



คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวที่ปรับปรุงด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่นสำหรับวัสดุถมคันทาง
ENGINEERING PROPERTIES OF CLAY STABILIZED WITH EUCALYPTUS WOOD ASH
AND STONE DUST FOR ROAD EMBANKMENT MATERIAL

ณัฐพงศ์ นุ้ยเพชร^{1*} พิตยา แจ่มสว่าง²

¹นักศึกษาปริญญาโท, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

²ศาสตราจารย์ ดร., ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

*Corresponding author, E-mail: s6501081814017@email.kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

เถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่นเป็นวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมที่มีศักยภาพในการนำกลับมาใช้ประโยชน์ด้านวิศวกรรมโยธา โดยเฉพาะการปรับปรุงคุณสมบัติดินเหนียวซึ่งไม่สามารถใช้เป็นวัสดุถมคันทางได้โดยตรง เนื่องจากมีกำลังรับแรงเฉือนต่ำ ความสามารถในการรับน้ำหนักต่ำ และมีพฤติกรรมการพองตัวสูง งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลของการแทนที่ดินเหนียวด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่นในสัดส่วนต่าง ๆ เพื่อเพิ่มกำลังของดินและลดการใช้วัสดุธรรมชาติ โดยทำการทดสอบค่ากำลังรับแรงเบกทาน (CBR), ค่าการบวมตัว และ ค่ากำลังรับแรงเฉือนจากการทดสอบ Direct Shear ทั้งหมดเตรียมตัวอย่างภายใต้เงื่อนไขความชื้นเหมาะสม (OMC) และความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) ตามมาตรฐาน ASTM D1557 ผลการทดสอบพบว่าการเติมเถ้าไม้ยูคาลิปตัสช่วยเพิ่มความแน่นของโครงสร้างดิน โดยการเติมเต็มช่องว่าง ส่วนหินฝุ่นช่วยเพิ่มแรงเสียดทานภายในวัสดุผสม ทำให้ค่า CBR เพิ่มขึ้นจาก 5% ในดินเหนียวธรรมชาติเป็นสูงสุดประมาณ 33–42% ในสัดส่วนผสมที่เหมาะสม ขณะที่ค่าแรงยึดเหนี่ยว (c) มีแนวโน้มลดลงตามสัดส่วนวัสดุทดแทน แต่ค่ามุมเสียดทานภายใน (ϕ) เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยภาพรวมวัสดุผสมเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่นสามารถปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวให้เหมาะสมต่อการใช้งานเป็นวัสดุถมคันทางตามมาตรฐาน มทข.201/2545 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ดินเหนียวความพลาสติกต่ำ; เถ้าไม้ยูคาลิปตัส; ฝุ่นหิน; แกลิฟอร์เนียเบริงเรโซ; การทดสอบแรงเฉือนตรง

ABSTRACT

Eucalyptus wood ash and stone dust are industrial by-products with the potential for reuse in civil engineering applications, particularly for improving the properties of clayey soils, which cannot be directly used as embankment materials due to their low shear strength, low bearing capacity, and high swelling behavior. This research aims to investigate the effects of partially replacing clay with eucalyptus wood ash and stone dust at various proportions to enhance soil strength and reduce the consumption of natural materials. The laboratory tests conducted include the California Bearing Ratio (CBR), swelling, and Direct Shear tests. All specimens were prepared at their Optimum Moisture Content (OMC) and Maximum Dry Density (MDD) in accordance with ASTM D1557. The test results indicate that the addition of eucalyptus wood ash helps densify the soil structure by filling voids, while stone dust increases the internal friction within the mixture. Consequently, the CBR value

Natapong Nuyphet^{1*}, Pittaya Jamsawang²

¹Graduate Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

² Professor Doctor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

increased from 5% in natural clay to a maximum of approximately 33–42% at the optimal mixture proportion. Meanwhile, the cohesion (c) tended to decrease with increasing proportions of replacement materials, whereas the internal friction angle (ϕ) significantly increased. Overall, the mixture of eucalyptus wood ash and stone dust can effectively improve the engineering properties of clay, making it suitable for use as embankment fill material in accordance with the Department of Rural Roads standard DRR 201/2545.

KEYWORDS: Clay low plasticity; Eucalyptus ash; Stone dust; California Bearing Ratio; Direct Shear

1. บทนำ

การก่อสร้างคันทางถนนในประเทศไทย โดยเฉพาะถนนชนบทหรือพื้นที่นอกเขตเมืองใหญ่ ต้องพึ่งพาวัสดุที่มีความเหมาะสมในด้านความแข็งแรง ความมั่นคง และต้นทุนที่ยอมรับได้ อย่างไรก็ตาม วัสดุธรรมชาติเช่น ดินลูกรัง หรือ ดินทราย คุณภาพดี กลับเริ่มลดน้อยลงในหลายพื้นที่จากการใช้งานที่ต่อเนื่องและขาดการจัดการอย่างยั่งยืน การขนย้ายวัสดุจากแหล่งอื่นจึงก่อให้เกิดต้นทุนที่สูงและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น เช่น การใช้เชื้อเพลิงในการขนส่งและการสูญเสียพื้นที่หน้าดินในแหล่งขุด ในขณะที่ดินเหนียวซึ่งมีอยู่ทั่วไปกลับไม่สามารถนำมาใช้ถมคันทางได้โดยตรง เนื่องจากมีปัญหาด้านความสามารถในการรับน้ำหนักต่ำ (low bearing capacity), ค่าความสามารถในการพองตัวสูง (high swelling potential), ค่าการทรุดตัวสูง และการระบายน้ำต่ำ โดยเฉพาะในกรณีที่ดินเหนียวมีแร่กลุ่มมอนต์โมริลโลไนต์ ซึ่งไวต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำ [1-2] ดินประเภทนี้เมื่อใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นจะมีการหด-พองตัวอย่างรุนแรง ส่งผลให้คันทางหรือโครงสร้างบนผิวทางเกิดการแตกร้าวและทรุดตัวในระยะยาว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของดินเหนียวและลดการพึ่งพาวัสดุธรรมชาติ การนำวัสดุเหลือใช้จากภาคอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมมาปรับปรุงคุณสมบัติของดินเหนียว จึงได้รับความสนใจในทางวิศวกรรมโยธาและวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะวัสดุที่มีองค์ประกอบ ซิลิกา (SiO_2) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซึ่งสามารถก่อให้เกิดปฏิกิริยา pozzolanic reaction เมื่อผสมกับน้ำ และวัสดุปูนซีเมนต์หรือดินเหนียว ส่งผลให้โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุผสมมีความหนาแน่นและแข็งแรงมากขึ้น [3]

เถ้ายูคาลิปตัส (Eucalyptus ash: A) เป็นวัสดุพลอยได้จากการเผาเศษไม้ยูคาลิปตัสในอุตสาหกรรมชีวมวลเพื่อผลิตไฟฟ้าในโรงไฟฟ้า ซึ่งปกติแล้วถือเป็นของเสียที่ต้องจัดการทิ้ง แต่กลับมีศักยภาพในการนำมาใช้ประโยชน์ทางวิศวกรรมโยธา เนื่องจากมีองค์ประกอบที่คล้ายวัสดุพอซโซลาน (pozzolanic material) เช่น SiO_2 , CaO และ อะลูมินา (Al_2O_3) ซึ่งสามารถช่วยปรับปรุงพฤติกรรมของดินเหนียวทั้งในด้านความแข็งแรง [4] การระบายน้ำ และการลดการพองตัว [2,5-6] จากการศึกษาพบว่า การใช้ A ในอัตราส่วนเหมาะสมสามารถลด swelling index ได้กว่า 86%, ลด compression index ได้ถึง 54% และเพิ่ม coefficient of consolidation (C_v) ได้มากกว่า 100% เมื่อเทียบกับดินเหนียวธรรมชาติ [1]

หินฝุ่น (Stone dust) เป็นวัสดุพลอยได้จากกระบวนการโม่หรือบดหินธรรมชาติ เช่น หินปูนหรือหินแกรนิต 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 ส่งผลให้ความสามารถในการรับน้ำหนักและกำลังรับแรงเฉือนของดิน

เหนียวเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน [7] การใช้หินฝุ่นร่วมกับวัสดุปรับปรุงอื่น เช่น เถ้าไม้หรือปูนซีเมนต์ ยังช่วยส่งเสริมคุณสมบัติของดินเพิ่มเติม ซึ่งพบว่าสามารถเพิ่มค่า CBR ได้มากกว่า 3–5 เท่าเมื่อเทียบกับดินธรรมชาติ [8] งานวิจัย [9-11] แสดงให้เห็นว่า สามารถพัฒนาสมการประมาณค่าความสามารถในการรับน้ำหนักของดิน โดยใช้ข้อมูลทางแรงเฉือนและสมบัติเชิงกล ซึ่งช่วยให้สามารถพยากรณ์ค่าการรับน้ำหนักของวัสดุผสมได้อย่างแม่นยำ และสนับสนุนการออกแบบการปรับปรุงดินอย่างมีประสิทธิภาพ จากงานวิจัยหินฝุ่นจึงถือเป็นวัสดุเหลือใช้ที่มีศักยภาพในการนำกลับมาใช้ประโยชน์อย่างยั่งยืน ทั้งในด้านเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม

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

2. วัสดุและวิธีการทดสอบ

2.1 วัสดุ

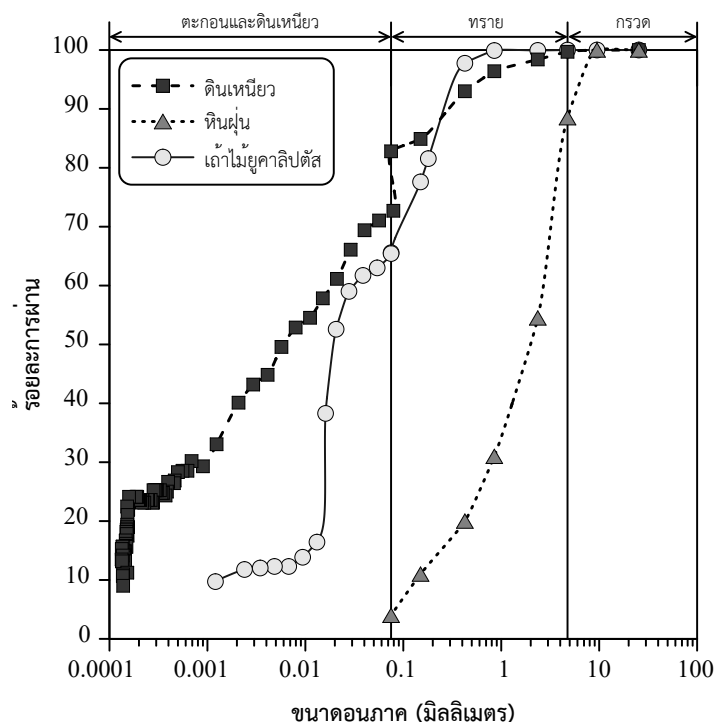
ในงานวิจัยนี้วัสดุพื้นฐานที่ใช้ในการทดสอบจะมีทั้งหมด 3 อย่าง ได้แก่ ดินเหนียวพลาสติกต่ำ (CL) หินฝุ่น (S) และเถ้าไม้ชุกาลิปดัส (W) แสดงในรูปที่ 1 ดินที่ใช้ในที่นี้คือดินชนิด ดินเหนียวพลาสติกต่ำ ที่มีคุณสมบัติดังนี้ ค่าความถ่วงจำเพาะของอนุภาคเม็ดดินอยู่ที่ 2.65 หินฝุ่นอยู่ที่ 2.74 และเถ้าไม้ชุกาลิปดัสอยู่ที่ 2.23 ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D854 [12] ค่าพิกัดความชื้นเหลวของดินเหนียวอยู่ที่ร้อยละ 30 ค่าพิกัดความเป็นพลาสติก ร้อยละ 20 ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D4318 [13] ความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินเหนียว, หินฝุ่น และเถ้าไม้ชุกาลิปดัสอยู่ที่ 18.84, 21.97 และ 14.52 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตรตามลำดับและความชื้นที่เหมาะสมของดินเหนียว, หินฝุ่น และเถ้าไม้ชุกาลิปดัสอยู่ที่ร้อยละ 10.80, 6.20 และ 24.80 ตามลำดับ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1557 [14] และ ขนาดคละอนุภาคดินแสดงในรูปที่ 2 ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D6913 [15] และ ASTM D7928 [16]

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียว, หินฝุ่นและเถ้าไม้ชุกาลิปดัส

คุณสมบัติทั่วไป	ดินเหนียว	หินฝุ่น	เถ้าไม้ชุกาลิปดัส
ความถ่วงจำเพาะ	2.65	2.74	2.23
ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร)	18.84	21.97	14.52
ความชื้นเหมาะสม (ร้อยละ)	10.80	6.20	24.80
ค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ, C_u	137.61	17.69	24.62
ค่าสัมประสิทธิ์ความโค้ง, C_c	0.35	2.42	6.15
ขีดจำกัดเหลว (ร้อยละ)	31	-	25
ขีดจำกัดพลาสติก (ร้อยละ)	20	-	22
ดัชนีความเป็นพลาสติก (ร้อยละ)	11	-	3
ประเภทดิน (USCS)	CL	SW	SM



รูปที่ 1 วัสดุในการทดสอบ



รูปที่ 2 กราฟการกระจายตัวของเม็ดดินในการทดสอบ

2.2 วิธีการทดสอบ

2.2.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบโดยอัตราส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 2 ในส่วนของการทดสอบ California bearing ratio (CBR) และ Direct shear test การเตรียมตัวอย่างดินจะทำการผสมดิน, หินฝุ่นและเถ้าไม้ยูคาลิปตัสให้เข้ากันและจึงใส่น้ำตามสัดส่วนต่างๆที่ได้ออกแบบไว้โดยควบคุมความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) และปริมาณน้ำที่เหมาะสม (OMC) ตามมาตรฐาน ASTM D1557 [14] ในส่วนของ California bearing ratio (CBR) จะทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1883 [17] ให้ค่าบวมตัวของตัวอย่างการทดสอบไม่เกิน 4% และค่า CBR ต้องไม่น้อยกว่า 4% ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง มทข.201/2545 สำหรับวัสดุถมคันทาง ในส่วนของ Direct shear test การเตรียมตัวอย่างดินจะทำการผสมดิน, หินฝุ่นและเถ้าไม้ยูคาลิปตัสให้เข้ากัน และจึงใส่น้ำตามสัดส่วนต่างๆ ที่ได้ออกแบบไว้โดยที่ดินที่ถูกผสมจะต้องใช้ในการเตรียมตัวอย่างทั้งหมดเพื่อเป็นการควบคุมความหนาแน่น

ของตัวอย่าง ในการพิจารณาเลือกอัตราส่วนผสมไม่มีอัตราส่วนผสมที่คงที่ถ้าไม่อยู่ภายใต้ค่า 50% เนื่องจากถ้าไม่อยู่ภายใต้ค่าเป็นวัสดุที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำและมีน้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่ต่ำ

ตารางที่ 2 สัดส่วนการผสมแอสฟัลต์และหินฝุ่น

สัญลักษณ์	ปริมาณดินเหนียว (CL) (%)	ปริมาณแอสฟัลต์ (W) (%)	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	

2.2.2 ขั้นตอนการทดลอง

2.2.2.1 การหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และความหนาแน่นแห้งสูงสุดได้จากการทดสอบการ บดอัดดินสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction test) ตามมาตรฐาน ASTM D1557 [14] เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นของดิน

2.2.2.2 California bearing ratio (CBR) test ตามมาตรฐาน ASTM D1883 [17] โดยตัวอย่างจะถูกเตรียมตามค่า OMC และ MDD โดยได้จากการทดสอบบดอัดดินสูงกว่ามาตรฐาน ตามมาตรฐาน ASTM D1557 [14]

2.2.2.3 Direct shear test ตามมาตรฐาน ASTM D3080 [18] เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ความต้านทานแรงเฉือนของดิน ได้แก่ ค่าความเหนียว (c) และ มุมเสียดทานภายใน (ϕ) ภายใต้ค่าน้ำหนักกดทับปกติที่กำหนด ตัวอย่างดินที่เตรียมโดยการอัดแน่นให้มีค่าความชื้นที่เหมาะสม (OMC) และความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) ตามผลการทดสอบบดอัดดินสูงกว่ามาตรฐาน ตามมาตรฐาน ASTM D1557 [14]

3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

3.1 ผลการทดสอบ Compaction (Modified compaction test)

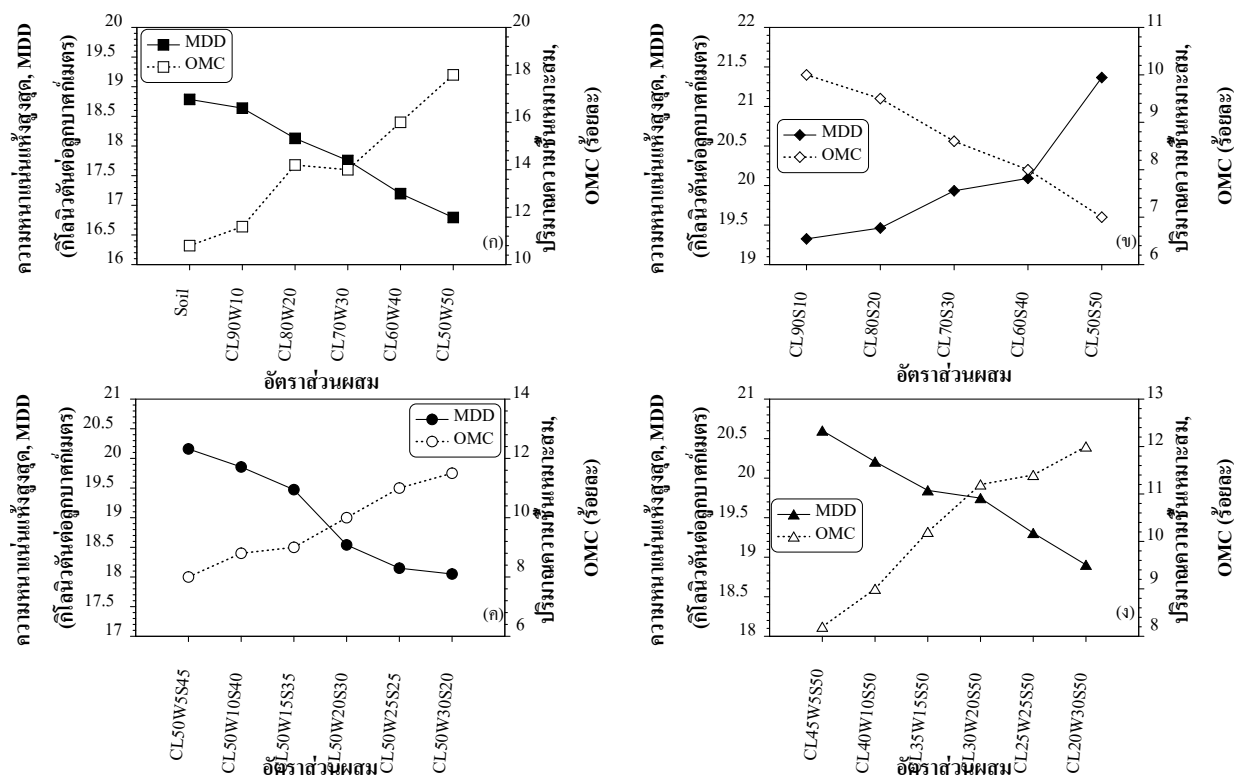
จากรูปที่ 3 แสดงค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณน้ำที่เหมาะสมของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินปูนผลการทดสอบ

ในส่วนของชุดผสมดินกับเถ้าไม้ยูคาลิปตัส (รูป ก) ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) และปริมาณความชื้นเหมาะสม (OMC) ในกราฟช้ายบนซึ่งเป็นการผสมดินกับเถ้าไม้ (W) พบว่าการเพิ่มปริมาณเถ้าไม้ตั้งแต่ร้อยละ 10 ถึง 50 ส่งผลให้ค่า MDD ลดลงและ OMC เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง พฤติกรรมนี้เกิดขึ้นเนื่องจากเถ้าไม้มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า เม็ดดินเหนียวและมีลักษณะทางกายภาพที่มีช่องว่างภายในอนุภาคมาก ทำให้ดูดซับน้ำได้ดี ส่งผลให้มวลรวมของดินลดลง และต้องการน้ำมากขึ้นในการบดอัด

ในส่วนของชุดผสมดินกับหินปูน (รูป ข) เมื่อพิจารณาจะเห็นแนวโน้มที่สวนทางกัน กล่าวคือการเพิ่มปริมาณหินปูนทำให้ค่า MDD สูงขึ้นและ OMC ลดลง กลไกทางกายภาพนี้เกิดจากการที่หินปูนมีน้ำหนักจำเพาะสูงกว่าดินเหนียว และเมื่อผสมเข้าด้วยกันจะช่วยปรับปรุงการจัดเรียงตัวของอนุภาค (Particle Packing) ทำให้เม็ดดินที่ละเอียดสามารถเข้าไปแทรกซอนเติมเต็มช่องว่างระหว่างอนุภาคหินปูนได้อย่างมีประสิทธิภาพ เกิดเป็นโครงร่าง (Granular Skeleton) ที่แน่นทึบและมีเสถียรภาพมากขึ้น ในขณะเดียวกัน หินปูนมีความสามารถในการกักเก็บน้ำตามผิวอนุภาคต่ำกว่าดินเหนียว

ในส่วนของชุดผสมที่คงที่ดินเหนียวที่ 50% (รูป ค) สำหรับกราฟช้ายล่างซึ่งควบคุมปริมาณดินไว้ที่ร้อยละ 50 และปรับลดปริมาณหินปูนเพื่อทดแทนด้วยเถ้าไม้ที่เพิ่มขึ้น พบว่าค่า MDD ลดลงและ OMC เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของเถ้าไม้ที่เพิ่มเข้ามาก การเปลี่ยนแปลงนี้เป็นผลมาจากการแทนที่วัสดุหยาบอย่างหินปูนที่มีความหนาแน่นสูงด้วยวัสดุละเอียดที่มีน้ำหนักเบาและมีความพรุนสูงกว่าอย่างเถ้าไม้ ทำให้ความหนาแน่นของมวลรวมลดลง

ในส่วนของชุดผสมที่คงที่หินปูนที่ 50% (รูป ง) ส่งผลให้ค่า MDD ลดลงและ OMC เพิ่มขึ้นในลักษณะเดียวกัน เนื่องจากการแทนที่อนุภาคดินด้วยเถ้าไม้ซึ่งมีน้ำหนักเบากว่า ส่งผลให้มวลรวมของแข็งต่อหน่วยปริมาตรลดลง ประกอบกับความละเอียด และช่องว่างขนาดเล็กจำนวนมากภายในตัวเถ้าไม้เองที่ทำหน้าที่กักเก็บน้ำทางกายภาพ ทำให้ส่วนผสมรูปแบบนี้ต้องการความชื้นที่สูงขึ้นเพื่อให้สามารถบดอัดและจัดเรียงตัวได้ถึงจุดที่มีความหนาแน่นสูงสุด



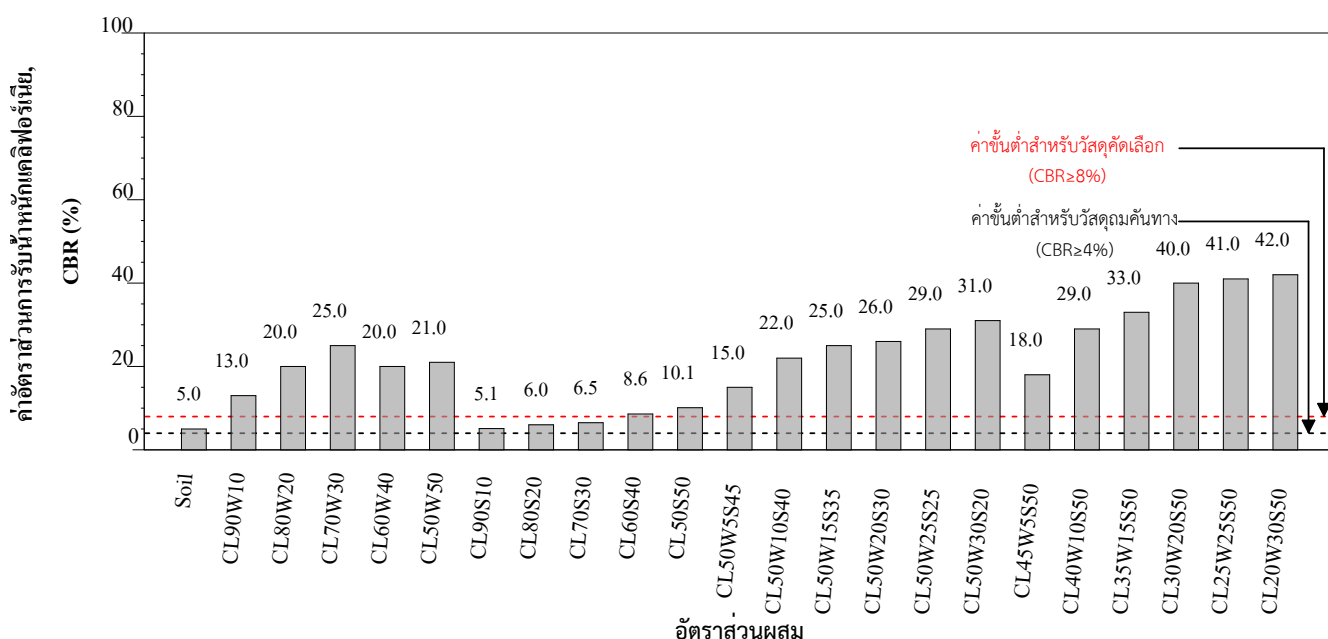
รูปที่ 3 ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณน้ำที่เหมาะสมของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินปูน
(ก) ดินเหนียวปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัส, (ข) ดินเหนียวปรับปรุงคุณภาพด้วยหินปูน, (ค) ดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินปูน (ดินเหนียวคงที่ 50%), (ง) ดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินปูน (หินปูนคงที่ 50%)

3.2 ผลการทดสอบ California bearing ratio (CBR)

จากรูปที่ 4 แสดงกำลังรับแรงแบกทานของดินเหนียว (CL) ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัส (W) และหินปูน (S) ในสัดส่วนต่างๆ พบว่าดินเหนียว (Soil) มีค่า CBR ต่ำเพียง 5% เนื่องจากโครงสร้างดินเหนียวมีลักษณะเป็นเม็ดดินขนาดเล็ก การเรียงตัวไม่เป็นระเบียบและมีช่องว่างระหว่างเม็ดดินสูง ส่งผลให้ความสามารถในการรับน้ำหนักและต้านทานการจมตัวต่ำ เมื่อมีการผสมวัสดุปรับปรุงลงไป ค่า CBR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยสัดส่วนที่มีเฉพาะเถ้าไม้ยูคาลิปตัส (CL90W10–CL50W50) ให้ค่า CBR อยู่ระหว่าง 13–21% เนื่องจากเถ้าไม้ยูคาลิปตัสมีลักษณะเป็นอนุภาคขนาดเล็กมาก สามารถแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างระหว่างเม็ดดินเหนียว ทำให้โครงสร้างโดยรวมแน่นขึ้น ลดการเคลื่อนตัวของเม็ดดินเมื่อรับแรง จึงเพิ่มความต้านทานการจมตัวได้ขึ้น

สำหรับดินเหนียวผสมหินปูน (CL90S10–CL50S50) ค่า CBR อยู่ในช่วง 5.1–10.1% ซึ่งเพิ่มขึ้นจากดินเดิมเพียงเล็กน้อย เนื่องจากหินปูนมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าเถ้าไม้ยูคาลิปตัส เมื่อเติมหินปูนลงในดินเหนียว อนุภาคขนาดใหญ่ไม่สามารถแทรกซึมเข้าสู่ช่องว่างเล็กๆ ได้อย่างทั่วถึง ทำให้การจัดเรียงตัวของโครงสร้างยังไม่แน่นเต็มที่ และการส่งผ่านแรงยังเกิดที่จุดสัมผัสเพียงบางส่วน ส่งผลให้ค่า CBR เพิ่มขึ้นเพียงระดับปานกลาง จากผลการทดสอบพบว่าค่า CBR ของอัตราส่วนที่ใส่หินปูนมีค่าต่ำกว่าอัตราส่วนที่ใส่เถ้าไม้ยูคาลิปตัสแม้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะสูงกว่า แม้ว่าหินปูนจะทำให้ความหนาแน่นของดินเพิ่มขึ้น แต่อนุภาคของเถ้าไม้มีขนาดเล็กกว่า จึงสามารถเติมเต็มช่องว่างระหว่างเม็ดดินได้ดีกว่า ทำให้โครงสร้างดินแน่นและต้านทานการกดแทรกได้มากขึ้น ส่งผลให้ค่า CBR สูงกว่าส่วนผสมที่ใส่หินปูน

เมื่อพิจารณาชุดผสมสามส่วน (CL50W5S45 ขึ้นไป) พบว่าค่า CBR เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึง 15–31% ในกลุ่มสัดส่วนระดับกลาง และสูงถึง 33–42% ในสัดส่วนที่มีหินปูนปริมาณมาก เช่น CL35W15S50, CL30W20S50, CL25W25S50 และ CL20W30S50 ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุด สะท้อนให้เห็นว่าการผสมอนุภาคสองชนิดที่มีขนาดแตกต่างกัน (ถ้าไม่ใช้แคลิปต์ขนาดละเอียดมาก และหินปูนขนาดใหญ่กว่า) ทำให้เกิดโครงสร้างเม็ดดินที่มีขนาดกะทัดรัดอย่างเหมาะสมโดยอนุภาคขนาดต่างกันเติมเต็มช่องว่างของกันและกันได้ดี ส่งผลให้โครงสร้างมีความแน่นสูง ลดปริมาณช่องว่างอากาศ และเมื่อรับแรงจากการทดสอบ CBR แรงสามารถถ่ายผ่านระหว่างเม็ดดินและหินปูนได้อย่างต่อเนื่องมากขึ้น อีกทั้งการแทรกตัวของอนุภาคละเอียดช่วยจำกัดการเคลื่อนที่ของเม็ดหินปูน ทำให้โครงสร้างรับน้ำหนักได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

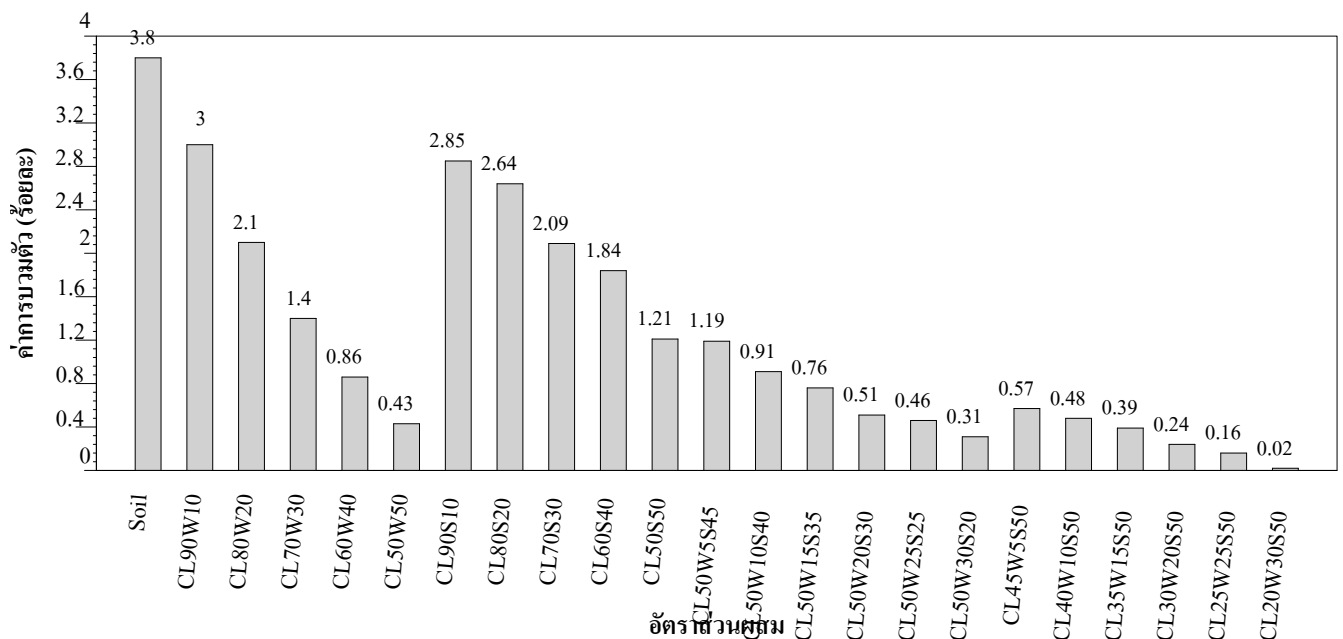


รูปที่ 4 กำลังรับแรงแบกทานของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินปูนในสัดส่วนต่าง ๆ

3.3 ผลการวัดค่าการบวมตัว (Swelling)

จากรูปที่ 5 จากผลการประเมินค่าการบวมตัว (Swelling) ภายใต้สภาวะการแช่น้ำในการทดสอบซีบีอาร์ (CBR) พบว่าดินเหนียวธรรมชาติมีพฤติกรรมการขยายตัวเชิงปริมาตรสูงสุดที่ร้อยละ 3.8 เมื่อพิจารณากลุ่มตัวอย่างที่ผสมวัสดุทดแทนเพียงชนิดเดียว พบว่าการเพิ่มสัดส่วนของเถ้าไม้ยูคาลิปตัสหรือหินปูนส่งผลให้ค่าการบวมตัวลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยเถ้าไม้สามารถลดการพองตัวได้ดีกว่าหินปูนในสัดส่วนที่เท่ากัน (ลดลงเหลือร้อยละ 0.43 ในสัดส่วน CL50W50 เทียบกับร้อยละ 1.21 ในสัดส่วน CL50S50) พฤติกรรมดังกล่าวอธิบายได้ด้วยกลไกทางกายภาพของการแทนที่อนุภาคดินเหนียวซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการบวมตัวด้วยวัสดุที่ไม่พองตัว ประกอบกับความละเอียดของเถ้าไม้ที่สามารถเข้าไปแทรกซอนและเติมเต็มช่องว่าง (Void) ระหว่างเม็ดดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้โครงสร้างมวลดินมีความแน่นทึบและลดทอนการซึมผ่านของน้ำ สำหรับกลุ่มตัวอย่างที่ควบคุมปริมาณดินเหนียวคงที่ร้อยละ 50 และปรับเปลี่ยนสัดส่วนผสมระหว่างเถ้าไม้และหินปูน ค่าการบวมตัวมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงร้อยละ 0.31 ในสัดส่วน CL50W30S20 ซึ่งเป็นผลลัพธ์จากการทำงานร่วมกันทางกายภาพ โดยหินปูนซึ่งเป็นวัสดุหยาบจะทำหน้าที่สร้างโครงร่างด้านทาน (Granular Skeleton) ในขณะที่เถ้าไม้ทำหน้าที่เติมเต็มช่องว่าง ช่วยเสริมให้เกิดการจัดเรียงตัวของอนุภาค (Particle Packing) ที่สมบูรณ์และเกิดการขัดตัว (Interlocking) ที่แข็งแรงเพื่อต้านทานแรงดันจากการพองตัว นอกจากนี้ เมื่อ

พิจารณากลุ่มที่ใช้หินฝุ่นเป็นโครงร่างหลักสูงถึงร้อยละ 50 และใช้เถ้าไม้แทนที่ปริมาณดินเหนียวในสัดส่วนที่เหลือ พบว่าการบวมตัวลดลงจนแทบไม่มีการพองตัว (ร้อยละ 0.02 ในสัดส่วน CL20W30S50) เนื่องจากโครงสร้างหลักมีความมั่นคงสูงจากการถ่ายเทแรงของอนุภาคหินฝุ่น ผนวกกับการลดทอนปริมาณดินเหนียวลงอย่างมาก มวลดินผสมรูปแบบนี้จึงมีเสถียรภาพทางกายภาพต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นสูงที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพที่เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุในงานวิศวกรรมทาง



รูปที่ 5 ค่าการบวมตัวของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่นในสัดส่วนต่าง ๆ

3.4 ความสามารถในการรับแรงเฉือนของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่น

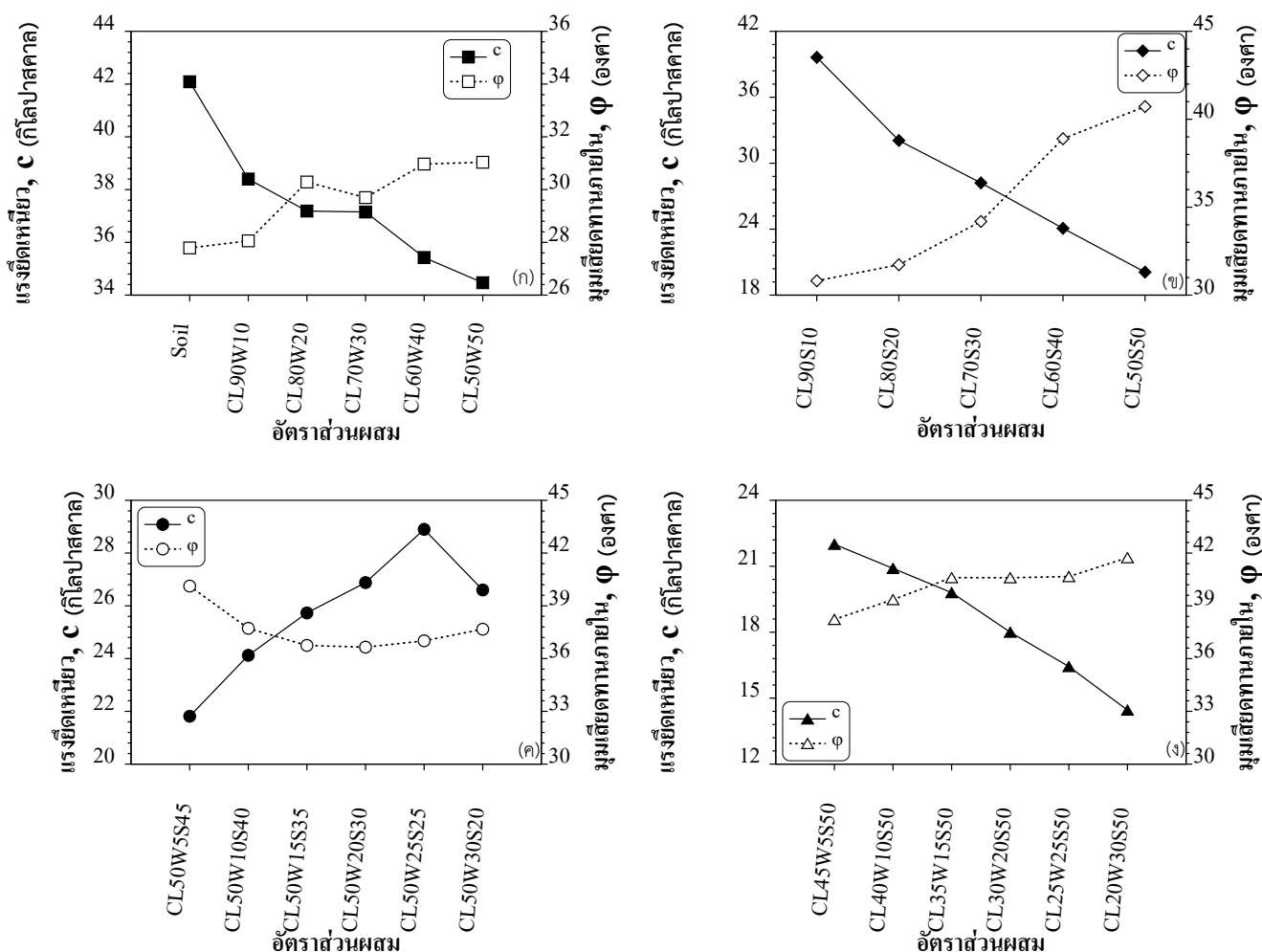
จากรูปที่ 6 แสดงแรงยึดเหนี่ยวและมุมเสียดทานภายในของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่น ผลการทดสอบแรงเฉือนแบบตรงทั้งสี่ชุด พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานแรงเฉือนของดินมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับลักษณะการจัดเรียงตัวของอนุภาคและการกระจายขนาดเม็ดวัสดุภายในส่วนผสม

ในชุดผสมดินกับเถ้าไม้ยูคาลิปตัส (รูป ก) ค่าแรงยึดเหนี่ยว (c) ระหว่างเม็ดดินมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณเถ้าไม้เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากอนุภาคของเถ้าไม้มีขนาดเล็กมาก ส่งผลให้โครงสร้างดินละเอียดขึ้นและมีการยึดเกาะแบบเม็ดต่อเม็ดลดลง แต่ในขณะเดียวกันมุมเสียดทานภายใน (ϕ) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากโครงสร้างที่มีการแทรกตัวของอนุภาคละเอียด ทำให้พื้นผิวสัมผัสระหว่างเม็ดดินเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อความต้านทานต่อการเคลื่อนตัวในทิศระนาบตั้ง

ในชุดผสมดินกับหินฝุ่น (รูป ข) พบว่าค่า c ลดลงอย่างต่อเนื่องตามการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนหินฝุ่น สาเหตุมาจากขนาดอนุภาคที่หยาบกว่าเมื่อกระจายอยู่ในดินเหนียว ทำให้โครงสร้างโดยรวมมีความเป็นดินลูกรังมากขึ้น ซึ่งมีลักษณะรับแรงหลักด้วยแรงเสียดทานมากกว่าแรงยึดเหนี่ยว ส่งผลให้ค่า ϕ เพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดตามสัดส่วนของอนุภาคหยาบที่มากขึ้น

สำหรับชุดผสมสามส่วน ดินเหนียว, เถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่น (รูป ค และ ง) พบว่าค่า c มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในสัดส่วนที่มีความสมดุลระหว่างวัสดุหยาบและวัสดุละเอียด โดยเฉพาะชุดที่มีอนุภาคหลายขนาดผสมกันเหมาะสม ทำให้อนุภาคละเอียดของเถ้าไม้สามารถเติมเต็มช่องว่างระหว่างเม็ดหินฝุ่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้โครงสร้างดินมีความแน่นสูงขึ้นและเกิดแรง

ขีดเหนียวเพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันค่า ϕ ของวัสดุชุดนี้มักปรับเพิ่มขึ้นเล็กน้อยอย่างสม่ำเสมอตามปริมาณหินฝุ่นที่มากขึ้น เนื่องจากมีจำนวนจุดสัมผัสระหว่างเม็ดวัสดุหยาบเพิ่มขึ้น ซึ่งช่วยให้วัสดุต้านทานการเลื่อนตัวได้ดีขึ้น



รูปที่ 6 แรงยึดเหนียวและมุมเสียดทานภายในของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่น (ก) ดินเหนียวปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัส, (ข) ดินเหนียวปรับปรุงคุณภาพด้วยหินฝุ่น, (ค) ดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่น (ดินเหนียวคงที่ 50%), (ง) ดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินฝุ่น (หินฝุ่นคงที่ 50%)

3.5 การเปรียบเทียบผลการศึกษา

3.5.1 ความสัมพันธ์เชิงลบระหว่างค่ากำลังรับแรงแบกทานและแรงยึดเหนียว

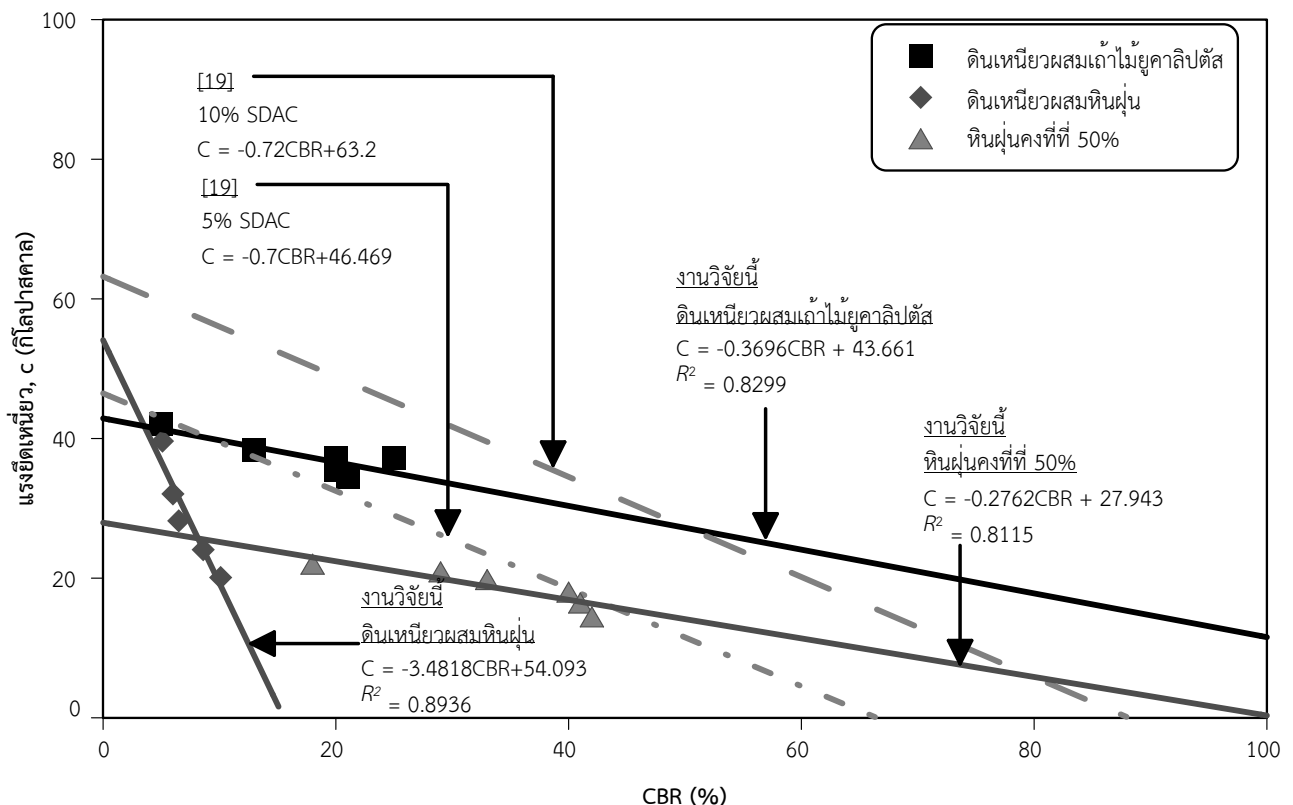
ความสัมพันธ์ระหว่าง CBR และค่า c ของทั้งสามชุดวัสดุแสดงแนวโน้มเชิงลบสอดคล้องกัน คือ เมื่อ CBR เพิ่มขึ้น ค่า c ลดลง โดยชุดดินเหนียวผสมเถ้าไม้ยูคาลิปตัส ให้ค่า c เริ่มต้นสูงกว่าเนื่องจากโครงสร้างแบบกึ่งเหนียว ยังมีแรงยึดเหนียวของเนื้อดินร่วมกับเถ้าไม้ยูคาลิปตัส ขณะที่ดินเหนียวผสมหินฝุ่น ให้ค่า c ต่ำลงเพราะพฤติกรรมของวัสดุที่มีลักษณะเป็นเม็ดมวลหยาบมีมากกว่า ส่วนหินฝุ่นคงที่ที่ 50% ให้ค่า c ต่ำที่สุดจากการแทนที่ดินเหนียวด้วยเม็ดหยาบจำนวนมาก แม้จะเพิ่ม CBR ผ่านการอัดกันระหว่างอนุภาค แต่ทำให้แรงยึดเหนียวลดลง ผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับงานของ [19] ซึ่งพบว่าแม้ Saw dust ash cement (SDAC) จะ

เพิ่ม CBR และมุมเสียดทานภายใน แต่ค่า c กลับลดลงตามระดับการปรับปรุง สะท้อนกลไกเดียวกันคือ การเพิ่มขึ้นของค่า CBR ผ่านโครงสร้างเชิงเสียดทานมักมาพร้อมการลดทอนค่า c ของดิน ดังรูปที่ 7

$$\text{ดินเหนียวผสมเถ้าไม่ยูคาลิปตัส} \quad c = -0.3693 \cdot \text{CBR} + 43.661 \quad R^2 = 0.8299 \quad (1)$$

$$\text{ดินเหนียวผสมหินฝุ่น} \quad c = -3.4818 \cdot \text{CBR} + 54.093 \quad R^2 = 0.8936 \quad (2)$$

$$\text{หินฝุ่นคงที่ที่ 50\%} \quad c = -0.276 \cdot \text{CBR} + 27.943 \quad R^2 = 0.8155 \quad (3)$$

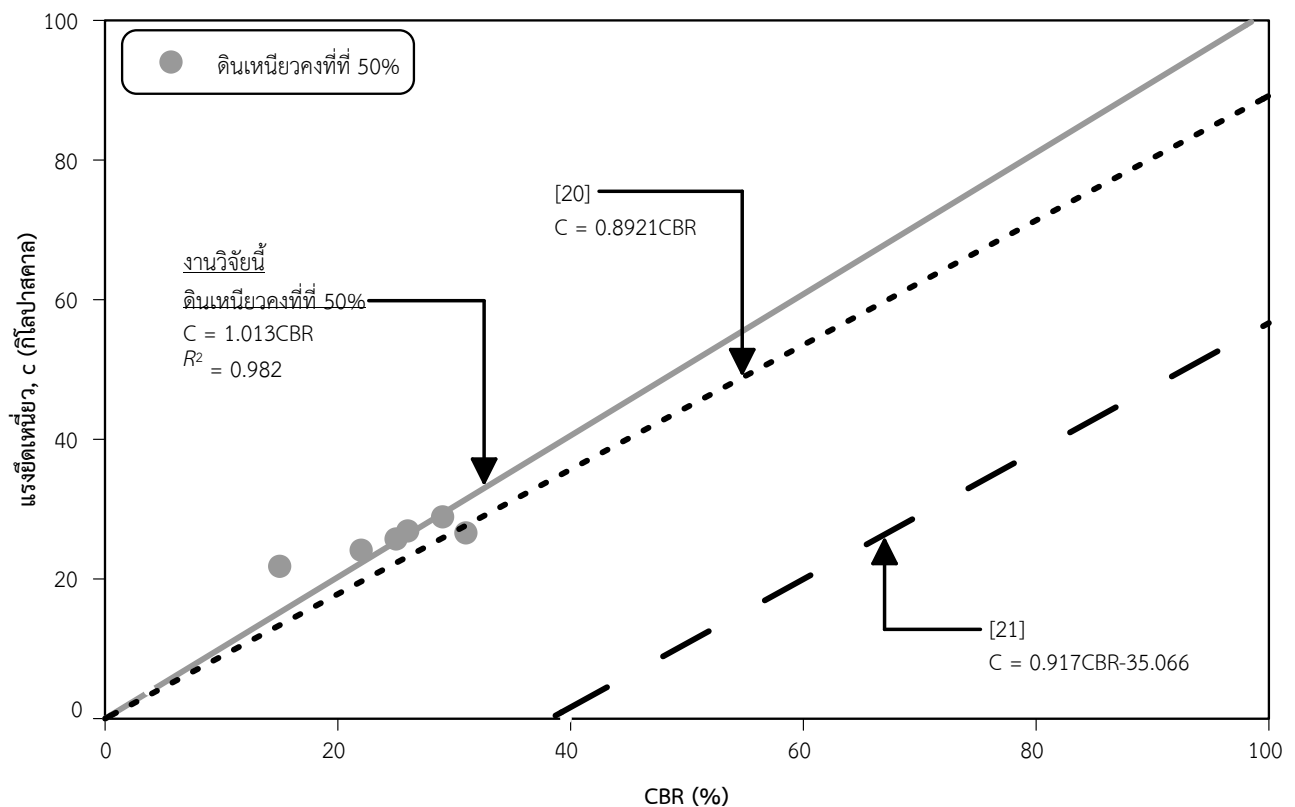


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงแบกทานและแรงยึดเหนี่ยว

3.5.2 ความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างค่ากำลังรับแรงแบกทานและแรงยึดเหนี่ยว

ดินเหนียวคงที่ที่ 50% แสดงแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทิศทางเดียวกัน เนื่องจากการอัดแน่นใกล้ OMC และ MDD ทำให้โครงสร้างเม็ดจัดเรียงดี ช่องว่างลดลง และแรงยึดเหนี่ยวจากดินเหนียวยังมีบทบาท ส่งผลให้ CBR และ c เพิ่มขึ้นโดยไม่เกิดการแปรผกผัน เหมือนกรณีที่พึ่งพาวาสคูเลชันเพียงอย่างเดียว ผลดังกล่าวสอดคล้องกับ [20] ที่พบว่าการคงส่วนดินละเอียดบางส่วนช่วยให้ CBR และ c เพิ่มขึ้นในช่วงสัดส่วนที่เหมาะสม และสอดคล้องกับ [21] ที่รายงานว่าเมื่อการจัดละเอียดและการอัดแน่นมีประสิทธิภาพ ค่ากำลังรับแรงแบกทานและแรงยึดเหนี่ยวจะเพิ่มขึ้นไปด้วยกัน ดังรูปที่ 8

$$\text{ดินเหนียวคงที่ที่ 50\%} \quad c = 1.013 \cdot \text{CBR} \quad R^2 = 0.982 \quad (4)$$



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงแบกทานและแรงยึดเหนี่ยว

4. สรุปผลการทดสอบ

จากการศึกษาพฤติกรรมทางกายภาพในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวด้วยเถ้าไม้ยูคาลิปตัสและหินปูน พบว่าวัสดุทั้งสองชนิดสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทางวิศวกรรมของดินเหนียวได้อย่างมีนัยสำคัญผ่านกลไกการจัดเรียงตัวของอนุภาคและการเติมเต็มช่องว่าง โดยอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดและให้ประสิทธิภาพสูงสุดทางวิศวกรรมคือสัดส่วน CL20W30S50 (ประกอบด้วยดินเหนียวร้อยละ 20 เถ้าไม้ยูคาลิปตัสร้อยละ 30 และหินปูนร้อยละ 50) ซึ่งอัตราส่วนนี้ให้ค่ากำลังรับแรงแบกทาน (CBR) สูงสุดถึงร้อยละ 42.0 และสามารถลดการบวมตัวได้ต่ำสุดเหลือเพียงร้อยละ 0.02 นอกจากนี้ ในภาพรวมของการปรับปรุงโครงสร้างดิน พบว่าการเพิ่มปริมาณวัสดุทดแทนส่งผลให้ค่าแรงยึดเหนี่ยว (c) ลดลง แต่ในขณะเดียวกันก็ช่วยเพิ่มค่ามุมเสียดทานภายใน (ϕ) ของมวลดินให้สูงขึ้นจากการขัดตัวกันของอนุภาค โครงสร้างที่ได้จึงมีความแน่นทึบและต้านทานการรับน้ำหนักได้ดีขึ้น ทำให้วัสดุผสมนี้มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุถมคันทางตามมาตรฐาน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้ขอขอบคุณศาสตราจารย์ ดร.พิทยา แจ่มสว่าง ที่ให้คำปรึกษาตลอดจนแก้ไขในข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างดี ผู้วิจัยตระหนักถึงความทุ่มเทของอาจารย์ และขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Mohanty, S. K., Pradhan, P. K. and Mohanty, C. R. Consolidation and drainage characteristics of expansive soil stabilized with fly ash and dolomite. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2016, 34 (5), pp. 1435–1451.
- [2] Rewatkar, V. B. Effect of eucalyptus wood ash on swelling behavior and microstructure of expansive soil. *Materials Today: Proceedings*, 2023, 84, pp. 342–350.
- [3] Lertwattanaruk, P. and Makul, N. Strength, leachability and microstructure characteristics of cement-based solidified waste water treatment sludge. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 186 (1), pp. 491–502.
- [4] Jamsawang, P., Charoensil, S., Namjan, T., Jongpradist, P. and Likitlersuang, S. Mechanical and microstructural properties of dredged sediments treated with cement and fly ash for use as road materials. *Road Materials and Pavement Design*, 2021, 22 (11), pp. 2498–2522.
- [5] Kalemekiewicz, J., Galas, D. and Sitarz-Palczak, E. The physicochemical properties and composition of biomass ash and evaluating directions of its applications. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2018, 27 (6), pp. 2593–2603.
- [6] Khadka, D., Sharma, R., Sapkota, S., Neupane, K., Gautam, D. and Bhattarai, B. Stabilization of expansive soil using wood ash and brick dust. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2022, 11 (7), pp. 66–71.
- [7] Thirumalai, S. and Puvvadi, V. Study on geotechnical properties of clay mixed with stone dust and rice husk ash. *Materials Today: Proceedings*, 2023, 84 (6), pp. 779–783.
- [8] JMEST. The effect of stone dust content in sand. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology*, 2015, 2 (5), pp. 902–906.
- [9] Samarakoon, A. M. P. B., Subashi, J. W., Bandara, A. K. R. and Niroshan, M. R. M. Prediction of CBR using strength parameters. *International Journal of GEOMATE*, 2021, 21 (88), pp. 37–44.
- [10] Kambhatla, D. and Rao, K. V. S. Evaluation of soaked and unsoaked CBR of soils using Random Forest. *Materials Today: Proceedings*, 2023, 80 (6), pp. 673–679.
- [11] Mir, B. A., Wani, B. A., Ahmad, N., Ayoub, R. and Aziz, J. Comparative study on load-settlement behavior of shallow footings on dredged material underlain by a rigid base. *World Research Journal of Civil Engineering*, 2014, 3 (1), pp. 34–38.
- [12] ASTM International. ASTM D854. *Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer*.
- [13] ASTM International. ASTM D4318. *Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils*.
- [14] ASTM International. ASTM D1557. *Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³))*.
- [15] ASTM International. ASTM D6913. *Standard test methods for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis*.

- [16] ASTM International. ASTM D7928. *Standard test method for particle-size distribution (gradation) of fine-grained soils using the sedimentation (hydrometer) analysis.*
- [17] ASTM International. ASTM D1883. *Standard test method for California bearing ratio (CBR) of laboratory-compacted soils.*
- [18] ASTM International. ASTM D3080/D3080M-11. *Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions.*
- [19] Ojuri, O. O. and Epe, G. G. Strength and leaching characteristics of crude oil contaminated sandy soil stabilized with sawdust ash-cement. In: *Geo-Chicago 2016*, 2016, pp. 582–590.
- [20] Blayi, R. A., Omer, B., Sherwani, A. F. H., Hamadamin, R. M. and Muhammed, H. K. Geotechnical characteristics of fine-grained soil with wood ash. *Cleaner Engineering and Technology*, 2024, 18, 100726.
- [21] Islam, S., Islam, J., Alam, M. J. B., Chowdhury, A. S. and Hasnat, N. Partial replacement of sand by fine-grained crushed waste glass along with fly ash stabilization for geotechnical applications in pavement. *Heliyon*, 2024, 10 (19), e38754.
- [22] กรมทางหลวงชนบท. มทช. 201-2545: *มาตรฐานวัสดุถมคันทาง*. กรุงเทพมหานคร: สำนักวิศวกรรมและตรวจสอบ กรมทางหลวงชนบท, 2545.