



Journal of Thailand Concrete Association

วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

แบบจำลองการทำนายการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบด

A prediction model of chloride penetration profile in concrete containing ground granulated blast-furnace slag

ทวีชัย สำราญวานิช^{1*}, สุธีรัตน์ จ้าว²

¹ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

²มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

ARTICLE INFO:

Received: February 13, 2015

Received Revised Form:

August 21, 2015

Accepted: August 28, 2015

ABSTRACT :

This paper aims to propose a prediction model of chloride penetration profile in concrete containing ground granulated blast-furnace slag (GGBFS). This model took into account the time-dependent models of chloride binding capacity, chloride diffusion coefficient, and chloride ion adsorption of GGBFS concrete. The effects of water to binder ratio, GGBFS replacement ratio, binder content, and chloride exposure period were considered in the models. The results of chloride penetration profile from prediction and experiment were compared and discussed. The predictions of chloride penetration profile have been found in a satisfactory degree of accuracy with the experimental data.

*Corresponding Author,
Email address: twc@bua.ac.th

KEYWORDS: Model, Chloride penetration profile, Concrete, Ground granulated blast-furnace slag

1. บทนำ

คอนกรีตเสริมเหล็กเป็นวัสดุโครงสร้างที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในงานก่อสร้าง แต่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตยังเป็นปัญหาสำคัญที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการเสื่อมสภาพ โดยเฉพาะโครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในสภาพแวดล้อมทะเล [1] ซึ่งมีโอกาสสัมผัสกับน้ำทะเลโดยตรงหรือสัมผัสกับไอเกลือ และความชื้นตลอดเวลา เนื่องจากออสโมซิสคลอไรด์แทรกซึมเข้าไปสะสมที่ผิวของเหล็กเสริมมากจนถึงระดับคลอไรด์วิกฤต เหล็กเสริมจะเริ่มเกิดสนิมและพัฒนาการเกิดสนิมจนกระทั่งโครงสร้างเกิดการวิบัติได้ [2-3] ส่งผลให้ความคงทนและอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กลดลง ซึ่งต้องสิ้นเปลืองงบประมาณจำนวนมากในการซ่อมแซมและบำรุงรักษา ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องพัฒนาแบบจำลองที่สามารถใช้ทำนาย

ปริมาณการแทรกซึมคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีต สำหรับใช้ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กให้มีความคงทนต่อการทำลายของเกลือคลอไรด์ และสามารถใช้ทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตได้เพื่อใช้ในการวางแผนบำรุงรักษาโครงสร้างได้อย่างถูกต้องตามเวลาที่เหมาะสมต่อไป

มีนักวิจัยได้เสนอแบบจำลองเพื่อทำนายการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต โดยใช้กฎการแพร่ของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) เช่น Thomas and Bamforth [4] ได้พัฒนาแบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ในคอนกรีตโดยพิจารณาถึงผลกระทบของตะกรันเตาถลุงเหล็กบด Tamimi et al. [5] ได้เสนอแนวทางการทำนายการแพร่คลอไรด์ในระยะยาวของคอนกรีต แต่ยังไม่มีความชัดเจนที่คิดผลของความสามารถเก็บกักคลอไรด์และการดึงดูดออสโมซิสคลอไรด์ของคอนกรีตไว้ในแบบจำลองด้วย

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาและเสนอแบบจำลองสำหรับการทำนายการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบด (หรือกากถลุงจากเตาถลุงแบบพ่นลมบด) โดยประกอบด้วย 3 แบบจำลองย่อย ได้แก่ แบบจำลองความสามารถเก็บกักคลอไรด์แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่ คลอไรด์ และแบบจำลองการดึงดูดไอออน คลอไรด์ โดยคำนึงถึงผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน ปริมาณวัสดุประสาน และระยะเวลาเผชิญกับคลอไรด์ในแบบจำลอง โดยการแทรกซึมคลอไรด์ที่ได้จากการทำนายจะถูกตรวจสอบกับผลการทดลองของ Prak [6, 7] และ McPolin et al. [8]

2. การพัฒนาแบบจำลอง

แบบจำลองการทำนายการแทรกซึม คลอไรด์ในคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้ผลการทดลองการแทรกซึมคลอไรด์ของ Prak [6, 7] ซึ่งในแบบจำลองนี้ประกอบไปด้วย 3 แบบจำลองย่อย ได้แก่ ความสามารถเก็บกักคลอไรด์สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ และการดึงดูดไอออนคลอไรด์องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแสดงไว้ในตารางที่ 1 และส่วนผสมของคอนกรีตและเงื่อนไขการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และตะกรันเตาถลุงเหล็กบด [6, 7]

องค์ประกอบทางเคมี	ปูนซีเมนต์	GGBFS
SiO ₂ (%)	19.51	34.06
Al ₂ O ₃ (%)	4.97	16.27
Fe ₂ O ₃ (%)	3.78	1.70
CaO (%)	65.38	36.05
MgO (%)	1.08	7.38
SO ₃ (%)	2.16	2.16
Na ₂ O (%)	0.01	0.21
K ₂ O (%)	0.47	1.09
LOI (%)	2.27	1.14
Ti ₂ O ₃ (%)	-	0.47
P ₂ O ₅ (%)	-	0.01
MnO (%)	-	0.28
องค์ประกอบทางกายภาพ		
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.85
ความละเอียดโดยวิธีเบลน (cm ² /g)	3,550	4,600

ตารางที่ 2 ส่วนผสมของคอนกรีตและเงื่อนไขการทดลอง [6, 7]

รหัสส่วนผสม	ปริมาณวัสดุ		s/b	ระยะเวลา	
	ประสาน	w/b		บ่มน้ำ	เผชิญคลอไรด์
	(kg/m ³)			(วัน)	(วัน)
OPC	320, 400	0.40, 0.50	0.00	28	28, 91, 365
GGBFS20	320, 400	0.40, 0.50	0.20	28	28, 91, 365
GGBFS50	320, 400	0.40, 0.50	0.50	28	28, 91, 365
GGBFS60	320, 400	0.40, 0.50	0.60	28	28, 91, 365
GGBFS70	320, 400	0.40, 0.50	0.70	28	28, 91, 365
เงื่อนไขการทดลอง					
ความเข้มข้นคลอไรด์			3.0% by weight of binder		
ระยะเวลาบ่มน้ำ (วัน)			28		
ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (วัน)			28, 91, 365		

หมายเหตุ: OPC หมายถึงคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนเป็นวัสดุประสาน

GGBFS20 หมายถึงคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนตะกรันเตาถลุง

เหล็กบดต่อวัสดุประสาน 0.20

w/b หมายถึงอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

s/b หมายถึงอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน

2.1 แบบจำลองความสามารถเก็บกักคลอไรด์

ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีต หรืออัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride ratio) หมายถึงความสามารถของคอนกรีตในการยึดจับคลอไรด์ภายในคอนกรีตให้เป็นคลอไรด์ที่ถูกยึดจับเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตนั้น

ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride) ของคอนกรีตเป็นผลต่างระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) และปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ในคอนกรีตนั้น ดังสมการที่ 1

$$C_{\text{fix}}(t) = C_{\text{tot}}(t) - C_{\text{free}}(t) \quad (1)$$

เมื่อ t = ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (year)

$C_{\text{tot}}(t)$ = ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระยะเวลา t
(% by wt of binder)

$C_{\text{fix}}(t)$ = ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับที่ระยะเวลา t
(% by wt of binder)

$C_{\text{free}}(t)$ = ปริมาณคลอไรด์อิสระที่ระยะเวลา t
(% by wt of binder)

หารสมการที่ 1 ด้วยปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด [$C_{\text{tot}}(t)$] ได้อัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับดังสมการที่ 2

$$\alpha_{\text{fix}}(t) = 1 - \alpha_{\text{free}}(t) \quad (2)$$

เมื่อ $\alpha_{\text{fix}}(t)$ = อัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ

(Fixed chloride ratio)

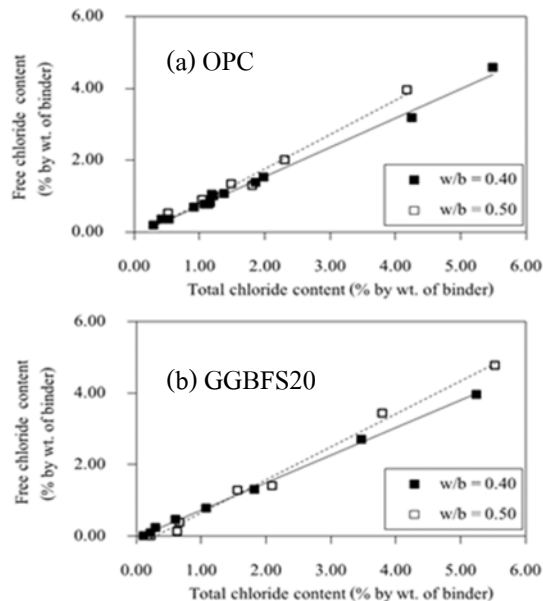
$\alpha_{\text{free}}(t)$ = อัตราส่วนคลอไรด์อิสระ

(Free chloride ratio)

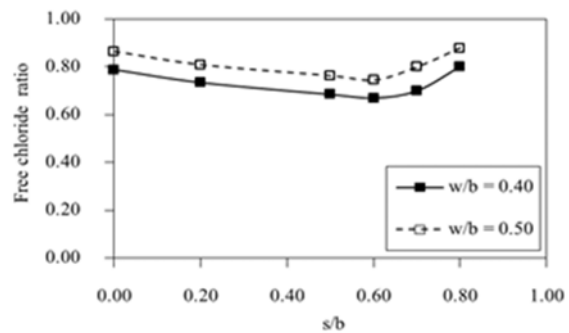
จากผลการทดลองการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบด [6, 7] สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระและปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตแต่ละส่วนผสมได้ ดังตัวอย่างในรูปที่ 1

หลังจากที่ได้อัตราส่วนคลอไรด์อิสระของคอนกรีตแต่ละส่วนผสม จึงศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคลอไรด์อิสระและอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน (s/b) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ (w/b) ดังรูปที่ 2

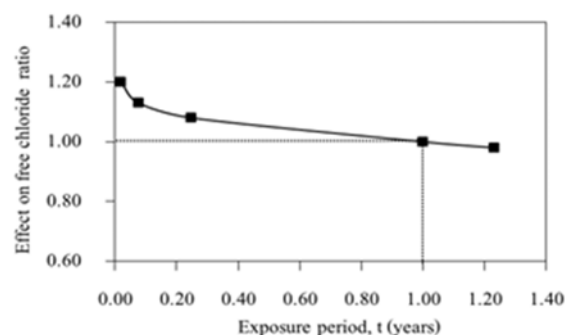
อัตราส่วนคลอไรด์อิสระมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับอายุของคอนกรีต เมื่อคอนกรีตมีอายุนานขึ้น อัตราส่วนคลอไรด์อิสระมีแนวโน้มลดลงดังรูปที่ 3 เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกของวัสดุประสานเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน จึงส่งผลให้คลอไรด์ถูกยึดจับได้มากขึ้น



รูปที่ 1 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระและปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 365 วัน



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคลอไรด์อิสระและอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสานที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน คลอไรด์อิสระและระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ของคอนกรีต

จากรูปที่ 1 ถึงรูปที่ 3 สามารถหาอัตราส่วนคลอไรด์อิสระของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดโดยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ได้ดังสมการที่ 3

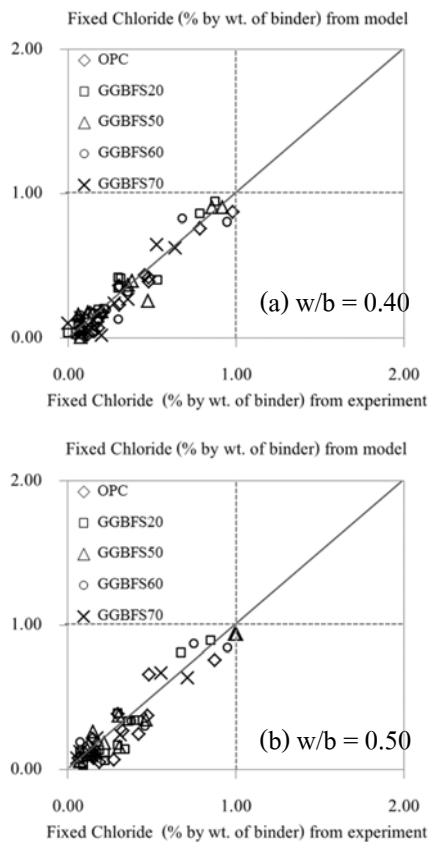
$$\alpha_{\text{free}}(t) = \left(\left(-0.27 \times \frac{w}{b} + 1.155 \right) \times \left(\frac{s}{b} \right)^{7.5} + \left(0.18 \times \frac{w}{b} - 0.298 \right) \times \frac{s}{b} + \left(0.74 \times \frac{w}{b} + 0.49 \right) \right) \times \frac{1}{t^{0.048}} \quad (3)$$

เมื่อ w/b = อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

s/b = อัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน

แทนสมการที่ 3 ในสมการที่ 2 ได้อัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ ดังสมการที่ 4

$$\alpha_{\text{fix}}(t) = \left(1 - \frac{1}{t^{0.048}} \left(\left(-0.27 \times \frac{w}{b} + 1.155 \right) \left(\frac{s}{b} \right)^{7.5} + \left(0.18 \times \frac{w}{b} - 0.298 \right) \times \frac{s}{b} + \left(0.74 \times \frac{w}{b} + 0.49 \right) \right) \right) \quad (4)$$



รูปที่ 4 การตรวจสอบความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนตะกั่วเตาสูงเหลือกับตัววัสดุประสานต่างๆ (a) w/b = 0.40, (b) w/b = 0.50

ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกั่วเตาสูงเหลือกับตัววัสดุประสานที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่างกัน และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ที่นานขึ้น ซึ่งจากการตรวจสอบความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีตที่ได้จากแบบจำลองเทียบกับผลการทดลอง พบว่าแบบจำลองนี้สามารถใช้เพื่อคำนวณหาความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมตะกั่วเตาสูงเหลือกับตัววัสดุประสานต่างๆ ได้ดังรูปที่ 4

2.2 แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์

การแทรกซึมคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตสามารถเกิดขึ้นได้เนื่องจากกลไกการเคลื่อนที่ต่างๆ ได้แก่ การแพร่ การซึมผ่าน และการดึงดูดคาปิลลารี เป็นต้น อย่างไรก็ตามเมื่อคอนกรีตอิ่มตัวด้วยน้ำและไม่เผชิญกับความ

ดันของน้ำ การแพร่คลอไรด์จะเป็นกระบวนการหลักที่ส่งผลโดยตรงต่อการแทรกซึมคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีต การแพร่คลอไรด์เกิดจากความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ต่างกัน กล่าวคือคลอไรด์จะแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งสามารถอธิบายได้จากกฎ การแพร่ข้อสองของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) ในหนึ่งทิศทาง ดังสมการที่ 5 และคำตอบของกฎการแพร่ ดังสมการที่ 6

$$\frac{\partial C_{\text{tot}}(x,t)}{\partial t} = -D_{\text{Cl}}(x,t) \frac{\partial^2 C_{\text{free}}(x,t)}{\partial x^2}$$

เมื่อ $C_{\text{tot}}(x, t)$ = ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระยะทาง x จากผิวหน้าคอนกรีตที่ระยะเวลา t (mol/l)

$C_{\text{free}}(x, t)$ = ปริมาณคลอไรด์อิสระที่ระยะทาง x จากผิวหน้าคอนกรีตที่ระยะเวลา t (mol/l)

$D_{\text{Cl}}(x, t)$ = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ คลอไรด์ที่ระยะทาง x จากผิวหน้าคอนกรีตที่ระยะเวลา t (cm^2/year)

x = ระยะทางจากผิวหน้าของคอนกรีต (cm)

t = ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (year)

$$C(x,t) = (C_s - C_i) \left[1 - \text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{\text{Cl}} \cdot t}} \right) \right] + C_i \quad (6)$$

เมื่อ $C(x, t)$ = ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระยะ x ที่เวลา t (% by wt of binder)

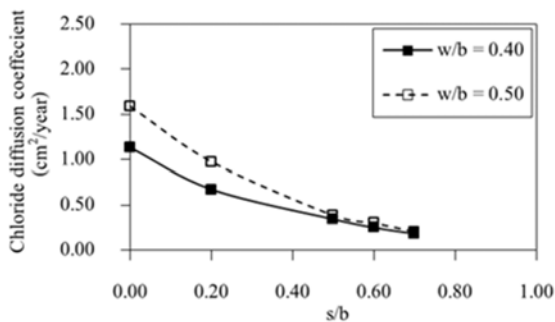
C_s = ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (% by wt of binder)

C_i = ปริมาณคลอไรด์ที่มีอยู่ในคอนกรีตตั้งแต่แรก (% by wt of binder)

D_{Cl} = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ (cm^2/year)

x = ระยะทางจากผิวหน้าของคอนกรีต (cm)

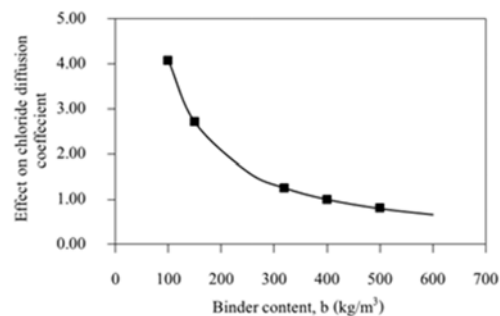
t = ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (year)



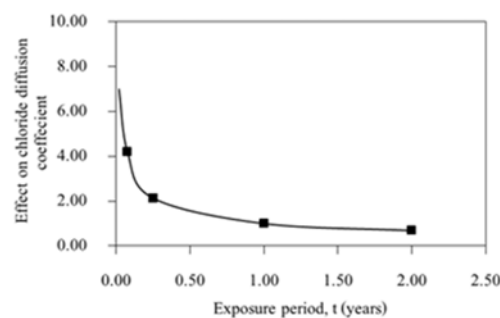
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และอัตราส่วนตะกั่วเตาสูงเหล็กบดต่อวัสดุประสานที่อัตราส่วนน้ำต่างๆที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 365 วัน

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกั่วเตาสูงเหล็กบดหาได้จากสมการที่ 6 โดยใช้ผลการทดลองการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกั่วเตาสูงเหล็กบด [6, 7] หลังจากที่ได้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต จึงศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และอัตราส่วนตะกั่วเตาสูงเหล็กบดต่อวัสดุประสานที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆดังตัวอย่างในรูปที่ 5 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกั่วเตาสูงเหล็กบดมีค่าต่ำกว่าสัมประสิทธิ์คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน เนื่องจากตะกั่วเตาสูงเหล็กบดทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ทำให้เกิดสารประกอบ C-S-H เพิ่มขึ้น ช่วยเพิ่มการยึดประสานของคอนกรีต คอนกรีตจึงมีความพรุนน้อยลง ส่งผลให้เกิดคลอไรด์แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตได้น้อย [6, 9]

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับปริมาณวัสดุประสานที่ใช้ ซึ่งการใช้ปริมาณวัสดุประสานในปริมาณที่สูงขึ้นก็จะส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์มีค่าลดลงดังรูปที่ 6 เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้ปริมาณวัสดุประสานสูง ย่อมเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้มากกว่าส่งผลให้คอนกรีตแน่นขึ้น และที่ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปริมาณวัสดุประสานที่ต่ำคลอไรด์จึงแทรกซึมเข้าไปได้ยากขึ้น



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และปริมาณวัสดุประสานของคอนกรีต



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ของคอนกรีต

นอกจากนี้สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์มีค่าขึ้นอยู่กับระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ของคอนกรีต เมื่อคอนกรีตมีระยะเวลาเผชิญคลอไรด์นานขึ้น คอนกรีตมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ลดลง เนื่องจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิก อย่างต่อเนื่องเป็นเวลานานส่งผลให้คอนกรีตแน่นขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์จึงมีแนวโน้มลดลงดังรูปที่ 7

จากรูปที่ 5 ถึงรูปที่ 7 สามารถหาสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกั่วเตาสูงเหล็กบดโดยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนตะกั่วเตาสูงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ปริมาณวัสดุประสานและระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ได้ ดังสมการที่ 7

$$D_{cl}(x, t) = \left((6.462 \times \frac{w}{b} - 1.135) \times (\frac{s}{b})^2 - (11.01 \times \frac{w}{b} - 2.109) \times \frac{s}{b} + (4.683 \times (\frac{w}{b}) - 0.759) \right) \times \frac{43.5}{t^{0.547} \times b^{1.014}} \quad (7)$$

เมื่อ $D_{cl}(x, t)$ = สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ (cm^2/year)

s/b = อัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน

w/b = อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

t = ระยะเวลาการเผชิญกับคลอไรด์ (year)

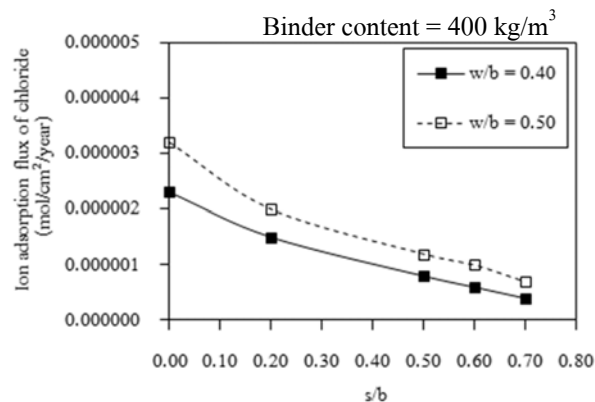
b = ปริมาณของวัสดุประสาน (kg/m^3)

2.3 แบบจำลองการดึงดูดไอออนคลอไรด์

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ใต้น้ำทะเลตลอดเวลาพบว่า ความเข้มข้นของ คลอไรด์ที่อยู่บริเวณใกล้ผิวของคอนกรีตจะมีความเข้มข้นคลอไรด์สูงกว่าความเข้มข้นคลอไรด์ในสารละลายโดยรอบของน้ำทะเล ปรากฏการณ์นี้ไม่สามารถอธิบายได้โดยกลไกการแพร่คลอไรด์อย่างเดียว เพราะ การแพร่จะยุติเมื่อความเข้มข้นคลอไรด์ในคอนกรีตเท่ากับความเข้มข้นคลอไรด์ของสิ่งแวดล้อมภายนอก แต่กลไกการดึงดูด ไอออนคลอไรด์จะเกิดขึ้น เนื่องจากบริเวณผิวของโพรงช่องว่างในคอนกรีตมีประจุไฟฟ้าเป็นบวก จะดึงดูดไอออนคลอไรด์ ซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นลบจากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้ามาในคอนกรีต [10]

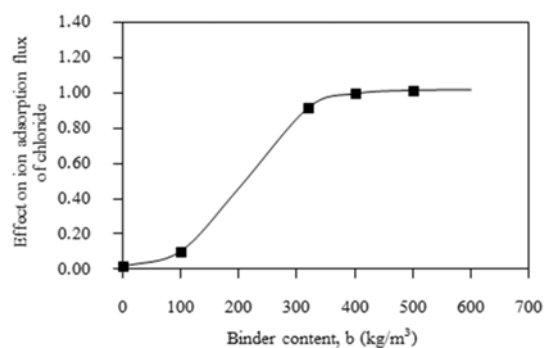
ในงานวิจัยนี้ได้สมมติให้การดึงดูดไอออน คลอไรด์ของคอนกรีตเกิดขึ้นที่ระยะ 1 cm เท่านั้น ทำนองเดียวกับ Sumranwanich et al. [11] โดยการเคลื่อนที่ของคลอไรด์แสดงด้วยการเปลี่ยนฟลักซ์คลอไรด์เนื่องจากกลไกการดึงดูดไอออน และถูกรวมกับการเปลี่ยน ฟลักซ์คลอไรด์ที่เกิดจากกระบวนการแพร่ ซึ่งฟลักซ์ของการดึงดูดไอออนคลอไรด์หาได้จากการคำนวณกลับจากผลการทดลอง [6, 7]

หลังจากที่ได้ฟลักซ์ของการดึงดูดไอออน คลอไรด์ จึงศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ฟลักซ์ของการดึงดูดไอออนคลอไรด์และอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสานที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ ดังตัวอย่างในรูปที่ 8

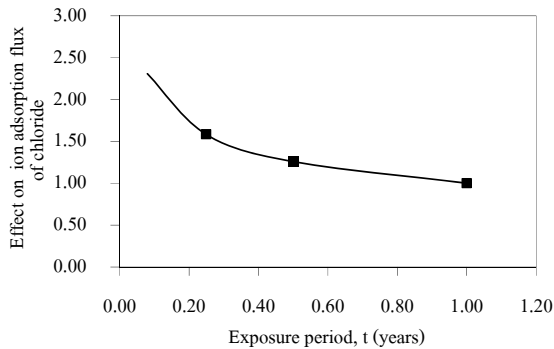


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ของการดึงดูดไอออนคลอไรด์และอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสานที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ

ฟลักซ์ของการดึงดูดไอออนคลอไรด์มีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับการปริมาณวัสดุประสาน และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ของคอนกรีต การที่ใช้ปริมาณวัสดุประสานในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้ฟลักซ์ของการดึงดูดไอออน คลอไรด์มีค่าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 9 เนื่องจากการดึงดูดไอออนคลอไรด์จะเกิดขึ้นที่เพสต์ของคอนกรีต ซึ่งคอนกรีตที่ใช้ปริมาณวัสดุประสานสูงจะมีเพสต์มาก และเมื่อระยะเวลาเผชิญคลอไรด์นานขึ้น ฟลักซ์ของการดึงดูดไอออนคลอไรด์มีค่าลดลงดังรูปที่ 10



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ของการดึงดูดไอออนคลอไรด์และปริมาณวัสดุประสานของคอนกรีต



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ของการดึงดูดไอออนคลอไรด์ และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ของคอนกรีต

จากรูปที่ 8 ถึงรูปที่ 10 สามารถหาฟลักซ์ของการดึงดูดไอออนคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดโดยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ปริมาณวัสดุประสานและระยะเวลาเผชิญ คลอไรด์ได้ ดังสมการที่ 8

$$F_{ad}(1, t) = \left(0.92 \times \frac{w}{b} - 0.141\right) \times 10^{-5} \times e^{-2.1 \times \left(\frac{s}{b}\right)} \times \frac{0.0153}{t^{0.331 \times (0.015 + e^{(-0.02 \times b)})}} \quad (8)$$

เมื่อ $F_{ad}(1, t)$ = ฟลักซ์ของการดึงดูดไอออน คลอไรด์ที่ชั้นที่ 1 จากผิวของคอนกรีตที่เวลา t ($\text{mol}/\text{cm}^2/\text{year}$)

s/b = อัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน

w/b = อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

b = ปริมาณของวัสดุประสาน (kg/m^3)

t = ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (year)

3. การคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์

จากแบบจำลองความสามารถเก็บกัก คลอไรด์ สัมประสิทธิ์การแพร่ คลอไรด์ และการดึงดูดไอออนคลอไรด์ที่ถูกพัฒนาขึ้นสามารถนำมาใช้ทำนายการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดด้วยวิธีวิเคราะห์แบบ Finite difference ของระยะทาง x และระยะเวลา t โดยที่ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีตจะจับไอออนคลอไรด์ไม่ให้เคลื่อนที่ด้วยผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮดรชันและปฏิกิริยา ปอซโซลานิกของวัสดุประสาน ซึ่งการยึดจับคลอไรด์ในคอนกรีตสามารถลดปริมาณ คลอไรด์อิสระได้ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ คลอไรด์ของการ

แพร่คลอไรด์มีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นตามเวลาอยู่กับการพัฒนาโครงสร้างโพรงช่องว่างในคอนกรีต โดยคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดที่อายุนั้นมีการแพร่ของคลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตที่อายุยาวนาน เนื่องจากที่อายุนั้นคอนกรีตจะมีปริมาณโพรงช่องว่างมากกว่า เพราะว่าการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับแคลเซียม ไฮดรอกไซด์ยังไม่มากในช่วงอายุนั้น แต่จะค่อยๆพัฒนาการเกิดปฏิกิริยาได้ในเวลาต่อมา การแพร่จึงค่อยๆ ลดลง สำหรับกลไกการดึงดูดไอออนจะเกิดที่ผนังโพรงช่องว่างในเพสต์ของคอนกรีต โดยมีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกซึ่งสามารถดึงดูดไอออนคลอไรด์ที่มีประจุไฟฟ้าเป็นลบจากภายนอกเข้ามาในคอนกรีตได้

อย่างไรก็ตาม แบบจำลองการทำนายการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้ผลการทดลองของตัวอย่างคอนกรีต ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 อัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน 0 ถึง 0.70 ปริมาณวัสดุประสาน 320 ถึง 400 kg/m^3 ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน และระยะเวลาการเผชิญคลอไรด์นานสุด 365 วัน

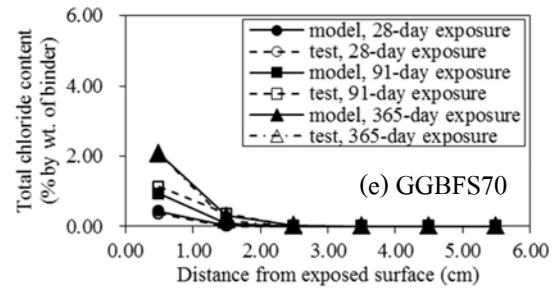
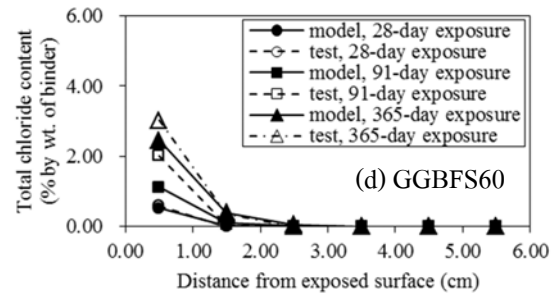
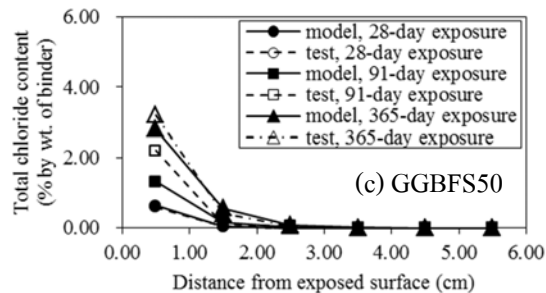
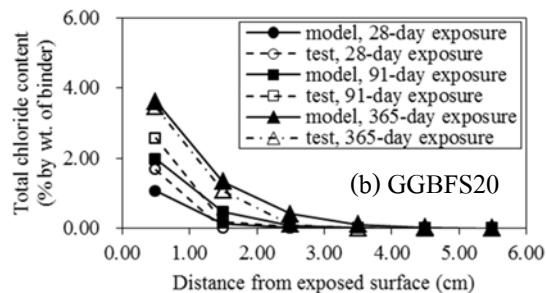
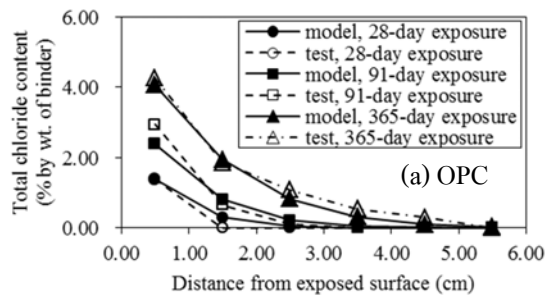
3.1 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์กับผลการทดลองของ Prak [6, 7]

Prak [6, 7] ได้ทำการทดลองการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดโดยหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาด 10 x 20 cm และบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน จากนั้นจึงนำตัวอย่างคอนกรีตไปเคลือบผิวด้วยอีพ็อกซี และแช่ในสารละลายคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3.0 เป็นเวลา 28 วัน 91 วัน และ 365 วัน เมื่อครบกำหนดระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ จึงนำตัวอย่างไปทำการทดลองหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดตามมาตรฐาน ASTM C1152 และปริมาณคลอไรด์อิสระ ASTM C1218

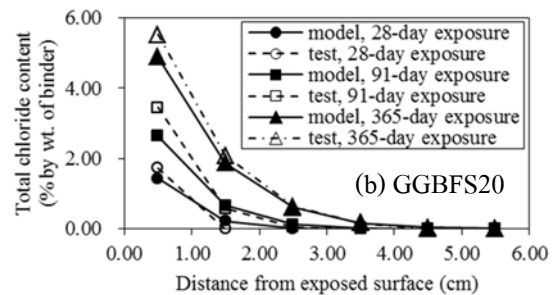
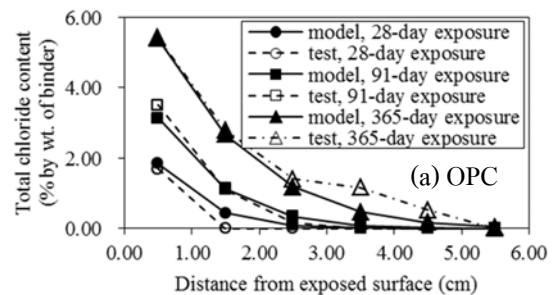
การทำนายการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้ปริมาณวัสดุประสาน 320 kg/m^3 และ 400 kg/m^3 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 อัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน 0, 0.20, 0.50, 0.60 และ 0.70 ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน 91 วัน และ 365 วัน ดังรูปที่ 11 ถึงรูปที่ 14 ตามลำดับ ซึ่งพบว่า แบบจำลองสามารถใช้เพื่อทำนายปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดได้ โดยปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดมีค่าลดลงตามระดับความลึกของคอนกรีต และปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ทำนายได้มีแนวโน้มที่ติดกับผลการทดลอง

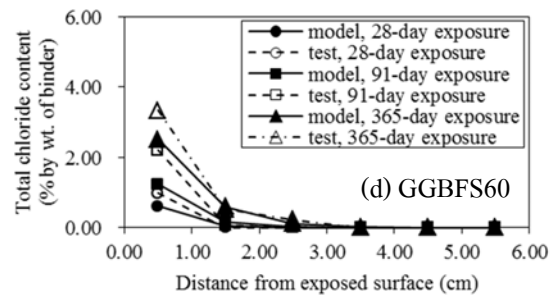
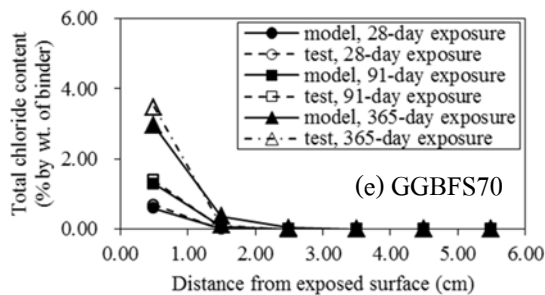
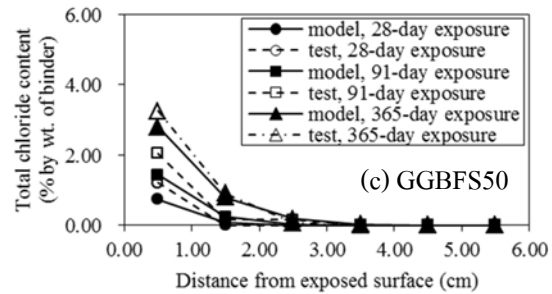
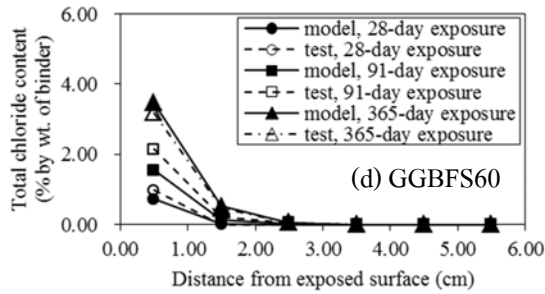
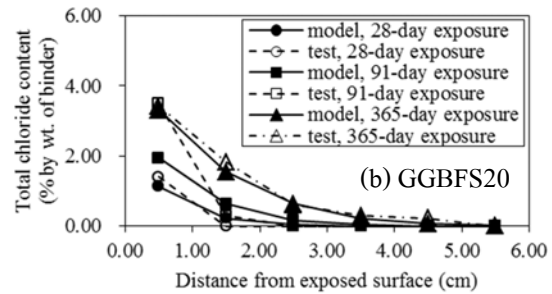
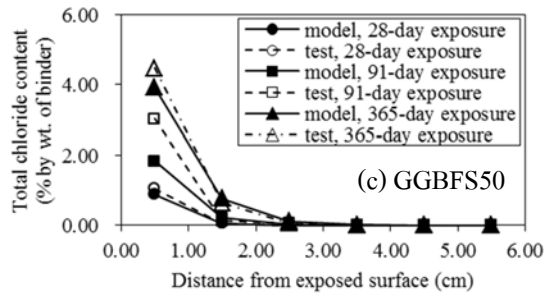
สำหรับการทำนายปริมาณคลอไรด์อิสระ ในคอนกรีต แบบจำลองนี้ก็สามารถใช้ทำนายได้ดีเช่นกัน โดยงานวิจัยนี้จะแสดงเฉพาะปริมาณคลอไรด์อิสระของคอนกรีตที่ใช้ปริมาณวัสดุประสาน 400 kg/m³ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 อัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน 0, 0.20, 0.50, 0.60 และ 0.70 ดังรูปที่ 15

รูปที่ 16 แสดงปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่คำนวณได้จากแบบจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ซึ่งพบว่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ทำนายได้มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง

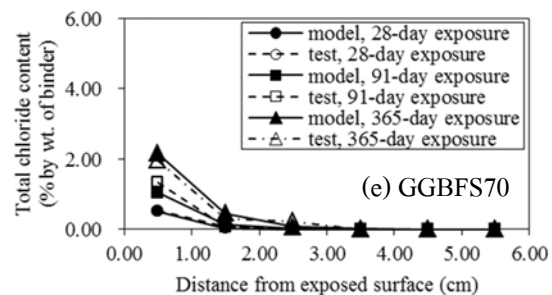
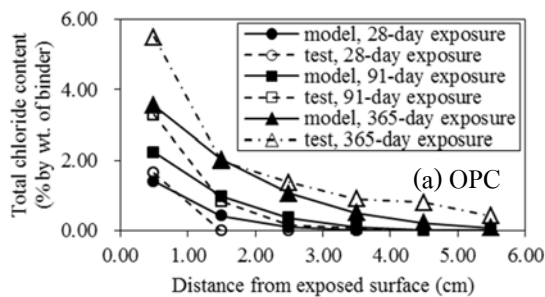


รูปที่ 11 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่อัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสานต่างๆ ($b = 400 \text{ kg/m}^3$, $w/b = 0.40$)

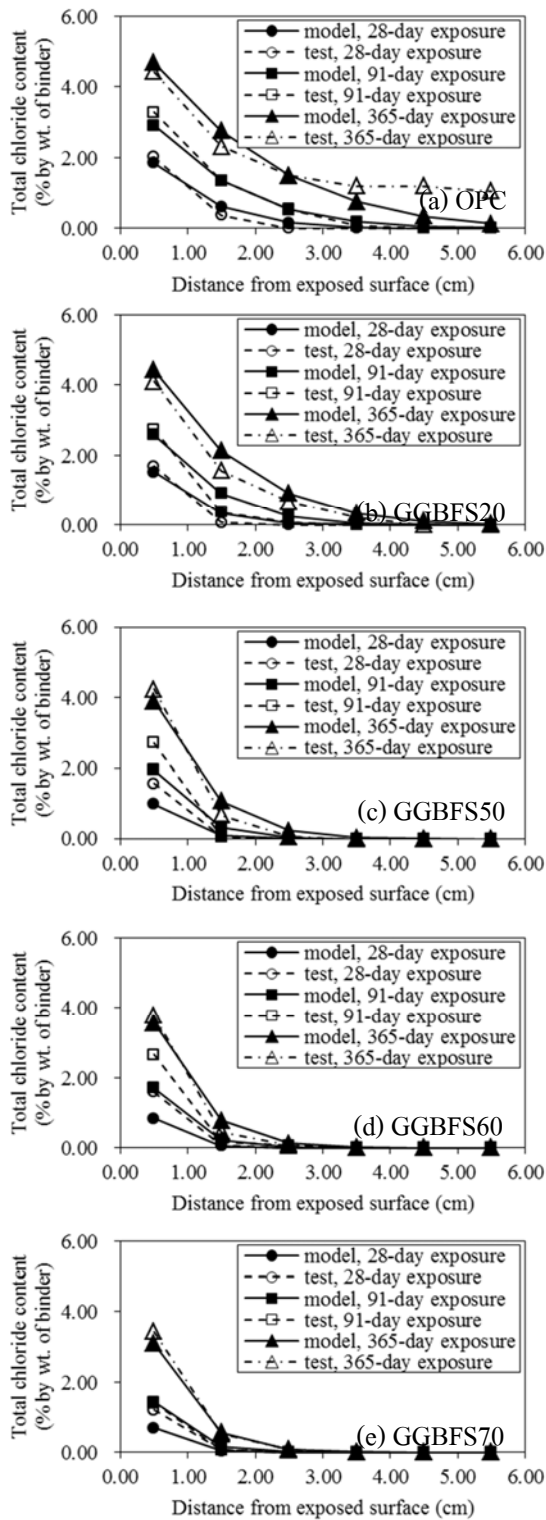




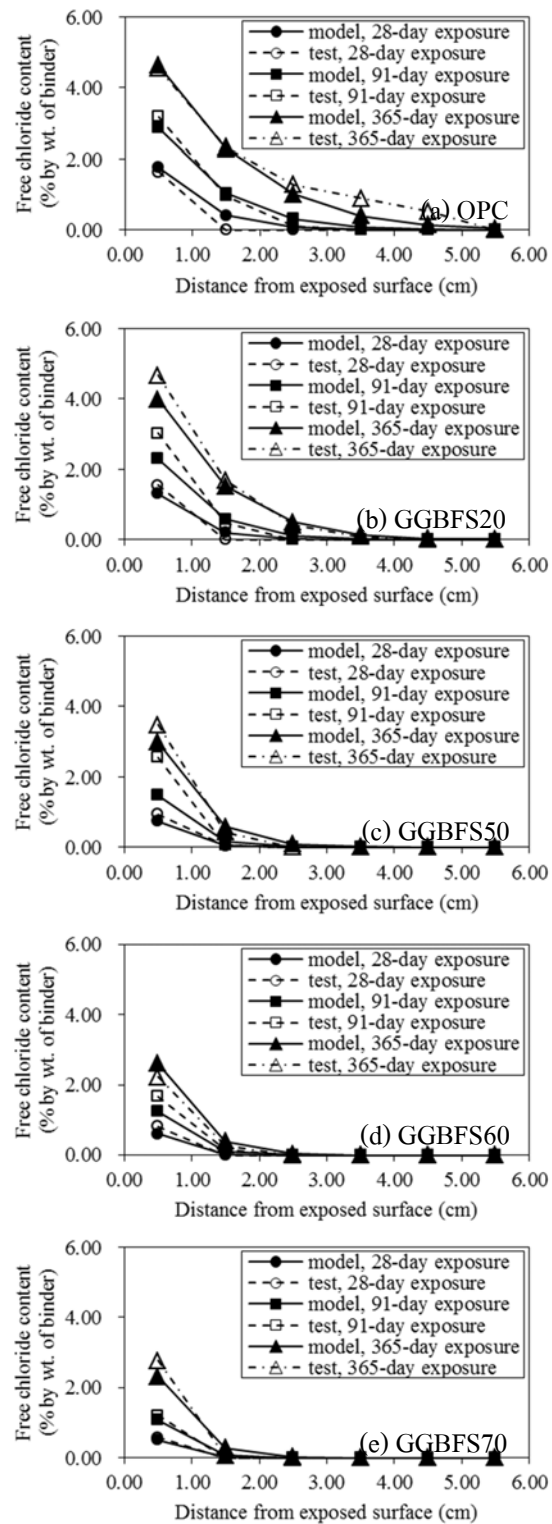
รูปที่ 12 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต ที่อัตราส่วนตะกรันเตาถลุง
เหล็กกับตอวัสดุประสานต่างๆ ($b = 400 \text{ kg/m}^3$, $w/b = 0.50$)



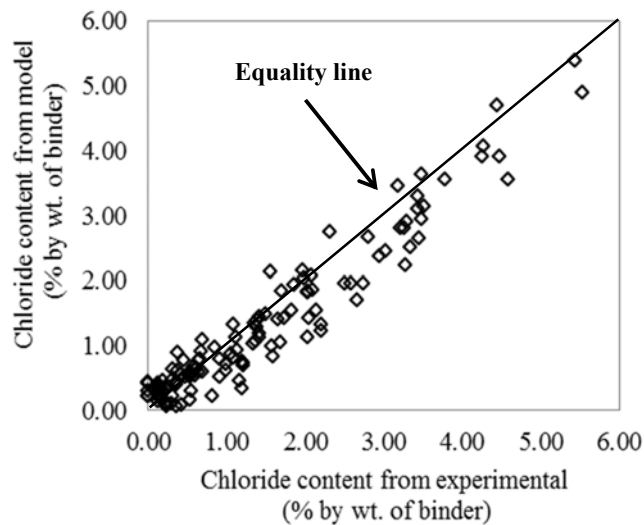
รูปที่ 13 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต ที่อัตราส่วนตะกรันเตาถลุง
เหล็กกับตอวัสดุประสานต่างๆ ($b = 320 \text{ kg/m}^3$, $w/b = 0.40$)



รูปที่ 14 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต ที่อัตราส่วนตะกั่วเตาถลุง เหล็กบดต่อวัสดุประสานต่างๆ ($b = 320 \text{ kg/m}^3$, $w/b = 0.50$)



รูปที่ 15 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต ที่อัตราส่วนตะกั่วเตาถลุง เหล็กบดต่อวัสดุประสานต่างๆ ($b = 400 \text{ kg/m}^3$, $w/b = 0.50$)



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่คำนวณได้จากแบบจำลอง และปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากการทดลอง

3.2 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์กับผลการทดลองของ McPolin et al. [8]

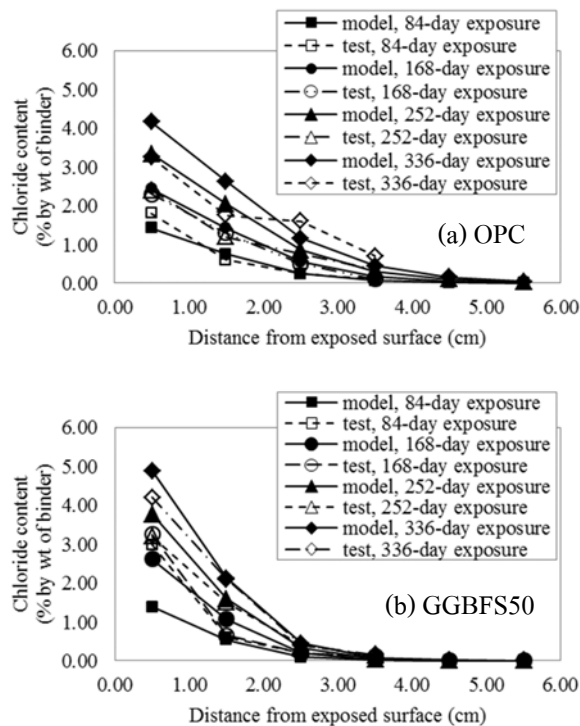
McPolin et al. [8] ได้ทำการศึกษาการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดภายใต้เงื่อนไขเปียกสลับแห้ง โดยแต่ละรอบมี 7 วัน คือเปียก 1 วัน และแห้ง 6 วัน หลังจากบ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำเป็นเวลา 3 วัน และนำมาบ่มด้วยการหุ้มแผ่นพลาสติกไว้จนตัวอย่างคอนกรีตครบอายุ 28 วัน จึงนำตัวอย่างคอนกรีตมาเผชิญกับสารละลายเกลือคลอไรด์โดยวัฏจักรที่ต่างกัน รายละเอียดส่วนผสมและเงื่อนไขการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 3 ทั้งนี้ผลการศึกษาได้แสดงเฉพาะค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเท่านั้น

ตารางที่ 3 ส่วนผสมของคอนกรีตและเงื่อนไขการทดลอง [8]

รหัสส่วนผสม	ส่วนผสมของคอนกรีต (kg/m^3)				
	ปูนซีเมนต์	GGBFS	น้ำ	ทราย	หิน
OPC	369	0	185	922	923
GGBFS50	181	181	181	905	905
เงื่อนไขการทดลอง					
ความเข้มข้นคลอไรด์	1.95% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน				
ระยะเวลาบ่มน้ำ (วัน)	28				
วัฏจักรเปียกสลับแห้ง (วัน)	84, 168, 252, 336				

แบบจำลองของความสามารถเก็บกัก คลอไรด์ สัมประสิทธิ์การแพร่ คลอไรด์ การดึงดูดไอออนคลอไรด์ และแบบจำลองของวัฏจักรเปียกสลับแห้งถูกสร้างเพื่อใช้ในการคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้ง ความสามารถเก็บกักคลอไรด์สามารถลดปริมาณคลอไรด์อิสระได้โดยการยึดจับไม่ให้คลอไรด์เคลื่อนที่เข้าไปในเนื้อคอนกรีตในขณะที่คลอไรด์อิสระที่เหลือสามารถแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตได้ ส่วนสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ และการดึงดูดไอออนจะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำ และปริมาณตะกรันเตาถลุงเหล็กบดที่ใช้ เมื่อคอนกรีตใช้ปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น คอนกรีตจะเกิดโพรงช่องว่างมากขึ้น จึงส่งผลให้คลอไรด์สามารถเคลื่อนที่เข้าไปในคอนกรีตได้มากกว่าคอนกรีตที่ใช้ปริมาณน้ำน้อย นอกจากนี้การใช้ปริมาณตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์สามารถช่วยลดการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตได้โดยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดจะทำปฏิกิริยาปฏิกิริยาโซลเจลกับผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันส่งผลให้เกิดเจลแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตในโพรงช่องว่างของคอนกรีต ทำให้คอนกรีตที่บ่มน้ำมากขึ้น จึงสามารถช่วยลดการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตได้

ผลการทำนายปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตล้วนและคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดที่เผชิญกับสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 84 วัน 168 วัน 252 วัน และ 336 วัน แสดงดังรูปที่ 17 ซึ่งพบว่า ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดมีค่าลดลงเมื่อความลึกของคอนกรีตเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเกิดสภาวะเปียกสลับแห้งนานขึ้น และจากการทำนายพบว่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ได้มีแนวโน้มที่ดีกับผลการทดลอง



รูปที่ 17 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตล้วนและคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบด ($w/b = 0.50$)

4. สรุปผล

จากการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองการทำนายการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. แบบจำลองการทำนายการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดประกอบด้วย แบบจำลองย่อยความสามารถเก็บกักคลอไรด์ สมบัติการแพร่คลอไรด์ และการดึงดูดไอออน คลอไรด์ โดยคำนึงถึงผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน ปริมาณวัสดุประสานและระยะเวลาเผชิญกับคลอไรด์ในแบบจำลอง

2. แบบจำลองสามารถใช้ทำนายการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดได้ ทั้งปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระในคอนกรีต รวมทั้งผลกระทบของปรากฏการณ์เปื่อยสลายแห่งต่อคอนกรีตด้วย และผลที่ได้จากการทำนายมีความถูกต้องที่น่าพอใจกับผลการทดลอง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้แต่งคนที่สองขอขอบพระคุณโครงการทุนพระราชทานความช่วยเหลือแก่ราชอาณาจักรกัมพูชา โดยสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี ณ มหาวิทยาลัยบูรพา และขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัย มหาวิทยาลัยบูรพา สัญญาเลขที่ 109/2558 ที่สนับสนุนการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2543. *ความคงทนของคอนกรีต*. พิมพ์ครั้งที่ 1.
- [2] Tangtermsirikul, S. 2003. *Durability and mix design of concrete*. 1st Edition, Printing house of Thammasat University, Thailand.
- [3] Fajardo, G., Valdez, P., and Pacheco, J., 2009. Corrosion of steel rebar embedded in natural pozzolan based mortars exposed to chlorides. *Construction and Building Materials*, 23, pp. 768–774.
- [4] Thomas, M. D., and Bamforth, P. B., 1999. Modelling chloride diffusion in concrete: Effect of fly ash and slag. *Cement and Concrete Research*, 29, pp. 487–495.
- [5] Tamimi, A. K., Abdalla, J. A., and Sakka, Z. I., 2008. Prediction of long-term chloride diffusion of concrete in harsh environment. *Construction and Building Materials*, 22, pp. 829–836.
- [6] สีน่า ปรัก, 2557. ความต้านทาน คลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและผงหินปูน, *วิทยานิพนธ์ หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา*, มหาวิทยาลัยบูรพา.
- [7] สีน่า ปรัก และทวีชัย สารานวนิช, 2556. ความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและผงหินปูน. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18*, เชียงใหม่.

- [8] McPolin, D., Basheer, P. A. M., Long, A. E., Grattan, K. T. V., and Sun, T. 2005. Obtaining progressive chloride profiles in cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 19, pp. 666-673.
- [9] Song, H. W., and Saraswathy, V. 2006. Studies on the corrosion resistance of reinforced steel in concrete with ground granulated blast-furnace slag-An overview. *Journal of Hazardous Materials*, 138, pp. 226-233.
- [10] Maruya, T., Tangtermsirikul, S., and Matsuoka, Y., 1998. Modeling of chloride ion movement in the surface layer of hardened concrete. *Concrete Library of JSCE*, 32, pp. 69-84.
- [11] Sumranwanich, T., Tangtermsirikul, S., and Maruya, T., 2004. Prediction of chloride penetration profile in cement-fly ash mortar and concrete. *Fourth International Conference on Concrete under Severe Conditions: Environment & Loading (CONSEC'04)*. South Korea.