

การใช้ดินเหนียวแทนที่ด้วยเถ้ายูคาลิปตัสและหินฝุ่นเป็นวัสดุถมคันทาง

นายณฐพงศ์ นุ้ยเพชร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2568

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

การใช้ดินเหนียวแทนที่ด้วยเถ้ายูคาลิปตัสและหินฝุ่นเป็นวัสดุถมคันทาง

นายณฐพงศ์ นุ้ยเพชร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2568

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การใช้ดินเหนียวแทนที่ด้วยเถ้ายูคาลิปตัสและหินฝุ่นเป็นวัสดุถมคันทาง

โดย นายณฐพงศ์ นุ้ยเพชร

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

.....
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ จันทร์วิพัฒน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....
ประธาน

(ศาสตราจารย์ ดร.พรเกษม จงประดิษฐ์)

.....
อาจารย์ที่ปรึกษา

(ศาสตราจารย์ ดร.พิทยา แจ่มสว่าง)

.....
กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ณพล อยู่บรรพต)

ชื่อ : นายณฐพงศ์ นุ้ยเพชร
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การใช้ดินเหนียวแทนที่ด้วยเถ้ายูคาลิปตัสและหินฝุ่นเป็นวัสดุถมคันทาง
สาขาวิชา : วิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ศาสตราจารย์ ดร.พิทยา แจ่มสว่าง
ปีการศึกษา : 2568

บทคัดย่อ

เถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่นเป็นวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมที่มีศักยภาพในการนำกลับมาใช้ประโยชน์ด้านวิศวกรรมโยธา โดยเฉพาะการปรับปรุงคุณสมบัติดินเหนียวซึ่งไม่สามารถใช้เป็นวัสดุถมคันทางได้โดยตรง เนื่องจากมีกำลังเฉือนต่ำ ความสามารถในการรับน้ำหนักต่ำ และมีพฤติกรรมการพองตัวสูง งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลของการแทนที่ดินเหนียวด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่นในสัดส่วนต่าง ๆ เพื่อเพิ่มกำลังของดินและลดการใช้วัสดุธรรมชาติ โดยทำการทดสอบค่ากำลังรับแรงแบกทาน (CBR), ค่ากำลังรับแรงเฉือนจากการทดสอบ Direct Shear และพารามิเตอร์การอัดตัวจากการทดสอบ Consolidation ทั้งหมดเตรียมตัวอย่างภายใต้เงื่อนไขความชื้นเหมาะสม (OMC) และความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) ตามมาตรฐาน ASTM D1557 ผลการทดสอบพบว่าการเติมเถ้าไม้ยูคาลิปตัสช่วยเพิ่มความแน่นของโครงสร้างดินโดยการเติมเต็มช่องว่าง ส่วนหินฝุ่นช่วยเพิ่มแรงเสียดทานภายในวัสดุผสม ทำให้ค่า CBR เพิ่มขึ้นจาก 5% ในดินเหนียวธรรมชาติเป็นสูงสุดประมาณ 33–42% ในสัดส่วนผสมที่เหมาะสม ขณะที่ค่าแรงยึดเหนี่ยว (c) มีแนวโน้มลดลงตามสัดส่วนวัสดุทดแทน แต่ค่ามุมเสียดทานภายใน (ϕ) เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน นอกจากนี้ ค่า Cc ลดลง และค่า Cv เพิ่มขึ้น สะท้อนพฤติกรรมการอัดตัวที่ดีขึ้นของดินผสม โดยภาพรวมวัสดุผสมเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่นสามารถปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวให้เหมาะสมต่อการใช้งานเป็นวัสดุถมคันทางตามมาตรฐาน มทช.201/2545 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

(วิทยานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 92 หน้า)

คำสำคัญ : ดินเหนียวอ่อนพลาสติกต่ำ เถ้าไม้ยูคาลิปตัส หินฝุ่น กำลังรับแรงแบกทาน แรงเฉือนตรง อัดตัวคายน้ำ

_____ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Name : Mr. Natapong Nuypet
Thesis Title : Using Clay Replaced with Eucalyptus Ash and Stone Dust as Embankment Material
Major Field : Civil Engineering
King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Thesis Advisor : Professor Dr. Pittaya Jamsawang
Academic Year : 2025

ABSTRACT

Eucalyptus wood ash and stone dust are industrial by-products with strong potential for reuse in geotechnical applications, particularly for improving the engineering properties of clay soils that are unsuitable for embankment construction in their natural state. Untreated clay typically exhibits low shear strength, low bearing capacity, and high swelling potential, leading to long-term instability when used as a road embankment material. This study investigates the effects of partially replacing clay with eucalyptus wood ash and stone dust in various proportions to enhance soil strength while reducing reliance on natural borrow materials. Laboratory testing included the California Bearing Ratio (CBR), Direct Shear Test, and Consolidation Test, with all specimens prepared at the optimum moisture content (OMC) and maximum dry density (MDD) determined from the Modified Compaction Test (ASTM D1557). The results indicate that the fine particles of eucalyptus ash effectively fill the voids within the clay matrix, while stone dust contributes to increased frictional resistance. Consequently, the CBR value increased from 5% for natural clay to approximately 33–42% in the optimum blended mixtures. The cohesion (c) of the mixtures tended to decrease as replacement levels increased, whereas the internal friction angle (ϕ) showed a consistent rise due to the enhanced interparticle contact. Furthermore, the blended soils exhibited reduced compression index (Cc) and improved coefficient of consolidation (Cv), demonstrating better compressibility characteristics. Overall, the combination of eucalyptus wood ash and stone dust significantly improves the engineering behavior of clay soils, enabling their effective use as embankment materials in accordance with DRR Standard MTC 201/2545

(Total 92 Pages)

Keywords: Clay low plasticity Eucalyptus ash Stone dust California Bearing Ratio Direct Shear Consolidation

_____ Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือของ ศาสตราจารย์ พิทยา แจ่มสว่าง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้การอบรม สั่งสอน และให้คำปรึกษาตลอดจนแก้ไขในข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างดี จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ ผู้วิจัยตระหนักถึงความทุ่มเทของอาจารย์ และกราบขอบพระคุณอย่างสุงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ได้เอื้ออำนวยความสะดวก ทั้งในเรื่องของสถานที่ อุปกรณ์ ตลอดจนเครื่องมือทดสอบที่ใช้สำหรับงานวิจัย จนงานวิจัยประสบความสำเร็จเป็นอย่างดี

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้การสนับสนุนในด้านการเงิน และเป็นแรงผลักดันให้กับผู้วิจัย จนสำเร็จในการศึกษาระดับปริญญามหาบัณฑิต

ณฐพงศ์ นุ้ยเพชร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ข
กิตติกรรมประกาศ ง
สารบัญ ช
สารบัญตาราง ฌ
สารบัญรูปภาพ ญ
บรรณนุกรม 85
ประวัติผู้เขียน 92
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย 3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5
2.1 เถ้าชีวมวล 5
2.2 การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมเทคนิคธรณีของดินผสมเถ้าชีวมวลและซีเมนต์ 6
2.3 หินฝุ่น 17
2.4 การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาค 20
2.5 การพิจารณาดินเพื่อใช้เป็นวัสดุทาง 25
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย 27
3.1 การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุ 27
3.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบ 32
3.3 การทดลองหากำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน (Direct Shear Test) 37
3.4 การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงแบกทาน (California Bearing Ratio, CBR) 37
3.5 การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation test) 38
3.6 การศึกษาด้วย Scanning Electron Microscope (SEM) 39
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล 41
4.1 ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะ 41
4.2 ผลการทดสอบการบดอัด (Compaction test) 42
4.3 ผลการทดสอบ Atterberg limits 46
4.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงแบกทาน (California Bearing Ratio, CBR) 50

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.5 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงเฉือนของดิน 53
4.6 ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ 57
4.7 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงแบกทานและแรงยึดเหนี่ยว 64
4.8 แบบจำลองถดถอยเชิงพหุของดินเหนียวปรับปรุงด้วยหินฝุ่นและเถ้าไม้ยูคาลิปตัส 67
4.9 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) 76
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ 83
5.1 สรุปผลงานวิจัย 83
5.2 ข้อเสนอแนะการศึกษาต่อไป 84

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	แสดงถึงพารามิเตอร์ของความแข็งแรงแรงเฉือนตรง	11
2-2	คุณสมบัติการอัดแน่นและการระบายน้ำของดินขยายตัวที่ปรับสภาพด้วยเถ้าลอย	16
2-3	คุณสมบัติการอัดแน่นและการระบายน้ำของดินขยายตัวที่ปรับสภาพด้วยโดโลชาร์	16
2-4	แสดงอัตราส่วนการผสมคอนกรีตธรรมดาและแบบรีไซเคิล	18
2-5	ข้อกำหนดของวัสดุทางตามมาตรฐานกรมทางหลวง	24
3-1	ข้อกำหนดในการทดสอบการบดอัดดินสูงกว่ามาตรฐาน	30
3-2	แสดงถึงคุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียว, หินฝุ่นและเถ้าไม้ยูคาลิปตัส	32
3-3	แสดงอัตราส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบ	33

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1	แสดงการเปลี่ยนแปลงของความถ่วงจำเพาะตามปริมาณเถ้าลอย	8
2-2	ผลกระทบของ KRWA ต่อค่าดัชนีความเป็นพลาสติก (PI) ของดินในช่วงระยะเวลาการบ่มที่แตกต่างกัน	9
2-3	ผลกระทบของ SSA ต่อความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) และปริมาณน้ำที่เหมาะสม (OMC) ตามปริมาณเถ้าลอย	10
2-4	การเปลี่ยนแปลงของการรับแรงเฉือนโดยตรงที่อัตราส่วนต่างๆ	11
2-5	ภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างเถ้าไม้	12
2-6	ภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างดินตะกอนแม่น้ำ	12
2-7	ภาพถ่าย SEM สำหรับดินเหนียวที่สะสมทางทะเลที่ผสมซีเมนต์ที่บ่มแล้ว + เถ้าไม้	13
2-8	ภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างที่มีดินเหนียว, เถ้า และเถ้าไม้	14
2-9	ค่า CBR ของดินปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ที่ปริมาณเถ้าต่างๆ	15
2-10	กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมธรรมชาติร่วมกับมวลละเอียดชนิดต่างๆ	18
2-11	กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลร่วมกับมวลละเอียดชนิดต่างๆ	19
2-12	ภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างเถ้า	21
2-13	ภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างดิน Hollywood : (A)ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ, (B)ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าลอย 9%	22
2-14	ภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างดิน Heiden : (A)ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ, (B)ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าลอย 9%	22
2-15	ภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างตะกอนขุดลอกที่ถูกทำให้เสถียร	23
2-16	โครงสร้างถนนลาดยางที่ใช้วัสดุธรรมชาติเป็นวัสดุทาง	25
2-17	การปรับปรุงคุณภาพชั้นพื้นทางด้วยเถ้าไม้ที่อัตราส่วนต่างๆ (ก) ค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด, (ข) ค่าCBR	26
3-1	วัสดุที่ใช้ทดสอบ	27
3-2	ภาพถ่าย SEM ของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	28
3-3	แสดงถึงการกระจายตัวของดิน,หินฝุ่นและเถ้าไม้ยูคาลิปตัส	30
3-4	ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบ Direct Shear Test	34
3-5	ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบ Consolidation Test	35
3-6	ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบ CBR	36
3-7	ตัวอย่างการเตรียมการทดสอบ SEM	36
3-8	เครื่องมือทดสอบ Direct shear test	37
3-9	เครื่องมือทดสอบ CBR	38

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

3-10 การทดสอบ Consolidation test 36

4-1 ค่าความถ่วงจำเพาะของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยหินฝุ่นและเถ้าไม้ยูคาลิปตัส 42

4-2 แสดงค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณน้ำที่เหมาะสมของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัส 43

4-3 แสดงค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณน้ำที่เหมาะสมของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยหินฝุ่น 44

4-4 แสดงค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของดินเหนียวที่ปรับปรุงด้วยหินฝุ่นและเถ้าไม้ยูคาลิปตัส (ดินเหนียวคงที่ที่ 50%) 45

4-5 แสดงค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของดินเหนียวที่ปรับปรุงด้วยหินฝุ่นและเถ้าไม้ยูคาลิปตัส (หินฝุ่นคงที่ที่ 50%) 46

4-6 ค่าพิกัดเหลวและดัชนีความเหนียวของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัส 47

4-7 ค่าพิกัดเหลวและดัชนีความเหนียวของดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยหินฝุ่น 48

4-8 ค่าพิกัดเหลวและดัชนีความเหนียวของดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่น (ดินเหนียวคงที่50%) 49

4-9 ค่าพิกัดเหลวและดัชนีความเหนียวของดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่น (หินฝุ่นคงที่50%) 50

4-10 กำลังรับแรงแบกทานของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่น 51

4-11 กำลังรับแรงแบกทานของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่น 53

4-12 แรงยึดเหนี่ยวและมุมเสียดทานภายในของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัส 54

4-13 แรงยึดเหนี่ยวและมุมเสียดทานภายในของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยหินฝุ่น 55

4-14 แรงยึดเหนี่ยวและมุมเสียดทานภายในของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่น(ดินเหนียวคงที่50%) 56

4-15 แรงยึดเหนี่ยวและมุมเสียดทานภายในของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่น (หินฝุ่นคงที่50%) 57

4-16 ค่าดัชนีการอัดตัว (Compression index, C_c) ของดินเหนียว (CL) ผสมเถ้าไม้ยูคาลิปตัส (W) และหินฝุ่น (S) ในสัดส่วนต่างๆ 59

4-17 ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนปริมาตร (Co-efficient of volume change, mv) ของดินเหนียว (CL) ผสมเถ้าไม้ยูคาลิปตัส (W) และหินฝุ่น (S) ในสัดส่วนต่างๆ 61

4-18 ค่าสัมประสิทธิ์การทรุดตัว (Co-efficient of Consolidation, C_v) ของดินเหนียว (CL) ผสมเถ้าไม้ยูคาลิปตัส (W) และหินฝุ่น (S) ในสัดส่วนต่างๆ 63

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4-19 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Co-efficient of permeability, k) ของดินเหนียว (CL) ผสมเถ้าไม้ยูคาลิปตัส (W) และหินฝุ่น (S) ในสัดส่วนต่างๆ 64

4-20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงแบกทานและกำลังต้านแรงเฉือน 66

4-21 การเปรียบเทียบระหว่างค่า cohesion ที่วัดได้และค่าที่คาดการณ์ไว้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ 68

4-22 การเปรียบเทียบระหว่างค่า Angle of internal friction ที่วัดได้และค่าที่คาดการณ์ไว้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ 69

4-23 การเปรียบเทียบระหว่างค่า CBR ที่วัดได้และค่าที่คาดการณ์ไว้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ 71

4-24 การเปรียบเทียบระหว่างค่า Cc ที่วัดได้และค่าที่คาดการณ์ไว้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ 72

4-25 การเปรียบเทียบระหว่างค่า mv ที่วัดได้และค่าที่คาดการณ์ไว้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ 74

4-26 การเปรียบเทียบระหว่างค่า C_v ที่วัดได้และค่าที่คาดการณ์ไว้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ 75

4-27 การเปรียบเทียบระหว่างค่า k ที่วัดได้และค่าที่คาดการณ์ไว้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ 76

4-28 โครงสร้างจุลภาคของตัวอย่าง 80

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การก่อสร้างคันทางถนนในประเทศไทย โดยเฉพาะถนนชนบทหรือพื้นที่นอกเขตเมืองใหญ่ ต้องพึ่งพาวัสดุถมที่มีความเหมาะสมในด้านความแข็งแรง ความมั่นคง และต้นทุนที่ยอมรับได้ อย่างไรก็ตาม วัสดุธรรมชาติเช่น ดินลูกรัง หรือ ดินทรายคุณภาพดี กลับเริ่มลดน้อยลงในหลายพื้นที่จากการใช้งานที่ต่อเนื่องและขาดการจัดการอย่างยั่งยืน การขนย้ายวัสดุจากแหล่งอื่นจึงก่อให้เกิดต้นทุนที่สูงและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น เช่น การใช้เชื้อเพลิงในการขนส่งและการสูญเสียพื้นที่หน้าดินในแหล่งขุด ในขณะเดียวกัน ดินเหนียวซึ่งมีอยู่ทั่วไปกลับไม่สามารถนำมาใช้ถมคันทางได้โดยตรง เนื่องจากมีปัญหาด้านความสามารถในการรับน้ำหนักต่ำ (Low bearing capacity), ค่าความสามารถในการพองตัวสูง (High swelling potential), ค่าการทรุดตัวสูง และการระบายน้ำต่ำ โดยเฉพาะในกรณีที่ดินเหนียวมีแร่กลุ่มมอนต์โมริลโลไนต์ ซึ่งไวต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำ (Mohanty, et al., 2016; Rewatkar, 2023) ดินประเภทนี้เมื่อใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นจะมีการหด-พองตัวอย่างรุนแรง ส่งผลให้คันทางหรือโครงสร้างบนผิวทางเกิดการแตกร้าวและทรุดตัวในระยะยาว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของดินเหนียวและลดการพึ่งพาวัสดุธรรมชาติ การนำวัสดุเหลือใช้จากภาคอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมมาปรับปรุงคุณสมบัติของดินเหนียว จึงได้รับความสนใจในทางวิศวกรรมโยธาและวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะวัสดุที่มีองค์ประกอบ ซิลิกา (SiO_2) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซึ่งสามารถก่อให้เกิดปฏิกิริยา pozzolanic reaction เมื่อผสมกับน้ำ และวัสดุปูนซิเมนต์หรือดินเหนียว ส่งผลให้โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุผสมมีความหนาแน่นและแข็งแรงมากขึ้น (Lertwattanaruk and Makul, 2011)

เถ้ายูคาลิปตัส (Eucalyptus ash: EA) เป็นวัสดุพลอยได้จากการเผาเศษไม้ยูคาลิปตัสในอุตสาหกรรมชีวมวลเพื่อผลิตกระดาษ ซึ่งปกติแล้วถือเป็นของเสียที่ต้องจัดการทิ้ง แต่กลับมีศักยภาพในการนำมาใช้ประโยชน์ทางวิศวกรรมโยธา เนื่องจากมีองค์ประกอบที่คล้ายวัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic material) เช่น SiO_2, CaO และ อะลูมินา (Al_2O_3) ซึ่งสามารถช่วยปรับปรุงพฤติกรรมของดินเหนียวทั้งในด้านความแข็งแรง (Jamsawang, et al., 2020) การระบายน้ำ และการลดการพองตัว (Sanja, et al.,2021; Kalembkiewicz, et al., 2018) (Khadka, et al., 2022; Rewatkar, 2023)

การศึกษาพบว่า การใช้ EA ในอัตราส่วนเหมาะสมสามารถลด swelling index ได้กว่า 86%, ลด compression index ได้ถึง 54% และเพิ่ม coefficient of consolidation (C_v) ได้มากกว่า 100% เมื่อเทียบกับดินเหนียวธรรมชาติ (Mohanty, et al., 2016)

หินฝุ่น (Stone dust) เป็นวัสดุพลอยได้จากกระบวนการโม่หรือบดหินธรรมชาติ เช่น หินปูน หรือหินแกรนิต จากอุตสาหกรรมผลิตหินก่อสร้าง มีลักษณะเป็นผงละเอียด โดยมีขนาดอนุภาคส่วนใหญ่เล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร และมักประกอบด้วยอนุภาคละเอียดขนาดต่ำกว่า 0.075 มิลลิเมตรในสัดส่วนที่สูง มีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.6–2.7 และมีพื้นที่ผิวสูง องค์ประกอบทางแร่หลักของหินฝุ่นได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และ SiO_2 ซึ่งมีความเฉื่อยทางเคมีแต่มีผลทางกายภาพต่อการปรับปรุงคุณสมบัติดิน ช่วยเพิ่มความแน่นและลดช่องว่างภายในโครงสร้างเม็ดดิน ส่งผลให้ความสามารถในการรับน้ำหนักและกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน (Thirumalai and Puvvadi, 2023) การใช้หินฝุ่นร่วมกับวัสดุปรับปรุงอื่น เช่น เถ้าไม้หรือปูนซีเมนต์ ยังช่วยส่งเสริมคุณสมบัติของดินเพิ่มเติม ซึ่งพบว่าสามารถเพิ่มค่า CBR ได้มากกว่า 3–5 เท่าเมื่อเทียบกับดินธรรมชาติ (JMEST, 2015) การศึกษาของ Jemal, et al., 2019) พบว่า การผสมหินฝุ่นกับดินเหนียวปนทรายแป้ง (silty clay) ช่วยเพิ่มค่ากำลังรับแรงเฉือนและลดค่าช่องว่างในโครงสร้างดิน ทำให้ดินมีความเหมาะสมต่อการนำมาใช้ในงานก่อสร้างถนน นอกจากนี้ Suman and Srivastava (2015) พบว่าหินฝุ่นยังสามารถใช้แทนทรายในงานคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีอัตราส่วนที่เหมาะสมอยู่ที่ 60% ของปริมาณทรายทั้งหมด ซึ่งส่งผลให้ค่าความแน่นและกำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น มีการศึกษาทางวิชาการหลายฉบับที่แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างค่าความแข็งแรงของดิน เช่น CBR กับพารามิเตอร์แรงเฉือนของดิน ได้แก่ ค่าความเหนียว (cohesion: c) และมุมแรงเสียดทานภายใน (Friction angle: φ) งานวิจัยโดย Samarakoon, et al., 2021, Kambhatla and Rao (2023) และ Zhang, et al., 2020 แสดงให้เห็นว่า สามารถพัฒนาสมการประมาณค่าความสามารถในการรับน้ำหนักของดิน โดยใช้ข้อมูลทางแรงเฉือนและสมบัติเชิงกล ซึ่งช่วยให้สามารถพยากรณ์ค่าการรับน้ำหนักของวัสดุผสมได้อย่างแม่นยำ และสนับสนุนการออกแบบการปรับปรุงดินอย่างมีประสิทธิภาพ จากงานวิจัยหินฝุ่นจึงถือเป็นวัสดุเหลือใช้ที่มีศักยภาพในการนำกลับมาใช้ประโยชน์อย่างยั่งยืน ทั้งในด้านเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม

ดังนั้น การวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อศึกษาศักยภาพของการใช้เถ้ายูคาลิปตัสและหินฝุ่นร่วมกับดินเหนียวในการปรับปรุงคุณสมบัติของดินเหนียววัสดุถมคันทาง โดยมุ่งเน้นการประเมินพฤติกรรมทางเทคนิคธรณี เช่น ค่า CBR กำลังรับแรงเฉือน ความแน่น ความสามารถในการต้านทานการยุบตัว และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาค ซึ่งจะช่วยสนับสนุนการใช้วัสดุเหลือใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ควบคู่ไปกับการพัฒนางานทางให้มีความยั่งยืนและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อหาปริมาณเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่นที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพดิน เพื่อใช้เป็นวัสดุถมคันทาง

1.2.2 เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมเทคนิคธรณีของดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่น ได้แก่ ค่าCBR ค่าอัดตัวคายน้ำและค่ากำลังรับแรงเฉือน

1.2.3 เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคดินปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่น

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินที่เป็นวัสดุทางธรรมชาติโดยใช้เถ้าไม้ยูคาลิปตัสจากโรงงานกระดาษดับเบิ้ลเอ จังหวัดปราจีนบุรี และหินฝุ่นที่ได้จากการโม่หินปูน เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุพื้นทาง ในการปรับปรุงคุณภาพดินจะใช้เถ้าไม้ยูคาลิปตัสด้วยและหินฝุ่นสัดส่วนดินต่อเถ้าไม้ยูคาลิปตัสต่อหินฝุ่น 90:10:0, 80:20:0, 70:30:0, 60:40:0, 50:50:0, 90:0:10, 80:0:20, 70:0:30, 60:0:40, 50:0:50, 50:5:45, 50:10:40, 50:15:25, 50:20:30, 50:25:25, 50:30:20, 45:5:50, 40:10:50, 35:15:50, 30:20:50, 25:25:50 และ 20:30:50 โดยทำการศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมเทคนิคธรณี และพฤติกรรมของดินประปรุงคุณภาพด้วยการทดสอบ California Bearing Ratio Test (CBR), Direct Shear Test และ Consolidation Test และการทดสอบระดับจุลภาคด้วยการทดสอบ Scanning Electron Microscope (SEM) เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่เหมาะสมโดยอ้างอิงมาตรฐานกรมทางหลวงชนบทประเทศไทย มทช.201-2545 สำหรับวัสดุถมคันทาง

1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย

จากงานวิจัยนี้สามารถอธิบายถึงผลกระทบจากปริมาณเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่นที่มีผลต่อดินและเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่นที่เหมาะสมสำหรับดิน เพื่อที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุถมคันทาง รวมไปถึงสามารถทราบถึงพฤติกรรม คุณสมบัติทางวิศวกรรมเทคนิคธรณีของตะกอนดินขุดด้วยวิธี กำลังรับแรงเฉือน, ค่าแคลิฟอร์เนีย แบริ่ง เรโช (CBR) และค่าการอัดตัวคายน้ำ และสามารถเป็นแนวทางในการออกแบบดินเหนียวผสมเถ้าไม้ยูคาลิปตัสได้กับงานอื่นๆได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าพระนครเหนือ

บทที่ 2

ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ดินเป็นทรัพยากรทางธรรมชาติที่สำคัญชนิดหนึ่ง และมีอยู่มากมาย แต่จะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันไปในแต่ละสภาพภูมิประเทศ เนื่องจากดินตะกอนท้ายเขื่อนเป็นดินเม็ดละเอียดจะมีกำลังต่ำ ความแข็งแรงต่ำ และการซึมผ่านต่ำ ปัญหาเหล่านี้จะส่งผลทำให้ดินที่นำมาใช้ในงานทางหลวงมีกำลังรับแรงแบกทานต่ำ และยิ่งทรุดตัว (Bariši´c, et al., 2019) ดังนั้นการนำดินมาใช้ในงานวิศวกรรมจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพให้มีคุณภาพดีขึ้นเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ หรือเพื่อมุ่งเน้นจุดหมายอื่นๆ ในการศึกษาคุณสมบัติของดินจะขึ้นอยู่กับส่วนผสมของหินฝุ่น และเถ้าชีวมวล เพื่อให้ได้อัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการใช้งาน การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงแบกทาน เป็นที่นิยมใช้ในการหากำลังรับแรงแบกทานของดินเนื่องจากเป็นวิธีที่น่าเชื่อถือและเป็นที่ยอมรับในงานทางวิศวกรรม ซึ่งในงานวิศวกรรมโยธานิยมใช้เป็นตัวกำหนดชนิดของดิน หรือดินที่ปรับปรุงคุณภาพ

2.1 เถ้าชีวมวล

เถ้าชีวมวล เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากวัสดุทางการเกษตรซึ่งเกิดจากการใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า เช่น เถ้าแกลบ, เถ้าชานอ้อย, เถ้าปาล์มน้ำมัน, เถ้าซังข้าวโพด และเถ้ามันสำปะหลัง เป็นต้น เถ้าชีวมวลที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสมกับการใช้เป็นปอซโซลาน กล่าวคือมีซิลิกา และอลูมินาออกไซด์สูง (มากกว่าร้อยละ 50 ของทั้งหมด) สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีตได้ เช่น การนำเถ้าแกลบมาแทนที่ปูนซีเมนต์ สำหรับประยุกต์ใช้ในงานพื้นทางมีข้อดีหลายประการ Z. Zimar, et al., 2022 ศึกษาข้อดีทางวิศวกรรมของการนำเถ้าแกลบ มาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อเพิ่มความคงทนของพื้นทางเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ดินเหนียวเพียงอย่างเดียว พบว่าเถ้าแกลบทำให้กำลังรับแรงแบกทานเพิ่มขึ้น การใช้เถ้าแกลบไม่เพียงแต่ช่วยลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายลดลงตามมาแต่ยังช่วยบรรเทาปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมเช่น ปัญหาฝุ่นละออง และน้ำเสียจากการชะล้างที่ไหลมาจากบ่อขยะฝังกลบ นักวิจัยหลายคนได้นำเสนอการประยุกต์ใช้เถ้าแกลบเพื่อบรรเทาปัญหาด้านเทคนิคธรณี Blayi, et al., 2024 พบว่าการนำดินเหนียวมาผสมกับเถ้าแกลบร้อยละ 0 ถึง 32 สามารถปรับปรุงสมบัติของดินได้ โดยลดความเป็นพลาสติกและเพิ่มกำลังแก่ดิน

ในประเทศไทยเถ้าชีวมวลที่สามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน และมีปริมาณค่อนข้างมาก แต่การนำมาประยุกต์ใช้ยังไม่เพียงพอต่อปริมาณเถ้าที่ยังเหลืออยู่ ได้แก่ เถ้าไม้ยูคาลิปตัส (Eucalyptus Wood

Ash, EWA) เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากการนำไม้ยูคาลิปตัสไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในอุตสาหกรรมผลิตไฟฟ้า และ/ หรือความร้อน จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า การแทนที่ด้วย EWA ในปริมาณมากกว่า 24% ในการทดสอบหาค่ารับแรงแบกทานทำให้กำลังรับแรงแบกทานลดลง (Blayi, et al., 2024, Sarvaswini, et al., 2017 ศึกษาการใช้เถ้ายูคาลิปตัส และฝุ่นหินแกรนิตในการปรับปรุงเสถียรภาพบล็อกดินโคลน โดยใช้ดินผสมฝุ่นหินแกรนิตที่อัตราส่วน 90%:10%, 80%:20%, 70%:30%, 60%:40 และ 50%:50% ผสมกับปูนซีเมนต์ และเถ้ายูคาลิปตัสที่อัตราส่วน ปูนซีเมนต์: เถ้ายูคาลิปตัส เท่ากับ 8%:0%, 7%:1%, 6%:2%, 5%:3%, 4%:4%, 3%:5%, 2%:6%, 1%:7% และ 0%:8% พบว่าบล็อกที่มีเถ้ายูคาลิปตัสมีผิวเรียบเนียน มีมุม และขอบเป็นไปตามที่กำหนดไว้อย่างดี ค่าการดูดซับน้ำของบล็อกมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเถ้ายูคาลิปตัสเพิ่มขึ้น เนื่องจากเถ้ายูคาลิปตัสทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมเติมรูขุมขน และรูพรุนระหว่างอนุภาคดิน บล็อกโคลนที่ปรับปรุงเสถียรภาพด้วยฝุ่นหินเกรนิต และเถ้ายูคาลิปตัสที่ 5% ปูนซีเมนต์ + 3% เถ้ายูคาลิปตัส มีค่าการรับแรงอัดเปียกเท่ากับ 3.34 N/mm^2 และแรงอัดแห้งของ 7.35 N/mm^2 ซึ่งตรงตามข้อกำหนดทั้งหมดของเกรด 30 ของ CSEB (Cement stabilized earth blocks) ตามที่ให้ไว้ใน IS: 1725-1982 Couto และคณะ (2019) ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เถ้ายูคาลิปตัส (EWA) เป็นส่วนผสมในคอนกรีต ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดสูงเร็ว และเถ้ายูคาลิปตัสที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 100 ปริมาณ 5, 10, 15 และ 20% เป็นส่วนผสมในคอนกรีต การวิเคราะห์ทางกายภาพพบว่า EWA มีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าสารตกค้างที่มาจากแหล่งกำเนิดอินทรีย์อื่น ๆ ในขณะที่พื้นที่ผิวจำเพาะของ BET นั้นไม่เพียงพอที่จะเสริมสร้างฟิลเลอร์ และ/ หรือเป็นวัสดุปอซโซลาน ทางเคมีส่วนที่เหลือแสดงอัตราสารอินทรีย์ต่ำ และค่าดัชนีกำลัง (Strength Activity Index) ต่ำกว่าค่าต่ำสุดที่มาตรฐานบราซิลกำหนด

2.2 การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมเทคนิคธรณีของดินผสมเถ้าชีวมวลและซีเมนต์

การปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการทางเคมีถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านความแข็งแรงของดินสำหรับการสร้างเขื่อน หรือถนน จากการศึกษาที่ผ่านมา (Jamsawang, et al., 2017a,b ; Yoobanpot, et al., 2017; Sefene, S. S. 2021) พบว่าคุณสมบัติทางกลของดินจะเปลี่ยนไปในทางที่ดีเมื่อทำการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ หรือวัสดุปอซโซลาน ลักษณะเฉพาะของดินซีเมนต์คือ มีการเชื่อมประสานด้วยผลิตภัณฑ์จากปูนซีเมนต์เพื่อยึดเกาะอนุภาคไว้ด้วยกันในการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับ องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ และคุณสมบัติของดิน โดยทั่วไปแล้วดินที่มีอนุภาคเป็นเม็ดหยาบ จะสามารถพัฒนากำลังได้สูงกว่าดินที่มีอนุภาคเป็นเม็ดละเอียดเมื่อผสมปริมาณซีเมนต์ในอัตราส่วนที่เท่ากัน องค์ประกอบต่าง ๆ ของปูนซีเมนต์จะทำให้เกิดปฏิกิริยา Hydration ในอัตราที่แตกต่างกัน เม็ดดินจะเกิดการเกาะกันเป็นก้อน และสามารถรับ

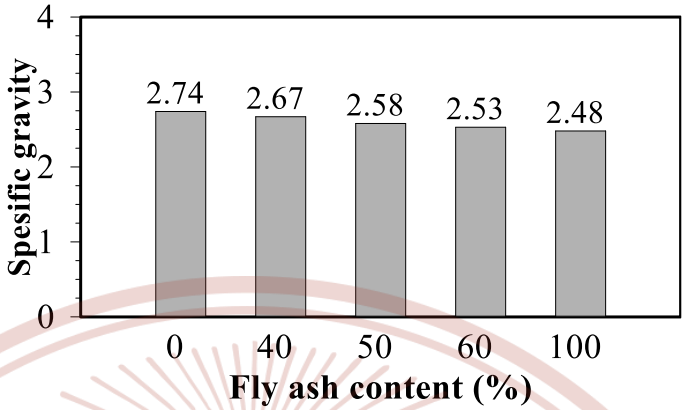
แรงอัดได้การยึดเกาะนี้จะเกิดขึ้นทั้งระหว่างเม็ดดินกับซีเมนต์ และซีเมนต์กับซีเมนต์เอง ซึ่งแยกประเภทสำหรับดินเม็ดละเอียด และดินเม็ดหยาบดังนี้

ดินเม็ดละเอียด ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้จะสูงกว่าดินเม็ดหยาบเพราะว่าดินเม็ดละเอียดจะมีพื้นที่ผิว และจุดสัมผัสมากกว่า ซีเมนต์จะเป็นตัวช่วยให้การเกาะตัวของเม็ดดินแข็งแรงขึ้น ดังนั้นนอกจากซีเมนต์จะทำให้ค่าของคุณสมบัติด้านความเหนียวลดลงแล้ว ยังเพิ่มค่ากำลังรับแรงเฉือนอีกด้วย เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีของซีเมนต์ที่เกิดขึ้นจะเกิดตามผิวเม็ดดินจะไปไล่น้ำที่เกาะอยู่รอบผิวเม็ดดินออกไป และซีเมนต์จะเข้าไปอยู่แทนที่ทำให้ลดการอ่อนตัวของดินเมื่อมีน้ำจากภายนอกซึมเข้าไปอีก

ดินเม็ดหยาบ ในกรณีของดินเม็ดหยาบ ปฏิกิริยาของซีเมนต์จะทำหน้าที่คล้ายกับการผสมคอนกรีต เว้นแต่ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) จะไม่ไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดดิน อนุภาคของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์จะขัดตัวกันด้วย Mechanical Interlock และยึดเกาะกันด้วย Chemical Cementation กรณีของทรายการยึดเกาะกันจะมีตรงบริเวณผิวสัมผัสกัน เมื่อทรายมีการบดอัดแน่นช่องระหว่างเม็ดทรายจะมีน้อยพื้นที่สัมผัสมีมากขึ้นการยึดเกาะกันจะแข็งแรงขึ้นด้วยแต่ถ้าเป็นทรายที่มีขนาดเดียวกันจะมีพื้นที่สัมผัสน้อย ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้จะมากกว่าชนิดที่ขนาดคละกันดี

2.2.1 การทดสอบคุณสมบัติความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity, GS)

จากการศึกษาของ Karim, et al., 2020 ได้ทำการทดสอบค่าแรงถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity, Gs) ของดิน ทรายเถ้าลอย (fly ash) และส่วนผสมระหว่างดินกับเถ้าลอย โดยใช้วิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D854 (water pycnometer) และ ASTM D5550 (gas pycnometer) เพื่อให้ได้ค่าที่มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ ผลการศึกษาพบว่า ค่าแรงถ่วงจำเพาะของวัสดุทั้งหมดมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 2.48–2.74 โดยเถ้าลอยชนิด Class F มีค่าแรงถ่วงจำเพาะต่ำที่สุดประมาณ 2.48 ขณะที่ดินเดิมมีค่าแรงถ่วงจำเพาะสูงกว่า เมื่อมีการเพิ่มสัดส่วนของเถ้าลอยลงในดิน ค่าแรงถ่วงจำเพาะของวัสดุผสมมีแนวโน้ม ลดลงอย่างต่อเนื่องตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเถ้าลอยมีความหนาแน่นและน้ำหนักจำเพาะต่ำกว่าวัสดุดินเดิม แนวโน้มดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า การเติมเถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางกายภาพของดิน โดยเฉพาะค่าแรงถ่วงจำเพาะ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของดิน เช่น การคำนวณอัตราส่วนช่องว่าง การวิเคราะห์การทรุดตัว และการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดิน การลดลงของค่า Gs ในดินผสมจึงมีความสัมพันธ์กับลักษณะทางกายภาพของเถ้าลอยที่มีน้ำหนักเบาและมีโครงสร้างเป็นอนุภาคละเอียด ส่งผลให้ดินผสมมีสมบัติโดยรวมแตกต่างจากดินเดิม

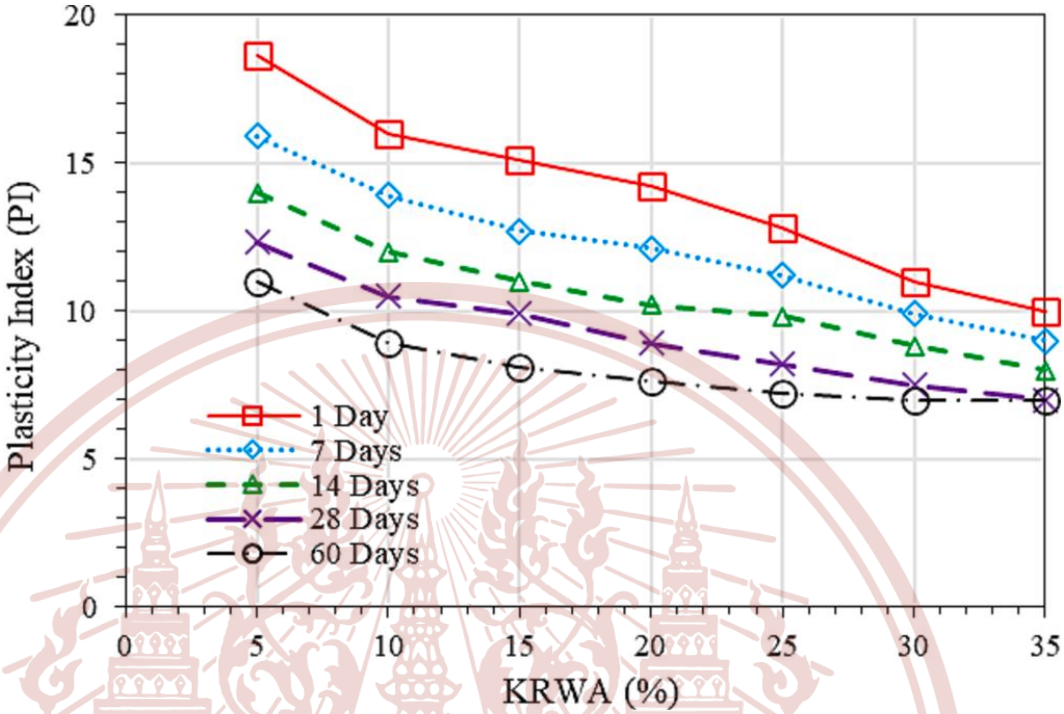


ภาพที่ 2-1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความถ่วงจำเพาะตามปริมาณเถ้าลอย (Karim , et al., 2020)

2.2.2 การศึกษาคุณสมบัติ Atterberg limits

การทดสอบ Atterberg limit test เป็นการทดสอบทางวิศวกรรมปฐพีที่ใช้ประเมินคุณสมบัติความเป็นพลาสติกของดินละเอียด โดยอาศัยปริมาณความชื้นเป็นเกณฑ์ในการจำแนกพฤติกรรมของดินในสภาวะต่าง ๆ ได้แก่ ขีดจำกัดเหลว (Liquid limit, LL) ขีดจำกัดพลาสติก (Plastic limit, PL) และขีดจำกัดหดตัว (Shrinkage limit, SL) ค่าที่ได้จะถูกนำมาใช้คำนวณดัชนีความเป็นพลาสติก (Plasticity index, PI) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดความแตกต่างระหว่างปริมาณน้ำที่ทำให้ดินเปลี่ยนจากสภาพกึ่งแข็งไปเป็นกึ่งเหลว

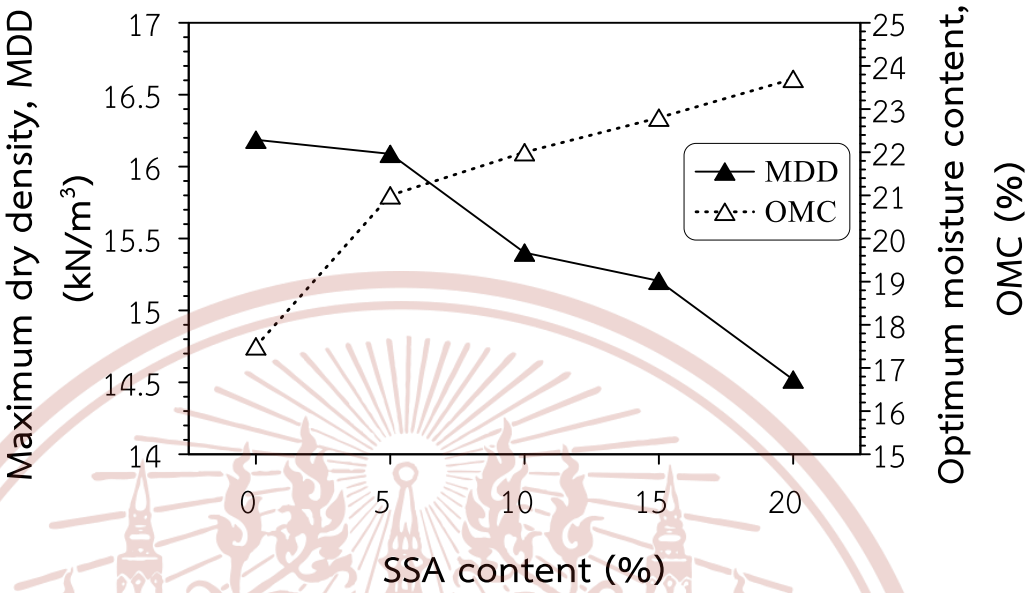
W. Hassan, et al., 2023 ได้ทำการศึกษาการใช้ KRWA (potassium-rich wood ash) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติดินกระจายตัว (dispersive clay) โดยเพิ่มเปอร์เซ็นต์ KRWA ต่างๆและทำการบ่มในช่วงเวลา 1, 7, 14, 28 และ 60 วัน การเติม KRWA ประมาณ 10 % และการบ่มนาน 28 วัน จะลดการกระจายตัวได้มากถึง 82 % ลดสัดส่วนโซเดียม 57 % และลด PI ได้ถึงประมาณ 56 % พร้อมกับเพิ่มกำลังรับน้ำหนักและลดการอัดตัวของดินจากภาพที่ 2-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Plasticity index กับปริมาณ KRWA พบว่าค่า PI มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มปริมาณ KRWA และเมื่อระยะเวลาการบ่มนานขึ้น โดยที่ 1 วัน มีค่า PI สูงที่สุดในทุกช่วงเปอร์เซ็นต์ของ KRWA และค่าจะลดลงตามลำดับที่บ่มนานขึ้น จนถึง 60 วัน ซึ่งมีค่า PI ต่ำที่สุดและคงที่มากขึ้นที่ประมาณ 7–9 แม้เพิ่มปริมาณ KRWA ต่อเนื่องก็ตาม สิ่งนี้สะท้อนให้เห็นว่ากลไกการแลกเปลี่ยนไอออนและการฟลอคคูเลชันเกิดขึ้นตั้งแต่ช่วงแรกทำให้ค่า PI ลดลงอย่างรวดเร็ว ขณะที่การบ่มยาวนานขึ้นส่งผลต่อปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่ช่วยเสริมสร้างโครงสร้างอนุภาคดินให้มั่นคงและลดความเป็นพลาสติกได้มากยิ่งขึ้น ผลลัพธ์ดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าเมื่อเพิ่ม KRWA ร่วมกับการบ่มค่า PI จะลดลงจนต่ำกว่าเกณฑ์ 10 ซึ่งถือเป็นดินพลาสติกต่ำ ที่เหมาะสมต่อการใช้งานทางวิศวกรรม เช่น งานถม งานถนน และงานดินถมฐานราก เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่ำและมีเสถียรภาพที่ดีขึ้น



ภาพที่ 2-2 ผลกระทบของ KRWA ต่อค่าดัชนีความเป็นพลาสติก (PI) ของดินในช่วงระยะเวลาการบ่มที่แตกต่างกัน (W. Hassan, et al., 2023)

2.2.3 การศึกษาคุณสมบัติของการบดอัดดิน (Compaction test)

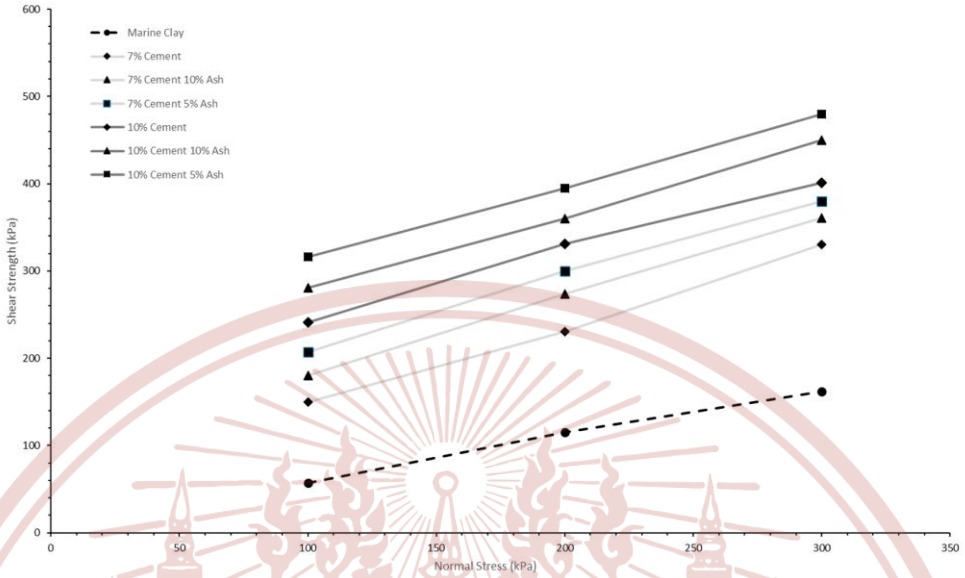
จากการศึกษาของ Cabalar, et al., 2024) ได้ทำการทดสอบการบดอัดแบบ Modified Proctor กับดินตะกอน (silt) ที่ผสมเถ้าตะกอนน้ำเสีย (SSA) ในอัตราส่วน 5, 10, 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง พบว่า การเติม SSA ส่งผลต่อพฤติกรรมการบดอัดของดินอย่างมีนัยสำคัญทั้งในด้านน้ำหนักแห้งสูงสุดและปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่สุด ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า เมื่อปริมาณ SSA เพิ่มขึ้น ค่า น้ำหนักแห้งสูงสุด (γ_{dmax}) ของดินมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ค่า ปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่สุด (Optimum moisture content: OMC) เพิ่มสูงขึ้น โดยดินเดิมมีค่า γ_{dmax} ประมาณ 16.19 kN/m³ และ OMC ประมาณ 17.6% แต่เมื่อเติม SSA ในอัตรา 20% ค่า γ_{dmax} ลดลงเหลือประมาณ 14.52 kN/m³ ขณะที่ OWC เพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 26.2%การลดลงของน้ำหนักแห้งสูงสุดสามารถอธิบายได้จากค่า ความถ่วงจำเพาะ (Gs) ของ SSA ที่ต่ำกว่าดินตะกอนเดิม ส่งผลให้ความหนาแน่นรวมของส่วนผสมลดลง ขณะเดียวกัน การเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่สุดเกิดจากความละเอียดของอนุภาค SSA และความต้องการน้ำเพิ่มเติมเพื่อใช้ในกระบวนการดูดซึมน้ำและปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบใน SSA การเติม SSA หรือวัสดุพอซโซลานิกชนิดอื่นในดินเนื้อละเอียด ทำให้ค่า OMC เพิ่มขึ้นและค่า γ_{dmax} ลดลง เนื่องจากอนุภาคละเอียดของเถ้าจะเข้าไปแทนที่โครงสร้างดินเดิมและเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะ ส่งผลให้ต้องใช้น้ำมากขึ้นเพื่อให้เกิดการบดอัดที่มีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 2-3 ผลกระทบของ SSA ต่อความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) และปริมาณน้ำที่เหมาะสม (OMC) ตามปริมาณเถ้าลอย (Cabalar, et al., 2024)

2.2.4 การศึกษาคุณสมบัติการรับแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear Test)

การรับแรงเฉือนโดยตรงของดินที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ ถือว่าเป็นคุณสมบัติทางวิศวกรรมปฐพีที่สำคัญ Ekinci, et al., 2020 ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของสารผสมเพิ่มที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน สารผสมเพิ่มที่นิยมใช้กันทั่วไปสำหรับการประยุกต์ใช้ดินซีเมนต์ในงานวิศวกรรมโยธา คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary portland cement, OPC) ซึ่งกำลังของดินซีเมนต์ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่างเช่น ชนิดของดิน ปริมาณ และชนิดของวัสดุผสมเพิ่มที่ใช้ ความหนาแน่นของการบดอัด ปริมาณความชื้น ระยะเวลาในการผสม อุณหภูมิในการบ่ม และปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น โดยปริมาณซีเมนต์และเถ้าไม้ที่ใช้เท่ากับ 7%:0%, 7%:10%, 7%:5,% 0%:10%, 10%:10% และ 5%:10% ภาพที่ 2-2 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของการรับแรงเฉือนโดยตรงสำหรับส่วนผสมของตะกอนดินเหนียวทะเล

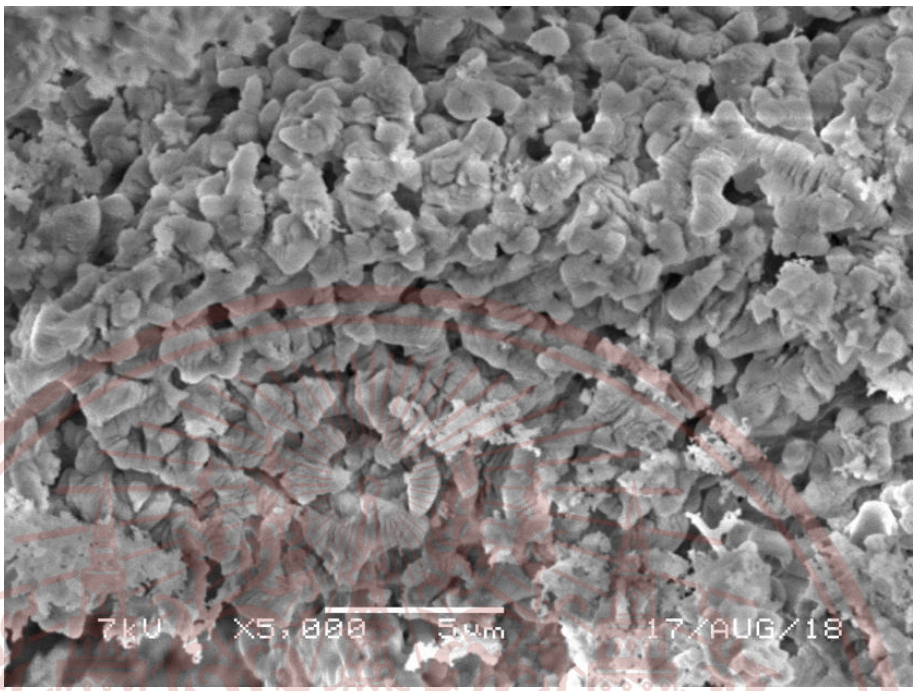


ภาพที่ 2-4 การเปลี่ยนแปลงของการรับแรงเฉือนโดยตรงที่อัตราส่วนต่างๆ (Ekinci, et al., 2020)

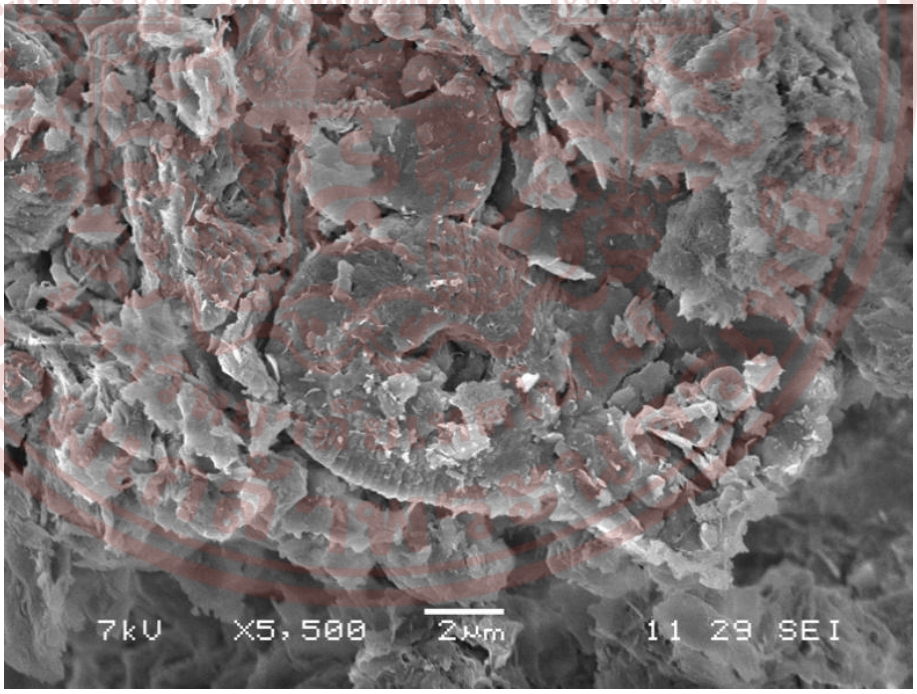
ตารางที่ 2-1 แสดงถึงพารามิเตอร์ของความแข็งแรงแรงเฉือนตรง

	Friction Angle (ϕ)	Cohesion (kPa)	Brittleness Index (%)
Marine Clay	27	10	0.00
7% Cement	42	57	42.60
7% Cement 10% Ash	42	91	25.87
7% Cement 5% Ash	41	123	25.48
10% Cement	39	164	54.06
10% Cement 10% Ash	40	216	32.87
10% Cement 5% Ash	39	233	21.40

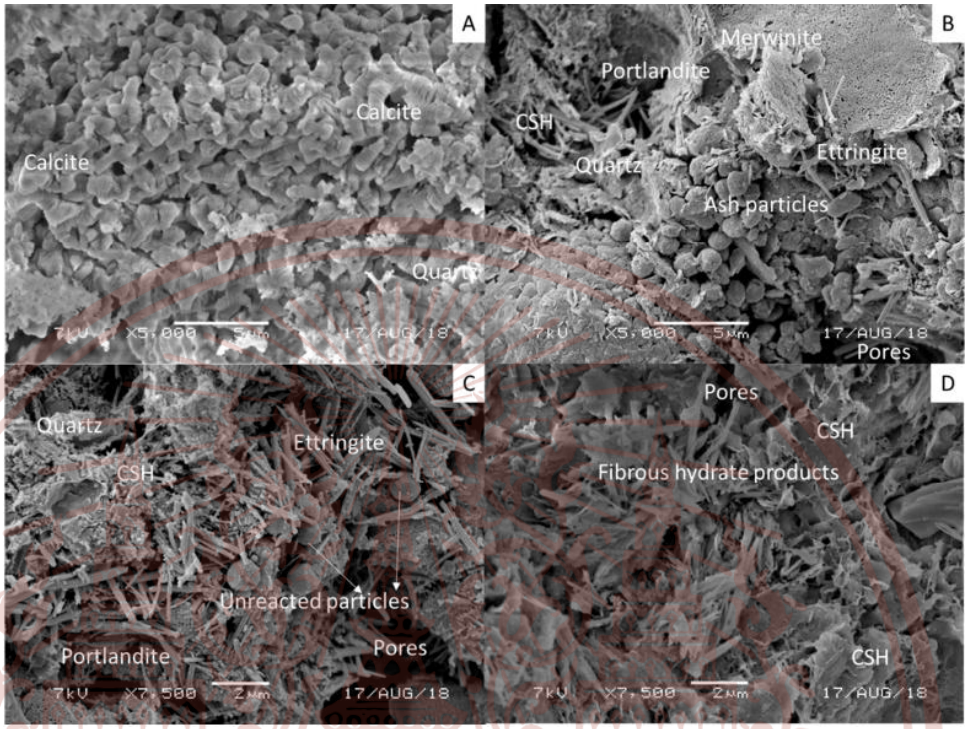
ที่มา : (Ekinci, et al., 2020)



ภาพที่ 2-5 ภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างเถ้าไม้ (Ekinci, et al., 2020)



ภาพที่ 2-6 ภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างดินตะกอนแม่น้ำ (Ekinci, et al., 2020)



ภาพที่ 2-7 ภาพถ่าย SEM (A) เถ้าไม้ที่ (B) 7 วัน (C) 28 วัน และ (D) 60 วัน สำหรับดินเหนียวที่สะสมทางทะเลที่ผสมซีเมนต์ที่บ่มแล้ว + เถ้าไม้ (Ekinci, et al., 2020)

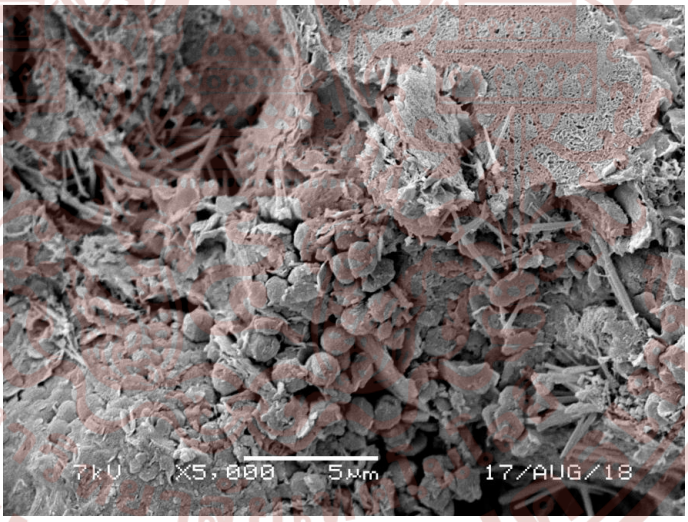
ภาพที่ 2-7 A แสดงถึงพื้นผิวที่มีลักษณะคล้ายแก้ว ซึ่งผลิตภัณฑ์เหล่านี้มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาโปซโซลานิกเพียงเล็กน้อยเนื่องจากมีลักษณะเฉื่อย อย่างไรก็ตาม อนุภาคที่มีภาพร่างยาวและไม่เป็นระเบียบ ซึ่งประกอบด้วยแคลเซียม, ควอตซ์, พอร์ตแลนด์ไดต์ และแมร์วินไนต์จำนวนเล็กน้อยนั้นแสดงถึงระยะผลึก (ภาพที่ 2-6) อนุภาคที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยม, เป็นเกล็ด, และยาวพร้อมขอบที่คมสามารถเห็นได้ในภาพที่ 2-6 และ 2-7 A ความไม่สม่ำเสมอในส่วนผสมนี้ทำให้รูพรุนเพิ่มขึ้นและส่งผลให้ความแข็งแรงลดลง การมีแคลเซียมในปริมาณมากทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นมากขึ้น

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเพิ่มเติมกับดินเหนียวส่งผลให้เกิดเมทริกซ์ที่หนาแน่นขึ้นตามที่แสดงในภาพ 2-7 B–D โครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายเข็ม, ระยะเป็นชั้น, และเกล็ดที่มีลักษณะเป็นมุมที่ประกอบด้วยบริเวณที่มีรูพรุนก็ถูกสังเกตเช่นกันตามที่แสดงในภาพ 2-7 B–D ภาพ 2-7 C แสดงให้เห็นอนุภาคคาร์บอนที่ไม่ได้เกิดปฏิกิริยา อนุภาคเหล่านี้มีการยึดติดที่หลวมและมีน้ำมากขึ้น

นอกจากนี้ยังพบแผ่นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีลักษณะเป็นรูปหกเหลี่ยมตามที่เห็นในภาพ 2-7 B และพบระยะเส้นใยบางส่วนตามที่แสดงในภาพ 2-7 C การเติมดินเหนียวลงในระบบทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น อนุภาคเชื่อมต่อกันได้ดีขึ้น และรูพรุนเต็มไปด้วยผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเกิดไฮเดรตหรือเปลี่ยนเป็นเจล CSH ที่เสถียร อย่างไรก็ตาม ยังคงมีรูพรุนและอนุภาคที่ไม่ได้เกิดปฏิกิริยาปรากฏอยู่ในภาพ SEM 2-7 B และ 2-7 C อนุภาคที่ไม่ได้เกิดปฏิกิริยาลดลงเมื่อเวลาผ่านไปดังที่เห็นในภาพ 2-7 D สิ่งนี้เกิดจากปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ในรูพรุนระหว่างการผสม ทำให้เกิดแหล่งน้ำเพิ่มเติมสำหรับปฏิกิริยา ซึ่งน้ำนี้สามารถนำมาใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่อไปได้

เถ้าไม้ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้มาจากบ้านเรือนในท้องถิ่น โดยทั่วไปจะมีเศษวัสดุที่ยังไม่ถูกเผาในเถ้าไม้ เนื่องจากความร้อนที่ผลิตได้จากเตาผิงในบ้านไม่สูงพอ ซึ่งสอดคล้องกับจำนวนอนุภาคที่ไม่ได้เกิดปฏิกิริยาจำนวนมากที่พบในภาพ SEM และค่า LOI (Loss on Ignition) ที่สูงจากการวิเคราะห์ทางเคมีของเถ้าไม้ ค่า LOI สูงมากเมื่อเทียบกับระดับที่แนะนำในซีเมนต์ (สูงกว่า 6%) ซึ่งทำให้เถ้าไม้ไม่เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องรับน้ำหนัก อย่างไรก็ตาม สำหรับการใช้งานที่ต้องการความแข็งแรงต่ำหรือปานกลางก็สามารถใช้ได้ งานวิจัยส่วนใหญ่ที่ทำเกี่ยวกับเถ้าไม้ได้มาจากการเผาชีวมวลซึ่งความร้อนสูงถึงมากกว่า 500°C

เถ้าไม้มีส่วนประกอบหลักคือ CaO และ SiO2 ดังนั้นโครงสร้างทั้งผลึกและอสัณฐานจึงมีอยู่ ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ SEM ของตัวอย่างเถ้าไม้บริสุทธิ์ในภาพที่ 2-4 การมีอยู่ของเฟสอสัณฐานบ่งบอกถึงคุณสมบัติการเกิดปฏิกิริยาโปซโซลานิก แต่เฟสผลึกบ่งบอกถึงการมีอยู่ของอนุภาคที่เฉื่อย ซึ่งส่งผลให้การเกิดไฮเดรชันช้าลงและต้องการการบ่มที่นานขึ้นเพื่อให้รูพรุนเต็มไปด้วยผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน ในภาพที่ 2-8 แสดงภาพ SEM ของตัวอย่างดินเหนียว-ซีเมนต์-เถ้า โดยเฉพาะภาพ SEM (ภาพที่ 2-5 และ 2-6) แสดงให้เห็นสถานการณ์นี้อย่างชัดเจน นอกจากนี้ การมี CaO ในปริมาณสูงในเถ้าไม้ช่วยสร้างพันธะที่แข็งแรงเมื่อทำปฏิกิริยากับดินเหนียวและซีเมนต์ตามที่แสดงในภาพที่ 2-8

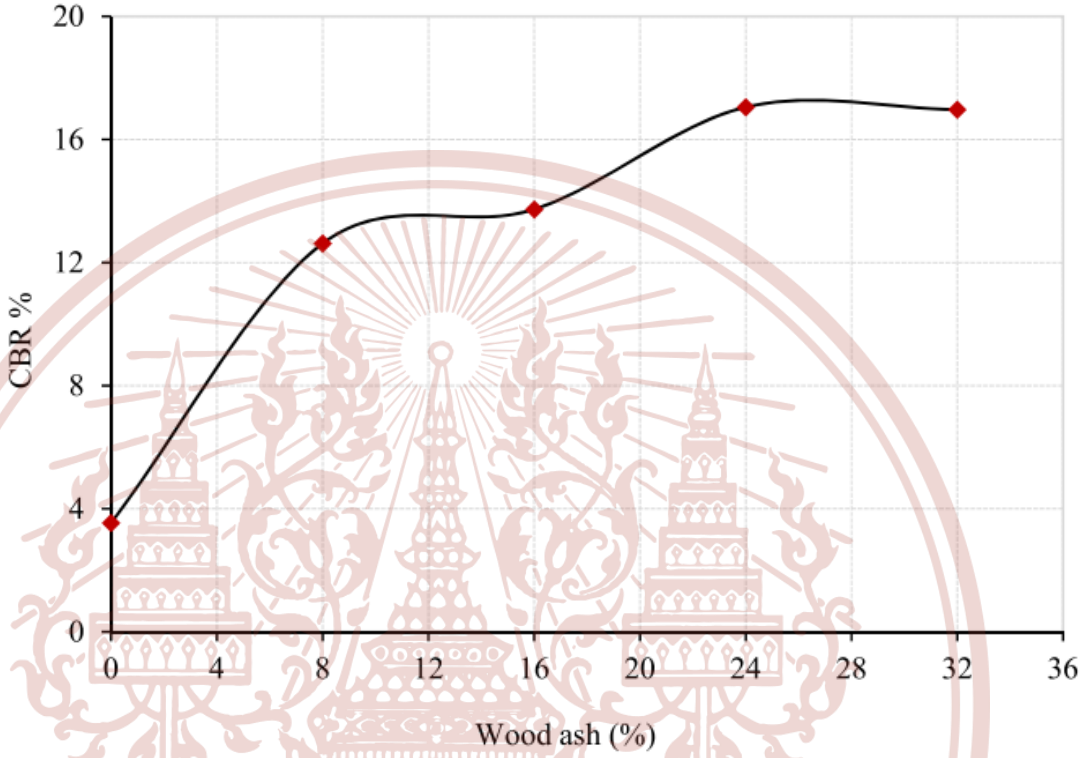


ภาพที่ 2-8 ภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างที่มีดินเหนียว, เถ้า และเถ้าไม้. (Ekinci, et al., 2020)

2.2.5 การศึกษา California Bearing Ratio (CBR)

ในการออกแบบวัสดุที่ใช้ในงานวิศวกรรมทางนิยมใช้ค่า CBR ในการประเมินความแข็งแรงของวัสดุ ดังนั้นการทดสอบนี้จึงเหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการหาค่าการบดอัดที่เหมาะสมในการใช้ในงานวิศวกรรมทาง Blayi, et al.,2024) ได้ทำการศึกษาผลของการใช้วัสดุปอซโซลานจากธรรมชาติต่อคุณสมบัติทางเทคนิคธรณีในดินปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ชีวมวล โดยผลจากการทดสอบ CBR ในดินเหนียวปรับปรุงคุณภาพ และไม่ปรับปรุงคุณภาพแสดงดังภาพที่ 2-6 จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่า CBR ของดินเหนียวปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้จะเพิ่มขึ้นจาก 3.5 เป็น 12.6, 13.5, 17 และ 16.5 ตามปริมาณเถ้าไม้ 0%, 8%, 16%, 24% และ 32% ตามลำดับการเพิ่มขึ้นของค่า CBR

อาจเป็นผลมาจากการแข็งตัวของสารประกอบเถ้าไม้ในดินอันเป็นผลมาจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิคระหว่างเถ้าไม้และดินเหนียว



ภาพที่ 2-9 ค่า CBR ของดินปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ที่ปริมาณเถ้าต่างๆ (Blayi, et al., 2024)

2.2.6 การทดสอบอัดตัวคายน้ำ (Consolidation test)

การอัดตัวคายน้ำคือการที่ดินมีการระบายน้ำออกเมื่อตัวอย่างดินมีหน่วยแรงมากระทำ ซึ่งจะส่งผลให้ตัวอย่างดินเกิดการทรุดตัวเนื่องจากการยุบตัวของดิน (Consolidation Settlement) สาเหตุที่ทำให้เกิดการทรุดตัวเพราะเมื่อน้ำที่อยู่ภายในชั้นดินไหลซึมออกมาจะทำให้แรงดันน้ำและปริมาตรของดินลดลงทำให้เกิดการทรุดตัว การทรุดลักษณะนี้จะเกิดหลังจากการทรุดตัวทันทีทันใด (Immediate Settlement) และจะเกิดในชั้นดินที่มีน้ำไหลซึมผ่านได้ช้า

Mohanty, et al., 2016 ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของดินเหนียวที่ผสมเถ้าถอยและโดโลซาร์ ซึ่งมีคุณสมบัติของการอัดแน่น เช่น ดัชนีการอัดตัว (Compression Index, C_c), ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Coefficient of Volume Change, m_v), ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัว (Coefficient of Compressibility, a_v), ค่าสัมประสิทธิ์การอัดแน่น (Coefficient of Consolidation, C_v) และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (สมบัติการระบายน้ำ) ของดินขยายตัวใหม่และตัวอย่างผสมได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 2-2 และ 2-3

ตารางที่ 2-2 คุณสมบัติการอัดแน่นและการระบายน้ำของดินขยายตัวที่ปรับสภาพด้วยเถ้าลอย

Sample reference	Compression index 'C_c'	Co-efficient of volume change 'm_v' (m^2/kN)	Co-efficient of compressibility 'a_v' (m^2/kN)	Coefficient of consolidation 'C_v' (m^2/min)	Co-efficient of permeability 'K' (m/min)
Only soil	0.298	0.39×10^{-3}	2.43×10^{-3}	1.31×10^{-6}	0.51×10^{-8}
95 % soil + 5 % Fly Ash	0.229	0.31×10^{-3}	1.87×10^{-3}	2.05×10^{-6}	0.63×10^{-8}
90 % soil + 10 % Fly Ash	0.173	0.31×10^{-3}	1.41×10^{-3}	2.25×10^{-6}	0.70×10^{-8}
85 % soil + 15 % Fly Ash	0.168	0.30×10^{-3}	1.37×10^{-3}	2.60×10^{-6}	0.78×10^{-8}
80 % soil + 20 % Fly Ash	0.148	0.29×10^{-3}	1.21×10^{-3}	2.78×10^{-6}	0.81×10^{-8}
75 % soil + 25 % Fly Ash	0.140	0.29×10^{-3}	1.14×10^{-3}	3.02×10^{-6}	0.88×10^{-8}
70 % soil + 30 % Fly Ash	0.136	0.29×10^{-3}	1.11×10^{-3}	3.55×10^{-6}	1.03×10^{-8}

ที่มา : Mohanty, et al., (2016)

ตารางที่ 2-3 คุณสมบัติการอัดแน่นและการระบายน้ำของดินขยายตัวที่ปรับสภาพด้วยโดโลชาร์

Sample reference	Compression index 'C_c'	Co-efficient of volume change 'm_v' (m^2/kN)	Co-efficient of compressibility 'a_v' (m^2/kN)	Coefficient of consolidation 'C_v' (m^2/min)	Co-efficient of permeability 'K' (m/min)
Only soil	0.298	0.39×10^{-3}	2.43×10^{-3}	1.31×10^{-6}	0.51×10^{-8}
95 % soil + 5 % Dolochar	0.222	0.32×10^{-3}	1.81×10^{-3}	2.19×10^{-6}	0.70×10^{-8}
90 % soil + 10 % Dolochar	0.187	0.31×10^{-3}	1.53×10^{-3}	2.23×10^{-6}	0.70×10^{-8}
85 % soil + 15 % Dolochar	0.186	0.30×10^{-3}	1.52×10^{-3}	2.44×10^{-6}	0.73×10^{-8}
80 % soil + 20 % Dolochar	0.183	0.30×10^{-3}	1.49×10^{-3}	2.83×10^{-6}	0.85×10^{-8}
75 % soil + 25 % Dolochar	0.160	0.30×10^{-3}	1.31×10^{-3}	3.45×10^{-6}	1.03×10^{-8}
70 % soil + 30 % Dolochar	0.155	0.30×10^{-3}	1.26×10^{-3}	3.75×10^{-6}	1.12×10^{-8}

ที่มา : Mohanty, et al., (2016)

ตารางที่ 2-2 แสดงความแปรผันของลักษณะการอัดแน่นตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้นในตัวอย่างผสม ดัชนีการอัดตัว, ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตร และค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวของตัวอย่างผสมลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น เนื่องจากการลดลงของสมบัติความเหนียวใน

ตัวอย่างผสมเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การอัดแน่นของตัวอย่างผสมเพิ่มขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไปเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นคุณสมบัติความเหนียวของตัวอย่างผสมลดลง ส่งผลให้การยุบตัวของตัวอย่างผสมลดลง และทำให้เวลาที่ต้องใช้ในทรุดตัวที่ 90% ก็ลดลงตามไปด้วย (Mohanty , et al., 2016)

ตารางที่ 2-3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติการอัดแน่นตามปริมาณโดโลชาร์ที่เพิ่มขึ้นในตัวอย่างผสม ดัชนีการอัดตัว ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตร และค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวของตัวอย่างผสมลดลงเมื่อปริมาณโดโลชาร์เพิ่มขึ้น สาเหตุมาจากการลดลงของคุณสมบัติความเหนียวของตัวอย่างผสมเมื่อปริมาณโดโลชาร์เพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การอัดแน่นของตัวอย่างผสมเพิ่มขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไปเมื่อปริมาณโดโลชาร์เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อปริมาณโดโลชาร์ในตัวอย่างดินผสมเพิ่มขึ้นคุณสมบัติความเหนียวของตัวอย่างผสมลดลง ส่งผลให้การยุบตัวของตัวอย่างผสมลดลง และเวลาที่ต้องใช้ในการทรุดตัวที่ 90% ก็ลดลงตามไปด้วย (Mohanty , et al., 2016)

2.3 หินฝุ่น

ในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมา อุตสาหกรรมก่อสร้างได้ผลิตของเสียจำนวนมาก ซึ่งส่งผลกระทบในทางลบไม่เพียงแต่ต่อการจัดการขยะมูลฝอยเท่านั้น แต่ยังรวมถึงสิ่งแวดล้อมด้วย สหภาพยุโรปเพียงแห่งเดียวผลิตขยะจากการก่อสร้างและรื้อถอน ประมาณ 320–380 ล้านตันต่อปี ในขณะเดียวกันอุตสาหกรรมก่อสร้างกำลังเผชิญกับการขาดแคลนวัสดุผสมเนื่องจากการลดลงของทรัพยากรธรรมชาติ โดยเฉพาะการอนุรักษ์แม่น้ำ ดังนั้นในสถานการณ์เช่นนี้ วัสดุเหลือใช้ เช่น ฝุ่นหินเศษอิฐ และขยะจากการก่อสร้าง จึงกลายเป็นทางเลือกสำหรับอุตสาหกรรมก่อสร้าง เพื่อเปลี่ยนขยะให้กลายเป็นทรัพยากร มีนักวิจัยหลายคนได้ศึกษาผลกระทบของการใช้ฝุ่นหินแกรนิตทดแทนทรายละเอียด

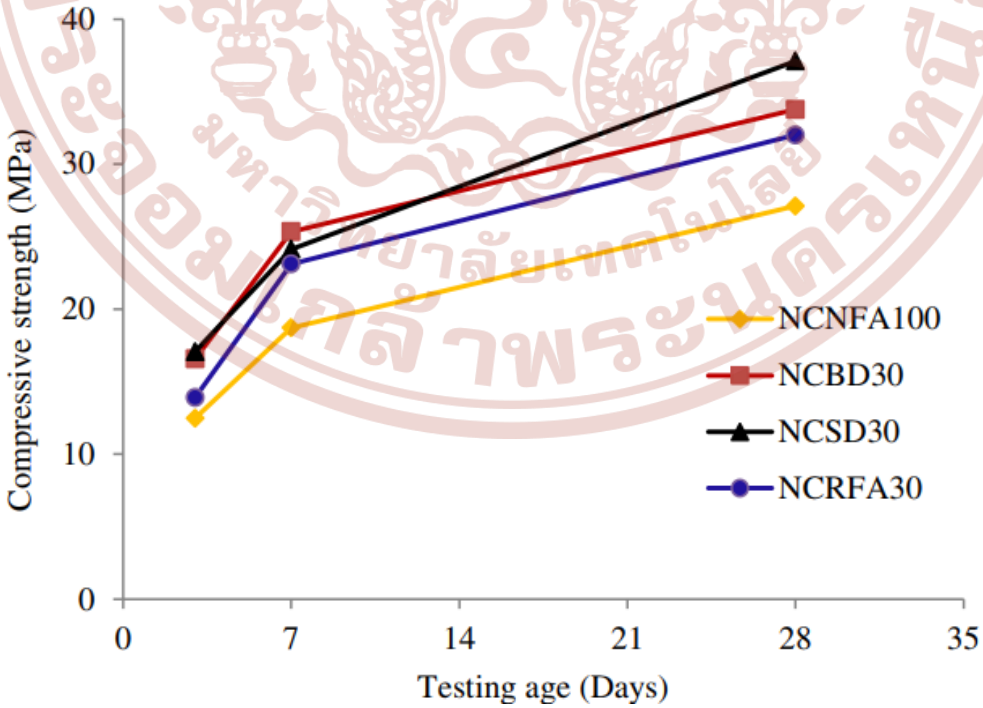
Chakradhara, et al., 2021 ได้ศึกษาการใช้ทรายแม่น้ำที่มีอยู่ในท้องถิ่นเป็นมวลละเอียด และมวลหยาบธรรมชาติ (NCA) ได้มาจากเหมืองหินในท้องถิ่น ฝุ่นอิฐ (BD) และฝุ่นหิน (SD) ถูกรวบรวมจากอุตสาหกรรมอิฐและหินในท้องถิ่น โดยมีค่าความถ่วงจำเพาะ ความหนาแน่นรวม และการดูดซึมน้ำของ BD และ SD อยู่ที่ 2.46, 1,440 กก./ลบ.ม., 12.8% และ 2.55, 1,550 กก./ลบ.ม., 1.6% ตามลำดับมวลหยาบรีไซเคิล (RCA) ได้มาจากอาคารหอพักป่าไม้ของมหาวิทยาลัย Guru Ghasidas Vishwavidyalaya (GGV) ซึ่งถูกทุบทิ้งและมีอายุ 20 ปี หินขนาดใหญ่ถูกบดให้มีขนาดเล็กลงด้วยมือก่อนจะถูกนำไปบดต่อในเครื่องบดกรามในห้องปฏิบัติการ จากนั้นทำการแยกมวลรวมที่ได้ด้วยตะแกรงมาตรฐาน มวลรวมที่มีขนาดมากกว่า 4.75 มม. และน้อยกว่า 20 มม. ถูกกำหนดให้เป็นมวลหยาบรีไซเคิล มวลรวมละเอียดรีไซเคิลได้จากการบดเพิ่มเติมด้วยมือให้มีขนาดระหว่าง 0.15 มม. ถึง 4.75 มม. โดยพบว่าความหนาแน่นรวม ความถ่วงจำเพาะ และการดูดซึมน้ำของ RFA มีค่าอยู่ที่

1,395 กก./ลบ.ม., 2.41% และ 9.1% ตามลำดับ คุณสมบัติที่ทดสอบ ได้แก่ กำลังอัด ความหนาแน่น กำลังรับแรงดึงทางอ้อม การดูดซึมน้ำ และความเร็วพัลส์อัลตราโซนิกของส่วนผสมทั้งหมด นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาสมรรถนะด้านความทนทานของส่วนผสมทั้งหมดในสภาวะกรด เช่น สารละลาย HCl และ H2SO4 จากผลการทดลองพบว่า กำลังอัดและกำลังรับแรงดึงแยก (27.95–23.23%) ของคอนกรีตทั้งมวลรวมธรรมชาติและรีไซเคิลเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อแทนที่บางส่วนด้วย SD ผลลัพธ์ยังแสดงให้เห็นว่าการดูดซึมน้ำลดลง 57.14–69.64% และ 4.67–34.67% ตามลำดับ เมื่อแทนที่ NFA ด้วย BD และ SD ในทั้ง NAC และ RAC คอนกรีตทั้งแบบมวลรวมธรรมชาติและรีไซเคิลมีความไวต่อกรด H2SO4 มากกว่า HCl ในแง่ของการสูญเสียน้ำหนักและกำลังอัด

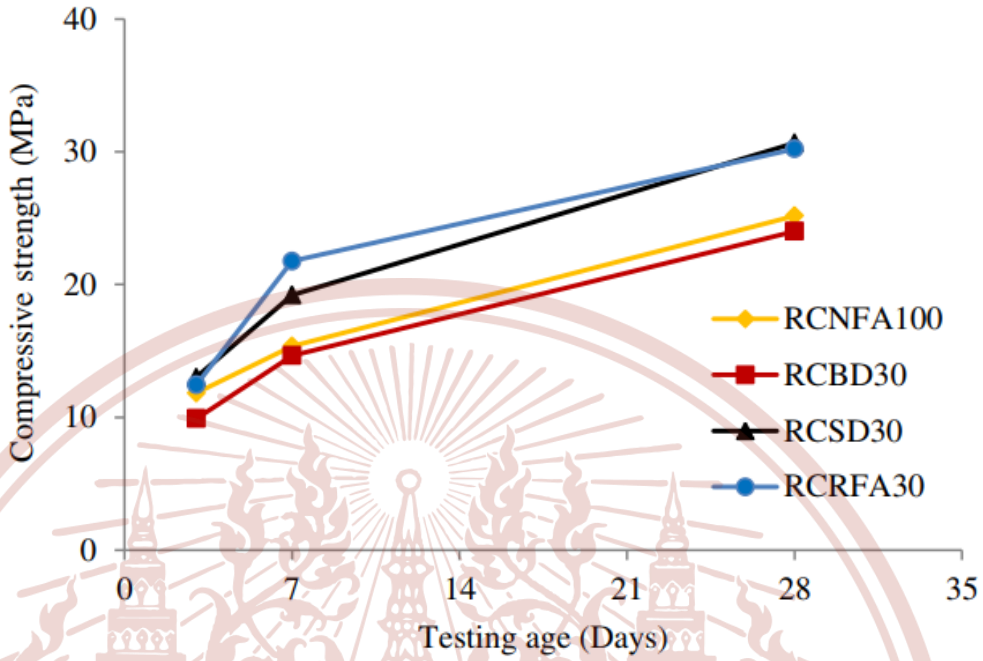
ตารางที่ 2-4 แสดงอัตราส่วนการผสมคอนกรีตธรรมดาและแบบรีไซเคิล

		Coarse aggregate		Fine aggregate				
Concrete mix	Cement (%)	NCA (%)	RCA (%)	NFA (%)	RFA (%)	BD (%)	SD (%)	Admixture (% by weight of cement)
NCNFA100	100	100	—	100	—	—	—	2
NCBD30	100	100	—	70	—	30	—	2
NCSD30	100	100	—	70	—	—	30	2
NCRFA30	100	100	—	70	30	—	—	2
RCNFA100	100	50	50	100	—	—	—	2
RCBD30	100	50	50	70	—	30	—	2
RCSD30	100	50	50	70	—	—	30	2
RCRFA30	100	50	50	70	30	—	—	2

ที่มา : Chakradhara, et al., (2021)



ภาพที่ 2-10 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมธรรมชาติร่วมกับมวลละเอียดชนิดต่างๆ (Chakradhara, et al., 2021)



ภาพที่ 2-11 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลร่วมกับมวลละเอียดชนิดต่างๆ (Chakradhara, et al., 2021)

ความแปรผันของกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลซึ่งมีการแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียดธรรมชาติด้วย BD, SD และ RFA ในช่วงเวลาการบ่มที่แตกต่างกันแสดงในภาพที่ 2-8 คอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลแสดงแนวโน้มคล้ายกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมธรรมชาติในการพัฒนากำลังอัดจาก 3 ถึง 7 วัน และ 7 ถึง 28 วัน จากภาพสามารถสังเกตได้ว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลและมีการแทนที่บางส่วนด้วยฝุ่นหินและมวลรวมละเอียดรีไซเคิลเพิ่มขึ้นในทุกช่วงเวลาการบ่มเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมธรรมชาติ 100% แต่การใช้ฝุ่นอิฐทำให้กำลังอัดลดลงที่ 3, 7 และ 28 วันเมื่อเปรียบเทียบกับ RAC ที่ใช้ NFA 100% ที่ 28 วัน การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของ RAC ที่มีการแทนที่บางส่วนด้วย SD และ RFA อยู่ที่ 21.76% และ 20.02% เมื่อเปรียบเทียบกับ RAC ที่ใช้ NFA 100% ขณะที่การลดลงของกำลังอัดจากการแทนที่บางส่วนด้วย BD อยู่ที่ 4.65%

2.4 การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาค

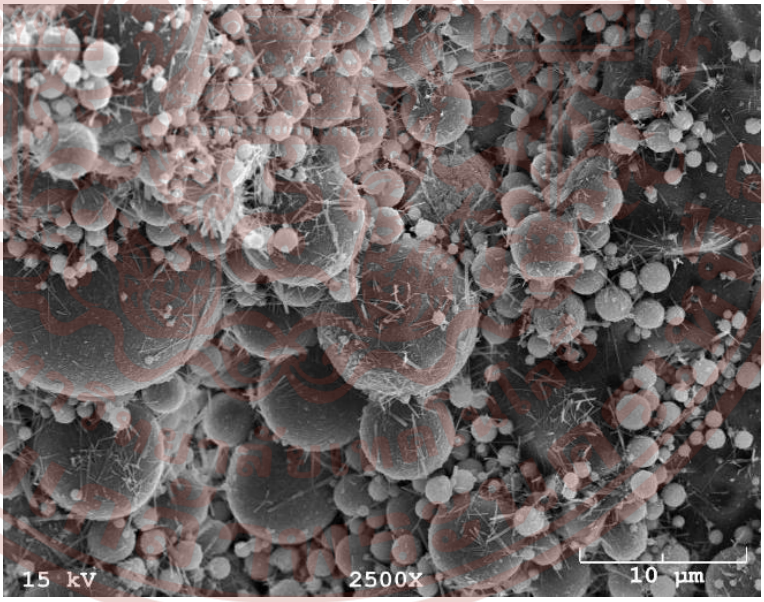
การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างในระดับจุลภาคเนื่องจากการผสมซีเมนต์ หรือสารผสมเพิ่มอื่นๆ เพื่อปรับปรุงคุณภาพดินสามารถอธิบายได้ด้วยการทดสอบ และวิเคราะห์โครงสร้างในระดับจุลภาคในการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคจะศึกษาด้านภาพร่างของอนุภาคดิน การจัดเรียงของโครงสร้าง และขนาดของช่องว่าง โดยใช้มีหลักการ และข้อจำกัดตามเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

2.4.1 การทดสอบด้วย Scanning Electron Microscope

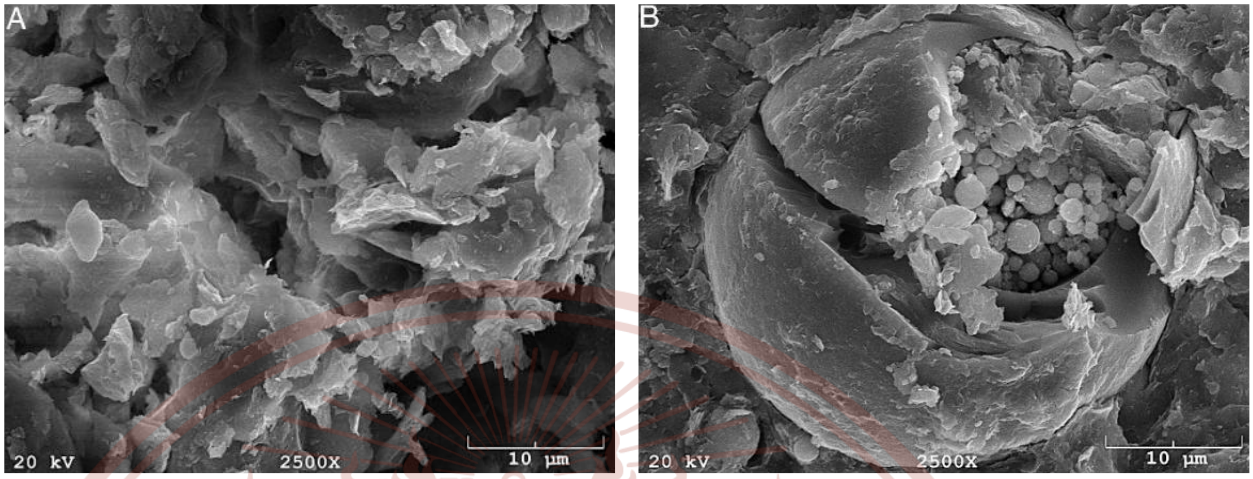
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเกิดจากการคิดค้นขึ้นมาเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพในการมองเห็นวัตถุของกล้องจุลทรรศน์ให้สามารถแสดงรายละเอียดได้ดีมากขึ้นกว่าเดิม โดยใช้ลำแสงอิเล็กตรอนแทนแสงธรรมดา ซึ่งมีหลักการทำงานคล้ายกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง แต่แตกต่างกันที่ส่วนประกอบภายใน กล่าวคือเป็นการประยุกต์เอาอิเล็กตรอนที่มีช่วงคลื่นสั้นกว่าคลื่นแสงมาใช้แทนคลื่นแสง และใช้เลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าแทนเลนส์กระจก โดยเลนส์ต่างๆในกล้องจะใช้ขดลวดพันรอบแท่งเหล็กอ่อน เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้น ซึ่งสนามแม่เหล็กจะผลักกับประจุของอิเล็กตรอน ทำให้ประจุอิเล็กเล็กตอนเบี่ยงเบนไปสู่เป้าหมายได้ และมีตัวตรวจวัดที่ จะมาจับสัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิดจากการที่ลำแสงอิเล็กตรอนไปกระทบผิวตัวอย่าง จากนั้นก็จะมีอุปกรณ์ในการแปลงสัญญาณที่ดีให้ได้ เป็นสัญญาณภาพปรากฏบนหน้าจอรับต่อไป ภาพของวัตถุ หรือตัวอย่างที่ได้จะมีกำลังขยายมากกว่า 3,000 เท่าถึงระดับมากกว่า 100,000 เท่า (กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงมีกำลังขยายได้เต็มที่ไม่เกิน 3,000 เท่า) และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพได้ โดยขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวอย่างตั้งแต่ 3-100 นาโนเมตร กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) จะได้ภาพมีลักษณะเป็นภาพ 3 มิติ ใช้ศึกษาโครงสร้างผิวเซลล์ หรือผิววัตถุ ลำแสงอิเล็กตรอนจะส่องกราดไปบริเวณด้านผิวนอกของวัตถุ ภาพที่ได้จะเห็นเฉพาะผิวนอก หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด เกิดจากการที่ Primary Electron วิ่งไปสะท้อนพื้นผิวของวัตถุ ทำให้มีการสะท้อนกลับของพลังงานในภาพแบบต่างๆ เช่น อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back-scatter Electron) รังสีเอ็กซ์ (X-ray) หรือ Secondary Electron ในกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดสัญญาณภาพที่ได้เกิดจากการใช้ตัวตรวจวัด Secondary Electron (Secondary Electron Detector: SE) และเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณอิเล็กตรอน แล้วส่งสัญญาณไปยังจอภาพ (Cathode Ray Tube) เพื่อให้ภาพที่เกิดมานั้นมองเห็นได้ โดยมีลักษณะเป็น 3 มิติ จากนั้นจึงบันทึกลง Photographic ข้อมูลที่ได้จากกล้อง SEM สามารถแสดงให้เห็นลักษณะพื้นผิวของวัสดุ ขนาด และรูปร่างของอนุภาคผง หรือตำแหน่งที่สนใจบนชิ้นงาน และแสดงให้เห็นลักษณะ และการกระจายของเฟสในโครงสร้างจุลภาค นอกจากนี้ยังสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer; EDS) ซึ่งช่วยในการศึกษา ชนิด ปริมาณ และการกระจายขององค์ประกอบธาตุของวัสดุ หรือสารมลทินได้อีกด้วย ทำให้การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานมีความละเอียด และได้ข้อมูลที่สมบูรณ์มากขึ้น

Lin, et al., 2013 ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของดินเหนียวที่ผสมเถ้าลอย จากการศึกษาด้วย SEM แสดงดังภาพที่ 2-11,2-12 และ 2-13 แสดงภาพถ่าย SEM ภาพที่ 2-11 แสดงให้เห็นว่าลักษณะทางกายภาพของเถ้าลอย ส่วนใหญ่ประกอบด้วยทรงกลมที่มีขนาดต่างกัน (0–20 มม.) ซึ่งมีพื้นผิวเรียบและเป็นแก้ว รวมทั้งมีผลึกยาวติดอยู่ ซึ่งคาดว่าเป็นเกห์เลไนต์ ($Ca_2Al[AlSiO_7]$) โดยอ้างอิงจาก

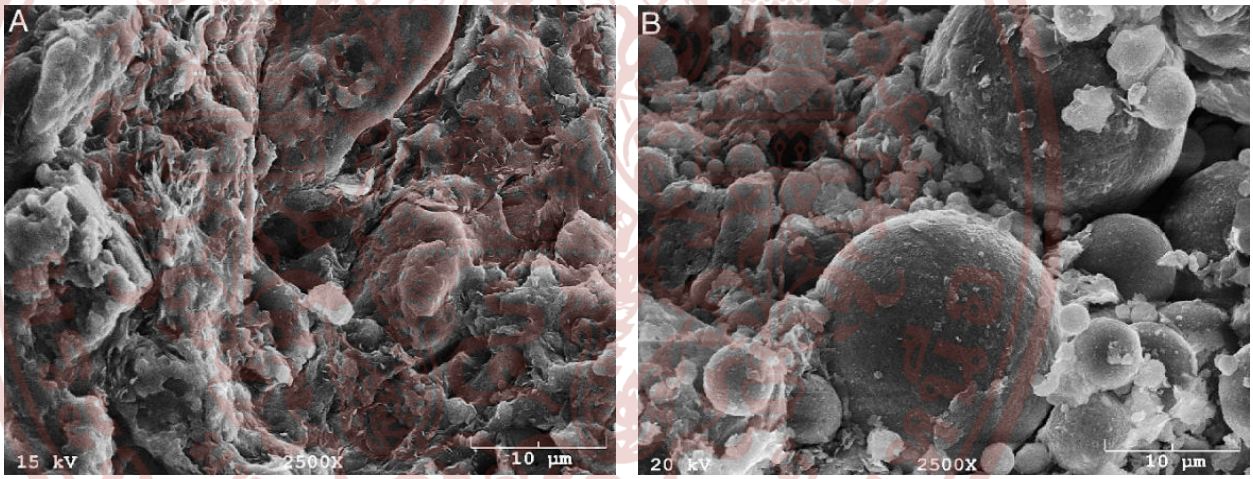
ลักษณะทางกายภาพที่แกนยาวขนานกับพื้นผิวของทรงกลม ตัวอย่างดิน Hollywood ที่ไม่ได้รับการปรับปรุงมีพื้นผิวที่หลวม โดยมีการเรียงตัวของอนุภาคดินเหนียวแบบขอบชนหน้าและหน้าชนหน้า (ภาพที่ 2-13A) โดยมีรูพรุนระหว่างอนุภาคเนื่องจากการเอาเม็ดตะกอนหรือทรายออกโดยไม่ตั้งใจ สำหรับตัวอย่างดิน Heiden ที่ไม่ได้รับการปรับปรุง มีโครงสร้างที่จับตัวกันเป็นก้อนมาก โดยมีการเรียงตัวแบบ "หน้าชนหน้า" ในแผ่นดินเหนียว (ภาพที่ 2-11A) หลังจากที่ได้รับการปรับปรุงโครงสร้างแล้ว ลักษณะทางกายภาพถูกครอบงำด้วยการมีอยู่ของทรงกลม ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่รู้จักกันดีของเถ้าลอยที่เกิดขึ้นเมื่อสารหลอมเหลวแคลเซียม-อะลูมิโนซิลิเกตเย็นตัวลงขณะที่ถูกก๊าซฟองโฟมนำพา (ภาพที่ 2-10B และภาพที่ 2-11B) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาพที่ 2.13B แสดงให้เห็นพลีโรสเฟียร์ (Plerosphere) ซึ่งเป็นทรงกลมกลวงที่มีผนังหลายชั้นและบรรจุทรงกลมเล็กๆ อยู่ข้างใน มีปรากฏการณ์ที่น่าสนใจเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคดินเหนียวบางส่วนแทรกซึมเข้าสู่พื้นที่ภายในของพลีโรสเฟียร์ผ่านบริเวณที่ผนังแตกออก ดังที่แสดงในส่วนบนขวาของภาพที่ 2-10B บริเวณอื่น ๆ ของภาพจุลทรรศน์ในตัวอย่างดิน Hollywood ที่ได้รับการปรับเสถียรแสดงลักษณะคล้ายกันกับในภาพที่ 2-11B



ภาพที่ 2-12 ภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างเถ้า (Lin, et al.,2013)



ภาพที่ 2-13 ภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างดิน Hollywood : (A)ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ, (B)ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าลอย 9% (Lin, et al., 2013)

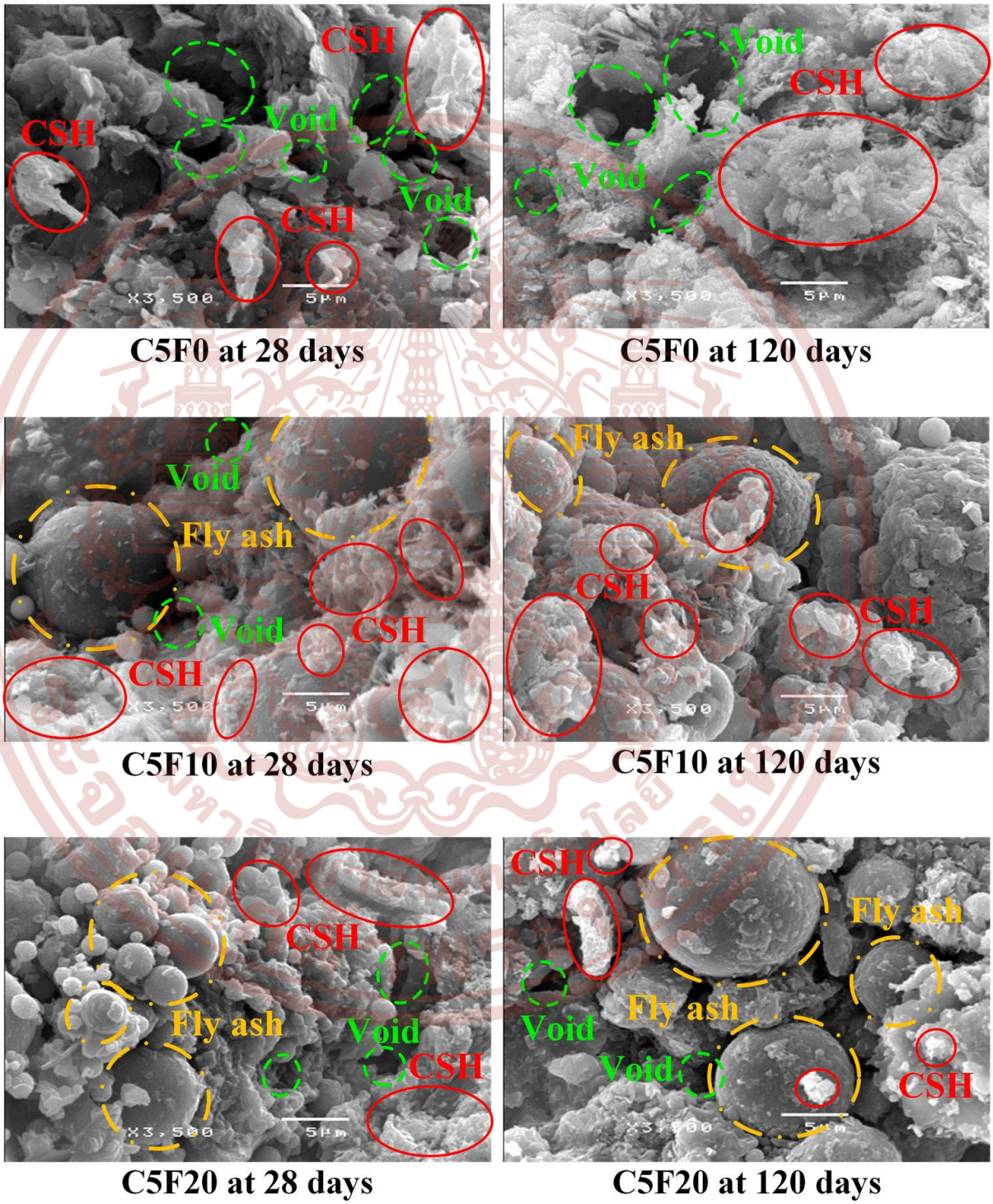


ภาพที่ 2-14 ภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างดิน Heiden : (A)ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ, (B)ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าลอย 9% (Lin, et al., 2013)

ภาพที่ 2-15 แสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคในตัวอย่าง C5F0, C5F10 และ C5F20 หลังจากการบ่มเป็นเวลา 28 วัน พบผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน รวมถึงCSHเจลในตัวอย่าง C5F0 และสังเกตได้ว่าพื้นผิวของตัวอย่างมีความขรุขระ แต่ยังพบช่องว่างระหว่างอนุภาคตะกอนบางส่วน หลังจากการบ่มเป็นเวลา 120 วัน ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาปอซโซลานิก เช่น ผลิตภัณฑ์ CSH ที่เพิ่มขึ้น ก่อตัวเป็นชั้นเคลือบบนกลุ่มตะกอนและเติมเต็มช่องว่าง ส่งผลให้โครงสร้างตะกอนหนาแน่นขึ้นและเพิ่มความแข็งแรงในการยึดเกาะระหว่างกลุ่มตะกอน

สำหรับภาพ SEM ของ C5F10 และ C5F20 ตรวจพบอนุภาค FA สามรูปแบบ ได้แก่ อนุภาค FA ที่มีพื้นผิวกรดกัดเซาะ, อนุภาค FA ที่มีพื้นผิวเรียบ และอนุภาค FA ที่มีเปลือกเคลือบด้วยผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอซโซลานิก รูปแบบแรกแสดงถึงการเกิดผลึกจากปฏิกิริยาปอซ

โซลานิก รูปแบบที่สองแสดงถึงอนุภาค FA ที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการเติมเต็มช่องว่าง รูปแบบที่สามแสดงถึงการมีอยู่ของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเคมีรอบ ๆ อนุภาค FA



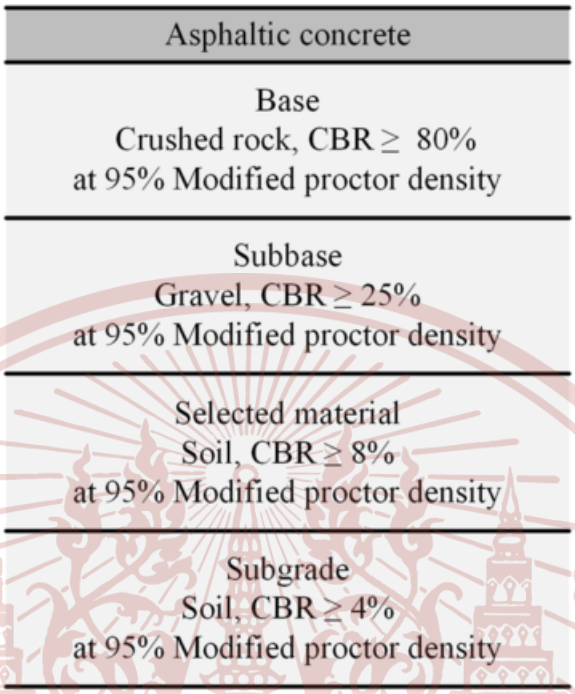
ภาพที่ 2.15 ภาพถ่าย SEMของตัวอย่างตะกอนขุดลอกที่ถูกทำให้เสถียร (Jamsawang, et al., 2020)

2.5 การพิจารณาดินเพื่อใช้เป็นวัสดุทาง

โครงสร้างโดยทั่วไปของงานทางจะประกอบไปด้วยวัสดุทาง 4 ชนิด ได้แก่ วัสดุถมคันทาง (Embankment material) วัสดุคัดเลือก (Selected material) วัสดุชั้นรองพื้นทาง (Subbase) วัสดุชั้นพื้นทาง (Base) ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดจะถูกเลือกใช้งานตามความเหมาะสมในด้านคุณสมบัติต่าง ๆ เช่น ขนาดคละความแข็งแรง และความคงทน เป็นต้น เพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานทางวิศวกรรม ที่ถูกกำหนดดังตารางที่ 2-5 ซึ่งการคัดเลือกวัสดุต่าง ๆ ในปัจจุบันให้มีคุณสมบัติตรงตามมาตรฐาน ทางวิศวกรรมในบางพื้นที่เต็มไปด้วยความยากลำบากดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพดินจึงถูกนำมาใช้ทดแทนโดยการปรับปรุงคุณภาพดินในปัจจุบันสามารถประยุกต์ปรับใช้ได้หลากหลายมากขึ้นอยู่กับการพิจารณาตามความเหมาะสมในการก่อสร้าง

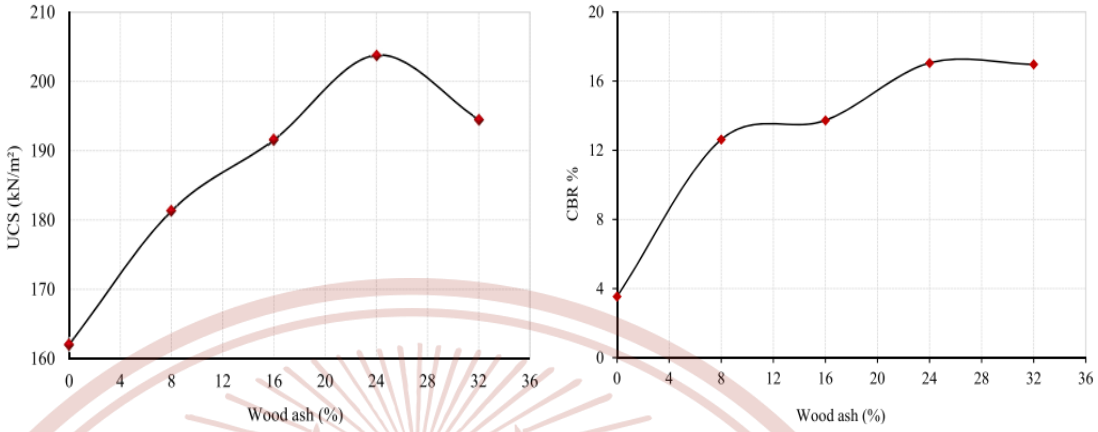
ตารางที่ 2-5 ข้อกำหนดของวัสดุทางตามมาตรฐานกรมทางหลวง

ชั้นพื้นทาง	คุณสมบัติของวัสดุ ที่ไม่ถูกปรับปรุงด้วยซีเมนต์
วัสดุชั้นพื้นทาง	ต้องมีค่ากำลังรับแรงแบกทาน มากกว่า 80% ที่ 95% ของการบด อัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน
วัสดุชั้นรองพื้นทาง	ต้องมีค่ากำลังรับแรงแบกทาน มากกว่า 25% ที่ 95% ของการบด อัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน
วัสดุคัดเลือก	ต้องมีค่ากำลังรับแรงแบกทาน มากกว่า 8% ที่ 95% ของการบดอัด แบบสูงกว่ามาตรฐาน
วัสดุถมคันทาง	ต้องมีค่ากำลังรับแรงแบกทาน มากกว่า 4% ที่ 95% ของการบดอัด แบบสูงกว่ามาตรฐาน



ภาพที่ 2-16 โครงสร้างถนนลาดยางที่ใช้วัสดุธรรมชาติเป็นวัสดุทาง

การพิจารณาดินเหนียวปรับเสถียรภาพเพื่อใช้เป็นวัสดุผิวทางแสดงในภาพที่ 2-16 มีข้อควรสังเกตว่าเมื่อใช้เถ้าไม้ในปริมาณตั้งแต่ ร้อยละ 3ขึ้นไป ดินเหนียวจะเหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุผิวทางเพราะค่า กำลังอัดแบบไม่ถูกจำกัด และ CBR สูงกว่าข้อกำหนดตามมาตรฐานขั้นต่ำ สำหรับดินเหนียวที่ปรับเสถียรภาพด้วยเถ้าไม้ในปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 32 ขึ้นไป พบว่าค่ากำลังอัดแบบไม่ถูกจำกัด และ CBR เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนดแต่ค่ากำลังอัดแบบไม่ถูกจำกัดและ CBR เริ่มมีกำลังที่ลดลง จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ การปรับเสถียรภาพดินเหนียวด้วยเถ้าไม้สามารถปรับปรุงดินเหนียวให้ใช้เป็นวัสดุคัดเลือกได้โดยมีปริมาณร้อยละของเถ้าไม้ที่แนะนำที่ 4 ถึง 24 ขณะที่ ฝุ่นเตาเผาซีเมนต์ สามารถปรับปรุงตะกอนเป็นวัสดุถมคันทางได้ มีศักยภาพเพื่อใช้เป็นสารปรับเสถียรภาพวัสดุผิวทางสำหรับงานถนนสอดคล้องกับข้อมูลของ Blayi, et al., 2024) ที่แสดงให้เห็นว่าเถ้าไม้มีประสิทธิภาพในการใช้เป็นสารปรับเสถียรภาพเพื่อปรับปรุงดินในโครงการก่อสร้างถนนนอกจากวัสดุผิวทางที่ปรับเสถียรภาพด้วย



ก ข

ภาพที่ 2-17 การปรับปรุงคุณภาพชั้นพื้นทางด้วยเถ้าไม้ที่อัตราส่วนต่างๆ (ก) ค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด, (ข) ค่าCBR (Blayi, et al., 2024)

บทที่ 3

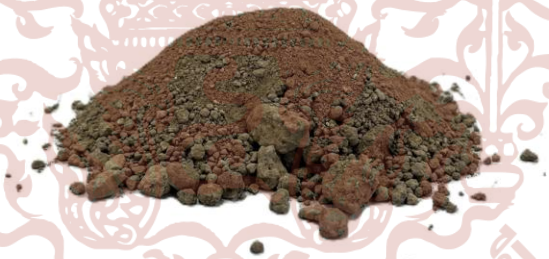
การดำเนินงานวิจัย

ในส่วนนี้จะแสดงรายละเอียด และขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่นเพื่อให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานด้านงานทางวิศวกรรมโยธา เช่น วัสดุถมคันทาง และวัสดุพื้นทางหรือรองพื้นทาง โดยการนำดิน ,เถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่นในอัตราส่วนที่เหมาะสม เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ต้องการตามมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบท มทช.201/2545 สำหรับวัสดุถมคันทาง

3.1 การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุ

ตัวอย่างวัสดุจำเป็นต้องมีการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของดิน เพื่อใช้ในจำแนกชนิดและพฤติกรรมของวัสดุ ซึ่งมีการทดสอบดังนี้

3.1.1 Grain size distribution ASTM D6913 เพื่อหาการกระจายขนาดของดินเหนียว, เถ้าไม้ยูคาลิปตัส และหินฝุ่น ก่อนได้รับการปรับปรุงคุณภาพ ดังภาพที่ 3-1



(ก) ดินเหนียว



(ข) หินฝุ่น

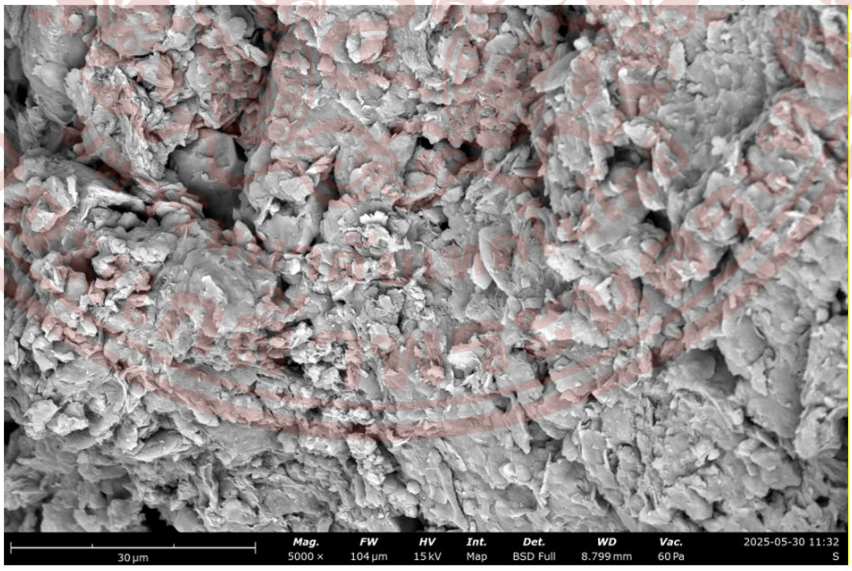
ภาพที่ 3-1 วัสดุที่ใช้ทดสอบ



(ค) เถ้าไม้ยูคาลิปตัส

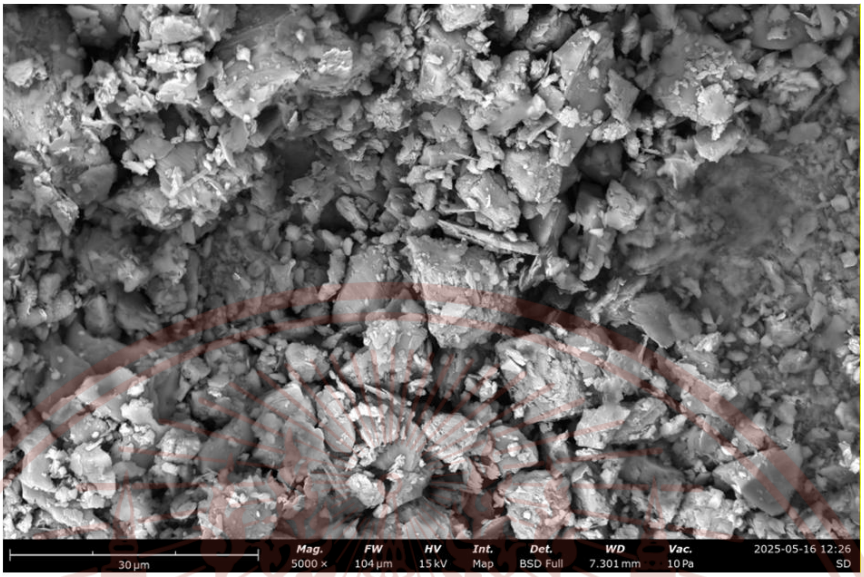
ภาพที่ 3-1 (ต่อ)

จากภาพที่ 3-2 แสดงภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของวัสดุที่ใช้ในการวิจัยที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงให้เห็นลักษณะของโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ พบว่าอนุภาคของดินเหนียวมีลักษณะการเรียงตัวที่แน่นทึบ โดยมีลักษณะของอนุภาคที่เป็นแผ่นบางๆ ซ้อนทับกันเป็นชั้นๆ อนุภาคของหินฝุ่นประกอบด้วยอนุภาคที่มีความแข็งและเป็นเหลี่ยมมุมที่ชัดเจน พื้นผิวขรุขระและขนาดอนุภาคไม่สม่ำเสมอ มีช่องว่างระหว่างอนุภาคปรากฏให้เห็น ในขณะที่อนุภาคของเถ้าไม้ยูคาลิปตัสมีลักษณะเป็นก้อนที่มีรูพรุนสูงและรูปร่างไม่แน่นอน โดยมีการเกาะตัวของอนุภาคแบบหลวมๆ และมีเนื้อสัมผัสที่ดูร่วนซุย การสังเกตโครงสร้างจุลภาคเหล่านี้ช่วยให้เข้าใจลักษณะทางกายภาพของวัสดุได้

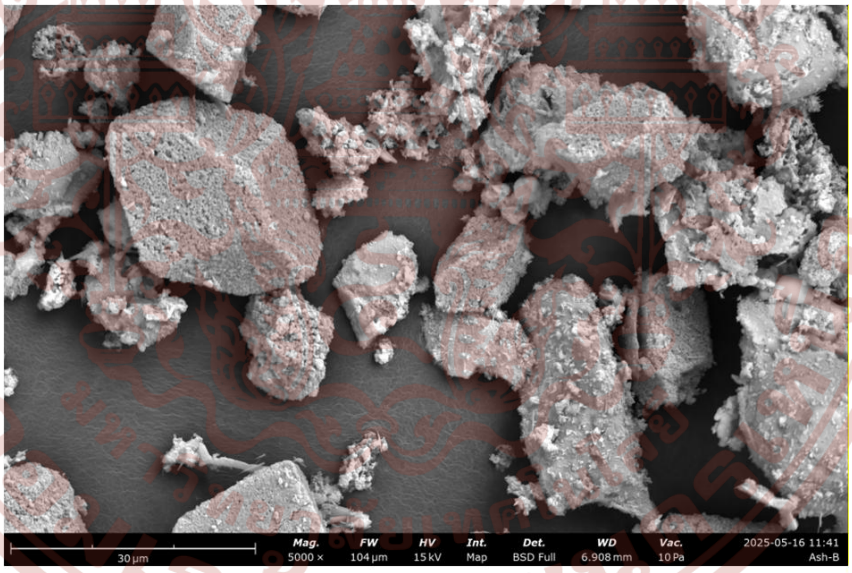


(ก) ดินเหนียว

ภาพที่ 3-2 ภาพถ่าย SEM ของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

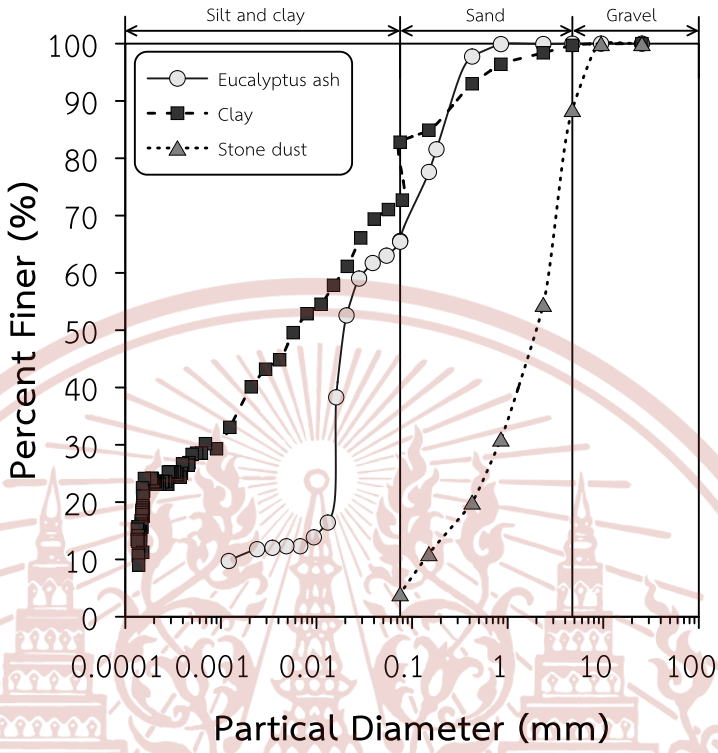


(ข) หินฝุ่น



(ค) เถ้าไม้ยูคาลิปตัส

ภาพที่ 3-2 (ต่อ)



ภาพที่ 3-3 แสดงถึงการกระจายตัวของดิน,หินฝุ่นและเถ้าไม้ยูคาลิปตัส

3.1.2 การหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และความหนาแน่นแห้งสูงสุด

ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดได้จากการทดสอบการ บดอัดดินสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction test) ตามมาตรฐาน ASTM D1557 เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นของดินโดยมีข้อกำหนด ดังตารางที่ 3-1 ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้การทดสอบการบดอัดดินสูงกว่ามาตรฐานวิธี A และ C

ตารางที่ 3-1 ข้อกำหนดในการทดสอบการบดอัดดินสูงกว่ามาตรฐาน

รายการ	**วิธี A**	**วิธี C**
ขนาดของโมล	101.6 มม	152.4 มม
ปริมาตรของโมล	943.3 ซม^3	2124 ซม^3
น้ำหนักค้อน	44.5 นิวตัน	44.5 นิวตัน
ความสูงในการตกกระทบของค้อน	457.2 มม	457.2 มม
จำนวนครั้งในการบดอัด	25	56
จำนวนชั้นในการบดอัด	5	5
พลังงานในการบดอัด	2696 kN-m/m^3	2696 kN-m/m^3
ดินที่ใช้ในการบดอัด	ดินผ่านตะแกรงเบอร์ 4	ดินผ่านตะแกรงขนาด 19 มม.

3.1.3 การทดสอบขีดจำกัดอัตเตอร์เบิรก์ (Atterberg limits) ตามมาตรฐาน ASTM D4318 เพื่อการทดสอบหาค่าพิกัดเหลว (Liquid limit) และพิกัดพลาสติก (Plastic limit) และดัชนีความเหนียวของดิน (Plastic index) ของดินก่อนและหลังได้รับการปรับปรุงคุณภาพ

3.1.4 Specific gravity ตามมาตรฐาน ASTM D854 เพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะของดินเหนียวอ่อน, หินฝุ่น และเถ้าไม้ยูคาลิปตัสที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.5 California bearing ratio (CBR) test ตามมาตรฐาน ASTM D1883 เพื่อหาค่า CBR ของวัสดุชั้นทาง การทดสอบ CBR มักใช้ในขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างของผิวทางที่มีความยืดหยุ่น ในการทดสอบ CBR ชิ้นงานจะถูกบดอัดในโมลมาตรฐานโดยมีการบดอัดที่สอดคล้องกับการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ใน 1 อัตราส่วนผสมที่กำหนดไว้จะเตรียมตัวอย่างจำนวน 3 ตัวอย่าง ตัวอย่างแต่ละอัตราส่วนผสมจะถูกทดสอบหลังจากแช่ในน้ำเป็นเวลา 4 วัน (96 ชั่วโมง) สภาพแช่น้ำจำลองพฤติกรรมของชั้นคันทาง (Subgrade) หรือชั้นรองพื้นทาง (Subbase) ภายใต้น้ำฝนหรือสถานการณ์น้ำท่วม ค่า CBR จะได้รับโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างแรงกด และระยะจมที่อัตราการกดที่ 1.27 มิลลิเมตร/นาที การทดสอบ CBR จะดำเนินการกับตัวอย่างดินที่เตรียมในโมลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร และความสูง 125 มิลลิเมตร

3.1.6 Consolidation Test (Oedometer) ตามมาตรฐาน ASTM D2435 เพื่อหาค่าพารามิเตอร์หลักที่บ่งบอกพฤติกรรมการยุบตัวของดินเหนียวภายใต้แรงกดในแนวดิ่ง ได้แก่ ดัชนีการอัดตัว(C_c), ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนปริมาตร (mv), ค่าสัมประสิทธิ์การทรุดตัว (C_v) และ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (k) โดยการทดสอบนี้ใช้ ตัวอย่างดินที่เตรียมโดยการอัดแน่นให้มีค่าความชื้นที่เหมาะสม (OMC) และความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) ตามผลการทดสอบ Compaction test ตามมาตรฐาน

3.1.7 การทดลองหากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินเป็นการทดสอบหากำลังต้านแรงเฉือนของตัวอย่างดินตามมาตรฐาน ASTM D3080 โดยขั้นตอนการทดสอบนำตัวอย่างดินที่อัตราส่วนต่างๆมาผสมและอัดลงแบบทดสอบและนำไปติดตั้งในเครื่องทดสอบ Direct shear test ในการทดสอบนี้จะทำการทดสอบในกรณีที่ตัวอย่างมีสภาวะอิ่มตัวของน้ำโดยการแช่ในน้ำในสภาวะที่มีแรงกระทำในแนวดิ่งตลอดเวลาเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นเริ่มทำการเฉือนตัวอย่างดินโดยการใช้มอเตอร์ ด้วยความเร็วอย่างสม่ำเสมอ

3.1.8 Scanning Electron Microscope (SEM) เพื่อศึกษาลักษณะของพื้นผิวและอนุภาค ความพรุน และลักษณะของช่องว่างก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพ

ตารางที่ 3-2 แสดงถึงคุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียว, หินฝุ่นและเถ้าไม้ยูคาลิปตัส

คุณสมบัติทั่วไป	ดินเหนียว	หินฝุ่น	เถ้าไม้ยูคาลิปตัส
Specific gravity	2.65	2.74	2.23
Maximum dry density (kN/m^3)	18.84	21.97	14.52
Optimum moisture content (%)	10.80	6.20	24.80
Coefficient of uniformity, C_u	-	17.69	24.62
Coefficient of curvature, C_c	-	2.42	6.15
Liquid limit (%)	31	-	-
Plastic limit (%)	20	-	-
Plastic index (%)	10	-	-
Unified soil classification	CL	SW	SM

3.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบ

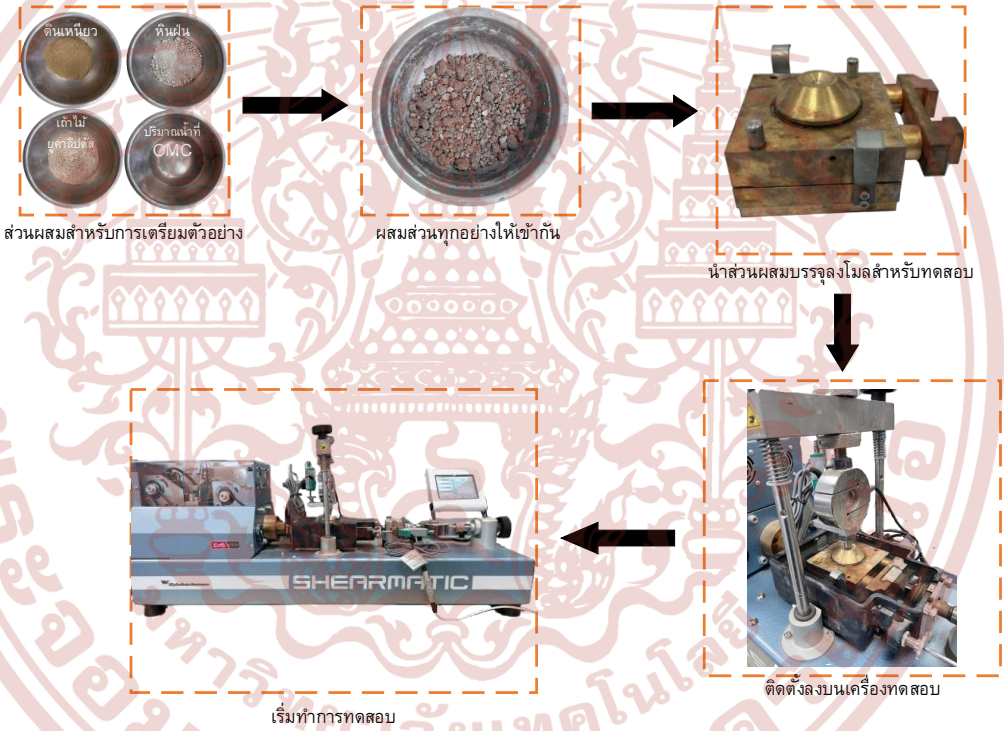
ในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบในส่วนนี้ประกอบด้วยตัวอย่างการทดสอบ California bearing ratio (CBR), Direct shear test และ Consolidation test การเตรียมตัวอย่างดินจะทำการผสมดิน,หินฝุ่นและเถ้าไม้ยูคาลิปตัสให้เข้ากัน และจึงใส่น้ำตามสัดส่วนต่างๆที่ได้ออกแบบไว้ ในส่วนของ California bearing ratio (CBR) จะทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1883 ให้ค่าบวมตัวของตัวอย่างการทดสอบไม่เกิน 4% และค่าCBRต้องไม่น้อยกว่า 4% ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง มทช.201/2545 สำหรับวัสดุถมคันทาง ในส่วนของ Shear stress test และ Consolidation test การเตรียมตัวอย่างดินจะทำการผสมดิน,หินฝุ่นและเถ้าไม้ให้เข้ากัน และจึงใส่น้ำตามสัดส่วนต่างๆ ที่ได้ออกแบบไว้โดยที่ดินที่ถูกผสมจะต้องใช้ในการเตรียมตัวอย่างทั้งหมดเพื่อเป็นการควบคุมความหนาแน่นของตัวอย่าง

ตารางที่ 3-3 แสดงอัตราส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบ

สัญลักษณ์	ปริมาณดินเหนียว (CL) (%)	ปริมาณเถ้าไม้ยูคาลิปตัส (A) (%)	ปริมาณหินฝุ่น(S) (%)
Soil	100	0	
CL90W10	90	10	
CL80W20	80	20	
CL70W30	70	30	0
CL60W40	60	40	
CL50W50	50	50	
CL90S10	90		10
CL80S20	80		20
CL70S30	70	0	30
CL60S40	60		40
CL50S50	50		50
CL50W5S45		5	45
CL50W10S40		10	40
CL50W15S35		15	35
CL50W20S30	50	20	30
CL50W25S25		25	25
CL50W30S20		30	20
CL45W5S50	45	5	
CL40W10S50	40	10	
CL35W15S50	35	15	
CL30W20S50	30	20	50
CL25W25S50	25	25	
CL20W30S50	20	30	

3.2.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ Direct Shear Test

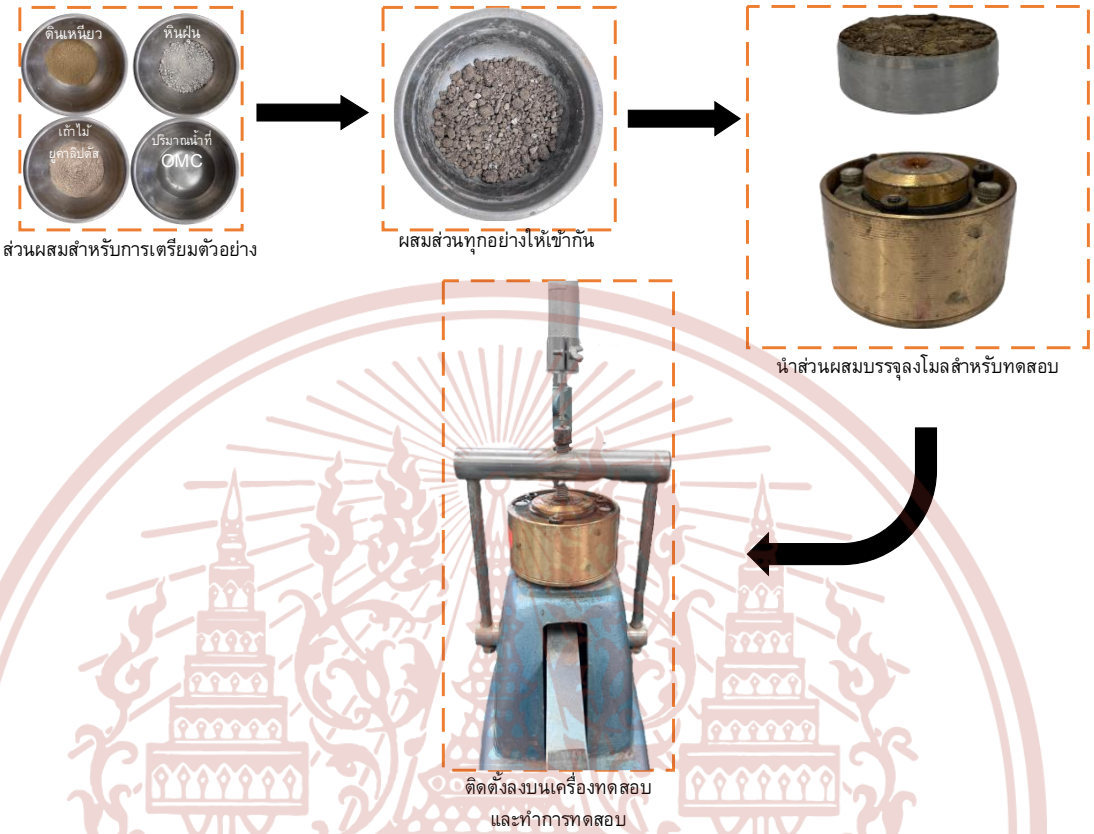
ตัวอย่างจะถูกเตรียมด้วยความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่กำหนดโดยการทดสอบการบดอัดดินสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction test) ตามมาตรฐาน ASTM D3080 ในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างจะทำการผสมดินเหนียวกับหินฝุ่นและเถ้าไม้ยูคาลิปตัส ในอัตราส่วนผสมต่างๆตามตารางที่ 3-4 ให้เข้ากัน แล้วจึงผสมน้ำที่ปริมาณน้ำเหมาะสม (Optimum Moisture Content : OMC) เมื่อคลุกเคล้าให้เข้ากันแล้ว นำไปบรรจุลงในแบบทดสอบ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 มม. และสูง 26 มม. จากนั้นทำการติดตั้งตัวอย่างเข้าเครื่องทดสอบและทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3080M ดังภาพที่ 3-3



ภาพที่ 3-4 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบ Direct Shear Test

3.2.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับสำหรับการทดสอบ Consolidation Test

ตัวอย่างจะถูกเตรียมด้วยความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่กำหนดโดยการทดสอบการบดอัดดินสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction test) ตามมาตรฐาน ASTM D1557-12(2021) ในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างจะทำการผสมดินเหนียวกับหินฝุ่นและเถ้าไม้ยูคาลิปตัส ในอัตราส่วนผสมต่างๆตามตารางที่ 3-4 ให้เข้ากัน แล้วจึงผสมน้ำที่ปริมาณน้ำเหมาะสม (Optimum Moisture Content : OMC) เมื่อคลุกเคล้าให้เข้ากันแล้ว นำไปบรรจุลงในแบบทดสอบ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 มม. และสูง 26 มม. จากนั้นทำการติดตั้งตัวอย่างเข้าเครื่องทดสอบ เพื่อรอดำเนินการทดสอบต่างๆ ดังภาพที่ 3-4



ภาพที่ 3-5 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบ Consolidation Test

3.2.3 การเตรียมตัวอย่างสำหรับสำหรับการทดสอบ California Bearing Ratio (CBR)

ตัวอย่างจะถูกเตรียมด้วยความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่กำหนดโดยการทดสอบการบดอัดดินสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction test) ในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างจะปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D1883-21 โดยทำการผสมดินเหนียวกับหินฝุ่นและเถ้าไม้ยูคาลิปตัส ในอัตราส่วนต่างๆตามตารางที่ 3-3 ให้เข้ากัน แล้วจึงผสมน้ำที่ปริมาณน้ำเหมาะสม เมื่อคลุกเคล้าให้เข้ากันแล้ว นำไปบรรจุลงในโมลทรงกระบอกซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว ความสูง 7 นิ้ว ประกอบเข้ากับ Base plate และ Spacer (Ø 6 นิ้ว หนา 2 นิ้ว) ในการบดอัดจะทำการบดอัดทั้งหมด 5 ชั้น เมื่อทำการบดอัดตามจำนวนชั้นและจำนวนครั้งเรียบร้อยแล้วจึงถอด Spacer ออก แล้วทำการปาดหน้าดินที่เกินขอบโมลให้เรียบสม่ำเสมอ จากนั้นนำโมลและดินไปชั่งน้ำหนักเพื่อจะหาค่าความหนาแน่นเปียก (Wet Density) แสดงดังภาพที่ 3-5



ภาพที่ 3-6 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบ CBR

3.2.4 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ Scanning Electron Microscope (SEM)

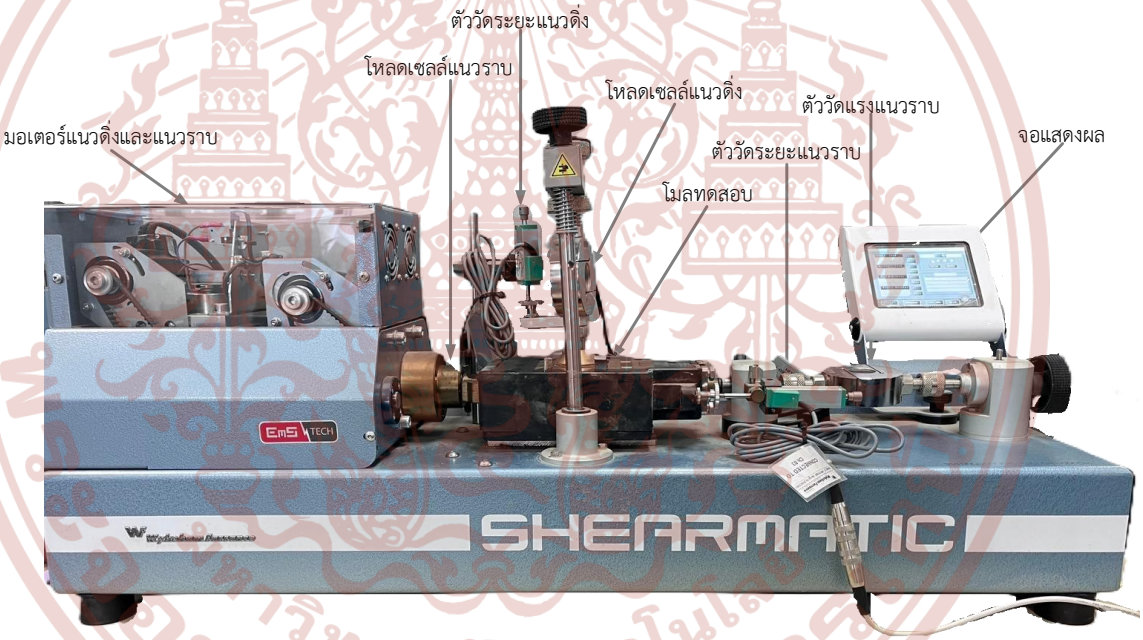
เมื่อนำก้อนตัวอย่างทำการทดสอบ Direct Shear เสร็จสิ้น จะทำการเก็บตัวอย่างตามอัตราส่วนผสมต่างๆ ไปดูดซับความชื้นด้วยซิลิก้าเจล (Silica Gel) สำหรับตัวอย่างทดสอบ SEM จะเลือกเก็บตัวอย่างขนาดประมาณ 3-4 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 3-7



ภาพที่ 3-7 ตัวอย่างการเตรียมการทดสอบ SEM

3.3 การทดลองหากำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน (Direct shear test)

การทดลองหากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินเป็นการทดสอบหากำลังต้านแรงเฉือนของตัวอย่างดินตามมาตรฐาน D3080M-23 โดยขั้นตอนการทดสอบนำตัวอย่างดินที่อัตราส่วนต่างๆมาผสมและอัดลงแบบทดสอบและนำไปติดตั้งในเครื่องทดสอบDirect Shear Test ในการทดสอบนี้จะทำการทดสอบในกรณีที่ตัวอย่างมีสภาวะอิ่มตัวของน้ำโดยการแช่ในน้ำในสภาวะที่มีแรงกระทำในแนวดิ่งตลอดเวลาเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นเริ่มทำการเฉือนตัวอย่างดินโดยการใช้มอเตอร์โดยทั่วไปจะใช้อัตราการเคลื่อนที่ตามแนวราบด้วยความเร็ว 1.27 มิลลิเมตรต่อนาที ถึง 0.25 มิลลิเมตรต่อนาที(0.05 นิ้วต่อนาที ถึง 0.01 นิ้วต่อนาที) อย่างสม่ำเสมอ โดยใช้เครื่อง Automatic Shear Testing Machine SHEAR MATIC EmS

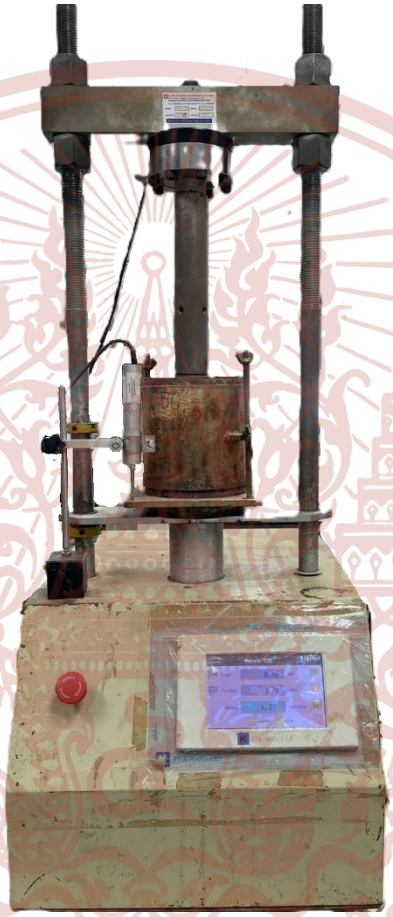


ภาพที่ 3-8 เครื่องมือทดสอบ Direct shear test

3.4 การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงแบกทาน (California Bearing Ratio, CBR)

การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงแบกทานเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D1883-21 เพื่อหาค่า CBR ของวัสดุชั้นทาง การทดสอบ CBR มักใช้ในขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างของผิวทางที่มีความยืดหยุ่น ในการทดสอบ CBR ชิ้นงานจะถูกบดอัดในโมลมาตรฐานโดยมีการบดอัดที่สอดคล้องกับการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ใน 1 อัตราส่วนผสมที่กำหนดไว้จะเตรียมตัวอย่างจำนวน 3 ตัวอย่าง ตัวอย่างแต่ละอัตราส่วนผสมจะถูกทดสอบหลังจากแช่ในน้ำเป็นเวลา 4 วัน (96 ชั่วโมง) สภาพแช่น้ำจำลองพฤติกรรมของชั้นคันทาง (Sub grade) หรือชั้นรองพื้นทาง (Sub base) ภายใต้น้ำฝนหรือ

สถานการณ์น้ำท่วม ค่า CBR จะได้รับโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างแรงกด และระยะจมที่อัตราการกดที่ 1.25 มิลลิเมตร/นาที การทดสอบ CBR จะดำเนินการกับตัวอย่างดินที่เตรียมในโมลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร และความสูง 125 มิลลิเมตร



ภาพที่ 3-9 เครื่องมือทดสอบ CBR

3.5 การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test)

การทดสอบการอัดตัวคายน้ำเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D2435 โดยตัวอย่างดินที่ได้จากขั้นตอน 3.2.2 เมื่อตัวอย่างดินถูกนำเข้าแบบทดสอบแล้ว ดังภาพที่ 3-8 และใช้เหล็กมาวางไว้บนแท่นวางน้ำหนักให้ได้แรงที่กระทำต่อพื้นที่ที่ต้องการ และทำการทดสอบด้วยเครื่อง Consolidation Test แบบLever arm โดยจะใส่น้ำหนัก1ค่าเป็นเวลา24ชั่วโมง หลังจากครบ24ชั่วโมงเปลี่ยนน้ำหนักเป็น 2 เท่าของน้ำหนักแรก



ภาพที่ 3-10 การทดสอบ Consolidation test

3.6 การศึกษาด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)

การศึกษาด้วย SEM เป็นการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาพของอนุภาคดินด้วยการใช้เทคนิคทางภาพถ่าย เป็นที่นิยมและมีการยอมรับอย่างแพร่หลายในงานวิจัยต่างๆ เทคนิคการวิเคราะห์ด้วย SEM สามารถยืนยัน และเพิ่มความเชื่อมั่นให้กับผลการทดสอบได้ โดยแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของดินมีอิทธิพลโดยตรงต่อโครงสร้างระดับจุลภาค ในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่การเปลี่ยนแปลงของช่องว่างภายในอนุภาคดิน (Pore size) และการเรียงตัวของอนุภาคดินตะกอนก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ ในขั้นตอนการทดสอบเลือกตัวอย่างจากระนาบการวิบัติหลังจากการทดสอบ Direct Shear Test แล้วทำให้แห้งด้วยการใช้ซิลิกาเจลในการดูดความชื้น หลังจากนั้นตัวอย่างจะถูกเคลือบด้วยทองคำขาวเป็นเวลา 30 วินาทีที่กระแส 50 mA ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการส่องด้วยอิเล็กตรอน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน Do Do JSM-5410 LV

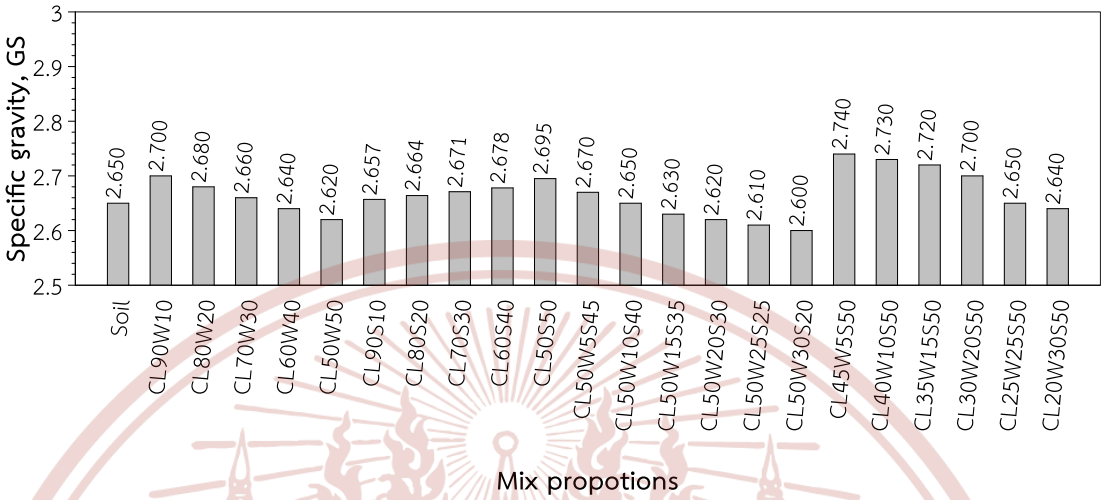
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าพระนครเหนือ

บทที่ 4
ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

เนื้อหาในบทนี้เกี่ยวกับผลการวิจัย และวิเคราะห์ผล โดยการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ในส่วนแรกแสดงถึงผลการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของดินเหนียวปรับปรุงคุณภาพด้วยหินฝุ่นและเถ้าไม้ยูคาลิปตัส ได้แก่ ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะ, ผลการทดสอบ Atterberg limits, ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงแบกทาน, ผลการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง และผลการอัดตัวคายน้ำ ในส่วนที่สองกล่าวถึงการศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางจุลภาพของตะกอนดินขุดปรับปรุงคุณภาพ ได้แก่ การศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาพของดินด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

4.1 ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะ

ภาพที่ 4-1 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยหินฝุ่นและเถ้าไม้ยูคาลิปตัส ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่นต่อค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity, GS) ของดินเหนียว โดยค่า GS ของดินเหนียวตั้งต้นอยู่ที่ 2.660 การเปลี่ยนแปลงที่สังเกตได้ในส่วนผสมต่างๆ สามารถอธิบายได้โดยอาศัยคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุเติมแต่งแต่ละชนิด จากการศึกษาพบว่าเถ้าไม้เป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าดินเหนียว ในขณะที่หินฝุ่นมีคุณสมบัติเป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นสูงกว่าปัจจัยเหล่านี้ส่งผลโดยตรงต่อแนวโน้มในกราฟ โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนของเถ้าไม้ยูคาลิปตัสในดินเหนียว ค่าความถ่วงจำเพาะของส่วนผสมมีแนวโน้มโดยรวมที่ลดลงเมื่อมีปริมาณเถ้าไม้ยูคาลิปตัสสูงขึ้น การลดลงของค่าความถ่วงจำเพาะนี้สามารถอธิบายได้จากการแทนที่อนุภาคดินซึ่งมีน้ำหนักมากกว่าด้วยอนุภาคเถ้าไม้ที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า (Blayi, et al., 2024; Nath, et al.,2018) ในทางตรงกันข้ามการเติมหินฝุ่นในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะของส่วนผสมสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จาก 2.620 ที่ CL90S10 ไปจนถึง 2.678 ที่ CL50S50 ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของหินฝุ่นที่เป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นสูง สำหรับส่วนผสมสามชนิด (CL-W-S) ค่า GS จะถูกควบคุมโดยอัตราส่วนของวัสดุทั้งสาม โดยส่วนผสมที่มีสัดส่วนหินฝุ่นสูงที่สุดคือ CL45W5S50 แสดงค่า GS สูงที่สุดที่ 2.740 ซึ่งตอกย้ำอิทธิพลของหินฝุ่นในการเพิ่มความหนาแน่นโดยรวมของส่วนผสม ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงค่าความถ่วงจำเพาะที่สังเกตได้ในกราฟจึงเป็นผลโดยตรงจากหลักการแทนที่เชิงปริมาตรและคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุแต่ละชนิด ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมปฐพี เนื่องจากค่าความถ่วงจำเพาะนี้จะส่งผลต่อเนื่องไปยังคุณสมบัติด้านการบดอัดและความหนาแน่นของดินที่ปรับปรุงแล้ว



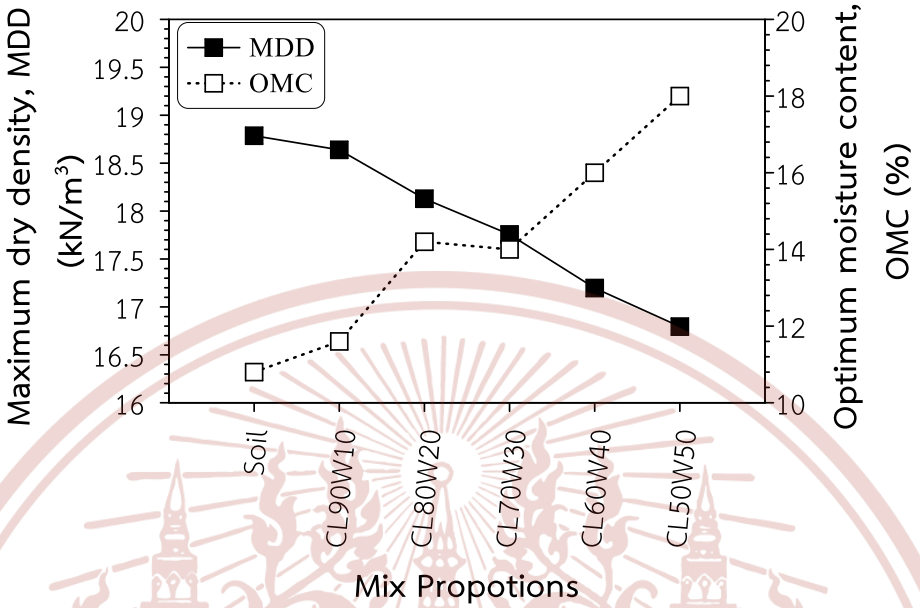
ภาพที่ 4-1 ค่าความถ่วงจำเพาะของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยหินฝุ่นและเถ้าไม้ยูคาลิปตัส

4.2 ผลการทดสอบการบดอัด (Compaction test)

การทดสอบการบดอัดเป็นการทดสอบพื้นฐานที่ใช้ในการประเมินพฤติกรรมของดินภายใต้การเพิ่มพลังงานการบดอัด เพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density: MDD) และค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content: OMC) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้สภาวะการบดอัดที่ให้ความหนาแน่นของดินสูงสุด การทดสอบนี้มีความสำคัญต่อการออกแบบและควบคุมคุณภาพวัสดุในงานทางวิศวกรรมโยธา เพื่อศึกษาผลของการผสมเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่นในสัดส่วนต่าง ๆ ต่อคุณสมบัติการบดอัดของดินเหนียว โดยมุ่งเน้นให้เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของ MDD และ OMC เมื่อปริมาณวัสดุผสมเปลี่ยนไป

4.2.1 ผลการทดสอบการบดอัดของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสที่อัตราส่วนต่างๆ

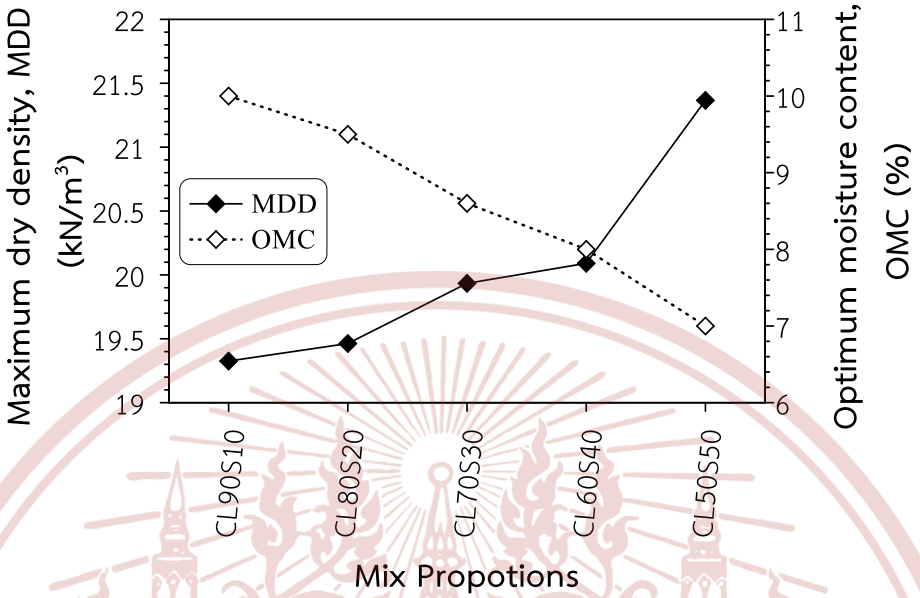
จากภาพที่ 4-2 แสดงค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณน้ำที่เหมาะสมของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัส พบว่าค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมเพิ่มสูงขึ้น การลดลงของ MDD เกิดขึ้นเนื่องจากเถ้ามีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าอนุภาคดิน ทำให้เมื่อแทนที่มวลดินที่หนักกว่าด้วยเถ้าที่เบากว่า จึงส่งผลโดยตรงให้น้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรของส่วนผสมลดลง (Barišić, et al., 2022; Cabalar, et al., 2024) สำหรับค่า OMC ที่เพิ่มสูงขึ้นนั้น มีสาเหตุมาจากอนุภาคเถ้ามีขนาดละเอียดและมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าดินเหนียวจึงต้องการปริมาณน้ำมากขึ้นเพื่อเคลือบผิวอนุภาคและทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นระหว่างการบดอัด (Somadas and Sarvade, 2024; Barišić, et al., 2022) นอกจากนี้ ปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) ที่เกิดขึ้นยังจำเป็นต้องใช้น้ำในกระบวนการเพื่อสร้างสารประกอบเชื่อมประสาน ซึ่งนำไปสู่การจับกลุ่มของอนุภาคดิน (Flocculation) ส่งผลให้โครงสร้างโดยรวมต้องการน้ำในระบบเพิ่มขึ้นเพื่อการจัดเรียงตัวที่ดีที่สุด (Somadas and Sarvade, 2024)



ภาพที่ 4-2 แสดงค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณน้ำที่เหมาะสมของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัส

4.2.2 ผลการทดสอบการบดอัดของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยหินฝุ่นที่อัตราส่วนต่างๆ

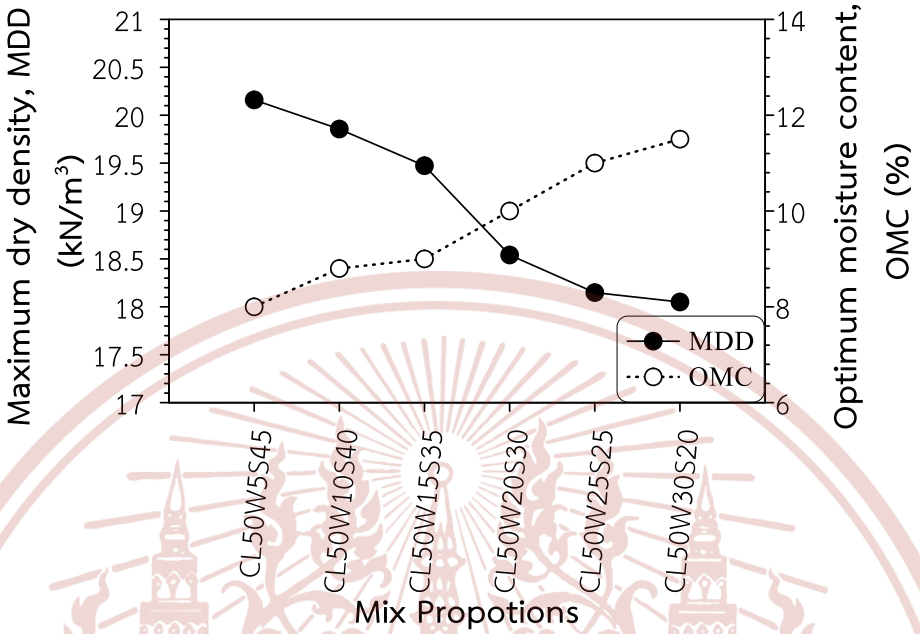
จากภาพที่ 4-3 แสดงค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณน้ำที่เหมาะสมของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยหินฝุ่น พบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนของหินฝุ่นค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมมีแนวโน้มลดลง ค่า MDD เพิ่มขึ้นเนื่องจากหินฝุ่นซึ่งทำหน้าที่เป็นโครงสร้างเม็ดหยาบภายในมวลดิน อนุภาคหินฝุ่นมีความถ่วงจำเพาะสูงและมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมได้เข้าไปแทรกตัวและเสริมสร้างการขัดตัว (Interlocking) ระหว่างอนุภาค ส่งผลให้การจัดเรียงตัวของอนุภาคภายใต้พลังงานการบดอัดเดียวกันมีความแน่นหนามากขึ้นและมีปริมาณช่องว่างอากาศ (Air voids) ลดลง จึงสามารถบดอัดได้ค่าความหนาแน่นแห้งที่สูงขึ้น (Cabalar และคณะ 2024) ในขณะเดียวกันค่า OMC ลดลงเนื่องจากการลดลงของความเป็นพลาสติกของส่วนผสมโดยรวม เมื่ออนุภาคหินฝุ่นซึ่งมีคุณสมบัติไม่เป็นพลาสติกเข้าไปแทนที่ดินเหนียว ความต้องการปริมาณน้ำเพื่อใช้เป็นสารหล่อลื่นในระหว่างการบดอัดจึงลดลงตามไปด้วย พฤติกรรมนี้มีความแตกต่างอย่างชัดเจนจากการใช้วัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าชีวมวลหรือเถ้าจากกากตะกอนน้ำเสีย ซึ่งมักจะทำให้ค่า OMC เพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคเถ้ามีความละเอียดและพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ทำให้ต้องการน้ำมากขึ้นสำหรับปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Somadas and Sarvade, 2024; Barišić, et al.,2022)



ภาพที่ 4-3 แสดงค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณน้ำที่เหมาะสมของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยหินฝุ่น

4.2.3 ผลการทดสอบการบดอัดของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่น โดยมีปริมาณของดินเหนียวคงที่ที่ 50%

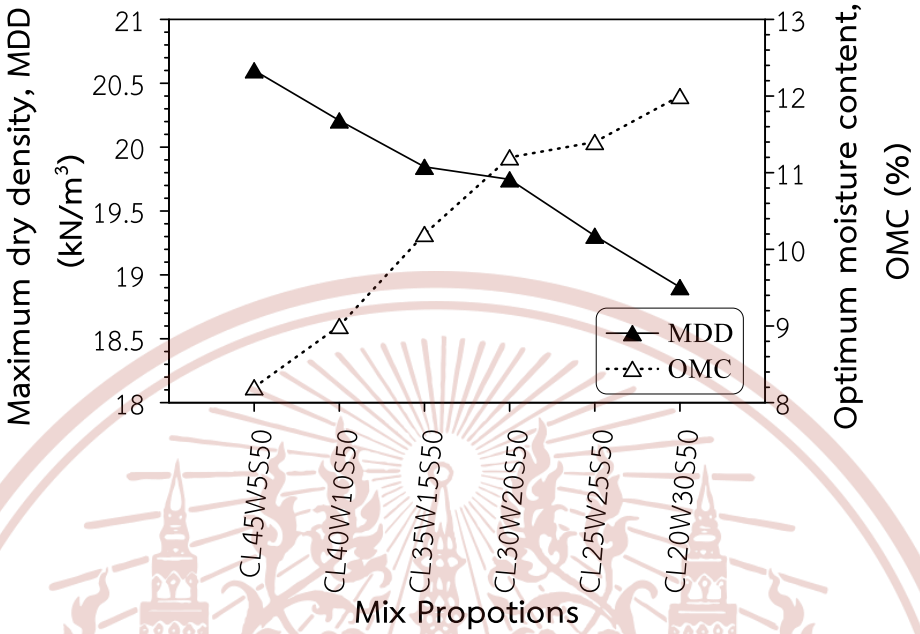
จากภาพที่ 4-4 แสดงค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของดินเหนียวที่ปรับปรุงด้วยหินฝุ่นและเถ้าไม้ยูคาลิปตัสโดยดินเหนียวคงที่ที่ 50% พบว่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมกลับเพิ่มสูงขึ้น ตามสัดส่วนของวัสดุปรับปรุงที่เพิ่มเข้าไป การเพิ่มขึ้นของ OMC เป็นผลโดยตรงจากคุณสมบัติของเถ้าไม้ซึ่งมีอนุภาคละเอียดและมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าดินเดิม ทำให้ส่วนผสมโดยรวมต้องการปริมาณน้ำมากขึ้นเพื่อใช้เคลือบผิวอนุภาคและทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นระหว่างการบดอัด (Somadas and Sarvade, 2024; Cabalar, et al., 2024) การลดลงของ MDD มีสาเหตุสำคัญมาจากการที่เถ้าไม้มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าดิน การแทนที่ดินซึ่งหนักกว่าด้วยเถ้าที่เบากว่าจึงส่งผลให้ความหนาแน่นรวมของของผสมลดลง (Barišić, et al., 2022; Cabalar, et al., 2024) ประกอบกับปรากฏการณ์การรวมกลุ่มของอนุภาคดิน (Flocculation and agglomeration) เมื่อเติมเถ้าเข้าไป ทำให้เกิดโครงสร้างดินที่โปร่งและมีช่องว่างมากขึ้น ซึ่งลดทอนความสามารถในการบดอัด (Compactability) และส่งผลให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ทำได้มีค่าน้อยลง (Somadas and Sarvade, 2024)



ภาพที่ 4-4 แสดงค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของดินเหนียวที่ปรับปรุงด้วยหินฝุ่นและเถ้าไม้ยูคาลิปตัส (ดินเหนียวคงที่ที่ 50%)

4.2.4 ผลการทดสอบการบดอัดของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่น โดยมีปริมาณของหินฝุ่นคงที่ที่ 50%

จากภาพที่ 4-5 แสดงค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของดินเหนียวที่ปรับปรุงด้วยหินฝุ่นและเถ้าไม้ยูคาลิปตัสโดยหินฝุ่นคงที่ที่ 50% ความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ ปริมาณความชื้นเหมาะสมกลับเพิ่มสูงขึ้น ตามสัดส่วนของวัสดุปรับปรุงที่เพิ่มเข้าไป การเพิ่มขึ้นของ OMC เป็นผลโดยตรงจากคุณสมบัติของเถ้าไม้ซึ่งมีอนุภาคละเอียดและมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าดินเดิม ทำให้ส่วนผสมโดยรวมต้องการปริมาณน้ำมากขึ้นเพื่อใช้เคลือบผิวอนุภาคและทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นระหว่างการบดอัด อีกทั้งน้ำส่วนหนึ่งยังถูกใช้ไปในปฏิกิริยาไฮเดรชันของส่วนประกอบในเถ้า (Somadas and Sarvade, 2024; Cabalar, et al., 2024) ขณะเดียวกัน การลดลงของ MDD มีสาเหตุสำคัญมาจากการที่เถ้าไม้มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าดิน การแทนที่ดินซึ่งหนักกว่าด้วยเถ้าที่เบากว่าจึงส่งผลให้ความหนาแน่นรวมของของผสมลดลง (Barišić, et al., 2022; Cabalar, et al., 2024) ประกอบกับปรากฏการณ์การรวมกลุ่มของอนุภาคดิน (Flocculation and Agglomeration) เมื่อเติมเถ้าเข้าไป ทำให้เกิดโครงสร้างดินที่โปร่งและมีช่องว่างมากขึ้น ซึ่งลดทอนความสามารถในการบดอัด (Compactability) และส่งผลให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ทำได้มีค่าน้อยลง (Somadas and Sarvade, 2024)



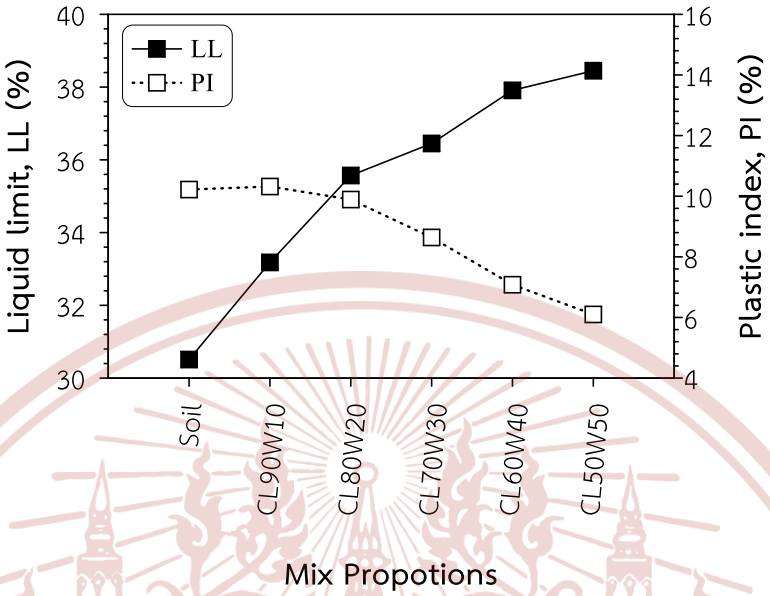
ภาพที่ 4-5 แสดงค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของดินเหนียวที่ปรับปรุงด้วยหินฝุ่นและเถ้าไม้ยูคาลิปตัส (หินฝุ่นคงที่ที่ 50%)

4.3 ผลการทดสอบ Atterberg limits

ในงานวิจัยนี้การทดสอบ Atterberg limits ได้ถูกนำมาใช้เพื่อประเมินผลของการผสมวัสดุปรับปรุงดินเหนียว ได้แก่ เถ้าไม้ยูคาลิปตัส (Eucalyptus wood ash) และหินฝุ่น (Stone dust) ต่อพฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินเหนียวธรรมชาติ โดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงของค่าขีดจำกัดเหลวและดัชนีความเป็นพลาสติก ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้สำคัญในการพิจารณาความเหมาะสมของดินสำหรับงานโครงสร้าง

4.3.1 ผลการทดสอบ Atterberg limits ของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสที่อัตราส่วนต่างๆ

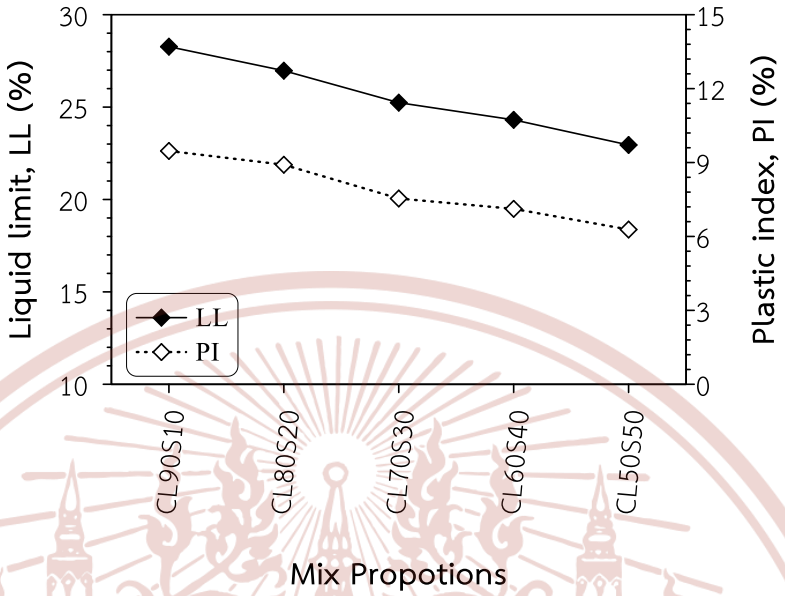
จากภาพที่ 4-6 แสดงค่า Liquid limit (LL) ของดินเหนียวที่มี Plasticity index (PI) เท่ากับ 39% มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าไม้ยูคาลิปตัสที่ผสม โดยค่าเริ่มต้นของดินเหนียวบริสุทธิ์อยู่ที่ 30.5% เมื่อเติมเถ้าไม้ยูคาลิปตัส 10% (CL90W10) ค่า LL ขยับขึ้นเป็น 33% และเมื่อสัดส่วนเถ้าเพิ่มเป็น 20–30% ค่า LL ก็ยังคงสูงขึ้นต่อเนื่องที่ 35.5% และ 36.5% ตามลำดับ กระทั่งที่อัตราส่วนผสม 50% (CL50W50) ค่า LL เพิ่มขึ้นถึง 38.5% การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงผลของอนุภาคเถ้าไม้ยูคาลิปตัสซึ่งมีขนาดเล็กและมีลักษณะพรุน ทำให้ดินเหนียวต้องการปริมาณน้ำมากขึ้นเพื่อเข้าสู่สภาวะไหลในระหว่างการทดสอบ (Barazesh, et al., 2012) ในขณะเดียวกัน ค่า PI มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณเถ้าไม้ยูคาลิปตัสเพิ่มขึ้น โดยแม้ค่าจะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในช่วง 10–20% (PI = 10% ที่ CL90W10 และ 9.7% ที่ CL80W20) แต่กลับลดลงเหลือ 8.5% ที่ CL70W30 จากนั้นเพิ่มเล็กน้อยเป็น 9.5% ที่ CL60W40 ก่อนจะลดลงอย่างชัดเจนเหลือ 6% ที่ CL50W50



ภาพที่ 4-6 ค่าพิกัดเหลวและดัชนีความเหนียวของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัส

4.3.2 ผลการทดสอบ Atterberg Limits ของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยหินฝุ่นที่อัตราส่วนต่างๆ

ภาพที่ 4-7 แสดงค่าพิกัดเหลวและดัชนีความเหนียวของดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยหินฝุ่น ในสัดส่วน CL90S10 จนถึง CL50S50 พบว่า ค่า LL และ PI มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อสัดส่วนหินฝุ่นเพิ่มขึ้นโดยค่า LL ลดลงจาก 28.5% ที่สัดส่วนหินฝุ่น 10% เหลือ 23% ที่สัดส่วน 50% ขณะที่ค่า PI ลดลงจาก 19% เหลือ 6.5% ในอัตราส่วนเดียวกัน การลดลงของค่า LL สะท้อนว่าเมื่อเติมวัสดุที่มีลักษณะหยาบ ไม่ดูดซึมน้ำ และไม่เกิดพฤติกรรมพลาสติกอย่างหินฝุ่นลงในดินเหนียว ส่งผลให้ความสามารถในการกักเก็บน้ำลดลง เนื่องจากพื้นผิวที่ไม่ดูดซึมน้ำของหินฝุ่นไปเจือจางอิทธิพลของอนุภาคดินเหนียวที่โดยธรรมชาติมีความสามารถในการดูดน้ำและเกิดการขยายตัวสูง ส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นกึ่งไหลของดินลดลงไปด้วย (Dixit and Patil., 2016) ค่า PI ที่ลดลงจาก 19% เหลือ 6.5% นั้น แสดงว่าหินฝุ่นสามารถลดความสามารถของดินในการคงรูปและการเปลี่ยนรูปในช่วงความชื้นที่อยู่ระหว่างค่า LL และ PL ได้อย่างมาก เนื่องจากดินเหนียวสูญเสียความเป็นพลาสติกลงไปและกลายเป็นวัสดุที่มีพฤติกรรมทางวิศวกรรมใกล้เคียงกับวัสดุไม่ขยายตัว (non-expansive) มากยิ่งขึ้น

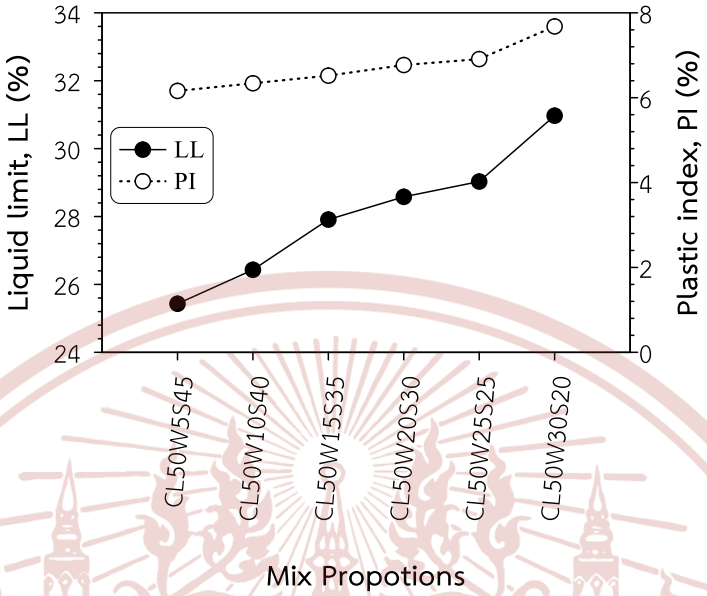


ภาพที่ 4-7 ค่าพิกัดเหลวและดัชนีความเหนียวของดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยหินฝุ่น

4.3.3 ผลการทดสอบ Atterberg Limits ของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่น โดยมีปริมาณของดินเหนียวคงที่ที่ 50%

ภาพที่ 4-8 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า LL ในดินเหนียวที่ผสมกับเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่น โดยที่สัดส่วนของดินเหนียวคงที่ที่ 50% พบว่าแนวโน้มของค่า LL เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อสัดส่วนของเถ้าไม้ยูคาลิปตัสมากขึ้นและหินฝุ่นลดลงตามลำดับ จากค่า LL = 25% ที่ CL50W5S45 เพิ่มขึ้นเป็น 31% ที่ CL50W30S20 เนื่องจากคุณสมบัติของเถ้าไม้ที่มีอนุภาคขนาดเล็กลักษณะพรุนและความสามารถในการดูดซับน้ำได้สูง (Barazesh, et al., 2012, Dixit and Patil., 2016) ซึ่งช่วยเพิ่มปริมาณน้ำที่ดินสามารถเก็บไว้ในสถานะพลาสติก ส่งผลให้ดินต้องการความชื้นมากขึ้นเพื่อเข้าสู่สถานะไหล ทั้งนี้ยังแสดงให้เห็นว่าเมื่อลดสัดส่วนของหินฝุ่นซึ่งเป็นวัสดุเนื้อหยาบและไม่อุ้มน้ำ ดินจะมีพฤติกรรมใกล้เคียงดินเหนียวมากขึ้น มีค่า LL สูงขึ้นและแนวโน้มกลับไปสู่ลักษณะของวัสดุที่มีพฤติกรรม plastic สูง

สำหรับ PI ซึ่งสะท้อนถึงช่วงความชื้นที่ดินยังคงพฤติกรรมพลาสติก พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อปริมาณเถ้าไม้ยูคาลิปตัสเพิ่มขึ้นจาก 5% เป็น 30% โดยค่า PI เพิ่มจาก 6.1% ที่ CL50W5S45 เป็น 7.7% ที่ CL50W30S20 ถึงแม้การเปลี่ยนแปลงจะไม่มากเหมือนค่า LL แต่แนวโน้มนี้ก็ชี้ว่าดินมีพฤติกรรมเหนียวขึ้นเล็กน้อย ซึ่งอาจมีผลจากปริมาณการอุ้มน้ำที่มากขึ้นจากเถ้าไม้ยูคาลิปตัสที่ดูดน้ำได้ดี อย่างไรก็ตาม ค่า PI ที่เพิ่มขึ้นยังอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ซึ่งถือว่าไม่กระทบต่อพฤติกรรมโดยรวมของดินอย่างรุนแรง จึงเป็นผลดีต่อดินที่ต้องการความสามารถในการขึ้นรูปในช่วงการบดอัดและก่อสร้าง

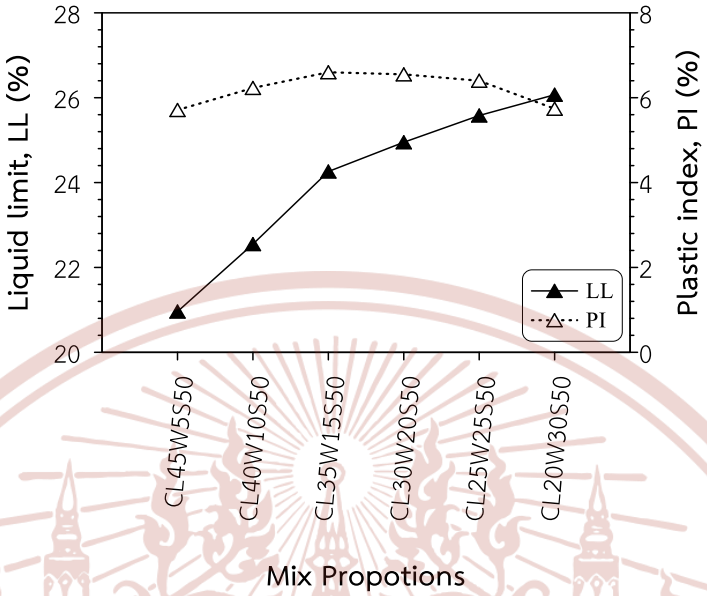


ภาพที่ 4-8 ค่าพิกัดเหลวและดัชนีความเหนียวของดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่น (ดินเหนียวคงที่50%)

4.3.4 ผลการทดสอบ Atterberg Limits ของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่น โดยมีปริมาณของหินฝุ่นคงที่ที่ 50%

จากภาพที่ 4-9 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า LL ของดินเหนียวผสมเถ้าไม้ยูคาลิปตัส โดยที่หินฝุ่นคงที่ที่ 50% และเพิ่มสัดส่วนของเถ้าไม้จาก 5% ถึง 30% พบว่า LL เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนตลอดช่วงสัดส่วนการผสม โดยเริ่มจากค่าต่ำสุดที่ 21% ในชุด CL45W5S50 และเพิ่มขึ้นจนถึง 26% ในชุด CL20W30S50 ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุดในกลุ่มตัวอย่างนี้ เนื่องจากคุณลักษณะของเถ้าไม้ยูคาลิปตัส ซึ่งเป็นวัสดุที่มีลักษณะ non-plastic แต่มีความสามารถในการดูดซับความชื้นได้ดีเนื่องจากมีโครงสร้างที่ละเอียดและพรุน เมื่อเติมเข้าไปในดินเหนียวจะทำให้ระบบโดยรวมมีพื้นที่ผิวรวมมากขึ้นและสามารถเก็บกักน้ำไว้ได้มากขึ้นในสถานะกึ่งของเหลว ส่งผลให้ดินต้องใช้น้ำในปริมาณที่สูงขึ้นกว่าจะเข้าสู่สถานะไหล (Barazesh, et al., 2012)

ค่า PI ซึ่งแสดงถึงช่วงความชื้นที่ดินคงพฤติกรรมพลาสติกได้ พบว่าค่า PI เพิ่มขึ้นจาก 5.7% ที่ CL45W5S50 เป็น 6.6% ที่ CL30W20S50 และ CL25W25S50 ก่อนจะลดลงอย่างชัดเจนเหลือ 3.7% ที่ CL20W30S50 พฤติกรรมนี้สามารถวิเคราะห์ได้ว่าการเติมเถ้าไม้ยูคาลิปตัสในสัดส่วนต่ำถึงปานกลาง (5–25%) ส่งผลให้ดินยังคงรักษาพฤติกรรมพลาสติกไว้ได้ดี (Bilal and Ahmad., 2023) และช่วงความชื้นที่ดินสามารถคงรูปร่างได้ (plastic state) จะขยายกว้างขึ้นเนื่องจาก LL เพิ่มแต่ PL เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่งผลให้ค่า PI เพิ่มขึ้นแต่เมื่อสัดส่วนเถ้าไม้ยูคาลิปตัสสูงถึง 30% ดินสูญเสียโครงสร้างการคงรูปจากความเป็นดินเหนียวไปบางส่วน เพราะสัดส่วนดินเหนียวที่ลดลงเพียง 20% จึงทำให้ค่า PI ลดลง การลดลงของ PI ที่ CL20W30S50 เกิดจากสัดส่วนของอนุภาคดินเหนียวต่ำจึงไม่สามารถรักษาความเป็นพลาสติกดินเหนียวไว้ได้



ภาพที่ 4-9 ค่าพิกัดเหลวและดัชนีความเหนียวของดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่น (หินฝุ่นคงที่50%)

4.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงแบกทาน (California Bearing Ratio, CBR)

สำหรับการดำเนินการทดสอบได้มีการเตรียมตัวอย่างดินและวัสดุผสมในสภาวะความชื้นที่เหมาะสมโดยควบคุมที่ค่า Optimum Moisture Content (OMC) และ Maximum Dry Density (MDD) ที่ได้จากการทดสอบการบดอัด (Compaction Test) จากนั้นจึงทำการบ่มตัวอย่างในระยะเวลาที่กำหนดและนำไปทดสอบกำลังรับแรงแบกทานด้วยอัตราการกดทดสอบคงที่ตาม ASTM D1883 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจะถูกนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบเพื่อหาผลของการผสมวัสดุต่างชนิดต่อค่ากำลังรับแรงแบกทานและใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาความเหมาะสมของวัสดุถมคันทาง

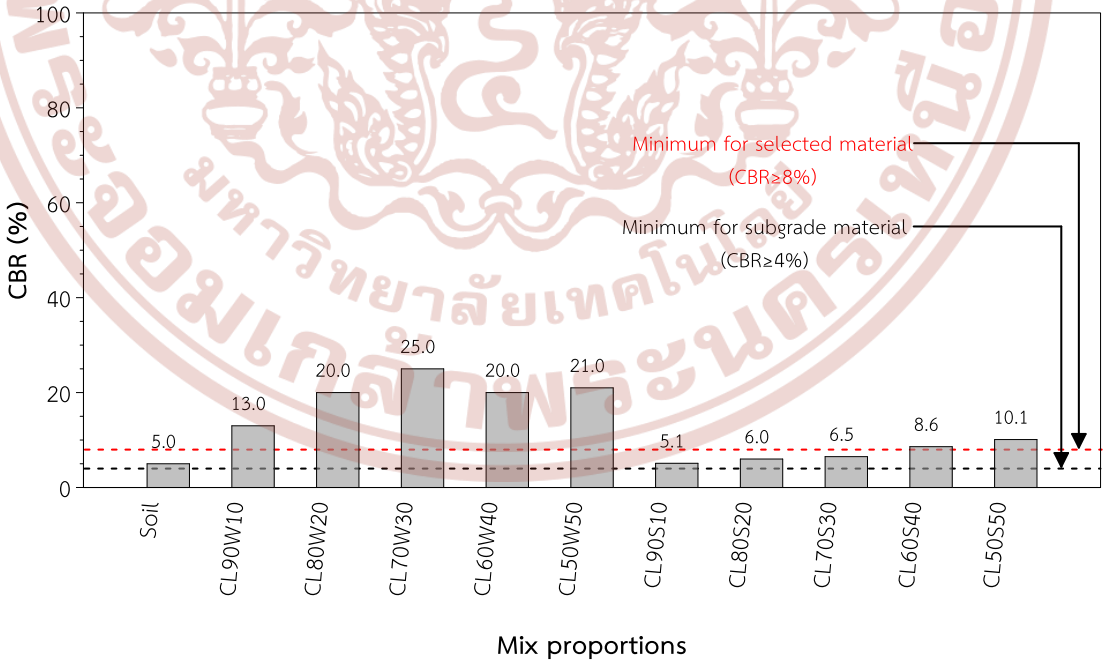
4.4.1 ผลการทดสอบกำลังรับแบกทานของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยหินฝุ่น

ภาพที่ 4-10 สำหรับชุดที่มีดินเหนียวและเถ้าไม้ยูคาลิปตัสตั้งแต่ CL90W10 ถึง CL50W50 ค่าเพิ่มขึ้นจาก 13% เป็น 20% และสูงสุด 25% ที่ CL70W30 แล้วจึงลดลงเล็กน้อยที่ CL60W40 และ CL50W50 อธิบายได้ด้วยพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ดินและผลของการบดอัด เมื่อปริมาณเถ้าไม้ยูคาลิปตัสอยู่ในช่วง 10–30% อนุภาคเถ้าที่มีขนาดเล็กและมีเหลี่ยมคมทำหน้าที่เป็นตัวอุดช่องว่าง (Active filler) ระหว่างเม็ดดินทำให้การกระจายขนาดเม็ด (Gradation) ของส่วนผสมแน่นขึ้น ช่องว่างลดลง การถ่ายแรงระหว่างเม็ดดีขึ้น และเมื่ออัดแน่นที่ OMC จะให้ความหนาแน่นแห้งสูงกว่าดินเดิมส่งผลให้ชั้นดินต้านทานการยุบตัวค่า CBR จึงเพิ่มจาก 13% ไปเป็น 20% และสูงสุดที่ 25% ซึ่งเป็นช่วงที่สัดส่วนเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและดินเหนียวให้โครงสร้างที่ลงตัวที่สุดระหว่างอนุภาคละเอียดที่ช่วยล็อกผิวสัมผัสกับเม็ดดินเดิมที่ยังคงบทบาทเป็นตัวค้ำยัน (Salih, et al., 2022; Sefene, 2021) เมื่อเพิ่มเถ้าไม้ยูคาลิปตัสเกินจุดเหมาะสมเป็น 40–50% ทำให้ค่า CBR ลดลง เนื่องจากเถ้าไม้ยูคาลิปตัสมีความหนาแน่นต่ำและมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ทำให้ส่วนผสมโดยรวมมีแนวโน้มให้ความหนาแน่นแห้งลดลง หากไม่ได้เพิ่มน้ำและพลังงานบดอัดให้สอดคล้องกับ OMC จะทำให้เกิดช่องว่าง (Void) ในเนื้อ

ดินมากขึ้นผล CBR จึงมีค่าที่ลดลง (Sefene, 2021) การแทนที่ดินเหนียวด้วยมวลละเอียดที่ไม่ให้แรงยึดเหนี่ยวในปริมาณที่มากเกินไปทำให้โครงข่ายยึดเหนี่ยวของเนื้อดินลดลงทำให้จึงเสียรูปได้ง่ายกว่า ช่วงเถ้าไม้ยูคาลิปตัส 20–30% เนื้อดิน (Fabric) เปลี่ยนจากโครงสร้างที่อัดแน่นสมดุลไปเป็นโครงสร้างที่ละเอียดหนาแน่นเกินต้องการน้ำมากขึ้นเพื่อจัดเรียงตัว CL70W30 เป็นจุดเหมาะสมที่สุดในชุดข้อมูลนี้

ในทางกลับกันชุดส่วนผสมที่ใช้หินฝุ่นตั้งแต่ 10–50% (CL90S10 ถึง CL50S50) ให้ค่า CBR ค่อนข้างต่ำ โดยอยู่ในช่วง ประมาณ 5–11% เท่านั้น ซึ่งบ่งชี้ว่าแม้หินฝุ่นจะช่วยเพิ่มความหนาแน่นแต่ไม่สามารถเสริมกำลังรับแรงแบบทานได้ (Mewade and Kushwaha., 2025) เทียบเท่ากับเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและไม่เพิ่ม CBR ได้เกินสองเท่าของดินเดิม เนื่องจากหินฝุ่นเป็นวัสดุที่ให้เพียงแรงเสียดทานเชิงกลระหว่างอนุภาคโดยไม่ก่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคในระดับจุลภาค

ในการออกแบบชั้นวัสดุคัดเลือกหรือดินเดิมที่มีค่ากำลังรับแรงแบกทานต่ำ ควรพิจารณาการใช้เถ้าไม้ยูคาลิปตัสในสัดส่วนที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มค่า CBR โดยต้องควบคุมปริมาณความชื้นและกระบวนการอัดแน่นให้อยู่ใกล้ค่า OMC และ MDD ที่เหมาะสมที่สุดจากการทดสอบ Proctor เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพทางกลศาสตร์สูงสุดและคงทนยั่งยืน จากผลการทดสอบสรุปได้ว่า การผสมเถ้าไม้ยูคาลิปตัสในช่วง 10–50% และหินฝุ่น 10–50% เป็นแนวทางที่เหมาะสมและคุ้มค่าทางวิศวกรรมในการเพิ่ม bearing capacity ของดินเหนียวที่มีค่า CBR ≤ 4% สำหรับการใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง ขณะที่ดินคัดเลือกที่มีค่า CBR ≤ 8% ควรเสริมด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัส 10–50% และหินฝุ่น 40–50% เพื่อให้ได้ค่ากำลังรองรับที่เพียงพอ

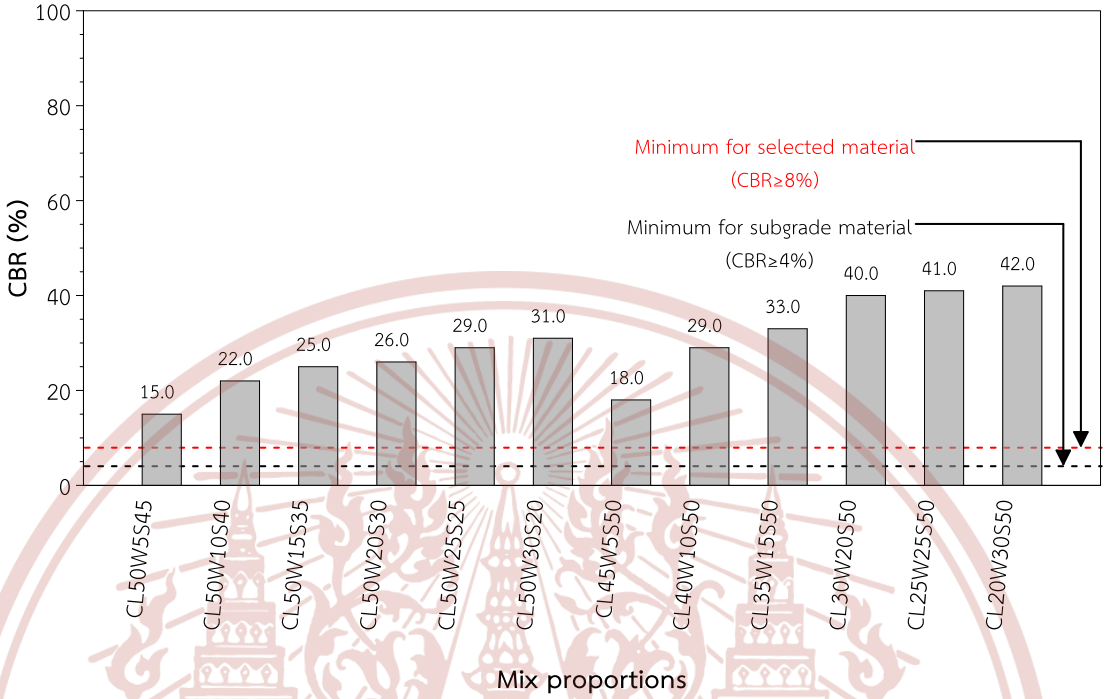


ภาพที่ 4-10 กำลังรับแรงแบกทานของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่น

4.4.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงแบกทานของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่น (ดินเหนียวคงที่50%) และดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่น (หินฝุ่นคงที่50%)

ภาพที่ 4-11 ตัวอย่างที่มีปริมาณดินเหนียวคงที่ที่ 50% (CL50W5S45, CL50W10S40, CL50W15S35, CL50W20S30, CL50W25S25 และ CL50W30S20) ช่วงเริ่มต้นที่ใส่เถ้าไม้ยูคาลิปตัสต่ำ ค่า CBR ยังไม่สูงมากจากนั้นเมื่อเพิ่มเถ้าไม้ยูคาลิปตัสค่า CBR เพิ่มขึ้น เนื่องจากขึ้นอยู่กับขนาดของวัสดุและการบดอัดเป็นหลัก เมื่อเพิ่มเถ้าไม้ยูคาลิปตัสทำให้ปริมาณอนุภาคละเอียด (Fines) ที่เข้ามาจะทำหน้าที่เป็นสารเติมเต็มที่ทำให้อุดช่องว่างระหว่างอนุภาคช่วยให้การกระจายตัวของขนาดอนุภาคดีขึ้นและเมื่อบดอัดที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุด โครงสร้างที่เกิดขึ้นจะแน่นขึ้น ทำให้ค่า CBR เพิ่มขึ้น การลดหินฝุ่นลงในช่วงแรกยังไม่ทำลายตัวยึดประสาน (Interlock) เดิมเพราะ Interlock ระหว่างอนุภาคยังคงอยู่จึงได้ผลรวมทั้งการจัดเรียงตัวของอนุภาค และ Interlock ที่สมดุลกว่าเดิม และเมื่อเพิ่มเถ้าไม้ยูคาลิปตัสปริมาณอนุภาคละเอียดจะมากเกินไปจนเคลือบผิวหินฝุ่นทำให้ลดแรงเสียดทาน ทำให้ไวต่อความชื้นและบดอัดได้ไม่เต็มศักยภาพความหนาแน่นแห้งเริ่มตกผลคือ ค่า CBR เพิ่มขึ้นเล็กน้อย แม้ยังสูงกว่าดินเหนียวอย่างชัดเจน การเติมวัสดุที่มีอนุภาคละเอียดในปริมาณที่เหมาะสม (20–30%) จะเพิ่มค่า CBR เนื่องจากการลดช่องว่างช่วยให้โครงสร้างดินแน่นขึ้นแข็งแรงขึ้นและรับแรงกดได้มากขึ้นส่งผลให้ค่า CBR สูงขึ้นก่อนค่าจะทรงตัวหรือลดลงเล็กน้อยเมื่อส่วนละเอียดมากเกินความจำเป็น (Blayi, et al., 2024; Salih, et al., 2022; Sefene, 2021; Al-Naje, et al., 2020; Wang, et al., 2024)

หินฝุ่นมีค่า CBR ค่อนข้างสูง (65%) เนื่องจากอนุภาคของหินฝุ่นทำหน้าที่เป็น Interlock เป็นหลัก และเมื่อมีการเพิ่มเถ้าไม้ยูคาลิปตัสในส่วนผสมระหว่างดินเหนียวกับหินฝุ่น (ตัวอย่าง CL45W5S50, CL40W10S50, CL35W15S50, CL30W20S50, CL25W25S50 และ CL20W30S50) พบว่าค่า CBR จะค่อยๆ เพิ่มขึ้น เนื่องสัดส่วนของดินเหนียวและเถ้าไม้ยูคาลิปตัสที่มีอนุภาคที่เล็กและละเอียดกว่าหินฝุ่น ได้ทำหน้าที่ช่วยเติมเต็มช่องว่างและทำให้ตัวอย่างมีความแน่นที่สม่ำเสมอกว่าตัวอย่างที่มีหินฝุ่นเป็นส่วนผสมเพียงอย่างเดียว โดยเมื่อเพิ่มเถ้าไม้ยูคาลิปตัสมากขึ้นพบว่าค่า CBR จะเริ่มคงที่ เนื่องจากอนุภาคละเอียดอาจจะเกินระดับที่เหมาะสม ทำให้ลดการยึดประสานของอนุภาคและความหนาแน่นของตัวอย่างทำให้อัตราส่วนผสมที่มีหินฝุ่น 50% มีค่าค่อนข้างสูงซึ่งมีค่าสูงกว่าอัตราส่วนที่มีดินเหนียว 50% เพราะอัตราส่วนมีหินฝุ่น 50% พึ่งพาแรงเสียดทานเป็นหลัก การเพิ่มขึ้นของค่า CBR ในช่วงหลังจึงเป็นผลจากอนุภาคละเอียดที่เข้าไปเติมเต็มและปรับสมดุลขนาดคละของอนุภาค (Ojuri and Epe, 2016; Blayi, et al., 2024)



ภาพที่ 4-11 กำลังรับแรงแบกทานของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่น

4.5 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงเฉือนของดิน

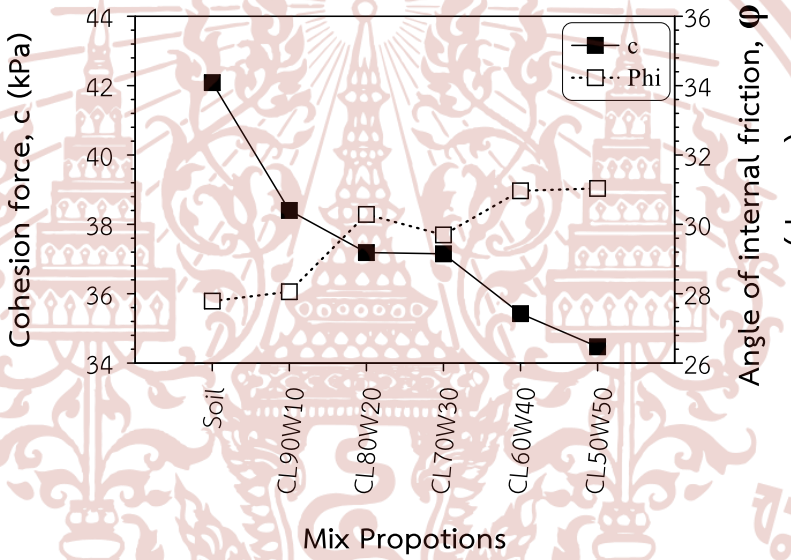
สำหรับการดำเนินการทดสอบได้มีการเตรียมตัวอย่างดินและวัสดุผสมในสภาวะความชื้นที่เหมาะสมโดยควบคุมที่ค่า Optimum moisture content และ Maximum dry density ที่ได้จากการทดสอบการบดอัด จากนั้นจึงทำการบ่มตัวอย่างในระยะเวลาที่กำหนดและนำไปทดสอบกำลังรับแรงแบกทานด้วยอัตราการกดทดสอบคงที่ตาม ASTM D1883 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจะถูกนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบเพื่อหาผลของการผสมวัสดุต่างชนิดต่อค่ากำลังรับแรงแบกทานและใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาความเหมาะสมของวัสดุถมคันทาง

4.5.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสที่อัตราส่วนต่างๆ

ภาพที่ 4-12 แสดงแรงยึดเหนี่ยวของดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัส จากผลการทดสอบพบว่าสำหรับดินเหนียวมีค่าแรงยึดเหนี่ยว (cohesion, c) เท่ากับ 42 kPa ซึ่งเป็นค่ายึดเหนี่ยวโดยธรรมชาติของดินตามธรรมชาติและลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณเถ้าไม้ยูคาลิปตัสเพิ่มขึ้น และเมื่อเติมปริมาณเถ้าไม้ยูคาลิปตัสเพิ่มขึ้นค่า c มีแนวโน้มลดลง โดยมีค่าเท่ากับ 38, 37, 37, 35 และ 34 kPa ที่ปริมาณเถ้าไม้ยูคาลิปตัส 10%, 20%, 30%, 40% และ 50% ตามลำดับ จากผลจะเห็นว่าค่า c จะลดลงอย่างเห็นได้เมื่อปริมาณเถ้าไม้ยูคาลิปตัสที่ 40% ค่าที่ลดลงเนื่องจากการที่เถ้าไม้ยูคาลิปตัสจัดเป็นวัสดุที่มีอนุภาคละเอียด (Fine-grained granular material) ไม่มีคุณสมบัติความเชื่อมแน่น (Non-cohesive) เมื่อนำมาแทนที่อนุภาคดินเหนียวที่เป็นต้นกำเนิดของแรงยึดเกาะระหว่างอนุภาค เช่น แรงดึงดูดระหว่างผิวอนุภาค (Adhesion) และแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่เกิดจากน้ำในรูพรุน (Apparent cohesion) จะเข้าไปขัดขวางการเชื่อมแน่นของอนุภาคดินเหนียว และเมื่อปริมาณ

ของอนุภาคที่ไม่มีความเชื่อมแน่นเพิ่มขึ้น สัดส่วนของอนุภาคดินเหนียวที่สร้างความเชื่อมแน่นจะลดลง ส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนโดยอาศัยความเชื่อมแน่นลดลงตามไปด้วย (Blayi, et al., 2024; Sefene, et al., 2021)

ค่ามุมเสียดทานภายในอยู่ที่ 28 องศา สำหรับดินเหนียวและเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่ปริมาณเถ้าไม้ยูคาลิปตัส 10% ก่อนที่จะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนที่ 20% และลดลงเล็กน้อยอีกครั้งที่ 30% จากนั้นจึงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึง 31 องศา ที่ปริมาณเถ้าไม้ยูคาลิปตัส 50% การเพิ่มขึ้นของมุมเสียดทานภายใน เนื่องจากอนุภาคของเถ้าไม้ยูคาลิปตัสซึ่งอาจมีรูปร่างและพื้นผิวที่หยาบ (Roughness) ช่วยเพิ่มแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคโดยรวม ทำให้ดินมีพฤติกรรมที่แข็งขึ้นภายใต้แรงเฉือน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะความเค้นตั้งฉากที่สูงขึ้น(Sefene, et al., 2021)

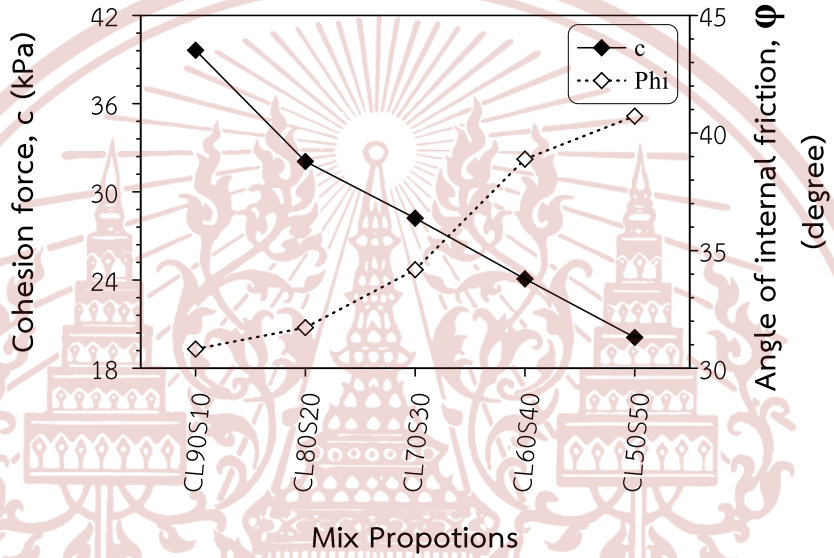


ภาพที่ 4-12 แรงยึดเหนี่ยวและมุมเสียดทานภายในของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัส

4.5.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยหินฝุ่นที่อัตราส่วนต่างๆ

ภาพที่ 4-13 แสดงแรงยึดเหนี่ยวของดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยหินฝุ่น จากผลการทดสอบพบว่าสำหรับดินเหนียวมีค่าแรงยึดเหนี่ยวเท่ากับ 42 kPa ซึ่งเป็นค่ายึดเหนี่ยวโดยธรรมชาติของดินตามธรรมชาติและลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณหินฝุ่นเพิ่มขึ้น และเมื่อเติมปริมาณหินฝุ่นเพิ่มขึ้นค่า c มีแนวโน้มลดลง โดยมีค่าเท่ากับ 39, 32, 28, 24 และ 20 kPa ที่ปริมาณหินฝุ่น 10%, 20%, 30%, 40% และ 50% ตามลำดับ การลดลงอย่างมากของค่าแรงเฉือนในกรณีของฝุ่นหินนี้ เนื่องคุณสมบัติที่ไม่มีความเชื่อมแน่นของฝุ่นหิน ซึ่งประกอบด้วยเศษหินบดละเอียดที่มีลักษณะเป็นเม็ดหยาบและมีพื้นผิวสัมผัสที่ไม่ก่อให้เกิดแรงยึดเกาะแบบความเชื่อมแน่น การแทรกซึมของฝุ่นหินเข้าไปในโครงสร้างดินเหนียวเป็นการไปรบกวนและลดจำนวนจุดสัมผัสระหว่างอนุภาคดินเหนียวที่มีแรงยึดเหนี่ยวต่อกัน ทำให้โครงสร้างเดิมที่ให้ความเชื่อมแน่นถูกทำลายและลดลงอย่างชัดเจน (Jamsawang, et al., 2020)

ค่ามุมเสียดทานภายในอยู่ที่ 28 องศา สำหรับดินเหนียวและเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึง 41 องศา ที่ปริมาณหินฝุ่น 50% การเพิ่มขึ้นของมุมเสียดทานภายใน ในกรณีของฝุ่นหินแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ยอดเยี่ยมของฝุ่นหินในการปรับปรุงคุณสมบัติด้านมุมเสียดทานภายในของดิน ซึ่งเกิดจากการที่ฝุ่นหินประกอบด้วยอนุภาคที่มีความหยาบและรูปร่างเหลี่ยมคมอย่างมาก เมื่อผสมลงในดินจะช่วยเพิ่มการขัดสี (interlocking) และแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคดินและอนุภาคฝุ่นหิน (Yin et al., 2021)



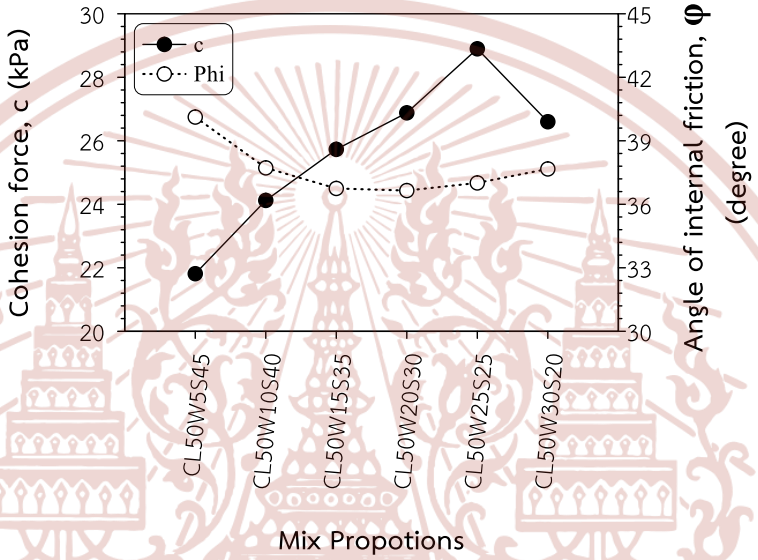
ภาพที่ 4-13 แรงยึดเหนี่ยวและมุมเสียดทานภายในของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยหินฝุ่น

4.5.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่น โดยมีปริมาณของดินเหนียวคงที่ที่ 50%

ภาพที่ 4-14 แสดงแรงยึดเหนี่ยวและมุมเสียดทานภายในของดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่น(ดินเหนียวคงที่50%) เมื่อเติมปริมาณเถ้าไม้ยูคาลิปตัสเพิ่มขึ้นค่า c มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 21, 24, 25, 26 และ 28 kPa ที่ปริมาณเถ้าไม้ยูคาลิปตัส 5%, 10%, 15%, 20% และ 25% ตามลำดับ พบว่าค่าแรงยึดเหนี่ยวของดินเหนียวคงที่ที่ 50% เพิ่มสูงขึ้นอย่างเด่นชัดเมื่อสัดส่วนเถ้าไม้ยูคาลิปตัสในส่วนผสมมากขึ้นในขณะที่สัดส่วนหินฝุ่นลดลง โดยในช่วงที่มีเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและต่ำหินฝุ่นสูง ค่าแรงเฉือนอยู่ในระดับต่ำเนื่องจากหินฝุ่นเป็นวัสดุเม็ดหยาบที่ไม่ช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคดิน แต่กลับลดปริมาณดินเหนียวที่ให้ความเชื่อมแน่นแก่ส่วนผสม อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าไม้ยูคาลิปตัสซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานิกเข้าไป จะเกิดการยึดประสานอนุภาคดินที่เติมเต็มช่องว่างในโครงสร้างดิน ส่งผลให้ค่าแรงยึดเหนี่ยวของดินผสมสูงขึ้นตามลำดับ (Owamah, et al., 2017)

ค่ามุมเสียดทานภายในมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มสัดส่วนเถ้าไม้ยูคาลิปตัส ขณะที่หินฝุ่นทำหน้าที่เป็นโครงสร้างอนุภาคหยาบ ให้ค่ามุมเสียดทานภายในเริ่มต้นอยู่ในระดับสูงกว่าดินเหนียวแต่เมื่อแทนที่หินฝุ่นด้วยเถ้าไม้มากขึ้น สัดส่วนอนุภาคหยาบและการขัดกันระหว่างอนุภาคลดลง ทำให้พื้นผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคลื่นขึ้นและแรงเสียดทานลดลง อีกทั้งการมีอนุภาคละเอียดสูงยังทำให้ต้อง

ใช้น้ำเพื่อการจัดเรียงตัวมากขึ้น หากสภาวะบดอัดไม่ถูกปรับให้เหมาะสมจะเกิดการบดอัดไม่เต็มประสิทธิภาพ ส่งผลให้ค่ามุมเสียดทานภายในลดลงอย่างต่อเนื่องตามที่สังเกตในรูป เมื่อลดโครงสร้างเม็ดหยาบและเพิ่มอนุภาคละเอียดที่ไม่ก่อแรงยึดเหนี่ยว ค่ามุมเสียดทานภายในของดินมักลดลง ซึ่งสะท้อนในเชิงกลศาสตร์ดินว่าองค์ประกอบแรงเฉือนแบบเสียดทาน ($\sigma' \tan\phi$) อ่อนตัวลงเมื่อ interlock ลดลง (Sefene, 2021; Salih, et al., 2022; Zang, et al., 2023).



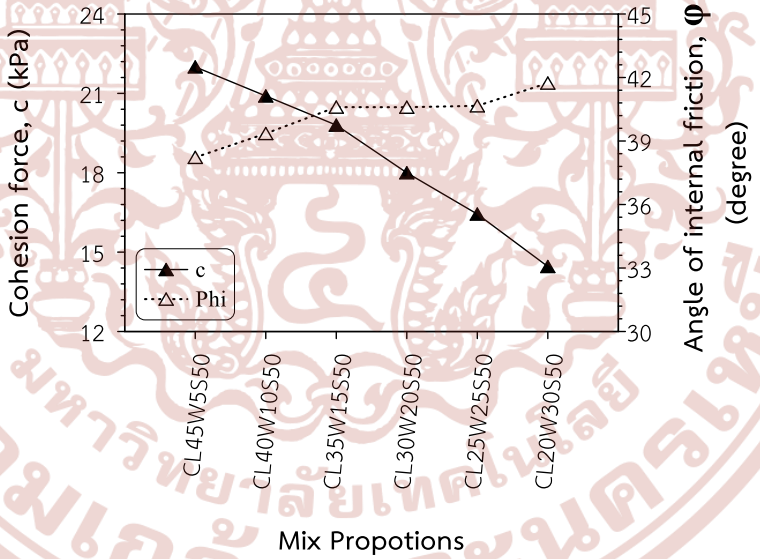
ภาพที่ 4-14 แรงยึดเหนี่ยวและมุมเสียดทานภายในของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่น(ดินเหนียวคงที่50%)

4.5.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่น โดยมีปริมาณของหินฝุ่นคงที่ที่ 50%

ภาพที่ 4-15 แสดงกำลังรับแรงเฉือนและมุมเสียดทานภายในของดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่น (หินฝุ่นคงที่50%) พบว่าค่า c ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณเถ้าไม้ยูคาลิปตัสเพิ่มขึ้น และเมื่อลดปริมาณดินเหนียวค่า c มีแนวโน้มลดลง โดยมีค่าเท่ากับ 22, 21, 19, 18, 16 และ 14 kPa ที่ปริมาณเถ้าไม้ยูคาลิปตัส 5%, 10%, 15%, 20%, 25% และ 30% ตามลำดับ ซึ่งลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อสัดส่วนเถ้าไม้ยูคาลิปตัสในส่วนผสมมากขึ้นในขณะที่สัดส่วนดินเหนียวลดลง จาก 22 kPa ที่เถ้าไม้ยูคาลิปตัส 5% เหลือ 14.5 kPa ที่เถ้าไม้ยูคาลิปตัส 30% สะท้อนว่าการใช้อัตราส่วนเถ้าไม้ยูคาลิปตัสสูงเพื่อแทนที่ดินเหนียวส่งผลให้ศักยภาพการเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของวัสดุลดลง เนื่องจากดินเหนียวถูกแทนที่ด้วยอนุภาคเถ้าไม้ยูคาลิปตัสที่มีลักษณะเป็นวัสดุเนื้อละเอียดไม่เป็นพลาสติก เมื่อพิจารณาจากแนวคิดของกลศาสตร์ดินสามารถอธิบายกลไกการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของดินได้ว่าการเพิ่มปริมาณวัสดุอนุภาคละเอียดที่ไม่ให้แรงยึดเหนี่ยวทำให้พื้นที่ผิวดินเปลี่ยนไปเป็นระบบที่พึ่งพาแรงเสียดทานมากขึ้น ขณะที่พฤติกรรมการบดอัดและการกระจายความชื้นไปตามรูพรุนมีแนวโน้มทำให้แรงดูดเชิงกายภาพลดลงด้วยเมื่อเถ้าไม้ยูคาลิปตัสสูงเกินจุดเหมาะสมจึงเห็นการลดลงของแรงยึดเหนี่ยวอย่างชัดเจน (Salih, et al., 2022; Sefene, 2021; Zang, et al., 2023). สำหรับการใช้งานที่อาศัยแรงยึดเหนี่ยวมาก เช่น ผิวดิน, ลาดตื้น หรือ

บริเวณที่ความเค้นตั้งฉากต่ำ การจำกัดเถ้าไม้ยูคาลิปตัสให้อยู่ในช่วง 15–20% โดยคงที่ปริมาณหินฝุ่นที่ 50% จะช่วยรักษาค่าแรงยึดเหนี่ยวให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อเสถียรภาพโดยยังคงข้อดีจากโครงร่างเม็ดหยาบของหินฝุ่นไว้ได้ (Zang, et al., 2023).

สำหรับมุมเสียดทานภายในของหินฝุ่นคงที่ที่ 50% เพิ่มขึ้นจาก 39 องศา ที่เถ้าไม้ยูคาลิปตัส 5% ไปสู่ 42 องศา ที่เถ้าไม้ยูคาลิปตัส 30% เนื่องมาจากการที่อัตราส่วนผสมมีโครงสร้างเม็ดหยาบเป็นองค์ประกอบหลักทำให้รับแรงเฉือนด้วยการเสียดทานและ Interlock อยู่แล้ว การเพิ่มเถ้าไม้ช่วยเติมเต็มช่องว่างระหว่างเม็ดหินฝุ่นและดินเหนียว ทำให้การกระจายขนาดโดยรวมแน่นและต่อเนื่องขึ้น การสัมผัสระหว่างอนุภาคซึ่งมีลักษณะเป็นเหลี่ยมคมมากขึ้นจึงต้านการเลื่อนได้ดีทำให้ความชันของแรงเฉือน (tan φ) สูงขึ้นแม้แรงยึดเหนี่ยวจะลดลง (Zang, et al., 2023) เมื่อโครงสร้างที่มีความเค้นตั้งฉากสูงจึงเป็นไปได้ที่ความต้านทานเฉือนรวมจะคงที่หรือเพิ่มขึ้นแม้ค่า c จะลดลงหากควบคุมการบดอัดและความชื้นได้เหมาะสม (Sefene, 2021; Salih, et al., 2022) หากเพิ่มปริมาณเถ้าไม้มากเกินไปโครงสร้างอาจหลวมจากส่วนละเอียดที่ไม่ช่วยยึดเหนี่ยว ทำให้ประโยชน์ด้าน φ ถูกชดเชยด้วยการสูญเสียความแน่นโดยรวมของมวลดิน ส่งผลให้ค่าดัชนีใช้งานและสมรรถนะรับแรงเฉือนเริ่มอ่อนลง (Salih, et al., 2022)



ภาพที่ 4-15 แรงยึดเหนี่ยวและมุมเสียดทานภายในของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่น (หินฝุ่นคงที่50%)

4.6 ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ

การทดสอบการทรุดตัวแบบหนึ่งมิติ (Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading) ตามมาตรฐาน ASTM D2435 ซึ่งเป็นวิธีการหลักในการวิเคราะห์พฤติกรรมการยุบตัวของดินภายใต้แรงกดโหลดโดยที่น้ำในรูพรุนระบายออกเพียงทิศทางเดียว การทดสอบดังกล่าวให้ค่าพารามิเตอร์สำคัญ เช่น Compression

index (C_c), Coefficient of consolidation (C_v), Coefficient of volume compressibility (mv) และ Coefficient of permeability (k) ซึ่งล้วนมีบทบาทในการประเมินพฤติกรรมเชิงกลของดินภายใต้สภาพใช้งานจริง ในการศึกษานี้ได้ดำเนินการทดสอบทางวิศวกรรมธรณีเทคนิคเพื่อประเมินพฤติกรรมการทรุดตัวของดินเหนียวจำแนกประเภท CL ซึ่งเป็นดินเหนียวความหนาแน่นปานกลาง โดยมีการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยการผสมวัสดุทางเลือก ได้แก่ เถ้าไม้ยูคาลิปตัส (Eucalyptus wood ash) และ หินฝุ่น (Stone dust) ในสัดส่วนต่าง ๆ ตามแผนการทดลอง โดยมุ่งหวังให้วัสดุเหล่านี้ช่วยลดการทรุดตัวและเพิ่มประสิทธิภาพการระบายน้ำของดิน ซึ่งเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานด้านโครงสร้างพื้นฐาน

4.6.1 ผลการทดสอบดัชนีการอัดตัว (C_c) ของดินเหนียว (CL) ผสมเถ้าไม้ยูคาลิปตัส (W) และหินฝุ่น (S) ในสัดส่วนต่างๆ

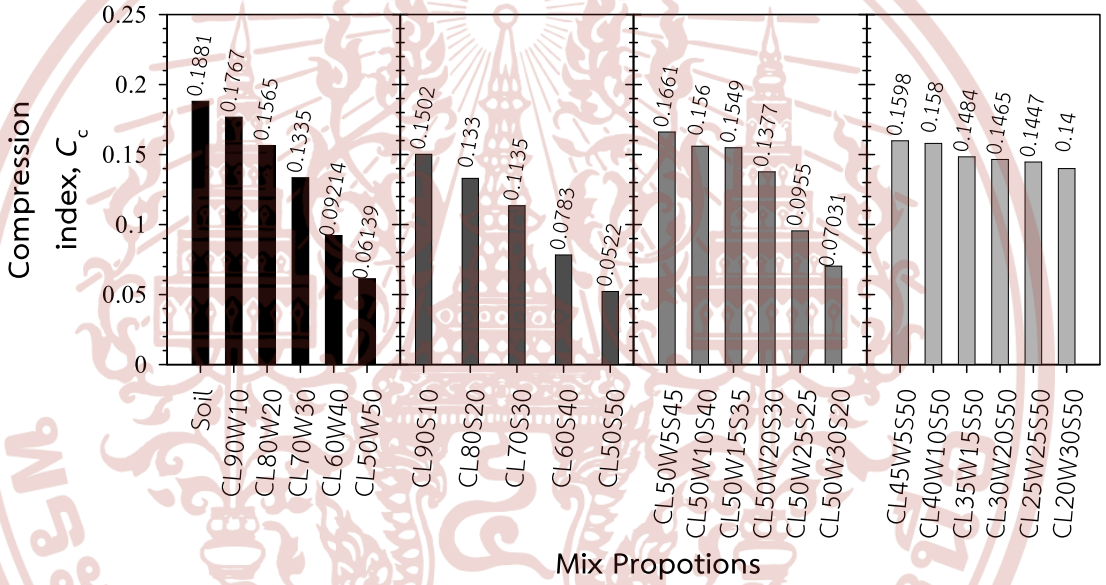
จากภาพที่ 4-16 แสดงค่าดัชนีการอัดตัว มีแนวโน้มเดียวกันโดยค่าการยุบตัวลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนอนุภาคละเอียดไม่ว่าจะเป็นการเติมเถ้าไม้ยูคาลิปตัสหรือหินฝุ่นโดยกรณีดินเหนียวผสมเถ้าไม้ยูคาลิปตัสอย่างเดียวให้ผลลดลงจากดินเหนียวที่ 0.188 และลดลงจนเหลือ 0.061 ที่ CL50W50 คิดเป็นการลด 67% และมีลดลงเล็กน้อยในช่วงที่ใส่เถ้าไม้ยูคาลิปตัสตั้งแต่ 10-30% แต่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเถ้าไม้ยูคาลิปตัส 30-50% เนื่องจากการจัดเรียงและการอัดแน่นของโครงสร้างภายในเปลี่ยนจากหลวมไปสู่แน่นเมื่อผ่านระดับส่วนผสมหนึ่งไปแล้ว เมื่อเพิ่มสัดส่วนอนุภาคละเอียดในดินเหนียวจนถึงช่วง 20–30% ขึ้นไป ค่า C_c จะลดอย่างเห็นได้ชัด (Chandrakar and Shukla, 2022; Islam, et al., 2022; Ahmed, et al., 2022; Ramakrishna, et al., 2021)

กรณีดินเหนียวผสมหินฝุ่นค่าก็ลดลงอย่างชัดเจนจาก 0.15 เหลือ 0.052 หรือ52% เนื่องจากหินฝุ่นในฐานะตัวเติมเชิงกายภาพช่วยลด C_c ตั้งแต่สัดส่วนต่ำ การเพิ่มส่วนผสมอย่างต่อเนื่องทำให้ C_c ลดลงแบบเป็นเส้นตรงมากกว่าและให้ค่าต่ำเสถียรเมื่อสัดส่วนตัวเติมเข้าใกล้ 30–50% (Ahmed et al., 2022; Islam et al., 2022) กรณีหินฝุ่นจึงเหมาะกับโครงการที่ต้องการดัชนีการอัดตัวที่ต้องการลด Cc อย่างต่อเนื่องโดยไม่ต้องเพิ่มอัตราส่วนสูงจนเกินไป (Ahmed, et al., 2022; Islam, et al., 2022)

กรณีดินเหนียวคงที่ที่ 50% แล้วเพิ่มเถ้าไม้ยูคาลิปตัสลดหินฝุ่น แสดงพฤติกรรมชัดเจนช่วงเถ้าไม้ยูคาลิปตัส 5–15% ค่า C_c เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยก่อนจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเถ้าไม้ยูคาลิปตัส ≥ 20% สะท้อนว่าตราบใดที่ยังคงสัดส่วนหินฝุ่นสูงโครงสร้างโดยรวมพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยจนกระทั่งสัดส่วนเถ้าไม้ยูคาลิปตัสมากพอจึงเกิดการปรับจัดเรียงตัวใหม่ แล้ว C_c ลดลงชัดเจนการมีช่วงเสถียรในตอนต้นก่อนเข้าสู่ช่วงลดลงชัดเจนลักษณะนี้ถูกพบในงานที่ปรับส่วนผสมภายใต้ข้อกำหนดให้คงดินเดิมระดับสูงเช่นกัน เมื่อส่วนผสมวัสดุผงละเอียดเกิน 20–30% จะเริ่มเห็นผลลด C_c เด่นขึ้น (Islam, et al., 2022; Ahmed, et al., 2022) ในการออกแบบหากต้องคงที่ดินเหนียวที่ 50% ด้วยเหตุผลด้านสมบัติอื่นๆควรกำหนดเถ้าไม้ยูคาลิปตัสอย่างน้อยช่วง 20–25% (พร้อมลดหินฝุ่น ≤25%) เพื่อให้การลด C_c เป็นช่วงที่การเพิ่มสัดส่วนที่เหมาะสม

กรณีหินฝุ่นคงที่ที่ 50% แล้วเพิ่มเถ้าไม้ยูคาลิปตัสลดดินเหนียว ให้ผลลด C_c ชัดและสม่ำเสมอที่สุดในทุกกลุ่ม จาก 0.166 ลดลงเหลือ 0.070 และลดลงตามของการเพิ่มเถ้าไม้ยูคาลิปตัส เนื่องจาก

การยึดโครงสร้างฐานด้วยหินฝุ่นที่สูงทำให้ดินเริ่มต้นจากสภาพที่แน่นแล้วการลดสัดส่วนดินเหนียว (ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่อ่อนไหวต่อการอัดตัว) ควบคู่ไปกับการเพิ่มอนุภาคละเอียดอีกชนิดจึงเปลี่ยนค่า C_c ได้อย่างต่อเนื่องและเด่นชัด การปรับส่วนผสมหลายองค์ประกอบพร้อมกันให้ผลลัพธ์ที่เด่นชัดกว่าการลดสัดส่วนดินเหนียวพร้อมเติมอนุภาคละเอียดมักลด C_c ได้มากกว่าการปรับองค์ประกอบเดียว (Ahmed, et al, 2022; Chandrakar and Shukla, 2022; Ramakrishna, et al., 2021) ในเชิงปฏิบัติการเล็งเป้าหมายสัดส่วนช่วงเถ้าไม้ยูคาลิปตัส 25–30% พร้อมลดดินเหนียวลงสู่ 20–25% ในอัตราส่วนหินฝุ่นคงที่ที่ 50% จึงเป็นช่วงส่วนผสมที่เหมาะสมและคุ้มค่าในการลดค่าดัชนีการอัดตัวสำหรับโครงการที่ต้องควบคุมการยุบตัวระยะยาวอย่างจริงจัง เช่น คันทางหรือฐานรากบนดินเนื้อละเอียด



ภาพที่ 4-16 ค่าดัชนีการอัดตัว (Compression index, C_c) ของดินเหนียว (CL) ผสมเถ้าไม้ยูคาลิปตัส (W) และหินฝุ่น (S) ในสัดส่วนต่างๆ

4.6.2 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนปริมาตร (mv) ของดินเหนียวผสมเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่นในสัดส่วนต่าง ๆ

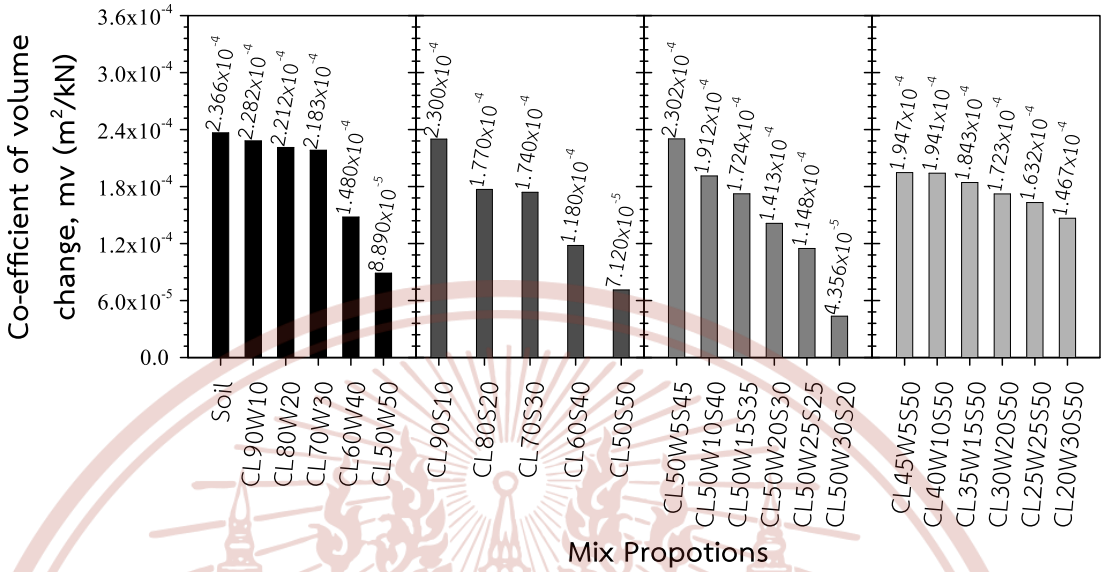
ภาพที่ 4-17 กรณีดินเหนียวผสมเถ้าไม้ยูคาลิปตัส ค่า mv ลดลงต่อเนื่องเมื่อเพิ่มสัดส่วนเถ้าไม้ยูคาลิปตัส โดยช่วงต้นมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ก่อนจะเข้าสู่ช่วงที่ค่าลดลงเด่นชัด เมื่อปริมาณเถ้าไม้ยูคาลิปตัส เพิ่มขึ้นจาก 10-30% และยังคงลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อปริมาณเถ้าไม้ยูคาลิปตัสที่ 40-50% ซึ่งตีความเชิงออกแบบได้ว่าหากต้องการควบคุมการทรุดตัวให้เห็นผลชัดการเลือกสัดส่วนเถ้าไม้ยูคาลิปตัสในช่วง 30-50% จะให้ประสิทธิภาพที่คุ้มค่าเป็นพิเศษ เหตุผลเชิงกายภาพคืออนุภาคเถ้าไม้ยูคาลิปตัสที่มีขนาดเล็กและกระจายตัวดีเข้าไปลดช่องว่าง (Voids) และเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเม็ดดิน ทำให้โครงสร้างรับแรงแน่นและเชื่อมต่อกันมากขึ้น เกิดการประสานกันของโครงสร้างเม็ดดิน (Interlocking effect) และโครงข่ายการถ่ายแรง (Force chains) ภายในมวลดินเหนียวส่งผลให้ปริมาตรเปลี่ยนต่อหน่วยความเค้นลดลง โดยไม่จำเป็นต้องอธิบายด้วยปฏิกิริยาเคมี เมื่อปริมาณตัวเติมเพิ่มจากระดับต่ำไปสู่ระดับที่มากเพียงพอ โครงสร้างภายในจะเปลี่ยนโหมดการจัดตัวและให้ผลลด

mv ที่ชัดเจนขึ้น (Chandrakar and Shukla, 2022; Ahmed, et al., 2022; Islam, et al., 2022; Ramakrishna et al., 2021)

ภาพที่ 4-17 กรณีดินเหนียวผสมหินฝุ่น ค่า mv ลดลงอย่างต่อเนื่องปริมาณการเพิ่มของหินฝุ่น หินฝุ่นทำหน้าที่เป็นโครงร่างเม็ดแร่ (Granular skeleton) ที่ช่วยลดช่องว่างและเพิ่มจุดสัมผัสของเม็ดดิน ทำให้โครงสร้างโดยรวมแน่นและสามารถถ่ายแรงได้ต่อเนื่องมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาตรที่เปลี่ยนต่อความเค้นลดลงอย่างเป็นระบบตั้งแต่สัดส่วนต่ำจนถึงสูง (10-50%) การเติมวัสดุผงแร่ที่มีการกระจายตัวดีช่วยทำให้ดัชนีการเปลี่ยนรูปของดินเหนียวลดลงเป็นขั้นเป็นตอนและเสถียรมากขึ้นเมื่อเข้าสู่ช่วงสัดส่วนระดับกลางถึงสูง (Ahmed, et al., 2022; Islam, et al., 2022)

ภาพที่ 4-17 กรณีที่ปริมาณดินเหนียวคงที่ที่ 50% แล้วเพิ่มเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและลดหินฝุ่น ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนปริมาตร (mv) แสดงออกมาเป็นสองช่วงที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยในช่วงแรกที่ปริมาณเถ้าไม้ยูคาลิปตัสอยู่ระหว่าง 5–15% ค่า mv ยังคงทรงตัวใกล้กัน แสดงว่าการเพิ่มเถ้าไม้ยูคาลิปตัสในปริมาณที่ต่ำยังไม่สามารถเปลี่ยนโครงสร้างโดยรวมของดินได้มากนัก แต่เมื่อปริมาณเถ้าไม้ยูคาลิปตัสเพิ่มขึ้นถึง 20% ขึ้นไปพบว่าค่า mv เริ่มลดลงอย่างชัดเจนและลดลงต่อเนื่องจนถึงค่าต่ำสุดเมื่อเถ้าไม้ยูคาลิปตัสอยู่ที่ 30% และ หินฝุ่น 20% พฤติกรรมนี้สะท้อนว่าหากต้องการผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพต่อการลด mv ภายใต้เงื่อนไขดินเหนียวคงที่ที่ 50% ควรกำหนดเถ้าไม้ยูคาลิปตัสให้อยู่ในช่วงอย่างน้อย 20–30% จึงจะเห็นการเปลี่ยนแปลงเด่นชัด เมื่อสัดส่วนวัสดุผงละเอียดถึงระดับหนึ่งพฤติกรรมการเปลี่ยนปริมาตรของดินจะเปลี่ยนโหมดการตอบสนองและให้ผลที่เด่นชัดขึ้น (Islam, et al., 2022; Ahmed, et al., 2022)

ภาพที่ 4-17 กรณีที่ปริมาณหินฝุ่นคงที่ที่ 50% แล้วเพิ่มเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและลดดินเหนียว ค่า mv ลดลงอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงสัดส่วนผสม พฤติกรรมดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า การคงสัดส่วนวัสดุแร่ผงในระดับสูงทำให้โครงสร้างภายในของดินมีความเสถียร และการปรับลดปริมาณดินเหนียวพร้อมเพิ่มสัดส่วนวัสดุผงละเอียดอีกชนิดหนึ่งช่วยให้ mv ลดลงได้อย่างเป็นระบบ โดยลักษณะการลดลงเป็นไปแบบค่อยเป็นค่อยไป ไม่มีการเปลี่ยนแปลงแบบกะทันหัน จึงเหมาะสมกับงานที่ต้องการควบคุมการทรุดตัวให้ปรับตัวลงอย่างต่อเนื่องและสามารถคาดการณ์ได้ เนื่องจากการคงวัสดุแร่ผงในระดับสูงแล้วค่อยๆปรับองค์ประกอบอีกตัวหนึ่งมักให้ผลลดตัวชี้วัดการยุบตัวและการเปลี่ยนปริมาตรอย่างเป็นระบบและควบคุมได้ (Ahmed, et al., 2022; Ramakrishna, et al., 2021)



ภาพที่ 4-17 ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนปริมาตร (Co-efficient of volume change, mv) ของดินเหนียว (CL) ผสมเถ้าไม้ยูคาลิปตัส (W) และหินฝุ่น (S) ในสัดส่วนต่างๆ

4.6.3 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การทรุดตัว (C_v) ของดินเหนียวผสมเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่นในสัดส่วนต่างๆ

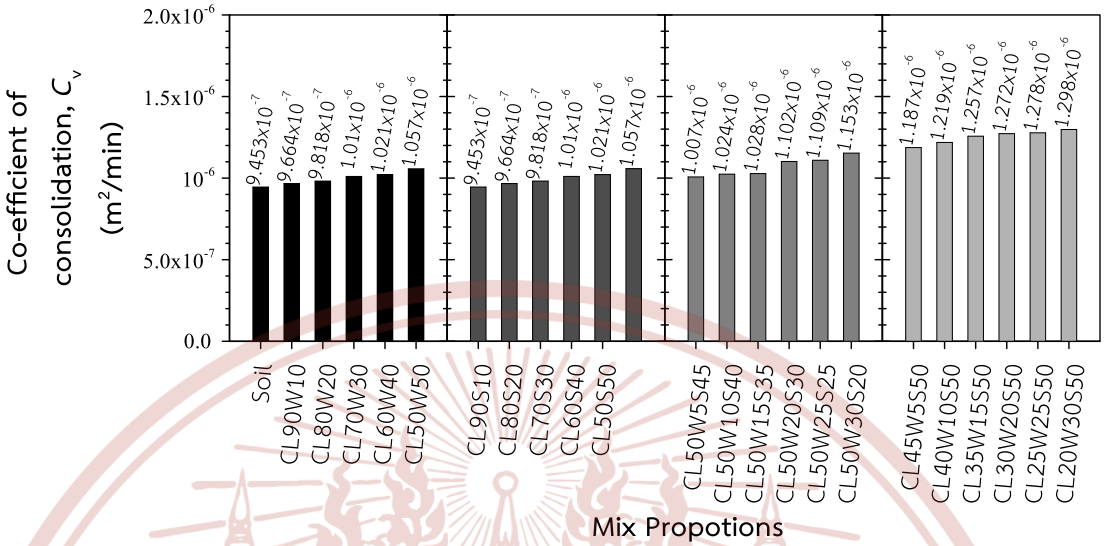
ภาพที่ 4-18 กรณีดินเหนียวผสมเถ้าไม้ยูคาลิปตัส ค่าสัมประสิทธิ์การทรุดตัว (C_v) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในช่วงอัตราส่วนผสมที่มีเถ้าไม้ยูคาลิปตัสตั้งแต่ 10-20% การเปลี่ยนแปลงของค่า C_v เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เนื่องจากปริมาณถ้ำม้ยูคาลิปตัสที่เพิ่มเข้าไปยังไม่เพียงพอที่จะปรับโครงสร้างของดินให้เกิดการเปลี่ยนแปลงได้ แต่เมื่อเถ้าไม้ยูคาลิปตัสเพิ่มขึ้น 30-50% โครงสร้างภายในของดินเริ่มมีการจัดเรียงใหม่อนุภาคละเอียดจากเถ้าไม้ยูคาลิปตัสทำหน้าที่แทรกตัวลงไปในช่องว่างและส่งเสริมการเชื่อมโยงของโครงข่ายช่องว่างภายในดิน ส่งผลให้เส้นทางการไหลลดลงและรูพรุนภายในมวลดินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการระบายน้ำได้ดีขึ้นพร้อมกับค่า mv ลดลง เมื่อทั้งสองตัวแปรเปลี่ยนไปในทิศทางดังกล่าวค่า C_v จึงเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัด จากนั้นเมื่อสัดส่วนเถ้าไม้ยูคาลิปตัสอยู่ในระดับสูงเกิน ดินจะเข้าสู่สภาวะที่โครงร่างภายในค่อนข้างเสถียรและการจัดเรียงตัวใหม่ของอนุภาคเริ่มถึงขีดจำกัด ทำให้แม้ค่า C_v จะยังคงเพิ่มขึ้น แต่มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย การเพิ่มวัสดุผงละเอียดในระดับสัดส่วนที่เหมาะสมช่วยให้ทางระบายน้ำภายในต่อเนื่องขึ้นและความสามารถในการเปลี่ยนปริมาตรลดลง ทำให้กระบวนการทรุดตัวดำเนินได้รวดเร็วกว่าเดิม (Chandrakar and Shukla, 2022; Ahmed, et al., 2022; Islam, et al., 2022; Ramakrishna, et al., 2021)

ภาพที่ 4-18 กรณีดินเหนียวผสมหินฝุ่น ค่า C_v มีลักษณะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง การเพิ่มหินฝุ่นส่งผลให้ค่า C_v เพิ่มขึ้นเนื่องจากหินฝุ่นซึ่งมีลักษณะเป็นอนุภาคเชิงแร่ที่ผ่านกระบวนการย่อยที่มีการกระจายตัวดีและผิวสัมผัสเหลี่ยมคม ช่วยเสริมสร้างโครงร่างภายในดินให้มีความหนาแน่นขึ้น โดยสามารถลดช่องว่างและเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเม็ดดินทำให้การถ่ายแรงทำได้ดีมากขึ้น ผลลัพธ์ดังกล่าวส่งผลให้ความสามารถในการซึมน้ำของดินเพิ่มขึ้น ขณะที่การเปลี่ยนปริมาตรลดลง เมื่อพิจารณาร่วมกันแล้วจะทำให้ค่า C_v มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มสัดส่วนหินฝุ่นทำให้โครงสร้างภายในของดินมีทางระบายน้ำที่เชื่อมโยงต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพมากขึ้น จึงทำให้กระบวนการ

ระบายน้ำส่วนเกินและการเข้าสู่สมดุลการทรุดตัวดำเนินไปได้รวดเร็วกว่าเดิม การเพิ่มวัสดุผงแร่ที่มีการกระจายตัวสม่ำเสมอทำให้การระบายน้ำในระยะการอัดตัวดีขึ้นอย่างเป็นระบบ (Ahmed, et al., 2022; Islam, et al., 2022)

ภาพที่ 4-18 กรณีดินเหนียวคงที่ที่ 50% ค่า C_v โดยในช่วงแรกที่ปริมาณเถ้าไม้ยูคาลิปตัสอยู่ในระดับต่ำ 5–15% ค่า C_v มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย สะท้อนว่าการเพิ่มเถ้าไม้ยูคาลิปตัสในปริมาณดังกล่าวยังไม่เพียงพอที่จะปรับโครงสร้างภายในดินให้เกิดการเปลี่ยนแปลง แต่เมื่อปริมาณเถ้าไม้ยูคาลิปตัสเพิ่มขึ้นเกิน 20% ค่า C_v เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากอนุภาคเถ้าไม่ยูคาลิปตัสที่มีขนาดละเอียดและกระจายตัวดีช่วยปรับโครงสร้างภายในของดินให้แน่นขึ้นและสร้างทางเชื่อมระหว่างคอคอดรูพรุน (pore throats) ได้มากขึ้น ส่งผลให้การระบายน้ำส่วนเกินระหว่างกระบวนการอัดตัวเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยช่วงสัดส่วนเถ้าไม้ยูคาลิปตัสที่ 20–30% ถือเป็นช่วงสัดส่วนที่เหมาะสมต่อการพัฒนาประสิทธิภาพของดินที่ให้ผลลัพธ์คุ้มค่าต่อการเร่งกระบวนการระบายน้ำส่วนเกินและทำให้ดินเข้าสู่สมดุลการทรุดตัวได้รวดเร็วขึ้น การเพิ่มสัดส่วนวัสดุผงละเอียดจนเกินเกณฑ์หนึ่งทำให้กระบวนการทรุดตัวดำเนินเร็วขึ้นอย่างมีนัย (Islam, et al., 2022) การใช้ส่วนผสมร่วมกันของวัสดุผงมากกว่าหนึ่งชนิดให้ผลเด่นกว่าการใช้ชนิดเดียว โดยเฉพาะในช่วงสัดส่วนระดับกลางถึงสูง (Ahmed, et al., 2022)

ภาพที่ 4-18 กรณีหินฝุ่นคงที่ที่ 50% ค่า C_v เพิ่มขึ้นตามปริมาณของเถ้าไม้ยูคาลิปตัส พฤติกรรมดังกล่าวสะท้อนถึงผลของการคงสัดส่วนวัสดุหยาบเชิงแรในระดับสูง ซึ่งทำหน้าที่เป็นโครงร่างหลักของดิน และเมื่อปรับเพิ่มวัสดุผงละเอียดอีกชนิดหนึ่งเข้าไป โครงข่ายช่องว่างภายในมีการเชื่อมโยงที่ดีขึ้น การระบายน้ำจึงเป็นไปได้อย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่องการปรับส่วนผสมในลักษณะนี้จึงเหมาะสำหรับงานที่ต้องการควบคุมการทรุดตัวให้ดำเนินไปอย่างเป็นระบบ โดยที่การเพิ่มสัดส่วนเถ้าไม้ยูคาลิปตัสสามารถทำให้ค่า C_v เพิ่มขึ้นไม่เกิดพฤติกรรมกระโดดเช่นในบางกรณีที่ส่วนผสมยังไม่ถึงระดับวิกฤต การใช้ส่วนผสมร่วมกันของวัสดุผงมากกว่าหนึ่งชนิดให้ผลเด่นกว่าการใช้ชนิดเดียว โดยเฉพาะในช่วงสัดส่วนระดับกลางถึงสูง (Ahmed, et al., 2022) และสอดคล้องกับหลักการที่ว่าเมื่อโครงสร้างดินได้รับการปรับด้วยวัสดุผงละเอียดที่เหมาะสม กระบวนการทรุดตัวจะดำเนินได้เร็วขึ้นและเสถียรกว่าในกรณีผสมต่ำ (Ramakrishna, et al., 2021)



ภาพที่ 4-18 ค่าสัมประสิทธิ์การทรุดตัว (Co-efficient of Consolidation, C_v) ของดินเหนียว (CL) ผสมเถ้าไม้ยูคาลิปตัส (W) และหินฝุ่น (S) ในสัดส่วนต่างๆ

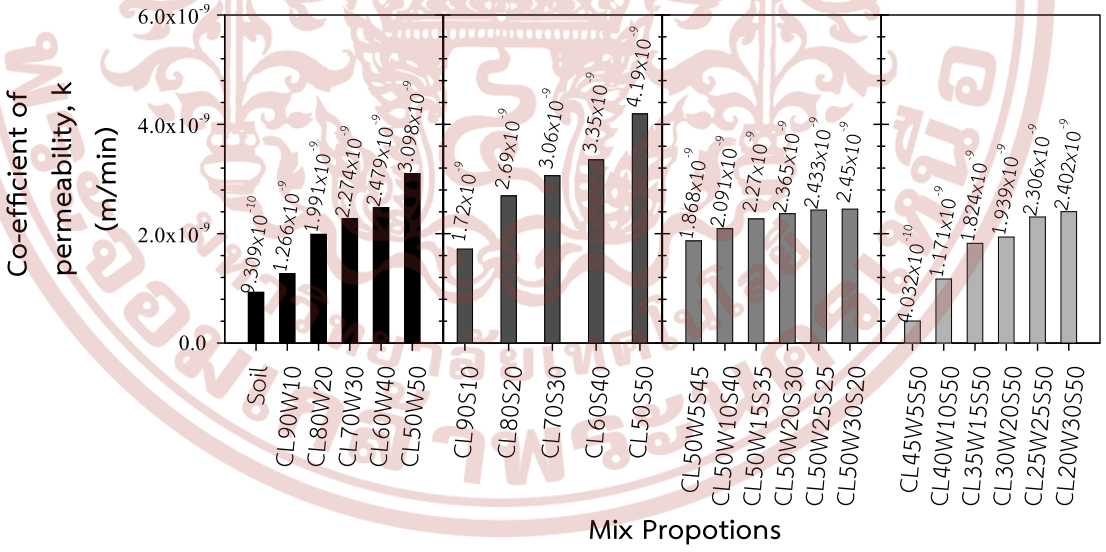
4.6.4 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (k) ของดินเหนียวผสมเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่นในสัดส่วนต่าง ๆ

ภาพที่ 4-19 กรณีดินเหนียวผสมเถ้าไม้ยูคาลิปตัส ค่า k แสดงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นที่ชัดเจนในช่วงที่ใส่เถ้าไม้ยูคาลิปตัสประมาณ 10–30% ก่อนที่ลักษณะกาเพิ่มขึ้นจะน้อยลงเมื่อเข้าสู่สัดส่วนสูงกว่า 30% สะท้อนถึงการปรับเปลี่ยนโครงสร้างภายในของดินที่ดำเนินไปอย่างเป็นลำดับขั้นโดยอนุภาคเถ้าที่มีขนาดละเอียดและกระจายตัวดีทำหน้าที่เพิ่มความต่อเนื่องของช่องว่างระหว่างรูพรุน (pore-throat continuity) และลดเส้นทางการไหล (tortuosity) ทำให้เกิดระบบทางไหลภายในดินที่มีความเชื่อมต่ออย่างมีประสิทธิภาพภายในมวลดินส่งผลให้การไหลผ่านดีขึ้นอย่างมีนัย เมื่อปริมาณเถ้าไม้ยูคาลิปตัสเพิ่มจนสูงมาก โครงสร้างเริ่มเข้าใกล้ภาวะอิ่มตัวต่อการจัดเรียงใหม่จึงปรากฏลักษณะการเพิ่มขึ้นของค่า k ที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย การเสริมวัสดุผงละเอียดในระดับสัดส่วนที่เหมาะสมช่วยทำให้ช่องทางระบายน้ำภายในต่อเนื่องขึ้นและประสิทธิภาพการไหลผ่านดีขึ้นอย่างเป็นระบบและอนุภาคเถ้าที่กระจายตัวละเอียดสามารถปรับการจัดวางเม็ดดินและช่วยให้สมรรถนะการระบายน้ำได้ดีในช่วงสัดส่วนผสมระดับกลาง (Chandrakar and Shukla, 2022; Ahmed, et al., 2022)

ภาพที่ 4-19 สำหรับกรณีดินเหนียวผสมหินฝุ่น ค่า k พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นตลอดช่วงสัดส่วนหินฝุ่นตั้งแต่ 10–50% การเพิ่มปริมาณหินฝุ่นในแต่ละช่วงส่งผลให้โครงสร้างภายในของดินมีการปรับตัวเนื่องจากอนุภาคหินฝุ่นที่มีลักษณะเหลี่ยมคมและกระจายตัวดีสามารถเสริมสร้างโครงร่างเชิงเม็ด (granular skeleton) ให้แข็งแรงขึ้นเรื่อยๆ ส่งผลให้การเชื่อมโยงของช่องว่างระหว่างรูพรุนมีความต่อเนื่องมากขึ้นและลดเส้นทางการไหลทำให้เส้นทางการไหลของน้ำมีประสิทธิภาพมากขึ้นในทุกช่วงสัดส่วน การเพิ่มวัสดุผงแร่ที่มีการกระจายตัวสม่ำเสมอทำให้การระบายน้ำในระยะการอัดตัวดีขึ้นอย่างเป็นระบบ (Ahmed, et al., 2022; Islam, et al., 2022) การเติมหินฝุ่นในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจะช่วยเพิ่มค่า k ซึ่งเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมปฐพีที่ต้องการควบคุมแนวโน้มการซึมน้ำให้มีเสถียรภาพและสามารถคำนวณได้อย่างชัดเจน.

ภาพที่ 4-19 กรณีคงที่ดินเหนียวที่ที่ 50% ค่า k พบว่าในช่วงที่เถ้าไม้ยูคาลิปตัส อยู่ในระดับต่ำ (5-15%) มีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่เมื่อเถ้าไม้ยูคาลิปตัสเพิ่มขึ้นถึงช่วง 20–30% ค่า k จะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน พฤติกรรมนี้แสดงให้เห็นว่าการเติมเถ้าไม้ยูคาลิปตัสในปริมาณดังกล่าวเพียงพอที่จะปรับเปลี่ยนโครงสร้างภายในของดิน ทำให้โครงสร้างมีความต่อเนื่องของช่องว่างมากขึ้นและการระบายน้ำมีประสิทธิภาพสูงขึ้น การเพิ่มสัดส่วนวัสดุผงละเอียดจนเกินเกณฑ์หนึ่งทำให้กระบวนการไหลผ่านและการทรุดตัวดำเนินได้รวดเร็วขึ้นอย่างมีนัย (Islam, et al., 2022) การใช้ส่วนผสมร่วมกันของวัสดุผงมากกว่าหนึ่งชนิดให้ผลเด่นกว่าการใช้ชนิดเดียว โดยเฉพาะในช่วงสัดส่วนระดับกลางถึงสูง (Ahmed, et al., 2022) ดังนั้น การเพิ่มเถ้าไม้ยูคาลิปตัสในช่วง 20–30% ภายใต้ เงื่อนไขที่คงที่ดินเหนียวที่ 50% จึงเป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงค่า k ของดินเหนียว

ภาพที่ 4-19 กรณีหินฝุ่นคงที่ที่ 50% ค่า k มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง พฤติกรรมนี้สะท้อนให้เห็นว่าการคงสัดส่วนวัสดุหยาบเชิงแร่ในระดับสูงช่วยสร้างโครงสร้างจุลภาคของดินที่มีการจัดเรียงตัวแน่นขึ้นขณะที่การเพิ่มเถ้าไม้ยูคาลิปตัสทำให้โครงสร้างมีการเติมเต็มและปรับการเชื่อมโยงของช่องว่าง จนเกิดการระบายน้ำที่มีความต่อเนื่องและสม่ำเสมอมากขึ้น การใช้ส่วนผสมร่วมกันของวัสดุผงมากกว่าหนึ่งชนิดให้ผลเด่นกว่าการใช้ชนิดเดียว โดยเฉพาะในช่วงสัดส่วนระดับกลางถึงสูง (Ahmed, et al., 2022) และเมื่อโครงสร้างดินได้รับการปรับด้วยวัสดุผงละเอียดที่เหมาะสม กระบวนการระบายน้ำในระยะการทรุดตัวจะดำเนินไปได้อย่างรวดเร็วและเสถียรกว่า (Ramakrishna, et al., 2021)



ภาพที่ 4-19 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Co-efficient of permeability, k) ของดินเหนียว (CL) ผสมเถ้าไม้ยูคาลิปตัส (W) และหินฝุ่น (S) ในสัดส่วนต่างๆ

4.7 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงแบกทานและแรงยึดเหนี่ยว

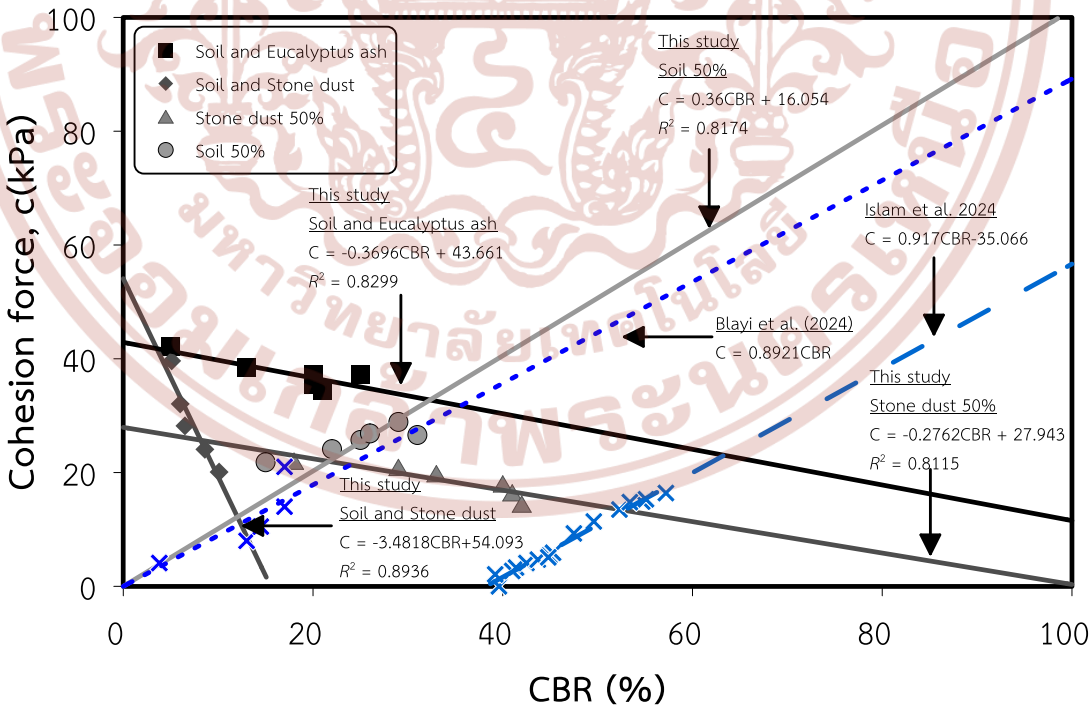
การประเมินสมบัติเชิงกลของดินถือเป็นประเด็นสำคัญในงานวิศวกรรมปฐพี เนื่องจากคุณภาพของดินเป็นปัจจัยที่กำหนดเสถียรภาพและความมั่นคงของโครงสร้างพื้นฐาน การทดสอบกำลังรับแรง

แบกทานและการทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนโดยตรง เป็นสองวิธีที่ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์สมรรถนะของดิน โดยการทดสอบ CBR ใช้เพื่อสะท้อนความสามารถของดินในการรองรับน้ำหนักจรและการใช้งานในงานทางและงานพื้นทาง ขณะที่การทดสอบกำลังเฉือนโดยตรงใช้เพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์เชิงกลได้แก่ ค่า (c) และ φ ซึ่งมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของดินและการออกแบบโครงสร้างต่างๆ แม้ว่าทั้งสองการทดสอบจะประเมินสมบัติที่แตกต่างกัน แต่ในเชิงพฤติกรรมของดินนั้นค่ากำลังรับแรงแบกทานและค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนต่างเป็นตัวสะท้อนความสามารถของดินในการต้านทานต่อแรงภายนอกในรูปแบบที่ต่างกัน การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าทั้งสองจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากสามารถใช้เป็นฐานข้อมูลเพื่อเชื่อมโยงผลการทดสอบ ลดความซ้ำซ้อนในการทดลองทางห้องปฏิบัติการ และเพิ่มประสิทธิภาพในการคาดการณ์คุณสมบัติของดินในภาคสนาม การศึกษานี้จึงมุ่งเน้นการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบระหว่างค่ากำลังรับแรงแบกทานและค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนโดยตรง เพื่อสร้างความเข้าใจที่เป็นระบบ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานออกแบบและงานปรับปรุงคุณภาพดินในอนาคต

จากภาพที่ 4-20 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนกำลังรับน้ำหนักของดิน (CBR) และค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยว (Cohesion, c) ของชุดข้อมูลทดสอบ พบว่ากลุ่มวัสดุผสมที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวในงานวิจัยนี้ (ได้แก่ ดินผสมเถ้ายูคาลิปตัส ดินผสมฝุ่นหิน และฝุ่นหินร้อยละ 50) ล้วนแสดงแนวโน้มความสัมพันธ์เชิงลบในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อค่า CBR เพิ่มสูงขึ้น ค่าแรงยึดเหนี่ยว (c) กลับมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยพฤติกรรมดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากกลไกการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางวิศวกรรมของวัสดุผสม สำหรับชุดดินผสมเถ้ายูคาลิปตัส (Soil + Eucalyptus ash) พบว่ามีค่า c เริ่มต้นค่อนข้างสูงในช่วงที่ค่า CBR ต่ำ ซึ่งเป็นผลมาจากโครงสร้างแบบกึ่งยึดเหนี่ยว (Semi-cohesive) ที่ยังมีอิทธิพลของอนุภาคดินเหนียวทำงานร่วมกับอนุภาคของเถ้าไม้ แต่เมื่อค่า CBR สูงขึ้น โครงสร้างของมวลดินจะเริ่มเปลี่ยนไปสู่ระบบที่พึ่งพาแรงเสียดทานภายใน (Internal friction) เป็นหลัก ส่งผลให้ค่า c ลดลงอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ชุดดินผสมฝุ่นหิน (Soil + Stone dust) มีแนวโน้มลดลงในลักษณะคล้ายคลึงกันแต่ให้ค่า c ที่ต่ำกว่าอย่างชัดเจน เนื่องจากฝุ่นหินมีพฤติกรรมแบบวัสดุเม็ดหยาบ (Granular material) ที่เด่นชัดกว่าคุณสมบัติการยึดเหนี่ยว จึงทำให้ค่า CBR ดีขึ้นจากการเสียดทานโดยที่ค่า c ไม่สูงมากนัก ส่วนชุดฝุ่นหินร้อยละ 50 (Stone dust 50%) เป็นชุดที่แสดงค่า c ต่ำที่สุดและมีอัตราการลดลงอย่างรวดเร็วที่สุด เนื่องจากโครงสร้างดินเดิมถูกแทนที่ด้วยเม็ดวัสดุหยาบจำนวนมาก ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคสูญเสียไปอย่างชัดเจน แม้ว่าโครงสร้างการขัดตัวระหว่างเม็ดดิน (Interlocking) จะเข้ามาช่วยส่งเสริมให้ค่า CBR สูงขึ้นแทนก็ตามอย่างไรก็ตาม เมื่อนำพฤติกรรมทางวิศวกรรมของชุดทดสอบดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองความสัมพันธ์จากงานวิจัยในอดีต ได้แก่ การศึกษาของ Blayi, et al., (2024) ที่เสนอสมการความสัมพันธ์ c = 0.8921CBR และ Islam, et al. (2024) ที่เสนอสมการ c = 0.917CBR - 35.066 กลับพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ โดยงานวิจัยทั้งสองฉบับได้นำเสนอความสัมพันธ์เชิงบวก (Positive correlation) ระหว่างค่า CBR และค่า c ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากำลังรับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นนั้นแปรผันตรงกับแรงยึดเหนี่ยวที่สูงขึ้น ความแตกต่างของแนวโน้มนี้สามารถอธิบายได้จากลักษณะของวัสดุและกลไกการรับแรงที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปความสัมพันธ์เชิงบวกดังกล่าวมักพบในกลุ่มดินที่มีความเหนียวตามธรรมชาติสูง หรือในงานปรับปรุงคุณภาพดินด้วยสารเคมี

(Chemical stabilization) ที่ก่อให้เกิดสารประกอบเชื่อมประสาน (Cementitious gel) ซึ่งช่วยเพิ่มทั้งแรงยึดเหนี่ยวและกำลังรับน้ำหนักไปพร้อมกัน ซึ่งแตกต่างอย่างสิ้นเชิงกับกลไกเชิงกล (Mechanical stabilization) ของเถ้ายูคาลิปตัสและฝุ่นหินในงานวิจัยนี้ ที่เน้นการเข้าไปแทนที่ (Replacement) อนุภาคดินเหนียวด้วยวัสดุเม็ดหยาบนั่นเองดังนั้น ผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้จึงเป็นการยืนยันถึงกลไกการรับแรงที่เปลี่ยนแปลงไปของโครงสร้างดินเมื่อได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยวัสดุผสม การเติมเถ้ายูคาลิปตัสและฝุ่นหินลงไปในมวลดิน จะเข้าไปลดสัดส่วนของอนุภาคดินเหนียว (Clay particles) ซึ่งเป็นกลไกหลักในการสร้างแรงยึดเหนี่ยว ส่งผลให้ค่า c ลดลงตามปริมาณวัสดุผสมที่เพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน การเข้ามาแทนที่ของเม็ดวัสดุเหล่านี้ได้เข้าไปเพิ่มความเสียดทานและการขัดตัว (Interlocking) ระหว่างอนุภาค ทำให้โครงสร้างดินโดยรวมมีความแข็งแรงและต้านทานแรงต้านทานได้ดีขึ้น ซึ่งสะท้อนออกมาในรูปของการเพิ่มขึ้นของค่า CBR อย่างชัดเจน พฤติกรรมดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า การพัฒนากำลังรับน้ำหนักของชั้นดินด้วยวิธีนี้ อาศัยโครงร่างความเสียดทานเป็นหลัก แลกมากับการสูญเสียคุณสมบัติความยึดเหนี่ยวดั้งเดิมของเนื้อดินไปตามสัดส่วนการผสม

Soil and Eucalyptus ash	$c = 0.024 \cdot CBR^2 - 1.023 \cdot CBR + 46.829$	$R^2 = 0.8503$ (4-1)
Soil and Stone dust	$c = -3.4818 \cdot CBR + 54.093$	$R^2 = 0.8936$ (4-2)
Soil 50%	$c = 0.36\ CBR + 16.054$	$R^2 = 0.8174$ (4-3)
Stone dust 50%	$c = -0.276 \cdot CBR^2 + 0.633 \cdot CBR + 15.354$	$R^2 = 0.9273$ (4-4)



ภาพที่ 4-20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงแบกทานและกำลังต้านแรงเฉือน

4.8 แบบจำลองถดถอยเชิงพหุของดินเหนียวปรับปรุงด้วยหินฝุ่นและเถ้าไม้ยูคาลิปตัส

จากการศึกษาพบว่า การสร้างแบบจำลองถดถอยเชิงพหุของดินเหนียวที่ปรับปรุงด้วยหินฝุ่นและเถ้าไม้ยูคาลิปตัสสามารถสะท้อนความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางวิศวกรรมดินกับค่า c ที่ได้จากการทดสอบจริงได้อย่างเหมาะสม โดยได้เลือกใช้ตัวแปรอิสระที่มีบทบาทสำคัญต่อพฤติกรรมของดิน ได้แก่ ค่า PI, OMC, MDD และ CBR มาสร้างเป็นสมการเชิงประจักษ์ สมการดังกล่าวไม่เพียงสะท้อนทิศทางการเปลี่ยนแปลงของแรงยึดเหนี่ยวจากอิทธิพลของปัจจัยด้านองค์ประกอบและสมบัติทางฟิสิกส์ของดิน

4.8.1 การประมาณค่าแรงยึดเหนี่ยว (Cohesion, c) ด้วยแบบจำลองถดถอยเชิงพหุ

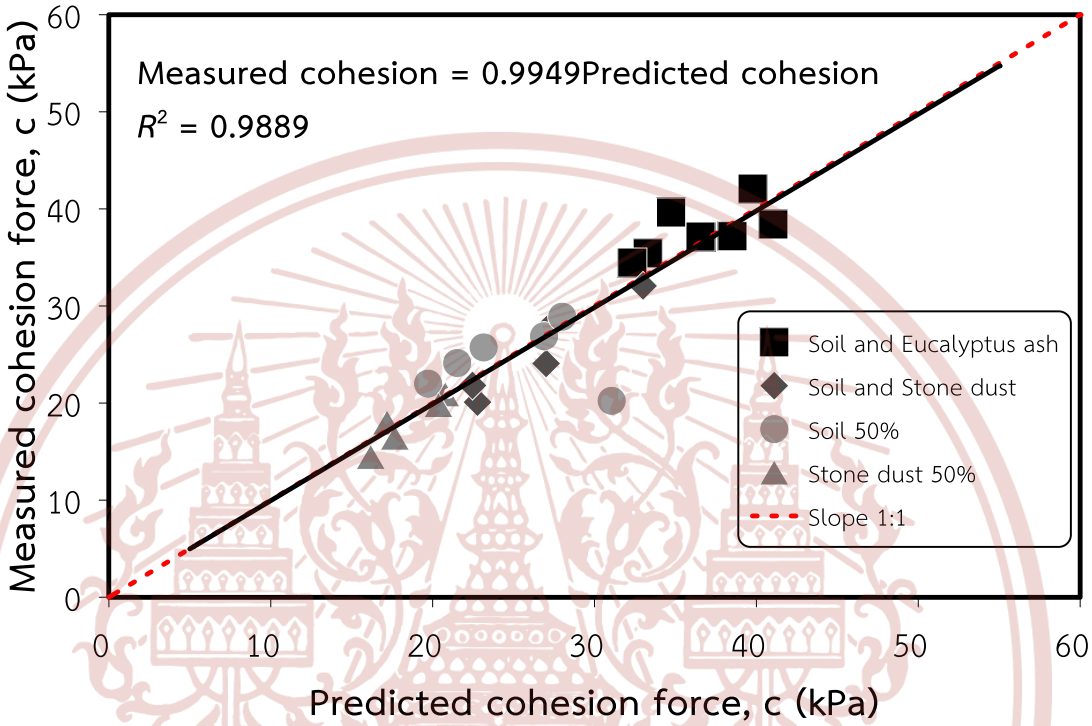
จากผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลพบว่า ค่าความยึดเหนี่ยว (Cohesion, c) ของดินผสมเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่นได้รับอิทธิพลจากหลายปัจจัย เช่น ค่า PI, LL, OMC, MDD และ GS ปัจจัยเหล่านี้มีความสัมพันธ์กับค่า c ของดินที่ปรับปรุงคุณภาพ ดังนั้นเพื่อรวมผลกระทบของตัวแปรต่างๆ และสร้างสมการพยากรณ์ จึงได้ทำการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ (Multiple linear regression analysis) โดยพิจารณาตัวแปรปฏิสัมพันธ์ร่วม (Interaction term) เช่นเดียวกัน จากนั้นจึงเปรียบเทียบค่า c ที่ทำนายได้กับค่าที่วัดจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งผลลัพธ์ของสมการแสดงไว้ดังนี้

$$c = 4.26(PI) + 0.08(LL) + 14.49(OMC) + 2.75(MDD) + 31.42(GS) - 0.89(OMC \cdot MDD) - 118.18 \quad (4\text{-}5)$$

$$R^2 = 0.92$$

โดยสมการนี้ให้ค่า $R^2 = 0.92$ แสดงถึงความสามารถของแบบจำลองในการอธิบายความแปรผันของค่าความยึดเหนี่ยว (c) ได้ในระดับสูงถึง 92% เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าจริงจากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย พบว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมบูรณ์ (Mean absolute error) อยู่ที่ประมาณ ±1.71$ kPa (หรือเฉลี่ยประมาณ ±6.49%) ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้และมีความแม่นยำสูงสำหรับการประเมินเชิงวิศวกรรมจากสมการจะเห็นได้ว่าค่า c มีความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างชัดเจนกับค่าความพลาสติกของดิน (PI) ซึ่งสะท้อนว่าดินที่มีความเหนียวจัด (ปริมาณดินเหนียวสูง) จะมีแรงยึดเกาะระหว่างอนุภาคเม็ดดินที่สูงขึ้น ส่งผลให้ค่าความยึดเหนี่ยว (c) เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในขณะเดียวกัน ตัวแปรความชื้นเหมาะสม (OMC) และความหนาแน่นแห้ง (DD) มีตัวคูณเดี่ยวเป็นบวก หมายความว่าการเพิ่มความชื้นให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมและบดอัดให้ได้ความหนาแน่นสูงสุดจะช่วยให้เม็ดดินเกาะตัวกันได้ดีขึ้นอย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาในรูปแบบปฏิสัมพันธ์ร่วมกัน แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงลบ ซึ่งมีความหมายทางปฐพีกลศาสตร์ว่า หากเพิ่มความชื้นมากเกินไปจนเกินจุดที่สมดุลกับความหนาแน่น (ดินแฉะเกินไป) น้ำจะเข้าไปแทรกระหว่างเม็ดดินและทำหน้าที่เหมือนสารหล่อลื่น (Lubricant) ทำให้แรงยึดเหนี่ยวลดลง นอกจากนี้ ค่าพิกัดของเหลว (LL) และความถ่วงจำเพาะ (GS) ยังมีค่าสัมประสิทธิ์เป็นบวก ซึ่งช่วยสนับสนุนโครงสร้างและการยึดเกาะของอนุภาคดินได้อีกด้วยโดยสรุปแบบจำลองเชิงเส้นนี้สามารถใช้ในการประเมินหรือทำนายค่าความยึดเหนี่ยว (c) ของดินผสมเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสะท้อนถึงความสัมพันธ์ระหว่าง

คุณสมบัติทางพลาสติก ความชื้น และโครงสร้างความหนาแน่นของดินที่มีผลต่อกำลังต้านทานแรงเฉือนของวัสดุอย่างชัดเจน



ภาพที่ 4-21 การเปรียบเทียบระหว่างค่า cohesion ที่วัดได้และค่าที่คาดการณ์ไว้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ

4.8.2 การประมาณค่ามุมเสียดทายภายใน (Angle of internal friction, φ) ด้วยแบบจำลองถดถอยเชิงพหุ

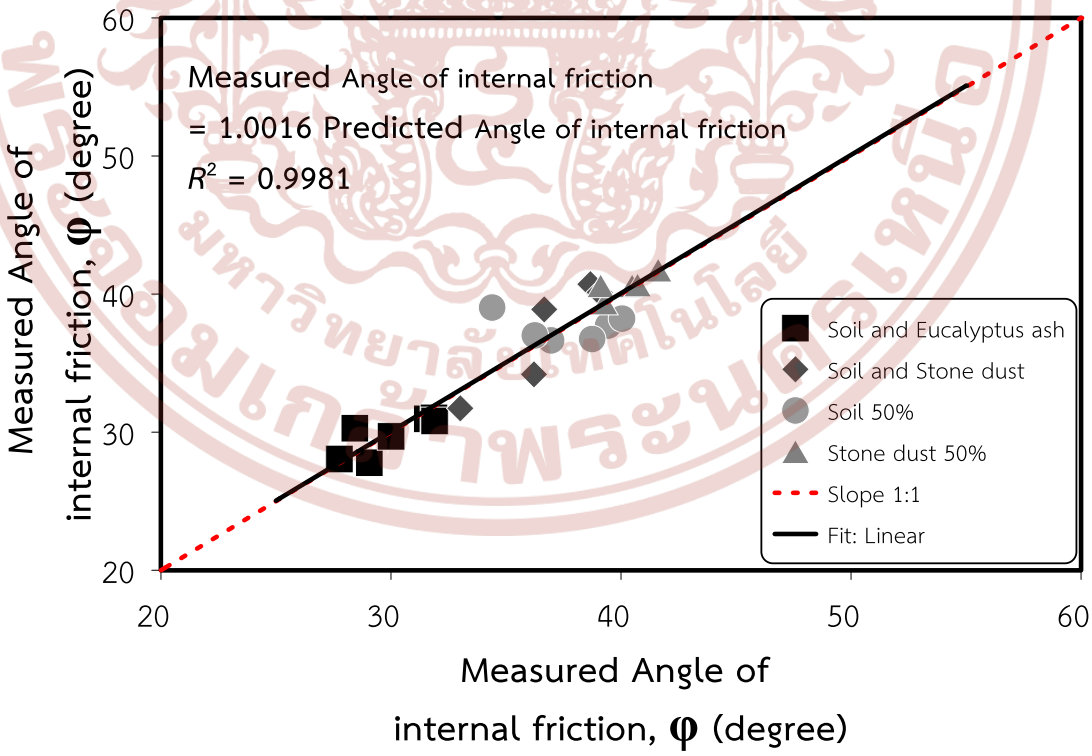
จากผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลพบว่า ค่ามุมเสียดทานภายใน (Angle of internal friction, φ) ของดินผสมเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่นได้รับอิทธิพลจากหลายปัจจัย เช่น ค่า PI, LL, OMC, MDD และ GS ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีความสัมพันธ์กับค่า φ ของดินที่ปรับปรุงคุณภาพ ดังนั้นเพื่อรวมผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ และสร้างสมการพยากรณ์ ผู้วิจัยจึงได้ทำการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ (Multiple linear regression analysis) โดยพิจารณาตัวแปรปฏิสัมพันธ์ร่วม (Interaction term) จากนั้นจึงเปรียบเทียบค่า φ ที่ทำนายได้กับค่าที่วัดจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งผลลัพธ์ของสมการแสดงไว้ดังนี้

$$\varphi = -2.32(PI) - 0.10(LL) - 7.46(OMC) - 1.81(DD) - 22.34(GS) + 0.44(OMC \cdot DD) + 141.47$$

$$R^2 = 0.905 \qquad (4\text{-}6)$$

โดยสมการนี้ให้ค่า R^2 = 0.90 แสดงถึงความสามารถของแบบจำลองในการอธิบายความแปรผันของค่ามุมเสียดทานภายใน (φ) ได้ในระดับสูงถึง 90% เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าจริงจากการ

ทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย พบว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมบูรณ์ (Mean absolute error) อยู่ที่ประมาณ 1.16 องศา หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเพียงแค่ 3.27% ซึ่งจัดว่ามีความแม่นยำสูงมากและอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ดีสำหรับการประเมินเชิงวิศวกรรมจากสมการจะเห็นได้ว่า ค่ามุมเสียดทานภายใน (φ) มีความสัมพันธ์เชิงลบอย่างชัดเจนกับค่าความพลาสติกของดิน (PI) ซึ่งสะท้อนความจริงที่ว่า ดินที่มีความเหนียวจัด (ดินเหนียว) จะมีอนุภาคที่แบนและมีชั้นน้ำห่อหุ้ม ทำให้เกิดการลื่นไถลระหว่างเม็ดดินได้ง่าย ส่งผลให้ค่ามุมเสียดทานภายในต่ำลงอย่างมาก (ตรงข้ามกับทรายที่มีความหยาบและมีมุมเสียดทานสูงกว่า)นอกจากนี้ แม้ตัวแปรความชื้นเหมาะสม (OMC) และความหนาแน่นแห้ง (MDD) จะมีตัวคูณเดี่ยวเป็นค่าลบ แต่เมื่อพิจารณาในรูปแบบการทำงานร่วมกันผ่านตัวแปรปฏิสัมพันธ์ แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงบวกที่น่าสนใจ หมายความว่าหากดินได้รับการควบคุมความชื้นให้อยู่ในระดับที่สมดุลกับพลังงานการบดอัดจนได้ความหนาแน่นสูงสุด อนุภาคของดิน เถ้าไม้ยูคาลิปตัส และหินฝุ่น จะจัดเรียงตัวขัดล็อคกันแน่นขึ้น (Interlocking) ซึ่งพฤติกรรมการขัดล็อคของโครงสร้างที่หนาแน่นนี้เองที่ช่วยเพิ่มมุมเสียดทานภายในของมวลดินได้อย่างมีนัยสำคัญโดยสรุป แบบจำลองเชิงเส้นนี้สามารถใช้ในการประเมินหรือทำนายค่ามุมเสียดทานภายในของดินผสมเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสะท้อนถึงอิทธิพลของปริมาณดินเหนียว พฤติกรรมการจัดเรียงตัวของเม็ดดิน และความสามารถในการบดอัด ที่ส่งผลต่อกำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของการเสียดทานได้อย่างชัดเจน



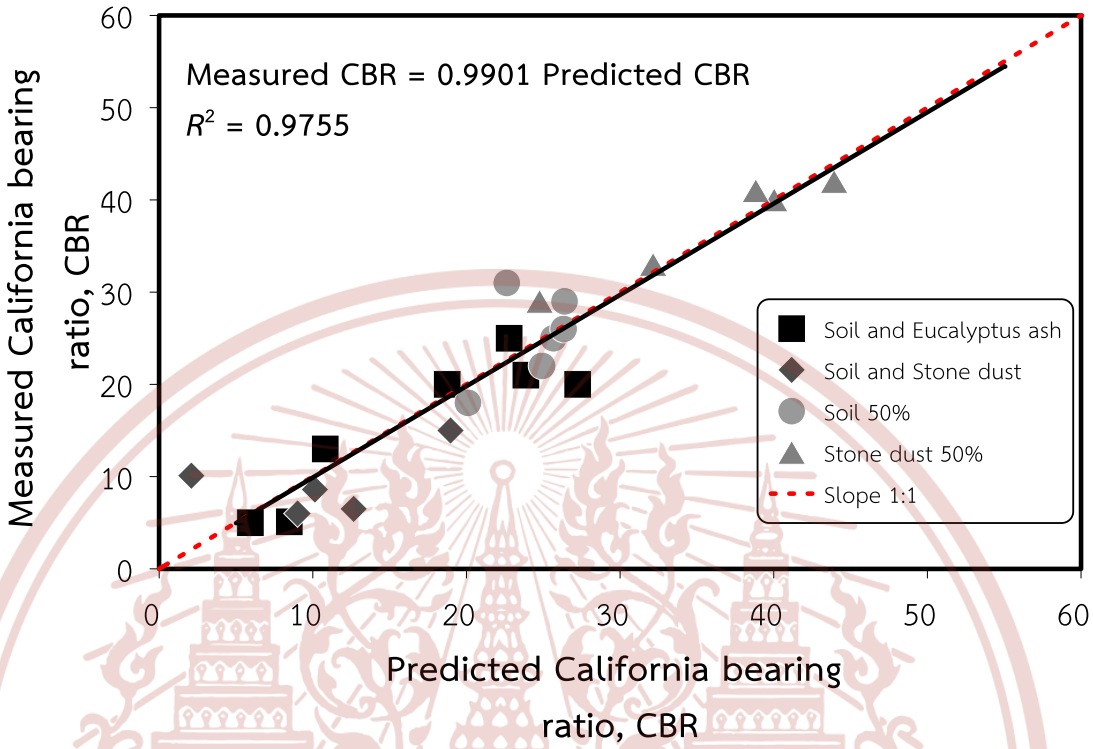
ภาพที่ 4-22 การเปรียบเทียบระหว่างค่า Angle of internal friction ที่วัดได้และค่าที่คาดการณ์ไว้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ

4.8.3 การประมาณค่ากำลังรับแรงแบกทาน (California bearing ratio, CBR) ด้วยแบบจำลองถดถอยเชิงพหุ

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงแบกทานพบว่าค่า CBR ของดินผสมเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่นได้รับอิทธิพลจากหลายปัจจัย เช่น ค่า PI, LL, OMC, MDD และค่า GS ปัจจัยเหล่านี้มีความสัมพันธ์กับค่า CBR ของดินที่ปรับปรุงคุณภาพ ดังนั้นเพื่อรวมผลกระทบของตัวแปรต่างๆและสร้างสมการพยากรณ์ จึงได้ทำการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ (Multiple linear regression analysis) โดยพิจารณาตัวแปรปฏิสัมพันธ์ร่วม (Interaction term) ด้วย จากนั้นจึงเปรียบเทียบค่า CBR ที่ทำนายได้กับค่าที่วัดจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งผลลัพธ์ของสมการแสดงไว้ดังนี้

$$CBR = -8.09(PI) + 1.09(LL) - 51.03(OMC) - 24.69(MDD) + 11.61(GS) + 2.96(OMC \cdot MDD) + 437.88 \qquad R^2 = 0.90 \qquad (4\text{-}7)$$

โดยสมการนี้ให้ค่า $R^2 = 0.90$ แสดงถึงความสามารถของแบบจำลองในการอธิบายความแปรผันของค่า CBR ได้ในระดับสูงถึง 90% เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าจริงจากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย พบว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมบูรณ์ (Mean absolute error) อยู่ที่ประมาณ ±2.78% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับการประเมินเชิงวิศวกรรมจากสมการจะเห็นได้ว่าค่า CBR มีความสัมพันธ์เชิงลบอย่างชัดเจนกับค่าความพลาสติกของดิน (PI) ซึ่งสะท้อนว่าดินที่มีความเหนียวจัดจะบดอัดได้ยากและมีโครงสร้างที่หนาแน่นต่ำ ส่งผลให้ค่า CBR ลดลง ในทางกลับกัน แม้ตัวแปรความชื้นเหมาะสม (OMC) และความหนาแน่นแห้ง (DD) จะมีตัวคูณเดี่ยวเป็นลบ แต่เมื่อพิจารณาในรูปแบบปฏิสัมพันธ์ร่วมกัน แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงบวกที่สำคัญ หมายความว่าการควบคุมความชื้นให้อยู่ใกล้ค่าที่เหมาะสมและการบดอัดให้ได้ความหนาแน่นสูงสุดตามคุณสมบัติดิน จะช่วยให้เม็ดดินจัดเรียงตัวแน่นขึ้นและเพิ่มความต้านทานการเจาะทะลุ ทำให้ค่า CBR สูงขึ้น นอกจากนี้ ค่าพิกัดของเหลว (LL) และความถ่วงจำเพาะ (GS) ยังมีค่าสัมประสิทธิ์เป็นบวก ซึ่งช่วยสนับสนุนการรับน้ำหนักของอนุภาคดินได้อีกด้วยโดยสรุปแบบจำลองเชิงเส้นนี้สามารถใช้ในการประเมินหรือทำนายค่า CBR ของดินผสมเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสะท้อนถึงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางพลาสติก ความชื้น และโครงสร้างความหนาแน่นของดินที่มีผลต่อกำลังรับน้ำหนักของวัสดุอย่างชัดเจน



ภาพที่ 4-23 การเปรียบเทียบระหว่างค่า CBR ที่วัดได้และค่าที่คาดการณ์ไว้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ

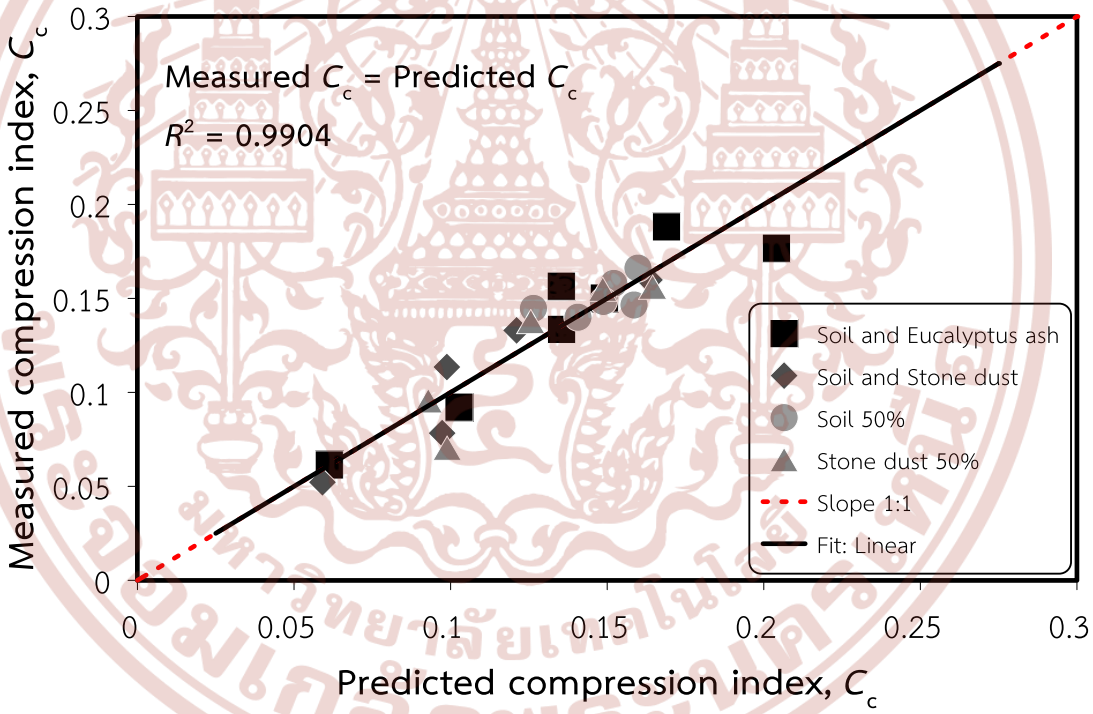
4.8.4 การประมาณค่าดัชนีการอัดตัว (Compression index, C_c) ด้วยแบบจำลองถดถอยเชิงพหุ

จากผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำพบว่า ค่าดัชนีการอัดตัว (C_c) ของดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่น ได้รับอิทธิพลจากปัจจัยทางกายภาพและคุณสมบัติดัชนีของดินหลายประการ เช่น พิกัดของไหล (LL), ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC), ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD), ความถ่วงจำเพาะ (GS) และอัตราส่วนช่องว่างเริ่มต้น (e_0) ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีความสัมพันธ์เชิงซ้อนกับพฤติกรรมการยุบตัวของดินดังนั้นเพื่อสร้างเครื่องมือที่สามารถทำนายพฤติกรรมของดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงได้ทำการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และการถดถอยเชิงพหุ (Multiple linear regression) โดยคัดกรองเฉพาะตัวแปรที่มีนัยสำคัญทางสถิติ จากนั้นจึงนำค่า C_c ที่ทำนายได้มาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ ซึ่งผลการวิเคราะห์สามารถสร้างเป็นสมการพยากรณ์ได้ดังสมการดังนี้

$$C_c = -0.8949 + 0.0061(LL) - 0.0243(OMC) - 0.0493(MDD) + 0.8164(GS) - 0.2215(e_0)$$
$$R^2 = 0.871 \qquad (4\text{-}8)$$

โดยสมการนี้ให้ค่า $R^2 = 0.871$ แสดงถึงความสอดคล้องของแบบจำลองกับข้อมูลการทดลองในระดับสูง กล่าวคือ แบบจำลองสามารถอธิบายความแปรผันของค่า C_c ได้ประมาณ 87.1 % ของข้อมูลทั้งหมด โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Error, MAE) อยู่ในระดับต่ำมากที่ 0.0104 ซึ่งสะท้อนถึงเสถียรภาพของแบบจำลองในเชิงสถิติและการทำนายที่แม่นยำในทุก

ช่วงข้อมูล ตัวแปรที่ส่งผลในสมการนี้ คือ OMC, MDD, LL, GS และ e_0 ซึ่งล้วนมีบทบาทเชิงกลที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการเปลี่ยนปริมาตรของเนื้อดินภายใต้แรงอัด ค่า MDD และค่า e0 แสดงอิทธิพลเชิงลบ สอดคล้องกับพฤติกรรมที่ว่าโครงสร้างที่มีความหนาแน่นแห้งสูงและมีอัตราส่วนช่องว่างเริ่มต้นน้อย สื่อถึงโครงสร้างแน่นหนาช่องว่างอากาศน้อย ทำให้ C_c ลดลง สำหรับค่า OMC พบว่ามีผลเชิงลบต่อค่า C_c ตามสมการ ดินที่ถูกบดอัดในระดับความชื้นที่เหมาะสมจะมีการจัดเรียงตัวของเม็ดดินที่ดีและต้านทานการอัดตัวได้ดีกว่า ส่งผลให้การยุบตัวลดลง ขณะที่ค่า LL มีผลเชิงบวก สอดคล้องกับแนวคิดที่ว่าดินที่มี LL สูงจะมีปริมาณเม็ดละเอียดและมีแนวโน้มดูดซับน้ำยึดเกาะไว้มาก ทำให้เนื้อดินมีความเป็นพลาสติกสูงและเอื้อต่อการเปลี่ยนปริมาตรจึงทำให้ C_c เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ค่า GS มีอิทธิพลเชิงบวก การปรับโครงสร้างด้วยวัสดุผสมทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะเปลี่ยนไป ซึ่งสัมพันธ์กับการปรับเปลี่ยนจุดสัมผัสระหว่างเม็ดดิน แม้จะช่วยกระจายแรงได้ดีแต่ยังคงเปิดโอกาสให้เกิดการอัดตัวในระดับที่สัมพันธ์กับสัดส่วนของคุณสมบัติทางกลของดินผสม



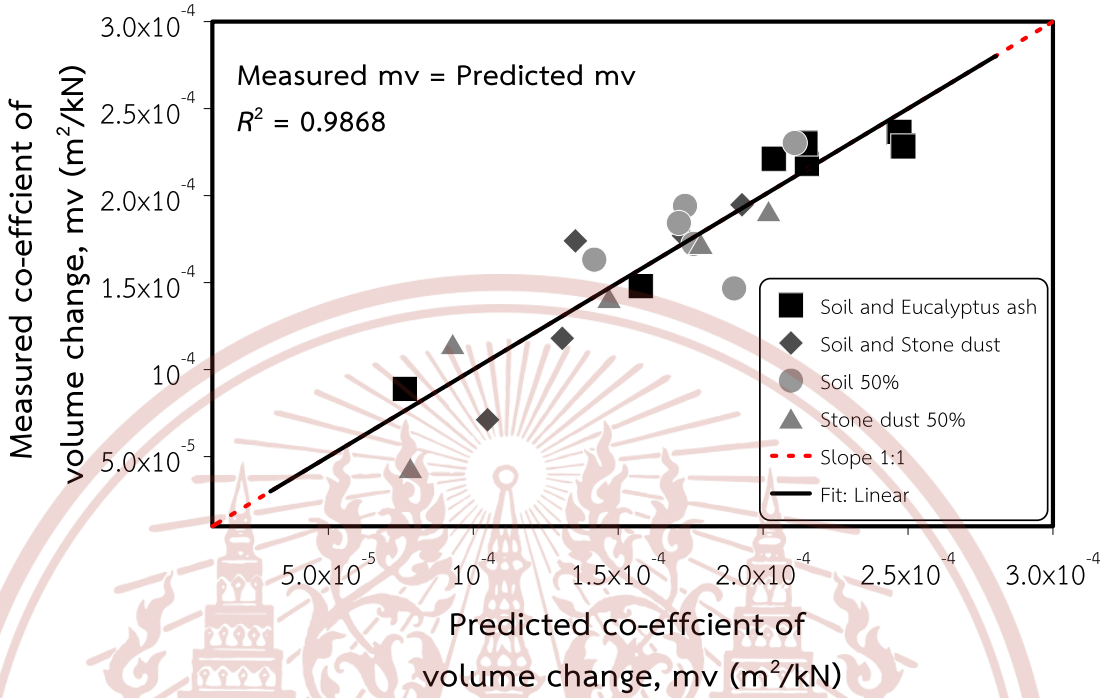
ภาพที่ 4-24 การเปรียบเทียบระหว่างค่า C_c ที่วัดได้และค่าที่คาดการณ์ไว้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ

4.8.4 การประมาณค่าดัชนีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (mv) ด้วยแบบจำลองถดถอยเชิงพหุ

จากผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนปริมาตร (mv) ของดินที่ปรับปรุงคุณภาพได้รับอิทธิพลจากหลายปัจจัย เช่น ค่า PI, LL, OMC, MDD, GS และ e_0 ปัจจัยเหล่านี้มีความสัมพันธ์กับค่า mv ของดินที่ปรับปรุงคุณภาพ ดังนั้นเพื่อรวมผลกระทบของตัวแปรต่างๆ และสร้างสมการพยากรณ์ จึงได้ทำการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุนามที่มีตัวแปรปฏิสัมพันธ์ (Quadratic multiple regression model) จากนั้นจึงเปรียบเทียบค่า mv ที่ทำนายได้กับค่าที่วัดจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ

$$mv = -0.009598 + 0.001129(PI) + 0.000013(LL) - 0.000029(OMC) - 0.000041(MDD) + 0.003957(GS) - 0.000206(e_0) - 0.000420(PI \cdot GS)\ R^2 = 0.849 \quad (4\text{-}9)$$

โดยสมการนี้ให้ค่า R^2 = 0.849 แสดงถึงความสอดคล้องของแบบจำลองกับข้อมูลการทดลองในระดับสูง กล่าวคือ แบบจำลองสามารถอธิบายความแปรผันของค่า mv ได้ประมาณ 84.9 % ของข้อมูลทั้งหมด โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean absolute error) อยู่ในระดับต่ำมากที่ 0.000017 ซึ่งสะท้อนถึงเสถียรภาพของแบบจำลองในเชิงสถิติและการทำนายที่แม่นยำในทุกช่วงข้อมูล ตัวแปรที่ส่งผลในสมการนี้ คือ PI, LL, OMC, MDD, GS, e0 และพจน์ปฏิสัมพันธ์ซึ่งล้วนมีบทบาทเชิงกลที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการเปลี่ยนปริมาตรของเนื้อดินภายใต้แรงอัด ค่า MDD และค่า e_0 แสดงอิทธิพลเชิงลบ สอดคล้องกับพฤติกรรมที่ว่าโครงสร้างที่มีความหนาแน่นแห้งสูงและมีอัตราส่วนช่องว่างเริ่มต้นน้อย สื่อถึงโครงสร้างแน่นหนาช่องว่างอากาศน้อย ทำให้ mv ลดลง สำหรับค่า OMC พบว่ามีผลเชิงลบต่อค่า mv ตามสมการ ดินที่ถูกบดอัดในระดับความชื้นที่เหมาะสมจะมีการจัดเรียงตัวของเม็ดดินที่ดีและต้านทานการอัดตัวได้ดีกว่า ส่งผลให้การเปลี่ยนปริมาตรลดลง ขณะที่ค่า LL และ PI มีผลเชิงบวก สอดคล้องกับแนวคิดที่ว่าดินที่มี LL และ PI สูงจะมีปริมาณเม็ดละเอียดและมีแนวโน้มดูดซับน้ำยึดเกาะไว้มาก ทำให้เนื้อดินมีความเป็นพลาสติกและมีความยืดหยุ่นสูงจึงเอื้อต่อการยุบตัวทำให้ mv เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่า PI และค่า GS แสดงอิทธิพลร่วมเชิงลบ หมายความว่าแม้พจน์ PI จะเพิ่มความยืดหยุ่นของดิน แต่หากมี GS สูงจะหมายถึงโครงสร้างเม็ดที่แข็งแรงซึ่งเข้ามาช่วยลดการอัดตัวลง สอดคล้องกับพจน์ที่มีค่าสัมประสิทธิ์เป็นลบ การปรับโครงสร้างด้วยวัสดุผสมทำให้ความถ่วงจำเพาะเปลี่ยนไป ซึ่งสัมพันธ์กับการปรับเปลี่ยนจุดสัมผัสระหว่างเม็ดดิน ช่วยให้สามารถกระจายแรงได้ดีแต่ยังคงเปิดโอกาสให้เกิดการอัดตัวในระดับที่สัมพันธ์กับสัดส่วนของคุณสมบัติทางกลของดินผสม



ภาพที่ 4-25 การเปรียบเทียบระหว่างค่า mv ที่วัดได้และค่าที่คาดการณ์ไว้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ

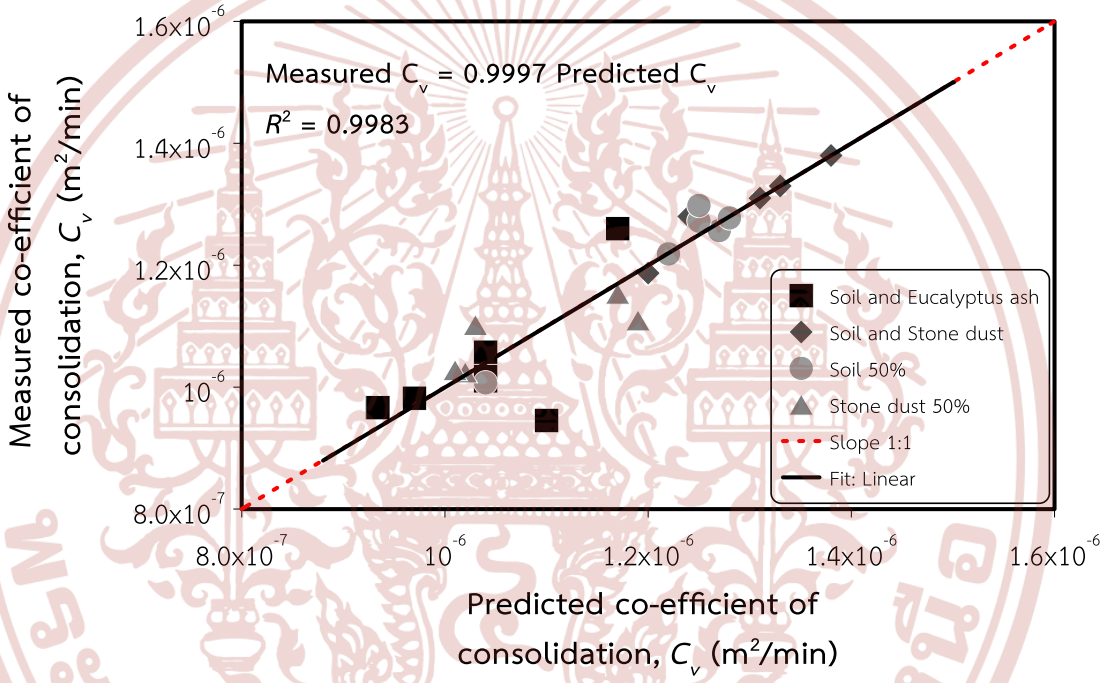
4.8.5 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การทรุดตัว (C_v) ด้วยแบบจำลองถดถอยเชิงพหุ

จากผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (C_v) ของดินที่ปรับปรุงคุณภาพได้รับอิทธิพลจากหลายปัจจัย เช่น ค่า PI, LL, OMC, MDD, GS และ e_0 ปัจจัยเหล่านี้มีความสัมพันธ์กับค่า C_v ของดินที่ปรับปรุงคุณภาพ ดังนั้นเพื่อรวมผลกระทบของตัวแปรต่างๆ และสร้างสมการพยากรณ์ จึงได้ทำการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ (Multiple linear regression model) จากนั้นจึงเปรียบเทียบค่า C_v ที่ทำนายได้กับค่าที่วัดจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ

$$C_v = 8.95 \cdot 10^{-6} - 4.38 \cdot 10^{-10}(PI) - 7.55 \cdot 10^{-9}(LL) - 1.76 \cdot 10^{-8}(OMC) + 5.52 \cdot 10^{-8}(MDD) - 3.27 \cdot 10^{-6}(GS) + 4.79 \cdot 10^{-7}(e_0) \qquad R^2 = 0.868 \qquad (4\text{-}10)$$

โดยสมการนี้ให้ค่า R^2 = 0.868 แสดงถึงความสอดคล้องของแบบจำลองกับข้อมูลการทดลองในระดับสูง กล่าวคือ แบบจำลองสามารถอธิบายความแปรผันของค่า C_v ได้ประมาณ 86.8 % ของข้อมูลทั้งหมด โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean absolute error) อยู่ในระดับที่ต่ำมากที่ $3.22 \cdot 10^{-8}$ ซึ่งสะท้อนถึงเสถียรภาพของแบบจำลองในเชิงสถิติและการทำนายที่แม่นยำในทุกช่วงข้อมูลตัวแปรที่ส่งผลในสมการนี้ คือ PI, LL, OMC, MDD, GS และ e_0 ซึ่งล้วนมีบทบาทเชิงกลที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับอัตราการระบายน้ำและการเปลี่ยนปริมาตรของเนื้อดินภายใต้แรงอัด ค่า PI, LL และ OMC แสดงอิทธิพลเชิงลบ สอดคล้องกับพฤติกรรมที่ว่าดินที่มีความเป็นพลาสติกสูง มีปริมาณเม็ดละเอียดมาก และถูกบดอัดที่ความชื้นสูง จะมีแนวโน้มกักเก็บน้ำไว้ในโครงสร้างได้ดี ส่งผลให้ความสามารถในการซึมน้ำ (Permeability) ลดลง ทำให้อัตราการอัดตัวคายน้ำหรือค่า C_v มีค่าน้อยลงตามไปด้วย นอกจากนี้ ค่า GS ยังมีอิทธิพลเชิงลบ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการปรับโครงสร้างด้วยวัสดุ

ผสมที่ทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้น อาจมีส่วนเข้าไปแทรกตัวและลดขนาดช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ทำให้การไหลของน้ำในมวลดินเกิดได้ช้าลง ในขณะที่ค่า MDD และค่า e_0 แสดงอิทธิพลเชิงบวก ซึ่งอธิบายได้ว่าการมีปริมาตรช่องว่างเริ่มต้น (e_0) ที่เหมาะสมจะช่วยให้น้ำระบายออกได้ง่ายขึ้นในระยะแรก ประกอบกับความหนาแน่นแห้ง (MDD) ที่สูงขึ้นส่งผลให้โครงสร้างดินมีความต้านทานและความแข็งแรง (Stiffness) มากขึ้น (ลดค่าการเปลี่ยนปริมาตรลง) เมื่อเนื้อดินมีความแข็งแรงทนทานต่อแรงอัดได้ดีกว่าความต้านทานการไหลของน้ำ จึงส่งผลให้อัตราส่วนสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (C_v) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามคุณสมบัติทางกลของดินผสม



ภาพที่ 4-26 การเปรียบเทียบระหว่างค่า C_v ที่วัดได้และค่าที่คาดการณ์ไว้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ

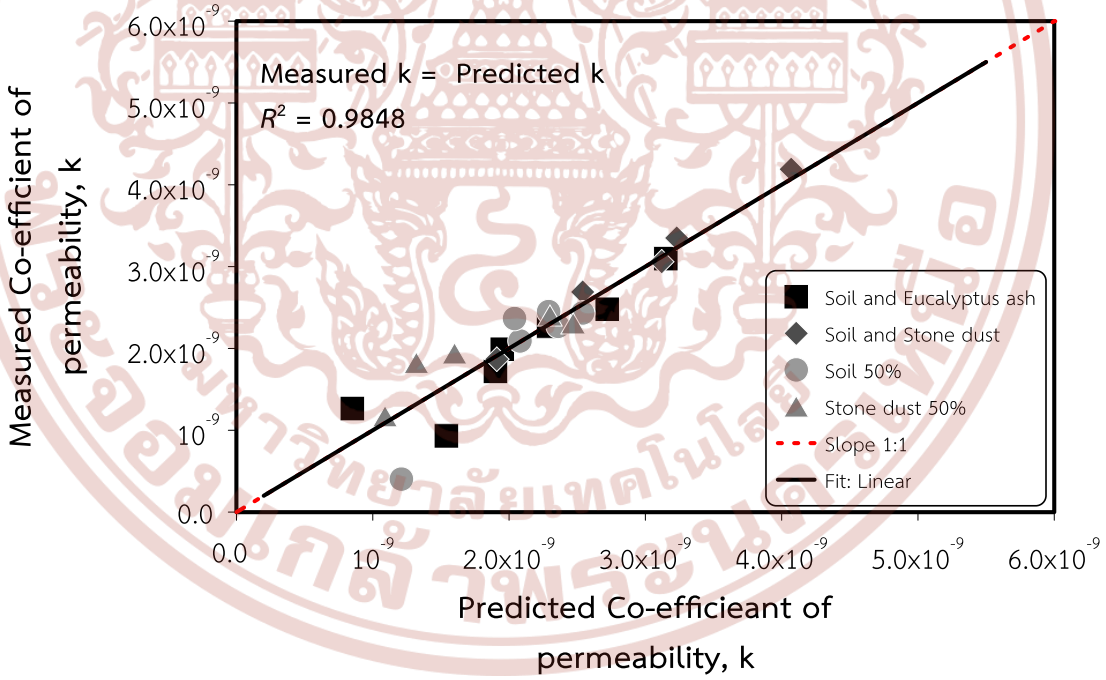
4.8.6 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (k) ด้วยแบบจำลองถดถอยเชิงพหุ

จากผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (k) ของดินที่ปรับปรุงคุณภาพได้รับอิทธิพลจากหลายปัจจัย เช่น ค่า PI, LL, OMC, MDD, GS และ e_0 ปัจจัยเหล่านี้มีความสัมพันธ์กับค่า k ของดินที่ปรับปรุงคุณภาพ ดังนั้นเพื่อรวมผลกระทบของตัวแปรต่างๆ และสร้างสมการพยากรณ์ จึงได้ทำการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ (Multiple linear regression model) จากนั้นจึงเปรียบเทียบค่า k ที่ทำนายได้กับค่าที่วัดจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ

$$k = 2.98 \cdot 10^{-8} - 5.66 \cdot 10^{-11}(PI) + 5.73 \cdot 10^{-12}(LL) + 1.93 \cdot 10^{-10}(OMC) + 9.38 \cdot 10^{-10}MDD) - 1.88 \cdot 10^{-8}(GS) + 5.08 \cdot 10^{-9}(e_0) \qquad R^2 = 0.870 \qquad (4\text{-}11)$$

โดยสมการนี้ให้ค่า $R^2 = 0.870$ แสดงถึงความสอดคล้องของแบบจำลองกับข้อมูลการทดลองในระดับสูง กล่าวคือ แบบจำลองสามารถอธิบายความแปรผันของค่า k ได้ประมาณ 87 % ของข้อมูล

ทั้งหมด โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean absolute error) อยู่ในระดับที่ต่ำมากที่ $2.07 \cdot 10^{-10}$ ซึ่งสะท้อนถึงเสถียรภาพของแบบจำลองในเชิงสถิติและการทำนายที่แม่นยำในทุกช่วงข้อมูลตัวแปรที่ส่งผลในสมการนี้ คือ PI, LL, OMC, MDD, GS และ e_0 ซึ่งล้วนมีบทบาทเชิงกลที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการไหลซึมของน้ำผ่านช่องว่างในเนื้อมวลดิน ค่า e_0 แสดงอิทธิพลเชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญ สอดคล้องกับพฤติกรรมทางกายภาพที่ว่าเมื่ออัตราส่วนช่องว่างเริ่มต้นสูงขึ้น พื้นที่สำหรับการไหลของน้ำในมวลดินจะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการระบายน้ำหรือค่า k สูงขึ้นตามไปด้วย ขณะที่ค่า GS และ PI แสดงอิทธิพลเชิงลบ ซึ่งอธิบายได้ว่าการเพิ่มสัดส่วนวัสดุผสมที่ทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะรวมเปลี่ยนไป หรือเนื้อดินที่มีความเป็นพลาสติกสูง (มีปริมาณเม็ดละเอียดมาก) อนุภาคเหล่านี้จะเข้าไปแทรกตัวและลดขนาดของช่องว่างระหว่างเม็ดดินให้แคบลงและมีความซับซ้อนขึ้น ทำให้น้ำไหลซึมผ่านได้ยากขึ้น สำหรับค่า OMC และ MDD ที่แสดงผลเชิงบวก สะท้อนถึงปฏิกิริยาร่วมกันในเชิงโครงสร้าง เมื่อการบดอัดใช้น้ำในระดับที่เหมาะสมและโครงสร้างมีความหนาแน่น การรับแรงดันน้ำจะทำได้ดีและลดโอกาสที่จะเกิดการเคลื่อนตัวอุดตันของอนุภาคละเอียดภายในช่องว่าง ส่งผลให้ภาพรวมยังคงรักษาความสามารถในการซึมผ่านของน้ำภายใต้สภาพโครงสร้างของดินผสมไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 4-27 การเปรียบเทียบระหว่างค่า k ที่วัดได้และค่าที่คาดการณ์ไว้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ

4.9 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวปรับปรุงด้วยหินฝุ่นและเถ้าไม้ยูคาลิปตัสสามารถสังเกตได้จากการส่องกราดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน โดยดำเนินการภายหลังทดสอบกำลังรับแรงเฉือนเพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินเหนียวที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยหินฝุ่นและเถ้าไม้ยูคาลิปตัส ภาพที่ 4-22 แสดงโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่าง CL70W30, CL50S50, CL50W30S20 และ CL20W30S50

จากภาพที่ 4-27(ก) พบว่าโครงสร้างจุลภาคของดินผสมมีลักษณะการรวมตัวของอนุภาคดินเหนียวและอนุภาคเถ้าไม้ยูคาลิปตัสเป็นกลุ่มอย่างต่อเนื่องมากกว่าดินเหนียวธรรมชาติ อนุภาคต่าง ๆ แสดงการเกาะประสานกันจนเกิดมวลโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบแบบแผ่นขนาน ซึ่งแตกต่างจากลักษณะโครงสร้างของดินเหนียวที่มักมีแนวโน้มจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันเมื่ออยู่ภายใต้แรงเฉือน บริเวณระนาบเฉือนปรากฏพื้นผิวที่มีความขรุขระและไม่เรียบสม่ำเสมอ แสดงถึงการถ่ายโอนแรงเฉือนผ่านกลไกแรงเสียดทานและการยึดเกาะระหว่างอนุภาคเป็นหลัก มากกว่าการเลื่อนตัวแบบเรียบของผิวสัมผัสดินเพียงอย่างเดียว ลักษณะดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าการเติมเถ้าไม้ยูคาลิปตัสช่วยลดความต่อเนื่องของโครงสร้างดินเหนียวเดิม และเพิ่มความซับซ้อนของผิวสัมผัสภายในโครงสร้างดิน นอกจากนี้ยังพบว่าอนุภาคจากเถ้าไม้ยูคาลิปตัสมีการแทรกตัวอยู่ระหว่างอนุภาคดินเหนียว ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของช่องว่างภายใน โดยยังคงปรากฏช่องว่างขนาดเล็กถึงปานกลางในบางบริเวณ ลักษณะดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดสอบการบดอัดที่พบว่าดินผสมมีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดต่ำกว่าดินเหนียวธรรมชาติ เนื่องจากเถ้าไม้ยูคาลิปตัสเป็นวัสดุที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำและไม่สามารถอัดแน่นเชิงมวลได้ดีเท่าดินเดิม อย่างไรก็ตาม แม้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินผสมจะลดลง แต่การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคดังกล่าวส่งผลให้กลไกการรับแรงของดินเปลี่ยนจากการรับแรงผ่านโครงสร้างดินเหนียวเพียงอย่างเดียว ไปสู่การรับแรงผ่านแรงเสียดทานและการยึดประสานระหว่างอนุภาคที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาผลการทดสอบ CBR พบว่าดินผสมเถ้าไม้ยูคาลิปตัสให้ค่า CBR สูงกว่าดินเหนียวธรรมชาติอย่างชัดเจน ซึ่งสามารถอธิบายได้จากความสามารถของโครงสร้างจุลภาคที่มีผิวสัมผัสขรุขระและมีจุดยึดเกาะจำนวนมากในการต้านทานการเจาะและการเสียรูปภายใต้แรงกดซ้ำ แสดงให้เห็นว่าแม้ดินผสมจะมีความหนาแน่นแห้งลดลง แต่การเพิ่มกลไกแรงเสียดทานภายในและการยึดประสานระหว่างอนุภาคมีบทบาทสำคัญต่อการเพิ่มค่าความต้านทาน CBR ของดินผสม

จากภาพที่ 4-27(ข) พบว่ามวลอนุภาคมีการจัดเรียงตัวที่แน่นและต่อเนื่องมากขึ้น อนุภาคหินฝุ่นกระจายตัวแทรกอยู่ระหว่างอนุภาคดินเหนียว ส่งผลให้ช่องว่างระหว่างเม็ดดินมีขนาดลดลงและมีลักษณะไม่ต่อเนื่อง บริเวณระนาบการเฉือนปรากฏลักษณะพื้นผิวที่ไม่เรียบและมีความขรุขระสะท้อนถึงการเพิ่มขึ้นของแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคเมื่อเกิดการถ่ายโอนแรงเฉือน อนุภาคหินฝุ่นทำหน้าที่เป็นโครงร่างรับแรง ขณะที่ดินเหนียวทำหน้าที่ประสานมวลอนุภาค ส่งผลให้การเคลื่อนตัวของอนุภาคตามแนวระนาบการเฉือนถูกจำกัดมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับดินธรรมชาติ นอกจากนี้ ยัง

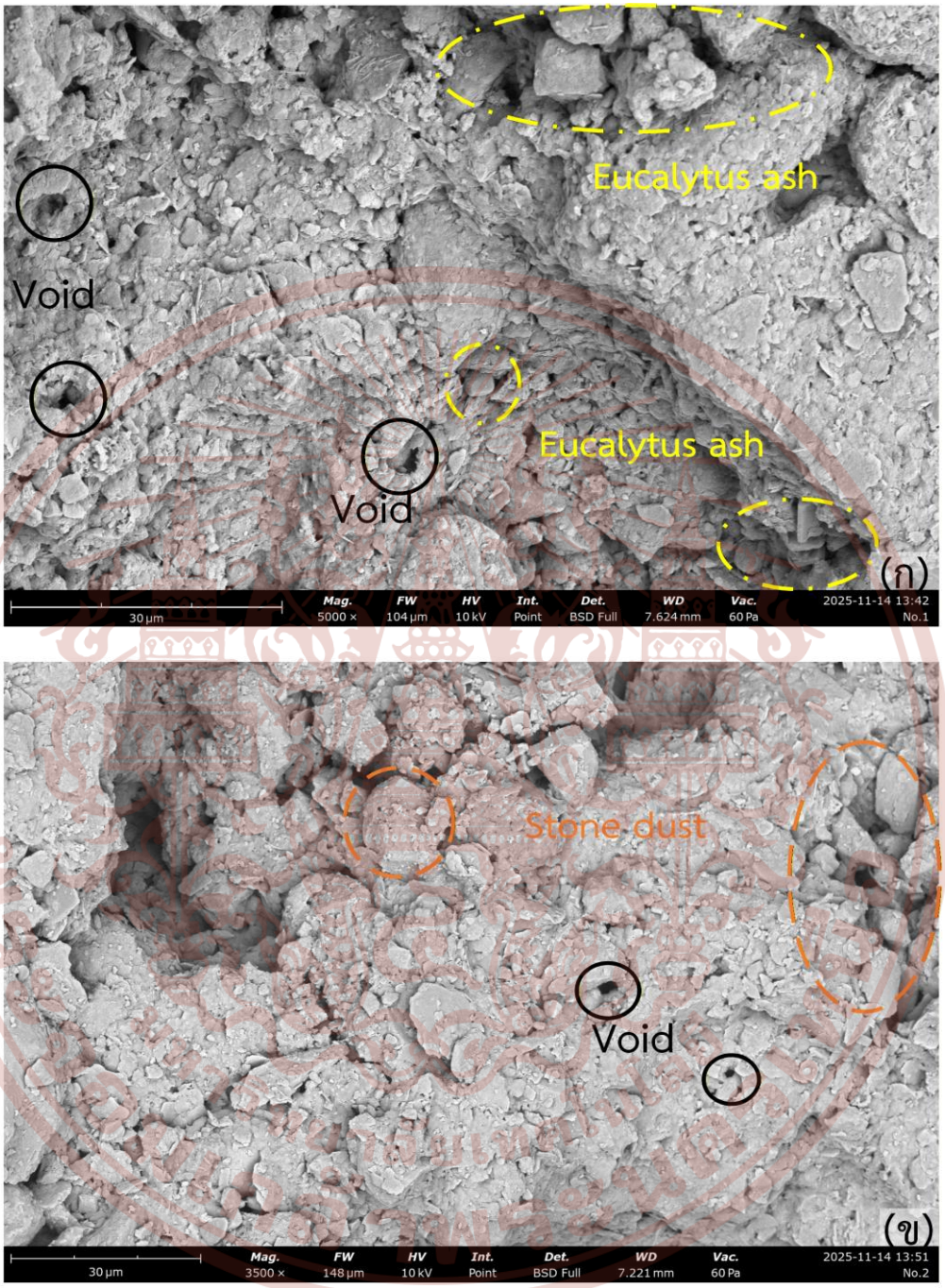
พบว่าบริเวณใกล้ระนาบการเฉือนมีลักษณะของการอัดตัวแน่นของมวลดินสูง ซึ่งเป็นผลจากการจัดเรียงตัวใหม่ของอนุภาคภายใต้แรงเฉือน ลักษณะจุลภาคดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดสอบความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่มีค่าสูงกว่าดินเหนียวธรรมชาติ เนื่องจากอนุภาคหินฝุ่นช่วยเติมเต็มช่องว่างระหว่างอนุภาคดินเหนียว ทำให้ระบบโครงสร้างมีประสิทธิภาพในการจัดเรียงตัวมากขึ้น เมื่อพิจารณาผลการทดสอบ CBR พบว่าโครงสร้างจุลภาคที่มีความแน่นและมีแรงเสียดทานภายในสูงนี้ช่วยเพิ่มความสามารถของมวลดินในการต้านทานการแทรกตัวของหัวกด CBR โดยแรงที่กระทำถูกถ่ายโอนผ่านโครงร่างของอนุภาคหินฝุ่นไปยังมวลดินโดยรอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้การเสียรูปเฉพาะที่ใต้หัวกดลดลง อย่างไรก็ตาม แม้ค่า CBR ของดินผสมหินฝุ่นจะสูงกว่าดินธรรมชาติอย่างมีนัยสำคัญ แต่ยังคงมีค่าต่ำกว่าสูตรผสมที่มีวัสดุประสานร่วมด้วย เนื่องจากการยึดเกาะระหว่างอนุภาคส่วนใหญ่ยังอาศัยแรงเสียดทานเป็นหลักและยังขาดกลไกการประสานเชิงเคมีหรือการเติมเต็มช่องว่างอย่างสมบูรณ์ ซึ่งจำกัดระดับการเพิ่มขึ้นของค่า CBR ในระบบดินผสมชนิดนี้

จากภาพที่ 4-27(ค) แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับดินธรรมชาติ อนุภาคของดินผสมมีการจับตัวรวมกันเป็นมวลโดยอนุภาคดินเหนียวทำหน้าที่เชื่อมประสานระหว่างอนุภาคหินฝุ่นและเถ้าไม้ยูคาลิปตัส ส่งผลให้เกิดโครงสร้างที่มีความต่อเนื่องและเสถียรมากขึ้น บริเวณระนาบการเฉือนพบพื้นผิวที่มีลักษณะขรุขระและไม่สม่ำเสมอ ซึ่งบ่งชี้ถึงการเพิ่มขึ้นของแรงเสียดทานและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคภายใต้การรับแรงเฉือน นอกจากนี้ ยังพบอนุภาคขนาดเล็กแทรกตัวอยู่ตามช่องว่างและผิวของอนุภาคขนาดใหญ่ ส่งผลให้เกิดการถ่ายแรงภายในโครงสร้างดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลักษณะดังกล่าวสะท้อนถึงการทำงานร่วมกันของวัสดุทั้งสามชนิดในการสร้างกลไกการรับแรงแบบผสมผสาน เมื่อพิจารณาผลการทดสอบ CBR พบว่าดินผสมสูตรนี้ให้ค่า CBR สูงกว่าดินธรรมชาติอย่างชัดเจน เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคที่มีการกระจายแรงได้ดีสามารถต้านทานการแทรกตัวของหัวกดได้มากขึ้น โดยแรงที่กระทำถูกถ่ายโอนผ่านมวลรวมของอนุภาคไปยังบริเวณโดยรอบ ลดการเสียรูปเฉพาะที่ใต้หัวกด CBR อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม ภายในโครงสร้างจุลภาคยังพบช่องว่างขนาดเล็กกระจายตัวอยู่ระหว่างมวลรวมของอนุภาค ซึ่งสะท้อนถึงการจัดเรียงตัวของอนุภาคที่ยังไม่แน่นทึบ เนื่องจากลักษณะผิวและรูปร่างที่ไม่สม่ำเสมอของเถ้าไม้ยูคาลิปตัส ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินผสมมีค่าต่ำกว่าดินธรรมชาติ และเป็นปัจจัยที่จำกัดระดับการเพิ่มขึ้นของค่า CBR แม้ว่าโดยรวมโครงสร้างดินจะมีความสามารถในการต้านทานแรงและการเสียรูปเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับดินธรรมชาติ

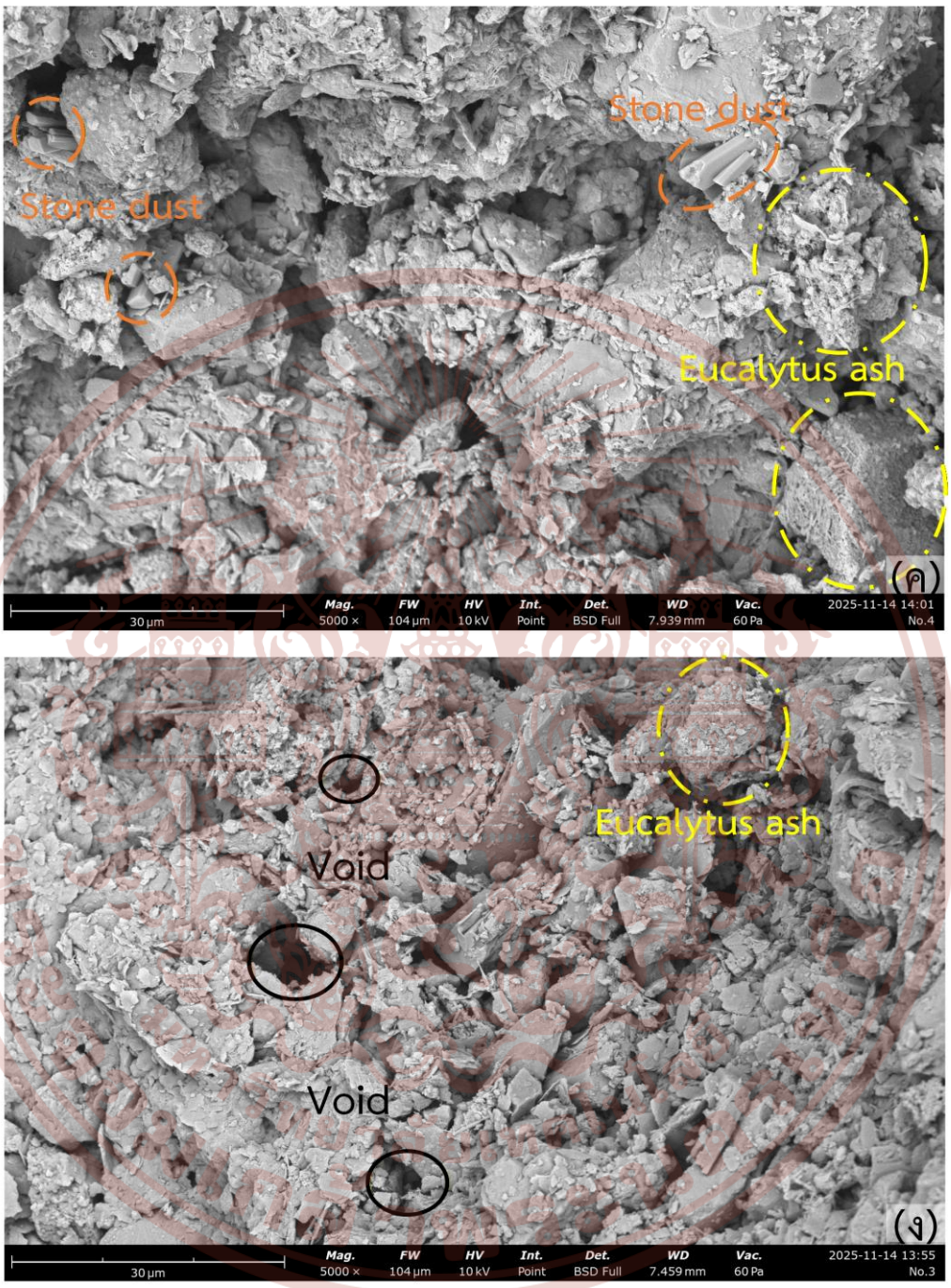
จากภาพที่ 4-27(ง) แสดงให้เห็นลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ประกอบด้วยอนุภาคขนาดต่าง ๆ กระจายตัวร่วมกันอย่างไม่สม่ำเสมอ โดยอนุภาคหินฝุ่นซึ่งมีขนาดค่อนข้างหยาบทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของมวลดิน ขณะที่อนุภาคดินเหนียวและเถ้าไม้ยูคาลิปตัสแทรกตัวและยึดเกาะอยู่ตามช่องว่างระหว่างอนุภาคหินฝุ่น จากภาพ SEM พบว่าการสัมผัสระหว่างอนุภาคมีลักษณะเป็นการรวมตัวกันเป็นกลุ่มมากกว่าการเรียงตัวแบบหลวม ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงการถ่ายแรงภายในมวลดินผสมที่มีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะบริเวณระนาบการเฉือนซึ่งเกิดการแตกหักและการเคลื่อนตัวของอนุภาคร่วมกัน ส่งผลให้ดินผสมมีความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนและแรงกดทะลุเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณา

ผลการทดสอบ CBR พบว่าดินผสมสูตรนี้ให้ค่า CBR สูงกว่าดินธรรมชาติอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคที่มีโครงร่างของหินฝุ่นทำหน้าที่รับแรงหลักร่วมกับการยึดประสานของอนุภาคดินเหนียวและเถ้าไม้ ทำให้แรงจากหัวกด CBR ถูกถ่ายโอนไปยังมวลดินโดยรอบได้อย่างต่อเนื่อง ลดการเสียรูปเฉพาะที่ใต้หัวกด และเพิ่มความต้านทานต่อการแทรกตัวของหัวกดอย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม จากภาพ SEM ยังสามารถสังเกตได้ว่าภายในโครงสร้างดินผสมยังคงปรากฏช่องว่างขนาดเล็กกระจายอยู่บางส่วน และการเรียงตัวของอนุภาคไม่แน่นทึบเท่าดินธรรมชาติ ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าไม้ยูคาลิปตัสเป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ เมื่อผสมในสัดส่วนที่ค่อนข้างสูงจึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินผสมมีค่าต่ำกว่าดินธรรมชาติ อย่างไรก็ตาม แม้ค่าความหนาแน่นแห้งจะลดลง แต่กลไกการรับแรงแบบผสมผสานระหว่างแรงเสียดทานจากโครงร่างหินฝุ่นและแรงยึดเกาะจากดินเหนียวและเถ้าไม้ยูคาลิปตัส มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มค่าความต้านทาน CBR ของดินผสมให้สูงที่สุด

พระจอมเกล้าพระนครเหนือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี



ภาพที่ 4-28 โครงสร้างจุลภาคของตัวอย่าง ก) CL70W30, ข) CL50S50, ค) CL50W30S20 และ ง) CL20W30S50


Stone dust
Stone dust
Eucalytus ash
(ค)
30 µm
Mag. 5000 ×
FW 104 µm
HV 10 kV
Int. Point
Det. BSD Full
WD 7.939 mm
Vac. 60 Pa
2025-11-14 14:01
No.4
Eucalytus ash
Void
Void
(ง)
30 µm
Mag. 5000 ×
FW 104 µm
HV 10 kV
Int. Point
Det. BSD Full
WD 7.459 mm
Vac. 60 Pa
2025-11-14 13:55
No.3

ภาพที่ 4-28 (ต่อ)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าพระนครเหนือ

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยหินฝุ่นและเถ้าไม้ยูคาลิปตัส สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ค่าความถ่วงจำเพาะ (Gs): การเติมเถ้าไม้ยูคาลิปตัสส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะของส่วนผสมลดลงตามปริมาณเถ้าที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการแทนที่ด้วยวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำในขณะที่การเพิ่มสัดส่วนหินฝุ่นส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยส่วนผสมที่มีค่า Gs สูงที่สุด คือ CL45W5S50 ที่ค่า 2.740 ซึ่งสะท้อนถึงอิทธิพลของหินฝุ่นในการเพิ่มความหนาแน่นโดยรวมของส่วนผสม

5.1.2 ผลการทดสอบการบดอัด (Compaction Test): การใช้เถ้าไม้ยูคาลิปตัสปรับปรุงคุณภาพดินทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) ลดลงและค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสม (OMC) เพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าที่สูง ส่วนการใช้หินฝุ่นจะให้ผลในทางตรงกันข้ามคือค่า MDD เพิ่มขึ้นและค่า OMC ลดลง เนื่องจากอนุภาคหินฝุ่นที่มีความถ่วงจำเพาะสูงและลักษณะเหลี่ยมคมช่วยเสริมสร้างการขัดตัว (Interlocking) และลดช่องว่างอากาศในมวลดิน

5.1.3 ผลการทดสอบ Atterberg Limits: เถ้าไม้ยูคาลิปตัสส่งผลให้ค่าขีดจำกัดเหลว (LL) ของดินเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าเนื่องจากลักษณะอนุภาคที่พรุนทำให้ต้องการน้ำมากขึ้น ขณะที่การเติมหินฝุ่นช่วยลดทั้งค่า LL และดัชนีความเป็นพลาสติก (PI) ของดินลงอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ดินเหนียวสูญเสียความเป็นพลาสติกและมีพฤติกรรมทางวิศวกรรมใกล้เคียงกับวัสดุที่ไม่ขยายตัว (Non-expansive) มากยิ่งขึ้น

5.1.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงแบกทาน (CBR): การผสมเถ้าไม้ยูคาลิปตัสในช่วงร้อยละ 10-30 ช่วยเพิ่มค่า CBR ได้สูงสุดถึงร้อยละ 25 (ที่ส่วนผสม CL70W30) เนื่องจากอนุภาคเถ้าช่วยอุดช่องว่างระหว่างเม็ดดินทำให้การกระจายขนาดแน่นขึ้น โดยเฉพาะในชุดที่มีหินฝุ่นคงที่ร้อยละ 50 การเพิ่มเถ้าไม้ช่วยปรับสมดุลขนาดคละของอนุภาคส่งผลให้ค่า CBR สูงขึ้นต่อเนื่องจนถึงร้อยละ 42

5.1.5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน (Direct Shear Test) แรงยึดเหนี่ยว (Cohesion, c) ของดินมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเติมวัสดุปรับปรุงคุณภาพเนื่องจากการลดสัดส่วนของอนุภาคดินเหนียวที่เป็นต้นกำเนิดของแรงยึดเกาะ อย่างไรก็ตาม ค่ามุมเสียดทานภายใน (φ) จะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยเฉพาะหินฝุ่นที่ช่วยเพิ่มการขัดสีและแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคได้สูงถึง 41 องศา

5.1.6 ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) การปรับปรุงดินส่งผลให้ค่าดัชนีการอัดตัว (C_c) และสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนปริมาตร (mv) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การทรุดตัว (C_v) และสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (k) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างดินที่ได้รับการปรับปรุงมีทางระบายน้ำที่ต่อเนื่องและเสถียรมากขึ้น ทำให้กระบวนการทรุดตัวดำเนินไปได้รวดเร็วกว่าดินเหนียวธรรมชาติ

5.2 ข้อเสนอแนะการศึกษาต่อไป

5.2.1 ศึกษาผลของ ระยะเวลาการบ่ม (curing time) ต่อค่า CBR และกำลังรับแรงเฉือน

5.2.2 ศึกษาพฤติกรรมของดินผสมภายใต้การเปลี่ยนแปลงความชื้นซ้ำ (wetting–drying cycles)

5.2.3 ทดลองใน ระดับสนาม (field trial) เพื่อเปรียบเทียบกับผลในห้องปฏิบัติการ

พระจอมเกล้าพระนครเหนือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

กรมทางหลวงชนบท. (2545). มาตรฐานวัสดุถมคันทาง (Embankment : Material): มทช. 201-2545. กรุงเทพฯ: สำนักวิเคราะห์ วิจัยและพัฒนา กรมทางหลวงชนบท.

ภาษาอังกฤษ

Abubekir, E. C., & Agon, A. (2019). Utilization of crushed stone dust as A stabilizer for sub grade soil: A case study in Jimma town. Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara, 17, 55–64.

Al-naje, F. Q., Abed, A. H., & Al-Taie, A. J. (2020). A review of sustainable materials to improve geotechnical properties of soils. Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences, 23(3), 289–305. https://doi.org/10.29194/njes.23030289

ASTM D854 Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by the Water Displacement Method

ASTM D1557 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft3 (2,700 kN-m/m3))

ASTM D1883 Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils

ASTM D2435 Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading

ASTM D3080 Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions

ASTM D4318 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils

ASTM D6913 Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis

Banyhussan, Q., & Sahib, B. A. (2023). LARGE-SCALE DIRECT SHEAR TESTING OF DIFFERENT SUBGRADE SOIL TYPES REINFORCED BY GEOSYNTHETICS. Journal of Engineering and Sustainable Development.

Barazesh, A., Saba, H., Yousefi Rad, M., & Gharib, M. (2012). Effect of wood ash admixture on clay soils in Atterberg test. International Journal of Basic Sciences & Applied Research, 1(4), 83–89.

Barišić, I., Netinger Grubeša, I., Dokšanović, T., & Marković, B. (2019). Feasibility of agricultural biomass fly ash usage for soil stabilisation of road works. Materials, 12(9), 1375. https://doi.org/10.3390/ma12091375

Barišić, I., Netinger Grubeša, I., Hackenberger, D. K., Palijan, G., Glavić, S., & Trkmić, M. (2022). Multidisciplinary approach to agricultural biomass ash usage for earthworks in road construction. Materials, 15(13), 4529. https://doi.org/10.3390/ma15134529

Bilal, M., & Ahmad, N. (2020). Effectiveness of stone dust as an expansive soil stabilizer. In Proceedings of the 2nd Conference on Sustainability in Civil Engineering (CSCE'20).

Blayi, R. A., Omer, B., Sherwani, A. F. H., Hamadamin, R. M., & Muhammed, H. K. (2024). Geotechnical characteristics of fine-grained soil with wood ash. Cleaner Engineering and Technology, 18(100726), 100726. https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100726

Cabalar, A. F., Ibrahim, M. A., Yildiz, O., & Yavuz, A. (2024). Effects of sewage sludge ash and stone powder on the properties of a silt. Construction and Building Materials, 450(138586), 138586. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138586

Chakradhara Rao, M. (2021). Influence of brick dust, stone dust, and recycled fine aggregate on properties of natural and recycled aggregate concrete. Structural Concrete, 22(S1). https://doi.org/10.1002/suco.202000103

Couto, Á. F. do, Nogueira, G. S. F., Sandoval, G. F. B., Schwantes-Cezario, N., & Morales, G. (2019). Initial study of Eucalyptus Wood Ash (EWA) as a mineral admixture in concrete. Dyna, 86(208), 264–270. https://doi.org/10.15446/dyna.v86n208.74580

Dimter, S., Zagvozda, M., Tonc, T., & Šimun, M. (2021). Construction of economical pavement structures with wood ash. IOP Conference Series. Materials Science and Engineering, 1202(1), 012048. https://doi.org/10.1088/1757-899x/1202/1/012048

Dixit, A., & Patil, K. A. (2016). Effect of stone dust on geotechnical properties of soil. International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), 6(4), 1–04.

Ekinci, A., Hanafi, M., & Aydin, E. (2020). Strength, stiffness, and microstructure of wood-ash stabilized marine clay. Minerals (Basel, Switzerland), 10(9), 796. https://doi.org/10.3390/min10090796

Hassan, W., Alshameri, B., Jamil, S. M., Maqsood, Z., Haider, A., & Shahzad, A. (2023). Incorporating potassium-rich waste material in a sustainable way to stabilize dispersive clay: A novel practical approach for the construction industry. Construction and Building Materials, 400(132717), 132717. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132717

Islam, S., Islam, J., Alam, M. J. B., Chowdhury, A. S., & Hasnat, N. (2024). Partial replacement of sand by fine-grained crushed waste glass along with fly ash stabilization for geotechnical applications in pavement. Heliyon, 10(19), e38754. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38754

Islam, S., Islam, J., & Robiul Hoque, N. M. (2022). Improvement of consolidation properties of clay soil using fine-grained construction and demolition waste. Heliyon, 8(10), e11029. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11029

Jamsawang, P., Charoensil, S., Namjan, T., Jongpradist, P., & Likitlersuang, S. (2021). Mechanical and microstructural properties of dredged sediments treated with cement and fly ash for use as road materials. Road Materials and Pavement Design, 22(11), 2498–2522. https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1772349

Jmest. (2015). The effect of stone dust content in sand. Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology, 2(5), 902–906.

Kalembkiewicz, J., Galas, D., & Sitarz-Palczak, E. (2018). The physicochemical properties and composition of biomass ash and evaluating directions of its applications. Polish Journal of Environmental Studies, 27(6), 2593–2603. https://doi.org/10.15244/pjoes/80870

Kambhatla, D., & Rao, K. V. S. (2023). Evaluation of soaked and unsoaked CBR of soils using Random Forest. Materials Today: Proceedings, 80(6), 673–679.

Karim, M. A., Sami Hassan, A., & Kaplan, A. (2020). Optimization of soil to fly-ash mix ratio for enhanced engineering properties of clayey sand for subgrade use. Applied Sciences (Basel, Switzerland), 10(20), 7038. https://doi.org/10.3390/app10207038

Khadka, D., Sharma, R., Sapkota, S., Neupane, K., Gautam, D., & Bhattarai, B. (2022). Stabilization of expansive soil using wood ash and brick dust. International Journal of Engineering Research & Technology, 11(7), 66–71.

Lertwattanaruk, P., & Makul, N. (2011). Strength, leachability and microstructure characteristics of cement-based solidified waste water treatment sludge. Journal of Hazardous Materials, 186(1), 491–502.

Lin, B., Cerato, A. B., Madden, A. S., & Elwood Madden, M. E. (2013). Effect of fly ash on the behavior of expansive soils: Microscopic analysis. Environmental & Engineering Geoscience, 19(1), 85–94. https://doi.org/10.2113/gseegeosci.19.1.85

Liu, M., Saberian, M., Li, J., Zhu, J., Perera, S. T. A. M., Roychand, R., & Tajaddini, A. (2024). Evaluation of brown coal fly ash for stabilising expansive clay subgrade: A sustainable solution for pavement construction. Resources, Conservation, and Recycling, 204(107533), 107533. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107533

Mawlood, Y., Mohammed, A., Hummadi, R., Hasan, A., & Ibrahim, H. (2022). Modeling and statistical evaluations of unconfined compressive strength and compression index of the clay soils at various ranges of liquid limit. Journal of Testing and Evaluation, 50(1), 551–569. https://doi.org/10.1520/jte20200505

Mewade, S. S., & Kushwaha, S. S. (2025). Experimental investigation on stabilization of expansive soil using stone dust. International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT), 14(2), 245–250.

Mohanty, S. K., Pradhan, P. K., & Mohanty, C. R. (2016). Consolidation and drainage characteristics of expansive soil stabilized with fly ash and dolochar. Geotechnical and Geological Engineering, 34, 1435–1451.

Nath, B. D., Sarkar, G., Siddiqua, S., Rokunuzzaman, M., & Islam, M. R. (2018). Geotechnical properties of wood ash‐based composite fine‐grained soil. Advances in Civil Engineering, 2018(1), 1–7. https://doi.org/10.1155/2018/9456019

Ojuri, O. O., & Epe, G. G. (2016). Strength and leaching characteristics of crude oil contaminated sandy soil stabilized with sawdust ash-cement. Geo-Chicago 2016.

Owamah, H. I., Atikpo, E., Oluwatuyi, O., & Oluwatomisin, A. M. (2018). Geotechnical properties of clayey soil stabilized with cement-sawdust ash for highway construction. Journal of Applied Sciences & Environmental Management, 21(7), 1378. https://doi.org/10.4314/jasem.v21i7.29

Rewatkar, V. B. (2023). Effect of eucalyptus wood ash on swelling behavior and microstructure of expansive soil. Materials Today: Proceedings, 84, 342–350.

Salih, H. H., Bander, M. A., & Jasim, R. K. (2022). Sustainable utilization of stone powder and recycled fine aggregates in subgrade soils. Construction and Building Materials, 345, 128208. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128208

Sefene, S. S. (2021). Determination of effective wood ash proportion for black cotton soil improvement. Geotechnical and Geological Engineering, 39(1), 617–625. https://doi.org/10.1007/s10706-020-01508-x

Somadas, P., & Sarvade, P. G. (2024). Sustainable engineering: Utilisation of biomedical waste ash for untapped potential in soil stabilisation. International Journal of Sustainable Engineering, 17(1), 1066–1082. https://doi.org/10.1080/19397038.2024.2434705

Thirumalai, S., & Puvvadi, V. (2023). Study on geotechnical properties of clay mixed with stone dust and rice husk ash. Materials Today: Proceedings, 84(6), 779–783.

Wang, L., Zang, Y., Jiang, H., Liu, S., & Cui, H. (2025). Mechanical behavior of crushed and compacted solidified dredged sludge solidified by industrial by-

products. Construction and Building Materials, 466(140243), 140243. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140243

Wang, X., Dong, Q., Hu, J., Liu, P., Li, Z., Chen, Y., & Xu, G. (2024). Experimental study on mechanical properties of recycled aggregate mixed soil. Materials, 17(18), 4448. https://doi.org/10.3390/ma17184448

Yin, K., Liu, J., Vasilescu, A.-R., Di Filippo, E., & Othmani, K. (2021). A procedure to prepare sand–clay mixture samples for soil–structure interface direct shear tests. Applied Sciences (Basel, Switzerland), 11(12), 5337. https://doi.org/10.3390/app11125337

Zhang, Z., Yin, J.-H., & Liu, H. (2020). Mechanical and microstructural properties of dredged sediments treated with cement and fly ash for use as road materials. Journal of Materials in Civil Engineering, 32(4).

Zimar, Z., Robert, D., Sidiq, A., Zhou, A., Giustozzi, F., Setunge, S., & Kodikara, J. (2022). Waste-to-energy ash for treating highly expansive clays in road pavements. Journal of Cleaner Production, 374(133854), 133854. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133854

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นายณฐพงศ์ นุ้ยเพชร

ชื่อวิทยานิพนธ์ การใช้ดินเหนียวแทนที่ด้วยเถ้ายูคาลิปตัสและหินฝุ่นเป็นวัสดุถมคันทาง

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ประวัติ พ.ศ. 2564 : สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

สถานที่ติดต่อปัจจุบัน : ที่อยู่ 328/1 หมู่ 8 ตำบลทุ่งระยะ อำเภอสวี จังหวัดชุมพร รหัสไปรษณีย์ 86130 โทรศัพท์ 095-295-5239

email. s6501081814017@email.kmutnb.ac.th

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าพระนครเหนือ