

แนวทางการผลิตคอนกรีตสีเขียวอย่างยั่งยืนด้วยเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์ โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ และมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล

A Sustainable Approach to Producing Green Concrete Using E-Waste Fibers, Polyvinyl Alcohol, and Recycled Concrete Aggregates

บุรฉัตร ฉัตรวิระ¹, กมลวรรณ เพ็ญเสวี^{2,*} และ กฤษดา เสือเอี่ยม³

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต จ.ปทุมธานี

³ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: kn.pensawee@gmail.com

บทคัดย่อ

การมุ่งเน้นความยั่งยืนทางสิ่งแวดล้อมและการจัดการของเสียที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยส่งเสริมการพัฒนาคอนกรีตสีเขียว งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาแนวทางวิธีการผลิตคอนกรีตสีเขียวอย่างยั่งยืนโดยการนำเถ้าลอยมาแทนที่ 20% โดยน้ำหนักเพื่อลดการใช้ปูนซีเมนต์ นำมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (0% และ 25% โดยน้ำหนัก) แทนมวลรวมหยาบ และผสมรวมเส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ (0%, 1.5%, 3.0%, 4.5% และ 6% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์) นอกจากนี้ยังมีการเติมโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ในปริมาณคงที่ 1% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ โดยทำการปรับปริมาตรสารลดน้ำในแต่ละส่วนผสมตามค่าการทดสอบการยุบตัวของคอนกรีตที่กำหนดไว้ 100 ± 25 มม. ทำการศึกษาเพื่อประเมินสมบัติทางกล และความคงทนของคอนกรีตที่อายุแตกต่างกัน ผลการศึกษาพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตจากมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลผสมรวมเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณผสมรวมไม่เกิน 4.5% และมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณผสมรวมเพิ่มมากขึ้น โดยผลการทดสอบกำลังอัด ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกและความคงทนของคอนกรีตเป็นไปในทางเดียวกับกำลังอัด ในขณะที่ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตเป็นไปในทิศทางตรงกันข้าม จากส่วนผสมที่เหมาะสมแสดงให้เห็นสมรรถนะของสมบัติทางกลที่โดดเด่น เนื่องมาจากศักยภาพในการผสมผสานร่วมกันระหว่างเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์ โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ และมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลสำหรับการผลิตคอนกรีตเพื่อการก่อสร้างอย่างยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: คอนกรีตสีเขียว, เส้นใยอิเล็กทรอนิกส์, โพลีไวนิลแอลกอฮอล์, มวลรวมรีไซเคิล, ความยั่งยืน, สมบัติทางกล

Abstract

The focus on environmental sustainability and the increasing demand for effective waste management have become key drivers for the development of green concrete. This study investigates a sustainable method for producing green concrete by replacing 20% of cement with fly ash to reduce cement consumption, using recycled concrete aggregate (0% and 25% by weight) as a coarse aggregate replacement, and incorporating E-waste fibers (0%, 1.5%, 3.0%, 4.5%, and 6% by weight of cement). Additionally, polyvinyl alcohol (PVA) was added at a

fixed dosage of 1% by weight of cement. The slump of the concrete was maintained at 100 ± 25 mm by adjusting the superplasticizer dosage in each mix. The study evaluated the mechanical properties and durability of concrete at different curing ages. The results revealed that incorporating recycled concrete aggregate and E-waste fibers enhanced the compressive strength, with optimal performance observed at an E-waste fiber content of up to 4.5%. Beyond this threshold, the mechanical properties showed a decline. Similar trends were observed for flexural strength, ultrasonic pulse velocity and durability properties. Conversely, water absorption increased with higher E-waste fiber content. The optimal mix demonstrated superior mechanical performance, highlighting the synergistic potential of combining E-waste fibers, polyvinyl alcohol, and recycled concrete aggregate. This approach offers a viable solution for producing sustainable and environmentally friendly concrete.

Keywords: Green concrete, E-waste fibers, Polyvinyl alcohol, Recycled aggregates, Sustainability, Mechanical properties

1. คำนำ

การขยายตัวอย่างรวดเร็วของเมือง และการเติบโตของอุตสาหกรรมทั่วโลกได้นำไปสู่การเพิ่มขึ้นอย่างมากของกิจกรรมการก่อสร้าง ส่งผลให้มีการใช้ทรัพยากรธรรมชาติเพิ่มขึ้นอย่างมากควบคู่ไปกับการเกิดขยะเป็นจำนวนมากตามไปด้วย และได้กลายเป็นความท้าทายที่สำคัญในหลายเมืองที่กำลังเติบโต โดยเฉพาะในประเทศที่กำลังพัฒนา [1] ซึ่งจากการขยายตัวของเมืองและโครงสร้างพื้นฐานเนื่องจากการเติบโตของประชากรอย่างรวดเร็วนั้น ส่งผลต่อความต้องการคอนกรีตทั่วโลกเพิ่มขึ้น และก่อให้เกิดความกังวลเกี่ยวกับการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างสิ้นเปลือง เนื่องจากคาดการณ์ว่าความต้องการมวลรวมจากวัสดุธรรมชาติ (Natural aggregate) ทั่วโลกจะเกิน 50 พันล้านตันภายในปี 2025 ในขณะเดียวกัน ปริมาณขยะจากการก่อสร้างและการรื้อถอน (Construction and demolition waste) ทั่วโลกเกิดขึ้นปริมาณมากกว่า 3.57 พันล้านตันต่อปี [2] โดยเฉพาะในประเทศจีนและอินเดีย ในแต่ละปีปริมาณขยะจากการก่อสร้างและการรื้อถอนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาประเทศจีนมีปริมาณขยะจากการก่อสร้างและการรื้อถอนสูงถึง 2.4 พันล้านตัน สูงกว่าปริมาณขยะมูลฝอยจากชุมชนถึง 15 เท่า

ที่สำคัญขยะจากการก่อสร้างและการรื้อถอนเหล่านี้มีเพียง 5% เท่านั้นที่ถูกนำกลับมาใช้ใหม่ ส่วนที่เหลือจะถูกทิ้งในสถานที่ทิ้งขยะ [3]

จากกระบวนการผลิตคอนกรีตแบบดั้งเดิมซึ่งประกอบไปด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และมวลรวมจากธรรมชาติเป็นหลักนั้น ส่งผลกระทบต่อปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก อาทิเช่น ความต้องการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างสิ้นเปลือง ผลกระทบจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดจนปัญหาการกำจัดขยะจากกระบวนการผลิต [4] เพื่อแก้ไขปัญหานี้การพัฒนาคอนกรีตสีเขียวโดยการผสมวัสดุรีไซเคิล และผลผลิตพลอยได้จากอุตสาหกรรมจึงเป็นหนึ่งในแนวทางที่ยั่งยืน โดยมวลรวมที่สามารถเวียนใช้ผสมคอนกรีต (Recycled Concrete Aggregate, RCA) ที่ได้จากขยะจากการก่อสร้างและรื้อถอนถือได้ว่าเป็นทางเลือกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ไม่เพียงแต่ช่วยรักษาทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัดแต่ยังช่วยลดขยะในหลุมฝังกลบอีกด้วย โดยต้องผ่านกระบวนการบดย่อยคอนกรีตเหลือทิ้ง เช่น คอนกรีตจากโรงงานคอนกรีตสำเร็จรูป คอนกรีตจากการรื้อถอนอาคาร หรือคอนกรีตจากการตัดหัวเสาเข็ม เป็นต้น เมื่อคอนกรีตเหลือทิ้งเหล่านี้ถูกนำมาบดย่อยจะได้มวลรวมหยาบที่สามารถนำมาใช้ทดแทนหินจากธรรมชาติได้ [5-6]

ปัจจัยสำคัญในการพิจารณาสมบัติของคอนกรีตที่ผสมรวม RCA คือ ความแข็งแรง โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่ทำจาก RCA จะมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ทำจากมวลรวมธรรมชาติ [7] กำลังอัดที่ลดลงนี้อาจแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับปริมาณการแทนที่ Çakir [8] ศึกษาพบว่าส่วนผสมคอนกรีตเมื่อแทนที่มวลรวมธรรมชาติด้วย RCA ปริมาณ 25%, 50%, 75% และ 100% กำลังอัดมีแนวโน้มลดลง 11%, 18%, 22%, และ 24% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม ส่วน Gyawali [9] ศึกษาพบว่าสามารถใช้ RCA ในส่วนผสมของคอนกรีตได้สูงถึง 20%-30% โดยส่งผลต่อการลดลงของกำลังอัดในระดับที่ยอมรับได้ ในขณะที่ Safiuddin et al. [10] พบว่าสามารถนำ RCA มาแทนที่ในส่วนผสมคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตัวเองได้สูงถึง 50% โดยไม่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตสด นอกจากนี้พบว่าความหนาแน่นและอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมีความสัมพันธ์ในเชิงผกผันกัน โดยที่ความสัมพันธ์นี้มีนัยสำคัญมากขึ้นเมื่อปริมาณการผสมรวม RCA เพิ่มขึ้น [11] จากข้อจำกัดหรือผลกระทบจากการนำ RCA มาเป็นวัสดุทดแทนมวลรวมหยาบในงานคอนกรีตนั้น ปัจจุบันได้มีการนำวัสดุประสานทดแทน (Supplementary cementitious materials) เช่น ซิลิกาฟูมหรือเถ้าลอย รวมถึงสารเติมแต่งจำพวกโพลีเมอร์สังเคราะห์เข้ามาผสมรวมเพื่อช่วยลดการสูญเสียกำลังอัดได้ [12-13] โดย Hong-Hu Chu [14] ได้ทำการศึกษาคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอย (10% และ 20%) และ PVA (1% และ 2%) พบว่าคอนกรีตที่เถ้าลอย 10% และ PVA 1% ที่บ่มในน้ำ ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตได้ Viswanath [15] ได้ศึกษาคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ เมื่อนำสารโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) มาผสม โดย PVA เป็นโพลีเมอร์สังเคราะห์ที่ไม่มีสารพิษ และละลายน้ำได้ จะทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติในการทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี และมีความต้านทานแรงดัดและแรงดึง การทดสอบได้เติม PVA ที่ 0.5%, 1%, 1.5% และ 2% พบว่า PVA ที่เหมาะสมที่ทำให้คอนกรีตสามารถรับกำลังได้เพิ่มมากขึ้นอยู่ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ส่วน Mohammed [16] ศึกษาพบว่าคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสม PVA ที่ 1.2% และ 2% ส่งผลให้ค่ากำลังอัดและกำลังดึงมากกว่าคอนกรีตทั่วไป นอกจากนี้การนำเส้นใยเข้าไปใช้งานร่วมกับ RCA ยังได้รับการระบุว่าเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถใช้ปรับปรุงประสิทธิภาพของคอนกรีตได้อีกด้วย [6]

ในปัจจุบันการกำจัดขยะอิเล็กทรอนิกส์ (E-waste) กลายเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญเนื่องจากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีอย่างรวดเร็วและ

การบริโภคอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นแนวคิดของการศึกษาวิจัยในครั้งนี้เป็นการนำเส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่รีไซเคิลแล้วกลับมาใช้ในงานคอนกรีต จึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหานี้ได้ ในขณะเดียวกันยังอาจช่วยเพิ่มคุณสมบัติของคอนกรีตได้อีกด้วย หากนำมาใช้ในปริมาณที่เหมาะสม [17-19] ทั้งนี้ จากการสำรวจเอกสารการศึกษาที่เกี่ยวข้องก่อนหน้านี้ยังไม่พบว่ามีการศึกษาผลกระทบจากการนำเส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่มีต่อสมบัติทางกลของคอนกรีตที่มีส่วนผสมร่วมของ RCA วัสดุประสานทดแทนและโพลีเมอร์สังเคราะห์ การศึกษานี้ได้ให้ข้อมูลใหม่ในการปรับปรุงสมบัติทางกลของคอนกรีตที่ใช้ RCA เป็นวัสดุทดแทนมวลรวมหยาบจากธรรมชาติ ผลการศึกษาเพื่อเป็นแนวทางการผลิตคอนกรีตสีเขียวอย่างยั่งยืนและช่วยส่งเสริมเทคโนโลยีก่อสร้างที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุผสม

2.1.1 วัสดุประสาน (Cementitious materials) ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (OPC) โดยมีองค์ประกอบหลักทางเคมีได้แก่ CaO (63.16%), SiO_2 (20.37%), Al_2O_3 (5.21%), และ Fe_2O_3 (3.17%) ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.14 เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C150 [20], เถ้าลอยผลผลิตพลอยได้จากการผลิตไฟฟ้าโรงไฟฟ้าพลังความร้อน ผลรวมขององค์ประกอบทางเคมีหลักได้แก่ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 60.68% ความถ่วงจำเพาะ 2.20 ถือได้ว่าเป็นเถ้าลอย Class C ตามมาตรฐาน ASTM C618 [21] ถูกนำมาใช้เพื่อเติมเต็มช่องว่างภายในของคอนกรีต

2.2.2 มวลรวม ประกอบไปด้วย มวลรวมละเอียดจากธรรมชาติ (NFA) ใช้ทรายแม่น้ำ ค่าความถ่วงจำเพาะ 2.64 ค่าโมดูลัสความละเอียด 3.51 มวลรวมหยาบธรรมชาติ (NCA) ใช้หินปูนย่อยขนาด ค่าความถ่วงจำเพาะ 2.72 ค่าโมดูลัสความละเอียด 7.41 ขนาดอนุภาคใหญ่สุด 19 มม. ปริมาณการแตกหักของวัสดุมวลรวมเมื่อถูกบดทับ 19.7% ตามมาตรฐาน ASTM C131 [22] และมวลรวมที่สามารถเวียนใช้ผสมคอนกรีต (RCA) จากการนำซากคอนกรีตโครงสร้างอาคารเก่าที่ทำการรื้อถอน ซากคอนกรีตถูกทุบและบดย่อยขนาดที่โรงงานรีไซเคิลคอนกรีต ดังรูปที่ 1 จากนั้นร่อนเพื่อให้ได้ขนาดที่ต้องการ (ในช่วง 4.75-19 มม.) โดย RCA ที่นำมาใช้นี้มีค่าความถ่วงจำเพาะ 3.02 ค่าโมดูลัสความละเอียด 7.76 ค่าการดูดซึมน้ำ 3.63% และปริมาณการแตกหักของวัสดุมวลรวมเมื่อถูกบดทับสูงกว่ามวลรวมหยาบจากธรรมชาติ (24.8%) โดยมวลรวมทั้งหมดอยู่ในสภาพแห้งในอากาศ และมีการกระจายตัวขนาดคละเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C33 [23]



รูปที่ 1 การบดย่อยซากคอนกรีตโครงสร้างเก่าที่รื้อถอน

2.2.3 เส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ (E-fiber) จากโรงงานกำจัดขยะอิเล็กทรอนิกส์ ด้วยการรีไซเคิลแผงวงจรพิมพ์เพื่อแยกโลหะ เช่น ทองแดง ออกจากขยะอีกครั้ง โลหะส่วนที่เป็นได้เหลือจากการกระบวนการจะมีลักษณะเป็นเส้นใย ขนาดความยาวเฉลี่ย 2-3 มม. เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 18-20 ไมครอน และค่าความถ่วงจำเพาะ 0.69 ดังรูปที่ 2

2.2.4 โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ซึ่งเป็นโพลิเมอร์สังเคราะห์ที่ไม่มีสารพิษ ไม่มีกลิ่น มีสีขาวถึงสีเหลืองอ่อน ละลายน้ำได้ดีและมีช่วงค่า pH อยู่ที่ 5.0-7.0 ค่าความถ่วงจำเพาะ 1.27 เมื่อนำมาผสมกับคอนกรีต จะช่วยให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงดัดเพิ่มมากขึ้น และช่วยเพิ่มการต้านทานการกัดกร่อนจากสารเคมี

2.2.5 สารลดน้ำจำนวนมาก (HRWR) ประเภท A และ F คุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C494 [24] เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถเทได้ของคอนกรีต และน้ำประปาที่สะอาด ไม่มีสิ่งเจือปนสำหรับใช้ในการผสมและบ่มคอนกรีต



รูปที่ 2 เส้นใยจากจากขยะอิเล็กทรอนิกส์

2.2 ส่วนผสมคอนกรีต

ในการศึกษาครั้งนี้อัตราส่วนของคอนกรีตได้จัดเตรียมไว้ทั้งหมด 6 ส่วนผสม โดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณเส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อศึกษาผลกระทบต่อสมบัติทางกลของคอนกรีต ส่วนผสมควบคุม (R0E0) กำหนดเถ้าลอย 20% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ นำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ ใช้มวลรวมจากธรรมชาติอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.55 และเติม PVA ที่ 1% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ในขณะที่ส่วนผสม R25E0 ทำการแทนที่มวลรวมหยาบจากธรรมชาติด้วย RCA ปริมาณ 25% โดยน้ำหนัก โดยยังไม่ทำการผสม E-fiber ลงไป สำหรับส่วนผสมเหลือที่ R25E1.5, R25E3.0, R25E4.5 และ R25E6.0 เป็นส่วนผสมที่เริ่มมีการใส่ E-fiber ลงไปในปริมาณ 1.5%, 3.0%, 4.5% และ 6.0% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ตามลำดับ เพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณเส้นใยที่แตกต่างกันสรุปได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต (kg/m³)

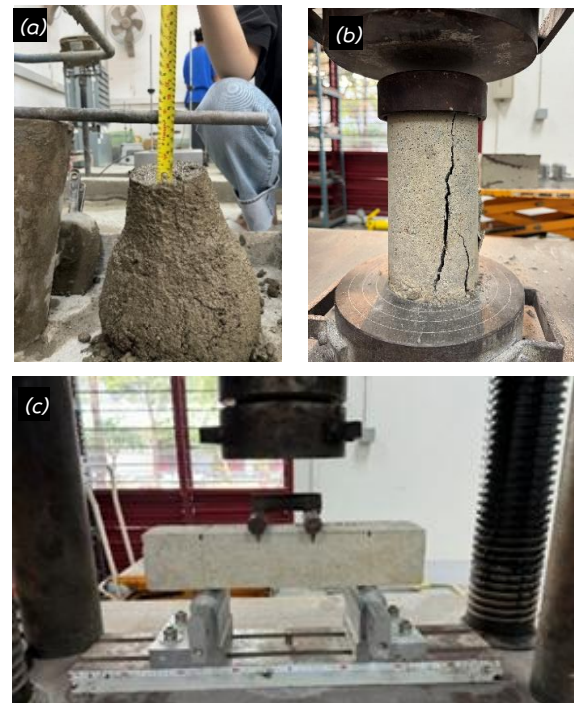
Materials	Concrete mixes designation					
	R0E0	R25E0	R25E1.5	R25E3	R25E4.5	R25E6
OPC	291	291	291	291	291	291
FA	73	73	73	73	73	73
NFA	818	818	818	818	818	818
NCA	1028	771	771	771	771	771
RCA	-	257	257	257	257	257
Water	200	200	200	200	200	200
PVA	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6
E-fiber	-	-	5.5	10.9	16.4	21.8
HRWR(%)	0.30	0.55	0.64	0.88	1.16	1.35

2.3 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง

เครื่องผสมคอนกรีตในห้องทดสอบ (Concrete Pan Mixer) ถูกใช้ นำมาทำการผสมวัสดุทั้งหมดเข้าด้วยกัน ขั้นตอนการผสมเริ่มจากการนำ หิน/RCA ทราย และ E-fiber มาผสมเข้าด้วยกันเป็นเวลา 2 นาที เพื่อช่วย ชัดผิวของ E-fiber ให้มีความหยาบเพิ่มขึ้นช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการยึด เกาะกับเนื้อคอนกรีต จากนั้นใส่ปูนซีเมนต์ เถ้าลอยและ PVA ลงไปผสมต่อ อีก 1 นาที ทำการเติมน้ำในปริมาณคงที่แต่ให้ทำการปรับปริมาณสารลดน้ำ พิเศษที่เตรียมไว้ลงไปจนประเมินได้ว่าคอนกรีตสดที่ได้นั้นมีค่าการยุบตัว อยู่ในช่วงที่กำหนด (100 ± 25 มม.) ทำการผสมต่ออีก 2 นาที จนได้ คอนกรีตที่มีความสม่ำเสมอและเป็นเนื้อเดียวกัน จึงนำคอนกรีตสดมาทำ การทดสอบการยุบตัวเพื่อยืนยันว่ามีความชื้นเหลวเป็นไปตามที่กำหนด แล้วทำการเทคอนกรีตลงในแบบหล่อที่เตรียมไว้ ทำการบ่มเพื่อรอทดสอบ ตามอายุที่กำหนด โดยใช้จำนวนตัวอย่างทดสอบส่วนผสมละ 3 ตัวอย่างต่อ อายุการบ่ม

2.4 วิธีการทดสอบ

2.4.1 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต (Slump test) เป็นการทดสอบเพื่อ หาค่าความชื้นเหลวของคอนกรีตสด เพื่อประเมินความสามารถได้ของ คอนกรีต โดยเทคอนกรีตสดลงในกรวยตักขนาดมาตรฐานแบ่งเป็น 3 ชั้น เท่ากันโดยปริมาตร ในแต่ละชั้นตักด้วยเหล็กจากนั้นยกกรวยขึ้นเพื่อวัดค่า การยุบตัวของคอนกรีต (รูปที่ 3(a)) ตามมาตรฐาน ASTM C143 [25]



รูปที่ 3 การทดสอบตัวอย่างของคอนกรีต

2.4.2 กำลังอัด (Compressive Strength) โดยการทดสอบกำลังอัด ของคอนกรีตใช้ตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาด 100 x 200 มม. (รูปที่ 3(b)) ตามมาตรฐาน ASTM C39 [26] ตัวอย่างทดสอบทำการบ่มในน้ำภายใต้ สภาวะแวดล้อมควบคุมที่อายุ 7, 28 และ 91 วัน ตามลำดับ

2.4.3 กำลังดัด (Flexural Strength) โดยการทดสอบกำลังดัดของ คอนกรีตใช้ตัวอย่างคานขนาด 100 x 100 x 500 มม. โดยใช้วิธี Simple Beam with Third-Point Loading (รูปที่ 3(c)) ตามมาตรฐาน ASTM C78 [27] ที่อายุ 7, 28 และ 91 วัน ตามลำดับ

2.4.4 ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Pulse Velocity) เป็นวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย ด้วยการวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกที่ส่งผ่านตัวอย่างคอนกรีต เพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ของคอนกรีต ที่อายุ 7, 28 และ 91 วัน ตามลำดับ ตามมาตรฐาน ASTM C597 [28]

2.2.5 การดูดซึมน้ำ (Water Absorption) โดยทำการทดสอบการดูดซึมน้ำของตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 100 มม. ตามมาตรฐาน ASTM C642 [29] ที่อายุ 28 และ 91 วัน

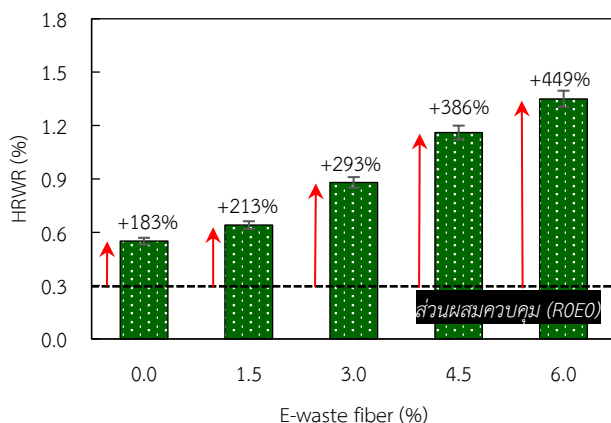
2.2.6 การต้านทานซัลเฟต (Sulfate Resistance): การทดสอบการต้านทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟต โดยตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 100 มม. แขนในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้น 10% หลังคอนกรีตอายุ 28 วัน โดยทำการประเมินร้อยละการสูญเสียกำลังอัดและมวลหลังแช่เป็นระยะเวลา 91 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C1012 [30]

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

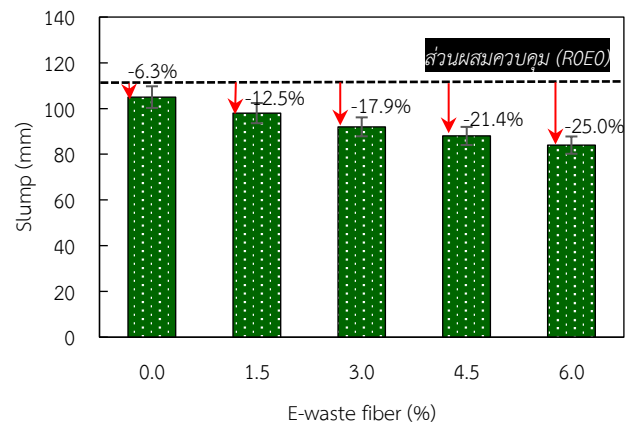
3.1 สมบัติของคอนกรีตสด

จากผลการศึกษาพบว่าปริมาณสารลดน้ำจำนวนมาก (HRWR) ที่ต้องการในแต่ละส่วนผสมเพื่อให้ได้ความชื้นเหลวตามที่กำหนดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณ E-fiber ที่เพิ่มขึ้น โดยในส่วนผสมควบคุม (ROEO) ใช้สารลดน้ำเพียง 0.30% ในขณะที่ส่วนผสมที่มีการใช้ E-fiber และ RCA ร่วมกัน (R25E6) ต้องใช้สารลดน้ำสูงถึง 1.35% ซึ่งคิดเป็น 449% ของส่วนผสมควบคุม (ROEO) ดังแสดงในรูปที่ 4 ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะของ E-fiber เป็นแท่งยาวและบางมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงทำให้ต้องการน้ำมากขึ้นในการหล่อหุ้มและกระจายตัวในส่วนผสม [2, 6-7] นอกจากนี้การใช้ RCA ซึ่งพื้นผิวมีความพรุนและหยาบมากกว่ามวลรวมจากธรรมชาติยังส่งผลต่อความต้องการน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้นเช่นกัน [17-18]

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ E-fiber และความต้องการน้ำที่เพิ่มขึ้นในแต่ละส่วนผสมยังสอดคล้องกับผลการทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าการยุบตัวของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ E-fiber ในส่วนผสมเพิ่มขึ้น โดยส่วนผสมควบคุม ROEO มีค่าการยุบตัว 112 มม. ขณะที่ส่วนผสมที่มีการผสมรวม RCA และปริมาณ E-fiber สูงสุด 6% มีค่าการยุบตัวเพียง 84 มม. คิดเป็นร้อยละค่าการยุบตัวที่สูญเสียไปถึง 25% เมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุม ซึ่งความต้องการน้ำในส่วนผสมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีความหนืดเพิ่มขึ้นและไหลตัวได้ยากขึ้นรวมถึงปริมาณ E-fiber ที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการพันกันและขัดขวางการไหลตัวของคอนกรีตอีกด้วย [17-18]



รูปที่ 4 ปริมาณสารลดน้ำพิเศษและร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคอนกรีตเมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุม (ROEO)

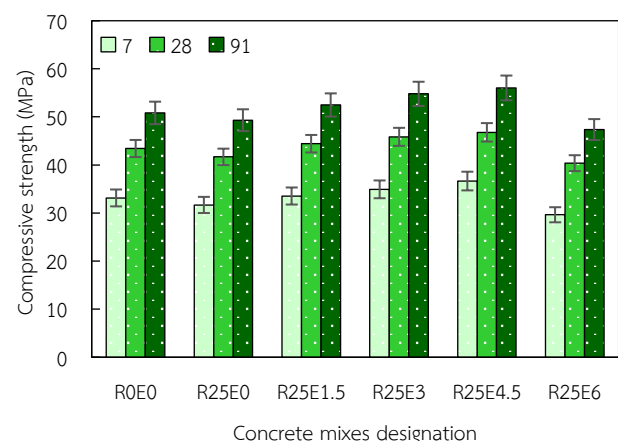


รูปที่ 5 ค่าการยุบตัวและร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคอนกรีตเมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุม (ROEO)

3.2 สมบัติของคอนกรีตแข็งตัว

3.2.1 กำลังอัด

การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตมีการเปลี่ยนแปลงตามอายุการบ่มและปริมาณ E-fiber ที่ใช้ในส่วนผสมดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่ากำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นจาก 7 วัน ถึง 91 วัน แต่อย่างไรก็ตาม กำลังอัดที่เพิ่มขึ้นแตกต่างกันตามปริมาณ E-fiber ในแต่ละส่วนผสม สำหรับส่วนผสม R25EO ซึ่งผสมรวมเฉพาะ RCA โดยไม่มี E-fiber เห็นได้ว่าการกำลังอัดลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ ROEO โดยคิดเป็น 4.4%, 3.9% และ 3.0% ที่อายุ 7, 28 และ 91 วันตามลำดับ กำลังอัดที่ลดลงนี้อาจเกิดจากคุณสมบัติของ RCA ที่มีความพรุนสูงกว่าหินธรรมชาติส่งผลให้ความหนาแน่นและกำลังอัดลดลง [2, 5-8, 13]



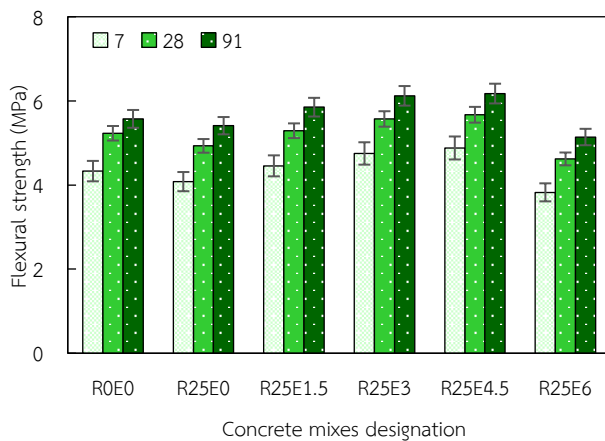
รูปที่ 6 กำลังอัดของคอนกรีต

ต่อมาเมื่อผสมเพิ่ม E-fiber ในส่วนผสม พบว่ากำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ E-fiber อยู่ในระดับที่เหมาะสม โดยปริมาณ E-fiber ที่ 1.5%, 3.0% และ 4.5% (R25E1.5, R25E3 และ R25E4.5) มีกำลังอัดสูงกว่าส่วนผสมควบคุม (ROEO) ทุกช่วงอายุการบ่ม โดยเฉพาะส่วนผสม R25E4.5 มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 10.6%, 7.7% และ 10.2% ที่อายุ 7, 28 และ 91 วันตามลำดับ การเพิ่มขึ้นนี้เกิดจาก E-fiber ทำหน้าที่เป็นตัวเสริมแรง (Reinforcement) ช่วยต้านทานการแตกร้าวและเพิ่มความสามารถในการรับแรงของคอนกรีต [17-18] ในทางตรงกันข้ามเมื่อเพิ่มปริมาณ E-fiber สูงขึ้น (R25E6) พบว่ากำลังอัดมีแนวโน้มลดลง

10.6%, 7.0% และ 6.8% ที่อายุ 7, 28 และ 91 วันตามลำดับ กำลังอัดที่ลดลงนี้อาจเกิดจากการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของ E-fiber ในส่วนผสมที่มากเกินไปส่งผลให้เกิดช่องว่างภายในคอนกรีตเพิ่มขึ้น ทำให้ความหนาแน่นและกำลังอัดลดลงของคอนกรีตลดลง [19]

3.2.2 กำลังอัด

การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตสอดคล้องกับผลการศึกษากำลังอัดของคอนกรีต กล่าวคือเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาการบ่มของคอนกรีตและปริมาณ E-fiber ในแต่ละส่วนผสมดังแสดงในรูปที่ 7 เช่นเดียวกันสำหรับส่วนผสม R25E0 แนวโน้มของกำลังอัดลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ ROE0 โดยประมาณ 5.8%, 5.7% และ 2.9% ที่อายุ 7, 28 และ 91 วันตามลำดับ เมื่อผสมเพิ่ม E-fiber ในลักษณะเดียวกันกับกำลังอัดพบว่ากำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยปริมาณ E-fiber ที่ 1.5%, 3.0% และ 4.5% (R25E1.5, R25E3 และ R25E4.5) มีกำลังอัดสูงกว่าส่วนผสมควบคุม (ROE0) ทุกช่วงอายุการบ่ม โดยเฉพาะส่วนผสม R25E4.5 มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 12.7%, 8.4% และ 10.8% ที่อายุ 7, 28 และ 91 วันตามลำดับ ในทางตรงกันข้ามเมื่อเพิ่มปริมาณ E-fiber สูงขึ้น (R25E6) พบว่ากำลังอัดมีแนวโน้มลดลง 11.5%, 11.7% และ 7.7% ที่อายุ 7, 28 และ 91 วันตามลำดับ ทั้งนี้เห็นว่าการผสมรวม E-fiber ในปริมาณที่เหมาะสมสามารถเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตได้ (4.5%) ในทางตรงกันข้ามการผสม E-fiber ในปริมาณที่มากเกินไปจะส่งผลต่อการลดลงของกำลังอัด สอดคล้องกับการศึกษาของ Jittamaro et al. [17]

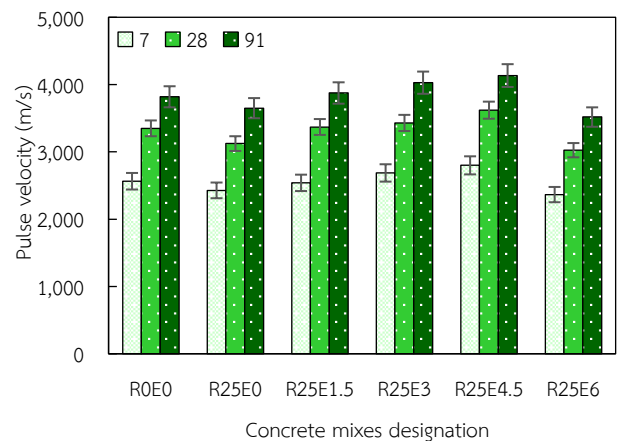


รูปที่ 7 กำลังอัดของคอนกรีต

3.2.3 ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก

จากผลการศึกษาความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกของคอนกรีตพบว่า มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบ่มที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งแสดงถึงการพัฒนาของโครงสร้างความสมบูรณ์ภายในของคอนกรีต มีแนวโน้มที่ดีขึ้นอย่างต่อเนื่อง สำหรับส่วนผสม R25E0 พบว่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกลดลงเมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุม (ROE0) ประมาณ 5.3%, 6.8% และ 4.4% ที่อายุ 7, 28 และ 91 วันตามลำดับ เนื่องจากผลของความพรุนของ RCA ที่สูงกว่ามวลรวมจากธรรมชาติ เมื่อผสมเพิ่ม E-fiber พบว่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น [17] เมื่อปริมาณ E-fiber ในส่วนผสมไม่เกิน 4.5% ในขณะเดียวกันเมื่อเพิ่มปริมาณ E-fiber สูงขึ้นถึง 6% พบว่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ประมาณ 7.8%, 9.7% และ 7.9% เมื่อเปรียบเทียบกับ

ส่วนผสมควบคุม (ROE0) ที่อายุ 7, 28 และ 91 วันตามลำดับ ทั้งนี้เห็นว่าการผสมรวม E-fiber ในปริมาณที่เหมาะสมสามารถช่วยลดการเกิดรอยแตกขนาดเล็ก (Micro-crack) ส่งผลให้คลื่นอัลตราโซนิกเดินทางผ่านได้อย่างรวดเร็ว [18] ในทางตรงกันข้ามการผสม E-fiber ในปริมาณที่มากเกินไปอาจทำให้ E-fiber มีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอจนส่งผลกระทบต่อความต่อเนื่องของโครงสร้างภายในทำให้การเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกผ่านตัวอย่างคอนกรีตช้าลง [19]



รูปที่ 8 ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกของคอนกรีต

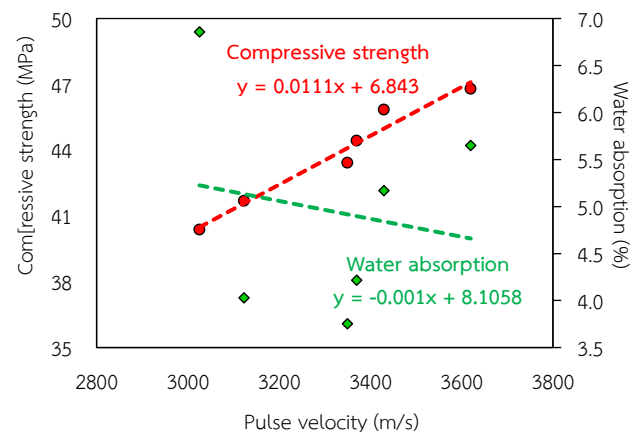
จากรูปที่ 9 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับกำลังอัดของคอนกรีต และความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับการดูดซึมน้ำของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน เห็นได้ว่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับกำลังอัดของคอนกรีตมีค่ากำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกเพิ่มขึ้นและมีความสัมพันธ์ในลักษณะลอการิทึม (Logarithm) กับความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก ดังสมการที่ (1)

$$y = 0.0111x + 6.843 \quad (1)$$

เมื่อ y คือค่ากำลังอัดคอนกรีต และ x คือค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก ในขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับการดูดซึมน้ำของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ลดลงเมื่อความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกเพิ่มขึ้น เป็นความสัมพันธ์ในลักษณะลอการิทึม (Logarithm) ดังสมการที่ (2)

$$y = -0.001x + 8.1058 \quad (2)$$

เมื่อ y คือค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน และ x คือค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก

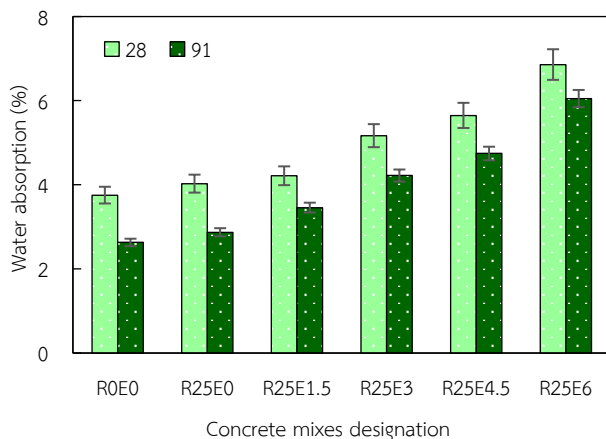


รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับกำลังอัดของคอนกรีต และความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับการดูดซึมน้ำของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

3.3 ความคงทนของคอนกรีต

3.3.1 การดูดซึมน้ำ

จากรูปที่ 10 เห็นได้ว่าผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของตัวอย่างคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นจาก 28 วัน เป็น 91 วัน ในทุกส่วนผสม แสดงถึงการพัฒนาโครงสร้างภายในของคอนกรีต แนวโน้มมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นและช่องว่างลดลงเมื่ออายุของคอนกรีตเพิ่มขึ้น สำหรับส่วนผสม R25E0 พบว่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ R0E0 เนื่องจากความสามารถในการดูดซึมน้ำของ RCA ที่สูงกว่ามวลรวมจากธรรมชาติ เมื่อผสมเพิ่ม E-fiber ตั้งแต่ 1.5%-6% พบว่าการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในส่วนผสม R25E6 มีการดูดซึมน้ำสูงที่สุด 6.86% และ 6.05% ที่อายุ 28 และ 91 วันตามลำดับ แนวโน้มการดูดซึมน้ำของตัวอย่างคอนกรีตที่เพิ่มนี้อาจเกิดจากปัจจัยหลายประการ อาทิเช่น การกระจายตัวของ E-fiber ที่ไม่สม่ำเสมอทำให้เกิดช่องว่างภายในคอนกรีต รวมถึงคุณสมบัติของ E-fiber ที่ไม่ดูดซึมน้ำอาจเกิดช่องว่างระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์คอนกรีต ตลอดจนการใส่ E-fiber ในปริมาณที่มากเกินไปมีโอกาสทำให้เส้นใยเกาะกันเป็นกลุ่มส่งผลให้เกิดช่องว่างขนาดใหญ่ ลดความหนาแน่นของเนื้อคอนกรีตจนส่งผลทำให้คอนกรีตมีการดูดซึมน้ำสูงขึ้น [17-18]

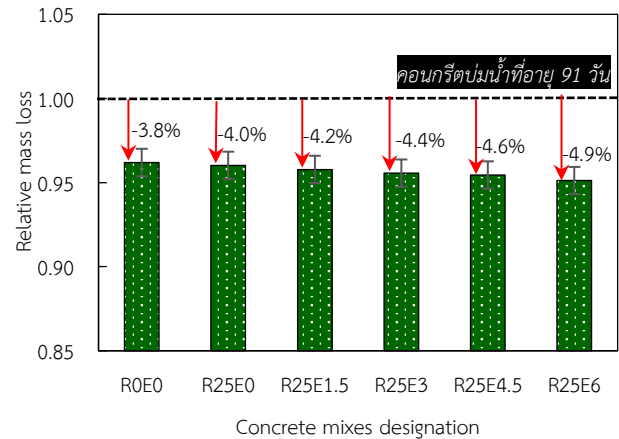


รูปที่ 10 การดูดซึมน้ำของคอนกรีต

3.3.2 การต้านทานซัลเฟต

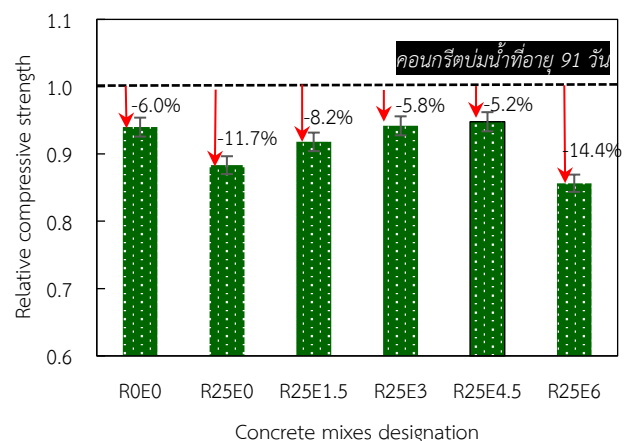
การศึกษาผลกระทบจากการกัดกร่อนของสารละลายซัลเฟต เมื่อพิจารณามวลคอนกรีตที่ลดลงหลังจากแช่ในสารละลายซัลเฟตจนถึงอายุ 91 วัน (เริ่มแช่คอนกรีตในสารละลายซัลเฟตที่อายุ 28 วัน) ดังแสดงในรูปที่ 11 พบว่ามวลสัมพัทธ์ของคอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละส่วนผสมมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ E-fiber ในส่วนผสม ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการต้านทานซัลเฟตที่ลดลง คอนกรีตที่ใช้ RCA แทนที่มวลรวมธรรมชาติ (R25E0) มีการสูญเสียมวลลดลงเล็กน้อย (4.0%) เมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุม (R0E0) ที่มีค่า 3.8% ในขณะที่ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ E-fiber ในส่วนผสม พบว่าแนวโน้มการสูญเสียมวลเพิ่มมากขึ้นหรือกล่าวได้ว่าความสามารถในการต้านทานซัลเฟตมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง จาก 4.2%, 4.4%, 4.6% และ 4.9% ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอและการสะสมตัวของเส้นใยในปริมาณมากเกินไปทำให้เกิด

เกิดช่องว่างและโพรงอากาศที่ผิวตัวอย่างคอนกรีต ซึ่งเป็นช่องทางให้สารละลายซัลเฟตสามารถซึมผ่านและเกิดการกัดกร่อนได้มากขึ้น [19]



รูปที่ 11 มวลสัมพัทธ์และร้อยละมวลของคอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุม (R0E0) หลังการทดสอบการกัดกร่อนของสารละลายซัลเฟต

เมื่อพิจารณาการลดลงของกำลังอัดหลังจากแช่ในสารละลายซัลเฟตเมื่อเวลาผ่านไป 91 วัน (เริ่มแช่คอนกรีตในสารละลายซัลเฟตที่อายุ 28 วัน) พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มแตกต่างกันไปตามส่วนผสมของคอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 12 ส่วนผสมควบคุม (R0E0) มีค่ากำลังอัดสัมพัทธ์ 0.940 แสดงถึงการสูญเสียกำลังอัดประมาณ 6% เมื่อแช่ในสารละลายซัลเฟต ส่วนคอนกรีตที่ใช้ RCA แทนที่มวลรวมธรรมชาติ (R25E0) ค่าการสูญเสียกำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นถึง 11.7% แสดงถึงความต้านทานซัลเฟตที่ลดลงเนื่องจากลักษณะความพรุนที่สูงของ RCA ทำให้ไอออนซัลเฟตสามารถแทรกซึมและทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ของปูนซีเมนต์ได้ง่ายขึ้น เมื่อผสมเพิ่ม E-fiber ปริมาณ 1.5%, 3%, และ 4.5% พบว่าคอนกรีตมีค่ากำลังอัดสัมพัทธ์เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะใน R25E4.5 ที่มีค่าสูงสุดถึง 0.948 ทั้งนี้เนื่องมาจาก E-fiber ที่ช่วยเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างภายในคอนกรีต ลดรอยแตกร้าวและช่องว่างภายในจนส่งผลให้การแทรกซึมของไอออนซัลเฟตลดลง [19] แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณ E-fiber สูงขึ้น (6%) พบว่าความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (14.4%) การลดลงนี้อาจเป็นผลจากการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอและการสะสมตัวของเส้นใยที่มากเกินไปจนส่วนผลทำให้เกิดช่องว่างและโพรงอากาศภายในคอนกรีตมากขึ้น [6, 19]



รูปที่ 12 กำลังอัดสัมพัทธ์และร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ลดลง
เมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุม (ROEO)
หลังการทดสอบการกัดกร่อนของสารละลายซัลเฟต

4. บทสรุป

- การใช้ RCA แทนมวลรวมหยาบธรรมชาติทำให้กำลังอัด กำลังดัดและความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกของคอนกรีตลดลงเล็กน้อย เนื่องจากลักษณะความพรุนที่สูงขึ้นของ RCA อย่างไรก็ตาม การเสริมด้วย E-fiber สามารถชดเชยข้อด้อยเหล่านี้ได้
- การผสมรวม E-fiber ที่ 4.5% ส่งผลให้กำลังอัดและกำลังดัดเพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 16.8% และ 14.6% ตามลำดับเมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุม (ROEO) แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการเสริมความแข็งแรงและลดรอยแตกร้าวภายในโครงสร้างคอนกรีต สอดคล้องกับผลการทดสอบความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก
- การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ E-fiber ในส่วนผสมเพิ่มสูงขึ้น แสดงถึงการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอและการสะสมตัวของเส้นใยในกรณีปริมาณมากเกินไปทำให้เกิดช่องว่างและโพรงอากาศที่ผิวตัวอย่างคอนกรีต
- คอนกรีตที่ผสมรวม E-fiber สูงกว่า 4.5% มีแนวโน้มการลดลงของมวลเพิ่มขึ้นเนื่องจากผลของการกัดกร่อนของซัลเฟตที่ผิวของตัวอย่างคอนกรีต ในทางตรงกันข้ามคอนกรีตที่ผสมรวม E-fiber ไม่เกิน 4.5% มีแนวโน้มต้านทานการกัดกร่อนของซัลเฟตเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเกิดจากโครงสร้างภายในคอนกรีตมีความสมบูรณ์ ช่องว่างภายในลดลงจนส่งผลให้การแทรกซึมของไอออนซัลเฟตลดลง
- การผสมรวม E-fiber ในปริมาณ 4.5% ร่วมกับ RCA เป็นแนวทางที่เหมาะสมที่สุดในการพัฒนาคอนกรีตที่มีคุณสมบัติทางกลและความทนทานที่ดี โดยสามารถเพิ่มสมบัติทางกลและความทนทานของคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต ควรศึกษาหาแนวทางการปรับปรุงเส้นใยหรือกระบวนการผสมเพื่อให้สามารถผสมรวม E-fiber ได้มากขึ้น นอกจากนี้ควรพิจารณาศึกษาความทนทานในระยะยาวเพื่อประเมินความเหมาะสมในการใช้งานจริงในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบ รวมทั้งสถานที่ในการท่วิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณในความอนุเคราะห์จากบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความสนับสนุนวัสดุรวมถึงการทดสอบ และบริษัท ปูนซีเมนต์ไทย (แ่งคอย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการบดย่อยเศษคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา ตลอดจนสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้คำแนะนำในทุกขั้นตอนของการศึกษา จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Peng, X., Jiang, Y., Chen, Z., Osman, A.I., Mohamed Farghali, M., Rooney, D.W., Yap, P.-S. (2023). Recycling municipal, agricultural and industrial waste into energy, fertilizers, food and construction materials, and economic feasibility: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21, pp. 765–801.
- [2] Patil, Y.R., Dakwale, V.A., Ralegaonkar, R.V. (2024). Recycling construction and demolition waste in the sector of construction, *Advances in Civil Engineering*, 6234010, 13 pp.
- [3] Duan, H., Miller, T. R., Liu, G., Tam, V.W. (2018). Construction debris becomes growing concern of growing cities. *Waste Management*, 83, pp. 1-5.
- [4] Habert, G., Miller, S.A., John, V.M., Provis, J.L., Favier, A., Horvath, A., Scrivener, K.L. (2020). Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1, pp. 559–573.
- [5] Setkit, M. (2022). Recycled aggregate concrete. *TCA Magazine*, Thailand Concrete Association, 16(3), TCA_M 160308, 10 pp.
- [6] Wattanapanich, C., Imjai, T., Sridhar, R., Garcia, R., Thomas, B.S. (2024). Optimizing recycled aggregate concrete for severe conditions through machine learning techniques: A review. *Engineered Science*, 31, e1191.
- [7] Wang, B., Yan, L., Fu, Q., Kasal, B. (2021). A comprehensive review on recycled aggregate and recycled aggregate concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 171, 105565.
- [8] Çakır, Ö. (2014). Experimental analysis of properties of recycled coarse aggregate (RCA) concrete with mineral additives. *Construction and Building Materials*, 68, pp. 17-25.
- [9] Gyawali, T.R. (2022). Re-use of concrete/brick debris emerged from big earthquake in recycled concrete with zero residues. *Cleaner Waste Systems*, 2, 100007.
- [10] Safiuddin, M., Salam, M., Jumaat, M. (2010). Effects of recycled concrete aggregate on the fresh properties of self-consolidating concrete. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 11(4), pp. 1023-1041.
- [11] Duan, Z., Deng, Q., Xiao, J., Zhang, H., Nasr, A., Li, L., Zou, S. (2023). Early-stage water-absorbing behavior and mechanism of recycled coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 394, pp. 132138.
- [12] Vuong, H. T., Nguyen, T. H., Phan, T. D., Nguyen, D. L., Nguyen, D. T., Nguyen, S. H. (2024). Recycled coarse aggregate concrete and its application in CFRP reinforced concrete beam. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, pp. 1–29.
- [13] Yaowarat, T., Horpibulsuk, S., Arulrajah, A., Mohammadinia, A., Chinkulkijniwat, A. (2019). Recycled concrete aggregate modified with polyvinyl alcohol and fly ash for concrete pavement applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(7).
- [14] Hong-Hu, C., Bilal, S., Fahid, A., Muhammad, F., Wei, W., Panuwat, J., M., Ijaz, Sumaira, Q., Rifaqat, A. (2022). Coupled effect of poly vinyl alcohol and fly ash on mechanical

- characteristics of concrete. *Ain Shams Engineering Journal*. Volume 13, Issue 3, 101633.
- [15] Viswanath, P. and E.T. Thachil, Properties of Polyvinyl Alcohol Cement Pastes. *Materials and Structures*, 2008. 41(1):p. 123-130.
- [16] Mohammed, A., Jawad, T., Aymen, J. (2023). Improving concrete properties using polyvinyl alcohol (PVA) solution with steel fiber reinforced. *AIP Conf. Proc.* 2806, 040049
- [17] Jittamaro, P., Maho, B., Pongsopha, P., Nicomrat, D., Jamnam, S., Makul, N., Sua-iam, G. (2024). Enhancing the usability of electronic waste fibers in high-performance self-compacting mortar incorporating corn cob ash and silica fume: Fresh and hardened properties. *Construction and Building Materials*, 416, 135194.
- [18] Makul, N., Hussain, Q., Nawaz, A., Saingam, P., Sua-iam, G. (2024). Effect of para-wood ash and calcium carbonate on the properties of eco-friendly self-compacting mortar reinforced with electronic waste fibers. *Journal of Building Engineering*, 95, 110353.
- [19] Saingam, P., Chatveera, B., Roopchalaem, J., Hussain, Q., Ejaz, A., Khaliq, W., Makul, N., Chaimahawan, P., Sua-iam, G. (2025). Influence of recycled electronic waste fiber on the mechanical and durability characteristics of eco-friendly self-consolidating mortar incorporating recycled glass aggregate. *Case Studies in Construction Materials*, 22, e04369.
- [20] ASTM C150, Standard Specification for Portland Cement, West Conshohocken, USA, 2020.
- [21] ASTM C618, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, West Conshohocken, USA, 2021.
- [22] ASTM C131, Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine, West Conshohocken, USA, 2021.
- [23] ASTM C33, Standard Specification for Concrete Aggregates, West Conshohocken, USA, 2021.
- [24] ASTM C494, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, West Conshohocken, USA, 2021.
- [25] ASTM C143, Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, West Conshohocken, USA, 2021.
- [26] ASTM C39, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, West Conshohocken, USA, 2021.
- [27] ASTM C78, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), West Conshohocken, USA, 2021.
- [28] ASTM C597, Standard Test Method for Ultrasonic Pulse Velocity Through Concrete, West Conshohocken, USA, 2021.
- [29] ASTM C642, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, West Conshohocken, USA, 2021.
- [30] ASTM C1012, Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution, West Conshohocken, USA, 2021.