การวิเคราะห์สมรรถนะของวัสดุซีเมนต์ผสมเม็ดยางบดและน้ำยางพารา ภายใต้กลไกความพรุน

Performance Analysis of Cement Composites Incorporating Crumb Rubber and Natural Rubber Latex under Porosity-Driven Mechanisms

ปราชญ์ ใหญ่เอี่ยม วชิระ แสงรัศมี*
สาขาวิชาสถาปัตยกรรมนวัตกรรมสร้างสรรค์เพื่อความยั่งยืน
คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
Prach Yaieam, Vachira Sangrutsamee
Department of Creative Innovation Architecture for Sustainability,
Faculty of Architecture, Rajamangala University of Technology Thanyaburi
prach_y@mail.rmutt.ac.th, vachira_s@rmutt.ac.th
*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ

รับบทความ	23/04/2569
แก้ไขบทความ	20/05/2569
ยอมรับบทความ	19/06/2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติของวัสดุซีเมนต์ผสมเม็ดยางบดและน้ำยางพาราในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน โดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงบูรณาการระหว่างความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และกำลังอัดของวัสดุ ภายใต้กลไกที่ขับเคลื่อนด้วยความพรุน โดยมีอัตราส่วนซีเมนต์ต่อเม็ดยางบด 3 ระดับ (1:1, 1:2.5 และ 1:4) และอัตราส่วนของสารละลายน้ำต่อน้ำยางพารา 4 ระดับ (1:0, 1:0.1, 1:0.2 และ 1:0.3) ทดสอบสมบัติทางกายภาพและเชิงกล ได้แก่ ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และกำลังอัด

ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มปริมาณเม็ดยางบดและน้ำยางพาราส่งผลให้ความพรุนและค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุเพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าความหนาแน่นและกำลังอัดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ผ่านแนวคิดประสิทธิภาพที่ขับเคลื่อนด้วยความพรุน (porosity-driven performance) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความพรุนเป็นตัวแปรหลักที่ควบคุมสมบัติวัสดุ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พบว่าสูตรผสมในกลุ่มอัตราส่วน 1:1 (T1) มีค่าการรับกำลังอัด 8.9-10 เมกะปาสคาล (MPa) ค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่า 10% และความหนาแน่น 1500 กก./ลบ.ม. มีสมบัติเหมาะสมสำหรับการใช้งานเป็นคอนกรีตบล็อกมวลเบา ในขณะที่สูตรผสมที่มีเม็ดยางบดสูงเหมาะสำหรับงานไม่รับน้ำหนักหรือวัสดุฉนวน

ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของการใช้วัสดุผสมยางรีไซเคิลเป็นวัสดุก่อสร้างทางเลือกโดยการควบคุมระดับความพรุน คุณสมบัติของวัสดุสามารถปรับแต่งให้ตรงตามข้อกำหนดด้านประสิทธิภาพเฉพาะ ซึ่งเป็นแนวทางที่นำไปสู่การก่อสร้างที่ยั่งยืนได้

***คำสำคัญ**: วัสดุซีเมนต์ผสม เม็ดยางบด น้ำยางพารา ความพรุน สมรรถนะวัสดุ*

Abstract

This study examines the characteristics of cement composites produced with the mixing of varying ratios of crumb rubber and natural rubber latex, and the interrelationship between density, water absorption and compressive strength in response to porosity. The used proportions are 1:1, 1:2.5 and 1:4 cement to crumb rubber, and 1:0, 1:0.1, 1:0.2 and 1:0.3 water to latex solution. The physical and mechanical properties, such as density, water absorption and compressive strength, were assessed.

The experimental results revealed that increasing the proportions of crumb rubber and natural latex led to higher porosity and water absorption, while density and compressive strength significantly decreased. This relationship can be explained through the concept of porosity-driven performance, indicating that porosity is a key factor governing material properties. Compared with industrial product standards, the mixture with a 1:1 ratio (T1) exhibited compressive strength values of 8.9–10 MPa, water absorption below 10%, and a density of approximately 1500 kg/m³, demonstrating suitable properties for lightweight concrete block applications. In contrast, mixtures containing higher proportions of crumb rubber are more appropriate for non-load-bearing applications or thermal insulation materials.

The above work studied the performance of recycled rubber-based composites as a sustainable alternative to conventional construction materials, whereby the mechanical properties of the composites can be tailored to suit different applications by varying the porosity during the manufacturing process.

keywords*: cement composites, crumb rubber, natural rubber latex, porosity, material performance*

บทนำ

ในปัจจุบันปริมาณยางรถยนต์ใช้แล้วทั่วโลกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามการขยายตัวของอุตสาหกรรมยานยนต์ ส่งผลให้เกิดปัญหาขยะยางรถยนต์ซึ่งย่อยสลายได้ยากและก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาว (Mohajerani et al., 2020) ในปี พ.ศ. 2567 ประเทศไทยมีจำนวนรถยนต์จดทะเบียนสะสมมากถึง 44.91 ล้านคัน โดยในจำนวนนี้เป็นรถใหม่ 2.67 ล้านคัน และยังมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น (กลุ่มสถิติการขนส่ง, 2567) ส่งผลให้มียางรถยนต์ที่หมดสภาพจากรถยนต์ส่วนบุคคล (ไม่เกิน 4 ล้อ) มากถึง 30 ล้านเส้นหรือประมาณ 240,000 ตันต่อปี ซึ่งเป็นปริมาณที่สูง (กรมการขนส่งทางบก, 2567) การนำยางรถยนต์ใช้แล้วมารีไซเคิลเป็นเม็ดยางบดเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่ได้รับความสนใจอย่าง แพร่หลาย เนื่องจากสามารถลดปริมาณของเสียและเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้ (Ince et al., 2022)

วัสดุซีเมนต์ผสมเม็ดยางบดได้ถูกศึกษาอย่างต่อเนื่อง โดยพบว่าการเติมเม็ดยางสามารถช่วยลดความหนาแน่น เพิ่มความยืดหยุ่น และปรับปรุงสมบัติบางประการ เช่น ความต้านทานแรงกระแทก อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่รายงานตรงกันว่าการเพิ่มปริมาณเม็ดยางบดส่งผลให้กำลังอัดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ อันเนื่องมาจากประการแรกคือการยึดเกาะที่ไม่สมบูรณ์ระหว่างผิวของยางและเนื้อซีเมนต์ และประการที่สองคือการเพิ่มขึ้นของความพรุนภายในวัสดุ (พัฒนศักดิ์ ชัยพรรณา และนัฐวุฒิ เหมะธุลิน, 2565; Li et al., 2022; Siddique & Naik, 2004)

เพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าว นักวิจัยได้พยายามปรับปรุงสมบัติของวัสดุโดยการเติมสารปรับปรุงคุณภาพ เช่น โพลีเมอร์หรือน้ำยางพาราซึ่งสามารถช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างอนุภาคและปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ (Ohama, 1995) งานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าน้ำยางพาราสามารถสร้างฟิล์มโพลีเมอร์ภายในเนื้อวัสดุและช่วยเพิ่มความเหนียวของระบบซีเมนต์ อย่างไรก็ตาม การใช้ในปริมาณสูงอาจทำให้เกิดโพรงอากาศเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ความหนาแน่นลดลงรวมถึงค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น (ชูเกียรติ ชูสกุล และคณะ, 2566; Nattakamol Kerdjangwat & Chuchai Sujivorakul, 2025)

แม้ว่าจะมีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาผลของเม็ดยางบดและน้ำยางพาราต่อสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลของวัสดุซีเมนต์ แต่ส่วนใหญ่ยังคงมุ่งเน้นการรายงานผลการทดลองในลักษณะเชิงเดี่ยว เช่น การศึกษาผลของตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งต่อกำลังอัดหรือความหนาแน่น โดยยังขาดการวิเคราะห์เชิงบูรณาการที่เชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติต่างๆภายใต้กรอบแนวคิดเดียวกัน นอกจากนี้ ยังมีข้อจำกัดในการอธิบายกลไกที่เชื่อมโยงโครงสร้างจุลภาคกับสมรรถนะของวัสดุในภาพรวม โดยเฉพาะในระบบที่มีทั้งเม็ดยางบดและน้ำยางพาราร่วมกัน ดังนั้นช่องว่างงานวิจัยที่สำคัญสามารถสรุปได้ดังนี้ 1) การขาดการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงระบบระหว่างความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และกำลังอัดภายใต้ตัวแปรหลายมิติ 2) การขาดกรอบแนวคิดเชิงกลไกที่อธิบายบทบาทของความพรุนในการควบคุมสมบัติวัสดุ และ 3) การขาดการเชื่อมโยงผลการทดลองกับศักยภาพในการนำไปใช้งานจริงในงานสถาปัตยกรรมและวัสดุก่อสร้างทางเลือก

เพื่อตอบโจทย์ช่องว่างดังกล่าว งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติของวัสดุซีเมนต์ผสมเม็ดยางบดและน้ำยางพาราในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน โดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงบูรณาการระหว่างความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และกำลังอัด รวมถึงการอธิบายกลไกของวัสดุผ่านแนวคิดที่ขับเคลื่อนด้วยความพรุน (porosity-driven mechanism) นอกจากนี้ ยังมีการประเมินสมบัติวัสดุเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เพื่อพิจารณาศักยภาพในการนำไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้างทางเลือกที่มีความยั่งยืน

วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

การพัฒนาวัสดุซีเมนต์ผสมเม็ดยางบดได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่องในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา เนื่องจากสามารถนำของเสียจากยางรถยนต์มาใช้ประโยชน์และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม งานวิจัยจำนวนมากได้ศึกษาผลของการแทนที่มวลรวมด้วยเม็ดยางบดในคอนกรีต โดยพบว่าการเติมเม็ดยางช่วยลดความหนาแน่นของวัสดุ เพิ่มความยืดหยุ่น และเพิ่มความสามารถในการดูดซับพลังงานจากแรงกระแทก อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดสำคัญคือการลดลงของกำลังอัดและความแข็งของวัสดุ (Mohajerani et al., 2020; Siddique & Naik, 2004)

สาเหตุหลักของสมบัติเชิงกลที่ลดลงในวัสดุซีเมนต์ผสมเม็ดยางบดเกิดจากลักษณะผิวของเม็ดยางที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic surface) และมีการยึดเกาะกับเนื้อซีเมนต์ได้ไม่ดี ส่งผลให้เกิดเขตต่อระหว่างวัสดุ (interfacial transition zone: ITZ) ที่อ่อนแอ รวมถึงการเพิ่มขึ้นของโพรงอากาศภายในวัสดุ (Li et al., 2022) การเพิ่มขึ้นของความพรุนดังกล่าวมีผลโดยตรงต่อการลดลงของกำลังอัด และการเพิ่มขึ้นของการดูดซึมน้ำ ซึ่งเป็นตัวชี้วัดสำคัญของความทนทานของวัสดุ เพื่อแก้ไขข้อจำกัดด้านสมบัติเชิงกล นักวิจัยได้เสนอแนวทางการปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ โดยการใช้สารปรับปรุงคุณภาพ เช่น โพลีเมอร์หรือน้ำยางพารา ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างอนุภาคและลดความเปราะของวัสดุได้ (สุดนิรัน เพชรรัตน์ และคณะ, 2564; Ohama, 1995) งานวิจัยด้านโพลีเมอร์ซีเมนต์พบว่า การเติมโพลีเมอร์สามารถก่อให้เกิดฟิล์มโพลีเมอร์ภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งช่วยเพิ่มความเหนียว และลดการแตกร้าว อย่างไรก็ตาม การใช้ในปริมาณสูงอาจส่งผลให้เกิดฟองอากาศและเพิ่มความพรุนของโครงสร้าง ซึ่งอาจส่งผลเสียต่อกำลังอัด (Hilal, 2016)

ในกรณีของการใช้วัสดุยางร่วมกับโพลีเมอร์ งานวิจัยล่าสุดได้แสดงให้เห็นถึงความซับซ้อนของปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสอง โดยการเพิ่มเม็ดยางบดร่วมกับโพลีเมอร์อาจให้ผลทั้งในเชิงบวกและลบ ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนและกระบวนการผสม (Li et al., 2022)

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่ยังคงมุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรในลักษณะเชิงเดี่ยว เช่น การศึกษาผลของปริมาณเม็ดยางต่อกำลังอัด หรือผลของโพลีเมอร์ต่อความหนาแน่น โดยยังขาดการวิเคราะห์เชิงบูรณาการที่เชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติต่าง ๆ ภายใต้กรอบแนวคิดเดียวกัน ยังขาดการพัฒนาแบบจำลองเชิงแนวคิดที่สามารถอธิบายกลไกของวัสดุในภาพรวม โดยเฉพาะบทบาทของความพรุนในการควบคุมสมบัติทั้งทางกายภาพและเชิงกลของวัสดุ

วิธีการดำเนินงานวิจัย

วัตถุดิบและอัตราส่วนผสม

วัตถุดิบที่ใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตชิ้นทดสอบ ประกอบด้วย

- ซีเมนต์สูตรไฮดรอลิก (Hydraulic Cement) ยี่ห้อ ทีพีไอ ชนิดปูนแดง 299 มอก. 2594-2556 และ ASTM C1157 TYPE GU เป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม น้ำหนัก 1400 กรัม/ลิตร
- เม็ดยางบด (Crumb Rubber) ยางรถยนต์บด (T) ขนาด 1-3 มิลลิเมตร น้ำหนัก 375 กรัม/ลิตร จากบริษัท แมกซ์เวลล์ เอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด จ.สระบุรี
- น้ำประปา ที่มีค่า pH 6.5 ±0.5 ใสและสะอาด
- น้ำยางธรรมชาติ (Natural Rubber Latex) น้ำยางพารา (P) ที่เป็นน้ำยางสดมีโครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วย Cis-1,4-Polyisoprene สูตรเคมีคือ (C_5H_8) และถูกรักษาสภาพด้วยแอมโมเนีย
- สารลดแรงตึงผิว NP-9 (Nonyl Phenol Ethoxylate-NPE) สูตรเคมีคือ $C_{15}H_{24}O(C_2H_4O)_9$ ชนิดไม่มีประจุ (Nonionic Surfactant)

ในการศึกษาวัสดุซีเมนต์ผสมน้ำยางพารา (P) และเม็ดยางบด (T) กำหนดอัตราส่วนผสมชิ้นทดสอบทั้ง 12 สูตร แสดงดังตาราง 1 มีตัวแปรหลักสองตัวคือ

- อัตราส่วนน้ำต่อปริมาณน้ำยางพารา (P) ที่แตกต่างกัน 1:0, 1:0.1, 1:0.2 และ 1:0.3
- อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อเม็ดยางบด (T) 1:1, 1:2.5 และ 1:4

ตาราง 1 อัตราส่วนผสมทั้งหมด

สัญลักษณ์	อัตราส่วนผสมโดยปริมาตร (ลิตร)		
	ซีเมนต์	สารละลาย(น้ำ : พารา*)	เม็ดยางบด
P0T1	1	0.66(1:0)	1
P1T1	1	0.66(1:0.1)	
P2T1	1	0.66(1:0.2)	
P3T1	1	0.66(1:0.3)	
P0T2	1	0.66(1:0)	2.5
P1T2	1	0.66(1:0.1)	
P2T2	1	0.66(1:0.2)	
P3T2	1	0.66(1:0.3)	
P0T4	1	0.66(1:0)	4
P1T4	1	0.66(1:0.1)	
P2T4	1	0.66(1:0.2)	
P3T4	1	0.66(1:0.3)	

หมายเหตุ: * อัตราส่วนของน้ำยางพาราต่อสารลดแรงตึงผิวเท่ากับ 1:0.1

ที่มา: ผู้วิจัย, 2568

วิธีการผลิตชิ้นงานทดสอบ

การผลิตชิ้นทดสอบมีขั้นตอนการผลิตดังนี้

- เตรียมแม่พิมพ์เพื่อผลิตชิ้นทดสอบ และตวงวัตถุดิบตามอัตราส่วนที่แสดงในตาราง 1
- ผสมสารลดแรงตึงผิว (NP-9) กับน้ำยางพารา (P) ให้เข้ากันตามอัตราส่วนที่กำหนด จากนั้นนำมาผสมน้ำให้เข้ากันตามอัตราส่วนในตาราง 1 เพื่อลดการจับตัวของน้ำยางพารากับซีเมนต์ในสารละลาย (น้ำ : น้ำยางพารา)
- นำซีเมนต์ผสมกับสารละลายที่เตรียมไว้ตามอัตราส่วนที่กำหนดในตาราง 1 ผสมให้เข้ากันด้วยสว่านไฟฟ้า
- เติมเม็ดยางบด (T) ตามอัตราส่วนที่กำหนดในตารางที่ 1 ผสมให้เข้ากันด้วยสว่านไฟฟ้าประมาณ 2 นาที
- เทส่วนผสมลงแม่พิมพ์ที่เตรียมไว้ กระทุ้งให้ส่วนผสมลงในแม่พิมพ์ทั่วทุกตำแหน่งและปาดผิวบนให้เรียบ
- ปล่อยให้วัสดุผสมจับตัวกันเป็นเวลา 12 ชั่วโมงจึงทำการถอดแม่พิมพ์
- นำชิ้นทดสอบทั้งหมดไปบ่มในที่ร่มเป็นเวลา 28 วัน ก่อนนำไปทดสอบ

การทดสอบวัสดุ

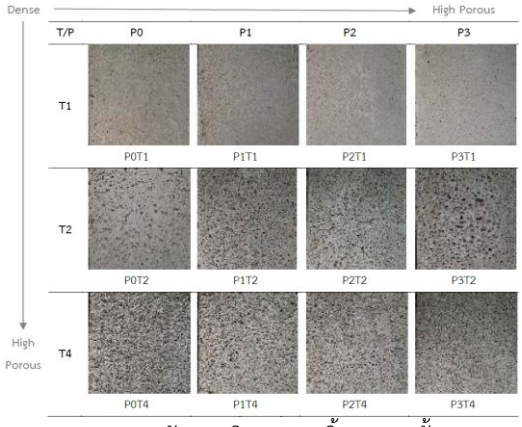
ชิ้นทดสอบขนาด 10x10x10 เซนติเมตร จำนวน 12 สูตร (อัตราส่วนผสม) สูตรละ 3 ชิ้น รวมชิ้นทดสอบทั้งหมด 36 ชิ้น ที่ได้ทำการบ่มในที่ร่มเป็นเวลา 28 วัน นำมาทดสอบสมบัติทางกายภาพ (ลักษณะผิว ขนาด ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำ) โดยอ้างอิงวิธีการตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C642 และการทดสอบทางกล (การรับแรงอัด) โดยอ้างอิงวิธีการตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C109 จากนั้นนำผลการทดสอบมาหาค่าเฉลี่ยของแต่ละส่วนผสม

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

ลักษณะโครงสร้างและกลไกการเกิดโพรงอากาศ

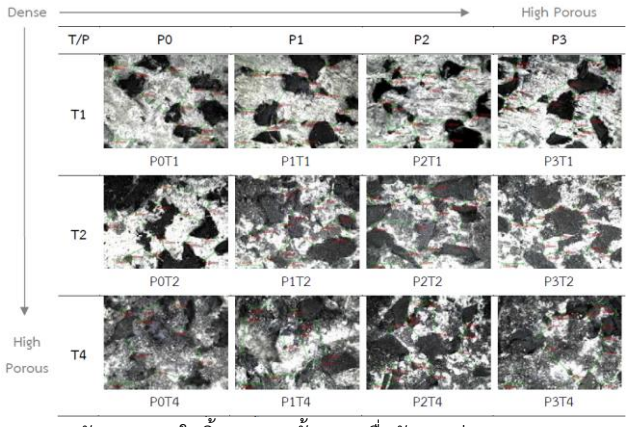
การเปลี่ยนแปลงลักษณะผิวของวัสดุตามปริมาณเม็ดยางบดแสดงในภาพ 1 แสดงให้เห็นว่าลักษณะผิวของชิ้นทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนตามอัตราส่วนของเม็ดยางบด (T) โดยในกลุ่ม T1 (1:1) พื้นผิวมีลักษณะค่อนข้างทึบแน่น และมีโพรงอากาศขนาดเล็กกระจายตัวอย่างจำกัด ในขณะที่กลุ่ม T2 (1:2.5) และ T4 (1:4) แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของจำนวนและขนาดของโพรงอากาศอย่างต่อเนื่อง

เมื่อทำการตัดและตรวจสอบภายในด้วยกล้องขยายแสดงดังภาพ 2 พบว่าลักษณะโครงสร้างภายในสอดคล้องกับพื้นผิวภายนอก โดยชิ้นทดสอบในกลุ่ม T1, T2 และ T4 แสดงการเพิ่มขึ้นของขนาดและปริมาณของโพรงอากาศตามสัดส่วนเม็ดยางบด (T) ชิ้นทดสอบที่มีน้ำยางพารา (P) เป็นส่วนผสมจะมีขนาดและปริมาณของโพรงอากาศสูงขึ้นตามปริมาณน้ำยางพารา (P) เช่นกันจาก P1 (1:0.1), P2 (1:0.2) และ P3 (1:0.3) ตามลำดับ เมื่อเทียบกับ P0 (1:0) ที่ไม่มีน้ำยางพาราเป็นส่วนผสม



ภาพ 1 ลักษณะผิวนอกของชิ้นทดสอบทั้งหมด

ที่มา: ผู้วิจัย, 2568



ภาพ 2 ลักษณะภายในชิ้นทดสอบทั้งหมด เมื่อตัดและถ่ายภาพขยาย 50x

ที่มา: ผู้วิจัย, 2568

พฤติกรรมดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากลักษณะของเม็ดยางบดที่มีพื้นผิวไม่ชอบน้ำ และมีความยืดหยุ่นสูง ซึ่งส่งผลให้การยึดเกาะระหว่างอนุภาคยางกับเนื้อซีเมนต์ลดลง และเกิดช่องว่างระหว่างเฟสมากขึ้น (Li et al., 2022) นอกจากนี้การแทนที่มวลรวมด้วยเม็ดยางยังทำให้ความหนาแน่นลดลงและเพิ่มความพรุนโดยรวมของวัสดุ (Mohajerani et al., 2020)

ในขณะเดียวกัน การเพิ่มอัตราส่วนของน้ำยางพารา (P) จาก P1 ถึง P3 พบว่าทำให้พื้นผิวของวัสดุมีความหยาบและมีโพรงอากาศเพิ่มขึ้นในทุกกลุ่ม T ซึ่งสะท้อนถึงบทบาทของน้ำยางพาราในการเปลี่ยนแปลงสภาวะของเนื้อวัสดุจากระบบที่ค่อนข้างหนาแน่นไปสู่ระบบที่มีความพรุนสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

จากภาพ 2 ซึ่งแสดงโครงสร้างภายในของชิ้นทดสอบภายใต้การขยาย 50 เท่า พบว่าโครงสร้างภายในมีแนวโน้มสอดคล้องกับลักษณะผิวภายนอก กล่าวคือ เมื่อปริมาณเม็ดยางบด (T) เพิ่มขึ้น จะเกิดการเพิ่มขึ้นของโพรงอากาศทั้งในด้านขนาดและจำนวน ในกลุ่ม T1 โครงสร้างภายในยังคงมีความต่อเนื่องของเนื้อซีเมนต์ค่อนข้างดี และมีโพรงอากาศขนาดเล็กกระจายตัว แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเม็ดยางบดเป็น T2 และ T4 พบว่ามีการรวมตัวของโพรงอากาศและเกิดช่องว่างขนาดใหญ่ที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งบ่งชี้ถึงความสมบูรณ์ของโครงสร้างภายในที่ลดลง

ผลลัพธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่รายงานว่า การเพิ่มปริมาณยางรีไซเคิลในคอนกรีตจะส่งผลให้โครงสร้างภายในมีความพรุนสูงขึ้น และมีการกระจายตัวของโพรงอากาศมากขึ้น เนื่องจากการยึดเกาะที่ไม่สมบูรณ์ระหว่างชั้นยางและซีเมนต์ (Singaravel et al., 2024)

นอกจากนี้ การเพิ่มปริมาณน้ำยางพารา (P) ยังส่งผลให้เกิดโพรงอากาศที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและมีลักษณะเชื่อมต่อกันมากขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลของวัสดุ

บทบาทของน้ำยางพาราและสารลดแรงตึงผิวต่อการเกิดโพรงอากาศ

กลไกการเกิดโพรงอากาศในวัสดุสามารถอธิบายได้จากปฏิสัมพันธ์ระหว่างน้ำยางพารา (P) และสารลดแรงตึงผิว (NP-9) ในระหว่างกระบวนการผสม โดยน้ำยางพาราประกอบด้วยโพลีเมอร์ชนิด Cis-1,4-polyisoprene ซึ่งสามารถสร้างฟิล์มโพลีเมอร์ภายในเนื้อวัสดุ และมีบทบาทในการปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างอนุภาคบางส่วน (สุดนิรัน เพชรรัตน์ และคณะ, 2564; Nattakamol Kerdjangwat & Chuchai Sujivorakul, 2025) อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการใช้ร่วมกับสารลดแรงตึงผิว (NP-9) จะทำให้แรงตึงผิวของของเหลวลดลง ส่งผลให้เกิดฟองอากาศจำนวนมากในระหว่างการผสม (air entrainment mechanism) ฟองอากาศเหล่านี้เมื่อวัสดุแข็งตัวจะกลายเป็นโพรงอากาศถาวรภายในโครงสร้าง อีกทั้งการเพิ่มปริมาณน้ำยางพารายังส่งผลให้ความหนืดของสารละลายเพิ่มขึ้น ซึ่ง

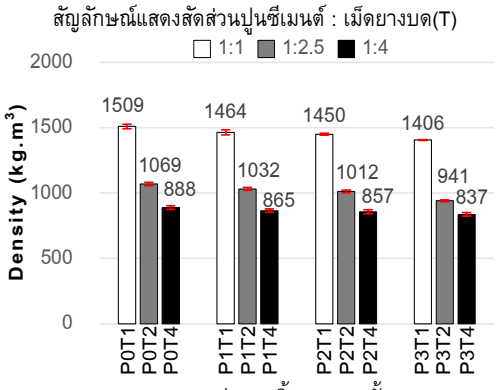
ช่วยให้ฟองอากาศมีเสถียรภาพมากขึ้นและยากต่อการสลายตัว ส่งผลให้เกิดการสะสมของโพรงอากาศในระดับที่สูงขึ้น กลไกดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานที่ระบุว่าการใช้โพลีเมอร์ในคอนกรีตสามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและเพิ่มปริมาณโพรงอากาศได้อย่างมีนัยสำคัญ (Ohama, 1995)

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ปริมาณเม็ดยางบดและน้ำยางพาราเป็นตัวแปรสำคัญที่ควบคุมการเกิดโพรงอากาศภายในวัสดุ โดยมีผลโดยตรงต่อโครงสร้างจุลภาค ซึ่งเป็นปัจจัยพื้นฐานที่กำหนดสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของวัสดุในภาพรวม

ความหนาแน่นของวัสดุและความสัมพันธ์กับโครงสร้างภายใน

ผลของปริมาณเม็ดยางบดต่อความหนาแน่นรวมของวัสดุซีเมนต์ผสมน้ำยางพาราและเม็ดยางบดแสดงดังภาพ 3 แสดงถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นตามอัตราส่วนผสมอย่างชัดเจน จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของเม็ดยางบด (T) จาก 1:1 (T1) เป็น 1:2.5 (T2) และ 1:4 (T4) ค่าความหนาแน่นของวัสดุลดลงอย่างต่อเนื่องในทุกกรณีของสารละลาย โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้สารละลายเป็นน้ำเพียงอย่างเดียว (P0) ซึ่งค่าความหนาแน่นลดลงจาก 1,509 กก./ม³ (P0T1) เป็น 1,068 กก./ม³ (P0T2) และ 888 กก./ม³ (P0T4) ตามลำดับ

พฤติกรรมดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากการแทนที่มวลรวมซีเมนต์ด้วยเม็ดยางบดซึ่งมีความหนาแน่นต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ (ประมาณ 300–500 กก./ม³) ส่งผลให้ความหนาแน่นรวมของวัสดุลดลงตามสัดส่วนของเม็ดยางที่เพิ่มขึ้น (Li et al., 2022; Mohajerani et al., 2020) นอกจากนี้ การยึดเกาะที่ไม่สมบูรณ์ระหว่างอนุภาคยางและเนื้อซีเมนต์ยังส่งผลให้เกิดช่องว่างภายในเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นอีกปัจจัยสำคัญที่ทำให้ค่าความหนาแน่นลดลง



ภาพ 3 ความหนาแน่นของชิ้นทดสอบทั้งหมด

ที่มา: ผู้วิจัย, 2568

อิทธิพลของน้ำยางพาราต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น

เมื่อพิจารณาผลของน้ำยางพารา (P) พบว่า การเพิ่มอัตราส่วนของน้ำยางพาราจาก P1 (1:0.1) ไปยัง P3 (1:0.3) ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของวัสดุมีแนวโน้มลดลงในทุกกลุ่ม T โดยเฉพาะในกลุ่มที่มีเม็ดยางบดสูง (T4) ซึ่งมีค่าความหนาแน่นต่ำสุด กลไกของปรากฏการณ์นี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเกิดโพรงอากาศที่ได้กล่าวคือ การใช้สารลดแรงตึงผิว (NP-9) ร่วมกับน้ำยางพาราส่งผลให้เกิดฟองอากาศจำนวนมากในระหว่างกระบวนการผสม และฟองอากาศเหล่านี้จะคงอยู่ในรูปของโพรงอากาศถาวรเมื่อวัสดุแข็งตัว

นอกจากนี้ การเพิ่มปริมาณน้ำยางพารายังทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ฟองอากาศมีเสถียรภาพมากขึ้นและไม่สามารถสลายตัวได้ง่าย จึงเกิดการสะสมของโพรงอากาศในระดับที่สูงขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นรวมของวัสดุลดลงอย่างต่อเนื่อง (Ohama, 1995) ผลลัพธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่ระบุว่าการใช้โพลีเมอร์ในวัสดุซีเมนต์สามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและเพิ่มปริมาณโพรงอากาศ ซึ่งส่งผลให้ความหนาแน่นลดลง โดยเฉพาะในระบบที่มีการเกิดฟองอากาศร่วมด้วย (Siddique & Naik, 2004)

ความหนาแน่นเป็นตัวบ่งชี้ความพรุน

จากการวิเคราะห์ร่วมระหว่างผลการทดลองในภาพ 3 และลักษณะจุลโครงสร้างในภาพ 1 และ 2 สามารถสรุปได้ว่า ความหนาแน่นของวัสดุมีความสัมพันธ์โดยตรงกับระดับความพรุนภายในโครงสร้าง กล่าวคือ วัสดุที่มีความหนาแน่นสูง (เช่น กลุ่ม T1) มีโครงสร้างที่ทึบแน่นและมีโพรงอากาศในปริมาณจำกัด และวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ (เช่น กลุ่ม T4 และ P3) มีโครงสร้างที่พรุนและมีโพรงอากาศจำนวนมาก รวมถึงมีแนวโน้มเกิดการเชื่อมต่อของโพรงอากาศ

ดังนั้น ความหนาแน่นจึงสามารถใช้เป็นตัวชี้วัดทางอ้อม (proxy indicator) ของความพรุนในวัสดุซีเมนต์ผสมได้ ซึ่งเป็นแนวคิดพื้นฐานที่ได้รับการยอมรับในงานวิจัยด้านวัสดุก่อสร้าง (Scott, 2011) นอกจากนี้ แนวโน้มการลดลงของความหนาแน่นยังมีความสัมพันธ์เชิงเหตุและผลกับสมบัติอื่นของวัสดุ โดยการเพิ่มขึ้นของการดูดซึมน้ำและการลดลงของกำลังอัด

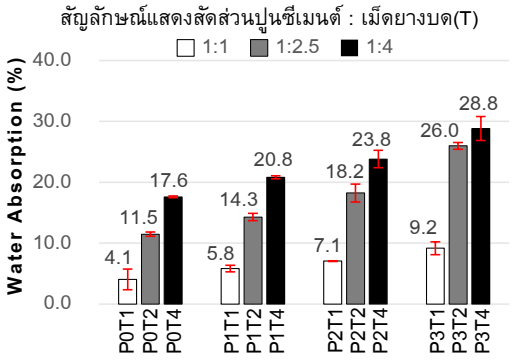
พฤติกรรมการดูดซึมน้ำและความสัมพันธ์กับความพรุนของวัสดุ

ผลของปริมาณเม็ดยางบดต่อการดูดซึมน้ำแสดงดังภาพ 4 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของเม็ดยางบด (T) จาก 1:1 (T1) เป็น 1:2.5 (T2) และ 1:4 (T4) ค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุกกรณีของสารละลาย

โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้สารละลายเป็นน้ำเพียงอย่างเดียว (P0) พบว่าค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นจาก 4.1% (P0T1) เป็น 11.5% (P0T2) และ 17.6% (P0T4) ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างชัดเจนระหว่างปริมาณเม็ดยางบดและการดูดซึมน้ำ

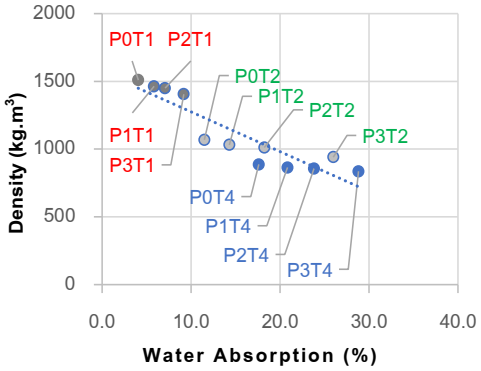
พฤติกรรมดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากการเพิ่มขึ้นของความพรุนภายในวัสดุ เนื่องจากเม็ดยางบดมีพื้นผิวไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) และมีการยึดเกาะกับเนื้อซีเมนต์ได้ไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคจำนวนมาก ซึ่งเปิดโอกาสให้น้ำสามารถแทรกซึมเข้าไปในโครงสร้างได้ง่ายขึ้น (Li et al., 2022)

นอกจากนี้ การแทนที่มวลรวมด้วยเม็ดยางยังส่งผลให้เกิดการดักจับอากาศในระหว่างการผสมทำให้โครงสร้างภายในมีลักษณะพรุนมากขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น (Siddique & Naik, 2004)



ภาพ 4 การดูดซึมน้ำของชิ้นทดสอบ

ที่มา: ผู้วิจัย, 2568



ภาพ 5 การเปรียบเทียบค่าดูดซึมน้ำกับความหนาแน่นของชิ้นทดสอบ

ที่มา: ผู้วิจัย, 2568

อิทธิพลของน้ำยางพาราต่อการดูดซึมน้ำ

เมื่อพิจารณาผลของน้ำยางพารา (P) พบว่า การเพิ่มอัตราส่วนของน้ำยางพาราจาก P1 (1:0.1) ไปยัง P3 (1:0.3) ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในทุกกลุ่ม T โดยค่าการดูดซึมน้ำสูงสุดพบในกลุ่ม P3T4 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 28.8%

กลไกของปรากฏการณ์นี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเกิดโพรงอากาศที่ได้อภิปรายไว้ก่อนหน้านี้กล่าวคือ การใช้สารลดแรงตึงผิว (NP-9) ร่วมกับน้ำยางพาราส่งผลให้เกิดฟองอากาศจำนวนมากในระหว่างกระบวนการผสม และฟองอากาศเหล่านี้จะกลายเป็นโพรงอากาศถาวรเมื่อวัสดุแข็งตัว นอกจากนี้ แม้ว่าน้ำยางพาราจะสามารถสร้างฟิล์มโพลีเมอร์ที่ช่วยปรับปรุงการยึดเกาะในระดับหนึ่ง แต่การเพิ่มปริมาณมากเกินไปจะทำให้โครงสร้างมีความไม่ต่อเนื่องมากขึ้น และเพิ่มปริมาณช่องว่างภายใน ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น (Ohama, 1995)

ผลลัพธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่รายงานว่าการเพิ่มปริมาณโพลีเมอร์หรือวัสดุที่ก่อให้เกิดฟองอากาศในระบบซีเมนต์สามารถเพิ่มค่าการดูดซึมน้ำได้อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของโพรงอากาศภายใน (Scott, 2011)

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำ

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำและความหนาแน่นของวัสดุแสดงดังภาพ 5 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มความสัมพันธ์แบบแปรผกผัน (inverse relationship) อย่างชัดเจน กล่าวคือ เมื่อความหนาแน่นของวัสดุลดลง ค่าการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้น

แนวโน้มดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากบทบาทของความพรุนในโครงสร้างวัสดุ โดยวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำจะมีปริมาณโพรงอากาศสูง ซึ่งทำหน้าที่เป็นช่องทางให้ของเหลวสามารถซึมผ่านได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น (Scott, 2011) ในทางกลับกัน วัสดุที่มีความหนาแน่นสูงจะมีโครงสร้างที่ทึบแน่นและมีปริมาณโพรงอากาศต่ำ จึงมีความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของน้ำได้ดีกว่า

นอกจากนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำยังสามารถพิจารณาในเชิงโครงสร้างจุลภาคได้ว่า เป็นผลมาจากการกระจายตัวของโพรงอากาศทั้งในรูปแบบความพรุนที่แยกได้และความพรุนที่เชื่อมต่อกัน ปัจจัยดังกล่าวมีผลต่อพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุ (Hilal, 2016)

บทบาทของความพรุนต่อสมบัติวัสดุ

จากผลการวิเคราะห์ทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่า ความพรุน เป็นตัวแปรหลักที่ควบคุมพฤติกรรมการดูดซึมน้ำของวัสดุ โดยได้รับอิทธิพลจากทั้งปริมาณเม็ดยางบด (T) และน้ำยางพารา (P) การเพิ่มขึ้นของความพรุนไม่เพียงส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเท่านั้น แต่ยังมีผลต่อสมบัติอื่นของวัสดุ เช่น การลดลงของความหนาแน่น และการลดลงของกำลังอัด ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงระบบของสมบัติวัสดุซีเมนต์ผสม

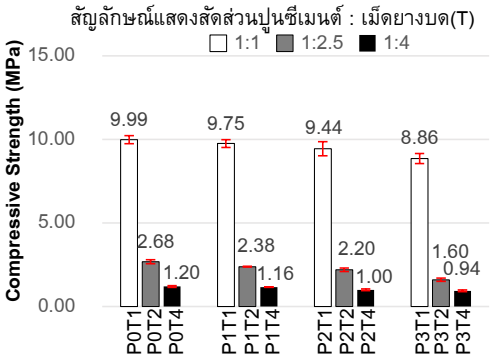
ดังนั้น การควบคุมระดับความพรุนจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบวัสดุให้มีสมดุลระหว่างน้ำหนักเบา ความสามารถในการดูดซึมน้ำ และความแข็งแรงเชิงกล ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญในการพัฒนาวัสดุก่อสร้างทางเลือกในบริบทของความยั่งยืน

กำลังอัดและพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุซีเมนต์ผสม

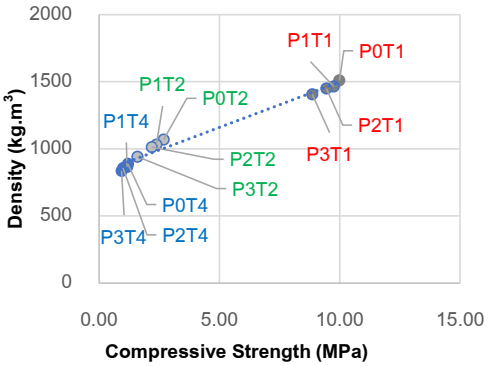
ผลของปริมาณเม็ดยางบดต่อกำลังอัดของชิ้นทดสอบทั้งหมดแสดงดังภาพ 6 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของเม็ดยางบด (T) จาก 1:1 (T1) เป็น 1:2.5 (T2) และ 1:4 (T4) ค่ากำลังอัดของวัสดุลดลงอย่างมีนัยสำคัญในทุกกรณีของสารละลาย

โดยในกรณีที่ใช้สารละลายเป็นน้ำเพียงอย่างเดียว (P0) ค่ากำลังอัดลดลงจาก 9.99 MPa (P0T1) เป็น 2.68 MPa (P0T2) และ 1.20 MPa (P0T4) ตามลำดับ ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงผลกระทบของการแทนที่มวลรวมด้วยเม็ดยางบดต่อความสามารถในการรับแรงของวัสดุ กลไกสำคัญที่อธิบายพฤติกรรมดังกล่าวคือ การลดลงของความต่อเนื่องของเนื้อซีเมนต์และการเพิ่มขึ้นของเขตต่อระหว่างวัสดุที่อ่อนแอระหว่างเม็ดยางและซีเมนต์ ซึ่งส่งผลให้การถ่ายโอนแรงภายในโครงสร้างลดประสิทธิภาพลง (Siddique & Naik, 2004)

นอกจากนี้ เม็ดยางบดมีโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำและมีพฤติกรรมยืดหยุ่นสูง เมื่ออยู่ภายใต้แรงอัดจะเกิดการเสียรูปได้ง่าย ส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานแรงอัดของวัสดุโดยรวมลดลง (Li et al., 2022)



ภาพ 6 ค่าการรับแรงอัดของชิ้นทดสอบ
ที่มา: ผู้วิจัย, 2568



ภาพ 7 การเปรียบเทียบค่าการรับแรงอัดกับความหนาแน่นของชิ้นทดสอบ
ที่มา: ผู้วิจัย, 2568

อิทธิพลของน้ำยางพาราต่อสมบัติเชิงกล

เมื่อพิจารณาผลของน้ำยางพารา (P) พบว่า การเพิ่มอัตราส่วนของน้ำยางพาราจาก P1 (1:0.1) ไปยัง P3 (1:0.3) ส่งผลให้ค่ากำลังอัดของวัสดุลดลงอย่างต่อเนื่อง แม้ว่าน้ำยางพาราจะมีบทบาทในการสร้างฟิล์มโพลีเมอร์ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มการยึดเกาะในบางกรณี แต่เมื่อใช้ในปริมาณสูง จะส่งผลให้เกิดโครงสร้างที่มีความพรุนมากขึ้นจากการเกิดฟองอากาศ และลดความต่อเนื่องของเนื้อซีเมนต์ นำไปสู่ความสามารถในการรับแรงอัดที่ลดลง (Ohama, 1995) นอกจากนี้ โพลีเมอร์จากน้ำยางพารายังมีลักษณะยืดหยุ่นซึ่งแม้จะช่วยเพิ่มความเหนียวของวัสดุ แต่กลับลดความแข็งและความสามารถในการต้านทานแรงอัด ส่งผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนระหว่างความยืดหยุ่นและความแข็งแรงเชิงกลของวัสดุ (Scott, 2013) ผลลัพธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่รายงานว่า การเพิ่มปริมาณโพลีเมอร์ในวัสดุซีเมนต์มีแนวโน้มทำให้กำลังอัดลดลง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของโพรงอากาศและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค (Hilal, 2016)

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและกำลังอัด

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นและกำลังอัดของวัสดุแสดงดังภาพ 7 ซึ่งแสดงให้เห็นแนวโน้มความสัมพันธ์เชิงบวก กล่าวคือ วัสดุที่มีความหนาแน่นสูงจะมีค่ากำลังอัดสูง ในขณะที่วัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำจะมีค่ากำลังอัดลดลง ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากโครงสร้างภายในของวัสดุ โดยวัสดุที่มีความหนาแน่นสูงจะมีโครงสร้างที่ทึบแน่นและมีโพรงอากาศน้อย ทำให้สามารถถ่ายโอนแรงภายในได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในทางกลับกัน วัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำจะมีโครงสร้างที่พรุนและมีโพรงอากาศจำนวนมาก ซึ่งทำหน้าที่เป็นจุดอ่อน (weak points) ที่ทำให้เกิดการเริ่มต้นของการวิบัติภายใต้แรงอัด แนวคิดนี้สอดคล้องกับทฤษฎีความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและกำลังอัดในวัสดุซีเมนต์ ซึ่งระบุว่าการเพิ่มขึ้นของความพรุนจะส่งผลให้กำลังอัดลดลง (Hilal, 2016)

ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและกำลังอัด

จากการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ว่า ความพรุน (porosity) เป็นตัวแปรหลักที่ควบคุมสมบัติเชิงกลของวัสดุ โดยมีผลมาจากทั้งปริมาณเม็ดยางบด (T) และน้ำยางพารา (P) การเพิ่มขึ้นของความพรุนส่งผลให้ความหนาแน่นลดลง การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น และกำลังอัดลดลง ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและกำลังอัดสามารถอธิบายได้ผ่านแนวคิดของ porosity-driven performance model ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการควบคุมระดับความพรุนเป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบวัสดุให้มีสมดุลระหว่างน้ำหนักเบา ความสามารถในการดูดซึมน้ำ และความแข็งแรงเชิงกล แนวทางดังกล่าวมีความสำคัญอย่างยิ่งในการพัฒนาวัสดุก่อสร้างทางเลือก โดยเฉพาะในกรณีของวัสดุที่มีส่วนประกอบเป็นวัสดุรีไซเคิล โดยต้องคำนึงถึงทั้งประสิทธิภาพเชิงกลและความยั่งยืนควบคู่กัน

การวิเคราะห์สมรรถนะเชิงบูรณาการและการประเมินตามมาตรฐานอุตสาหกรรม

ความสัมพันธ์เชิงบูรณาการของสมบัติวัสดุ จากการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ผ่านมาพบว่าสมบัติหลักของวัสดุ ได้แก่ ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และกำลังอัด มีความสัมพันธ์กันอย่างเป็นระบบ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อความหนาแน่นของวัสดุลดลง ค่าการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (ภาพ 5) ในขณะที่กำลังอัดมีแนวโน้มลดลง (ภาพ 7) ซึ่งสะท้อนถึงความสัมพันธ์เชิงเหตุและผลของโครงสร้างภายในวัสดุ

ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ผ่านบทบาทของความพรุน ซึ่งเป็นตัวแปรหลักที่ควบคุมสมบัติเหล่านี้ กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นของปริมาณเม็ดยางบด (T) และน้ำยางพารา (P) ส่งผลให้เกิดโพรงอากาศภายในวัสดุเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ความหนาแน่นลดลง ในขณะเดียวกันโพรงอากาศเหล่านี้ทำหน้าที่เป็นช่องทางให้ของเหลวแทรกซึมได้ง่ายขึ้น และเป็นจุดอ่อนที่ทำให้เกิดการวิบัติภายใต้แรงอัด (Hilal, 2016; Scott, 2011)

การประเมินสมบัติวัสดุตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

ผลการเปรียบเทียบสมบัติวัสดุกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมดังแสดงในตาราง 2

จากการวิเคราะห์พบว่า กลุ่มวัสดุที่มีอัตราส่วน T1 (1:1) ได้แก่ P0T1, P1T1, P2T1 และ P3T1 มีสมบัติผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 2601-2556 สำหรับคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ โดยมีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1,400–1,600 กก./ม^3 กำลังอัดมากกว่า 5 MPa และการดูดซึมน้ำไม่เกิน 20% ในขณะที่กลุ่ม T2 (1:2.5) มีเพียงสูตร P0T2 ที่ผ่านเกณฑ์ มอก. 58-2560 สำหรับคอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก ซึ่งกำหนดให้มีกำลังอัดไม่ต่ำกว่า 2.5 MPa และการดูดซึมน้ำไม่เกิน 14.6%

ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า การเพิ่มปริมาณเม็ดยางบดและน้ำยางพารา แม้จะช่วยลดน้ำหนักของวัสดุ แต่ส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลและการดูดซึมน้ำ ซึ่งอาจทำให้วัสดุไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานในบางกรณี

ตาราง 2 การเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุชิ้นทดสอบกับมาตราฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

สัญลักษณ์	ความหนาแน่น (kg/m^3)	การดูดซึมน้ำ (%)	การรับแรงอัด (MPa)
P0T1	1509.2	4.1	9.99
P1T1	1463.5	5.8	9.75
P2T1	1449.7	7.1	9.44
P3T1	1406.0	9.2	8.86
มอก.2601-2556	1400-1600	<20.0	>5.00
P0T2	1068.7	11.5	2.68
มอก.58-2560	<1680.0	<14.6	>2.50
P1T2	1031.5	14.3	2.38
P2T2	1012.1	18.2	2.20
P3T2	940.9	26.0	1.60
P0T4	888.3	17.6	1.20
P1T4	865.0	20.8	1.16
P2T4	856.9	23.8	1.00
P3T4	836.6	28.8	0.94

หมายเหตุ: ตัวอักษรสีแดงคือไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

ที่มา: ผู้วิจัย, 2568

การคัดเลือกสูตรผสมที่เหมาะสมต่อการใช้งาน

จากการวิเคราะห์เชิงบูรณาการของสมบัติวัสดุและการเปรียบเทียบกับมาตรฐาน สามารถระบุแนวทางการเลือกใช้วัสดุได้ดังนี้ สูตรผสมในกลุ่ม T1 (1:1) เหมาะสมสำหรับการใช้งานเป็นวัสดุก่อสร้างที่ต้องการความสมดุลระหว่างน้ำหนักเบาและกำลังอัด เช่น คอนกรีตบล็อกมวลเบาสำหรับก่อผนังชนิดไม่รับน้ำหนัก สูตรผสมในกลุ่ม T2 (1:2.5) สามารถใช้ในงานที่ไม่รับน้ำหนัก (non-load bearing applications) โดยเฉพาะสูตร P0T2 เพียงสูตรเดียว และสูตรผสมในกลุ่ม T4 (1:4) แม้จะมีน้ำหนักเบามาก แต่มีข้อจำกัดด้านกำลังอัดและการดูดซึมน้ำสูง จึงอาจเหมาะสำหรับงานเฉพาะทาง เช่น วัสดุฉนวนหรือองค์ประกอบที่ไม่ต้องรับแรง ดังนั้นการเลือกใช้อัตราส่วนผสมควรพิจารณาจากความต้องการด้านสมรรถนะของวัสดุ โดยเฉพาะการควบคุมระดับความพรุนให้เหมาะสมกับการใช้งานจริง

ศักยภาพการประยุกต์ใช้ในงานสถาปัตยกรรม

จากผลการทดลองและการประเมินตามมาตรฐาน สามารถเสนอแนวทางการประยุกต์ใช้วัสดุได้ดังนี้

- กลุ่ม T1 (1:1) เหมาะสำหรับการใช้งานเป็นวัสดุก่อผนังชนิดไม่รับน้ำหนัก เช่น คอนกรีตบล็อกมวลเบา เนื่องจากมีสมดุลระหว่างความหนาแน่น กำลังอัด และการดูดซึมน้ำ ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรม
- กลุ่ม T2 (1:2.5) เหมาะสำหรับการใช้งานเป็นวัสดุตกแต่ง หากต้องการความแข็งแรงเพิ่มขึ้นควรมีการเสริมโครงสร้างรับแรงตามข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ก่อสร้างนั้นๆ
- กลุ่ม T4 (1:4) เหมาะสำหรับการใช้งานเฉพาะทาง เช่น วัสดุฉนวน หรือองค์ประกอบที่ต้องการน้ำหนักเบา เนื่องจากมีความพรุนสูงและกำลังอัดต่ำ

ดังนั้น วัสดุซีเมนต์ผสมเม็ดยางบดและน้ำยางพาราจึงมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นวัสดุก่อสร้างที่ตอบสนองทั้งด้านสมรรถนะและการใช้งานจริงในงานสถาปัตยกรรม

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาวัสดุซีเมนต์ผสมเม็ดยางบดและน้ำยางพาราในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน พบว่าสมบัติของวัสดุมีความสัมพันธ์เชิงระบบที่ถูกควบคุมโดยระดับความพรุนของโครงสร้างภายใน โดยการเพิ่มปริมาณเม็ดยางบดและน้ำยางพาราส่งผลให้เกิดโพรงอากาศมากขึ้น ทำให้ค่าความหนาแน่นลดลง ขณะที่ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น และกำลังอัดลดลงตามลำดับ ความสัมพันธ์ดังกล่าวสะท้อนถึงกลไกหลักของวัสดุที่สามารถอธิบายได้ผ่านแนวคิด porosity-driven performance ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคมีผลโดยตรงต่อสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลของวัสดุ

เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พบว่าวัสดุในกลุ่มอัตราส่วน 1:1 (T1) สามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐานผนังไม่รับน้ำหนัก โดยมีสมดุลระหว่างความหนาแน่น กำลังอัด และการดูดซึมน้ำที่เหมาะสม ขณะที่กลุ่มอัตราส่วน 1:2.5 (T2) มีบางสูตรที่เหมาะสมสำหรับงานไม่รับน้ำหนัก ส่วนกลุ่ม 1:4 (T4) แม้จะมีน้ำหนักเบาแต่มีข้อจำกัดด้านกำลังอัดและการดูดซึมน้ำสูง จึงเหมาะสำหรับการใช้งานเฉพาะทางที่ไม่ต้องรับแรง

ในเชิงการประยุกต์ใช้ วัสดุที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพในการนำไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้างทางเลือก โดยเฉพาะในงานที่ต้องการลดน้ำหนักโครงสร้างและเพิ่มคุณสมบัติด้านฉนวน ทั้งนี้การเลือกใช้อัตราส่วนผสมควรพิจารณาให้เหมาะสมกับสมรรถนะที่ต้องการ โดยเน้นการควบคุมระดับความพรุนให้สมดุลระหว่างความแข็งแรงและคุณสมบัติด้านการใช้งาน

นอกจากนี้ การนำเม็ดยางบดจากยางรถยนต์ใช้แล้วมาใช้ในวัสดุยังเป็นแนวทางที่ช่วยลดของเสียและส่งเสริมการใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืน อย่างไรก็ตาม ควรมีการศึกษาสมบัติเพิ่มเติม เช่น การนำความร้อน ความทนทาน การลามไฟ และพฤติกรรมระยะยาว เพื่อยืนยันศักยภาพของวัสดุในระดับการใช้งานจริงต่อไป

บรรณานุกรม

กรมการขนส่งทางบก. (2567). *รายงานประจำปี 2567 กรมการขนส่งทางบก : จำนวนรถที่จดทะเบียนสะสม 2564-2566.* https://www.dlt.go.th/th/annual-report/

กรมการขนส่งทางบก. กองแผนงาน. กลุ่มสถิติการขนส่ง. (2567). *จำนวนรถที่จดทะเบียนสะสม ณ วันที่ 31 ธันวาคม 2567.* https://web.dlt.go.th/statistics/

ชูเกียรติ ชูสกุล, ทวิช กล้าแท้, ดุสิต ชูพันธ์, สุพร ฤทธิภักดี, ขวัญชีวา หยงสตาร์, และสุนันท์ มนต์แก้ว. (2566). กระเบื้องซีเมนต์ปูพื้นผสมยางรถยนต์ใช้แล้ว. ใน *การประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 28* (หน้า MAT23-1). มหาวิทยาลัยพะเยา.

พัฒนศักดิ์ ชัยพรรณา และนัฐวุฒิ เหมะธุลิน. (2565). การปรับปรุงดินตะกอนหนองหารด้วยยางพาราและซีเมนต์ให้เหมาะสำหรับการก่อสร้างชั้นทาง. ใน *การประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27* (หน้า GTE28-1). มหาวิทยาลัยพะเยา.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2556). *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ.* มอก. 2601-2556.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2560). *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก*. มอก. 58-2560.

สุดนิรัน เพชรรัตน์, รุ่งอรุณ บุญถ่าน, และรุ่งโรจน์ ฤกษ์หร่าย (2564). การประยุกต์ใช้ยางพาราเป็นสารผสมเพิ่มในการผลิตอิฐดินซีเมนต์. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 16*(1), 1-13.

Hilal, A. A. (2016). Microstructure of concrete. In S. A. Salih (Ed.), *High performance concrete technology and applications* (pp. 3-23). IntechOpen.

Ince, C., Shehata, B. M. H., Derogar, S., & Ball, R. J. (2022). Towards the development of sustainable concrete incorporating waste tyre rubbers: A long-term study of physical, mechanical & durability properties and environmental impact. *Journal of Cleaner Production, 334*, 130223.

Kerdjangwat, N., & Sujivorakul, C. (2025). Properties of glass fiber reinforced concrete using rubber latex as an ingredient. *The Journal of Industrial Technology, 21*(1), 118-134.

Li, Y., Chai, J., Wang, R., Zhou, Y., & Tong, X. (2022). A review of the durability-related features of waste tyre rubber as a partial substitute for natural aggregate in concrete. *Buildings, 12*(11), 1975. https://doi.org/10.3390/buildings12111975

Mohajerani, A., Burnett, L., Smith, J. V., Markovski, S., Rodwell, G., Rahman, M. T., Kurmus, H., Mirzababaei, M., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S., & Maghool, F. (2020). Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, *155*, 104679.

Ohama, Y. (1995). *Handbook of polymer-modified concrete and mortars: Properties and process technology.* William Andrew.

Scott, R. (2011). *Properties of concrete* (5th ed.). Pearson.

Siddique, R., & Naik, T. R. (2004). Properties of concrete containing scrap-tire rubber–An overview. *Waste Management, 24*(6), 563–569.

Singaravel, D. A., Veerapandian, P., Rajendran, S., & Dhairiyasamy, R. (2024). Enhancing high-performance concrete sustainability: Integration of waste tire rubber for innovation. *Scientific Reports, 14*(1), 4635.