

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



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยเรื่อง ...การศึกษาปริมาณคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่
แช่ใน สภาวะ แวดล้อมทะเล

(A study of Threshold Chloride Content of Fly Ash Concrete in Marine environment)

คณะผู้วิจัย

นายวิเชียร ชาลี

นายกฤษดา ประสพชัยชนะ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

16 ส.ค. 2554

29 158 1

๕๑๕๐๗๖๖๖

เริ่มบริการ
18 ต.ค. 2554

สนับสนุนโดย ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2553

พฤศจิกายน พ.ศ. 2553

ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2553
รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ตามที่ นายวิเชียร ชาลี พนักงานมหาวิทยาลัย ตำแหน่งอาจารย์ สังกัดภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย เรื่อง “การศึกษาปริมาณคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล” จากทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2553 โดยมีงบประมาณทั้งโครงการ 194,500 บาท ขณะนี้ผลการดำเนินการวิจัยเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้ว

รายละเอียดของโครงการวิจัย

ผู้เสนอ	:	นายวิเชียร ชาลี
หน่วยงาน	:	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ระยะเวลาดำเนินการ	:	12 เดือน
งบประมาณ	:	194,500 บาท

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาผลของผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤติ ในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมน้ำทะเลถึงระยะเวลา 7 ปี หล่อตัวอย่างคอนกรีตโดยใช้เถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ในอัตราร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 และ หล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด 200x200x200 มม. และฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 10, 20, 50 และ 75 มม. หลังจากบ่มคอนกรีตจนอายุครบ 28 วัน นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่บริเวณชายฝั่งทะเล จ.ชลบุรี หลังจากแช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งครบ 2, 3, 4, 5 และ 7 ปี ได้ทำการวัดพื้นที่ของการเกิดสนิมเหล็กและทดสอบหาปริมาณคลอไรด์โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย (คลอไรด์อิสระ) ในคอนกรีต ณ ตำแหน่งที่ฝังเหล็ก จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ตำแหน่งฝังเหล็กกับการเกิดสนิมของเหล็กเสริม สามารถวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์วิกฤติในแต่ละส่วนผสมได้

ผลการวิจัยพบว่า ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ ในคอนกรีต มีค่าลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินสูงขึ้น (โดยเฉพาะในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณต่ำ) และมีค่าลดลงตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มากขึ้น

คำสำคัญ : สภาวะแวดล้อมทะเล, เถ้าถ่านหิน, คลอไรด์วิกฤติ, การกัดกร่อน, ระยะหุ้ม

Abstract

The objectives of this investigation were to study the effect of W/B ratios and fly ash on threshold chloride content of concrete under marine environment. Mea moh fly ash was used as a partial replacement of Portland cement type I at 0, 15, 25, 35, and 50% by weight of binder. Water to binder ratios (W/B) were varied as 0.45, 0.55, and 0.65. Concrete cube specimens of 200 mm were cast and steel bars of 12-mm in diameter and 50-mm in length were embedded at coverings of 10, 20, 50, and 75 mm. Subsequently, the hardened concrete specimens were cured in fresh water until the age of 28 days and then were exposed to tidal zone of marine environment in Chonburi province. The specimens were tested for water soluble chloride content at the position of embedded steel bar and corrosion of embedded steel bar after being exposed to tidal zone of sea water for 2, 3, 4, 5, and 7 years. The threshold chloride level (T) was evaluated from relationship between chloride content at the position of embedded steel bar and initial corrosion of embedded steel bar.

The results showed that the threshold chloride level (free chloride) of concrete decreased with increasing of fly ash replacement (especially in low volume fly ash) and the decrease of W/B ratio.

Keyword ; Marine environment, Fly ash, Threshold chloride, Corrosion, Covering depth

กิตติกรรมประกาศ

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

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลงานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นฐานข้อมูลเพื่อนำไปใช้แก้ปัญหาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเลประเทศไทย ให้เกิดความเสียหายน้อยที่สุด ช่วยเสริมสร้างความรู้ และความเข้าใจ ตลอดจนช่วยส่งเสริมการใช้ถ้ำถ่านหินในงานคอนกรีตให้มากยิ่งขึ้น

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ช
รายการรูปประกอบ	ซ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ระเบียบวิธีวิจัย	3
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตในทะเล	4
2.2 กระบวนการกัดกร่อนทางเคมีเนื่องจากสารประกอบซัลเฟตต่อคอนกรีต	5
2.3 การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์	9
2.4 อิทธิพลของปูนซีเมนต์ผสมวัสดุปอซโซลานต่อการกัดกร่อน	16
2.5 แนวทางการใช้เถ้าถ่านหินในการป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากน้ำทะเล	16
2.6 ระยะเวลาของเหล็กเสริมคอนกรีต	17
2.7 การป้องกันการกัดกร่อนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเล	18
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	19
3. วิธีการศึกษา	22
3.1 รายละเอียดคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล	22
3.2 การทดสอบปริมาณสารประกอบคลอไรด์ในคอนกรีต	25

3.3 การทดสอบความเป็นสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต	28
4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล	29
4.1 การเกิดสนิมในเหล็กและปริมาณคลอไรด์ ณ ตำแหน่งเหล็กที่ฝังเหล็กในคอนกรีต	29
4.2 การหาค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤติ	31
4.3 ผลของเถ้านหินต่อระดับคลอไรด์วิกฤติ	33
4.4 การประยุกต์ใช้ปริมาณคลอไรด์วิกฤติในการออกแบบคอนกรีตที่คำนึงถึงความคงทน	35
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	38
5.1 สรุปผล	38
5.2 ข้อเสนอแนะ	38
เอกสารอ้างอิง	39
ภาคผนวก	41

รายการตาราง

ตาราง		หน้า
3.1	อัตราส่วนผสมคอนกรีต	23
4.1	แสดงปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่ผสมเข้าถ่านหินที่แช่ใน สิ่งแวดล้อมทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้ง	33
4.2	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล	36
ผ 1	ปริมาณคลอไรด์บริเวณรอบผิวเหล็กเสริมในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อม ทะเลเป็นเวลา 2 ปี	42
ผ 2	ปริมาณคลอไรด์บริเวณรอบผิวเหล็กเสริมในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อม ทะเลเป็นเวลา 3 ปี	43
ผ 3	ปริมาณคลอไรด์บริเวณรอบผิวเหล็กเสริมในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อม ทะเลเป็นเวลา 4 ปี	44
ผ 4	ปริมาณคลอไรด์บริเวณรอบผิวเหล็กเสริมในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อม ทะเลเป็นเวลา 5 ปี	45
ผ 5	ปริมาณคลอไรด์บริเวณรอบผิวเหล็กเสริมในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อม ทะเลเป็นเวลา 7 ปี	46
ผ6	ปริมาณสนิมเหล็กเสริมในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 2 ปี	47
ผ7	ปริมาณสนิมเหล็กเสริมในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี	48
ผ8	ปริมาณสนิมเหล็กเสริมในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 4 ปี	49
ผ9	ปริมาณสนิมเหล็กเสริมในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี	50
ผ10	ปริมาณสนิมเหล็กเสริมในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี	51

รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า	
2.1	ชนิดของสิ่งแวดล้อมทะเล	5
2.2	การเกิดสนิมเหล็กเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเมื่อมีคลอไรด์ในคอนกรีต	9
2.3	รูปแบบความเสียหายของคอนกรีตเนื่องจากเหล็กเสริมเป็นสนิม	11
2.4	ตัวอย่างรูปตัดตามยาวของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ซึมเข้าไปในคอนกรีต โดยแสดงในหน่วยร้อยละของน้ำหนักของปูนซีเมนต์	13
3.1	การฝังเหล็กลงในคอนกรีต	24
3.2	ตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง	25
3.3	คอนกรีตบริเวณที่ฝังเหล็กเพื่อใช้ทดสอบปริมาณคลอไรด์	26
3.4	การทดสอบหาปริมาณสารประกอบคลอไรด์ในคอนกรีต	27
4.1	การกัดกร่อนของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตและปริมาณคลอไรด์ ที่ตำแหน่งฝังเหล็กเมื่อแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี	31
4.2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเกิดสนิมกับปริมาณคลอไรด์ ที่บริเวณใกล้ผิวเหล็กในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3, 4, 5, และ 7 ปี	32
4.3	ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่แช่ใน สภาวะแวดล้อมทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง	35
4.4	ร้อยละของ T/D_c ของคอนกรีตที่ผสมเส้นผ่านศูนย์กลางกับคอนกรีตของ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.45 ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง	37

บทที่ 1 บทนำ

บทนี้เป็นกรกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเล วัตถุประสงค์ และขอบเขตการศึกษา

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสกับน้ำทะเลหรืออยู่บริเวณชายฝั่ง จะประสบปัญหาความเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อนที่ค่อนข้างรุนแรง ซึ่งเป็นผลมาจาก แรงกระแทกของคลื่น กรวดทราย ความแปรปรวนของน้ำทะเล ความชื้น อุณหภูมิ น้ำขึ้น-ลง และทิศทางการพัดพาของคลื่น เป็นต้น ปัจจัยทางกายภาพเหล่านี้ ทำให้เกิดการสึกกร่อนบริเวณผิวหน้าของคอนกรีต ส่งผลต่อเนื้อให้ เกิดกระบวนการกัดกร่อนทางเคมีได้ง่ายขึ้น อีกทั้งในน้ำทะเลมีเกลือของสารเคมีหลายชนิดละลายอยู่ โดยเฉพาะเกลือของซัลเฟตและคลอไรด์ ซึ่งมีความเข้มข้นสูงในน้ำทะเล ซึ่งการกัดกร่อนของซัลเฟตจะทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวในเบื้องต้น และเกิดการแตกร้าวตามมา ทำให้คอนกรีตสูญเสียความสามารถในการรับกำลัง ส่วนการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ จะไม่ได้ทำอันตรายต่อคอนกรีตโดยตรง แต่คลอไรด์เมื่อซึมเข้าไปในคอนกรีต จะทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม จนเกิดการขยายตัว และทำให้คอนกรีตบริเวณรอบเหล็กเสริมเกิดการแตกร้าวในที่สุด สิ่งต่างๆเหล่านี้ล้วนเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการเสียหาย และก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมที่สูงตลอดจนความไม่คุ้มค่าในการใช้งานโครงสร้างดังกล่าว

ในการป้องกันปัญหาการกัดกร่อนจากน้ำทะเลมีด้วยกันหลายวิธี แต่ละวิธีก็มีค่าใช้จ่ายที่แตกต่างกันไป ตามกระบวนการขั้นตอนการดำเนินงาน การนำสารปอซโซลานมาเป็นส่วนผสมในคอนกรีตก็เป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจ โดยเจ้าถ่านหินเป็นสารปอซโซลานที่นิยมนำมาเพิ่มความทนทานของคอนกรีตตามแนวความคิดของการออกแบบปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตสมัยใหม่ มีงานวิจัยหลายชิ้นที่กล่าวถึง การใช้เจ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน จะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้น [1-5] ทั้งในเรื่องของกำลังอัด ความสามารถในการซึมผ่านน้ำ ตลอดจนกลไกทางปฏิกิริยาเคมีที่ช่วยเกื้อหนุนให้คอนกรีตมีความทนทานสูงขึ้น แต่จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า การศึกษาถึงผลการใช้วัสดุปอซโซลานในการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสภาพแวดล้อมทะเลจริงในประเทศไทยมีน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับต่างประเทศ และประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อนชื้น ซึ่งทำให้ไม่สามารถใช้ฐานข้อมูลของต่างประเทศที่มีอยู่ได้ จึงมีความจำเป็นต้องทำการศึกษาและเก็บข้อมูลการใช้เจ้าถ่านหิน ซึ่งเป็นวัสดุที่มีอยู่ในประเทศมาใช้ประโยชน์ เพื่อหาแนวทางป้องกันการกัดกร่อนของคอนกรีตในสภาพแวดล้อมทะเลจริงที่เกิดขึ้นในประเทศไทย

ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (Threshold chloride content) เป็นปริมาณคลอไรด์รอบผิวเหล็กเสริมที่ส่งผลให้เริ่มเกิดการกัดกร่อน โดยทั่วไปคอนกรีตเสริมเหล็กเริ่มมีการกัดกร่อนเมื่อปริมาณคลอไรด์มีค่าเกินร้อยละ 0.2 ถึง 0.7 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน [6] อย่างไรก็ตามปริมาณคลอไรด์วิกฤติจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ลักษณะผิวของเหล็กเสริม, ชนิดของวัสดุประสาน, คุณสมบัติของคอนกรีต, ตลอดจนสถานะแวดล้อมที่คอนกรีตสัมผัส เป็นต้น ปริมาณคลอไรด์วิกฤติมีประโยชน์ในการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างสถานะของการกัดกร่อนเริ่มต้นของเหล็กที่เสริมในคอนกรีต กับปริมาณของคลอไรด์อิสระรอบผิวของเหล็กเสริม ซึ่งจะมีผลสืบเนื่องในการพิจารณาความเสี่ยงของการกัดกร่อนในเหล็กเสริมเมื่อทราบปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีต โดยทั่วไปแล้วในการตรวจสอบสถานะการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีอยู่เดิม จะพิจารณาในสองประเด็นหลักๆ คือ พิจารณาในส่วนของกำลังรับแรงเชิงกล ซึ่งอาจทดสอบโดย โดยการเจาะทดสอบกำลังอัด หรือการทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดโดยวิธีไม่ทำลาย และอีกส่วนต้องพิจารณาด้านสถานะการกัดกร่อนควบคู่ไปด้วยซึ่งสามารถทำได้โดยการเจาะดูปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีต แล้วนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับปริมาณคลอไรด์วิกฤติซึ่งจะทำให้ทราบถึงสถานะการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตได้นอกจากนั้นในงานโครงสร้างใหม่ที่เริ่มมีการออกแบบที่ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติด้านความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก จำเป็นที่จะต้องใช้ข้อมูลปริมาณคลอไรด์วิกฤติประกอบการออกแบบด้วย งานวิจัยส่วนใหญ่ได้นำเสนอค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤติจากฐานข้อมูลในห้องปฏิบัติการ โดยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งจะออกมาในรูปแบบของความเสี่ยงที่เริ่มกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตมากกว่าที่จะเป็นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นจริงๆ และเป็นสถานะแวดล้อมที่อยู่ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งจะแตกต่างจากสถานะแวดล้อมจริงที่มีปัจจัยหลายอย่างที่เกื้อหนุนให้เกิดการทำลายโครงสร้างทั้งทางด้านเคมีและทางด้านกายภาพ นอกจากนี้ยังพบว่ามิงงานศึกษาที่เกี่ยวกับปริมาณคลอไรด์วิกฤติจากการเก็บข้อมูลในสถานะแวดล้อมจริงจำนวนน้อยมาก และที่สำคัญคือไม่พบงานวิจัยดังกล่าวในสภาพแวดล้อมทะเลบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ซึ่งเป็นเขตร้อนชื้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการศึกษาปริมาณคลอไรด์วิกฤติจากการเก็บข้อมูลของคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินในสถานะแวดล้อมทะเลจริงถึงระยะเวลาแช่น้ำทะเล 7 ปี

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของปริมาณเถ้านหินต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่แช่ในสถานะแวดล้อมทะเล

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่แช่ในสถานะแวดล้อมทะเล

1.2.3 เพื่อศึกษาระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่เหมาะสมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ใน สภาวะแวดล้อมทะเล

1.3 ระเบียบวิธีวิจัย

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษาปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (Threshold chloride content) ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะจากตัวอย่างที่แช่ในสภาวะแวดล้อมน้ำทะเลเป็นระยะเวลา 7 ปี โดยศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน, และปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีต โดยการศึกษาครั้งนี้ใช้คอนกรีตที่มี อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 และใช้เถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ในอัตราร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานหล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด 200x200x200 มม. และฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 10, 20, 50 และ 75 มม. หลังจากบ่มคอนกรีตจนอายุครบ 28 วันนำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่บริเวณชายฝั่งทะเลโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี โดยคอนกรีตสัมผัสกับน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง หลังจากแช่ตัวอย่างคอนกรีตครบ 7 ปี ได้นำคอนกรีตมาทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต, วัดพื้นที่ของการเกิดสนิมเหล็ก, และนำตัวอย่างคอนกรีตบริเวณรอบผิวเหล็กมาทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ตาม ASTM C 1218 โดยจากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์กับการเกิดสนิมของเหล็กเสริมสามารถนำมาวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์วิกฤติในแต่ละส่วนผสมได้

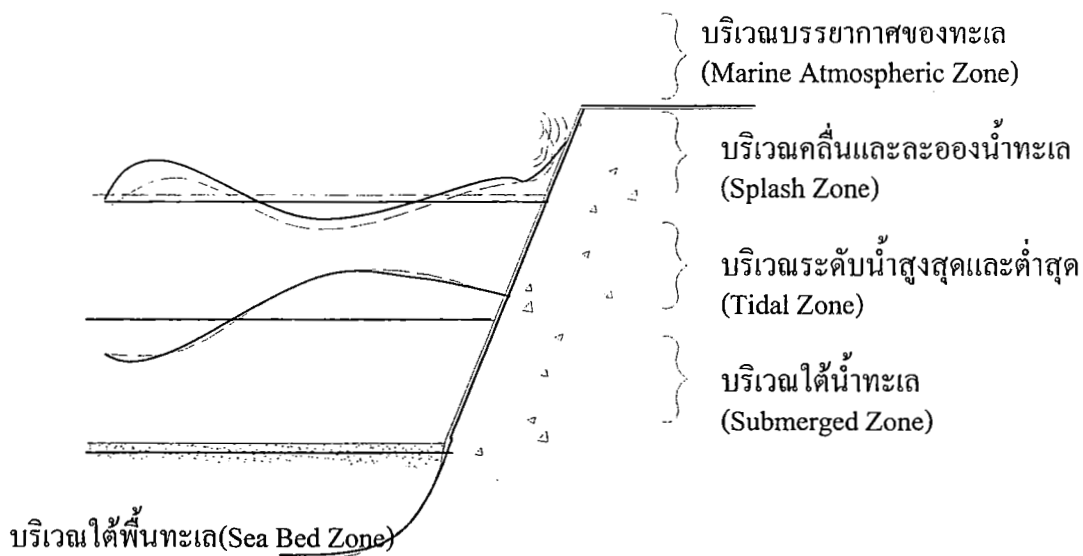
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะกล่าวถึงผลกระทบของน้ำทะเลที่มีต่อคอนกรีต, กลไกการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ที่ส่งผลให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นสนิม, การกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต, วัสดุปอซโซลาน, ปฏิกิริยาปอซโซลาน, เล้าถ่านหิน, การป้องกันการกัดกร่อนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตในทะเล

โครงสร้างของคอนกรีตในน้ำทะเลและบริเวณชายฝั่งเป็นส่วนที่ต้องเผชิญกับสภาพแวดล้อมที่แปรปรวนส่งผลให้การกัดกร่อนเกิดขึ้นค่อนข้างสูงไม่ว่าจะเป็นการกัดกร่อนเนื่องจากสภาพแวดล้อมทางกายภาพโดยการได้รับแรงกระแทกจากคลื่น ทราบ กรวดโดยตรง ซึ่งส่งผลให้เกิดการสึกกร่อนที่ผิวคอนกรีตหรือการกัดกร่อนที่เกิดจากกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นเนื่องจากสารประกอบเคมีซึ่งเป็นองค์ประกอบในน้ำทะเล โดยการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณจะมีความรุนแรงที่แตกต่างกันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบในน้ำทะเลและสภาพแวดล้อมทางกายภาพ เช่น ความแปรปรวนของระดับน้ำทะเล ความแรงและการพัดพาของคลื่น ตลอดจนสิ่งแวดล้อมภายนอกที่มีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการกัดกร่อนทางเคมีต่อโครงสร้างคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยบริเวณบรรยากาศของทะเล (Marine Atmospheric Zone) เป็นบริเวณที่ไม่ได้รับแรงกระแทกและสัมผัสกับน้ำทะเลโดยตรงอาจอยู่ห่างไกลจากทะเลหลายกิโลเมตร ความเสียหายที่เกิดขึ้นจะเป็นผลเนื่องจากเกลือคลอไรด์ที่มีในอากาศ เกิดการพัดพาโดยลมสัมผัสกับเนื้อคอนกรีต เกิดการแพร่ของไอออนคลอไรด์ (Chloride Ions) เข้าไปในเนื้อคอนกรีตในบริเวณที่มีรอยแตกร้าวหรือมีความพรุน ส่งผลให้เกิดสนิมในเหล็กเสริมเร็วขึ้นและเกิดการขยายตัวดันคอนกรีตให้แตกร้าวเสียหาย บริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash Zone) บริเวณนี้จะได้รับแรงกระแทกค่อนข้างแรงส่งผลให้เกิดรอยปริแตกเล็กๆทำให้คลอไรด์และความชื้นซึมผ่านเข้าไปถึงเหล็กเสริมส่งผลให้เกิดสนิมในเหล็กเสริมได้ค่อนข้างสูง เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีออกซิเจนอยู่เป็นจำนวนมาก ประกอบกับการซึมผ่านของคลอไรด์ที่เร่งให้เกิดสนิมเหล็กมากขึ้น โดยความเสียหายที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้จะเป็นผลเนื่องจากคลอไรด์เป็นหลัก และการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตจะมีน้อยมาก บริเวณที่สัมผัสกับน้ำทะเลในลักษณะเปียกและแห้งสลับกัน (Tidal Zone) จะได้รับผลกระทบทั้งจากคลื่น กรวด ทราบ ที่กระแทก ตลอดจนผลกระทบจากการกัดกร่อนเนื่องจากกระบวนการทางเคมีทั้งคลอไรด์และซัลเฟต ซึ่งน้ำทะเลจะเข้าสู่เนื้อคอนกรีตที่แห้งโดยการซึมผ่าน (Absorption) จนคอนกรีตอยู่ในสภาพอิ่มตัวและเมื่อสภาพแวดล้อมเปลี่ยนเป็นแห้งจะมีคราบเกลือที่ติดผิวคอนกรีต โดยเกลือของสารประกอบต่างๆ เมื่ออยู่ในสถานะของแข็งจะไม่เป็นอันตรายต่อโครงสร้างคอนกรีต แต่เมื่อกลับมา

สภาพเปียกอีกครั้ง จะได้เป็นสารละลายคลอไรด์ซึ่งมีความเข้มข้นมากขึ้นและแพร่เข้าไปในเนื้อคอนกรีตมากขึ้นซึ่งเมื่อน้ำลดคอนกรีตจะสัมผัสกับออกซิเจนและคลอไรด์ที่มีเข้มข้นอยู่แล้วในเนื้อคอนกรีตจะเร่งให้เกิดสนิมเหล็กมากขึ้น ความเสียหายที่เกิดขึ้นในสภาพแวดล้อมแบบนี้มีความรุนแรงมากขึ้นในกรณีในช่วงเวลาที่คอนกรีตแห้งนาน [2-4] และนอกจากนั้นบริเวณนี้ยังได้รับผลกระทบจากการกัดกร่อนของซัลเฟตอีกด้วย ดังนั้นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นต่อโครงสร้างในสภาวะนี้ค่อนข้างสูง ซึ่งการศึกษาถึงกระบวนการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นตลอดจนการศึกษาถึงแนวทางในการป้องกันและต้านทานการกัดกร่อนเป็นสิ่งที่จะต้องให้ความสำคัญและพัฒนาข้อมูลให้ชัดเจนมากขึ้น ส่วนบริเวณที่อยู่ใต้น้ำ (Submerged Zone) การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นจะมีความรุนแรงน้อยกว่า เนื่องจากไม่ได้รับผลกระทบที่รุนแรงจากคลื่นประกอบกับการซึมผ่านของออกซิเจนเข้าไปเร่งการเกิดสนิมในเหล็กเสริมมีน้อยมาก ถึงแม้ความเข้มข้นของคลอไรด์จะมีสูงแต่ถ้าไม่ได้สัมผัสกับออกซิเจนก็จะไม่เกิดสนิมในเหล็กเสริม แต่การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเป็นผลเนื่องจากซัลเฟตที่เกิดปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์โดยตรง



รูปที่ 2.1 ชนิดของสิ่งแวดลอมทะเล

2.2 กระบวนการกัดกร่อนทางเคมีเนื่องจากสารประกอบซัลเฟตต่อคอนกรีต

ในน้ำทะเลจะมีส่วนประกอบของเกลือของสารประกอบต่างๆ หลายชนิดโดยส่วนประกอบหลักๆจะเป็นเกลือของคลอไรด์และซัลเฟต โดยมีสารประกอบของคลอไรด์มากที่สุด ซึ่งการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากคลอไรด์จะมีความรุนแรงมากในกรณีที่เป็นคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากคลอไรด์จะเร่งให้เกิดสนิมในเหล็กเสริมมากขึ้น ส่วนสารประกอบซัลเฟตจะพบรองลงมาและการกัดกร่อนที่

เกิดขึ้นจะเกิดกับซีเมนต์เพสต์ โดยทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวและเสียหายซึ่งจะได้กล่าวละเอียดต่อไป ในงานวิจัยฉบับนี้จะให้ความสำคัญกับการศึกษาการกัดกร่อนของน้ำทะเลต่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินซึ่งตัวอย่างทดสอบเป็นคอนกรีตที่ไม่มีเหล็กเสริม การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นจะเป็นผลเนื่องจากสารประกอบซัลเฟตมากกว่า ดังนั้นจึงมุ่งประเด็นการศึกษาไปที่การกัดกร่อนเนื่องจากสารประกอบซัลเฟตในน้ำทะเล เป็นหลัก

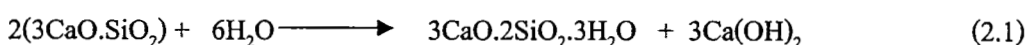
2.2.1 กระบวนการกัดกร่อนของสารประกอบซัลเฟตต่อคอนกรีต

เกลือซัลเฟตที่พบในธรรมชาติและเป็นอันตรายต่อโครงสร้างคอนกรีตได้แก่ โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) และแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) โดยเฉพาะในน้ำทะเลจะพบแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วคอนกรีตจะมีส่วนผสมของมวลรวมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แต่มวลรวมจะมีผลในการทำปฏิกิริยากับซัลเฟตน้อยมาก ดังนั้นจึงนำเสนอเฉพาะกระบวนการกัดกร่อนที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับซัลเฟตเท่านั้น

2.2.1.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

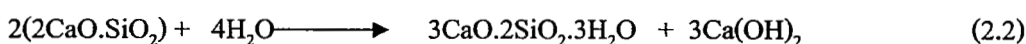
เป็นที่ทราบกันอยู่แล้วว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบไปด้วยสารประกอบหลักอยู่ 4 ชนิดได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) หรือ C_3S ไดแคลเซียมซิลิเกต ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) หรือ C_2S ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) หรือ C_3A และเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) หรือ C_4AF โดย C_3S เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะให้ความแข็งแรงกับคอนกรีตในระยะแรกๆ สูง และเกิดความร้อนในคอนกรีตสูงด้วย C_2S จะให้ความแข็งแรงกับคอนกรีตในระยะแรกๆ ต่ำและให้กำลังสูงขึ้นในระยะหลัง ส่วน C_3A และ C_4AF ให้ความแข็งแรงกับคอนกรีตน้อยมากและเมื่อแข็งตัวจะก่อให้เกิดปัญหาการกัดกร่อนของคอนกรีตเนื่องจากซัลเฟต แต่จำเป็นต้องมี C_3A และ C_4AF เป็นส่วนประกอบของปูนซีเมนต์เสมอเนื่องจากเป็นฟลักซ์ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ โดยทำให้อุณหภูมิในการเผาไหม้ต่ำลงและเสียค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำลง เมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันตามสมการที่ 2.1 ถึง 2.3 ดังนี้

ปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างไตรแคลเซียมซิลิเกตกับน้ำ



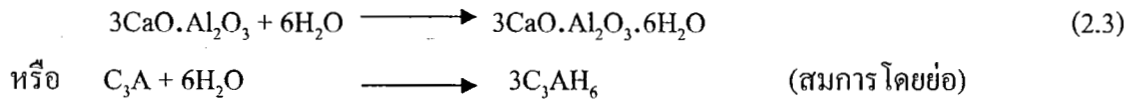
หรือ $2\text{C}_3\text{S} + 6\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{C-S-H} + 3\text{Ca}(\text{OH})_2$ (สมการโดยย่อ)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างไดแคลเซียมซิลิเกต กับน้ำ



หรือ $2\text{C}_2\text{S} + 4\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{C-S-H} + 3\text{Ca}(\text{OH})_2$ (สมการโดยย่อ)

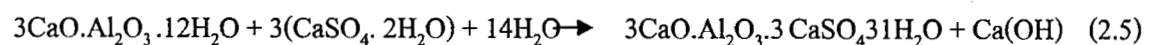
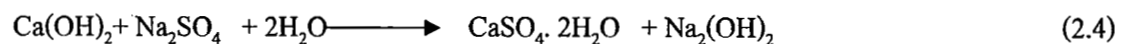
ปฏิกิริยาระหว่างไตรแคลเซียมอลูมิเนตกับน้ำ



ผลของปฏิกิริยาตามสมการที่ 2.1 และ 2.2 ได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) หรือชื่อย่อ C-S-H เป็นสารประกอบที่มีลักษณะเป็นเจล (gel) มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานและให้กำลังแก่คอนกรีตขณะที่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) เป็นสารที่อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อคอนกรีตเนื่องจากสารประกอบนี้จะทำปฏิกิริยากับสารละลายซัลเฟตต่างๆซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยาและกระบวนการกักคร่อนจะกล่าวต่อไป แต่อย่างไรก็ตาม $\text{Ca}(\text{OH})_2$ มีคุณสมบัติเป็นด่างอย่างมากคือมี pH ประมาณ 12.5 ซึ่งมีส่วนช่วยป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กเสริมได้เป็นอย่างดี ส่วนปฏิกิริยาตามสมการที่ 2.3 จะได้สารแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) หรือชื่อย่อ C-A-H เป็นสารที่มีรูปร่างเป็นแท่งลูกบาศก์และให้กำลังคอนกรีตเพียงเล็กน้อย แต่จะทำปฏิกิริยากับสารละลายซัลเฟตก่อให้เกิดปัญหาในการขยายตัวและแตกร้าวในคอนกรีต

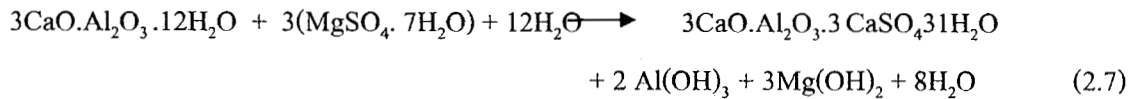
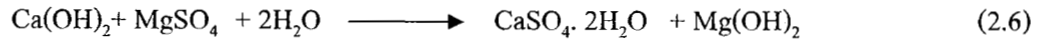
2.2.1.2 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาของโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ต่อการกักคร่อนคอนกรีต

เริ่มต้นจากปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมซัลเฟตกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันตามสมการที่ (2.1) และ (2.2) ทำให้ได้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}_2(\text{OH})_2$) และแคลเซียมซัลเฟต ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) หรือ ยิปซัม ตามสมการที่ (2.4) โดยยิปซัมจะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องกับ C-A-H ซึ่งได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันตามสมการที่ (2.3) โดยปฏิกิริยาเกิดขึ้นดังสมการที่ (2.5) และบางส่วนอาจเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตที่ซัลเฟตอ้อนหายไป หรืออาจเกิดปฏิกิริยากับ C_3A ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งทั้งหมดนี้ทำให้ได้แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$) หรือ Ettringite



2.2.1.3 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาของแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ต่อการกักคร่อนคอนกรีต

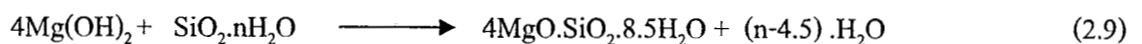
ปฏิกิริยาระหว่างแมกนีเซียมซัลเฟตกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้ได้แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) และแคลเซียมซัลเฟต หรือ ยิปซัม ตามสมการที่ (2.6) จากนั้น ยิปซัมจะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องกับ C-A-H ดังที่ได้กล่าวมาแล้วตามสมการที่ (2.5) ได้ผลเป็นแคลเซียมซัลโฟลูมิเนต หรือ Ettringite นอกจากนั้นแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ยังทำปฏิกิริยากับ C-A-H ได้เป็น แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}(\text{OH})_3$) และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) ตามสมการที่ (2.7) อีกด้วย



นอกจากนี้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันยังทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมซัลเฟตได้เป็นยิปซัม แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และซิลิกาเจล ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) ตามสมการที่ (2.8)



ยิปซัมที่เกิดขึ้นนี้ยังไปทำปฏิกิริยากับ C-A-H ตามสมการที่ (2.5) อีกด้วยซึ่งผลที่ได้เป็น Ettringite เหมือนเดิม ส่วนซิลิกาเจล ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) ตามสมการที่ (2.8) ยังทำปฏิกิริยากับ แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ได้เป็น แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($4\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 8.5\text{H}_2\text{O}$) ดังสมการที่ (2.9)



โดยสรุปแล้วกระบวนการกักครองทางเคมีเนื่องสารประกอบซัลเฟตที่มีต่อคอนกรีตทำให้ได้สารประกอบที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีตดังนี้

แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต หรือ Ettringite เป็นสารที่ไม่ละลายน้ำมีการขยายตัวทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวซึ่งโดยส่วนมากแล้วสารนี้เกิดจากสารตั้งต้นที่มีองค์ประกอบของอลูมิเนต ดังนั้นในการผลิตปูนซีเมนต์ด้านทานซัลเฟตจึงมีเหตุผลที่ต้องจำกัดปริมาณของ C_3A และ C_4AF ให้น้อย ซึ่งสารเหล่านี้ไม่ช่วยให้กำลังคอนกรีตเพิ่มมากนักดังที่กล่าวมาแล้ว

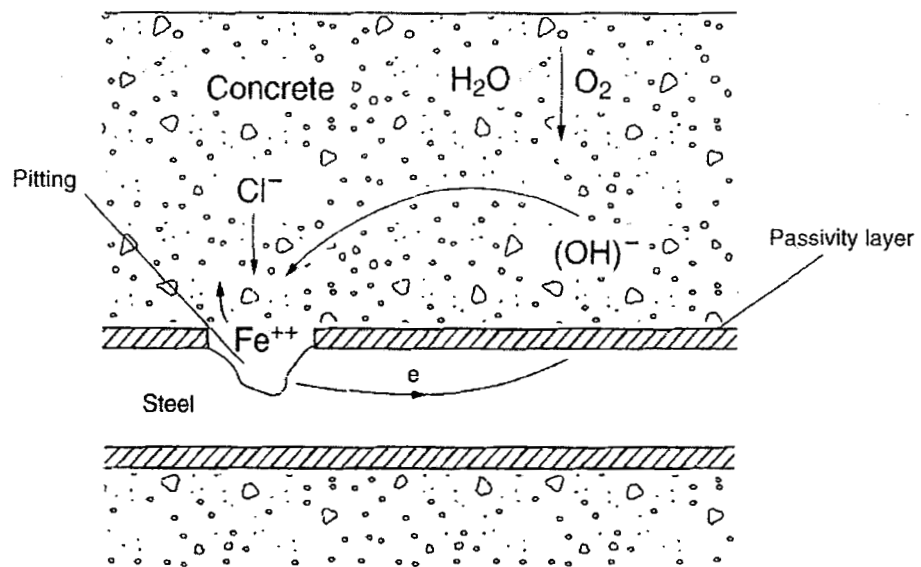
แคลเซียมซัลเฟตหรือ ยิปซัม เป็นผลจากปฏิกิริยาระหว่าง แคลเซียมไฮดรอกไซด์กับแมกนีเซียมซัลเฟต โดยยิปซัมจะมีการขยายตัวมากกว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นสารดั้งเดิม ถึง 2.2 เท่า เป็นผลทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวและแตกร้าว นอกจากนั้นยังทำให้คอนกรีตสูญเสียความสามารถในการยึดเกาะระหว่างซีเมนต์พาสต์กับมวลรวม อันเนื่องจากเกลือที่เกิดขึ้นสามารถชะล้างออกไปได้ง่ายส่งผลให้เนื้อคอนกรีตหายไปและมวลรวมหลุดออกจากคอนกรีตได้ง่าย โดยในกระบวนการผลิตคอนกรีตสามารถลดปริมาณของยิปซัมลงได้โดยการเติมสารที่มีคุณสมบัติเป็นปอซโซลานเพื่อลด C_3S และ C_2S ซึ่งเป็นสารที่ก่อให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และจะเป็นแนวทางการศึกษาในงานวิจัยในครั้งนี้

แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต เป็นสารประกอบที่เป็นผลจากปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาเจลกับแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ โดยสารนี้มีลักษณะเป็นสีขาวและส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง

2.3 การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์

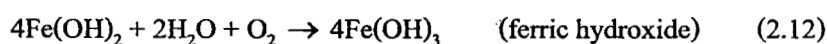
คลอไรด์เป็นตัวการหลัก ที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริม และเป็นผลให้คอนกรีตบริเวณรอบเหล็กเสริมเสียหายเนื่องจากการขยายตัวของเหล็กเสริมที่เป็นสนิม กลไกการกัดกร่อนเริ่มต้นจาก เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำ จะเกิดฟิล์มบางๆของ $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ เคลือบผิวเหล็กที่ฝังในคอนกรีตไว้ ฟิล์มออกไซด์นี้จะทำหน้าที่ป้องกันการเกิดสนิม อย่างไรก็ตามอิออนของคลอไรด์ก็สามารถทำลายฟิล์มนี้ได้ และเมื่อมีน้ำและออกซิเจนมาสัมผัสกับเหล็กเสริมบริเวณที่ไม่มีฟิล์มออกไซด์ปกป้องกันอยู่ เหล็กก็จะเป็นสนิม

การเกิดสนิมในเหล็กเกิดจากความต่างศักย์ทางไฟฟ้าของเหล็กเสริมในคอนกรีต ทำให้เกิดเซลล์ไฟฟ้าเคมีขึ้น มีขั้วบวก (Anode) และขั้วลบ (Cathode) เชื่อมกัน โดยน้ำซึ่งมีคลอไรด์ในโพรงของซีเมนต์ ทำหน้าที่เป็นสื่ออิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ประจุไฟฟ้าบวกเฟอร์รัสไอออน Fe^{++} ที่ขั้วบวกจะวิ่งไปสู่สื่ออิเล็กโทรไลต์ ขณะที่อิเล็กตรอนที่มีประจุไฟฟ้าลบ e^- วิ่งตามเหล็กเสริมไปที่ขั้วลบ อิเล็กตรอนเหล่านี้จะรวมกับน้ำและออกซิเจนทำให้เกิดไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ซึ่งจะวิ่งผ่านสื่ออิเล็กโทรไลต์ไปรวมกับ Fe^{++} ทำให้เกิด $\text{Fe}(\text{OH})_2$ และทำปฏิกิริยาออกซิเดชันจนทำให้เกิดสนิม ดังรูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาดังกล่าว แสดงดังสมการต่อไปนี้



รูปที่ 2.2 การเกิดสนิมเหล็กเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเมื่อมีคลอไรด์ในคอนกรีต

Anodic reactions:



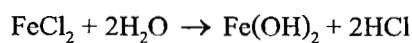
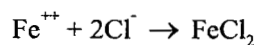
Cathodic reaction:



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

ความต่างศักย์ของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี สามารถเกิดขึ้น เมื่อคอนกรีตมีสภาพที่แตกต่างกัน เช่น ส่วนหนึ่งของคอนกรีตจมในน้ำทะเลตลอดเวลา แต่อีกส่วนหนึ่งต้องสัมผัสกับน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งเป็นระยะๆ ในบางกรณีความต่างของระยะหุ้มคอนกรีตส่งผลถึงการเชื่อมต่อของสื่อไฟฟ้าเคมี มีผลทำให้เกิดความต่างศักย์ รวมไปถึงความแตกต่างของความเข้มข้นของเกลือของน้ำในโพรงคอนกรีตด้วย

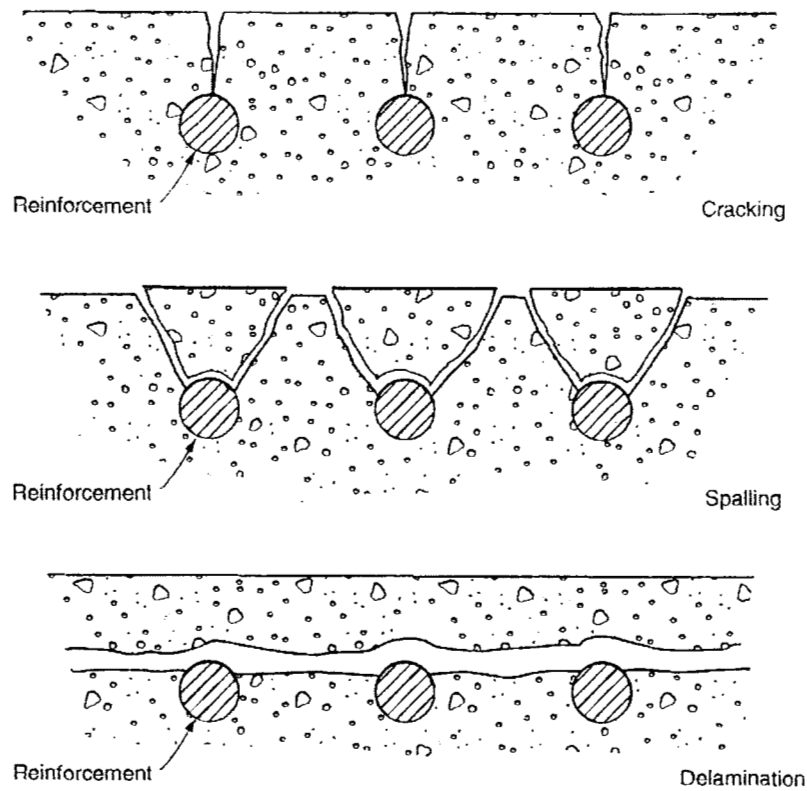
สำหรับการกัดกร่อนในช่วงต้น ฟิสิมบางจะถูกเจาะ โดยคลอไรด์ไอออนจะกระตุ้นให้ผิวเหล็กเสริมกลายเป็นขี้บวก พื้นผิวด้านที่ไม่ถูกกระตุ้นก็จะมีสภาพเป็นขี้ลวบ ดังสมการต่อไปนี้



เนื่องจาก คลอไรด์ไอออนเป็นเป็นตัวก่อให้เกิดปฏิกิริยาอีกครั้ง ดังนั้น สนิมเหล็กที่เกิดขึ้นจึงไม่มีคลอไรด์เป็นองค์ประกอบ แม้ว่าเฟอร์รัสคลอไรด์จะเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเกิดปฏิกิริยา

เซลล์ไฟฟ้าเคมี มีความจำเป็นต้องใช้น้ำในโพรงของคอนกรีตเป็นตัวกลางเชื่อมระหว่างขี้บวกและขี้ลวบ ระบบโพรงของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวในคอนกรีตเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการกัดกร่อน เนื่องจากเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะเกิดขึ้นได้ต้องอาศัยน้ำที่อยู่ในโพรงเป็นสื่ออิเล็กโทรไลต์

การกัดกร่อนที่เกิดขึ้น ทำให้เหล็กเสริมเกิดการขยายตัว ปริมาตรเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดรอยแตก (Cracking) การหลุดร่อน (Spalling) ไปจนถึงคอนกรีตกับเหล็กเสริมไม่มีแรงยึดเหนี่ยวต่อกัน (Delamination) (รูปที่ 2.3) ในขณะที่เกิดการกัดกร่อนพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมที่ทำหน้าที่เป็นขี้บวกจะมีขนาดเล็กลง เนื่องจากเกิดการสูญเสียประจุไฟฟ้า ทำให้เกิดรูขนาดเล็บบนเหล็กเสริม



รูปที่ 2.3 รูปแบบความเสียหายของคอนกรีตเนื่องจากเหล็กเสริมเป็นสนิม

2.3.1 ปริมาณคลอไรด์ในปฏิภาคส่วนผสม

ปริมาณคลอไรด์ที่พบในคอนกรีต อาจมีสาเหตุมาจากการใช้มวลรวมที่ไม่สะอาด หรือคอนกรีตนั้นสัมผัสกับน้ำทะเล น้ำกร่อย หรือการใช้สารเคมีผสมเพิ่มที่มีคลอไรด์เป็นองค์ประกอบ จากสาเหตุข้างต้นทำให้ มาตรฐานการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กของประเทศต่างๆ อนุญาตให้มีปริมาณคลอไรด์ขั้นต่ำไม่เกินค่าที่กำหนด เช่น BS 8110 Part 1 กำหนดปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride-ion) ในคอนกรีตเสริมเหล็กไม่เกินร้อยละ 0.40 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ACI 318-89 ใช้ปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในน้ำ (Water-soluble Chloride ions) เป็นตัวหลักในการพิจารณา โดยกำหนดให้ปริมาณคลอไรด์ไม่ควรเกินร้อยละ 0.15 โดยน้ำหนักของของปูนซีเมนต์ โดยหลักใหญ่ใจความ ค่าทั้งสองนี้ ไม่มีความแตกต่างกัน เนื่องจาก ปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในน้ำเป็นส่วนหนึ่งของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด บางครั้งคลอไรด์ที่ละลายในน้ำ ถูกเรียกว่า คลอไรด์อิสระ (Free chloride) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดสามารถหาได้โดยวิธีทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในกรด (Acid-soluble chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C 1152-90 หรือ BS 1881 Part 124

ส่วนประกอบของปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตที่สามารถพบปริมาณคลอไรด์ เริ่มต้นจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่ามีปริมาณคลอไรด์น้อยมาก คือ น้อยกว่าร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนัก น้ำคั้นสามารถพบปริมาณคลอไรด์ 250 พีพีเอ็ม ในส่วนของมวลรวม BS 882 กำหนดค่าปริมาณคลอไรด์

ทั้งหมดสูงสุด เพื่อให้สอดคล้องกับมาตรฐาน BS 5328 Part 1 และ BS 8110 Part 1 นั่นคือ ปริมาณคลอไรด์ของมวลรวมในคอนกรีตเสริมเหล็กไม่ควรเกินร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนักของมวลรวมทั้งหมด และไม่ควรเกินร้อยละ 0.03 เมื่อใช้ปูนซีเมนต์ประเภททนซัลเฟต สำหรับคอนกรีตอัดแรงอนุญาตให้มีปริมาณคลอไรด์ในมวลรวมไม่เกินร้อยละ 0.01 ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกระบุกำหนดขึ้นข้างต้น เป็นค่าที่ทำให้มั่นใจได้ว่า จะไม่ทำให้เกิดการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ เว้นแต่มีคลอไรด์ซึมเข้ามาเพิ่มเติมในคอนกรีต ขณะที่คอนกรีตนั้นถูกใช้งาน

2.3.2 การซึมผ่านของคลอไรด์

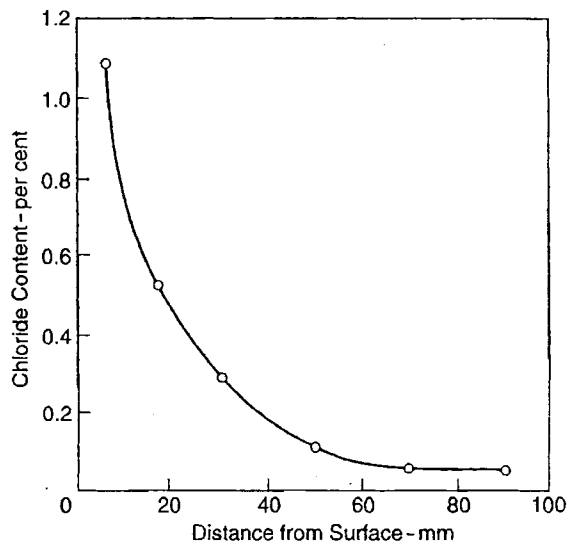
ปัญหาการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์สามารถเกิดขึ้นได้เสมอ เมื่อคลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้ามาในคอนกรีต โดยเฉพาะในกรณีที่คอนกรีตนั้นสัมผัสกับน้ำทะเล คลอไรด์ที่พบนั้นมีแหล่งที่มาจากน้ำทะเลนั่นเอง โดยคลอไรด์จะตกค้างบนผิวหน้าคอนกรีตในรูปของไอเกลือของน้ำทะเลที่มีขนาดเล็ก ซึ่งถูกพัดพามากับคลื่นและกระแสนลม หรืออาจอยู่ในรูปของละอองน้ำทะเล ซึ่งทำให้คอนกรีตมีสภาพเปียกชื้นเนื่องจากละอองน้ำทะเล (Wetted by dew) ไอของคลอไรด์ (Air-borne chloride) สามารถถูกพัดพาไปได้ไกลถึง 2 กิโลเมตร ซึ่งขึ้นอยู่กับกระแสนลมและสภาพภูมิประเทศ

น้ำใต้ดิน หรือน้ำกร่อย (Brackish groundwater) ที่สัมผัสกับคอนกรีต ก็ล้วนเป็นแหล่งที่มาของคลอไรด์

อย่างไรก็ตาม คลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้ามาในคอนกรีตได้ โดยอาศัยน้ำเป็นตัวนำพา และเมื่อคลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้ามาในคอนกรีตอย่างต่อเนื่อง มีผลทำให้บริเวณผิวเหล็กเสริมเกิดการสะสมของคลอไรด์ไอออนในปริมาณที่สูง เมื่อคอนกรีตจมน้ำทะเลตลอดเวลา ก็ย่อมเกิดการซึมผ่านของคลอไรด์ แต่บริเวณใต้น้ำทะเลมีความเข้มข้นของออกซิเจนน้อยและอัตราการแพร่ของออกซิเจนเข้าไปในคอนกรีตต่ำมาก เนื่องจากช่องว่างภายในคอนกรีตเป็นช่องว่างที่อิมมิดีด้วยน้ำ ทำให้ไม่มีออกซิเจนที่จะไปรวมตัวกับน้ำและอิเล็กตรอนที่ขั้วลบ สำหรับคอนกรีตที่อยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง ปริมาณคลอไรด์ที่พบในคอนกรีตจะสูงขึ้น ซึ่งจะพบมากกับโครงสร้างที่ตั้งอยู่ตามชายฝั่งในสภาพภูมิอากาศร้อนชื้น

เมื่อคอนกรีตเริ่มสัมผัสกับน้ำทะเล คอนกรีตจะดูดซับน้ำทะเลจนกระทั่งคอนกรีตนั้นอิมมิดีไปด้วยน้ำ และถ้าหากสภาพภายนอกคอนกรีตเปลี่ยนเป็นสภาพแห้ง ทิศทางการเคลื่อนที่ของน้ำจะเกิดการเคลื่อนที่ย้อนกลับ และระเหยออกจากคอนกรีต ทำให้เกลือตกค้างในช่องว่าง เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพเปียกอีกครั้ง ความเข้มข้นของเกลือบริเวณใกล้ผิวหน้าจะสูงขึ้น โดยเกลือที่มีความเข้มข้นสูงที่บริเวณผิวจะเกิดการถ่ายเทไปยังบริเวณภายในที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า เรียกการถ่ายเทชนิดนี้ว่าการแพร่ ซึ่งในแต่ละรอบของการเปียกและแห้ง ส่งผลให้เกลือยังสามารถแพร่เข้าไปในคอนกรีตและเข้าไปสู่บริเวณเหล็กเสริมมากขึ้น ความสามารถในการแพร่ของเกลือนั้น ขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกคอนกรีต และช่วงระยะเวลาที่คอนกรีตแห้งตัว

โดยทั่วไป คอนกรีตจะเปื่อยได้เร็ว แต่จะแห้งได้ช้ากว่ามาก ทำให้ภายในของคอนกรีตไม่สามารถแห้งโดยสมบูรณ์ ดังนั้นการแพร่ของไอออนของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลตลอดเวลา จึงเกิดขึ้นได้ช้ากว่าคอนกรีตที่อยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างรูปตัดตามยาวของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ซึมเข้าไปในคอนกรีต โดยแสดงในหน่วยร้อยละของน้ำหนักของปูนซีเมนต์ [2]

รูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างปริมาณคลอไรด์ที่ซึมผ่านคอนกรีต ที่ระดับความลึกต่างๆ จากผิวหน้า พบว่าเกลือสามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้อย่างต่อเนื่อง ภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้ง ซึ่งการหาปริมาณคลอไรด์ สามารถทำได้จากการวิเคราะห์ผงตัวอย่างคอนกรีตที่ระดับความลึกต่างๆ ทางเคมี ในบางครั้งพบว่า คอนกรีตที่ผ่านการแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 10 ปี มีปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตสูงกว่าความเข้มข้นของน้ำทะเล นั่นคือ เมื่อเวลาผ่านไป การสะสมของคลอไรด์ย่อมมีปริมาณมากเพียงพอที่จะซึมเข้ามาถึงบริเวณเหล็กเสริม

อย่างที่ได้อธิบายมาแล้ว สภาวะเปียกสลับแห้งมีอิทธิพลโดยตรงต่อการซึมผ่านของคลอไรด์ รวมไปถึงการได้รับผลกระทบเนื่องจาก ทิศทางการพัดพาของน้ำทะเล กระแสลม อุณหภูมิ ความชื้น แสงอาทิตย์ และลักษณะการใช้งานของโครงสร้าง ซึ่งแต่ละส่วนของโครงสร้างก็ย่อมมีโอกาสสัมผัสกับสภาวะเปียกสลับแห้งที่แตกต่างกัน ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องพิจารณาถึงสภาพแวดล้อมที่ก่อให้เกิดความเสียหายเนื่องการกัดกร่อนของแต่ละส่วนของโครงสร้าง การที่คอนกรีตอยู่ในสภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียก เป็นการเร่งให้คลอไรด์สามารถซึมเข้าสู่คอนกรีตได้เร็วขึ้น ด้วยเหตุนี้ คอนกรีตบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal zone) จึงเกิดการกัดกร่อนของคลอไรด์น้อยกว่าบริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash zone) คอนกรีตที่สัมผัสน้ำทะเลเป็นบางครั้งบางคราวมีความเสี่ยงต่อการกัด

ก่อนเนื่องจากน้ำทะเล เช่น คอนกรีตบริเวณหลักสำหรับผูกเชือก คอนกรีตบริเวณหัวดับเพลิงที่ใช้น้ำทะเล พื้นที่โรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้น้ำทะเลในการซักล้าง เป็นต้น

2.3.3 ปริมาณคลอไรด์ที่กระตุ้นให้เหล็กเริ่มเกิดสนิม

กระบวนการการกัดกร่อนของเหล็กเสริม จะเริ่มต้นเมื่อมีปริมาณคลอไรด์เพียงเล็กน้อยที่ผิวเหล็ก แต่เป็นการยากที่จะกล่าวได้ว่า ปริมาณหรือความเข้มข้นของคลอไรด์เท่าใด ที่จะกระตุ้นให้เหล็กเสริมเป็นสนิม เนื่องจากขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ซึ่งยังไม่สามารถอธิบายให้ชัดเจนได้ ยิ่งไปกว่านั้น การแพร่ของคลอไรด์เข้าไปยังซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว มีรูปแบบที่ไม่แน่นอนอน ภายในห้องปฏิบัติการมีการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะการซึมผ่านของคลอไรด์ในรูปของรูปตัดตามยาว (Chloride profiles) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาวิธีป้องกันการเกิดสนิมอันเนื่องจากการซึมผ่านของคลอไรด์ ซึ่งจะใช้วิธีพิจารณาหาระยะหุ้มที่เหมาะสมสำหรับเหล็กเสริม

ในปริมาณคลอไรด์ที่เท่ากัน คอนกรีตที่มีคลอไรด์ผสมอยู่ในปริมาณส่วนผสมตั้งแต่เริ่มต้น จะเกิดอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมสูงกว่าคอนกรีตที่มีการซึมผ่านของคลอไรด์หลังจากคอนกรีตนั้นมีการใช้งานไปแล้ว

ขณะที่เกิดกระบวนการซึมผ่านของคลอไรด์ ปริมาณคลอไรด์ที่สามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีต ขึ้นอยู่กับ ความสามารถในการต้านทานของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว, การเปลี่ยนแปลงความชื้น และปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้เป็นผลเนื่องจากลักษณะของการแช่คอนกรีต

ในกรณีทั่วไป ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดไม่ได้เป็นตัวบ่งชี้ถึงความรุนแรงของการกัดกร่อน แต่คลอไรด์ทั้งหมดสามารถจำแนกออกได้ 3 ส่วน คือ Chemically bound ซึ่งถูกรวมอยู่ในผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ อีกส่วนหนึ่ง คือ Physically bound ซึ่งติดอยู่ที่ผิวโพรงของเจล (Gel pores) และส่วนสุดท้าย เรียกว่า คลอไรด์อิสระ ซึ่งจะมีอิทธิพลต่อการเกิดสนิมของเหล็กอย่างสูง อย่างไรก็ตาม การกระจายตัวของคลอไรด์ไอออนทั้ง 3 ชนิด จะไม่สามารถคงอยู่ได้ในสถานะเดิมตลอดเวลา แต่จะสามารถปรับเปลี่ยนเพื่อให้ไอออนทั้งหมดอยู่ในสถานะสมดุล เช่น ตามปกติคลอไรด์อิสระจะพบตามน้ำที่อยู่ในช่องว่าง (Pore water) ของคอนกรีต ถ้าคลอไรด์อิสระมีปริมาณที่มากเกินไป ความจำเป็น คลอไรด์อิสระนั้นจะกลายสภาพไปเป็นคลอไรด์ยึดจับ เพื่อให้ไอออนอื่น ๆ อยู่ในสภาพสมดุล

2.3.4 การดักจับคลอไรด์ไอออน

การดักจับคลอไรด์ไอออนอยู่ในรูปปฏิกิริยาเคมีกับ C_3A ก่อให้เกิดแคลเซียม คลอโรลูมินเนต ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) บางครั้งเรียกว่า เกลือของฟรีเดิล (Friedel's salt) ในลักษณะเดียวกันคลอไรด์ก็ถูกดักจับโดย C_4AF ผลที่ได้คือ แคลเซียม คลอโรเฟอร์ไรต์ ($3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) ดังนั้น จากปฏิกิริยาข้างต้นคลอไรด์ไอออนจะถูกดักจับเมื่อปูนซีเมนต์มีปริมาณ C_3A สูง หรือ ปริมาณ

ส่วนผสมคอนกรีตใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณมาก ด้วยเหตุนี้ การใช้ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A สูง จะช่วยต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ได้

ในขณะเดียวกัน การป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต มีความต้องการปริมาณ C_3A ต่ำ ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องพิจารณาถึงปริมาณ C_3A ในปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม เพื่อป้องกันความเสียหายจากซัลเฟต และเพื่อป้องกันอันตรายจากคลอไรด์ในน้ำทะเลควบคู่กันไป ขณะที่ปัจจุบันปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คัดแปลง (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทสอง) ซึ่งสามารถทนซัลเฟตได้ปานกลาง และให้ความร้อนไม่สูงมากนัก เป็นอีกตัวเลือกในการนำไปใช้งาน บางครั้งการใช้ปูนซีเมนต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (Ground granulated blastfurnace slag) ก็สามารถช่วยในการดักจับคลอไรด์ไอออน โดยอลูมิเนียมที่อยู่ในตะกรัน (Slag) ทำหน้าที่ในการดักจับ แต่งานวิจัยที่ศึกษาในเรื่องนี้ยังมีจำนวนน้อย

ความเป็นไปได้ที่จะใช้ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A สูงนั้น มีข้อจำกัดตรงที่ เมื่อ C_3A มีปริมาณสูงย่อมทำให้เกิดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันสูง พฤติกรรมดังกล่าวจึงกลายเป็นข้อด้อย และเป็นอันตรายต่อการก่อสร้าง โครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่ที่ต้องสัมผัสกับน้ำทะเล

หลายๆมาตรฐานการออกแบบ เช่น BS 8110 Part 1 กำหนดปริมาณคลอไรด์ขั้นต่ำในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภททนซัลเฟต โดยมีแนวความคิดที่อยู่บนสมมติฐานที่ว่า คลอไรด์ส่งผลเสียต่อกระบวนการต้านทานซัลเฟต ซึ่งปัจจุบันได้มีการตรวจสอบสมมติฐานดังกล่าวแล้วว่าเป็นเท็จ

เมื่อกลับมาพิจารณาในเรื่อง ความเข้มข้นคลอไรด์ในน้ำที่อยู่ในช่องว่างของคอนกรีต พบว่าที่สภาวะสมดุล ความเข้มข้นของคลอไรด์จะขึ้นอยู่กับไอออนอื่นๆที่กระจายตัวอยู่ในน้ำตามช่องว่าง เช่น ที่ค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดค่าหนึ่ง ถ้าไฮดรอกไซด์ไอออนมีความเข้มข้นสูง คลอไรด์อิสระก็จะมีความเข้มข้นสูงด้วย ด้วยเหตุนี้ในบางครั้ง อัตราส่วนระหว่าง Cl^-/OH^- อาจจะถูกใช้ในการพิจารณาถึงความก้าวหน้าของการกัดกร่อน แต่ไม่ได้เป็นค่ามาตรฐานในการพิจารณาเรื่องดังกล่าว อีกทั้งมีการพบว่า ปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ในปฏิกิริยาส่วนผสม เกลือโซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$) จะมีปริมาณคลอไรด์อิสระสูงกว่า เกลือแคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) อย่างมีนัยสำคัญ นั่นหมายความว่า น้ำทะเลซึ่งมีเกลือโซเดียมคลอไรด์ละลายอยู่ จะเกิดกัดกร่อนของเหล็กเสริมอย่างแน่นอน

เนื่องจากปัจจัยที่มีความหลากหลาย สัดส่วนของคลอไรด์ยึดจับจึงมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงร้อยละ 50 ถึง 80 หรืออาจต่ำกว่าร้อยละ 50 ของคลอไรด์ทั้งหมด ดังนั้น อาจจะไม่เป็นความจริงที่คลอไรด์ยึดจับที่อยู่ในคลอไรด์ทั้งหมดจะไม่ก่อให้เกิดการกัดกร่อน จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ผลของความต้องการสภาวะสมดุลของน้ำในโพรงคอนกรีตที่แตกต่างกัน ทำให้น้ำหนักของคลอไรด์ยึดจับซึ่งมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ไม่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

2.4 อิทธิพลของปูนซีเมนต์ผสมวัสดุปอซโซลานต่อการกัดกร่อน

ในหัวข้อก่อนหน้านี้นี้ได้มีการกล่าวถึงอิทธิพลทางเคมีของปูนซีเมนต์ประเภทต่างๆ ที่มีต่อคลอไรด์ไอออน ขณะเดียวกันการใช้ปูนซีเมนต์ผสมวัสดุปอซโซลานก็ย่อมมีอิทธิพลต่อโครงสร้างโพรง (Pore structure) ในซีเมนต์เพสต์เช่นกัน ทั้งในแง่ของป้องกันการซึมผ่าน และการต้านทานการกัดกร่อน

ถ้าถ่านหิน ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และซิลิกาฟูม เป็นวัสดุปอซโซลานที่มีความน่าสนใจ ซึ่งเมื่อนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในปฏิภาคส่วนผสม ส่งผลให้คอนกรีตสามารถลดการซึมผ่านของสารเคมี เพิ่มการต้านทานการกัดกร่อน อีกทั้งช่วยลดอัตราการกัดกร่อน ในส่วนของซิลิกาฟูม ให้ผลทางด้านบวกต่อโครงสร้างโพรงของซีเมนต์เพสต์ซึ่งมีความแน่นขึ้น ทำให้ความต้านทานเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ซิลิกาฟูมสามารถลดความเป็นกรด-ด่างของน้ำในโพรง ซึ่งเป็นผลมาจากการทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)

เมื่อพิจารณาถึงความสามารถเทได้ (Workability) ของคอนกรีต การใช้ซิลิกาฟูม หรือซูเปอร์พลาสติไซเซอร์ (Superplasticizer) ต่างก็เป็นสารผสมเพิ่มที่ช่วยให้สามารถทำงานได้ง่ายขึ้นเหมือนกัน แต่ซิลิกาฟูมมีข้อได้เปรียบตรงที่ ทำให้โครงสร้างโพรงของซีเมนต์เพสต์แน่นขึ้น ซึ่งการใช้ซูเปอร์พลาสติไซเซอร์ จะไม่ส่งผลต่อโครงสร้างโพรงภายในคอนกรีต ดังนั้น เมื่อใช้ซูเปอร์พลาสติไซเซอร์จึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงกระบวนการกัดกร่อน

การใช้วัสดุประสานตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ช่วยทำให้คอนกรีตที่มีโอกาสเกิดการกัดกร่อนในสภาพภูมิอากาศร้อน มีความทนทานมากขึ้น กว่าการใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว

2.5 แนวทางการใช้ถ่านหินในการป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากน้ำทะเล

ความเสียหายที่เกิดขึ้นในโครงสร้างคอนกรีตที่ก่อสร้างในบริเวณที่เสี่ยงต่อการถูกทำลาย เป็นสิ่งที่วงการก่อสร้างต้องตระหนักและให้ความสำคัญถึงแนวทางการศึกษาที่จะป้องกันและปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีต ภายใต้ความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ โดยเฉพาะสภาพแวดล้อมบริเวณน้ำทะเลและน้ำเสียในสภาวะจริงซึ่งมีความแปรปรวนของสภาพแวดล้อมที่มีอิทธิพลต่อการทำลายโครงสร้างคอนกรีตค่อนข้างสูงแต่โดยสรุปแล้ว การทำลายเกิดขึ้นใน 2 ลักษณะคือ การกัดกร่อนทางกายภาพและการกัดกร่อนทางเคมี โดยการกัดกร่อนทางกายภาพนั้นเกิดขึ้นเนื่องจากแรงกระแทกโดยตรง ได้แก่ การขัดสี ซึ่งการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นจะมีหลายลักษณะ เช่น การเลื่อนไถล การขูดขีด การชะล้างด้วยกระแสน้ำกรวดทรายเป็นต้น ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นลักษณะการกัดกร่อนที่ผิวนอกของคอนกรีต ลักษณะการกัดกร่อนทางกายภาพอีกแบบคือการแตกตัวของฟองอากาศ ซึ่งจะเป็นการสึกกร่อนของผิวคอนกรีตที่เกิดจากการแตกตัวหรือระเบิดของฟองอากาศที่อยู่ในน้ำ ลักษณะการกัดกร่อนจะเป็นการเกิดหลุมบ่อที่มีขนาดเล็กบนผิวคอนกรีต จากความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากสภาพแวดล้อมทางกายภาพจะส่งผลให้เกิดความอ่อนแอในเนื้อคอนกรีตและเป็นสาเหตุทำให้ถูกกัด

ก่อนเนื่องจากกระบวนการทางเคมีได้ง่ายขึ้น โดยในกระบวนการกักกร่อนทางเคมีนั้นส่วนใหญ่แล้ว ในสิ่งแวดล้อมที่เป็นน้ำเสียและน้ำทะเลจะเกิดการกักกร่อนจากสารประกอบของคลอไรด์ ซัลเฟต และกรดซัลฟูริกที่ได้จากกระบวนการทางชีววิทยาดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งคลอไรด์จะมีผลอย่างมาก ในกรณีของคอนกรีตเสริมเหล็ก

อย่างไรก็ตามการกักกร่อนที่เกิดขึ้นมีผลของสภาพแวดล้อมทางกายภาพเข้ามาเกี่ยวพันให้การกักกร่อนในกระบวนการทางเคมีเป็นไปได้ง่ายและมีความรุนแรงมากขึ้น แตกต่างจากการทดลองในห้องปฏิบัติการที่จะมีผลเนื่องจากกระบวนการทางเคมีเพียงอย่างเดียว โดยกระบวนการกักกร่อนเกิดจากการที่ซัลเฟตและกรดสามารถที่จะซึมผ่านเข้าไปในเนื้อคอนกรีตและเกิดปฏิกิริยาการกักกร่อน ส่งผลให้โครงสร้างเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นการพัฒนาคอนกรีตให้มีความที่บ่มน้ำมีความสามารถในการซึมผ่านต่ำและทนทานต่อสภาพแวดล้อมทางกายภาพน่าจะเป็นแนวทางในการป้องกันการกักกร่อนได้ดี และเมื่อศึกษาลงไปลึกถึงกระบวนการเกิดปฏิกิริยาที่แสดงในรูปของสมการเคมีจะเห็นว่า ปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่าง C_3S และ C_2S กับน้ำมีอิทธิพลต่อการเกิดการกักกร่อนเนื่องจากซัลเฟต ดังนั้นการลดปริมาณของ C_3S และ C_2S ลงได้ก็เป็นการลดปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลงด้วยซึ่งจะทำให้การกักกร่อนเนื่องจากซัลเฟตลงด้วยเช่นกัน

นอกจากนั้นปริมาณของ C_3A และ C_4AF ก็เป็นสารประกอบตั้งต้นที่ก่อให้เกิดการกักกร่อนของซัลเฟตมากขึ้นด้วย การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์จะทำให้คอนกรีตมีความทนทานต่อซัลเฟตมากขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานจะลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นตัวสำคัญที่จะทำปฏิกิริยากับซัลเฟตดังที่กล่าวมาแล้ว นอกจากนี้การผสมเถ้าถ่านหินลงในคอนกรีตยังเป็นการลด C_3A ในวัสดุประสาน เพราะจะใช้ปูนซีเมนต์น้อยลงและการใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณที่เหมาะสมยังช่วยทำให้คอนกรีตมีความแน่นและที่บ่มน้ำมากขึ้นซึ่งทำให้ซัลเฟตและสารประกอบเคมีอื่นๆ ซึมผ่านเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้ยากขึ้นทำให้การกักกร่อนเกิดน้อยลง ส่งผลให้คอนกรีตมีความทนทานมากขึ้น ดังนั้นการใช้เถ้าถ่านหินในการป้องกันการกักกร่อนเนื่องจากซัลเฟตในน้ำทะเลและน้ำเสียน่าจะเป็นแนวทางที่เป็นไปได้สูงและควรมีการทดสอบในสภาพจริงเพื่อรองรับในการนำไปใช้งาน

2.6 ระยะเวลาของเหล็กเสริมคอนกรีต

ระยะเวลาของเหล็กเสริมคอนกรีตเป็นปัจจัยสำคัญที่ควบคุมการส่งผ่านคลอไรด์ไอออนเข้าไปในคอนกรีต การมีระยะเวลาที่เหมาะสมกับระยะเวลาการใช้งานคอนกรีต จะช่วยให้คลอไรด์ไม่สามารถเดินทางมาถึงผิวของเหล็กเสริมได้ ฉะนั้นความที่บ่มน้ำของคอนกรีตและระยะเวลาจึงเป็นปัจจัยอันดับต้นๆที่ควรคำนึงถึง ด้วยเหตุนี้ มาตรฐานการออกแบบเกือบทุกมาตรฐานจึงกำหนดทั้งระยะหุ้มขั้นต่ำ และกำลังของคอนกรีตที่ควรมีกำลังสูงกว่าปกติควบคู่กันไป

อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดในเรื่องระยะหุ้ม อันดับแรก คือ ระยะหุ้มจะไม่มีประโยชน์ต่อการป้องกันเหล็กเสริม ถ้าคอนกรีตที่ใช้มีความพรุนสูง จนสารเคมีต่างๆสามารถซึมเข้าไปได้ อนึ่ง จุดประสงค์ของการกำหนดระยะหุ้มไม่ได้มีไว้เพื่อป้องกันเหล็กเสริมเพียงอย่างเดียว แต่ช่วยทำให้มั่นใจได้ว่าโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถรับแรงกระทำได้ รวมไปถึงการป้องกันอันตรายจากเพลิงไหม้ หรือด้านทานการสึกกร่อน การมีระยะหุ้มที่มากเกินไป เป็นผลมาจากคอนกรีตมีปริมาณมาก ซึ่งเสมือนว่าคอนกรีตนั้นไม่มีการเสริมกำลังด้วยเหล็กเสริม นอกจากนี้ ระยะหุ้มของเหล็กยังช่วยควบคุม การหดตัว (Shrinkage) และความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal stresses) รวมไปถึงช่วยป้องกันรอยแตกที่อาจเกิดขึ้นจากความเค้น เมื่อเกิดรอยแตกขึ้น ระยะหุ้มที่มีความหนาถูกพิสูจน์แล้วว่าก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้าง ในทางปฏิบัติ ความหนาระยะหุ้มควรมีค่าไม่เกิน 80 ถึง 100 มม. (3 ถึง 4 นิ้ว) ซึ่งการตัดสินใจเลือกใช้ระยะหุ้ม ควรพิจารณาตามมาตรฐานการออกแบบที่กำหนดไว้

การเลือกใช้ระยะหุ้มที่มีความหนาน้อย อาจทำให้คลอไรด์สามารถซึมเข้าไปถึงเหล็กเสริมได้ง่าย เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้อาจไม่มีความทึบน้ำ เกิดรอยแตก หรือในระหว่างการก่อสร้างวางเหล็กเสริมผิดตำแหน่ง

2.7 การป้องกันการกัดกร่อนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเล

คอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำทะเล จำเป็นต้องกำหนดคุณภาพของคอนกรีตให้มีความทนทานสูงเป็นพิเศษ โดยพิจารณาถึงสภาพแวดล้อมทางภูมิประเทศและภูมิอากาศประกอบในการออกแบบคอนกรีตดังกล่าวต้องเป็นคอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง มีคุณสมบัติการซึมผ่านน้ำต่ำ ซึ่งหมายถึงการใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำ มีการทำให้แน่นและบ่มคอนกรีตอย่างคิด้วยระยะเวลาที่นานเพียงพอ ในกรณีที่เป็นคอนกรีตเสริมเหล็กต้องมีความหนาของระยะหุ้มเหล็กที่มากพอ รอยต่อของคอนกรีตต้องมีการออกแบบและก่อสร้างอย่างถูกต้องวิธี ก็ยอมได้คอนกรีตที่มีคุณภาพดี

ความเสียหายและความรุนแรงของการกัดกร่อนต่อคอนกรีตอาจไม่เท่ากันตลอดทั้งโครงสร้างของคอนกรีต บริเวณคอนกรีตที่น้ำขึ้น-ลงมีการเสียหายสูง เพราะบริเวณดังกล่าวมีการขัดสีของน้ำทะเลต่อคอนกรีตทั้งจากการกระแทกของคลื่นและการไหลเวียนของน้ำทะเล นอกจากนี้ คอนกรีตในบริเวณน้ำขึ้น-ลงมีการสะสมสารเคมีทั้งคลอไรด์ ซัลเฟต และเกลือต่างๆในช่องว่างของคอนกรีต ทำให้ความเข้มข้นสูงกว่าปกติจึงเกิดการกัดกร่อนที่รวดเร็ว

การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ห้า สามารถทนทานต่อสารละลายซัลเฟตได้ดี แต่การป้องกันเหล็กเสริมจากการเป็นสนิมเนื่องจากการแพร่ของคลอไรด์จะมีน้อยกว่าปูนซีเมนต์ประเภทอื่น การใช้ปูนซีเมนต์ผสมตะกอนเตาถลุงเหล็กบดละเอียดก็มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน

เนื่องจากคลอไรด์และซัลเฟตได้สูง ด้วยเหตุนี้ การเลือกปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม และการใช้วัสดุปอซโซลานผสมลงในคอนกรีต จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ

มาตรฐาน ACI 201.2R ได้กำหนดให้คอนกรีตที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีซัลเฟตและคลอไรด์สูง มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ไม่เกิน 0.40 ถึง 0.45 และให้มีระยะหุ้มเหล็กเสริมไม่น้อยกว่า 5 ถึง 6 ซม. เพื่อลดความเสี่ยงของการเกิดสนิมในเหล็กเสริม

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

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปริญญา และอุกฤษฏ์ [1] ได้หล่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าแกลบในปริมาณร้อยละ 40 ถึง 80 แล้วทดสอบความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ ตามมาตรฐาน ASTM C 1202 พบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าแกลบสามารถต้านทานการซึมผ่านได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม การเพิ่มปริมาณเถ้าลอยและเถ้าแกลบทำให้ความสามารถในการต้านทานดีขึ้น ส่วนความสามารถในด้านการรับกำลังอัด คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าแกลบในอัตราส่วนร้อยละ 20 ที่อายุ 28 วัน จะให้กำลังอัดที่ใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม และที่อายุ 90 วัน กำลังอัดเพิ่มสูงขึ้นกว่าคอนกรีตควบคุม ทั้งนี้เนื่องจาก อิทธิพลของการเกี่ยวพันกัน (Synergic effect) ระหว่างวัสดุปอซโซลานทั้งสอง

มณเฑียร และคณะ [2] พบว่า คอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทางทะเลเป็ยกสลับแห้งเป็นเวลา 3 ปี กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน มีความสามารถในการพัฒนากำลังอัดอย่างต่อเนื่องในทางกลับกัน คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง และประเภทห้า เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว มีค่ากำลังอัดต่ำกว่าร้อยละ 20 ของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า คอนกรีตควบคุมเริ่มมีปัญหาในเรื่องกำลังอัดที่มีค่าต่ำลง ซึ่งอาจส่งผลเสียต่อองค์อาคารที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว

Bai และคณะ [3] ได้ทดสอบหล่อคอนกรีต ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์, เถ้าถ่านหิน และดินขาวเผา (Metakaolin) เป็นวัสดุประสาน เพื่อศึกษาการซึมผ่านของคลอไรด์ และกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลสังเคราะห์เป็นเวลา 18 เดือน พบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 30 ช่วยให้ความเข้มข้นและความสามารถในการซึมผ่านของคลอไรด์ลดลง ซึ่งสามารถเห็นผลได้ชัดเจนขึ้นเมื่อระยะเวลาการแช่น้ำทะเลนานขึ้น

Thomas และ Matthews [5] ได้ทำการเก็บข้อมูลคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 10 ปี คอนกรีตดังกล่าวแช่น้ำทะเลอยู่ที่ Building Research Establishment (BRE) บริเวณปากแม่น้ำ Thames Estuary เมือง Shoeburyness ประเทศอังกฤษ มีปริมาณสารประกอบคลอไรด์และซัลเฟตใกล้เคียงกับน้ำทะเลในประเทศไทย แต่น้ำทะเล BRE มีอุณหภูมิ 10 °C ซึ่งมีความแตกต่าง

จากอุณหภูมิของน้ำทะเลในเขตพื้นที่ร้อนชื้นอย่างประเทศไทยโดยสิ้นเชิง ดังนั้น สภาวะการกักกร่อน
เนื่องจากน้ำทะเลต่อคอนกรีตย่อมมีความแตกต่างกันหลายประเด็น ซึ่งในเบื้องต้น Thomas รายงานว่า
คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินช่วยต้านทานปริมาณคลอไรด์ที่พยายามซึมเข้าไปในคอนกรีตได้ดีกว่า
คอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหิน และการบ่มคอนกรีตให้นานขึ้น มีผลต่อการซึมผ่านของคลอไรด์เพียง
เล็กน้อยเมื่อคอนกรีตนั้นแช่อยู่ในน้ำทะเลเป็นเวลานาน ขณะที่ผลกระทบของการเพิ่มกำลังอัดที่มีต่อ
การต้านทานคลอไรด์ มีอิทธิพลน้อยกว่าการเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินในปฏิภาคส่วนผสม

บทที่ 3 วิธีการศึกษา

บทนี้กล่าวถึงระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้ในการศึกษานี้ ซึ่งประกอบด้วย รายละเอียดของข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณปริมาณคลอไรด์วิกฤติ กระบวนการหาค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤติ ในคอนกรีตที่ผสมเส้นใยหิน ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลาถึง 7 ปี

3.1 รายละเอียดคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล

ในการคำนวณหาค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤติเมื่อแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล ได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์วิกฤติจากข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ที่ตำแหน่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตและการเกิดสนิมในเหล็กเสริม โดยใช้ฐานข้อมูลจากตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล เป็นเวลา 2, 3, 4, 5 และ 7 ปี โดยรายละเอียดของตัวอย่างคอนกรีตมีดังนี้

ตัวอย่างที่มีการเตรียมเมื่อ 7 ปี ที่แล้วใช้คอนกรีตที่มี W/B เท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 และใช้เส้นใยที่ได้โดยตรงจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยนำหน้าวัสดุประสาน ซึ่งส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาแสดงในตารางที่ 3.1 หล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด 200x200x200 มม. และฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. ที่ระยะหุ้มคอนกรีต 10, 20, 50 และ 75 มม. ดังแสดงในรูปที่ 3.1 หลังจากบ่มคอนกรีตจนอายุครบ 28 วัน นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่บริเวณชายฝั่งทะเลโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี โดยคอนกรีตสัมผัสกับน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.2 หลังจากแช่ตัวอย่างคอนกรีตครบ 2, 3, 4, 5 และ 7 ปี ได้นำคอนกรีตมาทบทวนการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีตโดยการวัดพื้นที่ของการเกิดสนิมเหล็ก และนำตัวอย่างคอนกรีตบริเวณรอบผิวเหล็กที่ฝังมาทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ตาม ASTM C1218 [7] ซึ่งเป็นปริมาณคลอไรด์อิสระที่อยู่ในโพรงของคอนกรีต

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต

Mix	Mix proportions of concrete (kg/m ³)					W/B
	Cement	Fly Ash	Fine aggregate	Coarse aggregate	Water	
I45	478	-	639	1,024	215	0.45
I45F15	406	72	639	1,004	215	0.45
I45F25	359	119	639	990	215	0.45
I45F35	311	167	639	977	215	0.45
I45F50	239	239	639	957	215	0.45
I55	478	-	639	971	262	0.55
I55F15	406	72	639	948	262	0.55
I55F25	359	119	639	933	262	0.55
I55F35	311	167	639	918	262	0.55
I55F50	239	239	639	897	262	0.55
I65	478	-	639	922	311	0.65
I65F15	406	72	639	898	311	0.65
I65F25	359	119	639	881	311	0.65
I65F35	311	167	639	864	311	0.65
I65F50	239	239	639	840	311	0.65

ความหมายของสัญลักษณ์ในแต่ละอัตราส่วนผสมมีความหมายดังนี้

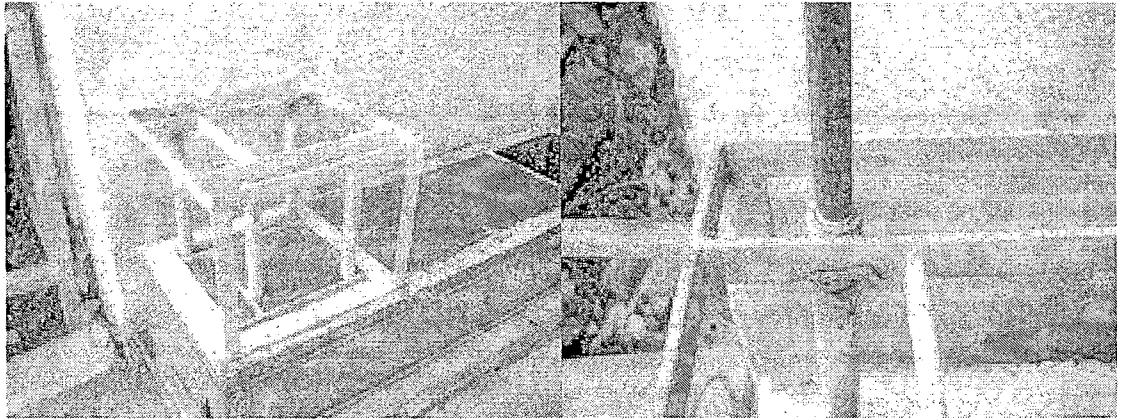
- “ I45, I55 และ I65 ” หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 ตามลำดับ
- “ F15, F25, F35 และ F50 ” หมายถึง การแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I เท่ากับ ร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานตามลำดับ

ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์

- “ I45F15 ” หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

29 158 1

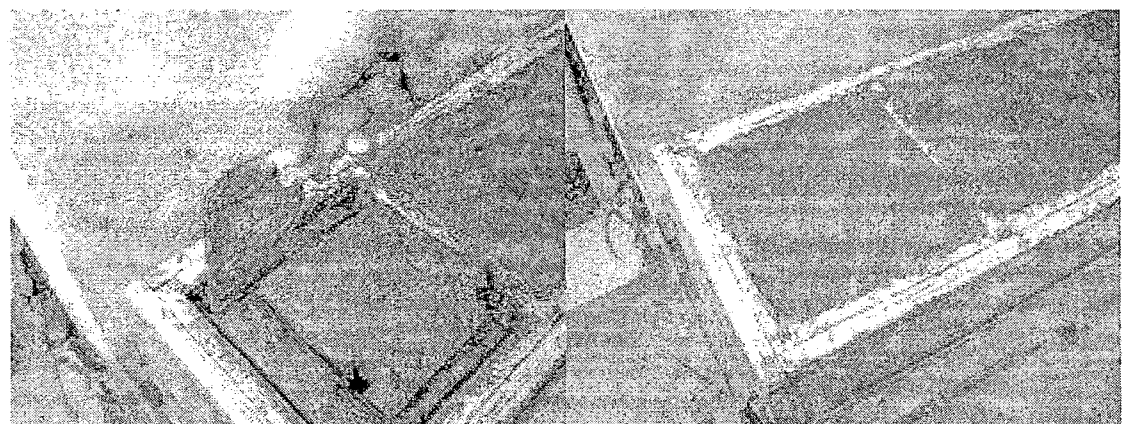
๖๒๔.143
 ๐๖๖๔๓
 ๓.๒



(ก) วางแบบฝังเหล็กบนแบบหล่อคอนกรีต (ข) ใช้เหล็กนำร่องเพื่อดันคอนกรีตให้เกิดช่องว่าง

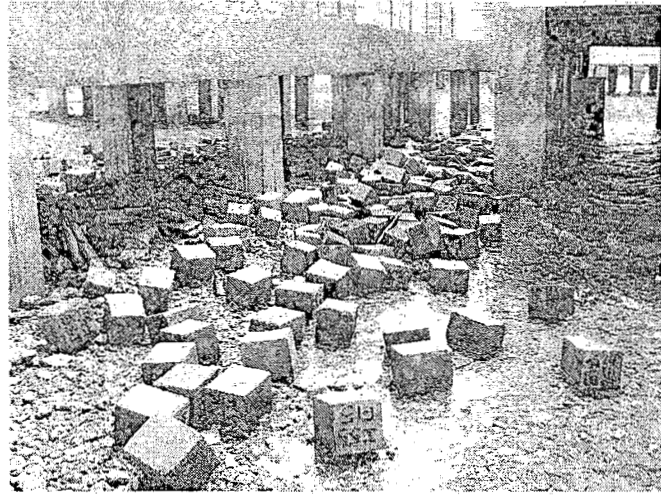


(ค) หย่อนเหล็กลงในคอนกรีต (ง) ตรวจสอบว่าเหล็กที่ฝังอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ



(จ) ใช้เกรียงเกลี่ยคอนกรีตสดให้เต็มแบบหล่อ (ฉ) ตกแต่งผิวหน้าคอนกรีตให้เรียบ

รูปที่ 3.1 การฝังเหล็กลงในคอนกรีต



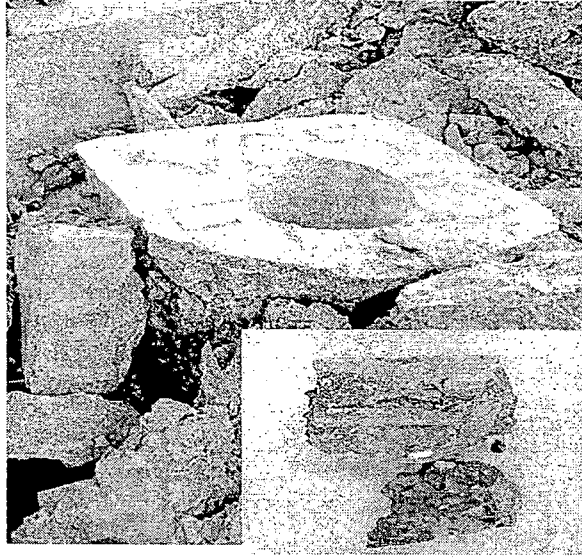
รูปที่ 3.2 ตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง

3.2 การทดสอบปริมาณสารประกอบคลอไรด์ในคอนกรีต

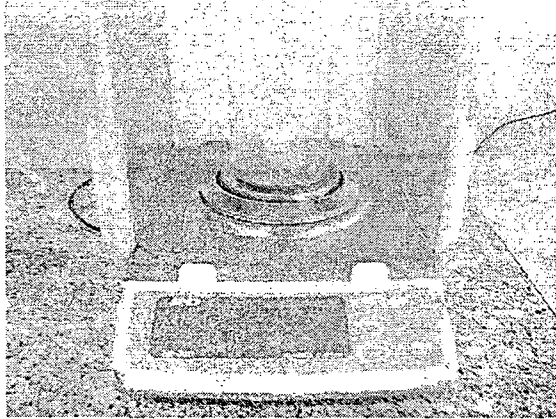
การทดสอบใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปลูกบาศก์ขนาด 20 ซม. ที่ผ่านการแช่น้ำทะเลตามระยะเวลาที่กำหนด โดยนำคอนกรีตมาทำการทุบดูการเกิดสนิม (รูปที่ 3.3) และนำคอนกรีตบริเวณรอบผิวของเหล็กเสริมมาทำการบดและนำไปทดสอบหาปริมาณสารประกอบคลอไรด์ที่ละลายในน้ำ (Water-soluble chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C 1218 [7] โดยการไตเตรทปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ในคอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งสามารถคำนวณร้อยละของคลอไรด์ได้ ดังสมการที่ 3.1

$$Cl, \% = \frac{3.545[(V_1 - V_2)N]}{W} \quad (3.1)$$

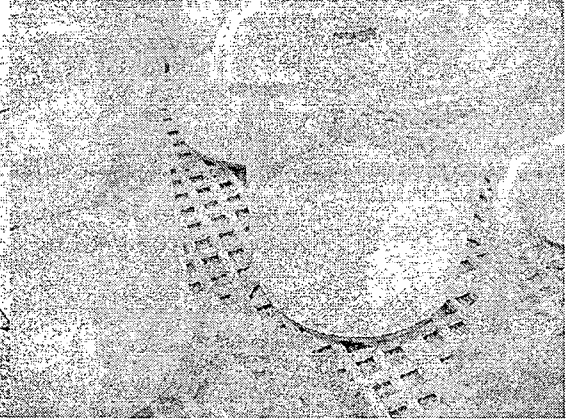
เมื่อ	V_1	คือ	ปริมาตรของสารละลาย 0.05 N AgNO ₃ ที่ใช้สำหรับการไตเตรทตัวอย่าง
	V_2	คือ	ปริมาตร ของสารละลาย 0.05 N AgNO ₃ ที่ใช้สำหรับการไตเตรท Blank
	N	คือ	Exact normality ของสารละลาย 0.05 N AgNO ₃
	0.10	คือ	Milliequivalents ของ NaCl ที่เติม (2.0 mL × 0.05 N)
	W	คือ	น้ำหนักของผงตัวอย่างคอนกรีต (กรัม)



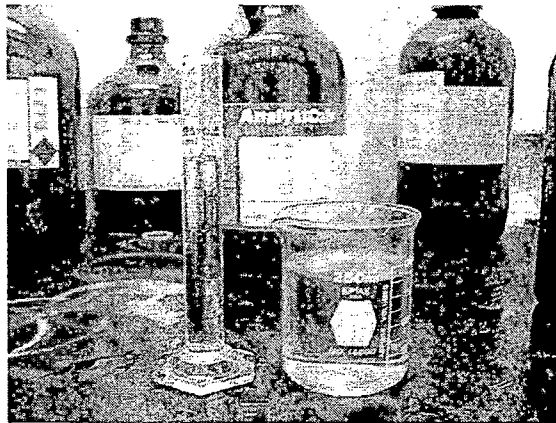
รูปที่ 3.3 คอนกรีตบริเวณที่ฝังเหล็กเพื่อใช้ทดสอบปริมาณคลอไรด์



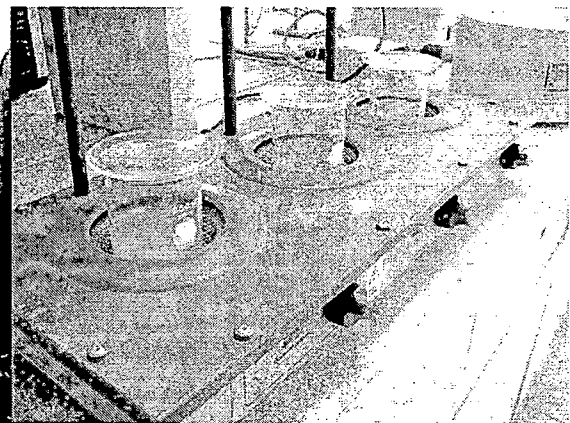
(ก) ชั่งน้ำหนักผงคอนกรีต



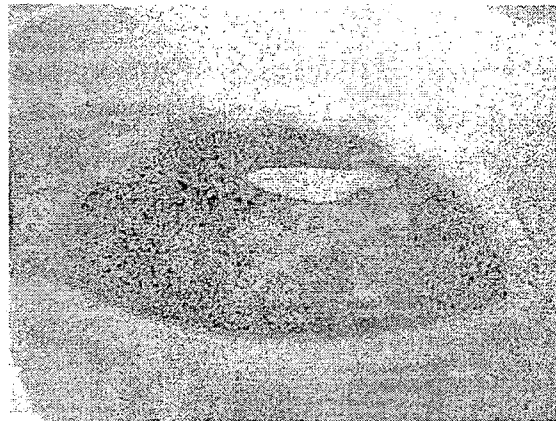
(ข) เติมน้ำกลั่น 75 ml



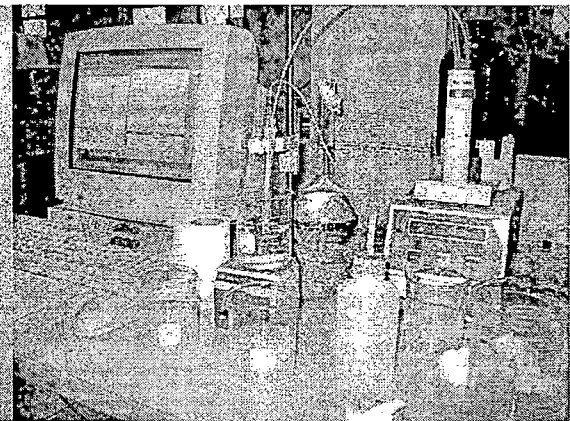
(ค) เติมสารละลายกรดไนตริก 25 ml



(ง) ให้ความร้อน



(จ) กรองสารละลายตัวอย่าง



(ฉ) ไตเตรทด้วยเครื่องไตเตรทอัตโนมัติ

รูปที่ 3.4 การทดสอบหาปริมาณสารประกอบคลอไรด์ในคอนกรีต

3.3 การทดสอบความเป็นสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

การสำรวจความเป็นสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต ที่ระยะหุ้มต่างๆ เพื่อให้เป็นข้อมูลเชิงโยงความสัมพันธ์กับปริมาณคลอไรด์ที่ซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีต และเพื่อศึกษาความเหมาะสมในการเลือกใช้ระยะหุ้มคอนกรีตที่ผสมเสถียรขึ้น เพื่อต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทางทะเล

หลังจากเก็บตัวอย่างคอนกรีต ที่มีอายุการแช่น้ำทะเลครบตามกำหนด นำคอนกรีตรูปลูกบาศก์มาทำการกดให้แตก เพื่อเก็บเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ระยะหุ้มต่างๆ มาสำรวจความเป็นสนิมของเหล็กโดยการวัดพื้นที่การเกิดสนิมบนเหล็กที่ฝังในคอนกรีต ใช้กระดาษกราฟใสที่มีช่องตารางขนาด 2×2 มม. ตัดให้มีขนาดใหญ่พอที่จะสามารถหาวได้รอบเหล็ก จากนั้นใช้ปากกาเขียนเขียนแผ่นใสระบายบนกระดาษกราฟใสตรงตำแหน่งที่เกิดสนิม นำกระดาษกราฟใสที่ได้มานับพื้นที่การเกิดสนิม เทียบกับพื้นที่ผิวเหล็กเสริมทั้งหมด แล้วนำมาคำนวณร้อยละของพื้นที่ผิวของเหล็กที่เกิดสนิม ดังสมการที่ 3.2

$$C, \% = \left(\frac{RA}{SA} \right) \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ	C	คือ	ร้อยละของพื้นที่ผิวของเหล็กที่เกิดสนิม
	RA	คือ	พื้นที่ผิวเหล็กที่เกิดสนิม (มม. ²)
	SA	คือ	พื้นที่ผิวทั้งหมดของเหล็ก (มม. ²)

บทที่ 4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้ได้กล่าวถึง ผลการทดสอบปริมาณคลอไรด์ที่ตำแหน่งฝังเหล็ก การเกิดสนิมในเหล็ก การหาค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤติจากฐานข้อมูลด้านความคงทนของคอนกรีตในสภาพแวดล้อมทะเล ถึง 7 ปี และผลของเถ้านหินต่อค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤติ

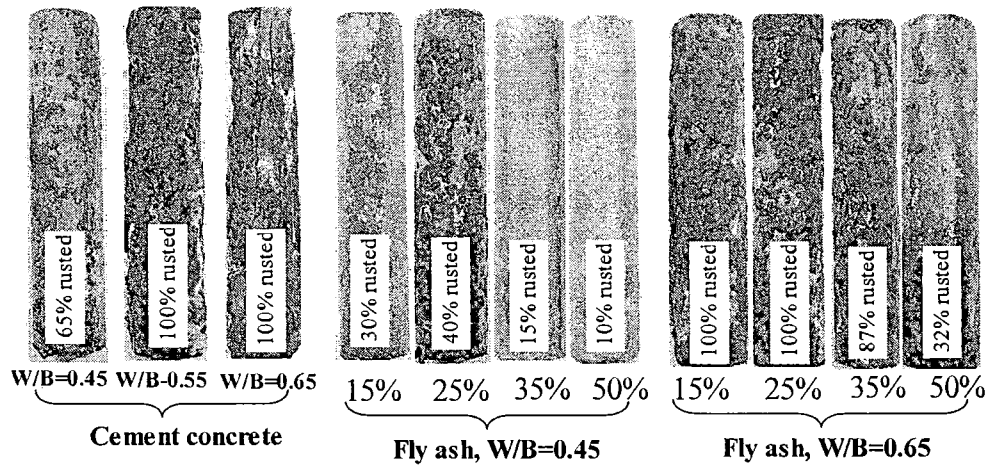
4.1 การเกิดสนิมในเหล็กและปริมาณคลอไรด์ ณ ตำแหน่งเหล็กที่ฝังเหล็กในคอนกรีต

หลังจากที่แช่คอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 7 ปี ได้นำตัวอย่างคอนกรีตมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัดให้บีบอัด จากนั้นเก็บแท่งเหล็กที่ฝังตามตำแหน่งระยะหุ้มต่างๆ เพื่อวัดพื้นที่การเกิดสนิม และถ่ายรูปเพื่อศึกษาลักษณะการเกิดสนิม และเก็บตัวอย่างคอนกรีตบริเวณรอบเหล็กที่ฝังมาทำการทดสอบปริมาณคลอไรด์โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย

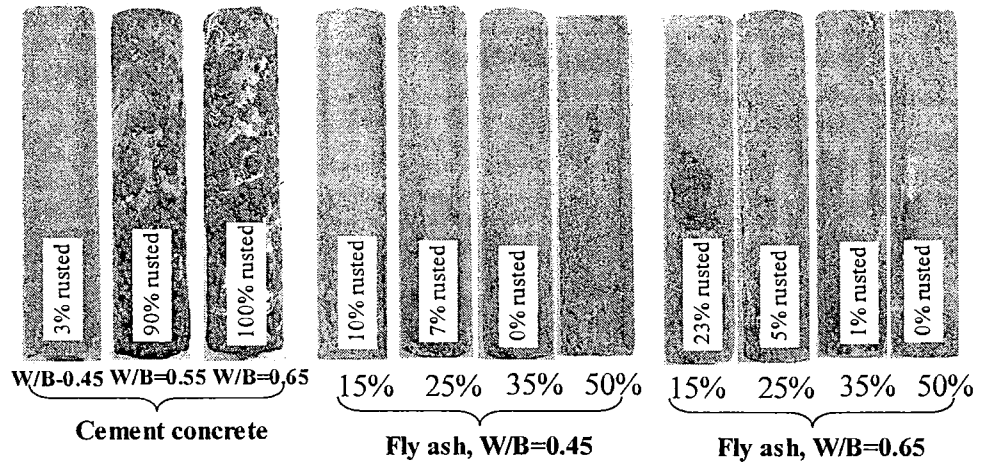
รูปที่ 4.1 แสดงการกัดกร่อนของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต ที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 20 และ 50 มม. เมื่อแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี โดยพบว่า เหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 ทุกสัดส่วนผสมเกิดสนิมที่ระยะหุ้ม 20 มม. อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 ถึงแม้จะเกิดสนิมค่อนข้างมากทุกส่วนผสม แต่ยังคงสังเกตเห็นความแตกต่างของการเกิดสนิมเหล็กที่มีปริมาณลดลงเมื่อแทนที่เถ้านหินถึงร้อยละ 50 ในคอนกรีต ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเถ้านหินมีศักยภาพในการป้องกันการทำลายคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเล แต่การใช้เถ้านหินในปริมาณสูงมากอาจส่งผลให้สูญเสียคุณสมบัติเชิงกลและไม่เหมาะสมในการใช้งาน โครงสร้าง เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 พบว่า ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 20 มม. ไม่เหมาะสมอย่างยิ่งในการใช้งานในสิ่งแวดล้อมทะเลเนื่องจากเกิดการกัดกร่อนในเหล็กเสริมอย่างชัดเจนในคอนกรีตธรรมดา ส่วนในคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินพบว่า การแทนที่เถ้านหินที่มากขึ้น มีการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ระยะหุ้ม 20 มม. ลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้านหินที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเดียวกัน โดยคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินร้อยละ 35-50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีการเกิดสนิมเหล็กน้อยมาก ถึงแม้จะใช้ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กแค่ 20 มม.

เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 50 มม. เมื่อแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 7 ปี พบว่า กลุ่มคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้านหินที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และ 0.65 มีการกัดกร่อนเหล็กเสริมเกิดขึ้นชัดเจน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากกว่า 0.55 ไม่สามารถใช้ในการก่อสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมทะเลได้ เมื่อพิจารณาผลของเถ้านหินต่อการเกิดสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ระยะ 50 มม. พบว่า การใช้เถ้านหินส่งผลให้การเกิดสนิมในเหล็กลดลงอย่างชัดเจน โดยคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงถึง 0.65 ที่ผสมเถ้าน

ถ่านหินร้อยละ 15 ถึง 50 ให้ผลในการต้านทานการเกิดสนิมเหล็กได้ดีเทียบเท่ากับคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมถ่านหินที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น สามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ที่จะส่งผลให้เกิดสนิมในเหล็กได้ เนื่องจากปฏิกิริยาดังกล่าวช่วยลดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำลงได้ และเปลี่ยนให้เป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุประสาน ตลอดจนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ยังเป็นสารตั้งต้นที่ก่อให้เกิดการทำลายเนื่องจากซัลเฟตในน้ำทะเล โดยจะทำให้เกิดยิปซัมที่ละลายน้ำได้และส่งผลให้คอนกรีตมีความพรุนมากขึ้น ดังนั้นปฏิกิริยาปอซโซลานจึงมีส่วนช่วยอย่างมากในการทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำและลดการซึมผ่านของสารเคมีที่จะเข้าไปทำอันตรายกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลได้ โดยคอนกรีตที่ผสมถ่านหินร้อยละ 0,15,25,35, และ 50 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 มีการเกิดสนิมในเหล็กที่ระยะหุ้ม 50 มม. เมื่อแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 7 ปี เท่ากับร้อยละ 3, 10, 7, 0 และ 0 ตามลำดับ จากผลการศึกษาพบว่า การใช้ถ่านหินในปริมาณมากขึ้นส่งผลให้การกัดกร่อนเหล็กที่ฝังในคอนกรีตลดลงค่อนข้างชัดเจน แต่การใช้ถ่านหินในปริมาณสูงในงานคอนกรีตก็ส่งผลเสียต่อคุณสมบัติเชิงกลด้วยเช่นกัน โดยเฉพาะกำลังอัดในช่วงต้นค่อนข้างต่ำ ดังนั้นการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตที่จะใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเลจะต้องคำนึงถึงทั้งคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติด้านความคงทนควบคู่กันไป โดยจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า การใช้ถ่านหินที่ได้จากแหล่งแม่เมาะในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 35 ส่งผลให้คุณสมบัติเชิงกลเป็นไปในทิศทางที่ดี ประกอบกับคุณสมบัติด้านความคงทนก็ดีด้วย [8-10] ดังนั้นจึงมีความเหมาะสมที่จะพัฒนาให้เป็นส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้งานได้ในสภาวะแวดล้อมดังกล่าวได้



(ก) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 20 มม.



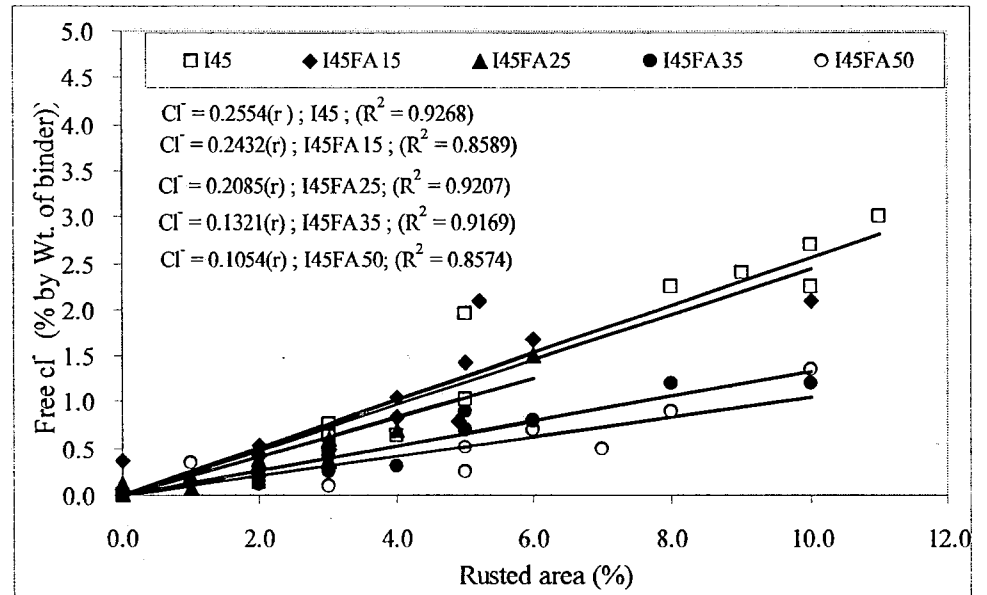
(ข) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 50 มม.

รูปที่ 4.1 การกัดกร่อนของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตและปริมาณคลอไรด์ที่ตำแหน่งฝังเหล็กเมื่อแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 7 ปี

4.2 การหาค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤติ

ในการศึกษาครั้งนี้ทำการหาปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (T) จากข้อมูลที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีตกับปริมาณคลอไรด์อิสระที่ตำแหน่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีต ที่ได้จากการทดสอบหลังจากที่แช่ตัวอย่างคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3, 4, 5, และ 7 ปี โดยกำหนดให้ปริมาณคลอไรด์วิกฤติเป็นปริมาณคลอไรด์ที่เริ่มทำให้เหล็กที่ฝังในคอนกรีตเกิดสนิม (ร้อยละ 1) เมื่อพิจารณาตามรูปที่ 4.2 ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเกิดสนิมกับปริมาณคลอไรด์ที่บริเวณใกล้ผิวเหล็กในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3, 4, 5, และ 7 ปี พบว่า สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระและร้อยละการเกิดสนิม (r) คือ $Free\ Cl = 0.2554(r)$ เมื่อแทนค่า r เท่ากับ 1% ได้ $Free\ Cl =$

0.26% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ซึ่งปริมาณคลอไรด์อิสระดังกล่าวกำหนดให้เป็นค่า คลอไรด์วิกฤติ (T) ของคอนกรีต I45 นอกจากนี้ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ ของคอนกรีตส่วนผสมอื่นๆก็หาได้ในลักษณะเดียวกัน และแสดงดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเกิดสนิมกับปริมาณคลอไรด์ที่บริเวณใกล้ผิวเหล็กในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3, 4, 5, และ 7 ปี

ตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลใน
สภาวะเปียกสลับแห้ง

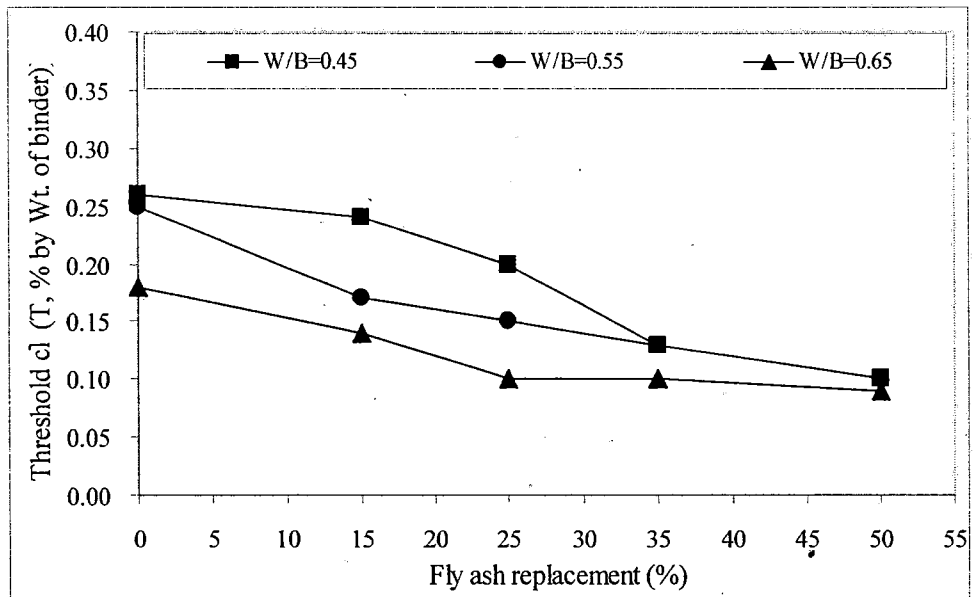
ส่วนผสม	ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (% โดยน้ำหนักวัสดุ ประสาน)	ส่วนผสม	ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (% โดยน้ำหนักวัสดุ ประสาน)
I45	0.26	I55F35	0.13
I45F15	0.26	I55F50	0.10
I45F25	0.26	I65	0.13
I45F35	0.26	I65F15	0.13
I45F50	0.26	I65F25	0.13
I55	0.25	I65F35	0.13
I55F15	0.25	I65F50	0.09
I55F25	0.15		

4.3 ผลของเถ้าถ่านหินต่อระดับคลอไรด์วิกฤติ

โดยทั่วไประดับคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตจะขึ้นกับลักษณะทางเคมีและทางกายภาพของสารละลายในโพรงของซีเมนต์เพสต์ที่อยู่ใกล้ผิวเหล็กเสริม โดยลักษณะทางเคมีได้แก่ อัตราส่วนของ Cl/OH^- [11-13] ซึ่งถ้าความเป็นด่างในโพรงซีเมนต์เพสต์มีค่าต่ำและปริมาณคลอไรด์อิสระในโพรงมีค่าสูงจะมีผลทำให้อัตราส่วน Cl/OH^- มีค่าสูงขึ้นด้วย จะส่งผลให้การกัดกร่อนเหล็กเสริมเกิดขึ้นได้เร็ว ซึ่งหมายถึง ระดับของปริมาณคลอไรด์วิกฤติที่ทำให้เริ่มเกิดการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตมีค่าต่ำลง อย่างไรก็ตาม ปริมาณคลอไรด์วิกฤติยังขึ้นกับปัจจัยทางกายภาพอื่นๆ เช่น ลักษณะผิวของเหล็กที่ใช้เสริมคอนกรีต สภาพแวดล้อมภายนอก และความพรุนในคอนกรีต เป็นต้น โดยคอนกรีตที่มีความพรุนสูง จะทำให้ปริมาณคลอไรด์วิกฤติมีค่าต่ำลง เนื่องจากการกัดกร่อนเหล็กเสริมจะเกิดได้เร็วกว่าคอนกรีตที่มีความพรุนต่ำ

รูปที่ 4.3 แสดงผลของเถ้าถ่านหินต่อ ระดับคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลาถึง 7 ปี จากผลการศึกษาพบว่า ระดับคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตลดลงตามปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินที่มากขึ้นและชัดเจนในกลุ่มคอนกรีตที่มี อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูง มากกว่าในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ เช่น คอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 มีปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 เท่ากับ 0.26%, 0.24%, 0.20%, 0.13%, และ 0.10% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ ในขณะที่

กลุ่มที่มี อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 มีปริมาณคลอไรด์วิกฤติเท่ากับ 0.18%, 0.14%, 0.10%, 0.10% และ 0.09% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตในปริมาณที่สูงขึ้น จะส่งผลให้การกักเก็บคลอไรด์มีมากขึ้นและส่งผลให้มีปริมาณคลอไรด์อิสระในโพรงของซีเมนต์เพสต์ลดลงได้ [14] ซึ่งน่าจะมีผลทำให้อัตราส่วนของ Cl^-/OH^- มีค่าต่ำลงตามปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหิน แต่การใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้นก็มีผลให้ความเป็นด่างในโพรงซีเมนต์เพสต์ลดลงได้มากเช่นกัน [6] และทำให้อัตราส่วนของ Cl^-/OH^- มีค่าเพิ่มขึ้นได้ ดังนั้น ระดับคลอไรด์วิกฤติ จึงต่ำลงตามการแทนที่เถ้าถ่านหินที่มากขึ้น นอกจากนี้ในการศึกษาครั้งนี้ พบว่า การใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณต่ำ (ในช่วงร้อยละ 15-35) ส่งผลต่อระดับคลอไรด์วิกฤติมากกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินปริมาณสูง (ร้อยละ 35-50) โดยเห็นได้ชัดในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 โดยในคอนกรีตที่มี อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 เมื่อแทนที่เถ้าถ่านหินในคอนกรีตเพิ่มจากร้อยละ 15 ถึง ร้อยละ 35 ทำให้ค่า ระดับคลอไรด์วิกฤติลดลงได้ถึง 0.11% (ลดลงจาก 0.24% เป็น 0.13%) ในขณะที่การเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินจากร้อยละ 35 เป็น ร้อยละ 50 ส่งผลให้ ระดับคลอไรด์วิกฤติ ลดลงแค่ 0.03% เท่านั้น (ลดลงจาก 0.13% เป็น 0.10%) หรือ ระดับคลอไรด์วิกฤติมีค่าเกือบคงที่ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากในคอนกรีตที่มีปริมาณเถ้าถ่านหินสูงทำให้คอนกรีตมีความชื้นน้ำมาก โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณร้อยละ 35 และ 50 ให้ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใกล้เคียงกัน [15] และมีความชื้นน้ำสูงมาก ดังนั้น ระดับคลอไรด์วิกฤติที่ใกล้เคียงกันในกลุ่มคอนกรีตที่มีเถ้าถ่านหินในปริมาณสูงน่าจะมีผลมาจากลักษณะทางกายภาพของโพรงในซีเมนต์เพสต์ เป็นหลัก นอกจากนี้ ค่า ระดับคลอไรด์วิกฤติจะขึ้นกับอัตราส่วนของ Cl^-/OH^- ในโพรงซีเมนต์เพสต์แล้ว ความพรุนในเนื้อคอนกรีตถือว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อระดับคลอไรด์วิกฤติ โดยคอนกรีตที่มีความพรุนสูง ความชื้นและออกซิเจนสามารถแทรกซึมเข้าไปถึงได้ง่าย และอาจส่งผลให้เหล็กเกิดการกัดกร่อนได้เร็วภายใต้ปริมาณคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นต่ำได้ ซึ่งหมายถึงระดับคลอไรด์วิกฤติมีค่าต่ำลงนั่นเอง โดยแสดงให้เห็นในการศึกษาครั้งนี้ว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้น ให้ ระดับคลอไรด์วิกฤติที่ต่ำลง (ตารางที่ 4.1) เช่น คอนกรีตที่แทนที่เถ้าถ่านหินร้อยละ 25 และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 มีปริมาณคลอไรด์วิกฤติเท่ากับ 0.20%, 0.15% และ 0.10% โดยน้ำหนักวัสดุประสานตามลำดับ



รูปที่ 4.3 ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางของคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง

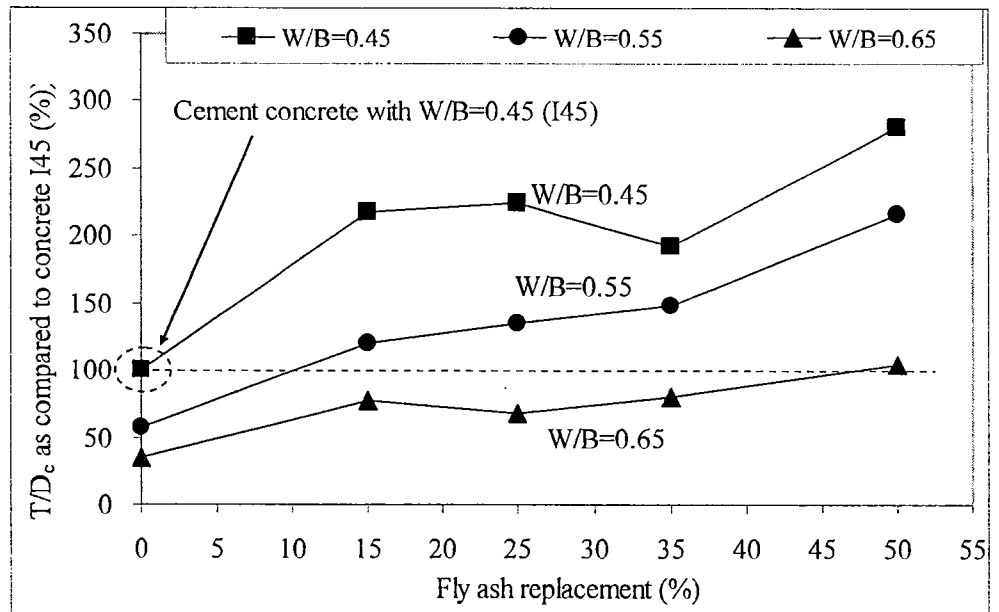
4.4 การประยุกต์ใช้ปริมาณคลอไรด์วิกฤติในการออกแบบคอนกรีตที่คำนึงถึงความคงทน

โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตจะสามารถต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลได้ดี จะต้องมีความสัมพันธ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) ที่ต่ำและมีค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (T) สูง จากการศึกษาที่ผ่านมาได้หาค่าสัมพันธ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) ในคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลโดยใช้ส่วนผสมคอนกรีตเดียวกันกับการศึกษาในครั้งนี้ [15] และแสดงค่าสัมพันธ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) ดังแสดงในตารางที่ 4.2 คอนกรีตที่มีคุณสมบัติด้านความคงทนที่ดีจะมีค่า T/D_c ที่สูง ในรูปที่ 4.4 แสดงค่าร้อยละของอัตราส่วน T/D_c เทียบกับ คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 (I45) ซึ่งเป็นคอนกรีตที่มีคุณสมบัติอย่างต่ำที่ ACI กำหนดให้สามารถใช้ในสภาพแวดล้อมทะเลได้ โดยพบว่าคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตที่วัดในรูปของอัตราส่วน T/D_c มีค่าสูงขึ้นตามปริมาณการแทนที่เส้นผ่านหินที่มากขึ้น และมีแนวโน้มเหมือนกันในทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ตลอดจนแนวโน้มของอัตราส่วน T/D_c มีค่าลดลงตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น นั่นแสดงให้เห็นแนวโน้มที่ชัดเจนว่า การใช้เส้นผ่านหินผสมในคอนกรีตสามารถต้านทานการทำลายเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลได้ดี โดยเฉพาะในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ นอกจากนั้นถ้าพิจารณาในด้านความคงทน พบว่าการผสมเส้นผ่านหินในคอนกรีตที่มี อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำกว่า 0.55 ให้ค่าร้อยละของ T/D_c เมื่อเทียบกับคอนกรีต I45 สูงกว่าร้อยละ 100 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใช้เส้นผ่านหินผสมในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงถึง 0.55 สามารถเพิ่มคุณสมบัติ

ด้านความคงทนและด้านทานการทำลายเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเล ได้ดีกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มี อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 โดยคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน ร้อยละ 15, 25, 35, และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และ 0.55 มีค่าร้อยละของ T/D_c เทียบกับคอนกรีต I45 เท่ากับ 217, 225, 192, 281 และ 121, 135, 103, 216 ตามลำดับ ส่วนกลุ่มที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงถึง 0.65 พบว่าไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเล เนื่องจากมีค่า ร้อยละของ T/D_c เทียบกับคอนกรีต I45 น้อยกว่า 100 เกือบทุกส่วนผสม อย่างไรก็ตามการพิจารณาความเหมาะสมของคอนกรีตที่ใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเลดังที่กล่าวมาข้างต้นได้พิจารณาเฉพาะผลของการด้านทานการทำลายเหล็กเสริมเนื่องจากสารประกอบคลอไรด์ ซึ่งถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญ แต่นอกเหนือจากปัจจัยดังกล่าว การเลือกใช้คอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเลจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตควบคู่ไปด้วย เพราะถึงแม้ว่าคอนกรีตจะมีการด้านทานการทำลายเนื่องจากคลอไรด์ได้ดี แต่ถ้าเป็นคอนกรีตที่มีกำลังต่ำเกินไปก็ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน

ตารางที่ 4.2 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล

ส่วนผสม	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ($D_c \times 10^{-6}$ มม ² /วินาที)	ส่วนผสม	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ($D_c \times 10^{-6}$ มม ² /วินาที)
I45	3.65	I55F35	1.23
I45F15	3.65	I55F50	1.23
I45F25	3.65	I65	1.23
I45F35	0.95	I65F15	1.23
I45F50	0.50	I65F25	1.23
I55	3.65	I65F25	1.23
I55F15	0.50	I65F50	1.23
I55F25	1.56		



รูปที่ 4.4 ร้อยละของ T/D_c ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินเทียบกับคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

5.1.1) ระดับคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตลดลงตามปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินที่มากขึ้น และชัดเจนในกลุ่มคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูง มากกว่าในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ

5.1.2) การใช้เถ้าถ่านหินผสมคอนกรีตในปริมาณต่ำ (ในช่วงร้อยละ 15-35) ส่งผลต่อระดับคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตมากกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินปริมาณสูง (ร้อยละ 35-50)

5.1.3) การใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 สามารถเพิ่มคุณสมบัติด้านความคงทนและด้านทานการทำลายเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลได้ดีเทียบเท่ากับคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1) ควรดำเนินการเก็บข้อมูลการกักกร่อนคอนกรีตเนื่องจากน้ำทะเลอย่างต่อเนื่องและเป็นระบบ เพื่อให้ข้อมูลที่ได้มีความสมบูรณ์ และสามารถนำไปเป็นฐานข้อมูลที่ใช้งานได้จริง

5.2.2) ควรเก็บตัวอย่างน้ำทะเลจากชายฝั่งทะเลอันดามัน และพื้นที่ชายฝั่งทะเลอื่นๆ ในประเทศไทย เพื่อเป็นข้อมูลเปรียบเทียบกับน้ำทะเลชายฝั่งอ่าวไทย ที่ทำการแช่ตัวอย่างคอนกรีตในงานวิจัยนี้

5.2.3) ควรมีการศึกษาถึงการนำวัสดุปอซโซลานชนิดอื่นมาใช้ในการต้านทานการกักกร่อนเนื่องจากน้ำทะเล เช่น เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เถ้าขานอ้อย เถ้าปาล์มน้ำมัน เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] ปริญญา จินดาประเสริฐ และอุกฤษฏ์ โช้ศรี, 2548, “กำลังรับแรงและความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและเถ้าแกลบ”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 10, 2-4 พฤษภาคม, ชลบุรี, หน้า MAT 44-48.
- [2] มณฑิธร ทิมวาณิช และคณะ, 2548, “ผลกระทบของน้ำทะเลต่อการซึมผ่านของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 10, 2-4 พฤษภาคม, ชลบุรี, หน้า MAT 49-54.
- [3] J. Bai, S. Wild, and B.B. Sabir, 2003, “Chloride ingress and strength loss in concrete with different PC-PFA-MK binder compositions exposed to synthetic seawater”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, No. 3, pp. 353-362.
- [4] Chai Jaturapitakkul and Reungrut Cheerarot “A Development of Bottom Ash as a Pozzolanic Material” *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 15, No.1, 2003, pp. 48-53.
- [5] Thomas, M.D.A. and Matthews, J.D., 2004, “Performance of PFA Concrete in a Marine Environment – 10-year Results”, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 26, No. 1, pp. 5-20.
- [6] Thomas M.D.A., 1996, “Chloride Threshold in Marine Concrete”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, pp. 513-519.
- [7] ASTM. Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete, C1218 M-99R08. *Annual Book of ASTM Standards 2008*;04.02.
- [8] Dhir RK, El-Mohr MAK, Dyer TD. “Developing chloride resisting concrete using PFA”. *Cement Concrete Res* 1997;27:1633-1639.
- [9] Dhir RK, Jones MR. “Development of chloride-resisting concrete using fly ash”. *Fuel* 1999;78 :137-142.
- [10] Chalee W, Jaturapitakkul C, Chindaprasirt P. “Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater”. *Marine Struct* 2009; 22:341-353.
- [11] Ki Yong Ann, Ha-Won Song. “Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete”. *Corrosion Science* 2007;49: 4113-4133.
- [12] Yuan Q, Shi C, Schutter GD, Audenaert K, Deng D. “Chloride binding of cement-based materials subjected to external chloride environment – A review”. *Constr Build Mater* 2009; 23:1-13.
- [13] Broomfield JP. *Corrosion of Steel in Concrete*. England, Taylor & Francis Ltd 1996:1–10.

- [14] Cheewaket T., Jaturapitakkul C. and Chalee W., "Long term performance of chloride binding capacity in fly ash concrete in a marine environment", *Construction and Building Materials* 24 (2010) 1352-1357
- [15] Chalee W. and Jaturapitakkul C., "Effect of W/B ratios and fly ash finenesses on chloride diffusion coefficient of concrete in marine environment", *Materials and Structures* (2009) 42 : pp. 505-514

ภาคผนวก

ปริมาณคลอไรด์และสนิมเหล็กในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล

ตาราง ผ.1 ปริมาณคลอไรด์บริเวณรอบผิวเหล็กเสริมในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 2 ปี

Mix	Chloride Content (% by Wt. of Binder)		
	10-mm Covering Depth	20-mm Covering Depth	50-mm Covering Depth
I45	4.41	2.61	0.00
I55	5.00	2.00	0.64
I65	6.42	4.61	1.23
I45F15	5.41	1.82	0.15
I45F25	5.21	2.00	0.64
I45F35	4.64	1.86	0.00
I45F50	3.43	0.41	0.00
I55F15	5.21	2.43	0.00
I55F25	6.20	2.00	0.00
I55F35	5.24	1.62	0.00
I55F50	4.40	0.40	0.00
I65F15	6.61	3.64	0.10
I65F25	4.64	1.62	0.00
I65F35	5.40	0.41	0.00
I65F50	4.60	0.21	0.00

ตาราง ผ.2 ปริมาณคลอไรด์บริเวณรอบผิวเหล็กเสริมในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี

Mix	Chloride Content (% by Wt. of Binder)		
	10-mm Covering Depth	20-mm Covering Depth	50-mm Covering Depth
I45	5.92	4.80	2.07
I55	7.00	5.45	2.23
I65	7.64	4.25	3.02
I45F15	5.60	2.30	0.30
I45F25	7.64	2.24	0.00
I45F35	5.07	2.00	0.00
I45F50	3.83	0.60	0.30
I55F15	7.00	4.30	0.14
I55F25	6.80	3.40	0.24
I55F35	6.43	3.04	0.30
I55F50	6.80	0.00	0.00
I65F15	7.32	4.30	0.21
I65F25	7.40	4.20	0.11
I65F35	6.80	3.20	0.14
I65F50	6.20	1.66	0.00

ตาราง ผ.3 ปริมาณคลอไรด์บริเวณรอบผิวเหล็กเสริมในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 4 ปี

Mix	Chloride Content (% by Wt. of Binder)		
	10-mm Covering Depth	20-mm Covering Depth	50-mm Covering Depth
I45	6.21	5.11	0.63
I55	7.22	5.64	2.00
I65	8.43	6.24	2.83
I45F15	5.80	2.42	0.42
I45F25	5.64	2.43	0.00
I45F35	5.42	1.62	0.00
I45F50	4.00	0.83	0.00
I55F15	6.80	4.00	0.24
I55F25	6.30	3.45	0.10
I55F35	5.30	2.20	0.23
I55F50	5.40	0.80	0.00
I65F15	7.40	4.60	0.52
I65F25	7.60	4.30	0.00
I65F35	7.60	3.50	0.23
I65F50	5.30	2.40	0.10

ตาราง ผ.4 ปริมาณคลอไรด์บริเวณรอบผิวเหล็กเสริมในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี

Mix	Chloride Content (% by Wt. of Binder)			
	10-mm Covering Depth	20-mm Covering Depth	50-mm Covering Depth	75-mm Covering Depth
I45	6.16	5.22	0.51	0.00
I55	7.12	5.73	2.10	0.81
I65	8.50	6.72	2.81	1.08
I45F15	5.80	2.60	0.30	0.00
I45F25	6.10	2.51	0.30	0.00
I45F35	5.40	2.22	0.30	0.00
I45F50	4.24	0.91	0.00	0.00
I55F15	7.10	4.40	2.00	0.32
I55F25	6.65	3.73	1.00	0.00
I55F35	6.50	3.42	0.30	0.00
I55F50	6.50	1.40	0.23	0.00
I65F15	7.54	4.80	1.03	0.30
I65F25	5.80	4.54	0.70	0.32
I65F35	7.20	1.40	0.40	0.32
I65F50	6.50	2.50	0.11	0.00

ตาราง ผ.5 ปริมาณคลอไรด์บริเวณรอบผิวเหล็กเสริมในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 7 ปี

Mix	Chloride Content (% by Wt. of Binder)			
	10-mm Covering Depth	20-mm Covering Depth	50-mm Covering Depth	75-mm Covering Depth
I45	6.5	5.6	0.6	0
I45F15	6.2	2.9	0.5	0
I45F25	6.1	2.5	0.2	0
I45F35	5.3	3.1	0.2	0
I45F50	5	1.2	0.1	0
I55	7.8	5.7	1.9	0.9
I55F15	5	4.7	1.8	0.6
I55F25	6.9	3.4	1.8	0
I55F35	6.1	3.8	0.4	0
I55F50	5.3	1.2	0.6	0
I65	7.8	6.2	3.1	1
I65F15	6.5	3.9	1	0.3
I65F25	7.9	4.7	0.6	0.6
I65F35	7.3	3.6	0.9	0.2
I65F50	6.1	2.6	0.1	0

ตาราง ผ.6 ปริมาณสนิมเหล็กเสริมในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 2 ปี

Mix	Rusted Area (%)			
	10-mm Covering Depth	20-mm Covering Depth	50-mm Covering Depth	75-mm Covering Depth
I45	26.0	5.5	0.0	0
I45F15	20.2	5.2	0.0	0
I45F25	22.5	5.0	0.0	0
I45F35	20.2	5.0	0.0	0
I45F50	31.8	5.0	0.0	0
I55	95.5	9.5	0.0	0
I55F15	81.2	6.2	0.3	0
I55F25	97.1	4.7	0.3	0
I55F35	87.0	3.3	0.0	0
I55F50	95.0	2.0	0.0	0
I65	97.1	17.0	3.7	0
I65F15	100.0	16.7	0.5	0
I65F25	96.6	5.0	0.0	0
I65F35	35.5	2.1	0.0	0
I65F50	53.1	5.0	0.0	0

ตาราง ผ.7 ปริมาณสนิมเหล็กเสริมในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี

Mix	Rusted Area (%)			
	10-mm Covering Depth	20-mm Covering Depth	50-mm Covering Depth	75-mm Covering Depth
I45	100.0	23.3	10.0	0
I45F15	65.5	4.9	0.0	0
I45F25	29.2	2.7	0.0	0
I45F35	73.2	6.6	0.0	0
I45F50	61.0	0.0	0.0	0
I55	100.0	72.7	0.0	0
I55F15	100.0	15.0	0.0	0
I55F25	100.0	6.6	0.0	0
I55F35	100.0	39.8	0.0	0
I55F50	99.2	0.5	0.0	0
I65	100.0	88.9	14.9	3
I65F15	100.0	86.5	1.1	0
I65F25	100.0	82.2	1.1	0
I65F35	100.0	45.6	3.7	0
I65F50	100.0	5.0	1.1	0

ตาราง ผ.8 ปริมาณสนิมเหล็กเสริมในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 4 ปี

Mix	Rusted Area (%)			
	10-mm Covering Depth	20-mm Covering Depth	50-mm Covering Depth	75-mm Covering Depth
I45	100	45.1	10	0
I45F15	22.8	13.3	0	0
I45F25	34.5	5	0	0
I45F35	34.5	10	0	0
I45F50	55.7	4.2	0	0
I55	100	76.9	10.9	1
I55F15	100	14.6	0	0
I55F25	100	9.5	0	0
I55F35	100	8.6	0	0
I55F50	100	13.3	0	0
I65	100	84.9	11.1	5
I65F15	100	13.3	0	0
I65F25	100	8.7	0	0
I65F35	100	42.4	0	0
I65F50	87.5	3.2	0	0

ตาราง ผ.9 ปริมาณสนิมเหล็กเสริมในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี

Mix	Rusted Area (%)			
	10-mm Covering Depth	20-mm Covering Depth	50-mm Covering Depth	75-mm Covering Depth
I45	100	45	4	0
I45F15	100	20	2	0
I45F25	100	30	2	0
I45F35	100	7	0	0
I45F50	100	5	0	0
I55	100	100	70	40
I55F15	100	45	5	0
I55F25	100	100	5	0
I55F35	100	30	2	0
I55F50	100	14	2	0
I65	100	100	80	60
I65F15	100	100	23	0
I65F25	100	95	4	0
I65F35	100	93	2	0
I65F50	100	25	0	0

ตาราง ผ.10 ปริมาณสนิมเหล็กเสริมในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 7 ปี

Mix	Rusted Area (%)			
	10-mm Covering Depth	20-mm Covering Depth	50-mm Covering Depth	75-mm Covering Depth
I45	100	65	3	0
I45F15	100	30	10	0
I45F25	100	40	7	0
I45F35	100	15	0	0
I45F50	100	30	2	0
I55	100	100	90	60
I55F15	100	100	15	0
I55F25	100	100	90	0
I55F35	100	65	0	0
I55F50	100	24	1	0
I65	100	100	100	70
I65F15	100	100	23	0
I65F25	100	100	3	0
I65F35	100	87	1	0
I65F50	100	32	0	0