

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยบูรพา  
ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

รหัสโครงการ 170299

สัญญาเลขที่ 100/2558

## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยเรื่อง

แบบจำลองเพื่อทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้  
โดยใช้ฐานข้อมูลที่แช่คอนกรีตในสภาพแวดล้อมทะเลถึง 9 ปี

(The proposed model to predict the chloride penetration in concrete containing  
rice husk-bark ash based on 9-year exposure in marine site)

หัวหน้าโครงการวิจัย

นายวิเชียร ชาติ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

๒๕๖๑ 835 1 9

- 2 พ.ย. 2559

366 1 13

AR 0115๖5๖

ธันวาคม 2558

เริ่มบริการ

-5 ก.ย. 25๖๖

ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558  
รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ตามที่ นายวิเชียร ชาลี พนักงานมหาวิทยาลัย ตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ สังกัดภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย เรื่อง “แบบจำลองเพื่อทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเส้นใยกลบเปลือกไม้โดยใช้ฐานข้อมูลที่แช่คอนกรีตในสภาพแวดล้อมทะเลถึง 9 ปี” จากทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 มีงบประมาณทั้งโครงการ 551,000 บาท ขณะนี้ผลการดำเนินการวิจัยเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้ว

รายละเอียดของโครงการวิจัย

ผู้เสนอ	:	นายวิเชียร ชาลี
หน่วยงาน	:	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ระยะเวลาดำเนินการ	:	12 เดือน
งบประมาณ	:	551,000 บาท

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในสภาวะแวดล้อมทะเล โดยสร้างแบบจำลองจากข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ ที่ได้จากตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 2, 3, 5, 7 และ 9 ปี ในการสร้างแบบจำลองใช้หลักการการวิเคราะห์เชิงถดถอยแบบพหุคูณ ในกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิกส์ ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (ในช่วง 0.45 ถึง 0.65), ปริมาณเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในคอนกรีต (ร้อยละ 0 ถึง 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน), ระยะจากผิวหน้าคอนกรีต และระยะเวลาในการแช่คอนกรีต (มากกว่า 2 ปี) ผลที่ได้จากแบบจำลองคือ ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (โดยน้ำหนักวัสดุประสาน) ในคอนกรีตที่ตำแหน่งต่างๆจากผิวหน้าคอนกรีต ผลการใช้แบบจำลองเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ใช้สร้างแบบจำลอง พบว่า ปริมาณคลอไรด์จากการทำนายมีค่าคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงร้อยละ  $\pm 30$  และผลการทำนายของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในปริมาณไม่เกินร้อยละ 35 มีความถูกต้องมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน นอกจากนี้ได้มีการเปรียบเทียบผลการทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์กับงานวิจัยอื่น โดยพบว่าปริมาณคลอไรด์จากการทำนายส่วนใหญ่มีค่าคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงร้อยละ  $\pm 35$

คำสำคัญ : การแทรกซึมของคลอไรด์, เถ้าแกลบ-เปลือกไม้, การทำนาย, สิ่งแวดล้อมทะเล

## Abstract

In this study, a mathematical model for predicting chloride penetration in concrete containing ground rice husk-bark ash (GRBA) in a marine environment is 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 in concrete. Input variables are 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 presents 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 GRBA as high as 35% 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.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้ความสะดวกด้านเครื่องมือและห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ธุรการ และช่างเทคนิคประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่ช่วยประสานงานและช่วยเหลือเป็นอย่างดี ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนจากรัฐบาล (งบประมาณเงินแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 100/2558

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลงานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นฐานข้อมูล เพื่อส่งเสริมการใช้งานเจ้าชิวมวลที่มีมากในประเทศ ให้สามารถใช้ในงานก่อสร้างอย่างเป็นรูปธรรมมากขึ้น โดยเฉพาะการนำไปใช้แก้ปัญหาคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเลประเทศไทย ให้เกิดความเสียหายน้อยที่สุด

## สารบัญ

### สารบัญเนื้อหา

เนื้อหา	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ป
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญเนื้อหา	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>4</b>
2.1 แนวคิดในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	4
2.2 วัสดุปอชโซลาน	5
2.3 ปฏิกริยาปอชโซลาน	6
2.4 เถ้าแกลบ – เปลือกไม้	6
2.5 การศึกษาเกี่ยวกับการใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ในงานคอนกรีต	7
2.6 สิ่งแวดล้อมทะเล	9
2.7 ผลของสิ่งแวดล้อมทะเลต่อการกัดกร่อนคอนกรีต	10
2.8 การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์	12
2.9 การกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต	18
2.10 การป้องกันการกัดกร่อนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเล	21

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22
<b>บทที่ 3 วิธีการศึกษา</b>	<b>25</b>
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	25
3.2 อุปกรณ์การทดสอบและเครื่องมือ	25
3.3 ตัวอย่างคอนกรีตที่ได้เตรียมเมื่อ 9 ปีที่แล้ว	28
3.4 สมบัติของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา	32
<b>บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล</b>	<b>34</b>
4.1 การสร้างแบบจำลอง	34
4.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง	42
4.3 การประยุกต์ใช้แบบจำลอง	45
4.4 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ หลังแช่น้ำทะเล 9 ปี	46
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	<b>50</b>
5.1 สรุปผล	50
5.2 ข้อเสนอแนะ	50
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>51</b>
ภาคผนวก ก ผลผลิต (Output)	54
ภาคผนวก ข รายงานการเงิน	67
ภาคผนวก ค ประวัตินักวิจัย	69

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ปริมาณสูงสุดของคลอไรด์ไอออนเพื่อป้องกันการเกิดสนิม	14
3.1	อัตราส่วนผสมคอนกรีต	29
3.2	องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน	33
4.1	สัมประสิทธิ์ $\beta$	40
4.2	ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต	40



## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ภาพขยายของอนุภาคของเส้นใยเคลือบ-เปลือกไม้ก่อนและหลังการบด	7
3.1 ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 20	26
3.2 เครื่องชั่งอ่านละเอียด 0.0001 กรัม	26
3.3 เครื่องทดสอบกำลังอัด	26
3.4 อุปกรณ์บดคอนกรีต	27
3.5 เครื่องตัดคอนกรีต	27
3.6 เครื่องเจาะคอนกรีต	27
3.7 เครื่องดูดสูญญากาศ	28
3.8 เครื่องไทเทรตอัตโนมัติ	28
3.9 ตัวอย่างคอนกรีตที่แช่บริเวณชายฝั่งทะเล จ.ชลบุรี	30
3.10 การทดสอบปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 9 ปี	32
4.1 การหาค่า $\beta$ และ $C_0$ ในข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่มี $W/B = 0.45$ และผสมเส้นใยเคลือบ-เปลือกไม้ร้อยละ 0 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน	37
4.2 การหาค่า $\beta$ และ $C_0$ ในข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่มี $W/B = 0.65$ และผสมเส้นใยเคลือบ-เปลือกไม้ร้อยละ 0 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน	39
4.3 ผลการทำนายปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลที่ได้จากการแช่คอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 7 และ 9 ปี	44
4.4 ผลการทำนายปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลของ Thomas and Matthews, (2004) ที่แช่คอนกรีตธรรมดา ในน้ำทะเลประเทศอังกฤษ	44
4.5 ผลการทำนายปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลของ Chalee et al., (2013) ที่แช่คอนกรีตธรรมดาในน้ำทะเลอ่าวไทยเป็นเวลา 7 ปี	45
4.6 การกำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเพื่อป้องกันการกัดกร่อนเริ่มต้น จากผลการทำนายปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเคลือบ-เปลือกไม้บดละเอียด ที่มี $W/B=0.45$ และแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 40 ปี	46
4.7 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเคลือบ-เปลือกไม้บดละเอียด ที่มี $W/B=0.45$ และแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 9 ปี	48
4.8 ผลของเส้นใยเคลือบ-เปลือกไม้บดละเอียดต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 9 ปี	49

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อใช้งานในสภาวะแวดล้อมทะเล ต้องให้ความสำคัญกับการป้องกันการกัดกร่อนที่ทำลายคอนกรีตเสริมเหล็ก คู่ไปกับการรับแรงเชิงกลเพื่อให้โครงสร้างมีความแข็งแรง และมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ซึ่งการกัดกร่อนของโครงสร้างในสภาวะแวดล้อมดังกล่าว มีสาเหตุหลักมาจากคลอไรด์และซัลเฟต โดยคลอไรด์เป็นสาเหตุที่ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม และขยายตัวส่งผลให้คอนกรีตแตกร้าว งานวิจัยที่ผ่านมา (Chalee et al., 2013) พบว่า การแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 35 สามารถต้านการแทรกซึมของคลอไรด์เนื่องจากน้ำทะเลได้ดี ประกอบกับเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่เป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำได้ดี ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูง และการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำลง (Cheewaket et al., 2012; Chindaprasirt et al., 2005 ; Thomas and Matthews, 2004 ; Neville, 1996 ; Chindaprasirt et al., 2007)

การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต เพื่อให้สามารถต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ จำเป็นต้องใช้ฐานข้อมูลที่ได้จากการเก็บข้อมูลจากตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลจริง โดยระยะเวลาที่แช่ตัวอย่างคอนกรีตที่นานขึ้น จะให้ผลการศึกษาที่อธิบายพฤติกรรมการกัดกร่อน ได้สอดคล้องกับการใช้งานจริงมากขึ้น อย่างไรก็ตามการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเลจริง อาจมีข้อจำกัดในเรื่องของระยะเวลาที่แช่ตัวอย่าง ซึ่งถ้าสามารถใช้ฐานข้อมูลที่ได้จากการแช่ตัวอย่างในสิ่งแวดล้อมทะเล ในการทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในระยะยาวได้ ก็จะเป็นประโยชน์อย่างมากในการเลือกใช้ส่วนผสมคอนกรีตให้สามารถทนต่อการกัดกร่อนจากคลอไรด์ในน้ำทะเลในระยะยาวได้ นอกจากนี้ยังสามารถทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ตลอดจนการบำรุงรักษาที่จะมีขึ้นในอนาคตได้อีกด้วย

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ฐานข้อมูลในภาคสนามมีค่อนข้างน้อย โดย Chalee et al., (2009) ได้สร้างแบบจำลองเพื่อทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน ที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้ง ซึ่งพบว่า แบบจำลองดังกล่าวสามารถใช้งานได้ดีในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินไม่เกินร้อยละ 50 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในช่วง 0.45 ถึง 0.65 โดยเปรียบเทียบผลการศึกษา กับข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ที่เก็บในภาคสนามทั้งในประเทศและต่างประเทศ พบว่า แบบจำลองดังกล่าวมีความสอดคล้องกับข้อมูลที่เก็บในสนามในช่วงร้อยละ  $\pm 25$

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองซึ่งแสดงในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ในการทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำทะเลบริเวณชายฝั่ง โดยเน้นคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียด ในการสร้างแบบจำลองได้ใช้ฐานข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์จากน้ำทะเลที่ได้จากการทดสอบโดยการแช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำทะเลที่อายุ 2, 3, 5, 7 และ 9 ปี ซึ่งให้ผลการศึกษาที่สอดคล้องกับพฤติกรรมการกักต่อน้ำจริง และสอดคล้องกับการแทรกซึมของคลอไรด์ในระยะยาวได้ดี ทำให้แบบจำลองมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น ตลอดจนการพัฒนาแบบจำลองให้มีรูปแบบของการใช้งานที่ง่าย คำนวณได้สะดวกรวดเร็ว ก็จะเป็นประโยชน์ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่คำนึงถึงความคงทนต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อสร้างแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเล โดยใช้ฐานข้อมูลที่มีการศึกษาในสภาวะแวดล้อมจริงถึงระยะเวลา 9 ปี

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของเถ้าแกลบเปลือกไม้และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 9 ปี

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อในการทำนายปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (total chloride) ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ หลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล โดยใช้ฐานข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์จากน้ำทะเลที่ได้จากการทดสอบโดยแช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำทะเลที่อายุ 2, 3, 5, 7 ปี (ซึ่งมีฐานข้อมูลอยู่แล้ว) และจะเก็บตัวอย่างทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์เพิ่มเติมต่อเนื้อที่อายุ 9 ปี ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการแทรกซึมคลอไรด์ในระยะยาวในการศึกษาครั้งนี้ จะได้จากการแช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำทะเลนานถึง 9 ปี ฐานข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้จากตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียด (ค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ไม่น้อยละ 5 โดยน้ำหนัก) ไม่น้อยละ 50 และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในช่วง 0.45 ถึง 0.65 โดยแบบจำลองนี้จะใช้ได้กับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีลักษณะการซึมผ่านของคลอไรด์ในทิศทางเดียวเท่านั้น เนื่องจากฐานข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองได้จากตัวอย่างคอนกรีตที่เจาะตรงตำแหน่งกึ่งกลางของคอนกรีตลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มม<sup>3</sup> ซึ่งเป็นการซึมผ่านของคลอไรด์ในทิศทางเดียวจากพื้นผิวของทรงลูกบาศก์ลงไปในแนวกึ่งกลางของตัวอย่างคอนกรีต โดยโครงสร้างที่เหมาะสมในการใช้แบบจำลองนี้ได้แก่ พื้น ฐานราก หรือโครงสร้างอื่นๆ ที่มีลักษณะการซึมเข้าของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตในลักษณะทิศทางเดียว การสร้างแบบจำลองทาง

คณิตศาสตร์เพื่อทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ในครั้งนี้ มีตัวแปรตามคือ ปริมาณคลอไรด์ที่ตำแหน่งใดๆจากผิวคอนกรีต ส่วนตัวแปรอิสระได้แก่ ระยะจากผิวหน้าคอนกรีตถึงตำแหน่งที่ต้องการทำนายปริมาณคลอไรด์ ระยะเวลาแช่น้ำทะเล อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ในคอนกรีต โดยการสร้างแบบจำลองจะใช้เทคนิคการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (multi regression analysis) และกฎข้อที่ 2 ของ ฟิคส์ (Fick's second law)

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1) นำเสนอฐานข้อมูลที่ใช้ประกอบในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสถานะแวดล้อมทะเลในประเทศไทย โดยการประยุกต์ใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ซึ่งเป็นวัสดุที่มีในประเทศไทยให้เกิดประโยชน์ และมีประสิทธิภาพสูง ภายใต้งบประมาณตามหลักวิศวกรรม

1.4.2) นำเสนอแบบจำลองเพื่อทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้เพื่อประกอบในการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในสถานะแวดล้อมทะเล ซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาจากผลการศึกษาในสถานะแวดล้อมจริงในประเทศไทยและวัสดุที่มีในประเทศ ซึ่งจะได้ข้อมูลที่สอดคล้องกับการใช้งานจริง ที่มีความชัดเจนและครอบคลุมมากขึ้น

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แนวคิดในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การศึกษาที่ผ่านมาพบว่า เถ้าแกลบเปลือกไม้ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากโรงไฟฟ้าชีวมวลที่ใช้แกลบที่ได้จากโรงสีข้าวและเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ได้จากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ มีอัตราส่วนระหว่างแกลบต่อเปลือกไม้ก่อนการเผาเท่ากับ 65:35 โดยน้ำหนัก โดยใช้ข้อมูลในการเผาครั้งที่ประมาณ 800 – 900 องศาเซลเซียส เมื่อนำมาบดละเอียดจะมีซิลิกาสูง (สูงถึงร้อยละ 70) และมีสมบัติเป็นวัสดุพอสโซลาน ทำให้คอนกรีตมีความตึบน้ำ และลดกลไกทางเคมีที่ส่งผลให้เกิดความเสียหายเนื่องจากน้ำทะเลได้ โดยพบว่าการแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 35 สามารถต้านการแทรกซึมของคลอไรด์เนื่องจากน้ำทะเลได้ดี (Chalee et al., 2013) ซึ่งถ้ามีการสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลก็จะเป็นการเพิ่มฐานข้อมูลในการส่งเสริมเพื่อนำไปใช้งานได้มากขึ้น หลักการที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองครั้งนี้ใช้หลักของการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (multi regression analysis) ควบคู่กับกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของ ฟิคส์ (Fick's second law) โดยสร้างแบบจำลองบนฐานข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลถึง 9 ปี โดยมีสมมติฐานว่า การแทรกซึมของคลอไรด์ต้องเป็นไปตามกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของ ฟิคส์ (Fick's second law) และคลอไรด์มีลักษณะการแทรกซึมในทิศทางเดียว (diffusion in one dimension) ทั้งนี้เพื่อให้สอดคล้องกับลักษณะของตัวอย่างคอนกรีตที่ได้ทดสอบหาการแทรกซึมของคลอไรด์ในภาคสนาม

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในครั้งนี้ จะใช้เทคนิควิเคราะห์โดยวิธี Multi - regression analysis กับฐานข้อมูลในภาคสนาม โดยเริ่มจากสมการกฎการแพร่ข้อที่สองของ Fick's Law (Crank , 1975) ดังแสดงในสมการที่ 1 ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ( $D_c$ ) มีความสัมพันธ์กับเวลาตามสมการที่ 2.2 ดังนั้นการแทนค่า  $D_c$  ในสมการที่ 2.1 จะได้ดังสมการที่ 2.3 จะได้คำตอบทั่วไป (General Solution) ของสมการที่ 2.3 ดังสมการที่ 4 (Crank , 1975)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_c \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2.1)$$

$$D_c = (t)^{-\beta} \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = t^{-\beta} \frac{\partial^2 C}{\partial^2 t} \quad (2.3)$$

$$C_{x,t} = C_o \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2 \sqrt{\frac{t^{(1-\beta)}}{(1-\beta)}}} \right) \right] \quad (2.4)$$

เมื่อ  $C_{x,t}$  = ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ตำแหน่ง  $x$ ,  $t$  = ระยะเวลาแช่น้ำทะเล,  $x$  = ระยะจากผิวหน้าคอนกรีต,  $C_o$  = ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ระยะเวลาแช่น้ำทะเล และ erf = error function ซึ่งการใช้เทคนิค Multi - regression analysis กับฐานข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ในภาคสนามน่าจะทำให้ทราบค่าสัมประสิทธิ์  $\beta$  ที่อยู่ในรูปของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) และปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ในคอนกรีตได้

## 2.2 วัสดุปอซโซลาน (ปริญา และชัย, 2547)

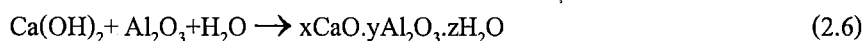
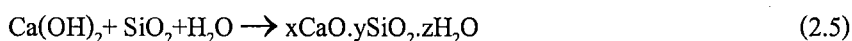
วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Materials) ตามคำจำกัดความของ ASTM C 618 หมายถึง วัสดุที่ประกอบด้วยออกไซด์ของซิลิกา (Siliceous) หรือ ซิลิกาและอลูมินา (Siliceous and aluminous) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานมีคุณสมบัติของวัสดุประสานน้อยมากหรือไม่มีเลย แต่เมื่อมีความละเอียดที่เหมาะสมและมีความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับด่างหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ที่อุณหภูมิห้อง ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานได้ดีคล้ายกับปูนซีเมนต์ เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่า ปฏิกิริยา ปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) โดยทั่วไปวัสดุปอซโซลานที่มีอยู่ในปัจจุบันแบ่งได้ 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ วัสดุปอซโซลานธรรมชาติ (Natural Pozzolans) ซึ่งเกิดจากกระบวนการตามธรรมชาติ เช่น เถ้าภูเขาไฟ และดินขาวเผา (Met kaolin) เป็นต้น ส่วนอีกประเภทหนึ่งคือ วัสดุปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial Pozzolans) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นวัสดุพลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการผลิตในงานอุตสาหกรรม เช่น ซิลิกาฟุ้ง เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เถ้าขานฮ้อย เถ้าปลั่มน้ำมัน ตะกรันเตาถลุงเหล็ก ดินขาวเผา เป็นต้น

ปัจจุบันวัสดุปอซโซลานนิยมนำมาใช้ในงานคอนกรีตในรูปแบบของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน เนื่องจากวัสดุปอซโซลานมีคุณสมบัติช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้ดีขึ้นทั้งใน

ด้านความสามารถรับแรงอัด ความทนทานต่อการกัดกร่อน และความคุ้มทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากวัสดุปอซโซลานมีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ ส่งผลให้สามารถลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตได้

### 2.3 ปฏิกิริยาปอซโซลาน (ปริญญา และชัย, 2547)

เมื่อปูนซีเมนต์รวมตัวกับน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และมีผลิตภัณฑ์ที่สำคัญจากปฏิกิริยา คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$  หรือ C-S-H) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) และ แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ( $3\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  หรือ C-A-H) ปฏิกิริยาปอซโซลาน เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายหลังจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมินาไดรอกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ในวัสดุปอซโซลาน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ดังสมการที่ 2.5 และ 2.6 ซึ่งทั้ง C-S-H และ C-A-H ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานนี้ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น และลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น โดยปฏิกิริยาปอซโซลานจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออายุประมาณ 7 วัน และทำปฏิกิริยาต่อไปเรื่อย ๆ แม้ว่าคอนกรีตมีอายุมากกว่า 3 ปีครั้งก็ตาม

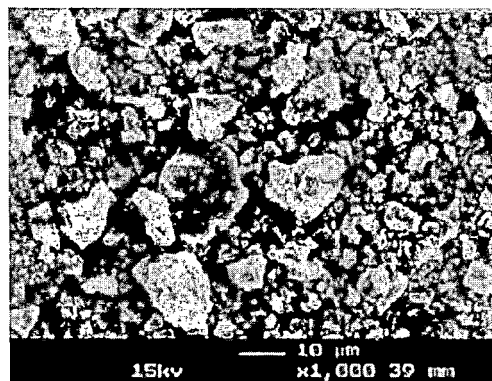
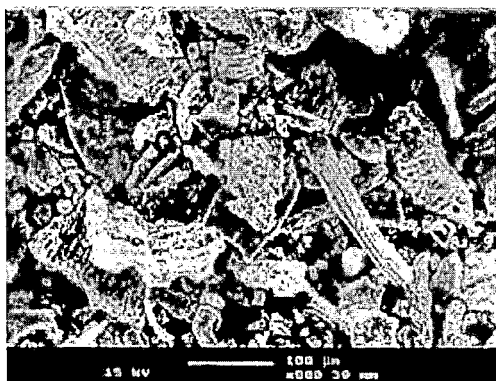


### 2.4 เถ้าแกลบ – เปลือกไม้ (Rice husk–bark ash)

เถ้าแกลบ–เปลือกไม้เป็นผลพลอยได้จากโรงไฟฟ้าชีวมวลที่ใช้แกลบที่ได้จากโรงสีข้าวและ 18 เปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ได้จากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ มีอัตราส่วนระหว่างแกลบต่อเปลือกไม้ก่อนการเผาเท่ากับ 65:35 โดยน้ำหนัก และมีอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาที่ประมาณ 800 – 900 องศาเซลเซียส หลังจากการเผาเถ้าแกลบ-เปลือกไม้จะทิ้งลงมาตามปล่องทิ้ง และมีการรดน้ำเพื่อลดอุณหภูมิรวมถึงป้องกันการฟุ้งกระจายก่อนขนไปทิ้งยังพื้นที่ทิ้งต่อไป (ปริญญา และชัย, 2547)

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ–เปลือกไม้ มีองค์ประกอบรวมของ ซิลิกา อลูมินา และเฟอร์ริก-ออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ประมาณร้อยละ 85 ซึ่งมากกว่าร้อยละ 70 และมีปริมาณของ  $\text{SO}_3$  และ LOI เท่ากับร้อยละ 0.60 และ 3.72 ตามลำดับ ลักษณะทางกายภาพของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ รูปร่างไม่แน่นอน อนุภาคมีความพรุนสูงดังแสดงในรูปที่ 2.1 ค่าร้อยละของน้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 จะน้อยลงเมื่อผ่านการบดละเอียดซึ่งจะมีค่าประมาณร้อยละ 3.8-32.6 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ

ระยะเวลาในการบด ความถี่จำเพาะจะมีค่าสูงขึ้นตามความละเอียดที่เพิ่มขึ้น เพราะการบดจะไปทำลายรูพรุนและโพรงอากาศในอนุภาคทำให้ค่าความถี่จำเพาะสูงขึ้น มีค่าประมาณ 2.1-2.3 รูปที่ 2.1 แสดงภาพขยายของอนุภาคของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ก่อนและหลังการบด



ก. เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ก่อนการบด

ข. เถ้าแกลบ-เปลือกไม้หลังการบด

รูปที่ 2.1 ภาพขยายของอนุภาคของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ก่อนและหลังการบด

## 2.5 การศึกษาเกี่ยวกับการใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ในงานคอนกรีต

โดยทั่วไปแล้วเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่ไม่ผ่านการบดจะมีอนุภาคที่หยาบ มีความพรุนสูงและไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในงานคอนกรีต โดยจากการศึกษาที่ผ่านมา (วลัยลักษณ์ และคณะ 2550) พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ก่อนบด (ค่ากลางของอนุภาคเท่ากับ 75.3 ไมครอน) ทุกอัตราการแทนที่ และทุกอายุการทดสอบมีค่ากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนอย่างชัดเจน โดยกำลังอัดจะมีค่าลดลง เมื่อมีการแทนที่เถ้าแกลบ - เปลือกไม้ก่อนบดมากขึ้นเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ก่อนบด มีอนุภาคขนาดใหญ่จึงทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้น้อย และมีความพรุนสูงทำให้คอนกรีตต้องการน้ำในส่วนผสมสูงขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้จึงเป็นการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานจึงส่งผลให้กำลังอัดลดลง

เมื่อแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีความละเอียดมากขึ้น (ค่ากลางของอนุภาคเท่ากับ 27.5 ไมครอน) พบว่าสามารถพัฒนากำลังอัดให้สูงขึ้นได้เมื่อเทียบกับคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ก่อนบด คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ร้อยละ 10 มีกำลังอัดมากกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนที่อายุ 90 วัน แต่เมื่อมีการเพิ่มปริมาณการแทนที่มากขึ้น ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลง



ส่วนการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ความละเอียดสูง (ค่ากลางของอนุภาคเท่ากับ 10.9 ไมครอน) ในอัตราร้อยละ 10 และ 20 มีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนทั้งที่อายุ 28 และ 90 วัน ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ความละเอียดสูงจะมีค่าเพิ่มขึ้น เกิดเนื่องจากความละเอียดของเถ้า-แกลบ-เปลือกไม้ที่สูงขึ้น สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี และอนุภาคที่มีความละเอียดสูงสามารถแทรกอุดช่องว่างของเพสต์ส่งผลให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น กำลังอัดจึงสูงขึ้น

ผลของกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ทั้ง 3 ความละเอียดแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงคุณภาพของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ โดยการบดให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นหรือมีขนาดอนุภาคที่เล็กลงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตให้ดีขึ้น

ส่วนคุณสมบัติด้านการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ วลัยลักษณ์ และคณะ (2550) พบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ก่อนบด (ค่ากลางของอนุภาคเท่ากับ 75.3 ไมครอน) มีค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนทุกอายุการทดสอบ ทั้งนี้เนื่องจากขนาดอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าปูนซีเมนต์และมีความพรุนสูงจึงมีความต้องการน้ำในส่วนผสมสูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน ส่งผลทำให้คอนกรีตมีช่องว่างมากขึ้น ค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตจึงสูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน และเมื่อใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ความละเอียดสูง (ค่ากลางของอนุภาคเท่ากับ 10.9 ไมครอน) ผสมคอนกรีตพบว่า ในทุกอัตราการแทนที่มีค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนทุกอายุการทดสอบ เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะการบดเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ให้ความละเอียดมากขึ้นมีผลทำให้อนุภาคเล็กลง เมื่อแทนที่ในคอนกรีตจะแทรกตัวในช่องว่างของคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีความแน่นมากขึ้น ค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตจึงต่ำลง

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณการแทนที่ของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ต่อค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่อายุ 90 วัน คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ความละเอียดปานกลางและความละเอียดสูง ให้ผลในทิศทางเดียวกันกับคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ก่อนบด คือ การแทนที่ในอัตราร้อยละ 10 มีค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ต่ำที่สุด และมีค่าสูงขึ้นเมื่อการแทนที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าแกลบ-เปลือกไม้มีความพรุนเหลืออยู่ ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่มากขึ้นความต้องการน้ำในอัตราส่วนผสมจึงมากขึ้น ทำให้ค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตสูงขึ้นด้วย

ดังนั้นจากการศึกษาที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่า คอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ความละเอียดสูงไม่เกินร้อยละ 20 เป็นคอนกรีตที่มีทั้งคุณสมบัติในด้านกำลังอัดที่สูงกว่า และค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน ส่วนคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ร้อยละ 30 และ 40 ที่อายุ 90 วัน มีกำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตซีเมนต์ล้วนและมีค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน และในการศึกษาครั้งนี้จึงมุ่งประเด็นไปที่การขยายผลของ

การศึกษาที่ผ่านมาที่พบว่า การใช้เส้นแกลบเปลือกไม้ที่มีความละเอียดสูงผสมในคอนกรีตในปริมาณที่เหมาะสมสามารถลดการซึมผ่านน้ำลงได้ ประกอบกับมีการพัฒนากำลังอัดไปในทิศทางที่ดี จึงน่าจะให้ผลดีต่อการต้านทานการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลได้

## 2.6 สิ่งแวดล้อมทะเล

### 2.6.1 ลักษณะทางกายภาพ (Mehta, 1989; Buslov, 1990)

1) อุณหภูมิ โดยทั่วไปอุณหภูมิที่พื้นผิวของน้ำทะเลอาจแปรเปลี่ยนจากจุดเยือกแข็งของน้ำทะเล (-2 องศาเซลเซียส) ในเขตที่มีอากาศเย็น ไปจนถึงสูงประมาณ 30 องศาเซลเซียส ในเขตร้อน โดยอุณหภูมิจะลดลงตามความลึกของน้ำจนถึงระดับหนึ่ง คือ 2 ถึง 5 องศาเซลเซียส ที่ความลึกประมาณ 100 ถึง 1000 เมตร

2) ชีวภาพทางทะเล สิ่งมีชีวิตในทะเล เช่น พวกแพลงก์ตอนและสิ่งมีชีวิตประเภทมอลลัสก์ (หอยและหมึกชนิดต่างๆ) ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตบริเวณที่สัมผัสกับน้ำทะเลลดลงอย่างมาก และส่งผลให้บริเวณผิวคอนกรีตอ่อนแอ และมีการสึกกร่อนเนื่องจากการกัดเซาะของคลื่นได้ง่าย โดยทั่วไปสิ่งมีชีวิตเหล่านี้จะเจริญเติบโตได้ดีในบริเวณที่มีออกซิเจน และมีแสงสว่าง ซึ่งพบมากในช่วงความลึก 20 เมตร จากระดับน้ำทะเล และพบน้อยลงในบริเวณน้ำทะเลลึกและมีสภาพอากาศเย็น

3) ความดันน้ำ ความดันของน้ำทะเลต่อโครงสร้างส่วนที่จมในน้ำทะเล เป็นไปตามสมการดังนี้

$$P = \rho h$$

โดยที่  $P$  คือความดัน  $\rho$  คือความหนาแน่นของน้ำทะเล และ  $h$  คือความลึกของน้ำทะเล ค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นของน้ำทะเลจะเท่ากับ 1026 กก/ม<sup>3</sup> โดยคิดเป็นแรงดันน้ำต่อความลึกของน้ำทะเล 1 เมตร ได้ประมาณ 1 ตันต่อตารางเมตร แรงดันน้ำดังกล่าว ส่งผลให้น้ำทะเลสามารถเคลื่อนตัวเข้าสู่วัสดุที่มีรูพรุนได้ง่าย และมีการสะสมของน้ำทะเลภายในโพรงคอนกรีตและเมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้งจะทำให้การตกผลึกของเกลือและก่อให้เกิดความเสียหายในเนื้อคอนกรีตได้ นอกจากนี้ความดันน้ำสามารถแทรกเข้าไปในรูเล็กๆ ของช่องว่างที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการก่อสร้างคอนกรีตในน้ำทะเล เช่น ช่องในคอนกรีตอัดแรง หรือช่องที่เกิดจากการถอดแบบหล่อแบบเลื่อนขึ้น เป็นต้น

4) คลื่นและละอองน้ำทะเล แรงที่เกิดจากคลื่นในมหาสมุทรจะมีค่าสูงมาก และต้องนำมาพิจารณาประกอบในการออกแบบโครงสร้างในทะเล โดยปกติแล้วคลื่นเกิดจากแรงลมกระทำต่อน้ำ โดยแรงเสียดทานจากลมจะถูกแปลงเป็นพลังงานคลื่น

5) ไอทะเล เมื่ออากาศอุ่นจากฝั่งแผ่นดินพัดผ่านข้ามอากาศเย็นเหนือน้ำทะเล จะทำให้เกิดหมอกตามแนวชายฝั่งในช่วงฤดูร้อน ส่วนในฤดูหนาวอากาศเย็นจากแผ่นดินจะพัดผ่านอากาศที่อุ่นและ

ขึ้นบนผิวน้ำทะเล ซึ่งทั้งสองปรากฏการณ์ส่งผลให้เกิดการกลั่นตัวของความชื้นและก่อให้เกิดหมอกเมฆที่ลอยต่ำ หมอกในแถบชายฝั่งโดยมากจะนำพาน้ำทะเลหยดเล็กๆ ซึ่งเป็นลักษณะของละอองน้ำทะเลติดมาด้วย เช่นเดียวกับละอองคลื่นที่เกิดขึ้นจากแรงลมบนผิวน้ำหรือการที่คลื่นไปกระทบโครงสร้างต่างๆ ทำให้มีการกระจายตัวของน้ำทะเลจำนวนมากไปยังบรรยากาศและลมสามารถพัดพาละอองน้ำเหล่านั้นเข้าไปในฝั่งทะเลเป็นระยะทางไกลได้และส่งผลทำให้มีการกักกร่อนเกิดขึ้นในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเลได้

### 2.6.2 ลักษณะทางเคมี

โดยทั่วไปน้ำทะเลบริเวณอ่าวไทย มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ในช่วง 7.9 ถึง 8.2 มีปริมาณคลอไรด์อยู่ระหว่าง 16,000 ถึง 18,000 มก./ล. (ร้อยละ 1.6-1.8 โดยน้ำหนักของน้ำทะเล) และปริมาณซัลเฟตมีค่า 2,200 ถึง 2,500 มก./ล. (ร้อยละ 0.22-0.25 โดยน้ำหนักของน้ำทะเล) (Chalee et al., 2013) โดยปริมาณคลอไรด์ที่มีในน้ำทะเลส่วนใหญ่จะเป็น โซเดียมคลอไรด์ประมาณร้อยละ 90 และอีกประมาณร้อยละ 10 เป็นแมกนีเซียมคลอไรด์ ปริมาณคลอไรด์และซัลเฟตดังกล่าวถือว่าปริมาณสูงและส่งผลต่อการทำลายโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในระดับที่รุนแรง

## 2.7 ผลของสิ่งแวดล้อมทะเลต่อการกัดกร่อนคอนกรีต

ความเสียหายและความรุนแรงของการกัดกร่อนต่อคอนกรีตอาจไม่เท่ากันตลอดทั้งโครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ในสถานะเปียกสลับแห้งจะมีความเสียหายสูง เพราะบริเวณดังกล่าวมีการขัดสีของน้ำทะเลต่อคอนกรีตทั้งจากแรงกระแทกของคลื่น ทิศทางลม อุณหภูมิ ความชื้น ระยะเวลาที่โครงสร้างอยู่ในสถานะเปียกสลับแห้ง การไหลเวียนของน้ำทะเล นอกจากนี้ คอนกรีตที่สถานะเปียกสลับแห้งมีการสะสมสารเคมีทั้งซัลเฟต คลอไรด์ และเกลือต่างๆ ในช่องว่างของคอนกรีต ทำให้มีความเข้มข้นสูงกว่าปกติ จึงเกิดการกัดกร่อนที่รวดเร็ว ในกรณีที่มีรอยแตก ร้าวเล็ก ๆ ซึ่งเกิดจากการหดตัวหรือขยายตัวเนื่องจากความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะยิ่งทำให้คอนกรีตมีความเสียหายรวดเร็วยิ่งขึ้น โดยทั่วไปลักษณะของโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมน้ำทะเล สามารถแบ่งได้ 5 บริเวณ (Mehta, 1989) ดังนี้

### 2.7.1) บริเวณบรรยากาศของทะเล (Marine Atmospheric Zone)

คอนกรีตบริเวณบรรยากาศของทะเลไม่ได้สัมผัสกับน้ำทะเลโดยตรง แต่จะสัมผัสกับละอองน้ำทะเลที่ลมพัดมา อากาศที่มีไอเกลือจากน้ำทะเลเจือปน ความเข้มข้นของเกลือจะลดลงตามระยะห่างจากน้ำทะเล โดยขึ้นอยู่กับสภาพทางธรรมชาติของชายฝั่งทะเล ทิศทาง และความแรงของกระแสลมที่จะพัดพาละอองไอเกลือ แม้โครงสร้างที่อยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลเข้ามาหลายกิโลเมตรก็ยังมี

โอกาสได้รับเกลือจากน้ำทะเลได้ ความเสียหายที่เกิดขึ้นจะเป็นผลเนื่องจากเกลือคลอไรด์ที่มีในอากาศ เกิดการพัดพาโดยลมสัมผัสกับเนื้อคอนกรีต เกิดการแพร่ของไอออนคลอไรด์ (Chloride Ions) เข้าไปในเนื้อคอนกรีตในบริเวณที่มีรอยแตกร้าวหรือมีความพรุน ส่งผลให้เกิดสนิมในเหล็กเสริมเร็วขึ้นและเกิดการขยายตัวดันคอนกรีตให้แตกร้าวเสียหาย จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า กลไกการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ในบริเวณนี้มีความแปรปรวน โดยปริมาณคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต (Surface chloride concentration) ขึ้นอยู่กับลักษณะการพัดพาของกระแสลม และ ปริมาณฝนที่ตกก็มีผลชัดเจนต่อการชะเอาปริมาณคลอไรด์ที่ผิวให้ตกลงอย่างชัดเจน

#### 2.7.2) บริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash Zone)

บริเวณนี้เป็นบริเวณที่อยู่เหนือระดับน้ำขึ้นสูงสุด โดยคอนกรีตที่ก่อสร้างบริเวณนี้จะเปียกน้ำเมื่อสัมผัสกับคลื่นและละอองน้ำทะเล ซึ่งเมื่ออยู่ในสภาพแห้งในช่วงน้ำลงความเสียหายของคอนกรีตบริเวณนี้จะเกิดการกัดกร่อนของคลอไรด์ค่อนข้างรุนแรง เนื่องจากในสภาพที่คอนกรีตเปียกสลับแห้งทำให้คลอไรด์แทรกซึมเข้าสู่เหล็กเสริมได้เร็วขึ้น นอกจากนั้นบริเวณนี้ยังได้รับแรงกระแทกค่อนข้างแรง ส่งผลให้เกิดรอยปริแตกเล็กๆ ทำให้คลอไรด์ ความชื้นและออกซิเจน ซึมผ่านเข้าไปถึงเหล็กได้เร็วขึ้น โดยความเสียหายที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้จะเป็นผลเนื่องจากคลอไรด์เป็นหลัก ส่วนการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตจะมีน้อยมาก โดยพบว่าความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดขึ้นบริเวณนี้จะสูงกว่าบริเวณอื่น

#### 2.7.3) บริเวณที่สัมผัสกับน้ำทะเลในลักษณะเปียกและแห้งสลับกัน (Tidal Zone)

บริเวณที่สัมผัสกับน้ำทะเลในลักษณะเปียกและแห้งสลับกัน จะได้รับผลกระทบทั้งจากคลื่นกรวด ทราบ ที่กระแทก ตลอดจนผลกระทบจากการกัดกร่อนเนื่องจากกระบวนการทางเคมีทั้งคลอไรด์และซัลเฟต ซึ่งน้ำทะเลจะเข้าสู่เนื้อคอนกรีตที่แห้งโดยการซึมผ่าน (Absorption) จนคอนกรีตอยู่ในสภาพอืดัวและเมื่อสภาพแวดล้อมเปลี่ยนเป็นแห้งจะมีคราบเกลือที่ติดผิวคอนกรีต โดยเกลือของสารประกอบต่างๆ เมื่ออยู่ในสถานะของแข็งจะไม่เป็นอันตรายต่อโครงสร้างคอนกรีต แต่เมื่อกลับมาสภาพเปียกอีกครั้ง จะได้เป็นสารละลายคลอไรด์ซึ่งมีความเข้มข้นมากขึ้นและแพร่เข้าไปในเนื้อคอนกรีตมากขึ้น ซึ่งเมื่อน้ำลดคอนกรีตจะสัมผัสกับออกซิเจนและคลอไรด์ที่มีเข้มข้นอยู่แล้วในเนื้อคอนกรีตจะเร่งให้เกิดสนิมเหล็กมากขึ้น ความเสียหายที่เกิดขึ้นในสภาพแวดล้อมแบบนี้มีความรุนแรงมากขึ้นในกรณีในช่วงเวลาที่คอนกรีตแห้งนาน และนอกจากนั้นบริเวณนี้ยังได้รับผลกระทบจากการกัดกร่อนของซัลเฟต ฟิชและสิ่งมีชีวิต อีกด้วย

#### 2.7.4) บริเวณที่อยู่ใต้น้ำทะเล (Submerged Zone)

การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นจะมีความรุนแรงน้อยกว่าบริเวณอื่น เนื่องจากไม่ได้รับผลกระทบที่รุนแรงจากคลื่น และการซึมผ่านของออกซิเจนเข้าไปเพื่อเร่งการเกิดสนิมในเหล็กเสริมมีน้อยมาก ถึงแม้ความ

เข้มข้นของคลอไรด์จะมีสูงก็ตาม ถ้าไม่ได้สัมผัสกับออกซิเจนก็ไม่เกิดสนิมในเหล็กเสริม การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเป็นผลเนื่องจากซัลเฟตที่เกิดปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์โดยตรง

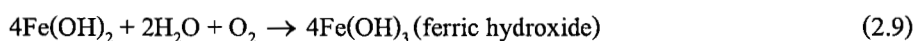
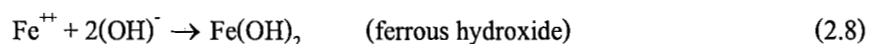
## 2.8 การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ (Broomfield, 1996 ; Neville, 1996 ; คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2543)

### 2.8.1 กลไกการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์

โดยทั่วไปแล้ว สารประกอบคลอไรด์จะไม่ส่งผลที่เป็นอันตรายกับเนื้อของคอนกรีตที่ไม่มีเหล็กเสริม ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการใช้น้ำที่มีปริมาณของคลอไรด์ผสมในคอนกรีตกลับส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดที่สูงขึ้น แต่การใช้งานของคอนกรีตในโครงสร้างทั่วไปจำเป็นต้องใช้เหล็กเสริมเข้าไปในคอนกรีตเพื่อรับแรงดึง ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตรับแรงดึงได้น้อยมาก และการที่ในคอนกรีตมีเหล็กเสริมนี้เองจึงส่งผลให้การทำลายเนื่องจากคลอไรด์ต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีความชัดเจนและรุนแรงมาก ทั้งนี้เนื่องจากการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์แตกต่างจากการกัดกร่อนทางเคมีอื่นตรงที่ คลอไรด์ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมและคอนกรีตบริเวณรอบๆ เหล็กเสริมเท่านั้นที่เสียหายเนื่องจากการขยายตัวของเหล็กเสริม ทำให้ดัดคอนกรีตให้เกิดการแตกร้าว ตลอดจนความสามารถในการรับแรงของเหล็กเสริมคอนกรีตต่ำลงและเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ทำลายองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดฟิล์มบางๆ ของ  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  เคลือบผิวเหล็กไว้ และฟิล์มนี้ทำหน้าที่ป้องกันการเกิดสนิมเหล็ก อย่างไรก็ตามอ็อกซิเจนของคลอไรด์สามารถทำลายฟิล์มนี้ได้ และเมื่อมีน้ำและก๊าซออกซิเจนตรงบริเวณเหล็กเสริมที่ไม่มีฟิล์มป้องกันอยู่ เหล็กจะเป็นสนิม

การเกิดสนิมในเหล็กเกิดจากความต่างศักย์ทางไฟฟ้าของเหล็กเสริมในคอนกรีต ทำให้เกิดเซลล์ไฟฟ้าเคมีขึ้น มีขั้วบวก (Anode) และขั้วลบ (Cathode) เชื่อมกันโดยน้ำซึ่งมีคลอไรด์ในโพรงของซีเมนต์ ทำหน้าที่เป็นสื่ออิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ประจุไฟฟ้าบวกเฟอร์รัสไอออน  $\text{Fe}^{++}$  ที่ขั้วบวกจะวิ่งไปสู่สื่ออิเล็กโทรไลต์ ขณะที่อิเล็กตรอนที่มีประจุไฟฟ้าลบ  $e^-$  วิ่งตามเหล็กเสริมไปที่ขั้วลบ อิเล็กตรอนเหล่านี้จะรวมกับน้ำและออกซิเจนทำให้เกิดไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) ซึ่งวิ่งผ่านสื่ออิเล็กโทรไลต์ไปรวมกับ  $\text{Fe}^{++}$  ทำให้เกิด  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  และทำปฏิกิริยาออกซิเดชันจนทำให้เกิดสนิม ปฏิกิริยาดังกล่าว แสดงดังสมการที่ 2.7 ถึง 2.10 (Broomfield, 1996)

Anodic reactions:



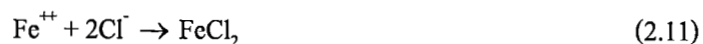
Cathodic reaction:



จากสมการข้างต้น เมื่อออกซิเจนถูกใช้จนหมดไป น้ำก็สามารถทำปฏิกิริยาขึ้นมาใหม่ได้ แต่จำเป็นต้องอาศัยกระบวนการเกิดที่ต่อเนื่อง ด้วยเหตุนี้จึงไม่เกิดการกัดกร่อนในคอนกรีตที่แห้งตลอดเวลา ซึ่งมีความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) ต่ำกว่าร้อยละ 60 หรือคอนกรีตที่จมอยู่ในน้ำทะเล ซึ่งไม่มีโอกาสได้สัมผัสกับอากาศ ถ้าความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมที่จะเกิดการกัดกร่อน อยู่ในช่วงร้อยละ 70 ถึง 80 ถ้าความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่านี้ จะทำให้ออกซิเจนแพร่เข้าไปในคอนกรีตได้น้อยลง

ความต่างศักย์ของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี สามารถเกิดขึ้น เมื่อคอนกรีตมีสภาพที่แตกต่างกัน เช่น ส่วนหนึ่งของคอนกรีตจมในน้ำทะเลตลอดเวลา แต่อีกส่วนหนึ่งต้องสัมผัสกับน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งเป็นระยะๆ ในบางกรณีความต่างของระยะหุ้มคอนกรีตส่งผลถึงการเชื่อมต่อของลวดไฟฟ้าเคมี มีผลทำให้เกิดความต่างศักย์ รวมไปถึงความแตกต่างของความเข้มข้นของเกลือของน้ำในโพรงคอนกรีตด้วย

สำหรับการกัดกร่อนในช่วงต้น ฟิล์มบางจะถูกเจาะ โดยคลอไรด์ไอออนจะกระตุ้นให้ผิวเหล็กเสริมกลายเป็นขี้ขาวก พื้นผิวด้านที่ไม่ถูกกระตุ้นก็จะมีสภาพเป็นขี้ขาว ดังสมการที่ 2.11 และ 2.12



เนื่องจาก คลอไรด์ไอออนเป็นเป็นตัวก่อให้เกิดปฏิกิริยาอีกครั้ง ดังนั้นสนิมเหล็กที่เกิดขึ้นจึงไม่มีคลอไรด์เป็นองค์ประกอบ แม้ว่าเฟอร์รัสคลอไรด์จะเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเกิดปฏิกิริยาเซลล์ไฟฟ้าเคมี มีความจำเป็นต้องใช้น้ำในโพรงของคอนกรีตเป็นตัวกลางเชื่อมระหว่างขี้ขาวกและขี้ขาว ระบบโพรงของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวในคอนกรีตเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการกัดกร่อน เนื่องจากเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะเกิดขึ้นได้ต้องอาศัยน้ำที่อยู่ในโพรงเป็นสื่ออิเล็กโทรไลต์

การกัดกร่อนที่เกิดขึ้น ทำให้เหล็กเสริมเกิดการขยายตัว ปริมาตรเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดรอยแตก (Cracking) การหลุดล่อน (Spalling) ไปจนถึงคอนกรีตกับเหล็กเสริมไม่มีแรงยึดเหนี่ยวต่อกัน

(Delamination) ในขณะที่เกิดการกัดกร่อนพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมที่ทำหน้าที่เป็นขั้วบวกจะมีขนาดเล็กลง เนื่องจากเกิดการสูญเสียประจุไฟฟ้า ทำให้เกิดรูขนาดเล็กบนเหล็กเสริม

ความต่างศักย์เกิดจากการที่คอนกรีตมีความแตกต่างกัน ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุ เช่น จากความแตกต่างของความชื้น ความแตกต่างของความเข้มข้นของเกลือของน้ำในโพรง ความแตกต่างของสภาพแวดล้อม และความแตกต่างของความหนาของคอนกรีตหุ้ม เป็นต้น เซลล์ไฟฟ้าในลักษณะนี้ของคอนกรีตเซลล์หนึ่งอาจยาว 10 มม. จนถึง 6 ม.

คอนกรีตอาจมีคลอไรด์เนื่องจากการใช้ส่วนผสมของวัสดุที่มีคลอไรด์ เช่น ใช้น้ำ ทราบ หิน, ปูนซีเมนต์ หรือสารเคมีผสมเพิ่มที่มีคลอไรด์ปนอยู่ ดังนั้นจึงต้องทำการตรวจสอบว่ามีปริมาณคลอไรด์อยู่ในปริมาณที่ไม่ทำให้เกิดอันตรายต่อคอนกรีต ว.ส.ท. ได้กำหนดปริมาณคลอไรด์ไอออนที่ละลายน้ำได้ในคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อป้องกันการเกิดสนิมต้องมีค่าไม่เกินพิคัดตามตารางที่ 2.1 โดยคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตอัดแรงจะกำหนดไว้ค่อนข้างต่ำคือไม่เกินร้อยละ 0.06 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตอัดแรงต้องใช้เหล็กเสริมที่มีกำลังสูง และการทำลายพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมเพียงเล็กน้อยก็ส่งผลต่อการรับแรงของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กค่อนข้างชัดเจน ดังนั้นจึงยอมให้ปริมาณคลอไรด์ที่เข้าไปสัมผัสค่อนข้างน้อย เพื่อลดความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมในเหล็กเสริม

ตารางที่ 2.1 ปริมาณสูงสุดของคลอไรด์ไอออนเพื่อป้องกันการเกิดสนิม (คณะกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2543)

ชนิดขององค์อาคาร	ปริมาณสูงสุดของคลอไรด์ไอออน (CI) ที่ละลายน้ำได้ในคอนกรีต (ร้อยละ โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์)
คอนกรีตอัดแรง	0.06
คอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสกับคลอไรด์ในขณะใช้งาน	0.06
คอนกรีตเสริมเหล็กในสถานะแห้งหรือที่มีการป้องกันความชื้นในขณะใช้งาน	1.00
งานก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอื่นๆ	0.06

#### 2.8.2 ปริมาณคลอไรด์ในปฏิภาคส่วนผสม

ปริมาณคลอไรด์ที่พบในคอนกรีต อาจมีสาเหตุมาจากการใช้มวลรวมที่ไม่สะอาด หรือคอนกรีตนั้นสัมผัสกับน้ำทะเล น้ำกร่อย หรือการใช้สารเคมีผสมเพิ่มที่มีคลอไรด์เป็นองค์ประกอบ จากสาเหตุข้างต้นทำให้ มาตรฐานการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กของประเทศต่างๆ อนุญาตให้มีปริมาณ

คลอไรด์ขึ้นต่ำไม่เกินค่าที่กำหนด เช่น BS 8110 Part 1 กำหนดปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride-ion) ในคอนกรีตเสริมเหล็กไม่เกินร้อยละ 0.40 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ สำหรับ ACI 318-89 ใช้ปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในน้ำ (Water-soluble Chloride ions) ที่ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 1218 เป็นตัวหลักในการพิจารณา โดยกำหนดให้ปริมาณคลอไรด์ไม่ควรเกินร้อยละ 0.15 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ โดยหลักใหญ่ใจความ คำทั้งสองนี้ ไม่มีความแตกต่างกัน เนื่องจาก ปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในน้ำเป็นส่วนหนึ่งของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด บางครั้งคลอไรด์ที่ละลายในน้ำ เรียกว่า คลอไรด์อิสระ (Free chloride) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดสามารถหาได้โดยวิธีทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในกรด (Acid-soluble chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C 1152

ส่วนผสมคอนกรีตที่สามารถพบคลอไรด์ เริ่มต้นจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่ามีปริมาณคลอไรด์น้อยมาก คือ น้อยกว่าร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนัก น้ำดื่มสามารถพบปริมาณคลอไรด์ 250 พีพีเอ็ม ในส่วนของมวลรวม BS 882 กำหนดค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดสูงสุด เพื่อให้สอดคล้องกับมาตรฐาน BS 5328 Part 1 และ BS 8110 Part 1 นั่นคือ ปริมาณคลอไรด์ของมวลรวมในคอนกรีตเสริมเหล็กไม่ควรเกินร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนักของมวลรวมทั้งหมด และไม่ควรเกินร้อยละ 0.03 เมื่อใช้ปูนซีเมนต์ประเภททนซัลเฟต สำหรับคอนกรีตอัดแรงอนุญาตให้มีปริมาณคลอไรด์ในมวลรวมไม่เกินร้อยละ 0.01 ปริมาณคลอไรด์ที่กำหนดขึ้นข้างต้น เป็นค่าที่ทำให้มั่นใจได้ว่า จะไม่ทำให้เกิดการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ เว้นแต่มีคลอไรด์ซึมเข้ามาเพิ่มเติมในคอนกรีต ขณะที่คอนกรีตนั้นใช้งานอยู่

### 2.8.3 การซึมผ่านของคลอไรด์

ปัญหาการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์สามารถเกิดขึ้นได้เสมอ เมื่อคลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้ามาในคอนกรีต โดยเฉพาะในกรณีที่คอนกรีตสัมผัสกับน้ำทะเล คลอไรด์ที่พบมีแหล่งที่มาจากน้ำทะเลนั่นเอง โดยคลอไรด์จะตกค้างบนผิวหน้าคอนกรีตในรูปของไอเกลือของน้ำทะเลที่มีขนาดเล็ก ซึ่งถูกพัดพามากับคลื่นและกระแสนลม หรืออาจอยู่ในรูปของละอองน้ำทะเล ซึ่งทำให้คอนกรีตมีสภาพเปื่อยขึ้นเนื่องจากละอองน้ำทะเล ไอของคลอไรด์สามารถพัดพาไปได้ไกลถึง 2 กิโลเมตร

อย่างไรก็ตาม คลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้ามาในคอนกรีตได้ โดยอาศัยน้ำเป็นตัวนำพา และเมื่อคลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้ามาในคอนกรีตอย่างต่อเนื่อง มีผลทำให้บริเวณผิวเหล็กเสริมเกิดการสะสมของคลอไรด์ไอออนในปริมาณที่สูง เมื่อคอนกรีตจมอยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา ก็ย่อมเกิดการซึมผ่านของคลอไรด์ แต่บริเวณใต้น้ำทะเลมีความเข้มข้นของออกซิเจนน้อยและอัตราการแพร่ของออกซิเจนเข้าไปในคอนกรีตต่ำมาก เนื่องจากช่องว่างภายในคอนกรีตเป็นช่องว่างที่อึดตัวด้วยน้ำ ทำให้ไม่มีออกซิเจนที่จะไปรวมตัวกับน้ำและอิเล็กตรอนที่ขั้วลบ สำหรับคอนกรีตที่อยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง ปริมาณคลอไรด์ที่พบในคอนกรีตจะสูงขึ้น ซึ่งพบมากกับ โครงสร้างที่ตั้งอยู่ตามชายฝั่ง ในสภาพภูมิอากาศร้อนชื้น



เมื่อคอนกรีตเริ่มสัมผัสกับน้ำทะเล คอนกรีตจะดูดซับน้ำทะเลจนกระทั่งคอนกรีตนั้นอิ่มตัวไปด้วยน้ำ และถ้าหากสภาพภายนอกคอนกรีตเปลี่ยนเป็นสภาพแห้ง ทิศทางการเคลื่อนที่ของน้ำจะเกิดการเคลื่อนที่ย้อนกลับ และระเหยออกจากคอนกรีต ทำให้เกลือตกค้างในช่องว่าง เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพเปียกอีกครั้ง ความเข้มข้นของเกลือบริเวณใกล้ผิวหน้าจะสูงขึ้น โดยเกลือที่มีความเข้มข้นสูงที่บริเวณผิวจะเกิดการถ่ายเทไปยังบริเวณภายในที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า เรียกการถ่ายเทชนิดนี้ว่า การแพร่ ซึ่งในแต่ละรอบของการเปียกและแห้ง ส่งผลให้เกลือยังสามารถแพร่เข้าไปในคอนกรีตและเข้าไปสู่บริเวณเหล็กเสริมมากขึ้น ความสามารถในการแพร่ของเกลือนั้น ขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกคอนกรีต และช่วงระยะเวลาที่คอนกรีตแห้งตัว

โดยทั่วไป คอนกรีตจะเปียกได้เร็ว แต่จะแห้งได้ช้ากว่ามาก ทำให้ภายในของคอนกรีตไม่สามารถแห้งโดยสมบูรณ์ ดังนั้นการแพร่ของไอออนของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลตลอดเวลา จึงเกิดขึ้นได้ช้ากว่าคอนกรีตที่อยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง

ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว สภาพเปียกสลับแห้งมีอิทธิพลโดยตรงต่อการซึมผ่านของคลอไรด์ รวมไปถึงการได้รับผลกระทบเนื่องจาก ทิศทางการพัดพาของน้ำทะเล กระแสลม อุณหภูมิ ความชื้น แสงอาทิตย์ และลักษณะการใช้งานของโครงสร้าง ซึ่งแต่ละส่วนของโครงสร้างก็ย่อมมีโอกาสสัมผัสกับสภาพเปียกสลับแห้งที่แตกต่างกัน ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องพิจารณาถึงสภาพแวดล้อมที่ก่อให้เกิดความเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อนของแต่ละส่วนของโครงสร้าง การที่คอนกรีตอยู่ในสภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียก เป็นการเร่งให้คลอไรด์สามารถซึมเข้าสู่คอนกรีตได้เร็วขึ้น ด้วยเหตุนี้ คอนกรีตบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal zone) จึงเกิดการกัดกร่อนของคลอไรด์น้อยกว่าบริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash zone) คอนกรีตที่สัมผัสน้ำทะเลเป็นบางครั้งบางครั้งมีความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนเนื่องจากน้ำทะเล เช่น คอนกรีตบริเวณหลักสำหรับผูกเชือก คอนกรีตบริเวณหัวคับเพลิงที่ใช้น้ำทะเล พื้นที่โรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้น้ำทะเลในการชักล้าง เป็นต้น

#### 2.8.4 ปริมาณคลอไรด์ที่กระตุ้นให้เหล็กเริ่มเกิดสนิม

กระบวนการการกัดกร่อนของเหล็กเสริม เริ่มต้นเมื่อมีปริมาณคลอไรด์เพียงเล็กน้อยที่ผิวเหล็ก แต่เป็นการยากที่จะกล่าวว่า ปริมาณหรือความเข้มข้นของคลอไรด์เท่าใด ที่จะกระตุ้นให้เหล็กเสริมเป็นสนิม เนื่องจากขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ซึ่งยังไม่สามารถอธิบายให้ชัดเจนได้ ยิ่งไปกว่านั้น การแพร่ของคลอไรด์เข้าไปยังซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว มีรูปแบบที่ไม่แน่นอน ภายในห้องปฏิบัติการ มีการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะการซึมผ่านของคลอไรด์ในรูปของรูปตัดตามยาว (Chloride profiles) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาวิธีป้องกันการเกิดสนิมอันเนื่องจากการซึมผ่านของคลอไรด์ ซึ่งจะใช้วิธีพิจารณาหาระยะหุ้มที่เหมาะสมสำหรับเหล็กเสริม

ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้พยายามที่จะศึกษาปริมาณคลอไรด์ที่ส่งผลให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเริ่มเป็นสนิม หรือที่เรียกว่า ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (Threshold chloride) ซึ่งพบว่าปริมาณคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตธรรมดามีค่าในช่วงร้อยละ 0.3-0.5 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินจะมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา และพบว่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.1-0.3 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (Glass and Buenfeld, 1997 ; Hui Yu et al., 2012) นอกจากนั้นในปริมาณคลอไรด์ที่เท่ากัน พบว่าคอนกรีตที่มีคลอไรด์ผสมอยู่ในปฏิภาคส่วนผสมตั้งแต่เริ่มต้น จะมีอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่มีคลอไรด์ผสมอยู่ในปฏิภาคส่วนผสมหลังจากคอนกรีตนั้นมีการใช้งานไปแล้ว

ในปริมาณคลอไรด์ที่เท่ากัน คอนกรีตที่มีคลอไรด์ผสมอยู่ในปฏิภาคส่วนผสมตั้งแต่เริ่มต้น จะเกิดอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมสูงกว่าคอนกรีตที่มีการซึมผ่านของคลอไรด์หลังจากคอนกรีตนั้นมีการใช้งานไปแล้ว ขณะที่เกิดกระบวนการซึมผ่านของคลอไรด์ ปริมาณคลอไรด์ที่สามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีต ขึ้นอยู่กับ ความสามารถในการต้านทานของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว, การเปลี่ยนแปลงความชื้น และปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้เป็นผลเนื่องจากลักษณะของการแช่คอนกรีต

ในกรณีทั่วไป ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดไม่ได้เป็นตัวบ่งชี้ถึงความรุนแรงของการกัดกร่อน แต่คลอไรด์ทั้งหมดสามารถจำแนกออกได้ 3 ส่วน คือ Chemically bound ซึ่งรวมอยู่ในผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยา ไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ อีกส่วนหนึ่ง คือ Physically bound ซึ่งติดอยู่ที่ผิวโพรงของเจล (Gel pores) และส่วนสุดท้าย เรียกว่า คลอไรด์อิสระ ซึ่งมีอิทธิพลต่อการเกิดสนิมของเหล็กอย่างสูง อย่างไรก็ตาม การกระจายตัวของคลอไรด์ไอออนทั้ง 3 ชนิด ไม่สามารถคงอยู่ได้ในสถานะเดิมตลอดเวลา แต่สามารถปรับเปลี่ยนเพื่อให้ไอออนทั้งหมดอยู่ในสภาวะสมดุล เช่น ตามปกติคลอไรด์อิสระจะพบตามน้ำที่อยู่ในช่องว่างของคอนกรีต ถ้าคลอไรด์อิสระมีปริมาณที่มากเกินไปจนความจำเป็น คลอไรด์อิสระนั้นจะกลายสภาพไปเป็นคลอไรด์ยึดจับ เพื่อให้ไอออนอื่นๆ อยู่ในสภาพสมดุล

#### 2.8.5 การดักจับคลอไรด์ไอออน

การดักจับคลอไรด์ไอออนอยู่ในรูปปฏิกิริยาเคมีกับ  $C_3A$  ก่อให้เกิดแคลเซียมคลอโรลูมินาต ( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ ) บางครั้งเรียกว่า เกลือของฟรีเดล (Friedel's salt) ในลักษณะเดียวกัน คลอไรด์ก็ถูกดักจับโดย  $C_4AF$  ผลที่ได้คือแคลเซียมคลอโรเฟอร์ไรต์ ( $3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ ) ดังนั้นจากปฏิกิริยาข้างต้นคลอไรด์ไอออนจะถูกดักจับเมื่อปูนซีเมนต์มีปริมาณ  $C_3A$  สูง หรือ ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณมาก ด้วยเหตุนี้ การใช้ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ  $C_3A$  สูง จะช่วยต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ได้ดี

ในขณะที่เดียวกัน การป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต มีความต้องการปริมาณ  $C_3A$  ต่ำ ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องพิจารณาถึงปริมาณ  $C_3A$  ในปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม เพื่อป้องกันความเสียหายจากซัลเฟต และเพื่อป้องกันอันตรายจากคลอไรด์ในน้ำทะเลควบคู่กันไป ขณะที่ปัจจุบัน ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ดัดแปลง (ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทสอง) ซึ่งสามารถทนซัลเฟตได้ปานกลาง และให้ความร้อนไม่สูงมากนัก เป็นอีกตัวเลือกในการนำไปใช้งาน บางครั้งการใช้ปูนซีเมนต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (Ground granulated blast furnace slag) ก็สามารถช่วยในการดักจับคลอไรด์ไอออน โดยอลูมิเนียมที่อยู่ในตะกรัน (Slag) ทำหน้าที่ในการดักจับ แต่งานวิจัยที่ศึกษาในเรื่องนี้ยังมีจำนวนน้อย การใช้ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ  $C_3A$  สูง มีข้อจำกัดตรงที่ เมื่อ  $C_3A$  มีปริมาณสูงย่อมทำให้เกิดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันสูง และทำปฏิกิริยากับซัลเฟตได้ง่าย พฤติกรรมดังกล่าวจึงกลายเป็นข้อด้อย และเป็นอันตรายต่อการก่อสร้าง โครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่ที่ต้องสัมผัสกับน้ำทะเล

เมื่อพิจารณา ความเข้มข้นคลอไรด์ในน้ำที่อยู่ในช่องว่างของคอนกรีต พบว่าที่สภาวะสมดุล ความเข้มข้นของคลอไรด์จะขึ้นอยู่กับไอออนอื่นๆที่กระจายตัวอยู่ในน้ำตามช่องว่าง เช่น ที่ค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดค่าหนึ่ง ถ้าไฮดรอกไซด์ไอออนมีความเข้มข้นสูง คลอไรด์อิสระก็จะมีค่าเข้มข้นสูงด้วย ด้วยเหตุนี้ในบางครั้ง อัตราส่วนระหว่าง  $Cl^-/OH^-$  อาจใช้ในการพิจารณาถึงความก้าวหน้าของการกัดกร่อน แต่ไม่ได้เป็นค่ามาตรฐานในการพิจารณาเรื่องดังกล่าว อีกทั้งมีการพบว่า ปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ในปฏิกิริยาส่วนผสม เกลือโซเดียมคลอไรด์ ( $NaCl$ ) จะมีปริมาณคลอไรด์อิสระสูงกว่า เกลือแคลเซียมคลอไรด์ ( $CaCl_2$ ) อย่างมีนัยสำคัญ นั่นหมายความว่า น้ำทะเลซึ่งมีเกลือโซเดียมคลอไรด์ละลายอยู่ จะเกิดกัดกร่อนของเหล็กเสริมอย่างแน่นอน เนื่องจากปัจจัยที่มีความหลากหลาย สัดส่วนของคลอไรด์ยึดจับจึงมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงร้อยละ 50 ถึง 80 หรืออาจต่ำกว่าร้อยละ 50 ของคลอไรด์ทั้งหมด ดังนั้น อาจจะไม่เป็นความจริงที่คลอไรด์ยึดจับที่อยู่ในคลอไรด์ทั้งหมดจะไม่ก่อให้เกิดการกัดกร่อน

## 2.9 การกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต (Neville, 1996 ; ปรินญา จินดาประเสริฐ, 2547 ; คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2543)

เกลือซัลเฟตมีอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติทั้งในดินและในน้ำใต้ดิน เช่น โซเดียมซัลเฟต ( $Na_2SO_4$ ), โพแทสเซียมซัลเฟต ( $K_2SO_4$ ), แมกนีเซียมซัลเฟต ( $MgSO_4$ ) และแคลเซียมซัลเฟต ( $CaSO_4$ ) ความรุนแรงของการทำลายของซัลเฟตต่อคอนกรีตขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของซัลเฟต และความชื้น ซึ่งสารซัลเฟตที่อยู่ในสถานะของแข็งจะไม่เป็นอันตรายต่อคอนกรีต และการทำลายของซัลเฟตจะไม่เกิดขึ้น เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้ง แต่มีความรุนแรงมากขึ้นเมื่อคอนกรีตเปียกชื้น และรุนแรงอย่างมากในกรณีที่มี

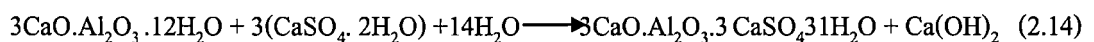
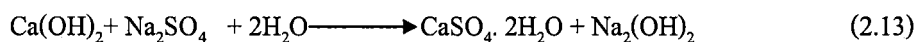
อยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง โดยสารละลายจะค่อยๆ ซึมเข้าไปภายในช่องว่างของเนื้อคอนกรีตและทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ ทำให้เกิดการขยายตัวและแตกร้าวจนไม่สามารถรับกำลังได้

### 2.9.1 กระบวนการกัดกร่อนของสารประกอบซัลเฟตต่อคอนกรีต

เกลือซัลเฟตที่พบในธรรมชาติและเป็นอันตรายต่อโครงสร้างคอนกรีตได้แก่ โซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) แมกนีเซียมซัลเฟต ( $\text{MgSO}_4$ ) และแคลเซียมซัลเฟต ( $\text{CaSO}_4$ ) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วคอนกรีตจะมีส่วนผสมของมวลรวมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แต่มวลรวมจะมีผลในการทำปฏิกิริยากับซัลเฟตน้อยมาก ดังนั้นจึงนำมาเสนอเฉพาะกระบวนการกัดกร่อนที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับซัลเฟตเท่านั้น โดยจะนำเสนอเฉพาะสารประกอบซัลเฟตที่ส่งผลกระทบต่อการทำลายคอนกรีต และพบมากในสภาพแวดล้อมทั่วไป เช่น ในสถานะแวดล้อมทะเล ในบริเวณดินเค็มเป็นต้น โดยในที่นี้จะกล่าวถึงกระบวนการกัดกร่อนเนื่องจาก โซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต ซึ่งพบมากในสภาพแวดล้อมทั่วไปและมีผลต่อการทำลายโครงสร้างคอนกรีตค่อนข้างรุนแรง ซึ่งโดยภาพรวมแล้วการทำลายเนื่องจากซัลเฟตต่อคอนกรีตจะเป็นไปในลักษณะที่ทำให้คอนกรีตขยายตัว แตกร้าวและสูญเสียกำลังรับแรงเชิงกล

#### 1) กระบวนการกัดกร่อนของโซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) ต่อคอนกรีต

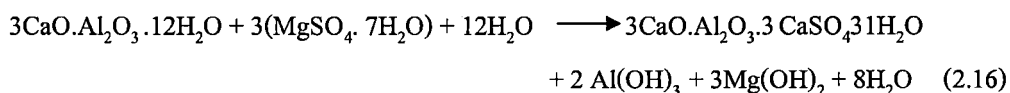
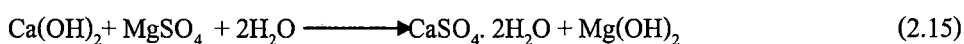
กระบวนการกัดกร่อนของสารประกอบซัลเฟตต่อคอนกรีตเริ่มต้นจากปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมซัลเฟตกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ได้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Na}_2(\text{OH})_2$ ) และแคลเซียมซัลเฟต ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) หรือ ยิปซัม ตามสมการที่ (2.13) โดยยิปซัมจะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องกับ C-A-H ซึ่งได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยปฏิกิริยาเกิดขึ้นดังสมการที่ (2.14) และบางส่วนอาจเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตที่ซัลเฟตไอออนหายไป หรืออาจเกิดปฏิกิริยากับ  $\text{C}_3\text{A}$  ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งทั้งหมดนี้ทำให้ได้แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ ) หรือ Ettringite



#### 2) กระบวนการกัดกร่อนของแมกนีเซียมซัลเฟต ( $\text{MgSO}_4$ ) ต่อคอนกรีต

ปฏิกิริยาระหว่างแมกนีเซียมซัลเฟตกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้ได้แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) และแคลเซียมซัลเฟตหรือ ยิปซัม ตามสมการที่ (2.15) จากนั้น ยิปซัมจะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องกับ C-A-H ดังที่ได้กล่าวมาแล้วตามสมการที่ (2.14) ได้ผลเป็นแคลเซียมซัลโฟลูมิเนต หรือ Ettringite นอกจากนี้แมกนีเซียมซัลเฟต ( $\text{MgSO}_4$ ) ยังทำปฏิกิริยากับ C-A-H ได้

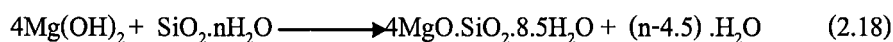
เป็น แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) ตามสมการที่ (2.16) อีกด้วย



นอกจากนี้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันยังทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมซัลเฟตได้เป็นยิปซัม แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และซิลิกาเจล ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) ตามสมการที่ (2.17)



ยิปซัมที่เกิดขึ้นนี้ยังไปทำปฏิกิริยากับ C-A-H ตามสมการที่ (2.16) อีกด้วยซึ่งผลที่ได้เป็น Ettringite เหมือนเดิม ส่วนซิลิกาเจล ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) ตามสมการที่ (2.17) ยังทำปฏิกิริยากับ แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ได้เป็น แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( $4\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 8.5\text{H}_2\text{O}$ ) ดังสมการที่ (2.18)



ยิปซัมและแคลเซียมซัลโฟลูมิเนตที่เกิดขึ้น มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าสารประกอบเดิม มีการขยายตัวทำให้มีปริมาตรมากขึ้น และเกิดแรงดันภายในคอนกรีตเป็นผลให้คอนกรีตแตกร้าวในที่สุด ส่วนซิลิกาเจลและแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต เป็นสารที่ไม่แข็งแรงเท่ากับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่สูญเสียไปทำให้กำลังของคอนกรีตลดลง การลดปริมาณของ  $\text{C}_3\text{A}$  ให้น้อยลงจะทำให้ปริมาณของแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตลดลง ส่งผลให้ปริมาณการเกิดยิปซัม แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต และแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตลดลงตามไปด้วย ทำให้การกัดกร่อนของซัลเฟตลดลง ดังนั้นการใช้ปูนซีเมนต์ที่มี  $\text{C}_3\text{A}$  ต่ำ จึงสามารถลดการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตได้

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของไทย มอก. 15 ได้กำหนดปริมาณ  $\text{C}_3\text{A}$  ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนทนซัลเฟตไว้ไม่เกินร้อยละ 5 ส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ไม่ได้กำหนดไว้ อย่างไรก็ตาม ACI 318 แนะนำว่าหากใช้ปูนซีเมนต์ที่มี  $\text{C}_3\text{A}$  มากถึงร้อยละ 10 ควรใช้ W/C ต่ำคือประมาณ 0.4 ซึ่งจะทำการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตลดลงและการกัดกร่อน

เนื่องจากสารละลายซัลเฟตก็จะลดลงด้วย ในกรณีที่มีความเข้มข้นของซัลเฟตสูง คือเมื่อมีซัลเฟตในดิน ร้อยละ 0.2 หรือมีซัลเฟตในน้ำ 1,500 ถึง 10,000 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ค่า W/C ที่ใช้ไม่ควรเกิน 0.45 และควรใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และในกรณีที่มีความเข้มข้นของซัลเฟตสูงมาก คือมีซัลเฟตในดินเกินร้อยละ 2.0 หรือมีซัลเฟตในน้ำเกินกว่า 10,000 ppm นอกจากคอนกรีตต้องมี W/C ไม่เกิน 0.45 แล้ว ยังต้องใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมกับวัสดุปอชโซลาน เช่น เถ้าถ่านหิน เป็นต้น ทั้งนี้ต้องตรวจสอบว่าวัสดุปอชโซลานสามารถเพิ่มความต้านทานซัลเฟตในสภาวะดังกล่าวได้

แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต หรือ Ettringite เป็นสารที่ไม่ละลายน้ำมีการขยายตัวทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวซึ่งโดยส่วนมากแล้วสารนี้เกิดจากสารตั้งต้นที่มีองค์ประกอบของอลูมิเนต ดังนั้นในการผลิตปูนซีเมนต์ต้านทานซัลเฟตจึงมีเหตุผลที่ต้องจำกัดปริมาณของ  $C_3A$  และ  $C_4AF$  ให้น้อย ซึ่งสารเหล่านี้ไม่ช่วยให้กำลังคอนกรีตเพิ่มมากนักดังที่กล่าวมาแล้ว

แคลเซียมซัลเฟตหรือ ยิปซัม เป็นผลจากปฏิกิริยาระหว่าง แคลเซียมไฮดรอกไซด์กับ แมกนีเซียมซัลเฟต โดยยิปซัมจะมีการขยายตัวมากกว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นสารตั้งเดิม ถึง 2.2 เท่า เป็นผลทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวและแตกร้าว นอกจากนั้นยังทำให้คอนกรีตสูญเสียความสามารถในการยึดเกาะระหว่างซีเมนต์เพสต์กับมวลรวม อันเนื่องมาจากเกลือที่เกิดขึ้นสามารถชะล้างออกไปได้ง่ายส่งผลให้เนื้อคอนกรีตหายไปและมวลรวมหลุดออกจากคอนกรีตได้ง่าย โดยในกระบวนการผลิตคอนกรีตสามารถลดปริมาณของยิปซัมลงได้โดยการเติมสารที่มีคุณสมบัติเป็นปอชโซลานเพื่อลด  $C_3S$  และ  $C_2S$  ซึ่งเป็นสารที่ก่อให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และจะเป็นแนวทางการศึกษาในงานวิจัยในครั้งนี้

แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรต เป็นสารประกอบที่เป็นผลจากปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาเจลกับ แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ โดยสารนี้มีลักษณะเป็นสีขาวและส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง

## 2.10 การป้องกันการกัดกร่อนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเล

การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก คุณสมบัติด้านกำลังอัดเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบ ปัจจุบันพบว่าความทนทานเป็นอีกปัจจัยที่มีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งเช่นกัน เนื่องจากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะสามารถรับกำลังได้ตามที่ออกแบบ จำเป็นต้องมีความทนทานด้วย หากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมน้อยจะส่งผลให้กำลังของโครงสร้างลดลงด้วย โดยเฉพาะโครงสร้างที่ต้องอยู่ในสภาวะแวดล้อมน้ำทะเล ซึ่งเกิดปัญหาการกัดกร่อนทั้งทางกายภาพและสารเคมี จึงจำเป็นต้องออกแบบให้โครงสร้างมีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมเหล่านี้ คุณสมบัติโดยทั่วไปของโครงสร้างคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเลควรทนทานต่อ

การกัดกร่อนจากคลอไรด์และซัลเฟตได้ดี ซึ่งหมายถึงการที่คลอไรด์และซัลเฟตสามารถแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตได้ยาก

ดังนั้นควรออกแบบคอนกรีตให้มีความหนาแน่นสูง มีคุณสมบัติการซึมผ่านน้ำผ่านคอนกรีตต่ำ ซึ่งหมายถึงออกแบบคอนกรีตให้มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ มีอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม ทำคอนกรีตให้แน่นและมีการบ่มคอนกรีตที่ดี ทำให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพดี มีความทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดีในระดับหนึ่ง ตามมาตรฐาน ACI 201.2R กำหนดให้คอนกรีตที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีคลอไรด์หรือซัลเฟตสูง มีค่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานอยู่ในช่วง 0.40 ถึง 0.45 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมไม่น้อยกว่า 50 ถึง 60 มม. และใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เพื่อลดความเสี่ยงของการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต (กรณีที่คอนกรีตดังกล่าวสัมผัสกับซัลเฟต)

การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แม้ว่า จะต้านทานการกัดกร่อนซัลเฟตได้ดี แต่การต้านทานการเป็นสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์ยังน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เนื่องจากมี  $C_3A$  น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ดังนั้นการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอสำหรับสภาวะที่มีการกัดกร่อนรุนแรงอย่างเช่นสภาวะแวดล้อมทะเล

การทำให้คอนกรีตมีความทนทานนั้นมีหลายวิธี เช่น การเคลือบผิวคอนกรีตด้วยโพลีเมอร์อีพ็อกซี โพลียูรีเทน เป็นต้น หรือการเคลือบผิวเหล็กเสริมด้วยอีพ็อกซีหรือสังกะสี ก็นับเป็นอีกวิธีที่ช่วยป้องกันการกัดกร่อนได้ดีแต่เป็นวิธีที่ยุ่งยากและมีค่าใช้จ่ายสูง การใช้วัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าถ่านหิน ในส่วนผสมคอนกรีตนับเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ โดยมีงานวิจัยจำนวนมากสนับสนุนว่าวัสดุปอซโซลานสามารถช่วยเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมีต่างๆ ได้ดี และยังช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายเนื่องจากวัสดุปอซโซลานส่วนใหญ่เป็นผลพลอยได้จากการผลิตและเป็นวัสดุเหลือทิ้ง

อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติแล้ว การป้องกันหรือเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟตและคลอไรด์อาจมีวิธีการอื่นๆ อีกหลายวิธี ซึ่งวิธีการเหล่านี้อาจใช้ร่วมกันได้เพื่อให้เกิดผลดีที่สุด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพิจารณาตามความเหมาะสม เช่น ความสำคัญของโครงสร้าง อายุและลักษณะการใช้งาน ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง การซ่อมแซมบำรุงรักษา เป็นต้น

## 2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาที่ผ่านมาพบว่า เถ้าแกลบเปลือกไม้ที่ผ่านการบดให้ละเอียด สามารถเพิ่มกำลังอัดให้คอนกรีตได้ค่อนข้างสูง โดย Sata et al., (2007) พบว่า การใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดให้ค่าแรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 2 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุ

ประสาน สามารถใช้เป็นคอนกรีตกำลังสูงได้ และโดย Sata et al., (2012) ยังพบว่า เถ้าแกลบเปลือกไม้ที่บดให้มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับขนาดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10-20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ถึงร้อยละ 110 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ศักยภาพทางเคมีของเถ้าแกลบเปลือกไม้ ให้ผลการศึกษาของสมบัติเชิงกลเป็นไปในทิศทางที่ดี ส่วนการศึกษาสมบัติด้านความคงทน บुरฉัตร และคณะ (2555) ได้ทำการศึกษาศสมบัติของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูน โดยใช้เถ้าแกลบบดและผงหินปูน 2 ชนิดที่มีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยเท่ากับ 29 12 และ 128 ไมโครเมตร ในอัตราส่วน 0 20 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มีค่าการไหลแผ่ร้อยละ  $110 \pm 5$  พบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบบดและผงหินปูนเพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ลดลงตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบบดผสมผงหินปูนที่เพิ่มขึ้น มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบและผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 40 มีการพัฒนากำลังอัดดีที่สุดและใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ปกติ ส่วนการทดสอบความทนทานต่อซัลเฟตพบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบบดและผงหินปูนเพิ่มมากขึ้นทำให้การสูญเสียกำลังอัดและการหดตัวแห้งมีค่าลดลง

การนำเถ้าแกลบหรือเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ไปใช้งานคอนกรีตยังไม่แพร่หลาย ทั้งนี้เพราะวัสดุปอชโซลานอื่น โดยเฉพาะเถ้าถ่านหินสามารถนำมาใช้ได้ง่ายกว่าโดยไม่ต้องบดให้ละเอียด ทำให้การวิจัยด้านเถ้าแกลบ-เปลือกไม้มีน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับกรวิจัยด้านเถ้าถ่านหิน นอกจากนี้ การศึกษาคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเล Chalee et al., (2013) ได้ศึกษาผลของเถ้าแกลบเปลือกไม้และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ต่อการแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี พบว่า การใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้นแต่ไม่เกินร้อยละ 35 ส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง แต่การแทนที่สูงถึงร้อยละ 50 กลับส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กมีแนวโน้มสูงขึ้น นอกจากนี้ วิเชียร และชัย (2554) ได้ศึกษาผลของเถ้าแกลบเปลือกไม้และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ต่อการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล พบว่า ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ในคอนกรีต อย่างไรก็ตาม การแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ปริมาณสูงในคอนกรีต (แทนที่ร้อยละ 50) กลับส่งผลให้การกักเก็บคลอไรด์



ในคอนกรีตมีค่าลดลง นอกจากนั้นพบว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลง ส่งผลให้ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดสูงขึ้น จากผลการศึกษาที่กล่าวมาข้างต้น แสดงให้เห็นว่าถ้าเคลือบเปลือกไม้ที่ผ่านการบดละเอียด มีศักยภาพในการป้องกันการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลต่อ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ได้เป็นอย่างดี ซึ่งการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายสถานะการกัดกร่อนในระยะยาว เป็นแนวทางการพัฒนาข้อมูลที่ได้จากภาคสนาม ให้ใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพและเป็นรูปธรรมมากขึ้น ในการศึกษาที่ผ่านมา มีงานวิจัยเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลายชิ้น แต่ส่วนใหญ่เป็นการสร้างแบบจำลองโดยใช้ฐานข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการเป็นหลัก ซึ่งส่งผลให้พฤติกรรมการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตสอดคล้องกับสถานะการใช้งานจริงค่อนข้างน้อย ส่วนการสร้างแบบจำลองที่ใช้ฐานข้อมูลในภาคสนามมีค่อนข้างน้อย โดย Chalee et al., (2009) ได้สร้างแบบจำลองเพื่อทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลในสถานะเปียกสลับแห้ง ซึ่งพบว่า แบบจำลองดังกล่าวสามารถใช้งานได้ดีในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินไม่เกินร้อยละ 50 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในช่วง 0.45 ถึง 0.65 โดยเปรียบเทียบผล การศึกษากับข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ที่เก็บในภาคสนามทั้งในประเทศและต่างประเทศ พบว่าแบบจำลองดังกล่าวมีความสอดคล้องกับข้อมูลที่เก็บในสนามในช่วงร้อยละ  $\pm 20$  ซึ่งถือว่าเป็นที่น่าพอใจสำหรับการสร้างแบบจำลองดังกล่าว นอกจากนั้นได้เปรียบเทียบแบบจำลองกับข้อมูลทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งพบว่า ข้อมูลที่ทำนายส่วนใหญ่มีแนวโน้มสูงกว่าที่ได้จากห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้เนื่องจากผลการศึกษาในห้องปฏิบัติการไม่ได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อมทางกายภาพ เช่น คลื่น กระแทก อุณหภูมิ การทำลายทางชีวภาพ เป็นต้น จึงส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตต่ำกว่าที่ได้จากการศึกษาในภาคสนาม การสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอชโซลานมีค่อนข้างน้อย โดยเฉพาะสร้างจากฐานข้อมูลในภาคสนามมีน้อยมาก ซึ่งส่วนใหญ่เป็นแบบจำลองที่ใช้ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน ส่วนคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอชโซลานชนิดอื่นยังไม่พบ ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านเปลือกไม้ ซึ่งเป็นวัสดุปอชโซลานอีกชนิดหนึ่งที่มีแนวโน้มในการป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากน้ำทะเลได้ดี เพื่อเป็นฐานข้อมูลในการส่งเสริมการใช้งานเถ้าถ่านเปลือกไม้ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งในงานคอนกรีตต่อไป

### บทที่ 3

#### วิธีการศึกษา

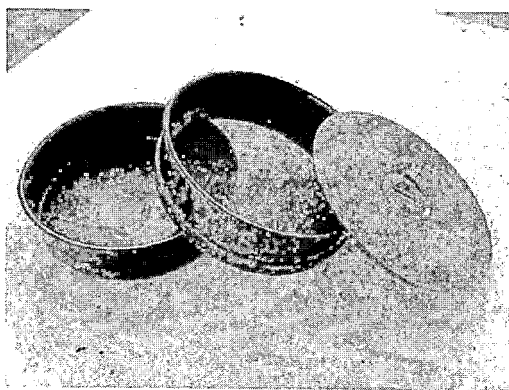
งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อในการทำนายปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (total chloride) ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ หลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล โดยใช้ฐานข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์จากน้ำทะเลที่ได้จากการทดสอบโดยแช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำทะเลที่อายุ 2, 3, 5, 7 ปี (ซึ่งมีฐานข้อมูลอยู่แล้ว) และจะเก็บตัวอย่างทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์เพิ่มเติมต่อเนื่องที่อายุ 9 ปี ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการแทรกซึมคลอไรด์ในระยะยาวในการศึกษาครั้งนี้ จะได้จากการแช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำทะเลนานถึง 9 ปี ฐานข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้จากตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียด (ข้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก) ไม่เกินร้อยละ 50 และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในช่วง 0.45 ถึง 0.65 โดยรายละเอียดการดำเนินงานวิจัยมีดังนี้

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

- |                         |  |
|-------------------------|--|
| 3.1.1 ปูนซีเมนต์        | ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งมีคุณสมบัติตรงตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม มอก.15-2532 |
| 3.1.2 เถ้าแกลบเปลือกไม้ | ใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ที่บดละเอียด โดยข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก         |
| 3.1.3 ทราย              | ใช้ทรายแม่น้ำร้อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4  |
| 3.1.4 หิน               | ใช้หินคละที่มีขนาดใหญ่สุด 19 มม.   |
| 3.1.5 น้ำ               | ใช้น้ำสะอาด การทดลองนี้ใช้น้ำประปา   |

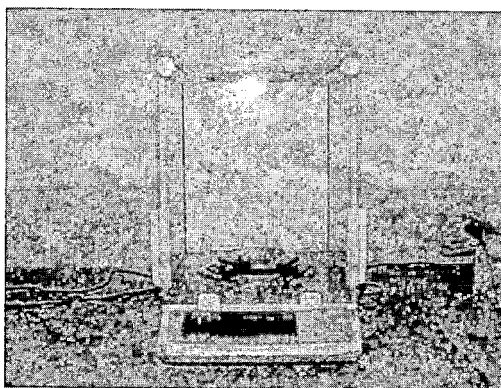
#### 3.2 อุปกรณ์การทดสอบและเครื่องมือ

- 3.2.1 ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 20 (รูปที่ 3.1)



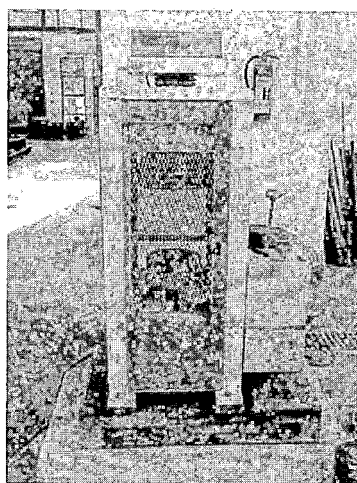
รูปที่ 3.1 ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 20

3.2.2 เครื่องชั่งอ่านละเอียด 0.0001 กรัม (รูปที่ 3.2)



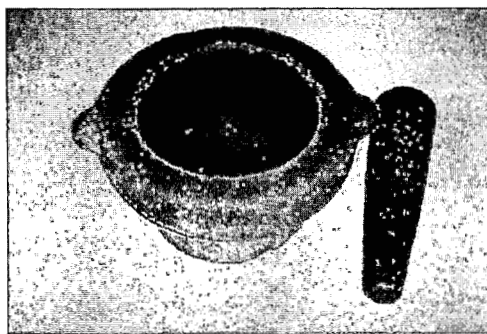
รูปที่ 3.2 เครื่องชั่งอ่านละเอียด 0.0001 กรัม

3.2.3 เครื่องทดสอบกำลังอัด (รูปที่ 3.3)



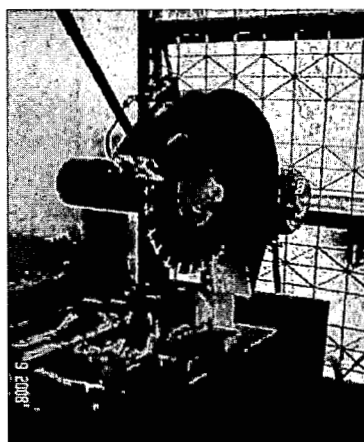
รูปที่ 3.3 เครื่องทดสอบกำลังอัด

### 3.2.4 อุปกรณ์บดคอนกรีต (รูปที่ 3.4)



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์บดคอนกรีต

### 3.2.5 เครื่องตัดคอนกรีต (รูปที่ 3.5)



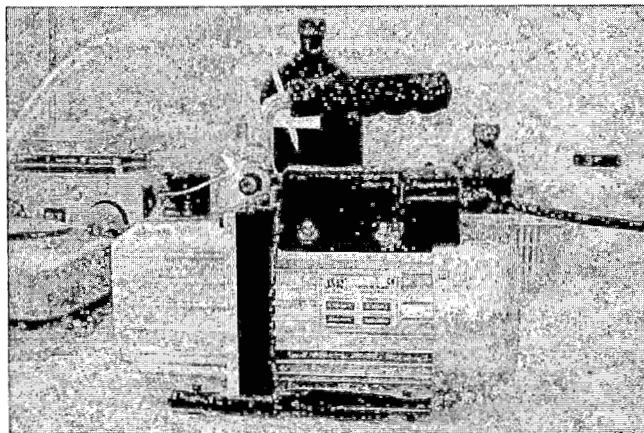
รูปที่ 3.5 เครื่องตัดคอนกรีต

### 3.2.6 เครื่องเจาะคอนกรีต (รูปที่ 3.6)



รูปที่ 3.6 เครื่องเจาะคอนกรีต

### 3.2.7 เครื่องดูดสูญญากาศ (รูปที่ 3.7)



รูปที่ 3.7 เครื่องดูดสูญญากาศ

### 3.2.8 เครื่องไทเทรตอัตโนมัติ (รูปที่ 3.8)



รูปที่ 3.8 เครื่องไทเทรตอัตโนมัติ

## 3.3 ตัวอย่างคอนกรีตที่ได้เตรียมเมื่อ 9 ปีที่แล้ว

### 3.3.1 ส่วนผสมคอนกรีต

การศึกษานี้ใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และ 0.65 ใช้เส้นแกลบเปลือกไม้ที่บดละเอียด โดยค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนักแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต

ส่วนผสม	ส่วนผสมคอนกรีต (กก./ม. <sup>3</sup> )				
	ปูนซีเมนต์ ประเภท 1	เถ้าแกลบ เปลือกไม้ (GRBA)	หิน	ทราย	น้ำ
I45	424	-	979	767	190
I45	295	-	1,039	814	192
I45GRBA15	360	64	957	767	190
I45GRBA 25	318	106	938	767	190
I45GRBA 25	276	148	925	767	190
I45GRBA 50	212	212	952	767	190
I65GRBA 15	251	64	1,023	814	192
I65GRBA 25	221	74	1,012	814	192
I65GRBA 15	192	103	1,000	814	192
I65GRBA 50	148	148	982	814	192

ความหมายของสัญลักษณ์ในแต่ละอัตราส่วนผสมมีความหมายดังนี้

- “ I ” หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุ  
ประสาน
- “GRBA” หมายถึง เถ้าแกลบเปลือกไม้
- “ 45 65 ” หมายถึง อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, และ 0.65 ตามลำดับ
- “15 25 35 50” หมายถึง คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบเปลือกไม้ใน  
อัตราส่วนร้อยละ 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน  
ตามลำดับ

ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์

- “ I45 ” หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีอัตราส่วนน้ำต่อ  
วัสดุประสานเท่ากับ 0.45
- “ I45GRBA15 ” หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้า  
แกลบเปลือกไม้ที่ผ่านการบดขนาดร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุ  
ประสานและมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

### 3.3.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

งานวิจัยนี้ใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.45 และ 0.65 ใช้เส้นแกลบ-เปลือกไม้ที่ผ่านการบดละเอียด จนมีน้ำหนักข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และควบคุมค่ายุบตัวให้อยู่ในช่วง 50-100 มม. โดยใช้สารลดน้ำพิเศษประเภทซัลโฟเนตเมลามีนฟอร์มดิไฮด์คอนเดนเซต ช่วยในการเพิ่มความสามารถเทได้ ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตตามส่วนผสมในตารางที่ 3.1 เป็นรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มม<sup>3</sup> หลังจากบ่มคอนกรีตจนอายุครบ 28 วัน นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่บริเวณชายฝั่งทะเลโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี โดยคอนกรีตสัมผัสกับน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งดังรูปที่ 3.9 คุณสมบัติของน้ำทะเลบริเวณที่นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ มีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) อยู่ในช่วง 7.9-8.2 และปริมาณคลอไรด์มีค่าอยู่ระหว่าง 16,000-19,000 มก./ล. ส่วนซัลเฟตระหว่าง 2,200-2,700 มก./ล. และมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 25 ถึง 35 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.9 ตัวอย่างคอนกรีตที่แช่บริเวณชายฝั่งทะเล จ.ชลบุรี

### 3.3.3 การทดสอบตัวอย่างคอนกรีต

การศึกษารั้งนี้ได้เก็บข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเส้นแกลบเปลือกไม้ที่อายุ 9 ปี เพื่อให้ได้ข้อมูลในการทำแบบจำลองที่ใช้ทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ได้สมบูรณ่มากขึ้น โดยได้ดำเนินการขนย้ายตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเส้นแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดที่อายุแช่น้ำทะเล 9 ปี จากทะเล ทำการเจาะ ตัดและบดตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบปริมาณคลอไรด์ โดยได้ทำการทดสอบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดโดยใช้กรดเป็นตัวทำลาย ดังรายละเอียดต่อไปนี้

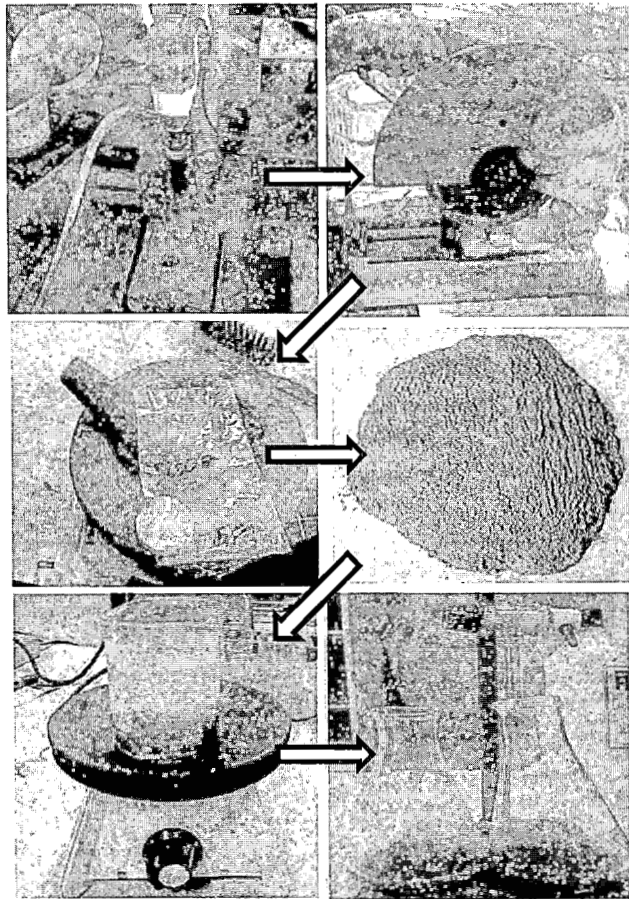
หลังจากแช่เมื่อแช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำทะเลครบ 9 ปี นำตัวอย่างทรงลูกบาศก์มาเจาะบริเวณกึ่งกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. และนำแท่งตัวอย่างที่เจาะมาตัดที่ระดับความลึกต่างๆ แล้วบดให้ละเอียดและนำผงตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ที่ความลึกต่างๆ มาทดสอบปริมาณคลอไรด์โดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย (Acid-soluble chloride) ตาม ASTM C 1152 เพื่อให้ได้ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (total chloride content)

การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในระบบโดยใช้กรดเป็นตัวทำละลายมีขั้นตอนดังนี้

- 1) นำตัวอย่างที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ไปชั่งน้ำหนักประมาณ 10 กรัม โดยชั่งละเอียด 0.01 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 2) เติมน้ำกลั่นปริมาณ 75 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์
- 3) เติมกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) เจือจาง (1:1) ปริมาณ 25 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์
- 4) ปิดบีกเกอร์ด้วยกระจกและคนให้เข้ากันประมาณ 1 – 2 นาที
- 5) นำไปต้มให้เดือดประมาณ 3 นาที แล้วทิ้งไว้จนกระทั่งเย็นตัว
- 6) นำไปกรองผ่านกระดาษกรองใช้กระดาษกรอง 2 แผ่น
- 7) บีบอัดตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร ไปใส่ในขวดทดลองรูปชมพู่
- 8) เติมสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต ( $\text{K}_2\text{CrO}_4$ ) 5% ลงไป 1 มิลลิลิตร และเติมสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ( $\text{NaHCO}_3$ ) 2% ลงไป 10 มิลลิลิตร แล้วนำไปไทเทรต
- 9) ทำการไทเทรตด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรด ( $\text{AgNO}_3$ ) จนเป็นสีส้ม
- 10) บันทึกปริมาตรของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรด ( $\text{AgNO}_3$ ) ที่ใช้ไป เพื่อนำไปคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ระดับความลึกต่างๆ
- 11) เตรียมการไทเทรตแบลนด์ โดยใช้สารละลายแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) 0.2 กรัม ใส่บีกเกอร์ แล้วเติมน้ำกลั่นเท่ากับปริมาณสุดท้ายในการไทเทรตตัวอย่าง แล้วเติมสารละลายโพแทสเซียมโครเมต ( $\text{K}_2\text{CrO}_4$ ) 5% ลงไป 1 มิลลิลิตร และเติมสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ( $\text{NaHCO}_3$ ) 2% ลงไป 10 มิลลิลิตร
- 12) ทำการไทเทรตด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรด ( $\text{AgNO}_3$ ) จนเป็นสีส้ม
- 13) บันทึกปริมาตรของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรด ( $\text{AgNO}_3$ ) ที่ใช้ไป เพื่อนำไปคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ในน้ำกลั่น

โดยรายละเอียดการทดสอบปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตและการเกิดสนิมเหล็กแสดงดังรูปที่





รูปที่ 3.10 การทดสอบปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 9 ปี

#### 3.4 สมบัติของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C150 และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียด (กำลังบดแรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก) มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.15 และขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 10.8 ไมครอน สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่บดละเอียด มีผลรวมของสารประกอบหลัก  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  เท่ากับร้อยละ 90.66 และ มีปริมาณของ  $\text{SiO}_2$  สูงถึงร้อยละ 87 ซึ่งส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่ทำให้คอนกรีตมีสมบัติเชิงกลและสมบัติด้านความคงทนที่ดี เถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดมีค่า LOI ร้อยละ 5.71 โดยองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานแสดงดังตารางที่ 3.2 มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.73 และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.62 ส่วนมวลรวมหยาบใช้หินขนาดใหญ่ที่สุดเท่ากับ 19 มม.

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (%)	วัสดุ	
	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ บดละเอียด (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	1.06	0.09
Loss on ignition	2.89	5.71

## บทที่ 4

### ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

#### 4.1 การสร้างแบบจำลอง

งานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อในการทำนายปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (total chloride) ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ หลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล โดยใช้ฐานข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์จากน้ำทะเลที่ได้จากการทดสอบโดยแช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำทะเลที่อายุ 2 3 5 7 และ 9 ปี ในการสร้างแบบจำลองใช้หลักการการวิเคราะห์เชิงถดถอยแบบพหุคูณ ในกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิคส์ (Fick's second law) ดังสมการที่ (4.1)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_c \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (4.1)$$

ในการหาสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ( $D_c$ ) ในคอนกรีตจากสมการที่ (4.1) เป็นที่ยอมรับกันว่าสามารถใช้ได้ดีกับข้อมูลการทดสอบในภาคสนามที่มีการแช่ตัวอย่างคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเล (Thomas and Matthews, 2004) และในการศึกษาที่ผ่านมา Chalee and Jaturapitakkul, (2009) พบว่า สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาที่ตัวอย่างคอนกรีตสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมที่มีคลอไรด์นานขึ้น ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตในระยะยาว จึงควรมีการแปรเปลี่ยนค่าที่  $D_c$  ในสมการที่ (4.1) ตามระยะเวลาที่นานขึ้น โดยการศึกษาที่ผ่านมาของ Mangat and Limbachiya, (1999) พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ( $D_c$ ) กับระยะเวลาที่คอนกรีตสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์เป็นไปตามสมการที่ (4.2)

$$D_c = (t)^{-\beta} \quad (4.2)$$

แทนค่า ( $D_c$ ) จากสมการที่ (4.2) ในสมการที่ (4.1) ได้ดังสมการที่ (4.3)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = t^{-\beta} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (4.3)$$

คำตอบทั่วไป (general solution) ของสมการที่ (4.3) เป็นไปตามสมการที่ (4.4)

$$C_{x,t} = C_o [1 - \operatorname{erf}(\frac{x}{2\sqrt{\frac{t^{(1-\beta)}}{(1-\beta)}}})] \quad (4.4)$$

สมการที่ (4.4) สามารถใช้หาปริมาณคลอไรด์ ( $C_{x,t}$ ) ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตที่ระยะจากผิวหน้าคอนกรีต  $x$  (มม.) และระยะเวลาที่แช่คอนกรีตในสิ่งแวดล้อมคลอไรด์  $t$  (วินาที) ซึ่งในการทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในระยะยาวได้เปลี่ยนหน่วยเวลา  $t$  จากวินาทีเป็น ปี เพื่อให้สามารถใช้งานได้ง่ายขึ้น เปลี่ยนหน่วยเวลาจากวินาทีเป็นปีในสมการที่ (4.4) ได้เป็นดังสมการที่ (4.5)

$$C_{x,t} = C_o [1 - \operatorname{erf}(\frac{x}{2\sqrt{\frac{(31536000t)^{(1-\beta)}}{(1-\beta)}}})] \quad (4.5)$$

เมื่อ

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

$t$  = ระยะเวลาแช่ (ปี)

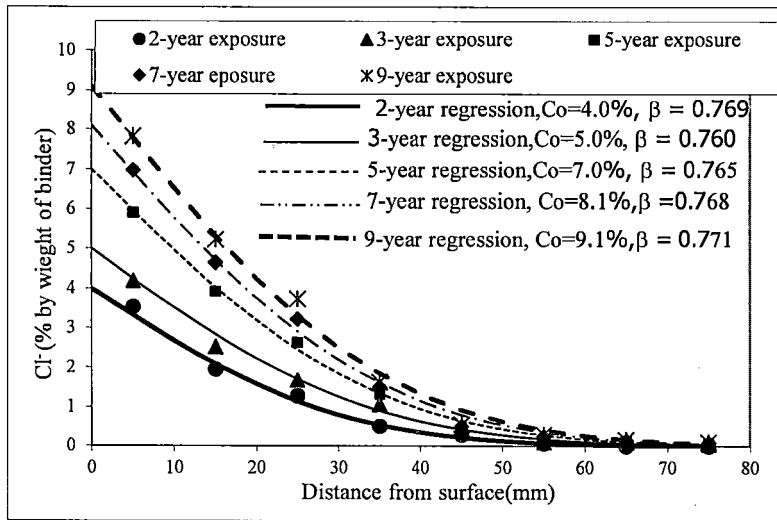
$x$  = ระยะจากผิวหน้าคอนกรีต (มม.)

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

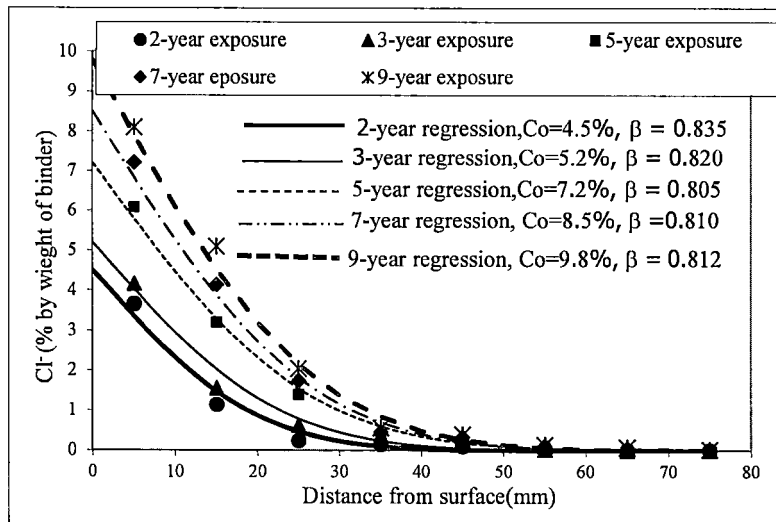
$\beta$  = ค่าสัมประสิทธิ์

$\operatorname{erf}$  = ฟังก์ชันค่าผิดพลาด (Error function)

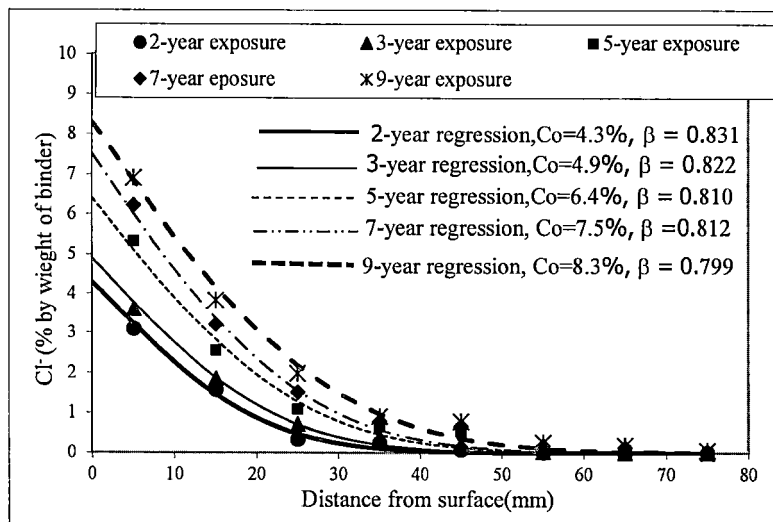
การหาปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตตามสมการที่ (4.5) จำเป็นต้องทราบค่าสัมประสิทธิ์  $\beta$  และ ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต ( $C_o$ ) ซึ่งในการสร้างแบบจำลองครั้งนี้ ได้ใช้หลักการวิเคราะห์เชิงถดถอยของสมการที่ (4.5) ในข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ได้จากการแช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำทะเลระยะเวลา 9 ปี ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.1 ที่แสดงการหาค่า  $\beta$  และ  $C_o$  โดยใช้หลักการวิเคราะห์เชิงถดถอยที่ปรับค่า  $\beta$  และ  $C_o$  ในสมการที่ (4.5) ให้กราฟสอดคล้องกับข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 และผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ร้อยละ 0 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ดังรูปที่ 4.1(ก), 4.1(ข) 4.1(ค) 4.1(ง) และ 4.1(จ) ตามลำดับ ซึ่งในส่วนผสมคอนกรีตอื่นๆก็หาได้ในลักษณะเดียวกัน ซึ่งรูปที่ 4.2 แสดง การหาค่า  $\beta$  และ  $C_o$  ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 โดยให้ค่า  $\beta$  และ  $C_o$  แสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ



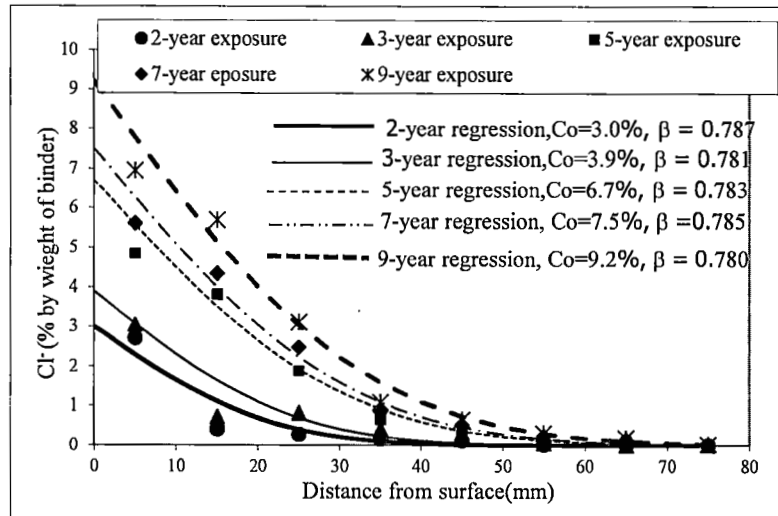
(ก) คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



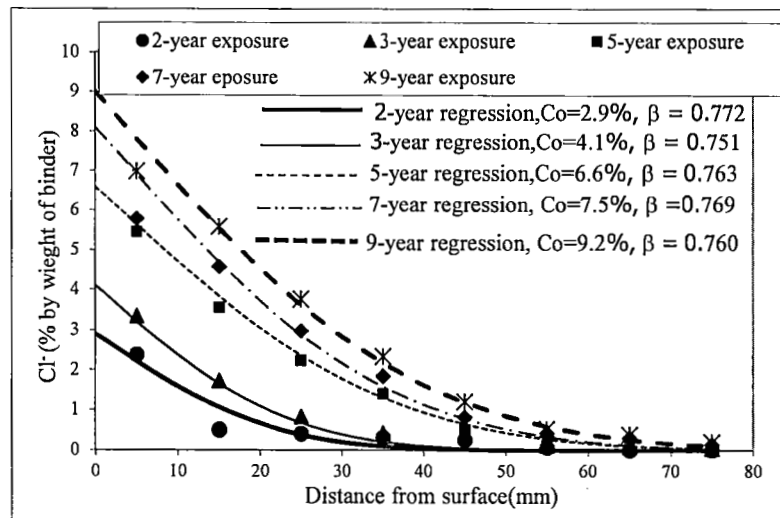
(ข) คอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน



(ค) คอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

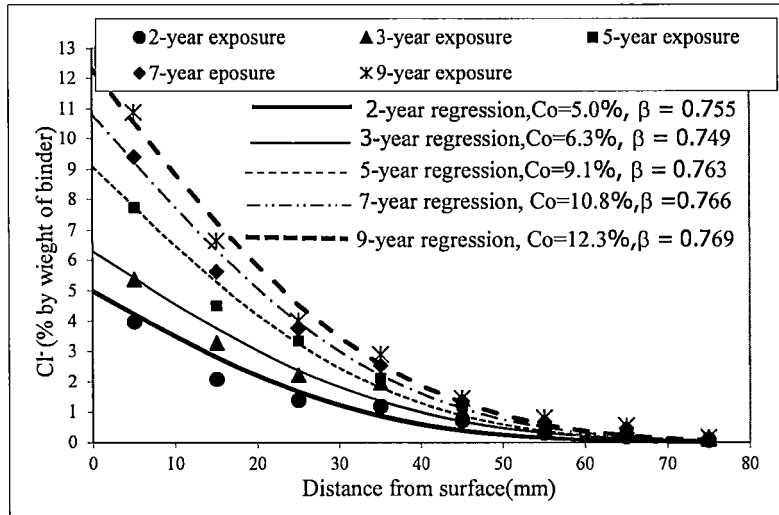


(ง) คอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

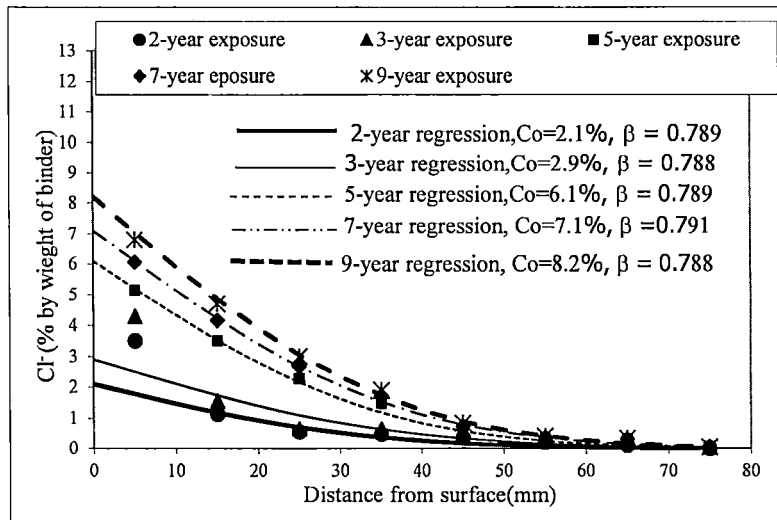


(จ) คอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

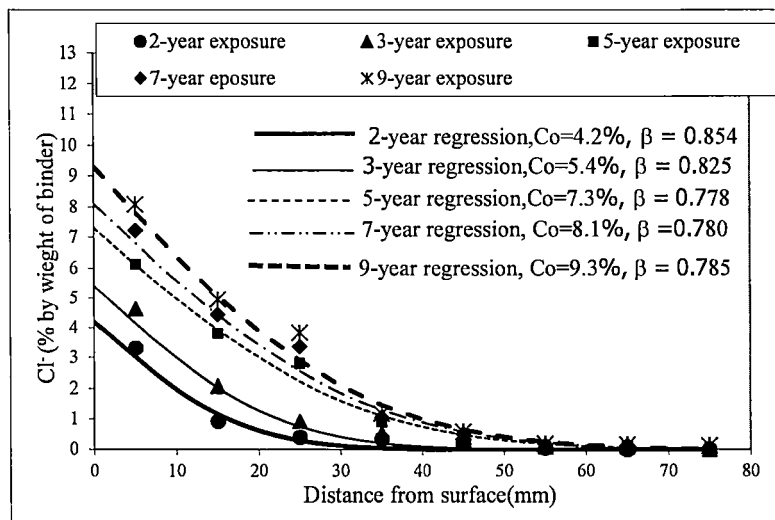
รูปที่ 4.1 การหาค่า  $\beta$  และ  $C_0$  ในข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่มี  $W/B = 0.45$  และผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ร้อยละ 0 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน



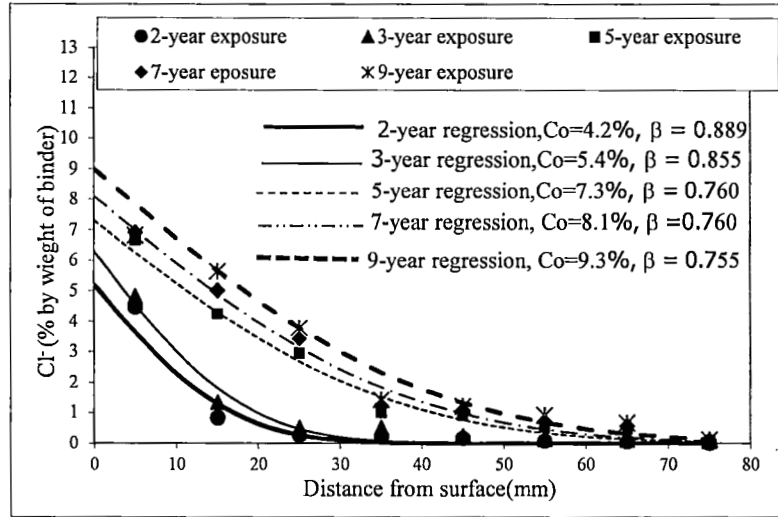
(ก) คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



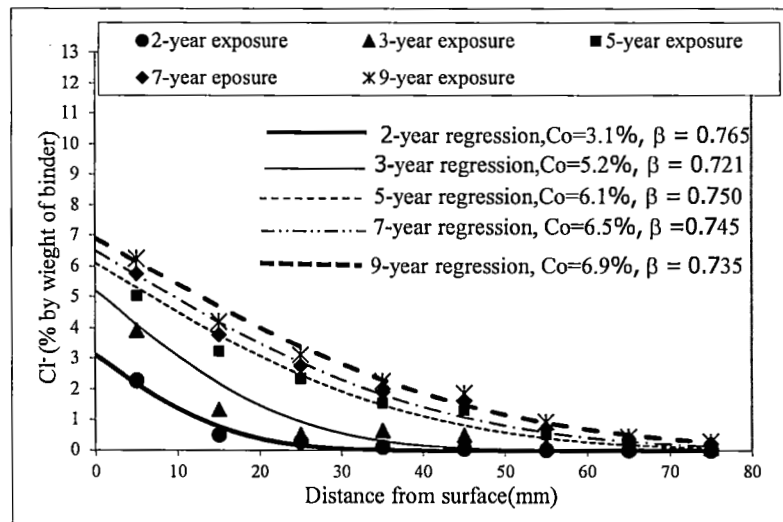
(ข) คอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน



(ค) คอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน



(ง) คอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน



(จ) คอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

รูปที่ 4.2 การหาค่า  $\beta$  และ  $C_0$  ในข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่มี W/B = 0.65 และผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ร้อยละ 0 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน



ตารางที่ 4.1 สัมประสิทธิ์  $\beta$ 

ส่วนผสม	สัมประสิทธิ์ $\beta$					เฉลี่ย $\beta$
	แช่น้ำทะเล 2 ปี	แช่น้ำทะเล 3 ปี	แช่น้ำทะเล 3 ปี	แช่น้ำทะเล 3 ปี	แช่น้ำทะเล 9 ปี	
I45	0.769	0.769	0.765	0.769	0.771	0.767
I45GRBA15	0.835	0.820	0.805	0.81	0.812	0.820
I45GRBA25	0.831	0.822	0.810	0.822	0.799	0.815
I45GRBA35	0.787	0.787	0.787	0.785	0.780	0.783
I45GRBA 50	0.771	0.751	0.765	0.769	0.780	0.763
I65	0.755	0.749	0.763	0.766	0.769	0.760
I45GRBA35	0.787	0.785	0.799	0.785	0.780	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	0.769	0.721	0.750	0.735	0.735	0.743

ตารางที่ 4.2 ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต

ส่วนผสม	ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต, $C_s$ (% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน)					เฉลี่ย $C_s$				
	แช่น้ำ ทะเล 2 ปี	แช่น้ำ ทะเล 2 ปี	แช่น้ำ ทะเล 5 ปี	แช่น้ำ ทะเล 7 ปี	แช่น้ำ ทะเล 2 ปี	แช่น้ำ ทะเล 2 ปี	แช่น้ำ ทะเล 3 ปี	แช่น้ำ ทะเล 2 ปี	แช่น้ำ ทะเล 7 ปี	แช่น้ำ ทะเล 7 ปี
	I45	4.0	5.0	7.0	8.1	9.1	3.7	3.7	3.7	3.7
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	3.7	3.7	3.7	3.7	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  $\beta$  ตามตารางที่ 4.1 พบว่าไม่มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาที่ชัดเจน แต่มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงตามปริมาณการแทนที่เก่าแลกเปลี่ยนเปลือกไม้และ W/B ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงได้ใช้ค่าเฉลี่ยของ  $\beta$  ในการทำการวิเคราะห์เชิงถดถอยแบบพหุคูณเทียบกับปริมาณการแทนที่เก่าแลกเปลี่ยนเปลือกไม้บดละเอียด (GRBA) กับ W/B การวิเคราะห์เชิงถดถอยในความสัมพันธ์ระหว่าง  $\beta$  กับ ปริมาณการแทนที่เก่าแลกเปลี่ยนเปลือกไม้บดละเอียด (GRBA) ได้ความสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการโพลิโนเมียลดีกรีสอง ดังสมการที่ (4.6)

$$\beta = \alpha_1 (GRBA)^2 + \alpha_2 (GRBA) + \alpha_3 \quad (4.6)$$

การวิเคราะห์เชิงถดถอยในความสัมพันธ์ระหว่าง  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  และ  $\alpha_3$  กับ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงดังสมการที่ (7) ถึง (9) ตามลำดับ

$$\alpha_1 = -7 \times 10^{-5} \quad (4.7)$$

$$\alpha_2 = -0.0005(W/B) + 0.0031 \quad (4.8)$$

$$\alpha_3 = -0.0605(W/B) + 0.7990 \quad (4.9)$$

เมื่อแทนค่า  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  และ  $\alpha_3$  ในสมการที่ (4.6) คำนวณค่า  $\beta$  ในรูปของปริมาณการแทนที่เก่าแลกเปลี่ยนเปลือกไม้บดละเอียดและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานดังสมการที่ (4.10)

$$\beta = (-7 \times 10^{-5})(GRBA)^2 + [(-0.0005)(W/B) + 0.0031] (GRBA) + (-0.0605)(W/B) + 0.7990 \quad 4.10$$

เมื่อ  $\beta$  = ค่าสัมประสิทธิ์

GRBA = ร้อยละการแทนที่เก่าแลกเปลี่ยนเปลือกไม้บดละเอียดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

W/B = อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

พิจารณาค่า  $C_0$  ตามตารางที่ 4.2 พบว่า ไม่มีความสัมพันธ์กับปริมาณของเก่าแลกเปลี่ยนเปลือกไม้ที่ชัดเจน แต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่แช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำทะเล ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงได้ใช้ค่าเฉลี่ยของ  $C_0$  ในการทำการวิเคราะห์เชิงถดถอยกับระยะเวลาแช่

คอนกรีตในน้ำทะเล โดยการวิเคราะห์เชิงถดถอยในความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_0$  กับระยะเวลาแช่ (t) ได้ความสัมพันธ์ในรูปแบบของฟังก์ชันลอการิทึม ดังสมการที่ (4.11)

$$C_0 = \gamma_1 \ln(t) + \gamma_2 \quad (4.11)$$

การวิเคราะห์เชิงถดถอยในความสัมพันธ์ระหว่าง  $\gamma_1$ , และ  $\gamma_2$  กับ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ได้ความสัมพันธ์เชิงเส้นดังสมการที่ (4.12) และ (4.13) ตามลำดับ

$$\gamma_1 = -0.501(W/B) + 3.4752 \quad (4.12)$$

$$\gamma_2 = 2.436(W/B) + 0.4895 \quad (4.13)$$

แทนค่า  $\gamma_1$ , และ  $\gamma_2$  ในสมการที่ (4.11) คำนวณหา  $C_0$  ได้ดังสมการที่ (4.14)

$$C_0 = [(-0.501)(W/B) + 3.4752] \ln(t) + (2.436)(W/B) + 0.4895 \quad (4.14)$$

เมื่อ  $C_0$  = ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต (ร้อยละโดยน้ำหนักวัสดุประสาน) (ที่  $x=0$ ) ที่ระยะเวลาแช่ t

W/B = อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

แบบจำลองนี้สามารถใช้ทำนายปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (total chloride) ที่ตำแหน่งใดๆ จากผิวหน้าคอนกรีตและระยะเวลาแช่น้ำทะเลตั้งแต่ 2 ปี ขึ้นไป ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดไม่เกินร้อยละ 50 และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในช่วง 0.45 ถึง 0.65 อย่างไรก็ตามแบบจำลองนี้สามารถใช้ได้กับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีรอยแตกและมีลักษณะการซึมผ่านของคลอไรด์ในทิศทางเดียวเท่านั้น เนื่องจากข้อมูลของปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตหาได้จากตัวอย่างที่เจาะตรงตำแหน่งกึ่งกลางของคอนกรีตลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มม.<sup>3</sup> ซึ่งสมมุติให้เป็นการซึมผ่านในทิศทางเดียวจากพื้นผิวของทรงลูกบาศก์ลงไปในแนวตั้งของตัวอย่างคอนกรีต โดยโครงสร้างที่เหมาะสมในการใช้แบบจำลองนี้ได้แก่ พื้น ฐานราก หรือ โครงสร้างอื่นๆที่มีลักษณะการซึมเข้าของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตในลักษณะทิศทางเดียว

#### 4.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

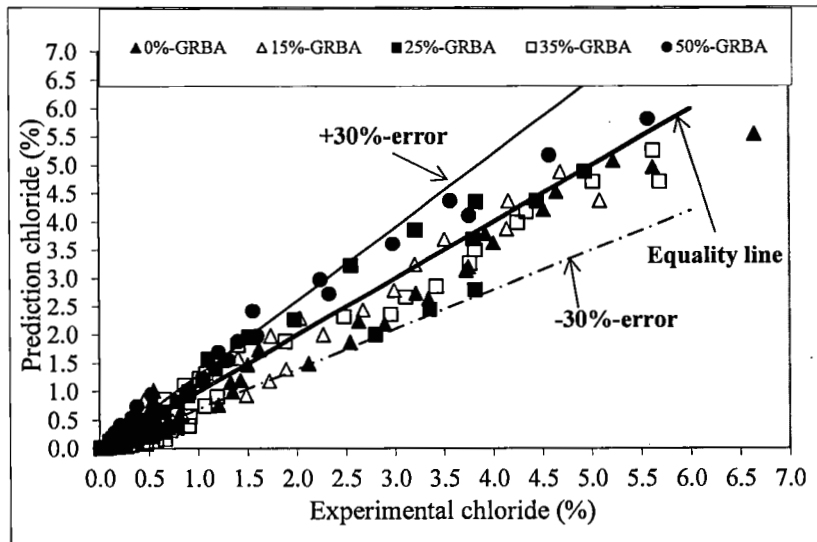
การเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียด ที่ได้จากแบบจำลอง กับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 และ 9 ปี โดยเปรียบเทียบในคอนกรีต

ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.45 และ 0.65 ปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ บดละเอียดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุ ประสาน และใช้ปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึกจากผิวหน้าคอนกรีตเท่ากับ 15, 25, 35, 45, 55, 65 และ 75 มม. ดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยเส้นทึบแสดงค่าคลาดเคลื่อนร้อยละ +30 จากผลการทดลองจริง ส่วนเส้นประแสดงค่าคลาดเคลื่อนร้อยละ -30

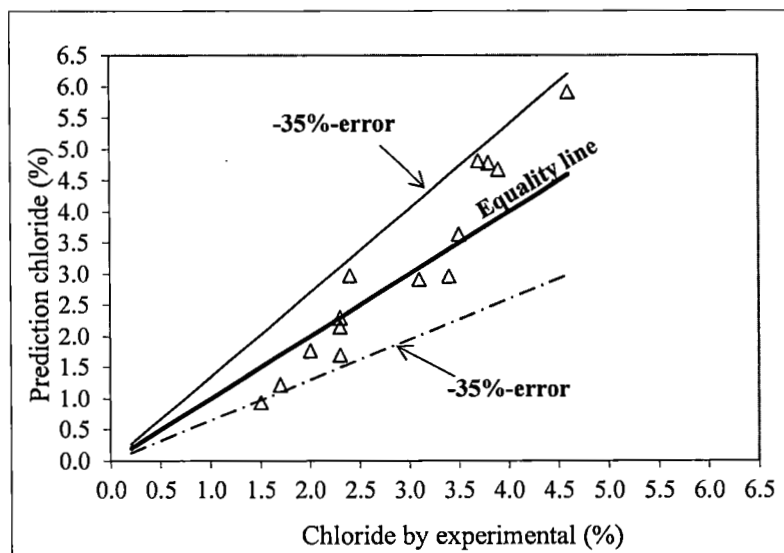
ผลการเปรียบเทียบพบว่าข้อมูลส่วนใหญ่อยู่ในช่วงร้อยละ  $\pm 30$  โดยคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน อย่างไรก็ตามการเปรียบเทียบข้อมูลดังกล่าวเป็นเพียงการทดสอบกระบวนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ว่าสามารถทำนายได้สอดคล้องกับข้อมูลที่ใช้เป็นฐานในการสร้างแบบจำลอง ซึ่งควรมีการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทำนายปริมาณคลอไรด์โดยแบบจำลอง กับข้อมูลการแทรกซึมคลอไรด์ ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล ของนักวิจัยท่านอื่นๆ ด้วย อย่างไรก็ตาม ด้วยข้อจำกัดงานวิจัยที่ผ่านมา ไม่พบข้อมูลการศึกษาความคงทนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมทะเล ตลอดจนข้อมูลที่ทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในห้องปฏิบัติการค่อนข้างน้อยและมีอายุการแช่ไม่นาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เปรียบเทียบผลการทำนายกับข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ ในคอนกรีตธรรมดาเท่านั้น

รูปที่ 4.4 ได้เปรียบเทียบผลการทำนายปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดา ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.51 กับข้อมูลงานวิจัยของ Thomas and Matthews, (2004) ที่เก็บข้อมูลในสภาวะแวดล้อมทะเลจริงที่อายุแช่น้ำทะเล 2, 4 และ 10 ปี ผลปรากฏว่าข้อมูลส่วนใหญ่อยู่ในช่วงของค่าคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ  $\pm 35$  จากข้อมูลที่เก็บโดย Thomas ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากข้อมูลที่เก็บโดย Thomas เป็นสภาพน้ำทะเลที่เก็บในเขตหนาวที่ประเทศอังกฤษ ซึ่งแตกต่างจากข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองครั้งนี้ ที่เก็บจากสภาพน้ำทะเลของอ่าวไทยซึ่งเป็นเขตร้อนชื้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการทำนายปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลของ Chalee et al., (2013) ที่แช่คอนกรีตธรรมดา ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45, 0.55 และ 0.65 ในสิ่งแวดล้อมทะเลอ่าวไทยเป็นเวลา 7 ปี ดังรูปที่ 4.5 พบว่า ข้อมูลส่วนใหญ่อยู่ในช่วงของค่าคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ  $\pm 25$  ซึ่งต่ำกว่าค่าคลาดเคลื่อนที่ได้จากการศึกษาของ Thomas ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า สิ่งแวดล้อมทะเลที่แตกต่างกัน มีผลต่อการทำนายปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตของแบบจำลองนี้ โดยแบบจำลองสามารถทำนายปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมทะเลในเขตร้อนชื้นได้ดีกว่าเขตหนาว ทั้งนี้เนื่องจากข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองได้จากการแช่ตัวอย่างคอนกรีตใน

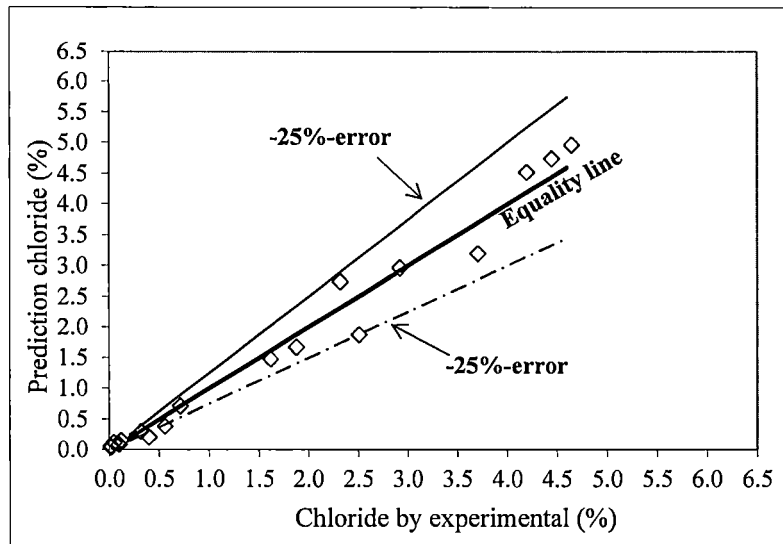
น้ำทะเลบริเวณเขตร้อนชื้น อย่างไรก็ตามการทำนายปริมาณคลอไรด์โดยใช้แบบจำลองนี้ในสภาพแวดล้อมทะเลทั้ง 2 แห่งให้ผลไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งสามารถยอมรับในการใช้งานได้



รูปที่ 4.3 ผลการทำนายปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลที่ได้จากการแช่คอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 7 และ 9 ปี



รูปที่ 4.4 ผลการทำนายปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลของ Thomas and Matthews, (2004) ที่แช่คอนกรีตธรรมดา ในน้ำทะเลประเทศอังกฤษเป็นเวลา 2 4 และ 10 ปี

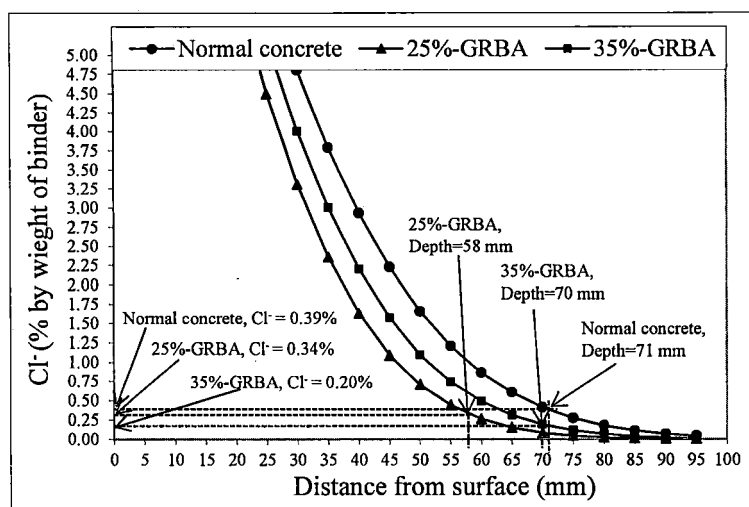


รูปที่ 4.5 ผลการทำนายปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลของ Chalee et al., (2013) ที่เขาคอนกรีตธรรมดาในน้ำทะเลอ่าวไทยเป็นเวลา 7 ปี

#### 4.3 การประยุกต์ใช้แบบจำลอง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้สามารถทำนายปริมาณของคลอไรด์ทั้งหมดที่แทรกซึมเข้าในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียด ภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่งได้ โดยข้อมูลดังกล่าวมีประโยชน์ในการกำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเพื่อให้สอดคล้องกับอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเล ในช่วงเวลาก่อนการกัดกร่อนเริ่มต้น (initial corrosion) ตัวอย่างการใช้งานของแบบจำลองดังรูปที่ 4.6 ได้แสดงการกำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเพื่อป้องกันการกัดกร่อนเริ่มต้น จากข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ได้จากแบบจำลองในคอนกรีตธรรมดา คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดร้อยละ 25 และ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่มี W/B=0.45 และแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 40 ปี จากงานวิจัยที่ผ่านมา (วิเชียร ชาติ, 2556) พบว่าคอนกรีตธรรมดา คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดร้อยละ 25 และ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่มี W/B=0.45 มีปริมาณคลอไรด์วิกฤติ เท่ากับร้อยละ 0.39 0.34 และ 0.20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ โดยปริมาณคลอไรด์วิกฤติดังกล่าว มีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน (วิเชียร ชาติ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2554) ที่อัตราส่วนการแทนที่เดียวกันเล็กน้อย จากปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ดังกล่าว สามารถใช้กำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเพื่อป้องกันการกัดกร่อนเริ่มต้นในคอนกรีตกลุ่มนี้ หลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่งเป็นเวลา 40 ปี ได้เท่ากับ 71 58 และ 70 มม. ตามลำดับ ข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์เนื่องจากน้ำทะเล เข้าไปในคอนกรีตในระยะยาว ยังสามารถใช้ทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ตลอดจน

เป็นข้อมูลประกอบการเลือกส่วนผสมคอนกรีต ที่ต้องการก่อสร้างในสิ่งแวดล้อมทะเลให้สามารถใช้งานได้ตามอายุการใช้งานที่ต้องการได้ อย่างไรก็ดีตามแบบจำลองนี้ได้สร้างจากฐานข้อมูลที่แช่ตัวอย่างคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเล ที่ไม่อยู่ในสภาวะการรับแรงเชิงกล ดังนั้นผลที่ได้จากการทำนาย เมื่อเทียบกับการใช้งานจริง ที่อยู่ภายใต้การรับแรงของ โครงสร้างอาจแตกต่างกันได้

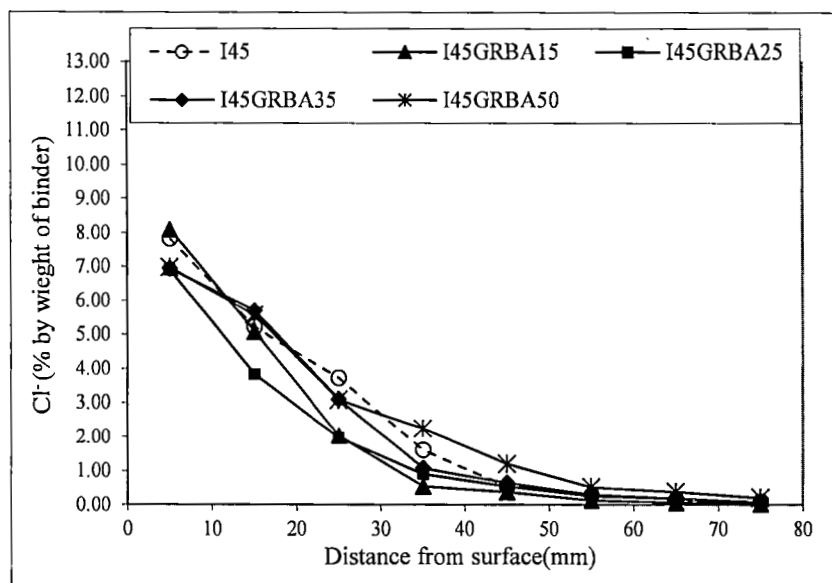


รูปที่ 4.6 การกำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเพื่อป้องกันการกัดกร่อนเริ่มต้น จากผลการทำนายปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียด ที่มี W/B=0.45 และแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 40 ปี

#### 4.4 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้หลังแช่น้ำทะเล 9 ปี

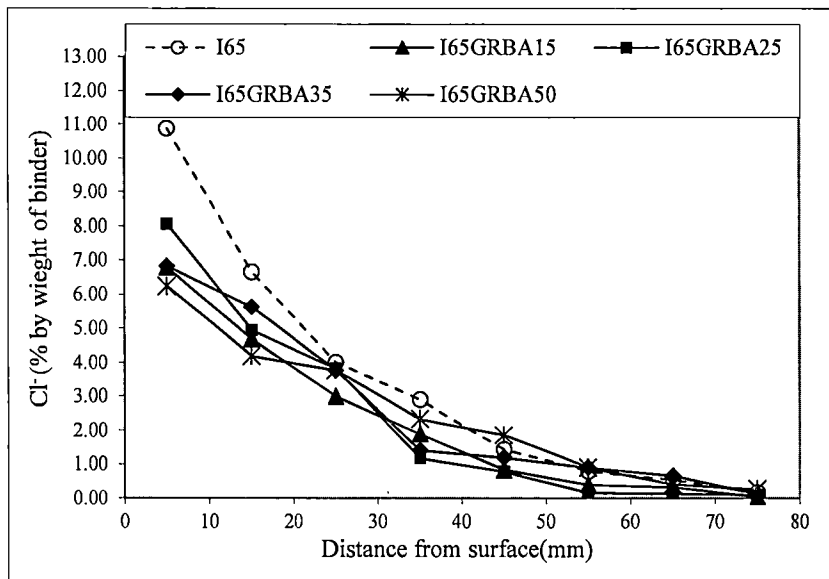
เมื่อพิจารณาการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ หลังแช่น้ำทะเล 9 ปี ดังรูปที่ 4.7 โดยภาพรวม พบว่า การใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ในส่วนผสมคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์ลดลง และการใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สูงถึงร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีผลให้ต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์มีแนวโน้มลดลง และมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนเมื่อผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ในปริมาณที่สูงขึ้นถึงร้อยละ 50 และมีแนวโน้มเหมือนกันในกลุ่มที่มี W/B 0.45 และ 0.65 ดังรูปที่ 4.7(ก) และ 4.7(ข) ตามลำดับ และมีความชัดเจนมากขึ้นเมื่อพิจารณาปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึก 25 35 และ 45 มม. ดังรูปที่ 4.8(ก) 4.8(ข) และ 4.8(ค) ตามลำดับ นั้นแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่ผ่านการบดละเอียด กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ให้ผลดีต่อคุณสมบัติด้านความคงทน และลดการแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้ โดยการแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ในปริมาณที่สูงขึ้นไม่เกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่งผลให้การแทรกซึม

ของคลอไรด์ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเส้นแกลบเปลือกไม้ที่ผ่านการบดละเอียดสามารถที่จะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานและส่งผลให้เนื้อคอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตลดการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ (Tangchirapat et al.,2008; Chindaprasirt et al.,2005; Suwanmaneechot et al.,2009; Chalee et al.,2013) นอกจากนี้ ในงานวิจัยที่ผ่านมา (Chindaprasirt et al.,2007) ที่ได้ศึกษาการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตที่ผสมเส้นแกลบเปลือกไม้ พบว่าการใช้เส้นแกลบเปลือกไม้ในปริมาณที่สูง จะทำให้การซึมผ่านของน้ำสูงขึ้น นั่นหมายถึงความคงทนต่อสารเคมีที่เข้าไปทำอันตรายต่อคอนกรีตน้อยลง แต่การแทนที่ในปริมาณที่ไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน จะส่งผลดีต่อคอนกรีต โดยลดการซึมผ่านของน้ำลง และดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเส้นแกลบเปลือกไม้ ซึ่งเมื่อพิจารณาพร้อมกับผลการศึกษาในงานวิจัยนี้ พบว่ามีแนวโน้มที่ไปในทิศทางเดียวกัน โดยการใช้เส้นแกลบเปลือกไม้ถึงร้อยละ 50 ของน้ำหนักวัสดุประสาน ส่งผลให้การต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ลดลงอย่างมาก ทั้งนี้ อาจเป็นผลมาจากการใช้เส้นแกลบเปลือกไม้ในปริมาณสูงจะลดปริมาณของปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีตลง และส่งผลให้ความแข็งแรงที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง และนอกจากนั้นปริมาณเส้นแกลบเปลือกไม้ส่วนที่เกินและไม่ได้ทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ก็สามารถที่ละลายน้ำและถูกชะออกมาได้ง่าย ซึ่งส่งผลให้คอนกรีตเกิดความพรุนและทำให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีต เช่น คอนกรีตที่มี W/B เท่ากับ 0.45 และแทนที่เส้นแกลบเปลือกไม้ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 0 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึก 35 มม. เท่ากับร้อยละ 1.61 0.54 0.90 1.07 และ 2.25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ



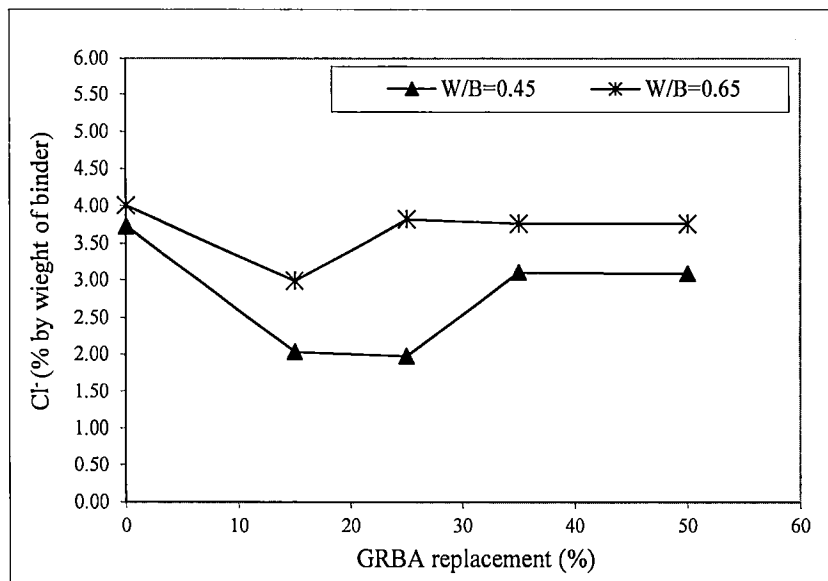
ก) W/B = 0.45



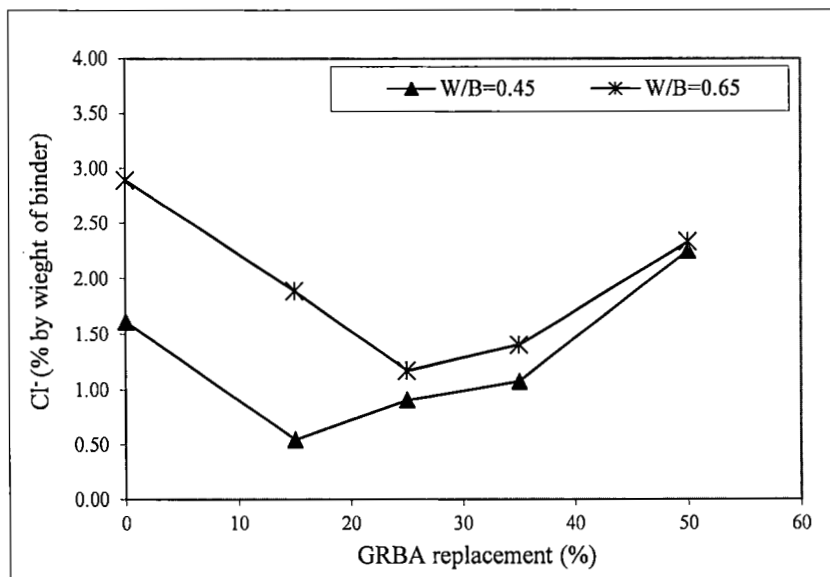


ข) W/B = 0.65

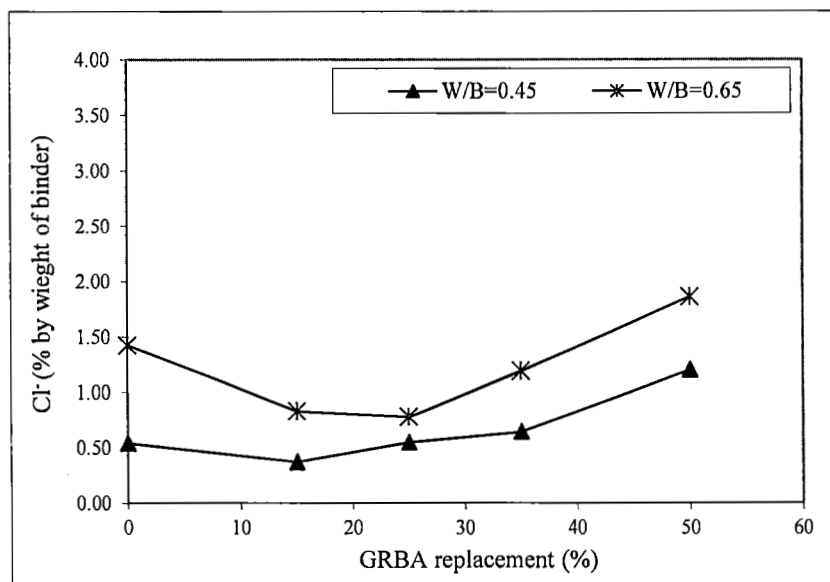
รูปที่ 4.7 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบน-เปลือกไม้บดละเอียด ที่มี W/B=0.45 และเข้าน้ำทะเลเป็นเวลา 9 ปี



ค) ความลึก 25 มม.



ข) ความลึก 35 มม.



ค) ความลึก 45 มม.

รูปที่ 4.8 ผลของเด้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 9 ปี

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากผลการศึกษสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

5.1.1) แบบจำลองนี้สามารถใช้ทำนายปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด ที่ตำแหน่งใดๆ จากผิวหน้าคอนกรีตและระยะเวลาแช่น้ำทะเลตั้งแต่ 2 ปี ขึ้นไป ในคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดไม่เกินร้อยละ 50 และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในช่วง 0.45 ถึง 0.65 แบบจำลองนี้สามารถใช้ได้กับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่มีลักษณะการซึมผ่านของคลอไรด์ในทิศทางเดียวเท่านั้น โดยการใช้แบบจำลองในการทำนายปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดสูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่ามีความคลาดเคลื่อนมากกว่าคอนกรีตกลุ่มอื่น

5.1.2) การใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ในส่วนผสมคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์หลังที่คอนกรีตแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 9 ปี ลดลง และการใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สูงถึงร้อยละ 35 มีผลให้ด้านทานการแทรกซึมคลอไรด์มีแนวโน้มลดลง โดยมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน เมื่อผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ในปริมาณที่สูงขึ้นถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในระยะยาว ในคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอชโซลานชนิดอื่นๆ (เถ้าปาล์มน้ำมัน เถ้าแกลบ เถ้าชานอ้อย เป็นต้น) ที่มีผลการศึกษาการแทรกซึมของคลอไรด์ จากตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลานาน เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สมบูรณ์ และเป็นการส่งเสริมการใช้วัสดุปอชโซลานที่มีในประเทศเพื่อใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง

## เอกสารอ้างอิง

- คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. (2543). ความคงทนของคอนกรีต, พิมพ์ครั้งที่ 1, บริษัท จุดทอง จำกัด, กรุงเทพมหานคร, หน้า 24-72.
- นุรฉัตร นัทรวิระ และ เพิ่มพูน ศรีนวล. (2555). การศึกษาสมบัติของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูน. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร*, 35(2), 201-218.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2547). ปูนซีเมนต์ ปอชโซลาน และ คอนกรีต. ครั้งที่ 3, สมาคมคอนกรีตไทย
- วัลย์ลักษณ์ สารจันทน์ วีรชาติ ตั้งจิรภัทร ชัย จาตุรพิทักษ์กุล เอกชัย ภัทรวงศ์ไพบูลย์. (2550). ผลกระทบของความละเอียดและอัตราทดแทนที่ของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ต่อกำลังอัดและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12*, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.
- วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2554). ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล. *วารสารวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี* 34 (3), 203-213
- วิเชียร ชาลี. (2556). ระดับคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา* 18(2), 132-143
- วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2554). ปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม* 7(1), หน้า 21-28.
- ACI 211.1-91(1991). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete.
- ACI 201.2R-01 (2003). Guide to durable concrete.
- ACI 318-89 (2003). Building Code Requirements for Reinforced Concrete.
- ASTM C1218. (2008). Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.02.*
- ASTM C1152. (2008). Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete, *Annual Books of ASTM Standards V. 04.02.*

- ASTM C150.(1997). Standard Specification for Portland Cement. *Annual Book of ASTM Standards*; V. 04.01.
- Broomfield, J.P., 1996, Corrosion of Steel in Concrete, England, Taylor & Francis Ltd
- Buslov V.M. (1990). New ACI Guide for design concrete marine structures, *Concrete International*, 12(5), 41–6.
- Chalee W., Sasakul T., Suwanmaneechot P., and Jaturapitakkul C. (2013). 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*, 37, 47–53.
- Chalee W., Jaturapitakkul C., Chindaprasirt P. (2009). Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater. *Marine Structures* 22, 341-353.
- Chalee W., Jaturapitakkul C. (2009). Effect of W/B ratios and fly ash finenesses on chloride diffusion coefficient of concrete in marine environment. *Materials and Structures* 42, 505-514.
- Chalee W., Ausapanit P., Jaturapitakkul C. (2010). Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis. *Materials and Design* 31, 1242-1249.
- Cheewaket C., Jaturapitakkul C. and Chalee W. (2012). Initial corrosion presented by chloride threshold penetration of concrete up to 10 year-results under marine site. *Construction and Building Materials*, 37, 693-698.
- Chindaprasirt P., Homwuttiwong S. and Jaturapitakkul C. (2007). Strength and Water Permeability of Concrete Containing Palm Oil Fuel Ash and Rice Husk–Bark Ash. *Construction and Building Materials*, 21(7), 1492-1499.
- Chindaprasirt P., Jaturapitakkul C. and Sinsiri T. (2005). Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. *Cement and Concrete Composites*, 27, 425 - 428.
- Crank J., 1975, The mathematic of diffusion, 2<sup>nd</sup>, ed. Oxford Press, London.
- Glass G. K., Buenfeld, N. R., (1997). The presentation of the chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. *Corros.Sci.* 39, 1001 - 1013.

- Hui Yu, Kuang-Tsan K. Chiang, Lietai Yang, (2012) Threshold chloride level and characteristics of reinforcement corrosion initiation in simulated concrete pore solutions. *Construction and Building Materials* 26, 723-729.
- Mangat PS., Limbachiya MC. (1999). Effect of initial curing on chloride diffusion in concrete repair materials. *Cement and Concrete Research* 29, 1475-1485.
- Mehta P.K., 1989, Durability of concrete in marine environment—an overview, Proceedings Gerwick Symposium on Durability of Concrete in Marine Environment, 20–27.
- Neville A.M., 1996, Properties of Concrete, 4<sup>th</sup> ed., Longman, Malaysia, pp. 563-575.
- Sata V., Jaturapitakkul C., Kiattikomol K. (2007). Influence of pozzolan from various by-product materials on mechanical properties of high-strength concrete. *Construction and Building Materials* 21, 1589-1598.
- Sata V., Tangpagasit J., Jaturapitakkul C., Chindaprasirt P. (2012). Effect of W/B ratios on pozzolanic reaction of biomass ashes in Portland cement matrix. *Cement and Concrete Composites* 34, 94 -100.
- Thomas M.D.A. and Matthews J.D. (2004). Performance of PFA Concrete in a Marine Environment – 10-year Results. *Cement and Concrete Composites*, 26, (1), 5-20.

**ภาคผนวก ก**  
**ผลผลิต (Output)**  
**บทความวิจัยระดับชาติ**

- 1) ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ วิเชียร ชาลี. (2559). การทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเส้นใยแก้ว-เปลือกไม้ภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 26(1).



## การทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล

ชัย จาดูรพิทักษ์กุล

ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

วิเชียร ชาลี\*

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

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

รับเมื่อ 11 มีนาคม 2558 ตอบรับเมื่อ 1 กรกฎาคม 2558 เผยแพร่ออนไลน์ x พฤศจิกายน 2558

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

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-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  $\pm 30$  และผลการทำนายของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในปริมาณไม่เกินร้อยละ 35 มีความถูกต้องมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน นอกจากนี้ได้มีการเปรียบเทียบผลการทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์กับงานวิจัยอื่น โดยพบว่าปริมาณคลอไรด์จากการทำนายส่วนใหญ่มีค่าคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงร้อยละ  $\pm 35$

คำสำคัญ: การแทรกซึมของคลอไรด์ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ การทำนาย สิ่งแวดล้อมทะเล

การอ้างอิงบทความ: ชัย จาดูรพิทักษ์กุล และ วิเชียร ชาลี, "การทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล," วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 26, ฉบับที่ 1, หน้า x-x, ม.ค.-เม.ย. 2559.  
DOI: 10.14416/j.kmutnb.2015.07.003





## 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@bua.ac.th

Received 11 March 2015; Accepted 1 July 2015; Published online: x November 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

Please cite this article in press as: C. Jaturapitakkul and W. Chalee, "Predicting the Chloride Penetration of Concrete Containing Rice Husk-bark Ash under Marine Environment," *The Journal of KMUTNB.*, Vol. 26, No. 1, pp. x-x, Jan.-Apr. 2016 (in Thai). DOI: 10.14416/j.kmutnb.2015.07.003

## 1. บทนำ

การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อใช้งานในสภาวะแวดล้อมทะเล ต้องให้ความสำคัญกับการป้องกันการกัดกร่อนที่ทำลายคอนกรีตเสริมเหล็ก คู่ไปกับการรับแรงเชิงกลเพื่อให้โครงสร้างมีความแข็งแรง และมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ซึ่งการกัดกร่อนของโครงสร้างในสภาวะแวดล้อมดังกล่าว มีสาเหตุหลักมาจากคลอไรด์และซัลเฟต โดยคลอไรด์เป็นสาเหตุที่ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม และขยายตัวส่งผลให้คอนกรีตแตกร้าว

งานวิจัยที่ผ่านมา [1] พบว่าการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 35 สามารถต้านการแทรกซึมของคลอไรด์เนื่องจากน้ำทะเลได้ดี ประกอบกับเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่เป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำได้ดี ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูง และการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำลง [2], [3]

การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต เพื่อให้สามารถต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ จำเป็นต้องใช้ฐานข้อมูลที่ได้จากการเก็บข้อมูลจากตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลจริง โดยระยะเวลาที่แช่ตัวอย่างคอนกรีตที่นานขึ้น จะให้ผลการศึกษาที่อธิบายพฤติกรรมการกัดกร่อน ได้สอดคล้องกับการใช้งานจริงมากขึ้น อย่างไรก็ตามการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเลจริง อาจมีข้อจำกัดในเรื่องของระยะเวลาที่แช่ตัวอย่าง ซึ่งถ้าสามารถใช้ฐานข้อมูลที่ได้จากการแช่ตัวอย่างในสิ่งแวดล้อมทะเล ในการทำงานการแทรกซึมของคลอไรด์ในระยะยาวได้ ก็จะเป็นประโยชน์อย่างมากในการเลือกใช้ส่วนผสมคอนกรีตให้สามารถทนต่อการกัดกร่อนจากคลอไรด์ในน้ำทะเลในระยะยาวได้ นอกจากนี้ยังสามารถทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กตลอดจนการบำรุงรักษาที่จะมีขึ้นในอนาคตได้อีกด้วย

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

ที่ผสมเถ้าถ่านหิน ที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลในสภาวะเปียกสลบแห้ง ซึ่งพบว่า แบบจำลองดังกล่าวสามารถใช้งานได้ดีในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินไม่เกินร้อยละ 50 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในช่วง 0.45 ถึง 0.65 โดยเปรียบเทียบผลการศึกษากับข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ที่เก็บในภาคสนามทั้งในประเทศและต่างประเทศ พบว่าแบบจำลองดังกล่าวมีความสอดคล้องกับข้อมูลที่เก็บในสนามในช่วงร้อยละ  $\pm 25$

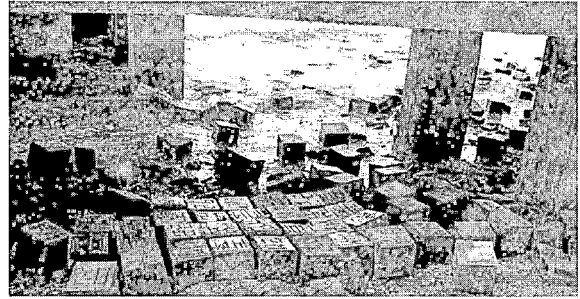
การศึกษาค้นคว้ามีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองซึ่งแสดงในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ในการทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำทะเลบริเวณชายฝั่ง โดยเน้นคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียด ในการสร้างแบบจำลองได้ใช้ฐานข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์จากน้ำทะเลที่ได้จากการทดสอบโดยการแช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำทะเลที่อายุ 2, 3, 5, 7 และ 9 ปี ซึ่งให้ผลการศึกษาที่สอดคล้องกับพฤติกรรมการกัดกร่อนจริง และสอดคล้องกับการแทรกซึมของคลอไรด์ในระยะยาวได้ดี ทำให้แบบจำลองมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น ตลอดจนการพัฒนาแบบจำลองให้มีรูปแบบของการใช้งานที่ง่าย คำนวณได้สะดวกรวดเร็ว ก็จะเป็นประโยชน์ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่คำนึงถึงความคงทนต่อไป

## 2. วิธีการศึกษา

### 2.1 วัสดุประสานและมวลรวม

วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาค้นคว้านี้ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C150 [5] และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียด (ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก) มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.15 และขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 10.8 ไมครอน สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่บดละเอียด มีผลรวมของสารประกอบหลัก  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  เท่ากับร้อยละ 90.66 และ และมีปริมาณของ  $\text{SiO}_2$  สูงถึงร้อยละ 87 ซึ่งส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่ทำให้คอนกรีตมีสมบัติเชิงกลและสมบัติด้าน

ความคงทนที่ดี แก้วแอลบ-เปลือกไม้บดละเอียดมีค่า LOI ร้อยละ 5.71 โดยองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน แสดงดังตารางที่ 1 มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำที่มีค่า โมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.73 และความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 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. โดยใช้สารลดน้ำพิเศษประเภท ซัลโฟเนตเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเซต (Sulfonated Melamine Formaldehyde Condensates) ช่วยในการเพิ่มความสามารถเทได้ ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตตามส่วนผสมในตารางที่ 2 เป็นรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 200 มม.<sup>3</sup> 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]

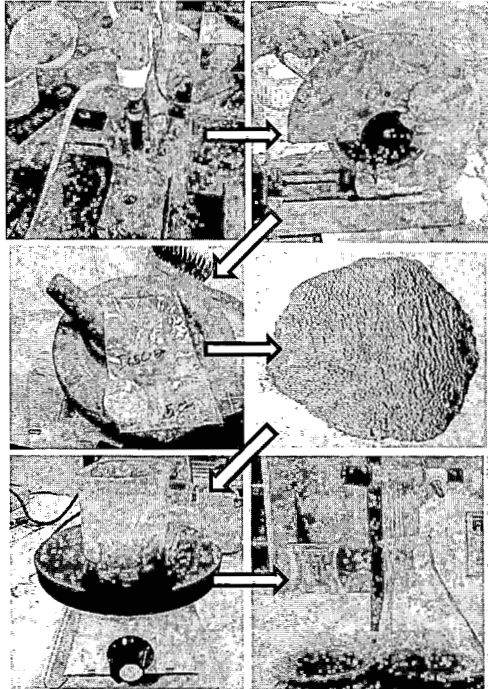
## 2.2 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

### 2.2.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

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

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต

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

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

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

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

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

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

เมื่อ

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

$t$  = ระยะเวลาแช่ (ปี)

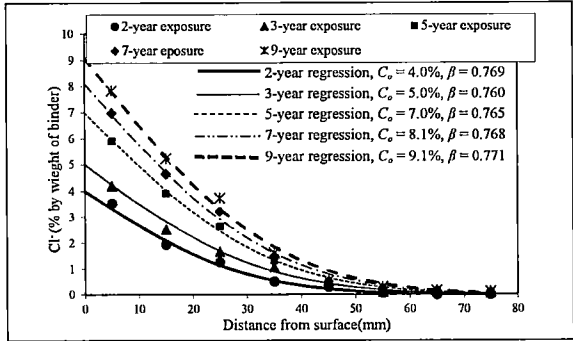
$x$  = ระยะจากผิวหน้าคอนกรีต (มม.)

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

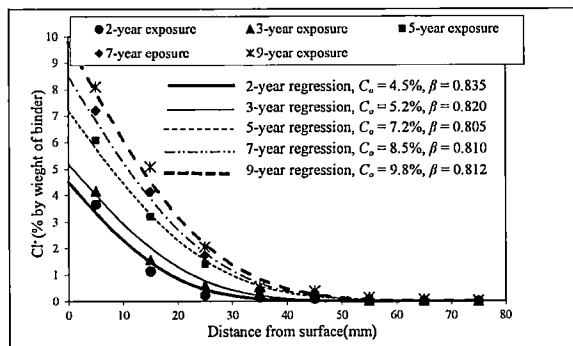
$\beta$  = ค่าสัมประสิทธิ์

$\operatorname{erf}$  = ฟังก์ชันค่าผิดพลาด (Error Function)

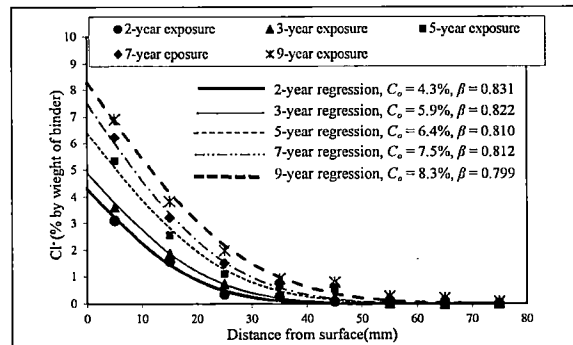
การหาปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตตามสมการที่ (5) จำเป็นต้องทราบค่าสัมประสิทธิ์  $\beta$  และความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต ( $C_o$ ) ซึ่งในการสร้างแบบจำลองครั้งนี้ได้ใช้หลักการวิเคราะห์เชิงถดถอยของสมการที่ (5) ในข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ได้จากการแช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำทะเลระยะเวลา 9 ปี ดังตัวอย่างในรูปที่ 3 ที่แสดงการหาค่า  $\beta$  และ  $C_o$  โดยใช้หลักการวิเคราะห์เชิงถดถอยที่ปรับค่า  $\beta$  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 ก็ทำได้ในลักษณะเดียวกัน โดยให้ค่า  $\beta$  และ  $C_o$  แสดงในตารางที่ 3 และ 4 ตามลำดับ



(ก) คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



(ข) คอนกรีตผสมแก้วเกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน



(ค) คอนกรีตผสมแก้วเกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

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

ตารางที่ 3 สัมประสิทธิ์  $\beta$ 

ส่วนผสม	สัมประสิทธิ์ $\beta$					เฉลี่ย $\beta$
	ชั้นน้ำทะเล 2 ปี	ชั้นน้ำทะเล 3 ปี	ชั้นน้ำทะเล 5 ปี	ชั้นน้ำทะเล 2 ปี	ชั้นน้ำทะเล 9 ปี	
I45	0.769	0.760	0.765	0.769	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	0.812
I45GRBA15	0.787	0.781	0.783	0.783	0.780	0.783
I45GRBA 50	0.772	0.751	0.763	0.799	0.760	0.763
I65	0.755	0.749	0.783	0.766	0.780	0.766
I65GRBA15	0.799	0.788	0.789	0.791	0.788	0.789
I65GRBA25	0.854	0.825	0.778	0.780	0.780	0.804
I65GRBA35	0.769	0.855	0.760	0.783	0.755	0.789
I65GRBA 50	0.765	0.721	0.750	0.745	0.735	0.745

ตารางที่ 4 ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต

ส่วนผสม	ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต, $C_s$ (% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน)					เฉลี่ย $C_s$				
	ชั้นน้ำทะเล 2 ปี	ชั้นน้ำทะเล 3 ปี	ชั้นน้ำทะเล 5 ปี	ชั้นน้ำทะเล 7 ปี	ชั้นน้ำทะเล 9 ปี	ชั้นน้ำทะเล 2 ปี	ชั้นน้ำทะเล 5 ปี	ชั้นน้ำทะเล 2 ปี	ชั้นน้ำทะเล 7 ปี	ชั้นน้ำทะเล 9 ปี
	I45	4.0	5.0	7.0	8.1	9.1	3.7	3.7	3.7	3.7
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	6.4	8.1	9.0					
I65	5.0	6.3	9.1	10.8	12.3	3.9	3.7	3.9	3.9	7.9
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	9.3					
I65GRBA 50	3.1	5.2	6.1	6.5	6.9					

พิจารณาค่า  $\beta$  ตามตารางที่ 3 พบว่าไม่มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาที่ชัดเจน แต่มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงตามปริมาณการแทนที่เถ้ากลบ-เปลือกไม้และ W/B ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงได้ใช้ค่าเฉลี่ยของ  $\beta$  ในการทำการวิเคราะห์เชิงถดถอยแบบพหุคูณเทียบกับปริมาณการแทนที่เถ้ากลบ-เปลือกไม้บดละเอียด (GRBA) กับ W/B การวิเคราะห์เชิงถดถอยในความสัมพันธ์ระหว่าง  $\beta$  กับปริมาณการแทนที่เถ้ากลบ-เปลือกไม้บดละเอียด (GRBA) ได้ความสัมพันธ์ในรูปแบบ

ของสมการโพลิโนเมียลดีกรีสอง ดังสมการที่ (6)

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

การวิเคราะห์เชิงถดถอยในความสัมพันธ์ระหว่าง  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  และ  $\alpha_3$  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  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  และ  $\alpha_3$  ในสมการที่ (6) คำนวณค่า  $\alpha$  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  $\alpha$  = ค่าสัมประสิทธิ์

$GRBA$  = ร้อยละการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

$W/B$  = อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

พิจารณาว่า  $C_0$  ตามตารางที่ 4 พบว่าไม่มีความสัมพันธ์กับปริมาณของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ชัดเจน แต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่แช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำทะเล ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จึงได้ใช้ค่าเฉลี่ยของ  $C_0$  ในการทำการวิเคราะห์เชิงถดถอยกับระยะเวลาแช่คอนกรีตในน้ำทะเล โดยการวิเคราะห์เชิงถดถอยในความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_0$  กับระยะเวลาแช่ ( $t$ ) ได้ความสัมพันธ์ในรูปแบบของฟังก์ชันลอการิทึมดังสมการที่ (11)

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

การวิเคราะห์เชิงถดถอยในความสัมพันธ์ระหว่าง  $\gamma_1$  และ  $\gamma_2$  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  $\gamma_1$  และ  $\gamma_2$  ในสมการที่ (11) คำนวณหา  $C_0$  ได้ดังสมการที่ (14)

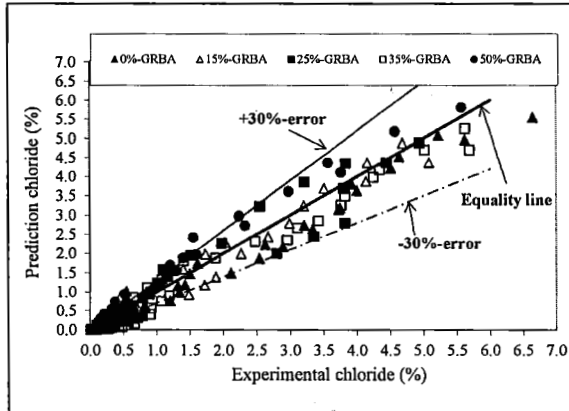
$$C_0 = [(-0.501)(W/B) + 3.4752] \ln(t) + (-2.436)(W/B) + 0.4895 \quad (14)$$

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.<sup>3</sup> ซึ่งสมมุติให้เป็นการซึมผ่านในทิศทางเดียวจากพื้นผิวของทรงลูกบาศก์ลงในแนวตั้งของตัวอย่างคอนกรีต โดยโครงสร้างที่เหมาะสมในการใช้แบบจำลองนี้ได้แก่ พื้นฐานราก หรือโครงสร้างอื่นๆ ที่มีลักษณะการซึมเข้าของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตในลักษณะทิศทางเดียว

#### 4. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

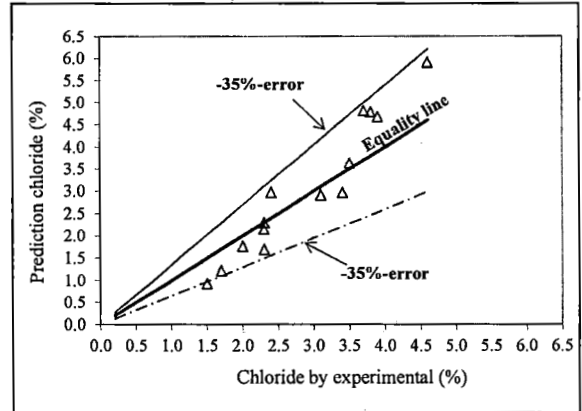
การเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดที่ได้จากแบบจำลอง กับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5, 7 และ 9 ปี โดยเปรียบเทียบในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45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



รูปที่ 4 ผลการทำนายปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลที่ได้จากการแช่คอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5, 7 และ 9 ปี

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

ผลการเปรียบเทียบพบว่าข้อมูลส่วนใหญ่อยู่ในช่วงร้อยละ  $\pm 30$  โดยคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน อย่างไรก็ตามการเปรียบเทียบข้อมูลดังกล่าวเป็นเพียงการทดสอบกระบวนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถทำนายได้สอดคล้องกับข้อมูลที่ใช้เป็นฐานในการสร้างแบบจำลอง ซึ่งควรมีการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทำนายปริมาณคลอไรด์โดยแบบจำลอง กับข้อมูลการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล ของนักวิจัยท่านอื่นๆ ด้วย อย่างไรก็ตาม ด้วยข้อจำกัดงานวิจัยที่ผ่านมา ไม่พบข้อมูลการศึกษาความคงทนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมทะเล ตลอดจนข้อมูล

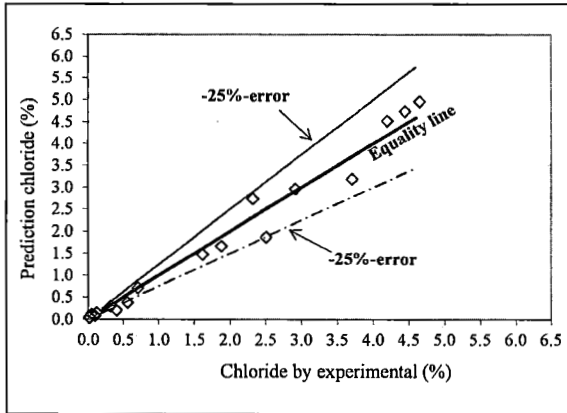


รูปที่ 5 ผลการทำนายปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลของ Thomas [7] ที่แช่คอนกรีตธรรมดามาน้ำทะเลประเทศอังกฤษเป็นเวลา 2, 4 และ 10 ปี

ที่ทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในห้องปฏิบัติการค่อนข้างน้อยและมีอายุการแช่ไม่นาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เปรียบเทียบผลการทำนายกับข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดาเท่านั้น

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



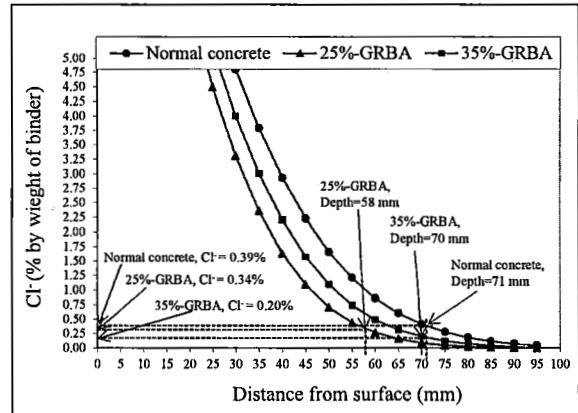


รูปที่ 6 ผลการทำนายปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลของ Chalee [10] ที่แช่คอนกรีตธรรมดาในน้ำทะเลแล้วเป็นเวลา 7 ปี

สิ่งแวดล้อมทะเลที่แตกต่างกัน มีผลต่อการทำนายปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตของแบบจำลองนี้ โดยแบบจำลองสามารถทำนายปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่สัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมทะเลในเขตร้อนชื้นได้ดีกว่าเขตนาน ทั้งนี้เนื่องจากข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองได้จากการแช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำทะเลบริเวณเขตร้อนชื้น อย่างไรก็ตามการทำนายปริมาณคลอไรด์โดยใช้แบบจำลองนี้ในสภาพแวดล้อมทะเลทั้ง 2 แห่งให้ผลไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งสามารถยอมรับในการใช้งานได้

### 5. การประยุกต์ใช้แบบจำลอง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้สามารถทำนายปริมาณของคลอไรด์ทั้งหมด ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตที่ผสมแก้วกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่งได้ โดยข้อมูลดังกล่าวมีประโยชน์ในการกำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเพื่อให้สอดคล้องกับอายุการใช้งาน ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเล ในช่วงเวลาก่อนการกัดกร่อนเริ่มต้น (Initial Corrosion) ตัวอย่างการใช้งานของแบบจำลองดังรูปที่ 7 ได้แสดงการกำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเพื่อป้องกันการกัดกร่อนเริ่มต้น จากข้อมูลการ



รูปที่ 7 การกำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเพื่อป้องกันการกัดกร่อนเริ่มต้น จากผลการทำนายปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมแก้วกลบ-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] พบว่าคอนกรีตธรรมดาคอนกรีตที่ผสมแก้วกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดร้อยละ 25 และ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่มี  $W/B = 0.45$  มีปริมาณคลอไรด์วิกฤติเท่ากับร้อยละ 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 ตลอดจนเป็นข้อมูลประกอบการเลือกส่วนผสมคอนกรีต ที่ต้องการก่อสร้างใน



สิ่งแวดล้อมทะเลให้สามารถใช้งานได้ตามอายุการใช้งานที่ต้องการได้ อย่างไรก็ตามแบบจำลองนี้ได้สร้างจากฐานข้อมูลที่แช่ตัวอย่างคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเลที่ไม่อยู่ในสภาวะการรับแรงเชิงกล ดังนั้นผลที่ได้จากการทำนายเมื่อเทียบกับการใช้งานจริง ที่อยู่ภายใต้การรับแรงของโครงสร้างอาจแตกต่างกันได้

## 6. สรุป

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

แบบจำลองนี้สามารถใช้ทำนายปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด ที่ตำแหน่งใดๆ จากผิวหน้าคอนกรีตและระยะเวลาแช่น้ำทะเลตั้งแต่ 2 ปี ขึ้นไป ในคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตที่ผสมแก้วแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดไม่เกินร้อยละ 50 และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในช่วง 0.45 ถึง 0.65 แบบจำลองนี้สามารถใช้ได้กับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่มีลักษณะการซึมผ่านของคลอไรด์ในทิศทางเดียวเท่านั้น โดยการใช้แบบจำลองในการทำนายปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมแก้วแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดสูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน 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. *Cem. Concr. Compos.*

[2] P. Chindaprasirt, S. Homwuttiwong, 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. *Constr Build Mater.*

[3] W. Tangchirapat, R. Buranasing, C. Jaturapitakkul, and P. Chindaprasirt, "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. Chindaprasirt, "Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater," *Marine Structures*, vol. 22, pp. 341–353, 2009.

[5] ASTM. *Standard Specification for Portland Cement*, C150/C150M-12. Annual Book of ASTM Standards 2012, 04.01.

[6] ASTM. *Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete*, C 1152. Annual Book of ASTM Standards 2008, 04.02.

[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).

**ภาคผนวก ข**  
**รายงานการเงิน**

## รายงานสรุปการเงิน

เลขที่โครงการระบบบริหารงานวิจัย (NRPM 13 หลัก) 2558A10802331 สัญญาเลขที่ 100/2558  
โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้ จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ  
พ.ศ. 2558 มหาวิทยาลัยบูรพา

ชื่อโครงการ...แบบจำลองเพื่อทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้โดยใช้ฐานข้อมูล  
ที่แค่คอนกรีตในสภาพแวดล้อมทะเลถึง 9 ปี

ชื่อหัวหน้าโครงการวิจัย (ศ. /รศ. /ผศ. /ดร. /อ.) ...ผศ.ดร.วิเชียร ชาลี...

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ (วัน/ เดือน/ ปี)...1 ตุลาคม 2557 ถึงวันที่ (วัน/ เดือน/ ปี) ...30 กันยายน 2558

ระยะเวลาดำเนินการ จำนวน ..1....ปี...- .เดือน

## รายรับ

จำนวนเงินที่ได้รับ

งวดที่ 1 (50%) จำนวน ...275,500 .....บาท เมื่อ ...พฤศจิกายน พ.ศ. 2557...

งวดที่ 2 (40%) จำนวน ...220,400.....บาท เมื่อ ...พฤษภาคม พ.ศ. 2558.....

งวดที่ 3 (10%) จำนวน ...-.....บาท เมื่อ ...-.....

รวม ...495,900.....บาท

## รายจ่าย

หมวด	งบประมาณที่ตั้งไว้ (บาท)	งบประมาณที่ใช้ จริง (บาท)	จำนวนเงิน คงเหลือ/เกิน (บาท)
1. ค่าตอบแทน	0	0	0
2. ค่าจ้าง	90,000	90,000	0
2. ค่าจ้าง	101,000	101,000	0
4. ค่าใช้สอย	304,900	304,900	0
5. ค่าใช้จ่ายอื่นๆ ค่าเงินทุนอุดหนุนการวิจัยของ มหาวิทยาลัยเป็นค่าสาธารณูปโภค 10%	55,100	55,100	0
รวม	551,000	551,000	0

(ผศ.ดร.วิเชียร ชาลี)

หัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

**ภาคผนวก ค**  
**ประวัตินักวิจัย**

## ประวัติผู้วิจัย

### หัวหน้าโครงการวิจัย

ชื่อ – นามสกุล (ภาษาไทย)	นายวิเชียร ชาลี
ชื่อ – นามสกุล (ภาษาอังกฤษ)	Mr. Wichian Chalee
ตำแหน่งปัจจุบัน	ผู้ช่วยศาสตราจารย์
หน่วยงานที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก	

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยบูรพา อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131  
โทรศัพท์ 038-102-222 ต่อ 3356  
โทรสาร 038-102-222 ต่อ 3355  
E-mail wichian@buu.ac.th

### ประวัติการศึกษา

ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยขอนแก่น พ.ศ. 2541  
ปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
พ.ศ. 2546  
ปริญญาเอก วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า  
ธนบุรี พ.ศ. 2550

### สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

วัสดุก่อสร้าง, คอนกรีตผสมวัสดุป่อขุไชลานและเถ้าชีวมวล, ความคงทนของคอนกรีต

## ผลงานวิชาการ

### บทความวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารวิจัยระดับนานาชาติ

- 1) T. Cheewaket, C. Jaturapitakkul and W. Chalee, “Concrete durability presented by acceptable chloride level and chloride diffusion coefficient in concrete—10-year results in marine site”, *Materials and Structures* (2014) 47:1501–1511
- 2) P. Chindaprasirt and W. Chalee, “Effect of sodium hydroxide concentration on chloride penetration and steel corrosion of fly ash-based geopolymer concrete under marine site”, *Construction and Building Materials* 63, 2014, pp. 303–310
- 3) W. Chalee<sup>1</sup>, 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* 37, 2013, pp. 47–53
- 4) T. Cheewaket, C. Jaturapitakkul and W. Chalee, “Initial corrosion presented by chloride threshold penetration of concrete up to 10 year-results under marine site”, *Construction and Building Materials* 37, 2012, pp. 693–698
- 5) Rattapon Somna, Chai Jaturapitakkul, Pokpong Rattanachu, Wichian Chalee, “Effect of ground bagasse ash on mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete”, *Materials and Design* 36, 2012, pp. 597–603
- 6) Rattapon Somna, Chai Jaturapitakkul, Wichian Chalee, Pokpong Rattanachu, “Effect of W/B ratio and ground fly ash on properties of recycled aggregate”, *ASCE's Journal of Materials in Civil Engineering*, 24, 2012, pp. 16-22
- 7) T. Cheewaket, C. Jaturapitakkul and W. Chalee, 2010, “Long term performance of chloride binding capacity in fly ash concrete in a marine environment”, *Construction and Building Materials* 24 (2010) 1352–1357
- 8) W. Chalee, P. Ausapanit and C. Jaturapitakkul, 2010, “Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis”, *Materials and Design* (2010) 31 : pp. 1242-1249
- 9) C. Sanawong and W. Chalee, 2010, “Water permeability in fly ash based geopolymer concrete”, *J. of Civil engineering and architecture* 4 (2010) 15-19



- 10) W. Chalee and C. Jaturapitakkul\*, 2009, "Effect of W/B ratios and fly ash finenesses on chloride diffusion coefficient of concrete in marine environment", *Materials and Structures* (2009) 42 : pp. 505-514
- 11) W. Chalee, C. Jaturapitakkul\*, and P. Chindapasirt' 2009 "Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater" *Marine Structures*, 22, 2009, pp.341-353
- 12) Prinya Chindapasirt, Wichian Chalee, Chai Jaturapitakkul, and Ubolluk Rattanasak\*, 2009, "Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers," *Waste Management*, Vol.29, No. 2, pp 539-543. (Impact factor = 1.338)
- 13) Chalee, W., Teekavanit, M., Kiattikomol, K., Siripanichgorn, A., and Jaturapitakkul, C.\*, 2007, "Effect of W/C ratio on covering depth of fly ash concrete in marine environment," *Construction and Building Materials*, Vol.21, No.5, pp. 965-971 (Impact factor = 2.293)

#### บทความประกอบการประชุมสัมมนาทางวิชาการระดับนานาชาติ

- 14) W. Chalee, P. Suwanmaneechot and C. Jaturapitakkul (2011). CORROSION PERFORMANCE OF CONCRETE CONTAINING RICE HUSK-BARK ASH UNDER 5-YEAR EXPOSURE IN MARINE SITE. *Modern Methods and Advances in Structural Engineering and Construction ISEC-6*, Zurich, June 21-26, 21-28.
- 15) Koonthong, S., Chawkitcareon, P., and Chalee, W. (2010). Compressive strength and thermal conductivity of concrete masonry block containing plastic label waste. *The 3rd Technology and Innovation for Sustainable Development International Conference, TISD 2010*, Thailand, pp.801-804
- 16) Yimsiri, S. and Chalee, W. (2010). Damage of reinforced concrete building due to adjacent deep excavation. *3<sup>rd</sup> ASEAN Civil Engineering Conference, 3ACEC*, Manila, Philippine
- 17) Suwanmaneechot, P., Jaturapitakkul, C., and Chalee, W. (2009). Chloride penetration of concrete containing rice husk-bark ash in marine exposure site. *4th International Conference in Construction Materials: Performance, Innovstions and Structural Implications*, Nagoya, Japan, pp. 725-730, 725-730.
- 18) Chalee, W. and Jaturapitakkul, C. (2008). Long Term Performance of Fly Ash Concrete in Marine Environment. *The 8th ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium*, Bangkok, Thailand, 11th-14th November 2008, pp. 178-182

- 19) T. Klabprasit, C. Jaturapitakkul, W. Chalee, P. Chindaprasirt and S. Songpiriyakij (2008). Influence of Si/A1 ratio on Compressive Strength of Rice Husk-Bark Ashes and Fly Ash-based Geopolymer Paste. The 3rd ACF international conference ACF/VCA, Rex Hotel, Ho Chi Minh City, Vietnam, November 11-13, 2008, pp 151-157

### บทความวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารวิจัยระดับชาติ

- 20) มณเฑียร ทีฆวานิช, ประสิทธิ์ อุตสาหกรรม, วิเชียร ชาลี, เอนก ศิริพานิชกร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2549, “ผลกระทบของน้ำทะเลต่อการซึมผ่านของคลอไรด์ และการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน” วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 17, ฉบับที่ 2
- 21) วิเชียร ชาลี, มณเฑียร ทีฆวานิช, ประสิทธิ์ อุตสาหกรรม และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2550, “ผลกระทบ 1 ถ่านหินที่อยู่ในสถานะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 4 ปี” วารสารฉบับวิจัยและพัฒนา มจร., ปีที่ 30, ฉบับที่ 1, หน้า 153-166.
- 22) อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, วิเชียร ชาลี, และ ปริญา จินดาประเสริฐ, 2549, “การศึกษาการชะเถ้าถ่านหิน ลิกไนต์และกำลังอัดของวัสดุซีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน”, วารสารฉบับวิจัยและพัฒนา มจร., ปีที่ 29, ฉบับที่ 4, หน้า 437-446.
- 23) ปิยพงษ์ สุวรรณณีโชติ, ธวัชชัย ศาสกุล, วิเชียร ชาลี และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551, “ผลกระทบของน้ำทะเล ต่อคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ผสมเถ้าถ่านหินจากระบบฟลูอิดไดซ์เบด”, วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ปีที่ 31, ฉบับที่ 2, หน้า 357-370.
- 24) วิเชียร ชาลี และ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2552, “การศึกษาสมบัติความคงทนของวัสดุซีโอพอลิเมอร์จากเถ้า ถ่านหิน”, Burapha Sci., J.14 (1) หน้า 47-55
- 25) ชรินทร์ เสนาวงษ์, เกียรติสุดา สมณา และ วิเชียร ชาลี, 2553, “กำลังอัดและกำลังยึดเหนี่ยวของซีโอพอลิเมอร์ คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน”, Burapha Sci., J.15 (1) หน้า 13-22
- 26) ชรินทร์ เสนาวงษ์ และ วิเชียร ชาลี, 2554, “การแทรกซึมของคลอไรด์ในซีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่าน หินภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล”, วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 21 (2) : 187-195
- 27) กิตติกร เจริญพร้อม และ วิเชียร ชาลี, 2554, “ความถี่ของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ใน สิ่งแวดล้อมทะเล”, วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 21 (3) : 257-266
- 28) วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2554, “ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้า แกลบเปลือกไม้ภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล”, วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี 34 (3) : 203-213

- 29) วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2554, “ปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล”, วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ 7 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2554 หน้า 21-28
- 30) วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2554, “การปรับปรุงความคงทนของคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเลโดยใช้เถ้าถ่านหิน”, *Burapha Sci. J.* 16 (2) : 51-62
- 31) ปิยพงษ์ สุวรรณฉวีโชติและ วิเชียร ชาลี, 2555, “การแทรกซึมของคลอไรด์และการกัดกร่อนเหล็กในคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบดและพูลเวอร์ไรซ์ ภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล”, วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 22 (3), 2555: 1-13
- 32) วิเชียร ชาลี และ กิรติกร เจริญพร้อม, 2555, “การต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน”, วารสารวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 35(2), หน้า 157-170
- 33) ณัฐกร แนบทอง, วิเชียร ชาลี, 2555, “การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ไม่ผ่านการบดในงานคอนกรีต”, *Burapha Sci. J.* 17(2) : 38-49
- 34) วิเชียร ชาลี และ ชีรพงษ์ เชื้อพลบ, 2556, “การประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเลด้วยคลื่นอัลตราโซนิค”, วารสารวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี -36(2), หน้า 197-213
- 35) วิเชียร ชาลี, 2556, “ระดับคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล” วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา 18(2), หน้า 132-143
- 36) กิรติกร เจริญพร้อม, วิเชียร ชาลี, 2556 “ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเล 10 ปี”, วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 23 (1),: 107-119
- 37) กนกเนตร ชื่นนุกุล วริศรา โกระวิโยธิน และ วิเชียร ชาลี, 2557 “ผลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออัตราการไหลของน้ำและกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนจากเถ้าถ่านหิน” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 24(1)
- 38) ปุณยวีร์ นิลรัตน์ วัฒนา พุทธิพา และ วิเชียร ชาลี, 2558 “การประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ระยะยาวในคอนกรีตภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลจากผลทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test” วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา 20(1), หน้า 35-50
- 39) ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ วิเชียร ชาลี, 2559 “การทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 26(1).

**บทความประกอบการประชุมสัมมนาทางวิชาการระดับชาติ**

- 40) PONHSAMPATEA LY กীরติกร เจริญพร้อม เทียง ชีวะเกตุ และ วิเชียร ชาลี “ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล”, การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20, 8-10 กรกฎาคม 2558 พัทยา ชลบุรี หน้า 1-6.
- 41) REAKSMEY SOEURT PONHSAMPATEA LY และ วิเชียร ชาลี “กำลังอัดและการกักคร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 15 ปี”, การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20, 8-10 กรกฎาคม 2558 พัทยา ชลบุรี หน้า 1-6.
- 42) ณัฐวุฒิ ธารเนตร ธรรมชาติ มูลสาร และ วิเชียร ชาลี “วัสดุประสานจากเถ้าถ่านหินและสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์”, การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20, 8-10 กรกฎาคม 2558 พัทยา ชลบุรี หน้า 1-6.
- 43) ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ และ วิเชียร ชาลี “ระยะเวลาการกักคร่อนเริ่มต้นของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล”, การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 19, 14-16 พฤษภาคม 2557 อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น หน้า 831-836.
- 44) นำพล บุตรเชื้อไทย เทียง ชีวะเกตุ และ วิเชียร ชาลี, 2556, “การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทำจากมวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล”การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18, 8-10 พฤษภาคม 2556 อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ หน้า MAT113-MAT118.
- 45) วิชย พรหมรักษ์, อภิชาติ ทุมสุด และ วิเชียร ชาลี, 2556, “การป้องกันการกักคร่อนของคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเลโดยใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์”การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18, 8-10 พฤษภาคม 2556 อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ หน้า MAT107-MAT112
- 46) กীরติกร เจริญพร้อม เทียง ชีวะเกตุ วิเชียร ชาลี, 2556, “ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล”การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18, 8-10 พฤษภาคม 2556 อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ หน้า MAT234-MAT238
- 47) กীরติกร เจริญพร้อม เทียง ชีวะเกตุ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ วิเชียร ชาลี , 2554, “การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล”การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 7, 19-21 ตุลาคม 2554 อำเภอเมือง จังหวัดระยอง หน้า MAT94-MAT100.

- 48) วิเชียร ชาลี, ปิยพงษ์ สุวรรณมณี โชติ,ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ธวัชชัย สาสกุล 2553, “ผลของเถ้านหิน 3 แหล่งต่อการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล”,การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 6, 20-22 ตุลาคม 2553 อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี หน้า 40-48.
- 49) ชรินทร์ เสนาวงษ์ อธิธิพล วิไลลักษณ์และ วิเชียร ชาลี, 2552, “การทำคอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนักจากเถ้านดินระบบฟลูอิดไดซ์เบด”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14, 13-15 พฤษภาคม 2552, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี หน้า 1587-1592
- 50) ชรินทร์ เสนาวงษ์ เกียรติสุดา สมณา ปริญญา จินดาประเสริฐ และ วิเชียร ชาลี, “คุณสมบัติเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหิน”, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 5, 20-22 ตุลาคม 2552
- 51) ศิชน คุณทอง เพ็ชรพร เขาวกิจเจริญ และ วิเชียร ชาลี, “ขนาดของเสียประเภทพลาสติกที่เหมาะสมในการทำคอนกรีตมวลเบา”, การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์ วิศวกรรม และการจัดการสิ่งแวดล้อมครั้งที่ 1, 22-23 กันยายน 2552, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 39-44
- 52) ศิชน คุณทอง เพ็ชรพร เขาวกิจเจริญ และ วิเชียร ชาลี, “ปริมาณของเสียประเภทพลาสติกที่เหมาะสมในการทำคอนกรีตมวลเบา”, การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยครั้งที่ 35, 15-17 ตุลาคม 2552, เดอะไฮทรีสปอร์ต ชลบุรี
- 53) P. Suwanmaneechot , C. Jaturapitakkul and W. Chalee , 2551, “Water permeability of fly ash concrete in marine environment”, การประชุมวิชาการคอนกรีตและจีโอพอลิเมอร์แห่งชาติครั้งที่ 2, 5-6 กันยายน 2551, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น หน้า 49-55.
- 54) รัฐพล สมณา วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551, “ผลกระทบของเถ้านหิน 3 แหล่ง ต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต”, การประชุมวิชาการคอนกรีตและจีโอพอลิเมอร์แห่งชาติครั้งที่ 2, 5-6 กันยายน 2551, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น หน้า 107-112.
- 55) วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551, “ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมของคลอไรด์โดยวิธีเร่งกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต”, การประชุมวิชาการคอนกรีตและจีโอพอลิเมอร์แห่งชาติครั้งที่ 2, 5-6 กันยายน 2551, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น หน้า 66-72.
- 56) วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2550, “สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล”, การประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติครั้งที่ 3, 24-26 ตุลาคม 2550, โรงแรมลองบีช การ์ดีน โฮเทล แอนด์ สปา, พัทยา ชลบุรี หน้า 103-109

- 57) ธวัชชัย สาสกุล , ปิยพงษ์ สุวรรณมณี โชติ, วิเชียร ชาลี, ชัย จาตุรพิทักษ์กุลและ เอกชัย ภัทรวงษ์  
ไพบุรย์, 2550, “กำลังอัดและการซึมผ่านคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์  
ประเภทที่ 5 ในสภาพแวดล้อมทะเล”, การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12, 2-4 พฤษภาคม 2550,  
โรงแรมอมรินทร์ลา구나 จ. พิษณุโลก หน้า 41-46
- 58) Wichian Chalee, Prasit Ausapanit and Chai Jaturapitakkul, “A model for predicting the required cover  
depth of fly ash concrete in marine environment, Annual Concrete Conference 2, Udon Thani, 2006.
- 59) Chalee, W., Teekavanit, M., and Jaturapitakkul, C., “Compressive Strength and Chloride Penetration  
Profile of Fly Ash Concrete under 4-Year Exposure in Sea Water”, International Conference on Pozzolan,  
Concrete and Geopolymer, May 24-25, 2006, Khon Kaen, Thailand, pp. 180-188.
- 60) Smith Songpiriyakij, Wichian Chalee, Chai Jaturapitakkul, “Model for Predicting Compressive Strength  
of Fly Ash Concrete from Fly Ash Fineness,” Proceeding of 8th National Convention on Civil  
Engineering, Khon Kean, 2003.
- 61) วีรวัฒน์ สิ้นศิริ, วิเชียร ชาลี, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และปริญญา จินดาประเสริฐ, 2546, "ผลกระทบของความ  
ละเอียดเฉลี่ยต่อกำลังอัดและโครงสร้างโพรงในเพสต์", การประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติ ครั้งที่ 1,  
14-16 พฤษภาคม, กาญจนบุรี, หน้า 225-232.
- 62) วิเชียร ชาลี, มณฑิธร คุ้มวานิช, ประสิทธิ์ อุตส่าห์พานิช, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ  
ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2548, “ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและระยะหุ้มเหล็กต่อการกัดกร่อนใน  
คอนกรีตผสมเถ้าลอยในสภาวะแวดล้อมทะเล”, การประชุมวิชาการเทคโนโลยีและนวัตกรรมสำหรับการ  
พัฒนาอย่างยั่งยืน, 25-26 มกราคม 2549, ขอนแก่น, หน้า 527-532.
- 63) อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, ชาญชัย พลตรี, และ วิเชียร ชาลี, 2548, “การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุซีโอ  
พอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน”, การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติครั้งที่ 10, 2-4 พฤษภาคม 2548, โรงแรมแอม  
บาสซาเดอร์ซิตี จอมเทียน พัทยา ชลบุรี

#### บทความวิชาการ

- 1) วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2552, “คอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเล” โยธาสาร (วิศวกรรมสถาน  
แห่งประเทศไทย), ปีที่ 20, ฉบับที่ 6. หน้า 82-89.
- 2) วิเชียร ชาลี, 2552, “ความคงทนของคอนกรีตในสภาพแข็งตัว” พัฒนาเทคนิคศึกษา, มจพ, ปีที่ 21, ฉบับที่ 69.  
หน้า 11-17.

- 3) วิเชียร ชาติ, 2554, “อายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเล” โยธาสาร (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย), ปีที่ 23, ฉบับที่ 2. หน้า 1-6.