บทความวิจัย

ผลกระทบของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลจากโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีต

อัญชนา กิจจานนท์ และ ทวีชัย สำราญวานิช*
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 1862 1230 อีเมล: twc@buu.ac.th
DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.07.009
รับเมื่อ 14 พฤษภาคม 2563 แก้ไขเมื่อ 16 กรกฎาคม 2563 ตอบรับเมื่อ 22 กรกฎาคม 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 29 กรกฎาคม 2564
© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

บทความนี้มุ่งศึกษาผลกระทบของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลจากโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ และกำลังอัดของคอนกรีต โดยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลถูกใช้เป็นวัสดุแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติที่การแทนที่ร้อยละ 10, 25, 50 และ 100 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.40 และอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานที่ 0.30 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง และทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตทำการทดสอบที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28, 56 และ 91 วัน สำหรับการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดของคอนกรีตทำการทดสอบที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน จากนั้นคอนกรีตถูกนำไปเผชิญสารละลายคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 3.0% เป็นเวลา 28, 56 และ 91 วัน จากผลการทดลองพบว่า เมื่ออัตราส่วนมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลต่อมวลรวมหยาบสูงขึ้นทำให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตต่ำลง คอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลมีความต้านการแทรกซึมคลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและมีกำลังอัดเกือบใกล้เคียงคอนกรีตซีเมนต์ล้วนที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลที่อายุ 91 วัน

คำสำคัญ: มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล เถ้าลอย ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ กำลังอัด คอนกรีต

การอ้างอิงบทความ: อัญชนา กิจจานนท์ และ ทวีชัย สำราญวานิช, "ผลกระทบของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลจากโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีต," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 32, ฉบับที่ 1, หน้า 87–96, ม.ค.–มี.ค. 2565.

Research Article

Effect of Recycled Concrete Aggregates from Ready-mixed Concrete Plant on Chloride Penetration Resistance and Compressive Strength of Concrete

Aunchana Kijjanon and Taweechai Sumranwanich*
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University, Chon Buri, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 1862 1230, E–mail: twc@buu.ac.th
DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.07.009
Received 14 May 2020; Revised 16 July 2020; Accepted 22 July 2020; Published online: 29 July 2021
© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This paper aims to study the effect of recycled concrete aggregate from the ready-mixed concrete plant (RA) on the chloride resistance and compressive strength of concrete. The RA was used to replace natural coarse aggregate at the replacement percentages of 10%, 25%, 50% and 100%. The water to binder ratio of 0.40 was used. Fly ash to binder ratio was kept at 0.30. The rapid chloride penetration and compressive strength tests were performed at 28, 56 and 91 days of water curing. Bulk chloride diffusion tests of concrete were measured after being cured in water for 28 days and submerged in 3.0% chloride solution for 28, 56 and 91 days, respectively. From the experimental results, it was found that the chloride penetration resistance and compressive strength of concrete decreased with the increase of RA to natural coarse aggregate ratio. Fly ash concrete with RA had higher chloride penetration resistance than that of cement concrete with RA with the compressive strength almost equal to cement concrete with RA at 91 days.

Keywords: Recycled Concrete Aggregate, Fly Ash, Chloride Penetration Resistance, Compressive Strength, Concrete

Please cite this article as: A. Kijjanon and T. Sumranwanich, "Effect of recycled concrete aggregates from ready-mixed concrete plant on chloride penetration resistance and compressive strength of concrete," *The Journal of KMUTNB*, vol. 32, no. 1, pp. 87–96, Jan.–Mar. 2022 (in Thai).

1. บทนำ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เผชิญกับสิ่งแวดล้อมทะเลมักเกิดการเสื่อมสภาพ และความเสียหายเนื่องจากเกลือคลอไรด์ในน้ำทะเล โดยเกลือคลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าสู่ภายในเนื้อคอนกรีตได้จากหลายกลไก เช่น การแพร่ (Diffusion) การดึงดูดแคพิลลารี (Capillary Suction) การดึงดูดอิออนคลอไรด์ (Ion Adsorption) และความดันน้ำ (Hydraulic Pressure) ซึ่งอาจเกิดกลไกใดกลไลหนึ่งหรือทั้งหมดร่วมกันก็ได้ แต่เมื่อเกลือคลอไรด์เข้าไปภายในเนื้อคอนกรีตและมีการสะสมของคลอไรด์ที่บริเวณผิวของเหล็กเสริมจนมีค่ามากกว่าปริมาณคลอไรด์วิกฤต (Threshold Chloride Content) ชั้นฟิล์มเฉื่อย (Passive Film) ที่เคลือบป้องกันเหล็กเสริมอยู่จะถูกทำลายลง (Depassivation) และหากมีออกซิเจนและความชื้นที่เพียงพอจะทำให้เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิมได้ และเมื่อปริมาตรของสนิมเกิดมากขึ้นก็จะดันเนื้อคอนกรีตที่ห่อหุ้มเกิดการแตกร้าวและหลุดล่อนในที่สุด [1], [2] ในการป้องกันปัญหาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากคลอไรด์นอกจากการออกแบบคอนกรีตให้มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ หรือใช้สารเคลือบผิวคอนกรีต หรือใช้สารเคลือบผิวเหล็กเสริมแล้ว การเลือกใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์เพื่อปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้มีความคงทนก็เป็นแนวทางที่เหมาะสม เนื่องจากสารปอซโซลานช่วยเพิ่มความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ให้มากขึ้น [3] ซึ่งสารปอซโซลานที่นิยมใช้ในงานคอนกรีตของไทยคือเถ้าลอย (Fly Ash) โดยเถ้าลอยเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยถ่านหิน คุณสมบัติโดยทั่วไปของเถ้าลอยประกอบด้วยซิลิกาออกไซด์และอะลูมินาออกไซด์ที่สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกทำให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต ผลผลิตดังกล่าวทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นมากขึ้น นอกจากนี้อนุภาคของเถ้าลอยมีลักษณะค่อนข้างกลมและมีขนาดเล็ก เมื่อใช้เถ้าลอยผสมในคอนกรีต เถ้าลอยจึงสามารถเข้าไปเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีต (Filler Effect) ทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นมากขึ้น [4]

ในภาคอุตสาหกรรมการก่อสร้างถือว่าคอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างหลักที่ใช้มากที่สุด ทั้งผลิตภัณฑ์คอนกรีตสำเร็จรูปที่ผลิตจากโรงงานคอนกรีตสำเร็จรูป (Precast Concrete Plant) และคอนกรีตพร้อมเทที่ผลิตจากโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จ (Ready-mixed Concrete Plant) ในกระบวนการผลิตเหล่านี้ทำให้เกิดเศษวัสดุเหลือทิ้งของคอนกรีตจำนวนมาก ซึ่งเศษวัสดุเหล่านี้ไม่มีมูลค่า และต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดที่ต้องทำเพื่อไม่ให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นหากสามารถนำเศษคอนกรีตกลับนำมาใช้ใหม่ (Reuse) ได้ก็จะช่วยลดกระบวนการที่สร้างผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมลงได้ [5] โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้ประโยชน์มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) หรือหิน (Rock) ในเศษคอนกรีต ซึ่งจากงานวิจัยในอดีต [6]–[9] พบว่า การใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (Recycled Concrete Aggregate) ทำให้ความแข็งแรงของคอนกรีตลดลง เนื่องจากผิวของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลมีสิ่งสกปรกอยู่มากส่งผลให้ความแข็งแรงของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เพสต์ และมวลรวมลดลง ในงานวิจัยของ Kou และ Poon [10] ได้ศึกษากำลังอัดและการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิล และพบว่า เมื่อใช้อัตราส่วนของมวลรวมรีไซเคิลสูงขึ้นทำให้กำลังอัดลดลง และการแทรกซึมของคลอไรด์มากขึ้น เนื่องจากมวลรวมรีไซเคิลมีความพรุนสูงกว่ามวลรวมหยาบจากธรรมชาติ การนำมวลรวมรีไซเคิลมาใช้ในคอนกรีตจะทำให้เกิดปัญหาคุณภาพคอนกรีตที่แย่ลง ไม่เหมือนกับการใช้มวลรวมหยาบธรรมชาติ ทั้งเรื่องกำลังอัด การดูดซึมน้ำ และความคงทน เช่น ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ ดังนั้นแนวทางหนึ่งในการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลให้ดีขึ้นก็คือ การใช้สารปอซโซลาน เช่น เถ้าลอย ช่วยในการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีต

บทความนี้จึงมุ่งศึกษาผลกระทบของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลจากโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ และกำลังอัดของคอนกรีต โดยศึกษาการใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานเพื่อปรับปรุงคุณภาพคอนกรีต และศึกษาปริมาณการใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติต่างๆ กันด้วย

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์ (I)	เถ้าลอย (FA)
SiO_2	21.30	40.68
Al_2O_3	4.96	22.07
Fe_2O_3	3.10	12.64
CaO	66.61	13.69
MgO	1.81	2.98
SO_3	2.72	1.72
ออกไซด์อื่นๆ	0.04	5.06
LOI	0.74	1.07
คุณสมบัติทางกายภาพ		
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.29
ความละเอียดโดยวิธีของเบลน (cm^2/g)	3,400	2,836

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวม

คุณสมบัติทางกายภาพ	S	NA	RA
ความถ่วงจำเพาะ	2.58	2.72	2.46
การดูดซึมน้ำ (%)	0.97	0.66	5.54

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุและส่วนผสม

ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (I) เป็นวัสดุประสานหลัก และใช้เถ้าลอย (FA) แทนที่บางส่วนของวัสดุประสาน โดยองค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสานแสดงไว้ในตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวมละเอียด (S) มวลรวมหยาบธรรมชาติ (NA) และมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลจากโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จ (RA) แสดงไว้ในตารางที่ 2 และส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาแสดงไว้ในตารางที่ 3 โดยใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (RA) เป็นวัสดุแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติที่ร้อยละ 10, 25, 50 และ 100 โดยปริมาตรคอนกรีต ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.40 และอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน (f/b) 0.30

ตารางที่ 3 ส่วนผสมคอนกรีต

Mix id	Mix proportions (kg/m^3)					
	I	FA	Water	S	NA	RA
I40	460	-	184	755	972	-
I40-RA10	460	-	184	755	875	88
I40-RA25	460	-	184	755	729	220
I40-RA50	460	-	184	755	486	440
I40-RA100	460	-	184	755	-	879
I40-F30	305	131	174	755	972	-
I40-F30RA10	305	131	174	755	875	88
I40-F30RA25	305	131	174	755	729	220
I40-F30RA50	305	131	174	755	486	440
I40-F30RA100	305	131	174	755	-	879

หมายเหตุ:
"I40" หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ w/b 0.40, "I40-RA(X)" หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 w/b 0.40 และใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติที่ร้อยละ X, "I40-FA30" หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 และ w/b 0.40

2.2 วิธีการทดสอบ

2.2.1 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง

การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งทำตามมาตรฐาน ASTM C1202 [11] โดยการหาค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านโพรงช่องว่างที่อิ่มตัวด้วยน้ำภายในคอนกรีต โดยการทดสอบใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. ทดสอบที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28, 56 และ 91 วัน โดยภายหลังจากครบกำหนดระยะเวลาบ่มน้ำตัวอย่างถูกตัดให้มีความหนา 5 ซม. และทำการทดสอบ โดยเริ่มจากประกอบตัวอย่างเข้าเซลทดสอบแล้วเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.3 M ที่ขั้วบวก (Anode) และสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 3% ที่ขั้วลบ (Cathode) ผ่านค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 60±0.01 โวลต์ ต่อเนื่องเป็นเวลา 6 ชั่วโมง เก็บข้อมูลกระแสไฟฟ้าแล้วคำนวณปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านพร้อมวิคราะห์คุณภาพได้ตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ความสามารถการแทรกซึมคลอไรด์อิออนของคอนกรีต [11]

Charge passed (Coulombs)	Chloride ion penetrability
> 4,000	High
2,000–4,000	Moderate
1,000–2,000	Low
100–2,000	Very low
< 100	Negligible

2.2.2 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดของคอนกรีต

ทำการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1556 [12] โดยหาปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในแต่ละความลึกในรูปแบบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total Chloride) ของคอนกรีต โดยเริ่มจากหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. จากนั้นบ่มตัวอย่างในน้ำเป็นเวลา 28 วัน เมื่อครบระยะเวลาบ่มน้ำ นำตัวอย่างเคลือบผิวด้านข้างและด้านล่างด้วยอิพ็อกซี ยกเว้นด้านบนหนึ่งด้านเพื่อควบคุมให้คลอไรด์แพร่เข้าสู่คอนกรีตในทิศทางเดียว จากนั้นนำตัวอย่างไปแช่ในสารละลายคลอไรด์ความเข้มข้นคลอไรด์ 5% เป็นระยะเวลา 28, 56 และ 91 วัน เมื่อครบระยะเวลาแช่ในสารละลายคลอไรด์ นำตัวอย่างตัดหนาชั้นละ 1 ซม. นำมาบดเป็นผงเพื่อทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดตามมาตรฐาน ASTM C1152 [13] ต่อไป

2.2.3 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

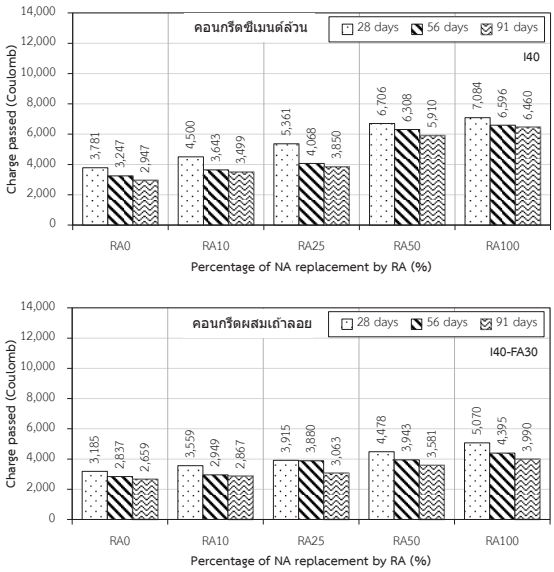
ทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน BS EN 1881-116 [14] โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 10 × 10 × 10 ซม^3 และทดสอบที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28, 56 และ 91 วัน ตามลำดับ

3. ผลการทดลอง

3.1 การแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง

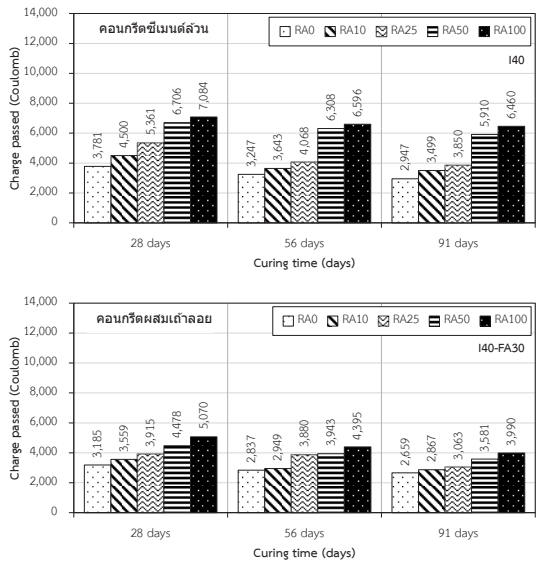
เมื่อพิจารณาผลกระทบของระยะเวลาบ่มน้ำดังรูปที่ 1 พบว่า คอนกรีตมีปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านต่ำลง

เมื่อระยะเวลาบ่มน้ำนานขึ้น หรือกล่าวได้ว่าคอนกรีตมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งสูงขึ้นเมื่อมีระยะเวลาบ่มน้ำนานขึ้น โดยมีแนวโน้มลักษณะเดียวกันในทุกๆ ส่วนผสมคอนกรีต เนื่องจากคอนกรีตที่มีระยะเวลาบ่มน้ำที่นานขึ้นทำให้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และปอซโซลานิกของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น ทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นเพิ่มมากขึ้นด้วย ส่งผลให้ประจุไฟฟ้าไหลผ่านโพรงช่องว่างภายในคอนกรีตได้ยากขึ้น ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตจึงสูงขึ้น



รูปที่ 1 ผลกระทบของระยะเวลาบ่มน้ำต่อการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต

รูปที่ 2 แสดงผลกระทบของร้อยละการแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลต่อการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต จากรูปพบว่า คอนกรีตมีปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตเพิ่มขึ้นเมื่อร้อยละการแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเพิ่มขึ้น เนื่องจากมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลมีความพรุนสูงเมื่อเทียบกับมวลรวมธรรมชาติ ความพรุนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลทำให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมผ่านโพรงช่องว่างของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเข้าไปภายในเนื้อคอนกรีตได้สูง [16] ด้วยเหตุนี้ คอนกรีตที่ใช้ร้อยละการแทนที่ของมวลรวมรีไซเคิลสูงมีโครงสร้างโพรงช่องว่างสูงตามไปด้วย [16] โดย



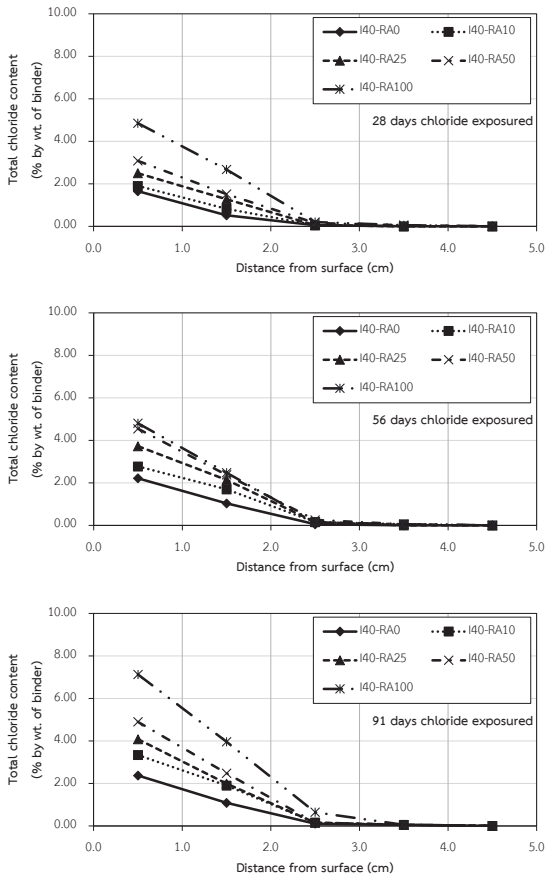
รูปที่ 2 ผลกระทบของร้อยละการแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลต่อการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต

เมื่อพิจารณาความสามารถการแทรกซึมคลอไรด์อิออนของคอนกรีตตามเกณฑ์ข้อกำหนดในตารางที่ 4 พบว่า ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน คอนกรีต I40-RA0 มีช่วงการแทรกซึมคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์ปานกลาง ในขณะที่คอนกรีต I40-RA10, I40-RA25, I40-RA50 และ I40-RA100 มีช่วงการแทรกซึมคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์สูง สำหรับที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 56 วัน พบว่า คอนกรีต I40-RA0 และ I40-RA10 มีช่วงการแทรกซึมคลอไรด์ปานกลาง ในขณะที่คอนกรีต I40-RA25, I40-RA50 และ I40-RA100 มีช่วงการแทรกซึมคลอไรด์สูง สำหรับที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 91 วัน พบว่า คอนกรีต I40-RA0, I40-RA10 และ I40-RA25 มีช่วงการแทรกซึมคลอไรด์ปานกลาง ในขณะที่คอนกรีต I40-RA50 และ I40-RA100 มีช่วงการแทรกซึมคลอไรด์สูง สำหรับปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีตผสมเถ้าลอย (I40-FA30) มีแนวโน้มเดียวกันกับคอนกรีตซีเมนต์ล้วน (I40) โดยค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มร้อยละการแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล โดยเมื่อพิจารณาความสามารถการแทรกซึมคลอไรด์อิออนตามเกณฑ์ข้อกำหนดในตารางที่ 4 พบว่า ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน คอนกรีต I40-FA30RA0, I40-FA30RA10 และ I40-FA30RA25 มีช่วงการแทรกซึมคลอไรด์ปานกลาง ในขณะที่คอนกรีต I40-FA30RA50 และ I40-FA30RA100 มีช่วงการแทรกซึมคลอไรด์สูง สำหรับที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 56 วัน พบว่า คอนกรีต I40-FA30RA0, I40-FA30RA10, I40-FA30RA25 และ I40-FA30RA50 มีช่วงการแทรกซึมคลอไรด์ปานกลาง ในขณะที่คอนกรีต I40-FA30RA100 มีช่วงการแทรกซึมคลอไรด์สูง สำหรับที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 91 วัน พบว่า คอนกรีตผสมเถ้าลอยทุกร้อยละการแทนที่มีการแทรกซึมคลอไรด์ปานกลาง

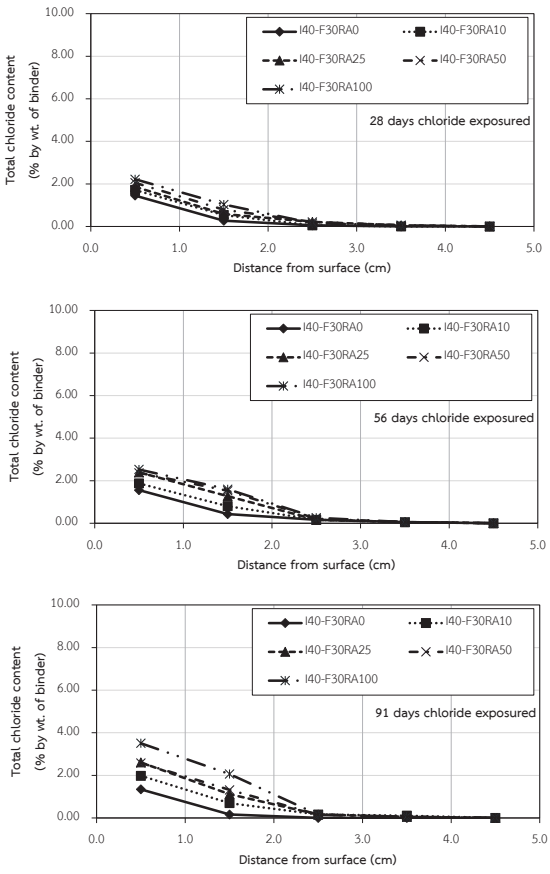
เมื่อพิจารณาผลกระทบของเถ้าลอยต่อการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตพบว่า ที่ร้อยละการแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและระยะเวลาบ่มน้ำเท่ากัน คอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ล้วนอย่างชัดเจน เนื่องจากเถ้าลอยสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับ $Ca(OH)_2$ เกิดเป็นผลผลิต เช่น CSH และ CAH ซึ่งผลผลิตดังกล่าวทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นขึ้น นอกจากนี้อนุภาคของเถ้าลอยสามารถเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีต อันทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยต่ำกว่าคอนกรีตล้วน [17], [18]

3.2 การแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดของคอนกรีต

รูปที่ 3 และ 4 แสดงการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ล้วนและคอนกรีตผสมเถ้าลอย ที่การแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลต่างๆ ตามลำดับ จากรูปพบว่า การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาเผชิญคลอไรด์นานขึ้น และเมื่อพิจารณาผลกระทบของร้อยละการแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลพบว่า การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดเพิ่มขึ้นเมื่อร้อยละการแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเพิ่มขึ้น เนื่องจากมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลมีความพรุนสูงเมื่อเทียบมวลรวมหยาบธรรมชาติ กล่าวคือ ความพรุนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล



รูปที่ 3 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน



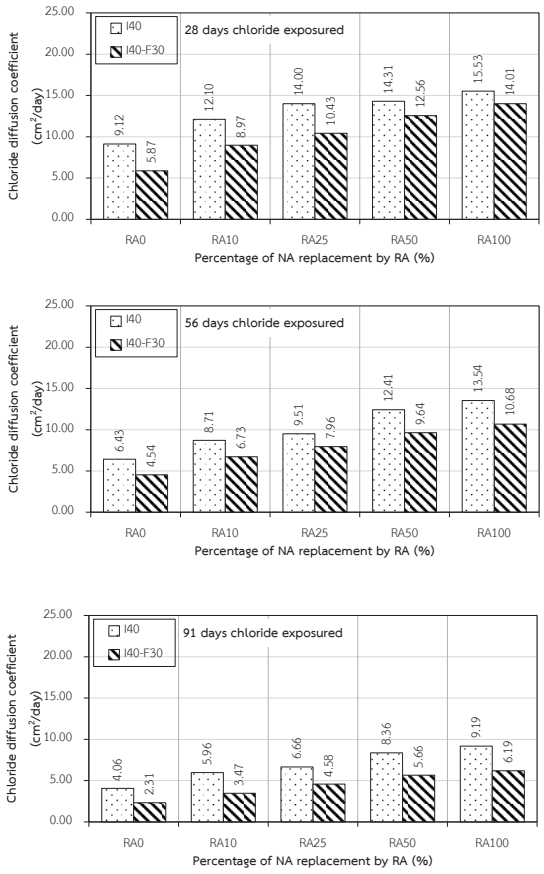
รูปที่ 4 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอย

ทำให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมผ่านโพรงช่องว่างของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเข้าไปภายในเนื้อคอนกรีตได้สูง [15] ทำให้คอนกรีตที่มีร้อยละการแทนที่ของมวลรวมรีไซเคิลสูงมีโครงสร้างโพรงช่องว่างสูงตามไปด้วย [16] หากพิจารณาผลกระทบของเถ้าลอยพบว่า เมื่อใช้ร้อยละการแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและระยะเวลาเผชิญคลอไรด์เท่ากัน คอนกรีตผสมเถ้าลอยมีการแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งในหัวข้อที่ผ่านมา เนื่องจากเถ้าลอยสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับ $Ca(OH)_2$ เกิดเป็นผลผลิต เช่น CSH และ CAH ซึ่งผลผลิตดังกล่าวทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นขึ้น นอกจากนี้อนุภาคของเถ้าลอยสามารถเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตได้ด้วย [18], [19]

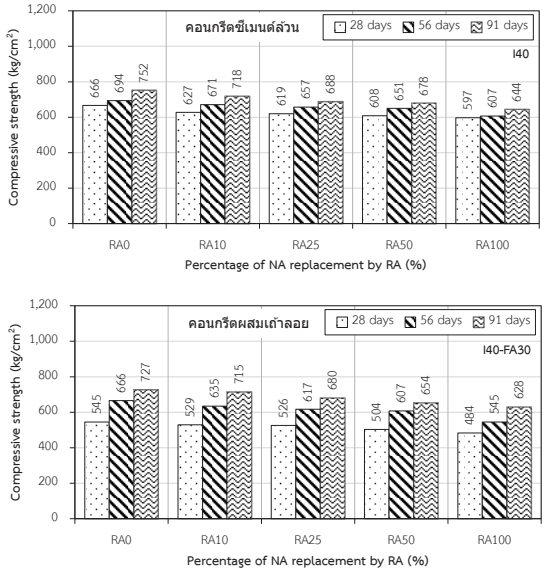
จากผลการแทรกซึมปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ได้จากการทดสอบนำมาคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ (Chloride Diffusion Coefficient) ของคอนกรีตตามสมการคำตอบของ Fick's 2nd Law ดังสมการที่ (1)

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

โดยที่ $C(x,t)$ คือ ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระยะ x เวลา t ใดๆ (% by wt. of binder) x คือ ระยะหุ้มเหล็กเสริม (cm) D_{cl} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ในคอนกรีต (cm^2/year) t คือ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (ปี) C_i คือ ปริมาณคลอไรด์เริ่มต้นในคอนกรีต (% by wt. of binder)



รูปที่ 5 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต



รูปที่ 6 กำลังอัดของคอนกรีต

C_s คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (% by wt. of binder)

รูปที่ 5 แสดงสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย ที่การแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่ร้อยละ 0, 10, 25, 50 และ 100 จากรูปพบว่า สัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มร้อยละการแทนที่มวลรวมหยาบ กล่าวคือ คอนกรีตมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ลดลง นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาร้อยละการแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ที่เท่ากัน คอนกรีตผสมเถ้าลอยมีสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนอย่างชัดเจน เนื่องจากเถ้าลอยสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับ $Ca(OH)_2$ เกิดเป็นผลผลิต เช่น CSH และ CAH ซึ่งผลผลิตดังกล่าวทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นขึ้น นอกจากนี้อนุภาคของเถ้าลอยสามารถเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีต อันทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นเพิ่มมากขึ้น [17], [18] ด้วยเหตุนี้คอนกรีตผสมเถ้าลอยจึงมีสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน

3.3 กำลังอัดของคอนกรีต

รูปที่ 6 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้การแทนที่มวลรวมหยาบด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลร้อยละ 0, 10, 25, 50 และ 100 ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28, 56 และ 91 วัน จากรูปพบว่าคอนกรีตมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาบ่มน้ำนานขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Ann และคณะ [5] และ Wagih และคณะ [19] ที่ศึกษากำลังอัดของคอนกรีตผสมมวลรวมรีไซเคิลที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 7, 28, 90 และ 180 วัน นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาผลกระทบของการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลพบว่า กำลังอัดของคอนกรีตลดลงเมื่อเพิ่มร้อยละการแทนที่ ซึ่งสอดคล้องกับผลของ Ann และคณะ [5], Yue และคณะ [16], Wagih และคณะ [19] และ Dilbas และคณะ [20] เนื่องจากมวลรวมคอนกรีต

รีไซเคิลมีความพรุนสูงเมื่อเทียบกับมวลรวมธรรมชาติ กำลังอัดของคอนกรีตขึ้นกับความแข็งแรงของมวลรวมและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเพสต์ และมวลรวมด้วย การใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลทำให้ความแข็งแรงของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เพสต์ และมวลรวมต่ำลง คอนกรีตจึงเกิดการสูญเสียความแข็งแรง [5] นอกจากนี้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลมีโครงสร้างที่ไม่สมบูรณ์ซึ่งเกิดจากกระบวนการบดย่อยเศษคอนกรีตทำให้มีรอยแตกร้าวภายใน และมีความพรุนสูง เนื่องจากการยึดจับของมอร์ตาร์เก่า ทำให้ความแข็งแรงของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลต่ำลงไปด้วย [20]

เมื่อพิจารณาผลกระทบของการใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานพบว่า คอนกรีตผสมเถ้าลอยยังคงมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนที่อายุ 28 วัน และ 56 วัน สำหรับทุกอัตราส่วนการแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล เนื่องจากการใช้เถ้าลอยทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตลดลง ส่งผลให้การเกิดผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ที่กำลัง เช่น CSH และ CAH ลดลง ซึ่งส่งผลให้กำลังอัดต่ำลงไปด้วย [21] แต่ที่อายุการบ่ม 91 วัน การใช้เถ้าลอยร้อยละ 30 ช่วยปรับปรุงกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยให้มีค่าใกล้เคียงเกือบเท่ากับกำลังอัดของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน สำหรับทุกปริมาณมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล

4. สรุป

จากผลการศึกษาผลกระทบของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลจากโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีต สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1) การใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลจากโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติทำให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตลดลง

2) การใช้เถ้าลอยในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลแทนที่มวลรวมหยาบช่วยปรับปรุงความต้านทานการคลอไรด์ของคอนกรีตให้สูงขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตซีเมนต์ล้วนที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลแทนที่มวลรวมหยาบ

3) คอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 ยังมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตล้วนเมื่อใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติที่อายุ 28 และ 56 วัน แต่มีกำลังอัดใกล้เคียงเกือบเท่ากันที่อายุ 91 วัน

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยมหาวิทยาลัยบูรพา สัญญาเลขที่ 128/2561 และการสนับสนุนจากหน่วยวิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษาบูรพา (BCONTEC) และศูนย์เทคโนโลยีการก่อสร้างและการจัดการจราจร (CONTRA) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

เอกสารอ้างอิง

[1] T. Sumranwanich and S.Tangtermsirikul, *Concrete Structure Deterioration*. Bangkok: Charansanitwong Printing, 2018 (in Thai).

[2] S. Tangtermsirikul, *Durability and Mix Design of Concrete*, 1st ed. Pathum Thani: Thammasat University, Rangsit Campus, 2003.

[3] P. Chindaprasirt, S. Rukzon, and V. Sirivivatnanon, "Resistance to chloride penetration of blended portland cement mortar containing palm oil fuel, rice husk ash and fly ash,"*Construction and Building Materials*, vol. 22, pp. 932–938, 2008.

[4] P. Chindaprasirt and C.Jaturapitakkul, *Cement, Pozzolan and Concrete*. Bangkok: Thai Concrete Assocoation (TCA), 2004 (in Thai).

[5] K. Y. Ann, H. Y. Moon, Y. B. Kim, and J. Ryou, "Durability of recycled aggregate concrete using pozzolanic materials," *Waste Management*, vol. 28, pp. 993–999, 2008.

[6] M. B.de Oliveira and E.Vazquez, "The influence

of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete," *Waste Management*, vol. 16, pp. 113–117, 1996.

[7] C. S. Poon, Z. H. Shui, and L. Lam, "Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates," *Construction and Building Materials*, vol. 18, pp. 461–468, 2004.

[8] D. Sani, G. Moriconi, G. Fava, and V. Corinaldesi, "Leaching and mechanical behaviour of concrete manufactured with recycled aggregated," *Waste Management*, vol. 25, pp. 117–182, 2005.

[9] T. Y. Tu, Y. Y. Chen, and C. L. Hwang, "Properties of HPC with recycled aggregates," *Cement and Concrete Research*, vol. 36, pp. 943–950, 2006.

[10] S. C. Kou and C. S. Poon, "Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate," *Construction and Building Materials*, vol. 35, pp. 59–76, 2012.

[11] *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*, American Society for Testing and Materials, ASTM C1202, 2000.

[12] *Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion*, American Society for Testing and Materials, ASTM C1556, 2000.

[13] *Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete*, American Society for Testing and Materials, ASTM C1152, 2000.

[14] *Method for determination of compressive strength of concrete cubes*, British Standards (BS), BS 1881-116.

[15] B. H. Oh, S. W. Cha, B. S. Jang, and S. Y. Jang, "Development of high-performance concrete having high resistance to chloride penetration," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 212, pp. 221–231, 2002.

[16] P. Yue, Z. Tan, and Z. Guo, "Microstructure and mechanical properties of recycled aggregate concrete in seawater environment," *The Scientific World Journal*, vol. 2013, pp. 1–7, 2013.

[17] S. E. Hussain and S. Rasheeduzafar, "Corrosion resistance performance of fly ash blended cement concrete," *ACI Material Journal*, vol. 91, pp. 264–273, 2013.

[18] T. Simcic, S. Pejovnik, GDe. Schutter, and V. B. Bosiljkov, "Chloride ion penetration into fly ash modified concrete during wetting-drying cycles," *Construction and Building Materials*, vol. 93, pp. 1216–1223, 2015.

[19] A. M. Wagih, H. Z. El-Karmoty, M. Ebid, and S. H. Okba, "Recycled construction and demolition concrete waste as aggregate for structural concrete," *Housing and Building National Research Center Journal*, vol. 9, pp. 193–200, 2013.

[20] H. Dilbas, M. Simsek, and O. Cakie, "An investigation on mechanical and physical peoperties of recycled aggregate concrete (RAC) with and without silica fume," *Construction and Building Materials*, vol. 61, pp. 50–59, 2014.

[21] A.M. Neville, *Properties of Concrete*, 4th ed. Longman Group Ltd., 1995.