



คุณสมบัติคอนกรีตพูนที่ผสมเถ้าลอยและเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

วันโชค เครือหงษ์ ปัญญา คล่องอักษรกุล* ศตวรรษ หฤหรรษ์พงศ์ วราวุธ ณรงค์อินทร์
อภิวัฒน์ แสงแก้ว และ ปิติพงษ์ ทองดาว

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ เขตพื้นที่อุเทนถวาย,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: panya_kl@rmutto.ac.th

วันที่รับบทความ: 25 กันยายน 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 5 พฤษภาคม 2569; วันที่ตอบรับบทความ: 6 กรกฎาคม 2569
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 20 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาคอนกรีตพูนด้วยการนำเถ้าลอยและเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ โดยนำเถ้าลอยและเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมคอนกรีตพูน การนำเส้นใย PVA มาใช้เนื่องจากมีกำลังรับแรงดึงที่ดี เมื่อคอนกรีตเกิดรอยร้าวขนาดเล็กเส้นใยจะทำหน้าที่ยึดเกาะระหว่างรอยร้าวได้ จึงทำการศึกษาสมบัติทางกลและกายภาพ เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนเท่ากับ 10:90 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ส่วนเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมในอัตราส่วนร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ วัสดุมวลรวมหยาบได้เลือกหินที่ค้างตะแกรงเบอร์ # 8 และเบอร์ # 3/4 มาใช้ในการทดลอง เพื่อศึกษาผลของขนาดมวลรวมที่แตกต่างกันต่อคุณสมบัติของคอนกรีตพูน ทดสอบการดูดซึมน้ำ ความพูน หน่วยน้ำหนัก แรงอัด และ แรงดัด ที่อายุการบ่ม 28 วัน ผลการทดสอบพบว่าค่าการดูดซึมน้ำมีค่าร้อยละ 9.00 ถึง 18.70 ความพูนมีค่าร้อยละ 4.50 ถึง 9.60 หน่วยน้ำหนักมีค่า 2,027 ถึง 2,335 กก.ต่อลบ.ม.และ กำลังรับแรงอัดมีค่า 7.89 ถึง 16.30 เมกะปาสคาล ที่อายุการบ่ม 28 วัน การผสมเส้นใย PVA ในอัตราส่วนร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ร่วมกับการใช้เถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ส่งผลเชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติทางกลของคอนกรีตพูน โดยเส้นใย PVA ทำหน้าที่เป็นโครงข่ายเสริมแรงภายในที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงดัด (Flexural Capacity) และเพิ่มความต่อเนื่องของวัสดุประสานรอบมวลรวมหยาบ แม้ว่าเส้นใยจะส่งผลต่อความหนืดและการเกิดช่องว่าง แต่การเลือกใช้ขนาดมวลรวมละเอียด (Grading) ที่เหมาะสม เช่นในส่วนผสม S5 สามารถชดเชยข้อด้อยดังกล่าวและเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้สูงสุดถึง 16.30 MPa ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานทั่วไปสำหรับคอนกรีตพูน

คำสำคัญ: เถ้าลอย; พอลิไวนิลแอลกอฮอล์; คอนกรีตพูน

Properties of Pervious Concrete Containing Fly Ash and Polyvinyl Alcohol Fibers

Wunchock Kroehong, Panya Klongaksornkul*, Sattawat Haruehansapong, Warayut Narong-in¹, Apiwat Saengkaew¹ and Pitiphong Thongdao

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture Uthenthawai Campus,
Rajamangala University of Technology Tawan-ok

* Corresponding author, E-mail: panya_kl@rmutto.ac.th

Received: 25 September 2025; Revised 5 May 2026; Accepted: 6 July 2026

Online Published: 20 August 2026

Abstract: This study focuses on the development of pervious concrete by incorporating fly ash and polyvinyl alcohol (PVA) fibers. PVA fibers were utilized due to their high tensile strength; when micro-cracks occur within the concrete matrix, these fibers function as a bridging mechanism across the cracks. Consequently, the mechanical and physical properties of the concrete were investigated. Fly ash was used to replace cement at a ratio of 10:90 by weight of binder, while PVA fibers were added at 0.5% by weight of cement. For the coarse aggregate, stone particles retained on sieve sizes No. #8 and No. #3/4 were selected to investigate the effect of different aggregate sizes on the properties of pervious concrete. The experimental program included tests on water absorption, porosity, unit weight, compressive strength, and flexural strength at 28 days of curing. The results indicated that water absorption values ranged from 9.00% to 18.70%, porosity ranged from 4.50% to 9.60%, unit weight ranged from 2,027 to 2,335 kg/m³, and compressive strength values ranged from 7.89 to 16.30 MPa at 28 days of curing. The incorporation of 0.5% PVA fibers by weight, together with 10% fly ash as a cement replacement, yielded a significant positive impact on the mechanical properties of pervious concrete. The PVA fibers acted as an internal reinforcing network that enhanced flexural capacity and improved binder continuity around the coarse aggregates. Although fiber inclusion affected the viscosity of the concrete mixture and void formation, the selection of an appropriate aggregate grading, such as Mix S5, effectively compensated for these drawbacks and achieved the highest compressive strength of 16.30 MPa, which exceeds the standard criteria generally established for pervious concrete.

Keywords: Fly ash; Polyvinyl alcohol; Pervious concrete



1. บทนำ

คอนกรีตพรุน (Pervious Concrete) เป็นวัสดุซึ่งมีความสามารถในการระบายน้ำได้ดีเนื่องจากไม่มีมวลรวมละเอียดจึงทำให้มีรูพรุนขนาดใหญ่ที่มีความต่อเนื่องภายใน คุณสมบัติดังกล่าวจึงนำไปใช้ในงานก่อสร้างถนน ทางเท้า ตลอดจนสิ่งปลูกสร้างอื่นๆ แทนการใช้คอนกรีตธรรมดา อย่างไรก็ตามข้อจำกัดสำคัญของคอนกรีตพรุนก็คือมีกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดที่ต่ำกว่าคอนกรีตทั่วไปเนื่องจากความพรุนในเนื้อวัสดุ [1] ปัจจุบันมีการศึกษาโดยการใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลมาผสมในคอนกรีตพรุนเพื่อทำให้การระบายน้ำได้ดีมากขึ้น [2] คอนกรีตพรุนนั้นประกอบไปด้วยวัสดุ 3 ส่วน คือ วัสดุประสานซึ่งอาจเป็นปูนซีเมนต์อย่างเดียวหรือมีวัสดุป่อโซลันด้วยก็ได้ มวลรวมหยาบ และ น้ำ คอนกรีตพรุนโดยทั่วไปจะมีอัตราการไหลผ่านของน้ำอยู่ระหว่าง 0.14 ถึง 1.22 เซนติเมตรต่อวินาที และมีกำลังอัดอยู่ระหว่าง 2.80 ถึง 28.0 เมกะปาสคาล [3]

สำหรับประเทศไทยได้มีการนำเถ้าลอย (Fly Ash) ซึ่งเป็นผลผลิตที่ได้มาจากการกระบวนการเผาถ่านหินในโรงงานไฟฟ้าพลังงานความร้อนมาใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตกันอย่างแพร่หลายซึ่งเถ้าลอยนี้เมื่อนำมาผสมคอนกรีตจะทำให้ช่องว่างที่เกิดในคอนกรีตมีจำนวนลดลง เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาป่อโซลันขนาดโพรงในซีเมนต์เพสต์มีขนาดเล็กลง ในขณะเดียวกันก็ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดในระยะยาวมีค่ามากขึ้นสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Yang and Jiang [4] พบว่าคอนกรีตพรุนที่ได้จากมวลรวมขนาด 5-10 มิลลิเมตร ให้ค่ากำลังรับแรงอัด 13.8 เมกะปาสคาล ขณะที่คอนกรีตพรุนที่ได้จากมวลรวม

ขนาด 10-20 และ 15-30 มม. ให้ค่ากำลังรับแรงอัด 9.8 และ 7.1 เมกะปาสคาล ตามลำดับ คุณสมบัติของเถ้าลอยยังช่วยให้คอนกรีตมีความทนทานดีขึ้นเนื่องมาจากการใช้น้ำลดลง ในขณะเดียวกันก็ไม่ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดน้อยลงต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน [5] ปัจจุบันนี้ได้มีการคิดค้นนำพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol, PVA) มาผสมกับคอนกรีตเพื่อพัฒนาให้มีคุณสมบัติที่ดียิ่งขึ้นเช่นกัน โดยเมื่อพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มาผสมกับปูนซีเมนต์ ทราย และ วัสดุมวลรวมหยาบพบว่าคอนกรีตมีการยึดเกาะเหนียวแน่นเพิ่มขึ้น เมื่อคอนกรีตเกิดรอยร้าว เส้นใย PVA ที่กระจายตัวอยู่จะช่วยป้องกันการขยายตัวของรอยร้าว และ เพิ่มความสามารถในการรับแรงดัดได้ดี อย่างไรก็ตาม เส้นใย PVA ก็มีข้อจำกัดเช่นกันกล่าวคือเมื่อนำเส้นใย PVA มาผสมกับคอนกรีตจะทำให้เกิดช่องว่างในคอนกรีตมากขึ้นเนื่องจากเส้นใย PVA นั้นเพิ่มความหนืดให้กับน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีต ทำให้เกิดฟองอากาศในขณะผสมคอนกรีตซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลง

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการพัฒนา กำลังของคอนกรีตพรุนที่ผสมเถ้าลอยและ เส้นใย PVA เพื่อเป็นวัสดุทางเลือกในการทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนช่วยในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและป้องกันการทำลายสมดุลของระบบนิเวศจากการลดลงของการซึมผ่านน้ำลงดิน ผลการศึกษาจะก่อให้เกิดประโยชน์ทั้งทางด้านเศรษฐกิจในการลดต้นทุนด้านการผลิตคอนกรีตพรุนเนื่องจากเถ้าลอยเป็นวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรม ด้านสิ่งแวดล้อมช่วยในการกำจัดของเสียอย่างยั่งยืน



2. วิธีการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้วิจัย

2.1.1 ปูนซีเมนต์หรือวัสดุประสาน

ปูนซีเมนต์ (Cement) ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ 1 มีคุณสมบัติตามมาตรฐานมอก.15-2562 [6] เป็นวัสดุประสานเมื่อผสมกับน้ำจะทำปฏิกิริยาแข็งตัวและมีความคงทนในน้ำได้ โดยมีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ที่ 3.15 ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญในการคำนวณปริมาณการใช้งานและควบคุมคุณภาพคอนกรีต

2.1.2 หิน

เนื่องจากคอนกรีตพูนจำเป็นต้องมีช่องว่างที่เชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่องเพื่อให้น้ำไหลผ่านได้อย่างสะดวก จึงใช้หินที่มีขนาดใกล้เคียงกัน (Uniform-Sized-Aggregate) อย่างหิน #8 และ หิน #3/4 ทำให้ช่องว่างระหว่างเม็ดหินมีขนาดสม่ำเสมอและต่อเนื่องกันมากกว่าการใช้หินขนาดกะทัดรัดไปอุดช่องว่างได้ ขนาดของหิน #8 และ หิน #3/4 เป็นขนาดหินที่เหมาะสมในการสร้างช่องว่างที่มีขนาดใหญ่พอที่จะยอมให้น้ำไหลผ่านได้ดีแต่ก็ไม่ใหญ่จนเกินไปทำให้กำลังอัดคอนกรีตลดลงอย่างมาก

2.1.3 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์

ในงานวิจัยนี้ได้นำเส้นใย PVA ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งมีขนาดประมาณ 6 มม. ถึง 9 มม. และมีคุณสมบัติเป็นไปตามตารางที่ 1 นำมาผสมกับคอนกรีตในอัตราส่วนร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีสมบัติพิเศษคือสามารถย่อยสลายได้โดยวิธีชีวภาพและสามารถติดไฟได้ เส้นใย PVA เป็นเส้นใยสังเคราะห์ชนิดหนึ่งที่เกิดจากพลาสติกโดยใช้กระบวนการทางพอลิเมอร์ในการปรับปรุงคุณสมบัติโครงสร้างทางเคมี โดยเส้นใย PVA

สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ประเภทค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นต่ำและประเภทค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นสูงซึ่งเป็นเส้นใย PVA ที่นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีความสำคัญต่อการเสียรูปเมื่อคอนกรีตรับแรงอัด และการยึดตัวเมื่อคอนกรีตแตกร้าวในขณะเดียวกันเส้นใย PVA ก็มีส่วนสำคัญในการช่วยเสริมกำลังรับแรงดัดให้คอนกรีต

2.1.4 แก้วลอย

แก้วลอยจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง แก้วลอยที่นำมาใช้เป็นแก้วลอย Class F องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของแก้วลอยได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมินัมออกไซด์ (Al_2O_3) และ เฟอริกออกไซด์ (Fe_2O_3)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกลของเส้นใย PVA

วัสดุ	กำลังรับแรงดึง (กิกะปาสคาล)	โมดูลัสยืดหยุ่น (กิกะปาสคาล)	ร้อยละการยืดตัว	ความถ่วงจำเพาะ
PVA	0.88-1.60	25 – 40	6 – 10	1.3



รูปที่ 1 เส้นใย PVA ที่ใช้ในงานคอนกรีตพูน



2.2 ส่วนผสมสำหรับคอนกรีตพูน

การออกแบบส่วนผสมสำหรับคอนกรีตพูนโดยใช้วัสดุประสานซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ น้ำ และมวลรวมหยาบ 1 ลบ.ม. จะประกอบด้วยปูนซีเมนต์ 400 กิโลกรัม น้ำ 152 กิโลกรัม มวลรวมหยาบ 1,380 กิโลกรัม ซึ่งจะได้ น้ำหนักรวมทั้งหมด 1,900 กิโลกรัมสำหรับทดสอบผสมและปรับแก้ส่วนผสม

2.3 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

การเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกลโดยใช้ส่วนผสมของคอนกรีตพูน ปริมาณเส้นใย PVA เท่ากับร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.38 ปริมาณการแทนที่เถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์ (FA/C) เท่ากับ 10:90 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน การเลือกใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เนื่องจากเป็นช่วงที่เหมาะสมซึ่งสามารถเพิ่มความทนทานและปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตได้ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังอัดในช่วงต้นมากนัก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา ซึ่งการใช้ปริมาณเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ที่มากเกินไปจะทำให้การพัฒนา กำลังรับแรงอัดในช่วงต้นนั้นค่อนข้างช้า การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตพูนโดยการกำหนดปริมาณซีเมนต์เพสต์จากช่องว่างของหินแต่ละขนาดเท่ากับ 0.15 อัตราส่วนของคอนกรีตพูนโดยการแทนที่เถ้าลอยและเส้นใย PVA เป็นไปตามที่แสดงในตารางที่ 2 งานวิจัยนี้จะศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของคอนกรีตพูนที่ผสมเถ้าลอยและเส้นใย PVA โดยคัดเลือกขนาดของหินที่ค้ำตะแกรง #3/4 (19 มม.) และ #8 (9.5 มม.) มาใช้เป็นมวลรวมหยาบ

ตารางที่ 2 การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตพูนที่ใช้สัดส่วนมวลรวมหยาบต่างกัน

ส่วนผสม ที่	ปูน (กก)	หิน (กก.)		น้ำ (กก)	เส้น ใย (กก)	เถ้า ลอย (กก)
		#3/4	#8			
S1	400	0	1380	152	2	40
S2	400	1380	0	152	2	40
S3	400	690	690	152	2	40
S4	400	1035	345	152	2	40
S5	400	345	1035	152	2	40

โดยในแต่ละสัดส่วนผสมนำมาหาค่าการทดสอบเฉลี่ย ซึ่งสมบัติที่ต้องทดสอบจะประกอบไปด้วย การดูดซึมของคอนกรีตพูน, ความพรุนของคอนกรีตพูน, หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตพูน, กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูน และ กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูนมีขั้นตอนการดำเนินการดังต่อไปนี้

1. เตรียมแบบหล่อสำหรับตัวอย่างทรงลูกบาศก์ โดยทาน้ำมันที่แบบหล่อขนาด กว้างxยาวxสูง 10x10x10 เซนติเมตรสำหรับการทดสอบหากล้างรับแรงอัด และ แบบหล่อขนาด กว้างxลึกxยาว 15x15x45 เซนติเมตรสำหรับการทดสอบแรงดัด

2. เตรียมส่วนผสมสำหรับคอนกรีตพูนผสมเถ้าลอยและเส้นใย PVA ตามการออกแบบดังแสดงในตารางที่ 2

3. ทำการผสมโดยใช้เครื่องผสมคอนกรีตเมื่อส่วนผสมเข้ากันได้ดีแล้วจึงนำไปเทเข้าแบบหล่อคอนกรีตโดยทิ้งไว้ 24 ชม. แล้วทำการถอดแบบเมื่อคอนกรีตแข็งตัวดีแล้ว



4. นำตัวอย่างทดสอบคอนกรีตพูนที่ผสมเกล็ดลอยและเส้นใย PVA ที่ถอดแบบเรียบร้อยแล้วไปบ่มในน้ำให้มีอายุ 28 วัน

5. นำตัวอย่างมาทดสอบคุณสมบัติต่างๆ เช่น การดูดซึมน้ำของคอนกรีตพูน, ความพรุนของคอนกรีตพูน, หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตพูน, กำลังรับแรงอัด และ กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูนที่อายุการบ่ม 28 วัน เป็นต้น

2.4 วิธีการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต

2.4.1 การดูดซึมน้ำ, ความพรุน, หน่วยน้ำหนัก

นำตัวอย่างไปใส่ในเครื่องเก็บสูญญากาศแล้วทำการดูดอากาศออกหลังจากนั้นเติมน้ำลงไปให้ท่วมชิ้นงานแล้วทำการอัดแรงดันในสภาพสูญญากาศเป็นเวลา 1 ชั่วโมงแล้วปล่อยความดันในสภาพสูญญากาศออกและทิ้งไว้ 18 ชั่วโมง หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักในสภาพผิวแห้ง, ชั่งน้ำหนักชิ้นตัวอย่างในน้ำ แล้วนำชิ้นตัวอย่างเข้าอบเพื่อหาค่าน้ำหนักอบแห้ง แล้วคำนวณค่าเฉลี่ยของชิ้นตัวอย่าง ทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตพูนตามมาตรฐาน ASTM C642 [7] และคำนวณค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตพูนจากมวลและปริมาตรของชิ้นตัวอย่างที่แข็งตัวแล้ว (Hardened Concrete)

2.4.2 กำลังรับแรงอัด

นำตัวอย่างคอนกรีตพูนไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัดเพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ชิ้นตัวอย่างสามารถรับได้ โดยทดสอบหาลำดับกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C39[8]

2.4.3 กำลังรับแรงดัด

นำตัวอย่างคอนกรีตพูนไปทดสอบรับน้ำหนักบรรทุกที่กึ่งกลางความยาวของชิ้นงานแล้ววัดค่าการแอ่นตัวของชิ้นงานและคำนวณหาค่าหน่วยแรงดัดที่เกิดขึ้นโดยทดสอบหาลำดับกำลังรับแรงดัดตามมาตรฐาน ASTM C78 [9]

3. ผลการทดสอบ

3.1 การดูดซึมน้ำ

ค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตพูนผสมเกล็ดลอยและเส้นใย PVA ทั้ง 5 ชุด แสดงดังรูปที่ 2 ส่วนผสมที่ S1 ใช้หิน #8 ร้อยละ 100 ของน้ำหนักมวลรวม การใช้หิน #8 เพียงอย่างเดียวทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นในระดับหนึ่ง ด้วยค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 10.40 แม้หินขนาดเล็กจะจัดเรียงตัวได้ดี แต่การขาดมวลรวมขนาดใหญ่ทำให้ยังมีช่องว่างบางส่วน ส่วนผสมที่ S2 ใช้หิน #3/4 ร้อยละ 100 ของน้ำหนักมวลรวม ส่วนผสมนี้มีการดูดซึมน้ำสูงสุดถึงร้อยละ 18.70 การใช้หินขนาดใหญ่ทั้งหมดส่งผลให้เกิดช่องว่างขนาดใหญ่ระหว่างมวลรวม โครงสร้างมีความพรุนสูง และน้ำ สามารถซึมผ่านได้ง่ายที่สุด ส่วนผสมที่ S3 ใช้หิน #8 และ #3/4 อย่างละร้อยละ 50 ของน้ำหนักมวลรวมส่วนผสมนี้แสดงค่าการดูดซึมน้ำต่ำที่สุดที่ร้อยละ 9.00 ซึ่งเห็นว่าการผสมหินขนาดเล็กและใหญ่ในสัดส่วนที่สมดุลช่วยให้มวลรวมจัดเรียงตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

ส่วนผสมที่ S4 ใช้หิน #8 ร้อยละ 25 ของน้ำหนักมวลรวม และ ใช้หิน #3/4 ร้อยละ 75 ของน้ำหนักมวลรวม ตามลำดับ การเพิ่มสัดส่วนหิน #3/4 เป็นร้อยละ 75

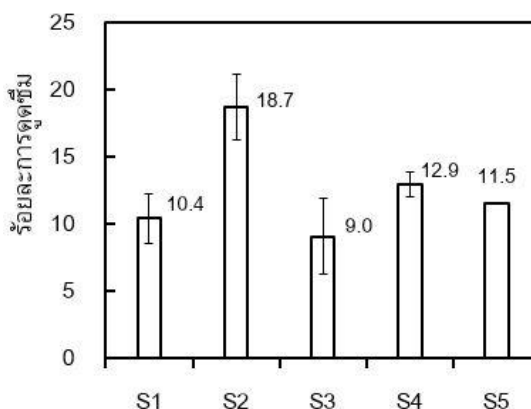


ทำให้เกิดช่องว่างในโครงสร้างมากขึ้น ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 12.90 สะท้อนถึงการกระจายตัวของมวลรวมที่ไม่สมดุลเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมที่ S3 ส่วนผสมที่ S5 ใช้หิน #8 ร้อยละ 75 ของน้ำหนักมวลรวม และ ใช้หิน #3/4 ร้อยละ 25 ของน้ำหนักมวลรวม ตามลำดับ

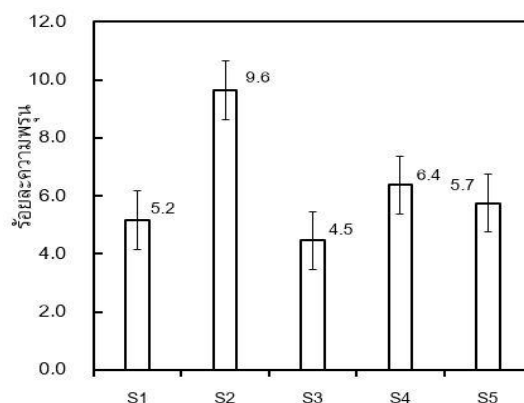
การเพิ่มสัดส่วนหิน #8 เป็นร้อยละ 75 ช่วยลดช่องว่างได้ดีกว่าส่วนผสม S2 และ S4 แต่ยังคงดูดซึมน้ำร้อยละ 11.50 ซึ่งสูงกว่าส่วนผสม S3 เนื่องจากสัดส่วนหินขนาดใหญ่ยังไม่เพียงพอต่อการเติมเต็มช่องว่างอย่างสมบูรณ์

3.2 ความพรุน

รูปที่ 3 แสดงค่าความพรุนของคอนกรีตพรุนที่อายุการบ่ม 28 วันโดยใช้ส่วนผสมอัตราส่วนต่างๆ ทั้ง 5 ส่วนผสม ส่วนผสมที่ S1 ใช้หิน #8 ร้อยละ 100 ของน้ำหนักมวลรวม การใช้หิน #8 เพียงอย่างเดียวทำให้คอนกรีตมีความพรุนค่อนข้างต่ำที่ร้อยละ 5.20 เนื่องจากหินขนาดเล็กสามารถจัดเรียงตัวได้แน่นและช่วยลดช่องว่างได้ในระดับหนึ่ง ซึ่งส่งผลดีต่อความแข็งแรงและการกันซึม ส่วนผสมที่ S2 ใช้หิน #3/4 ร้อยละ 100 ของน้ำหนักมวลรวมส่วนผสมนี้มีค่าความพรุนสูงที่สุดที่ร้อยละ 9.60 การใช้หินขนาดใหญ่ทั้งหมดทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเม็ดมวลรวมเป็นจำนวนมาก โครงสร้างมีความพรุนสูง ส่วนผสมที่ S3 ใช้หิน #8 และ # 3/4 อย่างละร้อยละ 50 ของน้ำหนักมวลรวมส่วนผสมนี้ให้ค่าความพรุนต่ำที่สุดที่ร้อยละ 4.50 แสดงให้เห็นว่าการผสมหินทั้งขนาดเล็กและใหญ่ในสัดส่วนที่เท่ากันช่วยให้มวลรวมจัดเรียงตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด สามารถเติมเต็มช่องว่างภายในโครงสร้างได้อย่างสมบูรณ์ [10]



รูปที่ 2 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตพรุนที่อายุการบ่ม 28 วันโดยใช้อัตราส่วนต่างๆ ทั้ง 5 ส่วนผสม



รูปที่ 3 ความพรุนของคอนกรีตพรุนที่อายุการบ่ม 28 วันโดยใช้อัตราส่วนต่างๆ ทั้ง 5 ส่วนผสม

ส่วนผสมที่ S4 ใช้หิน #8 ร้อยละ 25 ของน้ำหนักมวลรวม และ ใช้หิน #3/4 ร้อยละ 75 ของน้ำหนักมวลรวม ตามลำดับค่าความพรุนเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 6.40 เมื่อสัดส่วนของหินขนาดใหญ่เพิ่มขึ้น การเติมเต็มช่องว่างด้วยหินขนาดเล็กไม่เพียงพอ ทำให้เกิดช่องว่างในเนื้อคอนกรีตมากกว่าส่วนผสมอื่นๆ ที่มีหิน #8 มากกว่า ส่วนผสมที่ S5 ใช้หิน #8 ร้อยละ 75 ของ



น้ำหนักมวลรวม และ ใช้หิน #3/4 ร้อยละ 25 ของน้ำหนักมวลรวมตามลำดับ มีค่าความพรุนอยู่ที่ร้อยละ 5.70 ซึ่งยังคงดีในระดับหนึ่ง เนื่องจากมีสัดส่วนของหินขนาดเล็กเพียงพอที่จะช่วยเติมเต็มช่องว่างได้ดีกว่าส่วนผสมที่ S2 และ S4 แม้จะไม่สมดุลเท่าส่วนผสมที่ S3

ผลการทดสอบพบว่าค่าความพรุนอยู่ในช่วงร้อยละ 4.5 - 9.6 ซึ่งต่ำกว่าช่วงทั่วไปของคอนกรีตพรุน (ร้อยละ 15 - ร้อยละ 20) อย่างไรก็ตามโครงสร้างยังคงมีช่องว่างที่เชื่อมต่อกัน (Interconnected Voids) ซึ่งอาจยังคงสามารถระบายน้ำได้ในระดับหนึ่ง ทั้งนี้ควรมีการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำ (Permeability) เพิ่มเติมในงานวิจัยต่อไป

3.3 หน่วยน้ำหนัก

ในการศึกษาองค์ประกอบของคอนกรีตพรุนเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างชนิดและสัดส่วนของมวลรวมกับค่าหน่วยน้ำหนัก (Unit Weight) ได้มีการทดสอบ 5 ส่วนผสมหลัก โดยมุ่งเน้นไปที่การใช้หิน #8 และหิน #3/4 ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่น่าสนใจดังนี้ส่วนผสมที่ S1 ใช้หิน #8 ร้อยละ 100 ของน้ำหนักมวลรวมการใช้หิน #8 เพียงอย่างเดียว ส่วนผสมที่ S1 มีค่าหน่วยน้ำหนักอยู่ที่ 2,142 กก./ตอลบ.ม. ซึ่งจัดอยู่ในระดับปานกลาง ผลที่ได้ชี้ให้เห็นว่าหินขนาดเล็กสามารถจัดเรียงตัวได้ค่อนข้างแน่น ช่วยเติมเต็มช่องว่างได้ดีพอสมควร ส่วนผสมที่ S2 ใช้หิน #3/4 ร้อยละ 100 ของน้ำหนักมวลรวมส่วนผสมนี้ให้ค่าหน่วยน้ำหนักสูงที่สุดที่ 2,335 กก./ตอลบ.ม. แม้การทดสอบความพรุนจะแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างมีช่องว่างค่อนข้างมาก แต่ด้วยขนาดและน้ำหนักที่มากกว่าของหิน #3/4 จึงส่งผลให้หน่วยน้ำหนักรวมของคอนกรีตสูงกว่าส่วนผสมอื่น ๆ

ส่วนผสมที่ S3 ใช้หิน #8 และ #3/4 อย่างละร้อยละ 50 ของน้ำหนักมวลรวมส่วนผสมที่มีการลดขนาดมวลรวมในสัดส่วนเท่ากันนี้มีหน่วยน้ำหนักอยู่ที่ 2,155 กก./ตอลบ.ม. ซึ่งอยู่ในระดับปานกลางและใกล้เคียงกับส่วนผสมที่ S1 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการผสมมวลรวมลดขนาดในสัดส่วนที่เท่ากันนี้ ส่วนผสมที่ S4 ใช้หิน #8 ร้อยละ 25 ของน้ำหนักมวลรวม และ ใช้หิน #3/4 ร้อยละ 75 ของน้ำหนักมวลรวม ตามลำดับส่วนผสมนี้มีหน่วยน้ำหนักอยู่ที่ 2,213 กก./ตอลบ.ม. ซึ่งจัดอยู่ในระดับสูงและใกล้เคียงกับส่วนผสมที่ S2 เนื่องจากมีสัดส่วนของหิน #3/4 ที่สูงกว่า หินที่มีขนาดใหญ่และน้ำหนักมากจึงส่งผลให้หน่วยน้ำหนักโดยรวมของคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามสัดส่วน ส่วนผสมที่ S5 ใช้หิน #8 ร้อยละ 75 ของน้ำหนักมวลรวม และ ใช้หิน #3/4 ร้อยละ 25 ของน้ำหนักมวลรวม ตามลำดับส่วนผสมนี้มีหน่วยน้ำหนักต่ำที่สุดที่ 2,027 กก./ตอลบ.ม. ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแม้จะมีหินขนาดเล็กในสัดส่วนมากก็ช่วยลดความพรุนได้ดีซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4 เนื่องจากว่าส่วนผสม S2 นั้นใช้มวลรวมขนาดใหญ่ทำให้มีชั้นฟิล์มซีเมนต์เพสต์ที่หนาส่งผลให้มีหน่วยน้ำหนักที่สูงที่สุดแม้จะมีความพรุนสูง ในทางกลับกันส่วนผสม S5 มีมวลรวมขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวสูงเกินกว่าที่ปริมาณซีเมนต์เพสต์จะเคลือบให้หนาแน่นได้ซึ่งก่อให้เกิดโพรงขนาดเล็กและความพรุนภายในเนื้อวัสดุซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่มาให้น้ำหนักมวลรวมลดลงอย่างมีนัยสำคัญแม้ความพรุนที่วัดได้จะต่ำก็ตาม แม้ว่าสัดส่วนวัสดุเริ่มต้นจะมีน้ำหนักรวมประมาณ 1,900 กก./ตอลบ.ม. แต่ค่าหน่วยน้ำหนักที่วัดได้อยู่ในช่วง 2,027 - 2,335 กก./ตอลบ.ม. อาจเกิดจากการอัดแน่นของมวลรวมระหว่างการขึ้นรูปการดูดซึมน้ำ

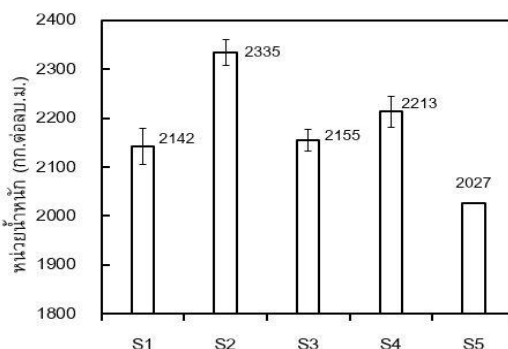


ตารางที่ 3 เปรียบเทียบการดูดซึม ความพรุน หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตพรุน 5 ส่วนผสม

ส่วนผสม	สัดส่วนหิน #8: #3/4	ผลการทดสอบ		
		การดูดซึม (%)	ความพรุน (%)	หน่วยน้ำหนัก กก./ม. ³
S1	100: 0	10.4	5.2	2142
S2	0: 100	18.7	9.6	2335
S3	50: 50	9.0	4.5	2155
S4	25: 75	12.9	6.4	2213
S5	75: 25	11.5	5.7	2027

เข้าสู่โครงสร้างรูปพรุน และน้ำที่คงค้างภายในตัวอย่าง ซึ่งส่งผลให้ค่าหน่วยน้ำหนักที่วัดได้สูงกว่าค่าทางทฤษฎี

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบการดูดซึม ความพรุน และหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตพรุนทั้ง 5 ส่วนผสม ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบในตารางที่ 3 จากตารางเปรียบเทียบการดูดซึม ความพรุน และ หน่วยน้ำหนัก พบว่าขนาดของมวลรวมที่แตกต่างกันในแต่ละส่วนผสมมีความสัมพันธ์โดยตรงกับคุณสมบัติทั้งหมดที่กล่าวมา อิทธิพลของมวลรวมต่อคุณสมบัติของคอนกรีตพรุนเมื่อเพิ่มสัดส่วนของหิน #3/4 (มวลรวมขนาดใหญ่) ในส่วนผสมที่ S2 (หิน #3/4 ร้อยละ 100) และส่วนผสมที่ S4 (หิน #3/4 ร้อยละ 75) ค่า หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากหิน #3/4 มีน้ำหนักมาก อย่างไรก็ตาม ความพรุนและการดูดซึมกลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ด้วยเช่นกัน โดยเฉพาะในส่วนผสมที่ S2 ที่ใช้หิน #3/4 เพียงอย่างเดียว พบว่ามีค่าการดูดซึมและความพรุนสูงที่สุด เมื่อเพิ่มสัดส่วนของหิน #8 (มวลรวมขนาดเล็ก) ในทางตรงกันข้ามเมื่อใช้หิน #8 ในสัดส่วนที่มากกว่า เช่น ในส่วนผสมที่ S1 (หิน #8 ร้อยละ 100) และส่วนผสมที่ S5 (หิน #8



รูปที่ 4 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตพรุนที่อายุการบ่ม 28 วันโดยใช้อัตราส่วนต่างๆทั้ง 5 ส่วนผสม

ร้อยละ 75) โครงสร้างคอนกรีตสามารถ ลดความพรุนลงได้ในระดับหนึ่ง เนื่องจากหินขนาดเล็กสามารถแทรกตัวเข้าเต็มช่องว่างได้ดีขึ้น แต่ หน่วยน้ำหนักโดยรวมจะลดลง เนื่องจากหิน #8 มีน้ำหนักน้อยกว่าหิน #3/4

3.4 กำลังรับแรงอัด

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของส่วนผสมทั้ง 5 ส่วนผสม แสดงดังรูปที่ 5 ผลการทดสอบจากการใช้อัตราส่วนหิน #8 และ หิน #3/4 ที่แตกต่างกันต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ณ อายุการบ่ม 28 วัน เป็นดังแสดงในตารางที่ 4

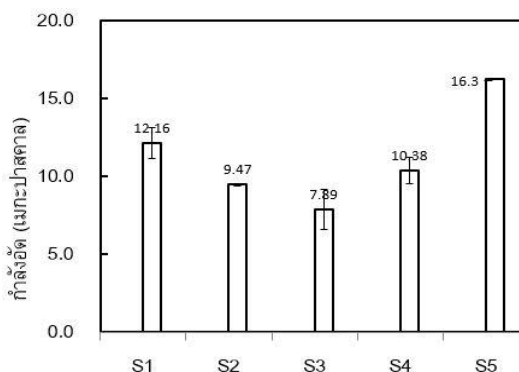
ส่วนผสมที่ S1 ใช้หิน #8 ร้อยละ 100 ของน้ำหนักมวลรวม การใช้หิน #8 เพียงอย่างเดียวแสดงกำลังอัดที่ 12.16 เมกะปาสกาล ผลลัพธ์นี้ชี้ให้เห็นว่าหินขนาดเล็กสามารถเรียงตัวได้อย่างหนาแน่น ทำให้โครงสร้างคอนกรีตพัฒนาความแข็งแรงได้ดีในระยะยาว แม้ว่าการพัฒนากำลังอัดในช่วงแรกอาจไม่เต็มที่ แต่เมื่อครบอายุ 28 วัน ค่ากำลังอัดที่ได้ก็อยู่ในระดับที่สูงพอสมควรและไม่ใช้ค่าที่ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนผสมอื่นๆ ส่วนผสมที่ S1 ใช้หิน #8 ร้อยละ 100 ของน้ำหนักมวลรวม



ตารางที่ 4 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัด น้ำหนักบรรทุก และการแอ่นตัว ของคอนกรีตพูน 5 ส่วนผสม

ส่วนผสม	สัดส่วนหิน #8: #3/4	ผลการทดสอบ		
		แรงอัด (เมกะปาสคาล)	น้ำหนักบรรทุก (นิวตัน)	การแอ่นตัว (มม.)
S1	100: 0	12.16	1900	2.01
S2	0: 100	9.47	1780	2.20
S3	50: 50	7.89	1300	1.12
S4	25: 75	10.38	1800	0.97
S5	75: 25	16.30	2300	1.57

ส่วนผสมที่ S2 ใช้หิน #3/4 ร้อยละ 100 ของน้ำหนักมวลรวมส่วนผสมนี้ให้กำลังอัดอยู่ในระดับต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับทุกส่วนผสม โดยมีค่ากำลังอัดที่ 9.47 เมกะปาสคาล การใช้หินขนาดใหญ่เพียงอย่างเดียวส่งผลให้โครงสร้างคอนกรีตมีความพรุนสูง และการยึดเกาะของเนื้อปูนไม่สามารถกระจายตัวได้อย่างทั่วถึงทำให้คอนกรีตมีขีดจำกัดในการรับแรงอัด แม้เวลาผ่านไปกำลังอัดก็ยังคงอยู่ในระดับต่ำส่วนผสมที่ S3 ใช้หิน #8 และ #3/4 อย่างละคร้อยละ 50 ของน้ำหนักมวลรวมส่วนผสมที่มีการลดขนาดมวลรวมในสัดส่วนเท่ากันนี้ ส่วนผสมนี้แสดงกำลังอัดที่ 7.89 เมกะปาสคาล แม้ผลการทดสอบก่อนหน้านี้จะระบุว่าส่วนผสมนี้มีความพรุนต่ำที่สุด กลับทำให้ค่ากำลังอัดที่ได้อยู่ในระดับต่ำที่สุด ซึ่งอาจเกิดจากการกระจายตัวของเนื้อปูนที่ไม่สมดุล หรือช่องว่างภายในโครงสร้างไม่ได้ช่วยเสริมประสิทธิภาพในการรับแรงอัดอย่างเต็มที่ สะท้อนให้เห็นถึงข้อจำกัดในการพัฒนาความแข็งแรง



รูปที่ 5 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูนที่อายุการบ่ม 28 วันโดยใช้อัตราส่วนต่างๆทั้ง 5 ส่วนผสม

ส่วนผสมที่ S4 ใช้หิน #8 ร้อยละ 25 ของน้ำหนักมวลรวม และ ใช้หิน #3/4 ร้อยละ 75 ของน้ำหนักมวลรวม ตามลำดับ กำลังอัดของส่วนผสมนี้อยู่ที่ 10.38 เมกะปาสคาล ส่วนผสมนี้แสดงการพัฒนากำลังอัดที่ชัดเจนจากช่วงต้นจนถึงอายุ 28 วัน ซึ่งบ่งชี้ถึงความสามารถในการพัฒนาโครงสร้างภายในเมื่อปูนซีเมนต์มีการแข็งตัวอย่างสมบูรณ์แม้จะมีสัดส่วนของหินขนาดใหญ่ในปริมาณมาก แต่ยังคงสามารถกระจายแรงอัดได้ดีในระยะยาว ส่งผลให้กำลังอัดอยู่ในระดับที่ค่อนข้างดี ส่วนผสมที่ S5 ใช้หิน #8 ร้อยละ 75 ของน้ำหนักมวลรวม และ ใช้หิน #3/4 ร้อยละ 25 ของน้ำหนักมวลรวมตามลำดับ ส่วนผสมนี้ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุกส่วนผสม โดยมีกำลังอัดที่ 16.30 เมกะปาสคาล

การรวมกันของหินขนาดเล็กที่ช่วยให้โครงสร้างแน่น และหินขนาดใหญ่ในปริมาณที่เหมาะสม ช่วยให้การกระจายตัวของมวลรวมมีความสมดุลมากที่สุด ทำให้โครงสร้างภายในมีความหนาแน่นและสามารถพัฒนาความแข็งแรงได้สูงทั้งในระยะสั้นและระยะยาว



จึงเหมาะสำหรับงานที่ต้องการกำลังอัดสูงและความทนทานต่อสภาวะแวดล้อม

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน พบว่าตัวอย่างคอนกรีตพูนทั้ง 5 ส่วนผสมมีค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 7.89 ถึง 16.30 เมกะปาสคาล ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานคอนกรีตพูนทั่วไปที่กำหนดให้มีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 2.8 ถึง 28 เมกะปาสคาล จะเห็นได้ว่าคอนกรีตพูนทุกส่วนผสมในงานวิจัยนี้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานและสามารถนำไปใช้งานได้

3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความพูนและกำลังรับแรงอัด

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความพูนและ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูน 5 ส่วนผสม (S1-S5) ดังแสดงในรูปที่ 6 มีความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

1. จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความพูนและ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูนพบว่าคอนกรีตที่มีความพูนสูงจะมีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำ เนื่องมาจากช่องว่างที่มากจะทำให้พื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพในการรับแรงลดลงส่งผลให้ค่าสตีเฟนลดลง

2. ส่วนผสมที่ S2 มีค่าความพูนสูงสุดแต่กำลังรับแรงอัดไม่ต่ำที่สุด แม้ว่าส่วนผสม S3 จะมีค่าความพูนต่ำที่สุด แต่กำลังอัดกลับต่ำที่สุดเช่นกัน ซึ่งอาจเกิดจากการกระจายตัวของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่สม่ำเสมอ รวมถึงความหนาของเพสต์ (Paste Thickness) ที่ไม่เพียงพอต่อการเคลือบผิวมวลรวมอย่างทั่วถึง ส่งผลให้บริเวณรอยต่อระหว่างมวลรวมและเพสต์ (Interfacial Transition Zone: ITZ) มีความอ่อนแอ ทำให้ประสิทธิภาพในการรับแรงอัดลดลง ผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นว่ายังมีปัจจัยอื่นที่นอกเหนือจาก

ความพูน เช่น สัดส่วนของมวลรวมมีบทบาทต่อกำลังรับแรงอัดอย่างมาก

3. แนวโน้มโดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความพูนและกำลังรับแรงอัดเป็นแบบผกผันหรือแบบปฏิภาคกลับ แต่จากกราฟนี้แสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความพูนและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูนเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ เช่น การกระจายตัวของขนาดช่องว่าง เป็นต้น ซึ่งทำให้ผลลัพธ์ของแต่ละตัวอย่างมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

3.6 กำลังรับแรงดัด

การทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูนหลังการบ่มเป็นเวลาระยะ 28 วันภายใต้สภาวะการรับแรงดัดแบบแรงกระทำ 3 จุด ซึ่งใช้เครื่องทดสอบที่บันทึกค่าแรงสูงสุดและการโก่งตัวของชิ้นงานระหว่างการรับแรงกดคอนกรีตดัดแสดงในรูปที่ 7 ส่วนผสมที่ S1 นี้แสดงพฤติกรรมการรับแรงดัด ค่ากำลังรับแรงดัดมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและยังคงแสดงพฤติกรรมที่มีสตีเฟนส์ที่ดีและมั่นคง ซึ่งรับน้ำหนักบรรทุกทุกที่ที่กระทำสูงสุด 1,900 นิวตัน มีการแอ่นตัว 2.01 มม. หลังบ่ม 28 วัน คอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมขนาดเล็ก #8 เพียงอย่างเดียวสามารถเพิ่มค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกได้อย่างมีนัยสำคัญอย่างไรก็ตามความแปรปรวนยังคงมีอยู่ในส่วนผสมนี้ เนื่องจากการจัดเรียงตัวของมวลรวมขนาดเล็กอาจเกิดช่องว่างที่ไม่สม่ำเสมอได้ง่าย

ส่วนผสมที่ S2 ซึ่งใช้มวลรวมหยาบหิน #3/4 ร้อยละ 100 ของน้ำหนักมวลรวมหลังจากบ่ม 28 วัน พบว่าตัวอย่างคอนกรีตพูนมีค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเท่ากับ 1,780 นิวตัน แสดงพฤติกรรม

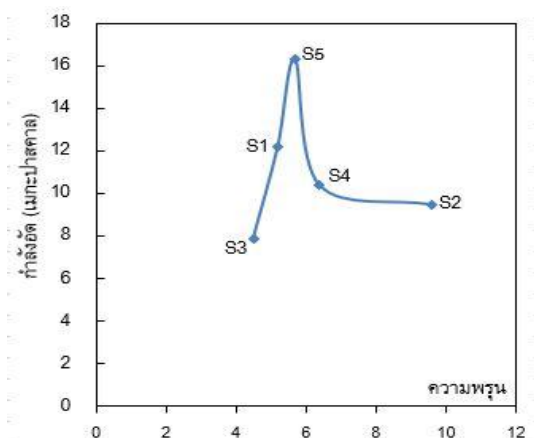


การรับแรงและการแอ่นตัวโดยมีค่าการแอ่นตัวสูงสุดเท่ากับ 2.34 มม. ซึ่งอยู่ในระดับปานกลาง ผลทดสอบบ่งชี้ว่าคอนกรีตมีพฤติกรรมแข็งแรงและเสียรูปน้อยมากก่อนที่จะเกิดการวิบัติ ส่งผลให้โครงสร้างภายในของคอนกรีตพูนมีความหนาแน่นและกำลังรับแรงเพิ่มขึ้นอย่างเหมาะสม [11]

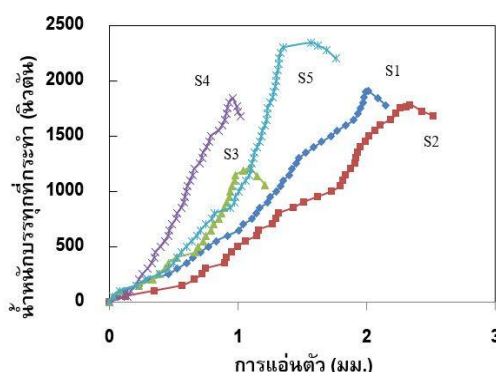
ส่วนผสมที่ S3 มีค่ากำลังน้ำหนักรวมทุก 1300 นิวตัน มีการแอ่นตัว 1.12 มม. แสดงพฤติกรรมการรับแรงที่ราบรื่นและมั่นคงในขณะที่ส่วนผสมที่ S1 และ S2 ก็มีความแข็งแรงใกล้เคียงกัน คุณสมบัติด้านความสม่ำเสมอนี้เป็นข้อได้เปรียบสำคัญสำหรับการนำส่วนผสมนี้ไปใช้งานจริงที่ต้องการคุณภาพคอนกรีตที่คงที่ จากการทดสอบกำลังแรงดัดของคอนกรีตพูน

ส่วนผสมที่ S4 ซึ่งประกอบด้วยมวลรวมหิน #8 ร้อยละ 25 และหิน #3/4 ร้อยละ 75 หลังจากบ่มครบ 28 วัน โดยให้ค่าน้ำหนักกระทำสูงสุดเท่ากับ 1,800 นิวตัน ซึ่งถือเป็นค่าที่อยู่ในระดับปานกลางเมื่อเทียบกับบรรดาสารผสมทั้งหมดที่ได้ทำการทดสอบ ส่วนผสมที่ S4 ซึ่งเน้นมวลรวมขนาดใหญ่ ให้ค่าการแอ่นตัว 0.97 มม. ซึ่งให้ผลการทดสอบกำลังแรงดัดหลังบ่ม 28 วันที่โดดเด่นในเรื่องของสตีเฟเนส

แม้ส่วนผสมที่ 4 จะมีการแอ่นตัวที่น้อย แต่ส่วนผสมที่ 4 ก็มีพฤติกรรมที่มีความเหนียวและสตีเฟเนสที่ดีในเวลาเดียวกัน โครงสร้างมีความหนาแน่นที่ดี รองรับน้ำหนักบรรทุกได้สูงและสามารถดูดซับพลังงานได้ดีก่อนการแตกหัก จึงเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการนำไปใช้ในโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรงสูงและเสถียรภาพระยะยาวจากการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูน



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและร้อยละความพูนที่อายุการบ่ม 28 วันโดยใช้อัตราส่วนต่างๆ ทั้ง 5 ส่วนผสม



รูปที่ 7 น้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคอนกรีตพูนที่อายุการบ่ม 28 วัน ที่ส่วนผสมที่ S1-S5

ส่วนผสมที่ S5 ซึ่งประกอบด้วยมวลรวมหิน #8 ร้อยละ 75 และหิน #3/4 ร้อยละ 25 หลังจากบ่มครบ 28 วัน พบว่าค่าน้ำหนักบรรทุกของตัวอย่างให้ค่าอยู่ในระดับสูงอย่างโดดเด่น โดยค่าน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 2,300 นิวตัน มีค่าการแอ่นตัว 1.57 มม. ถือเป็นค่าที่สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอื่นๆ ที่ได้ทดสอบมา



จากกราฟจะพบว่าน้ำหนักบรรทุกทุกที่อายุ 28 วันของส่วนผสมนี้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยเพิ่มขึ้นจากผลการทดสอบ ซึ่งแสดงถึงศักยภาพในการพัฒนากำลังของสูตรผสมนี้ได้อย่างต่อเนื่องและเกินความคาดหมายเมื่อเทียบกับสูตรผสมอื่น ๆ

ลักษณะเด่นของส่วนผสมที่ S5 นี้อยู่ที่ความสมดุลระหว่างมวลรวมขนาดเล็ก (หิน #8) และขนาดใหญ่ (หิน #3/4) ซึ่งช่วยให้เกิดการจัดเรียงตัวของเม็ดมวลรวมที่แน่นหนา พร้อมทั้งยังคงพื้นที่ช่องว่างสำหรับระบายน้ำตามคุณสมบัติของคอนกรีตพรุน ส่งผลให้ได้เนื้อคอนกรีตที่แข็งแรง เหนียว และมีพฤติกรรมที่สม่ำเสมอในทุกตัวอย่างที่ทดสอบ

3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและกำลังรับแรงดัด

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความพรุนและ กราฟน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวนั้นสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. คอนกรีตพรุนที่มีความพรุนต่ำมีแนวโน้มที่จะรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดได้มากกว่าคอนกรีตพรุนที่มีความพรุนสูง อย่างไรก็ตามอาจมีปัจจัยอื่น ๆ นอกเหนือจากความพรุนเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น ส่วนผสม หรือ กระบวนการบ่ม เป็นต้น

2. โดยทั่วไปคอนกรีตที่มีความพรุนสูงมักจะมีความยืดหยุ่นและความทนทานต่ำกว่าซึ่งส่งผลให้เมื่อรับน้ำหนักบรรทุกจะเกิดการแอ่นตัวได้มากกว่าเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่มีความพรุนต่ำกว่าเมื่อรับน้ำหนักที่เท่ากัน

อย่างไรก็ตาม ส่วนผสมที่ S2 และ S4 เป็นคอนกรีตพรุนที่มีความพรุนสูงมีการแอ่นตัว 2.2 มม. และ 0.97 มม. ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่มี

ความพรุนสูงมีแนวโน้มที่จะถึงจุดวิบัติได้เร็วขึ้น และไม่สามารถรับการเสียรูปได้มากเท่ากับคอนกรีตที่มีความพรุนต่ำ

อย่างไรก็ตาม ข้อมูลจากกราฟแสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ไม่ได้เป็นแบบเชิงเส้นเสมอไป ยังมีปัจจัยอื่นๆที่เข้ามามีผลต่อพฤติกรรมของคอนกรีตพรุน ในการศึกษาครั้งนี้การเติมเส้นใย PVA ร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์จะส่งผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้นและอาจทำให้เกิดฟองอากาศในเนื้อคอนกรีตเป็นปัจจัยลดทอนกำลังของคอนกรีตพรุน แต่ข้อจำกัดนี้ถูกชดเชยด้วยการใช้เกล็ดลอยแทนปูนซีเมนต์ซึ่งเกล็ดลอยได้เข้าไปเติมเต็มช่องว่างขนาดเล็กและช่วยเพิ่มกำลังรับแรงในระยะยาว

4. สรุปผลการทดลอง

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตพรุนจำนวน 5 ตัวอย่าง (ส่วนผสมที่ S1 – ส่วนผสมที่ S5) เพื่อศึกษาผลกระทบต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความพรุน หน่วยน้ำหนัก การดูดซึมน้ำ กำลังรับแรงอัด และ กำลังรับแรงดัด อายุการบ่ม 28 วัน สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ตัวอย่างส่วนผสม S1 มีค่าการดูดซึมน้ำ ความพรุน และ หน่วยน้ำหนักในระดับปานกลาง ซึ่งแสดงพฤติกรรมความเหนียว (Ductility) และ ความยืดหยุ่นที่ดี ในขณะที่การแอ่นตัวอยู่ในระดับปานกลางและสามารถดูดซับพลังงานได้ดี จึงเหมาะสมสำหรับโครงสร้างที่ต้องรองรับแรงกระแทกหรือพลศาสตร์ เช่น แรงสั่นสะเทือน

2. ตัวอย่างส่วนผสม S2 มีค่าความพรุนและค่าการดูดซึมน้ำสูงที่สุด จึงควรมีหน่วยน้ำหนักต่ำที่สุดแต่เนื่องจาก ตัวอย่างส่วนผสม S2 นั้นใช้มวลรวมขนาดใหญ่ทำให้มีชั้นฟิล์มซีเมนต์เพสต์ที่หนาส่งผลให้มีหน่วย



น้ำหนักมากที่สุด แม้คุณสมบัติทางกำลังจะไม่โดดเด่น แต่มีความเหมาะสมสำหรับงานคอนกรีตพูนทั่วไปที่เน้นประสิทธิภาพการระบายน้ำและต้องการเสถียรภาพทางโครงสร้าง เช่น ทางเท้า ทางจักรยานและ ลานอเนกประสงค์

3. ตัวอย่างส่วนผสม S3 มีค่าความพูนและการดูดซึมน้ำต่ำที่สุดโดยมีหน่วยน้ำหนักอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม เหมาะสำหรับโครงสร้างที่รับน้ำหนักบรรทุกไม่สูงมาก หรือ งานที่ไม่ได้ให้ความสำคัญกับพฤติกรรมการเสียรูปก่อนการแตกร้าว

4. ตัวอย่างส่วนผสม S4 ค่าการดูดซึมน้ำ ความพูน และ หน่วยน้ำหนักค่อนข้างสูงอันเนื่องมาจากการใช้สัดส่วนมวลรวมหยาบที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามส่วนผสมนี้มีจุดเด่นในด้านความสมดุลระหว่างความแข็งแรงและความเหนียวโดยให้ความเค้นและความสามารถในการดูดซับพลังงานในระดับสูงอย่างต่อเนื่อง จึงเหมาะสมกับโครงสร้างที่ต้องรับแรงกระทำแบบซ้ำ เช่น พื้นลานโรงงาน, โรงงานอุตสาหกรรมหนัก, ลานจอดรถ และ ถนน

5. ตัวอย่างส่วนผสม S5 ค่าการดูดซึมน้ำและความพูนลดลงมาอยู่ในระดับปานกลาง แต่หน่วยน้ำหนักยังต่ำอยู่เนื่องจากมวลรวมขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวสูงเกินกว่าที่ปริมาณซีเมนต์เพสต์จะเคลือบให้หนาแน่นได้ซึ่งก่อให้เกิดโพรงขนาดเล็กและความพูนภายในเนื้อวัสดุทำให้หน่วยน้ำหนักลดลงต่ำที่สุด

จุดเด่นสำคัญของตัวอย่างส่วนผสม S5 คือ ให้ค่าความเค้นสูงที่สุด แต่มีการแอ่นตัวน้อยซึ่งบ่งชี้ถึงพฤติกรรมการวิบัติแบบเปราะ จึงเหมาะสมกับโครงสร้างที่ต้องรับแรงดัดแบบคงที่ในระดับสูง เช่น พื้นที่รองรับเครื่องจักร

การเพิ่มสมรรถนะของคอนกรีตพูนในงานวิจัยนี้อาศัยคุณสมบัติของเถ้าลอยและเส้นใย PVA โดยผลการศึกษาพบว่า เส้นใย PVA สามารถช่วยเพิ่มกำลังและการยึดเกาะของคอนกรีตพูนอย่างมีนัยสำคัญ และ เถ้าลอยยังช่วยลดช่องว่างในคอนกรีตและพัฒนากำลังได้ในระยะยาว การใช้วัสดุทั้งสองชนิดจึงเป็นแนวทางที่ก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดทั้งในมิติการเพิ่มกำลัง มิติทางเศรษฐกิจ และ มิติของการบริหารจัดการวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมอย่างยั่งยืน

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ไม่ได้มีการเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม (control mix) ที่ไม่มีส่วนผสมเถ้าลอยและเส้นใย PVA ซึ่งถือเป็นข้อจำกัดของการศึกษา ดังนั้นการเปรียบเทียบผลกระทบของวัสดุผสมเพิ่มเติมจึงอาศัยการอ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมา และ งานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำโดยตรง (Permeability) ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญของคอนกรีตพูน จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก คณะวิศวกรรมศาสตร์ และสถาปัตยกรรมศาสตร์ เขตพื้นที่อุเทนถวายที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุและเครื่องมือในการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Abousnina, F. Aljuaydi, B. Benabed, M.H. Almabrok, and V. Vimonsatit, A state-of-the-art review on the influence of porosity on the compressive strength of porous concrete for infrastructure applications, Buildings, 2025, 15(13), 2311.

- [2] K. Triphone, R. Thep Wong, A study of water permeability on porous concrete using recycled coarse aggregates, The 25th National Convention on Civil Engineering, Proceeding, 2020, MAT13, 1-7. (in Thai)
- [3] ACI 522R-10: Report on Pervious Concrete, American Concrete Institute, USA, 2010.
- [4] J. Yang and G. Jiang, Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. Cement and Concrete Research, 2003, 33(3), 381-386.
- [5] Y. Aoki, R.S. Ravindrarajah, and H. Khabbaz, Properties of pervious concrete containing fly ash, Road Materials and Pavement Design, 2012, 13(1), 1-11.
- [6] TIS 15-2562: Portland Cement, Ministry of Industry, Thailand, 2019. (in Thai)
- [7] ASTM C642-21: Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2021.
- [8] ASTM C39/C39M-21: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, Conshohocken, PA, USA, 2021.
- [9] ASTM C78/C78M-18 Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete, ASTM International, Conshohocken, PA, USA, 2021.
- [10] V.V. Hung, S.Y. Seo, H.Y. Kim and G.C. Lee, Permeability and strength of pervious concrete according to aggregate size and blocking material, Sustainability, 2021, 13(1), 426.
- [11] H. Bilal, X. Gao, L. Cavaleri., A. Khan, and M. Ren, Mechanical, durability, and microstructure characterization of pervious concrete incorporating polypropylene fibers and fly ash/silica fume, Journal of Composites Science, 2024, 8(11), 456.