

ผลกระทบของน้ำยางพาราต่อคุณสมบัติของวัสดุพื้นทางที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์

Impact of Natural Rubber Latex on the Properties of Cement-Treated Base

วัชร ศรีสกุล^{1,*} ธนัท ขุบอุปการ² สุรศักดิ์ เกตุบุญนา³ และ ประสาร จิตรเพ็ชร⁴

^{1,3,4} สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ.ตรัง

² สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จ.สงขลา

*Corresponding author; E-mail address: watchara.s@rmutsv.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเติมน้ำยางพาราอิมัลชันต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์ โดยใช้ดินลูกรังและหินคลุกซึ่งเป็นวัสดุพื้นถิ่นที่หาได้ง่ายในภาคใต้ของประเทศไทย วัสดุถูกผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วน 0–5% โดยน้ำหนักของมวลรวม และน้ำยางพาราอิมัลชันในอัตราส่วน 0–20% โดยน้ำหนักของน้ำผสม การทดสอบในห้องปฏิบัติการประกอบด้วย การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (UCS), โมดูลัสของความยืดหยุ่น (E_{50}) และค่าการดูดซึมน้ำ (Absorption) ผลการทดลองพบว่า การเติมน้ำยางพาราในช่วง 5–10% ช่วยเพิ่มค่ากำลังอัดและความยืดหยุ่นได้ โดยเฉพาะสูตรที่ใช้ซีเมนต์ 5% และน้ำยางพารา 10% ให้ค่า UCS สูงสุด 8.08 MPa และ E_{50} สูงสุด 5.98 MPa การเติมน้ำยางพารายังช่วยลดค่าการดูดซึมน้ำได้ โดยสูตรที่ใช้ซีเมนต์ 2% และน้ำยาง 20% ให้ค่าการดูดซึมน้ำต่ำสุดร้อยละ 0.35 อย่างไรก็ตาม การเติมน้ำยางพาราเกิน 15% ส่งผลให้คุณสมบัติบางประการลดลง จึงสรุปได้ว่าสัดส่วนที่เหมาะสมคือ ซีเมนต์ 5% และน้ำยางพารา 10% ซึ่งเหมาะสำหรับใช้ในงานก่อสร้างถนนที่ต้องการวัสดุแข็งแรง ยืดหยุ่น และทนทานต่อความชื้น

คำสำคัญ: ดินซีเมนต์, น้ำยางพารา, ดินลูกรัง, หินคลุก, กำลังอัดแกนเดียว

Abstract

This study aimed to investigate the effects of natural rubber latex emulsion on the engineering properties of cement-treated base using lateritic soil and crushed rock from southern Thailand. The materials were mixed with Type I Portland cement at 0–5% by dry weight and latex emulsion at 0–20% by water weight. Laboratory tests included unconfined compressive strength (UCS), modulus of elasticity (E_{50}), and water absorption. The results showed that adding 5–10% latex significantly improved both UCS and E_{50} . The optimal mixture for lateritic soil was 5% cement and 10% latex, yielding the highest UCS of 8.08 MPa and E_{50} of 5.98 MPa. The latex also reduced water absorption effectively; for instance, the mixture with 2% cement and 20% latex provided the lowest absorption value of 0.35 %. However, latex contents above 15% tended to decrease performance due to excessive viscosity. Therefore, the mix of 5% cement and 10% latex is recommended for enhancing strength, flexibility, and moisture resistance, suitable for rural road construction.

Keywords: soil–cement, natural rubber latex, lateritic soil, crushed rock, unconfined compressive strength

1. คำนำ

การก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานด้านคมนาคม เช่น ถนนและทางวิ่ง จำเป็นต้องมีฐานรากที่แข็งแรงและมั่นคง โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีวัสดุถมไม่เหมาะสม การปรับปรุงคุณภาพดินจึงเป็นทางเลือกที่ได้รับความนิยม โดยทั่วไปมักใช้การผสมปูนซีเมนต์ (Soil-Cement Stabilization) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของดิน [1] หรือการบำบัดวัสดุเมทัลลิกด้วยซีเมนต์ที่เรียกว่า วัสดุพื้นทางที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ (Cement-Treated Base, CTB) การปรับปรุงลักษณะทางกลของดินด้วยซีเมนต์เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนัก และลดการยึดตัวหรือการทรุดตัวของดิน [2]

อย่างไรก็ตาม ดินที่ได้รับการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวมักมีลักษณะแข็งเปราะ (brittle) และมีความสามารถในการต้านทานแรงกระทำแบบไดนามิกหรือน้ำซึมผ่านต่ำ [3–4] เมื่อดินดูดซับความชื้นหรือสัมผัสน้ำเป็นเวลานาน อาจเกิดปัญหาการลดกำลังรับแรงอัดลงอย่างมาก [5]

เพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว งานวิจัยในช่วงหลังได้ให้ความสนใจกับการนำวัสดุพอลิเมอร์ธรรมชาติ เช่น น้ำยางพารา (Natural Rubber Latex) มาใช้ร่วมกับซีเมนต์เพื่อเพิ่มความเหนียวและความยืดหยุ่นของดินที่ปรับปรุงแล้ว น้ำยางพารามีคุณสมบัติพิเศษในการยึดเกาะสูง ยืดหยุ่น และต้านทานความชื้นได้ดี สามารถช่วยลดการแตกร้าวและเพิ่มความทนทานของดินซีเมนต์ได้ [6–7]

ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตน้ำยางพารารายใหญ่ของโลก การนำน้ำยางพารามาใช้ในงานวิศวกรรมโยธานอกจากจะช่วยปรับปรุงคุณภาพวัสดุก่อสร้างแล้วยังช่วยสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับผลผลิตทางการเกษตร สนับสนุนเศรษฐกิจฐานราก และลดการพึ่งพาวัสดุก่อสร้างจากต่างประเทศอีกด้วย

งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อศึกษาผลของน้ำยางพาราอิมัลชันที่เติมในวัสดุชั้นพื้นทางที่ผ่านการบำบัดด้วยซีเมนต์ ต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรม เช่น กำลังรับแรงอัดและค่า CBR โดยใช้วัสดุจากงานปรับปรุงถนน ได้แก่ ดินลูกรังและหินคลุก เพื่อให้ได้วัสดุฐานรากที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และสามารถนำไปใช้ในงานก่อสร้างถนนชนบทหรือพื้นที่ห่างไกลได้อย่างยั่งยืน

2. วัสดุและวิธีการ

การศึกษาในครั้งนี้เป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อประเมินผลกระทบของการเติมน้ำยางพาราอิมัลชันต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินที่ผสมปูนซีเมนต์ โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มวัสดุหลัก ได้แก่ ดินลูกรัง และ หินคลุก ซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็นชั้นทางของงานถนนในประเทศไทย โดยการ

ทดลองประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ การเตรียมวัสดุ การผสมและการเตรียมตัวอย่าง และการทดสอบทางวิศวกรรม

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

ในการศึกษานี้ใช้วัสดุดินสองประเภท ได้แก่ ดินลูกรังและหินคลุก ซึ่งเก็บมาจากโครงการปรับปรุงถนนในเขตจังหวัดสงขลา เป็นวัสดุเดิมที่อาจมีการปนเปื้อนของมลพิษบางส่วนในดินลูกรัง เนื่องจากสภาพการใช้งานจริง วัสดุทั้งสองชนิดมีลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติพื้นฐานที่แตกต่างกัน โดยดินลูกรังมีลักษณะสีออกน้ำตาลแดง เนื้อค่อนข้างละเอียดและเม็ดหินขนาดเล็กปะปน ขณะที่หินคลุกประกอบด้วยหินบดขนาดต่าง ๆ ปนกับฝุ่นหินในสัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุชั้นทาง โดยภาพถ่ายของวัสดุที่ใช้แสดงไว้ในรูปที่ 1(ก) และ (ข) ตามลำดับ



รูปที่ 1 วัสดุที่ใช้ทดสอบ (ก) ดินลูกรัง และ (ข) หินคลุก

สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการทดลอง ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ที่นิยมใช้ในงานโครงสร้างทั่วไปเนื่องจากมีคุณสมบัติในการรับแรงอัดสูงและแข็งตัวได้ดี ส่วนวัสดุปรับปรุงเสริมแรงที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือน้ำยางพารา ซึ่งเป็นน้ำยางพาราธรรมชาติที่ผ่านการดัดแปรทางเคมีด้วยเทคนิคการกราฟต์ยางธรรมชาติ (Natural Rubber Grafting) ผ่านกระบวนการอิมัลชันพอลิเมอร์เอมิวชัน (Emulsion Polymerization) เพื่อยืดอายุการใช้งานและเพิ่มเสถียรภาพของน้ำยาง เนื่องจากน้ำยางพาราสามารถยับยั้งการเกิดเชื้อราและเพิ่มเสถียรภาพของน้ำยาง

น้ำยางพาราที่ใช้มีลักษณะเป็นอิมัลชันชนิดอิมัลชันน้ำในน้ำมัน ซึ่งช่วยให้สามารถผสมกับน้ำได้ง่ายและมีความเสถียรสูง เหมาะสำหรับใช้เป็นสารเติมแต่งในงานดินซีเมนต์เพื่อเพิ่มความเหนียว ความยืดหยุ่น และช่วยลดการดูดซึมน้ำของวัสดุผสมได้อย่างมีประสิทธิภาพ [8-9]

2.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง

ก่อนดำเนินการผสมวัสดุและทดสอบทางวิศวกรรมในห้องปฏิบัติการ จำเป็นต้องเตรียมวัสดุให้ได้ตามมาตรฐาน เพื่อให้ผลการทดลองมีความถูกต้อง เชื่อถือได้ และสามารถเปรียบเทียบกันได้ในแต่ละชุดการทดสอบ โดยเริ่มจากการคัดแยกวัสดุที่มีขนาดเกินเกณฑ์ออก และนำวัสดุที่ผ่านการร่อนแล้วไปอบแห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ $105 \pm 5^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุทุกชุดอยู่ในระดับใกล้เคียงกัน

จากนั้นจึงทำการชั่งตวงวัสดุตามอัตราส่วนที่กำหนดในแต่ละสูตร โดยเริ่มจากการผสมวัสดุแห้ง ได้แก่ ดินลูกรังหรือหินคลุกกับปูนซีเมนต์ให้เข้ากันอย่างทั่วถึงในภาชนะผสม ก่อนเติมน้ำยางพาราอิมัลชันในปริมาณที่กำหนด ซึ่งในบางสูตรอาจต้องมีการเจือจางน้ำยางพาราด้วยน้ำสะอาดเพื่อควบคุมให้

ปริมาณความชื้นรวมอยู่ในระดับความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content: OMC) ที่ได้จากผลการทดสอบการบดอัดล่วงหน้า

ภายหลังการผสมจะนำวัสดุที่ได้บรรจุลงในแบบหล่อรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.5 cm. และความสูง 15.0 cm. โดยใช้วิธีการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน จำนวน 5 ชั้น ชั้นละ 25 ครั้ง ตัวอย่างที่ได้จะถูกนำไปบ่มในห้องควบคุมอุณหภูมิที่ประมาณ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 7 วัน ก่อนทำการทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียว (UCS) และการดูดซึมน้ำ

2.3 วิธีการทดสอบ

เพื่อประเมินผลของการเติมน้ำยางพาราอิมัลชันต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์ผสม การทดลองนี้ได้ดำเนินการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการตามมาตรฐานทางวิศวกรรมปฐพี โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 กลุ่มหลัก ได้แก่ การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ การทดสอบการบดอัด และการทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุผสม

การทดสอบเบื้องต้นเริ่มจากการวิเคราะห์ขนาดเม็ดดินเพื่อจำแนกประเภทของวัสดุตามระบบ Unified Soil Classification System (USCS) โดยใช้วิธีการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานตาม ASTM D422 [10] ผลลัพธ์ที่ได้จะนำมาใช้ในการพิจารณาความเหมาะสมเบื้องต้นของวัสดุที่จะนำมาใช้เป็นชั้นรองพื้นทางในงานก่อสร้าง จากนั้นจึงดำเนินการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Compaction Test) ตาม ASTM D698 [11] เพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density: MDD) และค่า OMC ซึ่งมีความสำคัญต่อการควบคุมปริมาณน้ำในการผสมและการเตรียมตัวอย่างในแต่ละสูตร

สำหรับการประเมินสมบัติทางกลของวัสดุผสมที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราจะดำเนินการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวตามมาตรฐาน ASTM D2166 [12] โดยใช้ตัวอย่างที่ผ่านการบ่มในห้องควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 7 วัน ทดสอบด้วยเครื่องกดแรงอัด (Compression Testing Machine) เพื่อบันทึกค่าความเค้น-ความเครียดและกำลังอัดสูงสุด นอกจากนี้ ยังทำการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำตามมาตรฐาน ASTM C642 [13] เพื่อประเมินความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของน้ำ

3. ผลการศึกษา

การทดลองในครั้งนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมเบื้องต้นของดินที่ใช้ในการวิจัยและการทดสอบคุณสมบัติของดินซีเมนต์ที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพารา โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

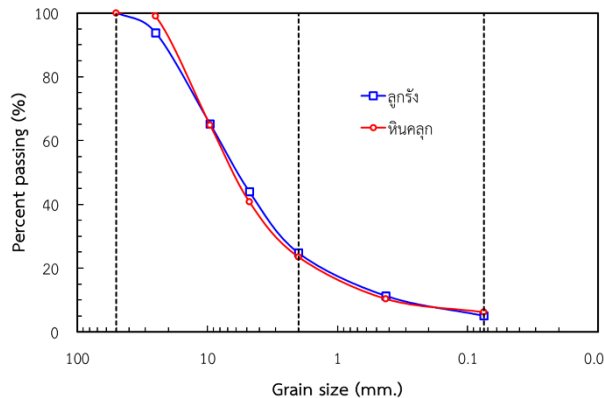
3.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมเบื้องต้น

ในการศึกษานี้ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมเบื้องต้นของวัสดุดิน 2 ประเภท ได้แก่ ดินลูกรัง (Lateritic Soil) และ หินคลุก (Crushed Rock) ซึ่งเป็นวัสดุพื้นถิ่นที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานก่อสร้างชั้นโครงสร้างถนน การทดสอบดำเนินการตามมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบทสำหรับงานพื้นทางดินซีเมนต์ (มทข. 244-2556) [14]

จากผลการทดสอบส่วนคละเม็ดดินของหินคลุกและดินลูกรังดังรูปที่ 2 พบว่า ดินลูกรังมีขนาดอนุภาคมีมาตรฐาน (D_{50}) เท่ากับ 5.85 mm. ขนาดเม็ดดินใหญ่สุดไม่เกิน 50 mm. มีสัดส่วนผ่านตะแกรงเบอร์ 10 (2.00 มม.) เท่ากับ 24.78% และผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (0.075 มม.) เท่ากับ 5.05% ในขณะที่หินคลุกมีขนาดอนุภาคมีมาตรฐาน (D_{50}) เท่ากับ 6.30 mm. ขนาดเม็ดดินใหญ่สุดไม่เกิน 50 mm. มีสัดส่วนผ่านตะแกรงเบอร์ 10 เท่ากับ 23.56% และผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เท่ากับ 6.17% ผลการกระจายขนาด

เม็ดดินของวัสดุทั้งสองจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากได้มาจากพื้นที่หน้างานเดียวกัน จึงทำให้คุณสมบัติบางประการใกล้เคียงกันตามข้อกำหนดของโครงการ

ทั้งดินลูกรังและหินคลุกมีขนาดเม็ดดินและการกระจายตัวของเม็ดดินที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มทข. 244-2556 [14] สำหรับการใช้เป็นวัสดุพื้นทางในงานถนนซีเมนต์ โดยเฉพาะในด้านขนาดเม็ดดินใหญ่สุด และสัดส่วนของวัสดุที่ผ่านตะแกรงขนาดละเอียด ซึ่งสะท้อนถึงความเหมาะสมเบื้องต้นของวัสดุทั้งสองในการนำไปปรับปรุงด้วยซีเมนต์และวัสดุเสริมแรงอื่นในชั้นตอนถัดไป

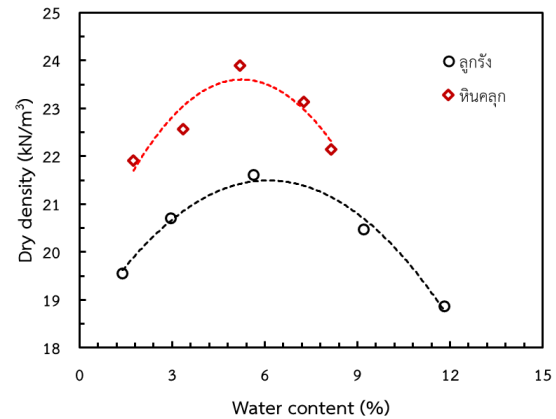


รูปที่ 2 การกระจายตัวของขนาดของเม็ดดินลูกรังและหินคลุก

จากการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินในห้องปฏิบัติการเพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์ พบว่า ดินลูกรังมีค่าพิกต์ความเหลว (Liquid Limit; LL) เท่ากับ 24.5% ค่าพิกต์พลาสติก (Plastic Limit; PL) เท่ากับ 21.5% และค่าดัชนีความเป็นพลาสติก (Plasticity Index; PI) เท่ากับ 3.0% ขณะที่หินคลุกมีค่าพิกต์ความเหลวเท่ากับ 12.1%, ค่าพิกต์พลาสติกเท่ากับ 11.0% และค่าดัชนีความเป็นพลาสติกเท่ากับ 1.1% ค่าดัชนีความเป็นพลาสติกที่อยู่ในระดับต่ำของวัสดุทั้งสองแสดงให้เห็นว่าดินลูกรังและหินคลุกจัดอยู่ในกลุ่มวัสดุที่มีความสามารถในการเปลี่ยนรูปต่ำ ซึ่งเหมาะสมต่อการปรับปรุงด้วยวัสดุประสาน

นอกจากนี้ จากการทดสอบขีดจำกัดอัตราเบอร์ก พบว่าค่าพิกต์ความเหลวและค่าดัชนีความเป็นพลาสติกของวัสดุทั้งสองอยู่ในเกณฑ์ที่น้อยกว่า 35% และ 11% ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงชนบท (มทข. 244-2556) ส่งผลให้สามารถจัดประเภทวัสดุทั้งสองให้อยู่ในกลุ่ม A-1-a ตามระบบการจำแนกของ AASHTO ซึ่งจัดเป็นวัสดุคุณภาพดี เหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุชั้นรองผิวทางและชั้นพื้นทางในงานถนน

จากผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (ASTM D1557) [15] ตามที่แสดงในรูปที่ 3 พบว่า ดินลูกรังมีค่า OMC เท่ากับ 5.63% และให้ค่า MDD เท่ากับ 21.57 kN/m³ ขณะที่หินคลุกมีค่า OMC เท่ากับ 5.20% และค่า MDD เท่ากับ 23.93 kN/m³ จากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าหินคลุกมีความสามารถในการบดอัดได้แน่นกว่าเมื่อเทียบกับดินลูกรัง ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้หินคลุกเหมาะสมต่อการใช้งานในชั้นฐานของโครงสร้างทางมากกว่า ทั้งนี้ ค่า OMC ที่ได้จากการทดสอบจะถูกใช้แทนเกณฑ์อ้างอิงในการคำนวณปริมาณน้ำที่เหมาะสมสำหรับการผสมวัสดุในแต่ละสูตร โดยเฉพาะในการผสมร่วมกับปูนซีเมนต์และน้ำยางพาราเพื่อควบคุมคุณภาพของการบดอัดและกำลังของตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและปริมาณความชื้น

สำหรับการประเมินความสามารถในการรับแรงของวัสดุ ได้ดำเนินการทดสอบค่าดัชนีแคลิฟอร์เนีย แบร์ริ่ง เรโซ (California Bearing Ratio; CBR) กับตัวอย่างดินลูกรังและหินคลุกที่บดอัดในระดับ 95% ของค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) ผลการทดสอบพบว่า ดินลูกรังให้ค่า CBR เท่ากับ 115% ที่ความหนาแน่นแห้ง 2.095 ton/m³ ขณะที่หินคลุกให้ค่า CBR สูงถึง 250% ที่ความหนาแน่นแห้ง 2.316 ton/m³ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า หินคลุกมีสมรรถนะในการรับแรงได้ดีกว่าดินลูกรังอย่างชัดเจน ผลการทดสอบดังกล่าวสอดคล้องกับคุณสมบัติทางวิศวกรรมอื่น ๆ ทำให้สามารถสรุปได้ว่า หินคลุกมีความเหมาะสมมากกว่าสำหรับการนำไปใช้งานเป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางในงานถนนที่ต้องรับน้ำหนักมาก ขณะที่ดินลูกรังสามารถใช้ได้ดีในชั้นรองพื้นทางรองหรือในพื้นที่ที่มีการใช้งานน้อยกว่า คุณสมบัติทางวิศวกรรมโดยรวมของดินลูกรังและหินคลุกที่ได้จากการทดสอบในครั้งนี้สรุปไว้ใน ตารางที่ 1 ซึ่งเปรียบเทียบกับเกณฑ์ตามมาตรฐาน มทข. 244 - 2556 ของกรมทางหลวงชนบท [14] โดยพบว่าวัสดุทั้งสองชนิด ผ่านเกณฑ์มาตรฐานในทุกพารามิเตอร์ที่กำหนด อย่างไรก็ตาม แม้ว่าวัสดุดังกล่าวจะมีค่า CBR เพียงพอสำหรับใช้งานเป็นชั้นพื้นทางหรือรองพื้นทาง การปรับปรุงด้วยซีเมนต์และน้ำยางพาราในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความแข็งแรง ทนทานต่อความชื้น และแรงกระทำซ้ำในระยะยาว รวมทั้งศึกษาผลของน้ำยางพาราต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุ

ตารางที่ 1 สมบัติทางวิศวกรรมตามมาตรฐาน มทข. 244 - 2556 ของดินลูกรังและหินคลุก

Engineering Properties	Standard มทข. 244 - 2556	Lateritic soil	Crushed rock
1. The largest grain size	< 50.00	< 50.00	< 50.00
2. Percent passing of Sieve N0.10	≤ 70.00%	24.78 %	23.56 %
3. Percent passing of Sieve N0.200	≤ 25.00%	5.05 %	6.17 %
4. Liquid limit (LL)	≤ 40.00%	24.5 %	12.1 %
5. Plasticity index (PI)	≤ 15.00%	3%	1.1 %
7. Modifier proctor	-	5.63%	5.23 %
8. % CBR at 95% Max	-	115 % at dry density 2.095 ton/m ³	250 % at dry density 2.316 ton/m ³

3.2 ลัดส่วนการผสม

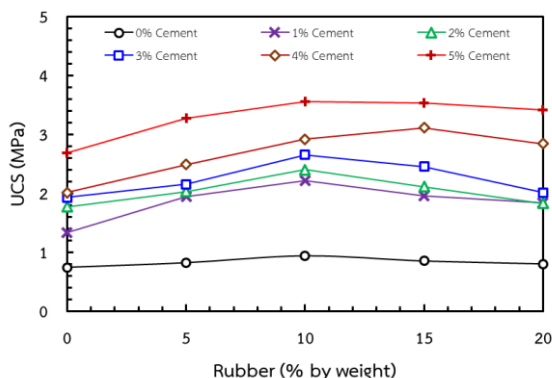
ในการศึกษานี้ได้กำหนดลัดส่วนการผสมของวัสดุโดยพิจารณาจากความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างถนนจริงและความเป็นไปได้ในการควบคุมคุณภาพในระดับภาคสนาม โดยเลือกใช้วัสดุท้องถิ่นที่หาได้ง่ายในพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทย ได้แก่ ดินลูกรังและหินคลุก ซึ่งเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับการใช้เป็นวัสดุชั้นทาง การปรับปรุงคุณสมบัติดินดำเนินการโดยผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วน 0, 1, 2, 3, 4 และ 5% โดยน้ำหนักของมวลรวม ร่วมกับการเติมน้ำยางพาราอิมัลชันในอัตราส่วน 0%, 5%, 10%, 15% และ 20% โดยน้ำหนักของน้ำผสม เพื่อประเมินผลกระทบของปริมาณน้ำยางพาราต่อสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์ที่ได้

3.3 ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (UCS) ของดินซีเมนต์ผสมด้วยน้ำยางพารา

การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (UCS) ดำเนินการกับตัวอย่างดินลูกรังและหินคลุกที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 0, 1, 2, 3, 4 และ 5% โดยน้ำหนักของมวลรวม และน้ำยางพาราอิมัลชันในสัดส่วน 0, 5, 10, 15 และ 20% โดยน้ำหนักของน้ำที่ใช้ในการผสม โดยตัวอย่างทั้งหมดผ่านกระบวนการบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้ความชื้นสม่ำเสมอ แล้วจึงทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

3.3.1 กำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังซีเมนต์ผสมด้วยน้ำยางพารา

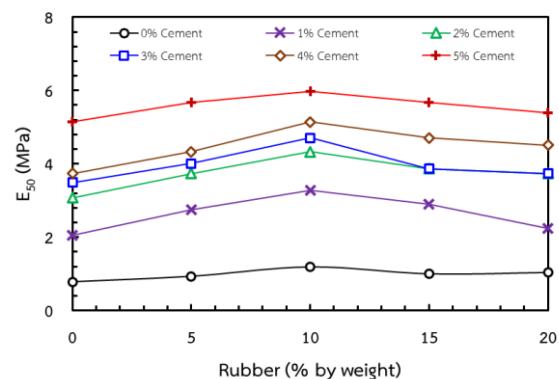
จากผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ใช้ดินลูกรังเป็นวัสดุตั้งต้นดังรูปที่ 4 พบว่า การเติมน้ำยางพาราในช่วง 5–10% โดยน้ำหนักของน้ำผสมสามารถเพิ่ม UCS ได้ โดยเฉพาะเมื่อผสมร่วมกับซีเมนต์ในอัตราส่วน 5% โดยน้ำหนักของวัสดุแห้ง จะได้ค่า UCS สูงสุดที่ 3.56 MPa เพิ่มขึ้นจากค่าของสูตรที่ไม่มีน้ำยางพารา (2.69 MPa) คิดเป็นร้อยละ 132.34 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าน้ำยางพาราสามารถเพิ่มการยึดเกาะระหว่างอนุภาคของดินและวัสดุประสานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และช่วยลดการแตกร้าวภายในเนื้อวัสดุ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับมาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวง (ทล.ม. 204/2564) [16] ซึ่งกำหนดให้วัสดุพื้นทางต้องมีค่า UCS ไม่น้อยกว่า 1.724 MPa หลังการบ่ม 7 วัน พบว่า ตัวอย่างที่ผสมซีเมนต์ 1% โดยไม่มีน้ำยางพาราให้ค่า UCS เพียง 1.33 MPa ซึ่งไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน แต่เมื่อต้องเติมน้ำยางพาราตั้งแต่ 5% ขึ้นไป ค่า UCS จึงเพิ่มขึ้นจนผ่านเกณฑ์



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและปริมาณน้ำยางพาราของดินซีเมนต์ที่ใช้ดินลูกรังเป็นวัสดุตั้งต้น

อย่างไรก็ตาม เมื่อเติมน้ำยางพาราในปริมาณมากกว่า 10% เช่น ที่ระดับ 15% และ 20% ค่ากำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เหลือ 3.53 และ 3.41 MPa ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อน้ำยางจะช่วยให้เพิ่มความยืดหยุ่นของวัสดุ แต่หากมีมากเกินไปอาจลดความสามารถในการอัดแน่นของเนื้อดิน ทำให้แรงยึดเหนี่ยวของวัสดุลดลง

นอกจากนี้ การวิเคราะห์ค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity; E_{50}) ซึ่งหมายถึงอัตราส่วนระหว่างความเค้นกับความเครียดที่จุดกึ่งกลางของความแข็งแรงสูงสุด และใช้ในการบ่งบอกความสามารถของวัสดุในการเสียรูปโดยไม่แตกร้าว ดังรูปที่ 5 พบว่าการเพิ่มปริมาณซีเมนต์และการเติมน้ำยางพาราในช่วง 5–10% ส่งผลให้ค่า E_{50} เพิ่มขึ้น โดยสูตรที่ให้ค่า E_{50} สูงสุดคือ ซีเมนต์ร้อยละ 5 ร่วมกับน้ำยางพาราร้อยละ 10 ซึ่งให้ค่า E_{50} เท่ากับ 5.98 MPa แสดงให้เห็นถึงการพัฒนาโครงสร้างภายในของวัสดุให้มีความแข็งแรงและยืดหยุ่นสูงขึ้น ขณะเดียวกัน เมื่อเติมน้ำยางพาราเกินร้อยละ 10 เช่น ที่ร้อยละ 15 และ 20 ค่า E_{50} เริ่มลดลงอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในกรณีที่มีน้ำยางพาราร้อยละ 20 ค่า E_{50} ลดลงเหลือเพียง 5.40 MPa จากที่เคยสูงสุดในส่วนที่เหมาะสม สะท้อนว่าการเติมน้ำยางพาราเกินขนาดอาจส่งผลต่อเนื้อวัสดุ เช่น การลดการยึดเกาะระหว่างเม็ดดินและปูนซีเมนต์หรือการเกิดโครงสร้างภายในที่หลวมเกินไป ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า สูตรผสมที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด คือ ดินลูกรังผสมซีเมนต์ร้อยละ 5 และน้ำยางพาราร้อยละ 10 ซึ่งให้ค่า UCS และ E_{50} สูงสุด และเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานในชั้นโครงสร้างพื้นทางที่ต้องการทั้งความแข็งแรงและความยืดหยุ่นอย่างสมดุล

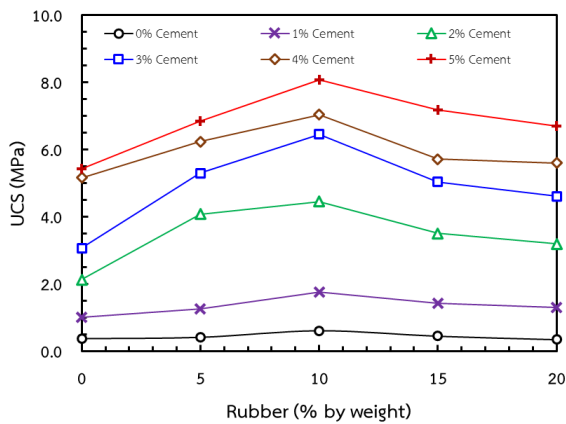


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสและปริมาณน้ำยางพาราของดินซีเมนต์ที่ใช้ดินลูกรังเป็นวัสดุตั้งต้น

3.3.2 กำลังอัดแกนเดียวของหินคลุกซีเมนต์ผสมด้วยน้ำยางพารา

จากรูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดแกนเดียวกับปริมาณน้ำยางพาราในหินคลุก พบว่า การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ตั้งแต่ 0 ถึง 5% ส่งผลให้ UCS เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะเมื่อเติมน้ำยางพาราในช่วง 5–10% พบว่าค่า UCS สูงขึ้นอย่างเด่นชัดในทุกระดับของซีเมนต์ ทั้งนี้ สูตรที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดคือ การผสมซีเมนต์ร้อยละ 5 กับน้ำยางพาราร้อยละ 10 ซึ่งให้ค่า UCS สูงสุดที่ 8.08 MPa ตัวอย่างที่มีซีเมนต์ตั้งแต่ 2% ขึ้นไปสามารถให้ค่า UCS ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ทล.ม. 204/2564 ได้ทั้งหมด อย่างไรก็ตาม สำหรับตัวอย่างที่ผสมซีเมนต์เพียง 1% ค่า UCS จะผ่านเกณฑ์มาตรฐาน (≥ 1.724 MPa) เฉพาะกรณีที่มีการเติมน้ำยางพาราตั้งแต่ 10% ขึ้นไปเท่านั้น เช่น ซีเมนต์ 1% ร่วมกับน้ำยางพารา 10% ได้ค่า UCS เท่ากับ 1.77 MPa ผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าน้ำยางพารามีบทบาทสำคัญในการเพิ่มกำลังอัดแกนเดียวของวัสดุอย่างชัดเจน โดยช่วยเสริมการ

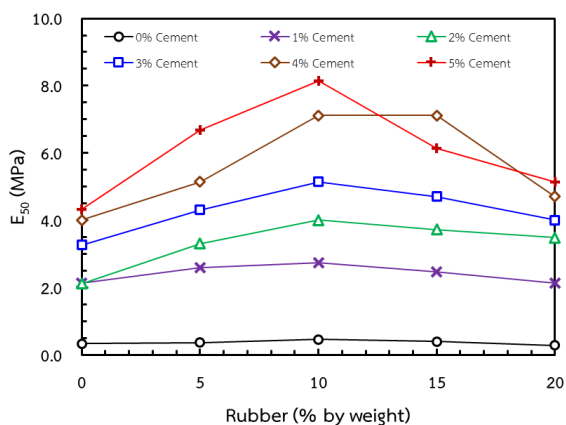
ยึดเกาะระหว่างเม็ดวัสดุและเนื้อปูนซีเมนต์ ลดการแตกร้าว และเพิ่มความหนาแน่นของโครงสร้างภายใน



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและปริมาณน้ำยางพาราของดินซีเมนต์ที่ใช้หินคลุกเป็นวัสดุตั้งต้น

แต่เมื่อเติมน้ำยางพาราเกินร้อยละ 10 เช่นในสูตรที่มีน้ำยางพารา 15–20% ค่า UCS มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากความหนืดที่เพิ่มขึ้นของน้ำยางพาราทำให้การกระจายตัวไม่สม่ำเสมอและลดประสิทธิภาพในการอัดแน่นของวัสดุ ดังนั้น สัดส่วนการเติมน้ำยางพาราที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการพัฒนากำลังอัดแกนเดียวของหินคลุกซีเมนต์คือ ซีเมนต์ 5% และน้ำยางพารา 10% ซึ่งสามารถสร้างวัสดุพื้นทางที่มีความแข็งแรงสูงและตอบสนองต่อมาตรฐานงานก่อสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในส่วนของ E_{50} ของดินซีเมนต์ที่ใช้หินคลุกเป็นวัสดุตั้งต้นแสดงดังรูปที่ 7 ซึ่งแสดงถึงความสามารถของวัสดุในการเสียรูปโดยไม่แตกหัก พบแนวโน้มสอดคล้องกับค่า UCS โดยสูตรที่ให้ค่า E_{50} สูงสุดคือ หินคลุกผสมซีเมนต์ 5% และน้ำยางพารา 10% ที่ค่า E_{50} เท่ากับ 8.14 MPa สูงกว่าสูตรที่ไม่มีน้ำยางพารา (4.33 MPa) คิดเป็นร้อยละ 80 การเพิ่มขึ้นของค่า E_{50} บ่งชี้ว่าวัสดุมีทั้งความแข็งแรงและความเหนียว สามารถทนแรงกระทำแบบซ้ำซ้อนหรือไดนามิกได้ดี ซึ่งเหมาะสมกับการใช้งานในโครงสร้างชั้นพื้นทาง

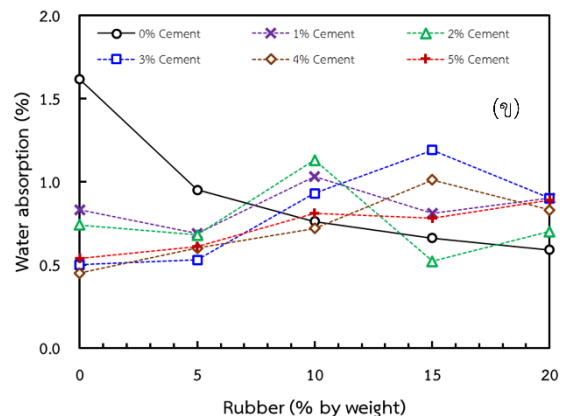
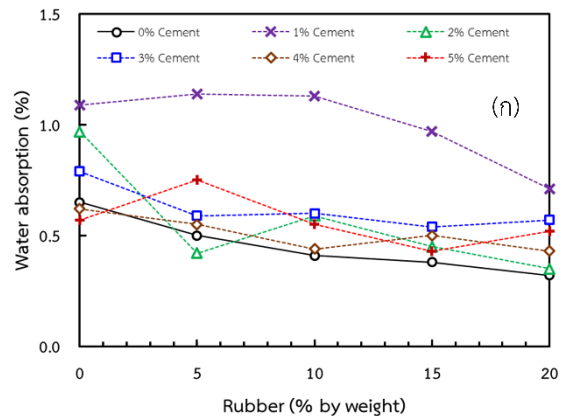


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสและปริมาณน้ำยางพาราของดินซีเมนต์ที่ใช้หินคลุกเป็นวัสดุตั้งต้น

อย่างไรก็ตาม เช่นเดียวกับค่า UCS เมื่อปริมาณน้ำยางเกิน 10% ค่า E_{50} เริ่มลดลง เหลือ 6.14 และ 5.15 MPa ตามลำดับ แสดงถึงข้อจำกัดในการใช้น้ำยางพาราเกินปริมาณที่เหมาะสม ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการปรับปรุงดินลูกรังคือซีเมนต์ร้อยละ 5 และน้ำยางพาราร้อยละ 10 ซึ่งให้ทั้งกำลังอัดและความยืดหยุ่นสูงสุด เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในงานโยธาที่ต้องการวัสดุพื้นทางคุณภาพสูง

3.3.3 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ

จากผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของดินซีเมนต์ที่ใช้ดินลูกรังและหินคลุกเป็นวัสดุตั้งต้นดังรูปที่ 8 (ก) และ (ข) ตามลำดับ พบว่าในกรณีไม่เติมซีเมนต์และยางพารา ดินลูกรังมีค่า absorption ต่ำกว่า (0.66%) เมื่อเทียบกับหินคลุก (1.62%) แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างเนื้อวัสดุของดินลูกรังหนาแน่นกว่าเมื่อเติมซีเมนต์เพิ่มขึ้นทั้งดินลูกรังและหินคลุกมีแนวโน้มที่ค่า absorption จะลดลง การเติมน้ำยางพาราในปริมาณที่เหมาะสมมีผลช่วยลดค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุผสมได้ โดยเฉพาะในช่วงร้อยละ 5–10 สำหรับดินลูกรัง และร้อยละ 10–15 สำหรับหินคลุก ตัวอย่างเช่น ในกรณีของดินลูกรังที่ผสมซีเมนต์ร้อยละ 2 และน้ำยางพาราร้อยละ 20 ค่า absorption ลดลงจากร้อยละ 0.97 เหลือร้อยละ 0.35 แสดงถึงประสิทธิภาพของน้ำยางพาราในการเคลือบผิวอนุภาคและอุดช่องว่างระหว่างเม็ดวัสดุ ทำให้ลดการแทรกซึมของน้ำเข้าสู่เนื้อวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 8 การดูดซึมน้ำของ (ก) ดินลูกรังซีเมนต์ และ (ข) หินคลุกซีเมนต์ปรับปรุงด้วยยางพาราที่ปริมาณยางพาราที่แตกต่างกัน

สำหรับหินคลุก ผลการทดลองแสดงแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน โดยสูตรที่ใช้ซีเมนต์ร้อยละ 4 และน้ำยางร้อยละ 10 ค่าการดูดซึมน้ำลดลงเหลือร้อยละ 0.72 และสูตรที่ใช้ซีเมนต์ร้อยละ 5 กับน้ำยางร้อยละ 10 ให้ค่า absorption ต่ำเพียงร้อยละ 0.81 ซึ่งสะท้อนถึงศักยภาพของน้ำยางพาราในการเสริมสร้างความทนทานของวัสดุต่อการซึมน้ำได้อย่างชัดเจน แต่ถ้าเติมมากเกินไป (เช่น 15–20%) โดยเฉพาะในหินคลุก อาจทำให้การดูดซึมน้ำกลับเพิ่มขึ้น เพราะโครงสร้างวัสดุเริ่มหวม

ในกรณีที่ไม่มีการเติมซีเมนต์เลย (0% Cement) ผลการทดสอบยังคงแสดงให้เห็นว่าน้ำยางพารามีบทบาทสำคัญในการลดค่าการดูดซึมน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพเช่นกัน โดยในดินลูกรังเมื่อเติมน้ำยางพาราร้อยละ 10 ค่า absorption ลดลงจาก 0.66 เหลือเพียงร้อยละ 0.30 ส่วนในหินคลุก ค่า absorption ลดลงจาก 1.62 เหลือร้อยละ 0.59 ที่ระดับน้ำยางร้อยละ 20 แสดงให้เห็นว่าน้ำยางสามารถทำหน้าที่เสมือนสารประสานตามธรรมชาติที่ช่วยลดการซึมน้ำ แม้ในกรณีที่ไม่มีส่วนประกอบอย่างซีเมนต์ อย่างไรก็ตาม เมื่อลองเติมน้ำยางพาราเกินกว่าร้อยละ 15–20 ค่าการดูดซึมน้ำกลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เช่น ซีเมนต์ร้อยละ 3 และน้ำยางพาราร้อยละ 15 ค่า absorption เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 1.19 ซึ่งอาจเกิดจากความหนืดและการกระจายตัวของน้ำยางที่ไม่สม่ำเสมอ ส่งผลต่อความสามารถในการอัดแน่นของวัสดุ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า การเติมน้ำยางพาราในปริมาณที่เหมาะสม (ร้อยละ 5–10) โดยเฉพาะร่วมกับซีเมนต์ในช่วงร้อยละ 4–5 จะช่วยเสริมคุณสมบัติในการต้านทานน้ำของวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเหมาะสมสำหรับใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสูงหรือพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการกัดเซาะและการเสื่อมสภาพของโครงสร้างวัสดุจากการดูดซึมน้ำ

4. บทสรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการเติมน้ำยางพาราอิมัลชันต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์บดอัด โดยใช้ดินลูกรังและหินคลุกผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และน้ำยางพาราในสัดส่วน 0–20% ของน้ำผสม ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ กำลังอัดแกนเดียว (UCS), และค่าการดูดซึมน้ำ เพื่อพัฒนาวัสดุที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับใช้ในทางโครงสร้างถนน โดยเฉพาะในพื้นที่ชนบท และส่งเสริมการใช้ทรัพยากรท้องถิ่นอย่างยั่งยืน จากผลการทดสอบ สามารถสรุปสาระสำคัญได้ดังนี้

1. ดินลูกรังและหินคลุกที่นำมาใช้มีคุณสมบัติผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มทข. 244–2556 โดยหินคลุกมีความหนาแน่นและค่า CBR สูงกว่า แสดงถึงความเหมาะสมในการใช้งานรองรับน้ำหนักมากกว่าดินลูกรัง
2. การผสมซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร่วมกับน้ำยางพาราอิมัลชันสามารถเพิ่มค่า UCS และ E_{50} ได้ทั้งในดินลูกรังและหินคลุก สูตรที่ให้ผลดีที่สุดสำหรับดินลูกรังคือ ซีเมนต์ 5% และน้ำยางพารา 10% ให้ค่า UCS และ E_{50} สูงสุด 8.08 MPa และ 5.98 MPa ตามลำดับ ส่วนหินคลุกเหมาะสมกับการใช้ ซีเมนต์ 4–5% และน้ำยางพารา 10–15% ซึ่งให้ค่าความแข็งแรงและความยืดหยุ่นสูงเช่นกัน
3. การเติมน้ำยางพาราในปริมาณที่มากเกินไป คือ มากกว่า 15–20% ส่งผลให้ค่ากำลังทางวิศวกรรมลดลง ซึ่งอาจเกิดจากความหนืดของน้ำยางที่รบกวนการอัดแน่นและการกระจายตัวในวัสดุ
4. น้ำยางพารามีประสิทธิภาพในการลดค่าการดูดซึมน้ำ โดยเฉพาะเมื่อใช้ในสูตรที่มีซีเมนต์ 4–5% และน้ำยางพารา 10–15% เช่น สูตรดินลูกรังผสมซีเมนต์ 2% กับน้ำยาง 20% ให้ค่า absorption ต่ำสุดที่ร้อยละ 0.35 และหินคลุกที่ร้อยละ 0.72
5. สูตรผสมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานจริง คือ ซีเมนต์ 5% ร่วมกับน้ำยางพารา 10% ซึ่งให้สมดุลทั้งในด้านความแข็งแรง ความยืดหยุ่น

และความทนทานต่อความชื้น เหมาะกับโครงสร้างถนนในพื้นที่ชื้นหรือทางไกล

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และศูนย์วิจัยภัยพิบัติทางธรรมชาติภาคใต้ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือในการดำเนินการทดลองในห้องปฏิบัติการ นอกจากนี้ ขอขอบคุณนางสาวสุนิษฐา ชันทอง และนายวิจิตร วิสิทธิ์การ ที่ให้ความช่วยเหลือในการเตรียมตัวอย่างและดำเนินการทดสอบในห้องปฏิบัติการอย่างเต็มความสามารถ อันมีส่วนสำคัญที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Firoozi, A.A., Guney Olgun, C., Firoozi, A.A., Baghini, M.S. (2017) Fundamentals of soil stabilization. *Geo-Engineering* 8, 26.
- [2] สุธิ ปิยะพิพัฒน์ (2561). การทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยแบบจำลองเพื่อตรวจสอบพฤติกรรมการยุบตัวของดินเหนียวที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกกับแผ่นพื้นดินซีเมนต์. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*, ปีที่ 13, ฉบับที่ 2, หน้า 97-105.
- [3] Park, S.S. (2011). Unconfined compressive strength and ductility of fiber-reinforced cemented sand. *Construction and Building Materials*, 25(2), pp. 1134-1138.
- [4] Schnaid, F., Prietto P.D.M. and Consoli, N.C. (2001) Characterization of cemented sand in triaxial compression. *J. Geotech. Engrg.*, ASCE, 127(10), pp. 857-868.
- [5] Ingles, O.G. and Metcalf, J.B. (1972). *Soil stabilization principles and practice* (Vol. 11).
- [6] ไอรดาภรณ์ หาดแก้ว, กรกฎ นุสิทธิ์, ทวีศักดิ์ ตะกะทะ และ พิรพงศ์ จิตเสียม (2563). คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์ผสมยางพาราและดินซีเมนต์ผสมยางสไตรีนอะคริลิก. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25*, ชลบุรี, 15-17 กรกฎาคม 2563, หน้า GTE08-1 - GTE08-6.
- [7] สุนันรัตน์ เพชรรัตน์, รุ่งอรุณ บุญถ่าน และ รุ่งโรจน์ ฤกษ์ห่วย (2564). การประยุกต์ใช้ยางพาราเป็นสารผสมเพิ่มในการผลิตอิฐดินซีเมนต์. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*, ปีที่ 16, ฉบับที่ 1, หน้า 1-13.
- [8] ประชุม คำพุ่ม (2567). การพัฒนาผลิตภัณฑ์บล็อกผนังทำมาจากดินซีเมนต์ผสมน้ำยางธรรมชาติ. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม*, ปีที่ 17, ฉบับที่ 3, หน้า 43-51.
- [9] พัฒนศักดิ์ ชัยพรรณา และ นัฐภูมิ เหมะจุลิน (2565). การปรับปรุงดินตะกอนหนองหารด้วยยางพาราและซีเมนต์ให้เหมาะสำหรับการก่อสร้างชั้นทาง. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27*, เชียงราย, 24-26 สิงหาคม 2565, หน้า GTE28-1 – GTE28-5.
- [10] ASTM D422-63 (2007). *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*. ASTM International, West Conshohocken, PA.

- [11] ASTM D698-12 (2012). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction of Soil Standard Effort*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [12] ASTM D2166-16 (2016). *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [13] ASTM C642-21 (2022). *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [14] กรมทางหลวงชนบท ประเทศไทย (2557). มทข. 244-2556, *มาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์*.
- [15] ASTM D1557-12e1 (2012). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³))*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [16] กรมทางหลวง (2565). ทล.-ม. 203/2556, *มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Base)*.