

ผลกระทบของการแทนที่หินย้อยด้วยกรวดแม่น้ำต่อสมบัติเชิงกลและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ของคอนกรีต

Effect of crushed limestone replacement with river gravel on the mechanical properties and economic viability of concrete

นภาพร พิมพ์ทอง และ เจริญชัย ฤทธิรุท*

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
จังหวัดขอนแก่น 40000

*Corresponding Author: Charoenchai.ri@rmu.ac.th

Received 8 July 2025; Received in revised form 3 September 2025; Accepted 1 October 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลกระทบเชิงเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ของการแทนที่หินย้อยบางส่วนด้วยกรวดแม่น้ำ ที่จัดหาได้ในท้องถิ่น ต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีต โดยศึกษาภายใต้เงื่อนไขที่จำลองการปฏิบัติงานจริงซึ่งมีการปรับปริมาณน้ำเพื่อให้ได้ความสามารถในการเทได้ที่เหมาะสม การทดลองได้ออกแบบส่วนผสมโดยแทนที่หินย้อยด้วยกรวดแม่น้ำในอัตราส่วน 0%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% และ 100% โดยน้ำหนักของมวลรวมหายาบ ซึ่งส่งผลให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) มีค่าลดลงจาก 0.457 ในส่วนผสมที่ใช้หินย้อย 100% เหลือ 0.424 ในส่วนผสมที่ใช้กรวดแม่น้ำ 100% ผลการทดสอบที่อายุ 28 วัน พบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงอย่างเป็นระบบตามปริมาณกรวดแม่น้ำที่เพิ่มขึ้น จาก 278 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc) ในส่วนผสมควบคุม เหลือ 188 ksc ในส่วนผสมที่ใช้กรวดแม่น้ำ 100% ซึ่งคิดเป็นการลดลงประมาณ 32% ในทางตรงกันข้าม กำลังต้านทานแรงดึงแบบผ่าซีกกลับมีพฤติกรรมที่แตกต่างออกไป โดยมีค่าสูงสุดที่ 29.7 ksc ในส่วนผสมที่ใช้กรวดแม่น้ำ 70% (30C70G) ซึ่งสูงกว่าส่วนผสมควบคุมถึง 16% การวิเคราะห์เชิงเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ชี้ให้เห็นว่า ส่วนผสมที่แทนที่ด้วยกรวดแม่น้ำ 50% (50C50G) เป็นจุดที่เหมาะสมที่สุด โดยสามารถรักษากำลังรับแรงอัดได้ถึง 250 ksc (98% ของกำลังที่ออกแบบ) ในขณะที่สามารถลดต้นทุนค่ามวลรวมหายาบได้ประมาณ 29.7% เมื่อเทียบกับส่วนผสมที่ใช้หินย้อยเพียงอย่างเดียว ดังนั้น การใช้กรวดแม่น้ำแทนที่หินย้อยบางส่วนจึงเป็นทางเลือกที่มีศักยภาพในการผลิตคอนกรีตสำหรับงานโครงสร้างทั่วไปในพื้นที่ที่สามารถจัดหากรวดแม่น้ำได้ในราคาที่ต่ำกว่า

คำสำคัญ: มวลรวมหายาบ, กรวดแม่น้ำ, หินย้อย, สมบัติเชิงกล, การวิเคราะห์ต้นทุน

Abstract

This research aims to evaluate the technical and economic effects of partially replacing crushed limestone (C) with locally sourced river gravel (G) on the mechanical properties of concrete, under conditions simulating practical field applications where water content is adjusted to achieve suitable workability. The experimental program involved mix designs with river gravel replacement levels of 0%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, and 100% by weight of



coarse aggregate. This adjustment resulted in a decrease in the water-to-cement (W/C) ratio from 0.457 for the 100% crushed stone mix to 0.424 for the 100% river gravel mix. The 28-day test results indicated a systematic decrease in compressive strength as the river gravel content increased, from 278 ksc in the control mix to 188 ksc in the 100% gravel mix, a reduction of approximately 32%. Conversely, the splitting tensile strength exhibited a different behavior, peaking at 29.7 ksc for the mix with 70% river gravel (30C70G), which was 16% higher than the control mix. A techno-economic analysis identified the 50% replacement mix (50C50G) as the optimal balance, achieving a compressive strength of 250 ksc (98% of the design strength) while reducing coarse aggregate costs by approximately 29.7% compared to the mix using only crushed stone. Therefore, the partial replacement of crushed stone with river gravel presents a viable alternative for producing structural concrete in regions where river gravel is an economically advantageous local resource.

Keywords: Coarse aggregate, River gravel, Crushed stone, Mechanical properties, Cost analysis

บทนำ

คอนกรีตนับเป็นวัสดุโครงสร้างพื้นฐานที่มีบทบาทสำคัญที่สุดในอุตสาหกรรมการก่อสร้างสมัยใหม่ โดยมีมวลรวม เป็นองค์ประกอบหลักซึ่งคิดเป็นร้อยละ 60–75 ของปริมาตรรวมทั้งหมด คุณสมบัติและต้นทุนของมวลรวมจึงเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลโดยตรงต่อสมบัติเชิงกล ความทนทาน และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของคอนกรีต [1] โดยทั่วไป มวลรวมหยาบที่นิยมใช้ในงานก่อสร้างคือหินย่อย (crushed limestone, C) ซึ่งได้จากการระเบิดและย่อยหินจากแหล่งหินธรรมชาติ ลักษณะเหลี่ยมมุมและผิวหยาบของหินย่อยส่งเสริมการยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เพสต์กับมวลรวม ทำให้คอนกรีตที่ใช้หินย่อยมีความแข็งแรงสูง ทั้งในแง่กำลังอัดและกำลังดัด [2-3] อย่างไรก็ตาม ในหลายพื้นที่ของประเทศไทย โดยเฉพาะพื้นที่ราบลุ่มแม่น้ำ การจัดหาหินย่อยมักมีต้นทุนสูงจากค่าขนส่ง ขณะที่กรวดแม่น้ำ (river gravel, G) เป็นวัสดุที่หาได้ง่ายในท้องถิ่นและมีราคาถูกกว่า จึงนับเป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับการนำมาใช้แทนหินย่อยเพื่อลดต้นทุนการก่อสร้าง [4-5]

ความแตกต่างทางกายภาพระหว่างหินย่อยและกรวดแม่น้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่ควบคุมสมบัติของคอนกรีต โดยหินย่อยมีพื้นผิวหยาบและเหลี่ยมมุมซึ่ง

ก่อให้เกิดการยึดเหนี่ยวเชิงกล (mechanical interlock) ที่แข็งแรงและช่วยเพิ่มคุณภาพของบริเวณรอยต่อระหว่างมวลรวมกับซีเมนต์เพสต์ (interfacial transition zone: ITZ) ส่งผลโดยตรงต่อความแข็งแรงของคอนกรีต ในทางตรงกันข้าม กรวดแม่น้ำมีลักษณะกลมมนและผิวเรียบจากการขัดสีตามธรรมชาติ ทำให้แรงยึดเหนี่ยวกับซีเมนต์เพสต์ลดลงและอาจกลายเป็นจุดอ่อนของคอนกรีต งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเมื่อใช้กรวดแม่น้ำแทนหินย่อยทั้งหมด กำลังอัดของคอนกรีตมีก่ลดลงร้อยละ 4-7 ซึ่งสอดคล้องกับหลักการดังกล่าว [5-6]

แม้จะมีข้อด้อยด้านกำลังรับแรง แต่กรวดแม่น้ำก็มีข้อดีที่สำคัญในด้านสมบัติของคอนกรีตสด กล่าวคือ รูปทรงกลมมนช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคมวลรวม ทำให้ส่วนผสมคอนกรีตมีความสามารถในการเทได้ดีขึ้น ดังนั้น ในการผลิตคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเท่ากัน คอนกรีตที่ใช้กรวดแม่น้ำจะต้องการปริมาณน้ำน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้หินย่อย ซึ่งปริมาณน้ำที่ลดลงนี้ส่งผลให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) ลดลง และตามกฎของ Abram's law การลดลงของ W/C จะส่งผลให้กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์สูงขึ้น [7-8]

จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่างานวิจัยในห้องปฏิบัติการส่วนใหญ่มักควบคุมอัตราส่วน W/C ให้

คงที่เพื่อแยกศึกษาผลกระทบของชนิดมวลรวม แม้จะช่วยให้เข้าใจกลไกได้ชัดเจน แต่ไม่สะท้อนสภาวะจริงที่ผู้ควบคุมงานมักปรับปริมาณน้ำให้เหมาะกับการทำงาน ส่งผลให้อัตราส่วน W/C เปลี่ยนแปลงเมื่อแทนที่หินย่อยด้วยกรวดแม่น้ำ จึงเกิดช่องว่างองค์ความรู้เกี่ยวกับผลกระทบสุทธิ (net effect) ที่ประกอบด้วยสองด้านที่ขัดแย้งกัน คือ (1) ผลเชิงลบจากแรงยึดเหนี่ยวต่ำของกรวดแม่น้ำ และ (2) ผลเชิงบวกจากการลดลงของ W/C งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาผลกระทบของการแทนที่หินย่อยด้วยกรวดแม่น้ำในสัดส่วนต่าง ๆ ต่อกำลังอัดและกำลังต้านทานแรงดึงแบบผ่าซีก วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของ W/C ที่เกิดขึ้น และทำการวิเคราะห์เชิงเทคนิคและเศรษฐศาสตร์เพื่อหาสัดส่วนการแทนที่ที่เหมาะสมที่สุด ทั้งด้านสมบัติเชิงกลและความคุ้มค่า

วัสดุและวิธีการทดลอง

1. วัสดุที่ใช้

วัสดุที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ทรายแม่น้ำ (มวลรวมละเอียด), น้ำประปา, และมวลรวมหยาบ 2 ชนิด ได้แก่ หินย่อยดังแสดงในรูปที่ 1 เป็นหินปูนย่อยเบอร์ 3/4 นิ้ว ขนาดใหญ่สุด 19 มิลลิเมตร จากแหล่ง อ.ภูผาม่าน จ.ขอนแก่น



รูปที่ 1 หินย่อย จังหวัดขอนแก่น

กรวดแม่น้ำดังแสดงในรูปที่ 2 เป็นกรวดแม่น้ำโขงเบอร์ 1 ขนาดใหญ่สุด 25 มิลลิเมตร จากแหล่ง อ.ห้วยใหญ่ จ.มุกดาหาร ในการศึกษาครั้งนี้ มวลรวม

หยาบทั้งสองชนิดถูกนำมาใช้ ตามสภาพที่จัดหาได้ เพื่อสะท้อนถึงการใช้งานจริงในพื้นที่



รูปที่ 2 กรวดแม่น้ำโขง จังหวัดมุกดาหาร

2. การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

ส่วนผสมควบคุม (100C0G) ถูกออกแบบตามมาตรฐาน ACI 211.1-91 ให้มีกำลังรับแรงอัดเป้าหมายที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 255 ksc (25.0 MPa) จากนั้นจึงออกแบบส่วนผสมอื่นๆ โดยการแทนที่หินย่อยด้วยกรวดแม่น้ำตามสัดส่วนโดยน้ำหนักที่กำหนด ปริมาณปูนซีเมนต์และทรายถูกกำหนดให้คงที่ในทุกส่วนผสม ส่วนปริมาณน้ำได้รับการปรับลดลงในส่วนผสมที่มีสัดส่วนกรวดแม่น้ำสูงขึ้น โดยคำนวณตัวกำหนดไว้ที่ 10 ± 2.5 เซนติเมตร รายละเอียดของสัดส่วนผสมและอัตราส่วน W/C ที่คำนวณได้แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบ ต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

สัดส่วนผสม	ซีเมนต์ (kg.)	ทราย (kg.)	หินย่อย (kg.)	กรวดแม่น้ำ (kg.)	น้ำ (kg.)
100C0G	328	851	1028	0	150
50C50G	328	851	514	514	147
40C60G	328	851	411	617	145
30C70G	328	851	308	720	143
20C80G	328	851	206	822	140
10C90G	328	851	103	925	140
0C100G	328	851	0	1028	139

3. การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุได้ดำเนินการตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ การวิเคราะห์ขนาดคละของมวลรวม (AASHTO T 27) , การหาค่าดัชนีความแบนและความยาว (BS 812) , การทดสอบความต้านทานการสึกหรอโดยเครื่องลอสมแอนเจลีส์ (ASTM C 131) , การหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียด (AASHTO T 84) และมวลรวมหยาบ (AASHTO T 87) รวมถึงการหาค่าหน่วยน้ำหนักและช่องว่างในมวลรวม (ASTM C29/C29M) สำหรับการเตรียมตัวอย่างคอนกรีต ได้ทำการหล่อตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM C192/C192M-14 โดยใช้ตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 10×10×10 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 14 และ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C39/C39M-21 และตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาด 15×30 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงแบบผ่าซีก (splitting tensile strength) ที่อายุ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C496/C496M-17

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

1. คุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวม

ผลการทดสอบคุณสมบัติของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดแสดงในตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ข้อสังเกตที่สำคัญคือ หินย่อย (C) มีค่าความถ่วงจำเพาะรวม (2.71) และร้อยละช่องว่าง (41%) สูงกว่ากรวดแม่น้ำ (G) ซึ่งมีค่า 2.61 และ 35% ตามลำดับ ความแตกต่างนี้สะท้อนถึงลักษณะทางกายภาพที่ต่างกัน โดยหินย่อยมีรูปทรงเหลี่ยมมุมทำให้มีการจัดเรียงตัวที่ไม่แน่นเท่ากรวดที่มีลักษณะกลมมนกว่า ซึ่งส่งผลให้มีปริมาณช่องว่างระหว่างอนุภาคมากกว่า [9]

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวมหยาบ

ผลการทดสอบคุณสมบัติ	หิน ย่อย	กรวด แม่น้ำ
ค่าโมดูลัสความละเอียด (fineness modulus)	8.26	9.09
ดัชนีความแบน %	20	27
ดัชนีความยาว %	27	25
ร้อยละความต้านทานการ ขัดสี %	27.8	25.2
ความถ่วงจำเพาะรวม	2.71	2.61
ร้อยละช่องว่าง	41	35

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวมละเอียด

รายการ	ผลการทดสอบ
ค่าโมดูลัสความละเอียด (fineness modulus)	2.50
ค่าเฉลี่ย ความถ่วงจำเพาะ สภาพ (oven-dry)	2.60
ค่าเฉลี่ย ความถ่วงจำเพาะ อิมตัวผิวแห้ง (SSD)	2.62
ค่าเฉลี่ย ความถ่วงจำเพาะ แท้จริง	2.67
ค่าเฉลี่ยการดูดซึมน้ำ (%)	1.05

2. กำลังรับแรงอัด (compressive strength)

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 14 และ 28 วัน แสดงในตารางที่ 4 และ 5 ตามลำดับ แนวโน้มที่ชัดเจนคือ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อสัดส่วนของกรวดแม่น้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้น โดยกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ลดลงจาก 278 ksc ในส่วนผสมควบคุม (100C0G) เหลือเพียง 188 ksc ในส่วนผสมที่ใช้กรวดแม่น้ำ 100% (0C100G) คิดเป็นการลดลงถึง 32.4%

การลดลงของกำลังอัดนี้มีสาเหตุหลักมาจากคุณสมบัติทางกายภาพของกรวดแม่น้ำที่มีผิวเรียบและรูปทรงกลมมน ซึ่งส่งผลให้เกิดแรงยึดเหนี่ยว (bond strength) ที่อ่อนแอบริเวณรอยต่อระหว่างมวลรวมกับซีเมนต์เพสต์ (ITZ) เมื่อคอนกรีตรับแรงอัด รอยร้าวขนาดเล็ก (microcracks) มีแนวโน้มที่จะเริ่มต้นและขยายตัวไปตามแนวรอยต่อนี้ได้ง่ายกว่าเมื่อเทียบกับหินย่อยที่มีผิวหยาบและเป็นเหลี่ยมมุมซึ่งสร้างการขัดประสานเชิงกลที่ดีกว่า [10]

อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์จำเป็นต้องพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วน W/C ที่เปลี่ยนแปลงไปควบคู่กันด้วย จากตารางที่ 1 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนกรวดแม่น้ำ ปริมาณน้ำที่ต้องการเพื่อให้ได้ความสามารถในการเทได้ที่เหมาะสมลดลง ส่งผลให้อัตราส่วน W/C ลดลงจาก 0.457 เป็น 0.424 การลดลงของ W/C นี้โดยทฤษฎีแล้วจะทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความหนาแน่นสูงขึ้นและมีกำลังสูงขึ้น ดังนั้นกำลังอัดที่วัดได้จึงเป็นผลลัพธ์สุทธิของสองปัจจัยที่ขัดแย้งกัน คือ (1) การลดลงของกำลังเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวที่อ่อนแอของกรวด และ (2) การเพิ่มขึ้นของกำลังเนื่องจากคุณภาพของซีเมนต์เพสต์ที่ดีขึ้นจาก W/C ที่ต่ำลง ผลการทดลองที่แสดงให้เห็นว่ากำลังอัดยังคงลดลงอย่างชัดเจน บ่งชี้ว่าผลกระทบเชิงลบจากคุณสมบัติของผิวกรวดแม่น้ำมีอิทธิพลมากกว่าผลกระทบเชิงบวกจากการลดลงของอัตราส่วน W/C ในการศึกษา

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ที่อายุ 14 วัน

สัดส่วนผสม	กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (ksc.)	กำลังรับแรงอัด/กำลังรับแรงอัดที่กำหนด
100C0G	260	1.02
50C50G	245	0.96
40C60G	234	0.92
30C70G	229	0.90
20C80G	211	0.83
10C90G	190	0.74
0C100G	176	0.69

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ที่อายุ 28 วัน

สัดส่วนผสม	กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (ksc.)	กำลังรับแรงอัด/กำลังรับแรงอัดที่กำหนด
100C0G	278	1.09
50C50G	250	0.98
40C60G	244	0.96
30C70G	237	0.93
20C80G	220	0.86
10C90G	203	0.80
0C100G	188	0.74

3. กำลังต้านทานแรงดึงแบบผ่าซีก (splitting tensile strength)

ตารางที่ 6 แสดงผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงดึง พบพฤติกรรมที่น่าสนใจและแตกต่างจากกำลังรับแรงอัดอย่างชัดเจน กล่าวคือ เมื่อเพิ่มสัดส่วนการแทนที่ด้วยกรวดแม่น้ำ ค่ากำลังต้านทานแรงดึงกลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดที่สัดส่วน 30C70G (กรวด 70%) ซึ่งให้ค่ากำลังดึงสูงถึง 29.7 ksc สูงกว่าส่วนผสมควบคุม (25.5 ksc) ถึง 16.5% หลังจากนั้นค่ากำลังดึงจึงเริ่มลดลง พฤติกรรมที่ไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear) นี้ชี้ให้เห็นว่ากลไกการต้านทานแรงดึงและแรงอัดในคอนกรีตที่ใช่มวลรวมผสมนั้นมีความซับซ้อน สมมติฐานหนึ่งที่เป็นไปได้คือ การผสมผสานระหว่างหินย่อยที่มีเหลี่ยมมุมกับกรวดที่มีความกลมมนในอัตราส่วนที่เหมาะสม (เช่น 30C70G) อาจช่วยปรับปรุงการจัดเรียงตัวของโครงสร้างมวลรวม (aggregate skeleton) ให้มีความหนาแน่นและต่อเนื่องกันมากขึ้น ซึ่งการจัดเรียงตัวที่ดีนี้อาจสร้างเส้นทางการขยายตัวของรอยร้าวที่คดเคี้ยวกว่า (more tortuous crack path) เมื่อรับแรงดึง ทำให้ต้องใช้พลังงานในการแตกหักสูงขึ้น ส่งผลให้กำลังต้านทานแรงดึงสูงขึ้นตามไปด้วย [11]

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต ที่อายุ 28 วัน

สัดส่วนผสม	ความหนาแน่นเฉลี่ย (kg/m ³)	กำลังรับแรงดึงเฉลี่ย (ksc.)
100C0G	2460	25.5
50C50G	2440	26.1
40C60G	2450	27.9
30C70G	2410	29.7
20C80G	2430	26.1
10C90G	2440	25.5
0C100G	2390	24.7

4. การวิเคราะห์เชิงเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ (techno-economic analysis)

ผลการคำนวณแสดงในตารางที่ 7 พบว่าการแทนที่หินย้อยด้วยกรวดแม่น้ำสามารถลดต้นทุนค่ามวลรวมหยาบได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยการใช้กรวดแม่น้ำ 100% สามารถลดต้นทุนได้ถึง 59% เมื่อเทียบกับการใช้หินย้อย 100%

ตารางที่ 7 การวิเคราะห์ต้นทุนมวลรวมหยาบต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม. (ราคาประมาณการ ณ ไตรมาส 1 ปี 2568)

สัดส่วนผสม	ราคา G (บ.)	ราคา C (บ.)	รวมราคา (บ.)	% การลดต้นทุน (เทียบกับ 100C0G) (%)
100C0G	0	763.27	763.27	0.0
50C50G	155.62	381.64	537.26	29.7
40C60G	186.81	305.16	491.97	35.5
30C70G	217.99	228.68	446.67	41.5
20C80G	248.87	152.95	401.82	47.4
10C90G	280.06	76.48	356.53	53.3
0C100G	311.24	0.00	311.24	59.2

หมายเหตุ คำนวณจากราคาประมาณการ: กรวดแม่น้ำ 550 บาท/ลบ.ม., หินย้อย 1,200 บาท/ลบ.ม.

(รวมค่าขนส่งมายังแหล่งผลิตสมมติใน จ.ขอนแก่น) โดยอ้างอิงข้อมูลจากดัชนีราคาวัสดุก่อสร้าง

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ในตารางที่ 5 และต้นทุน ในตารางที่ 7 จะเห็นได้ว่าส่วนผสม 50C50G เป็นจุดที่น่าสนใจที่สุดในเชิงปฏิบัติ โดยให้กำลังอัด 250 ksc ซึ่งใกล้เคียงกับกำลังที่ออกแบบ (255 ksc) หรือคิดเป็น 98% ของเป้าหมาย แต่สามารถลดต้นทุนค่ามวลรวมหยาบได้ถึง 29.7% ในขณะที่การเพิ่มสัดส่วนกรวดแม่น้ำมากกว่านี้ แม้จะช่วยลดต้นทุนได้มากขึ้น แต่ก็ต้องแลกมากับกำลังอัดที่ลดลงต่ำกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับงานโครงสร้างทั่วไป

สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาผลกระทบของการแทนที่หินย้อยด้วยกรวดแม่น้ำต่อสมบัติเชิงกลและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของคอนกรีต สามารถสรุปผลได้ดังนี้

ผลต่อกำลังรับแรงอัด การเพิ่มสัดส่วนการแทนที่หินย้อยด้วยกรวดแม่น้ำส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลงอย่างเป็นระบบ สาเหตุหลักมาจากแรงยึดหน่วงที่อ่อนแอกว่าบริเวณรอยต่อระหว่างผิวกรวดที่เรียบมนกับซีเมนต์เพสต์ อย่างไรก็ตาม ผลกระทบเชิงลบนี้ได้รับการบรรเทาลงบางส่วนจากการที่ส่วนผสมที่ใช้กรวดต้องการน้ำน้อยลง ส่งผลให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลดลง ซึ่งช่วยเพิ่มคุณภาพของเนื้อซีเมนต์เพสต์

ผลต่อกำลังต้านทานแรงดึง กำลังต้านทานแรงดึงแบบผ่าซีกมีพฤติกรรมที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยมีค่าเพิ่มขึ้นและจุดสูงสุดที่สัดส่วนการแทนที่ด้วยกรวด 70% ก่อนที่จะลดลง ซึ่งบ่งชี้ว่าการผสมผสานมวลรวมสองชนิดในอัตราส่วนที่เหมาะสมอาจช่วยปรับปรุงโครงสร้างภายในเพื่อต้านทานการขยายตัวของรอยร้าวได้ดีขึ้น

ความคุ้มค่าเชิงเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ การวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่าสัดส่วนการแทนที่ 50% (50C50G) เป็นทางเลือกที่สมดุลและเหมาะสมที่สุดในทางปฏิบัติ โดยสามารถรักษากำลังรับแรงอัดได้สูงถึง 98% ของกำลังที่ออกแบบไว้ ในขณะที่สามารถลด

ต้นทุนค่ามวลรวมหายาได้เกือบ 30% ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับงานก่อสร้างในพื้นที่ที่สามารถจัดหากรวดแม่น้ำได้สะดวกและมีราคาถูก

การใช้กรวดแม่น้ำเป็นส่วนผสมทดแทนหินย้อยบางส่วนเป็นกลยุทธ์ที่มีศักยภาพในการลดต้นทุนการผลิตคอนกรีตโดยยังคงสมบัติเชิงโครงสร้างที่ยอมรับได้ อย่างไรก็ตาม ผู้ออกแบบควรพิจารณาถึงการลดลงของกำลังอัดและทำการออกแบบส่วนผสมให้เหมาะสมกับความต้องการของโครงการ

ข้อเสนอแนะ

สำหรับการศึกษาต่อไปควรมุ่งเน้นการประเมินสมบัติความทนทานระยะยาวของคอนกรีตที่ผสมกรวดแม่น้ำ เช่น ความต้านทานการซึมผ่าน การกัดกร่อนเหล็กเสริม และการทนต่อวัฏจักรแช่-เยือกแข็ง ตลอดจนการพัฒนาวิธีปรับปรุงคุณภาพของกรวดเพื่อเสริมแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมกับซีเมนต์เพสต์ นอกจากนี้ การวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อมเชิงวงจรชีวิตและการผสมผสานวัสดุทดแทนชนิดอื่นร่วมกับกรวดแม่น้ำ จะช่วยสร้างองค์ความรู้ที่รอบด้านและสนับสนุนการใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืนในงานคอนกรีตต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน สาขาวิศวกรรมโยธา และฝ่ายตรวจสอบและวิเคราะห์ทางวิศวกรรม ศูนย์สร้างทางขอนแก่น กรมทางหลวง ที่ให้การสนับสนุนวัสดุ อุปกรณ์ และห้องปฏิบัติการสำหรับการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Muhit, I.B., Haque, S. and Alam, M.R. (2013). Influence of crushed coarse aggregates on properties of concrete, *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, vol. 1(5), pp 103-106.

[2] Poloju, K.K., Anil, V. and Manchiryal, R. (2017). Properties of concrete as influenced by shape and texture of fine aggregate,

American Journal of Applied Scientific Research, vol. 3(3), pp. 28-36.

[3] Kadir, S.S. (2006). Properties of high-strength fibrous concrete with crushed stone as coarse aggregate, *Journal of Zankoy Sulaimani - Part A*, vol. 9(1), pp. 59-68.

[4] Ezawa M. (1967) On the beneficiation of gravel and crushed stone, *FLOTATION*, vol. 1967(33), pp. 36-42.

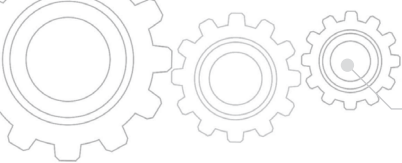
[5] Limantara, A.D., Widodo, A., Winarto, S., Krisnawati, L.D. and Mudjanarko, S.W. (2018). Optimizing the use of natural gravel brantas river as normal concrete mixed with quality $f_c = 19.3$ Mpa, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 140, pp. 012104.

[6] Silva, M.A., Pepe, M., Andrade, R.G.M.D., Pfeil, M. and Filho, R.D.T. (2017). Rheological and mechanical behavior of high strength steel fiber-river gravel self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*, vol. 150, pp. 606-618.

[7] Li, C., Sun, Q. and Li, F. (2011). Proportion design of concrete with gravel-crushed Proto-Machine-Made sand, *Advanced Materials Research*, vols. 295-297, pp. 436-439.

[8] Odeyemi, S.O. (2021). Mechanical properties of granite-gravel porous concrete, *International Journal of Engineering Research in Africa*, vol. 57, pp. 115-123.

[9] Daukšys, M., Dunauskas, A. and Juociūnas S. (2023). Effect of coarse aggregate characteristics on the permeability properties of pervious concrete, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1276, pp. 012004.



[10] Kosaka, Y. and Tanigawa, Y. (1975). Effect of coarse aggregate on fracture of concrete : part 2 : study on microscopic obserbation, *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, vol. 231, pp. 1-11.

[11] Yehia, S., Abdelfatah, A. and Mansour, D. (2020). Effect of aggregate type and specimen configuration on concrete compressive strength, *Crystals*, vol. 10(7), pp. 625.

