

ความสามารถเก็บกักคลอไรด์และการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอย ผงหินปูนและสารขยายตัว

ลีน่า ปริก¹ และทวีชัย สำราญวานิช^{2*}
lyna_plnce@hotmail.com¹, twc@buu.ac.th^{2*}

^{1, 2*} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี

Received	: 08-Sep-2020
Revised	: 19-Oct-2020
Accepted	: 30-Oct-2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาความสามารถกักเก็บคลอไรด์และการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอย ผงหินปูน และสารขยายตัว โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.50 แทนที่วัสดุประสานบางส่วนด้วยเถ้าลอยที่ร้อยละ 30 แทนที่วัสดุประสานบางส่วนด้วยผงหินปูนที่ร้อยละ 5 15 และ 25 ตามลำดับ และแทนที่วัสดุประสานบางส่วนด้วยสารขยายตัวที่ร้อยละ 10 ทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน และทดสอบการดูดซึมน้ำที่ 28 วัน จากผลการศึกษาพบว่าความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและมอร์ตาร์ผสมสารขยายตัวสูงกว่าของมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน ในขณะที่ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของมอร์ตาร์ผสมผงหินปูนต่ำกว่าของมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วนและเมื่อใช้ผงหินปูนมากขึ้นความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของมอร์ตาร์ลดลง โดยมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยให้ความสามารถเก็บกักคลอไรด์สูงที่สุด นอกจากนี้ การดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ผงหินปูน และสารขยายตัวสูงกว่าของมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน

คำสำคัญ: ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ มอร์ตาร์ เถ้าลอย ผงหินปูน สารขยายตัว

Chloride Binding Capacity and Water Absorption of Mortar Containing Fly Ash, Limestone Powder, and Expansive Additive

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

^{1, 2*} Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University

Received	: 08-Sep-2020
Revised	: 19-Oct-2020
Accepted	: 30-Oct-2020

Abstract

This paper aims to study the chloride binding capacity and water absorption of mortar containing fly ash (FA), limestone powder (LP), and expansive additive (EA). Portland cement Type I was used as the main cementitious material. The water to binder ratio was kept at the ratio of 0.40 and 0.50. FA and LP partially replaced the cement at percentages of 30% and 5%, 15% and 25% respectively EA replaced the binder at 10%. The chloride penetration test of mortars was conducted at the chloride exposure period of 91 days. The water absorption of mortars was done at the age of 28 days after curing. From the results, it was found that chloride binding capacity of FA mortars and EA mortars was higher than that of cement-only mortars, while chloride binding capacity of LP mortars was lower than that of cement-only mortars. Increasing the LP to binder ratio resulted in the reduction of chloride binding capacity of mortars. The chloride binding capacity of FA mortars was highest. Moreover, the water absorption of Mortar with FA, LP, and EA was higher than that of the cement-only mortars.

Keywords: chloride binding capacity, mortar, fly ash, limestone powder, expansive additive

1. บทนำ

หนึ่งในปัจจัยหลักที่มีผลต่อความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมากที่สุดคือความสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ โดยเกลือคลอไรด์เป็นสาเหตุสำคัญต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีต [1-3] โดยทั่วไปคอนกรีตเมื่อต้องเผชิญกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ อีออนของคลอไรด์จะสามารถแพร่เข้าไปในคอนกรีตผ่านตามเครือข่ายโพรงช่องว่างในซีเมนต์เพสต์ ซึ่งการแพร่ของอีออนคลอไรด์นั้นเกิดขึ้นเนื่องด้วยผลของความแตกต่างของความเข้มข้นคลอไรด์ หากคลอไรด์สามารถแพร่เข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้เร็ว ก็จะทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตมีโอกาสเกิดสนิมได้เร็ว ด้วยเหตุนี้สมบัติของคอนกรีตในแง่ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์และความต้านทานการแพร่คลอไรด์จึงเป็นดัชนีที่สำคัญค่าหนึ่งในการพิจารณาถึงความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตนั้น ๆ คลอไรด์เมื่อแทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ คลอไรด์บางส่วนจะถูกยึดจับด้วยกลไกการยึดเหนี่ยวทางกายภาพ และทางเคมีของระบบวัสดุประสาน เรียกว่า คลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride) ส่วนเกลือคลอไรด์ที่ไม่ถูกยึดจับจะสามารถแทรกซึมเข้าไปในโพรงช่องว่างในเนื้อคอนกรีตต่อไปได้ โดยคลอไรด์นี้ถูกเรียกว่า คลอไรด์อิสระ (Free chloride) ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ (Chloride binding capacity) ของคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ หมายถึงความสามารถในการยึดจับคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ให้กลายเป็นคลอไรด์ที่ถูกจับยึด (Fixed chloride) ด้วยกลไกการยึดเหนี่ยวทางกายภาพ (Physical binding) และทางเคมี (Chemical binding) [1, 4] ของคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ โดยคลอไรด์ที่ถูกจับยึดนี้จะไม่สามารถทำอันตรายต่อเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตได้ ดังนั้นหากคอนกรีตหรือมอร์ตาร์มีความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์สูง จะช่วยป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมให้ช้าลงได้ การยึดจับคลอไรด์ด้วยกระบวนการทางเคมีเกิดจากสารประกอบไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C3A) และเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C4AF) ที่มีอยู่ใน

ปูนซีเมนต์เป็นหลัก [5, 6] ในขณะที่การยึดจับคลอไรด์ด้วยกระบวนการทางกายภาพนั้นคลอไรด์ถูกยึดจับไว้ที่ผิวของผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิก เช่น C-S-H, C-A-H, C-A-F-H, ettringite และ monosulfate รวมทั้งมวลรวมละเอียด เป็นต้น [1, 7-9] โดยความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของมอร์ตาร์จะเปลี่ยนแปลงตามเวลา ชนิดวัสดุประสาน และปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าลอย ซิลิกาฟูม ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด เป็นต้น และวัสดุที่เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมอื่น เช่น ผงหินปูน มาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติคอนกรีตให้มีความคงทนมากขึ้น [10] โดยเถ้าลอย (Fly ash) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้เพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนอย่างแพร่หลาย ซึ่งการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนช่วยลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ซึ่งทำให้อัตราการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) สู่ชั้นบรรยากาศอีกด้วย [11] เถ้าลอยถูกนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตสำหรับงานก่อสร้างหลากหลายรูปแบบทั้งนี้เนื่องจากการใช้เถ้าลอยทำให้สมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และความต้านทานการเกิดสนิม เป็นต้น [12-16] ศิริระ อาทมาท และ ทวีชัย สำราญวานิช (2562) [17] พบว่า การใช้เถ้าลอยในคอนกรีตผสมเถ้ากันเตาร้อยละ 10 ทำให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม การใช้เถ้าลอยในคอนกรีตยังมีข้อด้อยบางประการ เช่น ต้องการระยะเวลาบ่มน้ำที่นานขึ้น การพัฒนากำลังอัดต่ำ ต้องการเวลาพัฒนากำลังอัดมากกว่า 28 วัน จากงานวิจัยของ Hussain et al. (2013) [18] พบว่าการใช้เถ้าลอยทำให้ระยะเวลาบ่มน้ำคอนกรีตนานขึ้นเนื่องจากเถ้าลอยจะเกิดปฏิกิริยาช้ารวมถึงความต้องการน้ำสำหรับการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกในระยะยาว Deilami et al. (2017) [19] พบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยส่งผลดีต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และการดูดซึมน้ำ อย่างมีนัยสำคัญ แต่กำลังอัดที่อายุต้นลดลง Sadrmomtazi et al. (2017)

[20] พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่อายุ 7 และ 28 วัน ต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน แต่กำลังอัดของคอนกรีตพัฒนาสูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนที่อายุ 90 วัน

สำหรับผงหินปูน (Limestone powder) เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการย่อยหินเพื่อเป็นวัตถุดิบใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์และคอนกรีต จากความต้องการใช้ปูนซีเมนต์ที่สูงขึ้นส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่ถูกปล่อยออกมาจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ [21, 22] เพื่อลดปัญหามลพิษและการกำจัดผลพลอยได้ที่เกิดจากอุตสาหกรรมจึงจำเป็นต้องมีการนำผลพลอยได้เหล่านี้มาใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง [23] จากงานวิจัยในปัจจุบันแสดงให้เห็นถึงจุดเด่นของการใช้วัสดุที่เป็นผลพลอยได้เหล่านี้มากขึ้น [24] การใช้ผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนทำให้คุณสมบัติคอนกรีตดีขึ้น โดยผงหินปูนจะช่วยเข้าไปเติมเต็มโพรงช่องว่าง (Filler effect) ภายในเนื้อคอนกรีต นอกจากนี้ ยังช่วยประหยัดต้นทุนอีกด้วยส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมโดยช่วยลดการปล่อยก๊าซ CO_2 จากกระบวนการปูนซีเมนต์ (ลดปริมาณความต้องการใช้ปูนซีเมนต์) การใช้ผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนทำให้กำลังอัดของคอนกรีตในช่วงอายุต้นสูงขึ้น [25] ในขณะที่ทำให้หลังความต้องการระยะเวลาบ่มให้น้อยลง [18]

ปัญหาที่เกิดจากการหดตัวและกำลังรับแรงดึงต่ำเป็นสมบัติที่ไม่พึงปรารถนาสองประการที่พบเห็นได้บ่อยกับงานคอนกรีตในประเทศไทย ภายใต้สภาพที่ถูกยึดรั้ง โครงสร้างคอนกรีตอาจแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวได้ แต่การหดตัวของคอนกรีตสามารถควบคุมได้ด้วยการใช้สารเคมีผสมเพิ่ม เช่น สารขยายตัว (Expansive additives) โดยเมื่อคอนกรีตขยายตัวสารขยายตัวจะสร้างหน่วยแรงอัดในเนื้อคอนกรีตที่อยู่ภายใต้สภาพที่ถูกยึดรั้ง ซึ่งจะช่วยลดหรือขจัดหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นจากการหดตัวของคอนกรีตที่อยู่ภายใต้สภาพที่ถูกยึดรั้งนั้นได้ [26] จากการศึกษาของ Liu et al. (2019) [27] พบว่า การใช้สารขยายตัวในคอนกรีตไหลตัวได้เอง (Self-compacting concrete) ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงเล็กน้อย ในขณะที่การหดตัวแบบออโตจีนัส (Autogenous shrinkage) และการหดตัวแบบแห้ง (Drying shrinkage) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

นอกจากนี้ ยังช่วยเพิ่มความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์อีกด้วย

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์และการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยผงหินปูนและสารขยายตัว โดยศึกษามอร์ตาร์ที่ใช้ระบบวัสดุประสาน 2 ชนิด (Binary cementitious system) และระบบวัสดุประสาน 3 ชนิด (Ternary cementitious system) เปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว

2. รายละเอียดการทดลอง

2.1. วัสดุและส่วนผสมคอนกรีต

การศึกษานี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland cement type I, OPC1) เป็นวัสดุประสานหลัก และแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอย (Fly ash, FA) ผงหินปูน (Limestone powder, LP) และสารขยายตัว (Expansive additive, EA) โดยองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ดังแสดงในตารางที่ 1 เถ้าลอยที่ใช้เป็นเถ้าลอยที่ได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ในขณะที่ผงหินปูนที่ใช้เป็นผงหินปูนที่ได้มาจากโรงงานย่อยหินปูนจังหวัดลพบุรี โดยขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงหินปูนอยู่ที่ $8\text{ }\mu\text{m}$ ส่วนสารขยายตัวที่ใช้เป็นวัสดุเชิงพาณิชย์ที่มีขายตามท้องตลาดในประเทศไทยซึ่งเป็นวัสดุที่มีสารประกอบแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นหลักโดยการขยายตัวของสารขยายตัวนี้เกิดจากผลึกของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมออกไซด์ สำหรับมวลรวมละเอียด (Sand) ใช้ทรายแม่น้ำที่มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.60 และโมดูลัสความละเอียดที่ 3.10

ในการศึกษาผลกระทบของเถ้าลอยผงหินปูน และสารขยายตัวต่อความสามารถเก็บกักคลอไรด์และการดูดซึมน้ำนั้น ใช้มอร์ตาร์ทั้งหมด 20 ส่วนผสมแตกต่างกัน โดยมีมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์อย่างเดียวเป็นวัสดุประสานรวมทั้งมอร์ตาร์ที่ใช้ระบบวัสดุประสานแบบ 2 ชนิด และแบบ 3 ชนิด ซึ่งรายละเอียดส่วนผสมของมอร์ตาร์ดังแสดงในตารางที่ 2 สำหรับมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานแบบ 2 ชนิดประกอบไปด้วยมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30

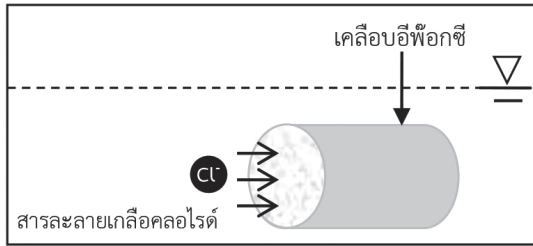
(F30) มอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยผงหินปูนร้อยละ 5, 15 และ 25 (L5, L15 และ L25) และมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยสารขยายตัวร้อยละ 10 (E10) ส่วนมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานแบบ 3 ชนิดประกอบด้วยมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยร้อยละ 5 รวมกับผงหินปูนร้อยละ 25 (F5L25) มอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 รวมกับผงหินปูนร้อยละ 15 (F15L15) มอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยร้อยละ 25 รวมกับผงหินปูนร้อยละ 5 (F25L5) และมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 รวมกับสารขยายตัวร้อยละ 10 (F30E10) โดยในการออกแบบส่วนผสมมอร์ตาร์ใช้อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน 2.75 ทุกส่วนผสม และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่ 0.40 และ 0.50

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ (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

2.2. ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของมอร์ตาร์

ในการทดสอบหาความสามารถเก็บกักคลอไรด์ (Chloride binding capacity) สามารถหาได้ทั้งโดยตรงและการประมาณโดยทางอ้อม อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการหาความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของมอร์ตาร์ด้วยวิธีทางอ้อมเท่านั้น ซึ่งวิเคราะห์จากผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมด (Bulk chloride diffusion) ของมอร์ตาร์ ในการทดสอบหาปริมาณการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดในมอร์ตาร์ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C1556 [28] โดยหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์เป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตรตามส่วนผสมที่ออกแบบไว้ จำนวนส่วนผสม 1 ตัวอย่างทำการถอดแบบภายหลังหล่อตัวอย่างเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวอย่างอยู่ในสภาวะการขยายตัวได้แบบอิสระ (Free expansion) อย่างไรก็ตาม ในโครงสร้างจริงคอนกรีตจะอยู่ในสภาวะขยายตัวแบบยึดรั้ง (Restrained expansion) ซึ่งอาจส่งผลทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวได้ และส่งผลเสียต่อความคงทนของคอนกรีต จากนั้นจึงนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำเป็นระยะเวลา 27 วัน ก่อนนำไปเผชิญกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์เมื่อตัวอย่างมอร์ตาร์ครบอายุบ่มตามระยะเวลาที่กำหนดแล้วจึงนำตัวอย่างขึ้นจากน้ำและทิ้งไว้ให้แห้งในอากาศเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการทาพื้นผิวตัวอย่างด้วยอีพ็อกซีเพื่อป้องกันไม่ให้คลอไรด์แทรกซึมเข้าไปในตัวอย่าง โดยยกเว้นไว้หนึ่งด้าน (ด้านบนที่หล่อ) ดังรูปที่ 1 เพื่อให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปในตัวอย่างตลอดช่วงทำการทดลอง หลังจากทาสีอีพ็อกซีแข็งตัวแล้วจึงนำตัวอย่างไปแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 5.0 เป็นระยะเวลา 91 วัน โดยอุณหภูมิตลอดช่วงการทดสอบอยู่ที่ประมาณ 30°C ± 5 องศาเซลเซียส



รูปที่ 1 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์

เมื่อตัวอย่างครบระยะเวลาเผชิญคลอไรด์แล้วจึงนำตัวอย่างออกจากสารละลายเกลือคลอไรด์ทิ้งไว้ให้แห้งในอากาศ แล้วนำตัวอย่างไปตัดเป็นแผ่นหนาที่ละ 1 เซนติเมตร ตามความยาวจากผิวหน้าด้านที่เผชิญคลอไรด์ จากนั้นนำแผ่นตัวอย่างที่ตัดแล้วไปบดเป็นผงผ่านตะแกรงเบอร์ 20 เพื่อนำไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในมอร์ตาร์ โดยในการบดตัวอย่างจะเลือกเฉพาะบริเวณตรงกลางของแผ่นตัวอย่างทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงคลอไรด์ที่อาจปนเปื้อนจากด้านข้างได้ในการหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride content) และปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride content) ในมอร์ตาร์ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1152 [29] และ ASTM C1218 [30] โดยปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride content) สามารถคำนวณได้จากสมการ

ที่ 1 ซึ่งเป็นผลต่างระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระของมอร์ตาร์

$$C_{tot}(t_s, t_e) = C_{fix}(t_s, t_e) + C_{free}(t_s, t_e) \quad (1)$$

โดย $C_{tot}(t_s, t_e)$ คือปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน) ; $C_{fix}(t_s, t_e)$ คือปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับในมอร์ตาร์ (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน) ; $C_{free}(t_s, t_e)$ คือปริมาณคลอไรด์อิสระในมอร์ตาร์ (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน); t_s คืออายุตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ระยะเวลาเริ่มเผชิญคลอไรด์ ซึ่งในการทดลองนี้เท่ากับระยะเวลาบ่มน้ำ (วัน) ; และ t_e คือระยะเวลาเริ่มเผชิญคลอไรด์ของมอร์ตาร์ (วัน)



รูปที่ 2 การทดสอบการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์

ตารางที่ 2 ส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการศึกษา

เลขที่	รหัสตัวอย่าง	วัสดุประสาน (kg)				ทราย (SSD) (kg)	น้ำ (kg)
		ปูนซีเมนต์	เถ้าลอย*	สารขยายตัว*	ผงหินปูน*		
1	C1W40	1.00	-	-	-	2.75	0.40
2	C1F30W40	0.70	0.30	-	-	2.75	0.40
3	C1L5W40	0.95	-	-	0.05	2.75	0.40
4	C1L15W40	0.85	-	-	0.15	2.75	0.40
5	C1L25W40	0.75	-	-	0.25	2.75	0.40
6	C1E10W40	0.90	-	0.10	-	2.75	0.40
7	C1F5L25W40	0.70	0.05	-	0.25	2.75	0.40
8	C1F15L15W40	0.70	0.15	-	0.15	2.75	0.40
9	C1F25L5W40	0.70	0.25	-	0.05	2.75	0.40
10	C1F30 E10W40	0.60	0.30	0.10	-	2.75	0.40
11	C1W50	1.00	-	-	-	2.75	0.50

ตารางที่ 2 ส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการศึกษา (ต่อ)

เลขที่	รหัสตัวอย่าง	วัสดุประสาน (kg)				ทราย (SSD) (kg)	น้ำ (kg)
		ปูนซีเมนต์	เถ้าลอย*	สารขยายตัว*	ผงหินปูน*		
12	C1F30W50	0.70	0.30	-	-	2.75	0.50
13	C1E10W50	0.90	-	0.10	-	2.75	0.50
14	C1L5W50	0.95	-	-	0.05	2.75	0.50
15	C1L15W50	0.85	-	-	0.15	2.75	0.50
16	C1L25W50	0.75	-	-	0.25	2.75	0.50
17	C1F5L25W50	0.70	0.05	-	0.25	2.75	0.50
18	C1F15L15W50	0.70	0.15	-	0.15	2.75	0.50
19	C1F25L5W50	0.70	0.25	-	0.05	2.75	0.50
20	C1F30 E10W50	0.60	0.30	0.10	-	2.75	0.50

หมายเหตุ: *แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเป็นร้อยละโดยน้ำหนักวัสดุประสาน

2.3. การดูดซึมน้ำ

การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption test) ถูกดำเนินการเพื่อคำนวณหาอัตราการดูดซับ (Sorpsivity rate) หรืออัตราการดูดซึมน้ำ (Water absorption rate) ผ่านผิวหน้าตัวอย่างมอร์ตาร์ โดยในการทดสอบได้ให้ผิวหน้าตัวอย่างหนึ่งด้านเท่านั้นที่สัมผัสกับน้ำที่อุณหภูมิห้อง ในขณะที่ผิวตัวอย่างที่เหลือถูกปิดผนึกทั้งนี้เพื่อจำลองการดูดซึมน้ำในชิ้นตัวอย่างด้านเดียว (ทิศทางเดียว)

การดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1585 [31] โดยหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์เป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตรหนา 5 เซนติเมตร ส่วนผสมละ 3 ตัวอย่าง ทำการถอดแบบภายหลังหล่อตัวอย่างเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำเป็นระยะเวลา 28 วัน หลังจากครบอายุบ่มแล้ว นำตัวอย่างไปอบในตู้อบเป็นระยะเวลา 3 วันที่อุณหภูมิ $50^{\circ}\text{C} \pm 2$ องศาเซลเซียส จากนั้นนำตัวอย่างออกจากตู้อบโดยเก็บไว้ในภาชนะปิด แล้วทิ้งไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิที่ $23^{\circ}\text{C} \pm 2$ องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 15 วัน จากนั้นทำการปิดผนึกด้วยเทปไวนิลและแผ่นพลาสติกด้านข้างตัวอย่าง แล้วนำตัวอย่างไปตั้งในภาชนะที่มีน้ำที่ได้เตรียมไว้ ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยวางตัวอย่างให้สัมผัสกับน้ำลึก

3 เซนติเมตร โดยประมาณ การดูดซึมน้ำ (Water absorption) ถูกทำการวัดด้วยวิธีการชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่เพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 1, 5, 10, 20, 30 และ 60 นาที หลังจากนั้นจึงทำการวัดทุก ๆ 6 ชั่วโมง อัตราการดูดซึมน้ำ คือความชันของเส้นความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมเทียบกับรากที่สองของเวลา

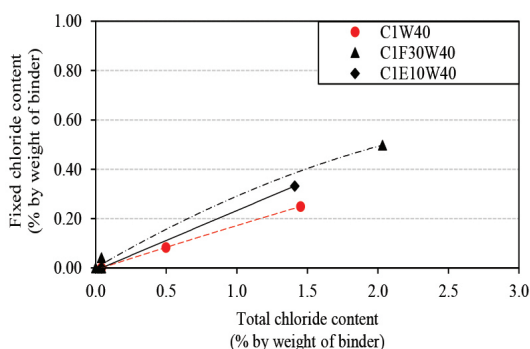
3. ผลการทดลองและอภิปราย

3.1. ความสามารถเก็บกักคลอไรด์

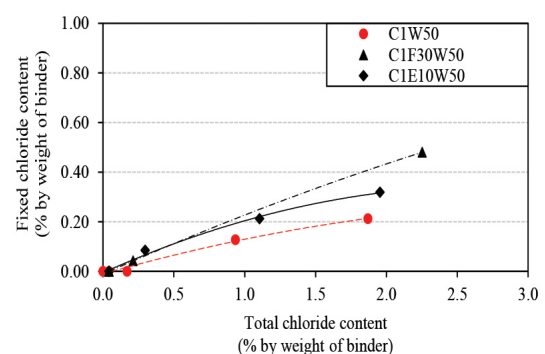
ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ในงานวิจัยนี้ นำเสนอในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด หรือเรียกว่า อัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride ratio) พิจารณาความสามารถเก็บกักคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานแบบ 2 ชนิดแสดงดังรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ จากรูปที่ 3 พบว่า ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและมอร์ตาร์ผสมสารขยายตัว (วัสดุประสานแบบ 2 ชนิด) สูงกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว และเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยกับมอร์ตาร์ผสมสารขยายตัว พบว่า ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยสูงกว่ามอร์ตาร์ผสมสารขยายตัว โดยความสามารถเก็บกักคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและ

มอร์ตาร์ผสมสารขยายตัวอาจเนื่องมาจากปฏิกิริยาของ
 แก๊สและสารขยายตัวในมอร์ตาร์ก่อให้เกิด C-S-H,
 C-A-H และ ettringite มากขึ้นซึ่งสารประกอบเหล่านี้
 มีคุณสมบัติที่สามารถยึดจับคลอไรด์ได้ด้วยกลไกทาง
 กายภาพ [1] อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาผลกระทบของ
 ผงหินปูนจากรูปที่ 4 พบว่า ความสามารถเก็บกักคลอไรด์
 ของมอร์ตาร์ที่ผสมผงหินปูนต่ำกว่ามอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน
 และเมื่อใช้ผงหินปูนในปริมาณที่มากขึ้น (เพิ่มขึ้นจาก
 ร้อยละ 5 ถึง 25) ส่งผลทำให้ความสามารถเก็บกัก
 คลอไรด์ของมอร์ตาร์ยิ่งลดลง เพราะเนื่องมาจากปริมาณ
 ปูนซีเมนต์ที่ลดลงจากการแทนที่ด้วยผงหินปูน (Dilution
 effect) นอกจากนี้ ผงหินปูนอาจทำหน้าที่เพียงเป็นวัสดุ
 ช่วยเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีต (Filler
 effect) เนื่องจากเป็นวัสดุเฉื่อยที่ไม่สามารถทำปฏิกิริยา
 กับผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้

เมื่อพิจารณาผลกระทบของมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุ
 ประสานแบบ 3 ระบบต่อความสามารถเก็บกักคลอไรด์
 จากรูปที่ 5 พบว่า ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของ
 มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยรวมกับสารขยายตัวต่ำกว่าของ
 มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและมอร์ตาร์ผสมสารขยายตัว
 เพียงอย่างเดียว (วัสดุประสาน 2 ชนิด) อย่างไรก็ตาม
 ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอย
 รวมกับสารขยายตัวสูงกว่าเมื่อเทียบกับของมอร์ตาร์
 ซีเมนต์ล้วน จากรูปที่ 6 พิจารณาความสามารถเก็บกัก
 คลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยรวมกับผงหินปูน
 พบว่า เมื่อใช้เถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้นในขณะที่ใช้
 ผงหินปูนในปริมาณที่น้อยลงส่งผลทำให้ความสามารถ
 เก็บกักคลอไรด์ของมอร์ตาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น นอกจากนี้
 ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอย
 รวมกับผงหินปูนต่ำกว่าของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอย
 อย่างเดียว

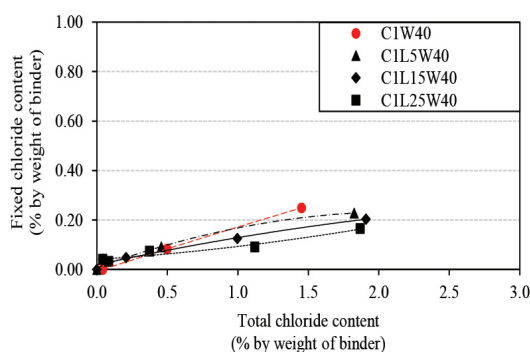


ก) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.40

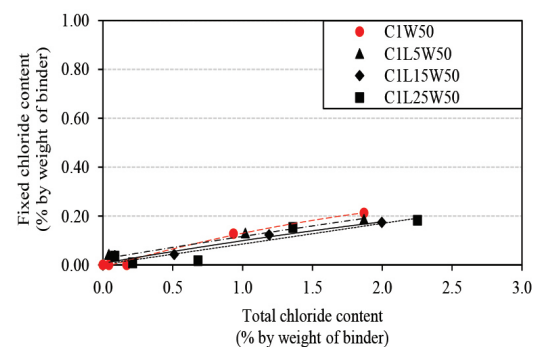


ข) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.50

รูปที่ 3 ความสามารถยึดจับคลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานแบบ 2 ชนิด
 (มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและมอร์ตาร์ผสมสารขยายตัว) ภายหลังเผชิญคลอไรด์เป็นระยะเวลา 91 วัน

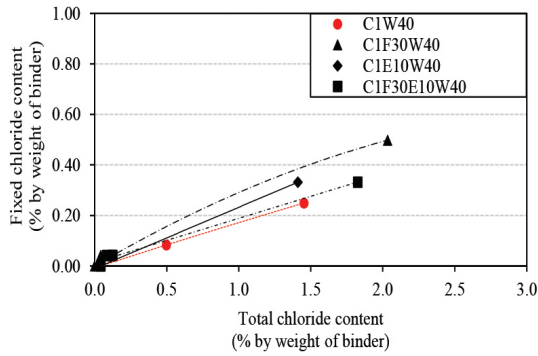


ก) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.40

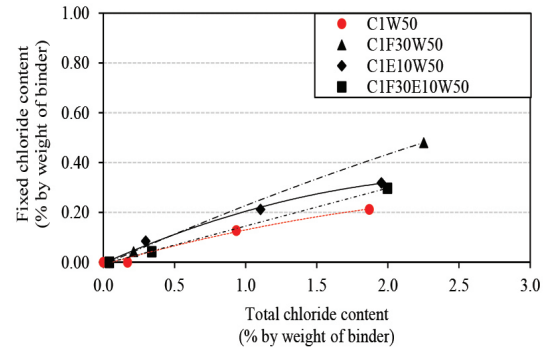


ข) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.50

รูปที่ 4 ความสามารถยึดจับคลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานแบบ 2 ชนิด (มอร์ตาร์ผสมผงหินปูน)
 ภายหลังเผชิญคลอไรด์เป็นระยะเวลา 91 วัน



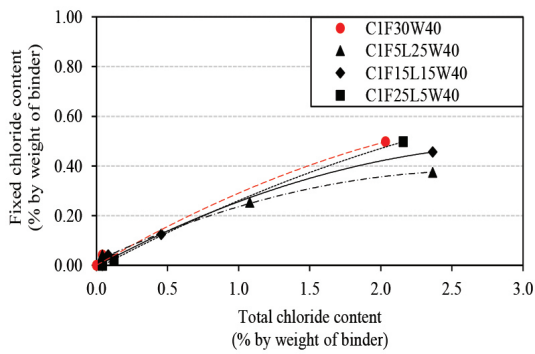
(ก) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.40



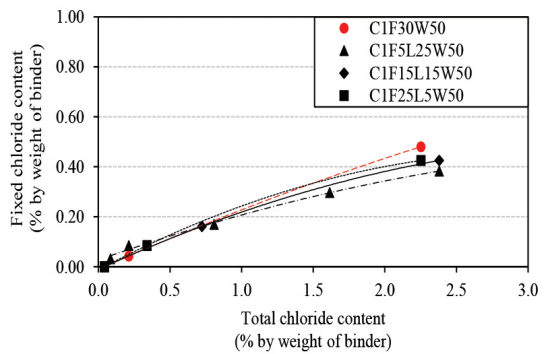
(ข) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.50

รูปที่ 5 ความสามารถยึดจับคลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานแบบ 2 ชนิด และ 3 ชนิด

(มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและสารขยายตัว) ภายหลังเผชิญคลอไรด์เป็นระยะเวลา 91 วัน



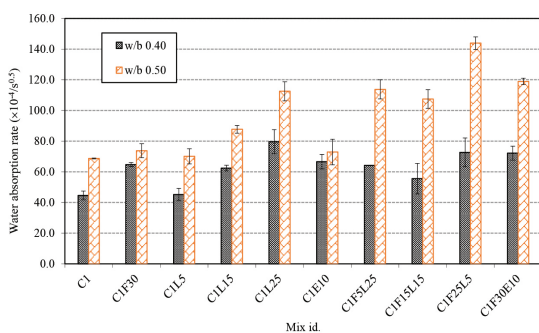
(ก) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.40



(ข) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.50

รูปที่ 6 ความสามารถยึดจับคลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานแบบ 2 ชนิด และ 3 ชนิด

(มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน) ภายหลังเผชิญคลอไรด์เป็นระยะเวลา 91 วัน



รูปที่ 7 การดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย (FA) ผงหินปูน (LP) และ สารขยายตัว (EA)

3.2. การดูดซึมน้ำ

รูปที่ 7 แสดงผลการทดลองอัตราการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย (FA) ผงหินปูน (LP) และ สารขยายตัว (EA) ซึ่งพบว่า อัตราการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ลดลงเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b)

ลดลง เมื่อพิจารณาอัตราส่วนน้ำที่ใช้ระบบวัสดุประสาน 2 ชนิด พบว่า อัตราการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย มอร์ตาร์ผสมผงหินปูนและมอร์ตาร์ผสมสารขยายตัวมีแนวโน้มสูงกว่าของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์อย่างเดียวในขณะเดียวกัน สำหรับมอร์ตาร์ผสมผงหินปูนเมื่อใช้ผงหินปูนในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลทำให้อัตราการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม การดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยต่ำกว่าเมื่อเทียบกับของมอร์ตาร์ที่ผสมผงหินปูน แต่สูงกว่าเมื่อเทียบกับของมอร์ตาร์ที่ผสมสารขยายตัว เมื่อพิจารณาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานแบบ 3 ชนิด จากผลการทดลอง พบว่า มอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยรวมกับผงหินปูน เมื่อเพิ่มร้อยละแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยมากขึ้น (เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 5 ถึง 25) แต่ลดร้อยละแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน (เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 25 ถึง 5) ส่งผลทำให้อัตราการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

อัตราการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มสูงขึ้นและสูงกว่าของมอร์ตาร์ที่ใช้ซีเมนต์ล้วน นอกจากนี้ อัตราการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยรวมกับสารขยายตัวสูงกว่าของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยอย่างเดียวเนื่องจากความแข็งของเพสต์ในมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยต่ำที่อายุต้นซึ่งเกิดการขยายตัวได้ง่ายหากใช้ร่วมกับเถ้าลอยส่งผลอาจทำให้เกิดเป็นรอยร้าวภายในโครงสร้างเพสต์ได้ การดูดซึมน้ำจึงสูงขึ้น อัตราการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ผงหินปูน และ สารขยายตัวที่มีค่าสูงกว่าของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวนั้นอาจเป็นเพราะเนื่องมาจากวัสดุเหล่านี้ในช่วงอายุต้นที่ 28 วัน เกิดปฏิกิริยาได้ช้ากว่าปูนซีเมนต์ส่งผลให้ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาต่าง ๆ น้อยลง ทำให้ผิวหน้าตัวอย่างเมื่อต้องสัมผัสกับน้ำอาจถูกชะล้างได้ง่ายขึ้น

4. สรุปผล

จากการศึกษาความสามารถเก็บกักคลอไรด์ และการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอย ผงหินปูน และสารขยายตัว สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและมอร์ตาร์ผสมสารขยายตัวสูงกว่าของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว แต่ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยสูงกว่าของมอร์ตาร์ผสมสารขยายตัว
2. ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่ผสมผงหินปูนต่ำกว่าของมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน และเมื่อใช้ผงหินปูนในปริมาณที่มากขึ้น (เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 5 ถึง 25) ส่งผลทำให้ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของมอร์ตาร์ยิ่งลดลง
3. ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยรวมกับสารขยายตัวต่ำกว่าของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและมอร์ตาร์ผสมสารขยายตัวเพียงอย่างเดียว แต่สูงกว่าของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ล้วน
4. ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยรวมกับผงหินปูนต่ำกว่าของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยอย่างเดียว แต่ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้นในขณะที่ใช้ผงหินปูนในปริมาณที่น้อยลง

5. อัตราการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ต่ำกว่าของมอร์ตาร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 อัตราการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ผงหินปูน และ สารขยายตัวต่ำกว่าของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์อย่างเดียว

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] Pérez BM, Zibara H, Hooton RD, Thomas MDA. A study of the effect of chloride binding on service life predictions. *Cement and Concrete Research*. 2000; 30: 1215-23.
- [3] Florea MVA, Brouwers HJH. Modelling of chloride binding related to hydration products in slag-blended cements. *Construction and Building Materials*. 2014; 64: 421-30.
- [4] Sumranwanich T, Tangtermsirikul S. Time-dependent chloride binding capacity of various types of cement pastes. *ScienceAsia*. 2004; 30(2):127-34.
- [5] Kim MJ, Kim KB, Ann KY. The influence of C3A content in cement on the chloride transport. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2016; 2016: 1-8.

- [6] Zhu Q, Jiang L, Chen Y, Xu J, Mo L. Effect of chloride salt type on chloride binding behavior of concrete. *Construction and Building Materials*. 2012; 37: 512-7.
- [7] Thomas MDA, Hooton RD, Scott A, Zibara H. The effect of supplementary cementitious materials on chloride binding in hardened cement paste. *Cement and Concrete Research*. 2012; 42: 1-7.
- [8] Muthulingam S, Rao, BN. Chloride binding and time-dependent surface chloride content models for fly ash concrete. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 2015; 10(1): 112-20.
- [9] Cheewaket T, Jaturapitakkul C, Chalee W. Long term performance of chloride binding capacity in fly ash concrete in a marine environment. *Construction and Building Materials*. 2010; 24(8): 1352-7.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Mehta PK. Studies on blended Portland cements containing Santorin earth. *Cement and Concrete Research*. 1981; 11(4): 507-18.
- [13] Mehta PK, Monterio P.J.M. *Concrete: Microstructure. Properties and Materials*. (3rd Edition), The McGraw-Hill Companies. 2006.
- [14] Massazza F. Pozzolan cements. *Cement and Concrete Composites*. 1993; 15(4): 185-214.
- [15] Chindaprasirt P, Jaturapitakkul C, Sinsiri T. Effect of fly ash fineness on micro-structure of blended cement paste. *Construction and Building Materials*. 2007; 21(4): 1534-41.
- [16] 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.
- [17] 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)
- [18] 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.
- [19] Deilami S, Aslani F, Elchalakani M. Durability assessment of self-compacting concrete with fly ash. *Advances in Concrete Construction*. 2017; 19(5): 489-99.
- [20] 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.

- [21] 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.
- [22] Praveen Kumar VV, Ravi Prasada D. Influence of supplementary cementitious materials on strength and durability characteristics of concrete. *Advances in Concrete Construction*. 2019; 7(2): 75-85.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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: 120-9.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] American Society for Testing and Materials. ASTM C1218. Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete. *Annual Book of ASTM Standards*. 2004; Vol. 4.02.
- [31] American society for testing materials. ASTM C1585-04. Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concrete. *Annual Book of ASTM Standards*. 2004; Vol. 4.02.