ผลกระทบของการเติมแคลเซียมออกไซด์อิสระในเถ้าลอยต่อความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน

Effect of Addition of Free Lime in Fly Ash on Chloride Binding Capacity of Paste with Fly Ash and Limestone Powder

พร้อมพงศ์ ฉลาดธัญญกิจ[1,*] ปิติศานต์ กร้ำมาตร[2] ทวีชัย สำราญวานิช[3] และ สมนึก ตั้งเติมสิริกุล[4]

[1] อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก จ.ตาก
[2] รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จ.ปทุมธานี
[3] รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี
[4] ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีโยธา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จ.ปทุมธานี
**Corresponding author; E-mail address: chalattunyakij@rmutl.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาผลกระทบของแคลเซียมออกไซด์อิสระ (free CaO) ในเถ้าลอยต่อความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) แทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน โดยนำเถ้าลอยดั้งต้นมาเติมแคลเซียมออกไซด์เพื่อให้ free CaO ในเถ้าลอยมีปริมาณต่างกัน ผลการศึกษาพบว่าการแทนที่ OPC ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 ทำให้ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในเพสต์มีค่าน้อยลง แต่ความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์กลับมีค่ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับของเพสต์ OPC ล้วน ส่วนเพสต์การแทนที่ OPC ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 นั้น มีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและอัตราส่วนความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ใกล้เคียงกับของเพสต์ OPC ล้วน นอกจากนี้เพสต์การแทนที่ OPC ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 ให้ค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดใกล้เคียงกัน แต่อัตราส่วนความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์มีแนวโน้มที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับของเพสต์ OPC ล้วน สุดท้ายปริมาณ free CaO ในเถ้าลอยที่ต่างกันไม่มีผลต่อปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์

คำสำคัญ: แคลเซียมออกไซด์อิสระ เถ้าลอย ผงหินปูน คลอไรด์

Abstract

The aim of this research was to study the effect of free lime (fCaO) in the fly ash on chloride binding capacity of ordinary Portland cement (OPC) paste replaced by fly ash and limestone powder. The original fly ash added fCaO in order to the fly ash having different amounts of fCaO. The results showed that the total chloride content of paste of OPC replaced with 10% limestone powder was less, while the chloride binding capacity was higher when compared with OPC paste. Besides, paste replacing OPC with 30% fly ash showed the total chloride content and the fixed chloride ratio were similar to that of OPC paste. In addition, paste that replaced OPC with 20% fly ash together with 10% limestone powder gave the total chloride content close to, but the fixed chloride ratio was less tendency when compared with OPC paste. Finally, the different amounts of fCaO in fly ash did not affect the total chloride content and the chloride binding capacity of the pastes.

Keywords: Free lime; Fly ash; Limestone powder; Chloride

1. คำนำ

โครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ในสภาพแวดล้อมน้ำทะเลมักเกิดการกัดกร่อน ซึ่งสาเหตุหนึ่งเกิดจากเกลือคลอไรด์ที่อยู่ในน้ำทะเลทำให้ชั้นฟิล์มออกไซด์ที่หุ้มเหล็กเสริมถูกทำลายจนต่ำกว่าระดับวิกฤตแล้วเหล็กเสริมจึงเกิดสนิม [1, 2] ส่งผลให้พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมน้อยลง รวมถึงขยายตัวดันให้คอนกรีตแตกร้าว เป็นผลให้กำลังรับแรงของส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีค่าน้อยลง

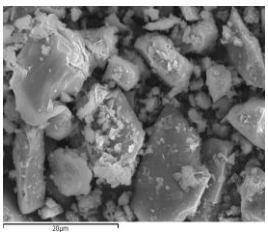
ปัจจุบันมีการใช้เถ้าลอยอย่างแพร่หลาย ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณที่เหมาะสมส่งผลให้ความต้านทานคลอไรด์ดีขึ้น [3, 4] แต่เถ้าลอยส่งผลให้กำลังรับน้ำหนักในช่วงอายุต้นของคอนกรีตมีค่าน้อยลง [5, 6] ส่วนผงหินปูนซึ่งเป็นวัสดุเฉื่อย (Inert Material) เมื่อนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ทำให้กำลังรับน้ำหนักในช่วงอายุต้นมีค่ามากขึ้น [7] เห็นได้ว่าการนำวัสดุเหลือทิ้งทั้งสองชนิดนี้มาแทนที่ปูนซีเมนต์เป็นการนำข้อดีของวัสดุแต่ละชนิดมาใช้ร่วมกัน เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีสมบัติดีขึ้นกว่าการใช้เถ้าลอยหรือผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ขณะที่เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้า

แม่เมาะมีแนวโน้มที่จะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระ (Free lime, free CaO) สูงขึ้น [8, 9] ซึ่งส่งผลต่อสมบัติทางกลและความคงทนของคอนกรีตผสมเถ้าลอย [10, 11] ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้จึงได้ทำการศึกษาผลกระทบของแคลเซียมออกไซด์อิสระในเถ้าลอยต่อความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน โดยการศึกษาครั้งนี้ใช้เถ้าลอยตั้งต้นจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ 2 ตัวอย่าง (ตัวอย่างเถ้าลอย A และ D) ซึ่งถูกนำมาเติมแคลเซียมออกไซด์ CaO เพื่อให้ได้ตัวอย่างเถ้าลอยที่มีปริมาณ free CaO แตกต่างกัน (ตัวอย่างเถ้าลอย A B C D E และ F)

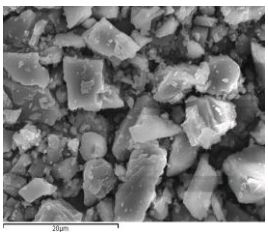
2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

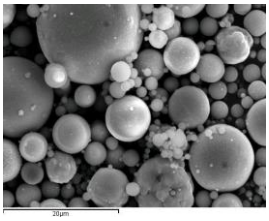
การศึกษานี้ใช้วัสดุผงซึ่งประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) เป็นวัสดุประสานหลัก ใช้เถ้าลอยและผงหินปูนเป็นวัสดุแทนที่บางส่วนใน OPC ใช้ผงหินปูนขนาดเฉลี่ย 3 ไมโครเมตร ทรายแม่น้ำ ทั้งนี้ลักษณะทางกายภาพของวัสดุผงโดยภาพถ่ายขยายกำลังสูง (SEM) มีรายละเอียดดังรูปที่ 1 สำหรับเถ้าลอยใช้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ 2 ตัวอย่าง คือเถ้าลอย A และเถ้าลอย D เป็นเถ้าลอยตั้งต้นซึ่งมีปริมาณ free CaO เท่ากับร้อยละ 0.83 และ 2.11 ตามลำดับ ส่วนเถ้าลอย B และ C เกิดจากการเติมแคลเซียมออกไซด์ลงในเถ้าลอยตั้งต้น A เพื่อให้ได้เถ้าลอยที่มีปริมาณ free CaO เท่ากับ ร้อยละ 2.43 และ 3.81 ตามลำดับ ส่วนเถ้าลอย E และ F เกิดจากการเติมแคลเซียมออกไซด์ลงในเถ้าลอยตั้งต้น D เพื่อให้ได้เถ้าลอยที่มีปริมาณ free CaO เท่ากับร้อยละ 3.11 และ 4.51 ตามลำดับ โดยปริมาณ free CaO ในเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีรายละเอียดดังตารางที่ 1 ส่วนองค์ประกอบทางเคมี ความถ่วงจำเพาะ และความละเอียดของวัสดุผงแต่ละชนิดมีรายละเอียดดังตารางที่ 2



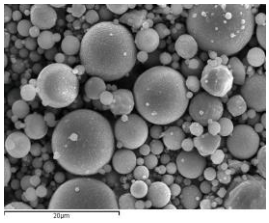
(ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



(ข) ผงหินปูน



(ค) เถ้าลอย A



(ง) เถ้าลอย D

รูปที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุผงโดยภาพถ่ายขยายกำลังสูง (SEM)

2.2 สัดส่วนผสมของเพสต์

ตัวอย่างเพสต์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีทั้งหมด 14 สัดส่วนผสม มีรายละเอียดดังตารางที่ 3 โดยทุกสัดส่วนผสมใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55

2.3 การทดสอบความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์

ในการศึกษาครั้งนี้ประเมินความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์ โดยหาปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับไว้ในตัวอย่างเพสต์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ซึ่งเป็นแนวทางวิธีการทดสอบและการคำนวณของ ทวีชัย สำราญวานิช [2] รายละเอียดวิธีการศึกษามีดังนี้

ตารางที่ 1 ปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระ (free CaO) ในเถ้าลอยที่ใช้ศึกษา

ตัวอย่างเถ้าลอย	free CaO (**ร้อยละ**)
A	**0.83**
B	**2.43**
C	**3.83**
D	**2.11**
E	**3.11**
F	**4.51**

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมี ความละเอียด และความถ่วงจำเพาะของวัสดุผง

องค์ประกอบทางเคมี (%)	OPC	เถ้าลอย A	เถ้าลอย D	ผงหินปูน 3μ
SiO_2	19.62	41.54	32.96	0.46
Al_2O_3	5.18	21.98	17.24	0.06
Fe_2O_3	3.59	13.69	14.93	0.03
CaO	64.17	13.69	22.46	55.25
MgO	1.02	2.24	2.80	0.37
SO_3	2.71	1.86	5.08	<0.01
Na_2O	0.02	1.16	1.04	<0.01
K_2O	0.54	3.08	2.71	0.001
LOI	2.52	0.12	0.22	43.79
free CaO	1.00	0.83	2.11	0.00
ความละเอียดโดยวิธีเบลน (ซม.^{2}/ก.)	3,350	3,830	1,705	12,160
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	3.18	2.40	2.78

ตารางที่ 3 สัดส่วนผสมของวัสดุผงที่ใช้ทำเพสต์ในการศึกษา

ลำดับที่	สัญลักษณ์ *	OPC (% by weight)	เถ้าลอย (%by weight)	ผงหินปูน 3μ (%by weight)
1	PC	100	0	0
2	PC 10L	90	0	10
3	PC 30FA	70	30	0
4	PC 30FB	70	30	0
5	PC 30FC	70	30	0
6	PC 30FD	70	30	0
7	PC 30FE	70	30	0
8	PC 30FF	70	30	0
9	PC 20FA 10L	70	20	10
10	PC 20FB 10L	70	20	10
11	PC 20FC 10L	70	20	10
12	PC 20FD 10L	70	20	10
13	PC 20FE 10L	70	20	10
14	PC 20FF 10L	70	20	10

* หมายเหตุ: PC คือ เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน
PC 10L คือ เพสต์ผสมผงหินปูนร้อยละ 10
PC 30FA คือ เพสต์ผสมเถ้าลอย A ร้อยละ 30
PC 20FA 10L คือ เพสต์ผสมเถ้าลอย A ร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

2.3.1 *การเตรียมตัวอย่างเพสต์*

เตรียมตัวอย่างเพสต์ตามมาตรฐาน ASTM C305 โดยใช้ชิ้นตัวอย่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร หนา 10 มิลลิเมตร ซึ่งในแต่ละสัดส่วนผสมของเพสต์ใช้ชิ้นตัวอย่างทั้งหมด 13 ชิ้น (10 ชิ้นสำหรับรีดเอาสารละลายภายในโพรง และ 3 ชิ้นสำหรับหาค่าการดูดซึมน้ำ) ทำการหล่อตัวอย่างเพสต์ในแบบหล่อแล้วบ่มไว้ที่อุณหภูมิห้อง ถอดแบบที่ระยะเวลาการบ่ม 24 ชั่วโมง หลังจากถอดแบบนำตัวอย่างบ่มในน้ำ 7 วัน ที่อุณหภูมิห้อง หลังจากครบระยะเวลาบ่มนำชิ้นตัวอย่างขึ้นจากน้ำแล้วเช็ดผิวให้แห้งและนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนร้อยละ 5 เป็นระยะเวลา 91 วัน ที่อุณหภูมิห้อง ดังรูปที่ 2

2.3.2 *การทดสอบและวิธีการคำนวณหาความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์*

เมื่อแช่ตัวอย่างเพสต์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ครบระยะเวลา 91 วัน ให้นำชิ้นจากสารละลายแล้วเช็ดผิวให้แห้ง นำชิ้นตัวอย่าง 10 ชิ้นมาอัดเอาสารละลายในโพรงของชิ้นตัวอย่าง (pore solution) ด้วยเครื่องทดสอบ UTM (universal testing machine) ที่ใช้ร่วมกับเครื่องมือกระบอกอัดและฐานรองที่ออกแบบมาโดยเฉพาะดังรูปที่ 3 บดอัดชิ้นตัวอย่างให้ได้สารละลายในโพรงอย่างน้อย 3 ถึง 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ส่วนค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นตัวอย่างเพสต์หาได้จากการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างเพสต์ 3 ชิ้นโดยนำไปอบในเตาที่อุณหภูมิ 100±5 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นตัวอย่างเพสต์ที่หาได้นี้นำไปใช้สำหรับการคำนวณหาปริมาณคลอไรด์อิสระในชิ้นตัวอย่างเพสต์ต่อไป โดยมีรายละเอียดการคำนวณดังนี้

คลอไรด์ไอออนทั้งหมด (total Cl^-) หาค่าได้จากผลคูณของปริมาตรสารละลายโซเดียมคลอไรด์กับค่าผลต่างระหว่างคลอไรด์ไอออนเริ่มต้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ก่อนแช่ชิ้นตัวอย่างและคลอไรด์ไอออนของสารละลายโซเดียมคลอไรด์หลังแช่ชิ้นตัวอย่างเพสต์เป็นเวลา 91 วัน ส่วนคลอไรด์ไอออนอิสระ (free Cl^-) สามารถหาค่าได้จากความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนของสารละลายที่ถูกรีดออกมาจากโพรงของชิ้นตัวอย่างคูณกับค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นตัวอย่าง สุดท้ายค่าคลอไรด์ไอออนของตัวอย่างเพสต์ที่ถูกยึดจับไว้ (fixed Cl-) สามารถหาค่าได้จากผลต่างระหว่างคลอไรด์ไอออนทั้งหมดกับคลอไรด์ไอออนอิสระ โดยความเข้มข้นของคลอไรด์วิเคราะห์ได้จากการไตรเตรทสารละลายที่อัดมาจากชิ้นตัวอย่างด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท ($AgNO_3$) ส่วนวิธีการคำนวณหาค่าคลอไรด์ไอออนที่ถูกยึดจับไว้สามารถหาได้โดยใช้สมการที่ (1) และ (2)

$$\text{Total } Cl^- = \left\{[Cl^-]_i - [Cl^-]_f\right\} \times V \quad (1)$$

$$\text{Fixed } Cl^- = \text{Total } Cl^- - \text{Free } Cl^- \quad (2)$$

Free Cl^- หาค่าได้จากสารละลายในโพรงของตัวอย่างเพสต์และค่าการดูดซึมน้ำ

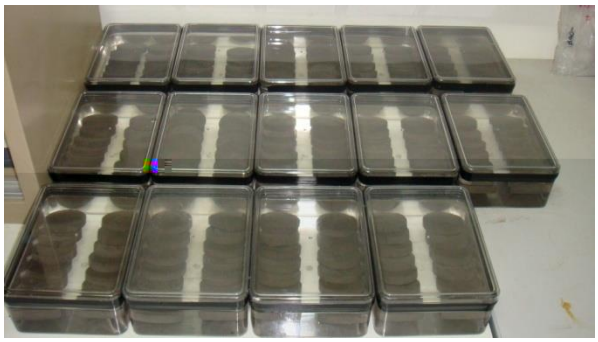
โดย $[Cl^-]_i$ คือ คลอไรด์ไอออนเริ่มต้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ก่อนแช่ชิ้นตัวอย่าง

$[Cl^-]_f$ คือ คลอไรด์ไอออนของสารละลายโซเดียมคลอไรด์หลังแช่ชิ้นตัวอย่าง

V คือ ปริมาตรสารละลายโซเดียมคลอไรด์

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่อยู่ในชิ้นตัวอย่างเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ล้วน เพสต์ผสมผงหินปูน เพสต์ผสมเถ้าลอย และเพสต์ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ที่ระยะเวลาแช่ชิ้นตัวอย่างเพสต์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน มีรายละเอียดผลการศึกษาดังรูปที่ 4 ซึ่งพบว่าเพสต์ผสมผงหินปูนร้อยละ 10 มีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดน้อยกว่าของเพสต์ OPC ล้วน ทั้งนี้เพราะผงหินปูนมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ เมื่อนำผงหินปูนไปแทนที่ปูนซีเมนต์จึงทำหน้าที่เป็นวัสดุเติมเต็ม (filler) ส่งผลให้ปริมาณช่องว่างภายในเนื้อเพสต์น้อยลง [12, 13] ประกอบกับอนุภาคของผงหินปูนสามารถยึดจับคลอไรด์อิออนด้วยแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพ (physical bound) ที่ผิวของผงหินปูน ด้วยเหตุผลดังกล่าวรวมกันจึงทำให้คลอไรด์อิออนเข้าไปในเนื้อเพสต์น้อยลง ส่วนเพสต์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 และผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 นั้น พบว่าเพสต์ทั้งสองสัดส่วนผสมมีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดใกล้เคียงกันและใกล้เคียงกับเพสต์ OPC ล้วน แต่มีแนวโน้มมากกว่าเพสต์ผสมผงหินปูนร้อยละ 10 ทั้งนี้เพราะสมบัติของผงหินปูนเป็นวัสดุเติมเต็ม) ลดปริมาณช่องว่างภายในเนื้อเพสต์อาจมีประสิทธิภาพมากกว่าการแทนที่ ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย เพราะโดยทั่วไปแล้วเถ้าลอยส่งผลให้เพสต์มีปริมาณโพรงมากขึ้น คลอไรด์อิออนจึงสามารถเข้าไปในเนื้อเพสต์มากขึ้น



รูปที่ 2 ชิ้นตัวอย่างทดสอบ 14 ส่วนผสมที่แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์



(ก) การติดตั้งเครื่องมือรีดสารละลาย

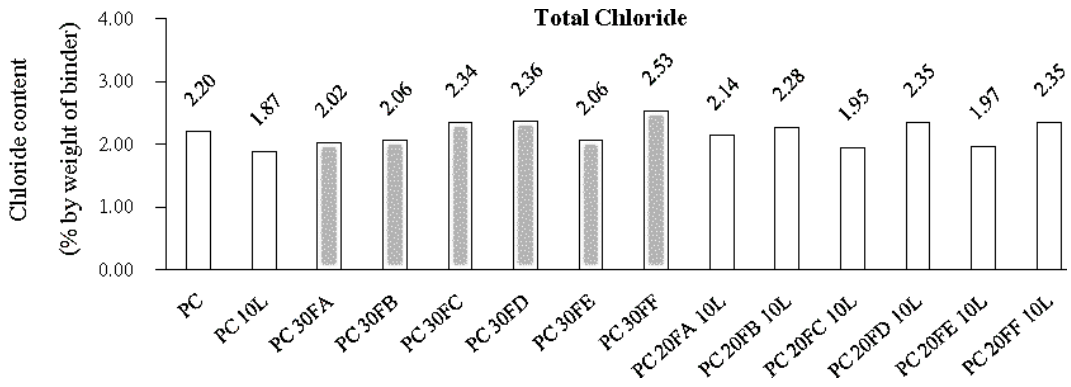


(ข) สารละลายที่ถูกรีดออกจากโพรงของชิ้นตัวอย่างเพสต์

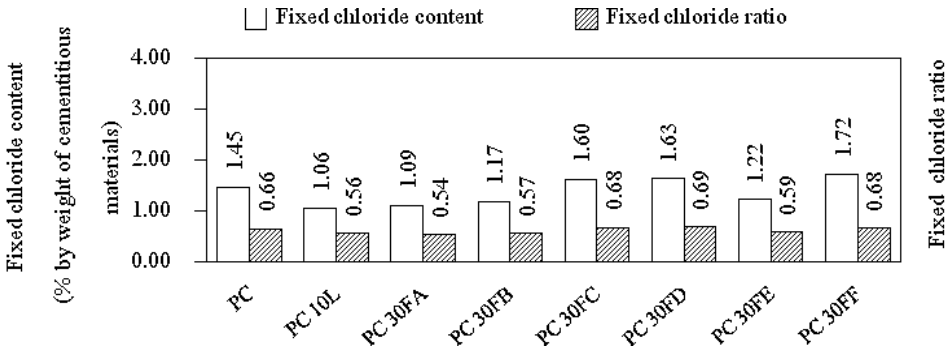
รูปที่ 3 การเก็บตัวอย่างสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในชิ้นตัวอย่างเพสต์

สำหรับผลของ free CaO ในเถ้าลอยที่มีปริมาณต่างกันต่อปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของทุกสัดส่วนผสม พบว่า ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของเพสต์ไม่มีความสัมพันธ์กับปริมาณ free CaO ในเถ้าลอยที่ต่างกัน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า free CaO ไม่มีผลต่อปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของเพสต์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 และเพสต์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

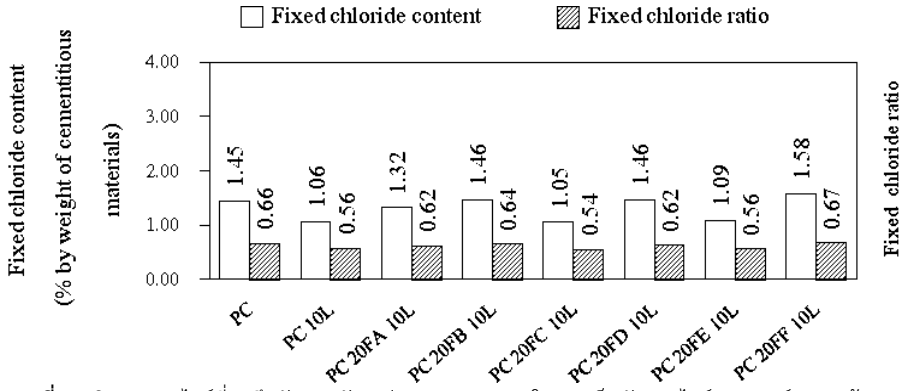
สำหรับรูปที่ 5 แสดงปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับและอัตราส่วนความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ (หาได้จากอัตราส่วนของปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับต่อปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด) ของเพสต์ OPC ล้วน เพสต์ผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และเพสต์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 ที่ระยะเวลาแช่ชิ้นตัวอย่างเพสต์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน ซึ่งพบว่าเพสต์ผสมผงหินปูนร้อยละ 10 มีอัตราส่วนความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์น้อยกว่าของเพสต์ OPC ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะถึงแม้การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนจะทำให้คลอไรด์อิอออนเข้าไปในเนื้อเพสต์น้อยลง (ดังรูปที่ 4 เพสต์ OPC ล้วนและเพสต์ผสมผงหินปูนร้อยละ 10 มีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 2.20 และ 1.87 ตามลำดับ) แต่เนื่องจากผงหินปูนเป็นวัสดุเฉื่อยไม่ไวต่อการทำปฏิกิริยา (Inert material) เมื่อแทนที่ในปูนซีเมนต์จึงทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์น้อยลง และปริมาณ C_3A และ C_4AF จึงน้อยลงด้วย ซึ่งสารประกอบทั้งสองนี้สามารถยึดจับคลอไรด์อิอออนได้โดยทำปฏิกิริยาทางเคมี (chemical bound) นอกจากนี้ยังทำให้ปริมาณ C_3S C_2S และผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (CSH, CAH, monosulfate และ ettringite) ลดลงอีกด้วย ซึ่งสารประกอบเหล่านี้ก็สามารถยึดจับคลอไรด์อิอออนได้เช่นกันด้วยแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพ [1, 2] ดังนั้นจากสาเหตุดังกล่าวรวมกัน จึงเป็นผลให้การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนทำให้ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับน้อยลง ซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ที่ลดลงของเพสต์ผสมผงหินปูน ส่วนเพสต์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 จากการศึกษาในครั้งนี้พบว่ามีอัตราส่วนความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ใกล้เคียงกับของเพสต์ OPC ล้วนและเพสต์ผสมผงหินปูนร้อยละ 10



รูปที่ 4 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของเพสต์ OPC ล้วน และเพสต์ผสมถ้าลอยและผงหินปูน



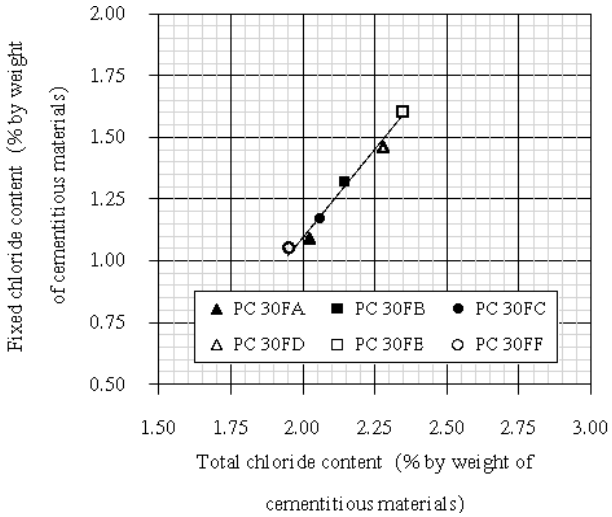
รูปที่ 5 ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับและอัตราส่วนความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์ OPC ล้วน เพสต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน



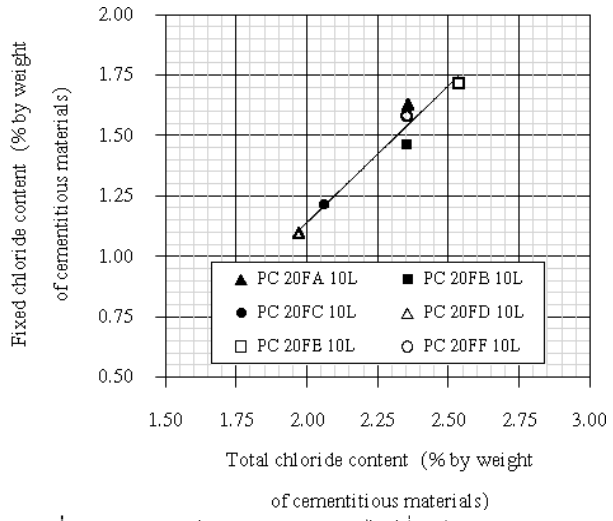
รูปที่ 6 ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับและอัตราส่วนความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์ OPC ล้วน เพสต์ผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และเพสต์ผสมถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

ส่วนรูปที่ 6 แสดงปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับและอัตราส่วนความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์ OPC ล้วน เพสต์ผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และเพสต์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 ซึ่งพบว่าเพสต์ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนมีแนวโน้มให้ค่าอัตราส่วนความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์น้อยกว่ากรณีของเพสต์ OPC ล้วน ยกเว้นเพสต์ผสมเถ้าลอยตัวอย่าง F ร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 มีค่าอัตราส่วนความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ใกล้เคียงกับของเพสต์ OPC ล้วน สาเหตุที่ทำให้การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนส่งผลให้ค่าอัตราส่วนความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ลดลง เพราะผงหินปูนเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ทำให้ C_3A C_4AF และผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นน้อยลงนั่นเอง

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณ free CaO ในเถ้าลอยต่อความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 และเพสต์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 ซึ่งอธิบายได้จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับและปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด ดังรูปที่ 7 และ 8 ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าปริมาณ free CaO ในเถ้าลอยไม่มีผลต่อความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์ เนื่องจากค่าการเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์ OPC แทนที่ด้วยเถ้าลอยทุกตัวอย่าง (เถ้าลอยตัวอย่าง A B C D E และ F) อยู่บนเส้นแนวโน้มเดียวกัน



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับและปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของเพสต์ OPC ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับและปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของเพสต์ OPC ผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

4. สรุป

จากผลการศึกษาครั้งนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

1) การใช้วัสดุประสานร่วมระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) เถ้าลอย และผงหินปูน เมื่อพิจารณาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในเพสต์เมื่อแช่ชิ้นตัวอย่างทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน พบว่าเมื่อแทนที่ OPC ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 ทำให้ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในเพสต์มีค่าน้อยลง ส่วนการแทนที่ OPC ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 พบว่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของเพสต์ทั้งสองสัดส่วนผสมมีค่าใกล้เคียงกันและใกล้เคียงกับของเพสต์ OPC ล้วน แต่มีแนวโน้มมากกว่าของเพสต์ผสมผงหินปูนร้อยละ 10

2) ความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์เมื่อแทนที่ OPC ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 ทำให้อัตราส่วนความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์น้อยลงแสดงถึงความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์ที่ลดลงเมื่อแทนที่ OPC ด้วยผงหินปูน ส่วนเพสต์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 นั้น มีอัตราส่วนความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ใกล้เคียงกับของเพสต์ OPC ล้วนและเพสต์ผสมผงหินปูนร้อยละ 10 นอกจากนี้พบว่าเพสต์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 มีแนวโน้มค่าอัตราส่วนความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์น้อยกว่าของเพสต์ OPC ล้วน ทั้งนี้ยกเว้นเพสต์ผสมเถ้าลอยตัวอย่าง F มีค่าอัตราส่วนความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ใกล้เคียงกับของเพสต์ OPC ล้วน

3) ปริมาณ free CaO ที่ต่างกันในเถ้าลอย (ปริมาณ free CaO ของเถ้าลอยชุด A เท่ากับร้อยละ 0.83, 2.43 และ 3.81 ส่วนเถ้าลอยชุด D เท่ากับร้อยละ 2.11, 3.11 และ 4.51) ไม่มีผลต่อความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา และ ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก ที่ให้การสนับสนุนในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] S. Tangtermsirikul, (2003). *Durability and Mix Design of Concrete*. Printing House of Thammasat University, pp.123-132.

[2] T. Sumranwanich, (2004). *Chloride Binding Capacity of Cement – Fly Ash Past and Simulation of Chloride Profile in Concrete*. Ph.D. Thesis, Civil Engineering, School of Civil Engineering and Technology, Sirindhorn International Institute of Technology, Thailand. http://digital.library.tu.ac.th/tu_dc/frontend/Info/item/dc:114613

[3] P. Supattatum, B. Chatveera and S. Tangtermsirikul, S. (2000). Chloride Binding Capacity of Cement - Fly Ash Past. *Journal of The Engineering Institute of Thailand*, 4, pp. 62-66.

[4] S. Plang-ngern and S. Tangtermsirikul, (2000). Chloride Binding Capacity in Fly Ash Concrete. *Journal of The Engineering Institute of Thailand*, 2, pp. 1-8. https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/eit-researchjournal/article/view/179816/127674

[5] P. Chindaprasirt, (2000). *Fly ash in concrete (The updated edition).* Thailand Concrete Assocoation.

[6] Tarun R. Naik, Shiw S. Singh, Mohammad M. Hossain, (1995). Properties of high performance concrete systems incorporating large amounts of high-lime fly ash. *Construction and Building Materials Journal*, 9, pp. 203. https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00009-5

[7] N. Voglis, G. Kakali, E. Chaniotakis and S. Tsivilis, (2005). Portland-Limestone cement their properties and hydration compared to those of other composite cements. *Cement & Concrete Composites Journal*, 27, pp. 191–196. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.006

[8] P. Chalattunyakij, P. Krammart, K. Kaewmane, S. Tangtermsirikul, (2012). Effect of Addition of Free Lime in Fly Ash on Expansion and Weight Loss in Sulfate Solution of Mortar with Fly Ash and Limestone Powder. *Journal of industrial technology*, 8, pp. 37-48. http://j.cit.kmutnb.ac.th/en/paper-view/130

[9] K. Kaewmaneea, P. Krammart, T. Sumranwanich and S. Tangtermsirikul, (2016). Properties of Fly Ash-Cement Mixtures with the Addition of Free Lime. *Annual Concrete Conference 5*, Nakhon Ratchasima, Thailand, 20–22 October 2009, pp. 64-69.

[10] Vagelis G. Papadakis, (2000). Effect of fly ash on Portland cement systems: Part II. High-calcium fly ash. *Cement and Concrete Research*, 30, pp. 1647-1654. https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00388-4

[11] Cengiz D. A., Alaettin K., Umur K. S., (2004). Strength and shrinkage properties of mortar containing a nonstandard high-calcium fly ash. *Cement and Concrete Research*, 34, pp. 99-102. https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00247-3

[12] B. Bissonnette, P. Pierre and M. Pigeon, (1999). Influence of Key Parameters on Drying Shrinkage of Cementitious Materials. *Cement & Concrete Research*, 29, pp. 1661. https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00156-8

[13] T. Sinsiri, (2005). *Effect of Particle Size and Shape of Fly Ash on Pore Structure and Permeability of Blended Cement Paste*. Ph. D. Thesis, Civil Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand. http://eng.sut.ac.th/ce/ccbm/paper/doctor/theerawat/abstract.pdf