

ความต้านทานคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล

Chloride Resistance and Compressive Strength of Concrete with Recycled Concrete Aggregates

ทวีชัย สำราญวานิช^{1*} และ ลีน่า ปรัก²

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา^{1*}

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี²

E-mail: twc@buu.ac.th^{1*}, lyna_plnce@hotmail.com²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล โดยใช้อัตราส่วนแทนที่มวลรวมหยาบด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่ร้อยละ 10, 25, 50 และ 100 โดยน้ำหนัก แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยที่ร้อยละ 20 และ 30 แทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูนที่ร้อยละ 10 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ทำการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรง ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดและกำลังอัดคอนกรีต จากผลการทดลองพบว่า ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตลดลงเมื่อปริมาณมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้นเมื่อบ่มนานขึ้น นอกจากนี้ การใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานบางส่วนอย่างเดียวยังสามารถเพิ่มความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลให้ดีกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนได้ดีกว่าการใช้เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนในการแทนที่วัสดุประสานบางส่วน

คำสำคัญ: ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์; กำลังอัด; มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล; เถ้าลอย; ผงหินปูน; คอนกรีต

Abstract

This research aims to study the chloride penetration resistance and compressive strength of concrete with recycled concrete aggregate (RCA). The RCA was used to replace the coarse aggregate at the percentage replacement of 10%, 25%, 50% and 100 %. Fly ash (FA) was used as a partial binder replacement material at the percentage replacement of 20% and 30%. While, limestone powder (LP) was used to replace the binder at the percentage replacement of 10%. The water to binder ratios (w/b) were kept at the ratios of 0.40, 0.50 and 0.60. The rapid chloride penetration resistance, bulk chloride diffusion resistance and compressive strength of the concrete with RCA were conducted. Based on the experimental results, it was found that the chloride

penetration resistance and compressive strength of concrete reduced with the increase of w/b and RCA amount. While, the chloride penetration resistance and compressive strength of concrete increased when the water curing was increased. Besides, the utilization of only FA could increase the chloride penetration resistance and compressive strength of concrete with RCA better than concrete with FA and LP.

Keywords: chloride penetration resistance; compressive strength; recycled concrete aggregate; fly ash; limestone powder; concrete

1. บทนำ

ทรัพยากรธรรมชาติต่าง ๆ บนโลกล้วนมีอยู่อย่างจำกัด มนุษย์จึงต้องพิจารณาถึงความจำเป็นที่จะต้องนำของเก่าหรือสิ่งของที่เหลือใช้กลับมาใช้ใหม่ (Recycling) เพื่อให้สิ่งของเหล่านั้นเกิดประโยชน์สูงสุด เช่นเดียวกันในด้านอุตสาหกรรมก่อสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีต ซึ่งถือว่าเป็นอุตสาหกรรมที่ต้องใช้ทรัพยากรธรรมชาติจำนวนมากมาใช้ในการผลิต โดยวัตถุดิบหลักที่ต้องใช้ในการทำก็คือหิน (Rock) หรือมวลรวมหยาบ (Coarse aggregate) ซึ่งได้มาจากการระเบิดภูเขาแล้วนำมาย่อยให้มีขนาดเล็กลงผสมในคอนกรีต จากสถาบันการก่อสร้างแห่งประเทศไทยเปิดเผยว่า อุตสาหกรรมก่อสร้างในปี 2561 คาดว่าความต้องการใช้คอนกรีตเพิ่มมากขึ้น โดยจะมีทั้งการก่อสร้างระบบโครงสร้างพื้นฐานและอสังหาริมทรัพย์ทำให้อุตสาหกรรมก่อสร้างเติบโตขึ้น ซึ่งการก่อสร้างส่วนใหญ่ใช้ทั้งคอนกรีตที่ผลิตจากโรงงานผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป (Precast concrete plant) และโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จ (Ready-mixed concrete plant) ซึ่งในกระบวนการผลิตคอนกรีตเหล่านี้จะส่งผลก่อให้เกิดเศษคอนกรีตจำนวนมาก

ในปัจจุบันมีเศษคอนกรีตที่เหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก ซึ่งเศษคอนกรีตต่าง ๆ เหล่านี้ล้วนมีที่มาจากหลาย ๆ แห่ง ทั้งที่มาจากโรงงานผลิตชิ้นส่วนคอนกรีต

หล่อสำเร็จรูป จากโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ หรือจากการทุบทำลายอาคาร (Building demolition) เป็นต้น จึงมีความจำเป็นในการนำเอาเศษคอนกรีตเหล่านั้นกลับมาใช้ใหม่ให้เกิดประโยชน์ โดยเมื่อนำเศษคอนกรีตเหล่านั้นมาบดย่อยทำเป็นมวลรวมหยาบโดยจะเรียกว่ามวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (Recycled concrete aggregate, RCA) โดยพบว่า มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลจะมีมอร์ตาร์ (Mortar) เกาะติดมาด้วย ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดผลเสียบางประการต่อมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลตามมา อาทิเช่น ความพรุน (Porosity) สูงที่ผิวการดูดซึมน้ำ (Absorption) ของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลมีค่าสูงขึ้น รวมถึงการยึดเกาะ (Bonding) ระหว่างผิวคอนกรีตใหม่ไม่ดีเท่าที่ควร Poon and Kou (2006) [1] ได้ศึกษากำลังอัดและการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิล โดยพบว่า เมื่อใช้มวลรวมรีไซเคิลมากขึ้นทำให้กำลังอัดลดลง การแทรกซึมของคลอไรด์เพิ่มขึ้นเนื่องจากในมวลรวมรีไซเคิลมีความพรุนสูงกว่ามวลรวมหยาบจากธรรมชาติ การนำมวลรวมรีไซเคิลมาใช้งานคอนกรีตจะเกิดปัญหาด้านคุณภาพที่ต่างจากการใช้มวลรวมที่ได้จากธรรมชาติ แต่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตด้วยการเลือกใช้วัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าลอย ซิลิกาฟูม ตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น และวัสดุที่เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมอื่น เช่น ผงหินปูน มาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติคอนกรีตให้มีความคงทนมากขึ้นได้ [2, 3]

เถ้าลอย (Fly ash, FA) เป็นผลพลอยได้จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้เพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนอย่างแพร่หลาย ซึ่งการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนช่วยลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ซึ่งทำให้ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [4] นอกจากนี้การใช้เถ้าลอยทำให้คุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น [5-9] ศิระ อาทมาท และ ทวีชัย สำราญวานิช (2562) [10] พบว่า การใช้เถ้าลอยในคอนกรีตผสมเถ้ากันเตาร้อยละ 10 ทำให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้เถ้าลอยในคอนกรีตยังมีข้อด้อยบางประการ เช่น ต้องการระยะเวลาบ่มน้ำที่นานขึ้น ต้องการเวลาพัฒนากำลังอัดมากกว่า 28 วัน จากงานวิจัยของ Hussain et al. (2013) [11] พบว่าการใช้เถ้าลอยทำให้ระยะเวลาบ่มน้ำคอนกรีตนานขึ้นเนื่องจากเถ้าลอยจะเกิดปฏิกิริยาช้า รวมถึงความต้องการน้ำสำหรับปฏิกิริยาปอซโซลานิกในระยะยาว Deilami et al. (2017) [12] พบว่า การใช้เถ้าลอยในคอนกรีตส่งผลดีต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และการดูดซึมน้ำอย่างมีนัยสำคัญ แต่กำลังอัดที่อายุต้นลดลง Sadrmomtazi et al. (2017) [13] พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่อายุ 7 และ 28 วัน ต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน แต่กำลังอัดของคอนกรีตพัฒนาสูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนที่อายุ 90 วัน

ผงหินปูน (Limestone powder, LP) เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการย่อยหินเพื่อเป็นวัตถุดิบใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์และคอนกรีต โดยจากงานวิจัยในปัจจุบันแสดงให้เห็นถึงจุดเด่นของการใช้วัสดุที่เป็นผลพลอยได้เหล่านี้มากขึ้น [14] การใช้ผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนทำให้คุณสมบัติคอนกรีตดีขึ้น โดยผงหินปูนจะช่วยเข้าไปเติมเต็มโพรงช่องว่าง (Filler effect) ภายในเนื้อคอนกรีต นอกจากนี้ยังช่วยประหยัดต้นทุน อีกทั้งส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อม โดยช่วยลดการปล่อยก๊าซ CO₂ จากกระบวนการปูนซีเมนต์ (ลดปริมาณความ

ต้องการใช้ปูนซีเมนต์) การใช้ผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนทำให้กำลังอัดของคอนกรีตในช่วงอายุต้นสูงขึ้น [15] ในขณะที่ทำให้ลดความต้องการระยะเวลาบ่มให้น้อยลง [11]

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลกระทบของการใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลจากโรงงานคอนกรีตสำเร็จรูปในคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน โดยทดสอบความต้านทานคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีต เพื่อให้ทราบสมบัติความคงทนของคอนกรีตสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล (Marine environment) ควบคู่ไปกับสมบัติเชิงกลในด้านกำลังอัดด้วย

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุและส่วนผสมคอนกรีต

การศึกษานี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland cement type I, OPC1) เป็นวัสดุประสานหลัก และแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอย (Fly ash, FA) และผงหินปูน (Limestone powder, LP) โดยองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 เถ้าลอยที่ใช้เป็นเถ้าลอยที่ได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ในขณะที่ผงหินปูนที่ใช้เป็นผงหินปูนที่ได้มาจากโรงงานย่อยหินปูน จังหวัดลพบุรี โดยขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงหินปูนอยู่ที่ 8 μm สำหรับมวลรวมละเอียด (Sand) ใช้ทรายแม่น้ำที่มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.60 และโมดูลัสความละเอียดที่ 3.10 มวลรวมหยาบเป็นหินปูนมีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.71 และมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (Recycled concrete aggregate, RCA) ได้จากโรงงานคอนกรีตสำเร็จรูปที่ใช้กำลังอัด 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีความถ่วงจำเพาะ 2.43 โดยขนาดกะของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งเป็นไปตาม มยพ. 1201-50 [16] โดยถือเป็นมวลรวมหยาบเลขขนาด (Size number) 57 ตาม ASTM C33

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ (OPC1) เถ้าลอย (FA) และผงหินปูน (LP)

Chemical compositions (%)	OPC1	FA	LP
SiO ₂	20.20	36.10	0.06
Al ₂ O ₃	4.70	19.40	0.09
Fe ₂ O ₃	3.73	15.10	0.04
CaO	63.40	17.40	54.80
MgO	1.37	2.97	0.57
SO ₃	1.22	0.77	0.01
Na ₂ O	0.02	0.55	0.01
K ₂ O	0.28	2.17	0.01
LOI	2.72	2.81	43.80
Physical properties			
Fineness (cm ² /g)	3,430	2,460	9,260
Specific gravity	3.15	2.27	2.70

ตารางที่ 2 ขนาดคละของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล

Sieve No.	Cumulative passing of RCA (%)
1 1/2" (37.5 mm)	100.00
1" (25 mm)	99.75
3/4" (19.0 mm)	78.68
1/2" (12.5 mm)	49.55
3/8" (9.5 mm)	35.79
No.4 (4.75 mm)	8.58
No.8 (2.36 mm)	4.18

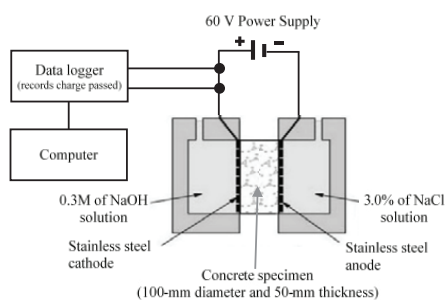
2.2 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

ใช้แบบหล่อตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ความสูง 20 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งและ

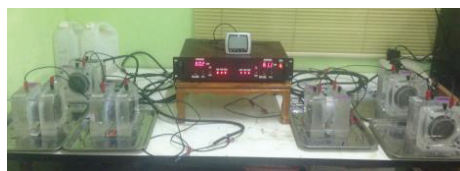
การแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมด ส่วนการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตใช้แบบหล่อตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 10×10×10 เซนติเมตร โดยหล่อตัวอย่างคอนกรีตตามส่วนผสมในตารางที่ 3 ซึ่งใช้อัตราส่วนแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 และ 30 อัตราส่วนแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และอัตราส่วนแทนที่มวลรวมหยาบด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลร้อยละ 10, 25, 50 และ 100 โดยปริมาตร ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.40, 0.50 และ 0.60 ทำการถอดแบบภายหลังจากหล่อตัวอย่าง 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำตัวอย่างไปแช่ในน้ำ จนครบตามระยะเวลาที่กำหนดที่ 28, 56 และ 91 วัน

2.3 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง

การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (Rapid chloride penetration test, RCPT) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1202 [17] ซึ่งเป็นการหาปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่าน (Charge passed) โพรงช่องว่างภายในคอนกรีตที่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยในการศึกษานี้ได้ทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งภายหลังจากที่ตัวอย่างบ่มน้ำครบตามระยะเวลาที่กำหนด 28, 56 และ 91 วัน โดยเมื่อตัวอย่างครบอายุกำหนดทดสอบแล้วนำตัวอย่างขึ้นมาตัดให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ความหนา 5 เซนติเมตร แล้วนำตัวอย่างคอนกรีตไปประกอบเข้ากับเซลล์ทดสอบ จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.3M ที่ขั้วบวก (Anode) และสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 3.0% ที่ขั้วลบ (Cathode) จากนั้นเริ่มให้ค่าศักย์ไฟฟ้า 60 V DC ไหลผ่านตัวอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยมีรายละเอียดดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งผลการทดสอบที่ได้แสดงเป็นปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างตลอดช่วงทดสอบมีหน่วยเป็นคูลอมบ์ (Coulomb)



(ก) รายละเอียดการเตรียมตัวอย่างทดสอบ



(ข) การทดสอบ

ภาพที่ 1 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง

ตารางที่ 3 ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

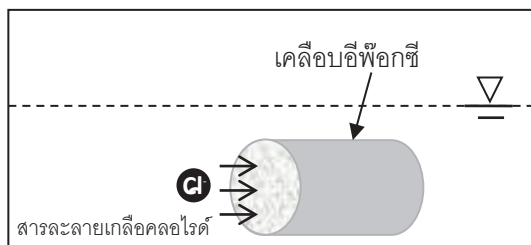
Mix id.	w/b	Mix proportion of concrete (kg/m ³)						
		OPC1	FA	LP	Water	Sand	Rock	RCA
C100W40	0.40	460	-	-	184	761	965	-
C100RA10W40		460	-	-	184	761	872	87
C100RA25W40		460	-	-	184	761	727	217
C100RA50W40		460	-	-	184	761	484	434
C100RA100W40		460	-	-	184	761	-	867
C70FA30W40		305	131	-	174	761	969	-
C70FA30RA10W40		305	131	-	174	761	872	87
C70FA30RA25W40		305	131	-	174	761	727	217
C70FA30RA50W40		305	131	-	174	761	484	434
C70FA30RA100W40		305	131	-	174	761	-	867
C60FA30LP10W40		257	129	43	171	761	969	-
C60FA30LP10RA10W40		257	129	43	171	761	872	87
C60FA30LP10RA25W40		257	129	43	171	761	727	217
C60FA30LP10RA50W40		257	129	43	171	761	484	434
C60FA30LP10RA100W40		257	129	43	171	761	-	867
C70FA20LP10W40W40		305	87	44	174	761	969	-
C70FA20LP10RA10W40		305	87	44	174	761	872	87
C70FA20LP10RA25W40		305	87	44	174	761	727	217
C70FA20LP10RA50W40		305	87	44	174	761	484	434
C70FA20LP10RA100W40		305	87	44	174	761	-	867
C100W50W50	0.50	404	-	-	202	761	965	-
C100RA10W50		404	-	-	202	761	872	87
C100RA25W50		404	-	-	202	761	727	217
C100RA50W50		404	-	-	202	761	484	434
C100RA100W50		404	-	-	202	761	-	867
C10060W60	0.60	360	-	-	216	761	965	-
C100RA10W60		360	-	-	216	761	872	87
C100RA25W60		360	-	-	216	761	727	217
C100RA50W60		360	-	-	216	761	484	434
C100RA100W60		360	-	-	216	761	-	867

หมายเหตุ: “C70FA20LP10RA50W40” หมายถึง คอนกรีตที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนร้อยละ 20 และ 10 ตามลำดับ และแทนที่มวลรวมหยาบด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลร้อยละ 50

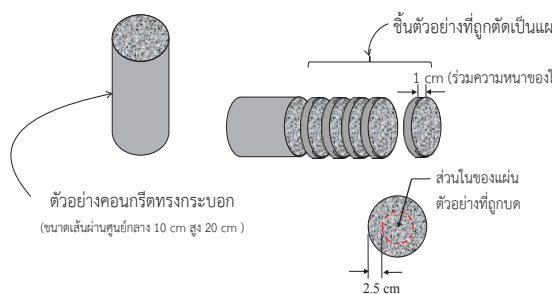
2.4 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมด

ในการทดสอบหาปริมาณการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมด (Bulk chloride diffusion test) ในคอนกรีตดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C1556 [18] โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร โดยภายหลังตัวอย่างคอนกรีตถูกบ่มในน้ำเป็นระยะเวลา 28 วัน แล้วจึงนำตัวอย่างขึ้นจากน้ำและทิ้งไว้ให้แห้งในอากาศเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการทาพื้นผิวตัวอย่างด้วยอีพ็อกซีเพื่อป้องกันไม่ให้คลอไรด์แทรกซึมเข้าไปในตัวอย่าง โดยยกเว้นไว้หนึ่งด้าน ดังแสดงในภาพที่ 2 เพื่อให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปในตัวอย่างตลอดช่วงทำการทดลอง หลังจากทือพ็อกซีแข็งตัวแล้วจึงนำตัวอย่างไปแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์เข้มข้น 3.0% เป็นระยะเวลา 28, 56 และ 91 วัน ตามลำดับ โดยอุณหภูมิตลอดช่วงการทดสอบอยู่ที่ประมาณ $30^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ เมื่อตัวอย่างครบระยะเวลาเผชิญคลอไรด์แล้วจึงนำตัวอย่างออกจากสารละลายเกลือคลอไรด์ทิ้งไว้ให้แห้งในอากาศ แล้วนำตัวอย่างไปตัดเป็นแผ่นที่ละ 1 เซนติเมตร ตามความยาวจากผิวหน้าที่ไม่ทาอีพ็อกซี (ด้านที่เผชิญคลอไรด์) จากนั้นนำแผ่นตัวอย่างที่ตัดแล้วไปบดเป็นผงผ่านตะแกรงเบอร์ 20 เพื่อนำไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีต โดยในการบดตัวอย่างจะเลือกเฉพาะบริเวณตรงกลางของแผ่นตัวอย่าง ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงคลอไรด์ที่อาจปนเปื้อนจากด้านข้างได้ ซึ่งสำหรับการตัดและบดตัวอย่างมีรายละเอียดดังแสดงในภาพที่ 3 ในการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Acid-soluble chloride content) ในคอนกรีตทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1152 [19] จากนั้นจึงนำข้อมูลผลการทดลองการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ได้จากการทดลองไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ (D_a) ของคอนกรีตโดย

ใช้สมการคำตอบกฎข้อที่สองของฟิกค์ (Fick's second law of diffusion equation) ดังสมการที่ 1



ภาพที่ 2 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมด



ภาพที่ 3 การเตรียมผงตัวอย่างคอนกรีต

$$C(x,t) = C_i + (C_s - C_i) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_a t}} \right) \right] \quad (1)$$

เมื่อ $C(x,t)$ คือปริมาณคลอไรด์ที่ความลึก x ใด ๆ ภายหลังเผชิญคลอไรด์เป็นระยะเวลา t ใด ๆ (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

C_i คือ ปริมาณคลอไรด์เริ่มต้นในคอนกรีต (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

C_s คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าคอนกรีต (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

erf คือ เออเอร์ฟฟังก์ชัน

D_a คือ สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ (ตารางเซนติเมตร/ปี)

x คือ ความลึกจากผิวหน้า (เซนติเมตร)

t คือ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (ปี)

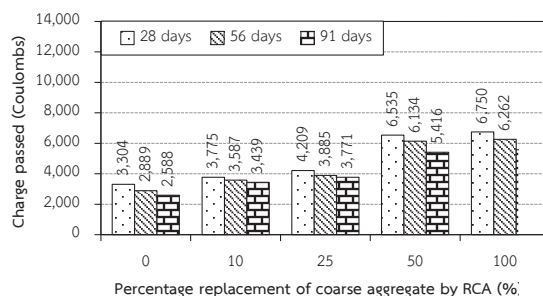
2.5 การทดสอบกำลังอัด

ทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตโดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 10x10x10 เซนติเมตรตามมาตรฐาน BS 1881-116 [20] โดยทำการทดสอบภายหลังตัวอย่างคอนกรีตบ่มน้ำครบตามกำหนดเป็นระยะเวลา 28, 56 และ 91 วัน

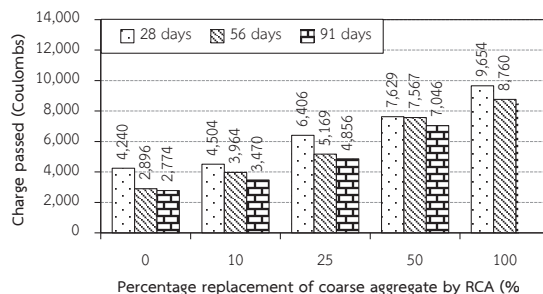
3. ผลการทดลองและอภิปราย

3.1 การแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีต

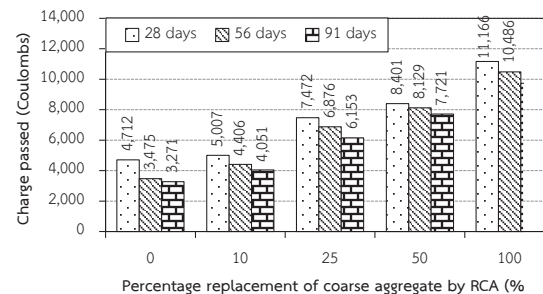
จากภาพที่ 4 พิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนแทนที่มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลต่อมวลรวมหยาบสำหรับคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40, 0.50 และ 0.60 พบว่า ค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากหินธรรมชาติ โดยเมื่อแทนที่มวลรวมหยาบด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้ค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตสูงขึ้น กล่าวอีกนัยหนึ่งคือคอนกรีตมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีตลดลง เนื่องจากมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลมีส่วนประกอบที่เป็นซีเมนต์เฟสหรือมอร์ตาร์ติดอยู่ทำให้การยึดเกาะคอนกรีตไม่ดี อีกทั้งมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลมีความพรุนสูงจึงทำให้คอนกรีตมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีตลดลง อย่างไรก็ตามเมื่ออายุบ่มนานขึ้นความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตสูงขึ้น (ค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตลดลง) ตามไปด้วย เนื่องจากผลผลิตที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมากขึ้น ซึ่งไปอุดโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นมากขึ้น



(ก) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



(ข) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

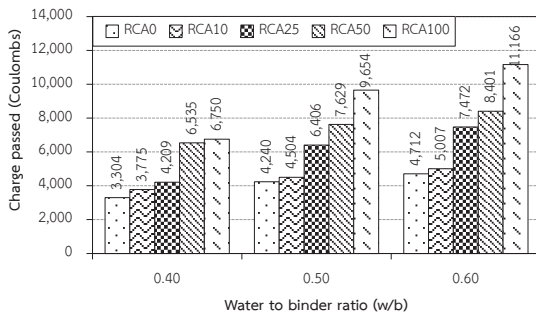


(ค) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

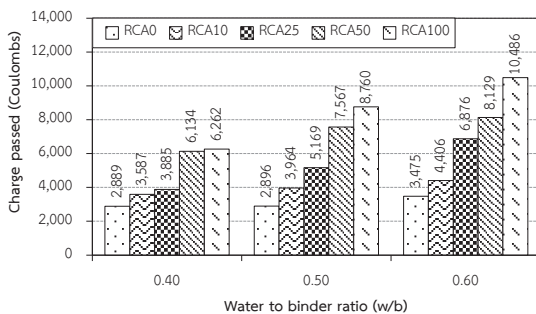
ภาพที่ 4 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล

เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) จากภาพที่ 5 พบว่า ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีตลดลง (ค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตเพิ่มขึ้น) เมื่อ w/b สูงขึ้น

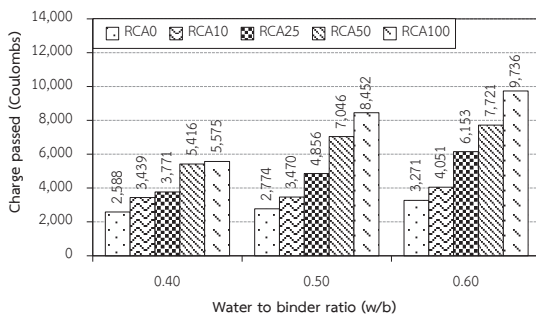
เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้ w/b สูงขึ้นทำให้มีปริมาณน้ำอิสระมากขึ้นส่งผลทำคอนกรีตมีความพรุนที่เกิดจากน้ำอิสระเหล่านั้นสูงขึ้นตามไปด้วย เป็นเหตุทำให้ประจุไฟฟ้าสามารถไหลผ่านคอนกรีตผ่านไปตามโครงช่องว่างเหล่านั้นได้ง่ายขึ้น



(ก) ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน



(ข) ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 56 วัน

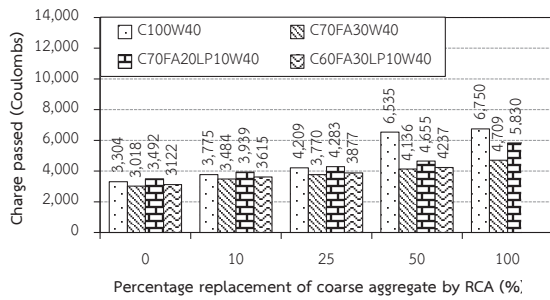


(ค) ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 91 วัน

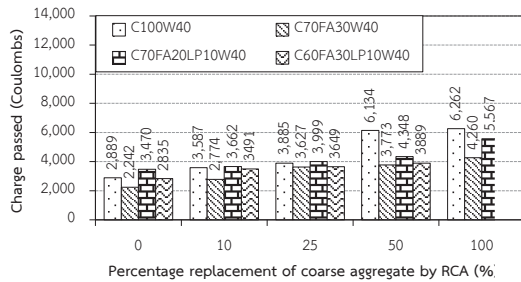
ภาพที่ 5 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตที่ผสมมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่ใช้ w/b ต่างกัน

ภาพที่ 6 พิจารณาผลกระทบของเถ้าลอยและผงหินปูนต่อประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต (ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีต) ที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่ w/b 0.40 พบว่า ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน สำหรับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลแทนที่มวลรวมหยาบไม่เกินร้อยละ 25 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีตผสมเถ้าลอย (C70FA30W40) และคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน (C70FA20LP10W40 และ C60FA20LP10W40) ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับคอนกรีตซีเมนต์ล้วน (C100W40) แต่เมื่อคอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลแทนที่มวลรวมหยาบมากกว่าร้อยละ 25 พบว่า ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนลดลงต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนอย่างมีนัยสำคัญ

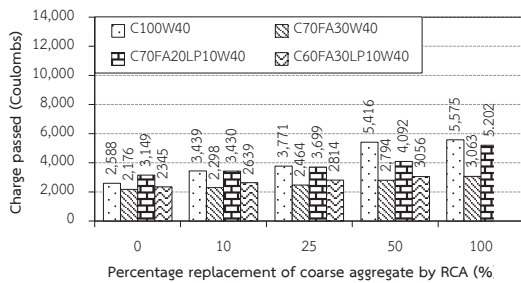
อย่างไรก็ตาม เมื่ออายุบ่มน้ำนานขึ้น (ภาพที่ 6) คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานที่ร้อยละ 30 (C70FA30W40) ให้ความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตสูงขึ้น (ค่าประจุไฟฟ้าลดลง) และสูงที่สุดทุกส่วนผสม เนื่องจากเถ้าลอยทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น เมื่อพิจารณาการใช้เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนในการแทนที่วัสดุประสาน พบว่า ที่ร้อยละแทนที่วัสดุประสานเท่ากัน (ร้อยละ 30) ความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (C70FA20LP10W40) ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานอย่างเดียว (C70FA30W40) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยเป็นร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (C60FA30LP10W40) พบว่า ความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตเพิ่มขึ้นและใกล้เคียงเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานอย่างเดียว



(ก) ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน



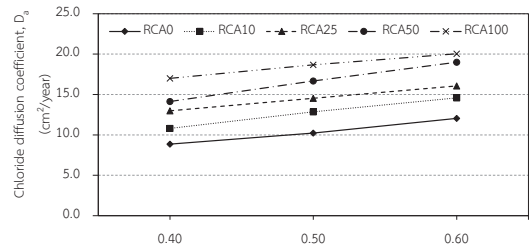
(ข) ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 56 วัน



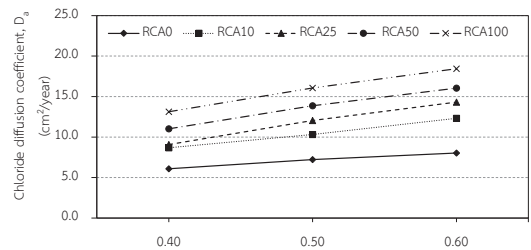
(ค) ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 91 วัน

ภาพที่ 6 ผลกระทบของเถ้าลอยและผงหินปูนต่อประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล

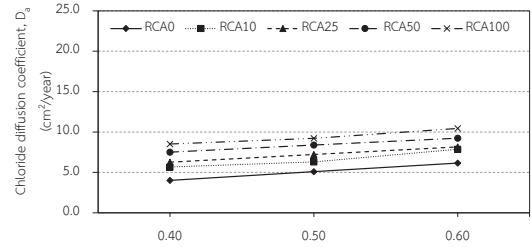
3.2 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต



(ก) ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน



(ข) ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 56 วัน



(ค) ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 91 วัน

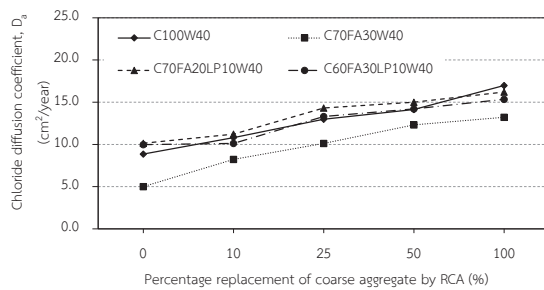
ภาพที่ 7 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล

ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดในคอนกรีตนำเสนอในรูปค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ คลอไรด์ (Da) ซึ่งจากภาพที่ 7 เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนพื้นที่มวลรวมคอนกรีตริโซเคลต่อมวลรวมหยาบต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40, 0.50 และ 0.60 พบว่า เป็นไปในทำนองเดียวกันกับผลการทดลองความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตริโซเคลสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากหินธรรมชาติ และเมื่อใช้มวลรวมคอนกรีตริโซเคลแทนที่มวลรวมหยาบในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตสูงขึ้น เนื่องจากมวลรวมคอนกรีตริโซเคลมีส่วนประกอบของซีเมนต์มอร์ตาร์ติดอยู่ทำให้การยึดเกาะไม่ดี อีกทั้งมวลรวมคอนกรีตริโซเคลมีความพรุนสูงส่งผลทำให้ไอออนคลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตได้มากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์จึงสูงขึ้นตามไปด้วย

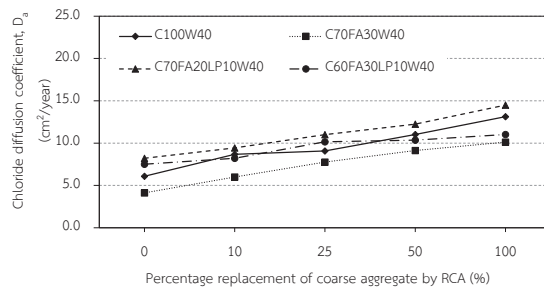
เมื่อพิจารณาผลกระทบของ w/b จากภาพที่ 7 พบว่า สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตสูงขึ้นเมื่อ w/b สูงขึ้น เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้ w/b สูงขึ้นทำให้มีปริมาณน้ำอิสระมากขึ้นส่งผลทำให้คอนกรีตมีความพรุนที่เกิดจากน้ำอิสระเหล่านั้นสูงขึ้นตามไปด้วย ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ที่แพร่ผ่านไปตามโพรงช่องว่างเหล่านั้นได้ง่ายขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อคอนกรีตถูกบ่มนานขึ้นส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตลดลงตามไปด้วย เนื่องจากผลผลิตที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมากขึ้น ซึ่งไปอุด

โพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นมากขึ้น ไอออนคลอไรด์จึงแทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้ยากขึ้น

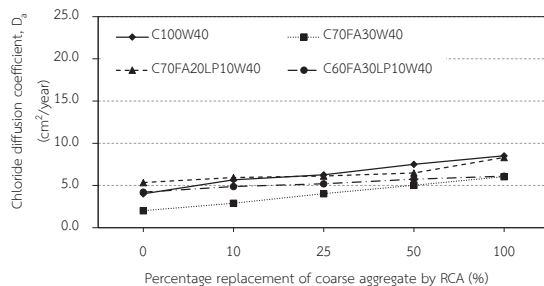
ภาพที่ 8 แสดงผลกระทบของเถ้าลอยและผงหินปูนต่อสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตริโซเคลที่ w/b 0.40 พบว่า สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานที่ร้อยละ 30 (C70FA30W40) มีค่าต่ำสุดและต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน (C100W40) และคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนทุกส่วนผสมอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากเถ้าลอยทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบแน่นมากขึ้น เมื่อพิจารณาการใช้เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนในการแทนที่วัสดุประสาน พบว่า ที่ร้อยละ แทนที่วัสดุประสานเท่ากัน (ร้อยละ 30) สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (C70FA20LP10W40) มีแนวโน้มสูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยเป็นร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (C60FA30LP10W40) พบว่า สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงใกล้เคียงกับคอนกรีตซีเมนต์ล้วน อย่างไรก็ตาม เมื่ออายุบ่มนานขึ้นถึง 91 วัน ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของ C70FA20LP10W40 และ C60FA30LP10W40 มีแนวโน้มลดลงต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน อาจเนื่องมาจากเถ้าลอยทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดผลผลิตได้มากขึ้นประกอบกับผงหินปูนที่ช่วยอุดโพรงช่องว่างทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นมากขึ้น



(ก) ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน



(ข) ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 56 วัน



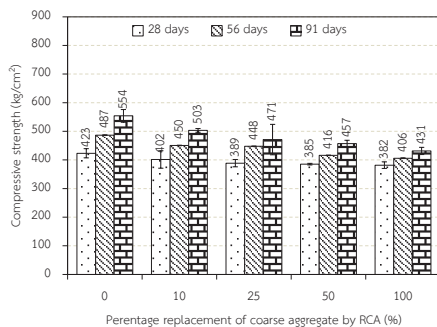
(ค) ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 91 วัน

ภาพที่ 8 ผลกระทบของเถ้าลอยและผงหินปูนต่อสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล

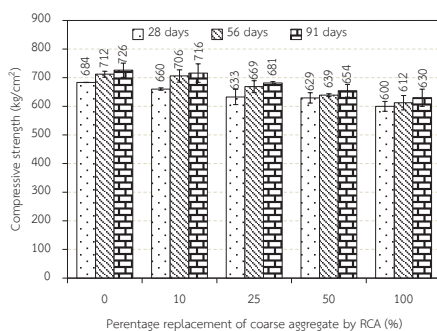
3.3 กำลังอัดของคอนกรีต

ภาพที่ 9 เมื่อพิจารณาผลกระทบของการใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40, 0.50 และ 0.60 พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากหินธรรมชาติ และเมื่อปริมาณการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงเนื่องจากมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลมีส่วนประกอบของมอร์ตาร์ติดอยู่ ทำให้ความสามารถในการการยึดประสานระหว่างซีเมนต์เฟสและมวลรวมหยาบลดลง นอกจากนี้ มอร์ตาร์ที่ติดมายังทำให้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลมีความพรุนสูง จึงทำให้คอนกรีตมีค่ากำลังอัดลดลง อย่างไรก็ตามเมื่ออายุบ่มน้ำนานขึ้นกำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากผลผลิตที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมากขึ้นซึ่งไปอุดโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นมากขึ้น

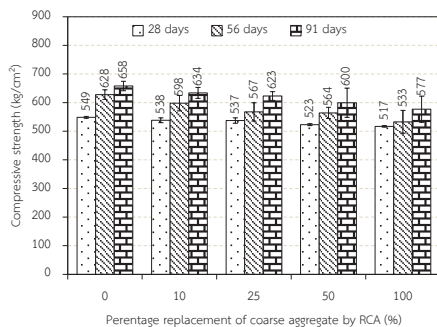
เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) จากภาพที่ 9 (ก, ข และ ค) พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตลดลงเมื่อ w/b สูงขึ้น เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้ w/b สูงขึ้นทำให้มีปริมาณน้ำอิสระมากขึ้นส่งผลทำให้คอนกรีตมีความพรุนที่เกิดจากน้ำอิสระเหล่านั้นสูงขึ้นตามไปด้วย เป็นเหตุทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง



(ก) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



(ข) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

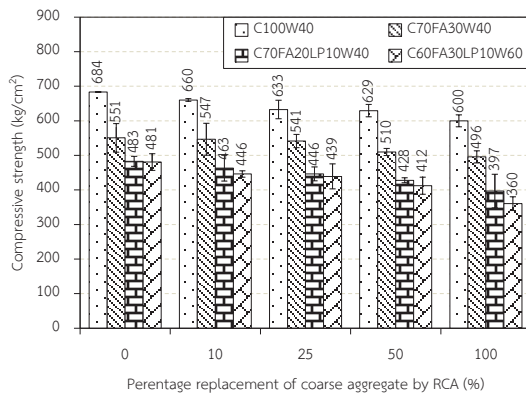


(ค) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

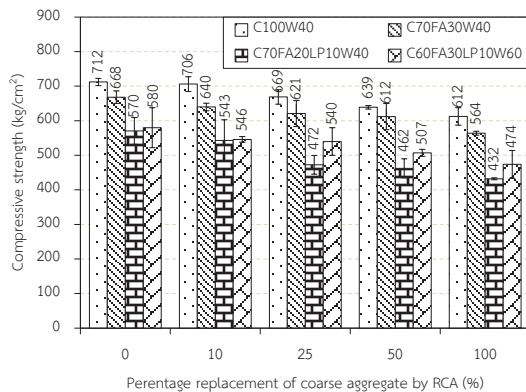
ภาพที่ 9 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล

จากภาพที่ 10 พิจารณาผลกระทำของการใช้เถ้าลอยและผงหินปูนในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลต่อกำลังอัดของคอนกรีต พบว่า ที่อายุบ่ม 28 วัน กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยและคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานบางส่วนต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน (C100W40) แต่เมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้น (ที่ 56 และ 91 วัน) กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ร้อยละ 30 (C70FA30W40) มีแนวโน้มสูงขึ้นและสูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนในช่วงระยะเวลาการบ่มน้ำที่ 91 วัน เนื่องจากเถ้าลอยทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ช่วยเพิ่มการยึดประสานในคอนกรีตส่งผลให้คอนกรีตมีความแข็งแรงมากขึ้น

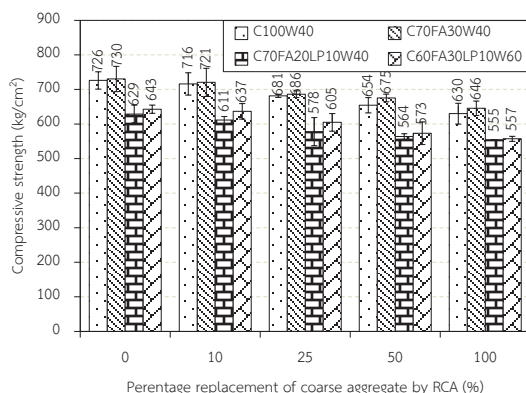
นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน จากภาพที่ 10 พบว่ากำลังอัดของ คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยและผงหินปูน (C70FA20LP10W40 และ C60FA30LP10W40) ลดลงต่ำกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยอย่างเดียว อาจเป็นเพราะผงหินปูน แม้จะช่วยทำให้คอนกรีตแข็งแรงมากขึ้นแต่เนื่องจากเป็นวัสดุที่ไม่มีความเป็นวัสดุปอซโซลาน ดังนั้น สารยึดประสานที่เป็นเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกในคอนกรีตที่ใช้ผงหินปูนอาจน้อยกว่าเมื่อเทียบกับคอนกรีตผสมเถ้าลอยอย่างเดียว



(ก) ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน



(ข) ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 56 วัน



(ค) ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 91 วัน

ภาพที่ 10 ผลกระทบของเถ้าลอยและผงหินปูนต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล

4. สรุปผล

จากผลการศึกษาความต้านทานคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากหินธรรมชาติ โดยเมื่อแทนที่มวลรวมหยาบด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีตลดลง

2. สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากหินธรรมชาติ โดยเมื่อแทนที่มวลรวมหยาบด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้น

3. กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลมีแนวโน้มต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากหินธรรมชาติ โดยเมื่อแทนที่มวลรวมหยาบด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง

4. การใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานบางส่วนอย่างเดียวยังสามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติด้านความคงทน (ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์) และทางกล (กำลังอัด) ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลให้ดีกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนได้ดีกว่าการใช้เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนในการแทนที่วัสดุประสานบางส่วน

5. ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตลดลงเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้นเมื่อบ่มน้ำนานขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยมหาวิทยาลัยบูรพา สัญญาเลขที่ 109/2560 และการสนับสนุนจากหน่วยวิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษาบูรพา (BCONTEC) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Kou S C, and Poon C S (2012). Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, 35: 59-76.
- [2] กิรติ ชัยประเศียร และ สุรทิน สุทธิประภา (2558). ผลกระทบของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลจากโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จต่อความต้านทานคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีต. *ปริญญานิพนธ์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา, ชลบุรี, ประเทศไทย*
- [3] Jena T, and Panda K C (2018). Mechanical and durability properties of marine concrete using fly ash and silpozz. *Advances in Concrete Construction*, 6(1): 47-68.
- [4] Zunino F, Boehm-Courjault E, and Scrivener K (2020). The impact of calcite impurities in clays containing kaolinite on their reactivity in cement after calcination. *Materials and Structures*, 53(44): 1-15.
- [5] Mehta P K (1981). Studies on blended Portland cements containing Santorin earth. *Cement and Concrete Research*, 11(4): 507-518.
- [6] Mehta P K, and Monterio P J M (2006). *Concrete: Microstructure. Properties and Materials*. (3rd Edition), The McGraw-Hill Companies.
- [7] Massazza F (1993). Pozzolanic cements. *Cement and Concrete Composites*, 15(4): 185-214.
- [8] Chindaprasit P, Jaturapitakkul C, and Sinsiri T (2007). Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cement paste. *Construction and Building Materials*, 21(4): 1534-1541.
- [9] Nguyen C V, Lambert P, and Bui V N (2020). Effect of locally sourced pozzolan on corrosion resistance of steel in reinforced concrete beams. *International Journal of Civil Engineering*, 18: 619-630.
- [10] Arttamart S, and Sumranwanich T (2019). Compressive strength and chloride penetration resistance of concrete with fly ash, limestone powder and partial replacement of fine aggregate by bottom ash. *Journal of Engineering, RMUTT*, 17(2): 113-125. (in Thai)
- [11] Hussain K, Choktaweekarn P, Saengsoy W, Srichan T, and Tangtermsirikul S (2013). Effect of cement types, mineral admixtures, and bottom ash on the curing sensitivity of concrete. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 20(1): 94-105.
- [12] Deilami S, Aslani F, and Elchalakani M (2017). Durability assessment of self-compacting concrete with fly ash. *Advances in Concrete Construction*, 19(5): 489-499.
- [13] Sadrmomtazi A, Tahmouresi B, and Amooie M (2017). Permeability and mechanical properties of binary and ternary cementitious mixtures. *Advances in Concrete Construction*, 5(5): 423-436.
- [14] Sunil B M, Manjunatha L S, Lolitha R, and Subhash C Y (2015). Potential use of mine tailings and fly ash in concrete. *Advances in Concrete Construction*, 3(1): 55-69.
- [15] Lawrence P, Cyr M, Ringot E (2003). Mineral admixtures in mortars: effect of inert materials on short term hydration. *Cement and Concrete Research*, 33(12): 1939-1947.
- [16] กรมโยธาธิการและผังเมือง. มยพ. 1201-50. *มาตรฐานการทดสอบหาขนาดผลของมวลรวม*
- [17] American society for testing materials. ASTM 1202-97. Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. *Annual Book of ASTM Standard*. 2004; Vol.4.02.
- [18] American society for testing and materials. ASTM 1556. Standard test method for determining the apparent chloride diffusion coefficient of cementitious mixtures by bulk diffusion. *Annual Book of ASTM Standard*. 2004; Vol. 4.02.
- [19] American society for testing and materials. ASTM C1152. Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete. *Annual Book of ASTM Standards*. 2004; Vol. 4.02.
- [20] British Standard. BS 1881-116. Method for determination of compressive strength of concrete cubes, 1983.