การปรับปรุงสมบัติของดินตะกอนโดยใช้จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าปาล์มและเถ้ายางสำหรับนำไปใช้ในงานวิศวกรรมผิวทาง

วรากร สุยะต๊ะ

วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
ตุลาคม 2568

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

การปรับปรุงสมบัติของดินตะกอนโดยใช้จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าปาล์มและเถ้ายางสำหรับนำไปใช้ในงานวิศวกรรมผิวทาง

วรากร สุยะต๊ะ

วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
ตุลาคม 2568
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

IMPROVING THE PROPERTIES OF SEDIMENT USING GEOPOLYMERS DERIVED FROM PALM OIL FUEL ASH AND RUBBER ASH FOR PAVEMENT ENGINEERING

WARAKORN SUYATA

A Thesis Submitted to University of Phayao

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Master of Engineering Degree in Civil Engineering

October 2025

Copyright 2025 by University of Phayao

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การปรับปรุงสมบัติของดินตะกอนโดยใช้จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าปาล์มและเถ้ายางสำหรับนำไปใช้ในงานวิศวกรรมผิวทาง

ของ วรากร สุยะต๊ะ

ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
ของมหาวิทยาลัยพะเยา

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธนกร ชมภูรัตน์)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(รองศาสตราจารย์ ดร. ปรีดา ไชยมหาวัน)

..... อาจารย์บัณฑิตศึกษามหาวิทยาลัยพะเยา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธเนศ ทองเดชศรี)

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพงศ์ ดำรงวิริยะนุภาพ)

เรื่อง: การปรับปรุงสมบัติของดินตะกอนโดยใช้จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าปาล์มและเถ้ายางสำหรับนำไปใช้ในงานวิศวกรรมผิวทาง

ผู้วิจัย: วรากร สุยะต๊ะ, วิทยานิพนธ์: วศ.ม. (วิศวกรรมโยธา), มหาวิทยาลัยพะเยา, 2568

อาจารย์ที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์ ดร. ธนกร ชมภูรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีดา ไชยมหาวัน

คำสำคัญ: ดินตะกอนกว๊านพะเยา, จีโอโพลิเมอร์, เถ้าปาล์ม, เถ้ายาง, การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว, การทดสอบความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้ง, การทดสอบโมดูลัสคืนตัว, การทดสอบหาความเร็วเฉือนหรือเรโซแนนซ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการยกระดับดินตะกอนกว๊านพะเยาให้ใช้เป็นวัสดุสำหรับงานวิศวกรรมผิวทาง โดยใช้ตัวประสานจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าชีวมวลสองชนิด ได้แก่ เถ้าปาล์มและเถ้ายาง ออกแบบส่วนผสมด้วยสัดส่วนดินตะกอน:เถ้า (S:FA) 90:10–70:30 อัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH = 0.67, 1.0 และ1.5 และสัดส่วนของเหลวต่อเถ้า (L/FA) = 0.4, 0.5 และ0.6 (ใช้ความเข้มข้น NaOH 8 Molar) ประเมินคุณสมบัติพื้นฐานของดิน ได้แก่ การทดสอบหาขีดพิกัดอัตเตอร์เบิร์ก การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ การหาขนาดคละ การบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน และการทดสอบด้านกำลังประกอบไปด้วย การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว (UCS) อายุบ่ม 7, 28, 60 และ 90 วัน การทดสอบความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้ง การทดสอบโมดูลัสคืนตัว (MR) การทดสอบหาความเร็วเฉือนหรือเรโซแนนซ์อิสระ และการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค SEM/EDS ผลการทดสอบพบว่า UCS เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการแทนที่เถ้าและอายุบ่ม โดย L/FA = ระดับกลางให้ค่ากำลังเด่นอย่างสม่ำเสมอ และอัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH ที่ 1.5 ให้กำลังมากกว่า 1.0, และ 0.67 ส่วนผสมที่โดดเด่นคือส่วนผสมดินตะกอน 70 เปอร์เซ็นต์ต่อเถ้า 30 เปอร์เซ็นต์ (S70–P30) ซึ่งให้กำลังสูงพัฒนาต่อเนื่องในช่วง 28–90 ภาพรวมผ่านเกณฑ์วัสดุชั้นรองพื้นทางและชั้นพื้นทาง และหลายส่วนผสมผ่านเกณฑ์ การทดสอบเปียกสลับแห้งพบว่าส่วนผสมเถ้าปาล์มมีความคงทนมากกว่าเถ้ายาง ค่าผลทดสอบ MR สัมพันธ์ทางบวกกับ UCS ส่วนค่าความเร็วคลื่นพบว่าเพิ่มตามความแข็งและความต่อเนื่องของโครงสร้างภายในสอดคล้องกับแนวโน้มกำลัง และผลการ SEM/EDS แสดงหลักฐานชัดเจนถึงการก่อรูปของเจล N-A-S-H ที่มีความต่อเนื่องในกลุ่มเถ้าปาล์ม และการเกิดร่วมของเจล C-(A)-S-H ในกลุ่มเถ้ายาง ซึ่งมีบทบาทในการอุดช่องว่างระดับจุลภาคและเสริมการยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค ส่งผลให้เมทริกซ์มีความหนาแน่นและความเชื่อมต่อสูงขึ้น จากผลทั้งหมดสรุปได้ว่าการใช้จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าชีวมวลสามารถยกระดับดินตะกอนกว๊านพะเยาให้เหมาะสมต่อการใช้งานเป็นวัสดุชั้นทาง โดยเฉพาะส่วนผสม S70–P30 ที่สัดส่วนของเหลวต่อเถ้าอยู่ช่วงสมดุล และใช้อัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH 1.5 ซึ่งให้ผลเด่นทั้งด้านกำลัง ความทนทาน และความสามารถในการคืนตัว พร้อมทั้งเอื้อต่อการใช้ทรัพยากรเหลือทิ้งอย่างคุ้มค่าในงานวิศวกรรมทาง

Title: IMPROVING THE PROPERTIES OF SEDIMENT USING GEOPOLYMERS DERIVED FROM PALM OIL FUEL ASH AND RUBBER ASH FOR PAVEMENT ENGINEERING

Author: Warakorn Suyata, Thesis: M.Eng. (Civil Engineering), University of Phayao, 2025

Advisor: Associate Professor Thanakorn Chompoorat , Ph.D. Co-advisor Associate ProfessorPreeda Chaimahawan , Ph.D.

Keywords: Kwan Phayao dredged sediment, geopolymer, palm oil fuel ash, rubber ash, unconfined compressive strength, wet–dry durability, resilient modulus, free-free resonance, SEM/EDS

ABSTRACT

This study evaluates the feasibility of upgrading dredged sediment from Kwan Phayao for use as pavement materials by geopolymer stabilization with two biomass ashes: palm oil fuel ash (POFA; denoted P) and rubber ash (denoted R). Mix designs employed sediment-to-ash ratios (S:FA) of 90:10 to 70:30, sodium silicate–to–sodium hydroxide ratios (Na_2SiO_3/NaOH) of 0.67, 1.0, and 1.5, and liquid-to-ash ratios (L/FA) of 0.4, 0.5, and 0.6, using 8 M NaOH. Fundamental properties were determined by Atterberg limits, specific gravity, particle-size distribution, and Modified Proctor compaction. Engineering performance was assessed via unconfined compressive strength (UCS) at 7, 28, 60, and 90 days, wet–dry durability, resilient modulus (MR), wave-velocity testing by the free-free resonance (FFR) method, and microstructural analysis by scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS). Results show that UCS increased with ash replacement and curing time. The intermediate liquid-to-ash level (L/FA ≈ 0.5) consistently delivered higher strengths, and a Na_2SiO_3/NaOH ratio of 1.5 outperformed 1.0 and 0.67. The S70–P30 mixture exhibited standout performance with sustained strength development between 28 and 90 days. Overall, the treated materials met relevant specifications for subbase and base layers, with several mixtures satisfying base-course requirements. Wet–dry cycling indicated that POFA mixtures were more durable than R mixtures. MR was positively correlated with UCS, and measured wave velocity increased with stiffness and internal continuity, consistent with strength trends. SEM/EDS provided clear evidence of a continuous N–A–S–H gel network in POFA systems and the coexistence of C–(A)–S–H in R systems, which filled micro-voids and enhanced interparticle bonding, yielding a denser, more connected matrix. Collectively, the findings demonstrate that biomass-ash geopolymers can effectively upgrade Kwan Phayao dredged sediment for pavement applications, with S70–P30 at an intermediate L/FA and Na_2SiO_3/NaOH = 1.5 achieving superior strength, durability, and resilience while promoting the valorization of waste resources in pavement engineering

กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาและการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยพะเยา ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือ สถานที่ และวัสดุอุปกรณ์สำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา รวมถึงหน่วยปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบที่คณาจารย์และเจ้าหน้าที่ได้ให้คำแนะนำอย่างใกล้ชิด

กระผมขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่อ รองศาสตราจารย์ ดร.ธนกร ชมภูรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้มอบโอกาสและความเชื่อมั่นแนะนำแนวทางวิชาการ และดูแลตั้งแต่เริ่มต้นการวิจัย ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ ทองเดชศรี คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่สละเวลาให้ข้อเสนอแนะเชิงลึกและชี้แนะรายละเอียดเชิงเทคนิค ซึ่งมีส่วนสำคัญยิ่งต่อการยกระดับคุณภาพงานวิจัยฉบับนี้

กระผมขอขอบคุณ คณาจารย์ บุคลากร และเพื่อน ทุกท่าน สำหรับการช่วยเหลือในการเก็บตัวอย่าง เตรียมชิ้นทดสอบ ดำเนินการทดลอง ตลอดจนการแลกเปลี่ยนความคิดเห็นทางวิชาการอย่างสร้างสรรค์ ทำให้งานวิจัยเรื่อง “การปรับปรุงสมบัติของดินตะกอนโดยใช้จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าปาล์มและเถ้ายางสำหรับนำไปใช้ในงานวิศวกรรมผิวทาง” ดำเนินไปได้อย่างราบรื่น กระผมซาบซึ้งใน กำลังใจจากครอบครัว คอยสนับสนุน เข้าใจ และอยู่เคียงข้างเสมอมา ถือเป็นพลังสำคัญให้กระผมก้าวผ่านอุปสรรคในการทำงานวิจัยครั้งนี้ได้ สุดท้ายนี้กระผมหวังเป็นอย่างยิ่งว่า วิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจ กระผมขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

วรากร สุยะต๊ะ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฎ

สารบัญภาพ ..... ฎ

บทที่ 1 บทนำ 1

ที่มาและความสำคัญของปัญหา 1

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 4

ขอบเขตการวิจัย 4

แนวทางดำเนินงานวิจัย 5

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย 6

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 2

ดินตะกอนกว๊านพะเยา 2

การปรับปรุงคุณภาพดินเพื่อนำไปใช้ในการก่อสร้างพื้นทาง 11

วัตถุประสงค์ของการปรับปรุงคุณภาพดินทางเคมี 11

การปรับปรุงคุณภาพดินทางเคมี 11

จีโอพอลิเมอร์ 13

ความแตกต่างระหว่างจีโอพอลิเมอร์กับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 16

โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ 17

โซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate ,Na_2SiO_3) 19

กระบวนการผลิตโซเดียมซิลิเกต 19
ประโยชน์ของโซเดียมซิลิเกต 19
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) 20
เถ้าปาล์ม (Palm oil fuel ash) 21
เถ้ายาง (Rubber ash) 22
ปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการให้กาลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ 23
การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง 24
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย 29
วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ 29
การทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และคุณสมบัติวิศวกรรม 31
การทดสอบหาขีดพิกัดอัตเตอร์เบิร์ก (Atterberg test) 32
การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity test) 32
การทดสอบหาขนาดคละ (Grain size analysis) 33
การทดสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning electron microscope (SEM) 33
การทดสอบ energy dispersive x-ray spectroscopy (EDS) 34
การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction test) 34
การประดิษฐ์โมล PVC และค้อนบดอัดสำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว 37
การออกแบบพลังงานบดอัด 38
การเตรียมตัวอย่างวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ 39
การเตรียมดินตะกอนและเถ้าลอย 39
การเตรียมสารละลายอัลคาไลน์ 40
การทดสอบกำลังรับแรงอัดเดี่ยว (Unconfined compression test) 40
การทดสอบความคงทนด้วยวิธีแบบเปียกสลับแห้ง 41

การทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient modulus test) 42
การทดสอบหาความเร็วเฉือนหรือโรโซแนนซ์ (Free-free resonant frequency method) 44
บทที่ 4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล 45
คุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนกว๊านพะเยา 45
ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานแบบพิเศษ 49
ดินตะกอนกว๊านพะเยา 49
เถ้าปาล์ม 51
เถ้ายาง 53
ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว 56
ผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้ง (Wetting and drying) ของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์ม 72
ผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้ง (Wetting and drying) ของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้ายาง 75
ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus, MR) 78
ผลการทดสอบเรโซแนนซ์อิสระ Free-Free Resonant Frequency (FFR) 82
ความสัมพันธ์ด้านกำลังของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าปาล์มและเถ้ายาง 86
การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค 89
บทที่ 5 บทสรุป 98
สรุปคุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนกว๊านพะเยา 98
สรุปผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานแบบพิเศษ 99
สรุปผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว 100
สรุปผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้ง (Wetting and drying) ของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าปาล์ม 101

สรุปผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้ง (Wetting and drying) ของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้ายาง 101
สรุปผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus, MR) 102
สรุปผลการทดสอบเรโซแนนซ์อิสระ Free-Free Resonant Frequency (FFR) 103
การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่าง 103
ข้อเสนอแนะ 103
บรรณานุกรม 105
ประวัติผู้วิจัย 112

สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1ปริมาณตะกอนกว๊านพะเยาที่ขุดลอกในปี 2551-2563 9

ตาราง 2 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและการจำแนกชนิดดินตะกอนกว๊านพะเยา 10

ตาราง 3 คุณภาพของดินที่ชนิดต่างกัน 12

ตาราง 4 พื้นที่ปลูกยางพาราของประเทศไทย 22

ตาราง 5 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และคุณสมบัติทางวิศวกรรม 31

ตาราง 6 โปรแกรมทดสอบของดินตะกอนที่ปรับปรุงโดยใช้จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าปาล์มและเถ้ายาง . 36

ตาราง 7 ลำดับการให้แรงกระทำของการทดสอบโมดูลัสคืนตัว 43

ตาราง 8 ผลทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานและจำแนกชนิดดินตะกอนกว๊านพะเยาในทางวิศวกรรม .. 47

ตาราง 9 องค์ประกอบธาตุของดินตะกอนกว๊านพะเยา เถ้าปาล์ม และเถ้ายาง 55

ตาราง 10 องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างผสม (Geopolymer Mixtures) 95

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพ 1 เรือขุดลอกตะกอน (ก) และกองดินตะกอนกว๊านที่ถูกขุดขึ้นมา (ข) 3

ภาพ 2 แผนแนวทางดำเนินงานวิจัย 7

ภาพ 3 กองดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ถูกขุดลอกขึ้นมากองทิ้งไว้ 9

ภาพ 4 แสดงกระบวนการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชั่น (Geopolymerization process) 15

ภาพ 5 แสดงปฏิกิริยาเคมีชนิดซีเมนต์ไฮเดรชันเปรียบเทียบกับชนิดจีโอพอลิเมอไรเซชัน 16

ภาพ 6 โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์พวกสายโซโพลีไซอะเลต 18

ภาพ 7 โซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate ,Na_2SiO_3) 19

ภาพ 8 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) 20

ภาพ 9 เถ้าปาล์ม (palm oil fuel ash) ร่อนผ่านตะแกรงละเอียดเบอร์ 100 21

ภาพ 10 เถ้ายาง (rubber ash) ร่อนผ่านตะแกรงละเอียดเบอร์ 100 23

ภาพ 11 กำลังอัดดินเหนียวผสมจีโอโพลีเมอร์ที่ 65 °C 48 ชม. 26

ภาพ 12 กำลังอัดดินเหนียวผสมจีโอโพลีเมอร์ที่ 75 °C 48 ชม. 27

ภาพ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดและช่วงเวลาการบ่มตัวอย่าง 28

ภาพ 14 บริเวณเก็บตัวอย่างดินตะกอน 29

ภาพ 15 กองดินตะกอนกว๊านที่ถูกขุดลอกทิ้งไว้ 30

ภาพ 16 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ (ก) ดินตะกอนกว๊านพะเยา (ข) เถ้าปาล์ม (ค) เถ้ายาง 30

ภาพ 17 เครื่องมือการทดสอบโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 34

ภาพ 18 (ก) เครื่องทดสอบและ (ข) การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินตะกอนกว๊านพะเยา 35

ภาพ 19 โมล PVC ที่ประดิษฐ์ขึ้นมาใหม่ 37

ภาพ 20 เครื่องมือกระแทกที่ใช้ในการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน 38

ภาพ 21 การทดสอบกำลัง (ก) กล่องบ่มตัวอย่างควบคุมอุณหภูมิ 30°C 41

ภาพ 22 การติดตั้งตัวอย่างการทดสอบสำหรับการทดสอบ 44

ภาพ 23 การติดตั้งตัวอย่างการทดสอบสำหรับการทดสอบหาความเร็วเฉือน..... 44

ภาพ 24 กราฟแสดงผลการทดสอบหาขนาดคละของดินตะกอนกว๊านพะเยา 46

ภาพ 25 การจำแนกดินตะกอนกว๊านพะเยาตามระบบ USCS 48

ภาพ 26 ความสัมพันธ์ของหน่วยน้ำหนักแห้งและความชื้นที่เหมาะสมของดินตะกอนกว๊านพะเยา .. 48

ภาพ 27 ดินตะกอนกว๊านพะเยาที่กำลังขยาย (ก) 3,000 และ (ข) 5,000 เท่า..... 50

ภาพ 28 เถ้าปาล์มที่กำลังขยาย (ก) 3,000 และ (ข) 5,000 เท่า..... 52

ภาพ 29 เถ้าปาล์มที่กำลังขยาย (ก) 3,000 และ (ข) 5,000 เท่า..... 54

ภาพ 30 กำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวอายุการบ่มที่ 7 วัน อัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH 59

ภาพ 31 กำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวอายุการบ่มที่ 28 วัน อัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH 62

ภาพ 32 กำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวอายุการบ่มที่ 60 วัน อัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH เท่ากับ (ก) 0.67 , (ข) 1 และ (ค) 1.5 64

ภาพ 33 กำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวอายุการบ่มที่ 90 วัน อัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH เท่ากับ (ก) 0.67 , (ข) 1 และ (ค) 1.5 66

ภาพ 34 ค่า E_{50} ของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ ที่ 7 วัน อัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH เท่ากับ (ก) 0.67 , (ข) 1 และ (ค) 1.5 67

ภาพ 35 ค่า E_{50} ของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ ที่ 28 วัน อัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH เท่ากับ (ก) 0.67 , (ข) 1 และ (ค) 1.5 68

ภาพ 36 ค่า E_{50} ของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ ที่ 60 วัน อัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH เท่ากับ (ก) 0.67 , (ข) 1 และ (ค) 1.5 69

ภาพ 37 ค่า E_{50} ของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ ที่ 90 วัน อัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH เท่ากับ (ก) 0.67 , (ข) 1 และ (ค) 1.5 70

ภาพ 38 ความสัมพันธ์ค่า UCS ของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์มที่สภาวะเปียกสลับแห้งที่อายุการบ่ม (ก) 7 วัน (ข) 28 วัน และ (ค) 60 วัน 74

ภาพ 39 ความสัมพันธ์ค่า UCS ของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้ายางที่สภาวะเปียกสลับแห้งที่อายุการบ่ม (ก) 7 วัน (ข) 28 วัน และ(ค) 60 วัน..... 76

ภาพ 40 การเปลี่ยนแปลงของค่า $q_{u(W-D)}/qu$ ตามจำนวนรอบการเปียกสลับแห้ง..... 78

ภาพ 41 ค่า MR กับ L/FA ของดินตะกอนปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าปาล์มและเถ้ายาง 79

ภาพ 42 ค่า MR กับ UCS ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าปาล์มและเถ้ายาง L/FA = 0.4–0.6... 80

ภาพ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นคืนตัวและค่า E_{50} ของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่..... ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์ม (P) และเถ้ายาง (R) ที่อัตราส่วน S70-P30 และ S70 R30 โดยมีค่า L/FA อยู่ในช่วง 0.4–0.6 81

ภาพ 44 ผลการทดสอบค่าความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (Vp) (ก) 7 วัน และ (ข) 28 วัน..... 83

ภาพ 45 ผลการทดสอบค่าความเร็วคลื่นทุติยภูมิ (Vs) (ก) 7 วัน และ (ข) 28 วัน 84

ภาพ 46 โมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้นและโมดูลัสเฉือนเริ่มต้นกับค่ากำลังแรงอัดแกนเดี่ยว..... 85

ภาพ 47 ความสัมพันธ์ความเร็วคลื่นกับกำลังอัด (qu) 85

ภาพ 48 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุการบ่มต่าง ๆ ($q_{u(D)}$) ต่อค่ากำลังอัดแกนเดียวที่อายุ 28 วัน ($q_{u(28D)}$) 87

ภาพ 49 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (q_u) และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_{50})..... 87

ภาพ 50 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวและค่าความเครียดที่จุดวิบัติของ ดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์ โดยพิจารณาผลของอัตราส่วน $Na_2SiO_3/NaOH$ = (ก) 0.67, (ข) 1 และ (ค) 1.5..... 88

ภาพ 51 จุลภาคดินตะกอนผสมเถ้าปาล์ม (S:P = 70:30) ที่ L/FA = 0.4–0.6 ขยาย 5,000 เท่า 92

ภาพ 52 จุลภาคดินตะกอนผสมเถ้ายาง (S:R = 70:30) ที่ L/FA = 0.4–0.6 ขยาย 5,000 เท่า 94

บทที่ 1

บทนำ

ที่มาและความสำคัญของปัญหา

กว๊านพะเยาเป็นทะเลสาบน้ำจืดธรรมชาติที่ใหญ่ที่สุดในภาคเหนือและอันดับ 3 ของประเทศไทย คำว่า "กว๊าน" ตามภาษาพื้นเมืองหมายถึง "บึง" กว๊านพะเยามีอาณาบริเวณมากถึง 12,831 ไร่ หรือ 20.53 ตารางกิโลเมตร อดีตมีความลึกเฉลี่ย 2.62 เมตร ปัจจุบันมีความลึกเฉลี่ยประมาณ 1.93 เมตร สามารถเก็บกักน้ำได้ 55.65 ล้านลูกบาศก์เมตร ซึ่งกว๊านพะเยาประสบปัญหาการกักเก็บน้ำได้น้อย เนื่องจาก บริเวณกว๊านพะเยามีลักษณะภูมิประเทศล้อมรอบไปด้วยภูเขาเมื่อเกิดฝนตกทำให้การไหลของน้ำจากภูเขาจะเกิดการชะล้างพังทลายของดิน เป็นสาเหตุของเกิดการทับถมกันของดินตะกอนส่งผลให้กว๊านพะเยาตื้นเขินจากการทับถมดินตะกอน ด้วยเหตุนี้ทางหน่วยงานกรมชลประทานได้ดำเนินการขุดลอกดินตะกอนออกจากกว๊านพะเยา เพื่อเพิ่มปริมาณเก็บกักน้ำในกว๊านพะเยา ดังแสดงในภาพ 1(a) พบว่าจากการขุดลอกดินตะกอนกว๊านถูกกองทิ้งอยู่บริเวณรอบ ๆ กว๊านพะเยาเป็นจำนวนมาก ดังแสดงในภาพ 1(b) ตะกอนที่ขุดลอกถือว่าเป็น “วัสดุเหลือใช้” หรือเรียกได้ว่าเป็น “ขยะสิ่งแวดล้อม”

ดังนั้น การจัดการดินตะกอนกว๊านจึงถือเป็นเรื่องสำคัญ หน่วยงานต่าง ๆ ได้มีการณรงค์การอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมมากขึ้น จึงทำให้หลายหน่วยงานมีจุดมุ่งหมายจะนำของเหลือใช้มาใช้ให้เกิดประโยชน์และเพิ่มคุณค่า ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความต้องการที่จะนำดินตะกอนที่ได้จากการขุดลอกใต้ท้องกว๊านพะเยา ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้มาใช้ประโยชน์ด้านวิศวกรรมการทางสำหรับงานถนน ถึงอย่างไรก็ตามถ้าจะนำดินตะกอนกว๊านพะเยามาใช้ในงานโครงสร้างถนนอาจไม่เป็นไปตามมาตรฐานการออกแบบที่กำหนดไว้ เพราะดินตะกอนมีความชื้นตามธรรมชาติสูง และอาจมีปริมาณสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ ปนอยู่ในดิน ทำให้ดินมีกำลังรับแรงเฉือนที่ต่ำ จากปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการนำเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินมาใช้ในการเพิ่มคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเพื่อให้สามารถนำไปใช้สำหรับงานถนนได้ เช่น การปรับปรุงดินด้วยการผสมซีเมนต์ การปรับปรุงดินด้วยจีโอพอลิเมอร์ เป็นต้น แต่ในปัจจุบันนั้น การปรับปรุงดินด้วยการใช้ปูนซีเมนต์มีค่าใช้จ่ายที่สูงและกระบวนการผลิตเกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งทำให้โลกร้อนขึ้นทำให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ผู้วิจัยจึงมี

แนวคิดที่จะหาวัสดุเพื่อมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ โดยใช้เถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากโรงไฟฟ้าไฟฟ้าชีวมวล มาเป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์เพื่อปรับปรุงดินคุณภาพดินตะกอน

จีโอโพลิเมอร์ คือ วัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมีสมบัติคล้ายกับปูนซีเมนต์แต่ใช้พลังงานในการผลิตน้อยกว่า ซึ่งจีโอโพลิเมอร์สามารถสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบซิลิกา (Silica) และอะลูมินา (Alumina) เช่น เถ้าลอย เป็นต้น จุดเด่นที่สำคัญอีกประการณ์หนึ่งของจีโอโพลิเมอร์ คือ ในกระบวนการผลิตไม่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของปัญหาสภาวะโลกร้อนในปัจจุบัน แตกต่างจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่สิ่งแวดล้อมในปริมาณมาก ซึ่งงานวิจัยของ Sukmak et al. (2013) ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยมาพัฒนาความแข็งแรงของดินเหนียว โดยใช่ดินเหนียวเป็นมวลรวมละเอียดและเถ้าลอยใช้เป็นวัสดุปอซโซลานิก เถ้าลอยจะถูกกระตุ้นด้วยสารละลายอัลคาไลน์ (L) คือ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเป็นด่านสูง แล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จีโอโพลิเมอร์ไรเซชั่น (Geopolymerization) ส่งผลให้เกิดการเชื่อมประสานกันมีสมบัติคล้ายกับปูนซีเมนต์ เถ้าชีวมวลมาจากการเผาเพื่อนำความร้อนไปใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมมีปริมาณรวมกันประมาณ 20 ล้านตันต่อปี (Chindaprasirt, 2012) เถ้าชีวมวลกลายเป็นขยะที่ถูกกองทิ้งทำให้เกิดเป็นมลภาวะและเถ้าส่วนใหญ่ยังไม่ได้ถูกนำ มาใช้ประโยชน์แต่อย่างไร จึงต้องมีการนำไปกำจัดทิ้งในบ่อที่เตรียมไว้หรือใช้ในการถมที่ กลายเป็นปัญหาที่สร้างผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกเถ้า (FA) 2 ชนิด คือ เถ้าปาล์ม (palm oil fuel ash) และเถ้ายาง (rubber ash) จากโรงไฟฟ้าชีวมวล นำเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์เพื่อปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนกว๊าน

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนกว๊านพะเยาด้วยจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งอัตราส่วนผสม อัตราส่วนดินตะกอนต่อเถ้าชีวมวล (S : FA) เท่ากับ 90:10 80:20 และ 70:30 ใช้สารละลายอัลคาไลน์ (L) คือ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Na_2SiO_3/NaOH) เท่ากับ 0.67, 1 และ 1.5 และอัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อเถ้าชีวมวล (L/FA) เท่ากับ 0.4, 0.5, 0.6 ซึ่งใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8 โมลาร์ เพื่อปรับปรุงดินตะกอนกว๊านพะเยา ให้สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุสำหรับงานถนนได้ตามมาตรฐานกรมทางหลวงดินซีเมนต์ชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางซึ่งกำลังรับแรงอัดไม่น้อยกว่า 1724 kPa และ 689 kPa

(ก)

(ข)

ภาพ 1 เรือขุดลอกตะกอน (ก) และกองดินตะกอนกว้านที่ถูกขุดขึ้นมา (ข)

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

การปรับปรุงสมบัติของดินตะกอนโดยใช้จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าปาล์มและเถ้ายางสำหรับนำไปใช้ในงานวิศวกรรมผิวทางมีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1. ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำดินตะกอนกว๊านพะเยามาใช้ประโยชน์ในด้านวิศวกรรมผิวทาง

2. ศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้านกำลังของดินตะกอนกว๊านที่ถูกปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์มและเถ้ายาง

3.เพื่อสนับสนุนให้เกิดการนำวัสดุท้องถิ่นภายในประเทศมาใช้ร่วมกับวัสดุเหลือทิ้งให้เกิดประโยชน์สูงสุด

ขอบเขตการวิจัย

การปรับปรุงสมบัติของดินตะกอนโดยใช้จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าปาล์มและเถ้ายางสำหรับนำไปใช้ในงานวิศวกรรมผิวทางมีขอบเขตการวิจัยดังต่อไปนี้

1. รวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย

2. ตัวอย่างในการทดสอบจะเลือกใช้ดินตะกอนกว๊านพะเยา และเถ้าชีวมวลที่ได้จากโรงไฟฟ้ากลุ่มธุรกิจพลังงานไฟฟ้าจากชีวมวล บริษัท ท่าฉาง กรีน เอ็นเนอร์ยี่ จำกัด (มหาชน) จังหวัดสุราษฎร์ธานี

3. อัตราส่วนดินตะกอนกว๊านต่อเถ้าชีวมวลเท่ากับ 90:10 80:20 และ 70:30

4. ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เท่ากับ 8 โมลาร์

5. อัตราส่วน โซเดียมซิลิเกต/โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Na_2SiO_3/ NaOH) เท่ากับ 0.67 1 และ 1.5

6. อัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์/เถ้า (L/FA) เท่ากับ 0.4 0.5 0.6 โดยน้ำหนัก

7. การทดสอบในห้องปฏิบัติการประกอบไปด้วย การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนและเถ้า การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction test) ตามมาตรฐาน ASTM D 1557 (2016) การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว (Unconfined compression test) ตามมาตรฐาน ASTM D 2166 (2016) การทดสอบความคงทน (wetting and drying durability) ตามมาตรฐาน ASTM D559 (2015) การทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว ตามมาตรฐาน AASHTO T307 (2012) และวิธีเรโซแนนซ์อิสระ ASTM C215 (1999)

8. การทดสอบคุณสมบัติทางเคมีเพื่อหาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคในห้องปฏิบัติการประกอบไปด้วย การทดสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) และการทดสอบ energy dispersive x-ray spectroscopy (EDS)

9. งานวิจัยนี้กำหนดปริมาณน้ำในการบดอัดและผสมให้เท่ากันในทุกสูตรส่วนผสม โดยไม่คำนึงถึงประเภทหรือปริมาณเถ้าที่ใช้

แนวทางดำเนินงานวิจัย

แนวทางการดำเนินงานวิจัยจะแสดงแนวทางดำเนินงานโดยแบ่งออกเป็น 9 ขั้นตอนหลัก ดังแสดงในหัวข้อด้านล่าง และภาพ 2 ดังต่อไปนี้

ทบทวนการศึกษางานวิจัย บทความ และมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

หาแหล่งวัตถุดิบตัวอย่างดินตะกอนกว๊านพะเยาที่บริเวณขุดลอก และตัวอย่างเถ้าลอยที่ได้จากการโรงไฟฟ้าซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เถ้าลอย 2 ชนิด คือ เถ้าลอยปาล์มและเถ้าลอยยาง จากโรงไฟฟ้ากลุ่มธุรกิจพลังงานไฟฟ้าชีวมวล บริษัท ท่าฉาง กรีน เอ็นเนอร์ยี่ จำกัด (มหาชน) จังหวัดสุราษฎร์ธานี จากนั้นนำตัวอย่างดินตะกอนกว๊านพะเยาและเถ้าลอยมาทำการทดสอบและหาคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมและคุณสมบัติทางเคมี

ทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินตะกอนกว๊านพะเยาและหาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้ง ได้ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด (maximum dry density, $g_{dry,max}$) และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (optimum moisture content, OMC)

ทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนผสมจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยปาล์มและเถ้าลอยยาง อัตราส่วนดินตะกอน : เถ้าลอย เท่ากับ 90:10 80:20 และ 70:30 ผสมสารละลายอัลคาไลน์ (L) อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Na_2SiO_3/ NaOH) เท่ากับ 0.67 1 และ 1.5 โดยใช้อัตราส่วนสารละลาย อัลคาไลน์ต่อเถ้าลอย (L/FA) เท่ากับ 0.4 0.5 0.6 โดยน้ำหนัก และใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8 โมลาร์ ในระยะเวลาในการบ่มตัว 7 28 60 และ 90 วัน ตามลำดับ

ทดสอบความคงทนของดินตะกอนผสมจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยปาล์มและเถ้าลอยยาง ที่สภาวะเปียกสลับแห้ง (wetting and drying durability test) ณ รอบที่ 1 3 และ 6 ในระยะการบ่มตัว 7 28 และ 60 วันตามลำดับ

ทดสอบโมดูลัสคืนตัว (M_R) และวิธีเรโซแนนซ์อิสระ (FFR) ที่ระยะเวลาในการบ่มตัว 7 28 และ 60 วัน ตามลำดับ

ทดสอบคุณสมบัติทางเคมี ประกอบไปด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุใช้การทดสอบโดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรส (XRF) และการทดสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของดินตะกอนผสมจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยปาล์มและเถ้าลอยยาง

สรุปวิเคราะห์และประเมินผลจากการทดสอบ

จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์และนำเสนองานวิจัย

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

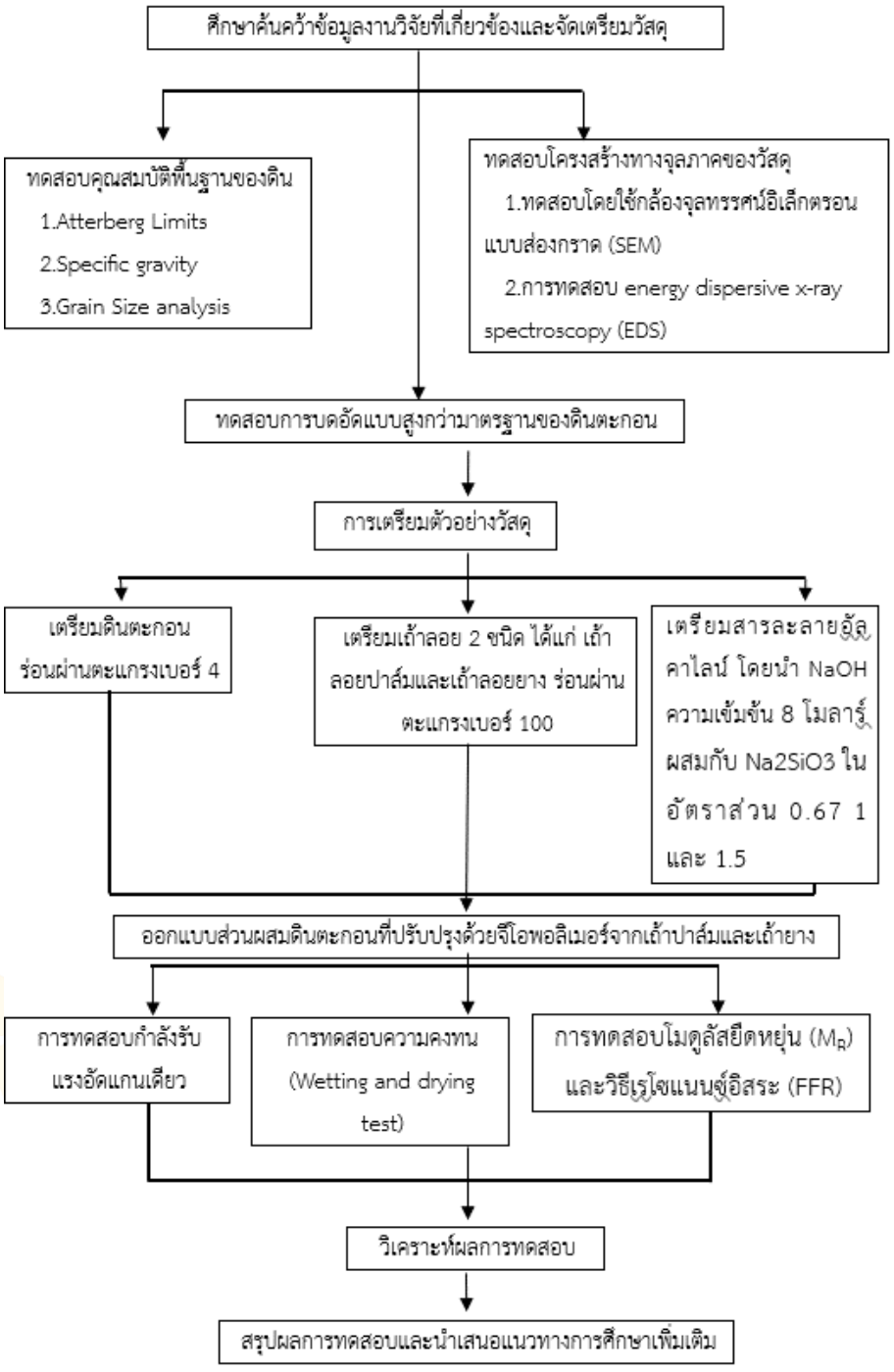
1. ได้ทราบถึงคุณสมบัติของดินตะกอนกว๊านพะเยา เถ้าปาล์ม และเถ้ายาง

2. ได้ศึกษาคุณภาพและสมบัติทางวิศวกรรมของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ถูกปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์และเถ้าลอย

3. เพื่อนำวัสดุภายในประเทศมาใช้ให้เกิดประโยชน์มากที่สุด

4. เป็นแนวทางในการศึกษาค้นคว้าองค์ความรู้ใหม่ ๆ เกี่ยวกับแนวทางการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุทางวิศวกรรม

5. เพื่อเป็นแนวทางในการจัดการทรัพยากรที่ถูกต้องและเกิดผลประโยชน์สูงสุดแก่ชุมชน



ภาพ 2 แผนแนวทางดำเนินงานวิจัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันนั้นการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยการใช้ปูนซีเมนต์มีค่าใช้จ่ายที่สูงมากขึ้นและกระบวนการผลิตเกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งทำให้โลกร้อนขึ้นทำให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จากปัญหาดังกล่าวจึงทำให้นำแนวคิดที่จะหาวัสดุเพื่อมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ โดยใช้เถ้าชีวมวลซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการผลิตไฟฟ้ามาเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ เพื่อปรับปรุงดินคุณภาพตะกอนซึ่งส่งผลให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ลดลง และเพื่อที่จะประหยัดค่าใช้จ่ายในโครงการอีกทั้งยังสามารถรู้สมบัติของดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์ ดังนั้นแล้วจึงต้องหาเอกสารและข้อมูลวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อที่จะสามารถรู้แนวทางและกระบวนการในการดำเนินการให้ตรงกับมาตรฐานนั้นเอง

ดินตะกอนกว๊านพะเยา

กว๊านพะเยาเป็นทะเลสาบน้ำจืดธรรมชาติที่ใหญ่ที่สุดในภาคเหนือและอันดับ 3 ของประเทศไทย กว๊านพะเยาเป็นบึงน้ำขนาดใหญ่ที่ได้รวบรวมลำห้วยต่าง ๆ มากถึง 18 สาย มีอาณาบริเวณมากถึง 12,831 ไร่ หรือ 20.53 ตารางกิโลเมตร อดีตมีความลึกเฉลี่ย 2.62 เมตร ปัจจุบันมีความลึกเฉลี่ยประมาณ 1.93 เมตร สามารถเก็บกักน้ำได้ 55.65 ล้านลูกบาศก์เมตร ปัจจุบันกว๊านพะเยาประสบปัญหาการกักเก็บน้ำได้น้อย เนื่องจาก บริเวณกว๊านพะเยามีลักษณะภูมิประเทศล้อมรอบไปด้วยภูเขา เมื่อเกิดฝนตกทำให้การไหลของน้ำจากภูเขาจะเกิดการชะล้างพังทลายของดิน ซึ่งเป็นสาเหตุของเกิดการทับถมกันของดินตะกอนและเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากขึ้นภายในกว๊านพะเยา ส่งผลให้กว๊านพะเยาตื้นเขิน ทำให้สามารถเก็บกักน้ำได้น้อยลง ด้วยเหตุนี้ทางหน่วยงานกรมชลประทานได้ดำเนินการขุดลอกดินตะกอนออกจากกว๊านพะเยา เพื่อเพิ่มปริมาณเก็บกักน้ำในกว๊านพะเยา ดังแสดงในภาพ 1 ปัจจุบันพบว่าจากการขุดลอกดินตะกอนกว๊านถูกกองทิ้งอยู่บริเวณรอบ ๆ กว๊านพะเยาเป็นจำนวนมาก ดังนั้นการจัดการดินตะกอนกว๊านจึงถือเป็นเรื่องสำคัญ

ปัจจุบันหน่วยงานทางภาครัฐได้มีการดำเนินนโยบายในการปรับปรุงระบบนิเวศบริเวณกว๊านพะเยา สำหรับพัฒนาแหล่งน้ำ ทางหน่วยงานกรมชลประทาน จังหวัดพะเยา ได้ดำเนินการขุดลอกเอาดินตะกอนที่เกิดจากการสะสมของดินตะกอนกว๊านพะเยา อันเนื่องจากการจากการพังทลาย ชะล้างตกตะกอนและซากพืชซากสัตว์ สะสมลงสู่กว๊านพะเยา ดังแสดงในตารางที่ 2 นอกจากนี้งานวิจัยของ Chompoorat et al., (2020) ยังแสดงถึงคุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนกว๊านพะเยา ดังตารางที่ 2

ภาพ 3 กองดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ถูกขุดลอกขึ้นมากองทิ้งไว้

ตาราง 1ปริมาณตะกอนกว๊านพะเยาที่ขุดลอกในปี 2551-2563

ปี	ตะกอนที่ขุดลอก (m^3)
2551	491,420
2552	401,304
2553	334,181
2554	333,570
2555	314,265
2556	291,205
2557	291,205
2558	110,048

ตาราง 1 (ต่อ)

ปี	ตะกอนที่ขุดลอก (m^3)
2559	402,110
2560	224,315
2561	194,880
2562	195,585
2563	200,610

ที่มา: หน่วยงานควบคุมและกำจัดวัชพืชจังหวัดพะเยา, 2551 – 2563

ตาราง 2 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและการจำแนกชนิดดินตะกอนกว๊านพะเยา

การทดสอบ	ผลการทดสอบ
การทดสอบหาขีดพิกัดอัตเตอร์เบิร์ก	LL = 41.70 % PL = 23.40 % SL = 20.44 %
การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ	2.72
การทดสอบหาขนาดคละ	ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 เท่ากับ 99.94 % ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 เท่ากับ 92.00 %
การจำแนกตามเกณฑ์ของ AASHTO	A-7-6
การจำแนกตามเกณฑ์ของ USCS	CL

ที่มา: Chompoorat (2020)

การปรับปรุงคุณภาพดินเพื่อนำไปใช้ในการก่อสร้างพื้นทาง

ในการก่อสร้างถนนนั้นปัจจัยที่ควรคำนึง ก็จะเป็นเรื่องดินส่วนใหญ่ เพราะดินนั้นจะเป็นจุดเริ่มต้นในการก่อสร้าง จึงมักมีปัญหาและอุปสรรคเข้ามาให้แก้ไข ซึ่งดินนั้นก็จะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ ซึ่งบางครั้งปัญหานี้ก็สามารถแก้ไขโดยการเปลี่ยนสถานที่ก่อสร้าง ซึ่งถ้าหากไม่สามารถหลีกเลี่ยงสถานที่ก่อสร้างได้นั้น ก็จะมีวิธีที่นิยมใช้ก็คือ การใช้เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดิน ก็จะส่งผลทำให้ดินที่ถูกปรับปรุงนั้นมีเสถียรภาพมากขึ้น อีกทั้งยังเพิ่มคุณสมบัติของตัวดินให้สามาถนำไปใช้กับงานด้านวิศวกรรมพื้นทาง (Pavement engineering) อีกความหมายของการปรับปรุงดิน ก็ยังหมายถึง การปรับปรุงวัสดุในท้องถิ่นที่มีอยู่นั้นให้เกิดประโยชน์และยังเพิ่มคุณสมบัติเดิมให้ดียิ่งขึ้น โดยทำการเพิ่มสารผสม (Stabilizing agent) เข้าไป ซึ่งนักวิจัยก็จะทำการปรับปรุงเป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับงานวิศวกรรมพื้นทาง

วัตถุประสงค์ของการปรับปรุงคุณภาพดินทางเคมี

การปรับปรุงคุณภาพของดิน คือ การทำให้ดินตามธรรมชาติมีความสามารถนำไปใช้งานทางด้านวิศวกรรมได้ เช่น การปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังของดินให้มีความแข็งแรงสามารถรับกำลังแบกทานได้ การคงสภาพของดิน ซึ่งการปรับปรุงคุณภาพดินในทางวิศวกรรมมี 4 วิธี คือ การบดอัดดิน (Compaction) การระบายน้ำ (Drainage) การเสริมแรง (Reinforcement) และการเติมสารเชื่อมประสาน (Cementation)

การปรับปรุงคุณภาพดินทางเคมี

วิธีการปรับปรุงคุณภาพของดินที่เหมาะสมกับดินเหนียวอ่อน ได้แก่ การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีทางเคมี เนื่องจาก สารประสานสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับซิลิกา (Si) และอะลูมินา (Al) ที่มีอยู่มากในดินได้ดี เมื่อผสมสารเคมีในปริมาณที่เหมาะสม จะส่งผลให้ดินเหนียวจะมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมดีขึ้นเช่นกัน มีกำลังอัดสูงขึ้น กำลังรับแรงเฉือนสูงขึ้น อัตราการทรุดตัวต่ำลง สารประสานที่นิยมนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียว ได้แก่ ปูนซีเมนต์ ปูนขาว ของเสียจากอุตสาหกรรม เช่น เถ้าลอย เป็นต้น

Hausmann (1990) กล่าวไว้ว่า การปรับปรุงคุณภาพของดินสำหรับนำมาใช้ในงานวิศวกรรมพื้นทางนั้นมีวัตถุประสงค์ก็เพื่อเพิ่มความสามารถในการรับกำลัง (Strength) ลดการเสียรูป (Distortion) ภายใต้การเพิ่มขึ้นของแรง ลดความสามารถในการยุบอัดตัว (Compressibility)

ควบคุมการหดตัวและการบวมตัว (Shrinkage and Swelling) ควบคุมการระบายน้ำ (Drainage) และการซึมน้ำ (Permeability) ดังนั้น การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีการใช้สารเคมี เป็นการปรับปรุงดินที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในงานทางด้านวิศวกรรมผิวทาง เพราะสามารถเพิ่มความสามารถการรับกำลังของดินได้รวดเร็ว ซึ่งสารเคมีที่นำมาใช้ผสมนั้นก็มีอยู่เป็นจำนวนมาก ไม่ว่าจะเป็น ปูนซีเมนต์ ปูนขาวและเถ้าลอย แต่ในงานวิจัยฉบับนี้จะเน้นกล่าวถึงการปรับปรุงดินด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์มและเถ้ายาง

Sukmak et al. (2013) ได้นำเสนอปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการพัฒนาความแข็งแรงของจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้ดินเหนียวเป็นมวลรวมละเอียดและเถ้าลอยใช้เป็นวัสดุปอซโซลานิก ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายอัลคาไลน์ คือโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในส่วนผสมได้กำหนดอัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH และอัตราส่วน L/FA ต่าง ๆ ซึ่งใช้อุณหภูมิในการบ่ม 65 75 และ 85 องศาเซลเซียส จากการศึกษาพบว่า กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามสารกระตุ้นอัลคาไลน์ที่เพิ่มขึ้น และการพัฒนากำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่มตัวที่ 28 วันคล้ายกับการพัฒนากำลังรับแรงอัดในปูนซีเมนต์

United States Airforce (1969) ได้กล่าวถึงการปรับปรุงคุณภาพของดินโดยแบ่งตามขนาดและค่าดัชนีพลาสติก (Plastic Index) ดังแสดงในตารางที่ 3

ตาราง 3 คุณภาพของดินที่ชนิดต่างกัน

ชนิดของดิน	วิธีการปรับปรุงที่มีประสิทธิภาพสูงสุด
1.ดินเม็ดหยาบ (Coarse granular)	• ดินผสมยางมะตอย • ดินผสมซีเมนต์ • ปูนขาวผสมเถ้าลอย
2.ดินเม็ดละเอียด (Fine granular soils)	• ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ • ดินผสมยางมะตอย • ปูนขาวผสมเถ้าลอย • คลอไรด์

ตารางที่ 3 (ต่อ)

3.ดินเหนียวมีค่าพลาสติกต่ำ (Clay of low plasticity)	• การบดอัด • ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ • ตัวกันน้ำทางเคมี • ปูนขาวดัดแปลง
4.ดินเหนียวมีค่าพลาสติกสูง (Clay of high plasticity)	• การปรับปรุงด้วยปูนขาว

ที่มา: United States Airforce (1969)

ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีการใช้สารเคมี เป็นการปรับปรุงดินที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในงานทางด้านวิศวกรรมผิวทาง เพราะสามารถเพิ่มความสามารถการรับกำลังของดินได้รวดเร็ว ซึ่งสารเคมีที่นำมาใช้ผสมนั้นก็มีอยู่เป็นจำนวนมาก ไม่ว่าจะเป็น ปูนซีเมนต์ ปูนขาวและเถ้าลอย แต่ในงานวิจัยฉบับนี้จะเน้นกล่าวถึงการปรับปรุงดินด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์มและเถ้ายาง

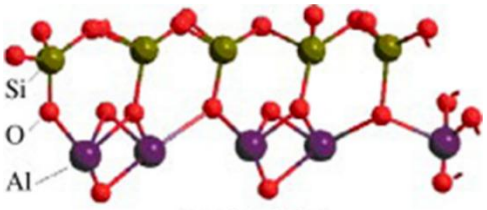
จีโอพอลิเมอร์

จีโอพอลิเมอร์ คือ วัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมีสมบัติคล้ายกับปูนซีเมนต์แต่ใช้พลังงานในการผลิตน้อยกว่า จุดเด่นที่สำคัญอีกประการณ์หนึ่งของจีโอพอลิเมอร์ คือ ในกระบวนการผลิตไม่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของปัญหาสภาวะโลกร้อนในปัจจุบัน แตกต่างจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่สิ่งแวดล้อมในปริมาณมาก

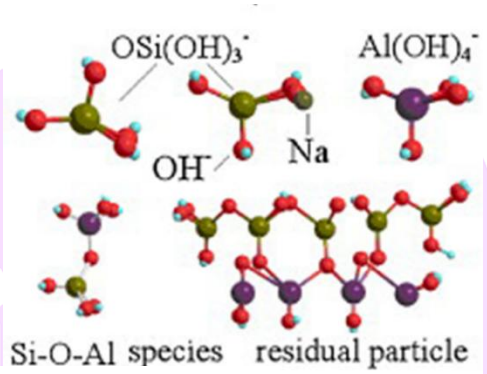
Davidovits et al. (1999) กล่าวไว้ว่า จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุผสมอะลูมิโนซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติแบบอสัณฐาน ถูกคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ. 1970 โดยศาสตราจารย์โจเซฟ เดวิดดอฟ (Prof. Joseph Davidovits) นักวิทยาศาสตร์เคมีชาวฝรั่งเศส โดยจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชั่น (Geopolymerization) ของสารตั้งต้นที่ประกอบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นหลัก (Hassan et al., 2019) ได้แก่ ดินขาวเผา (Metakaolin) เถ้าลอย (Fly ash) หรือ เถ้าแกลบ (Rice husk ash) ซึ่งสารตั้งต้นดังกล่าวอาจผ่านกระบวนการต่าง ๆ เช่น การบด หรือ การเผา เพื่อเพิ่มความสามารถของวัสดุในการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอไรเซชั่น (Geopolymerization) และถูกชะล้าง

ด้วยสารละลายด่างที่มีความเข้มข้นสูง ได้แก่ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เพื่อชะอะลูมินาและซิลิกาออกมาจากสารตั้งต้น แล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้จีโอพอลิเมอร์สามารถก่อตัวและให้กำลังอัดได้

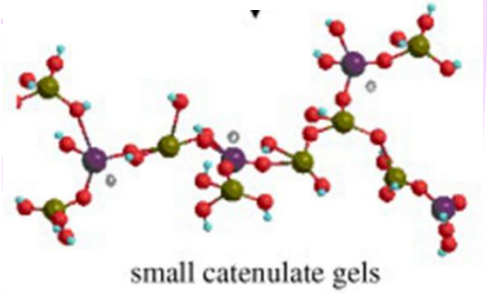
โดยปฏิกิริยาในการเกิดจีโอพอลิเมอร์เป็นกระบวนการที่ปล่อยความร้อนออกมา (Exothermic process) แบ่งออกเป็นสามขั้นตอน ในขั้นตอนแรก คือ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (Deconstruction) เป็นการก่อตัวของเครือข่ายอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) ซึ่งทำให้เกิดโมเลกุลขนาดใหญ่ที่มีโครงสร้างรูปแบบอสัณฐานสามมิติ (Amorphous) ขั้นตอนที่สอง คือ การเกิดพอลิเมอไรเซชั่น (Polymerization) ก่อให้เกิดโครงสร้างแบบเจลของจีโอพอลิเมอร์จากอะลูมิเนตและซิลิเกตในสารตั้งต้นกับสารละลายด่าง และขั้นตอนสุดท้ายคือการคงรูป (Stabilization) โดยเกิดขึ้นหลังจากการเก็บรักษาตัวอย่างเป็นเวลา 24 ชั่วโมงในช่วงอุณหภูมิคงที่ ทำให้เครือข่ายของจีโอพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบเจลขนาดเล็กถูกเปลี่ยนเป็นเครือข่ายขนาดใหญ่ จากการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างนี้เอง ทำให้จีโอพอลิเมอร์มีความเสถียรมากขึ้น (Yip et al., 2005) ดังภาพ 4



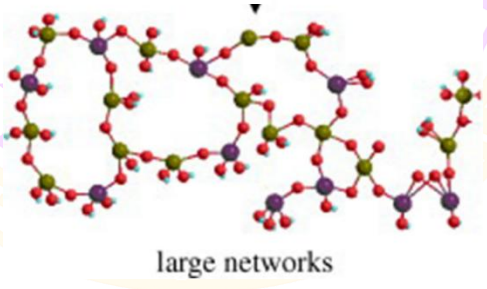
ขั้นตอนที่ 1 : Deconstruction (H_2O,OH^-,Na^+)



ขั้นตอนที่ 2 : Polymerrization



ขั้นตอนที่ 3 : Stabilization

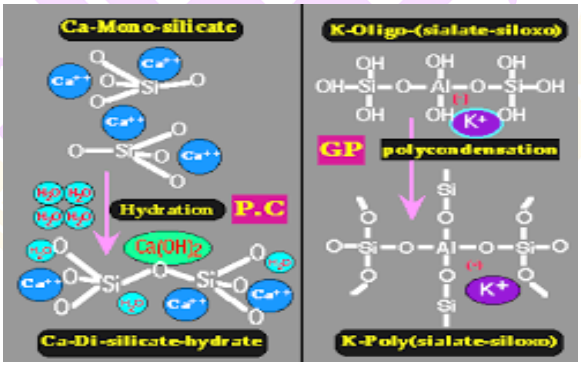


ภาพ 4 แสดงกระบวนการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชั่น (Geopolymerization process)

ที่มา: (Yao et al., 2009)

ความแตกต่างระหว่างจีโอพอลิเมอร์กับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือ วัสดุเชื่อมผสานชนิดหนึ่งเมื่อผสมกับน้ำแล้วเกิดการแข็งตัว ได้จากการเผาส่วนผสมของหินปูนและหินดินดานหรือดินเหนียวที่อุณหภูมิ 1,400-1,600 องศาเซลเซียส ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญอยู่ 4 เฟสอันได้แก่ ไตรแคลเซียม ซิลิเกต (Tricalcium silicate, $3CaO.SiO_2$) ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium silicate, $2CaO.SiO_2$) ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (Tricalcium aluminate, $3CaO.Al_2O_3$) และเตตระแคลเซียมอะลูมิโน เฟอร์ไรต์ (Tetrecalcium aluminoferrite, $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$) ความแตกต่างระหว่างซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และจีโอพอลิเมอร์ที่องค์ประกอบทางเคมีและปฏิกิริยาเคมี โดยซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างและมีความแข็งแรงโดยการทำปฏิกิริยากับน้ำ ในขณะที่จีโอพอลิเมอร์เกิดจากการที่สารอะลูมิโนซิลิเกต ทำปฏิกิริยากับสารละลายอัลคาไลน์ ซึ่งอัลคาไลไฮดรอกไซด์จะสลายพันธะและปล่อยไอออนจากวัสดุอะลูมิโนซิลิเกต และมีการประสานพันธะใหม่เป็นโมเลกุลลูกโซ่โดยอัลคาไลไอออนปรับสมดุลประจุในโครงสร้างโพลีไซอะเลตและเกิดการคายน้ำในระหว่างเกิดปฏิกิริยาเคมี (S.E. Wallah, and B.V. Rangan, 2006) รูปที่ 5 ฝั่งซ้ายมือแสดงการแข็งตัวของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์โดยปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียม-ซิลิเกตกลายเป็นแคลเซียม-ไดซิลิเกต-ไฮเดรตและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $Ca(OH)_2$ ฝั่งขวามือแสดงการแข็งตัวของจีโอพอลิเมอร์โดยโมเลกุลโพแทสเซียมไซอะเลตไซลอกโซกลายเป็นโครงข่ายโมเลกุลลูกโซ่ของโพแทสเซียมไซอะเลตไซลอกโซ (J. Davidovits, 1999)



ภาพ 5 แสดงปฏิกิริยาเคมีชนิดซีเมนต์ไฮเดรชันเปรียบเทียบกับชนิดจีโอพอลิเมอไรเซชัน

ที่มา: (J. Davidovits, 1999)

นอกจากนี้ในงานวิจัยหลายงานได้แสดงการเปรียบเทียบจีโอพอลิเมอร์กับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่าจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดอะลูมิโนซิลิเกตที่ถูกกระตุ้นโดยอัลคาไลน์ (J. Davidovits, 1994) ต่างจากซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่จีโอพอลิเมอร์ใช้ต้นทุนการผลิตต่ำกว่าและสามารถผลิตได้โดยใช้วัสดุที่มีอยู่ตามธรรมชาติผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และน้ำ (J. Davidovits, 1988) เนื้อวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ใช้เวลาในการก่อตัวที่เร็วกว่า มีความทนทานต่อกรดที่ดีกว่า (J. Davidovits, 1987, J. Davidovits, et al., 1990) จีโอพอลิเมอร์ยังมีกำลังรับแรงอัด (Compressive strength) สูงและมีการหดตัว (Shrinkage) จากการแข็งตัวที่น้อยกว่า (P.G. Malone, T. Kirkpatrick, and C.A. Randall, 1986, J. Davidovits, 1988) มีความทนทานต่อความร้อนและไฟที่ดีกว่า

จากการทดลองของ J. Davidovits (1988) ได้รายงานว่า จีโอพอลิเมอร์สามารถก่อตัวได้อย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิห้องและได้กำลังรับแรงอัดในช่วง 20 เมกะปาสคาล หลังจาก 4 ชั่วโมงแรก และ 70-100 เมกะปาสคาล หลังจาก 28 วัน และความแข็งแรงส่วนใหญ่ของชิ้นงานอายุ 28 วัน เกิดขึ้นระหว่าง 2 วันแรกของการบ่ม ดังนั้นจีโอพอลิเมอร์จึงเป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจ เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการใช้งานและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (J.L. Provis, 2014)

โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์

โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ประกอบด้วย ซิลิคอน-ออกโซ-อะลูมิเนต (S.E. Wallah, and B.V. Rangan, 2006) ที่เชื่อมต่อกันเป็นโครงข่ายสามมิติสูตรเคมีของจีโอพอลิเมอร์ แสดงในสมการที่ (2.1)

$$M_n(-(SiO_2)_z - ALO_2)_n.wH_2O \qquad (2.1)$$

โดย M คือ ธาตุอัลคาไลน์

\- คือ การยึดเกาะพันธะ

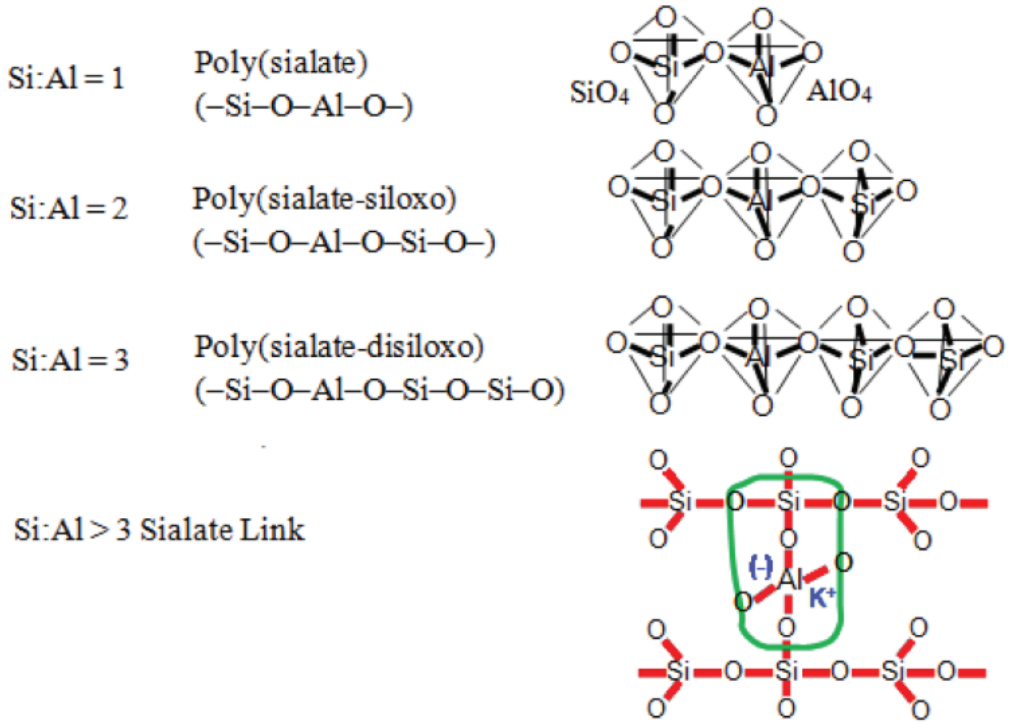
Z คือ จำนวนโมเลกุล SiO_2 เท่ากัย 1,2 หรือ 3

N คือ จำนวนหน่วยโมเลกุลที่ต่อกันเป็นสายโซ่ หรือ Degree of Polymerization

w คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำ

J. Davidovits (2002) ได้จำแนกโครงสร้างพื้นฐานของจีโอพอลิเมอร์ โดยแบ่งตามสัดส่วนระหว่าง Si ต่อ Al ได้แก่ (1) Si:Al = 1 เรียก โพลีไซอะเลต Poly(sialate) (2) Si:Al = 2 เรียก โพลี

ไซอะเลตไซลอกโซ (Polysialate-siloxo) (3) Si:Al=3 เรียกโพลีไซอะเลตไดไซลอกโซ (Polysialate-disiloxo) และ (4) Si:Al > 3 เรียก ไซอะเลตลิงค์ (Sialate link) ดังแบบจำลองในภาพ 5



ภาพ 6 โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์พวกสายโซโพลิไซอะเลต

ที่มา: J. Davidovits (2002)

โดยอัตราส่วนอะตอมของ Si:Al จะบอกถึงคุณสมบัติของวัสดุและประเภทของการใช้งานวัสดุนั้น ๆ อาทิเช่น อัตราส่วน 1, 2, และ 3 ทาให้ได้สารที่มีโครงสร้างเป็น 3 มิติ หากอัตราส่วนสูงกว่า 3 จะเกิดการเชื่อมขวางขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5 หรืออัตราส่วน 15 หรือมากกว่า จะทำให้ได้สารประกอบโพลิเมอร์มากขึ้น ตัวอย่างคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ เป็นดังนี้

- อัตราส่วน 2:1 เหมาะสมสำหรับงานซีเมนต์และคอนกรีต
- อัตราส่วน 3:1 สารประกอบไฟเบอร์กลาสและวัสดุสาหรับกระบวนการผลิตไททาเนียมที่สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงระหว่าง 200-1,000 องศาเซลเซียส
- อัตราส่วนระหว่าง 20:1–35:1 ได้สารที่มีโครงสร้างเป็นแบบเชื่อมขวาง (Crosslink) ใน 2 มิติ มีคุณสมบัติเป็นสารประกอบไฟเบอร์กลาสที่มีประสิทธิภาพสูง (High Performance Fiber Composites)

โซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate ,Na_2SiO_3)

โซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate) หรือที่รู้จักกันในชื่อ "น้ำแก้ว หรือ น้ำกาว" เป็นสารประกอบไปด้วย โซเดียมออกไซด์, ซิลิกา และน้ำ ผสมกันอยู่ในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน และสารเคมีตัวนี้เป็นน้ำ ยาบ่มคอนกรีตชนิดโซเดียมซิลิเกต สามารถแทรกซึมบนพื้นผิวของคอนกรีตและปูนฉาบได้เป็นอย่างดี หน้าที่ถูกกำหนดให้มาทำปฏิกิริยากับหินปูน ส่วนที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮโดรชั่นอีกครั้งหนึ่ง จึงทำให้ผิวหน้าของคอนกรีตแข็งขึ้น ลดรูพรุนที่เกิดจากน้ำ ในคอนกรีตที่ระเหยออกมาได้

กระบวนการผลิตโซเดียมซิลิเกต

เริ่มจากการนำเอาโซดาแอชกับซิลิกามาหลอมให้เป็นน้ำแก้วที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส แล้วทำให้เย็นตัวเป็นก้อนแก้วแล้วนำไปเข้า เครื่องบ่มอัตโนมัติ เพื่อละลายอีกครั้งให้กลายเป็นน้ำแก้ว สัดส่วนของโซเดียมกับซิลิกาจะบ่งบอกถึงคุณสมบัติของ โซเดียมซิลิเกต ถ้าทำให้สัดส่วนใกล้กันมาก เราจะได้เป็นผลึกของของแข็งที่เรียกว่า โซเดียมเมตาซิลิเกต

ประโยชน์ของโซเดียมซิลิเกต

โซเดียมซิลิเกตมีประโยชน์มากสำหรับอุตสาหกรรมผงซักฟอก และกำลังมีบทบาทในฐานะเป็นตัวเชื่อมและทำให้เกิดโครงสร้างของพวก จีโอพอลิเมอร์ที่ไม่จำเป็นต้องเผาสูงเหมือนการผลิตเซรามิก สาหรับในอุตสาหกรรมเซรามิกถือว่าเป็นสัดส่วนที่น้อยมากเมื่อเทียบกับการใช้งานในอุตสาหกรรมอื่น ใช้สำหรับเป็นตัวช่วยกระจายลอยตัว เป็นตัวเชื่อมประสานสำหรับการก่ออิฐเตาเป็นเคลือบใสสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความมันแบบไม่มากนัก เป็นแค่ปิดผิวจาง

ภาพ 7 โซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate ,Na_2SiO_3)

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH)

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) หรือ โซดาไฟ (Caustic soda) เป็นสารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นด่างแก่ ที่ละลายได้ในน้ำ ประกอบด้วยโลหะโซเดียม และเบสไฮดรอกไซด์ มีลักษณะเป็นของแข็ง (ในรูปแบบผง เกล็ด เป็นแท่งหรือ เม็ดกลม) สีขาว ไม่มีกลิ่น ดูดความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 318 องศาเซลเซียส ผลิตได้จากกระบวนการแยกสารทางไฟฟ้า (Electrolysis) ของน้ำเกลือและเป็นสารเคมีที่ใช้ทั่วไปในห้องปฏิบัติการ และใช้ในอุตสาหกรรมเคมี เช่น อุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษ สบู่และผลิตภัณฑ์ซักฟอก เคมีภัณฑ์ทำความสะอาด โรงกลั่นน้ำ มันอุตสาหกรรมโลหะ อาหาร เส้นใยเรยอน สิ่งทอใช้ในการฟอกย้อม ล้างสีไหม และช่างเจียระไนพลอยก็ใช้ในขั้นตอนล้างเม็ดพลอยที่เจียระไนเสร็จแล้ว นอกจากนั้นยังใช้ปรับสภาพน้ำทิ้งที่มีฤทธิ์เป็นกรดให้เป็นกลางก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติอีกด้วย

โซเดียมไฮดรอกไซด์บริสุทธิ์ มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว ที่พบได้บ่อยจะทำเป็นเม็ด โซเดียมไฮดรอกไซด์นี้ดูดความชื้นได้ดีมาก หากนำออกมาจากภาชนะบรรจุแล้วตั้งทิ้งไว้สักครู่จะดูดความชื้นจากอากาศ จากสภาพที่เป็นเม็ดแข็ง จะเริ่มเหลว เนื้อสารจะน้อยลง เพราะถูกเจือจางด้วยความชื้น จึงควรเก็บโซเดียมไฮดรอกไซด์ไว้ในขวดที่มีฝาปิดสนิท เมื่อเตรียมโซเดียมไฮดรอกไซด์บริสุทธิ์ให้เป็นสารละลายโดยการละลายน้ำ ให้ความร้อนออกมาจึงต้องระมัดระวัง หากเตรียมความเข้มข้นสูงห้ามเตรียมในภาชนะพลาสติก เนื่องจาก ความร้อนที่เกิดจากการละลายด้วยน้ำ ทำให้พลาสติกละลายได้ความสามารถในการละลายของโซดาไฟ จะลายได้ในตัวทำละลายที่มีขั้วได้นอกจากน้ำ เช่น เอทานอล และเมทานอล ไม่สามารถละลายได้ใน อีเทอร์ หรือตัวทำละลายอื่นที่ไม่มีขั้ว

ภาพ 8 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH)

เถ้าปาล์ม (Palm oil fuel ash)

เถ้าปาล์ม คือ เถ้าที่ได้จากการเผากากของผลปาล์มน้ำมัน ได้แก้ เศษกะลาและเส้นใยของผลปาล์มที่อุณหภูมิประมาณ 800° C ถึง 900° C เพื่อเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าปาล์มที่เกิดขึ้นมีการนำไปใช้ประโยชน์น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณที่เกิดขึ้นในแต่ละปี ส่วนใหญ่ต้องนำไปทิ้ง ทำให้เกิดปัญหาในเรื่องการกำจัดตามมาและเป็นการสูญเสียพื้นที่ในการทิ้งโดยสูญเปล่า นอกจากนี้ยังทำให้เกิดมลภาวะเนื่องจากการฟุ้งกระจายของเถ้าปาล์มอีกด้วย โดยเถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้มีลักษณะเป็นผงฝุ่นและมีสารประกอบทางเคมีซึ่งส่วนใหญ่เป็นซิลิกา และอะลูมินา มีสมบัติในการประสานเล็กน้อยหรือไม่มีเลยแต่เมื่ออยู่ในรูปเป็นผงละเอียด และเมื่อมีความชื้นจะทำปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติและเกิดเป็นสารประกอบ ซึ่งมีสมบัติในการประสาน

Hussin et al. (1996) ได้ศึกษาการนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน โดยบดเถ้าให้มีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์และแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 60 พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่อายุ 28 วัน ให้กำลังรับแรงอัดสูงที่สุด โดยกำลังรับแรงอัดในช่วงก่อน 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดที่ต่ำ แต่หลังจากนั้น กำลังรับแรงอัดมีการพัฒนากำลังสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าปาล์มเป็นส่วนผสม นอกจากนี้คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มยังมีสมบัติต้านทานการกรัดกร่อนที่เกิดจากสารละลายกรดไฮโดรคลอริกได้ดีกว่าคอนกรีตที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว

ภาพ 9 เถ้าปาล์ม (palm oil fuel ash) ร่อนผ่านตะแกรงละเอียดเบอร์ 100

เถ้ายาง (Rubber ash)

เถ้ายาง มาจากอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการแปรรูปยางพารา การทำเฟอร์นิเจอร์จากต้นยางพาราเป็นจำนวนที่สูงมาก ซึ่งในการแปรรูปยางพาราจากอุตสาหกรรมดังกล่าวทำให้เกิดปริมาณขี้เลื่อย เศษไม้ ปีกไม้ จากไม้ยางพาราเป็นจำนวนมาก โดยหลังจากได้เศษไม้จากอุตสาหกรรมนั้นจะถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ รวมถึงการเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดปริมาณเถ้าไม้ยางพาราเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ปริมาณที่เหลือทำให้เกิดปัญหาในการกำจัดทิ้ง รวมไปถึงปัญหาการกักเก็บ และค่าใช้จ่ายในการกำจัด และเพื่อลดปัญหานั้นการนำเถ้ายางที่ของเหลือทิ้งมาใช้ให้เหลือน้อยที่สุด โดยการนำวัสดุเถ้ายางที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงนำมาใช้ประโยชน์ในการเพิ่มความแข็งแรงและสามารถลดการใช้ปูนซีเมนต์ได้

ดนุพลและจริชาติ (2543) ได้ศึกษามอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและไม้ยางพารา พบว่า เถ้าไม้ยางพารามีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งเป็นปริมาณมากพอที่จะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน โดยจับตัวเป็นก้อนแข็งได้โดยไม่ต้องผสมปูนขาว

ตาราง 4 พื้นที่ปลูกยางพาราของประเทศไทย

ปี	พื้นที่ปลูก (ล้านไร่)
2548	13.610
2549	14.354
2550	15.353
2551	16.717
2552	17.410

ที่มา: สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2553)

ภาพ 10 เถ้ายาง (rubber ash) ร่อนผ่านตะแกรงละเอียดเบอร์ 100

ปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการให้กาลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์

ความเข้มข้นของ NaOH

บทบาทของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอไรเซชัน คือ ทำหน้าที่สลายพันธะโมเลกุลของสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตแล้วแตกตัวเป็นไอออนออกมาทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอไรเซชัน (ปริญญา จินดาประเสริฐ และคณะ 2005) หากโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความเข้มข้นสูงจะส่งผลให้ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอไรเซชันเกิดได้ดีขึ้น เป็นผลให้เวลาในการก่อตัวเร็วขึ้น และค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์สูงขึ้นด้วย และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ยังเป็นที่นิยมในการใช้สังเคราะห์และพัฒนาจีโอพอลิเมอร์มากที่สุดในกลุ่มของอัลคาไลไฮดรอกไซด์ เนื่องจาก โซเดียมไฮดรอกไซด์มีราคาถูกที่สุด หาใช้ได้ง่าย และมีความหนืดต่ำ

อัตราส่วนระหว่างโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์

โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) เป็นสารละลายที่มีซิลิคอนละลายได้เป็นองค์ประกอบมีโครงสร้างแบบกึ่งเสถียรซึ่งจะมีการตกตะกอนช้ามาก (P.W. Brown, 1990) บทบาทของโซเดียมซิลิเกตในปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอไรเซชัน คือ ทำหน้าที่เป็นตัวประสานซิลิกอนไอออนและอะลูมิเนียมไอออนในปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอไรเซชันเพื่อให้เกิดเป็นโครงสร้างโพลีไซอะเลตที่มีความเสถียร โซเดียมไอออนและซิลิคอนละลายได้ที่พบในสารละลายโซเดียมซิลิเกตทำหน้าที่โดยโซเดียมไอออนจากสารละลายโซเดียมซิลิเกตจะช่วยปรับสมดุลประจุให้กับ AlO_4^-

ซิลิกาละลายได้เมื่ออยู่ในรูปของซิลิเกตจะทำหน้าที่ประสานโครงสร้างโดยเพิ่มการแบ่งปันออกซิเจนร่วมกับอะลูมิเนตและซิลิเกตที่อยู่ข้างเคียง เป็นการจัดเรียงโครงสร้างเกิดเป็นเจล

ของอะลูมิโนซิลิเกตและควบแน่นเป็นสายโซ่ ปริมาณที่มากขึ้นของซิลิคอนละลายได้ในสารละลายโซเดียมซิลิเกตจะทาหน้าที่จัดเรียงโครงสร้างก่อให้เกิดเจลของอะลูมิโนซิลิเกตได้เร็วขึ้น การจัดเรียงโครงสร้างที่รวดเร็วส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์เกิดโครงสร้างแบบอสัณฐาน ซึ่งโครงสร้างจะไม่เปลี่ยนไปเป็นแบบผลึกแม้จะผ่านระยะเวลานาน (P. Duxson, et al., 2007) หน้าที่ดังกล่าวสัมพันธ์กับอัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยทั่วไปแล้วถ้าหากอัตราส่วนดังกล่าวมีค่าสูงถึงค่าที่เหมาะสม จะส่งผลให้ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอไรเซชันเกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้นทำให้ใช้เวลาในการก่อตัวที่เร็วขึ้น เกิดโครงสร้างแบบอสัณฐานได้มากขึ้นเป็นผลให้ค่ากาลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์สูงขึ้นด้วย

อัตราส่วนระหว่างสารละลายและผงจีโอพอลิเมอร์ (L/FA)

การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์โดยทั่วไปหากอัตราส่วนระหว่างสารละลายและผงจีโอพอลิเมอร์มีค่าสูงเกินไป สารละลายจะไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอไรเซชันกับผงจีโอพอลิเมอร์อย่างทั่วถึง เป็นผลให้จีโอพอลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดต่ำ ในทางตรงกันข้ามหากอัตราส่วนระหว่างผงจีโอพอลิเมอร์และสาร ละลายมีค่าต่ำ ปริมาณของเหลวสารละลายที่มีมากในส่วนผสมจะส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์ใช้เวลาในการก่อตัวนานขึ้น กำลังรับแรงอัดและความสามารถในการใช้งานของจีโอพอลิเมอร์จึงถูกกำหนดโดยอัตราส่วนและสมบัติของวัสดุที่ใช้สังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ ถนัดกิจ ชารีรัตน์ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ (2005) ได้ศึกษาการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอย พบว่าเมื่อขนาดของอนุภาคลดลงจะส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์มีกาลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น

อุณหภูมิในการบ่ม

บทบาทของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในการบ่มในปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอไรเซชัน คือ เร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอไรเซชัน โดยทั่วไปแล้วอุณหภูมิการบ่มที่สูงขึ้นจะทำให้เวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ก่อตัวได้เร็วขึ้น

S. Songpiriyakij (2005) ได้กล่าวว่า เวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของ จีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากตะกรันเหล็ก สัมพันธ์กับอุณหภูมิในการบ่ม พบว่า อุณหภูมิการบ่มที่สูงขึ้นสามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดในระยะเริ่มต้น และเวลาในการบ่มที่นานขึ้นมีผลในการเพิ่มค่ากำลังอัดให้กับจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอย

การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง

รวบรวมรายงานวิจัยที่จะกล่าวถึง เกี่ยวกับคุณสมบัติของการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอย

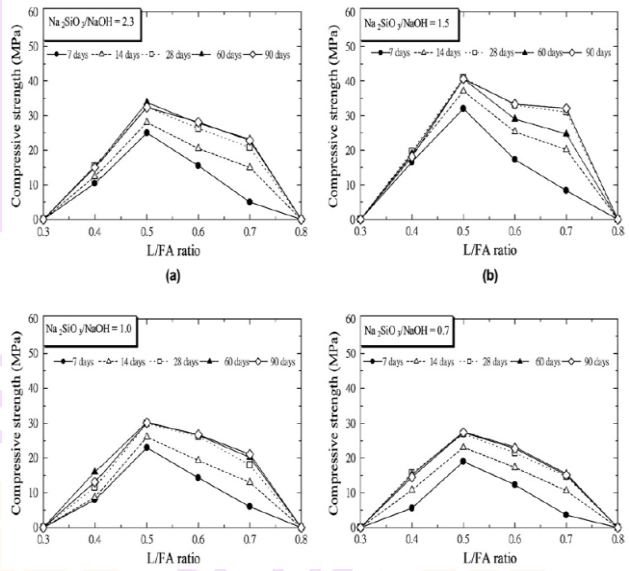
Davidovits (1994) ได้ศึกษาถึงคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ซีเมนต์ พบว่า จีโอพอลิเมอร์เป็นซีเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาโพลิคอนเดนเซชัน หรือเรียกว่า ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชั่น (Geopolymerization) เกิดเป็นโครงสร้างแบบซีโอลิทิก (Zeolitic) นอกจากนั้นคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ยังสามารถเติมสารต่างๆ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่ดีขึ้นหรือเพิ่มความแข็งแรงให้กับจีโอพอลิเมอร์ จีโอพอลิเมอร์จะแข็งตัวได้ในอุณหภูมิปกติและมีกำลังรับแรงอัด 70-100 MPa มีความแข็ง หดตัวน้อย ทนความเย็นและต้านทานการสึกกร่อน ทำให้มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่สมบูรณ์แบบใช้กับโครงสร้างได้ระยะยาว ในด้านสิ่งแวดล้อมพบว่าการใช้จีโอพอลิเมอร์จะดีกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ การผลิตจีโอพอลิเมอร์ไม่ต้องการกระบวนการการเผาด้วยอุณหภูมิสูงที่ต้องใช้เชื้อเพลิงมากในการเตรียมส่วนประกอบและไม่เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มากเหมือนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Hardjito et al. (2004) พบว่าจีโอโพลิเมอร์หรือเรียกว่า อลูมิโนซิลิเกตโพลิเมอร์ สามารถผลิตจากวัตถุดิบที่มีซิลิกาและอลูมินาในปริมาณมากไม่ว่าจากธรรมชาติหรือจากกากของเสียจากโรงงาน เช่น เถ้าถ่านหิน องค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์คล้ายกับซีโอไลท์ โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ในระดับโมเลกุลจะเชื่อมกันทั้งแบบสั้นและยาว ผลการศึกษาพบว่าจีโอโพลิเมอร์เป็นสารที่มีคุณสมบัติที่จะใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ในอนาคต เพราะจีโอโพลิเมอร์มีคุณสมบัติที่เหมาะสมและมีผลดีต่อสิ่งแวดล้อม แต่จำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมเพื่อสร้างมาตรฐานการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์

เธียรศักดิ์ กลับประสิทธิ์ และคณะ (2551) ได้ทำการวิจัยศึกษาจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่ทำจากเถ้าถ่านหินและเถ้าชีวมวล โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมด อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ อัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Na_2SiO_3: NaOH) โดยน้ำ หนักต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ นอกจากนี้ยังศึกษาถึง ผลกระทบอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มต่อกำ ลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ด้วย โดยตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์เพสต์รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตรสูง 6 เซนติเมตร ได้หล่อขึ้นเพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน ผลการศึกษาพบว่า การใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมดที่สูงขึ้น ส่งผลให้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์เพสต์มีค่าน้อยลง ซึ่งทำให้กำลังอัดมีค่าสูงขึ้นค่าอัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ร้อยละ 40:60 ให้กำลังอัดของเพสต์สูงที่สุด โดยที่อายุ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 510 กก/ซม^2 ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เริ่มมีผลต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์เมื่อมีอายุหลังจาก 28 วันโดยการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น ทำให้การพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุปลายดีขึ้น และการบ่มจีโอพอลิเมอร์เพสต์

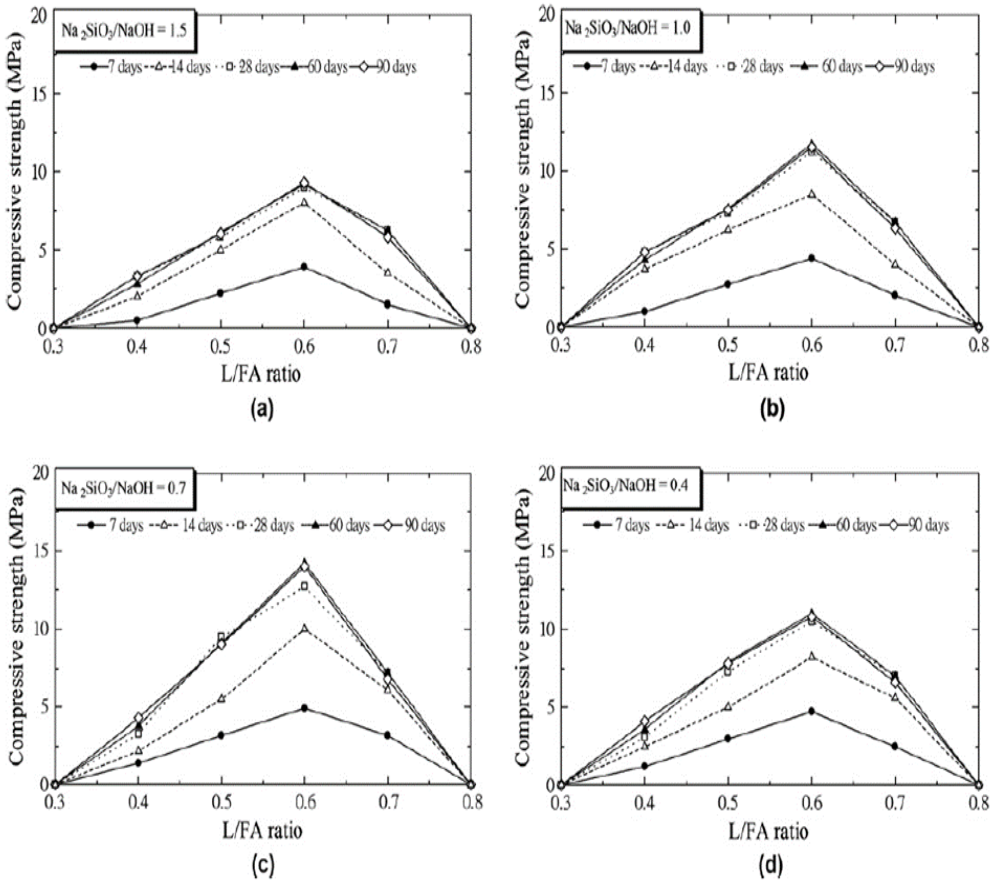
ด้วยอุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์สูงขึ้นในระยะเวลาช่วงต้น

Sukmak et al. (2013) ได้นำเสนอปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการพัฒนาความแข็งแรงของ จีโอพอลิเมอร์ที่ใช้ดินตะกอนเป็นมวลรวมละเอียดและเถ้าลอยใช้เป็นวัสดุปอซโซลานิก ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายอัลคาไลน์ (L) คือ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในส่วนผสมได้กำหนดอัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH และอัตราส่วน L/FA ต่าง ๆ ซึ่งใช้อุณหภูมิในการบ่ม 65 และ 75 องศาเซลเซียส จากการศึกษาพบว่า กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามสารกระตุ้นอัลคาไลน์ที่เพิ่มขึ้น และการพัฒนากำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่มตัวที่ 28 วันคล้ายกับการพัฒนากำลังรับแรงอัดในปูนซีเมนต์ โดยอัตราส่วน L/FA ที่เหมาะสมที่สุดให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงที่สุดอยู่ที่ 0.5 และอัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH เท่ากับ 1.5 จากงานวิจัยจีโอโพลิเมอร์จากดินตะกอนแสดงให้เห็นว่า ดินตะกอนสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบร่วมกับเถ้าถ่านหินในการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่มีกำลังอัดและความคงทนสูง



ภาพ 11 กำลังอัดดินเหนียวผสมจีโอโพลีเมอร์ที่ 65 °C 48 ชม.

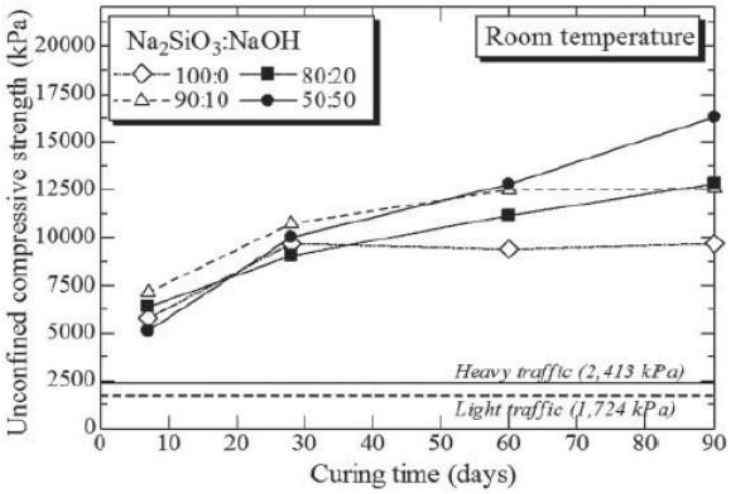
ที่มา: Sukmak et al. (2013)



ภาพ 12 กำลังอัดดินเหนียวผสมจีโอโพลีเมอร์ที่ 75 °C 48 ชม.

ที่มา: Sukmak et al. (2013)

Phummiphan et al. (2015) ได้ศึกษาการบ่มตัวอย่างอุณหภูมิ (27 ถึง 30°C) เป็นระยะเวลา 7 28 60 และ 90 วัน แสดงให้เห็นว่า UCS ที่ระยะเวลา 7 วัน เป็นไปมาตรฐานจราจรแบบหนาแน่น และ UCS เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม แม้หลังจาก 28 วัน เนื่องจาก การเจริญเติบโตของผลผลิตของจีโอโพลิเมอไรเซชัน (N-A-S-H) ทุกช่วงเวลา ค่า UCS สูงสุดถูกพบที่อัตราส่วน Na_2SiO_3 : NaOH 50 : 50 ที่ระยะเวลาการบ่ม 60 และ 90 วัน ขณะที่ระยะเวลการบ่มนั้นมีผลมากกว่าในตัวอย่างที่ 28 วัน ค่า UCS ที่อัตราส่วน Na_2SiO_3 : NaOH 100 : 0 เป็นอัตราส่วนพื้นฐานที่ระยะการบ่มที่ 28 วัน ดีที่สุด ได้จากปฏิกิริยา C-S-H ซึ่งเป็นผลผลิตจากวัสดุเชื่อมประสานซีเมนต์จากปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาจาก Na_2SiO_3 และ แคลเซียมจากเถ้าลอย เป็นการเพิ่มเจลช่วยประสานระหว่างอนุภาคดินและช่องว่างระหว่างอนุถาคดินเข้าด้วยกัน



ภาพ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดและช่วงเวลาการบ่มตัวอย่าง

ที่มา: Phummiphan et al. (2015)

ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยในการศึกษาการนำดินตะกอนกว้านพะเยาใช้เป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าปาล์มและเถ้ายาง สำหรับนำไปใช้ในงานวิศวกรรมผิวทาง และจากงานวิจัยทั้งหมดที่กล่าวมาในข้างต้น เป็นการศึกษาอิทธิพลที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด ซึ่งให้ความสำคัญต่อการศึกษาเฟคเตอร์ต่าง ๆ จึงสามารถนำค่าเฟคเตอร์เหล่านั้นมาช่วยในการพิจารณาถึงความสำคัญต่องานวิจัยได้โดยตรง เช่น อัตราส่วน Na_2SiO_3 : NaOH, อัตราส่วน Soil : FA และเลือกใช้อุณหภูมิต่ำ (30°C) ในการบ่มตัวอย่าง

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

บทนี้ได้กล่าวถึงวิธีการดำเนินงานวิจัยซึ่งประกอบไปด้วย การจัดเตรียมวัสดุวัสดุอุปกรณ์ เครื่องมือ และขั้นตอนการทดสอบตัวอย่างตามมาตรฐานต่าง ๆ ซึ่งทำการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานตามมาตรฐาน American society for testing and materials (ASTM) และ มาตรฐาน American association of state highway and transportation officials (AASHTO) แสดงในหัวข้อดังต่อไปนี้

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

สำหรับวัสดุที่นำมาใช้ในการทดสอบเพื่อศึกษาวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วย ดินตะกอนกว๊านพะเยา เถ้าลอยปาล์ม และเถ้าลอยยาง โดยตัวอย่างดินตะกอนที่นำมาทดสอบจะเป็นดินที่ได้จากกระบวนการขุดลอกตะกอนในกว๊านพะเยา อำเภอเมืองพะเยา จังหวัดพะเยา และได้ทำการเก็บตัวอย่างดินจากบริเวณพื้นที่ ดังแสดงในภาพ 14 ส่วนเถ้าลอยปาล์มและเถ้าลอยยางที่ใช้ได้จากการใช้ปาล์มน้ำมันและไม้ยางพาราเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า จากโรงไฟฟ้ากลุ่มธุรกิจพลังงานไฟฟ้าชีวมวล บริษัท ท่าฉาง กรีน เอ็นเนอร์ยี่ จำกัด (มหาชน) จังหวัดสุราษฎร์ธานี

ภาพ 14 บริเวณเก็บตัวอย่างดินตะกอน

ภาพ 15 กองดินตะกอนกว๊านที่ถูกขุดลอกทิ้งไว้

ที่มา: กรมชลประทาน, 2566

(ก) **(ข)** **(ค)**

(ง) **(จ)**

ภาพ 16 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ (ก) ดินตะกอนกว๊านพะเยา (ข) เถ้าปาล์ม (ค) เถ้ายาง (ง) โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และ (จ) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

การทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และคุณสมบัติวิศวกรรม

ในการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยปาล์มและเถ้าลอยยาง ตามมาตรฐานดังตาราง 5 เป็นข้อกำหนดควบคุมสำหรับการทดสอบในงานวิจัยนี้

ตาราง 5 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และคุณสมบัติทางวิศวกรรม

การทดสอบ	**วัตถุประสงค์**	**มาตรฐาน**
การทดสอบหาขีดพิกัดอัตเตอร์เบิร์ก (Atterberg test)	เพื่อหาค่า LL PL PI และ SL	ASTM D4318 ASTM D 427
การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity test)	เพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะ	ASTM D 854
การหาขนาดคละ (Grain size analysis)	เพื่อหาขนาดคละและจำแนกดิน	ASTM D 442
การบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction test)	เพื่อหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด	ASTM D 1157
กำลังรับแรงอัดแบบแกนเดี่ยว (Unconfined compression test)	เพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว	ASTM D 2166
การทดสอบความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้ง (Wetting and drying durability test)	เพื่อหาคุณสมบัติต่อความทนทานต่อการสึกหรอ	ASTM D 559-96
การทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus, M_R)	เพื่อหาโมดูลัสคืนตัว	AASHTO T307
การทดสอบหาความเร็วเฉือนหรือเรโซแนนซ์อิสระ (Free-Free Resonant Frequency method, FFR)	เพื่อทดสอบหาความเร็วเฉือน	ASTM C215
X-ray fluorescence (XRF)	เพื่อวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี	-
Scanning electron microscope (SEM)	เพื่อศึกษาลักษณะสัณฐานและของ ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง	-
energy dispersive x-ray spectroscopy (EDS)	เพื่อวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี	-

โดยในการทดสอบแต่ละประเภทมีรายละเอียดดังนี้

การทดสอบหาขีดพิกัดอัตเตอร์เบิร์ก (Atterberg test)

3.1 ขีดจำกัดเหลว (Liquid limit, LL) คือ ปริมาณความชื้นในมวลดินขณะที่มวลดินเริ่มเปลี่ยนสภาพจากของเหลว (Viscous fluid) ไปเป็นสารหนืดตัวในสถานภาพพลาสติก (Plastic state)

3.2 ขีดจำกัดพลาสติก (Plastic limit, PL) คือ ปริมาณความชื้นในมวลดินขณะที่เปลี่ยนสถานภาพจากพลาสติกเป็นกึ่งของแข็ง (Semi - solid state)

3.3. ขีดจำกัดหดตัว (Shrinkage limit, SL) คือ ปริมาณความชื้นที่ดินเปลี่ยนจากสภาพกึ่งของแข็งเป็นของแข็ง และจะไม่มีการหดตัวต่อไปอีกแล้ว แต่เมื่อความชื้นยิ่งลดลงไปฟองอากาศจะเริ่มแทรกเข้าไปในมวลดิน และทำให้เกิดสภาวะไม่อิ่มตัวเกิดขึ้น จนกระทั่งไม่มี ความชื้นอยู่เลย

ส่วนค่าความชื้นในสถานภาพพลาสติกของดิน เราเรียกว่า ดัชนีพลาสติก Plasticity index (PL) คือ ผลต่างของ LL และ PL มักเป็นตัวแสดงถึงความเหนียวของดินและยังแสดงความไวต่อการเปลี่ยนสถานภาพต่อความชื้นของมวลดินนั้น จึงเป็นค่าที่สำคัญใช้มากในการจำแนกมวลดิน

การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity test)

ค่าความถ่วงจำเพาะของวัตถุใด ๆ คือ อัตราส่วนของน้ำหนักในอากาศของวัตถุต่อน้ำหนักน้ำที่อุณหภูมิ 4 °C ที่มีปริมาตรเท่าวัตถุนั้น (ถ.พ. คือ วัตถุนั้นหนักเป็นกี่เท่าของน้ำ) ในมวลดินจะประกอบด้วยธาตุสาร หลาย ๆ อย่าง ดังนั้นความถ่วงจำเพาะในมวลดินก็คือ ค่าเฉลี่ยของความถ่วงจำเพาะของธาตุ สารเหล่านั้น ดังจะเห็นได้ว่า ดินลูกรังบางชนิดมีธาตุเหล็กอยู่มากจึงทำให้มีค่าความถ่วงจำเพาะ สูงถึง 3.00 หรือมากกว่า ในทางตรงกันข้าม ถ้ามีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบสำคัญ ก็จะทำให้ มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำประมาณ 2.00 แต่กระนั้นค่าเฉลี่ยของมวลดินโดยทั่วไปจะอยู่ในระหว่าง 2.60 ถึง 2.80 ค่าความถ่วงจำเพาะ จะเป็นคุณสมบัติพื้นฐานสำคัญอีกค่าหนึ่ง ทำให้สามารถ คำนวณหาปริมาตรช่องว่าง (Void volume) ความอิ่มตัว (Degree of saturation) ความพรุน (Porosity) และอื่น ๆ ได้ อีกทั้งยังจะทำให้อนุมานได้ว่ามวลดินนั้น ๆ ประกอบด้วยธาตุสารอะไรบ้างที่เป็นองค์ประกอบ โดยดินตะกอนทั่วไปมีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ที่ 2.60-2.72

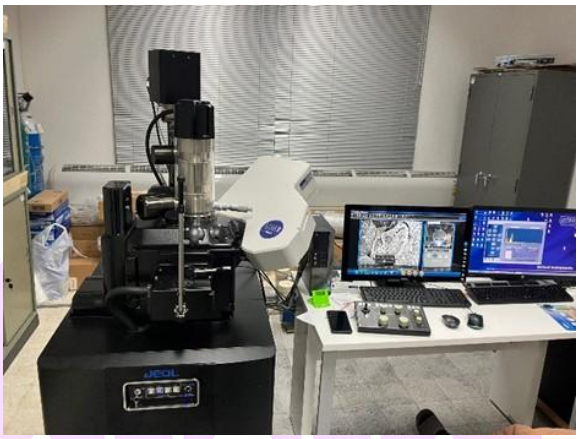
การทดสอบหาขนาดคละ (Grain size analysis)

ในมวลดินปริมาณหนึ่งอาจประกอบด้วยเม็ดดินหลายขนาด ตั้งแต่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 10 cm ไปจนถึงขนาด 0.0002 mm ซึ่งไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า โดยคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของมวลดินจะขึ้นอยู่กับขนาดเม็ดดิน เช่น มวลดินที่มีขนาดเม็ดใหญ่กว่าตะแกรงเบอร์ 200 (0.075 mm) ส่วนมากจะไม่มีความเหนียวหรือแรงยึดเกาะระหว่างเม็ดดิน ซึ่งเรียกว่า ดินทราย (Granular soil) ส่วนดินที่มีส่วนประกอบเป็นเม็ดเล็กมาก ๆ (ผ่านตระแกรงเบอร์ 200) ก็จะเรียกว่า ดินเหนียว (Cohesive soil) นอกจากนั้นขนาดของเม็ดดิน ยังมีอิทธิพลกับการซึมผ่านของน้ำ (Permeability) ความแข็งแรง (Strength) อัตราการทรุดตัว (Rate of consolidation) และอื่น ๆ อีกมากมาย การหาขนาดและการกระจายของเม็ดดินอาจทำได้ด้วยกันหลายวิธี แต่ที่จะนำมาปฏิบัติในงานวิจัยนี้ คือ วิธีร่อนผ่านตะแกรงแบบล้าง (Wet sieve analysis) สำหรับทดสอบกับดินที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.075 mm ขึ้นไป ส่วนวิธีตกตะกอนจะใช้ไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer) สำหรับใช้วัดการตกตะกอน สำหรับทดสอบกับดินที่มีขนาดเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร และนำขนาดคละของดินมาใช้ในการจำแนกประเภทของดินต่อไป

การทดสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning electron microscope (SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เรียกโดยย่อว่า SEM เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้อิเล็กตรอนเป็นแหล่งกำเนิดแสง เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะสัณฐานของวัสดุในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมาก และเนื่องจากข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่มีความยาวคลื่นแสงขนาดใหญ่กว่าลักษณะสัณฐานบางชนิดที่ต้องการศึกษา และกำลังความสามารถในการแยกชัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดามีค่าต่ำ ใช้ดูวัตถุเล็กสุด ประมาณ 0.2 μm และให้กำลังขยายสูงสุดไม่เกิน 3,000 เท่า ซึ่งไม่สามารถตรวจสอบรายละเอียดของวัตถุที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ได้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง มีความสามารถในการแยกชัดดี เนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้น เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของวัสดุ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีกำลังขยายมากกว่า 3,000 เท่าจนถึงระดับมากกว่า 100,000 เท่า และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพ ซึ่งขึ้นกับลักษณะตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100 nm อีกทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับโหมดเทคนิคการวิเคราะห์อื่น เช่น การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรเมตรีแบบกระจายพลังงาน (energy dispersive spectrometry, EDS) และ การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรเมตรีแบบกระจายความยาวคลื่น (wave length dispersive spectrometry, WDS) ที่เป็นข้อมูล

ทางเคมี จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วไป ทั้งในด้านวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี การแพทย์ อุตสาหกรรม นิติวิทยาศาสตร์โบราณคดี



ภาพ 17 เครื่องมือการทดสอบโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การทดสอบ energy dispersive x-ray spectroscopy (EDS)

การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของตัวอย่างทำโดยใช้ Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) ร่วมกับ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยเมื่อลำอิเล็กตรอนจาก SEM ชนกับตัวอย่าง จะเกิดการปล่อย รังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ ซึ่ง EDS วัดพลังงานเพื่อระบุชนิดและปริมาณเชิงสัมพัทธ์ของธาตุหลักและธาตุรอง พร้อมประเมินการกระจายตัวบนพื้นผิวตัวอย่าง ผลลัพธ์รายงานเป็น น้ำหนักร้อยละ (wt%) ในลักษณะ semi-quantitative เนื่องจากวัดได้เฉพาะผิวและมีความแม่นยำจำกัด แต่ยังให้ข้อมูลสำคัญต่อการประเมินคุณสมบัติทางเคมี ความสัมพันธ์กับพฤติกรรมทางฟิสิกส์ และการจำแนกประเภทวัสดุ เช่น low-calcium, high-calcium หรือ pozzolanic ash รวมถึงใช้เปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM C618 สำหรับการประเมินปฏิกิริยา pozzolanic, การตั้งตัว หรือ self-cementing ของวัสดุ)

การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction test)

การบดอัดเป็นกระบวนการที่ใช้แรงหรือน้ำหนักมากระทำเพื่อทำให้เม็ดดินเบียดตัวชิดกันเพื่อเพิ่มความแน่นและความสามารถในการรับน้ำหนัก ลดการทรุดตัว และลดการซึมผ่านของน้ำ โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานและทำการบดอัดตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ

จุดประสงค์ก็เพื่อประมาณค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด และปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของดินตะกอนสำหรับนำไปใช้เตรียมตัวอย่าง ในการทดสอบอื่น ๆ ต่อไป

ในโปรแกรมการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินตะกอนกว๊านพะเยา ตัวอย่างดินที่ในการทดสอบดินจะถูกแยกขนาดโดยเลือกใช้ดินที่มีขนาดผ่านตระแกรงเบอร์ 4 และตัวอย่างดินจะถูกทำให้มีสภาพที่ปราศจากความชื้นโดยการนำไปอบก่อนทำการทดสอบขั้นต่อไป

สำหรับวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ดังแสดงในภาพ 5 จะใช้โมลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ 17.5 ± 0.25 cm และมีความสูงเท่ากับ 15.2 ± 0.25 cm ซึ่งจะมีปริมาตรประมาณ 3175.5 cm^3 ส่วนค้อนสำหรับกระแทกจะมีน้ำหนักของค้อนรวมก้านจับเท่ากับ 4.39 kg และมีระยะยกเท่ากับ 43 cm ซึ่งจะนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ในการทดสอบดังแสดงในภาพอุปกรณ์สำหรับการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

ในขั้นตอนของการบดอัด หลังจากที่เตรียมตัวอย่างดินที่ปริมาณอัตราส่วน ใด ๆ แล้ว จากนั้นจะใส่น้ำเริ่มต้นผสมเข้าไปประมาณ 3% ของน้ำหนักดินแห้ง แล้วเริ่มทำการบดอัดดินด้วยการแบ่งชั้นบดอัดออกเป็น 5 ชั้น ด้วยการบดอัดจากการตกกระแทกของค้อนจำนวนชั้นละ 56 ครั้ง เมื่อบดอัดครบจำนวนตามที่ชั้นบดอัดแล้วจะทำการตัดแต่งตัวอย่างให้มีขนาดเท่ากับโมลบดอัด แล้วทำการเก็บข้อมูลน้ำหนักและปริมาณความชื้นของก้อนดินที่บดอัดไป ต่อจากนั้นจะทำการผสมดินอีกครั้งโดยเพิ่มปริมาณน้ำเข้าไปอีกเพื่อทำการบดอัดและเก็บข้อมูลอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะกระทำแบบนี้จนกว่าน้ำหนักของดินที่บดอัดแล้วมีค่าลดลง

(ก) **(ข)**

ภาพ 18 (ก) เครื่องทดสอบและ (ข) การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินตะกอนกว๊านพะเยา

ตาราง 6 โปรแกรมทดสอบของดินตะกอนที่ปรับปรุงโดยใช้จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าปาล์มและเถ้ายาง

ตัวอย่าง	L/FA	การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว	การทดสอบความคงทน	การทดสอบโมดูลัสคืนตัว	การทดสอบหาความเร็วเฉือน
S90-P10L0.4	0.4	3	-	-	-
S80-P20L0.4		3	-	-	-
S70-P30L0.4		3	3	3	3
S90-P10L0.5	0.5	3	-	-	-
S80-P20L0.5		3	-	-	-
S70-P30L0.5		3	3	3	3
S90-P10L0.6	0.6	3	-	-	-
S80-P20L0.6		3	-	-	-
S70-P30L0.6		3	3	3	3
S90-R10L0.4	0.4	3	-	-	-
S80-R20L0.4		3	-	-	-
S70-R30L0.4		3	3	3	3
S90-R10L0.5	0.5	3	-	-	-
S80-R20L0.5		3	-	-	-
S70-R30L0.5		3	3	3	3
S90-R10L0.6	0.6	3	-	-	-
S80-R20L0.6		3	-	-	-
S70-R30L0.6		3	3	3	3
		SUM	ทุกเงื่อนไข	ทุกอายุการบ่ม	1,026

หมายเหตุ 1. S คือ ดินตะกอนกว๊านพะเยา

FA คือ เถ้าลอย (เถ้าลอยปาล์ม เถ้าลอยยาง)

L คือ สารละลายอัลคาไลน์ (อัตราส่วน Na_2Sio_3 : NaOH)

P คือ เถ้าปาล์ม (Palm oil fuel ash)

R คือ เถ้ายาง (Rubber ash)

2. หน่วยของปริมาณส่วนผสมคิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนักดินแห้ง เช่น P-S90FA10L0.4 คือ สัดส่วนดินตะกอนกว้านพะเยา 90 เปอร์เซ็นต์ และเถ้าลอย 10 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักดินแห้ง ใช้สารละลายอัลคาไลน์ต่อเถ้าลอย เท่ากับ 0.4

3. การทดสอบความคงทน การทดสอบโมดูลัสคืนตัวและการทดสอบหาความเร็วเฉือน จะเลือกเฉพาะส่วนผสมที่ให้กำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวดีที่สุดไปทดสอบ

การประดิษฐ์โมล PVC และค้อนบดอัดสำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว

ในส่วนของตัวอย่างสำหรับทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวจากขนาดตัวอย่างทดสอบ เดิมจะใช้ตัวอย่างขนาดใหญ่เท่ากับโมลบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ซึ่งในการทดลองต้องมีการเตรียม ตัวอย่างในปริมาณที่มาก ดังนั้นจึงได้ประดิษฐ์โมลสำหรับทำการทดสอบด้วยการใช้ท่อ PVC ขนาด 2 นิ้วทำเป็นโมล เตรียมตัวอย่างทดสอบด้วยการผ่าครึ่งตามแนวยาวของท่อ และกำหนดความสูงของโมล PVC นี้ ให้มีอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเทียบกับความสูงเท่ากับ 1 ต่อ 2 อ้างอิงจากจากงานวิจัยของ ธัชชัย และคณะ, (2560) แสดงดังในภาพ 19

เนื่องจากการประดิษฐ์โมล PVC ขึ้นมาใหม่ทำให้การบดอัดไม่สามารถใช้ค้อนบดอัดทดสอบแบบเดิมได้ ดังนั้นจึงได้ทำการประดิษฐ์ค้อนบดอัดที่มีขนาดเล็กลงเพื่อให้สามารถนำมาใช้บดอัดให้เข้ากับโมล PVC ที่ประดิษฐ์ขึ้นมาได้แสดงในภาพ 20 จะแสดงถึงค้อนบดอัดขนาดใหม่ที่ประดิษฐ์ขึ้น ซึ่งค้อนบดอัดใหม่นี้จะมีน้ำหนักค้อนรวมก้านยกเท่ากับ 1.62 kg และ ระยะยกเท่ากับ 35.5 เซนติเมตร

ภาพ 19 โมล PVC ที่ประดิษฐ์ขึ้นมาใหม่

ภาพ 20 เครื่องมือกระแทกที่ใช้ในการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

การออกแบบพลังงานบดอัด

จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวและการทดสอบความคงทน ซึ่งโดยเฉพาะการทดสอบดังกล่าวที่ต้องใช้ตัวอย่างในขนาดที่แตกต่างกับตัวอย่างจากทดสอบบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน เหตุผลนี้เองทำให้ต้องมีการควบคุมหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างเพื่อให้ตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบนั้นมีหน่วยน้ำหนักที่เท่ากันกับดินที่บดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ซึ่งวิธีการควบคุมหน่วยน้ำหนักจะทำได้โดยวิธีการเทียบพลังงานในการบดอัด โดยมีวิธีการคำนวณเทียบพลังงานในการบดอัดจากสมการ 3.10.1 ดังนี้

$$E = \frac{B \times L \times W \times H}{V} \qquad (3.10.1)$$

เมื่อ E คือ พลังงานที่ใช้ในการบดอัด

B คือ จำนวนครั้งที่ใช้ในการบดอัดในแต่ละชั้น

L คือ จำนวนชั้นที่ใช้ในการบดอัด

W คือ น้ำหนักของค้อนบดอัด (รวมก้านยกด้วย)

H คือ ความสูงของระยะยกของค้อนบดอัด

V คือ ปริมาตรของโมล

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณหาพลังงานบดอัดจากการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของโมลบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานเท่ากับ 15.2 cm

ขนาดความสูงของโมลบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานเท่ากับ 17.7 cm

จะได้ปริมาตรของโมลบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานเท่ากับ 3211.814 cm^3

น้ำหนักของค้อนเท่ากับ 4.39 kg ระยะยกของค้อนบดอัดเท่ากับ 43 cm

จำนวนชั้นบดอัด 5 ชั้น จำนวนครั้งในการบดอัดแต่ละชั้น 56 ครั้ง

จากสมการ $$E = \frac{B \times L \times W \times H}{V}$$

$$E = \frac{56 \times 5 \times 4.39 \times 43}{3211.814}$$

จะได้ $$E = 16.456 \ \ cm\text{-}kg / cm^3$$

ขั้นตอนที่ 2 ย้ายสมการเพื่อคำนวณหาจำนวนครั้งในการบดอัดในท่อ PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของโมลบดอัดแบบท่อ PVC เท่ากับ 5.35 cm ขนาดความสูงของโมลบดอัดแบบท่อ PVC เท่ากับ 10.7 cm จะได้ปริมาตรของโมลบดอัดแบบท่อ PVC เท่ากับ 240.537 cm^3 น้ำหนักของค้อนบดอัดแบบใหม่เท่ากับ 1.62 kg ระยะยกของค้อนแบบใหม่เท่ากับ 35.5 cm จำนวนชั้นบดอัด 3 ชั้น พลังงานจากการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน 16.456 cm-kg/cm^3

จากสมการ $$E = \frac{B \times L \times W \times H}{V}$$

จะได้ $$16.456 = \frac{B \times 3 \times 1.62 \times 35.5}{240.537}$$

ดังนั้นจะทำการบดอัดชั้นละ $$B = \frac{16.456 \times 240.537}{3 \times 1.62 \times 35.5} = 22.94 \approx 23$$ ครั้ง

การเตรียมตัวอย่างวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

การเตรียมดินตะกอนและเถ้าลอย

ตะกอนกว๊านพะเยา จะถูกนำไปอบ 24 ชั่วโมงให้แห้งสนิท จากนั้นนำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4

เถ้าลอยปาล์มและเถ้าลอยยาง จะถูกนำไปอบ 24 ชั่วโมงให้แห้งสนิท จากนั้นนำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100

การเตรียมสารละลายอัลคาไลน์

การผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) มีขั้นตอนการเตรียมดังนี้

1. นำNaOH ชนิดเม็ดไปกวนผสมกับน้ำ เตรียมให้มีความเข้มข้น 8 โมลาร์ ทิ้งไว้ 30 นาที

2. นำสารละลาย NaOH ไปกวนผสมกับสารละลาย Na_2SiO_3 นาน 30 นาที ในอัตราส่วน Na_2SiO_3 : NaOH เป็น 0.67 1.0 และ 1.5 โดยปริมาตร

3. บ่มสารละลายทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปใช้งาน

การทดสอบกำลังรับแรงอัดเดี่ยว (Unconfined compression test)

การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength) เป็นการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังอัดโดยไม่มีแรงดันด้านข้างโดยอ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 2166 ตัวอย่างดินที่นำมาใช้ทดสอบจะเป็นดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าที่ได้จากการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้ากลุ่มธุรกิจพลังงานไฟฟ้าชีวมวล ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เถ้า 2 ชนิด คือ เถ้าปาล์มและเถ้ายาง ในการเตรียมตัวอย่างการทดสอบ นำดินตะกอนที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ผสมกับเถ้าชีวมวล อัตราส่วน S : FA เท่ากับ 90:10 80:20 และ 70:30 จากนั้นผสมสารละลายอัลคาไลน์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.67,1 และ 1.5 โดยใช้อัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อเถ้า เท่ากับ 0.4, 0.5, 0.6 โดยน้ำหนัก และใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8 โมลาร์ การเตรียมตัวอย่างแต่ละอัตราส่วนผสมจะถูกบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ในแบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5.35 เซนติเมตร (2 นิ้ว) สูง 10.7 เซนติเมตร (4 นิ้ว) โดยจะนำไปบ่มในตู้อบควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิต่ำในการบ่มตัวอย่างเลือกใช้ 30 องศาเซลเซียส บ่มเป็นเวลา 7, 28, 60 และ 90 วัน และเตรียมตัวอย่างในการทดสอบจำนวน 3 : 1 ส่วนผสมและอายุการบ่ม เมื่อครบอายุการบ่มจะถูกนำไปหาคุณสมบัติด้านกำลังหาได้จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

(ก)

(ข)

ภาพ 21 การทดสอบกำลัง (ก) กล่องบ่มตัวอย่างควบคุมอุณหภูมิ 30°C
(ข) เครื่องมือการทดสอบกำลังรับแรงอัดเดี่ยว

การทดสอบความคงทนด้วยวิธีแบบเปียกสลับแห้ง

การทดสอบความคงทนเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าร้อยละการสูญเสียของตัวอย่างดิน โดยอ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D559-96 จะเป็นการจำลองสภาพธรรมชาติของตัวอย่างที่อยู่ในสถานะต่าง ๆ เช่น แห้งหรือเปียก เป็นต้น โดยการทดสอบนั้นจะใช้ข้อมูลหน่วยน้ำหนักและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่ได้ในการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานมาทำการเตรียมตัวอย่างทดสอบความคงทน วัสดุดินตัวอย่างที่ใช้ทดสอบกำหนดให้ดินมีขนาดผ่านตะแกรงขนาด 4.75 mm (เบอร์ 4) ซึ่งตัวอย่างทดสอบจะมีขนาดหน้าตัดประมาณ 4 นิ้ว ตัวอย่างมีความสูงประมาณ 4.58

นิ้ว และทำการควบคุมความหนาแน่นของตัวอย่างด้วยการใช้สมการพลังงานในการบดอัดเหมือนที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวเข้ามาช่วย เพื่อให้ตัวอย่างทดสอบมีความหนาแน่น เทียบเท่ากับการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ในการทดสอบจะทดสอบโดยการนำตัวอย่างดินที่ครบอายุการบ่มตัว 7 28 และ 60 วัน ไปแช่น้ำ 5 ชั่วโมง เพื่อจำลองสภาวะเปียก ต่อมานำตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 71 องศาเซลเซียส 42 ชั่วโมง เพื่อจำลองสภาวะแห้ง จากที่กล่าวมานี้คือ 1 รอบการทดสอบเปียกสลับแห้ง ซึ่งทำการทดสอบทั้งหมด 6 รอบ แล้วนำตัวอย่างเฉพาะรอบที่ 1 3 และ 6 มาทดสอบการสูญเสียกำลังอัดด้วยการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

การทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient modulus test)

การทดสอบโมดูลัสคืน (MR) ตัวในวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบตามมาตรฐาน AASHTO T307 โดยการป้อนน้ำหนักจะเป็นแบบกระทำซ้ำ คุณสมบัติ Resilient Modulus (MR) เป็นคุณสมบัติที่แสดงถึงความแข็งแรงของวัสดุโดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง การทดสอบและคุณสมบัติ Resilient Modulus สำหรับดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์มและเถ้ายาง โดยค่า Resilient Modulus จะมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างค่าความเค้นซ้ำซากสูงสุดที่กระทำในแนวแกนต่อค่าความเครียดคืนตัวในแนวแกน โดยสมการทางคณิตศาสตร์ของ Resilient Modulus ดังสมการ 3.2

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \tag{3.2}$$

โดยที่ M_R คือค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุ

σ_d คือความเค้นเพิ่มที่กระทำในแต่ละรอบ

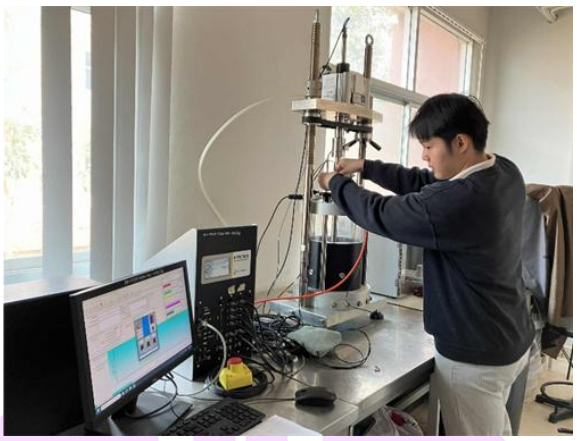
ε_r คือความเครียดที่คืนตัวได้ (Recoverable Strain)

ตัวอย่างดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จะถูกวางบนแท่นรองที่มีความขรุขระประกบทั้งด้านบนและด้านล่าง จากนั้นห่อหุ้มตัวอย่างด้วยเยื่อหุ้ม จากนั้นทำการติดตั้งอุปกรณ์ และเครื่องวัดระยะ (Linear variable differential transformer, LVDT) จำนวน 2 ตัว ซึ่งเครื่องวัดระยะ LVDT จะติดตั้งเป็นเส้นทแยงมุมระหว่างกัน เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงรูปร่างให้มีลักษณะคงที่ เมื่อติดตั้งเสร็จจึงเริ่มการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกนแบบกระทำซ้ำ การประมวลจะเริ่มจากลำดับการให้แรงที่ 1 ถึง ลำดับที่ 15 แสดงในตาราง 7 ซึ่งแต่ละลำดับการให้แรงกระทำจะมีการเปลี่ยนแปลงไปคือ ความเค้นโอบรัด ความเค้นเบี่ยงเบน และ ความเค้นสัมผัส ในส่วนของการให้แรงแต่ละลำดับของเครื่องนั้นจะให้แรงและถอนแรง จำนวน 100 รอบ ใน 1 ลำดับการทดสอบจนกระทั่งถึงลำดับที่ 15 หรือตัวอย่างเกิดการพังจึงจะหยุดการทดสอบ

ตาราง 7 ลำดับการให้แรงกระทำของการทดสอบโมดูลัสคืนตัว

Sequence no.	Confining stress (kPa)	Deviator stress (kPa)	No. of load application
0	103.4	103.4	500
1	20.7	20.7	100
2	20.7	41.4	100
3	20.7	62.1	100
4	34.5	34.5	100
5	34.5	68.9	100
6	34.5	103.4	100
7	68.9	68.9	100
8	68.9	137.9	100
9	68.9	206.8	100
10	103.4	68.9	100
11	103.4	103.4	100
12	103.4	206.8	100
13	137.9	103.4	100
14	137.9	137.9	100
15	137.9	275.8	100

ที่มา: (Chompoorat et al. 2018)



ภาพ 22 การติดตั้งตัวอย่างการทดสอบสำหรับการทดสอบ

การทดสอบหาความเร็วเฉือนหรือโรโซแนนซ์ (Free-free resonant frequency method)

นำตัวอย่างที่มีอายุ 7 และ 28 วัน ทำการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเร็วคลื่นกับตัวอย่างดิน โดยการทดสอบหาค่าความเร็ว คลื่นปฐมภูมิ (p-wave) และคลื่นทุติยภูมิ (s-wave) โดยทำการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเร็วบริเวณปลายด้านหนึ่งของตัวอย่างแล้วจึงทำการยิงคลื่นตัวอย่างบริเวณด้านปลายตรงกันข้ามกับที่ติดเซ็นเซอร์ แสดงดังภาพ 22 เพื่อเป็นตัวส่งสัญญาณหาเซ็นเซอร์วัดความเร็วในแต่ละการทดสอบหาความเร็ว แล้วจึงทำการบันทึกค่าความถี่ของทั้ง p-wave และ s-wave

(ก) **(ข)**

ภาพ 23 การติดตั้งตัวอย่างการทดสอบสำหรับการทดสอบหาความเร็วเฉือน
(ก) ติดตั้งตัวอย่างลงในเครื่อง (ข) ทดสอบหาความเร็วคลื่นปฐมภูมิและทุติยภูมิ

บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล

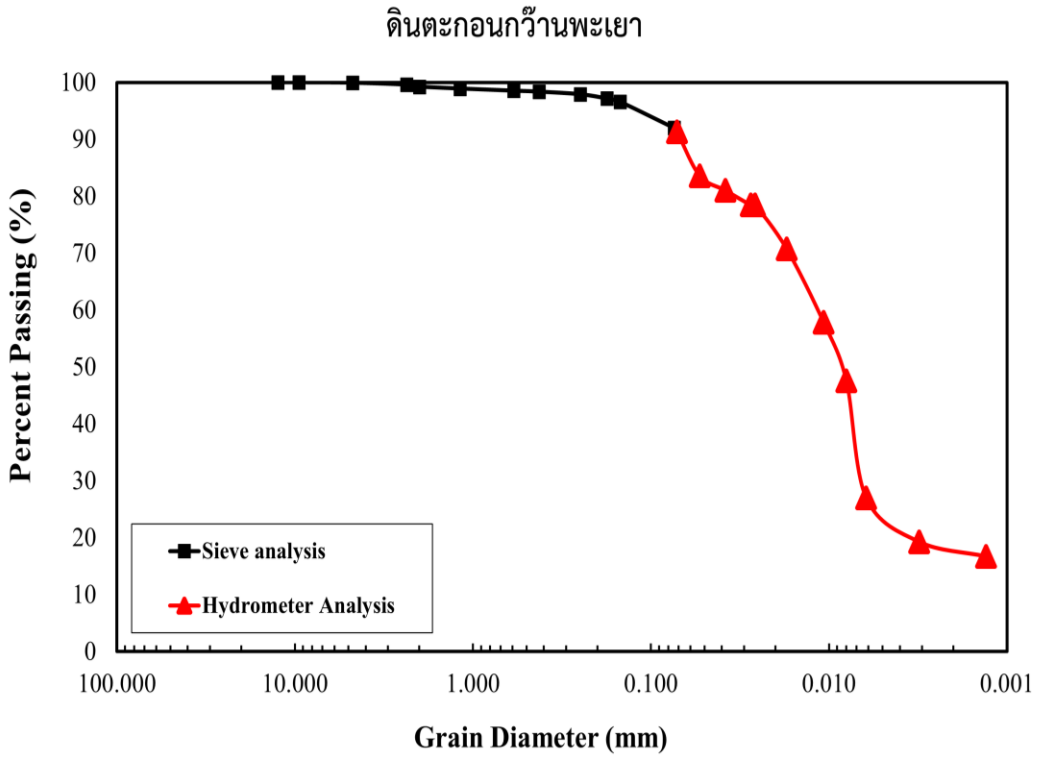
ในบทนี้เป็นการนำเสนอผลการทดสอบที่ได้จากการศึกษาวิจัย โดยเริ่มจากการวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่นำมาใช้ ได้แก่ ดินตะกอนกว๊านพะเยา เถ้าปาล์ม และเถ้ายาง เพื่อสร้างความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุ จากนั้นจึงนำเสนอผลการทดสอบกำลังอัดไม่ถูกจำกัดและการประเมินความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งเป็นตัวชี้วัดสำคัญด้านสมบัติเชิงกลและสมบัติเคมี นอกจากนี้ยังมีการทดสอบเพื่อประเมินความคงทนของวัสดุด้วยวิธีเปียกสลับแห้ง การทดสอบโมดูลัสคืนตัว และการทดสอบความเร็วคลื่นเฉือนด้วยวิธีเรโซแนนซ์ เพื่อสะท้อนพฤติกรรมทั้งในเชิงสถิตและเชิงพลวัตของวัสดุ ผลการศึกษาที่นำเสนอในบทนี้จะเป็นพื้นฐานสำหรับการอภิปรายและข้อสรุปในบทถัดไป

คุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนกว๊านพะเยา

ในการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนกว๊านพะเยา ได้ทำการทดสอบด้านวิศวกรรมเบื้องต้น ได้แก่ การหาค่าขีดพิกัดอัตเตอร์เบิร์ก (Atterberg test) การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity test) และการวิเคราะห์การคละของเม็ดดิน (Grain size analysis) ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการจัดจำแนกประเภทของดินตามหลักเกณฑ์ทางวิศวกรรมโยธาได้ โดยรายละเอียดผลการทดสอบจะแสดงในหัวข้อถัดไป

จากการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนกว๊านพะเยา พบว่า ดินมีค่าความถ่วงจำเพาะ (Gs) เท่ากับ 2.71 ซึ่งอยู่ในช่วงค่ามาตรฐานของดินอนินทรีย์ทั่วไป (2.60–2.80) แสดงให้เห็นว่า องค์ประกอบแร่ธาตุของดินมีความใกล้เคียงกับดินเหนียวและดินตะกอนในแหล่งน้ำจืดทั่วไป

ค่าขีดจำกัดความเป็นพลาสติกของดินอยู่ในระดับปานกลาง โดยมีค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid limit; LL) เท่ากับ 42.60 % ค่าขีดจำกัดพลาสติก (Plastic limit; PL) เท่ากับ 23.46 % และค่าขีดจำกัดการหดตัว (Shrinkage limit; SL) เท่ากับ 19.52 % เมื่อพิจารณาค่าดัชนีความเป็นพลาสติก (Plasticity Index; PI = LL – PL) เท่ากับประมาณ 19.14 % ซึ่งบ่งชี้ว่า ดินมีพฤติกรรมเป็นดินเหนียวที่มีความสามารถในการเปลี่ยนรูปร่างได้ (plasticity) ในระดับปานกลางถึงสูง (medium to high plastic clay) คุณสมบัติดังกล่าวมีผลให้ดินมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำ และอาจเกิดการบวมตัวหรือยุบตัวเมื่อสภาพความชื้นเปลี่ยนแปลง



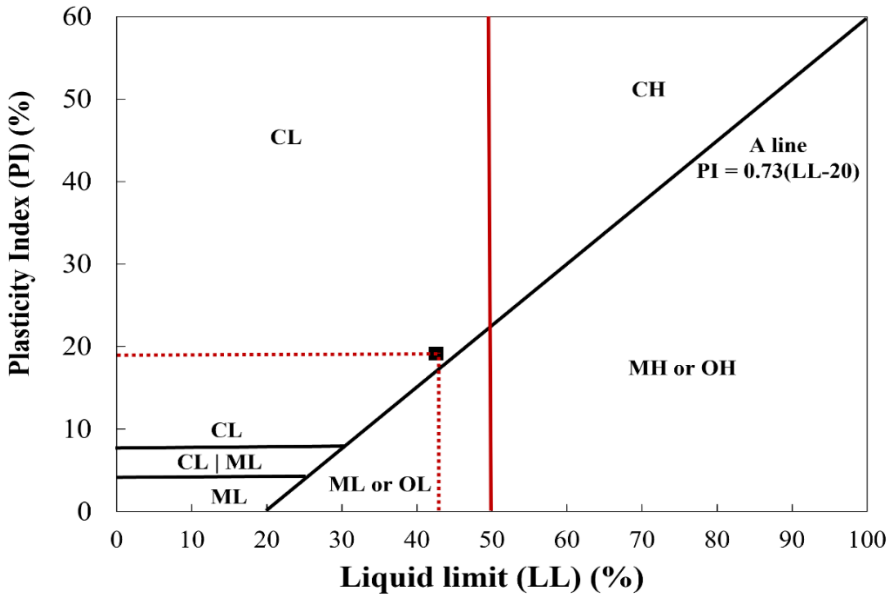
ภาพ 24 กราฟแสดงผลการทดสอบหาขนาดคละของดินตะกอนกว๊านพะเยา

ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดเม็ดดิน พบว่า ดินตะกอนร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มม.) ได้ถึง 99.93 % และผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (0.075 มม.) เท่ากับ 92.00 % แสดงให้เห็นว่า ดินมีอนุภาคละเอียดเกือบทั้งหมด และจัดอยู่ในกลุ่มดินตะกอนละเอียด (fine-grained soil) อย่างชัดเจน

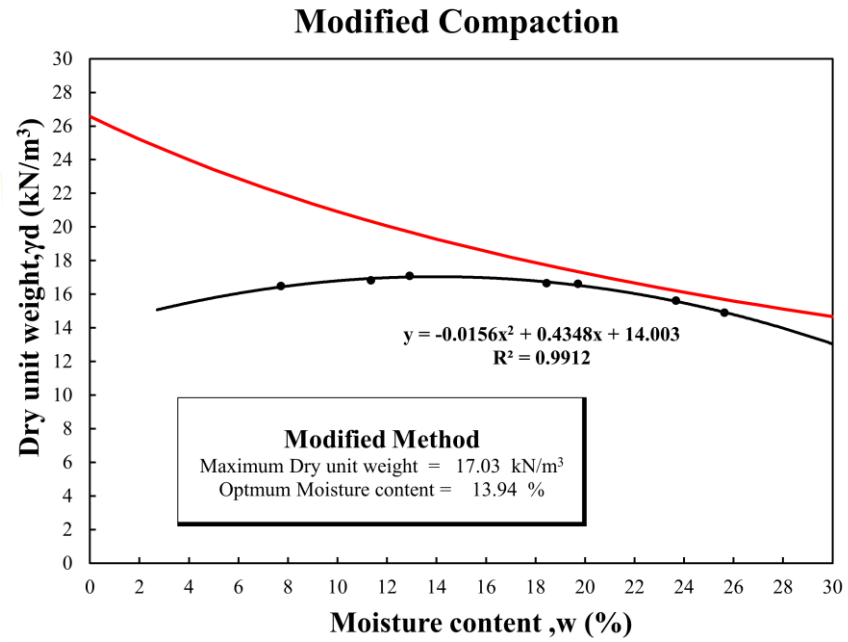
ตาราง 8 ผลทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานและจำแนกชนิดดินตะกอนกว๊านพะเยาในทางวิศวกรรม

คุณสมบัติของดิน	ผลการทดสอบ
ค่าความถ่วงจำเพาะ (Gs)	2.71
การทดสอบขีดพิกัดอัตเตอร์เบิร์ก	42.60 % 23.46 % 19.52 %
การทดสอบหาขนาดคละ	ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 = 99.93 % ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 = 92.00 %
หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด	17.03 kN/m^3
ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม	13.94 %
การจำแนกตามเกณฑ์ ASSHTO	A-7-6
การจำแนกตามเกณฑ์ USCS	CL

เมื่อนำผลการทดสอบมาจำแนกตามมาตรฐานการจำแนกดิน พบว่า ดินตะกอนกว๊านพะเยาจัดอยู่ในกลุ่ม A-7-6 ตามระบบ AASHTO ซึ่งบ่งชี้ว่าเป็นดินเหนียวคุณภาพต่ำถึงปานกลาง (poor to fair subgrade material) ไม่เหมาะสมสำหรับการใช้เป็นชั้นทางโดยตรงโดยไม่ผ่านการปรับปรุง นอกจากนี้ ตามระบบการจำแนกดินแบบ USCS พบว่า ดินอยู่ในกลุ่ม CL (Clay with low to medium plasticity) ซึ่งสอดคล้องกับผลค่าขีดจำกัดอัตเตอร์เบิร์กที่แสดงว่า ดินมีความเป็นพลาสติกปานกลาง



ภาพ 25 การจำแนกดินตะกอนกว๊านพะเยาตามระบบ USCS



ภาพ 26 ความสัมพันธ์ของหน่วยน้ำหนักแห้งและความชื้นที่เหมาะสมของดินตะกอนกว๊านพะเยา

การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Compaction Test) ได้ดำเนินการเพื่อหาค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density: MDD) และปริมาณ

ความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content: OMC) ของดินตะกอนกว๊านพะเยา ผลการทดสอบพบว่า MDD = 17.03 kN/m³ และ OMC = 13.94 % ค่าที่ได้พิจารณาได้ว่าดินมีความสามารถในการอัดแน่นได้ในระดับปานกลาง แต่เนื่องจากเป็นดินอนุภาคละเอียดและมีพลาสติกปานกลาง การควบคุมความชื้นระหว่างการก่อสร้างจึงเป็นปัจจัยสำคัญ หากมีน้ำเกินหรือขาดจากค่าที่เหมาะสมเพียงเล็กน้อย อาจทำให้กำลังรับแรงและความคงทนลดลงได้ จากผลการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ดินตะกอนกว๊านพะเยามีศักยภาพในการปรับปรุงกำลังรับแรงและเสถียรภาพได้หากได้รับการบดอัดด้วยพลังงานที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม ด้วยข้อจำกัดด้านความพลาสติกและความไวต่อปริมาณน้ำ การใช้งานจริงยังจำเป็นต้องพิจารณาการปรับปรุงดินเพิ่มเติมด้วยวัสดุประสาน เช่น เถ้าปาล์มหรือเถ้ายาง เพื่อเพิ่มความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง

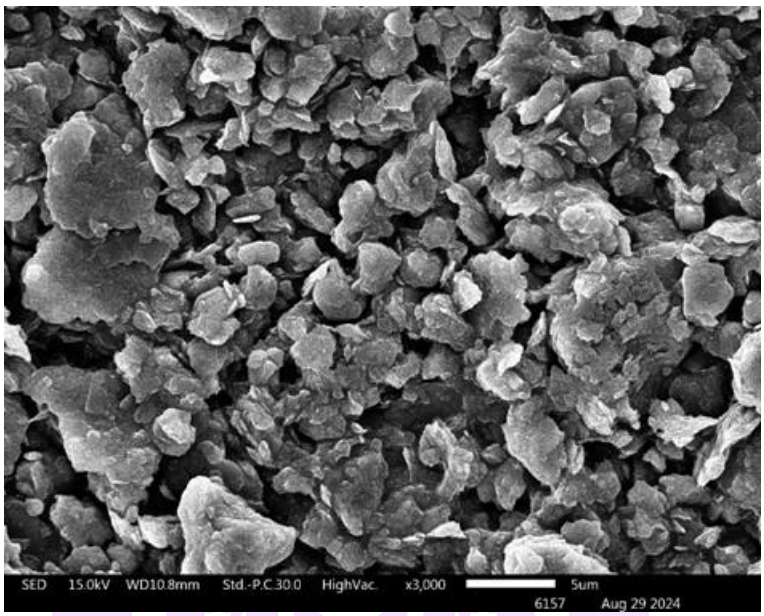
กล่าวโดยสรุป ดินตะกอนกว๊านพะเยามีลักษณะเป็นดินเหนียวละเอียด มีความเป็นพลาสติกสูงและมีแนวโน้มการหดตัวเมื่อแห้ง ประกอบกับค่าการจำแนกดินตามมาตรฐานสากลที่จัดอยู่ในกลุ่มดินเหนียวคุณภาพต่ำ ทำให้ไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานทางวิศวกรรมโดยตรง หากไม่ได้รับการปรับปรุงสมบัติ เช่น การเสริมวัสดุปอซโซลานิกหรือการทำให้เกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความคงทนของดิน

ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานแบบพิเศษ

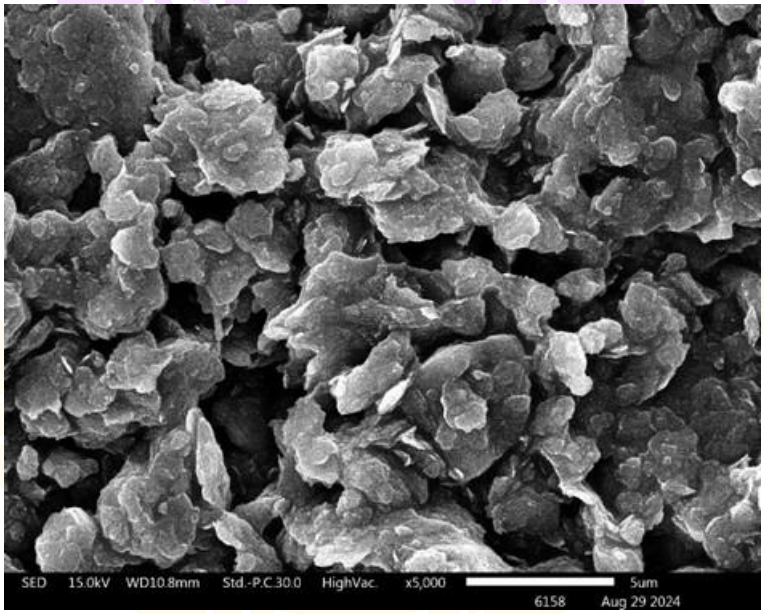
เพื่อทำความเข้าใจลักษณะเฉพาะของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย ได้ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานเชิงลึกของดินตะกอนกว๊านพะเยา เถ้าปาล์ม และเถ้ายาง โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพระดับจุลภาค และ Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) เพื่อระบุองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

ดินตะกอนกว๊านพะเยา

ผลการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 3,000 และ 5,000 เท่า แสดงให้เห็นว่า ดินตะกอนกว๊านพะเยามีลักษณะโครงสร้างอนุภาคละเอียดรูปร่างเป็นเกล็ดบาง (flake-like structure) ซึ่งทับซ้อนและจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ ลักษณะดังกล่าวก่อให้เกิดช่องว่างและรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากในโครงสร้างดิน ส่งผลให้ดินมีคุณสมบัติที่สัมพันธ์กับพฤติกรรมของดินเหนียว ได้แก่ ความสามารถในการอัดตัวสูง (high compressibility) และค่าการซึมผ่านต่ำ (low permeability)



(ก)



(ข)

ภาพ 27 ดินตะกอนกว๊านพะเยาที่กำลังขยาย

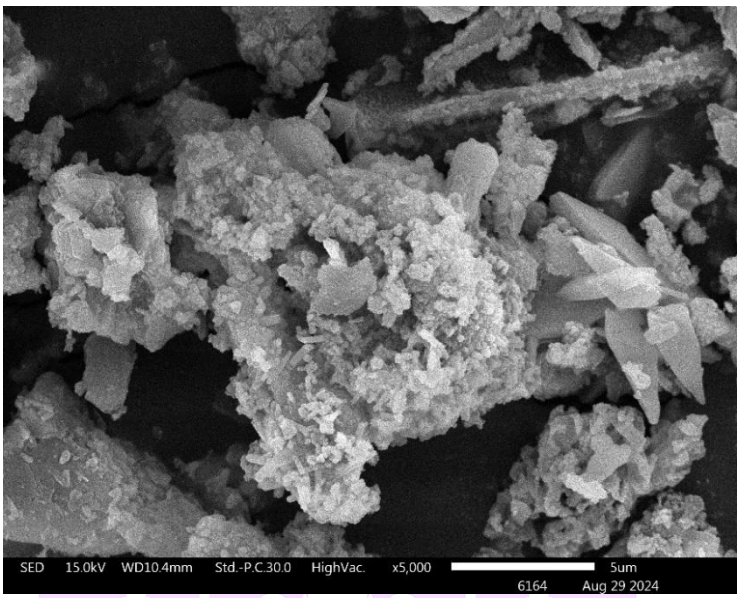
(ก) 3,000 และ (ข) 5,000 เท่า

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) พบว่า ดินตะกอนกว๊านพะเยามี ซิลิกอน (Si) เป็นองค์ประกอบหลักในสัดส่วน 67.15 % ซึ่งสะท้อนถึงการมีแร่ ควอตซ์ (Quartz) เป็นส่วนประกอบหลักในเนื้อดิน ขณะเดียวกันตรวจพบอะลูมิเนียม (Al) ในปริมาณ 16.64 % ซึ่งสัมพันธ์กับการปรากฏของแร่ในกลุ่มดินเหนียว เช่น คาโอลิไนต์ (Kaolinite) และ อิลไลต์ (Illite) ส่วน เหล็ก (Fe) ตรวจพบในสัดส่วน 8.93 % บ่งบอกถึงการมีแร่เหล็กออกไซด์หรือสารประกอบที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบร่วม ธาตุรองที่ปรากฏ ได้แก่ โพแทสเซียม (K) 5.41 % แมกนีเซียม (Mg) 1.17 % และ โซเดียม (Na) 0.69 % แม้จะอยู่ในปริมาณเล็กน้อย แต่สามารถมีบทบาทต่อสมบัติทางเคมีของดิน เช่น ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนและสมดุลเคมี ขณะที่ธาตุ แคลเซียม (Ca), ไทเทเนียม (Ti) และ ซัลเฟอร์ (S) ไม่ปรากฏในการวิเคราะห์ครั้งนี้

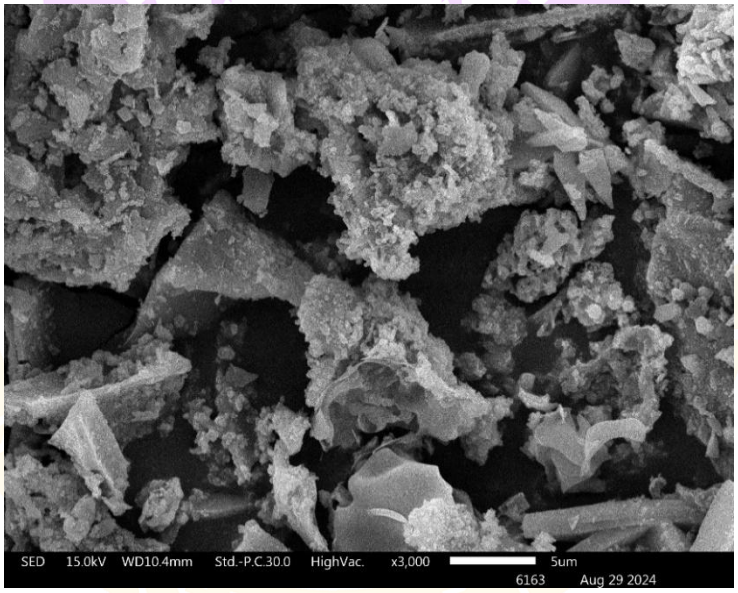
โดยสรุป ผลการวิเคราะห์ SEM และ EDS แสดงให้เห็นว่า ดินตะกอนกว๊านพะเยามีโครงสร้างจุลภาคที่เป็นเกล็ดบางซ้อนทับกัน มีรูพรุนสูง และมีองค์ประกอบทางเคมีที่ถูกครอบงำโดยซิลิกา (Si) และ อะลูมิเนียม (Al) ร่วมกับเหล็ก (Fe) ในระดับหนึ่ง ลักษณะดังกล่าวสะท้อนถึงคุณสมบัติของดินที่มีแนวโน้มอัดตัวสูงและมีความแข็งแรงต่ำในสภาพธรรมชาติ อย่างไรก็ตาม การที่ดินมีซิลิกาและอะลูมิเนียมในสัดส่วนสูงถือเป็นข้อได้เปรียบต่อการปรับปรุงเสถียรภาพด้วยวัสดุประเภท จีโอพอลิเมอร์ (geopolymer) ซึ่งอาศัยปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันของซิลิกาและอะลูมิเนียมภายใต้สภาวะด่าง (alkaline activation) เพื่อสร้างสารประกอบเจล เช่น N-A-S-H หรือ C-A-S-H gel ที่สามารถช่วยเติมเต็มรูพรุนและยึดเกาะระหว่างอนุภาคดินได้ดี ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคมีความหนาแน่นมากขึ้นและเพิ่มความทนทานต่อสภาวะแวดล้อม ซึ่งเป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการยกระดับสมบัติทางวิศวกรรมของดินตะกอนกว๊านพะเยาให้เหมาะสมต่อการใช้งานในงานโยธาและสิ่งแวดล้อมต่อไป

เถ้าปาล์ม

ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 3,000 และ 5,000 เท่า แสดงให้เห็นว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมีโครงสร้างอนุภาคที่ไม่สม่ำเสมอ ส่วนใหญ่ปรากฏเป็นก้อนขนาดเล็กที่เกาะตัวกัน (agglomerates) พร้อมผลึกละเอียดปกคลุมบนพื้นผิว อนุภาคบางส่วนมีลักษณะเป็นแท่งยาวหรือคล้ายเข็ม (needle-like crystals) สะท้อนถึงการก่อตัวของผลึกใหม่จากกระบวนการเผาไหม้กากปาล์ม ลักษณะดังกล่าวชี้ว่าเถ้ามีความพรุนและพื้นที่ผิวสูง ซึ่งเอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีในภายหลัง



(ก)



(ข)

ภาพ 28 เถ้าปาล์มที่กำลังขยาย (ก) 3,000 และ (ข) 5,000 เท่า

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) พบว่า เถ้าปาล์มมี โพแทสเซียม (K) ในสัดส่วนสูงที่สุด 39.08 % ตามด้วย ซิลิกอน (Si) 30.20 % และ แคลเซียม (Ca) 21.57 % ขณะที่ธาตุรอง เช่น แมกนีเซียม (Mg 4.38 %),

เหล็ก (Fe 3.16 %) และ อะลูมิเนียม (Al 1.61 %) ปรากฏในปริมาณเล็กน้อย ส่วน Na, S และ Ti ไม่ถูกตรวจพบ องค์ประกอบดังกล่าวสะท้อนถึงคุณสมบัติของเถ้าปาล์มในฐานะวัสดุปอซโซลานิก โดยแม้ปริมาณซิลิกาและอะลูมิเนียมจะไม่สูงเท่าดินตะกอน แต่การมีโพแทสเซียมและแคลเซียมจำนวนมากสามารถช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาด่างภายในตัวเอง และเมื่อเข้าสู่กระบวนการจีโอพอลิเมอไรเซชัน จะก่อให้เกิดเจล C-A-S-H และ N-A-S-H ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวประสาน ลดรูพรุน และเพิ่มความหนาแน่นให้แก่โครงสร้างวัสดุ

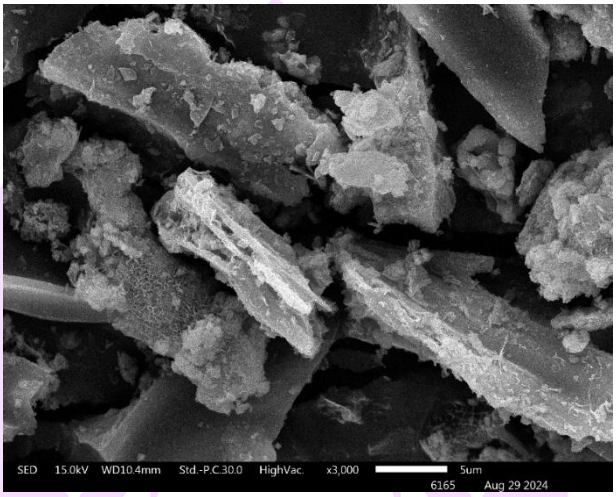
เถ้ายาง

ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 3,000 และ 5,000 เท่า แสดงให้เห็นว่าเถ้ายางพารามีโครงสร้างอนุภาคที่แตกหักง่ายและไม่เป็นระเบียบ อนุภาคส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นก้อนที่พรุน (porous agglomerates) และมีโพรงจำนวนมากภายในโครงสร้าง บางพื้นที่แสดงการซ้อนทับของเกล็ดบาง ซึ่งสะท้อนถึงความไม่สม่ำเสมอของเนื้อวัสดุ ลักษณะดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า เถ้ายางมีพื้นที่ผิวสูงและมีความพรุนมาก ซึ่งเอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับสารละลายด่าง

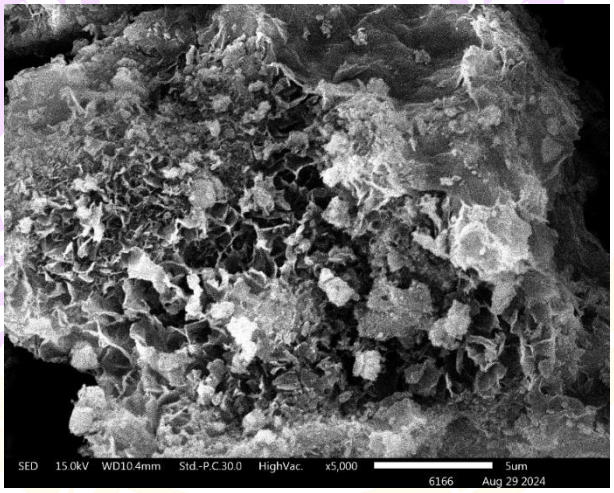
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) พบว่าเถ้ายางมี แคลเซียม (Ca) เป็นองค์ประกอบหลักสูงถึง 58.91 % ตามด้วย โพแทสเซียม (K) 16.99 %, ซิลิกอน (Si) 12.91 %, แมกนีเซียม (Mg) 6.24 % และ อะลูมิเนียม (Al) 4.95 % ขณะที่ Na, S, Ti และ Fe ไม่ปรากฏในการวิเคราะห์ครั้งนี้ องค์ประกอบดังกล่าวแสดงว่าเถ้ายางมีปริมาณแคลเซียมสูงเป็นพิเศษ ซึ่งอาจทำหน้าที่เป็นแหล่งของ $Ca(OH)_2$ เมื่อสัมผัสกับความชื้นหรือสารละลายด่าง และสามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอะลูมิเนียมเพื่อสร้างสารประกอบเจลในกลุ่ม C-A-S-H ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะเดียวกันการมีโพแทสเซียมในระดับสูงยังช่วยเสริมการเกิดปฏิกิริยาเชิงด่าง ส่งผลให้เถ้ายางพารามีศักยภาพสูงในการใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์

เมื่อนำผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าทั้ง 2 ชนิดมาจำแนกตามมาตรฐาน ASTM C618 จำเป็นต้องแปลงค่าองค์ประกอบธาตุที่ได้จาก EDS เป็นออกไซด์หลัก ได้แก่ ซิลิกา (SiO_2), อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3), เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานได้ จากการคำนวณพบว่า เถ้าปาล์ม มีปริมาณ CaO สูงและรวม SiO_2+ Al_2O_3+ Fe_2O_3 เกิน 50% ทำให้สามารถจำแนกเป็น Class C / High-Calcium Ash ตามมาตรฐาน ASTM อย่างชัดเจนและใกล้เคียงกับเถ้าลอยแม่เมาะ ที่ใช้กันในงานคอนกรีตและวัสดุปู

ผิวจราจร ในขณะที่เถ้ายางแม้จะมี CaO สูงมาก แต่ปริมาณรวมของต่ำกว่าเกณฑ์ 50% จึงไม่สามารถจำแนกเป็น Class C หรือ F ตามมาตรฐาน ASTM ได้ แต่สามารถอธิบายเชิงคุณสมบัติว่าเป็น lime-rich ash ซึ่งสะท้อนลักษณะของเถ้าที่มีแคลเซียมสูง



(ก)



(ข)

ภาพ 29 เถ้าปาล์มที่กำลังขยาย (ก) 3,000 และ (ข) 5,000 เท่า

ตาราง 9 องค์ประกอบธาตุของดินตะกอนกว๊านพะเยา เถ้าปาล์ม และเถ้ายาง

องค์ประกอบ	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)		
	ดินตะกอนกว๊านพะเยา	เถ้าปาล์ม	เถ้ายาง
Sodium (Na)	0.69	0	0
Magnesium (Mg)	1.17	4.38	6.24
Aluminium (Al)	16.64	1.61	4.95
Silicon (Si)	67.15	30.2	12.91
Sulfur (S)	0	0	0
Potassium (K)	5.41	39.08	16.99
Calcium (Ca)	0	21.57	58.91
Titanium (Ti)	0	0	0
(Fe) Iron	8.93	3.16	0

หมายเหตุ: ค่าธาตุแสดงเป็นน้ำหนักร้อยละ (wt%) วัดด้วย Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)

จากการวิเคราะห์ SEM และ EDS ของวัสดุทั้งสามชนิด พบว่า ดินตะกอนกว๊านพะเยามีองค์ประกอบเด่นคือซิลิกาและอะลูมิเนียม แต่มีโครงสร้างจุลภาคที่พรุนและแข็งแรงต่ำ จึงจำเป็นต้องได้รับการปรับปรุง ขณะที่เถ้าปาล์มน้ำมันมีทั้งซิลิกาและแคลเซียมในระดับสูง ร่วมกับโพแทสเซียมที่ทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นด่าง ซึ่งส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนเถ้ายางพารามีแคลเซียมสูงมาก ทำหน้าที่เป็นแหล่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ช่วยเร่งการก่อตัวของเจล C-A-S-H แม้ซิลิกาและอะลูมิเนียมจะมีปริมาณไม่มากนัก การผสมผสานวัสดุทั้งสามจึงเป็นแนวทางที่เหมาะสม โดยดินทำหน้าที่เป็นแหล่ง Si–Al หลัก เถ้าปาล์มช่วยเพิ่มทั้งสารตั้งต้นและตัวกระตุ้นด่าง ขณะที่เถ้ายางช่วยเสริมแคลเซียมเพื่อการสร้างเจลที่มีความหนาแน่น ส่งผลให้ระบบจีโอพอลิเมอร์ที่ได้มีความแข็งแรงและทนทานกว่าวัสดุเดี่ยวอย่างชัดเจน

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว

การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว (Unconfined Compressive Strength: UCS) ถูกนำมาใช้เพื่อประเมินสมบัติเชิงกลของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์ม (P) และเถ้ายาง (R) โดยกำหนดอัตราส่วนผสมระหว่างดินตะกอนและเถ้าเท่ากับ 90:10, 80:20 และ 70:30 ซึ่งสอดคล้องกับการแทนที่ดินด้วยเถ้าในปริมาณ 10, 20 และ 30% โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังได้เปรียบเทียบผลการทดสอบภายใต้อัตราส่วนสารละลายด่าง Na_2SiO_3/NaOH ที่ 0.67, 1.0 และ 1.5 รวมถึงอัตราส่วนของสารละลายอัลคาไลน์ต่อเถ้า (L/FA) ที่ 0.4, 0.5 และ 0.6 ทั้งนี้ผลการทดสอบ UCS จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง (1989; 2013) ซึ่งกำหนดว่า ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุ 7 วัน ต้องไม่ต่ำกว่า 1,724 kPa สำหรับวัสดุชั้นพื้นทาง (Base) และ 689 kPa สำหรับวัสดุชั้นรองพื้นทาง (Subbase)

ภาพที่ 30(ก): สำหรับกรณีที่ Na_2SiO_3/NaOH = 0.67 ค่ากำลังอัดแกนเดี่ยว (UCS) ที่วัดได้อยู่ในช่วง 984.45–1,452.34 kPa โดยดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยเถ้าปาล์ม (P) ให้ค่าสูงสุด คือ S70–P30 ที่ L/FA = 0.5 มีค่า 1,452.34 kPa (ช่วงของชุด P = 1,064.29–1,452.34 kPa) และดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยเถ้ายาง (R) ให้ค่าสูงสุด คือ S70–R30 ที่ L/FA = 0.5 มีค่า 1,342.00 kPa (ช่วงของชุด R = 984.45–1,342.00 kPa) ที่ L/FA = 0.5 พบแนวโน้มเพิ่มขึ้นของกำลังอัดตามปริมาณการแทนที่เถ้าอย่างชัดเจน เช่น ชุด P เพิ่มขึ้นจาก 1,300.15 kPa เป็น 1,409.125 kPa และเป็น 1,452.34 kPa เมื่อเพิ่มเถ้าเป็น 10%, 20% และ 30% ตามลำดับ ขณะที่ชุด R เพิ่มขึ้นจาก 1,152.657 kPa เป็น 1,200.00 kPa และเป็น 1,342.00 kPa ตามสัดส่วนเดียวกัน สำหรับส่วนผสมที่ให้ค่าสูงสุดของแต่ละชุด (S70–P30 และ S70–R30) การปรับ L/FA จาก 0.4 เป็น 0.5 ทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น Δ = +1.8% (P) และ Δ = +7.4% (R) ขณะที่การเพิ่มเป็น L/FA = 0.6 ทำให้กำลังอัดลดลง Δ = −4.4% (P) และ Δ = −14.9% (R) จากผลการทดสอบพบว่าสะท้อนความพรุนระดับจุลภาคจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีของเหลวส่วนเกิน เมื่อเทียบกับมาตรฐานกรมทางหลวง (ทล.-ม.204/2556; ทล.-ม.206/2532/2564) ผลทดสอบทั้งหมดสูงกว่ามาตรฐานดินซีเมนต์ชั้นรองพื้นทาง (689 kPa) อย่างชัดเจน แต่ยังต่ำกว่ามาตรฐานดินซีเมนต์ชั้นพื้นทาง (1,724 kPa) ทั้งนี้ แนวโน้มกำลังอัดที่เพิ่มตามปริมาณเถ้าสอดคล้องกับกลไกการเติมเต็มช่องว่างระดับจุลภาค (micro-filler effect) และการเพิ่มแหล่ง Si–Al สำหรับปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ (Tangchirapat et al., 2009)

ภาพที่ 30(ข): Na_2SiO_3/NaOH = 1.0 ค่ากำลังอัดแกนเดี่ยว (UCS) อยู่ในช่วง 928.308–1,807.853 kPa โดย ดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยเถ้าปาล์ม (P) ให้ค่าสูงสุดคือ S70–P30 ที่ L/FA = 0.5

มีค่า 1,807.853 kPa (ช่วงของชุด P = 1,174.67–1,807.853 kPa) ส่วน ดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยเถ้ายาง (R) ให้ค่าสูงสุดคือ S80–R20 ที่ L/FA = 0.5 มีค่า 1,346.24 kPa (ช่วงของชุด R = 928.308–1,346.24 kPa). ที่ L/FA = 0.5 ชุด P เพิ่มขึ้นจาก 1,337.16 kPa เป็น 1,395.914 kPa และเป็น 1,807.853 kPa ตามสัดส่วนเถ้า 10%, 20% และ 30% ขณะที่ชุด R เพิ่มจาก 1,298.92 kPa เป็น 1,346.24 kPa ก่อนลดลงเป็น 1,312.72 kPa. ผลทั้งหมดสูงกว่ามาตรฐานดินซีเมนต์ชั้นรองพื้นทาง 689 kPa และเฉพาะ S70–P30 ที่ L/FA = 0.5 เท่านั้นที่ ผ่านมาตรฐานชั้นพื้นทาง 1,724 kPa; แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับหลักการที่ว่า โมดูลัสซิลิเกตของสารละลายด่างที่สูงขึ้น เอื้อต่อการก่อรูปเจล N-A-S-H และ C-(A)-S-H ที่ต่อเนื่องและหนาแน่นยิ่งขึ้น (Davidovits et al., 2015)

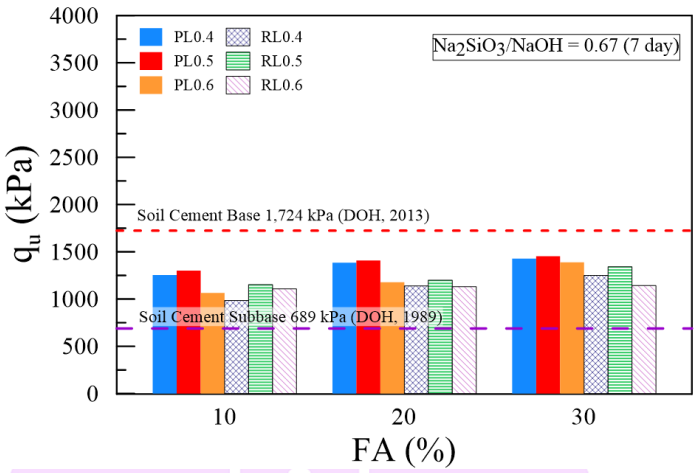
ภาพที่ 30(ค): สำหรับกรณีที่ Na_2SiO_3/NaOH = 1.5 ค่ากำลังอัดแกนเดี่ยว (UCS) อยู่ในช่วง 902.97–1,847.084 kPa โดย ดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยเถ้าปาล์ม (P) ให้ค่าสูงสุดคือ S70–P30 ที่ L/FA = 0.5 มีค่า 1,847.084 kPa ซึ่งสูงกว่ามาตรฐานดินซีเมนต์ชั้นพื้นทางประมาณ +7.1% และที่ L/FA = 0.6 ของส่วนผสมเดียวกันยังอยู่เหนือเกณฑ์เล็กน้อยที่ 1,761.071 kPa (~+2.1%) ส่วน ดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยเถ้ายาง (R) ให้ค่าสูงสุดคือ S70–R30 ที่ L/FA = 0.5 มีค่า 1,584.85 kPa ซึ่งต่ำกว่าชั้นพื้นทางแต่สูงกว่าชั้นรองพื้นทางทุกกรณี ที่ L/FA = 0.5 แนวโน้มกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนเถ้าอย่างชัดเจน โดยชุด P เพิ่มขึ้นจาก 1,188.968 kPa เป็น 1,503.066 kPa และเป็น 1,847.084 kPa ขณะที่ชุด R เพิ่มขึ้นจาก 993.82 kPa เป็น 1,282.97 kPa และเป็น 1,584.85 kPa สำหรับสัดส่วน 70:30 การปรับ L/FA จาก 0.4 เป็น 0.5 ทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น Δ = +26.7% (P) และ Δ = +60.7% (R) แต่เมื่อเพิ่มเป็น 0.6 กำลังอัดลดลง Δ = −4.7% (P) และ Δ = −15.5% (R) สะท้อนว่าแม้ L/FA = 0.6 สารอัลคาไลน์ต่อเถ้าสูงกว่า ส่งผลให้เกิดน้ำส่วนเกินและความพรุนจุลภาคมากขึ้น จึงทำให้ L/FA = 0.5 เป็นระดับที่สมดุลและเหมาะสมที่สุดสำหรับระบบนี้ ซึ่งสอดคล้องกับหลักการว่าโมดูลัสซิลิเกตและระดับอัลคาไลที่เหมาะสมช่วยเพิ่มการเชื่อมโยงของโครงข่ายเจล N-A-S-H และ C-(A)-S-H ให้หนาแน่นยิ่งขึ้น (Provis et al., 2014)

โดยภาพรวม การเพิ่มสัดส่วนการแทนที่เถ้า จาก 90:10 เป็น 70:30 ช่วยให้กำลังเพิ่มขึ้นต่อเนื่อง อธิบายได้จากทั้งผลการเติมระดับจุลภาค (micro-filler effect) และการเพิ่มแหล่ง Si/Al ที่เอื้อต่อการเกิดเจลจีโอโพลิเมอร์ในเนื้อวัสดุ (เช่น N-A-S-H / C-(A)-S-H) สำหรับอัตราส่วนของสารละลายด่าง L/FA = 0.5 ที่ให้ผลดีที่สุดเมื่อเทียบกับ 0.4 และ 0.6 นั้น สะท้อนจุดเหมาะสมของสัดส่วนของเหลวต่อของแข็ง/ตัวกระตุ้น ซึ่งงานวิจัยหลายงานรายงานว่าเมื่อของสารละลายอัลคาไลน์

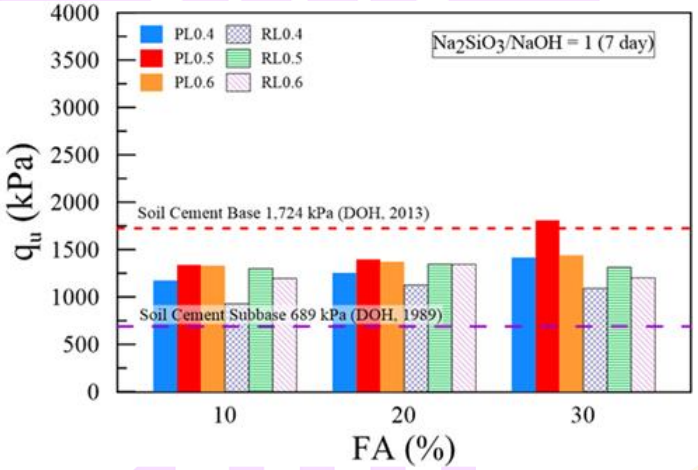
น้อยเกินไปปฏิกิริยาจะเกิดได้ช้าลง แต่หากมากไปเกินไปความพรุนจะเพิ่มขึ้น ปฏิกิริยาจะเกิดได้รวดเร็วกว่าแต่ทำให้เกิดรอยแตกบนวัสดุตัวอย่าง ส่งผลให้กำลังลดลง

เปรียบเทียบวัสดุเถ้า: ส่วนผสมดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วย เถ้าปาล์ม (P) มักให้กำลังช่วงต้นสูงกว่าเถ้ายาง (R) เนื่องจาก ซิลิกาอสัณฐานในเถ้าปาล์มมีความไวต่อปฏิกิริยาสูงและทำหน้าที่ได้ทั้ง micro-filler และ ปอซโซลานิก ขณะที่ในเถ้ายาง ซึ่งมีความว่องไวต่ำกว่า เนื่องจากเถ้ายางมีแคลเซียมจำนวนมาก แต่แคลเซียมมากเกินไปไปยับยั้งการเกิดเจลปฏิกิริยาและก่อให้เกิดผลึกแคลเซียมที่รบกวนโครงสร้างเจล amorphous ทำให้วัสดุเปราะเกิดรอยแตก และกำลังรับแรงอัดลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Castillo et al., (2021)

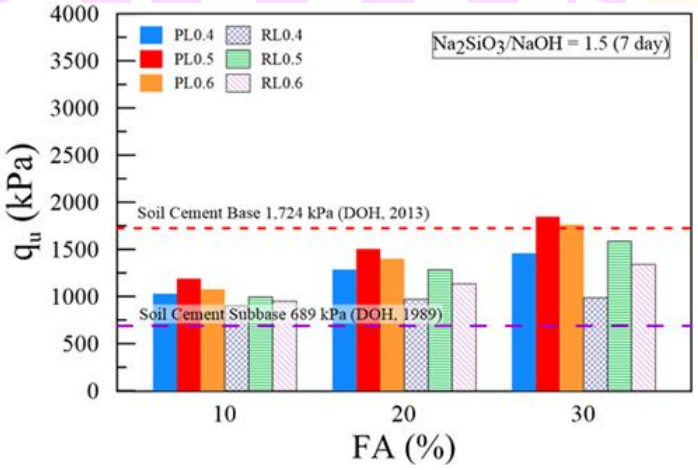
ที่อายุบ่ม 7 วัน ส่วนผสมทั้งหมดให้กำลังอัดสูงกว่ามาตรฐานชั้นรองพื้นทาง 689 kPa โดยเฉพาะ P ที่ 70:30 ร่วมกับ L/FA = 0.5 ภายใต้อัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH = 1.0–1.5 สามารถผ่านมาตรฐานชั้นพื้นทาง 1,724 kPa ได้ แต่ 0.67 ไม่สามารถผ่านมาตรฐานชั้นพื้นทาง



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพ 30 กำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวอายุการบ่มที่ 7 วัน อัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH เท่ากับ (a) 0.67 , (b) 1 และ (c) 1.5

ภาพที่ 31(ก): Na_2SiO_3/NaOH = 0.67 (อายุบ่ม 28 วัน) ค่ากำลังอัดแกนเดี่ยว (UCS) อยู่ในช่วง 1,174.68–2,312.64 kPa โดย ดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยเถ้าปาล์ม (P) ให้ค่าสูงสุด คือ S70–P30 ที่ L/FA = 0.5 มีค่า 2,312.64 kPa ขณะที่ ดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยเถ้ายาง (R) สูงสุดที่ S70–R30 ที่ L/FA = 0.5 มีค่า 1,467.06 kPa ภายในแต่ละระดับ L/FA กำลังมีแนวโน้มเพิ่มตามสัดส่วนเถ้าอย่างชัดเจน ตัวอย่างที่ L/FA = 0.5 ชุด P เพิ่มขึ้นจาก 1,595.66 kPa เป็น 1,947.84 kPa และเป็น 2,312.64 kPa ส่วนชุด R เพิ่มจาก 1,220.65 kPa เป็น 1,375.79 kPa และเป็น 1,467.06 kPa แนวโน้มดังกล่าวอธิบายได้จาก การเติมเต็มช่องว่างระดับจุลภาค และการเพิ่มแหล่ง Si/Al สำหรับการเกิดเจลจีโอโพลิเมอร์ ทำให้เจล N-A-S-H และ C-(A)-S-H พัฒนาอย่างต่อเนื่องและมีความหนาแน่นสูงขึ้น (Tangchirapat et al., 2009; Provis & Bernal, 2014) เมื่อพิจารณาสูตรที่สัดส่วนเถ้า 70:30 พบว่า การปรับ L/FA จาก 0.4 เป็น 0.5 ทำให้กำลังเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปรับเป็น 0.6 กำลังลดลง (ชุด P: 1,807.22, 2,312.64, 1,854.38 kPa ตามลำดับ; ชุด R: 1,398.55, 1,467.06, 1,408.32 kPa ตามลำดับ) สอดคล้องกับข้อเท็จจริงว่าเมื่อของเหลวและสารอัลคาไลน์มากเกินความจำเป็นอาจก่อให้เกิด การตกผลึกระยะต้นและเพิ่มความพรุนจุลภาค จึงลดความสามารถการยึดเหนี่ยวของเจล (Sukmak et al., 2013) โดยรวม P ให้ค่ากำลังสูงกว่า R ซึ่งสอดคล้องกับการมีซิลิกาอสัณฐานเชิงปฏิกิริยามากกว่า ทำให้เข้าร่วมปฏิกิริยาได้รวดเร็วกว่า

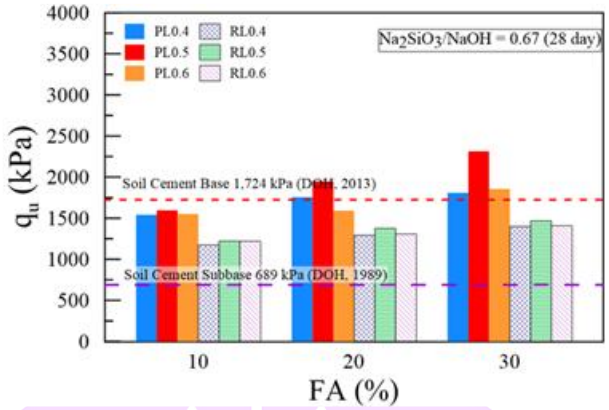
ภาพที่ 31(ข): Na_2SiO_3/NaOH = 1.0 (อายุบ่ม 28 วัน) ค่ากำลังอัดอยู่ในช่วง 1,072.56–2,350 kPa โดย ดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยเถ้าปาล์ม (P) ให้ค่าสูงสุด คือ S70–P30 ที่ L/FA = 0.5 มีค่า 2,350 kPa และดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยเถ้ายาง (R) สูงสุดที่ S80–R20 ที่ L/FA = 0.5 มีค่า 1,700 kPa ภายในแต่ละระดับ L/FA กำลังเพิ่มตามสัดส่วนเถ้าอย่างเด่นชัดในชุด P ตัวอย่างที่ L/FA = 0.5 ค่ากำลังเพิ่มขึ้นจาก 1,567.81 kPa เป็น 1,687.94 kPa และเป็น 2,350 kPa สะท้อนบทบาทของ โมดูลัสซิลิเกตที่สูงขึ้น ซึ่งเอื้อต่อการละลายของซิลิกา–อะลูมินาและการก่อรูปโครงข่ายเจล N-A-S-H และ C-(A)-S-H ที่ต่อเนื่องและหนาแน่นยิ่งขึ้น (Provis & Bernal, 2014) สำหรับชุด R แนวโน้มเพิ่มขึ้นชัดเจนจากสัดส่วนเถ้า 10% เป็น 20% แต่เมื่อเพิ่มเป็น 30% ค่ากำลังกลับลดลงในหลายระดับ L/FA (เช่น 1,600 kPa เป็น 1,700 kPa ก่อนลดลงเป็น 1,542.42 kPa ที่ L/FA = 0.5) ซึ่งบ่งชี้ว่าการเพิ่มเถ้ายางเกินระดับเหมาะสมอาจทำให้ เฟสแคลเซียมเชิงผลึก และอนุภาคที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาทำหน้าที่เป็นจุดกำเนิดโพรงและรอยแตก ส่งผลให้โครงสร้างเจลถูกรบกวนเช่นเดียวกับผลในภาพที่ 30(a) การปรับ L/FA จาก 0.4 เป็น 0.5 ช่วยยกระดับกำลังอย่างเด่นชัด แต่เมื่อปรับเป็น

0.6 ค่ากำลังมักลดลงเนื่องจากของเหลวและสารอัลคาไลน์เกินความจำเป็น ซึ่งเอื้อต่อการเกิดผลึกระยะแรกและเพิ่มความพรุนจุลภาค (Sukmak et al., 2013)

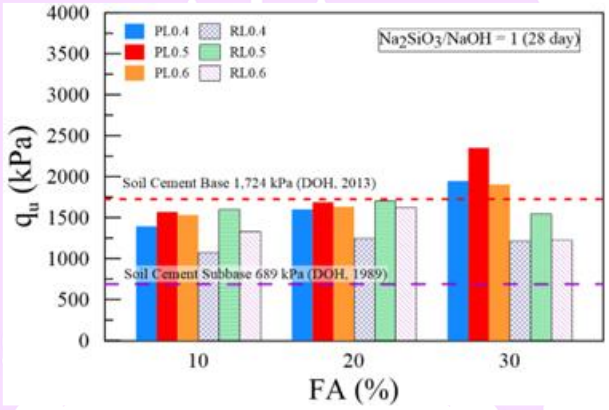
ภาพที่ 31(ค): เมื่ออัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH = 1.5 ที่อายุบ่ม 28 วัน พบว่า ค่ากำลังอัดแกนเดี่ยว (UCS) อยู่ในช่วง 1,036.00–2,475.42 kPa โดย ดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยเถ้าปาล์ม (P) ให้ค่าสูงสุดคือ S70–P30, L/FA = 0.5 ที่ 2,475.42 kPa (ช่วงของชุด P = 1,201.17–2,475.42 kPa) ส่วน ดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยเถ้ายาง (R) สูงสุด คือ S70–R30, L/FA = 0.5 ที่ 2,033.00 kPa (ช่วงของชุด R = 1,036.00–2,033.00 kPa) ภายในแต่ละระดับ L/FA พบว่า ค่ากำลังเพิ่มขึ้นชัดตามสัดส่วนเถ้า โดยเฉพาะที่ L/FA = 0.5 ซึ่งทั้งชุด P และ R เพิ่มจาก 10% ⟶ 30% (เช่น P: 1,322.21 ⟶ 1,828.99 ⟶ 2,475.42 kPa; R: 1,170.66 ⟶ 1,654.54 ⟶ 2,033.00 kPa). ซึ่งแนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Fernández-Jiménez & Palomo, (2005) ซึ่งสะท้อนบทบาทของ โมดูลัสซิลิเกตที่สูง ซึ่งช่วยให้การละลาย Si–Al เกิดเข้มข้นและต่อเนื่อง ก่อให้เกิดโครงข่ายเจล N-A-S-H และ C-(A)-S-H ที่มีความหนาแน่นมากขึ้นหลังการบ่ม

เมื่อพิจารณาผลของ L/FA พบว่า 0.5 เป็นระดับที่เหมาะสมที่สุด ให้ค่ากำลังสูงกว่าทั้ง 0.4 และ 0.6 การเพิ่มเป็น 0.6 แม้จะทำให้สารละลายอัลคาไลน์มากขึ้น แต่กลับก่อให้เกิด การตกผลึกระยะต้นและความพรุนจุลภาค ทำให้การยึดเหนี่ยวของเจลลดลงและกำลังต่ำกว่า 0.5 ในหลายสูตร (Sukmak et al., 2013) สำหรับความแตกต่างของวัสดุเถ้า ชุด P ให้ค่ากำลังสูงกว่า R อย่างสม่ำเสมอ

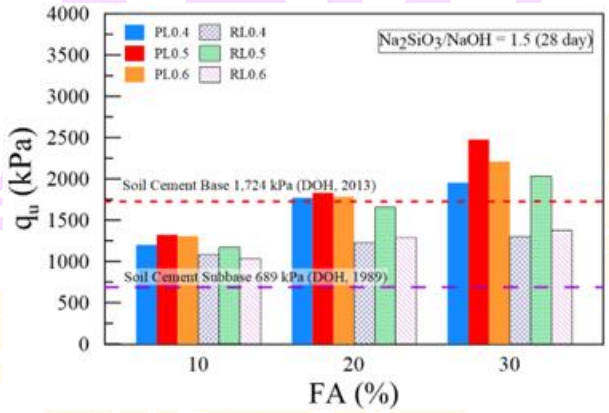
จากผลการทดลองที่อายุบ่ม 28 วัน พบว่าเมื่อปรับอัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH = 1.5 ร่วมกับ L/FA = 0.5 และสัดส่วนเถ้า 70:30 ทำให้โครงข่ายเจล N-A-S-H และ C-(A)-S-H มีความหนาแน่นและเสถียรที่สุด ส่งผลให้ดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยเถ้าปาล์ม (P) ให้ค่ากำลังสูงเด่นกว่าส่วนผสมอื่น ๆ



(ก) 0.67



(ข) 1



(ค) 1.5

ภาพ 31 กำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวอายุการบ่มที่ 28 วัน อัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH

ภาพที่ 32(ก): Na_2SiO_3/NaOH = 0.67 (อายุบ่ม 60 วัน) ค่ากำลังอัดแกนเดี่ยว (UCS) อยู่ในช่วง 1,335.21–2,531.15 kPa โดย ดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยเถ้าปาล์ม (P) สูงสุดที่ S70–P30, L/FA = 0.5 = 2,531.15 kPa และ ดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยเถ้ายาง (R) สูงสุดที่ S70–R30, L/FA = 0.5 = 1,608.56 kPa ภายในแต่ละระดับ L/FA ค่ากำลังเพิ่มตามสัดส่วนเถ้าอย่างต่อเนื่อง เนื่องจาก

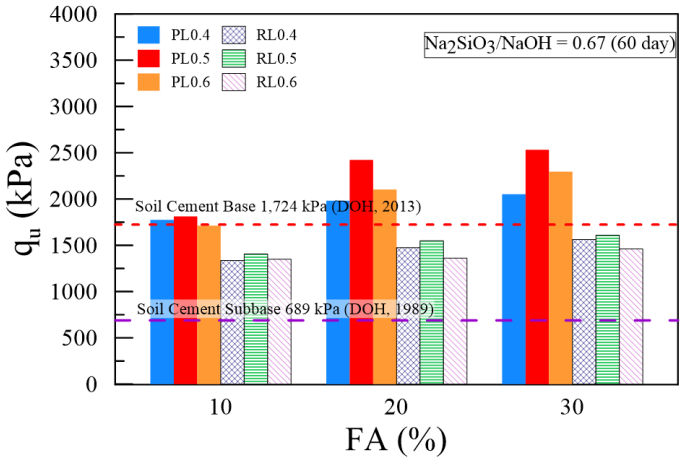
การละลายของ Si–Al และการควบแน่นของเจล N-A-S-H/C-(A)-S-H ดำเนินต่อทำให้เนื้อวัสดุหนาแน่นขึ้น ขณะที่ L/FA = 0.5 ให้ผลเด่นกว่า 0.4 และ 0.6; ค่าที่ 0.6 มักต่ำลงเพราะสารอัลคาไลน์เกินความจำเป็นเอื้อต่อการเกิดโดยรวม P ให้กำลังสูงกว่า R อย่างสม่ำเสมอ

ภาพที่ 32(ข): Na_2SiO_3/NaOH = 1.0 (อายุบ่ม 60 วัน) ค่ากำลังอัดอยู่ในช่วง 1,243.38–2,554.11 kPa โดย P สูงสุดที่ S70–P30, L/FA = 0.5 = 2,554.11 kPa และ R สูงสุดที่ S80–R20, L/FA = 0.5 = 1,745.61 kPa ชุด P แสดงการเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนเถ้าในทุก L/FA สอดคล้องกับบทบาทของโมดูลัสซิลิเกตที่สูงขึ้นซึ่งส่งเสริมการก่อรูปเจลต่อเนื่องและหนาแน่น ส่วนชุด R มักเพิ่มจาก 10% เป็น 20% แต่ที่ 30% ค่ากำลังลดลงในหลาย L/FA อันเนื่องจาก เฟสแคลเซียมเชิงผลึกและอนุภาคที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาซึ่งทำหน้าที่เป็นตำแหน่งกำเนิดโพรงและรอยแตก

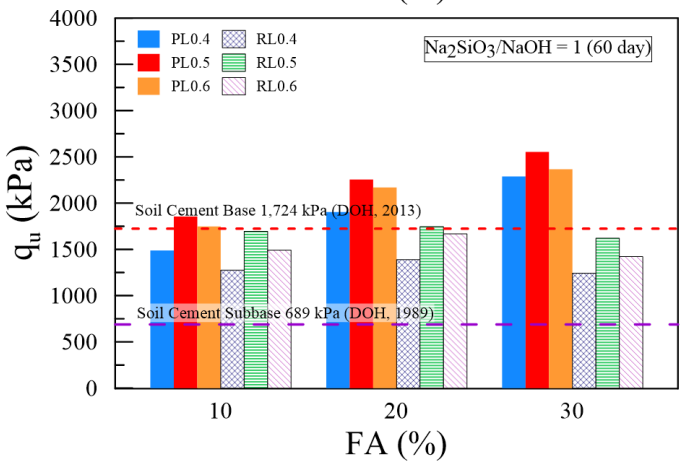
ภาพที่ 32(ค): Na_2SiO_3/NaOH = 1.5 (อายุบ่ม 60 วัน) ค่ากำลังอัดอยู่ในช่วง 1,140.43–3,065.60 kPa โดย P สูงสุดที่ S70–P30, L/FA = 0.5 = 3,065.60 kPa และ R สูงสุดที่ S70–R30, L/FA = 0.5 = 2,120.39 kPa ระดับด่างนี้เอื้อต่อการละลายพอลิเมอไรเซชันอย่างต่อเนื่องจนโครงข่ายเจลหนาแน่นชัด โดยเฉพาะ เถ้า 70:30 ที่ L/FA = 0.5 ขณะที่ 0.6 แม้มีสารละลายมากขึ้นแต่ค่ากำลังกลับลดลงในหลายสูตรจากผลของสารอัลคาไลน์/ของเหลวส่วนเกินที่ก่อให้เกิดผลึกระยะแรกและเพิ่มความพรุนจุลภาค โดยรวม P ยังคงเด่นกว่า R จากการมี ซิลิกาอสัณฐานเชิงปฏิกิริยา สูงกว่า

โดยภาพรวม การบ่มที่ 60 วันส่งผลให้ค่ากำลังอัดสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อเทียบกับ 28 วัน โดยมีปัจจัยหลัก ได้แก่ (1) ปริมาณเถ้า 70:30 ให้ค่ากำลังสูงสุด, (2) ค่า L/FA = 0.5 ยังคงเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด และ (3) เถ้าปาล์มมีค่ากำลังสูงกว่าเถ้ายางในทุกกรณี เนื่องจากมีปริมาณ Si เชิงปฏิกิริยาที่ละลายได้มากกว่า ทำให้เกิดเจล N-A-S-H และ C-(A)-S-H ต่อเนื่องในระยะยาว แม้มาตรฐานกรมทางหลวงจะพิจารณาค่ากำลังที่อายุ 7 วันเป็นหลัก แต่ผลการทดสอบที่ 60 วันยืนยันว่าค่ากำลังของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าปาล์มและเถ้ายางยังคงพัฒนาต่อเนื่อง โดยเฉพาะสูตรเถ้าปาล์มที่สัดส่วน 70:30 ร่วมกับ L/FA = 0.5 และ Na_2SiO_3/NaOH = 1.5 ซึ่งให้ค่ากำลังเกินกว่า 3,000 kPa สะท้อนถึงศักยภาพของวัสดุในการใช้งานทางวิศวกรรมปฐพีระยะยาวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

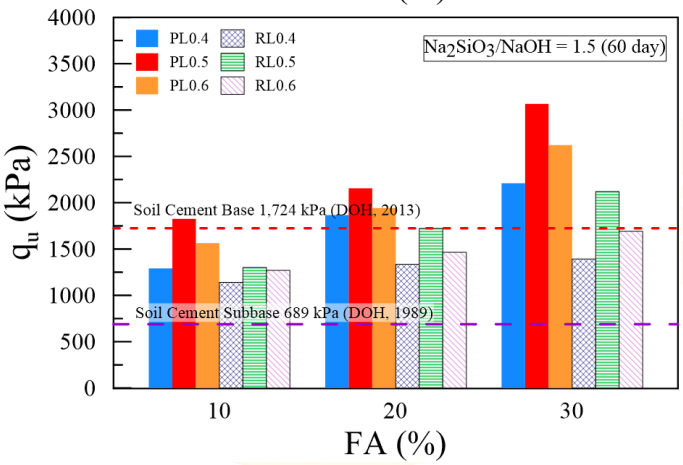
(ก)



(ข)



(ค)



ภาพ 32 กำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวอายุการบ่มที่ 60 วัน อัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH เท่ากับ (ก) 0.67 , (ข) 1 และ (ค) 1.5

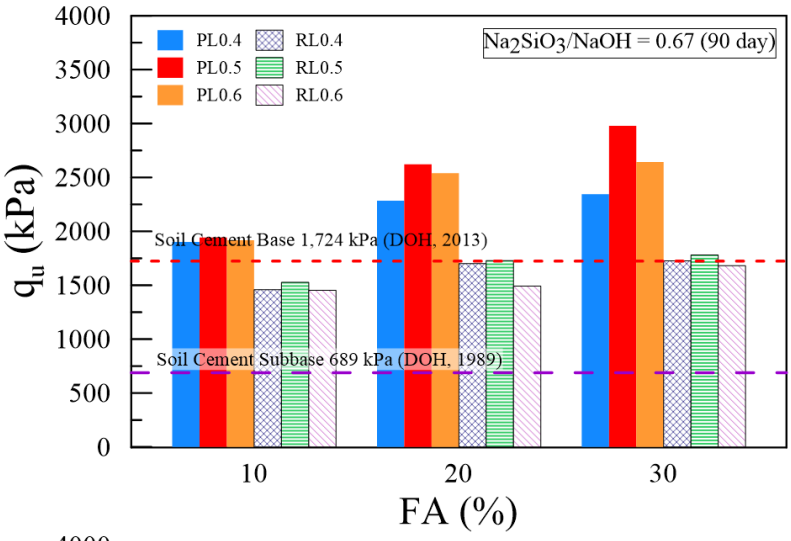
ภาพที่ 33(ก): Na_2SiO_3/NaOH = 0.67 (90 วัน) ค่ากำลังอัดแกนเดี่ยว (UCS) อยู่ในช่วง 1,452.88–2,979.04 kPa โดย ดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยเถ้าปาล์ม (P) สูงสุดที่ S70–P30, L/FA = 0.5 เท่ากับ 2,979.04 kPa และ ดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยเถ้ายาง (R) สูงสุดที่ S70–R30, L/FA = 0.5 เท่ากับ 1,780.70 kPa ภายในแต่ละระดับ L/FA ค่ากำลังเพิ่มตามสัดส่วนเถ้าอย่างต่อเนื่องจากการละลายของ Si–Al และการก่อรูป–จัดระเบียบของเจล N-A-S-H และ C-(A)-S-H ทำให้เมทริกซ์หนาแน่นขึ้น ขณะที่ L/FA = 0.5 เหมาะสมที่สุด

ภาพที่ 33(ข): Na_2SiO_3/NaOH = 1.0 (90 วัน) ค่ากำลังอัดอยู่ในช่วง 1,282.99–3,059.65 kPa โดย P สูงสุดที่ S70–P30, L/FA = 0.5 เท่ากับ 3,059.65 kPa และ R สูงสุดที่ S80–R20, L/FA = 0.5 เท่ากับ 1,893.31 kPa แนวโน้มในชุด P ยังคงเพิ่มตามสัดส่วนเถ้าในทุก L/FA สอดคล้องกับผลของ โมดูลัสซิลิเกตที่สูงขึ้น ซึ่งส่งเสริมการละลาย–พอลิเมอไรเซชันและความต่อเนื่องของเจล ส่วน R ที่สัดส่วนเถ้าสูงบางส่วนผสมกำลังลดลง เนื่องจากเฟสแคลเซียมเชิงผลึก และอนุภาคที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาทำหน้าที่เป็นตำแหน่งกำเนิดโพรงและรอยแตก จึงรบกวนโครงสร้างเจล

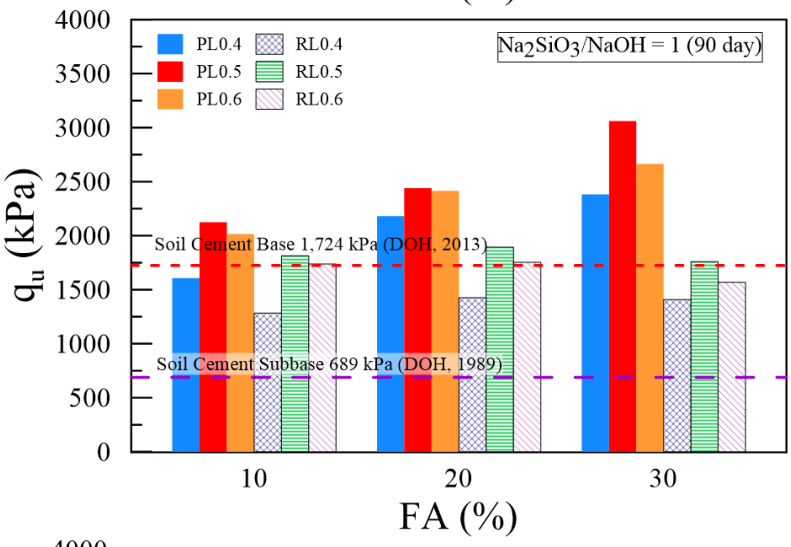
ภาพที่ 33(ค): Na_2SiO_3/NaOH = 1.5 (90 วัน) ค่ากำลังอัดโดยรวมอยู่ในช่วง 1,285.03–3,800.48 kPa โดย P สูงสุดที่ S70–P30, L/FA = 0.5 เท่ากับ 3,800.48 kPa และ R สูงสุดที่ S70–R30, L/FA = 0.5 เท่ากับ 2,348.65 kPa ระดับด่างนี้ส่งเสริมการเชื่อมโยง (cross-linking) ของโครงข่ายเจลให้หนาแน่นและเสถียรยิ่งขึ้นเมื่อบ่มยาวขึ้น จึงให้ค่ากำลังสูงเด่นในสูตร 70:30 ที่ L/FA = 0.5 ส่วน L/FA = 0.6 แม้มีสารละลายมากขึ้น แต่กำลังต่ำกว่า 0.5 จากผลของของเหลวอัลคาไลน์ส่วนเกินที่กระตุ้น การตกผลึกระยะแรก และเพิ่มความพรุนจุลภาค โดยรวมดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยเถ้าปาล์ม (P) ยังคงเหนือกว่า ดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยเถ้ายาง (R) จากการมีซิลิกาอสัณฐานเชิงปฏิกิริยาสูงกว่า

จากการวิเคราะห์ผลสะท้อนให้เห็นว่าที่ 90 วัน ผลที่ได้ตอกย้ำแนวโน้มการพัฒนากำลังอัดอย่างต่อเนื่องจาก 7, 28 และ 60 วัน โดยมีปัจจัยสำคัญคือ (1) ปริมาณเถ้า 70:30 ให้ค่ากำลังสูงสุด, (2) ค่า L/FA = 0.5 ยังคงเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด และ (3) เถ้าปาล์มให้ค่ากำลังสูงกว่าเถ้ายางในทุกกรณี ผลลัพธ์นี้สะท้อนถึงความทนทานและความเสถียรของโครงสร้างเจล N-A-S-H และ C-(A)-S-H ที่พัฒนาอย่างต่อเนื่องเมื่อระยะเวลาการบ่มนานขึ้น ผลการทดสอบที่ 90 วันยืนยันว่า ค่ากำลังอัดของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวงทุกกรณีอย่างมาก โดยสูตรที่มีศักยภาพสูงสุด คือ เถ้าปาล์มสัดส่วน 70:30 ร่วมกับ L/FA = 0.5 และ Na_2SiO_3/NaOH = 1.5 ซึ่งให้ค่ากำลังมากถึง 3,800.48 kPa แสดงถึงความเหมาะสมในการนำไปใช้ในงานทางและงานวิศวกรรมปฐพีที่ต้องการกำลังระยะยาว

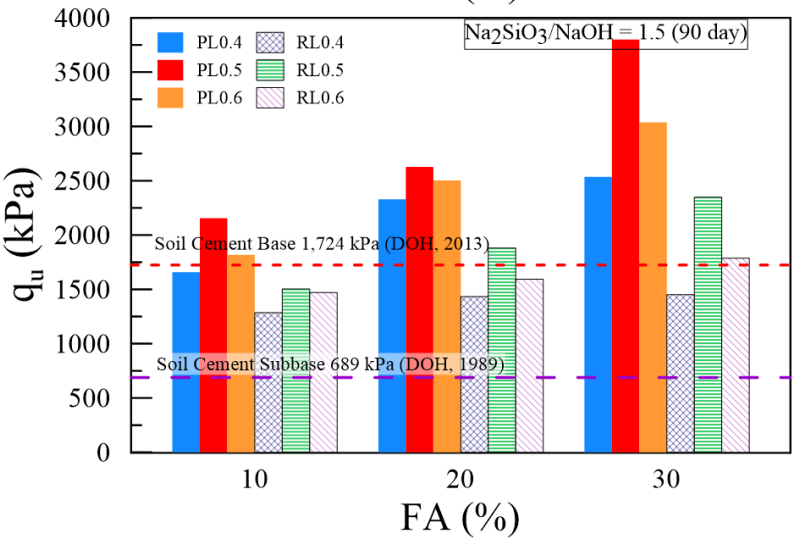
(ก)



(ข)

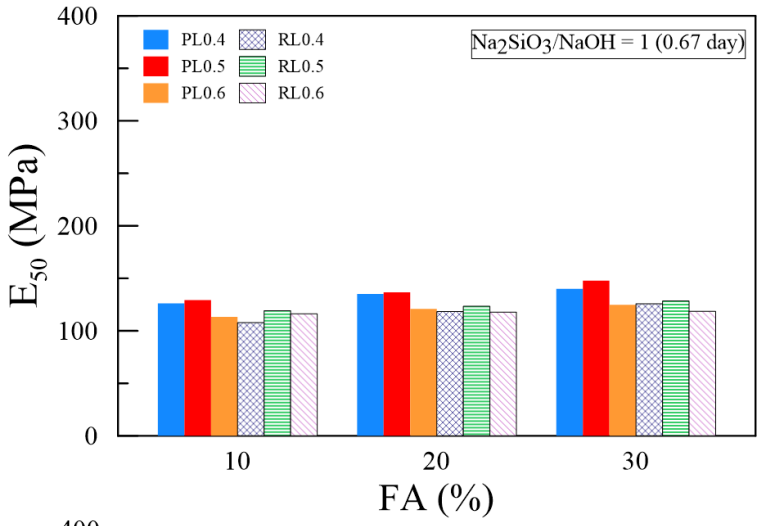


(ค)

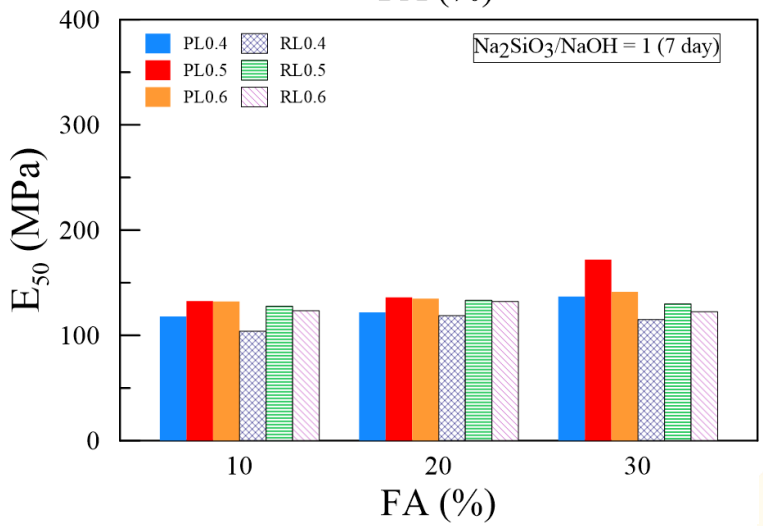


ภาพ 33 กำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวอายุการบ่มที่ 90 วัน อัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH เท่ากับ (ก) 0.67 , (ข) 1 และ (ค) 1.5

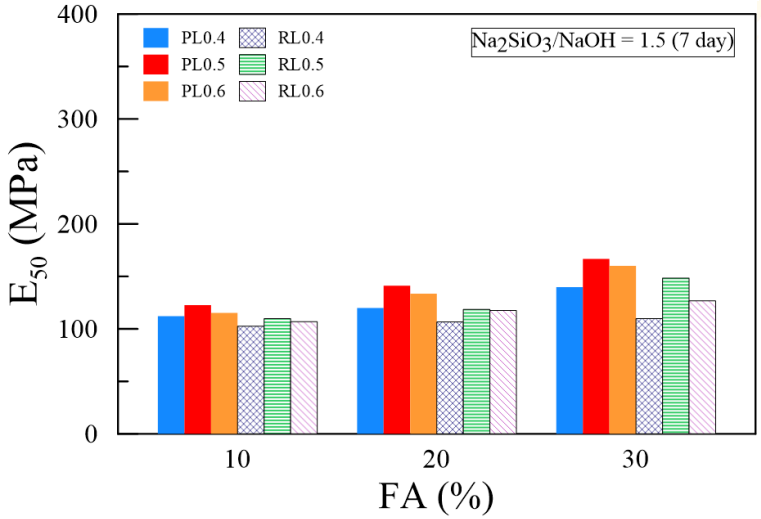
(ก)



(ข)

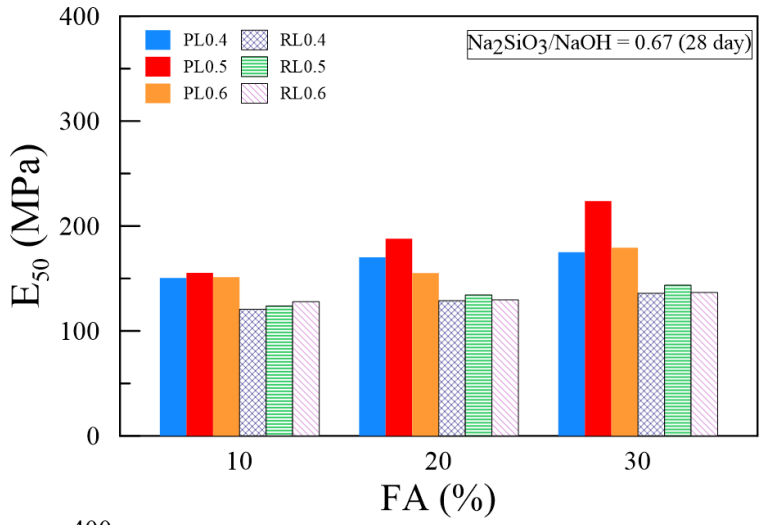


(ค)

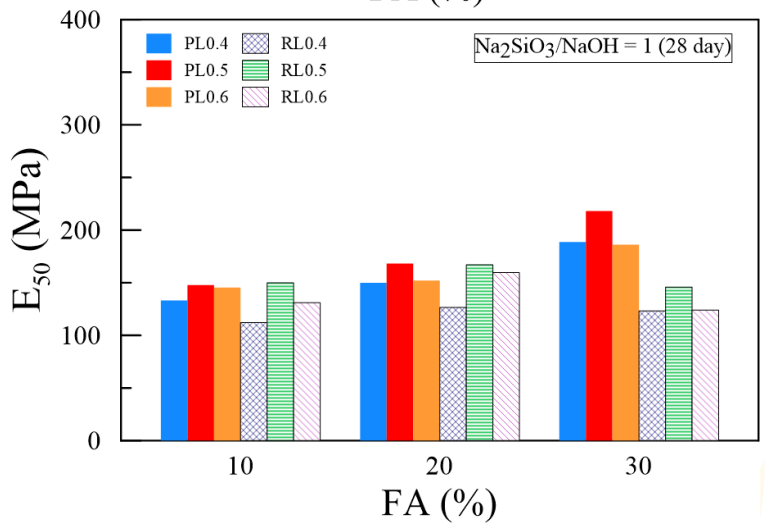


ภาพ 34 ค่า E_{50} ของดินตะกอนกว้านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ ที่ 7 วัน อัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH เท่ากับ (ก) 0.67 , (ข) 1 และ (ค) 1.5

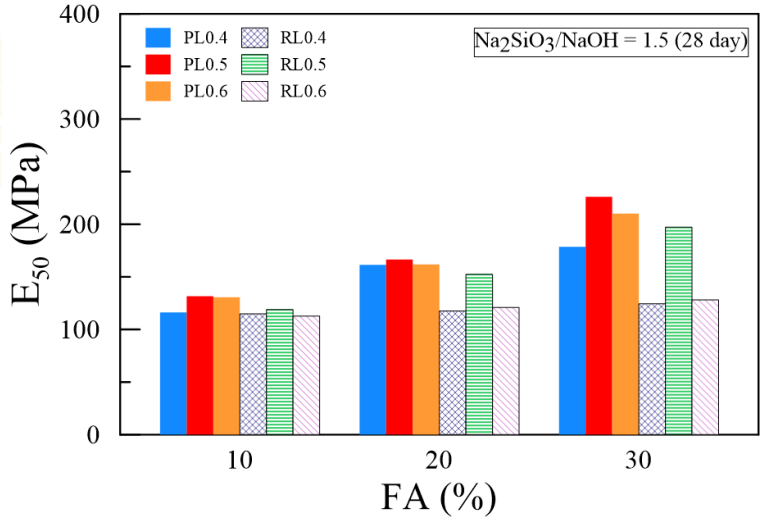
(ก)



(ข)

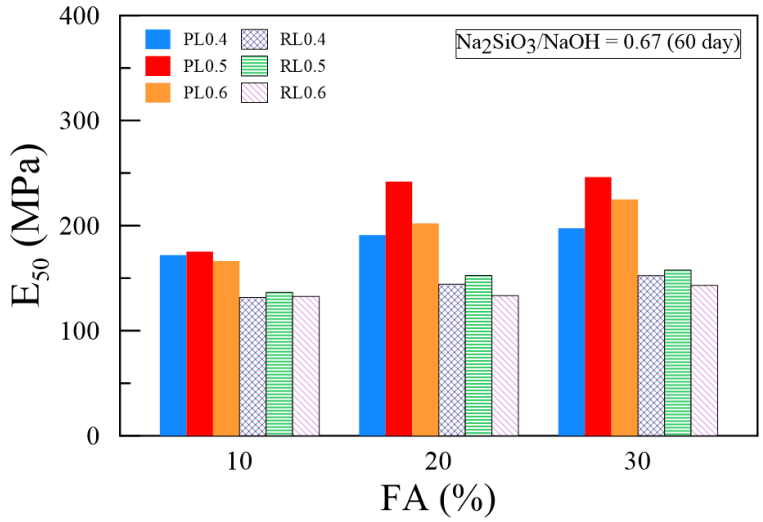


(ค)

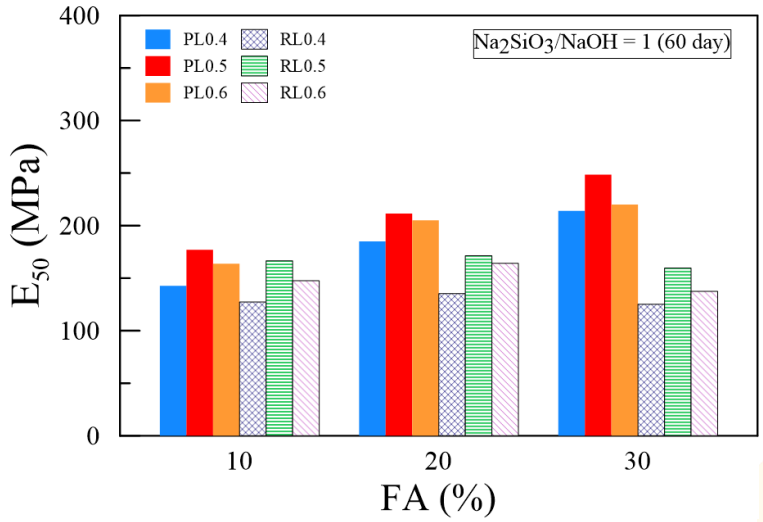


ภาพ 35 ค่า E_{50} ของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ ที่ 28 วัน อัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH เท่ากับ (ก) 0.67 , (ข) 1 และ (ค) 1.5

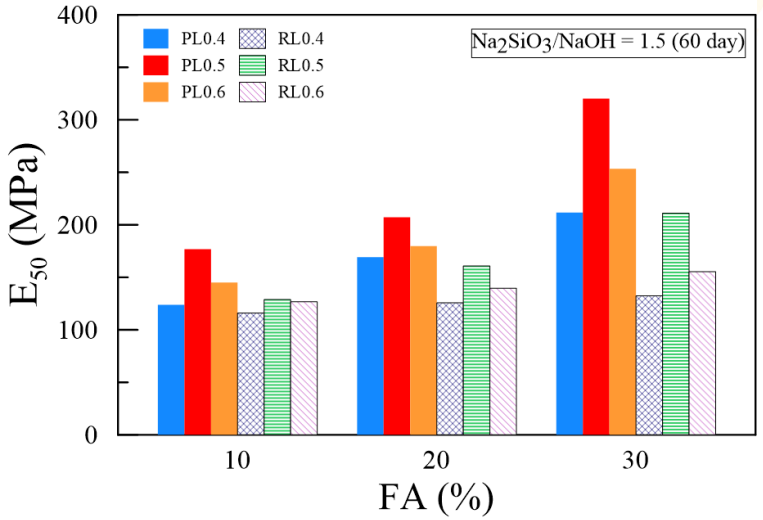
(ก)



(ข)

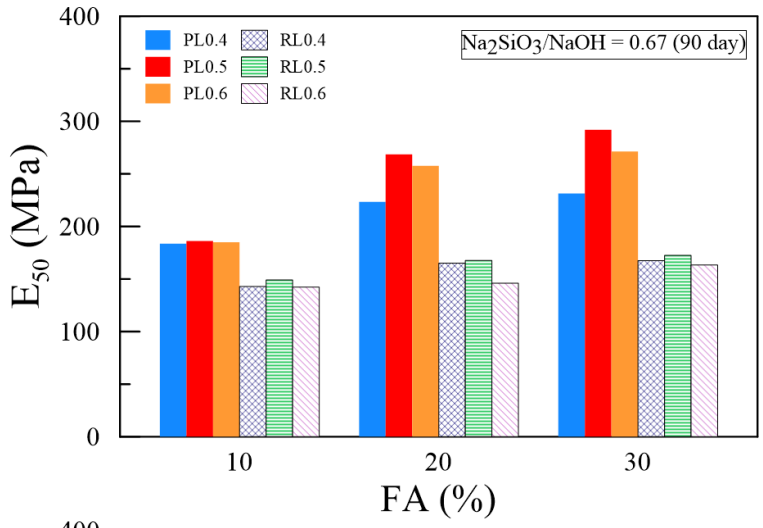


(ค)

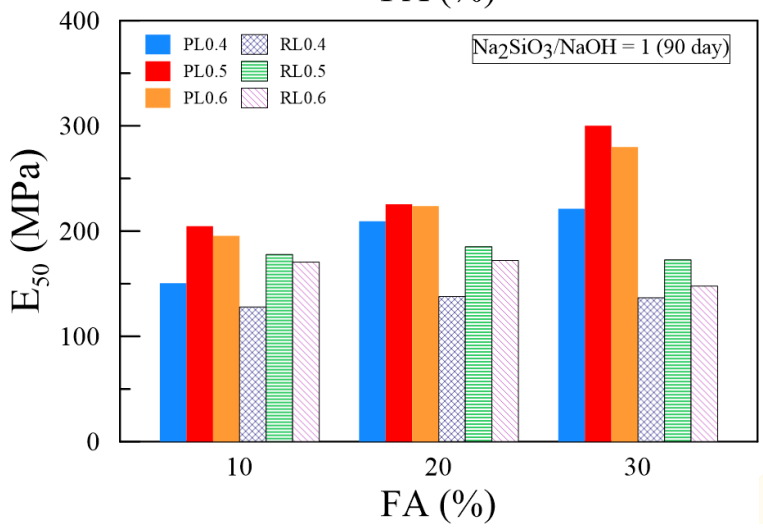


ภาพ 36 ค่า E_{50} ของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ ที่ 60 วัน อัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH เท่ากับ (ก) 0.67 , (ข) 1 และ (ค) 1.5

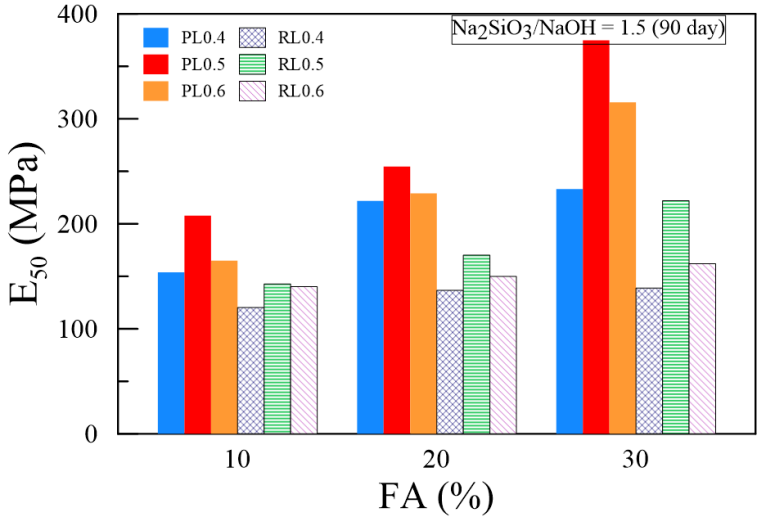
(ก)



(ข)



(ค)



ภาพ 37 ค่า E_{50} ของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ ที่ 90 วัน อัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH เท่ากับ (ก) 0.67 , (ข) 1 และ (ค) 1.5

ค่า E_{50} หรือโมดูลัสยืดหยุ่นที่ระดับความเครียดซึ่งให้กำลังอัดครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด (secant modulus at 50% of q_u) เป็นตัวชี้วัดความแข็งแกร่งเชิงยืดหยุ่นของดินที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์ โดยผลที่ได้สะท้อนพฤติกรรมการรับแรงในช่วงยืดหยุ่นและแสดงศักยภาพของโครงสร้างภายในดินเมื่อถูกกระทำด้วยแรงอัด สำหรับชุดทดสอบ Na_2SiO_3/NaOH = 1.5 ที่อายุบ่ม 7, 28, 60 และ 90 วัน (ภาพ 32–35) พบว่า E50 เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามอายุบ่มและสัดส่วนเถ้า โดยเมื่อเพิ่มสัดส่วนเถ้าจาก 90:10 เป็น 80:20 และ 70:30 ค่า E50 จะสูงขึ้นอย่างชัดเจน สอดคล้องกับแนวโน้มของกำลังอัดแกนเดี่ยว (UCS) ที่รายงานไว้ก่อนหน้า ทั้งนี้ดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยเถ้าปาล์ม (P) ให้ค่า E_{50} สูงกว่าเถ้ายาง (R) อย่างเป็นระบบ โดยเฉพาะที่อัตราส่วน L/FA = 0.5 ซึ่งเป็นจุดทำงานที่ให้ทั้ง UCS และ E50 สูงสุดในชุดการทดสอบ

ภาพ 32 ที่อายุ 7 วัน ค่า E_{50} ยังอยู่ในระดับต่ำเมื่อเทียบกับอายุที่มากกว่า แต่สามารถสังเกตได้ว่ามีการเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าที่ใช้ผสม โดยเถ้าปาล์มให้ค่า E_{50} สูงกว่าเถ้ายาง ซึ่งสอดคล้องกับค่า UCS ที่เถ้าปาล์มมีแนวโน้มสูงกว่าในระยะต้น

ภาพ 33 ที่อายุ 28 วัน ค่า E_{50} เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยสูตรเถ้าปาล์มที่สัดส่วน 70:30 และ L/FA = 0.5 มีค่า E50 สูงที่สุด แสดงให้เห็นว่าเมื่อโครงสร้างเจลจีโอโพลิเมอร์พัฒนาไปมากขึ้น ความแข็งแกร่งเชิงยืดหยุ่นของดินก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้ผลยังสะท้อนถึงความสัมพันธ์โดยตรงกับค่า UCS ที่เพิ่มขึ้นจนสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานดินซีเมนต์ฐานทาง

ภาพ 34 ที่อายุ 60 วัน ค่า E_{50} ของหลายสูตรเพิ่มขึ้นมากกว่าเท่าตัวเมื่อเปรียบเทียบกับช่วง 7 วัน โดยเฉพาะสูตรที่ผสมเถ้าปาล์ม ซึ่งชี้ให้เห็นถึงบทบาทของซิลิกาเชิงปฏิกิริยาในการสร้างเจล N-A-S-H และ C-(A)-S-H ที่มีความต่อเนื่องและหนาแน่น ส่งผลให้ดินมีทั้งกำลังและความแข็งแกร่งเชิงยืดหยุ่นที่สูงขึ้นตามอายุบ่ม

ภาพ 35 ที่อายุ 90 วัน ค่า E_{50} มีค่าสูงสุดในทุกสูตร โดยสูตรเถ้าปาล์ม 70:30, L/FA = 0.5 และ Na_2SiO_3/NaOH = 1.5 ให้ค่า E_{50} มากกว่า 2–3 เท่าของค่าในช่วง 7 วัน สอดคล้องกับค่า UCS ที่สูงถึง 3,800.48 kPa แสดงให้เห็นว่าการพัฒนากำลังในระยะยาวไม่ได้สะท้อนเพียงค่ากำลังรับแรงอัดสูงขึ้นเท่านั้น แต่ยังหมายถึงความแข็งแรงเชิงยืดหยุ่นที่ดีขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการใช้งานจริงในงานทางและงานวิศวกรรมปฐพี

ผลการศึกษาในส่วนนี้แสดงให้เห็นว่าค่า E_{50} สอดคล้องกับค่า UCS ทุกช่วงอายุการบ่ม โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้า ชนิดเถ้า ระยะเวลาการบ่ม และอัตราส่วนสารละลายด่างที่เหมาะสม (L/FA = 0.5 และ Na_2SiO_3/NaOH = 1.5) การที่ค่า E_{50} พัฒนาตาม UCS แสดงให้เห็นว่า โครงสร้างภายในดินที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์มีทั้งความแข็งแรงและความแข็งแกร่งเชิงยืดหยุ่นที่เพียงพอสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านวิศวกรรมโยธาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้ง (Wetting and drying) ของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์ม

การทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียก–แห้ง (W–D) มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินเสถียรภาพของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์มภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงความชื้นซ้ำ ๆ ซึ่งใกล้เคียงกับสภาพแวดล้อมจริงของวัสดุในงานทางและงานวิศวกรรมปฐพี โดยผลการทดสอบพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวหลังผ่านรอบ W–D ($q_{u(W-D)}$) และกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวเดิม (q_u) ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการเชิงเส้น ($q_u(W-D)$) = k•qu พร้อมค่าสัมประสิทธิ์กำหนด (R^2) ที่แสดงความสอดคล้องของแบบจำลอง

ภาพ 38(ก) ที่อายุบ่ม 7 วัน พบว่า (qu(W-D)) มีค่าเท่ากับ 2.58qu สำหรับ 1 รอบ, เพิ่มขึ้นเป็น 3.75qu สำหรับ 3 รอบ และลดลงเหลือ 3.25qu สำหรับ 6 รอบ โดยมีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.93–0.95 แสดงให้เห็นว่ารอบต้น (1–3 รอบ) ช่วยเสริมกำลังอัดเนื่องจากการละลายและควบแน่นของซิลิกาและอะลูมินาในเถ้าปาล์มยังคงดำเนินต่อ ส่งผลให้เกิดเจลจีโอพอลิเมอร์ต่อเนื่อง แต่เมื่อจำนวนรอบมากขึ้น กำลังลดลงจากการเริ่มเกิดรอยแตกจุลภาคและความเสียหายสะสมภายใน

ภาพ 38(ข) ผลการทดสอบที่อายุ 28 วัน พบว่า (qu(W-D)) มีค่า 2.86qu สำหรับ 1 รอบ, สูงสุดที่ 3.35qu สำหรับ 3 รอบ และลดลงเหลือ 2.94qu สำหรับ 6 รอบ โดยมีค่า R^2 ประมาณ 0.87–0.90 เมื่อเปรียบเทียบกับอายุ 7 วัน จะเห็นว่าค่าทวีคูณจากรอบต้นลดลงเล็กน้อย เนื่องจากวัสดุมีโครงสร้างเจลที่หนาแน่นและสมบูรณ์มากขึ้นตั้งแต่ก่อนทดสอบ ทำให้ผลจากการเปียก–แห้งเสริมกำลังเชิงสัมพัทธ์น้อยลง ขณะเดียวกัน การเพิ่มรอบยังคงทำให้กำลังลดลงจากความเสียหายที่สะสม

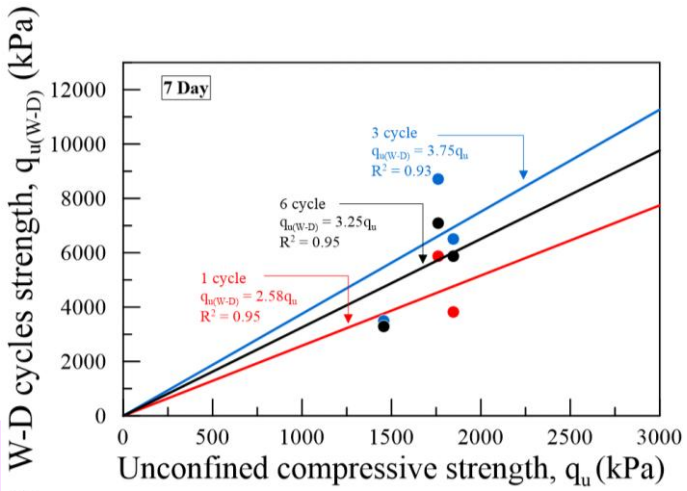
ภาพ 38(ค) ที่อายุ 60 วัน ค่ากำลังหลัง W–D มีค่า 2.62qu สำหรับ 1 รอบ, 3.12qu สำหรับ 3 รอบ และ 2.88qu สำหรับ 6 รอบ โดยมีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.84–0.90 ซึ่งแนวโน้มคล้ายกับช่วงอายุ 28 วัน แต่ค่าการเสริมกำลังสัมพัทธ์จากรอบต้นลดลงอีก เนื่องจาก โครงสร้างจีโอพอลิเมอร์มีความอิ่มตัวและเสถียรขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อจำนวนรอบมากขึ้น การสูญเสียด่างและการเกิดรอยแตกขนาดเล็กยังคงส่งผลให้กำลังลดลงต่อเนื่อง

ผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียก–แห้ง (W–D cycles) แสดงพฤติกรรมที่สอดคล้องกับงานวิจัยหลายงาน โดยรอบต้น (1–3 รอบ) ช่วยเพิ่มค่ากำลังอัดเมื่อเทียบกับค่าเดิม เนื่องจากการละลาย–ควบแน่นของซิลิกาและอะลูมินายังคงดำเนินต่อ ทำให้เกิดเจล N-A-S-H และ C-(A)-S-H ใหม่เข้ามาเสริมโครงสร้าง ส่งผลให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อจำนวนรอบเพิ่มมากขึ้น (เช่น 3–6 รอบ) ค่ากำลังเริ่มลดลงอย่างต่อเนื่องจากกลไกการเสื่อมสภาพภายใน เช่น การเกิดรอยแตกจุลภาค การสูญเสียด่าง และความพรุนที่เพิ่มขึ้น งานวิจัยของ Wu et al. (2021) พบว่า ดินเหนียวอ่อนที่

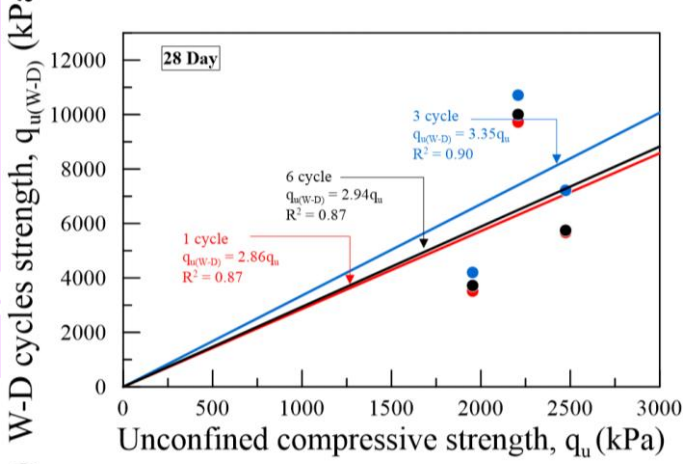
ปรับปรุงด้วย one-part geopolymer มีการพัฒนา stiffness และ strength ต่อเนื่องในรอบต้นของ W–D cycles ก่อนจะลดลงในรอบถัดไป shear strength ของ residual soil เพิ่มขึ้นช่วงแรก แต่ลดลงชัดเจนเมื่อจำนวนรอบมากขึ้นเนื่องจากการเกิดรอยแตกและความพรุนสะสม ส่วน Ngo et al. (2022) ชี้ว่าดินที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์มีความคงทนต่อการเปียก–แห้งได้ดีกว่าดินซีเมนต์ โดยเฉพาะในรอบต้น แต่หากเพิ่มจำนวนรอบมากขึ้น กำลังจะลดลงจากกลไกความเสียหายเช่นเดียวกัน

ดังนั้นพฤติกรรมของดินตะกอนกว้านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าปาล์มในงานวิจัยนี้ จึงสอดคล้องกับรายงานสากลว่าช่วง 1–3 รอบแรก มีการเสริมกำลังเชิงสัมพัทธ์ แต่เมื่อเข้าสู่ 3–6 รอบ ค่ากำลังจะเริ่มลดลงตามกลไกการเสื่อมสภาพสะสม

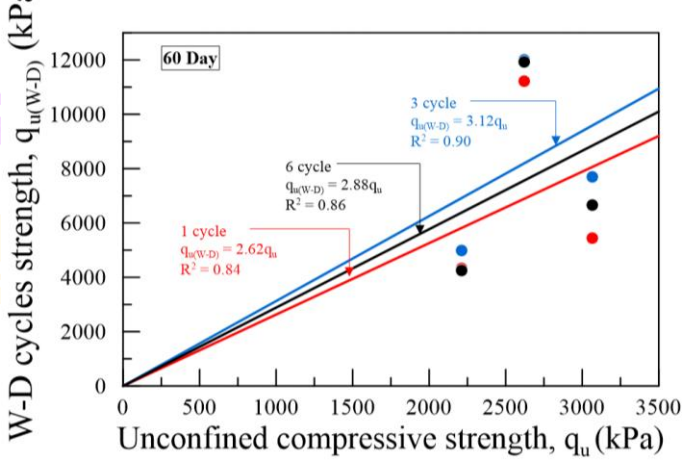
(ก)



(ข)



(ค)



ภาพ 38 ความสัมพันธ์ค่า UCS ของดินตะกอนกว้านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์มที่สภาวะเปียกสลับแห้งที่อายุการบ่ม (ก) 7 วัน (ข) 28 วัน และ (ค) 60 วัน

ผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้ง (Wetting and drying) ของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้ายาง

การทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียก–แห้ง (W–D cycles) เป็นการจำลองสภาวะการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินซ้ำ ๆ เพื่อประเมินความเสถียรของกำลังต้านทานการรับแรงอัดของวัสดุปรับปรุง ผลการทดสอบดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้ายาง โดยเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวหลังรอบการเปียก–แห้ง (W–D (การเปลี่ยนแปลงของค่า qu(W–D)/qu ตามจำนวนรอบการเปียก–แห้ง) ต่อค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวเดิม (qu) ที่อายุบ่มต่าง ๆ

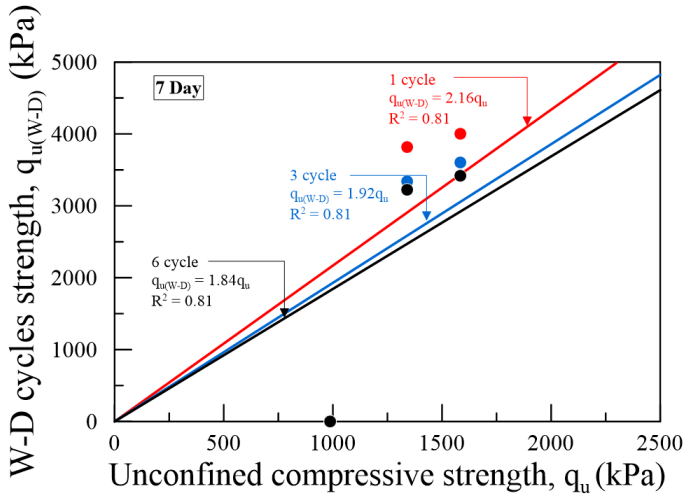
ภาพ 39(ก) ที่อายุ 7 วัน ค่ากำลังสัมพัทธ์ของวัสดุหลังผ่านการเปียก–แห้ง 1 รอบ มีค่าเท่ากับ 2.16qu จากนั้นลดลงเป็น 1.92qu ที่ 3 รอบ และ 1.84qu ที่ 6 รอบ โดยมีค่า R2=0.81 ทุกกรณี แสดงถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ดีระหว่าง qu(W-D) และ qu แม้ว่ากำลังจะค่อย ๆ ลดลงตามจำนวนรอบ เนื่องจากการเกิดรอยแตกจุลภาคและช่องว่างที่สะสม

ภาพ 39(ข) ที่อายุ 28 วัน ค่ากำลังสัมพัทธ์อยู่ที่ 2.07qu หลัง 1 รอบ, 1.99qu ที่ 3 รอบ และ 1.74qu ที่ 6 รอบ โดยมีค่า R2=0.885–0.91 ซึ่งสะท้อนถึงความเสถียรเชิงกลที่ดีกว่าในระยะบ่ม 7 วัน แต่แนวโน้มการลดลงของกำลังเมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้นยังคงปรากฏชัด

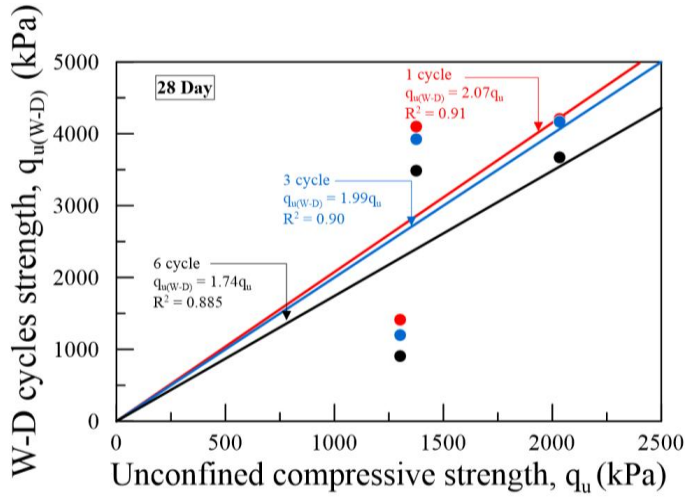
ภาพ 39(ค) ผลที่อายุ 60 วัน พบว่า ค่ากำลังสัมพัทธ์เท่ากับ 2.00qu สำหรับ 1 รอบ, 1.91 qu สำหรับ 3 รอบ และ 1.70qu สำหรับ 6 รอบ โดยมีค่า R2=0.91–0.94 ซึ่งเป็นค่าความสัมพันธ์สูงที่สุดในสามช่วงอายุ สะท้อนถึงความเสถียรที่เพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม แต่ยังคงมีแนวโน้มการเสื่อมกำลังเมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้น

ผลการทดสอบแสดงว่า ดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้ายางมีความสามารถในการคงทนภายใต้สภาวะเปียก–แห้งในระดับหนึ่ง โดยกำลังสัมพัทธ์สูงขึ้นเล็กน้อยในรอบต้น แต่เมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้น กำลังลดลงอย่างต่อเนื่อง สาเหตุสำคัญมาจากองค์ประกอบทางเคมีของเถ้ายางซึ่งมีปริมาณ CaO สูง แต่ส่วนใหญ่ปรากฏในรูปผลึก (crystalline CaO) ที่มีความ reactive ต่ำ ทำให้การสร้างเจล C–S–H และ N–A–S–H มีความต่อเนื่องจำกัด เมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าปาล์ม พบว่าเถ้ายางมีประสิทธิภาพในการรักษากำลังภายใต้การเปียก–แห้งต่ำกว่า ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Horpibulsuk et al. (2016) ที่พบว่าการมี CaO ในรูปผลึกจำนวนมากมักส่งผลให้วัสดุจีโอโพลิเมอร์มีความทนทานต่อการเปียก–แห้งต่ำลง ดังนั้นการปรับปรุงดินด้วยเถ้ายางสามารถเพิ่มความคงทนได้ในระดับหนึ่ง โดยเฉพาะในระยะบ่มต้น แต่มีข้อจำกัด จึงอาจไม่เหมาะกับงานที่ต้องเผชิญการเปลี่ยนแปลงสภาวะเปียก–แห้งบ่อยครั้งหรือต้องการความทนทานสูง

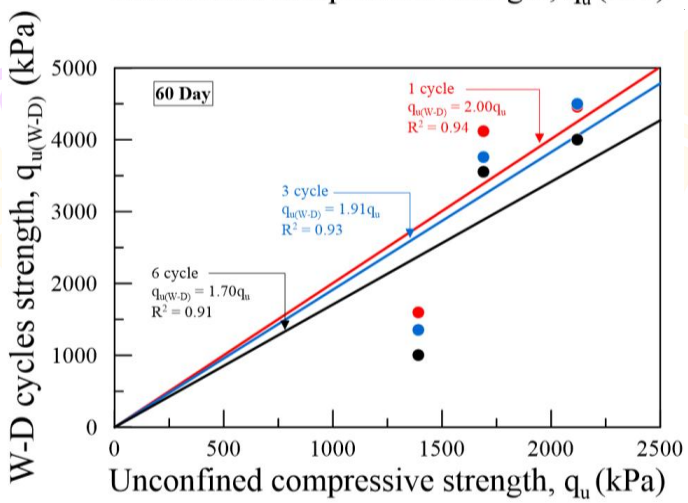
(ก)



(ข)



(ค)



ภาพ 39 ความสัมพันธ์ค่า UCS ของดินตะกอนกว้านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้ายางที่สภาวะเปียกสลับแห้งที่อายุการบ่ม (ก) 7 วัน (ข) 28 วัน และ(ค) 60 วัน

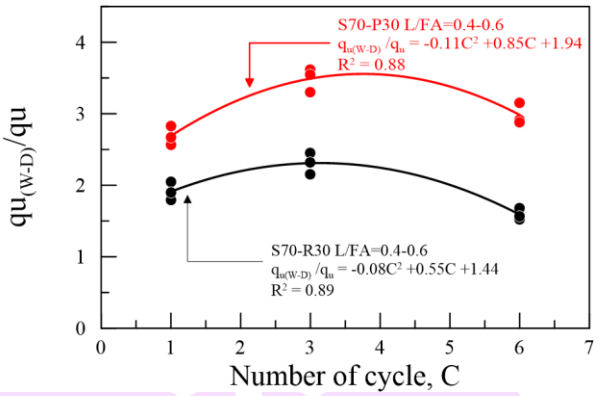
ภาพ 38 แสดงผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียก–แห้ง (Wetting and Drying; W–D) ของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าปาล์ม (S70–P30) และเถ้ายางพารา (S70–R30) แสดงถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วน $q_{u(W-D)}/q_u$ เมื่อจำนวนรอบการเปียก–แห้งเพิ่มขึ้นจาก 1 รอบ เป็น 3 รอบ และ 6 รอบ

สำหรับส่วนผสม S70–P30 พบว่า $q_{u(W-D)}/q_u$ มีค่าประมาณ 1.94–3.5 โดยเพิ่มสูงขึ้นจากรอบที่ 1 ไปจนถึงรอบที่ 3 แสดงถึงการพัฒนาความคงทนในช่วงต้น ซึ่งอาจเกิดจากการที่กระบวนการเปียก–แห้งช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันและการก่อตัวของเจล N–A–S–H และ C–(A)–S–H ให้มีความหนาแน่นมากขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อรอบเพิ่มขึ้นถึง 6 รอบ ค่า $q_{u(W-D)}/q_u$ มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย แสดงให้เห็นถึงผลของการเกิดไมโครแคร็ก (microcracks) และช่องว่างในโครงสร้างซึ่งเกิดจากความเค้นซ้ำและการเปลี่ยนแปลงความชื้น ส่งผลให้ความคงทนลดลงในระยะยาว

ในขณะที่ส่วนผสม S70–R30 ค่า $q_{u(W-D)}/q_u$ มีค่าต่ำกว่าอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับ S70–P30 อยู่ในช่วง 1.4–2.5 และมีแนวโน้มใกล้เคียงกันคือเพิ่มขึ้นจนถึงรอบที่ 3 ก่อนที่จะลดลงในรอบที่ 6 การที่เถ้ายางพารามีสัดส่วน CaO สูงแต่ส่วนใหญ่อยู่ในรูปผลึก (crystalline) ที่มีความ reactive ต่ำ จึงทำให้การสร้างเจลยึดเหนี่ยวไม่เด่นชัดเท่าเถ้าปาล์ม ส่งผลต่อความคงทนของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่ต่ำกว่าในทุกจำนวนรอบ

เมื่อเปรียบเทียบทั้งสองวัสดุ พบว่า เถ้าปาล์ม (P) แสดงศักยภาพด้านความคงทนดีกว่าเถ้ายาง (R) อย่างต่อเนื่อง โดยสามารถรักษาค่า $q_{u(W-D)}/q_u$ ให้อยู่ในระดับสูงกว่า แม้เมื่อจำนวนรอบเปียก–แห้งเพิ่มขึ้น ซึ่งยืนยันถึงบทบาทของ ซิลิกาเชิงปฏิกิริยา (reactive silica) ในเถ้าปาล์มที่ช่วยให้ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ดำเนินไปได้ต่อเนื่อง และสร้างโครงข่ายเจลที่ต้านทานการเสื่อมสลายได้ดีกว่า

ซึ่งการทดสอบนี้สะท้อนว่า จำนวนรอบการเปียก–แห้งมีผลทั้งเชิงบวกและเชิงลบต่อความคงทนของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ โดยรอบต้น ๆ (1–3 รอบ) สามารถกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาเสริมกำลัง แต่เมื่อรอบสะสมมากขึ้น (6 รอบ) จะส่งผลให้เกิดการเสื่อมสลายภายในเนื้อวัสดุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในวัสดุที่ใช้เถ้ายางพาราเป็นสารตั้งต้น



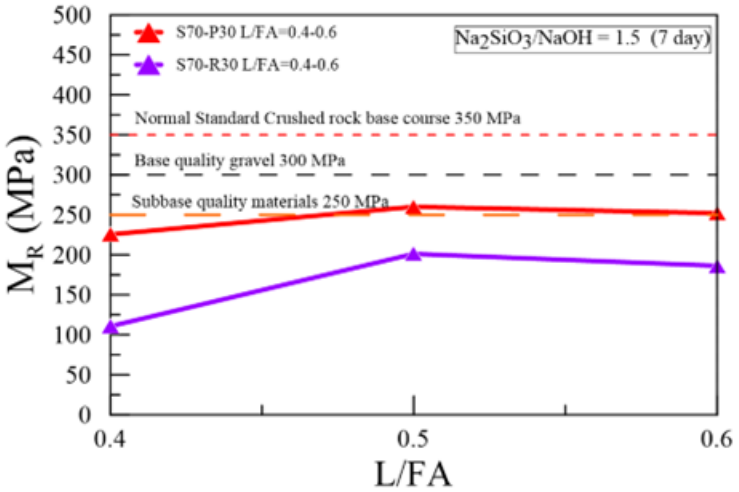
ภาพ 40 การเปลี่ยนแปลงของค่า $q_{u(W-D)}/qu$ ตามจำนวนรอบการเปียกสลับแห้ง

ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus, MR)

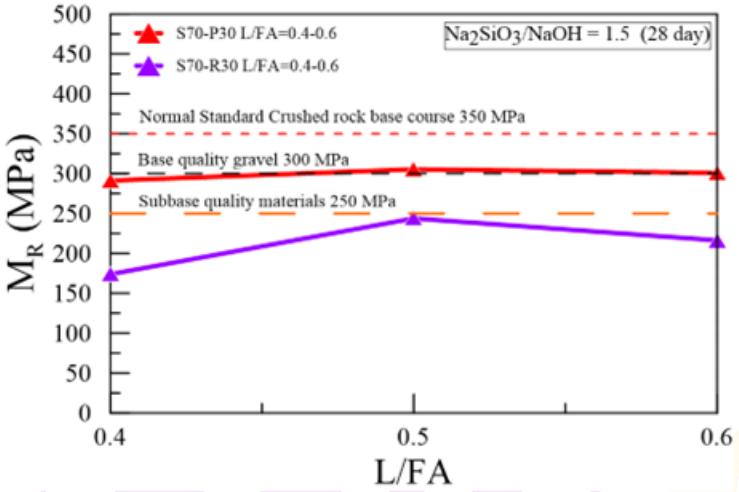
การทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus, MR) ถูกนำมาใช้เพื่อประเมินสมบัติเชิงยืดหยุ่น–คืนตัวของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์มและเถ้ายาง โดยเลือกเฉพาะส่วนผสมที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวสูงสุด (S70-P30 และ S70-R30 ภายใต้สัดส่วน L/FA = 0.4–0.6 และ Na_2SiO_3/NaOH = 1.5) มาทดสอบ ณ อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน ผลการทดสอบเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานที่ใช้ในงานทาง ได้แก่ ค่าวัสดุ Subbase 250 MPa, Base quality gravel 300 MPa และ Crushed rock base 350 MPa ตามมาตรฐาน AASHTO (1993)

จากผลการทดสอบที่อายุ 7 วัน ภาพ 41(ก) พบว่า ส่วนผสม S70-P30 ให้ค่า MR ประมาณ 220–260 MPa ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐาน Subbase 250 MPa เล็กน้อย และมีแนวโน้มเข้าใกล้ระดับ Base quality gravel 300 MPa เมื่อค่า L/FA = 0.5 ขณะที่ส่วนผสม S70-R30 มีค่า MR ต่ำกว่า (110–200 MPa) ซึ่งยังไม่ถึงเกณฑ์ Subbase มาตรฐาน แสดงให้เห็นว่าเถ้าปาล์มมีศักยภาพในการสร้างโครงสร้างยืดหยุ่นที่เหมาะสมกว่าการใช้เถ้ายางในช่วงต้นอายุบ่ม

ที่อายุ 28 วัน ภาพที่ 41(ข) ค่า MR ของส่วนผสม S70-P30 ปรับตัวสูงขึ้นอยู่ที่ประมาณ 290–300 MPa สามารถผ่านเกณฑ์ Base quality gravel และเข้าใกล้เกณฑ์ Crushed rock base 350 MPa ได้อย่างชัดเจน ขณะที่ส่วนผสม S70-R30 ให้ค่า MR ประมาณ 170–220 MPa แม้จะสูงขึ้นเมื่อเทียบกับอายุ 7 วัน แต่ยังต่ำกว่ามาตรฐาน Subbase เล็กน้อย แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างด้านศักยภาพระหว่างเถ้าปาล์มและเถ้ายางในเชิงการสร้างโครงสร้างยืดหยุ่น



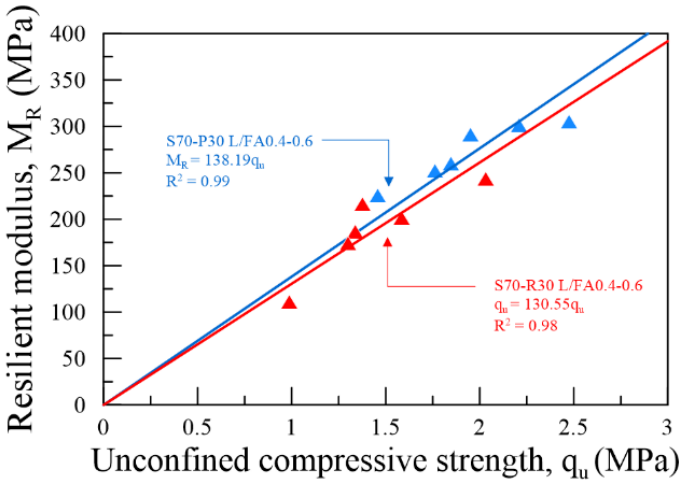
(ก) 7 วัน



(ข) 28 วัน

ภาพ 41 ค่า MR กับ L/FA ของดินตะกอนปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าปาล์มและเถ้ายาง

โดยภาพรวม ผลการทดสอบ MR สอดคล้องกับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว (UCS) ที่ได้จากการทดสอบก่อนหน้า โดยส่วนผสม S70-P30 ให้ค่ากำลังและความสามารถในการรับแรงซ้ำ (resilient behavior) สูงกว่าส่วนผสม S70-R30 อย่างต่อเนื่อง อันเป็นผลมาจากองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มซึ่งมีปริมาณ SiO_2 ในรูปอสัณฐาน (amorphous silica) สูงกว่า ทำให้การเกิดเจลยึดเหนี่ยว N-A-S-H และ C-(A)-S-H เป็นไปอย่างต่อเนื่องและให้โครงสร้างที่แน่นหนาและคืนตัวได้ดีภายใต้การรับแรงซ้ำ (Solanki & Zaman, 2012)



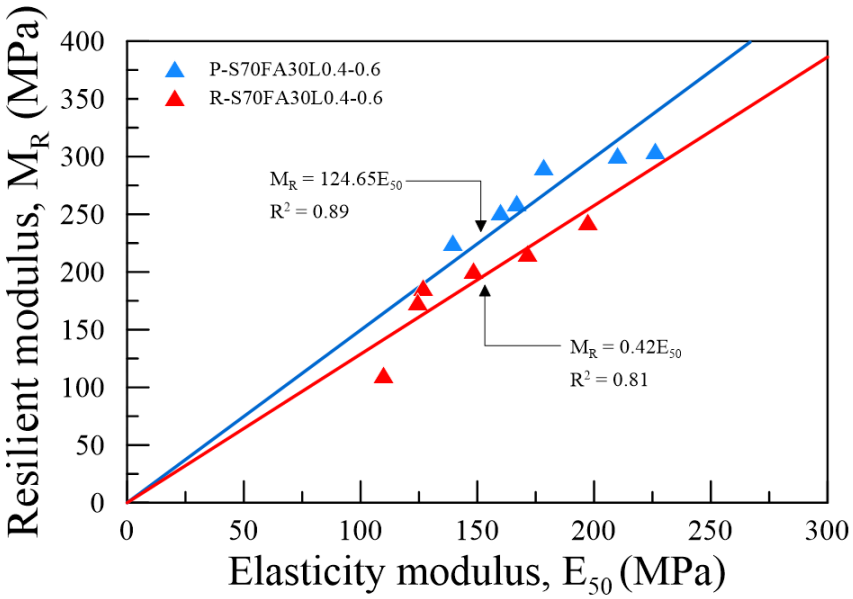
ภาพ 42 ค่า MR กับ UCS ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าปาล์มและเถ้ายาง L/FA = 0.4–0.6

ภาพ 42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นคืนตัว (Resilient Modulus, M_R) และค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว (Unconfined Compressive Strength, q_u) ของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์ม (P) และเถ้ายาง (R) ภายใต้อัตราส่วนผสม S70-P30 และ S70-R30 โดยกำหนดอัตราส่วน L/FA อยู่ในช่วง 0.4–0.6 ผลการทดสอบพบว่า MRM_RMR และ q_u มีความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ชัดเจนและมีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (R^2) อยู่ในระดับสูงมาก คือ 0.99 สำหรับส่วนผสมที่ใช้เถ้าปาล์ม และ 0.98 สำหรับส่วนผสมที่ใช้เถ้ายาง สะท้อนให้เห็นว่าค่ากำลังอัดแกนเดี่ยวสามารถใช้เป็นตัวแปรทำนายพฤติกรรมเชิงยืดหยุ่นของวัสดุที่ผ่านการปรับปรุงได้อย่างมีนัยสำคัญ สมการความสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงสถิติ ได้แก่

- ส่วนผสม S70-P30 (L/FA = 0.4–0.6): $M_R = 138.19q_u, R^2 = 0.99$ (4.1)
- ส่วนผสม S70-R30 (L/FA = 0.4–0.6): $M_R = 130.55q_u, R^2 = 0.98$ (4.2)

จากสมการดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเถ้าปาล์มมีแนวโน้มให้ค่าความสัมพันธ์สูงกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับเถ้ายาง ซึ่งบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพในการเสริมสร้างโครงข่ายเจลจีโอพอลิเมอร์ที่หนาแน่นและต่อเนื่องมากกว่า ส่งผลให้วัสดุสามารถต้านทานต่อแรงซ้ำ (repeated loading) ได้ดีกว่า แนวโน้มนี้สอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดี่ยวที่รายงานไว้ก่อนหน้านี้ ซึ่งพบว่า เถ้าปาล์มมีศักยภาพในการพัฒนากำลังช่วงต้นและเสถียรภาพของโครงสร้างที่ดีกว่าเถ้ายาง

โดยสรุปความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง M_R และ q_u ที่มีค่า R^2 ใกล้เคียง 1 ยืนยันว่า ค่ากำลังอัดแกนเดี่ยวสามารถใช้เป็นตัวชี้วัดเพื่อประมาณค่าความสามารถในการต้านทานแรงซ้ำของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งมีความสำคัญต่อการออกแบบและการประเมินสมรรถนะของวัสดุในงานทาง โดยเฉพาะชั้นซับเบสและชั้นเบสที่ต้องรองรับแรงจากการจราจรอย่างต่อเนื่อง



ภาพ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นคืนตัวและค่า E_{50} ของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์ม (P) และเถ้ายาง (R) ที่อัตราส่วน S70-P30 และ S70 R30 โดยมีค่า L/FA อยู่ในช่วง 0.4–0.6

ภาพ 43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง โมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus, M_R) และ โมดูลัสยืดหยุ่นจากการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (E_{50}) ของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์ม (S70-P30) และเถ้าไม้ยาง (S70-R30) พบว่าค่าทั้งสองมีความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ชัดเจน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์กำหนด (R^2) อยู่ในช่วง 0.81–0.89 แสดงถึงความสอดคล้องของผลการทดสอบเชิงกลทั้งสองรูปแบบ

สำหรับส่วนผสม S70-P30 ความสัมพันธ์ที่ได้คือ

$$M_R = 124.65E_{20}, R^2 = 0.89M_R \quad (4.3)$$

ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่า เถ้าปาล์มสามารถเสริมสร้างโครงสร้างเจลจีโอพอลิเมอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้พฤติกรรมการคืนตัวภายใต้โหลดซ้ำสอดคล้องกับความแข็งแกร่งที่ได้จากการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

ขณะที่ส่วนผสม S70-R30 แสดงความสัมพันธ์ดังนี้

$$M_R = 0.42E_{50}, R^2 = 0.81M_R \quad (4.4)$$

โดยมีค่าความชันของสมการต่ำกว่า S70-P30 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าแม้เถ้าไม้ยางจะมี CaO สูง แต่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระยะต้นและความสามารถในการสร้างโครงข่ายเจลที่ต่อเนื่องมีข้อจำกัดมากกว่าเมื่อเทียบกับเถ้าปาล์ม เมื่อเชื่อมโยงกับผลการทดสอบ กำลังรับแรงอัดแกนเดียว (UCS) และความสัมพันธ์ UCS-M_R ที่ได้อธิบายมาก่อนหน้านี้ จะเห็นได้ว่าผลลัพธ์มีความสอดคล้องกันอย่างชัดเจน โดยส่วนผสมที่ให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงกว่า (โดยเฉพาะ S70-P30) มักจะส่งผลให้ค่า M_R และ E_{50} สูงขึ้นตามไปด้วย แสดงให้เห็นว่า กลไกการก่อตัวของเจลจีโอพอลิเมอร์ (N-A-S-H และ C-(A)-S-H) ไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มความแข็งแกร่งเชิงสถิต (UCS) เท่านั้น แต่ยังมีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาสมบัติยืดหยุ่นและการคืนตัวของวัสดุอีกด้วย

ผลการทดสอบเรโซแนนซ์อิสระ Free-Free Resonant Frequency (FFR)

ผลการทดสอบค่าความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (Vp) และความเร็วคลื่นทุติยภูมิ (Vs) ของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์ภายใต้ส่วนผสม S70-P30 (เถ้าปาล์ม) และ S70-R30 (เถ้ายาง) ที่อัตราส่วน L/FA = 0.4–0.6 และอัตราส่วนสารละลายด่าง Na_2SiO_3/NaOH = 1.5 แสดงดังภาพที่ 44 และ 45 โดยทำการทดสอบที่อายุ 7 และ 28 วัน

ที่อายุ 7 วัน พบว่า S70-P30 ให้ค่า Vp อยู่ระหว่าง 250–280 m/s และ Vs อยู่ระหว่าง 150–260 m/s โดยค่าทั้งสองสูงสุดที่อัตราส่วน L/FA = 0.5 ก่อนจะลดลงเล็กน้อยที่ L/FA = 0.6 ขณะที่ S70-R30 ให้ค่า Vp ต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ (160–230 m/s) และค่า Vs ประมาณ 140–180 m/s โดยแสดงแนวโน้มสูงสุดที่ L/FA = 0.5 เช่นเดียวกัน

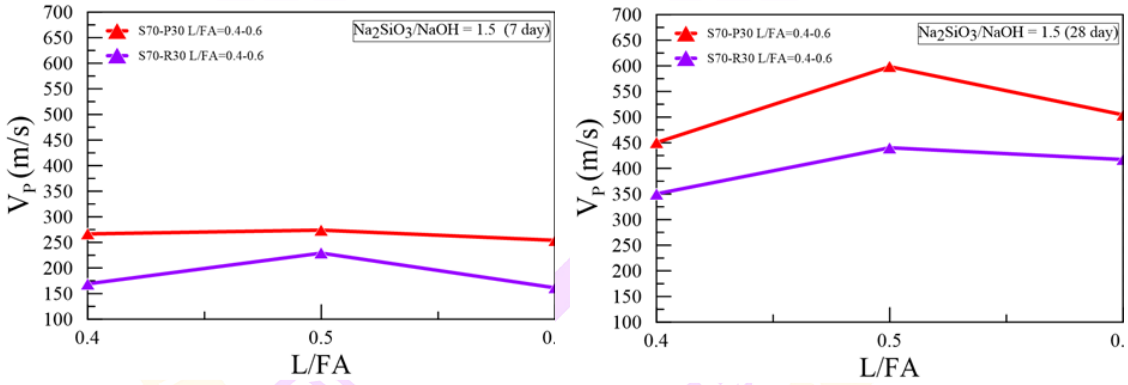
เมื่อพิจารณาที่อายุ 28 วัน ค่าความเร็วคลื่นทั้ง Vp และ Vs มีการเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดในทุกส่วนผสม โดย S70-P30 ให้ค่า Vp อยู่ระหว่าง 450–600 m/s และ Vs ประมาณ 300–360 m/s ในขณะที่ S70-R30 ให้ค่า Vp ระหว่าง 350–440 m/s และ Vs ประมาณ 230–330 m/s ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการพัฒนาความหนาแน่นและความต่อเนื่องของโครงสร้างวัสดุเมื่ออายุเพิ่มขึ้น โดยมีอัตราส่วน L/FA = 0.5 เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการพัฒนาโครงสร้างจุลภาค

แนวโน้มดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า ปริมาณสารละลายด่างมีผลต่อประสิทธิภาพการละลายซิลิกาและอะลูมินาที่อยู่ในเถ้า โดยที่ L/FA = 0.5 เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดต่อการเกิดกระบวนการละลาย (dissolution) และการควบแน่น (polycondensation) ของสารตั้งต้นจีโอโพลิเมอร์ ทำให้เกิดการสร้างเจลประเภท N-A-S-H และ C-(A)-S-H ที่มีความหนาแน่นและต่อเนื่องสูง ขณะที่ L/FA ต่ำกว่า (0.4) อาจทำให้ปฏิกิริยาเกิดไม่สมบูรณ์ และค่า L/FA สูงกว่า (0.6) มีแนวโน้มก่อให้เกิดความเป็นด่างส่วนเกินและรูพรุนที่ไม่พึงประสงค์ ส่งผลให้ค่าความเร็วคลื่นลดลง นอกจากนี้ผลการทดสอบยังชี้ให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างเถ้าปาล์มและเถ้ายางอย่างชัดเจน โดยส่วนผสมที่ใช้เถ้าปาล์ม (S70-P30) ให้ค่าความเร็วคลื่นสูงกว่าทุกช่วงอายุและทุกอัตราส่วน L/FA ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติ

ทางเคมีของเถ้าปาล์มที่มีปริมาณซิลิกาเชิงปฏิกิริยาสูงกว่า ทำให้สามารถสร้างโครงข่ายเจลที่หนาแน่นกว่าเถ้ายาง

เมื่อเชื่อมโยงกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (UCS) โมดูลัสยืดหยุ่น E_{50} และโมดูลัสคืนตัว (MR) ที่รายงานไว้ก่อนหน้านี้ พบว่า ผลของ Vp และ Vs มีความสอดคล้องกันอย่างเป็นระบบ กล่าวคือ ส่วนผสมที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่ามักจะให้ค่าความเร็วคลื่นสูงกว่าเช่นกัน สะท้อนถึงบทบาทสำคัญของกลไกการสร้างเจลจีโอโพลิเมอร์ที่ไม่เพียงแต่เสริมความแข็งแรงเชิงสถิตของวัสดุ แต่ยังเพิ่มความแข็งแกร่งเชิงพลวัตและความสามารถในการคืนตัวของวัสดุภายใต้การรับแรงซ้ำอีกด้วย

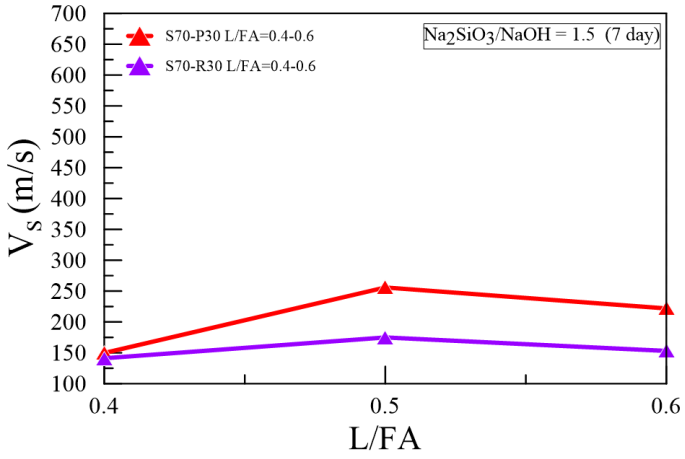
กล่าวโดยสรุป ผลการทดสอบ FFR ชี้ชัดว่า การเลือกใช้สัดส่วนผสมที่เหมาะสม (โดยเฉพาะ S70-P30 ที่ L/FA = 0.5) สามารถยกระดับสมบัติทางพลวัตของดินตะกอนกว้านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์ได้อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ค่าความเร็วคลื่นสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้สมรรถนะของวัสดุในเชิงไม่ทำลายซึ่งมีประโยชน์ต่อการประเมินและออกแบบวัสดุทางวิศวกรรมโยธา โดยเฉพาะงานชั้นทางและชั้นรองพื้นทางที่ต้องรองรับแรงซ้ำจากการจราจรอย่างต่อเนื่อง



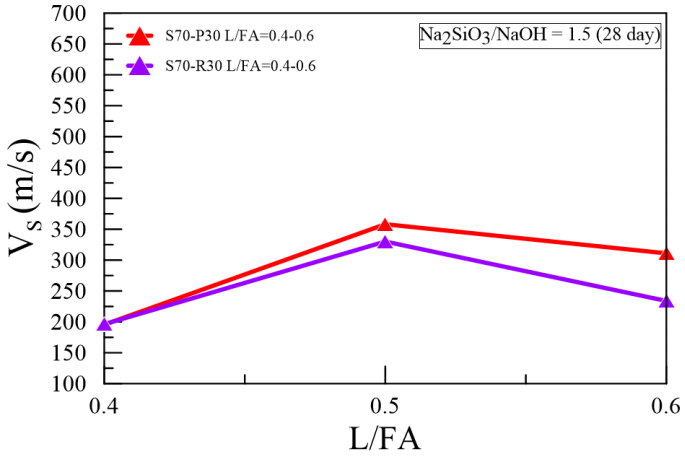
(ก) (ข)

ภาพ 44 ผลการทดสอบค่าความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (Vp) (ก) 7 วัน และ (ข) 28 วัน

(ก)

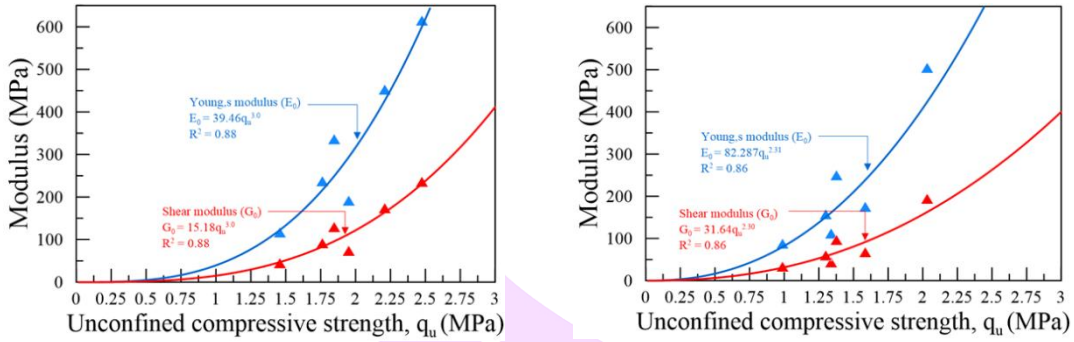


(ข)



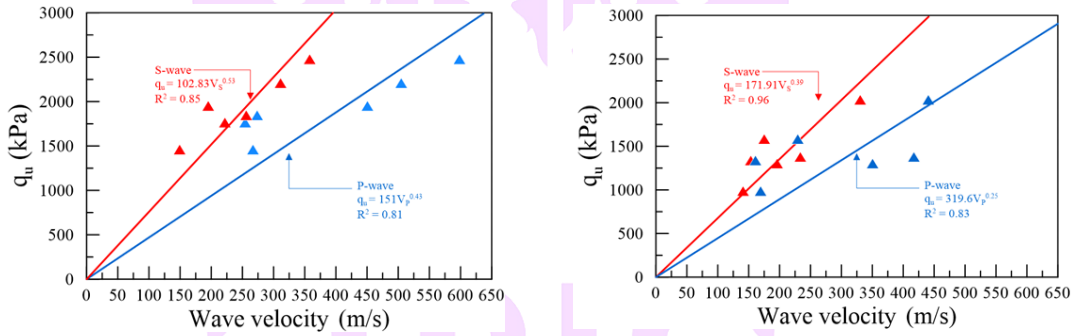
ภาพ 45 ผลการทดสอบค่าความเร็วคลื่นทุติยภูมิ (Vs) (ก) 7 วัน และ (ข) 28 วัน

จากผลการทดสอบความเร็วคลื่นตามวิธี Free-Free Resonant Frequency (FFR) พบว่าสามารถนำค่าความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (Vp) มาคำนวณหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้น (Initial Young's Modulus, E_0) และนำค่าความเร็วคลื่นทุติยภูมิ (Vs) มาคำนวณหาค่าโมดูลัสเฉือนเริ่มต้น (Initial Shear Modulus, G_0) ได้ดังแสดงในภาพ 46 และยังสามารถสะท้อนสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุได้อย่างไม่ทำลายตัวอย่างและเป็นตัวแปรสำคัญในการเชื่อมโยงกับผลการทดสอบเชิงกลอื่น ๆ เช่น กำลังรับแรงอัดแกนเดียว (q_u) และโมดูลัสยืดหยุ่นจากการทดสอบแบบดั้งเดิม (E_{50}) เพื่อประเมินสมรรถนะโดยรวมของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้ในการปรับปรุงดิน



(ก) S70-P30 (ข) S70-R30

ภาพ 46 โมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้นและโมดูลัสเฉือนเริ่มต้นกับค่ากำลังแรงอัดแกนเดี่ยว



(ก) S70-P30 (ข) S70-R30

ภาพ 47 ความสัมพันธ์ความเร็วคลื่นกับกำลังอัด (qu)

ภาพ 47(ก) และ 47(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (Vp) และค่าความเร็วคลื่นทุติยภูมิ (Vs) กับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (qu) ของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าปาล์ม (Palm ash) และเถ้ายาง (Rubber wood ash) ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นแนวโน้มที่ชัดเจนว่า เมื่อค่าความเร็วคลื่นทั้ง Vp และ Vs เพิ่มขึ้น ค่า qu ก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

สำหรับดินที่ปรับปรุงด้วยเถ้าปาล์มพบว่าค่ากำลังอัดแกนเดียวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามค่าความเร็วคลื่น โดยเฉพาะในกรณีของคลื่นเฉือน (Vs) ที่แสดงความสัมพันธ์ชัดเจนกว่าเมื่อเทียบกับคลื่นปฐมภูมิ (Vp) ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของดินในเชิงเฉือนมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความแข็งแรงเชิงรับแรงอัด การเพิ่มขึ้นของ Vs จึงสามารถบ่งชี้ถึงการพัฒนาของโครงสร้างจุลภาคที่หนาแน่นขึ้นจากการก่อตัวของเจลจีโอโพลิเมอร์

ในส่วนของดินที่ปรับปรุงด้วยเถ้ายางแนวโน้มก็มีลักษณะคล้ายคลึงกัน คือ ค่า q_u มีค่ามากขึ้นเมื่อ Vp และ Vs เพิ่มขึ้น แต่ค่า q_u โดยรวมยังคงต่ำกว่าของเถ้าปาล์มในทุกช่วงของการทดสอบ สาเหตุเนื่องมาจากข้อจำกัดของเถ้ายางซึ่งแม้จะมี CaO ในปริมาณสูง แต่ส่วนใหญ่เป็นผลึก (crystalline) จึงไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาสร้างเจลที่ต่อเนื่องและมีความหนาแน่นได้เทียบเท่ากับเถ้าปาล์มที่มี SiO_2 ในรูปอสัณฐาน (amorphous silica) สูงกว่า

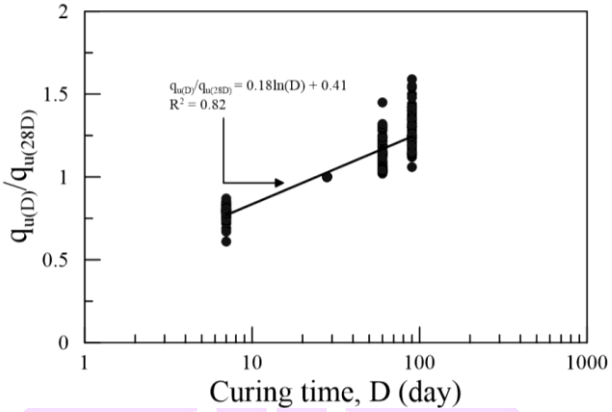
ผลการทดสอบสะท้อนว่า Vs มีความสัมพันธ์กับค่ากำลังอัดแกนเดียว (UCS) อย่างเสถียรกว่า Vp ทั้งในกรณีดินที่ปรับปรุงด้วยเถ้าปาล์มและเถ้ายาง เนื่องจาก Vs ขึ้นกับโมดูลัสเฉือน (G) โดยตรง ซึ่งเป็นตัวแปรหลักที่กำหนดความแข็งแรงเชิงกลของโครงข่ายเจลจีโอโพลิเมอร์ ในขณะที่ Vp ไวต่อความพรุนและความชื้นตกค้างมากกว่า จึงมีความผันผวนสูงกว่า

ความสัมพันธ์ด้านกำลังของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าปาล์มและเถ้ายาง

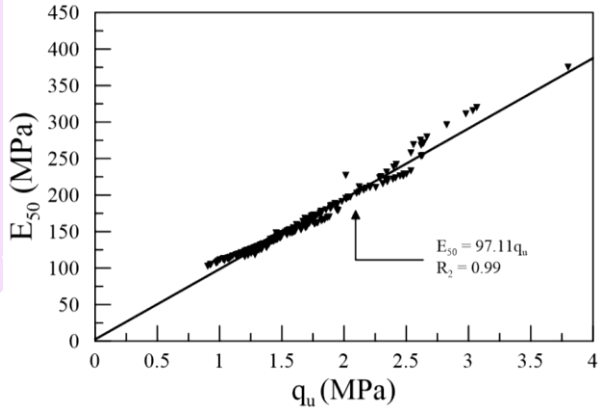
ภาพที่ 48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุการบ่มต่าง ๆ ($q_{u(D)}$) ต่อค่ากำลังอัดแกนเดียวที่อายุ 28 วัน ($q_{u(28D)}$) กับเวลาในการบ่ม (D) ของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์ ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติสามารถสร้างสมการเชิงลอการิทึมได้ดังนี้

$$\frac{q_{u(D)}}{q_{u(28D)}} = 0.18\ln(D) + 0.41 \quad (R^2 = 0.82) \tag{4.5}$$

จากสมการดังกล่าวพบว่า ค่ากำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์มีการเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบ่ม โดยมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจากช่วง 7 วัน ไปจนถึง 90 วัน ก่อนที่จะเข้าสู่ค่าที่ค่อนข้างคงตัวเมื่ออายุการบ่มมากกว่า 90 วัน ผลนี้สอดคล้องกับกลไกการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์ที่ต้องใช้เวลาในการละลาย (dissolution) ของซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าชีวมวล และการเกิดเจลชนิด N–A–S–H และ C–(A)–S–H ที่หนาแน่นมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคมีความต่อเนื่องและความพรุนลดลง (Provis & Bernal, 2014; Davidovits, 2015) ความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการบ่งชี้ได้ว่า ค่ากำลังอัดแกนเดียวที่อายุการบ่ม 28 วัน สามารถใช้เป็นตัวอ้างอิงมาตรฐานในการประเมินกำลังในช่วงอายุอื่น ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการออกแบบส่วนผสมและการประเมินสมรรถนะในงานวิศวกรรมฐานรากและทางพิเศษ เนื่องจากค่า R^2 = 0.82 แสดงถึงความน่าเชื่อถือของแบบจำลองเชิงประจักษ์ที่สามารถทำนายแนวโน้มกำลังได้อย่างมีนัยสำคัญ



ภาพ 48 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุการบ่มต่าง ๆ ($q_{u(D)}$) ต่อค่ากำลังอัดแกนเดียวที่อายุ 28 วัน ($q_{u(28D)}$)



ภาพ 49 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (q_u) และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_{50})

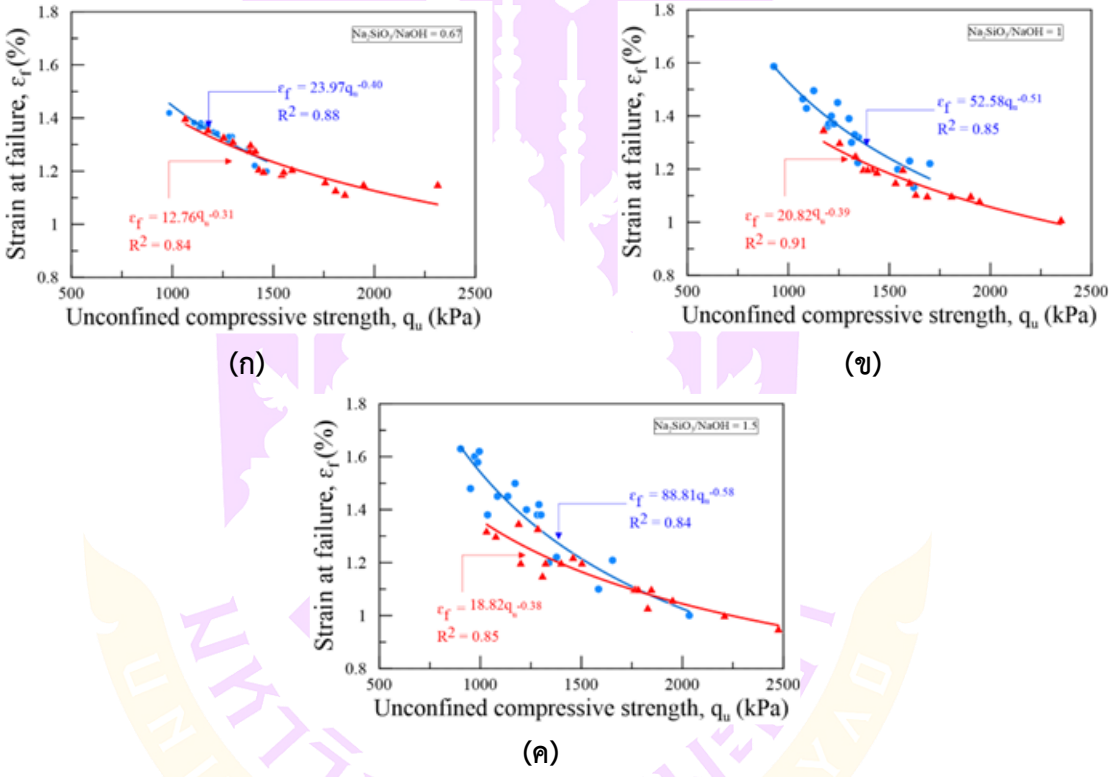
ภาพที่ 49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, qu) และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elasticity Modulus, E_{50}) ของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าชีวมวล ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าค่า E_{50} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่า qu อย่างมีนัยสำคัญ และมีความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้นตรง โดยสมการความสัมพันธ์เชิงประจักษ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติสามารถเขียนได้ดังนี้

$$E_{50} = 97.11q_u \quad (R^2 = 0.99) \tag{4.6}$$

จากสมการดังกล่าวสามารถตีความได้ว่า ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (q_u) สามารถใช้เป็นตัวแปรทำนายค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_{50}) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากค่าความสอดคล้องของ

แบบจำลอง (Coefficient of Determination, R^2) มีค่าเท่ากับ 0.99 ซึ่งอยู่ในระดับสูงมาก สะท้อนถึงความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของความสัมพันธ์ดังกล่าว (Rong-rong et al., 2020)

ในเชิงวิศวกรรมผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงเชิงสถิตของดินที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าชีวมวล ย่อมส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติด้านความยืดหยุ่นและความสามารถในการต้านทานการเสียรูปภายใต้แรงกระทำ (Deformability resistance) โดยกลไกสำคัญเกิดจากการก่อตัวของเจลจีโอโพลิเมอร์ประเภท N-A-S-H และ C-(A)-S-H ซึ่งช่วยเสริมสร้างโครงข่ายของวัสดุให้มีทั้งความแข็งแรงและความสามารถในการคืนรูปมากยิ่งขึ้น



ภาพ 50 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวและค่าความเครียดที่จุดวิบัติของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์ โดยพิจารณาผลของอัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH = (ก) 0.67, (ข) 1 และ (ค) 1.5

ภาพที่ 50(ก)–(ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (q_u) และค่าความเครียดที่จุดวิบัติ (εf) ของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์ โดยส่วนผสมดินตะกอนกับเถ้าปาล์มแสดงด้วยเส้นสีแดง และส่วนผสมดินตะกอนกับเถ้ายางแสดงด้วยเส้นสีน้ำเงิน ภายใต้อัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH ที่แตกต่างกันคือ 0.67, 1.0 และ 1.5 ผลการทดสอบพบว่า ทั้งสองส่วนผสมมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (q_u) เพิ่มสูงขึ้น

ค่า (ε_f) มีแนวโน้มลดลง ซึ่งเป็นพฤติกรรมทั่วไปของวัสดุที่มีลักษณะเปราะมากขึ้น (Consoli et al., 2009) ที่อัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH = 0.67 ภาพ 50(ก) ส่วนผสมที่ใช้เถ้าปาล์ม (เส้นสีแดง) และเถ้ายาง (เส้นสีน้ำเงิน) ต่างมีความสัมพันธ์ระหว่าง qu และ ε_f ในรูปสมการกำลัง (power function) โดยมีค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.84–0.88 แสดงถึงการทำนายแนวโน้มได้ในระดับที่น่าเชื่อถือ

ที่อัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH = 1.0 ภาพ 50(ข) ให้ค่า R^2 สูงสุดถึง 0.91 สำหรับกรณีเถ้าปาล์ม แสดงถึงความแม่นยำในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง qu และ ε_f ที่ชัดเจนยิ่งขึ้น ส่วนเถ้ายางให้ค่า R^2 ที่ใกล้เคียงกัน (≈0.85)

ที่อัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH = 1.5 ภาพ 50(ค) แนวโน้มยังคงสอดคล้องกับสองกรณีแรก โดยมีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.84–0.85 แม้จะต่ำกว่า Na_2SiO_3/NaOH = 1.0 เล็กน้อย แต่ยังสะท้อนความสัมพันธ์ได้ดี

โดยรวมแล้ว ส่วนผสมที่ใช้เถ้าปาล์ม (สีแดง) แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง q_u และ ε_f ที่มีเสถียรภาพมากกว่าเมื่อเทียบกับส่วนผสมที่ใช้เถ้ายาง (สีน้ำเงิน) สะท้อนให้เห็นว่าเถ้าปาล์มสามารถสร้างโครงสร้างเจลจีโอโพลิเมอร์ที่หนาแน่นและต่อเนื่องกว่า ส่งผลให้พฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุมีความสัมพันธ์กับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวอย่างชัดเจนกว่าเถ้ายาง

การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค

เพื่อทำความเข้าใจเชิงกลไกของการเสริมสร้างกำลังและการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงวิศวกรรมของดินตะกอนกว้านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์ งานวิจัยนี้ดำเนินการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค (microstructural analysis) โดยอาศัยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ควบคู่กับการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเชิงจุดด้วยรังสีเอกซ์เร่งพลังงาน (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy: EDS) ณ อายุบ่ม 28 วัน ซึ่งเป็นช่วงที่เนื้อวัสดุโดยรวมมีการพัฒนาความแข็งแรงและเสถียรภาพของโครงสร้างเจลอย่างชัดเจนสอดคล้องกับผล เช่น กำลังรับแรงอัดแกนเดียวและโมดูลัส ที่รายงานในบทก่อนหน้า การคัดเลือกองค์ประกอบผสมสำหรับการตรวจสอบเชิงจุลภาคมุ่งเน้นส่วนผสมที่ให้สมรรถนะเด่นด้านกำลังและความคงทน เพื่อสะท้อนภาพโครงสร้างที่พึงประสงค์และเปรียบเทียบอิทธิพลของชนิดเถ้าชีวมวลอย่างมีระบบ โดยเลือกส่วนผสม S70-P30: ดินตะกอน 70% ผสมเถ้าปาล์ม 30% ที่ช่วง L/FA = 0.4–0.6 และ ส่วนผสม S70-R30: ดินตะกอน 70% ผสมเถ้ายางพารา 30% ที่ช่วง L/FA = 0.4–0.6

ส่วนผสมทั้งสอง (S70-P30 และ S70-R30) สามารถมองว่าเป็นส่วนผสมหลักของแหล่งซิลิกา-อะลูมินาที่แตกต่างกัน โดยมีระดับการมีส่วนร่วมของ แคลเซียม (Ca) ไม่เท่ากัน ความแตกต่างนี้ส่งผลให้เกิดการสร้างเจลจีโอโพลิเมอร์ในรูปแบบที่หลากหลาย ได้แก่

1.เจล N-A-S-H (Sodium Alumino-Silicate Hydrate) ซึ่งมักพบในระบบที่มีซิลิกา-อะลูมินาสูงและแคลเซียมต่ำ

2.เจล C-(A)-S-H (Calcium Alumino-Silicate Hydrate) หรือเจลผสมที่มีทั้งแคลเซียม-ซิลิเกตและอะลูมิโนซิลิเกต ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีแคลเซียมเข้ามามีบทบาทมากขึ้น

การก่อตัวของเจลเหล่านี้มีความสำคัญโดยตรงต่อ ความต่อเนื่องของโครงข่าย (network continuity), ความหนาแน่นของบริเวณรอยต่อ (interfacial transition zone; ITZ) และ ระดับการเชื่อมต่อของรูพรุน (connected porosity) ซึ่งทั้งหมดเป็นปัจจัยที่กำหนดสมบัติเชิงกล (เช่น กำลังอัด, โมดูลัส) และความคงทนในระยะยาวของวัสดุ

ในการศึกษานี้ SEM ถูกใช้เพื่อตรวจสอบรูปร่างและลักษณะของเนื้อวัสดุ เช่น การเกิดและการกระจายตัวของเจลในเนื้อดิน การสร้างสะพานเจล (gel bridges) ที่เชื่อมอนุภาคดินและเถ้า ความหนาแน่นและความต่อเนื่องของรอยต่อ การมีอยู่ของรูพรุนและรอยแตกจุลภาค (microcracks) ที่อาจเป็นจุดอ่อนของวัสดุ ขณะที่ EDS ช่วยวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในระดับจุดและแบบแผนที่ธาตุ โดยมุ่งเน้นไปที่ธาตุหลัก ได้แก่ Si, Al, Ca, Na และ K ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสร้างเจลโดยตรงที่อาจมีผลต่อโครงสร้างในระดับหนึ่ง การตรวจวัดนี้ยังช่วยระบุจุดที่ยังคงเป็นอนุภาคเถ้าที่ไม่ทำปฏิกิริยาหรือควอตซ์ ซึ่งทำให้เกิดรูพรุนและลดความต่อเนื่องของโครงข่าย

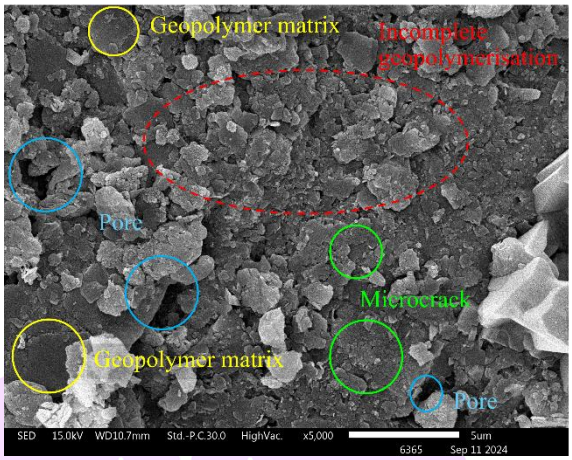
ภาพ 51(ก) S70–P30, L/FA = 0.4 จากการวิเคราะห์ด้วย SEM พบการก่อตัวของเมทริกซ์จีโอโพลิเมอร์ (geopolymer matrix) ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างซิลิกา (Si) และอะลูมินา (Al) ภายใต้สภาวะด่างสูง ส่งผลให้เกิดเจล N-A-S-H ที่มีลักษณะไร้ผลึกและปรากฏเป็นโครงข่ายต่อเนื่องบางส่วน อย่างไรก็ตามยังพบ การเกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ (incomplete reaction) ในหลายบริเวณ โดยพบอนุภาคเถ้าที่ไม่ทำปฏิกิริยาจำนวนหนึ่ง ซึ่งกลายเป็นตำแหน่งกำเนิดของรูพรุน (pore) และรอยแตกขนาดจุลภาค (microcrack) ที่กระจายอยู่ในเนื้อวัสดุ แม้รอยแตกและรูพรุนเหล่านี้ยังไม่เชื่อมต่อกันเป็นเครือข่าย แต่ก็สะท้อนให้เห็นว่าการเกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์อาจจำกัดศักยภาพของการพัฒนากำลังในระดับสูงสุด ทั้งนี้ลักษณะดังกล่าวสอดคล้องกับงานของ Opiso et al. (2023) ที่รายงานว่าการมีอนุภาคเถ้าที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาจะทำให้โครงข่ายจีโอโพลิเมอร์ไม่สมบูรณ์และส่งผลต่อการพัฒนากำลังและความคงทน

ภาพ 51(ข) S70–P30, L/FA = 0.5 จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วย SEM ของตัวอย่างที่ให้ผลการพัฒนากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวที่สูงพบว่า พื้นที่ส่วนใหญ่ประกอบด้วย เมทริกซ์จีโอโพลิเมอร์ (geopolymer matrix) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ระหว่างซิลิกา (Si) และอะลูมินา (Al) ภายใต้สภาวะด่างสูง ทำให้ก่อรูปเป็นเจล N-A-S-H ที่มีลักษณะไร้ผลึกและต่อเนื่อง (amorphous, continuous) โครงข่ายดังกล่าวทำหน้าที่เป็น “แกนรับแรง” ของวัสดุ โดยยึดเหนี่ยวอนุภาคดินและเถ้าให้รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน นอกจากนี้ยังสังเกตเห็น สะพานเจล (gel bridges) ซึ่ง

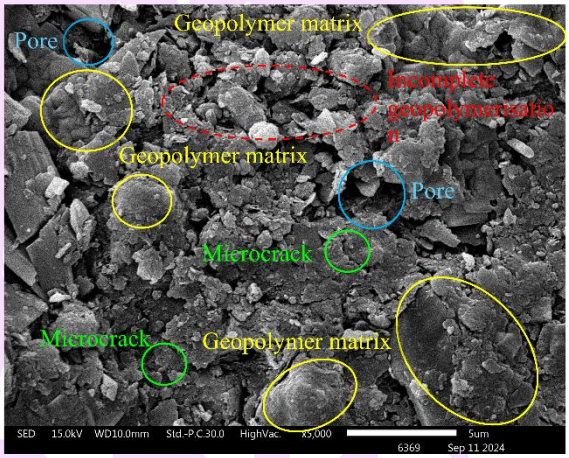
เป็นบริเวณที่เจลจีโอโพลิเมอร์ก่อตัวเชื่อมระหว่างผิวอนุภาคสองอนุภาค ส่งผลให้บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุ (interfacial transition zone; ITZ) มีความหนาแน่นมากขึ้น การปรากฏร่วมกันของเมทริกซ์จีโอโพลิเมอร์ที่ต่อเนื่อง และ gel bridges สะท้อนถึงความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์อันมีบทบาทสำคัญต่อการเพิ่ม ค่ากำลังอัดและความคงทน เนื่องจากช่วย ลดการเชื่อมต่อของรูพรุน (connected porosity) และ ชะลอการลุกลามของรอยแตกจุลภาค (microcrack) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Khasib et al., 2021)

ภาพ 51(ค) S70–P30, L/FA = 0.6 โครงสร้างจุลภาคที่ได้จาก SEM แสดงให้เห็นว่าเมทริกซ์จีโอโพลิเมอร์ ยังคงปรากฏอย่างต่อเนื่อง แต่เริ่มพบ incomplete reaction และการก่อตัวของ รูพรุนและ microcrack มากขึ้นกว่าสภาวะที่ L/FA = 0.5 โดยรูปร่างของเจลไม่สม่ำเสมอและปรากฏความพรุนในบางพื้นที่ ซึ่งชี้ว่าปริมาณสารละลายด่างที่สูงเกินไปอาจทำให้เกิดการหดตัวเฉพาะที่ และก่อให้เกิด microcrack เพิ่มขึ้น ความไม่สมดุลดังกล่าวอาจลดประสิทธิภาพของการเชื่อมโยงโครงข่ายเจล ส่งผลให้กำลังอัดลดลงเล็กน้อยจากจุดเหมาะสมที่ L/FA = 0.5 ลักษณะนี้สอดคล้องกับรายงานของ Provis & Bernal (2014) ที่ชี้ว่าการจัดสมดุลองค์ประกอบมีผลสำคัญต่อการสร้างเจลจีโอโพลิเมอร์ที่หนาแน่นและต่อเนื่อง หากปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์หรือมีการหดตัวมากเกินไปจะเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดรอยแตกจุลภาคและการลดทอนความคงทน

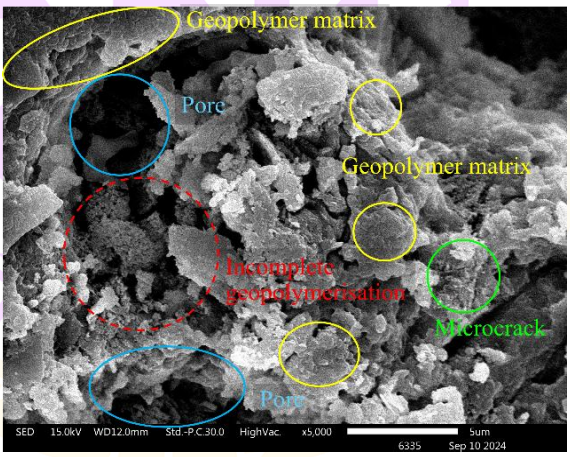
(ก) S70-P30 L/FA =0.4



(ข) S70-P30 L/FA =0.5



(ค) S70-P30 L/FA =0.6



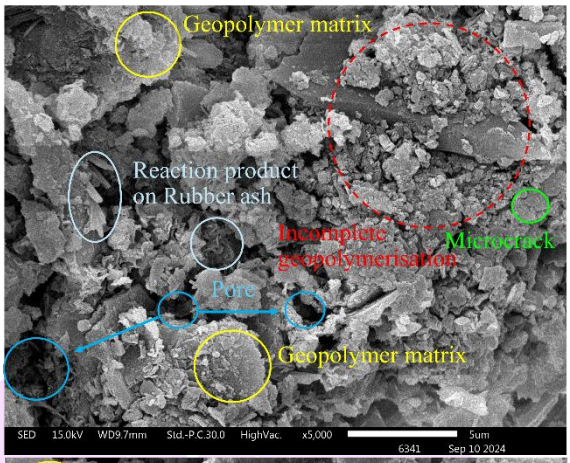
ภาพ 51 จุลภาคดินตะกอนผสมเถ้าปาล์ม (S:P = 70:30) ที่ L/FA = 0.4–0.6 ขยาย 5,000 เท่า

ภาพ 52(ก) S70–R30, L/FA = 0.4 จากการวิเคราะห์ภาพ SEM พบว่า ผลิตผลของปฏิกิริยา (reaction product) เกิดขึ้นเฉพาะบริเวณผิวของอนุภาคเถ้ายาง โดยไม่กระจายเป็นโครงข่ายต่อเนื่อง โครงสร้างที่ปรากฏยังมี การเกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ (incomplete reaction) อย่างชัดเจน ร่วมกับการพบ รูพรุน (pore) และรอยแตกขนาดจุลภาค (microcrack) กระจายตัวหลายตำแหน่ง ลักษณะดังกล่าวสะท้อนว่าโครงข่ายเจลจีโอโพลิเมอร์ยังไม่พัฒนาเต็มที่ แม้เถ้ายางจะมีปริมาณ Ca สูง ซึ่งเอื้อต่อการก่อตัวของเจล C-(A)-S-H แต่ในสภาวะ L/FA ต่ำเกินไป การละลายซิลิกายังไม่สมดุล ทำให้เจลที่เกิดขึ้นไม่ต่อเนื่อง ส่งผลให้ตัวอย่างนี้ให้ค่ากำลังอัดต่ำที่สุดในกลุ่มเถ้ายาง (García-Lodeiro et al., 2011)

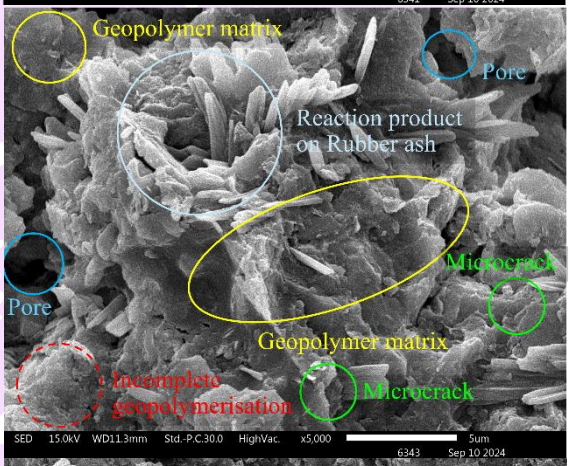
ภาพ 52(ข) S70–R30, L/FA = 0.5 ภาพ SEM แสดงโครงสร้างที่พัฒนาไปในทางที่ดีขึ้น โดยพบ geopolymer matrix ต่อเนื่องมากขึ้นกว่าสภาวะ L/FA = 0.4 พร้อมการปรากฏของเจล C-(A)-S-H ซึ่งก่อตัวเติมเต็มช่องว่างเล็ก ๆ (gel infilling) และช่วยเพิ่มความหนาแน่นของโครงสร้าง อย่างไรก็ตามยังพบ incomplete reaction และ pore/microcrack ในหลายบริเวณ แม้ตัวอย่างนี้จะให้ค่ากำลังอัดสูงสุดในส่วนผสมของเถ้ายาง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมของเถ้าปาล์มที่ L/FA = 0.5 จะเห็นได้ชัดว่าความต่อเนื่องของโครงข่ายและความสมบูรณ์ของเจลยังด้อยกว่า ความเปราะของเจล C-(A)-S-H ทำให้มีความเสี่ยงต่อการเกิดรอยแตกจุลภาคสูง แม้จะช่วยพัฒนากำลังได้ดีในช่วงต้น (Redden & Neithalath, 2014; Vázquez-Rodríguez et al., 2023)

ภาพ 52(ค) S70–R30, L/FA = 0.6 การวิเคราะห์ SEM แสดงให้เห็นการก่อตัวของ reaction product ที่ยังคงจำกัดเฉพาะผิวอนุภาคเถ้ายาง และมีการปรากฏของ incomplete reaction อย่างต่อเนื่อง ร่วมกับการปรากฏของ pore และ microcrack ที่เริ่มเชื่อมต่อกันเป็นแนวทางเด่นชัดมากขึ้น ส่งผลให้โครงข่ายเจลไม่สามารถพัฒนาได้เต็มที่ แม้การมี CaO สูงในระบบจะยังส่งเสริมการเกิดเจล C-(A)-S-H แต่การใช้สารละลายด่างในสัดส่วนที่มากเกินไปทำให้เกิดการหดตัวเฉพาะที่และเพิ่มรอยแตกจุลภาค ส่งผลให้ค่ากำลังอัดลดลงเมื่อเทียบกับสภาวะที่ L/FA = 0.5 และบ่งชี้ถึงความคงทนที่ด้อยลงในระยะยาว (Provis & Bernal, 2014)

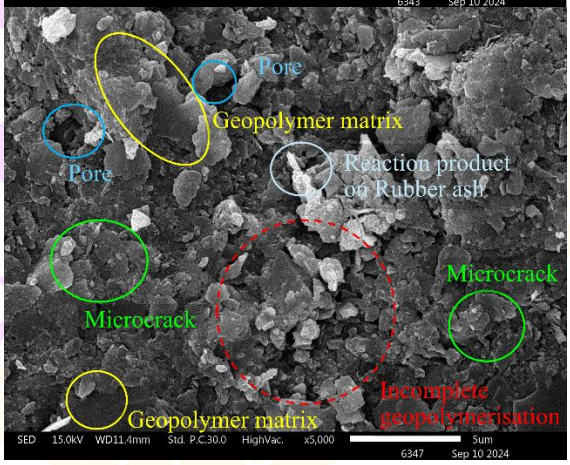
(ก) S70-R30 L/FA =0.4



(ข) S70-R30 L/FA =0.5



(ค) S70-R30 L/FA =0.6



ภาพ 52 จุลภาคดินตะกอนผสมเถ้ายาง (S:R = 70:30) ที่ L/FA = 0.4–0.6 ขยาย 5,000 เท่า

ตาราง 10 องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างผสม (Geopolymer Mixtures)

Mix	UCS (kPa)	Si (%)	Al (%)	Na (%)	K (%)	Si/Al	(Na+K/Al)
S70-P30 L/FA =0.4	1951.90	43.25	14.84	6.07	22.78	2.91	1.94
S70-P30 L/FA =0.5	2475.415	43.77	14.20	11.6	11.19	3.08	1.60
S70-P30 L/FA =0.6	2209.098	55.29	15.19	7.91	10.73	3.64	1.23
S70-R30 L/FA =0.4	1300	34.98	11.24	8.29	12.65	3.11	1.86
S70-R30 L/FA =0.5	2033	46.37	14.62	6.69	9.80	3.17	1.12
S70-R30 L/FA =0.6	1376.042	49.29	13.70	7.44	7.78	3.60	1.11

หมายเหตุ : ค่าองค์ประกอบทางเคมีแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์เชิงอะตอม (atomic %) วัดด้วย Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)

กลไกหลักที่กำหนดสมบัติของจีโอโพลิเมอร์อยู่ที่การก่อรูปของเจล N-A-S-H และ C-(A)-S-H เจลเหล่านี้เกิดขึ้นจากกระบวนการละลายซิลิกาและอะลูมินาในสภาวะด่าง จากนั้นจึงเชื่อมโยงกันจนกลายเป็นโครงข่ายสามมิติที่แข็งแรง ปัจจัยทางเคมีที่มีบทบาทสำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยานี้ คือ อัตราส่วน Si/Al และ R/Al (R = Na+K) ซึ่งถือเป็นตัวบ่งชี้ความสมดุลของระบบ งานวิจัยจำนวนมากได้ยืนยันตรงกันว่า หากค่า Si/Al อยู่ใกล้เคียง 3 และ R/Al อยู่ใกล้เคียง 1.0 จะเอื้อต่อการสร้างโครงสร้างที่หนาแน่น มีกำลังอัดสูง และคงทนในระยะยาว ทั้งนี้พบสอดคล้องกันในผลการศึกษาของ Ding et al. (2018), (Phoo-ngernkham et al., 2013), Češnovar et al. (2019)

ตารางที่ 10 ซึ่งแสดงค่ากำลังอัดแกนเดียว (UCS) พร้อมทั้งปริมาณของ Si, Al, Na และ K รวมถึงค่าของอัตราส่วนที่สำคัญ (Si/Al และ R/Al) ภายใต้เงื่อนไขสัดส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อเถ้า (L/FA) ที่ 0.4, 0.5 และ 0.6 โดยทำการเปรียบเทียบทั้งกรณีดินผสมเถ้าปาล์ม (P) และดินผสมเถ้ายาง (R) ส่วนผสมดินตะกอน 70% ผสมเถ้าปาล์ม 30% ใช้สัดส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อเถ้าที่ 0.4 (S70–P30, L/FA = 0.4) ค่าที่ได้คือ Si/Al = 2.91, R/Al = 1.94 และ UCS = 1,951.90 kPa แม้ค่า Si/Al จะอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แต่ค่า R/Al กลับสูงเกินไป ทำให้เกิดความเป็นด่างมากกว่าที่ระบบต้องการ ส่งผลให้ปฏิกิริยาไม่สมดุล เจล N-A-S-H ที่เกิดขึ้นไม่ต่อเนื่อง โครงสร้างเกิดรูพรุนและรอยแตกจุลภาคมากขึ้น กำลังอัดที่ได้จึงไม่สูงสุด (Češnovar et al., 2019)

ส่วนผสมดินตะกอน 70% ผสมเถ้าปาล์ม 30% ใช้สัดส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อเถ้าที่ 0.5 (S70–P30, L/FA = 0.5) มีค่า Si/Al = 3.08, R/Al = 1.60 และ UCS สูงสุดถึง 2,475.42 kPa ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุดในกลุ่มเถ้าปาล์ม ผลการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่า องค์ประกอบทางเคมีอยู่ในสภาวะสมดุลพอดี การละลายและการเชื่อมโยงของ Si และ Al กับ Na^+ เป็นไปอย่างเต็มที่ เกิดเจล N-A-S-H แบบ มีลักษณะไร้ผลึกที่หนาแน่นและต่อเนื่อง ส่งผลให้โครงสร้างแข็งแรง ความพรุนและรอยแตกลดลง (Ding et al., 2018;), (Phoo-ngernkham et al., 2013)

ส่วนผสมดินตะกอน 70% ผสมเถ้าปาล์ม 30% ใช้สัดส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อเถ้าที่ 0.6 (S70–P30, L/FA = 0.6) ที่สัดส่วนนี้ได้ค่า Si/Al = 3.64, R/Al = 1.23, และ UCS = 2,209.10 kPa ค่า R/Al ยังคงใกล้เคียงสมดุล (≈1.0) ซึ่งเอื้อต่อการเกิดโครงข่าย N-A-S-H อย่างเหมาะสม อย่างไรก็ตาม งานวิจัยของ Češnovar et al. (2019) กล่าวไว้ว่า ค่า Si/Al ที่สูงเกินไปทำให้ซิลิกามีปริมาณมากเกินความสามารถของระบบด่างในการละลายและเชื่อมโยง ส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดไม่เต็มที่ (incomplete geopolymerization) เกิดเจลที่ไม่ต่อเนื่องและมีรูพรุนมากขึ้น UCS จึงลดลงจากค่าที่เหมาะสมที่สุด (L/FA = 0.5)

ส่วนผสมดินตะกอน 70% ผสมเถ้ายาง 30% ใช้สัดส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อเถ้าที่ 0.4 (S70–P30, L/FA = 0.4) มีค่า Si/Al = 3.11, R/Al = 1.86 และ UCS = 1,300 kPa แม้ค่า Si/Al จะเหมาะสม แต่ค่า R/Al ที่สูงเกินไปทำให้เกิดด่างส่วนเกิน เจลที่ได้ไม่ต่อเนื่องโครงสร้างเกิดรูพรุนและรอยแตกจุลภาคมากขึ้น

ส่วนผสมดินตะกอน 70% ผสมเถ้ายาง 30% ใช้สัดส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อเถ้าที่ 0.5 (S70–P30, L/FA = 0.5) ค่าที่ได้คือ Si/Al = 3.17, R/Al = 1.12 และ UCS = 2,033 kPa ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุดในกลุ่มเถ้ายาง ค่าที่ได้นี้ถือว่าใกล้สมดุลย์มากที่สุด ทำให้การเกิดเจลทั้ง N-A-S-H และ C-(A)-S-H เป็นไปอย่างสมดุล ส่งผลให้โครงสร้างโดยรวมหนาแน่นขึ้นและกำลังสูงสุด แม้จะยังต่ำกว่าของกลุ่มเถ้าปาล์มแต่ก็เป็นข้อพิสูจน์ว่า R/Al ที่ใกล้ 1 เป็นเกณฑ์สำคัญในการสร้างโครงสร้างที่แข็งแรง

ส่วนผสมดินตะกอน 70% ผสมเถ้ายาง 30% ใช้สัดส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อเถ้าที่ 0.6 (S70–P30, L/FA = 0.6) ค่า Si/Al = 3.60, R/Al = 1.11 และ UCS = 1,376.04 kPa แม้ค่า R/Al จะยังใกล้เคียง 1 แต่ Si/Al ที่สูงเกินไป ประกอบกับปริมาณ Ca สูงในเถ้ายาง โดยผลจะสอดคล้องกับงานวิจัยของ Shamsah et al. (2025) และ Castillo et al., (2021) กล่าวว่าแคลเซียมในปริมาณที่เหมาะสมช่วยกระตุ้นการเกิดเจล C-A-S-H ร่วมกับ N-A-S-H ทำให้โครงสร้างหนาแน่นและมีกำลังอัดสูงขึ้น แต่ถ้าแคลเซียมมากเกินไปไปยับยั้งการเกิดเจล N-A-S-H และก่อให้เกิดผลึกแคลเซียมที่รบกวนโครงสร้างเจล amorphous ทำให้วัสดุแข็งเปราะเกิดรอยแตก และกำลังรับแรงอัดลดลง

อย่างไรก็ตามการเกิด N-A-S-H ขึ้นอยู่กับชนิดและองค์ประกอบเคมีของสารตั้งต้น ในงานนี้เถ้าปาล์มและเถ้ายางมีสัดส่วน Si-Al-Ca ไม่เหมือนกัน จึงทำให้กลไกจีโอโพลิเมอร์และปริมาณ N-A-S-H ที่ก่อตัว “เปลี่ยนไป” ตามชนิดเถ้า ข้อสังเกตนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Liang et al. (2021) ที่ชี้ว่าเมื่อเปลี่ยนสารตั้งต้นกระบวนการปฏิกิริยา N-A-S-H จะเปลี่ยนตามองค์ประกอบ

บทที่ 5

บทสรุป

ในบทนี้จะสรุปผลการวิจัยการปรับปรุง “ดินตะกอนกว๊านพะเยา” ด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าชีวมวลสองชนิด ได้แก่ ดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยเถ้าปาล์มและเถ้ายาง โดยพิจารณาผลของสัดส่วนดินตะกอน:เถ้า (S:FA = 90:10–70:30) สัดส่วนของเหลวต่อเถ้า (L/FA = 0.4–0.6) และอัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH เท่ากับ 0.67, 1.0 และ 1.5 (ใช้ NaOH ความเข้มข้น 8 โมลาร์) ต่อสมรรถนะทางวิศวกรรมสำหรับในการใช้งานเป็นวัสดุงานถนน พร้อมเทียบกับเกณฑ์อ้างอิงที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ เกณฑ์ UCS ของกรมทางหลวงสำหรับชั้นรองพื้นทางและชั้นพื้นทาง (≥ 689 kPa และ ≥ 1,724 kPa ตามลำดับ) เพื่อยืนยันความเหมาะสมในการใช้งานจริง

สรุปคุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนกว๊านพะเยา

ดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ศึกษานี้มีลักษณะเป็นดินเนื้อละเอียดจัด โดยผลการทดสอบพื้นฐานแสดงให้เห็นว่าเม็ดดินมีความถ่วงจำเพาะ (Gs) เท่ากับ 2.71 ซึ่งอยู่ในช่วงของดินอนินทรีย์ทั่วไป สอดคล้องกับดินเหนียวจากแหล่งน้ำจืด ผลการทดสอบขีดพิกัดอัตเตอร์เบิร์กให้ค่าขีดจำกัดเหลว (LL) 42.60% ขีดจำกัดพลาสติก (PL) 23.46% และขีดจำกัดการหดตัว (SL) 19.52% ทำให้ดัชนีความเป็นพลาสติก (PI) ประมาณ 19.14% บ่งชี้พฤติกรรมดินเหนียวที่มีความสามารถในการเปลี่ยนรูปร่างระดับปานกลางและไวต่อความชื้น และปริมาณดินที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ได้ 99.93% และผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ได้ 92.00% จัดว่าเป็นดินละเอียดเกือบทั้งหมด ดินตะกอนกว๊านพะเยา มีปริมาณความชื้นของดินในธรรมชาติ (natural water content) เท่ากับ 10.44% ค่า หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด (Maximum dry unit weight, γd) เท่ากับ 17.03 kN/m³ และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) เท่ากับ 13.94% เมื่อจำแนกดินแบบ USCS ดินนี้อยู่ในกลุ่ม A-7-6 ตามระบบ AASHTO และจัดเป็น CL (clay with low to medium plasticity)

ในเชิงวิศวกรรมดินตะกอนกว๊านพะเยามีคุณภาพตามธรรมชาติอยู่ในระดับค่อนข้างต่ำสำหรับการเป็นวัสดุสำหรับงานถนน หากนำไปใช้งานโดยไม่ปรับปรุงย่อมมีความเสี่ยงต่อการบวมและยุบตัวเมื่อความชื้นเปลี่ยนแปลง อีกทั้งความสามารถในการรับกำลังและความคงทนอาจไม่ผ่านเกณฑ์ที่เกี่ยวข้อง การใช้งานภาคสนามจึงควรเน้นการควบคุมความชื้นให้ใกล้เคียง OMC ระหว่างการก่อสร้าง และควรดำเนินการปรับปรุงเสถียรภาพด้วยวัสดุประสานที่เหมาะสม เช่น การทำให้เกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าชีวมวล เพื่อยกระดับกำลังรับแรง ลดความไวต่อความชื้น และเพิ่มความคงทนให้สอดคล้องกับความต้องการใช้งานจริงของโครงสร้างถนนในสภาพแวดล้อมท้องถิ่น

สรุปผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานแบบพิเศษ

1. ดินตะกอนกว๊านพะเยาภาพจากการทดสอบ SEM พบว่าเม็ดดินเป็นแผ่นบางซ้อนกันแบบไม่เป็นระเบียบ จึงมีรูเล็ก ๆ กระจายอยู่มาก ลักษณะนี้ทำให้ดินอัดตัวได้ง่ายและน้ำซึมผ่านได้ช้า ซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคราะห์ธาตุ (EDS) ที่พบซิลิกาและอะลูมิเนียมเด่นชัด (Si=67.15%, Al=16.64 %) มีเหล็กเล็กน้อย (Fe = 8.93%) และไม่พบแคลเซียม กล่าวโดยรวมดินตะกอนมีรูพรุนมาก แต่มีวัตถุดิบสำคัญอย่าง Si–Al เพียงพอสำหรับการสร้าง “กาวยึดเกาะแบบจีโอโพลิเมอร์” หากได้รับสภาวะด่างและแหล่งแคลเซียมที่เหมาะสม

2. เถ้าปาล์มน้ำมันมีผลึกละเอียดและเส้นเข็มให้เห็นมีความพรุนสูง จึงตอบสนองต่อปฏิกิริยาได้ดี ด้านองค์ประกอบ EDS พบโพแทสเซียมสูง (K = 39.08%) รองลงมาคือซิลิกา (Si=30.20%) และแคลเซียม (Ca=21.57%) พร้อมธาตุรองเล็กน้อย แต่เถ้าปาล์มที่มีโพแทสซียม (K) สูงทำให้ละลายให้ไอออน K^+ คอย เสริมสภาวะด่างใกล้ผิวอนุภาค ทำให้การละลาย Si–Al ได้ต่อเนื่อง ประกอบกับการมีทั้ง Si (วัตถุดิบสร้างโครงข่าย) และ Ca (ช่วยก่อตัวเจลคล้ายปูน) เถ้าปาล์มจึงช่วยให้เกิดกาวยึดเกาะที่เข้าไปอุดรูพรุนและเชื่อมอนุภาคดินได้มีประสิทธิภาพ

3. เถ้ายางมีเนื้อพรุน แตกหักง่าย เป็นก้อนที่มีโพรงภายในจำนวนมาก เอื้อต่อการซึมของสารด่างเข้าไปทำปฏิกิริยา จุดเด่น คือ แคลเซียมสูงมาก (Ca = 58.91 %) รองลงมา คือ โพแทสเซียม (K = 16.99%) และมีซิลิกา-แมกนีเซียม-อะลูมิเนียมในระดับรอง (Si=12.91%, Mg=6.24%, A=4.95%) คุณสมบัตินี้ทำให้เถ้ายางทำหน้าที่เป็นแหล่งแคลเซียมเข้มข้น ที่ช่วยสร้างกาวยึดเกาะคล้ายปูนได้รวดเร็ว ส่งผลให้กำลังช่วงต้นพัฒนาเร็วและโครงสร้างภายในแน่นขึ้น

ดินตะกอนกว๊านพะเยามีซิลิกาและอะลูมิเนียมสูงแต่โครงสร้างพรุน จึงแข็งแรงตามธรรมชาติไม่มากและควรปรับปรุงก่อนใช้งาน เถ้าปาล์มมีทั้งซิลิกาและแคลเซียมพร้อมโพแทสเซียมที่ช่วยคงสภาพด่าง ทำให้การเกิดการยึดเกาะแบบจีโอโพลิเมอร์ได้มีประสิทธิภาพ ส่วนเถ้ายางมีแคลเซียมสูงมาก ทำหน้าที่เป็นแหล่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ช่วยเร่งการก่อตัวของเจลคล้ายปูนให้โครงสร้างแน่นขึ้น

สรุปผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว

ผลการทดสอบชี้ชัดว่า สมบัติทางวิศวกรรมของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์ถูกกำหนดโดยสามปัจจัยร่วม ได้แก่ สัดส่วนการแทนที่เถ้า (ดิน:เถ้า 90:10, 80:20, 70:30), อัตราส่วนของเหลวต่อเถ้า (L/FA = 0.4, 0.5, 0.6) และอัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH เท่ากับ 0.67, 1.0 และ 1.5 โดยมีแนวโน้มสอดคล้องกันทุกอายุบ่ม (7, 28, 60 และ 90 วัน) คือ การเพิ่มเถ้าเป็น 30% ช่วยยกระดับทั้ง UCS และ E_{50} อย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่ L/FA = 0.5 ให้สมดุลย์ดีที่สุดระหว่างการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างการเกิดจีโอโพลิเมอไรเซชั่นและเกิดการคงรูปควบแน่นของเจล ส่วน L/FA = 0.6 ทำให้เกิดของเหลวส่วนเกิน เพิ่มความพรุนระดับจุลภาคและลดกำลังลง อัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH ที่สูงขึ้นจนถึง 1.5 ช่วยให้โครงข่ายเจล N-A-S-H และ C-(A)-S-H เชื่อมโยงหนาแน่นยิ่งขึ้น ส่งผลเชิงบวกต่อกำลังทั้งระยะต้นและระยะยาว

ที่อายุ 7 วัน ส่วนผสมทุกสูตรมีกำลังสูงกว่ามาตรฐานวัสดุชั้นรองพื้นทางของกรมทางหลวง (≥ 689 kPa) อย่างชัดเจน และเฉพาะส่วนผสมที่ใช้เถ้าปาล์มสัดส่วน 70:30 ร่วมกับ L/FA = 0.5 ภายใต้อัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH เท่ากับ 1.0 และ 1.5 สามารถผ่านเกณฑ์วัสดุชั้นพื้นทาง (≥ 1,724 kPa) ได้ แต่ที่ 0.67 ไม่สามารถผ่านมาตรฐานชั้นพื้นทาง

เมื่อบ่มที่ 28 และ 60 วัน ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นต่อเนื่องตามสัดส่วนเถ้า โดยชุดที่ใช้เถ้าปาล์ม (P) ให้ค่ามากกว่าชุดเถ้ายาง (R) อย่างสม่ำเสมอภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน ทั้งจากบทบาทของซิลิกาเชิงปฏิกิริยาในเถ้าปาล์มที่เอื้อต่อการเกิดเจลต่อเนื่อง และจากผลของ L/FA = 0.5 ซึ่งเป็นจุดทำงานที่เหมาะสมที่สุด ตัวอย่างเชิงตัวเลขที่สะท้อนภาพรวม ได้แก่ ช่วง 28 วัน S70–P30, L/FA = 0.5, Na_2SiO_3/NaOH= 1.5 ให้ UCS ประมาณ 2,475 kPa และช่วง 60 วัน เพิ่มเป็นราว 3,066 kPa ส่วนระบบเถ้ายางภายใต้เงื่อนไขที่ดีที่สุดในช่วงเดียวกันให้ค่าใกล้ 2,120 kPa ทั้งนี้การใช้ L/FA = 0.6 แม้เพิ่มปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ แต่กลับลดกำลังลงในหลายสูตรจากการเกิดผลึกระยะแรกและความพรุนจุลภาคที่เพิ่มขึ้น

ที่อายุ 90 วัน แนวโน้มการพัฒนากำลังยังดำเนินต่อไป โดยสูตรที่ให้สมรรถนะสูงสุด คือ เถ้าปาล์ม 70:30 ร่วมกับ L/FA = 0.5 และ Na_2SiO_3/NaOH = 1.5 ให้ค่า UCS สูงสุดประมาณ 3,800 kPa ขณะที่ระบบเถ้ายางที่สัดส่วนและเงื่อนไขเดียวกันให้ค่าสูงสุดราว 2,350 kPa แสดงถึงความได้เปรียบของเถ้าปาล์มในฐานะสารตั้งต้นที่มีซิลิกาอสัณฐานเชิงปฏิกิริยาสูงกว่า ส่งผลให้โครงข่ายเจลหนาแน่นและต่อเนื่องมากกว่า

ค่า E_{50} แปรผันสอดคล้องกับ UCS ทุกช่วงอายุบ่ม โดยเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนเถ้า อัตราส่วนของเหลวต่อเถ้า และเวลาในการบ่ม สะท้อนว่าเนื้อวัสดุไม่เพียงรับแรงอัดได้สูงขึ้น แต่ยังมีความ

แข็งแกร่งเชิงยืดหยุ่นที่ดีขึ้น ซึ่งสำคัญต่อพฤติกรรมรับน้ำหนักซ้ำของวัสดุสำหรับงานถนน สูตรที่ให้ E_{50} สูงสุดสอดคล้องกับสูตรที่ให้ UCS สูงสุด คือ P:70:30, L/FA = 0.5, Na_2SiO_3/NaOH เท่ากับ 1.5

โดยสรุป สำหรับการออกแบบส่วนผสมเพื่อใช้งานจริง แนะนำให้ใช้ เถ้าปาล์มสัดส่วน 30% (S:FA = 70:30) ร่วมกับ L/FA = 0.5 และ Na_2SiO_3 เท่ากับ 1.5 เหมาะสมต่อการใช้งานเป็นวัสดุสำหรับงานถนน ส่วนระบบเถ้ายางสามารถตอบโจทย์ระดับชั้นรองพื้นทางได้ดี แต่ควรหลีกเลี่ยงสัดส่วนเถ้าและของเหลวที่สูงเกินไปเพื่อลดความเสี่ยงจากความพรุนจุลภาคและการตกผลึกที่ไม่พึงประสงค์

สรุปผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้ง (Wetting and drying) ของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าปาล์ม

ผลการทดสอบของดินตะกอนกว๊านพะเยาซึ่งปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าปาล์ม ชี้ให้เห็นแนวโน้มร่วมที่ชัดเจนทุกอายุบ่ม กล่าวคือ ในช่วงรอบต้นของการเปียก–แห้ง (1–3 รอบ) ค่ากำลังรับแรงอัดหลังทดสอบสูงกว่าก่อนทดสอบ เนื่องจาก การที่ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ยังดำเนินต่อ ทำให้ผลิตภัณฑ์เจลเกิดเพิ่มขึ้นและเข้าไปเติมเต็มช่องว่างละเอียด ส่งผลให้เนื้อวัสดุแน่นและรับแรงอัดได้ดีขึ้น เมื่อจำนวนรอบเพิ่มมากขึ้น (4-6 รอบ) เริ่มเห็นการลดลงของกำลังอัดจากผลสะสมของความเสียหายภายใน ได้แก่ รอยแตกระดับจุลภาค การสูญเสียด่าง และความพรุนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้โครงข่ายเจลต่อเนื่องน้อยลงและความสามารถในการรับแรงลดลงตามลำดับ

สรุปผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้ง (Wetting and drying) ของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้ายาง

ผลการทดสอบระบุว่า ดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้ายางมีความคงทนต่อการเปียก–แห้งในระดับปานกลาง โดยกำลังสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นเล็กน้อยในรอบต้น ก่อนลดลงต่อเนื่องเมื่อจำนวนรอบมากขึ้น สาเหตุหลักเกี่ยวข้องกับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้ายางที่มี CaO สูง แต่ส่วนใหญ่เป็นเฟสผลึกซึ่งมีความไวต่อปฏิกิริยาต่ำ จึงจำกัดการก่อตัวและความต่อเนื่องของเจลยึดเหนี่ยว (C–S–H และ N–A–S–H) ส่งผลให้เกิดรอยแตกระดับจุลภาคและความพรุนสะสมได้ง่าย เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเถ้าปาล์ม เถ้ายางรักษากำลังภายใต้การเปียก–แห้งได้ต่ำกว่าอย่างชัดเจน กล่าวโดยสรุป การใช้เถ้ายางช่วยเพิ่มความคงทนได้ในช่วงบ่มต้นและรอบต้นของการใช้งาน แต่มีข้อจำกัดต่อสภาวะที่ต้องเผชิญวงจรเปียก–แห้งถี่หรือรุนแรง จึงควรพิจารณาความเหมาะสมของงานและการออกแบบส่วนผสมให้สอดคล้องกับระดับความทนทานที่ต้องการ

สรุปผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus, MR)

ได้ทำการทดสอบ MR เพื่อประเมินสมบัติยืดหยุ่น–คืนตัวของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์ โดยคัดเลือกส่วนผสมที่ให้กำลังอัดสูงสุด คือ S70–P30 (เถ้าปาล์ม) และ S70–R30 (เถ้ายาง) ภายใต้อัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH เท่ากับ 1.5 และช่วง L/FA = 0.4–0.6 ที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน แล้วเปรียบเทียบกับเกณฑ์งานทางของ AASHTO (1993): Subbase 250 MPa, Base quality gravel 300 MPa, Crushed rock base 350 MPa

ที่ 7 วัน ส่วนผสม S70–P30 ให้ค่า MR ≈ 220–260 MPa สูงกว่ามาตรฐาน Subbase 250 MPa เล็กน้อยและมีแนวโน้มเข้าใกล้ 300 MPa เมื่ออยู่ที่ค่ากลางของช่วง L/FA ขณะที่ S70–R30 มีค่า MR ≈ 110–200 MPa ซึ่งยังต่ำกว่าเกณฑ์ Subbase สะท้อนว่าเถ้าปาล์มพัฒนาโครงข่ายที่คืนตัวภายใต้แรงซ้ำได้ดีกว่าในระยะบ่มต้น

ที่ 28 วัน S70–P30 ปรับตัวสูงขึ้นเป็น MR ≈ 290–300 MPa ผ่านเกณฑ์ Base quality gravel 300 MPa และเข้าใกล้ระดับ Crushed rock base 350 MPa อย่างมีนัยยะ ส่วน S70–R30 เพิ่มเป็น MR ≈ 170–220 MPa แม้ดีกว่าอายุ 7 วัน แต่โดยรวมยังต่ำกว่าเกณฑ์ Subbase เล็กน้อย ความแตกต่างนี้สอดคล้องกับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มที่มี SiO_2 อสัณฐานสูง ส่งผลให้การเกิดเจลยืดเหนี่ยว N–A–S–H และ C–(A)–S–H ต่อเนื่องและหนาแน่นกว่าเถ้ายางที่มี CaO เชิงผลึกเด่น จึงมีความไวต่อปฏิกิริยาต่ำกว่า

ผล MR ยังสอดคล้องกับแนวโน้ม UCS และ E50 โดย MR เพิ่มขึ้นตามกำลังอัดและความแข็งแกร่งเชิงยืดหยุ่น แสดงให้เห็นว่า ค่ากำลังอัดสามารถใช้ชี้นำพฤติกรรมคืนตัวของวัสดุได้ในทางปฏิบัติ สรุปได้ว่า S70–P30 เหมาะสำหรับใช้งานอย่างน้อยระดับ Subbase ตั้งแต่ 7 วัน และสามารถเลื่อนสู่ระดับ Base ได้ที่ 28 วันภายใต้สภาวะผสมและบ่มที่เหมาะสม ขณะที่ S70–R30 แม้พัฒนาได้ตามเวลา แต่ยังไม่ถึงเกณฑ์ Subbase จึงควรปรับเงื่อนไขส่วนผสม/การบ่มหรือใช้ในงานที่ความต้องการต่ำกว่า

สรุปผลการทดสอบเรโซแนนซ์อิสระ Free-Free Resonant Frequency (FFR)

การทดสอบเรโซแนนซ์อิสระ (FFR) เพื่อหาความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (Vp) และทุติยภูมิ (Vs) ของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์ (S70–P30 และ S70–R30; Na_2SiO_3/NaOH เท่ากับ 1.5, L/FA = 0.4–0.6) พบว่า Vp และ Vs เพิ่มขึ้นเมื่ออายุบ่มจาก 7 เป็น 28 วัน สะท้อนการพัฒนาโครงสร้างภายในให้หนาแน่นและต่อเนื่องมากขึ้น โดย S70–P30 ให้ค่าสูงกว่า S70–R30 อย่างสม่ำเสมอ และระดับ L/FA กลางให้ค่าสูงสุดเล็กน้อย แนวโน้มดังกล่าว สอดคล้องกับค่า UCS, MR และ E50 คือ ส่วนผสมที่มีกำลังสูงกว่าจะให้ความเร็วคลื่นสูงกว่า จึงสามารถใช้ Vp–Vs เป็นตัวชี้วัดแบบไม่ทำลาย เพื่อประเมินคุณภาพวัสดุสำหรับชั้นรองพื้นทางและชั้นพื้นทางได้อย่างเหมาะสม

การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่าง

ผลโดยรวมพบว่า ระดับของเหลวต่อเถ้าที่สมดุล ทำให้เกิดเมทริกซ์จีโอโพลิเมอร์ต่อเนื่อง เจล N-A-S-H และ C-(A)-S-H แทรกอัดช่องว่าง เกิดสะพานเจล (gel bridges) เชื่อมอนุภาค ดันให้บริเวณรอยต่อหนาแน่นขึ้นและลดความพรุนในวัสดุ จึงสอดคล้องกับค่ากำลังอัดและโมดูลัสที่สูงที่สุด ในทางกลับกัน L/FA ต่ำ ทำให้ปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์เหลืออนุภาคเถ้าที่ไม่เกิดปฏิกิริยา เป็นต้นกำเนิดรูพรุนรอยแตกจุลภาค ขณะที่ L/FA สูง ก่อให้เกิดการหดตัวเฉพาะที่และรอยแตกเพิ่ม ส่งผลให้กำลังลดลงจากจุดเหมาะสม

เมื่อเปรียบเทียบชนิดเถ้า S70–P30 แสดงโครงข่ายเจลที่ต่อเนื่องกว่าอย่างชัดเจน จากการมีซิลิกาเชิงปฏิกิริยาสูง จึงสร้างเจลไร้ผลึกหนาแน่นและกระจายทั่วเนื้อวัสดุ ส่วน S70–R30 แม้มีแคลเซียมสูงที่ช่วยให้เกิด C-(A)-S-H แต่ผลิตผลปฏิกิริยามักจำกัดอยู่แถวผิวอนุภาค เกิดรูพรุน/รอยแตกมากกว่า ความต่อเนื่องของโครงข่ายจึงด้อยลง การวิเคราะห์เชิงองค์ประกอบยืนยันว่า อัตราส่วน Si/Al ใกล้ 3 และ (Na+K)/Al ใกล้ 1 สัมพันธ์กับกำลังอัดที่สูงและโครงสร้างหนาแน่น

ข้อเสนอแนะ

การคัดเลือกและปรับสภาพวัสดุในกรณีจำเป็นต้องใช้เถ้ายางซึ่งมีแคลเซียมเชิงผลึกสูง ควร “ปรับสมดุลเคมีของส่วนผสม” โดยผสมเสริมแหล่งซิลิกาเชิงปฏิกิริยา (เช่น เถ้าปาล์มบางส่วน หรือวัสดุปอซโซลานซิลิกาสูง) เพื่อให้สัดส่วน Si/Al ใกล้ ~3 และอัตราส่วน (Na+K)/Al ใกล้ ~1 อันเป็นช่วงที่เกื้อหนุนการก่อรูปเจล N-A-S-H/C-(A)-S-H ให้ต่อเนื่องและหนาแน่น ลดรูพรุนที่เชื่อมถึงกันและจุดกำเนิดรอยแตกจุลภาค ควบคู่กันนี้ควร “ปรับสภาพเถ้า” ด้วยการบดละเอียดและคัดขนาดเพื่อลดอนุภาคไม่เกิดปฏิกิริยา รวมถึงการกระตุ้นผิวหรือแช่ด่างนำร่องบางกรณีเพื่อเร่งการละลาย Si–Al ทั้งหมดนี้ควรถูกกำกับด้วยสเปกคุณภาพวัตถุดิบและสารละลายก่อนผสมเพื่อความสม่ำเสมอของ

ผลลัพธ์ นอกจากนี้หากเสริมเส้นใยชีวมวลท้องถิ่นปริมาณต่ำ เช่น เส้นใยผักตบชวา เส้นใยข้าวโพด อาจช่วยเพิ่มความเหนียว ลดการกระจายตัวของรอยแตกและเพิ่มอายุการใช้งาน

ประเด็นวิจัยต่อยอดควรสำรวจช่วงส่วนผสม ใกล้ 70:30 อย่างละเอียด และกำหนดสัดส่วนของเหลวต่อเถ้าให้ชัดเจนยิ่งขึ้น ภายใต้อัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH ระดับกลาง–สูงหลายค่าเพื่อหาจุดเหมาะสมด้านสมรรถนะ–ต้นทุน เพิ่มการทดสอบความคงทนในโหมดที่สะท้อนสภาพแวดล้อมจริง (ซัลเฟต คลอไรด์ คาร์บอเนชัน การชะล้าง pH และรอบเปียก–แห้งมากกว่า 6 รอบ) ขยายการทดสอบเชิงพลวัตและอัตราการโหลดที่ต่างกันเพื่อสร้างแบบจำลอง MR สำหรับการออกแบบชั้นทาง ควรจัดทำแปลงทดลองภาคสนามและติดตามผลระยะยาว (คุณสมบัติเชิงกล ความชื้น–อุณหภูมิ และการชะละลาย) สำหรับการศึกษาในอนาคต แนะนำให้ พิจารณาผลของปริมาณน้ำต่อสมบัติของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ โดยเฉพาะความหนาแน่นและความแข็งแรง เนื่องจากแม้จะกำหนดน้ำเริ่มต้นเท่ากัน การเพิ่มสารอื่น ๆ อาจส่งผลให้ปริมาณน้ำรวมเปลี่ยนไปและมีผลต่อผลลัพธ์เชิงกล ควบคู่การประเมินความปลอดภัยของสารด่าง ผลกระทบสิ่งแวดล้อม และวิเคราะห์ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ เพื่อสนับสนุนการยกระดับสู่แนวปฏิบัติและมาตรฐานวัสดุในพื้นที่อย่างยั่งยืน

บรรณานุกรม

กรมทางหลวง. (2532). *มาตรฐานที่ ทล.-ม. 206/2532: มาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ (DH-S 206/2532).* กรุงเทพฯ: สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง.

กรมทางหลวง. (2556). *มาตรฐานที่ ทล.-ม. 204/2556: มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ (DH-S 204/2556).* กรุงเทพฯ: สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง.

จินดาประเสริฐ, ป., ชารีรัตน์, ถ., & คุณาวนากิจ, ว. (2548). สารจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยแม่เมาะ. *วิศวกรรมสาร มข.*, *32*(5), 715–724.

จังหวัดพะเยา. (2551–2563). *รายงานการควบคุมและกำจัดวัชพืชและการขุดลอกกว๊านพะเยา*. จังหวัดพะเยา.

ดนุพล ตันนโยภาส, & จิรชาติ เจ้าสินเจริญ. (2543). ปูนสอผสมเถ้าลอยและเถ้าขี้เลื่อยไม้ยางพารา. *วารสารสงขลานครินทร์ (Songklanakarin Journal of Science and Technology)*, *22*(4), 489–500.

ธัชชัย ใหม่ขันท์. (2560). *การศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังและความคงทนของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และเถ้าลอย*. (วิทยานิพนธ์ วศ.ม., มหาวิทยาลัยพะเยา).

เธียรศักดิ์ กลับประสิทธิ์, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, ปริญญา จินดาประเสริฐ, & สมิตร ส่งพิริยะกิจ. (2551). จีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ทำจากเถ้าถ่านหินและเถ้าชีวมวล ตอนที่ 1: ผลกระทบของสัดส่วนผสมต่อกำลังอัด. *วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา*, *19*(2), 9–16.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2553). *รายงานสถานการณ์เศรษฐกิจการเกษตร*. ศูนย์สารสนเทศการเกษตร. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร

American Association of State Highway and Transportation Officials. (2012). T 307 : Determining the resilient modulus of soils and aggregate materials.

ASTM International. (1999). ASTM C215-99: Standard test method for fundamental transverse, longitudinal, and torsional resonant frequencies of concrete specimens. ASTM International.

ASTM International. (2015). ASTM D559/D559M-15: Standard test methods for wetting and drying tests of compacted soil-cement mixtures. ASTM International.

ASTM International. (2016). ASTM D1557-16: Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort. ASTM International.

ASTM International. (2016). ASTM D2166/D2166M-16: Standard test method for

unconfined compressive strength of cohesive soil. ASTM International.

ASTM International. (n.d.). ASTM D422: Standard test method for particle-size analysis of soils [Withdrawn]. ASTM International.

ASTM International. (n.d.). ASTM D427: Standard test method for shrinkage factors of soils [Withdrawn]. ASTM International.

ASTM International. (n.d.). ASTM D4318: Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. ASTM International.

ASTM International. (n.d.). ASTM D854: Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer. ASTM International.

Brown, P. W. (1990). The system Na2O–CaO–SiO2–H2O. *Journal of the American Ceramic Society*, *73*(11), 3457–3461 https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1990.tb06475.x

Castillo, S., et al. (2021). Study on calcium content and geopolymer strength. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *33*(4), 04021021. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003678

Češnovar, K., Ducman, V., & Šajna, A. (2019). *Influence of the Si/Al ratio on the freeze–thaw resistance of geopolymers*. *Materials*, *12*(6), 1006. https://doi.org/10.3390/ma12061006

Chindaprasirt, P., Rattanasak, U., & Taebuanhuad, S. (2012). Resistance to acid and sulfate solutions of microwave-assisted high-calcium fly ash geopolymer. *Materials and Structures*, *46*(3), 375–381. https://doi.org/10.1617/s11527-012-9907-1

Chompoorat, T., Thepumong, T., Taesinlapachai, S., & Likitlersuang, S. (2021). Repurposing of stabilised dredged lakebed sediment in road base construction. *Journal of Soils and Sediments*. Advance online publication. https://doi.org/10.1007/s11368-021-02974-3

Davidovits, J. (1987). Ancient and modern concretes—What is the real difference? *Concrete International*, *9*(12), 23–29.

Davidovits, J. (1991). Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. Journal of *Thermal Analysis and Calorimetry*, *37*(8), 1633–1656. https://doi.org/10.1007/BF01912193

Davidovits, J. (1994). *Properties of geopolymer cements*. In Proceedings of the First International Conference on Alkaline Cements and Concretes (Vol. 1, pp. 131–149). SRIBM. https://www.geopolymer.org/wp-content/uploads/KIEV.pdf

Davidovits, J. (1999). *Chemistry of geopolymeric systems*, terminology. In Proceedings of Geopolymer '99: Second International Conference on Geopolymers (pp. 9–39). Saint-Quentin, France: Geopolymer Institute.

Davidovits, J. (2002, October 28–29). *30 years of successes and failures in geopolymer applications: Market trends and potential breakthroughs*. Paper presented at Geopolymer 2002 Conference, Melbourne. Geopolymer Institute. https://www.geopolymer.org/wp-content/uploads/30YearsGEOP.pdf

Davidovits, J. (2020). Geopolymer chemistry and applications (5th ed.). Saint-Quentin: Geopolymer Institute. ISBN 978-2954453118

Davidovits, J., & Davidovics, M. (1988). Geopolymer: Room-temperature ceramic matrix for composites. *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, *9*(7–8), 835–842. https://doi.org/10.1002/9780470310496.ch34

Ding, Y., Cheng, T., & Wu, Y. (2018). Application of R/Al ratio in preparation of alkali-activated cementitious materials. C*hemical Engineering Transactions*, 71, 1483–1488. https://doi.org/10.3303/CET1871249

Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & van Deventer, J. S. J. (2007). Geopolymer technology: The current state of the art. *Journal of Materials Science*, *42*(9), 2917–2933. https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z

Fernández-Jiménez, A., Palomo, A., & Criado, M. (2005). Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: A descriptive model. *Cement and Concrete Research*, *35*(6), 1204-1209. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.08.021

García-Lodeiro, I., Palomo, A., Fernández-Jiménez, A., & Macphee, D. E. (2011). Compatibility studies between N-A-S-H and C-A-S-H gels. *Cement and Concrete Research*, *41*(9), 923–931. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.05.006

Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M. J., & Rangan, B. V. (2004). On the development of fly ash-based geopolymer concrete. *ACI Materials Journal*, *101*(6), 467–472.

Hassan, A., Arif, M., & Shariq, M. (2019). Use of geopolymer concrete for a cleaner and sustainable environment—A review of mechanical properties and microstructure. *Journal of Cleaner Production*, 223, 704–728. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.051

Hausmann, M. R. (1990). *Engineering principles of ground modification*. McGraw-Hill.

Opiso, E. M., Tabelin, C. B., Maestre, C. V., Aseniero, J. P. J., Arima, T., & Villacorte-Tabeli, M. (2023). Utilization of palm oil fuel ash (POFA) as an admixture for the synthesis of a gold mine tailings-based geopolymer composite. *Minerals*, *13*(2), Article 232. https://doi.org/10.3390/min13020232

Phoo-ngernkham, T., Sata, V., Hanjitsuwan, S., Ridtirud, C., Hatanaka, S., & Chindaprasirt, P. (2015). High calcium fly ash geopolymer mortar containing Portland cement for use as repair material. *Construction and Building Materials*, 98, 482–488. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.139

Provis, J., & van Deventer, J. S. J. (Eds.). (2014). Alkali activated materials: State-of-the-art report, RILEM TC 224-AAM. Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7672-2

Provis, J. L. (2014). Geopolymers and other alkali activated materials: Why, how, and what? *Materials and Structures*, *47*(1), 11-25. https://doi.org/10.1617/s11527-013-0211-5

Provis, J. L., & Bernal, S. A. (2014). Geopolymers and related alkali-activated materials. *Annual Review of Materials Research*, *44*(1), 299-327. https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070813-113515

Shamsah, M., Kalfat, R., Subramaniam, K. V. L., & Hanumananaik, M. (2025). Calcium enhanced ambient cured fly ash based geopolymer binders. *Scientific Reports*, 15, Article 25603. https://doi.org/10.1038/s41598-025-07854-1

Sukmak, P., Horpibulsuk, S., & Shen, S.-L. (2013). Strength development in clay–fly ash geopolymer. *Construction and Building Materials*, 40, 566–574. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.015

Tangchirapat, W., Jaturapitakkul, C., & Chindaprasirt, P. (2009). Use of palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material for producing high-strength concrete.

Construction and Building Materials, *23*(7), 2641-2646. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.01.008

United States Department of the Army, & Department of the Air Force. (1969). *TM 5-822-4 / AFM 88-7, Chapter 4: Soil stabilization for roads and streets*. Washington, DC: U.S. Government Printing Office.

Wallah, S. E., & Rangan, B. V. (2006). *Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: Long-term properties* (*Research Report GC 2*). Curtin University of Technology.

Wan, H., Xue, Z., & Wang, C. (2020). Insight into the leaching of sodium alumino-silicate gels: Structure evolution and gel degradation. *Frontiers in Materials*, 7, 56. https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00056

Yao, X., Zhang, Z., Zhu, H., & Chen, Y. (2009). Geopolymerization process of alkali–metakaolinite characterized by isothermal calorimetry. *Thermochimica Acta*, *493*(1-2), 49–54. https://doi.org/10.1016/j.tca.2009.04.002

Yip, C. K., Lukey, G. C., & Van Deventer, J. S. J. (2005). The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at early stage of alkaline activation. *Cement and Concrete Research*, *35*(9), 1688–1697. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.042

J. Wu, Y. Min, B. Li, and X. Zheng. (2021). “Stiffness and Strength Development of the Soft Clay Stabilized by the One-Part Geopolymer Under One-Dimensional Compressive Loading,” *Soils and Foundations*, vol. 61, no. 4, pp. 974-988.

T. P. Ngo, Q. B. Bui, V. T. A. Phan, and H. B. Tran. (2022). “Durability of Geopolymer Stabilised Compacted Earth Exposed to Wetting–Drying Cycles at Different Conditions of pH and Salt.” C*onstruction and Building Materials*, vol. 329, article no. 127168.

Solanki, P., & Zaman, M. (2012). *Microstructural and mineralogical characterization of clay stabilized using calcium-based stabilizers*. In A. Méndez-Vilas (Ed.), Scanning Electron Microscopy (pp. 1–20). InTech. https://doi.org/10.5772/34986

Khasib, I. A., Daud, N. N. N., & Nasir, N. A. M. (2021). Strength Development and Microstructural Behavior of Soils Stabilized with Palm Oil Fuel Ash (POFA)-Based Geopolymer. *Applied Sciences*, *11*(8), 3572. https://doi.org/10.3390/app11083572

Vázquez-Rodríguez, F. J., Elizondo, N., Montes-González, M., Gómez-Rodríguez, C.,

González-Carranza, Y., & Guzmán, A. M., Rodríguez, E. A. (2024). The effect of μ-limestone additions on the mechano-chemical and microstructural properties of slag and fly-ash/slag alkali-activated cements. *Materials*, *17*(23), 5940. https://doi.org/10.3390/ma17235940

Redden, R., & Neithalath, N. (2014). Microstructure, strength, and moisture stability of alkali activated glass powder-based binders. *Cement & Concrete Composites*, 45, 46-56. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.09.011

Liang, G., Li, H., Zhu, H., Liu, T., Chen, Q., & Guo, H. (2021). Reuse of waste glass powder in alkali-activated metakaolin/fly ash pastes: Physical properties, reaction kinetics and microstructure. *Resources, Conservation and Recycling*, 173, 105721. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105721

มหาวิทยาลัยพะเยา
UNIVERSITY OF PHAYAO

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	วรากร สุยะต๊ะ
วัน เดือน ปี เกิด	1 พฤษภาคม 2542
สถานที่เกิด	จังหวัดตาก
วุฒิการศึกษา	พศ.2565 วศ.บ.(สาขาวิศวกรรมโยธา), มหาวิทยาลัยพะเยา, พะเยา.
ที่อยู่ปัจจุบัน	84 ม.2 ต.ตากออก อ.บ้านตาก จ.ตาก 63120
ผลงานตีพิมพ์	วรากร สุยะต๊ะ, อนุพงศ์ คำปลอด, ธนกฤต เทพอุโมงค์ และ ธนกร ชมภูรัตน์ (29-31 พฤษภาคม 2567). การปรับปรุงสมบัติของดินตะกอนโดยใช้จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าปาล์มและเถ้ายางสำหรับนำไปใช้ในงานวิศวกรรมผิวทาง, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 29 (NCCE29), ณ ศูนย์ประชุมนานาชาติดิเอ็มเพรส จังหวัดเชียงใหม่