



## วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. UBU Engineering Journal

บทความวิจัย

### ผลกระทบของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบดและเถ้าลอยต่อความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตภายหลังเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลของไทย

### Effects of interground fly ash cement and fly ash on chloride resistance of concrete after exposure to marine environment of Thailand

อัญชณา กิจจานนท์ ศักกรินทร์ ปวีตรปภ ทวีชัย สำราญวานิช\*

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131

Aunchana Kijjanon Sakkarin Pavitpok Taweechai Sumranwanich\*

Faculty of Engineering, Burapha University Chonburi 20131

\* Corresponding author.

E-mail: twc@buu.ac.th; Telephone: 0 81862 1230

วันที่รับบทความ 7 พฤษภาคม 2563; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 26 มิถุนายน 2563; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 31 สิงหาคม 2563

วันที่ตอบรับบทความ 5 ตุลาคม 2563

#### บทคัดย่อ

บทความนี้มุ่งศึกษาผลกระทบของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบดและเถ้าลอยต่อความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตภายหลังเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลของไทยเป็นเวลาเจ็ดปี โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบด และการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยเป็นวัสดุประสานในคอนกรีต ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40, 0.50 และ 0.60 และอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.20, 0.40 และ 0.60 จากผลการศึกษาพบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบดและคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ทั้งนี้คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 นอกจากนี้พบว่า ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบดมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 40 สำหรับคอนกรีตที่ใช้คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 60 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงที่สุด

#### คำสำคัญ

ความต้านทานคลอไรด์ ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบด เถ้าลอย คอนกรีต สิ่งแวดล้อมทะเล

#### Abstract

This paper aims to study effects of interground fly ash cement and fly ash on chloride resistance of concrete after exposure to marine environment of Thailand for seven years. Portland cement type I, Portland cement type V, interground fly ash cement and partial replacement of cement by fly ash were used for binder in concrete. Water to binder (w/b) ratios of 0.20, 0.40 and 0.60 and fly ash to binder ratios of 0.20, 0.40 and 0.60 were used. From the experimental results, concretes with interground fly ash cement and with fly ash replacement had higher chloride penetration resistance than concretes with Portland cement types I and V. Concrete with Portland cement type I had higher chloride penetration resistance than concrete with Portland cement type V. Furthermore, it was found that chloride penetration resistance of concrete mixed with interground fly ash cement was close to that with binder

replacement by fly ash at 40%. Finally, concrete containing binder replacement by fly ash at 60% with w/b of 0.40 had the highest chloride resistance.

## Keywords

chloride resistance; interground fly ash cement; fly ash; concrete; marine environment

## 1. บทนำ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เผชิญกับสิ่งแวดล้อมทะเลมักเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากเกลือคลอไรด์ในน้ำทะเล โดยคลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าสู่ภายในเนื้อคอนกรีตได้จากหลายกระบวนการ เช่น การแพร่ (Diffusion) การดึงดูดคาพิลลารี (Capillary suction) การดึงดูดอออนคลอไรด์ (Ion adsorption) และแรงดันน้ำ (Hydraulic pressure) ซึ่งการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์อาจเกิดจากกลไกทั้งหมดที่กล่าวมาหรือเพียงกลไกใดกลไกหนึ่งเท่านั้น เมื่อคลอไรด์แทรกซึมภายในเนื้อคอนกรีตและมีการสะสมของคลอไรด์ที่บริเวณผิวของเหล็กเสริมจนมีค่ามากกว่าปริมาณคลอไรด์วิกฤต (Critical chloride content) ชั้นฟิล์มที่เคลือบป้องกันเหล็กเสริมอยู่จะถูกทำลายลง และหากมีปริมาณออกซิเจนและความชื้นที่เพียงพอจะทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเริ่มเกิดสนิมได้ เมื่อปริมาณของสนิมเกิดเพิ่มมากขึ้นจะดันให้เนื้อคอนกรีตเกิดการหลุดล่อนและแตกร้าวในที่สุด [1, 2]

การป้องกันการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากคลอไรด์ นอกจากการออกแบบให้คอนกรีตมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ การใช้สารเคลือบผิวคอนกรีตหรือการใช้สารเคลือบผิวเหล็กเสริมแล้ว การเลือกใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ยิมนำมาใช้เนื่องจากวัสดุปอซโซลานทำให้ความสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์เพิ่มขึ้น [1-3] โดยวัสดุปอซโซลานที่ยิมนำมาใช้มากในงานคอนกรีตของไทยคือเถ้าลอย (Fly ash) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ เถ้าลอยประกอบด้วยซิลิกาออกไซด์และอลูมินาออกไซด์ที่สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกทำให้มอร์ตาร์และคอนกรีตมีความต้านทานคลอไรด์เนื่องจากความทึบแน่นที่เพิ่มขึ้น [3, 4] อีกทั้งอนุภาคค่อนข้างกลมและเล็กของเถ้าลอยช่วยเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตได้ด้วย

ดังนั้นบทความนี้จึงมุ่งศึกษาความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและเถ้าลอยภายหลัง

เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลาเจ็ดปี โดยพิจารณาทั้งความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตและกำลังอัดของคอนกรีต

## 2. วิธีการศึกษา

### 2.1 วัสดุและส่วนผสม

ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (PC1) เป็นวัสดุประสานหลัก ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (PC5) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบด (IFAC) และใช้เถ้าลอยชนิด 2x (FA) [5] แทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพแสดงในตารางที่ 1 ส่วนรูปร่างอนุภาคของวัสดุแสดงในรูปที่ 1-4 ตามลำดับ สำหรับส่วนผสมคอนกรีตแสดงในตารางที่ 2 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.40, 0.50 และ 0.60 อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน (f/b) เท่ากับ 0.20, 0.40 และ 0.60 ส่วน IFAC มีส่วนประกอบของเถ้าลอยผสมประมาณร้อยละ 30-35

### 2.2 วิธีการทดสอบ

1) การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต ทดสอบโดยหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C1152 ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 20x20x20 ซม.<sup>3</sup> ซึ่งตัวอย่างจะทำการฝังเหล็กเสริมโดยใช้แท่นกำหนดระยะฝังของเหล็กเสริม โดยกำหนดให้ระยะหุ้มเหล็กเสริมเท่ากับ 1, 2, 5, และ 7.5 ซม ดังรูปที่ 5 จากนั้นบ่มตัวอย่างจนกระทั่งครบ 28 วัน และนำตัวอย่างไปเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล หลังจากตัวอย่างเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลาเจ็ดปี นำก้อนตัวอย่างที่ได้มาเจาะเก็บแท่งตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก โดยทำการเจาะจากผิวหน้าของก้อนตัวอย่างลงไปตลอดช่วงความสูงของก้อนตัวอย่าง จะได้แท่งตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 ซม สูง 20 ซม จำนวน 2 แท่ง จากนั้นนำแท่งตัวอย่างที่เจาะได้มาตัดเป็นชิ้นความหนาชิ้นละ 1 ซม ลึกลงไปจากผิวหน้าเป็นจำนวน 10 ชิ้น

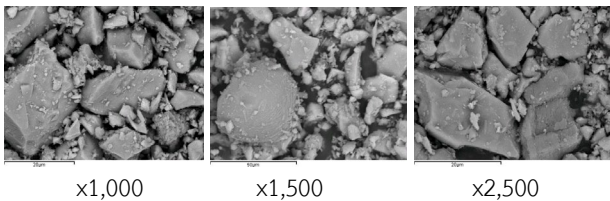
จากนั้นบดตัวอย่างแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 และนำผงตัวอย่างที่บดได้ไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดต่อไป

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

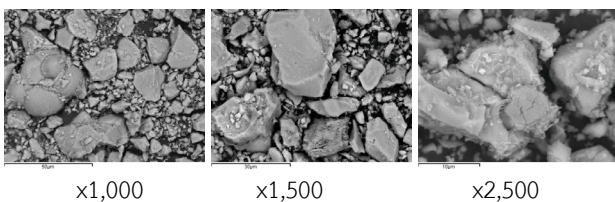
องค์ประกอบทางเคมี (%)	PC1	PC5	IFAC	FA
SiO <sub>2</sub>	19.51	21.87	24.98	40.93
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.97	3.87	9.25	22.42
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.78	4.34	5.97	13.64
CaO	65.38	64.56	52.65	13.63
MgO	1.08	1.11	1.62	2.93
Na <sub>2</sub> O	0.01	0.01	<0.01	0.89
K <sub>2</sub> O	0.44	0.24	0.78	2.39
SO <sub>3</sub>	2.16	2.08	2.48	1.92
LOI	2.27	1.59	1.85	0.46
C <sub>3</sub> S	69.6	55.2	-	-
C <sub>2</sub> S	3.5	21.2	-	-
C <sub>3</sub> A	6.8	2.9	-	-
C <sub>4</sub> AF	11.5	13.2	-	-

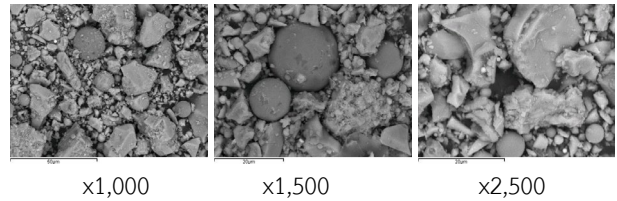
คุณสมบัติทางกายภาพ				
ความละเอียดโดยวิธี				
Blaine fineness (ชม <sup>2</sup> /กรัม)	3,550	3,830	4,470	2,460



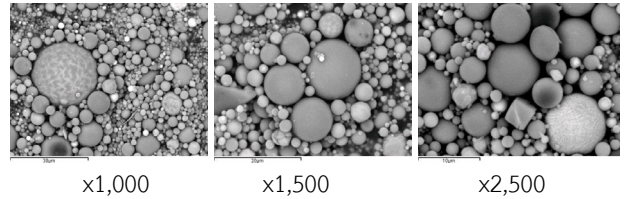
รูปที่ 1 รูปร่างอนุภาคของ PC1



รูปที่ 2 รูปร่างอนุภาคของ PC5



รูปที่ 3 รูปร่างอนุภาคของ IFAC



รูปที่ 4 รูปร่างอนุภาคของ FA

2) การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมทดสอบโดยนำเหล็กเสริมแช่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 500 ml ที่ผสมกับ 3.5 g เฮกซะเมทิลีนเตตราอามีน และเติมน้ำกลั่นจนกระทั่งครบ 1,000 ml เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 20 ถึง 25 °C ตามมาตรฐาน ASTM G1 [6] จากนั้นนำเหล็กเสริมขึ้นมาทำความสะอาด และชั่งน้ำหนัก ทำการบันทึกเป็นน้ำหนักสุดท้าย (W<sub>f</sub>) โดยกระทำจนกว่าน้ำหนักสุดท้ายคงที่ คำนวณการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม (Weight loss) ดังสมการที่ (1)

$$\text{Weight loss (\%)} = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่ W<sub>i</sub> คือ น้ำหนักเริ่มต้นของเหล็กเสริม (g)

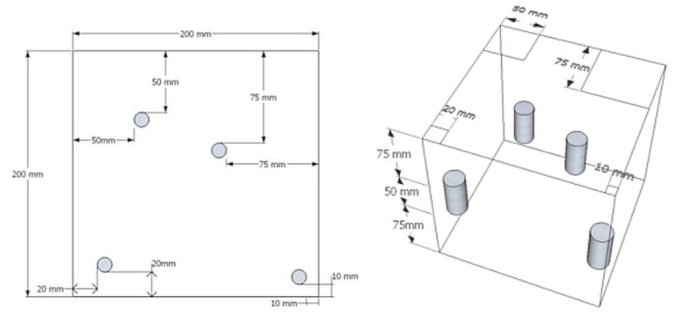
W<sub>f</sub> คือ น้ำหนักสุดท้ายของเหล็กเสริม (g)

3) การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ทดสอบโดยนำก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่เจาะออกมาซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 ซม. จากนั้นตัดตัวอย่างที่เจาะให้ได้อัตราส่วนความชะลูด (Slenderness ratio) เท่ากับ 1:2 ทำการปรับระดับผิวหน้าของตัวอย่างคอนกรีตด้วยกัมมะถัน และทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต (Compressive strength) ตามมาตรฐาน ASTM C39 [7]

### 3. ผลการทดลองและอภิปราย

#### 3.1 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

รูปที่ 6 แสดงผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตชนิดต่างๆ โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่พิจารณาคือ 0.40 0.50 และ 0.60 ซึ่งพบว่าเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดมีค่าเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงทำให้คอนกรีตมีโครงสร้างโพรงช่องว่างสูง [8-11] การแพร่คลอไรด์จึงเกิดขึ้นสูงตามไปด้วย



รูปที่ 5 รายละเอียดตำแหน่งการฝังเหล็กเสริม

ตารางที่ 2 ส่วนผสมคอนกรีต (kg/m<sup>3</sup>)

รหัส	Cement	Fly ash	Rock (SSD)	Sand (SSD)	Water
PC1-W40	435	-	1,025	776	174
PC1-W50	382	-	1,025	776	191
PC1-W60	340	-	1,025	776	204
PC5-W40	435	-	1,025	776	174
PC5-W50	382	-	1,025	776	191
PC5-W60	340	-	1,025	776	204
IFAC-W40	435	-	1,025	776	174
IFAC -W50	382	-	1,025	776	191
IFAC -W60	340	-	1,025	776	204
FA20-W40	335	84	1,025	776	168
FA40 -W40	242	162	1,025	776	162
FA60 -W40	156	234	1,025	776	156
FA20-W50	295	74	1,025	776	185
FA40 -W50	215	143	1,025	776	179
FA60 -W50	139	208	1,025	776	173
FA20-W60	264	66	1,025	776	198
FA40 -W60	193	128	1,025	776	193
FA60 -W60	125	187	1,025	776	187

รูปที่ 7 แสดงผลกระทบของการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (PC1) ประเภทที่ 5 (PC5) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยบด (IFAC) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากันต่อการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต โดยพบว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีการแทรกซึมคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานที่มีปริมาณของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C<sub>3</sub>A) สูง ซึ่ง C<sub>3</sub>A สามารถทำปฏิกิริยากับคลอไรด์ยึดจับเกลือคลอไรด์ให้เป็น Friedel's salt [10] ดังนั้นจึงทำให้การแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และหากพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (PC1) กับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบด (IFAC) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากันพบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบด (IFAC) มีการแทรกซึมคลอไรด์ที่ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 อย่างเห็นได้ชัดเจนเนื่องจากเถ้าลอยสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับ Ca(OH)<sub>2</sub> เกิดเป็นผลผลิต เช่น CSH และ CAH ซึ่งผลผลิตนี้ทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นขึ้น [12] นอกจากนี้ผลผลิตที่เกิดขึ้นยังสามารถยึดจับคลอไรด์ไว้ที่ผิวของผลผลิตดังกล่าวได้ [13-14] อีกทั้งอนุภาคของเถ้าลอยสามารถเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีต ส่งผลทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นเพิ่มมากขึ้น ด้วยเหตุนี้การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยบดจึงต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 [15]

รูปที่ 8 แสดงการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบดและคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย ซึ่งพบว่าการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นส่งผลให้การแทรกซึมคลอไรด์ลดลงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบด เนื่องจากการใช้เถ้าลอยมีสารซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันก่อให้เกิดผลผลิต เช่น CSH และ CAH ทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นเพิ่มขึ้น [12, 15] อีกทั้งผลผลิตที่เกิดขึ้นยังสามารถจับคลอไรด์ไว้ที่ผิวได้ [13-14] ด้วยเหตุนี้การใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.60 จึงมีการแทรกซึมคลอไรด์ต่ำที่สุด ในขณะที่คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบดมีการแทรกซึมคลอไรด์ใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.40

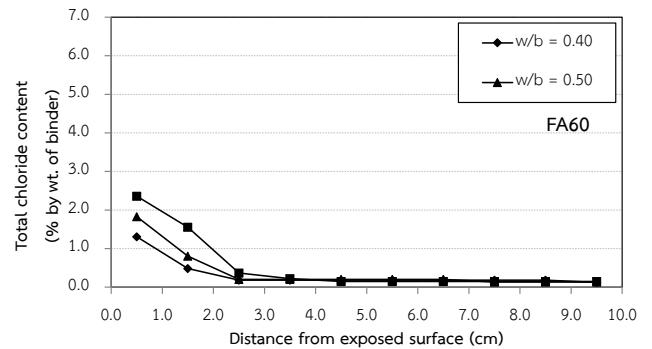
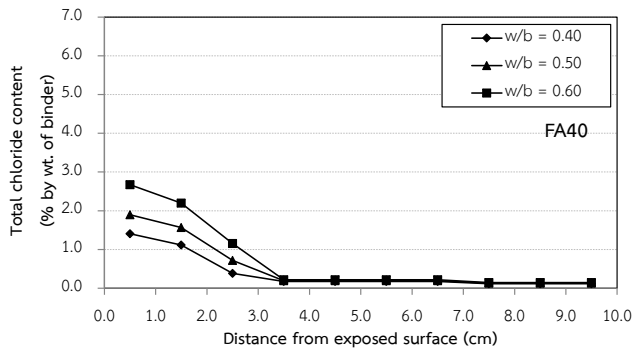
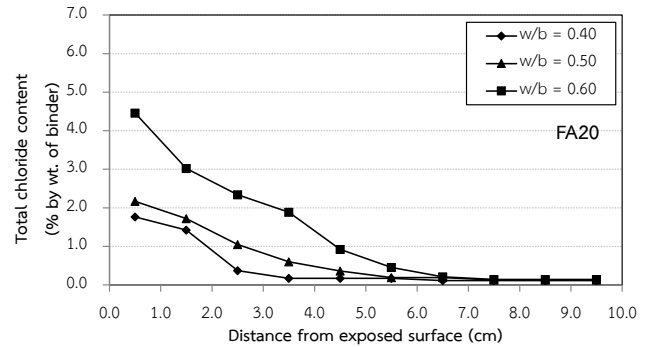
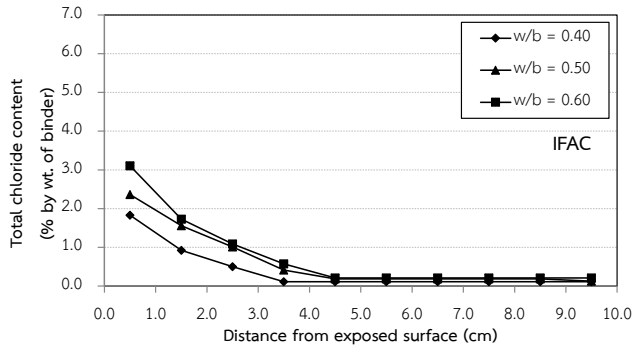
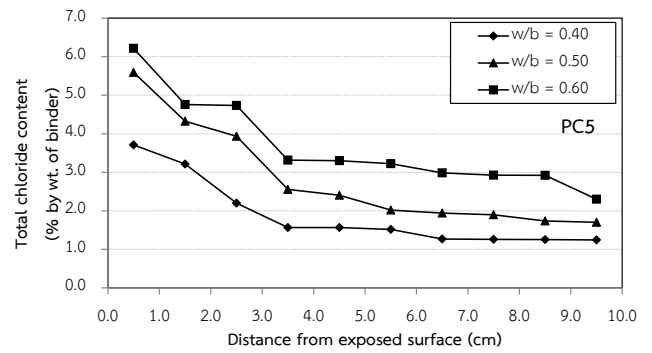
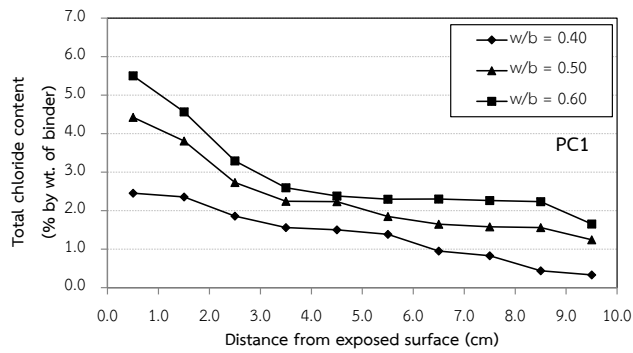
จากข้อมูลการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตสามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ (Chloride diffusion coefficient) ของคอนกรีตได้ ตามสมการคำตอบของ Fick's 2<sup>nd</sup> law of diffusion ดังสมการที่ (2)

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

โดยที่  $C_{(x,t)}$  คือ ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระยะ  $x$  เวลา  $t$  ใดๆ (% by wt. of binder),  $x$  คือ ระยะหุ้มเหล็กเสริม (ซม),  $D_a$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ในคอนกรีต ( $\text{ซม}^2/\text{ปี}$ ),  $t$  คือ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (ปี),  $C_0$  คือ ปริมาณคลอไรด์เริ่มต้นในคอนกรีต (% by wt. of binder),  $C_s$  คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (% by wt. of binder)

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตในรูปที่ 9 พบว่า เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงทำให้คอนกรีตมีโครงสร้างโพรงช่องว่างสูง ดังนั้นสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตจึงสูงขึ้นด้วย [10, 16] และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (PC1) ประเภทที่ 5 (PC5) และปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบด(IFAC) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากันพบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีสัมประสิทธิ์การแพร่คลอ

ไรด์ของคอนกรีตอยู่ที่ 3.49, 4.47 และ 5.48  $\text{ซม}^2/\text{ปี}$  สำหรับ w/b เท่ากับ 0.40, 0.50 และ 0.60 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่มีค่าอยู่ที่ 4.22, 5.57 และ 8.24  $\text{ซม}^2/\text{ปี}$  สำหรับ w/b เท่ากับ 0.40, 0.50 และ 0.60 ตามลำดับ เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีปริมาณของไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $\text{C}_3\text{A}$ ) ที่สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับคลอไรด์เกิดเป็น Friedel's salt ได้ [10] ดังนั้นจึงทำให้การแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ด้วยเหตุนี้สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จึงต่ำกว่า และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (PC1) กับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบด (IFAC) และการแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ที่ w/b เท่ากับ 0.40, 0.50 และ 0.60 พบว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบด (IFAC) มีสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตเท่ากับ 0.27, 0.38 และ 0.46  $\text{ซม}^2/\text{ปี}$  คอนกรีต FA20 มีสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตเท่ากับ 0.48, 0.71 และ 0.88  $\text{ซม}^2/\text{ปี}$  คอนกรีต FA40 มีสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตเท่ากับ 0.43, 0.47 และ 0.53  $\text{ซม}^2/\text{ปี}$  และคอนกรีต FA60 มีสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตเท่ากับ 0.16, 0.18 และ 0.27  $\text{ซม}^2/\text{ปี}$  ตามลำดับ ซึ่งสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของณัฐพล วงษ์วาร และคณะ [15] และ อัญชญา กิจจานนท์ [16] เนื่องจากเถ้าลอยสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ทำให้เกิดผลผลิต เช่น CSH และ CAH ที่ทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่น นอกจากนี้อนุภาคของเถ้าลอยสามารถเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นเพิ่มมากขึ้นด้วย [12, 15] ด้วยเหตุนี้สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยจึงต่ำลง และพบว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.60 มีสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ต่ำที่สุด ซึ่งผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pavitpok และ Sumranwanich [17]

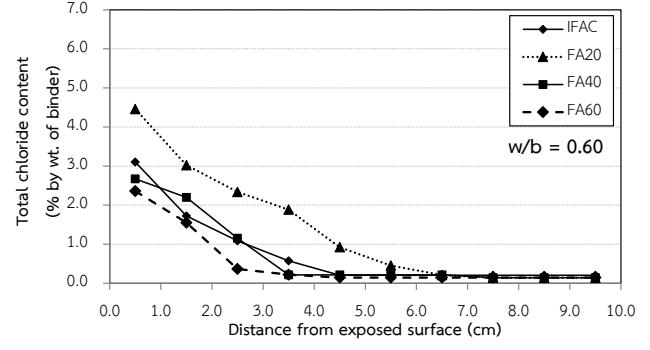
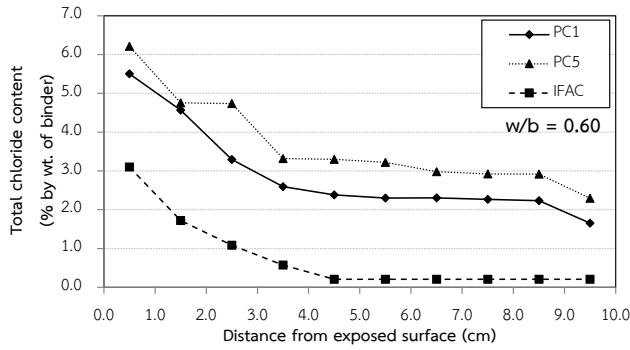
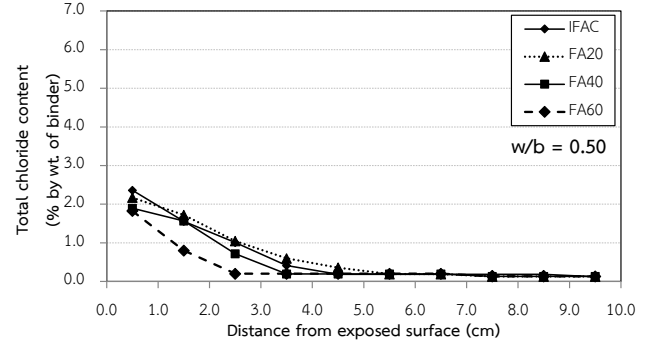
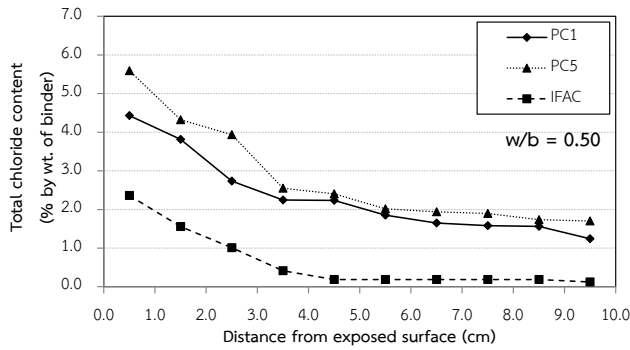
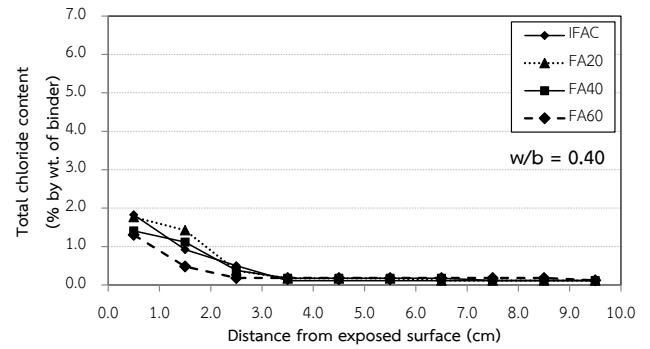
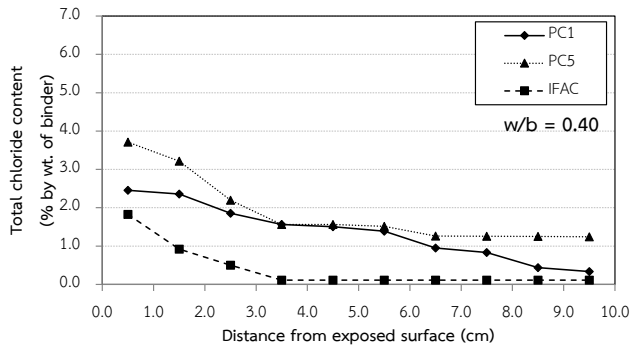


รูปที่ 6 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตทุกชนิดในการศึกษา

### 3.2 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม

จากรูปที่ 10 พบว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงขึ้น การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสมของคอนกรีตมากขึ้น ทำให้คอนกรีตมีความพรุนเพิ่มมากขึ้น คลอไรด์ในน้ำทะเลสามารถแทรกซึมผ่านโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตไปยังเหล็กเสริมได้ง่าย ทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดสนิมมาก

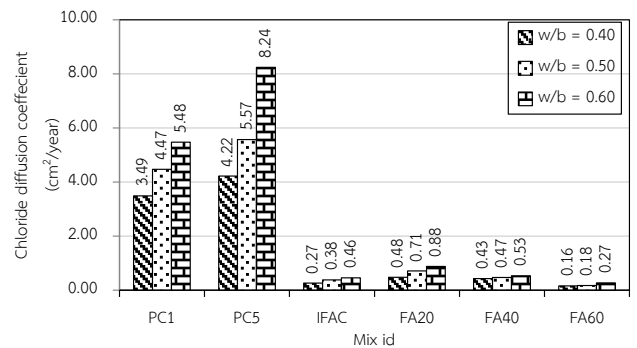
ขึ้น ซึ่งผลการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมนี้สอดคล้องกับผลการแทรกซึมคลอไรด์และสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต และเมื่อพิจารณาที่ระยะหุ้มเหล็กเสริม (Covering depth) ที่มากขึ้นพบว่า เมื่อระยะหุ้มเหล็กเสริมเพิ่มมากขึ้น การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตมีค่าน้อยลง



รูปที่ 7 ผลกระทบของชนิดของปูนซีเมนต์ต่อการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

เมื่อพิจารณาการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (PC1) ประเภทที่ 5 (PC5) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยบด (IFAC) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากันพบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีการสูญเสีย น้ำหนักของเหล็กเสริมมากที่สุด รองลงมาเป็นคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบด ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับผลการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต

รูปที่ 8 ผลกระทบของการใช้เถ้าลอยต่อการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต



รูปที่ 9 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบด (IFAC) และคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.20,

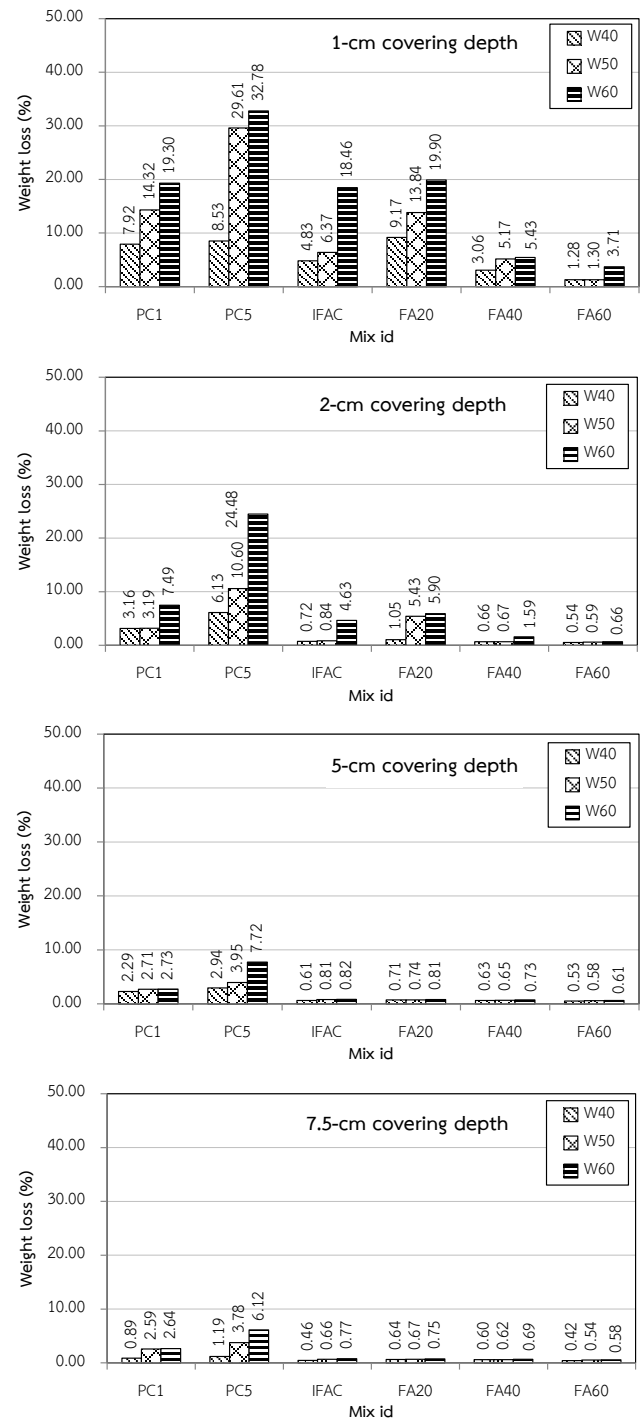
0.40 และ 0.60 พบว่า การเพิ่มอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานส่งผลให้การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมลดลง และคอนกรีตที่ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบดมีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.40 ทั้งนี้พบว่า คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.60 มีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมต่ำที่สุด และมีแนวโน้มเดียวกันในทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

### 3.3 กำลังอัดของคอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ดังรูปที่ 11 พบว่า คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง ในทุกส่วนผสมคอนกรีต ซึ่งผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wattanapornprom และ Stitmannaitum [18] และ Elsaeger และคณะ [19] เนื่องจากการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้นทำให้คอนกรีตมีโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตสูงส่งผลให้ความสามารถในการรับกำลังของคอนกรีตลดลง โดยผลกำลังอัดที่ได้นี้สอดคล้องกับผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ และการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

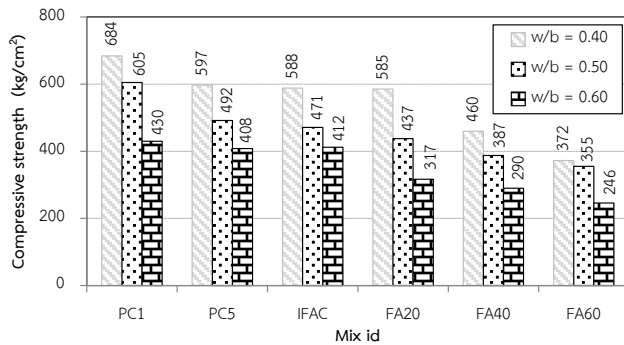
เมื่อพิจารณากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (PC1) พบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีกำลังอัดสูงที่สุด โดยมีค่าอยู่ที่ 684, 605 และ 430 kg/cm<sup>2</sup> สำหรับ w/b เท่ากับ 0.40, 0.50 และ 0.60 ตามลำดับ เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีปริมาณไตรแคลเซียมซัลเฟต (C<sub>3</sub>S) สูง จึงเกิดผลผลิต CSH และ CAH มาก และส่งผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จึงมีกำลังอัดสูงที่สุด รองลงมาเป็นคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ซึ่งมีกำลังอัดอยู่ที่ 597, 492, 408 kg/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ และน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อยู่ 12.7%, 18.7% และ 5.1% ตามลำดับ และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบดมีกำลังอัดอยู่ที่ 588, 471, 412 kg/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อยู่ 14.0%, 22.2% และ 4.2% ตามลำดับ สำหรับกำลังอัดที่ลดลงของคอนกรีตผสมเถ้าลอยบดเนื่องจากการใช้เถ้าลอยทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ใน

คอนกรีตน้อยลง ทำให้การเกิดผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ที่ทำให้เกิดกำลัง เช่น CSH และ CAH ลดลงตามไปด้วย ดังนั้นกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยบดจึงต่ำกว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Harison และคณะ [20]



รูปที่ 10 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม





รูปที่ 11 กำลังอัดของคอนกรีต

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบด (IFAC) และคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.20, 0.40 และ 0.60 พบว่า การเพิ่มอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wattanapornprom และ Stitmannaitum [18], Elsageer และคณะ [19] และ Harison และคณะ [20] โดยคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.60 มีกำลังอัดต่ำที่สุด โดยมีค่าอยู่ที่ 372, 355 และ 246 kg/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ และมีแนวโน้มเดียวกันในทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เนื่องจากการใช้เถ้าลอยที่สูงขึ้นทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ในระบบน้อยลง ส่งผลให้เกิดผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ที่ต่ำกว่า เช่น CSH และ CAH ลดลงไปด้วย ดังนั้นกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.60 จึงต่ำที่สุด

#### 4. สรุปผล

จากผลการศึกษาลักษณะของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบด และเถ้าลอยต่อความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตภายหลังเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลของประเทศไทยเป็นเวลาเจ็ดปี สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1) ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตและความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตต่ำลง

2) คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และมี

สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตและการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

3) คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบดมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 และมีสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตและการเกิดสนิมของเหล็กเสริมต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5

4) คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ทั้งนี้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน โดยคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.60 มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตมากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ต่ำที่สุดและมีการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่น้อยที่สุด

5) คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบดมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.40

6) เมื่อพิจารณาส่วนผสมคอนกรีตที่เหมาะสมทั้งด้านความต้านทานคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตพบว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบดมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดที่ดี

#### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยมหาวิทยาลัยบูรพา สัญญาเลขที่ 129/2561 และการสนับสนุนจากหน่วยวิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษาบูรพา (BCONTEC) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา และศูนย์เทคโนโลยีการก่อสร้างและการจัดการจราจร (CONTRA) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. *ความคงทนของคอนกรีต*. พิมพ์ครั้งที่ 1; 2543.

- [2] Tangtermsirikul S. *Durability and Mix Design of Concrete (1st edition)*. Pathum Thani: Thammasat University, Rangsit Campus; 2003.
- [3] Chindaprasirt P, Rukzon S, Sirivatnanon V. Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel, rice husk ash and fly ash. *Construction and Building Materials*. 2008;22: 932 – 938.
- [4] ศิระ อาทมาท และทวีชัย สำราญวานิช. กำลังอัดและความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนและใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียด. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราช มงคลธัญบุรี*. 2562;17(2): 113-125.
- [5] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. *มอก-2135-2545 เถ้าลอยจากถ่านหินใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีต*. 2546.
- [6] ASTM G1, Standard practice for preparing cleaning and evaluating corrosion test specimens.
- [7] ASTM C39, Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens.
- [8] Hosein M, Shekarchi M, Tadayon M. Long-term field study of chloride ingress in concretes containing pozzolans exposed to severe marine tidal zone. *Construction and Building Materials*. 2016;123: 611-616.
- [9] Yoo J, Oh B, Park S, Kim S. Chloride penetration resistance properties of concrete containing mineral admixtures. *Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structure*. 2010.
- [10] Sumranwanich T, Tangtermsirikul S. Time-dependent chloride binding capacity of various types of cement pastes. *Science Asia*. 2004;30(2): 127-134.
- [11] Leng F, Feng N, Lu X. Experimental study on the properties of resistance to diffusion of chloride ions of fly ash and blast furnace slag concrete. *Cement and Concrete Research*. 2000;30: 989-992.
- [12] Simcic T, Pejovnik S, Schutter GD, Bosiljkov, VB. Chloride ion penetration into fly ash modified concrete during wetting-drying cycles. *Construction and Building Materials*. 2015.
- [13] Ipavec A, Vuk T, Gabrovsek R, Kaucic, V. Chloride binding into hydrated blended cements: The influence of limestone and alkalinity. *Cement and Concrete Research*. 2013;48: 74-85.
- [14] 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: 1352-1357.
- [15] ญัฐพล วงษ์วาร, ทวีชัย สำราญวานิช และ สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล. ผลกระทบของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบดและปูนซีเมนต์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าลอยต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล. *การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 11, นครราชสีมา*, 17-19 กุมภาพันธ์ 2559.
- [16] อัญชญา กิจงานนท์. *แบบจำลองสำหรับการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตและอายุการใช้งานที่ปลอดภัยการบำรุงรักษาซ่อมแซมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้สิ่งแวดล้อมคลอไรด์*. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา. คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยบูรพา. 2560.
- [17] Pavitpok S, Sumranwanich T. Effect of interground fly ash cement and blast-furnace slag cement on chloride diffusion coefficient and compressive strength of concrete under marine environment of Thailand: *Proceedings of The 5th Annual International Conference on Architecture and Civil Engineering 2017 (ACE 2017)*, Singapore: Global Science and Technology Forum; 2017. p.1-10.
- [18] Wattanapornprom R, Stitmannaitum B. Comparison of properties of fresh and hardened concrete containing finely ground glass powder, fly ash, or silica fume. *Engineering Journal*. 2015;19(3): 35-47.

- [19] Elsageer MA, Millard SG, Barnett, SJ. Strength development of concrete containing coal fly ash under different curing temperature conditions: *Proceedings of 2009 World of Coal Ash (WOCA) Conference*, Lexington: USA; 2009. p.1-11.
- [20] Harison A, Srivastava V, Herbert, A. Effect of fly ash on compressive strength of Portland pozzolona cement concrete. *Journal of Acadamia and Industrial Research (JAIR)*. 2014;2(8): 476-479.