

# ความต้านทานต่อการสึกกร่อนของคอนกรีตรีไซเคิลที่ผสมวัสดุมวลรวมรีไซเคิลและขยะพลาสติก

## Abrasion Resistance of Recycled Concrete Incorporating Recycled Aggregates and Plastic Waste

ณัฐพล เกตุคำ<sup>1</sup> สิริัญญา ทองชาติ<sup>1</sup> และ กฤษณะ จันทโรทัย<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จ.นครปฐม

\*Corresponding author; E-mail address: fengknj@ku.ac.th

### บทคัดย่อ

ประเทศไทยกำลังเผชิญกับปัญหาการจัดการขยะจากการรื้อถอนโครงสร้างอาคารและขยะพลาสติกที่ไม่สามารถรีไซเคิลได้ ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเศษคอนกรีตจากการรื้อถอนและขยะพลาสติกมาใช้เป็นวัสดุมวลรวมในคอนกรีต โดยเฉพาะการประเมินความต้านทานต่อการสึกกร่อนของคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการแทนที่วัสดุมวลรวมละเอียดด้วยขยะพลาสติกในสัดส่วนร้อยละ 10 และ 20 และผ่านกระบวนการรีไซเคิลซ้ำ นำตัวอย่างไปแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตร้อยละ 5 เป็นเวลา 28 วัน เพื่อจำลองสถานะในพื้นที่ดินที่มีซัลเฟตจากการทดสอบความต้านทานการสึกกร่อนด้วยวิธี Rotating-Cutter ตาม ASTM C944-99 พบว่า ค่าความสึกที่สูญเสียของตัวอย่างที่ไม่ได้แช่ในสารละลายลดลงจาก 2.70 เป็น 0.70 มม. ตามการเพิ่มขยะพลาสติกขณะที่ตัวอย่างที่แช่ในสารละลายมีค่าความสึกที่สูญเสียเพิ่มขึ้นจาก 0.29 เป็น 0.48 มม. สำหรับร้อยละการสูญเสียจากน้ำหนัก ตัวอย่างที่ไม่ได้แช่มีค่าระหว่าง 0.05%–0.10% และตัวอย่างที่แช่มีค่าระหว่าง 0.03%–0.08% สรุปได้ว่าการใช้ขยะพลาสติกในสัดส่วนร้อยละ 10 ร่วมกับวัสดุรีไซเคิลที่ผ่านการรีไซเคิลเพียง 1 รอบ มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการต้านทานการสึกกร่อน โดยเหมาะสมต่อการใช้งานในพื้นที่ที่มีหรือไม่มีซัลเฟต

คำสำคัญ: คอนกรีตรีไซเคิล, ขยะพลาสติก, วัสดุมวลทดแทนในคอนกรีต, ความต้านทานต่อการสึกกร่อน, สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

### Abstract

Thailand is facing increasing challenges in managing waste from building demolitions and non-recyclable plastic, both of which pose serious environmental concerns. This study aims to utilize recycled concrete aggregate and plastic waste as alternative materials in concrete mixtures and evaluate the abrasion resistance of recycled aggregate concrete (RAC) incorporating plastic waste as a partial fine aggregate replacement at 10% and 20% by volume. Several mixes were also subjected to multiple recycling cycles. The specimens were

immersed in 5% magnesium sulfate solution for 28 days to simulate sulfate-rich soil environments. Abrasion resistance was tested using the Rotating-Cutter method in accordance with ASTM C944-99. The results showed that, in non-immersed samples, abrasion depth decreased from 2.70 mm to 0.70 mm as plastic content increased, whereas immersed samples showed an increase in abrasion depth from 0.29 mm to 0.48 mm. For weight loss percentage, non-immersed samples ranged from 0.05% to 0.10%, while immersed samples ranged from 0.03% to 0.08%. It was concluded that the RAC mix with 10% plastic waste and only one recycling cycle provided the best performance in terms of abrasion resistance, making it a suitable material for use in both sulfate and non-sulfate environments.

Keywords: Recycled Concrete, Plastic Waste, Alternative Fine Aggregate, Abrasion Resistance, Magnesium Sulfate Solution

### 1. คำนำ

ประเทศไทยมีการเติบโตอย่างรวดเร็วในภาคการก่อสร้าง โดยเฉพาะโครงการด้านโครงสร้างพื้นฐาน เช่น ถนน อาคาร และระบบคมนาคม ส่งผลให้ความต้องการวัสดุก่อสร้างเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ขณะเดียวกันมาตรฐานด้านความมั่นคง แข็งแรง และความปลอดภัยในการก่อสร้างก็ได้รับการปรับปรุงให้ทันสมัยมากขึ้น ทำให้โครงสร้างเดิมที่ไม่สอดคล้องกับมาตรฐานจำเป็นต้องได้รับการปรับปรุงหรือรื้อถอน ปัจจัยหลักที่นำไปสู่การรื้อถอนสิ่งปลูกสร้าง ได้แก่ อายุการใช้งานที่ยาวนาน การเสื่อมสภาพของโครงสร้าง และความเสี่ยงต่อความปลอดภัยของผู้ใช้งานและประชาชนในพื้นที่ใกล้เคียง โดยทั่วไป การรื้อถอนอาคารในประเทศไทยใช้เครื่องจักรหนัก เนื่องจากการใช้วัตถุระเบิดยังไม่เป็นที่ยอมรับ จากกระบวนการนี้จึงก่อให้เกิดเศษคอนกรีตจำนวนมาก ซึ่งมีถูกกำจัดด้วยวิธีฝังกลบ [1]

นอกจากนี้ ประเทศไทยยังประสบปัญหาขยะพลาสติกอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในช่วงการแพร่ระบาดของโควิด-19 ซึ่งส่งผลให้ปริมาณขยะพลาสติกเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 45 หรือเฉลี่ย 139 กรัมต่อคนต่อวัน เมื่อเทียบกับช่วงก่อนการระบาด [2–5] ขยะพลาสติกเหล่านี้ส่วนใหญ่

ไม่สามารถรีไซเคิลได้และมักถูกกำจัดอย่างไม่เหมาะสม ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาว

ในช่วงที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาหลายชิ้นที่มุ่งเน้นการนำวัสดุเหลือใช้ เช่น แก้วอลูมิเนียม เศษแก้ว และเศษยาง มาทดแทนวัสดุมวลรวมละเอียดในคอนกรีต เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรม โดยเฉพาะด้านกำลังรับแรงอัด ในขณะเดียวกันก็มีงานวิจัยที่นำคอนกรีตจากการรื้อถอนกลับมาใช้ใหม่ในฐานะวัสดุมวลรวม ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการรีไซเคิลวัสดุก่อสร้างเหล่านี้เพื่อลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ

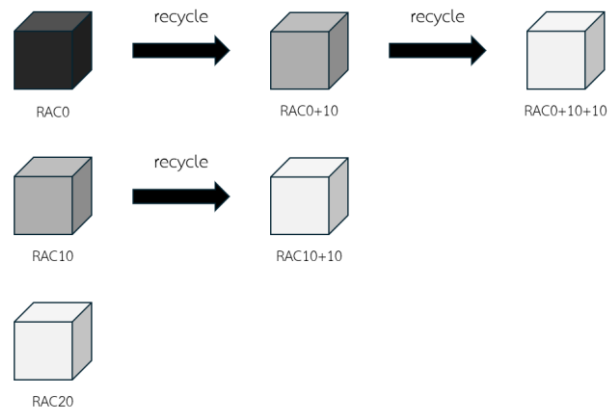
อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่รวมเอา "ขยะพลาสติกที่ไม่สามารถรีไซเคิลได้" มาผสมในคอนกรีตร่วมกับวัสดุมวลรวมรีไซเคิลยังมีจำนวนจำกัด โดยเฉพาะการศึกษาที่ประเมินผลกระทบต่อความทนทาน เช่น ความต้านทานต่อการสึกกร่อนภายใต้สภาวะแวดล้อมที่มีซัลเฟต ซึ่งมักพบในพื้นที่ดินที่มีแมกนีเซียมเป็นองค์ประกอบทางธรณีเคมี

จากพื้นฐานดังกล่าว ผู้วิจัยจึงมีความสนใจศึกษาแนวทางการใช้ขยะพลาสติกและวัสดุจากการรื้อถอนเป็นวัสดุทดแทนในคอนกรีต โดยเฉพาะในบริบทของงานทางวิศวกรรมขนส่งที่ต้องเผชิญกับสภาวะดินที่มีซัลเฟตสูง ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความคงทนของโครงสร้างถนนคอนกรีต อีกทั้งยังพิจารณาถึงผลของการรีไซเคิลซ้ำหลายรอบว่ามีผลต่อสมบัติทางวิศวกรรมอย่างไรบ้าง เพื่อให้สามารถประเมินความเป็นไปได้ของการใช้งานจริงในระดับโครงสร้างพื้นฐาน

งานวิจัยนี้จึงมุ่งวิเคราะห์คุณสมบัติด้านความต้านทานต่อการสึกกร่อนของคอนกรีตที่รีไซเคิลที่ใช้ขยะพลาสติกแทนวัสดุมวลรวมละเอียด ภายใต้การแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยปริมาตร เพื่อจำลองสภาวะที่สอดคล้องกับพื้นที่ก่อสร้างในภาคสนาม [6-7]

## 2. ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาความต้านทานต่อการสึกกร่อนของคอนกรีตที่ใช้วัสดุมวลรวมหยาบจากเสาเข็มที่ถูกย่อยและขยะพลาสติก (Plastic Waste – PW) ที่มาจากการแทนที่วัสดุมวลรวมละเอียดในสัดส่วนที่แตกต่างกันจนได้ตัวอย่างวัสดุมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (Recycled Aggregate Concrete – RAC) โดยดำเนินการผลิตและทดสอบคอนกรีตในหกกรณีตัวอย่าง ได้แก่ คอนกรีตที่ไม่มีการใช้ขยะพลาสติก (RAC0) คอนกรีตที่ใช้ขยะพลาสติกแทนที่วัสดุมวลรวมละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 (RAC10, RAC20) จากนั้นจะทำการรีไซเคิลก่อนตัวอย่าง RAC0 และ RAC10 แล้วนำไปผสมพลาสติกอีกครั้งโดยแทนที่สัดส่วนวัสดุมวลรวมละเอียดที่ร้อยละ 10 จะได้เป็นตัวอย่าง RAC0+10 และ RAC10+10 ตามลำดับ และจะทำการนำตัวอย่างไปรีไซเคิลและผสมพลาสติกใหม่โดยแทนที่สัดส่วนวัสดุมวลรวมละเอียดที่ร้อยละ 10 จะได้เป็นตัวอย่าง RAC0+10+10 จนได้ตัวอย่างกรณีตัวอย่างต่างๆ ที่แสดงในรูปที่ 1 ซึ่งในแต่ละกรณีจะมี 2 ก้อนตัวอย่างรวมทั้งสิ้น 12 ก้อนตัวอย่าง



รูปที่ 1 กรณีตัวอย่างคอนกรีตรีไซเคิลที่ใช้ทดสอบ

ตัวอย่างคอนกรีตทั้งหมดได้รับการบ่มในน้ำเป็นระยะเวลา 28 วัน จากนั้นแบ่งตัวอย่างกรณีละ 1 ก้อนตัวอย่างมาแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยปริมาตรเป็นระยะเวลา 28 วัน [8-11] การทดสอบใช้เพื่อจำลองสภาวะแวดล้อมของคอนกรีตรีไซเคิลเมื่อนำไปใช้งานถนนบนดินที่ไม่มีและมีสภาวะซัลเฟต ซึ่งดินจะมีแมกนีเซียมเป็นหนึ่งในธาตุองค์ประกอบที่มีผลต่อการสึกกร่อนของถนนคอนกรีต

หลังจากการบ่มในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ตัวอย่างทั้งหมดจะถูกนำมาทดสอบความต้านทานต่อการสึกกร่อนโดยใช้วิธี Rotating-Cutter ตามมาตรฐาน ASTM C944/C944M – 19 *Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method* ซึ่งวัดค่าความลึกของการสึกกร่อน และคำนวณเป็นร้อยละการสูญเสียจากน้ำหนักที่สูญเสียไป ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มตัวอย่างที่ผ่านการบ่มแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตกับตัวอย่างที่ไม่ได้แช่สารละลายดังกล่าว

## 3. วัสดุและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

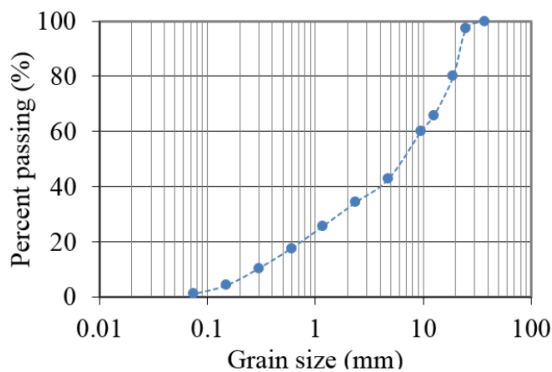
### 3.1 วัสดุหลักสำหรับการผสมคอนกรีต

#### 3.1.1 วัสดุมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล

วัสดุมวลรวมที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีตของงานวิจัยนี้ คือ คอนกรีตที่ได้จากเสาเข็มที่ไม่ใช้งานแล้วซึ่งถูกนำมารื้อถอนจากสิ่งปลูกสร้าง การรื้อถอนสิ่งก่อสร้างมักจะทำให้เกิดวัสดุคอนกรีตที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ในการถมที่ดิน หรือทำคันทางถนน วัสดุคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ถูกย่อยจากเสาเข็มที่ไม่ใช้แล้ว ซึ่งมีลักษณะและขนาดการกระจายของวัสดุมวลรวมรีไซเคิลดังที่แสดงในรูปที่ 2 และรูปที่ 3 [12-14]



รูปที่ 2 คอนกรีตรีไซเคิลที่มาจากเสาเข็มที่ไม่ใช้แล้ว [14]



รูปที่ 3 กราฟการกระจายขนาดของวัสดุมวลรวมรีไซเคิล [14]

### 3.1.2 ขยะพลาสติกรีไซเคิล

ขยะพลาสติก (PW) เป็นส่วนผสมหลักอีกชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้แทนวัสดุมวลรวมละเอียดในคอนกรีต สำหรับงานวิจัยนี้ ขยะพลาสติกที่ได้รับมาจะเป็นขยะพลาสติกที่ปนและปนเปื้อนด้วยโลหะหนัก ทำให้การกำจัดหรือนำมารีไซเคิลได้ยากหรือไม่สามารถรีไซเคิลได้ แต่ขยะนั้นมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี สามารถนำมาแทนที่มวลรวมละเอียดในส่วนผสมคอนกรีตได้ ขยะเหล่านี้จะได้รับการรีไซเคิลผ่านกระบวนการแยกโดยใช้ความถี่เฉพาะ เพื่อแยกพลาสติกที่สามารถรีไซเคิลได้จากพลาสติกที่ไม่สามารถนำมาใช้ใหม่ได้ พลาสติกที่มีความถี่เฉพาะสูงกว่าความถี่เฉพาะของน้ำจะถูกคัดออกและไม่ถูกนำไปใช้ในการผลิตคอนกรีต ซึ่งมีลักษณะของพลาสติกที่ใช้แทนวัสดุมวลรวมละเอียดที่แสดงในรูปที่ 4 [15]



รูปที่ 4 ขยะพลาสติกที่ใช้แทนที่วัสดุมวลรวมละเอียดในส่วนผสมคอนกรีต

### 3.2 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

วัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีตประกอบด้วยเสาเข็มคอนกรีตที่ไม่ใช้แล้ว ขยะพลาสติก ปูนปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และน้ำสะอาด [16-17] โดยเริ่มต้นด้วยการย่อยเสาเข็มคอนกรีตที่ไม่ใช้แล้วด้วยเครื่องย่อยคอนกรีตและขยะพลาสติกด้วยเครื่องย่อยขนาดเล็ก เพื่อเก็บไว้สำหรับใช้งานในภายหลัง หลังจากนั้นจะทำการคัดแยกวัสดุมวลรวมด้วยเครื่องคัดแยกขนาด เพื่อปรับปรุงวัสดุคอนกรีตรีไซเคิลให้มีขนาดคละ ซึ่งจะลดช่องว่างในวัสดุคอนกรีตรีไซเคิลที่อาจมีผลต่อค่าร้อยละการสูญเสีย โดยใช้วัสดุมวลรวมที่ค้างอยู่บนตะแกรงขนาด 1 นิ้วลงไปในการผสม ส่วนวัสดุที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 จะถูกใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียด ดังที่แสดงในรูปที่ 3 สำหรับการเตรียมการผสมในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณส่วนผสมที่ใช้ในการออกแบบ [14]

| ตัวอย่างทดสอบ | มวลรวมหยาบ (กก.) | มวลรวมละเอียด (กก.) | รวม(กก.) | พลาสติก (กก.) | น้ำ (กก.) | ปูน (กก.) |
|---------------|------------------|---------------------|----------|---------------|-----------|-----------|
| RC0           | 29.09            | 21.75               | 50.84    | 0.00          | 8.23      | 11.84     |
| RC10          | 22.50            | 16.82               | 39.33    | 0.82          | 6.61      | 9.58      |
| RC20          | 11.82            | 8.84                | 20.66    | 0.90          | 3.65      | 5.27      |
| RC0+10        | 22.69            | 16.97               | 39.66    | 0.80          | 8.47      | 9.39      |
| RC10+10       | 15.71            | 11.75               | 27.46    | 0.56          | 5.99      | 6.50      |
| RC0+10+10     | 7.86             | 5.87                | 13.73    | 0.28          | 3.88      | 3.25      |

หลังจากการผสมวัสดุมวลรวมทั้งหมดตามสัดส่วนที่ออกแบบในเครื่องไม่คอนกรีตแล้ว จะทำการทดสอบหาค่าการยุบตัวของคอนกรีตเพื่อวัดความสามารถในการเทคอนกรีต ดูสภาพความชื้นเหลว และลักษณะการไหลตัว ก่อนที่จะนำไปเทในแบบหล่อขนาด 10x10x10 เซนติเมตรทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นจะถอดออกจากแบบ เพื่อให้ได้ตัวอย่าง RAC0 ซึ่งนำไปบ่มในน้ำในบ่อพักน้ำเป็นเวลา 28 วัน หลังจากนั้นจะนำตัวอย่าง RAC0 จำนวน 2 ก้อนมาพักให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน [18]

- ตัวอย่าง RAC0 ที่ไม่ได้แช่ในสารละลายจะถูกเก็บไว้ 1 ก้อน
- ตัวอย่างอีก 1 ก้อนจะถูกแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลา 28 วัน ก่อนนำขึ้นมากักในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน

ตัวอย่างอื่น ๆ จะถูกเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิลตามที่กล่าวในขอบเขตการวิจัย และแยกไปแช่ในสารละลายหรือไม่แช่สารละลายตามที่ระบุในขั้นตอนต่อไป

### 3.3 การทดสอบหาความต้านทานการสึกกร่อนของพื้นผิวคอนกรีตโดยวิธี

Rotating – Cutter ตามมาตรฐานที่ใช้ทดสอบ ASTM C944-99

หลังจากที่ได้ตัวอย่างจากกรณีที่ไม่ได้แช่และแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตในแต่ละกรณีของตัวอย่างแล้ว จะทำการวัดขนาดความกว้าง ความยาว และความสูงของตัวอย่างเพื่อหาปริมาตรของตัวอย่างทดสอบ จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างการทดสอบเพื่อกำหนดจุดกึ่งกลางและกำหนดด้านที่ใช้ในการทดสอบเป็น Normal Load และ

Double Load ตามลำดับ เพื่อเตรียมตัวสำหรับการทดสอบความต้านทาน การสึกกร่อน โดยเครื่องมือทดสอบจะแสดงในรูปที่ 5 [19]



รูปที่ 5 เครื่องทดสอบความต้านทานการสึกกร่อนคอนกรีต (ASTM C944-99)

นำชิ้นทดสอบไปวางในเครื่องทดสอบ โดยให้หัวขัด (Dressing Wheel) สัมผัสกับตัวชิ้นทดสอบ จากนั้นเปิดเครื่องทดสอบที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที ภายใต้น้ำหนักกด 98 นิวตัน เป็นเวลา 6 นาที (ในด้าน Normal Load) โดยบันทึกการสูญเสียน้ำหนักจากการขัดทุกๆ 2 นาที ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2 ต่อมาใช้เครื่องเป่าแรงดันลมเป่าเศษฝุ่นวัสดุมวลรวมที่ผ่านการทดสอบออก จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักอีกครั้งเพื่อหาค่าน้ำหนักที่สูญเสียไป ทำการวัดความลึกของการเจาะที่เกิดจากการทดสอบโดยใช้เครื่องวัดความลึกดิจิตอล ซึ่งจะหาค่าความลึกจากผิวหน้าของตัวอย่างทดสอบ ค่าดังกล่าวจะนำมาคิดเป็นค่าร้อยละการสูญเสียในภายหลัง

ตารางที่ 2 มาตรฐานการทดสอบหาความต้านทานการสึกกร่อนของพื้นผิวคอนกรีต โดยวิธี Rotating – Cutter (ASTM C944-99)

| ชนิดทดสอบ   | น้ำหนักที่กระทำ (นิวตัน) | จำนวนการทดสอบ (รอบ) | เวลาที่ใช้ทดสอบในแต่ละรอบ (นาที) |
|-------------|--------------------------|---------------------|----------------------------------|
| Normal Load | 98                       | 3                   | 2                                |
| Double Load | 197                      | 3                   | 2                                |

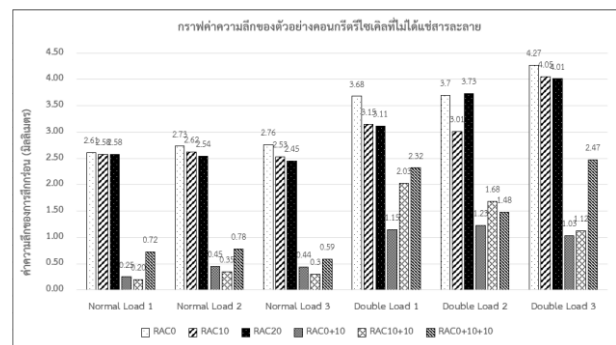
กระบวนการนี้จะทำการทดสอบในแต่ละด้านของตัวอย่างครบ 3 รอบ จากนั้นจะเปลี่ยนน้ำหนักกดเป็น 197 นิวตันและทำการทดสอบในด้าน Double Load เป็นเวลา 6 นาที โดยบันทึกการสูญเสียน้ำหนักจากการขัดทุกๆ 2 นาที กระบวนการจะดำเนินการเช่นเดียวกับด้าน Normal Load จนครบ 3 ด้าน เมื่อทดสอบครบทั้งสองด้าน (Normal Load และ Double Load) แล้ว จะหาค่าความลึกและน้ำหนักที่สูญเสียไป ซึ่งจะนำไปสู่การคำนวณค่าร้อยละการสูญเสียต่อไป

#### 4. การวิเคราะห์ผล

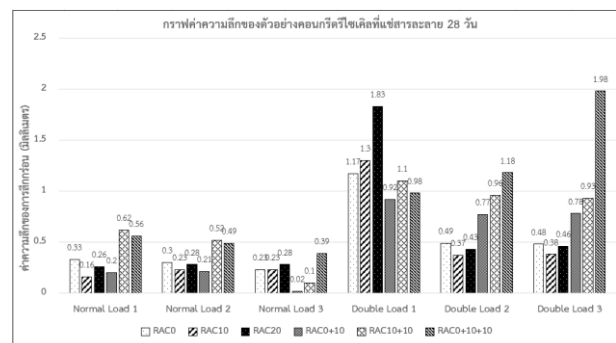
ในงานวิจัยนี้ ได้ดำเนินการวิเคราะห์ความต้านทานการสึกกร่อนของตัวอย่างคอนกรีตไร้เซลล์ โดยการแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นสองประเด็นหลัก คือ ค่าความลึกที่สูญเสีย และ ค่าร้อยละการสูญเสีย ซึ่งได้จากน้ำหนักที่สูญเสียไป ผลการวิเคราะห์มีรายละเอียดดังนี้

##### 4.1 ความลึกที่สูญเสีย

จากผลการทดสอบในงานวิจัยนี้ ได้ทำการวัดค่าความลึกจากด้านผิวคอนกรีตของตัวอย่างในทุกกรณีที่ทดสอบ โดยใช้เครื่องมือวัดดิจิตอล ซึ่งผลการทดสอบที่ได้แสดงใน รูปที่ 7 และ รูปที่ 8

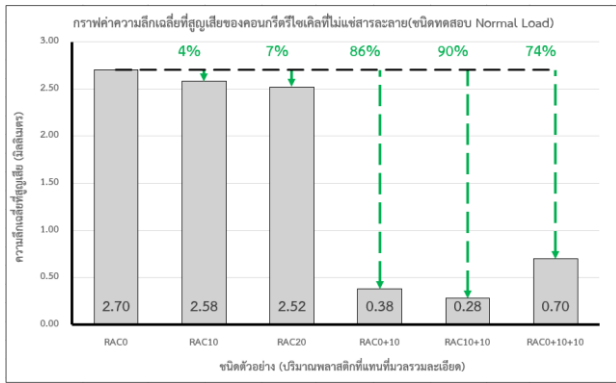


รูปที่ 7 ค่าความลึกที่สูญเสียของตัวอย่างคอนกรีตไร้เซลล์ที่ไม่ได้แช่สารละลาย

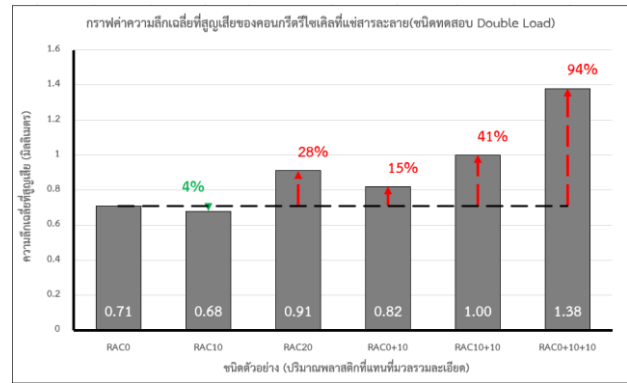


รูปที่ 8 ค่าความลึกที่สูญเสียของตัวอย่างคอนกรีตไร้เซลล์ที่แช่ในสารละลายที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 (แมกนีเซียมซิลิเกต) เป็นเวลา 28 วัน

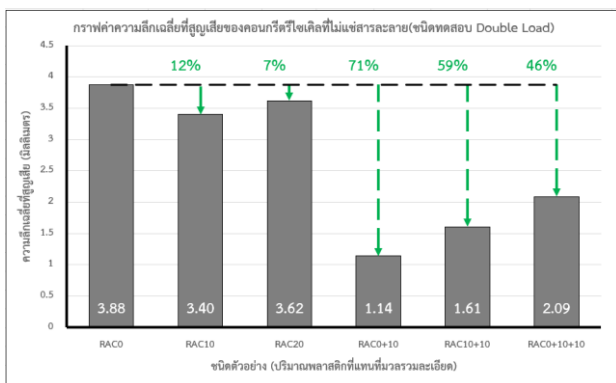
สำหรับการคำนวณค่าความลึกที่สูญเสียของแต่ละตัวอย่างนั้น จะนำค่าความลึกจากการวัดในทุกด้านของตัวอย่างที่ทำการทดสอบจำนวน 3 ด้าน (ทดสอบ 3 ครั้งต่อด้าน) มาคำนวณหาค่าเฉลี่ย และทำการแสดงผลพล็อตเป็นกราฟแท่งแสดงร้อยละส่วนต่างความคาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับกรณีตัวอย่าง RAC0 ตามชนิดของการทดสอบ Normal Load ดังแสดงไว้ในรูปที่ 9 และ รูปที่ 10 และชนิดของการทดสอบ Double Load ซึ่งสามารถดูได้จาก รูปที่ 11 และ รูปที่ 12



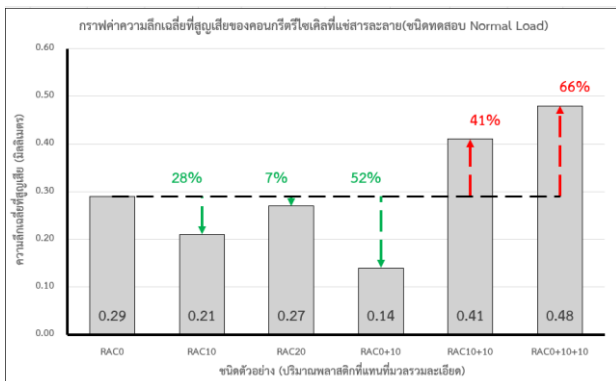
รูปที่ 9 ค่าความโก่งเอนสูงสุดของคอนกรีตไร้เหล็กที่ไม่ได้เสริมสลาย (ชนิดการทดสอบ Normal Load)



รูปที่ 12 ค่าความโก่งเอนสูงสุดของคอนกรีตไร้เหล็กที่เสริมสลายที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลา 28 วัน (ชนิดการทดสอบ Double Load)



รูปที่ 10 ค่าความโก่งเอนสูงสุดของคอนกรีตไร้เหล็กที่ไม่ได้เสริมสลาย (ชนิดการทดสอบ Double Load)



รูปที่ 11 ค่าความโก่งเอนสูงสุดของคอนกรีตไร้เหล็กที่เสริมสลายที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลา 28 วัน (ชนิดการทดสอบ Normal Load)

#### 4.1.1 การทดสอบชนิด Normal Load

ค่าความโก่งเอนสูงสุดของตัวอย่างแต่ละประเภทในกรณีที่ไม่ได้เสริมสลายและเสริมสลายเป็นเวลา 28 วัน จะแสดงไว้ดังตารางที่ 3 ดังนี้

ตารางที่ 3 ค่าความโก่งเอนสูงสุดของตัวอย่าง (Normal Load)

| ตัวอย่าง   | ไม่ได้เสริมสลาย (มิลลิเมตร) | เสริมสลาย 28 วัน |
|------------|-----------------------------|------------------|
| RAC0       | 2.70                        | 0.29             |
| RAC10      | 2.58                        | 0.21             |
| RAC20      | 2.52                        | 0.27             |
| RAC0+10    | 0.38                        | 0.14             |
| RAC10+10   | 0.28                        | 0.41             |
| RAC0+10+10 | 0.70                        | 0.48             |

#### 4.1.2 การทดสอบชนิด Double Load

ค่าความโก่งเอนสูงสุดของตัวอย่างแต่ละประเภทในกรณีที่ไม่ได้เสริมสลายและเสริมสลายเป็นเวลา 28 วัน จะแสดงไว้ดังตารางที่ 4 ดังนี้

ตารางที่ 4 ค่าความโก่งเอนสูงสุดของตัวอย่าง (Double Load)

| ตัวอย่าง   | ไม่ได้เสริมสลาย (มิลลิเมตร) | เสริมสลาย 28 วัน |
|------------|-----------------------------|------------------|
| RAC0       | 0.71                        | 3.88             |
| RAC10      | 0.68                        | 3.40             |
| RAC20      | 0.91                        | 3.62             |
| RAC0+10    | 0.81                        | 1.14             |
| RAC10+10   | 1.00                        | 1.61             |
| RAC0+10+10 | 1.38                        | 2.09             |

จาก รูปที่ 9 และ รูปที่ 10 ซึ่งแสดงค่าความโก่งเอนในกรณีที่ไม่ได้เสริมสลาย พบว่า การเพิ่มปริมาณการแทนที่ด้วยขยะพลาสติก (RAC10 และ RAC20) จะทำให้ค่าความโก่งเอนสูงสุดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับตัวอย่าง RAC0 (ที่ไม่มีการแทนที่พลาสติก) โดยที่ตัวอย่าง RAC0+10 แสดงค่าความโก่งเอนต่ำสุดอย่างมีนัยสำคัญ

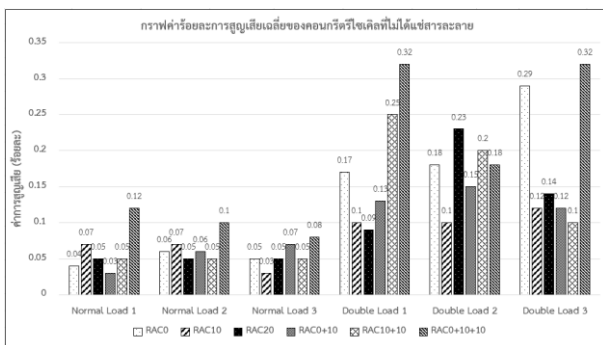
ในกรณีที่แซนสารละลายที่ 28 วัน พบว่า การเพิ่มปริมาณการแทนที่ด้วยขยะพลาสติกที่ ร้อยละ 20 (เช่น RAC20) ทำให้ค่าความสึกหรบที่สูญเสีย เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่มีการแทนที่น้อยกว่า (เช่น RAC0+10 ซึ่งมีค่าความสึกหรบที่สูญเสียต่ำสุด)

ทั้งนี้ในการทดสอบทั้ง Normal Load และ Double Load ให้ผลลัพธ์ในทิศทางเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณการแทนที่พลาสติกมีผลต่อความต้านทานการสึกหรบของคอนกรีตไร้เหล็ก โดยการเพิ่มพลาสติกในปริมาณมากทำให้ความต้านทานลดลง

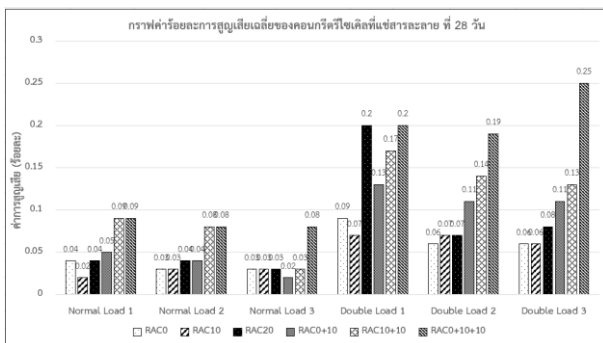
#### 4.2 ค่าร้อยละการสูญเสียซึ่งมาจากน้ำหนักที่สูญเสียไป

จากผลการทดสอบ ผู้วิจัยได้ทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างก่อนและหลังการทดสอบความต้านทานการสึกหรบทุกครั้ง โดยคำนวณค่าร้อยละการสูญเสียจากน้ำหนักตัวอย่างก่อนทดสอบครั้งแรกสุดของแต่ละด้าน แล้วนำมาหาผลต่างกับน้ำหนักตัวอย่างหลังทดสอบของด้านนั้น ๆ จากนั้นนำค่าที่ได้มาหารกับน้ำหนักตัวอย่างก่อนทดสอบครั้งแรกสุด แล้วคูณด้วย 100 เพื่อหาค่าร้อยละการสูญเสียในแต่ละด้าน ผลการทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 11 และรูปที่ 12

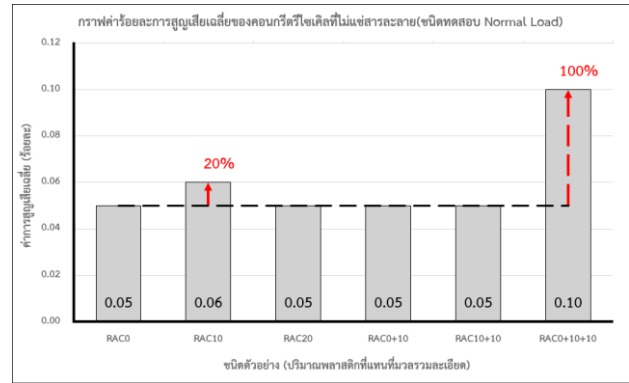
ค่าร้อยละการสูญเสียของแต่ละด้านถูกนำมาคำนวณค่าเฉลี่ยและทำการแสดงผลเป็นกราฟแท่งแสดงร้อยละส่วนต่างความคาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับกรณีตัวอย่าง RAC0 ตามชนิดของการทดสอบ Normal Load ดังแสดงไว้ในรูปที่ 13 และ รูปที่ 14 และชนิดของการทดสอบ Double Load ซึ่งสามารถดูได้จาก รูปที่ 15 และ รูปที่ 16



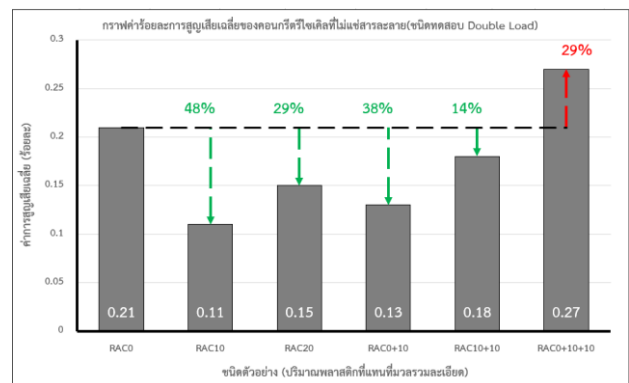
รูปที่ 11 ค่าร้อยละการสูญเสียเฉลี่ยของคอนกรีตไร้เหล็กที่ไม่ได้แซนสารละลาย



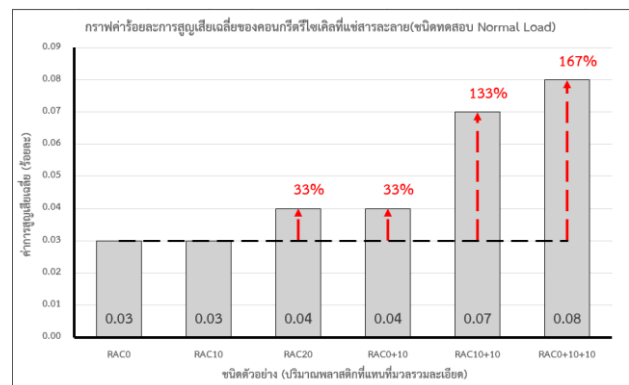
รูปที่ 12 ค่าร้อยละการสูญเสียเฉลี่ยของคอนกรีตไร้เหล็กที่แซนสารละลายที่ 28 วัน



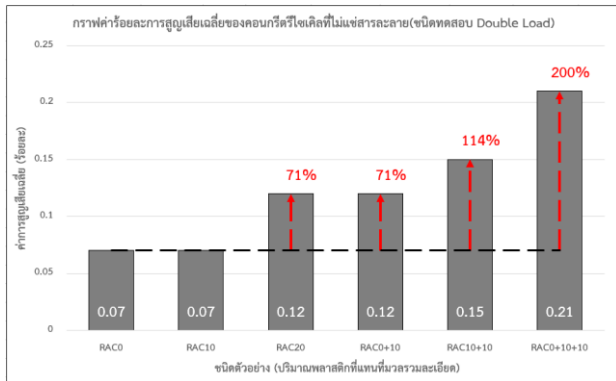
รูปที่ 13 ค่าร้อยละการสูญเสียเฉลี่ยของคอนกรีตไร้เหล็กที่ไม่ได้แซนสารละลาย (ชนิดการทดสอบ Normal Load)



รูปที่ 14 ค่าร้อยละการสูญเสียเฉลี่ยของคอนกรีตไร้เหล็กที่ไม่ได้แซนสารละลาย (ชนิดการทดสอบ Double Load)



รูปที่ 15 ค่าร้อยละการสูญเสียเฉลี่ยของคอนกรีตไร้เหล็กที่แซนสารละลายที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลา 28 วัน (ชนิดการทดสอบ Normal Load)



รูปที่ 14 ค่าร้อยละการสูญเสียเฉลี่ยของคอนกรีตไร้เหล็กที่ใส่สารละลายที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลา 28 วัน (ชนิดการทดสอบ Double Load)

#### 4.2.1 การทดสอบแบบ Normal Load

ค่าร้อยละการสูญเสียเฉลี่ยของตัวอย่างแต่ละประเภทในกรณีที่ไม่ได้แช่สารละลายและแช่สารละลายเป็นเวลา 28 วัน จะแสดงไว้ดังตารางที่ 5 ดังนี้

ตารางที่ 5 ค่าร้อยละการสูญเสียเฉลี่ยของตัวอย่าง (Normal Load)

| ตัวอย่าง   | ไม่ได้แช่สารละลาย (%) | แช่สารละลาย 28 วัน |
|------------|-----------------------|--------------------|
| RAC0       | 0.05                  | 0.03               |
| RAC10      | 0.06                  | 0.03               |
| RAC20      | 0.05                  | 0.04               |
| RAC0+10    | 0.05                  | 0.04               |
| RAC10+10   | 0.05                  | 0.07               |
| RAC0+10+10 | 0.10                  | 0.08               |

#### 4.2.2 การทดสอบแบบ Double Load

ค่าร้อยละการสูญเสียเฉลี่ยของตัวอย่างแต่ละประเภทในกรณีที่ไม่ได้แช่สารละลายและแช่สารละลายเป็นเวลา 28 วัน จะแสดงไว้ดังตารางที่ 6 ดังนี้

ตารางที่ 6 ค่าร้อยละการสูญเสียเฉลี่ยของตัวอย่าง (Double Load)

| ตัวอย่าง   | ไม่ได้แช่สารละลาย (%) | แช่สารละลาย 28 วัน |
|------------|-----------------------|--------------------|
| RAC0       | 0.21                  | 0.07               |
| RAC10      | 0.11                  | 0.07               |
| RAC20      | 0.15                  | 0.12               |
| RAC0+10    | 0.13                  | 0.12               |
| RAC10+10   | 0.18                  | 0.15               |
| RAC0+10+10 | 0.27                  | 0.21               |

จาก รูปที่ 13 และรูปที่ 14 สามารถวิเคราะห์แนวโน้มของผลการทดสอบทั้ง Normal Load และ Double Load ได้ดังนี้

##### 1. กรณีที่ไม่ได้แช่สารละลาย

ในการทดสอบแบบ Normal Load ค่าร้อยละการสูญเสียเฉลี่ยมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน โดย RAC0+10+10 มีค่าการสูญเสียสูงสุดถึง 2 เท่า

ของตัวอย่างอื่น ๆ เนื่องจากตัวอย่างมีการเพิ่มจำนวนรอบการรีไซเคิลขึ้นมาอีกหนึ่งรอบและได้เพิ่มปริมาณขยะพลาสติกเข้ามาแทนที่มวลรวมละเอียดอีกร้อยละ 10 โดยปริมาตร ทำให้ส่วนผสมของมวลรวมหยาบ และน้ำหนักรวมของตัวอย่างคอนกรีตนี้ลดลงไป คุณสมบัติด้านความแข็งแรงจึงลดลงจนทำให้เกิดการสูญเสียจากการสึกกร่อนมีมากขึ้น

ในการทดสอบแบบ Double Load ตัวอย่าง RAC0 มีค่าร้อยละการสูญเสียสูงสุด ส่วนตัวอย่างที่มีค่าการสูญเสียต่ำสุดอย่างมีนัยสำคัญคือ RAC10

RAC0+10+10 ยังคงเป็นตัวอย่างที่มีค่าการสูญเสียสูงสุด

##### 2. กรณีที่แช่สารละลาย 28 วัน

ในการทดสอบแบบ Normal Load ค่าร้อยละการสูญเสียเฉลี่ยไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อเพิ่มปริมาณขยะพลาสติก

ในการทดสอบแบบ Double Load ค่าการสูญเสียเพิ่มขึ้นต่อเนื่องและตัวอย่าง RAC0+10+10 ยังคงมีค่าการสูญเสียสูงสุดเป็น 2 เท่าของตัวอย่างอื่น ๆ มีค่าการสูญเสียสูงสุดถึง 2 เท่าของตัวอย่างอื่น ๆ เนื่องจากตัวอย่างมีการเพิ่มจำนวนรอบการรีไซเคิลขึ้นมาอีกหนึ่งรอบและได้เพิ่มปริมาณขยะพลาสติกเข้ามาแทนที่มวลรวมละเอียดอีกร้อยละ 10 โดยปริมาตร ทำให้ส่วนผสมของมวลรวมหยาบ และน้ำหนักรวมของตัวอย่างคอนกรีตนี้ลดลงไป คุณสมบัติด้านความแข็งแรงจึงลดลงจนทำให้เกิดการสูญเสียจากการสึกกร่อนมีมากขึ้น

## 5. สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้สรุปผลการทดสอบความต้านทานการสึกกร่อนของคอนกรีตไร้เหล็ก โดยใช้ตัวอย่างที่แช่และไม่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ผลจากการชั่งน้ำหนักและการวัดความลึกที่สูญเสียของตัวอย่างทดสอบทำให้ทราบว่า คอนกรีตไร้เหล็กประเภท RAC0+10 มีค่าความลึกเฉลี่ยที่สูญเสียอยู่ที่น้อยอย่างมีนัยสำคัญ และประเภท RAC10 มีค่าร้อยละการสูญเสียเฉลี่ยที่ต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ หากทำการเพิ่มจำนวนรอบการรีไซเคิลและเพิ่มปริมาณขยะพลาสติกเข้าไปแทนที่มวลรวมละเอียดมากขึ้นนั้นจะทำให้ความหนาแน่นรวมของคอนกรีตลดลง เนื่องจากมวลรวมที่ใช้มีความหนาแน่นต่ำและเกิดโพรงอากาศมากขึ้น ความแข็งแรงภายในของเนื้อคอนกรีตลดลง โดยเฉพาะในส่วนเชื่อมประสานระหว่างเม็ดพลาสติกและปูนซีเมนต์ ซึ่งมีแนวโน้มที่จะหลุดร่อนง่ายเมื่อได้รับแรงเฉือนหรือแรงอัดที่ปริมาณช่องว่างอากาศภายในเพิ่มขึ้น จากการใช้วัสดุรีไซเคิลเข้าช้อนซึ่งทำให้การกระจายตัวของมวลรวมไม่สม่ำเสมอและลดความต้านทานต่อการสึกกร่อน อีกทั้งคอนกรีตมีค่าน้ำหนักที่ลดลง และส่งผลความสามารถในการต้านทานการสึกกร่อนของคอนกรีตที่ลดลงเมื่ออยู่ในสภาวะที่มีซัลเฟต โดยคอนกรีตไร้เหล็กที่มีการผสมด้วยขยะพลาสติกร้อยละ 10 จะมีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานมากที่สุดเมื่อเทียบกับพื้นที่ที่ตรึงนั้นมีสภาวะที่มีซัลเฟต

งานวิจัยนี้ได้ทำการประเมินความต้านทานต่อการสึกกร่อนของคอนกรีตไร้เหล็กที่ใช้วัสดุมวลรวมจากการรีไซเคิลและขยะพลาสติกในส่วนต่าง ๆ โดยเปรียบเทียบผลระหว่างตัวอย่างที่แช่และไม่แช่ใน

สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต พบว่า ตัวอย่าง RAC0+10 ให้ค่าความลึกเฉลี่ยที่สูญเสียต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ตัวอย่าง RAC10 ให้ค่าร้อยละการสูญเสียจากน้ำหนักต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มจำนวนรอบการรีไซเคิลร่วมกับการเพิ่มสัดส่วนขยะพลาสติกทำให้เนื้อคอนกรีตมีน้ำหนักลดลง ส่งผลให้คุณสมบัติด้านทานการสึกกร่อนลดลง โดยเฉพาะในสภาวะที่มีซัลเฟต จึงสามารถสรุปได้ว่า คอนกรีตรีไซเคิลที่มีส่วนผสมของขยะพลาสติกร้อยละ 10 และผ่านการรีไซเคิลเพียงรอบเดียว มีความเหมาะสมต่อการใช้งานมากที่สุดภายใต้สภาวะดังกล่าว เพื่อเพิ่มความชัดเจนของผลการทดลองและยืนยันความทนทานของวัสดุในระยะยาว ผู้วิจัยเสนอให้ขยายระยะเวลาการแช่ในสารละลายซัลเฟตเพิ่มเติมในอนาคต

ทั้งนี้ จากผลการศึกษาเบื้องต้น วัสดุดังกล่าวเหมาะสมต่อการใช้งานในโครงสร้างที่รับน้ำหนักไม่มาก เช่น ทางจักรยาน พื้นทางเดิน หรือบล็อกทางเท้า อย่างไรก็ตาม คุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุยังไม่เพียงพอสำหรับการนำไปใช้งานเป็นถนนที่รองรับการจราจรของรถยนต์หรือรถบรรทุกขนาดใหญ่ จึงควรมีการศึกษาวัดคุณสมบัติประเภทอื่นเพิ่มเติม เพื่อพัฒนาให้เหมาะสมกับการใช้งานในงานโครงสร้างพื้นฐานในอนาคต

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ วัสดุวัสดุรวม รวมไปถึงอุปกรณ์ในการทดสอบ จนกระทั่งการวิจัยครั้งนี้สำเร็จเรียบร้อยด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังว่างานวิจัยฉบับนี้คงเป็นประโยชน์สำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง และผู้ที่สนใจศึกษาต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Sabbrojman, M., et al. (2024). "A comparative review on the utilisation of recycled waste glass, ceramic and rubber as fine aggregate on high performance concrete: Mechanical and durability properties". *Developments in the Built Environment* 17.
- [2] Almeshal, I., et al. (2020). "Use of recycled plastic as fine aggregate in cementitious composites: A review." *Construction and Building Materials* 253.
- [3] Jia, Z., et al. (2025). "Eco-concrete with recycled aggregate functionalized with phase change materials: Physical and mechanical behavior". *Construction and Building Materials* 471.
- [4] Zhuang, D., et al. (2025). "Recycled coarse aggregate from waste concrete strengthened by microbially induced calcium carbonate precipitation". *Environmental Technology & Innovation* 37.
- [5] กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, ก. (2022). รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี 2564. บริษัท เอพี คอนเน็กซ์ จำกัด.
- [6] Shi, X., et al. (2023). "A comprehensive investigation on sulphate resistance of geopolymer recycled concrete: Macro and micro properties". *Construction and Building Materials* 403.
- [7] Singh, P. K. and P. Rajhans (2025). "Effect of surface treatment and mixing approach on the durability performance of recycled aggregate geopolymer concrete against aggressive environment". *Journal of Building Engineering* 101.
- [8] Deng, Z. (2024). "Influence of recycled rubber and glass aggregates on magnesium sulfate resistance of geopolymers: Physio-mechanical properties and mechanisms". *Construction and Building Materials* 438.
- [9] Mostofinejad, D., et al. (2020). "Durability of concrete containing recycled concrete coarse and fine aggregates and milled waste glass in magnesium sulfate environment". *Journal of Building Engineering* 29.
- [10] Singh, R. P., et al. (2024). "Durability assessment of fly ash, GGBS, and silica fume based geopolymer concrete with recycled aggregates against acid and sulfate attack". *Journal of Building Engineering* 82.
- [11] Zhang, H., et al. (2021). "Improving the sulfate resistance of recycled aggregate concrete (RAC) by using surface-treated aggregate with sulfoaluminate cement (SAC)". *Construction and Building Materials* 297.
- [12] Yehia, S. A., et al. (2024). "Compressive behavior of eco-friendly concrete containing glass waste and recycled concrete aggregate using experimental investigation and machine learning techniques". *Construction and Building Materials* 436.
- [13] Wang, J., et al. (2025). "The synergistic effect of recycled steel fibers and rubber aggregates from waste tires on the basic properties, drying shrinkage, and pore structures of cement concrete". *Construction and Building Materials* 470.
- [14] Jantarachot, K. (2023). "Compressive Strength of Recycled Aggregated Concrete from Concrete Waste and Plastic Waste". *International Journal of GEOMATE* 25(108).
- [15] Ramos, T., et al. (2013). "Granitic quarry sludge waste in mortar: Effect on strength and durability". *Construction and Building Materials* 47: 1001-1009.

- [16] Dosho, Y. (2025). Sustainable Concrete Waste Recycling System: Improving the Performance of Concrete Using Low-Quality Recycled Aggregate ". Transportation Research Procedia 85, pp. 308-319.
- [17] Song, J., et al. (2025). "Synergetic valorization of recycled aggregates and waste glass powder in sustainable concrete: Microstructure, mechanical strength, and bonding performance". Construction and Building Materials 458.
- [18] Xie, F., et al. (2021). "Experimental investigations on the durability and degradation mechanism of cast-in-situ recycled aggregate concrete under chemical sulfate attack". Construction and Building Materials 297.
- [19] Zhu, P., et al. (2024). "Improving sulfate resistance of 100% recycled coarse aggregate concrete by simultaneous application of limestone powder and EDTA-2Na". Construction and Building Materials 418.