



การทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล

ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

วิเชียร ชาลี*

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08-9791-5171 อีเมล: wichian@buu.ac.th

รับเมื่อ 11 มีนาคม 2558 ตอรับเมื่อ 1 กรกฎาคม 2558 เผยแพร่ออนไลน์ 3 ธันวาคม 2558

© 2016 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในสภาวะแวดล้อมทะเล โดยสร้างแบบจำลองจากข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ ที่ได้จากตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 2, 3, 5, 7 และ 9 ปี ในการสร้างแบบจำลองใช้หลักการการวิเคราะห์เชิงถดถอยแบบพหุคูณในกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิคส์ ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (ในช่วง 0.45 ถึง 0.65) ปริมาณเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในคอนกรีต (ร้อยละ 0 ถึง 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน) ระยะจากผิวหน้าคอนกรีต และระยะเวลาในการแช่คอนกรีต (มากกว่า 2 ปี) ผลที่ได้จากแบบจำลองคือ ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (โดยน้ำหนักวัสดุประสาน) ในคอนกรีตที่ตำแหน่งต่างๆ จากผิวหน้าคอนกรีต ผลการใช้แบบจำลองเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ใช้สร้างแบบจำลอง พบว่าปริมาณคลอไรด์จากการทำนายมีค่าคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงร้อยละ ± 30 และผลการทำนายของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในปริมาณไม่เกินร้อยละ 35 มีความถูกต้องมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน นอกจากนี้ได้มีการเปรียบเทียบผลการทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์กับงานวิจัยอื่น โดยพบว่าปริมาณคลอไรด์จากการทำนายส่วนใหญ่มีค่าคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงร้อยละ ± 35

คำสำคัญ: การแทรกซึมของคลอไรด์ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ การทำนาย สิ่งแวดล้อมทะเล



Predicting the Chloride Penetration of Concrete Containing Rice Husk-bark Ash under Marine Environment

Chai Jaturapitakkul

Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand

Wichian Chalee*

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University, Chon Buri, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08-9791-5171, E-mail: wichian@buu.ac.th

Received 11 March 2015; Accepted 1 July 2015; Published online: 3 December 2015

© 2016 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

In this study, a mathematical model for predicting chloride penetration into concrete containing ground rice husk-bark ash (GRBA) in a marine environment was developed. The empirical model was based on 2, 3, 5, 7, and 9-year investigation of concretes in a marine site. Multiple regression analysis of the data was carried out by applying Fick's second law of diffusion to generate an empirical formula for predicting chloride concentration into concrete. Input variables were W/B ratios (ranging from 0.45 to 0.65), GRBA contents (0 to 50%), distance from the concrete surface, and exposure time (beyond 2 years). The output was the total chloride concentration (% by weight of binder) at any position from the concrete surface. Model validation revealed that the predicted chloride concentration levels were within a $\pm 30\%$ error margin in the samples used to generate the model. The predicted results in concrete with less than 35% GRBA were more accurate than the concrete with 50% GRBA. The model was also verified using data from previous researches. Most predicted chloride concentration levels were within a $\pm 35\%$ margin of error from test results.

Keywords: Chloride Penetration, Rice Husk-bark Ash, Prediction, Marine Environment

1. บทนำ

การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อใช้งานในสภาวะแวดล้อมทะเล ต้องให้ความสำคัญกับการป้องกันการกัดกร่อนที่ทำลายคอนกรีตเสริมเหล็ก คู่ไปกับการรับแรงเชิงกลเพื่อให้โครงสร้างมีความแข็งแรง และมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ซึ่งการกัดกร่อนของโครงสร้างในสภาวะแวดล้อมดังกล่าว มีสาเหตุหลักมาจากคลอไรด์และซัลเฟต โดยคลอไรด์เป็นสาเหตุที่ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม และขยายตัวส่งผลให้คอนกรีตแตกร้าว

งานวิจัยที่ผ่านมา [1] พบว่าการแทนที่แก้วเกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 35 สามารถต้านการแทรกซึมของคลอไรด์เนื่องจากน้ำทะเลได้ดี ประกอบกับแก้วเกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่เป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำได้ดี ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูง และการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำลง [2], [3]

การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต เพื่อให้สามารถต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ จำเป็นต้องใช้ฐานข้อมูลที่ได้จากการเก็บข้อมูลจากตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลจริง โดยระยะเวลาที่แช่ตัวอย่างคอนกรีตที่นานขึ้น จะให้ผลการศึกษาที่อธิบายพฤติกรรมการกัดกร่อน ได้สอดคล้องกับการใช้งานจริงมากขึ้น อย่างไรก็ตามการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเลจริง อาจมีข้อจำกัดในเรื่องของระยะเวลาที่แช่ตัวอย่าง ซึ่งถ้าสามารถใช้ฐานข้อมูลที่ได้จากการแช่ตัวอย่างในสิ่งแวดล้อมทะเล ในการทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในระยะยาวได้ ก็จะเป็นประโยชน์อย่างมากในการเลือกใช้ส่วนผสมคอนกรีตให้สามารถทนต่อการกัดกร่อนจากคลอไรด์ในน้ำทะเลในระยะยาวได้ นอกจากนี้ยังสามารถทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กตลอดจนการบำรุงรักษาที่มีขึ้นในอนาคตได้อีกด้วย

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ฐานข้อมูลในภาคสนามมีค่อนข้างน้อย โดย Chalee *et al.* [4] ได้สร้างแบบจำลองเพื่อทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต

ที่ผสมแก้วถ่านหิน ที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้ง ซึ่งพบว่า แบบจำลองดังกล่าวสามารถใช้งานได้ดีในคอนกรีตที่ผสมแก้วถ่านหินไม่เกินร้อยละ 50 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในช่วง 0.45 ถึง 0.65 โดยเปรียบเทียบผลการศึกษากับข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ที่เก็บในภาคสนามทั้งในประเทศและต่างประเทศ พบว่า แบบจำลองดังกล่าวมีความสอดคล้องกับข้อมูลที่เก็บในสนามในช่วงร้อยละ ± 25

การศึกษารั้วนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองซึ่งแสดงในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ในการทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำทะเลบริเวณชายฝั่ง โดยเน้นคอนกรีตที่ผสมแก้วเกลบ-เปลือกไม้บดละเอียด ในการสร้างแบบจำลองได้ใช้ฐานข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์จากน้ำทะเลที่ได้จากการทดสอบโดยการแช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำทะเลที่อายุ 2, 3, 5, 7 และ 9 ปี ซึ่งให้ผลการศึกษาที่สอดคล้องกับพฤติกรรมการกัดกร่อนจริง และสอดคล้องกับการแทรกซึมของคลอไรด์ในระยะยาวได้ดี ทำให้แบบจำลองมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น ตลอดจนการพัฒนาแบบจำลองให้มีรูปแบบของการทำงานที่ง่าย คำนวณได้สะดวกรวดเร็ว ก็จะเป็นประโยชน์ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่คำนึงถึงความคงทนต่อไป

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุประสานและมวลรวม

วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษารั้วนี้ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C150 [5] และแก้วเกลบ-เปลือกไม้บดละเอียด (ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก) มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.15 และขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 10.8 ไมครอน สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของแก้วเกลบ-เปลือกไม้ที่บดละเอียด มีผลรวมของสารประกอบหลัก SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 90.66 และ และมีปริมาณของ SiO_2 สูงถึงร้อยละ 87 ซึ่งส่งผลดีต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่ทำให้คอนกรีตมีสมบัติเชิงกลและสมบัติ

ด้านความคงทนที่ดี แก้วแอลบ-เปลือกไม้บดละเอียดมีค่า LOI ร้อยละ 5.71 โดยองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานแสดงดังตารางที่ 1 มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.73 และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.62 ส่วนมวลรวมหยาบใช้หินขนาดใหญ่สุดเท่ากับ 19 มม.



ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (%)	วัสดุ	
	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	แก้วแอลบ-เปลือกไม้บดละเอียด (GRBA)
Silicon dioxide	20.80	87.0
Aluminum oxide	5.50	1.08
Iron oxide	3.16	2.58
Calcium oxide	64.97	1.25
Magnesium oxide	1.06	0.5
Sodium oxide	0.08	0.08
Potassium oxide	0.55	1.0
Sulfur trioxide	2.96	0.09
Loss on ignition	2.89	5.71

รูปที่ 1 ตัวอย่างคอนกรีตที่แช่บริเวณชายฝั่งทะเล จ.ชลบุรี

ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และควบคุมค่ายุบตัวให้อยู่ในช่วง 50–100 มม. โดยใช้สารลดน้ำพิเศษประเภทซัลโฟเนตเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเซต (Sulfonated Melamine Formaldehyde Condensates) ช่วยในการเพิ่มความสามารทได้ ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตตามส่วนผสมในตารางที่ 2 เป็นรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 200 มม.³ หลังจากบ่มคอนกรีตจนอายุครบ 28 วัน นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่บริเวณชายฝั่งทะเลโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี โดยคอนกรีตสัมผัสกับน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งดังรูปที่ 1 คุณสมบัติของน้ำทะเลบริเวณที่นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ มีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) อยู่ในช่วง 7.9–8.2 และปริมาณคลอไรด์มีค่าอยู่ระหว่าง 16,000–19,000 มก./ล. ส่วนซัลเฟต ระหว่าง 2,200–2,700 มก./ล. และมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 20 ถึง 30 องศาเซลเซียส [1]

2.2 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

2.2.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

งานวิจัยนี้ใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.45 และ 0.65 ใช้แก้วแอลบ-เปลือกไม้ที่ผ่านการบดละเอียด จนมีน้ำหนักค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 3 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต

ส่วนผสม	ส่วนผสมคอนกรีต (กก./ม. ³)						W/B
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	แก้วแอลบ-เปลือกไม้บดละเอียด (GRBA)	หิน	ทราย	น้ำ	SP	
I45	424	-	979	767	190	-	0.45
I65	295	-	1,039	814	192	-	0.65
I45GRBA15	360	64	957	767	190	0.85	0.45
I45GRBA 25	318	106	938	767	190	1.70	0.45
I45GRBA 35	276	148	925	767	190	2.54	0.45
I45GRBA 50	212	212	952	767	190	3.82	0.45
I65GRBA 15	251	44	1,023	814	192	-	0.65
I65GRBA 25	221	74	1,012	814	192	-	0.65
I65GRBA 35	192	103	1,000	814	192	0.30	0.65
I65GRBA 50	148	148	982	814	192	0.30	0.65



รูปที่ 2 การทดสอบปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต

2.2.2 การทดสอบ

หลังจากแช่เมื่อแช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำทะเลครบ 2, 3, 5, 7 และ 9 ปี นำตัวอย่างทรงลูกบาศก์มาเจาะบริเวณกึ่งกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. และนำแท่งตัวอย่างที่เจาะมาตัดที่ระดับความลึกต่างๆ แล้วบดให้ละเอียดและนำผงตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ที่ความลึกต่างๆ มาทดสอบปริมาณคลอไรด์โดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย (Acid-soluble Chloride) ตาม ASTM C 1152 [6] เพื่อให้ได้ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total Chloride Content) โดยรูปที่ 2 แสดงการเตรียมตัวอย่างและทดสอบปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต

3. การสร้างแบบจำลอง

งานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อในการทำนายปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total Chloride) ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตที่ผสมแก้วกลบ-เปลือกไม้หลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล โดยใช้ฐานข้อมูลการแทรกซึม

ของคลอไรด์จากน้ำทะเลที่ได้จากการทดสอบโดยแช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำทะเลที่อายุ 2, 3, 5, 7 และ 9 ปี ในการสร้างแบบจำลองใช้หลักการวิเคราะห์เชิงถดถอยแบบพหุคูณ ในกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิคส์ (Fick's Second Law) ดังสมการที่ (1)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_c \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (1)$$

ในการหาสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) ในคอนกรีตจากสมการที่ (1) เป็นที่ยอมรับกันว่าสามารถใช้ได้ดีกับข้อมูลการทดสอบในภาคสนามที่มีการแช่ตัวอย่างคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเล [7] และในการศึกษาที่ผ่านมา [8] พบว่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาที่ตัวอย่างคอนกรีตสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมที่มีคลอไรด์นานขึ้น ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตในระยะยาว จึงควรมีการแปรเปลี่ยนค่าที่ D_c ในสมการที่ (1) ตามระยะเวลาที่นานขึ้น โดยการศึกษาที่ผ่านมาของ Mangat และ Limbachiya [9] พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) กับระยะเวลาที่คอนกรีตสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์เป็นไปตามสมการที่ (2)

$$D_c = (t)^{-\beta} \quad (2)$$

แทนค่า (D_c) จากสมการที่ (2) ในสมการที่ (1) ได้ตั้งสมการที่ (3)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = t^{-\beta} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (3)$$

คำตอบทั่วไป (General Solution) ของสมการที่ (3) เป็นไปตามสมการที่ (4)

$$C_{x,t} = C_o [1 - \text{erf}(\frac{x}{2\sqrt{t^{(1-\beta)}}(1-\beta)}})] \quad (4)$$

สมการที่ (4) สามารถใช้หาปริมาณคลอไรด์ ($C_{x,t}$) ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตที่ระยะจากผิวหน้าคอนกรีต x (มม.) และระยะเวลาที่แช่คอนกรีตในสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ t (วินาที) ซึ่งในการทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในระยะยาวได้เปลี่ยนหน่วยเวลา t จากวินาทีเป็นปี เพื่อให้สามารถใช้งานได้ง่ายขึ้น เปลี่ยนหน่วยเวลาจากวินาทีเป็นปีในสมการที่ (4) ได้เป็นดังสมการที่ (5)

$$C_{x,t} = C_o [1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{\frac{(31536000t)^{(1-\beta)}}{(1-\beta)}}} \right)] \quad (5)$$

เมื่อ

$C_{x,t}$ = ปริมาณคลอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนักวัสดุประสาน) ที่ระยะจากผิวหน้าคอนกรีต x และระยะเวลาที่แช่คอนกรีตในสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ t

t = ระยะเวลาแช่ (ปี)

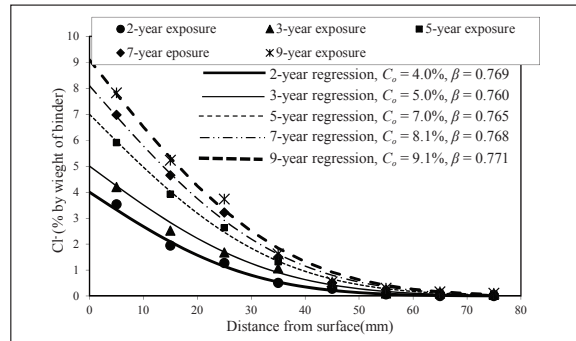
x = ระยะจากผิวหน้าคอนกรีต (มม.)

C_o = ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต (ร้อยละโดยน้ำหนักวัสดุประสาน) (ที่ $x = 0$) ที่ระยะเวลาแช่ t

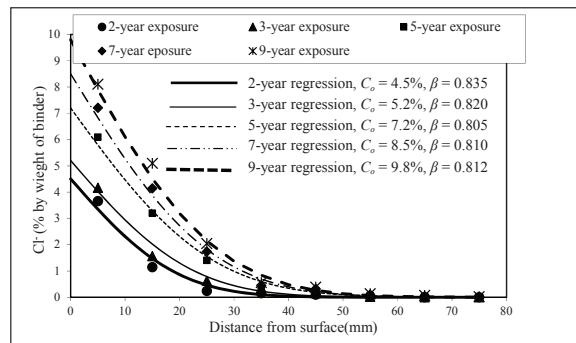
β = ค่าสัมประสิทธิ์

erf = ฟังก์ชันค่าผิดพลาด (Error Function)

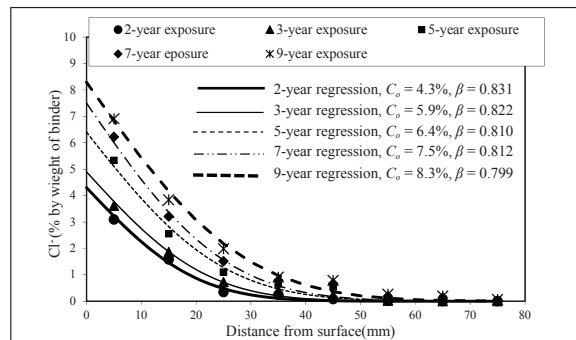
การหาปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตตามสมการที่ (5) จำเป็นต้องทราบค่าสัมประสิทธิ์ β และ ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต (C_o) ซึ่งในการสร้างแบบจำลองครั้งนี้ได้ใช้หลักการวิเคราะห์เชิงถดถอยของสมการที่ (5) ในข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ได้จากการแช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำทะเลระยะเวลา 9 ปี ดังตัวอย่างในรูปที่ 3 ที่แสดงการหาค่า β และ C_o โดยใช้หลักการวิเคราะห์เชิงถดถอยที่ปรับค่า β และ C_o ในสมการที่ (5) ให้กราฟสอดคล้องกับข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 และผสมแก้วเกลบ-เปลือกไม้ร้อยละ 0, 15 และ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ดังรูปที่ 3(ก), 3(ข) และ 3(ค) ตามลำดับ ซึ่งในส่วนผสมคอนกรีตอื่นๆ ก็หาได้ในลักษณะเดียวกัน โดยให้ค่า β และ C_o แสดงในตารางที่ 3 และ 4 ตามลำดับ



(ก) คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



(ข) คอนกรีตผสมแก้วเกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน



(ค) คอนกรีตผสมแก้วเกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

รูปที่ 3 การหาค่า β และ C_o ในข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่มี $W/B = 0.45$ และผสมแก้วเกลบ-เปลือกไม้ร้อยละ 0, 15 และ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

ตารางที่ 3 สัมประสิทธิ์ β

ส่วนผสม	สัมประสิทธิ์ β					เฉลี่ย β
	แช่หน้าทะเล 2 ปี	แช่หน้าทะเล 3 ปี	แช่หน้าทะเล 5 ปี	แช่หน้าทะเล 7 ปี	แช่หน้าทะเล 9 ปี	
I45	0.769	0.760	0.765	0.768	0.771	0.767
I45GRBA15	0.835	0.820	0.805	0.81	0.812	0.816
I45GRBA25	0.831	0.822	0.810	0.812	0.799	0.815
I45GRBA35	0.787	0.781	0.783	0.785	0.780	0.783
I45GRBA 50	0.772	0.751	0.763	0.769	0.760	0.763
I65	0.755	0.749	0.763	0.766	0.769	0.760
I65GRBA15	0.789	0.788	0.789	0.791	0.788	0.789
I65GRBA25	0.854	0.825	0.778	0.780	0.785	0.804
I65GRBA35	0.789	0.855	0.760	0.760	0.755	0.784
I65GRBA 50	0.765	0.721	0.750	0.745	0.735	0.743

ตารางที่ 4 ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต

ส่วนผสม	ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต, C_s (% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน)					เฉลี่ย C_s				
	แช่หน้า ทะเล 2 ปี	แช่หน้า ทะเล 3 ปี	แช่หน้า ทะเล 5 ปี	แช่หน้า ทะเล 7 ปี	แช่หน้า ทะเล 9 ปี	แช่หน้า ทะเล 2 ปี	แช่หน้า ทะเล 3 ปี	แช่หน้า ทะเล 5 ปี	แช่หน้า ทะเล 7 ปี	แช่หน้า ทะเล 9 ปี
I45	4.0	5.0	7.0	8.1	9.1	3.7	4.6	6.8	7.9	7.9
I45GRBA15	4.5	5.2	7.2	8.5	9.8					
I45GRBA25	4.3	4.9	6.4	7.5	8.3					
I45GRBA35	3.0	3.9	6.7	7.5	9.2					
I45GRBA 50	2.9	4.1	6.6	8.1	9.0					
I65	5.0	6.3	9.1	10.8	12.3	3.9	5.2	7.2	8.1	8.1
I65GRBA15	2.1	2.9	6.1	7.1	8.2					
I65GRBA25	4.2	5.4	7.3	8.1	9.3					
I65GRBA35	5.2	6.3	7.3	8.1	9.0					
I65GRBA 50	3.1	5.2	6.1	6.5	6.9					

พิจารณาค่า β ตามตารางที่ 3 พบว่าไม่มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาที่ชัดเจน แต่มีแนวโน้มเปลี่ยนตามปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และ W/B ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงได้ใช้ค่าเฉลี่ยของ β ในการทำการวิเคราะห์เชิงถดถอยแบบพหุคูณเทียบกับปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียด (GRBA) กับ W/B การวิเคราะห์เชิงถดถอยในความสัมพันธ์ระหว่าง β กับปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียด (GRBA) ได้ความสัมพันธ์ในรูปแบบ

ของสมการโพลีโนเมียลดีกรีสอง ดังสมการที่ (6)

$$\beta = \alpha_1(GRBA)^2 + \alpha_2(GRBA) + \alpha_3 \quad (6)$$

การวิเคราะห์เชิงถดถอยในความสัมพันธ์ระหว่าง α_1 , α_2 และ α_3 กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงดังสมการที่ (7) ถึง (9) ตามลำดับ

$$\alpha_1 = -7 \times 10^{-5} \quad (7)$$



$$\alpha_2 = -0.0005(W/B) + 0.0031 \quad (8)$$

$$\alpha_2 = -0.0605(W/B) + 0.7990 \quad (9)$$

เมื่อแทนค่า α_1 , α_2 และ α_3 ในสมการที่ (6) คำนวณค่า α ในรูปของปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานดังสมการที่ (10)

$$\beta = (7 \times 10^{-5})(GRBA)^2 + [(-0.0005)(W/B) + 0.0031](GRBA) + (-0.605)(W/B) + 0.7790 \quad (10)$$

เมื่อ α = ค่าสัมประสิทธิ์

$GRBA$ = ร้อยละการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

W/B = อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

พิจารณาค่า C_0 ตามตารางที่ 4 พบว่าไม่มีความสัมพันธ์กับปริมาณของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ชัดเจน แต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่แช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำทะเล ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงได้ใช้ค่าเฉลี่ยของ C_0 ในการทำการวิเคราะห์เชิงถดถอยกับระยะเวลาแช่คอนกรีตในน้ำทะเล โดยการวิเคราะห์เชิงถดถอยในความสัมพันธ์ระหว่าง C_0 กับระยะเวลาแช่ (t) ได้ความสัมพันธ์ในรูปแบบของฟังก์ชันลอการิทึมดังสมการที่ (11)

$$C_0 = \gamma_1 \ln(t) + \gamma_2 \quad (11)$$

การวิเคราะห์เชิงถดถอยในความสัมพันธ์ระหว่าง γ_1 และ γ_2 กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ได้ความสัมพันธ์เชิงเส้นดังสมการที่ (12) และ (13) ตามลำดับ

$$\gamma_1 = -0.501(W/B) + 3.4752 \quad (12)$$

$$\gamma_2 = 2.436(W/B) + 0.4895 \quad (13)$$

แทนค่า γ_1 และ γ_2 ในสมการที่ (11) คำนวณหา C_0 ได้ดังสมการที่ (14)

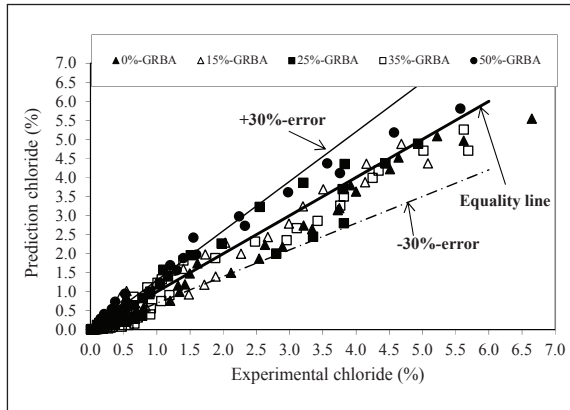
$$C_0 = [(-0.501)(W/B) + 3.4752] \ln(t) + (-2.436)(W/B) + 0.4895 \quad (14)$$

เมื่อ C_0 = ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต (ร้อยละโดยน้ำหนักวัสดุประสาน) (ที่ $x=0$) ที่ระยะเวลาแช่ t
 W/B = อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

แบบจำลองนี้สามารถใช้ทำนายปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total Chloride) ที่ตำแหน่งใดๆ จากผิวหน้าคอนกรีตและระยะเวลาแช่น้ำทะเลตั้งแต่ 2 ปี ขึ้นไปในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดไม่เกินร้อยละ 50 และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในช่วง 0.45 ถึง 0.65 อย่างไรก็ตาม แบบจำลองนี้สามารถใช้ได้กับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีรอยแตกและมีลักษณะการซึมผ่านของคลอไรด์ในทิศทางเดียวเท่านั้น เนื่องจากข้อมูลของปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตหาได้จากตัวอย่างที่เจาะตรงตำแหน่งกึ่งกลางของคอนกรีตลูกบาศก์ขนาด $200 \times 200 \times 200$ มม.³ ซึ่งสมมุติให้เป็นการซึมผ่านในทิศทางเดียวจากพื้นผิวของทรงลูกบาศก์ลงไป แนวตั้งของตัวอย่างคอนกรีต โดยโครงสร้างที่เหมาะสมในการใช้แบบจำลองนี้ได้แก่ พื้นฐานราก หรือโครงสร้างอื่นๆ ที่มีลักษณะการซึมเข้าของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตในลักษณะทิศทางเดียว

4. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

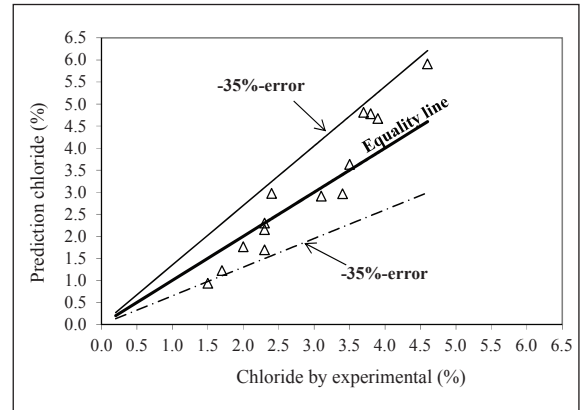
การเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดที่ได้จากแบบจำลอง กับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5, 7 และ 9 ปี โดยเปรียบเทียบในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และ 0.65 ปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



รูปที่ 4 ผลการทำนายปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลที่ได้จากการแช่คอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5, 7 และ 9 ปี

ร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และใช้ปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึกจากผิวหน้าคอนกรีตเท่ากับ 15, 25, 35, 45, 55, 65 และ 75 มม. ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยเส้นทึบแสดงค่าคลาดเคลื่อนร้อยละ +30 จากผลการทดลองจริง ส่วนเส้นประแสดงค่าคลาดเคลื่อนร้อยละ -30

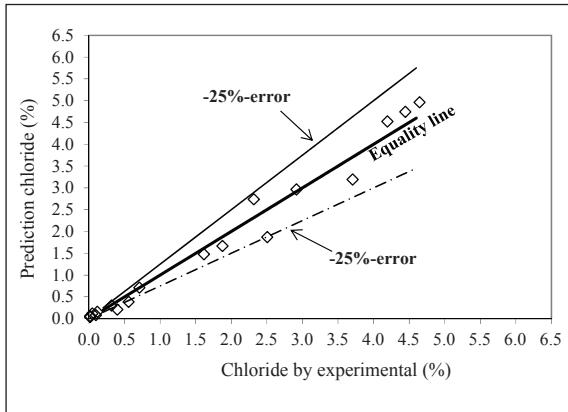
ผลการเปรียบเทียบพบว่าข้อมูลส่วนใหญ่อยู่ในช่วงร้อยละ ± 30 โดยคอนกรีตที่ผสมแก้วกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าคอนกรีตที่ผสมแก้วกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน อย่างไรก็ตามการเปรียบเทียบข้อมูลดังกล่าวเป็นเพียงการทดสอบกระบวนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ว่าสามารถทำนายได้สอดคล้องกับข้อมูลที่ใช้เป็นฐานในการสร้างแบบจำลอง ซึ่งควรมีการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทำนายปริมาณคลอไรด์โดยแบบจำลอง กับข้อมูลการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมแก้วกลบ-เปลือกไม้ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล ของนักวิจัยท่านอื่นๆ ด้วย อย่างไรก็ตาม ด้วยข้อจำกัดงานวิจัยที่ผ่านมา ไม่พบข้อมูลการศึกษาความคงทนของคอนกรีตที่ผสมแก้วกลบ-เปลือกไม้ ที่สัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมทะเล ตลอดจนข้อมูล



รูปที่ 5 ผลการทำนายปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลของ Thomas [7] ที่แช่คอนกรีตธรรมดาในน้ำทะเลประเทศอังกฤษเป็นเวลา 2, 4 และ 10 ปี

ที่ทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในห้องปฏิบัติการค่อนข้างน้อยและมีอายุการแช่ไม่นาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เปรียบเทียบผลการทำนายกับข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ ในคอนกรีตธรรมดาเท่านั้น

รูปที่ 5 ได้เปรียบเทียบผลการทำนายปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดา ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.51 กับข้อมูลงานวิจัยของ Thomas [7] ที่เก็บข้อมูลในสภาวะแวดล้อมทะเลจริงที่อายุแช่น้ำทะเล 2, 4 และ 10 ปี ผลปรากฏว่าข้อมูลส่วนใหญ่อยู่ในช่วงของค่าคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ ± 35 จากข้อมูลที่เก็บโดย Thomas ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากข้อมูลที่เก็บโดย Thomas เป็นสภาพน้ำทะเลที่เก็บในเขตหนาวที่ประเทศอังกฤษ ซึ่งแตกต่างจากข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองครั้งนี้ ที่เก็บจากสภาพน้ำทะเลของอ่าวไทยซึ่งเป็นเขตร้อนชื้น นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาผลการทำนายปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลของ Chalee [10] ที่แช่คอนกรีตธรรมดา ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45, 0.55 และ 0.65 ในสิ่งแวดล้อมทะเลอ่าวไทยเป็นเวลา 7 ปี ดังรูปที่ 6 พบว่าข้อมูลส่วนใหญ่อยู่ในช่วงของค่าคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ ± 25 ซึ่งต่ำกว่าค่าคลาดเคลื่อนที่ได้จากการศึกษาของ Thomas ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า

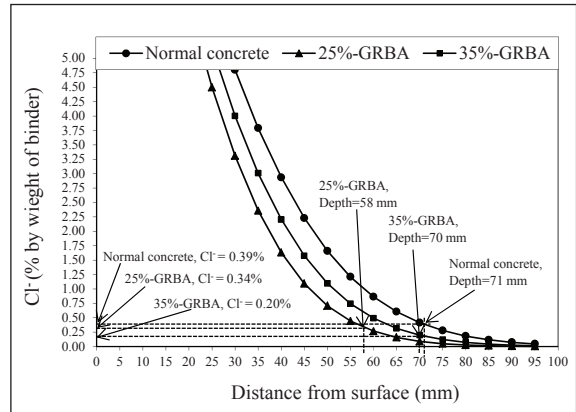


รูปที่ 6 ผลการทำนายปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลของ Chalee [10] ที่ใช้คอนกรีตธรรมดาในน้ำทะเลอ่าวไทยเป็นเวลา 7 ปี

สิ่งแวดล้อมทะเลที่แตกต่างกัน มีผลต่อการทำนายปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตของแบบจำลองนี้ โดยแบบจำลองสามารถทำนายปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมทะเลในเขตร้อนชื้นได้ดีกว่าเขตหนาว ทั้งนี้เนื่องจากข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองได้จากการแช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำทะเลบริเวณเขตร้อนชื้น อย่างไรก็ตามการทำนายปริมาณคลอไรด์โดยใช้แบบจำลองนี้ในสภาพแวดล้อมทะเลทั้ง 2 แห่งให้ผลไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งสามารถยอมรับในการใช้งานได้

5. การประยุกต์ใช้แบบจำลอง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้สามารถทำนายปริมาณของคลอไรด์ทั้งหมด ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตที่ผสมแก้วกลบ-เปลือกไม้บดละเอียด ภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่งได้ โดยข้อมูลดังกล่าวมีประโยชน์ในการกำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก เพื่อให้สอดคล้องกับอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเล ในช่วงเวลาก่อนการกัดกร่อนเริ่มต้น (Initial Corrosion) ตัวอย่างการใช้งานของแบบจำลองดังรูปที่ 7 ได้แสดงการกำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเพื่อป้องกันการกัดกร่อนเริ่มต้น จากข้อมูลการ



รูปที่ 7 การกำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเพื่อป้องกันการกัดกร่อนเริ่มต้น จากการทำนายปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมแก้วกลบ-เปลือกไม้บดละเอียด ที่มี $W/B = 0.45$ และแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 40 ปี

แทรกซึมของคลอไรด์ที่ได้จากแบบจำลองในคอนกรีตธรรมดา คอนกรีตที่ผสมแก้วกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดร้อยละ 25 และ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่มี $W/B = 0.45$ และแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 40 ปี จากงานวิจัยที่ผ่านมา [11] พบว่าคอนกรีตธรรมดา คอนกรีตที่ผสมแก้วกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดร้อยละ 25 และ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่มี $W/B = 0.45$ มีปริมาณคลอไรด์วิกฤติ เท่ากับร้อยละ 0.39, 0.34 และ 0.20 โดยน้ำหนักวัสดุประสานตามลำดับ โดยปริมาณคลอไรด์วิกฤติดังกล่าว มีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมแก้วถ่านหิน [12] ที่อัตราส่วนการแทนที่เดียวกันเล็กน้อย จากปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่ผสมแก้วกลบ-เปลือกไม้ดังกล่าว สามารถใช้กำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเพื่อป้องกันการกัดกร่อนเริ่มต้นในคอนกรีตกลุ่มนี้ หลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่งเป็นเวลา 40 ปี ได้เท่ากับ 71, 58 และ 70 มม. ตามลำดับ ข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์เนื่องจากน้ำทะเล เข้าไปในคอนกรีตในระยะยาว ยังสามารถใช้ทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ตลอดจนเป็นข้อมูลประกอบการเลือกส่วนผสมคอนกรีตที่ต้องการก่อสร้างใน



สิ่งแวดล้อมทะเลให้สามารถใช้งานได้ตามอายุการใช้งานที่ต้องการได้ อย่างไรก็ตามแบบจำลองนี้ได้สร้างจากฐานข้อมูล ที่แช่ตัวอย่างคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเล ที่ไม่อยู่ในสภาวะการรับแรงเชิงกล ดังนั้น ผลที่ได้จากการทำนาย เมื่อเทียบกับการใช้งานจริง ที่อยู่ภายใต้การรับแรงของโครงสร้างอาจแตกต่างกันได้

6. สรุป

จากผลการศึกษานี้สามารถสรุปได้ดังนี้

แบบจำลองนี้สามารถใช้ทำนายปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด ที่ตำแหน่งใดๆ จากผิวหน้าคอนกรีตและระยะเวลาแช่ทะเลตั้งแต่ 2 ปี ขึ้นไป ในคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดไม่เกินร้อยละ 50 และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในช่วง 0.45 ถึง 0.65 แบบจำลองนี้สามารถใช้ได้กับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่มีลักษณะการซึมผ่านของคลอไรด์ในทิศทางเดียวเท่านั้น โดยการใช้แบบจำลองในการทำนายปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดสูงถึงร้อยละ 50 โดยนำหน้าวัสดุประสาน พบว่ามีความคลาดเคลื่อนมากกว่าคอนกรีตกลุ่มอื่น

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทูสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนจากรัฐบาล (งบประมาณเงินแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 100/2558

เอกสารอ้างอิง

[1] W. Chalee, T. Sasakul, P. Suwanmaneechot, and C. Jaturapitakkul, "Utilization of rice husk-bark ash to improve the corrosion resistance of concrete under 5-year exposure in a marine environment," *Cement and Concrete Composites*, vol. 37, pp. 47–53, 2013.

- [2] P. Chindapasirt, S. Homwuttivong, and C. Jaturapitakkul, "Strength and Water Permeability of Concrete Containing Palm Oil Fuel Ash and Rice Husk-Bark Ash," *Construction and Building Materials*, vol. 21, pp. 1492–1499, 2007.
- [3] W. Tangchirapat, R. Buranasing, C. Jaturapitakkul, and P. Chindapasirt, "Influence of rice husk bark ash on mechanical properties of concrete containing high amount of recycled aggregates," *Construction and Building Materials*, vol. 22, pp. 1812–1819, 2008.
- [4] W. Chalee, C. Jaturapitakkul, and P. Chindapasirt, "Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater," *Marine Structures*, vol. 22, pp. 341–353, 2009.
- [5] *Standard Specification for Portland Cement*, ASTM C150/C150M-12, 2012.
- [6] *Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete*, ASTM C 1152, 2008.
- [7] MDA. Thomas and JD. Matthews, "Performance of pfa concrete in a marine environment-10-year results," *Cement and Concrete Research*, vol. 26, pp. 5–20, 2004.
- [8] W. Chalee and C. Jaturapitakkul, "Effect of W/B ratios and fly ash finenesses on chloride diffusion coefficient of concrete in marine environment," *Materials and Structures*, vol. 42, pp. 505–514, 2009.
- [9] PS. Mangat and MC. Limbachiya, "Effect of initial curing on chloride diffusion in concrete repair materials," *Cement and Concrete Research*, vol. 29, pp. 1475–1485, 1999.
- [10] W. Chalee, P. Ausapanit, and C. Jaturapitakkul, "Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis,"



- Materials and Design*, vol. 31, pp. 1242–1249, 2010.
- [11] W. Chalee and C. Jaturapitakkul, “Chloride binding capacity of concrete containing rice husk bark ash under marine environment,” *KMUTT Research and Development Journal*, vol. 34, no. 2, pp. 203–210, 2011 (in Thai).
- [12] W. Chalee and C. Jaturapitakkul, “Threshold chloride content of fly ash concrete under marine environment,” *Journal of Industrial Technology*, vol. 7, no. 1, pp. 21–28, 2007 (in Thai).