



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

### โครงการวิจัยเรื่อง

การศึกษาระยะเวลาที่กัดกร่อนเริ่มต้นของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้  
ภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล

(A study of time to initial corrosion of steel reinforcement in concrete containing  
rice husk-bark ash under marine environment)

คณะผู้วิจัย

นายวิเชียร ชาลี

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

สนับสนุนโดย ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

กันยายน พ.ศ. 2557

ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ตามที่ นายวิเชียร ชาลี พนักงานมหาวิทยาลัย ตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ สังกัดภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย เรื่อง “การศึกษาระยะเวลาที่ครื่องเริ่มต้นของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล” จากทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557 มีงบประมาณทั้งโครงการ 590,000 บาท ขณะนี้ผลการดำเนินการวิจัยเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้ว

รายละเอียดของโครงการวิจัย

ผู้เสนอ : นายวิเชียร ชาลี  
หน่วยงาน : ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา  
ระยะเวลาดำเนินการ : 12 เดือน  
งบประมาณ : 590,000 บาท

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาระยะเวลาเริ่มกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียด (GRBA) ที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล โดยใช้คอนกรีตควบคุมทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.45 และ 0.65 ในแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ที่ผ่านการบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน หล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด 200x200x200 มม.<sup>3</sup> และฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. โดยมีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเท่ากับ 10 20 50 และ 75 มม. นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่บริเวณชายฝั่งทะเลใน จ. ชลบุรี ทำการเก็บตัวอย่างทดสอบปริมาณคลอไรด์อิสระในคอนกรีต ณ ตำแหน่งที่ฝังเหล็ก การกัดกร่อนของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต และทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีต หลังแช่คอนกรีตในน้ำทะเลเป็นเวลา 2 3 5 และ 7 ปี จากข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีตและปริมาณคลอไรด์วิกฤติ สามารถวิเคราะห์การกัดกร่อนเริ่มต้นในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ได้ ผลการวิจัยพบว่า การใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ผสมในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 25 ส่งผลให้ยืดระยะเวลาที่เหล็กเสริมในคอนกรีตเริ่มกัดกร่อนอย่างชัดเจน

คำสำคัญ : เถ้าแกลบเปลือกไม้, การกัดกร่อนเริ่มต้น, ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ, ระยะหุ้มคอนกรีต, สิ่งแวดล้อมทะเล

## Abstract

This research studied the initial corrosion of reinforcing steel in concrete containing ground rice husk-bark ash (GRBA) under marine environment. Control concretes were prepared using Portland cement type I with W/B ratios of 0.45 and 0.65. GRBA concrete were cast using GRBA to replace Portland cement type I at the percentages of 15, 25, 35, and 50% by weight of binder at the same W/B ratios of the control concretes. Concrete cube specimens of 200x200x200 mm<sup>3</sup> were cast and steel bars of 12-mm in diameter and 50-mm in length were embedded with concrete coverings of 10, 20, 50, and 75 mm. Concrete specimens were exposed to a tidal zone of marine environment in Chonburi province. The specimens were tested for free chloride content at the position of embedded steel bar, corrosion of the embedded steel bar and free chloride penetration in concrete after being exposed to tidal zone of sea water for 2, 3, 5, and 7 years. The free chloride penetration and chloride threshold levels obtained from this testing led to the determination of time to initial corrosion of GRBA concrete. The results found that the use of GRBA as high as 25% replacement in concrete greatly prolongs the time to initial corrosion of the reinforcing steel in the concretes.

**Keywords:** rice husk-bark ash, initial corrosion, chloride threshold content, concrete cover, marine environment

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาที่ให้ความสะดวกด้านเครื่องมือและห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ธุรการ และช่างเทคนิคประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่ช่วยประสานงานและช่วยเหลือเป็นอย่างดี ตลอดจนขอขอบคุณ โรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี ที่ได้อนุเคราะห์สถานที่เช่าตัวอย่าง

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า การศึกษาระยะเวลาดังกล่าวจะเริ่มต้นของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการใช้งานในสิ่งแวดล้อมทะเล จะมีประโยชน์ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตให้มีความสอดคล้องกับอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่มีการใช้งานในสิ่งแวดล้อมทะเล ตลอดจนเพิ่มฐานข้อมูลเพื่อนำไปใช้แก้ปัญหาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเลประเทศไทย และช่วยส่งเสริมการใช้ถั่วแกลบเปลือกไม้ในงานคอนกรีตให้เป็นรูปธรรมมากขึ้น

## สารบัญ

### สารบัญเนื้อหา

เนื้อหา	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
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 คอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเล	4
2.2 การทำลายของคอนกรีตที่สัมผัสกับสภาวะแวดล้อมทะเล	4
2.3 การทำลายเนื่องจากลักษณะทางกายภาพ	5
2.4 การทำลายเนื่องจากลักษณะทางเคมี	7
2.5 เถ้าแกลบ - เปลือกไม้	8
2.6 อายุการใช้งานของ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	9
2.7 ปฏิกริยาปอซโซลาน	16
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
<b>บทที่ 3 วิธีการศึกษา</b>	<b>19</b>
3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา	19
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	19

3.3 วิธีการทดสอบ	20
<b>บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล</b>	<b>28</b>
4.1 สมบัติของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา	28
4.2 สมบัติของน้ำทะเลที่แช่ตัวอย่างคอนกรีต	29
4.3 ข้อมูลด้านความคงทนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้หลัง แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี	30
4.4 การหาความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตที่ผสม เถ้าแกลบเปลือกไม้	35
4.5 ความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์วิกฤติ	42
4.6 ระยะเวลาที่คร่อนเริ่มต้นของเหล็กเสริมในคอนกรีต	44
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	<b>47</b>
5.1 สรุปผล	47
5.2 ข้อเสนอแนะ	48
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>49</b>
<b>ภาคผนวก ก</b>	<b>51</b>
<b>ภาคผนวก ข</b>	<b>57</b>

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ส่วนผสมคอนกรีต	21
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน	29
4.2 สมบัติของน้ำทะเลบริเวณ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี	30
4.3 ระดับคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้	36
ผ1 ปริมาณการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้หลัง แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 2 และ 3 ปี	52
ผ2 ปริมาณการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้หลัง แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 และ 7 ปี	55



## สารบัญรูปร่างภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะการกักกร่อนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเล	4
2.2 ภาพขยายของอนุภาคของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ก่อนและหลังการบด	9
2.3 อายุการใช้งานของคอนกรีต	10
2.4 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่แนะนำในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเถ้าถ่านหินในสิ่งแวดล้อมทะเล	12
2.5 การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มี $W/B = 0.45$ ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 2, 3, 4, 5, 7 และ 10 ปี	14
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์วิกฤติกับระยะเวลาที่แช่คอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเล	14
2.7 ผลของเถ้าถ่านหินต่อระยะเวลาที่เริ่มมีการกักกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตเมื่อแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล	15
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	20
3.2 ตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง	22
3.3 การเตรียมตัวอย่างทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต	22
3.4 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์โดยใช้กรดเป็นตัวทำลาย	25
3.5 การทดสอบการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี	26
4.1 ผลของเถ้าแกลบเปลือกไม้ต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 7 ปี	31
4.2 ผลของเถ้าแกลบเปลือกไม้ต่อร้อยละของกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี เทียบกับอายุ 28 วัน	32
4.3 การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี	33
4.4 การแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี	34
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเกิดสนิมกับปริมาณคลอไรด์อิสระที่บริเวณใกล้ผิวเหล็กในคอนกรีตควบคุมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 2 3 5 และ 7 ปี	36
4.6 การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีตธรรมดาที่มี $W/B$ เท่ากับ 0.45 หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 2 3 5 และ 7 ปี	37

รูปที่	หน้า
4.7 การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่มี W/B เท่ากับ 0.45 หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 2 3 5 และ 7 ปี	37
4.8 การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่มี W/B เท่ากับ 0.45 หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 2 3 5 และ 7 ปี	38
4.9 การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่มี W/B เท่ากับ 0.45 หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 2 3 5 และ 7 ปี	38
4.10 การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่มี W/B เท่ากับ 0.45 หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 2 3 5 และ 7 ปี	39
4.11 การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีตธรรมดาที่มี W/B เท่ากับ 0.65 หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 2 3 5 และ 7 ปี	39
4.12 การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่มี W/B เท่ากับ 0.65 หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 2 3 5 และ 7 ปี	40
4.13 การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่มี W/B เท่ากับ 0.65 หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 2 3 5 และ 7 ปี	40
4.14 การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่มี W/B เท่ากับ 0.65 หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 2 3 5 และ 7 ปี	41
4.15 การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่มี W/B เท่ากับ 0.65 หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 2 3 5 และ 7 ปี	41
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์วิกฤตกับระยะเวลาแช่น้ำทะเลในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้	43
4.17 ผลของเถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดต่อระยะเวลาที่คร่อนเริ่มต้นของเหล็กเสริม ในคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้ง	46

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาพแวดล้อมทะเลมีอายุการใช้งานที่สั้นกว่าโครงสร้างปกติ และเป็นที่ยอมรับที่จะประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้างดังกล่าวให้ถูกต้องได้ ทั้งนี้เนื่องจากความเสียหายที่เกิดขึ้นมีหลายองค์ประกอบที่เกี่ยวข้อง เช่น คุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้ก่อสร้าง ลักษณะการรับแรงเชิงกล และสภาพแวดล้อมที่โครงสร้างสัมผัสอยู่ อย่างไรก็ตามการประเมินอายุของโครงสร้างภายใต้สภาวะใช้งานในสภาพแวดล้อมทะเล เป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องศึกษา เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบในการออกแบบโครงสร้างให้สามารถใช้งานได้ยาวนานมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการซ่อมแซมโครงสร้างในสภาพแวดล้อมดังกล่าวมีค่าใช้จ่ายที่สูง

อายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีต หมายถึง ระยะเวลาตั้งแต่ที่ก่อสร้างโครงสร้างเสร็จจนกระทั่งมีความเสียหายเกิดขึ้นในโครงสร้างคอนกรีตที่สามารถสังเกตได้ หรือระดับความเสียหายที่ยอมรับได้ (acceptable damage level) (CSIRO, 2000; Chindaprasirt, et al.,2000; Cao, et al.,1999) โดยทั่วไปพบว่า เมื่อโครงสร้างคอนกรีตเริ่มมีความเสียหายที่สามารถสังเกตได้เกิดขึ้น ความเสียหายที่เกิดขึ้นในช่วงหลังจะเร็วมาก ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างคอนกรีตมีการเสื่อมสภาพ และการแทรกซึมของคลอไรด์ ความชื้น และ ออกซิเจน ที่ส่งผลให้เกิดความเสียหายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีมากขึ้น ดังนั้นการพิจารณาอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเล ส่วนใหญ่จะพิจารณาถึงช่วงอายุที่โครงสร้างเริ่มมีความเสียหายเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งเรียกว่า ระยะเวลาที่ก่อการเริ่มต้น (time to initial corrosion) ทั้งนี้เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายมากจนกระทั่งไม่สามารถซ่อมแซมได้ หรือมีค่าใช้จ่ายในการซ่อมที่สูงเกินไป

การศึกษาระยะเวลาที่ก่อการเริ่มต้นของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการใช้งานในสิ่งแวดล้อมทะเล มีประโยชน์ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตให้มีความสอดคล้องกับระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก และอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องการออกแบบใช้งาน การประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจากเวลาที่เหล็กเสริมในคอนกรีตเริ่มกัดกร่อนสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการแทรกซึมปริมาณคลอไรด์วิกฤติกับระยะเวลาที่โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมทะเล ซึ่งการศึกษาจะต้องเก็บข้อมูลในสภาพแวดล้อมจริงภายใต้ระยะเวลาที่ยาวนาน เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องและน่าเชื่อถือในสภาพแวดล้อมจริง การศึกษาถึงแนวทางในการเลือกคอนกรีตเพื่อใช้ก่อสร้างในสิ่งแวดล้อมทะเลได้พิจารณาถึงการปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัว ให้สามารถต้านทานการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมดังกล่าว โดย

มุ่งไปที่ลักษณะทางกายภาพที่ต้องการให้คอนกรีตมีความทึบน้ำและต้านทานการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์และซัลเฟตจากน้ำทะเลที่จะเข้าไปทำลายคอนกรีตและเหล็กเสริม นอกจากนี้ยังพิจารณาถึงลักษณะทางเคมีที่ต้องการลดส่วนผสมของสารตั้งต้นในคอนกรีตที่อาจเกิดปฏิกิริยากับคลอไรด์และซัลเฟตและก่อให้เกิดความเสียหายได้ การศึกษาที่ผ่านมาพบว่า การใช้วัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าถ่านหิน และเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่บดละเอียด ผสมแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สามารถต้านทานการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลได้ดี โดยเฉพาะเถ้าแกลบเปลือกไม้ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากโรงไฟฟ้าชีวมวลที่ใช้แกลบที่ได้จากโรงสีข้าวและเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ได้จากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ มีอัตราส่วนระหว่างแกลบต่อเปลือกไม้ก่อนการเผาเท่ากับ 65:35 โดยน้ำหนัก โดยใช้อุณหภูมิในการเผาคงที่ประมาณ 800 – 900 องศาเซลเซียส เมื่อนำมาบดละเอียดจะมีซิลิกาสูงและมีสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำ และลดการเกิดทางเคมีที่ส่งผลให้เกิดความเสียหายเนื่องจากน้ำทะเลได้ ดังนั้นการศึกษาข้อมูลด้านความคงทนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ภายใต้ระยะเวลาที่คอนกรีตแช่น้ำทะเลยาวนานขึ้น สามารถที่จะวิเคราะห์ถึง ปริมาณเถ้าแกลบเปลือกไม้ ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก และระยะเวลาที่คอนกรีตเสริมเหล็กเริ่มมีการกัดกร่อน ซึ่งสามารถใช้เป็นข้อมูลด้านความคงทนสำหรับคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ เพื่อออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องการใช้งานในสิ่งแวดล้อมทะเลให้เป็นรูปธรรมและชัดเจนมากขึ้น ดังนั้นในการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะหาระยะเวลาที่เหล็กเสริมในคอนกรีตเริ่มมีการกัดกร่อน โดยใช้ฐานข้อมูลด้านความคงทนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่แช่น้ำทะเลที่ทดสอบไว้แล้ว ที่อายุ 2, 3, 5 ปี และจะเก็บข้อมูลเพิ่มเติมที่อายุ 7 ปี

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของเถ้าแกลบเปลือกไม้ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก ต่อระยะเวลาการกัดกร่อนเริ่มต้นในคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลถึง 7 ปี

1.2.2 เพื่อศึกษาการใช้ข้อมูลด้านความคงทนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตเพื่อใช้ในสภาพแวดล้อมทะเล ให้เหมาะสมทั้งคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติด้านความคงทนควบคู่กันไป

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้ศึกษาระยะเวลาการกัดกร่อนเริ่มต้นในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้บนฐานข้อมูลทดสอบตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในสภาพแวดล้อมทะเลถึงเวลา 7 ปี โดยข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ระยะเวลาการกัดกร่อนเริ่มต้น ได้แก่ ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (threshold chloride level) และการแทรกซึมของคลอไรด์ (chloride penetration profile) โดยตัวอย่างคอนกรีตที่ทำวิจัยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

เท่ากับ 0.45 และ 0.65 ใช้เส้นแกลบเปลือกไม้บดละเอียดค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มม<sup>3</sup> และฟิ่งเหล็ก RB 12 ที่ตำแหน่งมุมของก้อนตัวอย่างที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 10, 20, 50 และ 75 มม. ทำการเก็บข้อมูลด้านความคงทนเพื่อวิเคราะห์ระยะเวลาการกัดกร่อนเริ่มต้นของคอนกรีต ได้แก่ ทดสอบการเกิดสนิมเหล็กและปริมาณคลอไรด์ที่ตำแหน่งเหล็กเสริมเพื่อหาปริมาณคลอไรด์วิกฤติ และทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ เพื่อหาความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์วิกฤติ ตลอดจนทดสอบกำลังอัด ของคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล เพื่อยืนยันการนำไปใช้งานให้เหมาะสมทั้งสมบัติเชิงกลและสมบัติด้านความคงทนต่อไป

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบระยะเวลาที่คอนกรีตที่ผสมเส้นแกลบเปลือกไม้เริ่มมีการกัดกร่อนหลังจากแช่ในน้ำทะเล ซึ่งสามารถใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ต้องการใช้งานในสิ่งแวดล้อมทะเลให้เหมาะสมทั้ง ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก ปริมาณของเส้นแกลบเปลือกไม้ และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ที่สอดคล้องกับอายุการใช้งานที่ต้องการได้

1.4.2 เป็นการส่งเสริมการนำวัสดุเหลือทิ้งจากผลผลิตทางอุตสาหกรรมไปสร้างมูลค่า โดยใช้ให้เกิดประโยชน์ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ตลอดจนเป็นการลดพลังงาน ลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม และช่วยลดปัญหาโลกร้อนได้อีกทางหนึ่งด้วย

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 คอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเล

โครงสร้างของคอนกรีตในน้ำทะเลและบริเวณชายฝั่งเป็นส่วนที่ต้องเผชิญกับสภาพแวดล้อมที่แปรปรวนส่งผลให้การกัดกร่อนเกิดขึ้นค่อนข้างสูง (ดังแสดงในรูปที่ 2.1) ไม่ว่าจะเป็นการกัดกร่อนเนื่องจากสภาพแวดล้อมทางกายภาพ เช่น แรงกระแทกจากคลื่น ทราบ กรวดโดยตรง หรือการกัดกร่อนที่เกิดจากสารประกอบเคมีซึ่งเป็นองค์ประกอบในน้ำทะเล ซึ่งการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณจะมีความรุนแรงที่แตกต่างกันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบในน้ำทะเลและสภาพแวดล้อมทางกายภาพ เช่น ความแปรปรวนของระดับน้ำทะเล ความแรงและการพัดพาของคลื่น ตลอดจนสิ่งแวดล้อมภายนอกที่มีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการกัดกร่อนทางเคมีต่อโครงสร้างคอนกรีต



รูปที่ 2.1 ลักษณะการกัดกร่อนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเล

#### 2.2 การทำลายของคอนกรีตที่สัมพันธ์กับสภาวะแวดล้อมทะเล

การเลือกคอนกรีตเพื่อใช้ในการงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเลนั้น จำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงสาเหตุที่ก่อให้เกิดการทำลายโครงสร้างดังกล่าว จากนั้นจึงพิจารณาถึงการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตเพื่อรองรับการทำลาย โดยทั่วไปแล้วการทำลายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเลเกิดจาก 2 สาเหตุใหญ่ๆ ได้แก่ สาเหตุทางกายภาพ และสาเหตุทางเคมี ดังนั้นการป้องกันการทำลายโครงสร้างดังกล่าว สามารถทำได้โดยการเลือกคอนกรีตให้มีความทึบน้ำสูง และทนทานต่อสภาวะแวดล้อมทางกายภาพ หรือการใช้วิธีการเคลือบผิวของคอนกรีต

โดยทั่วไปแล้ว พบว่า น้ำทะเลบริเวณอ่าวไทย มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ในช่วง 7.8 ถึง 8.2 ปริมาณคลอไรด์มีค่าอยู่ระหว่าง 16,000 ถึง 19,000 มก./ล. และปริมาณซัลเฟตมีค่า 2,200 ถึง 2,700 มก./ล. (Chalee et al.,2010) โดยปริมาณคลอไรด์ที่มีในน้ำทะเลส่วนใหญ่จะเป็น โซเดียมคลอไรด์ประมาณร้อยละ 90 และอีกประมาณร้อยละ 10 เป็นแมกนีเซียมคลอไรด์ จากข้อกำหนดของ ACI 318-05 ที่ระบุว่า คอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำที่มีซัลเฟตละลายอยู่ในปริมาณ 1,500 ถึง 10,000 มก./ล. ถือว่าคอนกรีตอยู่ในสถานะที่อาจเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต อย่างรุนแรง ACI จึงแนะนำให้ใช้คอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำกว่า 0.45 และมีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ไม่น้อยกว่า 310 กก./ซม.<sup>2</sup> ส่วนคอนกรีตที่เกิดการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม ACI จึงเสนอให้ใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำกว่า 0.45 และมีกำลังรับแรงอัดไม่น้อยกว่า 350 กก./ซม.<sup>2</sup> ที่อายุ 28 วัน

## 2.3 การทำลายเนื่องจากลักษณะทางกายภาพ

### 2.3.1 การสึกกร่อน

ความต้านทานการสึกกร่อนของคอนกรีตหมายถึงความสามารถของผิวหน้าของคอนกรีตที่จะทนทานต่อการขัดสีหรือเสียดสีของวัตถุอื่น ซึ่งในการทดสอบคอนกรีตเพื่อหาความต้านทานต่อการสึกกร่อนเป็นเรื่องยาก เนื่องจากความเสียหายจากการสึกกร่อนที่เกิดขึ้นมาจากหลายสาเหตุ ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมที่คอนกรีตสัมผัส โดยทั่วไปแล้วความสามารถในการต้านทานต่อการสึกกร่อนของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับกำลังอัดของคอนกรีต คุณสมบัติและคุณภาพของมวลรวม วิธีการบดแต่งผิวหน้า การใช้วัสดุเคลือบผิวหน้า และการบ่มคอนกรีต โดยจากผลการทดสอบที่ผ่านมาพบว่า กำลังอัดของคอนกรีตเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการบ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานการสึกกร่อน แต่ในคอนกรีตที่มีปริมาณฟองอากาศสูงก็จะทำให้การต้านทานการสึกกร่อนได้ต่ำลง ดังนั้นการเพิ่มความสามารถในการต้านทานการสึกกร่อนของคอนกรีตสามารถทำได้ โดยการเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตให้สูงขึ้น นั่นคือใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ และลดปริมาณฟองอากาศในคอนกรีต นอกจากนี้จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้เถาถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีต ร้อยละ 20 ถึง 30 โดยน้ำหนัก สามารถต้านทานการสึกกร่อนได้ดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถาถ่านหิน

### 2.3.2 การหดตัวแบบแห้ง

การหดตัวแบบแห้งเกิดจากการที่คอนกรีตสูญเสียน้ำที่บริเวณผิว และส่งผลให้คอนกรีตเกิดการหดตัวและแตกร้าว ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมที่คอนกรีตสัมผัสมีความชื้นต่ำ และทำให้น้ำอิสระ (free water) ในคอนกรีตระเหยออกมา โดยปัญหาการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง จะเกิดขึ้นกับคอนกรีตที่อยู่ในสถานะแข็งตัว (hardened state) แต่กลไกของการหดตัวและแตกร้าวจะคล้ายกับการแตกร้าวแบบพลาสติก โดยทั่วไปแล้วการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรภายในเนื้อคอนกรีตจะไม่เท่ากับ

ปริมาณของน้ำที่สูญเสียออกจากคอนกรีต ซึ่งในช่วงแรกของการสูญเสีย น้ำออกจากผิวคอนกรีต คอนกรีตจะยังไม่เกิดการแตกร้าวเกิดขึ้น หรืออาจเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้งอย่างต่อเนื่อง ทำให้น้ำที่อยู่ในโพรงคาปิลลารี (Capillary pores) เกิดการสูญเสีย และในสภาวะนี้เองที่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรภายในเนื้อซีเมนต์เจลใกล้เคียงกับปริมาตรของน้ำที่สูญเสียออกไป ทำให้เกิดแรงดึงขึ้นในช่องว่างคาปิลลารีในเนื้อซีเมนต์เจล และเกิดการแตกร้าวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรในซีเมนต์เจลได้ การหดตัวแบบแห้งที่เกิดขึ้นในเนื้อซีเมนต์เพสต์จะขึ้นอยู่กับลักษณะของโครงสร้างทางกายภาพของซีเมนต์เจล มากกว่าองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ [2] ช่วงเวลาที่เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง มักจะเป็นช่วงเวลาหลังจากเสร็จสิ้นการบ่มเป็นต้นไป รอยแตกร้าวนี้อาจจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ แม้อายุคอนกรีตจะมากเป็นปีแล้วก็ตาม แต่ส่วนใหญ่แล้วมักจะเริ่มเกิดในช่วง 2 ถึง 3 เดือนแรกหลังจากสิ้นสุดการบ่ม นอกจากนี้พบว่าการหดตัวแบบแห้งจะเกิดกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมขนาดเล็กกว่าขนาดใหญ่ ตลอดจนการบ่มคอนกรีตด้วยไอน้ำสามารถที่จะลดปัญหาการแตกร้าว เนื่องจากการหดตัวแบบแห้งได้ค่อนข้างชัดเจน

จะเห็นได้ว่ากลไกการเกิดการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้งทั้งหมด เกิดขึ้นในเนื้อซีเมนต์เพสต์ซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ดังนั้นการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตให้มีปริมาณของปูนซีเมนต์ลดลงซึ่งอาจใช้วัสดุปอซโซลานผสมในคอนกรีต และควบคุมปริมาณน้ำในคอนกรีตให้ลดลง ตลอดจนให้มีส่วนผสมของมวลรวมขนาดใหญ่ในปริมาณที่มากขึ้น ก็จะเป็นแนวทางป้องกันการเกิดการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้งได้

### 2.3.3 การเสื่อมสภาพเนื่องจากสาเหตุทางชีวภาพ

การเสื่อมสภาพเนื่องจากสาเหตุทางชีวภาพของคอนกรีต เกิดขึ้นจากสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กทั้งพืชและสัตว์ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่คอนกรีตสัมผัส เช่น โครงสร้างคอนกรีตในน้ำทะเล หรือในแหล่งน้ำเสีย เป็นต้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการเสื่อมสภาพของคอนกรีตเนื่องจากสาเหตุทางชีวภาพเกิดได้ 2 ลักษณะ คือ การทำลายโดยตรงทางกายภาพของสิ่งมีชีวิต เช่น รา ตะไคร่น้ำ รากพืช หอย เพรียง เป็นต้น แต่ความเสียหายที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้จะไม่มีความรุนแรงไม่มากนัก เนื่องจากเป็นผลกระทบที่ผิวของคอนกรีตมากกว่า แต่ด้วยคุณสมบัติของคอนกรีตที่มีความ แข็ง และแน่น การทำลายในลักษณะนี้ไม่ค่อยเห็นผลชัดเจน แต่ทั้งนี้ก็จะส่งผลเกื้อหนุนให้การทำลายในลักษณะอื่นๆ ได้ง่ายขึ้น ลักษณะที่สองเป็นการทำลายโดยทางอ้อม ซึ่งมีความซับซ้อนมากขึ้น โดยเกิดจากสิ่งมีชีวิตพวกรา ตะไคร่น้ำ และแบคทีเรีย ที่สามารถย่อยสลายซัลเฟต โดยจะเปลี่ยนซัลเฟตในสภาพแวดล้อมให้กลายเป็นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) ซึ่งละลายในความชื้นในผิวของคอนกรีตกลายเป็นกรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ ) ที่ส่งผลต่อการทำลายคอนกรีตได้ ซึ่งการย่อยสลายจะเกิดขึ้นได้เร็วในสภาวะที่ไร้ออกซิเจน



## 2.4 การทำลายเนื่องจากลักษณะทางเคมี

### 2.4.1 การทำลายเนื่องจากคลอไรด์ (Broomfield, 1996)

คลอไรด์เป็นตัวหลักที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริม และเป็นผลให้คอนกรีตบริเวณรอบเหล็กเสริมเสียหายเนื่องจากการขยายตัวของเหล็กเสริมที่เป็นสนิม กลไกการกัดกร่อนเริ่มต้นจาก เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำ จะเกิดฟิล์มบางๆของ  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  เคลือบผิวเหล็กที่ฝังในคอนกรีตไว้ ฟิล์มออกไซด์นี้จะทำหน้าที่ป้องกันการเกิดสนิม อย่างไรก็ตามไอออนของคลอไรด์ก็สามารถทำลายฟิล์มนี้ได้ และเมื่อมีน้ำและออกซิเจนมาสัมผัสกับเหล็กเสริมบริเวณที่ไม่มีฟิล์มออกไซด์ปกป้องอยู่ เหล็กก็จะเป็นสนิม การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นทำให้เหล็กเสริมเกิดการขยายตัว ปริมาตรเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดรอยแตก การหลุดล่อน ไปจนถึงคอนกรีตกับเหล็กเสริมไม่มีแรงยึดเหนี่ยวต่อกัน ขณะเดียวกันการเกิดสนิมที่เหล็กเสริมทำให้พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมมีขนาดเล็กลง ส่งผลให้กำลังรับแรงของเหล็กเสริมคอนกรีตลดลงด้วย

กระบวนการการกัดกร่อนของเหล็กเสริม เริ่มต้นเมื่อมีปริมาณคลอไรด์เพียงเล็กน้อยที่ผิวเหล็ก แต่เป็นการยากที่จะกล่าวว่า ปริมาณหรือความเข้มข้นของคลอไรด์ดังกล่าวมีค่าเป็นเท่าใดที่จะกระตุ้นให้เหล็กเสริมเป็นสนิม เนื่องจากขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ซึ่งยังไม่สามารถอธิบายให้ชัดเจนได้ ยิ่งไปกว่านั้น การแพร่ของคลอไรด์เข้าไปยังซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว มีรูปแบบที่ไม่แน่นอน ในงานวิจัยที่ผ่านมา ได้พยายามที่จะศึกษาปริมาณคลอไรด์ที่ส่งผลให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเริ่มเป็นสนิม หรือที่เรียกว่า ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (Threshold chloride) ซึ่งพบว่าปริมาณคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตธรรมดาามีค่าในช่วงร้อยละ 0.3-0.5 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินจะมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา และพบว่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.1-0.3 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน นอกจากนี้ในปริมาณคลอไรด์ที่เท่ากัน พบว่าคอนกรีตที่มีคลอไรด์ผสมอยู่ในปฏิภาคส่วนผสมตั้งแต่เริ่มต้น จะมีอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่มีคลอไรด์ผสมอยู่ในปฏิภาคส่วนผสมหลังจากคอนกรีตนั้นมีการใช้งานไปแล้ว

โดยทั่วไป ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตไม่ได้เป็นตัวบ่งชี้ถึงความรุนแรงของการกัดกร่อนเพียงอย่างเดียว แต่คลอไรด์ทั้งหมดสามารถจำแนกออกได้ 3 ส่วน คือ Chemically bound ซึ่งรวมอยู่ในผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ อีกส่วนหนึ่งคือ Physically bound ซึ่งติดอยู่ที่ผิวโพรงของเจล (Gel pores) และส่วนสุดท้าย เรียกว่า คลอไรด์อิสระ ซึ่งมีอิทธิพลต่อการเกิดสนิมของเหล็กอย่างสูง อย่างไรก็ตาม การกระจายตัวของคลอไรด์ไอออนทั้ง 3 ชนิดไม่สามารถคงอยู่ได้ในสถานะเดิมตลอดเวลา แต่สามารถปรับเปลี่ยนเพื่อให้ไอออนทั้งหมดอยู่ในสภาวะสมดุล เช่น ตามปกติคลอไรด์อิสระจะพบตามน้ำที่อยู่ในช่องว่าง (Pore water) ของคอนกรีต ถ้าคลอไรด์อิสระมีปริมาณที่มากเกินไปจนความจำเป็น คลอไรด์อิสระนั้นจะกลายสภาพไปเป็นคลอไรด์ยึดจับ เพื่อให้ไอออนอื่นๆ อยู่ในสภาพสมดุล

#### 2.4.2 การทำลายเนื่องจากซัลเฟต (Neville, 1996)

เกลือซัลเฟตมีอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติทั้งในดินและในน้ำใต้ดิน เช่น โซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), โพแทสเซียมซัลเฟต ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ), แมกนีเซียมซัลเฟต ( $\text{MgSO}_4$ ) และแคลเซียมซัลเฟต ( $\text{CaSO}_4$ ) ความรุนแรงของการทำลายของซัลเฟตต่อคอนกรีตขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของซัลเฟต และความชื้น ซึ่งสารซัลเฟตที่อยู่ในสถานะของแข็งจะไม่เป็นอันตรายต่อคอนกรีต และการทำลายของซัลเฟตจะไม่เกิดขึ้น เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้ง แต่มีความรุนแรงมากขึ้นเมื่อคอนกรีตเปียกชื้น และรุนแรงอย่างมากในกรณีที่อยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง โดยสารละลายจะค่อยๆ ซึมเข้าไปภายในช่องว่างของเนื้อคอนกรีตและทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ ทำให้เกิดการขยายตัวและแตกร้าวจนไม่สามารถรับกำลังได้

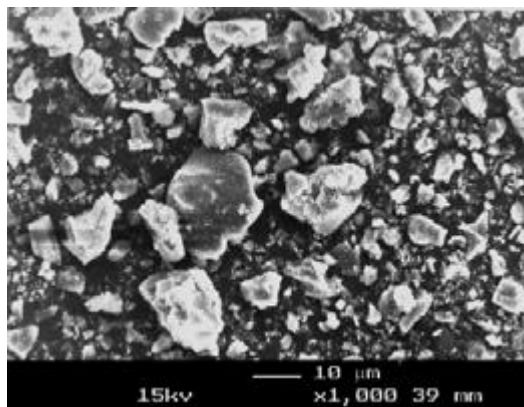
ซัลเฟตสามารถทำลายโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ได้ โดยทำปฏิกิริยากับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมอลูมิเนตไฮดรต และแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต ทำให้ได้ยิปซัม แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต และซิลิกาเจล ที่มีปริมาณมากขึ้นทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวและแตกร้าวได้ในที่สุด จะเห็นได้ว่าซัลเฟตสามารถซึมผ่านเข้าไปในเนื้อคอนกรีต และเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนส่งผลให้โครงสร้างเกิดความเสียหาย ซึ่งการพัฒนาคอนกรีตให้มีความทนน้ำและทนทานต่อสภาพแวดล้อมทางกายภาพ เป็นแนวทางในการป้องกันการกัดกร่อนได้ดี และการใช้วัสดุปอซโซลาน เช่น การใช้เถ้าถ่านหิน ซิลิกาฟูม ตะกรันเตาถลุงเหล็ก และเถ้าแกลบ สามารถลดปฏิกิริยาที่ทำให้การขยายตัวเนื่องจากซัลเฟตลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้ลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นสารประกอบตั้งต้นที่ทำปฏิกิริยากับซัลเฟตแล้วส่งผลให้เกิดความเสียหาย นอกจากนี้การใช้วัสดุปอซโซลานบางตัว เช่น เถ้าถ่านหิน แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณที่เหมาะสม (ร้อยละ 25 ถึง 35) ยังเป็นการลดปริมาณของ  $\text{C}_3\text{A}$  ในวัสดุประสาน พร้อมทั้งช่วยให้คอนกรีตมีความทนน้ำและลดการแทรกซึมของสารเคมีต่างๆ ที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีตอีกด้วย

#### 2.5 เถ้าแกลบ - เปลือกไม้

เถ้าแกลบ – เปลือกไม้เป็นผลพลอยได้จากโรงไฟฟ้าชีวมวลที่ใช้แกลบที่ได้จากโรงสีข้าวและเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ได้จากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ มีอัตราส่วนระหว่างแกลบต่อเปลือกไม้ก่อนการเผาเท่ากับ 65:35 โดยน้ำหนัก และมีอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาที่ประมาณ 800 – 900 องศาเซลเซียส หลังจากการเผาเถ้าแกลบ-เปลือกไม้จะทิ้งลงมาตามปล่องทิ้ง และมีการรดน้ำเพื่อลดอุณหภูมิรวมถึงป้องกันการฟุ้ง-กระจายก่อนขนไปทิ้งยังพื้นที่ทิ้งต่อไป

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 รูปร่างไม้แน่นอน อนุภาคมีความพรุนสูงดังแสดงในรูปที่ 2.2 ค่าร้อยละของน้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐาน

เบอร์ 325 จะน้อยลงเมื่อผ่านการบดละเอียดซึ่งจะมีค่าประมาณร้อยละ 3.8-32.6 ทั้งนี้ขึ้นกับระยะเวลาในการบด ความถี่ความถี่จะมีความถี่สูงขึ้นตามความละเอียดที่เพิ่มขึ้น เพราะการบดจะไปทำลายรูพรุนและโพรงอากาศในอนุภาคทำให้ค่าความถี่ความถี่สูงขึ้น มีค่าประมาณ 2.1-2.3



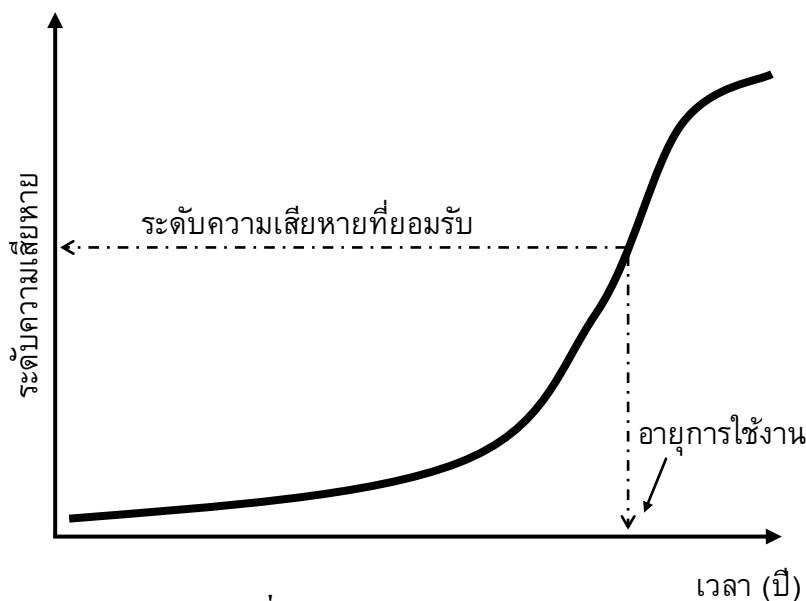
ก. เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ก่อนการบด

ข. เถ้าแกลบ-เปลือกไม้หลังการบด

รูปที่ 2.2 ภาพขยายของอนุภาคของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ก่อนและหลังการบด (Tangchirapat et al., 2008)

## 2.6 อายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

อายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีต หมายถึง ระยะเวลาตั้งแต่ที่ก่อสร้างโครงสร้างเสร็จจนกระทั่งมีความเสียหายเกิดขึ้นในโครงสร้างคอนกรีตที่สามารถสังเกตได้ หรือระดับความเสียหายที่ยอมรับได้ (acceptable damage level) (CSIRO, 2000; Chindaprasirt, et al.,2000; Cao, et al.,1999) โดยทั่วไปพบว่า เมื่อโครงสร้างคอนกรีตเริ่มมีความเสียหายที่สามารถสังเกตได้เกิดขึ้น ความเสียหายที่เกิดขึ้นในช่วงหลังจะเร็วมาก (รูปที่ 2.3) ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างคอนกรีตมีการเสื่อมสภาพ และการแทรกซึมของคลอไรด์ ความชื้น และ ออกซิเจน ที่ส่งผลให้เกิดความเสียหายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีมากขึ้น ดังนั้นการพิจารณาอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเล ส่วนใหญ่ก็จะพิจารณาถึงช่วงอายุที่โครงสร้างเริ่มมีความเสียหายเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายมากจนกระทั่งไม่สามารถซ่อมแซมได้ หรือมีค่าใช้จ่ายในการซ่อมที่สูงเกินไป



รูปที่ 2.3 อายุการใช้งานของคอนกรีต

### 2.6.1 การประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

การประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเล จะพิจารณาจากการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตที่เกิดจากคลอไรด์ในน้ำทะเลเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากเป็นความเสียหายที่สังเกตเห็นได้ชัด และสามารถวิเคราะห์ถึงกลไกการทำลายได้ง่าย (Cao, et al., 1999; Chalee, et al., 2009 ; Chalee, et al., 2010) โดยการประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้างดังกล่าวที่อยู่ในสภาพแวดล้อมทะเล จะอยู่ในรูปของแบบจำลองที่มีตัวแปรเกี่ยวข้องกับวัสดุที่ใช้ทำคอนกรีต (ชนิดของวัสดุประสาน) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก คุณสมบัติเชิงกล (กำลังอัด) คุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต (สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ การกักเก็บคลอไรด์ ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ) และแสดงผลในรูปของอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีต อย่างไรก็ตาม ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลต่อการทำลายโครงสร้างคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเลที่ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ชัดเจน และส่งผลต่อความแม่นยำของการประเมินอายุการใช้งานของคอนกรีต เช่น คุณภาพของการควบคุมงานก่อสร้าง การทำลายทางกายภาพเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเล การทำลายเนื่องจากซัลเฟตและเกลือชนิดอื่นที่อยู่ในน้ำทะเล การทำลายเนื่องจากสาเหตุทางชีวภาพ ลักษณะการรับแรงเชิงกล ตลอดจนสิ่งแวดล้อมที่โครงสร้างคอนกรีตสัมผัส เป็นต้น

หลักการพื้นฐานของประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเลโดยทั่วไป สามารถคำนวณได้ง่าย เนื่องจากใช้ฐานข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตในการคำนวณเพียงอย่างเดียว โดยมีขั้นตอนดังนี้ (CSIRO, 2000)

ก) ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ ( $D_c$ ) และปริมาณคลอไรด์ที่ผิว ( $C_s$ ) ในคอนกรีต ซึ่งโดยทั่วไปแล้วค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์จะลดลงและปริมาณคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีตจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อคอนกรีตแช่น้ำทะเลนานขึ้น (Chalee, 2009) โดยอัตราการลดลงของ

สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์จะน้อยลงหรือเกือบคงที่ เมื่อระยะเวลาแช่น้ำทะเลนานขึ้น สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์และปริมาณคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต ที่เหมาะในการประเมินอายุการใช้งานของ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กควรได้จากการทดสอบในคอนกรีตที่อายุค่อนข้างนาน และ สอดคล้องกับสภาพแวดล้อมจริงมากที่สุด

ข) การประเมินอายุการใช้งานของ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาพแวดล้อมทะเลจาก ข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ส่วนใหญ่ใช้กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) โดย คำตอบทั่วไปของกฎการแพร่ข้อที่สองของฟิค สามารถทำนายความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ระดับความลึก  $x$  และระยะเวลา  $t$  ( $C_{x,t}$ ) ได้ดังสมการที่ (2.1) (Crank, 1975)

$$C_{x,t} = C_i + (C_s - C_i) \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}}\right) \quad (2.1)$$

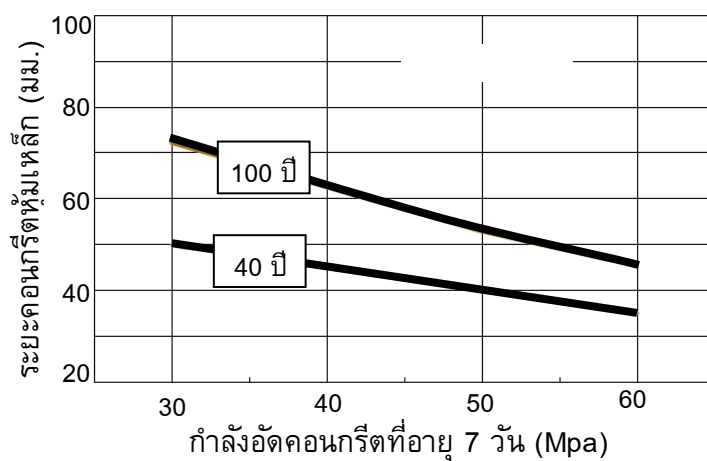
เมื่อ  $D_c$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์,  $C_s$  คือความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต และ  $C_i$  คือ ปริมาณคลอไรด์เริ่มต้นที่มีในส่วนผสมคอนกรีต ซึ่งในการประเมินอายุการใช้งานของ โครงสร้างคอนกรีต ส่วนใหญ่จะไม่คิดปริมาณคลอไรด์เริ่มต้นที่มีในส่วนผสมคอนกรีต ( $C_i = 0$ ) (CSIRO, 2000) ดังสมการที่ (2.2)

$$C_{x,t} = C_s \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}}\right)\right] \quad (2.2)$$

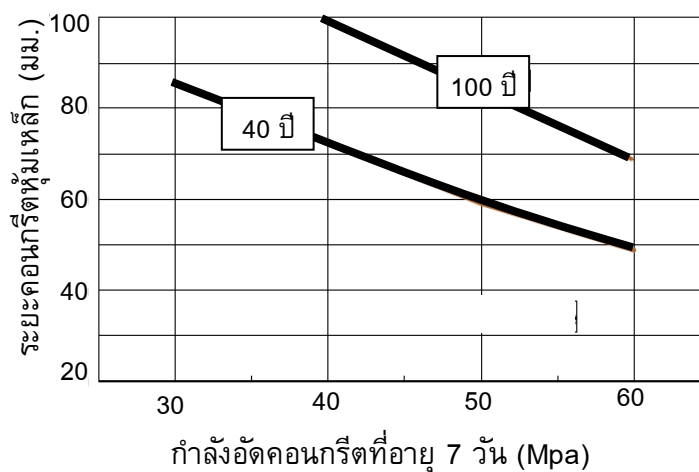
จากสมการที่ (2.2) แทนค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ ( $D_c$ ) ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิว คอนกรีต ( $C_s$ ) และให้ปริมาณคลอไรด์ ( $C_{x,t}$ ) ที่ระยะจากผิวคอนกรีตใกล้ตำแหน่งผิวของเหล็กเสริม (ระยะ  $x$ ) เท่ากับปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (Chloride threshold) ซึ่งสามารถคำนวณระยะเวลาที่คลอไรด์ สามารถแทรกซึมเข้าในคอนกรีตที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กใดๆ เท่ากับปริมาณคลอไรด์วิกฤติได้ ปริมาณ คลอไรด์วิกฤติเป็นปริมาณคลอไรด์รอบผิวเหล็กเสริมที่ส่งผลให้เริ่มเกิดการกัดกร่อน โดยทั่วไป คอนกรีตเสริมเหล็กเริ่มมีการกัดกร่อนเมื่อปริมาณคลอไรด์มีค่าเกินร้อยละ 0.2 ถึง 0.7 โดยน้ำหนัก วัสดุประสาน อย่างไรก็ตามปริมาณคลอไรด์วิกฤติจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ลักษณะผิวของเหล็ก เสริม ชนิดของวัสดุประสาน คุณสมบัติของคอนกรีต ตลอดจนสภาพแวดล้อมที่คอนกรีตสัมผัส เป็นต้น

รูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างการประเมินอายุการใช้งานของ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเถา ถ่านหินในสิ่งแวดล้อมทะเลที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่ต่างกัน รูปที่ 2.4(ก) แสดงระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก ที่ต้องการ เมื่อคอนกรีตสัมผัสกับน้ำทะเลบริเวณที่อยู่ใต้น้ำทะเล (Submerged Zone) และรูปที่ 2.4(ข) คอนกรีตสัมผัสกับน้ำทะเลบริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash Zone) ซึ่งใช้ฐานข้อมูลที่ศึกษาใน ประเทศออสเตรเลีย (CSIRO, 2000) ประกอบในการคำนวณเพื่อประเมินอายุการใช้งานของ โครงสร้าง

จากรูปเห็นได้ว่า บริเวณที่ทำการก่อสร้าง กำลังอัดและระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กมีผลต่ออายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเล โดยพิจารณาที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กและกำลังอัดที่เท่ากัน พบว่า คอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำทะเลในบริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเลมีอายุการใช้งานที่สั้นกว่าคอนกรีตที่อยู่บริเวณใต้น้ำทะเลอย่างชัดเจน ตลอดจนกำลังอัด และระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่มากขึ้นส่งผลให้ยี่ดอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเล โดยจากรูปที่ 2.4 พบว่า การใช้ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเท่ากับ 65 มิลลิเมตร ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่มีกำลังอัดที่ 7 วัน เท่ากับ 30 เมกะปาสกาล โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่จมอยู่ใต้น้ำทะเลอาจมีอายุการใช้งานได้ถึง 100 ปี ความเสียหายจึงจะเกิดขึ้น ในขณะที่คอนกรีตเดียวกันนี้ ที่อยู่บริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล ความเสียหายอาจเกิดขึ้นได้เมื่ออายุโครงสร้างไม่ถึง 40 ปี



ก (บริเวณที่อยู่ใต้น้ำทะเล)



ข) บริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล

รูปที่ 2.4 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่แนะนำในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเถ้าถ่านหินในสิ่งแวดล้อมทะเล (CSIRO, 2000)

ความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเลนอกจากขึ้นกับบริเวณที่โครงสร้างสัมผัสกับน้ำทะเลดังที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว สภาพภูมิอากาศบริเวณน้ำทะเลที่แตกต่างกันก็มีผลต่อความเสียหายที่แตกต่างกัน ซึ่งในเขตที่มีอากาศเปลี่ยนแปลงจากเย็นมากจนน้ำทะเลเป็นน้ำแข็งและน้ำแข็งเกิดการละลายเมื่ออากาศอุ่นขึ้น ก็จะได้รับ ความเสียหายชัดเจนจากสภาวะการแข็งตัวและการละลายตัวของน้ำทะเลควบคู่ไปด้วย ซึ่งส่งผลให้เกิดการแตกร้าวเสียหายได้ชัดเจนมากขึ้น จากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่า สภาวะการแข็งตัวและการละลายตัวของน้ำทะเลมีผลชัดเจนต่อการทำลายโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเลส่วนที่จมอยู่ใต้น้ำทะเล โดยคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลหลังจากที่ผ่านสภาวะการแข็งตัวและการละลายตัวของน้ำสลับกัน มีค่าการซึมผ่านในคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตที่แช่ในน้ำจืด หรือในอากาศ ประมาณ 4 ถึง 6 เท่า ส่วนในบริเวณที่อากาศร้อนขึ้นถึงแม้ไม่ได้รับความเสียหายเนื่องจากสภาวะการแข็งตัวและละลายตัวของน้ำสลับกัน แต่ความเสียหายที่เกิดขึ้นก็มีความรุนแรงชัดเจน โดยเฉพาะบริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล หรือแม้แต่บริเวณน้ำขึ้นน้ำลง ดังนั้นในการประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเล ควรใช้ฐานข้อมูลที่ได้จากการศึกษาในบริเวณที่ภูมิอากาศใกล้เคียงกัน ซึ่งจะให้ความน่าเชื่อถือมากขึ้น

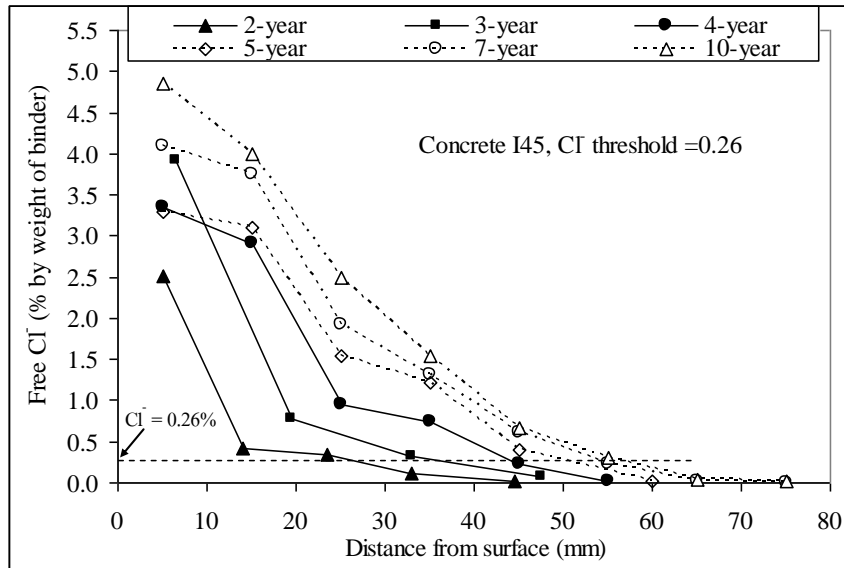
การประเมินอายุการใช้งานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตร้อนชื้นสามารถทำได้โดยใช้ฐานข้อมูลจากงานวิจัย ที่แช่ตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมแล้วผ่านหินในสภาวะน้ำขึ้นลงบริเวณชายฝั่งในเขตร้อนชื้น (อ่าวไทย) เป็นเวลา 10 ปี (Cheewaket et al., 2012) โดยการศึกษานี้ได้วิเคราะห์ระยะเวลาที่คอนกรีตเริ่มมีการกัดกร่อน (initial corrosion) ในรูปของความสัมพันธ์ของการแทรกซึมคลอไรด์วิกฤติเข้าไปในคอนกรีต โดยระดับความลึกที่ปริมาณคลอไรด์แทรกซึมเข้าไปเท่ากับปริมาณคลอไรด์วิกฤติ แสดงถึงการกัดกร่อนเหล็กเสริมเริ่มเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งนี้ โดยมีขั้นตอนการประเมินดังนี้

ก) ทหาระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเพื่อป้องกันการกัดกร่อนเริ่มต้น

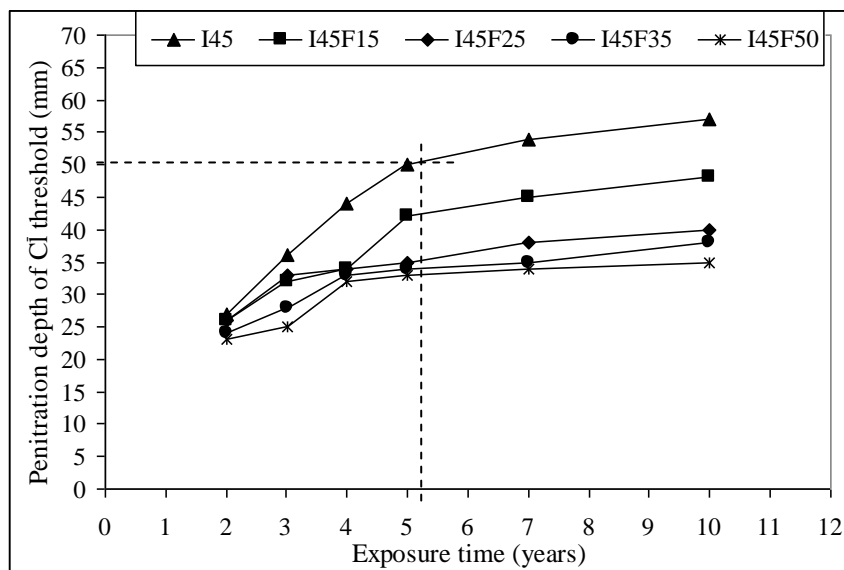
การทหาระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเพื่อป้องกันการกัดกร่อนเริ่มต้นในรูปของระดับความลึกของการแทรกซึมปริมาณคลอไรด์วิกฤติแสดงตัวอย่างดังรูปที่ 2.5 ซึ่งแสดงการแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีต ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 2, 3, 4, 5, 7 และ 10 ปี โดยจากรูปดังกล่าวสามารถระบุระดับความลึกจากผิวคอนกรีตที่ให้ปริมาณคลอไรด์เท่ากับระดับคลอไรด์วิกฤติ (0.26%) หลังจากที่คอนกรีตแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 2, 3, 4, 5, 7 และ 10 ปี เท่ากับ 27, 36, 44, 50, 54 และ 57 มม. ตามลำดับ

ข) หากความสัมพันธ์ระหว่างระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กกับระยะเวลาที่แช่คอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเล

จากระดับระดับความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์วิกฤติที่หาได้ในขั้นตอน (ก) สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่ป้องกันการกัดกร่อนเริ่มต้น (ระดับความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์วิกฤติ) กับระยะเวลาที่แช่คอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเลของคอนกรีตได้ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มี W/B = 0.45 ที่แช่ในสถานะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 2, 3, 4, 5, 7 และ 10 ปี

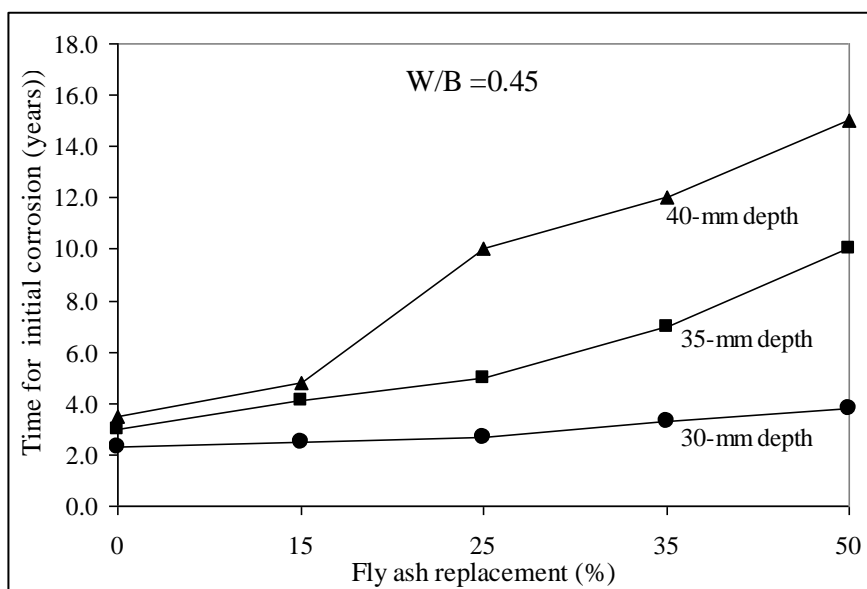


รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์วิกฤติกับระยะเวลาที่แช่คอนกรีตในสถานะแวดล้อมทะเล

รูปที่ 2.6 สามารถวิเคราะห์สถานะการกัดกร่อนเหล็กเสริมภายใต้ระยะเวลาแช่น้ำทะเลและระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กต่างๆได้ เช่น โครงสร้างพื้นหรือฐานรากคอนกรีตที่ใช้คอนกรีตธรรมดาที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 และใช้ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 50 มม. มีแนวโน้มที่จะเริ่มมีการกัดกร่อนเหล็กเสริมหลังจากที่คอนกรีตสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี นอกจากนี้จากการศึกษาพบว่า การใช้



เถ้าถ่านหินจากแหล่งแม่เมาะแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 บางส่วนสามารถยืดอายุการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตเมื่อมีการก่อสร้างในสภาพแวดล้อมทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งได้ (บริเวณชายฝั่ง) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ที่พบว่า การใช้ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 35 มม. ในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 และใช้เถ้าถ่านหินจากแหล่งแม่เมาะแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานสามารถยืดระยะเวลาก่อนที่เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิมได้เป็น 3, 4, 5, 7 และ 10 ปี ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม การใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากกว่าร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสานในคอนกรีตถึงแม้จะยืดระยะเวลาเริ่มการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตได้ แต่กำลังอัดในช่วงต้นค่อนข้างต่ำ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อารรับแรงเชิงกลและรอยร้าวที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากการรับน้ำหนักในช่วงต้นได้



รูปที่ 2.7 ผลของเถ้าถ่านหินต่อระยะเวลาที่เริ่มมีการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตเมื่อแช่ในสภาพแวดล้อมทะเล

การประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาพแวดล้อมทะเลตามวิธีการที่กล่าวมา สามารถประเมินระยะเวลาที่โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเริ่มมีการกัดกร่อนเหล็กเสริมเมื่อปริมาณคลอไรด์ที่ตำแหน่งเหล็กเสริม มีความเข้มข้นถึงระดับคลอไรด์วิกฤติ ซึ่งเป็นวิธีการประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้างที่ทำให้ง่ายภายใต้สมมุติฐานที่ความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเกิดจากคลอไรด์ในน้ำทะเลเพียงอย่างเดียว และอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตที่ถูกต้องน่าจะมีแนวโน้มที่สั้นกว่าระยะเวลาที่ประเมินด้วยวิธีดังกล่าว ทั้งนี้เนื่องจากความเสียหายที่เกิดขึ้นในโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมทะเล มีปัจจัยหลายอย่างที่เกี่ยวข้อง เช่น การทำลายทางกายภาพจาก คลื่น การขัดสีของกรวดทราย การเสื่อมสภาพทางชีวภาพ และลักษณะการรับแรงเชิงกลของโครงสร้างคอนกรีต เป็นต้น ซึ่ง

ปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ไม่สามารถพิจารณาได้ครอบคลุมทั้งหมด อย่างไรก็ตามแนวทางการประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้างในน้ำทะเลด้วยวิธีดังกล่าวสามารถใช้เป็นแนวทางในการพิจารณาอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเลในเบื้องต้นได้ และสามารถใช้เป็นฐานข้อมูลประกอบในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในสภาพแวดล้อมทะเล ให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานต่อไป

## 2.7 ปฏิกิริยาปอซโซลาน

ปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นหลังจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน กล่าวคือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะทำปฏิกิริยารวมตัวกับซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ที่มีอยู่ในเม็ดานหินจนทำให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ตามลำดับ ดังสมการที่ (2.3) และ (2.4)



โดยที่ค่า  $x$ ,  $y$ ,  $z$  เป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับชนิดของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งสารประกอบทั้งสองมีคุณสมบัติในการยึดประสาน ส่งผลให้เพสต์ที่ผสมเม็ดานหินมีความสามารถในการยึดประสานดีขึ้น และความสามารถในการรับกำลังอัดสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ล้วนเป็นเพราะการรวมของสารประกอบทั้งสองดังกล่าวที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน สำหรับการทดสอบหาค่าปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นหาได้จากอัตราส่วนร้อยละระหว่างกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเม็ดานหินกับมอร์ตาร์มาตรฐาน ซึ่งค่าดังกล่าวเรียกว่า “ดัชนีกำลัง” โดยปฏิกิริยาปอซโซลานจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออายุประมาณ 7 วัน และทำปฏิกิริยาต่อไปเรื่อย ๆ แม้ว่าคอนกรีตมีอายุมากกว่า 3 ปีครั้งก็ตาม

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเล จะพิจารณาจากการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตที่เกิดจากคลอไรด์ในน้ำทะเลเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากเป็นความเสียหายที่ส่งผลชัดเจน และสามารถวิเคราะห์ถึงกลไกการทำลายได้ง่าย (Cao, et al., 1999; Chalee, et al., 2009 ; Chalee, et al., 2010) โดยการประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้างดังกล่าวที่อยู่ในสภาพแวดล้อมทะเล จะอยู่ในรูปของแบบจำลองที่มีตัวแปรเกี่ยวข้องกับวัสดุที่ใช้ทำคอนกรีต (ชนิดของวัสดุประสาน) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก คุณสมบัติเชิงกล (กำลังอัด) คุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต (สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ การกักเก็บคลอไรด์ ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ) และแสดงผลในรูปของอายุการใช้

งานของโครงสร้างคอนกรีต อย่างไรก็ตาม ยังมีปัจจัยอื่นๆที่ส่งผลต่อการทำลายโครงสร้างคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเลที่ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ชัดเจน และส่งผลต่อความแม่นยำของการประเมินอายุการใช้งานของคอนกรีต เช่น คุณภาพของการควบคุมงานก่อสร้าง การทำลายทางกายภาพเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเล การทำลายเนื่องจากซัลเฟตและเกลือชนิดอื่นที่อยู่ในน้ำทะเล การทำลายเนื่องจากสาเหตุทางชีวภาพ ลักษณะการรับแรงเชิงกล ตลอดจนสิ่งแวดล้อมที่โครงสร้างคอนกรีตสัมผัส เป็นต้น (Chalee, et al., 2009 ; Chalee, et al., 2010)

อายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีต หมายถึง ระยะเวลาตั้งแต่ที่ก่อสร้างโครงสร้างเสร็จจนกระทั่งมีความเสียหายเกิดขึ้นในโครงสร้างคอนกรีตที่สามารถสังเกตได้ หรือระดับความเสียหายที่ยอมรับได้ (acceptable damage level) (CSIRO, 2000; Chindaprasirt, et al.,2000; Cao, et al.,1999) ซึ่งส่วนใหญ่จะพิจารณาถึงช่วงอายุที่โครงสร้างเริ่มมีความเสียหายเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งเรียกว่า ระยะเวลาที่ก่อการเริ่มต้น (time to initial corrosion) ทั้งนี้เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายมากจนกระทั่งไม่สามารถซ่อมแซมได้ หรือมีค่าใช้จ่ายในการซ่อมที่สูงเกินไป ในการศึกษาที่ผ่านมา Cheewaket et al. (2012) ได้ศึกษาก่อนการเริ่มต้นในคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินจากข้อมูลด้านความคงทนหลังแช่ตัวอย่างในน้ำทะเลเป็นเวลา 10 ปี พบว่า การใช้เถ้านหินอย่างน้อยร้อยละ 35 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงถึง 0.65 สามารถต้านทานการกัดกร่อนเริ่มต้นได้ดีใกล้เคียงกับคอนกรีตธรรมดาที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 และอัตราการแทรกซึมของคลอไรด์วิกฤตจะเกิดขึ้นสูงในช่วง 5 ปีแรกและมีอัตราที่ลดลงในช่วง 5-10 ปี ส่วน Chalee et al. (2007) ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและเถ้านหินต่อระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล พบว่าคอนกรีตผสมเถ้านหินที่มากขึ้นมีอัตราการซึมผ่านของคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา และอัตราการซึมผ่านของคลอไรด์ลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้านหินสูงขึ้น ซึ่งสามารถลดระยะหุ้มที่ต้องการเพื่อป้องกันการกัดกร่อนเริ่มต้นในเหล็กเสริมได้ นอกจากนี้ยังพบว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลดลงจะช่วยลดระยะหุ้มเหล็กได้ โดยมีผลชัดเจนกับคอนกรีตธรรมดามากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้านหิน ทั้งนี้สามารถลดระยะหุ้มเหล็กเพื่อป้องกันการกัดกร่อนที่ระยะเวลาเช่นน้ำทะเล 4 ปี จาก 60 เป็น 30 มม.ได้ โดยผสมเถ้านหินถึงร้อยละ 50 ในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าแลกเปลี่ยนไม้ Chalee et al. (2013) พบว่า การผสมกับเถ้าแลกเปลี่ยนไม้ในอัตราส่วนร้อยละ 15-25 โดยน้ำหนัก สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีหลังจากการเผชิญสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี

การใช้เถ้าแลกเปลี่ยนไม้บดละเอียดสามารถเพิ่มความต้านทานการขยายตัวเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักได้ดี แต่งมอร์ดาร์ที่ผสมเถ้าแลกเปลี่ยนไม้บดละเอียดในอัตราการแทนที่ร้อยละ 10 ถึง 40 มีการขยายตัวต่ำกว่างมอร์ดาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยการแทนที่ร้อยละ 20 มีการขยายตัวต่ำ

ที่สุด และการขยายตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อมีการแทนที่สูงขึ้น นอกจากนี้การใช้ถั่วแกลบ-เปลือกไม้ที่มีความละเอียดมากขึ้น พบว่าการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลง การนำถั่วแกลบหรือถั่วแกลบ-เปลือกไม้ไปใช้งานคอนกรีตยังไม่แพร่หลาย ทั้งนี้เพราะวัสดุปอซโซลานอื่น โดยเฉพาะถั่วถ่านหินสามารถนำมาใช้ได้ง่ายกว่าโดยไม่ต้องบดให้ละเอียด ทำให้การวิจัยด้านถั่วแกลบ-เปลือกไม้มีน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ การวิจัยด้านถั่วถ่านหิน ดังนั้นการใช้ถั่วแกลบหรือถั่วแกลบ-เปลือกไม้ในงานคอนกรีตจึงยังคงต้องใช้อย่างระมัดระวัง การวิจัยและพัฒนาในด้านนี้ยังต้องทำอีกมาก โดยเฉพาะด้านการใช้งานระยะยาวและความคงทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีต่างๆ และความคงทนต่อสภาพแวดล้อมทะเล

## บทที่ 3

### วิธีการศึกษา

บทนี้กล่าวถึงระเบียบวิธีที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งประกอบด้วย วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ วิธีการทดสอบ ดังนี้

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

- |                         |  |
|-------------------------|--|
| 3.1.1 ปูนซีเมนต์        | ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งมีคุณสมบัติตรงตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม มอก.15-2532 |
| 3.1.2 เล้าเกลบเปลือกไม้ | ใช้เล้าเกลบเปลือกไม้ที่บดละเอียด โดยค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก          |
| 3.1.3 ทราย              | ใช้ทรายแม่น้ำร้อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4  |
| 3.1.4 หิน               | ใช้หินละเอียดที่มีขนาดใหญ่ที่สุด 19 มม.  |
| 3.1.5 น้ำ               | ใช้น้ำสะอาด การศึกษานี้ใช้น้ำประปา   |

3.1.6 สารเคมีที่ใช้ในการทดสอบปริมาณคลอไรด์ ได้แก่ โพแทสเซียมโครเมต ( $K_2CrO_4$ ) ซิลเวอร์ไนเตรต ( $AgNO_3$ ) โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ( $NaHCO_3$ ) และแคลเซียมคาร์บอเนต ( $CaCO_3$ ) และโซเดียมคลอไรด์ ( $NaCl$ )

#### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 20 และ เบอร์ 325
2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)
3. เครื่องตัดคอนกรีต (ดังรูปที่ 3.1 ก)
4. เครื่องชั่งอ่านละเอียด 0.0001 กรัม (ดังรูปที่ 3.1 ข)
5. เครื่องต้มสาร (ดังรูปที่ 3.1 ค)
6. เครื่องทดสอบกำลังอัด (ดังรูปที่ 3.1 ง)
7. ครกหิน
8. กราฟและปากกาเขียนพลาสติก

9. อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต ได้แก่ ขวดชมพู ขวดวัดปริมาตรกระดาษกรอง ปิเปตต์ กระบอกตวง แท่งแก้ว ที่ตักสาร บิวเรตต์ กรวยกรอง หลอดหยด (Dropper) เครื่องดูดสุญญากาศ



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

### 3.3 วิธีการทดสอบ

#### 3.3.1 ตัวอย่างคอนกรีตที่ได้เตรียมเมื่อ 7 ปีที่แล้ว

ตัวอย่างคอนกรีตที่ได้เตรียมเมื่อ 7 ปีที่แล้ว มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.45 และ 0.65 ใช้เส้นแกลบเปลือกไม้บดละเอียดที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุ หล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มม<sup>3</sup> และฝิ่งเหล็ก RB 12 ที่ตำแหน่งมุมของก้อนตัวอย่างที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 10, 20, 50 และ 75 มม. นอกจากนั้นหล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. เพื่อใช้ทดสอบกำลังอัด ส่วนผสม

คอนกรีตที่ได้เก็บข้อมูลด้านความคงทนในครั้งนี้แสดงดัง ตารางที่ 3.1 โดยตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้เก็บข้อมูลด้านความคงทนแสดงดังรูปที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมคอนกรีต

ส่วนผสม	ส่วนผสมคอนกรีต (กก/ม <sup>3</sup> )						กำลังอัดที่อายุ 28 วัน (ksc)
	Cement Type I	GRBA	หิน	ทราย	น้ำ	สารลดน้ำ	
I45	424	-	979	767	190	-	451
I65	295	-	1,039	814	192	-	309
I45GRBA15	360	64	957	767	190	0.85	429
I45GRBA 25	318	106	938	767	190	1.70	408
I45GRBA 35	276	148	925	767	190	2.54	394
I45GRBA 50	212	212	952	767	190	3.82	393
I65GRBA 15	251	44	1,023	814	192	-	338
I65GRBA 25	221	74	1,012	814	192	-	329
I65GRBA 35	192	103	1,000	814	192	0.30	311
I65GRBA 50	148	148	982	814	192	0.30	286

หมายเหตุ ความหมายของสัญลักษณ์ในแต่ละอัตราส่วนผสมมีความหมายดังนี้

- “ I ” หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน
- “ GRBA ” หมายถึง ถ้ำกลบเปลือกไม้บดละเอียด
- “ 45, 65 ” หมายถึง อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และ 0.65 ตามลำดับ
- “ 15, 25, 35, 50 ” หมายถึง คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วยถ้ำกลบเปลือกไม้บดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานตามลำดับ

ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์

- “I65” หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65
- “I65GRBA15” หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยถ้ำกลบเปลือกไม้ที่ผ่านการบดขนาดร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสานและมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลในสภาพเปียกกลับแห้ง

### 3.3.2 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบปริมาณคลอไรด์

นำก้อนคอนกรีตทรงลูกบาศก์หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี (รูปที่ 3.2) มาเจาะบริเวณกึ่งกลางให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มม. เพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์อิสระ และหลังจากนั้นทำการตัดตัวอย่างคอนกรีตที่เจาะให้หนาชั้นละ 10 มม. จากผิวบนไปยังแนวกึ่งกลางและบดคอนกรีตแต่ละชั้นให้ละเอียด จึงนำตัวอย่างที่ทำการบดแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 และเก็บส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 20 มาทดสอบปริมาณคลอไรด์โดยใช้กรดเป็นตัวทำลายตาม ASTM C 1152 (Total chloride content) และใช้น้ำเป็นตัวทำลาย (water-soluble chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C 1218 การเตรียมตัวอย่างทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตแสดงดังรูปที่ 3.3



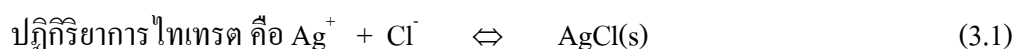
รูปที่ 3.3 การเตรียมตัวอย่างทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต

### 3.3.3 การทดสอบปริมาณคลอไรด์

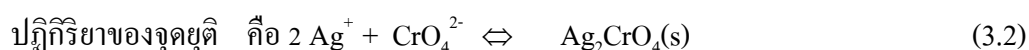
การทดสอบปริมาณคลอไรด์ใช้การไทเทรตด้วยซิลเวอร์ไอออนตามวิธีของมอร์ (Mohr's method) วิธีนี้จะเกิดตะกอนที่มีสีแดงของเกลือที่ไม่ละลาย ณ จุดยุติ นิยมใช้การไทเทรตหาคลอไรด์ด้วยสารละลาย



มาตรฐานซิลเวอร์ไนเตรต โดยการเติมโครเมตไอออน ( $\text{CrO}_4^{2-}$ ) ซึ่งเป็นอินดิเคเตอร์ในสารละลายที่เป็นกลางของสารละลายตัวอย่างคลอไรด์ เมื่อไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ไนเตรต จะเกิดตะกอนสีขาว ซิลเวอร์คลอไรด์ ( $\text{AgCl}$ ) ก่อน ดังสมการ 3.1 เมื่อตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์ตกสมบูรณ์แล้ว หยดต่อไปของซิลเวอร์ไนเตรตจะทำให้เกิดตะกอนสีแดงของ  $\text{Ag}_2\text{CrO}_4$  ดังสมการ 3.2 ซึ่งละลายได้มากกว่าตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์



ตะกอนขาว



ตะกอนแดง

ก) การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในระบบโดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย (Acid-soluble Chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C 1152

การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในระบบโดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย (Acid-soluble Chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C 1152 มีขั้นตอนดังนี้ (รูปที่ 3.4)

1. นำตัวอย่างที่ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ไปชั่งน้ำหนักประมาณ 10 กรัมโดยชั่งละเอียด 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 ( $\text{K}_2\text{CrO}_3$ ) 5% ลงไป 1 มิลลิลิตร และเติมสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ( $\text{NaHCO}_3$ ) 2% ลงไป 10 มิลลิลิตร แล้วนำไปไทเทรต
9. ทำการไทเทรตด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ( $\text{AgNO}_3$ ) จนเป็นสีส้ม
10. บันทึกปริมาตรของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ( $\text{AgNO}_3$ ) ที่ใช้ไป เพื่อนำไปคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ระดับความลึกต่างๆ
11. เตรียมการไทเทรตแบลนด์ โดยใช้สารละลายแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) 0.2 กรัม ใส่บีกเกอร์แล้วเติมน้ำกลั่นเท่ากับปริมาณสุดท้ายในการไทเทรตตัวอย่าง แล้วเติมสารละลายโพแทสเซียม

โครเมต ( $K_2CrO_4$ ) 5% ลงไป 1 มิลลิลิตร และเติมสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ( $NaHCO_3$ ) 2% ลงไป 10 มิลลิลิตร

12. ทำการไทเทรตด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ( $AgNO_3$ ) จนเป็นสีส้ม
13. บันทึกปริมาตรของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ( $AgNO_3$ ) ที่ใช้ไป เพื่อนำไปคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ในน้ำกลั่น



ก) นำตัวอย่างที่ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ไปชั่งน้ำหนักประมาณ 10 กรัม เติมน้ำกลั่นและกรดไนตริก



ข) นำตัวอย่างไปต้มให้เดือด 3 นาที



ค) นำตัวอย่างที่เย็นแล้วมากรองโดยใช้เครื่องดูดสุญญากาศ



ง) นำตัวอย่างที่ผ่านการกรองแล้วมาทำการไคเตรต

### รูปที่ 3.4 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์โดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย

ข) การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระในระบบโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย (water-soluble chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C 1218

การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระในระบบโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย (water-soluble chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C 1218 มีขั้นตอนเหมือนกับการหาปริมาณคลอไรด์โดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย แต่แตกต่างกันที่ต้องละลายตัวอย่างทดสอบในน้ำและต้องทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชม. ก่อนนำมาไทเทรตหาปริมาณคลอไรด์ ดังนี้

- 1) นำตัวอย่างที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ไปชั่งน้ำหนักประมาณ 10 กรัม โดยชั่งละเอียด 0.01 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร

- 2) เติมน้ำกลั่นปริมาณ 50 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์
- 3) คนให้เข้ากันประมาณ 1 – 2 นาที
- 4) นำไปต้มให้เดือดประมาณ 3 นาที แล้วทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง
- 5) นำไปกรองผ่านกระดาษกรองใช้กระดาษกรอง 2 แผ่น
- 6) ปิเปตต์ ตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร ไปใส่ในขวดทดลองรูปชมพู่
- 7) เติมสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต ( $K_2CrO_3$ ) 5% ลงไป 1 มิลลิลิตร และเติมสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ( $NaHCO_3$ ) 2% ลงไป 10 มิลลิลิตร แล้วนำไปไทเทรต
- 8) ทำการไทเทรตด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ( $AgNO_3$ ) จนเป็นสีส้ม
- 9) บันทึกปริมาตรของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ( $AgNO_3$ ) ที่ใช้ไป เพื่อนำไปคำนวณ

### 3.3.4 การทดสอบการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

การทดสอบการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี โดยมีรายละเอียดดังนี้ (รูปที่ 3.5)

1) นำคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ ขนาด  $200 \times 200 \times 200$  มม.<sup>3</sup> ที่มีการฝังเหล็กที่มุม มากดดูการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีตซึ่งมีระยะหุ้ม 10, 20, 50 และ 75 มม. โดยใช้เครื่องทดสอบกำลังอัด กดให้ก่อนคอนกรีตแตกออก

2) นำเหล็กออกมาทำการวัดพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กด้วยการทาพื้นที่ผิวเหล็กที่เป็นสนิม ลงบนกระดาษกราฟสี่เหลี่ยมซึ่งทำเป็นช่องขนาด  $2 \times 2$  มม. แล้วนับจำนวนช่องเพื่อหาพื้นที่การเกิดสนิม

3) ถ่ายรูปการเกิดสนิมในแต่ละระยะหุ้มของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต



รูปที่ 3.5 การทดสอบการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี

### 3.3.5 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่น้ำทะเล ได้เก็บตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. ที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี (ดังรูปที่ 3.2) มาแคบหัวให้เรียบทั้ง 2 ด้าน และทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 7 ปี โดยใช้เครื่องทดสอบกำลังอัด (รูปที่ 3.1 ง)

## บทที่ 4

### ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดสอบสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา การหาความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและปริมาณเถ้าแกลบเปลือกไม้ต่อกำลังอัด การแทรกซึมของคลอไรด์ ความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์ วิกฤติ และระยะเวลาที่คร่อนเริ่มต้นของเหล็กเสริมในคอนกรีต

#### 4.1 สมบัติของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

การศึกษานี้ได้เก็บข้อมูลด้านความคงทนต่อเนื่องถึงระยะเวลา 7 ปี โดยได้เตรียมตัวอย่างทดสอบเพื่อแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งเมื่อ 7 ปีที่แล้ว ที่ได้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าแกลบเปลือกไม้เป็นวัสดุประสาน โดยเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่ใช้เป็นผลพลอยได้จากโรงไฟฟ้าชีวมวล ซึ่งบดให้ละเอียดจนมีน้ำหนักข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 3 พื้นที่ผิวจำเพาะวิธีของเบลนเท่ากับ 9,460 ซม.<sup>2</sup>/ก. และมีค่าเฉลี่ยของอนุภาค เท่ากับ 10.04 ไมโครเมตร เถ้าแกลบเปลือกไม้ที่ผ่านการบดมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.15 ส่วนองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบเปลือกไม้พบว่า มีผลรวมออกไซด์ของ SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เท่ากับร้อยละ 90.66 ซึ่งมากกว่าร้อยละ 70 และมีปริมาณของ SO<sub>3</sub> และค่า LOI เท่ากับร้อยละ 0.09 และ 5.71 ตามลำดับ ซึ่งไม่เกินค่ามาตรฐานของ ASTM C 618 คือร้อยละ 4 และ 10 ตามลำดับ องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบเปลือกไม้แสดงดังตารางที่ 4.1 ส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ปกติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไปตามมาตรฐาน ASTM C150 ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 3.00 ถึง 3.20 ความละเอียดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าน้ำหนักข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 20 พื้นที่ผิวจำเพาะวิธีของเบลนเท่ากับ 3,250 ซม.<sup>2</sup>/ก. และมีค่าเฉลี่ยของอนุภาค ที่ทดสอบจากการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน เท่ากับ 25 ไมโครเมตร องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีออกไซด์หลัก ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) อะลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) รวมกันได้ร้อยละ 94.4 ดังแสดงในตารางที่ 4.1 สำหรับมวลรวมที่ใช้ในการศึกษาคั้งนี้ใช้ทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียด โดยมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.73 และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.62 ส่วนมวลรวมหยาบใช้หินขนาดใหญ่สุดเท่ากับ 19 มม. และมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.74

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	วัสดุประสาน	
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท ที่ 1	เถ้าแกลบเปลือกไม้ บดละเอียด (GRBA)
Silicon dioxide, SiO <sub>2</sub>	20.80	87.0
Aluminum oxide, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.50	1.08
Iron oxide, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.16	2.58
Calcium oxide, CaO	64.97	1.25
Magnesium oxide, MgO	1.06	0.5
Sodium oxide, Na <sub>2</sub> O	0.08	0.08
Potassium oxide, K <sub>2</sub> O	0.55	1.0
Sulfur trioxide, SO <sub>3</sub>	2.96	0.09
Loss On Ignition, LOI	2.89	5.71

#### 4.2 สมบัติของน้ำทะเลที่แช่ตัวอย่างคอนกรีต

จากการเก็บตัวอย่างน้ำทะเลในบริเวณที่พังก่อนคอนกรีตคือบริเวณชายฝั่งทะเลด้านหลังโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา พบว่า น้ำทะเลมีลักษณะใส ไม่มีสี มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ในช่วง 7.9-8.2 ส่วนสารประกอบที่ปะปนในน้ำทะเล จะเห็นได้ว่า มีค่าอยู่ในระดับใกล้เคียงกับทะเลทั่วไป คือ ปริมาณคลอไรด์มีค่าอยู่ระหว่าง 16,000-19,000 มก./ล. ส่วนซัลเฟตระหว่าง 2,200-2,600 มก./ล. จากการทดสอบพบว่าปริมาณคลอไรด์มากกว่าซัลเฟต ประมาณ 8 เท่า โดยปริมาณคลอไรด์ที่มีในน้ำทะเลส่วนใหญ่จะเป็นโซเดียมคลอไรด์ประมาณร้อยละ 90 และอีกประมาณร้อยละ 10 เป็นแมกนีเซียมคลอไรด์ โดยผลการทดสอบคุณสมบัติของน้ำทะเลที่ช่วงเวลาต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.2 ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลการศึกษาของสถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเล (2537) ที่รายงานไว้ว่า บริเวณชายฝั่งทะเลศรีราชามีค่าความเป็นกรด-ด่างระหว่าง 7.86 ถึง 8.63 และจากข้อกำหนดของ ACI 318-05 ที่ระบุว่า คอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำที่มีซัลเฟตละลายอยู่ในปริมาณ 1,500 ถึง 10,000 มก./ล. ถือว่าคอนกรีตอยู่ในสถานะที่อาจเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตอย่างรุนแรง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าน้ำทะเลในบริเวณด้านหลังโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา ส่งผลให้คอนกรีตอยู่ในสถานะแวดล้อมที่รุนแรง ACI จึงแนะนำให้ใช้คอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ห้า มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำกว่า 0.45 และมีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ไม่น้อยกว่า 310 กก./ซม.<sup>2</sup> ส่วนคอนกรีตที่เกิดการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม ACI จึงเสนอให้ใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำกว่า 0.40 และมีกำลังรับแรงอัดไม่น้อยกว่า 350 กก./ซม.<sup>2</sup> ที่อายุ 28 วัน

โดยทั่วไป ระดับน้ำทะเลบริเวณด้านหลังโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา ขึ้นและลง วันละ 2 รอบ คือ มีระดับสูงขึ้นจนท่วมคอนกรีตในช่วงเวลาเช้า จากนั้นระดับน้ำเริ่มลดลงในช่วงเวลาบ่ายจนคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้ง ช่วงเย็นระดับน้ำเริ่มเพิ่มสูงขึ้นจนท่วมคอนกรีตอีกครั้ง และลดระดับลงในเวลากลางคืน ซึ่งในแต่ละฤดูกาล เวล่าน้ำขึ้น-ลง อาจมีการเปลี่ยนแปลงไปบ้าง เช่น ช่วงฤดูหนาว ระดับน้ำที่สูงขึ้นจนท่วมคอนกรีตจะมีระยะเวลายาวนานกว่าปกติ และลดระดับลงเพียงเล็กน้อย ทำให้บางครั้งคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้งในช่วงเวลาสั้นมาก หรือไม่ได้อยู่ในสภาพแห้งเลย

ตารางที่ 4.2 สมบัติของน้ำทะเลบริเวณ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี

สมบัติ	เมษายน 2004	กุมภาพันธ์ 2005	พฤษภาคม 2008	กันยายน 2010	เมษายน 2012	มกราคม 2013
คลอไรด์, Cl <sup>-</sup> (mg/l)	16,000	18,000	17,500	18,120	18,910	18,750
ซัลเฟต, SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	2,500	2,200	2,300	2,250	2,610	2,430
ค่า pH	8.2	8.2	8.1	8.2	8.1	8.2

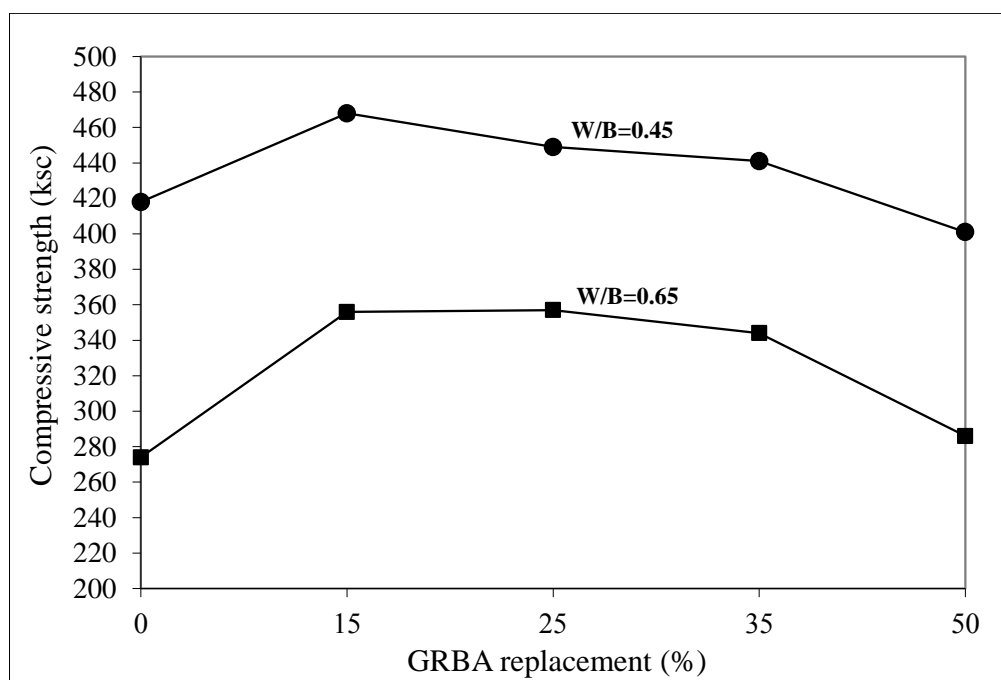
#### 4.3 ข้อมูลด้านความคงทนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี

##### 4.3.1 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้

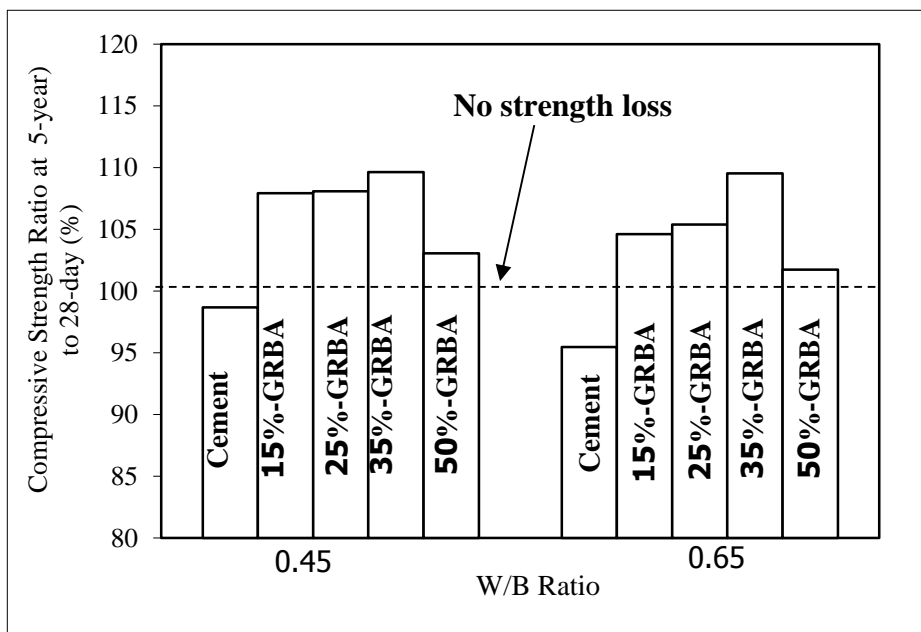
เมื่อพิจารณาผลของปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ต่อกำลังอัดของคอนกรีตหลังจากแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี ดังรูปที่ 4.1 พบว่า การแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดในช่วงร้อยละ 15 ถึง 35 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานส่งผลให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ และเป็นแนวโน้มเดียวกันทั้งสองอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ส่วนการแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้สูงถึงร้อยละ 50 กลับมีผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงและต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ปริมาณของเถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดผสมในคอนกรีตร้อยละ 15 ถึง 25 มีความเหมาะสมที่ส่งผลเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารประกอบซัลเฟตในน้ำทะเลและให้สมบัติเชิงกลที่ดี นอกจากนี้พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าแกลบเปลือกไม้สูงขึ้นเป็นร้อยละ 35 เริ่มส่งผลให้กำลังอัดลดลงและต่ำสุดในกลุ่มที่แทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้สูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดในปริมาณที่มากกว่าร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสานไม่เหมาะสมที่จะใช้ในคอนกรีตที่มีการก่อสร้างในสิ่งแวดล้อมทะเล เนื่องจากให้กำลังอัดที่มีแนวโน้มต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม เมื่อพิจารณาการพัฒนากำลังอัดในรูปร้อยละของกำลังอัดที่อายุแช่น้ำทะเล 7 ปี เทียบกับอายุ 28 วัน ดังรูปที่ 4.2 พบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดในปริมาณที่สูงขึ้นไม่เกิน



ร้อยละ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีอัตราการเพิ่มของกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเล 7 ปีเมื่อเทียบกับ 28 วัน มากขึ้น โดยคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 ที่มี W/B เท่ากับ 0.45 มีร้อยละของกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเล 7 ปี เทียบกับ 28 วันเท่ากับ 92.7, 109.1, 110.0, 111.9, และ 102.0 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบเปลือกไม้ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า มีปริมาณ SiO สูงมาก (ร้อยละ 87) ประกอบกับขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบที่ผ่านการบดละเอียด จึงส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในระยะยาวดีขึ้น (Tangchirapat et al.,2008; Chindaprasirt et al.,2005) อย่างไรก็ตามการใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ในปริมาณสูงขึ้น มีแนวโน้มให้ร้อยละของกำลังอัดที่อายุแช่น้ำทะเล 7 ปี เทียบกับ 28 วันมีค่าต่ำลง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ในปริมาณสูงปูนซีเมนต์มีปริมาณน้อย กำลังคอนกรีตที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจึงต่ำ ประกอบกับปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันไม่เพียงพอที่จะเข้าทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับเถ้าแกลบเปลือกไม้ได้สมบูรณ์



รูปที่ 4.1 ผลของเถ้าแกลบเปลือกไม้ต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 7 ปี

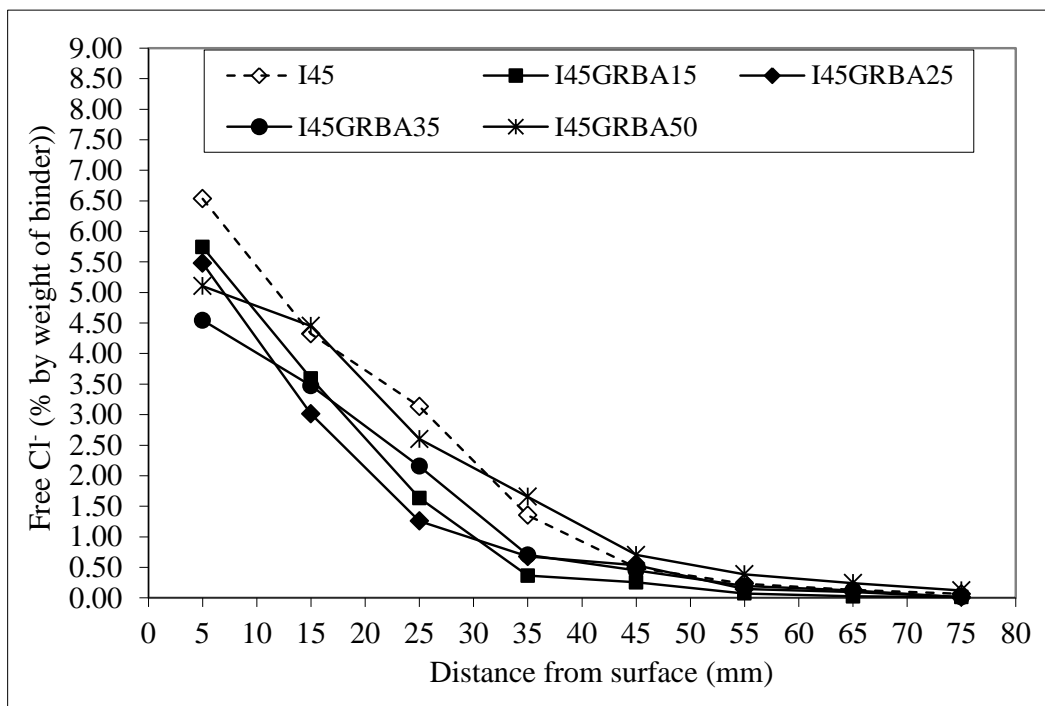


**รูปที่ 4.2** ผลของเส้นแกลบเปลือกไม้ต่อร้อยละของกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี เทียบกับอายุ 28 วัน

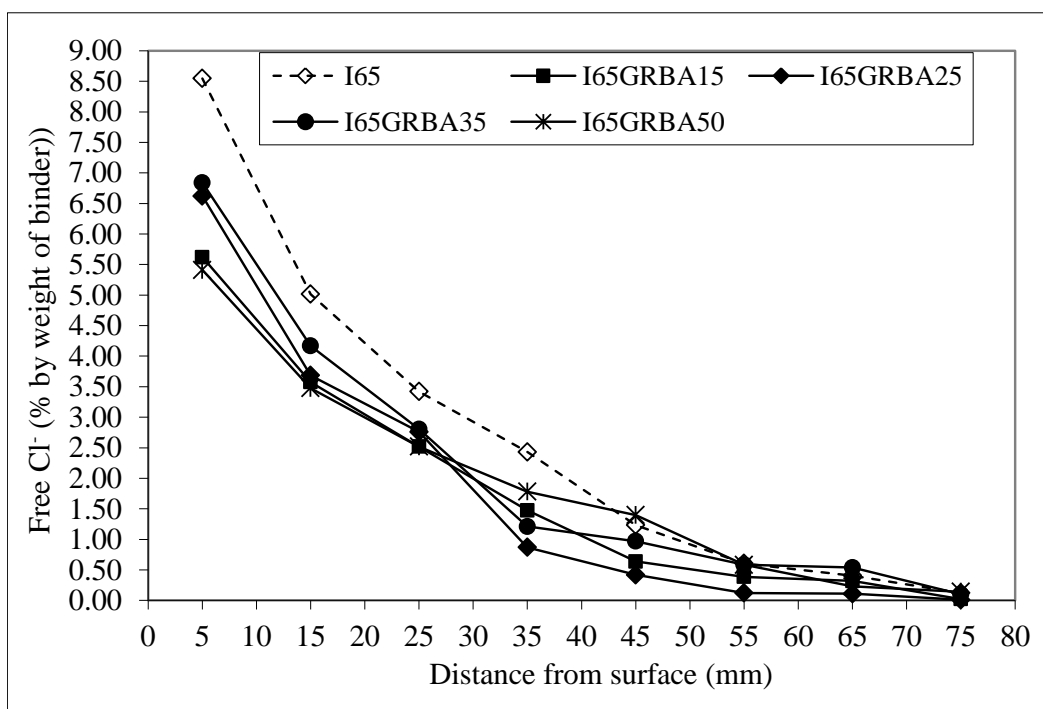
#### 4.3.2 การแทรกซึมของคลอไรด์

เมื่อพิจารณาการแทรกซึมของคลอไรด์อิสระและคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตที่ผสมเส้นแกลบเปลือกไม้บดละเอียดหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ พบว่า การใช้เส้นแกลบเปลือกไม้ในส่วนผสมคอนกรีตมีผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระและคลอไรด์ทั้งหมดมีแนวโน้มลดลง และมีแนวโน้มต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ปฏิริยาปอซโซลานระหว่างเส้นแกลบเปลือกไม้ที่ผ่านการบดละเอียดกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิริยาไฮเดรชัน ให้ผลดีต่อคุณสมบัติด้านความคงทน และลดการแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้ โดยการแทนที่เส้นแกลบเปลือกไม้ในปริมาณที่สูงขึ้นไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระและคลอไรด์ทั้งหมดลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเส้นแกลบเปลือกไม้ที่ผ่านการบดละเอียดสามารถที่จะเกิดปฏิริยาปอซโซลานและส่งผลให้เนื้อคอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตลดการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ (Tangchirapat et al.,2008; Chindaprasirt et al.,2005) อย่างไรก็ตามเมื่อใช้เส้นแกลบเปลือกไม้บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานกลับมีผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตมีแนวโน้มมากขึ้น (ความคงทนลดลง) ซึ่งสอดคล้องกับกำลังอัดของคอนกรีตกลุ่มนี้ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ผลดังกล่าวนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Chindaprasirt et al.,2007) ที่พบว่า การใช้เส้นแกลบเปลือกไม้ในปริมาณที่สูง จะทำให้การซึมผ่านของน้ำสูงขึ้น นั่นหมายถึงความคงทนต่อสารเคมีที่เข้าไปทำอันตรายต่อคอนกรีตน้อยลง แต่การแทนที่ในปริมาณที่ไม่เกิน

ร้อยละ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน จะส่งผลดีต่อคอนกรีต โดยลดการซึมผ่านของน้ำลง และดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้

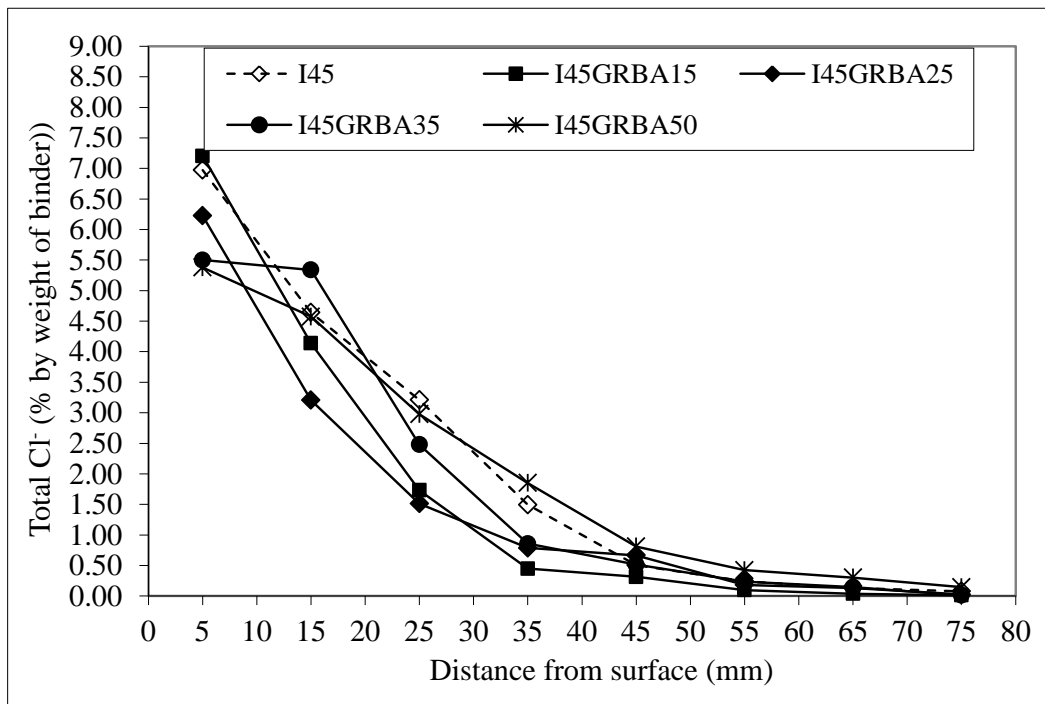


(ก) W/B = 0.45

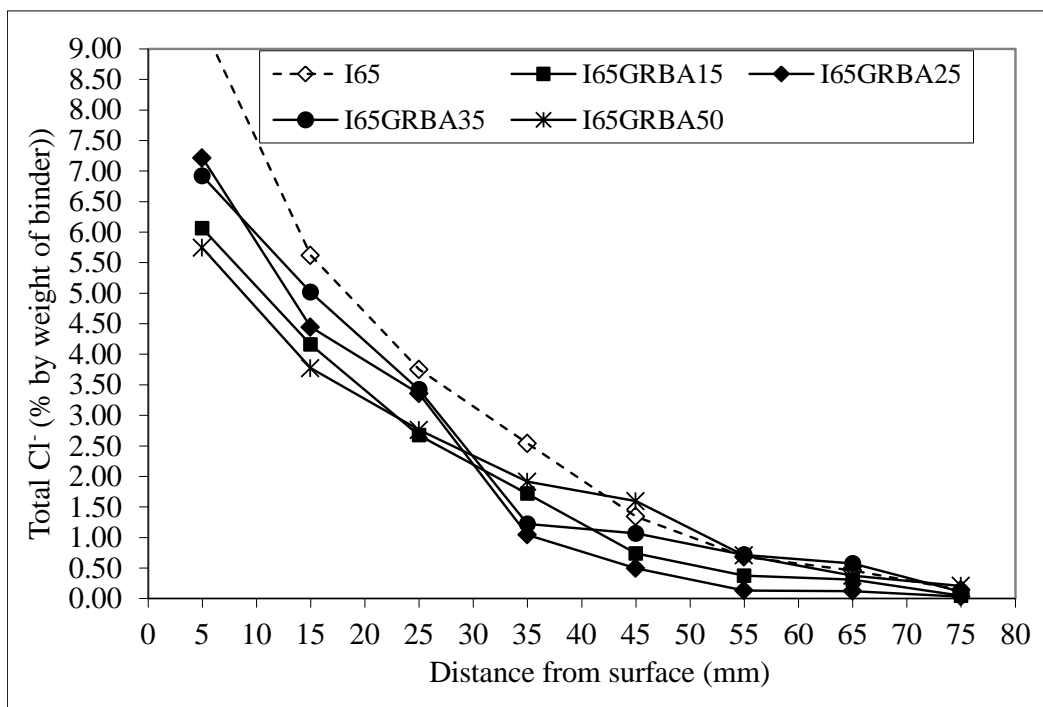


(ข) W/B = 0.65

รูปที่ 4.3 การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี



(ก) W/B = 0.45



(ข) W/B = 0.65

รูปที่ 4.4 การแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี

#### 4.4 การหาความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้

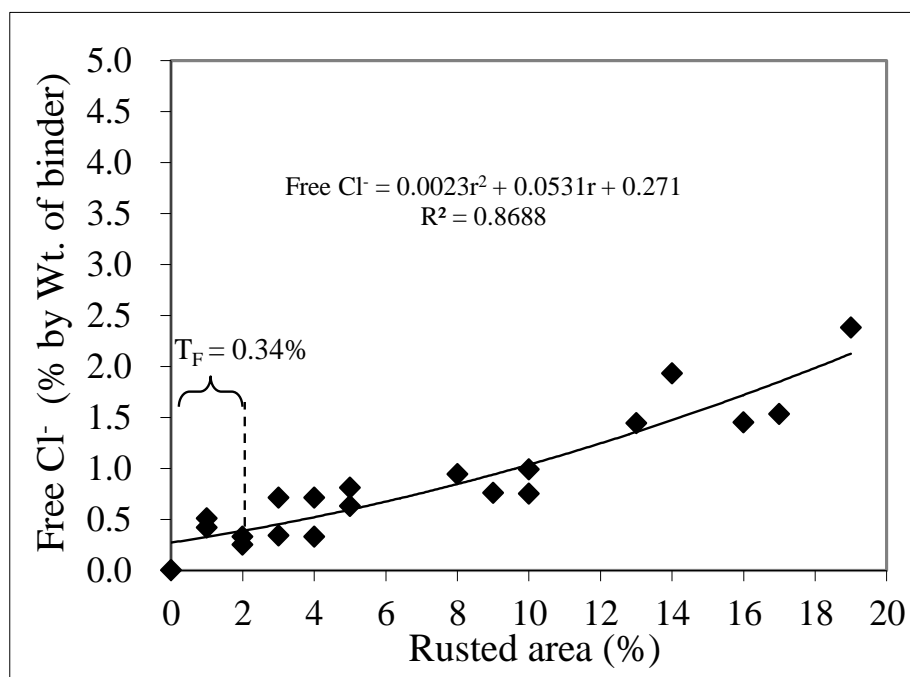
การหาระยะเวลาก่อนเริ่มต้นของเหล็กเสริมในคอนกรีต จะต้องทราบระดับคลอไรด์วิกฤติ และเส้นกราฟการแทรกซึมของคลอไรด์ที่อายุแช่น้ำทะเลต่างๆ (การศึกษาครั้งนี้ศึกษาที่อายุ 2, 3, 5 และ 7 ปี) เพื่อที่จะได้ทราบระยะเวลาที่ระดับคลอไรด์วิกฤติสามารถแทรกซึมเข้าไปที่ความลึกต่างๆ ตามที่กำหนดได้

รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเกิดสนิมกับปริมาณคลอไรด์อิสระที่บริเวณใกล้ผิวเหล็ก ในคอนกรีตควบคุมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 2 3 5 และ 7 ปี ซึ่งพบว่า สมการความสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงถดถอย ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระ ( $Free\ Cl^-$ ) และร้อยละการเกิดสนิม ( $r$ ) ในคอนกรีตธรรมดา คือ  $Free\ Cl^- = 0.0023(r^2) + 0.0531(r) + 0.271$  เมื่อแทนปริมาณร้อยละพื้นที่สนิมเหล็ก ( $r$ ) เท่ากับ 0 0.25 0.50 0.75 1.00 1.25 1.50 1.75 และ 2.00 ได้  $Free\ Cl^-$  เท่ากับ ร้อยละ 0.27 0.29 0.30 0.31 0.33 0.34 0.36 0.37 และ 0.39 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ ซึ่งค่าเฉลี่ยของปริมาณคลอไรด์อิสระที่ก่อให้เกิดพื้นที่ของสนิมเหล็กในช่วงร้อยละ 0 ถึง 2 มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 0.34 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ซึ่งค่าเฉลี่ยของปริมาณคลอไรด์ดังกล่าวนี้ ได้กำหนดให้เป็นระดับคลอไรด์วิกฤติที่เป็นคลอไรด์อิสระของคอนกรีตธรรมดา ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ระดับคลอไรด์วิกฤติ ของคอนกรีตส่วนผสมอื่นๆ ก็ทำได้ในลักษณะเดียวกัน โดยการหาระดับคลอไรด์วิกฤติดังกล่าวนี้ได้แสดงในงานวิจัยที่ผ่านมา (วิเชียร ชาติ, 2557) และแสดงระดับคลอไรด์วิกฤติที่เป็นคลอไรด์อิสระของคอนกรีตทุกส่วนผสมหลังแช่น้ำทะเลถึงอายุ 7 ปี ดังตารางที่ 4.3

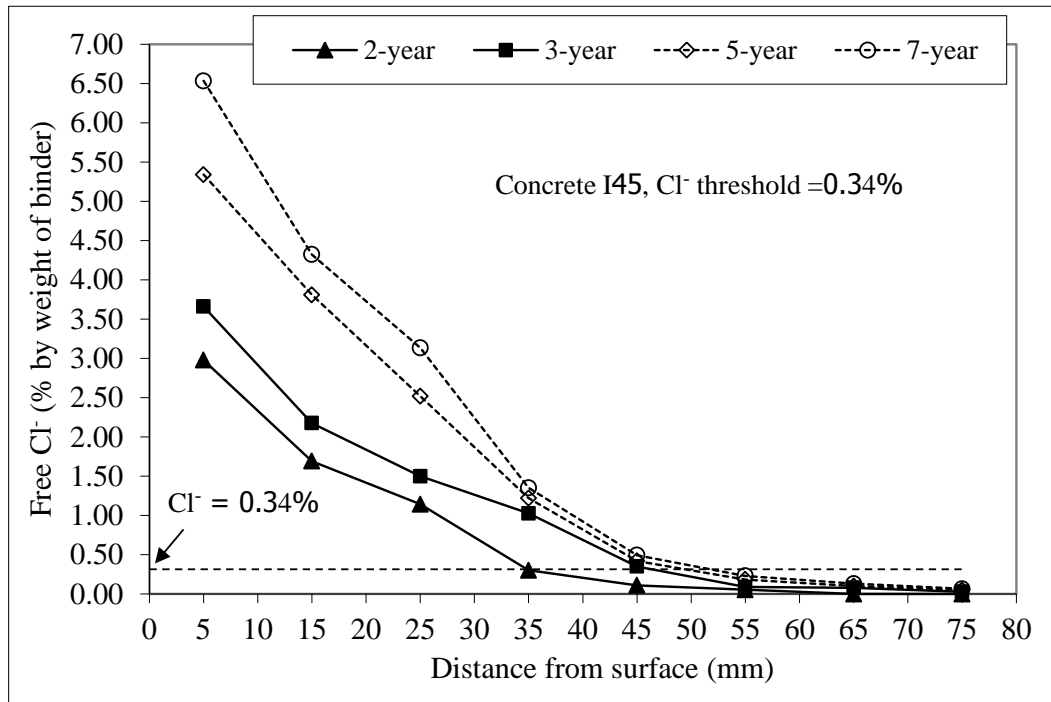
การศึกษานี้ได้หาระยะเวลาก่อนเริ่มต้นของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ จากความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์วิกฤติ (คลอไรด์อิสระ) กับระยะเวลาที่แช่คอนกรีตในน้ำทะเล ดังรูปที่ 4.6 ถึง 4.15 เมื่อพิจารณารูปที่ 4.6 ที่แสดงกราฟการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดาที่มี W/B เท่ากับ 0.45 หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 2 3 5 และ 7 ปี ซึ่งคอนกรีตดังกล่าวนี้ มีปริมาณคลอไรด์วิกฤติเท่ากับร้อยละ 0.34 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ดังนั้นสามารถหาความลึกของการแทรกซึมปริมาณคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตธรรมดาที่อายุแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 2 3 5 และ 7 ปี ได้เท่ากับ 35 45 51 และ 54 มม. ตามลำดับ ซึ่งสามารถหาความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์วิกฤติในส่วนผสมอื่นๆ ได้ลักษณะเดียวกันนี้

ตารางที่ 4.3 ระดับคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้

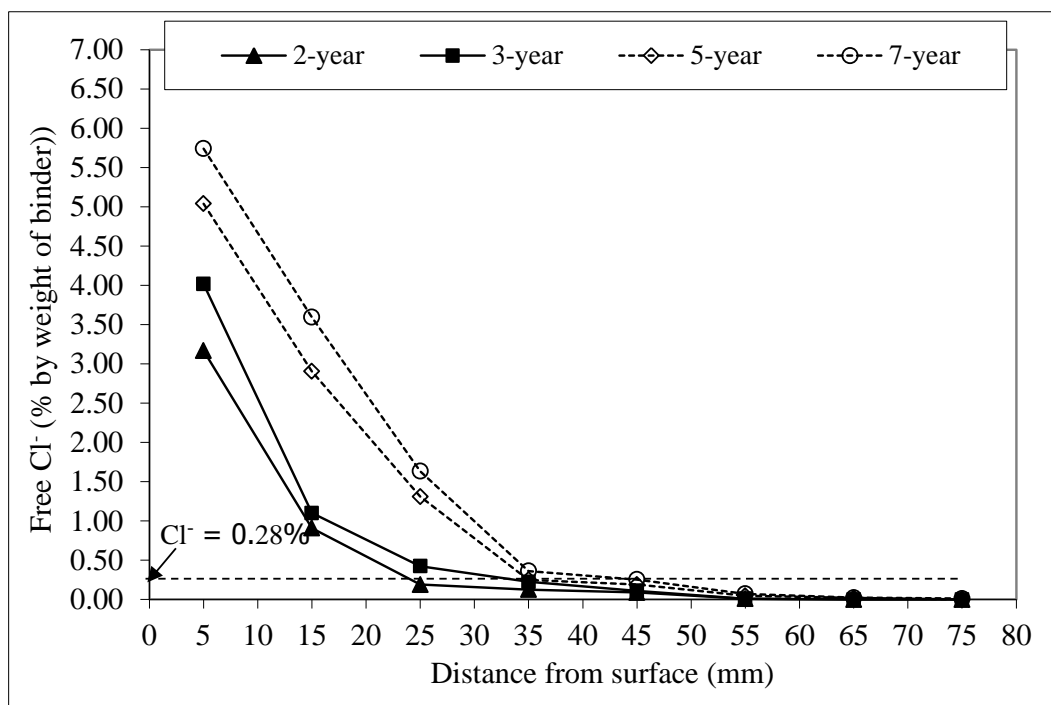
ส่วนผสม	ระดับคลอไรด์วิกฤติ (ร้อยละโดยน้ำหนักวัสดุประสาน)
I45	0.34
I45GRBA15	0.28
I45GRBA25	0.25
I45GRBA35	0.15
I45GRBA50	0.09
I65	0.25
I65GRBA15	0.18
I65GRBA25	0.16
I65GRBA35	0.10
I65GRBA50	0.08



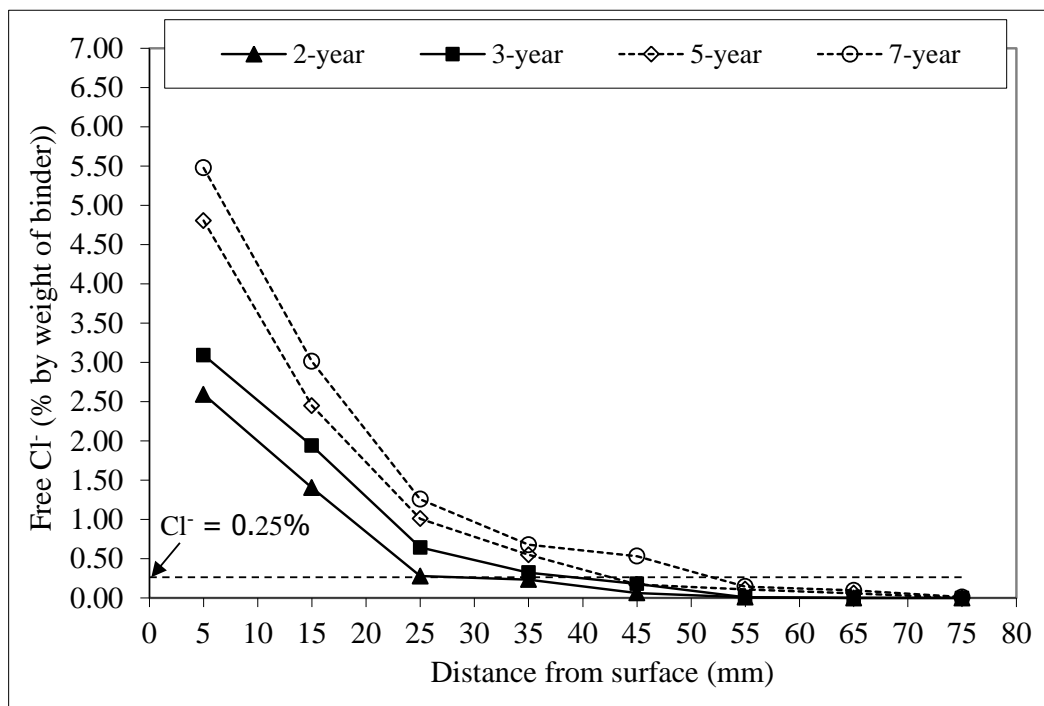
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเกิดสนิมกับปริมาณคลอไรด์อิสระที่บริเวณใกล้ผิวเหล็ก ในคอนกรีตควบคุมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 2 3 5 และ 7 ปี



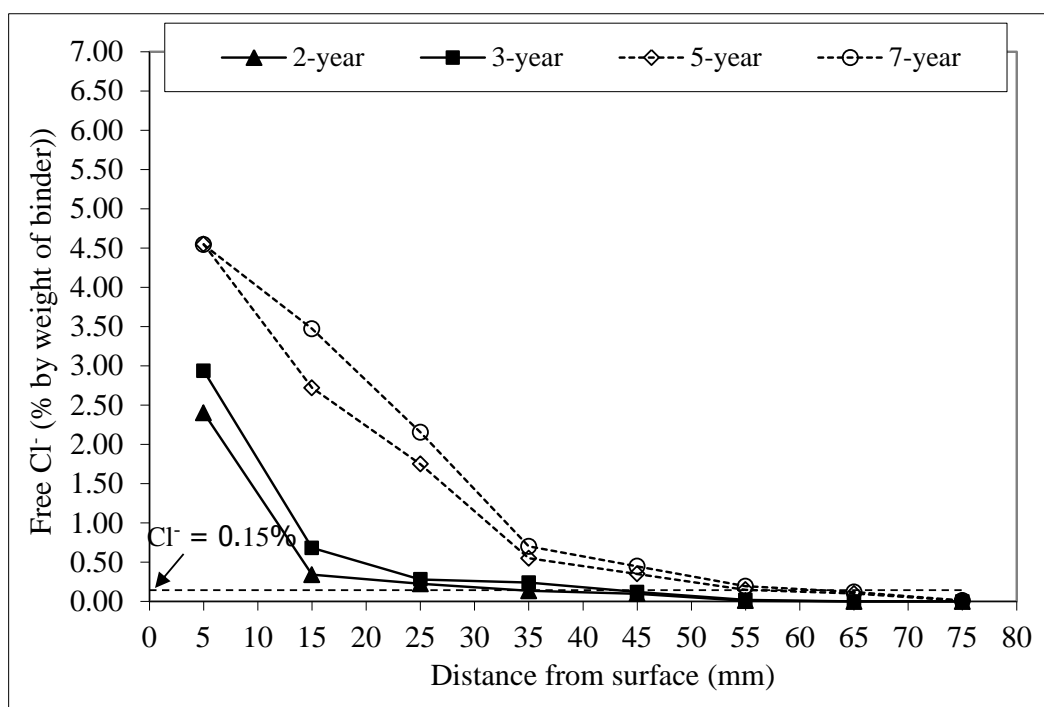
รูปที่ 4.6 การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีตธรรมดาที่มี W/B เท่ากับ 0.45 หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 2 3 5 และ 7 ปี



รูปที่ 4.7 การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่มี W/B เท่ากับ 0.45 หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 2 3 5 และ 7 ปี

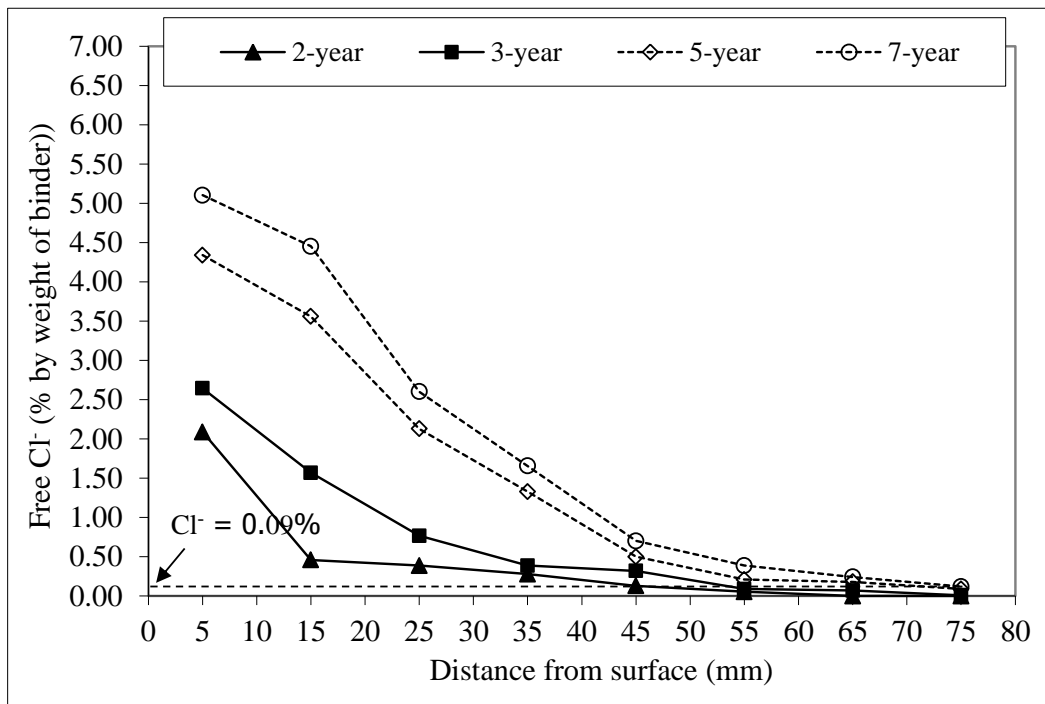


รูปที่ 4.8 การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่มี W/B เท่ากับ 0.45 หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 2 3 5 และ 7 ปี

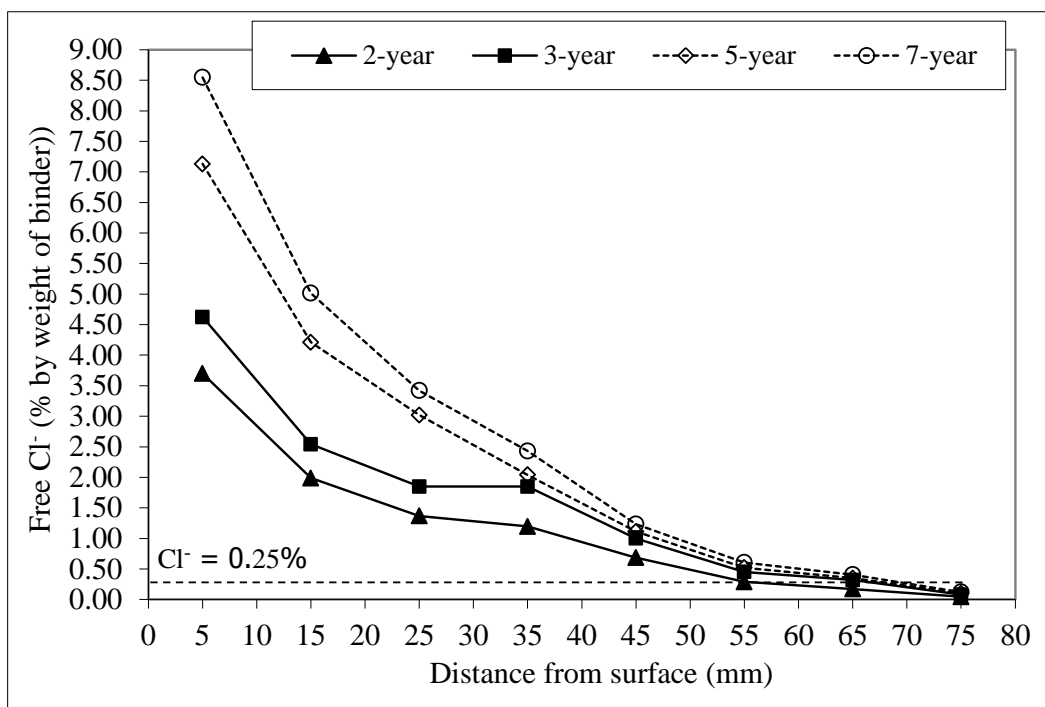


รูปที่ 4.9 การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่มี W/B เท่ากับ 0.45 หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 2 3 5 และ 7 ปี

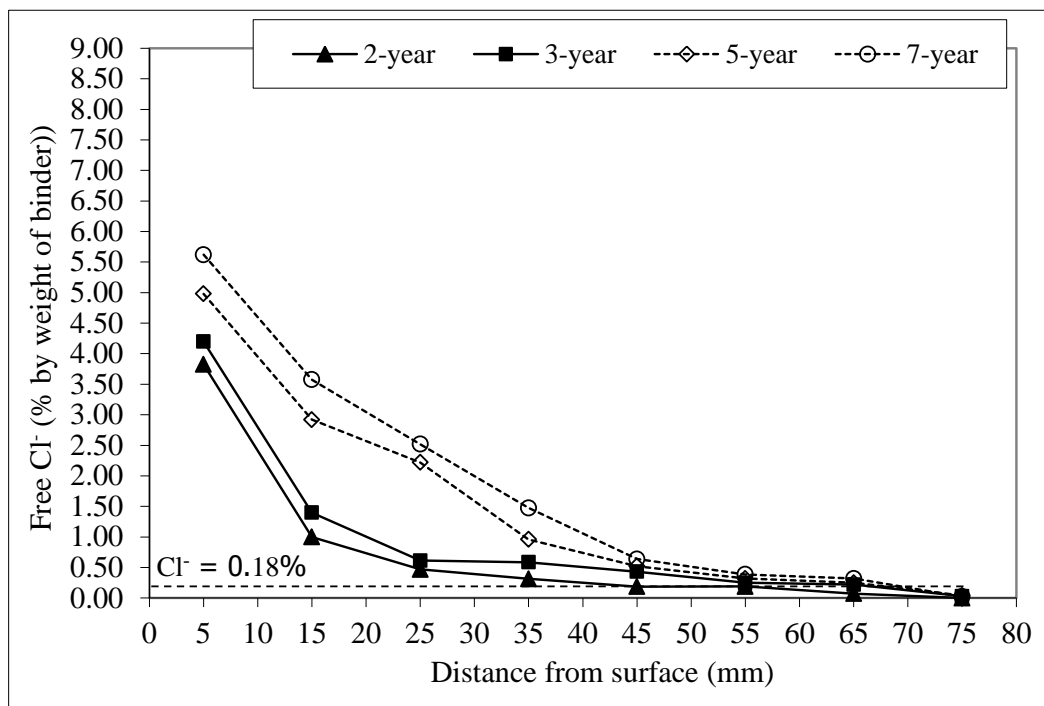




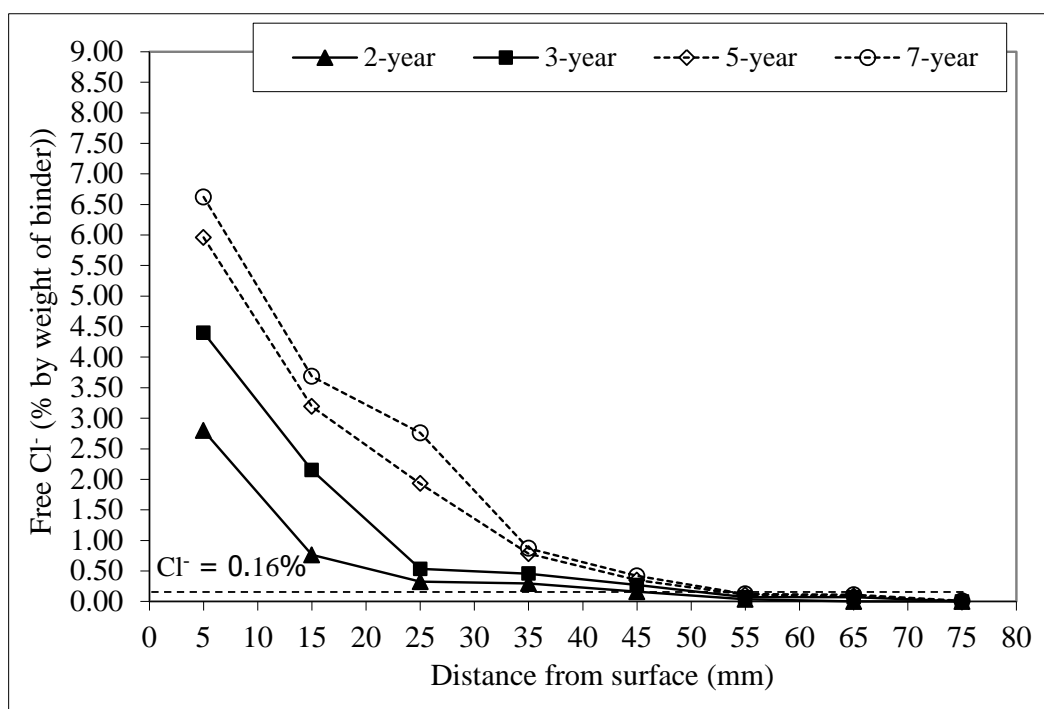
รูปที่ 4.10 การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ร้อยละ 50 โดย น้ำหนักวัสดุประสาน ที่มี W/B เท่ากับ 0.45 หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 2 3 5 และ 7 ปี



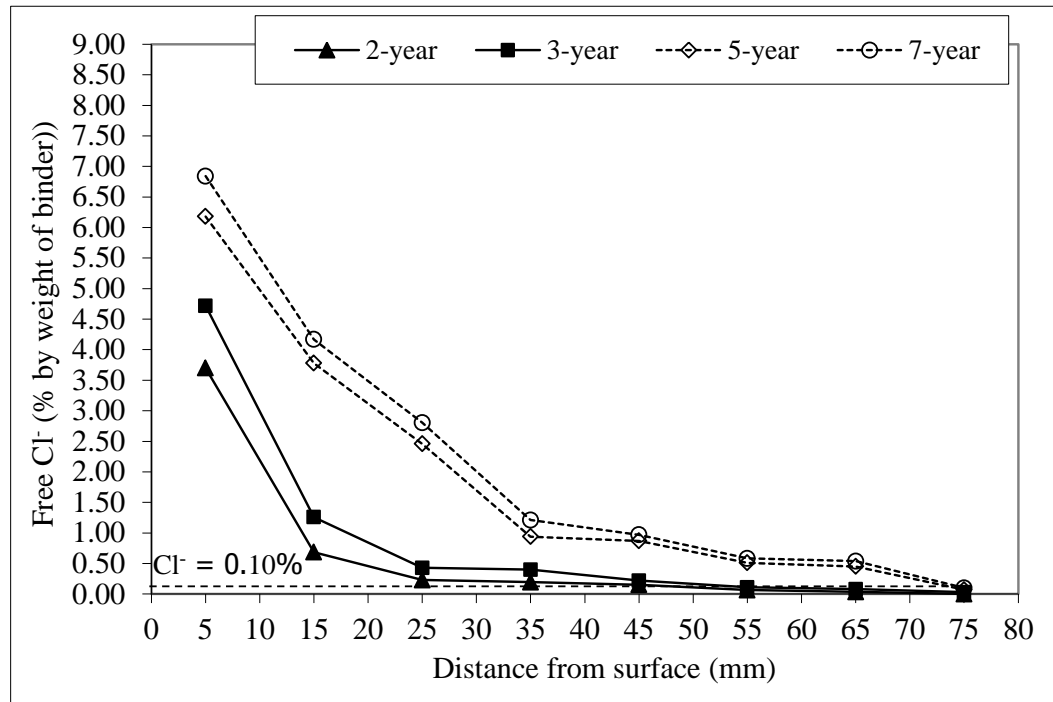
รูปที่ 4.11 การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีตธรรมดาที่มี W/B เท่ากับ 0.65 หลังแช่น้ำทะเล เป็นเวลา 2 3 5 และ 7 ปี



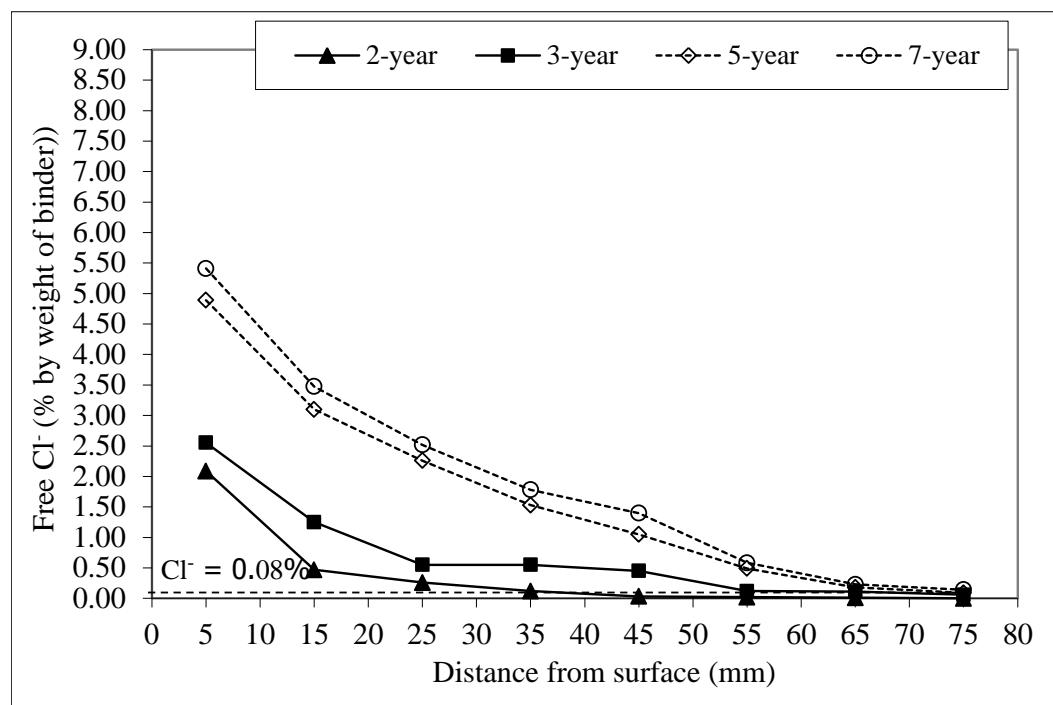
รูปที่ 4.12 การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ร้อยละ 15 โดย น้ำหนักวัสดุประสาน ที่มี W/B เท่ากับ 0.65 หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 2 3 5 และ 7 ปี



รูปที่ 4.13 การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ร้อยละ 25 โดย น้ำหนักวัสดุประสาน ที่มี W/B เท่ากับ 0.65 หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 2 3 5 และ 7 ปี



รูปที่ 4.14 การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ร้อยละ 35 โดย น้ำหนักวัสดุประสาน ที่มี W/B เท่ากับ 0.65 หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 2 3 5 และ 7 ปี

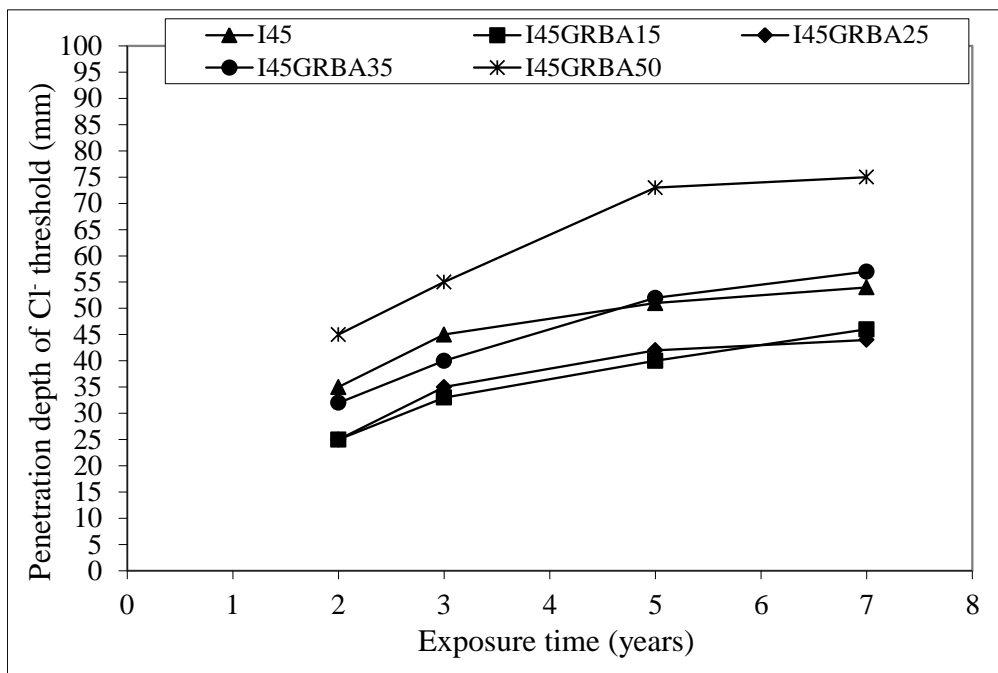


รูปที่ 4.15 การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ร้อยละ 50 โดย น้ำหนักวัสดุประสาน ที่มี W/B เท่ากับ 0.65 หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 2 3 5 และ 7 ปี

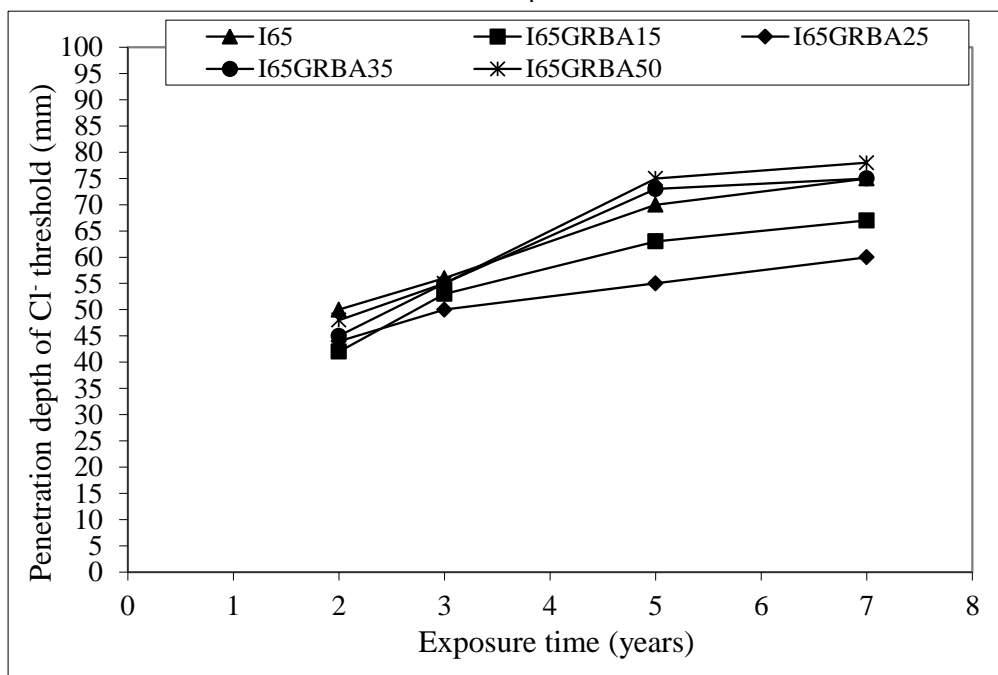
#### 4.5 ความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์วิกฤติ

รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์วิกฤติกับระยะเวลาแช่น้ำทะเลในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ พบว่า ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์วิกฤติมีแนวโน้มลดลงเมื่อแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดไม่เกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยให้ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์วิกฤติน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดาที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเดียวกัน ส่วนการแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ในปริมาณที่สูงถึงร้อยละ 50 กลับส่งผลให้คลอไรด์วิกฤติสามารถแทรกซึมได้ลึกมากขึ้นและมีแนวโน้มสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา เช่น คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ร้อยละ 0 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 มีความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์วิกฤติที่อายุแช่น้ำทะเล 5 ปี เท่ากับ 51 40 42 52 และ 73 มม. ตามลำดับ ส่วนคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 ให้ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์วิกฤติเท่ากับ 70 63 55 73 และ 75 มม. ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่ผ่านการบดละเอียดกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ให้ผลดีต่อคุณสมบัติด้านความคงทน และลดการแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้ โดยการแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ไม่เกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่งผลให้ความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์วิกฤติลดลง เนื่องจากเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่ผ่านการบดละเอียดสามารถที่จะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานและส่งผลให้เนื้อคอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตลดการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ (Tangchirapat et al.,2008; Chalee et al.,2010) ส่วนการแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ในคอนกรีตสูงถึงร้อยละ 50 ที่มีผลให้ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์วิกฤติมากขึ้น อาจเกิดจากการใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ในปริมาณสูงจะลดปริมาณของปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีตลง และส่งผลให้ความแข็งแรงที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง นอกจากนั้นปริมาณเถ้าแกลบเปลือกไม้ส่วนที่เกินและไม่ได้ทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ก็สามารถที่ละลายน้ำและถูกชะออกมาได้ง่าย ซึ่งส่งผลให้คอนกรีตเกิดความพรุนและทำให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตได้ง่ายขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่ได้ศึกษาการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ พบว่าการใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ในปริมาณที่สูง จะทำให้การซึมผ่านของน้ำสูงขึ้น (Chindaprasirt et al.,2007)

ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์วิกฤติที่มีอัตราการเพิ่มที่สูงในช่วง 5 ปีแรก ที่คอนกรีตสัมผัสกับน้ำทะเล หลังจากนั้นพบว่า มีอัตราการเพิ่มที่ลดลง (สังเกตจากความชันของกราฟ) อาจเป็นผลจากเมื่อระยะเวลาผ่านไปนานขึ้น ขนาดของโพรงในคอนกรีตลดลง ตลอดจนการใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดผสมในคอนกรีตจะช่วยปรับปรุงให้ขนาดโพรงในคอนกรีตลดลงได้ โดยเฉพาะเมื่ออายุของคอนกรีตนานขึ้น และส่งผลให้อัตราการเพิ่มของความลึกการแทรกซึมคลอไรด์วิกฤติเข้าไปในคอนกรีตลดลงได้เมื่อแช่คอนกรีตนานขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Chalee et al.,2009) ที่พบว่า สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลมีแนวโน้มลดลงเมื่ออายุคอนกรีตนานขึ้น



ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45



ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65

รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์กับระยะเวลาแช่น้ำทะเลในคอนกรีตที่ผสมเส้นใยแก้วเปลือกไม้

#### 4.6 ระยะเวลาการก่อเริ่มต้นของเหล็กเสริมในคอนกรีต

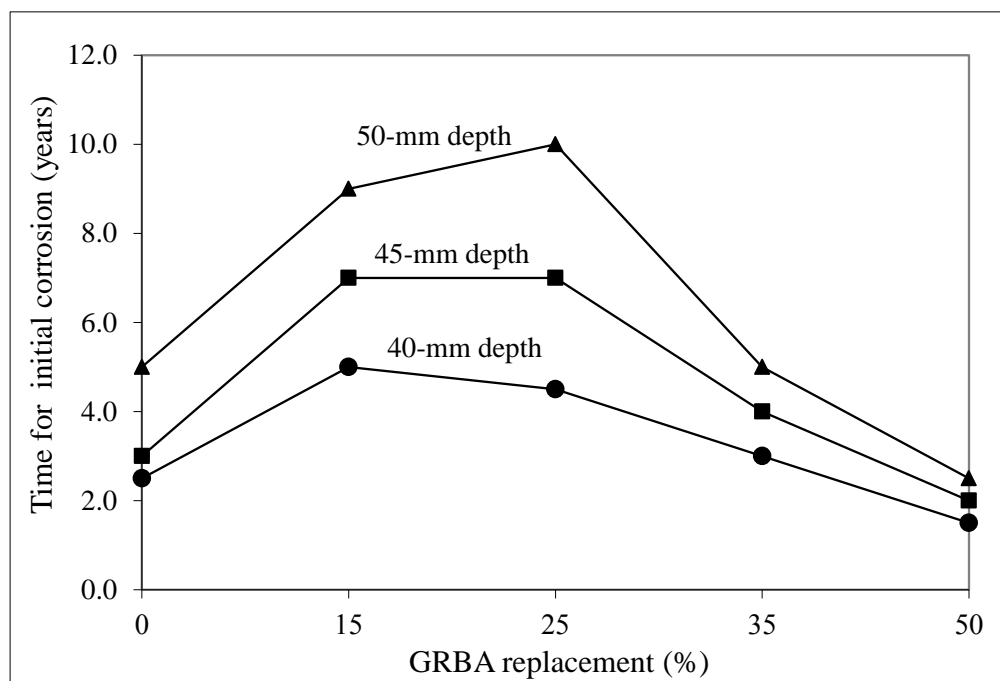
การศึกษาครั้งนี้ กำหนดให้ระยะเวลาการก่อเริ่มต้นของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่ระดับความลึกใดๆ เป็นระยะเวลาที่ปริมาณคลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตที่ระดับความลึกนั้นๆ เท่ากับความเข้มข้นของระดับคลอไรด์วิกฤติ พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์วิกฤติกับระยะเวลาแห้งน้ำทะเลในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ ดังรูปที่ 5 สามารถหาระยะเวลาการก่อเริ่มต้นของเหล็กเสริมที่ใช้ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กต่างๆ ได้ เช่น ในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดร้อยละ 0 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีระยะเวลาการก่อเริ่มต้นของเหล็กเสริมที่ระดับความลึก 45 มม. เท่ากับ 3 7 7 4 และ 2 ปี ตามลำดับ ซึ่งระยะเวลาการก่อเริ่มต้นที่ระดับความลึกอื่นก็หาได้ในลักษณะเดียวกัน

พิจารณาผลของเถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดต่อระยะเวลาการก่อเริ่มต้นของเหล็กเสริมในคอนกรีต ที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้ง ที่ระดับความลึก 40 45 และ 50 มม. ดังรูปที่ 4.17 พบว่า การใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 25 สามารถยืดระยะเวลาเริ่มการก่อเริ่มต้นของเหล็กเสริมที่ระดับความลึกต่างๆ ได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 (รูปที่ 4.17(ก)) ส่วนการแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ในคอนกรีตร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีแนวโน้มให้ระยะเวลาการก่อเริ่มต้นลดลงและลดลงต่อเนื่อง เมื่อแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้สูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เช่น คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดร้อยละ 0 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีระยะเวลาการก่อเริ่มต้นของเหล็กเสริมที่ระดับความลึก 50 มม. เท่ากับ 5 9 10 5 และ 2.5 ปี ตามลำดับ ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์วิกฤติดังที่กล่าวมาข้างต้น

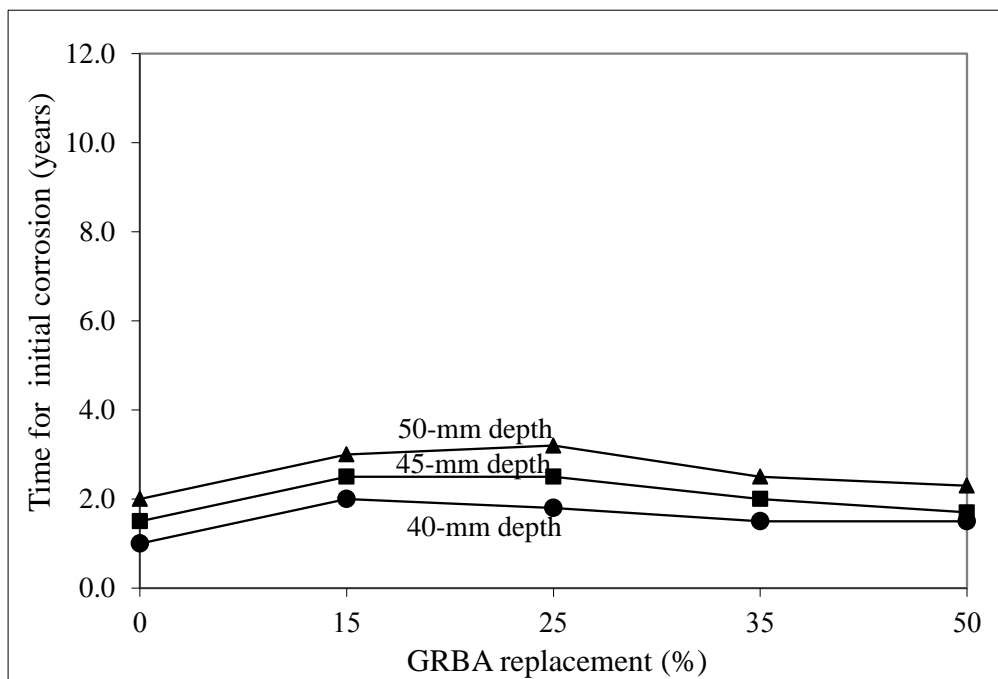
เมื่อพิจารณาในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้นเป็น 0.65 ดังรูปที่ 4.17(ข) พบว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้น มีระยะเวลาการก่อเริ่มต้นที่สั้นลง และการใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดผสมในคอนกรีตมีแนวโน้มเหมือนกับกลุ่มที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 แต่ผลของเถ้าแกลบเปลือกไม้ต่อระยะเวลาเริ่มการก่อเริ่มต้นของเหล็กเสริมในคอนกรีตกลุ่มนี้ ไม่ชัดเจนเหมือนกับกลุ่มที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ทั้งนี้อาจเป็นผลจากการใช้น้ำปริมาณมากในคอนกรีตส่งผลให้คอนกรีตมีความพรุน ทำให้คลอไรด์ ความชื้น และออกซิเจนที่มีผลให้เหล็กเสริมเป็นสนิมสามารถแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตได้เร็วขึ้น และการผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ในคอนกรีตก็ยืดระยะเวลาการก่อเริ่มต้นได้ในระดับหนึ่งเท่านั้น

การศึกษาครั้งนี้สามารถยืนยันการใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียด เพื่อยืดระยะเวลาที่เหล็กเสริมในคอนกรีตที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่งจะเริ่มการก่อเริ่มต้นได้ โดยการใช้เถ้าแกลบ

เปลือกไม้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 15-25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีความเหมาะสมในการป้องกันการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตได้เป็นอย่างดี ส่วนการผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ในคอนกรีตสูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน กลับพบว่าไม่เหมาะสมในการใช้งานในสิ่งแวดล้อมทะเลอย่างยิ่ง เนื่องจากเหล็กเสริมในคอนกรีตสามารถกัดกร่อนได้เร็วมาก และเร็วกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เท่ากัน ซึ่งผลที่ได้แสดงถึงปริมาณที่เหมาะสมของเถ้าแกลบเปลือกไม้ (ร้อยละ 15-25) ในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่ส่งผลดีต่อสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต ในงานวิจัยที่ผ่านมา (Cheewaket et al., 2012) ที่ศึกษาเกี่ยวกับระยะเวลาการกัดกร่อนเริ่มต้นในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่อยู่บริเวณชายฝั่งทะเล พบว่า การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้นถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถยืดระยะเวลาที่เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิมได้นานขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งผลดังกล่าวแตกต่างจากผลการศึกษาในครั้งนี้ที่ใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ในคอนกรีตร้อยละ 50 มีสมบัติด้านความคงทนที่ด้อยลงอย่างชัดเจน ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ชนิดของวัสดุปอซโซลานมีผลอย่างมาก ต่อการต้านทานการกัดกร่อนคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเล ดังนั้นการเลือกใช้วัสดุปอซโซลานในคอนกรีตเพื่อป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากสิ่งแวดล้อมที่รุนแรงจำเป็นต้องมีฐานข้อมูลจากงานวิจัย ที่สามารถยืนยันการนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45



ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65

รูปที่ 4.17 ผลของเส้นแวงเปลือกไม้บดละเอียดต่อระยะเวลาที่ครอนเริ่มต้นของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้ง



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

จากผลการศึกษาของงานวิจัยนี้สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

- 5.1.1 การใช้เถาแกลบเปลือกไม้บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ไม่เกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีผลให้ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์วิกฤติลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดา ส่วนการใช้เถาแกลบเปลือกไม้ในคอนกรีตสูงกว่าร้อยละ 35 กลับส่งผลให้ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์วิกฤติมีแนวโน้มมากขึ้น
- 5.1.2 การใช้เถาแกลบเปลือกไม้บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถยืดระยะเวลาเริ่มกัดกร่อนเหล็กเสริมได้อย่างชัดเจน โดยเห็นผลชัดเจนในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45
- 5.1.3 การใช้เถาแกลบเปลือกไม้บดละเอียดในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเล มีผลชัดเจนต่อการยืดระยะเวลากัดกร่อนเริ่มต้นของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 มากกว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65
- 5.1.4 การศึกษาครั้งนี้พบว่า การใช้เถาแกลบเปลือกไม้บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 15-25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 สามารถยืดระยะเวลากัดกร่อนเริ่มต้นของเหล็กเสริม ได้นานกว่าคอนกรีตธรรมดาที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเดียวกัน ถึง 2 เท่า
- 5.1.4 การศึกษาครั้งนี้ พบว่า การใช้เถาแกลบเปลือกไม้บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 15-25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์เนื่องจากน้ำทะเลได้ดี ประกอบกับมีกำลังอัดที่สูง จึงมีความเหมาะสมที่จะพัฒนาเพื่อใช้เป็นคอนกรีตที่ก่อสร้างในสิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่ง เนื่องจากให้สมบัติด้านความคงทนควบคู่กับสมบัติเชิงกลที่ดี

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1. ควรมีการศึกษาระยะเวลาการก่อมลพิษเริ่มต้นในคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานชนิดอื่นๆที่สัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่รุนแรง เช่น เถ้าแกลบ เถ้าปาล์มน้ำมัน เถ้าชานอ้อย ที่มีในประเทศ เพื่อจะได้เป็นฐานข้อมูลในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่ต้องการใช้งานในสภาวะแวดล้อมทะเล ให้มีความคงทนต่อไป

5.2.2. ควรมีพัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการใช้งานในสิ่งแวดล้อมทะเล โดยใช้ฐานข้อมูลระยะเวลาการก่อมลพิษเริ่มต้นในการสร้างแบบจำลอง

5.2.3. ควรมีการศึกษาเปรียบเทียบระยะเวลาการก่อมลพิษเริ่มต้นในคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานต่างชนิดกันที่ใช้ในสภาพแวดล้อมทะเลต่างกัน เพื่อจะได้ฐานข้อมูลในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่ต้องการใช้งานในสภาวะแวดล้อมทะเลให้หลากหลายมากขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2547). ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และ คอนกรีต. ครั้งที่ 3, สมาคมคอนกรีตไทย
- วิเชียร ชาลี. (2557). ระดับคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, 18, 132-143.
- ACI 318-05. (2005). Building Code Requirement for Structural Concrete and Commentary”, *ACI Manual of Concrete Practice*, 51-56.
- ASTM C150.(1997). Standard Specification for Portland Cement. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.01.*
- 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 C618. (1997). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, fly ash, natural pozzolan, pozzolans. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.01.*
- Broomfield, J.P., 1996, Corrosion of Steel in Concrete, England, Taylor & Francis Ltd
- 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.
- Chalee, W., Sasakul, T., Suwanmaneechot, P. & 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.
- Cao, H.T., Moorehead, D. and Potter, R.J., (1999). Predicting of Service Life of Reinforced Concrete Structures in Marine Environment and AS 3600. *Concrete Institute of Australia 19<sup>th</sup> Biennial Conference Proceedings*, Sydney, May 1999, pp 131-137.

- Cheewaket, C., Jaturapitakkul, C. & 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.
- Chindapasirt P., Jaturapitakkul C., & Sinsiri T., 2005. Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. *Cement and Concrete Composites*, 27, (4), 425-428.
- Chindapasirt, P., Homwuttiwong, S. & 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.
- Chindapasirt, P. Sirivivatnanon, V., and Cao, H.T., (2000). Specification of concrete quality and concrete cover for durable structures in marine environment. *the Second Asia / Pacific Conference on Durability of Building Systems: Harmonised Standards and Evaluation*, July 10 -12, 2000 in Bandung, Indonesia.
- CSIRO, (2000). Service life of concrete in marine environment. *CSIRO research report BRE No. 062*, Fly ash reference data sheet No.5
- Neville, A.M., (1996). *Properties of Concrete*, 4<sup>th</sup> ed., England, Addison Wesley
- Tangchirapat, W., Buranasing, R., Jaturapitakkul, C., & Chindapasirt, P., (2008). Influence of rice husk bark ash on mechanical properties of concrete containing high amount of recycled aggregates. *Constr Build Mater*, 22, 1812-1819.
- 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

ปริมาณการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมถ้ำแกลบเปลือกไม้หลังแช่น้ำทะเลถึงอายุ 7 ปี

ตารางที่ ผ 1 ปริมาณการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 2 และ 3 ปี

Mixture	dis. (mm)	Cl <sup>-</sup> (by Wt. of binder)			
		2-year exposure		3-year exposure	
		Acid	Water	Acid	Water
I65	5	3.98	3.70	5.37	4.62
	15	2.08	1.99	3.27	2.54
	25	1.39	1.37	2.23	1.85
	35	1.29	1.20	2.10	1.85
	45	0.73	0.68	1.11	1.00
	55	0.31	0.29	0.52	0.45
	65	0.19	0.17	0.33	0.32
	75	0.06	0.05	0.11	0.08
I45	5	3.53	2.98	4.19	3.66
	15	1.94	1.69	2.52	2.18
	25	1.27	1.14	1.68	1.50
	35	0.50	0.30	1.07	1.03
	45	0.28	0.11	0.42	0.35
	55	0.06	0.05	0.10	0.09
	65	0.00	0.00	0.09	0.08
	75	0.00	0.00	0.04	0.03
I65GRBA15	5	4.51	3.83	5.30	4.20
	15	1.13	1.00	1.56	1.40
	25	0.55	0.47	0.65	0.61
	35	0.47	0.32	0.65	0.59
	45	0.35	0.19	0.53	0.43
	55	0.21	0.19	0.31	0.25
	65	0.10	0.07	0.23	0.22
	75	0.00	0.00	0.04	0.03
I65GRBA25	5	3.31	2.80	4.63	4.40
	15	0.91	0.76	2.07	2.15
	25	0.40	0.32	0.91	0.53
	35	0.33	0.30	0.52	0.46
	45	0.19	0.16	0.31	0.27
	55	0.04	0.04	0.08	0.07
	65	0.00	0.00	0.08	0.07
	75	0.00	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ ผ 1 ปริมาณการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 2 และ 3 ปี (ต่อ)

Mixture	dis. (mm)	Cl <sup>-</sup> (by Wt. of binder)			
		2-year exposure		3-year exposure	
		Acid	Water	Acid	Water
I65GRBA35	5	4.47	3.70	4.83	4.72
	15	0.83	0.68	1.33	1.26
	25	0.26	0.23	0.52	0.43
	35	0.22	0.19	0.52	0.40
	45	0.17	0.15	0.26	0.22
	55	0.08	0.06	0.13	0.11
	65	0.05	0.04	0.11	0.08
	75	0.00	0.00	0.06	0.03
I65GRBA50	5	2.27	2.09	3.92	2.55
	15	0.50	0.47	1.32	1.25
	25	0.28	0.26	0.51	0.55
	35	0.11	0.12	0.64	0.55
	45	0.05	0.03	0.49	0.45
	55	0.02	0.02	0.16	0.12
	65	0.01	0.01	0.13	0.11
	75	0.00	0.00	0.08	0.06
I45GRBA15	5	3.65	3.17	4.16	4.02
	15	1.14	0.91	1.56	1.10
	25	0.23	0.19	0.62	0.42
	35	0.15	0.13	0.29	0.22
	45	0.10	0.09	0.15	0.11
	55	0.02	0.01	0.02	0.01
	65	0.00	0.00	0.00	0.00
	75	0.00	0.00	0.00	0.00
I45GRBA25	5	3.10	2.59	3.61	3.09
	15	1.58	1.40	1.86	1.94
	25	0.34	0.28	0.72	0.64
	35	0.24	0.23	0.39	0.32
	45	0.07	0.06	0.21	0.18
	55	0.01	0.01	0.02	0.01
	65	0.00	0.00	0.00	0.00
	75	0.00	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ ผ 1 ปริมาณการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้หลังแช่น้ำทะเลเป็น  
เวลา 2 และ 3 ปี (ต่อ)

Mixture	dis. (mm)	Cl <sup>-</sup> (by Wt. of binder)			
		2-year exposure		3-year exposure	
		Acid	Water	Acid	Water
I45GRBA35	5	2.71	2.40	3.05	2.94
	15	0.41	0.34	0.72	0.68
	25	0.28	0.23	0.82	0.28
	35	0.16	0.14	0.41	0.24
	45	0.12	0.10	0.14	0.12
	55	0.01	0.01	0.04	0.02
	65	0.00	0.00	0.00	0.00
	75	0.00	0.00	0.00	0.00
I45GRBA50	5	2.37	2.09	3.35	2.65
	15	0.50	0.46	1.73	1.57
	25	0.41	0.39	0.83	0.77
	35	0.32	0.28	0.42	0.39
	45	0.25	0.13	0.37	0.32
	55	0.06	0.05	0.12	0.09
	65	0.00	0.00	0.09	0.07
	75	0.00	0.00	0.04	0.01



ตารางที่ ๒ ปริมาณการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 และ 7 ปี

Mixture	dis. (mm)	Cl <sup>-</sup> (by Wt. of binder)			
		5-year exposure		7-year exposure	
		Acid	Water	Acid	Water
I65	5	7.73	7.13	9.41	8.55
	15	4.51	4.21	5.62	5.02
	25	3.34	3.02	3.75	3.42
	35	2.12	2.04	2.54	2.43
	45	1.20	1.11	1.34	1.23
	55	0.55	0.52	0.68	0.61
	65	0.37	0.35	0.46	0.41
	75	0.12	0.10	0.14	0.12
I45	5	5.91	5.34	6.97	6.53
	15	3.92	3.81	4.64	4.32
	25	2.63	2.52	3.21	3.14
	35	1.32	1.22	1.50	1.35
	45	0.45	0.42	0.51	0.50
	55	0.19	0.18	0.24	0.23
	65	0.11	0.10	0.13	0.13
	75	0.06	0.05	0.08	0.07
I65GRBA15	5	5.15	4.98	6.06	5.62
	15	3.51	2.92	4.16	3.58
	25	2.27	2.22	2.67	2.52
	35	1.48	0.96	1.72	1.47
	45	0.62	0.52	0.74	0.64
	55	0.33	0.32	0.37	0.39
	65	0.27	0.25	0.31	0.32
	75	0.06	0.04	0.04	0.02
I65GRBA25	5	6.13	5.96	7.22	6.62
	15	3.80	3.19	4.44	3.69
	25	2.80	1.93	3.36	2.76
	35	0.89	0.78	1.05	0.87
	45	0.42	0.35	0.50	0.42
	55	0.10	0.11	0.13	0.12
	65	0.10	0.09	0.12	0.11
	75	0.01	0.00	0.03	0.01

ตารางที่ ๒ ปริมาณการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 และ 7 ปี (ต่อ)

Mixture	dis. (mm)	Cl <sup>-</sup> (by Wt. of binder)			
		5-year exposure		7-year exposure	
		Acid	Water	Acid	Water
I65GRBA35	5	6.67	6.18	6.92	6.84
	15	4.25	3.78	5.02	4.17
	25	2.95	2.46	3.42	2.81
	35	1.01	0.94	1.22	1.21
	45	0.91	0.87	1.07	0.97
	55	0.54	0.51	0.72	0.58
	65	0.47	0.45	0.57	0.54
	75	0.09	0.07	0.11	0.10
I65GRBA50	5	5.02	4.89	5.74	5.41
	15	3.23	3.10	3.77	3.48
	25	2.34	2.26	2.76	2.52
	35	1.55	1.53	1.91	1.78
	45	1.30	1.05	1.60	1.40
	55	0.52	0.49	0.70	0.58
	65	0.32	0.18	0.37	0.23
	75	0.15	0.09	0.21	0.14
I45GRBA15	5	6.09	5.04	7.21	5.74
	15	3.20	2.90	4.14	3.59
	25	1.40	1.31	1.73	1.63
	35	0.35	0.25	0.45	0.36
	45	0.25	0.19	0.31	0.25
	55	0.07	0.05	0.10	0.07
	65	0.02	0.02	0.04	0.02
	75	0.01	0.00	0.01	0.01
I45GRBA25	5	5.33	4.81	6.23	5.48
	15	2.55	2.45	3.21	3.01
	25	1.10	1.01	1.51	1.26
	35	0.65	0.55	0.79	0.68
	45	0.54	0.17	0.67	0.53
	55	0.12	0.11	0.18	0.15
	65	0.09	0.06	0.13	0.10
	75	0.01	0.00	0.02	0.01

ตารางที่ ๒ ปริมาณการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 และ 7 ปี (ต่อ)

Mixture	dis. (mm)	Cl <sup>-</sup> (by Wt. of binder)			
		5-year exposure		7-year exposure	
		Acid	Water	Acid	Water
I45GRBA35	5	4.84	4.55	5.50	4.54
	15	4.05	2.72	5.34	3.47
	25	1.88	1.75	2.48	2.15
	35	0.65	0.55	0.86	0.70
	45	0.39	0.35	0.51	0.45
	55	0.18	0.15	0.24	0.19
	65	0.11	0.10	0.15	0.12
	75	0.01	0.01	0.01	0.01
I45GRBA50	5	4.45	4.34	5.38	5.10
	15	3.57	3.56	4.57	4.45
	25	2.24	2.13	2.98	2.60
	35	1.40	1.33	1.85	1.66
	45	0.52	0.50	0.81	0.70
	55	0.33	0.21	0.42	0.39
	65	0.23	0.18	0.30	0.24
	75	0.1	0.09	0.15	0.12

## ภาคผนวก ข

### ผลผลิต (Output)

#### บทความวิจัยที่ส่งตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับชาติ

- 1) ปิยพงษ์ สุวรรณมณี โชติ และ วิเชียร ชาลี, (2557). ระยะเวลาคัดกรองเริ่มต้นของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล. *การประชุมวิชาการ โยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 19*, 14-16 พฤษภาคม 2557 อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น, 831-836.



ระยะเวลาที่กัดกร่อนเริ่มต้นของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสม  
เถ้าแกลบเปลือกไม้ภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล  
Time to Initial Corrosion of Steel Reinforcement in Concrete  
Containing Rice Husk-Bark Ash under Marine Environment

ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ<sup>1</sup> และ วิเชียร ชาลี<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ. พะเยา

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาระยะเวลาเริ่มกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียด (GRBA) ที่ใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเล โดยใช้คอนกรีตควบคุมทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.45 และ 0.65 ในแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ที่ผ่านการบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานหล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด 200x200x200 มม. และฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. โดยมีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเท่ากับ 10 20 50 และ 75 มม. นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่บริเวณชายฝั่งทะเลใน จ.ชลบุรี ทำการเก็บตัวอย่างทดสอบปริมาณคลอไรด์อิสระในคอนกรีต ณ ตำแหน่งที่ฝังเหล็ก การกัดกร่อนของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต และทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีต หลังแช่คอนกรีตในน้ำทะเลเป็นเวลา 2 3 5 และ 7 ปี จากข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีตและปริมาณคลอไรด์วิกฤติ สามารถวิเคราะห์การกัดกร่อนเริ่มต้นในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ได้ ผลการวิจัยพบว่า การใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ผสมในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 25 ส่งผลให้ใช้ระยะเวลาที่เหล็กเสริมในคอนกรีตเริ่มกัดกร่อนอย่างชัดเจน

คำสำคัญ: เถ้าแกลบเปลือกไม้, การกัดกร่อนเริ่มต้น, ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ, ระยะหุ้มคอนกรีต, สิ่งแวดล้อมทะเล

### Abstract

This research studied the initial corrosion of reinforcing steel in concrete containing ground rice husk-bark ash (GRBA) under marine environment. Control concretes were prepared using Portland cement type I with W/B ratios of 0.45 and 0.65. GRBA concrete were cast using

GRBA to replace Portland cement type I at the percentages of 15, 25, 35, and 50% by weight of binder at the same W/B ratios of the control concretes. Concrete cube specimens of 200x200x200 mm<sup>3</sup> were cast and steel bars of 12-mm in diameter and 50-mm in length were embedded with concrete coverings of 10, 20, 50, and 75 mm. Concrete specimens were exposed to a tidal zone of marine environment in Chonburi province. The specimens were tested for free chloride content at the position of embedded steel bar, corrosion of the embedded steel bar and free chloride penetration in concrete after being exposed to tidal zone of sea water for 2, 3, 5, and 7 years. The free chloride penetration and chloride threshold levels obtained from this testing led to the determination of time to initial corrosion of GRBA concrete. The results found that the use of GRBA as high as 25% replacement in concrete greatly prolongs the time to initial corrosion of the reinforcing steel in the concretes.

Keywords: Rice husk-bark ash, initial corrosion, chloride threshold content, concrete cover, marine environment

### 1. บทนำ

อายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีต หมายถึง ระยะเวลาตั้งแต่ที่ก่อสร้างโครงสร้างเสร็จจนกระทั่งมีความเสียหายเกิดขึ้นในโครงสร้างคอนกรีตที่สามารถสังเกตได้ หรือระดับความเสียหายที่ยอมรับได้ [1-3] โดยทั่วไปพบว่า เมื่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเริ่มมีความเสียหายที่สามารถสังเกตได้เกิดขึ้น ความเสียหายที่เกิดขึ้นในช่วงหลังจะเร็วมาก ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างคอนกรีตมีการเสื่อมสภาพ และการแทรกซึมของคลอไรด์ ความชื้น และออกซิเจน ที่ส่งผลให้เกิดความเสียหายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีมากขึ้น ดังนั้นการพิจารณาอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเล ส่วนใหญ่จะพิจารณาถึงช่วง

\* ผู้เขียนผู้รับผิดชอบบทความ (Corresponding author)

E-mail address: wichian@buu.ac.th

อายุที่โครงสร้างเริ่มมีความเสียหายเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งเรียกว่าระยะเวลาที่คร่อนเริ่มต้น (time to initial corrosion) ทั้งนี้เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายจนกระทั่งไม่สามารถซ่อมแซมได้ หรือมีค่าใช้จ่ายในการซ่อมที่สูงเกินไป

การศึกษาระยะเวลาคร่อนเริ่มต้นของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการใช้งานในสิ่งแวดล้อมทะเล มีประโยชน์ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตให้มีความสอดคล้องกับระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก และอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องการออกแบบใช้งาน การประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจากระยะเวลาที่เหล็กเสริมในคอนกรีตเริ่มกัดกร่อน สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการแทรกซึมปริมาณคลอไรด์วิกฤติกับระยะเวลาที่โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมทะเล ซึ่งการศึกษายังต้องเก็บข้อมูลในสภาพแวดล้อมจริงภายใต้ระยะเวลาที่ยาวนาน เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องและน่าเชื่อถือในสภาพแวดล้อมจริง การศึกษาถึงแนวทางในการเลือกคอนกรีตเพื่อใช้ก่อสร้างในสิ่งแวดล้อมทะเลได้พิจารณาถึงการปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัว ให้สามารถต้านทานการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมดังกล่าว โดยมุ่งไปที่ลักษณะทางกายภาพที่ต้องการให้คอนกรีตมีความทึบน้ำและต้านทานการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์และซัลเฟตจากน้ำทะเลที่จะเข้าไปทำลายคอนกรีตและเหล็กเสริม นอกจากนี้ ยังพิจารณาถึงลักษณะทางเคมีที่ต้องการลดส่วนผสมของสารตั้งต้นในคอนกรีตที่อาจเกิดปฏิกิริยากับคลอไรด์และซัลเฟตและก่อให้เกิดความเสียหายได้ การศึกษาที่ผ่านมา [4-7] พบว่า การใช้วัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าถ่านหิน และเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่บดละเอียด ผสมแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สามารถต้านทานการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลได้ดี โดยเฉพาะเถ้าแกลบเปลือกไม้ซึ่งเป็นผลพลอยได้จาก โรงไฟฟ้าชีวมวลที่ใช้แกลบที่ได้จากโรงสีข้าวและเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ได้จากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ มีอัตราส่วนระหว่างแกลบต่อเปลือกไม้ก่อนการเผาเท่ากับ 65:35 โดยน้ำหนัก โดยใช้อุณหภูมิในการเผาที่ประมาณ 800 – 900 องศาเซลเซียส เมื่อนำมาบดละเอียดจะมีซิลิกาสูงและมีสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำและลดกลไกทางเคมีที่ส่งผลให้เกิดความเสียหายเนื่องจากน้ำทะเลได้ ดังนั้นการศึกษาค้นคว้าด้านความคงทนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ภายใต้ระยะเวลาที่คอนกรีตแช่น้ำทะเลยาวนานขึ้น สามารถที่จะวิเคราะห์ถึง ปริมาณเถ้าแกลบเปลือกไม้ ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก และระยะเวลาที่คอนกรีตเสริมเหล็กเริ่มมีการกัดกร่อน ซึ่งสามารถใช้เป็นข้อมูลด้านความคงทนสำหรับคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ เพื่อออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องการใช้งานในสิ่งแวดล้อมทะเลให้เป็นรูปธรรมและชัดเจนมากขึ้น ดังนั้นในการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะหาระยะเวลาที่เหล็กเสริมในคอนกรีตเริ่มมีการกัดกร่อน โดยใช้ฐานข้อมูลด้านความคงทนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่แช่น้ำทะเลถึงอายุ 7 ปี

## 2. วิธีการศึกษา

### 2.2.1 วัสดุ

การศึกษานี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าแกลบเปลือกไม้เป็นวัสดุประสาน โดยเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่ใช้เป็นผลพลอยได้จากโรงไฟฟ้าชีวมวล ซึ่งบดให้ละเอียดจนมีน้ำหนักข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 3 พื้นที่ผิวจำเพาะวิธีของเบลนเท่ากับ 9,460 ซม.<sup>2</sup>/ก. และมีค่าเฉลี่ยของอนุภาค เท่ากับ 10.04 ไมโครเมตร เถ้าแกลบเปลือกไม้ที่ผ่านการบดมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.15 ส่วนองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบเปลือกไม้พบว่า มีผลรวมออกไซด์ของ SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เท่ากับร้อยละ 90.66 ซึ่งมากกว่าร้อยละ 70 และมีปริมาณของ SO<sub>3</sub> และค่า LOI เท่ากับร้อยละ 0.09 และ 5.71 ตามลำดับ ซึ่งไม่เกินค่ามาตรฐานของ ASTM C 618 [8] คือร้อยละ 4 และ 10 ตามลำดับ องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบเปลือกไม้แสดงดังตารางที่ 1

ส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ปกติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไปตามมาตรฐาน ASTM C150 [9] ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 3.00 ถึง 3.20 ความละเอียดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีน้ำหนักข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 20 พื้นที่ผิวจำเพาะวิธีของเบลนเท่ากับ 3,250 ซม.<sup>2</sup>/ก. และมีค่าเฉลี่ยของอนุภาค ที่ทดสอบจากการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน เท่ากับ 25 ไมโครเมตร องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีออกไซด์หลัก ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) อะลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) รวมกันได้ร้อยละ 94.4 ดังแสดงในตารางที่ 1

สำหรับมวลรวมที่ใช้ในการศึกษานี้ใช้ทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียด โดยมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.73 และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.62 ส่วนมวลรวมหยาบใช้หินขนาดใหญ่อุดเท่ากับ 19 มม. และมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.74

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	วัสดุประสาน	
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (C)	เถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียด (GRBA)
Silicon dioxide, SiO <sub>2</sub>	20.80	87.0
Aluminum oxide, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.50	1.08
Iron oxide, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.16	2.58
Calcium oxide, CaO	64.97	1.25
Magnesium oxide, MgO	1.06	0.5
Sodium oxide, Na <sub>2</sub> O	0.08	0.08
Potassium oxide, K <sub>2</sub> O	0.55	1.0
Sulfur trioxide, SO <sub>3</sub>	2.96	0.09
Loss On Ignition, LOI	2.89	5.71

### 2.2.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

การศึกษานี้ ทำการเก็บข้อมูลด้านความคงทนเพื่อวิเคราะห์ระยะเวลาการกัดกร่อนเริ่มต้นของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ได้แก่ ทดสอบการเกิดสนิมเหล็กและปริมาณคลอไรด์ที่ตำแหน่งเหล็กเสริมเพื่อหาปริมาณคลอไรด์วิกฤติ และทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์อิสระ (free chloride content) โดยใช้น้ำเป็นตัวละลาย (water-soluble

chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C 1218[10] เพื่อหาการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตซึ่งจะใช้วิเคราะห์หาความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 2 3 5 และ 7 ปี โดยได้หล่อตัวอย่างคอนกรีตเป็นรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มม<sup>3</sup> และฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. ที่ระยะหุ้มคอนกรีต 10 20 50 และ 75 มม. ส่วนผสมคอนกรีตใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ที่ผ่านการบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.45 และ 0.65 และใช้สารลดน้ำพิเศษประเภทซัลโฟเนตมีนฟอร์มาลดีไฮด์คอนเดนเสดควบคุมค่ายุบตัวให้อยู่ในช่วง 50-100 มม. ส่วนผสมคอนกรีตแสดงดังตารางที่ 2 หลังจากบ่มคอนกรีตจนอายุครบ 28 วัน นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่บริเวณชายฝั่งทะเล จ.ชลบุรี โดยคอนกรีตสัมผัสกับน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง สมบัติของน้ำทะเลบริเวณที่นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ มีค่าความเป็นกรดด่าง (pH) อยู่ในช่วง 7.9-8.2 และปริมาณคลอไรด์มีค่าอยู่ระหว่าง 16,000-19,000 มก./ล. ส่วนซัลเฟตมีค่าระหว่าง 2,200-2,700 มก./ล. และมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 25 ถึง 35 องศาเซลเซียส ตัวอย่างคอนกรีตที่แช่น้ำทะเล แสดงดังรูปที่ 1

ตารางที่ 2 ส่วนผสมคอนกรีต

ส่วนผสม	ส่วนผสมคอนกรีต (กก/ม <sup>3</sup> )						กำลังอัดที่อายุ 28 วัน (ksc)
	C	GRBA	หิน	ทราย	น้ำ	สารลดน้ำ	
I45	424	-	979	767	190	-	451
I65	295	-	1,039	814	192	-	309
I45GRBA15	360	64	957	767	190	0.85	429
I45GRBA 25	318	106	938	767	190	1.70	408
I45GRBA 35	276	148	925	767	190	2.54	394
I45GRBA 50	212	212	952	767	190	3.82	393
I65GRBA 15	251	44	1,023	814	192	-	338
I65GRBA 25	221	74	1,012	814	192	-	329
I65GRBA 35	192	103	1,000	814	192	0.30	311
I65GRBA 50	148	148	982	814	192	0.30	286



รูปที่ 1 ตัวอย่างคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง

### 2.2.3 การทดสอบ

หลังจากแช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำทะเลครบ 2 3 5 และ 7 ปี นำก้อนคอนกรีตทรงลูกบาศก์มาเจาะบริเวณกึ่งกลางให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มม. เพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์อิสระ หลังจากนั้นทำการตัดตัวอย่างคอนกรีตที่เจาะให้หนาชั้นละ 10 มม. จากผิววนไปยังแนวกึ่งกลางและบดคอนกรีตแต่ละชั้นให้ละเอียด จึงนำตัวอย่างที่ทำการบดแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 และเก็บส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 20 มาทดสอบปริมาณคลอไรด์โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย (water-soluble chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C 1218 การเตรียมตัวอย่างทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตแสดงดังรูปที่ 2

ในการหาปริมาณคลอไรด์วิกฤติจากความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตกับปริมาณคลอไรด์อิสระ ที่ตำแหน่งเหล็กเสริม ได้หุบคูการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีตโดยการวัดพื้นที่ของการเกิดสนิม และนำตัวอย่างคอนกรีตบริเวณรอบผิวเหล็กที่ฝังมาบดให้ละเอียด นำผงตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 20 มาทดสอบปริมาณคลอไรด์โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย (water-soluble chloride) ตาม ASTM C 1218 เพื่อให้ได้ปริมาณคลอไรด์อิสระ (free chloride content)



รูปที่ 2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต

## 3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

### 3.1 การหาความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้

การหาระยะเวลากัดกร่อนเริ่มต้นของเหล็กเสริมในคอนกรีตจะต้องทราบระดับคลอไรด์วิกฤติ และเส้นกราฟการแทรกซึมของคลอไรด์ที่อายุแช่น้ำทะเลต่างๆ (การศึกษาครั้งนี้ศึกษาที่อายุ 2, 3, 5 และ 7 ปี) เพื่อที่จะได้ทราบระยะเวลาที่ระดับคลอไรด์วิกฤติสามารถแทรกซึมเข้าไปที่ความลึกต่างๆ ตามที่กำหนดได้

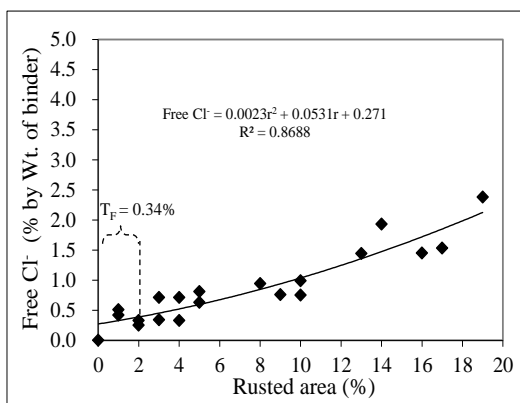
รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเกิดสนิมกับปริมาณคลอไรด์อิสระที่บริเวณใกล้ผิวเหล็ก ในคอนกรีตควบคุมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 2 3 5 และ 7 ปีซึ่งพบว่า สมการความสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงถดถอย ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free Cl<sup>-</sup>) และร้อยละการเกิดสนิม (r) ในคอนกรีตธรรมดา คือ  $Free\ Cl^- = 0.0.0023(r^2) + 0.0531(r) + 0.271$  เมื่อแทนปริมาณร้อยละพื้นที่สนิมเหล็ก (r) เท่ากับ 0 0.25 0.50 0.75 1.00 1.25 1.50 1.75 และ 2.00 ได้ Free Cl<sup>-</sup> เท่ากับ ร้อยละ 0.27 0.29 0.30

0.31 0.33 0.34 0.36 0.37 และ 0.39 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ ซึ่งค่าเฉลี่ยของปริมาณคลอไรด์อิสระที่ก่อให้เกิดพื้นที่ของสนิมเหล็กในช่วงร้อยละ 0 ถึง 2 มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 0.34 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ซึ่งค่าเฉลี่ยของปริมาณคลอไรด์ดังกล่าวนี้ ได้กำหนดให้เป็นระดับคลอไรด์วิกฤติที่เป็นคลอไรด์อิสระของคอนกรีตธรรมดาที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ระดับคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตส่วนผสมอื่นๆ ก็หาได้ในลักษณะเดียวกัน โดยการหาค่าคลอไรด์วิกฤติดังกล่าวนี้ได้แสดงในงานวิจัยที่ผ่านมา [11] และแสดงระดับคลอไรด์วิกฤติที่เป็นคลอไรด์อิสระของคอนกรีตทุกส่วนผสมหลังแช่น้ำทะเลถึงอายุ 7 ปี ดังตารางที่ 3

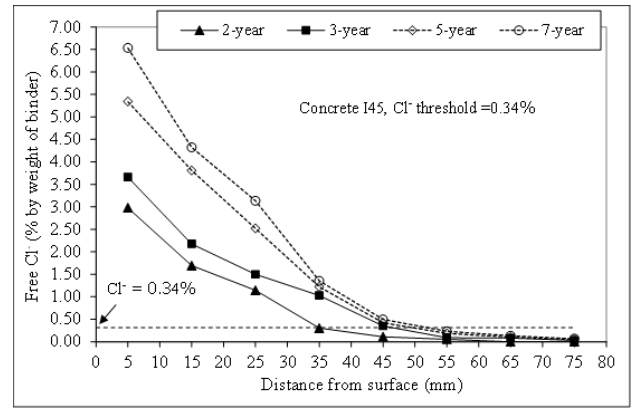
การศึกษารุ่นนี้ได้หาค่าระยะเวลาที่คร่อนเริ่มต้นของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้จากความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์วิกฤติกับระยะเวลาที่แช่คอนกรีตในน้ำทะเลรูปที่ 4 แสดงกราฟการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดาที่มี W/B เท่ากับ 0.45 หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 2 3 5 และ 7 ปี ซึ่งคอนกรีตดังกล่าวนี้มีปริมาณคลอไรด์วิกฤติเท่ากับร้อยละ 0.34 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ดังนั้นสามารถหาความลึกของการแทรกซึมปริมาณคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตธรรมดาที่อายุแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 235 และ 7 ปี ได้เท่ากับ 35 45 51 และ 54 มม. ตามลำดับ ซึ่งสามารถหาความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์วิกฤติในส่วนผสมอื่นๆ ได้ลักษณะเดียวกันนี้

ตารางที่ 3 ระดับคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้

ส่วนผสม	ระดับคลอไรด์วิกฤติ (ร้อยละโดยน้ำหนักวัสดุประสาน)
I45	0.34
I45GRBA15	0.28
I45GRBA25	0.25
I45GRBA35	0.15
I45GRBA50	0.09
I65	0.25
I65GRBA15	0.18
I65GRBA25	0.16
I65GRBA35	0.10
I65GRBA50	0.08



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเกิดสนิมกับปริมาณคลอไรด์อิสระที่บริเวณใกล้ผิวเหล็ก ในคอนกรีตควบคุมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 2 3 5 และ 7 ปี



รูปที่ 4 การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีตธรรมดาที่มี W/B เท่ากับ 0.45 หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 235 และ 7 ปี

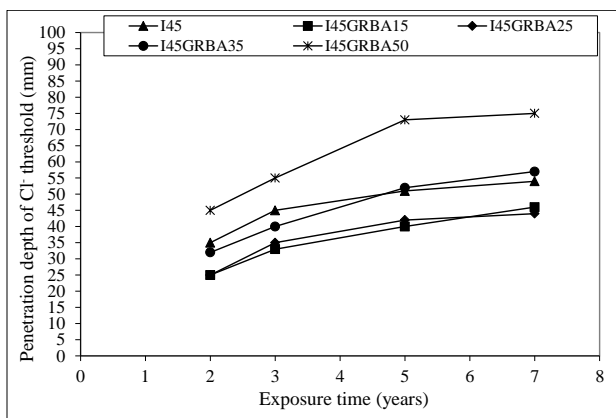
### 3.2 ความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์วิกฤติ

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์วิกฤติกับระยะเวลาแช่น้ำทะเลในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้พบว่า ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์วิกฤติมีแนวโน้มลดลงเมื่อแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดไม่เกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยให้ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์วิกฤติน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดาที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเดียวกัน ส่วนการแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ในปริมาณที่สูงถึงร้อยละ 50 กลับส่งผลให้คลอไรด์วิกฤติสามารถแทรกซึมได้ลึกมากขึ้นและมีแนวโน้มสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา เช่น คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ร้อยละ 0 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 มีความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์วิกฤติที่อายุแช่น้ำทะเล 5 ปี เท่ากับ 51 40 42 52 และ 73 มม. ตามลำดับ ส่วนคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 ให้ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์วิกฤติเท่ากับ 70 63 55 73 และ 75 มม. ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่ผ่านการบดละเอียดกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ให้ผลดีต่อคุณสมบัติด้านความคงทนและลดการแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้ โดยการแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ไม่เกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่งผลให้ความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์วิกฤติลดลง เนื่องจากเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่ผ่านการบดละเอียดสามารถที่จะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานและส่งผลให้เนื้อคอนกรีตมีความทึบแน่นมากขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตลดการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ [6, 12] ส่วนการแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ในคอนกรีตสูงถึงร้อยละ 50 ที่มีผลให้ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์วิกฤติมากขึ้น อาจเกิดจากการใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ในปริมาณสูงจะลดปริมาณของปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีตลง และส่งผลให้ความแข็งแรงที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง นอกจากนั้นปริมาณเถ้าแกลบเปลือกไม้ส่วนที่เกินและไม่ได้ทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ก็สามารถที่ละลายน้ำและถูกชะออกมาได้ง่าย ซึ่งส่งผลให้คอนกรีตเกิดความพรุนและทำให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตได้ง่ายขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่ได้ศึกษาการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือก

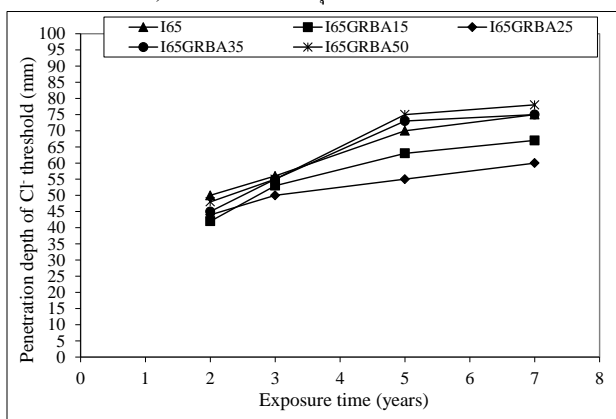


ไม่พบว่าการใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ในปริมาณที่สูง จะทำให้การซึมผ่านของน้ำสูงขึ้น [13]

ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์จากดินมีอัตราการเพิ่มที่สูงในช่วง 5 ปีแรก ที่คอนกรีตสัมผัสกับน้ำทะเล หลังจากนั้นพบว่าอัตราการเพิ่มที่ลดลง (สังเกตจากความชันของกราฟ) อาจเป็นผลจากเมื่อระยะเวลาผ่านไปนานขึ้นขนาดของโพรงในคอนกรีตลดลง ตลอดจนการใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดผสมในคอนกรีตจะช่วยปรับปรุงให้ขนาดโพรงในคอนกรีตลดลงได้ โดยเฉพาะเมื่ออายุของคอนกรีตมากขึ้น และส่งผลให้อัตราการเพิ่มของความลึกการแทรกซึมคลอไรด์จากดินเข้าไปในคอนกรีตลดลงได้ เมื่อแช่คอนกรีตมากขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [14] ที่พบว่า สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลมีแนวโน้มลดลงเมื่ออายุคอนกรีตมากขึ้น



ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45



ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65

**รูปที่ 6** ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์จากดินกับระยะเวลาแช่น้ำทะเลในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้

### 3.3 ระยะเวลาที่ครอเริ่มต้นของเหล็กเสริมในคอนกรีต

การศึกษาครั้งนี้ กำหนดให้ระยะเวลาที่ครอเริ่มต้นของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่ระดับความลึกใดๆ เป็นระยะเวลาที่ปริมาณคลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตที่ระดับความลึกนั้นๆ เท่ากับความเข้มข้นของระดับคลอไรด์จากดิน วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์จากดินกับระยะเวลาแช่น้ำทะเลในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ ดัง

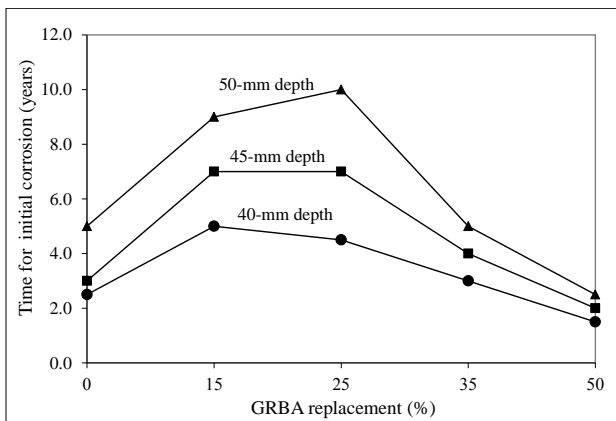
รูปที่ 5 สามารถหาระยะเวลาที่ครอเริ่มต้นของเหล็กเสริมที่ใช้ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กต่างๆ ได้เช่น ในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดร้อยละ 0 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีระยะเวลาที่ครอเริ่มต้นของเหล็กเสริมที่ระดับความลึก 45 มม. เท่ากับ 3 7 7 4 และ 2 ปี ตามลำดับ ซึ่งระยะเวลาที่ครอเริ่มต้นที่ระดับความลึกอื่นก็หาได้ในลักษณะเดียวกัน

พิจารณาผลของเถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดต่อระยะเวลาที่ครอเริ่มต้นของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้ง ที่ระดับความลึก 40 45 และ 50 มม. ดังรูปที่ 6 พบว่าการใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 25 สามารถยืดระยะเวลาเริ่มที่ครอเริ่มต้นของเหล็กเสริมที่ระดับความลึกต่างๆ ได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 (รูปที่ 6(ก)) ส่วนการแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ในคอนกรีตร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีแนวโน้มให้ระยะเวลาที่ครอเริ่มต้นลดลง และลดลงต่อเนื่อง เมื่อแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้สูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เช่น คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดร้อยละ 0 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีระยะเวลาที่ครอเริ่มต้นของเหล็กเสริมที่ระดับความลึก 50 มม. เท่ากับ 5 9 10 5 และ 2.5 ปี ตามลำดับซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์จากดินที่กล่าวมาข้างต้น

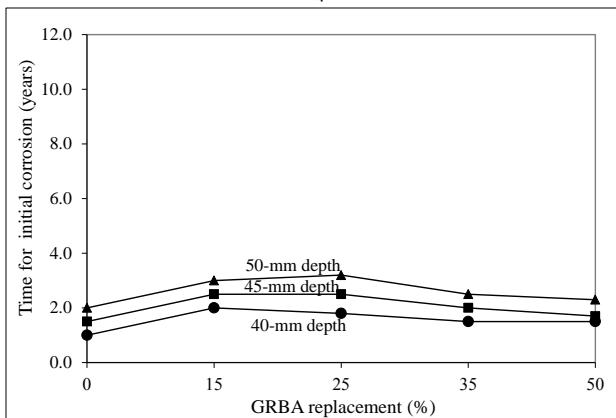
เมื่อพิจารณาในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้นไปเป็น 0.65 ดังรูปที่ 6(ข) พบว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้นไปมีระยะเวลาที่ครอเริ่มต้นที่สั้นลง และการใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดผสมในคอนกรีตมีแนวโน้มเหมือนกับกลุ่มที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 แต่ผลของเถ้าแกลบเปลือกไม้ต่อระยะเวลาเริ่มที่ครอเริ่มต้นของเหล็กเสริมในคอนกรีตกลุ่มนี้ไม่ชัดเจนเหมือนกับกลุ่มที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ทั้งนี้อาจเป็นผลจากการใช้น้ำปริมาณมากในคอนกรีตส่งผลให้คอนกรีตมีความพรุน ทำให้คลอไรด์ความชื้น และออกซิเจนที่มีผลให้เหล็กเสริมเป็นสนิมสามารถแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตได้เร็วขึ้น และการผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ในคอนกรีตก็ยืดระยะเวลาที่ครอเริ่มต้นได้ในระดับหนึ่งเท่านั้น

การศึกษาครั้งนี้สามารถยืนยันการใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียด เพื่อยืดระยะเวลาที่เหล็กเสริมในคอนกรีตที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่งจะเริ่มที่ครอเริ่มต้นได้ โดยการที่ใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 15-25 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีความเหมาะสมในการป้องกันการที่ครอเริ่มต้นของเหล็กเสริมในคอนกรีตได้เป็นอย่างดี ส่วนการผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ในคอนกรีตสูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน กลับพบว่าไม่เหมาะสมในการใช้งานในสิ่งแวดล้อมทะเลอย่างยิ่ง เนื่องจากเหล็กเสริมในคอนกรีตสามารถที่ครอเริ่มต้นได้เร็วมาก และเร็วกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เท่ากัน ซึ่งผลที่ได้แสดงถึงปริมาณที่เหมาะสมของเถ้าแกลบเปลือกไม้ (ร้อยละ 15-25) ในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่ส่งผลดีต่อสมบัติด้านความคงทนของ

คอนกรีต ในงานวิจัยที่ผ่านมา [15] ที่ศึกษาเกี่ยวกับระยะเวลาที่คร่อนเริ่มต้นในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่อยู่บริเวณชายฝั่งทะเล พบว่า การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้นถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถยืดระยะเวลาที่เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิมได้นานขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งผลดังกล่าวแตกต่างจากผลการศึกษาในครั้งนี้ที่การใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ในคอนกรีตร้อยละ 50 มีสมบัติด้านความคงทนที่ด้อยลงอย่างชัดเจน ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าชนิดของวัสดุปอชโซลานมีผลอย่างมากต่อการต้านทานการกัดกร่อนคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเล ดังนั้นการเลือกใช้วัสดุปอชโซลานในคอนกรีตเพื่อป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากสิ่งแวดล้อมที่รุนแรงจำเป็นต้องมีฐานข้อมูลจากงานวิจัยที่สามารถยืนยันการนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45



ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65

รูปที่ 6 ผลของเถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดต่อระยะเวลาที่คร่อนเริ่มต้นของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้ง

#### 4. สรุปผล

1) การใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ไม่เกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีผลให้ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์วิกฤตลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดาส่วนการใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ในคอนกรีตสูงกว่าร้อยละ

35 กลับส่งผลให้ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์วิกฤตมีแนวโน้มมากขึ้น

- การใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถยืดระยะเวลาเริ่มที่คร่อนเหล็กเสริมได้อย่างชัดเจน โดยเห็นผลชัดเจนในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45
- การใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเล มีผลชัดเจนต่อการยืดระยะเวลาที่คร่อนเริ่มต้นของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 มากกว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65
- การศึกษาครั้งนี้พบว่า การใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 15-25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 สามารถยืดระยะเวลาที่คร่อนเริ่มต้นของเหล็กเสริมได้นานกว่าคอนกรีตธรรมดาที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเดียวกัน ถึง 2 เท่า

#### กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) มหาวิทยาลัยบูรพา ประจำปีงบประมาณ 2557

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] CSIRO, "Service life of concrete in marine environment" *CSIRO research report BRE No. 062, 2000*, Fly ash reference data sheet No.5
- [2] Woo-Yong Jung, Young-Soo Yoon, Young-Moo Sohn. "Predicting the remaining service life of land concrete by steel corrosion". *Cement Concrete Res* 33, pp. 663-77, 2003.
- [3] H.T. Cao, D. Moorehead, R.J. Potter "Predicting of Service Life of Reinforced Concrete Structures in Marine Environment and AS 3600", *Concrete Institute of Australia 19 th Biennial Conference Proceedings 1999*, pp. 131-137.
- [4] W. Chalee, P. Ausapanit, C. Jaturapitakkul. "Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis". *Mater Design*, 3, pp. 1242-1249, 2010.
- [5] T. Cheewaket, C. Jaturapitakkul, W. Chalee. "Long term performance of chloride binding capacity in fly ash concrete in a marine environment". *Constr Build Mater*, 24, pp. 1352-1357, 2010.
- [6] W. Chalee, T. Sasakul, P. Suwanmaneechot, 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, pp. 47-53, 2013.
- [7] MDA. Thomas, JD. Matthews. "Performance of pfa concrete in a marine environment-10-year results". *Cement Concrete Res*, 26, pp. 5-20, 2004.
- [8] ASTM C618. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, fly ash, natural pozzolan, pozzolans. Annual Book of ASTM Standards, V. 04.01 1997.
- [9] ASTM C150. Standard Specification for Portland Cement. Annual Book of ASTM Standards, V. 04.01 1997.
- [10] ASTM C1218. Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete. Annual Book of ASTM Standards, V. 04.01 1997.
- [11] วิเชียร ชาติ, "ระดับคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้ากลบเปลือกไม้ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล", วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, ปีที่ 18, พ.ศ.2557, หน้า 132-143.
- [12] W. Tangchirapat, R. Buranasing, C. Jaturapitakkul, P. Chindapasirt. "Inuence of rice husk bark ash on mechanical properties of concrete containing high amount of recycled aggregates". *Constr Build Mater*, 22, pp. 1812-1819, 2008.
- [13] P. Chindapasirt, S. Homwuttiwong, C. Jaturapitakkul. "Strength and water permeability of concrete containing palm oil fuel ash and rice husk-bark ash". *Constr Build Mater*, 21, pp. 1492-1499, 2007.
- [14] W. Chalee, C. Jaturapitakkul. "Effect of W/B ratios and fly ash finenesses on chloride diffusion coefficient of concrete in marine environment". *Mater Struct*, 42, pp. 505-515, 2009.
- [15] T. Cheewaket, C. Jaturapitakkul, W. Chalee. "Initial corrosion presented by chloride threshold penetration of concrete up to 10 year-results under marine site". *Constr Build Mater*, 37, pp. 693-698, 2012.