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

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ : การสร้างดัชนีด้านความคงทนของคอนกรีตจากข้อมูลทดสอบในสภาพแวดล้อมทะเล

(Evaluation of durability index of concrete based on field indicator of concrete in marine site)

ผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิเชียร ชาลี

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

เริ่มบริการ
19 มิ.ย. 2556

- 8 มี.ค. 2556
จ.ค. 155081
316509

ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก สำนักบริหารโครงการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนา มหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ สำนักคณะกรรมการการอุดมศึกษา ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2554

อภินันทนาการ

ทุนสนับสนุนการวิจัย สำนักบริหารโครงการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนา มหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ
สำนักคณะกรรมการการอุดมศึกษา ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2554
รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ตามที่ นายวิเชียร ชาลี พนักงานมหาวิทยาลัย ตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ สังกัดภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย เรื่อง "การสร้างดัชนีด้านความคงทนของคอนกรีตจากข้อมูลทดสอบในสภาพแวดล้อมทะเล" จาก **ทุนสนับสนุนการวิจัย สำนักบริหารโครงการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนา มหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ สำนักคณะกรรมการการอุดมศึกษา ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2554** โดยมีงบประมาณทั้งโครงการ 380,000 บาท ขณะนี้ผลการดำเนินการวิจัยเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้ว

รายละเอียดของโครงการวิจัย

ผู้เสนอ	:	นายวิเชียร ชาลี
หน่วยงาน	:	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ระยะเวลาดำเนินการ	:	12 เดือน
งบประมาณ	:	380,000 บาท

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินต่อลักษณะความคงทนของคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมน้ำทะเล หล่อตัวอย่างคอนกรีตโดยใช้เถ้าถ่านหินชนิด F แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ในอัตราร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 และ สำหรับคุณสมบัติด้านความคงทน หล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด 200x200x200 มม.^{3} และฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 10, 20, 50, 75 และ 90 มม. หลังจากบ่มคอนกรีตจนอายุครบ 28 วัน นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่บริเวณชายฝั่งทะเล จ.ชลบุรี เป็นเวลา 10 ปี สร้างดัชนีด้านความคงทนของคอนกรีตจาก ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (T), สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c), ปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหิน, อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B), และกำลังอัดของคอนกรีต

ผลการวิจัยพบว่า ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (คลอไรด์อิสระ)ในคอนกรีต มีค่าลดลง เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลดลง และปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินสูงขึ้นตลอดจน สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตลดลงตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลง และปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินสูงขึ้น ลักษณะความคงทนของคอนกรีต ที่วิเคราะห์จากดัชนีความคงทน (T/D_c เทียบกับคอนกรีตที่มี W/B เท่ากับ 0.45) และกำลังอัด พบว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหิน ร้อยละ 15-35 มีคุณสมบัติด้านความคงทนที่ดี สามารถต้านทานการทำลายและยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : ดัชนีความคงทน, คลอไรด์วิกฤติ, สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์, อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน, เถ้าถ่านหิน, สิ่งแวดล้อมทะเล

Abstract

The objectives of this investigation are to study the effects of water to binder ratios (W/B) and fly ash contents on durability performance of concretes under marine environment. Class F 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. For durability study, concrete cube specimens of 200 mm were cast, and steel bars of 12-mm in diameter and 50-mm in length were embedded in the specimens at the coverings of 10, 20, 50, 75, and 90 mm. Subsequently, the hardened concrete specimens were cured in fresh water until the age of 28 days and then were exposed to the tidal zone of marine environment in Chonburi province for 10 years. Durability index of concrete was evaluated based on the chloride threshold level (T), chloride diffusion coefficient (D_c), fly ash replacement, W/B ratio, and compressive strength of the concrete.

The results showed that the chloride threshold level (free chloride) of concrete decreased with both the decrease of W/B ratio and the increase of fly ash replacement. Furthermore, the appearance chloride diffusion coefficient of all concrete mixtures obviously decreased with both the increase of fly ash replacement and the decrease of W/B ratio. Based on the concrete durability (T/D_c as compared to cement concrete with W/B ratio of 0.45) and compressive strength, the durability performance proposed in this study indicated that fly ash concretes with W/B ratio of 0.45 and 15-35% fly ash replacements provided high quality concretes in marine site, which could be efficiently employed to enhance the durability of concrete structures in marine environment.

Keyword: Durability index; Chloride threshold; Chloride diffusion coefficient; W/B ratio; Fly ash; Marine environment

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ทุนสนับสนุนการวิจัย สำนักบริหารโครงการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ สำนักคณะกรรมการการอุดมศึกษา ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2554 ที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัย ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาที่ให้ความสะดวกด้านเครื่องมือและห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ธุรการ และช่างเทคนิคประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่ช่วยประสานงานและช่วยเหลือเป็นอย่างดี ตลอดจนขอขอบคุณโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี ที่ได้อนุเคราะห์สถานที่แช่ตัวอย่าง

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลงานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นฐานข้อมูลเพื่อนำไปใช้แก้ปัญหาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเลประเทศไทย ให้เกิดความเสียหายน้อยที่สุด ช่วยเสริมสร้างความรู้ และความเข้าใจ ตลอดจนช่วยส่งเสริมการใช้เถ้าถ่านหินในงานคอนกรีตให้มากยิ่งขึ้น

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 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	**4**
2.1 คอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเล	4
2.2 กลไกการทำลายของสภาวะแวดล้อมทะเลต่อคอนกรีต	5
2.3 หลักการเลือกคอนกรีตเพื่อป้องกันการทำลายจากสภาวะแวดล้อมทะเล	21
2.4 แนวทางการใช้เถ้าถ่านหินเพื่อป้องกันการทำลายจากสภาวะแวดล้อมทะเล	22
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	27
3. วิธีการศึกษา	**30**
3.1 รายละเอียดคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล 10 ปี	30
3.2 การทดสอบคลอไรด์อิสระในคอนกรีต	34
3.3 การวัดสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต	34
3.4 การทดสอบปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ตำแหน่งฝังเหล็ก	37

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง บทที่	หน้า
4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล	**38**
4.1 การหาค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (T)	38
4.2 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c)	41
4.3 ผลของเถ้าถ่านหินต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์และปริมาณคลอไรด์วิกฤติ	44
4.4 ดัชนีความคงทนของคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเล	48
4.5 การจำแนกคุณภาพของคอนกรีตเพื่อใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเลจากดัชนีความคงทนและกำลังอัดคอนกรีต	50
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	**53**
5.1 สรุปผล	54
5.2 ข้อเสนอแนะ	54
เอกสารอ้างอิง	**55**
ภาคผนวก ก ผลผลิต (Output)	**57**
ภาคผนวก ข รายงานการเงิน	**66**
ภาคผนวก ค ประวัตินักวิจัย	**68**

รายการตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	ปริมาณสูงสุดของคลอไรด์อิอออนเพื่อป้องกันการเกิดสนิม	11
2.2	องค์ประกอบของน้ำทะเลบริเวณ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี	20
3.1	องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน	29
3.2	คุณสมบัติของมวลรวม	30
3.3	อัตราส่วนผสมของคอนกรีต	30
4.1	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ กำลังอัดที่อายุ 28 วัน และดัชนีความคงทนของคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 10 ปี	43

รายการรูปประกอบ

รูป		หน้า
2.1	ลักษณะการกัดกร่อนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเล	3
2.2	ชนิดของสิ่งแวดล้อมทะเล	4
2.3	โครงสร้างคอนกรีตที่เสื่อมสภาพเนื่องจากสาเหตุทางชีวภาพ	8
2.4	การเกิดสนิมเหล็กเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเมื่อมีคลอไรด์ในคอนกรีต	9
2.5	ลักษณะการทำลายของสารประกอบซัลเฟตต่อคอนกรีต	18
2.6	ร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 และผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะที่แยก และไม่แยกขนาดที่แช่ในน้ำทะเล 5 ปี เมื่อเทียบกับอายุแช่น้ำทะเล 3 ปี	22
2.7	กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะที่แยกและไม่แยกขนาดที่แช่ในน้ำทะเล 5 ปี	23
2.8	การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะและมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 เมื่อแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี	24
2.9	การเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี	25
3.1	การฝังเหล็กลงในคอนกรีต	32
3.2	ตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง	32
3.3	การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์	34
3.4	การทดสอบหาปริมาณสารประกอบคลอไรด์ในคอนกรีต	35
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเกิดสนิมกับปริมาณคลอไรด์ที่บริเวณใกล้ผิวเหล็กในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3, 4, 5, 7 และ 10 ปี	40
4.2	การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 0, 15, 25 และ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 10 ปี	42
4.3	ผลของเถ้าถ่านหินและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีตเมื่อแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 10 ปี	45

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป		หน้า
4.4	ผลของเถ้าถ่านหินและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตเมื่อแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 10 ปี	47
4.5	ผลของเถ้าถ่านหินและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อดัชนีความคงทนของคอนกรีตเมื่อแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 10 ปี	49
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความคงทนของคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล 10 ปี และกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน	51
4.7	การเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ระดับความลึก 50 มม. หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 10 ปี	51

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันคุณสมบัติด้านความทนทานของคอนกรีตเป็นอีกปัจจัยสำคัญในการออกแบบปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตนอกเหนือจากคุณสมบัติเชิงกล เนื่องจากคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเล น้ำกร่อย หรือใกล้ชายฝั่งทะเล มักประสบปัญหาความเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อนของสารเคมี และปัญหาเหล็กเสริมภายในคอนกรีตเป็นสนิม สาเหตุเหล่านี้เกิดเนื่องจากน้ำทะเลมีเกลือต่าง ๆ ละลายอยู่ซึ่งส่วนใหญ่ ได้แก่ คลอไรด์ และซัลเฟต ความทนทานของคอนกรีตเสริมเหล็กขึ้นอยู่กับสัดส่วนผสมคอนกรีต คุณภาพงาน การบ่ม และระยะหุ้มเหล็กเสริม เป็นต้น การใช้เถ้าถ่านหินในการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตเพื่อใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเลถือว่าเป็นที่ยอมรับ และให้ผลไปในทิศทางที่ดีต่อการป้องกันการทำลายของสภาวะแวดล้อมดังกล่าว โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมา (วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2554; Chalee *et al.*, 2007 ; Thomas *et al.*, 2004 ; Chalee *et al.*, 2009; Chalee *et al.*, 2010; Cheewaket *et al.*, 2010) พบว่าการใช้เถ้าถ่านหินที่มีคุณสมบัติที่ดี สามารถลดการทำลายเนื่องจากสภาวแวดล้อมทะเลได้อย่างชัดเจน ไม่ว่าจะเป็นการทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น และลดการแทรกซึมของคลอไรด์และซัลเฟต ที่จะเข้าไปทำอันตรายกับคอนกรีต หรือเพิ่มความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ (chloride binding capacity) ซึ่งเป็นผลให้ปริมาณคลอไรด์อิสระที่จะมาทำลายเหล็กเสริมมีปริมาณน้อยลง โดยแสดงผลการวิจัยอย่างชัดเจนและสอดคล้องกัน ทั้งที่มีการศึกษาในสภาพแวดล้อมจริง และในห้องปฏิบัติการ อย่างไรก็ตามการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตเพื่อป้องกันการทำลายเนื่องจากสภาพแวดล้อมทะเลและยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีต ค่อนข้างที่จะซับซ้อนและมีปัจจัยหลายอย่างที่ต้องศึกษา (Broomfield *et al.*, 1996 ; Mehta *et al.*,1991) ไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติทางด้านกายภาพ เช่น ความทึบน้ำของคอนกรีต หรือ คุณสมบัติทางด้านเคมี เช่น การกักเก็บคลอไรด์ (chloride binding capacity) ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (threshold chloride level) และ สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (chloride diffusion coefficient) เป็นต้น ซึ่งลักษณะทั้งหมดนี้เรียกว่า คุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต และสิ่งสำคัญที่ต้องทำการศึกษาควบคู่กันไปคือคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต เพราะจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูง (high volume fly ash) จะส่งผลดีมากต่อการต้านทานแทรกซึมของคลอไรด์ และลดการเกิดสนิมในเหล็กเสริม แต่คอนกรีตดังกล่าวไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในสภาพแวดล้อมทะเลเนื่องจากมีกำลังอัดที่ต่ำ (Gengying, 2004 ; Siddique, 2003) และอาจถูกทำลายได้ง่ายในสภาวะที่มีการใช้งาน

ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จะพิจารณาความเหมาะสมของคอนกรีตที่จะใช้ป้องกันการทำลายในสภาวะแวดล้อมทะเล โดยพิจารณาปัจจัยทั้งทางด้านความคงทน และคุณสมบัติเชิงกล เพื่อทำการวิเคราะห์ออกมาในรูปแบบของ ดัชนีความคงทนของคอนกรีต ซึ่งปัจจัยต่างๆที่ประกอบในการศึกษาได้แก่ ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (threshold chloride level) และ สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (chloride diffusion coefficient) โดยวิเคราะห์ควบคู่ไปกับคุณสมบัติเชิงกล ซึ่งข้อมูลต่างๆเหล่านี้ได้จากการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่แช่ในสภาพแวดล้อมทะเลจริงเป็นเวลาถึง 10 ปี

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาการสร้างดัชนีด้านความคงทนของคอนกรีตบนฐานข้อมูลที่ทดสอบในสิ่งแวดล้อมทะเลจริง

1.2.2 ศึกษาผลของอัตราส่วนการแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ต่อดัชนีด้านความคงทนในคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง

1.2.3 ศึกษาการใช้ดัชนีด้านความคงทนประกอบในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตเพื่อใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเล ให้เหมาะสมทั้งคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติด้านความคงทนควบคู่กันไป

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการสร้างดัชนีความคงทนของคอนกรีตบนฐานข้อมูลที่ทดสอบตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในสภาพแวดล้อมทะเลถึงเวลา 10 ปี โดยข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ดัชนีความคงทน ได้แก่ ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (threshold chloride level), สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (chloride diffusion coefficient) และกำลังอัด โดยตัวอย่างคอนกรีตที่ทำวิจัยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.45 0.55 และ 0.65 ใช้เถ้าเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะโดยตรงแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 20 ซม. และฝังเหล็ก RB12 ที่ตำแหน่งมุมของก้อนตัวอย่างที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 10, 20, 50, 75 และ 90 มม. ทำการเก็บข้อมูลด้านความคงทนเพื่อวิเคราะห์ดัชนีความคงทนของคอนกรีต ได้แก่ ทดสอบการเกิดสนิมเหล็กและปริมาณคลอไรด์ที่ตำแหน่งเหล็กเสริมเพื่อหาปริมาณคลอไรด์วิกฤติ และทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต ตลอดจนทดสอบกำลังอัด ของคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล และตรวจสอบดัชนีด้านความคงทนกับผลการทดสอบที่ได้จากภาคสนามเพื่อยืนยันการนำไปใช้งานต่อไป

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ข้อมูลดัชนีด้านความคงทนของคอนกรีต บนฐานข้อมูลที่ทดสอบในสิ่งแวดล้อมทะเลจริง โดยพิจารณาความเหมาะสมของคอนกรีตที่จะใช้ป้องกันการทำลายในสภาวะแวดล้อมทะเล ทั้งปัจจัยด้านความคงทน และคุณสมบัติเชิงกลควบคู่กันไป ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการเลือกใช้ส่วนผสมคอนกรีต เพื่อป้องกันการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเล ภายใต้ความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์และความแข็งแรงทนทานตามหลักวิศวกรรมต่อไป

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้กล่าวถึง คอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเล กลไกการทำลายของสภาวะแวดล้อมทะเลต่อคอนกรีต หลักการเลือกคอนกรีตเพื่อป้องกันการทำลายจากสภาวะแวดล้อมทะเล แนวทางการใช้เถ้าถ่านหินเพื่อป้องกันการทำลายจากสภาวะแวดล้อมทะเล และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

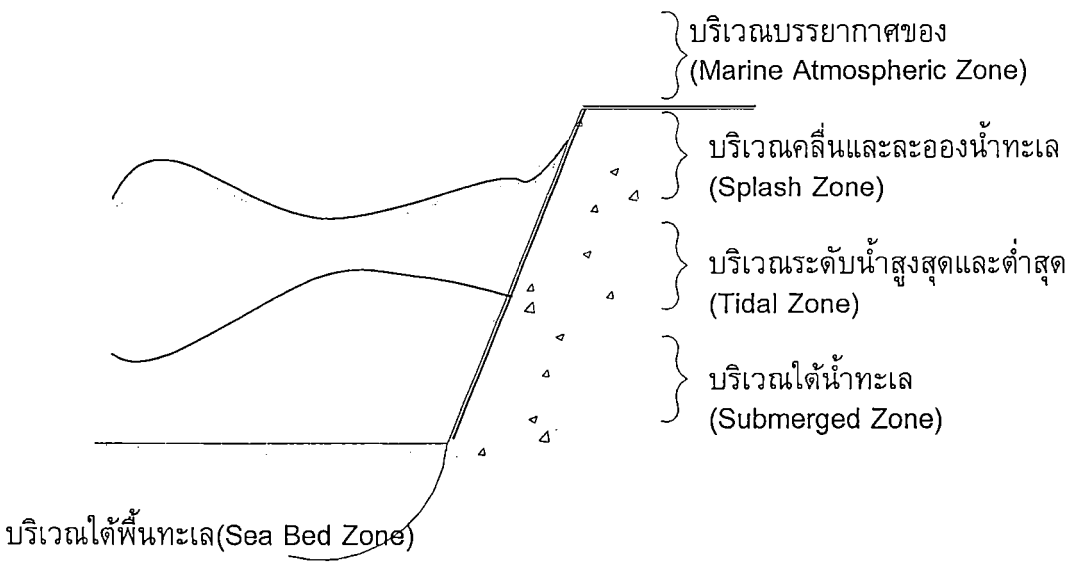
2.1 คอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเล

โครงสร้างของคอนกรีตในน้ำทะเลและบริเวณชายฝั่งเป็นส่วนที่ต้องเผชิญกับสภาพแวดล้อมที่แปรปรวนส่งผลให้การกัดกร่อนเกิดขึ้นค่อนข้างสูง (ดังแสดงในรูปที่ 2.1) โดยในการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเล ส่วนใหญ่จะมีการทำลายเกิดขึ้นค่อนข้างสูงในคอนกรีตที่มีการเสริมเหล็ก ทั้งนี้เพราะการทำลายจะเกิดจากการกัดกร่อนเหล็กเสริม ที่มีเกลือคลอไรด์เป็นตัวเร่งให้เกิดการทำลายที่เร็วขึ้น (Mehta, 1991)

รูปที่ 2.1 ลักษณะการกัดกร่อนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเล

รูปที่ 2.2 แสดงบริเวณบรรยากาศของทะเล (Marine Atmospheric Zone) เป็นบริเวณที่ไม่ได้รับแรงกระแทกและสัมผัสกับน้ำทะเลโดยตรงอาจอยู่ห่างไกลจากทะเลหลายกิโลเมตร ความเสียหายที่เกิดขึ้นจะเป็นผลเนื่องจากเกลือคลอไรด์ที่มีในอากาศ เกิดการพัดพาโดยลมสัมผัสกับเนื้อคอนกรีต เกิดการแพร่ของอิออนคลอไรด์ (Chloride Ions) เข้าไปในเนื้อคอนกรีตในบริเวณที่มีรอยแตกร้าวหรือมีความพรุน ส่งผลให้เกิดสนิมในเหล็กเสริมเร็วขึ้นและเกิดการขยายตัวดันคอนกรีตให้แตกร้าวเสียหาย บริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash Zone) บริเวณนี้จะได้รับแรงกระแทกค่อนข้างแรงส่งผลให้เกิดรอยปริแตกเล็กๆทำให้คลอไรด์และความชื้นซึมผ่านเข้าไปถึงเหล็กเสริมส่งผลให้เกิดสนิมในเหล็กเสริมได้ค่อนข้างสูง เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีออกซิเจนอยู่เป็นจำนวนมาก ประกอบกับการซึมผ่านของ

คลอไรด์ที่เร่งให้เกิดสนิมเหล็กมากขึ้น โดยความเสียหายที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้จะเป็นผลเนื่องจากคลอไรด์เป็นหลัก และการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตจะมีน้อยมาก บริเวณที่สัมผัสกับน้ำทะเลในลักษณะเปียกและแห้งสลับกัน (Tidal Zone) จะได้รับผลกระทบทั้งจากคลื่น กรวด ทราย ที่กระแทก ตลอดจนผลกระทบจากการกัดกร่อนเนื่องจากกระบวนการทางเคมีทั้งคลอไรด์และซัลเฟต ซึ่งน้ำทะเลจะเข้าสู่เนื้อคอนกรีตที่แห้งโดยการซึมผ่าน(Absorption) จนคอนกรีตอยู่ในสภาพอิ่มตัวและเมื่อสภาพแวดล้อมเปลี่ยนเป็นแห้งจะมีคราบเกลือที่ติดผิวคอนกรีตโดยเกลือของสารประกอบต่างๆ เมื่ออยู่ในสถานะของแข็งจะไม่เป็นอันตรายต่อโครงสร้างคอนกรีต แต่เมื่อกลับมาสภาพเปียกอีกครั้ง จะได้เป็นสารละลายคลอไรด์ซึ่งมีความเข้มข้นมากขึ้นและแพร่เข้าไปในเนื้อคอนกรีตมากขึ้นซึ่งเมื่อน้ำลดคอนกรีตจะสัมผัสกับออกซิเจนและคลอไรด์ที่มีเข้มข้นอยู่แล้วในเนื้อคอนกรีตจะเร่งให้เกิดสนิมเหล็กมากขึ้น ความเสียหายที่เกิดขึ้นในสภาพแวดล้อมแบบนี้มีความรุนแรงมากขึ้นในกรณีที่ช่วงเวลาที่คอนกรีตแห้งนาน และนอกจากนั้นบริเวณนี้ยังได้รับผลกระทบจากการกัดกร่อนของซัลเฟตอีกด้วย ดังนั้นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นต่อโครงสร้างในสภาวะนี้ค่อนข้างสูง ซึ่งการศึกษาถึงกระบวนการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นตลอดจนการศึกษาถึงแนวทางในการป้องกันและต้านทานการกัดกร่อนเป็นสิ่งที่ต้องให้ความสำคัญและพัฒนาข้อมูลให้ชัดเจนมากขึ้น ส่วนบริเวณที่อยู่ใต้ผิวน้ำ (Submerged Zone) การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นจะมีความรุนแรงน้อยกว่า เนื่องจากไม่ได้รับผลกระทบที่รุนแรงจากคลื่นประกอบกับการซึมผ่านของออกซิเจนเข้าไปเร่งการเกิดสนิมในเหล็กเสริมมีน้อยมาก ถึงแม้ความเข้มข้นของคลอไรด์จะมีสูงแต่ถ้าไม่ได้สัมผัสกับออกซิเจนก็จะไม่เกิดสนิมในเหล็กเสริม แต่การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเป็นผลเนื่องจากซัลเฟตที่เกิดปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์โดยตรง



รูปที่ 2.2 ชนิดของสิ่งแวดล้อมทะเล (Mehta, 1991)

2.2 กลไกการทำลายของสภาวะแวดล้อมทะเลต่อคอนกรีต (Broomfield, 1996)

โครงสร้างของคอนกรีตในน้ำทะเลและบริเวณชายฝั่งเป็นส่วนที่ต้องเผชิญกับสภาพแวดล้อมที่แปรปรวนส่งผลให้การกัดกร่อนเกิดขึ้นค่อนข้างสูงไม่ว่าจะเป็นการกัดกร่อนเนื่องจากสภาพแวดล้อมทางกายภาพโดยการได้รับแรงกระแทกจากคลื่น ทราย กรวดโดยตรง ซึ่งส่งผลให้เกิดการสึกกร่อนที่ผิวคอนกรีตหรือการกัดกร่อนที่เกิดจากกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นเนื่องจากสารประกอบเคมีซึ่งเป็นองค์ประกอบในน้ำทะเล โดยการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณจะมีความรุนแรงที่แตกต่างกันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบในน้ำทะเลและสภาพแวดล้อมทางกายภาพ เช่น ความแปรปรวนของระดับน้ำทะเล ความแรงและการพัดพาของคลื่น ตลอดจนสิ่งแวดล้อมภายนอกที่มีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการกัดกร่อนทางเคมีต่อโครงสร้างคอนกรีต โดยการทำลายสามารถแบ่งเป็น การทำลายทางกายภาพ และทางเคมีดังนี้

2.2.1 การทำลายทางกายภาพ

การทำลายเนื่องจากสภาวะทางกายภาพ เช่น การสึกกร่อน อุณหภูมิ การตกผลึกของเกลือและการเสื่อมสภาพเนื่องจากสาเหตุทางชีวภาพ เป็นต้น

ก) การสึกกร่อน (Abrasion-Erosion)

ความต้านทานการสึกกร่อนของคอนกรีตหมายถึงความสามารถของผิวหน้าของคอนกรีตที่จะทนทานต่อการขัดสีหรือเสียดสีของวัตถุอื่น โดยทั่วไปโครงสร้างคอนกรีตอาจถูกกระทำให้สึกกร่อนทางกลได้เป็น 3 ลักษณะหลัก คือ การขัดสี (Abrasion) การชะด้วยกระแสน้ำและกรวดทราย (Erosion) และ การแตกตัวของฟองอากาศในน้ำ (Cavitation) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) การขัดสี (Abrasion) ผิวคอนกรีตจะสึกกร่อนจากการขัดสีในหลายลักษณะเช่น การเลื่อนไถล (Sliding) การขัดถู ขูด ขีด ครูด (Scraping) การกระทบกระแทกแบบเฉี่ยว (Percussion) การขัดสีที่ถ่ายทอดจากยางล้อรถยนต์ไปสู่ผิวถนนจากการเร่งความเร็ว ชะลอความเร็วหรือห้ามล้อ เป็นต้น

2) การชะด้วยกระแสน้ำและกรวดทราย (Erosion) เป็นการสึกกร่อนของผิวคอนกรีตที่เกิดขึ้นจากกระแสน้ำที่ไหลผ่าน หรือเม็ดกรวดทรายที่ถูกพัดพามาด้วยกับกระแสน้ำ อัตราการสึกกร่อนของผิวคอนกรีตจะมีความรุนแรง ถ้ากระแสน้ำมีความเร็วสูง รูปร่างของกรวดทรายมีเหลี่ยมคม มีขนาดใหญ่ มีความแข็งมาก และมีน้ำหนักมาก ตัวอย่างของโครงสร้างที่มักเกิดปัญหาการชะด้วยกระแสน้ำและกรวดทราย เช่น ผิวคอนกรีตท้ายเขื่อน ทางน้ำล้น คอนกรีตดาดคลอง และทางน้ำต่างๆ และโครงสร้างบริเวณสภาวะแวดล้อมทะเล เป็นต้น

3) การแตกตัวของฟองอากาศ (Cavitations) เป็นการสึกกร่อนของผิวคอนกรีตที่เกิดการแตกตัวหรือระเบิดของฟองอากาศที่อยู่ในน้ำ ซึ่งจะมีความถี่สูง ฟองอากาศเหล่านี้จะเกิดขึ้นจากการไหลของกระแสน้ำที่มีความเร็วสูง ลักษณะของการสึกกร่อนก็จะเป็นลักษณะของการเกิดหลุมบ่อที่มีขนาดเล็กบนพื้นผิวของคอนกรีต และถ้ารุนแรงก็สามารถที่จะทำให้มวลรวมหลุดออกจากพื้นผิวคอนกรีตได้

ลักษณะของการสึกกร่อนของคอนกรีตจะเกิดขึ้นที่ผิวหน้า และจะมีความแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมที่โครงสร้างคอนกรีตสัมผัสอยู่ ในการทดสอบคอนกรีตเพื่อหาความต้านทานต่อการสึกกร่อนเป็นเรื่องยาก เนื่องจากความเสียหายจากการสึกกร่อนที่เกิดขึ้นมาจากหลายสาเหตุขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมที่คอนกรีตสัมผัส ตลอดจนคุณสมบัติและคุณภาพของมวลรวม วิธีการตบแต่งผิวหน้า การใช้วัสดุเคลือบผิวหน้า และการบ่มคอนกรีต ก็มีผลต่อการต้านทานการสึกกร่อนของคอนกรีตเช่นกัน

ข) การแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิ (Temperature crack)

คอนกรีตที่สัมผัสกับอุณหภูมิสูง หรืออากาศร้อนมากๆ ส่งผลให้คอนกรีตแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้งได้ โดยจะพบชัดเจนในคอนกรีตที่เป็นแผ่นบางและมีความชื้นที่ผิวต่ำ เช่น พื้นคอนกรีตทั่วไป งานถนนคอนกรีตเสริมเหล็ก งานผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นต้น โดยลักษณะการทำลายเกิดจากอากาศที่ร้อนและมีความชื้นต่ำ จะทำให้น้ำระเหยออกจากโพรงในซีเมนต์เพสต์ ทำให้คอนกรีตเกิดการหดตัวและแตกร้าวได้ (รายละเอียดกล่าวในหัวข้อการหดตัวแบบแห้ง) นอกจากนั้นที่อุณหภูมิสูงปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้คอนกรีตเกิดการก่อตัวและแข็งตัวเร็วขึ้น เป็นผลให้กำลังของคอนกรีตที่อายุมากขึ้นไม่สูงเท่าที่ควร เนื่องจากโครงสร้างของซีเมนต์ที่ก่อตัวอย่างรวดเร็วจะไม่สม่ำเสมอและเป็นผลึกที่ไม่แข็งแรง ในกรณีที่คอนกรีตสัมผัสกับอากาศที่ร้อนมาก ทำให้มีการระเหยของน้ำออกจากคอนกรีตอย่างรวดเร็ว โดยอุณหภูมิและความชื้นที่แตกต่างกันมากในช่วงกลางวัน เป็นผลทำให้เกิดการรั้งภายใน (internal restrain) เนื้อคอนกรีตอย่างมาก เพราะการยืดหดตัวของผิว และเนื้อคอนกรีตภายในจะไม่เท่ากันส่งผลให้เกิดการแตกร้าวได้ (Neville, 1996)

การเทคอนกรีตจำนวนมากที่เรียกว่า คอนกรีตหลา (mass concrete) เช่น ในการทำตอม่อขนาดใหญ่ (มีความหนามากกว่า 0.5 เมตร) และการทำเขื่อน ความร้อนจากปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้ภายในคอนกรีตมีอุณหภูมิสูงมาก และทำให้เกิดการแตกร้าวจากอุณหภูมิ (thermal cracking) ได้ ความแตกต่างของอุณหภูมิของคอนกรีตจะเกิดขึ้นถ้าไม่มีการหุ้มคอนกรีตด้วยฉนวน อุณหภูมิภายในคอนกรีตจะสูงกว่าอุณหภูมิที่ผิวหรือรอบนอก เนื่องจากที่ผิวมีการระบายความร้อนได้เร็ว คอนกรีตภายในจะพยายามขยายตัวโดยมีคอนกรีตภายนอกต้านทานไว้ ทำให้เกิดแรงดึงรอบนอกขณะที่คอนกรีตยังไม่แข็งแรงพอที่จะรับแรงดึงเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ แม้ว่าการคืบอาจสามารถช่วยกระจายและลดแรงที่เกิดขึ้นได้บ้าง ถึงอย่างไรก็ตามแรงดึงอาจสูงพอที่ทำให้เกิดรอยแตกร้าวที่ผิวนอกของคอนกรีตได้ และเมื่อคอนกรีตเริ่มเย็นลง คอนกรีตภายในจะหดตัวมากกว่าคอนกรีตภายนอกและจะถูกคอนกรีตรอบนอกต้านทานไว้ทำให้เกิดแรงดึงภายในขึ้น การกระจายและลดแรงจากการคืบเกิดขึ้นได้ไม่มากเนื่องจากคอนกรีตแข็งแรงขึ้น ดังนั้นจึงทำให้คอนกรีตภายในแตกร้าวและเสียหายได้ โดยพบว่าในคอนกรีตที่มีอุณหภูมิต่างกันเกิน 20°ซ จะส่งผลให้เกิดการแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิได้โดยที่ยังไม่ได้รับแรงใดๆ โดยการแตกร้าวจะเกิดในช่วงอายุ 1-3 วัน แต่ไม่

เกิน 2 สัปดาห์ ซึ่งอาจสังเกตเห็นรอยแตกร้าวได้หรือไม่ก็ได้ การแตกร้าวนี้มีผลต่อการรับแรงและความคงทนในระยะยาว

คอนกรีตที่สัมผัสกับอุณหภูมิในสภาพแวดล้อมจริงที่มีการแปรเปลี่ยนมากๆ จะส่งผลให้เกิดความเสียหายอย่างชัดเจนกับคอนกรีต โดยพบว่าคอนกรีตที่อยู่ในสภาพแวดล้อมทะเล ที่มีอุณหภูมิที่ผิวของน้ำทะเลแปรเปลี่ยนอยู่ในช่วง -2 °ซ (ทำให้น้ำทะเลถึงจุดเยือกแข็ง) และ 30 °ซ (Mehta, 1991) จะทำให้เกิดการแข็งตัวและละลายตัวของน้ำในคอนกรีต (freeze-thaw cycles) ส่งผลให้คอนกรีตแตกร้าวเสียหายได้ โดยในช่วงที่อุณหภูมิสูงน้ำในคอนกรีตเป็นของเหลว และเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงจนถึงจุดเยือกแข็ง น้ำในคอนกรีตจะแข็งตัวและมีปริมาตรเพิ่มขึ้น ดันคอนกรีตให้เกิดการแตกร้าวได้เสียหายได้ โดยในงานวิจัยที่ผ่านมา (Achintya & Prasad, 2003) พบว่า ผลกระทบของการละลายตัวและแข็งตัวของน้ำที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจากสภาพแวดล้อมภายนอก ส่งผลเสียหายอย่างชัดเจนในคอนกรีตที่แช่อยู่ใต้น้ำมากกว่าคอนกรีตที่อยู่เหนือน้ำ ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำคอนกรีตจะอิ่มตัวด้วยน้ำและมีน้ำในโพรงเป็นจำนวนมาก เมื่ออุณหภูมิต่ำลงทำให้น้ำแข็งตัว น้ำในโพรงคอนกรีตที่มีมากก็จะขยายตัวและดันคอนกรีตให้เกิดการแตกร้าวเสียหายอย่างรุนแรงได้ และพบว่าความรุนแรงนี้จะเพิ่มขึ้นเป็น 3-4 เท่า เมื่อคอนกรีตดังกล่าวอยู่ในน้ำทะเล

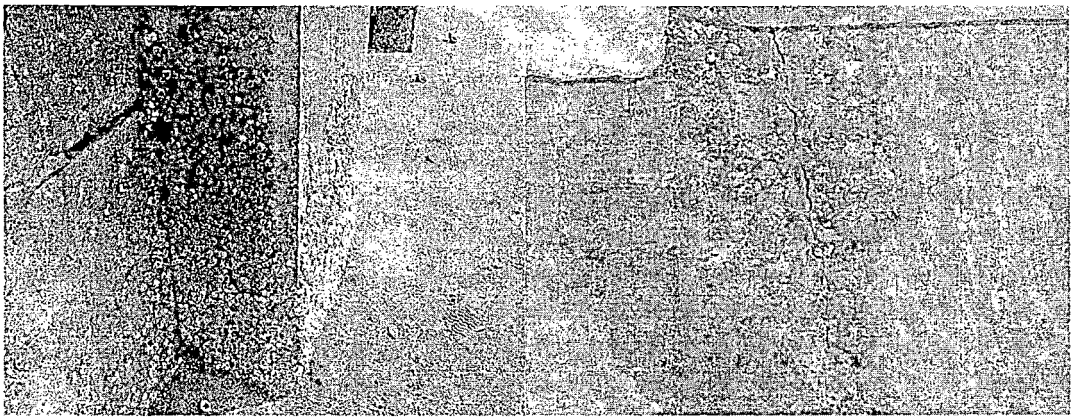
ค) การตกผลึกของเกลือ (Salt Crystallization)

การแตกร้าวในคอนกรีตเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น การตกผลึกของเกลือที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวเสียหายได้ ซึ่งเกลือต่างๆที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีต เช่น โซเดียมคลอไรด์ โซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมคลอไรด์ แมกนีเซียมซัลเฟต เป็นต้น

กลไกการทำลายเนื่องจากการตกผลึกของเกลือในคอนกรีตเกิดจากเกลือต่างๆที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมภายนอก เช่น น้ำทะเล ดินเค็ม หรือแหล่งน้ำเสียต่างๆ แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีต ซึ่งเกลือต่างๆดังที่กล่าวมานอกจากจะทำลายเหล็กเสริมในคอนกรีตแล้ว เกลือเหล่านี้จะมีการตกผลึกและส่งผลทำให้คอนกรีตแตกร้าวได้ การตกผลึกของเกลือจะเกิดขึ้นเมื่อน้ำละเหยออกจากผิวของคอนกรีต โดยเกลือที่ตกผลึกจะถูกดันเข้าไปในโพรงของคอนกรีต และก่อให้เกิดการแตกร้าวเสียหายได้ ในสภาวะแวดล้อมทะเลในบริเวณน้ำขึ้นลงจะส่งผลต่อการทำลายเนื่องจากการตกผลึกของเกลือค่อนข้างชัดเจน เนื่องจากในช่วงที่เปียกความเข้มข้นของเกลือที่ผิวคอนกรีตมีมาก หรืออยู่ในสภาพอิ่มตัว และเมื่อน้ำลงคอนกรีตอยู่ในสภาวะแห้งน้ำละเหยออกไปจะเกิดการตกผลึกที่ผิวคอนกรีต และเมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพเปียกอีกครั้งความเข้มข้นของเกลือที่ผิวคอนกรีตก็จะมีมากขึ้น และมีการตกลผลึกที่ชัดเจนเมื่ออยู่ในสภาวะแห้งอีกครั้ง ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นของเกลือที่ผิวคอนกรีตมีสูง ก็จะส่งผลให้เกิดการทำลายในคอนกรีตได้มากขึ้น

ง) การเสื่อมสภาพเนื่องจากสาเหตุทางชีวภาพ (Biological degradation)

การเสื่อมสภาพเนื่องจากสาเหตุทางชีวภาพของคอนกรีตจะเกิดขึ้นจากสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กทั้งพืชและสัตว์ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่คอนกรีตสัมผัส เช่น โครงสร้างคอนกรีตในน้ำทะเล หรือในแหล่งน้ำเสีย เป็นต้น รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างคอนกรีตที่เสื่อมสภาพเนื่องจากสาเหตุทางชีวภาพ โดยทั่วไปแล้วการเสื่อมสภาพของคอนกรีตเนื่องจากสาเหตุทางชีวภาพเกิดได้ 2 ลักษณะ คือการทำลายโดยตรงทางกายภาพของสิ่งมีชีวิต เช่น รา ตะไคร่น้ำ รากพืช หอย เพรียง เป็นต้น แต่ความเสียหายที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้จะมีความรุนแรงไม่มากนักเนื่องจากเป็นผลกระทบที่ผิวของคอนกรีตมากกว่า แต่ด้วยคุณสมบัติของคอนกรีตที่มีความเป็นด่าง แข็ง และแน่น การทำลายในลักษณะนี้ไม่เห็นผลชัดเจน แต่ทั้งนี้ก็จะส่งผลเกื้อหนุนให้การทำลายในลักษณะอื่นๆได้ง่ายขึ้น ลักษณะที่สองเป็นการทำลายโดยทางอ้อมซึ่งมีความซับซ้อนมากขึ้นโดยเกิดจากสิ่งมีชีวิตพวกรา ตะไคร่น้ำ และแบคทีเรีย ที่สามารถย่อยสลายซัลเฟตโดยจะเปลี่ยนซัลเฟตในสภาพแวดล้อมให้กลายเป็นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ซึ่งละลายในความชื้นในผิวของคอนกรีตกลายเป็นกรดซัลฟูริค (H_2SO_4) ที่ส่งผลต่อการทำลายคอนกรีตได้ ซึ่งการย่อยสลายจะเกิดขึ้นได้เร็วในสภาวะที่ไร้ออกซิเจน



รูปที่ 2.3 โครงสร้างคอนกรีตที่เสื่อมสภาพเนื่องจากสาเหตุทางชีวภาพ

2.2.2 การทำลายทางเคมี

ก) การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ (Chloride induced corrosion) (Neville, 1996)

- กลไกการกัดกร่อน

โดยทั่วไปแล้ว สารประกอบคลอไรด์จะไม่ส่งผลที่เป็นอันตรายกับเนื้อของคอนกรีตที่ไม่มีเหล็กเสริม ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการใช้น้ำที่มีปริมาณของคลอไรด์ผสมในคอนกรีตกลับส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดที่สูงขึ้น แต่การใช้งานของคอนกรีตในโครงสร้างทั่วไปจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใส่เหล็กเสริมเข้าไปในคอนกรีตเพื่อให้รับแรงดึง ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตรับแรงดึงได้น้อยมาก และการที่ในคอนกรีตมีเหล็กเสริมนี้เองจึงส่งผลให้การทำลายเนื่องจากคลอไรด์ต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีความชัดเจนและรุนแรงมาก ทั้งนี้เนื่องจากการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์

แตกต่างจากการกัดกร่อนทางเคมีอื่นตรงที่ คลอไรด์ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมและคอนกรีตบริเวณรอบๆ เหล็กเสริมเท่านั้นที่เสียหายเนื่องจากการขยายตัวของเหล็กเสริม ทำให้ดันคอนกรีตให้เกิดการแตกร้าว ตลอดจนความสามารถในการรับแรงของเหล็กเสริมคอนกรีตต่ำลงและเป็นสาเหตุหลักที่ทำลายองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดฟิล์มบางๆ ของ γ-Fe_2O_3 เคลือบผิวเหล็กไว้ และฟิล์มนี้ทำหน้าที่ป้องกันการเกิดสนิมเหล็ก อย่างไรก็ตามอิออนของคลอไรด์สามารถทำลายฟิล์มนี้ได้ และเมื่อมีน้ำและก๊าซออกซิเจนตรงบริเวณเหล็กเสริมที่ไม่มีฟิล์มป้องกันอยู่ เหล็กจะเป็นสนิม

การเกิดสนิมในเหล็กเกิดจากความต่างศักย์ทางไฟฟ้าของเหล็กเสริมในคอนกรีต ทำให้เกิดเซลล์ไฟฟ้าเคมีขึ้น มีขั้วบวก (Anode) และขั้วลบ (Cathode) เชื่อมกันโดยน้ำซึ่งมีคลอไรด์ในโพรงของซีเมนต์ ทำหน้าที่เป็นสื่ออิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ประจุไฟฟ้าบวกเฟอร์รัสอิออน Fe^{++} ที่ขั้วบวกจะวิ่งไปสู่สื่ออิเล็กโทรไลต์ ขณะที่อิเล็กตรอนที่มีประจุไฟฟ้าลบ e^- วิ่งตามเหล็กเสริมไปที่ขั้วลบ อิเล็กตรอนเหล่านี้จะรวมกับน้ำและออกซิเจนทำให้เกิดไฮดรอกไซด์อิออน $(OH)^-$ ซึ่งวิ่งผ่านสื่ออิเล็กโทรไลต์ไปรวมกับ Fe^{++} ทำให้เกิด $Fe(OH)_2$ และทำปฏิกิริยาออกซิเดชั่นจนทำให้เกิดสนิม ดังรูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาดังกล่าว แสดงดังสมการที่ 2.1 ถึง 2.4 (Neville, 1996)

Anodic reactions:

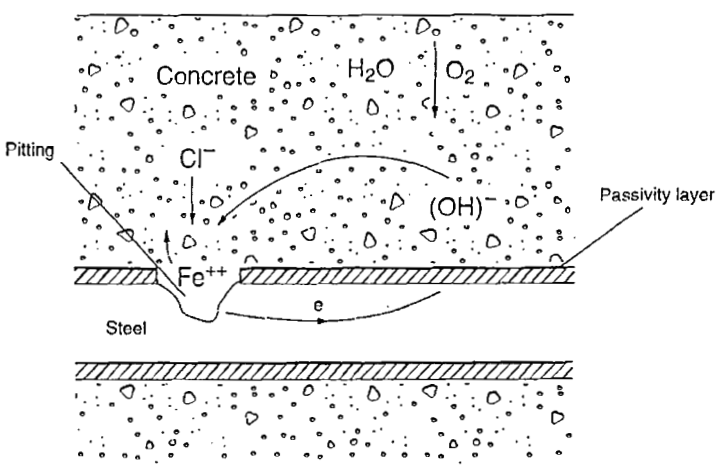
$$Fe \rightarrow Fe^{++} + 2e^- \qquad (2.1)$$

$$Fe^{++} + 2(OH)^- \rightarrow Fe(OH)_2 \quad \text{(ferrous hydroxide)} \qquad (2.2)$$

$$4Fe(OH)_2 + 2H_2O + O_2 \rightarrow 4Fe(OH)_3 \text{ (ferric hydroxide)} \qquad (2.3)$$

Cathodic reaction:

$$4e^- + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4(OH)^- \qquad (2.4)$$



รูปที่ 2.4 การเกิดสนิมเหล็กเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเมื่อมีคลอไรด์ในคอนกรีต (Neville, 1996)

จากสมการข้างต้น เมื่อออกซิเจนถูกใช้จนหมดไป น้ำก็สามารถก่อปฏิกิริยาขึ้นมาใหม่ได้ 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 ฟิล์มบางจะถูกเจาะ โดยคลอไรด์อิออนจะกระตุ้นให้ผิวเหล็กเสริมกลายสภาพเป็นขั้วบวก พื้นผิวด้านที่ไม่ถูกกระตุ้นก็จะมีสภาพเป็นขั้วลบ ดังสมการที่ 2.5 และ 2.6

$$Fe^{++} + 2Cl^{-} \rightarrow FeCl_2 \qquad (2.5)$$

$$FeCl_2 + 2H_2O \rightarrow Fe(OH)_2 + 2HCl \qquad (2.6)$$

เนื่องจาก คลอไรด์อิออนเป็นเป็นตัวก่อให้เกิดปฏิกิริยาอีกครั้ง ดังนั้นสนิมเหล็กที่เกิดขึ้นจึงไม่มีคลอไรด์เป็นองค์ประกอบ แม้ว่าเฟอรัสคลอไรด์จะเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเกิดปฏิกิริยาเซลล์ไฟฟ้าเคมี มีความจำเป็นต้องใช้น้ำในโพรงของคอนกรีตเป็นตัวกลางเชื่อมระหว่างขั้วบวกและขั้วลบ ระบบโพรงของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวในคอนกรีตเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการกัดกร่อน เนื่องจากเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะเกิดขึ้นได้ต้องอาศัยน้ำที่อยู่ในโพรงเป็นสื่ออิเล็กโทรไลต์

การกัดกร่อนที่เกิดขึ้น ทำให้เหล็กเสริมเกิดการขยายตัว ปริมาตรเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดรอยแตก (Cracking) การหลุดร่อน (Spalling)ไปจนถึงคอนกรีตกับเหล็กเสริมไม่มีแรงยึดเหนี่ยวต่อกัน (Delamination) ในขณะที่เกิดการกัดกร่อนพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมที่ทำหน้าที่เป็นขั้วบวกจะมีขนาดเล็กลง เนื่องจากเกิดการสูญเสียประจุไฟฟ้า ทำให้เกิดรูขนาดเล็กบนเหล็กเสริม

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

คอนกรีตอาจมีคลอไรด์เนื่องจากการใช้ส่วนผสมของวัสดุที่มีคลอไรด์ เช่น ใช้น้ำ ทราย หิน ปูนซีเมนต์ หรือสารเคมีผสมเพิ่มที่มีคลอไรด์ปนอยู่ ดังนั้นจึงต้องทำการตรวจสอบว่ามีปริมาณคลอไรด์อยู่ในปริมาณที่ไม่ทำให้เกิดอันตรายต่อคอนกรีต ว.ส.ท. ได้กำหนดปริมาณคลอไรด์อิออนที่ละลายน้ำได้ในคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อป้องกันการเกิดสนิมต้องมีค่าไม่เกินพิกัดตามตารางที่ 2.1 โดยคลอไรด์อิออนในคอนกรีตอัดแรงจะกำหนดไว้ค่อนข้างต่ำคือไม่เกินร้อยละ 0.06 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตอัดแรงต้องใช้เหล็กเสริมที่มีกำลังสูง และการทำลายพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมเพียงเล็กน้อยก็ส่งผลต่อการรับแรงของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กค่อนข้างชัดเจน ดังนั้นจึงยอมให้ปริมาณคลอไรด์ที่เข้าไปสัมผัสค่อนข้างน้อย เพื่อลดความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมในเหล็กเสริม

ตารางที่ 2.1 ปริมาณสูงสุดของคลอไรด์อิออนเพื่อป้องกันการเกิดสนิม (ว.ส.ท.)

ชนิดขององค์อาคาร	ปริมาณสูงสุดของคลอไรด์อิออน (Cl^-) ที่ละลายน้ำได้ในคอนกรีต (ร้อยละโดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์)
คอนกรีตอัดแรง	0.06
คอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสกับคลอไรด์ในขณะใช้งาน	0.06
คอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแห้งหรือที่มีการป้องกันความชื้นในขณะใช้งาน	1.00
งานก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอื่นๆ	0.06

-ปริมาณคลอไรด์ในปฏิภาคส่วนผสม

ปริมาณคลอไรด์ที่พบในคอนกรีต อาจมีสาเหตุมาจากการใช้มวลรวมที่ไม่สะอาด หรือคอนกรีตนั้นสัมผัสกับน้ำทะเล น้ำกร่อย หรือการใช้สารเคมีผสมเพิ่มที่มีคลอไรด์เป็นองค์ประกอบ จากสาเหตุข้างต้นทำให้ มาตรฐานการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กของประเทศต่างๆ อนุญาตให้มีปริมาณคลอไรด์ขั้นต่ำไม่เกินค่าที่กำหนด เช่น BS 8110 Part 1 กำหนดปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride-ion) ในคอนกรีตเสริมเหล็กไม่เกินร้อยละ 0.40 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ สำหรับ ACI 318-89 ใช้ปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในน้ำ (Water-soluble Chloride ions) เป็นตัวหลักในการพิจารณา โดยกำหนดให้ปริมาณคลอไรด์ไม่ควรเกินร้อยละ 0.15 โดยน้ำหนักของของปูนซีเมนต์ โดยหลักใหญ่ใจความ ค่าทั้งสองนี้ ไม่มีความแตกต่างกัน เนื่องจาก ปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในน้ำเป็นส่วนหนึ่งของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด บางครั้งคลอไรด์ที่ละลายในน้ำ เรียกว่า คลอไรด์อิสระ (Free chloride)

ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดสามารถหาได้โดยวิธีทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในกรด (Acid-soluble chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C 1152-90 หรือ BS 1881 Part 124

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

- การซึมผ่านของคลอไรด์

ปัญหาการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์สามารถเกิดขึ้นได้เสมอ เมื่อคลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้ามาในคอนกรีตโดยเฉพาะในกรณีที่คอนกรีตสัมผัสกับน้ำทะเล คลอไรด์ที่พบมีแหล่งที่มาจากน้ำทะเลนั่นเอง โดยคลอไรด์จะตกค้างบนผิวหน้าคอนกรีตในรูปของไอเกลือของน้ำทะเลที่มีขนาดเล็กซึ่งถูกพัดพามากับคลื่นและกระแสลม หรืออาจอยู่ในรูปของละอองน้ำทะเล ซึ่งทำให้คอนกรีตมีสภาพเปียกชื้นเนื่องจากละอองน้ำทะเล ไอของคลอไรด์สามารถพัดพาไปได้ไกลถึง 2 กิโลเมตร ตามรายงานของ (Nireki, 1987) แต่การเคลื่อนที่ของไอคลอไรด์ขึ้นอยู่กับกระแสลมและสภาพภูมิประเทศ นอกจากนี้ น้ำใต้ดิน หรือน้ำกร่อย (Brackish groundwater) ที่สัมผัสกับคอนกรีต ก็ล้วนเป็นแหล่งที่มาของคลอไรด์ อย่างไรก็ตาม คลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้ามาในคอนกรีตได้ โดยอาศัยน้ำเป็นตัวนำพา และเมื่อคลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้ามาในคอนกรีตอย่างต่อเนื่อง มีผลทำให้บริเวณผิวเหล็กเสริมเกิดการสะสมของคลอไรด์ไอออนในปริมาณที่สูง

เมื่อคอนกรีตจมอยู่ใต้น้ำทะเลตลอดเวลา ก็ย่อมเกิดการซึมผ่านของคลอไรด์ แต่บริเวณใต้น้ำทะเลมีความเข้มข้นของออกซิเจนน้อยและอัตราการแพร่ของออกซิเจนเข้าไปในคอนกรีตต่ำมาก เนื่องจากช่องว่างภายในคอนกรีตเป็นช่องว่างที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ทำให้ไม่มีออกซิเจนที่จะไปรวมตัวกับน้ำและอิเล็กตรอนที่ขั้วลบ สำหรับคอนกรีตที่อยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง ปริมาณคลอไรด์ที่พบในคอนกรีตจะสูงขึ้น ซึ่งพบมากกับโครงสร้างที่ตั้งอยู่ตามชายฝั่ง ในสภาพภูมิอากาศร้อนชื้น

เมื่อคอนกรีตเริ่มสัมผัสกับน้ำทะเล คอนกรีตจะดูดซับน้ำทะเลจนกระทั่งคอนกรีตนั้นอิ่มตัวไปด้วยน้ำ และถ้าหากสภาพภายนอกคอนกรีตเปลี่ยนเป็นสภาพแห้ง ทิศทางการเคลื่อนที่ของน้ำจะเกิดการเคลื่อนที่ย้อนกลับ และระเหยออกจากคอนกรีต ทำให้เหลือเกลือตกค้างในช่องว่าง เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพเปียกอีกครั้ง ความเข้มข้นของเกลือบริเวณใกล้ผิวหน้าจะสูงขึ้น โดยเกลือที่มีความเข้มข้นสูงที่บริเวณผิวจะเกิดการถ่ายเทไปยังบริเวณภายในที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า เรียกการถ่ายเทชนิดนี้ว่า

การแพร่ ซึ่งในแต่ละรอบของการเปียกและแห้ง ส่งผลให้เกลือยิ่งสามารถแพร่เข้าไปในคอนกรีตและเข้าไปสู่บริเวณเหล็กเสริมมากขึ้น ความสามารถในการแพร่ของเกลือนั้น ขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกคอนกรีต และช่วงระยะเวลาที่คอนกรีตแห้งตัว โดยทั่วไป คอนกรีตจะเปียกได้เร็ว แต่จะแห้งได้ช้ากว่ามาก ทำให้ภายในของคอนกรีตไม่สามารถแห้งโดยสมบูรณ์ ดังนั้นการแพร่ของไอออนของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลตลอดเวลา จึงเกิดขึ้นได้ช้ากว่าคอนกรีตที่อยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว สภาวะเปียกสลับแห้งมีอิทธิพลโดยตรงต่อการซึมผ่านของคลอไรด์ รวมไปถึงการได้รับผลกระทบเนื่องจาก ทิศทางการพัดพาของน้ำทะเล กระแสลม อุณหภูมิ ความชื้น แสงอาทิตย์ และลักษณะการใช้งานของโครงสร้าง ซึ่งแต่ละส่วนของโครงสร้างก็ย่อมมีโอกาสสัมผัสกับสภาวะเปียกสลับแห้งที่แตกต่างกัน ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องพิจารณาถึงสภาพแวดล้อมที่ก่อให้เกิดความเสียหายเนื่องการกัดกร่อนของแต่ละส่วนของโครงสร้าง การที่คอนกรีตอยู่ในสภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียก เป็นการเร่งให้คลอไรด์สามารถซึมเข้าสู่คอนกรีตได้เร็วขึ้น ด้วยเหตุนี้ คอนกรีตบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal zone) จึงเกิดการกัดกร่อนของคลอไรด์น้อยกว่าบริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash zone) คอนกรีตที่สัมผัสน้ำทะเลเป็นบางครั้งบางคราวมีความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนเนื่องจากน้ำทะเล เช่น คอนกรีตบริเวณหลักสำหรับผูกเชือก คอนกรีตบริเวณหัวดับเพลิงที่ใช้น้ำทะเล พื้นที่โรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้น้ำทะเลในการซักล้าง เป็นต้น

-ปริมาณคลอไรด์ที่กระตุ้นให้เหล็กเริ่มเกิดสนิม

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

ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้พยามที่จะศึกษาปริมาณคลอไรด์ที่ส่งผลให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเริ่มเป็นสนิม หรือที่เรียกว่า ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (Threshold chloride) ซึ่งพบว่าปริมาณคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตธรรมดามีค่าในช่วงร้อยละ 0.3-0.5 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินจะมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา และพบว่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.1-0.3 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (Thomas, 1996) นอกจากนั้นในปริมาณคลอไรด์ที่เท่ากัน พบว่าคอนกรีตที่มีคลอไรด์ผสมอยู่ในปฏิภาคส่วนผสมตั้งแต่เริ่มต้น จะมีอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่มีคลอไรด์ผสมอยู่ในปฏิภาคส่วนผสมหลังจากคอนกรีตนั้นมีการใช้งานไปแล้ว

ในปริมาณคลอไรด์ที่เท่ากัน คอนกรีตที่มีคลอไรด์ผสมอยู่ในปฏิภาคส่วนผสมตั้งแต่เริ่มต้น จะเกิดอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมสูงกว่าคอนกรีตที่มีการซึมผ่านของคลอไรด์หลังจากคอนกรีตนั้นมีการใช้งานไปแล้ว (Lambert, et al., 1991)

ขณะที่เกิดกระบวนการซึมผ่านของคลอไรด์ ปริมาณคลอไรด์ที่สามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีต ขึ้นอยู่กับ ความสามารถในการต้านทานของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว, การเปลี่ยนแปลงความชื้น และปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้เป็นผลเนื่องจากลักษณะของการแช่คอนกรีต

ในกรณีทั่วไป ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดไม่ได้เป็นตัวบ่งชี้ถึงความรุนแรงของการกัดกร่อน แต่คลอไรด์ทั้งหมดสามารถจำแนกออกได้ 3 ส่วน คือ Chemically bound ซึ่งรวมอยู่ในผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยา ไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ อีกส่วนหนึ่ง คือ Physically bound ซึ่งติดอยู่ที่ผิวโพรงของเจล (Gel pores) และส่วนสุดท้าย เรียกว่า คลอไรด์อิสระ ซึ่งมีอิทธิพลต่อการเกิดสนิมของเหล็กอย่างสูง อย่างไรก็ตาม การกระจายตัวของคลอไรด์ไอออนทั้ง 3 ชนิด ไม่สามารถคงอยู่ได้ในสถานะเดิมตลอดเวลา แต่สามารถปรับเปลี่ยนเพื่อให้ไอออนทั้งหมดอยู่ในสภาวะสมดุล เช่น ตามปกติคลอไรด์อิสระจะพบตามน้ำที่อยู่ในช่องว่าง (Pore water) ของคอนกรีต ถ้าคลอไรด์อิสระมีปริมาณที่มากเกินความจำเป็น คลอไรด์อิสระนั้นจะกลายสภาพไปเป็นคลอไรด์ยึดจับ เพื่อให้ไอออนอื่นๆ อยู่ในสภาพสมดุล

-การดักจับคลอไรด์ไอออน

การดักจับคลอไรด์ไอออนอยู่ในรูปปฏิกิริยาเคมีกับ C_3A ก่อให้เกิดแคลเซียมคลอโรอลูมิเนต ($3CaO.Al_2O_3.CaCl_2.10H_2O$) บางครั้งเรียกว่า เกลือของฟรีเดล (Friedel's salt) ในลักษณะเดียวกัน คลอไรด์ก็ถูกดักจับโดย C_4AF ผลที่ได้คือแคลเซียมคลอโรเฟอร์ไรต์ ($3CaO.Fe_2O_3.CaCl_2.10H_2O$) ดังนั้นจากปฏิกิริยาข้างต้นคลอไรด์ไอออนจะถูกดักจับเมื่อปูนซีเมนต์มีปริมาณ C_3A สูง หรือ ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณมาก ด้วยเหตุนี้การใช้ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A สูง จะช่วยต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ได้ดี

ในขณะเดียวกัน การป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต มีความต้องการปริมาณ C_3A ต่ำ ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องพิจารณาถึงปริมาณ C_3A ในปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม เพื่อป้องกันความเสียหายจากซัลเฟต และเพื่อป้องกันอันตรายจากคลอไรด์ในน้ำทะเลควบคู่กันไป ขณะที่ปัจจุบันปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทสอง) ซึ่งสามารถทนซัลเฟตได้ปานกลาง และให้ความร้อนไม่สูงมากนัก เป็นอีกตัวเลือกในการนำไปใช้งาน บางครั้งการใช้ปูนซีเมนต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (Ground granulated blast furnace slag) ก็สามารถช่วยในการดักจับคลอไรด์ไอออน โดยอลูมิเนตที่มีอยู่ในตะกรัน (Slag) ทำหน้าที่ในการดักจับ แต่งานวิจัยที่ศึกษาในเรื่องนี้ยังมีจำนวนน้อย

การใช้ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A สูง มีข้อจำกัดตรงที่ เมื่อ C_3A มีปริมาณสูงย่อมทำให้เกิดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นสูง และทำปฏิกิริยากับซัลเฟตได้ง่าย พฤติกรรมดังกล่าวจึงกลายเป็นข้อด้อย และเป็นอันตรายต่อการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่ที่ต้องสัมผัสกับน้ำทะเล (Hoff, 1991)

มาตรฐานการออกแบบ เช่น BS 8110 Part 1 กำหนดปริมาณคลอไรด์ขั้นต่ำในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภททนซัลเฟต โดยมีแนวความคิดที่อยู่บนสมมติฐานที่ว่า คลอไรด์ส่งผลเสียต่อกระบวนการต้านทานซัลเฟต ซึ่งปัจจุบันได้มีการตรวจสอบสมมติฐานดังกล่าวแล้วว่าไม่ถูกต้อง เมื่อพิจารณาในเรื่อง ความเข้มข้นคลอไรด์ในน้ำที่อยู่ในช่องว่างของคอนกรีต พบว่าที่สภาวะสมดุล ความเข้มข้นของคลอไรด์จะขึ้นอยู่กับไอออนอื่นๆที่กระจายตัวอยู่ในน้ำตามช่องว่าง เช่น ที่ค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดค่าหนึ่ง ถ้าไฮดรอกไซด์ไอออนมีความเข้มข้นสูง คลอไรด์อิสระก็จะมีความเข้มข้นสูงด้วย ด้วยเหตุนี้ในบางครั้ง อัตราส่วนระหว่าง Cl^-/OH^- อาจใช้ในการพิจารณาถึงความก้าวหน้าของการกัดกร่อน แต่ไม่ได้เป็นค่ามาตรฐานในการพิจารณาเรื่องดังกล่าว อีกทั้งมีการพบว่า ปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ในปฏิภาคส่วนผสม เกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) จะมีปริมาณคลอไรด์อิสระสูงกว่า เกลือแคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) อย่างมีนัยสำคัญ นั่นหมายความว่า น้ำทะเลซึ่งมีเกลือโซเดียมคลอไรด์ละลายอยู่ จะเกิดกัดกร่อนของเหล็กเสริมอย่างแน่นอน

เนื่องจากปัจจัยที่มีความหลากหลาย สัดส่วนของคลอไรด์ยึดจับจึงมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงร้อยละ 50 ถึง 80 หรืออาจต่ำกว่าร้อยละ 50 ของคลอไรด์ทั้งหมด ดังนั้น อาจจะไม่เป็นความจริงที่คลอไรด์ยึดจับที่อยู่ในคลอไรด์ทั้งหมดจะไม่ก่อให้เกิดการกัดกร่อน จากงานวิจัยที่ผ่านมา (Tritthart, 1989; Tang และ Nilsson, 1993) พบว่า ผลของความต้องการสภาวะสมดุลของน้ำในโพรงคอนกรีตที่แตกต่างกัน ทำให้น้ำหนักของคลอไรด์ยึดจับซึ่งมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ไม่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ นอกจากนั้นในงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 30 และ 50 ในเพสต์ พบว่าเพสต์ที่แทนที่เถ้าถ่านหินร้อยละ 30 สามารถเก็บกักคลอไรด์ได้ดีกว่าซีเมนต์เพสต์ธรรมดา แต่การแทนที่ร้อยละ 50 ให้ผลตรงกันข้าม

- สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ (Chloride diffusion coefficient)

สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีตเป็นตัวบ่งชี้ถึงอัตราการแพร่ของคลอไรด์ที่เข้าไปทำอันตรายต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งส่งผลชัดเจนต่ออายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเล โดยทั่วไปแล้วการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ (D_c) สามารถทำได้หลายวิธี โดยแต่ละวิธีก็จะให้ค่าที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์จากเส้นกราฟแสดงการแทรกซึมของคลอไรด์ (Chloride penetration profile) นิยมใช้กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) (Mangat, et al.,1999; Chalee, et al., 2009 ; Thomas, et al., 2004) เนื่องจากสามารถคำนวณได้ง่ายและรวดเร็ว

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีตโดยใช้กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) โดยหลักที่ถูกต้องแล้ว การเคลื่อนที่ของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตต้องเป็นลักษณะของการแพร่ที่เป็นการเคลื่อนที่ของคลอไรด์จากบริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งในกรณีของการทดสอบปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล การเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไม่ได้อยู่ในลักษณะของการแพร่เพียงอย่างเดียว แต่อาจเกิดขึ้นได้หลายลักษณะควบคู่กันไป เช่น การแพร่ (Diffusion) แรงดันน้ำ (Hydrostatic pressure) และการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรงคาปิลลารี (Capillary suction) ของคอนกรีต เป็นต้น ดังนั้น การประยุกต์ใช้กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิคเพื่อหาสัมประสิทธิ์การแพร่กับการแทรกซึมของคลอไรด์ที่สภาวะดังกล่าวจะไม่นิยมเรียกว่า สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ (Chloride diffusion coefficient) แต่จะเรียกเป็นสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (Chloride penetration coefficient) หรือสัมประสิทธิ์การแพร่ปรากฏของคลอไรด์ (Apparent diffusion coefficient)

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์โดยใช้เส้นกราฟแสดงการแทรกซึมของคลอไรด์ เริ่มจากกฎการแพร่ข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) (Crank, 1975) ดังแสดงในสมการที่ 2.7

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_c \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \qquad (2.7)$$

เมื่อ D_c ในสมการที่ 2.7 เป็นค่าคงที่ คำตอบทั่วไปของสมการที่ 2.7 แสดงดังสมการที่ 2.8

$$C_{x,t} = C_o[1 - erf(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}})] \qquad (2.8)$$

เมื่อ $C_{x,t}$ = ปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึก x และระยะเวลาที่คอนกรีตสัมผัสกับเกลือคลอไรด์ t

x = ระยะจากผิวหน้าคอนกรีต (มม.)

t = ระยะเวลาที่คอนกรีตสัมผัสกับเกลือคลอไรด์ (วินาที)

C_o = ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต (chloride concentration at concrete surface) ที่ระยะเวลาแช่ t

D_c = สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ระยะเวลาแช่ t (มม^2/วินาที)

erf = ฟังก์ชันค่าผิดพลาด (Error function)

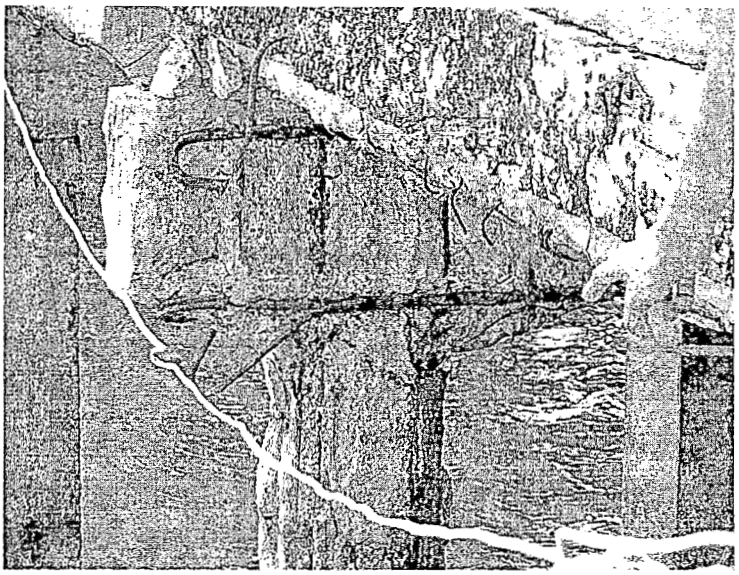
โดย $$erf(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n z^{(2n+1)}}{n!(2n+1)} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} (z - \frac{z^3}{3} + \frac{z^5}{10} - \frac{z^7}{42} + ...) \qquad (2.9)$$

ข) การกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต (Sulfate attack)

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

-กระบวนการกัดกร่อนของสารประกอบซัลเฟตต่อคอนกรีต (Neville, 1996)

เกลือซัลเฟตที่พบในธรรมชาติและเป็นอันตรายต่อโครงสร้างคอนกรีตได้แก่ โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) และแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วคอนกรีตจะมีส่วนผสมของมวลรวมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แต่มวลรวมจะมีผลในการทำปฏิกิริยากับซัลเฟตน้อยมาก ดังนั้นจึงนำมาเสนอเฉพาะกระบวนการกัดกร่อนที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับซัลเฟตเท่านั้น โดยจะนำเสนอเฉพาะสารประกอบซัลเฟตที่ส่งผลกระทบต่อการทำลายคอนกรีต และพบมากในสภาพแวดล้อมทั่วไป เช่น ในสภาวะแวดล้อมทะเล ในบริเวณดินเค็มเป็นต้น โดยในที่นี้จะกล่าวถึงกระบวนการกัดกร่อนเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต ซึ่งพบมากในสภาพแวดล้อมทั่วไปและมีผลต่อการทำลายโครงสร้างคอนกรีตค่อนข้างรุนแรง ซึ่งโดยภาพรวมแล้วการทำลายเนื่องจากซัลเฟตต่อคอนกรีตจะเป็นไปในลักษณะที่ทำให้คอนกรีตขยายตัว แตกร้าวและสูญเสียกำลังรับแรงเชิงกล รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะการทำลายของสารประกอบซัลเฟตต่อคอนกรีต



รูปที่ 2.5 ลักษณะการทำลายของสารประกอบซัลเฟตต่อคอนกรีต

1) กระบวนการกัดกร่อนของโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ต่อคอนกรีต

กระบวนการกัดกร่อนของสารประกอบซัลเฟตต่อคอนกรีตเริ่มต้นจากปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมซัลเฟตกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ทำให้ได้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($Na_2(OH)_2$) และแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4.\ 2H_2O$) หรือ ยิปซัม ตามสมการที่ (2.10) โดยยิปซัมจะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องกับ C-A-H ซึ่งได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น โดยปฏิกิริยาเกิดขึ้นดังสมการที่ (2.11) และบางส่วนอาจเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตที่ซัลเฟตอิออนหายไป หรืออาจเกิดปฏิกิริยากับ C_3A ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ซึ่งทั้งหมดนี้ทำให้ได้แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต ($3CaO.Al_2O_3.3CaSO_431H_2O$) หรือ Ettringite

$$Ca(OH)_2 + Na_2SO_4 + 2H_2O \longrightarrow CaSO_4.\ 2H_2O + Na_2(OH)_2 \quad \text{.....(2.10)}$$

$$3CaO.Al_2O_3\ .12H_2O + 3(CaSO_4.\ 2H_2O) + 14H_2O \longrightarrow 3CaO.Al_2O_3.3\ CaSO_431H_2O + Ca(OH)_2 \quad \text{..... (2.11)}$$

2) กระบวนการกัดกร่อนของแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ต่อคอนกรีต

ปฏิกิริยาระหว่างแมกนีเซียมซัลเฟตกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้ได้แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH)_2$) และแคลเซียมซัลเฟตหรือ ยิปซัม ตามสมการที่ (2.12) จากนั้น ยิปซัมจะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องกับ C-A-H ดังที่ได้กล่าวมาแล้วตามสมการที่ (2.11) ได้ผลเป็นแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต หรือ Ettringite นอกจากนั้นแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ยังทำปฏิกิริยากับ C-A-H ได้เป็น แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH)_2$) ตามสมการที่ (2.13) อีกด้วย

$$Ca(OH)_2 + MgSO_4 + 2H_2O \longrightarrow CaSO_4.2H_2O + Mg(OH)_2 \quad \text{.....(2.12)}$$

$$3CaO.Al_2O_3.12H_2O + 3(MgSO_4.7H_2O) + 12H_2O \longrightarrow 3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4 31H_2O + 2Al(OH)_3 + 3Mg(OH)_2 + 8H_2O \quad \text{...(2.13)}$$

นอกจากนี้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นยังทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมซัลเฟตได้เป็นยิปซัม แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และซิลิกาเจล ($SiO_2.nH_2O$) ตามสมการที่ (2.14)

$$3CaO.2SiO_2.nH_2O + MgSO_4.7H_2O \longrightarrow CaSO_4.2H_2O + Mg(OH)_2 + SiO_2.nH_2O \quad \text{.....(2.14)}$$

ยิปซัมที่เกิดขึ้นนี้ยังไปทำปฏิกิริยากับ C-A-H อีกด้วยซึ่งผลที่ได้เป็น Ettringite เหมือนเดิม ส่วนซิลิกาเจล ($SiO_2.nH_2O$) ตามสมการที่ (2.14) ยังทำปฏิกิริยากับ แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ได้เป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($4MgO.SiO_2.8.5H_2O$) ดังสมการที่ (2.15)

$$4Mg(OH)_2 + SiO_2.nH_2O \longrightarrow 4MgO.SiO_2.8.5H_2O + (n-4.5).H_2O \quad \text{.....(2.15)}$$

ยิปซัมและแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตที่เกิดขึ้น มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าสารประกอบเดิม มีการขยายตัวทำให้มีปริมาตรมากขึ้น และเกิดแรงดันภายในคอนกรีตเป็นผลให้คอนกรีตแตกร้าวในที่สุด ส่วนซิลิกาเจลและแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต เป็นสารที่ไม่แข็งแรงเท่ากับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่สูญเสียไปทำให้กำลังของคอนกรีตลดลง การลดปริมาณของ C_3A ให้น้อยลงจะทำให้ปริมาณของแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตลดลง ส่งผลให้ปริมาณการเกิดยิปซัม แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต และแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตลดลงตามไปด้วย ทำให้การกัดกร่อนของซัลเฟตลดลง ดังนั้นการใช้ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A ต่ำ จึงสามารถลดการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตได้

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของไทย มอก. 15 ได้กำหนดปริมาณ C_3A ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนทนซัลเฟตไว้ไม่เกินร้อยละ 5 ส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ไม่ได้กำหนดไว้ อย่างไรก็ตาม ACI 318 แนะนำว่าหากใช้ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A มากถึงร้อยละ 10 ควรใช้ W/C ต่ำคือประมาณ 0.4 ซึ่งจะทำให้การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตลดลงและการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายซัลเฟตก็จะลดลงด้วย ในกรณีที่ความเข้มข้นของซัลเฟตสูง คือเมื่อมีซัลเฟตในดินร้อยละ 0.2 หรือมีซัลเฟตในน้ำ 1,500 ถึง 10,000 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ค่า W/C ที่ใช้ไม่ควรเกิน 0.45 และควรใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และในกรณีที่ความเข้มข้นของซัลเฟตสูงมาก คือมีซัลเฟตในดินเกินร้อยละ 2.0 หรือมีซัลเฟตในน้ำเกินกว่า 10,000 ppm นอกจากคอนกรีตต้องมี W/C ไม่เกิน 0.45 แล้ว ยังต้องใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมกับวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าถ่าน

หิน เป็นต้น ทั้งนี้ต้องตรวจสอบว่าวัสดุปอซโซลานสามารถเพิ่มความต้านทานซัลเฟตในสภาวะดังกล่าวได้

2.3 หลักการเลือกคอนกรีตเพื่อป้องกันการทำลายจากสภาวะแวดล้อมทะเล

การเลือกคอนกรีตเพื่อใช้ในงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเลนั้น จำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงสาเหตุที่ก่อให้เกิดการทำลายโครงสร้างดังกล่าว จากนั้นจึงพิจารณาถึงการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตเพื่อรองรับการทำลาย โดยทั่วไปแล้วการทำลายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเลเกิดจาก 2 สาเหตุใหญ่ๆ ได้แก่ สาเหตุทายกายภาพ และสาเหตุทางเคมี ดังนั้นการป้องกันการทำลายโครงสร้างดังกล่าว สามารถทำได้โดยการเลือกคอนกรีตให้มีความทึบน้ำสูง และทนทานต่อสภาวะแวดล้อมทางกายภาพ หรือการใช้วิธีการเคลือบที่ผิวของคอนกรีต

โดยทั่วไปแล้วพบว่า น้ำทะเลบริเวณอ่าวไทย มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ในช่วง 7.9 ถึง 8.2 ในตารางที่ 2.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของน้ำทะเลบริเวณ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี ซึ่งจะเห็นว่าปริมาณคลอไรด์มีค่าอยู่ระหว่าง 16,000 ถึง 18,000 มก./ล. และปริมาณซัลเฟตมีค่า 2,200 ถึง 2,500 มก./ล. โดยปริมาณคลอไรด์ที่มีในน้ำทะเลส่วนใหญ่จะเป็นโซเดียมคลอไรด์ประมาณร้อยละ 90 และอีกประมาณร้อยละ 10 เป็นแมกนีเซียมคลอไรด์ จากข้อกำหนดของ ACI 318-05 ที่ระบุว่า คอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำที่มีซัลเฟตละลายอยู่ในปริมาณ 1,500 ถึง 10,000 มก./ล. ถือว่าคอนกรีตอยู่ในสภาวะที่อาจเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต อย่างรุนแรง ACI จึงแนะนำให้ใช้คอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำกว่า 0.45 และมีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ไม่น้อยกว่า 310 กก./ซม.^{2} ส่วนคอนกรีตที่เกิดการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม ACI จึงเสนอให้ใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำกว่า 0.45 และมีกำลังรับแรงอัดไม่น้อยกว่า 350 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 28 วัน

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของน้ำทะเลบริเวณ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี

Parameter	มกราคม 2544	พฤษภาคม2545	สิงหาคม 2546	ธันวาคม 2547	เมษายน 2548	กุมภาพันธ์ 2549
pH	8.2	8.2	7.9	8.2	8.2	8.2
Chloride (mg/l)	18,035	16,210	17,125	18,820	16,210	18,035
Sulphate (mg/l)	2,240	2,500	2,230	2,680	2,500	2,240

ในการเลือกคอนกรีตเพื่อป้องกันการกัดกร่อนในสภาวะแวดล้อมทางทะเลนั้น ได้มีการศึกษาถึงแนวทางในการพัฒนาคอนกรีตเพื่อใช้ในสภาวะแวดล้อมดังกล่าว โดยมีงานวิจัยที่ศึกษาในสภาวะ

แวดล้อมจริงซึ่งพบว่า การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 หรือ 5 สามารถป้องกันการกัดกร่อนจากน้ำทะเลได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินอย่างชัดเจน โดยพิจารณาลักษณะของคอนกรีตที่ใช้ในการป้องกันการกัดกร่อนในสภาวะแวดล้อมทะเลในด้านต่างๆดังนี้

1) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและชนิดของปูนซีเมนต์

การเลือกใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำจะทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงและเนื้อแน่นขึ้น สามารถที่จะป้องกันการแทรกซึมของสารเคมีที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีตได้ดีขึ้น ตลอดจนยังส่งผลดีต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตอีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามการทำคอนกรีตให้มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำก็จะส่งผลให้คอนกรีตเทเข้าแบบได้ยากขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้สารผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำเพื่อเพิ่มความสามารถในการเทให้กับคอนกรีตด้วย โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่ใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเลควรมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำกว่า 0.45 (ตามข้อแนะนำของ ACI 201.2) หรือในบางมาตรฐานอาจแนะนำให้ต่ำกว่า 0.40 (ตามข้อแนะนำของ SI 456-2000)

2) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก

การออกแบบคอนกรีตให้สามารถต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเล นอกจากจะส่งผลต่ออายุการใช้งานที่ยาวนานของโครงสร้างแล้ว ยังมีผลต่อการกำหนดระยะหุ้มเหล็กที่เหมาะสมเพื่อให้สามารถป้องกันสารเคมีที่เป็นอันตรายเข้าไปทำลายเหล็กเสริมในคอนกรีตด้วย ซึ่งโดยหลักแล้วการกำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่มีค่ามากก็จะส่งผลดีต่อการป้องกันการทำลายเหล็กเสริมในคอนกรีต แต่ถ้าระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กหนามากเกินไปจะเกิดรอยร้าวได้ง่ายเมื่อรับแรงดัด นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาถึงความสอดคล้องกับรูปร่างทางสถาปัตยกรรมและการรับแรงเชิงกลของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วย ในการกำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างที่ใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเล จะพิจารณาจากการซึมเข้าในเนื้อคอนกรีตของปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (ปริมาณคลอไรด์รอบผิวเหล็กเสริมที่ส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนเริ่มต้น) การใช้วัสดุปอซโซลานผสมในคอนกรีตสามารถที่จะลดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเพื่อป้องกันการกัดกร่อนเริ่มต้นที่ระยะเวลาที่ทำการออกแบบไว้ได้ หรืออีกนัยหนึ่งคือที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่เท่ากันก็จะสามารถยืดระยะเวลาที่เหล็กเสริมในคอนกรีตเริ่มที่จะมีการกัดกร่อนได้

2.4 แนวทางการใช้เถ้าถ่านหินเพื่อป้องกันการทำลายจากสภาวะแวดล้อมทะเล

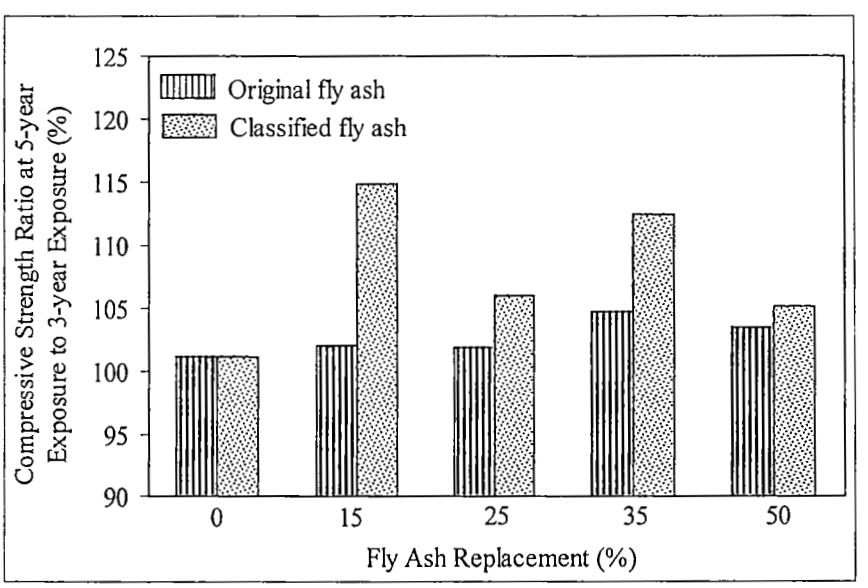
จากฐานข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยที่ผ่านมาทั้งที่ศึกษาในห้องปฏิบัติการ และการเก็บข้อมูลในสภาวะแวดล้อมน้ำทะเลในประเทศไทย ได้ข้อสรุปในทิศทางเดียวกันว่า การทำลายของสารเคมีที่อยู่ในน้ำทะเลที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีตจะเกิดจากสารประกอบซัลเฟตและคลอไรด์เป็นหลัก และได้มี

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

การศึกษาถึงการนำเถ้าถ่านหินในประเทศมาปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเล โดยผลการศึกษาเป็นที่น่าพอใจว่า เถ้าถ่านหินสามารถที่จะช่วยป้องกันการกัดกร่อนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเลได้เป็นอย่างดี ดังรายละเอียดต่อไปนี้

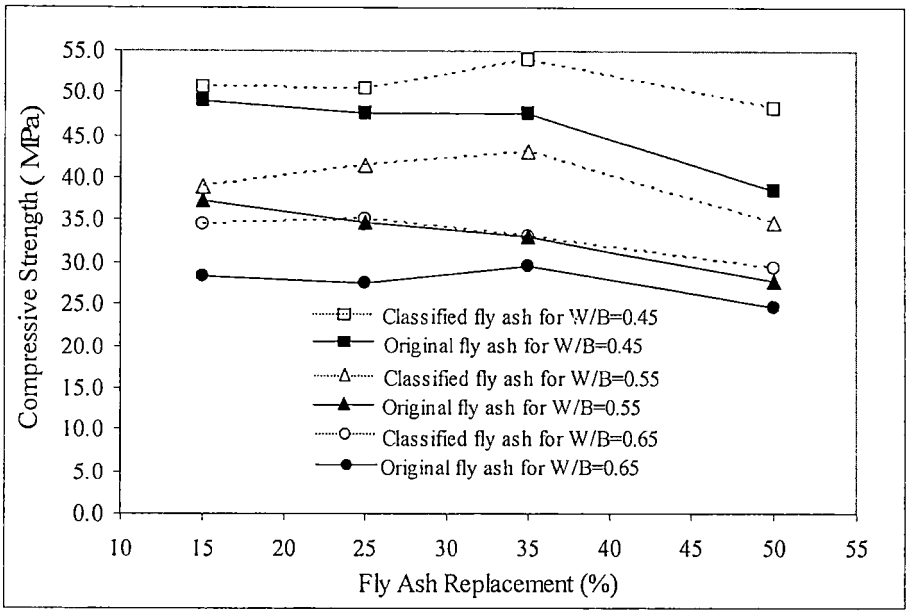
ก) การกัดกร่อนเนื่องจากสารประกอบซัลเฟตในน้ำทะเล

ในน้ำทะเลพบว่ามีสารประกอบโซเดียมซัลเฟตเป็นส่วนใหญ่ โดยสารประกอบซัลเฟตสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ได้สารประกอบใหม่ที่ทำให้เกิดการขยายตัวในคอนกรีต และความสามารถในการเป็นวัสดุประสานของซีเมนต์เพสต์ลดลง ซึ่งการใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณที่เหมาะสม สามารถลดการกัดกร่อนลงได้ ซึ่งการวัดความคงทนต่อสารประกอบซัลเฟตของคอนกรีตสามารถวัดได้จากค่าการขยายตัวของคอนกรีตและกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล โดยรูปที่ 2.6 แสดงร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะที่แยกและไม่แยกขนาดที่แช่ในน้ำทะเล 5 ปี เมื่อเทียบกับอายุแช่น้ำทะเล 3 ปี (Chalee, 2007) ซึ่งพบว่าการแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้นและมีความละเอียดมากขึ้นสามารถที่จะพัฒนากำลังอัดในช่วงที่แช่น้ำทะเล 3 ถึง 5 ปี ได้ดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน และนอกจากนั้นยังพบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดมากขึ้นจะมีค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี สูงกว่ากลุ่มที่ใช้เถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดน้อยกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 ร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 และผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะที่แยก และไม่แยกขนาดที่แช่ในน้ำทะเล 5 ปี เมื่อเทียบกับอายุแช่น้ำทะเล 3 ปี

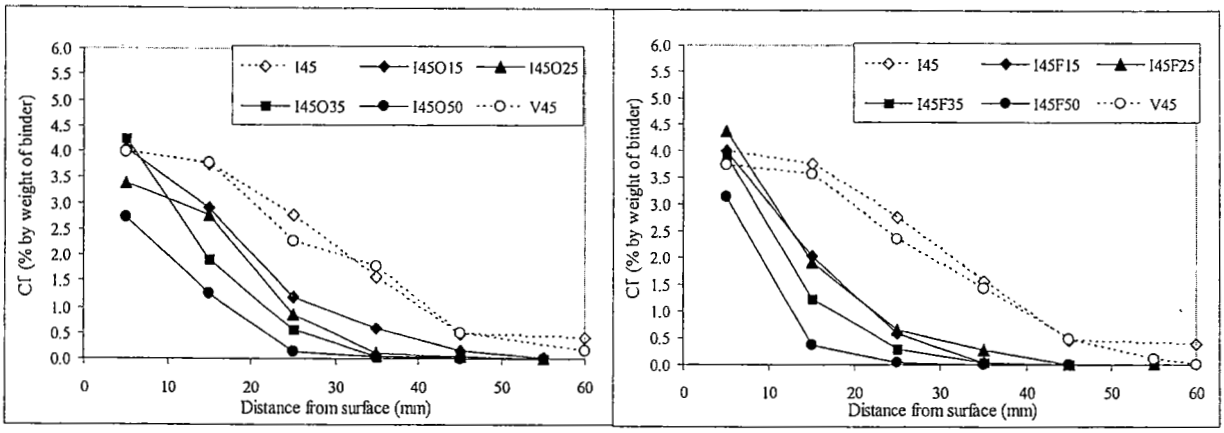
620.136
ว559ก
ฉ.3
316509



รูปที่ 2.7 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะที่แยกและไม่แยกขนาดที่แช่ในน้ำทะเล 5 ปี

ข) การกัดกร่อนเนื่องจากสารประกอบคลอไรด์

เมื่อคลอไรด์ซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตประกอบกับมีน้ำและออกซิเจนเพียงพอจะทำให้เกิดสนิมในเหล็กเสริม ส่งผลให้หน้าตัดของเหล็กลดลง และการขยายตัวของสนิมทำให้คอนกรีตแตกร้าวตามแนวเหล็กเสริม ตลอดจนส่งผลให้กำลังอัดของโครงสร้างลดลง นอกจากนี้รอยร้าวที่เกิดขึ้นยังเป็นการเร่งให้น้ำและออกซิเจนเข้าไปถึงบริเวณเหล็กเสริมได้เร็วขึ้น จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตสามารถที่จะป้องกันการแทรกซึมของคลอไรด์ที่อยู่ในน้ำทะเลเข้าไปในคอนกรีตได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ที่แช่ตัวอย่างคอนกรีตไว้ในน้ำทะเลบริเวณน้ำขึ้นน้ำลงเป็นเวลา 5 ปี (Chalee, 2007) และพบว่าปริมาณของคลอไรด์ที่ซึมเข้าในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ประเภทที่ I ที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะทั้งที่ไม่แยกและแยกขนาดมีปริมาณน้อยกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V อย่างชัดเจน จากงานวิจัยพบว่า การใช้เถ้าถ่านหินจากแม่เมาะที่ไม่ได้ผ่านการคัดแยกขนาด (ค่ากลางของอนุภาค ประมาณ 30 ไมโครเมตร) ให้ผลในการป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากน้ำทะเลเป็นที่น่าพอใจและไม่แตกต่างจากกลุ่มที่ใช้เถ้าถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาด (ค่ากลางของอนุภาค ประมาณ 10 ไมโครเมตร) มากนัก



ก) ใช้เถ้าถ่านหินไม่แยกขนาด ข) ใช้เถ้าถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาด

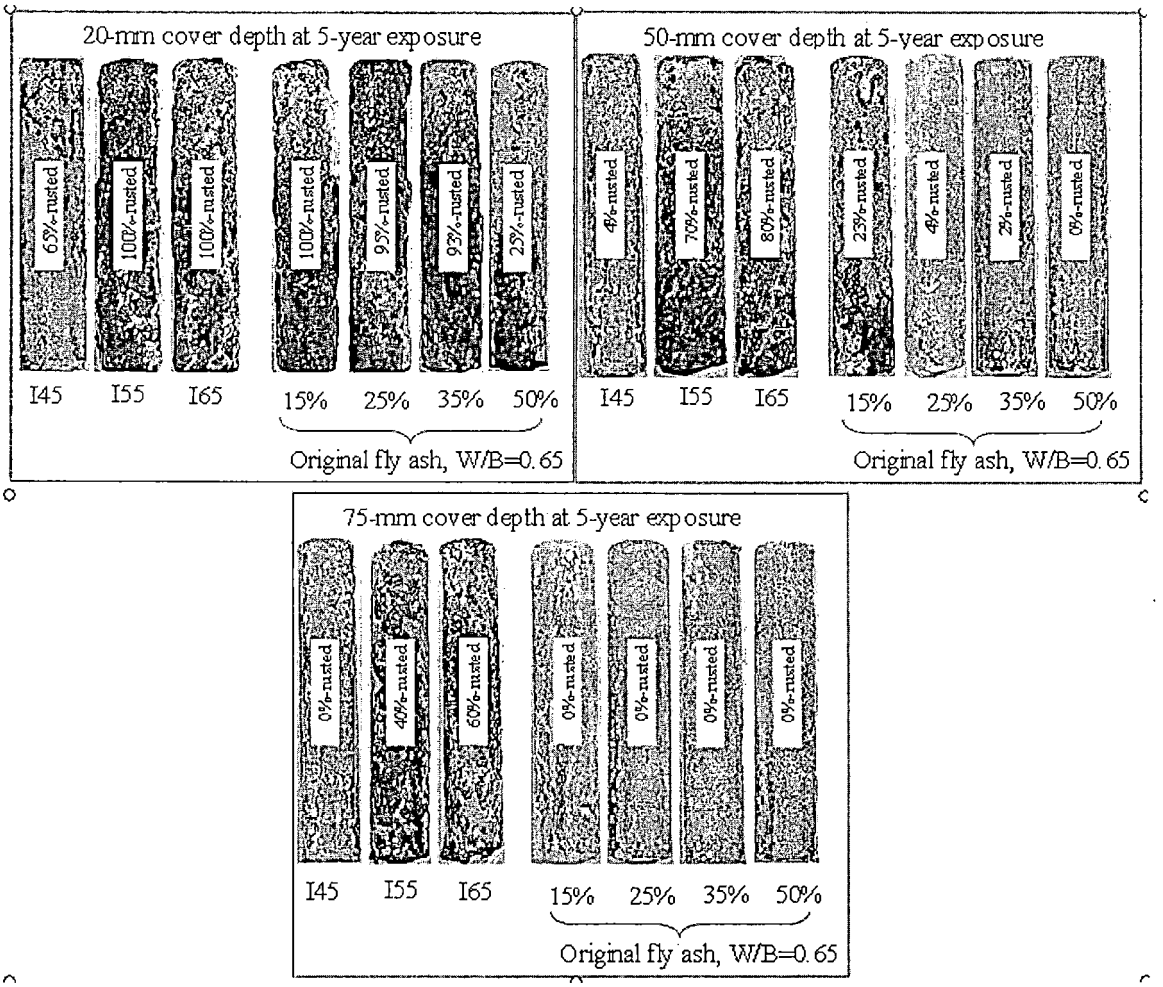
รูปที่ 2.8 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะและมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 เมื่อแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี

ค) การเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล

การเกิดสนิมของเหล็กในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นปัญหาที่สำคัญที่ส่งผลให้เกิดการทำลายที่รุนแรงและทำให้อายุการใช้งานของโครงสร้างน้อยลง การเกิดสนิมในเหล็กเสริมมีผลมาจากปริมาณน้ำและออกซิเจนที่แทรกซึมเข้าไปสัมผัสกับเหล็กเสริม ตลอดจนปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ในน้ำทะเลเองก็เร่งให้เกิดสนิมในเหล็กอย่างรุนแรงและรวดเร็วขึ้น โดยในงานวิจัยที่แช่ตัวอย่างคอนกรีตที่มีการฝังเหล็กที่ระยะหุ้มคอนกรีตต่างๆ กันพบว่าในบางตัวอย่างเหล็กที่ฝังในคอนกรีตเริ่มเกิดสนิมเหล็กเล็กน้อยที่อายุแช่น้ำทะเล 4 ปี แต่เมื่อเวลาผ่านไปแค่ 1 ปี เหล็กดังกล่าวเกิดสนิมมากขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเริ่มต้นเกิดสนิมที่ผิวของเหล็กเพียงเล็กน้อยก็จะนำไปสู่การทำลายเหล็กเสริมในคอนกรีตอย่างรวดเร็ว

รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะการเกิดสนิมในเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 เมื่อแช่ในน้ำทะเลที่สภาพเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 5 ปี (Chalee, 2007) โดยเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45, 0.55 และ 0.65 ซึ่งใช้สัญลักษณ์ I45, I55 และ I65 ตามลำดับ จากผลการศึกษาพบว่า การผสมเถ้าถ่านหินในคอนกรีตในปริมาณที่มากขึ้นสามารถต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตได้ดีขึ้น โดยคอนกรีตที่แทนที่เถ้าถ่านหินมากกว่าร้อยละ 25 ไม่พบการเกิดสนิมในเหล็กที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 50 และ 75 มม. ถึงแม้จะใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงถึง 0.65 ก็ตาม ส่วนที่มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กหนา 20 มม. ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากมีการเกิดสนิมเหล็กอย่างมากในคอนกรีตเกือบทุกส่วนผสม และเป็นที่น่าสังเกตว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินถึงร้อยละ 50 ถึงแม้จะมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงถึง 0.65 แต่ก็สามารถป้องกันการเกิดสนิมเหล็กได้ดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินที่

มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 แต่ทั้งนี้ การใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตสูงถึงร้อยละ 50 ก็จะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำลงอย่างมากเช่นกัน



รูปที่ 2.9 การเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

โดยสรุปแล้ว คอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลจะมีกลไกการทำลายที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับบริเวณที่โครงสร้างสัมผัส เช่น บริเวณระดับน้ำทะเลขึ้น-ลง หรือแถบชายฝั่ง โดยมากจะเกิดการทำลายเนื่องจากสาเหตุทางกายภาพที่ส่งผลเกื้อหนุนให้เกิดการทำลายเนื่องจากคลอไรด์และซัลเฟต ซึ่งบริเวณนี้การเกิดสนิมในเหล็กเสริมก็เป็นปัญหาหลักที่ส่งผลต่อการทำลายโครงสร้าง หรือบริเวณที่อยู่ใต้น้ำทะเลที่ไม่ได้สัมผัสกับออกซิเจนการทำลายก็จะเกิดจากซัลเฟตเป็นหลัก ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องเข้าใจถึงกลไกของการทำลายของโครงสร้างในแต่ละบริเวณที่โครงสร้างสัมผัสอยู่ เพื่อจะได้กำหนดวิธีการที่เหมาะสมในการป้องกันโดยคำนึงถึงความประหยัดและปลอดภัยตามหลักวิศวกรรม การใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าถ่านหินสามารถช่วยลดการทำลายดังกล่าวได้ค่อนข้างชัดเจนและทำให้อายุการใช้งานของโครงสร้างเหล่านี้ยาวนานขึ้น อย่างไรก็ตามการผสม

เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากถึงแม้จะป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตได้ดี แต่จะส่งผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง ดังนั้นควรเลือกใช้เถ้าถ่านหินที่มีคุณสมบัติที่ดี

การใช้เถ้าถ่านหินจากแม่เมาะแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ในคอนกรีตในช่วงร้อยละ 25 ถึง 35 และอัตราส่วนน้ำวัสดุประสานที่ต่ำกว่า 0.45 จะทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติที่ดีทั้งทางด้านความคงทนและคุณสมบัติเชิงกล นอกจากนั้นเถ้าถ่านหินจากแหล่งอื่นๆหรือสารปอซโซลานชนิดอื่น ก็สามารถนำมาใช้ปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านความคงทนของคอนกรีตในน้ำทะเลได้ แต่ทั้งนี้จำเป็นต้องทดสอบหรือมีผลการทดสอบที่เชื่อมั่นได้ เพื่อจะได้ทราบถึงปริมาณและชนิดของสารปอซโซลานที่เหมาะสม เพื่อให้ได้คอนกรีตที่ดีทั้งทางด้านความคงทนและคุณสมบัติเชิงกลต่อไป

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

คอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำทะเล จำเป็นต้องกำหนดคุณภาพของคอนกรีตให้มีความทนทานสูงเป็นพิเศษ โดยพิจารณาถึงสภาพแวดล้อมทางภูมิประเทศและภูมิอากาศประกอบในการออกแบบ คอนกรีตดังกล่าวต้องเป็นคอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง มีคุณสมบัติการซึมน้ำต่ำ ซึ่งหมายถึงการใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำ มีการทำให้แน่นและบ่มคอนกรีตอย่างดีด้วยระยะเวลาที่นานเพียงพอ ในกรณีที่เป็นคอนกรีตเสริมเหล็กต้องมีความหนาของระยะหุ้มเหล็กที่มากพอ รอยต่อของคอนกรีตต้องมีการออกแบบและก่อสร้างอย่างถูกวิธี ก็ย่อมได้คอนกรีตที่มีคุณภาพดี ความเสียหายและความรุนแรงของการกัดกร่อนต่อคอนกรีตอาจไม่เท่ากันตลอดทั้งโครงสร้างของคอนกรีต บริเวณคอนกรีตที่น้ำขึ้น-ลง มีการเสียหายสูง เพราะบริเวณดังกล่าวมีการขัดสีของน้ำทะเลต่อคอนกรีตทั้งจากการกระแทกของคลื่นและการไหลเวียนของน้ำทะเล นอกจากนี้ คอนกรีตในบริเวณน้ำขึ้น-ลง มีการสะสมสารเคมีทั้งคลอไรด์ ซัลเฟต และเกลือต่างๆ ในช่องว่างของคอนกรีต ทำให้ความเข้มข้นสูงกว่าปกติจึงเกิดการกัดกร่อนที่รวดเร็ว ในปัจจุบันการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทห้า สามารถทนทานต่อสารละลายซัลเฟตได้ดี แต่การป้องกันเหล็กเสริมจากการเป็นสนิมเนื่องจากการแพร่ของคลอไรด์จะมีน้อยกว่าปูนซีเมนต์ประเภทอื่น การใช้ปูนซีเมนต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดก็มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์และซัลเฟตได้สูง ด้วยเหตุนี้ การเลือกปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม และการใช้วัสดุปอซโซลานผสมลงในคอนกรีต จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้เถ้าถ่านหินผสมลงในคอนกรีตสามารถป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากน้ำทะเลได้ดี ทั้งลดการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต (วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2554; Chalee *et al.*, 2007 ; Thomas *et al.*, 2004 ; Chalee *et al.*, 2009; Chalee *et al.*, 2010; Cheewaket *et al.*, 2010) แต่การใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณสูงมีผลทำให้คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตในช่วงแรกไม่ดี (Gengying, 2004 ; Siddique, 2003) ตลอดจนส่งให้ปริมาณคลอไรด์วิกฤติมีค่าต่ำลงอย่างชัดเจน (Thomas, 1996 ; Glass& Buenfeld, 1997) จากการศึกษาที่ผ่านมา (Chalee *et al.*, 2010) พบว่า เถ้าถ่านหินมีศักยภาพในการใช้ป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลต่อ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยการแทนที่เถ้าถ่านหินที่มากขึ้นส่งผลให้ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคลอไรด์เนื่องจากน้ำทะเลจะลดลงอย่างชัดเจน โดยคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงถึง 0.65 สามารถใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเลได้เมื่อผสมเถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 25-50 เพราะให้ผลในการต้านทานการทำลายเหล็กเสริมเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลดีเทียบเท่ากับคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 อย่างไรก็ตาม Thomas (Thomas *et al.*, 2004) ได้ทำการเก็บข้อมูลคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 10 ปี คอนกรีตดังกล่าวแช่น้ำทะเลอยู่ที่ Building Research Establishment (BRE) บริเวณปากแม่น้ำ Thames Estuary เมือง Shoeburyness ประเทศอังกฤษ โดยหล่อคอนกรีตซึ่งฝังแท่งเหล็กไว้ภายใน และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินปริมาณร้อยละ 0 ถึง 50 จากนั้นนำตัวอย่างไปแช่น้ำทะเล และทำการวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์วิกฤติ ซึ่งผลการศึกษาพบว่า ปริมาณคลอไรด์วิกฤติมีค่าต่ำลงตามปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินที่มากขึ้น ซึ่งส่งผลไม่ดีต่อคุณสมบัติของวัสดุประสานที่ต้องการจะใช้ปรับปรุงคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต

ถึงแม้ว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินจะให้ผลของปริมาณคลอไรด์วิกฤติไปในทิศทางที่ไม่ดี แต่พบว่า สามารถป้องกันการแทรกซึมของคลอไรด์ได้เป็นอย่างดี ดังนั้นการนำจุดด้อยและจุดเด่นมาวิเคราะห์ร่วมกันเพื่อบ่งชี้คุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตในสภาพแวดล้อมทะเล จึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจในการพัฒนาและเลือกใช้ส่วนผสมคอนกรีตให้สามารถต้านทานการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

บทที่ 3
วิธีการศึกษา

บทนี้กล่าวถึงวิธีวิจัยที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งประกอบด้วย รายละเอียดของข้อมูลที่ใช้ในการสร้างดัชนีความคงทน ได้แก่ ตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 10 ปี การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต และการทดสอบการเกิดสนิมในเหล็กเสริม

3.1 รายละเอียดคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล 10 ปี

ในการสร้างดัชนีความคงทนของคอนกรีตที่สัมผัสสภาวะแวดล้อมทะเล ได้สร้างจากฐานข้อมูลที่เทดสอบ การแทรกซึมของคลอไรด์ การเกิดสนิมเหล็ก ปริมาณคลอไรด์ที่ตำแหน่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีต โดยได้ทดสอบไว้แล้วที่อายุ 2, 3, 4, 5 และ 7 ปี และได้ทดสอบข้อมูลด้านความคงทนเพิ่มเติมที่อายุแช่คอนกรีตในน้ำทะเล 10 ปี โดยข้อมูลดังกล่าวใช้ในการวิเคราะห์หาสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ และปริมาณคลอไรด์วิกฤติที่ใช้ในการสร้างดัชนีด้านความคงทนในการศึกษานี้ รายละเอียดการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตเมื่อ 12 ปี ที่แล้ว มีดังนี้

3.1.1 วัสดุ

- ปูนซีเมนต์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งมีคุณสมบัติตรงตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม มอก.15-2532
- เถ้าถ่านหิน ใช้ถ่านหินที่ได้โดยตรงจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าแม่ เมาะ
- ทราย ใช้ทรายแม่น้ำร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4
- หิน ใช้หินคลุกที่มีขนาดใหญ่สุด 19 มม.
- น้ำ ใช้น้ำสะอาด การทดลองนี้ใช้น้ำประปา

3.1.2 อุปกรณ์

- ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 20
- เครื่องชั่งอ่านละเอียด 0.0001 กรัม
- เครื่องทดสอบกำลังอัด
- เครื่องตัดคอนกรีต
- เครื่องเจาะคอนกรีต
- เครื่องดูดสุญญากาศ
- ชุดอุปกรณ์ทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต

3.1.3 คุณสมบัติของวัสดุประสานและมวลรวม

คุณสมบัติของวัสดุประสานและมวลรวมที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างทดสอบเมื่อ 12 ปีที่แล้วมีดังนี้

วัสดุประสานใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าถ่านหินชนิด F ที่ได้โดยตรงจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.23 มีอนุภาคที่ค้างตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 32 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 618 ที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ มีปริมาณผลรวมของสารประกอบหลัก SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 79.45 และ มีค่า LOI ร้อยละ 0.52 โดยองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน แสดงดังตารางที่ 3.1

มวลรวมหยาบที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีขนาดใหญ่สุดของมวลรวมเท่ากับ 19 มม. และมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 6.66 ส่วนมวลรวมละเอียดมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.63 ซึ่งสอดคล้องกับค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมหยาบที่มีค่าระหว่าง 5.5-8.5 และมวลรวมละเอียดมีค่าระหว่าง 2.2-3.1 ตารางที่ 3.2 แสดงผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมของมวลรวมตามมาตรฐาน ASTM C127-88 และ C128-93 โดยที่ความถ่วงจำเพาะทั้งหมดของมวลรวมหยาบและละเอียดในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.77 และ 2.57 ตามลำดับ สอดคล้องกับค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมที่มีค่าระหว่าง 1.6-3.2

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	วัสดุ	
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าถ่านหิน (FA)
Silicon Dioxide, SiO_2	20.80	44.95
Aluminium Oxide,	5.50	23.70
Iron Oxide, Fe_2O_3	3.16	10.80
Calcium Oxide, CaO	64.97	13.80
Magnesium Oxide,	1.06	3.47
Sodium Oxide, Na_2O	0.08	0.07
Potassium Oxide,	0.55	2.38
Sulfur Trioxide, SO_3	2.96	1.31
Loss On Ignition,	2.89	0.52

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของมวลรวม

คุณสมบัติ	มวลรวมหยาบ	มวลรวมละเอียด
Bulk Specific Gravity (SSD)	2.77	2.57
Apparent Specific Gravity	2.80	2.61
Absorption (%)	0.64	0.96
Fineness Modulus	6.66	2.63
Normal Maximum Size (mm)	19	-

3.1.4 ส่วนผสมคอนกรีต

ใช้ส่วนผสมคอนกรีตที่มี W/B เท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 และใช้เถ้าลอยที่ได้โดยตรงจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ซึ่งส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต

Mix	Mixture Proportions of Concretes (kg/m^3)					W/B
	Cement Type I	Fly Ash	Fine Aggregate	Coarse Aggregate	Water	
I45	478	-	639	1,024	215	0.45
I55	478	-	639	971	262	0.55
I65	478	-	639	922	311	0.65
I45FA15	406	72	639	1,004	215	0.45
I45 FA 25	359	119	639	990	215	0.45
I45 FA 35	311	167	639	977	215	0.45
I45 FA 50	239	239	639	957	215	0.45
I55 FA 15	406	72	639	948	262	0.55
I55 FA 25	359	119	639	933	262	0.55
I55 FA 35	311	167	639	918	262	0.55
I55 FA 50	239	239	639	897	262	0.55
I65 FA 15	406	72	639	898	311	0.65
I65 FA 25	359	119	639	881	311	0.65
I65 FA 35	311	167	639	864	311	0.65
I65 FA 50	239	239	639	840	311	0.65

ความหมายของสัญลักษณ์ในแต่ละอัตราส่วนผสมมีความหมายดังนี้

" I45, I55 และ I65 " หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 ตามลำดับ

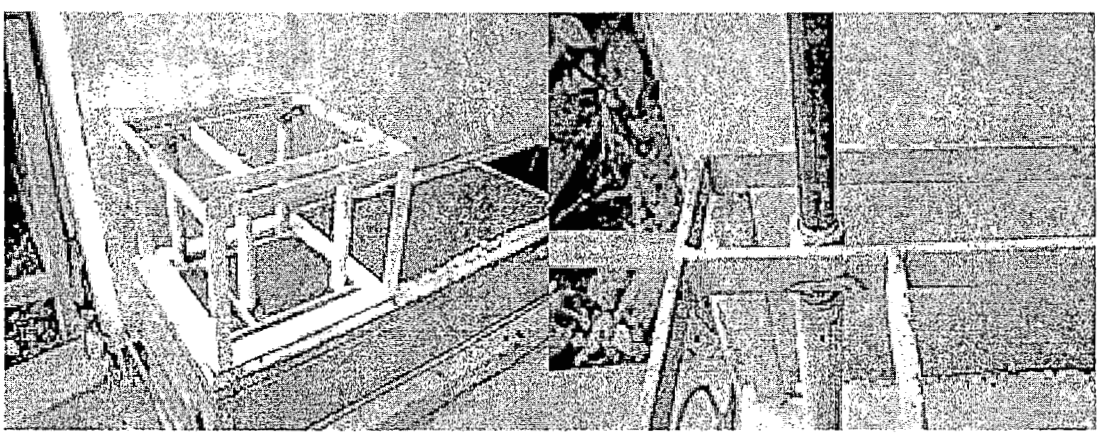
" FA15, FA25, FA35 และ FA50 " หมายถึง การแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I เท่ากับ ร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานตามลำดับ

ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์

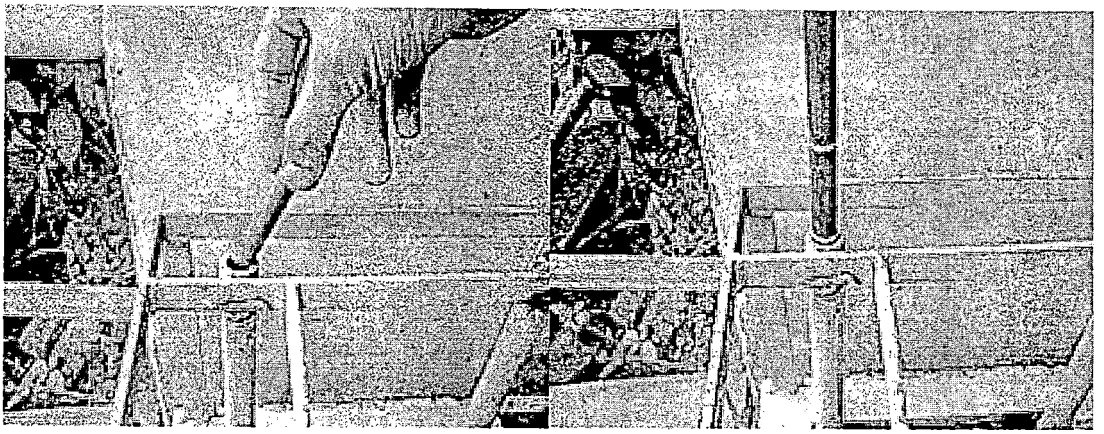
" I45FA15 " หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

3.1.5 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

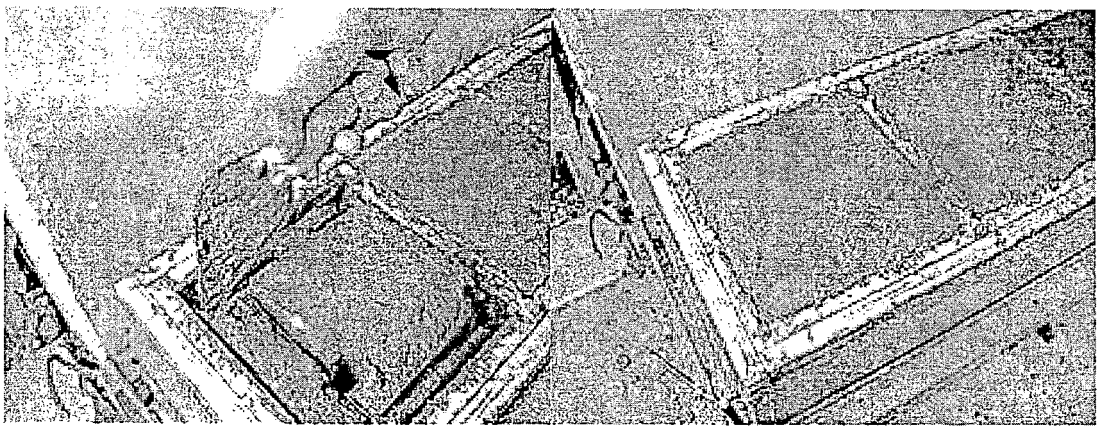
หล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด 200x200x200 มม. และฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. ที่ระยะหุ้มคอนกรีต 10, 20, 50, 75 และ 90 มม. ดังแสดงในรูปที่ 3.1 หลังจากบ่มคอนกรีตจนอายุครบ 28 วัน นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่บริเวณชายฝั่งทะเลโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี โดยคอนกรีตสัมผัสกับน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.2



(ก) วางแบบฝังเหล็กบนแบบหล่อคอนกรีต (ข) ใช้เหล็กนำร่องเพื่อดันคอนกรีตให้เกิดช่องว่าง

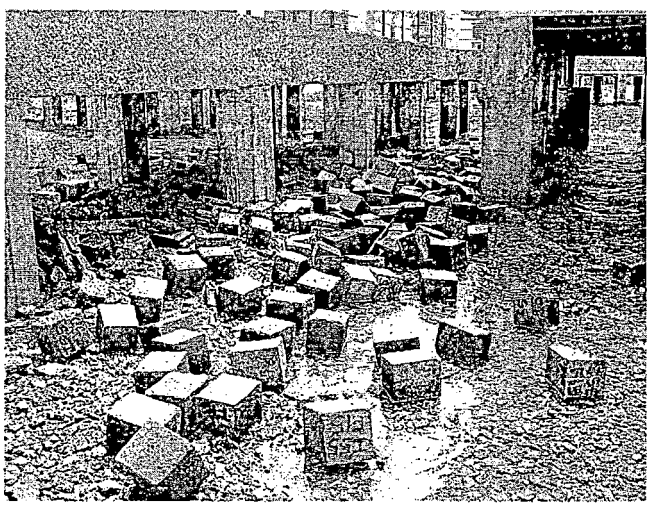


(ค) หย่อนเหล็กลงในคอนกรีต (ง) ตรวจสอบว่าเหล็กที่ฝังอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ



(จ) ใช้เกรียงเกลี่ยคอนกรีตสดให้เต็มแบบหล่อ (ฉ) ตกแต่งผิวหน้าคอนกรีตให้เรียบ

รูปที่ 3.1 การฝังเหล็กลงในคอนกรีต



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง

3.2 การทดสอบคลอไรด์อิสระในคอนกรีต

ทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเล เพื่อใช้วิเคราะห์หาสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต ซึ่งใช้ประกอบในการสร้างดัชนีความคงทนต่อไป การทดสอบใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปลูกบาศก์ขนาด 20 ซม. ที่ผ่านการแช่น้ำทะเลตามระยะเวลาที่กำหนด (10 ปี) โดยนำคอนกรีตมาทำการเจาะบริเวณกึ่งกลางของก้อนตัวอย่างให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.5 ซม. ทำการปาดผิวหน้าของแท่งคอนกรีตที่ได้จากการเจาะ ประมาณ 1 มม. เพื่อลดความแปรปรวนของปริมาณคลอไรด์ที่อยู่บริเวณผิวหน้าคอนกรีต จากนั้น ทำการตัดแท่งคอนกรีตตามขวางให้มีความหนา 1 ซม. นำตัวอย่างคอนกรีตที่ได้มาทำการบดเป็นผง และร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 20 (ขนาดช่องเปิด 850 ไมโครเมตร) การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์แสดงดังรูปที่ 3.3 นำผงคอนกรีตที่ระดับความลึกต่างๆ ไปทดสอบหาปริมาณสารประกอบคลอไรด์ที่ละลายในน้ำ (Water-soluble chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C 1218 โดยการไตเตรทปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ในคอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งสามารถคำนวณร้อยละของคลอไรด์ได้ ดังสมการที่ 3.1

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

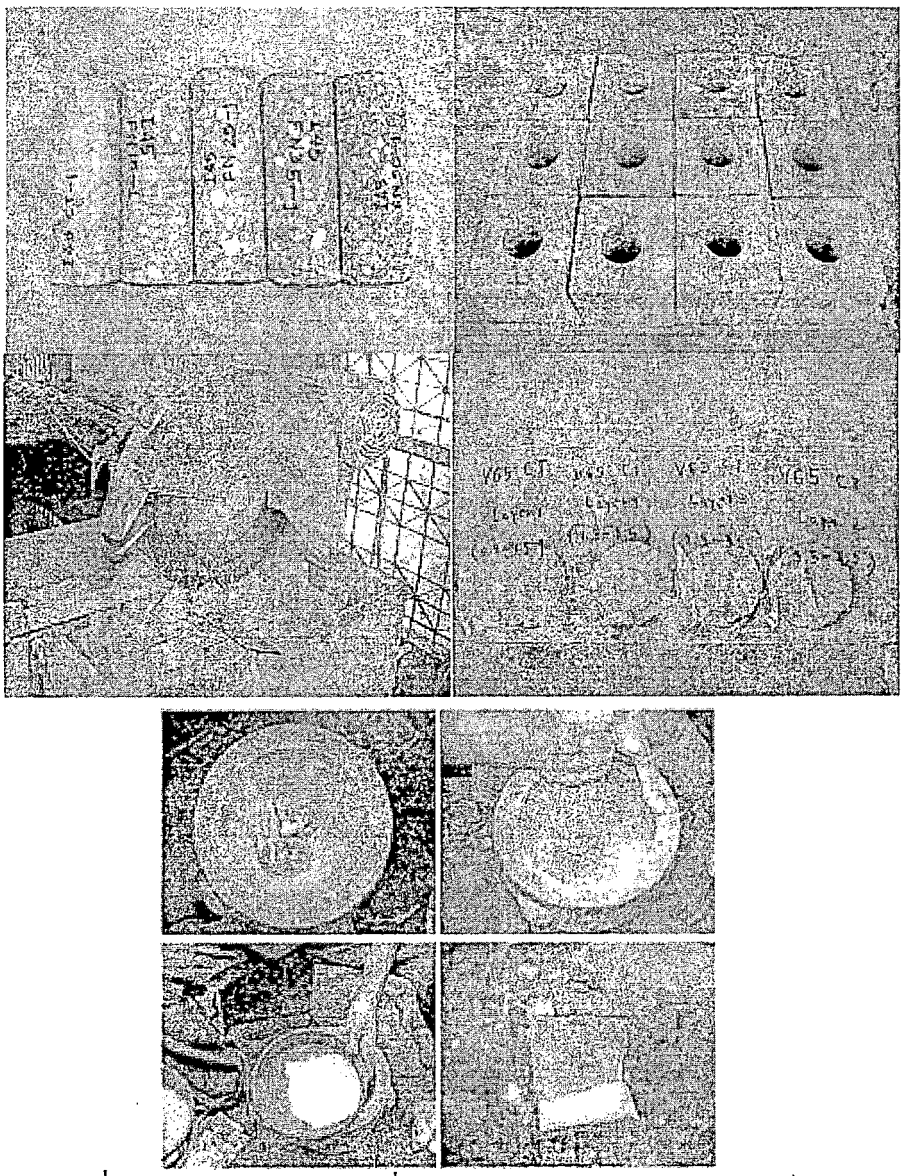
เมื่อ V_1 คือ ปริมาตรของสารละลาย 0.05 N $AgNO_3$ ที่ใช้สำหรับการไตเตรทตัวอย่าง

V_2 คือ ปริมาตร ของสารละลาย 0.05 N $AgNO_3$ ที่ใช้สำหรับการไตเตรท Blank

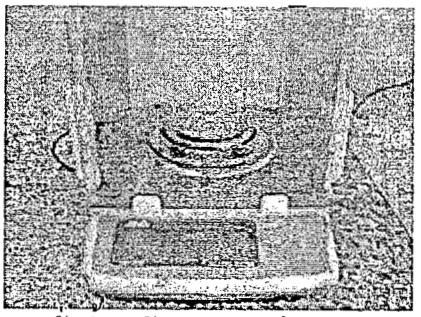
N คือ Exact normality ของสารละลาย 0.05 N $AgNO_3$

0.10 คือ Milliequivalents ของ NaCl ที่เติม (2.0 mL $\times$ 0.05 N)

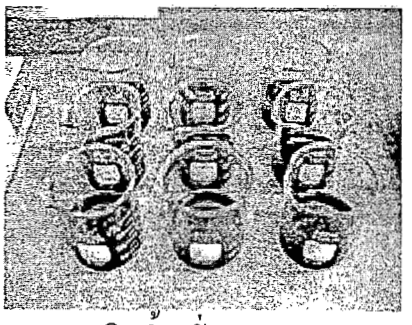
W คือ น้ำหนักของผงตัวอย่างคอนกรีต (กรัม)



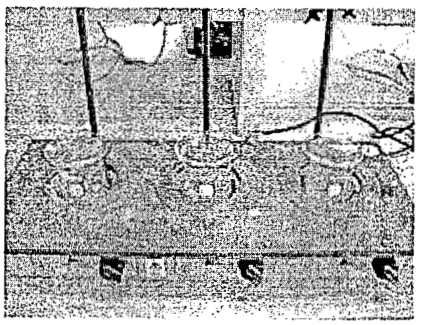
รูปที่ 3.3 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์



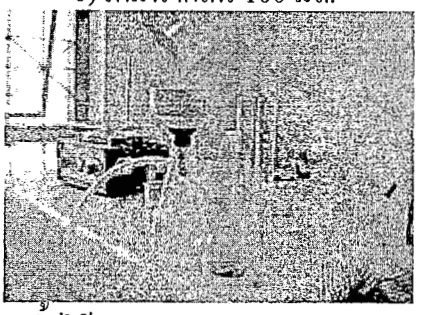
ก) ชั่งน้ำหนักผงคอนกรีต 10 กรัม



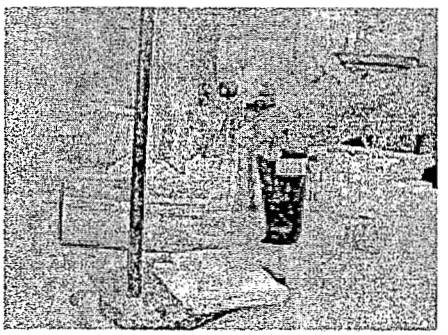
ข) เติมน้ำกลั่น 100 มล.



ค) ต้มให้เดือด 5 นาที



ง) ทิ้งไว้ 24 ชม. และกรองสารละลาย



จ) ไตเตรตหาปริมาณคลอไรด์

รูปที่ 3.4 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต

3.3 การวัดสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

การสำรวจความเป็นสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต ที่ระยะหุ้มต่างๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลเชื่อมโยงความสัมพันธ์กับปริมาณคลอไรด์ที่ซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีต เพื่อใช้หาปริมาณคลอไรด์วิกฤติ

หลังจากเก็บตัวอย่างคอนกรีต ที่มีอายุการแช่น้ำทะเลครบตามกำหนด (2, 3, 4, 5, 7 และ 10 ปี) นำคอนกรีตรูปลูกบาศก์มาทำการกดให้แตก เพื่อเก็บเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ระยะหุ้มต่างๆ มาสำรวจความเป็นสนิมของเหล็กโดยการวัดพื้นที่การเกิดสนิมบนเหล็กที่ฝังในคอนกรีต ใช้กระดาษกราฟใสที่มีช่องตาราง ขนาด 1×1 มม. ตัดให้มีขนาดใหญ่พอที่จะสามารถทาบได้รอบเหล็ก จากนั้นใช้ปากกาเขียนเขียนแผ่นใสระบายบนกระดาษกราฟใสตรงตำแหน่งที่เกิดสนิม นำกระดาษกราฟใส

ที่ได้มานับพื้นที่การเกิดสนิม เทียบกับพื้นที่ผิวเหล็กเสริมทั้งหมด แล้วนำมาคำนวณร้อยละของพื้นที่ผิวของเหล็กที่เกิดสนิม ดังสมการที่ 3.2

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

เมื่อ C คือ ร้อยละของพื้นที่ผิวของเหล็กที่เกิดสนิม

RA คือ พื้นที่ผิวเหล็กที่เกิดสนิม (มม.^{2})

SA คือ พื้นที่ผิวทั้งหมดของเหล็ก (มม.^{2})

3.4 การทดสอบปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ตำแหน่งฝังเหล็ก

เก็บตัวอย่างคอนกรีตบริเวณใกล้ผิวเหล็กที่ฝังในคอนกรีตมาบด และทดสอบคลอไรด์อิสระ ณ ตำแหน่งเหล็กที่ฝัง ตามมาตรฐาน ASTM C 1218 ดังวิธีที่กล่าวมาข้างต้น เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ และหาดัชนีความคงทนต่อไป

บทที่ 4
ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล

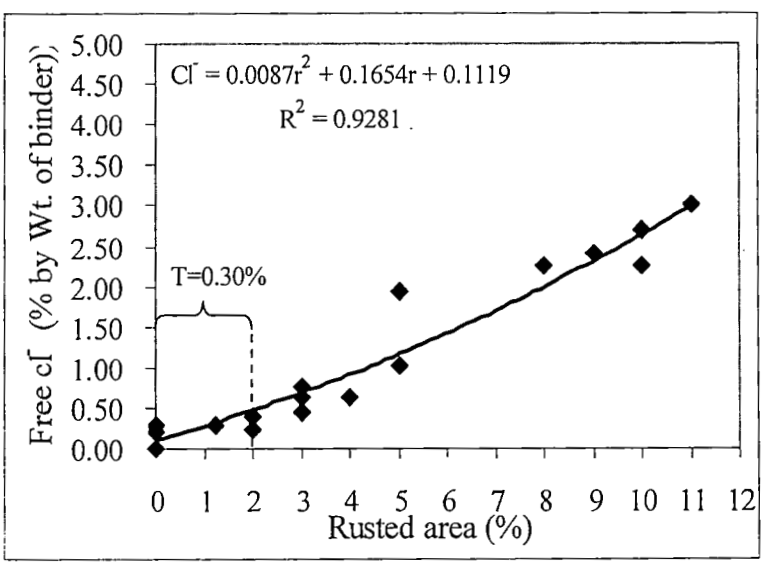
ในบทนี้ได้กล่าวถึง การหาค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤติจากฐานข้อมูลด้านความคงทนของคอนกรีตในสภาพแวดล้อมทะเลถึง 10 ปี การหาสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระที่อายุคอนกรีตแช่น้ำทะเล 10 ปี ผลของเถ้าถ่านหินและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤติและสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระ การสร้างดัชนีความคงทนจากปริมาณคลอไรด์วิกฤติและสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระ ตลอดจนการประเมินความคงทนของคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเลจากดัชนีความคงทนควบคู่กับคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต

4.1 การหาค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (T)

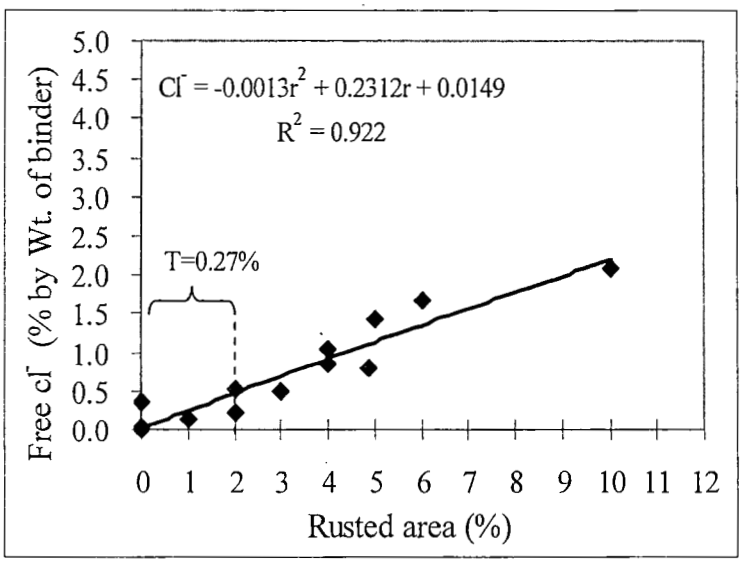
กระบวนการการกัดกร่อนของเหล็กเสริม เริ่มต้นเมื่อมีปริมาณคลอไรด์เพียงเล็กน้อยที่ผิวเหล็ก แต่เป็นการยากที่จะกล่าวว่า ปริมาณหรือความเข้มข้นของคลอไรด์เท่าใด ที่จะกระตุ้นให้เหล็กเสริมเป็นสนิม เนื่องจากขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ซึ่งยังไม่สามารถอธิบายให้ชัดเจนได้ ยิ่งไปกว่านั้น การแพร่ของคลอไรด์เข้าไปยังซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว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

ในการศึกษาที่ผ่านมาได้พยามที่จะศึกษาปริมาณคลอไรด์ที่ส่งผลให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเริ่มเป็นสนิม หรือที่เรียกว่า ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (Threshold chloride) ซึ่งพบว่าปริมาณคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตธรรมดามีค่าในช่วงร้อยละ 0.3-0.5 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินจะมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา และพบว่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.1-0.3 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (Thomas, 1996 ; Glass& Buenfeld, 1997) ในการหาระดับคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตเสริมเหล็กไม่มีวิธีมาตรฐานที่แน่นอนซึ่งนักวิจัยหลายท่านได้ใช้วิธีการหาที่แตกต่างกัน เช่น การใช้วิธีศักย์ไฟฟ้าเคมีเพื่อวิเคราะห์ความเสี่ยงที่เหล็กเริ่มเกิดสนิม หรือการหาจากความสัมพันธ์ระหว่างการกัดกร่อนเหล็กเสริมกับปริมาณคลอไรด์ที่ใกล้ผิวเหล็ก เป็นต้น ในการศึกษาครั้งนี้ทำการหาปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (T) จากข้อมูลที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีตกับปริมาณคลอไรด์อิสระที่ตำแหน่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีต ที่ได้จากการทดสอบหลังจากที่แช่ตัวอย่างคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3, 4, 5, 7 และ 10 ปี โดยกำหนดให้ปริมาณคลอไรด์วิกฤติที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ เป็นปริมาณคลอไรด์ที่เริ่มทำให้เหล็กที่ฝังในคอนกรีตเกิดสนิม

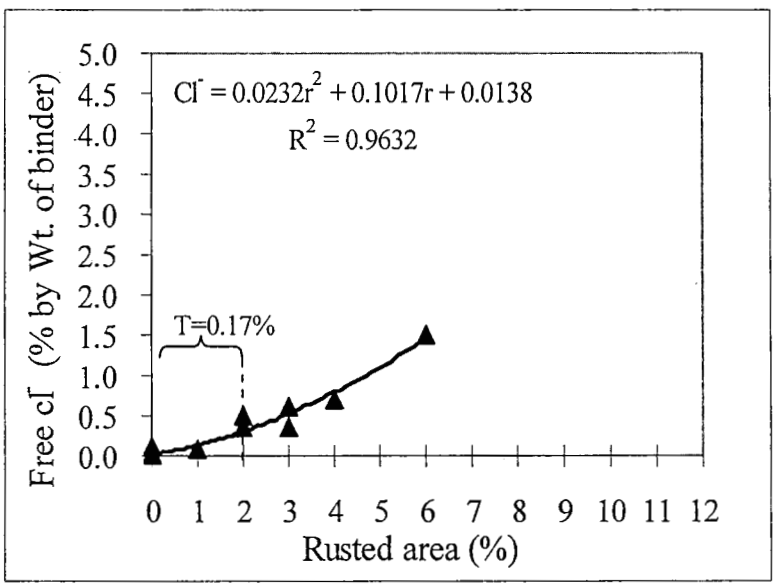
ที่เฉลี่ยจากการเกิดสนิมเหล็กร้อยละ 0 ถึง 2 เมื่อพิจารณาตามรูปที่ 4.1(a), 4.1(b), 4.1(c), 4.1(d) และ 4.1(e) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเกิดสนิมกับปริมาณคลอไรด์ที่บริเวณใกล้ผิวเหล็กในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ หลังจากที่คอนกรีตแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3, 4, 5, 7 และ 10 ปี จากการวิเคราะห์เชิงถดถอย (regression analysis) สามารถหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระ (Cl^-) และร้อยละการเกิดสนิม (r)ได้ เช่น คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 15 ดังแสดงในรูปที่ 4.1(b) ได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์และร้อยละการเกิดสนิมเหล็กคือ (r) คือ $Cl^- = -0.0013(r^2) + 0.2312(r) + 0.0149$ เมื่อแทนค่า r = 0.25%, 0.50%, 0.75%, 1.00%, 1.25%, 1.50%, 1.75% และ 2.00% ได้ ปริมาณคลอไรด์อิสระ Cl^- = 0.07, 0.13, 0.19, 0.24, 0.30, 0.36, 0.42 และ 0.47% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยของปริมาณคลอไรด์ที่สัมพันธ์กับร้อยละการเกิดสนิมในเหล็กเสริมช่วง ร้อยละ 0-2 หาได้เท่ากับ 0.27% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ซึ่งค่าเฉลี่ยของปริมาณคลอไรด์อิสระดังกล่าวนี้กำหนดให้เป็นค่า คลอไรด์วิกฤติ (T) ของคอนกรีต I45FA15 นอกจากนั้นปริมาณคลอไรด์วิกฤติ ของคอนกรีตส่วนผสมอื่นๆก็หาได้ในลักษณะเดียวกัน และแสดงดังตารางที่ 4.1



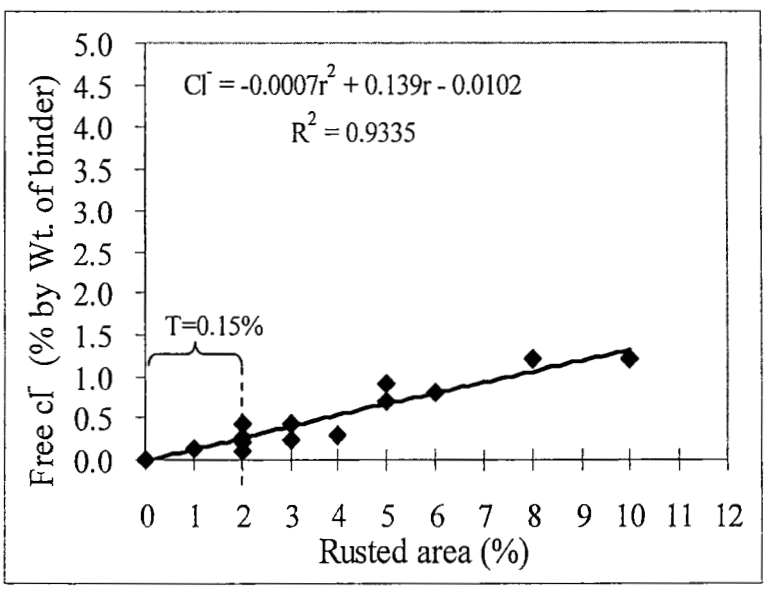
a) Cement concrete



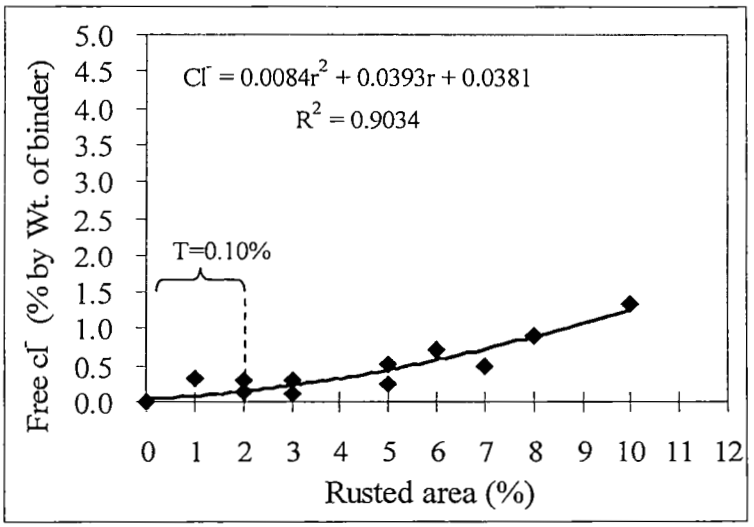
b) 15%-Fly ash concrete



c) 25%-Fly ash concrete



d) 35%-Fly ash concrete



e) 50%-Fly ash concrete

รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเกิดสนิมกับปริมาณคลอไรด์ที่บริเวณใกล้ผิวเหล็กในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3, 4, 5, 7 และ 10 ปี

4.2 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c)

ในการศึกษาครั้งนี้ หาค่า D_C ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินโดยใช้กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) (Crank, 1975) ดังแสดงในสมการที่ (4.1)

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

เมื่อ D_c ในสมการที่ (4.1) เป็นค่าคงที่ คำตอบทั่วไปของสมการที่ (4.1) แสดงดังสมการที่ (4.2)

$$C_{x,t} = C_o[1 - erf(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}})] \qquad (4.2)$$

เมื่อ $C_{x,t}$ = ปริมาณคลอไรด์อิสระ (โดยน้ำหนักวัสดุประสาน)ที่ระดับความลึก x และระยะเวลาในการแช่ t

x = ระยะจากผิวหน้าของคอนกรีต (มม.)

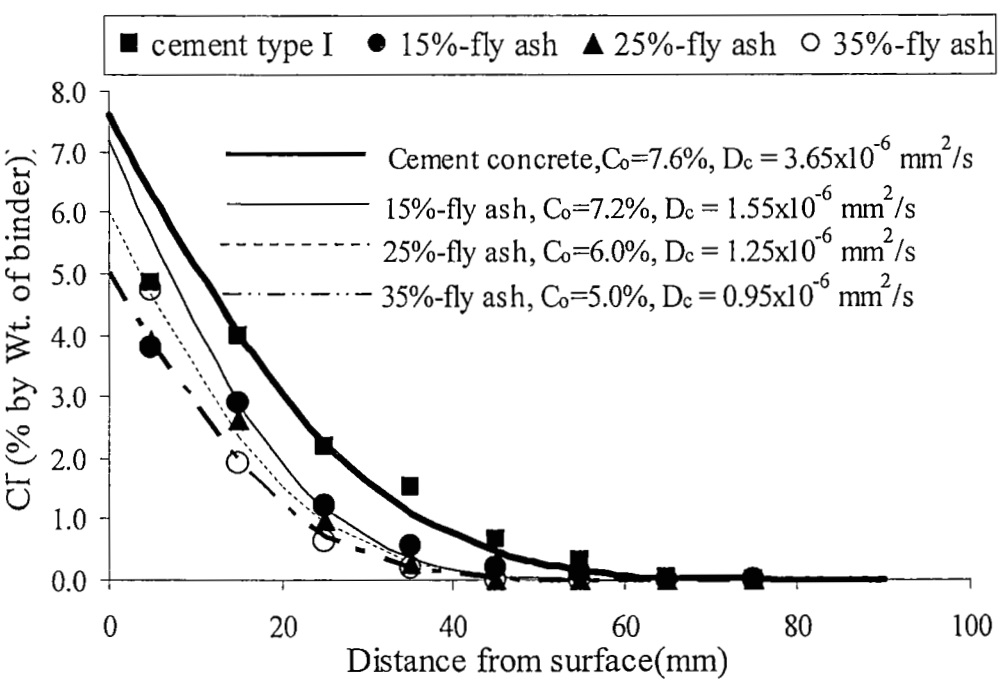
t = ระยะเวลาแช่ (วินาที)

C_o = ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต (ที่ x=0) ที่ระยะเวลาแช่ t

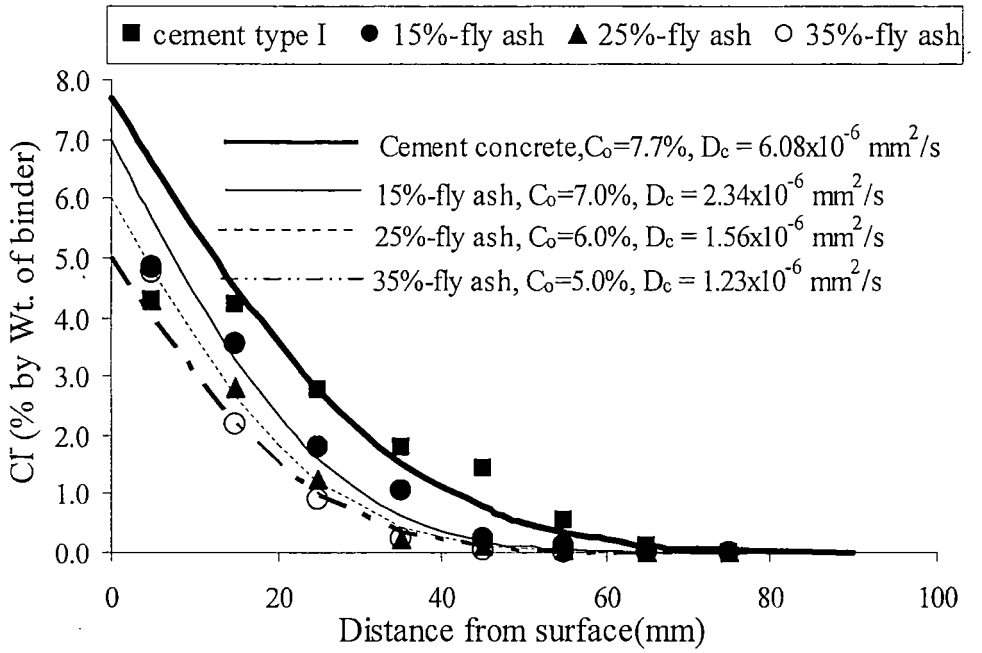
D_c = สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ระยะเวลา แช่ t (มม^2/วินาที)

erf = ฟังก์ชันค่าผิดพลาด (Error function)

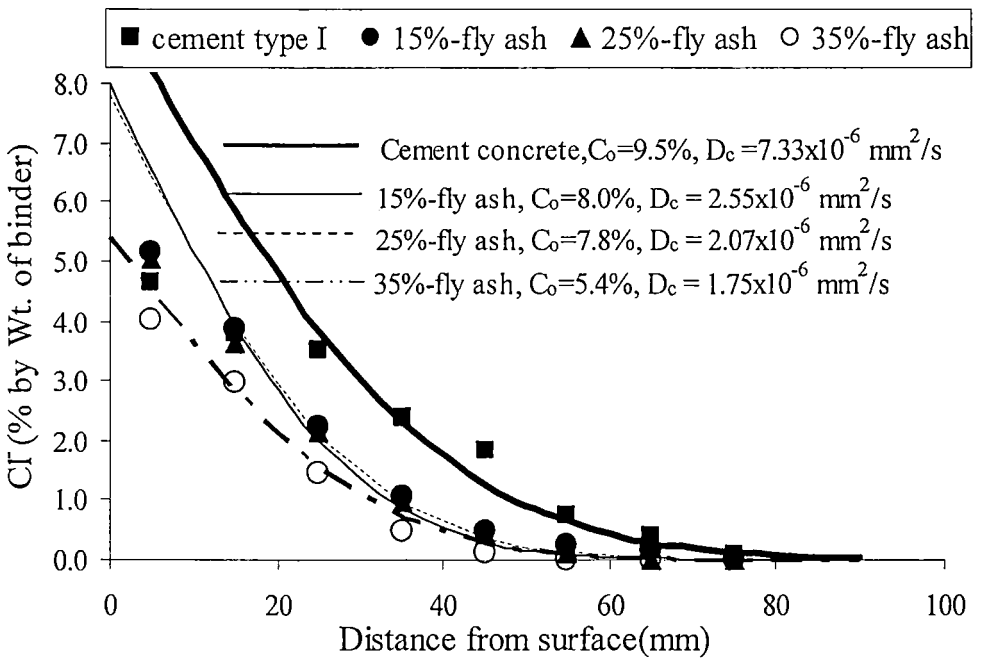
ปรับค่า D_c และ C_o ในสมการที่ (4.2) เพื่อให้กราฟสอดคล้องกับข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์มากที่สุด ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.2(a) ที่แสดงการแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 และแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 0, 15, 25 และ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 10 ปี การหาค่า D_c ได้ปรับค่า D_c และ C_o ในสมการที่ (4.2) เพื่อให้กราฟสอดคล้องกับข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์มากที่สุด ซึ่งผลที่ได้คือ สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระ (D_c) ในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 และแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 0, 15, 25 และ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 10 ปี ซึ่งเท่ากับ 3.65×10^{-6}, 1.55×10^{-6}, 1.25×10^{-6}, และ 0.95×10^{-6} มม^2/วินาที ตามลำดับ สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตส่วนผสมอื่นๆ ก็หาได้ในลักษณะเดียวกัน ดังรูปที่ 4.2(b) และ 4.2(c) และแสดงสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ดังตารางที่ 4.1



a) W/B =0.45



b) W/B =0.55



c) W/B =0.65

รูปที่ 4.2 การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 0, 15, 25 และ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 10 ปี

ตารางที่ 4.1 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ กำลังอัดที่อายุ 28 วัน และดัชนีความคงทนของคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 10 ปี

mix	chloride diffusion coefficient at 10-year exposure (D_c x10^{-6} mm^2/s)	Threshold chloride content, T (wt% of binder)	Compressive strength at 28 days (ksc)	DI = T/D_c as compared to I45 (%)
I45	3.65	0.30	504	100
I45FA15	3.65	0.30	474	212
I45FA25	1.25	0.17	452	165
I45FA15	0.95	0.17	450	212
I45FA50	0.50	0.17	338	165
I55	6.08	0.24	370	48
I55FA15	2.34	0.24	370	83
I55FA25	1.56	0.24	303	100
I55FA35	1.56	0.24	327	129
I55FA50	0.65	0.24	209	129
I65	3.65	0.30	209	48
I65FA15	1.56	0.24	209	83
I65FA25	3.65	0.24	370	48
I65FA25	3.65	0.30	209	48
I65FA50	1.25	0.30	166	100

4.3 ผลของเถ้าถ่านหินต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) และปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (T)

4.3.1 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์

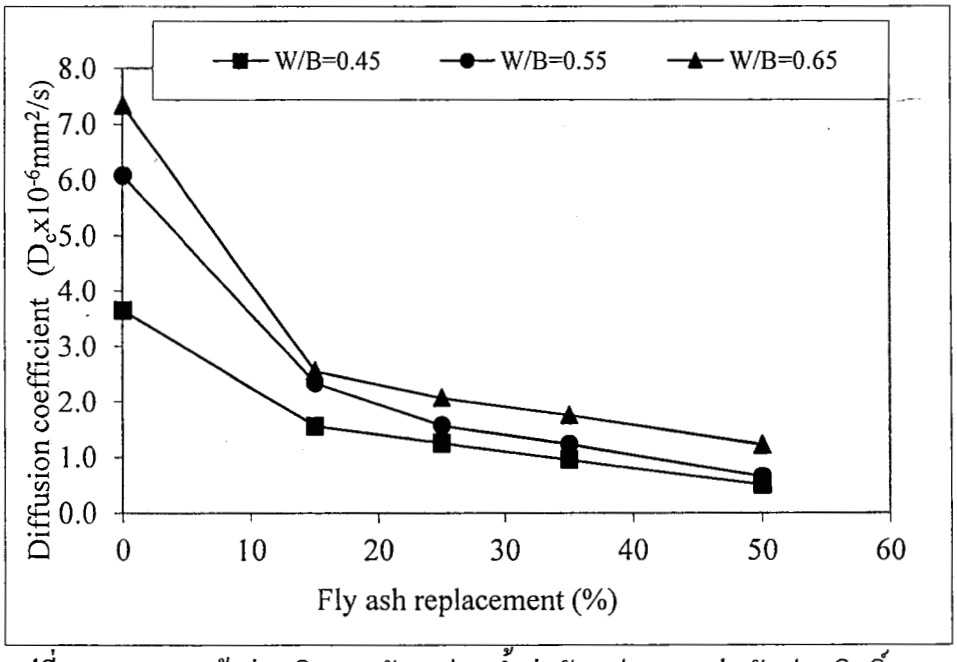
เมื่อพิจารณาผลของเถ้าถ่านหินและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อ D_c ในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลถึง 10 ปี ดังแสดงในรูปที่ 4.3 พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลงและปริมาณเถ้าถ่านหินที่มากขึ้น สามารถลดอัตราการแทรกซึมของคลอไรด์ที่เข้าไปในคอนกรีตได้อย่างชัดเจน ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับนักวิจัยท่านอื่นๆที่ได้ทำการศึกษาไว้ (Mangat& Limbachiya, 1999 ; Chalee *et al.*, 2007 ; Thomas *et al.*, 2004 ; Chalee&Jaturapitakkul , 2009 ; Chalee *et al.*, 2009; Chalee *et al.*,

2010; Cheewaket *et al.*, 2010) ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น สามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้ เนื่องจากปฏิกิริยาดังกล่าวช่วยลดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่เป็นผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำลงได้ และเปลี่ยนให้เป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุประสาน ตลอดจนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ยังเป็นสารตั้งต้นที่ก่อให้เกิดการทำลายเนื่องจากซัลเฟตในน้ำทะเล โดยจะทำให้เกิดยิปซัมที่ละลายน้ำได้และส่งผลให้คอนกรีตมีความพรุนมากขึ้นดังนั้นปฏิกิริยาปอซโซลานจึงมีส่วนช่วยอย่างมากในการทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำและลดการซึมผ่านของสารเคมีที่จะเข้าไปทำอันตรายกับโครงสร้างคอนกรีต นอกจากนั้น สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในครั้งนี้ เป็นการแทรกซึมของคลอไรด์อิสระ ซึ่งการใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้นผสมในคอนกรีต ก็ส่งผลให้การกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตมีมากขึ้น (Cheewaket *et al.*, 2010 ; Thomas, 1996) และปล่อยคลอไรด์อิสระออกมาน้อย จึงมีผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระต่ำลงด้วย

นอกจากนั้นพบว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลง มีประสิทธิผลต่อการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดามากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เช่น อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลดลงจาก 0.65 เป็น 0.45 ส่งผลให้ลดสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดา หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 10 ปี ลงเท่ากับ 3.68×10^{-6} มม.^{2}/วินาที (ลดลงจาก 7.33×10^{-6} มม.^{2}/วินาที ที่ W/B=0.65 เป็น 3.65×10^{-6} มม.^{2}/วินาที ที่ W/B= 0.45) ขณะที่คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์หลังคอนกรีตแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 10 ปี ลดลงเพียง 0.80×10^{-6} มม.^{2}/วินาที เท่านั้น (ลดลงจาก 1.75×10^{-6} มม.^{2}/วินาที ที่ W/B=0.65 เป็น 0.95×10^{-6} มม.^{2}/วินาที ที่ W/B= 0.45) การลดลงของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มีผลต่อการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดามากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน น่าจะเป็นผลจาก ความทึบน้ำในคอนกรีตธรรมดามีปัจจัยหลักมาจากกำลังอัดที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในคอนกรีตลง ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้ได้ลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลงจาก 0.65 เป็น 0.45 จึงทำให้สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ลดลง ส่วนกลไกการให้กำลังและความทึบน้ำในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในช่วงต้น จะเป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลานควบคู่กันไป (Chalee & Jaturapitakkul, 2009 ; Neville, 1996) ซึ่งคอนกรีตที่มีกำลังอัดต่ำลง (อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้น) ส่งผลให้ความทึบน้ำในคอนกรีตลดลงด้วย แต่หลังจากนั้น ความทึบน้ำในคอนกรีตมีผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่ทำให้โพรงในคอนกรีตลดลงและต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาค่อนข้างมาก ซึ่งความทึบน้ำของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในระยะยาวไม่ได้ขึ้นกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว แต่จะขึ้นกับคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเถ้าถ่านหินด้วย ดังนั้น การลดลงของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินจึงไม่มีผลชัดเจนต่อความทึบน้ำของคอนกรีตในระยะยาว และ

ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 10 ปี ไม่แตกต่างกันมาก

ในการศึกษาครั้งนี้ยังพบว่า การใช้เถ้าถ่านหินอย่างน้อยร้อยละ 15 ผสมในคอนกรีต จะลดค่า D_c ลงจากคอนกรีตธรรมดาที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินอย่างชัดเจน ในขณะที่เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินมากขึ้นจากร้อยละ 15 เป็นร้อยละ 35 ค่า D_c กลับมีค่าลดลงไม่มากนัก เช่น เมื่อแทนที่เถ้าถ่านหินในคอนกรีตที่มี W/B เท่ากับ 0.45 ร้อยละ 15 ทำให้ค่า D_c ที่แช่น้ำทะเล 10 ปี ลดลงจากคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน เท่ากับ 2.1×10^{-6} มม^2/วินาที (ลดจาก 3.65×10^{-6} มม^2/วินาที ในคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน เป็น 1.55×10^{-6} มม^2/วินาที ในคอนกรีตที่แทนที่เถ้าถ่านหินร้อยละ 15) ในขณะที่การผสมเถ้าถ่านหินในคอนกรีตถึงร้อยละ 35 ส่งผลให้คอนกรีตมีค่า D_c ลดลงจากคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 15 แค่ 0.6×10^{-6} มม^2/วินาที เท่านั้น (ลดจาก 1.55×10^{-6} มม^2/วินาที ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 15 เป็น 0.95×10^{-6} มม^2/วินาที ในคอนกรีตที่แทนที่เถ้าถ่านหินร้อยละ 35)



รูปที่ 4.3 ผลของเถ้าถ่านหินและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีตเมื่อแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 10 ปี

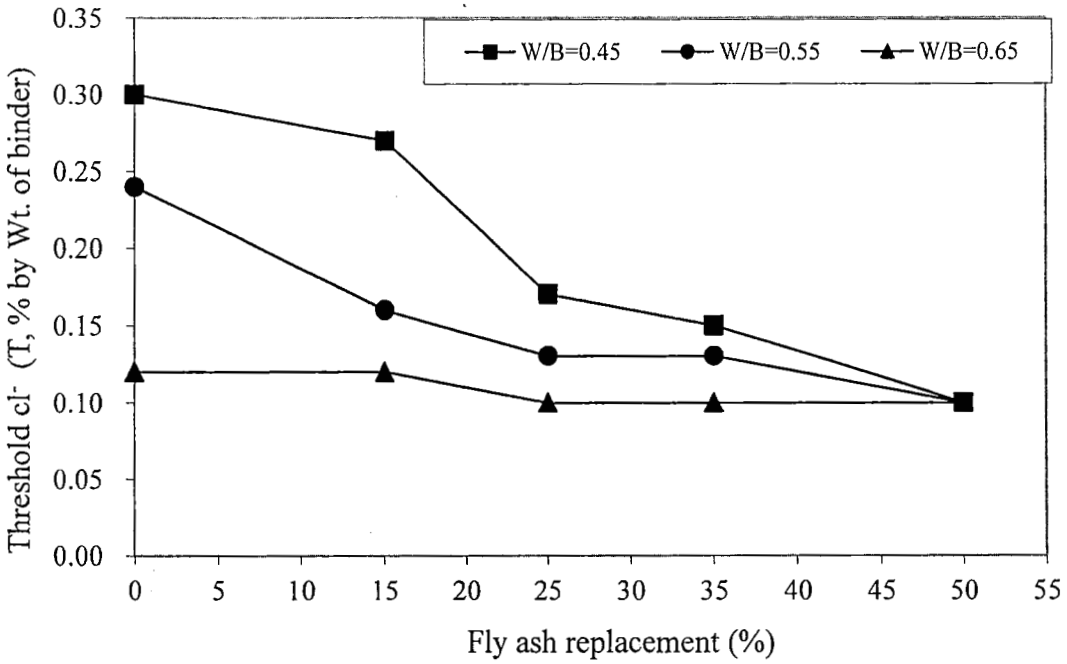
4.3.2 ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ

รูปที่ 4.4 แสดงผลของเถ้าถ่านหินต่อระดับคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลาถึง 10 ปี จากผลการศึกษาพบว่า ระดับคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตลดลงตามปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินที่มากขึ้นและชัดเจนในกลุ่มคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ มากกว่าในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง เช่น คอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 มีปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ

50 เท่ากับ 0.30%, 0.27%, 0.17%, 0.15%, และ0.10% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ ในขณะที่กลุ่มที่มี อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 มีปริมาณคลอไรด์วิกฤติเท่ากับ 0.12%,0.12%, 0.10%, 0.10% และ 0.10% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ โดยทั่วไประดับคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตจะขึ้นกับลักษณะทางเคมีและทางกายภาพของสารละลายในโพรงของซีเมนต์เพสต์ที่อยู่ใกล้ผิวเหล็กเสริม โดยลักษณะทางเคมีได้แก่ อัตราส่วนของ Cl^-/OH^- (Thomas, 1996 ; Suryavanshi *et al.*, 1998 ; Alonso *et al.*, 2000) ซึ่งถ้าความเป็นด่างในโพรงซีเมนต์เพสต์มีค่าต่ำและปริมาณคลอไรด์อิสระในโพรงมีค่าสูงจะมีผลทำให้อัตราส่วน Cl^-/OH^- มีค่าสูงขึ้นด้วย จะส่งผลให้การกัดกร่อนเหล็กเสริมเกิดขึ้นได้เร็ว ซึ่งหมายถึง ระดับของปริมาณคลอไรด์วิกฤติที่ทำให้เริ่มเกิดการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตมีค่าต่ำลง อย่างไรก็ตาม ปริมาณคลอไรด์วิกฤติยังขึ้นกับปัจจัยทางกายภาพอื่นๆ เช่น ลักษณะผิวของเหล็กที่ใช้เสริมคอนกรีต สภาพแวดล้อมภายนอก และความพรุนในคอนกรีต เป็นต้น โดยคอนกรีตที่มีความพรุนสูง จะทำให้ปริมาณคลอไรด์วิกฤติมีค่าต่ำลง เนื่องจากการกัดกร่อนเหล็กเสริมจะเกิดได้เร็วกว่าคอนกรีตที่มีความพรุนต่ำ

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตในปริมาณที่สูงขึ้น จะส่งผลให้การกักเก็บคลอไรด์มีดีขึ้นและส่งผลให้มีปริมาณคลอไรด์อิสระในโพรงของซีเมนต์เพสต์ลดลงได้ (Cheewaket *et al.*, 2010) ซึ่งน่าจะมีผลทำให้อัตราส่วนของ Cl^-/OH^- มีค่าต่ำลงตามปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหิน แต่การใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้นก็มีผลให้ความเป็นด่างในโพรงซีเมนต์เพสต์ลดลง และทำให้อัตราส่วนของ Cl^-/OH^- มีค่าเพิ่มขึ้นได้ ดังนั้น ระดับคลอไรด์วิกฤติ จึงต่ำลงตามการแทนที่เถ้าถ่านหินที่มากขึ้น นอกจากนั้นในการศึกษาครั้งนี้ พบว่า การใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณต่ำ (ในช่วงร้อยละ 15-35) ส่งผลต่อระดับคลอไรด์วิกฤติมากกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินปริมาณสูง (ร้อยละ 35-50) โดยเห็นได้ชัดในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 โดยในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 เมื่อแทนที่เถ้าถ่านหินในคอนกรีตเพิ่มจากร้อยละ 15 ถึงร้อยละ 35 ทำให้ค่า ระดับคลอไรด์วิกฤติลดลงได้ถึง 0.12% (ลดลงจาก 0.27% เป็น 0.15%) ในขณะที่การเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินจากร้อยละ 35 เป็น ร้อยละ 50 ส่งผลให้ ระดับคลอไรด์วิกฤติ ลดลงแค่ 0.05% เท่านั้น (ลดลงจาก 0.15% เป็น 0.10%) หรือ ระดับคลอไรด์วิกฤติมีค่าเกือบคงที่ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากในคอนกรีตที่มีปริมาณเถ้าถ่านหินสูงทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมาก โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณร้อยละ 35 และ 50 ให้ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใกล้เคียงกัน (Chalee & Jaturapitakkul, 2009) และมีความทึบน้ำสูงมาก ดังนั้น ระดับคลอไรด์วิกฤติที่ใกล้เคียงกันในกลุ่มคอนกรีตที่มีเถ้าถ่านหินในปริมาณสูงน่าจะมีผลมาจากลักษณะทางกายภาพของโพรงในซีเมนต์เพสต์ เป็นหลัก นอกจากค่า ระดับคลอไรด์วิกฤติจะขึ้นกับอัตราส่วนของ Cl^-/OH^- ในโพรงซีเมนต์เพสต์แล้ว ความพรุนในเนื้อคอนกรีตถือว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อระดับคลอไรด์วิกฤติ โดยคอนกรีตที่มีความพรุนสูง ความชื้นและออกซิเจนสามารถแทรกซึมเข้าไปถึงได้ง่าย และอาจส่งผลให้เหล็กเกิดการกัดกร่อนได้เร็วภายใต้ปริมาณคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นต่ำได้ ซึ่ง

หมายถึงระดับคลอไรด์วิกฤติมีค่าต่ำลงนั่นเอง โดยแสดงให้เห็นในการศึกษาครั้งนี้ว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้น ให้ ระดับคลอไรด์วิกฤติที่ต่ำลง (ตารางที่ 4.1) เช่น คอนกรีตที่แทนที่เถ้าถ่านหินร้อยละ 15 และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 มีปริมาณคลอไรด์วิกฤติเท่ากับ 0.27%, 0.16% และ 0.12% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 ผลของเถ้าถ่านหินและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตเมื่อแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 10 ปี

4.4 ดัชนีความคงทนของคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเล

คอนกรีตจะสามารถต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลได้ดีจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) ที่ต่ำ เนื่องจากจะสามารถป้องกันการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตได้ดีประกอบกับต้องมีระดับคลอไรด์วิกฤติ (T) สูงเพราะต้องใช้คลอไรด์เข้มข้นสูงในการกระตุ้นให้คอนกรีตเริ่มมีการกัดกร่อน ในการศึกษาครั้งนี้ได้หาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระ (D_c) ในคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 10 ปี และหาปริมาณคลอไรด์วิกฤติจากความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเกิดสนิมกับความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ตำแหน่งเหล็กเสริมในตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลถึง 10 ปี โดยได้ใช้อัตราส่วนระหว่าง ปริมาณคลอไรด์วิกฤติกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (T/D_c) และเทียบกับคอนกรีตเทียบกับคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 (I45) ซึ่งเป็นคอนกรีตที่ มีคุณสมบัติอย่างต่ำที่ ACI 201 กำหนดให้สามารถใช้ในสภาพแวดล้อมทะเลได้ ดังสมการที่ 4.3

$$DI = \frac{(T/D_c)}{(T/D_c)_{145}} \qquad (4.3)$$

เมื่อ

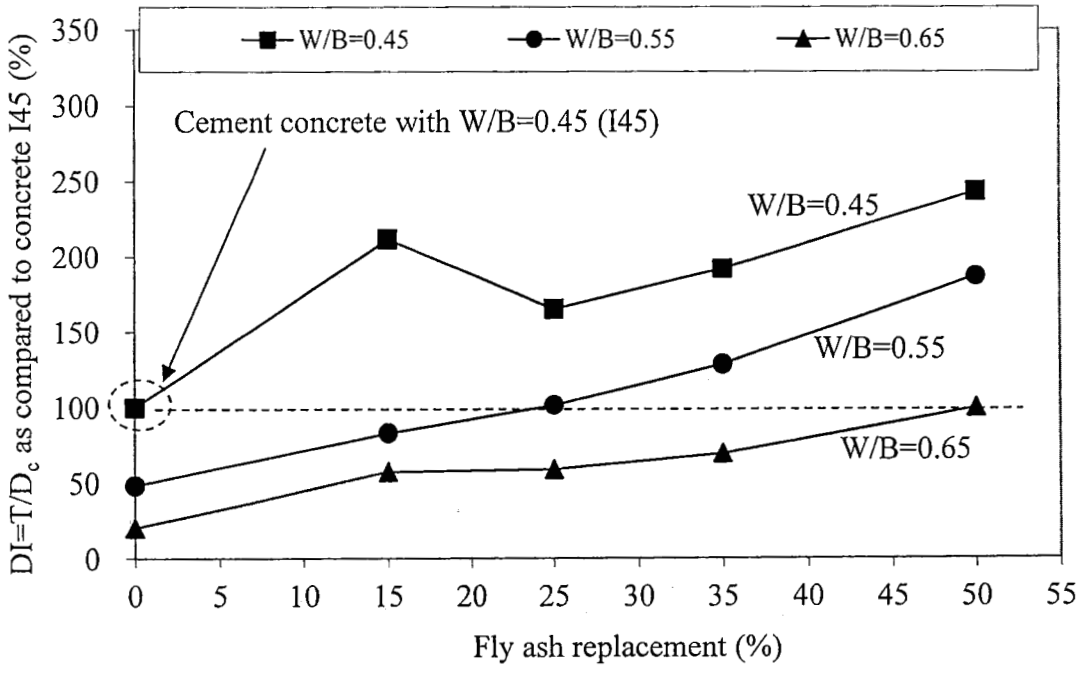
$DI =$ ดัชนีความคงทน

$(T/D_c) =$ อัตราส่วนระหว่างปริมาณคลอไรด์วิกฤติกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต

$(T/D_c)_{145} =$ อัตราส่วนระหว่างปริมาณคลอไรด์วิกฤติกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

รูปที่ 4.5 แสดงผลของเถ้าถ่านหินและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อดัชนีความคงทนของคอนกรีตเมื่อแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 10 ปี โดยพบว่า คุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตที่วัดในรูปของดัชนีความคงทน (Durability Index, DI) มีค่าสูงขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินที่มากขึ้น และมีแนวโน้มเหมือนกันในทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ตลอจนแนวโน้วของดัชนีความคงทนมีค่าลดลงตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น นั่นแสดงให้เห็นแนวโน้มที่ชัดเจนว่า การใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตสามารถต้านทานการทำลายเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลได้ดีโดยเฉพาะในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ นอกจากนั้นถ้าพิจารณาในด้านความคงทน พบว่าการผสมเถ้าถ่านหินมากกว่าร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสานในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำกว่า 0.55 ให้ค่าดัชนีความคงทน (DI) สูงกว่าร้อยละ 100 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงถึง 0.55 สามารถเพิ่มคุณสมบัติด้านความคงทนและต้านทานการทำลายเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลได้ดีกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มี อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 โดยคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 25, 35, และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 มีค่าดัชนีความคงทน (DI) เท่ากับ 101, 129 และ 187 ตามลำดับ ส่วนกลุ่มที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงถึง 0.65 พบว่าไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเล เนื่องจากมีค่าดัชนีความคงทน (DI) ต่ำกว่า 100 เกือบทุกส่วนผสม เช่น คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวะสดุประสาน 0.65 และแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีค่าดัชนีความคงทน (DI) เท่ากับ 20, 57, 59, 70 และ 100 ตามลำดับ และจะเห็นได้ว่าการผสมเถ้าถ่านหินปริมาณสูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ในคอนกรีตทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ให้ค่าดัชนีความคงทน (DI) สูงกว่าหรือเท่ากับ 100 โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 ให้ค่าดัชนีความคงทน (DI) เท่ากับ 243, 187 และ 100 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการพิจารณาความเหมาะสมของคอนกรีตที่ใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเลดังที่กล่าวมาข้างต้นได้พิจารณา

เฉพาะผลของการต้านทานการทำลายเหล็กเสริมเนื่องจากสารประกอบคลอไรด์ ซึ่งถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญ แต่นอกเหนือจากปัจจัยดังกล่าว การเลือกใช้คอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเลจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตควบคู่ไปด้วย เพราะถึงแม้ว่าคอนกรีตจะมีการต้านทานการทำลายเนื่องจากคลอไรด์ได้ดี แต่ถ้าเป็นคอนกรีตที่มีกำลังต่ำเกินไปก็ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน



รูปที่ 4.5 ผลของเถ้าถ่านหินและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อดัชนีความคงทนของคอนกรีตเมื่อแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 10 ปี

4.5 การจำแนกคุณภาพของคอนกรีตเพื่อใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเลจากดัชนีความคงทนและกำลังอัดคอนกรีต

การพิจารณาคุณสมบัติคอนกรีตเพื่อใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเลจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติด้านความคงทนและคุณสมบัติเชิงกลควบคู่กันไป เพราะถึงแม้ว่าคอนกรีตจะสามารถต้านทานการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ได้ดี แต่กลับพบว่ามีกำลังอัดในช่วงต้นต่ำ (คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินปริมาณสูง) ก็อาจส่งผลให้คอนกรีตไม่สามารถรับแรงเชิงกลในช่วงต้นได้ ก่อให้เกิดรอยร้าวในคอนกรีตซึ่งทำให้เกลือคลอไรด์และซัลเฟตสามารถที่จะเข้าทำลายเหล็กเสริมและคอนกรีตได้ง่ายขึ้น

ในการศึกษาครั้งนี้ได้จำแนกคุณภาพของคอนกรีตเพื่อใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเลจากดัชนีความคงทนและกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน เพื่อเป็นการยืนยันว่าคอนกรีตมีคุณสมบัติด้านความคงทนที่ดีควบคู่กับคุณสมบัติเชิงกลที่เหมาะสม โดยรูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความคงทนของคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล 10 ปี และกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน โดยเลือกกำลังอัดอย่างต่ำของคอนกรีตที่เหมาะสมในการก่อสร้างในสภาพแวดล้อมทะเลเท่ากับ 350 กก./ซม.^{2} เป็น

เกณฑ์ ซึ่งเป็นกำลังอัดคอนกรีตอย่างต่ำที่แนะนำโดย ACI 201 ดังนั้นสามารถจำแนกคุณภาพของคอนกรีตเพื่อใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเลโดยคำนึงถึงคุณสมบัติความคงทนควบคู่กับคุณสมบัติเชิงกลได้เป็น 4 กลุ่ม ดังนี้

1) คงทนสูง-กำลังอัดสูง (high corrosion resistance-high strength)

2) คงทนสูง-กำลังอัดต่ำ (high corrosion resistance-low strength)

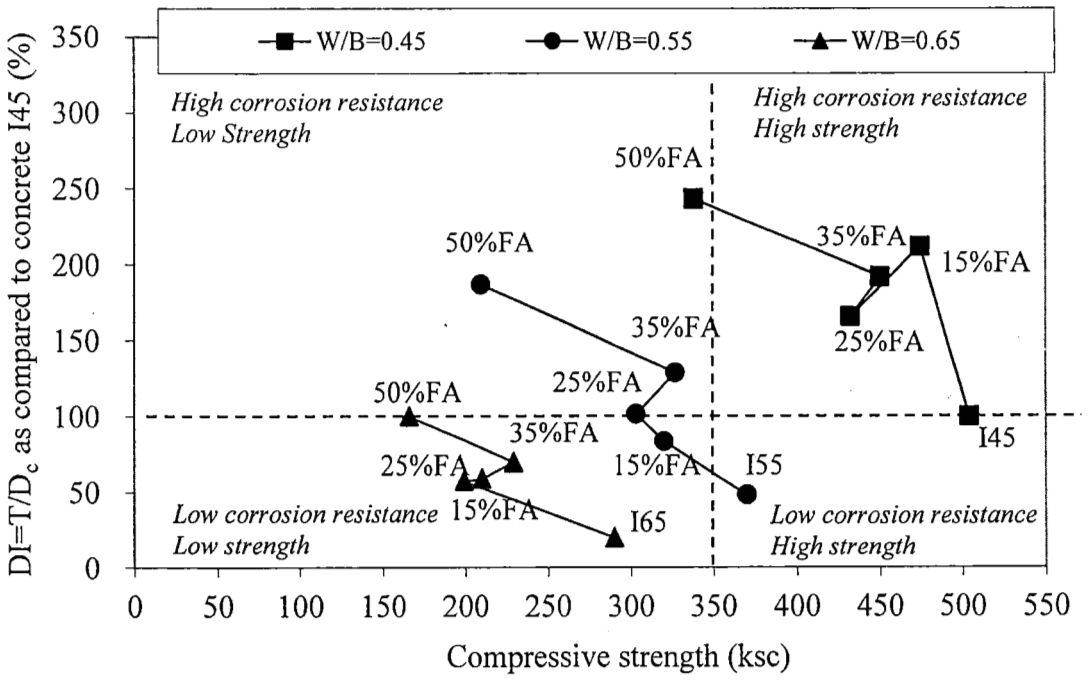
3) คงทนต่ำ-กำลังอัดสูง (low corrosion resistance-high strength)

4) คงทนต่ำ-กำลังอัดต่ำ (low corrosion resistance-low strength)

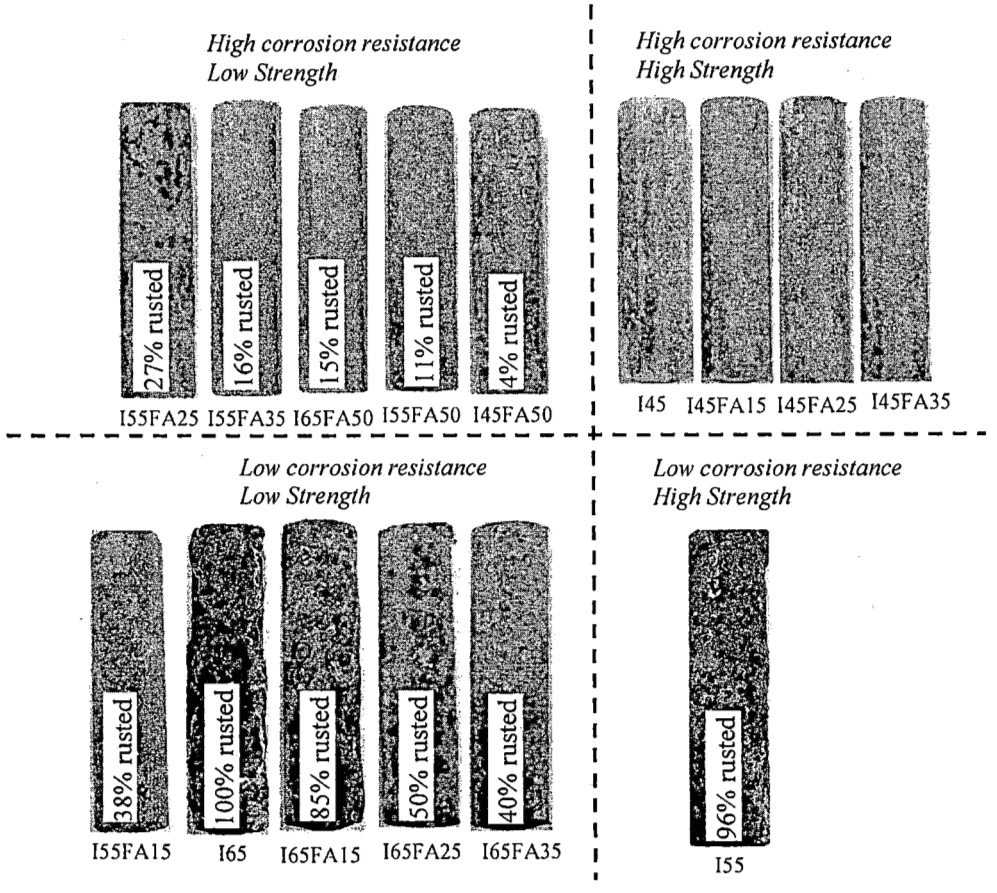
จากการจำแนกดังกล่าวพบว่า คอนกรีตที่มีคุณสมบัติเหมาะสมในการใช้งานในสภาพแวดล้อมทะเลได้แก่ กลุ่มคอนกรีตที่มี W/B เท่ากับ 0.45 และผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 15-35 ส่วนการใช้เถ้าถ่านหินสูงถึงร้อยละ 50 ถึงแม้จะมีคุณสมบัติด้านความคงทนที่ดี แต่กำลังอัดมีค่าค่อนข้างต่ำ เมื่อพิจารณาควบคู่กับการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ระดับความลึก 50 มม.หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 10 ปี ดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่า กลุ่มที่เกิดการกัดกร่อนเหล็กเสริมน้อยที่สุดคือ คงทนสูง-กำลังอัดสูง (high corrosion resistance-high strength) ส่วนกลุ่มที่มีคุณสมบัติแย่ที่สุดและไม่เหมาะสมในการนำมาใช้ในงาน ก่อสร้างในสิ่งแวดล้อมทะเล ได้แก่ คงทนต่ำ-กำลังอัดต่ำ (low corrosion resistance-low strength)ซึ่งผลสรุปคุณภาพของคอนกรีตที่ใช้ในสภาพแวดล้อมทะเลที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้แสดงดัง ตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การจำแนกคุณภาพของคอนกรีตเพื่อใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเลโดยใช้ดัชนีความคงทนและกำลังอัดคอนกรีต

คุณภาพคอนกรีต	ความคงทน	ส่วนผสมคอนกรีต
สูง	คงทนสูง-กำลังอัดสูง	- คอนกรีตที่มี W/B = 0.45 ผสมเถ้าถ่านหินไม่เกิน ร้อยละ 35
ปานกลาง	คงทนสูง-กำลังอัดต่ำ	- คอนกรีตที่มี W/B = 0.55 ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 25- 35 - คอนกรีตที่มี W/B = 0.45, 0.55 ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 50
ต่ำ	คงทนต่ำ-กำลังอัดสูง	- คอนกรีตธรรมดาที่มี W/B = 0.55
ต่ำมาก	คงทนต่ำ-กำลังอัดต่ำ	- คอนกรีตทุกส่วนผสมที่มี W/B = 0.65



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความคงทนของคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล 10 ปี และกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 4.7 การเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ระดับความลึก 50 มม.หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 10 ปี

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากผลการศึกษาสามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1) สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตลดลงตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลง และปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินสูงขึ้น และการลดลงของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีผลต่อการลดลงของสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดามากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน

5.1.2) ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (คลอไรด์อิสระ)ในคอนกรีต มีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลดลง และปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินสูงขึ้น (โดยเฉพาะในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณต่ำ)

5.1.3) การใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 สามารถเพิ่มคุณสมบัติด้านความคงทนและต้านทานการทำลายเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลได้ดีเทียบเท่ากับคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

5.1.4) ความคงทนของคอนกรีต ที่วิเคราะห์จากดัชนีความคงทน (T/Dc เทียบกับคอนกรีตที่มี W/B เท่ากับ 0.45) และกำลังอัด พบว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหิน ร้อยละ 15-35 มีคุณสมบัติด้านความคงทนที่ดี สามารถต้านทานการทำลายและยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.1.5) ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินสูงขึ้นส่งผลให้สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมในเหล็กเสริมได้ดีขึ้น แต่ส่งผลให้กำลังอัดที่อายุ 28 วันมีค่าต่ำลง ดังนั้นในการวิเคราะห์ดัชนีความคงทนของคอนกรีต จะต้องพิจารณาทั้งคุณสมบัติเชิงกล (กำลังอัด) และคุณสมบัติด้านความคงทน (คลอไรด์วิกฤติ สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ การเกิดสนิมเหล็ก) ควบคู่กันไป เพื่อให้ได้ส่วนผสมที่เหมาะสมในการก่อสร้างในสิ่งแวดล้อมทะเล ซึ่งรูปแบบการสร้างดัชนีความคงทนที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ สามารถนำไปใช้กับคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานชนิดอื่นๆได้ ตลอดจนใช้เป็นตัวบ่งชี้ด้านความคงทนระหว่างคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานต่างชนิดกันได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1) ควรดำเนินการเก็บข้อมูลการกัดกร่อนคอนกรีตเนื่องจากน้ำทะเลอย่างต่อเนื่องและเป็นระบบ เพื่อให้ข้อมูลที่ได้มีความสมบูรณ์ และสามารถนำไปเป็นฐานข้อมูลที่ใช้งานได้จริง

5.2.2) ควรเก็บตัวอย่างน้ำทะเลจากชายฝั่งทะเลอันดามัน และพื้นที่ชายฝั่งทะเลอื่นๆ ในประเทศไทย เพื่อเป็นข้อมูลเปรียบเทียบกับน้ำทะเลชายฝั่งอ่าวไทย ที่ทำการแช่ตัวอย่างคอนกรีตในงานวิจัยนี้

5.2.3) ควรมีการศึกษาถึงการนำวัสดุปอซโซลานชนิดอื่นมาใช้ในการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากน้ำทะเล เช่น เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เถ้าชานอ้อย เถ้าปาล์มน้ำมัน เป็นต้น ตลอดจนสร้างดัชนีความคงทนของคอนกรีตที่ผสมวัสดุเหล่านี้

เอกสารอ้างอิง

วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2554). การปรับปรุงความคงทนของคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเลโดยใช้เถ้าถ่านหิน. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, 16*(2), 51-56.

American Concrete Institute, 2003, ACI 232.2R-03: Use of fly ash in concrete, ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, Michigan.

American Concrete Institute, 2005, ACI 318-05: Building Code Requirements for Structural Concrete, ACI Manual of Concrete Practice, Part 4, Michigan.

ASTM. C1152 M-04E01. Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete, (2008). Annual Book of ASTM Standards ;04.02.

ASTM. C618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, fly ash, natural pozzolan, pozzolans, (1997). Annual Book of ASTM Standards; 04.01.

Achintya, H. and Prasad, M.M., (2003). Behaviour of Concrete in Freeze-thaw Environment of Sea Water. *IE (I) Journal, 84*, 96-101.

Alonso, C., Andrade, C., Castellote, M., Castro, P., (2000). Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar. *Cement and Concrete Research*, 30, 1047-1055.

Chalee, W., Teekavanit, M., Kiattikomol, K., Siripanichgorn, A. & Jaturapitakkul, C., (2007). Effect of W/C Ratio on Covering Depth of Fly Ash Concrete in Marine Environment. *Construction and Building Materials, 21,* 965-71.

Chalee, W., Jaturapitakkul, C. & Chindaprasirt P., (2009). Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater. *Marine Structures, 22,* 341-353.

Chalee, W., (2007). Effect of Fly Ash Finenesses and W/B Ratios on Concrete in Marine Environment. A *Dissertation of the Degree of Doctor of Philosophy (Civil Engineering)*, Faculty of Engineering King Mongkut's University of Technology Thonburi

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., 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

Cheewaket, T., Jaturapitakkul, C., and Chalee, W., *(2010).* Long term performance of chloride binding capacity in fly ash concrete in a marine environment. *Construction and Building Material* 24, 1352–1357.

Crank, J. (1975) The mathematic of diffusion, 2nd, edn. Oxford Press, London.

Glass, G.K., Buenfeld, N.R., (1997). The presentation of the chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. *Corrosion Science, 39,* 1001-1013.

Gengying, Li., (2004). Properties of High-Volume Fly Ash Concrete Incorporating Nano-SiO_2. *Cement and Concrete Research 33,* 425-31.

Hoff, G.C., (1991). Durability of Offshore and Marine Concrete Structures. *The 2nd International Conference of Durability of Concrete*, August 4-9, Montreal, Canada, 33-64.

Lambert, P., Page, C.L. & Vassie, P.R.W., (1991). Investigations of Reinforcement Corrosion. Electrochemical Monitoring of Steel in Chloride-Contaminated Concrete. *Materials and Structures, 24*, 351-358.

Mangat, PS., Limbachiya, MC., (1999). Effect of initial curing on chloride diffusion in concrete repair materials. *Cement and Concrete Research, 29,* 1475-85.

Mehta, P.K., (1991). Concrete in the Marine Environment, 1sted., England, Taylor & Francis Ltd. Broomfield, J.P., (1996). Corrosion of Steel in Concrete, England, Taylor & Francis Ltd

Neville, A.M., (1996). Properties of Concrete, 4thed., England, Addison Wesley

Siddique, R., (2003). Performance Characteristics of High-Volumn Class F Fly Ash Concrete. *Cement and Concrete Research, 33,* 539–547.

Suryavanshi, AK., Scantleburyb, JD., Lyod, SB., (1998). Corrosion of reinforcement Steel embedded in high water-cement ratio concrete contaminated with chloride. *Cement and Concrete Composites, 20,* 261-281.

Tang, L. & Nilsson, LO., (1993). Chloride Binding Capacity and Binding Isotherms of OPC Pastes and Mortars", *Cement and Concrete Research, 23,* 247-253.

Tritthart, J., (1989). Concrete Binding in Cement. II. The Influence of the Hydroxide Concentration in the Pore Solution of Hardened Cement Paste on Chloride Binding. *Cement and Concrete Research, 19,* 683-691.

Thomas, M.D.A. & Matthews, J.D., (2004). Performance of pfa Concrete in a Marine Environment-10-year Results. *Cement and Concrete Composites, 26,* 5-20.

Thomas M. (1996). Chloride threshold in marine concrete. *Cement and Concrete Research, 26,* 513-519.

ภาคผนวก ก

ผลผลิต (Output)

บทความวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับชาติ

1) วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, (2554), ปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล, *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม , 7 (1)*, 21-28.

ปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล

Threshold Chloride Content of Fly ash Concrete under Marine Environment

วิเชียร ชาลี [1] และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล [2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมน้ำทะเล คอนกรีตควบคุมทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 (คอนกรีต I45 I55 I65 ตามลำดับ) ในแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานได้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะในอัตราร้อยละ15, 25, 35 และ 50โดยน้ำหนักวัสดุประสาน หล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด 200x200x200 มม. และฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 10, 20, 50 และ 75 มม. หลังจากบ่มคอนกรีตจนอายุครบ 28 วัน นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่บริเวณชายฝั่งทะเล จ.ชลบุรี ทำการเก็บตัวอย่างทดสอบปริมาณคลอไรด์อิสระ (ใช้น้ำทำละลาย) ในคอนกรีต ณ ตำแหน่งที่ฝังเหล็ก และวัดพื้นที่สนิมเหล็กที่เกิดขึ้นหลังแช่คอนกรีตในน้ำทะเลเป็นเวลา 3, 4, 5, 7 และ 10 ปี จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ตำแหน่งฝังเหล็กกับการเกิดสนิมของเหล็กเสริม สามารถวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์วิกฤติในแต่ละส่วนผสมได้ ผลการวิจัยพบว่า ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ ในคอนกรีต มีค่าลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินสูงขึ้น (โดยเฉพาะในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณต่ำ) และมีค่าลดลงตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มากขึ้น

คำสำคัญ : สภาวะแวดล้อมทะเล, เถ้าถ่านหิน, คลอไรด์วิกฤติ, อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

---

[1]ผู้ช่วยศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา

[2]ศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รับเมื่อ 22 กันยายน 2553 ตอบรับเมื่อ 24 เมษายน 2554

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. Control concretes were designed by using Portland cement type I with water to binder (W/B) ratios of 0.45, 0.55 and 0.65 (Concrete I45, I55 and I65, respectively). Mae Moh fly ash was used as a partial replacement of Portland cement type I at 15, 25, 35, and 50% by weight of binder with the same W/B ratio of control concretes. 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 concretes 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 free chloride content (water soluble chloride) at the position of embedded steel bar and corrosion of embedded steel bar after being exposed to tidal zone of sea water for 3, 4, 5, 7, and 10 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, W/B ratio

1. บทนำ

การใช้เถ้าถ่านหินในการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตเพื่อใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นที่ยอมรับว่าให้ผลไปในทิศทางที่ดีต่อการป้องกันการทำลายของสภาวะแวดล้อมดังกล่าว โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้เถ้าถ่านหินที่มีคุณสมบัติที่ดี สามารถลดการทำลายเนื่องจากสภาวแวดล้อมทะเลได้อย่างชัดเจน ทั้งทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น [1-5] และลดการแทรกซึมของคลอไรด์และซัลเฟต ที่จะเข้าไปทำอันตรายกับคอนกรีต หรือเพิ่มความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ [6, 7] ซึ่งเป็นผลให้ปริมาณคลอไรด์อิสระที่จะมาทำลายเหล็กเสริมมีปริมาณน้อยลง โดยแสดงผลการวิจัยอย่างชัดเจนและสอดคล้องกัน ทั้งที่มีการศึกษาในสภาพแวดล้อมจริง และในห้องปฏิบัติการ อย่างไรก็ตามการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตเพื่อป้องกันการทำลายเนื่องจากสภาพแวดล้อมทะเลและยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีต ค่อนข้างที่จะซับซ้อนและมีปัจจัยหลายอย่างที่ต้องศึกษา ไม่ว่าจะเป็นลักษณะทางด้านกายภาพของคอนกรีต เช่น ความทึบน้ำ หรือลักษณะทางเคมี เช่น การกักเก็บคลอไรด์ ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ และสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ เป็นต้น ซึ่งลักษณะทั้งหมดนี้เรียกว่า คุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต

ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ เป็นปริมาณคลอไรด์รอบผิวเหล็กเสริมที่ส่งผลให้เริ่มเกิดการกัดกร่อน โดยทั่วไปคอนกรีตเสริมเหล็กเริ่มมีการกัดกร่อนเมื่อปริมาณคลอไรด์มีค่าเกินร้อยละ 0.2 ถึง 0.7 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน [7, 8] อย่างไรก็ตามปริมาณคลอไรด์วิกฤติจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ลักษณะผิวของเหล็กเสริม, ชนิดของวัสดุประสาน, คุณสมบัติของคอนกรีต, ตลอดจนสภาวะแวดล้อมที่คอนกรีตสัมผัส เป็นต้น ปริมาณคลอไรด์วิกฤติมีประโยชน์ในการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างสถานะของการกัดกร่อนเริ่มต้นของเหล็กที่เสริมในคอนกรีต กับปริมาณของคลอไรด์อิสระรอบผิวของเหล็กเสริม ซึ่งจะมีผลสืบเนื่องในการพิจารณาความเสี่ยงของการกัดกร่อนในเหล็กเสริมเมื่อทราบปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีต นอกจากนั้น ในงานโครงสร้างใหม่ที่เริ่มมีการออกแบบที่ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติด้านความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก จำเป็นที่จะต้องใช้ข้อมูลปริมาณคลอไรด์วิกฤติประกอบในการออกแบบด้วย งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่ได้นำเสนอค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤติจากฐานข้อมูลในห้องปฏิบัติการโดยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งจะวัดค่าออกมาในรูปแบบของความเสี่ยงที่เริ่มกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตมากกว่าการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นจริง และเป็นสภาวะแวดล้อมที่อยู่ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งจะแตกต่างจากสภาวะแวดล้อมจริงที่มีปัจจัยหลายอย่างที่เกื้อหนุนให้เกิดการทำลายโครงสร้างทั้งทางด้านเคมีและทางด้านกายภาพ นอกจากนั้นยังพบว่ามีงานศึกษาที่เกี่ยวกับปริมาณคลอไรด์วิกฤติจากการเก็บข้อมูลในสภาวะแวดล้อมจริงจำนวนน้อยมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาปริมาณคลอไรด์วิกฤติจากการเก็บข้อมูลของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในสภาวะแวดล้อมทะเลจริงถึงระยะเวลาแช่น้ำทะเล 10 ปี

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุ

การศึกษานี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าถ่านหินที่ได้โดยตรงจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.23 มีอนุภาคที่ค้างตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 32 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 618 [9] ที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ มีปริมาณผลรวมของสารประกอบหลัก SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 79.45 และ มีค่า LOI ร้อยละ 0.52 สามารถจัดเป็นเถ้าถ่านหิน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C 618 [9] โดยลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน แสดงดังตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุประสาน

ลักษณะทางกายภาพ	วัสดุ	
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	เถ้าถ่านหิน (FA)
Specific Gravity	3.15	2.23
Retained on a Sieve	N/A	32
Mean Particle Size	3	30

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

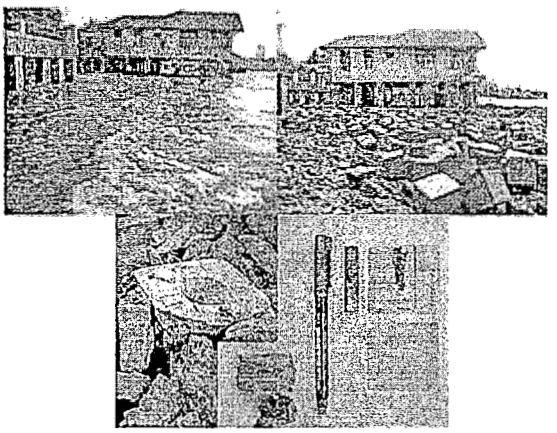
องค์ประกอบทางเคมี (%)	วัสดุ	
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	เถ้าถ่านหิน (FA)
Silicon Dioxide, SiO_2	20.80	44.95
Aluminium Oxide, Al_2O_3	5.50	23.70
Iron Oxide, Fe_2O_3	3.16	10.80
Calcium Oxide, CaO	64.97	13.80
Magnesium Oxide, MgO	1.06	3.47
Sodium Oxide, Na_2O	0.08	0.07
Potassium Oxide, K_2O	0.55	2.38
Sulfur Trioxide, SO_3	2.96	1.31
Loss On Ignition, LOI	2.89	0.52

2.2 การเตรียมตัวอย่าง

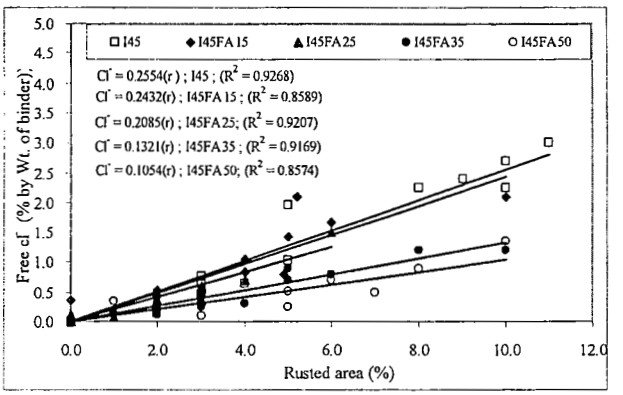
การศึกษาครั้งนี้ใช้คอนกรีตที่มี อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 และใช้เถ้าถ่านหินที่ได้โดยตรงจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาแสดงในตารางที่ 3 หล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด 200x200x200 มม. และฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. ที่ระยะหุ้มคอนกรีต 10, 20, 50 และ 75 มม. หลังจากบ่มคอนกรีตจนอายุครบ 28 วัน นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่บริเวณชายฝั่งทะเล จ.ชลบุรี โดยคอนกรีตสัมผัสกับน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง คุณสมบัติของน้ำทะเลบริเวณที่นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ มีค่าความเป็นกรดด่าง (pH) อยู่ในช่วง 7.9-8.2 และปริมาณคลอไรด์มีค่าอยู่ระหว่าง 16,000-19,000 มก./ล. ส่วนซัลเฟตระหว่าง 2,200-2,700 มก./ล. และ มีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 20 ถึง 35 องศาเซลเซียส หลังจากแช่ตัวอย่างคอนกรีตครบ 3, 4, 5, 7 และ10 ปี ได้นำคอนกรีตมาทุบดูการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีตโดยการวัดพื้นที่ของการเกิดสนิมเหล็กและนำตัวอย่างคอนกรีตบริเวณรอบผิวเหล็กที่ฝังมาทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ตาม ASTM C1218 [10] ซึ่งเป็นปริมาณคลอไรด์อิสระที่อยู่ในโพรงของคอนกรีต โดยจากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์กับการเกิดสนิมของเหล็กเสริมสามารถนำมาวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์วิกฤติในแต่ละส่วนผสมได้ รูปที่ 1 แสดงรายละเอียดตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต

ส่วนผสม	ส่วนผสมคอนกรีต (กก/ม^3)					W/B
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	เถ้าถ่านหิน (FA)	ทราย	หิน	น้ำ	
I45	478	-	639	1,024	215	0.45
I55	478	-	639	971	262	0.55
I65	478	-	639	922	311	0.65
I45FA15	406	72	639	1,004	215	0.45
I45 FA 25	359	119	639	990	215	0.45
I45 FA 35	311	167	639	977	215	0.45
I45 FA 50	239	239	639	957	215	0.45
I55 FA 15	406	72	639	948	262	0.55
I55 FA 25	359	119	639	933	262	0.55
I55 FA 35	311	167	639	918	262	0.55
I55 FA 50	239	239	639	897	262	0.55
I65 FA 15	406	72	639	898	311	0.65
I65 FA 25	359	119	639	881	311	0.65
I65 FA 35	311	167	639	864	311	0.65
I65 FA 50	239	239	639	840	311	0.65



รูปที่ 1 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบปริมาณคลอไรด์วิกฤติ



รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเกิดสนิมกับปริมาณคลอไรด์ที่บริเวณใกล้ผิวเหล็กในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3, 4, 5, 7 และ 10 ปี

3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

3.1 การหาปริมาณคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีต (T)

ในการศึกษาครั้งนี้ทำการหาปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (T) จากข้อมูลที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีตกับปริมาณคลอไรด์อิสระที่ตำแหน่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีต ที่ได้จากการทดสอบหลังจากที่แช่ตัวอย่างคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3, 4, 5, 7 และ 10 ปี โดยกำหนดให้ปริมาณคลอไรด์วิกฤติที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ เป็นปริมาณคลอไรด์ที่เริ่มทำให้เหล็กที่ฝังในคอนกรีตเกิดสนิม (ร้อยละ 1) เมื่อพิจารณาตามรูปที่ 2 ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเกิดสนิมกับปริมาณคลอไรด์ที่บริเวณใกล้ผิวเหล็กในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3, 4, 5, 7 และ 10 ปี พบว่าสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระ (Cl^-) และร้อยละการเกิดสนิม (r) คือ $Cl^- = 0.2554(r)$ เมื่อแทนค่า r เท่ากับ 1% ได้ Free $Cl^- = 0.26\%$ โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ซึ่งปริมาณคลอไรด์อิสระดังกล่าวกำหนดให้เป็นค่า คลอไรด์วิกฤติ (T) ของคอนกรีต I45 นอกจากนั้นปริมาณคลอไรด์วิกฤติ ของคอนกรีตส่วนผสมอื่นๆก็หาได้ในลักษณะเดียวกัน และแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้ง

ส่วนผสม	ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน)	ส่วนผสม	ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน)
I45	0.26	I55FA35	0.13
I45FA15	0.24	I55FA50	0.10
I45FA25	0.20	I65	0.18
I45FA35	0.13	I65FA15	0.14
I45FA50	0.20	I65FA25	0.13
I55	0.24	I65FA35	0.10
I55FA15	0.17	I65FA50	0.09
I55FA25	0.15		

3.2 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและเถ้าถ่านหินต่อระดับคลอไรด์วิกฤติ

โดยทั่วไประดับคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตจะขึ้นกับลักษณะทางเคมีและทางกายภาพของสารละลายในโพรงของซีเมนต์เพสต์ที่อยู่ใกล้ผิวเหล็กเสริม โดยลักษณะทางเคมีได้แก่

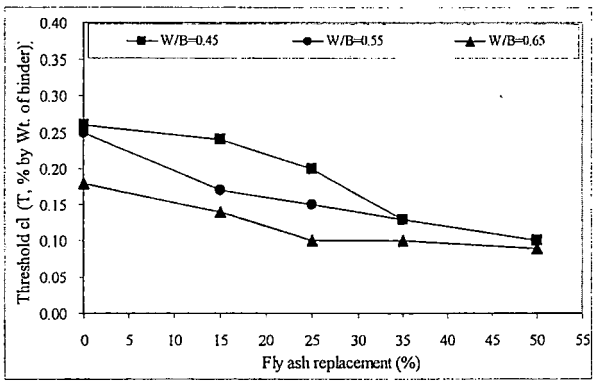
อัตราส่วนของ Cl^-/OH^- [6, 7, 11, 12] ซึ่งถ้าความเป็นด่างในโพรงซีเมนต์เพสต์มีค่าต่ำและปริมาณคลอไรด์อิสระในโพรงมีค่าสูงจะมีผลทำให้อัตราส่วน Cl^-/OH^- มีค่าสูงขึ้นด้วย จะส่งผลให้การกัดกร่อนเหล็กเสริมเกิดขึ้นได้เร็ว ซึ่งหมายถึง ระดับของปริมาณคลอไรด์วิกฤติที่ทำให้เริ่มเกิดการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตมีค่าต่ำลง อย่างไรก็ตาม ปริมาณคลอไรด์วิกฤติยังขึ้นกับปัจจัยทางกายภาพอื่นๆ เช่น ลักษณะผิวของเหล็กที่ใช้เสริมคอนกรีต สภาพแวดล้อมภายนอก และความพรุนในคอนกรีต เป็นต้น โดยคอนกรีตที่มีความพรุนสูง จะทำให้ปริมาณคลอไรด์วิกฤติมีค่าต่ำลง เนื่องจากการกัดกร่อนเหล็กเสริมจะเกิดได้เร็วกว่าคอนกรีตที่มีความพรุนต่ำ

รูปที่ 3 แสดงผลของเถ้าถ่านหินต่อ ระดับคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลจากข้อมูลถึง 10 ปี จากผลการศึกษาพบว่า ระดับคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตลดลงตามปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินที่มากขึ้น เช่น คอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 มีปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 เท่ากับ 0.26%, 0.24%, 0.20%, 0.13%, และ0.10% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตในปริมาณที่สูงขึ้น จะส่งผลให้การกักเก็บคลอไรด์มีมากขึ้น และส่งผลให้มีปริมาณคลอไรด์อิสระในโพรงของซีเมนต์เพสต์ลดลงได้ [13] ซึ่งน่าจะมีผลทำให้อัตราส่วนของ Cl^-/OH^- มีค่าต่ำลงตามปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหิน แต่การใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้นก็มีผลให้ความเป็นด่างในโพรงซีเมนต์เพสต์ลดลงได้มากเช่นกัน และทำให้อัตราส่วนของ Cl^-/OH^- มีค่าเพิ่มขึ้นได้ ดังนั้น ระดับคลอไรด์วิกฤติ จึงต่ำลงตามการแทนที่เถ้าถ่านหินที่มากขึ้น นอกจากนั้นในการศึกษาครั้งนี้ พบว่า การใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณต่ำ (ในช่วงร้อยละ 15-35) ส่งผลต่อระดับคลอไรด์วิกฤติมากกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินปริมาณสูง (ร้อยละ 35-50) เช่น ในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 เมื่อแทนที่เถ้าถ่านหินในคอนกรีตเพิ่มจากร้อยละ 15 ถึงร้อยละ 35 ส่งผลให้ค่าคลอไรด์วิกฤติลดลงได้ถึง 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 ซึ่งอาจเป็นผลมาจากในคอนกรีตที่มีปริมาณเถ้าถ่านหินสูงทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมาก โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณร้อยละ 35 และ 50 ให้ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใกล้เคียงกัน [15] และมีความทึบน้ำสูงมาก ดังนั้นระดับคลอไรด์วิกฤติที่ใกล้เคียงกันในกลุ่มคอนกรีตที่มีเถ้าถ่านหินในปริมาณสูงน่าจะมีผลมาจากลักษณะทางกายภาพของโพรงในซีเมนต์เพสต์ เป็นหลัก

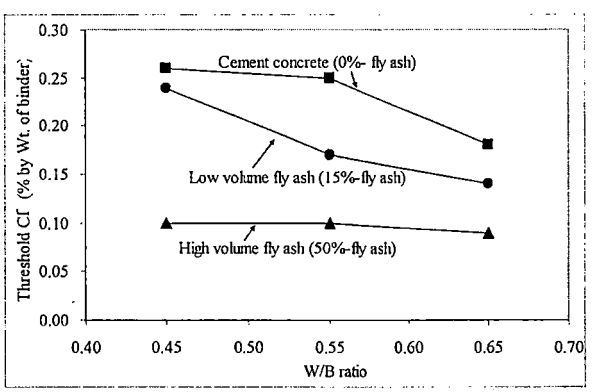
เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤติ ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์วิกฤติมีค่าลดลง และมีผลชัดเจนในคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณต่ำ (ร้อยละ 15) มากว่าในคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินปริมาณสูง (ร้อยละ 50) การที่ปริมาณคลอไรด์วิกฤติมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง จะมีความพรุนสูง ความชื้นและออกซิเจนสามารถแทรกซึมเข้าไปถึงได้ง่าย และส่งผลให้เหล็กเกิดการกัดกร่อนได้เร็วภายใต้ปริมาณคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นต่ำได้ ซึ่งหมายถึงระดับคลอไรด์วิกฤติมีค่าต่ำลงนั่นเอง

จากผลการศึกษาครั้งนี้พบว่า ปริมาณคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน แต่การเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตธรรมดากลับมีมากว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินถึงแม้ว่าระดับคลอไรด์วิกฤติจะต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา แต่ด้วยปฏิกิริยาปอซโซลานที่ส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำ และมีสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา [14] สามารถลดปริมาณของคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตกลุ่มที่ผสมเถ้าถ่านหินได้อย่างชัดเจน ดังนั้นผลการศึกษาครั้งนี้เห็นได้ว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาพแวดล้อมทะเลจะขึ้นกับความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์มากกว่าระดับของคลอไรด์วิกฤติที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามหลักการเลือกวัสดุประสานที่เหมาะสมเพื่อใช้ป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเล

จะต้องพิจารณาถึงความสามารถในการต้านทานคลอไรด์ที่สูง (สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ต่ำ) และระดับปริมาณคลอไรด์วิกฤติที่ต่ำ ตลอดจนให้คุณสมบัติเชิงกลที่ดี



รูปที่ 3 ผลของเถ้าถ่านหินต่อระดับคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง



รูปที่ 4 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อระดับคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง

4. บทสรุป

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1) ระดับคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตลดลงตามปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินที่มาก
2) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์วิกฤติมีค่าลดลง และมีผลชัดเจนในคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณต่ำ มากว่าในคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินปริมาณสูง
3) คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณต่ำ ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับคลอไรด์วิกฤติมากว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณสูง

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทุนอุดหนุนการวิจัยและพัฒนา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา สัญญาเลขที่ 12 /2553 และทุนสนับสนุนโครงการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาประจำปี พ.ศ. 2554

เอกสารอ้างอิง

1 ปริญญา จินดาประเสริฐ และอุกฤษฎ์ โข่ศรี, "กำลังรับแรงและความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบ", การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 10, 2-4 พฤษภาคม, ชลบุรี, 2548, หน้า MAT 44-48.

2 มณเฑียร ฑีฆวาณิช และคณะ. "ผลกระทบของน้ำ ทะเลต่อการซึมผ่านของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน", การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 10, 2-4 พฤษภาคม, ชลบุรี, 2548, หน้า MAT 49-54.

3 MDA. Thomas and JD. Matthews, "Performance of pfa concrete in a marine environment-10-year results", Cement and Concrete Composites, 2004, Vol.26, pp. 5-20.

4 S. Rukzon and P. Chindaprasirt, "Strength and chloride resistance of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash and fly ash", International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2009, Vol.16, pp. 475-481.

5 W. Chalee, M. Teekavanit, K. Kiattikomol, A. Siripanichgorn and C. Jaturapitakkul, "Effect of W/C ratio on covering depth of fly ash concrete in marine

environment", Construction and Building Materials, 2007, Vol.21, pp. 965-971.

6 Ki Yong Ann and Ha-Won Song. "Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete", Corrosion Science, 2007, Vol.49, pp. 4113 - 4133.

7 M. Thomas, "Chloride threshold in marine concrete", Cement and Concrete Research, 1996, Vol.26, pp. 513-519.

8 Broomfield, "Corrosion of Steel in Concrete", England Taylor & Francis, Ltd 1996, pp. 1-10.

9 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, 1997, Vol.04.01.

10 ASTM C1218, "Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete", Annual Book of ASTM Standards, 1997, Vol.04.01.

11 K Thangavel and NS. Rengaswamy, "Relationship between chloride/hydroxide ratio and corrosion rate of steel in concrete", Cement and Concrete Composites, 1998, Vol.20, pp. 283-292.

12 C. Alonso, C. Andrade, M. Castellote and P. Castro, "Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar", Cement and Concrete Research, 2000, Vol.30, pp. 1047-1055.

13 T. Cheewaket, C. Jaturapitakkul and W. Chalee, "Long term performance of chloride binding capacity in fly ash concrete in a marine environment", Construction and Building Materials, 2010, Vol.24, pp. 1352-1357.

14 W. Chalee and C. Jaturapitakkul, "Effect of W/B ratios and fly ash finenesses on chloride diffusion coefficient of concrete in marine environment", Materials and Structures, 2009, Vol.42, pp. 505-515.

ภาคผนวก ข

รายงานการเงิน

รายงานสรุปการเงิน

เลขที่โครงการ (NRPM 13 หลัก) **2554A10862004**

โครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ

สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา

ชื่อมหาวิทยาลัย บูรพา

ชื่อโครงการ การสร้างดัชนีด้านความคงทนของคอนกรีตจากข้อมูลทดสอบในสภาพแวดล้อมทะเล

ชื่อหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน / ผู้วิจัย ~~(อ./ ดร./~~ ผศ./ ~~รศ./ ศ.)~~ วิเชียร ชาลี

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ (วัน/ เดือน/ ปี) 01/04/2554 ถึงวันที่ (วัน/ เดือน/ ปี) 31/03/2555

ระยะเวลาดำเนินการ 1 ปี - เดือน ตั้งแต่วันที่ (วัน/ เดือน/ ปี) 01/04/2554 ถึงวันที่ (วัน/ เดือน/ ปี) 31/03/2555

รายจ่าย

หมวด	รายจ่ายสะสมจากรายงานครั้งก่อน	ค่าใช้จ่ายงวดปัจจุบัน	รวมรายจ่ายสะสมจนถึงงวดปัจจุบัน	งบประมาณรวมทั้งโครงการ	คงเหลือ (หรือเกิน)
1. ค่าตอบแทน	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2. ค่าจ้าง	24,000	24,000	48,000	48,000	0.00
3. ค่าวัสดุ	80,000	20,000	100,000	100,000	0.00
4. ค่าใช้สอย	132,000	100,000	232,000	232,000	0.00
5. ค่าใช้จ่ายอื่น ๆ (โปรดระบุเป็นข้อย่อย)					
รวม	236,000	144,000	380,000	380,000	0.00

จำนวนเงินที่ได้รับและจำนวนเงินคงเหลือ

จำนวนเงินที่ได้รับ

งวดที่ 1	190,000	บาท	เมื่อ พ.ค. 2554
งวดที่ 2	152,000	บาท	เมื่อ มี.ค. 2555
รวม	342,000	บาท	

ลงนามหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

ลงนามเจ้าหน้าที่การเงินโครงการ

ภาคผนวก ค

ประวัตินักวิจัย

ประวัติผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย

ชื่อ – นามสกุล (ภาษาไทย) นายวิเชียร ชาลี

ชื่อ – นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Mr. Wichian Chalee

ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์

หน่วยงานที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยบูรพา อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

โทรศัพท์ 038-102-222 ต่อ 3356

โทรสาร 038-102-222 ต่อ 3355

E-mail wichian@buu.ac.th

ประวัติการศึกษา

ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยขอนแก่น พ.ศ. 2541

ปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2546

ปริญญาเอก วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2550

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

วัสดุก่อสร้าง, คอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลานและเถ้าชีวมวล, ความคงทนของคอนกรีต

ผลงานวิชาการ

บทความวิจัยระดับนานาชาติ

1) W. Chalee, M. Teekavanit, K. Kiattikomol, A. Siripanichgorn and C. Jaturapitakkul, 2007, "Effect of W/C ratio on covering depth of fly ash concrete in marine environment," Construction and Building Materials, Vol.21, No.5, pp. 965-971 (Impact factor 2009 = 1.456)

2) W. Chalee and C. Jaturapitakkul, 2009, "Effect of W/B ratios and fly ash finenesses on chloride diffusion coefficient of concrete in marine environment", Materials and Structures (2009) 42 : pp. 505-514 (Impact factor 2009 = 0.753)

3) W. Chalee, C. Jaturapitakkul, and P. Chindaprasirt' 2009 "Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater" Marine Structures, 22, 2009, pp.341-353 (Impact factor 2009 = 1.031)

4) P. Chindaprasirt, W. Chalee, C. Jaturapitakkul, and U. Rattanasak, 2009, "Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers ," Waste Management, Vol.29, No. 2, pp 539-543. (Impact factor 2009 = 1.338)

5) W. Chalee, P. Ausapanit and C. Jaturapitakkul, 2010, "Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis", Materials and Design (2010) 31 : pp. 1242-1249 (Impact factor 2009 = 1.518)

6) T. Cheewaket, C. Jaturapitakkul and W. Chalee, 2010, "Long term performance of chloride binding capacity in fly ash concrete in a marine environment", Construction and Building Materials 24 (2010) 1352–1357 (Impact factor 2009 = 1.456)

7) C. Sanawong and W. Chalee, 2010, "Water permeability in fly ash based geopolymer concrete", J. of Civil engineering and architecture 4 (2010) 15-19

8) R. Somna, C. Jaturapitakkul, W. Chalee and P. Rattanachu, "Effect of W/B ratio and ground fly ash on properties of recycled aggregate", ASCE's Journal of Materials in Civil Engineering.

9) R. Somna, C. Jaturapitakkul, P. Rattanachu and W. Chalee, "Effect of ground bagasse ash on mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete", Materials and Design 36, 2012, pp. 597–603 (impact factor 2010 = 1.694)

ประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

1) W. Chalee, P. Suwanmaneechot and C. Jaturapitakkul, "Corrosion Performance of Concrete Containing Rice Husk-Bark Ash under 5-year Exposure in Marine Site", Modern Methods and Advances in Structural Engineering and Construction ISEC-6, Zürich, June 21–26, 2011 หน้า 21-28

2) W. Chalee, M. Teekavanit, and C. Jaturapitakkul, "Compressive Strength and Chloride Penetration Profile of Fly Ash Concrete under 4-Year Exposure in Sea Water", Inetrnational Conference on Pozzolan, Concrete and Geopolymer, May 24-25, 2006, Khon Kaen, Thailand, pp. 180-188.

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

4) W. Chalee and C. Jaturapitakkul "Long Term Performance of Fly Ash Concrete in Marine Environment ", The 8th ISOPE PACIFIC/ASIA OFFSHORE MECHANICS SYMPOSIUM, Asia Hotel, Bangkok, Thailand, November 11-14, 2008, pp 178-182.

5) P. Suwanmaneechot, C. Jaturapitakkul, and W. Chalee, "Chloride Penetration of Concrete Containing Rice Husk Bark Ash in Marine Exposure Site", 4th International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications, Nagoya, Japan, August 24-26, 2009, pp 725-730.

6) S. Koonthong, P. Chawakitchareon and W. Chalee, 2010, "Compressive strength and thermal conductivity of concrete masonry block containing plastic label waste", The 3rd Technology and Innovation for Sustainable Development International Conference (TISD 2010) Khonkaen University, Thailand, 4-6 March 2010.

บทความวิจัยระดับชาติ

1) มณเฑียร ฑีฆวาณิช, ประสิทธิ์ อุตส่าห์พานิช, วิเชียร ชาลี, เอนก ศิริพานิชกร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2549, "ผลกระทบของน้ำทะเลต่อการซึมผ่านของคลอไรด์ และการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน" วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 17, ฉบับที่ 2

2) อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, วิเชียร ชาลี, และ ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2549, "การศึกษาการชะเถ้าถ่านหินลิกไนต์และกำลังอัดของวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน"," วารสารฉบับวิจัยและพัฒนา มจธ., ปีที่ 29, ฉบับที่ 4, หน้า 437-446.

3) ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ, ธวัชชัย สาสกุล, วิเชียร ชาลี และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551, "ผลกระทบของน้ำทะเลต่อคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ผสมเถ้าถ่านหินจากระบบฟลูอิดไดซ์เบด", วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ปีที่ 31, ฉบับที่ 2, หน้า 357-370.

4) วิเชียร ชาลี และ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2552, "การศึกษาสมบัติความคงทนของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าก้นเตา", Burapha Sci., J.14 (1) หน้า 47-55

5) กิรติกร เจริญพร้อม และ วิเชียร ชาลี, 2554, "ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล",วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 21(3), 2554, หน้า 257-266.

6) ชรินทร์ เสนาวงษ์ และ วิเชียร ชาลี, 2554, "การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล",วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 21(2), 257-265.

7) วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2554, "ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล",วารสารวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 34(3), 245-255.

8) วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2554, "ปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล", วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, 7 (1), 21-28

9) วิเชียร ชาลี , มณเฑียร ฑีฆวาณิช , ประสิทธิ์ อุตส่าห์พานิช และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2550, "ผลกระทบของน้ำทะเลต่อกำลังอัด, การซึมผ่านของคลอไรด์ และการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 4 ปี" วารสารฉบับวิจัยและพัฒนา มจธ., ปีที่ 30, ฉบับที่ 1, หน้า 153-166.

10) ชรินทร์ เสนาวงษ์, เกียรติสุดา สมนา และ วิเชียร ชาลี, "กำลังอัดและกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน", Burapha Sci., J.15 (1) หน้า 13-22

11) วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2554, "การปรับปรุงความคงทนของคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเลโดยใช้เถ้าถ่านหิน", Burapha Sci., J.16 (2) หน้า 51-62

ประชุมวิชาการระดับชาติ

1) Smith Songpiriyakij, Wichian Chalee, Chai Jaturapitakkul, "Model for Predicting Compressive Strength of Fly Ash Concrete from Fly Ash Fineness," Proceeding of 8th National Convention on Civil Engineering, Khon Kean, 2003.

2) U Rattanasak, W Chalee, and P Chindaprasirt "A Study of Leaching of Lignite Fly Ash in Sodium Hydroxide Solution," การประชุมวิชาการคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์ ครั้งที่ 1 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 31 ตุลาคม 2548 หน้า 1-4

3) ธีรวัฒน์ สินศิริ, วิเชียร ชาลี, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และปริญญา จินดาประเสริฐ, 2546, "ผลกระทบของความละเอียดเถ้าลอยต่อกำลังอัดและโครงสร้างโพรงในเพสต์", การประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติ ครั้งที่ 1, 14-16 พฤษภาคม, กาญจนบุรี, หน้า 225-232.

4) Wichian Chalee, Prasit Ausapanit and Chai Jaturapitakkul, "A model for predicting the required cover depth of fly ash concrete in marine environment, Annual Concrete Conference 2, Udon Thani, 2006.

5) วิเชียร ชาลี, มณเฑียร ฑีฆวาณิช, ประสิทธิ์ อุตส่าห์พานิช, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2548, "ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและระยะหุ้มเหล็กต่อการกัดกร่อนในคอนกรีตผสมเถ้าลอยในสภาวะแวดล้อมทะเล", การประชุมวิชาการเทคโนโลยี และนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน, 25-26 มกราคม 2549, ขอนแก่น, หน้า 527-532.

6) อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, ชาญชัย พลตรี, และ วิเชียร ชาลี, 2548, "การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน", การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติครั้งที่ 10, 2-4 พฤษภาคม 2548, โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ซิตี้ จอมเทียน พัทยา ชลบุรี

7) วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2550, "สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล", การประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติครั้งที่ 3, 24-26 ตุลาคม 2550, โรงแรมลองบิช การ์เด้น โฮเทล แอนด์ สปา, พัทยา ชลบุรี หน้า 103-109

8) ธวัชชัย สาสกุล, ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ, วิเชียร ชาลี, ชัย จาตุรพิทักษ์กุลและ เอกชัย ภัทรวงศ์ไพบูรย์, 2550, "กำลังอัดและการซึมผ่านคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ในสภาพแวดล้อมทะเล", การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12, 2-4 พฤษภาคม 2550, โรงแรมอมรินทร์ลากูน จ. พิษณุโลก หน้า 41-46

316509

9) P. Suwanmaneechot , C. Jaturapitakkul and W. Chalee , 2551, "Water permeability of fly ash concrete in marine environment", การประชุมวิชาการคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์แห่งชาติครั้งที่ 2, 5-6 กันยายน 2551, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น หน้า 49-55.

10) รัฐพล สมนา วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551, "ผลกระทบของเถ้าถ่านหิน 3 แหล่ง ต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต", การประชุมวิชาการคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์แห่งชาติครั้งที่ 2, 5-6 กันยายน 2551, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น หน้า 107-112.

11) วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551, "ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมของคลอไรด์โดยวิธีเร่งกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต", การประชุมวิชาการคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์แห่งชาติครั้งที่ 2, 5-6 กันยายน 2551, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น หน้า 66-72.

12) ชรินทร์ เสนาวงษ์ อิทธิพล วิไลลักษณ์และ วิเชียร ชาลี, 2552, "การทำคอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนักจากเถ้าก้นเตาระบบฟลูอิดไดซ์เบด", การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14, 13-15 พฤษภาคม 2552, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี หน้า 1587-1592

13) ชรินทร์ เสนาวงษ์ เกียรติสุดา สมนา ปริญญา จินดาประเสริฐ และ วิเชียร ชาลี, "คุณสมบัติเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน", การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 5, 20-22 ตุลาคม 2552

14) ศิชน คูณทอง เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ และ วิเชียร ชาลี, "ขนาดของเสียประเภทฉลากพลาสติกที่เหมาะสมในการทำคอนกรีตมวลเบา ", การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์ วิศวกรรม และการจัดการสิ่งแวดล้อมครั้งที่ 1, 22-23 กันยายน 2552, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 39-44

15) ศิชน คูณทอง เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ และ วิเชียร ชาลี, "ปริมาณของเสียประเภทฉลากพลาสติกที่เหมาะสมในการทาคอนกรีตมวลเบา ", การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยครั้งที่ 35, 15-17 ตุลาคม 2552, เดอะไทด์รีสอร์ท ชลบุรี

บทความวิชาการ

1) วิเชียร ชาลี, 2554, "อายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเล", วารสารโยธาสาร ปีที่ 23 ฉบับที่ 2 เมษายน – มิถุนายน 2554 หน้า 1-6

2) วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2552, "คอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเล" โยธาสาร (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย), ปีที่ 20, ฉบับที่ 6. หน้า 82-89.

3) วิเชียร ชาลี, 2552, "ความคงทนของคอนกรีตในสภาพแข็งตัว" พัฒนาเทคนิคศึกษา, มจพ, ปีที่ 21, ฉบับที่ 69. หน้า 11-17.