การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตโดยใช้คอนกรีตผสมมวลรวมรีไซเคิลแบบย่อยซ้ำ

Study Properties of Concrete Manufactured with Multi-Recycled Concrete Aggregate

คณุตม์ สมบูรณ์ปัญญา[1] ภูษิต บุญยฤทธิ์[1] วงศกร สิมมา[1] และชิษณุพงศ์ สุธัมมะ[2]*

[1] นิสิตปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
[2] อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
**Corresponding author; E-mail address: fengcpsu@ku.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากเศษคอนกรีตที่เหลือใช้จากการทุบทำลายสิ่งก่อสร้างนั้นมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น โดยงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิล (RCA) และคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบย่อยซ้ำ (MRCA) อันได้แก่ การทดสอบการหาค่าความหนาแน่น, การทดสอบการหาค่าอัตราการดูดซึมน้ำ, การทดสอบการหาค่ากำลังรับแรงอัด และการทดสอบหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมด้วยวิธีวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-cell potential) และนำผลการทดสอบที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบจากธรรมชาติ (NCA) โดยตัวอย่างจะใช้ RCA และ MRCA โดยนำไปแทนที่ NCA ในอัตราส่วนร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 โดยปริมาตรตามลำดับ ค่ากำลังรับแรงอัดที่ออกแบบไว้เท่ากับ 240 กก/ตร.ซม. จากผลการทดสอบที่อายุ 28 วัน พบว่าเมื่อแทนที่ด้วย RCA และ MRCA ในอัตราส่วนร้อยละ 25 จะมีค่าความหนาแน่นและค่ากำลังรับแรงอัดมากที่สุด เมื่อแทนที่ด้วย RCA และ MRCA ในอัตราส่วนร้อยละ 100 จะมีค่าอัตราการดูดซึมน้ำมากที่สุด ส่วนการทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กเสริมด้วยวิธีวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ เมื่อแทนที่ด้วย RCA ในอัตราส่วนร้อยละ 25 จะมีค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมช้าที่สุด โดยค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์สูงที่สุดที่ทำให้คอนกรีตมีสนิมและเกิดรอยร้าวจะใช้ระยะเวลารวมทั้งสิ้นประมาณ 17 วัน เมื่อแทนที่ด้วย RCA ในอัตราส่วนร้อยละ 100 จะมีค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเร็วที่สุด โดยค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์สูงที่สุดที่ทำให้คอนกรีตมีสนิมและเกิดรอยร้าวจะใช้ระยะเวลารวมทั้งสิ้นประมาณ 5 วัน จากผลการวิจัยสรุปได้ว่าค่าความหนาแน่นและค่ากำลังรับแรงอัดของมวลรวมรีไซเคิลจะมีค่าลดลงตามอัตราส่วนการแทนที่ของ RCA และ MRCA ที่เพิ่มมากขึ้น ส่วนการหาค่าอัตราการดูดซึมน้ำของมวลรวมรีไซเคิลจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนการแทนที่ของ RCA และ MRCA ที่เพิ่มมากขึ้น และการหาค่าอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมด้วยวิธีวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ โดยค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามอัตราส่วนการแทนที่ของ RCA ที่เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: มวลรวมหยาบรีไซเคิล, มวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบย่อยซ้ำ, กำลังรับแรงอัด, การกัดกร่อนของเหล็กเสริม

Abstract

This research aimed to reduce environmental problems caused by the fraction of waste concrete, by studying properties of concrete which mixed with recycled aggregate concrete (RCA) and concrete which mixed with repetitive recycled concrete aggregate (MRCA), including density testing, water absorption testing, compressive strength testing and the corrosion performance testing of reinforcing steel which used half-cell potential test, and comparing the results of the tests with the results of natural mixed concrete (NCA). The calculation of the mixture used RCA and MRCA replacement NCA in mixing ratios percentages 25, 50, 75, and 100 by volume, respectively. Compressive strength was designed at 240 kg/cm^2. The experiment showed that when replacing 25% of RCA and MRCA, it has the highest density and compressive strength, and have highest water absorption when replaced by 100. The corrosion performance testing using half-cell potential test would have the slowest rust on reinforcement steel and highest half-cell electric potential which make concrete cracks at 17 days when replaced by 25. And it would have the highest rust on reinforcement steel and highest half-cell electric potential which make concrete cracks at 5 days when replaced by 100. The results revealed that the density and compressive strength would decrease as the replacement ratio of RCA and MRCA increases. The water absorption would increase with the increasing ratio of RCA and MRCA. And the rate of rusting of the reinforcement steel would increase with the increasing replacement ratio of RCA.

Keywords: recycled coarse aggregate, repetitive recycled coarse aggregate, compressive strength, corrosion of reinforcement steel

1. คำนำ

งานวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของคอนกรีตผสมมวลรวมรีไซเคิลโดยใช้เศษคอนกรีตที่เหลือใช้จากการทดสอบแรงอัดในห้องปฏิบัติการ จากภาควิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ซึ่งค่ากำลังรับแรงอัดเดิมของเศษคอนกรีตรีไซเคิลที่นำมาใช้งาน จะมีค่าประมาณ 240 ถึง 320 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยนำมาใช้แทนที่มวลรวมหยาบจากธรรมชาติในอัตราส่วนร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 โดยปริมาตรตามลำดับ ค่ากำลังรับแรงอัดที่ใช้ในการออกแบบส่วนผสมคือ 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และกำหนดค่ายุบตัว (Slump Test) ประมาณ 10-12 เซนติเมตร โดยใช้แบบหล่อทรงกระบอก (Cylinder) ระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบตัวอย่างคือ 7 และ 28 วัน โดยจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 4 ส่วนได้ดังนี้ การทดสอบค่าความหนาแน่นของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิล (RCA) และคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบย่อยซ้ำ (MRCA) เพื่อนำค่าความหนาแน่นมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับผลการทดลองการหาค่าความหนาแน่นของจากงานวิจัยอื่นว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันหรือไม่ การทดสอบหาค่าอัตราการดูดซึมน้ำมวลรวมหยาบรีไซเคิล (RCA) และมวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบย่อยซ้ำ (MRCA) เพื่อใช้หาอัตราส่วนการแทนที่ของมวลรวมรีไซเคิลและหาลำดับชั้นคุณภาพว่าอยู่ในชั้นใดตรงตามข้อกำหนดของ วสท. 1014-46 [11] หรือไม่ การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิล (RCA) และคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบย่อยซ้ำ (MRCA) โดยนำผลการทดลองไปวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากงานวิจัยอื่นว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันหรือไม่ และการทดสอบอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมด้วยวิธีวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-cell Potential) แบบเร่งไฟฟ้า 6 โวลต์ โดยกำหนดให้ค่าความเข้มข้นของสารละลายคลอไรด์ไอออนในอัตราส่วนร้อยละ 5 ของปริมาณน้ำที่ใช้ในการทดสอบ และอัตราส่วนที่ใช้ในการแทนที่ของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิลในอัตราส่วนร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 โดยปริมาตร ส่วนขั้นตอนลงมือปฏิบัติจะอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C876 [12]

2. ข้อกำหนดและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้อกำหนดสำหรับมวลรวมที่นำกลับมาใช้ใหม่

วันชัย สะตะ [1] ได้อ้างอิงข้อกำหนดสำหรับมวลรวมรีไซเคิล ซึ่งได้ยกตัวอย่างการนำมวลรวมรีไซเคิลกลับมาใช้ใหม่ตามข้อกำหนดของ วสท. 1014-46 [11] ได้จำแนกมวลรวมหยาบที่นำกลับมาใช้ใหม่และแบ่งออกเป็น 3 ระดับชั้นคุณภาพดังนี้

ชั้นคุณภาพที่ 1

ประกอบด้วยมวลรวมหยาบจากธรรมชาติไม่น้อยกว่า 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มวลรวมหยาบที่ใช้แล้วไม่มากกว่าร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก การดูดซึมน้ำต้องไม่เกินร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก

ชั้นคุณภาพที่ 2

เป็นมวลรวมหยาบส่วนใหญ่ที่ได้มาจากคอนกรีตที่ใช้แล้วและมีค่าการดูดซึมน้ำไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

ชั้นคุณภาพที่ 3

เป็นมวลรวมหยาบที่ได้จากเศษวัสดุก่อสร้างและเศษคอนกรีตที่ใช้แล้วจะต้องมีค่าการดูดซึมน้ำไม่เกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 1 การจำแนกมวลรวมหยาบที่นำกลับมาใช้ใหม่

คุณลักษณะ	ข้อกำหนด		
	ชั้นคุณภาพที่ 1	ชั้นคุณภาพที่ 2	ชั้นคุณภาพที่ 3
ความถ่วงจำเพาะสภาพแห้งของมวลรวมอย่างน้อย	2.40	2.00	1.50
น้ำหนักร้อยละมากที่สุดขององค์ประกอบย่อย			
- ความถ่วงจำเพาะอิ่มตัวผิวแห้งน้อยกว่า 2.20	10	10	-
- ความถ่วงจำเพาะอิ่มตัวผิวแห้งน้อยกว่า 1.80	1	1	10
- ความถ่วงจำเพาะอิ่มตัวผิวแห้งน้อยกว่า 1.00	0.5	0.5	1
น้ำหนักร้อยละมากที่สุดของวัสดุอื่นๆ	1	1	5

ที่มา: วสท. 1014-46 วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ [11]

2.2 การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C876

สำเริง รักช้อน [2] ได้อ้างอิงทฤษฎีและขั้นตอนการทดสอบการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์โดยใช้ Reference electrode ที่ทราบค่าศักย์ไฟฟ้าแล้ว เช่น Saturated Calomel electrode (SCE) หรือคอปเปอร์ - คอปเปอร์ซัลเฟต ต่อเป็นวงจรระหว่างเหล็กเสริมและโวลต์มิเตอร์ (Voltmeter) ตามมาตรฐาน ASTM C876 [12] ซึ่งขั้นตอนการทดสอบการหาค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์นั้นต้องทำการวางแท่ง Reference electrode บนผิวคอนกรีตเหนือตำแหน่งของเหล็กเสริมที่ต้องการตรวจสอบ (ก่อนทำการทดสอบนั้นผิวของตัวอย่างทดสอบต้องมีความชื้นเสมอ) จากนั้นอ่านค่าศักย์ไฟฟ้าจากโวลต์มิเตอร์และทำการบันทึกค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ เพื่อนำไปใช้ในการประเมินหาค่าแนวโน้มอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในแบบหล่อทรงกระบอกดังแสดงในรูปที่ 1

รูปที่ 1 ตัวอย่างการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C876 [12]

2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เทิดศักดิ์ สายสุทธิ์ [3] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการนำหัวเสาเข็มเหลือใช้นำมารีไซเคิลเป็นมวลรวมหยาบโดยการนำไปแทนที่มวลรวมหยาบจากธรรมชาติร้อยละ 25, 50, 75 และ100 โดยน้ำหนัก เพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิลตามมาตรฐาน BS 1881 ซึ่งใช้แบบหล่อเหล็กทรงลูกบาศก์ขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร จำนวน 180 ตัวอย่าง โดยกำหนดค่ากำลังอัดประลัยที่ออกแบบไว้เท่ากับ 210, 280 และ 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากนั้นทำการบ่มคอนกรีตที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ

จากผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิลในอัตราส่วนร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 โดยน้ำหนักตามลำดับ เมื่ออายุการบ่ม 28 วัน จะมีค่ากำลังรังแรงอัดโดยเฉลี่ยลดลงร้อยละ 3.75, 17.02, 19.37 และ 30.40 ตามลำดับ โดยที่มวลรวมรีไซเคิลจะมีคุณสมบัติทางกายภาพคือ มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมผิวขรุขระและมีมอร์ตาหุ้มเกาะผิวที่ไม่เรียบคม รวมทั้งค่าความพรุนและการดูดน้ำยังมีค่ามากกว่ามวลรวมหยาบจากธรรมชาติ และความถ่วงจำเพาะยังมีค่าน้อยกว่ามวลรวมหยาบจากธรรมชาติ ซึ่งมวลรวมรีไซเคิลจะมีค่าความแข็งแรงน้อยกว่ามวลรวมธรรมชาติ ส่งผลให้คอนกรีตผสมมวลรวมรีไซเคิลจึงมีความเหมาะสมกับการใช้งานประเภทงานพื้น, ถนน,งานพื้นทางเท้า หรืองานโครงสร้างอาคารที่พักอาศัย

นราวิชญ์, อภิสิทธิ์ และสุภาวดี [4] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตรีไซเคิลโดยการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยเศษคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิลในอัตราส่วนร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 โดยปริมาตร เพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตทั่วไปและคอนกรีตผสมมวลรวมรีไซเคิลโดยการแทนที่ด้วยมวลรวมหยาบรีไซเคิล โดยใช้ตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทดสอบเป็นแบบหล่อทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางของแบบหล่อขนาด 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร และแบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร โดยจะกำหนดค่ากำลังอัดที่ออกแบบไว้คือ 240 และ 320 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดคือ 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2 และตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ความหนาแน่นของคอนกรีต

กำลังอัดที่ออกแบบไว้ (กก./ตร.ซม.)	ร้อยละมวลรวมรีไซเคิล (ร้อยละ)	ความหนาแน่นของคอนกรีต (กก./ลบ.ม.)	ความแตกต่างของค่าความหนาแน่น (เปอร์เซ็นต์)
240	0	2,379.2	0
	25	2,340.7	1.6
	50	2,321.8	2.4
	75	2,308.8	3
	100	2,285.8	3.9
320	0	2,369.4	0
	25	2,332.1	1.6
	50	2,327.4	1.8
	75	2,305.5	2.7
	100	2,292.4	3.2

ที่มา: นราวิชญ์, อภิสิทธิ์ และสุภาวดี [4]

ตารางที่ 3 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงลูกบาศก์ (Cube)

กำลังอัดที่ออกแบบไว้ (กก./ตร.ซม.)	ร้อยละมวลรวมรีไซเคิล (ร้อยละ)	ค่ายุบตัว (ซม.)	อายุคอนกรีต (วัน)		
			7	14	28
240	0	10.10	245.985	274.606	296.435
	25	10.60	242.413	263.281	283.344
	50	10.45	220.984	253.994	277.732
	75	10.25	216.341	248.931	262.532
	100	10.45	180.718	228.872	245.863
320	0	11.25	343.815	355.795	413.029
	25	11.25	327.497	350.418	395.085
	50	11.40	316.060	341.290	368.022
	75	11.30	293.827	333.380	351.664
	100	11.00	246.513	302.722	338.450

ที่มา: นราวิชญ์, อภิสิทธิ์ และสุภาวดี [4]

จากงานวิจัยนี้สรุปได้ว่าค่าความหนาแน่นของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิลจะมีค่าลดลงตามอัตราส่วนการแทนที่ของเศษมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากมวลรวมหยาบรีไซเคิลมีช่องว่างภายในมากกว่ามวลรวมหยาบจากธรรมชาติ ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของมวลรวมรีไซเคิลมีค่าน้อยกว่าค่าความหนาแน่นของมวลรวมหยาบจากธรรมชาติ และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่ของมวลรวมหยาบรีไซเคิลมากยิ่งขึ้น จะส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดนั้นมีค่าลดลงตามไปด้วย

Vilson Abreu, luis Evangelista and Jorge de brito [5] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิล โดยกำหนดสัดส่วนมวลรวมหยาบรีไซเคิล (CRCA) ในอัตราส่วนแทนที่ร้อยละ 25 และ 100 โดยปริมาตรตามลำดับ ซึ่งการทดลองจะแบ่งจำนวนครั้งของการรีไซเคิลออกเป็น 3 รอบ โดยจะแสดงการกระจายขนาดคละของมวลรวมหยาบระหว่างส่วนผสมของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิลกับคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบย่อยซ้ำ ดังแสดงในตารางที่ 4 จากนั้นนำค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิลทั้ง 3 รอบ มาเปรียบเทียบกับค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบธรรมชาติ (CNA) ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 4 ปริมาณการกระจายขนาดของมวลรวม

ส่วนผสม		สัดส่วนในการผสม (กก./ลบ.ม.)		
		ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3
CNA	4-5.6 (มม.)	97.3	-	-
	5.6-8 (มม.)	107.3	-	-
	8-11.2 (มม.)	116.1	-	-
	11.2-16 (มม.)	327.6	-	-
	16-22.4 (มม.)	327.6	-	-
CRCA	4-5.6 (มม.)	-	86.7	82.2
	5.6-8 (มม.)	-	96.1	90
	8-11.2 (มม.)	-	103.3	97.8
	11.2-16 (มม.)	-	292.4	275.6
	16-22.4 (มม.)	-	292.4	275.6

ที่มา: Vilson Abreu, luis Evangelista and Jorge de brito [5]

ตารางที่ 5 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตและคอนกรีตรีไซเคิล

Concrete (เมกะปาสคาล)	7 วัน	28 วัน	56 วัน
Normal Concrete	46.2	55.9	63.8
RAC1-25	47.6	59.7	65
RAC1-100	44	54.1	59
RAC2-25	47	55.9	60.7
RAC2-100	43.3	53.3	57.6
RAC3-25	45.2	55.9	62.7
RAC3-100	40.3	48.6	56.2

ที่มา: Vilson Abreu, luis Evangelista and Jorge de brito [5]

จากงานวิจัยนี้สรุปได้ว่าค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงเมื่อรอบของการรีไซเคิลมวลรวมหยาบนั้นมากขึ้น ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดนั้นเกิดจากคุณสมบัติเชิงกลของมวลรวมหยาบดังนี้ ความหนาแน่นมีค่าลดลงเมื่อรอบของการรีไซเคิลมวลรวมหยาบนั้นมากขึ้น อาจเป็นเพราะมวลรวมหยาบรีไซเคิลมีโพรงภายในมากกว่ามวลรวมหยาบจากธรรมชาติ ค่าการดูดซึมน้ำมีค่ามากขึ้นเมื่อรอบของการรีไซเคิลมวลรวมหยาบนั้นมากขึ้น ส่งผลให้เมื่อจำนวนรอบของการรีไซเคิลเพิ่มมากขึ้นจำเป็นต้องใช้น้ำมากขึ้นตามไปด้วย

สลิลา รักวณิชย์ และ วันชัย ยอดสุดใจ [6] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมด้วยวิธีระบบป้องกันการเกิดสนิมกัลวานิกคาโทดิก (Galvanic Cathodic Protection) โดยจะทดลองด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้เหล็กขนาด 12 มิลลิเมตร การแบ่งตัวอย่างจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ แบบที่ 1 ติดตั้งระบบป้องกันการเกิดสนิมกัลวานิกคาโทดิก และแบบที่ 2 ไม่ติดตั้งระบบป้องกันการเกิดสนิมกัลวานิกคาโทดิก โดยมีตัวอย่างการทดสอบได้แก่ 180, 250 และ 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ โดยเตรียมสภาพตัวอย่างไว้ 2 แบบคือ แบบเปียกและแบบแห้งโดยระยะเวลาที่ใช้เวลาดูผลประมาณ 7 เดือน จากผลการทดลองสรุปได้ว่าตัวอย่างคอนกรีตประเภทที่ไม่ได้ติดตั้งระบบป้องกันการเกิดสนิมกัลวานิกคาโทดิกพบว่าคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงจะมีอัตราการเกิดสนิมช้ากว่าคอนกรีตที่มีกำลังอัดต่ำทั้งสภาวะแห้งและเปียกรวมไปถึงการเร่งปฏิกิริยาด้วยไฟฟ้า จากตัวอย่างคอนกรีตที่มีการติดตั้งระบบป้องกันการเกิดสนิมกัลวานิกคาโทดิกก็จะให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงจะมีอัตราการเกิดสนิมช้ากว่าคอนกรีตที่มีกำลังอัดต่ำเสมอทั้งสภาวะแห้งและเปียกรวมไปถึงการเร่งปฏิกิริยาด้วยไฟฟ้าอีกด้วย

Job Thomas, Nassif Nazeer Thaickavil and P.M. Wilson [7] ได้ทำการศึกษากำลังอัดและความทนทานของคอนกรีตที่มีมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลโดยการออกแบบอัตราส่วนผสมของมวลรวมหยาบต่อมวลรวมทั้งหมดของคอนกรีตโดยกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ไว้ที่ร้อยละ 0.4, 0.45 และ 0.5 ซึ่งกำหนดค่ากำลังรับแรงอัดไว้สามค่า 300, 350 และ 450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลแทนมวลรวมหยาบตามธรรมชาติ คือ 25, 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ใช้เวลาในการบ่มคอนกรีต 28 วัน จะพบได้ว่าค่ายุบตัวของคอนกรีตรีไซเคิลมีค่ายุบตัวมากกว่าปกติ 5 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ โดยมีผลโดยตรงกับการเพิ่มการแทนที่มวลรวมรีไซเคิล และคอนกรีตรีไซเคิลยังมีการดูดซึมน้ำที่มากขึ้นกว่าคอนกรีตธรรมดาถึง 40 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการแทนที่โดยมวลรวมรีไซเคิล 100 เปอร์เซ็นต์ ค่ากำลังอัดจะมีค่าลดลงประมาณ 11 ถึง 19 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบจากธรรมชาติ

Chaocan Zheng, Cong Lou, Geng Du, Xiaozhen Li, Zhiwu Liu and Liqin Li [8] ได้ทำการศึกษาและทดลองเกี่ยวกับผลกระทบการแทนที่ของมวลรวมหยาบตามธรรมชาติ (NCA) โดยมีมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (RCA) หรือมวลรวมอิฐดินเหนียวรีไซเคิล (RBA) ด้วยแรงอัด โดยการแทนที่ของมวลรวมหยาบทั้ง 3 ประเภทคือมวลรวมหยาบตามธรรมชาติ (NCA), มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (RCA) และมวลรวมอิฐดินเหนียวรีไซเคิล (RBA) ในอัตราส่วน 30, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งใช้การวัดผลที่ 28 และ 56 วัน ในการบ่มตัวอย่างจะใช้แม่แบบทรงลูกบาศก์มีขนาด 10 x 10 x 10 เซนติเมตร ซึ่งจะมีการนำคอนกรีตทั้งสามประเภทที่แข็งตัวแล้วไปทดสอบกำลังอัด ผลที่ได้คือค่ากำลังอัดของคอนกรีตจะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนร้อยละการแทนที่ของมวลรวมหยาบด้วย (RCA) และ (RBA) โดยทั่วไปคอนกรีตที่มี (RCA) มีประสิทธิภาพดีกว่าคอนกรีตที่ผสมด้วย (RBA) ซึ่งคอนกรีตแข็งตัวแล้วที่ระยะเวลา 28 วัน ที่มีการแทนที่ด้วย (RCA) หรือ (RBA) จะมีกำลังอัดลดลงเพียง 7.2 ถึง 11 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา (NCA) แต่เมื่อคอนกรีตธรรมดาถูกแทนที่ด้วย (RCA) หรือ (RBA) ในอัตราส่วน 100 เปอร์เซ็นต์ ค่ากำลังรับแรงอัดจะตกมากสุดที่คือ 9.6 และ 13 เปอร์เซ็นต์ หลังจาก 28 วันไปแล้วมวลรวมอิฐดินเหนียวรีไซเคิล (RBA) จะมีการพัฒนาความแข็งแรงช้ามากในขณะที่มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (RCA) ยังมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง

Tomas U. Ganiron Jr [9] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการนำเศษคอนกรีตที่ใช้แล้วหรือที่เรียกกันว่า Construction and Demolition Waste (C&D) มาใช้เป็นมวลรวมละเอียดในซีเมนต์มอร์ต้า จากงานวิจัยครั้งนี้ต้องการศึกษาค่าความสามารถในการรับแรงอัดประลัยของซีเมนต์มอร์ต้าที่ 7, 14, 21 และ 28 วัน ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)

ตัวอย่างการทดลอง	ค่ากำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)			
	7 (วัน)	14 (วัน)	21 (วัน)	28 (วัน)
Standard Mix	17.492	15.786	17.78	19.86
Concrete Debris Mix	11.412	14.176	16.286	16.384

ที่มา: Tomas U. Ganiron Jr [9]

จากการทดลองสรุปได้ว่าค่ากำลังรับแรงอัดประลัยของซีเมนต์มอร์ต้าโดยการผสมมวลรวมละเอียดรีไซเคิลที่ระยะเวลาทดสอบ 7, 14, 21 และ 28 วัน จะมีค่าลดลงเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับซีเมนต์มอร์ต้าผสมมวลรวมละเอียดจากธรรมชาติ

Adel El-Kurdey [10] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในซีเมนต์มอร์ต้า โดยการกำหนดปัจจัยที่ส่งผลต่อการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ซึ่งจะแบ่งกลุ่มตัวอย่างการทดลองออกเป็น 5 กลุ่ม แต่ละกลุ่มแบ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อการสึกกร่อนได้ดังนี้ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์, ระยะเวลาขณะบ่มตัวอย่าง, เส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม และระยะหุ้มเหล็กของตัวอย่างการทดลองตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 7 และตารางที่ 8

ตารางที่ 7 ค่าความเข้มข้นของการกัดกร่อนเหล็กเสริม

อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์	ระยะเวลาที่ใช้บ่ม (วัน)	Iron Loss (กรัม)
0.3	7	6.68
0.4	7	17.83
0.6	7	27.15
0.4	3	22.16
0.4	7	17.83
0.4	28	13.75

ที่มา: Adel El-Kurdey [10]

ตารางที่ 8 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างระยะหุ้มของคอนกรีตต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กเสริมและมวลที่สูญเสียไปของเหล็กเสริม

เส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม (มม.)	ระยะหุ้ม (มม.)	อัตราส่วนระยะหุ้มของคอนกรีตต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม	Iron Loss (กรัม)
6	34.5	2.64	13.07
13	31	2.38	17.83
22	26.5	1.18	24.50
26	24.5	0.94	27.46

ที่มา: Adel El-Kurdey [10]

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการสึกกร่อนของเหล็กเสริมเพิ่มมากขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นตาม หรือปริมาณซีเมนต์ยิ่งน้อยส่งผลให้เหล็กเสริมสึกกร่อนง่ายขึ้น และปริมาณของเหล็กเสริมที่หลุดออกมาจะมีปริมาณลดลงตามระยะเวลาในการบ่ม ในช่วงแรกค่าความเข้มข้นของคลอไรด์จะมีปริมาณมากส่งผลให้เหล็กจะสึกกร่อนออกมามากแต่เมื่อยิ่งบ่มนานมากขึ้น ค่าความเข้มข้นของคลอไรด์จะลดลงปริมาณเหล็กเสริมที่หลุดออกมาจะน้อยลงตามความเข้มข้นของการกัดกร่อนขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างและความหนาจากระยะเหล็กเสริมถึงขอบของตัวอย่างการทดลอง ถ้าความหนาจากระยะเหล็กเสริมถึงขอบของตัวอย่างมีค่าน้อยลงค่าความต้านทานการสึกกร่อนจะยิ่งน้อยตามไปด้วย เพราะว่าสารละลายคลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้าไปได้ง่ายขึ้น

3. ผลการวิจัย

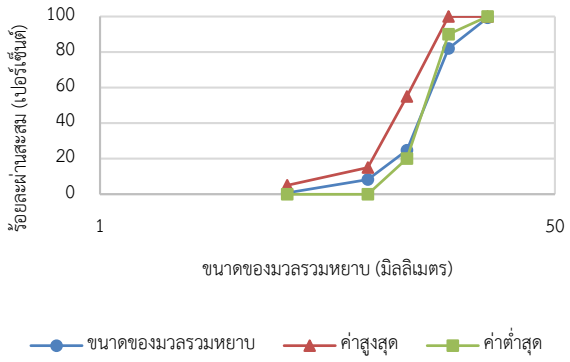
จากการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิลและมวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบย่อยซ้ำ เมื่อนำมาแทนที่มวลรวมหยาบจากธรรมชาติ โดยจะแสดงผลการทดลองดังนี้ การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ, การทดสอบหาค่าความหนาแน่น, การหาค่าอัตราการดูดซึมน้ำของมวลรวมรีไซเคิล, การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมมวลรวมรีไซเคิลและการทดสอบหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมด้วยวิธีวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ แบบเร่งไฟฟ้า 6 โวลต์ได้ดังนี้

3.1 การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบส่วนผสม

จากผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตโดยมีค่ากำลังรับแรงอัดเป้าหมายคือ 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร วัสดุที่ใช้ในการทดสอบมีดังนี้ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, หิน, ทราย, มวลรวมหยาบรีไซเคิล และมวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบย่อยซ้ำ โดยจะแสดงผลการทดสอบได้ดังนี้ การทดสอบหาค่าโมดูลัสความละเอียดของหิน ดังแสดงในตารางที่ 9 และรูปที่ 2 ส่วนการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์, การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะรวม, การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะปรากฏ และการทดสอบหาค่าความหนาแน่นของมวลรวมหยาบแห้ง ดังแสดงในตารางที่ 10

ตารางที่ 9 การทดสอบหาขนาดคละของมวลรวมหยาบ

เบอร์ตะแกรง	น้ำหนักหินค้างตะแกรง (กรัม)	เปอร์เซ็นต์ค้าง	เปอร์เซ็นต์ค้างสะสม	เปอร์เซ็นต์ผ่านสะสม
1	70	0.709	0.709	99.291
¾	1710	17.325	18.034	81.966
½	5650	57.244	75.279	24.721
⅜	1630	16.515	91.793	8.207
No.4	730	7.396	99.189	0.811
pan	80	0.811	100.000	0.000



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผ่านสะสมกับขนาดของมวลรวมหยาบ

ตารางที่ 10 ผลการทดสอบคุณสมบัติของส่วนผสมที่ใช้ในการออกแบบ

การทดสอบคุณสมบัติ	ปูนซีเมนต์	ทราย	หิน	มวลรวมหยาบรีไซเคิล	มวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบย่อยซ้ำ
ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์	3.217	-			
ความถ่วงจำเพาะรวม (อิ่มตัวผิวแห้ง)	-	2.572	2.609	2.483	2.343
ความถ่วงจำเพาะรวม (แห้ง)		2.544	2.601	2.386	2.185
ความถ่วงจำเพาะปรากฏ		2.618	2.622	2.643	2.595
ร้อยละการดูดซึมน้ำ		1.112	0.310	4.065	7.241
ความหนาแน่นของมวลรวมหยาบแห้ง (กก./ลบ.ม.)		-	1,512		

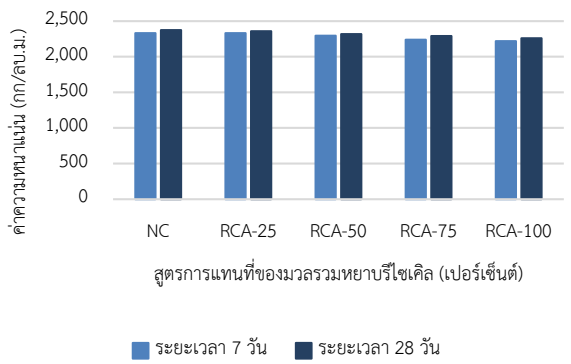
จากผลการทดสอบการหาขนาดคละของมวลรวมหยาบ ดังแสดงในตารางที่ 9 และรูปที่ 2 เมื่อนำผลการทดสอบดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับขนาดของมวลรวมหยาบตามมาตรฐาน ASTM C33 [13] จะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์ค้างของตะแกรงเบอร์ ¾ นิ้ว คือ 17.325 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่ามากกว่า 15 เปอเซ็นต์ของปริมาณหินที่ใช้ในการทดสอบ ดังนั้นขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหรือ Maximum Size คือตะแกรงเบอร์ 1 นิ้ว เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบส่วนผสม

3.2 ผลการทดลองการหาค่าความหนาแน่นของคอนกรีต

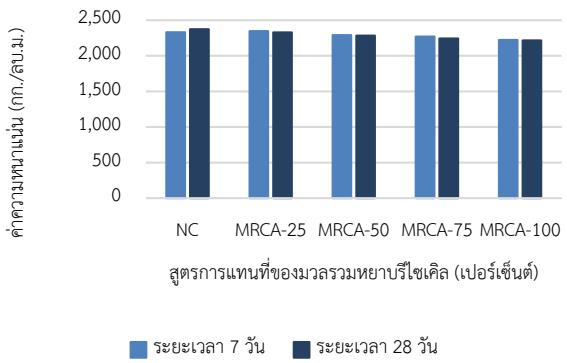
จากการทดลองหาค่าความหนาแน่นของคอนกรีตผสมมวลรวมรีไซเคิลด้วยตัวอย่างทรงกระบอก กำลังอัดที่ออกแบบไว้ 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยมีระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบคือ 7 และ 28 วัน โดยจะแสดงผลการทดสอบการหาค่าความหนาแน่น ดังแสดงในตารางที่ 11 และเมื่อนำค่าความหนาแน่นของมวลรวมรีไซเคิลมาเปรียบเทียบกันที่ระยะเวลา 7 และ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 3 และรูปที่ 4

ตารางที่ 11 ค่าความหนาแน่นของตัวอย่างทรงกระบอก

การแทนที่	กำลังอัดที่ออกแบบไว้ (กก./ตร.ซม.)	ร้อยละการแทนที่ (เปอร์เซ็นต์)	ค่าความหนาแน่นของคอนกรีตที่ 7 วัน (กก./ลบ.ม.)	ค่าความหนาแน่นของคอนกรีตที่ 28 วัน (กก./ลบ.ม.)
มวลรวมธรรมชาติ	240	0	2,330.863	2,374.047
มวลรวมหยาบรีไซเคิล		25	2,331.720	2,357.703
		50	2,294.528	2,316.674
		75	2,238.494	2,290.039
		100	2,219.621	2,258.830
มวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบย่อยซ้ำ		25	2,345.588	2,327.298
		50	2,290.461	2,282.558
		75	2,269.287	2,243.700
		100	2,223.577	2,216.822



รูปที่ 3 ค่าความหนาแน่นของมวลรวมหยาบรีไซเคิล (ทรงกระบอก)



รูปที่ 4 ค่าความหนาแน่นของมวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบย่อยซ้ำ (ทรงกระบอก)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบทรงกระบอกจะมีค่าลดลงตามอัตราส่วนการแทนที่ของมวลรวมหยาบรีไซเคิลและมวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบย่อยซ้ำที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ นราวิชญ์ และคณะ [4] และงานวิจัยของ Vilson Abreu, luis Evangelista and Jorge de brito [5]

3.3 อัตราการดูดซึมน้ำของมวลรวมรีไซเคิลที่ใช้จริง

จากสูตรการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตเมื่อทำการผสมจริงแล้วจะสามารถหาปริมาณน้ำที่ใช้จริงได้จากการเพิ่มปริมาณน้ำเข้าไปในเครื่องโม่ขณะทำการทดสอบเพื่อให้ได้ค่ายุบตัว (Slump Test) ประมาณ 10-12 เซนติเมตร โดยจะแสดงปริมาณน้ำที่ใช้จริงและอัตราการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ของมวลรวมหยาบรีไซเคิลและมวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบย่อยซ้ำ ดังแสดงในตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ปริมาณน้ำที่ใช้จริงในการแทนที่ด้วยมวลรวมรีไซเคิล

การแทนที่	ร้อยละการแทนที่ (เปอร์เซ็นต์)	น้ำที่ใช้จริง (กก.)	อัตราการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้น (เปอร์เซ็นต์)
มวลรวมหยาบจากธรรมชาติ	0	217.990	0
มวลรวมหยาบรีไซเคิล	25	217.990	0
	50	236.853	8.653
	75	241.569	10.81
	100	251.000	15.143
มวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบย่อยซ้ำ	25	233.552	7.139
	50	241.569	10.817
	75	246.284	12.979
	100	265.147	21.633

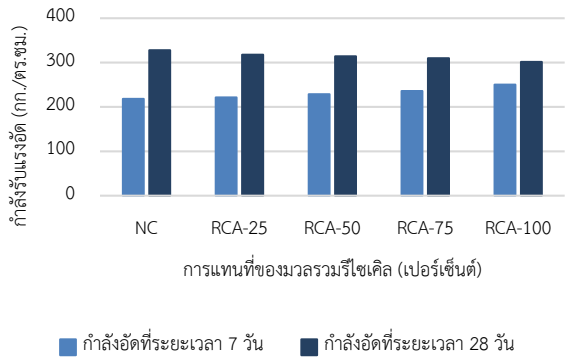
จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าร้อยละการแทนที่ของมวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบย่อยซ้ำจะมีค่าอัตราการดูดซึมน้ำที่มากกว่าการแทนที่ของมวลรวมหยาบรีไซเคิล และเมื่อนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับข้อกำหนด วสท. 1014-46 [11] โดยร้อยละการแทนที่ของมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่ 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์ กับร้อยละการแทนที่ของมวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบย่อยซ้ำที่ 25 เปอร์เซ็นต์ จัดอยู่ในระดับชั้นคุณภาพที่ 2 ซึ่งเป็นเศษคอนกรีตที่มีค่าอัตราการดูดซึมน้ำไม่เกินร้อยละ 10 ค่าความถ่วงจำเพาะ (สภาพแห้ง) ไม่ต่ำกว่า 2.00 และค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้สามารถรับแรงอัดได้ไม่เกิน 500 กก/ตร.ซม. และมีแนวโน้มผลการทดลองการหาค่าอัตราการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบรีไซเคิลและมวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบย่อยซ้ำไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยของ เทิดศักดิ์ สายสุทธิ์ [3] งานวิจัยของ Vilson Abreu , luis Evangelista and Jorge de brito [5] และงานวิจัยของ Job Thomas, Nassif Nazeer Thaickavil and P.M. Wilson [7]

3.4 ผลการทดลองการหาค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

จากผลทดลองการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบจากธรรมชาติกับคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิล โดยใช้แบบหล่อของตัวอย่างทรงกระบอกที่ระยะเวลา 7 วัน ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิลจะมีค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบธรรมชาติ ซึ่งมีแนวโน้มของผลการทดลองไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยของ Vilson Abreu, luis Evangelista and Jorge de brito [5] ส่วนที่ระยะเวลา 28 วัน ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิลจะมีค่ากำลังรับแรงอัดที่ต่ำกว่าค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบธรรมชาติ จากผลการทดลองดังกล่าวสรุปได้ว่าค่าแนวโน้มของผลการทดลองไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยของ เทิดศักดิ์ สายสุทธิ์ [3] งานวิจัยของ Job Thomas, Nassif Nazeer Thaickavil and P.M. Wilson [7] งานวิจัยของ Chaocan Zheng , Cong Lou, Geng Du, Xiaozhen Li, Zhiwu Liu and Liqin Li [8] และงานวิจัยของ Tomas U. Ganiron Jr [9] ดังแสดงในตารางที่ 13 และรูปที่ 5

ตารางที่ 13 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิล

กำลังอัดที่ออกแบบไว้ (กก./ตร.ซม.)	ร้อยละการแทนที่ (เปอร์เซ็นต์)	ค่ายุบตัว (ซม.)	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)		อัตราการพัฒนากำลังที่ 28 วัน (เปอร์เซ็นต์)
			7 วัน	28 วัน	
240	0	11	217.932	327.545	100.000
	25	11	221.459	317.618	96.969
	50	10	228.710	313.898	95.833
	75	10.5	235.653	309.805	94.584
	100	10.5	250.323	301.372	92.009

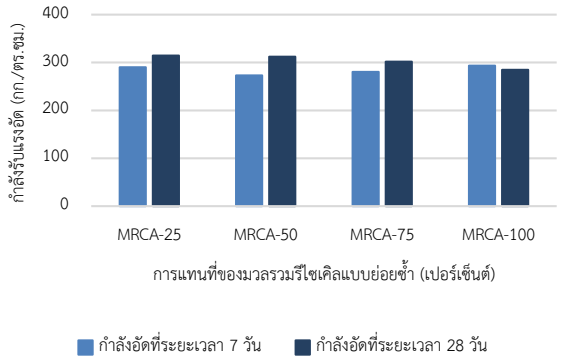


รูปที่ 5 เปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิล (ทรงกระบอก)

จากผลการทดลองการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบย่อยซ้ำ สรุปได้ว่าค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบย่อยซ้ำของตัวอย่างทรงกระบอกที่ระยะเวลา 7 วัน ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าสูงกว่าค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิล ส่วนที่ระยะเวลา 28 วัน ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบย่อยซ้ำจะมีค่ากำลังรับแรงอัดที่ต่ำกว่าค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิล ซึ่งมีแนวโน้มของผลการทดลองไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยของ Vilson Abreu, luis Evangelista and Jorge de brito [5] ดังแสดงในตารางที่ 14 และรูปที่ 6

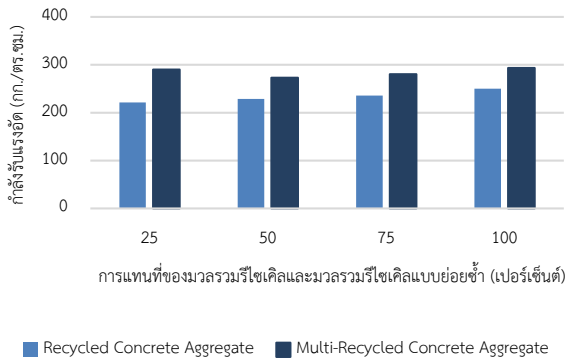
ตารางที่ 14 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบย่อยซ้ำ

กำลังอัดที่ออกแบบไว้ (กก./ตร.ซม.)	ร้อยละการแทนที่ (เปอร์เซ็นต์)	ค่ายุบตัว (ซม.)	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)		อัตราการพัฒนากำลังที่ 28 วัน (เปอร์เซ็นต์)
			7 วัน	28 วัน	
240	25	11	289.972	314.403	95.988
	50	10	273.201	312.091	95.282
	75	10.5	280.290	301.676	92.102
	100	10.5	293.429	284.824	86.957



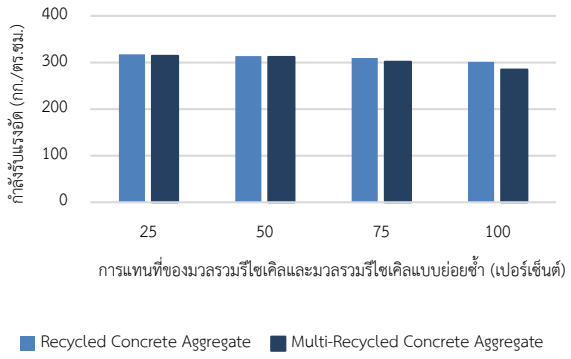
รูปที่ 6 เปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบย่อยซ้ำ (ทรงกระบอก)

เมื่อนำค่ากำลังรับแรงอัดของมวลรวมหยาบรีไซเคิลและมวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบย่อยซ้ำของตัวอย่างทรงกระบอกที่ระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง 7 วัน มาเปรียบเทียบกันจะเห็นได้ว่าค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิล (RCA) 100 เปอร์เซ็นต์ มีค่ากำลังรับแรงอัดมากที่สุด และค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบย่อยซ้ำ (MRCA) 25 และ 100 เปอร์เซ็นต์ นั้นมีค่ากำลังรับแรงอัดมากที่สุดและยังมีค่ากำลงรับแรงอัดที่ใกล้เคียงกัน โดยจะแสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของมวลรวมหยาบรีไซเคิลและมวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบย่อยซ้ำที่ระยะเวลา 7 วัน (ทรงกระบอก) ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 เปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของมวลรวมหยาบรีไซเคิลและมวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบย่อยซ้ำที่ระยะเวลา 7 วัน (ทรงกระบอก)

เมื่อนำค่ากำลังรับแรงอัดของมวลรวมหยาบรีไซเคิลและมวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบย่อยซ้ำของตัวอย่างทรงกระบอกที่ระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง 28 วัน มาเปรียบเทียบกันจะเห็นได้ว่าค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิล (RCA) 25 เปอร์เซ็นต์ มีค่ากำลังรับแรงอัดมากที่สุด และค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบย่อยซ้ำ (MRCA) 25 เปอร์เซ็นต์ นั้นมีค่ากำลังรับแรงอัดมากที่สุด โดยจะแสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของมวลรวมหยาบรีไซเคิลและมวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบย่อยซ้ำที่ระยะเวลา 28 วัน (ทรงกระบอก) ดังแสดงในรูปที่ 8

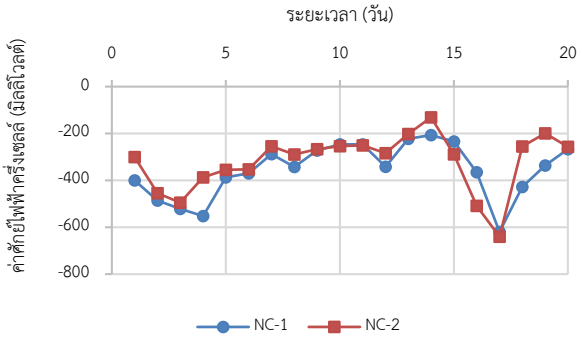


รูปที่ 8 เปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของมวลรวมหยาบรีไซเคิลและมวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบย่อยซ้ำที่ระยะเวลา 28 วัน (ทรงกระบอก)

3.5 ผลการทดลองการหาค่าความสึกกร่อนของเหล็กเสริม

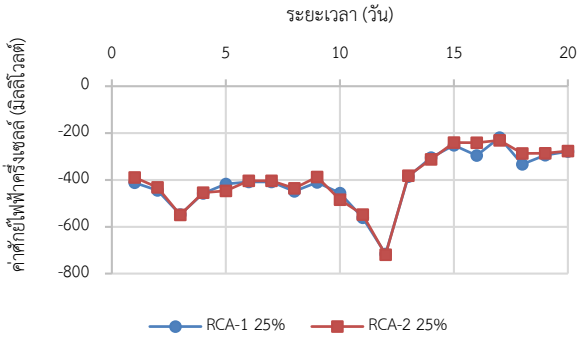
จากผลการทดลองการหาค่าความสึกกร่อนของเหล็กเสริมโดยการแทนที่ด้วยเศษคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิลในสัดส่วนร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100 โดยปริมาตร จะทดสอบด้วยวิธีการหาค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ โดยการเร่งไฟฟ้า 6 โวลต์ เพื่อเร่งปฏิกิริยาและเพิ่มอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมให้เร็วยิ่งขึ้น การทดลองนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาจำนวนวันสูงสุดที่สามารถวัดค่าศักย์ไฟฟ้าได้สูงที่สุดได้ดังนี้

การแทนที่ของ NCA สามารถวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์สูงสุดได้ดังนี้ ตัวอย่างทดสอบที่ 1 สามารถวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์สูงสุดคือ -619.667 มิลลิโวลต์ ตัวอย่างทดสอบที่ 2 สามารถวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์สูงสุดคือ -640.333 มิลลิโวลต์ ซึ่งทั้งสองตัวอย่างใช้เวลาทั้งสิ้น 17 วัน โดยจะแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์สูงสุดของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบจากธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่ 9



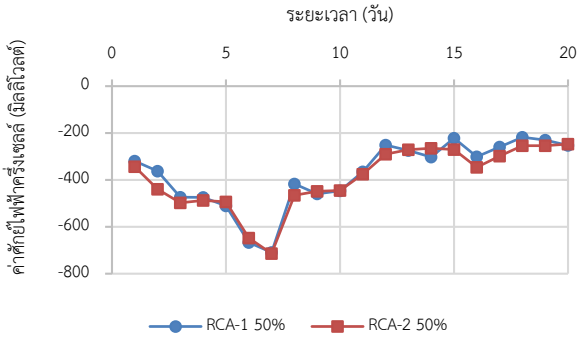
รูปที่ 9 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์สูงสุดของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบจากธรรมชาติ (NC = Normal Concrete)

การแทนที่ของ RCA ในอัตราส่วนร้อยละ 25 สามารถวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์สูงสุดได้ดังนี้ ตัวอย่างทดสอบที่ 1 สามารถวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์สูงสุดคือ -716.000 มิลลิโวลต์ ตัวอย่างทดสอบที่ 2 สามารถวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์สูงสุดคือ -719.000 มิลลิโวลต์ ซึ่งทั้งสองตัวอย่างใช้เวลาทั้งสิ้น 12 วัน โดยจะแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิล 25 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 10



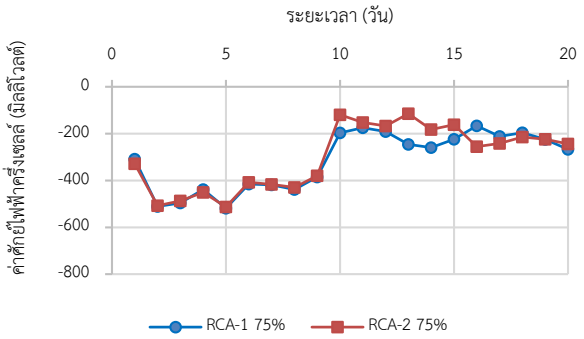
รูปที่ 10 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิล 25 เปอร์เซ็นต์ (RCA = Recycled Concrete Aggregate)

การแทนที่ของ RCA ในอัตราส่วนร้อยละ 50 สามารถวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์สูงสุดได้ดังนี้ ตัวอย่างทดสอบที่ 1 สามารถวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์สูงสุดคือ -709.667 มิลลิโวลต์ ตัวอย่างทดสอบที่ 2 สามารถวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์สูงสุดคือ -714.333 มิลลิโวลต์ ซึ่งทั้งสองตัวอย่างใช้เวลาทั้งสิ้น 7 วัน โดยจะแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิล 50 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 11



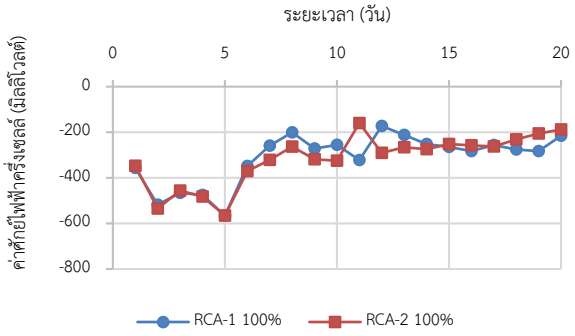
รูปที่ 11 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิล 50 เปอร์เซ็นต์ (RCA = Recycled Concrete Aggregate)

การแทนที่ของ RCA ในอัตราส่วนร้อยละ 75 สามารถวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์สูงสุดได้ดังนี้ ตัวอย่างทดสอบที่ 1 สามารถวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์สูงสุดคือ -518.000 มิลลิโวลต์ ตัวอย่างทดสอบที่ 2 สามารถวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์สูงสุดคือ -512.667 มิลลิโวลต์ ซึ่งทั้งสองตัวอย่างใช้เวลาทั้งสิ้น 5 วัน โดยจะแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิล 75 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิล 75 เปอร์เซ็นต์ (RCA = Recycled Concrete Aggregate)

การแทนที่ของ RCA ในอัตราส่วนร้อยละ 100 สามารถวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์สูงสุดได้ดังนี้ ตัวอย่างทดสอบที่ 1 สามารถวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์สูงสุดคือ -565.333 มิลลิโวลต์ ตัวอย่างทดสอบที่ 2 สามารถวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์สูงสุดคือ -565.667 มิลลิโวลต์ ซึ่งทั้งสองตัวอย่างใช้เวลาทั้งสิ้น 5 วัน โดยจะแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิล 100 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 13 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์สูงสุดของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิล 100 เปอร์เซ็นต์ (RCA = Recycled Concrete Aggregate)

จากผลการทดลองการหาค่าอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมด้วยวิธีการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-cell potential) โดยการเร่งไฟฟ้า 6 โวลต์ เมื่อนำผลการทดลองดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยเรื่องประสิทธิภาพของระบบป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กเสริมโดยวิธีกัลวานิกคาโทดิกของ สลิลา, รักวณิชย์ และวันชัย [6] ซึ่งจะเปรียบเทียบค่าอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมโดยไม่ใช้ระบบป้องกันการเกิดสนิมจะแสดงให้เห็นว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่ของมวลรวมหยาบรีไซเคิลมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย และจากงานวิจัยของ Adel El-Kurdey [10] ซึ่งได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการสึกกร่อนของเหล็กเสริมในซีเมนต์มอร์ต้า ซึ่งสามารถสรุปปัจจัยที่ส่งผลกระทบได้ดังนี้ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์, ระยะเวลาขณะบ่มตัวอย่าง, เส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม และระยะหุ้มเหล็กเสริม เมื่อกำหนดให้ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการกัดกร่อนของเหล็กเสริมเป็นค่าคงที่ โดยจะกำหนดปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการกัดกร่อนของเหล็กเสริมใหม่ คืออัตราส่วนการแทนที่ของมวลรวมหยาบรีไซเคิล ซึ่งเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่ของมวลรวมหยาบรีไซเคิล จะส่งผลให้ค่าอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

4. สรุปผลการวิจัย

1. ค่าความหนาแน่นของคอนกรีตผสมมวลรวม หยาบรีไซเคิล (RCA) และคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบย่อยซ้ำ (MRCA) สรุปได้ว่าเมื่อนำค่าความหนาแน่นของ RCA กับมวลรวมหยาบจากธรรมชาติ (NCA) ไปเปรียบเทียบกัน ค่าความหนาแน่นของ RCA จะมีค่าน้อยกว่าค่าความหนาแน่นของ NCA อันเนื่องมาจากค่าความถ่วงจำเพาะรวมของมวลรวมหยาบรีไซเคิลมีค่าน้อยกว่ามวลรวมหยาบธรรมชาติ ส่งผลให้คอนกรีต RCA นั้นจะมีความหนาแน่นน้อยกว่า NCA ส่วนการแทนที่ของ MRCA พบว่าค่าความหนาแน่นมีค่าน้อยกว่า RCA อันเนื่องมาจากค่าความถ่วงจำเพาะรวมของมวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบย่อยซ้ำ นั้นมีค่าน้อยกว่า มวลรวมหยาบรีไซเคิลส่งผลให้คอนกรีต MRCA นั้นมีค่าความหนาแน่นน้อยกว่าคอนกรีต RCA

2. อัตราการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบรีไซเคิลและมวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบย่อยซ้ำ สรุปได้ว่าเมื่อแทนที่อัตราส่วนร้อยละของมวลรวมหยาบรีไซเคิลเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าอัตราการดูดซึมน้ำเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย และเมื่อแทนที่อัตราส่วนร้อยละด้วยมวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบย่อยซ้ำ ทำให้ทราบว่ามวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบย่อยซ้ำนั้นจะมีค่าอัตราการดูดซึมน้ำที่มากกว่าการแทนที่ของมวลรวมหยาบรีไซเคิล
3. การแทนที่ของมวลรวมหยาบรีไซเคิลในอัตราส่วนร้อยละ25 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นเศษคอนกรีตที่มีค่าอัตราการดูดซึมน้ำไม่เกินร้อยละ 10 ค่าความถ่วงจำเพาะ (สภาพแห้ง) ไม่ต่ำกว่า 2.00 จึงสรุปได้ว่าการแทนที่ของมวลรวมหยาบรีไซเคิลดังกล่าวจัดอยู่ในระดับชั้นคุณภาพที่ 2 ส่วนการแทนที่ของมวลรวมหยาบรีไซเคิล 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์ จัดอยู่ในระดับชั้นคุณภาพที่ 3 ตามข้อกำหนด วสท. 1014-46 [11]
4. กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิลและคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบย่อยซ้ำ สรุปได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนร้อยละการแทนที่ของมวลรวมหยาบรีไซเคิลและมวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบย่อยซ้ำมากยิ่งขึ้น จะส่งผลให้ค่าความสามารถในการรับแรงอัดมีค่าลดลงตามอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น และเมื่อนำค่ากำลังรับแรงอัดระหว่างมวลรวมหยาบรีไซเคิลกับมวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบย่อยซ้ำมาเปรียบเทียบกันคอนกรีตที่ผสมด้วยเศษมวลรวมหยาบรีไซเคิลจะสามารถรับแรงอัดได้มากกว่าคอนกรีตที่ผสมเศษมวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบย่อยซ้ำ
5. อัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมจากการทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์โดยใช้วิธีเร่งกระแสไฟฟ้า 6 โวลต์ เพื่อให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมนั้นเร็วยิ่งขึ้น และเมื่อนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกันโดยการเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่ของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิลร้อยละ25, 50, 75 และ 100 โดยปริมาตร ผลการทดลองที่ได้คือเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่ของมวลรวมหยาบรีไซเคิลมากยิ่งขึ้น จะส่งผลให้อัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมนั้นเร็วกว่าเดิม แต่เมื่อลดปริมาณอัตราส่วนการแทนที่ของมวลรวมหยาบรีไซเคิลลงเรื่อยๆ อัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมจะมีค่าลดลงตามไปด้วย

เอกสารอ้างอิง

[1] สำเริง รักช้อน. 2552. ทฤษฎีและการทดสอบคอนกรีตเทคโนโลยี. ครั้งที่ 2. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
[2] วันชัย สะตะ. 2560. คอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม. ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.
[3] เทิดศักดิ์ สายสุทธิ์. 2555. RCA จากส่วนที่เหลือของเสาเข็มคอนกรีต, น. 1-11. ในรายการประชุมแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 9. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม.
[4] นราวิชญ์, อภิสิทธิ์ และสุภาวดี. 2019. การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตโดยใช้คอนกรีตทดสอบแล้วเป็นมวลรวมรีไซเคิล. ปริญญานิพนธ์ปริญญาตรี, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน.
[5] Vilson Abreu, Luís Evangelista and Jorge de Brito. 2018. The effect of multi-recycling on the mechanical performance of coarse recycled aggregates concrete. Construction and Building Materials 188: 480-489.
[6] สลิลา รักวณิชย์ และวันชัย ยอดสุดใจ. 2017. ประสิทธิภาพของระบบป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กเสริมโดยวิธีกัลวานิกคาโทดิก, น. 516-523. ในรายการประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 53. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์บางเขน, กรุงเทพมหานคร.
[7] Job Thomas, Nissif Nazeer Thaickavil and P.M.Wilson. 2018. Strength and durability of concrete containing crushed concrete aggregate. Journal of Building Engineering: 349-365.
[8] Chaocan Zheng, Cong Lou, Geng Du, Xiaozhen Li, Zhiwu Liu and Liqin Li. 2018. Mechanical properties of recycled concrete with demolished waste concrete aggregate and clay brick aggregate. Results in Physics 9: 1317-1322.
[9] Tomas U. Ganiron Jr. 2015. Recycling concrete debris from construction and demolition waste. International Journal of Advanced Science and Technology Vol.77: 7-24.
[10] Adel El-Kurdey. 1992. Corrosion of reinforced steel in concrete. Institute of Graduate Studies & Research, Alexandria University.
[11] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา. 2540. ข้อกำหนดมาตรฐานวัสดุและการก่อสร้างสำหรับโครงสร้างคอนกรีต. ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพมหานคร.
[12] ASTM C 876-91. 1999. Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel.
[13] ASTM C33/C33M-16. 2016. Standard Specification for Concrete Aggregates.