

ผลกระทบของระบบวัสดุประสานสองชนิดและสามชนิดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอย ผงหินปูนและสารขยายตัวต่อความต้านทานคลอไรด์

ลีน่า ปรีก¹ และทวีชัย สำราญวานิช^{2*}
lyna_plnce@hotmail.com¹, twc@buu.ac.th^{2*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

Received	: 8-Sep-2020
Revised	: 22-Dec-2020
Accepted	: 28-Jan-2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลกระทบของการใช้ระบบวัสดุประสานสองชนิด และระบบวัสดุประสานสามชนิดในมอร์ตาร์ต่อความต้านทานคลอไรด์ โดยศึกษาการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอย ผงหินปูนและสารขยายตัวในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.40 และ 0.50 ใช้เถ้าลอยและผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานบางส่วนตั้งแต่ร้อยละ 5 ถึง 30 และใช้สารขยายตัวแทนที่วัสดุประสานบางส่วนร้อยละ 10 ทำการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรง ความลึกการแทรกซึมคลอไรด์และการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดของมอร์ตาร์ จากผลการศึกษาพบว่า การใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในมอร์ตาร์ (ระบบวัสดุประสาน 2 ชนิด) สามารถลดปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่าน ความลึกการแทรกซึมคลอไรด์และสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของมอร์ตาร์ภายใต้การแทรกซึมคลอไรด์ได้ โดยมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงสุด นอกจากนี้ มอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน (ระบบวัสดุประสาน 3 ชนิด) ในสัดส่วนที่เหมาะสมให้ผลความต้านทานคลอไรด์ที่ดีที่สุด

คำสำคัญ: ความต้านทานคลอไรด์ มอร์ตาร์ เถ้าลอย ผงหินปูน สารขยายตัว

Effects of Binary and Ternary Binder Systems of Mortar with Fly Ash, Limestone Powder, and Expansive Additive on Chloride Resistance

Lyna Prak¹ and Taweechai Sumranwanich^{2*}
lyna_plnce@hotmail.com¹, twc@buu.ac.th^{2*}

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thayaburi

² Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University

Received	: 8-Sep-2020
Revised	: 22-Dec-2020
Accepted	: 28-Jan-2021

Abstract

This paper aims to study the effect of binary and ternary binder system in mortars on chloride resistance. The study used fly ash (FA), limestone powder (LP), and expansive additive (EA) as partial cement replacement materials in mortars. Ordinary Portland cement type I was used as the main binder. Water-to-binder ratios were kept at 0.40 and 0.50. The FA and LP partially replaced the binder at percentages ranging from 5% to 30%, and EA partially replaced the binder at 10%. The chloride resistances of binary and ternary binder mortars were investigated. Rapid chloride penetration, rapid chloride migration and bulk chloride diffusion of mortars were tested. The study showed that the use of FA as a supplementary material of binder in mortar (binary binder system) can reduce the charge passed, chloride penetration depth, and chloride diffusion coefficient of the mortar under chloride ingress. The binary binder mortar with FA exhibited the highest chloride resistance. Furthermore, the mortar with FA and LP (ternary binder system) at appropriate proportions displayed good chloride resistance results.

Keywords: chloride resistance, mortar, fly ash, limestone powder, expansive additive

1. บทนำ

การทำลายเนื่องจากคลอไรด์เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดสนิม โดยเฉพาะสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่มีคลอไรด์ [1-3] ซึ่งการเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีตเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเสื่อมสภาพ [4] เมื่อคอนกรีตต้องเผชิญกับคลอไรด์ อีออนคลอไรด์จะค่อย ๆ แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตจนถึงระดับผิวเหล็กเสริมและสะสมจนมีปริมาณมากกว่าระดับคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตฟิล์มบาง ๆ (Passive film) ที่หุ้มเหล็กเสริมจะถูกทำลายและเมื่อมีความชื้นและออกซิเจนเหล็กเสริมเกิดสนิมซึ่งนำไปสู่การวิบัติของโครงสร้าง [5] ดังนั้น โครงสร้างคอนกรีตจึงต้องได้รับการออกแบบให้มีความคงทนเพียงพอที่จะทนทานต่อสภาพแวดล้อมคลอไรด์รวมทั้งยังสามารถต้านทานแรงกระทำทั้งหมดได้ ความคงทนของคอนกรีตส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีต เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุพูน การเคลื่อนที่ของไอออนสารเคมีหรือความชื้นในคอนกรีตอาจเกิดขึ้นได้ด้วยกลไกการแพร่หรือการดูดซึมผ่านไปตามโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีต ดังนั้นเพื่อผลิตคอนกรีตให้มีความคงทนนั้นวัสดุปอซโซลานถูกนำมาใช้ในส่วนผสมคอนกรีตอย่างแพร่หลายซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าลอย ซิลิกาฟูม ตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น และวัสดุที่เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมอื่น เช่น ผงหินปูน มาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติคอนกรีตให้มีความคงทนมากขึ้น [6]

เถ้าลอย (Fly ash) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้เพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนอย่างแพร่หลาย ซึ่งการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนช่วยลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ซึ่งช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) สู่อากาศอีกด้วย [7] เถ้าลอยถูกนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตสำหรับงานก่อสร้างหลากหลายรูปแบบทั้งนี้เนื่องจากการใช้เถ้าลอยทำให้คุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และการเกิดสนิมเป็นต้น [8-12] ศิริระ อาทมาท และทวีชัย สารานูวานิช (2562) [13] พบว่า การใช้เถ้าลอยในคอนกรีตผสมเถ้ากั้นเตาร้อยละ 10 ทำให้ความต้านทานการ

แทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม การใช้เถ้าลอยในคอนกรีตยังมีข้อดีบางประการ เช่น ต้องการระยะเวลาบ่มน้ำที่นานขึ้น การพัฒนากำลังอัดต่ำ ต้องการเวลาพัฒนากำลังอัดมากกว่า 28 วัน จากงานวิจัยของ Hussain et al. (2013) [14] พบว่าการใช้เถ้าลอยทำให้ระยะเวลาบ่มน้ำคอนกรีตนานขึ้นเนื่องจากเถ้าลอยจะเกิดปฏิกิริยาเข้าร่วมถึงความต้องการน้ำสำหรับปฏิกิริยาปอซโซลานิกในระยะยาว Deilami et al. (2017) [15] พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยส่งผลดีต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และการดูดซึมน้ำอย่างมีนัยสำคัญ แต่กำลังอัดที่อายุต้นลดลง Sadrmomtazi et al. (2017) [16] พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่อายุ 7 และ 28 วัน ต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน แต่กำลังอัดของคอนกรีตพัฒนาสูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนที่อายุ 90 วัน

ส่วนผงหินปูน (Limestone powder) เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการย่อยหินเพื่อเป็นวัตถุดิบใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์และคอนกรีต จากความต้องการใช้ปูนซีเมนต์ที่สูงขึ้นส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่ถูกปล่อยออกมาจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ [17, 18] เพื่อลดปัญหามลพิษและการกำจัดผลพลอยได้ที่เกิดจากอุตสาหกรรมจึงจำเป็นต้องมีการนำผลพลอยได้เหล่านี้มาใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง [19] จากงานวิจัยในปัจจุบันแสดงให้เห็นถึงจุดเด่นของการใช้วัสดุที่เป็นผลพลอยได้เหล่านี้มากขึ้น [20] การใช้ผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนทำให้คุณสมบัติคอนกรีตดีขึ้น โดยผงหินปูนจะช่วยเข้าไปเติมเต็มโพรงช่องว่าง (Filler effect) ภายในเนื้อคอนกรีต นอกจากนี้ ยังช่วยประหยัดต้นทุนอีกทั้งส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อมโดยช่วยลดการปล่อยก๊าซ CO₂ จากกระบวนการปูนซีเมนต์ (ลดปริมาณความต้องการใช้ปูนซีเมนต์) การใช้ผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนทำให้กำลังอัดของคอนกรีตในช่วงอายุต้นสูงขึ้น [21] ในขณะที่ทำให้ลงความต้องการระยะเวลาบ่มให้น้อยลง [14]

ปัญหาที่เกิดจากการหดตัวและการรับกำลังดึงได้ต่ำเป็นคุณสมบัติที่ไม่พึงปรารถนาสองประการพบได้บ่อยกับงานคอนกรีตในประเทศไทย โครงสร้างคอนกรีตภายใต้สภาพที่ถูกยึดรั้ง คอนกรีตอาจแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวได้ แต่การหดตัวของคอนกรีตสามารถควบคุมได้ด้วยการใช้สารเคมี

ผสมเพิ่ม เช่น สารขยายตัว (Expansive additives) โดยเมื่อคอนกรีตขยายตัว สารขยายตัวจะสร้างหน่วยแรงอัดในเนื้อคอนกรีตที่อยู่ภายใต้สภาพที่ถูกยึดรั้ง ซึ่งจะช่วยลดหรือขจัดหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นจากการหดตัวของคอนกรีตที่อยู่ภายใต้สภาพที่ถูกยึดรั้งนั้นได้ [22] จากการศึกษาของ Liu et al. (2019) [23] พบว่า การใช้สารขยายตัวในคอนกรีตบดอัดได้ด้วยตัวเอง (Self-compacting concrete) ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงเล็กน้อย ในขณะที่การหดตัวแบบออโตจีนิส (Autogenous shrinkage) และการหดตัวแบบแห้ง (Drying shrinkage) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ ยังช่วยเพิ่มความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์อีกด้วย

ดังนั้นงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลกระทบของการใช้เถ้าลอย ผงหินปูนและสารขยายตัวแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนต่อความคงทนของมอร์ตาร์ โดยทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่ใช้ระบบวัสดุประสาน 2 ชนิด (Binary binder system) และระบบวัสดุประสาน 3 ชนิด (Ternary binder system) เปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว

2. วิธีการศึกษา

2.1. วัสดุและส่วนผสมคอนกรีต

การศึกษานี้ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland cement type I, OPC1) เป็นวัสดุประสานหลัก และแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอย (Fly ash, FA) ผงหินปูน (Limestone powder, LP) และสารขยายตัว (Expansive additive, EA) โดยองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 เถ้าลอยที่ใช้เป็นเถ้าลอยที่ได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ในขณะที่ผงหินปูนที่ใช้เป็นผงหินปูนที่ได้มาจากโรงงานย่อยหินปูนจังหวัดลพบุรี โดยขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงหินปูนอยู่ที่ 8 μm ส่วนสารขยายตัวที่ใช้เป็นวัสดุเชิงพาณิชย์ที่มีขายตามท้องตลาดในประเทศไทยซึ่งเป็นวัสดุที่มีสารประกอบแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นหลัก โดยการขยายตัวของสารขยายตัวนี้เกิดจากผลึกของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมออกไซด์ สำหรับมวลรวมละเอียด (Sand) ใช้ทรายแม่น้ำที่มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.60 และโมดูลัสความละเอียดที่ 3.10

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ (OPC1) เถ้าลอย (FA) ผงหินปูน (LP) และสารขยายตัว (EA)

Chemical compositions (%)	OPC1	FA	LP	EA
SiO ₂	20.20	36.10	0.06	9.60
Al ₂ O ₃	4.70	19.40	0.09	2.50
Fe ₂ O ₃	3.73	15.10	0.04	1.30
CaO	63.40	17.40	54.80	67.30
MgO	1.37	2.97	0.57	0.40
SO ₃	1.22	0.77	0.01	18.00
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	0.40
Physical properties				
Fineness (cm ² /g)	3,430	2,460	9,260	3,500
Specific gravity	3.15	2.27	2.70	3.04

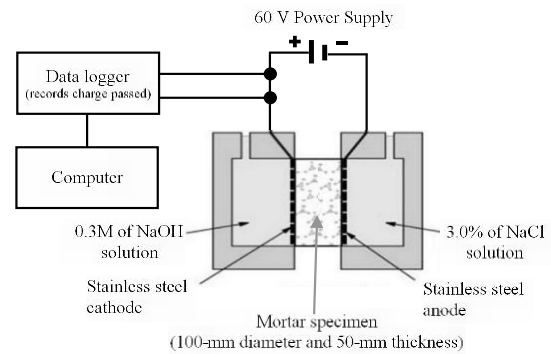
ในการศึกษาผลกระทบของเถ้าลอย ผงหินปูน และสารขยายตัวต่อความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์นั้น ใช้มอร์ตาร์ทั้งหมด 20 ส่วนผสมแตกต่างกัน โดยมีมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์อย่างเดียวรวมทั้งมอร์ตาร์ที่ใช้ระบบวัสดุประสาน 2 ชนิด และระบบวัสดุประสาน 3 ชนิด ซึ่งรายละเอียดส่วนผสมของมอร์ตาร์แสดงไว้ในตารางที่ 2 สำหรับมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานแบบ 2 ชนิดประกอบไปด้วยมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 (F30) มอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยผงหินปูนร้อยละ 5 L5 และ 25 (L5 L15 และ L25) และมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยสารขยายตัวร้อยละ 10 (E10) ส่วนมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานแบบ 3 ชนิดประกอบด้วยมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยร้อยละ 5 รวมกับผงหินปูนร้อยละ 25 (F5L25) มอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 รวมกับผงหินปูนร้อยละ 15 (F15L15) มอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยร้อยละ 25 รวมกับผงหินปูนร้อยละ 5 (F25L5) และมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 รวมกับสารขยายตัวร้อยละ 10 (F30E10) โดยในการออกแบบส่วนผสมมอร์ตาร์ใช้อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน 2.75 ทุกส่วนผสม และศึกษาที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.40 และ 0.50

ตารางที่ 2 ส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการศึกษา

No.	Designation	Cement (kg)	Sand (SSD) (kg)	Cement replacement materials (kg)			Water (kg)
				FA	EA	LP	
1	C1W40	1.00	2.75	-	-	-	0.40
2	C1F30W40	0.70	2.75	0.30	-	-	0.40
3	C1L5W40	0.95	2.75	-	-	0.05	0.40
4	C1L15W40	0.85	2.75	-	-	0.15	0.40
5	C1L25W40	0.75	2.75	-	-	0.25	0.40
6	C1E10W40	0.90	2.75	-	0.10	-	0.40
7	C1F5L25W40	0.70	2.75	0.05	-	0.25	0.40
8	C1F15L15W40	0.70	2.75	0.15	-	0.15	0.40
9	C1F25L5W40	0.70	2.75	0.25	-	0.05	0.40
10	C1F30E10W40	0.60	2.75	0.30	0.10	-	0.40
11	C1W50	1.00	2.75	-	-	-	0.50
12	C1F30W50	0.70	2.75	0.30	-	-	0.50
13	C1E10W50	0.90	2.75	-	0.10	-	0.50
14	C1L5W50	0.95	2.75	-	-	0.05	0.50
15	C1L15W50	0.85	2.75	-	-	0.15	0.50
16	C1L25W50	0.75	2.75	-	-	0.25	0.50
17	C1F5L25W50	0.70	2.75	0.05	-	0.25	0.50
18	C1F15L15W50	0.70	2.75	0.15	-	0.15	0.50
19	C1F25L5W50	0.70	2.75	0.25	-	0.05	0.50
20	C1F30E10W50	0.60	2.75	0.30	0.10	-	0.50

2.2. การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง

การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (Rapid chloride penetration test, RCPT) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1202 [24] ซึ่งเป็นการหาปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่าน (Charge passed) โพรงช่องว่างภายในมอร์ตาร์ที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ในทดสอบนี้ทำการเตรียมหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร หนา 5 เซนติเมตร ตามส่วนผสมที่ออกแบบไว้ดังแสดงในตารางที่ 2 ทำการถอดแบบหล่อตัวอย่าง 24 ชั่วโมง แล้วนำไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 27 และ 90 วัน และเริ่มทำการทดสอบที่ 28 และ 91 วัน โดยเมื่อตัวอย่างครบอายุกำหนดทดสอบแล้วนำตัวอย่างมาประกอบเข้ากับเซลล์ทดสอบ จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.3M ที่ขั้วบวก (Anode) และสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 3.0% ที่ขั้วลบ (Cathode) จากนั้นเริ่มให้ค่าศักย์ไฟฟ้า 60 V DC เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยมีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งผลการทดสอบถูกบันทึกเป็นปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างตลอดช่วงทดสอบมีหน่วยเป็นคูลอมป์ (Coulomb)

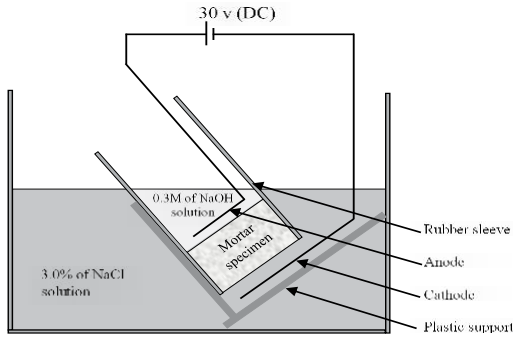


รูปที่ 1 รายละเอียดการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง

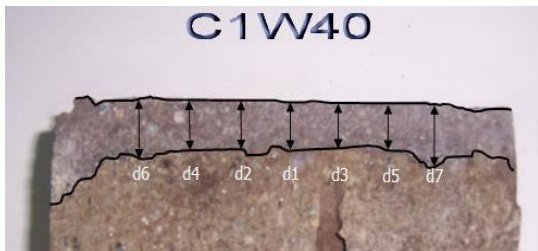
2.3. การทดสอบการเคลื่อนย้ายคลอไรด์แบบเร่ง

หล่อตัวอย่างมอร์ตาร์เป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร หนา 20 เซนติเมตร ทำการถอดแบบภายหลัหล่อตัวอย่างเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำเป็นระยะเวลา 27 วัน หลังจากครบอายุบ่มแล้ว นำตัวอย่างไปตัดเป็นชิ้น หนา 5 เซนติเมตร จากนั้นนำตัวอย่างไปประกอบเข้ากับชุดทดสอบการเคลื่อนย้ายคลอไรด์แบบเร่ง (Rapid chloride migration)

test, RCMT) เพื่อหาความลึกการแทรกซึมคลอไรด์ (Chloride penetration depth) โดยมีรายละเอียดการทดสอบดังในรูปที่ 2



รูปที่ 2 รายละเอียดการทดสอบการเคลื่อนย้ายคลอไรด์แบบเร่ง



รูปที่ 3 การวัดความลึกการแทรกซึมของคลอไรด์ในมอร์ตาร์

วิธีการทดสอบนี้ ประยุกต์จากวิธีการทดสอบที่เสนอโดย Tang and Nilsson (1992) [25] ซึ่งใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 3.0% เต็มลงไปทั้งขั้วลบ (Cathode) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.3M เต็มเข้าที่ขั้วบวก (Anode) จากนั้นเริ่มให้ค่าศักย์ไฟฟ้า 30 V DC เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างออกจากชุดทดสอบแล้วนำไปกัดให้แตกแบบผ่าซีกด้วยเครื่องกัดคอนกรีตเพื่อวัดค่าความลึกการแทรกซึมของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ ซึ่งในการหาความลึกการแทรกซึมคลอไรด์จะใช้ซิลเวอร์ไนเตรด (Silver nitrate) เข้มข้น 0.1M ฟ่นไปที่ตัวอย่างทันทีหลังกัดแตกแล้ว (ฟ่นด้านในเนื้อตัวอย่างที่แตก) [26] เมื่อผลึกสีขาวปรากฏบนผิวตัวอย่างที่ฟ่นที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาจึงทำการวัดความลึกการแทรกซึมคลอไรด์ โดยทำการวัดค่าความลึกตลอดหน้าตัดตัวอย่างอย่างน้อย 7 ค่าต่อหนึ่ง

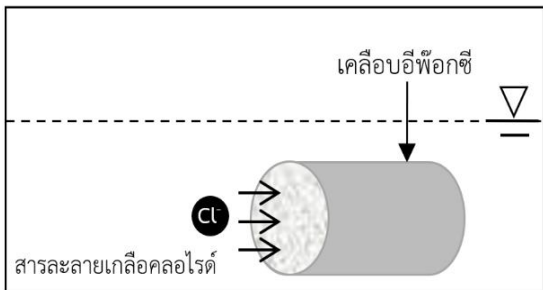
ตัวอย่างเพื่อนำไปคำนวณหาค่าความลึกการแทรกซึมคลอไรด์ ดังแสดงในรูปที่ 3

2.4. การแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมด

ในการทดสอบหาปริมาณการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมด (Bulk chloride diffusion test) ในมอร์ตาร์ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C1556 [27] โดยหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์เป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร ตามส่วนผสมที่ออกแบบไว้ ทำการถอดแบบภายหลังหล่อตัวอย่างที่ 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำเป็นระยะเวลา 27 วัน ก่อนนำไปเผชิญกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ เมื่อตัวอย่างมอร์ตาร์ครบอายุบ่มตามระยะเวลาที่กำหนดแล้วจึงนำตัวอย่างขึ้นจากน้ำและทิ้งไว้ให้แห้งในอากาศ 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการเคลือบตัวอย่างด้วยอีพ็อกซีเพื่อป้องกันไม่ให้คลอไรด์แทรกซึมเข้าไปในตัวอย่าง โดยยกเว้นไว้หนึ่งด้านดังแสดงในรูปที่ 4 เพื่อให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปในตัวอย่างได้ทิศทางเดียว หลังจากทือที่อีพ็อกซีแข็งตัวแล้วจึงนำตัวอย่างไปแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์เข้มข้น 5.0% เป็นระยะเวลา 91 และ 182 วัน ตามลำดับ โดยอุณหภูมิตลอดช่วงการทดสอบอยู่ที่ประมาณ $30^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ เมื่อตัวอย่างครบระยะเวลาเผชิญคลอไรด์แล้วจึงนำตัวอย่างออกจากสารละลายเกลือคลอไรด์ที่ทิ้งไว้ให้แห้งในอากาศ แล้วนำตัวอย่างไปตัดเป็นแผ่นหนา 1 เซนติเมตร ตามความยาวจากผิวหน้าที่ไม่ทือที่อีพ็อกซี (ด้านที่เผชิญคลอไรด์) จากนั้นนำแผ่นตัวอย่างที่ตัดแล้วไปบดเป็นผงผ่านตะแกรงเบอร์ 20 เพื่อนำไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในมอร์ตาร์ โดยในการบดตัวอย่างเลือกเอาเฉพาะบริเวณตรงกลางของแผ่นตัวอย่าง ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงคลอไรด์ที่อาจปนเปื้อนจากด้านข้างได้ ในการหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Acid-soluble chloride content) ของมอร์ตาร์ทำตามมาตรฐาน ASTM C1152 [28] จากนั้นจึงนำข้อมูลปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ได้จากการทดลองไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ (D_s) ของคอนกรีต โดยใช้สมการคำตอบกฎข้อที่สองของฟิค (Fick's second law of diffusion) ดังสมการที่ 1

$$c(x,t) = C_1 + (C_s - C_1) \left[1 - \text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_s t}} \right) \right] \quad (1)$$

เมื่อ $C(x,t)$ คือปริมาณคลอไรด์ที่ความลึก x ใด ๆ ภายหลังจากเผชิญคลอไรด์เป็นระยะเวลา t ใดๆ (% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน), C_i คือปริมาณคลอไรด์เริ่มต้นในคอนกรีต (% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน), C_s คือปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าคอนกรีต (% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน), erf คือฟังก์ชันความผิดพลาด, D_a คือสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ (ตารางเซนติเมตร/ปี), x คือความลึกจากผิวหน้า (เซนติเมตร) และ t คือระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (ปี)



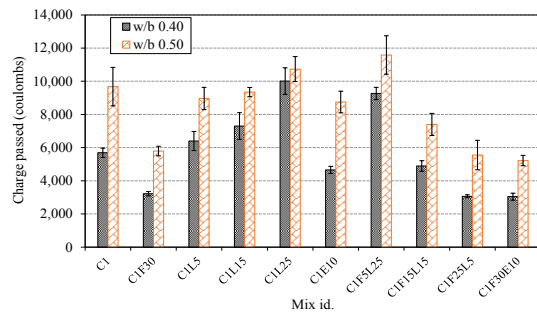
รูปที่ 4 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์

3. ผลการทดลองและอภิปราย

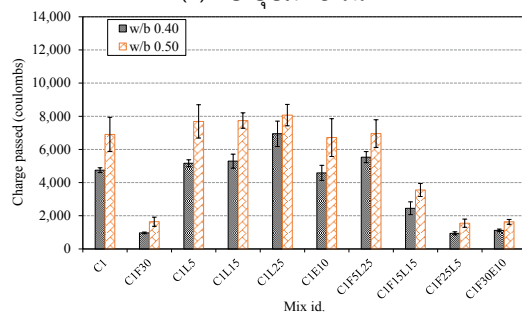
3.1. การแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง

รูปที่ 5 แสดงประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านของมอร์ตาร์ทุกส่วนผสม โดยประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านยังต่ำแสดงถึงมอร์ตาร์ซึ่งมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดี จากผลการทดลอง พบว่า ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.40 ต่ำกว่าของมอร์ตาร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างมอร์ตาร์มีค่าลดลง มอร์ตาร์ที่ใช้ w/b สูง ๆ จะมีน้ำส่วนเกินในส่วนผสมมากส่งผลให้มอร์ตาร์มีความพรุนสูงซึ่งทำให้มอร์ตาร์มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ต่ำ [10] อย่างไรก็ตาม เมื่อมอร์ตาร์มีอายุมากขึ้นปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอลิไซคลานิกเกิดได้มากขึ้นส่งผลทำให้มอร์ตาร์มีความทึบแน่นมากขึ้นเนื่องจากโพรงช่องว่างต่าง ๆ ภายใต้มอร์ตาร์ถูกเติมเต็มด้วยผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอลิไซคลานิก ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์จึงสูงขึ้นตามไปด้วย (ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านต่ำลง) เมื่อพิจารณา มอร์ตาร์ที่ใช้ระบบวัสดุประสาน 2 ชนิดพบว่า ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านของมอร์ตาร์ผสมแก้วลอยต่ำกว่า

ของมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วนอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากผลผลิตที่เกิดจากปฏิกิริยาปอลิไซคลานิกและอนุภาคขนาดเล็กของแก้วลอยบางส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยาเข้าไปอุดโพรงช่องว่างภายใต้มอร์ตาร์ทำให้มอร์ตาร์มีความทึบแน่นมากขึ้นและมีการซึมผ่านที่ต่ำ [6] ในทางกลับกัน สำหรับประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านของมอร์ตาร์ผสมผงหินปูนสูงกว่าของมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน โดยประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อใช้ผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์มากขึ้น (เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 5 ถึง 25) เนื่องมาจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลงจากการแทนที่ด้วยผงหินปูน (Dilution effect) นอกจากนี้ ผงหินปูนอาจทำหน้าที่เป็นวัสดุช่วยเติมเต็มโพรงช่องว่างภายใต้มอร์ตาร์ (Filler effect) เนื่องจากเป็นวัสดุเฉื่อยที่ไม่สามารถทำปฏิกิริยากับผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างมอร์ตาร์ที่ใช้ระบบวัสดุประสาน 2 ชนิดพบว่า ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านของมอร์ตาร์ผสมแก้วลอยต่ำกว่าของมอร์ตาร์ผสมผงหินปูนอย่างเห็นได้ชัด ในขณะเดียวกัน ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านของมอร์ตาร์ผสมสารขยายตัวต่ำกว่าของมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน อย่างไรก็ตาม ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านของมอร์ตาร์ผสมสารขยายตัวต่ำกว่ามอร์ตาร์ผสมหินปูนแต่สูงกว่าของมอร์ตาร์ผสมแก้วลอย



(ก) ที่อายุบ่ม 28 วัน



(ข) ที่อายุบ่ม 91 วัน

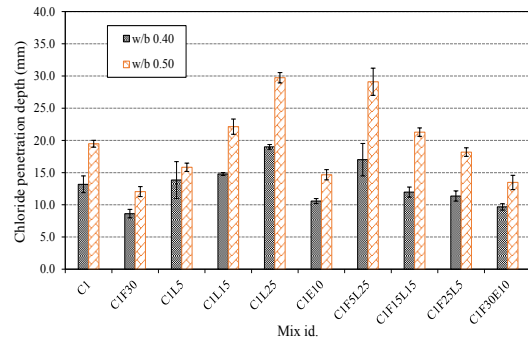
รูปที่ 5 ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านมอร์ตาร์ผสมแก้วลอย ผงหินปูนและสารขยายตัว

เมื่อพิจารณาอัตราที่ผสมแล้วโดยรวมกับผงหินปูน (มอร์ตาร์ที่ใช้ระบบวัสดุประสาน 3 ชนิด) พบว่า ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านของมอร์ตาร์ลดลงเมื่อร้อยละ แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยเพิ่มขึ้นในขณะที่ร้อยละแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนลดลง ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนร้อยละ 15:15 (C1F15L15) และ มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนร้อยละ 25:5 (C1F25L5) ต่ำกว่าของมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน โดยประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านของมอร์ตาร์ C1F25L5 ใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยอย่างเดียว นอกจากนี้ ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยรวมกับสารขยายตัวต่ำกว่าของมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วนแต่มีค่าใกล้เคียงกับของ C1F25L5 และของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยอย่างเดียว

3.2. ความลึกการแทรกซึมคลอไรด์

รูปที่ 6 แสดงผลการทดลองการหาความลึกการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ผงหินปูน และสารขยายตัว ที่อายุ 28 วัน พบว่า ความลึกการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ลดลงเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง เมื่อพิจารณาอัตราที่ใช้ระบบวัสดุประสาน 2 ชนิดพบว่า ความลึกการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย (C1F30) ต่ำกว่าของมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วนและมีค่าที่ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับของมอร์ตาร์ทุกส่วนผสม ตรงกันข้าม ความลึกการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ผสมผงหินปูนสูงกว่าของมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วนและมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อใช้ผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์มากขึ้น โดยความลึกการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยต่ำกว่าของมอร์ตาร์ผสมผงหินปูน ในขณะเดียวกัน ความลึกการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ผสมสารขยายตัวต่ำกว่าของมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วนแต่สูงกว่าของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย เมื่อพิจารณาอัตราที่ผสมแล้วโดยรวมกับผงหินปูน (ระบบวัสดุประสาน 3 ชนิด) พบว่า ความลึกการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ลดลงเมื่อร้อยละแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยเพิ่มขึ้นในขณะที่ร้อยละแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนลดลง อย่างไรก็ตาม ความลึกการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยรวมกับผงหินปูนมีแนวโน้มสูงกว่าของมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน นอกจากนี้ ค่าความลึกการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยรวมกับสารขยายตัวต่ำกว่าของ

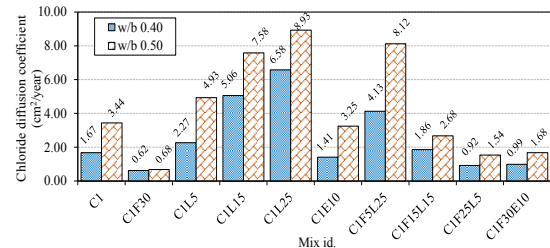
มอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วนแต่มีค่าสูงกว่าของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยอย่างเดียว



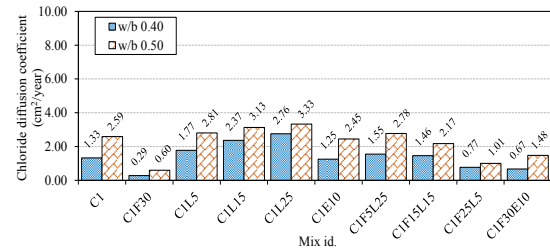
รูปที่ 6 ความลึกการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอย ผงหินปูนและสารขยายตัว

3.3. สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์

การแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ถูกนำเสนอในรูปแบบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ (D_c) ดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งเป็นคำตอบจากสมการกฎข้อที่สองของฟิกค์ที่คำนวณโดยใช้ข้อมูลผลการทดลองปริมาณคลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 และ 182 วัน พบว่า ค่า D_c ลดลงเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ลดลงและระยะเวลาเผชิญคลอไรด์เพิ่มขึ้น



(ก) ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน



(ข) ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 182 วัน

รูปที่ 7 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของมอร์ตาร์

D_0 ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย (C1F30) ต่ำกว่าของมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน โดย C1F30 มีค่า D_0 ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับทุกส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ศึกษา อย่างไรก็ตาม มอร์ตาร์ผสมผงหินปูนมีค่า D_0 สูงกว่าของมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วนและมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อใช้ผงหินปูนในปริมาณที่มากขึ้น นอกจากนี้ ค่า D_0 ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยต่ำกว่าของมอร์ตาร์ผสมผงหินปูนอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ค่า D_0 ของมอร์ตาร์ผสมสารขยายตัวต่ำกว่ามอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน อย่างไรก็ตาม ค่า D_0 ของมอร์ตาร์ผสมสารขยายตัวสูงกว่าของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแต่ต่ำกว่าของมอร์ตาร์ผสมหินปูน เมื่อพิจารณา มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยรวมกับผงหินปูน (ระบบวัสดุประสาน 3 ชนิด) พบว่า ค่า D_0 ลดลงเมื่อร้อยละแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยเพิ่มขึ้นในขณะที่ยังคงที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูนลดลง อย่างไรก็ตาม มีเพียงส่วนผสมมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยรวมกับผงหินปูนในสัดส่วนร้อยละ 25:5 (C1F25L5) ที่มีค่า D_0 ต่ำกว่าของมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วนที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 182 วัน นอกจากนี้ ค่า D_0 ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยรวมกับสารขยายตัวต่ำกว่ามอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วนทั้งที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 และ 182 วัน

4. สรุปผล

จากการศึกษาผลกระทบของระบบวัสดุประสานสองชนิดและสามชนิดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ผงหินปูน และสารขยายตัวต่อความต้านทานคลอไรด์สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในมอร์ตาร์ (ระบบวัสดุประสาน 2 ชนิด) สามารถลดปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่าน ความถี่การแทรกซึมคลอไรด์และสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ในมอร์ตาร์ได้ดีที่สุด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงสุดและสูงกว่ามอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน

2. ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่าน ความถี่การแทรกซึมคลอไรด์และสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของมอร์ตาร์ผสมผงหินปูน (ระบบวัสดุประสาน 2 ชนิด) สูงกว่ามอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน กล่าวคือ ความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่ผสมผงหินปูนต่ำกว่ามอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน และเมื่อใช้ผงหินปูนในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์ยิ่งลดลง

3. การใช้สารขยายตัวที่ร้อยละ 10 ในมอร์ตาร์ที่ใช้ระบบวัสดุประสาน 2 ชนิด และระบบวัสดุประสาน 3 ชนิด ช่วยเพิ่มความต้านทานคลอไรด์สูงกว่ามอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน

4. ความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยรวมกับผงหินปูน (ระบบวัสดุประสาน 3 ชนิด) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้นในขณะที่ใช้ผงหินปูนในปริมาณที่น้อยลง

5. ผลการทดลองทั้งจากการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่าน) ความถี่ของการแทรกซึมคลอไรด์และการแพร่คลอไรด์ (สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์) ของมอร์ตาร์มีความสอดคล้องกัน ซึ่งสามารถนำค่าทั้งสามไปใช้ประเมินความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ได้เหมือนกัน

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยและพัฒนา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา สัญญาเลขที่ 17/2550 และการสนับสนุนจากหน่วยวิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษาบูรพา (BCONTEC) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Sumranwanich T, Tangtermsirikul S. A model for predicting time-dependent chloride binding capacity of cement-fly ash cementitious system. *Materials and Structures*. 2004;37:387-96.
- [2] Angst U. Chloride induced reinforcement corrosion in concrete. Thesis for the degree of Philosophiae Doctor, Faculty of Engineering Science and Technology, Norwegian University of Science and Technology, Norway, 2011.

- [3] Rissardi CZ, de Souza CFN, Pacheco F, Christ R, Silveira LF. Chloride attack evaluation on concrete compositions according to Brazilian standard ABNT NBR 6118 specification. *J Build Rehabil.* 2016;1(19):1-12.
- [4] Prak L, Sumranwanich T. Investigation of chloride penetration and steel corrosion in repaired concrete after exposure to marine environment of Thailand. *Journal of Engineering, RMUTT.* 2020;18(1):165-73.
- [5] Thomas M. Chloride thresholds in marine concrete. *Cement and Concrete Research.* 1996;26(4):513-19.
- [6] Jena T, Panda KC. Mechanical and durability properties of marine concrete using fly ash and silpozz. *Advances in Concrete Construction.* 2018;6(1):47-68.
- [7] Zunino F, Boehm- Courjault E, Scrivener K. The impact of calcite impurities in clays containing kaolinite on their reactivity in cement after calcination. *Materials and Structures.* 2020;53(44):1-15.
- [8] Mehta PK. Studies on blended Portland cements containing Santorin earth. *Cement and Concrete Research.* 1981;11(4):507-18.
- [9] Mehta PK, Monterio P. J. M. *Concrete: Microstructure, Properties and Materials.* (3rd Edition), The McGraw-Hill Companies. 2006.
- [10] Massazza F. Pozzolanic cements. *Cement and Concrete Composites.* 1993;15(4):185-214.
- [11] Chindaprasit P, Jaturapitakkul C, Sinsiri, T. Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cement paste. *Construction and Building Materials.* 2007;21(4):1534-41.
- [12] Nguyen C.V, Lambert P, Bui V.N. Effect of locally sourced pozzolan on corrosion resistance of steel in reinforced concrete beams. *International Journal of Civil Engineering.* 2020;18:619-30.
- [13] Arttamart S, Sumranwanich T. 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.* 2019;17(2):113-25. (in Thai)
- [14] Hussain K, Choktaweekarn P, Saengsoy W, Srichan T, Tangtermsirikul S. Effect of cement types, mineral admixtures, and bottom ash on the curing sensitivity of concrete. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials.* 2013;20(1):94-105.
- [15] Deilami S, Aslani F, Elchalakani M. Durability assessment of self-compacting concrete with fly ash. *Advances in Concrete Construction.* 2017;19(5):489-99.
- [16] Sadrmomtazi A, Tahmouresi B, Amooie M. Permeability and mechanical properties of binary and ternary cementitious mixtures. *Advances in Concrete Construction.* 2017;5(5):423-36.
- [17] Naik TR, Singh SS, Hossain MM. Properties of high-performance concrete systems incorporating large amounts of high-lime fly ash. *Construction and Building Materials.* 1995;9(4):195-204.
- [18] Praveen Kumar W, Ravi Prasada D. Influence of supplementary cementitious materials on strength and durability characteristics of concrete. *Advances in Concrete Construction.* 2019;7(2):75-85.

- [19] Juenger MCG, Siddique R. Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. *Cement and Concrete Research*. 2015;78(1):71-80.
- [20] Sunil BM, Manjunatha LS, Lolitha R, Subhash CY. Potential use of mine tailings and fly ash in concrete. *Advances in Concrete Construction*. 2015;3(1):55-69.
- [21] Lawrence P, Cyr M, Ringot E. Mineral admixtures in mortars: effect of inert materials on short term hydration. *Cement and Concrete Research*. 2003;33(12):1939-47.
- [22] Lam NT, Sumranwanich T, Krammart P, Yodmalai D, Sahamitmongkol R, Tangtermsirikul S. Durability properties of concrete with expansive additive. *Research and Development Journal*. 2008;19(4):8-15.
- [23] Liu K, Shui Z, Sun T, Ling G, Li X, Cheng S. Effects of combined expansive agents and supplementary cementitious materials on the mechanical properties, shrinkage and chloride penetration of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. 2019;211:120-29.
- [24] 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.
- [25] Tang L, Nilsson LO. Chloride diffusivity in high strength concrete at different ages. *Nordic Concrete Research*. 1992;11(1):162-71.
- [26] Otsuki N, Nagataki S, Nakashita K. Evaluation of AgNO₃ solution spray method for measurement of chloride penetration into hardened cementitious matrix materials. *ACI Materials Journal*. 1992;89(6):587-92.
- [27] 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.
- [28] 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.