บทความวิจัย

การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน หินฝุ่น และปูนซีเมนต์ เพื่อพัฒนาวัสดุชั้นทาง

พงศ์ภูมิ ศรชมแก้ว
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ดารกร อินทรบุตร และ ภัทรชัย พงศ์โสภา*
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 09 7106 8947 อีเมล: Phattharachai.p@rmutp.ac.th
DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.11.003
รับเมื่อ 17 เมษายน 2567 แก้ไขเมื่อ 31 กรกฎาคม 2567 ตอบรับเมื่อ 31 ตุลาคม 2567 เผยแพร่ออนไลน์ 15 พฤศจิกายน 2567
© 2024 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

น้ำมันปาล์มเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งกำลังกลายเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญอย่างรวดเร็วเนื่องจากมีพลังงานศักย์สูงและลดการปนเปื้อนต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันปิโตรเลียม การส่งเสริมไบโอดีเซลมีประโยชน์ตรงที่ช่วยลดการพึ่งพาน้ำมันปิโตรเลียมและช่วยในการจัดการต้นทุนพลังงาน นอกจากนี้การผลิตไบโอดีเซลยังสร้างของเสียจากน้ำมันปาล์ม รวมถึงพวงผลไม้ที่ว่างเปล่า เส้นใย และเปลือกเมล็ดปาล์ม ซึ่งจะถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการผลิตไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดเถ้าจากน้ำมันปาล์มเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ทางอุตสาหกรรม การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพและวิศวกรรมของดินลูกรังที่ผสมกับฝุ่นหิน ขยะน้ำมันปาล์มจากการใช้งานในอุตสาหกรรม และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน การศึกษานี้ใช้ตัวอย่างที่ผสมกับเถ้าปาล์มน้ำมันในสัดส่วนที่แตกต่างกัน คือ 0% 1.25% 3.75% และ 5% ตามลำดับ ปริมาณหินฝุ่น 16% และ 18% และปริมาณปูนซีเมนต์ 6% และ 8% จากการทดสอบทางกายภาพพบว่า ขีดจำกัดเหลว ขีดจำกัดพลาสติก และขีดจำกัดการหดตัวมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเถ้าปาล์มน้ำมัน ในงานวิจัยนี้ได้ใช้การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานและการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว จากการทดสอบการบดอัดพบว่าค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมัน ปริมาณหินฝุ่น และปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของเถ้าปาล์มน้ำมัน หินฝุ่น และปูนซีเมนต์ ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของแต่ละอัตราส่วน โดยมีอัตราส่วนผสมของหินฝุ่น ปูนซีเมนต์ และเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่เหมาะสมจะสามารถทำให้รับกำลังได้สูง แต่ในกรณีที่มีเถ้าปาล์มน้ำมันที่มากเกินไปอาจจะส่งผลต่อค่าการรับกำลังอัดทำให้การรับกำลังอัดนั้นมีค่าลดลง

คำสำคัญ: ดินลูกรัง เถ้าปาล์มน้ำมัน หินฝุ่น ปูนซีเมนต์

การอ้างอิงบทความ: พงศ์ภูมิ ศรชมแก้ว, ดารกร อินทรบุตร และ ภัทรชัย พงศ์โสภา, "การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน หินฝุ่น และปูนซีเมนต์ เพื่อพัฒนาวัสดุชั้นทาง," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 35, ฉบับที่ 4, หน้า 1–12, เลขที่บทความ 254-7632, ต.ค.–ธ.ค. 2568.

วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 35 ฉบับที่ 4 ต.ค.–ธ.ค. 2568
The Journal of KMUTNB., Vol. 35, No. 4, Oct.–Dec. 2025

Research Article

Improvement of Lateritic Soil with Oil Palm Ash, Dust Stone, and Cement to Develop Road Surface Materials

Phongphoom Sornchomkaew
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin Wangklaikangwon Campus, Prachuap Khiri Khan, Thailand
Darrakorn Intarabut and Phattharachai Pongsopha*
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 09 7106 8947, E–mail: Phattharachai.p@rmutp.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.11.003
Received 17 April 2024; Revised 31 July 2024; Accepted 31 October 2024; Published online: 15 November 2024
© 2024 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

Palm oil is the main raw material for biodiesel production, rapidly becoming an important energy source due to its high potential energy and reduced environmental contamination compared to petroleum. Promoting biodiesel has the advantage of reducing the dependence on petroleum and helping to manage energy costs. In addition, biodiesel production generates palm oil waste, including empty fruit bunches, fibers, and palm kernel shells, which are used as fuel for electricity generation, resulting in palm oil ash as an industrial by-product. This study aimed to study the physical and engineering properties of laterite soil mixed with rock dust, oil palm ash, and Portland cement type 1. The study used different mixing ratios, with oil palm ash at 0%, 1.25%, 3.75%, and 5%, rock dust at 16% and 18%, and cement at 6% and 8%. Physically, the limits were found to be fluid, with plastic and shrinkage limits increasing as the amount of oil palm ash increased. The study employed a standard compaction test and a uniaxial compression test. The compaction test results showed that the maximum dry unit weight decreased as the oil palm ash content increased. The optimum moisture content increased with the addition of oil palm ash, rock dust, and cement. The uniaxial compression test revealed that mixing the right proportions of rock dust, cement, and oil palm ash could result in high strength. However, excessive amounts of oil palm ash negatively affected the compressive strength, leading to a decrease.

Keywords: Lateritic Soil, Oil Palm Ash, Dust Stone, Cement

Please cite this article as: P. Sornchomkaew, Darrakorn Intarabut and Phattharachai Pongsopha, "Improvement of Lateritic Soil with Oil Palm Ash, Dust Stone, and Cement to Develop Road Surface Materials," *The Journal of KMUTNB*, vol. 35, no. 4, pp. 1–12, ID. 254-7632, Oct.–Dec. 2025 (in Thai).

1. บทนำ

เนื่องจากทั่วโลกมีการตื่นตัวเรื่องการใช้พลังงานทดแทนจากพืชเพื่อลดการใช้น้ำมันปิโตรเลียม“ไบโอดีเซล” ซึ่งส่วนใหญ่ใช้ปาล์มน้ำมันเป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิต [1], [2] ได้กลายเป็นแหล่งพลังงานสำคัญในลำดับต้น ๆ ซึ่งให้พลังงานที่มีศักยภาพสูงไม่แตกต่างจากน้ำมันปิโตรเลียมมากนักอีกทั้งก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าและมีราคาถูกกว่าน้ำมันปิโตรเลียม หลายประเทศจึงเร่งรณรงค์และออกมาตรการผลักดันให้ประชาชนหันมาใช้และผลิตไบโอดีเซล เพื่อทดแทนน้ำมันปิโตรเลียมที่นับวันยิ่งมีราคาสูงขึ้นและผันผวนไม่แน่นอนส่งผลให้ปริมาณความต้องการปาล์มน้ำมัน ในภาคการผลิตต่าง ๆ ทั่วโลกรวมถึงประเทศไทยมีเพิ่มมากขึ้น ต้องการใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมอื่น ๆ และอุตสาหกรรมการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งปาล์มน้ำมันเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตไบโอดีเซล ส่งผลผลปาล์มน้ำมันได้แก่ เศษกะลา เส้นใย และทะลายปาล์มเปล่าของผลปาล์มมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งถูกนำมาเผาเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิดไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า มีอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาประมาณ 800–9,000 องศา ทำให้เกิดเถ้าปาล์มน้ำมัน (Palm Oil Fuel Ash) เป็นจำนวนมาก

ขณะเดียวกันได้มีการนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้ในงานก่อสร้างอย่างแพร่หลายและมีการวิจัยออกมาอย่างต่อเนื่องจากหลายสถาบัน จนเป็นที่ทราบกันดีว่าปาล์มน้ำมันสามารถใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนในงานคอนกรีตได้ดี [3], [4] แต่การศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของเถ้าปาล์มน้ำมันที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว ซีเมนต์และสารต่าง ๆ ยังไม่แพร่หลาย ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมา [5] ศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติของดินลูกรัง (LS) ด้วยการใช้เถ้าเส้นใยปาล์มน้ำมัน (OPFA) และปูนซีเมนต์ เพื่อใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้างชั้นทางยืดหยุ่น โดยผลการทดสอบพบว่า การผสม OPFA และปูนซีเมนต์ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของดิน โดยความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) ลดลงและปริมาณน้ำเหมาะสม (OMC) เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ส่วนผสมที่ดีที่สุด คือ ดินลูกรัง 80% OPFA 14% และปูนซีเมนต์ 6% ซึ่งให้ค่า CBR สูงถึง 190.09% (เมื่อแช่น้ำ) และกำลังอัดแบบไม่ถูกบีบอัด (UCS) ที่ 785.75 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร ทำให้เหมาะสมสำหรับการใช้เป็นวัสดุชั้นฐานในงานก่อสร้างถนน และการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังด้วยการใช้เถ้าถ่านปาล์มน้ำมัน (POFA) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อใช้ในการก่อสร้างถนน [6] โดยทำการผสมปูนซีเมนต์ในสัดส่วน 2–5% และ POFA ในสัดส่วน 5–15% ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าดินที่ผสมปูนซีเมนต์ 5% มีความต้านทานแรงอัดสูงสุดที่ 24.8 ksc และเมื่อผสม POFA 5% ร่วมกับปูนซีเมนต์ 5% ความต้านทานแรงอัดเพิ่มขึ้นเป็น 31.1 ksc อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มสัดส่วน POFA มากขึ้น ความต้านทานการอัดจะลดลง นอกจากนี้ปริมาณน้ำเหมาะสม (OMC) เพิ่มขึ้นจาก 9.7% เป็น 11.2% ในขณะที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุด ลดลงจาก 1.970 เป็น 1.861 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ผลลัพธ์แสดงให้ดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และ POFA ในบางสัดส่วนสามารถผ่านมาตรฐานชั้นฐานรองสำหรับงานก่อสร้างถนนตามมาตรฐานของกรมทางหลวงได้

หินฝุ่น เป็นหินปูนที่บดแบบหยาบ ๆ ที่เกิดจากการโม่หิน ซึ่งมีลักษณะเป็นฝุ่นผงที่มีขนาดเล็กละเอียดอยู่ที่ประมาณ 8 มิลลิเมตร ลงมาโดยมีองค์ประกอบสำคัญ คือ ธาตุแคลเซียมและธาตุแมกนีเซียม เป็นองค์ประกอบในหินฝุ่นทำให้สามารถนำไปปรับใช้ได้ในหลายจุดประสงค์ตามที่ผู้ใช้งานต้องการ ไม่ว่าจะด้านการนำมาเป็นส่วนผสมในงานก่อสร้างประเภทต่าง ๆ หรือแม้แต่การนำมาใช้ในการปรับสภาพดินก็ตาม มักถูกนำมาอัดอิฐบล็อก อิฐทางเท้า อิฐประสาน อิฐต่าง ๆ เป็นหินที่ใช้ในการก่อสร้างลานอเนกประสงค์ เช่น สนามกีฬา งานตกแต่งสวน และทางเท้า เป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของงานคอนกรีต ซึ่งสามารถใช้ในงานปูพื้นถนน เพื่อให้เกิดความเรียบเนียน และยังสามารถนำไปใช้ในงานก่อสร้างอื่น ๆ เพื่อลดต้นทุนการผลิตได้อีกด้วย [7]–[11] จากงานวิจัยที่ผ่านมา [12] การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยใช้หินฝุ่นและผงปูนขาว เพื่อพัฒนาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินสำหรับใช้ในงานก่อสร้างถนนโดยทำการผสมสารปรับปรุงคุณภาพในสัดส่วน 5% 10% 15% 20% 1% 3% และ 5% กับดินลูกรังพบว่า การเพิ่มสารปรับปรุง

ช่วยเพิ่มความหนาแน่นแห้งสูงสุด เพิ่มการยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคดิน (Cohesion) และมุมแรงเสียดทานภายใน ทำให้ดินมีความแข็งแรงมากขึ้น โดยสัดส่วนที่ให้ผลดีที่สุด คือ หินฝุ่น 10% และผงปูนขาว 3%

ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาเป็นศึกษาการปรับปรุงดินลูกรังผสมปูนซีเมนต์ หินฝุ่น และเถ้าปาล์มน้ำมัน ทางผู้วิจัยจึงพัฒนาเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมเบื้องต้นของดินลูกรังผสมร่วมกันระหว่างหินฝุ่น ปูนซีเมนต์ และเถ้าปาล์มน้ำมัน เพื่อพัฒนาดินชั้นทาง โดยการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตราฐาน และการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว และหาสัดส่วนผสมของดินลูกรังผสมหินฝุ่น ปูนซีเมนต์ และเถ้าปาล์มน้ำมันเพื่อพัฒนาดินชั้นทางที่เหมาะสมที่สุดกับการนำมาใช้งานก่อสร้างถนน ซึ่งคาดว่าในอนาคตเถ้าปาล์มน้ำมันจะนำมาใช้ในการก่อสร้างชั้นทางของถนนบนดินอ่อนมากหรืออาจนำมาใช้ในการทำถนนในชุมชน ตำบล ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐกิจพอเพียงและเป็นการนำขยะที่เกิดจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาผลิตเป็นวัสดุชนิดใหม่หมุนเวียนภายในประเทศ

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุ

2.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าความถ่วงจำเพาะ 3.15 ตามมาตรฐาน ASTM C150 [13]

2.1.2 ดินลูกรัง ใช้ตัวอย่างดินจากในพื้นที่ อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ดังแสดงในรูปที่ 1 มวลคละผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาดตะแกรงเบอร์ 40 ซึ่งจากการทำการทดสอบแล้วนั้น ผ่านตะแกรงเบอร์ 10 ร้อยละ 60 ผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ร้อยละ 30 และผ่านเบอร์ 200 ร้อยละ 8 จึงเป็นชนิด จ การแจกแจงขนาดคละสำหรับวัสดุชั้นรองพื้นทาง มยผ.2208-57 ดังแสดงในตารางที่ 1

2.1.3 เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุพลอยได้จากการนำกากของผลปาล์มน้ำมัน ได้แก่ เศษกะลา เส้นใย และทะลายปาล์มเปล่าของผลปาล์ม เผาเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิดไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้มานำมาจากบริษัทกลั่นน้ำมันปาล์ม อำเภอสวี จังหวัดชุมพร ดังแสดงในรูปที่ 2

รูปที่ 1 ดินลูกรัง

รูปที่ 2 เถ้าปาล์มน้ำมัน

ตารางที่ 1 การแจกแจงขนาดคละสำหรับวัสดุชั้นรองพื้นทาง มยผ.2208-57

ขนาดช่องตะแกรง	น้ำหนักที่ผ่านตะแกรง (ร้อยละ)				
	ชนิด ก	ชนิด ข	ชนิด ค	ชนิด ง	ชนิด จ
2” (50 มม.)	100	100	-	-	-
1” (25 มม.)	-	75–95	100	100	100
3/8” (9.5 มม.)	30–65	40–75	50–85	60–100	-
เบอร์ 10 (2 มม.)	15–40	20–45	25–50	40–70	40–100
เบอร์ 40 (0.425 มม.)	8–20	15–30	15–30	25–45	20–50
เบอร์ 200 (0.075 มม.)	2–8	5–20	5–15	5–20	6–20

รูปที่ 3 หินฝุ่น

2.1.4 หินฝุ่น เป็นผลพลอยได้จากการโม่หินปูน หินฝุ่นนำมาจาก ป.วัสดุก่อสร้าง อำเภอปราณบุรี ดังแสดงในรูปที่ 3

2.2 สัดส่วนผสม

2.2.1 สัดส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบา กำหนดอัตราส่วนผสมระหว่างดินลูกรัง ปูนซีเมนต์ หินฝุ่น และเถ้าปาล์มน้ำมัน กำหนดส่วนผสม ดินลูกรัง 100% ต่อ หินฝุ่น 12% และ 16% ต่อ ปูนซีเมนต์ 0% 6% และ 8% ต่อ เถ้าปาล์มน้ำมัน 0% 1.25% และ 5% ซึ่งมีสัดส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสม

ชื่อตัวอย่าง	สัดส่วนผสม (%)			
	S	D	C	P
100S	100	0	0	0
100S12D6C0P	100	12	6	0
100S12D6C1.25P	100	12	6	1.25
100S12D6C3.75P	100	12	6	3.75
100S12D6C5P	100	12	6	5
100S16D8C0P	100	16	8	0
100S16D8C1.25P	100	16	8	1.25
100S16D8C3.75P	100	16	8	3.75
100S16D8C5P	100	16	8	5

หมายเหตุ: aSbDcCdP

a หมายถึง ปริมาณดินลูกรัง (% โดย) S หมายถึง ดินลูกรัง
b หมายถึง ปริมาณหินฝุ่น (%) D หมายถึง หินฝุ่น
c หมายถึง ปริมาณปูนซีเมนต์ (%) C หมายถึง ปูนซีเมนต์
d หมายถึง ปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมัน (%) P หมายถึง เถ้าปาล์มน้ำมัน

รูปที่ 4 ตะแกรงมาตรฐาน

2.2.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบคอนกรีตมวลเบา เตรียมสัดส่วนผสมโดยนำดินลูกรัง หินฝุ่น ปูนซีเมนต์ และเถ้าปาล์มน้ำมัน มาผสมตามอัตราส่วนผสมตามอัตราส่วนที่กำหนดดังแสดงในตารางที่ 1 จากนั้นผสมกับน้ำตามค่าปริมาณความชื้นที่ได้กำหนดไว้ แล้วผสมให้เข้ากัน หลังจากนั้นต้องทำการบ่มตัวอย่างการทดสอบโดยใช้แผ่นพลาสติกห่อหุ้มตามระยะเวลา 28 วัน และนำไปทดสอบในขั้นตอนต่อไป

2.3 การทดสอบ

การจำแนกขนาดของดินโดยวิธีการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน ตามมาตรฐาน ASTM D 422 [14] การทดสอบนี้ใช้ในการวิเคราะห์และจำแนกขนาดอนุภาคของดิน โดยทำการร่อนดินผ่านตะแกรงที่มีขนาดช่องตะแกรงมาตรฐานต่าง ๆ เพื่อตรวจสอบว่าดินมีองค์ประกอบเป็นทราย กรวด หรือดินเหนียวมากน้อยเพียงใด ข้อมูลที่ได้จะถูกนำไปใช้ในการจำแนกประเภทดินตามระบบมาตรฐาน โดยนำตัวอย่างดินแห้งที่ผ่านการบดและเตรียมไว้แล้วร่อนตัวอย่างดินผ่านชุดตะแกรงมาตรฐานที่มีขนาดต่างกัน (จากขนาดใหญ่ไปเล็ก) ดังแสดงในรูปที่ 4 จากนั้นชั่งน้ำหนักดินที่ตกค้างบนแต่ละตะแกรง และคำนวณเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของดินที่ค้างบนตะแกรงแต่ละขนาด

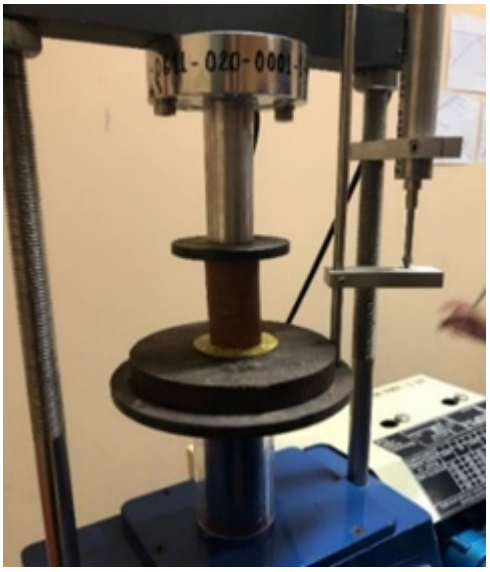
รูปที่ 5 การทดสอบหาขีดจำกัดความข้นเหลวของดิน

รูปที่ 6 การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

การทดสอบหาขีดจำกัดความข้นเหลวของดิน ตามมาตรฐาน ASTM D 4318-93 [15] เพื่อหาค่าขีดจำกัดความข้นเหลว (Liquid Limit; LL) ของดิน ซึ่งเป็นปริมาณน้ำที่ดินเริ่มเปลี่ยนจากสถานะพลาสติกเป็นสถานะไหลได้ การทดสอบจะใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Casagrande Apparatus โดยการสร้างร่องในตัวอย่างดินที่มีความชื้นและให้เกิดการเคลื่อนตัวของดินเมื่อทำการกระแทก การทดสอบนี้ช่วยบ่งชี้คุณสมบัติของดินเหนียวในสถานะต่าง ๆ โดยเตรียมดินให้มีความชื้นที่แตกต่างกันหลายระดับใส่ดินลงในถ้วยของเครื่องมือ Casagrande และสร้างร่องตรงกลางดิน ปล่อยให้เครื่องตีลงบนถ้วยและนับจำนวนครั้งที่ทำให้ร่องดินปิดสนิท ดังแสดงในรูปที่ 3 ทำซ้ำหลายครั้งเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งที่ร่องปิดสนิทและความชื้นของดิน จากนั้นสร้างกราฟและคำนวณขีดจำกัดความข้นเหลวจากจำนวนครั้ง 25 ครั้ง

การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตราฐาน ASTM D 1557–00 [16] เพื่อหาความหนาแน่นสูงสุดของดินหรือตัวอย่างวัสดุก่อสร้างเมื่อต้องการอัดแน่นให้มากกว่าระดับมาตรฐานทั่วไป โดยการใช้ปริมาณพลังงานในการอัดแน่นที่สูงขึ้น (Modified Proctor Test) ใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐาน โดยเตรียมตัวอย่างดินโดยเติมน้ำให้ได้ระดับความชื้นต่าง ๆ ใส่ตัวอย่างดินลงในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4 นิ้ว สูง 4.584 นิ้ว ดังแสดงในรูปที่ 6 และทำการอัดแน่นด้วยพลังงานที่มากกว่า Proctor มาตรฐานจากนั้นทำการบดอัดดินทีละชั้น (ประมาณ 5 ชั้น) โดยใช้ค้อนขนาด 10 ปอนด์ ระยะตก 18 นิ้ว ทดสอบที่มีน้ำหนักมากขึ้นและจำนวนครั้งที่มากขึ้นและชั่งน้ำหนักและคำนวณความหนาแน่นของตัวอย่างที่อัดแน่นแล้ว

การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว ASTM D 2166-00 [17] เพื่อหาค่ากำลังอัดแบบแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength) ของดินเหนียวหรือวัสดุอื่น ๆ โดยไม่ใช้การกดอัดจากด้านข้าง (Unconfined) เป็นการวัดความสามารถของดินในการรับแรงกดตามแนวแกน (Uniaxial Compression) จนถึงจุดที่เกิดการวิบัติ โดยนำตัวอย่างดินทรงกระบอกที่เตรียมไว้มาทดสอบในสภาวะไร้การกดอัดด้านข้างวางตัวอย่างในเครื่องทดสอบแรงอัดและบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงความสูงขณะที่เพิ่มแรงกดลงบนตัวอย่างกดต่อไปจนกระทั่งตัวอย่างดินเกิดการวิบัติ (แตกหรือเสียรูป) ดังแสดงในรูปที่ 7 จากนั้นบันทึกค่าแรงที่ทำให้เกิดการวิบัติและคำนวณกำลังอัดแกนเดียว



รูปที่ 7 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

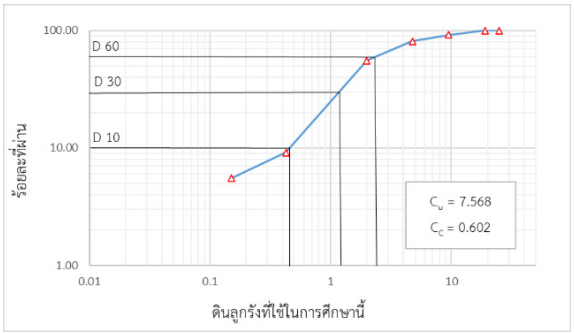
3. ผลการทดลอง

3.1 การจำแนกขนาดของดินโดยวิธีการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน

ตัวอย่างดินลูกรังที่ใช้ในการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน จากผลการทดสอบการหาขนาดของเม็ดดินโดยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานของตัวอย่างดินพบว่า ได้ค่า C_u เท่ากับ 7.568 และ C_c เท่ากับ 0.602 ซึ่งจากเงื่อนไขขนาดคละของดินเม็ดหยาบ สรุปได้ว่า $C_u > 4$ และ C_c ไม่อยู่ในช่วง 1–3 แสดงว่าดินชนิดนี้มีขนาดคละกันไม่ดี (Poor Grade) ดังแสดงในรูปที่ 8

3.2 ค่าขีดจำกัดความข้นเหลว

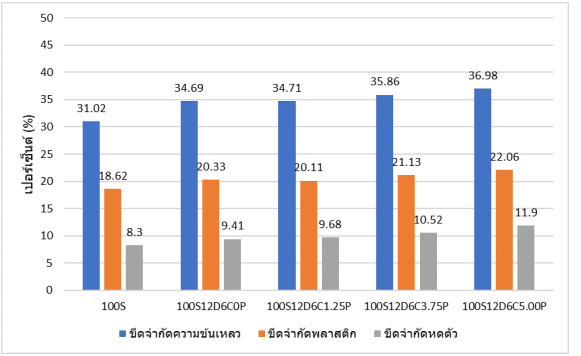
การทดสอบขีดจำกัดความข้นเหลวของดินลูกรังเมื่อปรับปรุงคุณภาพด้วย หินฝุ่น ปูนซีเมนต์ และเถ้าปาล์มน้ำมัน แล้วพบว่า ดินลูกรังที่ไม่ทำการผสมวัสดุเพิ่มเติม จะมีความข้นเหลวอยู่ที่ 31.02 เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานวัสดุรองพื้นทาง (มยพ. 2102–57) และมาตราฐานวัสดุลูกรังชนิดทำผิวจราจร (มยพ.2106–57) พบว่า ไม่เป็นไปตามเกณฑ์มาตราฐาน กล่าวคือ ดินลูกรังมีค่าขีดจำกัดเหลวไม่มากกว่า 35% และค่าดัชนีพลาสติก มากกว่า 4–11%



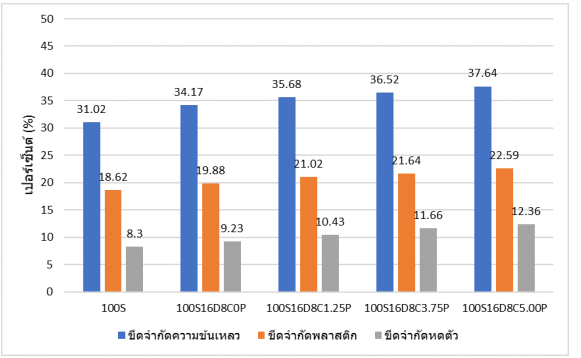
รูปที่ 8 การกระจายตัวของเม็ดดิน

ผลการทดสอบพบว่า ค่าขีดจำกัดความข้นเหลว ขีดจำกัดพลาสติกและขีดจำกัดหดตัวของตัวอย่างดินลูกรัง (100S) มีค่า 31.02% 18.62 % และ 8.3% ตามลำดับ และเมื่อปริมาณหินฝุ่นและปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นเป็น 12% และ 6% ตามลำดับ ซึ่งแสดงในตัวอย่าง 100S12D6C0P ส่งผลให้ค่าขีดจำกัดความข้นเหลว ขีดจำกัดพลาสติก และขีดจำกัดหดตัว เพิ่มขึ้นเป็น 34.69% 20.33% และ 9.41% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งการผสมหินฝุ่นและปูนซีเมนต์ในปริมาณดังกล่าวทำให้ค่าขีดจำกัดความข้นเหลวเพิ่มขึ้นเป็น 34.69% ซึ่งยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน (ไม่เกิน 35%) ส่วนค่าขีดจำกัดพลาสติกและขีดจำกัดหดตัวก็มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งแสดงถึงการปรับปรุงคุณสมบัติของดินลูกรังให้มีความเหมาะสมมากขึ้นสำหรับการใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อนำไปใช้เป็นวัสดุรองพื้นทางหรือผิวจราจร

เมื่อปริมาณหินฝุ่นและปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นเป็น 16% และ 8% ตามลำดับ ซึ่งแสดงในตัวอย่าง 100S16D8C0P พบว่าค่าขีดจำกัดความข้นเหลว ขีดจำกัดพลาสติกและขีดจำกัดหดตัว เพิ่มขึ้นเป็น 34.17% 19.88% และ 9.23% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 9 เนื่องจากเกิดจากการที่ปริมาณหินฝุ่นและปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการปรับปรุงโครงสร้างและคุณสมบัติทางเคมีของดิน การเติมหินฝุ่นทำให้เกิดการเพิ่มเนื้อที่ผิวสัมผัสของอนุภาคดิน ซึ่งส่งผลให้ดินสามารถกักเก็บน้ำได้มากขึ้น ทำให้ค่าขีดจำกัดความข้นเหลวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ปูนซีเมนต์ยังทำปฏิกิริยากับน้ำและดิน ทำให้เกิดสารประกอบซีเมนต์ (เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต หรือ



รูปที่ 9 ค่าขีดจำกัดความข้นเหลวของตัวอย่างดินลูกรังผสมหินฝุ่น 12% และ ปูนซีเมนต์ 6%

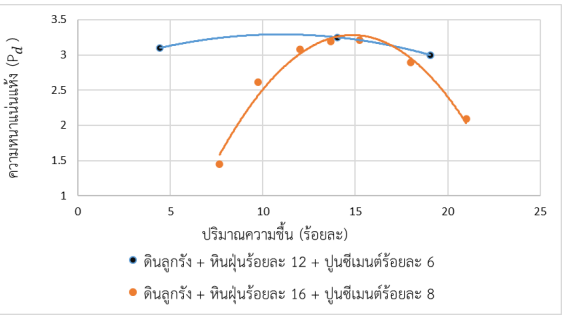


รูปที่ 10 ค่าขีดจำกัดความข้นเหลวของตัวอย่างดินลูกรังผสมหินฝุ่น 16% และ ปูนซีเมนต์ 8%

C-S-H) ซึ่งช่วยเพิ่มความคงตัวของดินและลดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของดินในสภาวะชื้นหรือแห้ง จึงทำให้ขีดจำกัดพลาสติกและขีดจำกัดหดตัวเพิ่มขึ้นตามไปด้วย [18]

ในส่วนของผลกระทบของปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันพบว่าค่าขีดจำกัดความข้นเหลว ขีดจำกัดพลาสติก และขีดจำกัดหดตัวของตัวอย่างที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน 1.25–5% มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นตามปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 9 และ 10 โดยขีดจำกัดความข้นเหลวนั้นเพิ่มขึ้นเนื่องจากวัสดุที่ทำการผสมเพิ่มเข้าไป ทำให้ต้องการปริมาณความชื้นที่สูงขึ้น

ในส่วนของขีดจำกัดพลาสติกเมื่อทำการเพิ่มวัสดุปูนซีเมนต์ และเถ้าปาล์มน้ำมัน เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้มีคุณสมบัติคล้ายกาวเคลือบตัวดินลูกรังทำให้ขีดจำกัดพลาสติกสูงขึ้น

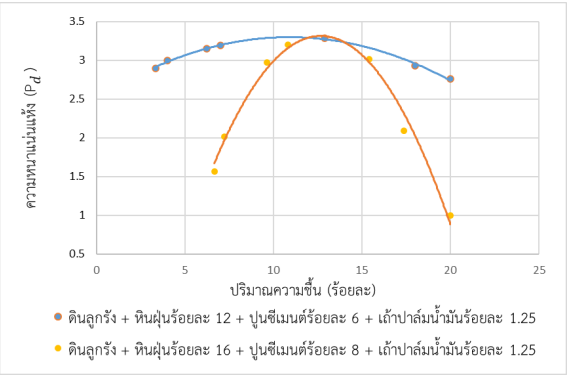


รูปที่ 11 เส้นกราฟการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ของดินลูกรังผสมหินฝุ่น และผสมปูนซีเมนต์

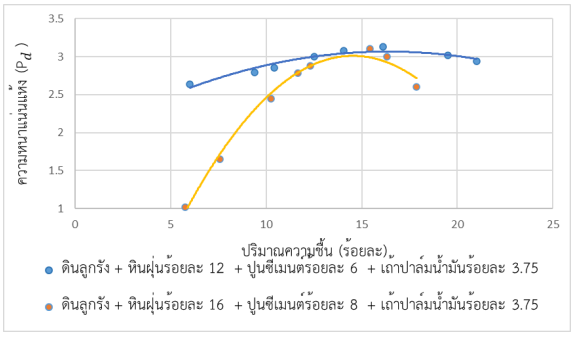
3.3 ค่าความหนาแน่นสูงสุด

การทดสอบการบดอัดดินเป็นการทดสอบเพื่อหาความหนาแน่นและความสามารถในการรับน้ำหนักของดินโดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้ง (Dry Density) กับปริมาณความชื้นในการบดอัด (Water Content) เพื่อหาความหนาแน่นสูงสุด (Maximum Dry Density) และหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมต่อการบดอัด (Optimum Moisture Content; OMC) ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีการบดอัดของ Proctor ประสิทธิภาพของการบดอัดนั้นจะขึ้นอยู่กับแรงเสียดทานระหว่างเม็ดดิน

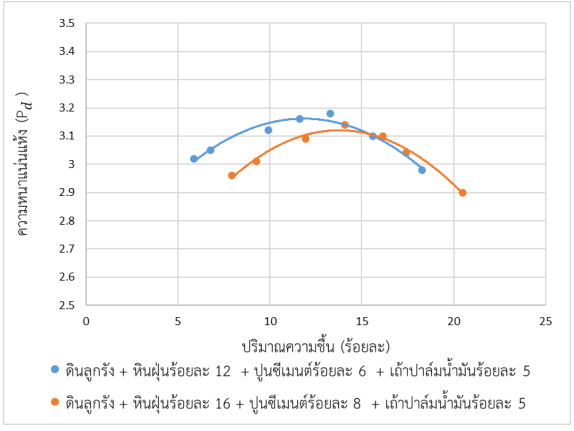
ผลการทดสอบพบว่า ดินลูกรังมีความหนาแน่นสูงสุด 3.05 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีปริมาณความชื้นที่เหมาะสม 13% และเมื่อปูนซีเมนต์และหินฝุ่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณความชื้นจะเพิ่มขึ้น และความหนาแน่นเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยพบว่า ตัวอย่างที่มีปริมาณหินฝุ่น 12% และปูนซีเมนต์ 6% (100S12D6C0P) จะมีปริมาณความชื้น 14.02% และตัวอย่างมีปริมาณหินฝุ่น 16% และปูนซีเมนต์ 8% (100S16D8C0P) มีปริมาณความชื้น 15.22% แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปูนซีเมนต์และหินฝุ่นจะทำให้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 11 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณหินฝุ่นและปูนซีเมนต์ทำให้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) เพิ่มขึ้น ซึ่งหมายความว่าดินจะต้องการความชื้นมากขึ้นในการบดอัดให้ได้ความหนาแน่นสูงสุด ทั้งนี้เนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างเม็ดดินที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการ



รูปที่ 12 เส้นกราฟการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินลูกรังผสมหินฝุ่นและผสมปูนซีเมนต์ปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมัน 1.25%



รูปที่ 13 เส้นกราฟการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Test) ของดินลูกรังผสมหินฝุ่น และผสมปูนซีเมนต์ ปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมัน 3.75%



รูปที่ 14 เส้นกราฟการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Test) ของดินลูกรังผสมหินฝุ่น และผสมปูนซีเมนต์ ปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมัน 5%

จัดเรียงตัวของอนุภาคที่แน่นขึ้น และทำให้ได้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [19], [20] การเพิ่มสัดส่วนหินฝุ่นและปูนซีเมนต์ความแข็งแรงเฉือนของดิน

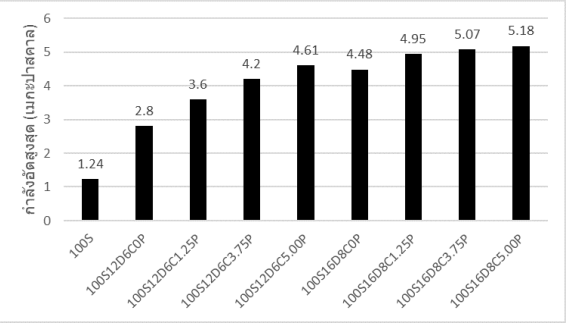
เมื่อเพิ่มเถ้าปาล์มน้ำมันไปในปริมาณ 1.25% ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจะน้อยกว่าอัตราส่วนที่ไม่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน แสดงดังรูปที่ 12 ซึ่งอาจเกิดจากคุณสมบัติของเถ้าปาล์มน้ำมันที่ช่วยลดความต้องการน้ำในการบดอัดของดิน เนื่องจากมีการเพิ่มช่องว่างรูพรุนหรือการกระจายตัวของเม็ดดินที่ทำให้การเชื่อมต่อกันดีขึ้น

เมื่อเพิ่มเถ้าปาล์มน้ำมันเป็น 3.75% พบว่า อัตราส่วนผสมนี้เป็นอัตราส่วนที่ต้องการปริมาณความชื้นที่มากที่สุด ในทางกลับกันเมื่อปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นเป็น 5% ส่งผลให้ปริมาณความชื้นจะลดลง แสดงดังรูปที่ 13 เนื่องจากการที่เถ้าปาล์มน้ำมันที่เพิ่มขึ้นทำให้ต้องการน้ำมากขึ้นเพื่อรักษาความสามารถในการบดอัดที่ดี เนื่องจากเถ้ามีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำสูง

เมื่อทำการเพิ่มปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันเป็น 5% ปริมาณความชื้นจะลดลง ด้านความหนาแน่นสูงสุด เมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนผสมของหินฝุ่นและปูนซีเมนต์จะมีค่าความหนาแน่นสูงสุดมากกว่าดินลูกรัง แสดงดังรูปที่ 14 เนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาในดินผสมเถ้าในระดับที่สูงขึ้น ซึ่งช่วยให้ดินมีการจับตัวกันดีขึ้นและไม่ต้องการน้ำมากนักในการทำให้ดินเชื่อมกัน

3.4 ค่ากำลังอัดแกนเดียว

ในการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว กำหนดให้ตัวอย่างทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.8 เซนติเมตร และสูง 7.5 เซนติเมตร โดยมีระยะเวลา 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 15 กำลังอัดสูงสุดของการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test) ของดินลูกรังที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยการผสมหินฝุ่น ปูนซีเมนต์ และเถ้าปาล์มน้ำมัน



รูปที่ 15 กำลังอัดแกนเดียว

ในอัตราส่วนที่ต่างกัน ผลการทดสอบพบว่า ตัวอย่างดินลูกรัง (100S) มีค่ากำลังรับแรงอัด 1.45 เมกะปาสคาล และเมื่อปริมาณหินฝุ่นและปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นเป็น 12% และ 6% ตามลำดับ (100S12D6C0P) พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเป็น 2.8 เมกะปาสคาล เนื่องจากเมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดการก่อตัวของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งเพิ่มความแข็งแรงของดิน [21]

เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมัน ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันที่เพิ่มขึ้น 1.25% 3.75% และ 5% โดยเพิ่มขึ้นเป็น 3.6 เมกะปาสคาล 4.2 เมกะปาสคาล และ 4.6 เมกะปาสคาล ตามลำดับ สาเหตุมาจากเมื่อเพิ่มเถ้าปาล์มน้ำมันในสัดส่วนที่สูงขึ้น เถ้าปาล์มน้ำมันจะทำหน้าที่เป็นสารเติมเต็ม (Filler) และสารปอซโซลาน (Pozzolanic Material) ซึ่งมีคุณสมบัติช่วยเพิ่มความแข็งแรงของดินได้มากขึ้นโดยการทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์และน้ำ เกิดสารประกอบที่ทำให้ดินมีความคงตัวและแข็งแรงมากขึ้น [22], [23] สังเกตเห็นว่าการเพิ่มสัดส่วนของหินฝุ่นและปูนซีเมนต์มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดอย่างมีนัยสำคัญ และการเพิ่มเถ้าปาล์มน้ำมันยังช่วยเพิ่มกำลังอัดได้อย่างต่อเนื่องตามอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น

ในส่วนของตัวอย่างดินลูกรังที่มีปริมาณหินฝุ่นและปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นเป็น 16% และ 8% ตามลำดับ (100S16D8C0P) พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเป็น 4.48 เมกะปาสคาล เนื่องจากหินฝุ่นมีลักษณะเป็นวัสดุที่มีขนาดอนุภาคละเอียด ทำหน้าที่เป็นสารเติมเต็ม (Filler) ที่ช่วยลดช่องว่างในโครงสร้างดิน เมื่อผสมในปริมาณที่มากขึ้น หินฝุ่นจะช่วยเพิ่มความแน่นของดิน ส่งผลให้โครงสร้างดินมีความแข็งแรงมากขึ้น อีกทั้งปูนซีเมนต์ในปริมาณ 8% ทำปฏิกิริยากับน้ำในดิน เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งช่วยเชื่อมประสานอนุภาคของดินและหินฝุ่นเข้าด้วยกัน ทำให้เกิดโครงสร้างที่แข็งแรงและทนทานมากขึ้น [21]

4. สรุป

ขีดจำกัดความข้นเหลวนั้นเพิ่มขึ้นเนื่องจากวัสดุที่ทำการผสมเพิ่มเข้าไป ทำให้ต้องการปริมาณความชื้นที่สูงขึ้น ในส่วนของขีดจำกัดพลาสติกเมื่อทำการเพิ่มวัสดุปูนซีเมนต์ และเถ้าปาล์มน้ำมัน เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้มีคุณสมบัติคล้ายกาวเคลือบตัวดินลูกรังทำให้ขีดจำกัดพลาสติกสูงขึ้น

ความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาแน่นของดินลูกรัง เนื่องจากการเพิ่มปริมาณหินฝุ่นปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมัน ซึ่งเป็นปอซโซลาน ทำให้เกิดการยึดประสานในการบดอัดและการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยผลของปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้เม็ดดินเกิดการยึดเกาะกัน การยึดเกาะที่เกิดขึ้นจากการพัฒนาของแรงยึดเกาะทางเคมีที่มีอยู่ในธรรมชาติของดิน โดยหินฝุ่นจะเป็นตัวช่วยเพิ่มความหนาแน่นของดินลูกรัง โดยมีปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมันจะเป็นวัสดุเชื่อมประสาน

ค่ากำลังอัดแกนเดียวพบว่า การผสมหินฝุ่นและปูนซีเมนต์ 12% และ 6% ตามลำดับ เพิ่มกำลังอัดสูงสุดของดินลูกรัง 1.93 เท่า และเมื่อผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน 1.25% 3.75% และ 5% เพิ่มกำลังอัดสูงสุดของดินลูกรังผสมหินฝุ่นและปูนซีเมนต์ 1.28, 1.48 และ 1.64 เท่า ตามลำดับ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่อนุเคราะห์สถานที่ในการจัดเตรียมตัวอย่างและเครื่องมือในการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

[1] D. Neupane, “Biofuels from renewable sources, a potential option for biodiesel production,” *Bioengineering*, vol. 10, no. 1, pp. 29, 2022.

[2] N. Khan, K. Sudhakar, and R. Mamat, “Role of biofuels in energy transition, green economy and carbon neutrality,” *Sustainability*, vol. 13, no. 22, pp. 12374, 2021.

[3] D. O. Oyejobi, T. S. Abdulkadir, and A. T. Ahmed, “A study of partial replacement of cement with palm oil fuel ash in concrete production,” *Journal of Agricultural Technology,* vol. 12, no. 4, pp. 619–631, 2016.

[4] H. M. Hamada, B. Skariah Thomas, B. Tayeh, F. M. Yahaya, K. Muthusamy, and J. Yang, “Use of oil palm shell as an aggregate in cement concrete: A review,” *Construction and Building Materials,* vol. 265, pp. 120357, 2020.

[5] J. E. Edeh, M. Joel, and V. O. Ogbodo, “Effects of oil palm fibre ash on cement stabilised lateritic soil used for highway construction,” *International Journal of Pavement Engineering,* vol. 23, no. 3, pp. 834–840, 2022.

[6] P. Pongchawitkorn, S. Jaritngam, and O. Somchainuek, “Lateritic soil quality improvement using palm oil fuel ash and cement for road construction,”*RMUTSV Research Journal*, vol. 16, no. 3, pp. 557–571, 2024 (in Thai).

[7] A. Dhanalakshmi and M. Shahul Hameed, “Strength properties of concrete using marble dust powder,” *East Asian Journal of Multidisciplinary Research*, vol. 1, no. 11, pp. 2521–2530, 2022.

[8] M. Idrees and A. Faiz, “Utilization of waste quarry dust and marble powder in concrete,” in Proceedings *Fifth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies (SCMT5)*, 2019, pp. 302–314.

[9] N. Soni, G. Yadav, A. Parakh, M. A. Nazim, D. K. Deshmukh, and P. Dewangan, “Strengthening of concrete by partial replacement of fine aggregate with stone dust,” *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology,* vol. 11, no. 5, pp. 1398–1402, 2023.

[10] C. Choosakul, K. Yongsata, and S. Monkaew, “Effect of decomposed-stone dust on properties of concrete,” *ASEAN Journal of Scientific and Technological Reports,* vol. 25, no. 1, Mar. 2022 (in Thai).

[11] K. Mohan das, N. Sundar, S. Harishankar, A. Raj Kumar, S. Kannan, and K. Ramesh, “An experimental study on strength characteristics of replacement of fine aggregate with stone dust and coarse aggregate with demolished concrete waste,” *Ymer Digital,* vol. 21, no. 2, pp. 683–700, 2022

[12] J. G. W. Tom, N. Telema, and T. C. Glory, “ Stabilization of laterite soil using quarry dust and limestone powder,” *Journal of Geotechnical Studies*, vol. 8, no. 2, pp. 29–36, 2023.

[13] *Standard Specification for Portland Cement,* ASTM C150-20, 2020.

[14] Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, ASTM D422-63,2007.

[15] *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*, ASTM D4318-17

[16] *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort,* ASTM D1557-12,

[17] *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil,* ASTM D2166/D2166M-16

[18] G. Jaja, T. Ngoye, J. Godfrey, N. Telema, and J. Horace, "Investigation of the geotechnical properties of laterite soil combined with quarry dust and lime," *Journal of Geotechnical Studies,* vol. 8, no. 3, pp. 10–16, 2023.

[19] G. Jaja, T. Ngoye, J. Godfrey Waribo Tom, N. Telema, and U. Unyeawaji Emmanuel, "Evaluation of strength and compressibility properties of laterite soil blended with quarry dust and cement," *Journal of Geotechnical Studies*, vol. 8, no. 2, pp. 21–28, 2023.

[20] R. Kufre Etim, D. Ufot Ekpo, I. Christopher Attah, and K. Chibuzor Onyelowe, "Effect of micro sized quarry dust particle on the compaction and strength properties of cement stabilized lateritic soil," *Cleaner Materials,* vol. 2, 2021.

[21] N. A. Wahab, M. J. Roshan, A. S. A. Rashid, M. A. Hezmi, S. N. Jusoh, N. D. N. Norsyahariati, and S. Tamassoki, "Strength and durability of cement-treated lateritic soil," *Sustainability*, vol. 13, no. 11, pp. 6430, 2021.

[22] E. Nnochiri and O. Aderinlewo, "Geotechnical properties of lateritic soil stabilized with the ashes of oil palm fronds," *Stavební obzor–Civil Engineering Journal,* vol. 25, no. 4, 2016.

[23] M. Toyeb, A. Hakam, and Andriani, "The strength and economic benefit of soil stabilization with Palm Oil Fuel Ash (POFA) as agro-waste,"in *The 2nd International Conference on Disaster Mitigation and Management (2nd ICDMM 2023),* 2023, pp. 7.