

การใช้มวลรวมหยาบจากแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลในคอนกรีตกำลังอัดระยะต้นสูงที่มี ส่วนผสมของเถ้าลอยละเอียดและไมโครซิลิกา

พัชรพล โพธิ์ศรี^{1*} ทวีชัย ภูอบอุ่น² อธิราช นาสิม³ อนรรชวี เจริญภักขารักษ์⁴ ปริญา จินดาประเสริฐ⁵
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตขอนแก่น^{1* 2 3 4}
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น⁵
อีเมล : Patcharapol.po@rmu.ac.th^{1*}

วันที่รับบทความ 19 เมษายน 2569

วันแก้ไขบทความ 14 มิถุนายน 2569

วันที่ตอบรับบทความ 24 มิถุนายน 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ศึกษาการใช้ประโยชน์จากมวลรวมหยาบแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล เพื่อใช้ในงานคอนกรีตที่รับกำลังอัดได้รวดเร็ว ที่มีส่วนผสมของ เถ้าลอยละเอียด และ ไมโครซิลิกา โดยมีส่วนผสม คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สารลดน้ำพิเศษ หยาบแม่น้ำ มวลรวมธรรมชาติ มวลรวมหยาบแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล คัดขนาด 4.75 ถึง 19.0 มม. เพื่อใช้เป็นมวลรวมหยาบรีไซเคิล โดยนำไปแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติ ในปริมาณ 0, 20 และ 40 % โดยน้ำหนักมวลรวมหยาบธรรมชาติ และได้ทำการพัฒนาสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้นโดยใช้วัสดุเติมแต่งได้แก่ ไมโครซิลิกา เปรียบเทียบกับเถ้าลอยละเอียด โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ 15 % โดยน้ำหนัก บ่มตัวอย่างในน้ำที่อุณหภูมิห้อง ทำการทดสอบกำลังอัด เมื่ออายุครบ 24 ชั่วโมง, 7 วัน และ 28 วัน และทำการทดสอบการดูดซึมน้ำ ปริมาณโพรงอากาศ กำลังรับแรงดัด และโมดูลัสยืดหยุ่น ที่อายุ 28 วัน ผลการศึกษาพบว่า อัตราส่วนผสมที่ใช้ไมโครซิลิกา 15 % มวลรวมหยาบแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล 40 % ให้กำลังรับแรงอัดที่อายุ 1 วัน เท่ากับ 365 ksc และ 28 วัน เท่ากับ 728 ksc ค่าการดูดซึมน้ำ 0.48 % ปริมาณโพรงอากาศ 1.19 % กำลังรับแรงดัด 87.1 ksc และโมดูลัสยืดหยุ่น 29.1 GPa เหมาะสมสำหรับทำคอนกรีตที่รับกำลังอัดรวดเร็ว ประเภทคอนกรีตกำลังสูง ตามมาตรฐาน ACI 363.2R-11 และอัตราส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยละเอียด 15 % มวลรวมหยาบแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล 40 % ให้กำลังรับแรงอัดที่อายุ 1 วัน เท่ากับ 305 ksc และ 28 วัน เท่ากับ 504 ksc ค่าการดูดซึมน้ำ 1.02 % ปริมาณโพรงอากาศ 2.50 % กำลังรับแรงดัด 55.4 ksc และโมดูลัสยืดหยุ่น 28.5 GPa เหมาะสมสำหรับทำคอนกรีตที่รับกำลังอัดรวดเร็ว ประเภทผนัง พื้นสำเร็จ ตามมาตรฐาน มอก.848-2546 นอกจากนี้ ยังพบว่าการใช้มวลรวมหยาบแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล ร่วมกับเถ้าลอยช่วยเพิ่มการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้ง ลดการใช้ปูนซีเมนต์ และเหมาะสมสำหรับทำคอนกรีตที่รับกำลังอัดรวดเร็ว

คำสำคัญ : คอนกรีตกำลังอัดระยะต้นสูง เถ้าลอยละเอียด มวลรวมหยาบแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล ไมโครซิลิกา



Use of Recycled Asphaltic Concrete Coarse Aggregate in High-Early-Strength Concrete Incorporating Fine Fly Ash and Microsilica

Patcharapol Posi^{1*}, Thaweechai Phoo-oboun², Thirang Nasim³,

Anakkhawee Charoenphantharak⁴, Prinya Chindaprasit⁵

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of
Technology Isan, Khon Kaen Campus^{1*,2,3,4}

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University⁵

E – mail : Patcharapol.po@rmuti.ac.th^{1*}

Received 19 April 2026

Revised 14 June 2026

Accepted 24 June 2026

Abstract

This study investigates the utilization of recycled asphalt concrete coarse aggregate in the production of high early strength concrete incorporating fine fly ash and micro silica. The mixtures consisted of ordinary Portland cement, superplasticizer, river sand, natural coarse aggregate, and recycled asphalt concrete coarse aggregate with a particle size range of 4.75–19.0 mm. The recycled aggregate was used to replace natural coarse aggregate at levels of 0, 20, and 40 % by weight. The performance of the concrete was further enhanced using supplementary cementitious materials, namely micro silica and fine fly ash, each used to replace 15 % of cement by weight. All specimens were water-cured at ambient temperature. Compressive strength was evaluated at 24 hours, 7 days, and 28 days, while water absorption, porosity, flexural strength, and modulus of elasticity were determined at 28 days. The results indicate that the mixture containing 15% microsilica and 40% recycled asphalt concrete aggregate achieved a compressive strength of 365 ksc at 1 day and 728 ksc at 28 days, with water absorption of 0.48%, porosity of 1.19%, flexural strength of 87.1 ksc, and a modulus of elasticity of 29.1 GPa. This mixture is suitable for early-strength high-performance concrete in accordance with ACI 363.2R-11. And the mixture incorporating 15% fine fly ash and 40% recycled aggregate exhibited a compressive strength of 305 ksc at 1 day and 504 ksc at 28 days, with water absorption of 1.02%, porosity of 2.50%, flexural strength of 55.4 ksc, and a modulus of elasticity of 28.5 GPa. This mixture is appropriate for precast wall and slab applications in accordance with TIS 848-2546. Furthermore, the combined use of recycled asphalt concrete aggregate and fly ash enhances the utilization of waste materials, reduces cement consumption, and promotes sustainability in the construction industry.

Keywords: high-early-strength concrete, fine fly ash, recycled asphalt concrete coarse aggregate, microsilica

1. บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยมีการขยายตัวทางเศรษฐกิจ ทั้งภาคอุตสาหกรรม ภาคการเกษตรกรรม และภาคบริการ (ท่องเที่ยว) ทำให้เกิดการเจริญเติบโตของเมืองหลวง หัวเมืองใหญ่ ซึ่งการพัฒนาประเทศในช่วงที่ผ่านมา มีการใช้ทรัพยากรธรรมชาติเป็นอย่างมากในการก่อสร้าง รวมทั้งการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานด้านคมนาคมขนส่งทางถนน ทำให้เกิดการขาดแคลนวัสดุตามธรรมชาติ เนื่องจากวัสดุธรรมชาติมีจำนวนจำกัด เมื่อวัสดุเริ่มลดน้อยลงและหายากมากขึ้นทำให้ราคาวัสดุแพงขึ้นไปด้วย โดยเฉพาะพื้นที่ห่างไกลจากแหล่งวัสดุ

ถนนสายหลักและถนนสายรองในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นผิวจราจรแอสฟัลต์คอนกรีต ผิวจราจรดังกล่าวจำเป็นต้องมีการบำรุงรักษาหรือบูรณะทาง เพื่อให้ผิวจราจรมีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการใช้งาน เช่น การปูผิวแอสฟัลต์คอนกรีตทับผิวจราจรเดิม การนำวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเดิมและพื้นทางเดิมกลับมาหมุนเวียนใช้เป็นชั้นพื้นทาง (Pavement Recycling) แล้วทำการปูผิวแอสฟัลต์คอนกรีตใหม่ ในกรณีที่ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเดิมมีความหนาเกินข้อกำหนด จะต้องมีการขุดไสผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเดิมออกก่อน จึงจะสามารถใช้ในงานพื้นทางหมุนเวียนได้ นอกจากนี้ยังมีการขุดไสผิวทางเดิมบริเวณที่เป็นร่องล้อหรือพื้นผิวจราจรไม่เรียบออก เพื่อให้ถนนมีความเรียบ สะดวก และปลอดภัยต่อการใช้งาน การบำรุงรักษาหรือบูรณะทางจึงเกิดวัสดุผิวทางแอสฟัลต์เดิม (RAP) ซึ่งเป็นของเสียมากขึ้นทุกวันอย่างต่อเนื่อง

วัสดุผิวทางแอสฟัลต์เดิม (RAP) มีส่วนผสมของมวลรวมธรรมชาติมากถึงร้อยละ 95 จึงได้มีการนำวัสดุผิวทางเดิมบางส่วนมาผสมกับปูนซีเมนต์ เพื่อใช้ในงานบำรุงรักษาถนน นอกจากนี้ยังใช้เป็นมวลรวมหยาบในส่วนผสมคอนกรีตในงานทาง เช่น ขอบคันทางคอนกรีต (Concrete Curb) คอนกรีตกั้นถนน (Barrier Concrete) แต่ก็มีวัสดุผิวทางเดิมคงเหลือเป็นของเสียอีกเป็นจำนวนมาก งานวิจัยนี้จึงได้นำวัสดุผิวทางแอสฟัลต์เดิม (RAP) มาทำการคัดแยกขนาดมวลรวม และนำมาใช้แทนมวลรวมธรรมชาติ เพื่อผลิตเป็นงานคอนกรีตที่รับกำลังอัดได้รวดเร็วที่มีส่วนผสมของวัสดุมวลรวมหยาบผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (Recycle Asphaltic Concrete Coarse Aggregate) เพื่อใช้ในงานคอนกรีตสำเร็จรูป (Precast Concrete) เช่น พื้น หรือผนังคอนกรีตสำเร็จรูป เป็นต้น

นอกจากนี้ นักวิจัยหลายท่านรายงานว่าแม้ว่าการใช้ RACA จะส่งผลกระทบต่อกำลังรับแรงของคอนกรีต แต่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติดังกล่าวได้ด้วยการใช้วัสดุปอซโซลานที่มีความละเอียดสูง เช่น เถ้าลอย (Fly Ash) และไมโครซิลิกา (Microsilica หรือ Silica Fume) โดยวัสดุเหล่านี้สามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากการไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ส่งผลให้เกิดเจลแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เพิ่มขึ้น ช่วยลดความพรุน เพิ่มความหนาแน่นของโครงสร้างจุลภาค และเพิ่มความแข็งแรงของคอนกรีต (Ergeshov et al., 2025; Phoo-ngernkham et al., 2015; Posi, et al., 2019)

สำหรับไมโครซิลิกา อนุภาคมีขนาดเล็กมากและมีปริมาณซิลิกาอสัณฐานสูง จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูงในการเพิ่มกำลังอัดระยะต้น ขณะที่เถ้าลอยมีต้นทุนต่ำกว่าและสามารถปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตได้ผ่านทั้งกลไกปอซโซลานและผลของการเติมเต็มช่องว่าง (Filler Effect) โดยเฉพาะเมื่อเถ้าลอยถูกบดหรือคัดขนาดให้มีความละเอียดสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการใช้เถ้าลอยละเอียดร่วมกับ RACA ในคอนกรีตกำลังอัดระยะต้นสูงยังมีจำนวนจำกัด และยังขาดข้อมูลเปรียบเทียบโดยตรงกับการใช้ไมโครซิลิกาภายใต้สภาวะการผลิตเดียวกัน ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาผลของการใช้มวลรวมหยาบแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลร่วมกับเถ้าลอยละเอียดและไมโครซิลิกาในคอนกรีตกำลังอัดระยะต้นสูง เพื่อประเมินผลต่อกำลังอัด กำลังดัด โมดูลัสยืดหยุ่น การดูดซึมน้ำ และความพรุน รวมทั้งเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุปอซโซลานทั้งสองชนิดต่อการชดเชยผลกระทบที่เกิดจากการใช้ RACA และสนับสนุนการใช้วัสดุรีไซเคิลในอุตสาหกรรมก่อสร้างอย่างยั่งยืน

อีกทั้งในการผลิตคอนกรีตได้รับกำลังอัดได้รวดเร็ว เพื่อเร่งกำลังให้คอนกรีตมีกำลังที่เพียงพอต่อการใช้งานในระยะเวลาอันสั้น โดยส่วนมากจะใช้วัสดุเติมแต่ง เพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังให้ดียิ่งขึ้น เช่น การเติมไมโครซิลิกา หรือ ไมโครซิลิกา ในส่วนผสมของคอนกรีต แต่ว่าไมโครซิลิกามีค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูง งานวิจัยนี้จึงมี

แนวความคิดที่จะนำวัสดุเติมแต่งชนิดอื่นที่มีราคาถูกมาใช้ในการคอนกรีตที่รับกำลังอัดรวดเร็ว จึงได้นำเถ้าลอยมาทำการร่อนผ่านตะแกรงเพื่อให้มีขนาดที่เล็กลงเพื่อที่จะเกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น และช่วยเติมเต็มช่องว่างของโพรงอากาศในคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น และนำผลการทดสอบเปรียบเทียบกับการใช้ไมโครซิลิกา ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาคูณสมบัติของคอนกรีตที่ได้รับกำลังอัดได้รวดเร็วที่มีส่วนผสมของมวลรวมหยาบจากแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล เถ้าลอยละเอียด และไมโครซิลิกา เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมงานก่อสร้างที่ต้องรับกำลังอัดได้รวดเร็ว และเพื่อเป็นข้อมูลสนับสนุนให้มีการนำวัสดุดังกล่าวไปใช้ในงานจริง นอกจากนี้การนำผลิตภัณฑ์ของเสียกลับมาใช้ใหม่ ยังช่วยลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ ลดต้นทุนในการซ่อมแซม ลดปริมาณขยะ และยังเป็นการช่วยสนับสนุนการใช้วัสดุรีไซเคิลในอุตสาหกรรมก่อสร้างที่ยั่งยืนได้อีกด้วย

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อศึกษาผลของการแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติด้วยมวลรวมหยาบแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลในอัตราร้อยละ 0, 20 และ 40 ต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตกำลังอัดระยะต้นสูง

2.2 เพื่อเปรียบเทียบผลของการใช้เถ้าลอยละเอียดและไมโครซิลิกาแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อกำลังอัด การดูดซึมน้ำ ความพรุน กำลังดัด และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

2.3 เพื่อประเมินศักยภาพของส่วนผสมที่พัฒนาขึ้นสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานคอนกรีตสำเร็จรูปที่ต้องการกำลังอัดระยะต้น



รูปที่ 1 มวลรวมหยาบรีไซเคิลจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (RACA)

3. วิธีการวิจัย

3.1 วัสดุ

3.1.1 ปูนซีเมนต์ เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

3.1.2 ทรายแม่น้ำ เป็นทรายหยาบ มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.64 และ ค่าการดูดซึมน้ำ ร้อยละ 0.36

3.1.3 มวลรวมหยาบธรรมชาติ เป็นหินปูนย่อย ขนาด 3/4 นิ้ว มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.71

3.1.4 มวลรวมหยาบรีไซเคิลจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ได้จากการขุดใส่ผิวทางเดิม จากแขวงทางหลวงชนบท อำเภอมือง จังหวัดหนองบัวลำภู ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4 นิ้ว ค้างเบอร์ 4 มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.44 ดังแสดงในรูปที่ 1

2.44 ดังแสดงในรูปที่ 1

3.1.5 ไมโครซิลิกา เกรดห้องปฏิบัติการ

- 3.1.6 แก้วลอย แก้วลอยละเอียดร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
- 3.1.6 สารลดน้ำ Sikament® NN (W) ประเภท F

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

Property	Fine Agg.	Coarse Agg.	RACA
ความถ่วงจำเพาะ	2.64	2.71	2.43
ขนาดอนุภาค(มม.)	0.08 – 4.75	4.75 – 19.00	4.75 – 19.00
โมดูลัสความละเอียด	2.28	6.04	6.42
หน่วยน้ำหนัก (กก./ลบ.ม.)	1697.97	1568.99	1496.12
การดูดซึมน้ำ (%)	0.36	0.86	0.26

Fine Agg.=มวลรวมละเอียด, Coarse Agg.=มวลรวมหยาบ, RACA=มวลรวมหยาบที่ใช้เกิดจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมี ของ แก้วลอย และไมโครซิลิกา (%)

Chemical	FA	MS
Composition, %		
SiO ₂	36.2	92.4
Al ₂ O ₃	15.52	-
Fe ₂ O ₃	14.25	0.33
CaO	22.57	2.52
K ₂ O	1.63	3.13
Na ₂ O	0.33	-
SO ₃	8.9	0.96
LOI	0.88	0.21

MS = ไมโครซิลิกา, FA = แก้วลอย

คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุแสดงในตารางที่ 1 หน่วยน้ำหนักของ มวลรวมละเอียด มวลรวมหยาบ และ RACA มีค่า 1,698, 1,569 และ 1,496 กก./ลบ.ม. ตามลำดับ RACA ถูกร่อนเพื่อให้ได้ส่วนที่มีขนาดระหว่าง 4.75 ถึง 19.00 มม. และถูกทำให้แห้งที่ผิวหน้าก่อนนำไปใช้ หินกรวดขนาดเล็กกว่าไม่ได้นำมาใช้เนื่องจากมีแอสฟัลต์และสิ่งสกปรกจำนวนมาก ส่วนหินกรวดขนาดใหญ่พบว่ามีแอสฟัลต์เคลือบอยู่บางส่วน 3.5 % องค์ประกอบทางเคมี (XRF) ของแก้วลอย ดังแสดงในตารางที่ 2 แก้วลอยประกอบด้วย SiO₂ 45.23%, Al₂O₃ 19.94%, Fe₂O₃ 13.14%, CaO 15.50% และมีค่า LOI 0.87% เป็นวัสดุปอซโซลาน Class F และไมโครซิลิกา ประกอบด้วย SiO₂ 92.40 %, Al₂O₃ 19.94%, Fe₂O₃ 0.33 %, CaO 2.25 % และมีค่า LOI 0.21%

3.2 สัดส่วนผสมและการผสมตัวอย่างทดสอบ

การทดลองครั้งนี้จะใช้ส่วนผสมทั้งหมด 9 ส่วนผสม ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สัดส่วนผสมของคอนกรีต (กก./ลบ.ม.)

Mixes	OPC	Fine Agg.	NA	RACA	Water	MS	FA	Pla.
00SF - 00RACA	370	670	1060	-	174	-	-	-
15FA - 00RACA	315	670	1060	-	94	-	56	7.4
15SF - 00RACA	315	670	1060	-	94	56	-	7.4
00SF - 20RACA	370	670	848	212	174	-	-	-
15FA - 20RACA	315	670	848	212	94	-	56	7.4
15SF - 20RACA	315	670	848	212	94	56	-	7.4
00SF - 40RACA	370	670	636	424	174	-	-	-
15FA - 40RACA	315	670	636	424	94	-	56	7.4
15SF - 40RACA	315	670	636	424	94	56	-	7.4

OPC = ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, NA = มวลรวมธรรมชาติ, RACA = มวลรวมหยาบรีไซเคิลจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต, MS = ไมโครซิลิกา, FA = เถ้าลอย, Pla. = สารลดน้ำพิเศษ

การผสมคอนกรีตที่รับกำลังอัดได้รวดเร็วที่มีส่วนผสมของมวลรวมหยาบแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล เริ่มต้นด้วยการนำปูนซีเมนต์และทรายในสภาพความชื้นอิ่มตัวผิวแห้งใส่ลงไปในเครื่องผสม เปิดเครื่องผสม และผสมให้เข้ากันแล้วทำการเติมมวลรวมหยาบธรรมชาติในสภาพความชื้นอิ่มตัวผิวแห้งและมวลรวมหยาบแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลในสภาพความชื้นอิ่มตัวผิวแห้ง ทำการผสมจนเข้ากัน ต่อมานำสารลดน้ำพิเศษและน้ำผสมกันแล้วค่อยๆเติมทีละ 10 เปอร์เซ็นต์ จนน้ำหมดตามที่ออกแบบไว้ ต่อมาทำการทดสอบค่าการทางานได้ โดยควบคุมค่าการยุบตัวที่ 7.5 ± 2.5 เซนติเมตร จากนั้นนำไปทำการเติมลงในแบบหล่อโดยใช้แบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15

เซนติเมตร ความสูง 30 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบ ค่ากำลังรับแรงอัด และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และแบบหล่อลูกบาศก์ ขนาด กว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบค่าความพรุนและการดูดซึมน้ำ และแบบหล่อนคอนกรีตขนาด กว้าง 15 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร สูง 15 เซนติเมตร เก็บตัวอย่างทดสอบไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการถอดแบบแล้วนำไปบ่มในน้ำจนครบตามระยะเวลาที่กำหนด

3.3 วิธีการทดสอบ

3.3.1 โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ของเถ้าลอยคัดขนาดและไมโครซิลิกา โดยใช้เทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) ทดสอบเมื่ออายุครบ 28 วัน (Prinya, Pornnapa, Suttipong, & Patcharapol, 2021)

3.3.2 กำลังอัด (Compressive Strength) ใช้ตัวอย่างแต่ละส่วนผสมจำนวน 3 ตัวอย่าง ทดสอบเมื่ออายุครบ 24 ชั่วโมง นับเวลาตั้งแต่ผสม ตามมาตรฐาน C 39/C 39M – 20 (ASTM C39/C39M-20, 2018)

3.3.3 ความพรุนและการดูดซึมน้ำ (Porosity and water absorption) ใช้ตัวอย่างแต่ละส่วนผสมจำนวน 3 ตัวอย่าง ทดสอบเมื่ออายุครบ 28 วันตามมาตรฐาน ASTM C642-21 (ASTM C642-21, 2021)

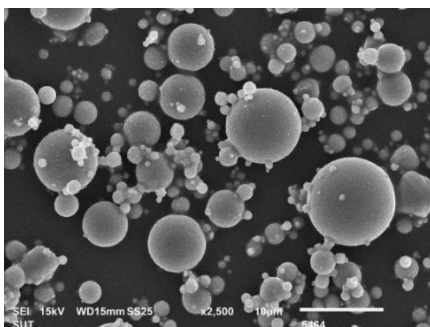
3.3.4 กำลังดัด (Flexural strength) ใช้ตัวอย่างแต่ละส่วนผสมจำนวน 3 ตัวอย่าง ทดสอบเมื่ออายุครบ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C78/C78M-16 (ASTM C78 / C78M - 16, 2016)

3.3.5 โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) ใช้ตัวอย่างแต่ละส่วนผสมจำนวน 2 ตัวอย่าง ทดสอบเมื่ออายุครบ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C469/C469M-14 (ASTM C469/C469M-14, 2014)

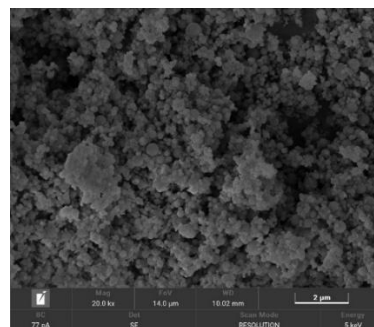
4. ผลการวิจัย

4.1 SEM, XRD ของเถ้าลอยและ ไมโครซิลิกา

ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง แสดงให้เห็นว่าอนุภาคมีลักษณะเป็นทรงกลมทึบเป็นส่วนใหญ่ และมีขนาดแตกต่างกันไป โดยลักษณะทรงกลมดังกล่าวแสดงไว้ในรูปที่ 2(ก) และภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของไมโครซิลิกาแสดงให้เห็นว่าอนุภาคมีลักษณะเป็นทรงกลมทึบเช่นเดียวกับเถ้าลอย แต่ขนาดของไมโครซิลิกานั้นมีขนาดเล็กกว่าขนาดของเถ้าลอยเป็นอย่างมาก ดังกล่าวแสดงไว้ในรูปที่ 2 (ข) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อวัสดุสารซีเมนต์เมื่อมีขนาดเล็กก็จะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้เร็วกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ (Posi, Kasemsiri, Lertnimoolchai, & Chindaprasirt, 2019)



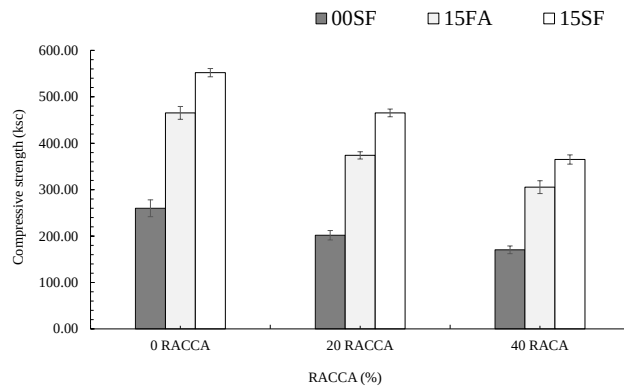
ก) เถ้าลอยแม่เมาะ



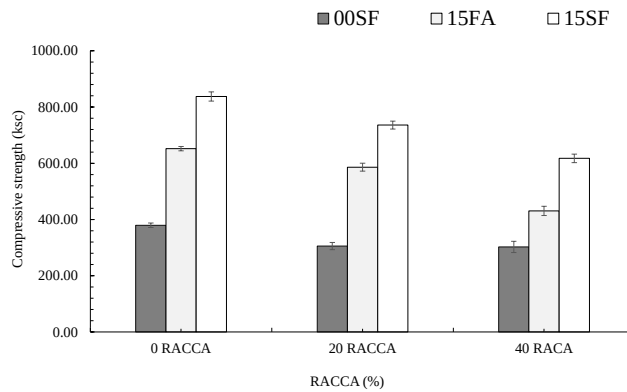
ข) ไมโครซิลิกา

รูปที่ 2 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของ ก) เถ้าลอยแม่เมาะ, ข) ไมโครซิลิกา

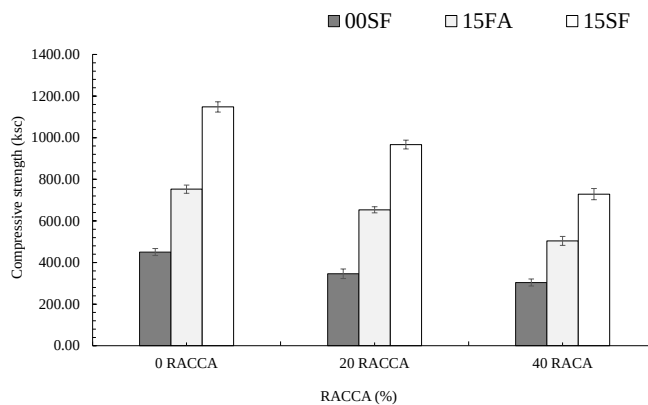
4.2 กำลังรับแรงอัด



ก) ผลกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ที่อายุ 1 วัน



ข) ผลกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ที่อายุ 7 วัน



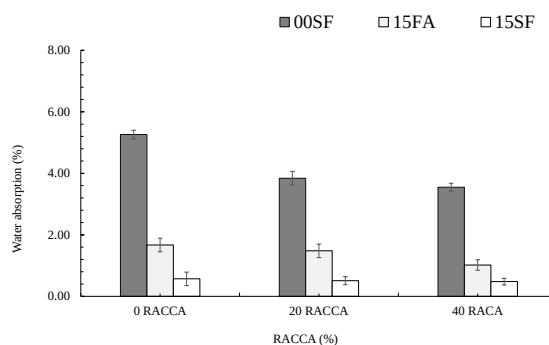
ค) ผลกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ที่อายุ 28 วัน

รูปที่ 3 ผลกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ที่อายุ 1, 7 และ 28 วัน

ผลการทดสอบคอนกรีตที่รับกำลังอัดได้รวดเร็วที่มีส่วนผสมของมวลรวมหยาบแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลแสดงในรูปที่ 3 จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราส่วนปริมาณของมวลรวมหยาบแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลมากขึ้นกำลังรับแรงอัดจะมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากกำลังอัดที่ลดลงเนื่องจากมวลรวมแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลมีแอสฟัลต์ซีเมนต์เคลือบที่ผิวมวลรวม ทำให้การยึดเกาะระหว่างสารเชื่อมประสานและมวลรวมมีค่าลดลง (Y. A. Khodair & engineering, 2017) ดังตัวอย่างกำลังรับแรงอัดที่อายุ 1 วัน แสดงดังรูปที่ 3 (ก) เมื่อเปลี่ยนปริมาณของมวลรวมหยาบแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล ที่ 0, 20 และ 40 % โดยมวล ส่วนผสม 00SF-00RACA, 00SF-20RACA และ 00SF-40RACA มีกำลังอัดเท่ากับ 239.0, 201.8 และ 170.5 ksc ตามลำดับ ที่อายุ 7 วัน แสดงดังรูปที่ 3 (ข) ส่วนผสม 00SF-00RACA, 00SF-20RACA และ 00SF-40RACA มีกำลังอัดเท่ากับ 379.6, 305.7 และ 302.7 ksc ตามลำดับ และที่อายุ 28 วัน แสดงดังรูปที่ 3 (ค) ส่วนผสม 00SF-00RACA, 00SF-20RACA และ 00SF-40RACA มีกำลังอัดเท่ากับ 450.5, 346.0 และ 304.0 ksc ตามลำดับ

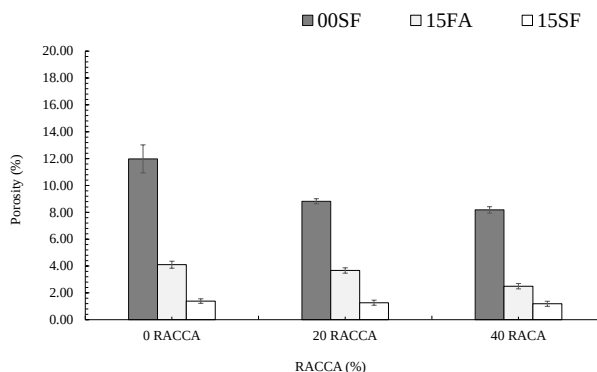
และเมื่อทำการเติมเถ้าลอยขนาดละเอียดแทนปูนซีเมนต์ 15 % โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับการเติมไมโครซิลิกา แทนปูนซีเมนต์ 15 % โดยน้ำหนัก พบว่า การแทนปูนซีเมนต์ด้วยไมโครซิลิกาให้กำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าการแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยขนาดละเอียด ทุกอายุการทดสอบ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก อนุภาคของไมโครซิลิกามีขนาดเล็กมาก และมีลักษณะเป็นเฟสอสัณฐาน (amorphous phase) ในระดับสูง ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว (Grabiec, Zawal, & Szulc, 2015) ดังตัวอย่างกำลังรับแรงอัดที่อายุ 1 วัน แสดงดังรูปที่ 3 (ก) ส่วนผสม 00SF-20RACA, 15FA-20RACA และ 15SF-20RACA มีกำลังอัดเท่ากับ 201.8, 373.9 และ 434.5 ksc ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามการแทนปูนซีเมนต์ ด้วยเถ้าลอยขนาดละเอียด มีต้นทุนในการผลิตคอนกรีตที่ต่ำกว่า เนื่องจากราคาที่สูงของไมโครซิลิกา และกำลังรับแรงอัดก็อยู่ในเกณฑ์ที่สามารถใช้สำหรับงานโครงสร้างที่รับกำลังอัดได้รวดเร็ว สำหรับงานผนังสำเร็จรูป และสามารถใช้มวลรวมหยาบแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล แทนที่มวลรวมธรรมชาติได้ถึง 40 % โดยมีกำลังรับแรงอัดที่ อายุ 1 วัน เท่ากับ 305 ksc ละกำลังอัดที่ 28 วัน เท่ากับ 504 ksc ตามมาตรฐาน มอก. 848-2546 ที่กำหนดกำลังรับแรงอัดที่ อายุ 1 วัน เท่ากับ 204 ksc ละกำลังอัดที่ 28 วัน เท่ากับ 350 ksc ตามลำดับ

4.3 การดูดซึมน้ำและปริมาณโพรงอากาศ



รูปที่ 4 ผลการดูดซึมน้ำของคอนกรีต ที่อายุ 28 วัน

ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำและปริมาณโพรงอากาศของคอนกรีตที่รับกำลังอัดได้รวดเร็วที่มีส่วนผสมของมวลรวมหยาบแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล แสดงในรูปที่ 4 และ 5 ตามลำดับ



รูปที่ 5 ผลปริมาณโพรงอากาศของคอนกรีต ที่อายุ 28 วัน

จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของมวลรวมหยาบแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลมากขึ้น ทำให้การดูดซึมน้ำมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากลักษณะความหนืดของแอสฟัลต์ซึ่งทำหน้าที่เป็นผนังที่น้ำซึมผ่านไม่ได้และต้านทานการซึมผ่านของของเหลวได้ (Wongkvanklom, Posi, Kampala, Kaewngao, & Chindaprasirt, 2021) มากกว่านั้นการดูดซึมน้ำและความพรุนของคอนกรีตจะสัมพันธ์กับช่องว่างในซีเมนต์เพสต์และมวลรวม (Y. Khodair & Raza, 2017)

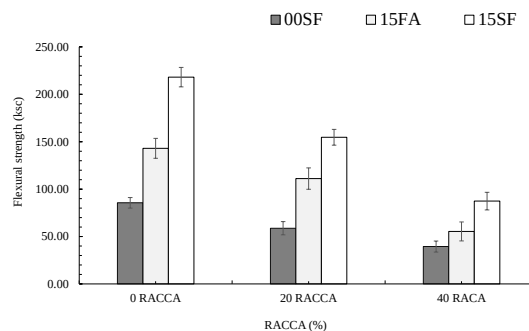
ความพรุนและการดูดซับสูงส่งผลเสียต่อความทนทานต่อการกัดกร่อนของคอนกรีต เนื่องจากของไหล เช่น น้ำซึมเข้าสู่คอนกรีต และทำให้ความเสถียรทางเคมีของคอนกรีตลดลง (Dulsang, Kasemsiri, Posi, Hizirolu, & Chindaprasirt, 2016) ตัวอย่างผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ และปริมาณโพรงอากาศ ที่ 28 วัน แสดงดังรูปที่ 4 และ 5 ตามลำดับ ส่วนผสม 00SF-00RACA, 00SF-20RACA และ 00SF-40RACA มีค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ ร้อยละ 5.26, 3.84 และ 3.55 ตามลำดับ และค่าปริมาณความพรุนเท่ากับ ร้อยละ 11.98, 8.82, และ 8.18 ตามลำดับ

และเมื่อทำการเติมเถ้าลอยขนาดละเอียดแทนปูนซีเมนต์ 15 % โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับการเติมไมโครซิลิกา แทนปูนซีเมนต์ 15 % โดยน้ำหนัก พบว่า การแทนปูนซีเมนต์ด้วยไมโครซิลิกาให้ค่าการดูดซึมน้ำ และปริมาณโพรงอากาศที่ต่ำกว่าการแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยขนาดละเอียด ทุกอายุการทดสอบ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณ ไมโครซิลิกา และเถ้าลอยละเอียด ทำให้เกิดเจลของ C-A-S-H และ C-S-H เพิ่มสูงขึ้น เจลเหล่านี้ทำงานร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพเพื่อสร้าง เมทริกซ์ที่หนาแน่นและเหนียวแน่นมากขึ้น ลดรูพรุนและรอยแตกขนาดเล็ก จึงช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความทนทาน นอกจากนี้ เมื่อวัสดุปอซโซลานมีขนาดเล็กละเอียด เช่น ไมโครซิลิกา การสร้างเมทริกซ์ที่หนาแน่นไม่ได้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีเพียงอย่างเดียว แต่ยังเกิดจากการเพิ่มความหนาแน่นของโครงสร้างจุลภาคผ่านการทำงานร่วมกันของรูปร่างอนุภาค อนุภาคของไมโครซิลิกา ที่ละเอียดมากทำหน้าที่เป็นสารเติมเต็ม ส่งผลให้ความหนาแน่นและความสมบูรณ์ทางกลของคอนกรีตดีขึ้น (Ergeshov et al., 2025)

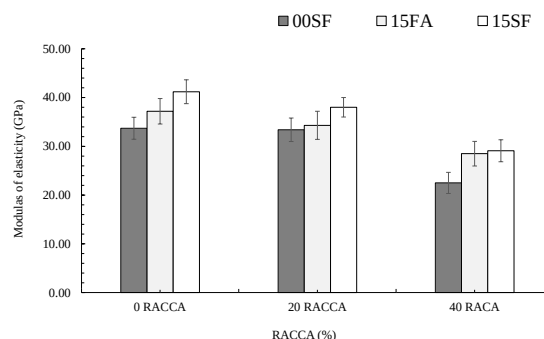
4.4 กำลังรับแรงดัด

ผลการทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตที่รับกำลังอัดได้รวดเร็วที่มีส่วนผสมของมวลรวมหยาบแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล แสดงในรูปที่ 6 จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณมวลรวมหยาบแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลเพิ่มสูงขึ้นทำให้กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตมีแนวโน้มที่ลดลง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของบริเวณรอยต่อที่มีการยึดเกาะอ่อน (weak bond) ระหว่างมวลรวมหยาบแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล กับเนื้อวัสดุ (matrix) (Prinya, Pornnapa, Sompron, & Patcharapol, 2020) ดังตัวอย่างกำลังดัดของคอนกรีต ที่อายุ 28 วัน เมื่อเปลี่ยนปริมาณของมวลรวมหยาบแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล ส่วนผสม 00SF-00RACA, 00SF-20RACA และ 00SF-40RACA มีค่ากำลังรับแรงดัดเท่ากับ 85.6, 58.8 และ 39.5 ksc ตามลำดับ

และเมื่อทำการเติมเถ้าลอยขนาดละเอียดแทนปูนซีเมนต์ 15 % โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับการเติมไมโครซิลิกา แทนปูนซีเมนต์ 15 % โดยน้ำหนัก พบว่า การแทนปูนซีเมนต์ด้วยไมโครซิลิกาให้ค่ากำลังรับแรงดัดที่สูงกว่าการแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยขนาดละเอียด ทุกอายุการทดสอบ การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงดัดมีสาเหตุมาจากการเพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาที่เกิดจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) และวัสดุปอซโซลาน ซึ่งสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ส่งผลให้กำลังรับแรงดัดดีขึ้น (Phoo-ngernkham et al., 2015; Posi, et al., 2019)



รูปที่ 6 ผลกำลังรับแรงดัดของคอนกรีต ที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 7 ผลโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ที่อายุ 28 วัน

4.5 โมดูลัสยืดหยุ่น

ผลการทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่น ของคอนกรีตที่รับกำลังอัดได้รวดเร็วที่มีส่วนผสมของมวลรวมหยาบแอสฟัลต์ คอนกรีตไร้เซล แสดงในรูปที่ 7 จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราส่วนปริมาณของมวลรวมมวลรวมหยาบแอสฟัลต์ คอนกรีตไร้เซล เพิ่มมากขึ้น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจะมีแนวโน้มลดลง โดยแนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับการลดลงของกำลังรับแรงอัด ดังตัวอย่างโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ที่อายุ 28 วัน เมื่อเปลี่ยนปริมาณของมวลรวมหยาบแอสฟัลต์ คอนกรีตไร้เซล ส่วนผสม 00SF-00RACCA, 00SF-20RACCA และ 00SF-40RACCA มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 33.7, 33.4 และ 22.5 GPa ตามลำดับ มากกว่านั้นโมดูลัสยืดหยุ่นได้รับอิทธิพลจากคุณสมบัติของมวลรวม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และกำลังรับแรงอัด (Chi, Huang, Yang, & Chang, 2003; Khan, Hao, Hao, & Shaikh, 2018) โดยทั่วไป ค่าของโมดูลัสยืดหยุ่นที่สูงกว่าสำหรับคอนกรีตที่มีกำลังอัดเท่ากัน แสดงถึงคุณภาพของคอนกรีตที่ดีกว่า

5. อภิปรายผลและสรุปผล

5.1 อภิปรายผล

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติด้วยมวลรวมหยาบแอสฟัลต์คอนกรีต รีไซเคิล (RACA) ส่งผลให้กำลังอัด กำลังดัด และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มปริมาณ RACA จาก 0 เป็น 40% แม้ว่าค่าการดูดซึมน้ำและความพรุนจะมีแนวโน้มลดลงก็ตาม การลดลงของกำลังเชิงกลสามารถอธิบายได้จากลักษณะเฉพาะของ RACA ซึ่งมีชั้นแอสฟัลต์เคลือบอยู่บนผิวมวลรวม ทำให้การยึดเกาะระหว่างมวลรวมกับซีเมนต์เพสต์บริเวณรอยต่อ (Interfacial Transition Zone: ITZ) มีประสิทธิภาพต่ำกว่ามวลรวมหินธรรมชาติ เนื่องจากแอสฟัลต์มีลักษณะเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นและมีพลังงานผิวต่ำ ส่งผลให้การถ่ายแรงระหว่างเนื้อคอนกรีตและมวลรวมลดลง เมื่อคอนกรีตได้รับแรงอัดหรือแรงดัด รอยแตกร้าวจึงสามารถเกิดและขยายตัวบริเวณ ITZ ได้ง่ายกว่า ส่งผลให้กำลังอัด กำลังดัด และโมดูลัสยืดหยุ่นลดลง

ในทางตรงกันข้าม ผลการทดลองพบว่าค่าการดูดซึมน้ำและความพรุนลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ RACA ซึ่งไม่ควรตีความว่าโครงสร้างภายในของคอนกรีตมีคุณภาพดีขึ้นโดยตรง เนื่องจากการลดลงดังกล่าวอาจเกิดจากคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Property) ของชั้นแอสฟัลต์ที่เคลือบผิวมวลรวม ซึ่งทำหน้าที่เป็นเกราะป้องกันการซึมผ่านของน้ำเข้าสู่เนื้อคอนกรีต ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำที่วัดได้ลดลง แม้ว่าความแข็งแรงเชิงกลของคอนกรีตจะลดลงก็ตาม ดังนั้นการประเมินคุณภาพของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของ RACA จึงควรพิจารณาร่วมกันทั้งสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล

สำหรับการใช้ไมโครซิลิกาและเถ้าลอยละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก พบว่าวัสดุทั้งสองชนิดสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตได้ โดยเฉพาะไมโครซิลิกาซึ่งให้ค่ากำลังอัด กำลังดัด และโมดูลัสยืดหยุ่นสูงกว่าเถ้าลอยละเอียดอย่างชัดเจน เนื่องจากไมโครซิลิกามีขนาดอนุภาคเล็กมากและมีปริมาณซิลิกาอสัณฐานสูง ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ได้รวดเร็ว เกิดการสร้างเจล C-S-H เพิ่มขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคมีความหนาแน่นมากขึ้น

นอกจากนี้ อนุภาคขนาดเล็กของไมโครซิลิกายังทำหน้าที่เป็นวัสดุเติมเต็ม (Filler Effect) โดยสามารถแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างระหว่างอนุภาคซีเมนต์และมวลรวม ทำให้ลดปริมาณรูพรุนและเพิ่มความต่อเนื่องของเนื้อวัสดุ ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำและความพรุนลดลง พร้อมทั้งเพิ่มกำลังเชิงกลของคอนกรีตได้พร้อมกัน ในกรณีของเถ้าลอยละเอียด แม้จะให้กำลังอัดต่ำกว่าไมโครซิลิกา แต่การร่อนให้มีขนาดละเอียดมากขึ้นช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะส่งเสริมทั้งปฏิกิริยาปอซโซลานและผลของการเติมเต็มช่องว่าง ส่งผลให้กำลังอัดและความทนทานของคอนกรีตดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ได้ใช้วัสดุปอซโซลาน ทั้งยังมีข้อได้เปรียบด้านต้นทุนและความยั่งยืน เนื่องจากเป็นวัสดุผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้า จากการศึกษาทั้งหมดแสดงให้เห็นว่า แม้การใช้ RACA จะส่งผลให้กำลังเชิงกลลดลงจากผลของชั้นแอสฟัลต์ที่บริเวณ ITZ แต่การใช้วัสดุปอซโซลานที่มีความละเอียดสูง โดยเฉพาะไมโครซิลิกา สามารถช่วยปรับปรุงโครงสร้างจุลภาค ลดความพรุน และชดเชยผลกระทบดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้สามารถใช้ RACA ในสัดส่วนสูงถึง 40% สำหรับการผลิตคอนกรีตกำลังอัดระยะต้นสูงได้

5.2 สรุปผล

ผลการศึกษาทั้งหมดของงานวิจัย สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

5.2.1 การเพิ่มปริมาณ RACA จาก 0–40% ส่งผลให้กำลังอัด กำลังดัด และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตลดลง เนื่องจากชั้นแอสฟัลต์ที่เคลือบผิวมวลรวมลดประสิทธิภาพการยึดเกาะบริเวณรอยต่อระหว่างมวลรวมและซีเมนต์เพสต์ (ITZ)

5.2.2 การเพิ่มปริมาณ RACA ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำและความพรุนลดลง อย่างไรก็ตาม การลดลงดังกล่าวมีแนวโน้มเกิดจากคุณสมบัติไม่ชอบน้ำของชั้นแอสฟัลต์ มากกว่าการแสดงถึงการพัฒนาโครงสร้างภายในของคอนกรีตในทุกด้าน

5.2.3 การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยไมโครซิลิกาและเถ้าลอยละเอียดร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ช่วยเพิ่มกำลังอัด กำลังดัด และโมดูลัสยืดหยุ่น พร้อมทั้งลดค่าการดูดซึมน้ำและความพรุนของคอนกรีต อันเป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานและผลของการเติมเต็มช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีต

5.2.4 ส่วนผสม 15SF-40RACA ให้สมบัติที่ดีที่สุด โดยมีกำลังอัดที่อายุ 1 วัน และ 28 วัน เท่ากับ 365 และ 728 ksc ตามลำดับ การดูดซึมน้ำ 0.48% ความพรุน 1.19% กำลังดัด 87.1 ksc และโมดูลัสยืดหยุ่น 29.1 GPa ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดคอนกรีตกำลังสูงของมาตรฐาน ACI 363.2R-11 (ACI 363.2R-11, 2011) ระบุว่า คอนกรีตกำลังสูง ต้องมีกำลังอัดที่ 28 วันต้องไม่น้อยกว่า 550 ksc.

5.2.5 ส่วนผสม 15FA-40RACA ให้กำลังอัดที่อายุ 1 วัน และ 28 วัน เท่ากับ 305 และ 504 ksc ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าข้อกำหนดของ มอก. 848-2546 สำหรับผลิตภัณฑ์คอนกรีตสำเร็จรูปประเภทผนังและพื้น อีกทั้งยังช่วยลดการใช้น้ำปูนซีเมนต์และการใช้วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมก่อสร้างและพลังงาน

5.2.6 ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการใช้ RACA ร่วมกับวัสดุปอซโซลานที่มีความละเอียดสูง โดยเฉพาะไมโครซิลิกา เป็นแนวทางที่มีศักยภาพสำหรับการผลิตคอนกรีตกำลังอัดระยะต้นสูงที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสนับสนุนแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนในอุตสาหกรรมก่อสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6. ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยพบว่าการนำมวลรวมหยาบแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RACA) มาใช้ร่วมกับเถ้าลอยละเอียดและไมโครซิลิกา สามารถพัฒนาคอนกรีตกำลังอัดระยะต้นสูงที่มีสมบัติเหมาะสมสำหรับงานคอนกรีตสำเร็จรูปได้ อย่างไรก็ตาม เพื่อให้เกิดความเข้าใจเชิงลึกและขยายขอบเขตการประยุกต์ใช้งานในอนาคต ควรมีการศึกษาประเด็นเพิ่มเติมดังต่อไปนี้

6.1 ก่อนนำมวลรวมหยาบแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลมาใช้ ควรมีการตรวจสอบปริมาณแอสฟัลต์ที่เคลือบผิวมวลรวมและคุณภาพของมวลรวมรีไซเคิลให้มีความสม่ำเสมอ เนื่องจากปริมาณแอสฟัลต์ที่แตกต่างกันอาจส่งผลต่อการยึดเกาะบริเวณรอยต่อระหว่างมวลรวมกับซีเมนต์เพสต์ (Interfacial Transition Zone; ITZ) และส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีต

6.2 ควรศึกษาสมบัติด้านความทนทานในระยะยาว (Long-term Durability) ของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของ RACA เพิ่มเติม เช่น การซึมผ่านของคลอไรด์ (Chloride Penetration Resistance) การซึมผ่านน้ำ (Water Permeability) ความต้านทานต่อการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ความต้านทานต่อซัลเฟต และการต้านทานการเกิดคาร์บอนเนชัน เพื่อประเมินความเหมาะสมสำหรับการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่รุนแรง

6.3 ควรศึกษาพฤติกรรมระยะยาวของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของ RACA เช่น การหดตัว (Drying Shrinkage) การคืบ (Creep) และการแตกร้าวจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เนื่องจากสมบัติดังกล่าวมีผลโดยตรงต่ออายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีต

6.4 ควรศึกษาความสามารถในการยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริม (Bond Strength between Concrete and Reinforcement) รวมถึงพฤติกรรมของชิ้นส่วนโครงสร้างจริง เช่น คาน เสา และแผ่นพื้น เพื่อยืนยันศักยภาพในการนำไปใช้งานทางวิศวกรรมโครงสร้าง

6.5 ควรศึกษาระดับการแทนที่มวลรวมหยาบแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลที่สูงกว่า 40% หรือการใช้ RACA แทนที่มวลรวมหยาบทั้งหมด เพื่อกำหนดขีดจำกัดการใช้งานและประเมินศักยภาพในการใช้ทรัพยากรรีไซเคิลให้เกิดประโยชน์สูงสุด

6.6 ควรศึกษาวิธีการปรับปรุงคุณภาพผิวของ RACA ก่อนนำมาใช้ เช่น การล้างทำความสะอาด การกำจัดชั้นแอสฟัลต์บางส่วน การเคลือบผิวด้วยสารปอซโซลาน หรือการปรับสภาพด้วยสารละลายเคมี เพื่อเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมกับซีเมนต์เพสต์ และลดผลกระทบจากชั้นแอสฟัลต์ที่ตกค้างอยู่บนผิวมวลรวม

6.7 ควรมีการศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของ RACA ภายใต้สภาวะแวดล้อมจริง (Field Exposure Test) และการติดตามผลในระยะยาว เพื่อยืนยันความเหมาะสมในการนำไปใช้งานก่อสร้างจริง รวมทั้งประเมินอายุการใช้งานและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของวัสดุรีไซเคิลชนิดนี้

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2569 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น คณะวิศวกรรมศาสตร์ รหัสโครงการ FF69/KKC/057

เอกสารอ้างอิง

- ACI 363.2R-11. (2011). Goide to Quality Control and Assurance of High-Strength Concrete. *ACI Materials Journal*.
- ASTM C39/C39M-20. (2018). *Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. Annual Book of ASTM Standard, Vol 04.02.
- ASTM C78 / C78M - 16. (2016). *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*. Annual Book of ASTM Standard, vol 04.02.
- ASTM C469/C469M-14. (2014). *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*. Annual Book of ASTM Standard, Vol.02.01.
- ASTM C642-21. (2021). *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. Annual Book of ASTM Standard, Vol.04.02.
- Chi, J. M., Huang, R., Yang, C. C., & Chang, J. J. (2003). Effect of aggregate properties on the strength and stiffness of lightweight concrete. *Cement and Concrete Composites*, 25(2), 197-205. doi: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00020-3](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00020-3).
- Dulsang, N., Kasemsiri, P., Posi, P., Hiziroglu, S., & Chindaprasirt, P. (2016). Characterization of an environment friendly lightweight concrete containing ethyl vinyl acetate waste. *Materials & Design*, 96, 350-356. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.037>.
- Ergeshov, Z., Örklemmez, E., Ketema, A., Kwami, M., Ilkentapar, S., Durak, U., Karahan, O., & Atiş, C. (2025). Influence of Silica Fume on the Mechanical and Microstructural Properties and Life Cycle Assessment of Fly Ash-Based Geopolymer Mortar. *Arabian Journal for Science and Engineering*. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s13369-025-10142-9>.
- Grabiec, A., Zawal, D., & Szulc, J. (2015). Influence of type and maximum aggregate size on some properties of high-strength concrete made of pozzolana cement in respect of binder and carbon dioxide intensity indexes. *Construction and Building Materials*, 98, 17-24. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.108>.
- Khan, M. Z. N., Hao, Y., Hao, H., & Shaikh, F. U. A. (2018). Mechanical properties of ambient cured high strength hybrid steel and synthetic fibers reinforced geopolymer composites. *Cement and Concrete Composites*, 85, 133-152. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.10.011>.

- Khodair, Y., & Raza, M. (2017). Sustainable self-consolidating concrete using recycled asphalt pavement and high volume of supplementary cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 131, 245-253. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.044>.
- Khodair, Y. A., & engineering, L. J. J. o. b. (2017). Self-compacting concrete using recycled asphalt pavement and recycled concrete aggregate. *Journal of Building Engineering*, 12, 282-287. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.job.2017.06.007>.
- Phoo-ngernkham, T., Sata, V., Hanjitsuwan, S., Ridditirud, C., Hatanaka, S., & Chindaprasirt, P. (2015). High calcium fly ash geopolymer mortar containing Portland cement for use as repair material. *Construction and Building Materials*, 98, 482-488. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.139>.
- Posi, P., Kasemsiri, P., Lertnimoolchai, S., & Chindaprasirt, P. (2019). effect of fly ash fineness on compressive, flexural and shear strength of high strength-high volume fly ash jointing mortar. *International Journal of GEOMATE*, 16(54), 36-41. doi: <http://dx.doi.org/10.21660/201.54.4662>.
- Prinya, C., Pornnapa, K., Sompron, L., & Patcharapol, P. (2020). Durability of concrete containing recycled asphaltic concrete aggregate and high calcium fly ash. *GEOMATE Journal*, 19(74), 8-14. doi: <http://dx.doi.org/10.21660/2020.74.5541>.
- Prinya, C., Pornnapa, K., Suttipong, P.-a., & Patcharapol, P. (2021). Fluidized bed coal-bark fly ash geopolymer with additives cured at ambient temperature. *GEOMATE Journal*, 16(54), 29-35. doi: <http://dx.doi.org/10.21660/2019.54.4654>.
- Wongkvanklom, A., Posi, P., Kampala, A., Kaewngao, T., & Chindaprasirt, P. (2021). Beneficial utilization of recycled asphaltic concrete aggregate in high calcium fly ash geopolymer concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00615. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00615>.

คุณค่าทางวิชาการ

งานวิจัยนี้ได้นำวัสดุที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ โดยได้นำเศษวัสดุมวลรวมหยาบแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล มาใช้ในการผลิตคอนกรีตอีกครั้ง และทำการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของ คอนกรีตที่มีส่วนผสมของมวลรวมหยาบแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล เพื่อเป็นการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมและใช้ทรัพยากรธรรมชาติให้คุ้มค่า โดยการนำการนำวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเดิม ที่ได้จากการรื้อถนนแอสฟัลต์ เพื่อซ่อมแซม และสร้างถนนใหม่ จึงมีเศษวัสดุผิวทางแอสฟัลต์เดิม (RAP) ซึ่งเป็นของเสียมากขึ้นทุกวันอย่างต่อเนื่อง นำมาย่อยให้เป็นมวลรวมหยาบแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล และทำการคัดขนาดให้ได้ตามมาตรฐานของมวลรวมหยาบและนำกลับมาใช้งานอีกครั้ง เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับของเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมการก่อสร้าง และเพื่อเป็นข้อมูลที่ใช้ในการพัฒนาคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลอย่างยั่งยืนต่อไป