

การปรับปรุงคุณภาพดินทรายที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมด้วยสารผสมเพิ่มชนิด
ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเพื่อการพัฒนากำลังและความแข็งแรง

GREEN STABILIZATION OF SANDY SOIL WITH HYDRAULIC
CEMENT ADMIXTURE FOR ENHANCED STRENGTH AND STIFFNESS

ปุณณวิช รุ่งเรือง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การปรับปรุงคุณภาพดินทรายที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมด้วยสารผสมเพิ่มชนิด
ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเพื่อการพัฒนากำลังและความแข็งแรง

ปุณณวิช รุ่งเรือง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การปรับปรุงคุณภาพดินทรายที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมด้วยสารผสมเพิ่มชนิด
ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเพื่อการพัฒนากำลังและความแข็งแรง
Green Stabilization of Sandy Soil with Hydraulic Cement Admixture
For Enhanced Strength and Stiffness

ชื่อ - นามสกุล นายปณณวิช รุ่งเรือง

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ศุภสิทธิ์ พงศ์ศิวัสถิตย์, Ph.D.

ปีการศึกษา 2567

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์วิระศักดิ์ ละอองจันทร์, Dr.-Ing)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์กำธรเกียรติ มุสิเกต, Ph.D.)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พงศ์กร พวงชมพู, Ph.D.)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ศุภสิทธิ์ พงศ์ศิวัสถิตย์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาสุปรีดิ์, Ph.D.)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. 2568

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การปรับปรุงคุณภาพดินทรายที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมด้วยสารผสมเพิ่มชนิด
ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเพื่อการพัฒนากำลังและความแข็งแรง
ชื่อ - นามสกุล นายปณณวิช รุ่งเรือง
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ศุภลลิตี พงศ์ศิวัชสถิตย์, Ph.D.
ปีการศึกษา 2567

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้เป็นการประเมินศักยภาพของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก เพื่อเป็นทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้เทคนิคการผสมลิกบนชั้นดินทราย ดินทรายที่ใช้ในการทดสอบนำมาจากสถานที่ก่อสร้างอาคารสูบน้ำดิบวัดราษฎร์จำนงค์ จังหวัดหนองคาย

ดินทรายตัวอย่างนำมาผสมกับปูน HC และ OPC ที่ร้อยละ 10, 15, 20, 25 และ 30 ของน้ำหนักดินแห้ง โดยอัตราส่วนน้ำต่อปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 1:1 แล้วทำการบ่มตัวอย่างที่ผสมเป็นเวลา 3, 7, 14 และ 28 วันแล้วทำการทดสอบแรงกดอัดแกนเดียวที่จะให้ค่ากำลังกดอัดแกนเดียว (q_u) และค่ามอดูลัสซีแคนท์ (E_{50}) จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

ผลการทดสอบพบว่าค่า q_u และ E_{50} ของปูนทั้ง 2 ชนิดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์และอายุการบ่มเพิ่มขึ้นและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แม้ผลการทดสอบของดินผสมปูน OPC จะมีค่ามากกว่าดินผสมปูน HC อยู่เล็กน้อยเนื่องจากความแตกต่างในองค์ประกอบของออกไซด์ จากการวิเคราะห์ผลทดสอบด้วยโครงสร้างทางจุลภาคแสดงให้เห็นถึงความคล้ายคลึงกันมากในการพัฒนาทั้งเอททริงไคต์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของดินที่ผสมปูนซีเมนต์ทั้ง 2 ชนิด อีกทั้งยังพบว่าหากนำข้อมูลทั้งหมดที่มีความสัมพันธ์แบบกราฟเส้นตรงระหว่างค่า q_u และ E_{50} ของปูน 2 ชนิดที่มีความใกล้เคียงกัน มาหาความสัมพันธ์สามารถเขียนเป็นสมการได้แก่ $E_{50} = 78.165q_u$ และเมื่อเปรียบเทียบค่า q_u และ E_{50} จากสมการกับตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ผสมด้วย HC ในสนามพบว่า ค่า q_u จากตัวอย่างในสนามให้ค่าที่สูงกว่าประมาณร้อยละ 31.95 และค่า E_{50} จากตัวอย่างในสนามให้ค่าที่สูงกว่าประมาณร้อยละ 76.15 ดังนั้นปูน HC จึงมีศักยภาพทดแทนปูน OPC ในการปรับปรุงดินเพื่อความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: การปรับปรุงคุณภาพดิน, ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก, แรงกดอัดทิศทางเดียว, มอดูลัสซีแคนท์,
การวิเคราะห์ผลทดสอบด้วยโครงสร้างทางจุลภาค

Thesis Title Green Stabilization of Sandy Soil with Hydraulic Cement Admixture
 For Enhanced Strength and Stiffness

Name – Surname Mr. Punrawit Rungruang

Program Civil Engineering

Thesis Advisor Associate Professor Supasit Pongsivasathit, Ph.D.

Academic Year 2024

ABSTRACT

This research evaluates the potential of Hydraulic Cement (HC) as an environmentally sustainable alternative to Ordinary Portland Cement (OPC) in soil stabilization using the Deep Mixing Method (DMM) on a sandy deposits. The sandy soil used in this study was collected from the raw water pumping station construction site at Wat Rat Jamnong, Nong Khai province.

Sandy soil samples were mixed with HC and OPC at proportions of 10, 15, 20, 25, and 30% by dry soil weight, with a water-to-cement ratio of 1:1. The mixtures were cured for 3, 7, 14, and 28 days, before undergoing unconfined compressive strength (UCS) testing to determine the unconfined compressive strength (q_u) and the secant modulus (E_{50}) from the stress-strain relationships.

The results showed that both q_u and E_{50} values with higher cement content and long curing periods, following similar trends. Although the OPC-treated soil exhibited slightly higher values than HC-treated soil due to differences in oxide composition, microstructural analysis revealed significant similarities in the development of ettringite crystals resulting from the hydration reactions in soils mixed with both cement types. A linear correlation between q_u and E_{50} was established and expressed as $E_{50}=78.165q_u$. Field samples of HC-treated soil exhibited approximately 31.95% higher q_u and 76.15% higher E_{50} compared to laboratory results. Therefore, HC demonstrates strong potential as an environmentally friendly alternative to OPC for soil stabilization applications.

Keywords: Soil Stabilization, Hydraulic Cement, Unconfined Compressive Strength, Secant Modulus, Microstructural Analysis

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณา และความอนุเคราะห์ของ รองศาสตราจารย์ศุภลลิตี พงศ์ศิวัสถิต อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้ทำการศึกษาวิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. วีระศักดิ์ ละอองจันทร์ ประธานกรรมการสอบ รองศาสตราจารย์ ดร. กำธรเกียรติ มุสิกเกต ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พงศกร พวงชมพู กรรมการสอบ ที่ได้ให้ความกรุณาในการแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของงานวิจัย เสียสละเวลาในการเป็นกรรมการสอบในครั้งนี้ การศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทราย บริเวณริมฝั่งแม่น้ำโขง วัดราชภูรจามงค์ และ ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่ใช้ในการศึกษาวิจัยจาก บริษัท ซอยล์ ซีเมนต์ คอลัมน์ จำกัด และ บริษัท เกษมดี ซายน์ แอนด์ คอนซัลแทนท์ จำกัด จึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ และมอบความดีทั้งหมดนี้ให้แก่ คุณพ่อ คุณแม่ และคณะครู-อาจารย์ ที่ให้การสนับสนุนปละประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้ และเป็นกำลังใจจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจ หากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ ขาดตกบกพร่อง หรือไม่สมบูรณ์ประการใด ผู้วิจัยขอกราบขออภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ปุณณวิช รุ่งเรือง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(9)
สารบัญรูป.....	(10)
บทที่ 1 บทนำ.....	14
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	14
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	15
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	15
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	16
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
2.1 บทนำ.....	17
2.2 ประวัติความเป็นมาของดินซีเมนต์.....	18
2.3 โครงสร้างดิน.....	19
2.4 โครงสร้างดินซีเมนต์.....	20
2.5 การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์.....	23
2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังของดินซีเมนต์.....	25
2.7 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	40
2.8 ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก.....	43

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.9 กำลังของดินซีเมนต์.....	54
2.10 สมการทำนายกำลังของดินซีเมนต์.....	56
2.11 การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope หรือ SEM).....	59
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	60
3.1 การเตรียมวัสดุ.....	60
3.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ.....	61
3.3 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	62
3.4 การวิเคราะห์และสรุปผล.....	63
บทที่ 4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	65
4.1 วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของดินตัวอย่าง.....	65
4.2 ผลการทดสอบ Scanning Microscope (SEM), X-ray Diffraction (XRD) และ X-ray Fluorescence (XRF).....	66
4.3 ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว.....	72
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	81
5.1 สรุปผลการศึกษา.....	81
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	82
บรรณานุกรม.....	83
ภาคผนวก.....	94
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบแรงกดอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test).....	95

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ข ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	116
ประวัติผู้เขียน.....	153



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ปรับปรุงตามการจำแนกแบบ ASSHTO.....	33
ตารางที่ 2.2 ปริมาณซีเมนต์โดยประมาณในการผสมสำหรับวัสดุต่างๆ.....	34
ตารางที่ 2.3 แนวทางการเลือกวัสดุผสมเพิ่ม (Additive) กับวัสดุแต่ละชนิด.....	40
ตารางที่ 2.4 ออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	41
ตารางที่ 2.5 สารประกอบหลักที่รวมอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	41
ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมซีเมนต์และจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาวิจัย.....	62
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของดินตัวอย่าง.....	65
ตารางที่ 4.2 ส่วนประกอบธาตุที่พบในดินตัวอย่าง ทดสอบด้วยวิธี X-ray Fluorescence.....	67
ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (HC) และ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (OPC).....	68

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างดินแบบเม็ดเดี่ยว.....	20
รูปที่ 2.2 โครงสร้างดินแบบรังผึ้ง.....	20
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของดินแบบ Dispersed และแบบ Flocculated.....	20
รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยตะกรันเหล็ก.....	22
รูปที่ 2.5 แสดงปฏิกิริยาไฮเดรชันของดินซีเมนต์.....	22
รูปที่ 2.6 แสดงปฏิกิริยาไฮเดรชันของดินซีเมนต์ผสมตะกรันเหล็ก.....	23
รูปที่ 2.7 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ ร้อยละ 8.....	28
รูปที่ 2.8 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ ร้อยละ 12.....	29
รูปที่ 2.9 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ ร้อยละ 16.....	29
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการบ่มของทรายที่มีขนาดคละสมำเสมอ และดินตะกอนปนเหนียว.....	30
รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ของค่าดัชนีพลาสติกกับเวลา.....	31
รูปที่ 2.12 ค่าพิกัดอัตราเบร็กของดินไอโอวา (Iowa) หลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน 1 ชั่วโมง.....	32
รูปที่ 2.13 อิทธิพลของการหน่วงเวลาการผสมระหว่างผสมขึ้นและการบดอัดที่มีผลต่อ กำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์.....	37
รูปที่ 2.14 การสูญเสียกำลังของดินซีเมนต์เนื่องจากการใช้เวลาในการบดอัดนานขึ้น.....	38
รูปที่ 2.15 เปรียบเทียบการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กรณีใช้วัสดุทดแทนที่ร้อยละ 10....	44

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.16 เปรียบเทียบคุณสมบัติการรับแรงของปูนซีเมนต์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.....	45
รูปที่ 2.17 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดของวัสดุมวลรวมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์และปูนไฮดรอลิกจากบริษัทปูนซีเมนต์ไทย.....	46
รูปที่ 2.18 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดของวัสดุมวลรวมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์และปูนไฮดรอลิกจากบริษัทนครหลวง.....	47
รูปที่ 2.19 แสดงกำลังต้านทานแรงอัดแกนเดียว ของตัวอย่างขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ปรับปรุงด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกในอัตราส่วนผสมซีเมนต์ ร้อยละ 1, 3, และ 5 ปริมาณความชื้นร้อยละ 8 ที่อายุบ่ม 7 วัน.....	48
รูปที่ 2.20 แสดงกำลังต้านทานแรงดึงทางอ้อม ของตัวอย่างขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ปรับปรุงด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกในอัตราส่วนผสมซีเมนต์ ร้อยละ 1, 3 และ 5 ปริมาณความชื้นร้อยละ 8 ที่อายุบ่ม 7 วัน.....	48
รูปที่ 2.21 แสดงกำลังต้านทานแรงอัดแกนเดียว ของตัวอย่างขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ปรับปรุง ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกในอัตราส่วนผสม ซีเมนต์ร้อยละ 3 ปริมาณความชื้นร้อยละ 8 ที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน.....	49
รูปที่ 2.22 แสดงกำลังต้านทานแรงดึงทางอ้อม ของตัวอย่างขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ปรับปรุงด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกในอัตราส่วนผสมซีเมนต์ ร้อยละ 3 ปริมาณความชื้นร้อยละ 8 ที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน.....	49
รูปที่ 2.23 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดกับปริมาณน้ำของดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยที่อัตรา ส่วนผสมแตกต่างกัน อายุ 60 วัน.....	50
รูปที่ 2.24 ภาพถ่าย SEM ของดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนผสมแตกต่างกัน อายุ 28 วัน.....	51

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.25 ภาพถ่าย SEM ของดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนผสมแตกต่างกัน อายุ 60 วัน.....	51
รูปที่ 2.26 ภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างดินที่อายุการบ่ม 28 วัน (a) อนุภาคดินเหนียว (b) ดินเหนียวถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ร้อยละ 1 (c) ดินเหนียวถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ร้อยละ 1 + นาโนซิลิการ้อยละ 1.....	52
รูปที่ 2.27 แสดงค่ากำลังของดินซีเมนต์ผสมนาโนซิลิกาที่อัตราส่วนผสมแตกต่างกัน อายุบ่ม 28 วัน	53
รูปที่ 2.28 ความสัมพันธ์ระหว่าง Initial Tangent Modulus in Tension กับกำลังดึงและกำลังอัดของดินซีเมนต์.....	54
รูปที่ 2.29 ความสัมพันธ์ระหว่าง Direct tensile strength กับ Unconfined compressive Strength ของดินซีเมนต์.....	55
รูปที่ 2.30 การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์.....	57
รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะของดินตัวอย่างก่อนร้อน (a) และลักษณะของดินตัวอย่างหลังร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (b).....	60
รูปที่ 3.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 (a) และปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิด GU (b).....	61
รูปที่ 3.3 แสดงการจัดทำตัวอย่าง (a) และการเก็บรักษาตัวอย่าง (b).....	62
รูปที่ 3.4 แผนภูมิขั้นตอนการทดสอบ การวิเคราะห์ข้อมูลและสรุป.....	64
รูปที่ 4.1 ภาพถ่าย SEM ของดินตัวอย่างที่กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	68
รูปที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบ X-ray diffraction ของตัวอย่างดิน.....	69
รูปที่ 4.3 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคของดินผสมปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกร้อยละ 10 อายุการบ่ม 3 วัน (a) และภาพโครงสร้างทางจุลภาคของดินผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 10 อายุการบ่ม 3 วัน (b).....	71

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.4	ภาพโครงสร้างทางจุลภาคของดินผสมปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกร้อยละ 25 อายุการบ่ม 28 วัน (a) และภาพโครงสร้างทางจุลภาคของดินผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 25 อายุการบ่ม 28 วัน (b).....	71
รูปที่ 4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unconfined Compressive Strength (q_u) กับปริมาณ ซีเมนต์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ.....	73
รูปที่ 4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unconfined Compressive Strength (q_u) กับปริมาณ ซีเมนต์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ และ อายุการบ่ม.....	74
รูปที่ 4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modulus of Elasticity (E_{50}) กับปริมาณซีเมนต์ที่อัตรา ส่วนต่าง ๆ.....	76
รูปที่ 4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modulus of Elasticity (E_{50}) ที่อายุการบ่มต่าง ๆ.....	77
รูปที่ 4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกดอัดแกนเดียว (q_u) และมอดูลัสยืดหยุ่น (E_{50}).....	79
รูปที่ 4.10	ตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ได้จากการเจาะแก่นเสาเข็มดินซีเมนต์ในภาคสนามที่ระดับความลึก 0-10 เมตร.....	80
รูปที่ 4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดแกนเดียว (q_u) และค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (E_{50}) ของ ตัวอย่างทดสอบในสนามและในห้องปฏิบัติการ.....	80

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันด้วยการเติบโตทั้งทางด้านเศรษฐกิจและด้านสังคมมีการเติบโตอย่างมาก ส่งผลให้มีความต้องการในการใช้ที่ดินและทรัพยากรธรรมชาติอื่น ๆ เพิ่มขึ้น ในขณะที่แหล่งทรัพยากรดังกล่าวมีแนวโน้มที่จะลดลงรวมถึงปัญหาทางสิ่งแวดล้อมที่กำลังเกิดขึ้น ด้วยเหตุนี้เทคโนโลยีและเทคนิคที่นำมาใช้ในงานก่อสร้างจึงถูกพัฒนาเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของงานก่อสร้างนั้น ๆ ภายใต้การปรับใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม แต่ยังคงได้มาตรฐานของการออกแบบและการก่อสร้างทางวิศวกรรม โครงสร้างส่วนใหญ่ล้วนแต่มีความเกี่ยวข้องกับดินแทบทั้งสิ้น โดยที่ดินเป็นวัสดุทั่วไปที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติจึงมีคุณสมบัติที่ซับซ้อนแตกต่างกันไปตามแหล่งกำเนิด ทำให้ในงานก่อสร้างมักพบปัญหาเกี่ยวกับงานดินอยู่เสมอ เช่น ดินไม่สามารถรับน้ำหนักของโครงสร้างได้ ดินทรุดตัว เป็นต้น ดังนั้นจึงต้องมีการทดสอบคุณสมบัติของดินและปรับปรุงคุณภาพของดินให้มีความแข็งแรงเพียงพอต่อการรับน้ำหนักของโครงสร้าง

การปรับปรุงคุณภาพดินคือการปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพและวิศวกรรมให้ดีขึ้น เช่น เพิ่มกำลังรับน้ำหนัก เพิ่มกำลังรับแรงเฉือน เพิ่มความหนาแน่น เป็นต้น เทคนิคในการปรับปรุงคุณภาพดินนั้นมีหลากหลายวิธี แต่วิธีที่เป็นที่นิยมนำมาใช้คือ การปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธีทางเคมีหรือที่รู้จักกันในชื่อ ดินซีเมนต์ (Soil Cement) ด้วยข้อจำกัดของปริมาณทรัพยากรที่ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุเพื่อปรับปรุงคุณภาพดินนั้นลดน้อยลง รวมถึงปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมที่ทั่วโลกกำลังพบเจอ จึงได้มีการศึกษาคุณสมบัติวัสดุใหม่ทดแทนวัสดุพื้นฐาน รวมถึงการหาวิธีปรับปรุงประสิทธิภาพของวัสดุที่ไม่ผ่านมาตรฐานให้สามารถเป็นวัสดุวิศวกรรมได้ ซึ่งจะช่วยลดภาระต้นทุนในการขนส่งวัสดุที่ได้มาตรฐานจากแหล่งวัสดุที่ห่างไกลได้

ที่ผ่านมาอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์และการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนซีเมนต์ได้มีการศึกษาวัสดุที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์กันอย่างแพร่หลาย โดยวัสดุที่ใช้ทดแทนนั้นจะมีซิลิกาและอลูมินาอย่างเพียงพอที่ได้จากการเผาไหม้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลาน เพื่อมีส่วนร่วมในการช่วยแก้ไขปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมจึงเกิดเป็น ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement, HC) ที่สามารถใช้แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Ordinary Portland Cement, OPC) ได้

อย่างไรก็ดีการใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกในประเทศไทยนั้นยังไม่มีที่นิยมมากนัก เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อเป็นสารผสมเพิ่มในงานปรับปรุงคุณภาพดินและยังขาดข้อมูลพื้นฐานที่

จำเป็น สำหรับการประยุกต์ใช้ในการออกแบบกรณีใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเป็นสารผสมเพิ่ม การศึกษาวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการพัฒนาความแข็งแรงของดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ศึกษาถึงประสิทธิภาพของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกในด้านการปรับปรุงประสิทธิภาพของดิน ด้วยการเปรียบเทียบกับผลการทดลองของดินตัวอย่างหลังถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) สำหรับดินที่ใช้ในการทดลองจะใช้ตัวอย่างดินที่เก็บจากโครงการก่อสร้างอาคารสูบน้ำดิบ วัดราษฎร์-จันทน์ จังหวัดหนองคาย เนื่องจากเป็นโครงการที่มีการประยุกต์ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกทดแทนการใช้ปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่นิยมใช้กับปัจจุบัน ผลที่ได้จากการวิจัยจะเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญด้านการพัฒนาเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินอย่างยั่งยืน โดยใช้สารผสมเพิ่มที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาผลกระทบของปริมาณปูน HC และ OPC ที่มีผลต่อค่าแรงกดอัดทิศทางเดียว (Unconfined Compressive Strength, q_u) และค่ามอดูลัสยืดหยุ่นที่ความเครียดร้อยละ 50 (Secant Modulus, E_{50}) ของดินทรายผสมปูน HC

1.2.2 ศึกษาอิทธิพลของอายุการบ่ม ของดินทรายผสมปูน HC และ OPC ที่มีผลต่อค่า q_u และ E_{50}

1.2.3 ศึกษาประสิทธิภาพของปูน HC ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในการเป็นสารผสมเพิ่มสำหรับงานปรับปรุงคุณภาพดิน ด้วยการเปรียบเทียบกับผลทดสอบของดินทรายผสมปูน OPC

1.2.4 ศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า q_u และ E_{50} ของดินทรายผสมปูน HC และ OPC และเสนอสมการในการทำนายค่า E_{50} เพื่อวัตถุประสงค์ในการออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์

1.2.5 ตรวจสอบความน่าเชื่อถือของสมการที่นำเสนอ ด้วยผลทดสอบค่า q_u ของเสาเข็มดินซีเมนต์ในภาคสนามจากตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ได้จากการเจาะแกน (Coring)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ตัวอย่างดินที่ใช้ในการศึกษาวิจัยเป็นดินทราย บริเวณริมฝั่งแม่น้ำโขง วัดราษฎร์จันทน์ หมู่ 3 ตำบลเมืองหมี่ อำเภอเมือง จังหวัดหนองคาย

1.3.2 ศึกษาสมบัติทางกายภาพของดินตัวอย่าง และสมบัติทางวิศวกรรมเมื่อผสมปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิดลงไปในดิน โดยทำการศึกษาที่ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 10, 15, 20, 25 และ 30

โดยนำหน้าดิน ในอัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์ (W/C) ที่ 1:1 และอายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วันก่อนนำไปทดสอบ

1.3.3 ทำการทดสอบตัวอย่างดินซีเมนต์ทั้งสองชนิด (HC และ OPC) ทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compressive Strength, q_u) โดยทดสอบชนิดละ 5 ตัวอย่างต่อปริมาณปูนซีเมนต์ที่ต่างกัน แล้วนำค่าที่ได้จาก 5 ตัวอย่างมาเฉลี่ย

1.3.4 ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิด GU

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงคุณสมบัติทางวิศวกรรม ของดินตัวอย่างเมื่อปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก

1.4.2 ทราบถึงความสัมพันธ์ของกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นที่ค่ากำลังเท่ากับร้อยละ 50 (E_{50}) ของดินซีเมนต์

1.4.3 เป็นข้อมูลต่อการพัฒนาการปรับปรุงประสิทธิภาพดินด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และพัฒนานำไปต่อยอดสู่การประยุกต์ใช้ในภาคสนามต่อไป

1.4.4 สามารถนำความรู้ไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยระดับสูงต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

โดยส่วนใหญ่งานก่อสร้างต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น ถนน เขื่อน อาคารบ้านเรือน ท่อส่งน้ำ อุโมงค์ เป็นต้น ล้วนแล้วแต่มีส่วนของโครงสร้างที่เกี่ยวข้องกับงานดิน ซึ่งดินเป็นวัสดุที่มีความหลากหลายและแปรปรวนแตกต่างกันออกไปในแต่ละพื้นที่ ผู้ออกแบบและผู้ควบคุมงานงานก่อสร้างต้องให้ความสำคัญกับคุณสมบัติและพฤติกรรมของดินทั้งในขั้นตอนการออกแบบและก่อสร้าง เพื่อป้องกันและลดผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นกับโครงสร้างอื่น ๆ บริเวณใกล้เคียง บ่อยครั้งที่โครงสร้างต่าง ๆ ต้องก่อสร้างบนชั้นดินที่อ่อนจะพบปัญหาที่เกี่ยวกับงานดิน เช่น การทรุดตัวในชั้นดิน ชั้นดินไม่สามารถรับน้ำหนักได้ การซึมผ่านของน้ำในชั้นดินที่มากเกินไปจนกำหนด จึงจำเป็นต้องปรับปรุงคุณภาพดินให้มีความสามารถเพียงพอต่อการรับน้ำหนักของโครงสร้าง โดยการปรับปรุงคุณภาพดินนั้นสามารถทำได้หลายวิธี โดยวิธีที่เป็นที่นิยมคือ การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีทางเคมีหรือการนำปูนซีเมนต์มาผสมเพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติและโครงสร้างของดินให้ดีขึ้น แต่เนื่องด้วยปัญหาการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศในปัจจุบันได้มีการรณรงค์ให้ภาคอุตสาหกรรมลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก จึงมีเทคโนโลยีใหม่ในการผลิตปูนซีเมนต์

Hausman [46] ได้กล่าวถึงการปรับปรุงคุณภาพดินไว้ว่า การปรับปรุงคุณภาพดินในด้านวิศวกรรมนั้นสามารถแบ่งออกไปเป็น 4 กลุ่ม คือ

1. การปรับปรุงคุณภาพดินเชิงกล (Mechanical Modification) เป็นการบดอัด (compaction) เพื่อเพิ่มความแน่นให้กับดิน (Soil Density)
2. การปรับปรุงคุณภาพดินโดยการเสริมกำลัง (Modification by Inclusions and confinement) เป็นการใช้เส้นการยึด (Nailing and Anchor) (Fiber) ตาข่าย (Mesh) และการทำกำแพงกันดิน (Retaining Wall) เพื่อเสริมกำลังให้กับดิน
3. การปรับปรุงคุณภาพดินเชิงกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Modification) วิธีนี้จะใช้การผสมวัสดุหรือสารผสมเพิ่ม (Additive) เพื่อเปลี่ยนแปลงหรือปรับปรุงคุณสมบัติของดิน เช่น ผสมเพิ่มสารประเภทซีเมนต์ (Cementitious Materials) หรือการฉีดน้ำปูนลงในดิน (Groutin)

4. การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีทางไฮดรอลิก (Hydraulic modification) จะใช้วิธีการ Preloading หรือ Consolidation เป็นการกระตุ้นกระบวนการระบายเพื่อเอาน้ำออกจากดิน (Dewatering)

โดยในปัจจุบันวิธีการต่าง ๆ ถูกนำมาปรับใช้เพื่อตอบสนองและแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับดิน แต่วิธีการที่เป็นนิยมและมีการวิจัยมากที่สุดคือ การปรับปรุงประสิทธิภาพของดินด้วยการผสมเพิ่มสารประเภทซีเมนต์หรือเรียกว่า ดินซีเมนต์ (Soil Cement)

2.2 ประวัติความเป็นมาของดินซีเมนต์

Portland Cement Association [19] รายงานว่าในปี 1940 ช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 ในประเทศสหรัฐอเมริกา ได้นำดินซีเมนต์มาใช้ในการก่อสร้างถนนมากกว่า 5.7 ล้านตารางเมตรและยังใช้กับงานก่อสร้างสนามบินประมาณ 16.8 ล้านตารางเมตร และหลังจากสงครามยุติลงการก่อสร้างถนนด้วยดินซีเมนต์ก็เป็นที่นิยมเพิ่มมากขึ้นในการใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางของถนนผิวคอนกรีต เป็นไหล่ทางที่จอดรถ รองพื้นอ่างเก็บน้ำ คู และคลองอีกด้วย

Davidson [22] ได้กล่าวถึงพัฒนานาการของดินซีเมนต์ไว้ว่ามีการใช้ดินซีเมนต์ในงานก่อสร้างเป็นครั้งแรกในปี 1915 ในงานก่อสร้างถนน Oak ในเมือง Sarasota รัฐ Florida โดยการขุดแล้วนำดินเซลล์จากอ่าวนำมาผสมทราย และซีเมนต์ จากนั้นก็เกลี่ยแล้วทำให้แน่นด้วยรถบดไอน้ำที่มีน้ำหนัก 10 ตัน อีกทั้งยังกล่าวถึงรายงานของ

Mill [1] ว่าในปี 1932 South California State Department ภายใต้การกำกับดูแลของ Dr. C.H. Moorefield ได้ศึกษาส่วนผสมของดินชนิดต่าง ๆ และซีเมนต์เพื่อให้มีประสิทธิภาพทางวิศวกรรมที่ดีขึ้น โดยได้รายงานไว้ว่า ดินผสมซีเมนต์เป็นวัสดุที่มีความเข้ากันได้ แต่ไม่ได้มีการระบุอัตราส่วนผสมของดินกับซีเมนต์ที่แน่นอน แต่งานก่อสร้างถนนหลายสายในปี ค.ศ. 1933 และปี ค.ศ. 1934 ได้นำการศึกษานี้ไปประยุกต์ใช้ โดยใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางผสมซีเมนต์ทำให้ลดราคาค่าวัสดุลง

Terrel และคณะ [39], Davidson [22] ได้ร่วมมือกันสร้างถนนดินซีเมนต์ที่มีความยาว 1.5 ไมล์ ใกล้เมือง Johnsonville เพื่อยืนยันผลของ South California State Department ปี 1935 Bureau of Public Road และ Portland Cement Association (PCA) ถนนเส้นนี้ต่อมากลายเป็นที่รู้จักว่าเป็นโครงการแรกของวิศวกรรมถนนซีเมนต์

The Siam Cement Company Ltd [29] ประเทศไทยเริ่มมีการประยุกต์ใช้ดินซีเมนต์ในปี 2508 โดยความร่วมมือของบริษัทปูนซีเมนต์ไทยจำกัดและกรมทางหลวง ในทางสายวารินชำราบ – เดชอุดม จังหวัดอุบลราชธานี โดยทดลองนำดินลูกรังผสมซีเมนต์ใช้เป็นพื้นทางระยะทาง 5 กิโลเมตร ผล

การทดลองเป็นที่น่าพอใจ ส่วนใหญ่ใช้งานได้ดีกรมทางหลวงจึงได้ออกแบบถนนหลายเส้นในภาคตะวันออกเฉียงใต้ โดยใช้ดินซีเมนต์เป็นพื้นทาง (Soil Cement Base)

ขวัญจิรา, พานิช และ อิทธิพล [72] ได้วิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของดินลูกรังโดยเติมซีเมนต์และเสริมกำลังด้วยเส้นใยเหล็กจากยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว จากการศึกษาพบว่าเปอร์เซ็นต์เส้นใยเหล็กจากยางรถยนต์ที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 3 โดยสามารถเพิ่มความต้านทานแรงดึงของดินลูกรังซีเมนต์ที่เสริมด้วยเส้นใยเหล็กจากยางรถยนต์ เพิ่มขึ้นร้อยละ 70 จากการทดสอบการดัดงอของคาน

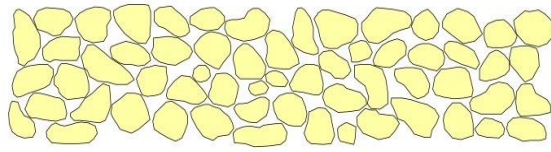
2.3 โครงสร้างของดิน

2.3.1 ดินเม็ดหยาบ (Coarse Grained Soil) หรือ ดินเนื้อร่วน (Granular or Cohesionless Soil) แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ กรวด และทราย มีขนาดเม็ดดินระหว่าง 0.075 มิลลิเมตร ถึง 75 มิลลิเมตร สามารถแยกออกจากกันได้ด้วยตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 ดินประเภทนี้จะมีโครงสร้างการเรียงตัวของเม็ดเดี่ยว (Single Grain) หรือโครงสร้างแบบรังผึ้ง (Honeycombed) สามารถรับแรงกดได้ดี มีค่าของอัตราส่วนระหว่างแรงที่ผิวต่อน้ำหนักเม็ดดินมาก ทำให้ดินไม่อยู่ในสภาวะพลาสติกได้

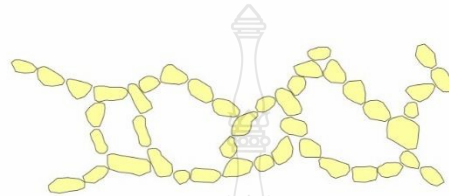
2.3.2 ดินเม็ดละเอียด (Fine Grained Soils) หรือ ดินเนื้อเหนียว (Cohesive Soil) จำแนกออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ทรายแป้ง (Silt) และ ดินเหนียว (Clay) มีขนาดของเม็ดดินที่เล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร เม็ดดินมีลักษณะแบนทำให้ค่าอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของเม็ดดินต่อแรงที่ผิวนั้นมีค่าน้อย ดินชนิดนี้จึงสามารถอยู่ในสภาวะพลาสติกได้ มักประกอบด้วยแร่ดินเหนียวจำพวก คาโอลิไนต์ (Kaolinite), อิลไลต์ (Illite) และมอนทโมริไนต์ (Montmorillonite) เป็นส่วนใหญ่ เกิดจากการจัดเรียงตัวของแผ่นซิลิกา (Silica Sheet) และ แผ่นยิบไซต์ (Gibbsite Sheet) และดินเม็ดละเอียดมีลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างอนุภาคดินที่สำคัญอยู่ 2 ลักษณะคือ

2.3.2.1 การจัดเรียงแบบเป็นระเบียบ (Dispersed Structure) จะเกิดขึ้นจากการบดอัดดิน (Compacted) ทำให้เม็ดดินจัดเรียงตัวใหม่แบบ face-to-face และแน่นขึ้น

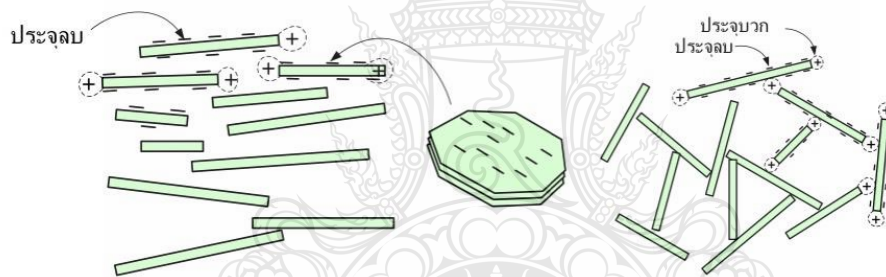
2.3.2.2 การจัดเรียงตัวแบบกระเจกระกะ (Flocculent Structure) เป็นการการจัดเรียงตัวแบบ edge-to-edge หรือ edge-to-face การจัดเรียงลักษณะนี้เมื่อถูกน้ำหนักหรือแรงกดทับจะเกิดการเรียงตัวกันใหม่ที่เป็นแบบเป็นระเบียบ



รูปที่ 2.1 โครงสร้างดินแบบเม็ดเดี่ยว (พรพจน์ [67])



รูปที่ 2.2 โครงสร้างดินแบบรังผึ้ง (พรพจน์ [67])



โครงสร้างแบบ Dispersed

โครงสร้างแบบ Flocculated

รูปที่ 2.3 โครงสร้างของดินแบบ Dispersed และแบบ Flocculated (พรพจน์ [67])

2.4 โครงสร้างดินซีเมนต์

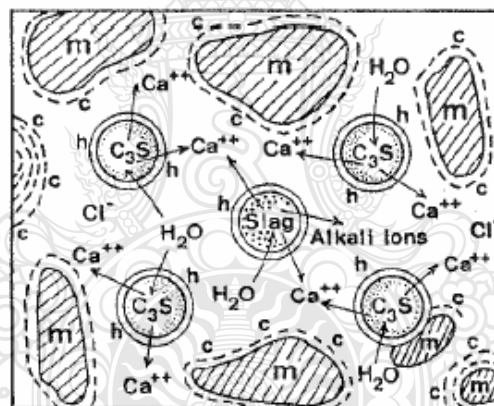
Mitchell และ El Jack [30] ได้แบ่งสถานะโครงสร้างของดินหลังผสมด้วยปูนซีเมนต์ไว้ 3 สถานะได้แก่

1. สถานะขณะบดอัด ในสถานะนี้จะไม่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันแต่อนุภาคของปูนซีเมนต์และอนุภาคของดินจะปะปนผสมกัน
2. สถานการณ์บ่มระยะสั้น ปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดขึ้นในสถานะนี้ หลังจากสถานะขณะบดอัดโดยซีเมนต์เจลจะซึมเข้าไปในช่องว่างระหว่างอนุภาคดินเกิดเป็น Lime ทำปฏิกิริยากับ Alumina

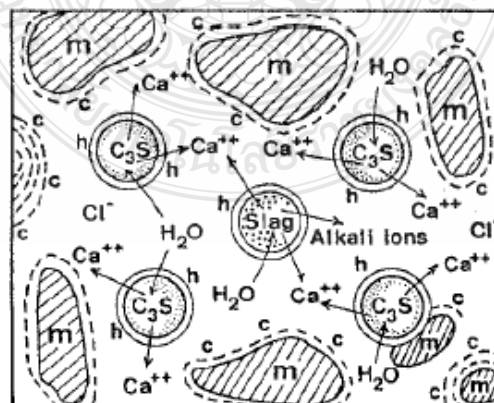
และ Silica ในดินจากนั้นซีเมนต์เจลพร้อมด้วยสารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยา จะซึมตามช่องว่างของอนุภาคดิน จึงทำให้ช่องว่างในมวลดินลดลง

3. สถานการณ์บ่มระยะยาว หลังจากซีเมนต์เจลและสารประกอบที่ซึมไปตามช่องว่างของอนุภาคดิน เมื่ออายุการบ่มนานขึ้นจะส่งผลให้กำลังของดินซีเมนต์พัฒนาสูงขึ้นตามไปด้วย

Kamon และ Nontananandh [47] ได้ศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาของดินซีเมนต์ที่อัตราส่วนซีเมนต์ต่อดินที่ต่างกัน พบว่าอัตราส่วนซีเมนต์ต่อดินร้อยละ 6 มีอัตราการลดลงของสาร C_3S ต่ำลง ในขณะที่มีการเพิ่มอัตราส่วนซีเมนต์ต่อดินเป็นร้อยละ 9, 12, และ 15 สาร C_3S มีอัตราการลดลงที่เพิ่มขึ้น และกำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ก็เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ทั้งนี้เมื่อภายหลังอายุการบ่มผ่านไปประมาณ 14 วัน พบว่าการลดลงของสาร C_3S นั้นเริ่มคงที่ จากการศึกษาจะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์มีความผกผันกับปริมาณสาร C_3S โดยเมื่อสาร C_3S นั้นลดปริมาณลงตามอายุการบ่มจะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังได้เสนอโครงสร้างกลไกปฏิกิริยาของดินซีเมนต์ที่ถูกปรับปรุงด้วยซีเมนต์และกากตะกั่ว (Slag) ที่เป็นวัสดุปอซโซลาน ดังภาพที่ 2.1

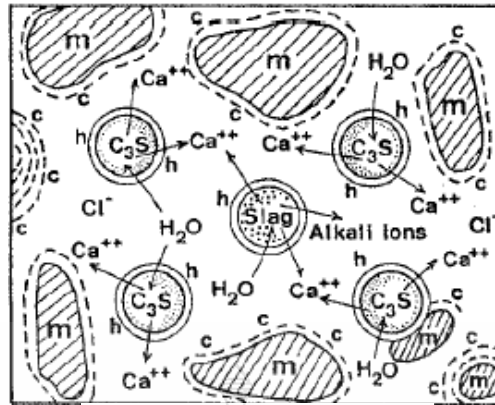


(a) Gelation phase



(b) Hardening phase

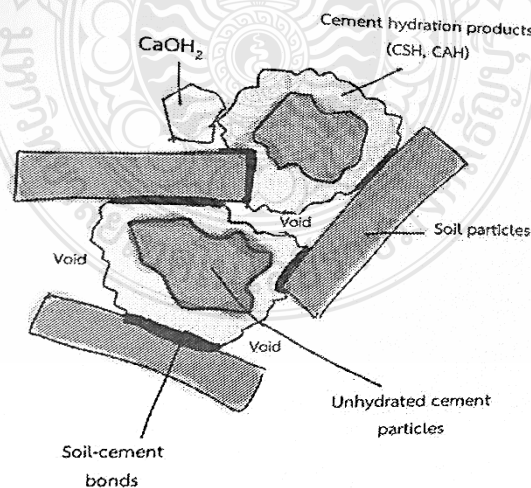
รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยตะกั่วเหล็ก (Kamon และ Nontananadh [47])



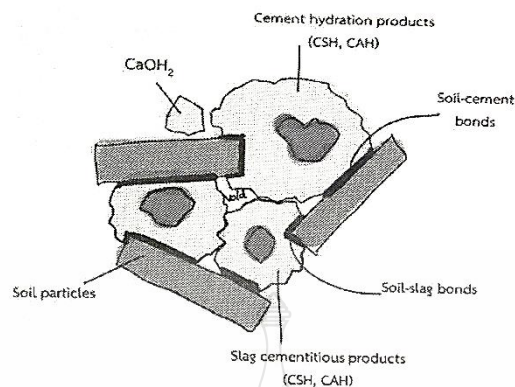
(c) Hardened phase

รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยตะกรันเหล็ก (Kamon และ Nontananadh [47])
(ต่อ)

Chaiyaput และAyawanan [62] ได้ศึกษากลไกการเชื่อมประสานเสริมของดินซีเมนต์และตะกรันเหล็กกล่าวไว้ว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์และปริมาณความชื้นในดิน นั้นส่งผลต่อกำลังรับน้ำหนักของดิน เกิดเป็น CSH และ CAH ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานทำให้อนุภาคดินรวมตัวกันแน่น ลดการซึมผ่านของน้ำรวมถึงทำให้การบวมตัวของเม็ดดินลดลงดังแสดงในรูปที่ 2.2 การใช้ตะกรันเหล็กเป็นสารผสมเพิ่มในดินซีเมนต์นั้นทำให้เกิดการเชื่อมประสานระหว่างอนุภาคดินมากขึ้น เนื่องจากองค์ประกอบของตะกรันเหล็กนั้นมีความคล้ายกับซีเมนต์ส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.5 แสดงปฏิกิริยาไฮเดรชันของดินซีเมนต์ (Chaiyaput และAyawanan [62])



รูปที่ 2.6 แสดงปฏิกิริยาไฮเดรชันของดินซีเมนต์ผสมตะกรันเหล็ก (Chaiyaput และAyawanan [62])

2.5 การปรับปรุงคุณสมบัติดินด้วยซีเมนต์

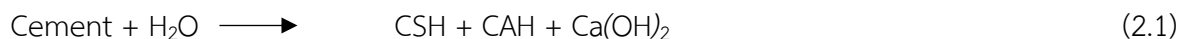
Hogentogler [2] กล่าวว่า การปรับปรุงดินเป็นการทำให้ดินจากแหล่งธรรมชาติมีความสามารถในการรับแรงแบกทานได้ดีขึ้น อาจทำได้ด้วยการบดอัดให้แน่นหรือใช้สารผสมเพิ่มลงไปในพื้นที่อาจเป็นผงหรืออาจเป็นของเหลวก็ได้

Circeo และคณะ [23] กล่าวว่า ดินเกือบทุกชนิดสามารถปรับปรุงคุณภาพได้ ซีเมนต์ที่ผสมลงไปดินจะเปลี่ยนแปลงสมบัติและโครงสร้างของดิน ถึงแม้ว่าจะผสมปริมาณซีเมนต์ที่เท่ากัน ดินที่ใช้มีคุณสมบัติทางกายภาพที่เหมือนกัน แต่ผลที่ได้จะแตกต่างกันเนื่องจากคุณสมบัติทางเคมีที่มีผลต่อกำลังอัดของดินผสมซีเมนต์

Mitchell [41] ได้กล่าวว่า จุดประสงค์ของการผสมสารเคมีในดินเพื่อต้องการควบคุมการเปลี่ยนแปลงปริมาตร ปรับปรุงการรับน้ำหนักหรือพฤติกรรมของหน่วยแรง (stress) และความเครียด (strain) ปรับปรุงการซึมผ่านของน้ำ และคงทนต่อการกัดกร่อนของหิน

Lambe, Michaels และ Moh [18] อธิบายว่าเมื่อซีเมนต์เข้าเจอกับน้ำและดินจะก่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ Calcium Silicate Hydrate (CSH), Calcium Aluminate Hydrate (CAH) และ Released Hydrate Lime ที่เป็นสารประกอบในซีเมนต์ที่แยกออกมาขณะเกิดปฏิกิริยา ซึ่งสาร CSH และ CAH จะเป็นตัวเชื่อมประสานเมื่อน้ำระเหยออก

Moh [28] ได้เขียนสมการทางเคมีของปฏิกิริยาของการเกิดดินซีเมนต์ไว้ดังสมการ



โดยเรียกปฏิกิริยาดังแสดงในสมการที่ 2.1 ว่า Hydration Reaction หรือ Primary Reaction ซึ่ง CSH และ CAH ที่ได้นั้นเกิดจากปฏิกิริยา Cement Hydration โดยตรง ส่วนสมการที่ 2.3 และ 2.4 เป็น ปฏิกิริยาต่อเนื่องระหว่าง Ca อีออน กับซิลิกาและอลูมินาในดินจึงก่อให้เกิด CSH และ CAH เรียกปฏิกิริยานี้ว่า Pozzolanic Reaction หรือ Secondary Reaction

Huasman [46] กล่าวว่าเมื่อซีเมนต์และน้ำผสมกันจะเกิดปฏิกิริยา Hydration Reaction ทันที ต่างจาก Pozzolanic Reaction ที่จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องแบบค่อยเป็นค่อยไปอีกหลายเดือน

Herzog และ Mitchell [27] ได้วิเคราะห์ปฏิกิริยาของซีเมนต์กับดินเหนียว พบว่า CSH และ CAH เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นกระบวนการแรก แล้วจึงเกิดปฏิกิริยาระหว่างซิลิกา และอลูมินากับ Calcium Ion ที่เกิดจาก Hydrate Lime เป็นกระบวนการที่สองทำให้ได้ CSH และ CAH เช่นกัน และจะใช้เวลาการเกิดมากกว่ากระบวนการแรก จึงเป็นสาเหตุให้กำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์พัฒนาขึ้นตามเวลาของการบ่มที่เพิ่มขึ้น

Pendola, Kennady และ Hutson [32] ได้กล่าวไว้ว่าปฏิกิริยาทางกายภาพและเคมีระหว่างซีเมนต์ น้ำและดินเป็นกระบวนการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์ที่ประกอบด้วยกลไก 4 ขั้นตอนร่วมกัน คือ

Hydration of Cement เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่ก่อให้เกิดโครงข่ายที่เชื่อมแน่นของเม็ดดิน ทำให้ระยะห่างระหว่างเม็ดดินนั้นลดลงจึงส่งผลให้การซึมผ่านของน้ำรวมถึงการบวมตัวของมวลดินนั้นลดลงแต่มีความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นหลังถูกปรับปรุง

Cation Exchange เป็นปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำจากเกลือในน้ำ ที่อยู่ในช่องว่างของเม็ดดิน จะถูกดึงดูดมาจับบนพื้นผิวของอนุภาค ทำให้ค่าพลาสติกของดินลดลงเมื่อผสมซีเมนต์กับดินประเภทที่มีความเชื่อมแน่น

Carbonation ปูนขาว (Lime) จะทำปฏิกิริยาเคมีกับคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศเกิดเป็นสารประกอบ Calcium Carbonate ทำให้มีความเชื่อมแน่นที่มากขึ้น

Pozzolan Reaction เป็นปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดการยึดเหนี่ยว (Cementing) ระหว่างอนุภาคดิน Alumina และ Silica ในดินจะทำปฏิกิริยากับปูนขาวเกิดเป็น Calcium Silicate หรือ Aluminates เป็นตัวเชื่อมประสานอนุภาคดินเป็นผลให้ความแข็งแรงของอนุภาคเพิ่มขึ้นสูง ในขั้นตอนนี้มีผลทำให้กำลังของวัสดุสูงขึ้นโดยอาศัยระยะเวลาที่นาน

Terrel และคณะ [39] พบว่าเมื่อผสมซีเมนต์เพสต์กับดินเม็ดหยาบ อนุภาคระหว่างโมเลกุลของเม็ดดินจะถึงยึดเข้าด้วยกันด้วยซีเมนต์เพสต์ การยึดเกาะจะเกิดที่ผิวระหว่างซีเมนต์เจลและผิวอนุภาคดิน และในดินเม็ดหยาบที่มีการปะปนของดินเหนียวอยู่ แร่ของดินเหนียวจะมีส่วนช่วยในการทำปฏิกิริยากับ Hydrate Lime ก่อให้เกิดสารเชื่อมประสาน CSH และ CAH

เกษม และพินิต [66] ได้ศึกษาพบว่า ในดินเหนียวมีแร่ซิลิกาผสมอยู่ในปริมาณมาก ซึ่งแร่ซิลิกาสามารถทำปฏิกิริยากับ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ในปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ดี เป็นผลให้เปลี่ยนคุณสมบัติของดิน ให้มีความสามารถรับน้ำหนักได้เพิ่มขึ้นรวมถึงมีการยุบตัวที่น้อยลง

2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังของดินซีเมนต์

2.6.1 ปริมาณและประเภทของซีเมนต์

Felt [11] ได้ศึกษาปริมาณซีเมนต์ที่มีผลต่อกำลังของดินซีเมนต์ โดยทดสอบในอัตราส่วนผสมของซีเมนต์ตั้งแต่ร้อยละ 6 ไปจนถึงร้อยละ 30 โดยปริมาตรมีอายุตั้งแต่ 2 วันขึ้นไปจนถึง 1 ปี และผ่านสภาพอากาศ 2 แบบคือ Wet-Dry และ Freeze-Thaw ตั้งแต่ 12 ครั้งไปจนถึง 96 ครั้ง ดินที่ใช้ในการทดสอบมี 3 ชนิดคือ Loamy Sand, Medium Clay และ Silty Clay Loam พบว่าเมื่อใช้ปริมาณซีเมนต์ต่อดินเพิ่มขึ้นจะเป็นผลให้ความแข็งแรงของดินซีเมนต์สูงขึ้นด้วย โดยในดินที่มีเม็ดดินขนาดเล็กจะให้กำลังรับแรงอัดที่น้อยกว่าดินที่มีเม็ดดินขนาดใหญ่ และในดินที่มีการปะปนของดินเหนียวมากจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่น้อยกว่าดินที่มีการปะปนของดินเหนียวสูง อีกทั้งปริมาณดินซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความแข็งแรงของดินซีเมนต์สูงขึ้นด้วย

อีกทั้ง Felt [11] ยังได้ศึกษาผลของกำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ที่ถูกปรับปรุงด้วยซีเมนต์ต่างประเภทกันโดยในการศึกษาจะใช้ซีเมนต์ type 1 และซีเมนต์ type 3 โดยดินที่นำมาปรับปรุงมี 2 ชนิดคือ Sandy Loam และ Silty Clay Loam พบว่าในดินชนิด Sandy Loam นั้นเมื่อถูกปรับปรุงด้วยซีเมนต์ type 3 จะได้กำลังรับแรงอัดเป็นสองเท่าของตัวอย่างที่ถูกปรับปรุงด้วยซีเมนต์ type 1 ในช่วงอายุการบ่ม 7 วัน และเป็น 1.4 เท่าในช่วงอายุการบ่มที่ 28 วัน ส่วนในดินชนิด Silty Clay Loam เมื่อถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ประเภทที่ 3 มีผลให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ประเภทที่ 1 เล็กน้อยเท่านั้น

ต่อมา Terashi, Tanaka และ Okumura [38] ได้วิเคราะห์คุณสมบัติเชิงวิศวกรรม และคุณสมบัติพื้นฐานของดินซีเมนต์อย่างจริงจัง และได้มีผู้สนใจด้านนี้มากขึ้น เช่น Kawasaki และคณะ [40], Nontananandh และ Yupakorn [52] จากการศึกษาเหล่านี้ได้ให้ข้อสรุปที่ใกล้เคียงกันว่าปริมาณของน้ำและซีเมนต์เป็นเหตุผลหลักที่มีผลต่อกำลังของดินซีเมนต์

จากผลการศึกษาของ Ruenkairergsa [42,43] พบว่าเหตุผลหลักที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์คือปริมาณของซีเมนต์ จึงต้องหาปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมในห้องปฏิบัติการก่อน เนื่องจากดินที่ต่างชนิดกันจะมีอัตรากำลังรับแรงอัดสูงขึ้นของดินซีเมนต์ที่แตกต่างกัน ในดินเม็ดหยาบ จะมีการเชื่อมประสานของพันธะที่แข็งแรงกว่าดินเม็ดละเอียด อีกทั้งดินที่มีการปะปนของดินเหนียวมาก จะให้กำลังรับแรงอัดที่ต่ำ

Lade และ Overton [45] ได้วิเคราะห์ผลของการเชื่อมประสานด้วยพันธะ (Cementation) ในดินเม็ดหยาบ ที่แรงดันรอบข้างต่ำแต่ปริมาณซีเมนต์ผสมแตกต่างกันภายใต้ความหนาแน่นที่เหมือนกัน ปริมาณน้ำที่ผสมเท่ากัน จากการศึกษาพบว่าค่ากำลังรับแรงดึง และค่ามุมเสียดทานภายในจากแรง (Internal Friction Angle) สูงขึ้น เมื่อปริมาณซีเมนต์ผสมเพิ่มขึ้น

Clare และ Pollard [5] ได้นำดิน 3 ชนิดในประเทศอังกฤษมาผสมกับซีเมนต์เพื่อศึกษาอิทธิพลของประเภทซีเมนต์ที่มีต่อดิน โดยพบว่าดินที่ผสมกับซีเมนต์ประเภท High-Alumina จะมีกำลังอัดที่สูงมากเมื่อมีอายุบ่ม 24 ชั่วโมง ต่างจากดินที่ผสมกับซีเมนต์ประเภทอื่นที่ต้องมีอายุบ่ม 5 วัน และที่ระยะเวลาการบ่มเท่ากันพบว่าค่ากำลังคราก (Yield Strength) ของดินที่ผสมซีเมนต์ประเภทที่ 3 จะให้ค่าความแข็งแรงที่สูงกว่าดินที่ผสมซีเมนต์ประเภทที่ 1

Massachusetts Institute of Technology [10] ได้ศึกษาดินตะกอนปนทราย และดินเหนียว (Clayey Sandy silt) ที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ โดยดินที่มาจากรัฐโอไฮโอจากการศึกษาพบว่า ดินที่ถูกปรับปรุงด้วยซีเมนต์ประเภทที่ 1 จะให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าดินที่ถูกปรับปรุงด้วยซีเมนต์ประเภทที่ 3 อยู่ 1.5 และ 1.3 เท่า ที่อายุ 7 วัน และ 28 วันตามลำดับ

Davidson และ Bruns [20] ได้ทดสอบกำลังอัดของดินทราย ตะกอน และดินเหนียวจากแหล่งที่มารัฐโอไฮโอที่ถูกปรับปรุงด้วยซีเมนต์ด้วยวิธี Freeze-Thaw และสรุปผลไว้ว่าการใช้ซีเมนต์ประเภทที่ 3 เหมาะสำหรับงานก่อสร้างถนนมากกว่าการใช้ซีเมนต์ประเภทที่ 1 ในการปรับปรุงคุณภาพดินเนื่องจากประหยัดกว่า เพราะช่วยให้ได้เปรียบในเรื่องของระยะเวลาการก่อสร้างจากความต้องการเวลาในการบ่มที่น้อยกว่าของซีเมนต์ประเภทที่ 3

Horpibulsuk และ Miura [49], Miura และคณะ [50] ได้กล่าวถึงตัวแปร Clay-Water/Cement Ratio (W/C) นั่นคือตัวแปรที่สามารถรวมปริมาณน้ำและปริมาณซีเมนต์ไว้ในตัวแปรเดียวได้ และได้นิยามไว้ว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างความชื้นในดินกับปริมาณซีเมนต์โดยน้ำหนักผึ่งแห้ง

2.6.2 คุณสมบัติของดินซีเมนต์

Davison [21] พบว่าดินที่มีสารอินทรีย์ปะปนอยู่จะทำให้ปฏิกิริยาเปลี่ยนไป ขึ้นอยู่กับ Cation ที่อยู่ในดินจะทำให้เกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกันไป อาทิ ดินที่มีซัลเฟต (SO_4^{2-}) ปะปนอยู่จะทำให้การแข็งตัวนั้นช้าและเกิดการบวมตัว

Ruenkairergsa [42,43] ในดินเม็ดละเอียดการปรับปรุงคุณสมบัติของดินด้วยซีเมนต์ส่งผลอย่างมากต่อส่วนประกอบทางเคมีของดิน ต่างจากดินที่มีเม็ดขนาดใหญ่ที่จะส่งผลเพียงเล็กน้อย และในดินที่มีการปะปนของสารอินทรีย์จะส่งผลต่อการปรับปรุงคุณสมบัติขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของสารอินทรีย์ เช่น เศษไม้ ฟาง หรือ Cellulose สารอินทรีย์จำพวกนี้จะส่งผลไม่มากนัก ต่างจาก Glucose, Tartaric Acid สารอินทรีย์จำพวกนี้จะมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา Cement Hydration อย่างมากทำให้การแข็งตัวนั้นช้าลง ในดินที่มีส่วนผสมของซัลเฟต (SO_4^{2-}) จะต้องใช้ซีเมนต์ชนิดต่อต้านซัลเฟตมาปรับปรุงจึงจะได้ผล เนื่องจากซัลเฟตจะมีผลหลังจากปฏิกิริยา Hydration จบลงทำให้การแข็งตัวช้า

Felt [11] ได้กล่าวไว้ในการศึกษาว่าข้อมูลที่ได้จากการบดอัดและปฏิกิริยาของดินซีเมนต์ที่เกิดขึ้นนั้น จะเป็นไปตามชนิดของดินที่นำมาใช้และแปรผันไปตามองค์ประกอบทางเคมีของดิน จะเห็นความแตกต่างที่ชัดเจนเมื่อนำดินชั้นบน (Topsoil) และดินชั้นกำเหนิด (Parent Material) จากแหล่งเดียวกัน มาปรับปรุงคุณสมบัติด้วยซีเมนต์จะพบว่าดินชั้นบนจะให้ประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าดินชั้นกำเหนิด

Terrel และคณะ [39] ได้อธิบายถึงความเหมาะสมของดินที่จะนำมาปรับปรุงคุณสมบัติไว้ว่า Organic Matter ที่ได้จากการย่อยสลายพืชในดินนั้นจะส่งผลกับกระบวนการปรับปรุงคุณภาพดินเล็กน้อยหรืออาจจะไม่ส่งผลเลย แต่หากเป็น Organic Compounds เช่น Nucleic Acid และ Dextrose Acid สารจำพวกนี้จะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันช้าลงและได้กำลังของดินซีเมนต์ที่ต่ำ เนื่องจาก Calcium Ions จากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะถูกดูดซับไว้ด้วย Organic เป็นผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินนั้นลดลง อีกทั้งยังส่งผลต่อกระบวนการการแข็งตัวของดินผสมซีเมนต์ให้ช้าลง

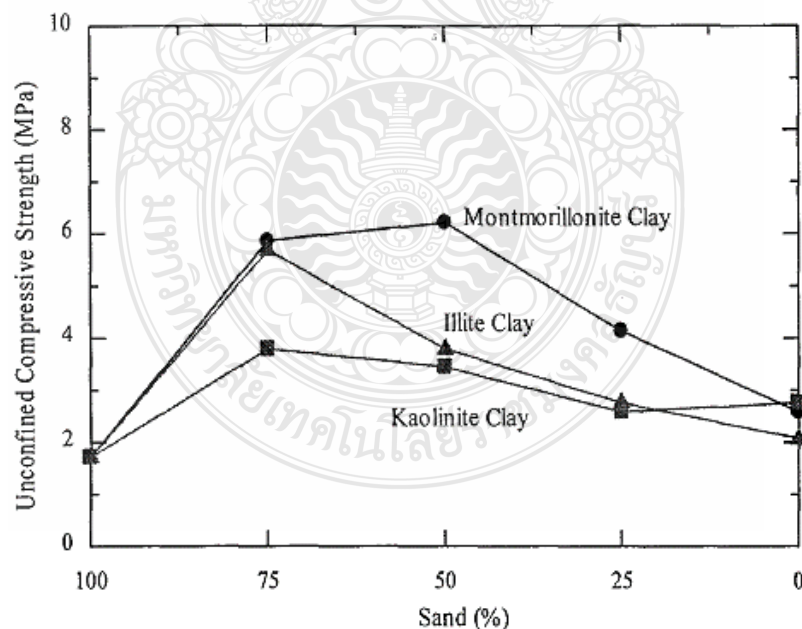
Ng [31] ได้ศึกษาผลอิทธิพลของคุณสมบัติของดินที่มีผลต่อการปรับปรุงคุณสมบัติโดยใช้ปูนซีเมนต์จึงพบว่า ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในการพัฒนาคุณสมบัติของดินจะขึ้นอยู่กับค่า Activity ใน

ดิน ที่ระดับความต้องการกำลังที่เท่ากันดินที่มีค่า Activity ต่ำจะต้องการใช้ซีเมนต์ในการผสมเพื่อปรับปรุงคุณภาพในปริมาณที่น้อยกว่าดินที่มีค่า Activity สูง

2.6.3 ปริมาณดินเหนียวและแร่ประกอบดินเหนียวที่มีอยู่ในดินซีเมนต์

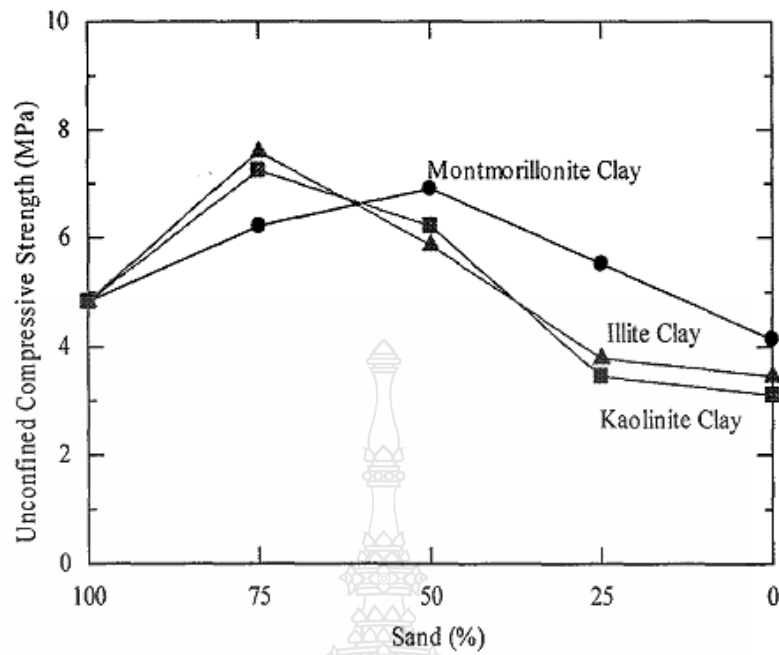
Reinhold [12] ทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการทดสอบกำลังกดอัดกับปริมาณดินเหนียว โดยนำทรายมาผสมกับดินเหนียวในปริมาณที่ต่างกันตั้งแต่ 0-100 เปอร์เซนต์ จึงได้ว่าค่ากำลังอัดและมอดูลัสยืดหยุ่นจะลดลงเมื่อปริมาณดินเหนียวเพิ่มขึ้น

Davidson และคณะ [24] ได้นำดินเหนียวจำพวก คาโอลินไนท์ (Kaolinite) , อิลไลท์ (Illite) และมอนโมริลโลไนท์ (Montmorillonite) มาผสมกับทรายในอัตราส่วนทรายต่อดินเหนียว 100:0 , 75:25 , 50:50 , 25:75 และ 0:100 แล้วนำไปทดสอบ Unconfined Compressive Strength ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 2.4 , 2.5 , 2.6 จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่ากำลังของดินซีเมนต์ลดลงอย่างเด่นชัดเมื่อผสมดินเหนียวเข้ากับดินจำพวกที่ไม่มีความเชื่อมแน่น (Cohesionless Soil) ในปริมาณที่มากกว่าร้อยละ 25 และให้การรับกำลังสูงสุดที่ปริมาณอัตราส่วนทรายต่อดินเหนียว 75:25 ปริมาณซีเมนต์ผสมร้อยละ 8 เพราะเป็นปริมาณอัตราส่วนของส่วนผสมเพิ่มที่มีขนาดคละติ (Well Grade) ทำให้มีค่าความหนาแน่นสูงสุด ส่งผลให้ได้ค่ากำลังสูงสุดตามมา



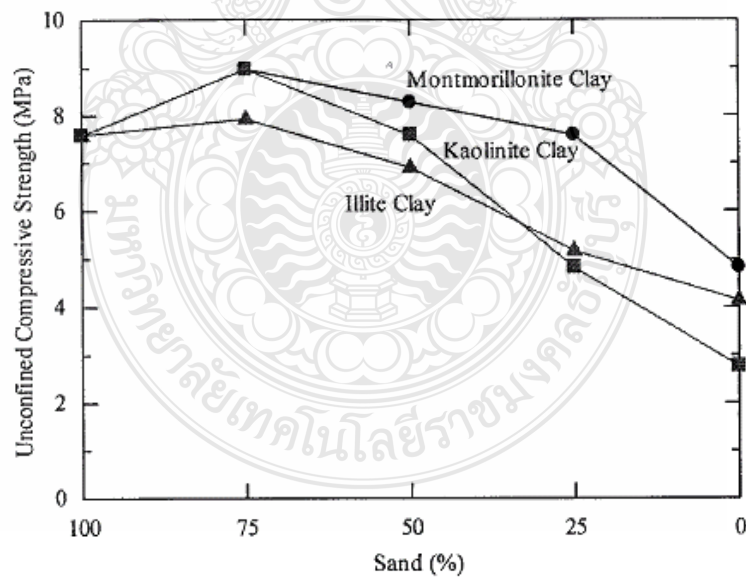
รูปที่ 2.7 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 8

(Davidson และคณะ [24])



รูปที่ 2.8 อิทธิพลของแร้ดินเหนียวที่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 12

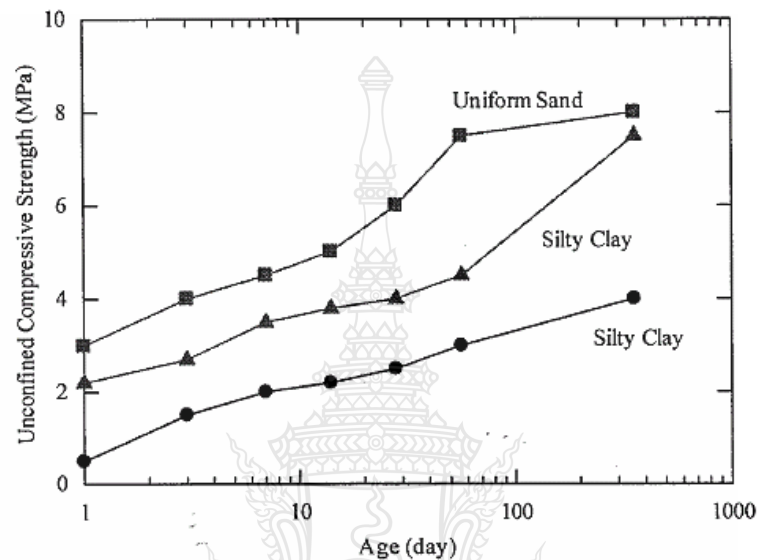
(Davidson และคณะ [24])



รูปที่ 2.9 อิทธิพลของแร้ดินเหนียวที่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 16

(Davidson และคณะ [24])

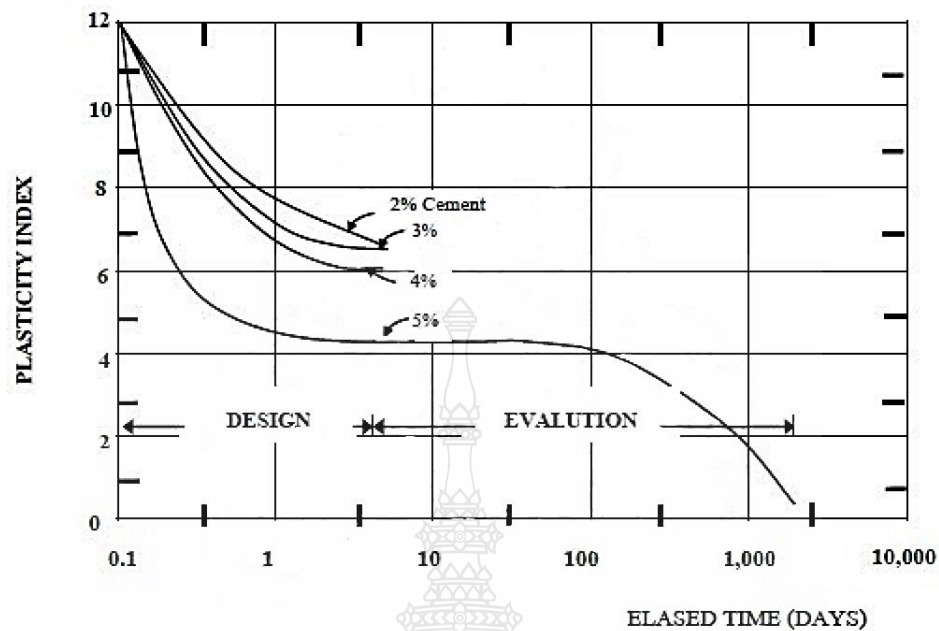
Grimer และ Krawczyk [26] ได้กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างอายุ (log scale) และ กำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ผสมซีเมนต์ร้อยละ 10 ดังรูปที่ 2.7 ระบุว่าทรายที่ไม่มีดินเหนียวผสมและมีขนาดของเม็ดดินสม่ำเสมอ (Uniform Sand) จะให้กำลังที่เพิ่มขึ้นสม่ำเสมอเป็นลักษณะเส้นตรงจากกราฟ หลังจากอายุบ่มครบ 28 วันจะเห็นการเพิ่มขึ้นของกำลังที่เปลี่ยนไปอย่างชัดเจน จึงคาดว่าจะเป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการบ่มของทรายที่มีขนาดคละสม่ำเสมอ และดินตะกอนปนเหนียว(Grimer และ Krawczyk [26])

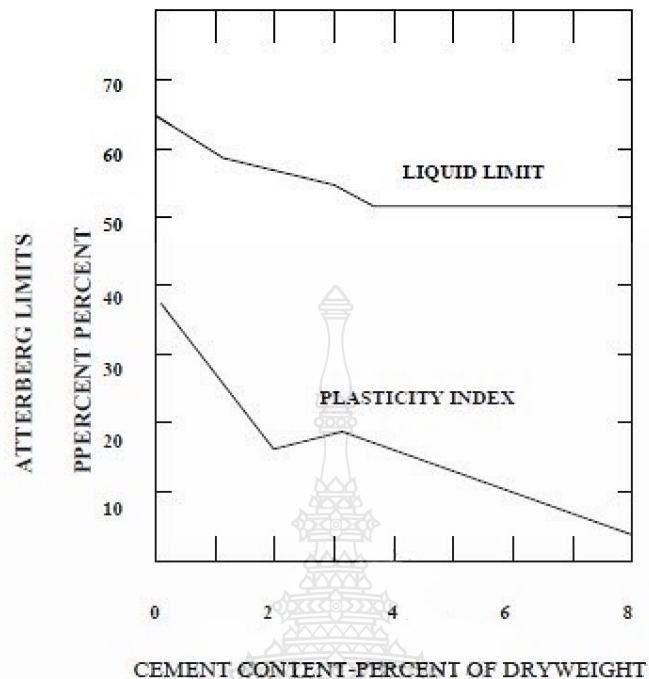
Bell [37] พบว่า Aqueous Phase จะลดลงจากปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวกับแร่ Montmorillonite ในดินเหนียว ทำให้เกิดปัญหาต่อการแข็งตัวของสาร Cementious ที่มีหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานในตัวปูนขาวนั้นไม่มากพอจึงได้เสนอวิธีการแก้ไขไว้ว่า ควรเพิ่ม Free Lime ให้สูงขึ้น ด้วยการเติมปริมาณซีเมนต์ลงไปให้มากกว่า 15 เปอร์เซ็นต์ จะให้ทำดินจำพวก Montmorillonite มีคุณสมบัติที่สามารถนำมาใช้งานได้

Redus [17] ได้หาความสัมพันธ์ของค่าดัชนีพลาสติกกับเวลาจากการทดสอบอัตราเตอร์ เบิร์ก (Atterberg's Limits) ของดินซีเมนต์ชั้นพื้นทาง (Base course) ในสนามบินต่าง ๆ ที่มีการใช้งานมานานหลายปี ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ของค่าดัชนีพลาสติกกับเวลา (Redus [17])

จากรูปที่ 2.8 จะสังเกตได้ว่าค่าดัชนีพลาสติกจะลดต่ำลงอย่างรวดเร็วเมื่อจำนวนซีเมนต์ที่ผสมเพิ่มมากขึ้น และเมื่อลดปริมาณซีเมนต์ที่ผสมลงดัชนีพลาสติกจะลดต่ำลงอย่างช้า ๆ อีกทั้งการลดลงของดัชนีพลาสติกยังเกิดมาจากระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอีกด้วย และจากการวิเคราะห์ของ Spangler and Patel [4] ที่ระบุผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีพลาสติกกับระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันใน 1 ชั่วโมง ที่เป็นไปในทิศทางเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.12 ค่าอัตรเบอร์กของดินไอโอวา (Iowa) หลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน 1 ชั่วโมง

(Spangler and Patel [4])

Norling และ Peckard [16] ได้นำดิน 3 ชนิด คือ Loamy Sand, Fine Sand Loam และดินเหนียว มาผสมกับซีเมนต์ในอัตราส่วนที่เหมือนกันและเติมมวลรวมหยาบที่ค้ำอยู่บนตะแกรงเบอร์ 4 ในอัตราส่วนที่ต่างกัน ทำการทดสอบหาค่ากำลังที่อายุการบ่ม 7 วัน เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของปริมาณมวลรวมหยาบที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 4 โดยผลของการทดสอบพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมของมวลรวมหยาบที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 4 มากเกินกว่าร้อยละ 50 ของน้ำหนักมวลรวมทั้งหมดในดินชนิด Loamy Sand และ Fine Sand Loam จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ลดลง

Portland Cement Association [19] ได้จำแนกการใช้ปริมาณซีเมนต์ของดินกลุ่มต่าง ๆ ตามระบบ ASSHTO ไว้ในตารางที่ 2.1 และ 2.2

ตารางที่ 2.1 ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ปรับปรุงตามการจำแนกแบบ ASSHTO

(ข้อมูลจาก Portland Cement Association [19])

ASSHTO	Usual range in cement		Estimated cement content	Cement content for wet-
SOIL	Requirement		And that used in the	dry and freeze-thaw test
GROUP	(% by vol.)	(% by wt.)	Moisture-density test	(% by wt.)
			(% by wt.)	
A-1-a	5-7	3-5	5	3-5-7
A-1-b	7-9	5-8	6	4-6-8
A-2	7-10	5-9	7	5-7-9
A-3	8-12	7-11	9	7-9-11
A-4	8-12	7-12	10	8-10-12
A-5	8-12	8-13	10	8-10-12
A-6	10-14	9-15	12	10-12-14
A-7	10-14	10-16	13	10-13-15

ตารางที่ 2.2 ปริมาณซีเมนต์โดยประมาณในการผสมสำหรับวัสดุต่าง ๆ

(ข้อมูลจาก Portland cement Association [19])

Type of miscellaneous material	Estimated cement contented		Cement contented for
	And That used in moisture -		Wet – dry and
	Density test		Freeze – thaw Test
	(% by vol.)	(% by wt.)	(% by wt.)
Shell Soil	8	7	5-7-9
Limestone screening	7	5	3-5-7

ตารางที่ 2.2 ปริมาณซีเมนต์โดยประมาณในการผสมสำหรับวัสดุต่าง ๆ

(ข้อมูลจาก Portland cement Association [19])(ต่อ)

Type of miscellaneous material	Estimated cement contented		Cement contented for
	And That used in moisture -		Wet – dry and
	Density test		Freeze – thaw Test
	(% by vol.)	(% by wt.)	(% by wt.)
Shale or disinter grated shale	11	10	8-10-12
Callche	8	7	5-7-9
Cinders	8	8	6-8-10
Chert	9	8	6-8-10
Chat	8	7	5-7-9
Marl	11	11	9-11-13
Scoria (Retaining No.4 material)	12	11	9-11-13
Scoria (Passing No.4 material only)	8	7	5-7-9
Air – Cooled slag	9	7	5-7-9
Water – cooled slag	10	12	10-12-14

2.6.4 ปริมาณความชื้นขณะบดอัด

Felt [11] และ Davidson และคณะ [24] มีผลการทดสอบที่ตรงกันจากการทำ Wet-Dry และ Freeze-Thaw เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบจากความชื้นที่มีต่อกำลังรับแรงอัดและความชื้นกับน้ำหนักที่สูญเสียไปทราบว่า ปริมาณความชื้นและความหนาแน่นนั้นจะส่งผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์เป็นอย่างมาก ในการบดอัดดินทรายนั้นควรทำด้วยปริมาณของความชื้นที่น้อยกว่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และในดินเหนียวควรบดอัดในปริมาณความชื้นที่สูงกว่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมเพียงเล็กน้อย เพื่อให้ได้กำลังอัดสูงสุด

Ruenkairergsa [42,43] ได้วิเคราะห์เทียบผลของปริมาณความชื้นกับความหนาแน่นของดินที่ได้จากการบดอัดตามวิธีของพร็อกเตอร์ (Proctor) ที่นำมาใช้ในงานดินซีเมนต์ไว้ว่า ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมนั้นไม่เพียงแต่จะให้ความหนาแน่นที่สูงสุดเพียงอย่างเดียว แต่ยังช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นนั้นสมบูรณ์ จากการทดสอบด้วยวิธี Freeze-Thaw ของดินตะกอนและดินเหนียวผสมเพิ่มซีเมนต์เพื่อหาความคงทน พบว่าความหนาแน่นมากสุดในดินซีเมนต์นั้นมิได้ช่วยให้ดินซีเมนต์มีความแข็งแรงคงทนมากที่สุดเสมอไป ในดินตะกอนเมื่อบดอัดด้วยปริมาณความชื้นที่สูงกว่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมเล็กน้อยจะได้ค่าความคงทนที่มีค่าสูงสุด แต่เมื่ออัดบดที่ปริมาณความชื้นที่ต่ำกว่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมค่าความแข็งแรงและคงทนจะลดลง ในส่วนของดินทรายผสมเพิ่มซีเมนต์เมื่อบดอัดด้วยปริมาณความชื้นน้อยกว่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่ร้อยละ 3-6 จะได้ค่าความแข็งแรงสูงสุด และในดินเหนียวจะได้ค่าความแข็งแรงมากสุดเมื่อบดอัดด้วยปริมาณความชื้นน้อยกว่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมเพียงเล็กน้อย

Lightsey และคณะ [33] นำตัวอย่างของดิน 4 ชนิด ได้แก่ Silty Loam, Sandy Loam, Silt และ Silty Clay Loam มาบดอัดด้วยวิธีมาตรฐาน (Standard Proctor Test) ในปริมาณความชื้นที่น้อยกว่าและมากกว่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และปล่อยให้เวลาผ่านไป 0, 2, 4 และ 6 ชั่วโมง ก่อนทำการบดอัด จากการทดลองพบว่าชนิดของดินและเวลาในการผสมควบคู่กับการบดอัดนั้น มีผลต่อความต้องการปริมาณน้ำส่วนเกินที่ใช้ในปฏิกิริยาของดินกับซีเมนต์ เพื่อให้เกิดความคงทนและความแข็งแรงสูงสุดของดินซีเมนต์ โดยในดินเม็ดละเอียดนั้นการหน่วงเวลาก่อนการบดอัดอาจไม่จำเป็น เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำในการบดอัดจะทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันนั้นสมบูรณ์ขึ้นส่งผลให้ดินซีเมนต์มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น และในดินเม็ดหยาบความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณน้ำในการบดอัด โดยจะเป็นการลดการเสียดทานระหว่างเม็ดดิน การหน่วงเวลาก่อนที่จะบดอัดจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงคงทนของดินซีเมนต์

2.6.5 การบ่มดินซีเมนต์

Clare and Pollard [5] ได้วิเคราะห์ผลกระทบจากอุณหภูมิที่ส่งผลต่อกำลังของดินซีเมนต์จึงทราบว่า เมื่อเวลาของการบ่ม 7 วันของดินซีเมนต์โดยเพิ่มอุณหภูมิของบ่มเป็น 60 องศาเซลเซียส ในขณะที่อุณหภูมิบรรยากาศ 25 องศาเซลเซียสค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นร้อยละ 2-2.5 ต่ออุณหภูมิในการบ่มที่เพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบดินซีเมนต์ที่ก่อสร้างในพื้นที่ที่มีอากาศเย็นที่อายุ 180 วันแรก หลังการก่อสร้างจะให้กำลังรับแรงอัดที่ต่ำกว่าดินซีเมนต์ที่ปลูกสร้างในพื้นที่ที่มีสภาวะอากาศอุ่นกว่าร้อยละ 50-100

Highway Research Board [3] ได้รายงานว่าการฉาบผิวด้วยวัสดุ Bituminous Seal 4 ชนิด คือ MC-2, RC-1, MC-3 และ Asphalt Emulsion นั้นสามารถเก็บรักษาความความชื้นของดินซีเมนต์ในสนามได้เป็นอย่างดีระหว่างการบ่ม 7 วันในสนาม

Maner [8] ใช้วัสดุ 4 ชนิดเพื่อใช้ทดสอบการบ่มพื้นทางดินซีเมนต์ดังนี้ Waterproof Paper, Calcium Chloride, RC-2 Asphalt, Tar และ Asphalt Emulsion ปรากฏว่าวัสดุทั้ง 4 ชนิดสามารถใช้งานได้เป็นอย่างดี อีกทั้งยังทราบว่าความชื้นในอากาศนั้นมีอิทธิพลอย่างมากต่อปริมาณความชื้นในดินซีเมนต์

Leadabrand [13] พบว่าขีดจำกัดในการรับแรงกดของดินซีเมนต์จะคล้ายกับกำลังรับแรงกดของคอนกรีต จากการผสมเพิ่มซีเมนต์ที่ 10% ของน้ำหนักดินแห้งเข้ากับดินตัวอย่าง 2 ชนิด คือ Clayey Sandy Soil และ Silty Soil แล้วทำการบดอัดในห้องปฏิบัติการ เพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุตั้งแต่ 2 วันจนถึง 5 ปี จากข้อมูลผลการทดสอบพบว่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามอายุ อีกทั้งยังทดสอบกำลังรับแรงอัดจากการเจาะ แก่นเก็บตัวอย่างดินซีเมนต์ในสนามจากโครงการก่อสร้างต่าง ๆ ที่ดินซีเมนต์มีอายุอยู่ในช่วง 1 ปีถึง 20 ปี พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้สอดคล้องกับค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ

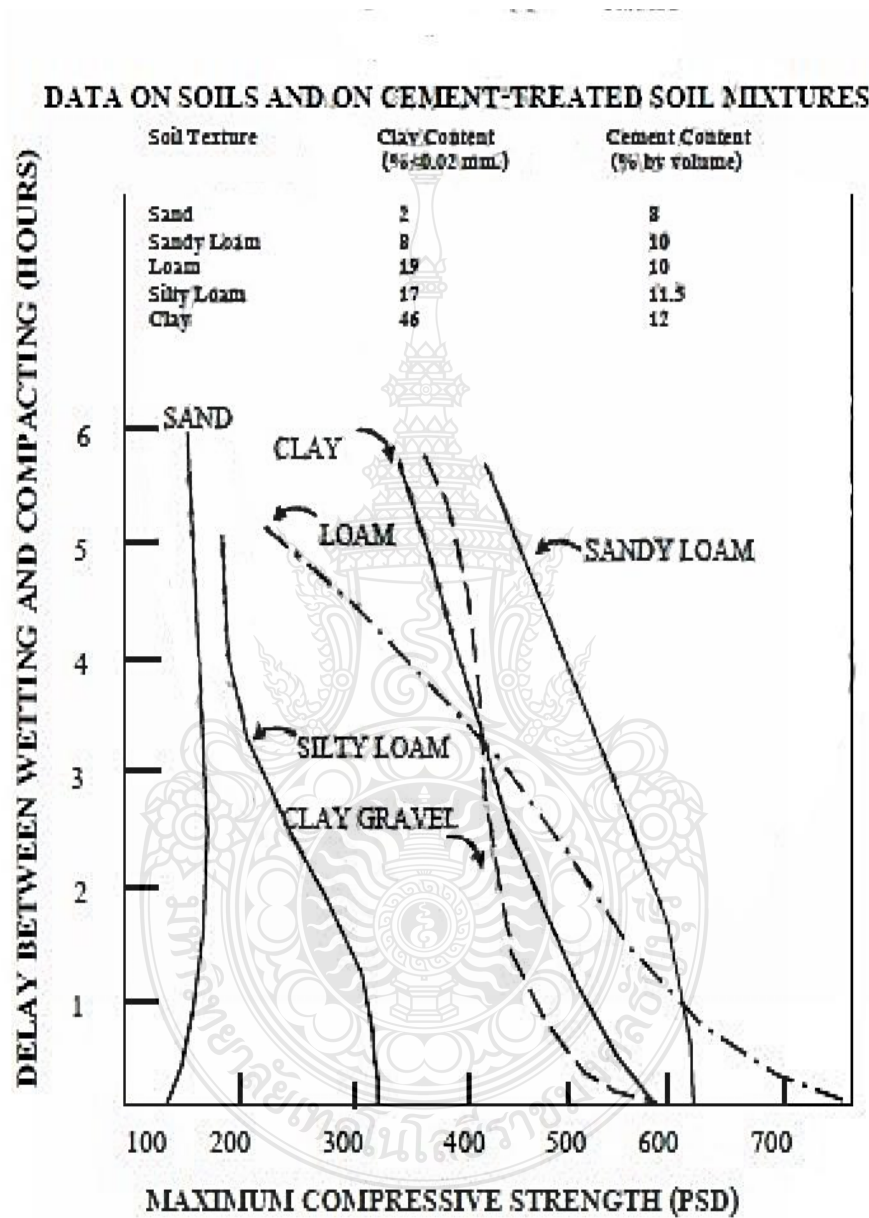
Shackel และ Lee [36] พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดและค่ากำลังรับแรงดึงของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอายุการบ่มและปริมาณซีเมนต์ จากการนำตัวอย่าง Artificial Soil ที่ได้จากการผสมระหว่าง Uniform Sand และ Commercial Air-Floated China Clay (Kaolin) ในอัตราส่วน 60:40 โดยน้ำหนัก มาผสมซีเมนต์ในอัตราส่วน 0%, 3% และ 8% และทำการบ่ม 2 ลักษณะที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสเท่ากันคือ ทั้งไว้ในอากาศและห่อในถุงพลาสติกที่อายุการบ่ม 0, 1, 3, 9, 23, 44 และ 81 วัน เมื่อครบอายุการบ่มตามลำดับแล้ว จึงนำไปทดสอบหาค่าการหดตัวหรือการขยายตัว ค่ากำลังรับแรงอัด ค่ากำลังรับแรงดึง และวัดปริมาณรูพรอง (Pore Size Distribution) ของดินซีเมนต์

2.6.6 ระยะเวลาในการผสม

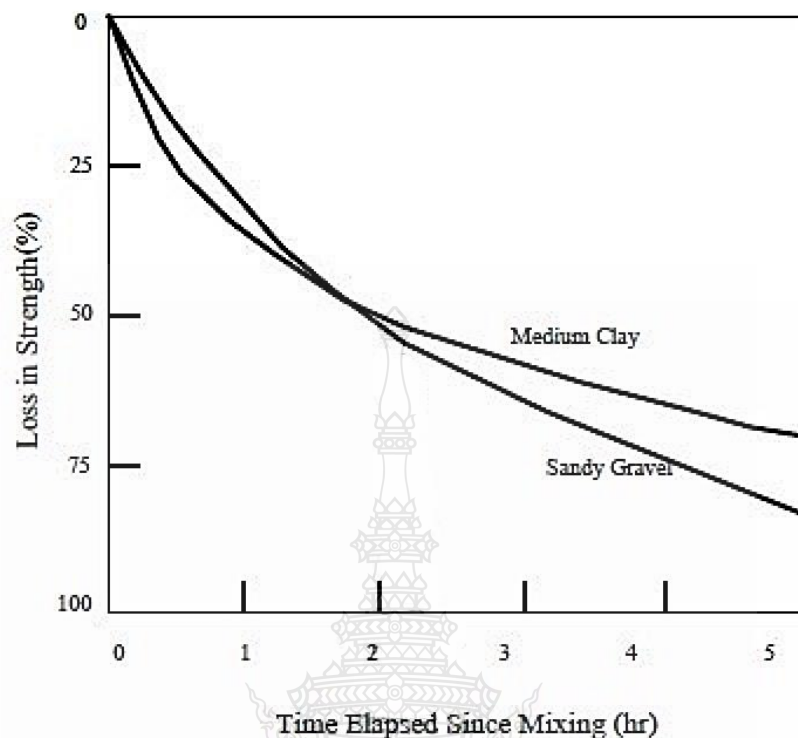
Felt [11] พบว่าการหน่วงเวลาการผสมแบบหยุดเป็นบางครั้ง ส่งผลเสียที่น้อยกว่าแบบหยุดผสมไปเลย และการหน่วงเวลาผสมให้นานขึ้นจะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของดินทุกชนิดลดลง เป็นผลจากการวิเคราะห์การหน่วงเวลาที่ส่งต่อกำลังรับแรงอัด และความแข็งแรงจากการผสมให้นานขึ้นแล้วทั้งไว้ ก่อนที่จะทำการบดอัด ของดิน 3 กลุ่ม คือ ดินกลุ่ม A-2 ($LL=26$, $PI=11$), ดินกลุ่ม A-4 ($LL=35$, $PI=12$), ดินกลุ่ม A-6-7 ($LL=47$, $PI=26$)

Ingles และ Metcalf [34] ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับระยะเวลาในการผสมดินซีเมนต์ จากการทดสอบดินตัวอย่าง 2 ชนิด คือ Medium clay และ Sandy Gravel พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดจะลดลงกว่า 50% เมื่อการผสมใช้เวลาที่นานขึ้น 1-2 ชั่วโมง และในดิน Sandy Gravel หากใช้เวลาในการผสมที่นานเกินกว่า 2 ชั่วโมงจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่น้อยกว่า Medium clay เล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 2.11

Marshall [9] พบว่ากำลังรับแรงอัดจะลดลงเมื่อเวลาที่ใช้ในการผสมนานขึ้น จากการวิเคราะห์ผลของการหน่วงเวลาการผสมระหว่างการผสมขึ้น และการบดอัดที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของดินชนิดต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.13 ผลกระทบของการหน่วงเวลาการผสมระหว่างผสมขึ้นและการบดอัดที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ (Marshall [9])



รูปที่ 2.14 การเสยกำลังของดินซีเมนต์จากการใช้เวลาในการบดอัดนานขึ้น

(Ingles และ Metcalf [34])

Horpibulsuk [49] กล่าวว่าสาเหตุที่ค่ากำลังของดินซีเมนต์ที่หาได้ในห้องปฏิบัติการนั้นมีค่าสูงกว่าค่ากำลังของดินซีเมนต์ในสนาม เป็นผลมาจากการควบคุมการผสมของดินซีเมนต์ที่ไม่สม่ำเสมอในสนาม

2.6.7 สารผสมเพิ่ม

Clare and Pollard [5] ได้ทดลองเติมสารผสมเพิ่มในทรายที่มีอัตราส่วนสารอินทรีย์ปะปนอยู่ 0.3% พบว่าการเติมสารประเภทปูนขาว (Lime) ที่ประมาณ 2% จะทำให้ตัวอย่างดินซีเมนต์แข็งตัวเร็วขึ้น 2 วัน จากเดิมที่ใช้เวลา 7 วัน เมื่อผสมด้วยซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพียงอย่างเดียว

Fuller และ Dabney [6] กล่าวว่าในดินที่มีค่าดัชนีพลาสติกสูงจะทำการผสมและบดอัดง่ายขึ้น เมื่อผสมเพิ่มปูนขาว อีกทั้งยังทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น

Maclean และคณะ [7] ได้ทดสอบผสมเพิ่มสารจำพวกปูนขาวลงไปให้อัตราส่วนร้อยละ 2 ในการปรับปรุงประสิทธิภาพดินที่มีค่าขีดจำกัดเหลวในช่วง 70 ถึง 75 และค่าดัชนีพลาสติกในช่วง 45 ถึง 53 โดยปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ผสมอยู่ที่ร้อยละ 15-30 พบว่า การผสมเพิ่มของสารจำพวกปูนขาวให้อัตราส่วนร้อยละ 2 ช่วยให้ดินซีเมนต์เพิ่มค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงขึ้น และเมื่อแช่น้ำจะช่วยเพิ่มความต้านทานการเสียดทานได้ดีขึ้น แต่หากผสมเพิ่มในอัตราส่วนที่มากเกินไปกว่า 2% ผลการทดสอบอาจเปลี่ยนแปลงไปจากที่กล่าวมาข้างต้น

Lamebe และ Moh [14] ได้รายงานผลของการทดลองจากการทดสอบการเติมสารผสมเพิ่มในดินตะกอนในรัฐ New Hampshire ดินเหนียวปนตะกอนในรัฐ Massachusetts และดินฝุ่นแข็งพรุนในเมือง Vicksburg โดยการปรับปรุงด้วยซีเมนต์ในปริมาณ 5% และเติมสารผสมเพิ่มปริมาณ 0.5-1% ได้ผลว่าสารผสมเพิ่มในกลุ่ม Dispersants, Synthetic resins, Waterproofing agents, Alkalies และเกลือ ที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด 29 ชนิด และมีบางชนิด ที่เพิ่มความแข็งแรงถึงร้อยละ 100 ถึง 150 ได้แก่ โซเดียมคาร์บอเนต, โซเดียมไฮดรอกไซด์, โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต และโซเดียมซิลิเฟต

Davidson และคณะ [15] ได้ศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพของดินด้วยการเติมซีเมนต์พอร์ตแลนด์และเถ้าลอยลิกไนต์ (Fly Ash) พบว่า เมื่อผสมเถ้าลอยในดินทรายผสมซีเมนต์นั้น ทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักนั้นมากขึ้น และหากผสมเถ้าลอยในดินเหนียวที่เติมซีเมนต์จะช่วยลดรอยแตกจากการหดตัว แต่ความคงทนไม่เพิ่มขึ้น

Pinto และคณะ [25] ศึกษาอัตราส่วนของปริมาณปูนขาวและซีเมนต์ที่ผสมในดิน 5 ชนิดที่มีแรมอนโลริโอไนท์ผสมอยู่ ที่ระยะเวลาการบ่ม 7, 14, และ 28 วัน และนำไปแช่น้ำไว้ 1 วัน ก่อนทำการทดสอบแรงอัดแกนเดียว ทราบว่า ในดินตัวอย่างที่มีปริมาณดินเหนียวปะปนอยู่มากและไม่มีหินปูนหรือแคลเซียมคาร์บอเนตผสมอยู่เมื่อผสมปูนขาวจะยิ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้สูงขึ้น

Wilmot [48] ได้แนะนำแนวทางในการใช้วัสดุกับสารผสมเพิ่มแต่ละชนิดดังแสดงในตารางที่ 2.3 และได้กล่าวว่างาน Pavement Recycling จากประเทศออสเตรเลียตั้งแต่ปี 1950 วัสดุที่ใช้เติมผสมเพิ่มมีเพียง Cement, Cement/Fly-Ash, Bitumen และ Hydrate lime เท่านั้น ต่อมา มีการนำซีเมนต์ผสมได้แก่ Cement+Slag, Cement+Fly-Ash, Cement+Lime มาใช้ในปี 1980 เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานให้นานขึ้น โดยที่ยังคงความแข็งแรงในระยะยาวไว้เท่าเดิม

ตารางที่ 2.3 แนวทางการเลือกวัสดุผสมเพิ่ม (Additive) กับวัสดุแต่ละชนิด (ดัดแปลง : Wilmot [48])

สารผสมเพิ่ม	หินย้อย	กรวดได้ ส่วนขนาด	กรวดปน ทรายแป้ง ดินเหนียว	*	ดินเหนียวปน ทรายและ ทรายแป้ง	ดินเหนียว ส่วนใหญ่
ปูนซีเมนต์	A	A	A	B	B	N
วัสดุประสาน	A	A	A	A	A	N
ปูนขาว (Hydrate Lime)	B	B	A	N	B	A
ปูนขาว+ปูนซีเมนต์	N	N	B	N	B	A
สารพอลิเมอร์ (Polymeric)	B	A	A	B	A	B
สารบิทุเมน (ยางมะตอย)	A	A	B	B	B	N

หมายเหตุ : A = ปกติเหมาะสมมาก; B = พอใช้; N = ปกติไม่เหมาะสม

* ขึ้นกับขนาดคละ (ทรายขนาดเดียวกำหนดให้มีสารผสมเพิ่มมากขึ้น)

2.7 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

2.7.1 สารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) สามารถจำแนกออกได้ 3 กลุ่มตามลักษณะการใช้งาน ได้แก่ ปูนซีเมนต์สำหรับงานโครงสร้าง ปูนซีเมนต์สำหรับงานก่อฉาบ และปูนซีเมนต์สำหรับงานพิเศษ

ปูนซีเมนต์ OPC ได้จากการเผาวัสดุที่สำคัญรวมกันคือ 1) Catcareous Material ได้แก่ หินปูน (Limestone) กับดินสอพอง (Chalk) 2) Argillaceous Material ได้แก่ Silica ที่อยู่ในรูปของดินเหนียว (Clay) และดินดาน (Shale) 3) Iron Oxide Material ได้แก่ แร่เหล็ก (Iron) หรือคิลาแลง (Laterite) โดยซีเมนต์ที่ได้จะประกอบด้วย แคลเซียมออกไซด์ (CaO), ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂),

อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3), ไออนออกไซด์ (Fe_2O_3) ซึ่งเป็นออกไซด์หลักรวมกันประมาณ ร้อยละ 90 ของน้ำหนักซีเมนต์ และมีแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO), โซเดียมออกไซด์ (Na_2O), ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2), ฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ (P_2O_5) เป็นออกไซด์รองโดยปริมาณออกไซด์ต่างๆ ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะแสดงในตารางที่ 2.4 เมื่อมีการรวมตัวของออกไซด์หลักในขณะที่เกิดเม็ดปูน (Clinker) จะเกิดเป็นสารประกอบ 4 ชนิดที่สำคัญดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.4 ออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชัชวาล [65])

ออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก
<u>ออกไซด์หลัก</u>	
CaO	60-67
SiO_2	17-25
Al_2O_3	3-8
Fe_2O_3	0.5-0.6
<u>ออกไซด์รอง</u>	
MgO	0.1-5.5
$\text{Na}_2+\text{K}_2\text{O}$	0.5-1.3
TiO_2	0.1-0.4
P_2O_5	0.1-0.2

ตารางที่ 2.5 สารประกอบหลักที่รวมอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชัชวาล [65])

ชื่อสารประกอบ	สารประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียม ซิลิเกต	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
ไดแคลเซียม ซิลิเกต	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
ไตรแคลเซียม อลูมินา	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
เตตราแคลเซียม อลูมิโนเฟอร์ไรท์	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

ปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นปฏิกิริยาที่สำคัญในการเชื่อมประสานของปูนซีเมนต์ โดยเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์เกิดเป็น วุ้นปูนซีเมนต์ (Cement gel) ที่เป็นสารเชื่อมประสาน เมื่ออายุเพิ่มขึ้นจะจับตัวกันและแข็งตัวในที่สุด ด้วยปริมาณสารแคลเซียมซิลิเกต (calcium silicate) ที่แตกต่างกันในปูนซีเมนต์แต่ละประเภท จึงทำให้คุณสมบัติการแข็งตัว ระยะเวลาและความแข็งแรงแตกต่างกันไป

2.7.2 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC)

ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ OPC หรือ มอก.15 เล่ม 1 ข้อกำหนดเกณฑ์คุณภาพ ได้แบ่งปูนซีเมนต์ OPC ออกเป็น 5 ประเภท ได้แก่

2.7.2.1 ประเภทที่ 1 : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ต้องการเวลาพอสมควรในการให้กำลังสูงสุดและให้ความร้อนในระดับปานกลาง ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ถูกใช้งานอย่างมากในงานก่อสร้างคอนกรีตทั่วไป เช่น เสา คาน ฐานราก เป็นต้น

2.7.2.2 ประเภทที่ 2 : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้จะให้ความร้อนที่ต่ำกว่าประเภทที่ 1 แต่สูงกว่าประเภทที่ 4 ในด้านการให้กำลังนั้น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 2 นี้จะให้กำลังที่ใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เหมาะสำหรับใช้ในงานคอนกรีตที่เกิดความร้อนและต้องการความทนทานการกัดกร่อนจากสารละลายซัลเฟตในระดับปานกลาง

2.7.2.3 ประเภทที่ 3 : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดสูงเร็ว ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้จะมีค่าความละเอียดมากกว่าประเภทที่ 1 จึงให้กำลังอัดที่สูงในระยะแรก จึงเหมาะกับงานคอนกรีตที่ต้องการความรวดเร็วในการใช้งานหรือต้องการถอดแบบอันสั้น นิยมใช้ในงานหล่อผลิตภัณฑ์คอนกรีตอัดแรงเช่น แผ่นพื้นอัดแรง เสาเข็มอัดแรง เป็นต้น งานโครงสร้างสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่ไม่ควรใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้ เนื่องจากในช่วงแรกจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันสูงมากทำให้เกิดความร้อนจากปฏิกิริยา อาจเป็นสาเหตุให้โครงสร้างเกิดการแตกร้าวได้

2.7.2.4 ประเภทที่ 4 : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้มีปริมาณของ C_3S โดยเฉลี่ยที่ประมาณร้อยละ 25-30 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำ จึงทำให้เกิดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ต่ำมาก เหมาะกับงานโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่หรือการก่อสร้างคอนกรีตหยาบ (Mass Concrete) เช่น เขื่อน เป็นต้น ด้วยอุณหภูมิขณะก่อตัวของคอนกรีตที่ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทอื่น จะช่วยลดปัญหาความเสี่ยงจากการแตกร้าวเนื่องจากความร้อน แต่ก็จะมีพัฒนาการกำลังที่ช้ากว่าปูนซีเมนต์ OPC ประเภทอื่น และในประเทศไทยไม่มีการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้ แต่มีการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับสารปอซโซลาน เช่น เถ้าลอย (Fly-Ash) เป็นต้น ซึ่งช่วยลดความร้อนที่เกิดขึ้นได้

2.7.2.5 ประเภทที่ 5 : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภททนซัลเฟตสูง เพื่อป้องกันการเข้ามาทำลายเนื้อคอนกรีตจากซัลเฟตภายนอก ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้จึงมีค่า C_3A ไม่เกินร้อยละ 5 และให้กำลังต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เหมาะกับงานคอนกรีตที่ต้องสัมผัสกับเกลือซัลเฟตโดยตรง จากดินหรือน้ำมีปริมาณซัลเฟตสูง เช่น โครงสร้างใต้ดิน โครงสร้างที่ต้องสัมผัสกับน้ำเสียโดยตรง เป็นต้น

สุทธิพงษ์, สุริยะ และพีรพงศ์ [71] ได้ศึกษาผลกระทบของปริมาณดินเม็ดละเอียดและปริมาณซีเมนต์ที่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังผสมซีเมนต์ โดยนำดินลูกรังที่มีคุณภาพไม่ผ่านมาตรฐานชั้นรองพื้นทางของกรมทางหลวง ที่มีปริมาณเม็ดละเอียดเท่ากับร้อยละ 0, 20, 30 และ 40 ของน้ำหนักดินแห้งรวม แล้วผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อปรับปรุงคุณภาพในอัตราส่วนร้อยละ 0, 4, 6 และ 8 ของน้ำหนักดินรวมแห้ง จากนั้นบดอัดที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและบ่มเป็นเวลา 7, 14, และ 28 วัน จากการศึกษาได้ทราบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นและผ่านเกณฑ์มาตรฐานชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวง เมื่อผสมปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนร้อยละ 4 ในช่วงของปริมาณดินเม็ดละเอียดร้อยละ 0-40

Barbero และคณะ [61] ได้นำดินกลุ่ม A-4 ตามการจำแนกประเภทดินของ AASTHO หรือดินจำพวกกรวด หยาบ และตะกอน มาปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของดินหลังการปรับปรุง จากการศึกษาพบว่าปริมาณที่เหมาะสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ผสมเพื่อปรับปรุงคุณภาพของดินกลุ่ม A-4 อยู่ที่ร้อยละ 3 ต่อน้ำหนักดิน

2.8 ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (HC)

2.8.1 ความเป็นมา

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรมได้ให้ความหมายของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement) ไว้ใน มอก.2594-2556 [68] ว่าหมายถึง ปูนซีเมนต์ที่ก่อตัวและแข็งตัวเนื่องจากการปฏิกิริยากับน้ำ และมีความสามารถทำนองเดียวกันนี้เมื่ออยู่ในน้ำ

สมาคมอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ไทย [74] ให้ข้อมูลไว้ว่า ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกนั้นเกิดจากการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีในการผลิตเพื่อช่วยลดปริมาณก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gases) ที่เป็นสาเหตุสำคัญของเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยขั้นตอนการผลิตของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกนั้นจะมีกรรมวิธีการผลิตเช่นเดียวกันกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่จะมีปรับลดปริมาณปูนเม็ดลงและแทนที่ด้วยวัสดุทดแทนได้แก่

- วัสดุที่มีส่วนประกอบของแคลเซียม เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต หินปูน ผุ่นจากเตาเผาปูนเม็ด
- วัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าลอย ซิลิกาฟูม ปอซโซลานธรรมชาติ

- กากถลุง เช่น กากถลุงจากเตาถลุงแบบพ่นลม

ด้วยทรัพยากรทางด้านหินปูนที่มีอยู่ของไทยนั้นมีปริมาณมากจึงนิยมนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนในการผลิตปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ถึงแม้ปริมาณเม็ดปูนที่ถูกใช้ในการผลิตจะถูกลดปริมาณลง และแทนที่ด้วยวัสดุทดแทน ประสิทธิภาพของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกจะยังเป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 2594 ที่สามารถใช้งานแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) ได้



รูปที่ 2.15 เปรียบเทียบการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กรณีใช้วัสดุทดแทนที่ร้อยละ 10 (สมาคมอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ไทย [74])

โดยมาตรฐานการผลิตปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก มอก.2594 ของกระทรวงอุตสาหกรรม นั้น ได้อ้างอิงมาจากมาตรฐาน ASTM C1157 ที่มุ่งเน้นควบคุมคุณสมบัติและประสิทธิภาพของปูนซีเมนต์มากกว่าการควบคุมคุณลักษณะทางเคมี โดยกำหนดความต้านทานแรงอัด (Strength) ที่ผู้ผลิตต้องควบคุมให้ได้ในมาตรฐานการผลิตที่กำหนด



รูปที่ 2.16 เปรียบเทียบคุณสมบัติการรับแรงของปูนซีเมนต์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมาคมอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ไทย [74])

2.8.2 ชนิดของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก

ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก หรือ มอก. 2594 ข้อกำหนดเกณฑ์คุณภาพที่อ้างอิงมาจากมาตรฐาน ASTM C1157 ได้แบ่งปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกออกเป็น 6 ชนิดตามลักษณะการใช้งาน คือ

2.8.2.1 GU ชนิดใช้งานทั่วไปปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิดนี้เหมาะสำหรับใช้ในงานคอนกรีตที่ไม่ต้องคุณสมบัติพิเศษ อาจเทียบเท่าได้กับปูนซีเมนต์ OPC type 1

2.8.2.2 HE ชนิดใช้งานให้ค่าแรงอัดช่วงต้นสูง (high early strength) ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิดนี้จะให้กำลังอัดที่รวดเร็ว อาจเทียบเท่าได้กับปูนซีเมนต์ OPC type 3

2.8.2.3 MS ชนิดใช้งานที่ต้องการความต้านทานซัลเฟตปานกลาง (moderate sulfate resistance) ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิดนี้เหมาะกับงานคอนกรีตที่ต้องการความคงทนต่อการกัดกร่อนของซัลเฟตในระดับปานกลาง อาจเทียบเท่าได้กับปูนซีเมนต์ OPC type 2

2.8.2.4 HS ชนิดใช้งานที่ต้องการความต้านทานซัลเฟตสูง (high sulfate resistance) ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิดนี้ เหมาะกับงานคอนกรีตที่ต้องสัมผัสกับปริมาณซัลเฟตที่สูง อาจเทียบเท่าได้กับปูนซีเมนต์ OPC type 5

2.8.2.5 MH ชนิดใช้งานที่ต้องการความร้อนปานกลางขณะทำปฏิกิริยากับน้ำ (moderate heat of hydration) ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิดนี้ขณะทำปฏิกิริยากับน้ำความร้อนที่เกิดขึ้นจะต่ำกว่าชนิด GU เล็กน้อย ใช้งานในลักษณะเดียวกันกับปูนซีเมนต์ OPC type 2

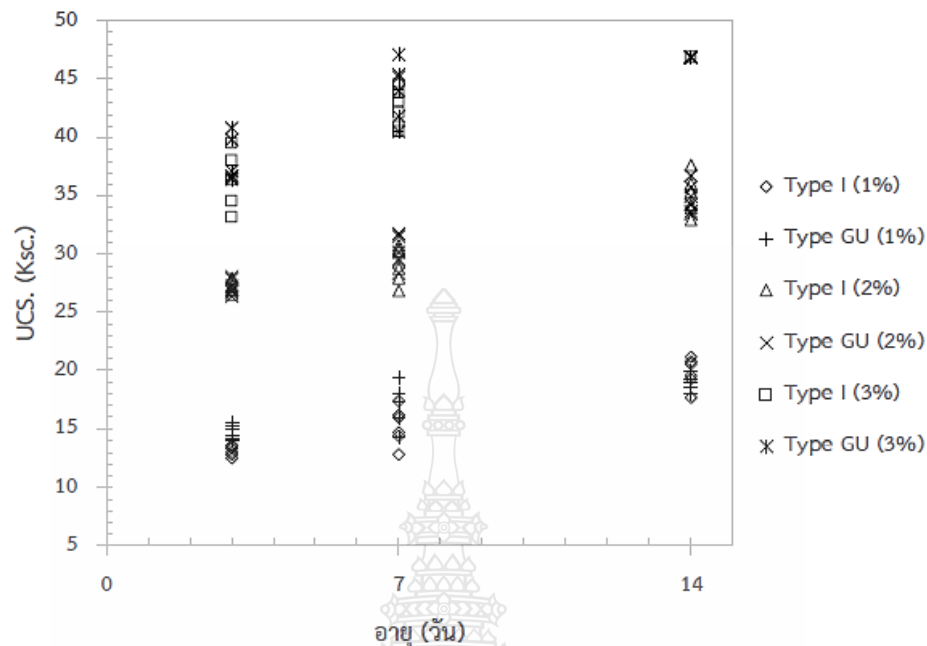
2.8.2.6 LH ชนิดใช้งานที่ต้องการความร้อนต่ำขณะทำปฏิกิริยากับน้ำ (low heat of hydration) ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิดนี้ความร้อนที่เกิดขึ้นขณะทำปฏิกิริยากับน้ำจะต่ำ และ

การพัฒนากำลังของปูนซีเมนต์ประเภทนี้ จะต่ำกว่าปูนซีเมนต์ทุกประเภทที่กล่าวมา สมควรกับใช้ในงานคอนกรีตขนาดใหญ่เช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ OPC type 4

จุฑา สุนิตย์สกุล และคณะ [69] ได้เปรียบเทียบกำลังรับแรงกดอัดของหินคลุกถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ OPC และปูนซีเมนต์ HC โดยปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบมีแหล่งผลิตที่ต่างกัน ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสมเท่ากับร้อยละ 1, 2 และ 3 แล้วบ่มตัวอย่างทดสอบเป็นเวลา 3, 7 และ 14 วัน จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 2.14 และรูปที่ 2.15 แสดงให้เห็นถึงค่ากำลังต้านทานแรงอัดของปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิดนั้นไม่ต่างกัน แต่ในขั้นตอนการผลิตนั้นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกจะปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่น้อยกว่าการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



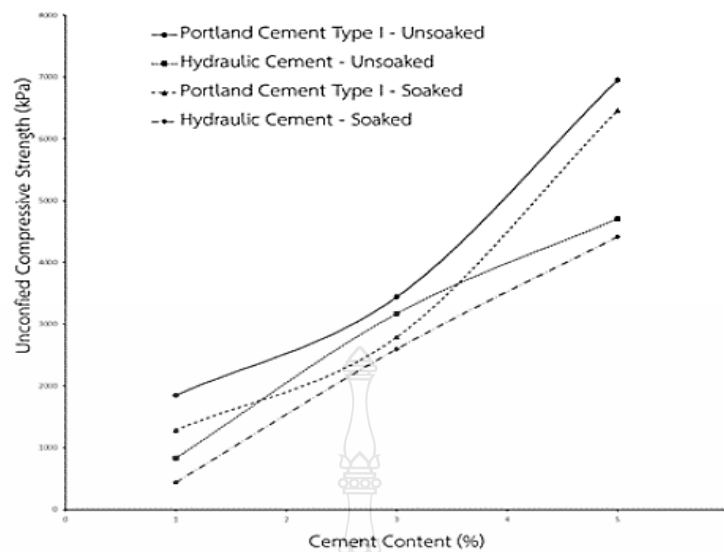
รูปที่ 2.17 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดของวัสดุมวลรวมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และปูนไฮดรอลิกจากบริษัทปูนซีเมนต์ไทย (จุฑา และคณะ [69])



รูปที่ 2.18 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดของวัสดุมวลรวมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์

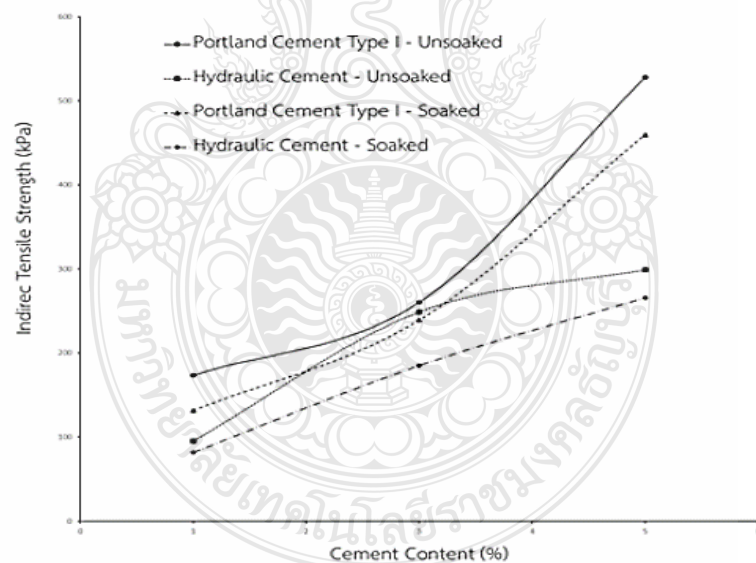
ปอร์ตแลนด์และปูนไฮดรอลิกจากบริษัทนครหลวง (จุฬา และคณะ [69])

ปัญญา, สุภณิกฤษ และ เชิดศักดิ์ [73] ได้วิเคราะห์กำลังอัดแกนเดียวและกำลังรับแรงดึงทางอ้อมของขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ผสมเพิ่มด้วยปูนซีเมนต์ OPC type 1 และปูนซีเมนต์ HC โดยผสมซีเมนต์ที่อัตราส่วนร้อยละ 1, 3 และ 5 ของน้ำหนักดินแห้ง แล้วบ่มที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน แล้วทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS) และทดสอบกำลังแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength, ITS) จากการทดสอบพบว่า แนวโน้มการพัฒนาของกำลังเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่ผสมและอายุของการบ่มทั้งสภาพแช่น้ำ (Soaked) และไม่แช่น้ำ (Unsoaked) โดยปริมาณที่เหมาะสมของซีเมนต์ผสมทั้งสองประเภทที่ให้ค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานงานทางกรมทางหลวงมีค่าเท่ากับร้อยละ 3 ดังแสดงในรูปที่ 2.16, 2.17, 2.18 และ 2.19 ตามลำดับ



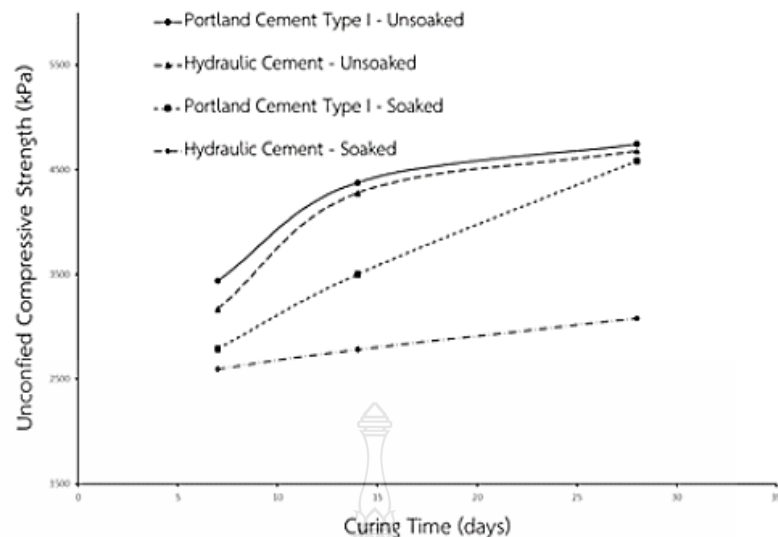
รูปที่ 2.19

แสดงกำลังต้านทานแรงอัดแกนเดียว ของตัวอย่างขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ OPC type 1 และปูนซีเมนต์ HC ในอัตราส่วนผสมซีเมนต์ร้อยละ 1, 3, และ 5 ปริมาณความชื้นร้อยละ 8 ที่อายุบ่ม 7 วัน (ปัญญา และคณะ [73])

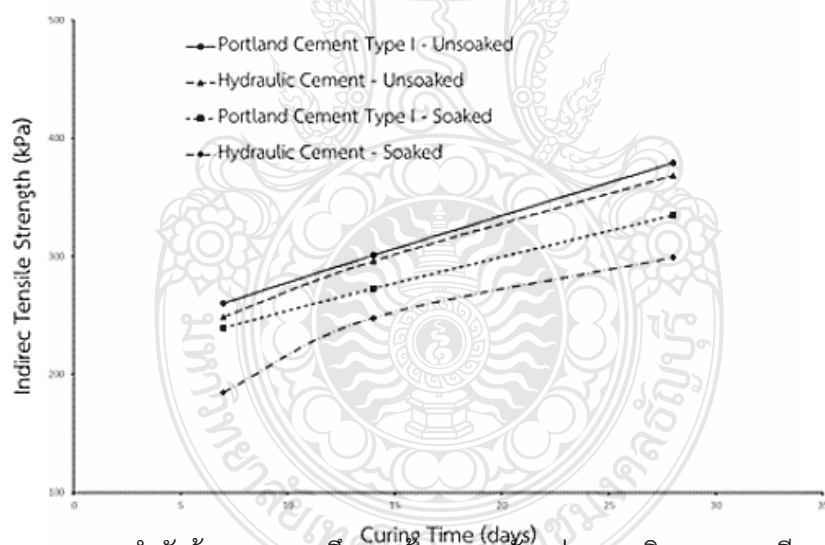


รูปที่ 2.20

แสดงกำลังต้านทานแรงดึงทางอ้อม ของตัวอย่างขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ OPC type 1 และปูนซีเมนต์ HC ในอัตราส่วนผสมซีเมนต์ร้อยละ 1, 3 และ 5 ปริมาณความชื้นร้อยละ 8 ที่อายุบ่ม 7 วัน (ปัญญา และคณะ [73])

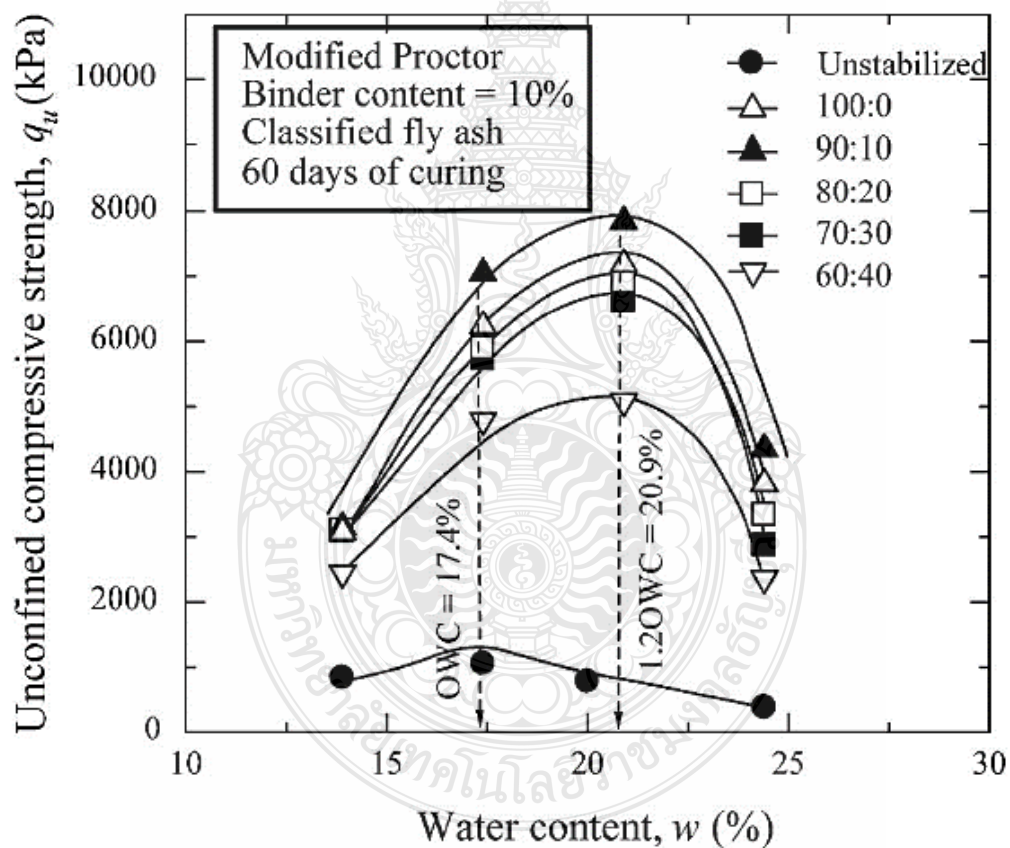


รูปที่ 2.21 แสดงกำลังต้านทานแรงอัดแกนเดียว ของตัวอย่างขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ OPC type 1 และปูนซีเมนต์ HC ในอัตราส่วนผสมซีเมนต์ร้อยละ 3 ปริมาณความชื้นร้อยละ 8 ที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน (ปัญญา และคณะ [73])

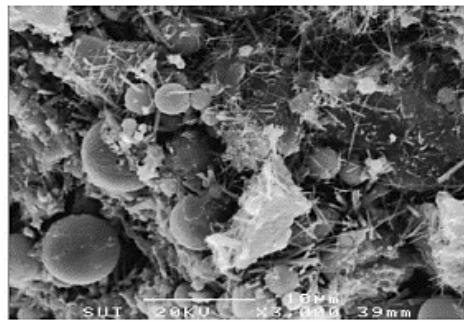


รูปที่ 2.22 แสดงกำลังต้านทานแรงดึงทางอ้อม ของตัวอย่างขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ OPC type 1 และปูนซีเมนต์ HC ในอัตราส่วนผสมซีเมนต์ร้อยละ 3 ปริมาณความชื้นร้อยละ 8 ที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน (ปัญญา และคณะ [73])

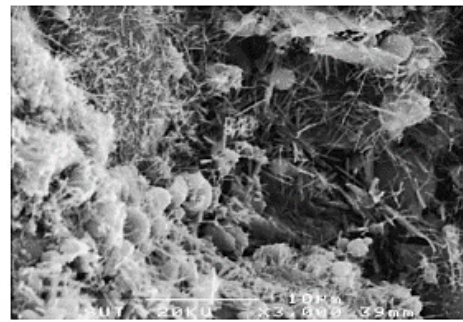
Horpibulsuk, Rachan และ Raksachon [54] ได้ศึกษาการพัฒนา กำลังและโครงสร้างจุลภาคในดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ผสมเถ้าลอย ได้ผลการศึกษาว่า ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ผสมเพิ่มเถ้าลอยมีค่าเท่ากับร้อยละ 20.9 โดยตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ผสมเพิ่มเถ้าลอยในปริมาณร้อยละ 10 จะให้ค่ากำลังอัดสูงสุด และหากมีการผสมเพิ่มเถ้าลอยในปริมาณที่มากกว่าร้อยละ 20 จะส่งผลให้ค่ากำลังที่ได้ลดต่ำลงดังแสดงในรูปที่ 2.20 จากภาพถ่าย SEM ดังแสดงในรูปที่ 2.21 และ 2.22 จะสังเกตได้ว่าเถ้าลอยจะกระจายอนุภาคของดินซีเมนต์ให้เล็กลง ส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ลดลงและเพิ่ม CSH ที่มีความสามารถจับเกาะมวลดินให้เข้ากัน ทำให้ปริมาณช่องว่างขนาดใหญ่ที่ลดลงเมื่ออายุของการบ่มมากขึ้น



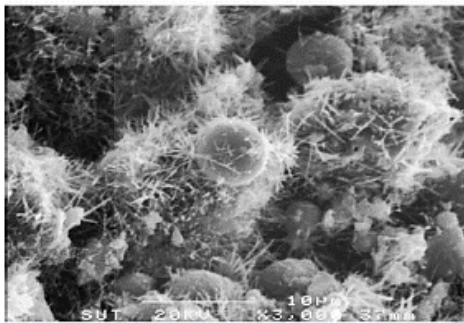
รูปที่ 2.23 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดกับปริมาณน้ำของดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนผสมแตกต่างกัน อายุ 60 วัน (Horpibulsuk และคณะ [54])



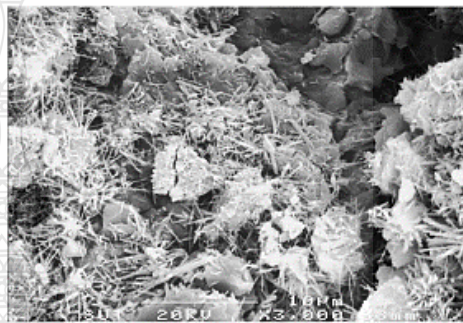
a) 70:30



b) 80:20

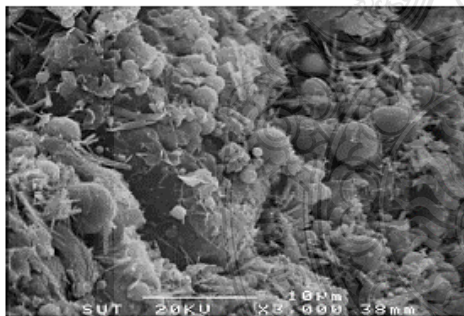


c) 90:10

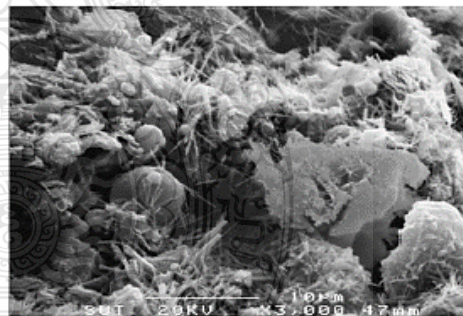


d) 100:0

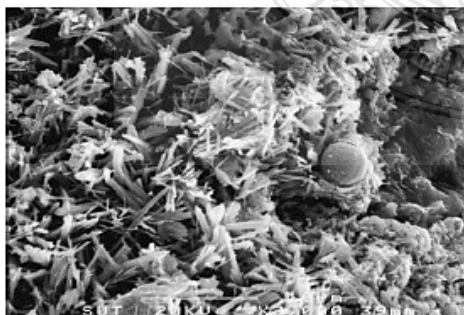
รูปที่ 2.24 ภาพถ่าย SEM ของดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนผสมแตกต่างกัน อายุ 28 วัน
(Horpibulsuk และคณะ [54])



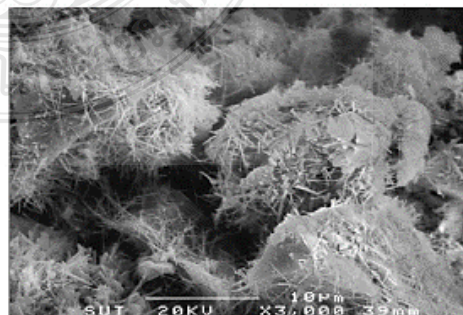
a) 70:30



b) 80:20



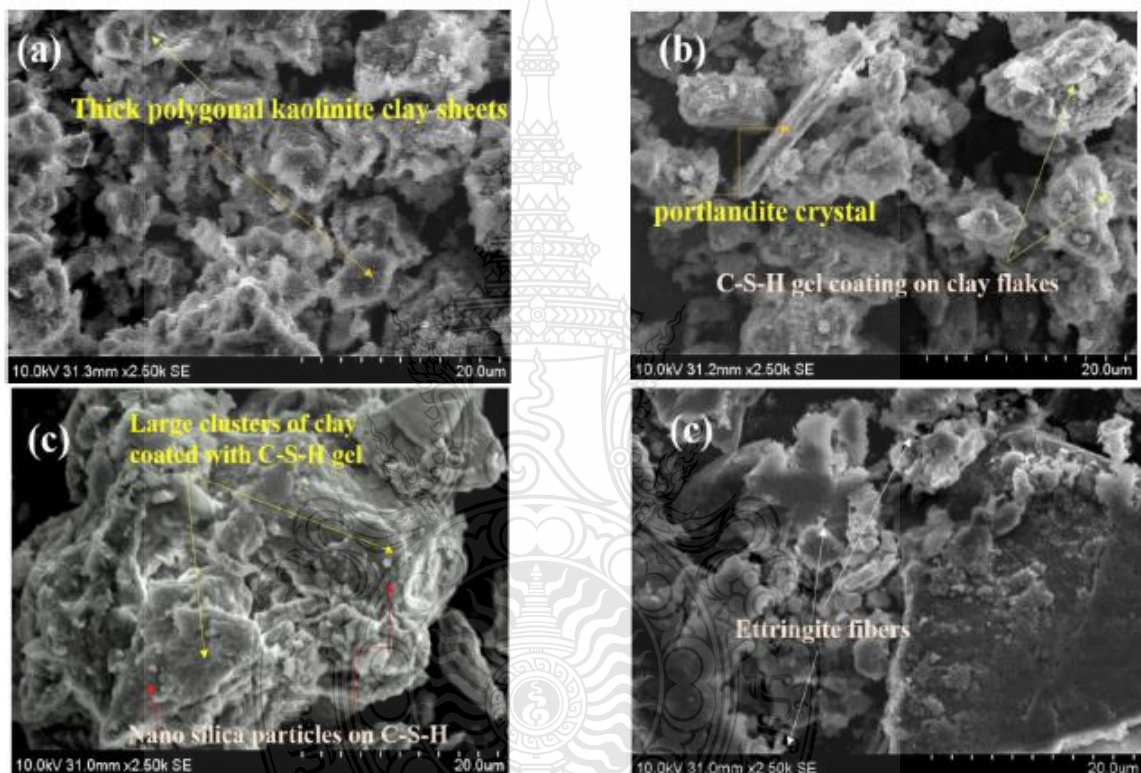
c) 90:10



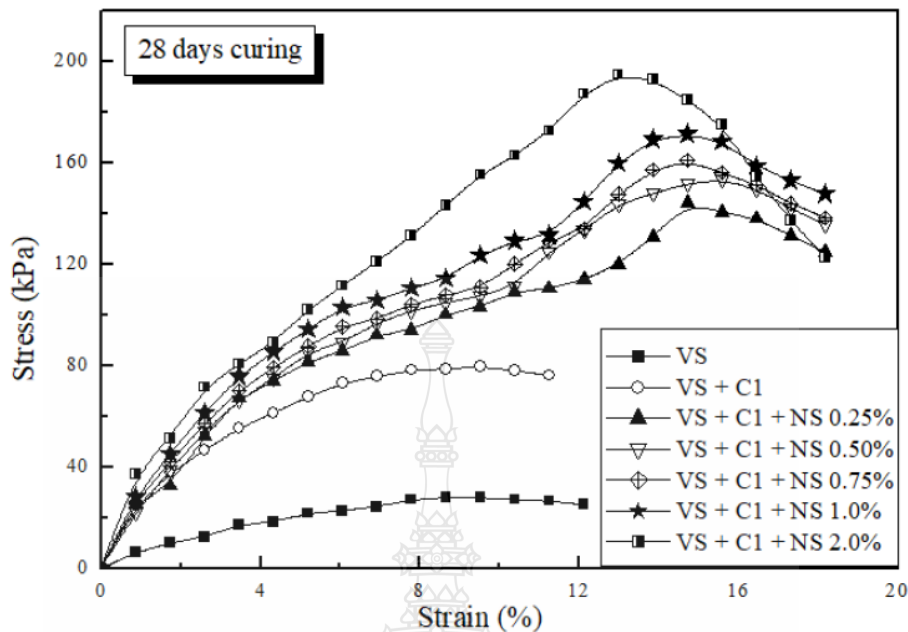
d) 100:0

รูปที่ 2.25 ภาพถ่าย SEM ของดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนผสมแตกต่างกัน อายุ 60 วัน
(Horpibulsuk และคณะ [54])

Thomas และ Rangaswamy [60] ได้ศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพดินเหนียวอ่อนด้วยปูนซีเมนต์ผสมนาโนซิลิกา จากการศึกษพบว่าดินเหนียวอ่อนที่ถูกปรับปรุงประสิทธิภาพด้วยซีเมนต์ผสมนาโนซิลิกานั้นให้ค่ากำลังที่สูงกว่าดินซีเมนต์ปกติ โดยอธิบายว่านาโนซิลิกาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาปอซโซลานิก เข้ากับปฏิกิริยา $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ทำให้จำนวนสารเชื่อมประสาน CSH เพิ่มขึ้นและเคลือบอนุภาคดินเหนียว มีพื้นที่แข็งแรงขึ้น โดยแนะนำว่าปริมาณที่เหมาะสมของนาโนซิลิกาที่ผสมเพิ่มเท่ากับร้อยละ 1 ต่อน้ำหนักดินแห้ง



รูปที่ 2.26 ภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างดินที่อายุการบ่ม 28 วัน (a) อนุภาคดินเหนียว (b) ดินเหนียวถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ร้อยละ 1 (c) ดินเหนียวถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ร้อยละ 1 + นาโนซิลิการ้อยละ 1 (Thomas และ Rangaswamy [60])



รูปที่ 2.27 แสดงค่ากำลังของดินซีเมนต์ผสมนาโนซิลิกาที่อัตราส่วนผสมแตกต่างกัน อายุบ่ม 28 วัน (Thomas และ Rangaswamy [60])

Andersson, Carlsson และ Leppanen [55] ได้รายงานเกี่ยวกับการใช้งานปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกในงานก่อสร้างจริง โดยได้กล่าวถึงโครงการก่อสร้างที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกในการปรับปรุงประสิทธิภาพดินเหนียวอ่อน ดินโคลน และดินอินทรีย์ไว้ 5 โครงการในประเทศสวีเดนและฟินแลนด์ ทั้ง 5 โครงการนั้นให้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจในการใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกปรับปรุงคุณภาพของดิน อีกทั้งยังช่วยในการรักษาสภาพแวดล้อมจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก และในแง่ของคุณสมบัตินั้นสามารถใช้แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้

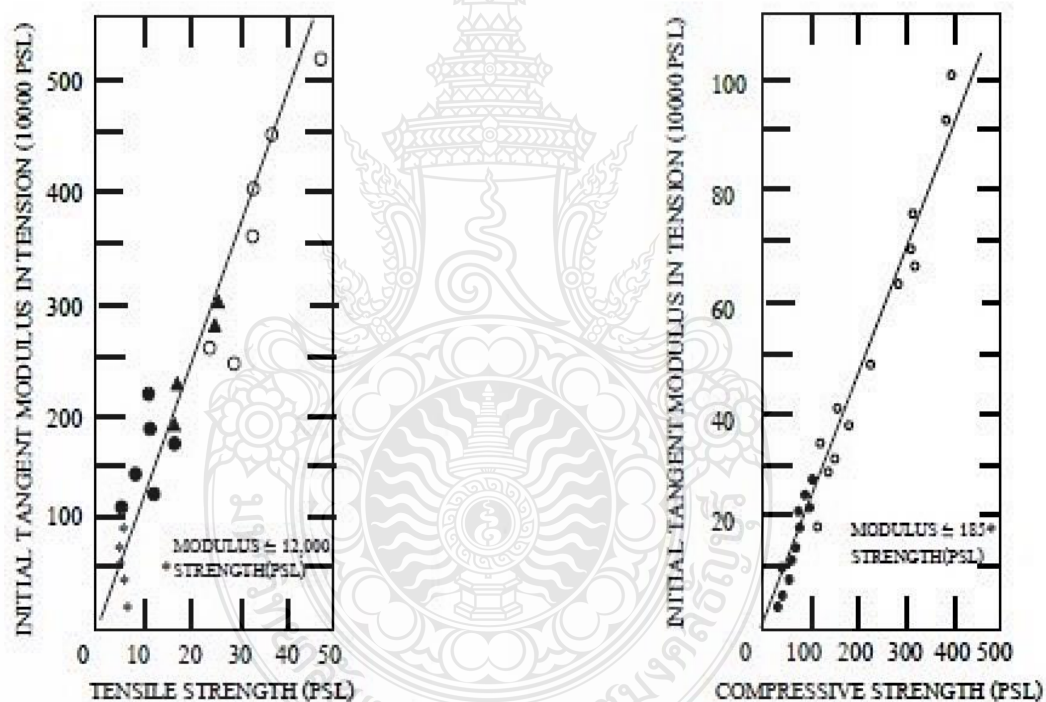
Chompoorat และ Likitlersuang [57] ได้ทดสอบกำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ที่ผสมเพิ่มเถ้าลอย พบว่าค่า UCS และ E_{50} ของดินซีเมนต์มีการพัฒนาเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่ผสมและระยะเวลาการบ่ม และในดินซีเมนต์ที่ผสมเพิ่มเถ้าลอยในปริมาณที่เหมาะสมจะให้ค่ากำลังที่ใกล้เคียงกับดินซีเมนต์ปกติอีกทั้งเมื่ออายุการบ่มครบ 28 วัน การพัฒนากำลังของดินซีเมนต์ที่ผสมเถ้าลอยจะยังมีการพัฒนาต่อไปอีกจนถึงอายุบ่ม 60 วัน เนื่องจากจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก

วฤธ , ศุภกิจ , อัครชัย [70] ได้ทดสอบกำลังของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเชื่อมประสานที่ผสมระหว่าง ปูนซีเมนต์ : ผงตะกรันเหล็ก : เถ้าชีวมวล พบว่าอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดเท่ากับ 0.750 : 0.125 : 0.125 และจากการวิเคราะห์ XRD พบว่าเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นสารตั้งต้น

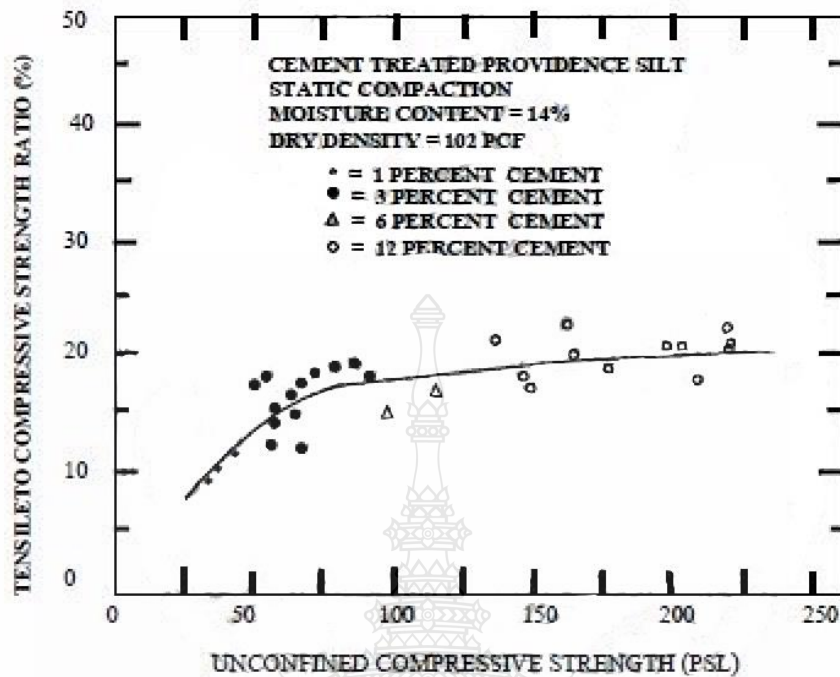
C₃S ลดลงและสารผลิตภัณฑ์ CSH มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ของ Thomas และ Rangaswamy [60] และ Horpibulsuk และคณะ [54]

2.9 กำลังของดินซีเมนต์

Wang และ Huston [35] นำปูนซีเมนต์ OPC type 1 มาเป็นวัสดุผสมในดินตะกอนเพื่อทดสอบหากำลังรับแรงดึงและกำลังรับแรงอัด พบว่า ที่ค่าปริมาณความชื้น ค่าความหนาแน่นแห้ง และสถานะของการเก็บตัวอย่างที่เหมือนกัน ของทั้งการทดสอบกำลังรับแรงดึงและแรงอัดจะมีการเสียรูปที่จุดวิบัติที่มีค่าคงที่เสมอ โดยค่าที่ได้จากการทดสอบกำลังรับแรงดึงจะต่ำกว่าค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ร้อยละ 10-20 ของกำลังรับแรงอัด อีกทั้งยังทราบว่าค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของแรงอัดกับค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของแรงดึงแปรผันตรงกับกำลัง ดังรูปที่ 2.28 และ 2.29



รูปที่ 2.28 ความสัมพันธ์ระหว่าง Initial Tangent Modulus in Tension กับกำลังดึงและกำลังอัดของดินซีเมนต์ (Wang และ Huston [35])



รูปที่ 2.29 ความสัมพันธ์ระหว่าง Direct tensile strength กับ Unconfined compressive Strength ของดินซีเมนต์ (Wang และ Huston [35])

Saitoh [44] พบว่าปริมาณปูนซีเมนต์และระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างมีความสัมพันธ์ต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ โดยกำลังรับแรงกดอัดของดินซีเมนต์จะสูงขึ้นเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์และระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น

Baker [58] กล่าวว่าเมื่อเวลาที่ใช้สำหรับการบ่มเพิ่มขึ้น กำลังรับแรงอัดของดินทุกชนิดจะเพิ่มขึ้น โดยดินที่สามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดได้ดีที่สุดคือ ดินทราย (Sand) และ กรวด (Gravel)

Chaiyaput และคณะ [64] ศึกษาเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างปูนซีเมนต์กับตัวอย่างดินซีเมนต์จาก 2 แหล่ง ได้แก่ ดินบอลเคลย์ (ดินซีเมนต์บอลเคลย์) และ ดินเหนียวอ่อน (ดินซีเมนต์ดินเหนียวอ่อน) ด้วยวิธีการบ่มที่แตกต่างกัน ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน พบว่าที่วิธีการบ่มเดียวกันค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์จะให้ค่าต่ำกว่ากำลังรับแรงกดอัดของปูนซีเมนต์อยู่ประมาณร้อยละ 50

2.10 สมการทำนายกำลังของดินซีเมนต์

Horpibulsuk และคณะ [53] อ้างอิงสมมุติฐาน Clay-Water/Cement Ratio Hypothesis (Horpibulsuk และ Miura [49], Miura และคณะ [50]) ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาค และพันธะซีเมนต์เชื่อมประสานของดิน จากการทดสอบและวิเคราะห์หาการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของดินซีเมนต์โดยละเอียดพบว่า Clay – Water / Cement Ratio เป็นตัวแปรเพียงตัวเดียวที่จะบ่งบอกกำลังของดินชนิดหนึ่งที่ผสมกับซีเมนต์

$$q_u = \frac{A}{B^{(W_C/C)}} \quad (2.5)$$

เมื่อ	q_u	คือ	กำลังต้านทานแรงอัดแกนเดียวที่เวลาบ่มค่าหนึ่ง
	A	คือ	ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน
	B	คือ	ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน มีค่าอยู่ระหว่าง 1.22 ถึง 1.24
	W_C/C	คือ	อัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์

และจากการศึกษาปรากฏการณ์การเพิ่มสูงขึ้นของกำลังของดินซีเมนต์ชนิดต่างๆ กับระยะเวลาในการบ่มของ Horpibulsuk และคณะ [53] สรุปได้ว่า ประเภทของดินนั้นไม่ได้มีผลต่ออัตราการเพิ่มของกำลังของดินซีเมนต์ โดยดินซีเมนต์ทุกชนิดจะมีอัตราการเพิ่มของกำลังมีค่าคงที่ที่สามารถแสดงในรูปแบบฟังก์ชันลอการิทึมของอายุการบ่มดินซีเมนต์ ที่แสดงในสมการที่ 2.6 และรูปที่ 2.31

$$\frac{q_D}{q_{28}} = 0.038 + 0.281 \ln D \quad (2.6)$$

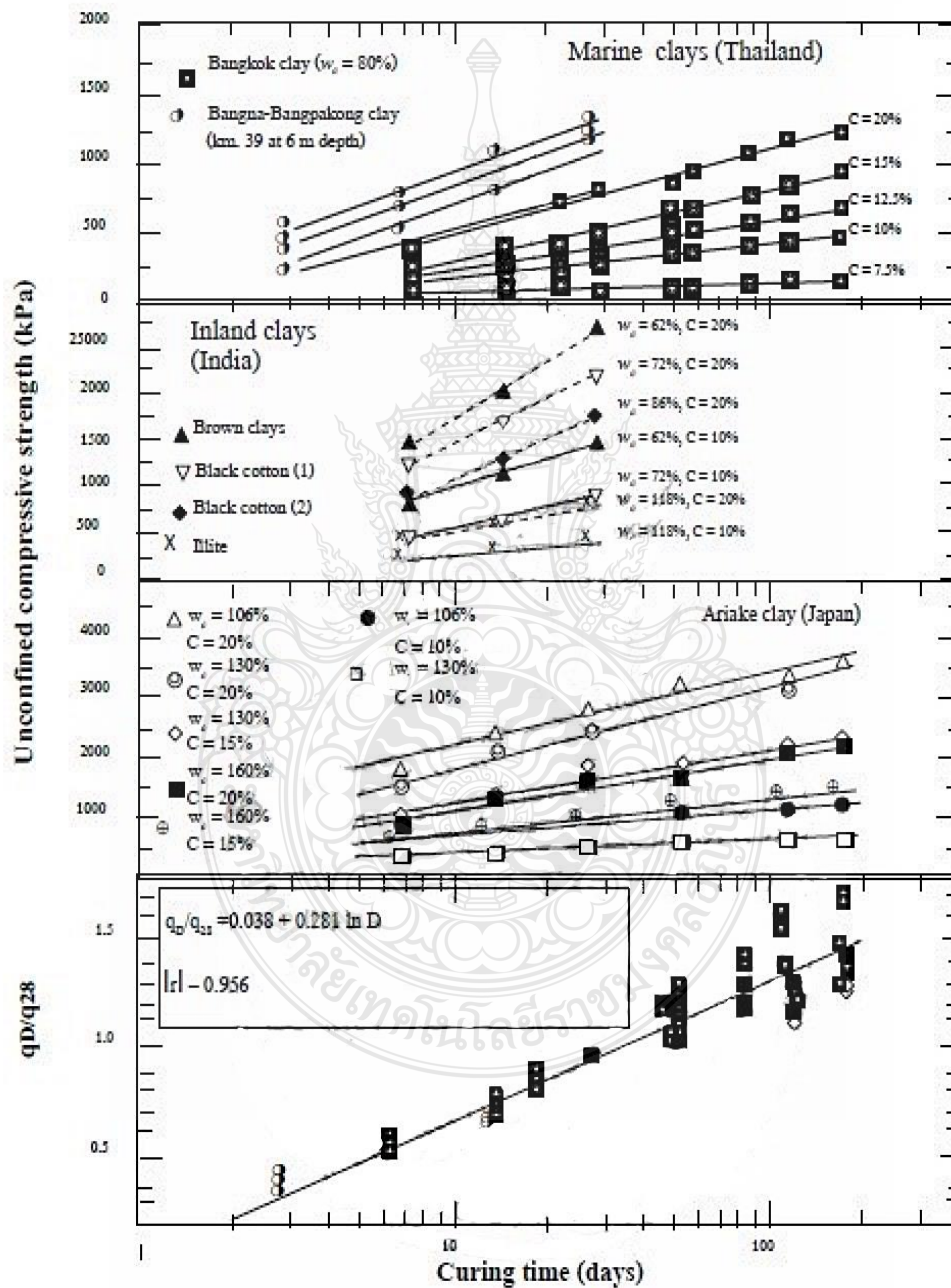
เมื่อ	q_D	คือ	กำลังกดอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ระยะเวลาบ่ม D ใดๆ
	q_{28}	คือ	กำลังกดอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน
	D	คือ	ระยะเวลาบ่ม

โดยสมการที่ 2.7 จะเป็นสมการที่สามารถทำนายกำลังของดินซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ และระยะเวลาบ่มใดๆ โดยใช้ผลของการทดสอบเพียงผลเดียวที่ระยะเวลาบ่มอายุ 28 วัน เกิดจากการนำสมการที่ 2.5 และ 2.6 มารวมกัน

$$\left[\frac{q_{(W_C/C)_{1,D}}}{q_{(W_C/C)_{28}}} \right] = 1.24^{(W_C/C)_{28} - (W_C/C)_D} (0.038 + 0.281 \ln D) \quad (2.7)$$

เมื่อ $q_{(w_c/C)_{1,D}}$ คือ กำลังกดอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ต้องการทราบ ที่ w_c/C หลังจากระยะบ่ม D วัน

$q_{(w_c/C)_{28}}$ คือ กำลังกดอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ทราบค่าที่ระยะบ่ม 28 วัน



รูปที่ 2.30 การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ Horpibulsuk และคณะ [53]

Chaiyaput และคณะ [59] เสนอสมการคำนวณหรือคาดการณ์ค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของดินซีเมนต์ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครสำหรับใช้ประเมินอัตราส่วนซีเมนต์ที่พอเหมาะ เพื่อให้ค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์เป็นไปตามการออกแบบ ตามระยะเวลาการบ่ม 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน ดังนี้

$$\text{ระยะเวลาบ่ม 7 วัน; } y = 8.759x + 391.51 \quad R^2 = 0.819 \quad (2.8)$$

$$\text{ระยะเวลาบ่ม 14 วัน; } y = 28.456x + 16.958 \quad R^2 = 0.872 \quad (2.9)$$

$$\text{ระยะเวลาบ่ม 28 วัน; } y = 39.150x - 29.3 \quad R^2 = 0.779 \quad (2.10)$$

เมื่อ x คือ ปริมาณของปูนซีเมนต์ (ร้อยละ)

y คือ ค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ (กิโลปาสกาล)

โดยอ้างอิงค่าแสดงความน่าเชื่อถือของสมการ (R^2) ที่ Moore และคณะ [56] ได้เสนอไว้ดังนี้

- $R^2 < 0.3$ สมการไม่มีความน่าเชื่อถือ
- $0.3 < R^2 < 0.5$ สมการมีความน่าเชื่อถือน้อย
- $0.5 < R^2 < 0.7$ สมการมีความน่าเชื่อถือปานกลาง
- $R^2 > 0.7$ สมการมีความน่าเชื่อถือมาก และเป็นค่าที่ยอมรับได้

และยังพบข้อจำกัดของการใช้สมการที่ 2.8 ถึง 2.10 ซึ่งมีดังต่อไปนี้

- 1) ค่าขีดจำกัดเหลว ควรอยู่ระหว่างร้อยละ 47 ถึงร้อยละ 103
- 2) ค่าขีดจำกัดพลาสติก ควรอยู่ระหว่างร้อยละ 29 ถึงร้อยละ 43
- 3) ดัชนีพลาสติก ควรอยู่ระหว่างร้อยละ 13 ถึงร้อยละ 60
- 4) อัตราส่วนปูนซีเมนต์ควรอยู่ระหว่างร้อยละ 5 ถึงร้อยละ 30 ของน้ำหนักดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ

2.11 การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope หรือ SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยในการพิจารณาลักษณะสัณฐานของวัสดุ ที่มีกำลังขยายมาก มีความสามารถในการแยกชัดที่ดี เพราะช่วงคลื่นที่สั้นและสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพได้ดี โดยให้กำลังขยายสูง 3000 เท่า ไปจนถึงมากกว่า 100000 เท่า (3 ถึง 100 นาโนเมตร) ในขณะที่กล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดาจะสามารถเห็นวัตถุขนาดเล็กอยู่ที่ประมาณ 0.2 ไมโครเมตร และมีกำลังขยายมากที่สุดไม่เกิน 3000 เท่า ด้วยความสามารถของกล้อง SEM จึงเป็นที่นิยมกันในปัจจุบัน และยังมีการประยุกต์การใช้งานร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์อื่น ๆ เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) ที่เป็นข้อมูลทางเคมี ในการศึกษาครั้งนี้ตัวอย่างดินจะถูกทำให้แห้งและย่อยให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3-4 มิลลิเมตร จึงนำไปติดบนแท่งติดตัวอย่าง แล้วเข้าสู่กระบวนการเคลือบตัวอย่างด้วยเครื่อง Iron sputtering device หลังจากนั้นจะถ่ายภาพดินตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 การเตรียมวัสดุ

การศึกษานี้ใช้ดินทราย บริเวณริมฝั่งแม่น้ำโขง วัดราษฎร์จำนงค์ หมู่ 3 ตำบลเมืองหมี่ อำเภอเมือง จังหวัดหนองคาย เก็บตัวอย่างแบบถูกรบกวน (Disturbed sample) ที่ระดับความลึก 0-1 เมตร ที่มีขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 4 แล้วรักษาตัวอย่างดินบรรจุในภาชนะปิด ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติเบื้องต้นของดินทราย และปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษานี้มี 2 ชนิด คือ ปูนซีเมนต์ OPC type 1 และ ปูนซีเมนต์ HC ชนิด GU ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะของดินตัวอย่างก่อนร่อน (a) และลักษณะของดินตัวอย่างหลังร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (b)



(a)



(b)

รูปที่ 3.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 (a) และปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิด GU (b)

3.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

หลังจากได้ดินทรายปนตะกอนที่ผ่านตระแกรงเบอร์ 4 จะนำดินมาผสมกับปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิด (HC และ OPC) ที่อัตราส่วนที่ผสมร้อยละ 10, 15, 20, 25 และ 30 โดยน้ำหนักดินแห้ง จากนั้นผสมน้ำให้ดินมีความเหลวคล้ายกับขั้นตอนการฉีดย้ำด้วยแรงดันเพื่อทำลายโครงสร้างดินที่ปฏิบัติในภาคสนาม ดังนั้นในขั้นตอนนี้ปริมาณความชื้นจะถูกปรับให้เท่ากับร้อยละ 20 ซึ่งใกล้เคียงกับขีดจำกัดเหลวของดินตัวอย่างนี้ ในขั้นตอนต่อมาเติมน้ำในส่วนผสมที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c ratio) 1:1 ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมคอนกรีตขนาดเล็ก เมื่อผสมเข้ากันดีแล้วจึงนำตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ได้ใส่ในแบบหล่อตัวอย่างทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 cm. สูง 7 cm. จากนั้นห่อหุ้มด้วยพลาสติกและเก็บในที่ลับแสงเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นของตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยจะเก็บตัวอย่างไว้เป็นเวลา 3, 7, 14 และ 28 วัน ก่อนนำไปทดสอบแรงกดอัดทิศทางเดียวตามมาตรฐาน ASTM D 2166-00 ในการศึกษาครั้งนี้ 1 ชุดตัวอย่างจะเท่ากับจำนวนตัวอย่าง 5 ตัวอย่าง โดยนำค่าจาก 5 ตัวอย่างมาเฉลี่ยเป็น 1 ตัวอย่าง ดังแสดงจำนวนตัวอย่างของการทดสอบในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมซีเมนต์และจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

ปริมาณซีเมนต์ต่อ น้ำหนักดินแห้ง (เปอร์เซ็นต์)	อายุการบ่ม (วัน) และจำนวนตัวอย่าง							
	Hydraulic Cement				Portland Cement			
	3	7	14	28	3	7	14	28
10	5	5	5	5	5	5	5	5
15	5	5	5	5	5	5	5	5
20	5	5	5	5	5	5	5	5
25	5	5	5	5	5	5	5	5
30	5	5	5	5	5	5	5	5
รวม	25	25	25	25	25	25	25	25
รวมทั้งหมด	200 ตัวอย่าง							



รูปที่ 3.3 แสดงการจัดทำตัวอย่าง (a) และการเก็บรักษาตัวอย่าง (b)

3.3 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

เพื่อศึกษาวิเคราะห์คุณสมบัติทางวิศวกรรม และคุณสมบัติทางกายภาพของดินซีเมนต์

3.3.1 วิเคราะห์ขนาดเม็ดดิน โดยวิธีการร่อนด้วยตระแกรงมาตรฐาน (Sieve Method) ตามมาตรฐาน ASTM D 422

3.3.2 ทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของดิน (Specific Gravity, G_s) ตามมาตรฐาน ASTM D 854-58

3.3.3 ทดสอบหน่วยน้ำหนัก (Unit Weight, γ) ทดสอบหาปริมาณความชื้น (Water Content) ตามมาตรฐาน ASTM D 2216-98

3.3.4 ทดสอบขีดจำกัดอัตราเตอร์เบิร์ก (Atterberg's Limit) ตามมาตรฐาน ASTM D 4318-93

3.3.5 ทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test) ตามมาตรฐาน ASTM D 2166-00

3.3.6 นำตัวอย่างส่งทดสอบหาปริมาณธาตุด้วยวิธี X-ray Diffraction (XRD), X-ray Fluorescence (XRF) และลักษณะสัณฐาน Scanning Electron Microscope (SEM)

3.4 การวิเคราะห์และสรุปผล

เมื่อทดสอบตัวอย่างดินซีเมนต์ทั้ง 2 ชนิด เรียบร้อยแล้วสามารถนำผลการทดสอบที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

3.4.1 ทราบถึงองค์ประกอบของธาตุในเม็ดดินที่เป็นคุณลักษณะพื้นฐานของตัวอย่างดิน และการพัฒนาผลของวัสดุเชื่อมประสานทั้ง 2 ชนิด

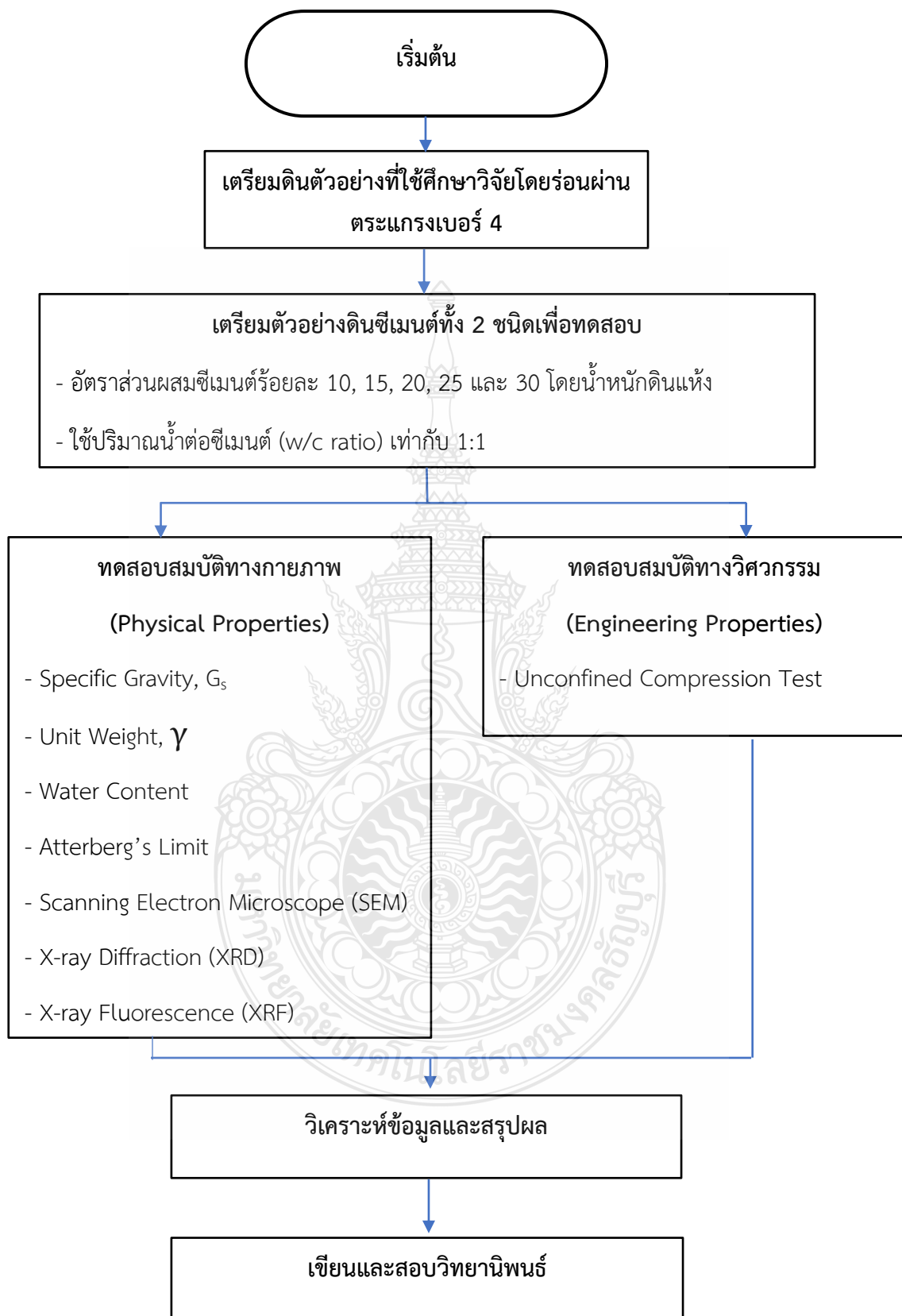
3.4.2 วิเคราะห์และสรุปอิทธิพลของปริมาณปูน HC ต่อการพัฒนาค่า q_u ของดินซีเมนต์

3.4.3 วิเคราะห์และสรุปผลอิทธิพลของปริมาณปูน HC ต่อการพัฒนาค่า E_{50} ของดินซีเมนต์

3.4.4 เปรียบเทียบผลทดสอบที่ได้กับผลทดสอบของดินทรายผสมปูน OPC เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพของปูน HC ด้านการปรับปรุงคุณภาพดิน

3.4.5 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_u และ E_{50} ของดินทรายผสมเพิ่มปูน HC เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับการออกแบบการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูน HC

3.4.6 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง q_u และ E_{50} ที่นำเสนอกับข้อมูลทดสอบตัวอย่างดินซีเมนต์ในภาคสนามที่ได้จากการเจาะแก่นจากเสาเข็มดินซีเมนต์ในโครงการก่อสร้างอาคารศูนย์บำบัดน้ำเสียเทศบาลเมืองจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี



รูปที่ 3.4 แผนภูมิขั้นตอนการทดสอบ การวิเคราะห์ข้อมูลและสรุป

บทที่ 4

ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

4.1 วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของดินตัวอย่าง

4.1.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างดิน

จากผลการทดสอบดินทราย บริเวณริมฝั่งแม่น้ำโขง วัดราษฎร์จำนงค์ หมู่ 3 ตำบลเมืองหมี่ อำเภอเมือง จังหวัดหนองคาย สามารถจำแนกชนิดของดินตามวิธีระบบเอกภาพ (Unified Soil Classification) โดยทราบการกระจายตัวของขนาดเม็ดดิน (C_u) = 4 ซึ่งน้อยกว่า 6 และค่าความโค้งของกราฟการกระจายตัว (C_c) = 0.8 ซึ่งต่ำกว่า 1 แสดงให้เห็นว่าดินทรายตัวอย่างนี้มีการกระจายตัวของขนาดเม็ดดินที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเป็นลักษณะของดินประเภท SP (Poorly graded sand) เป็นดินที่มีความสามารถในการรับน้ำหนักได้ไม่ดึ้นัก [81] จึงจำเป็นต้องได้รับการเสริมความแข็งแรงหรือเสถียรภาพจากการทดลองด้วยวิธีการร่อนผ่านตะแกรง แสดงให้เห็นว่าดินตัวอย่างนี้ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ได้เพียงร้อยละ 5 จึงยืนยันได้ว่าเป็นดินเม็ดหยาบ และการไม่สามารถทำการหาค่า Atterberg's Limits ซึ่งเป็นการทดสอบคุณสมบัติการยืดหยุ่นหรือการยุบตัวของดินได้ แสดงว่าดินตัวอย่างนี้ไม่มีคุณสมบัติในการยืดหยุ่นหรือการเปลี่ยนรูป (non-plastic) ซึ่งตรงกับลักษณะของดินเม็ดหยาบที่ไม่สามารถอุ้มน้ำหรือกักเก็บน้ำได้มาก [76] ค่า G_s ของดินตัวอย่างที่ได้จากการทดสอบความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) มีค่าเท่ากับ 2.74 ซึ่งถือว่าอยู่ในช่วงมาตรฐานสำหรับดินทรายทั่วไป และค่า Water Content จากการทดสอบหาค่าปริมาณความชื้นตามธรรมชาติ (Natural Water Content) อยู่ที่ร้อยละ 2.49 ซึ่งถือว่าต่ำมาก เป็นไปตามลักษณะของดินทรายที่ไม่สามารถเก็บน้ำได้ การที่ดินมีความชื้นต่ำนี้อาจส่งผลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรม เช่น ชีตจำกัดในการอัดตัวและความแข็งแรง

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของดินตัวอย่าง

คุณสมบัติทางกายภาพของดิน	
Natural Water Content (%)	2.49
Specific Gravity, G_s	2.74
Liquid Limit, LL (%)	20.30
Plastic Limit, PL (%)	ไม่สามารถหาค่าได้
Plastic Index, PI (%)	ไม่สามารถหาค่าได้
% ปริมาณดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4	100%
% ปริมาณดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200	1.30%
จำแนกชนิดดินตามระบบเอกภาพ	SP

4.2 ผลการทดสอบ Scanning Electron Microscope (SEM), X-ray Diffraction (XRD) และ X-ray Fluorescence (XRF)

4.2.1 ผลการทดสอบของดินตัวอย่าง

เมื่อใช้วิธี Scanning Electron Microscope (SEM) ทดสอบตัวอย่างดิน พบว่า ผลึกมีลักษณะเป็นแผ่นเหลื่อมซ้อนทับกันเป็นชั้นๆ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะทางธรณีวิทยาเรียกการเรียงตัวของผลึกลักษณะแบบนี้ว่าเป็นแบบไตรคลินิก (Triclinic) การเรียงตัวของผลึกในรูปแบบนี้สะท้อนถึงลักษณะโครงสร้างภายในของดินที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลของดิน จากการซ้อนทับกันของผลึกแบบไม่เป็นระเบียบดังรูปที่ 4.1 ซึ่งอาจส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงกดอัดและการอัดตัวของดิน [78]

เมื่อทดสอบด้วยวิธี X-ray diffraction (XRD) พบว่าดินตัวอย่างมีธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักคือ Quartz (SiO_2) เป็นแร่หลักในดินตัวอย่าง ดังรูปที่ 4.2 โดยมีค่า Lincounts สูงสุดที่ 26.8 องศา เป็นแร่ที่มีคุณสมบัติในด้านความแข็งแรงและความเสถียรดีจึงเป็นผลดีต่อสมบัติทางวิศวกรรมของดินในด้านการใช้เป็นวัสดุงานก่อสร้าง [79] และพบธาตุอื่น ได้แก่ ซิลิกอน (Si), เหล็ก(Fe), อลูมิเนียม (Al), แคลเซียม (Ca), โพแทสเซียม (K), แมกนีเซียม (Mg), ไทเทเนียม (Ti), โซเดียม (Na), แมงกานีส (Mn), เซอร์โคเนียม (Zr) ธาตุเหล่านี้สามารถเป็นตัวบ่งชี้ถึงการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของดิน เช่น การมีธาตุแคลเซียมอาจส่งผลดีต่อการเชื่อมประสานระหว่างดินกับซีเมนต์ [81]

และเมื่อทดสอบเชิงปริมาณด้วยวิธี X-ray Fluorescence (XRF) พบปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างดินซีเมนต์คือ ซิลิกอน (Si) สูงถึงร้อยละ 61.71 และ อลูมิเนียม (Al) ร้อยละ 13.26 ธาตุทั้งสองเป็นธาตุที่มีบทบาทสำคัญในการเกิดปฏิกิริยา Hydration ซึ่งเป็นปฏิกิริยาทางเคมีที่สำคัญต่อการพัฒนาความแข็งแรงของดินซีเมนต์ [77] และพบองค์ประกอบธาตุอื่น ๆ เช่น โพแทสเซียม (K), แคลเซียม (Ca) และแมกนีเซียม (Mg) ที่มีบทบาทในการช่วยเสริมคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินในด้านความแข็งแรงและเสถียรภาพเมื่อดินถูกผสมกับวัสดุเชื่อมประสาน ดังแสดงปริมาณร้อยละในตารางที่ 4.2

4.2.2 ผลการทดสอบของปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิด

เมื่อทดสอบหาปริมาณของสารประกอบในปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิดด้วยวิธี X-ray Fluorescence (XRF) พบว่าปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิดมีองค์ประกอบหลักทางเคมีที่คล้ายคลึงกันคือ CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , SO_3 , Na_2O , K_2O , TiO_2 สารประกอบเหล่านี้มีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนา กำลังของดินซีเมนต์ จากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่าง OPC และ HC คือปริมาณของซิลิกาและ อลูมินาที่สูงกว่าใน OPC ซึ่งสารประกอบทั้งสองเป็นสารประกอบที่มีบทบาทที่สำคัญต่อการพัฒนา กำลังของดินซีเมนต์ เนื่องจากสารประกอบทั้งสองช่วยในการสร้างโครงสร้างผลึกที่มีความแข็งแรงและเชื่อมประสานอนุภาคดินทำให้ดินซีเมนต์มีคุณสมบัติในด้านความแข็งแรงที่ดีขึ้น [81]

อย่างไรก็ตามจากข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าใน HC มีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่สูงกว่า OPC ซึ่งแคลเซียมออกไซด์เป็นสารประกอบหลักในการก่อตัวของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งเป็นสารเชื่อมประสานที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับดินซีเมนต์ [82] นอกจากนี้ปริมาณของแคลเซียมที่สูงขึ้นยังช่วยให้ HC มีความสามารถในการพัฒนากำลังได้เร็วขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ OPC ในสถานะที่มีความชื้นต่ำ [80]

ตารางที่ 4.2 ส่วนประกอบธาตุที่พบในดินตัวอย่าง ทดสอบด้วยวิธี X-ray Fluorescence

ธาตุที่พบ	ความเข้มข้น (%)	สารประกอบ	ความเข้มข้น (%)
Si	61.71	SiO ₂	70.47
Fe	15.84	Al ₂ O ₃	15.35
Al	13.26	Fe ₂ O ₃	8.27
K	4.07	K ₂ O	2.03
Ca	1.51	MgO	1.49
Mg	1.39	CaO	0.85
Ti	0.99	TiO ₂	0.65
Na	0.50	Na ₂ O	0.45
Mn	0.25	MnO	0.12
Zr	0.11	P ₂ O ₅	0.08
P	0.09	SO ₃	0.07
Ba	0.07	ZrO ₂	0.04
S	0.07	BaO	0.03
V	0.03	V ₂ O ₅	0.02
Cr	0.02	Cr ₂ O ₃	0.01
Zn	0.01	ZnO	< 0.01
Co	0.01	Co ₃ O ₄	< 0.01
Cu	0.01	CuO	< 0.01
Y	< 0.01	Y ₂ O ₃	< 0.01
Ni	< 0.01	NiO	< 0.01
La	< 0.01	La ₂ O ₃	< 0.01

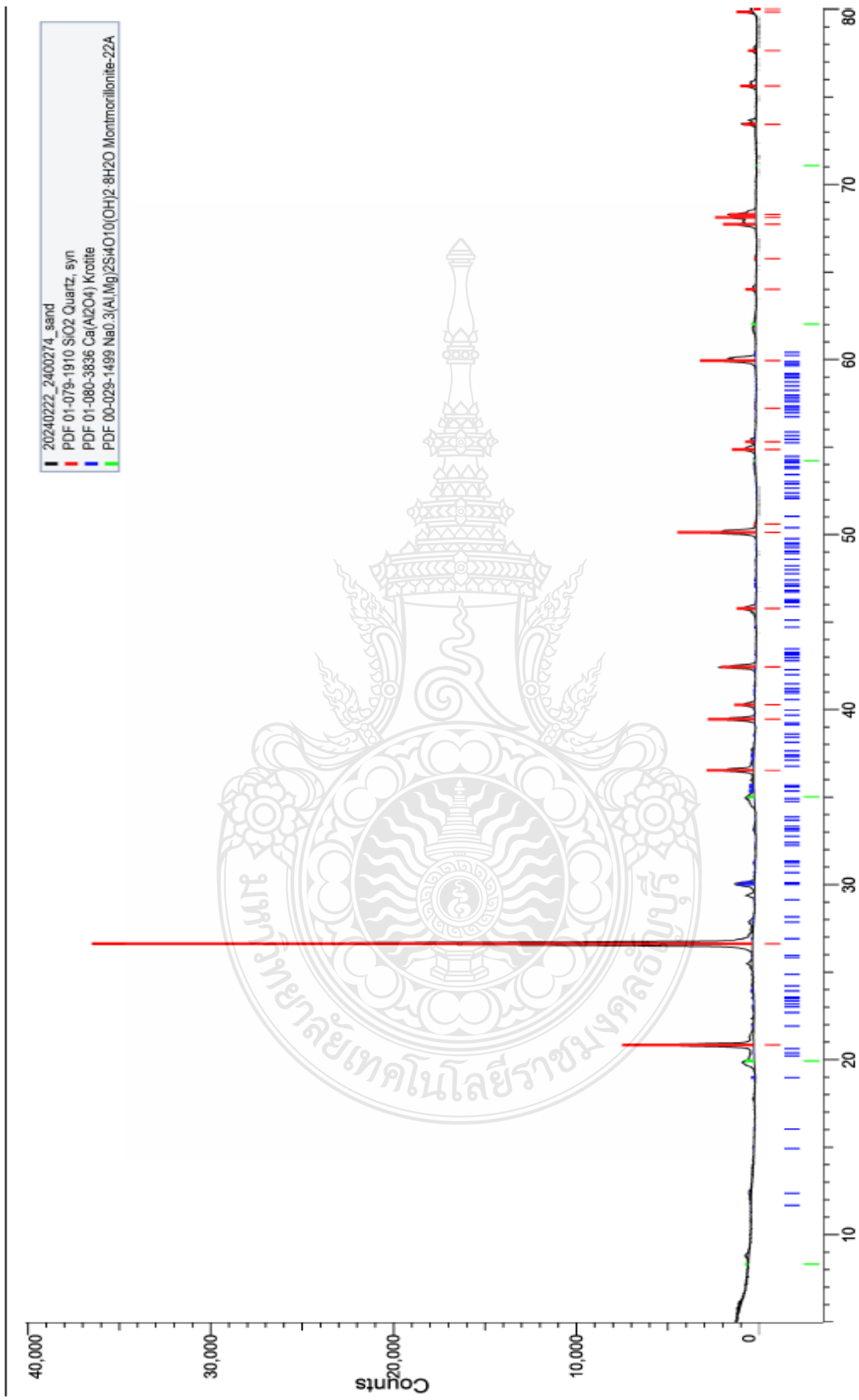
ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (HC) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่

1 (OPC)

Chemical Composition	HC (%)	OPC (%)
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	70.02	67.30
ซิลิกา (SiO ₂)	15.58	17.16
อลูมินา (Al ₂ O ₃)	3.44	4.02
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	2.95	3.06
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.09	2.39
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃)	5.68	4.53
โซเดียมออกไซด์ (Na ₂ O)	0.27	0.43
โพแทสเซียมออกไซด์ (K ₂ O)	0.492	0.431
ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂)	0.228	0.289



รูปที่ 4.1 ภาพถ่าย SEM ของดินตัวอย่างที่กำลังขยาย 10,000 เท่า



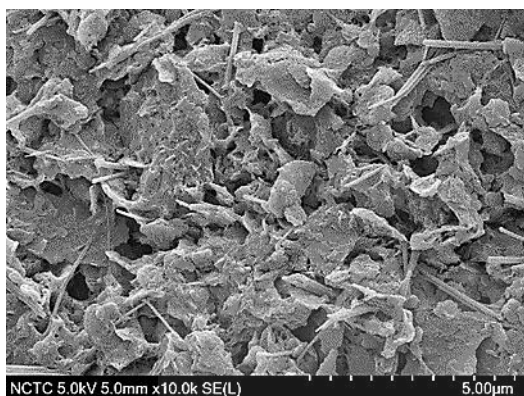
รูปที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบ X-ray diffraction ของตัวอย่างดิน

4.2.3 วิเคราะห์ผลทดสอบด้วยโครงสร้างทางจุลภาค (SEM) ของดินผสมซีเมนต์ทั้งสองชนิด

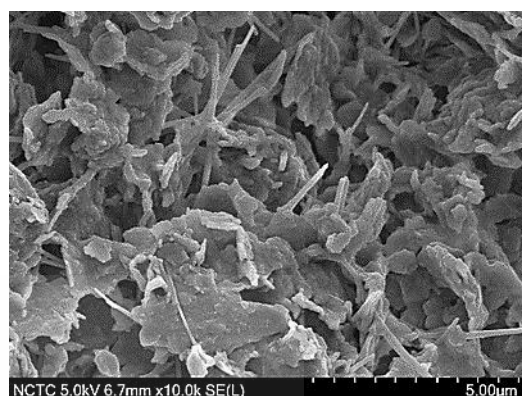
จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงภาพโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างดินที่ผสมเพิ่มซีเมนต์ทั้งสองชนิดที่อัตราส่วนร้อยละ 10 และ 25 มีอายุการบ่ม 3 และ 28 วัน แสดงให้เห็นโครงสร้างของดินซีเมนต์มีการพัฒนาไปในทิศทางที่คล้ายคลึงกันโดยพบการก่อตัวของผลึกที่มีลักษณะเป็นแท่งคล้ายเข็มเป็นผลึกของแคลเซียมซิลิโพลูมินเนตหรือเรียกว่าแท่งเอททริงไกต์ (ettringite) [80] ซึ่งเป็นผลึกที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างแคลเซียมซิลิเฟต, อลูมินา และน้ำ เป็นปฏิกิริยาที่สำคัญในการเพิ่มความหนาแน่นของดินผสมซีเมนต์ ส่งผลให้ความเป็นรูพรong (porosity) ลดลงอย่างมากเมื่อเวลาผ่านไป การลดลงของรูพรong นั้นส่งผลให้ดินซีเมนต์สามารถรับแรงอัดได้สูงขึ้น [82] กระบวนการนี้เป็นส่วนสำคัญในการเสริมสร้างสมบัติทางกลของดินซีเมนต์เนื่องจากความแข็งแรงของวัสดุจะเพิ่มสูงขึ้นตามการลดลงของรูพรong อากาศภายในโครงสร้างจุลภาค ที่อายุ 28 วัน จะสังเกตเห็นการพัฒนาของผลึกเอททริงไกต์ที่มีปริมาณมากขึ้นเมื่อเทียบกับช่วงอายุ 3 วัน การก่อตัวของแท่งเอททริงไกต์ช่วยเพิ่มความแข็งแรงด้วยการเชื่อมต่อระหว่างอนุภาคซีเมนต์และดิน ทำให้วัสดุมีความเสถียรและทนทานต่อแรงอัดมากขึ้น [75]

จากรูปที่แสดงจะสังเกตได้ว่าซีเมนต์ทั้งสองชนิดมีการพัฒนาโครงสร้างทางจุลภาคในทิศทางที่คล้ายกัน แต่ด้วยความแตกต่างขององค์ประกอบทางเคมีและปริมาณของสารประกอบในซีเมนต์เช่น ซิลิกา (SiO_2) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จึงทำให้ปริมาณและขนาดของแท่งเอททริงไกต์อาจแตกต่างกันไปจึงส่งผลต่อการพัฒนากำลังของดินซีเมนต์ในระยะยาว [79]

การลดลงของรูพรong อากาศและความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นของดินซีเมนต์ส่งผลให้โครงสร้างมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มและปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น โดยปฏิกิริยาไฮเดรชันยังคงดำเนินไปอย่างต่อเนื่องส่งผลให้เกิดการเชื่อมโยงกันของผลึกภายในโครงสร้างซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงอัดดังผลการทดสอบที่แสดงในหัวข้อต่อจากนี้

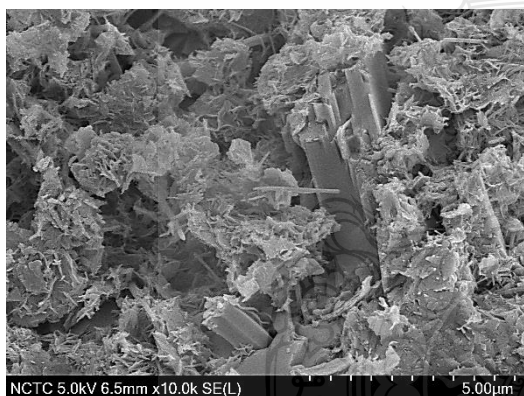


(a)

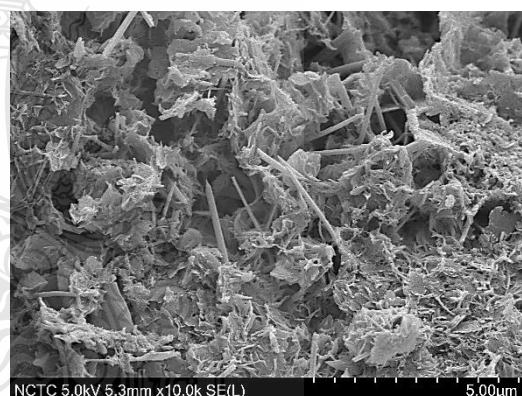


(b)

รูปที่ 4.3 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคของดินผสมปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกร้อยละ 10 อายุการบ่ม 3 วัน (a) และภาพโครงสร้างทางจุลภาคของดินผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 10 อายุการบ่ม 3 วัน (b)



(a)



(b)

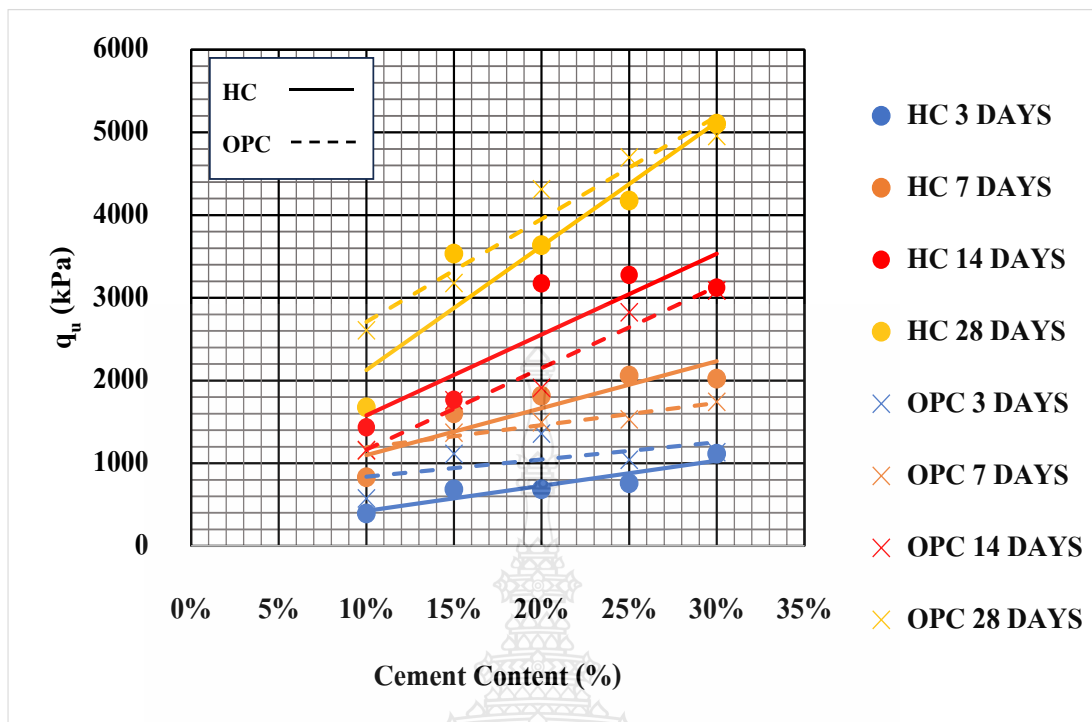
รูปที่ 4.4 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคของดินผสมปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกร้อยละ 25 อายุการบ่ม 28 วัน (a) และภาพโครงสร้างทางจุลภาคของดินผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 25 อายุการบ่ม 28 วัน (b)

4.3 ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

4.3.1 อิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ที่มีผลต่อค่า q_u

จากการทดลองพบว่าปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นของปูนทั้งสองชนิด ค่า q_u เฉลี่ยของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นในลักษณะของกราฟเส้นตรงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับดินซีเมนต์ที่ผสมเพิ่มด้วย OPC และ HC พบว่าค่า q_u เฉลี่ยที่ได้จากดินซีเมนต์ที่ผสมเพิ่มด้วย HC จะน้อยกว่าค่า q_u เฉลี่ยจาก OPC ประมาณร้อยละ 10.66 ซึ่งสาเหตุหลักเป็นผลมาจากการใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่เม็ดปูนบางส่วนในกระบวนการผลิต HC วัสดุปอซโซลานมีคุณสมบัติช่วยเพิ่มความคงทนของซีเมนต์ในระยะยาว จากตารางที่ 4.5 พบว่าใน OPC นั้นมีจำนวนของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) น้อยกว่า HC อยู่เล็กน้อยแต่มีปริมาณซิลิกาออกไซด์ (SiO₂) อลูมินาออกไซด์ (Al₂O₃) และอื่นๆ ใน OPC นั้นสูงกว่า HC ซึ่งสารประกอบเหล่านี้มีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาความแข็งแรงของดินซีเมนต์ โดยเฉพาะซิลิกาออกไซด์และอลูมินาออกไซด์ที่เป็นสารสำคัญในปฏิกิริยาระหว่างดินกับซีเมนต์ส่งผลให้ค่า q_u เฉลี่ยของ HC มีแนวโน้มที่ต่ำกว่า OPC เล็กน้อย โดยมีความใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Vinoth et al. [84] โดยกล่าวว่าซีเมนต์ที่มีปริมาณแคลเซียมซิลิเกตสูง มีแนวโน้มที่จะพัฒนาค่า q_u ได้ดีกว่า เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างแคลเซียมและซิลิกาในการสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งเป็นสารเชื่อมประสานที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับดินซีเมนต์

แม้ว่าการใช้วัสดุปอซโซลานใน HC จะให้ค่า q_u เฉลี่ยที่ต่ำกว่า OPC เล็กน้อยก็ตาม การใช้วัสดุปอซโซลานจะช่วยเพิ่มความเสถียรของโครงสร้างในระยะยาวด้วยการเติมเต็มช่องว่างภายในโครงสร้างทางจุลภาคและลดการก่อตัวของ Ca(OH)₂ ซึ่งช่วยลดความเป็นรุกรานของดินซีเมนต์ [75]



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unconfined Compressive Strength (q_u) กับปริมาณซีเมนต์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

4.3.2 อิทธิพลของระยะเวลาการบ่มที่มีผลต่อค่า q_u

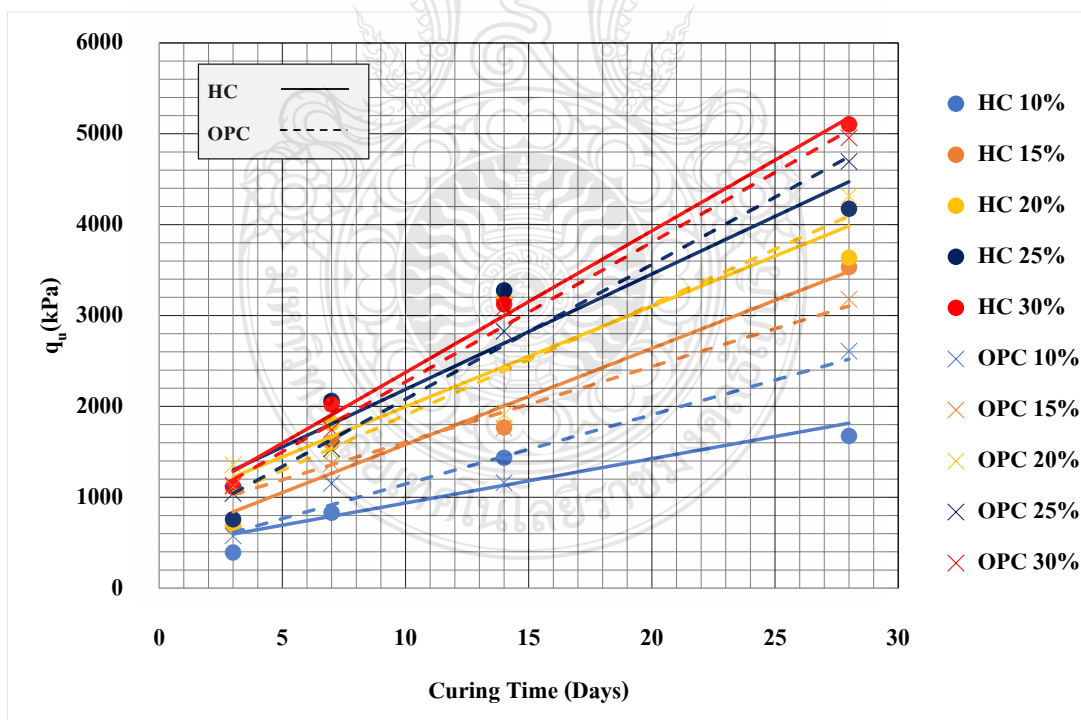
จากรูปที่ 4.6 พบว่าค่า q_u เฉลี่ยดินซีเมนต์ทั้งสองชนิด มีการพัฒนากำลังที่ดีขึ้นตามอายุของการบ่มค่า q_u เฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 3-4 เท่าเมื่อมีอายุการบ่ม 28 วัน สาเหตุหลักมาจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ Calcium Silicate Hydrate (CSH) และ Calcium Aluminate Hydrate (CAH) ซึ่งจะค่อย ๆ พัฒนาการเกิดปฏิกิริยาตามอายุของการบ่มของวัสดุประสานทั้งสองชนิด (HC และ OPC) การเกิดปฏิกิริยาเหล่านี้ช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับโครงสร้างภายในของดินซีเมนต์ ทำให้ดินซีเมนต์มีความแข็งแรงมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ค่า q_u เฉลี่ยมีแนวโน้มการพัฒนาแปรผันตรงกับปริมาณ HC และ OPC สังเกตได้ว่าค่า q_u เฉลี่ยที่ได้จากการผสมด้วย OPC มีแนวโน้มสูงกว่าค่า q_u เฉลี่ยจากการผสมด้วย HC อยู่ประมาณร้อยละ 21.36 เนื่องจาก OPC มีปริมาณของสารซิลิกาออกไซด์และสารอลูมินาออกไซด์สูงกว่า HC เล็กน้อย แม้ว่าปริมาณของแคลเซียมออกไซด์จะน้อยกว่า HC ซึ่งสารทั้งหมดเป็นสารที่ช่วยสร้าง CSH และ CAH ที่จำเป็นต่อการพัฒนากำลังของดินซีเมนต์

และการมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ที่สูงกว่าใน HC นั้นอาจส่งผลให้เกิดการแตกร้าวเนื่องจากการยืดหดตัว (Volume Change) จากปฏิกิริยาไฮเดรชันหรือการสูญเสียน้ำของดินซีเมนต์

ดังนั้นเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำที่อาจเกิดขึ้นในการบ่มดินผสมปูน HC จึงจำเป็นต้องเตรียมในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นเพียงพอ สำหรับการศึกษาวิจัยนี้ไม่พบเห็นรอยแตกขนาดเล็กบนก้อนตัวอย่างทั้งกรณี OPC และ HC นั้นอาจเป็นเพราะการเก็บตัวอย่างทดสอบถูกเก็บในสภาวะที่สูญเสียความชื้นน้อยจากห่อหุ้มด้วยแผ่น PVC และพลาสติกใสและเก็บในที่ภาชนะที่มิดชิด ดังแสดงในรูปที่ 3.3

การพัฒนากำลังของดินซีเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของ CSH และ CAH จะเห็นได้ชัดในระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการรับแรงอัดของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามแม้ในระยะเริ่มต้นดินที่ผสมเพิ่มด้วย OPC จะมีการพัฒนาความแข็งแรงเร็วกว่า HC แต่ความแตกต่างนี้จะลดลงเมื่ออายุการบ่มและปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้น เนื่องจากวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) ใน HC นั้นช่วยให้การพัฒนาความแข็งแรงในระยะยาวดีขึ้นแม้ในช่วงแรกจะเกิดปฏิกิริยาได้ช้ากว่า สังเกตได้จากที่ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 มีความแตกต่างกันเพียงร้อยละ 2.5 แต่ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 มีความแตกต่างกันถึงร้อยละ 30.44 ดังแสดงในรูปที่ 4.6

โดยสรุปได้ว่าความสามารถในการรับแรงอัดสอดคล้องกับระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้น สะท้อนถึงความสำคัญของปฏิกิริยาไฮเดรชันในการพัฒนาความแข็งแรงของดินที่ผสมเพิ่มด้วยซีเมนต์ทั้งสองชนิด



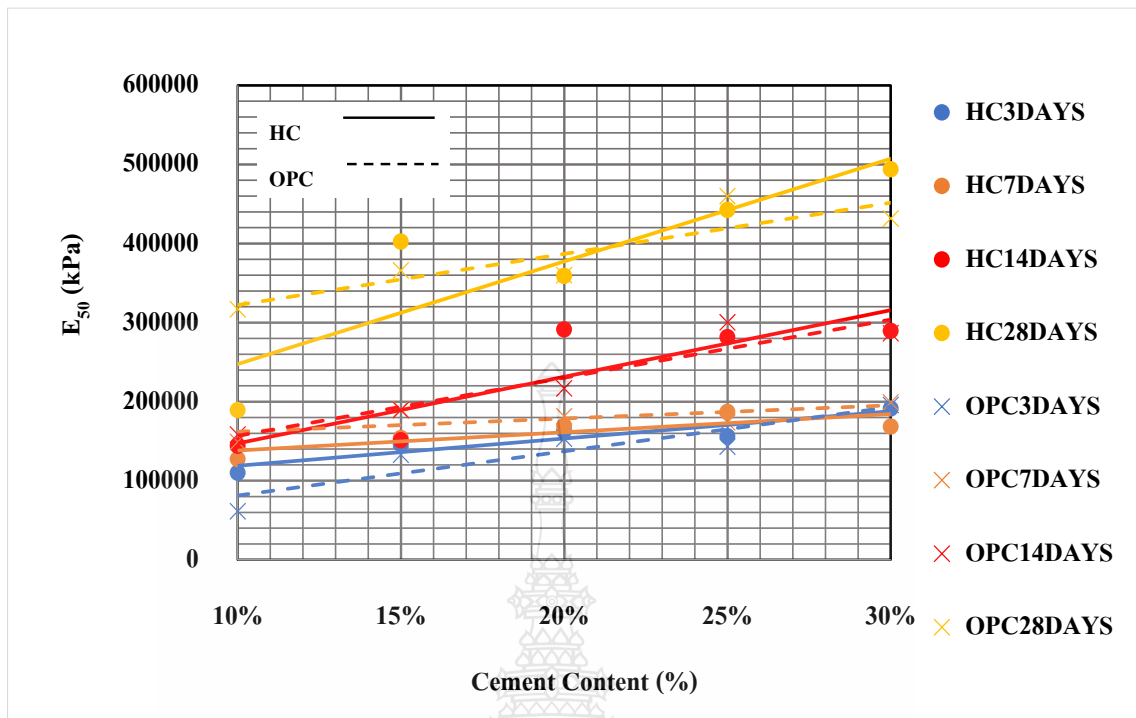
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unconfined Compressive Strength (q_u) กับปริมาณซีเมนต์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ และ อายุการบ่ม

4.3.3 อิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ที่ผลต่อค่ามอดูลัสซีแคนท์ (E_{50})

ค่ามอดูลัสซีแคนท์ (E_{50}) เป็นค่ามอดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากแนวคิดเชิงกลศาสตร์ของวัสดุ โดยคำนวณจากสมการ $E_{50} = (q_u/2)/\epsilon_{50}$ ซึ่งในที่นี้ q_u คือค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวสูงสุด (Unconfined Compressive Strength) ของดินผสมซีเมนต์ และ ϵ_{50} คือค่าความเครียดแนวแกน (Axial Strain) ที่สอดคล้องกับค่าความเค้น (Stress) เท่ากับ $q_u/2$ การเลือกจุด $q_u/2$ นี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อสะท้อนลักษณะการเสียรูปของวัสดุในช่วงการรับแรงก่อนถึงจุดวิกฤต และช่วยแสดงค่าความยืดหยุ่นในช่วงที่วัสดุยังไม่เกิดการวิบัติ (Failure)

จากข้อมูลที่น่าเสนอในรูปที่ 4.7 พบว่าค่าเฉลี่ย E_{50} มีการพัฒนาที่เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือ เมื่อมีการเติมซีเมนต์ในดินมากขึ้น ความสามารถในการรับแรงและความแข็งแรงของดินจะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นระบบ เนื่องจากโครงสร้างภายในของดินได้รับการพัฒนาให้มีความหนาแน่นและเชื่อมโยงกันดีขึ้นผ่านปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ โดยเฉพาะการเกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ซึ่งช่วยเสริมสร้างความแข็งแรงภายในโครงสร้างดิน เมื่อพิจารณาความแตกต่างระหว่างการใช้ปูนซีเมนต์สองชนิด (OPC และ HC) พบว่าค่า E_{50} เฉลี่ยของดินที่ผสมด้วย OPC จะสูงกว่าค่าที่ได้จาก HC เล็กน้อย (ประมาณร้อยละ 4.56) ในภาพรวม ทั้งนี้ เนื่องมาจากองค์ประกอบทางเคมีของ OPC ที่มีปริมาณสารประกอบที่สำคัญต่อการพัฒนากำลัง เช่น ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ในปริมาณที่สูงกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ HC สารประกอบเหล่านี้เป็นสารตั้งต้นที่สำคัญในการสร้าง CSH และ CAH ซึ่งมีส่วนช่วยให้การพัฒนาความแข็งแรงของดินผสมซีเมนต์เกิดขึ้นได้รวดเร็วและมากกว่าเล็กน้อยในช่วงแรกของการบ่ม อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างนี้สามารถลดลงได้โดยการปรับสัดส่วนปูนซีเมนต์หรือเพิ่มระยะเวลาการบ่ม [83]

โดยสรุป การเพิ่มขึ้นของปริมาณซีเมนต์มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า E_{50} ในลักษณะเชิงเส้นตรง และค่ามอดูลัสซีแคนท์ของดินผสมซีเมนต์ OPC จะสูงกว่าดินผสมซีเมนต์ HC เล็กน้อยอันเนื่องมาจากองค์ประกอบทางเคมีที่เอื้อต่อการสร้างสารเชื่อมประสานภายในมากกว่า ทั้งนี้ลักษณะความแตกต่างดังกล่าวสอดคล้องกับแนวโน้มที่พบในการเปรียบเทียบค่า q_u ซึ่งสะท้อนถึงแนวโน้มการพัฒนาความแข็งแรงของดินผสมซีเมนต์ทั้งสองชนิดในทิศทางที่คล้ายคลึงกัน



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modulus of Elasticity (E_{50}) กับปริมาณซีเมนต์ที่อัตราส่วนต่างๆ

4.3.4 อิทธิพลของอายุการบ่มที่ผลต่อค่า E_{50}

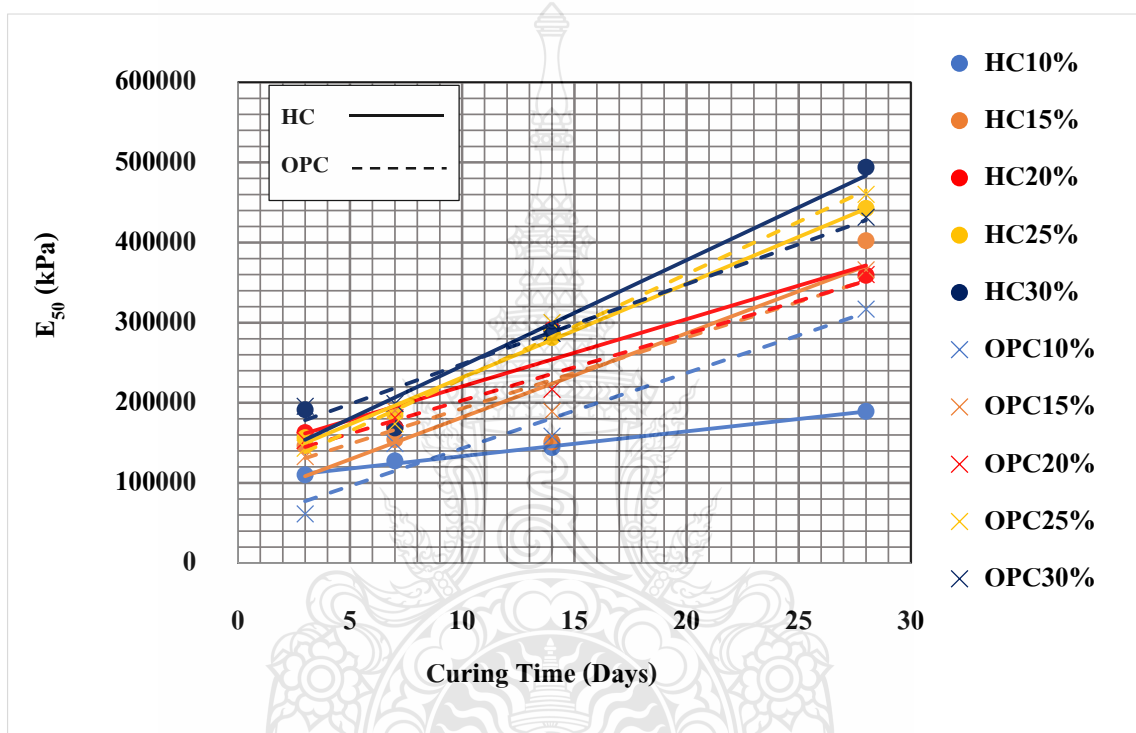
จากรูปที่ 7 พบว่าค่ามอดูลัสซีแคนท์ (E_{50}) ของดินผสมซีเมนต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงเมื่อเพิ่มอายุการบ่ม ซึ่งบ่งชี้ว่าเมื่อดินผสมซีเมนต์ได้รับเวลาในการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีมากขึ้น ความแข็งแรงและความสามารถในการต้านทานการเสียรูปก็เพิ่มขึ้นตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้มีสาเหตุมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของอนุภาคซีเมนต์ภายในดิน ที่ทำให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ซึ่งเป็นสารที่ช่วยเพิ่มความเชื่อมแน่นระหว่างอนุภาคดิน ลดช่องว่างภายในโครงสร้าง และเสริมสร้างความแข็งแรงโดยรวมของดินผสมซีเมนต์

เมื่อนำดินผสมปูนซีเมนต์ HC มาเปรียบเทียบกับดินผสมปูนซีเมนต์ OPC พบว่าค่า E_{50} ของดินผสมปูน HC ต่ำกว่าของดินผสมปูน OPC ในทุกช่วงอายุการบ่ม ยกเว้นเมื่อมีปริมาณซีเมนต์สูง (ประมาณร้อยละ 30) ในระยะเริ่มต้น OPC พัฒนาความแข็งแรงได้เร็วกว่าเฉลี่ยร้อยละ 14.34 เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีภายใน OPC ดังที่กล่าวในหัวข้อที่ 4.3.3

อย่างไรก็ตาม เมื่อผ่านการบ่มเป็นเวลา 28 วัน กรณีที่มีการผสมปูน HC ในปริมาณสูง (ร้อยละ 30) ทำให้ค่า E_{50} ของดินผสมปูน HC สูงกว่าของ OPC ประมาณร้อยละ 4.1 ซึ่งอาจเนื่องมาจากปริมาณแคลเซียมออกไซด์ที่สูงกว่าใน HC (อ้างอิงตารางที่ 4.3) ช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยาเสริมสร้างความแข็งแรงในระยะหลังได้มากขึ้น กล่าวคือ HC อาจใช้เวลาในการพัฒนาความแข็งแรงที่นานกว่า

เล็กน้อย แต่มีศักยภาพในการสร้างความแข็งแกร่งระยะยาวได้ดีหากมีปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่มมากพอ

โดยสรุป อายุการบ่มมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาค่ามอดูลัสซีแคนท์ (E_{50}) ของดินผสมซีเมนต์ การเพิ่มอายุการบ่มทำให้โครงสร้างภายในวัสดุพัฒนาความแข็งแกร่งมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นการใช้ซีเมนต์ OPC หรือ HC



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modulus of Elasticity (E_{50}) ที่อายุการบ่มต่าง ๆ

4.3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดแกนเดียว (q_u) และค่ามอดูลัสซีแคนท์ (E_{50})

จากผลการทดสอบเมื่อนำค่าแรงกดอัดแกนเดียว (q_u) มาหาความสัมพันธ์กับค่ามอดูลัสซีแคนท์ (E_{50}) พบว่าตัวแปรทั้งสองมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นพร้อมกัน โดยเมื่อค่า q_u เพิ่มขึ้นค่า E_{50} ก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสามารถแสดงเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงได้อย่างชัดเจนจากรูปที่ 4.9 ที่แสดงผลการวิเคราะห์ค่าทั้งสอง

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง q_u และ E_{50} ของดินที่ถูกผสมเพิ่มด้วยซีเมนต์ทั้งสองชนิด พบว่าแนวโน้มของสมการเส้นตรงมีความคล้ายคลึงกันอย่างมากมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าการพัฒนาความแข็งแกร่งและกำลังของดินที่ถูกผสมเพิ่มด้วย HC และ OPC มีความใกล้เคียงกัน

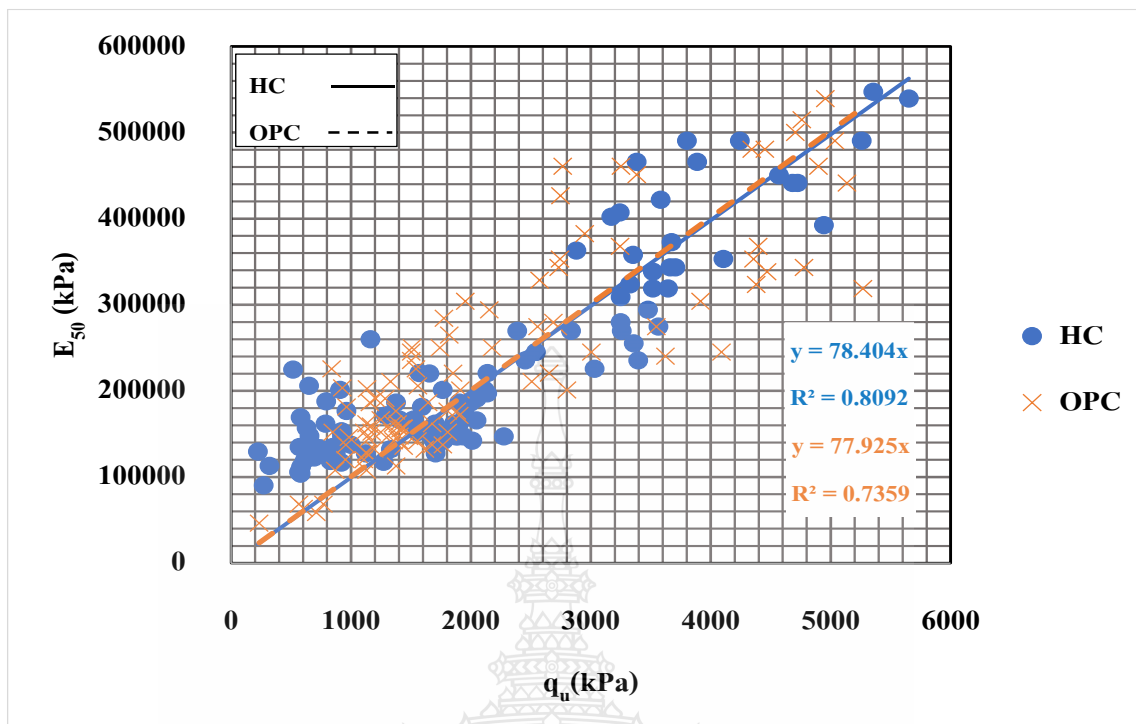
ในสัดส่วนที่ใช้ ทั้งนี้แม้ว่าดินที่ถูกผสมเพิ่มด้วย OPC จะมีการพัฒนาของค่า q_u และ E_{50} ที่เร็วในช่วงแรก แต่ในระยะยาว HC จะสามารถพัฒนาได้อย่างมีประสิทธิภาพไม่ต่างจาก OPC งานวิจัยนี้จึงขอเสนอสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_u และ E_{50} ในกรณีดินทรายผสมด้วยปูน HC สามารถเขียนเป็นสมการเชิงเส้นดังสมการที่ (4.1)

$$E_{50} = 78.404(q_u) \quad (4.1)$$

นอกจากนี้จากรูปที่ 4.9 ยังพบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลทดสอบของดินที่ถูกผสมเพิ่มด้วย OPC ความสัมพันธ์ระหว่าง q_u และ E_{50} ที่ได้จากผลการทดสอบของดินที่ถูกผสมเพิ่มด้วย OPC มีความคล้ายคลึงกับข้อมูลทดสอบของดินทรายที่ผสมเพิ่มด้วย HC สามารถหาความสัมพันธ์และเขียนเป็นสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ (4.2)

$$E_{50} = 78.165(q_u) \quad (4.2)$$

ผลการศึกษานี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sarkar et al. [85] ที่ได้ระบุความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างค่ามอดูลัสซีแคนท์ (E_{50}) และค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (q_u) โดยให้ความสัมพันธ์ $E_{50} = 69.32(q_u)$ แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการพัฒนากำลังของดินที่ผสมปูน OPC และ HC ที่ใกล้เคียงกันบ่งชี้ว่าการทดแทนการใช้ปูน OPC ด้วยปูน HC สามารถทำได้โดยไม่ก่อให้เกิดผลเสียร้ายแรงต่อความแข็งแรงของวัสดุผสม ทั้งนี้ แม้ OPC จะเป็นมาตรฐานที่ใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างมาอย่างยาวนาน แต่การเลือกใช้ HC จะมีส่วนช่วยในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่ชั้นบรรยากาศเนื่องจากในงานก่อสร้างส่วนใหญ่ ซึ่งรวมถึงงานผสมลิกในการปรับปรุงคุณภาพดินหรือก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ต้องใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่สูงมาก



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกดอัดแกนเดียว (q_u) และมอดูลัสยืดหยุ่น (E_{50})

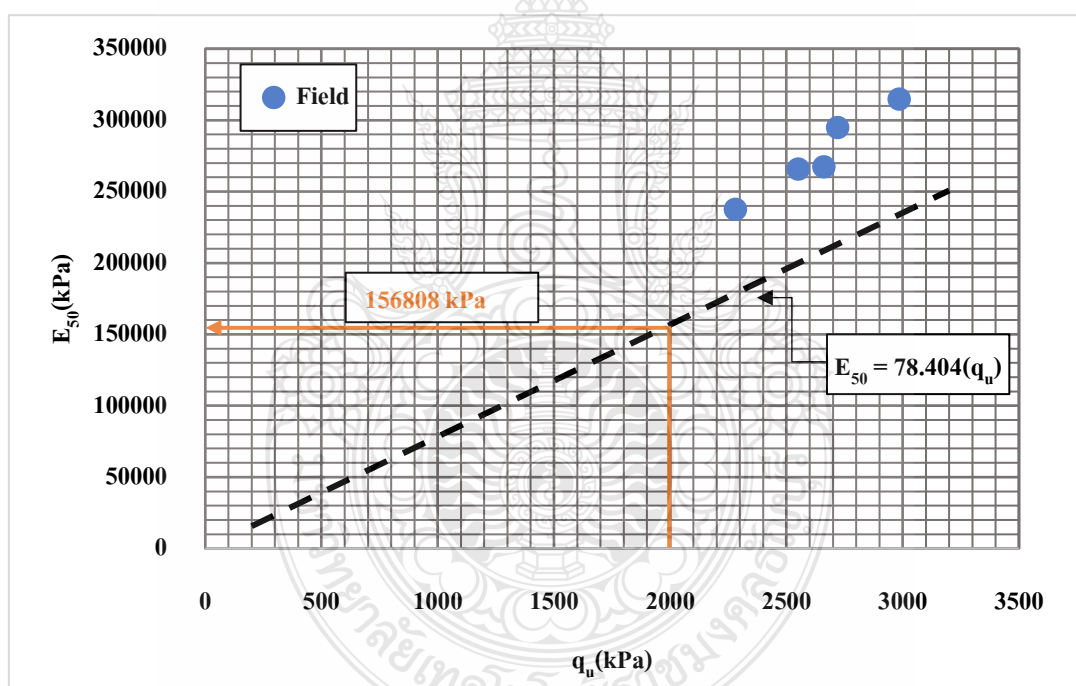
4.3.6 ตรวจสอบความน่าเชื่อถือของสมการที่นำเสนอ

เสาเข็มดินที่ใช้ในโครงการก่อสร้างอาคารสูบน้ำดิบวัดราษฎร์จำนงค์ จังหวัดหนองคาย ที่ก่อสร้างโดยใช้ HC โดยกำหนดค่าในการออกแบบไว้ที่ 2000 กิโลปาสกาล (kPa) ได้ถูกควบคุมคุณภาพในภาคสนามโดยใช้วิธีการนำตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ได้จากการเจาะแก่น (Coring Sample) เสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีอายุการบ่ม 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.10 โดยทำการสุ่มตัวอย่างเสาเข็มดินซีเมนต์ 1 ต้น ต่อจำนวน 100 ต้น แล้วนำมาทดสอบค่า q_u และ E_{50}

รูปที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบค่า q_u และ E_{50} จากตัวอย่างดินซีเมนต์ในภาคสนามกับสมการที่นำเสนอพบว่า ค่า q_u จากตัวอย่างในสนามให้ค่าที่สูงกว่าประมาณร้อยละ 31.95 และค่า E_{50} จากตัวอย่างในสนามให้ค่าที่สูงกว่าประมาณร้อยละ 76.15 แสดงให้เห็นถึงการพัฒนากำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ใช้ HC ในการก่อสร้างมีประสิทธิภาพสูงในสภาพแวดล้อมจริง ดังนั้นสมการที่ได้นำเสนอสามารถนำไปใช้ออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์ได้จริงเนื่องจากสมการที่นำเสนอให้ผลประเมินค่า E_{50} ที่ต่ำกว่าตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ได้จากภาคสนาม



รูปที่ 4.10 ตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ได้จากการเจาะแกนเสาเข็มดินซีเมนต์ในภาคสนามที่ระดับความลึก 0-10 เมตร



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดแกนเดียว (q_u) และค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (E_{s0}) ของตัวอย่างทดสอบในสนามและในห้องปฏิบัติการ

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษาการพัฒนากำลังและความแข็งแรงของดินที่ผสมเพิ่มด้วยซีเมนต์สองชนิด ได้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่ม เป็นผลทำให้ดินซีเมนต์มีคุณสมบัติด้านการรับแรงที่ดีขึ้น อีกทั้งค่ากำลังและความแข็งแรงที่ได้จากการผสมเพิ่มซีเมนต์ทั้งสองชนิดมีค่าที่ใกล้เคียงกันอย่างมีนัยสำคัญ สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ดินที่ผสมเพิ่มด้วยปูน HC ให้การพัฒนากำลังที่ต่ำกว่าดินผสมด้วยปูน OPC อยู่เล็กน้อย อันเป็นผลจากความแตกต่างของปริมาณ CaO , SiO_2 และ Al_2O_3 ในซีเมนต์ทั้งสองชนิด ส่งผลทำให้มีการพัฒนากำลังของปูน HC ช้ากว่าปูน OPC เล็กน้อย

5.1.2 ผลกระทบของปริมาณปูนซีเมนต์ที่ผสมและอายุการบ่มของปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิดมีความสอดคล้องกันอย่างมีนัยสำคัญ ความแตกต่างของค่า E_{50} และ q_u จากการผสมเพิ่มด้วยปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิดจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์และอายุการบ่ม การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ที่ผสมและอายุการบ่มทำให้ค่า E_{50} และ q_u เพิ่มขึ้นตาม

5.1.3 จากความสัมพันธ์ระหว่าง E_{50} และ q_u ของปูนทั้งสองชนิดที่ใกล้เคียงกันมากจากผลการทดสอบสามารถหาความสัมพันธ์และเขียนเป็นสมการเส้นตรงได้ว่า $E_{50} = 78.165(q_u)$ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อการออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์บนชั้นดินทรายได้ โดยเฉพาะบริเวณพื้นที่ริมฝั่งแม่น้ำโขง จังหวัดหนองคาย

5.1.4 เมื่อเปรียบเทียบค่า q_u และ E_{50} เฉลี่ยของตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ผสมเพิ่มด้วยปูน HC ในสนามจากโครงการก่อสร้างอาคารสูบน้ำดิบ วิศวกรรมจันทบุรี จังหวัดหนองคายกับตัวอย่างดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการพบว่าตัวอย่างดินซีเมนต์ในสนามให้ค่าที่สูงกว่าตัวอย่างดินในห้องปฏิบัติการ แสดงถึงประสิทธิภาพในการนำไปใช้งานจริงของปูน HC และความสามารถในการทดแทนปูน OPC

การใช้ปูน HC เพื่อทดแทนปูน OPC ในงานปรับปรุงคุณภาพดินแบบยั่งยืนโดยเฉพาะกับวิธีการผสมลึกสามารถทำได้ เป็นการช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศ เนื่องจากในงานผสมลึกต้องใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่สูงมาก

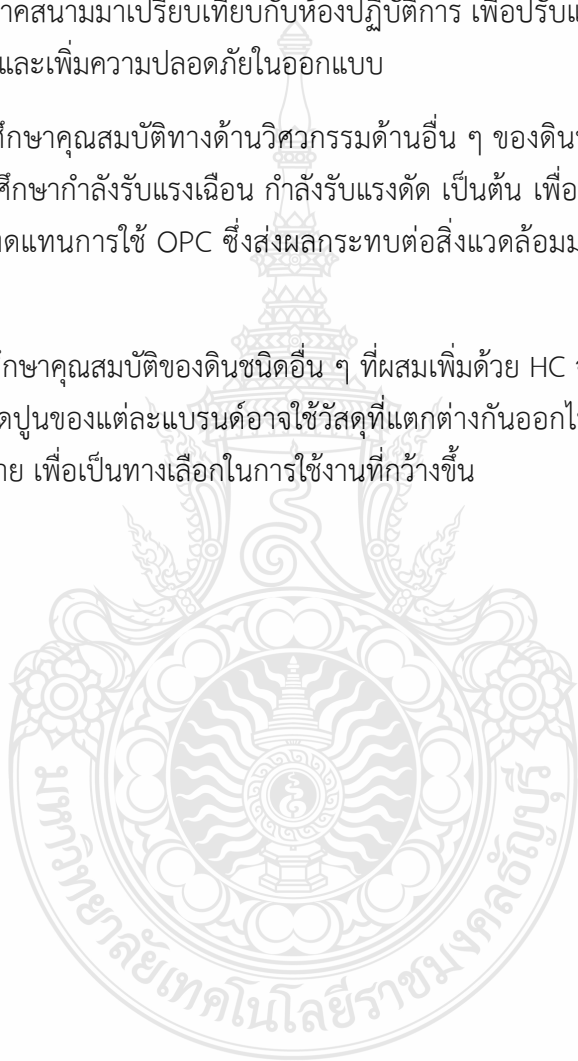
5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ ได้ทำการศึกษาทดสอบเฉพาะในห้องปฏิบัติการเท่านั้น เพื่อเป็นข้อมูลและแนวทางในการวิเคราะห์เพียงด้านเดียวเท่านั้น ซึ่งพฤติกรรมจริงอาจไม่ตรงกับผลที่ได้เท่าที่ควร ดังนั้นจึงควรจะมีการศึกษาเพิ่มเติม ดังนี้

5.2.1 การนำข้อมูลไปใช้งานจริงในการออกแบบและภาคสนาม ควรนำข้อมูลที่ได้จากตัวอย่างดินซีเมนต์ในภาคสนามมาเปรียบเทียบกับห้องปฏิบัติการ เพื่อปรับแก้ค่าให้สอดคล้องกับค่าของการใช้งานจริงในสนามและเพิ่มความปลอดภัยในออกแบบ

5.2.2 ควรศึกษาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมด้านอื่น ๆ ของดินทรายและดินชนิดอื่นที่ผสมเพิ่มด้วย HC เช่น การศึกษากำลังรับแรงเฉือน กำลังรับแรงดัด เป็นต้น เพื่อความหลากหลายของข้อมูลและประโยชน์ในการทดแทนการใช้ OPC ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่า HC ในขั้นตอนการผลิต

5.2.3 ควรศึกษาคุณสมบัติของดินชนิดอื่น ๆ ที่ผสมเพิ่มด้วย HC จากแบรนด์ต่าง ๆ เนื่องจากวัสดุที่นำมาทดแทนเม็ดปูนของแต่ละแบรนด์อาจใช้วัสดุที่ต่างกันออกไป และคุณสมบัติของดินแต่ละชนิดก็มีความหลากหลาย เพื่อเป็นทางเลือกในการใช้งานที่กว้างขึ้น



บรรณานุกรม

- [1] W. H. Mills, Jr. , "Road Base Stabilization with Portland Cement," *Engineering News Record*, vol. 115, no. 22, pp. 751-753, 1935.
- [2] C. A. Hogentogler, "Engineering Properties Of The Soils," *Mc Graw Hill Book, New York. USA*, 1938.
- [3] Highway Research Board, "Prevention of Moisture Loss in Soil-Cement with Bitumious Material," *Highway Research Board, Research Report*, p. 353, 1949.
- [4] M. G. Spangler and O. H. Patel, "Modification of a Gumbotil Soil by Lime and Portland Cement Admixtures," *Highway Research Board, Proceed 219*, pp. 561-566, 1949.
- [5] K. E. Clare and A. E. Pollard, "The Relationship between Compressive Strength and Age for Soil Stabilized with Four Type of Cement," *Magazine of Concrete Research*, vol. 3, no. 8, pp. 57-64, 1951.
- [6] M. G. Fuller and G. W. Dabney, "Stabilizing Weak and Defective Bases with Hydrated Lime," *in Roads and Streets*, vol. 95, pp. 64-69, 1952.
- [7] D. J. Maclean, P. J. M. Robinson, and S. B. Webb, "An Investigation of the Stabilization of Heavy Clay Soil with Cement for Road Base Construction," *Roads and Road Construction*, vol. 3, no. 358, pp. 287-292, 1952.
- [8] A. W. Maner, "Curing Soil Cement Base," *In Proceeding of Highway Research Board. Washington, DC: National Research Council* vol. 31, pp. 540-558, 1952.
- [9] T. J. Marshall, "Some Properties of Soil Treated With Portland Cement," *Symposium on Soil Stabilization, Australia*, pp. 28-34, 195

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [10] Massachusetts Institute of Technology, "Soil Stabilization for Highways," *Massachusetts Department of Public Works and Joint, Highway Research Project, Massachusetts*, vol. 81, 1954.
- [11] E. J. Felt, "Factors Influencing Physical Properties of Soil-Cement Mixtures," *Highway Research Board, Bulletin 108*, pp. 138-163, 1955.
- [12] F. Reinhold, "Elastic Behavior of Soil-Cement Mixtures," *Highway Research Board, Bulletin 108*, pp. 128-137, 1955.
- [13] J. A. Leadabrand, "Some Engineering Aspects of Soils-Cement Mixture," *Mid-South Section, ASCE*, pp. 64-69, 1956.
- [14] T. W. Lambe and Z. C. Moh, "Improvement of Strength of Soil-Cement with Additives," *Highway Research Board, Bulletin 183*, pp. 38-47, 1957.
- [15] D. T. Davidson, R. K. Katti, and W. D. E., "Use of Fly Ash with Portland Cement for Stabilization of Soil," *Highway Research Board, Bulletin 198*, pp. 1-11, 1958.
- [16] L. T. Norling and R. G. Packard, "Expanded Short-Cut Test Method for Determining Cement Factor for Sandy Soil," *Highway Research Board, Bulletin 198*, pp. 20-31, 1958.
- [17] J. F. Redus, "Study of Soil-Cement Base Courses on Military Airfields," *Highway Research Board, Bulletin 198*, pp. 13-19, 1958.
- [18] T. W. Lambe, A. S. Michaels, and Z. C. Moh, "Improvement Of Soil Cement With Alkali Metal Compounds," *Highway Research Board, Bulletin 241*, pp. 67-103, 1959.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [19] Portland Cement Association, "Soil-Cement Laboratory Handbook, Illinois: Skokie," 1959.
- [20] D. T. Davidson and B. W. Bruns, "Comparison of Type I and Type III Portland Cement for Soil Stabilization," *Highway Research Board, Bulletin 267*, pp. 28-45, 1960.
- [21] D. T. Davidson, "Soil Stabilization with Portland Cement," *Highway Research Board*, no. 292, pp. 751-753, 1961.
- [22] D. T. Davidson, "Soil Stabilization with Portland Cement," *Highway Research Board, Bulletin 292*, pp. 45-151, 1961.
- [23] L. T. Cireo, D. T. Davidson, and H. T. David, "Strength of Soil-Cement Mixture," *Iowa State University conference 41st Annual Session of Highway Research Board. National Research Council. Washington D.C., U.S.A., 1962.*
- [24] D. T. Davidson, G. L. Pitre, M. Mateos, and P. G. Kalankamary, "Moisture – Density, Moisture-Strength and Compaction Characteristic of Cement-Treated Soil Mixture," *Highway Research Board*, pp. 42-63, 1962.
- [25] C. D. S. Pinto, D. T. Davidson, and J. G. Leguros, "Effect of Lime on Cement Stabilization of Monmorillonitic Soils," *Highway Research Board, Bulletin 353*, pp. 64-83, 1962.
- [26] F. L. Grimer and J. Krawczyk, "Relative between stength and age for soil-cement with particular reference to prediction of later strength from earlier strength," *Magazine of Concrete Research*, pp. 21-30, 1963.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [27] A. Herzog and J. K. Mitchell, J. K., "Reaction Accompanying the Stabilization of Clay with Cement," *Highway Research Board*, vol. 36, pp. 146-171, 1963.
- [28] Z. C. Moh, "Reaction Of Soil Minerals With Cement And Chemicals," *Highway Research Board*, vol. 86, pp. 39-61, 1965.
- [29] The Siam Cement Company Ltd, "Demonstration Road Using Local Soil with Cement Stabilization," *Bangkok: Saim Cement*, pp. 25-26, 1965.
- [30] J. K. Mitchell and S. A. El Jack, "The Fabric of Soil-Cement and Its Formation," *In Proceedings of 14th National Conference Clay and Clay Minerals*, vol. 26, pp. 297-305, 1966.
- [31] S. C. Ng, "Cement Stabilization of Lateritic Soils," *Master of Engineering Thesis. Civil Engineering Program*, no. 125, pp. 55-65, 1966. Seato Graduate School of Engineering.
- [32] H. J. Pendola, T. W. Kennady, and W. R. Hutson, "Evaluation of Factors Affecting the Tensile Properties of Cement-Treated Materials," *University of Texas at Austin Research Report*, vol. 98, no. 3, 1969.
- [33] G. R. Lightsey, A. Arman, and C. D. Callihan, "Change in Charactoristids of Cement Stabilize Soils By Addition of Excess Compaction Moisture," *Highway Research Record*, vol. 315, pp. 36-45, 1970.
- [34] O. G. Ingles and J. B. Metcalf, "Soil Stabilization," *Sydney, Butterworths*, pp. 64-69, 1972.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [35] M. C. Wang and M. T. Huston, "Direct-Tensile Stress and Strain of Cement Stabilize Soil," *Highway Research Board*, vol. 351, pp. 19-24, 1972.
- [36] B. Shackle and R. H. F. Lee, "Some Aspect of Curing of Soil-Cement," in *The 7th Conference of the Australian Road Research Board* vol. 7, no. 7, pp. 5-17, 1974.
- [37] F. G. Bell, "The influence of the mineral content of clay on their stabilization with cement," *Association of Engineering Geologists*, pp. 267-278, 1976.
- [38] M. Terashi, H. Tanaka, and T. Okumura, "Engineering Properties of lime treated marine soils and DMM," *In Proceedings of 6th Asian Regional Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, vol. 1, pp. 191-194, 1979.
- [39] R. J. Terrel, E. J. Barenberg, J. M. Mitchell, and M. R. Thomson, "Soil Stabilization in Pavement Structure," *A User's Manual Mixture Design Consideration*, vol. 2, 1979. Washington D.C.: Government Printing Office.
- [40] T. Kawasaki, A. Niina, S. Saitoh, Y. Suzuki, and Y. Honjo, "Deep mixing method using cement hardening agent," *In Proceedings of 10th National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm*, pp. 721-724, 1981.
- [41] J. K. Michell, "Soil Improvement State Of The Art Report," *Proc. X ICSMFE (Rotterdam)*, 1982.
- [42] T. Ruenkairergsa, "Principle of Soil Stabilization," *Group Training in Road Construction, Bangkok*, pp. 17-26, 1982.
- [43] T. Ruenkairergsa, "Principle of Soil Stabilization," *Highway Department, Bangkok*, pp. 17-26, 1982.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [44] S. Saitoh, "Experimental study of engineering properties of cement improved ground by the deep mixing method," *Doctoral thesis, Nihon University*, p. 317 (in japanese), 1988.
- [45] P. V. Lade and D. D. Overton, "Cementation Effects in Frictional Material," *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 115, no. 9, pp. 1373-1387, 1989.
- [46] M. R. Hausmann, "Engineering Principles of Grong Modification," 1990. McGraw-Hill Publ.Co.
- [47] M. Kamon and S. Nontananandh, "Contribution of Stainless-Steel Slag to The Developmant of Strength For Seabed Hedoro," *Japan Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, vol. 30, pp. 63-72, 1990.
- [48] T. D. Wilmot, "Selection of Additive for Stabilization and Recycling of Road Pavemant," *Pavement Rahabilitaion Workshop, Queensland*, pp. 1-14, 24-25 August, 1995.
- [49] S. Horpibulsuk and N. Miura, "A new approach for studying behavior of cement stabilized clays," *In Proceedings of 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Turkey*, vol. 3, pp. 1759-1762, 2001.
- [50] N. Miura, S. Horpibulsuk, and T. S. Nagaraj, "Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content," *Soil and Foundations*, vol. 41, no. 5, pp. 33-45, 2001.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [51] S. Horpibulsuk, N. Miura, T. S. Nagaraj, and H. Koga, "Improvement of soft marine clays by deep mixing technique " in *Proceeding of 12th International Conference offshore and Polar Engineering, Kitakyushu, Japan*, pp. 584-591, 2002.
- [52] S. Nontananandh, A. Yupakorn, and T. Jirathanathaworn, "Influence of Delay Compaction on Strength of Lateritic Soil Cement," *In Proceedings of 8th National Convention on Civil Engineering(NCCE), Khon kean, p.6, 23-25 October 2002.*
- [53] S. Horpibulsuk, N. Miura, and T. S. Nagaraj, "Assesment of strength development in cement admixed clays," in *Geotechnique*, vol. 53, no. 4, pp. 439-444, 2003.
- [54] S. Horpibulsuk, R. Rachan, and Y. Rakachon, "ROLE OF FLY ASH ON STRENGTH AND MICROSTRUCTURE DEVELOPMENT IN BLENDED CEMENT STABILIZED SILTY CLAY," *Japanese Geotechnical Society*, vol. 49, no. 1, pp. 85-98, 2009.
- [55] R. Andersson, T. Carlsson, and M. Leppanen, "Hydraulic Cement Based Binder for Mass Stabilization of Organic Soils," *Soft Ground Technology*, pp. 158-169, 2012.
- [56] D. S. Moore, W. l. Notz, and M. A. Flinger, "The basic Practice of Statistics (6th ed.)," *New York,NY: W. H. Freeman and Company*, p. 138, 2013.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [57] T.Chompoorat and S. Likitlersuang, "Assessment of shrinkage characteristic in blended cement and fly ash admixed soft clay," *The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, pp. 311-316, 2015.
- [58] H. Baker, "Ground improvement," 2017. [Online] Available : <http://www.haywardbaker.com/solutions/ground-improvement>. (accessed 10/12/2017).
- [59] S. Chaiyaput, J. Ayawanna, P. Sertsoongnern, W. Pratumwan, and N. Kingnoi, "The Strength of soil-cement columns on the soft Bangkok clay: Equation and practical test," *The 5th International Conference on Smart Materials and Nanotechnology (Smatmat@2020)*, 2020.
- [60] G. Thomas and K. Rangaswamy, "Strengthening of cement blended soft clay with nano-silica particles," *Geomechanics and Engineering*, vol. 20, no. 6, pp. 505-516, 2020.
- [61] D. Barbero, L. D. Serraiocco, A. Maroni, and S. Peyrot, "Portland Cement for A-4 Group Soils Stabilization," *Journal of Geotechnical Engineering, March*, vol. 8, no. 1, 2021.
- [62] S. Chaiyaput and J. Ayawanna, "Stabilization of lateritic soil by ladle furnace slag for pavement subbase material," *Geomechanics and Engineering*, vol. 26(4): 323-311, 2021. <https://doi.org/10.12989/gae.2021.26.4.323>.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [63] S. Chaiyaput and J. Ayawanna, "Lateritic Soil Stabilization By Addition Of Steel Slags," *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, vol. 52(3): 66-69, 2021.
- [64] S. Chaiyaput, N. Arwaedo, N. Kingnoi, T. N. Nguyen, and J. Ayawanna, "Effect of curing conditions on the strength of soil cement, Case Studies in Construction Materials," 2022. 16: e010182. <http://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01082>.
- [65] ชัชวาล เศรษฐบุตร, "คอนกรีตเทคโนโลยี," 2536. กรุงเทพฯ :บริษัทคอนกรีตผสมเสร็จซีแพค.
- [66] เกษม เพชรเกตุ และ พินิต ตั้งบุญเติม, "การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์," *โยธาสาร*, pp. 30-39, 2540.
- [67] พรพจน์ ต้นเส็ง, "ปฐพีกลศาสตร์," pp. 40-42, 2554.
- [68] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, "ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก," *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม*, 2556.
- [69] จุฑา สุนิตย์สกุล, นัตรชัย จันท, ชัยรัตน์ ศุภชวโรจน์ และ วสันต์ มุธุศรี, "Hydraulic Blended Cement Stabilization Crushed Rock Base," *บทความทางวิชาการ การสัมมนาเจ้าหน้าที่วิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง ประจำปีงบประมาณ 2562*, pp. 63-80, 2562.
- [70] วฤธ รัตนรุ่งโรจน์, ศุภกิจ นนทนันทน์ และ อัครชัย เรืองแสงทอง, "การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯด้วยปูนซีเมนต์ผสมผงตะกรันเหล็กและเถ้าชีวมวลจากโรงงานผลิตกระดาษ" *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25*, 2563.
- [71] สุทธิพงศ์ คำดี, สุริยะ ทองมูณี และ ไพรพงศ์ จิตเสงี่ยม, "อิทธิพลของปริมาณดินเม็ดละเอียดและปริมาณซีเมนต์ต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังผสมซีเมนต์," *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25*, 2563.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [72] ขวัญจิรา หมั่นบำรุงศาสน์, พานิช วุฒิพฤษ, อิทธิพล มีผล, and ศิริพัฒน์ มณีแก้ว, "สมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และเสริมแรงด้วยเส้นใยเหล็กจากยางรถยนต์," *ประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ*, no. 27, 2565.
- [73] ปัญญา สุวรรณกลาง, สุภัณภษ ขาชำนาญ, and สุขศิริพัฒน์พงศ์, "กำลังอัดแกนเดียวและกำลังแรงดึงทางอ้อมของขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก," *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27*, 2565.
- [74] สมาคมอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ไทย, "ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกหนึ่งในมาตรการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทยตามข้อตกลงปารีส," no. 19, 2565.
- [75] F. M. Lea, *The Chemistry of Cement and Concrete*, 4th ed., Edward Arnold, 1970.
- [76] J. E. Bowles, *Engineering Properties of Soils and Their Measurement*, 4th ed., McGraw-Hill, 1992.
- [77] A. M. Neville, *Properties of Concrete*, 4th ed., Longman, 1996.
- [78] S. M. Rao and A. Sridharan, *Engineering Behaviour of Soils*, CRC Press, 2007.
- [79] J. K. Mitchell and K. Soga, *Fundamentals of Soil Behavior*, 3rd ed., John Wiley & Sons, 2005.
- [80] A. M. Neville, *Properties of Concrete*, 5th ed., Pearson, 2012.
- [81] B. M. Das, *Principles of Geotechnical Engineering*, 8th ed. Cengage Learning, 2013.
- [82] P. K. Mehta and P. J. M. Monteiro, *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, 4th ed., McGraw-Hill, 2014.
- [83] T. Z. Wang, C. M. Wang, Z. M. Zhang, and X. H. Huang, "Mechanical property of cement-stabilized soil with nano-CaO and reinforcement mechanism analysis,"

Chemical Engineering Transactions, vol. 51, pp. 1195-1200, 2016.

[84] Vinoth, R., et al., "Strength and durability characteristics of concrete containing fly ash and silica fume," *International Journal of Engineering and Technology*, vol.5, no. 2, pp. 101-108, 2018.

[85] P. K. Sarkar, K. C. Chao, K. N. Wong, and M. Wang, "Evaluation of index properties affecting unconfined compressive strength of jet-grouted soil columns for Bangkok soils," in *Proceedings of the International Conference on Deep Foundations and Ground Improvement*, Berlin, Germany, May 18–20, 2022.

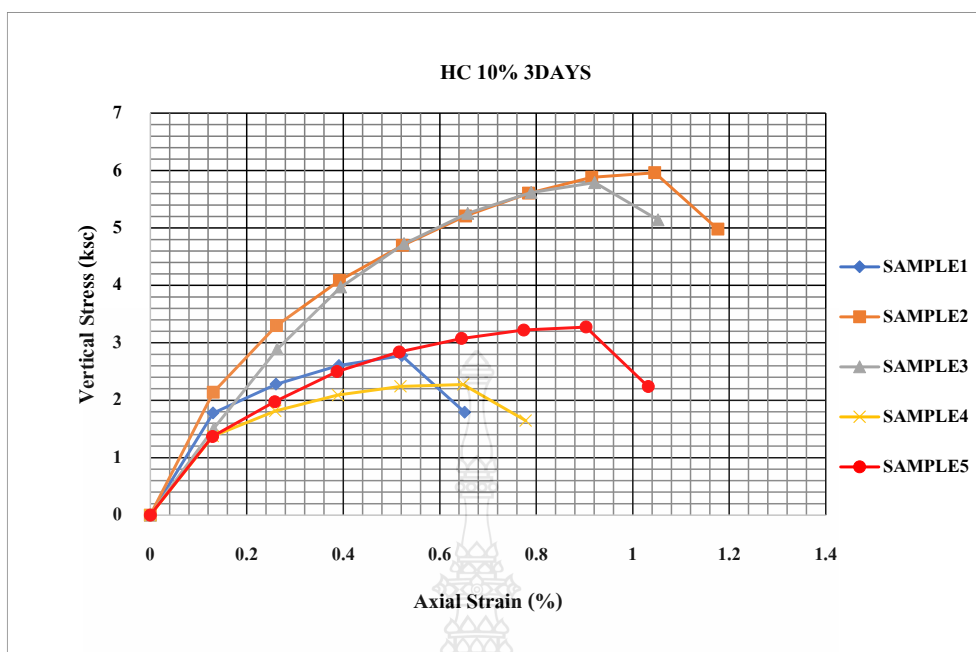


ภาคผนวก

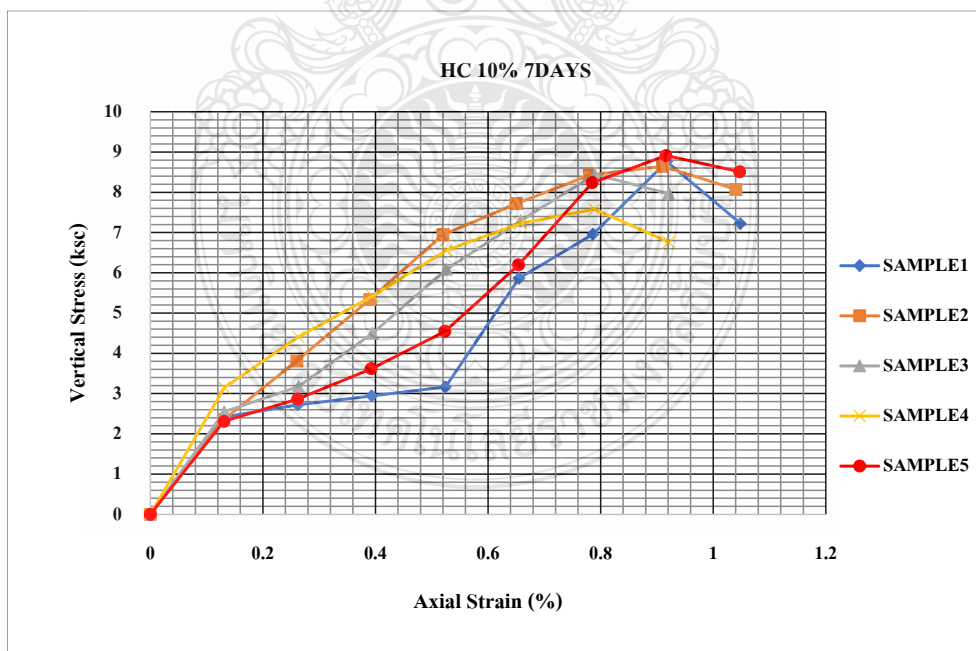


ภาคผนวก ก
ผลการทดสอบแรงกดอัดแกนเดียว
(Unconfined Compression Test)

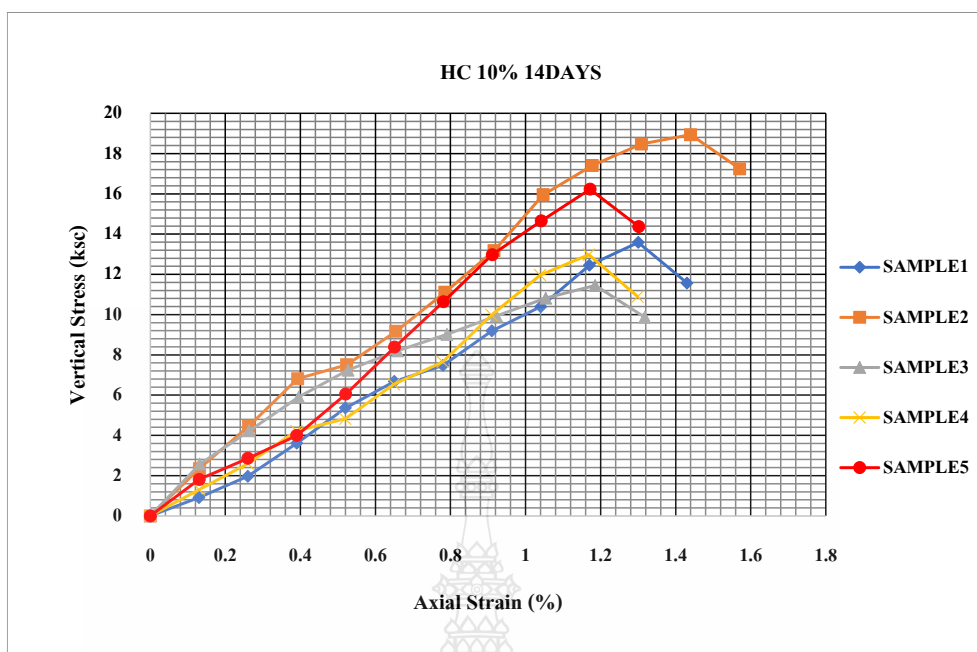




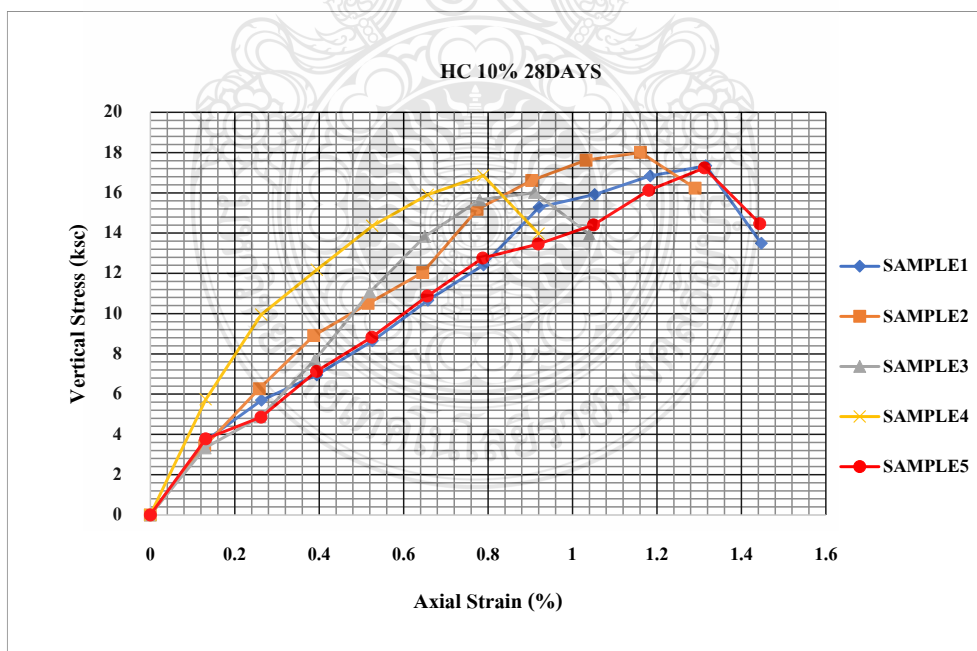
รูปที่ ก.1 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ดินผสม HC 10% ที่อายุบ่ม 3 วัน



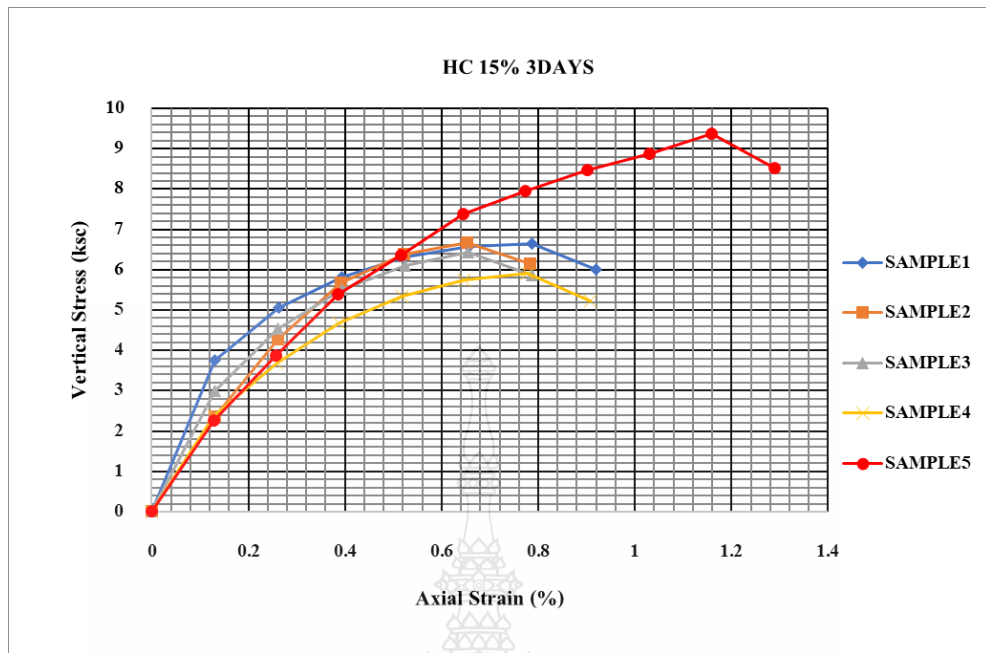
รูปที่ ก.2 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ดินผสม HC 10% ที่อายุบ่ม 7 วัน



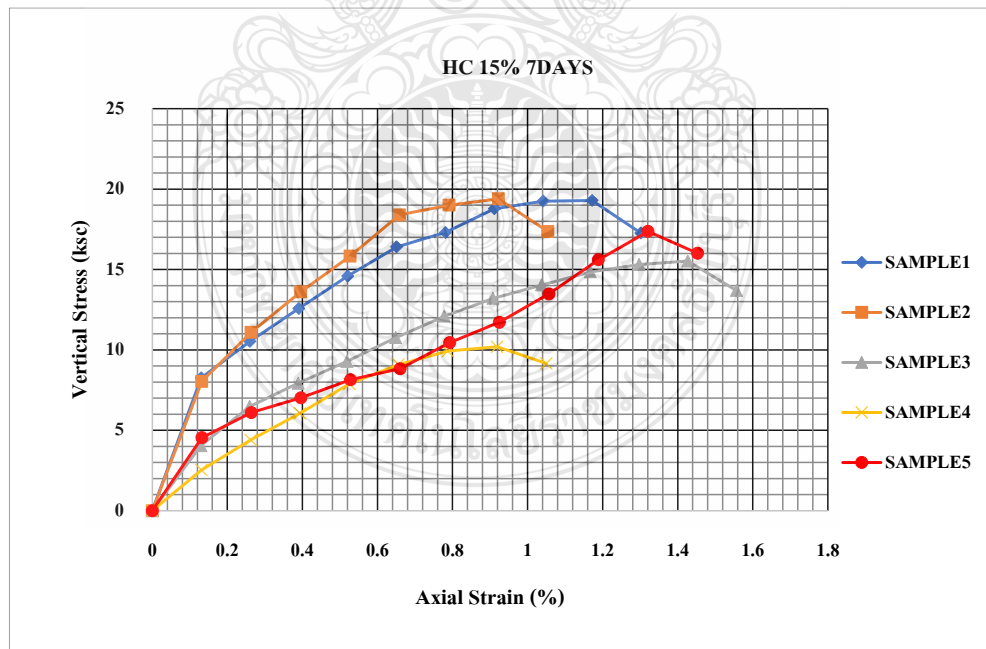
รูปที่ ก.3 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ดินผสม HC 10% ที่อายุบ่ม 14 วัน



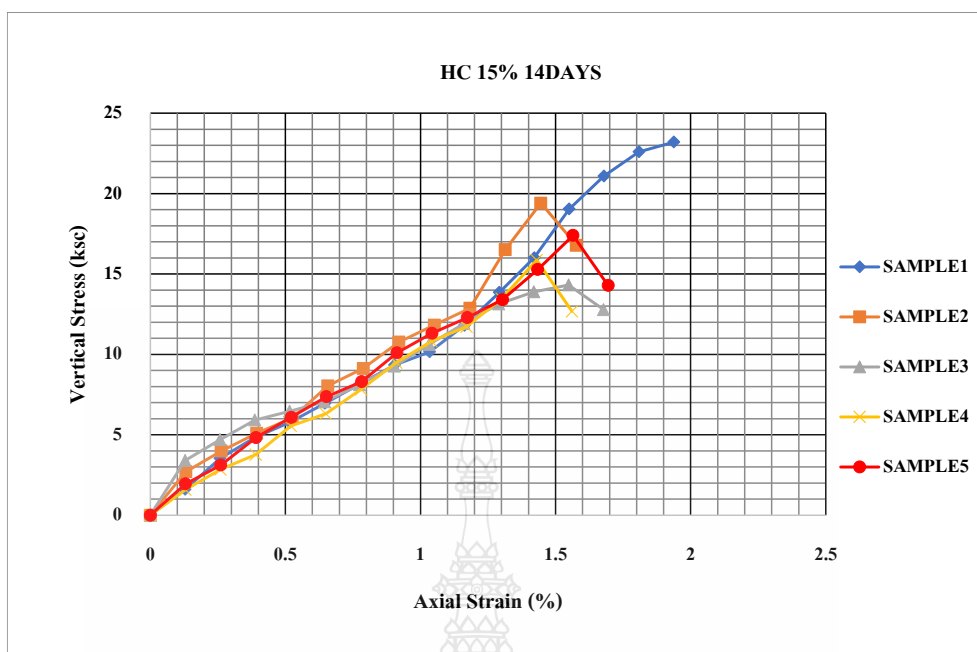
รูปที่ ก.4 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ดินผสม HC 10% ที่อายุบ่ม 28 วัน



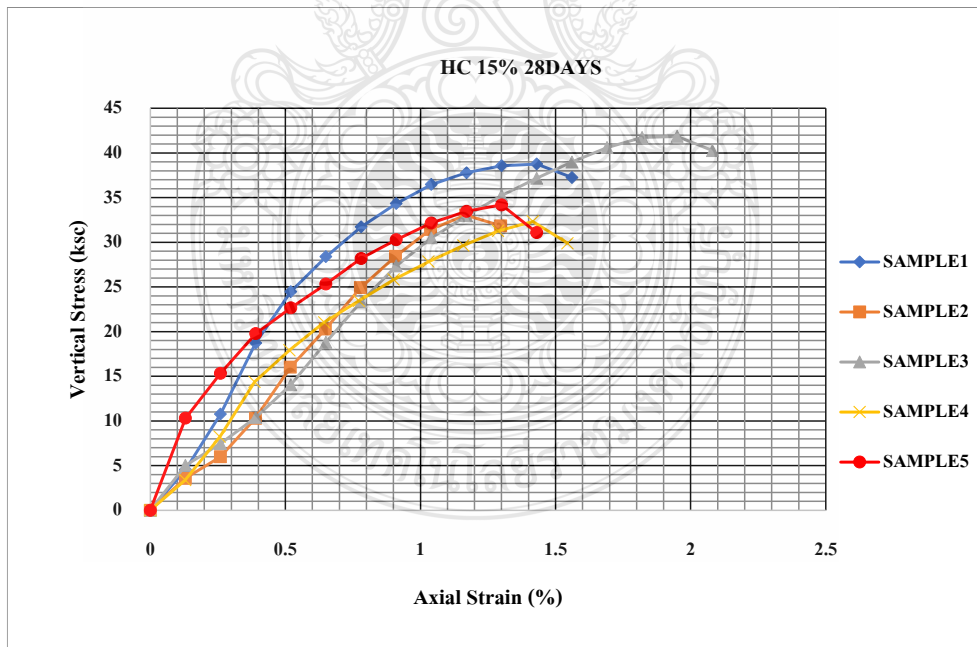
รูปที่ ก.5 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ดินผสม HC 15% ที่อายุบ่ม 3 วัน



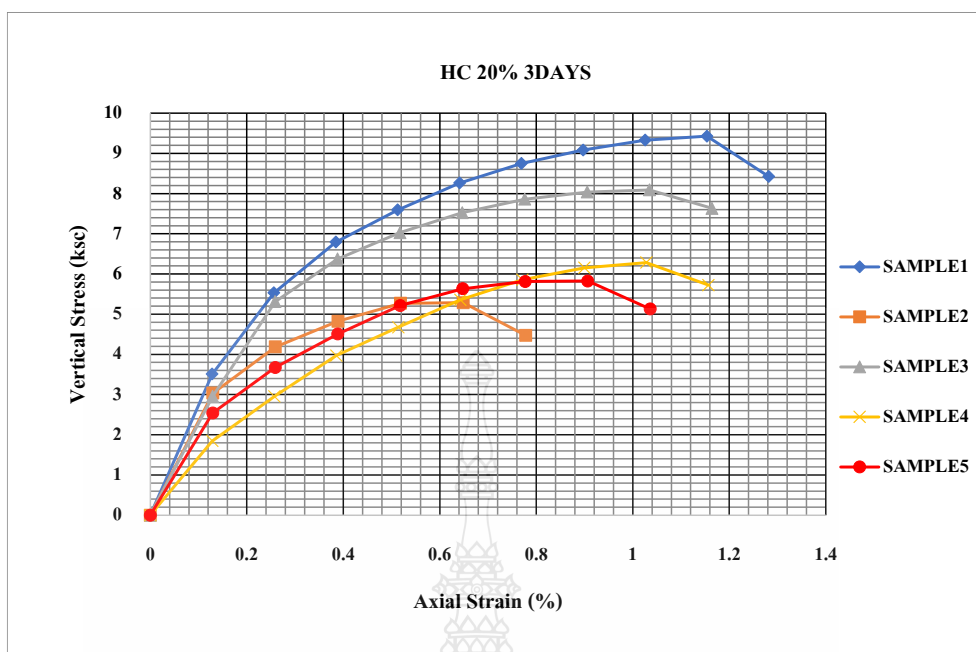
รูปที่ ก.6 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ดินผสม HC 15% ที่อายุบ่ม 7 วัน



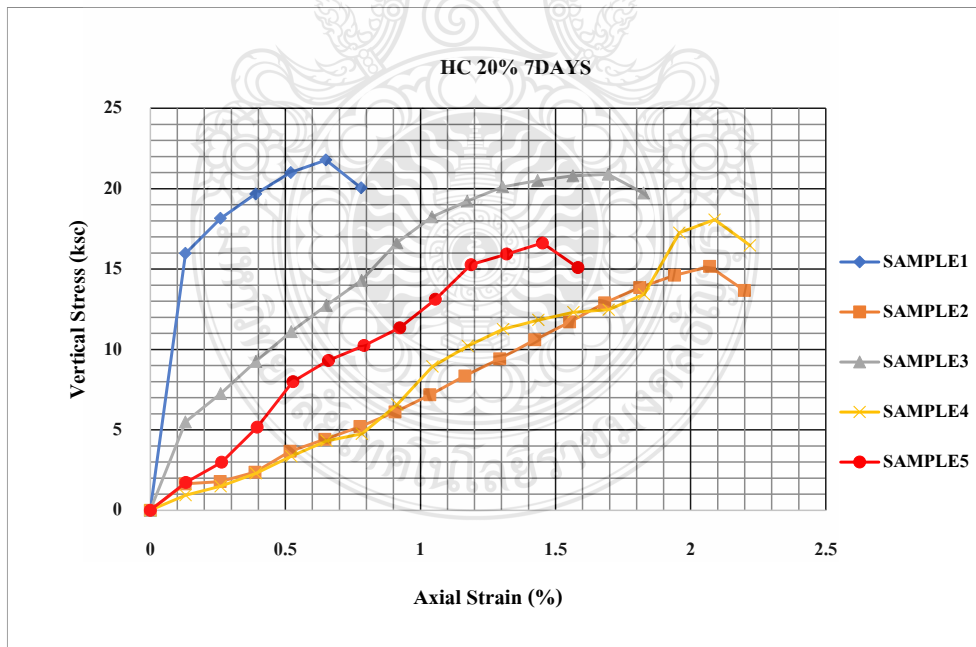
รูปที่ ก.7 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ดินผสม HC 15% ที่อายุบ่ม 14 วัน



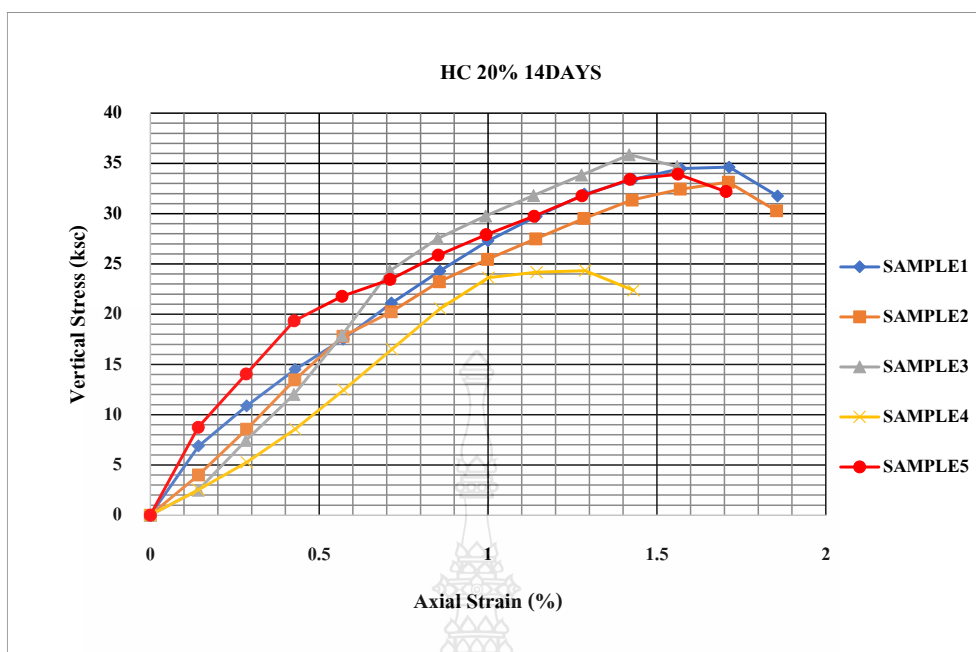
รูปที่ ก.8 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ดินผสม HC 15% ที่อายุบ่ม 28 วัน



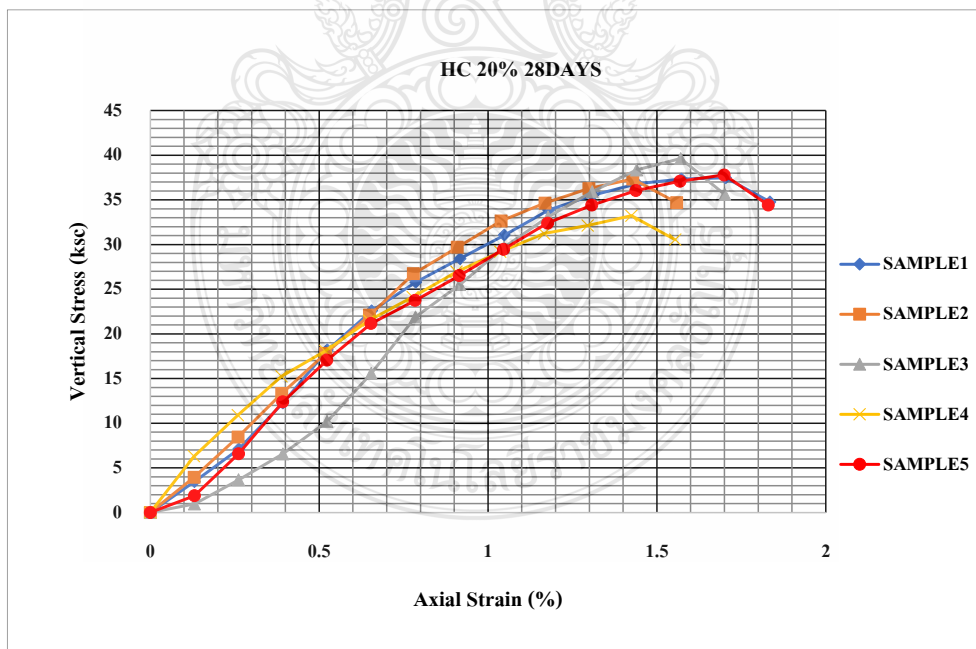
รูปที่ ก.9 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ดินผสม HC 20% ที่อายุบ่ม 3 วัน



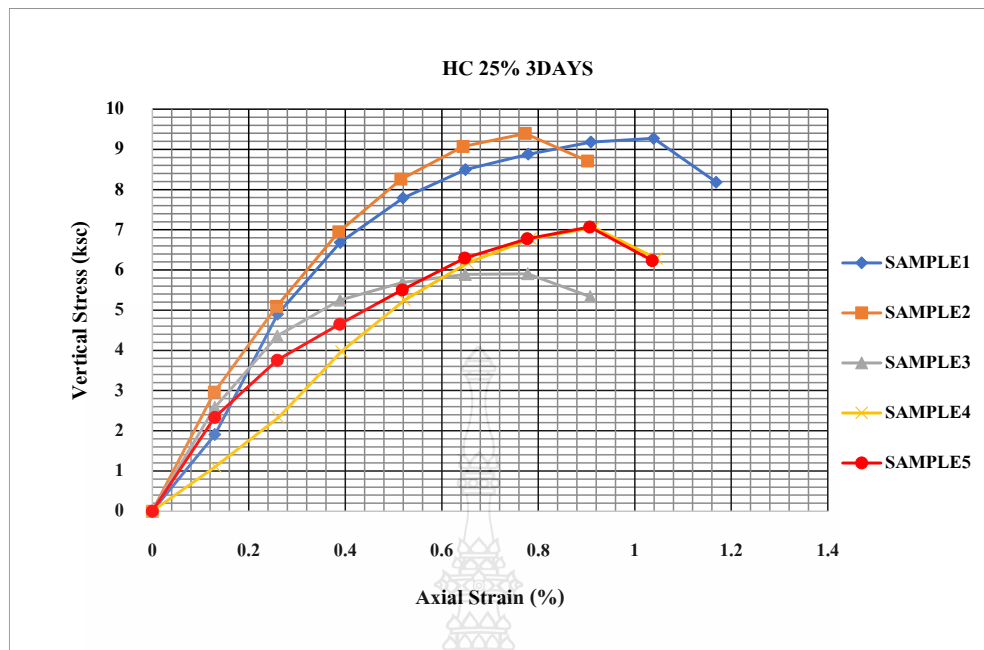
รูปที่ ก.10 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ดินผสม HC 20% ที่อายุบ่ม 7 วัน



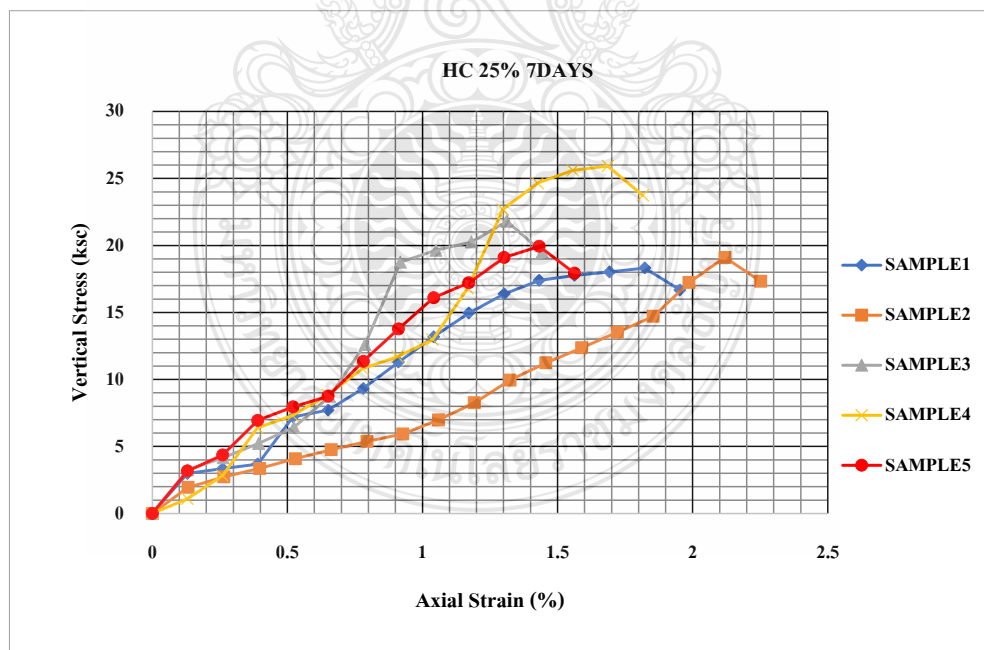
รูปที่ ก.11 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ดินผสม HC 20% ที่อายุบ่ม 14 วัน



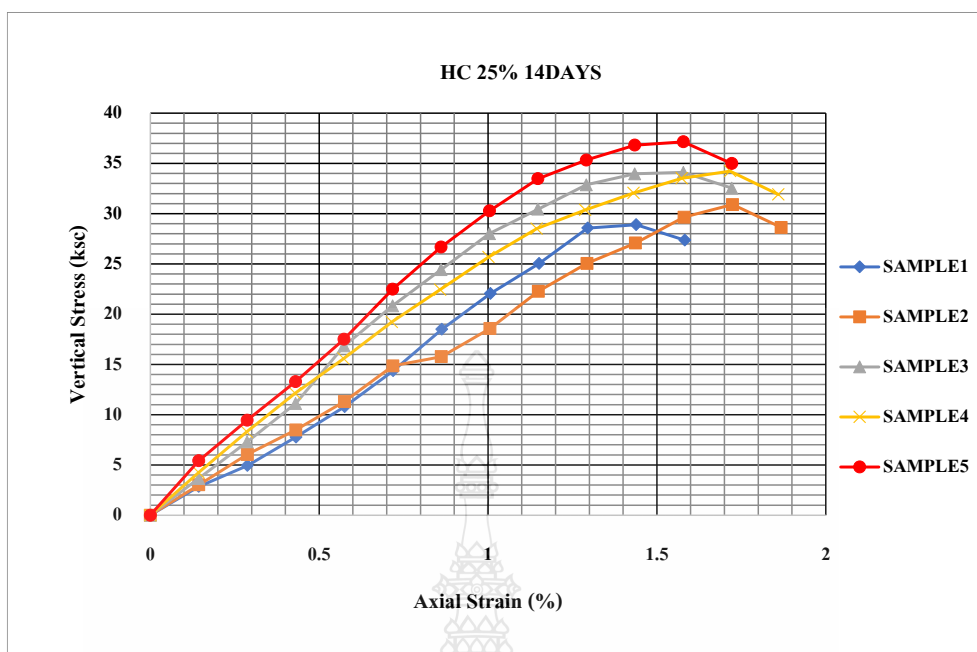
รูปที่ ก.12 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ดินผสม HC 20% ที่อายุบ่ม 28 วัน



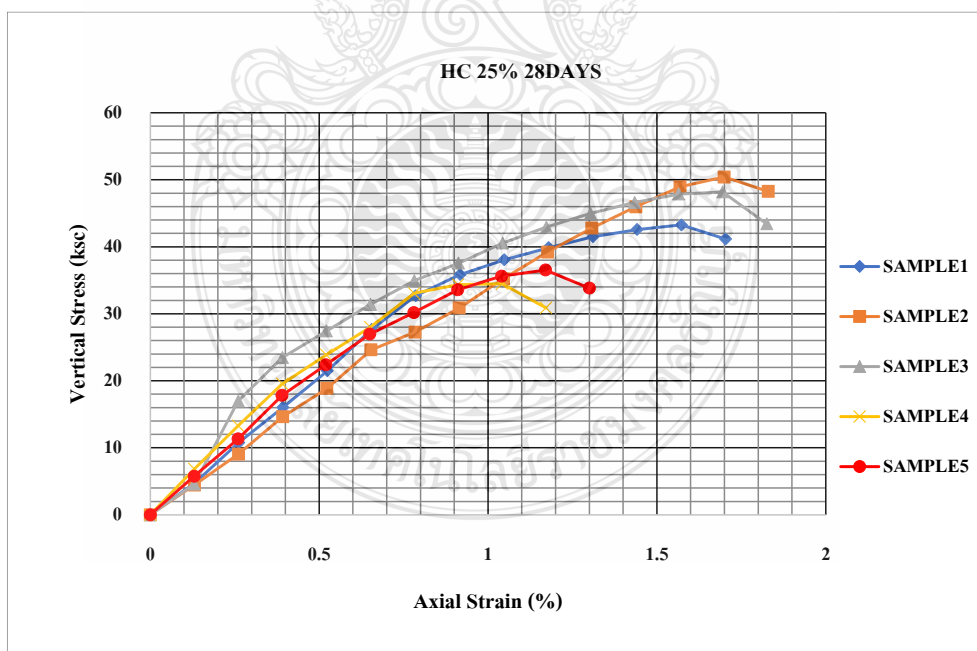
รูปที่ ก.13 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ดินผสม HC 25% ที่อายุบ่ม 3 วัน



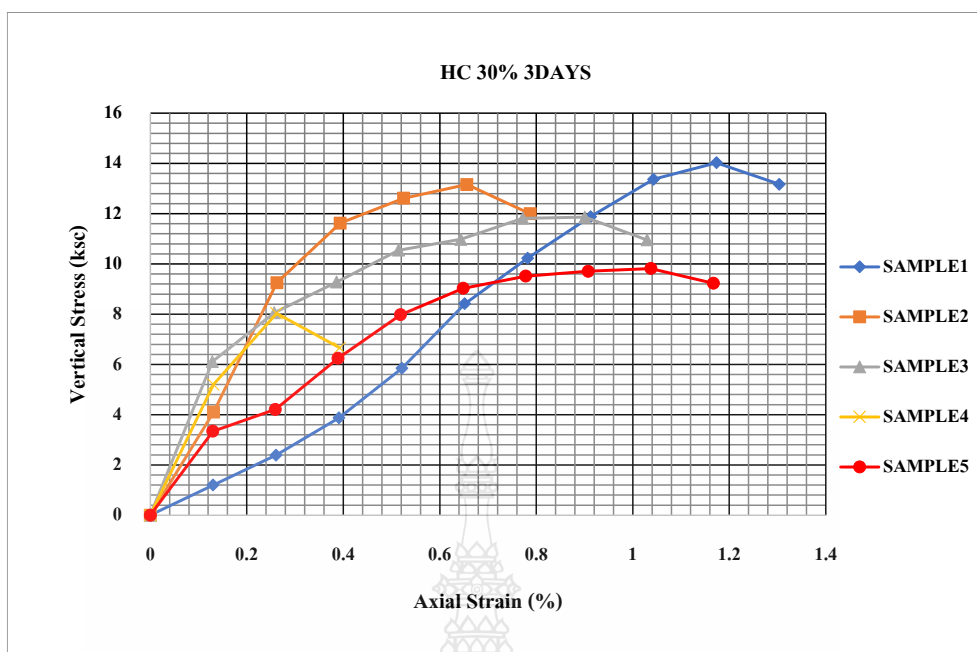
รูปที่ ก.14 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ดินผสม HC 25% ที่อายุบ่ม 7 วัน



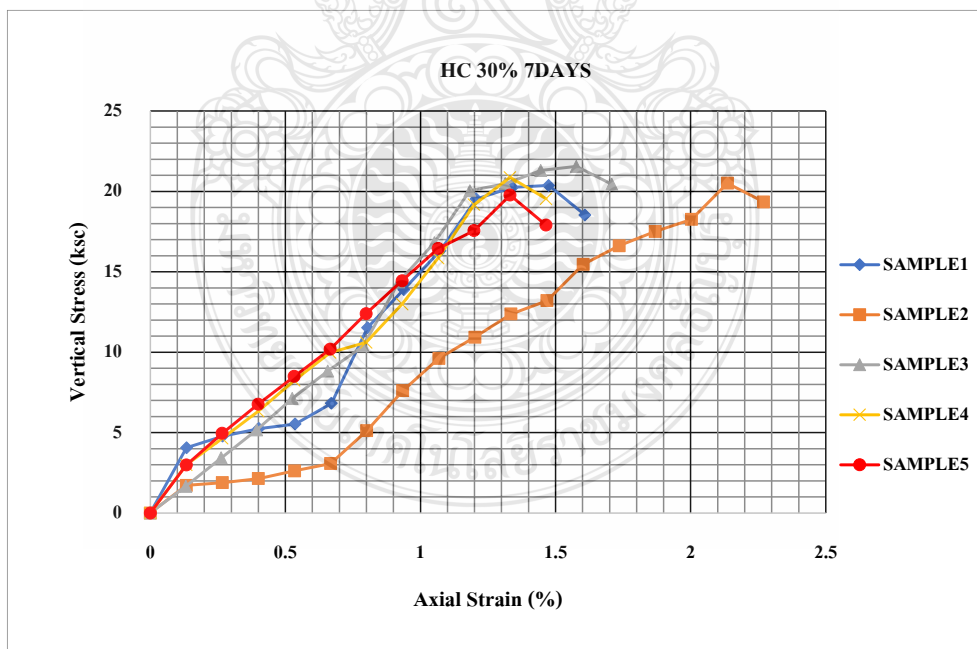
รูปที่ ก.15 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ดินผสม HC 25% ที่อายุบ่ม 14 วัน



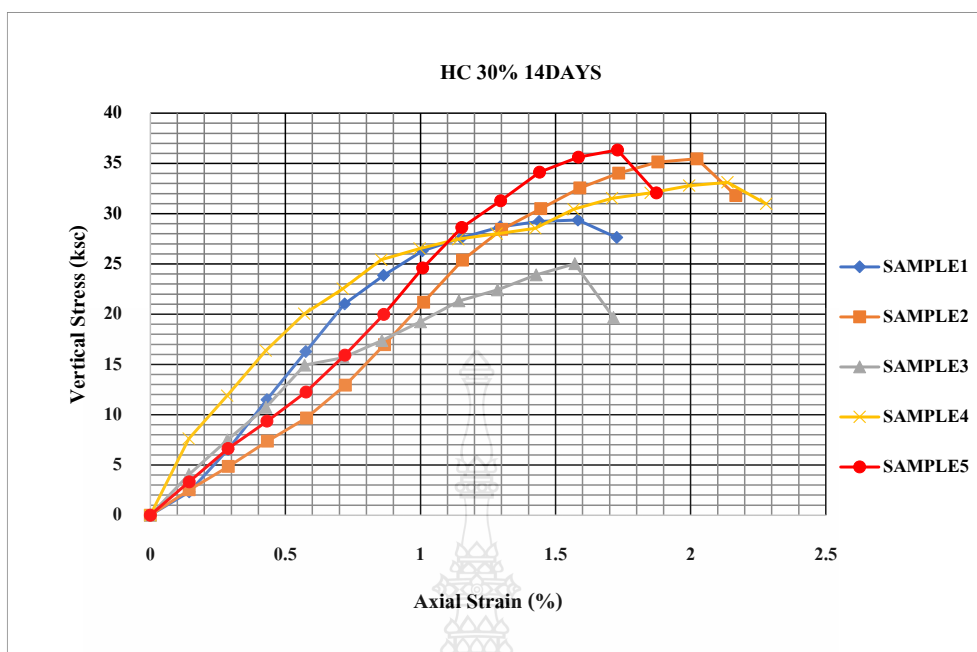
รูปที่ ก.16 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ดินผสม HC 25% ที่อายุบ่ม 28 วัน



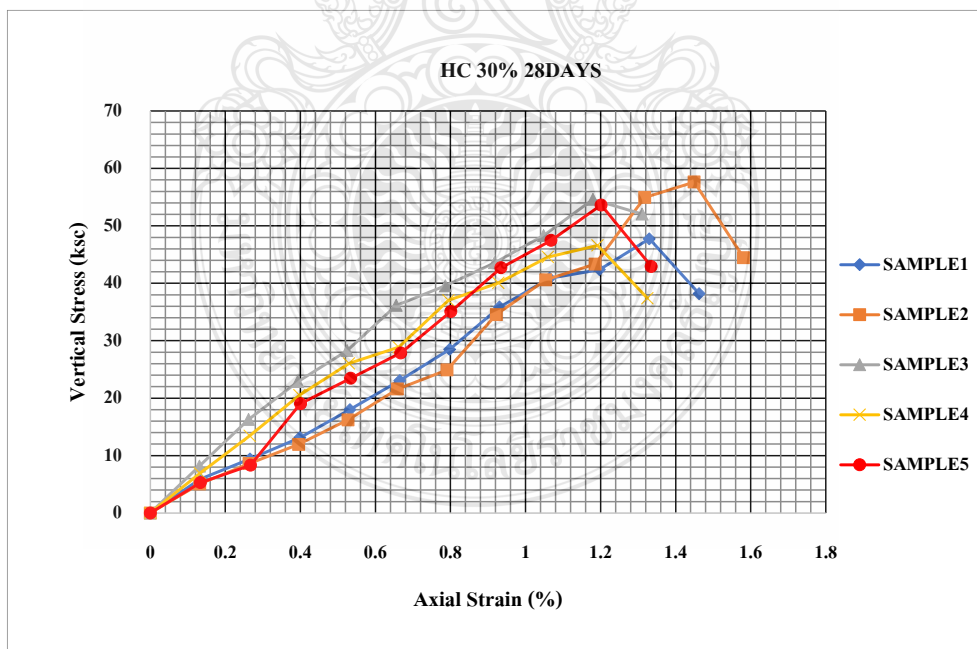
รูปที่ ก.17 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ดินผสม HC 30% ที่อายุบ่ม 3 วัน



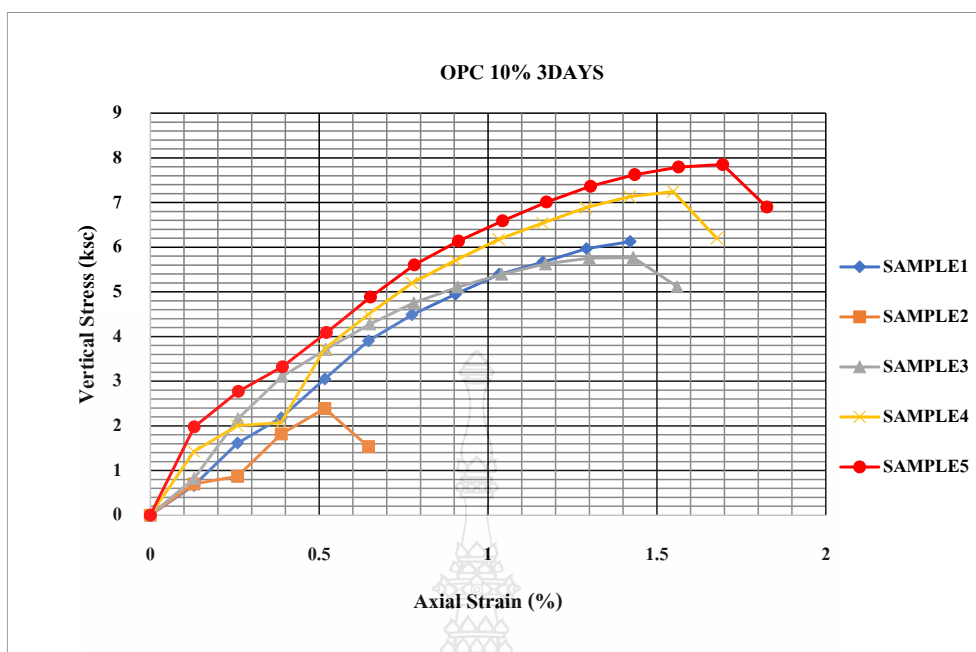
รูปที่ ก.18 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ดินผสม HC 30% ที่อายุบ่ม 7 วัน



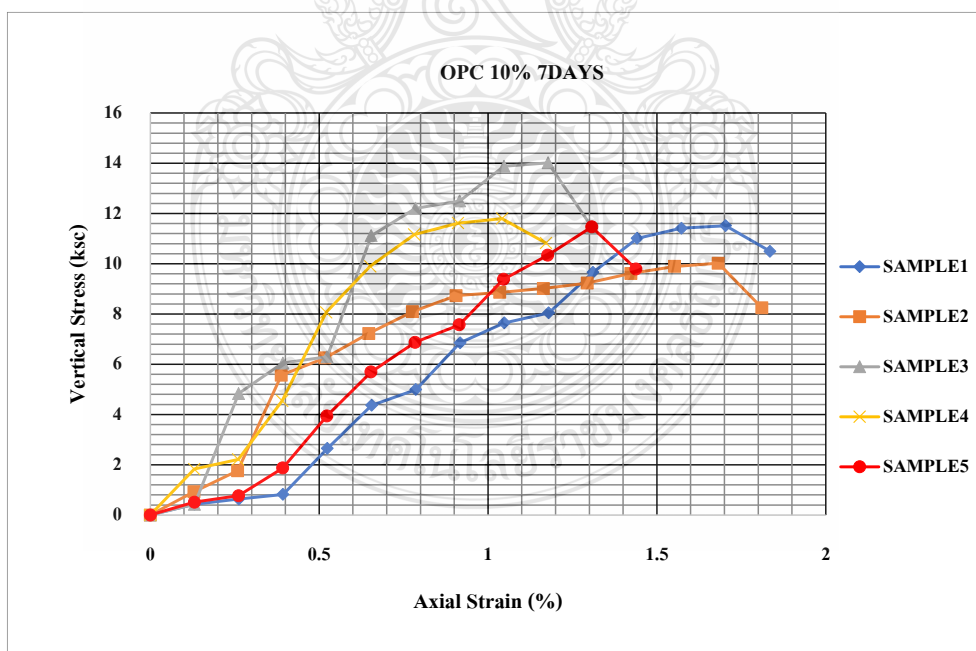
รูปที่ ก.19 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ดินผสม HC 30% ที่อายุบ่ม 14 วัน



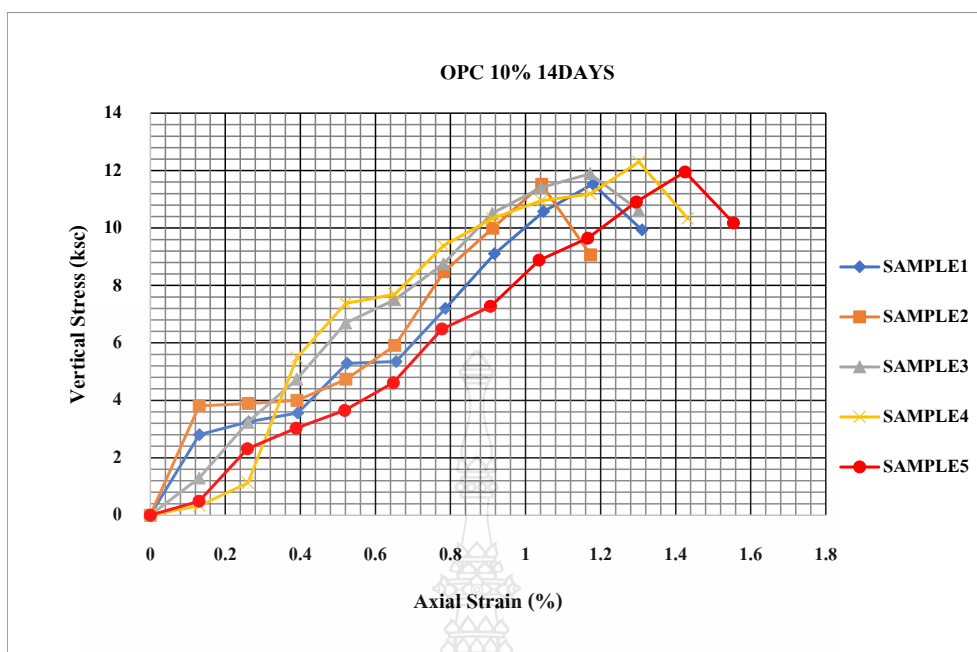
รูปที่ ก.20 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ดินผสม HC 30% ที่อายุบ่ม 28 วัน



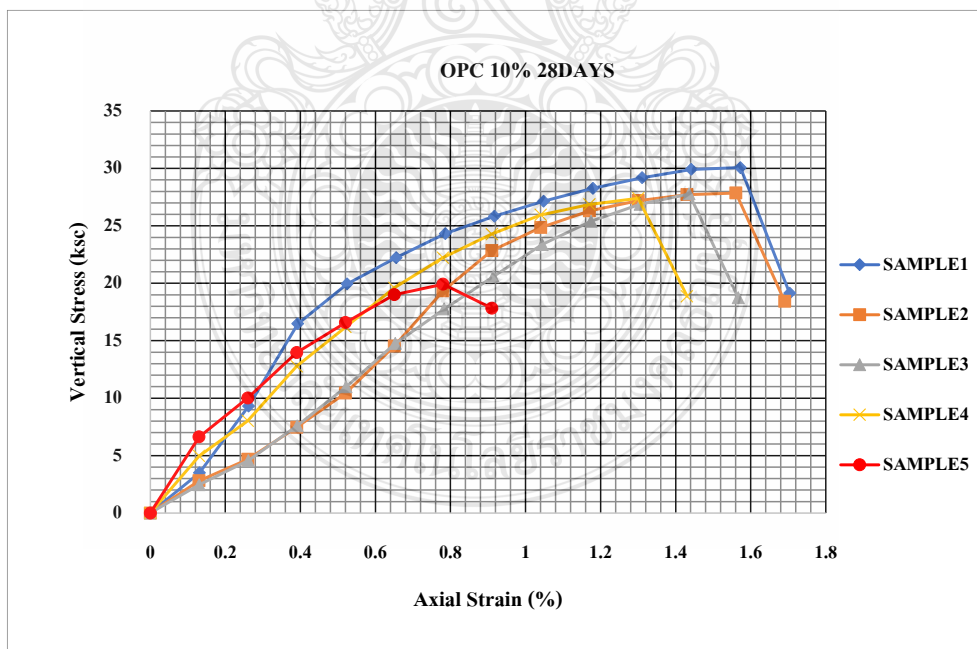
รูปที่ ก.21 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ดินผสม OPC 10% ที่อายุบ่ม 3 วัน



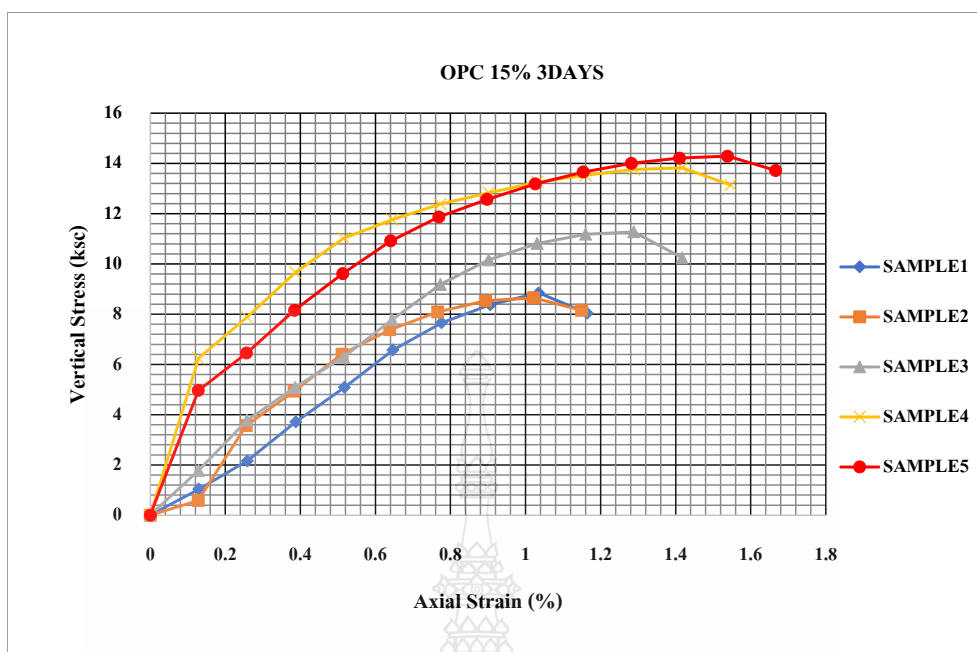
รูปที่ ก.22 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ดินผสม OPC 10% ที่อายุบ่ม 7 วัน



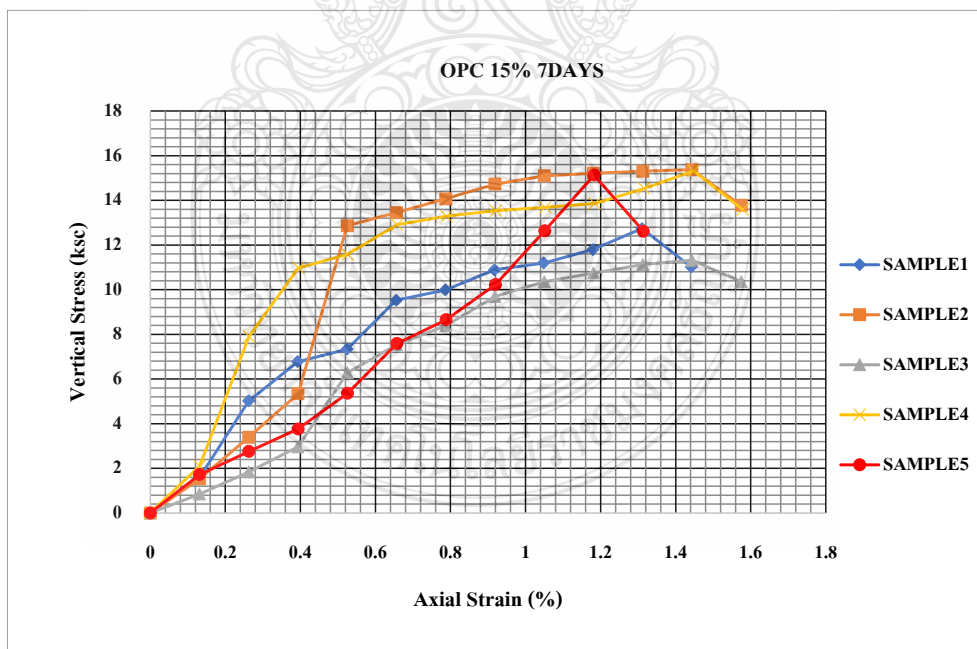
รูปที่ ก.23 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ดินผสม OPC 10% ที่อายุบ่ม 14 วัน



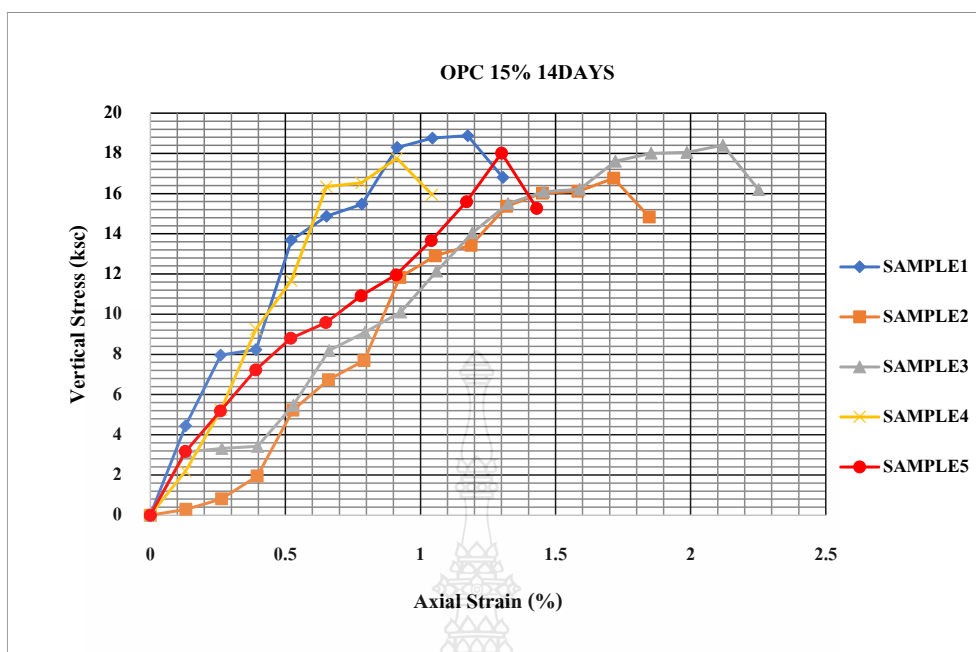
รูปที่ ก.24 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ดินผสม OPC 10% ที่อายุบ่ม 28 วัน



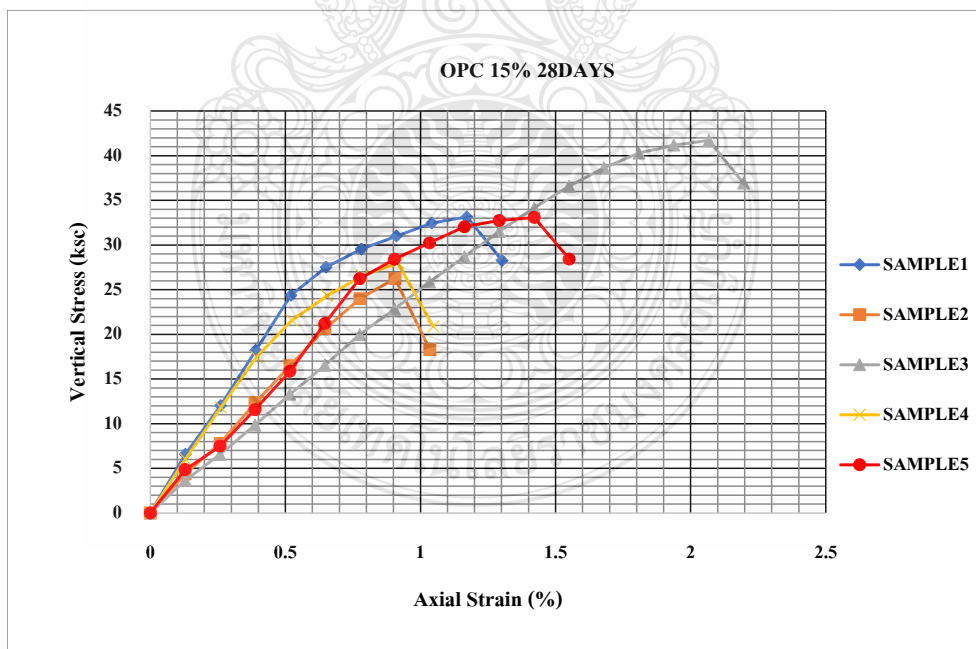
รูปที่ ก.25 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ดินผสม OPC 15% ที่อายุบ่ม 3 วัน



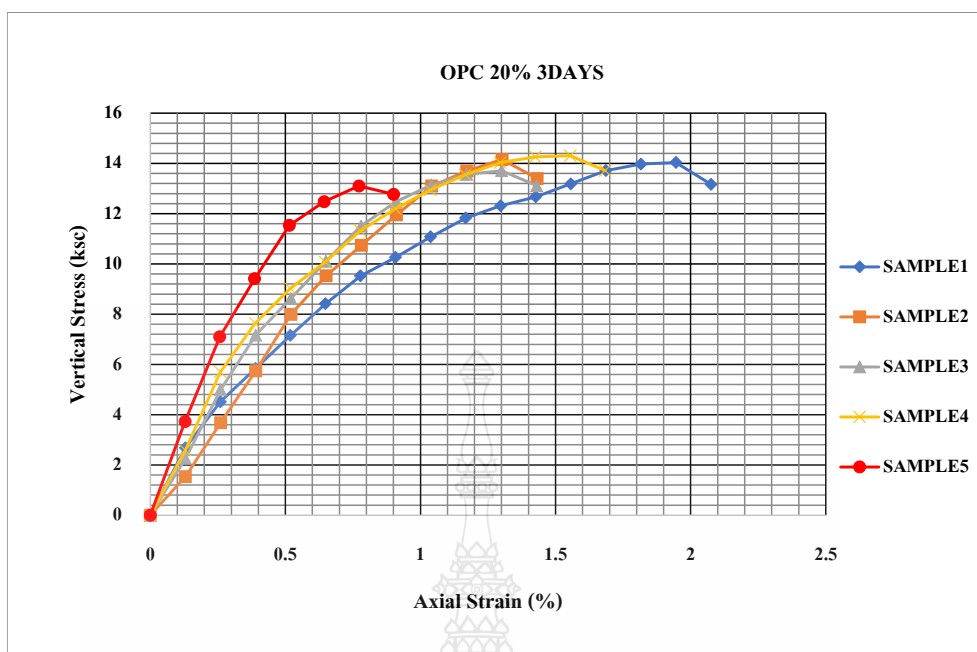
รูปที่ ก.26 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ดินผสม OPC 15% ที่อายุบ่ม 7 วัน



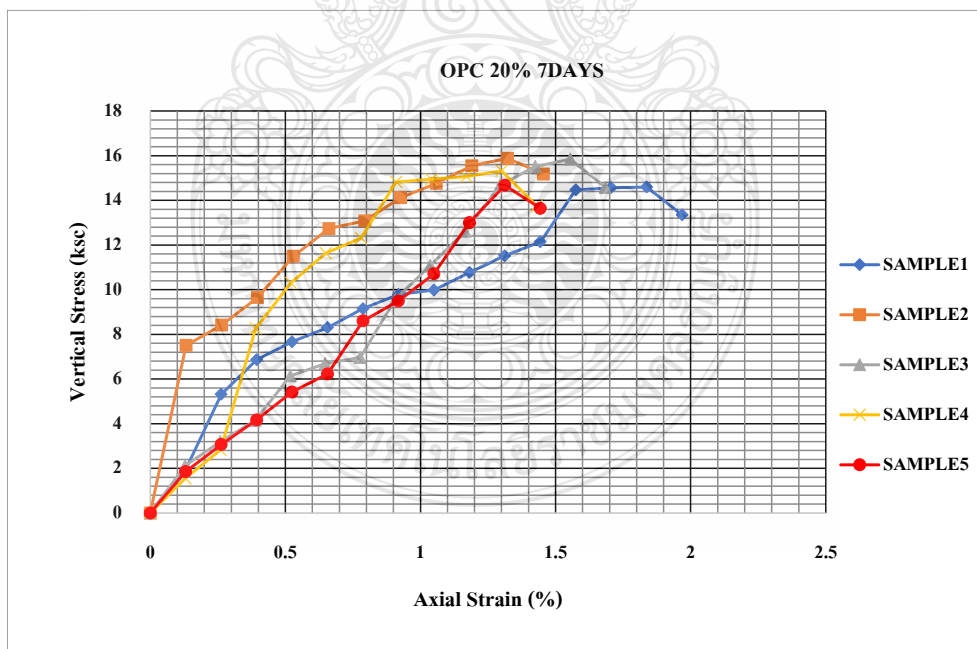
รูปที่ ก.27 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ดินผสม OPC 15% ที่อายุบ่ม 14 วัน



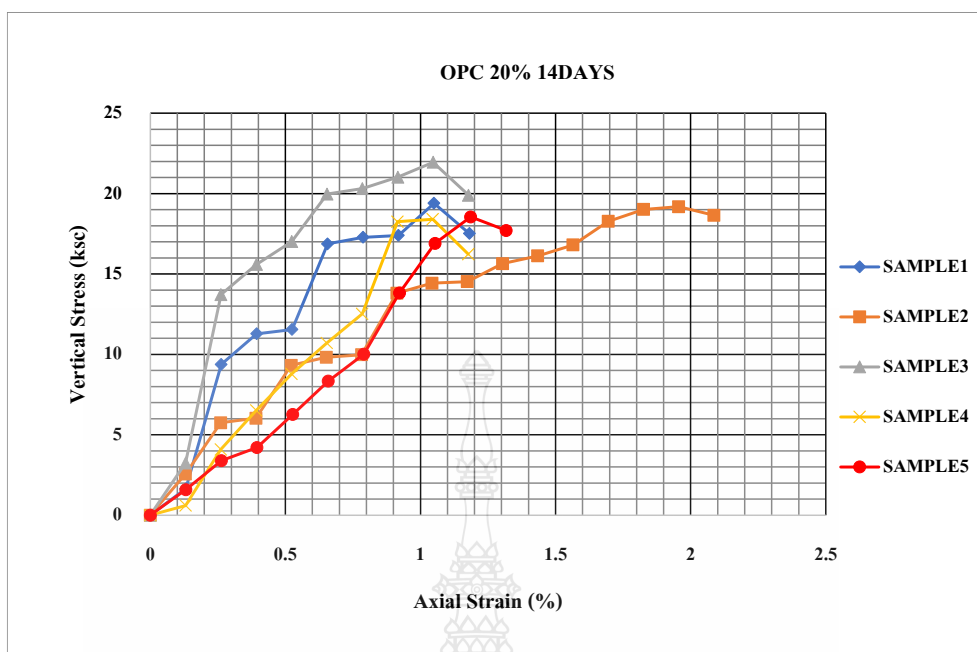
รูปที่ ก.28 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ดินผสม OPC 15% ที่อายุบ่ม 28 วัน



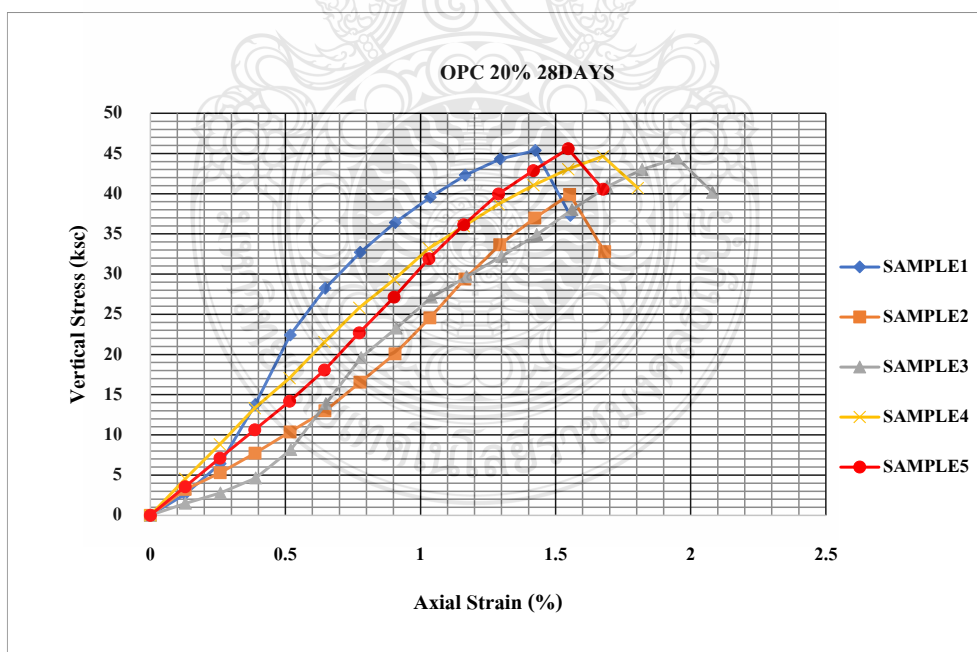
รูปที่ ก.29 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ดินผสม OPC 20% ที่อายุบ่ม 3 วัน



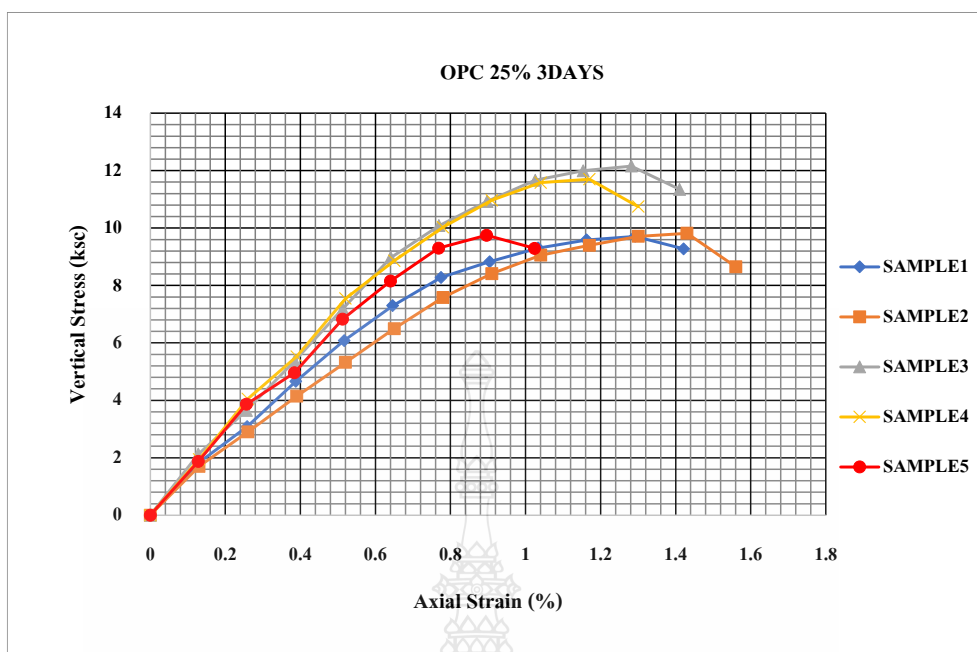
รูปที่ ก.30 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ดินผสม OPC 20% ที่อายุบ่ม 7 วัน



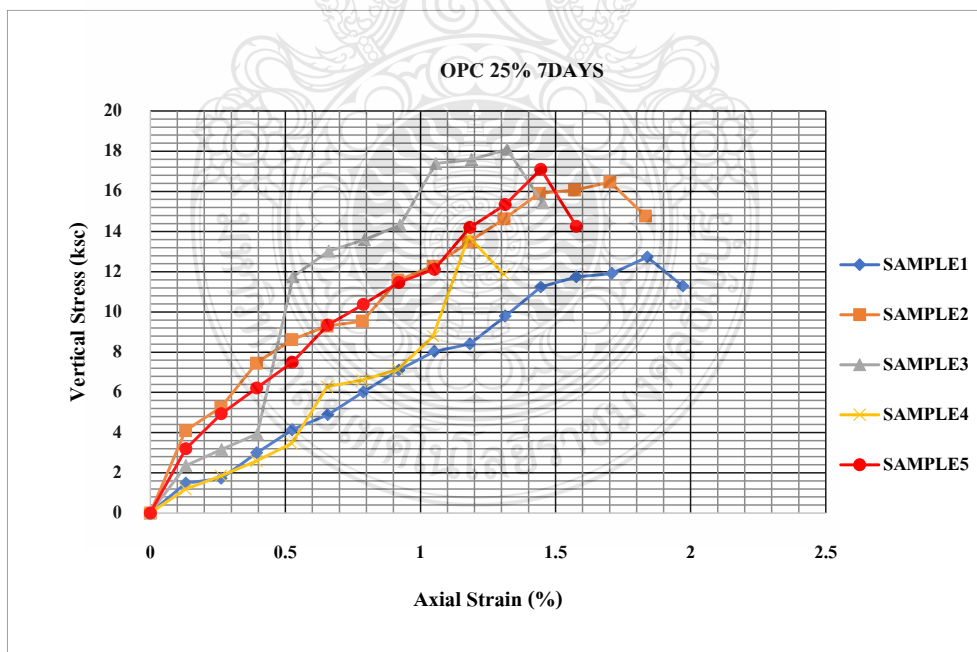
รูปที่ ก.31 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ดินผสม OPC 20% ที่อายุบ่ม 14 วัน



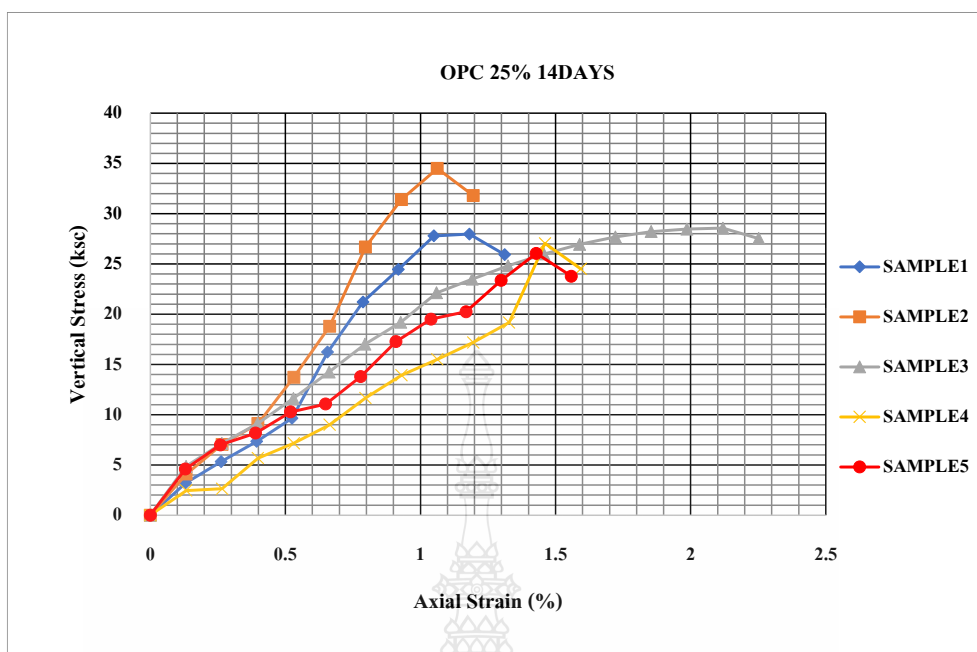
รูปที่ ก.32 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ดินผสม OPC 20% ที่อายุบ่ม 28 วัน



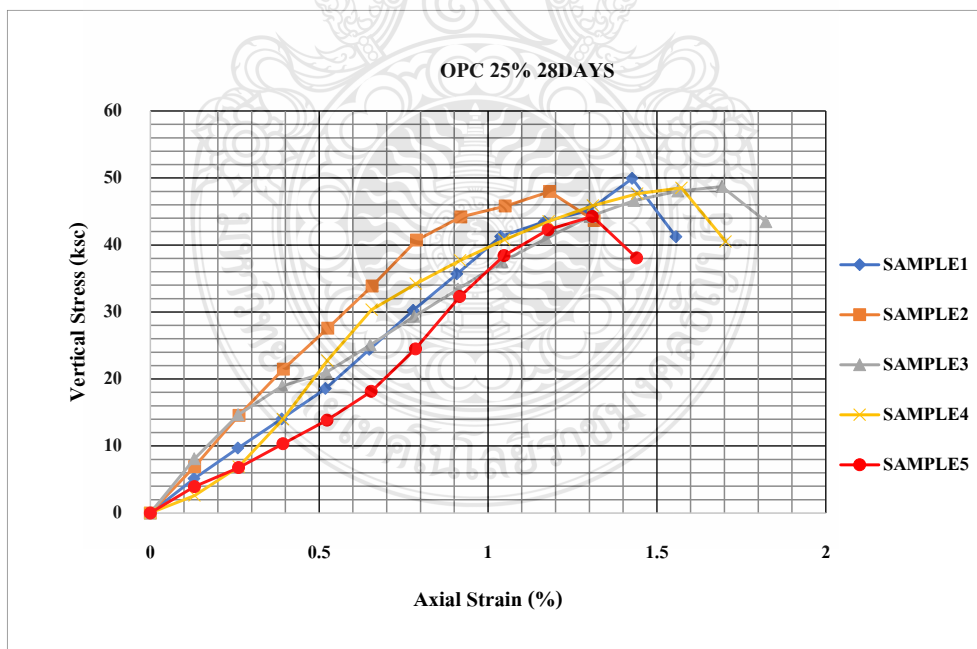
รูปที่ ก.33 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ดินผสม OPC 25% ที่อายุบ่ม 3 วัน



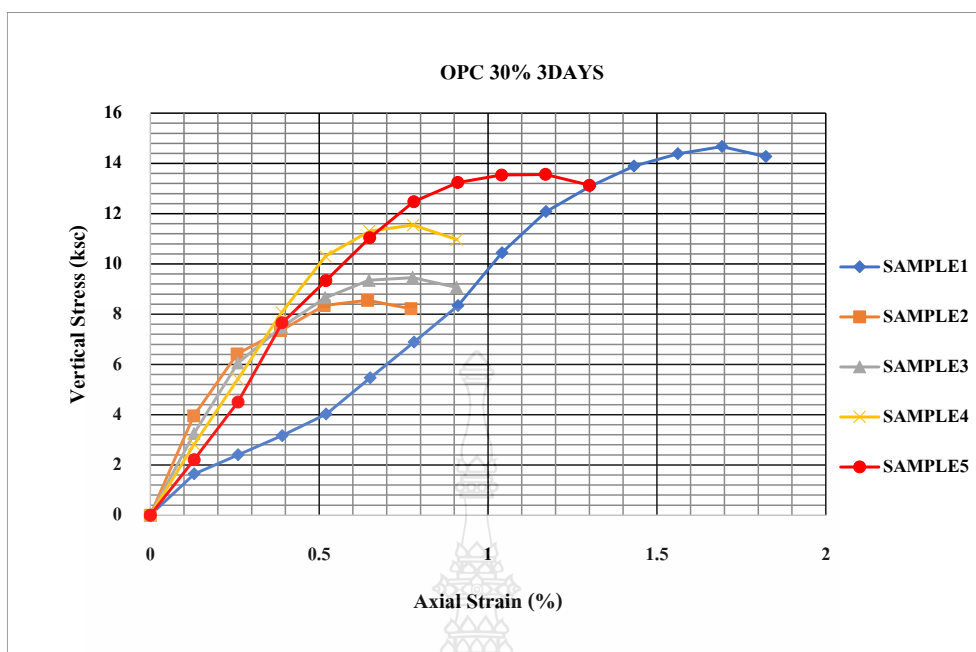
รูปที่ ก.34 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ดินผสม OPC 25% ที่อายุบ่ม 7 วัน



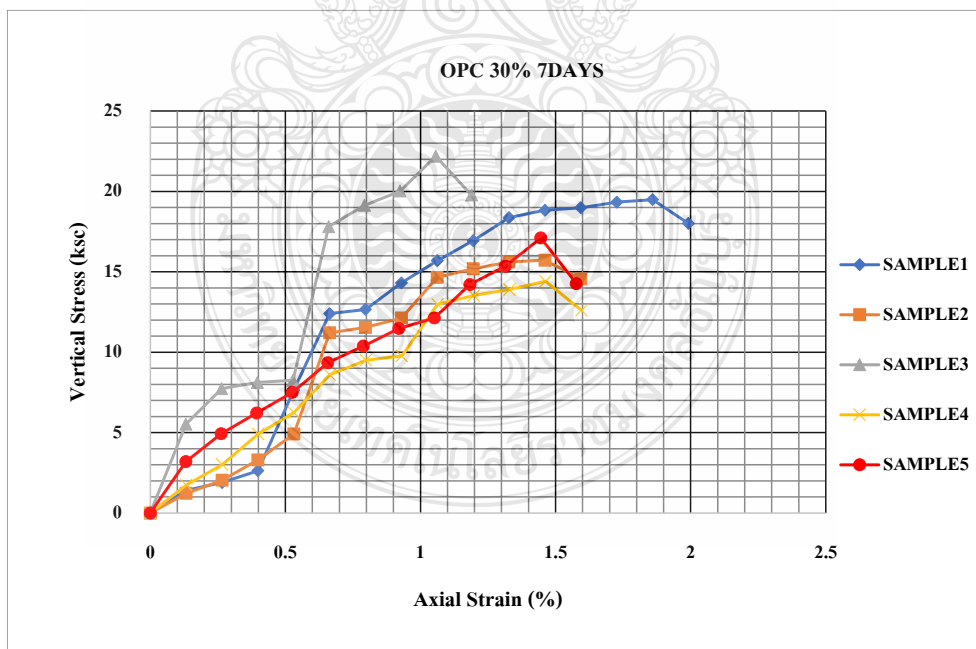
รูปที่ ก.35 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ดินผสม OPC 25% ที่อายุบ่ม 14 วัน



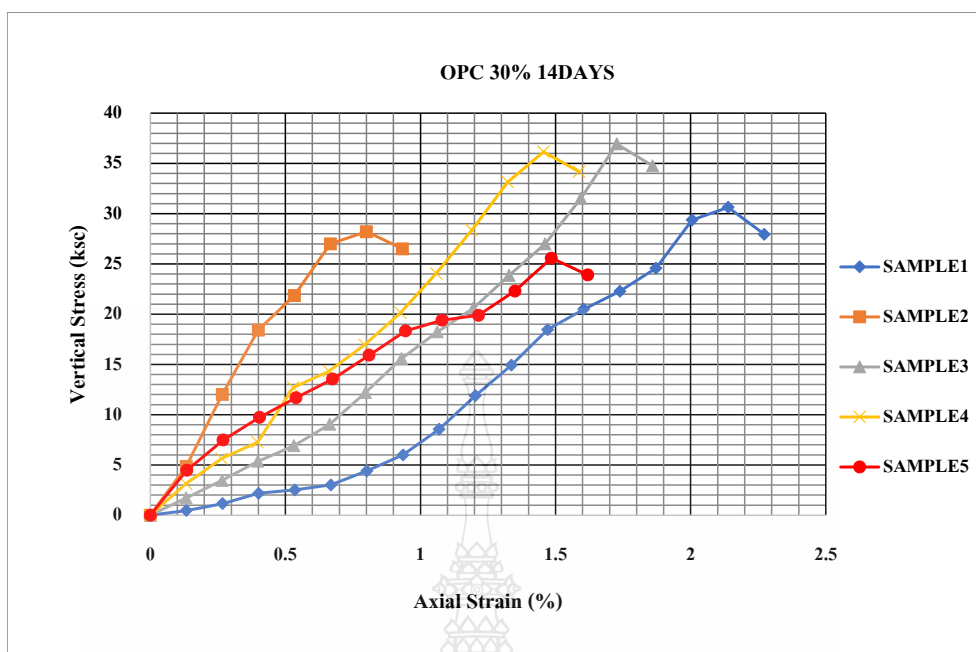
รูปที่ ก.36 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ดินผสม OPC 25% ที่อายุบ่ม 28 วัน



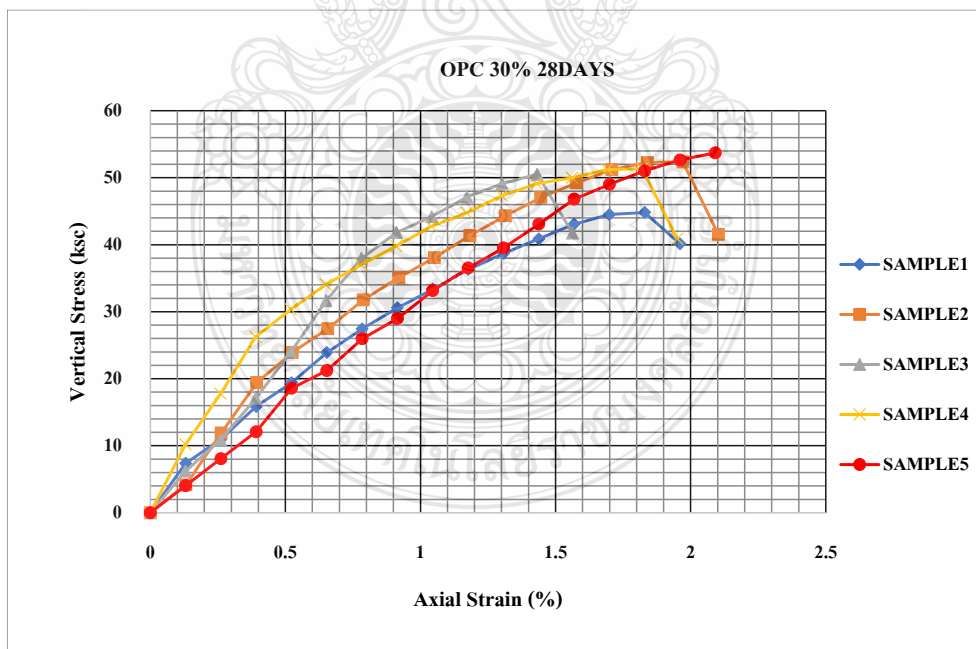
รูปที่ ก.37 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ดินผสม OPC 30% ที่อายุบ่ม 3 วัน



รูปที่ ก.38 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ดินผสม OPC 30% ที่อายุบ่ม 7 วัน



รูปที่ ก.39 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ดินผสม OPC 30% ที่อายุบ่ม 14 วัน



รูปที่ ก.40 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ดินผสม OPC 30% ที่อายุบ่ม 28 วัน

ภาคผนวก ข

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

KASEM BUNDIT Engineering Journal

ISSN 3027-6519 (Print) ISSN 3027-6527 (Online)



คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

ปีที่ 14 ฉบับที่ 3 กันยายน-ธันวาคม 2567
Vol.14 No.3 September-December 2024

วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต
Kasem Bundit Engineering Journal (KBEJ)
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิตจัดทำขึ้นเพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัยและพัฒนา ผลงานวิชาการ ตลอดจนองค์ความรู้ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ของอาจารย์ นักวิชาการอิสระ และวิศวกรทั่วไป และเป็นสื่อกลางระหว่างมหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิตกับสังคมภายนอกในการเผยแพร่ความรู้ต่างๆ ด้านวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อให้เป็นฐานความรู้อันจะนำไปสู่การพัฒนาด้านวิศวกรรมต่อไป โดยมีกำหนดตีพิมพ์ปีละ 3 ฉบับ ออกเป็นราย 4 เดือน (ประจำเดือนมกราคม-เมษายน พฤษภาคม-สิงหาคม และ กันยายน-ธันวาคม)

วัตถุประสงค์

- เพื่อเป็นเอกสารเผยแพร่ผลงานวิจัยของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
- เพื่อเป็นแหล่งเผยแพร่ผลงานวิจัยและพัฒนา และผลงานวิชาการของคณาจารย์ทั้งในและนอกสถาบัน ตลอดจนนักวิชาการอิสระและวิศวกรทั่วไป
- เพื่อส่งเสริมและกระตุ้นให้เกิดการวิจัยทั้งภายในและภายนอกสถาบัน ส่งผลให้มีการต่อยอดงานวิจัยและการพัฒนาองค์ความรู้ทางวิศวกรรม เพื่อให้เกิดความเชื่อมโยงระหว่างวิชาการและวิชาชีพ อันจะเป็นประโยชน์แก่ชุมชนและสังคมโดยรวม
- เพื่อสร้างกลไกสนับสนุนการเผยแพร่รวมถึงระบบการรวบรวมและคัดสรรผลงานวิจัยและงานสร้างสรรค์เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ทั้งในวงวิชาการและวิชาชีพ ซึ่งถือเป็นส่วนหนึ่งของการประกันคุณภาพการศึกษา

บทความที่สามารถตีพิมพ์ลงในวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

บทความที่สามารถตีพิมพ์ลงในวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิตจะเน้นเป็นบทความวิจัย (Research Article) หรืออาจจะเป็นบทความวิชาการ (Academic Article) ได้ เช่น บทความปริทัศน์ (Review Article) บทความทางเทคนิค (Technical Article) บทความเชิงปฏิบัติในวิชาชีพ (Professional Practice) เป็นต้น หรือในบางครั้งจะเป็นบทความรับเชิญ (Invited Article) หรือบทความอื่นๆ (Other Article) ด้วย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับดุลยพินิจของกองบรรณาธิการ โดยทุกบทความควรมีลักษณะดังนี้

- เป็นบทความวิจัยหรือบทความทางวิชาการ ในลักษณะที่จะนำไปสู่ความก้าวหน้าทางวิชาการและวิชาชีพ
- เป็นบทความที่ไม่เคยได้รับการตีพิมพ์มาก่อนทั้งภายในประเทศหรือต่างประเทศ
- เป็นบทความที่ไม่ได้อยู่ในระหว่างการพิจารณาของสื่อสิ่งพิมพ์อื่นๆ
- เป็นบทความที่ไม่ละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่น เนื้อหาในบทความไม่ได้ลอกเลียนหรือคัดลอกมาจากผลงานวิจัยของผู้อื่นหรือจากบทความอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต หรือปราศจากการอ้างอิงที่เหมาะสม
- ผู้เขียนได้แก้ไขบทความตามข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ (Peer Reviewer) หรือกองบรรณาธิการแล้ว
- บทความในลักษณะอื่นๆ นอกเหนือจากรายละเอียดข้างต้นจะได้รับการพิจารณาจากกองบรรณาธิการเป็นกรณีเฉพาะ

การประเมินบทความ

การประเมินบทความที่ดีมีพลังในวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิตมีรายละเอียดดังนี้

- บทความทุกฉบับจะได้รับการอ่านและตรวจสอบโดยผู้ทรงคุณวุฒิที่มีความเชี่ยวชาญเฉพาะในสาขาวิชานั้นๆ จำนวนไม่น้อยกว่า 3 ท่าน ในระบบ Double-blind Review โดยผู้ทรงคุณวุฒิและผู้เขียนบทความจะถูกปิดชื่อระหว่างกระบวนการพิจารณาบทความ
- กองบรรณาธิการจะพิจารณาบทความเบื้องต้นเกี่ยวกับความถูกต้องของรูปแบบบทความ ถ้าไม่ผ่านการพิจารณา จะส่งกลับไปแก้ไข ถ้าผ่านจะเข้าสู่การพิจารณาโดยผู้ทรงคุณวุฒิ เมื่อผลการประเมินผ่านหรือไม่ผ่านหรือมีการแก้ไขจะแจ้งผลให้ผู้เขียนทราบ เมื่อผู้เขียนดำเนินการแก้ไขบทความตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ และ/หรือ กองบรรณาธิการแล้ว จากนั้นจึงจะแจ้งให้ทราบกำหนดการตีพิมพ์บทความนั้นต่อไป
- กองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์ในการตรวจแก้ไขรูปแบบบทความที่ส่งมาตีพิมพ์และอาจจะส่งเรื่องคืนมายังผู้เขียนให้เพิ่มเติมหรือพิมพ์ต้นฉบับใหม่แล้วแต่กรณี
- การยอมรับการตีพิมพ์หรือปฏิเสธการตีพิมพ์บทความเป็นสิทธิ์ของกองบรรณาธิการ และกองบรรณาธิการจะไม่รับผิดชอบในเนื้อหาหรือความถูกต้องของบทความที่ส่งมาตีพิมพ์ทุกเรื่อง ความถูกต้องของเนื้อหา การใช้ภาษาและรูปแบบการเขียนถือเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียน

การส่งบทความ

ผู้เขียนจะต้องจัดเตรียมบทความต้นฉบับที่พิมพ์ตามข้อกำหนดของรูปแบบวารสาร จำนวน 1 ชุด และผู้เขียนบทความกรอกข้อมูลใบนำส่งบทความ พร้อมสแกนใบนำส่งบทความและแนบไฟล์

ต้นฉบับบทความส่งมาที่ E-Mail: engkasemjournal@kbu.ac.th หรือ ผู้เขียนสามารถส่งบทความผ่านระบบ Online Journal System ได้ที่ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/kbej/user/register>
หากมีปัญหาในการส่งบทความผ่านระบบ Online Journal System โปรดติดต่อกองบรรณาธิการ ที่ 02-320-2777 ต่อ 1211

ลิขสิทธิ์

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต ถือเป็นกรรมสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต ห้ามนำข้อความทั้งหมดไปตีพิมพ์ซ้ำ ยกเว้นได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิตแล้ว หากบทความที่ได้รับการตีพิมพ์นั้นเป็นบทความที่ละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นหรือมีความไม่ถูกต้องในเนื้อหาของบทความ ผู้เขียนบทความนั้นต้องเป็นผู้รับผิดชอบ

กำหนดตีพิมพ์

ปีละ 3 ฉบับ ออกเป็นราย 4 เดือน (ประจำเดือนมกราคม-เมษายน พฤษภาคม-สิงหาคม และ กันยายน-ธันวาคม)

จัดพิมพ์โดย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

คณะที่ปรึกษา:

ดร.วัลลภ สุวรรณดี	อธิการบดี มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ดร.สุวัฒน์ สุวรรณดี	รองอธิการบดีฝ่ายบริหาร มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ดร.เสนีย์ สุวรรณดี	รองอธิการบดีฝ่ายวางแผนและพัฒนา มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ดร.อริศ สุวรรณดี	รองอธิการบดีฝ่ายทรัพยากรบุคคล มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.ประสาร มาลากุล ณ อยุธยา	รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ผศ.อิงอร ตันพันธ์	ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.สุนิติ สุภาพ	หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

บรรณาธิการ:

รศ.ดร.ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
------------------------------	--

รองบรรณาธิการ:

ผศ.อนุชิต เจริญ	รองคณบดีฝ่ายวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
-----------------	---

กองบรรณาธิการ:

ศ.ดร.โกสินทร์ จ่านงไทย	ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศ.ดร.โจเซฟ เคดารี	สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีและ นวัตกรรม มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี
ศ.ดร.ต่อกุล กาญจนาลัย	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศ.ดร.ปราโมทย์ เดชะอำไพ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Prof. Dr.Belkacem Zeghmati	Laboratoire de Mathematiques et Physique des Systeme- Groupe de Mecanique Energetique, Universite de Perpignan, France
รศ.ดร.จรัญช เสี่ยมศักดิ์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.บุญเลิศ สือเฉย	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
รศ.ดร.พิภพ สุนทรสมัย	ที่ปรึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.มนตรี คำเงิน	ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอม เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์	ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ

รศ.ดร.ยุทธชัย บรรเทงจิตร	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.รัตติกร วรากุลศิริพันธุ์	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
รศ.ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร	สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.เวทิน ปิยรัตน์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องค์กรักษ์
รศ.ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ	ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.อิทธิพงศ์ ชัยสาภัย	บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
รศ.คันสนีย์ สุภาภา	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อ.ดร.ชาญยุทธ กฤตสุนันท์กุล	ภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร
อ.ดร.ชาญวิทย์ อุดมศักดิ์กุล	สำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ
อ.ดร.วสิน มหัตนรินทร์กุล	วิศวกร ที่ปรึกษาโรงงาน อาจารย์พิเศษ ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผู้ช่วยกองบรรณาธิการ:

รศ.วิญญู แสงสินกลกิจ	อ.ดร.ศักดิ์ชัย รักการ
อ.ธีรยุทธ จันทร์แจ่ม	ผศ.ดร.หนึ่งฤทัย ทิมย้ายงาม
ผศ.วรากร เกิดทรัพย์	อ.อุบลรัตน์ วาริชวัฒนะ

ฝ่ายเลขานุการ:

คุณยุพิน ไชยโคตร	คุณรุ่งนภาพร ภูธรราช
------------------	----------------------

บทความวิจัย (Research Article) (ต่อ)

- การศึกษาคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตเมื่อใช้วัสดุชั้นผิวทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเส้นลวดในยางรถยนต์
A STUDY ON PROPERTIES OF ASPHALT CONCRETE USING RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT IMPROVED WITH TIRE-DERIVED STEEL **85**
 ชีรเดช เอียดยอด ชลัท ทิพาการเกียรติ และ ภาวัด ไชยชาวนวาทิก
- การประยุกต์ใช้หลักการซิกมา ซิกม่าเพื่อลดสินค้าที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดในกระบวนการบรรจุเครื่องดื่ม
AN APPLICATION OF SIX SIGMA PRINCIPLE FOR REDUCTION NON-CONFORMING PRODUCT IN BEVERAGE FILLING PROCESS **114**
 เกวลิน สำเภาทอง กวินธร สัยเจริญ และ สิทธิชัย แซ่เหล่ม
- การประมาณประสิทธิภาพของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกในการพัฒนากำลังและความแข็งแรงของดินทรายสำหรับการปรับปรุงคุณภาพดิน
EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF HYDRAULIC CEMENT IN ENHANCING STRENGTH AND STIFFNESS OF SANDY SOIL FOR GROUND IMPROVEMENT **134**
 ปุณณวิช รุ่งเรือง วรพจน์ เพชรเกตุ ศุภสิทธิ์ พงศ์วิเศษสถิตย์ สุธี ปิยะพิพัฒน์ และ อติเทพ ศรีคงศรี
- สมบัติการทนต่อแรงกระแทกและสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนผสมเส้นใยธรรมชาติด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนเหวี่ยง
IMPACT STRENGTH PROPERTIES AND MORPHOLOGY OF NATURAL FIBER/POLYETHYLENE COMPOSITES WITH ROTATIONAL MOLDING PROCESS **153**
 ศิรประภา ตีประดิษฐ์ ณัฐรุพล ศรีช่วงโชติ จักรภพ คงสมแสง วรายุส ทรัพย์พล และ สุพัฒน์ สารอรรถ

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต:

ศ.ดร.กัณวีร์ กนิษฐ์พงศ์	สาขาวิศวกรรมขนส่ง สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย
ศ.ดร.โกสินทร์ จ่านองไทย	ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศ.ดร.แคทลียา ปัทมพรหม	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศ.ดร.โจเซฟ เคดารี	สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี
ศ.ดร.ต่อกุล กาญจนาลัย	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศ.ดร.ปราโมทย์ เดชะอำไพ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศ.ดร.พานิช วุฒิพุกภักดิ์	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
ศ.ดร.วัฒนวงศ์ รัตนวราห	สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ศ.ดร.สุวัฒนา จิตตลดากร	ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
Prof. Dr. Belkacem Zeghamati	Laboratoire de Mathematiques et Physique des Systeme- Groupe de Mecanique Energetique, Universite de Perpignan, France
รศ.ดร.กมลวัลย์ ลือประเสริฐ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
รศ.ดร.กรองแก้ว เล่าหลิดานนท์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ	ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.กัณวีร์ พลุปราชญ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์
รศ.ดร.กิตติพงศ์ อัครสกุล	ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.จิรนุช เสี่ยงมศักดิ์	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.ชูสิทธิ์ ประดับเพ็ชร์	สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
รศ.ดร.ชัยณรงค์ อธิสกุล	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
รศ.ดร.ณกร อินทร์พยุ่ง	คณะโลจิสติกส์ มหาวิทยาลัยบูรพา

รศ.ดร.ธนา คุปต์เชี๋ยร	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.ดนุพล ตันนโยภาส	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องแม่เหล็กและวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ดร.ทวีพล ชื้อสัตย์	ภาควิชาวิศวกรรมกรรมการวัดและควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.เทอดศักดิ์ รองวิริยะพานิช	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.ธนู ฉุยฉาย	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.ธีรศิลป์ ทุมวิภาต	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือวัดและอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.นคร ภู่วโรคม	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
รศ.ดร.นิตย์ เพ็ชรรักษ์	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
รศ.ดร.นิตมา อัจฉริยะโพธา	ศูนย์บริการทางการศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี วิทยาเขตราชบุรี
รศ.ดร.เนตรนภิส ตันเต็มทรัพย์	สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รศ.ดร.บวรโชค ผู้พัฒน์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.บุญเลิศ สื้อเนย	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัดชู	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ประยูร สุรินทร์	สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
รศ.ดร.ปราโมทย์ ศรีน้อย	สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.ปรีดา ไชยมหาวัน	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพะเยา
รศ.ดร.พนิต ภูจินดา	ภาควิชาการวางแผนภาคและเมือง คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.พรฤดี เนติโสภาคกุล	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.พานิช วุฒิพฤษ	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.พาสีทธิ์ หล่อธีรพงศ์	บัณฑิตวิทยาลัยการจัดการและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.พิภพ สุนทรสมัย	ที่ปรึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

รศ.ดร.พิศิษฐ์ โภคารตันกุล	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.ไพโรจน์ สิงหนัดกิจ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.พุศศักดิ์ ชิวสุวิทย์	ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ภัทรমন จงประดิษฐ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รศ.ดร.ภาวิณี เอี่ยมตระกูล	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ดร.มนตรี คำเงิน	ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์	ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.มานิช สรรพกิจพิพาการ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.ยุทธชัย บรรเทึงจิตร	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.รัตติกร วรากุลศิริพันธุ์	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
รศ.ดร.ระพี กาญจนะ	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.วรรณ ข้างสว่าง	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
รศ.ดร.วรรณ กรัสระเดช	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.วรากร ศรีเชวงทรัพย์	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และปัญญาประดิษฐ์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
รศ.ดร.วัชร เพียรสุภาพ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร	สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.เวคิน ปิยรัตน์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์
รศ.ดร.สถาพร โอภาสานนท์	สาขาวิชาบริหารธุรกิจระหว่างประเทศ ไลอัสติคส์และการขนส่ง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

รศ.ดร.สมใจ จันทร์อุดม	สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.สมศักดิ์ มีตะถา	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ	ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.สโรช บุญศิริพันธ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.สินชัย ชินวรรัตน์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.สิริพร โรจนนันต์	สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.เสรี เศวตเศรนี	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.สุทัศน์ สีสาทวิวัฒน์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.สุนิติ สุภาพ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รศ.ดร.สุรพล บุญลือ	ภาควิชาเทคโนโลยีและสื่อสารการศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.อดิศักดิ์ กาญจนหฤทัย	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยรังสิต
รศ.ดร.อรจักร จิตต์โสภาคย์	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.อิทธิพงศ์ ชัยสายันท์	บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
รศ.ดร.อำพล การุณสุนทวงษ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.เรวัฒน์ เหล่าไพบูลย์	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รศ.วัชรินทร์ วิทยกุล	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
รศ.วิญญู แสงสินกสิกิจ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ศันสนีย์ สุภาภา	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
รศ.เอกชัย วิมลมาลา	ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รศ.เอนก ศิริพานิชกร	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.กรกช ทวีสิน	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.ดร.กฤษ สุจริตตั้งธรรม	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
ผศ.ดร.กัมพล พรหมจระประวัตติ	สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.ดร.กิตติ สถาพรประสาธน์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผศ.ดร.กิตติศักดิ์ วิธินันทกิจ	สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตบางพระ
ผศ.ดร.กฤษณาทิ ทองศรี	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.เชมพัฒน์ ต้นตี่วัฒนกุล	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.จักร จันทลักขณา	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.จารุวรรณ เกษมทรัพย์	สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ผศ.ดร.จิราพรรณ สุนทรโชติ	ภาควิชาคณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.จิราวรรณ อุ่นเมตตาอารี	สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.เจษฎา ชัยนิยม	ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.นัทร สุจินดา	ธุรกิจส่วนตัว
ผศ.ดร.ชลัท ทิพาการเกียรติ	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผศ.ดร.ชัยรัตน์ ชีระวัฒนสุข	ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.ชัยวัฒน์ นุ่มทอง	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.ชูชัย สุจิวิกุล	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ผศ.ดร.ณพล ศรีศักดิ์	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพะเยา
ผศ.ดร.ณัฏฐา เจียรไนวชิระ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.ณัฐ อนุหารทรัพย์	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
ผศ.ดร.ณัฐพงศ์ พันธุ์น้อย	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.ณัฐพงศ์ มกระธัช	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ดนัย เผ่าฤทธิรักษ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ดวงพร กาศาสบี	สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม
ผศ.ดร.ดาวุด ทองทา	ภาควิชาคณิตศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ดิกะ บุญนาค	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
ผศ.ดร.ตรี วาทกิจ	สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะเกษตรและเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยนครพนม
ผศ.ดร.ทวีศักดิ์ ตะกระโทก	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผศ.ดร.นที ศรีสวัสดิ์	ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.นิพนธ์ วรรณโสภาคย์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.ปรรัตน์ ศุภมิตรโยธิน	สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.ประภาพรณ เกษราพงศ์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.ปริญญ์ บุญเกษม	สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผศ.ดร.พงศกร บำรุงไทย	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.พงษ์สิทธิ์ ประกฤษศรี	ภาควิทยาศาสตร์พื้นฐานและพลศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.พิพัฒน์พงศ์ วัฒนวันยู	วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต
ผศ.ดร.พิมพ์เพชร สระทองอุ่น	สาขาวิชาวิศวกรรมยานยนต์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

ผศ.ดร.มนทล นาวงษ์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.มนูญ มาศนิยม	ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผศ.ดร.รัฐวุฒิ รุ่งแทนคุณ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสยาม
ผศ.ดร.วรัญญู วงษ์เสรี	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.วัชรินทร์ ดงบัง	สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงานและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง
ผศ.ดร.วิชัย รุ่งเรืองอนันต์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.วินัย ไจกล้ำ	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.วิรัตน์ จอมขวา	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.ศิรตล ศิริขร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
ผศ.ดร.สนิหะ วงษา	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สมบุญ เจริญวิไลศิริ	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สมโพธิ อยู่ไว	สาขาวิชาวิศวกรรมเทคนิคธรณี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สมศักดิ์ มั่นคร	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
ผศ.ดร.สิตางค์ พิลัยหล้า	ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.สิทธิพงษ์ เพิ่มพิทักษ์	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผศ.ดร.สิริชัย จีรวงศ์สุรณ	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผศ.ดร.สิรางค์ กลั่นคำสอน	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.สุธิดา ทวีปักษ์พันธ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ผศ.ดร.สมล แสงเฮง พิสิษฐ์สังฆการ	ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการเผาไหม้และพลังงานทางเลือก ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.อรกมล วงษ์ภักดิ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผศ.กัมปนาท ไชยเพชร	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและเมคคาทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยภาพสินธุ์
ผศ.กานติส สุดสาคร	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.จิรเมธา สังข์เกษม	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ผศ.นราธิป แสงซ้าย	ศูนย์แห่งความเป็นเลิศเฉพาะทางด้านการวิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องเรือน วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.พรสิริ ขาดีปรีชา	คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
ผศ.วรรณะ ประภาภรณ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.วรากร เกิดทรัพย์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ผศ.สรวรรัตน์ วงษ์ศรีษะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผศ.สาธิต รุ่งฤดีสมบัติกิจ	สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ผศ.สุชาติ เหลืองประเสริฐ	ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.อุษณีย์ ระหา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.อนุชิต เจริญ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.กฤษณ์ อภิญาวิศิษฐ์	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อ.ดร.คมพันธ์ ชมสมุทร	สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อ.ดร.จักรภาพ วงศ์วิวัฒน์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
อ.ดร.ฉัตรเพชร ยศพล	สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

อ.ดร.ชัชพันธ์ ขำญาติ	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
อ.ดร.ชัยรัตน์ ตั้งดวงดี	ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
อ.ดร.ชาติ ฤทธิหิรัญ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อ.ดร.ชาญยุทธ กฤตสุนันท์กุล	ภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร
อ.ดร.ชาญวิทย์ อุดมศักดิ์กุล	สำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ
อ.ดร.ชานินทร์ ศรีสุวรรณภา	ภาควิชาสถิติประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อ.ดร.ณัฐภรณ์ เจริญธรรม	สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
อ.ดร.ณัฐวุฒิ ธนศรีสถิต	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อ.ดร.ดุษฎี สติระเศรษฐี	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนเรศวร
อ.ดร.ตันติกร พิชญพิบูล	คณะกรรมการโลจิสติกส์และการคมนาคมขนส่ง สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
อ.ดร.บุญเลิศ วงศ์เจริญแสงศิริ	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
อ.ดร.ปริญญา บุญมาเลิศ	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อ.ดร.ประกาศ ฝ่องสนาม	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
อ.ดร.ปรารภนา อินตะวิน	สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อ.ดร.พงศกร พรหมสวัสดิ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
อ.ดร.พิชญุตม์ จรัสบำรุงโรจน์	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อ.ดร.ภักดิ์วัฒน์ แสนเจริญ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
อ.ดร.ภาสินี ศิริประภา	คณะศิลปกรรมและสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อ.ดร.วรศิริ เดอ กาเดอนต์	สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
อ.ดร.วทีญญ รอดประพัฒน์	สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

อ.ดร.วศิน มหัตนรินทร์กุล	ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อ.ดร.วิทยา พวงสมบัติ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อ.ดร.วีรเดช กิริติธนวิทย์	สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
อ.ดร.ศรินรัตน์ วงษ์สี	กลุ่มวิจัยและพัฒนานิวเคลียร์ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)
อ.ดร.ศักดิ์ชาย รักการ	สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.สำเริง เนตรภู	บริษัท เอส. เอช. เค. เอ็นจิเนียริง จำกัด
อ.ดร.สุวรรณี สายสิน	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ
อ.ดร.อดิเทพ ศรีคงศรี	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.อภิชาติ บัวกล้า	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา
อ.ดร.อนันต์ เดอร์ชิง	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ
อ.ดร.เอกชัย อยู่ประเสริฐชัย	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.จุฬา สุนิตย์สกุล	สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง
ดร.พุทธิพงศ์ เหลือรัตนวัฒนา	สำนักก่อสร้างสะพาน กรมทางหลวงชนบท
ดร.อัศคพัฒน์ สว่างสุริย์	สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง
อ.จิรวัฒน์ ปล้องใหม่	สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ณัฐนนท์ รัตนไชย	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อ.นิตยา จันทรเรือง มหาผล	เลขาธิการสภาวิศวกร ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
อ.ว่าที่ ร.ต.สรวิชัย ดาแก้ว	คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
อ.สมเดช อิงคะวะระ	สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา

การประเมินประสิทธิภาพของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกในการพัฒนากำลังและ
ความแข็งแรงของดินทรายสำหรับการปรับปรุงคุณภาพดิน

EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF HYDRAULIC CEMENT IN ENHANCING STRENGTH AND STIFFNESS OF SANDY SOIL FOR GROUND IMPROVEMENT

ปฐณวิช รุ่งเรือง¹ วรพจน์ เพชรเกต² ศุภสิทธิ์ พงศ์วิะสถิตย³ สุธี ปิยะพิพัฒน์⁴ และ
อติเทพ ศรีคงศรี⁵

¹นักศึกษาปริญญาโท, สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชมงคลธัญบุรี 39 ม.1 ถ.รังสิต-นครนายก ต.คลองหก อ.คลองหก จ.ปทุมธานี 12110,
punnawit_r@mail.rmutt.ac.th

²นักศึกษาปริญญาเอก, สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชมงคลธัญบุรี 39 ม.1 ถ.รังสิต-นครนายก ต.คลองหก อ.คลองหก จ.ปทุมธานี 12110,
warapot_p@mail.rmutt.ac.th

^{3,4}อาจารย์, สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
39 ม.1 ถ.รังสิต-นครนายก ต.คลองหก อ.คลองหก จ.ปทุมธานี 12110,
³supasit.p@en.rmutt.ac.th, ⁴suthee.p@en.rmutt.ac.th

⁵อาจารย์, สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
60 ถ. ร่มเกล้า เขตมีนบุรี กรุงเทพมหานคร 10510, atitep.sri@kbu.ac.th

Punnawit Rungruang¹, Warapot Petchgate², Supasit Pongsivasathit³, Suthee Piyapiphat⁴
and Atitep Srikongsri⁵

¹Master student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Thanyaburi, 39 Moo 1 Rangsit-Nakhonnayok Street,
Khonghok Subdistrict, Klonghok District, Pathumthani 12110, Thailand,
punnawit_r@mail.rmutt.ac.th.

²Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Thanyaburi, 39 Moo 1 Rangsit-Nakhonnayok Street,
Khonghok Subdistrict, Klonghok District, Pathumthani 12110, Thailand,
warapot_p@mail.rmutt.ac.th.

^{3,4}Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Thanyaburi, 39 Moo 1 Rangsit-Nakhonnayok Street,
Khonghok Subdistrict, Klonghok District, Pathumthani 12110, Thailand,

³supasit.p@en.rmutt.ac.th, ⁴suthee.p@en.rmutt.ac.th

⁵Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasem Bundit
University, 60 Romklao Rd., Minburi Bangkok 10510, Thailand, atitep.sri@kbu.ac.th.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกในการปรับปรุงสมบัติความแข็งแรงของดินทรายได้แก่ ค่ากำลังกดอัดแกนเดียว (q_u) และค่ามอดูลัสซีแคนท์ (E_{50}) ของผลทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากการทดสอบแรงกดอัดแกนเดียว ตัวอย่างดินทดสอบนำมาจากสถานที่ก่อสร้างอาคารสูบน้ำดิบวัดราษฎร์จำนงค์ จังหวัดหนองคาย ดินทดสอบถูกผสมกับปูน HC ที่ร้อยละ 10, 15, 20, 25 และ 30 ของน้ำหนักดินแห้ง ทำการบ่มตัวอย่างดินผสมที่ 3, 7, 14 และ 28 วัน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 1:1 ในการประเมินปูน HC เพื่อเป็นสารผสมเพิ่มที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในงานปรับปรุงคุณภาพดินจะนำผลทดสอบที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลทดสอบของปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ชนิดที่ 1 (OPC) ภายใต้ปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่มเดียวกัน ผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์และอายุการบ่มทำให้ค่า q_u และ E_{50} เพิ่มขึ้นเป็นไปในทางเดียวกันของปูนทั้ง 2 ชนิด แต่อย่างไรก็ดีพบว่าผลทดสอบของดินผสมปูน HC มีค่าน้อยกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับดินผสมปูน OPC เนื่องจากองค์ประกอบของออกไซด์ที่ต่างกัน ผลการวิเคราะห์ผลทดสอบด้วยโครงสร้างทางจุลภาคแสดงถึงการพัฒนาแห่งเอทริงไคต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของดินที่ผสมปูนซีเมนต์ทั้ง 2 ชนิด มีลักษณะที่คล้ายคลึงกันมาก นอกจากนี้ยังพบว่าความสัมพันธ์แบบกราฟเส้นตรงระหว่างค่า q_u และ E_{50} ของปูนทั้งสองชนิดแทบไม่แตกต่างกัน หากนำข้อมูลทั้งหมดมาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_u และ E_{50} สามารถเขียนเป็นสมการได้แก่ $E_{50} = 78.165q_u$ ดังนั้นปูน HC สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานปรับปรุงคุณภาพดินอย่างยั่งยืนโดยเฉพาะกับเทคนิคการผสมลึก ทดแทนการใช้ปูน OPC เนื่องจากปูนชนิดนี้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: การปรับปรุงคุณภาพดิน, ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก, แรงกดอัดทิศทางเดียว, มอดูลัสซีแคนท์, การวิเคราะห์ผลทดสอบด้วยโครงสร้างทางจุลภาค

ABSTRACT

This research aims to investigate the effectiveness of hydraulic cement (HC) in improving the strength and stiffness properties of sandy soil, specifically focusing on unconfined compressive strength (q_u) and the secant modulus (E_{50}), derived from the stress-strain relationship of unconfined compression tests. The soil samples used were sandy soil obtained from the construction site of a water pumping station at Ratchamnong Temple in Nong-Khai Province. These samples were mixed with HC at varying proportions of 10 %, 15%, 20%, 25%, and 30% by dry weight. The curing periods employed were 3, 7, 14, and 28 days, with a water/cement ratio of 1:1. To evaluate HC as an environmentally friendly admixture for ground improvement, the test results using HC were compared with those using ordinary Portland cement (OPC) under identical cement content and curing periods. The results indicated that increasing the cement content and curing period enhanced both q_u and E_{50} for both HC and OPC, showing similar trends for both types of cement. However, the results for HC were slightly lower than those for OPC, likely due to differences in oxide composition. Scanning Electron Microscope analysis reveals that the development of Ettringite formation, resulting from the cement hydration reaction, shows significant similarity between HC and OPC as the curing period increases. Despite this, the linearly correlation between q_u and E_{50} for HC admixture was nearly identical to that for OPC admixture. From the overall results, the relationship between q_u and E_{50} can be expressed as $E_{50} = 78.165q_u$. Therefore, HC admixture can be effectively used in sustainable ground improvement, particularly in deep mixing methods, as an environmentally friendly alternative to OPC admixture.

KEYWORDS: Ground Improvement, Hydraulic cement, Unconfined compressive strength, Secant Modulus, Scanning Electron Microscope analysis

1. บทนำ

เทคนิคการทำให้ดินแข็งขึ้นด้วยวิธีการผสมลึก (Deep Mixing Method, DMM) ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง Ministry of Transport [1] ของประเทศญี่ปุ่นเปิดเผยว่าวิธี DMM นำมาใช้เป็นครั้งแรกในปี 1989 เพื่อเป็นฐานรากของโครงสร้างท่าเรือ เช่น กำแพงกันคลื่นหรือแนวป้องกันชายฝั่ง โดยใช้รูปแบบเสาแบบบล็อกและแบบผนัง และมีการเผยแพร่มาตรฐานการออกแบบในปี 1999 [2] และ 2007 [3] เทคนิคนี้ทำให้สามารถเพิ่มสมบัติ

เชิงกลของชั้นดินอ่อน The Ports and Harbours Association of Japan [4-6] ได้เผยแพร่มาตรฐานการออกแบบและก่อสร้างวิธี DMM ในเวอร์ชันภาษาญี่ปุ่น ต่อมา The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan [7-9] เผยแพร่มาตรฐานในเวอร์ชันภาษาอังกฤษ วิธีการออกแบบเสาแบบกลุ่มสำหรับการปรับปรุงชั้นดินอ่อนเพื่อรองรับคันดินถูกเผยแพร่โดย Public Works Research Center [10] และมีการปรับปรุงในปี 2004 [11] วิธี DMM ยังนำมาใช้เพิ่มเติมในระบบฐานรากลึกของอาคารในประเทศญี่ปุ่น พร้อมกับการเสนอแนวทางการออกแบบและการควบคุมคุณภาพสำหรับดินปรับปรุงโดยวิธี DMM [12] วิธี DMM ยังสามารถนำไปใช้เพื่อลดความเสี่ยงจากการเกิดปรากฏการณ์ดินเหลว (Liquefaction Mitigation) [13] นอกจากนี้มีการศึกษาพฤติกรรมความสามารถในการรับน้ำหนักตามแนวตั้งของเสาเดี่ยวรูปตัว T ในชั้นดินอ่อนโดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการและภาคสนามแบบเต็มรูปแบบ [14, 15] Pongsivasathit et al [16] นำเทคนิคนี้มาเป็นโครงสร้างของเขื่อนที่ประกอบด้วยดินซีเมนต์ที่เรียงแถวเป็นลักษณะของรวงผึ้ง (Honey Comb Structure) ร่วมกับกำแพงเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงเพื่อใช้เป็นเขื่อนกันน้ำในบ่อขุดขนาดใหญ่แห่งหนึ่ง

โดยทั่วไปเมื่อซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับดินจับตัวกันแข็งเป็นลักษณะคล้ายเสาเข็มในชั้นดิน ทำหน้าที่เสริมความเสถียรภาพของชั้นดินและช่วยลดการทรุดตัวของชั้นดิน [17-22] ความแข็งแรงของดินซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยโดยเฉพาะอย่างยิ่งชนิดของสารผสมได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Ordinary Portland Cement, OPC) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณภาคพื้นเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

ปัจจุบันสภาวะโลกร้อนที่เกิดจากการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือก๊าซเรือนกระจกเป็นปัญหาที่ทุกหน่วยงานต้องช่วยระดมกันแก้ไข โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมการผลิตผงปูนซีเมนต์ที่เป็นแหล่งปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมากสู่ชั้นบรรยากาศโลก ดังนั้นจึงได้มีการผลิตปูนชนิดใหม่ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement, HC) หรืออาจเรียกว่าปูนซีเมนต์คอมโพสิต (Composite Cement) ที่สามารถใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ [23] เนื่องจากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีการแทนที่ปูนเม็ดด้วยวัสดุอื่น อย่างเช่น ยิปซัม แก้วลอย รวมไปถึงกากจากอุตสาหกรรม เช่น ตะกรันเหล็ก ประมาณร้อยละ 10 จึงทำให้ช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แม้ค่าการปล่อยลดลงเพียงเล็กน้อย แต่ในการก่อสร้างใช้ปริมาณปูนจำนวนมาก จึงช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศได้อย่างมีนัยสำคัญ

อย่างไรก็ดีในงานปรับปรุงคุณภาพดินในประเทศไทย การใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกนั้นยังไม่เป็นที่นิยมมากนักเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากยังขาดข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับการประยุกต์ใช้ในการออกแบบ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการพัฒนากำลังและความแข็งแรงของดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ศึกษาถึงประสิทธิภาพของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกในด้านการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของดิน

ตัวอย่างที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สำหรับดินที่ใช้ในการทดสอบจะใช้ตัวอย่างดินที่เก็บจากโครงการก่อสร้างอาคารสูบน้ำดิบ วัดราษฎร์จันทน์ จังหวัดหนองคาย เนื่องจากเป็นโครงการที่ต้องทำกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ในชั้นทรายเพื่อแก้ไขการเอียงของโครงสร้างอาคารสูบน้ำที่เกิดขึ้นมากเกินจนขาดความเสถียรภาพในระหว่างการขุดลึก โดยโครงการนี้จะมีการประยุกต์ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกทดแทนการใช้ปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ผลการวิจัยจะเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญด้านการพัฒนาเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินอย่างยั่งยืนโดยใช้สารผสมเพิ่มที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

2. วิธีดำเนินงานวิจัย

2.1 การเตรียมวัสดุ

การศึกษานี้ใช้ดินทราย บริเวณริมฝั่งแม่น้ำโขง วัดราษฎร์จันทน์ หมู่ 3 ตำบลเมืองหมี่ อำเภอเมือง จังหวัดหนองคาย เก็บตัวอย่างแบบถูกรบกวน (Disturbed sample) ที่ระดับความลึก 0-1 เมตร ที่มีขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ดังแสดงในรูปที่ 1 และเมื่อนำมาจำแนกชนิดดินตามวิธีระบบเอกภาพ (Unified Soil Classification) พบว่าเป็นดินทรายชนิด SP (Poorly graded sand) แล้วเก็บตัวอย่างดินบรรจุในภาชนะปิด ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติเบื้องต้นของดินทราย และปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษานี้มี 2 ชนิด คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 และ ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิด GU ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 ลักษณะของดินตัวอย่างก่อนร่อน (a) และลักษณะของดินตัวอย่างหลังร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (b)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของดินทราย

คุณสมบัติทางกายภาพของดิน	
Natural Water Content (%)	2.49
Specific Gravity, Gs	2.74
Liquid Limit, LL (%)	20.30
Plastic Limit, PL (%)	ไม่สามารถหาค่าได้
Plasticity Index, PI (%)	ไม่สามารถหาค่าได้
% ปริมาณดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4	100%
% ปริมาณดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200	1.30%
จำแนกชนิดดินตามระบบเอกภาพ	SP



(a)



(b)

รูปที่ 2 ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิด GU (a) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (b)

ในตารางที่ 2 แสดงถึงองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิดที่ใช้ในการทดสอบ จะเห็นว่ามีความแตกต่างกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งปริมาณสารที่มีผลต่อการพัฒนากำลังของดินซีเมนต์ ได้แก่ ซิลิกาและอลูมินา ที่ปูน OPC มีค่ามากกว่าปูน HC อย่างไรก็ดีพบว่าปูน HC กลับมีค่าแคลเซียมออกไซด์ที่มากกว่าปูน OPC ซึ่งก็มีผลต่อการพัฒนากำลังของดินซีเมนต์เช่นเดียวกัน [24, 25]

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (HC) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC)

Chemical Composition	HC (%)	OPC (%)
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	70.02	67.30
ซิลิกาออกไซด์ (SiO ₂)	15.58	17.16
อลูมินาออกไซด์ (Al ₂ O ₃)	3.44	4.02
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	2.95	3.06
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.09	2.39
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃)	5.68	4.53
โซเดียมออกไซด์ (Na ₂ O)	0.27	0.43
โพแทสเซียมออกไซด์ (K ₂ O)	0.492	0.431
ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂)	0.228	0.289

2.2 การเตรียมวัสดุ

นำดินทรายที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มาผสมกับปูน HC และในทำนองเดียวกันนำดินทรายมาผสมกับปูน OPC ด้วย เพื่อใช้เป็นตัวแทนเปรียบเทียบประสิทธิภาพของปูน HC ในอัตราส่วนที่เท่ากันได้แก่ ร้อยละ 10, 15, 20, 25 และ 30 โดยน้ำหนักดินแห้ง เติมน้ำในส่วนผสมที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c ratio) เท่ากับ 1:1 สังเกตว่าปริมาณน้ำที่ผสมอยู่ในสัดส่วนที่มากจึงอาจมีบางส่วนที่เป็น น้ำอิสระ (free water) ที่ในการช่วยให้ส่วนผสมเข้ากันง่ายขึ้น เนื่องด้วยปริมาณที่มากจึงทำให้ดินซีเมนต์มีกำลังไม่สูงหากเปรียบเทียบกับกำลังของคอนกรีตผสม จากนั้นนำส่วนผสมมาผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมคอนกรีตขนาดเล็ก เมื่อผสมเข้ากันดีแล้วจึงนำตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ได้ใส่ในแบบหล่อตัวอย่างทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 cm. สูง 7 cm. แล้วห่อด้วยพลาสติกและเก็บในที่ลับแสงเพื่อลดการสูญเสียความชื้นของตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 3 โดยจะเก็บตัวอย่างไว้เป็นเวลา 3, 7, 14 และ 28 วัน ก่อนนำไปทดสอบหาค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive strength, q_u) ตามมาตรฐาน ASTM D 2166 ในตารางที่ 3 แสดงจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบในแต่ละกรณีศึกษา



รูปที่ 3 การเก็บรักษาตัวอย่าง (a) และการจัดทำตัวอย่าง (b)

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมซีเมนต์และจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

ปริมาณซีเมนต์ต่อ น้ำหนักดินแห้ง (เปอร์เซ็นต์)	อายุการปม (วัน) และจำนวนตัวอย่าง							
	Hydraulic Cement				Portland Cement			
	3	7	14	28	3	7	14	28
10	5	5	5	5	5	5	5	5
15	5	5	5	5	5	5	5	5
20	5	5	5	5	5	5	5	5
25	5	5	5	5	5	5	5	5
30	5	5	5	5	5	5	5	5
รวม	25	25	25	25	25	25	25	25
รวมทั้งหมด	200 ตัวอย่าง							

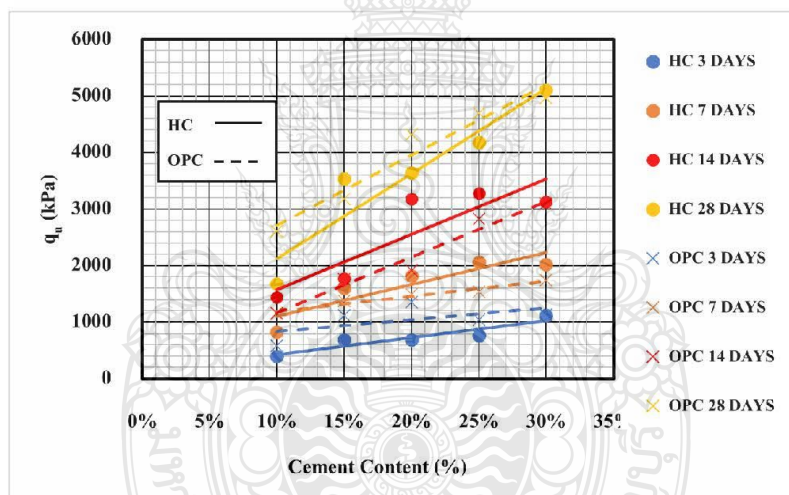
3. ผลการทดสอบ

3.1 ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

3.1.1 อิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ที่มีผลต่อค่า q_u

ในการนำเสนอข้อมูล เนื่องจากข้อมูลเป็นความเฉลี่ยและต้องการศึกษาความสัมพันธ์ของกำลังรับน้ำหนักของดินซีเมนต์กับอายุการปมและปริมาณซีเมนต์ จึงทำการพล็อตความสัมพันธ์แบบ Regression ข้อมูล และในงานวิจัยนี้จะขอเสนอเป็นความสัมพันธ์แบบเส้นตรง เนื่องจากอายุการปมมากที่สุดเพียงแค่ 28 วัน ค่ากำลังของดินซีเมนต์ยังคงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญอยู่ โดย

ผลการศึกษาระหว่างค่า q_u เฉลี่ยกับปริมาณซีเมนต์ทั้งสองชนิด ที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าเมื่ออัตราส่วนผสมของซีเมนต์ทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า q_u เฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น [26] ในลักษณะของสมการกราฟเส้นตรงอย่างมีนัยสำคัญ และค่า q_u เฉลี่ยที่ได้จากการผสมเพิ่มซีเมนต์ทั้งสองชนิดมีค่าที่ใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 4 ทั้งนี้ค่า q_u เฉลี่ยที่ได้จากการผสมเพิ่มด้วย HC ให้แนวโน้มน้อยกว่าค่า q_u เฉลี่ยที่ได้จากการผสมเพิ่มด้วย OPC เล็กน้อยในทุกอายุการบ่มอยู่เฉลี่ยร้อยละ 10.66 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะในกระบวนการผลิต HC นั้นมีการปรับลดปริมาณเม็ดปูนลง แล้วแทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลาน [27] โดยปูน OPC แม้จะมีสารแคลเซียมออกไซด์น้อยกว่าปูน HC อยู่เล็กน้อย แต่พบว่าปูน OPC มีปริมาณสารสำคัญอื่น ๆ ที่มีผลต่อกำลังของดินซีเมนต์ เช่น สารซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และอื่น ๆ เป็นต้น ที่สูงกว่าปูน HC ดังแสดงในตารางที่ 2 จึงทำให้กำลังความแข็งแรงของดินซีเมนต์ผสมปูน OPC มีแนวโน้มมากกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณีผสมปูน HC ทั้งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Vinoth et al [28]

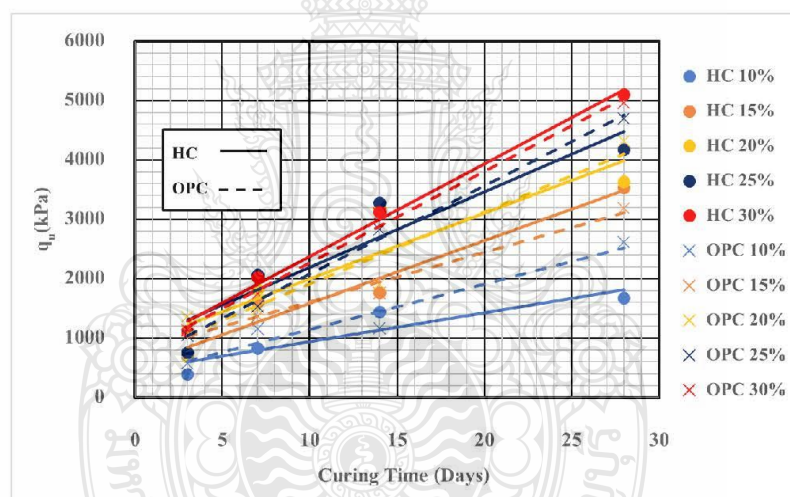


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unconfined Compressive Strength (q_u) กับปริมาณซีเมนต์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

3.1.2 อิทธิพลของระยะเวลาการบ่มที่ผลต่อค่า q_u

จากการศึกษาพบว่า ระยะเวลาในการบ่มยังเป็นอีกปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลให้ค่า q_u มีการพัฒนาเพิ่มสูงขึ้นตามอายุการบ่ม ดังแสดงในรูปที่ 5 เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยา Calcium Silicate Hydrate (CSH) และ Calcium Aluminate Hydrate (CAH) [29-30] จะค่อย ๆ พัฒนาการเกิดปฏิกิริยา

ตามอายุของการบ่มของวัสดุประสานทั้งสองชนิด (HC และ OPC) ค่า q_u เฉลี่ยมีแนวโน้มการพัฒนาแปรผันตรงกับปริมาณ HC และ OPC สังเกตได้ว่าค่า q_u เฉลี่ยที่ได้จากการผสมด้วย OPC มีแนวโน้มสูงกว่าค่า q_u เฉลี่ยจากการผสมด้วย HC ในช่วงแรกของการบ่มอยู่เฉลี่ยร้อยละ 21.36 แสดงถึงปฏิกิริยาในดินที่ผสมด้วย HC เกิดช้ากว่าดินที่ผสมด้วย OPC เล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ดังในตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่า แม้ว่าปูน OPC จะมีปริมาณของสารแคลเซียมออกไซด์ที่น้อยกว่า HC แต่ในองค์ประกอบอื่นๆ ที่สำคัญของปูน OPC เช่น สารซิลิกาออกไซด์ และอลูมินาออกไซด์ เป็นต้น สูงกว่าปูน HC จึงทำให้กำลังของดินผสมปูน OPC จึงมีค่ามากกว่าปฏิกิริยาของปูน HC อย่างไรก็ดีเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นความแตกต่างของค่า q_u ระหว่างดินที่ผสมด้วยปูนทั้งสองชนิดจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์ สังเกตจากที่ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 มีความแตกต่างเพียงร้อยละ 2.5 แต่ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 มีความแตกต่างกันถึงร้อยละ 30.44 ดังแสดงในรูปที่ 5



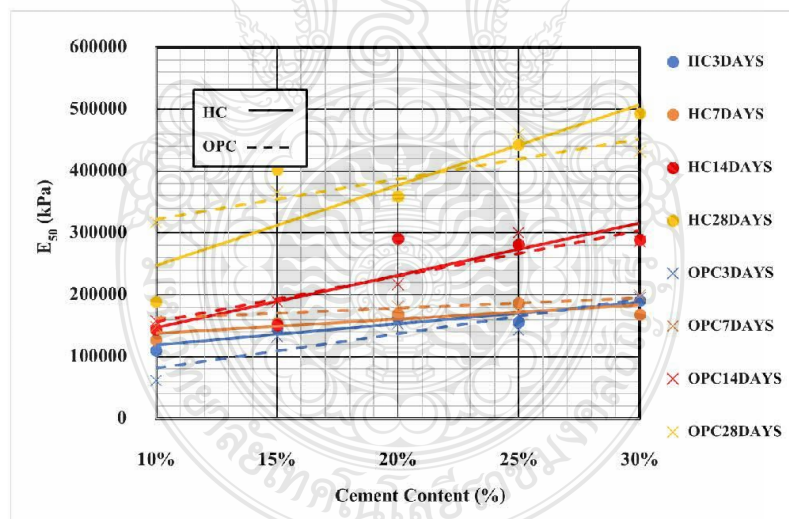
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unconfined Compressive Strength (q_u) กับปริมาณซีเมนต์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ และ อายุการบ่ม

แต่อย่างไรก็ดีเนื่องจากปูน HC มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ ที่สูงกว่าอาจทำให้จะส่งผลให้ดินซีเมนต์เกิดการแตกร้าวเนื่องจากการยัดหดตัว (Volume Change) จากปฏิกิริยา Hydration หรือการสูญเสียน้ำ ดังนั้นในการบ่มดินผสมปูน HC จำเป็นต้องเตรียมในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นเพียงพอเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำอาจสามารถช่วยลดการหดตัวและการแตกร้าวของดินซีเมนต์ได้

สำหรับการศึกษานี้ยังไม่พบเห็นรอยแตกขนาดเล็กบนก้อนตัวอย่างทั้งกรณี OPC หรือ HC อาจเป็นเพราะตัวอย่างทดสอบถูกทำปมในสภาวะที่เหมาะสมมีการสูญเสียความชื้นที่น้อยจากการห่อหุ้มตัวอย่างด้วยแผ่น PVC แบบใส และถูกเก็บในภาชนะที่มีดัดชิด ดังแสดงในรูปที่ 3

3.1.3 อิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ต่อค่า E_{50}

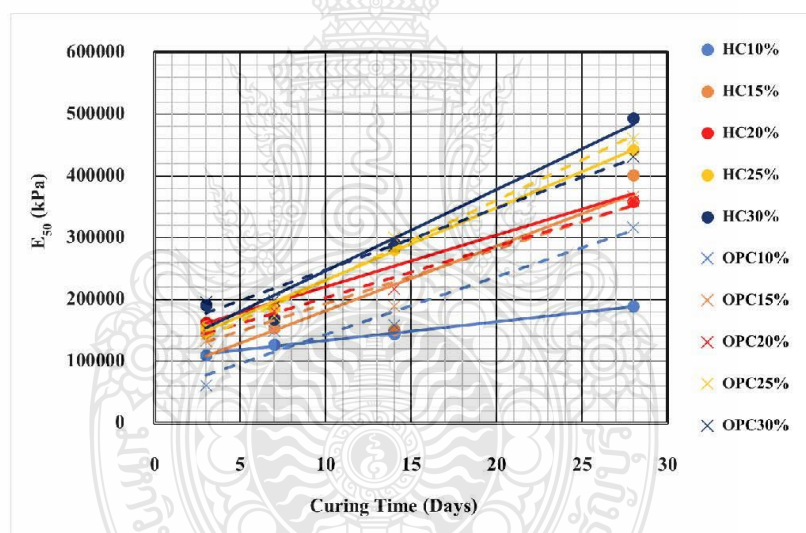
เมื่อกำหนดให้ E_{50} เป็นค่ามอดูลัสซีแคนท์ (Secant Modulus) ที่สามารถหาจากสมการดังต่อไปนี้ $E_{50} = (q_u/2)/\epsilon_{50}$ โดยที่ ϵ_{50} คือค่าความเครียดแนวแกนบนความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่สอดคล้องกับค่าของ $q_u/2$ ที่ได้จากการทดสอบ จากรูปที่ 6 แสดงผลของค่าเฉลี่ย E_{50} ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในลักษณะของกราฟเส้นตรงตามปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งการพัฒนาของค่าเฉลี่ย E_{50} ของดินผสมซีเมนต์ทั้งสองชนิดยังมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันกับลักษณะแนวโน้มของอิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ต่อค่า q_u เฉลี่ยกล่าวคือค่าเฉลี่ย E_{50} ของดินผสมปูน HC มีค่าน้อยกว่าของดินผสมปูน OPC เล็กน้อย อยู่เฉลี่ยร้อยละ 4.56 ทั้งนี้เนื่องจากด้วยเหตุผลในทำนองเดียวกันกับหัวข้อที่ 3.1.1 ปูน OPC โดยรวมมีปริมาณของสารที่สำคัญต่อกำลังมากกว่าปูน HC อยู่เล็กน้อย เช่น สารซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และอื่น ๆ ทำให้ดินผสมปูน HC มีการพัฒนาความแข็งแรงที่ช้ากว่าเล็กน้อย



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Secant Modulus (E_{50}) กับปริมาณซีเมนต์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

3.1.4 อิทธิพลของอายุการบ่มที่ผลต่อค่า E_{50}

จากรูปที่ 7 แสดงแนวโน้มของการพัฒนาค่าเฉลี่ย E_{50} ต่ออายุการบ่มของดินซีเมนต์มีลักษณะเป็นสมการเส้นตรง การเพิ่มขึ้นของอายุการบ่มทำให้ค่าเฉลี่ย E_{50} เพิ่มขึ้นตาม และพบว่าค่าเฉลี่ย E_{50} ของดินผสมปูน HC มีค่าน้อยกว่าของดินผสมปูน OPC ในทุกอายุการบ่ม แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความแข็งแรงของดินผสมซีเมนต์ทั้งสองชนิด แต่ปูน OPC จะมีการพัฒนาที่เร็วกว่าเฉลี่ยอยู่ร้อยละ 14.34 ยกเว้นแต่กรณีที่ดินผสมปูนในปริมาณสูง (ร้อยละ 30) พบว่าจะมีค่าน้อยกว่าในช่วงแรกแต่พออายุการบ่มถึง 28 วัน ดินผสมปูน HC กลับมีค่าสูงกว่าอยู่ร้อยละ 4.1 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะในปูน HC มีสารแคลเซียมออกไซด์ที่สูงกว่าปูน OPC (อ้างอิงตารางที่ 2) หากผสมในปริมาณที่สูงมากพอก็อาจทำให้มีการพัฒนาความแข็งแรงได้เร็วกว่าเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น สารแคลเซียมออกไซด์ที่มากกว่ามีผลทำให้การพัฒนากำลังของดินซีเมนต์ดีขึ้นในระยะยาว [31]

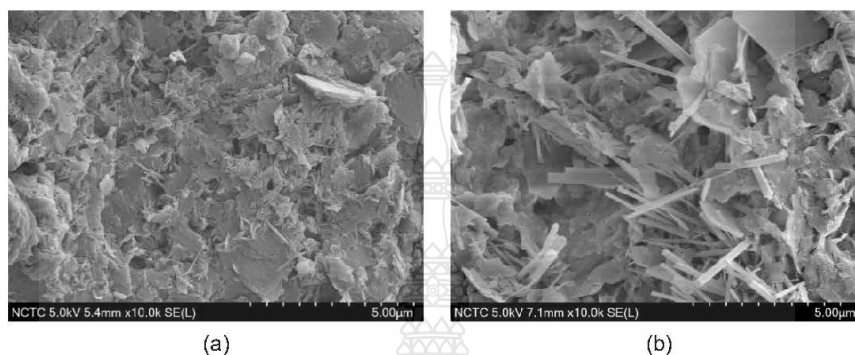


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Secant Modulus (E_{50}) ที่อายุการบ่มต่าง ๆ

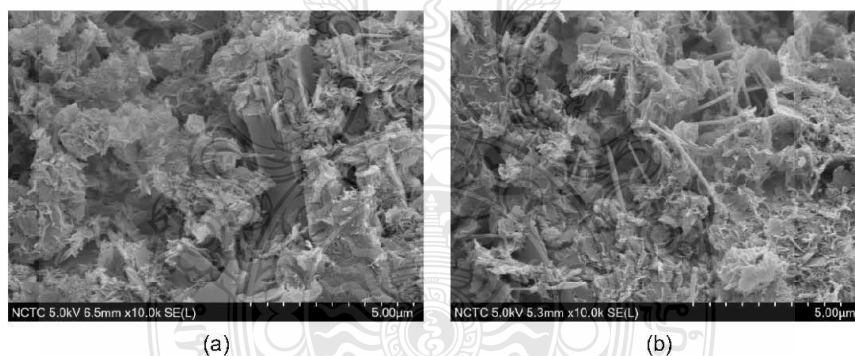
3.2 การวิเคราะห์ผลทดสอบด้วยโครงสร้างทางจุลภาค (SEM)

จากรูปที่ 8 แสดงภาพโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างดินที่ผสมปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิด ในอัตราส่วนร้อยละ 25 ที่อายุการบ่ม 3 วัน พบว่าการณี OPC แสดงให้เห็นถึงการพัฒนาของผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มากกว่ากรณี HC อย่างมีนัยยะสำคัญแม้ว่าจะมีอายุการบ่มเพียงแค่ 3 วัน

โดยมีปริมาณแท่งผลึกคล้ายเข็มหรือแท่งเอททริงไกต์เกิดขึ้นสำหรับกรณี OPC ที่มากกว่ากรณี HC อย่างชัดเจน



รูปที่ 8 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคของดินผสมปูน HC ร้อยละ 25 อายุการบ่ม 3 วัน (a) และ ภาพโครงสร้างทางจุลภาคของดินผสมปูน OPC ร้อยละ 25 อายุการบ่ม 3 วัน (b)



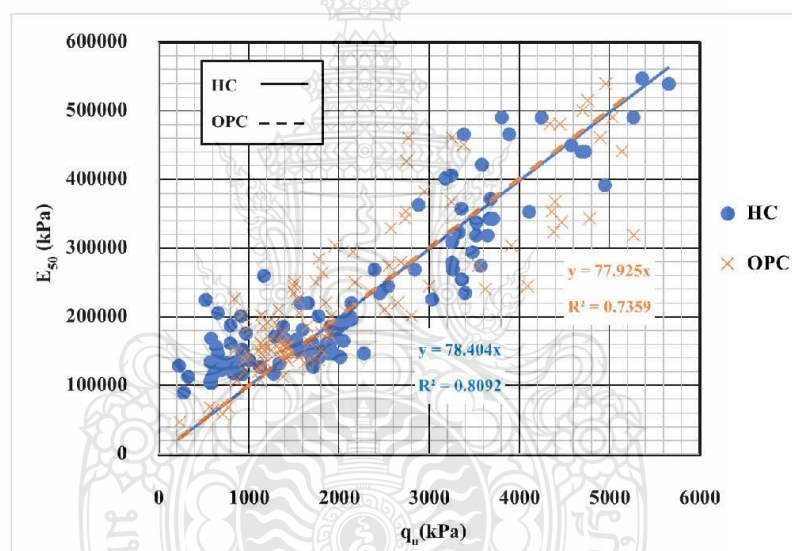
รูปที่ 9 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคของดินผสมปูน HC ร้อยละ 25 อายุการบ่ม 28 วัน (a) และ ภาพโครงสร้างทางจุลภาคของดินผสมปูน OPC ร้อยละ 25 อายุการบ่ม 28 วัน (b)

ในขณะที่ยังรูปที่ 9 แสดงภาพโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างดินที่ผสมเพิ่มซีเมนต์ทั้งสองชนิดที่อัตราส่วนร้อยละ 25 สำหรับอายุการบ่ม 28 วัน พบว่า เมื่อระยะเวลาการบ่มที่นานขึ้นการพัฒนาของผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิดมากขึ้น ในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการพัฒนากำลังของกรณีปูน HC มีแนวโน้มเพิ่มเมื่อระยะเวลาการบ่ม

ที่มากขึ้น ผลผลิตจากปฏิกิริยานี้ทำให้ความหนาแน่นของดินซีเมนต์ที่ผสมด้วยปูนทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้น [32] จึงทำให้ความสามารถในการรับแรงสูงขึ้นตามด้วยดังแสดงในหัวข้อที่ผ่านมา

3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_u และค่า E_{50}

เมื่อนำผลทดสอบแรงกดอัดแกนเดียว มาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_u กับ E_{50} ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 10 การเพิ่มขึ้นของค่า q_u มีผลทำให้ค่า E_{50} เพิ่มขึ้นตาม สามารถแสดงเป็นความสัมพันธ์แบบสมการเส้นตรง และเมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_u กับ E_{50} ของปูนทั้ง 2 ชนิดพบว่าสมการมีความคล้ายคลึงกันอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับกรณีผสมด้วยปูน HC สามารถเขียนเป็นสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ (1)



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกดอัดแกนเดียว (q_u) และ Secant Modulus (E_{50})

$$E_{50} = 78.404(q_u) \quad (1)$$

จากความใกล้เคียงกันหากนำข้อมูลทดสอบทั้งหมดของปูนทั้ง 2 ชนิดมาหาความสัมพันธ์สามารถเขียนเป็นสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ (2)

$$E_{50} = 78.165(q_u) \quad (2)$$

ซึ่งใกล้เคียงกับการวิจัยที่ผ่านมาของ Sarkar et al [33] ที่พบว่า $E_{50} = 69.32(q_u)$ ดังนั้นแนวโน้มในการทดแทนการใช้ปูน OPC ด้วยปูน HC สามารถทำได้เนื่องจากผลการศึกษาที่แสดงให้เห็นว่า มีการพัฒนากำลังของดินทรายผสม HC สอดคล้องเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับดินทรายผสม OPC อย่างมีนัยสำคัญ

4. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาการพัฒนา กำลังและความแข็งแรงของดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก สามารถสรุปได้ดังนี้

1) ดินผสมปูน HC ให้การพัฒนากำลังที่ต่ำกว่าดินผสมด้วยปูน OPC อยู่เล็กน้อย ทั้งนี้เป็นเพราะองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันของปูนทั้งสองชนิด โดยปูน OPC มีปริมาณของสารที่สำคัญต่อกำลังมากกว่าปูน HC ยกเว้นสารแคลเซียมออกไซด์ ที่ปูน HC มีค่ามากกว่าเล็กน้อย ส่งผลทำให้มีการพัฒนากำลังของปูน HC ช้ากว่าปูน OPC

2) ผลกระทบของปริมาณปูนที่ผสมและอายุการบ่มของปูนทั้งสองชนิดมีความสอดคล้องกัน อย่างมีนัยสำคัญ การเพิ่มปริมาณปูนที่ผสมและอายุการบ่มทำให้ค่า E_{50} และ q_u เพิ่มขึ้นตาม การเพิ่มปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่มทำให้ปูนทั้งสองมีความต่างของค่า E_{50} และ q_u ลดลง

3) ความสัมพันธ์ระหว่าง E_{50} และ q_u ของปูนทั้งสองชนิดสามารถแสดงออกเป็นสมการเส้นตรงและพบว่าปูนทั้งสองชนิดมีความสัมพันธ์ที่ใกล้เคียงกันมากแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย และเมื่อนำผลทดสอบทั้งหมดของปูนทั้งสองชนิดมาหาความสัมพันธ์ระหว่าง E_{50} และ q_u พบว่าสามารถแสดงออกด้วยสมการ $E_{50} = 78.165(q_u)$ สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อการออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์บนชั้นดินทรายได้ โดยเฉพาะบริเวณพื้นที่ริมฝั่งแม่น้ำโขง จังหวัดหนองคาย

การใช้ปูน HC เพื่อทดแทนปูน OPC ในงานปรับปรุงคุณภาพดินแบบยั่งยืนโดยเฉพาะกับวิธีการผสมลิกสามารถทำได้ เป็นการช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศเนื่องจากในงานผสมลิกต้องใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่สูงมาก

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัท ซอยล์ ซีเมนต์ คอลัมน์ จำกัด และ บริษัท เกษมดีชัยน์ แอนด์ คอนสตรัคชั่น จำกัด ที่เอื้อเฟื้อดินทราย บริเวณริมฝั่งแม่น้ำโขง วัตรราษฎร์จำนงค์ และปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่ใช้ในการทำวิจัย

References

- [1] Ministry of Transport. Technical standards for port and harbour facilities. London, UK: Ministry of Transport; 1989.
- [2] Ministry of Transport. Technical standards for port and harbour facilities. Tokyo, Japan: The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan; 1999.
- [3] Public Works Research Institute. Manual of ALicc method for ground improvement. Tsukuba, Japan: Public Works Research Institute; 2007.
- [4] The Ports and Harbours Association of Japan. Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan (Japanese version). Tokyo, Japan: The Ports and Harbours Association of Japan; 1989.
- [5] The Ports and Harbours Association of Japan. Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan (Japanese version). Tokyo, Japan: The Ports and Harbours Association of Japan; 1999.
- [6] The Ports and Harbours Association of Japan. Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan (Japanese version). Tokyo, Japan: The Ports and Harbours Association of Japan; 2007.
- [7] The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan. Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan (English version). Tokyo, Japan: The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan; 1991.
- [8] The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan. Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan (English version). Tokyo, Japan: The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan; 2002.
- [9] The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan. Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan (English version). Tokyo, Japan: The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan; 2009.
- [10] Public Works Research Center. Technical manual on deep mixing method for on land works. Tokyo, Japan: Public Works Research Center; 1999.
- [11] Public Works Research Center. Technical manual on deep mixing method for on land works. Tokyo, Japan: Public Works Research Center; 2004.
- [12] The Building Center of Japan. Design and quality control guideline of improved ground for building. Tokyo, Japan: The Building Center of Japan; 1997.

- [13] Ministry of Construction. Design and construction manual of liquefaction prevention techniques (draft). Joint Research Report. Tokyo, Japan: Ministry of Construction; 1999.
- [14] Yi Y, Liu S, Puppala AJ, Xi P. Vertical bearing capacity behaviour of single T-shaped soil–cement column in soft ground: laboratory modelling, field test, and calculation. *Acta Geotechnica* 2017;12(5):1077-88.
- [15] Yi Y, Liu S, Puppala AJ, Jing F. Variable-diameter deep mixing column for multi-layered soft ground improvement: Laboratory modeling and field application. *Soils and Foundations* 2019;59:633-43.
- [16] Pongsivasathit S, Petchgate W, Horpibulsuk S, Piyaphipat S. Composite contiguous pile wall and deep mixing column wall as a dam – design, construction and performance. *Case Studies in Construction Materials* 2021;15:e00771.
- [17] Coastal Development Institute of Technology. The deep mixing method – principle, design and construction. Lisse, Netherlands: A.A. Balkema Publishers; 2002.
- [18] Coastal Development Institute of Technology. The premixing method—principle, design and construction. London, United Kingdom: UK: A.A. Balkema Publishers; 2003.
- [19] Coastal Development Institute of Technology. Technical manual of deep mixing method for marine works. Tokyo, Japan: Coastal Development Institute of Technology; 2008.
- [20] Coastal Development Institute of Technology. Technical manual of premixing method. Tokyo, Japan: Coastal Development Institute of Technology; 2008.
- [21] Coastal Development Institute of Technology. Technical manual of light-weight geomaterial. Tokyo, Japan: Coastal Development Institute of Technology; 2008.
- [22] Coastal Development Institute of Technology. Technical manual of pneumatic flow mixing method. Tokyo, Japan: Coastal Development Institute of Technology; 2008.
- [23] Thai Cement Manufacturers Association. Hydraulic cement. Bangkok, Thailand: Thai Cement Manufacturers Association; 2022. (In Thai)
- [24] Petry TM, Little DN. Review of stabilization of clays and expansive soil in pavements and lightly loaded structures-history, practice, and future. *Journal of Materials in Civil Engineering* 2002;14(6):447-60.
- [25] Horpibulsuk S, Miura N, Nagaraj TS. Clay–water/cement ratio identity for cement admixed soft clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 2005;131(2):187-92.

- [26] Chaiyaput S, Manandhar S, Karki S, Ayawanna j. Characteristics of cement treated soil: A case study from soft Bangkok clay and red soil of Nepal. Lowland Technology International Journal 2020;22(2):178-91.
- [27] Suwanklang P, Chachamnan S, Suksiripattanapong C. Unconfined compressive strength and indirect tensile strength of crushed rock-cement waste improved with hydraulic cement. The 27th National Convention on Civil Engineering; 2002 Aug 24-26; Chiang Rai, Thailand. (In Thai)
- [28] Vinoth G, Moon S. W, Moon J, Ku T. Early strength development cement-treated sand using low-carbon rapid-hardening cements. Soils and Foundations 2018;58(5):1200-11.
- [29] Lambe TW, Michaels AS, Moh ZC. Improvement of soil-cement with alkali metal compounds. Highway Research Board Bulletin 1959;241:67-108.
- [30] Moh ZC. Reaction of soil minerals with cement and chemicals. Highway Research Record 1965;86:39-61.
- [31] Wang TZ, Wang CM, Zhang ZM, Huang XH. Mechanical property of cement-stabilized soil with nano-CaO and reinforcement mechanism analysis. Chemical Engineering Transactions 2016;51:1195-200.
- [32] Soeurt R, Somna R, Chalee W. Effect of alkaline activator on properties of mortar containing fly ash. Annual Concrete Conference 11; 2016 Feb 17-19; Nakhon Ratchasima, Thailand. (In Thai)
- [33] Sarkar PK, Chao KC, Wong KN, Wang M. Evaluation of index properties affecting unconfined compressive strength of jet-grouted soil columns for Bangkok soils. International Conference on Deep Foundations and Ground Improvement; 2022 May 18-20; Berlin, Germany.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ปุ่นณวิช รุ่งเรือง นักศึกษาปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 ม.1 ต.คลองหก อ.คลองหก จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ 02-549-3410 Email: punnawit_r@mail.rmutt.ac.th



วรพจน์ เพชรเกตุ นักศึกษาปริญญาเอก หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 ม.1 ต.คลองหก อ.คลองหก จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ 02-549-3410 Email: warapot_p@mail.rmutt.ac.th



ศุภสิทธิ์ พงศ์ศิระสถิตย์ รองศาสตราจารย์ ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 ม.1 ต.คลองหก อ.คลองหก จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ 02-549-3410 Email: supasit.p@en.rmutt.ac.th



สุธี ปิยะพิพัฒน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ที่ 1 ถนนรังสิตนครนายก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110 เบอร์โทรศัพท์ 02-549-3410 Email: suthee.p@en.rmutt.ac.th



อติเทพ ศรีคงศรี อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต 60 ถ. ร่มเกล้า เขตมีนบุรี กรุงเทพมหานคร 10510 Email: atitep.sri@kbu.ac.th

Article History:

Received: May 23, 2024

Revised: December 6, 2024

Accepted: December 6, 2024

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายปณณวิช รุ่งเรือง
วัน เดือน ปีเกิด	5 ตุลาคม 2538
ที่อยู่	14/828 หมู่บ้านบัวทองธานี ซอย 10 หมู่ 13 อำเภอบางบัวทอง ตำบลบางบัวทอง จังหวัดนนทบุรี 11110
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
ประสบการณ์การทำงาน	วิศวกรสนาม บริษัท ประยูรวิศว์ จำกัด พ.ศ. 2564 ถึง พ.ศ. 2565
เบอร์โทรศัพท์	08-5121-2975
อีเมล	punnawit_r@mail.rmutt.ac.th

