



สมรรถนะเชิงดัดแบบเปียกสลับแห้งของหินคลุกผสมซีเมนต์และเถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยโพลิโพรพิลีน

FLEXURAL PERFORMANCE UNDER WET-DRY CYCLES OF CEMENT-EUCALYPTUS ASH CRUSHED ROCK REINFORCED WITH POLYPROPYLENE FIBERS

ณัฐ สาบลำ* พิตทยา แจ่มสว่าง¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

*Corresponding author, E-mail: s6601081811017@email.kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

หินคลุกปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และเถ้ายูคาลิปตัส (Cement Treated Base with Eucalyptus Ash; CTB-EA) เป็นวัสดุที่มีศักยภาพสำหรับใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางเนื่องจากมีความแข็งแรงสูง อย่างไรก็ตาม วัสดุดังกล่าวยังคงแสดงพฤติกรรมแบบเปราะภายใต้การรับแรงดัด ส่งผลให้มีความสามารถในการรับแรงหลังการแตกร้าวและดูดซับพลังงานจำกัด งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาผลของการเสริมเส้นใยโพลิโพรพิลีนต่อสมรรถนะเชิงดัดของ CTB-EA โดยทำการทดสอบกำลังรับแรงดัดตามมาตรฐาน ASTM C1609 ที่ปริมาณเส้นใย 0–1.25% โดยปริมาตร และศึกษาผลของสภาวะเปียกสลับแห้งจำนวน 0, 1, 3, 6, 9 และ 12 รอบ ผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มปริมาณเส้นใยโพลิโพรพิลีนช่วยเพิ่มกำลังรับแรงดัดคงเหลือและค่าความเหนียวของวัสดุอย่างชัดเจน โดยเมื่อปริมาณเส้นใยมากกว่า 0.50% วัสดุเปลี่ยนจากพฤติกรรมแบบ Deflection-Softening เป็น Deflection-Hardening และสามารถรับแรงหลังการแตกร้าวได้อย่างต่อเนื่อง แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงจากพฤติกรรมแบบเปราะไปสู่พฤติกรรมแบบเหนียว นอกจากนี้พบว่าปริมาณเส้นใย 0.75% ให้สมดุลที่เหมาะสมระหว่างกำลังรับแรงดัด กำลังรับแรงดัดคงเหลือ และค่าความเหนียว ขณะที่สภาวะเปียกสลับแห้งส่งผลให้สมรรถนะเชิงดัดลดลงอย่างต่อเนื่องจากการเสื่อมสภาพของโครงสร้างภายในวัสดุ อย่างไรก็ตาม ตัวอย่างที่เสริมเส้นใยยังคงรักษาค่าความเหนียวและความสามารถในการรับแรงหลังการแตกร้าวได้ดีกว่าตัวอย่างที่ไม่เสริมเส้นใย แม้ภายหลังผ่านสภาวะเปียกสลับแห้ง 12 รอบ ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าเส้นใยโพลิโพรพิลีนสามารถปรับปรุงสมรรถนะเชิงดัด ความเหนียว และความทนทานต่อสภาวะเปียกสลับแห้งของ CTB-EA ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางที่มีความทนทานมากขึ้นในงานวิศวกรรมทางหลวง

คำสำคัญ: หินคลุกปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์; เถ้ายูคาลิปตัส; เส้นใยโพลิโพรพิลีน; การรับแรงดัด; ความเหนียว

ABSTRACT

Cement-treated base incorporating eucalyptus ash (CTB-EA) is a promising pavement material due to its high strength and potential sustainability benefits. However, CTB-EA generally exhibits brittle behavior under flexural loading, resulting in limited post-cracking load-carrying capacity and energy absorption. Therefore, this study investigated the effect of polypropylene fiber reinforcement on the flexural performance of CTB-EA. Flexural tests were conducted in accordance with ASTM C1609 using fiber contents ranging from 0 to 1.25% by volume. In addition, the durability of the material was evaluated under 0, 1, 3, 6, 9, and 12 wetting–drying cycles. The results showed that the incorporation of polypropylene fibers significantly improved the

residual flexural strength and toughness of CTB-EA. When the fiber content exceeded 0.50% by volume, the material behavior changed from deflection-softening to deflection-hardening, indicating a transition from brittle to ductile behavior with enhanced post-cracking performance. Among the investigated mixtures, a fiber content of 0.75% provided a favorable balance between flexural strength, residual strength, and toughness. Wetting–drying cycles progressively deteriorated the flexural performance of all mixtures due to the development of microcracks and degradation of internal bonding. Nevertheless, fiber-reinforced specimens maintained considerably higher toughness and post-cracking load-carrying capacity than the unreinforced mixture, even after 12 wetting–drying cycles. The findings demonstrate that polypropylene fibers effectively enhance the flexural performance, toughness, and durability of CTB-EA under wetting–drying conditions, thereby improving its suitability for pavement base applications.

Keywords: Cement Treated Base; eucalyptus ash; polypropylene fiber; flexural behavior; toughness

1. บทนำ

ในงานก่อสร้างโครงสร้างพื้นทาง (Pavement base and subbase) มักอาศัยวัสดุชั้นฐานอย่างหินคลุก (Crushed rock) เนื่องจากมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น ความสามารถในการรับน้ำหนักและความเสถียรภายใต้แรงกระทำ แต่หินคลุกมีข้อจำกัดด้านความเปราะ (Brittleness) เมื่อเผชิญกับสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงซ้ำ เช่น รอบเปียก-แห้ง (Wetting–drying cycles) ซึ่งเป็นหนึ่งในสาเหตุหลักที่สามารถเร่งให้เกิดการแตกร้าว การลดลงของความแข็งแรง การสึกกร่อนของวัสดุในระยะยาว และลดอายุการใช้งานของโครงสร้างถนน [1], [2] เพื่อเพิ่มสมรรถนะของวัสดุ หินคลุกจึงมักถูกปรับปรุงด้วยการผสมซีเมนต์ ซึ่งช่วยเพิ่มค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength: UCS) เนื่องจากมีต้นทุนไม่สูงและสามารถรับน้ำหนักได้ดีในระยะเริ่มต้นและประหยัดค่าใช้จ่าย แต่ในขณะเดียวกันก็ส่งผลให้วัสดุเปราะมากขึ้น มีพฤติกรรมการแตกร้าวที่รุนแรงเมื่อถูกแรงดัดหรือแรงเฉือน เพื่อลดผลกระทบจากปัญหาดังกล่าว การเสริมแรงวัสดุด้วยเส้นใยโพลิโพรพิลีน (Polypropylene fiber: PP) เป็นแนวทางหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มความเหนียว (Toughness) ความสามารถในการต้านทานการแตกร้าว และการยืดอายุของวัสดุทางที่ผ่านการเสริมด้วยซีเมนต์ เนื่องจากเส้นใยชนิดนี้มีคุณสมบัติเด่นในด้านทนทานต่อความชื้น ไม่ทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ มีความยืดหยุ่นสูงสามารถช่วยเพิ่มความเหนียว ลดการแตกร้าว และปรับปรุงพฤติกรรมหลังแตกร้าวของวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ [3], [4], [5], [6] จึงเหมาะสมสำหรับใช้งานในวัสดุที่สัมผัสความชื้นอย่างต่อเนื่อง

ในขณะเดียวกันการใช้วัสดุเหลือทิ้งที่มีคุณสมบัติปอซโซลาน เช่น เถ้าเูคาลิปตัส (Eucalyptus Ash: EA) ทดแทนบางส่วน of ปูนซีเมนต์ กำลังเป็นแนวทางที่ตอบโจทยทั้งด้านเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้เนื่องจาก EA เป็นวัสดุพลอยได้จากการเผาไหม้เูคาลิปตัสในโรงไฟฟ้าชีวมวล ซึ่งมีองค์ประกอบออกไซด์หลัก เช่น ซิลิกา (SiO_2), แคลเซียมออกไซด์ (CaO), และอะลูมินา (Al_2O_3) ซึ่งมีคุณสมบัติปอซโซลานิกและสามารถเข้าไปมีปฏิกิริยาทางเคมีกับปูนซีเมนต์หรือผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน เช่น $\text{Ca}(\text{OH})_2$ เพื่อสร้างเจลไฮเดรตชนิดต่างๆ ได้แก่ calcium silicate hydrate (C–S–H) และ calcium aluminosilicate hydrate (C–A–S–H) การเกิดเจลเหล่านี้ไม่เพียงแต่เพิ่มความแน่นและความแข็งแรงให้กับโครงสร้างภายในวัสดุ แต่ยังมีผลสำคัญในการลดการซึมผ่านของน้ำ ลดขนาดของรูพรุน และเพิ่มความทนทาน [7] นอกเหนือจากการใช้ปรับปรุงดิน เถ้าเูคาลิปตัสยังมีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนบางส่วน of ปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีตและวัสดุผสมซีเมนต์อื่น ๆ ซึ่งนอกจากจะช่วยลดต้นทุนและลดการพึ่งพาปูนซีเมนต์แล้ว ยังช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (CO_2) ที่เกิดจากอุตสาหกรรมซีเมนต์อย่างมีนัยสำคัญ ข้อมูลเหล่านี้ตอกย้ำถึงศักยภาพของ EA ในการพัฒนาทั้งสมบัติเชิงกลและสมบัติจุลภาคของวัสดุก่อสร้างผสมซีเมนต์อย่างยั่งยืน ดังนั้น EA จึงถือเป็นวัสดุ

ทางเลือกที่มีทั้งคุณค่าเชิงวิศวกรรมและสิ่งแวดล้อมอย่างยิ่งสำหรับการประยุกต์ใช้ร่วมกับวัสดุชั้นทาง เช่น หินคลุกผสมซีเมนต์ในงานโครงสร้างทางถนน

อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่บูรณาการวัสดุทั้งสองประเภท ได้แก่ เส้นใยโพลิโพรพิลีนและเถ้าชัลลิตัส ร่วมกับหินคลุกผสมซีเมนต์ ภายใต้การประเมินสมรรถนะเชิงคักภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้ง ยังมีจำนวนจำกัด ดังนั้นการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินสมรรถนะเชิงคักของหินคลุกผสมซีเมนต์ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยโพลิโพรพิลีนและเถ้าชัลลิตัส ภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้ง โดยเน้นการวิเคราะห์ทั้งด้านกำลังคัก ความเหนียวที่เปลี่ยนไปภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้ง เพื่อพัฒนาองค์ความรู้ในการผลิตวัสดุชั้นพื้นทางที่มีความแข็งแรง ทนทาน และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

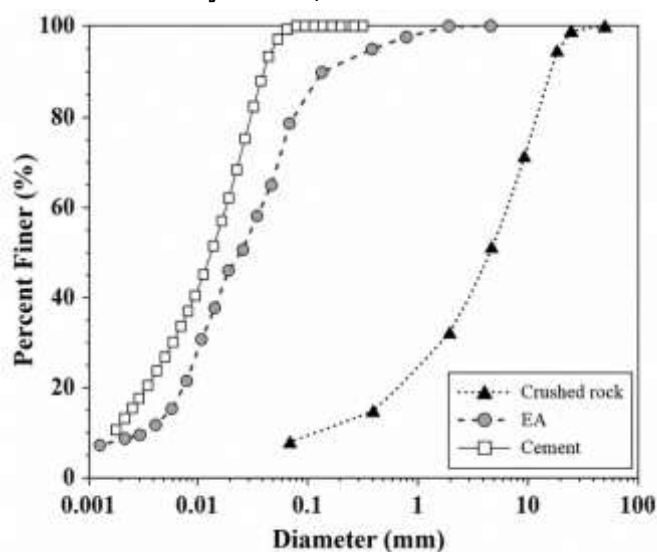
2. วัสดุและวิธีการทดสอบ

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้หินคลุกจากจังหวัดสุพรรณบุรี ประเทศไทยแสดงดังรูปที่ 1 (ก) จากกราฟการกระจายขนาดอนุภาคดังแสดงในรูปที่ 2 ตามมาตรฐานวิธีการทดลองกรมทางหลวงที่ ทล.-ท. 205 [8] พบว่าประกอบด้วยกรวด 49% ทราย 46% ทรายแป้ง 5% จัดเป็นหินคลุกที่มีขนาดกะทัดรัด มีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่ได้จากการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐานมีค่าเท่ากับ 22.16 kN/m^3 และ 5.9% ตามลำดับ โดยมีคุณสมบัติทางกายภาพของหินคลุกที่ได้ทำการทดสอบ เช่น ค่าความสึกหรอ (ทล.-ท. 202) [9] ค่าของส่วนที่ไม่คงทน (ทล.-ท. 213) [10] ชีดจำกัดความชื้นเหลวของดิน (ทล.-ท. 102-103) [11] ค่ากำลังรับแรงเบกทานของดิน (ทล.-ท. 109) [12] และค่าการดูดซึมน้ำ (ทล.-ท. 207) [13] ที่ได้สรุปไว้ในตารางที่ 1 ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกตามมาตรฐาน มอก. 2594 [14] เป็นสารผสมเพิ่มในการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุแสดงดังรูปที่ 3-1(ข) โดยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในการผลิตสามารถลดสภาวะเรือนกระจกที่เป็นสาเหตุทำให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้น เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement, OPC) ซึ่งปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเป็นวัสดุที่ยอมรับในวงกว้างมีมาตรฐานและข้อกำหนดที่ใช้ปูนซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพทั้งในและต่างประเทศ จึงสามารถนำมาอ้างอิง คัดแปลงให้เหมาะสมกับงานก่อสร้างได้ โดยมีลักษณะการกระจายตัวดังรูปที่ 2 เถ้าชัลลิตัส (Eucalyptus ash, EA) จากโรงงานกระดาษ จังหวัดปราจีนบุรี แสดงดังรูปที่ 1(ค) โดยในกระบวนการผลิตกระดาษจากไม้ยูคาลิปตัส จะมีวัตถุดิบที่จัดเป็นของเสียเกิดขึ้น เช่นเศษและเปลือกไม้ยูคาลิปตัส วัตถุดิบที่ได้จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าเพื่อนำมาใช้ภายในโรงงานของบริษัท โดยมีลักษณะการกระจายตัวดังรูปที่ 2 เส้นใยโพลิโพรพิลีน (Polypropylene fiber) ชนิด Macro มีความยาว 55 มิลลิเมตร ที่ทำจากโพลิโพรพิลีน (Polypropylene) ซึ่งเป็นพลาสติกพอลิเมอร์ชนิดหนึ่ง ถูกออกแบบมาเพื่อใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในคอนกรีตหรือวัสดุก่อสร้างอื่น ๆ เพื่อช่วยเพิ่มความทนทานต่อแรงดึง แรงคัก และลดการแตกร้าวของวัสดุ ดังรูปที่ 1(ง) โดยมีคุณสมบัติแสดงดังตารางที่ 2



รูปที่ 1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 2 กราฟการกระจายตัวของหินคลุก เถ้าลอย และปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทั่วไปของหินคลุก

คุณสมบัติทั่วไปของหินคลุก	จากการทดสอบ	มาตรฐานกรมทางหลวง
Los Angeles Abrasion (%)	2.97	ไม่เกินร้อยละ 35
Soundness (%)	6	ไม่เกินร้อยละ 9
Liquid Limit (%)	non plastic	ไม่เกินร้อยละ 25
Plasticity Index	non plastic	ไม่เกินร้อยละ 6
CBR (%)	90	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80
การดูดซึมน้ำ (%)	0.71	ไม่เกินร้อยละ 2

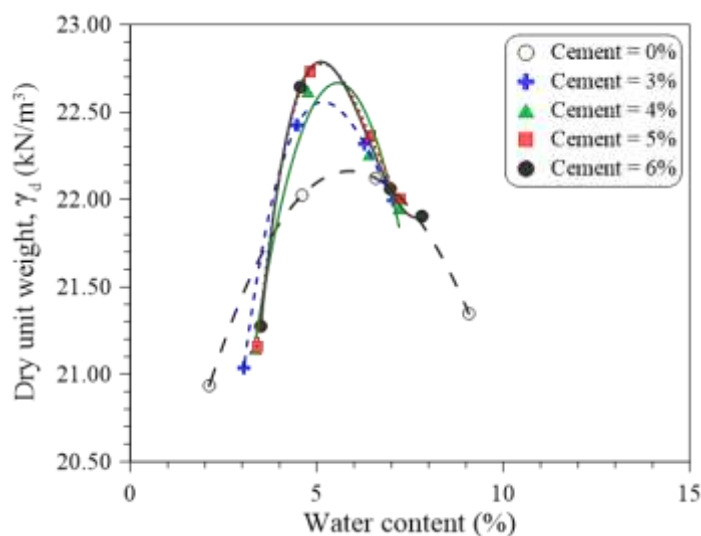
ตารางที่ 2 คุณสมบัติของเส้นใยสังเคราะห์ Macro Polypropylene

Properties	Macro Polypropylene
Length (mm)	55
Shape	Crimped
Section	Circular
Diameter or width (mm)	0.85
Specific weight (kN/m ³)	8.93
Tensile strength (Mpa)	250
Young's modulus (Gpa)	3.0

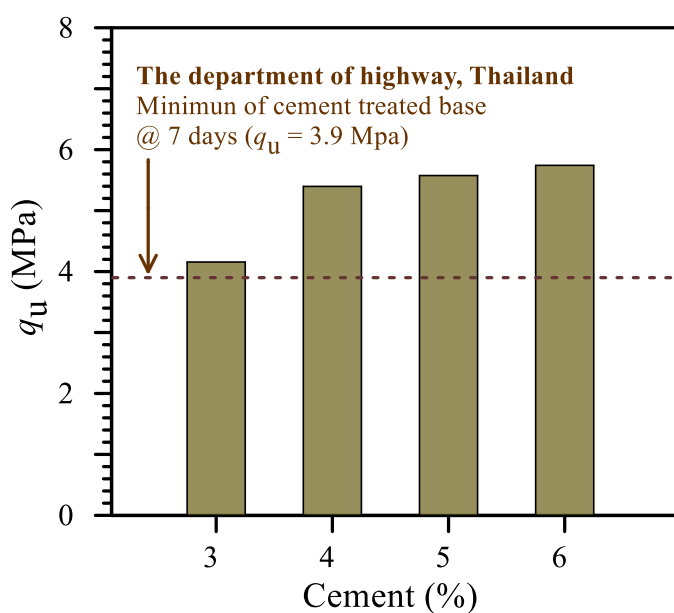
2.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

การกำหนดปริมาณปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและเถ้าภูเขาไฟที่ผสมในงานวิจัยนี้พิจารณาจากผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength; UCS) ที่อายุบ่ม 7 วัน โดยเปรียบเทียบกับมาตรฐานวัสดุพื้นทางหินคลุกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ (CTB) ของกรมทางหลวง ซึ่งกำหนดให้มีกำลังอัดแกนเดียวไม่น้อยกว่า 3.92 MPa ในงานวิจัยนี้จึงทำการทดลองโดยใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่ 3, 4, 5 และ 6% โดยน้ำหนักแห้งของหินคลุก

โดยเตรียมตัวอย่างหินคลุกผสมกับปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกในอัตราส่วนที่กำหนดไว้แล้วทำการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction test) ตามมาตรฐาน ทล.-ท.108[15] เพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกแต่ละสัดส่วน จากการทดสอบได้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกแต่ละสัดส่วน ดังรูปที่ 3 หลังจากนั้นจะนำค่าที่ได้ไปใช้ในการเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบกำลังอัดแกนเดียวตามมาตรฐานการทดสอบ ทล.-ท. 105 หลังอายุการบ่ม 7 วัน เมื่อครบกำหนดจะนำตัวอย่างทดสอบเพื่อหาค่ากำลังอัดแกนเดีย্বরูปที่ 4 แสดงผลความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดแกนเดียว (q_u) กับปริมาณปูนซีเมนต์ จากผลการทดสอบพบว่า ปริมาณปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกทั้ง 4 อัตราส่วน มีค่ามากกว่า 3.92 MPa ซึ่งผ่านมาตรฐานขั้นต่ำของการทดลองที่ ทล.-ท. 105/2515 โดยทุกส่วนผสมให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน อย่างไรก็ตาม ส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก 4% ให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงกว่าค่าขั้นต่ำที่กำหนดอย่างชัดเจน และให้ค่ากำลังอัดไม่แตกต่างจากส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกในปริมาณ 5% และ 6% มากนัก ดังนั้น การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่มากกว่า 4% ให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นในสัดส่วนที่ไม่มากเมื่อเทียบกับปริมาณปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่ต้องใช้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เลือกใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก 4% เป็นปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาต่อไป

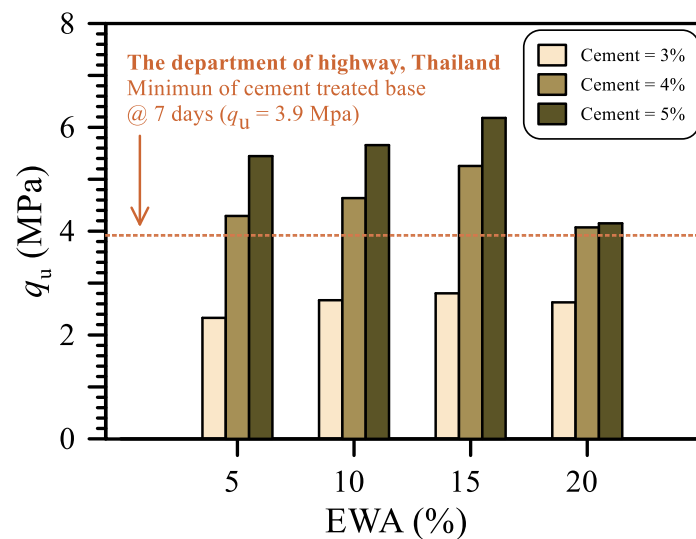


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกแต่ละสัดส่วน



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดแกนเดียว (q_u) กับปริมาณปูนซีเมนต์

หลังจากนั้นจึงศึกษาปริมาณเถ้าชัลคาลิปต์ที่เหมาะสมโดยใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก 4% และทำการแทนที่หินคลุกด้วยเถ้าชัลคาลิปต์ในปริมาณ 5–20% โดยน้ำหนักแห้งของหินคลุกโดยใช้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด และปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่ได้จากการกำหนดปริมาณปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่เหมาะสมแสดงในรูปที่ 3 จากนั้นทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวตามมาตรฐานการทดสอบ ทล.-ท. 105 หลังอายุการบ่ม 7 วัน เมื่อครบกำหนดจะนำตัวอย่างทดสอบเพื่อหาค่ากำลังอัดแกนเดียว ผลการทดสอบในรูปที่ 5 พบว่ากำลังอัดแกนเดียวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าชัลคาลิปต์จนถึง 15% และให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงสุด หลังจากนั้นค่ากำลังอัดแกนเดียวลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าชัลคาลิปต์เป็น 20% แสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าชัลคาลิปต์ในปริมาณที่เหมาะสมสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการยึดประสานของวัสดุได้ แต่หากใช้ในปริมาณมากเกินไปจะส่งผลให้ความแข็งแรงลดลง ดังนั้นจึงเลือกใช้เถ้าชัลคาลิปต์ 15% เป็นปริมาณที่เหมาะสมสำหรับใช้ในงานวิจัยนี้



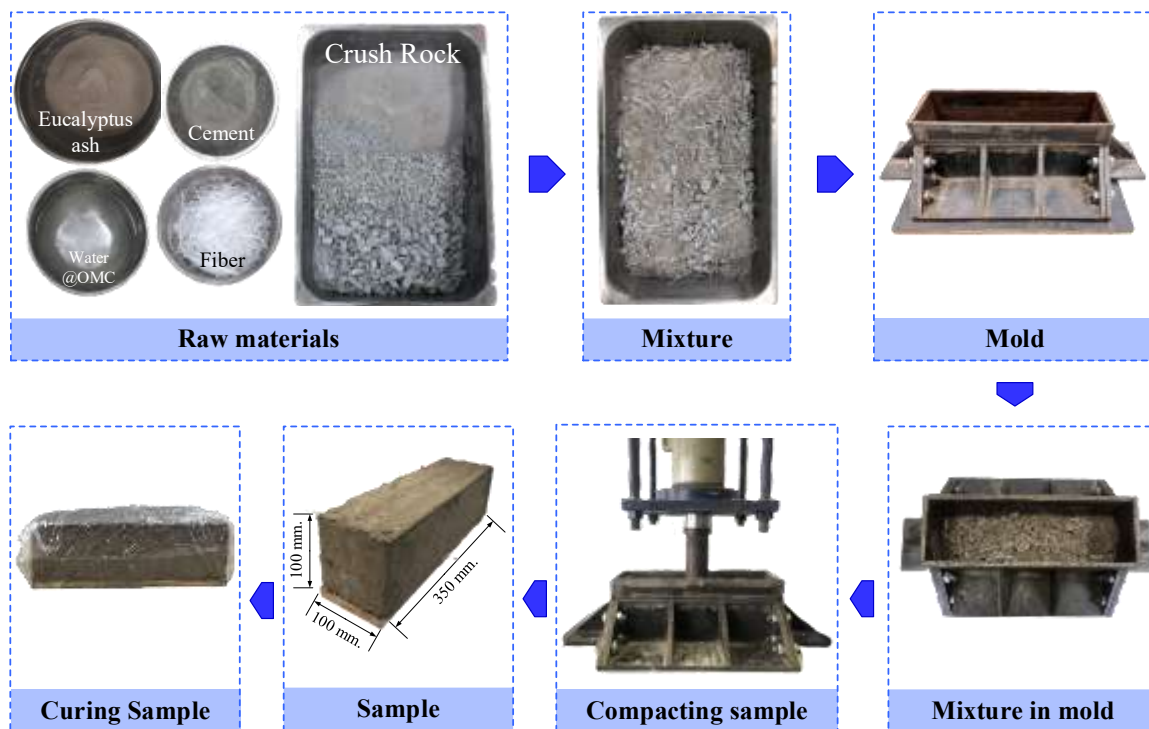
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดแกนเดียว (q_u) กับปริมาณเถ้าภูเขาไฟปัดส (EA)

ในการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดัด (Flexural Strength) ตามมาตรฐาน ASTM C1609 [16] ได้กำหนดปริมาณส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ปริมาณส่วนผสมและสัดส่วนตัวอย่าง

สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (แทนที่หินคลุกร้อยละโดยน้ำหนัก)	เถ้าภูเขาไฟปัดส (แทนที่หินคลุกร้อยละโดยน้ำหนัก)	เส้นใยโพลีพรพิลีน (แทนที่หินคลุกร้อยละโดยปริมาตร)
F0.00	4	15	0
F0.125			0.125
F0.25			0.25
F0.50			0.50
F0.75			0.75
F1.00			1.00
F1.25			1.25

ในการเตรียมตัวอย่างจะทำการเตรียมส่วนผสมประกอบด้วยหินคลุก ปูนซีเมนต์ และเถ้าภูเขาไฟปัดส นำวัสดุผสมให้เข้ากัน หลังจากนั้นจะทำการเติมเส้นใยสังเคราะห์ลงไปตามสัดส่วนในตารางที่ 3 ผสมต่อให้ส่วนผสมเข้ากัน หลังจากนั้นเติมน้ำโดยใช้ปริมาณน้ำที่เหมาะสม (OMC) ที่ได้จากการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction test) ตามมาตรฐาน ทล.-ท.108 [15] แสดงในรูปที่ 3 ทำการผสมส่วนผสมให้วัสดุเป็นเนื้อเดียวกันไม่รวมกันเป็นก้อน และมีการกระจายตัวของส่วนผสมอย่างทั่วถึง แล้วจึงนำไปอัดขึ้นรูปในโมลรูปแบบขนาด 100 x 100 x 350 มิลลิเมตร โดยใช้แท่นกดไฮดรอลิกในการขึ้นรูปตัวอย่าง ตามมาตรฐาน ASTM C1609 [16] โดยขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างแสดงในรูปที่ 6 หลังจากทำการขึ้นรูปตัวอย่างเสร็จสิ้นแล้ว นำตัวอย่างออกจากโมล นำพลาสติกแผ่นบาง (Wrap) หุ้มตัวอย่างไว้เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นบริเวณผิวตัวอย่าง แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิห้องตามอายุการบ่ม 28 วัน เพื่อบำรุงการทดสอบต่อไป



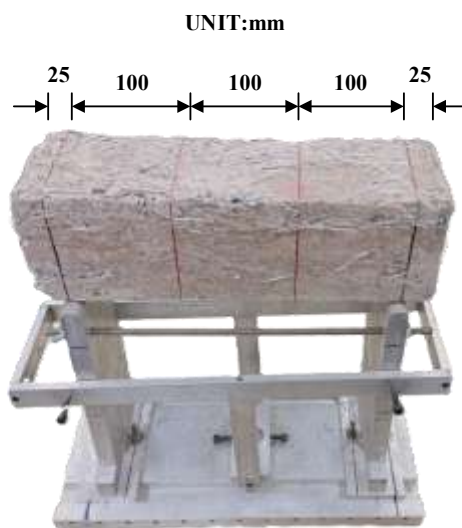
รูปที่ 6 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

2.3 วิธีการทดสอบกำลังรับแรงดัดภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้ง

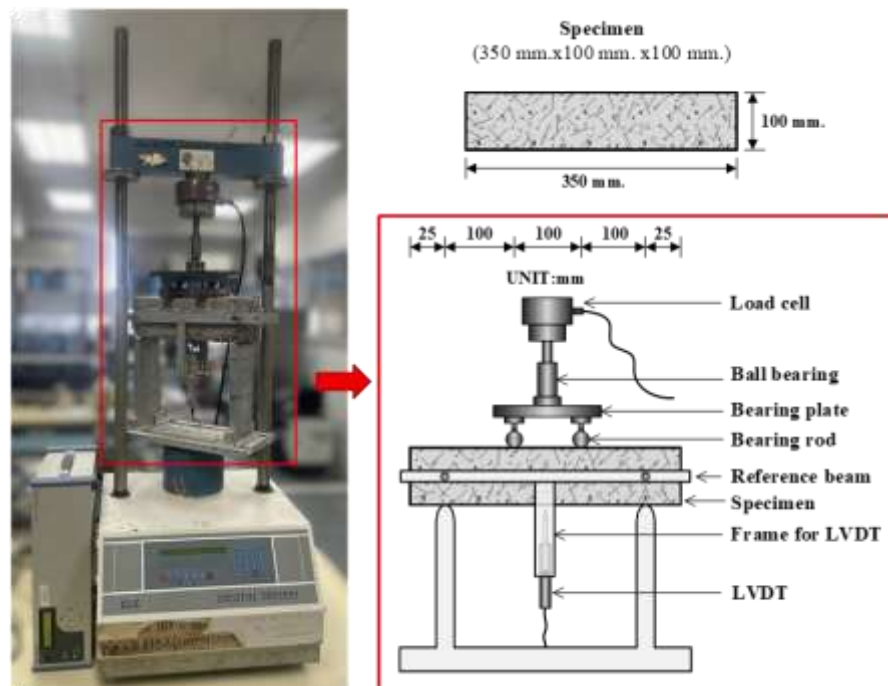
การทดสอบกำลังรับแรงดัด (Flexural Strength Test) ของวัสดุตามมาตรฐาน ASTM C1609 [16] ซึ่งใช้สำหรับการทดสอบคอนกรีตเสริมกำลังด้วยเส้นใย ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยตัวอย่างทดสอบที่ใช้จะเป็นคานขนาด 100x100x350 มิลลิเมตร ซึ่งได้จากการเตรียมตัวอย่างในหัวข้อ 2.2 เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการบ่มของตัวอย่างทดสอบ จะนำตัวอย่างออกจากพลาสติกที่ใช้บ่ม และทำการวัดขนาดความกว้าง (b) และความลึก (d) ของคาน โดยจะทำการทดสอบโดยใช้จำนวนตัวอย่าง 3 ตัวอย่างต่อการทดสอบ เพื่อศึกษาการสูญเสียกำลังรับแรงดัดของตัวอย่างภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้ง การทดสอบเปียกสลับแห้งจะทำการทดสอบจำนวน 1, 3, 6, 9 และ 12 รอบ โดยในแต่ละรอบ ตัวอย่างจะถูกแช่น้ำเป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 71°C เป็นเวลา 42 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน ASTM D559-15 [17] ดังแสดงในรูปที่ 7 เมื่อครบจำนวนรอบทดสอบที่กำหนดแล้ว จะนำตัวอย่างไปทดสอบกำลังรับแรงดัด (Flexural Strength Test) การทดสอบกำลังรับแรงดัดจะดำเนินการทดสอบตามรอบการทดสอบความทนทานต่อการเปียกและแห้งรอบที่ 1, 3, 6, 9 และ 12 รอบ จากนั้นทำการนำมาวางบนฐานรองรับ การวางตัวอย่างทดสอบบนฐานรองรับจะมีระยะห่างระหว่างฐานรองรับ (L) เท่ากับ 300 มิลลิเมตร และระยะห่างของหัวกดทดสอบจะเท่ากับ 100 มิลลิเมตร ตามรูปที่ 8 จากนั้นจะติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนของคาน (LVDT) ที่กึ่งกลางใต้ตัวอย่าง และนำตัวอย่างเข้าสู่เครื่องทดสอบคานตามรูปที่ 9 โดยใช้อัตราการกดคงที่ที่ 0.075 มิลลิเมตรต่อนาที จนกระทั่งตัวอย่างมีการแอ่นตัวสุทธิ 4 มิลลิเมตร จึงหยุดการทดสอบ แล้วบันทึกข้อมูลการโก่งตัวและน้ำหนักที่ใช้ในการกดเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 7 การทดสอบ Wetting and Drying Durability



รูปที่ 8 ระยะเวลาวางตัวอย่างบนฐานรองรับ



รูปที่ 9 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงดัด

2.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

ค่าความเหนียว (Toughness) ถูกคำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ (Load) และค่าการแอ่นตัวสุทธิ (Net Deflection) ที่ได้จากการทดสอบกำลังรับแรงดัด โดยคำนวณพื้นที่ใต้กราฟจนถึงค่าการแอ่นตัวสุทธิเท่ากับ $L/75$ (4 มม.) ตามข้อกำหนดของ ASTM C1609 ซึ่งค่าที่ได้แสดงถึงความสามารถของวัสดุในการดูดซับพลังงานก่อนการวิบัติ

ค่าความเหนียวที่สูงขึ้นแสดงถึงความสามารถของวัสดุในการดูดซับพลังงานและต้านทานการวิบัติหลังการแตกร้าวได้ดียิ่งขึ้น

แรงคงค้าง (Residual strength) เป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ประเมินสมรรถนะเชิงดัด โดยเฉพาะความสามารถในการรับแรงหลังจากเกิดรอยแตกครั้งแรก จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการแอ่นตัว แรงที่วัสดุยังสามารถรับได้หลังจุดกำลังสูงสุดครั้งแรกจะถูกเรียกว่าแรงคงค้าง

ตามแนวทางการทดสอบแรงดัดตามมาตรฐาน ASTM C1609 แรงคงค้างถูกกำหนดจากค่าการรับแรงของตัวอย่างที่การแอ่นตัวสุทธิเท่ากับ $L/150$ (ประมาณ 2 มม. สำหรับคานช่วงพาด 300 มม.) ซึ่งเป็นช่วงการแอ่นตัวที่เหมาะสมสำหรับการประเมินพฤติกรรมหลังการแตกร้าว

3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

3.1 การรับแรงดัดของหินคลุกผสมซีเมนต์และเถ้าภูเขาไฟที่เสริมแรงด้วยเส้นใยโพลี โพรพิลีนภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้ง

ผลการทดสอบการรับแรงดัดของวัสดุผสมหินคลุกซีเมนต์เถ้าภูเขาไฟที่เสริมแรงด้วยเส้นใยโพลีโพรพิลีนภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้งจำนวน 0-12 รอบ (WD0-12) แสดงดังรูปที่ 10 แสดงให้เห็นว่าสภาวะเปียกสลับแห้งส่งผลโดยตรงต่อการเสื่อมสมรรถนะเชิงกลของวัสดุ ทั้งในแง่ค่าการรับแรงดัดสูงสุด ความสามารถในการคงกำลังรับแรง และพฤติกรรมการรับแรงหลังการ

แตกร้าว ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มที่รายงานในงานวิจัยก่อนหน้านี้เกี่ยวกับวัสดุซีเมนต์ภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงความชื้นซ้ำ [1], [18], [19]

ตัวอย่างควบคุมที่ไม่เสริมเส้นใย (F0.00) มีค่าการรับแรงดัดเริ่มต้นที่ 5.27 kN ใน WD0 และลดลงต่อเนื่องเป็น 5.08, 4.58, 4.24, 4.04 และ 3.80 kN ใน WD1, WD3, WD6, WD9 และ WD12 ตามลำดับ คิดเป็นการลดลงรวม 27.9% หลังผ่านสภาวะเปียกสลับแห้ง 12 รอบ พฤติกรรมการวิบัติของตัวอย่าง F0.00 เป็นแบบเปราะ โดยเกิดการแตกร้าวหลักเพียงเส้นเดียวและสูญเสียความสามารถในการรับแรงทันทีหลังการแตกร้าวแรก ซึ่งสะท้อนถึงการสะสมความเสียหายระดับจุลภาคในเมทริกซ์ซีเมนต์จากการขยายตัวและหดตัวของความชื้นซ้ำ ๆ ภายในโครงสร้างรูปท่อน อันเป็นลักษณะพื้นฐานของวัสดุซีเมนต์ที่ไม่มีเส้นใยเสริมแรง [4], [18]

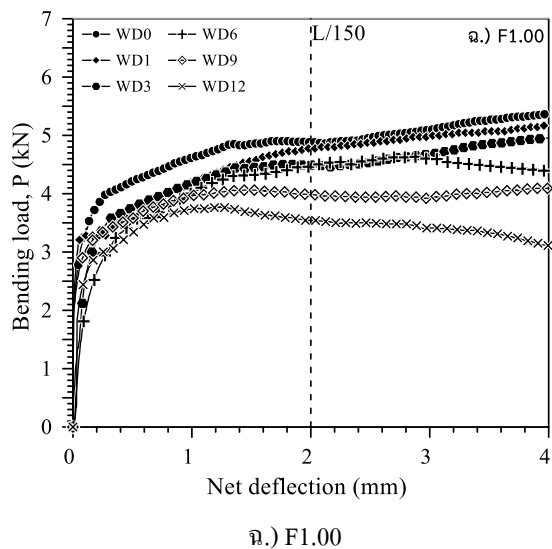
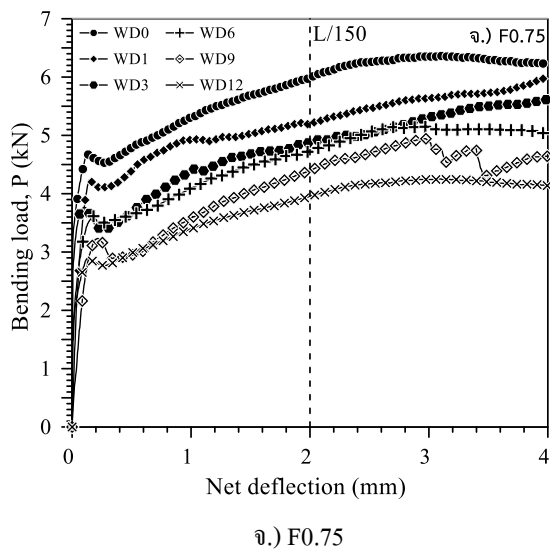
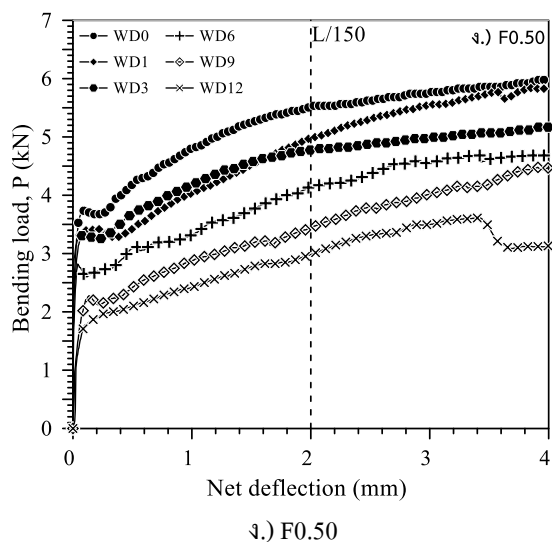
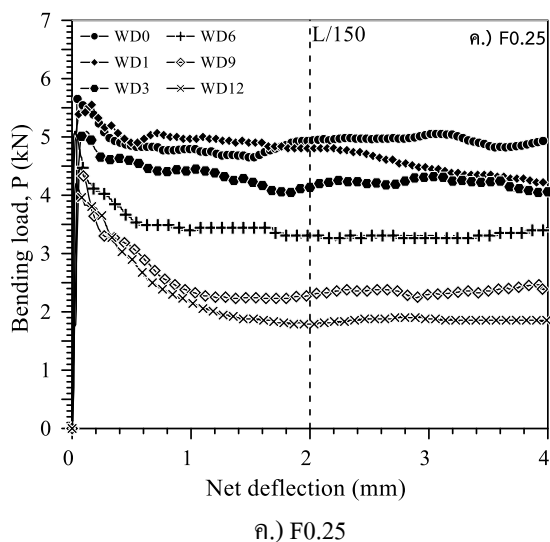
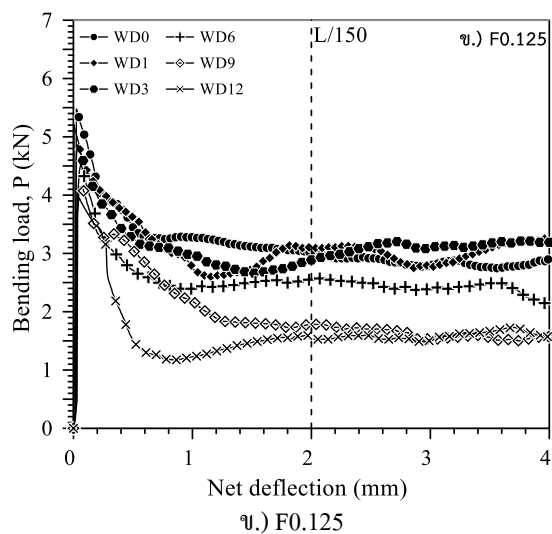
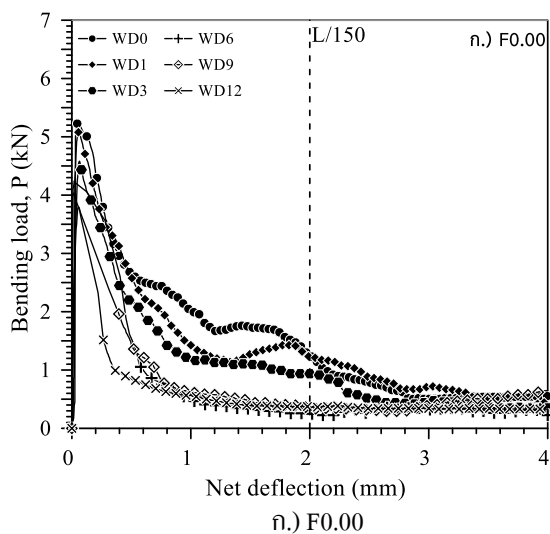
การเสริมแรงด้วยเส้นใยโพลิโพรพิลีนในปริมาณต่ำเริ่มแสดงบทบาทในการชะลอการเสื่อมของการรับแรงดัด โดยที่ปริมาณเส้นใย 0.125% ให้ค่าการรับแรงดัดเริ่มต้น 5.48 kN และลดลงเป็น 4.86 kN ใน WD3 และ 3.95 kN ใน WD12 หรือคิดเป็นการลดลงรวม 27.8% แม้ว่าค่ากำลังคงเหลือสุดท้ายจะใกล้เคียงกับ F0.00 แต่การลดลงในช่วงต้นถึงช่วงกลาง (WD1–WD6) เกิดขึ้นช้ากว่า ซึ่งสะท้อนถึงบทบาทของเส้นใยในการชะลอการขยายตัวของรอยร้าวภายในเนื้อวัสดุผ่านกลไก Crack bridging ในระยะเริ่มต้น [20], [21]

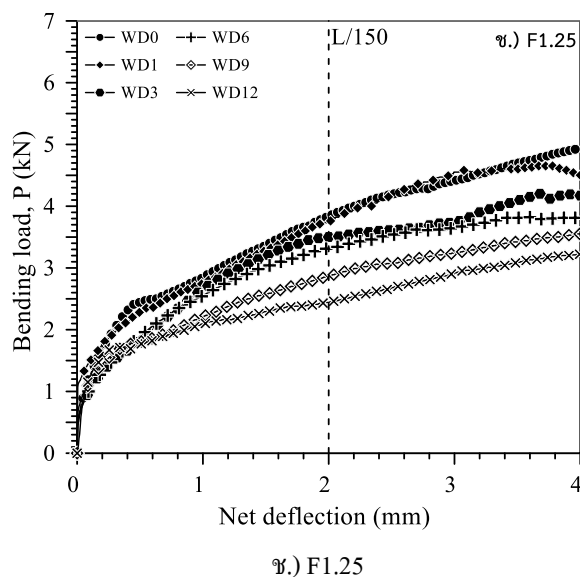
เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเป็น 0.25% ค่าการรับแรงดัดเริ่มต้นเพิ่มขึ้นเป็น 5.65 kN และลดลงเพียงเล็กน้อยเหลือ 5.55 kN ใน WD1 และ 5.10 kN ใน WD3 โดยไม่พบการลดลงเพิ่มเติมในช่วง WD3 ถึง WD6 ก่อนจะลดลงเป็น 4.46 และ 4.21 kN ใน WD9 และ WD12 ตามลำดับ คิดเป็นการลดลงรวม 25.5% พฤติกรรมดังกล่าวสะท้อนว่าโครงข่ายเส้นใยที่มีความต่อเนื่องมากขึ้นสามารถเชื่อมรอยร้าวขนาดเล็กและถ่ายแรงภายหลังการแตกร้าวได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงต้นถึงกลางของสภาวะเปียกสลับแห้ง ซึ่งสอดคล้องกับกลไกที่รายงานโดย Chindaprasirt, P., et al. [7] และ Jamsawang, P., et al. [20]

สำหรับปริมาณเส้นใย 0.50% ค่าการรับแรงดัดเริ่มต้นเพิ่มขึ้นเป็น 5.98 kN แต่ค่ากำลังลดลงอย่างชัดเจนในช่วงรอบปลาย โดยลดลงเหลือ 3.61 kN ใน WD12 หรือคิดเป็นการลดลงรวม 39.6% ซึ่งมากกว่าตัวอย่างที่ไม่เสริมเส้นใย แสดงให้เห็นถึงการเสื่อมของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้งที่ต่อเนื่อง และการสะสมของความเสียหายที่รอยต่อเส้นใย–เมทริกซ์ [1], [19]

ตัวอย่างที่เสริมแรงด้วยเส้นใยโพลิโพรพิลีนที่ปริมาณ 0.75% ให้สมรรถนะดีที่สุด โดยมีค่าการรับแรงดัดเริ่มต้นสูงสุดที่ 6.36 kN และลดลงเป็น 6.00, 5.62, 5.15, 4.94 และ 4.25 kN ใน WD1, WD3, WD6, WD9 และ WD12 ตามลำดับ คิดเป็นการลดลงรวม 33.2% หลังผ่าน 12 รอบ WD และยังคงรักษากำลังคงเหลือได้มากกว่าร้อยละ 66 ของค่าเริ่มต้น พร้อมทั้งแสดงพฤติกรรมการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไปและการเกิดรอยร้าวหลายจุด ซึ่งบ่งชี้ถึงความสามารถในการกระจายแรงเค้นและดูดซับพลังงานที่ดีของวัสดุ อันเป็นผลจากการทำงานร่วมกันของโครงข่ายเส้นใยและกลไก crack bridging ที่มีประสิทธิภาพ [7], [21]

ในทางกลับกันการเพิ่มปริมาณเส้นใยเป็น 1.00% และ 1.25% ทำให้ค่าการรับแรงดัดเริ่มต้นลดลงเหลือ 5.37 และ 4.94 kN ตามลำดับ และค่ากำลังใน WD12 ลดลงเหลือ 3.77 และ 3.22 kN ซึ่งสัมพันธ์กับปัญหาการรวมตัวของเส้นใย การเพิ่มความพรุน และการบดบังการอัดแน่นของเนื้อวัสดุ ส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์เสื่อมถอยลงภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้ง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Bui, T.T., et al. [1] และ Ikhlasi, M., et al. [19]





รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวสุทธิและการรับน้ำหนักของหินคลุกผสมซีเมนต์และเถ้าภูเขาไฟปลัสด์เสริมแรงด้วยเส้นใยโพลิโพรพิลีนภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้งที่รอบต่าง ๆ

3.2 ความเหนียวของหินคลุกผสมซีเมนต์และเถ้าภูเขาไฟปลัสด์เสริมแรงด้วยเส้นใยโพลิโพรพิลีนภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้ง

ผลการทดสอบค่าความเหนียวของวัสดุผสมหินคลุกซีเมนต์และเถ้าภูเขาไฟปลัสด์ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยโพลิโพรพิลีนภายใต้ระยะการแอ่นตัวที่ $L/75$ (4 มม.) แสดงในรูปที่ 11 แสดงให้เห็นว่าสภาวะเปียกสลับแห้งส่งผลโดยตรงต่อสมรรถนะหลังแตกร้าวของวัสดุ โดยค่าความเหนียวซึ่งสะท้อนความสามารถในการดูดซับพลังงานหลังเกิดรอยร้าว มีแนวโน้มลดลงตามจำนวนรอบเปียกสลับแห้งที่เพิ่มขึ้นในทุกสัดส่วนเส้นใย ทั้งนี้อัตราการลดลงและค่าความเหนียวคงเหลือขึ้นอยู่กับปริมาณเส้นใยที่เสริมเข้าไป ซึ่งสอดคล้องกับกลไกการถ่ายแรงหลังแตกร้าวของวัสดุซีเมนต์เสริมใยที่รายงานไว้ในงานของ Yoosuk, K., et al. [21] และ Mohr, B.J., et al. [22]

ตัวอย่างที่ไม่เสริมเส้นใย (F0.00) มีค่าความเหนียวใน WD0 เท่ากับ 6.03 N-mm และลดลงอย่างต่อเนื่องเหลือเพียง 2.43 N-mm ใน WD12 คิดเป็นการลดลงมากกว่าร้อยละ 59 ซึ่งสะท้อนพฤติกรรมประทะของวัสดุซีเมนต์ที่ไม่มีโครงข่ายเส้นใยช่วยถ่ายแรงหลังแตกร้าว โดยเมื่อเกิดรอยร้าวแล้ว วัสดุไม่สามารถดูดซับพลังงานเพิ่มเติมได้อย่างมีประสิทธิภาพ และความเสียหายจากสภาวะเปียกสลับแห้งจะเร่งการเสื่อมสภาพของสมรรถนะหลังแตกร้าวอย่างรวดเร็ว อันเป็นลักษณะพื้นฐานของวัสดุซีเมนต์ที่ไม่เสริมแรงภายใต้การเปลี่ยนแปลงความชื้นซ้ำ [1], [22]

การเสริมเส้นใยโพลิโพรพิลีนในปริมาณต่ำที่ 0.125% ทำให้ค่าความเหนียวเริ่มต้นเพิ่มขึ้นเป็น 12.52 N-mm และยังคงอยู่ที่ 6.61 N-mm ใน WD12 ซึ่งสูงกว่าตัวอย่าง F0.00 ในทุกจำนวนรอบ WD แสดงให้เห็นว่าเส้นใยแม้ในปริมาณต่ำสามารถทำหน้าที่เชื่อมรอยร้าวและถ่ายแรงข้ามรอยแตกได้อย่างไรก็ตาม แนวโน้มการลดลงที่ต่อเนื่องเมื่อจำนวนรอบ WD เพิ่มขึ้นชี้ว่าปริมาณเส้นใยระดับนี้ยังไม่เพียงพอในการคงโครงข่ายการถ่ายแรงหลังแตกร้าวภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงความชื้นซ้ำ ซึ่งสัมพันธ์กับการเสื่อมของแรงยึดเหนี่ยวบริเวณรอยต่อเส้นใย-เมทริกซ์ [1], [21]

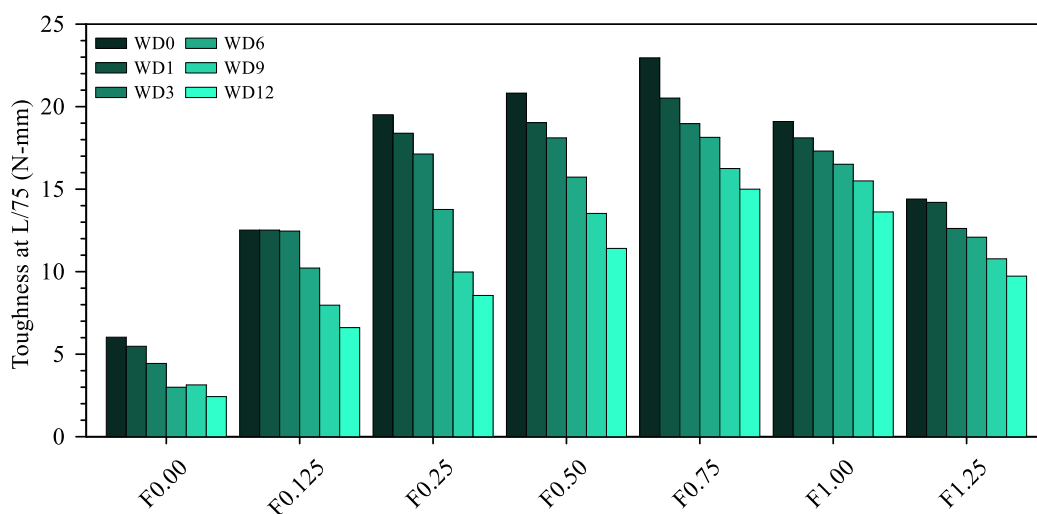
เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเป็น 0.25% ค่าความเหนียวใน WD0 เพิ่มขึ้นเป็น 19.51 N-mm และยังคงอยู่ที่ 8.56 N-mm ใน WD12 โดยมีอัตราการลดลงที่ช้ากว่ากลุ่ม F0.125 อย่างชัดเจน สะท้อนว่าโครงข่ายเส้นใยเริ่มมีความต่อเนื่องเพียงพอในการกระจายแรงดึง

ออกเป็นหลายจุด และลดความเข้มของความเค้นบริเวณปลายรอยร้าว แม้ภายใต้สภาวะเปิกสลับแห่งที่ต่อเนื่อง ซึ่งสอดคล้องกับกลไก crack bridging และการกระจายรอยร้าวย่อยที่รายงานโดย Hannawi, K., et al. [18] และ Jamsawang, P. [20]

สำหรับปริมาณเส้นใย 0.50% ค่าความเหนียวเริ่มต้นอยู่ที่ 20.82 N-mm และยังคงอยู่ที่ 11.41 N-mm ใน WD12 แสดงให้เห็นว่าปริมาณเส้นใยระดับนี้สามารถรักษาความสามารถในการดูดซับพลังงานหลังแตกร้าวได้อย่างต่อเนื่องตลอดช่วงการเสื่อมสภาพ โดยกลไกการถ่ายแรงแบบ crack bridging และ pull-out ซึ่งต้องใช้พลังงานสูงมีบทบาทสำคัญต่อการคงค่าความเหนียวภายใต้สภาวะเปิกสลับแห่ง [19]

ปริมาณเส้นใย 0.75% ให้ค่าความเหนียวสูงที่สุดในทุกจำนวนรอบ WD โดยมีค่า 22.96 N-mm ใน WD0 และยังคงสูงถึง 15.00 N-mm ใน WD12 ซึ่งสะท้อนว่าโครงข่ายเส้นใยในระดับนี้สามารถควบคุมการแตกร้าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้เกิดการแตกร้าวย่อยหลายจุดแทนการแตกร้าวหลักเพียงจุดเดียว และสามารถถ่ายแรงหลังแตกร้าวได้ต่อเนื่อง ส่งผลให้วัสดุมีความสามารถในการดูดซับพลังงานสูงและพฤติกรรมการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไป สอดคล้องกับรายงานของ [4], [7]

ในทางกลับกันการเพิ่มปริมาณเส้นใยเป็น 1.00% และ 1.25% ทำให้ค่าความเหนียวเริ่มต้นลดลงเหลือ 19.10 และ 14.40 N-mm ตามลำดับ และค่าความเหนียวใน WD12 ลดลงเหลือ 13.62 และ 9.73 N-mm ซึ่งต่ำกว่าตัวอย่างที่เสริมเส้นใยในช่วง 0.50–0.75% แนวโน้มดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าการใช้เส้นใยในปริมาณสูงเกินไปก่อให้เกิดปัญหาการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ การรวมกลุ่มของเส้นใยและการเพิ่มความพรุนภายในเมทริกซ์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายแรงหลังแตกร้าวลดลงภายใต้สภาวะเปิกสลับแห่ง ซึ่งสอดคล้องกับการอธิบายของ Bui, T.T., et al. [1] และ Ikhlasi, M., et al. [19]



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเหนียวที่ระยะแฉกตัวที่ L/75 ของหินคลุกผสมซีเมนต์และเถ้าภูเขาไฟดัดเสริมแรงด้วยเส้นใยโพลิโพรพิลีนภายใต้สภาวะเปิกสลับแห่งที่ปริมาณเส้นใยต่าง ๆ

3.3 ค่ากำลังคดคองเหลือของหินคลุกผสมซีเมนต์และเถ้าภูเขาไฟดัดเสริมแรงด้วยเส้นใยโพลิโพรพิลีนภายใต้สภาวะเปิกสลับแห่ง

ผลกระทบของสภาวะเปิกสลับแห่งต่อสมรรถนะเชิงคดคองของหินคลุกผสมซีเมนต์และเถ้าภูเขาไฟดัดเสริมแรงด้วยเส้นใยโพลิโพรพิลีนแสดงดังรูปที่ 12 โดยใช้ค่ากำลังคดคองเหลือที่ระยะแฉกตัว L/150 เป็นตัวชี้วัดหลัก เนื่องจากเป็นช่วงการเสียรูปที่วัสดุยังสามารถรับแรงคดคองหลังการแตกร้าวครั้งแรกได้ และสะท้อนประสิทธิภาพของเส้นใยในการทำหน้าที่เป็นสะพานรับแรงข้ามรอยร้าวได้โดยตรง ตามกลไกที่อธิบายไว้ในงานของ Paul, S.C., et al. [23]

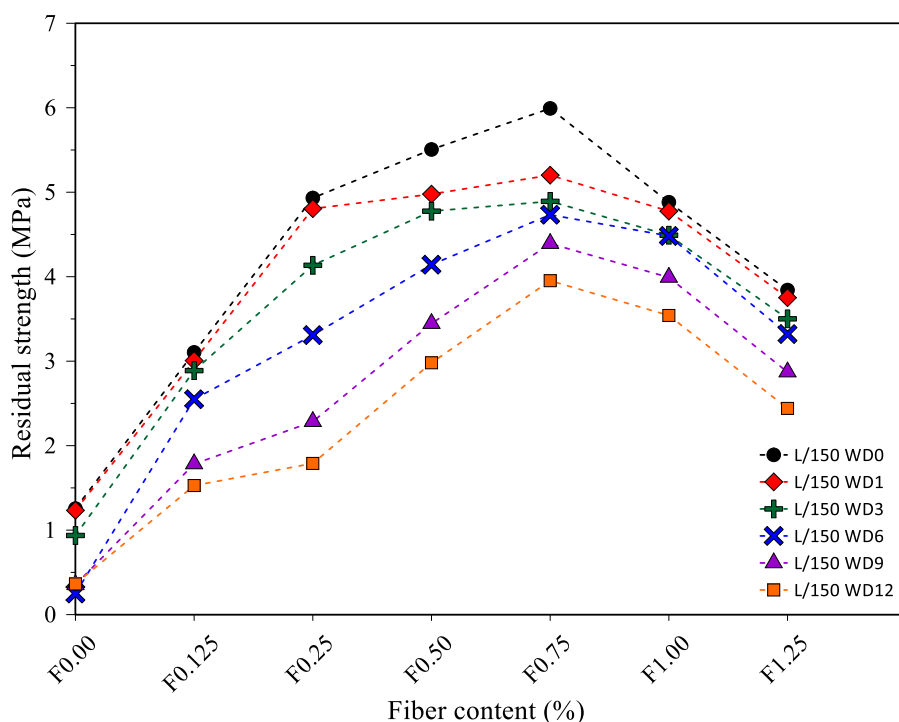
ตัวอย่างที่ไม่เสริมเส้นใย (F0.00) มีค่ากำลังดัดคงเหลือใน WD0 เท่ากับ 1.25 MPa และแทบไม่เปลี่ยนแปลงใน WD1 ก่อนจะลดลงอย่างรวดเร็วเหลือ 0.94 MPa ใน WD3 และลดลงเกือบเป็นศูนย์ใน WD6 (0.25 MPa) แสดงให้เห็นว่าวัสดุสูญเสียความสามารถในการรับแรงดัดหลังแตกร้าวเกือบทั้งหมดภายหลังผ่านสภาวะเปื่อยสลับแห้งเพียงไม่กี่รอบ แม้ใน WD9 และ WD12 ค่ากำลังดัดคงเหลือจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น 0.35–0.36 MPa แต่ยังคงอยู่ในระดับต่ำมาก พฤติกรรมดังกล่าวสะท้อนการสะสมของรอยร้าวจุลภาคจากการขยายและหดตัวของน้ำในรูพรุนของเมทริกซ์ซีเมนต์ ซึ่งเป็นกลไกหลักของการเสื่อมสภาพภายใต้สภาวะเปื่อยสลับแห้ง [24]

การเสริมเส้นใยโพลิโพรพิลีนที่ปริมาณ 0.125% (F0.125) ช่วยเพิ่มค่ากำลังดัดคงเหลืออย่างชัดเจน โดย WD0 มีค่า 3.10 MPa และ WD1 มีค่า 3.01 MPa อย่างไรก็ตาม เมื่อจำนวนรอบเปื่อยสลับแห้งเพิ่มขึ้น ค่าดังกล่าวลดลงต่อเนื่องเป็น 2.55 MPa ใน WD6 และเหลือ 1.53 MPa ใน WD12 สะท้อนว่าเส้นใยในระดับต่ำสามารถเริ่มทำหน้าที่เป็น micro-reinforcement และชะลอการลุกลามของรอยร้าวได้ แต่ยังไม่เพียงพอในการรักษาสรรณะหลังแตกร้าวในระยะยาว เมื่อแรงยึดเหนี่ยวที่รอยต่อเส้นใย-เมทริกซ์เริ่มเสื่อมลงจากการเปื่อยสลับแห้งซ้ำ [1]

เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเป็น 0.25% (F0.25) ค่ากำลังดัดคงเหลือเพิ่มขึ้นเป็น 4.93 MPa ใน WD0 และยังคงอยู่ในระดับสูงใน WD1 และ WD3 (4.81 และ 4.13 MPa) แสดงให้เห็นว่าเส้นใยมีการกระจายตัวที่เหมาะสมและสามารถสร้างเส้นทางการถ่ายแรงหลังแตกร้าวได้อย่างต่อเนื่อง แม้ใน WD12 ค่ากำลังดัดคงเหลือจะลดลงเหลือ 1.79 MPa แต่ยังคงสูงกว่ากลุ่ม F0.125 ในทุกรอบ WD สะท้อนความทนทานที่ดีกว่าของโครงข่ายเส้นใยในระดับนี้ [21]

กลุ่มที่ให้สมรรถนะดีที่สุดคือปริมาณเส้นใยระดับปานกลางถึงสูง (F0.50 และ F0.75) โดย F0.50 มีค่ากำลังดัดคงเหลือ WD0 เท่ากับ 5.51 MPa และยังคงอยู่ที่ 4.14 MPa ใน WD6 ก่อนลดลงเหลือ 2.98 MPa ใน WD12 ขณะที่ F0.75 ให้ค่ากำลังดัดคงเหลือสูงสุดในทุกจำนวนรอบ WD โดย WD0 เท่ากับ 5.99 MPa และยังคงสูงถึง 3.95 MPa ใน WD12 พฤติกรรมดังกล่าวสะท้อนว่าเส้นใยในช่วงปริมาณนี้สามารถสร้างโครงข่ายเสริมแรงที่มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเชื่อมต่อของรอยร้าวย่อย และยืดระยะการรับแรงหลังแตกร้าวออกไปได้ แม้เมทริกซ์จะเสื่อมสภาพจากสภาวะเปื่อยสลับแห้งแล้วก็ตาม [25]

ในทางตรงกันข้าม เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มสูงเกินไป (F1.00 และ F1.25) ค่ากำลังดัดคงเหลือเริ่มต้นกลับลดลง โดย F1.25 มีค่า WD0 เพียง 3.84 MPa และลดลงเหลือ 2.44 MPa ใน WD12 แนวโน้มนี้ชี้ให้เห็นถึงผลกระทบจากการกระจายตัวของเส้นใยที่ไม่สม่ำเสมอ การเกิดการจับกลุ่มของเส้นใย และการเพิ่มขึ้นของความพรุนในเมทริกซ์ ซึ่งกลายเป็นจุดอ่อนที่เร่งการเกิดและการขยายตัวของรอยร้าวภายใต้สภาวะเปื่อยสลับแห้ง [1]



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดัดคงเหลือที่ระยะ L/150 ของหินคลุกผสมซีเมนต์และถั่วลิสงเคลือบด้วยเส้นใยโพลีโพรพิลีนภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้งที่ปริมาณเส้นใยต่าง ๆ

4. สรุปผลการทดสอบ

4.1 สภาวะเปียกสลับแห้ง (WD 0–12 รอบ) ส่งผลให้สมรรถนะเชิงคดของวัสดุผสมหินคลุกซีเมนต์-ถั่วลิสงเคลือบเสื่อมลงอย่างต่อเนื่อง ทั้งในด้านกำลังดัดสูงสุด กำลังดัดคงเหลือ และค่าความเหนียว เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นซ้ำ ๆ ทำให้เกิดการหดตัวและขยายตัวภายในเนื้อวัสดุ ส่งผลให้เกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กสะสม (Microcracks) และลดประสิทธิภาพการยึดเกาะระหว่างผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาซีเมนต์กับมวลรวม รวมทั้งลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยกับเนื้อวัสดุ จึงทำให้ความสามารถในการรับและถ่ายโอนแรงหลังการแตกร้าวลดลง

4.2 ตัวอย่างที่ไม่เสริมเส้นใย (F0.00) แสดงพฤติกรรมเปราะชัดเจน โดยกำลังคดและค่าความเหนียวลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อจำนวนรอบ WD เพิ่มขึ้น และแทบไม่สามารถรับแรงหลังแตกร้าวได้

4.3 การเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีนช่วยชะลอการเสื่อมของสมรรถนะเชิงคด โดยเส้นใยทำหน้าที่เป็นด้ามสะพานรับแรงข้ามรอยร้าว (Crack bridging) และช่วยเพิ่มการดูดซับพลังงานหลังแตกร้าว

4.4 ปริมาณเส้นใยต่ำ (F0.00–0.125%) แม้ช่วยเพิ่มกำลังดัดคงเหลือและความเหนียวเมื่อเทียบกับ F0.00 แต่ยังไม่เพียงพอในการรักษาสมรรถนะในระยะยาวภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้งซ้ำ

4.5 ปริมาณเส้นใยช่วง 0.25–0.50% ให้สมรรถนะหลังแตกร้าวดีขึ้นอย่างชัดเจน โดยกำลังดัดคงเหลือและค่าความเหนียวยังคงอยู่ในระดับสูงกว่าเส้นใยปริมาณต่ำในทุกจำนวนรอบ WD

4.6 ปริมาณเส้นใย 0.75% ให้ผลดีที่สุด โดยให้กำลังคดเริ่มต้นสูง ค่ากำลังดัดคงเหลือและค่าความเหนียวสูงสุดหลังผ่าน 12 รอบ WD พร้อมพฤติกรรมการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไปและการเกิดรอยร้าวหลายจุด

4.7 การเพิ่มปริมาณเส้นใยมากเกินไป (F1.00-1.25%) ส่งผลเชิงลบต่อสมรรถนะ เนื่องจากการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ การรวมกลุ่มของเส้นใย และการเพิ่มความพรุนในเมทริกซ์ ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายแรงหลังแตกร้าลดลง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศ. ดร.พิทยา แจ่มสว่าง สำหรับคำแนะนำและข้อเสนอแนะทางวิชาการอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งตลอดการดำเนินงานวิจัยฉบับนี้ รวมถึงขอขอบคุณนักวิจัยในสาขาวิศวกรรมเทคนิคธรณี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้การสนับสนุนด้านวิชาการ เครื่องมือ และบรรยากาศการทำวิจัย ซึ่งมีส่วนสำคัญทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Bui, H., Levacher, D., Boutouil, M. and Sebaibi, N. *Effects of wetting and drying cycles on microstructure change and mechanical properties of coconut fibre-reinforced mortar*. Journal of Composites Science, 2022, 6(4), 102. Available from: <https://doi.org/10.3390/jcs6040102>
- [2] Rochanavibhata, U., Lhajai, S., Jongpradist, P., Makaratat, N., Jing, G. and Jamsawang, P. *Sustainable use of laterite replaced with bottom ash as road construction materials*. International Journal of Sustainable Engineering, 2024, 17(1), pp. 1–18. Available from: <https://doi.org/10.1080/19397038.2024.2394547>
- [3] Chompoorat, T., Likitlersuang, S., Buathong, P., Jongpradist, P. and Jamsawang, P. *Flexural performance and microstructural characterization of cement-treated sand reinforced with palm fiber*. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 25, pp. 1570–1584. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.036>
- [4] Jamsawang, P., Voottipruex, P. and Horpibulsuk, S. *Flexural strength characteristics of compacted cement-polypropylene fiber sand*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(9). Available from: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001205](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001205)
- [5] Karahan, O. and AtiŞ, C.D. *The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete*. Materials and Design, 2011, 32, pp. 1044–1049. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.07.011>
- [6] Lakshmi, A., Pandit, P., Bhagwat, Y. and Nayak, G. *A review on efficiency of polypropylene fiber-reinforced concrete*. Lecture Notes in Civil Engineering, 2022. Available from: https://doi.org/10.1007/978-981-16-2876-9_50
- [7] Chindaprasit, P., Jamsawang, P., Sukontasukkul, P., Jongpradist, P. and Likitlersuang, S. *Comparative mechanical performances of cement-treated sand reinforced with fiber for road and pavement applications*. Transportation Geotechnics, 2021, 30, 100626. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100626>
- [8] กรมทางหลวง. ทล.-ท. 205: 2532. *มาตรฐานวิธีการทดลองการวิเคราะห์ขนาดเม็ดดิน*. กรุงเทพฯ: กรมทางหลวง, 2532.
- [9] กรมทางหลวง. ทล.-ท. 202: 2516. *มาตรฐานการหาค่าความสึกหรอของหินโดยใช้เครื่องมือ Los Angeles abrasion*. กรุงเทพฯ: กรมทางหลวง, 2516.
- [10] กรมทางหลวง. ทล.-ท. 213: 2516. *มาตรฐานการทดสอบความคงทนของวัสดุ (Soundness)*. กรุงเทพฯ: กรมทางหลวง, 2516.
- [11] กรมทางหลวง. ทล.-ท. 102-103: 2516. *มาตรฐานการหาขีดจำกัดความชื้นเหลวของดิน*. กรุงเทพฯ: กรมทางหลวง, 2516.
- [12] กรมทางหลวง. ทล.-ท. 109: 2516. *มาตรฐานการหาค่ากำลังรับแรงแบกทานของดิน (CBR)*. กรุงเทพฯ: กรมทางหลวง, 2516.
- [13] กรมทางหลวง. ทล.-ท. 207: 2516. *มาตรฐานการหาค่าการดูดซึมน้ำ*. กรุงเทพฯ: กรมทางหลวง, 2516.
- [14] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. มอก. 2594: 2556. *มาตรฐานปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก*. กรุงเทพฯ: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2556.
- [15] กรมทางหลวง. ทล.-ท. 108: 2517. *มาตรฐานการทดสอบหาความแน่นของดินบดด้วยวิธีสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Test)*. กรุงเทพฯ: กรมทางหลวง, 2517.

- [16] ASTM International. ASTM C1609: 2024. *Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2024.
- [17] ASTM International. ASTM D559: 2015. *Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2015.
- [18] Hannawi, K., Bian, H., Prince-Agbodjan, W. and Raghavan, B. *Effect of different types of fibers on the microstructure and the mechanical behavior of ultra-high performance fiber-reinforced concretes*. Composites Part B: Engineering, 2016, 86, pp. 214–220. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.09.059>
- [19] Ikhlesi, Z., Kiamahalleh, M.V., Gholampour, A., Shahmirzadi, M.R. and Ngo, T.D. *Impact of wetting and drying cycles on flexural characteristics of wastepaper fiber-reinforced concrete containing metakaolin*. Innovative Infrastructure Solutions, 2024, 9, 467. Available from: <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01776-z>
- [20] Jamsawang, P., Suansomjeen, T., Sukontasukkul, P., Jongpradist, P. and Bergado, D.T. *Comparative flexural performance of compacted cement-fiber-sand*. Geotextiles and Geomembranes, 2018, 46, pp. 414–425. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2018.03.008>
- [21] Yoosuk, P., Suksiripattanapong, C., Goda, H., Phoo-ngernkham, T., Thumrongvut, J., Sukontasukkul, P. and Chindaprasirt, P. *Performance of polypropylene fiber-reinforced cellular lightweight fly ash geopolymer mortar under wet and dry cycles*. Case Studies in Construction Materials, 2024, 20, e03233. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03233>
- [22] Mohr, B.J., Nanko, H. and Kurtis, K.E. *Durability of kraft pulp fiber-cement composites to wet/dry cycling*. Cement and Concrete Composites, 2005, 27, pp. 435–448. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.07.006>
- [23] Paul, S., Islam, M.S. and Elahi, T.E. *Comparative effectiveness of fibers in enhancing engineering properties of earth as a building material: A review*. Construction and Building Materials, 2022, 332, 127366. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127366>
- [24] Pedreño-Rojas, M.A., Morales-Conde, M.J., Rubio-de-Hita, P. and Pérez-Gálvez, F. *Impact of wetting-drying cycles on the mechanical properties and microstructure of wood waste-gypsum composites*. Materials, 2019, 12(11), 1829. Available from: <https://doi.org/10.3390/ma12111829>
- [25] Ghone, M.O., Long, G., Yang, K., Ma, X. and Islam, N. *Toughness improvement of low strength ceramsite lightweight concrete by polypropylene fiber and recycled rubber particle*. Construction and Building Materials, 2024, 422, 135716. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135716>