



คุณสมบัติทางวิศวกรรมของเสากรวดซีเมนต์ใ้เยื่อคาลิปต์สเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก
ENGINEERING PROPERTIES OF CEMENT-EUCALYPTUS ASH GRAVEL COLUMN
REINFORCED WITH PLASTIC BOTTLE FIBERS

ธนกฤต ภูประดิษฐ์^{1*} และพิทยา แจ่มสว่าง¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

*Corresponding author, E-mail: s6601081811033@email.kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

การก่อสร้างคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อนมักประสบปัญหาการทรุดตัวและเสถียรภาพต่ำ เนื่องจากดินมีค่ากำลังเฉือนต่ำและการยุบตัวสูง การใช้เสารองรับ เช่น เสาคอนกรีต เสาดินซีเมนต์ และเสากรวด สามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพดินได้ อย่างไรก็ตาม เสาเหล่านี้มีความแข็งแรงสูงเกินความจำเป็นสำหรับงานคันทางดิน ส่งผลให้มีต้นทุนก่อสร้างที่มากและสิ้นเปลืองทรัพยากร ดังนั้น การศึกษานี้จึงนำเสนอเสาแบบยึดหยุ่นร่วมกับเสาแบบแข็งกลายเป็นเสาแบบกึ่งแข็ง ที่มีความสามารถและคุณสมบัติขึ้นอยู่กับการศึกษาวัสดุที่นำมาใช้ เรียกว่า “เสากรวดซีเมนต์ใ้เยื่อคาลิปต์สเสริมแรงด้วยเส้นใยขวดพลาสติก” เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมเพื่อนำไปใช้ในการก่อสร้าง ควบคู่กับการลดต้นทุนทรัพยากรและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยใ้เยื่อคาลิปต์สซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการเผาชีวมวลของโรงไฟฟ้าพลังงานชีวมวล ที่มีองค์ประกอบทางเคมีเหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุพอลิเมอร์ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการยึดประสานของวัสดุ ขณะเดียวกันได้นำขวดพลาสติกที่จัดอยู่ในวัสดุเหลือทิ้งประเภทขยะพลาสติกรีไซเคิลมาแปรรูปเป็นเส้นใยเพื่อปรับปรุงและเสริมประสิทธิภาพของวัสดุ อีกทั้งยังเป็นการลดปริมาณขยะต่อสิ่งแวดล้อม วัสดุที่ใช้ประกอบด้วยมวลรวมหยาบขนาด 4.76–9.51 และ 9.51–19.00 มิลลิเมตร ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกในปริมาณ 340 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.32 โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยใ้เยื่อคาลิปต์สในอัตราส่วนร้อยละ 5, 10, 15, 20 และ 25 โดยน้ำหนัก และใช้เส้นใยจากขวดพลาสติกขนาดความกว้าง 2 มิลลิเมตร ความยาว 70 มิลลิเมตร ในปริมาณร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยปริมาตร ทำการทดสอบความพูน กำลังรับแรงอัด กำลังดึงแบบผ่าซีก และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ที่อายุการบ่ม 28 และ 90 วัน ผลการศึกษาพบว่า ขนาดมวลรวม ปริมาณใ้เยื่อคาลิปต์ส และปริมาณเส้นใยพลาสติก ล้วนส่งผลต่อกำลังรับแรงและความสามารถในการระบายน้ำของเสา โดยมวลรวมแบบละเอียดให้กำลังรับแรงสูงสุดจากการจัดเรียงตัวที่ดี ขณะที่มวลรวมขนาดเดียวให้ความพูนและการไหลซึมผ่านของน้ำที่ต่ำกว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยใ้เยื่อคาลิปต์สที่ร้อยละ 10 ส่งผลให้มีกำลังรับแรงสูงสุด ความพูนและสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านต่ำสุด ในส่วนของเส้นใยพลาสติกที่ปริมาณร้อยละ 1.0 ส่งผลให้มีกำลังรับแรงสูงสุด ความพูนและสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านต่ำสุด ผลการวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบสัดส่วนผสมของเสากรวดซีเมนต์ใ้เยื่อคาลิปต์สเสริมแรงด้วยเส้นใยขวดพลาสติกให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์การใช้งาน ไม่ว่าจะเน้นด้านกำลังรับแรงหรือด้านการระบายน้ำ อันเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: เสากึ่งแข็ง; ใ้เยื่อคาลิปต์ส; เส้นใยขวดพลาสติก; ความพูน; กำลังรับแรงอัด; สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ

ABSTRACT

Construction of embankments on soft clay foundations often encounters excessive settlement and low stability due to the low shear strength and high compressibility of the soil. Ground improvement techniques using columns such as concrete columns, soil-cement columns, and gravel columns are commonly adopted to enhance subsoil performance. However, these columns generally provide strength higher than required for embankment applications, resulting in increased construction costs and resource consumption. This study proposes the development of a semi-rigid column by integrating the characteristics of flexible and rigid columns, namely a eucalyptus ash-cemented gravel column reinforced with plastic bottle fibers. The objective is to investigate its engineering properties for construction applications while simultaneously reducing material costs and environmental impacts. Ordinary Portland cement was partially replaced with eucalyptus ash, a by-product from biomass power plants with suitable chemical composition for pozzolanic reactions, to enhance bonding performance and reduce cement consumption. In addition, recycled plastic bottles were processed into fibers to reinforce the column material, aiming to improve crack resistance and mechanical performance while mitigating plastic waste. The materials consisted of coarse aggregates with sizes of 4.76–9.51 mm and 9.51–19.00 mm, hydraulic cement content of 340 kg/m³, and a water-cement ratio of 0.32. Cement was replaced with eucalyptus ash at 5, 10, 15, 20, and 25% by weight. Recycled plastic fibers with a width of 2 mm and length of 70 mm were incorporated at 0.5, 1.0, 1.5, and 2.0% by volume. Tests were conducted to determine porosity, compressive strength, splitting tensile strength, and coefficient of permeability at curing ages of 28 and 90 days. The results showed that aggregate size, eucalyptus ash content, and plastic fiber content all affected the strength and drainage capacity of the columns. Well-graded aggregate provided the highest strength due to better particle arrangement, while single-sized aggregate provided better porosity and water permeability. Replacing cement with 10% eucalyptus ash resulted in the highest strength, along with the lowest porosity and coefficient of permeability. Similarly, a plastic fiber content of 1.0% resulted in the highest strength, along with the lowest porosity and coefficient of permeability. These findings can serve as a guideline for designing the mix proportions of eucalyptus ash-cemented gravel column reinforced with plastic bottle fibers to suit specific application objectives—whether emphasizing strength or drainage performance—thereby promoting efficient resource utilization and reducing environmental impact.

KEYWORDS: Semi-rigid column; Eucalyptus ash; Plastic bottle fibers; Porosity; Compressive strength; Coefficient of permeability

1. บทนำ

ดินเหนียวอ่อนเป็นวัสดุทางธรณี โดยถือว่าเป็นดินที่มีปัญหาเนื่องจากมีกำลังเฉือนต่ำ และมีการยุบอัดตัวสูง [1, 2, 3] การก่อสร้างคันทางบนดินเหนียวอ่อนมักพบปัญหาจากแรงดันดินด้านข้างที่มาก และการทรุดตัว และการเคลื่อนตัวด้านข้างสูง รวมถึงเสถียรภาพต่ำนำไปสู่การวิบัติ ปัญหาเหล่านี้ทำให้งานก่อสร้างล่าช้า และเสียค่าใช้จ่ายสูงสำหรับซ่อมแซม เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินได้ถูกนำมาใช้อย่างต่อเนื่องเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว อาทิเช่น เสาดิน เสาทาย เสาซีเมนต์ผสมลิก [4, 5, 6] ซึ่งเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพเหล่านี้ล้วนแต่มีข้อดี และข้อเสียแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับข้อจำกัดเกี่ยวกับลักษณะทางธรณีเทคนิคของ

ชั้นดิน ข้อจำกัดด้านระยะเวลาในการก่อสร้าง หรือด้านการประมาณต้นทุนทั้งหมด ในส่วนของเสารองรับคันทางดิน โดยทั่วไปเสาที่ใช้ในการรองรับคันทางดินที่สร้างบนฐานรากดินเหนียวอ่อน อาทิเช่น เสาคอนกรีต เสาดินซีเมนต์ และเสากรวด ซึ่งเสาคอนกรีตมีความแข็งแรงสูง ลดการทรุดตัวได้ดี [7-12] และสามารถดกผ่านเข้าไปยังชั้นดินแข็ง หรือชั้นดินเหนียวแข็งเป็นผลทำให้สามารถรับกำลังได้มากกว่าเสาดินซีเมนต์ และเสากรวด แต่เนื่องด้วยจุดประสงค์ในการใช้งานที่เกินความจำเป็นจึงเกิดการสิ้นเปลืองทรัพยากร ดังนั้น เสาคอนกรีตจึงไม่เหมาะสมต่อการใช้งานในการรองรับคันทางดิน

ปัจจุบัน ประเทศไทยมีโรงไฟฟ้าพลังงานชีวมวลจำนวนมาก ซึ่งผลพลอยได้จากการใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง คือ เถ้าชีวมวล เถ้าเหล่านี้มักถูกกำจัดโดยการฝังกลบ ซึ่งต้องใช้พื้นที่จำนวนมาก และมีค่าใช้จ่ายสูงในการจัดการ แต่ปัจจุบันการนำเถ้าชีวมวลไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่น ๆ มีจำนวนมากขึ้น นักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาในการใช้ประโยชน์ในด้านงานวิศวกรรมโยธา [13, 14] การศึกษาข้างต้นทำให้เห็นว่าเถ้าชีวมวลมีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุปอชโซลานิกแทนที่ปูนซีเมนต์ มีส่วนในการทำให้คุณสมบัติของวัสดุดีขึ้น นอกจากนี้ยังมีส่วนในการช่วยลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ ลดต้นทุน และลดปัญหาในการฝังกลบของเถ้าชีวมวลอีกด้วย

ในขณะเดียวกัน ปัญหาปริมาณขยะมูลฝอยที่เพิ่มมากขึ้นทุกปี เนื่องมาจากอุตสาหกรรมการผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติกขวดพลาสติกขยายตัวอย่างรวดเร็ว เพื่อลดปัญหาที่กล่าวมา โดยการนำวัสดุเหลือทิ้งพลาสติกมาใช้งานวิศวกรรมโยธาเป็นวิธีการแก้ไขปัญหามูลขยะพลาสติกที่เพิ่มขึ้น นักวิจัยหลายท่านได้ตรวจสอบศักยภาพในการปรับปรุงคอนกรีตโดยการเพิ่มวัสดุเส้นใยชนิดต่างๆ [15, 16] เนื่องจากพลาสติกโพลีเอทิลีน (PE) มีการใช้งานมากที่สุดในการผลิตขวดน้ำ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ทนทานและยืดหยุ่น ทำให้เหมาะสำหรับการนำมาใช้งานในการเพิ่มวัสดุเป็นเส้นใยขวดพลาสติก และเป็นทางเลือกหนึ่งในการลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม ลดปริมาณขยะได้อีกด้วย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาหาปริมาณเถ้าชีวมวลปอชโซลานิกและเส้นใยขวดพลาสติกที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการก่อสร้างเสากรวดใช้เถ้าชีวมวลปอชโซลานิกเสริมแรงด้วยเส้นใยขวดพลาสติก โดยพิจารณาจากการทดสอบความพูน การรับกำลัง การรับกำลังดึงแบบผ่าซีก สัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำ และเพื่อศึกษาพฤติกรรม ของเสากรวดใช้เถ้าชีวมวลปอชโซลานิกเสริมแรงด้วยเส้นใยขวดพลาสติก

ผลการศึกษาที่ได้คาดว่าจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการเลือกใช้วัสดุทดแทนที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในการก่อสร้างเสากรวดใช้เถ้าชีวมวลปอชโซลานิกเสริมแรงด้วยเส้นใยขวดพลาสติกเพื่อใช้งานวิศวกรรมและงานโครงสร้างพื้นฐานอื่นๆ ของประเทศ และเป็นการลดปัญหาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

2. วัสดุและวิธีการทดสอบ

2.1. วัสดุ

ในงานวิจัยนี้วัสดุพื้นฐานที่ใช้ในการทดสอบจะมีทั้งหมด 4 อย่าง ได้แก่ มวลรวมหยาบ โดยในการทดสอบนี้เป็นหินกรวดที่ใช้ในการก่อสร้างทั่วไปมีคุณสมบัติดังตารางที่ 1 โดยมีขนาดที่ 9.51 – 19.00 มิลลิเมตร ใช้สัญลักษณ์ LG และ ขนาด 4.76 - 9.51 มิลลิเมตร ใช้สัญลักษณ์ SG นอกจากนี้ยังมีการนำมวลรวมหยาบทั้งสองขนาดมาผสมกันในอัตราส่วน 50:50 โดยน้ำหนัก โดยใช้สัญลักษณ์ MG เพื่อศึกษาผลของการกระจายขนาดผลที่มีต่อคุณสมบัติของวัสดุ กำหนดน้ำหนักและช่องว่าง ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C29 [17] ค่าความถ่วงจำเพาะ และการดูดซึม ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C127 [18] ค่าความต้านทานต่อการสึกกร่อน ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C131 [19] ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาเป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกตามมาตรฐาน

ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) 2594 ของกระทรวงอุตสาหกรรม ขี้เถ้าจากโรงไฟฟ้าที่ใช้มาจากการเผาชีวมวลในโรงงานกระดาษมีคุณสมบัติดังตารางที่ 2 โดยนำมาร้อนผ่านตะแกรงขนาด 425 ไมครอน เพื่อแยกเศษวัสดุที่เจือปนอยู่ ก่อนนำมาใช้และมีการใช้วัสดุเส้นใย โดยวัสดุเส้นใยที่ใช้เป็นเส้นใยจากขวดพลาสติก ชนิดโพลีเอทิลีน (PE) ที่เหลือใช้มีคุณสมบัติดังตารางที่ 3 นำมาตัดเป็นเส้นที่ขนาดความกว้าง 2 มิลลิเมตร ความยาว 70 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 วัสดุในการทดสอบ

ตารางที่ 1 คุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของมวลรวมหยาบ

คุณสมบัติ	มวลรวมหยาบ
ความหนาแน่นรวม (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)	1555
ช่องว่างระหว่างมวลรวม (%)	42.16
ความถ่วงจำเพาะ	2.73
การดูดซึมน้ำ (%)	0.43
ค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการทดสอบการขัดสีลออสแอนเจิลิส (%)	22.71

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก และขี้เถ้าจากโรงไฟฟ้า

องค์ประกอบของธาตุ	ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (%)	ขี้เถ้าจากโรงไฟฟ้า (%)
SiO ₂	13.93	25.5
Al ₂ O ₃	3.16	4.53
Fe ₂ O ₃	2.79	4.31
CaO	74.36	49.75
MgO	0.4	3.24
SO ₃	4.49	3.69
K ₂ O	0.61	8.44
Na ₂ O + Ti ₂ O + other	0.26	0.5

ตารางที่ 3 คุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของเส้นใยขวดพลาสติกกรีไซเคิล

คุณสมบัติ	เส้นใยจากขวดพลาสติก
กำลังรับแรงดึง (เมกะปาสกาล)	20
ค่าการยืดตัว (%)	7
ความถ่วงจำเพาะ	1.32
หน้าตัด	สี่เหลี่ยมผืนผ้า
ความยาว (มิลลิเมตร)	70
ความกว้าง (มิลลิเมตร)	2
อัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง	35
การดูดซึมน้ำ (%)	0.48

2.2. วิธีการทดสอบ

2.2.1. การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ในการเตรียมส่วนผสมสำหรับทำตัวอย่างในแต่ละครั้งจะเตรียมอย่างเพียงพอสำหรับหนึ่งตัวอย่างเพื่อเป็นการควบคุมคุณภาพตัวอย่าง โดยการเตรียมส่วนผสมดังตารางที่ 4 ขั้นแรกจะนำกรวด ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก จีเถ้าภูเขาไฟปัส และเส้นใยขวดพลาสติกผสมเข้าด้วยกัน จากนั้นทำการเติมน้ำ และผสมให้เข้ากันอีกครั้ง เพื่อให้เกิดความสม่ำเสมอของตัวอย่างทดสอบ ซึ่งสามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า จากนั้นนำแต่ละส่วนผสมที่ได้เตรียมไว้บรรจุลงในแบบหล่อตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ความสูง 200 มิลลิเมตร หลังจากเสร็จสิ้นการเตรียมตัวอย่างจะทำการหุ้มด้วยพลาสติกใสทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นเมื่อครบกำหนดเวลาถอดตัวอย่างออกจากแบบ และทำการบันทึกค่าน้ำหนัก และค่าขนาดของตัวอย่าง ก่อนที่จะนำไปบ่มด้วยการหุ้มด้วยพลาสติกใสตามอายุการบ่มที่ 28 และ 90 วัน เมื่อครบกำหนดอายุการบ่มจะนำตัวอย่างมาทำการทดสอบแต่ละกระบวนการที่กำหนดไว้

ตารางที่ 4 ตัวอย่างสัดส่วนของการผสม

มวลรวมหยาบ		จีเถ้าภูเขาไฟปัส (%)	เส้นใยจากขวดพลาสติก (%)	ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน
SG (%)	LG (%)				
		0		340	
		5		323	
		10		306	
100	0	15	0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0	289	0.32
		20		272	
		25		255	

0	100	0	0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0	340	0.32
		5		323	
		10		306	
		15		289	
		20		272	
		25		255	
50	50	0	0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0	340	0.32
		5		323	
		10		306	
		15		289	
		20		272	
		25		255	

2.2.2. ขั้นตอนการทดลอง

2.2.2.1 การทดสอบความพรุน (Porosity Test) ทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM C1754/ C1754M [20] เพื่อหาปริมาณช่องว่างของคอนกรีตพรุน โดยค่าความพรุนถูกคำนวณโดยค่าน้ำหนักของตัวอย่างหลังจากแช่ในน้ำอย่างน้อย 30 นาที และค่าน้ำหนักของตัวอย่างหลังจากการทำให้แห้งด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง

2.2.2.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive strength Test) ทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM C39/C39M [21] สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอก ซึ่งในทางปฏิบัติผิวด้านบน และด้านล่างของตัวอย่างมักจะ ไม่เรียบ ดังนั้น ก่อนการทดสอบจึงใช้ใบมีดเคลือบปิดที่หัวและท้ายของตัวอย่างให้เรียบตามมาตรฐาน ASTM C617/C617M [22] จากนั้นทำการทดสอบตัวอย่างด้วยเครื่องทดสอบแบบไฮดรอลิกที่อัตราความเค้น 0.25 ± 0.05 เมกะปาสกาลต่อวินาที จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ

2.2.2.3 การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (Splitting tensile strength Test) ทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM C496/C496M [23] สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตรูปทรงกระบอก ทำการทดสอบตัวอย่างด้วยเครื่องทดสอบแบบไฮดรอลิกที่อัตราคงที่ในช่วง 0.7 - 1.4 เมกะปาสกาลต่อวินาที จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ

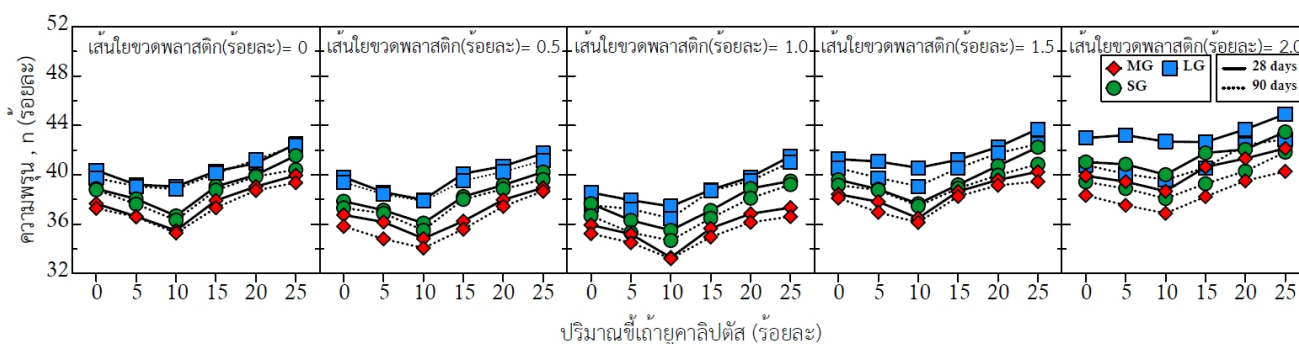
2.2.2.4 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่าน (Permeability coefficient Test) ทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM D5084 [24] สำหรับการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำ โดยได้นำวิธีการทดสอบมาปรับใช้เพื่อใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำในเสากรวดซีเมนต์ยูคาลิปตัสซีเมนต์เสริมแรงด้วยเส้นใยพลาสติกรีไซเคิล

3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

3.1. การทดสอบความพรุน

ผลการศึกษาความพรุนของเสากรวดซีเมนต์ยูคาลิปตัสซีเมนต์เสริมกำลังด้วยเส้นใยพลาสติกรีไซเคิล พบว่าค่าความพรุนในช่วง 33.20–44.92% โดยผลจากขนาดมวลรวม ปริมาณซีเมนต์ยูคาลิปตัส ปริมาณเส้นใย และอายุการบ่ม ล้วนมีผลต่อความพรุน ด้านขนาด

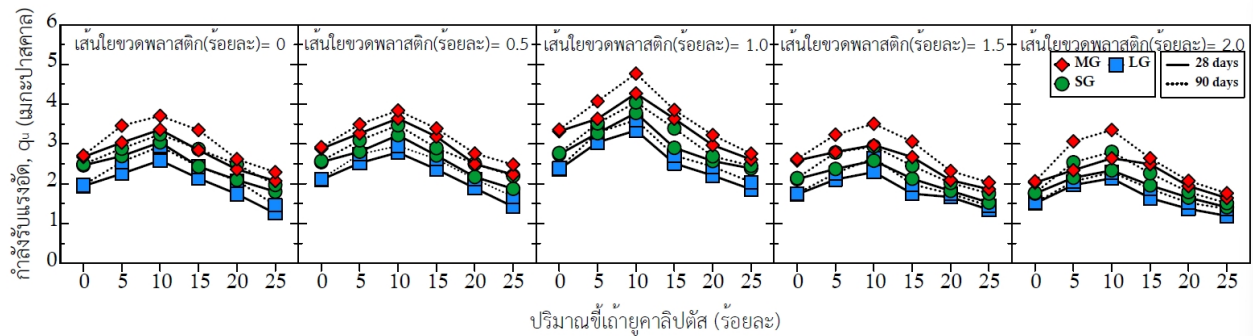
มวลรวม ตัวอย่าง MG (SG 50 : LG 50) ให้ค่าความพูนต่ำที่สุด เนื่องจากการจัดเรียงตัวและความอัดแน่นของอนุภาคดีที่สุด ขณะที่ LG ให้ค่าความพูนสูงที่สุด และ SG มีค่าอยู่ระหว่างกลาง ตัวอย่างที่อายุบ่ม 28 วัน พบว่าความพูนของ MG, SG และ LG ที่ไม่มีซีเมนต์และไม่มีเส้นใย เท่ากับร้อยละ 37.66, 38.87 และ 40.36 ตามลำดับ ในส่วนของการแทนที่ซีเมนต์ด้วยซีเมนต์และวัสดุเติมเต็ม ช่วยลดช่องว่างภายในโครงสร้าง [1, 25, 26] โดยอัตราการแทนที่ซีเมนต์ด้วยซีเมนต์และวัสดุเติมเต็มที่ร้อยละ 10 ส่งผลให้มีความพูนต่ำที่สุด โดยที่อายุบ่ม 28 วัน ตัวอย่าง MG ที่ซีเมนต์และวัสดุเติมเต็มที่ร้อยละ 10 และไม่มีเส้นใย มีความพูนลดลงเหลือร้อยละ 35.48 ด้านอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้นจาก 28 เป็น 90 วัน ส่งผลทำให้ค่าความพูนลดลงเล็กน้อย อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่ดำเนินต่อเนื่องในระยะยาว ที่อายุบ่ม 90 วัน ตัวอย่าง MG ที่ซีเมนต์และวัสดุเติมเต็มที่ร้อยละ 10 และไม่มีเส้นใย มีความพูนอยู่ที่ร้อยละ 35.28 สำหรับเส้นใยขวดพลาสติก พบว่าการเติมเส้นใยในปริมาณที่เหมาะสมช่วยลดความพูนภายในของวัสดุได้ [27] โดยที่ปริมาณเส้นใยร้อยละ 1.0



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความพูนต่อปริมาณซีเมนต์และเส้นใยที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 และ 90 วัน

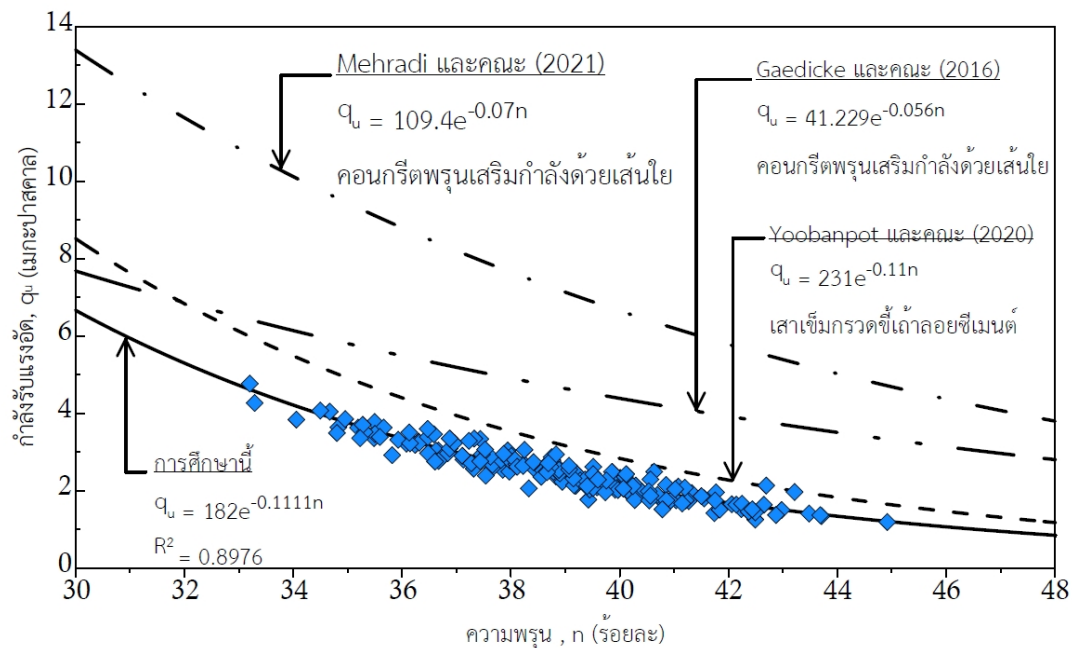
3.2. การทดสอบกำลังรับแรงอัด

ผลการศึกษากำลังรับแรงอัดของเสากระดกซีเมนต์และวัสดุเติมเต็มเสริมกำลังด้วยเส้นใยขวดพลาสติก พบว่ามีค่ากำลังอยู่ในช่วง 1.19–4.77 เมกะปาสกาล โดยผลจากขนาดมวลรวม ปริมาณซีเมนต์ ปริมาณเส้นใย และอายุการบ่ม มีผลต่อกำลังรับแรงอัดอย่างมีนัยสำคัญ ด้านขนาดมวลรวม ตัวอย่าง MG (SG 50 : LG 50) ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่า SG และ LG อย่างชัดเจน เนื่องจากการจัดเรียงตัวและความอัดแน่นของอนุภาคดีที่สุด [28] ตัวอย่างที่อายุบ่ม 28 วัน พบว่ากำลังรับแรงอัดของ MG, SG และ LG ที่ไม่มีซีเมนต์และไม่มีเส้นใย เท่ากับ 2.67, 2.46 และ 1.94 เมกะปาสกาล ตามลำดับ ในส่วนของการแทนที่ซีเมนต์ด้วยซีเมนต์และวัสดุเติมเต็ม ช่วยลดช่องว่างภายในโครงสร้าง [25, 26, 29] โดยปริมาณซีเมนต์และวัสดุเติมเต็มที่ร้อยละ 10 ส่งผลให้มีความกำลังรับแรงอัดสูงที่สุด ที่อายุบ่ม 28 วัน ตัวอย่าง MG ที่ซีเมนต์และวัสดุเติมเต็มที่ร้อยละ 10 และไม่มีเส้นใย มีกำลังรับแรงอัดอยู่ที่ 3.36 เมกะปาสกาล นอกจากนี้ ยังพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นจาก 28 เป็น 90 วัน อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่ดำเนินต่อเนื่องในระยะยาว ที่อายุบ่ม 90 วัน ตัวอย่าง MG ที่ซีเมนต์และวัสดุเติมเต็มที่ร้อยละ 10 และไม่มีเส้นใย มีกำลังรับแรงอัดอยู่ที่ 3.71 เมกะปาสกาล สำหรับเส้นใยขวดพลาสติก พบว่าการเติมเส้นใยในปริมาณที่เหมาะสมส่งผลทำให้กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น [15, 27] โดยที่ปริมาณเส้นใยร้อยละ 1.0 ส่งผลให้มีความกำลังรับแรงอัดสูงที่สุด โดยที่อายุบ่ม 28 และ 90 วัน ตัวอย่าง MG ที่ซีเมนต์และวัสดุเติมเต็มที่ร้อยละ 10 และเส้นใยร้อยละ 1.0 มีค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ที่ 4.27 และ 4.77 เมกะปาสกาล ตามลำดับ แสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดต่อปริมาณซีเมนต์แคลิฟอเนีย และเส้นใยที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 และ 90 วัน

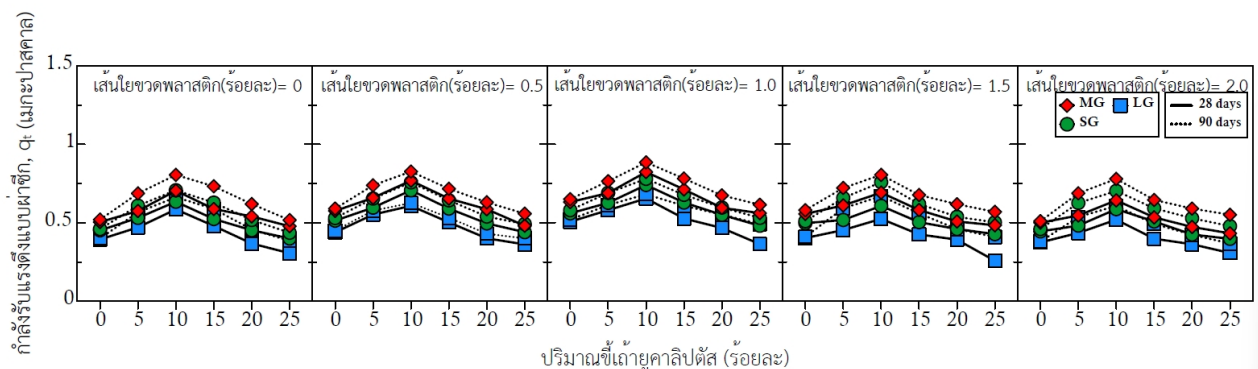
จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและกำลังรับแรงอัดของเสากรวดซีเมนต์แคลิฟอเนียที่เสริมกำลังด้วยเส้นใยพลาสติก โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าความพรุนและค่ากำลังรับแรงอัดจากการศึกษานี้สามารถแสดงได้อยู่ในรูปแบบระบบสมการเอกซ์โพเนนเชียล และได้ทำการเปรียบเทียบกับงานของ Yoobanpot, N., และคณะ [26], Gaedicke, C., และคณะ [30], Mehrabi, P., และคณะ [31] พบว่ามีแนวโน้มทิศทางที่สอดคล้องกัน โดยความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและกำลังรับแรงอัดมีความแปรผันแบบผกผันกัน ซึ่งเกิดจากช่องว่างความพรุนลดลงอันเนื่องมาจากผลของขนาดมวลรวม ซีเมนต์แคลิฟอเนีย และเส้นใย ทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงมากขึ้น ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้น แสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและกำลังรับแรงอัด

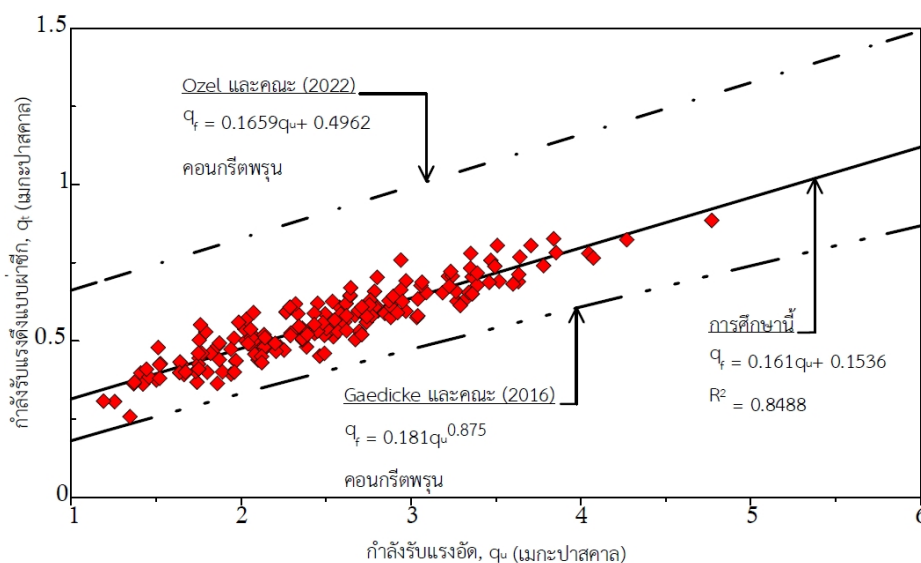
3.3. การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก

ผลการศึกษากำลังรับแรงดึงของเสากรวดซีเมนต์เสี้ยนใยพลาสติกเสริมกำลังด้วยเส้นใยขวดพลาสติก พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 0.26-0.88 เมกะปาสกาล ในด้านขนาดมวลรวม ตัวอย่าง MG (SG 50 : LG 50) ให้ค่ากำลังรับแรงดึงมากที่สุด เมื่อเทียบกับ SG และ LG ตัวอย่างเช่น ที่อายุบ่ม 28 วัน พบว่ากำลังรับแรงดึงของ MG, SG และ LG ที่ไม่มีซีเมนต์เสี้ยนใยพลาสติก และไม่มีเส้นใย เท่ากับ 0.50, 0.45 และ 0.39 เมกะปาสกาล ตามลำดับ ในส่วนของการแทนที่ซีเมนต์เสี้ยนใยพลาสติกส่งผลให้กำลังรับแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยปริมาณซีเมนต์เสี้ยนใยพลาสติกที่ร้อยละ 10 ให้ประสิทธิภาพสูงสุด ที่อายุบ่ม 28 วัน ตัวอย่าง MG ที่ซีเมนต์เสี้ยนใยพลาสติกร้อยละ 10 และไม่มีเส้นใย มีกำลังรับแรงดึงอยู่ที่ 0.70 เมกะปาสกาล นอกจากนี้ เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นจาก 28 เป็น 90 วัน ค่ากำลังรับแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกดำเนินต่อเนื่องในระยะยาว ที่อายุบ่ม 90 วัน ตัวอย่าง MG ที่ซีเมนต์เสี้ยนใยพลาสติกร้อยละ 10 และไม่มีเส้นใย มีกำลังรับแรงดึงอยู่ที่ 0.80 เมกะปาสกาล สำหรับเส้นใยขวดพลาสติก พบว่าส่งผลทำให้กำลังรับแรงดึงมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น โดยที่ปริมาณเส้นใยร้อยละ 1.0 ส่งผลให้มีค่ากำลังรับแรงดึงสูงที่สุด โดยที่อายุบ่ม 28 และ 90 วัน ตัวอย่าง MG ที่ซีเมนต์เสี้ยนใยพลาสติกร้อยละ 10 และเส้นใยร้อยละ 1.0 มีค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกอยู่ที่ 0.82 และ 0.88 เมกะปาสกาล ตามลำดับ แสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงต่อปริมาณซีเมนต์เสี้ยนใยพลาสติก และเส้นใยที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 และ 90 วัน

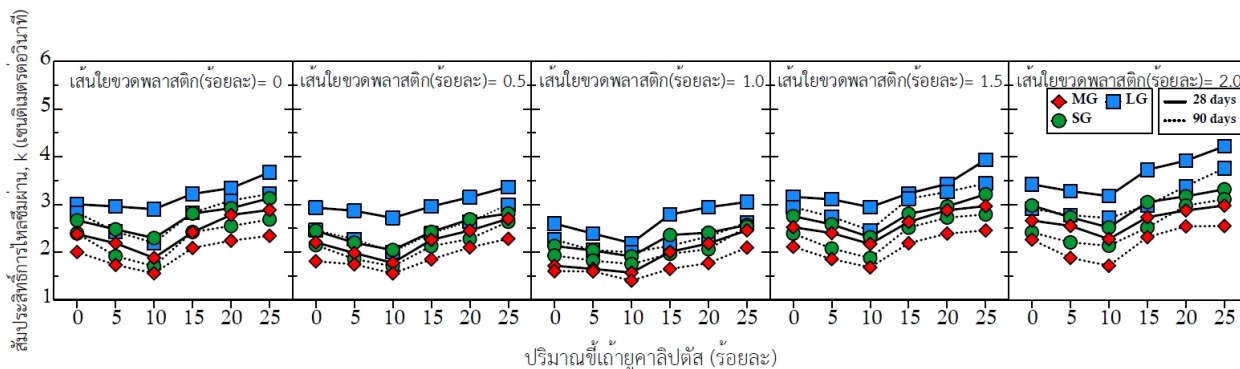
จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดและค่ากำลังรับแรงดึงของเสากรวดซีเมนต์เสี้ยนใยพลาสติกเสริมกำลังด้วยเส้นใยขวดพลาสติก โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดและค่ากำลังรับแรงดึงจากการศึกษานี้สามารถแสดงได้อยู่ในรูปแบบสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นแบบเส้นตรง โดยกำลังรับแรงดึงแปรผันโดยตรงกับกำลังรับแรงอัด เมื่อกำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ค่ากำลังรับแรงดึงมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามในอัตราส่วนร้อยละของกำลังรับแรงอัด และได้ทำการเปรียบเทียบกับงานของ Gaedicke, C., และคณะ [30], Ozel, B. F., และคณะ [32] พบว่ามีแนวโน้มทิศทางที่สอดคล้องกัน จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงดึงมีค่าอยู่ที่ประมาณร้อยละ 20 - 22 ของกำลังรับแรงอัด แสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก

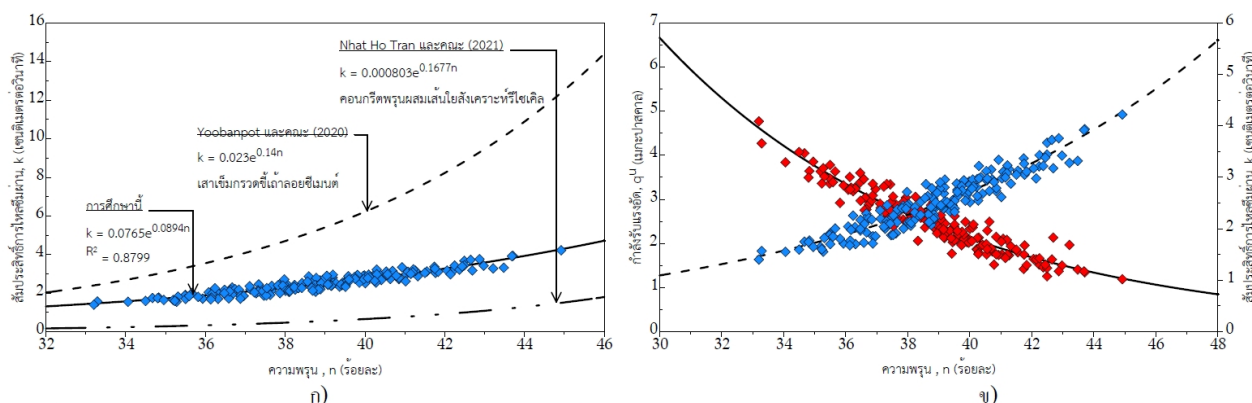
3.4. การทดสอบสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

สัมประสิทธิ์การซึมผ่านเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการประเมินความสามารถในการระบายน้ำของวัสดุคอนกรีตและวัสดุงานทาง จากการศึกษาค้นคว้าพบว่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของเสากรวดซีเมนต์เสาะกาลีปต์สซีเมนต์เสริมกำลังด้วยเส้นใยพลาสติค มีความสัมพันธ์โดยตรงกับโครงสร้างรูพรุนและระดับความต่อเนื่องของช่องว่างภายในวัสดุ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1.40–4.22 เซนติเมตรต่อวินาที เมื่อพิจารณาผลของขนาดมวลรวม พบว่าตัวอย่างเสา LG ให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านสูงสุดในทุกปริมาณซีเมนต์เสาะกาลีปต์สและทุกปริมาณเส้นใยพลาสติค ที่ทุกช่วงอายุการบ่ม เนื่องจากมีช่องว่างระหว่างอนุภาคขนาดใหญ่และโครงสร้างรูพรุนที่เชื่อมต่อกันได้ดี ส่งผลให้การไหลของน้ำผ่านตัววัสดุเสาได้มาก [28, 33, 34] ขณะที่ตัวอย่างเสา SG และ MG ให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านต่ำกว่า โดยตัวอย่าง MG, SG และ LG ที่ไม่มีซีเมนต์เสาะกาลีปต์ส และไม่มีเส้นใย ที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเท่ากับ 2.38, 2.67 และ 3.00 เซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ ในส่วนของการแทนที่ซีเมนต์เสาะกาลีปต์สส่งผลให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านมีแนวโน้มลดลง โดยอัตราการแทนที่ซีเมนต์ด้วยซีเมนต์เสาะกาลีปต์สที่ร้อยละ 10 ให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่น้อยที่สุด เนื่องจากซีเมนต์เสาะกาลีปต์สนั้นลดช่องว่างภายในโครงสร้าง ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านลดลง [25, 29] โดยตัวอย่าง MG ที่ซีเมนต์เสาะกาลีปต์สร้อยละ 10 และไม่มีเส้นใย ที่อายุบ่ม 28 วัน สัมประสิทธิ์การซึมผ่านมีค่า 1.88 เซนติเมตรต่อวินาที ด้านอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้นจาก 28 เป็น 90 วัน พบว่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของตัวเสามีแนวโน้มลดลง อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาปอลิไซคลานิกที่ดำเนินต่อเนื่องในระยะยาว ซึ่งไปลดช่องว่างภายในเสาลดลงเพิ่มเติม โดยตัวอย่าง MG ที่ซีเมนต์เสาะกาลีปต์สร้อยละ 10 และไม่มีเส้นใย ที่อายุบ่ม 90 วัน มีค่าอยู่ที่ 1.55 เซนติเมตรต่อวินาที และในส่วนของเส้นใยพลาสติค พบว่าเส้นใยพลาสติคที่นำมาแทนที่ส่งผลทำให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านมีค่าลดลง เนื่องจากเส้นใยพลาสติค ช่วยลดช่องว่างรูพรุนภายในตัวเสา โดยจะลดลงมากที่สุดที่ปริมาณเส้นใยพลาสติคร้อยละ 1.0 ตัวอย่าง MG ที่ซีเมนต์เสาะกาลีปต์สร้อยละ 10 และเส้นใยร้อยละ 1.0 ที่อายุบ่ม 28 และ 90 วัน มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่ 1.57 และ 1.40 เซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ แสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านต่อปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น ที่เวลาการบ่ม 28 และ 90 วัน

จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของเสากรวดซีเมนต์ซีเมนต์เสริมกำลังด้วยเส้นใยพลาสติก โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าความพรุนและค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านจากการศึกษานี้สามารถแสดงได้อยู่ในรูปแบบระบบสมการเอกซ์โพเนนเชียล โดยค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านแปรผันโดยตรงกับค่าความพรุนของวัสดุ ซึ่งเมื่อวัสดุมีความพรุนเพิ่มมากขึ้น สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำก็จะเพิ่มขึ้นตาม และได้ทำการเปรียบเทียบกับงานของ Yoobanpot, N., และคณะ [26], Tran, T. N. H., และคณะ [35] พบว่ามีแนวโน้มทิศทางที่สอดคล้องกัน และการศึกษาายังแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความพรุน กำลังรับแรงอัด และสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ต่างก็มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน โดยที่ กำลังรับแรงอัดจะแปรผกผันกับสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน โดยมีความพรุนเป็นตัวแปรหลักที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของทั้ง 2 ค่า ในการศึกษาพบว่า เมื่อกำลังรับแรงอัดมีค่าที่สูง ความพรุนจะต่ำ แต่เมื่อกำลังรับแรงอัดมีค่าที่ต่ำ ความพรุนจะสูง เนื่องมาจากผลของขนาดมวลรวม ซีเมนต์ซีเมนต์ และเส้นใย ส่งผลต่อช่องว่างความพรุนในโครงสร้าง แต่ในทางกลับกัน เมื่อความพรุนมีค่าที่สูง สัมประสิทธิ์การซึมผ่านจะมีค่าที่สูงตาม และเมื่อความพรุนมีค่าที่ต่ำ สัมประสิทธิ์การซึมผ่านจะมีค่าที่ต่ำเช่นเดียวกัน แสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) ความพรุนและสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (ข) ความพรุน กำลังรับแรงอัด และสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

4. สรุปผลการทดสอบ

จากผลการศึกษาที่ได้แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติและพฤติกรรมของเสากรวดซีเมนต์ภายใต้การอัดด้วยเส้นใยขวดพลาสติกมีการเปลี่ยนแปลง โดยเป็นผลเนื่องมาจากขนาดของมวลรวมหยาบ ปริมาณซีเมนต์และปริมาณเส้นใยจากขวดพลาสติก โดยหากต้องการความสามารถในด้านกำลังที่สูงควรเลือกใช้มวลรวมชนิด MG ซึ่งมีอัตราส่วนคละที่ต่ำส่งผลในด้านกำลังที่สูงแต่หากต้องการความสามารถในการระบายน้ำควรใช้มวลรวมหยาบแบบขนาดเดียว ซึ่งจะส่งผลดีในการไหลซึมผ่านมากกว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีเมนต์ภายใต้การอัดที่ปริมาณร้อยละ 10 ให้ผลดีที่สุดในด้านกำลังรับแรงในทุกขนาดมวลรวม ในด้านความพรุนและสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านมีค่าต่ำที่สุด ในส่วนของปริมาณเส้นใยจากขวดพลาสติกที่ร้อยละ 1.0 ให้กำลังรับแรงอัดและแรงดึงดีที่สุด ในขณะที่ค่าความพรุนและสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านต่ำที่สุด ในด้านความสัมพันธ์ กำลังรับแรงกับความพรุนจะแปรผกผันกัน ยิ่งความพรุนมาก กำลังรับแรงจะยิ่งต่ำ แต่ในทางกลับกัน สัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านกับความพรุน จะแปรผันตรงกัน ยิ่งความพรุนมาก ค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านจะยิ่งสูง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ พัทธยา แจ่มสว่าง เป็นอย่างสูง ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ตลอดจนตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของงานวิจัยด้วยความเอาใจใส่อย่างยิ่ง ผู้วิจัยตระหนักถึงความทุ่มเทและความเมตตาของท่านเป็นอย่างยิ่ง และขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Han, J. *Principles and practice of ground improvement*. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2015.
- [2] Horpibulsuk, S., Chinkulkijniwat, A., Cholphatsorn, A., Suebsuk, J., & Liu, M. D. *Consolidation behavior of soil-cement column improved ground*. Computers and Geotechnics, 2012, 43, 37-50. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2012.02.003>
- [3] Huang, J., & Han, J. *3D coupled mechanical and hydraulic modeling of a geosynthetic-reinforced deep mixed column-supported embankment*. Geotextiles and Geomembranes, 2009, 27(4), 272-280. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2009.01.001>
- [4] Dar, L. A., & Shah, M. Y. *Three-dimensional numerical study on behavior of geosynthetic encased stone column placed in soft soil*. Geotechnical and Geological Engineering, 2021, 39(3), 1901-1922. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01594-x>
- [5] Rajasekaran, G., & Narasimha Rao, S. *Compressibility behaviour of lime-treated marine clay*. Ocean Engineering, 2002, 29(5), 545-559. [https://doi.org/10.1016/S0029-8018\(01\)00010-5](https://doi.org/10.1016/S0029-8018(01)00010-5)
- [6] Rampello, S., & Callisto, L. *Predicted and observed performance of an oil tank founded on soil-cement columns in clayey soils*. Soils and Foundations, 2003, 43(4), 229-241. https://doi.org/10.3208/sandf.43.4_229
- [7] Chai, J.-C., Shrestha, S., Hino, T., Ding, W.-Q., Kamo, Y., & Carter, J. *2D and 3D analyses of an embankment on clay improved by soil-cement columns*. Computers and Geotechnics, 2015, 68, 28-37. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2015.03.014>
- [8] Jamsawang, P., Phongphinitana, E., Voottipruex, P., Bergado, D. T., & Jongpradist, P. *Comparative performances of two- and three-dimensional analyses of soil-cement mixing columns under an embankment load*. Marine Georesources & Geotechnology, 2019, 37(7), 852-869. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2018.1504261>
- [9] Jamsawang, P., Yoobanpot, N., Thanasisathit, N., Voottipruex, P., & Jongpradist, P. *Three-dimensional numerical analysis of a DCM column-supported highway embankment*. Computers and Geotechnics, 2016, 72, 42-56. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2015.11.006>
- [10] Kitazume, M., & Terashi, M. *The deep mixing method*. Boca Raton, Florida, USA / London, UK: CRC Press, 2013.

- [11] Phutthananon, C., Jongpradist, P., & Jamsawang, P. *Influence of cap size and strength on settlements of TDM-piled embankments over soft ground*. Marine Georesources & Geotechnology, 2020, 38(6), 686-705. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2019.1613700>
- [12] Umrvia, N. B., Parmar, M., Patil, S. V., Pathan, Y. A. V., & Modhiya, A. *Recent study on the behaviour of CFG pile, DM (deep mixing) columns and stone columns ground improvement technology*. GRD Journal for Engineering, 2019, (February), 241-246.
- [13] Jamsawang, P., Poorahong, H., Yoobanpot, N., Songpiriyakij, S., & Jongpradist, P. *Improvement of soft clay with cement and bagasse ash waste*. Construction and Building Materials, 2017, 154, 61-71. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.188>
- [14] Jongpradist, P., Homtragoon, W., Sukkarak, R., Kongkitkul, W., & Jamsawang, P. *Efficiency of rice husk ash as cementitious material in high-strength cement-admixed clay*. Advances in Civil Engineering, 2018, 8346319. <https://doi.org/10.1155/2018/8346319>
- [15] Huynh, T.-P., Le, T. H. M., & Ngan, N. V. C. *An experimental evaluation of the performance of concrete reinforced with recycled fibers made from waste plastic bottles*. Results in Engineering, 2023, 18, 101205. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101205>
- [16] Jamsawang, P., Suansomjeen, T., Sukontasukkul, P., Jongpradist, P., & Bergado, D. T. *Comparative flexural performance of compacted cement-fiber-sand*. Geotextiles and Geomembranes, 2018, 46(4), 414-425. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2018.03.008>
- [17] ASTM International. *Standard test method for bulk density ("unit weight") and voids in aggregate (ASTM C29/C29M-17a)*, 2017.
- [18] ASTM International. *Standard test method for specific gravity and absorption of coarse aggregate (ASTM C127-15)*, 2017.
- [19] ASTM International. *Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine (ASTM C131/C131M-14)*, 2017.
- [20] ASTM International. *Standard test method for density and void content of hardened pervious concrete (ASTM C1754/C1754M-12)*, 2017.
- [21] ASTM International. *Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens (ASTM C39/C39M-18)*, 2018.
- [22] ASTM International. *Standard practice for capping cylindrical concrete specimens (ASTM C617/C617M-15)*, 2017.
- [23] ASTM International. *Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens (ASTM C496/C496M-17)*, 2016.
- [24] ASTM International. *Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter (ASTM D5084-16a)*, 2017.
- [25] Xu, G., Shen, W., Huo, X., Yang, Z., Wang, J., Zhang, W., & Ji, X. *Investigation into the properties of porous concrete as road base material*. Construction and Building Materials, 2018, 158, 141-148. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.151>
- [26] Yoobanpot, N., Jamsawang, P., Krairan, K., Jongpradist, P., & Likitlersuang, S. *Laboratory investigation of the properties of cement fly ash gravel for use as a column-supported embankment*. Construction and Building Materials, 2020, 257, 119493. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119493>
- [27] Xia, J., Li, J., Di Sarno, L., & Gong, G. *Fiber utilization in pervious concrete: Review on manufacture and properties*. Construction and Building Materials, 2023, 406, 133372. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133372>
- [28] Joshaghani, A., Ramezaniapour, A. A., Ataei, O., & Golroo, A. *Optimizing pervious concrete pavement mixture design by using the Taguchi method*. Construction and Building Materials, 2015, 101, 317-325. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.094>
- [29] Arulrajah, A., Mohammadinia, A., Horpibulsuk, S., & Samingthong, W. *Influence of class F fly ash and curing temperature on strength development of fly ash-recycled concrete aggregate blends*. Construction and Building Materials, 2016, 127, 743-750. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.049>
- [30] Gaedicke, C., Torres, A., Huynh, K. C. T., & Marines, A. *A method to correlate splitting tensile strength and compressive strength of pervious concrete cylinders and cores*. Construction and Building Materials, 2016, 125, 271-278. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.031>
- [31] Mehrabi, P., Shariati, M., Kabirifar, K., Jarrah, M., Rasekh, H., Truong, N. T., Al Shariati, S., & Jahanbani, S. *Effect of pumice powder and nano-clay on the strength and permeability of fiber-reinforced pervious concrete incorporating recycled concrete aggregate*. Construction and Building Materials, 2021, 287, 122652. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122652>

- [32] Ozel, B. F., Sakalli, S., & Sahin, Y. *The effects of aggregate and fiber characteristics on the properties of pervious concrete*. Construction and Building Materials, 2022, 356, 129294. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129294>
- [33] Zhang, Y., Li, H., Abdelhady, A., & Yang, J. *Comparative laboratory measurement of pervious concrete permeability using constant-head and falling-head permeameter methods*. Construction and Building Materials, 2020, 263, 120614. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120614>
- [34] Zhong, R., & Wille, K. *Material design and characterization of high-performance pervious concrete*. Construction and Building Materials, 2015, 98, 51-60. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.027>
- [35] Tran, T. N. H., Puttiwongrak, A., Pongsopha, P., Intarabut, D., Jamsawang, P., & Sukontasukkul, P. *Microparticle filtration ability of pervious concrete mixed with recycled synthetic fibers*. Construction and Building Materials, 2021, 270, 121807. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121807>