วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา
Engineering Journal of Research and Development
วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์
The Engineering Institute of Thailand under H.M. The King's Patronage
ปีที่ 37 ฉบับที่ 1 มกราคม-มีนาคม 2569
Volume 37 Issue 1 January-March 2026
Received 9 November 2025
Revised 1 March 2026
Accepted 25 March 2026

ผลกระทบของชนิดมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลต่อความคงทนของคอนกรีตภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลของประเทศไทย

EFFECTS OF RECYCLED CONCRETE AGGREGATE TYPES ON THE DURABILITY OF CONCRETE UNDER MARINE ENVIRONMENTS IN THAILAND

อัญชนา กิจจานนท์[1], ลีน่า ปรัก[2], และทวีชัย สำราญวานิช[3,4*]
[1]อาจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
[2]ผู้ช่วยศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
[3]รองศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
[4*]รองศาสตราจารย์, ศูนย์ความยั่งยืนวิศวกรรมระบบเมืองและการขนส่ง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
*Corresponding author Email: twc@buu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้มุ่งศึกษาผลกระทบของชนิดของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตภายหลังเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลของไทย โดยใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่ได้จากโรงงานคอนกรีตสำเร็จรูป (RAA) และมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่ได้จากโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จ (RAB) แทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติ (NA) บางส่วนที่ร้อยละ 10, 25 และ 50 ส่วนผสมคอนกรีตใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.30 ทำการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ การเกิดสนิมของเหล็กเสริม และกำลังอัดของคอนกรีตภายหลังเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 2 และ 7 ปี จากผลการทดลองพบว่า คอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลทั้งสองชนิดมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมสูงกว่าคอนกรีตล้วนที่ใช้มวลรวมหยาบธรรมชาติเพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตาม กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลทั้งสองชนิดต่ำกว่าคอนกรีตล้วนที่ใช้มวลรวมหยาบธรรมชาติ เมื่อพิจารณาผลของร้อยละการแทนที่ของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลพบว่า ความต้านทานคลอไรด์ ความต้านทานการเกิดสนิมและกำลังอัดของคอนกรีตลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณการแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล นอกจากนี้ คอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลชนิด RAA มีความต้านทานคลอไรด์และกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลชนิด RAB

คำสำคัญ: มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล; เถ้าลอย; คอนกรีต; ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์; การเกิดสนิมของเหล็กเสริม

ABSTRACT

This paper investigates the effects of recycled concrete aggregate (RCA) types on the chloride penetration resistance and compressive strength of concrete exposed to marine environments in Thailand. Two types of recycled coarse aggregates were

Aunchana Kijjanon[1], Lyna Prak[2] and Taweechai Sumranwanich[3, 4*]
[1]Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi
[2]Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi
[3]Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University
[4*]Associate Professor, Sustainable Urban System Engineering and Transport Center, Faculty of Engineering, Burapha University

used: RCA obtained from precast concrete plants (RAA) and RCA from ready-mixed concrete plants (RAB), which were partially replaced with natural coarse aggregate (NA) at replacement levels of 10%, 25%, and 50%. The concrete mixtures were designed with a water-to-binder ratio of 0.40 and a fly ash-to-binder ratio of 0.30. Tests on chloride penetration resistance, reinforcement corrosion, and compressive strength were conducted after 2 and 7 years of marine exposure. The experimental results revealed that cement-fly ash concrete incorporating both types of recycled concrete aggregate exhibited higher resistance to chloride penetration and reinforcement corrosion than cement-only concrete with NA. However, the compressive strength of recycled aggregate concrete was lower than that of the control mix. When the percentage of recycled concrete aggregate replacement was considered, it was found that increasing the replacement ratio of recycled coarse aggregate led to reductions in chloride resistance, corrosion resistance, and compressive strength. Furthermore, concrete containing RAA showed higher chloride resistance and compressive strength than that containing RAB.

Keywords: recycled concrete aggregate; fly ash; concrete; chloride penetration resistance; reinforcement corrosion

1. บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่ได้รับความนิยมสูงที่สุดในโลก เนื่องจากมีต้นทุนต่ำ ความสามารถในการรับแรงสูง และความคงทนที่เหมาะสมต่อการใช้งานในโครงสร้างหลากหลายประเภท อย่างไรก็ตาม การผลิตคอนกรีตต้องอาศัยมวลรวมธรรมชาติ เช่น ทรายและหิน ซึ่งมีปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามการเติบโตของอุตสาหกรรมก่อสร้าง ส่งผลให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การกัดเซาะตลิ่งแม่น้ำ การทำลายภูเขา และการลดลงของทรัพยากรธรรมชาติ [1–2] เพื่อบรรเทาผลกระทบดังกล่าว แนวทางหนึ่งที่ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย คือ การนำคอนกรีตเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป โรงงานคอนกรีตผสมเสร็จ หรือจากการรื้อถอนอาคาร มาใช้เป็นมวลรวมหยาบทดแทนในคอนกรีตใหม่ [3–6] ซึ่งเป็นแนวทางสำคัญต่อการส่งเสริมเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular economy) และการพัฒนาอย่างยั่งยืนในอุตสาหกรรมก่อสร้าง อย่างไรก็ตาม มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (Recycled Concrete Aggregates: RCA) มีลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างที่แตกต่างจากมวลรวมหยาบธรรมชาติ โดยมีมอร์ตาร์เก่าติดอยู่ที่ผิว (Attached mortar) ส่งผลให้ RCA มีความหนาแน่นต่ำ ดูดซึมน้ำสูง มีความพรุนและความแข็งแรงเชิงกลต่ำ [7–9] คุณสมบัติเหล่านี้มีผลกระทบโดยตรงต่อสมบัติของคอนกรีตใหม่ ทั้งในด้านความสามารถในการทำงาน (Workability) กำลังรับแรง และความคงทนต่อสภาพแวดล้อม [7,10] ซึ่งอาจจำกัดการนำ RCA ไปใช้งานในโครงสร้างที่ต้องการความคงทนสูง

งานวิจัยจำนวนมากได้เสนอแนวทางในการปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตรีไซเคิล โดยการใช้วัสดุประสานทดแทนหรือวัสดุซีเมนต์เสริม (Supplementary Cementitious Materials: SCMs) เช่น เถ้าลอย (Fly ash), ผงหินปูน (Limestone powder) และตะกรันเตาถลุงเหล็กบด (Ground granulated blast-furnace slag, GGBFS) [11–13] วัสดุเหล่านี้ไม่เพียงช่วยปรับปรุงความแน่นของเนื้อคอนกรีตและลดความพรุน แต่ยังลดการใช้ปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นแหล่งปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลักในอุตสาหกรรมการผลิตวัสดุก่อสร้าง [14] การใช้วัสดุประสานทดแทนจึงเป็นแนวทางที่มีประโยชน์ทั้งในเชิงวิศวกรรมและสิ่งแวดล้อม

สำหรับประเทศไทย เถ้าลอยเป็นวัสดุปอซโซลานที่ได้รับการยอมรับและใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีศักยภาพในการปรับปรุงสมบัติคอนกรีตทั้งในระยะต้นและระยะยาว โดยเฉพาะในด้านการเพิ่มความสามารถในการทำงานของคอนกรีตสด ลดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และเพิ่มความต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ [15–18] นอกจากนี้ การใช้เถ้าลอยยังช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการผลิตปูนซีเมนต์ ทำให้แนวทางนี้สอดคล้องกับนโยบายการพัฒนาอย่างยั่งยืนในภาคการก่อสร้างของประเทศ แม้งานวิจัยก่อนหน้านี้จะแสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของการใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลร่วมกับวัสดุประสานทดแทน

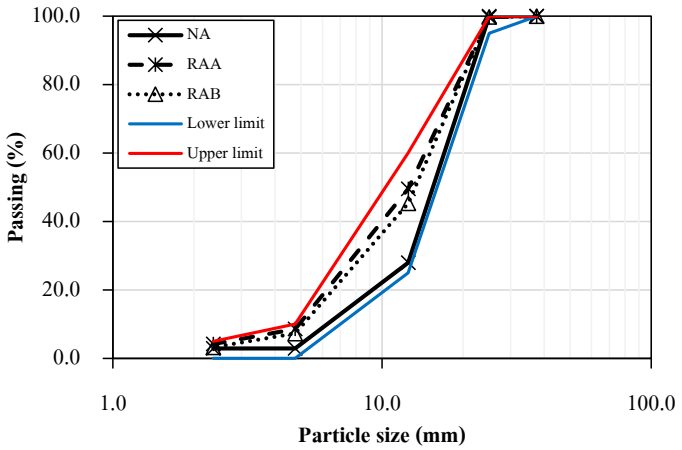
ในการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีต แต่การทดสอบส่วนใหญ่ยังคงจำกัดอยู่ในห้องปฏิบัติการภายใต้สภาวะควบคุม เช่น ความเข้มข้นคลอไรด์ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์คงที่ ซึ่งอาจไม่สะท้อนถึงพฤติกรรมของคอนกรีตในสภาวะจริง โดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมทะเลที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ความชื้น และความเข้มข้นของคลอไรด์อย่างต่อเนื่อง ปัจจัยเหล่านี้ส่งผลโดยตรงต่อกระบวนการแทรกซึมของไอออนคลอไรด์และการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาพฤติกรรมระยะยาวของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลจากโรงงานคอนกรีตสำเร็จรูป (RAA) และโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จ (RAB) แทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติในสัดส่วนร้อยละ 10, 25 และ 50 โดยผสมร่วมกับเถ้าลอยแม่เมาะชนิด 2ข แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เพื่อประเมินกำลังอัด ความต้านทานต่อการแทรกซึมคลอไรด์ และการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเลจริงของประเทศไทยในช่วงระยะเวลา 2 และ 7 ปี ผลการทดลองของการศึกษานี้จะช่วยเติมเต็มช่องว่างขององค์ความรู้เกี่ยวกับพฤติกรรมระยะยาวของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลในสภาวะจริง และเป็นข้อมูลสำคัญในการส่งเสริมการใช้วัสดุรีไซเคิลในโครงสร้างคอนกรีตอย่างยั่งยืน

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุและส่วนผสมคอนกรีต

ส่วนผสมคอนกรีตทั้งหมดใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (I) ตามมาตรฐาน มอก.15 [19] และ ASTM C150 [20] เป็นวัสดุประสานหลัก และใช้เถ้าลอยแม่เมาะ (F) ชนิด 2ข ตามมาตรฐาน มอก. 2135 [21] แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน สำหรับองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน แสดงดังตารางที่ 1 มวลรวมหยาบธรรมชาติ (NA) ที่ใช้ในการศึกษานี้ได้จากหินปูน (Limestone) ที่มีขนาดโตสุด 19 มิลลิเมตร ส่วนมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลมีสองประเภท ได้แก่ มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลจากโรงงานคอนกรีตสำเร็จรูป (RAA) ซึ่งมาจากส่วนผสมคอนกรีตที่มีกำลังอัดที่อายุ 1 วัน เท่ากับ 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลจากโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จ (RAB) ซึ่งมาจากส่วนผสมคอนกรีตที่มีกำลังอัดในช่วง 28 วัน ระหว่าง 220–270 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สำหรับมวลรวมละเอียด (S) ใช้ทรายบก โดยคุณสมบัติทางกายภาพของทั้งมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดแสดงไว้ในตารางที่ 2 และขนาดคละของมวลรวมหยาบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C33 [22] ดังแสดงในรูปที่ 1 สำหรับส่วนผสมคอนกรีตแสดงไว้ในตารางที่ 3 โดยใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลทั้งสองชนิดแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติบางส่วนที่ร้อยละ 0, 10, 25 และ 50 โดยปริมาตร ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.40 และใช้เถ้าลอยแม่เมาะชนิด 2ข แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน



รูปที่ 1 ขนาดคละของมวลรวมหยาบ

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (I)	เถ้าลอย (F)
SiO_2	19.51	36.39
Al_2O_3	4.97	16.90
Fe_2O_3	3.78	12.08
CaO	65.38	22.45
MgO	1.08	2.55
SO_3	2.16	2.91
Na_2O	0.01	1.62
K_2O	0.44	2.09
Loss on ignition (LOI)	2.27	2.10
คุณสมบัติทางกายภาพ		
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.26
ความละเอียดโดยวิธีเบลน (ตารางเซนติเมตรต่อกรัม)	3,550	2,460

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวม

มวลรวม	NA	RAA	RAB	S
ความถ่วงจำเพาะ	2.72	2.43	2.46	2.58
การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	0.66	5.30	5.54	0.97

ตารางที่ 3 ส่วนผสมคอนกรีต

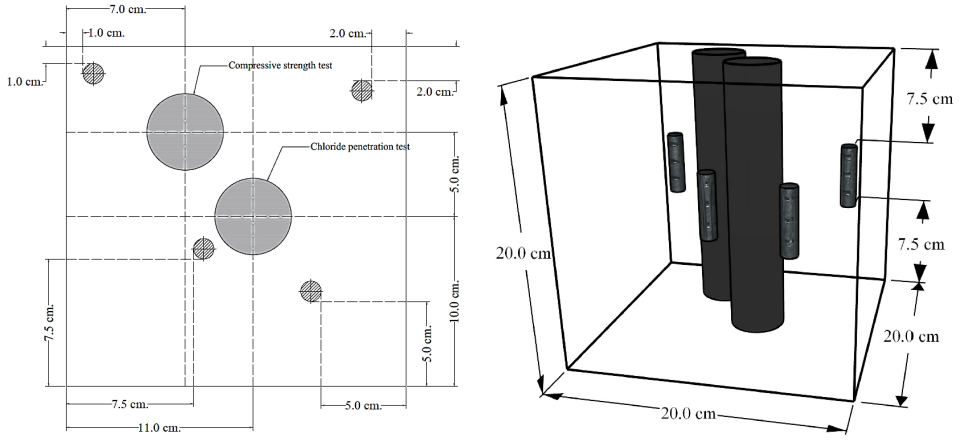
รหัสส่วนผสม	w/b	ส่วนผสมคอนกรีต (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)						
		วัสดุประสาน		น้ำ	มวลรวมละเอียด	มวลรวมหยาบ		
					S	NA	RAA	RAB
		I	F		(SSD)	(SSD)	(SSD)	(SSD)
I40	0.40	460	-	184	755	968	-	-
I40RAA10	0.40	460	-	184	755	875	87	-
I40RAA25	0.40	460	-	184	755	729	217	-
I40RAA50	0.40	460	-	184	755	486	434	-
I40RAB10	0.40	460	-	184	755	875	-	88
I40RAB25	0.40	460	-	184	755	729	-	220
I40RAB50	0.40	460	-	184	755	486	-	440
F30RAA10	0.40	305	131	174	755	875	87	-
F30RAA25	0.40	305	131	174	755	729	217	-
F30RAA50	0.40	305	131	174	755	486	434	-
F30RAB10	0.40	305	131	174	755	875	-	88
F30RAB25	0.40	305	131	174	755	729	-	220
F30RAB50	0.40	305	131	174	755	486	-	440

หมายเหตุ:
I40 คือ คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน, I40RAA(x) หรือ I40RAB(x) คือ คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนและใช้ RAA หรือ RAB แทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติที่ร้อยละ x
F30RAA(x) หรือ F30RAB(x) คือ คอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานและใช้ RAA หรือ RAB แทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติที่ร้อยละ x

2.2 วิธีการทดสอบ

2.2.1 การเตรียมตัวอย่าง

ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 20×20×20 ลูกบาศก์เซนติเมตร และทำการฝังเหล็กเสริม RB12 ชั้นคุณภาพ SR24 ในเนื้อคอนกรีต พร้อมกำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมไว้ที่ 1, 2, 5 และ 7.5 เซนติเมตร จากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตไปบ่มในน้ำจนกระทั่งครบระยะเวลา 28 วัน ก่อนนำไปสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณน้ำขึ้นน้ำลงที่ชายฝั่งทะเลจังหวัดชลบุรีเป็นระยะเวลา 2 และ 7 ปี เมื่อครบกำหนดจึงนำตัวอย่างขึ้นมาเจาะบริเวณกึ่งกลางของคอนกรีตเพื่อเตรียมแท่งตัวอย่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร และความสูง 20 เซนติเมตร จำนวน 2 แท่ง สำหรับใช้ในการทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีต ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 รายละเอียดการเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

2.2.2 การแทรกซึมคลอไรด์

นำแท่งคอนกรีตที่เจาะได้มาตัดแบ่งเป็นชิ้นหนา 1 เซนติเมตร จากผิวหน้าถึงความลึก 10 เซนติเมตร แล้วบดให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 เพื่อเตรียมผงตัวอย่างสำหรับทดสอบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดตามมาตรฐาน ASTM C1152 [23] โดยชั่งผงตัวอย่าง 5 กรัม เติมน้ำกลั่น 75 มิลลิลิตร และกรดไนตริกเจือจาง 1:1 จำนวน 25 มิลลิลิตร จากนั้นต้มจนกระทั่งเดือด ปล่อยทิ้งให้เย็นตัว แล้วกรองสารละลายก่อนนำไปไตเตรทด้วยเครื่อง Auto titration โดยใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรตความเข้มข้น 0.05 N เพื่อวัดปริมาณคลอไรด์ จากนั้นนำปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดแต่ละความลึกคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ (Chloride diffusion coefficient) จากสมการคำตอบของกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิคส์ ดังสมการที่ 1

$$C(x,t) = (C_s - C_i)\left[1 - \mathrm{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{D_{Cl} \times t}}\right)\right] + C_i \quad (1)$$

เมื่อ $C(x,t)$ คือ ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระยะทาง x จากผิวด้านนอกที่ระยะเวลา t (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน), D_{Cl} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต (ตารางเซนติเมตร/ ปี), C_s คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน), C_i คือ ปริมาณคลอไรด์ที่มีในคอนกรีตตั้งแต่ต้น (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน), x คือ ระยะทางจากผิวด้านนอก (เซนติเมตร), t คือ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (ปี)

2.2.3 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม

การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM G1 [24] โดยนำเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในตัวอย่างคอนกรีตแต่ละความลึกออกมาแช่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเจือจางในอัตราส่วน 1:1 เป็นระยะเวลาประมาณ 10 ถึง 15 นาที เพื่อกำจัดเนื้อสนิม จากนั้นจึงชั่งน้ำหนักเหล็กเสริมหลังการทำความสะอาด และคำนวณการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม

2.2.4 กำลังอัดของคอนกรีต

นำแท่งคอนกรีตที่ได้จากการเจาะมาตัดให้มีอัตราส่วนความชะลูด (Slenderness ratio) เท่ากับ 2:1 พร้อมปรับแต่งผิวหน้าของตัวอย่างให้เรียบและขนานกัน จากนั้นทำการทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C39 [25]

3. ผลการทดลองและอภิปราย

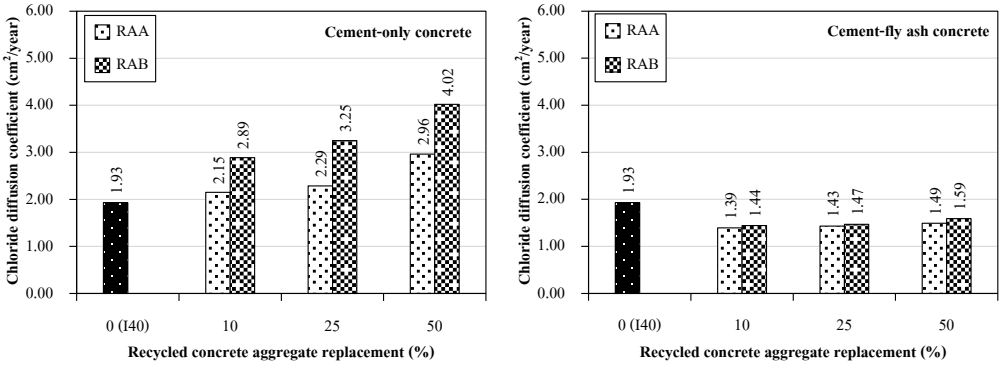
3.1 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์

รูปที่ 3 แสดงสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ (Chloride diffusion coefficient, CDC) ของคอนกรีตไม่ใช้และใช้เถ้าลอย ร่วมกับ RAA และ RAB ในสัดส่วนที่แตกต่างกันที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 2 และ 7 ปี จากรูปพบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ลดลงเมื่ออายุของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลานิกของปูนซีเมนต์และเถ้าลอยอย่างต่อเนื่อง ปฏิกิริยาเหล่านี้ก่อให้เกิดผลผลิตที่ช่วยเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นและความพรุนลดลง ส่งผลให้ความสามารถในการแพร่ของคลอไรด์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่งในคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอย

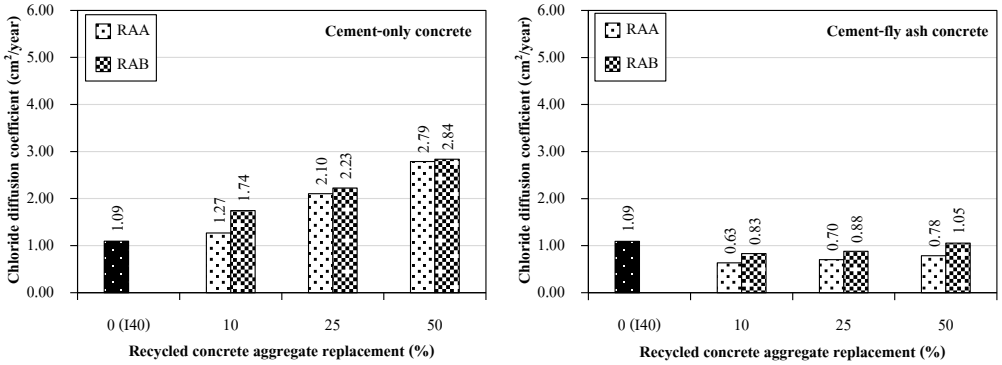
เมื่อพิจารณาผลกระทบของปริมาณการใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของ RAA และ RAB จากร้อยละ 0 เป็น 50 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งสะท้อนถึงการซึมผ่านคลอไรด์ที่มากขึ้น เนื่องจากมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลมีความพรุนสูงจากเศษเนื้อมอร์ตาร์เก่าบริเวณผิว และมีรอยแตกร้าวขนาดเล็กภายในมวลรวมที่เกิดจากกระบวนการบดย่อยเศษคอนกรีต [26] สาเหตุดังกล่าวทำให้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลมีความทึบน้ำต่ำส่งผลให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปภายในเนื้อคอนกรีตได้สูง เมื่อพิจารณาผลกระทบของชนิดของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล พบว่า คอนกรีตที่ใช้ RAA มีสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ RAB ทุกร้อยละการแทนที่ ทั้งนี้จากข้อมูลที่ได้จากโรงงานคอนกรีตสำเร็จรูปก่อนนำมาแปรใช้ใหม่เป็น RAA พบว่า เศษคอนกรีตดังกล่าวได้จากการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตให้มีกำลังอัดที่อายุ 1 วัน เท่ากับ 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ขณะที่กำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จก่อนนำมาแปรใช้ใหม่เป็น RAB มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ในช่วง 220 – 270 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ดังนั้น RAA ที่แปรใช้ใหม่จากคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงกว่าจึงมีความต้านทานคลอไรด์สูงกว่า RAB ที่แปรใช้ใหม่จากคอนกรีตที่มีกำลังอัดต่ำ คอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรี

ไซเคิลทั้งสองชนิด (RAA และ RAB) มีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดต่ำกว่าคอนกรีตล้วนอย่างชัดเจน เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลมีการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน

เมื่อเปรียบเทียบการใช้และไม่ใช้เถ้าลอยพบว่า ทุกปริมาณการแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติด้วย RAA และ RAB คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยมีสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอย เนื่องจากเถ้าลอยเป็นวัสดุปอซโซลานที่มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกสร้าง CSH และ CAH เป็นต้น นอกจากนี้ อนุภาคขนาดเล็กและกลมของเถ้าลอยสามารถเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตและรอยแตกร้าวขนาดเล็กของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล [11] ซึ่งกลไกดังกล่าวส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำเพิ่มมากขึ้น ขณะเดียวกัน การใช้เถ้าลอยช่วยเพิ่มความสามารถกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีต (Chloride binding capacity) เมื่อเทียบคอนกรีตซีเมนต์ล้วน คอนกรีตที่มีความสามารถกักเก็บคลอไรด์สูงสามารถลดการแทรกซึมคลอไรด์ภายในเนื้อคอนกรีตได้ [18] จึงทำให้คอนกรีตผสมเถ้าลอยมีความสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว



(ก) ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 2 ปี



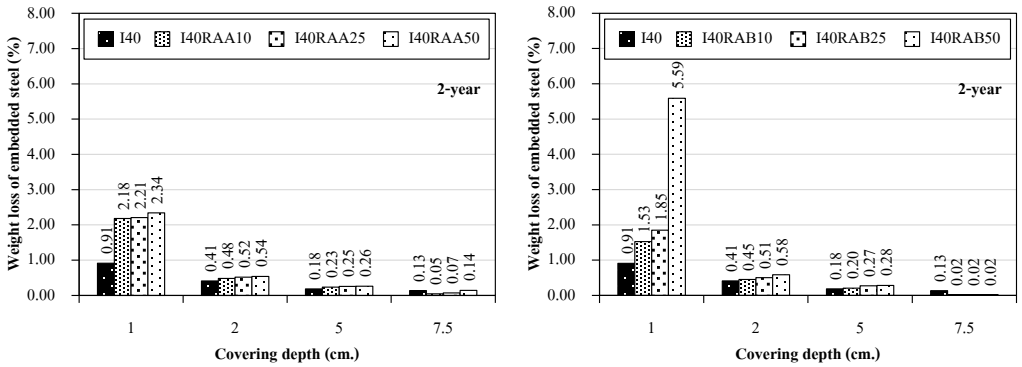
(ข) ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี

รูปที่ 3 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้และไม่ใช้เถ้าลอยร่วมกับ RAA หรือ RAB

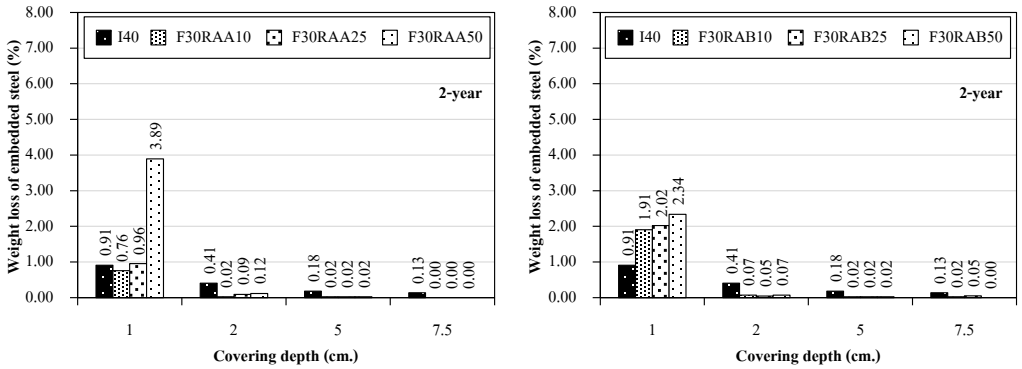
3.2 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม

การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 2 และ 7 ปี แสดงดังรูปที่ 4 และ 5 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาระยะเวลาเผชิญคลอไรด์พบว่า ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 2 ปี การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตทุกส่วนผสม

ยังอยู่ในระดับต่ำกว่าร้อยละ 6 แต่เมื่อระยะเวลาเผชิญคลอไรด์นานขึ้น จาก 2 ปี เป็น 7 ปี การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก โดยเฉพาะในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลในปริมาณสูง เช่น I40RAB50 ที่ตำแหน่งระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมเพียง 1 เซนติเมตร มีการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มจากร้อยละ 5.59 ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 2 ปี เป็นร้อยละ 41.36 ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 7 ปี ซึ่งการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมเพิ่มขึ้นกว่า 7 เท่า เนื่องจากคลอไรด์สามารถแทรกซึมผ่านเนื้อคอนกรีตได้มากขึ้นเมื่อระยะเวลานานขึ้น ส่งผลให้เหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตเกิดสนิมเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย เมื่อพิจารณาการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมทุกระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมพบว่า คอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลมีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมต่ำกว่าคอนกรีตล้วนที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล เนื่องจากการใช้เถ้าลอยช่วยปรับปรุงโครงสร้างโพรงช่องว่างของคอนกรีตทั้งจากการเติมเต็มโพรงช่องว่างในเนื้อคอนกรีตและการเติมเต็มรอยแตกร้าวขนาดเล็กของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลด้วยอนุภาคขนาดเล็กของเถ้าลอย และการเกิดผลผลิตจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอย ซึ่งช่วยลดการแทรกซึมคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีตส่งผลให้การเกิดสนิมของเหล็กเสริมต่ำกว่า แม้ว่าการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมที่ระยะความลึก 1 เซนติเมตร ส่วนใหญ่มีค่าสูงกว่าเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตล้วน อาจเป็นเพราะคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยมีปริมาณคลอไรด์วิกฤต (Critical chloride content) ต่ำกว่าคอนกรีตล้วน เนื่องจากการลดลงของ CH จากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก และการลดลงของปริมาณปูนซีเมนต์ [27-28] และจากหลายงานวิจัยพบว่า คอนกรีตผสมเถ้าลอยมีความทึบน้ำสูงกว่าคอนกรีตล้วน [18] คลอไรด์จึงแทรกซึมเข้าไปภายในเนื้อคอนกรีตได้ต่ำ และเกิดการสะสมอยู่ใกล้ผิวด้านนอกของคอนกรีต และจากการสะสมของปริมาณคลอไรด์บริเวณใกล้ผิวคอนกรีตและการที่คอนกรีตผสมเถ้าลอยมีปริมาณคลอไรด์วิกฤตต่ำส่งผลให้เหล็กเสริมบริเวณใกล้ผิวด้านนอกมีการเกิดสนิมสูง แต่เมื่อพิจารณาที่ระยะความลึก 2, 5 และ 7.5 เซนติเมตร กลับพบว่า การเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ใช้มวลรวมทั้งสองชนิดมีค่าต่ำกว่าเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตล้วนอย่างเห็นได้ชัด โดยการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร่วมกับมวลรวมทั้ง 2 ชนิด อยู่ในช่วงร้อยละ 1.62 – 11.97 ขณะที่การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตล้วนร่วมกับมวลรวมทั้ง 2 ชนิด อยู่ในช่วงร้อยละ 1.75 – 33.16 ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 7 ปี ดังนั้น คอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลทั้งสองชนิดสามารถนำมาใช้ในการลดการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ หากมีการออกแบบระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมที่เพียงพอ



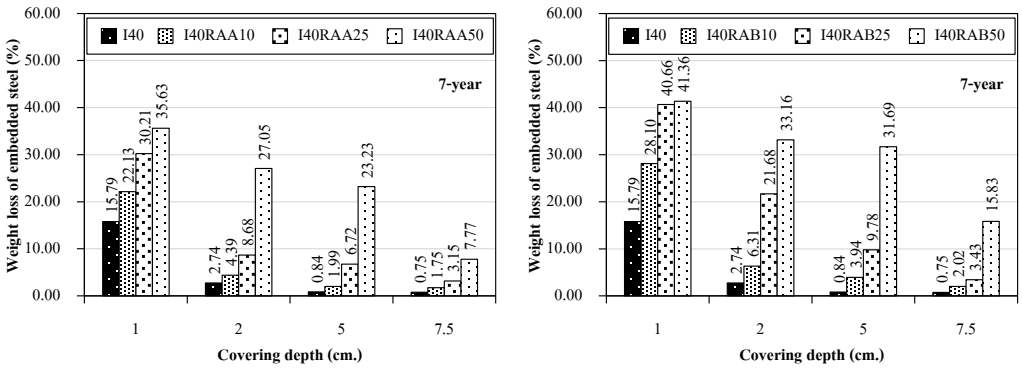
(ก) คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนร่วมกับ RAA และ RAB



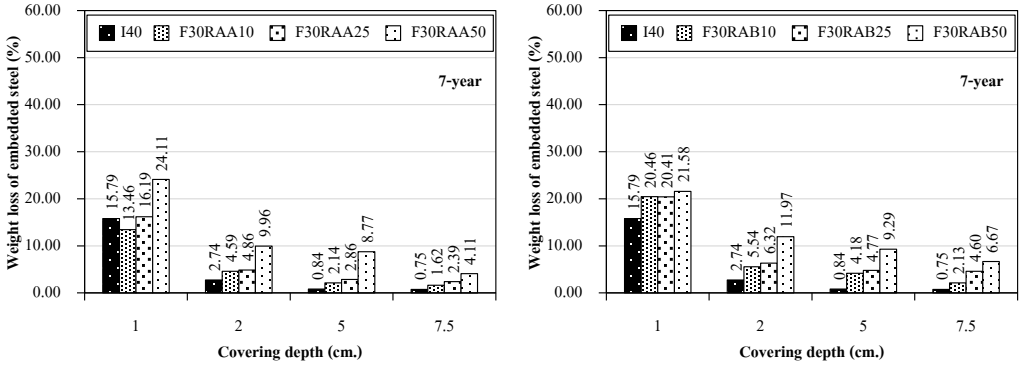
(ข) คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร่วมกับ RAA และ RAB

รูปที่ 4 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 2 ปี

นอกจากนี้การใช้ RAA และ RAB ในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้เหล็กเสริมมีการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มมากขึ้น โดยที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 2 ปี คอนกรีตล้วนที่ใช้ RAA มีการสูญเสียน้ำหนักอยู่ในช่วงร้อยละ 0.05 – 2.34 คอนกรีตล้วนที่ใช้ RAB มีการสูญเสียน้ำหนักอยู่ในช่วงร้อยละ 0.02 – 5.59 คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร่วมกับ RAA มีการสูญเสียน้ำหนักอยู่ในช่วงร้อยละ 0.00 – 3.89 และคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร่วมกับ RAB มีการสูญเสียน้ำหนักอยู่ในช่วงร้อยละ 0.00 – 2.34 เมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 7 ปี คอนกรีตล้วนที่ใช้ RAA มีการสูญเสียน้ำหนักอยู่ในช่วงร้อยละ 1.75 – 35.63 คอนกรีตล้วนที่ใช้ RAB มีการสูญเสียน้ำหนักอยู่ในช่วงร้อยละ 2.02 – 41.36 คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร่วมกับ RAA มีการสูญเสียน้ำหนักอยู่ในช่วงร้อยละ 1.62 – 24.11 และคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร่วมกับ RAB มีการสูญเสียน้ำหนักอยู่ในช่วงร้อยละ 2.13 – 21.58 จากรูปที่ 4 และ 5 พบว่า การใช้ RAB ส่งผลให้เหล็กเสริมมีการสูญเสียน้ำหนักสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ RAA เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล ได้แก่ ความพรุนสูงซึ่งมีสาเหตุจากการที่ผิวของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเคลือบด้วยเศษเนื้อมอร์ตาร์เก่า รวมถึงการเกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กจากกระบวนการบดย่อยเศษคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลมีความทึบน้ำต่ำและทำให้คลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้าสู่เนื้อคอนกรีตได้ง่าย สำหรับ RAA ที่เป็นเศษคอนกรีตที่ผ่านการออกแบบให้มีกำลังอัดสูงตั้งแต่ต้น (กำลังอัดที่อายุ 1 วัน เท่ากับ 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) ส่วน RAB มาจากเศษคอนกรีตผสมเสร็จที่มีกำลังอัดในช่วง 220–270 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุ 28 วัน ซึ่งความแตกต่างนี้ส่งผลต่อโครงสร้างภายในของมวลรวม เมื่อนำมาผลิตเป็นคอนกรีตใหม่ RAA ที่ได้จากเศษคอนกรีตกำลังอัดสูงจึงมีโครงสร้างแน่นและต้านทานคลอไรด์ได้ดีกว่า RAB ที่ได้จากเศษคอนกรีตผสมเสร็จกำลังอัดต่ำกว่า

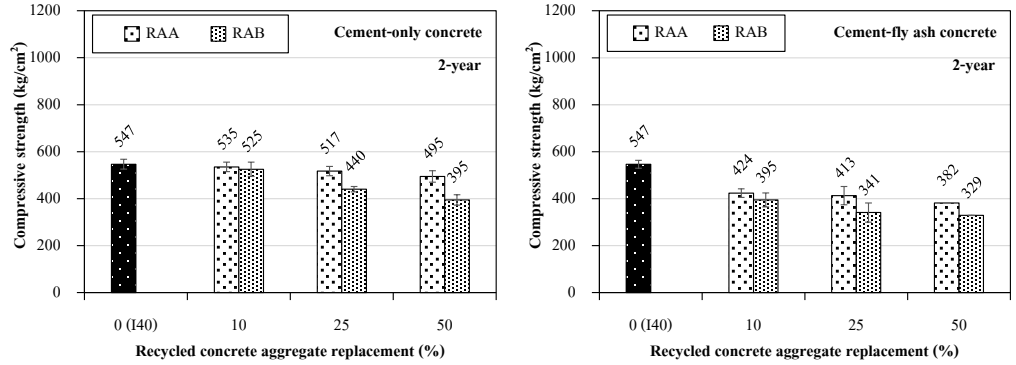


(ก) คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนร่วมกับ RAA และ RAB

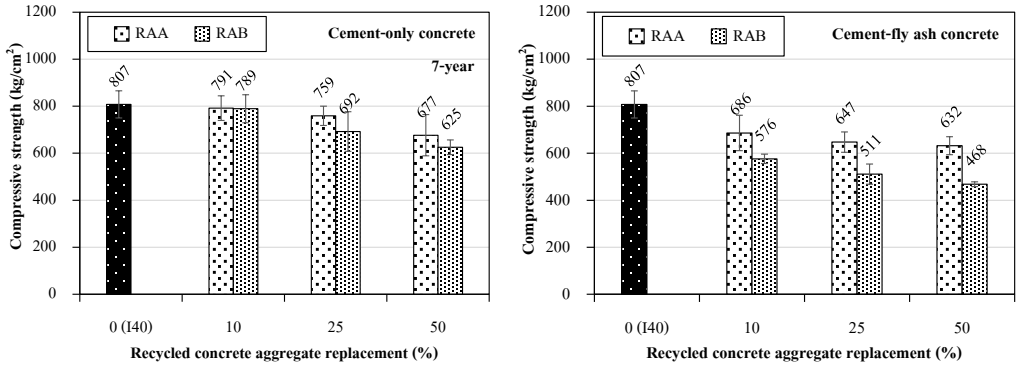


(ข) คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร่วมกับ RAA และ RAB

รูปที่ 5 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี



(ก) ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 2 ปี



(ข) ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล 7 ปี

รูปที่ 6 กำลังอัดของคอนกรีต

3.3 กำลังอัดของคอนกรีต

กำลังอัดของคอนกรีตล้วนและคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่ร้อยละการแทนที่ต่าง ๆ แสดงดัง รูปที่ 6 จากรูปพบว่า กำลังอัดของคอนกรีตทุกส่วนผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาเผชิญคลอไรด์นานขึ้น เมื่อพิจารณาผลกระทบของการใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลทั้ง 2 ชนิด เทียบกับคอนกรีตล้วนที่ไม่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล พบว่า ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 2 ปี คอนกรีตล้วนที่ไม่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลมีค่ากำลังอัดสูงสุดที่ประมาณ 547 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และค่ากำลังอัดลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มร้อยละการแทนที่มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเป็นร้อยละ 10, 25 และ 50 โดยมีกำลังอัดลดลงเหลือประมาณ 525 – 535 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร, 505 – 517 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และ 487 – 500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ขณะที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 7 ปี คอนกรีตล้วนที่ไม่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลมีค่ากำลังอัดสูงสุดที่ประมาณ 807 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ขณะที่คอนกรีตล้วนที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลร้อยละ 10, 25 และ 50 มีกำลังอัดประมาณ 798 – 791 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร, 692 – 759 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และ 625 – 677 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ เนื่องจากมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลมีการดูดซึมน้ำสูง (ดูตารางที่ 2) ความพรุนสูง และความหนาแน่นต่ำ ซึ่งผลกระทบเหล่านี้ส่งผลให้คอนกรีตมีความสามารถในการรับกำลังลดลง [3, 11] นอกจากนี้ จุดอ่อนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล เช่น โครงสร้างโพรงช่องว่างขนาดใหญ่และรอยแตกร้าวขนาดเล็กก็ส่งผลต่อการลดลงของกำลังอัดของคอนกรีตเช่นกัน [3] เมื่อพิจารณาผลกระทบของชนิดของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลต่อกำลังอัดของคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้ RAA มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ RAB เนื่องจาก RAA แปรใช้ใหม่จากเศษคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงกว่า RAB จึงทำให้คอนกรีตที่ใช้ RAA มีความแข็งแรงสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ RAB เมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดระหว่างคอนกรีตล้วนและคอนกรีตผสมเถ้าลอยพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตล้วนทั้งที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 2 ปี และ 7 ปี เนื่องจากการใช้เถ้าลอยทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมลดลง ส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) ซึ่งเป็นผลผลิตหลักจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ลดลงตามไปด้วย เมื่อปริมาณ CH ลดลง ปฏิกิริยาปอซโซลานิกระหว่างเถ้าลอยกับ CH จึงเกิดขึ้นในระดับที่ต่ำกว่า ส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งเป็นผลผลิตที่มีบทบาทสำคัญต่อการรับกำลังของคอนกรีตมีปริมาณลดลงตามไปด้วย ดังนั้น โครงสร้างเนื้อคอนกรีตที่ได้จึงมีความสามารถในการรับกำลังต่ำกว่าคอนกรีตล้วน

4. สรุปผล

1. คอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลมีความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตล้วน เนื่องจากสามารถลดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และเพิ่มความต้านทานต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม การใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลทั้งมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่ได้จากโรงงานคอนกรีตสำเร็จรูป (RAA) และมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่ได้จากโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จ (RAB) ในทุกปริมาณของการแทนที่มวลรวมธรรมชาติ (ร้อยละ 0 - 50 โดยปริมาตร) ส่งผลให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตล้วน

2. การเพิ่มสัดส่วนการแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล ส่งผลให้ความต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตลดลง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้ความสามารถในการต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมลดลง นอกจากนี้ กำลังอัดของคอนกรีตยังมีแนวโน้มลดลงตามสัดส่วนการแทนที่ที่เพิ่มขึ้นด้วย

3. มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่ได้จากโรงงานผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปมีประสิทธิภาพในการเพิ่มความต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตได้ดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่ได้จากโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จ

ทั้งนี้เนื่องจากเศษคอนกรีตที่นำมารีไซเคิลจากโรงงานคอนกรีตสำเร็จรูปมีคุณสมบัติด้านความแข็งแรงและกำลังอัดเริ่มต้นสูงกว่า ส่งผลให้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่ได้มีคุณภาพและคุณสมบัติที่ดีกว่า

ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยบูรพา ภายใต้งบประมาณเงินอุดหนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ประเภท Fundamental Fund ปีงบประมาณ พ.ศ. 2567” ลำดับที่ ววน.76/2567 และขอขอบคุณหน่วยวิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษาบูรพา (Burapha Construction and Maintenance Technology Research Unit, BCONTEC) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้การสนับสนุนในการดำเนินการศึกษาครั้งนี้ และขอขอบคุณนางสาวนันทชา กลั่นประเสริฐ และนางสาววิรัญชนา ญาณจินดา บัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ช่วยดำเนินการทดลองในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Dalgado, F. and Silva, F. Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review. *Journal of Building Engineering*, 2022, 52, 104452.

[2] Bai, G., Zhu, C., Liu, C. and Liu, B. An evaluation of the recycled aggregate characteristics and the recycled aggregate concrete mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 2020, 240, 117978.

[3] Wang, J., Che, Z., Zhang, K., Fan, Y., Niu, D. and Guan, X. Performance of recycled aggregate concrete with supplementary cementitious materials (fly ash, GBFS, silica fume, and metakaolin): Mechanical properties, pore structure, and water absorption. *Construction and Building Materials*, 2023, 368, 130455.

[4] Sunayana, S. and Barai, S. V. Partially fly ash incorporated recycled coarse aggregate based concrete: Microstructure perspectives and critical analysis. *Construction and Building Materials*, 2021, 278, 122322.

[5] Vieira, G. L., Schiavon, J. Z., Borges, P. M., Silva, S. R. and Oliveira Andrade, J. J. Influence of recycled aggregate replacement and fly ash content in performance of pervious concrete mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 271, 122665.

[6] Kim, K., Shin, M. and Cha, S. Combined effects of recycled aggregate and fly ash towards concrete sustainability. *Construction and Building Materials*, 2013, 48, pp. 499–507.

[7] Mefteh, H., Kebaïli, O., Oucief, H., Berredjem, L. and Arabi, N. Influence of moisture conditioning of recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 54, pp. 282–288.

[8] Martínez, I., Etxeberria, M., Pavón, E. and Díaz, N. Influence of demolition waste fine particles on the properties of recycled aggregate masonry mortar. *International Journal of Civil Engineering*, 2018, 16, pp. 1213–1226.

[9] Silva, R. V., de Brito, J. and Dhir, R. K. Fresh-state performance of recycled aggregate concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 2018, 178, pp. 19–91.

[10] Bonifazi, G., Palmieri, R. and Serranti, S. Evaluation of attached mortar on recycled concrete aggregates by hyperspectral imaging. *Construction and Building Materials*, 2018, 169, pp. 835–842.

[11] Chen, C., Lu, C., Lu, C., Wei, S., Guo, Z., Zhou, Q. and Wang, W. Synergetic effect of fly ash and ground-granulated blast slag on improving the chloride permeability and freeze-thaw resistance of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 2023, 365, 130015.

[12] อัญชนา กิจจานนท์ และ ทวีชัย สำราญวานิช. ผลกระทบของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลจากโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีต. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 2565, 32, หน้า 87–96.

[13] ทวีชัย สำราญวานิช และ ลีน่า ปรัก. ความต้านทานคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล. *วิศวกรรมสาร มก.*, 2563, 33, หน้า 35–48.

[14] Hossain, M. U., Dong, Y. and Ng, S. T. Influence of supplementary cementitious materials in sustainability performance of concrete industry: A case study in Hong Kong. *Case Studies in Construction Materials*, 2021, 15, e00659.

[15] Kaewmanee, K., Krammart, P., Sumranwanich, T., Vhoktaweekarn, P. and Tangtermsirikul, S. Effect of free lime content on properties of cement-fly ash mixtures. *Construction and Building Materials*, 2013, 38, pp. 829–836.

[16] Nguyen, T. B. T., Saengsoy, W. and Tangtermsirikul, S. Effect of initial moisture of wet fly ash on the workability and compressive strength of mortar and concrete. *Construction and Building Materials*, 2018, 183, pp. 408–416.

[17] Wanna, S., Saengsoy, W., Toochinda, P. and Tangtermsirikul, S. Effects of sand powder on sulfuric acid resistance, compressive strength, cost benefits, and CO2 reduction of high CaO fly ash concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 2020, 3284975.

[18] Kijjanon, A., Sumranwanich, T., Saengsoy, W. and Tangtermsirikul, S. Chloride penetration resistance, electrical resistivity, and compressive strength of concrete with calcined kaolinite clay, fly ash, and limestone powder. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2023, 35, 04022462.

[19] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. มอก. 15 เล่ม 1-2555. *ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 1 ข้อกำหนดเกณฑ์คุณภาพ*. กรุงเทพฯ: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2555.

[20] ASTM International. ASTM C150. *Standard specification for Portland cement*. In: *Annual Book of ASTM Standards*. West Conshohocken, PA: ASTM International.

[21] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. มอก. 2135-2545: 2546. *เถ้าลอยจากถ่านหินใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีต*. กรุงเทพฯ: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2546.

[22] ASTM International. ASTM C33. *Standard specification for concrete aggregates*. In: *Annual Book of ASTM Standards*. West Conshohocken, PA: ASTM International.

[23] ASTM International. ASTM C1152. *Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete*. In: *Annual Book of ASTM Standards*. West Conshohocken, PA: ASTM International.

[24] ASTM International. ASTM G1. *Standard practice for preparing, cleaning, and evaluation corrosion test specimens*. In: *Annual Book of ASTM Standards*. West Conshohocken, PA: ASTM International.

[25] ASTM International. ASTM C39. *Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. In: *Annual Book of ASTM Standards*. West Conshohocken, PA: ASTM International.

[26] Amorim, P., de Brito, J. and Evangelista, L. Concrete made with coarse concrete aggregate: Influence of curing on durability. *ACI Materials Journal*, 2012, 109, pp. 195–204.

[27] Angst, U., Elsener, B., Larsen, C. K. and Vennesland, Ø. Critical chloride content in reinforced concrete: A review. *Cement and Concrete Research*, 2009, 39, pp. 1122–1138.

[28] Cao, Y., Gehlen, C., Angst, U., Wang, L., Wang, Z. and Yao, Y. Critical chloride content in reinforced concrete: An updated review considering Chinese experience. *Cement and Concrete Research*, 2019, 117, pp. 58–68.