอนุรักษ์ธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม โดยลดการตัดไม้ทำลายป่าเพื่อนำมาใช้ในการก่อสร้าง

### 2.6.6 ข้อกำหนดในการออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์

Ruenkraitersa (1989) ได้รายงานไว้ว่า จากการศึกษาถนนที่ก่อสร้างด้วยดินซีเมนต์ภายใต้เกณฑ์การออกแบบ UCS ข้างต้นนั้นเหมาะสมกับสภาพเงื่อนไขด้านจราจรแห่งประเทศไทย และงานวิจัยฉบับนี้ได้แนะนำปริมาณปูนซีเมนต์ที่นำมาใช้ในการปรับปรุงดินอยู่ในช่วงร้อยละ 3-5 ค่าปริมาณปูนซีเมนต์เพียงพอที่จะทำให้ค่าของ UCS ที่อายุการบ่ม 7 วัน อยู่ในช่วง 1380 – 2070 Kpa ตามตารางที่ 2.15, 2.16 และ 2.17

#### ตารางที่ 2.16 ข้อกำหนดของการออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์

สถาบัน	ข้อกำหนดในการออกแบบ
กรมทางหลวง ประเทศไทย	ค่า UCS เมื่ออายุบ่ม 7 วัน ไม่น้อยกว่า 250 psi
National Association of Australia State Road Authorities (NAASRA)	1. ค่า UCS เมื่ออายุบ่ม 7 วัน อยู่ในช่วง 150-250 psi 2. ค่า CBR เมื่อบ่ม 7 วัน และแช่น้ำ 4 วัน
ประเทศออสเตรเลีย	ไม่น้อยกว่า 120
British Road Research Laboratory	ค่า UCS เมื่ออายุบ่ม 7 วัน ไม่น้อยกว่า 250 psi
กรมทางหลวง ประเทศกานา	ค่า CBR ไม่น้อยกว่า 200

ที่มา : Ruenkraitersa, 1982

#### ตารางที่ 2.17 ข้อกำหนดในการออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์ของกรมทางหลวง

ชนิดของการใช้งาน	ค่า UCS เมื่ออายุบ่ม 7 วัน
พื้นทางหินคลุกผสมปูนซีเมนต์	ไม่น้อยกว่า 24.6 ksc (350 psi)
พื้นทางดินซีเมนต์	ไม่น้อยกว่า 17.5 ksc (250 psi)
ชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์	ไม่น้อยกว่า 7 ksc (100 psi)
คั่นทางดินซีเมนต์	ไม่น้อยกว่า 6 ksc (85 psi)

ที่มา : สำนักงานวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง

## ตารางที่ 2.18 มาตรฐานวัสดุงานทาง

มาตรฐานชั้นทาง	$q_u$ (kPa)
มาตรฐานชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ (ทล.-ม. 204/2533)	1732
มาตรฐานชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์ (ทล.-ม. 206/2532)	689
มาตรฐานชั้นวัสดุคัดเลือก “ก” (ทล.-ม. 208/2532)	407
มาตรฐานชั้นวัสดุคัดเลือก “ข” (ทล.-ม. 209/2532)	331.8
มาตรฐานชั้นดินถมคันทาง (ทล.-ม. 102/2532)	294.2

ที่มา : สำนักงานวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง

## 2.7 ทดสอบแรงเฉือนของดินที่ไม่มีแรงดันด้านข้าง (Unconfined Compressive Strength)

การทดสอบแท่งตัวอย่างดินชนิด Cohesive Soil โดยปราศจากแรงดันด้านข้างที่กระทำต่อแท่งตัวอย่างดิน โดยใช้เครื่องกดทดสอบแบบธรรมดา (Compression Machine) ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันว่า การที่นำแท่งตัวอย่างดินมาทดสอบแบบนี้สามารถที่จะหาความต้านทานต่อแรงเฉือนของดินได้

การทดสอบแรงเฉือนของดินแบบไม่มีแรงดันด้านข้าง (Unconfined Compression Test) เป็นการหาค่ากำลังต้านทานต่อแรงกดสูงสุดจะกระทำโดยให้แรงกดกับแท่งตัวอย่างดิน จนกระทั่งแท่งตัวอย่างดินวิบัติ แล้วนำค่าความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ไปเขียนกราฟเพื่อหาค่าความเค้นสูงสุด ซึ่งความเค้นที่ได้นี้จะเรียกว่า Unconfined Compression Strength ( $q_u$ ) ซึ่งตัวอย่างดินที่ใช้ทดสอบ จะต้องเป็นดินที่มีความเชื่อมแน่นที่สามารถปั้นเป็นรูปได้ การรับแรงของดินแบบมีความเชื่อมแน่น จะเป็นไปในลักษณะใช้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน (Cohesion) ในการรับแรงเป็นส่วนใหญ่ ถ้าดินมีความเชื่อมแน่นน้อยถึงปานกลาง เช่นพวก Sand Silt , Sandy Clay หรือ Silt เป็นต้น การรับแรงจะเป็นในลักษณะใช้ทั้งแรงยึดเหนี่ยวและแรงเสียดทาน (Friction) ระหว่างเม็ดช่วยกันรับแรงต่างๆ ที่เกิดขึ้น และถ้าดินมีความเชื่อมแน่นมาก เช่น Clay ก็จะใช้แรงยึดเหนี่ยวในการรับแรงไว้ทั้งหมด ซึ่งแรงต่างๆ ที่กล่าวมาทั้งหมดนี้จะเรียกรวมกันว่า กำลังรับแรงเฉือนของดิน (Shear Strength) และตัวอย่างดินที่ใช้ทดสอบนี้ จะไม่มีการระบายน้ำออกจากตัวอย่างดินทดสอบเสร็จก่อนที่ตัวอย่างดินระบายน้ำออกได้ทันทีจึงเป็นการทดสอบดินแบบ Undrained และค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่ได้เป็นแบบแรงรวม (Total Stress) วัตถุประสงค์เพื่อหาค่าความต้านทานแรงเฉือนแบบปราศจากแรงดันด้านข้างของดินที่มีความเชื่อมแน่นสูง ตามมาตรฐาน ASTM D 2166

## 2.8 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability Test)

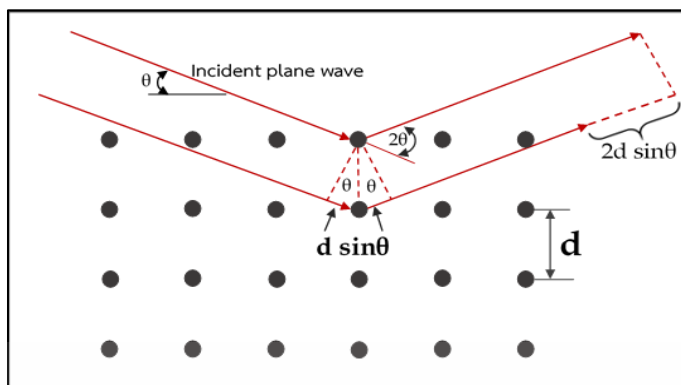
ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านได้ของดินเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของดินในด้านการยอมให้น้ำไหลผ่านมวลดิน ถ้าน้ำไหลผ่านมวลดินได้ง่ายค่าสัมประสิทธิ์จะมีค่ามาก นั่นคือดินจะมีช่องว่างมากหรือดินอยู่ในสภาพหลวม และถ้าค่าสัมประสิทธิ์มีค่าน้อยเท่าใดก็แสดงว่าดินนั้นมีความหนาแน่นมาก ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมนี้สามารถวัดความหนาแน่นของดินได้อีกวิธีหนึ่ง

ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านได้ของดิน จะใช้ความสัมพันธ์จากสมการของดาร์ซี เป็นทฤษฎีพื้นฐานในการทดสอบ โดยพบว่าอัตราการไหลของน้ำผ่านทรายจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความลาดชลศาสตร์ (Hydraulic Gradient)

โดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะมีอยู่ 2 วิธีการ คือ การทดสอบแบบความดันคงที่สำหรับทดสอบกับดินเม็ดหยาบ และการทดสอบแบบความดันเปลี่ยนแปลงสำหรับทดสอบกับดินเม็ดละเอียด ถ้าหากสภาพดินที่แตกต่างกันหลายชั้นก็สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำโดยการนำค่าดังกล่าวของแต่ละชั้นมาใช้ในการแทนค่าสมการซึ่งพิจารณาได้ 2 ทิศทาง คือ ทิศทางตั้งฉากกับชั้นดิน และทิศทางขนานกับชั้นดิน นอกจากนี้แล้วยังสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ซึมผ่านของน้ำได้จากการทดสอบ (Coefficient Of Permeability or Hydraulic Conductivity,  $k$ ) ตามมาตรฐาน ASTM D2434-68

## 2.9 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractomete, XRD)

XRD diffractometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ ซึ่งในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกแบบไม่ทำลายตัวอย่าง (Non-destructive analysis) ของสารประกอบและแร่ เพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก และสามารถแยกแยะประเภทและชนิดของวัสดุที่พบในธรรมชาติว่ามีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบใดหรือสามารถจำแนกได้ว่าวัสดุที่พบเห็นนั้นเป็นธาตุชนิดใด โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของลำรังสีสะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบดังรูปที่ 2.9 และทำการวัดค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ที่สะท้อนออกมาที่มุมต่าง ๆ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับชุดข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัด



รูปที่ 2.9 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในผลึก

โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์กับระยะห่างระหว่างระนาบผลึกและมุมตกกระทบ สามารถอธิบายโดยไขกฎของแบรกก์ (Bragg's Law) ดังสมการ 2-10

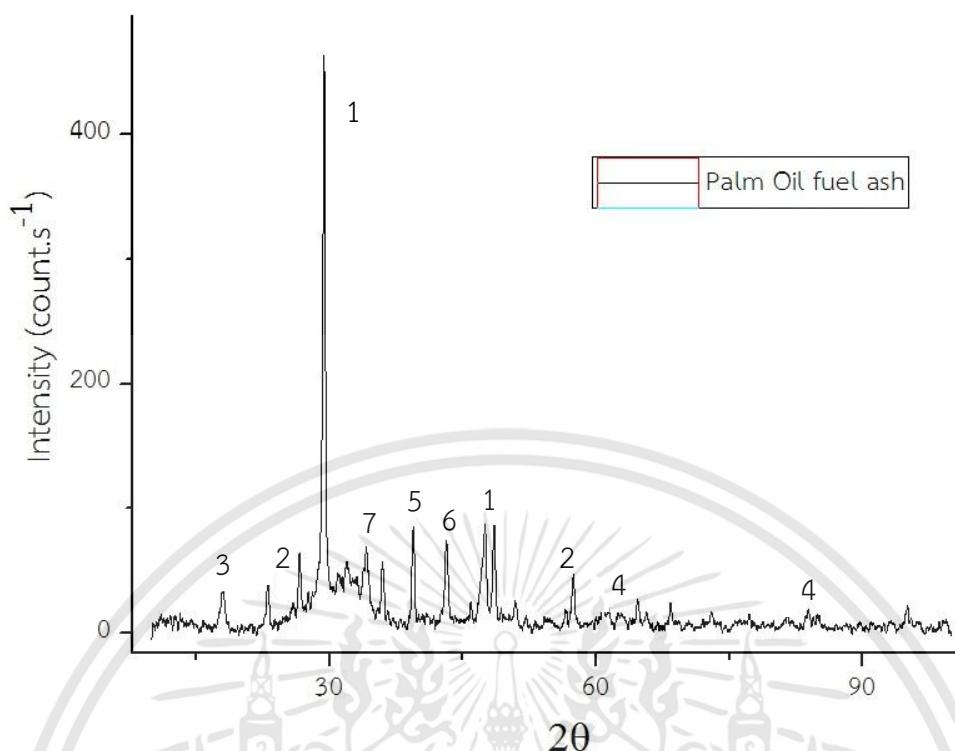
$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (2-10)$$

โดยที่  $\lambda$  = ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์  
 $n$  = การสะท้อน  
 $d$  = ระยะห่างระหว่างระนาบ

XRD สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและสามารถนำมาศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้อีกด้วย ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิด จะมีขนาดของ Unit Cell ที่ไม่เท่ากันทำให้ Pattern ของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ออกมาต่างกัน ทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่าง ๆ กับ Pattern ของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ได้ ซึ่งจะทำให้ทราบว่า ในตัวอย่งนั้น ๆ มีสารประกอบอะไรบ้าง นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ของ XRD ยังสามารถคำนวณหา ปริมาณขององค์ประกอบต่าง ๆ ที่อยู่ในตัวอย่าง, คำนวณหาขนาดอนุภาคของแต่ละ Unit cell, ความเครียดของตัวอย่าง, ค่าความเป็นผลึกของตัวอย่างและยังสามารถวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มบางพร้อมทั้งคำนวณค่าความหนาของชั้นฟิล์มบางได้อีกด้วย

เครื่อง XRD สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งแบบของแข็ง หรือแบบผงได้ในกรณีที่ตัวอย่างเป็นของแข็ง ผิวของตัวอย่างด้านที่ทำการทดสอบจะต้องเรียบ ส่วนตัวอย่างที่เป็นผงจะต้องมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 325 mesh หรือ ประมาณ 40 micron (ผงละเอียดคล้ายผงแป้ง) จึงจะให้ผลการทดสอบที่ดี โดยปริมาณที่ใช้ในการทดสอบจะอยู่ประมาณ 1-2 กรัมต่อครั้ง หรือถ้าตัวอย่างที่ทำการทดสอบเป็นก้อน ต้องมีขนาดกว้างยาว ไม่เกิน 10 cm ถึงแม้พื้นที่ที่จะทำการทดสอบจะเป็นเพียงบริเวณเล็ก ๆ ประมาณ 10 mm เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 XRD pattern ของเถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านขบวนการการเผาที่อุณหภูมิประมาณ 800°C.

จากรูปที่ 2.10 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของปาล์มน้ำมันที่ผ่านขบวนการการเผาที่อุณหภูมิประมาณ 800-900 °C โดยเครื่อง XRD ซึ่งประกอบไปด้วย 1 = ควอตซ์  $\text{SiO}_2$  (Quartz), 2 = แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaCO}_3$ ), 3 = ไอออนออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), 4 = ไตรแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( $\text{C}_3\text{S}$ ), 5 = โพแทสเซียมออกไซด์ ( $\text{K}_2\text{O}$ ), 6 = แมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ), 7 = อลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ก็คือ ไม่สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่าง เพื่อหาปริมาณ หรือ หาลักษณะประกอบตัวอย่าง ที่เป็น Amorphous ได้ เนื่องจากสารตัวอย่างกลุ่มนี้ จะไม่เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ XRD เป็นเทคนิคที่คล้ายคลึงกับเทคนิค spectroscopic อื่น ๆ เช่น เทคนิคการเรืองแสงของรังสีเอกซ์ (X-ray Fluorescence, XRF) โดยที่ XRF จะสามารถบอกได้ว่าวัสดุเหล่านั้นประกอบด้วยธาตุอะไรบ้าง ในขณะที่ XRD นั้นจะช่วยให้สามารถรู้ได้ว่าธาตุเหล่านั้นมีองค์ประกอบเป็นอย่างไร และเกิดเป็น peak ที่องศาต่าง ๆ ตามลักษณะโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง

## บทที่ 3

# วิธีการศึกษา

### 3.1 บทนำ

งานวิจัยได้ทำการศึกษาการพัฒนากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ และดินปรับปรุงแทนที่ซีเมนต์ บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อน กรุงเทพมหานครโดยเครื่องมือและวัสดุ รวมทั้งอธิบายถึงวิธีการรวบรวมผลการทดสอบ ตลอดจนการวิเคราะห์ ข้อมูลงานวิจัยโดยขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยมีดังนี้

### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยและการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

3.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียว ปูนซีเมนต์ และ เถ้าปาล์มน้ำมัน

ตารางที่ 3-1 รายการการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและวิศวกรรมของวัสดุ

วัสดุ	วิธีการทดสอบ	ตามมาตรฐาน
ดินเหนียว อ่อน (Soft Clay)	ปริมาณความชื้น (Natural Water Content)	ASTM D 2216
	ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)	ASTM D 854
	ขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit)	ASTM D 4318
	พิกัดพลาสติก (Plastic Limit)	ASTM D 1318
	ทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test)	ASTM D 2166
	ทดสอบความซึมผ่านน้ำในดิน (Permeability Test)	ASTM D 2434
	XRF (X-ray Fluorescence Test)	-
ซีเมนต์ (Cement)	XRF (X-ray Fluorescence Test)	-
	SEM (Scanning Electron Microscope)	-
เถ้าปาล์ม น้ำมัน (Palm Oil Fuel ash)	ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)	ASTM D 854
	ขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit)	ASTM D 4318
	พิกัดพลาสติก (Plastic Limit)	ASTM D 1318
	SEM (Scanning Electron Microscope)	-

หมายเหตุ การทดสอบ XRF และ SEM ของปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมันใช้ค่าคุณสมบัติจากผู้ผลิต

### 3.3 วัสดุ

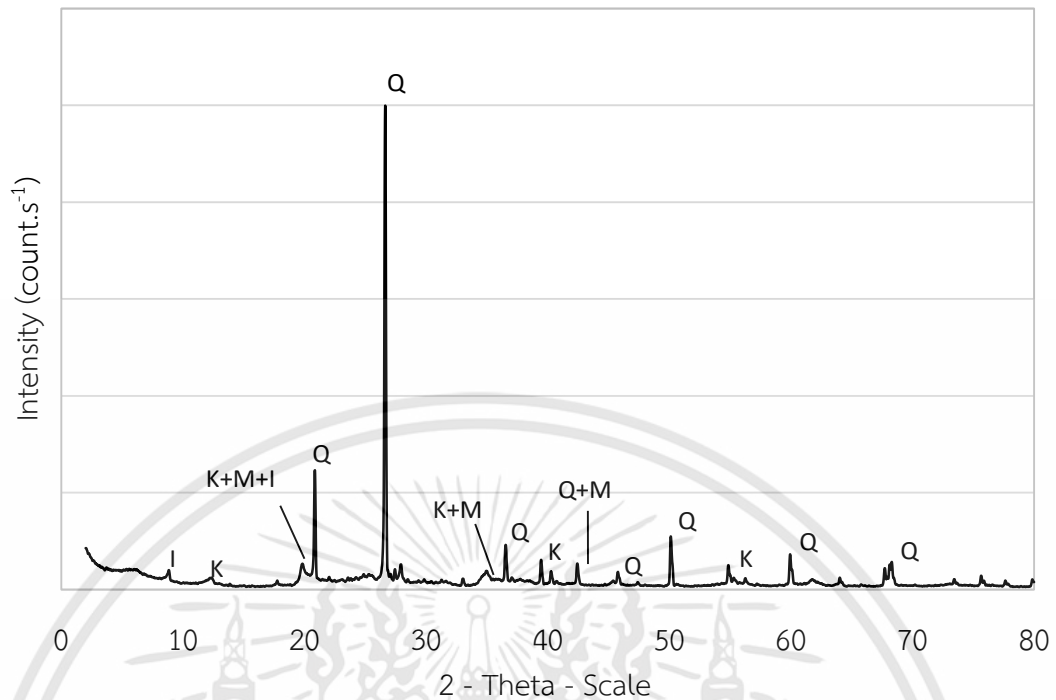
#### 3.3.1 ดินเหนียวอ่อน (Soft Clay)

ดินเหนียวอ่อน ที่นำมาวิจัยเป็นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพดังแสดงในตารางที่ 3.2 โดยเก็บที่ความลึก 3-7 เมตรจากระดับผิวดิน จากการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวอ่อนพบว่า เป็นดินเหนียวสีเทาดำ เมื่อจำแนกดินด้วยระบบการจำแนกแบบ Unified Soil Classification System พบว่าเป็นดินประเภท CH ซึ่งเป็นดินเหนียวอ่อนที่มีความเหนียวสูง รับกำลังอัดได้น้อยและ มีค่าการทรุดตัวสูง โดยมีค่าการทดสอบเพื่อหาปริมาณความชื้นตามธรรมชาติ ค่าความถ่วงจำเพาะ ค่าความหนาแน่นรวม รวมถึงการทดสอบเพื่อหาขีดจำกัดของเหลว ค่าขีดจำกัดพลาสติก และค่า Plasticity Index มีผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 คุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวอ่อน

คุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียว	
Natural water content (%)	60.03
Specific gravity	2.65
Wet unit weight (kg/m <sup>3</sup> )	1,547
Liquid limit (%)	39.89
Plastic limit (%)	19.67
Plasticity index (%)	20.80
Unified Soil Classification	CH

ผลการทดสอบ X - ray diffraction (XRD) ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ แสดงดังภาพที่ 3-1 พบว่าดินเหนียวส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยแร่ Quartz และ Kaolinite มุม  $2\theta$  ที่ให้ค่าความเข้มข้นสูงสุดของแร่ Quartz มีค่าเท่ากับ 26.64 องศา จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence (XRF) พบว่าองค์ประกอบหลักของดินเหนียวได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) มีค่าร้อยละ 62.5, อลูมินาออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) มีค่าร้อยละ 18.4 และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) มีค่าร้อยละ 8.49 แสดงดังตารางที่ 3-3



รูปที่ 3.1 Diffractogram ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพจากตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ

ตารางที่ 3-3 องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียว

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)								
สารประกอบ	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Other
ดินเหนียว	63.30	17.82	7.86	0.97	3.21	1.74	2.75	2.35

### 3.3.2 ปูนซีเมนต์ (Cement)

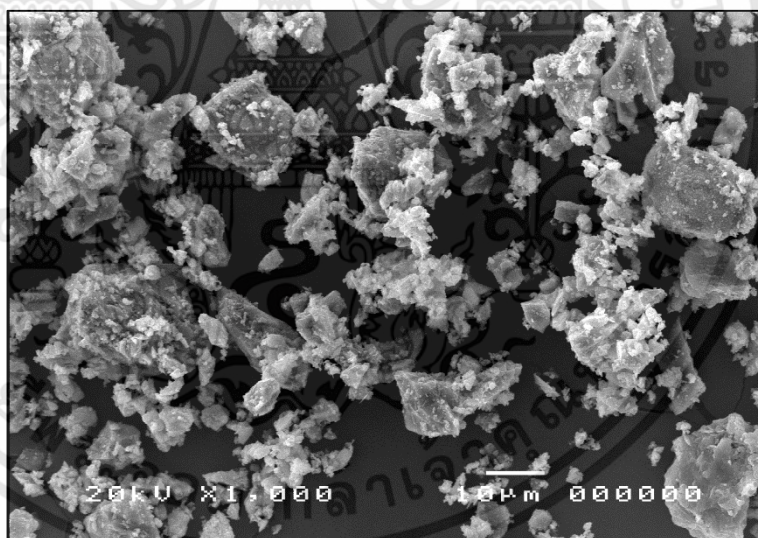
ปูนซีเมนต์ ที่ใช้ในการวิจัยเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Portland cement Type I) ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ มอก. 15-2547 และมาตรฐาน ASTM C-150 แสดงดังรูปที่ 3-5 โดยในงานวิจัยนี้ได้ควบคุมปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของดินเหนียวเท่ากับ ปูนซีเมนต์ 200 กก.ต่อดิน 1 ลบ.ม. ตามมาตรฐานที่แนะนำใช้ของกรมทางหลวง

จากรูปถ่าย SEM ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่าอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีความเป็นเหลี่ยมมุม พื้นผิวขรุขระ ดังแสดงในรูปที่ 3-3 และผลการทดสอบวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence(XRF) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

พบว่า มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลักมีค่าร้อยละ 69.5 และมีองค์ประกอบของออกไซด์ประเภทต่าง ๆ เช่น  $\text{SiO}_2$  มีค่าร้อยละ 16.3,  $\text{SO}_3$  มีค่าร้อยละ 5.04,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  มีค่าร้อยละ 3.72 และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  มีค่าร้อยละ 3.55 ดังแสดงรายละเอียดตามตารางที่ 3-3



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ใช้ในการวิจัย



รูปที่ 3.3 รูปถ่ายจาก SEM แสดงลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

ตารางที่ 3-4 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

สารประกอบ	องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)							
	CaO	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Other
ปูนซีเมนต์	69.5	16.3	5.04	3.72	3.55	0.728	0.37	0.792

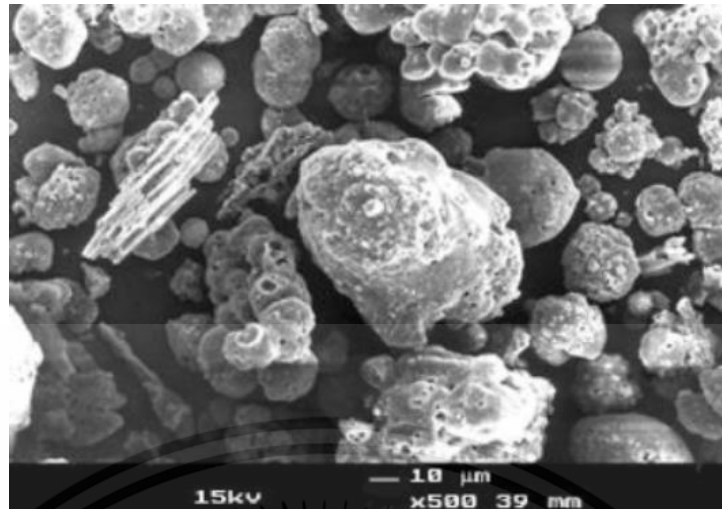
เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนเนื้อหาสำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในสื่อต่าง ๆ ได้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3 เถ้าปาล์มน้ำมัน (Palm Oil Fuel Ash)

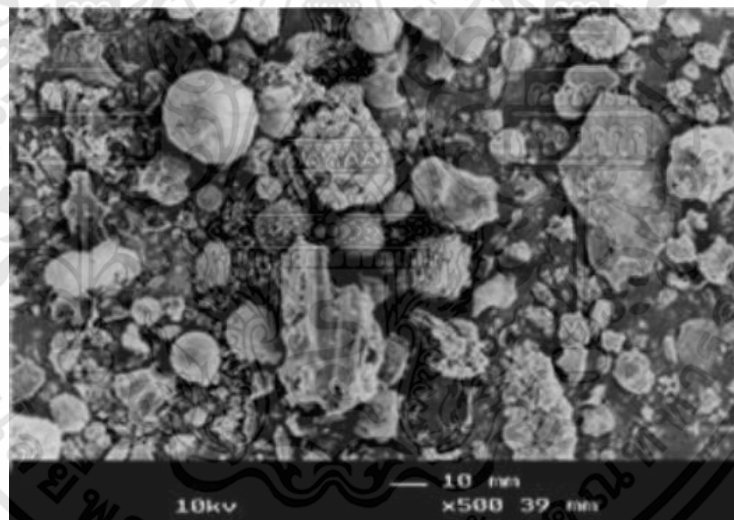
เถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้ในงานวิจัยนี้เก็บตัวอย่างจากบริษัท ไฮบริดเอ็นเนอร์จี จำกัด เป็นโรงงานผลิตกะลาปาล์ม เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าและพลังงานทดแทนไบโอดีเซล จังหวัด ชุมพร ลักษณะของเถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้จากโรงงานโดยตรงมีสีเทาเข้มถึงดำ มีลักษณะเม็ดใหญ่ มีความหยาบไม่แน่นอน มีความพรุนสูง บางส่วนกลมมนติดกันเป็นกลุ่มก้อน และมีขนาดไม่สม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 นำมาอบด้วยอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จากนั้นนำมาบดเพื่อเพิ่มความละเอียดก่อนนำมาใช้งาน เนื่องจากวัสดุปอซโซลานเมื่อมีความละเอียดสูงจะทำปฏิกิริยาได้ดี (2551, อรรคเดช ฤกษ์พิบูลย์) จากรูปถ่าย SEM พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันหลังจากผ่านการบด มีลักษณะเหลี่ยมมุม ขนาดอนุภาคและความพรุนลดลง (Chusilp และคณะ, 2009) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งมีขนาดอนุภาคเทียบเท่าและมีรูปร่างลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมคล้ายกันกับอนุภาคของปูนซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 (2551, อรรคเดช ฤกษ์พิบูลย์)



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างเถ้าปาล์มน้ำมันจากโรงงานโดยตรงที่ใช้ในงานศึกษา



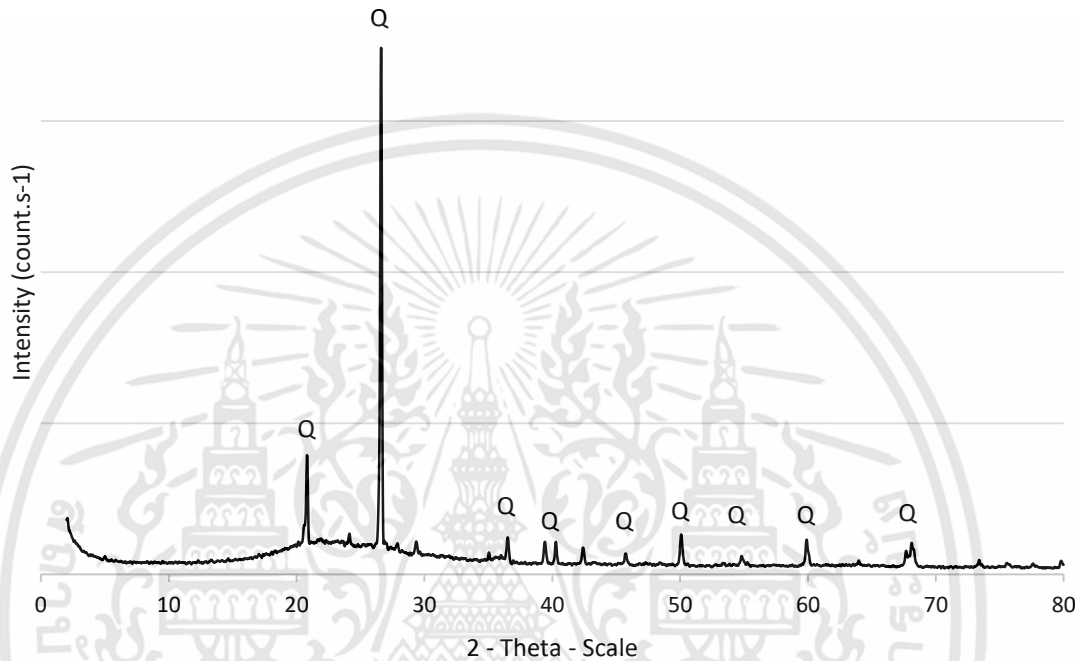
รูปที่ 3.5 รูปถ่ายจาก SEM แสดงลักษณะอนุภาคของตัวอย่างเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบำบัดที่ได้จากโรงงานโดยตรง ที่กำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ 3.6 รูปถ่ายจาก SEM ลักษณะอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันหลังบำบัดผ่านตระแกรงเบอร์ 40 ที่กำลังขยาย 500 เท่า

ผลการทดสอบ X - ray diffraction (XRD) ของเถ้าปาล์มน้ำมัน แสดงดังรูปที่ 3-7 พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยแร่ Quartz ที่ให้ค่าความเข้มข้นสูงสุดของแร่ Quartz จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence (XRF) ของเถ้าปาล์มน้ำมันพบว่าองค์ประกอบหลักของเถ้าปาล์มน้ำมันได้แก่  $\text{SiO}_2$  มีค่าร้อยละ 69.83 ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  มีค่าร้อยละ 11.34 และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  มีค่าร้อยละ 4.93 ดังแสดงรายในตารางที่ 3-4 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM C618 ซึ่งกำหนดให้วัสดุปู่อโซลิตัน Class N มีผลรวมของ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  มีค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากกว่าร้อยละ 70 ซึ่งถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีผลรวมขององค์ประกอบทางเคมีทั้ง 3 ชนิด เท่ากับร้อยละ 86.1 และมีค่า  $SO_3$  เท่ากับร้อยละ 1.26 ซึ่งไม่เกินตามมาตรฐาน ASTM C618 ซึ่งกำหนดไว้ไม่เกิน 4 เปอร์เซ็นต์ จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าว ถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาวิจัยในครั้งนี้สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุพอลิโพรพิลีนได้ โดยใช้ปฏิกิริยาจาก  $SiO_2$  และ  $Al_2O_3$



รูปที่ 3.7 Diffractogram ของถ้าปาล์มน้ำมัน

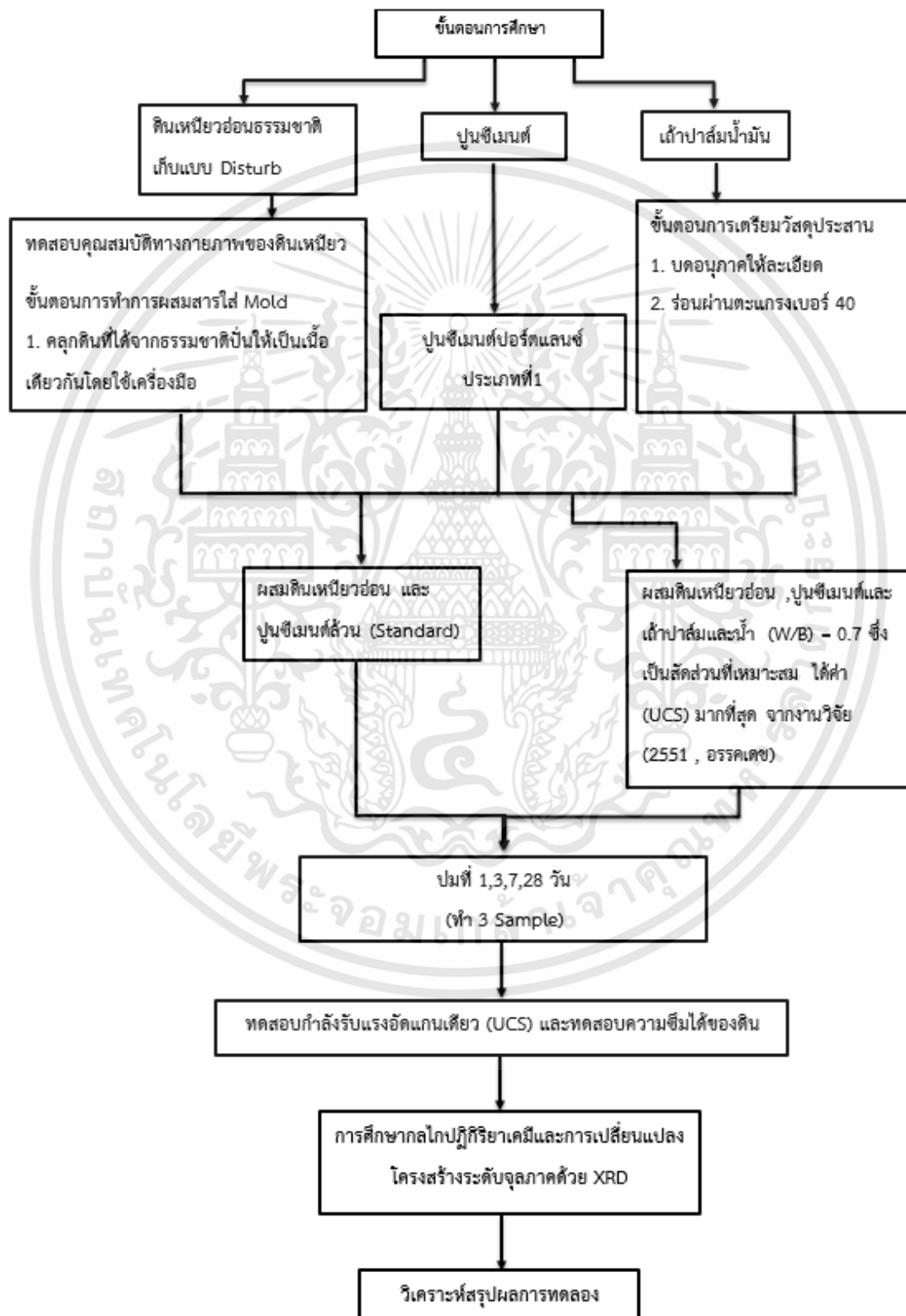
ตารางที่ 3-5 องค์ประกอบทางเคมีของถ้าปาล์มน้ำมัน

สารประกอบ	องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)							
	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	CaO	MgO	$SO_3$	$K_2O$	Other
ถ้าปาล์มน้ำมัน	69.83	11.34	4.93	5.64	1.82	1.26	2.83	2.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยจะดำเนินงานในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ของสถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยวิธีการในการดำเนินงานวิจัยมีลำดับดังรูปต่อไปนี้



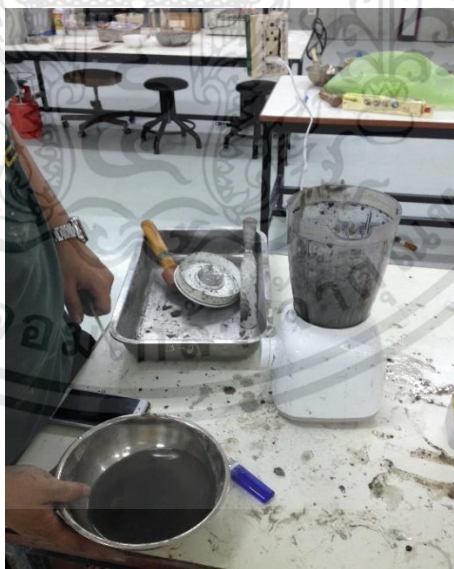
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.1 การเก็บตัวอย่างวัสดุและทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดิน

ดินเหนียวอ่อน ทำการเก็บตัวอย่างดินเหนียวอ่อนเป็นแบบถูกรบกวน (Disturbed Sample) โดยหลังจากเก็บตัวอย่างดินเหนียวอ่อนจากระดับความลึกที่ต้องการแล้ว คือ 3-7 เมตร โดยเก็บนำดินเหนียวอ่อนใส่ถุงพลาสติกไว้สองชั้นมัดปากถุงใส่ถังพลาสติกและปิดฝาถังให้แน่นหนา เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นในดิน และนำมาทดสอบคุณสมบัติทั้งด้านกายภาพและด้านวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อน ถ้าปาล์มน้ำมันที่เก็บตัวอย่างจากโรงงานผลิตกะลาปาล์มโดยตรงมีลักษณะค่อนข้างหยาบ และขนาดของอนุภาคไม่สม่ำเสมอ มีความพรุนสูง จึงนำถ้าปาล์มน้ำมันมาบดละเอียดให้มีความละเอียดให้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 10 ไมครอน หรือร่อนผ่านร่อนเบอร์ 30 (%) โดยใช้เครื่องมือวัด Blaine Air Permeability เป็นเครื่องมือใช้สำหรับวัดค่าความละเอียด จากนั้นนำถ้าปาล์มน้ำมันมาบดละเอียดแล้วมาศึกษาองค์ประกอบทางเคมีโดยการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุด้วยวิธีวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบด้วยวิธี X-ray Diffraction (XRD)

### 3.4.2 การผสมตัวอย่างดินเหนียวอ่อนกับสารเชื่อมประสานเพื่อเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างดินปรับปรุงแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยถ้าปาล์มน้ำมันเตรียมได้โดยนำดินเหนียวอ่อนมาผสมกับวัสดุผสมเชื่อมประสานตามมาตรฐาน JSF T821-1990 วัสดุเชื่อมประสานได้แก่ ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ้าปาล์มน้ำมันที่ปริมาณร้อยละ 15, 25, 35 และ 45 โดยน้ำหนักแห้ง ดังรูปที่ 3.8 ตามข้อแนะนำของกรมทางหลวงคือ ปูนซีเมนต์ 200 กก. ต่อดิน 1 ลบ.ม. ซึ่งเป็นข้อแนะนำที่ใช้สำหรับการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ มีรายละเอียดส่วนผสมต่างๆ ดังนี้



รูปที่ 3.8 การผสมดินปรับปรุงแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยถ้าปาล์มน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CP0 = ปูนซีเมนต์ 200 กก.

CP15 = ปูนซีเมนต์ 170 กก. และเถ้าปาล์มน้ำมัน 30 กก.(แทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน 15%)

CP25 = ปูนซีเมนต์ 150 กก. และเถ้าปาล์มน้ำมัน 50 กก.(แทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน 25%)

CP35 = ปูนซีเมนต์ 130 กก. และเถ้าปาล์มน้ำมัน 70 กก.(แทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน 35%)

CP45 = ปูนซีเมนต์ 110 กก. และเถ้าปาล์มน้ำมัน 90 กก.(แทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน 45%)

ดังแสดงในรูปที่ 3-8



รูปที่ 3.9 สัดส่วนการผสมปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมัน

ตัวแปรและจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้แสดงตามตารางที่ 3-5 ดังนี้

ตารางที่ 3-6 ตัวแปรและจำนวนตัวอย่างในการทดสอบ Unconfined Compression Test

ตัวแปร	จำนวน	หมายเหตุ
ชนิดของดิน	1	ดินเหนียว
ชนิดของสารเชื่อมประสาน	5	ดินผสมปูนซีเมนต์ ดินผสมปูนซีเมนต์และเถ้า ปาล์มน้ำมันที่อัตรา ส่วน 85:15, 75:25, 65:35, 55:45
ปริมาณน้ำต่อสารเชื่อมประสาน	1	0.70
ความละเอียด	1	2800 – 3000 cm <sup>2</sup> /g
ระยะเวลาในการบ่ม	5	1, 3, 7, 14 และ 28
ชนิดในการบ่ม	1	บ่มที่อุณหภูมิห้อง
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	3	ตัวอย่าง
จำนวนตัวอย่างที่ใช้ทั้งหมดในการทดสอบ	75	ตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเตรียมดินปรับปรุงแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน (W/B Ratio) เท่ากับ 0.7 ตามคำแนะนำการผสมเถ้าปาล์มน้ำมันกับคอนกรีตสด (อรรคเดช , 2551) หลังจากดินปรับปรุงแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องผสมแล้วนำไปบรรจุลงในแบบหล่อตัวอย่างทรงกระบอก (Mold) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 5 ซม. สูง 10 ซม. นำพลาสติกแผ่นบาง (Wrap) หุ้ม Mold ไว้เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นบริเวณผิวตัวอย่าง ทิ้งไว้จนครบ 24 ชั่วโมงจึงนำตัวอย่างออกจาก Mold เพื่อเตรียมการบ่มต่อไป

### 3.4.3 การบ่มตัวอย่าง

หลังจากนำตัวอย่างดินปรับปรุงแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันที่บ่มใน Mold จนครบ 24 ชั่วโมงออกมาแล้ว แยกตัวอย่างสำหรับบ่มออกเป็น 1 ชุด ดังนี้

ก). ตัวอย่างชุดที่ 1 เตรียมไว้สำหรับการบ่มแบบไม่แช่น้ำ (Unsoaked sample) นำตัวอย่างที่ออกมาจาก Mold แล้วไปชั่งน้ำหนัก จากนั้นรับหุ้มด้วยพลาสติกแผ่นบางแล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิห้องตามอายุการบ่ม 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน แสดงดังรูปที่ 3-9

ทั้งนี้การนับระยะเวลาในการบ่ม ทำการนับโดยเริ่มตั้งแต่การผสมดินเหนียวอ่อนเข้ากับวัสดุเชื่อมประสานทั้งนี้การนับระยะเวลาในการบ่ม



รูปที่ 3.10 แสดงตัวอย่างการบ่มแบบไม่แช่น้ำที่อุณหภูมิห้องของตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.4 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินผสมสารเชื่อมประสาน

ตัวอย่างดินปรับปรุงแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันที่ปม่ไว้จนครบอายุการปม่ที่ อุณหภูมิห้อง นำมาทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength หรือ UCS) ซึ่งเป็นการทดสอบที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการทดสอบดินประเภทดินเหนียว ทำได้โดยนำ ตัวอย่างไปติดตั้งในเครื่องทดสอบเรียบร้อยและทำการกดตัวอย่างด้วยการเพิ่มน้ำหนักในแนวตั้งโดย ทำการควบคุม Strain ในอัตรา 2 เปอร์เซ็นต์/นาที ใช้เกจวัดระยะที่มีความละเอียดถึง 0.01 มิลลิเมตรในอ่านค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้งทั้งหมด 1 ตัวทดสอบตัวอย่างจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการ วิบัติ บันทึกค่าแรงกดและการปริมาณการยุบตัวที่เกิดขึ้นเพื่อนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียด ผลที่ได้จากการบันทึกนำไปคำนวณหาค่ากำลังอัดแกนเดียวและค่า Modulus of Elasticity ( $E_{50}$ ) ได้ดังต่อไปนี้ แสดงในรูปที่ 3-10



รูปที่ 3.11 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของ ดินปรับปรุงแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วย  
เถ้าปาล์มน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Unconfined Compressive Strength ( $q_u$ )

$$q_u = P/A$$

เมื่อ  $q_u$  = Unconfined Compressive Strength (Ksc)  
 $P$  = แรงกดสูงสุดก่อนการวิบัติของแท่งตัวอย่าง (กก.)  
 $A$  = พื้นที่หน้าตัดของแท่งตัวอย่างในขณะที่ได้รับแรงกดสูงสุด (ซม.<sup>2</sup>)

- Modulus of Elasticity ( $E_{50}$ )

$$E_{50} = (\sigma_{\max}/2) \times (1/\epsilon)$$

เมื่อ  $E_{50}$  = Modulus of Elasticity at 50% Max.stress (Ksc)  
 $\sigma_{\max}$  = Maximum applied load (Ksc)  
 $\epsilon$  = Strain corresponding to 50% Max.stress (%)

### 3.4.5 การทดสอบค่าการซึมผ่านของดินปรับปรุงแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน

การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ( $K$ ) เพื่อหาอัตราการไหลผ่านของน้ำต่อมวลดินปรับปรุงแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน ในการทดสอบนี้ใช้การทดสอบแบบความดันคงที่จากการทดสอบถ้ำมวลดินที่น้ำซึมผ่านได้ยาก ค่า  $K$  การทดลองแบบความดันน้ำคงที่

$K = QL/ht$   
 เมื่อ  $K$  = สัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของดิน (ซม./วินาที)  
 $Q$  = ปริมาณน้ำที่ไหลซึม (ซม.<sup>3</sup>/วินาที)  
 $L$  = ความยาวของการไหลซึม (ซม.)  
 $h$  = การสูญเสียความดันหรือระดับน้ำ (ซม.)  
 $t$  = ช่วงเวลา (ปริมาณน้ำ  $Q$  ไหลผ่าน) (วินาที)

### 3.4.6 การศึกษาผลึกโกฏิกิริยาเคมีและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในระดับจุลภาค

ตัวอย่างดินปรับปรุงแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ล้วน และผลิตจากปูนซีเมนต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด จะนำมาศึกษาผลึกโกฏิกิริยาเคมีและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในระดับจุลภาคตามอายุการบ่มซึ่งการทดสอบนี้จะทำภายหลังจากการวิเคราะห์ผลการเลือกตัวอย่างที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดดีที่สุดเท่า่นั้นมาทำการศึกษา โดยจะทำการผสมตัวอย่างขึ้นมาใหม่ หลังครบกำหนดอายุการบ่มจะนำตัวอย่างมาทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว และจะทำการเก็บตัวอย่างส่วนหนึ่งไปทดสอบ ดังนี้

ก). ศึกษาผลึกโกฏิกิริยาเคมีโดยการวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบที่เกิดขึ้นด้วยวิธี X-ray diffraction (XRD)

ทำการศึกษาด้านกำลังรับน้ำหนักของดินปรับปรุงคุณภาพจาก ผลการศึกษาผลึกโกฏิกิริยาเคมีและผลการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในระดับจุลภาคตามอายุการบ่มที่ได้มาเปรียบเทียบกับระหว่างดินเหนียวผสมซีเมนต์ล้วน และเปรียบเทียบกับส่วนผสมอื่น

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

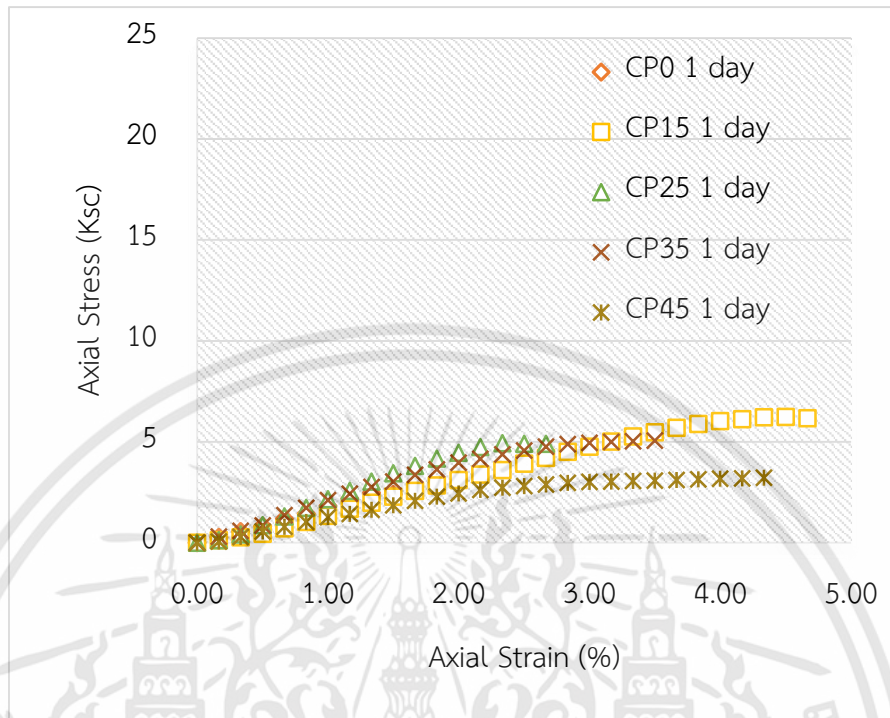
#### 4.1 บทนำ

บทนี้จะแสดงผลการศึกษาการพัฒนากำลังอัดแบบแกนเดียว การศึกษาการซึมได้ของน้ำในดิน และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับจุลภาคของดินปรับปรุงแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์ม น้ำมัน เพื่อนำมาศึกษาและวิเคราะห์ตัวแปรควบคุม (เวลาที่ใช้ในการบ่ม ปริมาณซีเมนต์ ปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์ม น้ำมัน วิธีการบ่ม) ที่มีผลต่อการพัฒนากำลังอัดของดินปรับปรุงแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์ม น้ำมัน ตามอายุการบ่มต่างๆ

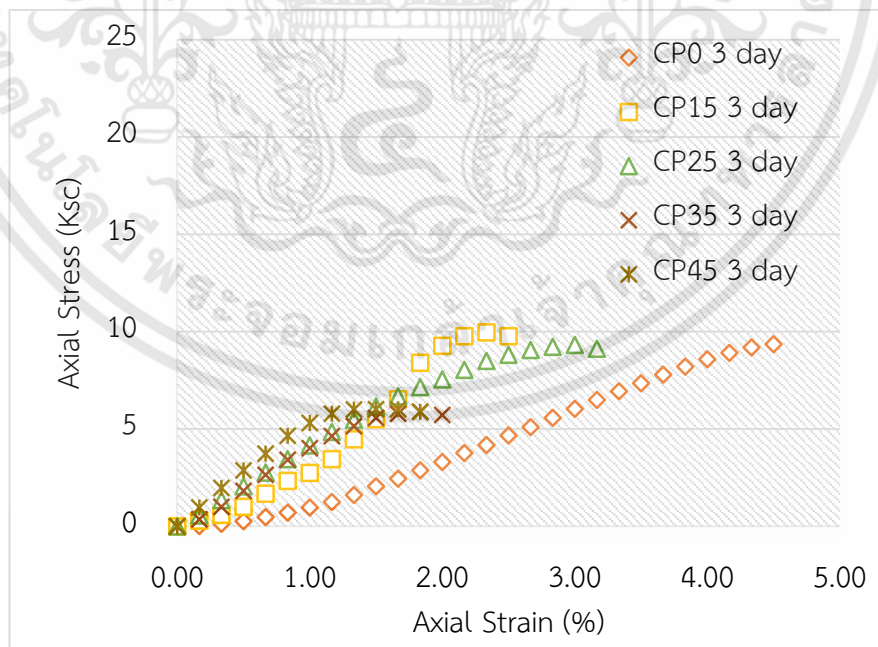
#### 4.2 Unconfined Compressive Strength test (Stress-strain curve)

เส้นโค้งสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curve) ของดินปรับปรุงแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์ม น้ำมัน สำหรับกรณีการบ่มแบบที่อุณหภูมิห้อง โดยแกน X ที่แสดงถึง ค่า Axial Strain และแกน Y แสดงถึงค่า Axial Stress แสดงตามรูปที่ 4-1 (ก-จ) แสดงความสัมพันธ์ Stress-Strain โดยข้อมูลที่ใช้เปรียบเทียบเป็นอัตราส่วนผสมต่างๆ ที่ระยะเวลาการบ่มเท่ากันและต่อมาได้ทำการศึกษาโดยเปลี่ยนการระบุข้อมูลความสัมพันธ์ Stress-Strain โดยข้อมูลที่ใช้เปรียบเทียบเป็นอัตราส่วนผสมเท่ากัน ที่ระยะเวลาการบ่มต่างๆ ตามรูปที่ 4-2 (ก-จ) พบว่า ความสัมพันธ์เป็นความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น การรับกำลังอัดในช่วงเริ่มต้น Stress-Strain มีแนวโน้มความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นซึ่งเป็นคุณสมบัติของวัสดุที่มีความยืดหยุ่น เมื่อ Stress เพิ่มขึ้นถึงค่าหนึ่งเส้นความสัมพันธ์จะเริ่มเปลี่ยนจากเส้นตรงเป็นเส้นโค้งซึ่งแสดงถึงคุณสมบัติความเป็นพลาสติกของวัสดุ และดินปรับปรุงแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์ม น้ำมันจะพังทลายภายใต้กำลังรับแรงอัด (Hongxia, 2012) เส้นโค้งสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดที่อายุการบ่ม 1 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4-2 (ก) พบว่า CP45 มีค่าความยืดหยุ่นสูงกว่า CP15, CP0, CP35 โดย CP25 มีค่าความยืดหยุ่นต่ำสุด ที่อายุการบ่ม 3 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4-2 (ข) CP0 ยังคงมีความยืดหยุ่นสูงกว่า CP15 แต่มีความยืดหยุ่นใกล้เคียงกับ CP25 CP35 โดย CP45 ยังคงมีค่าความยืดหยุ่นต่ำสุด ที่อายุการบ่ม 7 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4-2 (ค) CP15 มีความยืดหยุ่นใกล้เคียงกับ CP35 โดยที่ CP25 มีค่าความยืดหยุ่นมากกว่าส่วนผสมอื่น ๆ และ CP0 มีค่าความยืดหยุ่นต่ำสุด อีกทั้งยังพบว่า เมื่อทำการแทนที่ด้วยเถ้าปาล์ม น้ำมันเพิ่มขึ้นทำให้ความยืดหยุ่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าปาล์ม น้ำมันที่เพิ่มขึ้น ที่อายุการบ่ม 14 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4-2 (ง) พบว่า CP45 มีความยืดหยุ่นมากกว่า CP35 และส่วนผสมอื่น ๆ โดย CP0 มีค่าความยืดหยุ่นต่ำสุด ที่อายุการบ่ม 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4-2 (จ) พบว่า CP45 มีความยืดหยุ่นสูงที่สุด โดยความ

ยืดหยุ่นของดินปรับปรุงแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันที่เพิ่มขึ้นกล่าวคือ CP45 > CP35 > CP25 > CP15 > CP0

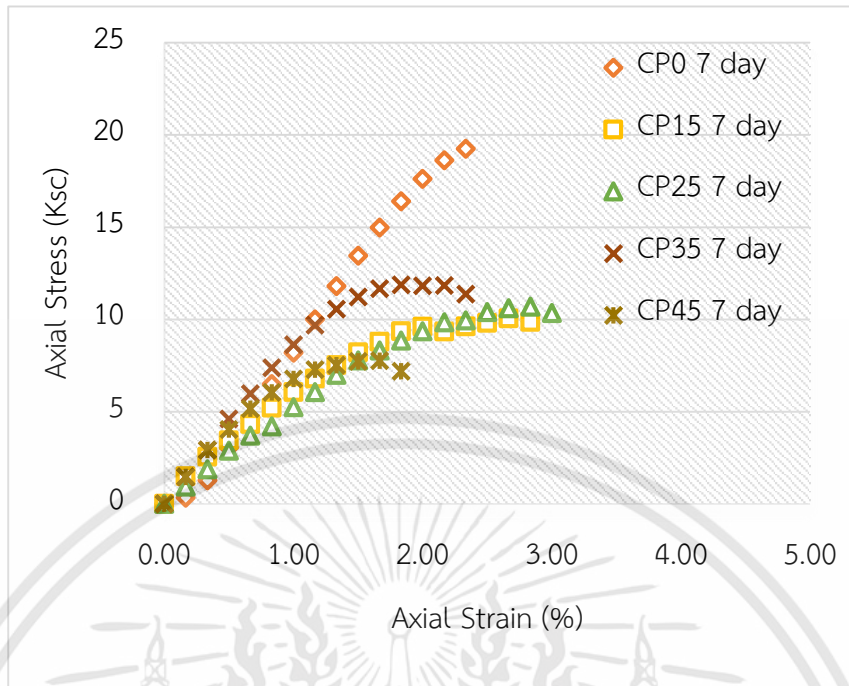


รูปที่ 4.1 (ก) เส้นโค้งสัมพันธ์ Stress-strain curve ของตัวอย่าง ที่อายุการบ่มต่างๆ ที่อายุการบ่ม 1 วัน

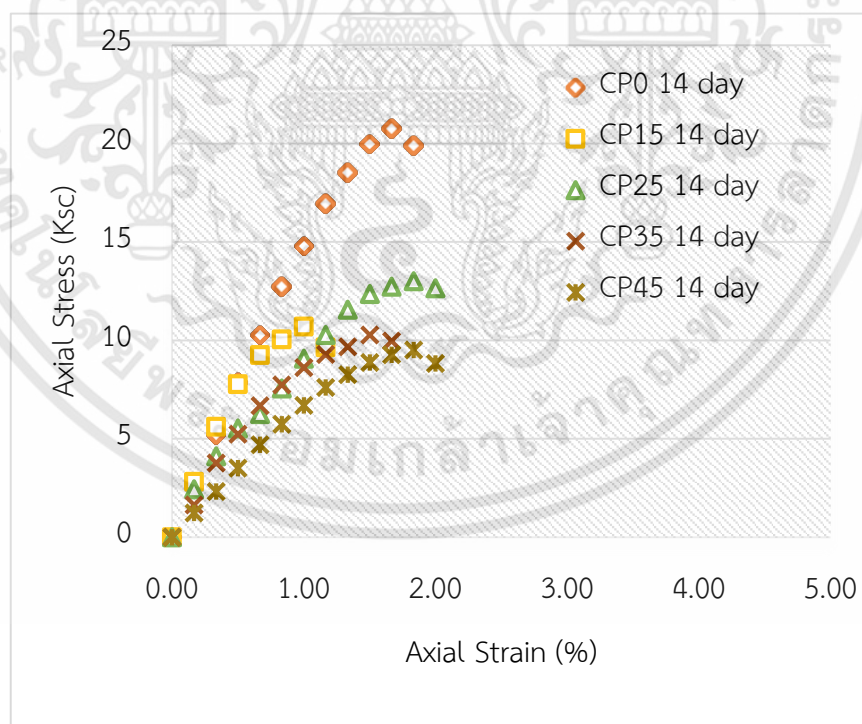


รูปที่ 4.1 (ข) เส้นโค้งสัมพันธ์ Stress-strain curve ของตัวอย่าง ที่อายุการบ่มต่างๆ ที่อายุการบ่ม 3 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

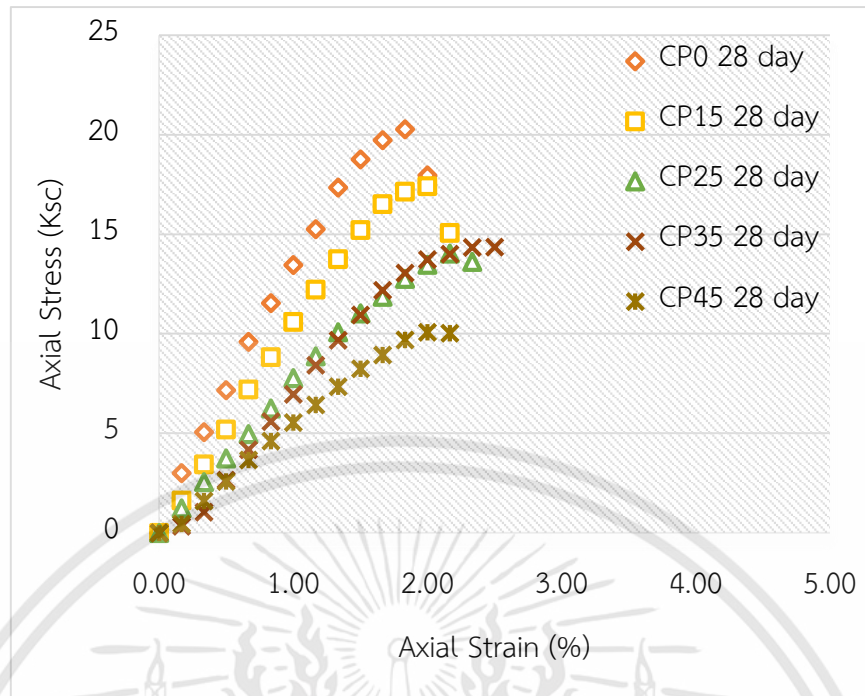


รูปที่ 4.1 (ค) เส้นโค้งสัมพันธ์ Stress-strain curve ของตัวอย่าง ที่อายุการบ่มต่างๆ ที่อายุการบ่ม 7 วัน

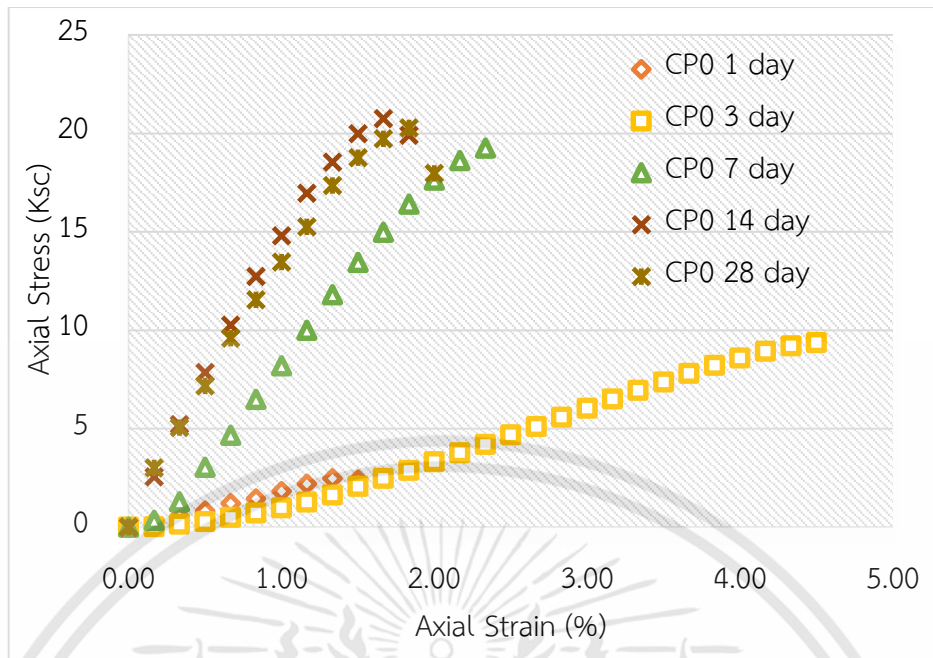


รูปที่ 4.1 (ง) เส้นโค้งสัมพันธ์ Stress-strain curve ของตัวอย่าง ที่อายุการบ่มต่างๆ ที่อายุการบ่ม 14 วัน

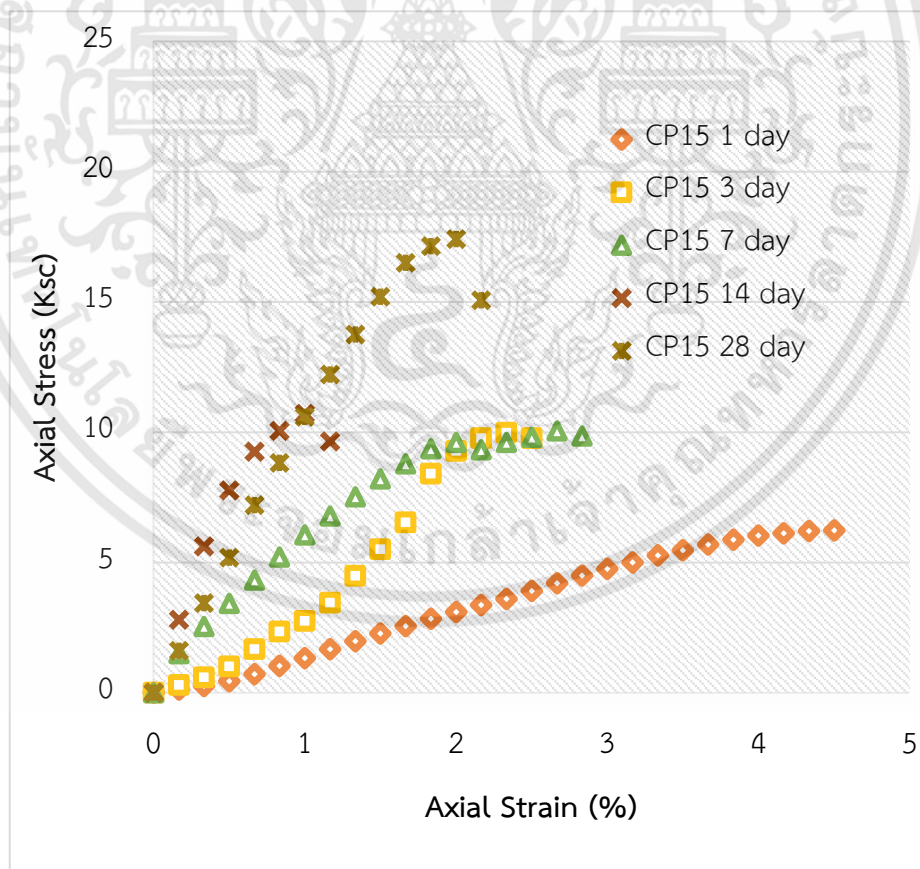
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 (จ) เส้นโค้งสัมพันธ์ Stress-strain curve ของตัวอย่าง ที่อายุการบ่มต่างๆ ที่อายุการบ่ม 28 วัน

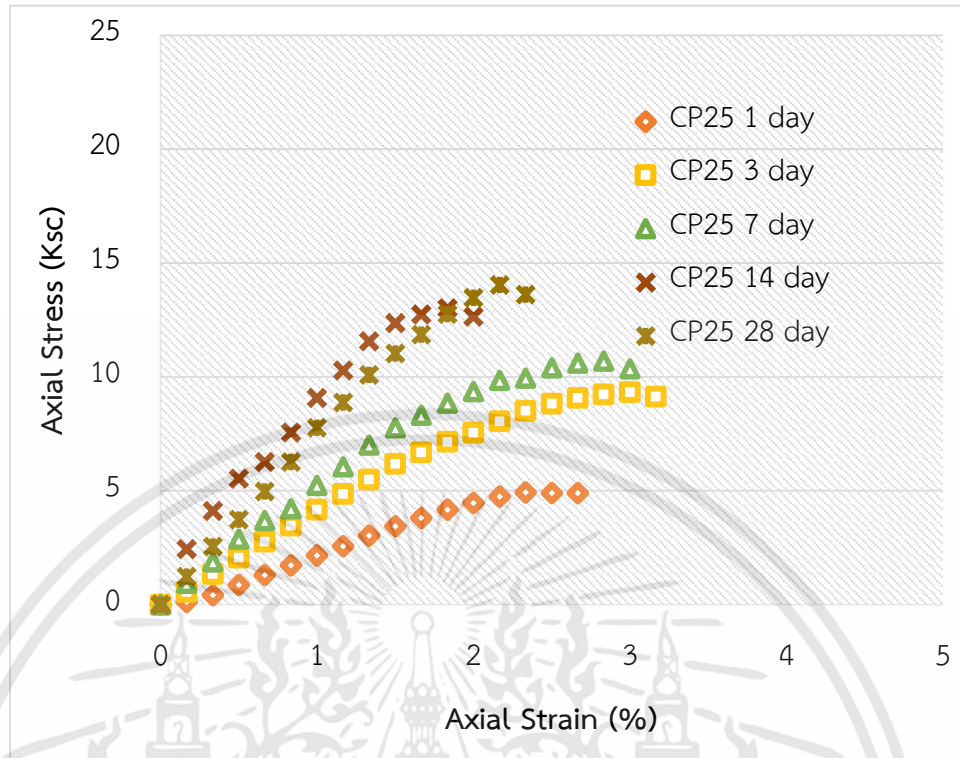


รูปที่ 4.2 (ก) เส้นโค้งสัมพันธ์ Stress-strain curve ของตัวอย่าง ที่อัตราส่วนเป็น CP0

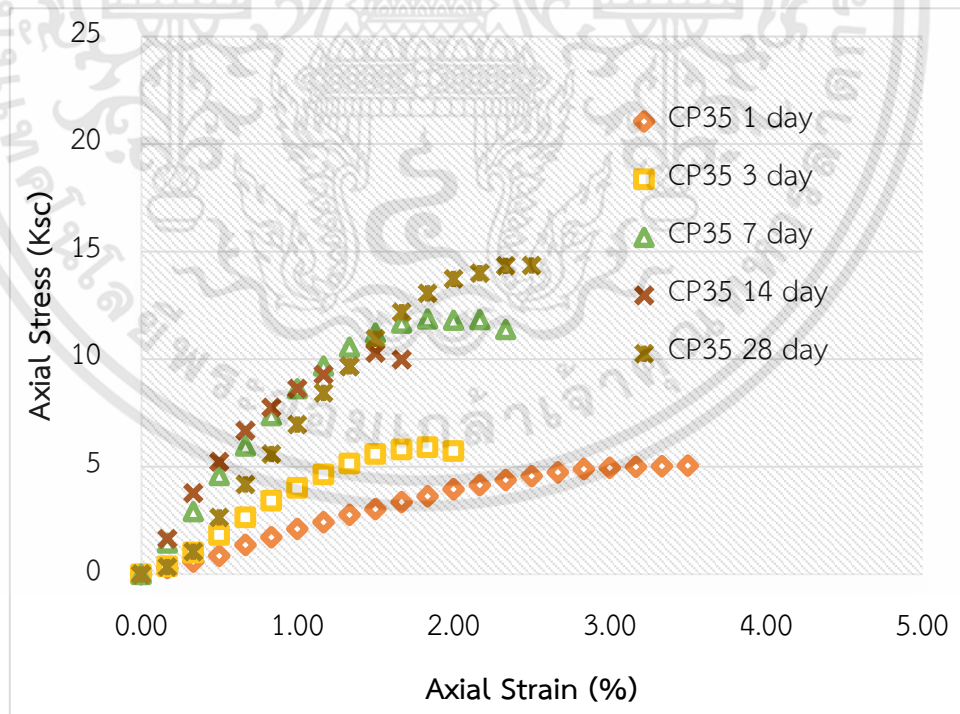


รูปที่ 4.2 (ข) เส้นโค้งสัมพันธ์ Stress-strain curve ของตัวอย่าง ที่อัตราส่วนเป็น CP15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

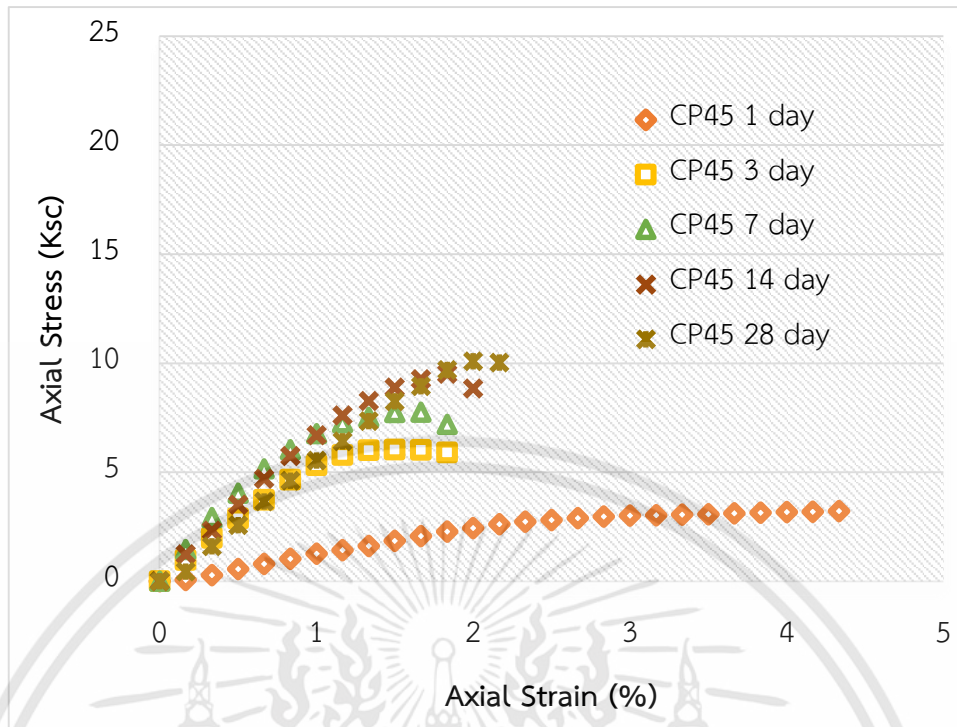


รูปที่ 4.2 (ค) เส้นโค้งสัมพันธ์ Stress-strain curve ของตัวอย่าง ที่อัตราส่วนเป็น CP25



รูปที่ 4.2 (ง) เส้นโค้งสัมพันธ์ Stress-strain curve ของตัวอย่าง ที่อัตราส่วนเป็น CP35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 (จ) เส้นโค้งสัมพันธ์ Stress-strain curve ของตัวอย่าง ที่อัตราส่วนเป็น CP45

ผลของเส้นโค้งสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดแสดงให้เห็นว่าเมื่อนำเถ้าปาล์มน้ำมันผสมกับดินซีเมนต์จะทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีในรูปแบบของการแลกเปลี่ยนไอออนบวกปฏิกิริยาปอซโซลาน และการเชื่อมประสาน (Cementation) ของตะกอนอนุภาคดินซีเมนต์ที่เกิดขึ้นจะเข้าไปรวมตัวกันในอนุภาคหยาบ ทำให้ช่วยต้านแรงอัดได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับดินเหนียวที่ผสมปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ปูนซีเมนต์จะมีบทบาทสำคัญในการก่อให้เกิดการเชื่อมประสานในวัสดุ ป้องกันไม่ให้วัสดุเกิดพังทลายเมื่อนำไปใช้ในการรับแรงอัดที่สูงขึ้น เป็นผลให้พฤติกรรมความเครียดของดินขยายตัวมีความเสถียรเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อสารเติมเพิ่มมีปริมาณเพิ่มขึ้น (Osinubi และคณะ 2009, Manikandan และ Moganraj 2014, Goyal และคณะ 2007)

### 4.3 ผลการศึกษากำลังอัดแบบไม่จำกัดของดินซีเมนต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

ผลการทดสอบกำลังอัดแบบไม่จำกัด (Unconfined Compression Test) ของดินซีเมนต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน ซึ่งได้จากการเฉลี่ยจากตัวอย่างทดสอบอย่างละ 3 ตัวอย่าง ผลทดสอบกำลังอัดพบว่าดินซีเมนต์มีกำลังอัดเพิ่มสูงขึ้นทุกอัตราส่วนผสมและอายุการบ่ม ดังแสดงใน ตาราง 4-1

ตารางที่ 4-1 กำลังอัดแบบไม่จำกัดของดินซีเมนต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันด้วยวิธีการบ่มที่อุณหภูมิห้อง

ลักษณะการบ่ม	อายุการบ่ม(วัน)	กำลังอัด $q_u$ (Ksc) ที่อายุการบ่ม				
		1 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
บ่มที่อุณหภูมิห้อง	CP0	3.72	8.75	17.38	20.50	21.49
	CP15	5.84	9.17	9.74	10.48	16.47
	CP25	4.92	8.24	11.67	12.66	17.76
	CP35	4.81	6.27	10.14	11.47	15.85
	CP45	3.15	6.23	7.33	9.51	10.36

โดยตัวอย่าง CP0 ที่ใช้ปูนผสมเพียงอย่างเดียวมีกำลังอัด 3.72, 8.75, 17.38, 20.50, 21.49 ksc ที่อายุการบ่ม 1, 3, 7, 14, 28 วัน ตามลำดับ สังเกตได้ว่ากำลังอัดของดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์อย่างเดียวนั้นมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 3, 7 วัน และพัฒนาเพิ่มขึ้นสูงในช่วง 14 วัน และกำลังอัดยังคงพัฒนาเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่ 28 วัน

เมื่อทำการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน 15%, 25%, 35% และ 45% โดยน้ำหนักแห่งพบว่ากำลังอัดของดินปรับปรุงแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันยังมีแนวโน้มสูงเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนและทุกอายุการบ่ม

กำลังอัดของตัวอย่าง CP15 ซึ่งเป็นการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน 15% โดยน้ำหนักแห่ง มีค่ากำลังอัด มีค่ากำลังอัด 5.84 ksc ที่อายุ 1 วันซึ่งมีค่าสูงกว่าทุกส่วนผสม และมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นเป็น 9.17 ksc ที่อายุ 3 วัน ซึ่งสูงกว่าทุกส่วนผสม ในขณะที่กำลังอัดเพิ่มขึ้นเป็น 9.74, 10.48 ksc ที่อายุ 7, 14 วัน โดยมีกำลังอัดต่ำกว่าเมื่อเทียบกับ CP25 และ CP0 ตามลำดับ เมื่อครบอายุ 28 วัน มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นเป็น 16.47 ksc ซึ่งมีกำลังอัดใกล้เคียงกับ CP25, CP35 แต่ยังคงมีค่ากำลังอัดต่ำกว่า CP0

กำลังอัดของตัวอย่าง CP25 ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน 25% โดยน้ำหนักแห่ง มีค่ากำลังอัด 4.92 ksc ที่อายุ 1 วัน มีค่ากำลังอัดสูงกว่า CP45, CP0, CP35 ตามลำดับ แต่มีค่ากำลังอัดต่ำกว่า CP15 ในขณะที่อายุ 3 วัน มีค่ากำลังอัดเป็น 8.24 มีค่ากำลังอัดใกล้เคียง CP0 และมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังอัดต่ำกว่า CP15 อยู่เล็กน้อย และมีค่ากำลังอัดสูงกว่า CP35, CP45 ที่อายุ 7 วัน มีค่ากำลังอัด 11.67 ksc ซึ่งต่ำกว่า CP0 และสูงกว่า CP45, CP35, CP15 ตามลำดับ ในขณะที่อายุ 14 วัน มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นเป็น 12.66 ksc ซึ่งสูงกว่า CP45, CP15, CP35 ตามลำดับ แต่ยังมีค่าต่ำกว่า CP0 ที่อายุ 28 วัน มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นเป็น 15.76 ksc ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ CP15, CP35 ตามลำดับ และมีค่ากำลังอัดสูงกว่า CP45 แต่ยังคงมีกำลังอัดต่ำกว่า CP0

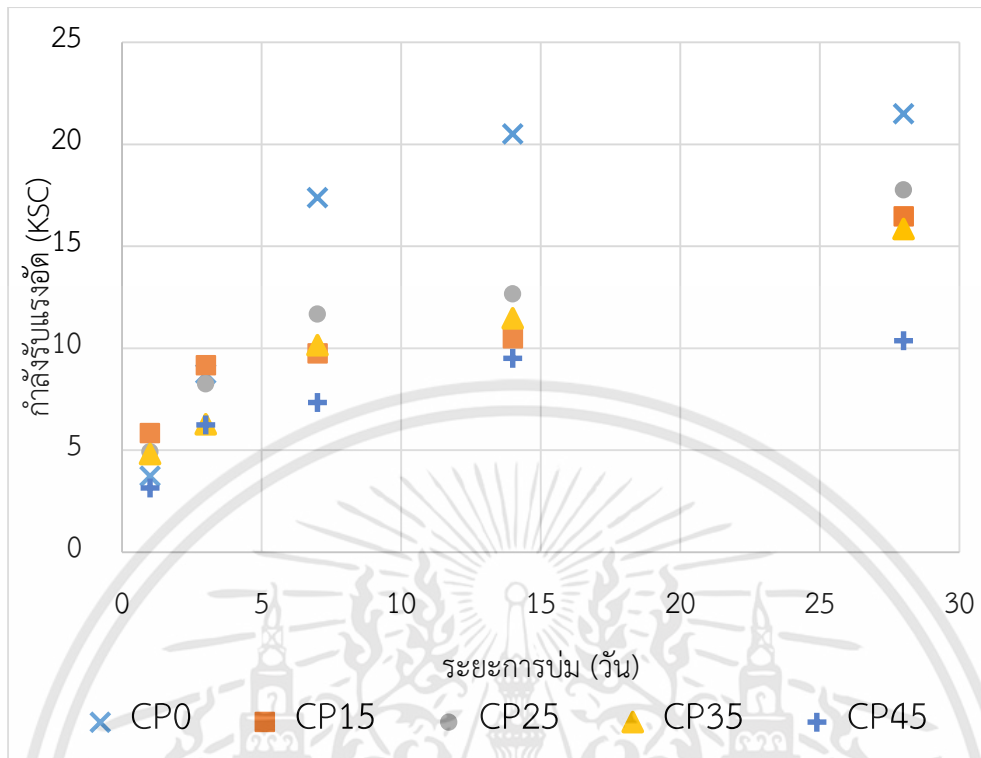
กำลังอัดของตัวอย่าง CP35 ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน 35% โดยน้ำหนักแห้ง มีค่ากำลังอัด 4.81 ksc ที่อายุ 1 วัน ซึ่งต่ำกว่า CP15, CP25 และมีกำลังอัดสูงกว่า CP45, CP0 ตามลำดับ ในขณะที่อายุ 3 วัน มีค่ากำลังอัดเป็น 6.27 ksc มีค่ามากกว่า CP45 เพียงเล็กน้อย แต่มีค่ากำลังอัดต่ำกว่า CP15, CP0, CP25 ตามลำดับ ที่อายุ 7 วัน มีค่ากำลังอัดเป็น 10.14 ksc มีกำลังอัดต่ำกว่า CP0, CP25 ตามลำดับ และมีกำลังอัดสูงกว่า CP45, CP15 ตามลำดับ ที่อายุ 14 วัน มีกำลังอัดเป็น 11.47 ksc มีกำลังอัดต่ำกว่า CP0, CP25 และมีกำลังอัดสูงกว่า CP45, CP15 ตามลำดับ ขณะที่อายุ 28 วัน มีกำลังอัดเป็น 15.85 มีค่าใกล้เคียง CP15, CP25 โดยมีกำลังอัดมากกว่า CP45 และยังคงมีกำลังอัดต่ำกว่า CP0

กำลังอัดของตัวอย่าง CP45 ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน 45% โดยน้ำหนักแห้ง มีค่ากำลังอัด 3.15 ksc ที่อายุ 1 วัน ซึ่งมีกำลังอัดต่ำกว่า CP15, CP35, CP25, และ CP0 ตามลำดับ ในขณะที่ 3 วัน มีค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นเป็น 6.23 ksc ซึ่งมีกำลังอัดต่ำกว่า CP15, CP0, CP25, และ CP35 ตามลำดับ ที่อายุ 7 วัน มีกำลังอัดเป็น 7.33 ksc ซึ่งมีกำลังอัดต่ำกว่า CP0, CP25, CP35 และ CP15 ตามลำดับ ที่อายุ 14 วัน มีค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นเป็น 9.51 ksc ซึ่งมีกำลังอัดต่ำกว่า CP0, CP25, CP35 และ CP15 ตามลำดับ ที่อายุ 28 วัน มีค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นเป็น 10.36 ksc ซึ่งมีกำลังอัดต่ำกว่า CP0, CP15, CP35 และ CP25 ตามลำดับ

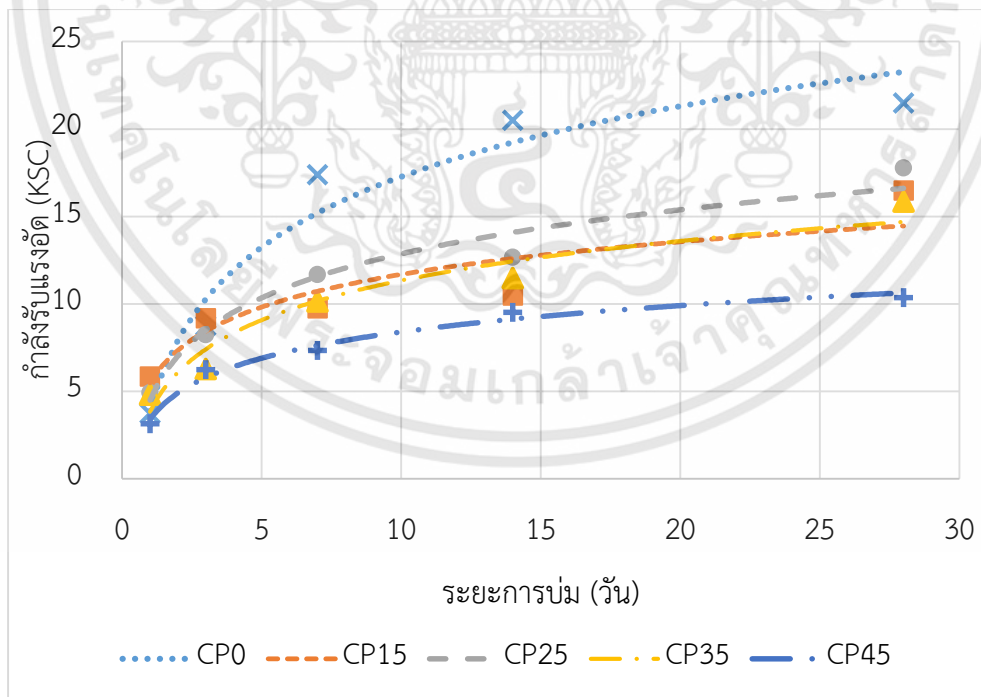
หลังจากการผลการทดสอบได้ระบุข้อมูลลงไปเป็นกราฟ ตามแสดงดังรูปที่ 4-3 (ก) ต่อมาเพื่อให้ข้อมูลดูชัดเจนมากขึ้นจึงแสดงเส้นความสัมพันธ์ของการพัฒนา กำลังอัดที่อายุการบ่ม โดยการ Fix-Curve แสดงดังรูปที่ 4-3 (ข) ซึ่งอยู่ในรูปความสัมพันธ์เชิงฟังก์ชันลอการิทึมแบบเนเจอร์ล (ln) โดยสามารถเขียนความสัมพันธ์ดังกล่าวให้อยู่ในรูปสมการทั่วไปได้ดังนี้ และแสดงค่าการพัฒนา กำลังอัดดินปรับปรุงแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันที่อายุการบ่มต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4-2

$$\begin{aligned}
 q_u &= A (\ln B) + C & (4-1) \\
 \text{เมื่อ} \quad A &= 2.67 \text{ ถึง } 5.82 \\
 B &= \text{อายุการบ่ม(วัน)} \\
 C &= 3.40 \text{ ถึง } 5.48
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 (ก) กำลังอัดของดินปรับปรุงแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน อายุการบ่มต่าง ๆ



รูปที่ 4.3 (ข) กำลังอัดของดินปรับปรุงแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน อายุการบ่มต่าง ๆ

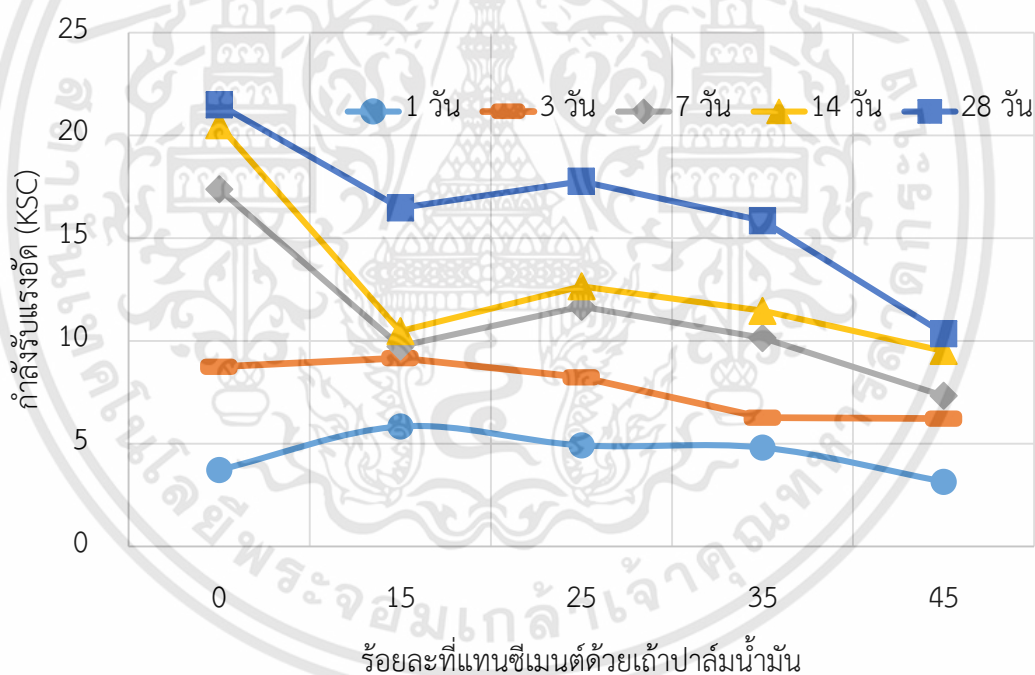
โดยวิธี Fix-Curve

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4-2 ความสัมพันธ์การพัฒนากำลังอัดดินปรับปรุงแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน  
ที่อายุการบ่มต่าง ๆ

ซึ่งสามารถสรุปความสัมพันธ์ของกำลังอัดกับระยะเวลาบ่มได้เป็นสมการดังนี้

ลักษณะการบ่มตัวอย่าง	ตัวอย่าง	สมการความสัมพันธ์	R <sup>2</sup>
บ่มที่อุณหภูมิต่ำ	CP0	$q_u = 5.82\ln(B) + 3.87$	0.9511
	CP15	$q_u = 2.67\ln(B) + 5.48$	0.8300
	CP25	$q_u = 3.63\ln(B) + 4.50$	0.9613
	CP35	$q_u = 3.26\ln(B) + 3.83$	0.9410
	CP45	$q_u = 2.17\ln(B) + 3.40$	0.9826



รูปที่ 4.4 กำลังอัดของดินปรับปรุงแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันด้วยร้อยละต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาการพัฒนากำลังอัดของดินปรับปรุงแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันตามแต่ละช่วงอายุการบ่มโดยเปรียบเทียบกับตัวอย่าง CP0 พบว่าที่อายุการบ่ม 1 วัน กำลังอัดของ CP15 > CP25 > CP35 > CP0 > CP45 หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าการก่อตัวระยะต้นของดินที่ผสมซีเมนต์อย่างเดียว ก่อตัวได้ช้ากว่าดินปรับปรุงแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าปาล์มที่ 15, 25, 35% แต่ก่อตัวได้เร็วกว่า 45% โดยกำลังอัดมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณปูนที่ลดลง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามลำดับที่อายุการบ่ม 3 วันพบว่า CP15 ให้กำลังอัดที่สูงที่สุดและสูงกว่า CP0 เพียงเล็กน้อย พบว่า CP0 มีการพัฒนากำลังอัดดีที่สุด และค่ากำลังอัดของ CP25 > CP35 ในขณะที่ CP45 ให้กำลังอัดต่ำที่สุด และจะพบว่าอัตราส่วนผสมที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน 15% จะมีการพัฒนากำลังอัดดีที่สุดที่ 1, 3 วัน ดูเหมือนว่า CP15 สามารถพัฒนากำลังอัดได้เร็วที่สุด ในช่วง 3 วันแรกเท่านั้น หลังจาก 3 วัน CP15 ก็จะมีพัฒนากำลังอัดได้น้อยมาก

ที่อายุการบ่ม 7 วัน CP0 มีการพัฒนากำลังอัดสูงที่สุดและให้กำลังอัดสูงที่สุด โดยกำลังอัดของ CP0 > CP25 > CP15 > CP35 ในขณะที่ CP45 ให้กำลังอัดต่ำที่สุด

ที่อายุการบ่ม 14 วัน CP0 มีการพัฒนากำลังอัดสูงที่สุดและให้กำลังอัดสูงที่สุด โดยกำลังอัดของ CP0 > CP25 > CP35 > CP15 ในขณะที่ CP45 ให้กำลังอัดต่ำที่สุด

ที่อายุการบ่ม 28 วัน CP0 มีการพัฒนากำลังอัดสูงที่สุดและให้กำลังอัดสูงที่สุด โดยกำลังอัดของ CP0 > CP25 > CP15 > CP35 ในขณะที่ CP45 ให้กำลังอัดต่ำที่สุด ในขณะที่ CP45 ให้กำลังอัดต่ำที่สุด และจะพบว่าอัตราส่วนผสมที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน 25% จะมีการพัฒนากำลังอัดดีที่สุดที่ 7, 14, 28 วัน ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลการทดสอบกำลังอัดโดยรวมพบว่า CP0 ที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์อย่างเดียวให้กำลังอัดสูงขึ้นอย่างรวดเร็วภายในอายุการบ่ม 3, 7, 28 วัน เมื่อทำการแทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน 25% จะเพิ่มกำลังอัดสูงที่สุดเมื่อเทียบกับสัดส่วนอื่นที่อายุการบ่ม 7, 14, 28 วัน และเมื่อทำการแทนที่เถ้าปาล์มที่ 45% พบว่าให้กำลังต่ำกว่าทุกกรณี จากผลการทดสอบกำลังอัดข้างต้นพบว่าเถ้าปาล์มน้ำมัน ส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดที่อายุการบ่ม 7-28 วัน เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน 25% หรือ CP25 จะพัฒนากำลังอัดได้ดีที่สุดในบรรดากการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันทุกส่วนผสม เมื่อผ่าน 7 วันไปแล้วสรุปดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 ผลสรุปค่า  $q_u$  ของการดินที่แทนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน

ที่ 1 – 3 วัน	CP0, CP25, CP15 กำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและสูงที่สุด
ที่ 7 วัน	CP15 จะมีการพัฒนากำลังลดลงมาเท่ากับ CP35 และเท่ากันไปจน 28 วัน
CP45	มีการพัฒนากำลังได้ช้าและต่ำที่สุด
CP0	พัฒนากำลังได้เร็วและต่อเนื่องจน 28 วัน มีกำลังอัดสูงที่สุดที่อายุ 14 วัน รองลงมาก็คือ CP25
CP15 และ CP35	มีค่าใกล้เคียงกันที่อายุการบ่มเดียวกัน

#### 4.4 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) $E_{50}$

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) หรือ  $E_{50}$  เป็นพารามิเตอร์สำคัญในการวิเคราะห์พฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของดินและยังปฏิสัมพันธ์กับน้ำหนักที่กระทำลงบนดิน ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นที่ใช้ในการแก้ไขปัญหาทางปฐพี เช่น การคำนวณทรุดตัวของฐานรากในเทอมของ Strain เป็นต้น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินปรับปรุงแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันแสดงดังตารางที่ 4-4 และตามรูปที่ 4-5

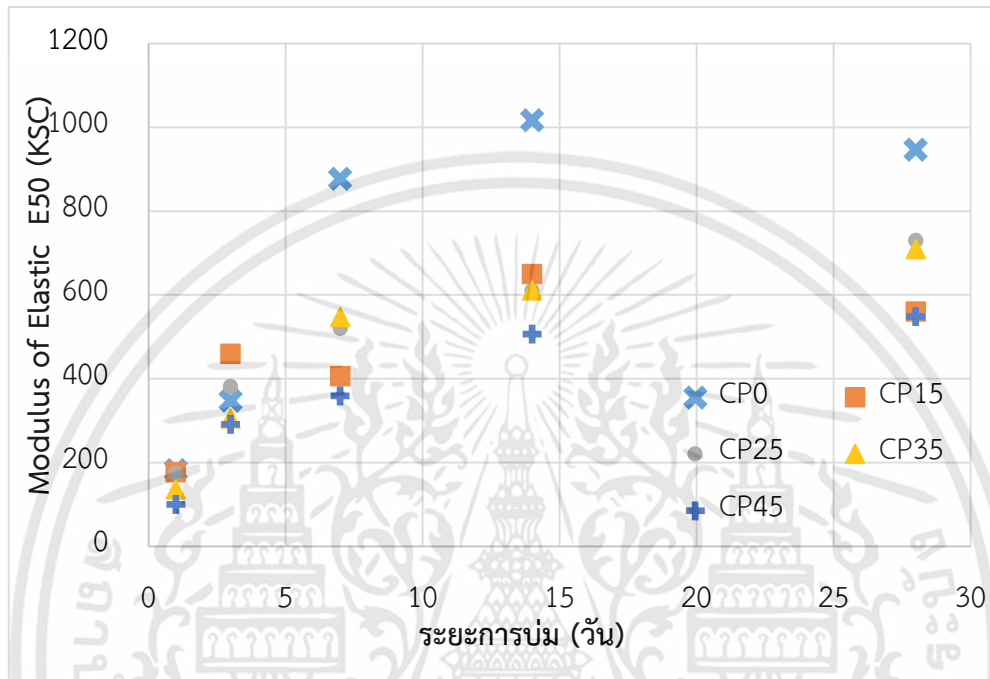
ตารางที่ 4-4 ค่า  $E_{50}$  ของดินปรับปรุงแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันผสมเถ้าปาล์ม น้ำมันด้วยวิธีการบ่มแบบที่อุณหภูมิต้อง

ลักษณะการบ่ม	อายุการบ่ม(วัน)	Modulus of elasticity ( $E_{50}$ ) (Ksc)				
		1 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
บ่มที่อุณหภูมิต้อง	CP0	181.77	347.43	877.18	1017.39	947.28
	CP15	176.91	459.49	405.99	650.40	702.77
	CP25	174.65	382.07	520.94	610.52	730.32
	CP35	136.02	305.73	547.98	611.04	650.94
	CP45	100.00	291.54	359.09	506.56	548.63

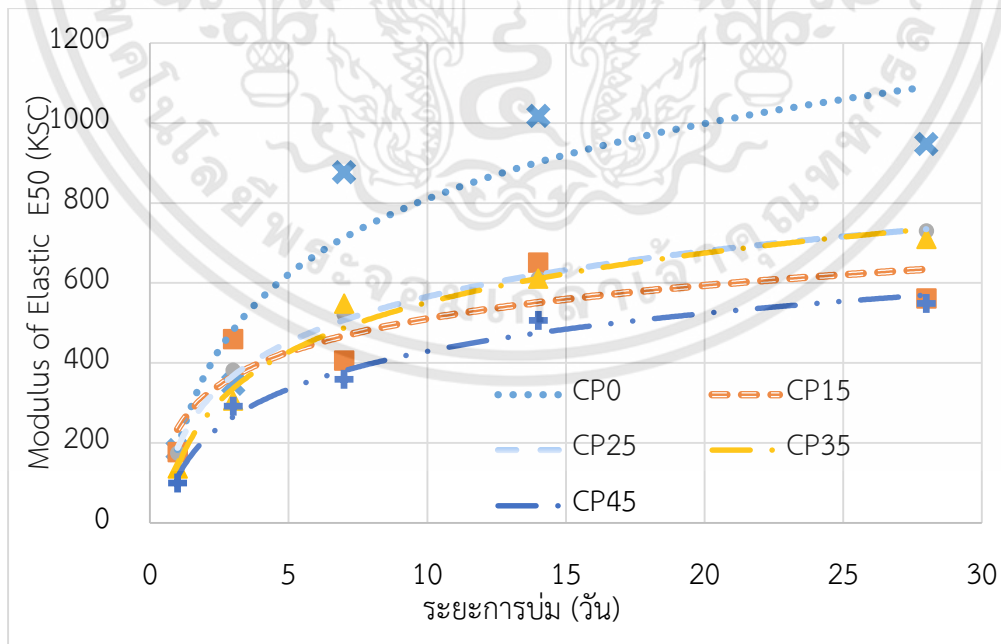
พบว่าค่า  $E_{50}$  มีแนวโน้มสูงขึ้นตามอายุที่บ่มตัวอย่าง และลดลงตามสัดส่วนที่ผสมเถ้าปาล์ม น้ำมันมากขึ้น โดยที่ CP0 ให้ค่า  $E_{50}$  เท่ากับ 181.77, 347.43, 877.18, 1017.39, 947.28 ksc ที่อายุ 1, 3, 7, 14, 28 วัน ตามลำดับ โดยค่า  $E_{50}$  เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ 3, 7, 14, 28 วัน ที่อายุการบ่ม 1 วัน ค่า  $E_{50}$  ที่ CP0 มีค่าสูงที่สุด และสูงกว่า CP45 < CP35 < CP25 < CP15 ตามลำดับ ที่อายุ 3 วัน CP15 มีค่าสูงกว่า CP45 < CP35 < CP0 < CP25 ตามลำดับ ที่อายุ 7 วัน CP0 มีค่าสูงที่สุดและสูงกว่า CP45 < CP15 < CP25 < CP35 ตามลำดับ ที่อายุ 14 วัน CP0 มีค่าสูงที่สุดและสูงกว่า CP45 < CP25 < CP35 < CP15 ตามลำดับ ที่อายุ 28 วัน CP0 มีค่าสูงที่สุดและสูงกว่า CP45 < CP15 < CP35 < CP25 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจะพบว่า CP45 ที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันที่ 45% ให้ค่า  $E_{50}$  น้อยที่สุดทุกอายุการบ่ม ดังแสดงในรูป 4-6

หลังจากการผลการทดสอบได้ระบุข้อมูลลงไปในกราฟ ตามแสดงดังรูปที่ 4-5 (ก) ต่อมา เพื่อให้ข้อมูลดูชัดเจนมากขึ้นจึงแสดงเส้นความสัมพันธ์ของการพัฒนาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of

elasticity)  $E_{50}$  ที่อายุการบ่ม โดยการ Fix-Curve แสดงดังรูปที่ 4-5 (ข) ซึ่งอยู่ในรูปความสัมพันธ์เชิงฟังก์ชันลอการิทึมแบบเนเจอร์ล (ln) โดยสามารถเขียนความสัมพันธ์ดังกล่าวให้อยู่ในรูปสมการทั่วไปได้ดังนี้ และแสดงค่าการพัฒนาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity)  $E_{50}$  ของดินปรับปรุงแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันที่อายุการบ่มต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4-4



รูปที่ 4.5 (ก) โมดูลัส ( $E_{50}$ ) ของดินปรับปรุงแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันที่อายุการบ่ม

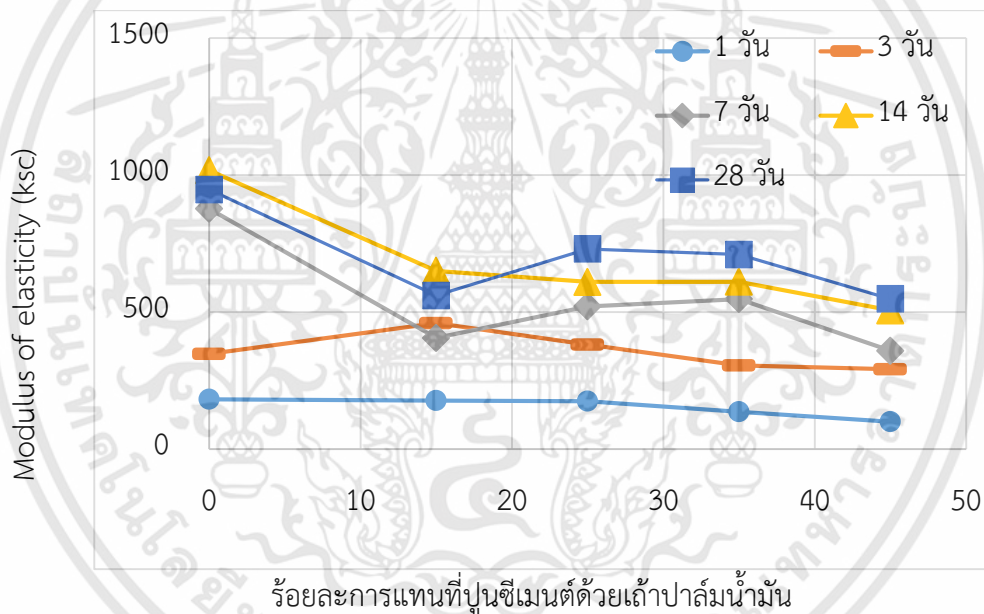


รูปที่ 4.5 (ข) โมดูลัส ( $E_{50}$ ) ของดินปรับปรุงแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันที่อายุการบ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4-5 ความสัมพันธ์การพัฒนากำลังอัดดินปรับปรุงแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันที่อายุการบ่มต่าง ๆ

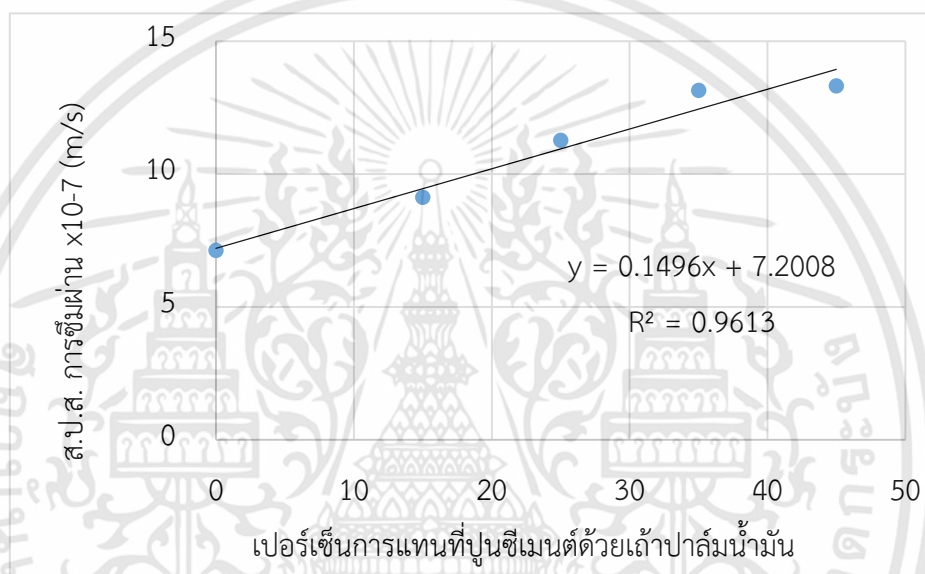
ลักษณะการบ่มตัวอย่าง	ตัวอย่าง	สมการความสัมพันธ์	R <sup>2</sup>
บ่มที่อุณหภูมิตั้ง	CP0	$E_{50} = 272.09\ln(B) + 183.58$	0.8644
	CP15	$E_{50} = 164.19\ln(B) + 187.64$	0.9936
	CP25	$E_{50} = 178.38\ln(B) + 140.49$	0.9764
	CP35	$E_{50} = 119.96\ln(B) + 234.4$	0.7590
	CP45	$E_{50} = 136.35\ln(B) + 115.3$	0.9781



รูปที่ 4.6 โมดูลัส ( $E_{50}$ )ของดินปรับปรุงแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันที่อายุการบ่มต่างๆ

#### 4.5 การทดสอบค่าการซึมน้ำของดินปรับปรุงแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์ม น้ำมัน

ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดินปรับปรุงแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์ม น้ำมัน Kt กับอัตราส่วนผสมที่อายุการบ่ม 28 วัน พบว่า เมื่อทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์ม 15%, 25%, 35%, 45% โดยน้ำหนักแห่งพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินปรับปรุงแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันยังมีแนวโน้มสูงขึ้นทุกอัตราส่วนเมื่อเทียบกับการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์ม 0% โดยได้สัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดินปรับปรุงแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันอยู่ระหว่าง  $10^{-6}$ - $10^{-7}$



รูปที่ 4.7 ค่าการซึมน้ำผ่านดินปรับปรุงแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันของตัวอย่างที่อายุการบ่ม 28 วัน

#### 4.6 อิทธิพลของปริมาณความชื้นที่มีต่อกำลังอัดดินซีเมนต์ จากปฏิกิริยาปอซโซลานิก

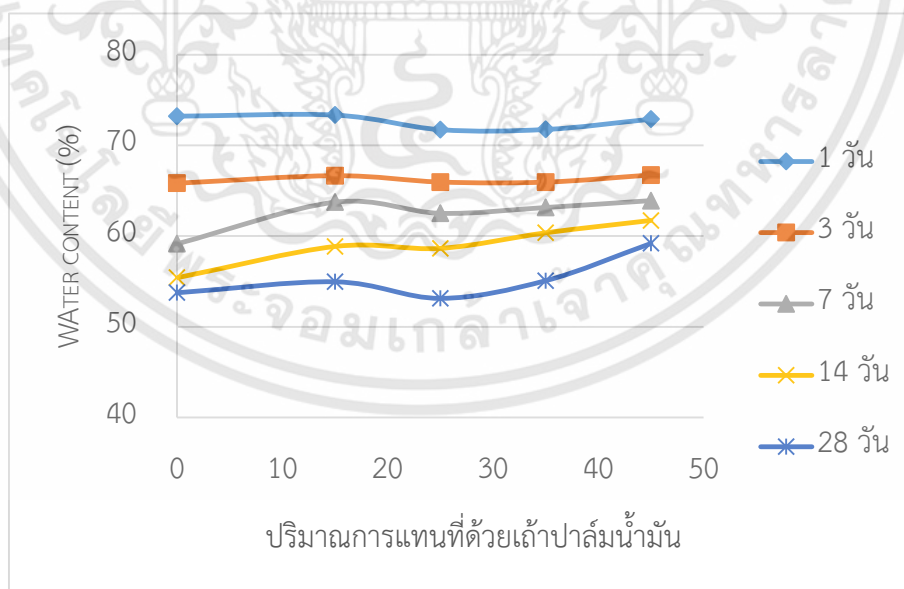
เมื่ออัตราส่วนผสมต่างๆ มีค่าความชื้นในดินซีเมนต์ อายุการบ่มที่ 1 วัน มีค่าใกล้เคียงกัน ดังตารางที่ 4-5 และรูปที่ 4-8 พบว่าที่อายุการบ่มที่ 3, 7, 14, 28 วัน อัตราส่วน CPO และ CP25 ใช้น้ำในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกมากกว่าส่วนผสมอื่น โดยปริมาณความชื้นในดินซีเมนต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันของอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ตามระยะเวลาการบ่มที่ต่างกันพบว่า ที่อายุการบ่ม 1 วัน ปริมาณความชื้นของดินซีเมนต์มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของเถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาใช้แทนที่ ที่อายุการบ่ม 28 วัน CP25 มีปริมาณความชื้นต่ำที่สุด โดยที่ CP45 มีปริมาณความชื้นสูงที่สุด ที่อายุการบ่ม 1, 3, 7 และ 14 วัน พบว่าปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน 25% ให้ค่าปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความชื้นน้อยที่สุด โดยมีปริมาณความชื้นต่ำกว่า CP0 ซึ่งมีซีเมนต์เพียงอย่างเดียวเป็นส่วนผสม และยังให้ค่าปริมาณความชื้นต่ำกว่าทุกอัตราส่วนผสม โดยค่ากำลังอัดแบบไม่จำกัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำลดลง ซึ่งทุกๆ ส่วนผสมสามารถใช้ค่าปริมาณน้ำในการผสมทำนายกำลังรับแรงอัดได้ ดังรูปที่ 4-9

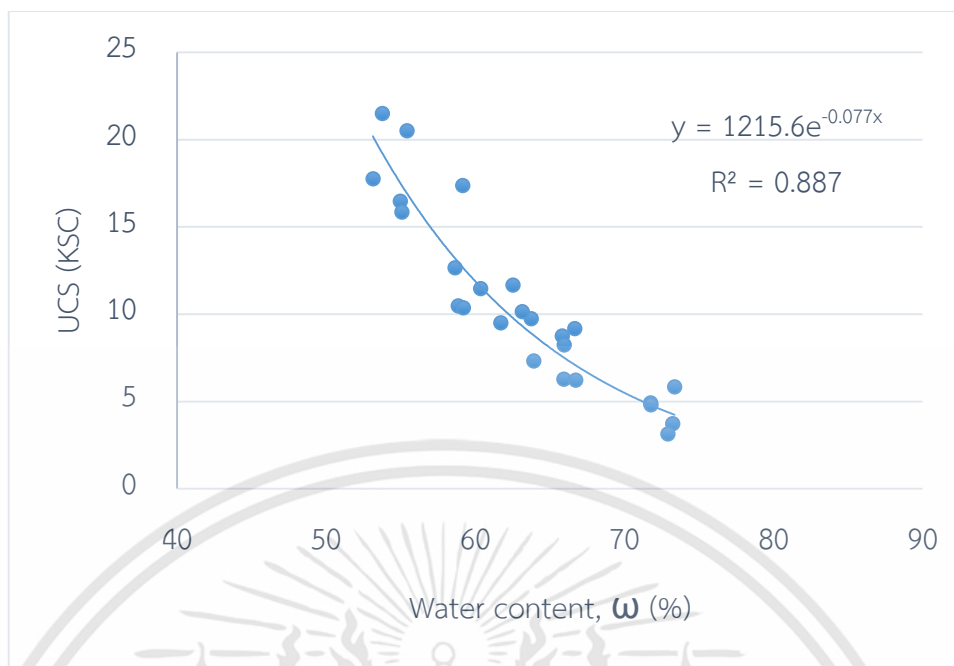
ตารางที่ 4-6 ปริมาณความชื้นของดินซีเมนต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันด้วยการบ่มที่อุณหภูมิห้อง

ลักษณะการบ่ม	อายุการบ่ม (วัน)	Water content (%)				
		CP0	CP15	CP25	CP35	CP45
บ่มที่ อุณหภูมิห้อง	1	73.23	73.35	71.74	71.76	72.90
	3	65.82	66.65	65.95	65.94	66.73
	7	59.15	63.74	62.51	63.15	63.91
	14	55.41	58.85	58.64	60.35	61.71
	28	53.75	54.96	53.13	55.08	59.19



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ปริมาณการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันเทียบกับปริมาณความชื้นของดินซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดแบบไม่จำกัดและปริมาณความชื้นตัวอย่างดินที่แทนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน

#### 4.7 การพิจารณาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันเทียบกับค่ากำลังอัดแสดงในรูปที่ 4-7 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงกำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน โดยอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ที่อายุการบ่มที่เวลาต่างกัน พบว่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใส่เถ้าปาล์มน้ำมันผสมในปริมาณที่น้อย จนถึงปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันค่าหนึ่งที่ทำให้กำลังอัดสูงสุด และเมื่อเพิ่มปริมาณให้มากกว่าถึงค่าหนึ่งจะทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง ที่อายุการบ่ม 3 วันกำลังอัดของดินซีเมนต์มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของเถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาใช้แทนที่ ที่อายุการบ่ม 7 วันกำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ยังคงมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของเถ้าปาล์มน้ำมันเช่นเดียวกันกับอายุการบ่มที่ 1 วัน ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วันพบว่าปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันที่ 25% จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดได้สูงสุดเมื่อเทียบกับปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันอัตราส่วนอื่น และมีค่ากำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกับดินซีเมนต์ CPO ซึ่งมีซีเมนต์เพียงอย่างเดียวเป็นส่วนผสม และกำลังของส่วนผสมจะมีอัตราการพัฒนาได้สูงในช่วงระยะเวลาบ่มมากกว่า 7 วัน

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้นพบว่า CP25 มีแนวโน้มการพัฒนากำลังรับแรงอัดมากที่สุดเมื่อเทียบกับอัตราส่วนผสมอื่น ๆ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการแทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน 25% เป็นอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนสำหรับใช้ในงานวิจัยปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนครั้งนี้ ซึ่งเหตุผลของการพัฒนากำลังรับแรงอัดนั้นอาจมาจากสัดส่วนที่เหมาะสมของ  $\text{SiO}_2$  และ อะลูมิเนียมออกไซด์  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (จากเถ้าปาล์มน้ำมัน) แคลเซียมไฮดรอกไซด์  $(\text{Ca}(\text{OH})_2, \text{CH})$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันจากซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมัน) จนกลายเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) จากปฏิกิริยาปอซโซลาน และก่อให้เกิดค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงขึ้นของตัวอย่าง

#### 4.8 รูปแบบการวิบัติของตัวอย่าง

รูปแบบการวิบัติของตัวอย่างและพฤติกรรมของวัสดุหลังเกิดการรับแรงอัดมีความสำคัญในการบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของวัสดุนั้น ๆ ดังรูปที่ 4-9 แสดงถึงรูปแบบการเสียรูปโดยทั่วไปของตัวอย่างดินเหนียวที่มีการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมันที่บ่มที่อุณหภูมิห้อง โดยปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการปรับปรุงที่ 200 กก.ต่อดิน 1 ลบ.ม. และแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน โดยเลือกตัวอย่าง CP25 ที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันสัดส่วนอื่นๆ และ CP45 ที่ให้ค่ากำลังอัดต่ำสุดเป็นตัวแทนการศึกษารูปแบบการวิบัติของตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นสารเชื่อมประสาน เทียบกับกับ CP0 ซึ่งมีปูนซีเมนต์เป็นสารเชื่อมประสานเพียงอย่างเดียว โดยตัวอย่างที่ผสมปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวกับตัวอย่างที่ผสมปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมันมีรูปแบบการวิบัติไม่แตกต่างกันมากนัก

รูปที่ 4-9 แสดงลักษณะการวิบัติของตัวอย่างดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมันที่บ่มที่อุณหภูมิห้องพบว่า ที่อายุการบ่ม 3 , 7 , 28 วัน CP0, CP25 และ CP45 มีรูปแบบการวิบัติที่มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกล่าวคือ เกิดรอยแตกเล็ก ๆ กึ่งกลางตัวอย่างและมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยจะขยายหน้าตัดขึ้น เนื่องจากในช่วงอายุ 3, 7 วัน ดินอยู่ในสภาพหลวม เมื่อได้รับแรงกดจะเกิดความเค้นขึ้นที่ผิวสัมผัส ทำให้ดินจับตัวกันค่อนข้างแน่น เมื่อลดช่องว่างระหว่างเม็ดดินแต่เมื่อมีแรงเพิ่มขึ้นอีกจนกระทั่งไม่มีช่องว่างของเม็ดดินเหลืออยู่ จนทำให้พื้นที่สัมผัสระหว่างเม็ดดินเพิ่มขึ้นไม่ทัน มวลดินอยู่ในสถานะที่ไม่สมดุลทำให้มวลดินเกิดการเคลื่อนที่จึงทำให้ตัวอย่างเกิดการวิบัติ ที่อายุการบ่ม 28 วัน CP0 และ CP25 เกิดการแตกหักของตัวอย่าง โดยเกิดการวิบัติขึ้นที่ค่าการเคลื่อนตัวต่ำ อันเป็นคุณสมบัติของวัสดุเปราะ CP45 เกิดรูปแบบการวิบัติใกล้เคียงกับ CP25 แต่มีการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือน ได้จากมูวิบัติของตัวอย่างที่มีความชันเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับ CP25 ที่อายุการบ่ม 28 วัน CP0, CP25 และ CP45 เกิดการแตกหักของตัวอย่าง อันเป็นคุณสมบัติของวัสดุเปราะ

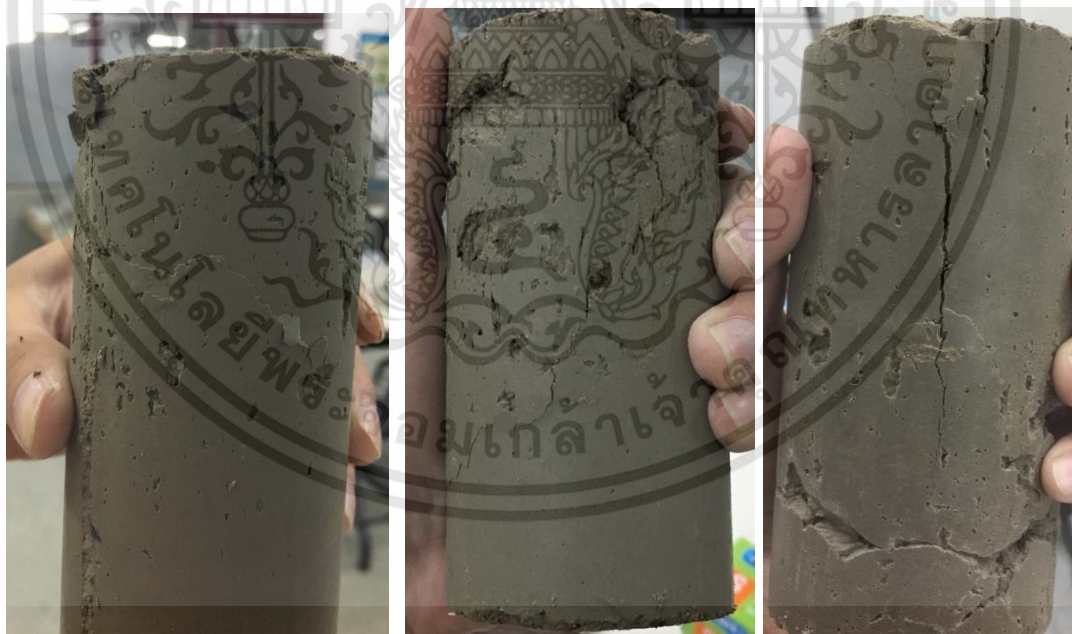


CP0

CP25

CP45

(ก) 3 วัน



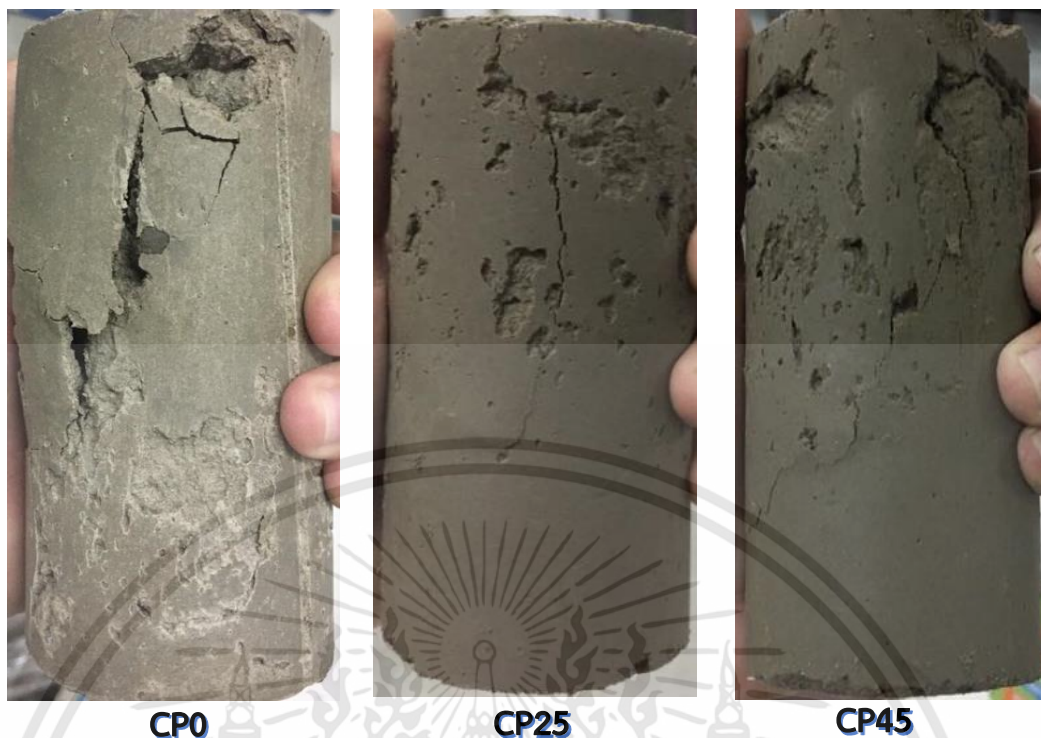
CP0

CP25

CP45

(ข) 7 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) 28 วัน

รูปที่ 4.10 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน บ่มที่อุณหภูมิห้อง

#### 4.9 การวิเคราะห์สารผลิตภัณฑ์อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมีของดินซีเมนต์

การวิเคราะห์สารผลิตภัณฑ์อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมีของดินซีเมนต์หลังปรับปรุงคุณภาพดินด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน สามารถกระทำได้โดยใช้เทคนิค (X-ray Diffraction หรือ XRD) เนื่องจาก CP25 ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดจึงเลือกเป็นตัวแทนดินซีเมนต์ เทียบกับกับ CP0 ซึ่งมีปูนซีเมนต์เชื่อมประสานเพียงอย่างเดียว มีความเหมาะสมใช้ในการปรับปรุงดินเหนียวอ่อน โดยนำมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบ ผลการวิเคราะห์ XRD ดังตามรูป 4-10 และรูปที่ 4-11 แสดงผลของ X-ray diffractograms ของสารประกอบในซีเมนต์เพสท์ในของดินซีเมนต์ล้วน และดินที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน ซึ่งนำมาทดสอบที่อายุการบ่ม 3, 14 และ 28 วัน ที่ พบว่าเมื่อเทียบกับดินซีเมนต์ CP0 มีสารผลิตภัณฑ์หลักอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นประกอบด้วย แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH), เอทริงไต์ (Ettringite), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH), ไตรแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( $C_3S$ ) และไดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( $C_2S$ ) ผสมรวมกันกับซิลิกา (Silica) ที่อยู่ในรูปของควอตซ์ (Quartz) (Muangtong et al., 2013) และแร่ดินเหนียวหลักได้แก่ มอนต์โมริลโลไนต์ (Montmorillonite), อิลไลต์ (Illite) และคาโอลิไนต์ (Kaolinite) เมื่อพิจารณาความเข้มข้น (Intensity) ของสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นโดยสามารถดูได้จากจุดสูงสุด (Peak) ของกราฟที่เกิดขึ้นหรือเรียกว่า “ความสูงพิก” โดยมีหน่วยความเข้มเป็น counts/second หรือ CPS พบว่า CSH มีค่าความเข้มข้นสูงที่สุดและ Ettringite มีความเข้มข้นรองลงมาดังนั้นจึงพิจารณาให้ CSH และ Ettringite เป็นสารผลิตภัณฑ์หลักที่ส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาเคมีของดินซีเมนต์ที่เกิดขึ้น พิจารณาความสูงพิกของ CSH และ Ettringite ตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อายุการบ่มพบว่าที่อายุการบ่ม 3 วัน ความสูงพีคของ CSH ยังมีค่าค่อนข้างต่ำ และเริ่มเพิ่มสูงขึ้นที่อายุ 14 และ 28 วันตามลำดับ แสดงผลของ X-ray diffractograms ของสารประกอบในซีเมนต์เพสต์ในของดินซีเมนต์ล้วน และดินที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันที่สัดส่วนร้อยละ 25% ซึ่งนำมาทดสอบที่อายุการบ่ม 3, 14 และ 28 วัน จากรูปที่แสดงพบว่าสารประกอบหลักคือการพิจารณาถึงการลดลงของสารประกอบตั้งต้นใน ซีเมนต์เพสต์ ได้แก่ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) โดยสารประกอบจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้นได้แก่ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และเอ็ททิงไกต์ (Ettringite) ไคแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( $\text{C}_2\text{S}$ ), ไตรแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( $\text{C}_3\text{S}$ ) ตามลำดับ ทำให้รู้ว่าปฏิกิริยาดินที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นอย่างไร จากผลวิเคราะห์ X-ray Diffraction หรือ XRD แสดงดังตารางที่ 4-7 และ 4-8 (ก-จ)

ตารางที่ 4-7 การลดลงของสารประกอบตั้งต้นของ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ )

อายุการบ่ม (วัน)	แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ )	
	CP0 (Counts/sec)	CP25 (Counts/sec)
3	76 (29.42°)	66 (29.42°)
14	68 (29.42°)	55 (29.42°)
28	64 (29.42°)	52 (29.42°)

ตารางที่ 4-8 สารประกอบจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้นของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH), เอ็ททิงไกต์ (Ettringite), ไคแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( $\text{C}_2\text{S}$ ) และ ไตรแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( $\text{C}_3\text{S}$ )

อายุการบ่ม (วัน)	แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH)	
	CP0 (Counts/sec)	CP25 (Counts/sec)
3	37 (50.16°)	83 (50.16°)
14	60 (50.16°)	85 (50.16°)
28	85 (50.16°)	98 (50.16°)

ก). แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH)

อายุการบ่ม (วัน)	เอ็ททิงไกต์ (Ettringite)	
	CP0 (Counts/sec)	CP25 (Counts/sec)
3	42 (68.18°)	36 (68.18°)
14	53 (68.18°)	43 (68.18°)
28	65 (68.18°)	77 (68.18°)

ข). เอ็ททิงไกต์ (Ettringite)

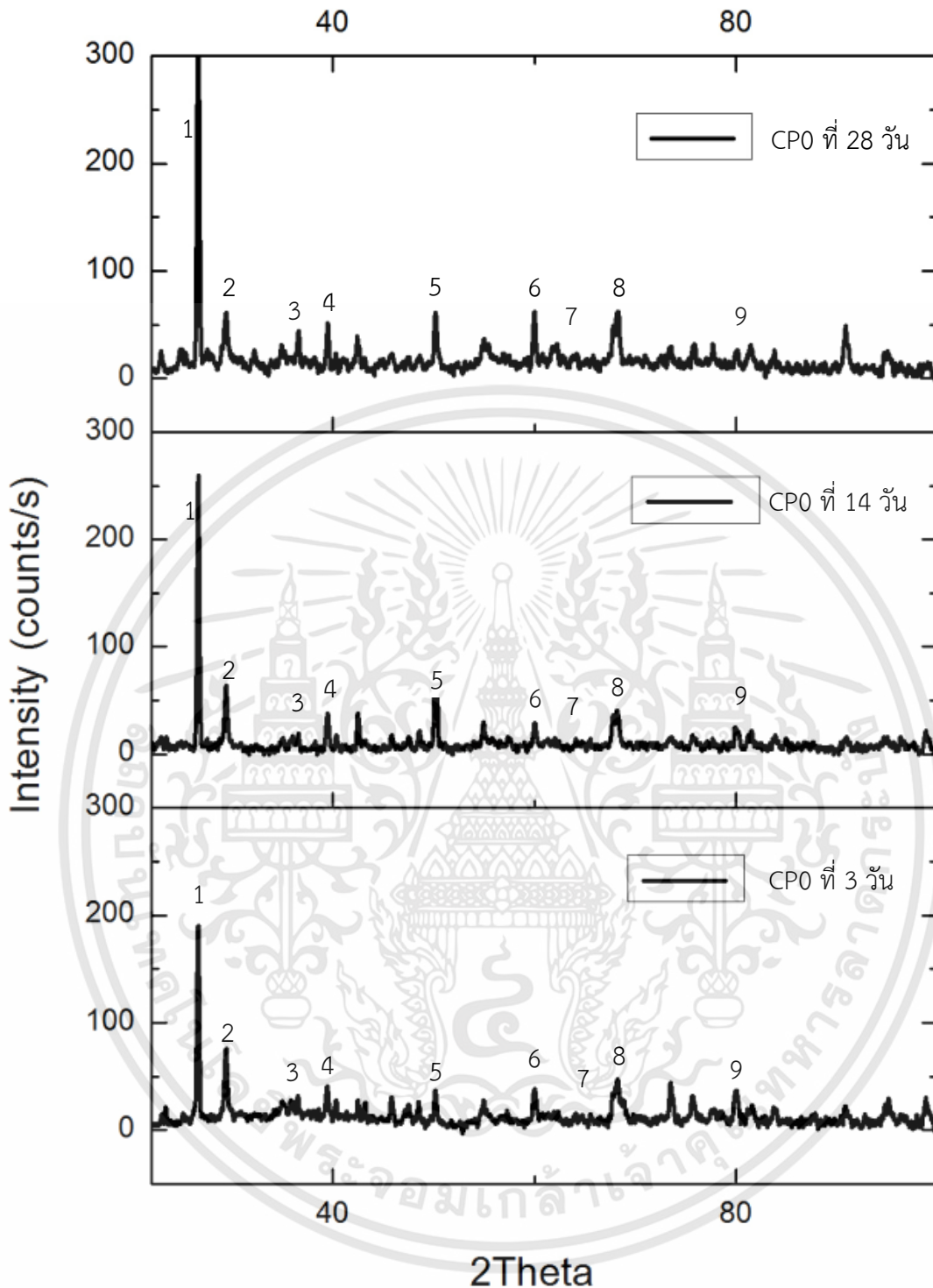
อายุการบ่ม (วัน)	ไตรแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C <sub>2</sub> S)	
	CP0 (Counts/sec)	CP25 (Counts/sec)
3	18 (36.56°)	37 (36.56°)
14	22 (36.56°)	50 (36.56°)
28	44 (36.56°)	70 (36.56°)

ค). ไตรแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C<sub>2</sub>S)

อายุการบ่ม (วัน)	ไตรแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C <sub>3</sub> S)	
	CP0 (Counts/sec)	CP25 (Counts/sec)
3	38 (39.48°)	34 (39.48°)
14	41 (39.48°)	36 (39.48°)
28	69 (39.48°)	91 (39.48°)

ง). ไตรแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C<sub>3</sub>S)

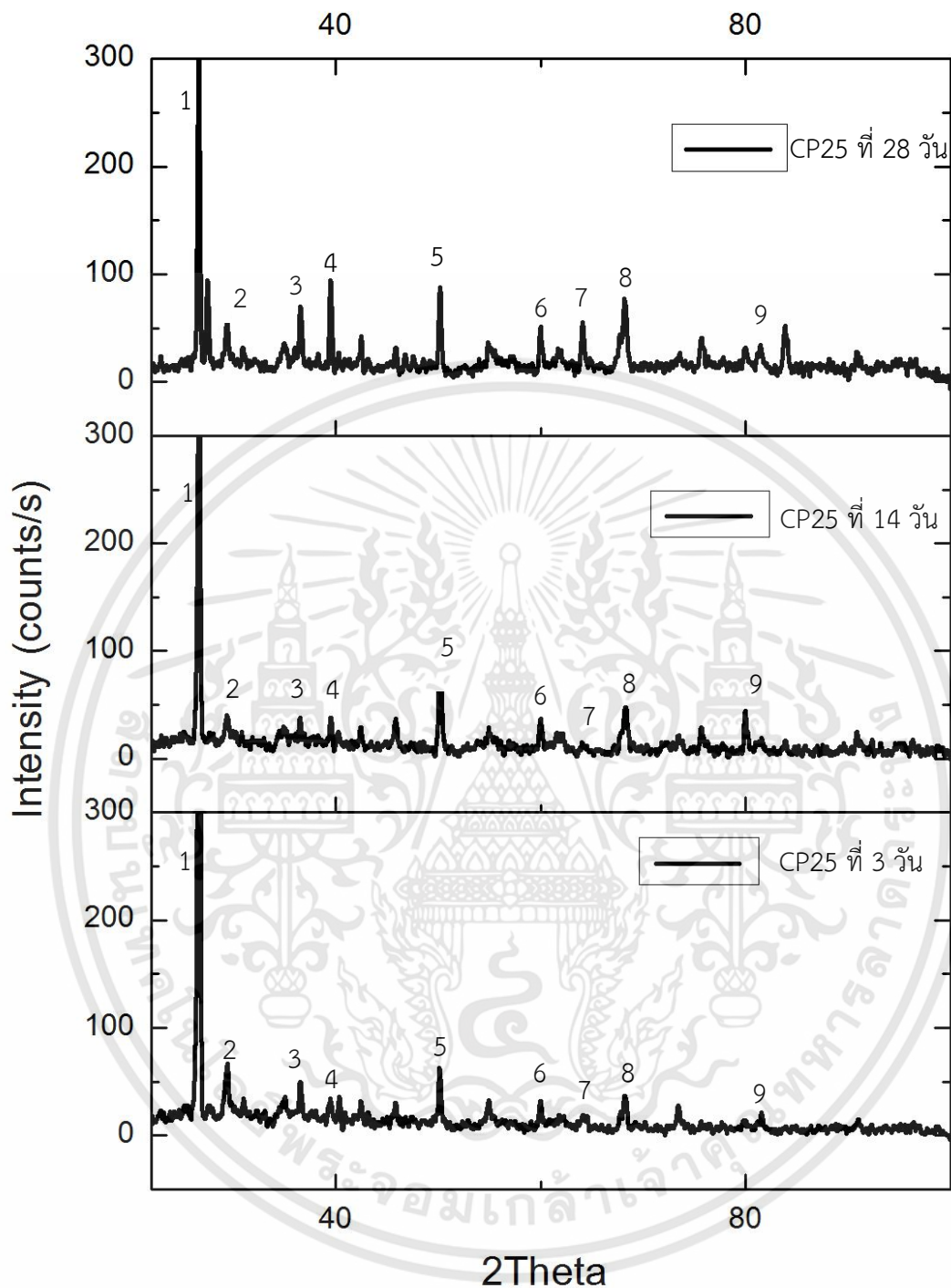
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 การวิเคราะห์ด้วยวิธี XRD ตัวอย่าง CPO ที่อายุการบ่ม 3, 14 และ 28 วัน

ผลวิเคราะห์ XRD ของดินซีเมนต์เมื่อ 1 = ควอทซ์(Quartz), 2 = แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), 3 = ไดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต( $\text{C}_2\text{S}$ ), 4 = ไตรแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( $\text{C}_3\text{S}$ ), 5 = แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH), 6 = มอลต์โมริลโลไนต์ (Montmorillonite), 7 = อิลไลต์ (Lilite), 8 = แอ็ททิงไกต์ (Ettringite) และ 9 = คาโอลิไนต์ (Kaolinite)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 การวิเคราะห์ด้วยวิธี XRD ตัวอย่าง CP28 ที่อายุการบ่ม 3, 14 และ 28 วัน

ผลวิเคราะห์ XRD ของดินซีเมนต์เมื่อ 1 = ควอทซ์(Quartz), 2 = แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), 3 = ไดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต( $\text{C}_2\text{S}$ ), 4 = ไตรแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( $\text{C}_3\text{S}$ ), 5 = แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH), 6 = มอลต์โมริลโลไนต์ (Montmorillonite), 7 = อิลไลต์ (Lilite), 8 = แอ็ททิงไคต์ (Ettringite) และ 9 = คาโอลิไนต์ (Kaolinite)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในหน่วย CPS ของ CP0 ตามรูปที่ 4-10 พบว่า  $C_2S$ ,  $C_3S$ , CSH มีปริมาณการเกิดขึ้นสูงเมื่อเทียบกับสารผลิตภัณฑ์ตัวอื่น โดยมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 28 วัน และมีอัตราเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันกับกำลังอัด จึงสันนิษฐานได้ว่า  $C_2S$ ,  $C_3S$ , CSH ส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัด

เมื่อพิจารณาสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในหน่วย CPS ของ CP25 พบว่า  $C_2S$ ,  $C_3S$ , CSH มีปริมาณการเกิดสูงขึ้นตามอายุการบ่มอย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับ CP25 ที่อายุ 14 วัน และ 28 พบว่า  $C_3S$  เริ่มมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นมากกว่า CP0 เห็นได้ว่าถ้าปาล์มน้ำมันสามารถให้สารผลิตภัณฑ์เช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ในปริมาณที่เหมาะสมในช่วงระยะเวลาการบ่ม 28 วัน ซึ่งกำลังที่ได้นั้นใกล้เคียงกับการผสมปูนซีเมนต์อย่างเดียว



## สรุปผลการวิเคราะห์และข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิเคราะห์

การศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯด้วยปูนซีเมนต์ และทำการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน เพื่อทราบถึงพฤติกรรมด้านกำลังอัดของดินซีเมนต์เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน โดยแปรผันตัวแปรควบคุมได้แก่ ปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน และอายุการบ่ม รวมถึงการศึกษากลไกปฏิกิริยาทางเคมีที่มีผลต่อการพัฒนา กำลังอัด และศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างดินซีเมนต์ในระดับจุลภาคตามอายุการบ่ม สรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 กำลังอัดแบบไม่จำกัด ของดินซีเมนต์ (Unconfined Compressive Strength) ทุกอัตราส่วนผสมทั้งการบ่มที่อุณหภูมิห้องมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามอายุการบ่มดินเหนียวอ่อนที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์จะมีการพัฒนา กำลังอัดไปอย่างรวดเร็วในช่วงการบ่มระยะสั้น (Short-term) ภายใน 28 วัน เมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมัน 25% (CP25) โดยน้ำหนักแห้ง พบว่าดินที่แทนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน (CP25) มีการพัฒนา กำลังอัดเพิ่มขึ้นและยังให้ค่ากำลังอัดสูงสุด เท่ากับ 17.76 ksc เมื่อเทียบกับอัตราส่วนผสมเถ้าปาล์มน้ำมันอื่น จึงกำหนดให้การแทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน 25% เป็นอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินในงานวิจัยนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานกรมทางหลวงแล้ว สามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินซีเมนต์ได้

5.1.2 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินปรับปรุงแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันยังมีแนวโน้มสูงขึ้นทุกอัตราส่วนเมื่อเทียบกับการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์ม 0% โดยได้สัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดินปรับปรุงแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันอยู่ระหว่าง  $10^{-6}$ - $10^{-7}$  (m/s)

5.1.3 สารผลิตภัณฑ์หลักอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ส่งผลต่อการพัฒนา กำลังอัดในดินซีเมนต์คือ CSH, Ettringite,  $C_2S$ ,  $C_3S$  มีอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม โดยเถ้าปาล์มน้ำมันสามารถให้สารผลิตภัณฑ์หลักได้เช่นเดียวกับกับปูนซีเมนต์ล้วน และพบว่าสารผลิตภัณฑ์หลักคือ CSH, Ettringite,  $C_2S$  และ  $C_3S$  มีส่วนช่วยทำให้ดินซีเมนต์มีช่องว่างลดลง มีความทึบและแข็งแรงมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการพัฒนา กำลังอัด

5.1.4 ผลวิเคราะห์ XRD ของดินซีเมนต์เมื่อได้สารผลิตภัณฑ์ดังนี้ 1 = ควอตซ์(Quartz), 2 = แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $Ca(OH)_2$ ), 3 = ไตรแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต( $C_2S$ ) ,4 = ไตรแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( $C_3S$ ), 5 = แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH), 6 = มอลต์โมริลโลไนต์ (Montmorillonite), 7 = อิลไลต์ (Lilite), 8 = แอ็ททิงไกต์ (Ettringite) และ 9 = คาโอลินไนต์ (Kaolinite) พบว่าสามารถทำนายปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น และการพัฒนา กำลังรับแรงอัดแกนเดียวอีกประการหนึ่ง

## 5.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัยต่อไป

5.2.1 งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาความเป็นไปได้ของการปรับปรุงกำลังอัดของดินเหนียวผสมปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมัน ดังนั้นจึงควรศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้านอื่น ๆ เพิ่มเติมเช่น ความทนทาน ปริมาณการทรุดตัว เป็นต้น

5.2.2 งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมันแก้ปัญหาเฉพาะดินเหนียวอ่อน ควรศึกษาเพิ่มเติมในการนำไปประยุกต์ใช้กับดินชนิดอื่น ๆ ที่มีปัญหาด้วย เช่น ดินตะกอน ดินลูกรังผุ เป็นต้น

5.2.3 ควรเพิ่มเติมการศึกษาผลกระทบความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันที่แตกต่างกันว่าส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดอย่างไร

5.2.4 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในระดับจุลภาคด้วย XRD นี้สามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้ในระดับหนึ่งเท่านั้น ควรมีการทดสอบเชิงลึกด้วยวิธีอื่นๆ เพิ่มเติมเช่น XRF และ SEM เป็นต้น



## บรรณานุกรม

- คณะกรรมการศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ คณะทำงาน. 2548. **ข้อมูลสภาพดิน  
บริเวณลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง**. กรุงเทพฯ : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรม  
ราชูปถัมภ์
- บริษัท ทีเอ็ม คอนซัลติ้ง เอนจิเนียริง แอนด์ แมเนจเม้นท์ จำกัด และ บริษัทวิศวกรรมธรณีและฐานราก  
จำกัด. 2552. **โครงการงานศึกษาจัดทำคู่มือการก่อสร้างถนนบนพื้นที่ดินอ่อน**. กรุงเทพฯ  
พรพจน์ ต้นเส็ง. 2554 (ปรับปรุง). **ปฐพีกลศาสตร์ Soil Mechanics**. นครราชสีมา :  
มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี
- วิศิษฐ์ อยู่ยงวัฒนา. 2554. **ปฐพีกลศาสตร์ SOIL MECHANICS**. ครั้งที่ 9. กรุงเทพฯ : สำนัก  
พิมพ์โพธิ์เพชร
- สุทธิศักดิ์ ศรีลัมภ์. 2558. “การพิบัติของถนนริมคลอง กรณีภัยแล้ง พ.ศ.2558.” หน้า 42-53.  
**วิศวกรรมสาร**. ปีที่ 68. ฉบับที่ 4. กรุงเทพฯ : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรม  
ราชูปถัมภ์
- สุพจน์ ศรีนิล, แหลมทอง เหล่าคงถาวร และ ชลธิ์ เร่บ้านเกาะ. 2555. **คู่มือปฏิบัติการทดลองปฐพี  
กลศาสตร์ LABORATORY TESTING**. ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอม  
เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์. 2548. **วิศวกรรมปฐพี**. ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย  
ในพระบรมราชูปถัมภ์
- อำนาจ ยานูวิริยะกุล. “การศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯเนื่องจาก  
แผ่นดินไหว” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาปฐพีศาสตร์,  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2552
- Bowles, Joseph E. 1997. **FOUNDATION ANALYSIS AND DESIGN**. Fifth Edition.  
Singapore : McGraw-Hill Company
- Das, Braja M. 1990. **Principles of Foundation Engineering**. Second Edition. United  
States of America : PWS-KENT Publishing Company
- Das, Braja M. 1985. **Principles of Geotechnical Engineering**. Second Edition.  
United States of America : PWS-KENT Publishing Company
- Letoueil, S. Magmam, J.P and Tavenas, F. 1990. **EMBANKMENTS ON SOFT CLAYS**.  
ELLIS HORWOOD LIMITED : England

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. (2555). **โครงการศึกษาศึกษาผลกระทบต่อโครงสร้างใต้ดิน** เนื่องจากการคืนตัวของแรงดันน้ำในชั้นน้ำบาดาล บริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. กระทรวง ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, พฤษภาคม 2555.

กลุ่มงานตรวจสอบและแนะนำวัสดุสร้างทาง “**การออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์**” สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง

คารวี มนทการติวงศ์. (2548). การศึกษากำลังอัดและความร้อนของคอนกรีตผสมเถ้าชานอ้อย. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

จิรศักดิ์ ภูริพันธ์วิชัย และคณะ. (2544.) “การศึกษาคอนกรีตบล็อกจากเถ้าชานอ้อย”. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ณพงศธร ลิขิตไพบูลย์. (2547.) “การพัฒนาเถ้าชานอ้อยเพื่อเป็นวัสดุปอซโซลาน”. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ทวีศักดิ์ คงศรี และ พีรเกียรติ เลิศพูนศรี. (2542). “การศึกษาผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและเถ้าชานอ้อย”. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ และ สุเชษฐ์ เอี่ยมเขย . (2532). ความคงทนของดินซีเมนต์ . รายงานฉบับที่ วว. 120. กองวิเคราะห์และวิจัย, กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ. 134 น.

ธีรพล สุวรรณรัชตกุล และคณะ. (2547). “การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าชานอ้อย”. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมโยธา คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

รสสุคนธ์ ชื่นวัฒนา.(2546). “คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

รุ่งลาวัลย์ ราชนัน และ ทรงสุตา วิจารณ์ (2556). “การพัฒนากำลังอัดแกนเดียวและโครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯบดอัดผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าชีวมวล” วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 36 ฉบับที่ 1 มกราคม - มีนาคม 2556[11]

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. (2547). **ข้อมูลสภาพดินบริเวณลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง**. กรุงเทพฯ, วสท.

ษณูรักษ์ เทียมวีรสกุล และ นที อतिकุณาการ. (2543). “การศึกษาการล้างรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าขานอ้อย”. *ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*.

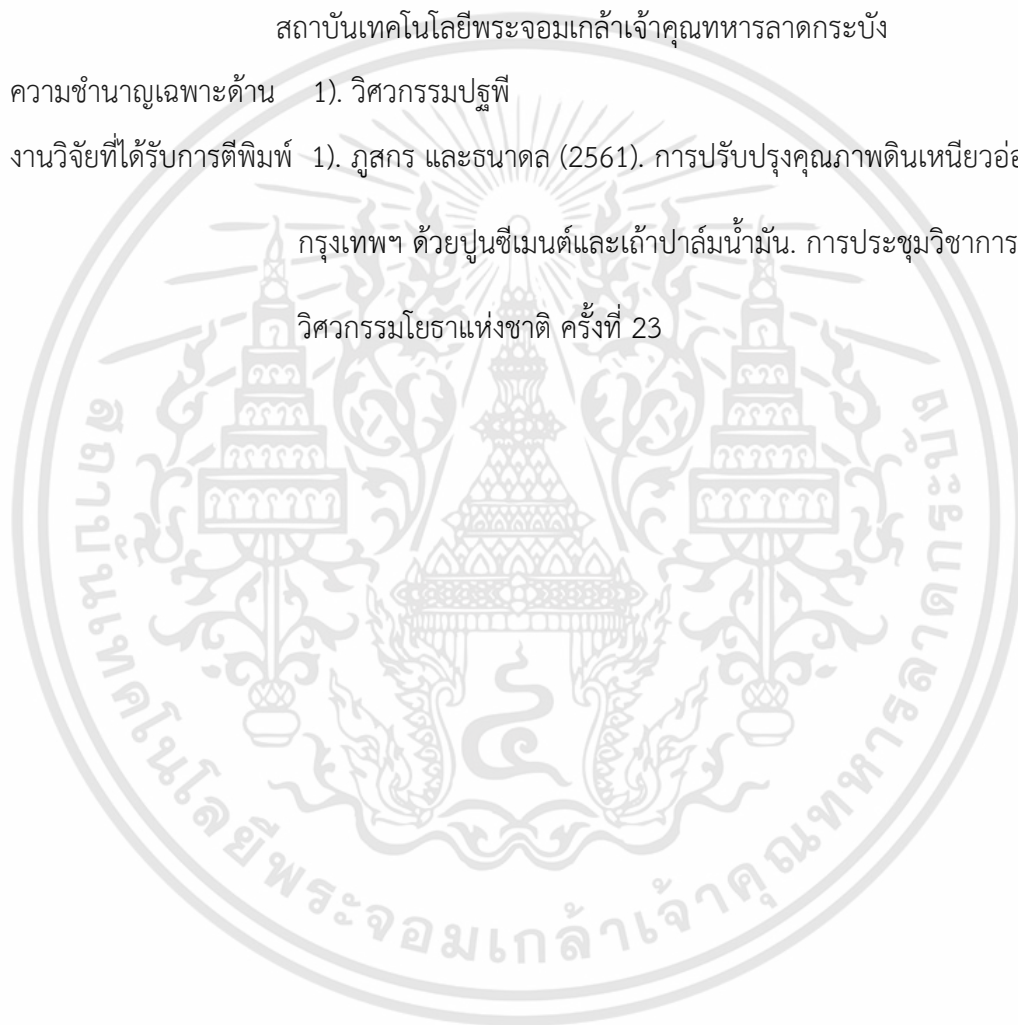
สุชีรา กุลชนะประสิทธิ์ และ ชูชัย สุจิวิรกุล. (2548). “ผลกระทบของเถ้าขานอ้อยต่อคุณสมบัติของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์”. ในเอกสารการประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติครั้งที่ 10.สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยและสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ชลบุรี. หน้า 67-72.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายภูสกร อยู่เย็น  
 วัน เดือน ปีเกิด 6 กรกฎาคม 2534 ที่กรุงเทพมหานคร  
 ที่อยู่ 99/201 หมู่บ้าน คาซ่าวิลล์ สุขุมวิท 5 แยก 71 แขวงอโงะเงิน เขตสายไหม  
 กรุงเทพมหานคร 10220 โทร 089-477-0889  
 ประวัติการศึกษา 2557 วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 ความชำนาญเฉพาะด้าน 1). วิศวกรรมปฐพี  
 งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ 1). ภูสกร และธนาตล (2561). การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อน  
 กรุงเทพฯ ด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมัน. การประชุมวิชาการ  
 วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้