

การสำรวจโครงสร้างจุลภาคและพฤติกรรมกำลังของดินเหนียววมตัวที่ปรับปรุงด้วยปูนขาวและ
ซีเมนต์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURE AND STRENGTH BEHAVIOUR OF EXPANSIVE
CLAY TREATED BY LIME AND CEMENT



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

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสำรวจโครงสร้างจุลภาคและพฤติกรรมกำลังของดินเหนียวบวมตัวที่ปรับปรุงด้วยปูนขาวและซีเมนต์
โดย	นายสุวิจักขณ์ สิริอิวิรุทธ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.วีรยุทธ โภมลวิลาศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย อุกฤษฏชน)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.วีรยุทธ โภมลวิลาศ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิรวีตร บุญญะฐิติ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธนกร ชมภูรัตน์)

สุวิจักขณ์ สิทธิอิวิรุทธ์ : การสำรวจโครงสร้างจุลภาคและพฤติกรรมกำลังของดินเหนียวบวมตัวที่ปรับปรุงด้วยปูนขาวและซีเมนต์. (INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURE AND STRENGTH BEHAVIOUR OF EXPANSIVE CLAY TREATED BY LIME AND CEMENT) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.วิรัช โกลมวิลาศ

ดินเหนียวบวมตัวถือว่าเป็นดินที่ก่อให้เกิดปัญหาในงานวิศวกรรมเป็นอย่างมาก เนื่องจากดินชนิดนี้มีค่าการบวมตัวสูงส่งผลให้เกิดการแตกร้าวเสียหายต่อชั้นผิวทางและฐานรากอาคาร งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวแม่เกาะซึ่งเป็นดินบวมตัวธรรมชาติด้วยปูนขาวและปูนซีเมนต์ เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุในทาง โดยจะศึกษาคุณสมบัติทางด้านกำลังและการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางจุลภาคของดินเหนียวที่ถูกปรับปรุงคุณภาพนี้ ดินเหนียวแม่เกาะถูกนำมาทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานเบื้องต้นเป็นลำดับแรก หลังจากนั้นทำการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวโดยการเพิ่มเสถียรภาพด้วยปูนขาวและปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนผสม 6 8 10 และ 12% ตัวอย่างดินแต่ละส่วนผสมจะถูกนำมาทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว ค่าซีบีอาร์ (CBR) ค่าโมดูลัสคืนตัว และค่าความเร็วคลื่นที่เดินทางผ่านตัวอย่างดินด้วยการทดสอบด้วยวิธีการสั่นพ้องปลายอิสระ (Free-free resonant method) ผลการทดสอบดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยสารผสมเพิ่มพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวและค่าซีบีอาร์มีการพัฒนา กำลังเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าตามระยะเวลาบ่มที่แตกต่างกัน ค่ากำลังรับแรงของดินตัวอย่างที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์มีค่ามากกว่าการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว ในขณะที่เดียวกันการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวสามารถลดการบวมตัวได้ดีกว่า การปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ จากผลการทดสอบยังสังเกตเห็นว่าค่าความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นรอบข้างมีอิทธิพลอย่างมากต่อค่าโมดูลัสคืนตัวของดินเหนียวที่ปรับปรุงด้วยสารเคมี เมื่อทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นพบว่าเมื่อค่าความเบี่ยงเบนเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าลดลง การหาความเร็วคลื่นในดินด้วยการทดสอบด้วยวิธีการสั่นพ้องปลายอิสระพบว่า ค่าความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (P-wave) และคลื่นทุติยภูมิ (S-wave) ที่วัดจากตัวอย่างดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นทีละน้อยตามระยะเวลาบ่ม ในทางกลับกันพบว่าค่าความเร็วคลื่นที่วัดจากตัวอย่างที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวมีค่าลดลงหลังจากระยะเวลาบ่ม 28 วัน งานวิจัยสังเกตการเปลี่ยนโครงสร้างทางจุลภาคของดินเหนียวก่อนและหลังปรับปรุงด้วยสารเคมี ด้วยภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และเครื่องวิเคราะห์ตัวอย่างโดยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (XRF) และเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) โดยผลการทดสอบพบว่า การปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวและปูนซีเมนต์จะก่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอซโซลานิก ซึ่งทั้งสองปฏิกิริยานี้จะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และเอทริงไคต์ (Et) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักที่มีส่วนช่วยในการพัฒนากำลังและลดการบวมตัวของดินเหนียวที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวและปูนซีเมนต์

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6070359521 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD: Expansive clay, Cement, Lime, Soil improvement, Strength, Microstructure

Suwijuck Sitthi-a-wiruth : INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURE AND STRENGTH BEHAVIOUR OF EXPANSIVE CLAY TREATED BY LIME AND CEMENT. Advisor: Prof. SUCHED LIKITLERSUANG, D.Phil. Co-advisor: Veerayut Komolvillas, D.Eng.

Expansive clays are well-known problematic soils worldwide. Due to their high swelling potential they can cause pavement and foundation failures. This research aims to study a stabilization of expansive Mae Moh clay using lime and cement. The lime- and cement-stabilized soils are employed as pavement materials. The study is focused on strength and microstructure characteristic of stabilized soils. The basic properties of Mae Moh soil were initially investigated. After that, soil specimens were prepared by varying lime and cement content at 6, 8, 10 and 12%. Each mixed specimens was examined in unconfined compressive strength (q_u), California bearing ratio (CBR), resilient modulus (M_r) and P-wave and S-wave velocities using free-free resonant method. The results of the study revealed that lime- and cement-stabilized soil can increase compressive strength and California bearing ratio (CBR). Findings also revealed that cement-stabilized soil has higher strength than lime-stabilized soil in every curing time while lime-stabilized soil has higher potential to decrease swelling. It can be observed that the deviator and confining stress significantly influence on resilient modulus of stabilized soil specimens. When deviator stress increases, resilient modulus decreases. The results of free-free resonant test exhibit that P-wave and S-wave velocities of soil-cement admixture slowly increase with curing time. On the other hand, they decrease after 28 days for lime mixtures. In this research, the microstructure changes of non-stabilized and stabilized soil were investigated using SEM, XRF and XRD. The results of microstructure investigation indicate that addition of cement or lime to soil contribute to the hydration and pozzolanic reaction, which can form calcium silicate hydrate (CSH) and ettringite (Et) in the mixtures. These products play an important role in strength development and reduce swelling in stabilized soil.

Field of Study: Civil Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2018

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินงานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยกระผมได้รับความอนุเคราะห์อย่างดียิ่งจากบุคคลหลายท่าน และหน่วยงานหลายหน่วยงาน ทั้งนี้กระผมจึงขอขอบพระคุณผู้ที่มีส่วนร่วมดังต่อไปนี้

ศ.ดร. สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสกระผมในการเรียนรู้ในสิ่งที่ผมสนใจ ท่านเป็นบุคคลที่คอยให้คำปรึกษา สนับสนุน และชี้แนะแนวทางเพื่อให้งานวิจัยดำเนินไปในทางที่ถูกที่ควร อีกทั้งยังช่วยแก้ไขในสิ่งที่บกพร่อง ทำให้งานวิจัยนี้ลุล่วงไปได้ด้วยดี และ ดร. วีรยุทธ โกมลวิลาศ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งคอยแนะนำแนวทางให้กระผมที่กำลังจะหลุดออกจากกรอบให้กลับมาได้ อีกทั้งให้ความรู้และสิ่งที่เป็นประโยชน์ ทำให้งานวิจัยดำเนินลุล่วงไปได้ดี

คณะกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ซึ่งได้แก่ รศ.ดร. บุญชัย อุกฤษฏาชน ที่ให้เกียรติเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และคอยให้คำปรึกษา มอบความรู้ ละเอียดแนะนำที่ดีให้กระผม รศ.ดร. ฐิรวัตร บุญญะฐิติ ที่ไม่เพียงแต่ให้เกียรติเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ท่านยังให้คำปรึกษาและอนุเคราะห์เครื่องมือสำหรับทดสอบคลื่นการสั่นพ้องแบบอิสระ และรศ.ดร. ธนกร ชมภูรัตน์ ที่ให้เกียรติเป็นกรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ขอขอบคุณท่านที่คอยให้คำแนะนำ คำปรึกษา ตลอดจนสนับสนุนอุปกรณ์ในการทดสอบเหมือนแม่เม่าที่ให้ ความอนุเคราะห์และสนับสนุนตัวอย่างดินในการวิจัย และบริษัทเคมีแมน จำกัด ที่สนับสนุนปูนขาวชนิดไฮเดรตโลมส์สำหรับการทดสอบ โดยไม่คิดค่าใช้จ่ายใดใด

คุณยุทธกาล สุวรรณเวช ขอขอบคุณที่สอนเทคนิคและกระบวนการทำแลป วิธีการใช้เครื่องมืออุปกรณ์การทำวิจัย อีกทั้งให้คำแนะนำในระหว่างการดำเนินการทดสอบ

เพื่อนและพี่ ทุกคนในภาควิชา ขอขอบคุณที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และดูแลความรู้สึกกันมา โดยตลอดระยะเวลาที่ศึกษา และนิสิตปริญญาตรีที่ให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้

นางสาวรมิตา วะสิน ขอขอบคุณที่ให้กำลังใจตลอดที่ดำเนินงานวิจัย คอยเตือนสติ ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำให้เป็นไปในทางที่ดี อีกทั้งคอยดูแลกระผมตลอดเวลาที่ดำเนินงานวิจัย โดยเฉพาะในวันที่กระผมป่วย ทำให้กระผมหายเร็วและสามารถดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จ

สุดท้ายนี้ กระผมขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวอย่างสูง ที่คอยให้กำลังใจเป็นอย่างดีเป็นที่สุด คอยสนับสนุนและเชื่อมั่นในสิ่งที่กระผมตั้งใจจะทำ ในวันที่ผมท้อและแย่ที่สุดท่านทั้งสองไม่เคยปฏิเสธที่จะไม่รับฟังกระผมแม้แต่น้อย คอยสอนแนวคิดให้ดำเนินชีวิตต่อไป ทำให้งานวิจัยนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปอย่างดี

สุวิจักขณ์ สิทธิอิวิรุทธ์

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 องค์ประกอบแร่ดินเหนียว.....	5
2.1.1 เคโอลิไนต์ (Kaolinite).....	5
2.1.2 อิลไลต์ (Illite).....	6
2.1.3 เสม็ดไทท์ (Smectite).....	6
2.1.4 คลอไรท์ (Chlorite).....	7
2.1.5 ฮาลอยด์ไซต์ (Halloysite).....	7
2.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการบวมตัว.....	7

2.2.1	ปัจจัยทางด้านคุณสมบัติดิน (Soil properties).....	7
2.2.2	ปัจจัยทางด้านสภาพแวดล้อม (Environment).....	8
2.2.3	ปัจจัยทางด้านความเค้น (Stress conditions).....	8
2.3	การศึกษาจำแนกระดับการบวมตัวของดินเหนียว	9
2.4	การศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวบวมตัว.....	10
2.5	ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	11
2.5.1	องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์.....	11
2.5.2	คุณสมบัติของสารประกอบหลัก.....	11
2.5.3	ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	12
2.5.4	ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	13
2.6	ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับปูนขาว.....	15
2.6.1	ประเภทของปูนขาว.....	15
2.6.2	คุณสมบัติของสารประกอบหลักของปูนขาวไฮเดรตไลม์.....	16
2.6.3	ปฏิกิริยาที่เกิดจากการผสมปูนขาว.....	17
2.7	การศึกษาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient modulus)	19
2.8	การศึกษาความเร็วเฉือนในดิน (Free-free resonant frequency method, FFR)	21
2.9	การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและองค์ประกอบแร่ธาตุ.....	24
2.9.1	การทดสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning electron microscope; SEM)	24
2.9.2	การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer; XRD).....	27
บทที่ 3	การดำเนินงานวิจัย.....	28
3.1	แผนการดำเนินงานวิจัย.....	28
3.2	การศึกษาลักษณะดินและการเลือกใช้สารผสมเพิ่ม.....	28
3.2.1	การศึกษาคูณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียว.....	28

4.2 การหาปริมาณปูนซีเมนต์และปูนขาวเริ่มต้นที่เหมาะสม.....	43
4.3 การทดสอบการบดอัดของดินเหนียวกับปูนซีเมนต์ ดินเหนียวกับปูนขาว	44
4.4 การทดสอบแคลิฟอร์เนีย แบร์ริง เรโซ (CBR).....	47
4.5 การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว.....	50
4.6 การทดสอบความเร็วเฉือนในดิน (Free-Free resonance method)	56
4.7 การทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient modulus test, M_r).....	60
4.8 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพ	69
4.9 การทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer; XRD).....	77
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	82
5.1 สรุปงานผลการวิจัย	82
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	84
บรรณานุกรม.....	85
ประวัติผู้เขียน.....	91

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 โครงสร้างผลึกที่เป็นองค์ประกอบของแร่ดินเหนียว.....	6
ตารางที่ 2-2 การจำแนกระดับการบวมตัวของดินเหนียวด้วยซีตจำกัดเหลว	9
ตารางที่ 2-3 การจำแนกระดับการบวมตัวของดินเหนียวด้วยซีตจำกัดพลาสติก	10
ตารางที่ 2-4 การจำแนกระดับการบวมตัวของดินเหนียวขึ้นอยู่กับค่าดัชนีการบวมตัวอิสระ	10
ตารางที่ 2-5 สารประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (เศรษฐบุตร, 2539).....	11
ตารางที่ 3-1 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานตามมาตรฐาน ASTM และ IS code specification	29
ตารางที่ 3-2 อัตราส่วนผสมระหว่างดินกับปูนซีเมนต์และปูนขาว	34
ตารางที่ 3-3 ลำดับการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวของชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทาง (AASHTO T307, 2007).....	38
ตารางที่ 3-4 ตารางแสดงรายการการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้น คุณสมบัติด้านกำลังและโครงสร้างทางจุลภาค.....	40
ตารางที่ 4-1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียว ปูนซีเมนต์ และปูนขาว	42
ตารางที่ 4-2 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียว	42
ตารางที่ 4-3 การประมาณปริมาณซีเมนต์ที่ต้องการสำหรับดินแต่ละชนิด	44
ตารางที่ 4-4 ค่าของความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของดินที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพและดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์	46
ตารางที่ 4-5 ค่าของความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของดินที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพและดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว	46
ตารางที่ 4-6 ผลการทดสอบค่า CBR ที่ของดินเหนียวก่อนการปรับปรุงคุณภาพและดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาว	48
ตารางที่ 4-7 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (k_1 k_2 k_3) ที่ได้จากแบบจำลองของ May และ Witczak ...	64
ตารางที่ 4-8 ปริมาณสารประกอบหลังจากปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาว	81



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2-1 พฤติกรรมของความเค้นและความเครียดในการทดสอบหาค่าโมดูลัสคลื่นตัว (Lee <i>et al.</i> , 1997).....	20
รูปที่ 2-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบน และความเค้นอัด (Lee <i>et al.</i> , 1997)..	20
รูปที่ 2-3 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบความเร็วเฉือน; (a) การเตรียมตัวอย่างเพื่อหาความถี่ตามแนวยาว; (b) การเตรียมตัวอย่างเพื่อหาความถี่ตามแนวขวาง (Verástegui-Flores <i>et al.</i> , 2015)	21
รูปที่ 2-4 ตัวอย่างการหาค่าความถี่พื้นฐาน (Fundamental frequency); (a) การบันทึกการข้อมูลของคลื่นสั้นสะท้อนกับเวลา; (b) การแปลงผลข้อมูลให้อยู่ในรูปความถี่ (Verástegui-Flores <i>et al.</i> , 2015).....	22
รูปที่ 2-5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นกับกำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัด; (a,b) ความสัมพันธ์ระหว่าง P-wave และ S-wave กับ UCS ตามลำดับ (Guimond-Barrett <i>et al.</i> , 2013).....	23
รูปที่ 2-6 ความสัมพันธ์ระหว่าง S-wave กับ UCS (Chan and Ch'ng, 2010).....	23
รูปที่ 2-7 ภาพถ่าย SEM ของดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวที่ 6%; (a) ภาพถ่ายของผงปูนขาว; (b) ภาพถ่ายการจับกลุ่มเป็นแผ่น (plate) ของดินที่ปรับปรุงด้วยปูนขาว 6%; (c) ภาพถ่ายดินที่ปรับปรุงด้วยปูนขาว 6% ที่อายุบ่มหลัง 7 วัน; (d) ภาพถ่ายดินที่ปรับปรุงด้วยปูนขาว 6% ที่อายุบ่มหลัง 28 วัน (Shinawi, 2017).....	25
รูปที่ 2-8 การวิเคราะห์ผลลัพท์โดย SEM; (a),(b) และ (c) ภาพถ่ายลักษณะของดินเหนียวก่อนนำไปแช่น้ำที่มีการบวมตัวจากมากถึงน้อย; (d),(e) และ (f) ภาพถ่ายลักษณะของดินเหนียวหลังนำไปแช่น้ำที่มีการบวมตัวจากมากถึงน้อย; (g),(h) และ (i) ภาพถ่ายลักษณะของดินเหนียวที่ปรับปรุงเสถียรภาพด้วยซีเมนต์หลังนำไปแช่น้ำที่มีการบวมตัวจากมากถึงน้อย (Jamsawang <i>et al.</i> , 2017).....	26
รูปที่ 2-9 รูปแบบที่สะท้อนจากรังสีเอ็กซ์ของดินที่ปรับปรุงด้วยความร้อน (Al-Rawas <i>et al.</i> , 2005).....	27
รูปที่ 3-1 การทดสอบหาค่าพิกัดสถานะความคงตัวของดิน; (a, b) ตัวอย่างดินในการทดสอบหาค่าขีดจำกัดเหลวก่อนและหลังเคาะ ตามลำดับ; (c) การทดสอบหาค่าขีดจำกัดพลาสติก.....	30

รูปที่ 3-2 การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของดิน; (a) การสอบเทียบขวดปรับปริมาตร; (b) การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของดิน.....	31
รูปที่ 3-3 การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน.....	32
รูปที่ 3-4 การทดสอบหาค่าการบวมตัวของอิสระเปรียบเทียบระหว่างน้ำกลั่นและน้ำมันก๊าด	33
รูปที่ 3-5 อุปกรณ์ที่ใช้และการประกอบโมลสำหรับการทดสอบ; (a) อุปกรณ์สำหรับการบดอัดดิน; (b) การประกอบโมลที่ใช้สำหรับการทดสอบ; (c) ปมตัวอย่างดินด้วยพลาสติก.....	34
รูปที่ 3-6 การเตรียมตัวอย่างดินเพื่อทำการทดสอบแบบไม่จำกัดแรง.....	36
รูปที่ 3-7 การเตรียมตัวอย่างดินในการทดสอบหาความเร็วเฉือนในดิน; (a) การเตรียมตัวอย่างดินเพื่อหาความเร็วแบบ P-wave; (b) การเตรียมตัวอย่างดินเพื่อหาความเร็วแบบ S-wave	37
รูปที่ 3-8 การเตรียมตัวอย่างดินเพื่อทำการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว; (a) การห่อหุ้มตัวอย่างดินด้วยเมมเบรน; (b) การติดตั้งอุปกรณ์ก่อนเริ่มทำการทดลอง	38
รูปที่ 3-9 การเตรียมตัวอย่างดินในการทดสอบโครงสร้างทางจุลภาค (SEM); (a) เครื่องฉายทอง; (b) ตัวอย่างดินที่ถูกเคลือบทอง	39
รูปที่ 4-1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับอัตราส่วนปริมาณปูนขาวที่เพิ่มขึ้น	43
รูปที่ 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นที่อัตราส่วนของปูนซีเมนต์ต่างกัน.....	45
รูปที่ 4-3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นที่อัตราส่วนของปริมาณปูนขาวต่างกัน.....	45
รูปที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการจม (Penetration) กับความเค้น (Stress) ของดินเหนียวก่อนปรับปรุงคุณภาพและดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาว ที่ปริมาณ 10% ระยะเวลาบ่มที่ 7 วัน.....	49
รูปที่ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างการบวมตัวและระยะเวลาที่ของดินเหนียวก่อนการปรับปรุงและหลังจากปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาวที่ปริมาณ 10%	50
รูปที่ 4-6 กำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดที่ขึ้นอยู่กับปริมาณของสารผสมเพิ่มและระยะเวลาบ่ม; (a) ค่า q_u ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์; (b) ค่า q_u ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว	51

รูปที่ 4-7 สมการความสัมพันธ์ของการพัฒนากำลังกำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่ระยะเวลาบ่มใดๆ เทียบกับกำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่ระยะเวลาบ่ม; (a) 7 วัน; (b) 28 วัน	54
รูปที่ 4-8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียวและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ 50 %	54
รูปที่ 4-9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับอัตราส่วนผสมของน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน; (a) อัตราส่วนผสมของน้ำตอปูนซีเมนต์; (b) อัตราส่วนผสมของน้ำตอปูนขาว	55
รูปที่ 4-10 ความสัมพันธ์ของความเร็วคลื่นที่ขึ้นอยู่กับปริมาณปูนซีเมนต์และระยะเวลาบ่ม; (a) ความเร็วคลื่น V_s ; (b) ความเร็วคลื่น V_p	57
รูปที่ 4-11 ความสัมพันธ์ของความเร็วคลื่นที่ขึ้นอยู่กับปริมาณปูนขาวและระยะเวลาบ่ม; (a) ความเร็วคลื่น V_s ; (b) ความเร็วคลื่น V_p	58
รูปที่ 4-12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นและกำลังรับแรงอัดแกนเดียว; (a) ความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (S-wave); (b) ความเร็วคลื่นทุติยภูมิ (P-wave).....	59
รูปที่ 4-13 ความสัมพันธ์ของโมดูลัสคั้นตัวและความเค้นเบี่ยงเบนเมื่อปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ที่ระยะเวลาบ่ม; (a), (b), (c) และ (d) 7 28 60 และ 90 วัน ตามลำดับ	61
รูปที่ 4-14 ความสัมพันธ์ของโมดูลัสคั้นตัวและความเค้นเบี่ยงเบนเมื่อปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวที่ระยะเวลาบ่ม; (a), (b), (c) และ (d) 7 28 60 และ 90 วัน ตามลำดับ	62
รูปที่ 4-15 ลักษณะของผิวตัวอย่างที่เกิดรอยร้าวเมื่อปรับปรุงเสถียรภาพด้วยปูนขาวที่ระยะเวลาบ่ม 90 วัน; (a) ปรับปรุงด้วยปูนขาวปริมาณ 8%, (b) ปรับปรุงด้วยปูนขาวปริมาณ 12%.....	63
รูปที่ 4-16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นและค่าโมดูลัสคั้นตัว; (a) ความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (S-wave); (b) ความเร็วคลื่นทุติยภูมิ (P-wave).....	66
รูปที่ 4-17 (a) ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียวและค่าโมดูลัสคั้นตัว; (b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ 50% และค่าโมดูลัสคั้นตัว; (c) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและค่าโมดูลัสคั้นตัว; (d) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของแรงเฉือนกับค่าโมดูลัสคั้นตัว	67
รูปที่ 4-18 ภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างก่อนปรับปรุงคุณภาพที่ระยะ 3000x (a) ดินเหนียวแม่เกาะ (b) ปูนซีเมนต์ (c) ปูนขาว	69
รูปที่ 4-19 ภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างดินเหนียวปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ที่ปริมาณ 6 8 10 และ 12% ที่ระยะเวลาบ่ม 7 28 60 และ 90 วัน ที่กำลังขยาย 12,000x.....	71

รูปที่ 4-20 ภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างดินเหนียวปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวที่ปริมาณ 6 8 10 และ 12% ที่ระยะเวลาบ่ม 7 28 60 และ 90 วัน ที่กำลังขยาย 6,000x 74

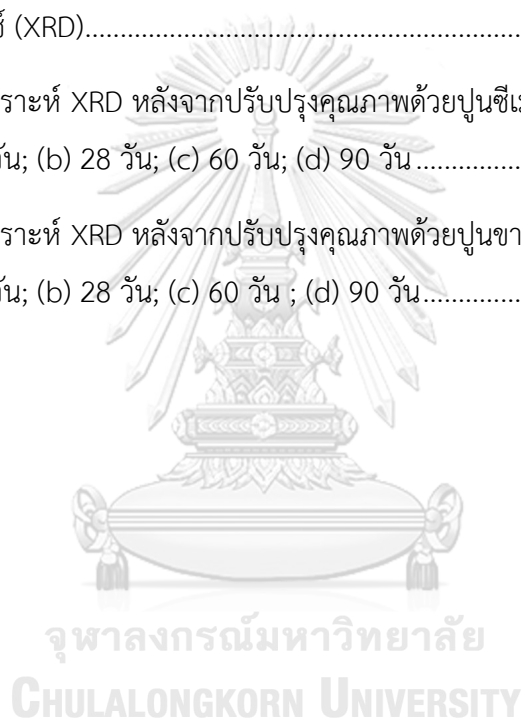
รูปที่ 4-21 ผลการวิเคราะห์สารประกอบธาตุด้วยเครื่อง EDS ของตัวอย่างที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปริมาณปูนซีเมนต์ 10% ตามระยะเวลาบ่ม; (a) 7 วัน; (b) 28 วัน; (c) 60 วัน; (d) 90 วัน..... 76

รูปที่ 4-22 ผลการวิเคราะห์สารประกอบธาตุด้วยเครื่อง EDS ของตัวอย่างที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปริมาณปูนขาว 10% ตามระยะเวลาบ่ม; (a) 7 วัน; (b) 28 วัน; (c) 60 วัน; (d) 90 วัน 76

รูปที่ 4-23 ผลการวิเคราะห์สารประกอบของดินเหนียวก่อนการปรับปรุงคุณภาพด้วยการทดสอบการ เลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)..... 79

รูปที่ 4-24 ผลการวิเคราะห์ XRD หลังจากปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ที่ 6% และ 10% ตาม ระยะเวลาบ่ม; (a) 7 วัน; (b) 28 วัน; (c) 60 วัน; (d) 90 วัน 80

รูปที่ 4-25 ผลการวิเคราะห์ XRD หลังจากปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวที่ 6% และ 10% ตาม ระยะเวลาบ่ม; (a) 7 วัน; (b) 28 วัน; (c) 60 วัน ; (d) 90 วัน 80



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ดินบวมตัวเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงทางปริมาตรขึ้นอยู่กับปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ โดยผลกระทบของสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงไปทำให้ปริมาณน้ำในมวลดินเกิดการเปลี่ยนแปลงและทำให้ดินที่อยู่ในสภาวะนั้นเกิดการบวมตัวและหดตัวสลับกัน นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงทางปริมาตรของดินทำให้เกิดรอยแตกร้าวของโครงสร้างงานดิน เช่น ผิวทาง ฐานราก และคันดินถม (Bharathi *et al.*, 2017; Emarah and Seleem, 2017) พฤติกรรมการบวมตัวของดินเหนียวขึ้นอยู่กับปริมาณของชนิดแร่ดินเหนียว ซึ่งดินที่มีแร่มอนมอริโอไนท์ (Montmorillonite) ในปริมาณมากจะมีการบวมตัวที่สูงมากและแร่ที่มีผลกระทบต่อการบวมตัวรองลงมาคือ แร้อิลไลต์ (Illite) และเคโอลิไนต์ (Kaolinite) ตามลำดับ (Diouri *et al.*, 2018) นอกจากนี้ปัจจัยอื่น ๆ ที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการบวมตัวของดินเหนียวได้แก่ ความหนาแน่นแห้งเริ่มต้น ช่องว่างในมวลดิน แรงดันกดทับ และการแลกเปลี่ยนประจุ

ปัญหาดินเหนียวบวมตัวพบได้มากทางตอนเหนือประเทศไทย โดยผลกระทบที่เกิดขึ้นจากดินเหนียวบวมตัวคือ ทำให้สิ่งก่อสร้างเกิดการพังและรอยร้าว งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาดินที่มีลักษณะการบวมตัวโดยดินที่ศึกษาได้รับมาจากเหมืองแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งเป็นเหมืองที่มีการขุดเปิดใหญ่ที่สุดในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยถ่านหินลิกไนต์ที่ขุดจากเหมืองแม่เมาะเป็นแหล่งเชื้อเพลิงที่สำคัญของประเทศไทย อย่างไรก็ตามดินที่ขุดมาจากเหมืองแม่เมาะส่วนใหญ่จะเป็นดินเหนียวและเป็นวัสดุเหลือทิ้งซึ่งในปัจจุบันมีการนำวัสดุเหลือทิ้งนี้กลับมาใช้ใหม่ (Teparut and Sthiannopkao, 2011) ในทางด้านวิศวกรรมจัดว่าเมื่อดินเหนียวอยู่ในสภาวะเปียกจะมีการบวมตัวสูงซึ่งทำให้กำลังรับแรงแบกทานและแรงเฉือนต่ำ แต่เมื่อดินเหนียวอยู่ในสภาวะแห้งดินจะมีลักษณะที่แข็งซึ่งทำให้การรับแรงแบกทานและแรงเฉือนสูงดังนั้นดินเหนียวจะมีความไวต่อปริมาณน้ำที่เข้ามาในมวลดิน (Emarah and Seleem, 2017) ในปัจจุบันได้มีการรณรงค์ในเรื่องการนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ใหม่ จึงมีการนำความรู้ทางด้านวิศวกรรมธรณีมาประยุกต์ร่วมกับวิศวกรรมผิวทาง (Pavement engineering) โดยนำดินที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งมาใช้กับงานทางมากขึ้นเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อสิ่งแวดล้อมและทางด้านวิศวกรรม โดยดินถูกนำมาปรับปรุงคุณภาพให้มีคุณสมบัติด้านกำลังเทียบเท่า

กับชั้นรองพื้นทาง (Subbase) และชั้นพื้นทาง (Base) (Praticò and Puppala, 2012; Shinawi, 2017)

การปรับปรุงคุณภาพดินบวมตัวทำได้หลายวิธี เช่น การปรับปรุงดินโดยไม่ใช้สารผสมเพิ่ม การปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้กระบวนการทางอุณหภูมิจึงและการปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้สารผสมเพิ่มด้วยวิธีทางเคมี (Chemical stabilization) เป็นวิธีหนึ่ง ที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในงานทางด้านวิศวกรรมทำได้โดยการผสมดินธรรมชาติกับสารผสมเพิ่ม (Additives) โดยส่วนใหญ่สารผสมเพิ่มที่ใช้กันทั่วไปได้แก่ ปูนซีเมนต์ ปูนขาว แกลบ หรืออาจจะนำ สารผสมเพิ่มแต่ละชนิดมาผสมรวมกันเป็นผลให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสารผสมเพิ่มกับดินแตกต่างกัน นอกจากนั้นวัตถุประสงค์หลักในการปรับปรุงคุณภาพดินได้แก่ การปรับปรุงคุณสมบัติพื้นฐาน การลดการทรุดตัว การเพิ่มคุณสมบัติทางด้านกำลังและการเพิ่มความทนทานของดิน (Al-Rawas *et al.*, 2005; Gaafer *et al.*, 2015) ที่ผ่านมามีงานวิจัยที่ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวด้วย วิธีทางเคมี เช่น การปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวด้วยปูนขาว (Mishra *et al.*, 2014; Shinawi, 2017) การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวด้วยปูนขาวและแกลบ (Phanikumar, 2009; Sharma *et al.*, 2012; Zhang and Cao, 2002) และการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวด้วยซีเมนต์ (Daipuria and Trivedi, 2016; Osinubi, 2000)

แม้ว่างานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินอย่างกว้างขวางโดยส่วนใหญ่ ศึกษาทางด้านคุณสมบัติพื้นฐานของดินที่เปลี่ยนแปลงไป การลดการบวมตัว และการรับแรงอัดของ ดิน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินบวมตัวด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาว โดยมี การศึกษาทั้งทางด้านคุณสมบัติพื้นฐานของดินที่เปลี่ยนแปลงไป การลดการบวมตัว การรับแรงอัดของ ดิน และยังมีมุ่งเน้นศึกษาค่าโมดูลัสคืนตัวซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งในการออกแบบชั้นผิวทาง และศึกษา โครงสร้างทางจุลภาคเพื่อวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างของดิน ทำให้สามารถ อธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจากการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวบวมตัว นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษา ความเร็วเฉือนในดิน (Free-Free resonant frequency method) เพื่อหาความสัมพันธ์ของ ความเร็วคลื่นที่ผ่านดินที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดและค่าโมดูลัสคืนตัวอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. เพื่อหาอัตราส่วนของปูนซีเมนต์และปูนขาวที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวบวมตัวเพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุผิวทาง
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานและด้านกำลังทั้งก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวบวมตัว ด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาว และศึกษาความเร็วเฉือน ที่อัตราส่วนผสมและระยะเวลาบ่มต่างกัน
3. เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางด้านจุลภาค และโครงสร้างผลึกของสารประกอบแร่ธาตุที่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของคุณสมบัติพื้นฐาน กำลัง และความเร็วเฉือนที่เปลี่ยนแปลง ทั้งก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาวที่อัตราส่วนผสมและระยะเวลาบ่มต่างกัน

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาคูณสมบัติทางวิศวกรรมและการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวบวมตัว โดยดินเหนียวถูกขุดมาจากเหมืองแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา

1. การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวบวมตัวทำโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 และปูนขาวประเภทไฮเดรตไลม์ (Hydrated lime) โดย
 - ใช้อัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ต่อดินเหนียวเท่ากับ 6, 8, 10, และ 12 %
 - ใช้อัตราส่วนผสมระหว่างปูนขาวต่อดินเหนียวเท่ากับ 6, 8, 10, และ 12 % (ปูนขาวได้รับการสนับสนุนจากบริษัทเคมีแมน จำกัด)
2. ศึกษาการบวมตัวและกำลังรับแรงแบกทานของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยอัตราส่วนผสมแตกต่างกันทั้งปูนซีเมนต์และปูนขาวโดยเตรียมตัวอย่างในการทดสอบด้านการบวมตัวและกำลังด้วยการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว ทดสอบหาค่าซีบีอาร์ และค่าโมดูลัสคืนตัว นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาความเร็วเฉือนในดินด้วยการทดสอบหาค่าความเร็วคลื่นที่เดินทางผ่านตัวอย่างดินด้วยวิธีสั่นพ้องปลายอิสระ
3. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคของดินเมื่อผสมด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาว โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron

microscope, SEM) และวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบแร่ธาตุโดยการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD)

จากการทดสอบที่ได้กล่าวมาข้างต้นสามารถวิเคราะห์หาอัตราส่วนของปูนซีเมนต์และปูนขาวที่เหมาะสมในการลดการบวมตัวของดินเหนียว เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ทางด้านการงานทางซึ่งอ้างอิงมาตรฐานตามกรมทางหลวง ประเทศไทย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของปูนซีเมนต์และปูนขาว เพื่อนำมาใช้ปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวบวมตัวสำหรับเป็นวัสดุดินถม วัสดุชั้นรองพื้นทาง และวัสดุชั้นพื้นทาง นอกจากนี้ยังสามารถลดปัญหาด้านการบวมตัวของดินเหนียวได้
2. สามารถทราบถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติพื้นฐานและด้านกำลังทั้งก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพ เมื่อทำการผสมที่อัตราส่วนและระยะเวลาบ่มต่างกัน
3. สามารถวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคทั้งก่อนและหลังปรับปรุงเพื่อทราบถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของการยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินและสารผสมเพิ่ม นอกจากนี้ยังสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงด้านคุณสมบัติพื้นฐาน กำลัง และความเร็วเฉือนในดินตามอัตราส่วนผสมและระยะเวลาบ่มที่ต่างกันอีกด้วย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ดินเหนียวบวมตัวเป็นปัญหาที่พบเจอทั่วโลก โดยดินมีการเปลี่ยนแปลงทางปริมาตรเมื่อความชื้นเปลี่ยนแปลง (Al-Rawas *et al.*, 2005; Puppala *et al.*, 2013) พฤติกรรมการบวมตัวของดินเกิดขึ้นได้จากหลากหลายปัจจัย โดยปริมาณและชนิดของแร่ดินเหนียวเป็นหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญ ดินเหนียวบวมตัวที่มีองค์ประกอบของแร่มอนมอริโอไนท์จะมีความไวต่อปริมาณน้ำที่เข้ามาในมวลดินค่อนข้างสูง เมื่อปริมาณน้ำที่เข้ามาในมวลดินมากจะทำให้ดินเหนียวเกิดการขยายตัว และดินเหนียวจะหดตัวเมื่อปริมาณน้ำออกจากมวลดิน ซึ่งพฤติกรรมการขยายและหดตัวนี้บ่งบอกได้ว่าดินบวมตัวมีความเป็นพลาสติกสูง นอกจากนั้นดินบวมตัวยังก่อให้เกิดปัญหาในงานด้านธรณีวิศวกรรมเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินเหนียวทำให้เกิดรอยแตกร้าวแก่สิ่งก่อสร้าง (Mollamahmutoglu *et al.*, 2009; Radhakrishnan *et al.*, 2014)

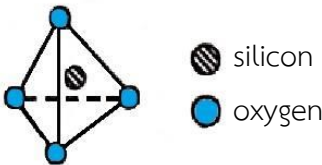
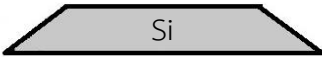
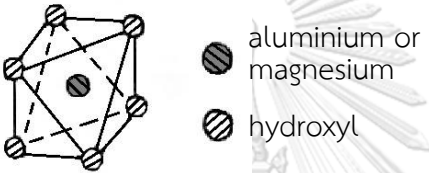

2.1 องค์ประกอบแร่ดินเหนียว

แร่ดินเหนียว (Clay minerals) มีลักษณะเป็นโครงสร้างผลึกขนาดเล็กซึ่งมีการจัดเรียงตัวเป็นแผ่น (Sheet-like structure) เกิดจากการเรียงตัวซ้อนกันของชั้นอลูมินาและซิลิกา และระหว่างชั้นจะมีไอออนบวกของธาตุโลหะ ส่วนใหญ่ดินเหนียวที่เกิดจากการตกตะกอนเป็นชั้นจะมีแร่เคโอลิไนต์ (Kaolinite) แร่อิลไลต์ (Illite) และแร่มอนมอริโอไนท์ (Montmorillonite) ผสมปะปนกัน ในขณะที่ดินเหนียวที่เกิดจากการผุพังทางเคมีของหินส่วนใหญ่จะมีแร่โครไรต์ (Chlorite) และฮาลอยด์ไซด์ (Halloysite) เป็นองค์ประกอบ แสดงดังตารางที่ 2-1

2.1.1 เคโอลิไนต์ (Kaolinite)

กลุ่มแร่เคโอลิไนต์มีโครงสร้างชนิด 1:1 ประกอบด้วยชั้นของซิลิกา (Tetrahedral layer) กับชั้นของอลูมินา (Octahedral layer) มีพันธะไฮโดรเจนบอนด์ (Hydrogen bonds) ยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นทำให้ดินเหนียวที่มีแร่เคโอลิไนต์มีความแข็งแรงและทนต่อสภาวะการเปลี่ยนแปลงความชื้นสูงกว่าแร่ดินเหนียวชนิดอื่นส่งผลให้การไหลซึมผ่านของน้ำในดินเหนียวทำได้ยาก นอกจากนั้นการบวมตัวและหดตัวของดินเหนียวลดลง

ตารางที่ 2-1 โครงสร้างผลึกที่เป็นองค์ประกอบของแร่ดินเหนียว

ชื่อกลุ่ม	สัญลักษณ์	องค์ประกอบ
Tetrahedron		4 oxygen ions enclosing one silicon ion (silicate)
Tetrahedral layer		Tetrahedra joined together to form a layer
Octahedron		6 oxygen ions or hydroxyl ions enclosing one aluminium, magnesium, iron or other ion
Octahedral layer		Octahedra joined together to form a layer

2.1.2 อิลไลต์ (Illite)

กลุ่มแร่อิลไลต์มีโครงสร้างชนิด 1:1 ประกอบด้วยชั้นของซิลิกา (Tetrahedral layer) กับชั้นของอลูมินา (Octahedral layer) และมีโพแทสเซียมไอออน (K^+) เชื่อมระหว่างชั้น แร่อิลไลต์พบเจอทั่วไป แต่มีรูปร่างหลายหลาก เช่น เป็นแผ่นบางเรียวยาว หรือเป็นเส้น ขนาดอนุภาคของแร่อิลไลต์มีลักษณะเป็นแผ่นที่มีขนาดไม่แน่นอน และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าแร่มอนมอริโอไนต์แต่มีความหนาแน่นมากกว่า ดินเหนียวที่มีแร่อิลไลต์ประกอบอยู่จะมีการบวมตัวและหดตัวปานกลาง

2.1.3 เสม็ดไทท์ (Smectite)

แร่ที่สำคัญในกลุ่มนี้ ได้แก่ แร่มอนมอริโอไนต์ แร่เฮกเทอไรต์ และ แร่อนโทไรต์ ซึ่งมีโครงสร้างชนิด 2:1 ประกอบด้วยชั้นของอลูมินา 1 ชั้น และประกอบด้วยชั้นของซิลิกา 2 ชั้น ซึ่งมีแรงแวนเดอร์วาลส์ยึดเหนี่ยวระหว่างชั้น และเป็นกลุ่มแร่ที่สามารถขยายตัวเมื่อถูกน้ำหรือสารอินทรีย์แทรกระหว่างชั้นในโครงสร้าง และมีสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวก (cation) ซึ่งไอออนบวกส่วนใหญ่ที่พบคือ Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} และ Na^+ นอกจากนั้นปริมาณน้ำที่เข้ามาจะไปดึงดูดแร่ทำให้เกิดการขยายตัวสูงแล้วหดตัวเมื่อน้ำไหลออกไป

2.1.4 คลอไรท์ (Chlorite)

กลุ่มแร่คลอไรท์มีโครงสร้างชนิด 2:1 ประกอบด้วยชั้นของอลูมินา 1 ชั้น และประกบด้วยชั้นของซิลิกา 2 ชั้น ซึ่งระหว่างโครงสร้าง 2:1 จะมีไอออนประจุบวก โดยส่วนมากจะเป็น Mg^{2+} และ Fe^{3+} เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า brucite-like layer นอกจากนี้ดินที่มีแร่คลอไรท์จะมีความรุนแรงของการบวมตัวและหดตัวน้อยกว่าดินเหนียวที่มีแร่มอนมอริโอไนท์

2.1.5 ฮาลอยด์ไซต์ (Halloysite)

กลุ่มแร่ฮาลอยด์ไซต์มีโครงสร้าง 1:1 ประกอบด้วยชั้นของซิลิกา กับชั้นของอลูมินา และมีโมเลกุลของน้ำเป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างโครงสร้าง ดินเหนียวที่มีแร่ฮาลอยด์ไซต์จะมีหน่วยน้ำหนักรวมน้อย และเมื่อโมเลกุลน้ำที่เชื่อมระหว่างโครงสร้างมีปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นจะทำให้โครงสร้างถูกทำลายจนมีลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอน (Tubular shape)

2.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการบวมตัว

กลไกการขยายและหดตัวของดินเหนียวเกิดจากการที่ปริมาตรช่องว่างในมวลดินเกิดการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลงซึ่งเกิดจากปัจจัยที่หลากหลาย โดยปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลของการบวมตัวและหดตัวของดินสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ปัจจัย ได้แก่ คุณสมบัติของดิน สภาพแวดล้อม และสภาพของความเค็ม (Elsharief *et al.*, 2014; Mokhtari and Dehghani 2012)

2.2.1 ปัจจัยทางด้านคุณสมบัติดิน (Soil properties)

1. แร่ดินเหนียว (Clay Mineralogy)

ดินที่มีแร่มอนมอริโอไนท์ปริมาณมากจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรสูง ส่วนดินที่มีแร่อิลไลต์ และเคโอลินด์ มักพบในดินที่ไม่มีการบวมตัวแต่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเมื่อขนาดอนุภาคเม็ดดินมีความละเอียด

2. สารละลายทางเคมีในดิน (Soil Water chemistry)

การบวมตัวของดินที่น้อยลงเกิดจากการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นไอออนบวกและการเพิ่มขึ้นของไอออนบวกที่อยู่ในระดับพลังงานวงนอกสุด (Cation valence) เช่น สารละลายน้ำในดินที่มีไอออน Mg^{2+} จะทำให้การบวมตัวของดินน้อยกว่าสารละลายน้ำในดินที่มี Na^+ อยู่

3. ความเป็นพลาสติก (Plasticity)

โดยทั่วไปดินที่มีคุณสมบัติเป็นพลาสติกสามารถบ่งบอกการบวมตัวและหดตัวของดินได้ซึ่งความเป็นพลาสติกจะมีปริมาณความชื้นในช่วงกว้างและมีขีดจำกัดเหลวที่สูง

4. โครงสร้างของดิน (Soil structure)

ดินที่มีลักษณะการรวมตัวกันเป็นกลุ่ม (Flocculated clays) มีแนวโน้มที่จะมีการขยายตัวเมื่อมีน้ำแทรกในโมเลกุลมากกว่าดินที่มีลักษณะกระจายตัว (Dispersed clays) เนื่องจากดินที่มีลักษณะกระจายตัวจะมีการเรียงตัวที่ขนานกัน ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคมากกว่าดินที่มีลักษณะการรวมตัวกันเป็นกลุ่ม

5. ความหนาแน่นแห้ง (Dry density)

ความหนาแน่นที่สูงบ่งบอกได้ว่าช่องว่างระหว่างอนุภาคเม็ดดินใกล้กันซึ่งอาจจะทำให้เกิดแรงผลักที่เสริมกันระหว่างอนุภาคเม็ดดินและศักย์การบวมตัว

2.2.2 ปัจจัยทางด้านสภาพแวดล้อม (Environment)

1. ปริมาณความชื้นเริ่มต้น (Initial moisture content)

ดินเหนียวแห้งจะมีการดูดซึมน้ำที่มากกว่าดินที่มีความชื้นสูง ซึ่งดินเปียกจะมีการสูญเสียน้ำอย่างทันทีเมื่อได้รับอิทธิพลจากความร้อนและเกิดการหดตัวมากกว่าดินที่มีสภาพแห้ง

2. การเปลี่ยนแปลงทางความชื้น (Moisture variations)

ความชื้นที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดบริเวณส่วนบนของชั้นดิน (Active zone) ส่งผลให้ผิวดินบริเวณนั้นเกิดการยกตัวสูงขึ้น

3. สภาพภูมิอากาศและอุณหภูมิ (Climate and temperature)

การเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศและอุณหภูมิเปียกสลับแห้ง ร้อนสลับเย็น ส่งผลให้ความชื้นเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้ดินเหนียวเกิดพฤติกรรมบวมตัวและหดตัวสลับกัน

2.2.3 ปัจจัยทางด้านความเค้น (Stress conditions)

1. ความเค้นที่เคยกดทับในอดีต (Stress history)

การขุดดินเหนียวออกไปจะทำให้ดินบริเวณที่ถูกขุดเกิดแรงดันขยายตัว ซึ่งแรงดันขยายตัวสามารถเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของดินเหนียวที่ถูกกดอัด แต่การบวมตัวที่อยู่ภายใต้น้ำหนักบรรทุกมวลเบา (Light loading) ระยะเวลาของดินเหนียวที่ถูกกดอัดจะไม่มีผลต่อการขยายตัวของดิน

2. สภาพของหน้างาน (In situ condition)

ความเค้นเริ่มต้นในดินต้องถูกประมาณค่าเพื่อประเมินลำดับของการให้แรงในมวลดิน

3. แรงกระทำ (Loading)

แรงกดทับที่มากที่สุดถูกใช้ในการวางทับดินที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร เพื่อสมดุลแรงผลักที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคดินและลดการบวมตัวของดินลง

2.3 การศึกษาจำแนกระดับการบวมตัวของดินเหนียว

การจำแนกประเภทดินเป็นการแยกดินออกเป็นกลุ่มตามพฤติกรรมทางวิศวกรรม แต่ไม่ได้อธิบายถึงรายละเอียด ส่วนใหญ่ในอดีตจะแยกประเภทดินตามขนาดเม็ดดินและลักษณะผิวดิน อย่างไรก็ตามปัจจุบันได้มีการจัดกลุ่มประเภทดินในรูปแบบใหม่โดยใช้การทดสอบขีดจำกัด (Atterberg's limit) นอกจากนั้นดินเหนียวสามารถจำแนกได้โดยสัดส่วนของแร่ดินเหนียว โดยเฉพาะกลุ่มแร่อมมอริโอไนท์ ซึ่งตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดิน ดังนั้นการจัดประเภทของดินเหนียวจึงมีความจำเป็นอย่างมาก Sridharan and Prakash (2000) ได้ทำการศึกษารวบรวมคุณสมบัติพื้นฐานของดินที่มีอิทธิพลต่อการบวมตัว ซึ่งงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าขีดจำกัดหดตัวไม่เพียงพอที่จะใช้ประเมินระดับในการบวมตัวของดิน ในภายหลังจึงได้มีการเสนอการทดสอบการบวมตัวแบบอิสระ (Free swell index test) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การบวมตัวของดิน

จากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าการบ่งบอกระดับการบวมตัวของดินเหนียวสามารถจำแนกโดยคุณสมบัติพื้นฐานของดิน ได้แก่ ขีดจำกัดเหลว (ตารางที่ 2-2) ขีดจำกัดพลาสติก (ตารางที่ 2-3) ขีดจำกัดการหดตัว ดัชนีพลาสติก และ ดัชนีการบวมตัวอิสระ (ตารางที่ 2-4) (Sridharan and Prakash, 2000) ซึ่งระดับการบวมตัวของดินเหนียวแบ่งออกเป็น 4 ระดับได้แก่ น้อย ปานกลาง มาก และมากที่สุด

ตารางที่ 2-2 การจำแนกระดับการบวมตัวของดินเหนียวด้วยขีดจำกัดเหลว

Degree of expansion	Chen	W _L : %	IS 1498
Low	< 30		20-35
Medium	30-40		35-50
High	40-60		50-70
Very high	>60		70-90

ที่มา: Sridharan and Prakash (2000)

ตารางที่ 2-3 การจำแนกระดับการบวมตัวของดินเหนียวด้วยขีดจำกัดพลาสติก

Degree of expansion	Ip: %		
	Holtz and Gibbs	Chen	IS 1498
Low	<20	0-15	<12
Medium	12-34	10-35	12-23
High	23-45	20-55	23-32
Very high	>32	>35	>32

ที่มา: Mitchell, J. K. and Freitag, D. R. (1959)

ตารางที่ 2-4 การจำแนกระดับการบวมตัวของดินเหนียวขึ้นอยู่กับค่าดัชนีการบวมตัวอิสระ

Liquid limit (%)	Plasticity index (%)	Free swell index (%)	Degree of expansion	Degree of severity
70-90	>32	>200	Very high	Severe
50-70	23-32	100-200	High	Critical
35-50	12-23	50-100	Medium	Marginal
20-35	<12	<50	Low	Non critical

ที่มา: Mohan and Goel (1959).

2.4 การศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวบวมตัว

การปรับปรุงคุณภาพดินสามารถทำได้ 2 วิธี คือ การปรับปรุงคุณภาพดินทางกลและการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยสารผสมเพิ่ม ซึ่งเป็นกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมกำลังรับแรงแบกทาน และความทนทานของดินทำให้เสถียรภาพดีขึ้น โดยทั่วไปการปรับปรุงคุณภาพดินจะทำให้ขนาดของเม็ดดินคละกันดีขึ้น ความเป็นพลาสติกของดินลดลง และกำลังรับแรงแบกทานเพิ่มขึ้น นอกจากนี้งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการใช้เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวบวมตัวด้วยสารเคมี (Chemical stabilization) อย่างหลากหลาย ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนขาว เถ้าลอย หรือการผสมกันระหว่างสารผสมเพิ่มดังกล่าว ซึ่งสารผสมเพิ่มจะเป็นตัวเชื่อมประสานเม็ดดินเพื่อพัฒนาคุณสมบัติพื้นฐานและด้านกำลังรับแรงของดิน งานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และ ปูนขาวประเภทไฮเดรตโลม์ ในการปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวบวมตัว

2.5 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเทาได้จากกระบวนการเผา ซึ่งวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ ได้แก่ ออกไซด์ของธาตุแคลเซียมจำพวกหินปูนและหินชอล์ก และออกไซด์ของธาตุซิลิกอนและอลูมิเนียมจำพวกหินชนวน หินดินดาน และดินเหนียว เมื่ออุณหภูมิประมาณ 1200 °C โมเลกุลน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกกำจัดออกไปจนกระทั่งอุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 1400 - 1600 °C จะทำให้ได้ปูนเม็ด (Clinker) ก้อนกลมขนาด 3 - 40 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปบดให้ละเอียด

2.5.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์

องค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แบ่งตามปริมาณออกไซด์ แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกคือออกไซด์หลักของปูนซีเมนต์ และกลุ่มที่สองคือออกไซด์รองของปูนซีเมนต์ แสดงดังตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-5 สารประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (เศรษฐบุตร, 2539)

กลุ่ม	องค์ประกอบออกไซด์	ชื่อย่อ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ออกไซด์หลัก	แคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide)	CaO	60.0 - 67.0
	ซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide)	SiO ₂	17.0 - 25.0
	อลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminum oxide)	Al ₂ O ₃	3.0 - 8.0
	เฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric oxide)	Fe ₃ O ₃	0.5 - 6.0
ออกไซด์รอง	แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide)	MgO	0.1 - 4.0
	โซเดียมออกไซด์ (Sodium oxide)	Na ₂ O	0.1 - 1.8
	โพแทสเซียมออกไซด์ (Potassium oxide)	K ₂ O	0.1 - 1.8
	ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (Sulfur trioxide)	SO ₃	0.5 - 3.0

ที่มา: เศรษฐบุตร (2539)

2.5.2 คุณสมบัติของสารประกอบหลัก

ออกไซด์หลักของปูนซีเมนต์มีปริมาณร้อยละ 90 ของปูนซีเมนต์ ออกไซด์เหล่านี้จะทำปฏิกิริยาทางเคมีและรวมตัวกันในรูปของสารประกอบขึ้นอยู่กับกระบวนการเผาและการเย็นตัวของเม็ดปูน ดังนั้นสารประกอบที่สำคัญมีอยู่ 4 ชนิด

1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S)

เป็นสารประกอบที่มีรูปทรงเป็นเหลี่ยมสี่เท่า เมื่อผสมน้ำกับปูนซีเมนต์ที่ประกอบด้วย ไตรแคลเซียมซิลิเกตจะทำให้เกิดปฏิกิริยาก่อตัวและแข็งตัว ซึ่งทำให้มีกำลังรับแรงที่ดีในช่วง 7 วันแรก โดยปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกตที่มีมากที่สุดในปูนซีเมนต์มีอยู่ประมาณร้อยละ 45 ถึง 55

2. ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S)

เป็นสารที่ประกอบที่มีเสถียรภาพที่อุณหภูมิปกติ มีลักษณะเป็นเม็ดกลมและมีลักษณะทวินนิง (Twining) เมื่อผสมกับน้ำจะทำให้เกิดความร้อนโดยมีค่าประมาณ 250 จูลต่อกรัม เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และกำลังจะเริ่มพัฒนาขึ้นหลังจาก 28 วันเป็นต้นไป ซึ่งค่อนข้างช้า แต่ในระยะยาวจะมีกำลังรับแรงใกล้เคียงกับไตรแคลเซียมซิลิเกต โดยปริมาณแคลเซียมซิลิเกตในปูนซีเมนต์มีอยู่ร้อยละ 15 ถึง 35

3. ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A)

เป็นสารประกอบที่มีรูปทรงเป็นเหลี่ยมสี่เหลี่ยม เกิดปฏิกิริยารุนแรงกับน้ำ ทำให้เกิดการก่อตัวทันที กำลังจะสามารถเพิ่มขึ้นเร็วมากภายในระยะเวลา 1 วัน แต่กำลังประลัย (Ultimate strength) จะค่อนข้างต่ำ โดยปริมาณไตรแคลเซียมอลูมิเนตในปูนซีเมนต์มีอยู่ร้อยละ 7 ถึง 15

4. เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF)

เป็นสารประกอบที่อยู่ในสภาพของสารละลายแข็ง เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะทำให้เฟสที่เกิดการก่อตัวทันที กำลังจะเพิ่มขึ้นได้รวดเร็วมากเช่นเดียวกับไตรแคลเซียมอลูมิเนต แต่กำลังประลัย (Ultimate strength) จะต่ำกว่าไตรแคลเซียมอลูมิเนตเล็กน้อย โดยปริมาณเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ในปูนซีเมนต์มีอยู่ร้อยละ 5 ถึง 10

2.5.3 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปริมาณของสารประกอบที่แตกต่างกันทำให้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ดังนั้นการเลือกใช้ประเภทของปูนซีเมนต์ต้องเลือกให้เหมาะสมกับงาน โดยมาตรฐาน ASTM C150 ได้จำแนกปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็น 5 ประเภทดังนี้

ประเภทที่ 1 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) ใช้ในงานคอนกรีตและผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่ไม่ต้องการความพิเศษ กำลังสูงสุดที่ได้จากปูนประเภทนี้ใช้ระยะเวลาบ่มพอประมาณไม่เร็ว ส่วนมากการใช้ปูนซีเมนต์ประเภทนี้เหมาะกับงานก่อสร้างทั่วไป เช่น เสา คาน ฐานรากอาคาร และถนน เป็นต้น

ประเภทที่ 2 หรือ ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนต่ำ ใช้ในงานคอนกรีตและผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่เกิดความร้อนต่ำและทนต่อการกัดกร่อนของสารละลายซัลเฟตปานกลาง ปูนซีเมนต์ประเภทนี้เหมาะสำหรับสร้างเขื่อนคอนกรีต หล่อท่อคอนกรีตขนาดใหญ่ และต่อม่อสะพาน

ประเภทที่ 3 หรือ ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์แบบแข็งเร็ว (High Early Strength) เป็นปูนซีเมนต์ที่มีกำลังสูงในช่วงแรกและมีความร้อนสูงจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเนื่องจากมีปริมาณสารประกอบจำพวกไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้เหมาะกับงานที่ต้องการใช้เวลาสั้นหรือต้องการถอดแบบเร็ว เช่น เสาเข็มคอนกรีต เสาไฟฟ้าคอนกรีต พื้นหรือคาน

ประเภทที่ 4 หรือ ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ให้ความร้อนต่ำมากเนื่องจากมีปริมาณสารประกอบจำพวกไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) น้อย แต่มีปริมาณของไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) สูง ปูนซีเมนต์ประเภทนี้จึงเหมาะกับงานคอนกรีตหนา และเขื่อนคอนกรีตขนาดใหญ่

ประเภทที่ 5 หรือ ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ทนซัลเฟต (Sulfate Resisting Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะมีปริมาณสารประกอบพวกไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) ต่ำมากทำให้การทำปฏิกิริยากับซัลเฟตเกิดขึ้นได้น้อย ส่งผลให้การกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายซัลเฟตลดลง ซึ่งปูนซีเมนต์ประเภทนี้เหมาะกับงานคอนกรีตที่สร้างในพื้นที่ที่มีสารละลายซัลเฟตสูง

2.5.4 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์

ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นเมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ ปฏิกิริยานี้ทำให้เกิดความร้อน การก่อตัว และเกิดกำลังของคอนกรีตซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดสารประกอบ นอกจากนั้นสารประกอบที่แตกต่างกันจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันออกไป โดยสามารถจำแนกปฏิกิริยาจากสารประกอบหลักทั้ง 4 ชนิดได้ดังนี้

1. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกตและไดแคลเซียมซิลิเกต (C_3S , C_2S) เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วจะได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($C-S-H$) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($CaOH_2$) ซึ่งเกิดปฏิกิริยาตามสมการดังนี้

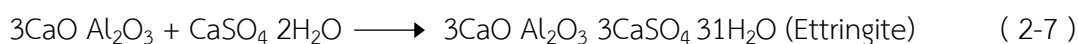


โดยปฏิกิริยาไฮเดรชันจะทำให้เกิดสารประกอบทางเคมีแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งสารประกอบนี้จะส่งผลทางด้าน การรับแรงโดยขึ้นอยู่กับ อายุการบ่ม องค์ประกอบของซีเมนต์ ความละเอียดของซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และอุณหภูมิ โดยแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างอนุภาค นอกจากนี้ปฏิกิริยาไฮเดรชันจะทำให้เกิดสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ซึ่งทำให้ซีเมนต์มีคุณสมบัติเป็นด่าง ($\text{pH} = 12.4$) และป้องกันการสึกกร่อน แต่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นนั้นสามารถทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ และทำให้เกิดรอยแตกร้าวได้

2. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) เมื่อผสมกับน้ำจะทำให้ซีเมนต์เพสต์แข็งตัวอย่างรวดเร็ว เกิดเป็นแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH)

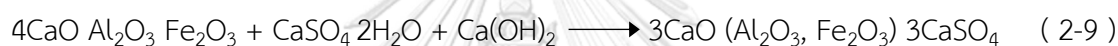


เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจำเป็นต้องใส่ยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) เพื่อชะลอการเกิดปฏิกิริยา นอกจากนี้การใส่ยิปซัมจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ของเอทริงไกต์ (Ettringite, Et) ครอบผิวของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A)



ในช่วงแรกชั้นของ Et จะทำปฏิกิริยาส่วนใหญ่กับไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) และ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3A) ชั้นของ Et จะชะลอการทำปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมซิลิเกต แต่ไม่ได้หยุดปฏิกิริยา Et ที่เกิดขึ้นจะมีแรงดันที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาตรของของแข็งเพิ่มขึ้น จนกระทั่งชั้นของ Et แยกออกทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับไตรแคลเซียมอลูมิเนต การแตกตัวของ Et จะทำให้เกิด Et ใหม่เข้าไปแทนที่ทำให้เกิดการชะลอของปฏิกิริยาไฮเดรชัน กระบวนการนี้กระทำซ้ำไปมาจนกระทั่งปริมาณการมีอยู่ของซัลเฟตไอออน (Ca^{2+} , SO_4^{2-} และ OH^-) ไม่เพียงพอที่จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดเป็น Et

3. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF) ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นในช่วงแรกเมื่อผสมกับน้ำ โดยสารประกอบเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์กับยิปซัมจะทำปฏิกิริยากันจนเกิดแคลเซียมซัลโฟลูมิเนต (Calcium sulfoaluminate) และแคลเซียมซัลโฟเฟอร์ไรต์ (Calcium sulfoferrite) ดังสมการที่ (2-9)



2.6 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับปูนขาว

การนำปูนขาวมาใช้งานนั้นเริ่มจากการทำเหมืองเพื่อให้ได้แร่หินปูนคุณภาพสูง โดยปูนขาวมีลักษณะผงละเอียดสีขาวได้มาจากกระบวนการเผาแร่หินปูน หรือ แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ที่อุณหภูมิมากกว่า $1000^\circ C$ เพื่อกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อเกิดปฏิกิริยาเคมีจะกลายเป็นปูนขาว หรือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากนั้นเมื่อนำปูนขาวผ่านน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเปลี่ยนรูปเป็นปูนขาวไฮเดรตไลม์ หรือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ส่วนที่เป็นผงแห้งเรียกว่าปูนขาว และส่วนที่เป็นสารแขวนลอยเรียกว่าน้ำปูนไลม์ (Milk of lime)

2.6.1 ประเภทของปูนขาว

การแบ่งประเภทของปูนขาวนั้นจำแนกได้ด้วยการทำปฏิกิริยากับน้ำ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทดังนี้

1. ปูนขาวควิกไลม์ (Quick lime)

เกิดจากกระบวนการเผาหินปูนโดยไม่ผ่านการทำปฏิกิริยากับน้ำ แร่ธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักคือ แคลเซียม (Ca) และแมกนีเซียม (Mg) โดยมีสัดส่วนของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) มากกว่า แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ดังนี้

- High calcium quick lime เป็นปูนขาวที่มีสารประกอบเฉพาะแคลเซียมออกไซด์ (CaO)
- Dolomitic quick lime เป็นปูนขาวที่มีสารประกอบทั้งแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ซึ่งมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์มากกว่า

2. ปูนขาวไฮเดรตไลม์ (Hydrated lime)

เกิดจากการนำปูนขาวประเภทไฮเดรตไลม์ ไปทำปฏิกิริยากับน้ำ ซึ่งสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้

- Hydrated high calcium lime เป็นปูนขาวที่มีสารประกอบเฉพาะแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂)
- Monohydrated dolomitic lime เป็นปูนขาวที่มีสารประกอบของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) และ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) โดยมีแคลเซียมไฮดรอกไซด์มากกว่า
- Dihydrated dolomitic lime เป็นปูนขาวที่มีสารประกอบของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) และ แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Mg(OH)₂) โดยมีแคลเซียมไฮดรอกไซด์มากกว่า

การจากศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนขาวนิยมใช้ปูนขาวชนิดไฮเดรตไลม์ (Hydrated lime) เนื่องจากปูนขาวชนิดนี้มีลักษณะเป็นผงละเอียด ทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคแล้วคลุกเคล้ากับดินได้เป็นอย่างดี โดยทั่วไปปูนขาวไฮเดรตไลม์ชนิด Dolomitic monohydrated lime เป็นปูนขาวที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการเพิ่มกำลังรับแรงของดิน

2.6.2 คุณสมบัติของสารประกอบหลักของปูนขาวไฮเดรตไลม์

สารประกอบของปูนขาวที่สำคัญจะประกอบด้วยแร่ธาตุจำพวกแคลเซียม (Ca²⁺) และแมกนีเซียม (Mg²⁺) เป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดการจับกลุ่มเกิดเป็นสารประกอบใหม่ดังนี้

1. แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂)

เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างน้ำกับปูนขาว โดยมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 70.10 และมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.43 ส่วนมากสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีลักษณะเป็นผงแป้งสีขาวและเมื่อทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์จะเปลี่ยนรูปเป็นแคลเซียม

คาร์บอนตซึ่งปฏิกิริยานี้ทำให้โลมมอร์ทาร์ที่มีปริมาณแคลเซียมสูงเกิดการแข็งตัวบริเวณพื้นผิว นอกจากนี้ยังเพิ่มความทนทานต่อการสึกกร่อน และมีความคงทนต่อการรับแรงที่กระทำต่อเนื่อง (Dynamic stress)

2. แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)

เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาแร่แมกนีเซียมในสภาพที่ใช้ ออกซิเจน โดยเผาไหม้ที่ อุณหภูมิ 400 – 900 °C ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 40.32 และมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.6 เป็น สารประกอบที่ดูดความชื้นได้ดีและสามารถละลายได้ในกรด

3. แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Mg(OH)₂)

เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างแมกนีเซียมออกไซด์กับน้ำ โดยมี น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 58.34 และมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.43 ส่วนมากในธรรมชาติพบในรูปของ แร่บรูไซต์ (Brucite) และมักจะพบร่วมกับแร่แมกนีเซียม (Periclase)

2.6.3 ปฏิกิริยาที่เกิดจากการผสมปูนขาว

สารประกอบหลักของปูนขาว ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ดังนั้นเมื่อทำการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนขาวจะเกิดปฏิกิริยาที่สำคัญอยู่ 4 ปฏิกิริยา (Harichane *et al.*, 2011) ดังนี้

1. ปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุไอออน (Cation exchange reaction)

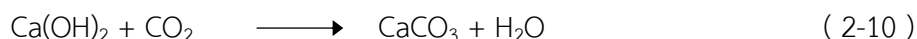
ส่วนใหญ่ในดินเหนียวจะมีธาตุจำพวกโซเดียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม แคลเซียม และ ไอออนอื่นๆ ($\text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{Ca}^{2+} < \text{Mg}^{2+}$) ซึ่งไอออนบวกที่มีจำนวนวาเลนซ์อิเล็กตรอนมากกว่ามีความสามารถในการแทนที่และเกาะยึดอยู่ที่พื้นผิวของดินเหนียวได้มากกว่าไอออนที่มีวาเลนซ์ อิเล็กตรอนน้อยกว่า โดยขึ้นอยู่กับความเป็นกรด-ด่าง และชนิดของแร่ธาตุในดิน เมื่อดินเหนียวถูก ผสมด้วยปูนขาวจะเกิดการแทนที่ด้วยประจุบวกของแคลเซียมส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความ เป็นพลาสติกในดินและการบวมตัวของดินลดลง

2. กระบวนการรวมตัวของเม็ดดิน (Flocculation – agglomeration)

ลักษณะโครงสร้างของดินเหนียวมีการจัดเรียงตัวเป็นแผ่นคล้ายกับโครงสร้างของ พอลิเมอร์ และโครงสร้างนี้เมื่อจับกับโมเลกุลน้ำทำให้น้ำล้อมรอบแผ่นดินเหนียวส่งผลให้เกิดการ เปลี่ยนแปลงปริมาตรหรือเกิดการบวมตัวของดิน แต่เมื่อปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว ไอออนของ แคลเซียม (Ca^{2+}) และแมกนีเซียม (Mg^{2+}) จะเข้าไปแทนที่โซเดียมไอออน (Na^+) และอะตอมของ ไฮโดรเจน (H^+) ทำให้โครงสร้างของดินเกิดการเปลี่ยนแปลงมีลักษณะดินร่วน

3. การเกิดสารประกอบคาร์บอเนต (Lime carbonation)

เกิดจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) หรือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ในการเพิ่มเสถียรภาพโดยทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศได้สารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3 หรือ $3\text{CaCO}_3\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$) และน้ำ

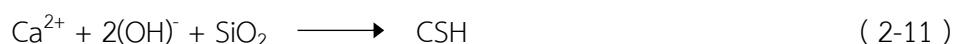


ปฏิกิริยาที่เกิดสารประกอบคาร์บอเนต (CaCO_3) ที่เกิดขึ้นจะทำให้ปูนขาวเกิดการแข็งตัวทำให้กำลังรับแรงที่ได้จากการผสมปูนขาวมีกำลังที่เพิ่มขึ้นและทนต่อการสึกกร่อน (Van Balen, 2005) นอกจากนี้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ไม่เพียงพอกต่อการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction) ส่งผลให้การผลิตสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate) ช้าลง อย่างไรก็ตามปฏิกิริยานี้ส่งผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

4. ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction)

เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากการผสมปูนขาว น้ำ และดินที่มีแร่ธาตุซิลิกาและอลูมินา (Si, Al) เป็นองค์ประกอบ โดยทั่วไปซิลิกาและอลูมินาพบได้ในดินที่ประกอบด้วยแร่ดินเหนียว ควอตซ์ เฟลด์สปาร์ ไมก้า และซิลิเกต Bell (1996) พบว่าค่า pH ที่สูงจะทำให้ซิลิกาจากแร่ดินเหนียวเกิดการละลายกระจายตัวรวมตัวกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca^{2+}) เกิดเป็นสารประกอบใหม่ ได้แก่ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นต่อเนื่องถ้ามีปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) และซิลิกาเพียงพอ (Bell, 1996)

Al-Mukhtar และคณะ (2010) พบว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างดินกับปูนขาว นอกจากสารประกอบ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) แล้วยังพบสารประกอบแคลเซียมอลูมิเนต (CAH) อีกด้วย ซึ่งสารประกอบเหล่านี้จะทำให้กำลังรับแรงจะเพิ่มมากขึ้นในรูปของผลึกเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก ซึ่งปฏิกิริยานี้อยู่กับระยะเวลาบ่มและอุณหภูมิ (Al-Mukhtar *et al.*, 2010)



แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาซีเมนต์และปูนขาว แต่รูปแบบของการเกิดปฏิกิริยาแตกต่างกัน โดยสารประกอบ CSH ของปูนซีเมนต์จะเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ส่วนสารประกอบ CSH ของปูนขาวจะเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction)

2.7 การศึกษาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient modulus)

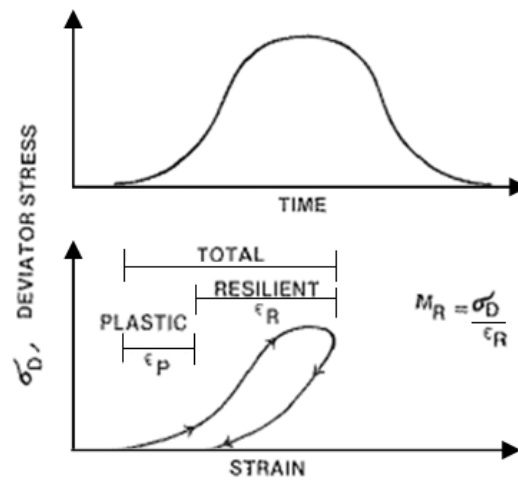
ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient modulus) เป็นคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุซึ่งมีความคล้ายคลึงกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) ซึ่งวัสดุที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่นเมื่อทำการใส่แรงและถอนแรงสลับไปมา (Repeated – load) จะมีการหดและคลายตัวทันทีอยู่ในรูปเดิม พฤติกรรมที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของดินเมื่อใส่แรงเข้าไปจะทำให้ความเค้นและความเครียดเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อทำการถอนแรงออกค่าความเค้นจะลดลงมาถึงศูนย์ ขณะเดียวกันความเครียดก็จะลดลงแต่ไม่กลับมาที่เดิมเนื่องจากเกิดการสูญเสียพลังงานแสดงดังรูปที่ 2-1 ดังนั้นเมื่อวัสดุที่ถูกแรงกระทำซ้ำไปมาจะเกิดการยุบตัวเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

การหาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient modulus) หาได้จากสัดส่วนของความเค้นที่เพิ่มขึ้นจากการใส่แรงในแต่ละรอบต่อความเครียดที่เพิ่มขึ้นในแต่ละรอบแสดงในสมการที่ (2-13) (Elliott and Thornton, 1988)

$$\text{Resilient modulus } (M_R) = \frac{\text{deviator stress } (\sigma_d)}{\text{strain } (\epsilon)} \quad (2-13)$$

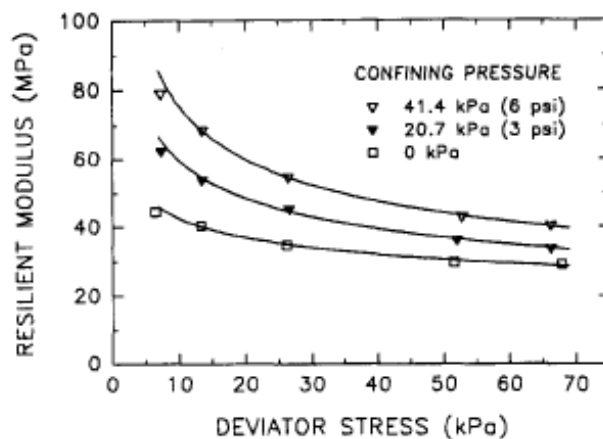
เมื่อ Deviator stress (σ_d) = อัตราส่วนของแรงกระทำต่อพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง

Strain (ϵ) = อัตราส่วนของระยะความยาวคืบรูปต่อระยะความยาวเดิม



รูปที่ 2-1 พฤติกรรมของความเค้นและความเครียดในการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว
(Lee et al., 1997)

นอกเหนือจากความเค้นและความเครียดที่มีผลต่อค่าโมดูลัสคืนตัวแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นที่มีผลกระทบต่อค่าโมดูลัสคืนตัว ได้แก่ สภาพทางกายภาพของดิน (ความชื้นและหน่วยน้ำหนักของดิน) ชนิดและลักษณะโครงสร้างของดิน และค่าพิกัดสถานะความคงตัวของดิน จากการศึกษาของ Lee et al. (1997) ทางด้านความเครียดซึ่งประกอบด้วยความเค้นเบี่ยงเบน (Deviator stress) และความเค้นอัด (Confining stress) สามารถสังเกตได้ว่าเมื่อความเค้นอัดเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าโมดูลัสคืนตัวเพิ่มขึ้นเช่นกัน (Lee et al., 1997) แสดงดังรูปที่ 2-2

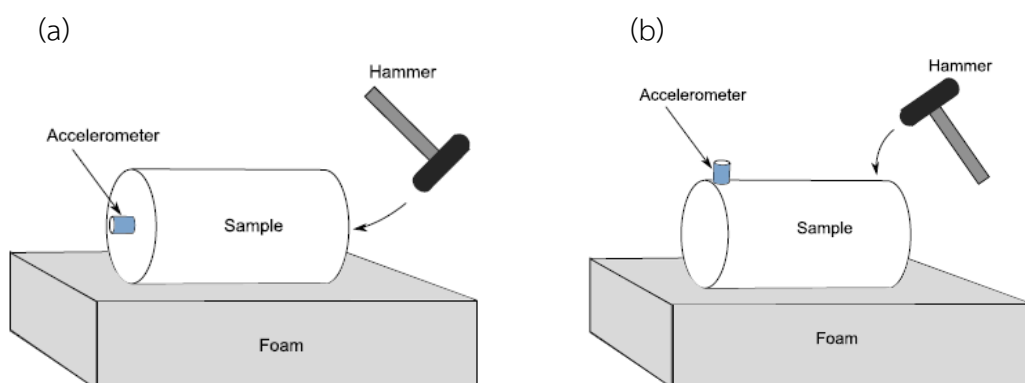


รูปที่ 2-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบน และความเค้นอัด (Lee et al., 1997)

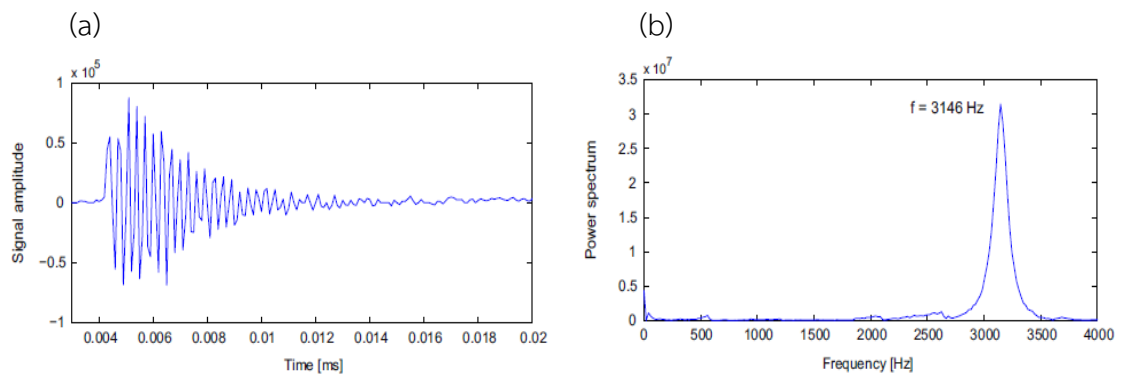
2.8 การศึกษาความเร็วเฉือนในดิน (Free-free resonant frequency method, FFR)

การทดสอบความเร็วเฉือนในดินเป็นทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมสำหรับตรวจวัดค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Young's modulus; E) และค่าโมดูลัสเฉือน (Shear modulus; G) ของดินที่มีความเชื่อมแน่น ซึ่งพฤติกรรมของความเค้นกับความเครียดมีความซับซ้อนและไม่เป็นเส้นตรง เมื่อพิจารณาที่ความเครียดน้อย ค่าของความแกร่ง (stiffness) จะมีค่ามาก ขณะที่เมื่อความเครียดเพิ่มขึ้นเข้าใกล้จุดที่จะพังค่าความแกร่งจะน้อยลง อย่างไรก็ตามจะสังเกตได้ว่าพฤติกรรมนี้จะมีค่าคงที่และมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงเมื่อพิจารณาความเครียดที่ต่ำกว่า 0.001 % (Clayton, 2011) ดังนั้นช่วงของความเครียดนี้สามารถหาได้โดยค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Young's modulus; E_0) และค่าโมดูลัสเฉือน (Shear modulus; G_0) จากการส่งสัญญาณคลื่นสั้นสะเทือน (Wave propagation-based method)

จากงานวิจัยของ Verástegui-Flores *et al.* (2015) ได้เตรียมตัวอย่างดินผสมปูนซีเมนต์เป็นรูปทรงกระบอกซึ่งมีอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ต่อความยาว (L) เท่ากับ 1:2 จากนั้นทำการประเมินค่าความถี่พื้นฐานจากการทดสอบ FFR ดังรูปที่ 2-3 (a) แสดงการติดตั้งเซนเซอร์สำหรับวัดความเร่งและค้อนทุบ เพื่อตรวจวัดค่าความถี่พื้นฐานของคลื่นสั้นสะเทือนแนวยาว (f_L) เมื่อพิจารณา รูปที่ 2-3 (b) และรูปที่ 2-4 แสดงถึงการประเมินค่าความถี่พื้นฐานตามแนวขวาง (f_T) จากรูปที่ 2-4 (a) แสดงถึงการบันทึกข้อมูลของคลื่นสั้นสะเทือนกับเวลา (Time-domain) จากนั้นทำการวิเคราะห์ในรูปแบบของความถี่ (Frequency domain) ซึ่งถูกแปลงสัญญาณคลื่นจากอนุกรมฟูเรียร์ (Fourier transform) แสดงดังรูปที่ 2-4 (b) (Verástegui-Flores *et al.*, 2015)



รูปที่ 2-3 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบความเร็วเฉือน; (a) การเตรียมตัวอย่างเพื่อหาความถี่ตามแนวยาว; (b) การเตรียมตัวอย่างเพื่อหาความถี่ตามแนวขวาง (Verástegui-Flores *et al.*, 2015)



รูปที่ 2-4 ตัวอย่างการหาค่าความถี่พื้นฐาน (Fundamental frequency); (a) การบันทึกการข้อมูลของคลื่นสั่นสะเทือนกับเวลา; (b) การแปลงผลข้อมูลให้อยู่ในรูปความถี่

(Verástegui-Flores *et al.*, 2015)

ดังนั้นการประเมินค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Young's modulus; E_0) และค่าโมดูลัสเฉือน (Shear modulus; G_0) สามารถหาได้ตามสมการที่ (2-14) และ (2-15) ดังนี้

$$E_0 = \rho v_p^2 = \rho(2Lf_L)^2 \quad (2-14)$$

$$G_0 = \rho v_s^2 = \rho(2Lf_T)^2 \quad (2-15)$$

เมื่อ

E_0 = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น

G_0 = ค่าโมดูลัสเฉือน

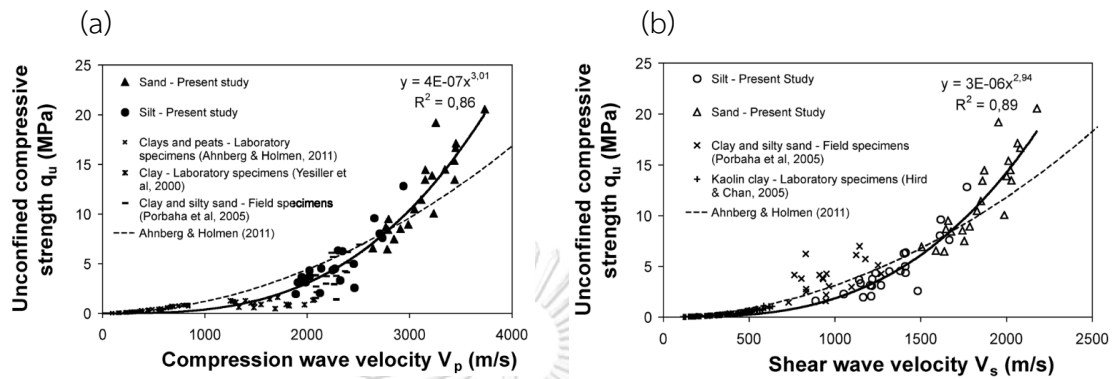
L = ความยาวของตัวอย่างดิน

f_L = ความถี่ตามแนวยาว

f_T = ความถี่ตามแนวขวาง

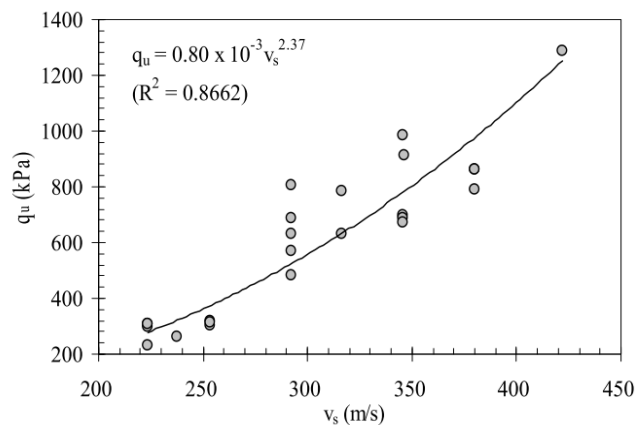
จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังทางด้านวิศวกรรมกับคลื่นความเร็วเฉือนทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารผสมเพิ่ม Guimond-Barrett *et al.* (2013) ได้ทำการวัดค่าความถี่ (Natural frequency) ของตัวอย่างดินที่ปรับปรุงคุณภาพโดยการทดสอบ FFR

พบว่าความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (P-wave) และ ความเร็วคลื่นทุติยภูมิ (S-wave) เพิ่มขึ้นอย่างไม่เป็นเส้นตรงเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัด (Unconfined compressive strength, UCS) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2-6 (a) และรูปที่ 2-6 (b) (Guimond-Barrett *et al.*, 2013)



รูปที่ 2-5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นกับกำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัด; (a,b) ความสัมพันธ์ระหว่าง P-wave และ S-wave กับ UCS ตามลำดับ (Guimond-Barrett *et al.*, 2013)

นอกจากนี้ Chan and Ch'ng (2010) ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของความเร็วคลื่นทุติยภูมิกับกำลังรับแรงอัดแกนเดียว โดยสามารถใช้ค่าการณกำลังของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และสารสกัดจากใบของสับปะรด จากรูปที่ 2-6 สังเกตได้ว่าค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเร็วคลื่นทุติยภูมิมีค่ามากขึ้น เนื่องจากตัวอย่างดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยสารผสมเพิ่มจะมีความแข็งแรงมากกว่าตัวอย่างดินที่ไม่ได้ปรับปรุงทำให้คลื่นสามารถวิ่งผ่านตัวอย่างดินได้เร็ว ดังนั้นดินที่มีอัตราส่วนผสม POC6 จะมีลักษณะแข็งและมีกำลังรับแรงมากทำให้ต้องใช้ความเร็วเฉือนมากในการที่จะทำให้ตัวอย่างพังทลาย (Chan and Ch'ng, 2010)



รูปที่ 2-6 ความสัมพันธ์ระหว่าง S-wave กับ UCS (Chan and Ch'ng, 2010)

2.9 การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและองค์ประกอบแร่ธาตุ

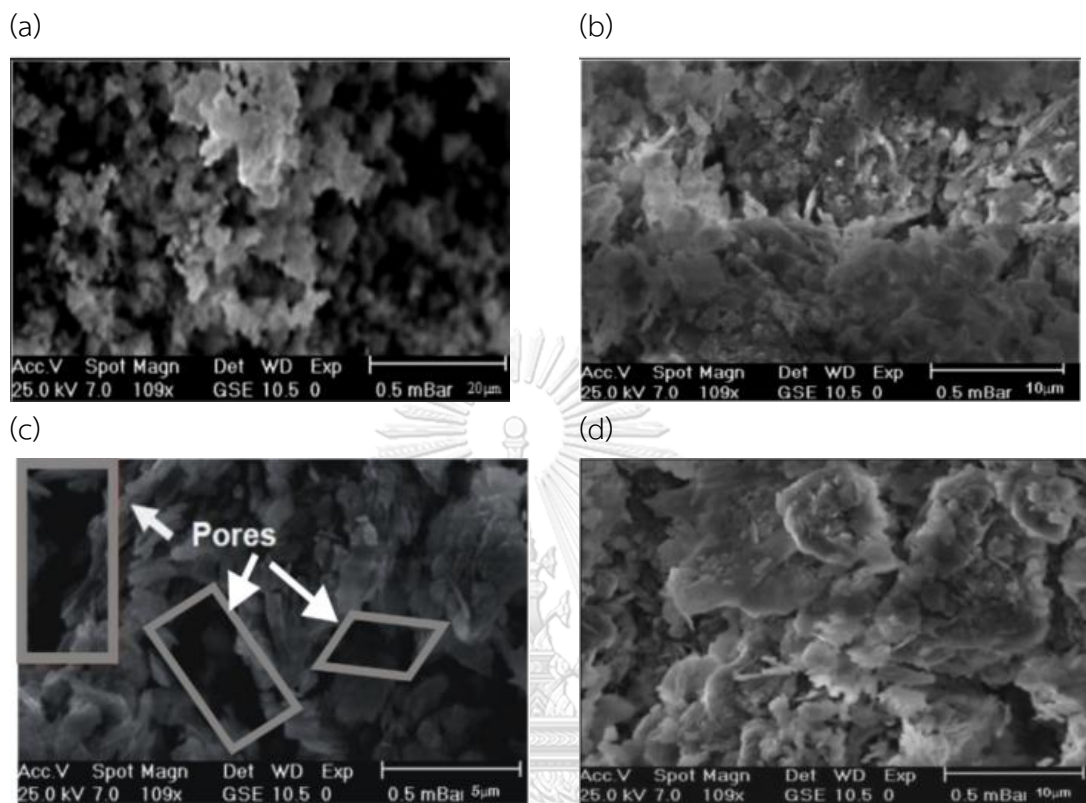
การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคเป็นการวิเคราะห์ลักษณะผิวดิน การยึดเกาะระหว่างเม็ดดิน ลักษณะโครงสร้างที่เกิดขึ้น และขนาดช่องว่างทั้งก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และปูนขาว ซึ่งการศึกษาลักษณะของโครงสร้างทางจุลภาคนี้สามารถอธิบายถึงพฤติกรรมของดินที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติพื้นฐานของดินและกำลังที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง นอกจากนี้ปริมาณขององค์ประกอบแร่ธาตุในดินยังมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยากับสารผสมเพิ่มก่อให้เกิดโครงสร้างผลึกอีกด้วย

2.9.1 การทดสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning electron microscope; SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้อิเล็กตรอนตรวจสอบวัตถุแทนแสงธรรมดา เนื่องจากความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนสั้นกว่าคลื่นแสงจึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีประสิทธิภาพสูงทั้งทางด้านกำลังขยายและรายละเอียดของภาพซึ่งสามารถวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคที่ชัดเจนมากขึ้น และยังสามารถส่องวัตถุที่เล็กขนาด 0.1 นาโนเมตร ในงานทางด้านปรับปรุงคุณภาพดินด้วยสารผสมเพิ่มเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงลักษณะผิวของดินนั้นนิยมใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) ซึ่งจะใช้อิเล็กตรอนส่องกราดไปทั่วเหลี่ยมของวัตถุ ดังนั้นภาพที่ได้จากกล้องจะมีลักษณะ 3 มิติ และแสดงบริเวณผิวนอกของวัตถุ โดยสามารถพิจารณา ๓ ตำแหน่งที่สนใจ นอกจากนั้นข้อมูลที่ได้จากการส่องกราดทำให้ทราบถึงลักษณะพื้นผิวของวัตถุ รูปร่างของอนุภาคเม็ดดิน และขนาดช่องว่างที่เกิดระหว่างเม็ดดิน

Shinawi (2017) ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินชั้นคั่นถม (Subgrade soil) ด้วยปูนขาว ซึ่งรูปที่ 2-7 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของดินและกำลังรับแรงตามระยะเวลาบ่ม จากรูปที่ 2-7 (a) แสดงลักษณะที่เป็นแป้งหยาบของปูนขาว และการจับตัวของอนุภาคดินที่ปรับปรุงด้วยปูนขาว 6% มีลักษณะเป็นแผ่นดังรูปที่ 2-7 (b) นอกจากนี้รูปที่ 2-7 (c) แสดงการรวมตัวระหว่างอนุภาคของปูนขาวและดินเหนียวละเอียดซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโครงสร้างเม็ดดินด้วยเหตุนี้จึงนำไปสู่การสังเกตเห็นการเพิ่มขึ้นของช่องว่างที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน และรูปที่ 2-7 (d) แสดงลักษณะของดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว 6% ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน จะสังเกตเห็นว่าอนุภาคเม็ดดินเกิดการเชื่อมประสานจับตัวส่งผลให้ปริมาณเม็ดดินหยาบเพิ่มมากขึ้นเนื่องจาก

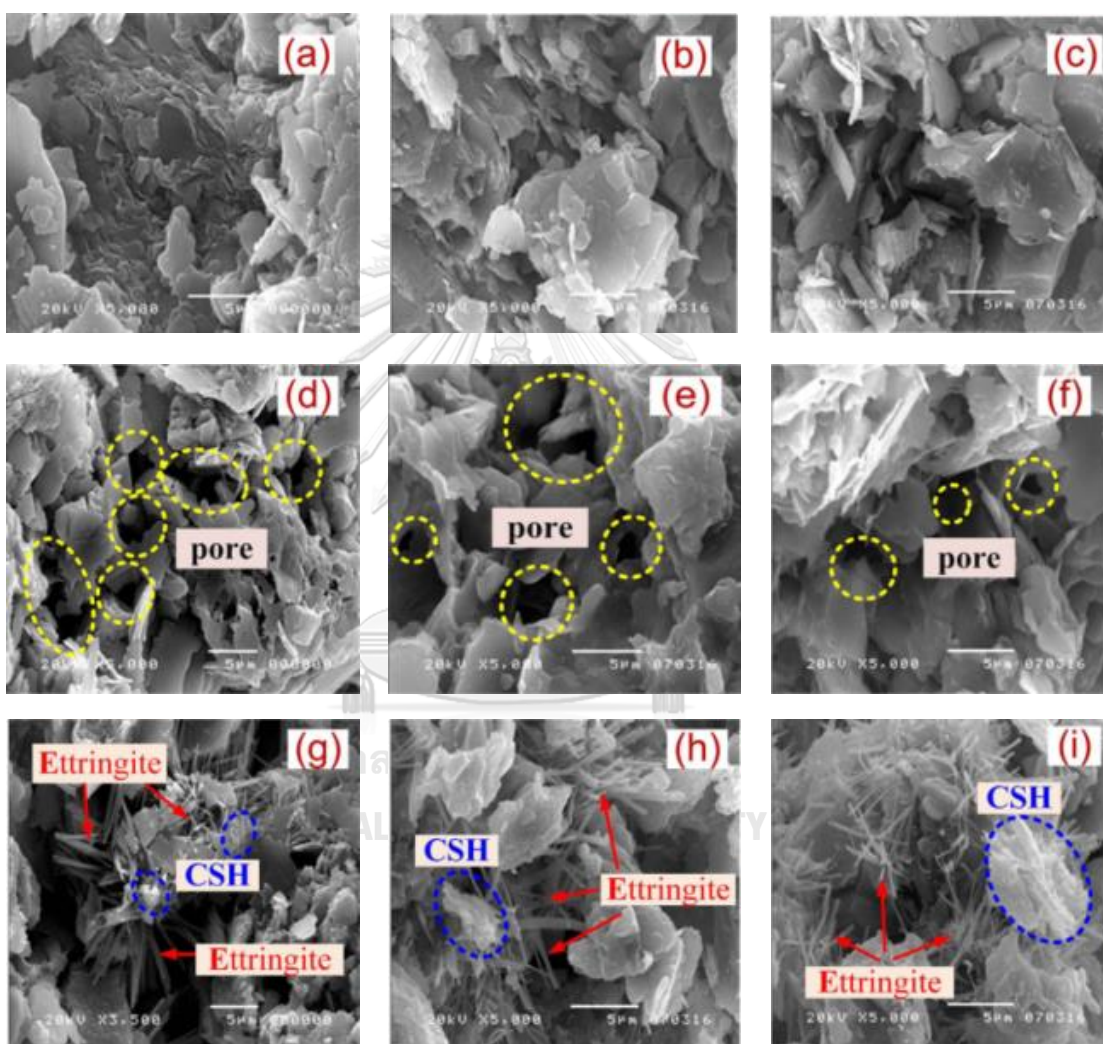
โครงสร้างเกาะกลุ่มกัน (Flocculation) ซึ่งทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคที่ลดลงและกำลังรับแรงเพิ่มขึ้นเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Shinawi, 2017)



รูปที่ 2-7 ภาพถ่าย SEM ของดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวที่ 6%; (a) ภาพถ่ายของผงปูนขาว; (b) ภาพถ่ายการจับกลุ่มเป็นแผ่น (plate) ของดินที่ปรับปรุงด้วยปูนขาว 6%; (c) ภาพถ่ายดินที่ปรับปรุงด้วยปูนขาว 6% ที่อายุบ่มหลัง 7 วัน; (d) ภาพถ่ายดินที่ปรับปรุงด้วยปูนขาว 6% ที่อายุบ่มหลัง 28 วัน (Shinawi, 2017)

งานวิจัยของ Jamsawang *et al.* (2017) ยังได้ศึกษาการเพิ่มเสถียรภาพของดินเหนียวด้วยกระบวนการผสมซีเมนต์ทั้งแบบต้นและแบบลึก นอกจากนี้ยังได้ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคทั้งก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์เพื่ออธิบายลักษณะของดินเหนียวที่มีการบวมตัวมากถึงน้อยและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น รูปที่ 2-8 (a), (b) และ (c) แสดงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของดินเหนียวก่อนแช่น้ำที่มีการบวมตัวจากมากไปน้อยตามลำดับ ซึ่งสังเกตได้ว่าดินเหนียวที่บวมตัวสูงจะมีลักษณะการวางตัวของเม็ดดินเป็นแผ่นบางเรียงตัวกันเป็นกลุ่มมากกว่าดินเหนียวที่มีการบวมตัวต่ำ รูปที่ 2-8 (d), (e) และ (f) แสดงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของดินเหนียวหลังแช่น้ำที่มีการบวมตัวจากมากไปน้อยตามลำดับ ซึ่งดินเหนียวที่มีการบวมตัวสูงเมื่อนำไปแช่น้ำจะมีช่องว่างระหว่างอนุภาคค่อนข้าง

มากกว่าดินเหนียวที่มีการบวมตัวน้อยเนื่องจากมีปริมาณของแรมอนมอริโอไนท์มาก รูปที่ 2-8 (g), (h) และ (i) แสดงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของดินเหนียวที่ปรับปรุงเสถียรภาพด้วยปูนซีเมนต์หลังนำไปแช่น้ำที่มีการบวมตัวจากมากไปน้อยตามลำดับ เมื่อปูนซีเมนต์ถูกผสมลงไปผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดขึ้นคือ CSH และ Et ซึ่งเกิดระหว่างอนุภาคดินเหนียวและเชื่อมดินเหนียวเป็นกลุ่มก้อน ซึ่งปริมาณของ Et ที่มากจะทำให้การบวมตัวของดินเหนียวลดลง (Jamsawang *et al.*, 2017)

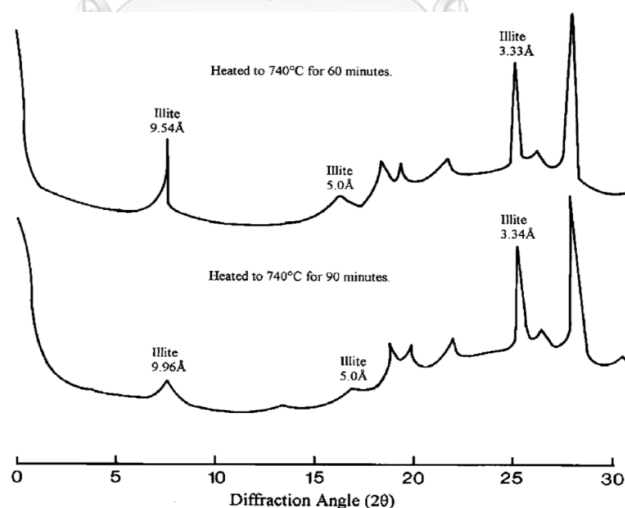


รูปที่ 2-8 การวิเคราะห์ผลลัพท์โดย SEM; (a),(b) และ (c) ภาพถ่ายลักษณะของดินเหนียวก่อนนำไปแช่น้ำที่มีการบวมตัวจากมากถึงน้อย; (d),(e) และ (f) ภาพถ่ายลักษณะของดินเหนียวหลังนำไปแช่น้ำที่มีการบวมตัวจากมากถึงน้อย; (g),(h) และ (i) ภาพถ่ายลักษณะของดินเหนียวที่ปรับปรุงเสถียรภาพด้วยซีเมนต์หลังนำไปแช่น้ำที่มีการบวมตัวจากมากถึงน้อย (Jamsawang *et al.*, 2017)

2.9.2 การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer; XRD)

เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันอาศัยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบแร่ สามารถแยกแยะและบ่งบอกชนิดของสารประกอบได้โดยการตรวจวัดความเข้มของรังสีที่สะท้อนกลับออกมาแล้วเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐาน เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิดจะมีระนาบของอะตอมและลักษณะของโครงสร้างผลึกที่ต่างกันไป ทำให้สารประกอบที่เกิดขึ้นแต่ละชนิดมีรูปแบบเอกลักษณ์เฉพาะตัว นอกจากนี้การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ยังสามารถคำนวณหาอนุภาคของแต่ละหน่วยเซลล์ ความเครียด และค่าความเป็นผลึกของตัวอย่าง

Al-Rawas *et al.* (2005) ได้ทำการศึกษาผลกระทบการบวมตัวของดินเหนียวโดยการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว ปูนซีเมนต์ และดินเหนียวที่ถูกเผาให้แตกเป็นผง จากรูปที่ 2-9 แสดงการเปลี่ยนแปลงของแร่ธาตุที่เกิดจากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 740 °C เป็นเวลา 60 และ 90 นาที แร่ธาตุที่เปลี่ยนแปลงไปสามารถหาได้จากการทดสอบ XRD ซึ่งจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าแร่มอนโมริโอไนต์และเคโอลิไนต์เมื่อเผาที่อุณหภูมินี้แร่ทั้งสองชนิดนี้จะถูกกำจัดออกไป แต่อย่างไรก็ตามสามารถสังเกตเห็นแร่ฮิลไลท์ได้เนื่องจากอุณหภูมิที่แร่ฮิลไลท์จะสลายตัวไปอยู่ที่ 800-1000 °C (Al-Rawas *et al.*, 2005)



รูปที่ 2-9 รูปแบบที่สะท้อนจากรังสีเอ็กซ์ของดินที่ปรับปรุงด้วยความร้อน (Al-Rawas *et al.*, 2005)

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

กระบวนการในงานวิจัยนี้ได้อธิบายถึงรายละเอียดและขั้นตอนการดำเนินงานในการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงทางวิศวกรรมของดินบวมตัวแม่เมาะ ทั้งก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาวประเภทไฮเดรตไลม์ ได้แก่ การทดสอบกำลังแรงอัดแบบไม่จำกัด (Unconfined compression test) การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient modulus test) และการทดสอบความเร็วเฉือนในดิน (Free-Free resonant frequency method) และการทดสอบแคลิฟอร์เนีย แบริง เรโซ (CBR) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาทางด้านโครงสร้างทางจุลภาคของดินโดยการทดสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) และการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) เพื่ออธิบายพฤติกรรมของดินที่เปลี่ยนแปลงไป

3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

1. เก็บตัวอย่างดินเหนียวบวมตัวจากเหมืองแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
2. ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวและปัจจัยที่มีผลต่อการบวมตัวของดินเหนียว
3. ศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของปูนขาวและปูนซีเมนต์ที่มีผลกระทบต่อ การบวมตัวของดินเหนียว
4. เลือกอัตราส่วนผสมของปูนขาวและปูนซีเมนต์กับดินเหนียว เพื่อนำมาใช้ในการทดสอบ
5. ศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติพื้นฐาน กำลัง และโครงสร้างทางจุลภาคของดินทั้งก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวและปูนซีเมนต์ ในอัตราส่วนที่เหมาะสม
6. วิเคราะห์ผลการทดสอบเพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวบวมตัวด้วยปูนขาวและปูนซีเมนต์
7. วิเคราะห์และอภิปรายผลการทดสอบ

3.2 การศึกษาลักษณะดินและการเลือกใช้สารผสมเพิ่ม

3.2.1 การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียว

งานวิจัยนี้ได้นำดินเหนียวบวมตัวจากเหมืองแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มาทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานตามมาตรฐาน ASTM และ IS ดังแสดงในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานตามมาตรฐาน ASTM และ IS code specification

การทดสอบ	มาตรฐานการทดสอบ
การวิเคราะห์หาขนาดเม็ดดิน	ASTM D 422
การทดสอบหาขีดจำกัดของอัตราเตอร์เบอร์ก	ASTM D 4318
การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของดิน	ASTM D854
การทดสอบการบดอัด	ASTM D 1557
การทดสอบหาการบวมตัวอิสระ	IS 2720 (part 40)

3.2.2 การศึกษาคุณสมบัติของสารผสมเพิ่ม

งานวิจัยนี้ศึกษาคุณสมบัติของสารผสมเพิ่มได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ ปูนขาวไฮเดรต (Hydrated lime) โดยปูนขาวนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เคมีแมน จำกัด นอกจากนี้ยังได้ศึกษาและเปรียบเทียบผลกระทบของสารผสมเพิ่มที่มีต่อดินเหนียวบวมตัวใน อัตราส่วนต่างๆ ทั้งด้านคุณสมบัติพื้นฐาน กำลัง และการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างภายใน

3.3 การเตรียมตัวอย่างและขั้นตอนการทดสอบ

สำหรับการเตรียมตัวอย่างและขั้นตอนการทดสอบแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน การทดสอบด้านกำลัง และการศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาค

3.3.1 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน

การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานได้แก่ การวิเคราะห์หาขนาดเม็ดดิน การทดสอบหาขีดจำกัดของอัตราเตอร์เบอร์ก การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะ การทดสอบการบดอัด และการทดสอบการบวมตัวอิสระ โดยแต่ละการทดสอบทำซ้ำเป็นจำนวน 5 ครั้ง

3.3.1.1 การวิเคราะห์หาขนาดเม็ดดิน (Particle size analysis of soils)

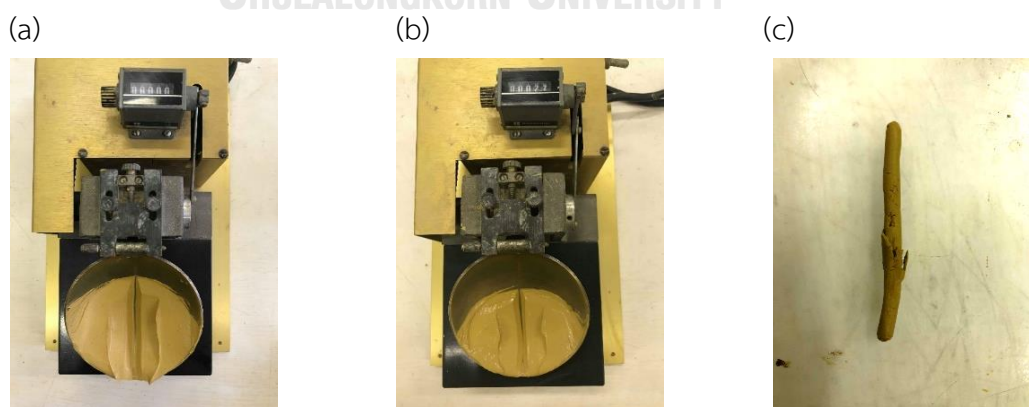
การวิเคราะห์หาขนาดเม็ดดินนั้นแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานแบบเปียก และส่วนที่สองคือการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานแบบแห้ง โดยการทดสอบนี้นำดินเหนียวแห้งปริมาณ 500 กรัมใส่ภาชนะและเติมน้ำให้ท่วมดินเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้เม็ดดินแตกตัว หลังจากนั้นนำดินที่แช่ไว้ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 โดยทำการเปิดน้ำล้างดินแล้วใช้มือลูบบนตะแกรงให้เม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 200 ผ่านลงไป ล้างดินจนกระทั่งตะกอนหมดไปหรือน้ำที่ผ่านตะแกรงใส จากนั้นนำดินที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 200 เทใส่ถ้วยแล้วนำไป

เข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 110 ± 5 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำดินที่อบแห้งมาทำการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานแบบแห้ง เบอร์ 4, 10, 20, 40, 100, 200 และถัด ตามลำดับ ด้วยเครื่องสั่นเป็นเวลา 10 นาที โดยบันทึกน้ำหนักตะแกรงก่อนร่อนและน้ำหนักตะแกรงรวมดินที่ค้างอยู่บนตะแกรงแต่ละขนาด หลังทำการทดสอบ

3.3.1.2 การทดสอบหาขีดจำกัดของอัตราเตอร์เบอร์ก (Atterberg's limit test)

การทดสอบหาค่าพิกัดสถานะความคงตัวของดินแบ่งออกเป็น 2 การทดสอบ ได้แก่ การทดสอบหาค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid limit) และขีดจำกัดพลาสติก (Plastic limit) ซึ่งดินที่นำมาใช้ในการทดสอบอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 ± 5 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ตัวอย่างดินที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ประมาณ 150 กรัม ถูกนำมาทดสอบหาค่าขีดจำกัดเหลว โดยเทดินลงในถ้วยกระเบื้องพร้อมกับเติมน้ำลงไป จากนั้นใช้ที่ปาดดินคลุกเคล้าดินกับน้ำให้เข้ากันแล้วจึงนำดินใส่ลงในถ้วยกระเบื้อง ใช้ที่ปาดดินกดและปาดดินเพื่อไล่ฟองอากาศด้านในออก ทำการกรีดร่องดินตรงกลาง หลังจากนั้นทำการเคาะจนกระทั่งดินเคลื่อนที่เข้ามาสัมผัสกันเป็นระยะยาว 12.7 มม. ทำการบันทึกจำนวนครั้งที่เคาะ และเก็บตัวอย่างดินที่แนบติดกันไปอบเพื่อหาความชื้น หลังจากนั้นทำการเพิ่มปริมาณน้ำที่ละน้อยจนกระทั่งได้ช่วงที่เหมาะสม (จำนวนเคาะควรอยู่ระหว่าง 15-40 ครั้ง)

การทดสอบหาค่าขีดจำกัดพลาสติก ทำได้โดยนำดินส่วนที่เหลือจากการทดสอบหาขีดจำกัดเหลว โดยทำการปั้นดินเหนียวให้เป็นรูปยาวรีคึ่งดินให้เป็นเส้นบนแผ่นกระจก โดยใช้น้ำหนักกดเบาๆ ให้ดินมีเส้นผ่านศูนย์กลางสม่ำเสมอประมาณ 3.2 มม. ทำการคลึงจนกระทั่งสังเกตเห็นรอยแตกร้าวบริเวณผิวดิน จากนั้นนำดินไปอบเพื่อหาความชื้น



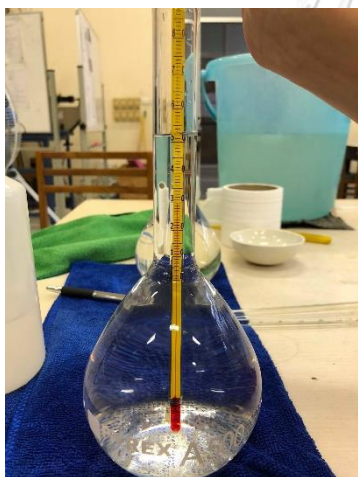
รูปที่ 3-1 การทดสอบหาค่าพิกัดสถานะความคงตัวของดิน; (a, b) ตัวอย่างดินในการทดสอบหาค่าขีดจำกัดเหลวก่อนและหลังเคาะ ตามลำดับ; (c) การทดสอบหาค่าขีดจำกัดพลาสติก

3.3.1.3 การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของดิน (Specific gravity test)

ดินที่ใช้ในการทดสอบหาความถ่วงจำเพาะร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ซึ่งก่อนการทดสอบ ขวดปรับปริมาตรขนาด 500 มล. ถูกสอบเทียบโดยการเทน้ำกลั่นลงในขวด จากนั้นให้ความร้อนโดยการนำขวดปรับปริมาตรไปต้มเพื่อไล่ฟองอากาศในน้ำออกให้หมด แล้วทำการวัดอุณหภูมิของน้ำในช่วง 18-30°C ประมาณ 5 จุด เมื่อได้อุณหภูมิตามที่ต้องการนำขวดปรับปริมาตรไปชั่งน้ำหนักและบันทึกค่า จากนั้นนำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักน้ำรวมขวดกับอุณหภูมิ

เมื่อทำการสอบเทียบขวดปรับปริมาตรเสร็จแล้ว ทำการเทดินลงไปในขวดปรับปริมาตรและเทน้ำกลั่นจนท่วมดินแต่ไม่ถึงปริมาตร 500 มล. (กรณีดินเหนียวให้ทำการแช่ดินประมาณ 12 -24 ชั่วโมง เพื่อให้ดินเหนียวดูดซับน้ำจนหมด) หลังจากแช่ดินแล้ว ทำการปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มล. จากนั้นทำการให้ความร้อนแก่ดินโดยการนำไปต้มเพื่อไล่ฟองอากาศในดินออก และทำการบันทึกอุณหภูมิพร้อมกับบันทึกน้ำหนักขวดที่มีน้ำและดินเช่นเดียวกันกับการสอบเทียบด้านบน

(a)



(b)



รูปที่ 3-2 การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของดิน; (a) การสอบเทียบขวดปรับปริมาตร; (b) การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของดิน

3.3.1.4 การทดสอบการบดอัด (Compaction test)

การทดสอบการบดอัดที่ใช้การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified proctor test) โดยดินที่นำมาใช้ต้องนำไปอบแห้งและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 โดยการบดอัด 1 โมล ใช้ตัวอย่างดินประมาณ 3 กิโลกรัม การทดสอบนี้ใช้โมลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.36 มม. และเมื่อเตรียมดินกับโมลเสร็จแล้วทำการผสมน้ำลงไปคลุกเคล้ากับดินให้เป็นเนื้อเดียวกันจากนั้นนำดินที่คลุกเคล้าแล้ว เทใส่โมลที่เตรียมไว้ และทำการบดอัดดินด้วยค้อนหนัก 10 ปอนด์ บดอัด 5 ชั้น ชั้นละ 25 ครั้ง หลังจากนั้นใช้เหล็กปาดดินให้พอดีกับโมล นำโมลที่มีดินอยู่ไปชั่งน้ำหนักและบันทึกค่าพร้อมทำการเก็บตัวอย่างดินด้านบนและด้านล่างเพื่อหาความชื้นเฉลี่ย จากนั้นนำดินที่อยู่ในโมลออก แล้วเพิ่มปริมาณน้ำลงไปดิน โดยเพิ่มปริมาณน้ำ 2 -3 เปอร์เซ็นต์ต่อครั้ง ทำการบดอัดซ้ำจนความหนาแน่นลดลง แล้วจึงหยุดการทดสอบ หลังจากนั้นเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณเปอร์เซ็นต์น้ำ



รูปที่ 3-3 การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

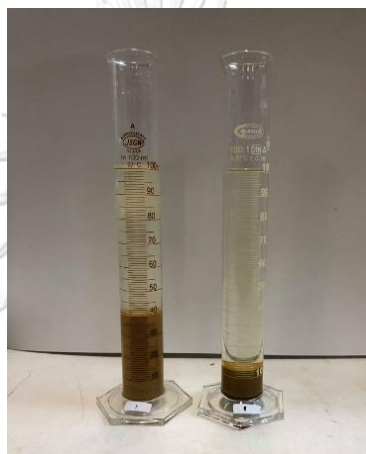
3.3.1.5 การทดสอบหาการบวมตัวอิสระ (Free swell index test)

การทดสอบหาการบวมตัวอิสระ แสดงดังรูปที่ 3-4 ดินที่ใช้ในการทดสอบอบแห้งที่อุณหภูมิ $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมงและทำการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 10 ประมาณ 20 กรัม จากนั้นทำการเทดินลงในขวดกระบอกตวง ขนาด 100 มล. โดยเทดินใส่กระบอกละ 10 กรัมเป็นจำนวนสองกระบอก กระบอกแรกปรับปริมาตรให้ถึง 100 มล. ด้วยน้ำกลั่น (Distilled water) ส่วนกระบอกที่สองปรับปริมาตรด้วยน้ำมันก๊าด (Kerosene) ใช้แท่งแก้วคนสารคนเพื่อให้เม็ดดินแตกตัว หลังจากนั้นตั้งกระบอกตวงทั้งสองไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการเปรียบเทียบปริมาตรของดินระหว่างกระบอก

ดวงทั้งสองแล้วบันทึกค่าโดยค่าดัชนีการบวมตัวอิสระ (Free swell index, FSI) หาได้ดังสมการที่ (3-1)

$$FSI(\%) = \left(\frac{V_d - V_k}{V_k} \right) \times 100 \quad (3-1)$$

เมื่อ V_d = ปริมาตรของดินที่แช่ในน้ำกลั่น
 V_k = ปริมาตรของดินที่แช่ในน้ำมันก๊าด



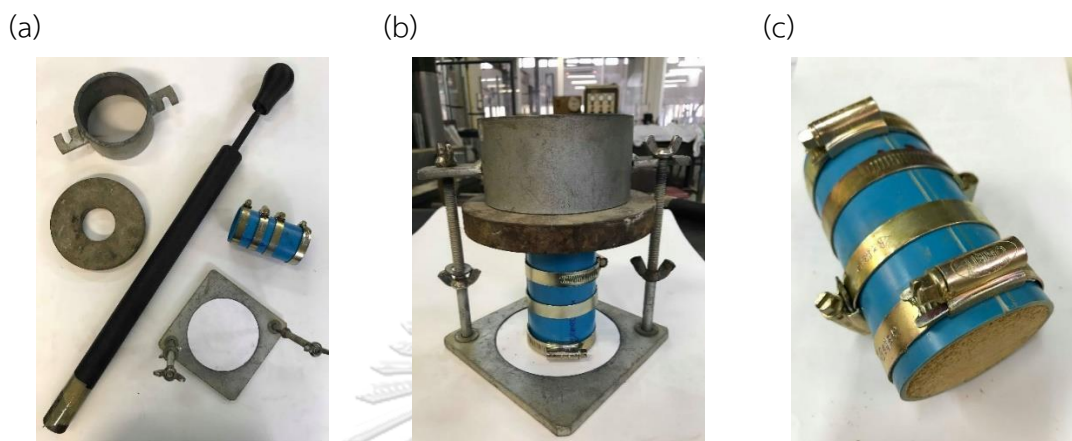
รูปที่ 3-4 การทดสอบหาค่าการบวมตัวอิสระเปรียบเทียบระหว่างน้ำกลั่นและน้ำมันก๊าด

3.3.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลัง

ตัวอย่างทรงกระบอกใช้ในการทดสอบกำลังแรงอัดแกนเดียว การทดสอบความเร็วเฉือนในดิน และการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว โดยแต่ละการทดสอบทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง ที่มีอัตราส่วนระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกับความสูงเท่ากับ 1:2 ซึ่งโมล PVC ที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. สูง 100 มม. แสดงดังรูปที่ 3-5 (a) โดยการประกอบโมลที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3-5 (b) การเตรียมตัวอย่างดินที่จะทำการผสมต้องนำดินแห้งร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 เพื่อใช้ในการผสมกับปูนขาวและปูนซีเมนต์ที่มีอัตราส่วนต่างๆ และการเตรียมตัวอย่างด้วยโมล PVC ได้นำปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content) และความหนาแน่นแห้ง (Dry density) จากการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction test)

โดยแต่ละอัตราส่วนผสม ทำการคลุกเคล้าดินกับสารผสมเพิ่มจนเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วจึงนำดินกับสารผสมเพิ่มใส่ลงไปในโมล PVC จากนั้นทำการบดอัดด้วยค้อนตามวิธีพลังงาน โดยงานวิจัยนี้ได้ทำ

การย่อขนาดของค้อนเหล็กกลึงซึ่งจำนวนชั้นที่ใช้ในการบดอัดทั้งหมด 3 ชั้น บดอัดชั้นละ 40 ครั้ง (เทียบเท่ากับการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน) เมื่อทำการขึ้นตัวตัวอย่างเสร็จแล้วทำการบ่มตัวอย่างด้วยการห่อพลาสติกซึ่งแสดงดังรูปที่ 3-5 (c)



รูปที่ 3-5 อุปกรณ์ที่ใช้และการประกอบโมลสำหรับการทดสอบ; (a) อุปกรณ์สำหรับการบดอัดดิน; (b) การประกอบโมลที่ใช้สำหรับการทดสอบ; (c) บ่มตัวอย่างดินด้วยพลาสติก

3.3.3 การทดสอบคุณสมบัติด้านกำลัง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาคูณสมบัติด้านกำลังของดินเหนียววมตัวทั้งก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวและปูนซีเมนต์ โดยการทดสอบแบ่งออกเป็น การทดสอบแคลิฟอร์เนีย แบบรีจเรโซ การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว การทดสอบความเร็วเฉือนในดิน และการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว ซึ่งอัตราส่วนผสมระหว่างดินกับปูนซีเมนต์และปูนขาวในงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 3-2

ปริมาณปูนซีเมนต์ (%) ต่อน้ำหนักดิน	ปริมาณปูนขาว (%) ต่อน้ำหนักดิน
0	0
6	6
8	8
10	10
12	12

3.3.3.1 การทดสอบ California bearing ratio test (CBR)

การเตรียมตัวอย่างทั้งก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพ ทำได้โดยร่อนดินตัวอย่างผ่านตะแกรงเบอร์ 4 จากนั้นนำดินมาผสมกับปูนซีเมนต์และปูนขาวที่อัตราส่วนต่างๆ จากนั้นทำการบดอัดดินด้วยค้อน โดยบดอัด 5 ชั้น ชั้นละ 56 ครั้ง โดยใช้โมลขนาด 6 นิ้ว สูง 7 นิ้ว ประกอบกับแท่งรองโลหะและปลอกครอบ และใช้กระดาษกรองวางบนแท่งรองโลหะ เมื่อบดอัดตัวอย่างเสร็จทำการถอดปลอกครอบและปาดตัวอย่างดินให้เรียบเสมอขอบโมล จากนั้นนำตัวอย่างดินมาชั่งน้ำหนักเพื่อหาความหนาแน่นเปียกพร้อมทั้งทำการบ่มตัวอย่างดิน จากนั้นทำการทดสอบแบบวิธีแช่น้ำ (Soaked CBR test) โดยการทำให้แผ่นวัดการขยายตัวพร้อมโลหะถ่วงน้ำหนักจำนวน 2 อัน สำหรับวัสดุพื้นทาง วัสดุรองพื้นทาง และวัสดุคัดเลือก ส่วนวัสดุดินคันถมใช้ 3 อัน วางบนตัวอย่างดินที่บดอัดไว้ แล้วนำตัวอย่างดินลงไปแช่น้ำให้ท่วมตัวอย่าง วางก้านสามขา (Tripod) สวมเกจวัดระยะเพื่อวัดการขยายตัวและอ่านค่าเกจวัดระยะทุกวัน เมื่อตัวอย่างแช่น้ำครบ 4 วัน ทำการยกตัวอย่างขึ้นจากน้ำแล้วนำตัวอย่างดินมาวางที่เครื่องกดเพื่อทำการทดสอบ Penetration test นำตัวอย่างวางให้ท่อนกดเข้าพอดีกับโลหะถ่วงน้ำหนัก หลังจากนั้นทำการปรับเกจวัดแรงและเกจวัดระยะให้เข็มทั้งสองอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์ แล้วจึงทำการกดตัวอย่างด้วยเครื่องกดอัตโนมัติด้วยอัตราเร็ว 0.05 นิ้ว ต่อนาที ทำการอ่านค่าน้ำหนักกดที่การยุบตัว 0, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.30, 0.40 และ 0.50 นิ้ว

3.3.3.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัด (Unconfined compression test)

การทดสอบนี้ใช้วิธีการควบคุมด้วยความเครียด (Strain) โดยดินตัวอย่างที่อายุครบการบ่มที่ 7, 28, 60 และ 90 วัน จะถูกวางตรงกลางแท่นรองของเครื่องกลโดยนำแผ่นอะคริลิกประกบทั้งด้านบนและด้านล่างของดินตัวอย่าง จากนั้นทำการปรับเกจวัดการเคลื่อนตัวและเกจวัดแรงให้เข็มชี้ที่เลขศูนย์ แสดงดังรูปที่ 3-6 ทำการกดตัวอย่างด้วยอัตราเร็วคงที่ บันทึกน้ำหนักกดและระยะเคลื่อนที่ลงทุก 15 วินาที เมื่อน้ำหนักกดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งน้ำหนักกดลดลงหรือเข็มวัดแรงติดย้อนกลับให้ทำการบันทึกค่าอีก 4-5 ค่า ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำหนักกดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เข็มวัดแรงไม่มีการติดกลับให้ใช้เข็มควบคุมค่าความเครียดของดินตัวอย่างที่ 20 % จึงทำการหยุดการทดสอบ (ควรบันทึกค่าอย่างน้อย 10 ค่า) วัดมูรอยแตกร้าวเทียบกับแนวนอน (ถ้ามี) และนำตัวอย่างไปหาค่าความชื้นหลังการทดสอบ



รูปที่ 3-6 การเตรียมตัวอย่างดินเพื่อทำการทดสอบแบบไม่จำกัดแรง

3.3.3.3 การทดสอบหาความเร็วเฉือนในดิน (Free-Free resonant frequency method)

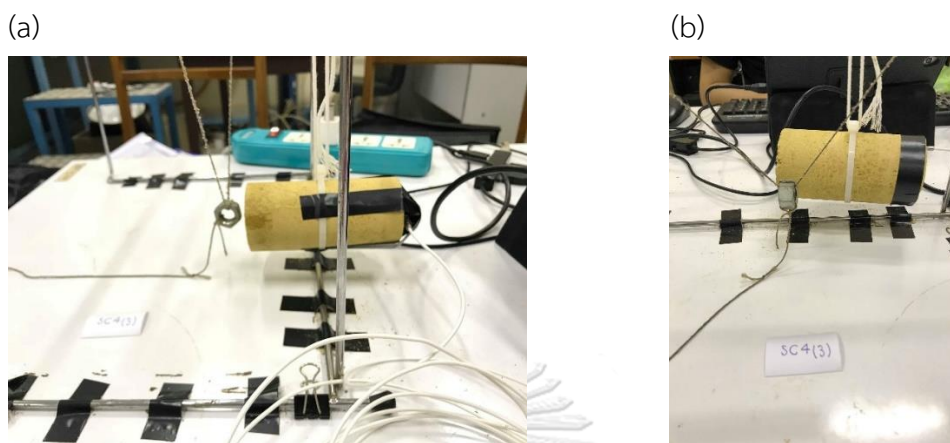
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบนี้

1. อุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณไฟฟ้าแบบ Integrated Electronics Piezo-Electric (IEPE)
2. เซ็นเซอร์วัดความเร็วคลื่น (Accelerometer)
3. น็อตตัวเมียที่ใช้สำหรับเป็นตัวกำเนิดคลื่น
4. โครงเหล็กดัดแปลงสำหรับติดตั้งตัวอย่างดิน

วิธีการทดสอบ

นำตัวอย่างที่ครบอายุการบ่มที่ 7 28 60 และ 90 วัน แขนงกับโครงเหล็ก โดยให้ตัวอย่างลอยขึ้นจากพื้น จากนั้นทำการติดเซ็นเซอร์วัดความเร็วคลื่นกับตัวอย่างดินโดยทดสอบหาค่าความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (P-wave) และความเร็วคลื่นทุติยภูมิ (S-wave) สำหรับการติดตั้งเพื่อหาค่าความเร็ว P-wave ทำการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเร็วบริเวณปลายที่ขนานกับด้านยาวของตัวอย่าง (Longitudinal wave) แล้วทำการเคาะตัวอย่างบริเวณด้านปลายตรงกันข้ามกับเซ็นเซอร์ ในทางกลับกันการติดตั้งเพื่อหาค่าความเร็ว S-wave ทำการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเร็วบริเวณปลายตัวอย่างทิศทางตั้งฉากกับด้านยาวของตัวอย่างทดสอบ (Transversal wave) แสดงในรูปที่ 3-7 ซึ่งทั้งสองการทดสอบนี้ทำการเคาะโดยใช้น็อตตัวเมียเป็นตัวส่งสัญญาณหาเซ็นเซอร์วัดความเร็ว และทำการเคาะ 50 ครั้ง ในแต่ละ

การทดสอบหาความเร็ว จากนั้นทำการบันทึกค่าความถี่ตามยาว (Longitudinal frequency, f_L) และความถี่ตามขวาง (Transversal frequency, f_T) ที่สังเกตได้



รูปที่ 3-7 การเตรียมตัวอย่างดินในการทดสอบหาความเร็วเฉือนในดิน; (a) การเตรียมตัวอย่างดินเพื่อหาความเร็วแบบ P-wave; (b) การเตรียมตัวอย่างดินเพื่อหาความเร็วแบบ S-wave

3.3.3.4 การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient modulus test)

ตัวอย่างดินที่ครบอายุบ่มที่ 7, 28, 60 และ 90 วัน จะถูกนำวางบนแท่นรองที่มีความขรุขระประกบทั้งด้านบนและด้านล่างของตัวอย่าง จากนั้นห่อหุ้มตัวอย่างดินด้วยเมมเบรน เพื่อให้ตัวอย่างดินรับแรงด้านข้างเท่ากันสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 3-8 (a) นำตัวอย่างเข้าเครื่องทดสอบ ทำการติดตั้งอุปกรณ์ลูกสูบสำหรับให้แรงในแนวแกนและเครื่องวัดระยะ Linear variable differential transformer (LVDT) จำนวน 2 ตัว ซึ่งเครื่องวัดระยะ LVDT ควรจะติดตั้งเป็นเส้นทแยงมุมระหว่างกัน แสดงในรูปที่ 3-8 (b) เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงรูปร่างให้มีลักษณะคงที่ เมื่อทำการติดตั้งตัวอย่างเสร็จแล้วจึงเริ่มการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ 14 kN Dynamic UTM การประมวลผลของเครื่องจะเริ่มจากลำดับที่ 1 ถึงลำดับที่ 15 ซึ่งแต่ละลำดับจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าแรงดันด้านข้าง (Confining stress) และ ความเค้นเบี่ยงเบน (Deviator stress) โดยใช้อุปกรณ์วัดค่าแรง (Loading cell) ในการตรวจวัดซึ่งรูปแบบช่วงเวลาของการให้แรงจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงที่แรกเป็นการให้แรงกระทำต่อตัวอย่าง 0.1 วินาที และช่วงที่สองเป็นการหยุดให้แรง 0.9 วินาที ซึ่งช่วงเวลาที่กระทำนี้จะกระทำในแต่ละรอบ (Cycle) และถูกแสดงในฟังก์ชันของ Haversine shape function โดยสถานะและลำดับของความเค้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะแสดงดังตารางที่ 3-3 การทดสอบนี้จะสิ้นสุดเมื่อตัวอย่างที่ทดสอบเกิดการพัง หรือจนกระทั่งความเครียดของตัวอย่างมีค่าเท่ากับร้อยละ 5

(a)



(b)



รูปที่ 3-8 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว; (a) การห่อหุ้มตัวอย่างดินด้วยเมมเบรน; (b) การติดตั้งอุปกรณ์ก่อนเริ่มทำการทดลอง

ตารางที่ 3-3 ลำดับการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวของชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทาง (AASHTO T307, 2007)

Sequence no.	Confining stress (σ_3) kPa	Deviator stress (σ_d) kPa	No. of load application
0	103.4	93.1	500
1	20.7	18.6	100
2	20.7	37.3	100
3	20.7	55.9	100
4	34.5	31	100
5	34.5	62	100
6	34.5	93.1	100
7	68.9	62.0	100
8	68.9	124.1	100
9	68.9	186.1	100
10	103.4	62.0	100
11	103.4	93.1	100
12	103.4	186.1	100
13	137.9	93.1	100
14	137.9	124.1	100
15	137.9	248.2	100

3.3.4 การทดสอบคุณสมบัติด้านโครงสร้างจุลภาค

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติด้านโครงสร้างจุลภาคเพื่อศึกษาพฤติกรรมของดินเหนียวบวมตัวทั้งก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาวโดยทำการทดสอบ ดังนี้

3.3.4.1 การทดสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning electron microscope; SEM)

หลังจากการทดสอบกำลังอัดแบบไม่จำกัด ทบตัวอย่างดินให้เป็นเศษผงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.5 – 3 มม. จากนั้นใช้ซิลิกาเจล (Silica gel) ดูดความชื้นของตัวอย่างดินให้แห้ง จากนั้นนำเทปขาวสองหน้ามาติดบนแท่นติดชิ้นงาน (Specimen stub) แล้วนำตัวอย่างดินมาห้ห้ครึ่งด้านที่ห้กจะถูกศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผิว ส่วนด้านผิวนอกจะทำการสกัดให้เรียบแล้ววางบนแท่นติดชิ้นงาน ทำการตัดเทปขาวสองหน้าความยาวประมาณ 20 มม. หนาประมาณ 1 มม. พาดรัดตัวอย่างดินกับแท่นติดชิ้นงาน เพื่อให้ชิ้นงานไม่เกิดการขยับใช้ลูกยางเป่าเศษฝุ่นที่ติดบริเวณผิวดินออก เมื่อทำการเตรียมตัวอย่างเสร็จแล้วนำตัวอย่างดินไปเคลือบทองด้วยเครื่องฉาบทอง (Sputter coater) ประมาณ 20-30 นาที แสดงในรูปที่ 3-9 เมื่อเคลือบทองเสร็จแล้วนำตัวอย่างไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ที่กำลังขยาย 250 -20000 เท่า เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง นอกจากนี้สามารถวิเคราะห์สารประกอบธาตุด้วยเครื่อง Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) โดยปล่อยรังสีอิเล็กตรอนลงไปในบริเวณที่สนใจเพื่อตรวจสอบปริมาณของสารประกอบ เมื่อรังสีอิเล็กตรอนสะท้อนกลับจะแสดงคลื่นที่มีลักษณะเฉพาะของสารประกอบนั้นออกมา

(a)



(b)



รูปที่ 3-9 การเตรียมตัวอย่างดินในการทดสอบโครงสร้างทางจุลภาค (SEM); (a) เครื่องฉาบทอง; (b) ตัวอย่างดินที่ถูกเคลือบทอง

3.3.4.2 การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer; XRD)

หลังจากการทดสอบกำลังอัดแบบไม่จำกัด ทบตัวอย่างดินให้เป็นเศษผง จากนั้นทำการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 และดูความชื้นด้วยซิลิกาเจล นำตัวอย่างดินมาทดสอบวิเคราะห์ศึกษาโครงสร้างผลึกของสารประกอบอาศัยองค์ความรู้ในการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในการระบุองค์ประกอบและโครงสร้างของสารที่มีอยู่ในตัวอย่างทั้งก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาว โดยใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD)

3.3.4.3 การศึกษาการเรืองของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Fluorescence; XRF)

โดยส่วนใหญ่การวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ จะวิเคราะห์ธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่าง ซึ่งตัวอย่างจะต้องร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 และไม่มี ความชื้น ในงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ธาตุหลักใน ดินเหนียว ปูนซีเมนต์ และปูนขาว การวิเคราะห์นี้ทำโดยการยิงรังสีเอ็กซ์ลงบนตัวอย่าง จากนั้นตัวอย่างจะคายพลังงานออกมาซึ่งจะแสดงค่าพลังงานหนึ่งที่สูงอยู่กับธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างนั้น และสามารถแยกธาตุแต่ละชนิดออกมาได้

จากการทดสอบที่กล่าวมาข้างต้น จึงขอสรุปรายการการทดสอบในงานวิจัยนี้ ดังตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3-4 ตารางแสดงรายการการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้น คุณสมบัติด้านกำลังและโครงสร้าง

ทางจุลภาค	6%		8%		10%		12%		
การทดสอบ	S	SC	SL	SC	SL	SC	SL	SC	SL
การทดสอบแคริฟอร์เนีย แบริ่ง เรโซ						✓	✓		
การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
การทดสอบหาค่าความเร็วคลื่นที่เดิน	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ทางผ่านตัวอย่างดินด้วยการทดสอบด้วย									
วิธีการสันฟองปลายอิสระ									
การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
การทดสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้อง	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
จุลทรรศน์อิเล็กตรอน									
EDS						✓	✓		
การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์		✓	✓			✓	✓		

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการปรับปรุงเสถียรภาพของดินเหนียววมตัวด้วยการประยุกต์ใช้ปูนซีเมนต์และปูนขาวเป็นส่วนผสม โดยงานวิจัยนี้ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานเบื้องต้นของดินเหนียววมตัวปูนซีเมนต์ และปูนขาว เพื่อคาดการณ์ปฏิกิริยาเคมีที่สามารถเกิดขึ้น ศึกษาหาค่า pH จากปริมาณของปูนขาวที่ผสมกับดินเหนียววมตัวซึ่งค่า pH ควรจะมีค่าเท่ากับ 12.4 เนื่องจากสามารถบ่งชี้ปริมาณปูนขาวที่เหมาะสมในการใช้เริ่มต้นในการผสมได้ จากนั้นดำเนินการขึ้นรูปตัวอย่าง ดินเปล่าดินผสมซีเมนต์และดินผสมปูนขาวตามอัตราส่วนผสมที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น เพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัด (Unconfined compression test) ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient modulus test) และความเร็วเฉือน (Free-Free resonant frequency method) อีกทั้งยังศึกษาหาค่าแคลิฟอร์เนีย แบริง เรโซ (CBR) และการบวมตัวของดินเหนียวทั้งก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพ เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติของชั้นทาง และทำการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคเพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบธาตุ และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างดินและสารปรับปรุงคุณภาพ ประกอบกับศึกษาความสัมพันธ์ทางด้านกำลังและด้านโครงสร้างทางจุลภาคตามอัตราส่วนผสมและระยะเวลาบ่ม เพื่ออธิบายแนวโน้มทางด้านกำลังตามอัตราส่วนผสมและระยะเวลาบ่มต่างกัน

4.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของดินเหนียววมตัว ปูนซีเมนต์ และปูนขาว

4.1.1 คุณสมบัติทางเคมี

จากการศึกษาองค์ประกอบแร่ธาตุของดินเหนียววมตัวจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 และปูนขาวประเภทไฮเดรตไลม์ โดยวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) พบว่าดินเหนียวมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) มากที่สุด เท่ากับ 49.63% รองลงมามีปริมาณ อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) เท่ากับ 19.14% 14.15% และ 10.67% ตามลำดับ ในส่วนของปูนซีเมนต์มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) มากที่สุด เท่ากับร้อยละ 62.97 รองลงมาได้แก่ สารประกอบซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ซึ่งมีปริมาณเท่ากับ 23.72% 4.28% และ 2.06% ตามลำดับ และในส่วนของปูนขาวมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) มากที่สุด เท่ากับ 96.04% รองลงมามีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เท่ากับร้อยละ 1.94 และ 1.57 ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียว ปูนซีเมนต์ และปูนขาว

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละโดยมวล		
	ดินเหนียว	ปูนซีเมนต์	ปูนขาว
ซิลิกอนไดออกไซด์ (silicon dioxide, SiO ₂)	49.63	23.72	1.94
อลูมิเนียมออกไซด์ (aluminum oxide, Al ₂ O ₃)	19.14	4.28	-
เฟอร์ริกออกไซด์ (ferric oxide, Fe ₂ O ₃)	10.67	2.06	-
แคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide, CaO)	14.15	62.97	96.04
แมกนีเซียมออกไซด์ (magnesium oxide, MgO)	1.37	1.85	1.57
โซเดียมออกไซด์ (sodium oxide, Na ₂ O)	0.24	0.64	0.04
โพแทสเซียมออกไซด์ (potassium oxide, K ₂ O)	2.67	0.67	0.08
ฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ (phosphorous oxide, P ₂ O ₅)	0.10	0.12	0.12

4.1.2 คุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวบวมตัว

ตารางที่ 4-2 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียว

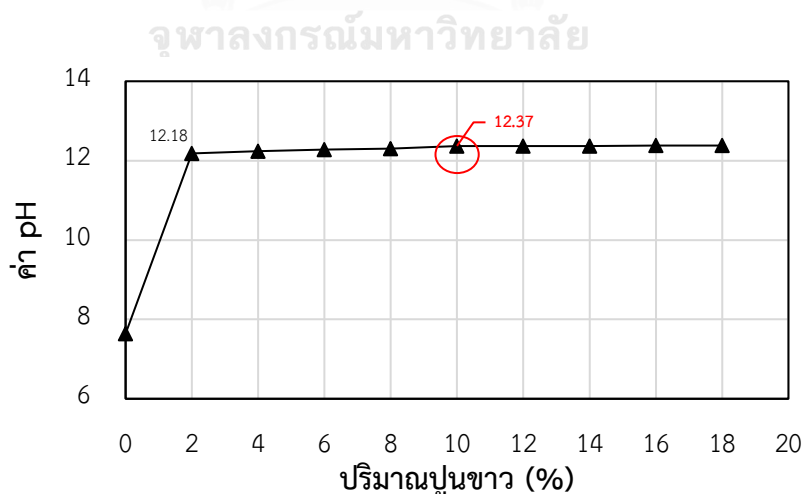
การทดสอบ	ผลการทดสอบ
การวิเคราะห์หาขนาดเม็ดดิน	ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เท่ากับ 99.35%
ค่าขีดจำกัดเหลว (LL.), %	66.16
ค่าขีดจำกัดพลาสติก (PL.), %	22.25
ค่าดัชนีพลาสติก (PI.), %	43.91
ความถ่วงจำเพาะของดิน (G _s)	2.75
ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC), %	14.21
ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (γ _d), g/cm ³	1.84
ค่าการบวมตัวอิสระ (FSI), %	67.88

การทดสอบหาคุณสมบัติของดินเหนียวบวมตัวเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM โดยมีการทดสอบวิเคราะห์หาขนาดเม็ดดิน การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ การทดสอบหาขีดจำกัดของอัตราเตอร์เบอร์ก การทดสอบการบดอัด ในส่วนของการทดสอบการบวมตัวอิสระจะทดสอบตามมาตรฐาน IS code specification ค่าการทดสอบเหล่านี้ถูกแสดงดังตารางที่ 4-2 จะสังเกตเห็นได้ว่ามากกว่า 95% ของขนาดเม็ดดินมีขนาดเล็กกว่า 0.075 มม. (ตะแกรงเบอร์ 200) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าดินชนิดนี้มีความ

เป็นดินเหนียว นอกจากนี้ยังพบว่าค่าขีดจำกัดเหลว (LL) และค่าดัชนีพลาสติก (PI) มีค่าเท่ากับ 66.16% และ 43.91% ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำค่าขีดจำกัดเหลว และค่าดัชนีพลาสติก มาจำแนกชนิดของดินเหนียวตามระบบ Unified Soil Classification System (USCS) แล้วนั้นจะได้ว่าดินเหนียวแม่เกาะถูกระบุอยู่ในชนิดดินที่มีความเหนียวสูง หรือ High plasticity clay (CH) เมื่อพิจารณาการบวมตัวของดินเหนียวด้วยการทดสอบการบวมตัวอิสระพบว่าดินมีค่าการบวมตัวอิสระ (FSI) เท่ากับ 67.88% ซึ่งสามารถจำแนกการบวมตัวว่าอยู่ในระดับบวมตัวปานกลาง (Moderate swelling)

4.2 การหาปริมาณปูนซีเมนต์และปูนขาวเริ่มต้นที่เหมาะสม

การทดสอบหาปริมาณปูนขาวที่เหมาะสมในการปรับปรุงเสถียรภาพของดินเหนียวจะขึ้นอยู่กับค่า pH เมื่อนำปูนขาวผสมกับดินเหนียวและน้ำจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างกัน โดยสามารถหาปริมาณปูนขาวที่เหมาะสมเมื่อค่า pH เท่ากับ 12.4 หรือจนกระทั่งค่า pH เริ่มมีค่าคงที่ (Bell, 1996; Emarah and Seleem, 2017; Sharma *et al.*, 2012) จากผลการทดสอบเมื่อนำปูนขาวที่มีปริมาณระหว่าง 0 – 18% มาผสมกับดินและน้ำ ค่า pH ที่ได้แสดงดังรูปที่ 4-1 สังเกตได้ว่าเมื่อผสมปริมาณปูนขาวในช่วง 0 – 8% ค่า pH มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 7.64 – 12.30 จากนั้นเพิ่มปริมาณปูนขาวจนกระทั่งถึง 10% เป็นต้นไปจะเห็นว่าค่า pH คงที่ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 12.37 ทำให้สามารถสรุปได้ว่าปริมาณปูนขาวที่เหมาะสมในการผสมกับดินและน้ำมีปริมาณอยู่ที่ 10 % ทำให้งานวิจัยนี้ได้ทำการใช้อัตราส่วนระหว่างดินกับปูนขาวอยู่ที่ 6 8 10 และ 12% โดยเลือกใช้ปริมาณสารผสมคร่อมกับช่วงที่วัดค่า pH ได้ค่าเท่ากับ 12.37 เนื่องจากเป็นตัวบ่งชี้ว่าเป็นปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงเสถียรภาพของดินแม่เกาะ



รูปที่ 4-1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับอัตราส่วนปริมาณปูนขาวที่เพิ่มขึ้น

นอกจากนั้นการหาอัตราส่วนของปริมาณซีเมนต์เริ่มต้นที่ต้องการ ทำได้โดยปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ควรใช้ขึ้นกับประเภทของดินที่สามารถจำแนกได้ดังตารางที่ 4-3 สำหรับงานวิจัยนี้สามารถจำแนกดินได้ว่าเป็นดินเหนียวชนิดที่มีความเหนียวสูง (CH) ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์เริ่มต้นที่ต้องการมีค่าเท่ากับประมาณ 10% ดังนั้นอัตราส่วนที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้อัตราส่วนระหว่างดินกับปูนซีเมนต์อยู่ที่ 6 8 10 และ 12% เช่นเดียวกับปูนขาว

ตารางที่ 4-3 การประมาณปริมาณซีเมนต์ที่ต้องการสำหรับดินแต่ละชนิด

ประเภทของดิน	ปริมาณปูนซีเมนต์เริ่มต้นที่ต้องการ (%)
GW, SW	5
GP, SW-SM, SW-SC, GW-GM, GW-GC	6
GM, SM, GC, SC, SP-SM, SP-SC, GP-GM, GP-GC, SM-SC, GM-GC	7
SP, CL, ML, ML-CL	10
MH-OH	11
CH	10

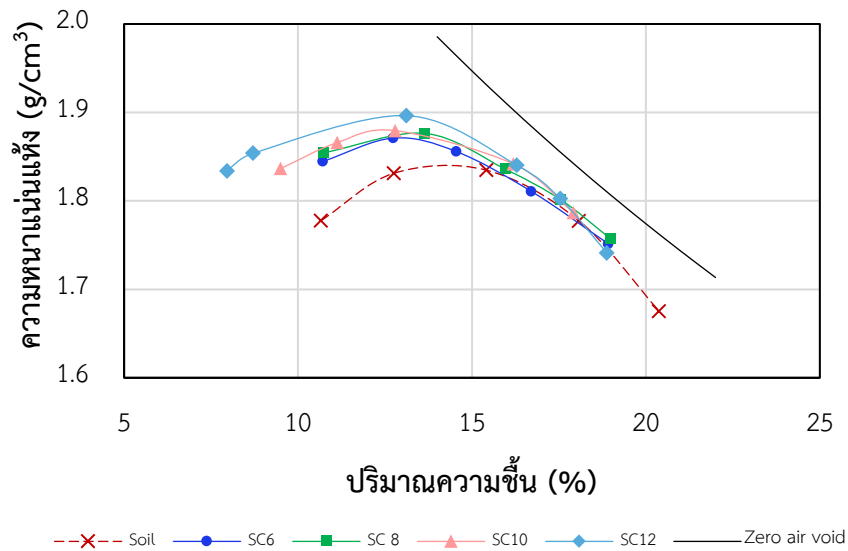
ที่มา: Military soils engineering (1992)

4.3 การทดสอบการบดอัดของดินเหนียวกับปูนซีเมนต์ ดินเหนียวกับปูนขาว

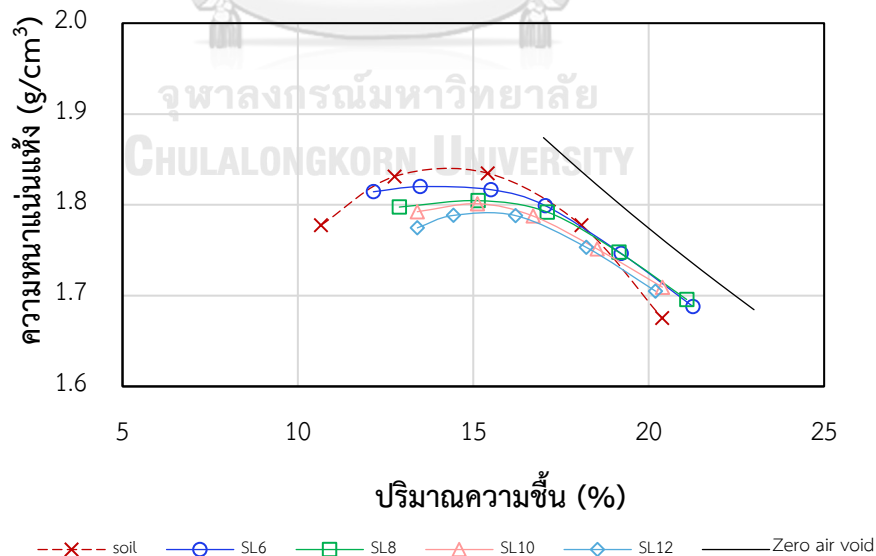
ความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นและความหนาแน่นแห้งของดินเหนียว ดินเหนียวผสมปูนซีเมนต์ และดินเหนียวผสมปูนขาวที่อัตราส่วนต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4-2 และรูปที่ 4-3 โดยค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density, γ_{dmax}) และค่าความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content, OMC) ที่แต่ละอัตราส่วนผสมสรุปดังตารางที่ 4-4 และ ตารางที่ 4-5

จากการทดสอบพบว่าปริมาณของปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเพิ่มขึ้นและปริมาณความชื้นเหมาะสมมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับดินเหนียวที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ ค่าที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 1.6 - 2.8% และปริมาณความชื้นเหมาะสมมีค่าใกล้เคียงกันประมาณเท่ากับ 13% โดยปริมาณความชื้นที่เหมาะสมได้รับอิทธิพลมาจากขนาดของเม็ดดินและปูนซีเมนต์ (Horpiulsuk S. *et al.*, 2009) ในทางตรงกันข้ามพบว่าปริมาณของปูนขาวที่เพิ่มขึ้นทำให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลง ขณะที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 14.21 - 15.42% เนื่องจากปูนขาวมีขนาดผงที่เล็กกว่าเม็ดดิน และมี

สารประกอบแคลเซียมออกไซด์เป็นหลักจึงทำให้ต้องใช้ปริมาณน้ำมากขึ้นในการทำปฏิกิริยากับดิน ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่กล่าวไว้ข้างต้นมีผลสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Al-Taie A. Y. *et al.*, 2015; Ikhlef N. S. *et al.*, 2014; Siddique A. and Hossain M. A., 2011)



รูปที่ 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นที่อัตราส่วนของปูนซีเมนต์ต่างกัน



รูปที่ 4-3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นที่อัตราส่วนของปริมาณปูนขาวต่างกัน

ตารางที่ 4-4 ค่าของความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของดินที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพและดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์

ปริมาณปูนซีเมนต์ (%)	γ_{dmax} (g/cm ³)	OMC (%)	W/C
0	1.84	14.21	-
6	1.87	12.89	2.15
8	1.88	13.44	1.68
10	1.88	12.33	1.23
12	1.89	12.89	1.07

หมายเหตุ: W/C คือสัดส่วนของปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมต่อปริมาณปูนซีเมนต์

ตารางที่ 4-5 ค่าของความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของดินที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพและดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว

ปริมาณปูนขาว (%)	γ_{dmax} (g/cm ³)	OMC (%)	W/L
0	1.84	14.21	-
6	1.82	13.92	2.32
8	1.80	15.04	1.88
10	1.80	15.06	1.50
12	1.79	15.42	1.28

หมายเหตุ: W/L คือสัดส่วนของปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมต่อปริมาณปูนขาว

สัดส่วนของปริมาณน้ำที่ใช้ต่อปริมาณของวัสดุเชื่อมประสานแสดงดังตารางที่ 4-4 และ ตารางที่ 4-5 จากการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวด้วยปูนซีเมนต์ พบว่าสัดส่วนของปริมาณน้ำต่อปูนซีเมนต์มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยปริมาณน้ำที่ต้องการใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ให้แข็งได้นั้นมีปริมาณน้อยกว่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ควรใช้ในการผสมกับดินเหนียว จึงอนุมานได้ว่าปริมาณน้ำที่ใช้ในการทดสอบมีหน้าที่หลัก 2 ส่วน คือส่วนแรกปริมาณน้ำจะถูกนำมาใช้ในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และส่วนที่สองจะช่วยในการบดอัดดินให้มีความหนาแน่นแห้งสูงสุด โดยอัตราส่วนของปริมาณน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ทำให้การเกิดปฏิกิริยาเคมีอย่างเพียงพอและสมบูรณ์ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 0.4 (Mather B. and Hime W.G., 2002) เมื่อพิจารณาผลการทดสอบของอัตราส่วนของปริมาณน้ำต่อปูนซีเมนต์ในปริมาณส่วนผสมของปูนซีเมนต์ที่ 6 – 12% พบว่ามีค่าที่ได้อยู่ในช่วง 1.07

– 2.15 ดังตารางที่ 4-4 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าปริมาณน้ำที่ใช้ในแต่ละสัดส่วนของปูนซีเมนต์มีปริมาณเพียงพอ และสามารถทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์

มากกว่านั้นเมื่อพิจารณาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการผสมน้ำกับปูนขาว พบว่าค่า pH เป็นปัจจัยหลักในการก่อให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก เนื่องจากค่า pH ที่เพิ่มขึ้นสูงกว่า 10.5 จะทำให้องค์ประกอบแร่ของอนุภาคของดินเหนียวเกิดการแตกตัวได้แก่ ซิลิกา (Si) และ อลูมินา (Al) หลังจากนั้นแคลเซียมจากปูนขาวจะจับตัวกับแร่ธาตุเหล่านี้ก่อให้เกิดสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) (Bell, 1996; Emarah and Seleem, 2017; Sharma *et al.*, 2012) ดังนั้นจากผลการทดสอบพบว่าปริมาณน้ำที่ใช้มีปริมาณเพียงพอที่ทำให้ค่า pH มีปริมาณที่สูงเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีอย่างสมบูรณ์ โดยผลการทดสอบหาค่า pH ได้ถูกอภิปรายไว้ข้างต้น

4.4 การทดสอบแคลิฟอร์เนีย แบริ่ง เรโซ (CBR)

การทดสอบค่า CBR เป็นการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับน้ำหนักของดินที่บดอัดแล้ว เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบวัสดุชั้นทางในงานวิศวกรรมทาง สำหรับชั้นคันทาง (Subgrade) ชั้นรองพื้นทาง (Subbase) และชั้นพื้นทาง (base) โดยการทดสอบหาค่า CBR เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D1883 ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาค่า CBR ทั้งก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาวที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน โดยการทดสอบได้เลือกใช้ปริมาณของปูนซีเมนต์และปูนขาวที่ 10% เนื่องจากเป็นปริมาณที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวแม่เมาะเพราะว่าปริมาณปูนซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับประเภทของดินที่นำมาปรับปรุงคุณภาพ ส่วนปริมาณปูนขาวนั้นขึ้นอยู่กับค่า pH ที่เท่ากับ 12.37 ซึ่งเป็นค่า pH ที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างดิน ปูนขาว และน้ำ โดยการทดสอบค่า CBR จะพิจารณาแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือการทดสอบค่า CBR แบบไม่แช่น้ำ (Unsoaked) และการทดสอบแบบแช่น้ำ (Soaked)

จากผลการทดสอบพบว่าค่า CBR ของดินเหนียวก่อนปรับปรุงคุณภาพแบบไม่แช่น้ำมีค่าเท่ากับ 65.22% และค่า CBR แบบแช่น้ำมีค่าเท่ากับ 3.98% ซึ่งตามมาตรฐานกรมทางหลวงค่า CBR ที่ไม่แช่น้ำสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทาง (Subbase) ได้ เนื่องจากค่า CBR มีค่ามากกว่า 25% ในทางกลับกันเมื่อตัวอย่างดินเหนียวถูกนำไปแช่น้ำพบว่าค่า CBR ที่ได้มีค่าลดลงอย่างมาก ส่งผลให้ดินเหนียวมีคุณสมบัติที่ไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน เนื่องจากค่า CBR มีค่าน้อยกว่า 5%

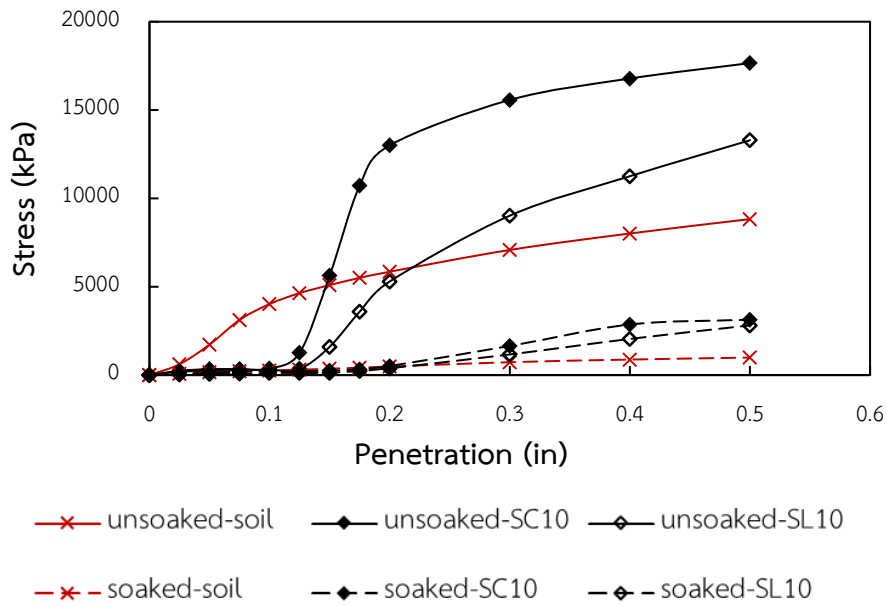
ดังนั้นจึงต้องทำการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาวเพื่อให้ดินเหนียวมีคุณสมบัติและเสถียรภาพที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ในงานชั้นทางได้

จากการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวแม่เมาะด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาวที่ปริมาณ 10% ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4-6 และความสัมพันธ์ระหว่างระยะการจม (Penetration) กับความเค้น (Stress) แสดงดังรูปที่ 4-4 เมื่อพิจารณาผลการทดสอบจะเห็นว่าค่า CBR ที่ได้จากการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวไม่ว่าจะด้วยปูนซีเมนต์หรือปูนขาวมีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน กล่าวได้ว่าเมื่อทดสอบตัวอย่างแบบไม่แช่น้ำ พบว่าค่า CBR ที่ได้มีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับดินเหนียวก่อนการปรับปรุง โดยการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ มีค่ามากขึ้นเท่ากับ 198.76% และปูนขาวมีค่าเท่ากับ 93.50% โดยการพัฒนาคิดเป็น 3.05 เท่าและ 1.43 เท่าของดินแม่เมาะก่อนปรับปรุงเสถียรภาพตามลำดับ ซึ่งค่า CBR ที่ได้มีค่ามากกว่า 80% ตามมาตรฐานกรมทางหลวงจึงสามารถพิจารณาได้ว่าตัวอย่างมีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการใช้งานในชั้นพื้นทาง และเมื่อนำตัวอย่างที่ถูกปรับปรุงคุณภาพไปทดสอบแบบแช่น้ำ พบว่าค่า CBR ที่ได้มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยลดลงเท่ากับ 17.40% เมื่อปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ และเท่ากับ 11.32% เมื่อปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว ซึ่งค่า CBR ที่ได้เหมาะสมกับการนำไปใช้เป็นวัสดุชั้นดินถม ซึ่งค่า CBR มีค่ามากกว่า 5% ตามมาตรฐานกรมทางหลวง

นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า CBR ที่ได้ระหว่างดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์กับดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวที่ปริมาณ 10% แสดงผลดังตารางที่ 4-6 พบว่าดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์มีอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า CBR มากกว่าปูนขาวเมื่อเปรียบเทียบกับดินเหนียวที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.05 และ 1.43 เมื่อทดสอบแบบไม่แช่น้ำตามลำดับ และมีค่าเท่ากับ 4.37 และ 2.84 เมื่อทดสอบแบบแช่น้ำตามลำดับ ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปริมาณ 10% จึงมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในงานชั้นดินถม

ตารางที่ 4-6 ผลการทดสอบค่า CBR ที่ของดินเหนียวก่อนการปรับปรุงคุณภาพและดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาว

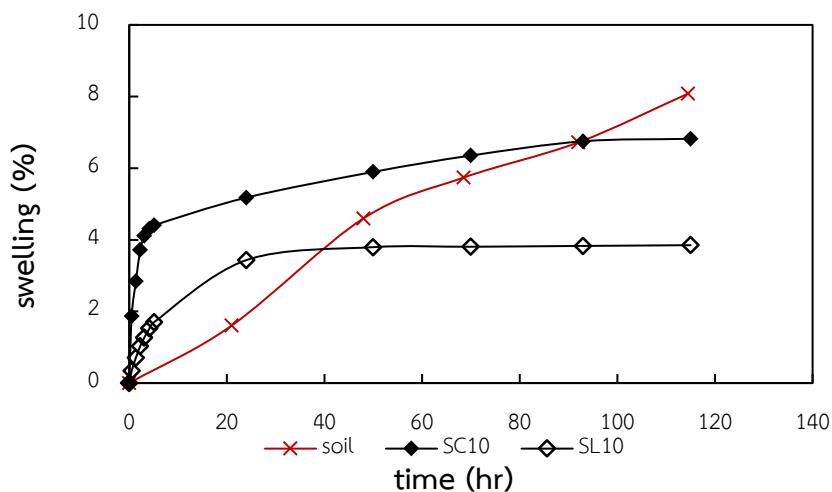
ระยะเวลาบ่ม (วัน)	สภาพการ ทดสอบ	CBR (%)		
		Soil	SC10	SL10
7	แบบไม่แช่น้ำ	65.22	198.76	93.50
	แบบแช่น้ำ	3.98	17.40	11.32



รูปที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการจม (Penetration) กับความเค้น (Stress) ของดินเหนียว ก่อนปรับปรุงคุณภาพและดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาว ที่ปริมาณ 10% ระยะเวลาบ่มที่ 7 วัน

มากกว่านั้นการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาวยังมีวัตถุประสงค์เพื่อลดการบวมตัว (Swelling) ของดินเหนียว จากผลการทดสอบที่แสดงดังรูปที่ 4-5 พบว่าการบวมตัวของดินเหนียวก่อนการปรับปรุงคุณภาพมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่มากขึ้น และสังเกตได้ว่าที่ระยะเวลาประมาณ 115 ชั่วโมง ดินเหนียวมีค่าการบวมตัวเท่ากับ 8.08% หลังจากนั้นเมื่อทำการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาว จากผลการทดสอบพบว่าในช่วงแรกมีแนวโน้มของการบวมตัวเพิ่มขึ้นอย่างมาก และหลังจากแช่ตัวอย่างในน้ำประมาณ 24 ชั่วโมง พบว่าค่าการบวมตัวเริ่มคงที่ โดยค่าการบวมตัวสุดท้ายมีค่าเท่ากับ 6.82% และ 3.85% ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปูนซีเมนต์และปูนขาวมีคุณสมบัติในการช่วยลดการบวมตัวของดินแม่เมาะ ในขณะที่ปูนขาวมีประสิทธิภาพในการช่วยลดการบวมตัวได้มากกว่าปูนซีเมนต์เมื่อเทียบกับดินเหนียวก่อนการปรับปรุงคุณภาพ โดยการปรับปรุงด้วยปูนขาวและปูนซีเมนต์สามารถลดการบวมตัวได้เท่ากับ 52.35% และ 15.60% ตามลำดับ เนื่องจากเม็ดปูนขาวมีขนาดที่ใกล้เคียงกับเม็ดดินมากกว่าปูนซีเมนต์จึงทำให้เกิดการจับตัวเป็นผลึกแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนช่วยในการลดการบวมตัวของดินได้ทั่วเม็ดดินในช่วงระยะเวลาบ่ม 7 วัน ขณะเดียวกันเมื่อปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ ผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาได้แก่ ผลึกแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) และเอทพริง

ไคต์ (Et) ซึ่งผลิตภัณฑ์เอททริงไคต์เป็นหนึ่งในสาเหตุที่ทำให้ดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์เกิดช่องว่างและการบวมตัวมากกว่าการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว ในทำนองเดียวกันปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวสามารถก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ Et ได้เช่นกันแต่เกิดที่ระยะเวลาบ่มมากกว่า 28 วัน (Nicholson, 2015)



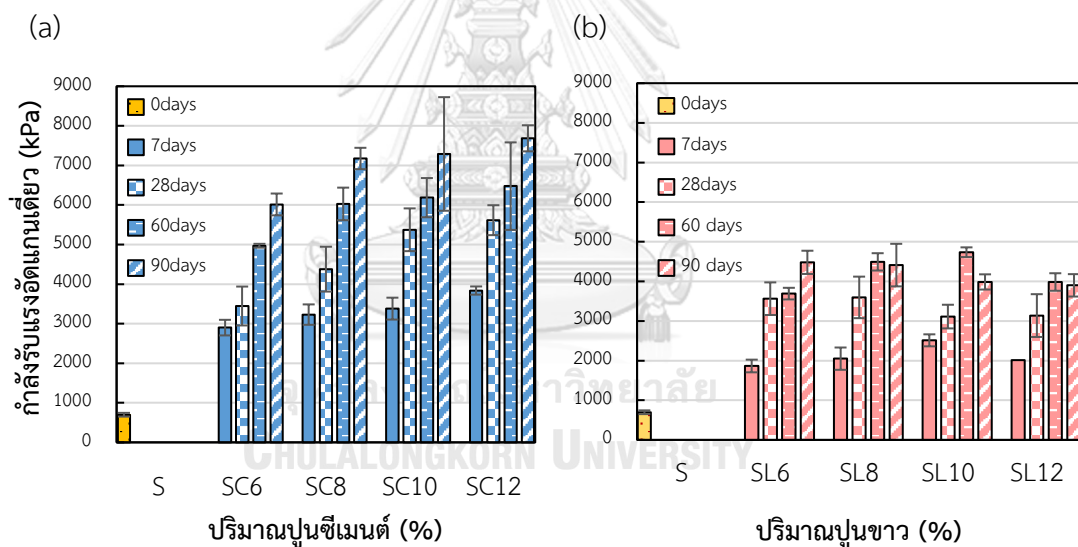
รูปที่ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างการบวมตัวและระยะเวลาที่ของดินเหนียวก่อนการปรับปรุงและหลังจากปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาวที่ปริมาณ 10%

4.5 การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

รูปที่ 4-6 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength, q_u) ตามมาตรฐาน ASTM D 2166 ของดินเหนียวบวมตัวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาว โดยแบ่งระยะเวลาบ่มออกเป็น 4 ระยะ ได้แก่ 7 28 60 และ 90 วัน จากการทดสอบพบว่าดินเหนียวเริ่มต้นก่อนปรับปรุงคุณภาพมีค่า q_u เท่ากับ 698.23 kPa ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่ามาตรฐานพื้นที่ทาง ทล. ม. 204/2556 โดยกรมทางหลวงกำหนดว่าวัสดุสำหรับชั้นพื้นที่ทางต้องให้กำลังรับแรงอัดไม่น้อยกว่า 1724 kPa ดังนั้นดินเหนียวบวมตัวนี้จึงมีคุณสมบัติไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุสำหรับชั้นพื้นที่ทาง

หลังจากนั้นเมื่อปรับปรุงเสถียรภาพของดินเหนียวด้วยปูนซีเมนต์ส่งผลให้กำลังรับแรงเพิ่มขึ้น โดยกำลังเพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับปริมาณของปูนซีเมนต์และระยะเวลาบ่ม โดยที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน ดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปริมาณ 6% มีค่า q_u เท่ากับ 2899.84 kPa จากนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์เป็น 8% 10% และ 12% ส่งผลให้ค่า q_u มีค่าเพิ่มมากขึ้นเป็น 3223.96

3380.04 และ 3837.43 kPa ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาที่ปริมาณปูนซีเมนต์อื่นๆที่ทดสอบพบว่ามีค่าแวนโน้มที่เหมือนกัน ในขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาค่า q_u ตามระยะเวลาบ่ม ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อปรับปรุงคุณภาพดินแม่เกาะด้วยปูนซีเมนต์ 6% ค่า q_u ที่ 7 วัน เพิ่มขึ้นเป็น 3446.50 kPa เมื่อมีระยะเวลาบ่มเท่ากับ 28 วัน และเพิ่มขึ้นเป็น 4970.07 และ 6013.53 kPa เมื่อระยะเวลาบ่มเท่ากับ 60 และ 90 วัน ตามลำดับ ดังรูปที่ 4-6 (a) ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการเพิ่มขึ้นของกำลังเมื่อผสมปูนซีเมนต์เกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างไตรแคลเซียมซัลเฟตและไดแคลเซียมซัลเฟต (C_3S, C_2S) กับน้ำ ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรต (CSH) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานกับอนุภาคของดินเหนียว นอกจากนี้เมื่ออายุบ่มของตัวอย่างมากขึ้นจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction) ก่อให้เกิดเอทริงไกต์ (Ettringite) ซึ่งมีส่วนช่วยในการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัด ดังนั้นผลการทดสอบจึงสังเกตเห็นกำลังรับแรงที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณของปูนซีเมนต์และระยะเวลาบ่มที่มากขึ้น (Jamsawang *et al.*, 2017; Saride *et al.*, 2013)



รูปที่ 4-6 กำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดที่ขึ้นอยู่กัปริมาณของสารผสมเพิ่มและระยะเวลาบ่ม; (a) ค่า q_u ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์; (b) ค่า q_u ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวของดินเหนียวที่ปรับปรุงเสถียรภาพด้วยปูนขาว แสดงดังรูปที่ 4-6 (b) เมื่อปรับปรุงเสถียรภาพของดินเหนียวที่ปริมาณปูนขาว 6% สามารถสังเกตได้ว่าค่า q_u ของดินเหนียวเพิ่มขึ้นจาก 698.23 kPa เป็น 1865.13 3563.00 3690.52 และ 4480.23 kPa ที่ระยะเวลาบ่ม 7 28 60 และ 90 วัน ตามลำดับ ในทางกลับกันที่ปริมาณปูนขาว 8% มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่า q_u ตามระยะเวลาบ่ม 7 28 และ 60 วัน จาก 2049.80 kPa เพิ่มขึ้นเป็น 3595.86

และ 4492.33 kPa ตามลำดับ จากนั้นค่า q_u มีค่าลดลงเท่ากับ 4410.90 kPa ที่ระยะเวลาบ่ม 90 วัน ในขณะที่เดียวกันการปรับปรุงคุณภาพด้วยปริมาณปูนขาว 10 และ 12% มีแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นและลดลงของค่า q_u คล้ายคลึงกันกับการปรับปรุงคุณภาพที่ปริมาณปูนขาว 8% เนื่องจากเกิดรอยแตกร้าวบนผิวของตัวอย่างดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวแสดงดังรูปที่ 4-15

เมื่อพิจารณาผลของการเพิ่มปริมาณปูนขาวต่อค่า q_u ของตัวอย่างดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน พบว่าการเพิ่มปริมาณปูนขาวจาก 6% เป็น 8% และ 10% ส่งผลให้ค่า q_u มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1865.13 kPa เป็น 2049.80 และ 2512.34 kPa ตามลำดับ จนกระทั่งที่ปริมาณปูนขาว 12% ค่า q_u มีค่าลดลงเท่ากับ 2013.50 kPa นอกจากนี้ยังพบว่าแนวโน้มของค่า q_u ที่ระยะเวลาบ่ม 60 วัน มีการเพิ่มขึ้นและลดลงตามปริมาณปูนขาวที่มากขึ้นเช่นเดียวกันกับระยะเวลาบ่มที่ 7 วัน

เมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน พบว่าเมื่อปรับปรุงคุณภาพด้วยปริมาณของปูนขาว 6% และ 8% ค่า q_u มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 3562.99 เป็น 3595.86 kPa ตามลำดับ หลังจากนั้นเมื่อปริมาณปูนขาวเพิ่มขึ้นเป็น 10 และ 12 % พบว่าค่า q_u มีค่าลดลงใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 3111.73 - 3136.99 kPa และเมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาบ่ม 90 วัน ค่า q_u มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อปริมาณปูนขาวเพิ่มขึ้นจาก 6 8 10 และ 12% โดยมีค่าเท่ากับ 4480.23 4410.9 3985.56 และ 3899.97 kPa ตามลำดับ ดังนั้นผลการทดสอบจากการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว สามารถสังเกตเห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของค่า q_u ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยได้แก่ ปริมาณปูนขาวที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพระยะเวลาบ่ม และผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยา โดยพบว่าการใช้ปูนขาวเป็นสารผสมเพิ่มควรคำนึงถึงปริมาณที่เหมาะสมในนำมาใช้ กล่าวคือปูนขาวต้องมีปริมาณที่ไม่มากเกินไปเนื่องจากในความเป็นจริงแล้วปูนขาวมีความเสียดทาน (Friction) และความเชื่อมแน่น (Cohesion) ระหว่างอนุภาคที่น้อย อีกทั้งการใช้ปูนขาวในปริมาณที่มากเกินไปจะส่งผลให้ปูนขาวทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น (lubricant) ภายในช่องว่างของอนุภาคดิน ก่อให้เกิดการลดลงของกำลัง (Baglari D. and S.K., 2013) นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มขึ้นของกำลังเมื่อผสมปูนขาวส่วนใหญ่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction) ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่สำคัญสำหรับกำลังที่เพิ่มขึ้นคือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และอลูมิเนียมซิลิเกตไฮเดรต (CAH) จากงานวิจัยนี้พบว่าผลึกของเอททริงไกต์ (Et) เริ่มก่อตัวขึ้นหลังจากระยะเวลาบ่มที่ 28 วัน และมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่มที่มากขึ้น ส่งผลให้กำลังที่ระยะเวลาบ่มที่ 90 มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากผลึก Et มีความแข็งทำให้เกิดแรงดันสูงมากกว่านั้นยังส่งผลให้เกิดการขยายตัวของดินทำให้เกิดรอยร้าวที่บริเวณผิวของตัวอย่างดินซึ่งผลการ

ทดสอบที่ได้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Baglari D. and S.K., 2013; Bell, 1996; Nicholson, 2015)

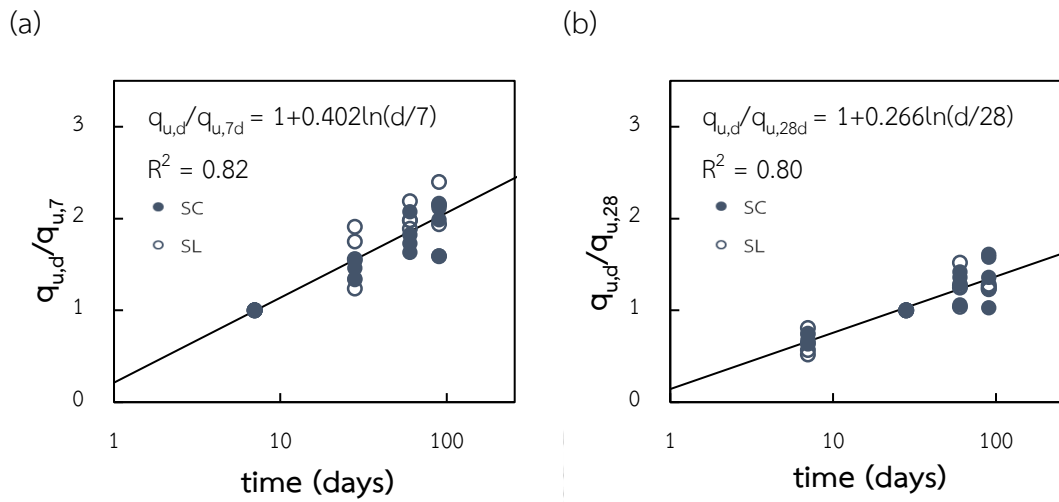
เมื่อทำการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดระหว่างปูนซีเมนต์และปูนขาวแสดงดังรูปที่ 4-6 สามารถสังเกตได้ว่าเมื่อผสมปริมาณของปูนซีเมนต์และปูนขาวที่อัตราส่วนเดียวกันค่า q_u ของปูนซีเมนต์จะมีกำลังมากกว่าค่า q_u ของปูนขาวที่ระยะเวลาบ่มเดียวกัน ซึ่งมีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว ได้แก่ ความหนาแน่นแห้ง โดยปูนซีเมนต์มีความหนาแน่นมากกว่าปูนขาว นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นยังมีความแตกต่างกันตามช่วงระยะเวลาบ่ม เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปูนซีเมนต์ ได้แก่ CSH และ Et ซึ่งเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของระยะเวลาบ่ม ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ Et ที่เกิดการจากปรับปรุงเสถียรภาพด้วยปูนขาว จะเกิดขึ้นหลังจากมีระยะเวลาบ่มมากกว่า 28 วัน อีกทั้งที่ระยะเวลาบ่มตั้งแต่ 60 – 90 วัน ตัวอย่างดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวในปริมาณตั้งแต่ 8 – 12% มีรอยร้าวเกิดขึ้นบริเวณผิวของตัวอย่างเนื่องจากการขยายตัวอีกด้วย

นอกจากนี้ รูปที่ 4-7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นทางด้านกำลังและระยะเวลาบ่มของตัวอย่างดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาวที่มีอายุการบ่ม 7 28 60 และ 90 วัน โดยสมการทฤษฎีอ้างอิงสำหรับการพัฒนากำลังดินเหนียวที่ถูกปรับปรุงคุณภาพได้ถูกนำเสนอตามงานวิจัยของ Horpibulsuk *et al.* (Horpibulsuk *et al.*, 2011) จากการศึกษาพบว่าเมื่อระยะเวลาบ่มเพิ่มขึ้น อัตราส่วนของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่ระยะเวลาใดๆ ($q_{u,d}$) เทียบกับกำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่ 7 และ 28 วัน มีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงอยู่ในรูปแบบสมการที่ (4-1) และ (4-2)

$$\frac{q_{u,d}}{q_{u,7d}} = 1 + 0.402 \ln\left(\frac{d}{7}\right) \quad R^2 = 0.82 \quad (4-1)$$

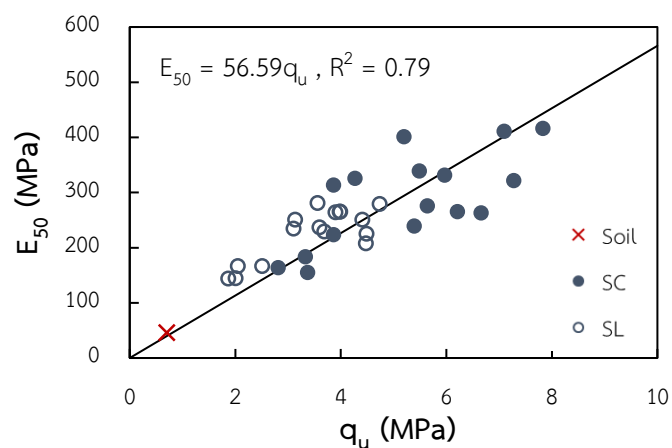
$$\frac{q_{u,d}}{q_{u,28d}} = 1 + 0.266 \ln\left(\frac{d}{28}\right) \quad R^2 = 0.80 \quad (4-2)$$

เมื่อ	d	=	อายุการบ่ม (วัน)
	$q_{u,d}$	=	ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่ระยะเวลาบ่มต่าง ๆ (kPa)
	$q_{u,7d}$	=	ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน (kPa)
	$q_{u,28d}$	=	ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน (kPa)



รูปที่ 4-7 สมการความสัมพันธ์ของการพัฒนากำลังกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวที่ระยะเวลาบ่มใดๆ เทียบกับกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวที่ระยะเวลาบ่ม; (a) 7 วัน; (b) 28 วัน
 หมายเหตุ: SC และ SL คือ ดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาว ตามลำดับ

นอกจากนี้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวสามารถคำนวณหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ 50% ของค่ากำลังรับแรงอัด ซึ่งค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ 50% (E_{50}) นี้เป็นค่าพารามิเตอร์หนึ่งที่ใช้ในการออกแบบและคำนวณพฤติกรรมในการรับแรงของวัสดุ จากผลการทดสอบสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว (q_u) และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ 50% (E_{50}) จากความสัมพันธ์ที่แสดงดังรูปที่ 4-8



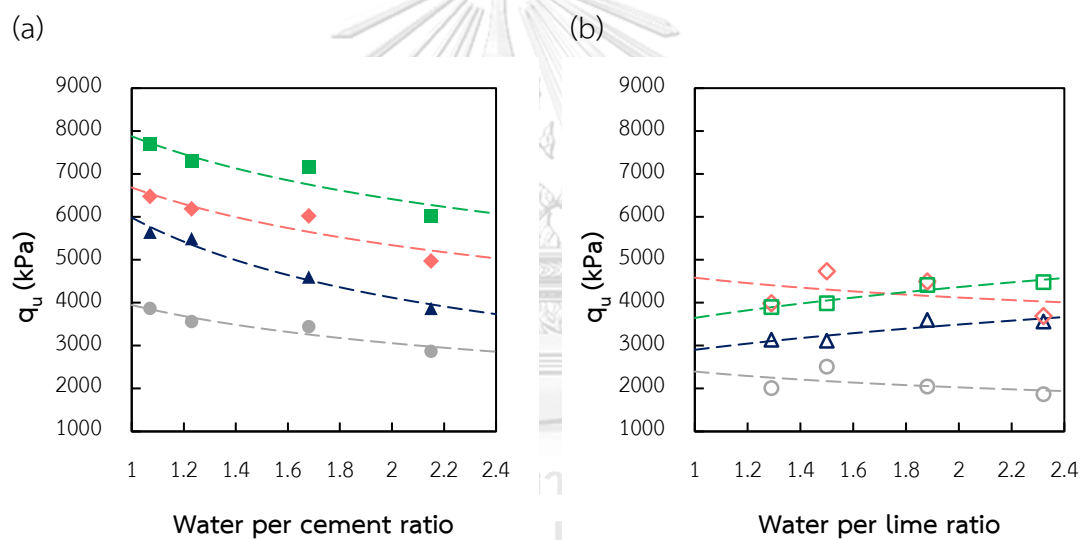
รูปที่ 4-8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ 50 %

จากความสัมพันธ์ที่แสดงข้างต้นสามารถสังเกตเห็นแนวโน้มที่เป็นเส้นตรงระหว่างค่า E_{50} กับ q_u กล่าวได้ว่า เมื่อค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (q_u) มีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่า E_{50} มีค่าสูงขึ้นด้วย นอกจากนี้จากการทดสอบยังพบว่าค่า E_{50} และค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (q_u) มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือค่าทั้งสองมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของปูนซีเมนต์และปูนขาวและระยะเวลาบ่มที่เพิ่มขึ้น โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_{50} กับ q_u สามารถวิเคราะห์ได้ดังสมการที่ (4-3)

$$E_{50} = 56.59q_u \quad R^2 = 0.79 \quad (4-3)$$

เมื่อ E_{50} = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ 50% ของกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (MPa)

q_u = ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่ (kPa)



● $q_{u(7d)} = 3946.35/(W/C)^{0.37}$, $R^2 = 0.90$

▲ $q_{u(28d)} = 5984.03/(W/C)^{0.54}$, $R^2 = 0.98$

◆ $q_{u(60d)} = 6684.72/(W/C)^{0.32}$, $R^2 = 0.84$

■ $q_{u(90d)} = 7879.03/(W/C)^{0.30}$, $R^2 = 0.83$

○ $q_{u(7d)} = 2396.46/(W/L)^{0.24}$, $R^2 = 0.23$

▲ $q_{u(28d)} = 2902.36(W/L)^{0.27}$, $R^2 = 0.78$

◆ $q_{u(60d)} = 4583.40/(W/L)^{0.15}$, $R^2 = 0.13$

■ $q_{u(90d)} = 3646.50(W/L)^{0.26}$, $R^2 = 0.92$

รูปที่ 4-9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับอัตราส่วนผสมของน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน; (a) อัตราส่วนผสมของน้ำต่อปูนซีเมนต์; (b) อัตราส่วนผสมของน้ำต่อปูนขาว

จากผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานแสดงดังรูปที่ 4-9 เมื่อพิจารณาดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ที่ทุกระยะเวลาบ่มสามารถสังเกตเห็นแนวโน้มที่ลดลงของกำลังรับแรงอัดเมื่ออัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นโดยแสดงอยู่ในรูปของสมการกำลัง นอกจากนี้งานวิจัยที่ผ่านมาของ (Horpiulsuk *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2005) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางกลของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ พบว่าอัตราส่วนของปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมกับปูนซีเมนต์ (W/C) เป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมทางด้านวิศวกรรมโดยเฉพาะคุณสมบัติทางด้านกำลัง เนื่องจากสัดส่วนของปริมาณน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สมบูรณ์และส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบทางเคมี

ในขณะเดียวกันดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว พบว่าเมื่ออัตราส่วนของน้ำต่อปูนขาวมีค่ามากขึ้น สังเกตเห็นว่าค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง ที่ระยะเวลาบ่ม 7 และ 60 วัน ในทางกลับกันค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มมากขึ้นที่ระยะเวลาบ่ม 28 และ 90 วัน ดังนั้นความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับอัตราส่วนของน้ำต่อปูนขาวมีแนวโน้มที่ไม่สัมพันธ์กันในแต่ละระยะเวลาบ่ม

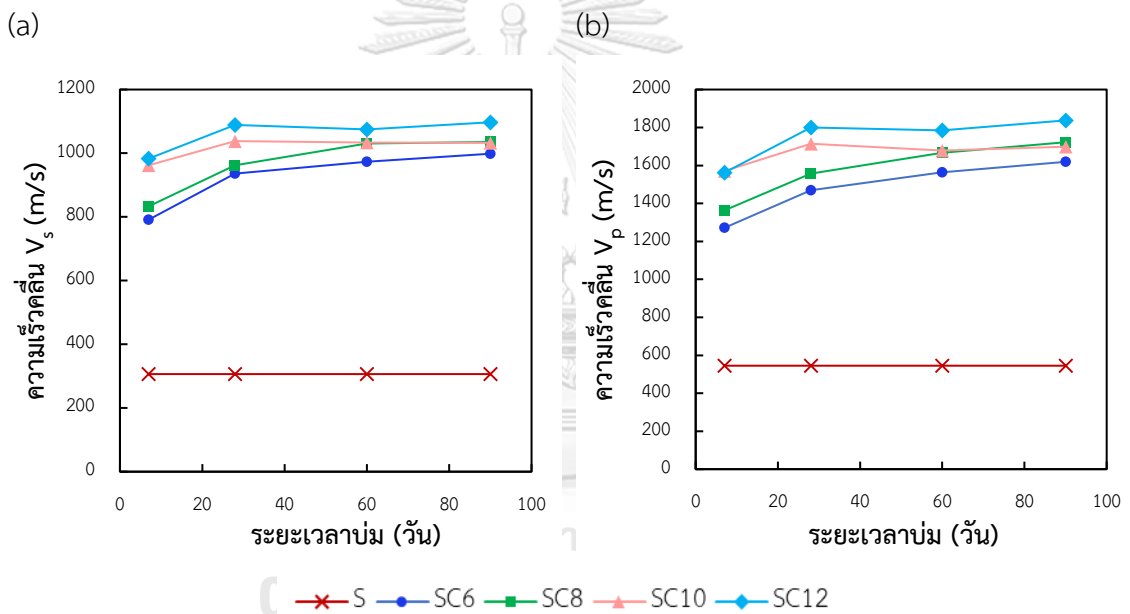
4.6 การทดสอบความเร็วเฉือนในดิน (Free-Free resonance method)

ความเร็วเฉือนในดินเหนียวแม่เมื่อก่อนปรับปรุงคุณภาพและหลังปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาว ถูกทดสอบโดยการใช้คลื่นสั้นพ้องอิสระเพื่อประเมินคุณสมบัติทางด้านกำลังในรูปแบบไดนามิก แสดงดังรูปที่ 4-10 และรูปที่ 4-11

จากผลการทดสอบพบว่าค่า V_s และ V_p ของดินแม่เมื่อก่อนการปรับปรุงคุณภาพมีค่า 306.37 และ 545.11 m/s ตามลำดับ และจากรูปที่ 4-10 สามารถสังเกตได้ว่าเมื่อปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวด้วยปูนซีเมนต์ ค่าความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (S-wave, V_s) และ ความเร็วคลื่นทุติยภูมิ (P-wave, V_p) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของปูนซีเมนต์และระยะเวลาบ่มที่มากขึ้น เมื่อพิจารณาค่า V_s ของดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปริมาณ 6% พบว่าที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน ค่า V_s มีค่า 791.48 m/s และเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเป็น 936.04 m/s ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน ในขณะที่เมื่อระยะเวลาบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 60 และ 90 วัน ค่า V_s ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ 973.30 และ 998.40 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาผลของการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ที่มีต่อค่า V_s พบว่าการเพิ่มขึ้นของค่า V_s มีแนวโน้มที่เหมือนกับการใช้ปูนซีเมนต์ที่ปริมาณ 6% แสดงดังรูปที่ 4-10 (a) และเมื่อพิจารณาค่า V_p ของดินที่ทำการปรับปรุงเสถียรภาพด้วยปูนซีเมนต์ปริมาณ 6% พบว่า ค่า V_p เพิ่มขึ้นจาก 1271.43 เป็น

1468.91 m/s ซึ่งเป็นการเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในช่วงระยะเวลาบ่ม 7-28 วัน จากนั้นที่ระยะเวลา 60 และ 90 วัน ค่า V_p ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 1563.57-1619.14 m/s

มากไปกว่านั้นเมื่อพิจารณาการเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์พบว่า ค่าความเร็วคลื่น V_s มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น เช่น เมื่อพิจารณาการปรับปรุงเสถียรภาพของดินด้วยปูนซีเมนต์ที่ 6 8 10 และ 12% ค่า V_s ที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 791.48 เป็น 833.36 962.25 และ 983.10 m/s ตามลำดับ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าเมื่อพิจารณาระยะเวลาบ่มที่ 7 - 28 วัน จะสังเกตเห็นการเพิ่มขึ้นของค่าความเร็วคลื่น V_s และ V_p อย่างชัดเจน จากนั้นค่าความเร็วคลื่น V_s และ V_p จะเริ่มคงที่ที่ระยะเวลาบ่ม 60 -90 วัน และการเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์ส่งผลให้ค่าความเร็วคลื่น V_s และ V_p มีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย

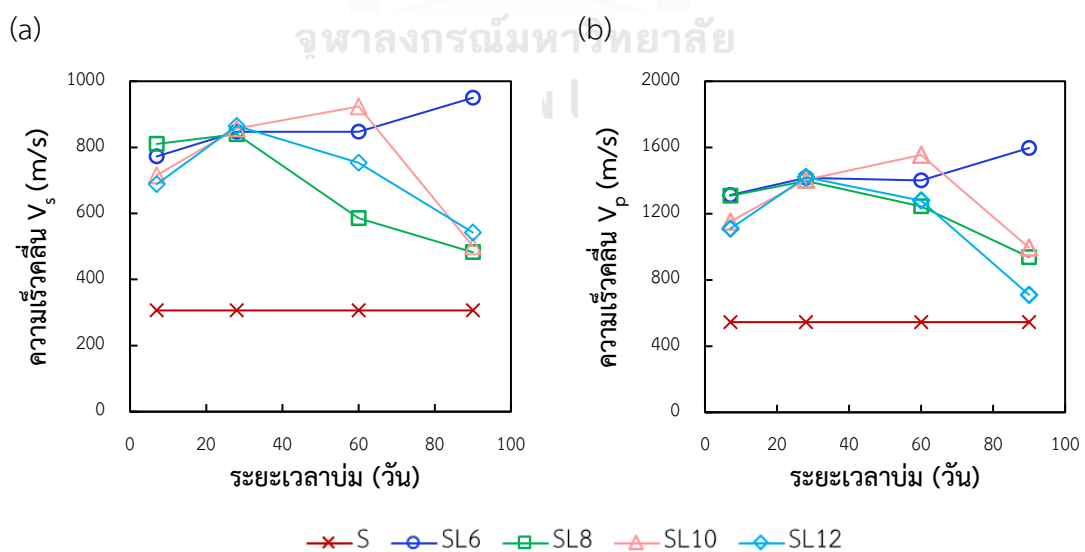


รูปที่ 4-10 ความสัมพันธ์ของความเร็วคลื่นที่ขึ้นอยู่กับปริมาณปูนซีเมนต์และระยะเวลาบ่ม; (a)

ความเร็วคลื่น V_s ; (b) ความเร็วคลื่น V_p

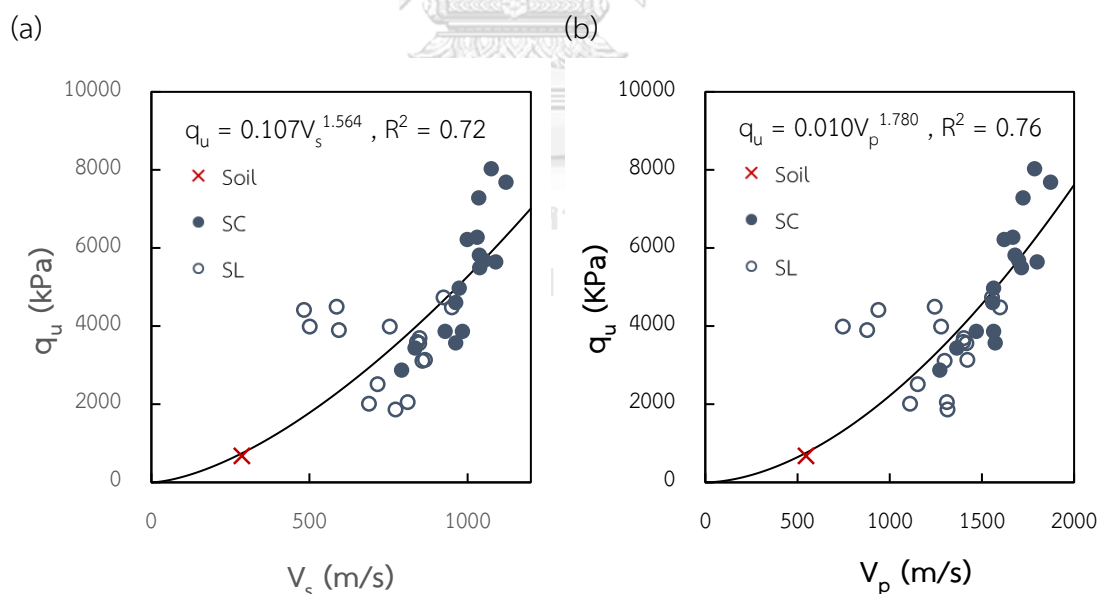
ในทางตรงกันข้ามเมื่อปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวด้วยปูนขาว ค่าความเร็วคลื่น V_s และ V_p แสดงดังรูปที่ 4-11 (a) และรูปที่ 4-11 (b) จากรูปจะสังเกตเห็นว่าเมื่อดินเหนียวถูกปรับปรุงด้วยปริมาณปูนขาว 6% ค่าความเร็วคลื่น V_s และ V_p มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่ม โดยที่ระยะเวลาบ่ม 7 28 60 และ 90 วัน ค่าความเร็วคลื่น V_s มีค่าเท่ากับ 772.39 846.85 847.49 และ 950.07 m/s ตามลำดับ ในทำนองเดียวกัน ค่าความเร็วคลื่น V_p มีค่าเท่ากับ 1312.59 m/s ที่อายุบ่ม 7 วัน และเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่มเป็น 1415.78 1401.83 และ 1596.83 m/s ตามลำดับ นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาปริมาณปูนขาวที่ 10% ค่าความเร็วคลื่น V_s และ V_p มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่มตั้งแต่ 7 28 และ 60 วัน โดยมีค่าความเร็วคลื่น V_s เท่ากับ 715.35 856.57 และ 923.58 m/s ตามลำดับ และค่าความเร็วคลื่น V_p เท่ากับ 1151.87 1404.15 และ 1554.82 m/s ตามลำดับ จนกระทั่งระยะเวลาบ่มเท่ากับ 90 วัน ค่าความเร็วคลื่น V_s และ V_p มีค่าลดลงเท่ากับ 500.58 และ 994.35 m/s ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาที่ปริมาณปูนขาว 8 และ 12% พบว่าค่าความเร็วคลื่น V_s และ V_p มีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกับการปรับปรุงดินเหนียวด้วยปูนขาวปริมาณ 10%

อย่างไรก็ตามผลการทดสอบพบว่าค่าความเร็วคลื่น V_s และ V_p เพิ่มขึ้นในระยะเวลาบ่ม 7 – 28 วัน เท่านั้น และค่าความเร็วคลื่น V_s และ V_p มีค่าลดลงที่ระยะเวลาบ่ม 60 และ 90 วัน นอกจากนี้สามารถสังเกตได้ว่าที่ระยะเวลาบ่ม 90 วัน เมื่อปริมาณปูนขาวเพิ่มขึ้นจาก 6 8 10 และ 12% ค่าความเร็วคลื่น V_s และ V_p มีแนวโน้มที่ลดลงตามปริมาณปูนขาวที่เพิ่มขึ้นซึ่งค่าที่ได้มีค่าน้อยกว่าที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน เนื่องจากเกิดรอยแตกร้าวบริเวณผิวของตัวอย่างดินแสดงดังรูปที่ 4-15



รูปที่ 4-11 ความสัมพันธ์ของความเร็วคลื่นที่ขึ้นอยู่กับปริมาณปูนขาวและระยะเวลาบ่ม; (a) ความเร็วคลื่น V_s ; (b) ความเร็วคลื่น V_p

จากรูปที่ 4-12 (a) และรูปที่ 4-12 (b) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวกับความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (P-wave) และคลื่นทุติยภูมิ (S-wave) สังเกตได้ว่าแนวโน้มของการพัฒนา กำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวมีลักษณะเป็นเส้นโค้งหงายซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Chan and Ch'ng, 2010; Guimond-Barrett *et al.*, 2013) เมื่อพิจารณาทั้งความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (P-wave) และคลื่นทุติยภูมิ (S-wave) สามารถวิเคราะห์ได้ว่าเมื่อพิจารณาค่าความเร็วคลื่นทั้งสองในช่วงแรก ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวมีอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังที่ละน้อย จากนั้นค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของปูนซีเมนต์และปูนขาวที่สูงขึ้น อีกทั้งระยะเวลาบ่มยังเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวอีกด้วย ปัจจัยภายนอกที่กล่าวมาข้างต้นไม่เพียงแต่ส่งผลต่อการสัมพันธ์ของความเร็วคลื่นและกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว แต่ยังมีปัจจัยภายในซึ่งคือการเกิดผลิตภัณฑ์ที่ก่อตัวขึ้นอยู่ในรูปของโครงสร้างผลึก เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) และเอททริงไคต์ (Et) โครงสร้างเหล่านี้จะทำหน้าที่เชื่อมประสานระหว่างอนุภาคเม็ดดินและส่งผลต่อความแข็งแรงของตัวอย่าง ทำให้ความเร็วคลื่นสามารถสัมพันธ์ได้ดีและกำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้น โดยสมการกำลังของการศึกษานี้แสดงดังสมการที่ (4-4) และ (4-5)



รูปที่ 4-12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นและกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว; (a) ความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (S-wave); (b) ความเร็วคลื่นทุติยภูมิ (P-wave)

$$q_u = 0.107V_s^{1.564} \quad R^2 = 0.72 \quad (4-4)$$

$$q_u = 0.010V_p^{1.780} \quad R^2 = 0.76 \quad (4-5)$$

เมื่อ	q_u	=	ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (kPa)
	V_s	=	ค่าความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (P-wave, m/s)
	V_p	=	ค่าความเร็วคลื่นทุติยภูมิ (S-wave, m/s)

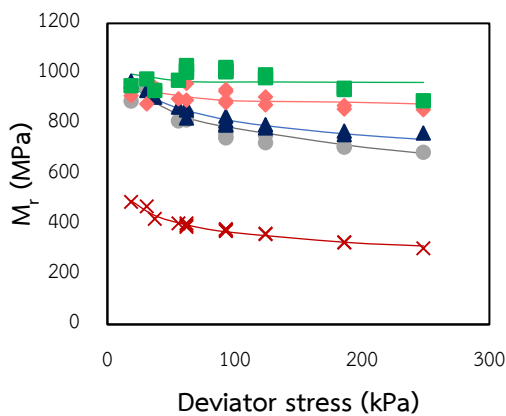
4.7 การทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient modulus test, M_r)

ค่าโมดูลัสคืนตัวของ การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวแม่เมาะด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาวที่อัตราส่วนผสม 6 8 10 และ 12% ที่ระยะเวลาบ่มแตกต่างกันที่ 7 28 60 และ 90 วัน ถูกทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ 14 kN Dynamic UTM ซึ่งมีการประมวลผลทั้งหมด 16 ลำดับ ลำดับละ 100 รอบ ซึ่งการให้แรงในแต่ละลำดับแสดงดังตารางที่ 3-3 ผลการทดสอบสำหรับค่าโมดูลัสคืนตัว (M_r) แสดงอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบน (Deviator stress) และโมดูลัสคืนตัว (M_r) ที่ระยะเวลาบ่มเดียวกันแสดงดังรูปที่ 4-13 และรูปที่ 4-14 จากผลการทดสอบพบว่าค่าโมดูลัสคืนตัวมีค่าลดลงเมื่อความเค้นเบี่ยงเบนมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากค่าความเค้นเบี่ยงเบนมีอิทธิพลต่อค่าโมดูลัสคืนตัวของดินเหนียวหลังจากการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาวมากกว่าความเค้นรอบข้าง มากไปกว่านั้นคุณสมบัติทางกายภาพยังเป็นหนึ่งในปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าโมดูลัสคืนตัวด้วย (Chompoorat *et al.*, 2018; Nguyen and Mohajerani, 2016) การทดสอบหา ค่าโมดูลัสคืนตัวตามมาตรฐานของกรมทางหลวงระบุว่าที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน เป็นระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ (Chompoorat *et al.*, 2018)

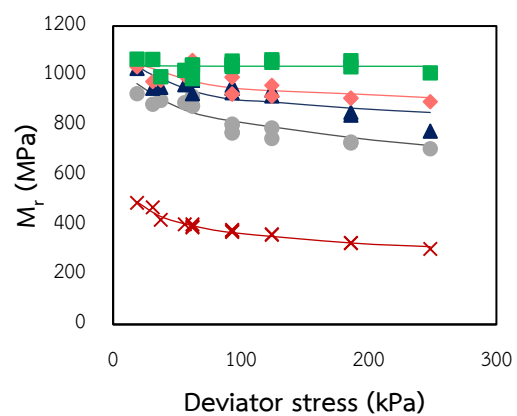
จากการทดสอบพบว่าค่าโมดูลัสคืนตัวของตัวอย่างดินแม่เมาะก่อนการปรับปรุงคุณภาพ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 311.12 MPa โดยเฉลี่ยจากค่าโมดูลัสคืนตัวในลำดับที่ 8 9 12 14 และ 15 ซึ่งแต่ละลำดับมีค่าความเค้นเบี่ยงเบนเท่ากับ 124.10 186.10 186.10 124.10 และ 248.20 kPa ตามลำดับ ในขณะที่เมื่อปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยปูนซีเมนต์ พบว่าค่าโมดูลัสคืนตัวจะมีค่ามากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์ โดยค่าเฉลี่ยของโมดูลัสคืนตัวมีค่าเท่ากับ 788.61 869.32 942.76 และ 980.72 MPa ตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่ 6 8 10 และ 12% ตามลำดับ ซึ่งปริมาณปูนซีเมนต์ที่ 12% มีค่าโมดูลัสคืนตัวมากที่สุด และเมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาบ่มที่ 28 วัน สังเกตเห็นว่าที่ปริมาณ

ปูนซีเมนต์ 6 8 และ 10% ค่าโมดูลัสคืนตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 743.93 840.36 และ 995.90 MPa ตามลำดับ และมีค่าลดลงใกล้เคียงกับปริมาณปูนซีเมนต์ 10% เมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์เป็น 12 % โดยมีค่าเท่ากับ 911.59 MPa เมื่อพิจารณาระยะเวลาบ่มที่ 60 และ 90 วัน พบว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าโมดูลัสคืนตัวมีความคล้ายคลึงกับระยะเวลาบ่มที่ 28 วัน เนื่องจากการพัฒนาของกำลังที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์จะสามารถพัฒนากำลังสูงสุดที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อพิจารณาระยะเวลาบ่มที่ 60 และ 90 วัน (Horpibulsuk S. *et al.*, 2009)

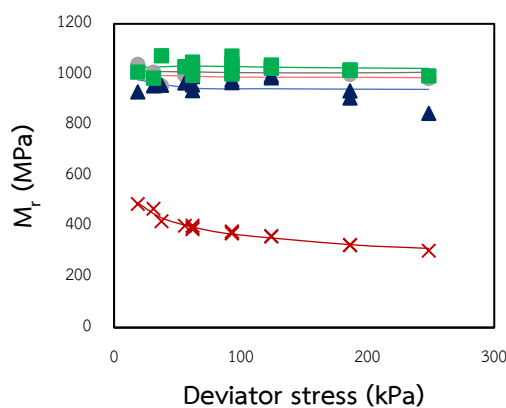
(a) ระยะเวลาบ่ม 7 วัน



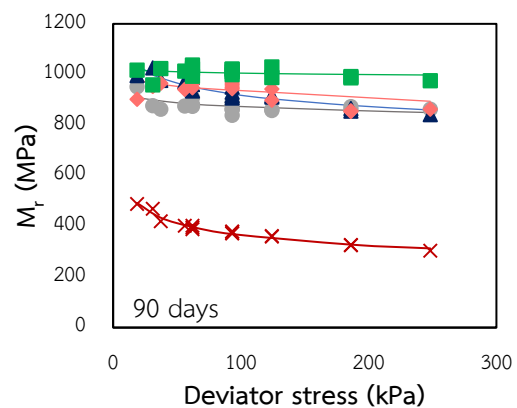
(b) ระยะเวลาบ่ม 28 วัน



(c) ระยะเวลาบ่ม 60 วัน



(d) ระยะเวลาบ่ม 90 วัน

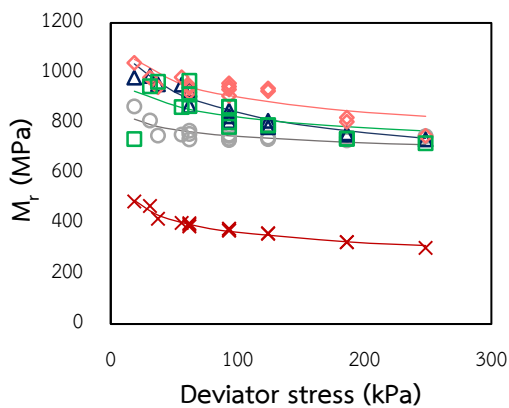


× Soil ● SC6 ▲ SC8 ◆ SC10 ■ SC12

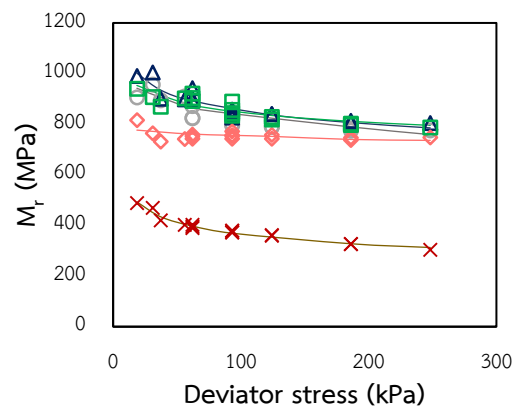
รูปที่ 4-13 ความสัมพันธ์ของโมดูลัสคืนตัวและความเค้นเบี่ยงเบนเมื่อปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ที่ระยะเวลาบ่ม; (a), (b), (c) และ (d) 7 28 60 และ 90 วัน ตามลำดับ

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวด้วยปูนขาวที่ระยะเวลาบ่ม 7 28 และ 60 วัน พบว่าค่าโมดูลัสคืนตัวมีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่ระยะบ่ม 7 วัน มีค่าอยู่ในช่วง 719.61 - 824.05 MPa และที่ระยะบ่ม 28 และ 60 วัน ค่าโมดูลัสคืนตัวมีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 820.97 - 924.72 MPa และ 761.46 - 863.02 MPa ตามลำดับ จนกระทั่งที่ระยะบ่ม 90 วัน สังเกตเห็นแนวโน้มที่ลดลงของค่าโมดูลัสคืนตัวจาก 924.80 เป็น 815.88 809.12 และ 702.61 MPa ตามปริมาณปูนขาวที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ เนื่องจากที่ระยะบ่ม 90 วัน บริเวณผิวของตัวอย่างเกิดรอยร้าวมากขึ้นตามปริมาณปูนขาวที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4-15

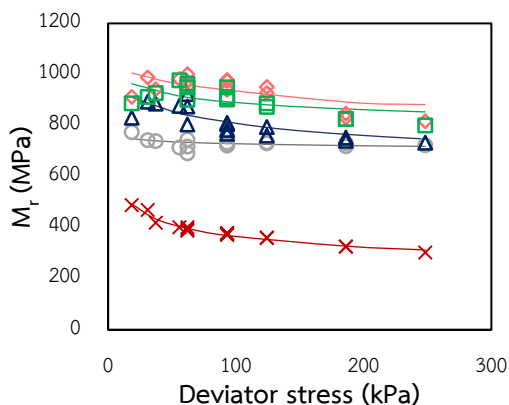
(a) ระยะเวลาบ่ม 7 วัน



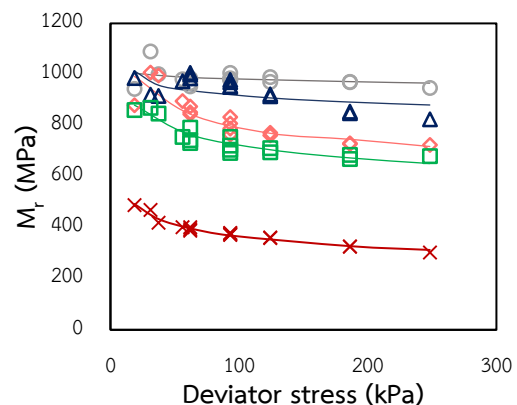
(b) ระยะเวลาบ่ม 28 วัน



(c) ระยะเวลาบ่ม 60 วัน

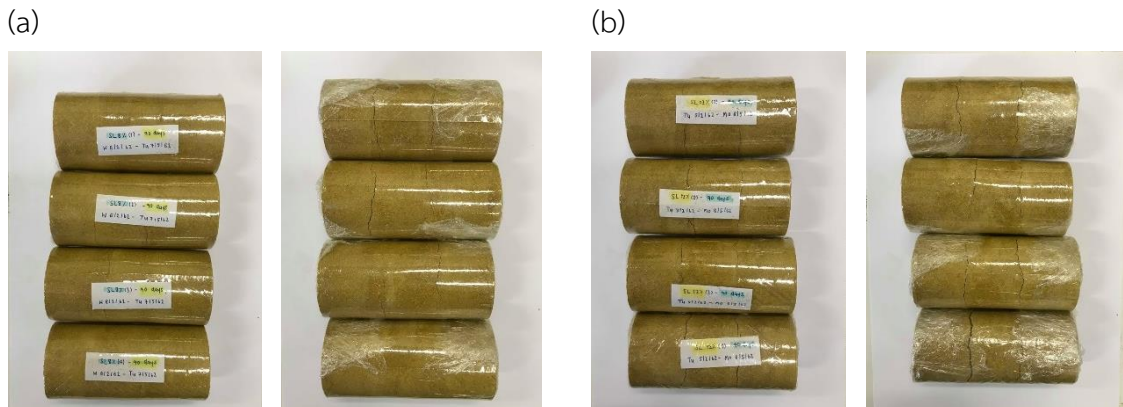


(d) ระยะเวลาบ่ม 90 วัน



× Soil ○ SL6 ▲ SL8 ◆ SL10 □ SL12

รูปที่ 4-14 ความสัมพันธ์ของโมดูลัสคืนตัวและความเค้นเบี่ยงเบนเมื่อปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวที่ระยะเวลาบ่ม; (a), (b), (c) และ (d) 7 28 60 และ 90 วัน ตามลำดับ



รูปที่ 4-15 ลักษณะของผิวตัวอย่างที่เกิดรอยร้าวเมื่อปรับปรุงเสถียรภาพด้วยปุ๋ยปฐขาวที่ระยะเวลาบ่ม 90 วัน; (a) ปรับปรุงด้วยปุ๋ยปฐขาวปริมาณ 8%, (b) ปรับปรุงด้วยปุ๋ยปฐขาวปริมาณ 12%

นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้มีการนำแบบจำลองของ May and Witczak (1981) มาประยุกต์ใช้เพื่ออธิบายพฤติกรรมที่ไม่เป็นเส้นตรง (Non-linear behaviour) ซึ่งการเกิดขึ้นของพฤติกรรมเหล่านี้เกิดจากตัวอย่างถูกให้แรงกระทำสลับไปมา (May R. W. and Witczak M. W., 1981) โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลสำคัญสำหรับแบบจำลองนี้คือ ความเค้นเบี่ยงเบน และความเค้นรอบข้าง แสดงดังสมการที่ (4-6) จากสมการดังกล่าวสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (k_1, k_2, k_3) ได้จากค่าโมดูลัสคืนตัวอีกด้วย ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของแต่ละอัตราส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 4-7

$$M_r = k_1 P_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_3} \quad (4-6)$$

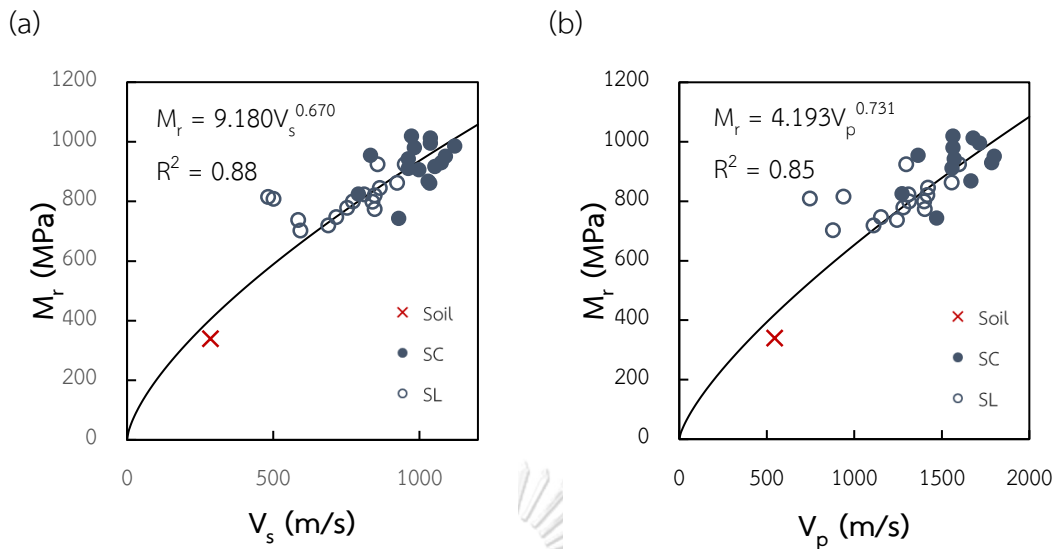
เมื่อ	k_1	k_2	k_3	=	ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficients)
	P_a			=	แรงดันบรรยากาศ 101 kPa (Atmospheric pressure)
	σ_d			=	ความเค้นเบี่ยงเบน (Deviator stress)
	θ			=	ผลรวมของความเค้นหลัก (Sum of principle stresses)

ตารางที่ 4-7 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (k_1 k_2 k_3) ที่ได้จากแบบจำลองของ May และ Witczak

ระยะเวลาป้อม (วัน)	ตัวอย่างดิน	ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย			
		k_1	k_2	k_3	R^2
7	S	3557.03	0.014	-0.187	0.97
	SC6	7930.52	-0.041	-0.096	0.87
	SC8	7972.44	0.002	-0.110	0.96
	SC10	9065.77	-0.018	-0.012	0.93
	SC12	9059.74	0.053	-0.056	0.97
28	SC6	8230.32	-0.039	-0.083	0.83
	SC8	8649.44	0.036	-0.110	0.93
	SC10	9673.68	-0.020	-0.038	0.95
	SC12	10217.10	0.003	-0.004	0.99
60	SC6	9855.66	0.012	-0.013	0.04
	SC8	8785.89	0.060	-0.060	0.73
	SC10	9822.22	-0.003	-0.002	0.54
	SC12	10462.57	-0.029	0.023	0.29
90	SC6	8668.35	-0.009	-0.019	0.40
	SC8	9053.67	0.000	-0.07	0.93
	SC10	8679.98	0.042	-0.069	0.78
	SC12	9967.35	-0.005	-0.003	0.98
7	SL6	7351.24	0.004	-0.055	0.58
	SL8	8759.19	-0.056	-0.080	0.96
	SL10	8779.69	0.011	-0.102	0.95
	SL12	8306.54	-0.021	-0.055	0.62
28	SL6	8573.60	-0.052	-0.041	0.84
	SL8	8327.26	0.011	-0.100	0.90
	SL10	7237.91	0.019	-0.036	0.97
	SL12	8339.48	0.002	-0.071	0.83
60	SL6	7182.68	0.001	-0.017	0.18
	SL8	8315.45	-0.044	-0.04	0.87
	SL10	8538.59	0.056	-0.096	0.96
	SL12	8763.54	0.002	-0.049	0.95
90	SL6	9734.17	-0.006	-0.010	0.26
	SL8	8592.67	0.052	-0.100	0.69
	SL10	8377.39	-0.048	-0.086	0.94
	SL12	7082.51	0.007	-0.122	0.99

จากผลการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (k_1, k_2, k_3) ของแต่ละอัตราส่วนผสมด้วยแบบจำลองของ May and Witczak (1981) พบว่าดินเหนียวก่อนการปรับปรุงคุณภาพมีค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย k_1, k_2 และ k_3 เท่ากับ 3357.03 0.014 และ -0.187 ตามลำดับ เมื่อพิจารณา ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย k_1, k_2 และ k_3 ของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปริมาณปูนซีเมนต์ที่ 6 8 10 และ 12% ที่ระยะเวลาบ่ม 7 28 60 และ 90 วัน สังเกตเห็นว่าค่า k_1 มีค่าอยู่ในช่วง 7930.52 ถึง 10462.57 ค่า k_2 มีค่าอยู่ในช่วง -0.041 ถึง -0.053 และค่า k_3 มีค่าอยู่ในช่วง -0.110 ถึง 0.023 ในขณะที่เดียวกันเมื่อพิจารณา ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย k_1, k_2 และ k_3 ของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปริมาณปูนขาว พบว่าค่า k_1 มีค่าอยู่ในช่วง 7082.51 ถึง 9734.17 ค่า k_2 มีค่าอยู่ในช่วง -0.056 ถึง 0.056 และค่า k_3 มีค่าอยู่ในช่วง -0.122 ถึง -0.010 ดังนั้นจากการวิเคราะห์จะสังเกตเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย k_1 จะเป็นค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับปริมาณของสารผสมเพิ่มและระยะเวลาบ่ม นอกจากนี้ยังพบว่าความเค้นรอบข้าง (Confining stress) มีอิทธิพลน้อยต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าโมดูลัสคืนตัวเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย k_2 มีค่าใกล้เคียงกับศูนย์ ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย k_3 มีค่าติดลบจึงสามารถระบุได้ว่าค่าโมดูลัสคืนตัวมีค่าลดลงเมื่อค่าความเค้นเบี่ยงเบนเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Chompoorat *et al.*, 2018; Lee *et al.*, 1997; Nguyen and Mohajerani, 2016)

นอกจากนี้ค่าความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (P-wave) และความเร็วคลื่นทุติยภูมิ (S-wave) ที่ได้จากค่าการสั่นพ้องของตัวอย่างดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาวทุกอัตราส่วนที่ระยะเวลาบ่ม 7 28 60 และ 90 วัน โดยค่าความเร็วคลื่นเหล่านี้สามารถนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์กับค่าโมดูลัสคืนตัวแสดงดังรูปที่ 4-16



รูปที่ 4-16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นและค่าโมดูลัสคั้นตัว; (a) ความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (S-wave); (b) ความเร็วคลื่นทุติยภูมิ (P-wave)

จากความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสคั้นตัวกับความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (P-wave) และคลื่นทุติยภูมิ (S-wave) พบว่าแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าโมดูลัสคั้นตัวมีลักษณะเป็นเส้นโค้งที่คล้ายคลึงกัน กล่าวคือเมื่อความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (P-wave) และคลื่นทุติยภูมิ (S-wave) มีค่าเพิ่มมากขึ้นค่าโมดูลัสคั้นตัวมีค่ามากขึ้นตาม โดยค่าโมดูลัสคั้นตัวในช่วงความเร็วคลื่นช่วงแรกมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และสมการกำลังสำหรับการศึกษานี้แสดงดังสมการที่ (4-7) และ (4-8)

$$M_r = 9.180V_s^{0.670} \quad R^2 = 0.88 \quad (4-7)$$

$$M_r = 4.193V_p^{0.731} \quad R^2 = 0.85 \quad (4-8)$$

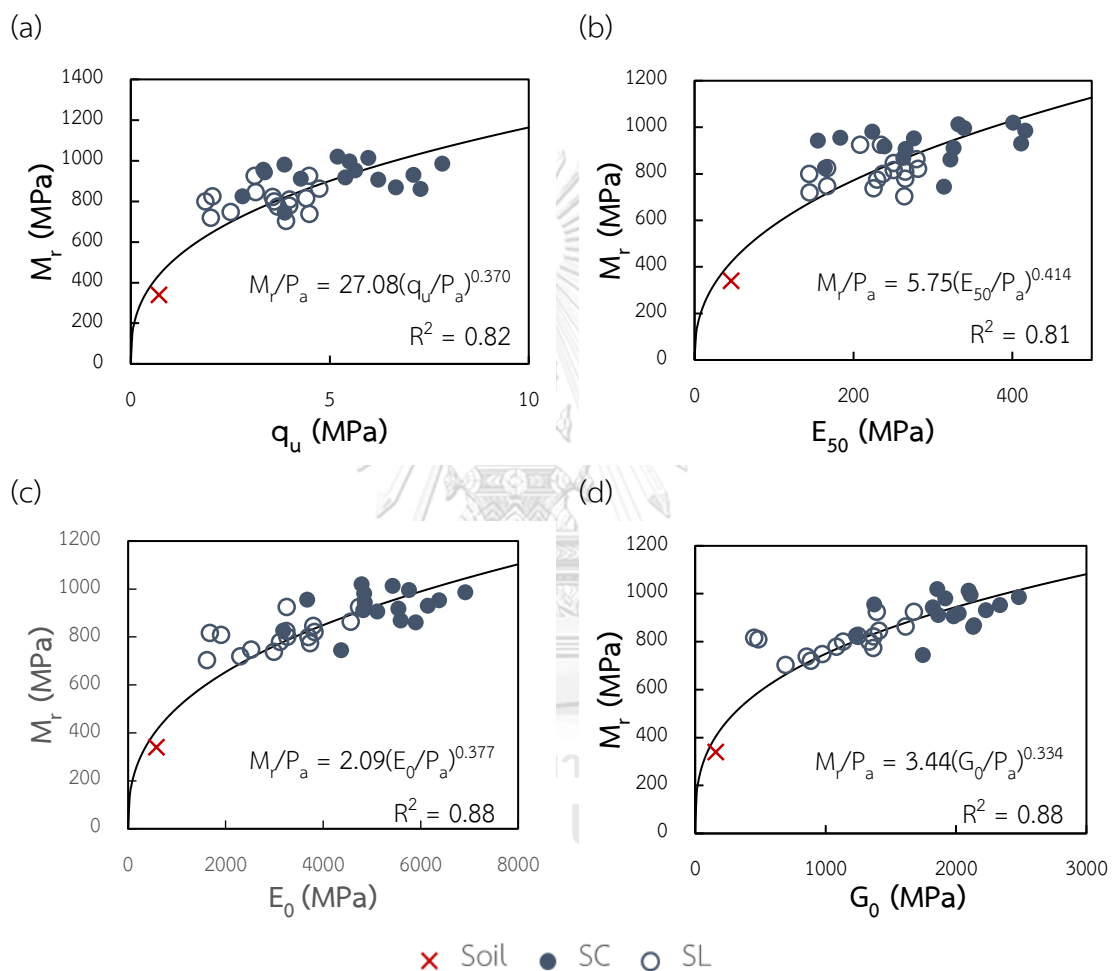
เมื่อ M_r = ค่าโมดูลัสคั้นตัว (MPa)

V_s = ค่าความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (P-wave, m/s)

V_p = ค่าความเร็วคลื่นทุติยภูมิ (S-wave, m/s)

นอกจากนั้นงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้องทั้งทางด้านกำลัง (Strength) และความต้านทานของวัสดุ (Stiffness) ได้แก่ ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (q_u) และ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ 50% (E_{50}) ซึ่งได้จากการทดสอบของกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_0) และค่าโมดูลัสของแรงเฉือน (G_0) ซึ่งค่าทั้งสองนี้ได้จากการทดสอบหาความเร็วคลื่นด้วยวิธีการสั่นพ้องปลายอิสระ

โดยค่าที่กล่าวมาข้างต้นมีอิทธิพลต่อการประเมินค่าโมดูลัสคืนตัวของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาวที่ระยะเวลาบ่ม 7 28 60 และ 90 วัน รูปที่ 4-17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสคืนตัวกับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสคืนตัวกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ 50% ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสคืนตัวกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่าโมดูลัสคืนตัวกับค่าโมดูลัสของแรงเฉือน ในรูปแบบสมการกำลัง



รูปที่ 4-17 (a) ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียวและค่าโมดูลัสคืนตัว; (b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ 50% และค่าโมดูลัสคืนตัว; (c) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและค่าโมดูลัสคืนตัว; (d) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของแรงเฉือนกับค่าโมดูลัสคืนตัว

จากผลการทดสอบสังเกตได้ว่าการเพิ่มขึ้นทางด้านกำลังของค่า q_u และความต้านทานของวัสดุของค่า E_{50} ค่า E_0 และค่า G_0 ส่งผลให้ค่าโมดูลัสคืนตัวมีค่าเพิ่มขึ้น โดยพฤติกรรมของการเพิ่มขึ้นนี้มีลักษณะของความสัมพันธ์แบบเส้นโค้งคว่ำ ซึ่งปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มขึ้นของความต้านทานของ

วัสดุ คือการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างภายในอนุภาคเม็ดดินทำให้ผลิตภัณฑ์ของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และเอทริงไกต์ (Et) ก่อตัวเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารผสมและระยะเวลาบ่ม อีกทั้งยังมีส่วนช่วยในการเพิ่มความต้านทานของวัสดุให้ดีขึ้นและส่งผลให้ความสามารถทางด้านกำลังรับแรงของดินเพิ่มขึ้นด้วย โดยสมการกำลังของการศึกษานี้แสดงดังสมการที่ (4-9) (4-10) (4-11) และ (4-12)

$$\frac{M_r}{P_a} = 27.08 \left(\frac{q_u}{P_a} \right)^{0.370} \quad R^2 = 0.82 \quad (4-9)$$

$$\frac{M_r}{P_a} = 5.75 \left(\frac{E_{50}}{P_a} \right)^{0.414} \quad R^2 = 0.80 \quad (4-10)$$

$$\frac{M_r}{P_a} = 2.09 \left(\frac{E_0}{P_a} \right)^{0.377} \quad R^2 = 0.82 \quad (4-11)$$

$$\frac{M_r}{P_a} = 3.44 \left(\frac{G_0}{P_a} \right)^{0.344} \quad R^2 = 0.80 \quad (4-12)$$

เมื่อ

M_r = ค่าโมดูลัสคืนตัว (MPa)

P_a = แรงดันบรรยากาศ 101 kPa (Atmospheric pressure)

q_u = ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวที่ (kPa)

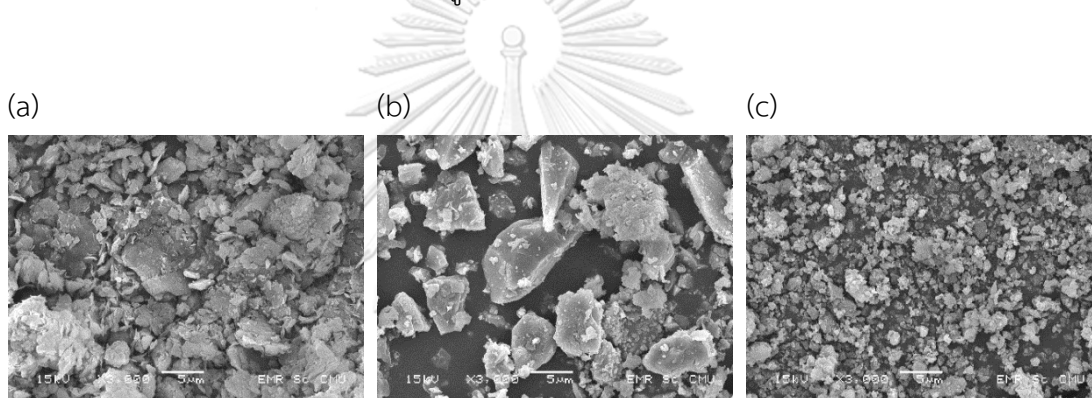
E_{50} = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ 50% ของกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว (MPa)

E_0 = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (MPa)

G_0 = ค่าโมดูลัสของแรงเฉือน (MPa)

4.8 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพ

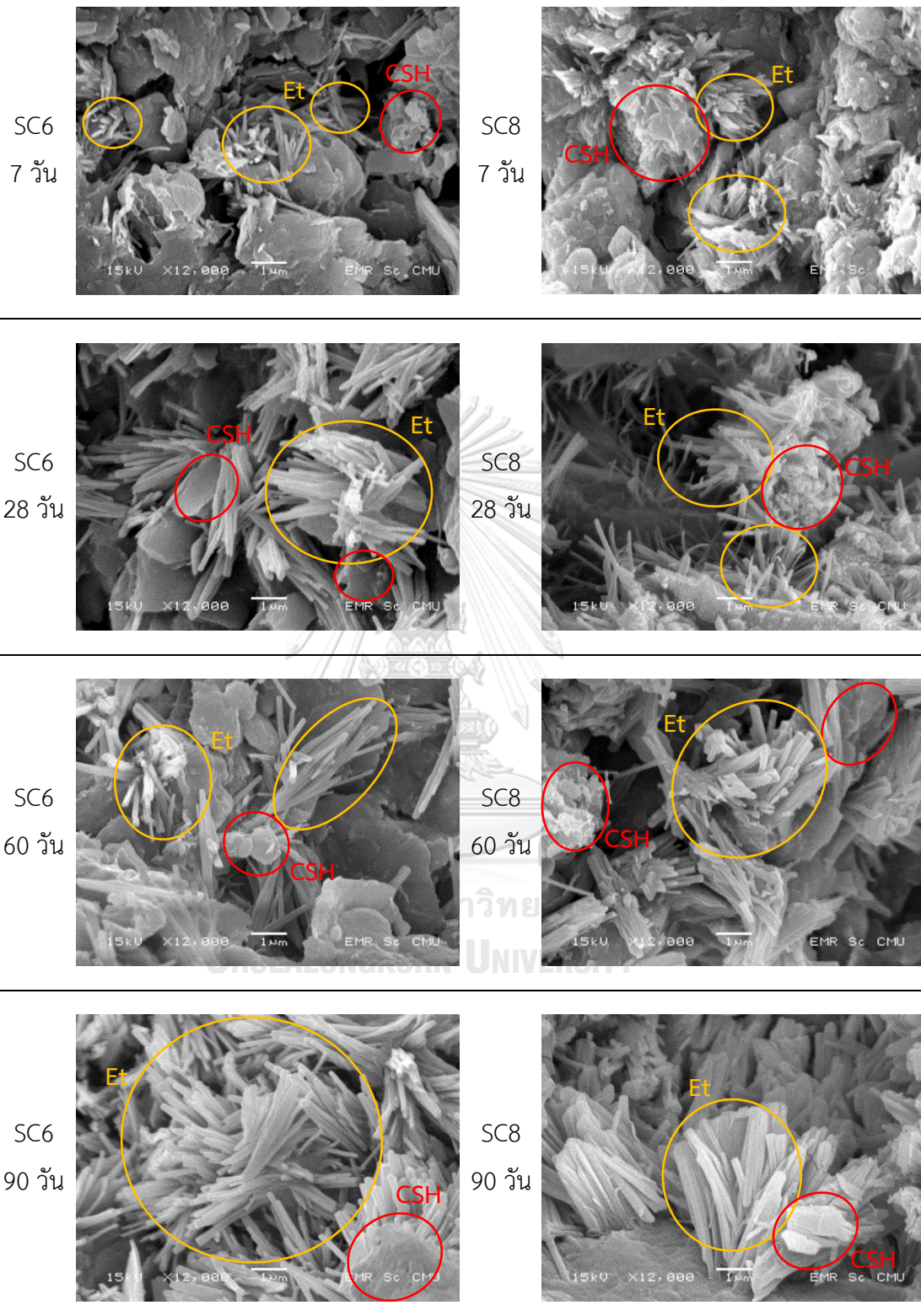
ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) และการวิเคราะห์ปริมาณขององค์ประกอบแร่ธาตุที่เปลี่ยนแปลงไปของดินเหนียวแม่เมาะเมื่อปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาวที่อัตราส่วนผสม 6 8 10 และ 12% โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางจุลภาคที่ระยะเวลาบ่ม 7 28 60 และ 90 วัน จากรูปที่ 4-18 แสดงภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างดินเหนียวแม่เมาะ ปูนซีเมนต์ และปูนขาวก่อนการปรับปรุง พบว่าดินเหนียวแม่เมาะมีลักษณะโครงสร้างการเรียงตัวของชั้นดินเป็นแผ่น ในขณะที่ปูนซีเมนต์มีลักษณะเป็นผลึกเหลี่ยมคล้ายกับก้อนกรวด ส่วนปูนขาวมีลักษณะเป็นก้อนผลึกกลมและมีขนาดเล็กกว่าเม็ดดินและปูนซีเมนต์

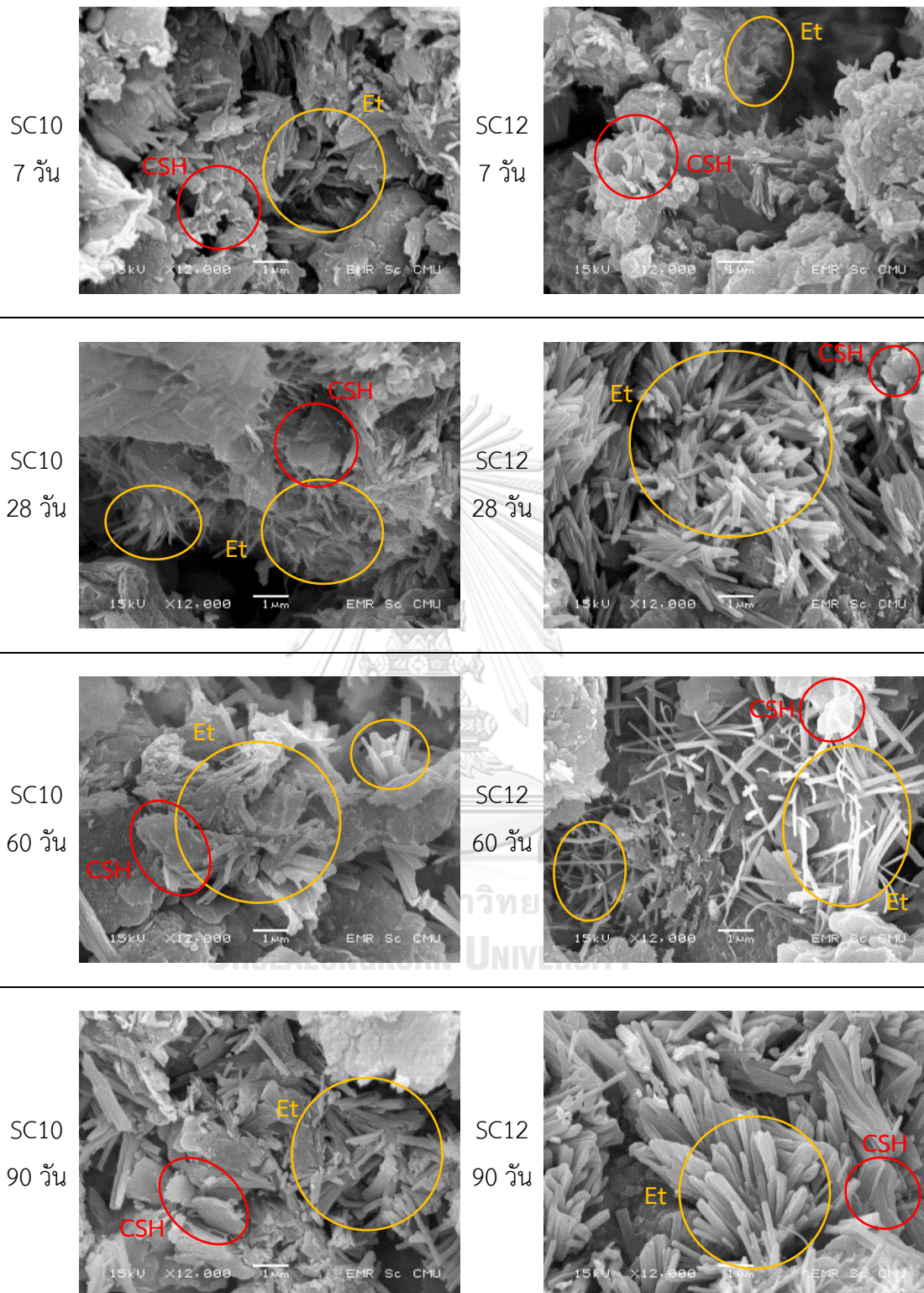


รูปที่ 4-18 ภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างก่อนปรับปรุงคุณภาพที่ระยะ 3000x

(a) ดินเหนียวแม่เมาะ (b) ปูนซีเมนต์ (c) ปูนขาว

หลังจากการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวแม่เมาะด้วยปูนซีเมนต์ปริมาณ 6% ที่ระยะเวลาบ่ม 7 และ 28 วัน สังเกตเห็นว่าบริเวณผิวของเม็ดดินถูกปกคลุมด้วยแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ที่แสดงอยู่ในรูปของโครงข่ายกระจายอยู่ในกลุ่มดินเหนียว ซึ่ง CSH เป็นผลิตภัณฑ์หลักจากกระบวนการของปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Primary hydration) นอกจากนี้ยังพบเอทริงไกต์ (Et) ที่มีลักษณะคล้ายเข็มก่อตัวขึ้นระหว่างอนุภาคดินเหนียวและโครงข่ายของ CSH ซึ่งทำให้โครงสร้างดินเหนียวอัดตัวแน่นขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้จากการทดสอบ UCS มีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องสามารถเรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชันทุติยภูมิ (Secondary hydration) ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับแร่ดินเหนียวและตะกอนซิลิกาต่อก่อให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ CSH และ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ อย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์ CSH และ Et (Horpibulsuk S. *et al.*, 2009; Jamsawang *et al.*, 2017; Sharma *et al.*, 2012)



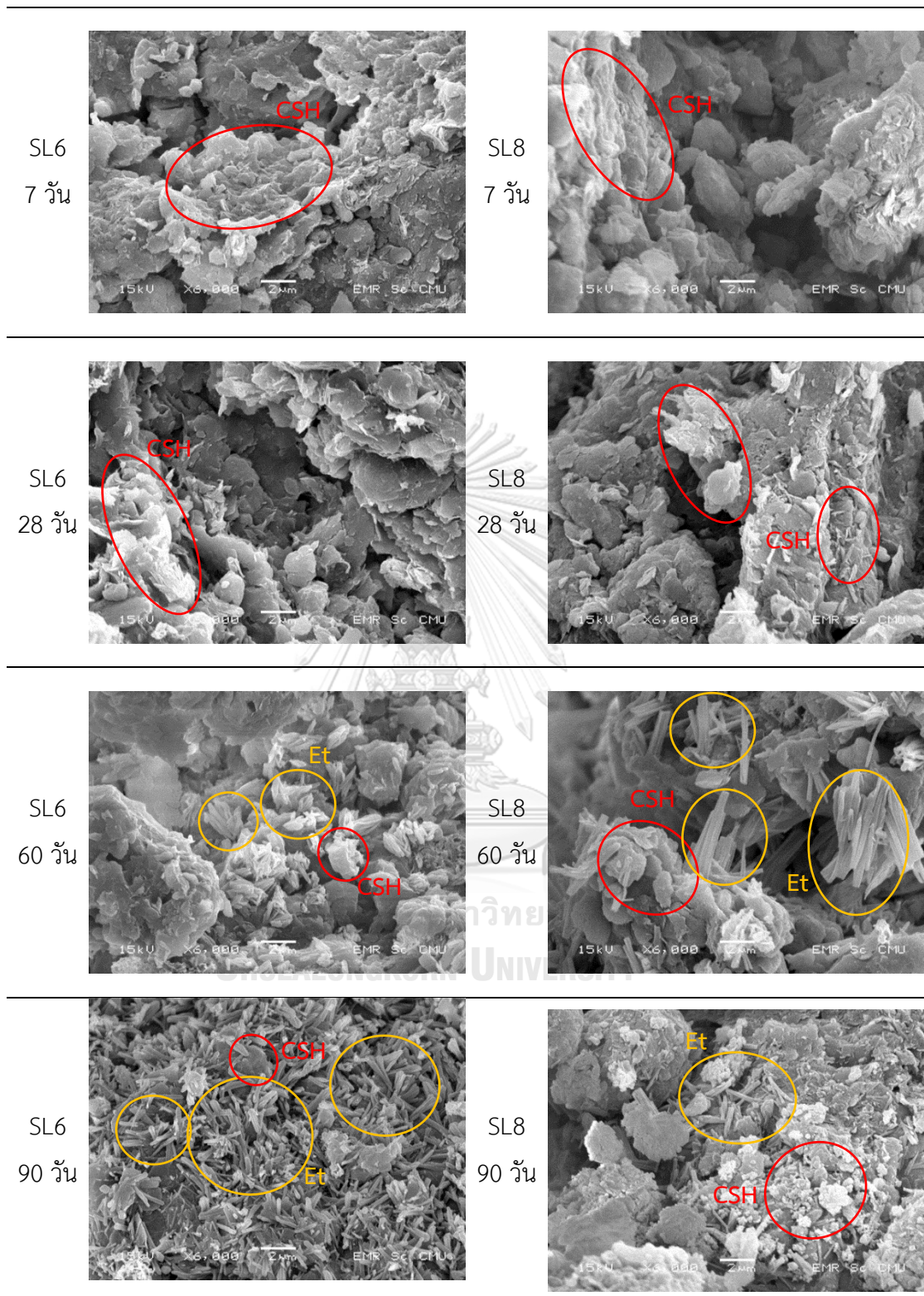


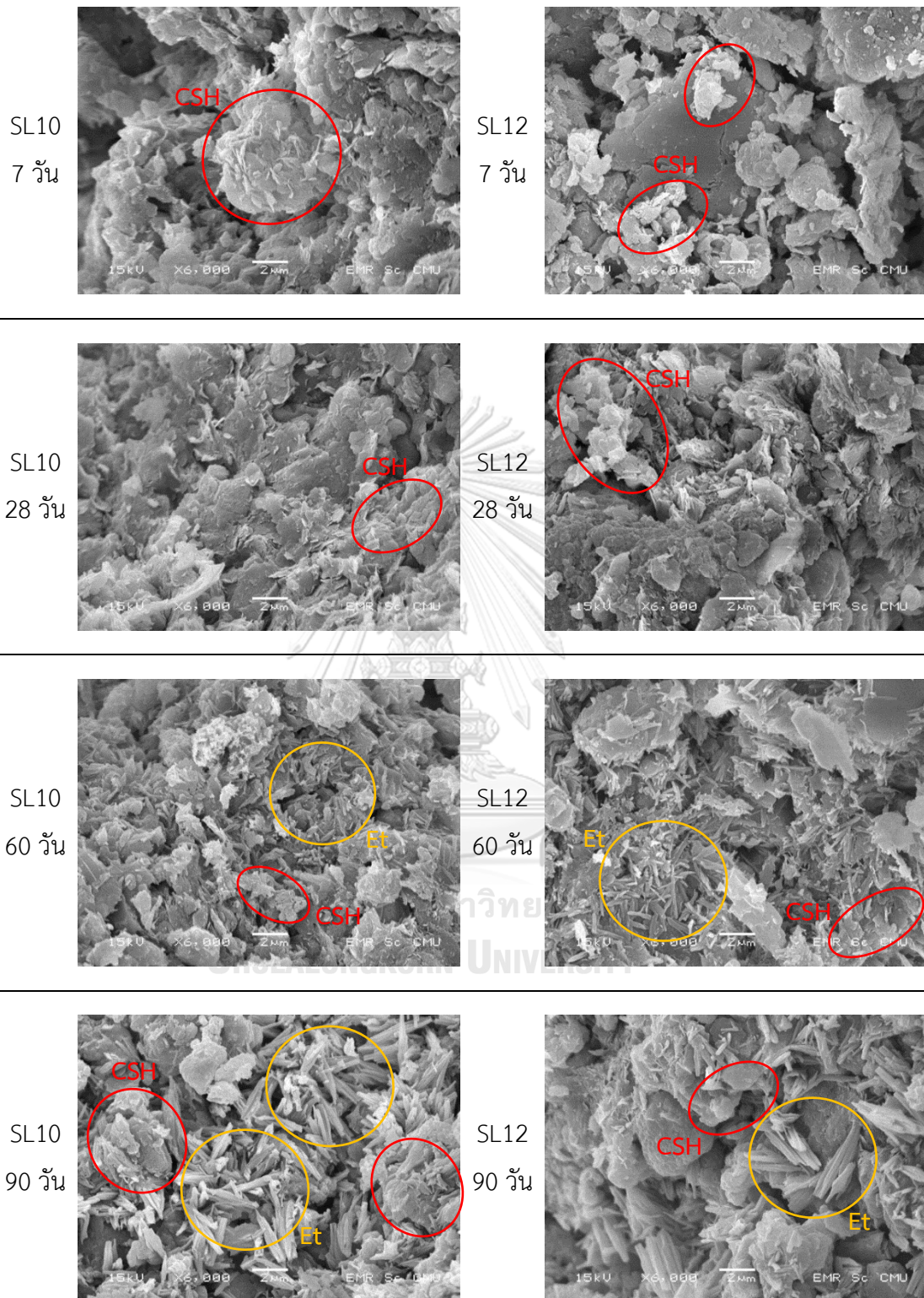
รูปที่ 4-19 ภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างดินเหนียวปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ที่ปริมาณ 6 8 10 และ 12% ที่ระยะเวลาบ่ม 7 28 60 และ 90 วัน ที่กำลังขยาย 12,000x

จากรูปที่ 4-19 พบว่าที่ระยะเวลาบ่ม 60 และ 90 วัน ผลผลิตของ CSH และ Et เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและสังเกตเห็นได้ว่าเข็มที่แสดงลักษณะของผลผลิต Et มีขนาดเพิ่มขึ้นและเกาะกลุ่มกันมากขึ้น และปริมาณช่องว่างที่เกิดขึ้นมีปริมาณลดลงเมื่อเทียบกับระยะเวลาบ่มที่ 7 และ 28 วัน นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนผสม 8 10 และ 12% พบแนวโน้มเดียวกันกับที่อัตราส่วนผสม 6% โดยผลผลิตของ CSH และ Et ก่อตัวเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณของปูนซีเมนต์และระยะเวลาบ่มที่เพิ่มขึ้นซึ่งผลการทดสอบสอดคล้องกับค่ากำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณของปูนซีเมนต์และระยะเวลาบ่มที่ได้จากการทดสอบ UCS

การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวแม่เมาะด้วยปริมาณปูนขาว 6 8 10 และ 12% ที่ระยะเวลาบ่ม 7 และ 28 วัน แสดงดังรูปที่ 4-20 จากภาพถ่าย SEM พบว่าลักษณะของผิวดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวมีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างเมื่อเปรียบเทียบกับดินแม่เมาะก่อนการปรับปรุงคุณภาพเนื่องจากในปูนขาวมี Ca^{2+} เป็นประจุสำคัญที่ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุไอออนบวกระหว่างปูนขาวและพื้นผิวของดินเหนียว ซึ่ง Ca^{2+} จะเข้ามาแทนที่ประจุในดินและยึดเกาะบริเวณผิวของดินเหนียว ส่งผลให้ความเป็นพลาสติกในดินลดลง และยังเกิดกระบวนการรวมตัวกันของเม็ดดิน (Flocculation – agglomeration) อีกด้วย (Bhuvaneshwari *et al.*, 2013) นอกจากนี้ที่ระยะเวลาบ่ม 7 และ 28 วัน สังเกตเห็นการเพิ่มขึ้นของผลึก CSH เมื่อปริมาณปูนขาวเพิ่มขึ้นจาก 6 – 12% เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ที่มีอยู่ในปูนขาวกับ Ca^{2+} ก่อให้เกิดผลึกเป็น CSH และเมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาบ่ม 60 และ 90 วัน พบว่ามีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องของผลึก CSH เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction) ซึ่งเกิดจากการผสมปูนขาว น้ำ และดินที่มีแร่ธาตุซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบ โดยค่า pH ที่ 12.4 เป็นปัจจัยสำคัญในการบ่งชี้ถึงความสามารถในการละลายซิลิกาในดินเหนียวเพื่อรวมตัวกับ Ca^{2+}

นอกจากนี้ที่ระยะเวลาบ่ม 60 และ 90 วัน พบว่ามีผลผลิตของ Et ก่อตัวขึ้นระหว่างอนุภาคดินเหนียวและโครงข่าย CSH ซึ่งการมีอยู่ของ Et เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลเฟอร์ไดออกไซด์ แคลเซียม และน้ำ จากผลการทดสอบสังเกตได้ว่าเมื่อปริมาณของปูนขาวเพิ่มขึ้นจาก 6 -12% ผลึกของ Et มีปริมาณเพิ่มขึ้นและเกาะกลุ่มกันมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณช่องว่างระหว่างอนุภาคดินเพิ่มขึ้นมากกว่านั้นผลึกของ Et ที่เกิดขึ้นจะมีแรงดันที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาตรของของแข็งเพิ่มขึ้น (Bhuvaneshwari *et al.*, 2013; Shinawi, 2017) ดังนั้นจึงทำให้กำลังรับแรงอัดของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวตั้งแต่ปริมาณ 8 – 12% ที่ระยะเวลาบ่ม 90 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดลดลง (Nicholson, 2015)





รูปที่ 4-20 ภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างดินเหนียวปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวที่ปริมาณ 6 8 10 และ 12% ที่ระยะเวลาบ่ม 7 28 60 และ 90 วัน ที่กำลังขยาย 6,000x

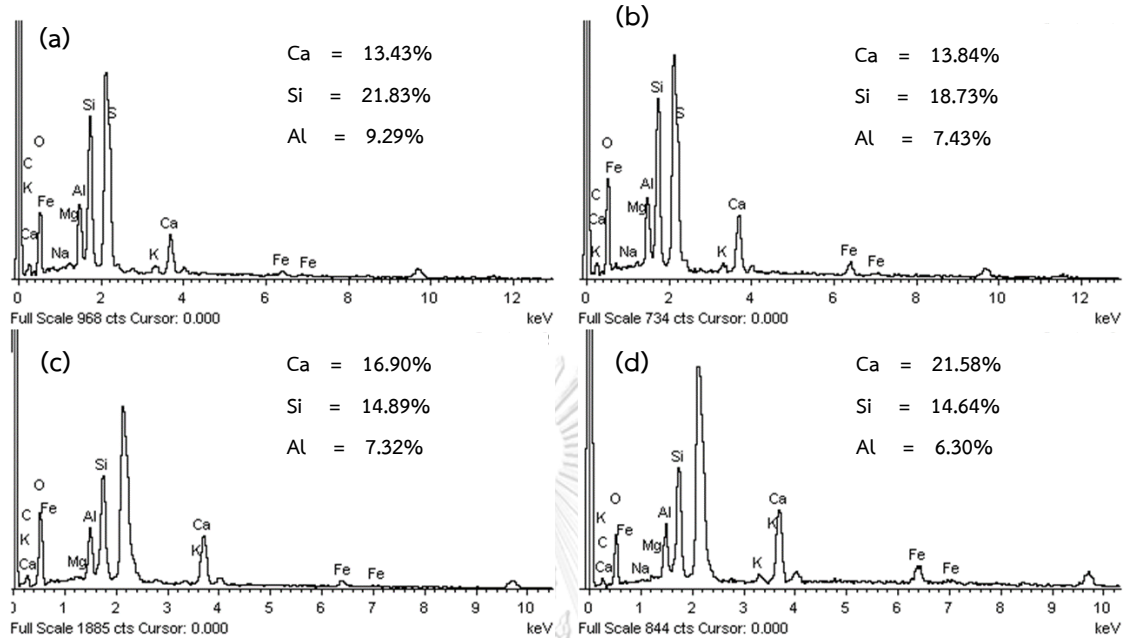
งานวิจัยนี้ยังพบว่าเมื่อดินเหนียวแม่เกาะถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาว ผลิตภัณฑ์หลักของการพัฒนากำลังคือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ เอททริงไคต์ (Et) โดยการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาวมีความแตกต่างกันตรงที่ผลิตภัณฑ์ของเอททริงไคต์ (Et) จากการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่ระยะเวลาบ่มที่ 7 วัน และเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องถึงระยะเวลาบ่มที่ 28 วัน จนกระทั่งเริ่มคงที่ที่ระยะเวลาบ่ม 90 วัน ในทางตรงกันข้ามเมื่อปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว การเกิดขึ้นของผลิตภัณฑ์เอททริงไคต์ (Et) จะเริ่มสังเกตเห็นได้ชัดที่ระยะเวลาบ่ม 60 วัน และเพิ่มขึ้นเมื่อถึงระยะเวลาบ่มที่ 90 วัน

นอกจากนี้รูปแบบของการเกิดปฏิกิริยาของผลิตภัณฑ์ของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาวมีความแตกต่างกัน โดยสารประกอบ CSH ของปูนซีเมนต์เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่วนสารประกอบ CSH ของปูนขาว เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก

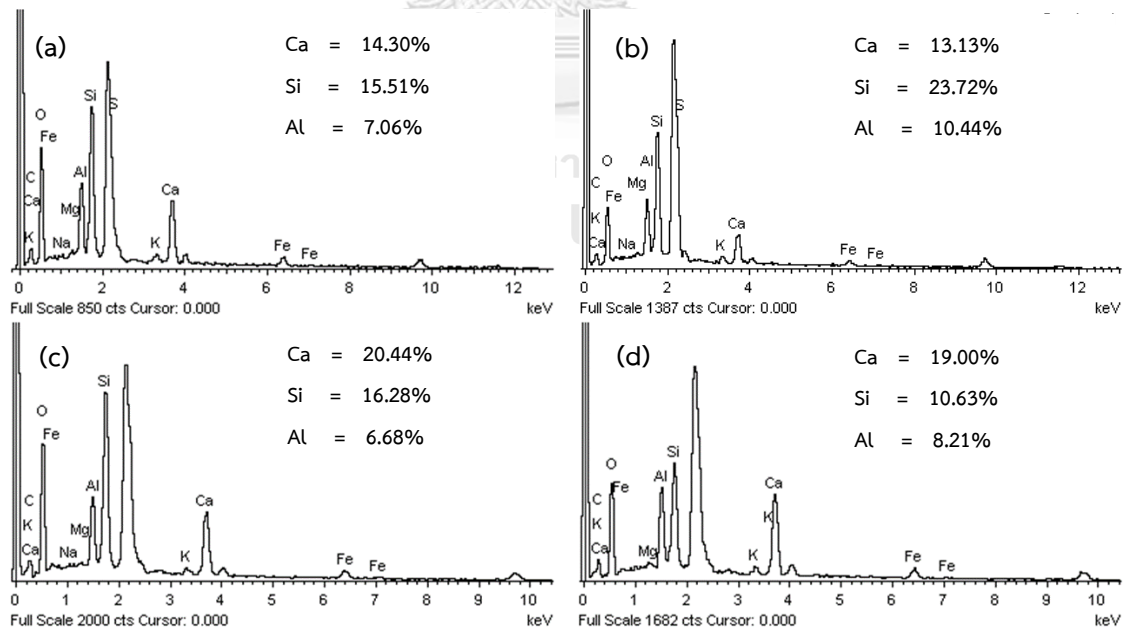
การวิเคราะห์สารประกอบธาตุด้วยเครื่อง Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) ถูกนำมาใช้เพื่อตรวจสอบปริมาณของธาตุที่มีอิทธิพลต่อการพัฒนาต้านกำลังและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตัวอย่างดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาว โดยงานวิจัยนี้ได้พิจารณาสารผสมเพิ่มที่ปริมาณ 10% เนื่องจากเป็นปริมาณที่เหมาะสมสำหรับดินเหนียวที่ใช้ในงานวิจัย จากผลการวิเคราะห์สารประกอบธาตุของตัวอย่างดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปริมาณปูนซีเมนต์และปูนขาวที่ 10% ที่ระยะเวลาบ่ม 7 28 60 และ 90 วัน พบว่าสารประกอบธาตุหลักที่พบส่วนใหญ่ได้แก่ แคลเซียม (Ca) ซิลิกอน (Si) อลูมิเนียม (Al) ออกซิเจน (O) และเฟอร์ริก (Fe) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Bell, 1996; Li J. and Poon C.s., 2017) มากกว่านั้นยังพบว่ามีธาตุอื่นๆที่ผสมอยู่เล็กน้อยได้แก่ แมกนีเซียม (Mg) โพแทสเซียม (K) โซเดียม (Na) และ ซัลเฟอร์ (S) รูปที่ 4-21 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ที่ 10% พบว่าที่ระยะเวลาบ่มมากขึ้น สารประกอบธาตุ Ca มีปริมาณเพิ่มขึ้น ส่วนสารประกอบธาตุ Si และ Al มีปริมาณลดลงทีละน้อย

เมื่อตัวอย่างดินถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปริมาณปูนขาว 10% แสดงดังรูปที่ 4-22 จากการวิเคราะห์พบว่าสารประกอบธาตุ Ca มีปริมาณเพิ่มตามระยะเวลาบ่มที่มากขึ้นเช่นเดียวกับการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ ในขณะที่เดียวกันพบว่าสารประกอบธาตุ Si และ Al มีปริมาณใกล้เคียงกันแม้ว่าระยะเวลาบ่มเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นจึงสามารถอนุมานได้ว่ากำลังรับแรงของ

ตัวอย่างดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาวมีการพัฒนาเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของสารประกอบธาตุ Ca เป็นหลัก



รูปที่ 4-21 ผลการวิเคราะห์สารประกอบธาตุด้วยเครื่อง EDS ของตัวอย่างที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปริมาณปูนซีเมนต์ 10% ตามระยะเวลาบ่ม; (a) 7 วัน; (b) 28 วัน; (c) 60 วัน; (d) 90 วัน



รูปที่ 4-22 ผลการวิเคราะห์สารประกอบธาตุด้วยเครื่อง EDS ของตัวอย่างที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปริมาณปูนขาว 10% ตามระยะเวลาบ่ม; (a) 7 วัน; (b) 28 วัน; (c) 60 วัน; (d) 90 วัน

4.9 การทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer; XRD)

การทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เพื่อวิเคราะห์และระบุชนิดของสารประกอบ โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่มีอยู่ในตัวอย่างทั้งในเชิงคุณภาพ (Qualitative) และเชิงปริมาณ (Quantitative) โดยสามารถบ่งบอกถึงความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาเคมีของดินเหนียวแม่เมาะทั้งก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาว โดยเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดโดยองค์กร JCPDs (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้เลือกทดสอบตัวอย่างที่มีการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาวที่ 6 และ 10% เนื่องจากที่ปริมาณ 6% เป็นปริมาณวัสดุเชื่อมประสานเริ่มต้นที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับการปรับปรุงคุณภาพที่ปริมาณ 10% เนื่องจากการทดสอบค่า pH ของปูนขาว เมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาวที่ 10% ทำให้ค่า pH มีค่าเป็น 12.37 ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงปริมาณปูนขาวที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกเมื่อผสมเข้ากับดินและน้ำ โดยความละเอียดของการวัดมุมในการทดสอบอยู่ที่ 2 θ ในช่วง 5 – 80 องศา โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาวที่ปริมาณ 6 และ 10% ตามระยะเวลาบ่มที่ 7 28 60 และ 90 วัน โดยเปรียบเทียบกับตัวอย่างดินเหนียวที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ รูปที่ 4-23 แสดงผลการวิเคราะห์ XRD ของตัวอย่างดินก่อนการปรับปรุงคุณภาพ พบว่าตัวอย่างดินประกอบด้วยผลึกของควอตซ์เป็นหลัก รองลงมาเป็นกลุ่มของแร่มอนมอริลไอโนต์ อิลไลต์ และคาโอลิโนต์ โดยกลุ่มของแร่เหล่านี้สามารถแสดงถึงคุณสมบัติของความเป็นดินเหนียว อีกทั้งยังมีอิทธิพลต่อความเป็นพลาสติกของดินและความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน

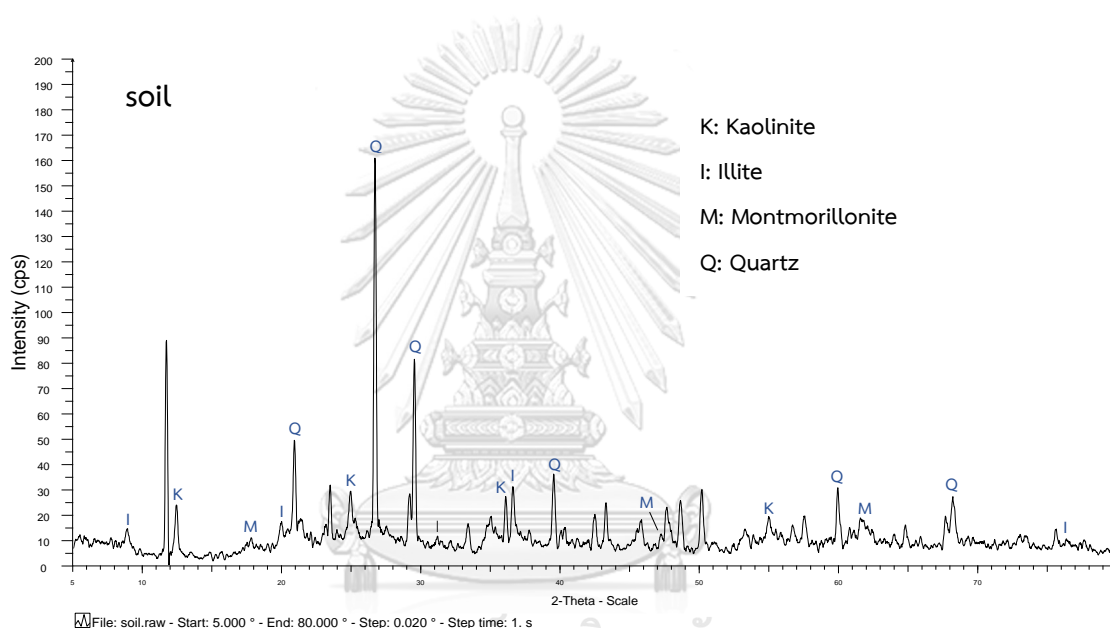
จากรูปที่ 4-24 แสดงผลการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของตัวอย่างดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปริมาณปูนซีเมนต์ 6% และ 10% ที่ระยะเวลาบ่ม 7 28 60 และ 90 วัน พบว่าระยะเวลาบ่มที่ 7 - 60 วัน ผลึกของ CSH และ Et ที่เกิดขึ้นมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่ม นอกจากนี้สารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) มีปริมาณที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน จนกระทั่งที่ระยะเวลาบ่ม 90 วัน พบว่าปริมาณของผลึก CSH และ Et มีปริมาณเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อปรับปรุงคุณภาพด้วยปริมาณปูนซีเมนต์ที่ 10% เนื่องจากการแลกเปลี่ยนระหว่างแร่ธาตุในดินกับองค์ประกอบธาตุที่มีอยู่ในสารผสมทำปฏิกิริยาระหว่างกันน้อยลงจึงทำให้ผลิตภัณฑ์ทั้งสองนั้นเริ่มมีปริมาณคงที่ ในทางตรงกันข้ามผลึกของ CSH และ Et มีการเจริญเติบโตอย่างต่อเนื่องเมื่อใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ 6%

นอกจากนี้ผลการทดสอบของดินเหนียวที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปริมาณปูนขาว 6% และ 10% แสดงดังรูปที่ 4-25 พบว่าการเจริญเติบโตของผลึก CSH ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวปริมาณ 10% มีการเจริญเติบโตที่มากกว่าการปรับปรุงคุณภาพที่ 6% เมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาบ่ม 7 - 60 วัน อย่างเห็นได้ชัด จนกระทั่งที่ระยะเวลาบ่ม 90 วัน พบว่าปริมาณของผลึก CSH มีค่าลดลง และยังสังเกตได้ว่าผลึกของ Et มีปริมาณเพิ่มขึ้นที่ละน้อยตามระยะเวลาบ่มตั้งแต่ 7 - 90 วัน ส่งผลให้สารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีปริมาณลดลงเนื่องจากถูกนำไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่อง โดยปริมาณสารประกอบที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาวแสดงดังตารางที่ 4-8

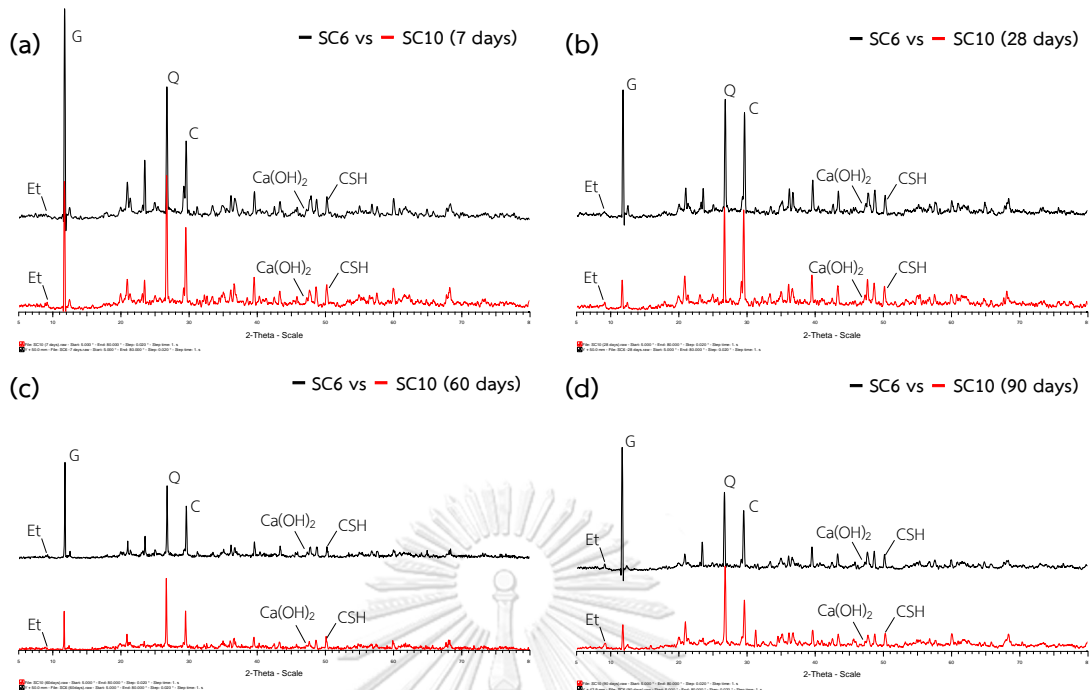
ปริมาณที่เปลี่ยนแปลงไปของผลึก CSH Et และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เมื่อปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาวที่ปริมาณ 10% ที่ระยะเวลาบ่ม 7 28 60 และ 90 วัน พบว่าดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์จะทำให้เกิดการกระตุ้นของสารผสมเพิ่มซึ่งก่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่งผลให้เกิดผลิตภัณฑ์ของ CSH และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) หลังจากนั้นเมื่อระยะเวลาบ่มเพิ่มขึ้นจึงเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องที่เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิก โดยเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแร่แคลเซียมไฮดรอกไซด์กับแร่ธาตุในดินเหนียวที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก ทำให้ผลึกของ CSH ก่อตัวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในทำนองเดียวกันเมื่อดินเหนียวถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวพบว่าการแลกเปลี่ยนไอออนโลหะบนผิวของดินเหนียว หลังจากนั้นอนุภาคดินจะเกิดการรวมตัวกัน ซึ่งปฏิกิริยาเหล่านี้เกิดจากการทำปฏิกิริยาชั้นปฐมภูมิ ได้แก่ ปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอออน (Cation exchange reaction) การรวมตัวกันแบบระเกะระกะ (Flocculation-agglomeration) และคาร์บอนเนชัน (Carbonation) นอกจากนี้ยังพบว่าการเกิดผลิตภัณฑ์ CSH เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกเป็นปฏิกิริยาหลัก

ในส่วนของการเพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์ Et พบว่าเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบยิปซั่มและสารประกอบแคลเซียมอลูมิเนตออกไซด์ โดยผลึกที่เกิดขึ้นก่อตัวอยู่ระหว่างอนุภาคดินเหนียวและผลึก CSH จากการทดสอบยังพบว่าสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นสารตั้งต้นในการก่อให้เกิดผลึกเหล่านี้มีปริมาณลดลง เนื่องจากถูกนำมาใช้ในปฏิกิริยาจนกระทั่งมีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิดปฏิกิริยาได้อีก

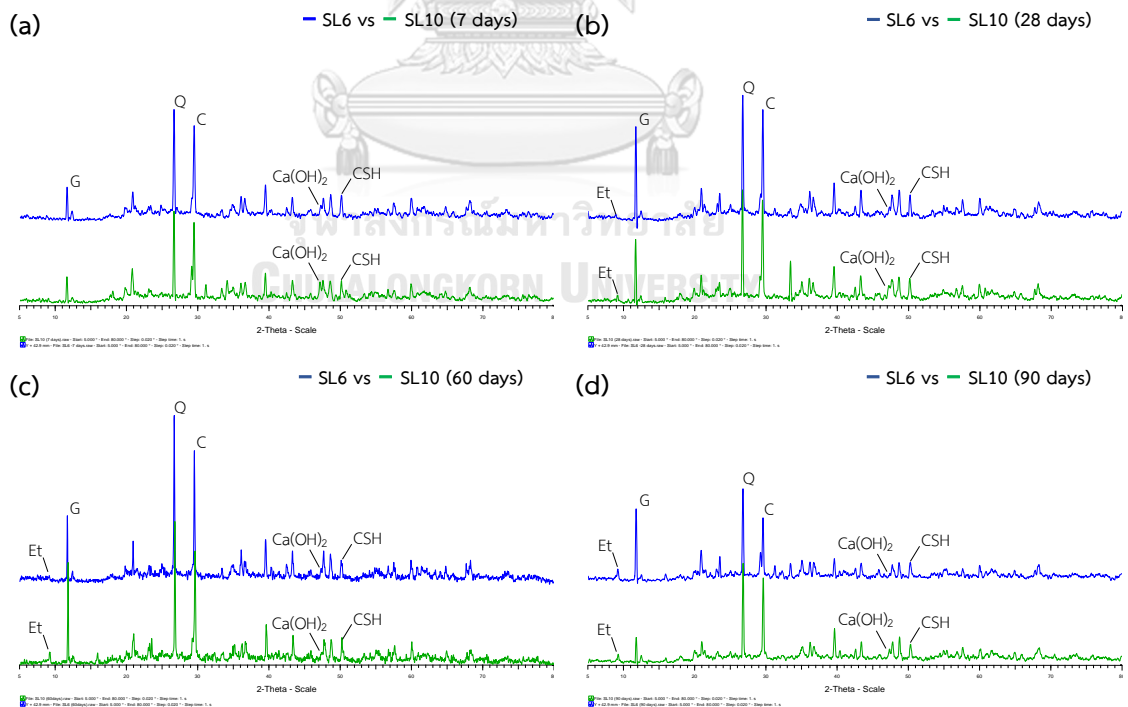
จากผลการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยการทดสอบ SEM EDS และ XRD สามารถอธิบายผลของกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวที่เปลี่ยนแปลงไปจากการปรับปรุงเสถียรภาพด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาว ผลการทดสอบบ่งชี้ว่าปริมาณของผลึก CSH จะมีส่วนช่วยในการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยสารผสมเพิ่มทั้งสองชนิด ในขณะที่ผลึก Et มีส่วนช่วยในการเพิ่มขึ้นของกำลังในตัวอย่างดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ ในทางกลับกันการเพิ่มขึ้นของผลึก Et ในตัวอย่างดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง เนื่องจากผลึกของ Et ทำให้ตัวอย่างดินเกิดการขยายตัวและมีรอยแตกร้าวที่บริเวณผิวของตัวอย่างดิน (Nicholson, 2015)



รูปที่ 4-23 ผลการวิเคราะห์สารประกอบของดินเหนียวก่อนการปรับปรุงคุณภาพด้วยการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)



รูปที่ 4-24 ผลการวิเคราะห์ XRD หลังจากปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ที่ 6% และ 10% ตามระยะเวลาบ่ม; (a) 7 วัน; (b) 28 วัน; (c) 60 วัน; (d) 90 วัน



รูปที่ 4-25 ผลการวิเคราะห์ XRD หลังจากปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวที่ 6% และ 10% ตามระยะเวลาบ่ม; (a) 7 วัน; (b) 28 วัน; (c) 60 วัน ; (d) 90 วัน

ในที่นี้ G = ยิปซัม; Q = ควอตซ์;
 C = แคลไซต์; CSH = แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต;
 Et = เอททริงไคต์; Ca(OH)₂ = แคลเซียมไฮดรอกไซด์

ตารางที่ 4-8 ปริมาณสารประกอบหลังจากปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาว

ปริมาณ สารผสม	ระยะ เวลาป่ม	ปริมาณสารประกอบในดินเหนียวหลังจากการปรับปรุงเสถียรภาพ					
		แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต		เอททริงไคต์		แคลเซียมไฮดรอกไซด์	
		SC	SL	SC	SL	SC	SL
6%	7	0.09	0.11	0.04	0.02	0.02	0.17
	28	0.60	1.05	0.07	0.08	0.04	0.16
	60	1.46	2.32	1.35	0.59	2.04	2.36
	90	7.14	7.41	6.15	2.93	0.52	1.64
10%	7	3.81	5.26	0.34	0.42	0.85	5.01
	28	7.29	6.64	1.05	1.13	0.03	0.51
	60	9.96	8.90	4.48	1.87	1.74	0.88
	90	8.91	5.58	3.53	2.46	0.32	0.64

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปงานผลการวิจัย

จากผลการทดสอบงานวิจัยในหัวข้อเรื่องการสำรวจโครงสร้างจุลภาคและพฤติกรรมของดินเหนียววมตัวที่ปรับปรุงด้วยปูนขาวและซีเมนต์ สำหรับดินที่นำมาปรับปรุงคุณภาพคือดินเหนียว จากเหมืองแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ในส่วนสารผสมเพิ่มที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 และปูนขาวไฮเดรตไลม์ จากผลการศึกษสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1) จากผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินแม่เมาะก่อนการปรับปรุงคุณภาพ พบว่าเมื่อจำแนกดินแม่เมาะโดยระบบ Unified (Unified Soil Classification System ,USCS) สามารถระบุได้ว่าเป็นดินชนิดที่มีความเหนียวสูง (High plasticity clay, CH) นอกจากนี้เมื่อทดสอบการบวมตัวอิสระของดินเหนียวสามารถบ่งบอกได้ว่าดินเหนียวมีการบวมตัวอยู่ในระดับปานกลาง (Moderate swelling)

2) จากผลการทดสอบ CBR ของตัวอย่างดินเหนียวแม่เมาะ พบว่าค่า CBR หลังจากปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาวมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยการทดสอบตัวอย่างดินแบบแห้งจะมีค่า CBR มากกว่าการทดสอบแบบแช่น้ำ นอกจากนี้ตัวอย่างดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์มีค่า CBR ที่มากกว่าการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวทั้งการทดสอบแบบเปียกและแบบแช่น้ำ ซึ่งบ่งบอกได้ว่าเมื่อใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่ม จะส่งผลให้ดินเหนียวที่ถูกปรับปรุงคุณภาพมีประสิทธิภาพในการรับแรงมากกว่าการใช้ปูนขาว ในขณะที่เดียวกันการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวสามารถลดการบวมตัวได้ดีกว่าการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์

3) จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว (Unconfined compression test) ของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาวพบว่าตัวอย่างดินมีความเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นวัสดุพื้นทาง (Base) นอกจากนี้การพัฒนาทางด้านกำลังที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์มีประสิทธิภาพสูงกว่าปูนขาว โดยการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดตามปริมาณและระยะเวลาบ่มที่เพิ่มขึ้น ในทางกลับกันพบว่าการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวมีแนวโน้มของการพัฒนากำลังที่ไม่ชัดเจนเมื่อพิจารณาระยะเวลาบ่มที่แตกต่างกัน

4) จากผลการทดสอบหาความเร็วคลื่นในตัวอย่างดินด้วยวิธีการสั่นพ้องอิสระ พบว่าค่าความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (P-wave) และความเร็วคลื่นทุติยภูมิ (S-wave) ที่วัดค่าได้จากดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นที่ละน้อยตามปริมาณระยะเวลาบ่มที่เพิ่มขึ้น ในทางกลับกันเมื่อตัวอย่างดินเหนียวถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวพบว่าความเร็วคลื่นมีแนวโน้มที่ลดลงหลังจากระยะเวลาบ่มที่ 28 วัน

5) จากผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสคั้นตัว พบว่า ความเค้นเบี่ยงเบนเป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าโมดูลัสคั้นตัว โดยค่าโมดูลัสคั้นตัวมีค่าลดลงเมื่อความเค้นเบี่ยงเบนมีค่าเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ค่าความเค้นรอบข้าง (Confining stress) มีอิทธิพลน้อยต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าโมดูลัสคั้นตัว

6) จากการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ของดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาว พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในระหว่างสารผสมเพิ่มกับองค์ประกอบธาตุที่มีอยู่ในดิน โดยกระบวนการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาหลักที่สำคัญคือปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) และปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic) โดยส่งผลให้เกิดผลิตภัณฑ์ของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และเอททริงไกต์ (Et) เมื่อตัวอย่างดินเหนียวถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ พบว่าการเจริญเติบโตของผลึก CSH และ Et มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาบ่ม ในขณะที่ตัวอย่างดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวมีการเจริญเติบโตของผลึก CSH อย่างต่อเนื่อง แต่ในส่วนของผลึก Et นั้นจะเริ่มมีการเจริญเติบโตอย่างเห็นได้ชัดหลังจากระยะเวลาบ่ม 28 วัน โดยสามารถยืนยันผลการทดสอบได้ด้วยวิธีการวิเคราะห์สารประกอบธาตุด้วยเครื่อง Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) และการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD) ซึ่งพบว่ามีปริมาณของ CSH และ Et เกิดขึ้นจริง นอกจากนี้ยังพบว่าระยะเวลาบ่มที่ 90 การพัฒนากำลังของดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวมีค่ากำลังรับแรงที่ลดลงตามปริมาณสารผสมที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการรวมกลุ่มของผลึก Et ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเม็ดดินค่อนข้างมากและทำให้ตัวอย่างเกิดรอยร้าวเนื่องจากการหดตัว

7) จากผลการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของตัวอย่างดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาวพบว่าผลการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ XRD มีความสอดคล้องกับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาค (SEM) จากการทดสอบสังเกตเห็นการพัฒนาอย่างต่อเนื่องของผลึก CSH และ Et ตามระยะเวลาบ่ม โดยผลึกของ CSH ทำหน้าที่หลักใน

การพัฒนากำลัง มากไปกว่านั้นเมื่อตัวอย่างดินถูกปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์พบว่าผลึกของ Et เป็นผลิตภัณฑ์เสริมที่ทำให้กำลังรับแรงมีค่ามากขึ้น แต่ในทางตรงกันข้ามตัวอย่างดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวผลึกของ Et จะทำให้กำลังรับแรงมีค่าลดลงเนื่องจากผลึกของ Et จะทำให้เกิดรอยแตกร้าวบริเวณผิวของตัวอย่างดิน

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรศึกษาคุณสมบัติของดินเบื้องต้นก่อนการเลือกใช้ชนิดของวัสดุและปริมาณของตัวเชื่อมประสาน เนื่องจากในงานวิจัยนี้พบว่าที่ระยะเวลาบ่ม 90 วัน ตัวอย่างเกิดรอยร้าวบริเวณผิวดินทั้งตามยาวและตามขวางเมื่อปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวในปริมาณมาก
- 2) เนื่องจากปูนซีเมนต์และปูนขาวเป็นวัสดุก่อสร้างที่มีราคาสูงและมีกระบวนการผลิตที่อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการเลือกใช้วัสดุเชื่อมประสานชนิดอื่นที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอาจเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่ควรพิจารณา
- 3) ในภายภาคหน้าขอเสนอแนะให้ทำการทดสอบเป็ยกสลับแห้งเพื่ออธิบายพฤติกรรมการเพิ่มขึ้นและลดลงของความคงทนของตัวอย่างดิน

บรรณานุกรม

- Al-Mukhtar, M., Lasledj, A., and Alcover, J.-F. (2010). Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20°C. *Applied Clay Science*, 50(2), 191-198. doi:10.1016/j.clay.2010.07.023
- Al-Rawas, A. A., Hago, A. W., and Al-Sarmi, H. (2005). Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman. *Building and Environment*, 40(5), 681-687. doi:10.1016/j.buildenv.2004.08.028
- Al-Taie A. Y., Disfani M. M., Evans R. P., Arulrajah A., and Horpibulsuk S. (2015). Determination of optimum lime content for volcanic expansive clays. *From Fundamentals to Applications in Geotechnics*, 1623-1630. doi:10.3233/978-1-61499-603-3-1623
- Baglari D., and S.K., D. (2013). *Improvement of expansive soil by lime and reinforcement*. Paper presented at the Proceedings of Indian Geotechnical Conference, Civil Engg. Department, Indian Institute of Technology, Roorkee.
- Bell, F. G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology*, 42, 223-237.
- Bharathi, K. S., Ramakrishna, M. M. E., and Gopalakrishna, P. (2017). Experimental study granular pile anchor foundation. *International Journal For Technological Research In Engineering*, 4(5), 814-818.
- Bhuvaneshwari, S., Robinson, R. G., and Gandhi, S. R. (2013). Behaviour of Lime Treated Cured Expansive Soil Composites. *Indian Geotechnical Journal*, 44(3), 278-293. doi:10.1007/s40098-013-0081-3
- Chan, C. M., and Ch'ng, S. S. (2010). Preliminary study of s-wave velocity and unconfined compressive strength of cement-palf stabilised kaolin. *International Journal of Integrated Engineering*, 2(2).
- Chompoorat, T., Likitlersuang, S., and Jongvivatsakul, P. (2018). The Performance of Controlled Low-strength Material Base Supporting a High-volume Asphalt Pavement. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(6), 2055-2063. doi:10.1007/s12205-018-1527-z

- Clayton, C. R. I. (2011). Stiffness at small strain: research and practice. *Géotechnique*, 61(1), 5-37. doi:10.1680/geot.2011.61.1.5
- Daipuria, P., and Trivedi, M. K. (2016). Improvement of swelling properties of expansive soil blending with sand and cement. *International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR)*, 5(6), 2009-2014.
- Diouri, A., Mohammed Cherif, M., Amal, M., Ramdane, B., Boukhari, A., Ait Brahim, L., . . . Nounah, A. (2018). Effect of swelling mineral on geotechnical characteristics of clay soil. *MATEC Web of Conferences*, 149. doi:10.1051/mateconf/201814902067
- Elliott, P. R., and Thornton, S. I. (1988). Resilient modulus and AASHTO pavement design. *Transportation Research Record No. 1196*, 116-124.
- Elsharief, A. M., Zumrawi, M. M. E., and Salam, A. M. (2014). Experimental study of some factors affecting swelling pressure. *University of Khartoum Engineering Journal*, 4(2), 1-7.
- Emarah, D. A., and Seleem, S. A. (2017). Swelling soils treatment using lime and sea water for roads construction. *Alexandria Engineering Journal*. doi:10.1016/j.aej.2017.08.009
- Gaafer, Manar, Bassioni, Hesham, Mostafa, and Tareq. (2015). Soil improvement techniques. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 6(12), 217-222.
- Guimond-Barrett, A., Nauleau, E., Le Kouby, A., Pantet, A., Reiffsteck, P., and Martineau, F. (2013). Free-Free Resonance Testing of In Situ Deep Mixed Soils. *Geotechnical Testing Journal*, 36(2). doi:10.1520/gtj20120058
- Harichane, K., Ghrici, M., Kenai, S., and Grine, K. (2011). Use of Natural Pozzolana and Lime for Stabilization of Cohesive Soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 29(5), 759-769. doi:10.1007/s10706-011-9415-z
- Horpibulsuk, S., Rachan, R., and Suddeepong, A. (2011). Assessment of strength development in blended cement admixed Bangkok clay. *Construction and Building Materials*, 25(4), 1521-1531. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.08.006
- Horpibulsuk S., Rachan R., and Raksachon Y. (2009). Role of fly ash on strength and microstructure development in blended cement stabilized silty clay. *The Japanese Geotechnical Society*,

49, 85-98.

- Ikhlef N. S., Ghembaza M. S., and Dadouch M. (2014). Effect of cement and compaction on the physicochemical behavior of a material in the region of Sidi Bel Abbès. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 4, 677-680.
- Jamsawang, P., Nuansrithong, N., Voottipruex, P., Songpiriyakij, S., and Jongpradist, P. (2017). Laboratory investigations on the swelling behavior of composite expansive clays stabilized with shallow and deep clay-cement mixing methods. *Applied Clay Science*, 148, 83-94. doi:10.1016/j.clay.2017.08.013
- Kim, W. S., Minh Tam, N., and Jung, D. H. (2005). Experimental study on strength of cement stabilized clay. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 3(2), 116-126. doi:10.1108/17260530510815358
- Lee, W., Bobra, N. C., Altschbaeffl, A. G., and White, T. D. (1997). Resilient modulus of cohesive soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(2), 131-136.
- Li J., and Poon C.s. (2017). Innovative solidification/stabilization of lead contaminated soil using incineration sewage sludge ash. *Chemosphere* 173, 143-152. doi:10.1016/j
- Mather B., and Hime W.G. (2002). Amount of water required for complete hydration of portland cement. *Concrete international*, 24(6), 56-58.
- May R. W., and Witczak M. W. (1981). Effective granular modulus to model pavement responses. *Transportation Research Record* 810, 1-9.
- Mishra, J., Yadav, R. K., and Singhai, A. K. (2014). Effect of Granite Dust on Index properties of Lime Stabilized Black Cotton Soil. *International Journal of Engineering Research and Science & Technology*, 3, 19-23.
- Mokhtari , M., and Dehghani , M. (2012). Swell-shrink behavior of expansive soils, damage and control. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17, 2673-2682.
- Mollamahmutoglu, M., Yilmaz, Y., and Güngör, A. G. (2009). Effect of a class C fly ash on the geotechnical properties of an expansive soil. *International Journal of Engineering Research & Development*, 1(1), 1-6.
- Nguyen, B. T., and Mohajerani, A. (2016). Resilient modulus of fine-grained soil and a

- simple testing and calculation method for determining an average resilient modulus value for pavement design. *Transportation Geotechnics*, 7, 59-70. doi:10.1016/j.trgeo.2016.05.001
- Nicholson, P. G. (2015). Admixture Soil Improvement. In *Soil Improvement and Ground Modification Methods* (pp. 231-288).
- Osinubi, K. J. (2000). *Stabilization of tropical black clay with cement and pulverised coal bottom ash admixture*. Paper presented at the Advances in unsaturated geotechnics, Denver, Colorado, United States.
- Phanikumar, B. R. (2009). Effect of lime and fly ash on swell, consolidation and shear strength characteristics of expansive clays: a comparative study. *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*, 4, 175-181. doi:10.1080/17486020902856983
- Praticò, F. G., and Puppala, A. J. (2012). Lime and Cement Treatments of Subgrades in Southern Italy: Facing Interports Issues and Challenges. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 53, 389-398. doi:10.1016/j.sbspro.2012.09.890
- Puppala, A. J., Manosuthikij, T., and Chittoori, B. C. S. (2013). Swell and shrinkage characterizations of unsaturated expansive clays from Texas. *Engineering Geology*, 164, 187-194. doi:10.1016/j.enggeo.2013.07.001
- Radhakrishnan , G., Kumar , M. A., and Raju , G. V. R. P. (2014). Swelling properties of expansive soils treated with chemicals and flyash. *American Journal of Engineering Research*, 3(4), 245-250.
- Saride, S., Puppala, A. J., and Chikyala, S. R. (2013). Swell-shrink and strength behaviors of lime and cement stabilized expansive organic clays. *Applied Clay Science*, 85, 39-45. doi:10.1016/j.clay.2013.09.008
- Sharma, N. K., Swain, S. K., and Sahoo, U. C. (2012). Stabilization of a Clayey Soil with Fly Ash and Lime: A Micro Level Investigation. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30(5), 1197-1205. doi:10.1007/s10706-012-9532-3
- Shinawi, E. A. (2017). Instability improvement of the subgrade soils by lime addition at Borg El-Arab, Alexandria, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 130, 195-201. doi:10.1016/j.jafrearsci.2017.03.020
- Siddique A., and Hossain M. A. (2011). Effect of lime stabilisation on engineering properties of

- an expansive soil for use in road construction. *Journal of Society for Transportation and Traffic Studies*, 2(4), 1-9.
- Sridharan, A., and Prakash, K. (2000). Classification procedures for expansive soils. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, 143(4), 235-240. doi:10.1680/geng.2000.143.4.235
- Teparut, C., and Sthiannopkao, S. (2011). Mae Moh Lignite Mine and Environmental Management. *Geosystem Engineering*, 14(2), 85-94. doi:10.1080/12269328.2011.10541335
- Van Balen, K. (2005). Carbonation reaction of lime, kinetics at ambient temperature. *Cement and Concrete Research*, 35(4), 647-657. doi:10.1016/j.cemconres.2004.06.020
- Verástegui-Flores, R. D., Di Emidio, G., Bezuijen, A., Vanwalleghem, J., and Kersemans, M. (2015). Evaluation of the free-free resonant frequency method to determine stiffness moduli of cement-treated soil. *Soils and Foundations*, 55(5), 943-950. doi:10.1016/j.sandf.2015.09.001
- Zhang, J.-r., and Cao, X. (2002). Stabilization of expansive soil by lime and fly ash. *Journal of Wuhan University of Technology - Master. Sci. Ed.*, 17, 73-77.
- เศรษฐบุตตร, ช. (2539). คอนกรีตเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ: บริษัทผลิตภัณ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	สุวิจักขณ์ สิทธิวิรุทธ์
วัน เดือน ปี เกิด	19 มกราคม 2538
สถานที่เกิด	จังหวัดเชียงใหม่
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี จากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ที่อยู่ปัจจุบัน	16/1 ม.5 ต.แม่เหียะ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50100
ผลงานตีพิมพ์	Relationship between free swell index and PI of natural expansive soil, The 31st KKHTCNN Symposium on Civil Engineering, 2018, Kyoto, Japan



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY