

ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดสนิมแบบ MACROCELL
ของการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแบบเฉพาะที่

FACTORS AFFECTING MACROCELL CORROSION OF
REINFORCED CONCRETE MEMBERS REPAIRED BY PATCHING

ตามยศ สมยาภักดี

TAMYOT SOMYAPAKDEE

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

พ.ศ. 2554

ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดสนิมแบบ MACROCELL
ของการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแบบเฉพาะที่

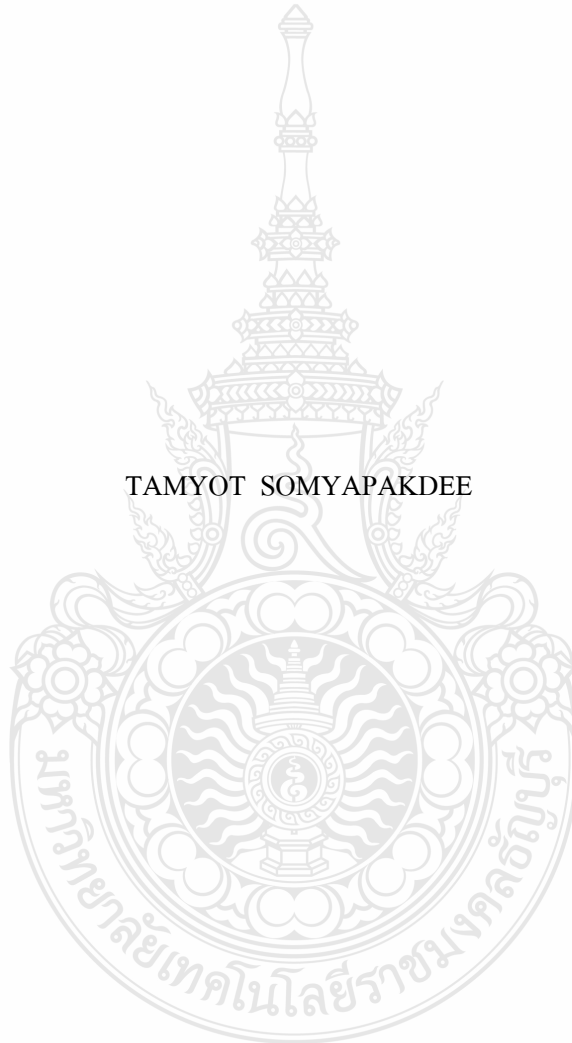
ตามยศ สมยาภักดี



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
พ.ศ. 2554

**FACTORS AFFECTING MACROCELL CORROSION OF
REINFORCED CONCRETE MEMBERS REPAIRED BY PATCHING**

TAMYOT SOMYAPAKDEE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT OF THE REQUIREMENTS FOR
THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
IN CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
RAJAMANKALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI

2011

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัย ขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ใน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีและข้อความต่างๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำผลงานวิจัยของผู้อื่นมาเสนอในชื่อของข้าพเจ้า



นายตามยศ สมยาภักดี



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดสนิมแบบ MACROCELL ของการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแบบเฉพาะที่
FACTORS AFFECTING MACROCELL CORROSION OF REINFORCED CONCRETE MEMBERS REPAIRED BY PATCHING

ชื่อนักศึกษา

นายตามยศ สมยาภักดิ์

รหัสประจำตัว

115070401010-9

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิติศานต์ กร้ามาตร

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ดร. ภัควัฒน์ แสนเจริญ

วัน เดือน ปี ที่สอบ

3 มีนาคม 2554

สถานที่สอบ

ห้อง E405 อาคารเฉลิมพระเกียรติ 80 พรรษา 5 ธันวาคม 2550
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ดร. หมีง จิ่ง)

..... กรรมการ

(ดร. พุทธิพล ทองอินทร์ดำ)

..... กรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิติศานต์ กร้ามาตร)

..... กรรมการ

(ดร. ภัควัฒน์ แสนเจริญ)

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมหมาย ผิวสอาด)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดสนิมแบบ MACROCELL ของการ ซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแบบเฉพาะที่
นักศึกษา	นายตามยศ สมยาภักดิ์
รหัสประจำตัว	115070401010-9
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา	2553
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิติสานต์ กร้ามาตร ดร. ภัควัฒน์ แสนเจริญ

บทคัดย่อ

การซ่อมแซมส่วนที่เสียหายเพียงบางส่วน หลังจากโครงสร้างเสื่อมสภาพจากการเกิดสนิม มักพบปัญหาตามมาคือ การเสื่อมสภาพของคอนกรีตบริเวณที่ได้รับการซ่อมแซมหรือบริเวณใกล้เคียง ภายในระยะเวลาไม่นาน

งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อศึกษาปัญหาจากการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแบบเฉพาะที่ ซึ่งทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ ทำการปรับเปลี่ยนส่วนผสมคอนกรีต ชนิดวัสดุประสาน ปริมาณคลอไรด์ไอออนที่ปนเปื้อนในตัวอย่าง ตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึงร้อยละ 4 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน อัตราส่วนของขนาดพื้นที่ของแอโนดต่อแคโทด และชนิดของวัสดุที่ใช้ในการซ่อมแซม โดยทำการวัดค่ากระแสการเกิดสนิม ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ ความต้านทานทางไฟฟ้า กำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตและมอร์ตาร์

ผลการทดสอบพบว่าเมื่อปริมาณคลอไรด์ไอออนด้านแอโนดเพิ่มขึ้น วัสดุซ่อมแซมที่ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าสูง สามารถลดอัตราการเกิดสนิมลงได้ โดยเห็นผลชัดเจนเมื่อพื้นที่ส่วนที่ปนเปื้อนคลอไรด์และไม่ได้รับการซ่อมแซมเหลือน้อย ซึ่งทำให้เกิดความเสียหายในส่วนนี้เร็วขึ้น จากผลการศึกษาสามารถเป็นแนวทางในการคัดเลือกวัสดุเพื่อให้การซ่อมแซมมีความคงทน

คำสำคัญ : สนิม, คลอไรด์, ซ่อมแซมบางส่วน, บำรุงรักษา, ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์, ความต้านทานไฟฟ้า

Thesis Title : FACTORS AFFECTING MACROCELL CORROSION OF REINFORCED CONCRETE MEMBERS REPAIRED BY PATCHING

Student Name : Mr. Tamyot Somyapakdee

Student ID : 115070401010-9

Degree Award : Master of Engineering

Study Program : Civil Engineering

Academic Year : 2010

Thesis Advisors : Assistant Professor Dr. Pitisan Krammart
Dr. Pakawat Sancharoen

ABSTRACT

Patching repair is one of famous methods to repair damaged reinforced concrete structure due to reinforcing steel corrosion by chloride attack. However, many applications show the early damage of RC structure in the vicinity area of repaired.

This study aims to clarify the factors affecting durability of patching repair of RC structure damaged by chloride attack. The laboratory experiment was conducted by preparing reinforcing concrete specimens with different concrete mix proportion, chloride ion content, coal fly ash content, surface area of steel in anode - cathode, and type of repairing materials. Corrosion current, half-cell potential, electrical resistivity and compressive strength of specimens were measured periodically.

The results showed that difference in chloride content between anode and cathode affects mainly on corrosion rate. However, selection of repairing material with high electrical resistivity can reduce corrosion rate. Service life evaluation of RC structure after being repaired as well as guideline for material selection for patching repair is given in order to obtain durable patching repairing work.

Keywords : Corrosion, Chloride, Patching repair, Maintenance, Half-cell potential, Resistivity

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คงไม่สามารถสำเร็จลุล่วง หากไม่ได้รับความกรุณาอย่างยิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิติสานต์ กร้ามาตร ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ ดร.ภักวีวัฒน์ แสนเจริญ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษาพร้อม แนะนำแนวคิดใน การดำเนินงานวิจัย และแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการทำงานวิจัย ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้แก่ ดร.หมิง จิ่ง ดร.พุทธพล ทองอินทร์คำ และ ศาสตราจารย์ ดร.สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล ผู้ทรงคุณวุฒิจากสถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ได้ให้ความเมตตา ความเข้าใจ พร้อมทั้งความรู้อันเป็นประโยชน์ยิ่ง ต่องานวิจัย

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และ ประสบการณ์อันมีค่ายิ่งในการดำเนินชีวิต

ท้ายสุด สำคัญยิ่ง ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้ทุกสิ่งแก่ชีวิตข้าพเจ้า แม้สิ่งนั้นจะได้มาอย่างยากลำบาก และด้วยหยาดเหงื่อของท่านที่ให้โอกาสข้าพเจ้าได้ศึกษาในระดับนี้

ตามยศ สมยาภักดี

3 มีนาคม 2554

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฅ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 พฤติกรรมของคอนกรีต	4
2.2 ความคงทนของคอนกรีต	4
2.3 การเสื่อมสภาพของคอนกรีต	5
2.4 การเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีต	5
2.5 ปริมาณสูงสุดของคลอไรด์ที่ยอมรับได้ในคอนกรีต	8
2.6 กระบวนการเกิดสนิมของโลหะที่ฝังในคอนกรีต	9
2.7 การเกิดสนิมของโลหะต่างชนิดที่ฝังอยู่ในเนื้อ	11
2.8 ผลกระทบของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	11
2.9 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยคลอไรด์	12
2.10 การตรวจสอบการเกิดสนิม	15
2.11 การตรวจสอบปริมาณคลอไรด์	16
2.12 การตรวจสอบความต้านทานทางไฟฟ้า	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.13 การซ่อมพื้นผิวคอนกรีต	18
2.14 การป้องกันการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีต	21
2.15 กระบวนการการเกิดสนิมแบบ Macrocell	23
2.16 การซ่อมแซมเฉพาะที่ (Patch Repair)	26
2.17 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	29
บทที่ 3 ขั้นตอนการศึกษา	
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	34
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	34
3.3 สัดส่วนผสม	36
3.4 การเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ	41
3.5 วิธีทำการทดสอบ	45
3.6 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ	47
3.7 แผนการดำเนินงาน	50
บทที่ 4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ	
4.1 ค่ากระแสการเกิดสนิมและศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์	51
4.2 ความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต และมอร์ตาร์	77
4.3 การประเมินอายุการใช้งานภายหลังการซ่อมแซม	79
4.4 การประเมินอายุการใช้งานจากผลการทดสอบศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ และความต้านทานไฟฟ้า	86
4.5 การวางแผนเพื่อบำรุงรักษาโครงสร้างสำหรับการซ่อมแซมบางส่วน	88
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบ	
5.1 สรุปผล	91
5.2 ข้อเสนอแนะ	92
เอกสารอ้างอิง	93

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	
ก. ตารางบันทึกผลการทดลอง	97
ข. ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่	129
ประวัติผู้เขียน	159



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปริมาณคลอไรด์ไอออนสูงสุดที่ยอมรับได้ในคอนกรีตสด	8
2.2 การแปลความหมายจากอุปกรณ์ Half-Cell Potential โดยใช้เซลล์อ้างอิง Cu-CuSO ₄	15
2.3 การแปลความหมายจากอุปกรณ์ Four-Probe Wenner-Type Resistivity	18
3.1 สัปดาห์ผสมคอนกรีตส่วนเดิม	36
3.2 สัปดาห์ผสมคอนกรีตส่วนซ่อมแซม	37
3.3 แสดงตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ	37
3.4 แผนการดำเนินงาน	50
4.1 ตัวอย่างคอนกรีตด้านแอโนดที่เกิดรอยร้าว ที่ระยะเวลา 16 สัปดาห์	83
4.2 งบประมาณที่ใช้ซ่อมแซมต่อครั้ง และวางแผนเพื่อการใช้งานเป็นเวลา 20 ปี	89



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	กระบวนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตทั้งหมด	7
2.2	การเกิดสนิมจากคลอไรด์ที่ปนเปื้อนในคอนกรีต	9
2.3	ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริม	10
2.4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ของคอนกรีตกับอัตราการเกิดสนิม	10
2.5	การเกิดสนิมเนื่องจากความแตกต่างของโลหะ	11
2.6	การหาความน่าจะเป็นที่เหล็กเสริมจะเป็นสนิมด้วยอุปกรณ์ Half-Cell Potential	16
2.7	การวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์ Four-Probe Wenner-Type Resistivity	17
2.8	รูปแบบการรื้อคอนกรีต	19
2.9	เปรียบเทียบอายุของการใช้งาน โครงสร้างกับสมรรถภาพของโครงสร้าง	22
2.10	รูปแบบการเกิดการเกิดสนิม	24
2.11	ตัวอย่างของการเกิดสนิมแบบ Macrocell	25
2.12	กลไกการเกิดสนิมแบบ Macrocell ที่กระทำก่อนและหลังการซ่อมแซมเฉพาะที่	28
3.1	เครื่องโวลต์มิเตอร์	35
3.2	เครื่อง Half-Cell Potential	35
3.3	เครื่อง Four-Probe Wenner Type Resistivity	35
3.4	การผสมคอนกรีตตามสัดส่วนผสม	42
3.5	การเตรียมแบบหล่อตัวอย่างทดสอบการเกิดสนิมแบบ Macrocell	42
3.6	เหล็กเสริมที่พร้อมใช้กับตัวอย่าง	43
3.7	รูปตัวอย่างสำหรับทดสอบการเกิดสนิมแบบ Macrocell	43
3.8	การหล่อตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ	44
3.9	การเก็บตัวอย่างในสภาวะเปียกและแห้งสลับกันใน 1 สัปดาห์	44
3.10	ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบความต้านทานทางไฟฟ้า	45
3.11	การวัดโอกาสเกิดสนิมในเหล็กเสริมด้วยอุปกรณ์ Half-Cell Potential	46
3.12	การวัดความต่างศักย์ระหว่างแอโนดกับแคโทดด้วยโวลต์มิเตอร์	46
3.13	การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าคอนกรีตด้วยอุปกรณ์ Four-Probe Resistivity Equipment.	47
3.14	การวัดอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริม	48

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1	52
4.2	53
4.3	55
4.4	56
4.5	57
4.6	58
4.7	63
4.8	64
4.9	65
4.10	66
4.11	67

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12	68
4.13	71
4.14	72
4.15	73
4.16	74
4.17	75
4.18	76
4.19	77
4.20	77
4.21	78
4.22	80
4.23	81
4.24	82
4.25	84
4.26	85
4.27	86

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.28 เปรียบเทียบค่ากระแสการเกิดสนิม ระหว่างค่าที่ได้จากการวัดและการคำนวณของ ตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่อัตราส่วนแอมโนคต่อแคลโทดเท่ากับ 7:21	87
4.29 อายุการใช้งานของตัวอย่างที่ปนเปื้อนคลอไรด์อิมมูร์ยละ 2	88
4.30 มวลค่างานซ่อมแซมกับอายุการใช้งานของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ	90



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

มอก.	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
วสท.	วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์
A/cm ²	Ampere Per Square Centimeter
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Material
C ₃ A	Tricalcium Silicate
C ₄ AF	Tetracalcium Alumino Ferrite
C-A-H	Calcium Aluminate Hydrate
C-S-H	Calcium Silicate Hydrate
Cl ⁻	Chloride Ion
Cu-CuSO ₄	Copper – Copper Sulfate Reference Cell
Fe ⁺	Iron Ion
Fe ₂ O ₃	Ferric Oxide
H ₂ O	Water
JSCE	Japan Society of Civil Engineers
kohm-cm	Kilo Ohm Centimeter
ksc	Kilogram Per Square Centimeter
mV	Milli Volt
NaCl	Sodium Chloride
O ₂	Oxygen
OH ⁻	Hydroxyl Ion

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีสมรรถภาพด้านความแข็งแรงเป็นอย่างมาก และทนทาน ต่อเงื่อนไขการทำอันตรายจากสิ่งแวดล้อมหลากหลายชนิด อย่างไรก็ตามความเสียหายในโครงสร้าง ยังคงปรากฏขึ้นจากผลลัพท์การเกิดสนิมของเหล็กเสริม การบำรุงรักษาและการซ่อมแซมสิ่งปลูกสร้าง เพื่อความปลอดภัยเหล่านี้ ต้องการผลการตรวจวัดและเทคนิคในการดูแลติดตาม สำหรับประเมินการเกิดสนิมของเหล็กเสริม วิศวกรต้องการเทคนิคที่มากกว่าสำหรับการประเมินเงื่อนไขของโครงสร้าง เมื่อต้องการบำรุงรักษาและซ่อมแซม เพื่อระบุปัญหาความคงทนที่น่าจะเป็นไปได้ในแบบต่างๆ ภายในโครงสร้างก่อนเป็นอันตราย [1]

กระบวนการเกิดสนิมโดยคลอไรด์ไอออนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก คือหนึ่งในกลไก การเสื่อมสภาพที่สำคัญ ที่ยังคงทำให้เกิดความสับสนในกลุ่มของนักวิจัยและวิศวกรทั้งหลาย เมื่อ ออกซิเจนและความชื้นมีปริมาณเพียงพอในคอนกรีตที่มีคุณภาพดี เหล็กจะถูกป้องกันโดยชั้นของ ออกไซด์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติเนื่องจากมีความคงตัวในสภาวะต่างที่สูงภายในคอนกรีต อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการซึมผ่านของคลอไรด์ไอออนเข้าสู่ภายในคอนกรีต โดยเฉพาะในโครงสร้างบริเวณ ชายฝั่งทะเล ทำให้อัตราส่วนของไฮดรอกไซด์ไอออนต่อคลอไรด์ลดลง และชั้นฟิล์มออกไซด์ถูกทำลาย ทำให้เหล็กสูญเสียการป้องกันจึงเข้าสู่สภาวะการเกิดสนิม การเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีตโดย พื้นฐานคือกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี ที่ขั้วบวก ธาตุเหล็กสูญเสียอิเล็กตรอน และที่ขั้วลบเป็น ตัวรับอิเล็กตรอน ออกซิเจนและความชื้น

ดังที่กล่าวมาข้างต้น รูปแบบของการเกิดสนิมสามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ การเกิดสนิม แบบ Microcell เรียกว่าการเกิดสนิมแบบสม่ำเสมอ (Uniform Corrosion) และ การเกิดสนิมแบบ Macrocell เรียกว่า การเกิดสนิมเฉพาะที่ (Local Corrosion) ในกรณีของการเกิดสนิมแบบ Macrocell นั้น ขั้วบวกและขั้วลบเกิดขึ้นในบริเวณที่ห่างกัน การเกิดสนิมแบบ Macrocell เป็นผลผลิตที่เกิดจากความแตกต่าง พฤติกรรมความไม่สม่ำเสมอของการแพร่กระจายคลอไรด์ไอออนสู่ธาตุใดธาตุหนึ่งซึ่งเป็นหนึ่งในองค์ประกอบหลัก ในกรณีนี้การสูญเสียเนื้อเหล็กที่ขั้วบวกเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิวสูงกว่า

เมื่ออัตราส่วนระหว่างข้าวบวกและข้าวลบที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวที่ค่อนข้างสูง ผลก็คืออัตราการเกิดสนิมที่สูงขึ้นและการเสื่อมสภาพเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว [2]

ความเสี่ยงที่จะเกิดสนิมภายหลังการซ่อมแซมเฉพาะที่ โดยทั่วไปจะเกิดขึ้นได้จากที่คอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมนั้นไม่มีคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวกัน ระหว่างคอนกรีตเก่าและวัสดุซ่อมแซมของเหล็กเสริมและจะส่งผลให้เกิดสนิม รอยร้าว และการหลุดร่อนของผิวคอนกรีต ซึ่งจะเกิดขึ้นในพื้นที่จำกัดถ้าบริเวณที่เสียหายมีการซ่อมแซมโดยการแทนที่ผิวคอนกรีตที่หลุดร่อนด้วยวัสดุซ่อมแซม (Repair Mortar) บริเวณที่ใกล้เคียงจุดที่ได้รับการซ่อมแซมนั้น จะเกิดความเสียหายเนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในระยะเวลาไม่นานภายหลังจากการซ่อม [3]

ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น การศึกษาวิจัยครั้งนี้ เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดสนิมภายหลังจากคอนกรีตที่เสื่อมสภาพลงจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริม เนื่องจากคลอไรด์ที่ซึมผ่านเข้าสู่เหล็กเสริมและได้รับการซ่อมแซมแบบเฉพาะที่ หรือแม้กระทั่งการเกิดสนิมในเหล็กเสริมที่มีสาเหตุมาจากการก่อสร้างที่ผิดพลาด เพื่อใช้ในการพิจารณา ประเมินอายุการใช้งาน ออกแบบวิธีการซ่อม ให้เหมาะสมและมีความคงทน

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

วัตถุประสงค์หลักของการศึกษา มีดังต่อไปนี้

- 1.2.1 ศึกษากรณีการเกิดสนิมแบบเฉพาะที่ของชิ้นส่วนคอนกรีตที่ซ่อมแซมบางส่วน
- 1.2.2 ศึกษาผลกระทบของความแตกต่างของปริมาณคลอไรด์ไอออนในวัสดุเดิมและวัสดุซ่อมแซม ต่ออัตราการเกิดสนิมแบบ Macrocell
- 1.2.3 ศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนพื้นที่ผิวเหล็กเสริมด้านแอโนดต่อพื้นที่ผิวเหล็กเสริมด้านแคโทดต่ออัตราการเกิดสนิมแบบ Macrocell
- 1.2.4 ศึกษาผลกระทบจากการใช้วัสดุซ่อมแซมที่แตกต่างกันต่ออัตราการเกิดสนิมแบบ Macrocell
- 1.2.5 เพื่อประเมินระยะเวลาที่ตัวอย่างคอนกรีตด้านแอโนดส่วนที่ซ่อมแซมจะเกิดรอยแตกร้าวจากการซ่อมแซมบางส่วน
- 1.2.6 เพื่อเสนอแนวทางการซ่อมแซมแบบบางส่วนให้มีความคงทนมากที่สุด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 คอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพโดยการเกิดสนิมของคลอไรด์และมีการซ่อมแซมด้วยวิธี Patching

1.3.2 คอนกรีตเก่าที่มีปริมาณคลอไรด์ไอออนปนเปื้อนร้อยละ 0, 0.5, 1, 2, 3 และ 4 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

1.3.3 คอนกรีตเก่าที่มีที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยร้อยละ 0 และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

1.3.4 วัสดุซ่อมได้แก่ ซีเมนต์มอร์ตาร์ ซีเมนต์พิเศษที่มีส่วนผสมของทรายคัดเกรด สารปรุงแต่งพิเศษ โพลีเมอร์ โพลีโพรพิลีนไฟเบอร์ และ ซีเมนต์พิเศษที่มีส่วนผสมของทรายคัดเกรด สารปรุงแต่งพิเศษ โพลีเมอร์

1.3.5 วัดค่ากระแสการเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตด้านแอโนด

1.3.6 วัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ด้านแอโนดและแคโทด

1.3.7 วัดค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าของคอนกรีตทั้งวัสดุเดิมและวัสดุซ่อมแซม

1.3.8 ทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดสนิมแบบ Macrocell ที่เกิดขึ้นภายหลังจากการซ่อมแซมคอนกรีตที่เสื่อมสภาพเนื่องจากการเกิดสนิมของสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีต โดยการศึกษาผลของความแตกต่างจากปริมาณคลอไรด์ที่ปนเปื้อนในคอนกรีตเก่าและวัสดุซ่อมแซม ผลจากอัตราส่วนแอโนดและแคโทด ผลของวัสดุซ่อมแซมที่ต่างชนิด เพื่อนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์หาอัตราการเกิดสนิมในเหล็กเสริมที่น้อยที่สุด เพื่อใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์เลือกวิธีการซ่อมแซม ลักษณะการซ่อมอีกทั้งยังใช้ในการประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้างส่วนที่ได้รับการซ่อมแซมด้วยวิธีการซ่อมบางส่วน (Patch Repair)

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พฤติกรรมของคอนกรีต

คอนกรีตไม่ได้มีพฤติกรรมตามที่เราต้องการให้เป็นเสมอไป พฤติกรรมที่ไม่พึงประสงค์ของคอนกรีตที่พบได้บ่อย ๆ เช่น การแตกตัว (Disintegration) การกะเทาะ (Spalling) การแตกร้าว (Cracking) การรั่วซึม (Leakage) การสึกกร่อน (Wear) และการแอ่นตัว (Deflection) หรือการทรุดตัว (Settlement) การพิจารณาหามาตรการที่ได้ผลเพื่อซ่อมแซมความเสียหาย จำเป็นต้องเข้าใจถึงสาเหตุและผลของพฤติกรรมที่จะเกิดขึ้น และผลลัพธ์ที่ได้ก็คือการซ่อมแซมที่ประสบผลสำเร็จและใช้งานต่อไปได้นาน พฤติกรรมความเสียหายของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ประกอบด้วย การออกแบบ วัสดุ การก่อสร้าง การใช้งาน สิ่งแวดล้อม และการที่คอนกรีตต้องสัมผัสอยู่กับสิ่งต่าง ๆ ความเสียหายของคอนกรีต [4]

2.2 ความคงทนของคอนกรีต

ความคงทนของคอนกรีตเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากซึ่งหมายถึงความสามารถในการทนต่อการเปลี่ยนแปลงจากสภาพแวดล้อม ทนต่อการทำลายจากสารเคมี ทนต่อแรงกระแทก หรือการกระทำอื่นๆ ตลอดอายุการใช้งานของโครงสร้างนั้น คอนกรีตที่คงทนจะต้องคงสภาพได้นานตลอดอายุการใช้งาน สิ่งก่อสร้างคอนกรีตจำนวนมากที่ถูกออกแบบและก่อสร้างโดยไม่คำนึงถึงความคงทน จึงส่งผลให้เกิดความเสียหายอย่างมาก ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายจำนวนมากมหาศาลในการซ่อมแซมรวมทั้งอายุการใช้งานของสิ่งก่อสร้างนั้นก็ลดลงด้วย

โครงสร้างคอนกรีตมีทั้งส่วนที่อยู่เหนือดิน เหนือน้ำ ใต้ดินและใต้น้ำทะเล โครงสร้างคอนกรีตดังกล่าวต้องทนต่อการเปลี่ยนแปลงสถานะต่างๆ ของลมฟ้าอากาศ ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี ทนต่อการเสียดสีและการฉีกขาด ทนต่อการซึมผ่านของน้ำ ความชื้นหรืออากาศ ตลอดอายุการใช้งาน [5]

2.3 การเสื่อมสภาพของคอนกรีต

สาเหตุของการเสื่อมสภาพของคอนกรีตสามารถจำแนกได้เป็น 5 ชนิด [5] ดังนี้

2.3.1 สาเหตุทางกายภาพ (Physical Deterioration) ได้แก่ การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) การหดตัวแบบพลาสติก (Plastic Shrinkage) การทรุดตัว (Settlement) การแข็งตัวและละลายของน้ำในคอนกรีต (Freezing and Thawing)

2.3.2 สาเหตุทางเคมี (Chemical Deterioration) ได้แก่ การคาร์บอนเนชัน (Carbonation) การกัดกร่อนโดยกรด (Acid Attack) การกัดกร่อนโดยซัลเฟต (Sulfate Attack) และปฏิกิริยาระหว่างด่างและมวลรวม (Alkaline Aggregate Reaction)

2.3.3 สาเหตุทางกล (Mechanical Deterioration) ได้แก่ การขัดสี (Abrasion) การกัดกร่อนด้วยกระแสน้ำและกรวดทราย (Erosion) การแตกตัวของฟองอากาศในน้ำ (Cavitations)

2.3.4 สาเหตุทางชีวภาพ (Biological Deterioration) ได้แก่ ตะไคร่ รา หรือแบคทีเรีย

2.3.5 สาเหตุรวม (Mixed Process) ได้แก่ การเกิดสนิมในเหล็ก เป็นต้น

2.4 การเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีต

โดยปกติแล้วเหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตจะถูกปกป้องไม่ให้เกิดสนิมด้วยความเป็นด่างที่สูงของคอนกรีต ทั้งนี้เนื่องจากในสถานะของความเป็นด่างที่สูง เหล็กจะไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาแอโนดิกได้ นั่นคือ เหล็กจะไม่เกิดการแตกตัวเป็นไอออนของเหล็ก และอิเล็กตรอนได้เลย ความเป็นด่างในคอนกรีตโดยปกติมักอยู่ในช่วงตั้งแต่ 12.5-13.5 ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ผสม และส่วนผสมของคอนกรีต คุณภาพคอนกรีตหุ้มเหล็กก็เป็นปัจจัยสำคัญของการควบคุมการเป็นสนิมของเหล็กเสริมด้วย

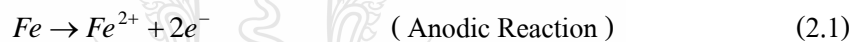
กลไกของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อเงื่อนไขทั้ง 3 ประการ [5] ดังต่อไปนี้

2.4.1 ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลงจนปฏิกิริยาแอโนดิกสามารถเกิดได้ ซึ่งความเป็นด่างในระดับที่จะทำให้ปฏิกิริยาแอโนดิกเกิดได้นั้น จะมีค่าของความเป็นด่างต่ำกว่าระดับ 9-10 และมักจะเรียกว่าระดับวิกฤตของความเป็นด่าง ความเป็นด่างของคอนกรีตลดลงได้ด้วยหลายสาเหตุต่างๆ ดังต่อไปนี้ คือ คาร์บอนเนชัน หรือแม้กระทั่งการชะล้างของน้ำฝนในกรณีที่คอนกรีตมีความพรุนมาก หรือ การซึมผ่านของคลอไรด์ไอออนเข้าไปทำลายชั้นฟิล์มโดยตรง

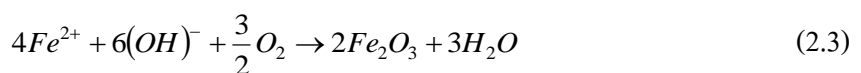
2.4.2 มีความชื้นเพียงพอที่จะทำให้ อีออนของเหล็กเข้าสู่สภาวะสารละลาย และเพียงพอที่จะทำปฏิกิริยาในการเกิดสนิม ซึ่งโดยปกติความชื้นมักจะมีเพียงพออยู่บริเวณคอนกรีตที่หุ้มรอบๆเหล็กเสริมอยู่แล้ว

2.4.3 ปริมาณออกซิเจนเพียงพอในการทำปฏิกิริยาเพื่อเกิดสนิม ซึ่งปกติแล้วออกซิเจนในปริมาณที่เพียงพอในการเกิดสนิมมักแพร่เข้าสู่คอนกรีตบริเวณเหล็กเสริม โดยผ่านทางช่องว่างที่ไม่อิมตัวด้วยน้ำ นั่นคือแพร่ผ่านอากาศในช่องว่าง แต่การแพร่ของออกซิเจนผ่านทางช่องว่างที่อิมตัวด้วยน้ำจะเป็นไปได้ยาก เนื่องจากออกซิเจนจะละลายน้ำได้น้อยมาก ดังนั้นคอนกรีตที่อิมตัวด้วยน้ำอยู่ตลอดเวลาจะไม่เกิดสนิมในเหล็กเสริม

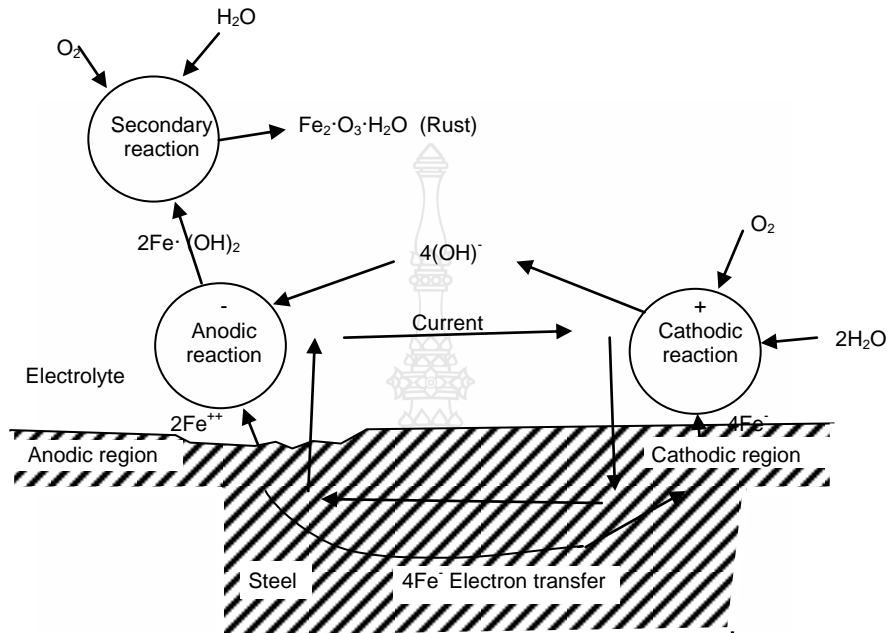
กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต จะเริ่มด้วยการที่ความเป็นต่างของคอนกรีตในบริเวณที่หุ้มรอบๆ เหล็กเสริมอยู่มีค่าลดลงจนถึงระดับวิกฤตหรือปริมาณคลอไรด์อีออนที่เข้าสู่โพรงคอนกรีตจนถึงระดับวิกฤต ประกอบกับบริเวณรอบๆเหล็กเสริมมีความชื้นเพียงพอ ทำให้เหล็กเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของสารเคมีด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrolysis) ขึ้นดัง สมการที่ (2.1)



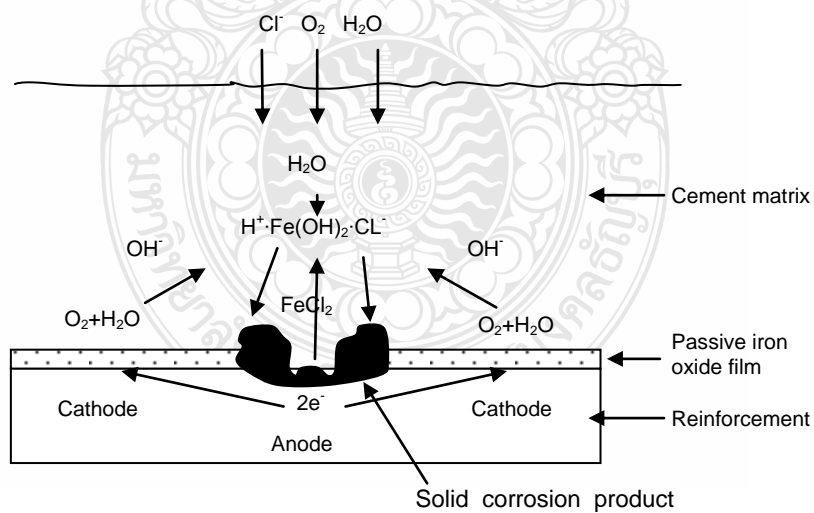
โดยเหล็กจะแตกตัวเป็นอีออน (Fe^{2+}) เข้าสู่สภาพสารละลายและอิเล็กตรอนจะวิ่งไปตามเหล็ก ปฏิกิริยานี้เรียกว่า กระบวนการแอโนดิก (Anodic Process) ต่อจากนั้น $2e^-$ ที่เกิดจากกระบวนการแอโนดิกจะไปรวมตัวกับน้ำและออกซิเจน (O_2) หรือบริเวณใกล้เคียงกับบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาแอโนดิก ทำให้เกิดเป็นไฮดรอกไซด์อีออน ($(OH)^-$) ดัง สมการที่ (2.2) ซึ่งปฏิกิริยานี้เรียกว่า กระบวนการแคโทดิก (Cathodic Process) หลังจากนั้นปฏิกิริยาการเกิดสนิมจะเกิดขึ้น ดัง สมการที่ (2.3)



โดยที่ Fe_2O_3 ก็คือ เฟอริกออกไซด์ หรือสนิมนั่นเอง ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นอาจจะเกิดต่างบริเวณกับบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาแอโนดิกก็ได้ หมายความว่าสนิมอาจจะเกิดคนละตำแหน่งกับบริเวณที่สูญเสียเนื้อเหล็กก็ได้ [5] ดังแสดงใน รูปที่ 2.1



Idealized Corrosion Diagram



Chloride-Induced Reinforcement Corrosion

รูปที่ 2.1 กระบวนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตทั้งหมด [6]

การเกิดสนิมในเหล็กเกิดจากความต่างศักย์ทางไฟฟ้าของเหล็กเสริมในคอนกรีต ซึ่งทำให้เกิด เซลล์ไฟฟ้าเคมีขึ้นมีขั้วบวกและขั้วลบ เชื่อมกันโดยมีสารละลายในโพรงของซีเมนต์ทำหน้าที่เป็นสื่อ อิเล็กโทรไลต์ ประจุไฟฟ้า Fe^{2+} ที่ขั้วบวกจะวิ่งไปสู่ขั้วอิเล็กโทรไลต์ และอิเล็กตรอนที่มีประจุไฟฟ้า ลบวิ่งตามเหล็กเสริมไปที่ขั้วบวก อิเล็กตรอนเหล่านี้จะรวมกับน้ำและออกซิเจนเกิดเป็นไฮดรอกซิล อีออนซึ่งวิ่งผ่านอิเล็กโทรไลต์ไปรวมกับ Fe^{2+} ทำให้เกิด $Fe(OH)_2$ และทำปฏิกิริยากับออกซิเจนอีกทำให้ เกิดเป็นสนิม

ความต่างศักย์เกิดจากการที่คอนกรีตมีความแตกต่างกัน ซึ่งอาจเกิดมาจากหลายสาเหตุ เช่น ความแตกต่างของความชื้น ความแตกต่างของความเข้มข้นของเกลือของน้ำในโพรง ความแตกต่าง ของสภาพแวดล้อม ความแตกต่างของความหนาของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม เป็นต้น เซลล์ไฟฟ้า ลักษณะนี้ของคอนกรีตเซลล์หนึ่งอาจยาวตั้งแต่ 10 มม. จนถึง 6 เมตร

2.5 ปริมาณสูงสุดของคลอไรด์ที่ยอมรับได้ในคอนกรีต

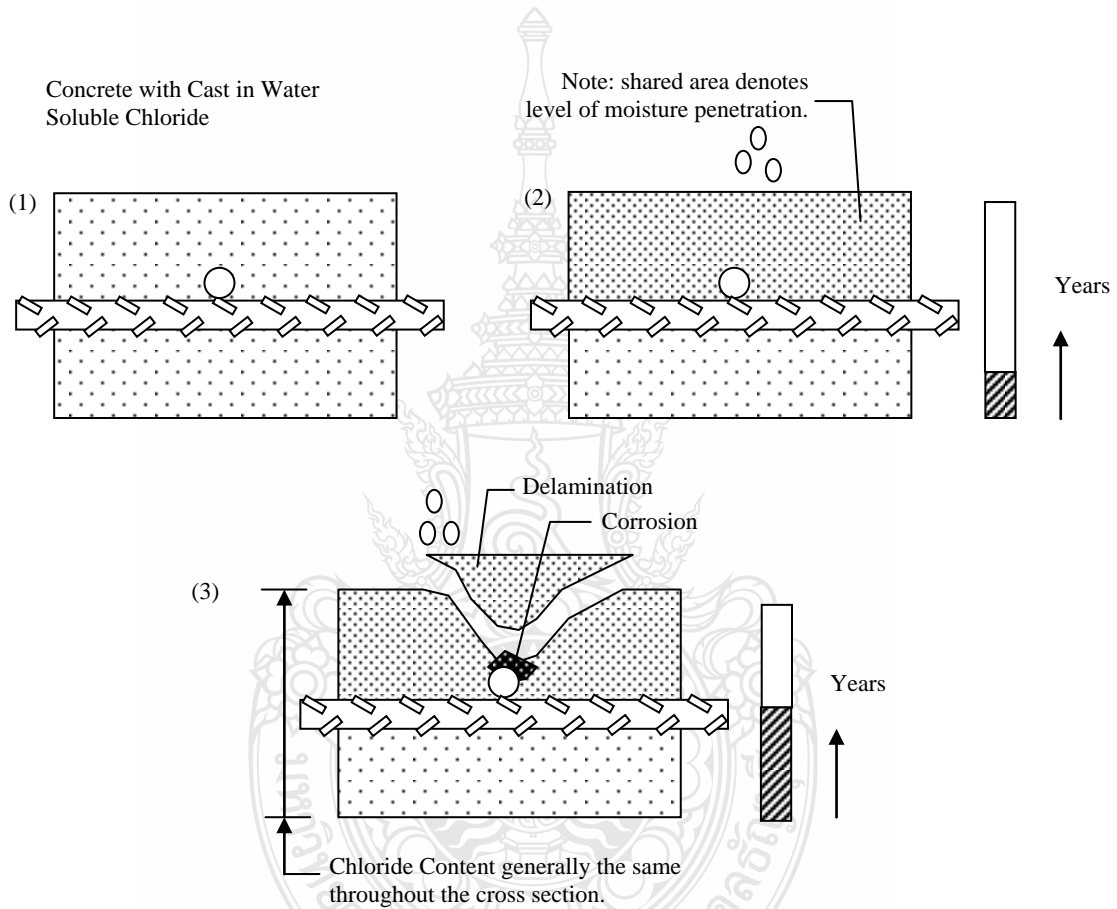
รูปที่ 2.2 คลอไรด์อาจมีอยู่ในเนื้อคอนกรีตได้ ถึงแม้ว่าโครงสร้างคอนกรีตจะยังไม่ได้ถูกใช้ งานเลขก็ตาม คลอไรด์อาจถูกผสมลงในเนื้อคอนกรีตโดยเจตนาในรูปสารผสมเพิ่ม หรือสารประกอบ ตามธรรมชาติในมวลรวมบางชนิด เช่น คอนกรีตที่มีส่วนผสมของทรายจากทะเล หรือการใช้น้ำทะเล ที่มีคลอไรด์เจือปนในการผสมคอนกรีต จะทำให้มีคลอไรด์ปนเปื้อนอยู่ตั้งแต่เริ่มต้น

ตารางที่ 2.1 ปริมาณคลอไรด์อีออนสูงสุดที่ยอมรับได้ในคอนกรีตสด [7,8]

ชนิดขององค์อาคาร	ปริมาณสูงสุดของคลอไรด์อีออนที่ ละลายน้ำได้ในคอนกรีต (ร้อยละ โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์)
คอนกรีตอัดแรง	0.06
คอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสคลอไรด์ในขณะใช้งาน	0.15
คอนกรีตเสริมเหล็กในสถานะแห้งหรือมีการป้องกัน ความชื้นในขณะใช้งาน	1.00
งานก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอื่นๆ	0.30

ACI 201.2R [7,8] ได้แนะนำปริมาณคลอไรด์ที่ยอมรับได้ไว้ในเนื้อคอนกรีตสดก่อนนำไปใช้งาน ดัง ตารางที่ 2.1

คลอไรด์ปรากฏอยู่ในสถานะที่ละลายน้ำ หรือละลายกรด คลอไรด์ที่อยู่ในสารผสมเพิ่มจะเป็นคลอไรด์ที่ละลายน้ำ ในขณะที่คลอไรด์ที่พบในมวลรวมอาจเป็นคลอไรด์ที่ละลายในกรด คลอไรด์ที่ละลายในน้ำเป็นคลอไรด์ชนิดที่ทำความเสียหายกับชิ้นส่วนโครงสร้างได้มากกว่า เนื่องจากสามารถละลายมาจากเนื้อคอนกรีตได้ง่าย [4]



รูปที่ 2.2 การเกิดสนิมจากคลอไรด์ที่ปนเปื้อนในคอนกรีต [4]

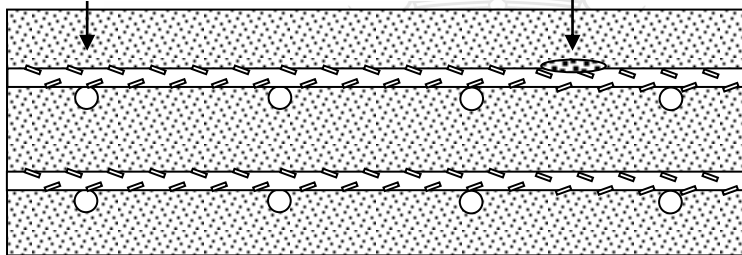
2.6 กระบวนการเกิดสนิมของโลหะที่ฝังในคอนกรีต

คอนกรีตเป็นวัสดุที่มีความเป็นด่างสูง ค่า pH ของคอนกรีตที่หล่อใหม่ ๆ มีค่าอยู่ระหว่าง 12 – 13 ซึ่งด้วยค่าความเป็นด่างขนาดนี้ โลหะที่ฝังอยู่ในคอนกรีตจะได้รับการป้องกันจากการเกิดสนิมจากแผ่นฟิล์มบาง ๆ (Passivating Film) ที่เคลือบผิวของโลหะไว้ อย่างไรก็ตาม ถ้าชั้นฟิล์มนี้ถูกทำลายลง ก็อาจเกิดสนิมขึ้นมาได้

การเกิดสนิม เป็นกระบวนการไฟฟ้าเคมี ที่ต้องมีขั้วไฟฟ้าแอโนด แคโทดและตัวนำไฟฟ้า คอนกรีตที่มีความชื้นก็จัดว่าเป็นตัวนำไฟฟ้าอย่างหนึ่ง ในขณะที่โลหะที่ฝังในคอนกรีตทำหน้าที่เป็น ขั้วแอโนดและแคโทดกระแสไฟฟ้าจะไหลจากแอโนดไปสู่แคโทดผลจากปฏิกิริยานี้จะทำให้เนื้อ โลหะเพิ่มปริมาณขึ้น เนื่องจาก Fe ถูกออกซิไดซ์ไปเป็น $Fe(OH)_2$ และ $Fe(OH)_3$ และเกิดตะกอนใน รูปของ $FeO \cdot OH$ (สนิม) การเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยออกซิเจนและน้ำ สำหรับคอนกรีตที่มีคุณภาพดี อัตราการเกิดสนิมจะเกิดขึ้นช้ามาก ดัง รูปที่ 2.3 แต่อัตราการเกิดสนิมจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วถ้าค่าความเป็นด่างของคอนกรีตมีค่าต่ำลงจากการเกิดคาร์บอนขึ้น ดัง รูปที่ 2.4 หรือคอนกรีต มีปฏิกิริยากับสารเคมีบางประเภท หรือมีการใช้โลหะต่างชนิดกันฝังร่วมกันในคอนกรีต [4]

ปัจจัยที่ป้องกันการเกิดสนิม

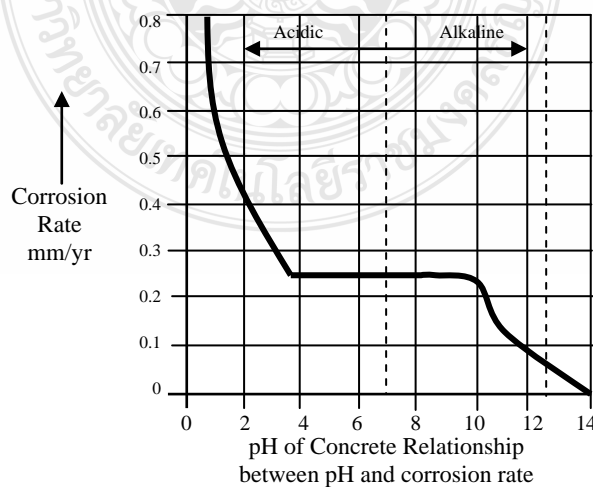
- คอนกรีตคุณภาพสูง
- ค่า pH สูง
- มีระบบการป้องกันเหล็กเสริมจากการเกิดสนิม



ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเกิดสนิม

- ออกซิเจน
- น้ำ
- กระแสไฟฟ้าที่สามารถเคลื่อนที่ไป-มาได้
- มีความไม่สมดุลทางเคมีบริเวณรอบๆ เหล็กเสริม
- ค่า pH ต่ำ
- คลอไรด์

รูปที่ 2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริม [4]



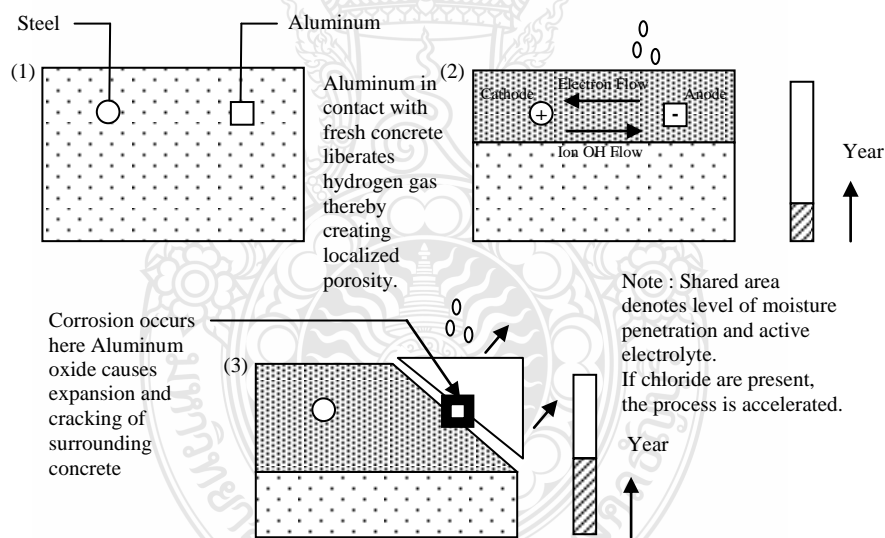
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ของคอนกรีตกับอัตราการเกิดสนิม [4]

2.7 การเกิดสนิมของโลหะต่างชนิดที่ฝังอยู่ในเนื้อคอนกรีต

การเกิดสนิมสามารถเกิดขึ้นได้ เมื่อ โลหะที่ฝังอยู่ในเนื้อคอนกรีตเป็นโลหะต่างชนิดกันในสถานะที่มีตัวนำไฟฟ้า เช่น เนื้อคอนกรีตเปียกชื้น การเกิดสนิมชนิดนี้เรียกว่า กัลวานิก (Galvanic) โลหะแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่ไวต่อปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเฉพาะตัวที่ไม่เหมือนกัน เช่น ทองคำ เป็นโลหะที่เฉื่อย ขณะที่สังกะสีเป็นโลหะที่ไวมาก

เมื่อโลหะสองชนิดมีการเชื่อมต่อกันด้วยไฟฟ้า โลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์น้อยกว่าจะเกิดสนิม สถานะเช่นนี้พบได้บ่อยในโครงสร้างที่มีการฝังอลูมิเนียมลงในคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยที่อลูมิเนียมมักจะเป็นท่อร้อยสายไฟหรือราวจับ อลูมิเนียมมีความไวต่อปฏิกิริยาสูงกว่าเหล็กเสริม ดังนั้นอลูมิเนียมจึงเป็นโลหะที่เกิดสนิมขณะที่เหล็กจะสะอาดขึ้น โดยที่ผิวของอลูมิเนียมจะมีสนิมเป็นออกไซด์เกิดขึ้นเป็นตะกอนขาว ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดึงขึ้นกับคอนกรีตที่หุ้มอลูมิเนียม ดัง รูปที่ 2.5

[4]



รูปที่ 2.5 การเกิดสนิมเนื่องจากความแตกต่างของโลหะ [4]

2.8 ผลกระทบของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

สาเหตุหลักที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตสูญเสียกำลังรับแรงลงไป จากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมมีอยู่ 2 ประการ คือ

2.8.1 ขนาดของเหล็กเสริมบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาแอโนดิก (สูญเสียอิเล็กตรอน) จะเล็กลง เนื่องจากเนื้อเหล็กบางส่วนกลายเป็นสารละลาย และอิเล็กตรอน ทำให้พื้นที่หน้าตัดรับแรงในบริเวณดังกล่าวมีขนาดของเหล็กที่ลดลง

2.8.2 การเกิดสนิมในเหล็กเสริมจะทำให้เกิดแรงดันต่อคอนกรีตบริเวณรอบๆ เหล็กเสริม เนื่องจากสนิมเหล็กจะมีปริมาตรมากกว่าเหล็กเดิม ซึ่งในบางกรณีสนิมเหล็กอาจจะมีปริมาตรมากกว่า 6 เท่าของเหล็กเดิม ถ้าปริมาณน้ำและออกซิเจนมีมากและบริเวณที่จะเกิดสนิมอาจจะเป็นบริเวณข้างเคียงตำแหน่งที่เหล็กสูญเสียอิเล็กตรอนก็ได้ สนิมเหล็กจะก่อให้เกิดแรงดันภายใน ดังนั้นจะทำให้คอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมแตกร้าวตามแนวเหล็กเสริมได้

ดังนั้นผลกระทบโดยรวมจากสาเหตุข้างต้นนี้ คือ กำลังรับแรงของโครงสร้างลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความต้านทานความล้า และความสามารถในการแอ่นตัวหรือเปลี่ยนรูปของโครงสร้างลดลงด้วย นอกจากนี้ ความยืดหยุ่นก็จะลดลง การเกิดรอยแตกร้าวก็เป็นการเร่งให้น้ำออกซิเจน คลอไรด์ เข้าไปถึงบริเวณเหล็กเสริมได้เร็วขึ้น ทำให้การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเร็วและรุนแรงยิ่งขึ้นด้วย [5]

2.9 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยคลอไรด์

2.9.1 กลไกของการมีคลอไรด์ในคอนกรีตและการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์

คลอไรด์เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตได้ โดยคลอไรด์ไอออนเป็นตัวการทำให้ชั้นฟิล์มที่ปกป้องเหล็กเสริมไม่ให้เกิดสนิมถูกทำลาย ถ้ามีน้ำและออกซิเจนเพียงพอ ก็จะทำให้เหล็กเกิดสนิมได้ [5]

2.9.2 แหล่งที่มาของคลอไรด์

คลอไรด์อาจมีอยู่ในคอนกรีตเอง เช่น มีอยู่ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต หิน ทราย (โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในทรายแหล่งที่มาใกล้ทะเล) หรือน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น แคลเซียม-คลอไรด์ที่มีอยู่ในสารเร่งการก่อตัว อย่างไรก็ตาม ได้มีการกำหนดมาตรฐานไว้สำหรับปริมาณคลอไรด์ที่ยอมรับได้ในคอนกรีตสด [7,8] แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความทนทานของคอนกรีตนั้น ส่วนมากจะมาจากภายนอกคอนกรีตในช่วงที่ใช้งาน เช่น จากน้ำทะเล จากดิน หรือจากเกลือที่ใช้ละลายน้ำแข็งในประเทศที่มีอากาศหนาว ซึ่งคลอไรด์อาจเข้าสู่คอนกรีตได้โดยวิธีดังต่อไปนี้

ก. การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตที่แห้งของน้ำที่มีคลอไรด์

ข. การแพร่ของคลอไรด์ไอออนจากภายนอกที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าภายในคอนกรีต

ค. การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตของน้ำที่มีคลอไรด์ โดยแรงดันของน้ำ

โดยทั่วไปแล้วแหล่งของคลอไรด์ ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตนั้นมาจากน้ำทะเล สำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา นั้น ถึงแม้คลอไรด์จะสามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ดี แต่ถ้าไม่มีออกซิเจน การเกิดสนิมของเหล็กเสริมก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ จึงไม่ปัญหา

ความเสี่ยงที่จะเกิดสนิมของเหล็กเสริมพบมากที่สุด บริเวณคลื่นและละอองน้ำ ร่องลมมาเป็นบริเวณบรรยากาศและบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง ส่วนบริเวณใต้ทะเลจะมีความเสี่ยงในการเกิดสนิมน้อยมาก

ในบริเวณใต้น้ำทะเลความเสี่ยงต่อการเกิดของสนิมในเหล็กเสริม เนื่องจากมีความเข้มข้นของออกซิเจนน้อย และอัตราการแพร่ของออกซิเจนเข้าไปในคอนกรีตต่ำมาก เนื่องจากช่องว่างภายในคอนกรีต เป็นช่องว่างอิมมิตัวด้วยน้ำ ซึ่งออกซิเจนละลายน้ำได้น้อยมาก ทำให้อัตราการแพร่เกิดขึ้นน้อย

ถึงแม้จะมีปริมาณออกซิเจนมากในบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง แต่การเกิดสนิมถูกจำกัด โดยอัตราการแพร่ที่ต่ำของออกซิเจน ผ่านทางช่องว่างที่อิมมิตัวด้วยน้ำของคอนกรีตช่วงที่คอนกรีตเปียก

ในกรณีเปียกสลับแห้งนั้น น้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตที่แห้งโดยการดูดซึม หรือการดูดซึมผ่านโพรงคาพิลลารีจนกระทั่งคอนกรีตอยู่ในสภาวะอิมมิตัว เมื่อสภาพภายนอกเปลี่ยนเป็นแห้ง น้ำที่ผิวคอนกรีตก็จะระเหยออกไป ทิ้งไว้แต่คราบเกลือ เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพเปียกอีกความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวก็จะสูงขึ้น ดังนั้นคลอไรด์ไอออนซึ่งมีความเข้มข้นสูงที่บริเวณผิว จะซึมเข้าสู่ภายในโดยการแพร่ ซึ่งในแต่ละรอบการเปียกสลับแห้ง จะทำให้คลอไรด์ที่บริเวณผิวคอนกรีตสูงขึ้นเรื่อยๆ และเข้าสู่ภายในคอนกรีตและสู่บริเวณเหล็กเสริมมากขึ้น โดยปกติแล้วคอนกรีตจะเปียกได้เร็ว แต่จะแห้งได้ช้ากว่ามากและภายในคอนกรีตนั้นไม่สามารถทำให้แห้งได้โดยสมบูรณ์ ดังนั้นการแพร่ของคลอไรด์ไอออนเข้าไปในคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำตลอดเวลาจึงช้ากว่าการเข้าไปของคลอไรด์โดยการเปียกสลับแห้งโดยน้ำทะเล

การเคลื่อนตัวของคลอไรด์ไอออนไปในคอนกรีต ขึ้นอยู่กับระยะเวลาของสภาพเปียกและแห้ง ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานที่และสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น การไหลของทะเล ทิศทางของลม ทิศทางของแสงอาทิตย์ และการใช้งานของโครงสร้าง เป็นต้น ทำให้โครงสร้างเดียวกันแต่ละ

ส่วนอาจจะประสบกับสภาวะเปียกและแห้งได้ไม่เหมือนกัน โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่สภาพที่ถูกน้ำทะเลเป็นบางครั้ง (ช่วงแห้งนาน) มักจะมีโอกาสเกิดปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมมากกว่าคอนกรีตที่ประสบกับสภาวะช่วงแห้งสั้น การเกิดสนิมจะเริ่มเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อ ปริมาณคลอไรด์ไอออนมีมากพอที่ผิวของเหล็กเสริม ซึ่งทำให้สูญเสียชั้นฟิล์มที่ป้องกันเหล็กเสริมจากออกซิเจนและน้ำ [5]

2.9.3 สภาวะของคลอไรด์ในคอนกรีต

คลอไรด์เมื่ออยู่ในคอนกรีตนั้น จะมีคลอไรด์บางส่วนที่ถูกยึดจับโดยกลไกดังต่อไปนี้

ก. ความสัมพันธ์ทางเคมี คลอไรด์บางส่วนจะถูกยึดจับโดยผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน เช่น ผลผลิตของ C_3A และ C_4AF ในรูปของ $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ หรือ $3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ หรือแม้แต้อยู่ในโครงสร้างที่เป็นผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ข. ความสัมพันธ์ทางกายภาพ คลอไรด์บางส่วนสามารถยึดด้วยแรงทางกายภาพได้บนผิวของผลผลิตไฮเดรชัน เช่น $C-S-H$ และ $C-A-H$ เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถถูกยึดอยู่บนผิวของวัสดุที่เป็นของแข็งที่ไม่มีปฏิกิริยา เช่น มวลรวม หรือ ผงฝุ่นหิน ได้ด้วย ถึงแม้จะเป็นปริมาณน้อยก็ตาม

คลอไรด์ส่วนใหญ่ที่ไม่ถูกยึดจับเรียกว่า คลอไรด์อิสระซึ่งจะมีสภาพเป็นสารละลายอยู่ในน้ำที่อยู่ช่องว่างของคอนกรีต คลอไรด์อิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของคลอไรด์ที่สามารถแพร่เข้าไปยังคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่ำกว่า ดังนั้นถ้าคอนกรีตสามารถยึดจับคลอไรด์ไว้เป็นจำนวนมาก ก็จะสามารถยืดเวลาของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีตออกไปได้ [5]

2.9.4 การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณใกล้ผิวที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมทะเล

ความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณผิวที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ เช่น ทะเลเป็นเวลานาน จะมีความเข้มข้นของคลอไรด์ในสารละลายที่อยู่ในช่องว่างของคอนกรีตสูงกว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมได้ ซึ่งเกิดได้ 2 กรณี ลักษณะดังนี้ [5]

ก. ในกรณีของสภาวะเปียกสลับแห้งด้วยน้ำทะเล ในขณะที่บริเวณผิวคอนกรีตแห้ง คอนกรีตจะสูญเสียเฉพาะน้ำซึ่งระเหยจากผิวคอนกรีต ที่เกลือไว้บริเวณผิวคอนกรีตที่แห้ง เมื่อคอนกรีตเข้าสู่สภาวะเปียก น้ำเกลือจะซึมเข้าสู่ภายในคอนกรีตอย่างรวดเร็ว เมื่อสภาวะเปียกสลับแห้งดำเนินไปหลายๆรอบ ก็ทำให้ความเข้มข้นของคลอไรด์ในบริเวณผิวของคอนกรีตสูงกว่าในสิ่งแวดล้อมได้

ข. ในกรณีของสภาวะเปียกสลับแห้งตลอดเวลาในน้ำทะเลหรือน้ำใต้ดินที่มีเกลือ ในกรณีนี้คลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมจะถูกดูดเข้าไปในช่องว่างของคอนกรีตได้ด้วยแรงทางประจุไฟฟ้า

เนื่องจากผิวของช่องว่างในคอนกรีตซึ่งมักจะเกิดเป็นผลผลิตทางไฮเดรชัน เช่น $C-S-H$ จะมีคุณสมบัติทางศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกซึ่งสามารถดึงคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมซึ่งมีประจุเป็นลบเข้าไปได้ อย่างไรก็ตามในสภาพของสิ่งแวดล้อมที่เปียกตลอดเวลา ถึงแม้คลอไรด์จะเข้าไปในคอนกรีตได้มากก็มักไม่เป็นอันตรายต่อเหล็กเสริม เนื่องจากไม่มีออกซิเจนเพียงพอต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริม ยกเว้นกรณีที่บริเวณที่ติดกับคอนกรีตจะมีส่วนที่มีสถานะแห้งได้ด้วย เช่น บริเวณผิวดิน ซึ่งคลอไรด์อาจแพร่เข้าไปสู่บริเวณที่สามารถแห้งได้ ทำให้ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผิวดินมีมากขึ้น และในบริเวณผิวดินซึ่งมีออกซิเจนมากเพียงพอ จึงอาจทำให้โครงสร้างบริเวณผิวดินเกิดสนิมในเหล็กเสริมได้

2.10 การตรวจสอบการเกิดสนิม

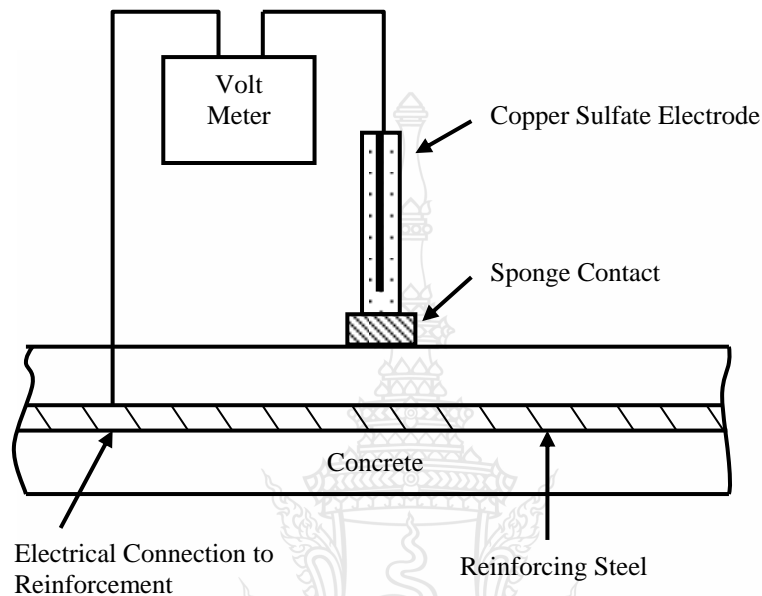
การเกิดสนิม เป็นการเสื่อมสลายเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของเหล็กเสริมที่เกิดขึ้นเมื่อชั้นฟิล์มของเหล็กเสริมถูกทำลายลงเนื่องจากคลอไรด์หรือคาร์บอนเนชั่น และเกิดเป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีขึ้นมาเมื่อเหล็กเสริมเกิดการเกิดสนิมขึ้นในคอนกรีตจะเกิดความต่างศักย์ขึ้นระหว่างพื้นที่ผิวเหล็กเสริมด้านแอโนดและพื้นที่ผิวเหล็กเสริมด้านแคโทด ความต่างศักย์นี้ สามารถวัดได้โดยวางเซลล์คอปเปอร์-คอปเปอร์ซัลเฟต ($Cu-CuSO_4$) บนผิวคอนกรีตแล้ววัดค่าความต่างศักย์ระหว่างเหล็กเสริมกับเซลล์อ้างอิง ที่สัมผัสผิวคอนกรีตและต่อกับ โวลต์มิเตอร์ที่มีค่าความต้านทานสูง (High-Impedance Voltmeter) ซึ่งต่อกับเหล็กเสริมอีกทีหนึ่ง โวลต์มิเตอร์จะอ่านค่าความต่างศักย์บริเวณต่างๆ ที่ทำการทดสอบ การอ่านค่าครั้งนี้จะอ่านในลักษณะของตาราง เพื่อทำเป็นแผนที่ของความต่างศักย์ (Potential Gradient Mapping)

การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ตามมาตรฐาน ASTM C876 [9] สามารถแปลความหมายได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การแปลความหมายจากอุปกรณ์ Half-Cell Potential โดยใช้เซลล์อ้างอิง $Cu-CuSO_4$

ค่าที่อ่านจากอุปกรณ์	โอกาสที่เหล็กเสริมจะเกิดสนิม
> -200 mV	ความน่าจะเป็น 90% ที่ไม่มีการเกิดสนิม
-200 to -350 mV	อาจจะมีหรือไม่มีเกิดสนิมก็ได้ ไม่ชัดเจน
< -350 mV	ความน่าจะเป็นมากกว่า 90% ที่จะมีการเกิดสนิม

ถ้าค่าที่อ่านได้มีค่าเป็นบวก โดยปกติจะหมายความว่า คอนกรีตมีความชื้นไม่เพียงพอและผลการทดสอบที่ได้ใช้การไม่ได้ อย่างไรก็ตาม การทดสอบนี้ไม่สามารถระบุถึงอัตราการเกิด สนิมได้ เป็นเพียงการตรวจสอบขนาดขอบเขตของการเกิดสนิมในขณะการทดสอบเท่านั้น [4] ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การหาความน่าจะเป็นที่เหล็กเสริมจะเป็นสนิมด้วยอุปกรณ์ Half-Cell Potential [10,11]

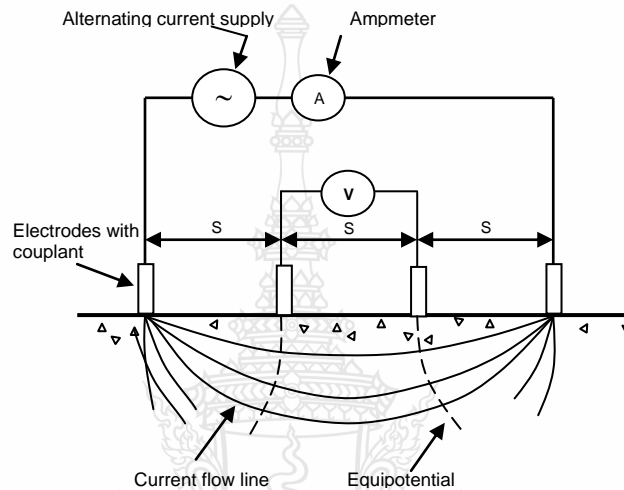
การวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ไม่สามารถใช้ตรวจสอบการเกิดสนิมในลวดอัดแรงแบบดึงที่หลัง (Post-Tensioned Strands) ได้ และไม่สามารถทดสอบได้ถ้าเหล็กเสริมไม่ต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามวิธีนี้เป็นวิธีที่มีผู้นิยมใช้กันมากเนื่องจากเป็นวิธีที่ทดสอบได้ง่าย รวดเร็ว และเสียค่าใช้จ่ายไม่มาก [4]

2.11 การตรวจสอบปริมาณคลอไรด์

เนื่องจากปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีผลกระทบอย่างมากต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีต การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อออนในคอนกรีตจึงเป็นการทดสอบที่สำคัญอย่างหนึ่งซึ่งสามารถทดสอบได้ด้วยวิธีการเก็บตัวอย่างผงคอนกรีตจากโครงสร้างโดยการเจาะคอนกรีตด้วยสว่านไฟฟ้าแบบเจาะกระแทก (Rotary-Percussion Hammer) หรืออาจเจาะแท่งตัวอย่างคอนกรีต (Coring) แล้วนำไปบดให้เป็นผงในห้องทดลอง การเก็บตัวอย่างผงคอนกรีตโดยปกติจะเก็บจากหลายๆจุดจากชิ้นส่วนโครงสร้างที่ต้องการทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM C1152 [12]

2.12 การตรวจสอบความต้านทานทางไฟฟ้า

การกักร่อน คือ ปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าเคมีอย่างหนึ่ง ความต้านทานทางไฟฟ้าของคอนกรีตจะเป็นตัวลดค่าอัตราการเกิดสนิมเหล็กเสริมคอนกรีตจากการไหลของกระแสไอออนิก (Ionic Current, กระแสอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในรูปแบบของไอออน) ผ่านจากด้านแอโนดไปยังแคโทดสำหรับสนิมเหล็กเสริมที่ปรากฏขึ้น



รูปที่ 2.7 การวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์ Four-Probe Wenner-Type Resistivity [10,11]

อุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้า ได้แก่ Four-Probe Wenner-Type Resistivity แสดงใน รูปที่ 2.7 และ Two-Probe Resistance Meter โดยนำอุปกรณ์วางลงที่ผิวของคอนกรีตเพื่ออ่านค่าความต้านทานทางไฟฟ้า ซึ่งโดยทั่วไปอุปกรณ์ที่ใช้วัดจะต้องมีระยะห่างของหัวขั้วที่ใหญ่กว่าขนาดมวลรวมที่โตสุด เพื่อไม่ให้ค่าความต้านทานที่วัดได้มวลรวมเพียงอย่างเดียวแทนที่จะเป็นค่าของคอนกรีต ซึ่งประกอบด้วยซีเมนต์เพสต์และมวลรวม และถ้าเป็นไปได้ที่จะหลีกเลี่ยงการวัดที่ระยะห่างเหล็กเสริมน้อยกว่าระยะวางหัวขั้วของอุปกรณ์เพื่ออ่านค่า ควรวางอุปกรณ์ในมุมที่ไม่พาดผ่านแนวของเหล็กเสริมเพื่อป้องกันการลัดวงจรในส่วนของกระแสที่เกิดขึ้นจากการวัดค่า นอกจากนี้การวัดค่าควรที่จะวัดจากขอบของคอนกรีต [10]

การตีความหมายจากการอ่านค่าความต้านทานทางไฟฟ้าจากอุปกรณ์นั้น ดังแสดงใน ตารางที่

2.3

ตารางที่ 2.3 การแปลความหมายจากอุปกรณ์ Four-Probe Wenner-Type Resistivity [10]

ค่าที่อ่านจากอุปกรณ์	อัตราการเกิดสนิมเหล็กเสริม
> 20 kohm.cm	ต่ำ
10 - 20 kohm.cm	ปานกลาง
5 - 10 kohm.cm	สนิมสูง
< 5 kohm.cm	สูงมาก

2.13 การซ่อมพื้นผิวคอนกรีต

2.13.1 กระบวนการซ่อมแซมผิวคอนกรีต

การซ่อมพื้นผิวคอนกรีตได้มีการปฏิบัติกันมาตั้งแต่มีการเทหล่อคอนกรีต ตลอดช่วงระยะเวลาที่ผ่านมาได้มีวิธีซ่อมแซมทั้งที่ได้เรียนรู้และทั้งที่ถูกยกเลิกปฏิบัติมากมาย กระบวนการซ่อมแซมในอดีตเป็นวิธีที่ง่าย ๆ วัสดุและวิธีการให้เลือกใช้เพียงเล็กน้อย ปัจจุบันการซ่อมพื้นผิวคอนกรีตเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนยิ่งกว่าในอดีตมากเนื่องจากเหตุผลหลายประการ ดังนี้

ก. มีการใช้คอนกรีตที่มีสมรรถนะสูงในงานก่อสร้าง (กำลังสูง น้ำหนักเบา และมีการผสมสารผสมเพิ่มชนิดต่าง)

ข. การออกแบบที่แม่นยำขึ้น

ค. มีการใช้คอนกรีตในหลายลักษณะ รวมทั้งการใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง

ง. สภาพทางอากาศ ตลอดจนการใช้เกลือละลายน้ำแข็ง

จ. โครงสร้างที่ซับซ้อน เช่น โครงสร้างอัดแรง โครงสร้างประกอบ เป็นต้น

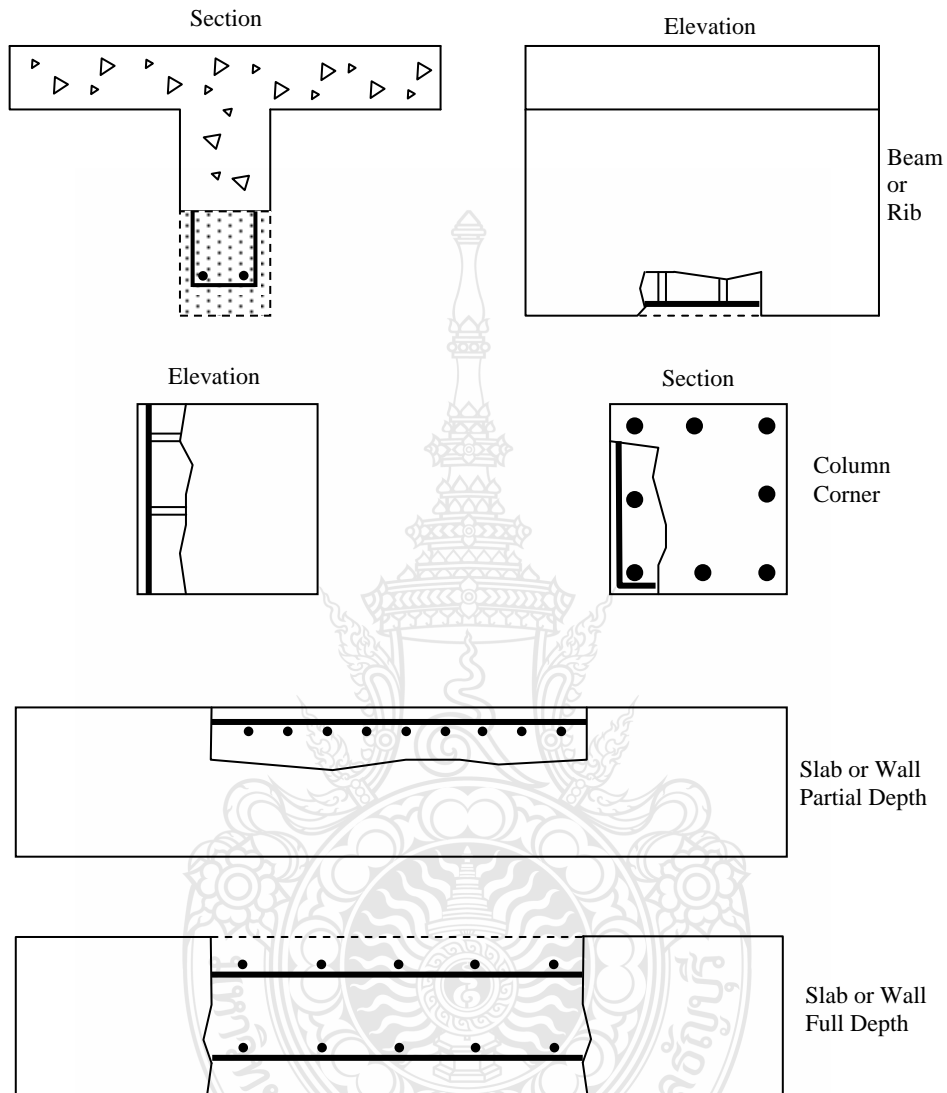
ฉ. วัสดุที่นำมาซ่อมแซมมีหลากหลายชนิดตามสภาวะการใช้งานต่างๆ

ช. มีเทคนิคในการเทหล่อคอนกรีตหลายวิธีในการซ่อมแซม

ปัจจุบัน เทคนิคการซ่อมพื้นผิวคอนกรีตเป็นเรื่องที่ต้องอาศัยความรู้ความเข้าใจในการทำงานเกี่ยวกับการทดสอบวัสดุ ประเมินสภาพโครงสร้าง วัสดุซ่อมแซมและผลกระทบที่ตามมา คุณสมบัติและพฤติกรรมของวัสดุ ข้อกำหนดเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อม และเทคโนโลยีการหล่อคอนกรีต การซ่อมเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพและคงทนนั้นไม่ใช่สิ่งที่จะทำได้แน่นอน ขั้นตอนการซ่อมแซมหลายอย่างมักจะทำกันผิด การซ่อมแซมบางชนิดเป็นสิ่งที่จำเป็น และการซ่อมแซมในขั้นตอนหนึ่งมักจะเป็นผลจากความสำเร็จในขั้นตอนอื่นๆ การซ่อมแซมที่คงทนและประสิทธิภาพเป็นกระบวนการที่พัฒนาไม่สิ้นสุด [4]

2.13.2 รูปแบบการซ่อมแซมพื้นผิว (Recommended Layout of Surface Repairs)

ดังแสดงใน รูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 รูปแบบการรื้อคอนกรีต

จาก รูปที่ 2.8 โดยทั่วไปการเสื่อมสภาพของพื้นผิวคอนกรีตจะไม่เท่ากันทั่วพื้นที่ พื้นที่ที่จะซ่อมแซมควรจะมีการปรับปรุงเพื่อให้มีรูปแบบที่ง่าย ควรจะออกแบบรูปแบบของพื้นที่ที่ซ่อมแซมเพื่อให้ความยาวขอบน้อยที่สุด การมีความยาวขอบยาวมากเกินไปหรือซับซ้อน จะเป็นผลให้เกิดหน่วยแรงหดตัวและการแตกร้าว ถ้าใช้เลื่อยในการเตรียมขอบ ควรเลื่อยให้ได้แนวตรง และอาจตัดให้พื้นที่มากกว่าพื้นที่ที่เสียหาย [4]

2.13.3 การป้องกันเหล็กเสริม

การป้องกันเหล็กเสริมจากการเกิดสนิม เมื่อถูกหุ้มด้วยสภาพที่มีความเป็นด่างสูงจากคอนกรีตคุณภาพดีที่เทหล่อใหม่ แต่ในการซ่อมแซมคอนกรีตนั้นบางครั้งจะต้องมีการป้องกันเหล็กเสริมเพิ่มเติม การป้องกันสามารถแบ่งได้ ดังนี้ [4]

ก. การทำฉนวนป้องกันเหล็กเสริมจากกระแสไฟฟ้าในคอนกรีต (Encapsulation) สามารถทำได้โดยการหุ้มเหล็กเสริมด้วยอีพอกซีเมื่อใช้เหล็กเสริมใหม่ Fusion-Bonded Epoxy เป็นวิธีป้องกันที่ดีที่สุด โดยการพ่นทรายและให้ความร้อนแก่เหล็กเสริม จากนั้นพ่นอีพอกซีลงบนเหล็ก โดยการควบคุมสิ่งแวดล้อมโดยรอบไว้ ในการทำงานในสนามจึงจำเป็นต้องเคลือบผิวเหล็กเสริมคอนกรีต โดยใช้การพ่นอีพอกซีเรซินหรือวิธีที่นิยมใช้มากกว่าคือการใช้แปรงทา ในการใช้เรซินในสนามเป็นการยากมากที่จะทำให้เหล็กเสริมถูกหุ้มด้วยอีพอกซี 100% บริเวณที่เหล็กพาดผ่านกัน และบริเวณด้านหลังของเหล็กเป็นบริเวณที่เกือบจะเข้าถึงไม่ได้ วิธีการทำฉนวนป้องกันเหล็กเสริมจากกระแสไฟฟ้าในคอนกรีตนี้ใช้ได้ผลดีเมื่อเหล็กเสริมในพื้นที่ที่เสียหายได้รับการหุ้มไว้ทั้งหมด อย่างไรก็ตาม ถ้าเหล็กเสริมถูกหุ้มไว้เพียงบางส่วนทั้งที่อยู่ในบริเวณที่ซ่อมแซมหรือบริเวณที่ติดๆกัน กระแสไฟฟ้าอาจเข้มข้นบริเวณที่ไม่ได้รับการหุ้ม จะกลายเป็นการเร่งการเกิดสนิมจนเป็นปัญหาได้

ข. การป้องกันเหล็กเสริมจากการเกิดสนิมโดยการเคลือบด้วยโลหะที่จะเกิดสนิมแทน (Cathodic Protection/Sacrificial Anode) ซึ่งสังกะสีเป็นโลหะที่ใช้กันมากเพื่อจุดประสงค์นี้ โดยทำการทาสังกะสีเข้ากับเหล็กเสริม ปัจจุบันได้มีการใช้สังกะสีหลอมเหลวเป็นสารเคลือบผิวเพื่อให้เกิดสนิมแทนเหล็กเสริม วิธีการนี้ใช้เมื่อทำการซ่อมผิวทั้งหมดเสร็จเรียบร้อยแล้ว พื้นผิวที่เคลือบด้วยสังกะสีจะถูกเชื่อมต่อทางไฟฟ้ากับโครงเหล็กเสริม เนื่องจากวิธีการนี้จะต้องมีการสูญเสียเนื้อโลหะ ดังนั้นอายุการใช้งานจึงขึ้นอยู่กับระดับของการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมที่ทำให้เกิดสนิมและลักษณะของกระแสแอนโนด วิธีการชนิดนี้ใช้ได้ในการทดลองเท่านั้น

ค. การป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยใช้กระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดสนิมย้อนกลับ (Cathodic Protection/Impressed Current) โดยทำการติดตั้งด้านแอนโนดที่บริเวณผิวคอนกรีตแล้วต่อเข้ากับเหล็กเสริม เพื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าไปในวงจรจะป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ วิธีการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมนี้ต้องมีความสอดคล้องกับสภาพแวดล้อมอย่างต่อเนื่อง จึงต้องมีการตรวจวัดและปรับเปลี่ยนอย่างสม่ำเสมอ

2.14 การป้องกันการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีต

โครงสร้างคอนกรีตต้องประสบกับสภาวะต่างๆ ที่อาจมีผลกระทบต่อพฤติกรรมของโครงสร้างได้ การเข้าใจถึงความสัมพันธ์ระหว่างการเสื่อมสภาพก่อนเวลาอันควร หรือเสื่อมสภาพที่ไม่ได้คาดการณ์เอาไว้ หรือการมีสภาพการใช้งานที่ไม่สมบูรณ์ กับสาเหตุของความเสียหายเหล่านี้ จะเป็นพื้นฐานในการเลือกใช้วิธีการที่จะทำการป้องกัน

2.14.1 การป้องกัน

การป้องกัน คือ วิธีการที่ควบคุมสาเหตุการเสื่อมสภาพหรือสาเหตุของการใช้งานไม่ได้ของโครงสร้าง โดยการ

- ก. เปลี่ยนแปลงสภาพการใช้งานหรือสภาพแวดล้อม
- ข. ปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตให้ดีขึ้น
- ค. ติดตั้งวัสดุป้องกันระหว่างสภาพการใช้งาน/สภาพแวดล้อมกับโครงสร้างคอนกรีต
- ง. เปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของกระบวนการไฟฟ้าเคมีเมื่อเกิดความเสียหายจากการเกิดสนิมของโลหะที่ฝังอยู่ในคอนกรีต

วิธีการป้องกันเกี่ยวกับการเสื่อมสภาพโดยปกติจะมีวัตถุประสงค์เพื่อยืดระยะเวลาระหว่างรอบการบำรุงรักษา ตัวอย่างเช่น คอนกรีตที่มีการบิ่นกระเทาะ (Spalling) ซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของการเสื่อมสภาพ (Deterioration) ที่อาจเกิดจากสภาวะการใช้งานหรือสภาพแวดล้อม (Exposure/Service Condition) จะทำให้เหล็กเสริมเกิดการเกิดสนิม การป้องกันคอนกรีตจากสภาวะการใช้งานหรือสิ่งแวดล้อมสามารถทำได้โดยใช้ การเคลือบผิววัสดุ ชั้นเคลือบผิว การเคลือบผิว และการขัดมัน ส่วนวิธีป้องกันที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานมีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ไขสภาวะที่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้าง เช่น การรั่วซึมของน้ำใต้ดินผ่านรอยแตกร้าวเข้าสู่พื้นที่ใช้งาน สามารถทำได้โดยการฉีดอัดสารกันน้ำ (Grouting) การตัดเส้นทางน้ำ (Diversion) การใช้แผ่นกันน้ำ (Membrane Waterproofing) หรือ Rout & Seal

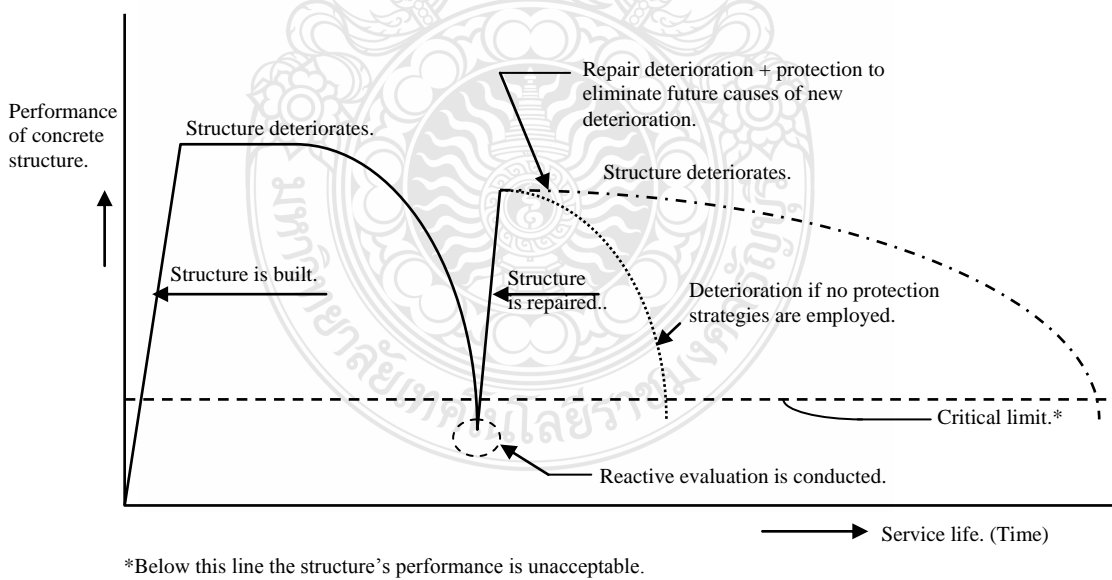
วิธีการป้องกัน โครงสร้างคอนกรีตมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี การเลือกใช้เทคนิคแต่ละอย่างที่เหมาะสมกับสภาพ โครงสร้างที่มีอยู่จำเป็นต้องพิจารณาถึงวิธีการที่ใช้ นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาถึงอายุการใช้งาน ความคุ้มค่า ความเป็นไปได้ในการก่อสร้าง สิ่งแวดล้อมและความสวยงาม

[4]

2.14.2 ระบบป้องกัน (Protection Systems)

สามารถติดตั้งได้ตั้งแต่ขั้นตอนการก่อสร้างหรือช่วงเวลาใดก็ได้ในช่วงอายุการใช้งานของโครงสร้างการออกแบบโครงสร้างที่ดีจะต้องมีการคาดการณ์และติดตั้งระบบป้องกันเอาไว้ มีหลายสถานะที่ทำให้โครงสร้างเสื่อมสภาพ (Deterioration) หรือใช้การไม่ได้ แต่ไม่ได้คำนึงถึงในระหว่างก่อสร้างจึงต้องทำการซ่อมแซม และ/หรือติดตั้งระบบป้องกันในระหว่างช่วงอายุการใช้งานของโครงสร้าง การป้องกันโครงสร้างที่ก่อสร้างเสร็จแล้วโดยปกติจะยากกว่าและมีวิธีให้เลือกใช้น้อยกว่าระบบป้องกันที่ติดตั้งระหว่างการก่อสร้าง

วิธีการป้องกันการเสื่อมสภาพของโครงสร้างก่อนเวลาอันควรให้คุ้มค่าที่สุดที่สุด เมื่อเทียบกับโครงสร้างที่ไม่ได้ทำการป้องกันเลย โดยใช้การวิเคราะห์มูลค่าปัจจุบัน (Present Value) เพื่อพิจารณาความคุ้มค่าของวิธีการป้องกัน จาก รูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพจากการซ่อมแซมที่มีการป้องกันที่ดีและการซ่อมแซมที่ไม่ได้ทำระบบป้องกัน ซึ่งหากมีการซ่อมแซมและทำระบบป้องกันที่ดีจะทำให้คอนกรีตส่วนที่ได้รับ การซ่อมแซมมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น โดยกำหนดให้การเสื่อมสภาพของคอนกรีตเป็นจุดวิกฤต [4]



รูปที่ 2.9 เปรียบเทียบอายุของการใช้งาน โครงสร้างกับสมรรถภาพของโครงสร้าง [4]

2.15 กระบวนการเกิดสนิมแบบ Macrocell

การเกิดสนิมที่เกิดจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่แอโนดและแคโทดจากผลของคลอไรด์ที่ปนเปื้อนในชิ้นส่วนของโครงสร้างทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างบริเวณพื้นผิวของเหล็กเสริมที่เกิดสนิมและที่ปราศจากสนิม กรณีนี้เรียกได้ว่า ปรากฏการณ์ของการเกิดสนิมแบบ Macrocell คลอไรด์เป็นตัวเร่งให้เกิดสนิมโดยเฉพาะอย่างยิ่งว่าแนวโน้มที่จะเกิดสนิมเป็นรูปแบบของการเกิดสนิมแบบ Macrocell ที่ระดับน้ำทะเลสูงสุดเป็นจุดที่มีการสะสมของคลอไรด์ในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์ในคอนกรีตอยู่ในสถานะเปียกชื้น โดยถูกดูดซับเก็บไว้เนื่องจากความชื้น การดูดซึมของน้ำในโพรงทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ค่าการนำไฟฟ้าที่สูงขึ้นทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างแอโนดและแคโทดที่ทำให้ไอออนสามารถเคลื่อนที่ผ่านน้ำที่อยู่ในโพรง

การแยกตัวของพื้นที่การเกิดสนิมไม่จำเป็นต้องแสดงให้เห็นถึงการกระจายของคลอไรด์ตามเหล็กเสริม ปฏิกิริยาแอโนดิกและปฏิกิริยาแคโทดิกนั้นแบ่งแยกกัน คือ พื้นที่แคโทดิกเป็นบริเวณกว้างๆ รองรับพื้นที่เล็กๆหรือจุดใดๆของแอโนดิก

สำหรับคาร์บอนชั้นที่ปรากฏในคอนกรีตจะเกิดทุกๆไป เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์ไม่สามารถซึมผ่านไปได้ไกล ดังนั้นการเกิดสนิมจึงเกิดเป็นรูปแบบของการเกิดสนิมแบบ Microcell กับ การปรากฏขึ้นอย่างชัดเจนอย่างต่อเนื่องตามแนวเหล็กเสริม [13]

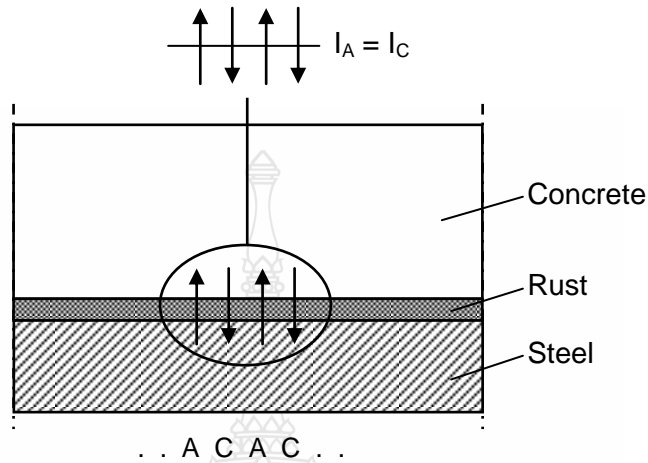
การเกิดสนิมที่เกิดขึ้นอย่างใดอย่างหนึ่งคือการเกิดสนิมแบบ Microcell เรียกว่าการเกิดสนิมแบบสม่ำเสมอ (Uniform corrosion) หรือการเกิดสนิมแบบ Macrocell เรียกว่า การเกิดสนิมเฉพาะจุด (Local corrosion) ในกรณีของการเกิดสนิมแบบ Macrocell นั้น โดยทั่วไปเกิดขึ้นภายใต้แนวโน้มของคลอไรด์ ขั้วบวกและขั้วลบเกิดการกระจายตัวของ การเกิดสนิมแบบ Macrocell เป็นผลผลิตที่เกิดจากความแตกต่าง พฤติกรรมความไม่สม่ำเสมอของการแพร่กระจายคลอไรด์ไอออนสู่ธาตุใดธาตุหนึ่งซึ่งเป็นหนึ่งในองค์ประกอบหลัก ในกรณีนี้การสูญเสียเนื้อเหล็กที่ขั้วบวกเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิวสูงกว่าเมื่ออัตราส่วนระหว่างขั้วบวกและขั้วลบที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวที่ค่อนข้างสูง ผลก็คืออัตราการเกิดสนิมที่สูงขึ้นและการเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว

การเกิดสนิมแบบ Macrocell โดยปกติเกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ของแรงดันไฟฟ้าสาเหตุจากความต่างศักย์ของขั้วบวกที่ต่ำมาก เนื่องจากปริมาณคลอไรด์ไอออนที่สูง การเคลื่อนที่ของแรงดันไฟฟ้าอยู่ ระหว่าง 100 mV ถึงมากกว่า 500 mV [2]

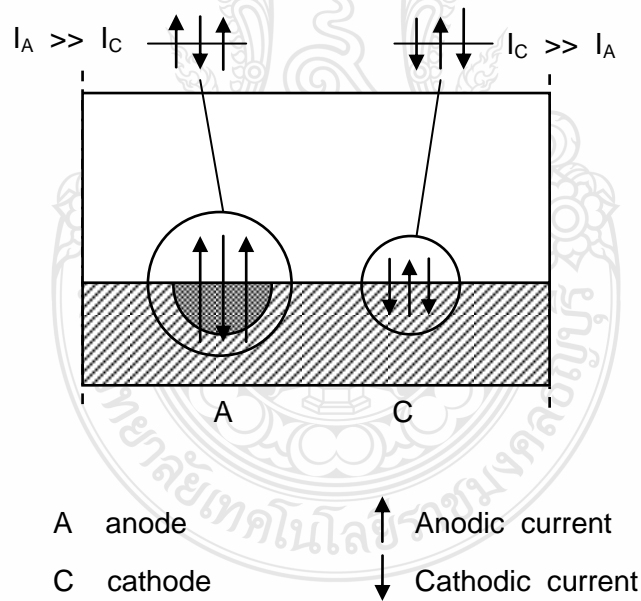
ภาพรวมของการเกิดสนิมแบบ Macrocell สามารถเขียนออกมาได้ในรูปของระบบไฟฟ้าอย่างง่าย โดยพื้นฐานของระบบต้นแบบของวงจร ที่แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของ

แรงดันไฟฟ้า ความต้านทานของระบบที่กำลังถูกกัดกร่อน และกระแสไฟฟ้าที่เกิดในวงจรของการเกิดสนิมแบบ Macrocell ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของอัตราการผลิตสนิม

Microcells (uniform iron removal)



Macrocells (pitting, local iron removal)

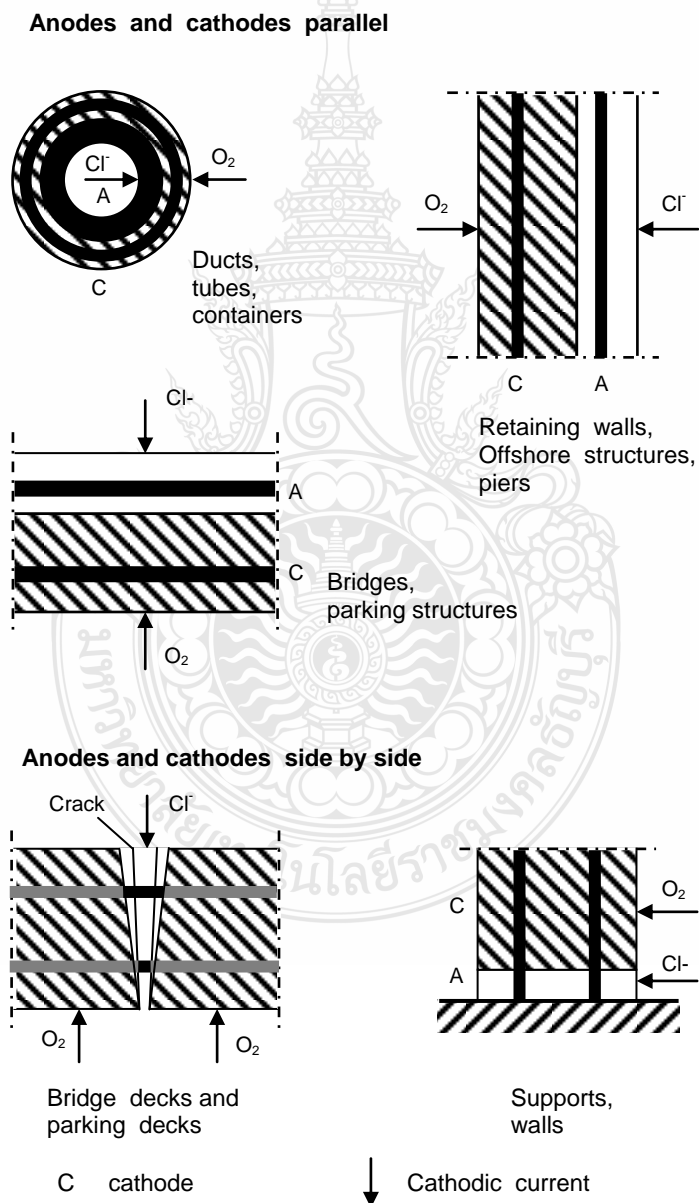


รูปที่ 2.10 รูปแบบการเกิดการเกิดสนิม [3]

จากทฤษฎีพบว่าอัตราการผลิตสนิมเฉลี่ยเสริมของการเกิดสนิมแบบ Macrocell เกิดภายใต้เงื่อนไขสามตัวแปรได้แก่ ความแตกต่างของปริมาณคลอไรด์ พื้นที่ผิวของขั้วลบต่อขั้วบวก และการแตกตัวของขั้วบวกกับขั้วลบ

จากผลการวิจัยพบว่าปัญหาการเกิดการเกิดสนิมแบบ Macrocell เพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณคลอไรด์ที่แตกต่างกันนั้น มีผลออกมามากคล้ายกัน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลต่างของคลอไรด์ที่เท่ากัน และ อัตราการเกิดสนิมเหล็กเสริม จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อผลต่างของปริมาณคลอไรด์มีค่าเพิ่มขึ้น [2]

การเกิดสนิมประกอบด้วยความเป็นโลหะและสารที่แตกตัวเป็นอะตอมสามารถนำไฟฟ้าได้ เชื่อมต่อขั้วบวกและขั้วลบสามารถปรากฏให้เห็นคือการเกิดสนิมแบบ Microcell เป็นหลักที่ เคลื่อนย้ายของธาตุเหล็กอย่างสม่ำเสมอ และการเกิดสนิมแบบ Macrocell ที่เกิดการแตกตัวของเหล็ก เป็นจุดเล็กๆ หรือเกิดเป็นสนิมหลุม ดัง รูปที่ 2.10



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างของการเกิดสนิมแบบ Macrocell [3]

การเกิดสนิมแบบ Microcell โดยทั่วไปเกิดจากการบ่อนั้นของคอนกรีตตลอดพื้นที่ที่กว้างๆ หรือปริมาณคลอไรด์ที่สูงมากๆ สม่่าเสมอตลอดพื้นที่บริเวณเหล็กเสริม จึงเกิดการก่อตัวเป็นรูปแบบของการเกิดสนิมแบบ Microcell ซึ่งประกอบด้วยคู่ของขั้วบวกและขั้วลบที่อยู่ติดกัน ขนาดเล็กมาก เพราะฉะนั้นผิวภายนอกจะปรากฏให้เห็นเป็นการหลุดร่อนของเนื้อเหล็ก

การเกิดสนิมแบบ Macrocell ปกติเกิดขึ้นในกรณีที่เกิดสนิมที่เกิดจากคลอไรด์ โดยประกอบด้วยพื้นผิวที่ขั้วบวกที่ถูกกระทำ เมื่อปริมาณคลอไรด์ถึงจุดวิกฤต ค่าความแตกต่างที่ขั้วลบกับขั้วบวกบริเวณใกล้เคียงกันมาก ๆ หรือบางครั้งขั้วบวกและขั้วลบอาจไม่ได้อยู่ใกล้เคียงกัน

รูปแบบของการเกิดสนิมแบบ Microcell และการเกิดสนิมแบบ Macrocell โดยการสูญเสียเนื้อเหล็กที่เกิดขึ้นบริเวณผิวจะเกิดมากกว่าในกรณีของการเกิดสนิมแบบ Macrocell เนื่องจากความต่างศักย์ที่ขั้วลบมีค่าสูงมากกระทำต่อเหล็กเป็นจุดเล็กๆ

การเกิดการเกิดสนิมแบบ Macrocell เนื่องจากความแตกต่างทางเรขาคณิต ดังที่กล่าวมาแล้ว ระยะห่างระหว่างขั้วบวกและขั้วลบอาจมีค่าน้อยหรือมากก็ได้ โครงสร้างที่ขั้วบวกและลบขนานกัน นั้น โดยเฉพาะถ้าด้านใดด้านหนึ่งของโครงสร้างคอนกรีตถูกกระทำด้วยคลอไรด์ อีกด้านเป็นอากาศ ถ้าด้านที่คลอไรด์ซึมผ่านเข้าไปถูกทำลายชั้นฟิล์มที่ป้องกันเหล็กเสริม จะเกิดสนิมขึ้นโดยการไหลของแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าสูง เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วบวกมีค่าต่ำมากๆ เนื่องจากปริมาณคลอไรด์ที่สูง การสูญเสียการป้องกันของเหล็กและปริมาณความชื้นที่สูง และศักย์ไฟฟ้าทางขั้วลบที่มีค่าเพิ่มขึ้นจากปริมาณออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นบริเวณผิวของเหล็ก แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นอาจมีค่าตั้งแต่ 100 mV ถึงมากกว่า 500 mV ดังแสดงใน รูปที่ 2.11 [3]

2.16 การซ่อมแซมเฉพาะที่ (Patch Repair)

สถานการณ์หลังจากซ่อมแซม พื้นผิวบริเวณที่เสียหาย โดยการรีคอนกรีตเก่าออกเฉพาะจุดที่เสียหายและทำการฉาบปิด ถ้าคอนกรีตเฉพาะบริเวณเกิดรอยร้าวที่ทำการรีคอนกรีตได้เกิด สนิมขึ้น บริเวณรอยปะซึ่งมีคลอไรด์ปนเปื้อนอยู่ ทั้งนี้เกิดจากการซ่อมของพื้นที่ที่กระทำกับขั้วบวกจากผลของการป้องกันที่ได้ทำการรีออก เพราะฉะนั้นพื้นผิวบริเวณนั้นอาจเริ่มกัดกร่อนอีกเพราะว่าการเกิดสนิมวิกฤตที่เริ่มขึ้นจากปริมาณคลอไรด์ซึ่งลดลง โดยผลกระทบจากการขาดการป้องกันที่ขั้วลบ อัตราการเกิดสนิมสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เพราะว่าบริเวณพื้นผิวของเหล็กอยู่ใกล้กับพื้นที่วิกฤตที่แสดงศักย์ไฟฟ้าบวกที่สูงมาก ผลก็คือเกิดอัตราสนิมที่สูงขึ้นจากความต่างศักย์

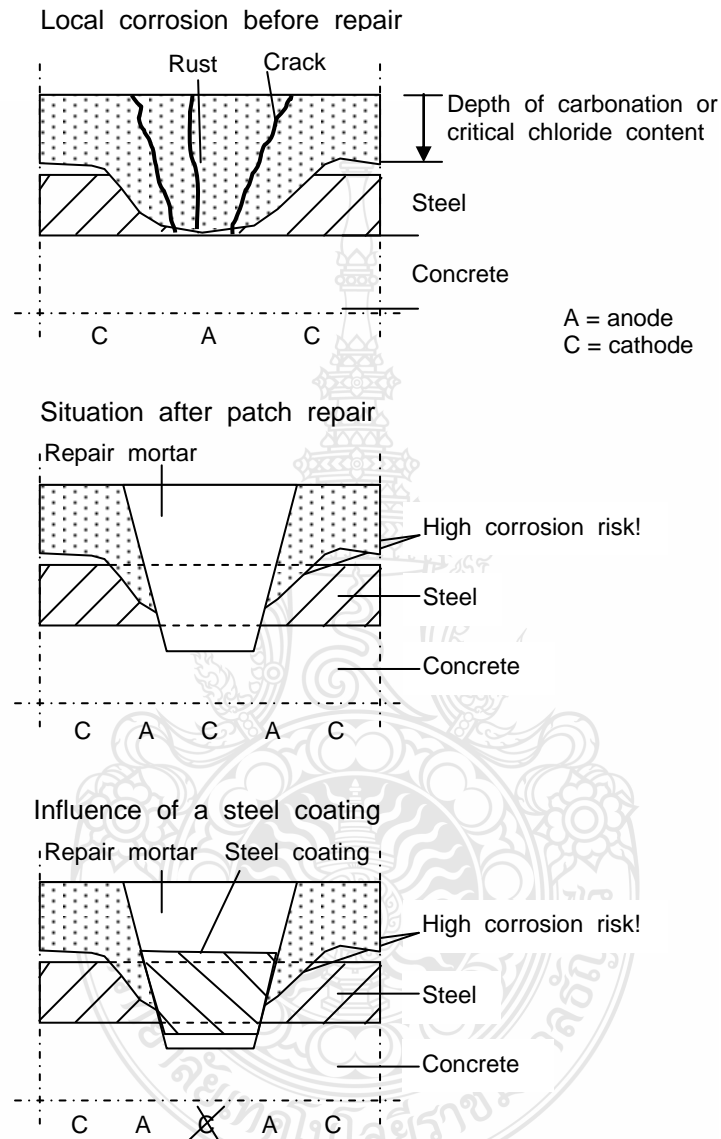
กลไกการเกิดสนิมเหล็กเสริม โดยปกตินี้ ไม่สามารถป้องกันได้ด้วยการเคลือบผิวเหล็กในบริเวณที่ซ่อม การห่อหุ้มที่พอเหมาะนั้นจำเป็นมาก เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคาะโทดิกสามารถลดลงได้ในบริเวณที่ได้รับการเคลือบผิวไว้ ในขณะที่การเคลือบผิวในรูปแบบทั่วไปสามารถลดอัตราการเกิดสนิมเหล็กเสริมได้เพียงเล็กน้อย แต่ไม่สามารถขัดขวางกระบวนการเกิดสนิมใกล้บริเวณที่ซ่อมได้ [3]

จากผลการวิจัยเรื่องความทนทานของชั้นหินกรวดซ่อมแซมบางส่วน พบว่าในการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่ใช้ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อระบุพฤติกรรมเหล็กในคอนกรีตภายหลังการซ่อมแซมบางส่วนจากความเสียหาย เนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริม โดยพื้นผิวที่ปนเปื้อนคลอไรด์ของคอนกรีต สามารถแสดงผลออกมาให้เห็นได้ คือ ในกรณีที่มีแนวโน้มจากคลอไรด์ที่เกิดการเกิดสนิมแบบ Macrocell ในพื้นที่ทั้งหมดซึ่งมีปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่ไม่สามารถรื้อออกได้ทั้งหมด ไม่ว่าจะตรวจสอบได้อย่างชัดเจนหรือไม่ก็ตาม ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบ ปริมาณคลอไรด์สูงสุดเท่ากับร้อยละ 0.5 ถึง 1.0 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และร้อยละ 0.5 ถึง 2.0 ในซีเมนต์ตะกอนเตาถลุง และ ซีเมนต์ถั่วลันเตา และจะแปรผันตามระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและปริมาณน้ำในเนื้อคอนกรีตปฏิกิริยาเคาะโทดิกของเหล็กเสริมภายในพื้นที่ที่ซ่อมแซมมีค่าลดลงเนื่องจากการเคลือบผิวเหล็กด้วยอีพอกซี อย่างไรก็ตามภายใต้เงื่อนไขตามความเป็นจริงนั้นพื้นผิวเหล็กภายนอกส่วนที่ซ่อมแซมนั้นกว้างมาก ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่กระทำกับขั้วลบ ซึ่งต้องทดลองให้เห็นจากการวัดค่ากระแสของการเกิดสนิมแบบ Macrocell [3]

จากรูปที่ 2.12 หลังจากทำการรื้อถอนคอนกรีตที่เสียหายและปนเปื้อนออกแล้ว ทำการซ่อมจุดนั้นด้วยการฉาบปะซึ่งมีวัสดุซ่อมแซมหลายชนิด วัสดุสำหรับงานซ่อมแซมเฉพาะทางถูกประยุกต์ใช้อย่างเหมาะสมเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะจุดซ่อมแซมที่เล็กๆ วัสดุเหล่านี้สามารถซ่อมโครงสร้างที่เสียหายจากคาร์บอนชั่นได้เป็นอย่างดี แต่กรณีของคลอไรด์นั้นไม่สามารถแก้ไขได้ในการซ่อมเฉพาะที่ ปัญหาที่เกิดขึ้นที่ด้านแอโนดพบได้แพร่หลายในโครงสร้างที่ปนเปื้อนด้วยคลอไรด์คือคอนกรีตทั่วไปมีความต้านทานต่ำเมื่อคลอไรด์ถูกชักนำเข้ามาด้วยความชื้น ความต้านทานที่ต่ำทำให้ปฏิกิริยาที่ ด้านแอโนดและแคโทดเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว

การซ่อมแซมเฉพาะที่นั้นไม่เพียงพอที่จะหยุดการเสื่อมสภาพที่เพิ่มขึ้นได้จากการกระทำของคลอไรด์ กรณีที่โครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมคลอไรด์ที่รุนแรงได้รับการซ่อมแซมเฉพาะที่ (Patch repair) พบว่าเป็นการเร่งการเกิดสนิมที่จุดที่ได้ซ่อมแซมกับการทำให้เกิดอีกครั้งอย่างรวดเร็วเมื่อยับยั้งปฏิกิริยาแอโนดิก ก็จะเป็นการยับยั้งการเกิดไฮดรอกไซด์ไอออนจากปฏิกิริยาเคาะโทดิกได้

เพราะฉะนั้นก็เป็นการป้องกันจากการเกิดสนิมเพราะว่าส่วนแคโทดที่เกิดจากการซ่อมแซมสูงขึ้น
 เหนือจุดวิกฤตของอัตราส่วน คลอไรด์ต่อไฮดรอกไซด์ และการเกิดสนิมเริ่มต้น บ่อยครั้งที่รอบๆ จุดที่
 ซ่อมแซม นี้เกิดปฏิกิริยาแอโนดิกจากเซลล์ไฟฟ้าเคมี [13]



รูปที่ 2.12 กลไกการเกิดสนิมแบบ Macrocell ที่กระทำก่อนและหลังการซ่อมแซมเฉพาะที่ [3]

2.17 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ha-Won Song และ Velu Saraswathy (2007) กล่าวถึง โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีศักยภาพด้านความคงทนและสามารถทนทานต่อการกระทำของสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย อย่างไรก็ตาม ความเสียหายใน โครงสร้างจะยังคงเกิดขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดสนิมเหล็กเสริมก่อนเวลาอันควร การบำรุงรักษาและการซ่อมแซมสะพานและอาคารเพื่อความปลอดภัยเหล่านี้ ต้องมีการตรวจสอบประสิทธิภาพและเทคนิคการตรวจสอบประเมินผลการเกิดสนิมเหล็กเสริม วิศวกรต้องมีความรู้ทางด้านเทคนิคที่ดีในการประเมินสภาพของโครงสร้าง เมื่อต้องทำการบำรุงรักษาและซ่อมแซม วิธีการเหล่านี้สามารถระบุปัญหาของความคงทนที่อาจจะเป็นไปได้ก่อนที่จะโครงสร้างจะเกิดความเสียหายอย่างร้ายแรง โดยได้แสดงความคิดเห็นด้านเทคนิคการตรวจสอบด้านไฟฟ้าเคมีและการทดสอบแบบไม่ทำลาย จากมุมมองของการประเมินการเกิดสนิมและการประยุกต์ใช้กับสะพาน อาคาร และโครงสร้างทางวิศวกรรมอื่นๆ [1]

Ominda Nanayakkara และ Yoshitaka Kato (2008) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนแคโทดต่อแอโนดและปริมาณคลอไรด์ต่อการเกิดสนิมในรูปแบบของ Macrocell โดยทดสอบตัวอย่างภายในห้องปฏิบัติการ โดยเพิ่มแปรผันปริมาณคลอไรด์อ็อกไซด์ และสัดส่วนของพื้นที่แคโทดต่อแอโนด ผลการทดสอบพบว่า อัตราการเกิดสนิมเพิ่มขึ้นตามปริมาณคลอไรด์อ็อกไซด์ที่แตกต่างกันเพิ่มขึ้นและพื้นที่แคโทดเพิ่มขึ้น และมีค่าลดลงจากการแยกพื้นที่แอโนดและแคโทด โดยสามารถยืนยันได้ว่าการเกิดสนิมที่เพิ่มขึ้น เกิดจากปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่เพิ่มขึ้นและความแตกต่างของปริมาณคลอไรด์ อย่างไรก็ตาม ไม่สมบูรณ์แบบ แต่สามารถตรวจสอบการเกิดสนิมที่เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่แคโทด การแยกตัวของแอโนดและแคโทดยังคงเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน และยังเป็นข้อโต้แย้งทางทฤษฎีที่ไม่สามารถสร้างการยอมรับได้

M. Raupach (1996) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานและผลกระทบในทางปฏิบัติของปริมาณคลอไรด์อ็อกไซด์ที่ทำให้เกิดสนิมเหล็กเสริมในคอนกรีต ผลการทดสอบพบว่า การเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตจากปริมาณคลอไรด์อ็อกไซด์เป็นปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี พื้นที่ผิวเหล็กเสริมสามารถถูกแบ่งเป็นแอโนดและแคโทด เหล็กเสริมด้านแอโนดถูกกำจัดออกไปโดยการเกิดสนิมซึ่งรองรับโดยปฏิกิริยาแคโทดปรากฏในพื้นที่ที่ติดกับกับแอโนดหรือบางกรณีอาจมีระยะห่างออกไปมาก การเกิดสนิมแบบ Macrocell เกิดขึ้นเป็นปรกติเมื่อปริมาณคลอไรด์ของคอนกรีตมีค่าสูง แต่ไม่กระจายไปตลอดความยาวของเหล็กเสริม ผลกระทบของการเกิดสนิมแบบ Macrocell ได้นำมาพิจารณาในการ

ออกแบบความคงทนของโครงสร้างใหม่ การวิเคราะห์ และประเมินผลของโครงสร้างเดิมและออกแบบการซ่อมแซม [3]

ความแปรปรวนของความหนาแน่นของกระแสการเกิดสนิมอาจจะสังเกตได้จากชนิดของธาตุต่อธาตุ ตัวอย่างต่อตัวอย่าง และครั้งต่อครั้ง ความไม่แน่นอนนี้สามารถกำจัดออกได้โดยการเพิ่มจำนวนตัวอย่างสำหรับการทดลองหลายๆ กรณีและใช้วิธีการแก้ปัญหาด้วยวิธีทางสถิติ [2]

Ominda Nanayakkara และ Yoshitaka Kato (2007) ได้ทำการศึกษา การเกิดสนิมแบบ Macrocell ของชิ้นส่วนคอนกรีตที่ซ่อมแซมบางส่วน โดยเพิ่มแปรผันปริมาณคลอไรด์ไอออนที่แตกต่างกันระหว่างส่วนที่ไม่ได้ซ่อมแซมกับส่วนที่ซ่อมแซม สรุปผลได้ว่า สมมติฐานทั่วไปและการวิจัยสามารถพบการเกิดสนิมจากการที่ซ่อมแซม ส่วนใหญ่เกิดขึ้นบริเวณที่พื้นผิวติดกับกับส่วนที่ซ่อมแซม และยังพบว่ากระแสการเกิดสนิมแบบ Macrocell ที่ด้านแอนโอดส่วนหนึ่งเกิดจากผลของวัสดุซ่อมแซม ขณะที่กระแสด้านแคโทดปรากฏในส่วนของคอนกรีตเมื่อปริมาณคลอไรด์ต่ำ สามารถยืนยันได้ว่า การเกิดสนิมแบบ Macrocell ในวัสดุซ่อมแซมอาจสังเกตได้เมื่อการเสื่อมสภาพของคอนกรีตจากการซ่อมแซม โดยวัสดุที่มีค่าความต้านทานวัสดุ หรือการต้านทานซึมผ่านของน้ำและออกซิเจนที่สูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนที่เป็นคอนกรีตเก่า กระบวนการเกิดสนิมนี้สามารถพบเห็นได้ทั่วไป เมื่อมีค่าความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าเคมีที่สูงมาก [14]

Ominda Nanayakkara และ Yoshitaka Kato (2006) ได้ทำการศึกษาการเกิดสนิมแบบ Macrocell พิจารณาปริมาณคลอไรด์ตามแนวเหล็กเสริม โดยจุดประสงค์ของการศึกษาก็เพื่อความเข้าใจต่อการเกิดสนิมเหล็กเสริมแบบ Macrocell จากการปริมาณคลอไรด์ไอออนที่แตกต่างกันซึ่งแสดงให้เห็นถึงสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันของคลอไรด์ที่เข้าสู่คอนกรีต ตัวอย่างที่หล่อเพื่อให้มีปริมาณคลอไรด์ไอออนที่แตกต่างกันทั้งสองด้านจากจุดกึ่งกลางของตัวอย่าง เหล็กเสริมที่แบ่งออกใช้เพื่อติดตามผลการเกิดสนิมเป็นระยะ และด้วยเหตุนี้เองความหนาแน่นของกระแสจึงถูกคำนวณ ซึ่งพบว่าค่าความหนาแน่นของกระแสการเกิดสนิมสูงสุด พบการเกิดสนิมในพื้นที่ที่ติดกับของชิ้นงานที่มีปริมาณคลอไรด์ไอออนที่แตกต่างกัน เช่นเดียวกับที่ปรากฏในด้านที่ปริมาณคลอไรด์ไอออนสูง และยังเข้าใจถึงการเกิด Macrocell จากการเพิ่มขึ้นของปริมาณคลอไรด์ไอออนที่แตกต่างกัน และปริมาณคลอไรด์ไอออนทั้งหมด [15]

Ominda Nanayakkara และ Yoshitaka Kato (2007) ได้ทำการศึกษาผลจากระยะเวลาต่อการเกิดสนิมเหล็กเสริมแบบ Macrocell ในชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากวัสดุและความไม่แน่นอนเดียวกันของสิ่งแวดล้อม เกี่ยวกับการทดลองด้วยพื้นฐานทางทฤษฎีเพื่อทราบถึงผลกระทบของ

ปริมาณคลอไรด์ไอออนที่แตกต่างและสม่ำเสมอต่อพฤติกรรมการเกิดสนิมแบบ Macrocell เพื่อแสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติของคอนกรีตที่ไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกันและต่างกันตามลำดับ ตัวอย่างคอนกรีตถูกหล่อขึ้นด้วยปริมาณคลอไรด์ไอออนที่แตกต่างกันในสองด้านจากจุดกึ่งกลางและปริมาณคลอไรด์ที่สม่ำเสมอตลอดขึ้นตัวอย่าง กระแสการเกิดสนิมแบบ Macrocell ได้จากการวัดตามแนวเหล็กเสริมเป็นระยะซึ่งเจาะจงเปรียบเทียบส่วนที่ถูกแบ่งออกเป็นพิเศษ และพบว่ากระแสการเกิดสนิมแบบ Macrocell ได้มีการเปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลา ดังนั้นตำแหน่งแอโนดิกเปลี่ยนปฏิกิริยาจากแอโนดิกสู่แคโทดิกตามระยะเวลา ซึ่งตำแหน่งแคโทดิกจะเปลี่ยนปฏิกิริยาแคโทดิกเป็นแอโนดิกในลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอ ในสถานการณ์อื่น บางตำแหน่งตามแนวเหล็กเสริมแสดงให้เห็นจุดที่มีอัตราการเกิดสนิมสูงสุดจุดเดียว และหลายๆจุด เป็นระยะๆ การสังเกตนี้ขึ้นอยู่กับเวลาของกระบวนการเกิดสนิม [16]

Shi yuan Qian, Jie ying Zhang, De yu Qu (2006) ได้ทำการศึกษาทฤษฎีและทำการทดลองการเกิดสนิมแบบ Microcell และ Macrocell จากการซ่อมแซมแบบบางส่วนบนโครงสร้างคอนกรีต โดยการซ่อมแซมบางส่วนใช้สำหรับซ่อมแซมความเสียหายโครงสร้างคอนกรีตได้อย่างง่าย อย่างไรก็ตามความคงทนของโครงสร้างยังไม่พอเพียงจากการซ่อมแซมบางส่วนเนื่องจากการเกิดสนิมอีกครั้งจากความเข้าใจที่แพร่หลาย กลไกของการกระจายตัวของรูปแบบการเกิดสนิม Macrocell ระหว่างพื้นที่ซ่อมแซม และติดกับส่วนที่ไม่ได้ซ่อมแซม ดังนั้นความเข้ากันได้ของศักย์ไฟฟ้าเคมีระหว่างสองพื้นที่เพื่อลดความเสี่ยงที่จะเกิดสนิมและเพื่อให้การซ่อมแซมบรรลุผล จึงทำการศึกษากลไกการเกิดสนิมและแนวคิดของความเข้ากันได้ระหว่างระบบการซ่อมแซมบางส่วนจากหลักการของศักย์ไฟฟ้าเคมีพื้นฐาน และพิสูจน์จากผลการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นกลไกการวัดค่าทั้ง Macrocell และ Microcell เป็นบทบาทที่สำคัญ ดังนั้นวัสดุที่คุณสมบัติต่างกันจะเป็นผลต่อการเกิดสนิมแบบ Macrocell ในแง่จลนศาสตร์การเกิดสนิม แสดงให้เห็นว่าขนาดของการเกิดสนิมที่เพิ่มเติมเกี่ยวข้องกับจลนศาสตร์การเกิดสนิมของแอโนดและแคโทด [17]

Montemor M.F., Simões A.M.P., and Ferreira M.G.S. (2003) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเกิดสนิมเหล็กเสริมจากการคลอไรด์ จากทฤษฎีเพื่อเทคนิคในการติดตามผล ผลการศึกษาคือส่วนประกอบของชั้นฟิล์มที่ปกป้องเหล็กเสริมและกลไกที่ทำให้เกิดความเสียหายจากคลอไรด์สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลอง [18]

Jaggi, S., Bohno, H., and Elsener, B. (2001) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเกิดสนิมแบบ Macrocell ของเหล็กเสริมในคอนกรีต โดยการทดลองและแบบจำลองเชิงตัวเลข สรุปได้ว่าใน

โครงสร้างจริง คลอไรด์เป็นตัวชักนำให้เกิดสนิมแบบ Macrocell อย่างรวดเร็วและเป็นแรงให้เกิดการสลายของเหล็กที่ตำแหน่งแอโนด จากการศึกษาสามารถจำลองการเกิด Macrocell ในห้องปฏิบัติการร่วมกับแบบจำลองเชิงตัวเลขได้ [19]

B. Elsener (2002) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับความเกี่ยวข้องของการตรวจสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมแบบ Macrocell ในคอนกรีต คือการเกิดสนิมเหล็กเสริมแบบ Macrocell เกิดระหว่างพื้นที่แอโนดกับแคโทดที่กว้างมากๆ ปรากฏในคลอไรด์ในถูกชักนำเข้าสู่การเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีต และมีหน้าที่ทำให้เกิดสนิมในปริมาณสูงมาก และลดพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมพบเห็น โดยทั่วไปในสะพาน คาคฟ้า หรือโครงสร้างพื้นฐาน [20]

ตามยศ สมยาภักดี, ภัควัฒน์ แสนเจริญ, ปิติศานต์ กร้ามาตร, สมนึก ตั้งเต็มศิริกุล (2553) ได้ทำการศึกษา เกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดสนิมของการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแบบเฉพาะที่ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับการซ่อมแซมความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการเกิดสนิม มักพบปัญหาที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างคอนกรีตภายหลังการซ่อมแซมแบบเฉพาะที่ คือ การเกิดสนิมอีกครั้งในระยะเวลาอันสั้น โดยเฉพาะบริเวณรอยต่อระหว่างคอนกรีตเก่ากับวัสดุซ่อมแซม จุดประสงค์ของการวิจัยครั้งนี้ก็เพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดสนิมในเหล็กเสริมของการซ่อมแซม โครงสร้างคอนกรีตแบบเฉพาะที่ ตัวอย่างที่ทดสอบแบ่งเป็นสองฝั่งคือคอนกรีตเก่าและวัสดุซ่อมแซม โดยแปรผันปริมาณคลอไรด์ไอออนในแท่งตัวอย่างคอนกรีตเก่า ร้อยละ 0, 2, 4 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวเหล็กเสริมของคอนกรีตเก่าและพื้นที่ผิวเหล็กเสริมของวัสดุซ่อมแซม ได้แก่ 3:17, 10:10 และ 17:3 วัสดุที่ใช้ซ่อมแซมได้แก่ ซีเมนต์มอร์ตาร์ มอร์ตาร์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยวัสดุโพลีเมอร์ และมอร์ตาร์สำหรับงานซ่อมแซม โดยทดสอบวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ และวัดค่ากระแสไฟฟ้า ผลการทดสอบพบว่า ปริมาณคลอไรด์ไอออนที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อค่าการเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตเพิ่มขึ้น อัตราส่วนพื้นที่ผิวเหล็กเสริมด้านแอโนดและแคโทดมีผลต่อค่าการเกิดสนิมเมื่อปริมาณคลอไรด์ไอออนเพิ่มขึ้น วัสดุซ่อมแซมที่มีความทึบน้ำมากมีผลทำให้กระแสที่เกิดขึ้นนั้นน้อยลง การเลือกใช้วัสดุสำหรับซ่อมแซมที่ถูกต้องเหมาะสมจะเป็นการลดการเกิดสนิมของเหล็กเสริม อายุการใช้งานของโครงสร้างหลังซ่อมแซมจะนานขึ้น เป็นการลดค่าใช้จ่ายสำหรับซ่อมบำรุง สุดท้ายเพื่อเป็นแนวทางในการเสนอวิธีซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กให้มีความคงทน [21]

ตามยศ สมยาภักดี, ภัควัฒน์ แสนเจริญ, ปิติศานต์ กร้ามาตร, สมนึก ตั้งเต็มศิริกุล (2553) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่ออายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ได้รับการ

ซ่อมแซมบางส่วน กล่าวคือในประเทศไทยมีการซ่อมแซมความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมพบเห็นได้โดยทั่วไป โดยเฉพาะโครงสร้างบริเวณชายทะเล และโครงสร้างที่มีอายุการใช้งานมานาน การซ่อมแซมซึ่งมักดำเนินการได้แก่ การซ่อมแซมแบบเฉพาะที่ (Patching repair) ซึ่งมีความง่ายและสะดวกที่สุด แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นได้แก่ ปัญหาความเสียหายซ้ำกับบริเวณที่ได้รับการซ่อมแซม หรือบริเวณใกล้เคียง ภายหลังจากการซ่อมแซมไม่นาน ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงมุ่งเน้นการศึกษาปัญหาด้านความคงทนของการซ่อมแซมการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์แบบเฉพาะที่ โดยมีการปรับเปลี่ยนสัดส่วนผสมของคอนกรีต ชนิดของวัสดุประสาน และขนาดพื้นที่ของบริเวณซ่อมแซม จากผลการทดลองวัสดุซ่อมแซมที่มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าสูง จะลดการเกิดสนิมของเหล็กเสริมลงได้ และผลของการซ่อมแซมพื้นที่บริเวณกว้างและเหลือพื้นที่ที่ไม่ได้รับการซ่อมแซมน้อย จะทำให้เกิดความเสียหายในบริเวณที่ไม่ได้รับการซ่อมแซมเร็วขึ้น จากผลการศึกษาสามารถเป็นแนวทางในการเลือกวัสดุซ่อมแซมเพื่อให้การซ่อมแซมมีความคงทน [22]



บทที่ 3

ขั้นตอนการศึกษา

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

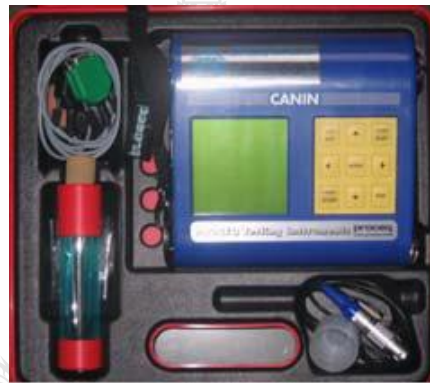
- 3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง ตามมาตรฐาน มอก. 80-2517 หรือ ASTM C150
- 3.1.2 ใ้ถ้ำลอย ใช้ใ้ถ้ำลอย ตามมาตรฐาน มอก.2135
- 3.1.3 มวลรวมละเอียด ใช้ทรายแม่น้ำ ร่อนผ่านตะแกรง เบอร์ 4
- 3.1.4 มวลรวมหยาบ ใช้หินปูนย่อย (Crushed limestone) ขนาด 3/4 นิ้ว
- 3.1.5 น้ำ ใช้ผสมคอนกรีตใช้น้ำประปา
- 3.1.6 โซเดียมคลอไรด์, NaCl (เกลือแกง)
- 3.1.7 เหล็กเสริมคอนกรีต DB16 ชั้นคุณภาพ SD30
- 3.1.8 สายไฟแบบเส้นเดี่ยวมีฉนวน พื้นที่หน้าตัด 1 ตร.มม. (THW 1x1 ตร.มม.)
- 3.1.9 ซีเมนต์พิเศษผสมโพลีเมอร์กับโพรพิลีนไฟเบอร์ และ ซีเมนต์พิเศษผสมโพลีเมอร์

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- 3.2.1 ไม้แบบหล่อคอนกรีตขนาด 70x70x280 มม.
- 3.2.2 โวลมิเตอร์ที่มีความต้านทานสูง ความละเอียด 0.01 มิลลิโวลต์ รูปที่ 3.1
- 3.2.3 เครื่อง Half-Cell Potential รูปที่ 3.2
- 3.2.4 เครื่อง Four-Probe Wenner-Type Resistivity รูปที่ 3.3
- 3.2.5 ตัวต้านทานขนาด 100 ($\pm 5\%$) โอห์ม
- 3.2.6 เครื่องผสมคอนกรีตและมอร์ตาร์



รูปที่ 3.1 เครื่อง โวลต์มิเตอร์



รูปที่ 3.2 เครื่อง Half-Cell Potential



รูปที่ 3.3 เครื่อง Four-Probe Wenner-Type Resistivity

3.3 สัดส่วนผสม

3.3.1 สัดส่วนผสมคอนกรีตเดิม (Original Concrete, OC)

คอนกรีตส่วนเดิมหรือคอนกรีตที่เสื่อมสภาพเนื่องจากการเกิดสนิมของคลอไรด์ ทำให้มีปริมาณคลอไรด์ปนเปื้อนอยู่ในคอนกรีตเนื่องจากการซึมผ่าน วัสดุที่ใช้คือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ปริมาณคลอไรด์ไอออนที่ปนเปื้อนคอนกรีตเท่ากับ 0 - 4 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม. และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ดังแสดงใน ตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนผสมคอนกรีตส่วนเดิม

สัญลักษณ์	ชนิดคอนกรีต	น้ำหนัก (กก./คอนกรีต 1 ลบ.ม.)					
		โซเดียมคลอไรด์	ซีเมนต์	เถ้าลอย	ทราย	หิน	น้ำ
1-OC	OPC0.0CL	0.0	380	-	780	1100	209
2-OC	OPC2.0CL	12.38	380	-	780	1100	209
3-OC	OPC4.0CL	24.77	380	-	780	1100	209
4-OC	OPC20FA0.0CL	0.0	304	76	780	1100	209
5-OC	OPC20FA0.5CL	3.10	304	76	780	1100	209
6-OC	OPC20FA1.0CL	6.19	304	76	780	1100	209
7-OC	OPC20FA2.0CL	12.38	304	76	780	1100	209
8-OC	OPC20FA3.0CL	18.58	304	76	780	1100	209
9-OC	OPC20FA4.0CL	24.77	304	76	780	1100	209

OPC หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

FA หมายถึง เถ้าลอย, 20FA หมายถึง เถ้าลอยปริมาณ ร้อยละ 20 ของวัสดุประสาน

CL หมายถึง ปริมาณคลอไรด์ไอออน, 1.0CL หมายถึง ปริมาณคลอไรด์ไอออน 1.0 กก.ต่อปริมาตรคอนกรีต 1 ลบ.ม.

3.3.2 สัดส่วนผสมวัสดุซ่อมแซม (Repair Material, RM)

วัสดุที่ใช้สำหรับซ่อมแซม ใช้ซีเมนต์มอร์ตาร์, ซีเมนต์พิเศษที่มีส่วนผสมของทราย คัดเกรด สารปรุงแต่งพิเศษ โพลีโพรพิลีนไฟเบอร์ และโพลีเมอร์, ซีเมนต์พิเศษที่มีส่วนผสมของทราย คัดเกรด สารปรุงแต่งพิเศษ และโพลีเมอร์ ดังแสดงใน ตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมมอร์ตาร์ส่วนซ่อมแซม

สัญลักษณ์	ชนิดมอร์ตาร์	น้ำหนัก (กก./คอนกรีต 1 ลบ.ม.)		
		วัสดุประสาน	ทราย	น้ำ
1-RM	Cement Mortar (CM)	600	1200	330
2-RM	Cement + Polymer + Fiber + Quartz Sand (PMM)	1800	-	288
3-RM	Cement + Polymer + Quartz Sand (PRM)	1800	-	252

ตารางที่ 3.3 แสดงให้เห็นถึงชุดตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนส่วนที่ซ่อมแซมที่แตกต่างกัน ออกไป ตัวอย่างเช่น 9-OC/3-RM (7:21) ใช้คอนกรีตเก่า OPC20FA4.0CL วัสดุซ่อมแซม PRM อัตราส่วนพื้นที่ผิวเหล็กเสริม แอนโอดต่อแคโทดเท่ากับ 7 ต่อ 21 ผลต่างปริมาณคลอไรด์ไอออนระหว่าง แอนโอดกับแคโทด เท่ากับ ร้อยละ 4 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

ลำดับ	สัญลักษณ์	วัสดุที่ใช้		อัตราส่วน ความยาว $L_A:L_C$	ผลต่าง ปริมาณ คลอไรด์	จำนวน ตัวอย่าง
		ขั้วลบ (Anodic)	ขั้วบวก (Cathodic)			
1	1-OC/1-RM	OPC0.0CL	CM	7:21	0.0	2
				14:14		2
				21:7		2
2	1-OC/2-RM	OPC0.0CL	PMM	7:21	0.0	2
				14:14		2
				21:7		2

ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ (ต่อ)

ลำดับ	สัญลักษณ์	วัสดุที่ใช้		อัตราส่วน ความยาว $L_A:L_C$	ผลต่าง ปริมาณ คลอไรด์	จำนวน ตัวอย่าง
		ขั้วบวก (Anodic)	ขั้วลบ (Cathodic)			
3	1-OC/3-RM	OPC0.0CL	PRM	7:21	0.0	2
				14:14		2
				21:7		2
4	2-OC/1-RM	OPC2.0CL	CM	7:21	2.0	2
				14:14		2
				21:7		2
5	2-OC/2-RM	OPC2.0CL	PMM	7:21	2.5	2
				14:14		2
				21:7		2
6	2-OC/3-RM	OPC2.0CL	PRM	7:21	2.0	2
				14:14		2
				21:7		2
7	3-OC/1-RM	OPC4.0CL	CM	7:21	4.0	2
				14:14		2
				21:7		2
8	3-OC/2-RM	OPC4.0CL	PMM	7:21	4.0	2
				14:14		2
				21:7		2
9	3-OC/3-RM	OPC4.0CL	PRM	7:21	4.0	2
				14:14		2
				21:7		2

ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ (ต่อ)

ลำดับ	สัญลักษณ์	วัสดุที่ใช้		อัตราส่วน ความยาว $L_A:L_C$	ผลต่าง ปริมาณ คลอไรด์	จำนวน ตัวอย่าง
		ขั้วบวก (Anodic)	ขั้วลบ (Cathodic)			
10	4-OC/1-RM	OPC20FA0.0CL	CM	7:21	0.0	2
				14:14		2
				21:7		2
11	4-OC/2-RM	OPC20FA0.0CL	PMM	7:21	0.0	2
				14:14		2
				21:7		2
12	4-OC/3-RM	OPC20FA0.0CL	PRM	7:21	0.0	2
				14:14		2
				21:7		2
13	5-OC/1-RM	OPC20FA0.5CL	CM	7:21	0.5	2
				14:14		2
				21:7		2
14	5-OC/2-RM	OPC20FA0.5CL	PMM	7:21	0.5	2
				14:14		2
				21:7		2
15	5-OC/3-RM	OPC20FA0.5CL	PRM	7:21	0.5	2
				14:14		2
				21:7		2
16	6-OC/1-RM	OPC20FA1.0CL	CM	7:21	1.0	2
				14:14		2
				21:7		2

ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ (ต่อ)

ลำดับ	สัญลักษณ์	วัสดุที่ใช้		อัตราส่วน ความยาว $L_A:L_C$	ผลต่าง ปริมาณ คลอไรด์	จำนวน ตัวอย่าง
		ขั้วบวก (Anodic)	ขั้วลบ (Cathodic)			
17	6-OC/2-RM	OPC20FA1.0CL	PMM	7:21	1.0	2
				14:14		2
				21:7		2
18	6-OC/3-RM	OPC20FA1.0CL	PRM	7:21	1.0	2
				14:14		2
				21:7		2
19	7-OC/1-RM	OPC20FA2.0CL	CM	7:21	2.0	2
				14:14		2
				21:7		2
20	7-OC/2-RM	OPC20FA2.0CL	PMM	7:21	2.0	2
				14:14		2
				21:7		2
21	7-OC/3-RM	OPC20FA2.0CL	PRM	7:21	2.0	2
				14:14		2
				21:7		2
22	8-OC/1-RM	OPC20FA3.0CL	CM	7:21	3.0	2
				14:14		2
				21:7		2
23	8-OC/2-RM	OPC20FA3.0CL	PMM	7:21	3.0	2
				14:14		2
				21:7		2

ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ (ต่อ)

ลำดับ	สัญลักษณ์	วัสดุที่ใช้		อัตราส่วน ความยาว $L_A:L_C$	ผลต่าง ปริมาณ คลอไรด์	จำนวน ตัวอย่าง
		ขั้วบวก (Anodic)	ขั้วลบ (Cathodic)			
24	8-OC/3-RM	OPC20FA3.0CL	PRM	7:21	3.0	2
				14:14		2
				21:7		2
25	9-OC/1-RM	OPC20FA4.0CL	CM	7:21	4.0	2
				14:14		2
				21:7		2
26	9-OC/2-RM	OPC20FA4.0CL	PMM	7:21	4.0	2
				14:14		2
				21:7		2
27	9-OC/3-RM	OPC20FA4.0CL	PRM	7:21	4.0	2
				14:14		2
				21:7		2

3.4 การเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

3.4.1 การผสม

เตรียมวัสดุผสมให้ได้ปริมาณตามที่ได้ออกแบบส่วนผสมไว้ สำหรับปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอย ทราช หิน เกลือ โซเดียมคลอไรด์ และน้ำ โดยใช้วิธีการชั่งน้ำหนัก

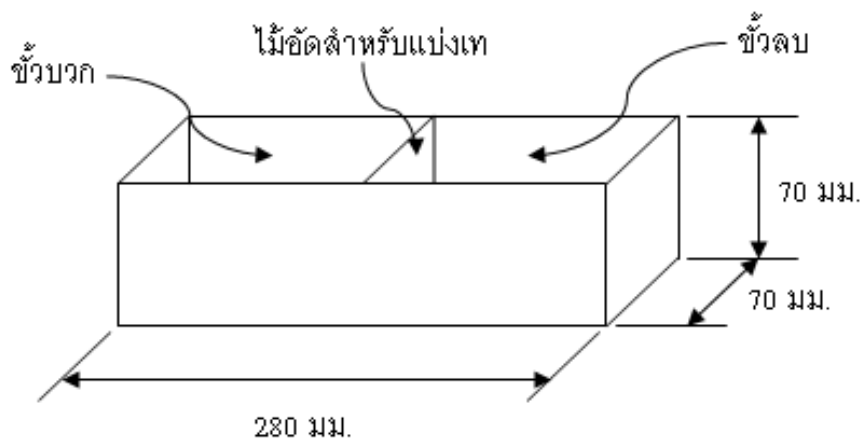
ทำการผสมโดยนำวัสดุผสมที่เตรียมไว้มาผสมให้เข้ากัน ใช้เวลาในการผสมทั้งหมด ประมาณ 5 นาที รูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การผสมคอนกรีตตามสัดส่วนผสม

3.4.2 การเตรียมแบบหล่อตัวอย่าง

ใช้แบบหล่อคอนกรีตขนาด 70x70x280 มิลลิเมตร ใช้ไม้อัด ขนาด 70x70x10 มิลลิเมตร เพื่อแบ่งเทชั้นส่วนคอนกรีตด้านแอโนด และด้านแคโทด รูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การเตรียมแบบหล่อตัวอย่างทดสอบการเกิดสนิมแบบ Macrocell

3.4.3 การเตรียมเหล็กเสริม

ตัดเหล็กเสริมให้ได้ความยาวตามที่ต้องการใช้ในตัวอย่าง โดยกำหนดค่าระยะหุ้มที่ปลายเหล็กเสริมเท่ากับด้านละ 2 เซนติเมตร หลังจากตัดเหล็กเสริมได้ความยาวตามที่กำหนดแล้ว ทำการขัดผิวเหล็กเสริมให้เรียบ และปราศจากคราบสนิมจากความชื้น จากนั้นล้างด้วยสารละลาย

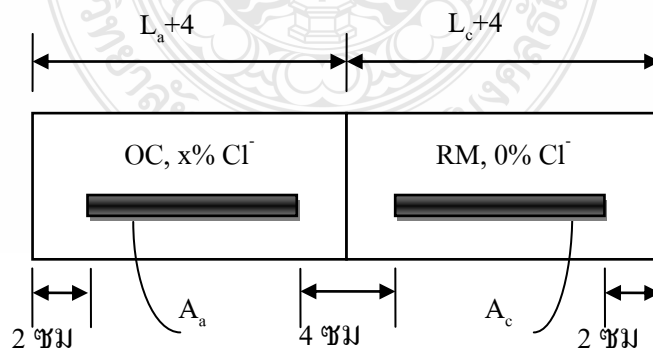
อะซีโตน เช็ดให้แห้ง ชั่งน้ำหนักจذبบันทึกค่า เชื่อมต่อสายไฟกับเหล็กเสริมด้วยหัวแร้ง ดังรูปที่ 3.6 จึงนำไปติดตั้งในแบบหล่อตัวอย่าง โดยใช้เส้นเอ็นรัดให้แน่น



รูปที่ 3.6 เหล็กเสริมที่พร้อมใช้กับตัวอย่าง

3.4.4 การหล่อตัวอย่าง

หลังจากผสมคอนกรีต แล้วให้ทำการเก็บตัวอย่างขนาด 70x70x280 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.7 โดยนำคอนกรีตใส่ลงในแบบหล่อโดยแบ่งออกเป็น 3 ชั้น ชั้นละเท่ากัน แต่ละชั้นกระทุ้ง 35 ครั้ง และชั้นสุดท้ายปาดผิวหน้าให้เรียบ ทิ้งคอนกรีตให้แข็งตัวในแบบหล่อ 24 ชั่วโมง รูปที่ 3.8 (ก) จากนั้นให้ทำการผสมคอนกรีตส่วนของวัสดุซ่อมแซม เทเข้าแบบหล่อที่ไว้จนตัวอย่างแข็งตัว อีก 24 ชั่วโมง รูปที่ 3.8 (ข) จำนวนตัวอย่างดังแสดงใน ตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.7 รูปตัวอย่างสำหรับทดสอบการเกิดสนิมแบบ Macrocell



(ก) หล่อคอนกรีตเก่า



(ข) หล่อวัสดุซ่อมแซม

รูปที่ 3.8 การหล่อตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

3.4.5 การบ่มตัวอย่างและเงื่อนไข

เมื่อก่อนตัวอย่างที่ทำไว้มีอายุครบ 24 ชั่วโมงให้ทำการแกะแบบแล้วนำไปบ่มทันที โดยหุ้มด้วยพลาสติก โดยก่อนทำการหุ้มพลาสติกให้ทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-Cell Potential Measurement) และค่าความต่างศักย์ระหว่างแอนโอดและแคโทด เก็บไว้เป็นครั้งแรก โดยใช้เวลาบ่ม 7 วัน จากนั้นทดสอบตัวอย่างที่อายุ 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 และ 16 สัปดาห์ตามลำดับ โดยให้ตัวอย่างอยู่ในสภาวะชื้นสลับแห้งใน 1 รอบหรือ 1 สัปดาห์ การบ่มตัวอย่างให้อยู่ในสภาวะชื้นทำโดยรดน้ำให้ชุ่ม คลุมตัวอย่างด้วยกระสอบป่านและปิดด้วยผ้าใบอีกชั้น กำหนดให้ตัวอย่างอยู่ในสภาวะชื้น 3 วัน แห้ง 4 วัน การทดสอบตัวอย่างทำหลังจากที่ตัวอย่างอยู่ในสภาวะชื้นดังแสดงใน รูปที่ 3.9



(ก) สภาวะแห้ง 4 วัน



(ข) สภาวะเปียก 3 วัน

รูปที่ 3.9 การเก็บตัวอย่างในสภาวะเปียกและแห้งสลับกันใน 1 สัปดาห์

3.4.6 ตัวอย่างในการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต มอร์ตาร์ (Compressive Strength) และตัวอย่างที่ใช้ทดสอบความต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า (Electrical Resistivity)

สำหรับตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีต กำหนดให้เป็น ลูกบาศก์ ขนาด 100x100x100 มม. 3 ตัวอย่าง โดยทดสอบหลังจากบ่มขึ้นรูป 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C39 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์วัสดุซ่อมแซม ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C109 โดยใช้ตัวอย่างขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร จำนวน 2 ตัวอย่าง โดยทดสอบหลังจากการบ่มขึ้นเป็นเวลา 28 วัน

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานการกระแสไฟฟ้า ใช้ตัวอย่าง ขนาด 70x70x280 มิลลิเมตร โดยเก็บตัวอย่างทุกสัดส่วนผสมละ 1 ตัวอย่าง โดยนำไปทดสอบหลังจากบ่มขึ้นรูป 28 วัน



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบความต้านทานทางไฟฟ้า

3.5 วิธีทำการทดสอบ

3.5.1 ทดสอบตัวอย่างด้วยการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-cell Potential Measurement) ASTM C876 [9] วัดค่าตามแนวเหล็กเสริมทุกๆ ระยะ 2 เซนติเมตร ทดสอบตัวอย่างที่สภาวะอิมมิดีด้วยน้ำหลังจากเปิดฝ้าคลุมออกเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดัง รูปที่ 3.11



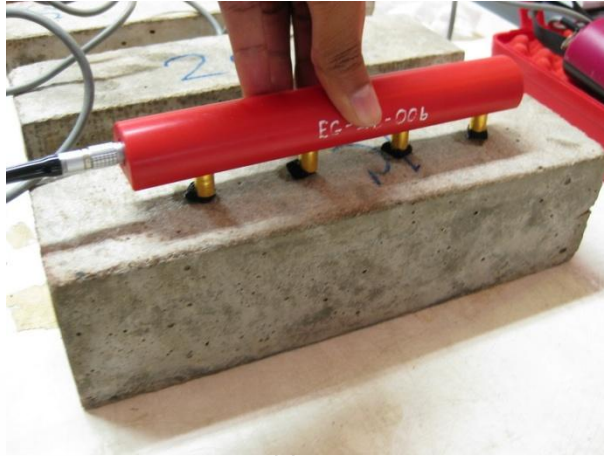
รูปที่ 3.11 การวัดโอกาสเกิดสนิมในเหล็กเสริมด้วยอุปกรณ์ Half-Cell Potential

3.5.2 ตรวจวัดค่าความต่างศักย์ระหว่างแอโนด-แคโทด ด้วยโวลต์มิเตอร์ ทดสอบตัวอย่างที่สถานะอิมมัวด้วยน้ำหลังจากเปิดฝ้าคลุมออกเป็นเวลา 1 ชั่วโมง [23] ดัง รูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การวัดความต่างศักย์ระหว่างแอโนดกับแคโทดด้วยโวลต์มิเตอร์

3.5.3 ตรวจวัดค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าของคอนกรีตและวัสดุที่ใช้ซ่อมแซม โดยใช้ตัวอย่างในการทดสอบขนาด 70x70x280 มิลลิเมตร ทดสอบตัวอย่างที่สถานะอิมมัวด้วยน้ำหลังจากเปิดฝ้าคลุมออกเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทดสอบเมื่อตัวอย่างมีอายุ 56 วัน [10,11] ดัง รูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าคอนกรีตด้วยอุปกรณ์ Four-Probe Resistivity Equipment

3.5.4 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C39 [24] โดยใช้ตัวอย่างขนาด 100x100x100 มิลลิเมตร ทดสอบเมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 7 วัน และ 28 วัน

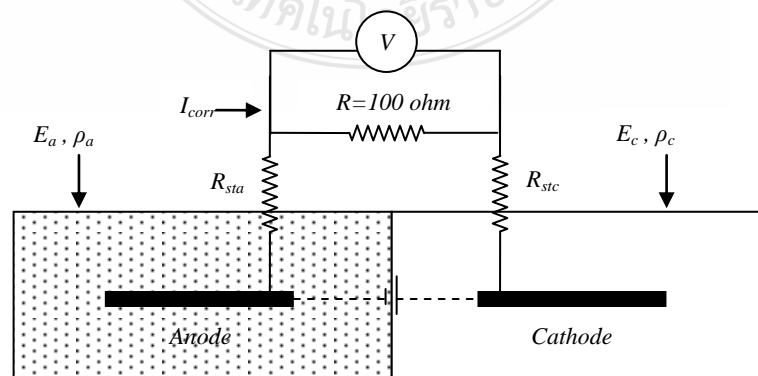
3.5.5 ทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์วัสดุที่ใช้ซ่อมแซม ตามมาตรฐาน ASTM C109 [25] โดยใช้ตัวอย่างขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร ทดสอบเมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 7 วัน และ 28 วัน

3.6 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

3.6.1 ประเมินโอกาสการเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีต

การทดสอบตัวอย่างด้วยการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-Cell Potential Measurement) ตามมาตรฐาน ASTM C876 [9] เพื่อประเมินโอกาสการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีตจากค่าที่ได้จากการทดสอบตาม ตารางที่ 2.2

3.6.2 การคำนวณอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริม



รูปที่ 3.14 การวัดอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

การคำนวณอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริม ได้จากการวัดค่าการไหลของกระแสไฟฟ้าระหว่างแอโนดและแคโทด ต่อพื้นที่ผิวของเหล็กเสริม รูปที่ 3.14 โดยค่าที่คำนวณได้เป็นอัตราการเกิดสนิมแบบ Macrocell ดังแสดงใน สมการที่ 3.1

$$I_{corr} = \frac{V}{(R + R_{sta} + R_{stc}) \cdot a} \quad \left(\frac{A}{cm^2} \right) \quad (3.1)$$

เมื่อ	I_{corr}	คือ	อัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริม (แอมแปร์/ตารางเซนติเมตร)
	V	คือ	ค่าความต่างศักย์รอมตัวต้านทานขนาด 100 โอห์ม ระหว่างแอโนดและแคโทด วัดได้จากอุปกรณ์โวลต์มิเตอร์ (โวลต์)
	R	คือ	ค่าความต้านทานที่เชื่อมต่อเหล็กเสริมระหว่างแอโนดและแคโทด (โอห์ม)
	R_{sta}	คือ	ค่าความต้านทานของสายไฟด้านแอโนด (โอห์ม)
	R_{stc}	คือ	ค่าความต้านทานของสายไฟด้านแคโทด (โอห์ม)
	a	คือ	พื้นที่ผิวของเหล็กเสริมด้านแอโนด (ตารางเซนติเมตร)

3.6.2 การคำนวณอัตราการเกิดการสนิมของเหล็กเสริมที่ได้จากการคำนวณของตัวอย่างที่ซ่อมแซมบางส่วน

จากผลการทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ และความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต ดังรูปที่ 3.14 เพื่อเปรียบเทียบกับค่ากระแสการเกิดสนิมที่วัดได้จากโวลต์มิเตอร์และคำนวณอายุการใช้งานตาม สมการที่ 3.2

การคำนวณอ้างอิงจาก สมการที่ 3.1 ดังสมการต่อไปนี้

$$I_{cal} = \frac{(E_A - E_C)}{(\rho_a + \rho_c) \cdot \frac{L}{A} \cdot a} \quad \left(\frac{A}{cm^2} \right) \quad (3.2)$$

เมื่อ	I_{cal}	คือ	อัตราการเกิดการสนิมของเหล็กเสริมที่ได้จากการคำนวณ (แอมแปร์/ตารางเซนติเมตร)
	E_A	คือ	ค่าเฉลี่ยศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ด้านแอโนด (โวลต์)

E_C	คือ	ค่าเฉลี่ยศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ด้านแคโทด (โวลต์)
$\rho_{a,c}$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต (ด้านแอโนด) และ วัสดุซ่อมแซม (ด้านแคโทด) (โอห์ม – เซนติเมตร)
a	คือ	พื้นที่ผิวของเหล็กเสริมด้านแอโนด (ตารางเซนติเมตร)
L	คือ	ความยาวของส่วนที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านระหว่างเหล็กเสริมและรอยต่อระหว่างด้านแอโนดและแคโทด (เซนติเมตร)
A	คือ	พื้นที่หน้าตัดของส่วนที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านระหว่างเหล็กเสริมและรอยต่อระหว่างด้านแอโนดและแคโทด (ตารางเซนติเมตร)

3.6.3 การประเมินอายุการใช้งานของตัวอย่างที่ซ่อมแซมบางส่วน

การประเมินอายุการใช้งานของตัวอย่างที่ซ่อมแซมบางส่วนทดสอบจากอัตราการเกิดสนิมเหล็กเสริมที่คำนวณได้จากตัวอย่าง โดยพิจารณาอายุการใช้งานของตัวอย่างเฉพาะระยะเวลาที่จะเกิดรอยร้าวจากการเกิดสนิมภายหลังจากการซ่อมแซม ดังนั้นจะไม่คำนึงถึง ระยะเวลาการเกิดสนิมจะเริ่มต้น

ระยะเวลาที่ทำให้เกิดรอยร้าวจากการเกิดสนิม โดยเป็นเวลาภายหลังจากเริ่มมีสนิมเกิดขึ้นและเกิดการสูญเสียน้ำหนัก 10 มก./ตร.ซม. [26] ซึ่งทำให้เกิดรอยร้าวน้ำหนักที่สูญเสียจากการเกิดสนิมสามารถคำนวณได้ดัง สมการที่ 3.3

$$W = \frac{I \cdot t \cdot MW}{F \cdot n} \quad (g) \quad (3.3)$$

เมื่อ	W	คือ	น้ำหนักที่สูญเสียไป (กรัม), มีค่ามากกว่า 10 มิลลิกรัม ต่อ ตารางเซนติเมตร จะเกิดรอยร้าว
	I	คือ	กระแสการเกิดสนิม (แอมแปร์), วัดจากตัวอย่าง
	t	คือ	เวลา (วินาที)
	MW	คือ	หน่วยน้ำหนักโมเลกุลของเหล็ก เท่ากับ 58.5
	F	คือ	ค่าคงที่ของฟาราเดย์ เท่ากับ 96,500
	n	คือ	จำนวนของวาเลนซ์อิเล็กตรอนของเหล็ก เท่ากับ 2

3.7 แผนการดำเนินงาน

ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย 12 เดือน ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แผนการดำเนินงาน

รายละเอียดแผนงาน	ระยะเวลา					
	เดือนที่ 1-2	เดือนที่ 3-4	เดือนที่ 5-6	เดือนที่ 7-8	เดือนที่ 9-10	เดือนที่ 11-12
1.หล่อตัวอย่างสำหรับทดสอบ	██████████					
2.ทดสอบตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ	████████████████████					
3.เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการ ทดสอบ	██					
4.เขียนรายงานการวิจัยและบทความทาง วิชาการ					██████████	



บทที่ 4

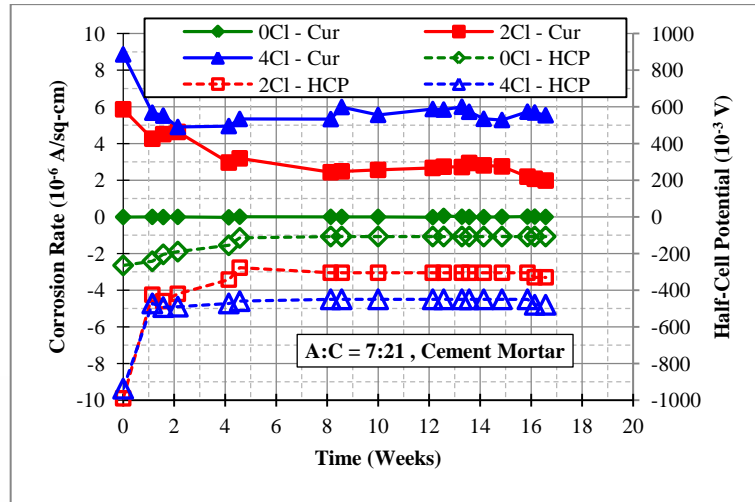
วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ โดยทำการวัดอัตราการเกิดสนิมโดยอ้อมวิธีการวัดค่าตามมาตรฐาน ASTM G109 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์โดยใช้ Half-Cell Potential Measurement ตามมาตรฐาน ASTM C876 ความต้านทานกระแสไฟฟ้าโดยใช้ Four-Probe Wenner-Type Resistivity Measurement กำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C39 สำหรับคอนกรีตและ ASTM C109 สำหรับมอร์ตาร์ โดยทำการแปรผันความแตกต่างของปริมาณคลอไรด์ไอออนที่ปนเปื้อนในตัวอย่างแอนโอดและแคโทด อัตราส่วนพื้นที่ผิวของเหล็กเสริมแอนโอดต่อแคโทด ชนิดของวัสดุที่ใช้ในการซ่อมแซม (แคโทด) สามารถนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์ตามจุดประสงค์ของการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

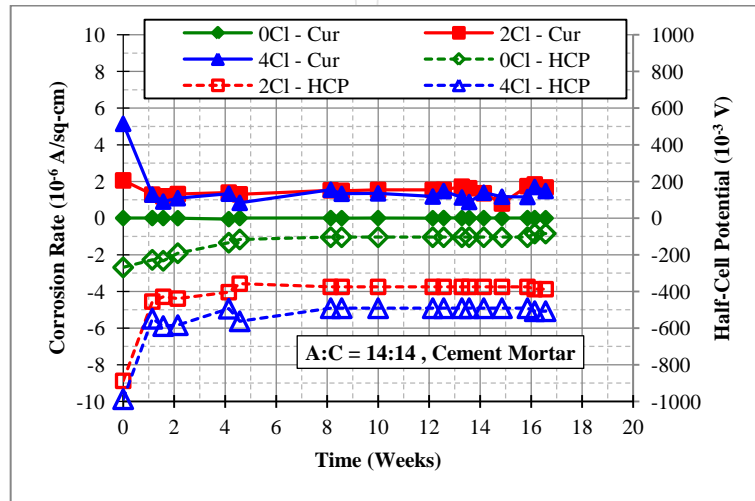
4.1 ค่ากระแสการเกิดสนิมและศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

4.1.1 ผลกระทบจากปริมาณคลอไรด์ไอออนที่แตกต่างกันระหว่างแอนโอดและแคโทด

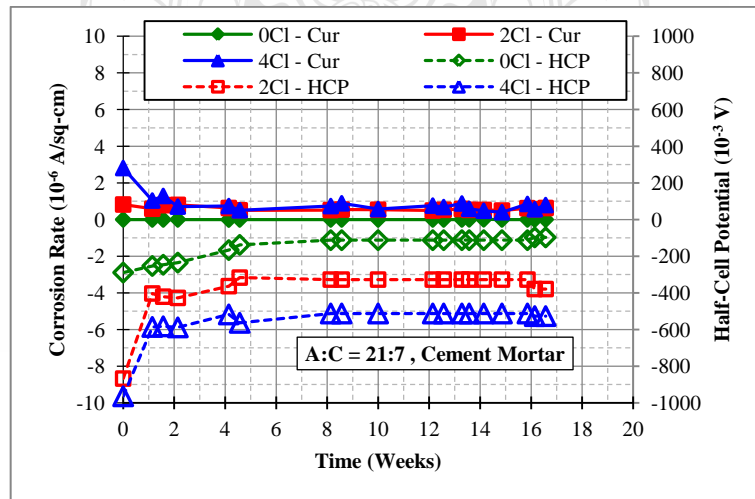
จาก รูปที่ 4.1 (ก-ค) แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตในตัวอย่างที่ใช้ซีเมนต์มอร์ตาร์ในการซ่อมแซม ซึ่งเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ไอออนที่แตกต่างกันระหว่างแอนโอดและแคโทด พบว่าปริมาณคลอไรด์ไอออนมีแตกต่างกันเพิ่มขึ้นนั้นเป็นผลทำให้มีแนวโน้มที่ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ลดลง โดยสังเกตได้อย่างชัดเจนที่ปริมาณคลอไรด์ไอออนร้อยละ 0 นั้นค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่วัดได้มีค่าประมาณ -100 mV ซึ่งสูงกว่า -200 mV ตามมาตรฐาน ASTM C876 นั้นประเมินได้ว่าตัวอย่างนี้มีโอกาสที่จะเกิดสนิมไม่เกินร้อยละ 10 เมื่อปริมาณคลอไรด์ไอออนที่แตกต่างกันมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 2 พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มีค่าลดลงจาก -100 mV เป็น -300 ถึง -350 mV ซึ่งสามารถประเมินได้ว่าเหล็กเสริมมีโอกาสที่จะเกิดสนิมหรือไม่เกิดก็ได้ ซึ่งยังไม่ชัดเจน และเมื่อปริมาณคลอไรด์ไอออนที่แตกต่างกันเพิ่มเป็นร้อยละ 4 สามารถประเมินได้ว่าเหล็กเสริมในตัวอย่างด้านแอนโอด มีโอกาสเกิดสนิมถึงร้อยละ 90 เนื่องจากค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ส่วนใหญ่มีค่าประมาณ -500 mV ตามมาตรฐาน ASTM C876 เมื่อสังเกตค่ากระแสการเกิดสนิมที่อัตราส่วนแอนโอดต่อแคโทด 7:21 พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ แต่เมื่อพื้นที่ส่วนแอนโอดมีค่าเพิ่มมากขึ้นพบว่าค่ากระแสการเกิดสนิมมีแนวโน้มที่มีค่าลดลง



(ก) อัตราส่วนแอนไอต์ต่อแคลโทดเท่ากับ 7:21

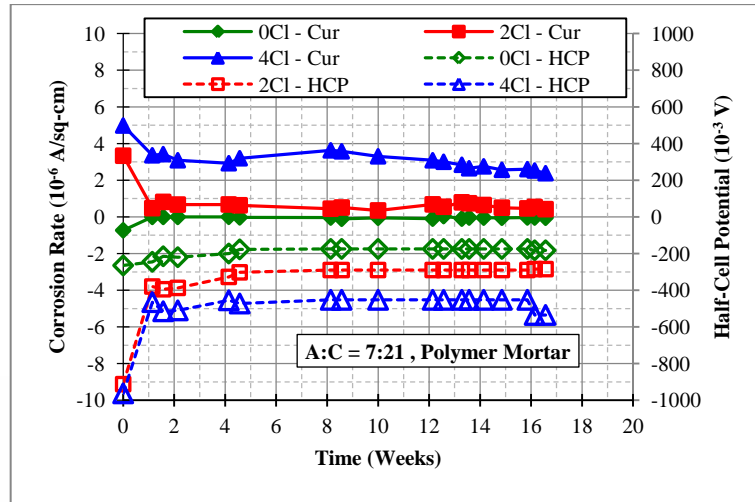


(ข) อัตราส่วนแอนไอต์ต่อแคลโทดเท่ากับ 14:14

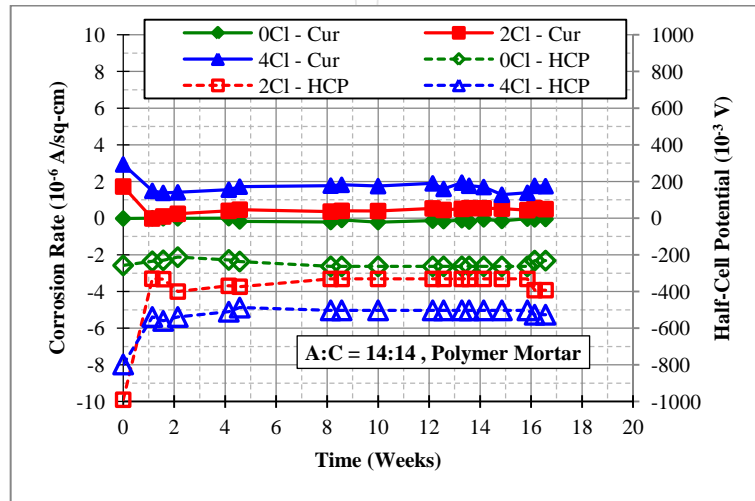


(ค) อัตราส่วนแอนไอต์ต่อแคลโทดเท่ากับ 21:7

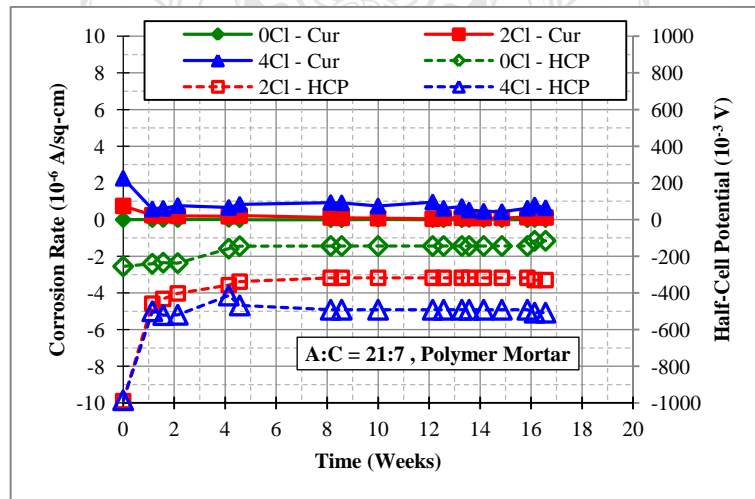
รูปที่ 4.1 กระแสการเกิดสนิมและศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ จากปริมาณคลอไรด์ไอออนที่แตกต่างกันของ ตัวอย่างที่ซ่อมแซมด้วยซีเมนต์มอร์ตาร์



(ก) อัตราส่วนแอมโนเนียมต่อแคลเซียมเท่ากับ 7:21



(ข) อัตราส่วนแอมโนเนียมต่อแคลเซียมเท่ากับ 14:14

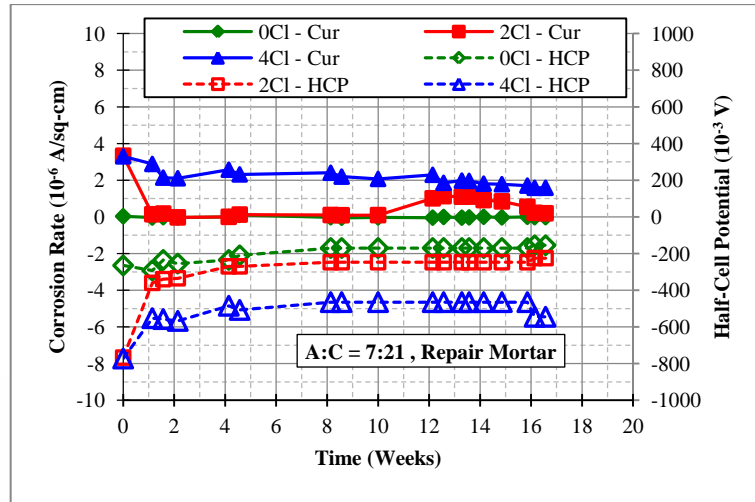


(ค) อัตราส่วนแอมโนเนียมต่อแคลเซียมเท่ากับ 21:7

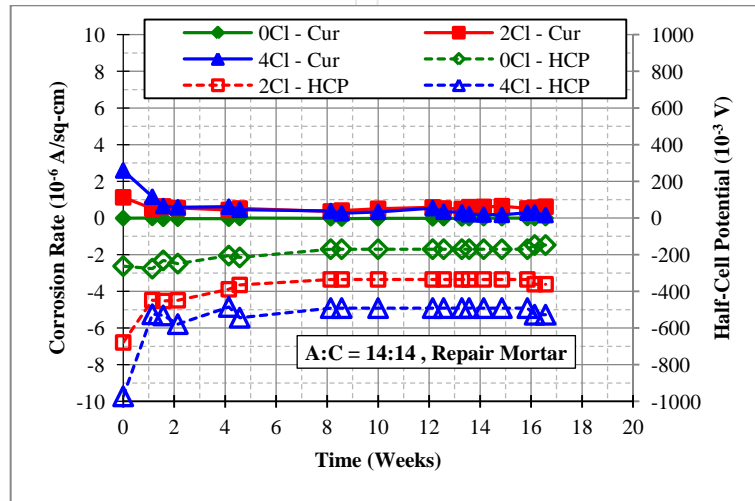
รูปที่ 4.2 กระแสการเกิดสนิมและศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ จากปริมาณคลอไรด์ไอออนที่แตกต่างกันของ ตัวอย่างที่ซ่อมแซมด้วยโพลิเมอร์โมดิฟายด์มอร์ตาร์

สำหรับตัวอย่างที่ใช้วัสดุซ่อมแซมจากซีเมนต์มอร์ตาร์เป็นโพลิเมอร์โมดิฟายด์มอร์ตาร์ จากรูปที่ 4.2 (ก-ค) ผลจากการทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์พบว่าที่ปริมาณคลอไรด์ไอออนที่แตกต่างกันระหว่างแอโนดและแคโทดเท่ากับร้อยละ 0 ที่อัตราส่วนแอโนดต่อแคโทดที่แตกต่างกันนั้นมีค่าใกล้เคียงกันคือมากกว่า -200 mV ประเมินได้ว่าเหล็กเสริมมีโอกาสร้อยละ 90 ที่จะไม่เกิดสนิม เมื่อปริมาณคลอไรด์ไอออนที่แตกต่างกันระหว่างแอโนดและแคโทดเท่ากับร้อยละ 2 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่วัดได้จากตัวอย่างมีค่าระหว่าง -300 ถึง -350 mV ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ใช้ซีเมนต์มอร์ตาร์ในการซ่อมแซม โดยประเมินได้ว่าเหล็กเสริมอาจเกิดสนิมหรือไม่เกิดก็ได้ และในตัวอย่างที่ปริมาณคลอไรด์ไอออนที่แตกต่างกันระหว่างแอโนดและแคโทดเท่ากับร้อยละ 4 ทดสอบได้ค่าประมาณ -500 mV ประเมินได้ว่าเหล็กเสริมมีโอกาสร้อยละ 90 ที่จะเกิดสนิม ส่วนการวัดค่ากระแสการเกิดสนิมและนำมาคำนวณอัตราการเกิดสนิมพบว่า ตัวอย่างที่ปริมาณคลอไรด์ไอออนแตกต่างกันระหว่างแอโนดและแคโทดมากกว่า ทำให้อัตราการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีตมีค่ามากกว่า และยังพบว่าที่อัตราส่วนแอโนดต่อแคโทดที่มีค่าต่ำ (แอโนดน้อยกว่าแคโทด) ค่าอัตราการเกิดสนิมจะสังเกตถึงความแตกต่างได้อย่างชัดเจนเมื่อปริมาณคลอไรด์ไอออนที่แตกต่างกันเพิ่มขึ้น

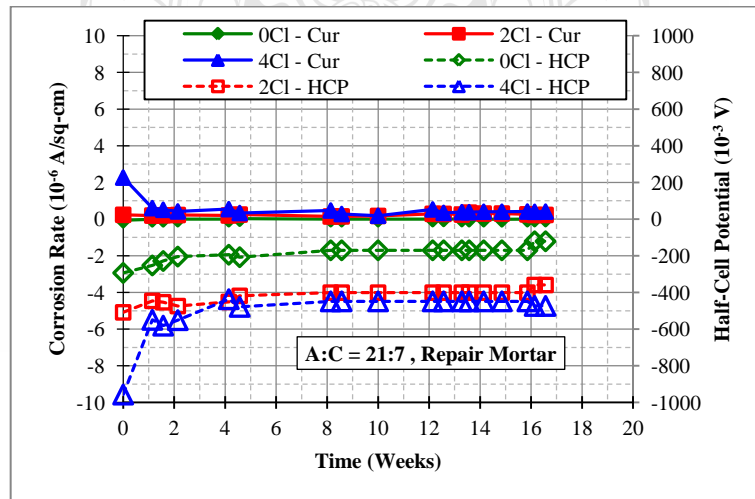
ตัวอย่างที่ใช้มอร์ตาร์สำหรับงานซ่อมแซมแบบ Patching นั้น รูปที่ 4.3 (ก-ค) ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่วัดได้ยังคงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับตัวอย่างที่ใช้ซีเมนต์มอร์ตาร์และโพลิเมอร์โมดิฟายด์มอร์ตาร์ในการซ่อมแซม คือ ตัวอย่างที่ปริมาณคลอไรด์ไอออนแตกต่างกันระหว่างแอโนดและแคโทดเท่ากับร้อยละ 0 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่ทดสอบบนตัวอย่างด้านแอโนดมีค่ามากกว่า -200 mV ซึ่งประเมินได้ว่าเหล็กเสริมมีโอกาสร้อยละ 90 ที่จะไม่เกิดสนิม เมื่อปริมาณคลอไรด์ไอออนที่แตกต่างกันเพิ่มขึ้น ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่วัดได้จากตัวอย่างด้านแอโนดมีค่าลดลงใกล้เคียงกับ -350 mV ซึ่งประเมินได้ว่าเหล็กเสริมอาจจะเกิดสนิมหรือไม่เกิดสนิมก็ได้ และเมื่อปริมาณคลอไรด์ไอออนเพิ่มเป็นร้อยละ 4 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่วัดได้มีค่าประมาณ -500 mV ประเมินได้ว่าเหล็กเสริมมีโอกาสร้อยละ 90 ที่จะเกิดสนิม ส่วนอัตราการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีตอ้างอิงวิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM G109 พบว่ามีแนวโน้มในทิศทางเดียวกับกับวัสดุที่ใช้ในการซ่อมแซมอีก 2 ชนิด ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบที่วัสดุซ่อมแซมที่ต่างชนิดกันพบว่า เมื่อปริมาณคลอไรด์ไอออนเพิ่มขึ้นวัสดุประเภท โพลิเมอร์โมดิฟายด์มอร์ตาร์และมอร์ตาร์สำหรับงานซ่อมแซมแบบ Patching จะมีผลให้ค่าอัตราการเกิดสนิมในเหล็กเสริมลดลง ซึ่งผลเกิดจากความต้านทานทางไฟฟ้าของคอนกรีต และผลของอัตราส่วนพื้นที่ผิวแอโนดต่อแคโทดก็เป็นผลทำให้ค่าอัตราการเกิดสนิมเปลี่ยนแปลงไปด้วย กล่าวคือเมื่อพื้นที่แอโนดมากขึ้น (ส่วนที่ไม่ได้ซ่อมแซม) จะทำให้ค่าอัตราการเกิดสนิมลดลง



(ก) อัตราส่วนแอนโนดต่อแคโทดเท่ากับ 7:21

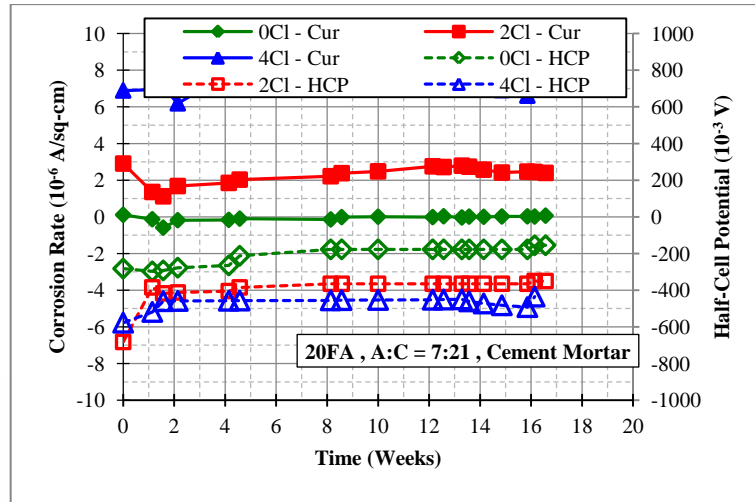


(ข) อัตราส่วนแอนโนดต่อแคโทดเท่ากับ 14:14

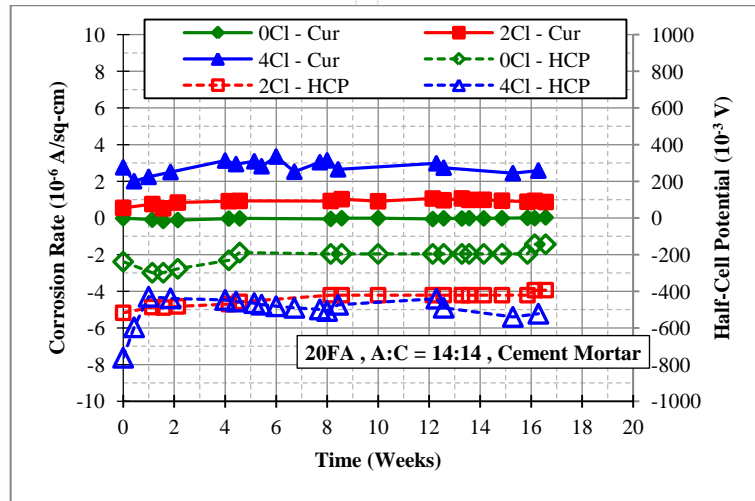


(ค) อัตราส่วนแอนโนดต่อแคโทดเท่ากับ 21:7

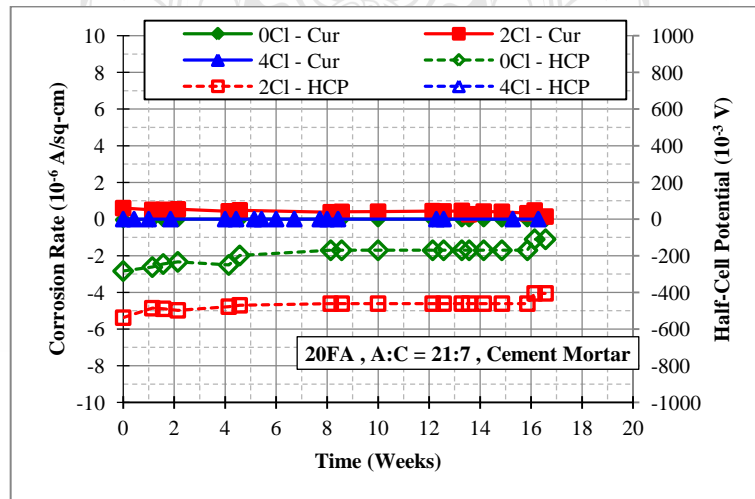
รูปที่ 4.3 กระแสการเกิดสนิมและศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ จากปริมาณคลอไรด์ไอออนที่แตกต่างกันของ ตัวอย่างที่ซ่อมแซมด้วยมอร์ตาร์สำหรับซ่อมแซม



(ก) อัตราส่วนแอนโนดต่อแคโทดเท่ากับ 7:21

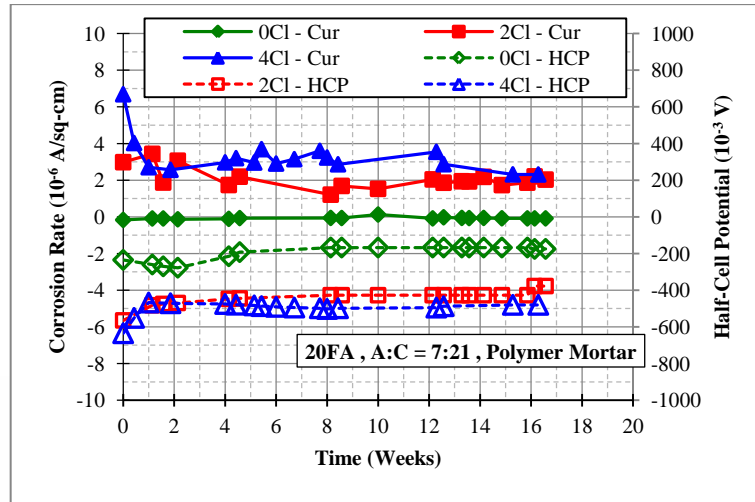


(ข) อัตราส่วนแอนโนดต่อแคโทดเท่ากับ 14:14

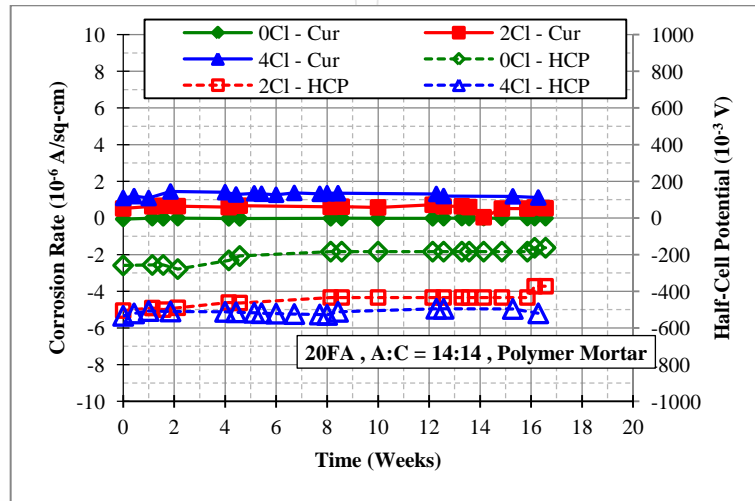


(ค) อัตราส่วนแอนโนดต่อแคโทดเท่ากับ 21:7

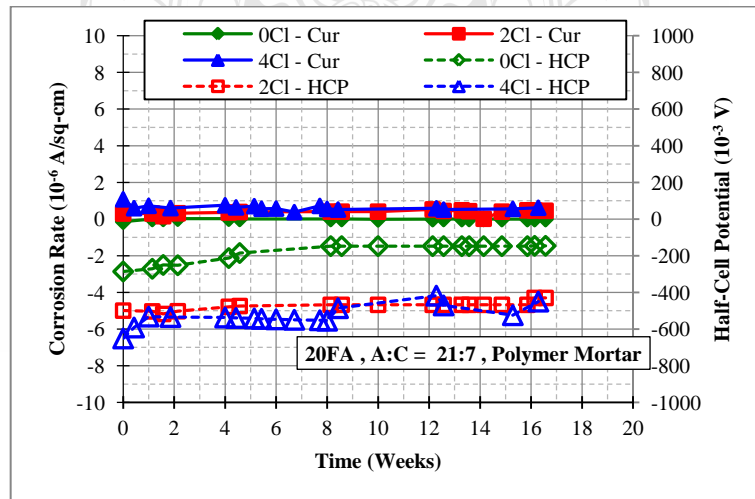
รูปที่ 4.4 กระแสการเกิดสนิมและศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ จากปริมาณคลอไรด์ไอออนที่แตกต่างกันของ ตัวอย่างที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 และซ่อมด้วยซีเมนต์มอร์ตาร์



(ก) อัตราส่วนแอนโอดต่อแคโทดเท่ากับ 7:21

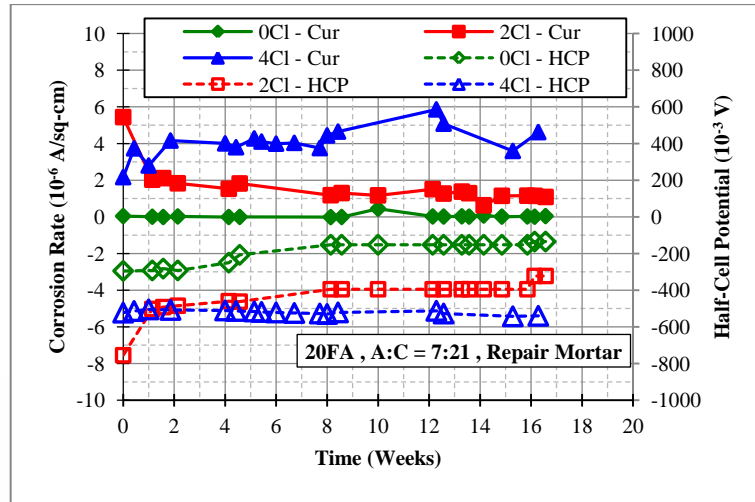


(ข) อัตราส่วนแอนโอดต่อแคโทดเท่ากับ 14:14

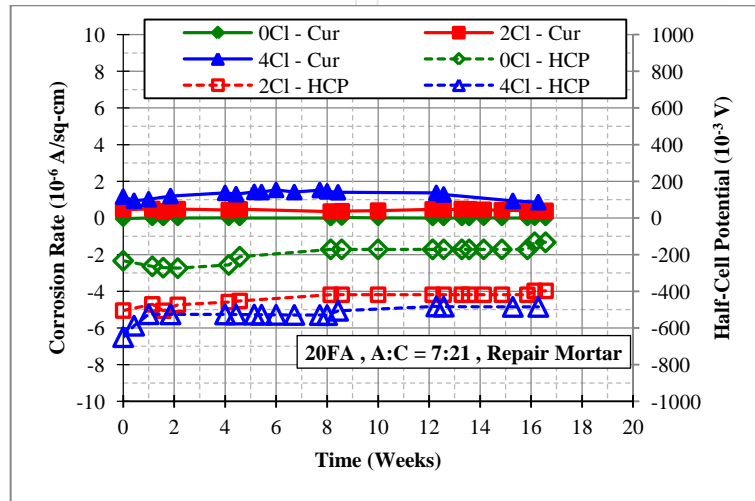


(ค) อัตราส่วนแอนโอดต่อแคโทดเท่ากับ 21:7

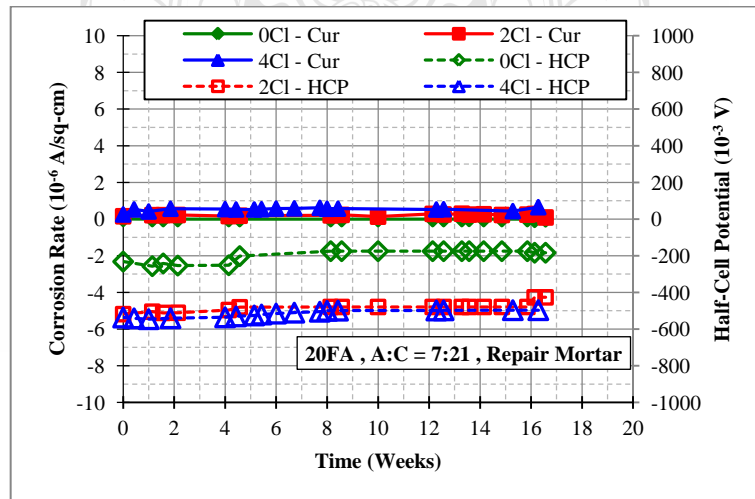
รูปที่ 4.5 กระแสการเกิดสนิมและศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ จากปริมาณคลอไรด์ไอออนที่แตกต่างกันของ ตัวอย่างที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 และซ่อมด้วยโพลิเมอร์โมดิฟายด์มอร์ตาร์



(ก) อัตราส่วนแอนโนดต่อแคโทดเท่ากับ 7:21



(ข) อัตราส่วนแอนโนดต่อแคโทดเท่ากับ 14:14



(ค) อัตราส่วนแอนโนดต่อแคโทดเท่ากับ 21:7

รูปที่ 4.6 กระแสการเกิดสนิมและศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ จากปริมาณคลอไรด์ไอออนที่แตกต่างกันของ ตัวอย่างที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 และ ซ่อมด้วยมอร์ตาร์สำหรับซ่อมแซม

จาก รูปที่ 4.4 (ก-ค) แสดงผลจากการทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และอัตราการเกิดสนิม ด้านแอโนด ของตัวอย่างคอนกรีตที่ถูกแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 และใช้วัสดุซ่อมแซมซีเมนต์ มอร์ตาร์ พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของตัวอย่างที่ปนเปื้อนคลอไรด์ไอออนร้อยละ 0 ค่าศักย์ไฟฟ้า ครึ่งเซลล์ที่วัดได้มีค่าเฉลี่ย -200 mV ประเมินได้ว่าโอกาสร้อยละ 90 ที่เหล็กเสริมไม่เกิดสนิม อัตรา การเกิดสนิมมีค่าต่ำมาก เมื่อปริมาณคลอไรด์ไอออนเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 2 พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มี ค่าลดต่ำลงซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง -350 ถึง -450 mV ซึ่งประเมินได้ว่าเหล็กเสริมคอนกรีตมีโอกาสเกิด สนิมร้อยละ 90 อัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตมีค่าอยู่ระหว่าง $0.5 - 2.0 \times 10^{-6}$ A/cm² และ เมื่อเพิ่มปริมาณคลอไรด์ไอออนที่ปนเปื้อนในตัวอย่างด้านแอโนดเป็นร้อยละ 4 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ ก็ลดต่ำกว่า -450 mV อัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตมีค่าระหว่าง $0.5 - 7.0 \times 10^{-6}$ A/cm² ซึ่ง ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนพื้นที่ผิวแอโนดต่อแคโทดเมื่อปริมาณคลอไรด์ไอออนเท่ากัน

จาก รูปที่ 4.5 (ก-ค) แสดงผลจากการทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และอัตราการเกิดสนิม ด้านแอโนด ของตัวอย่างคอนกรีตที่ถูกแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 และใช้วัสดุซ่อมแซมโพลีเมอร์ โมดิฟายด์มอร์ตาร์ แนวโน้มของผลจากความแตกต่างของปริมาณคลอไรด์ไอออนที่แตกต่างกัน ระหว่างแอโนดและแคโทด ยังคงเดิมคือเมื่อปริมาณคลอไรด์ไอออนที่ปนเปื้อนเท่ากับร้อยละ 0 นั้น ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ด้านแอโนดวัดได้ต่ำกว่า -200 mV และอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมมี ค่าต่ำมาก ประเมินได้ว่าเหล็กเสริมมีโอกาสร้อยละ 90 ที่จะไม่เกิดสนิม ในตัวอย่างที่ปริมาณคลอไรด์ ไอออนเท่ากับร้อยละ 2 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของตัวอย่างมีค่าน้อยกว่า -400 mV ประเมินได้ว่า เหล็กเสริมมีโอกาสเกิดสนิมร้อยละ 90 ค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีต อยู่ระหว่าง $0.0 - 2.0 \times 10^{-6}$ A/cm² และตัวอย่างที่ปริมาณคลอไรด์ไอออนปนเปื้อนร้อยละ 4 พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่ง เซลล์ลดลงต่ำกว่า -500 mV ค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตอยู่ระหว่าง $0.0 - 3.0 \times 10^{-6}$ A/cm² ซึ่งอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมขึ้นอยู่กับอัตราส่วนพื้นที่ผิวเหล็กเสริมแอโนดต่อแคโทด ด้วย

ตัวอย่างที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 และใช้วัสดุซ่อมแซมประเภทซีเมนต์สำหรับงาน ซ่อมแซมบางส่วน รูปที่ 4.6 (ก-ค) นั้นผลที่ได้ยังคงเดิม คือเมื่อปริมาณคลอไรด์ไอออนมีค่าต่ำ คือ เท่ากับ 0 นั้นเหล็กเสริมมีโอกาสเกิดสนิม ไม่เกินร้อยละ 10 จากการวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่มีค่า สูงกว่า -200 mV และค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมมีค่าต่ำมาก เมื่อคลอไรด์ไอออนเพิ่มขึ้น ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ก็มีแนวโน้มให้ค่าลดลงเรื่อยๆ ที่ร้อยละ 2 มีค่าต่ำกว่า -400 mV ที่ร้อยละ 4 มีค่าต่ำกว่า -500 mV ซึ่งประเมินได้ว่าเหล็กเสริมมีโอกาสถึงร้อยละ 90 ที่จะเกิดสนิม และอัตราการ

เกิดสนิมของเหล็กเสริมมีค่าอยู่ระหว่าง $0.0 - 3.0 \times 10^{-6}$ A/cm² ขึ้นอยู่กับปริมาณคลอไรด์ไอออนและอัตราส่วนพื้นที่ผิวแอโนดต่อแคโทด

จากผลการทดสอบพบว่า ผลกระทบจากปริมาณคลอไรด์ไอออนที่แตกต่างกันระหว่างแอโนดและแคโทด เมื่อปริมาณคลอไรด์ไอออนที่แตกต่างกันมีค่าสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนแอโนดต่อแคโทดเท่ากันและวัสดุซ่อมแซมชนิดเดียวกัน เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ค่ากระแสการเกิดสนิมมีค่าสูงขึ้น และค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อปริมาณคลอไรด์ไอออนในส่วนแอโนดมีค่าสูงขึ้น ทำให้เหล็กเสริมแตกตัวกลายเป็นเหล็กไอออนมากขึ้น ศักย์ไฟฟ้าด้านแอโนดจึงมีค่าลดลง เมื่อศักย์ไฟฟ้าด้านแอโนดลดลงโดยที่ศักย์ไฟฟ้าด้านแคโทดยังมีค่าคงเดิม จึงเกิดความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่างแอโนดและแคโทดที่มากขึ้น เป็นผลทำให้กระแสการเกิดสนิมสูงขึ้น และอัตราการเกิดสนิมสูงขึ้นด้วย และเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้อายุการใช้งานของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบภายหลังจากการซ่อมแซมนั้นลดลงด้วย

4.1.2 ผลกระทบของอัตราส่วนพื้นที่ผิวเหล็กเสริมแอโนดต่อแคโทด

ในกรณีที่มีปริมาณคลอไรด์ไอออนปนเปื้อนในตัวอย่างคอนกรีตร้อยละ 0 ทั้งตัวอย่างที่ใช้วัสดุประสานคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนและแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 รูปที่ 4.7 และ รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบพบว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มีค่าสูงกว่า -200 mV ซึ่งประเมินได้ว่าตัวอย่างมีโอกาสที่จะไม่เกิดสนิมเหล็กเสริมถึงร้อยละ 90 ค่าอัตราการเกิดสนิมมีค่าต่ำมาก เนื่องจากปริมาณคลอไรด์ไอออนที่มีค่าน้อยทำให้ศักย์ไฟฟ้าด้านแอโนดมีค่าต่ำ ทำให้อัตราส่วนพื้นที่ผิวเหล็กเสริมแอโนดต่อแคโทดนั้นไม่มีผลต่อตัวอย่างที่มีปริมาณคลอไรด์ไอออนปนเปื้อนร้อยละ 0

จากผลกระทบจากปริมาณคลอไรด์ไอออนที่แตกต่างกันระหว่างแอโนดและแคโทด ทำให้ทราบว่าเมื่อตัวอย่างที่ผลต่างของคลอไรด์ไอออนที่แตกต่างกัน เท่ากับ 0 เนื่องจากปริมาณคลอไรด์ไอออนที่แอโนดที่ต่ำ ทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าแอโนดและแคโทดไม่ต่างกันมาก และค่ามากกว่า -200 mV การแปรผันอัตราส่วนพื้นที่ผิวเหล็กเสริมแอโนดต่อแคโทดนั้น จึงเห็นผลได้ไม่ชัดเจน ทั้งค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และค่ากระแสการเกิดสนิม

รูปที่ 4.9 (ก-ค) ตัวอย่างคอนกรีตที่ปนเปื้อนปริมาณคลอไรด์ไอออนร้อยละ 2 ผลการทดสอบคือ ปริมาณคลอไรด์ไอออนที่เพิ่มขึ้นนั้นส่งผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ลดลงและค่าอัตราการเกิดสนิมที่สูงขึ้น โดยค่าที่วัดอยู่ระหว่าง -250 ถึง -450 mV ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนพื้นที่ผิวเหล็กเสริมแอโนดต่อแคโทดและชนิดของวัสดุซ่อมแซมด้วย โดยที่ค่าอัตราการเกิดสนิมเหล็กเสริมนั้นจะเห็นได้อย่างชัดเจน ดัง รูปที่ 4.9(ก) ตัวอย่างที่ซ่อมแซมด้วยซีเมนต์มอร์ตาร์ ที่อัตราส่วนแอโนดต่อแคโทด เท่ากับ

7:21 นั้น ค่าอัตราการเกิดสุมิเหล็กเสริมมีค่าสูงที่สุดประมาณ 3.0×10^{-6} A/cm² ที่อัตราส่วน 14:14 เท่ากับ 1.5×10^{-6} A/cm² และที่อัตราส่วน 21:7 เท่ากับ 0.5×10^{-6} A/cm² ซึ่งผลที่ได้นี้เกิดจากการคำนวณหาอัตราการเกิดสุมิ โดยการใชพื้นที่ผิวเหล็กเสริมด้านแอนโอดในการคำนวณหาอัตราการเกิดสุมิเหล็กเสริม (โดยสมมุติให้พื้นที่ผิวเหล็กเสริมด้านแอนโอดเกิดสุมิทั้งหมด)

รูปที่ 4.10 (ก-ค) แสดงตัวอย่างที่ปนเปื้อนปริมาณคลอไรด์ไอออนร้อยละ 2 และแทนที่ด้วยเกลือร้อยละ 20 ผลการทดสอบเป็นไปในทิศทางเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบกับ รูปที่ 4.9 (ก-ค) ผลจากการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ด้านแอนโอด ค่าที่ได้อยู่ระหว่าง -350 ถึง -500 mV สามารถประเมินได้ว่าเหล็กเสริมมีโอกาสเกิดสุมิร้อยละ 90 และค่าอัตราการเกิดสุมิเหล็กเสริม อยู่ระหว่าง $0.5 - 2.0 \times 10^{-6}$ A/cm² ค่าที่แตกต่างกันเป็นผลจากอัตราส่วนพื้นที่ผิวเหล็กเสริมด้านแอนโอดต่อแคโทดเปลี่ยนแปลงไป จะส่งผลต่ออัตราการเกิดสุมิเหล็กเสริมคอนกรีต กล่าวคือเมื่อพื้นที่ผิวเหล็กเสริมด้านแอนโอดมีค่าเพิ่มขึ้นค่าอัตราการเกิดสุมิเหล็กเสริมจะมีค่าลดลง และเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเกลือร้อยละ 20 พบว่าตัวอย่างที่แทนที่ด้วยเกลือร้อยละ 20 นั้นผลจากค่าอัตราการเกิดสุมิเหล็กเสริมต่ำกว่า ผลเกิดจากคุณสมบัติด้านความทึบน้ำของคอนกรีต กรณีที่ซ่อมด้วยซีเมนต์มอร์ตาร์นั้นค่าอัตราส่วนแอนโอดต่อแคโทดส่งผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และอัตราการเกิดสุมิอย่างชัดเจน แต่เมื่อซ่อมด้วยวัสดุโพลีเมอร์โมดิฟายด์มอร์ตาร์หรือมอร์ตาร์สำหรับงานซ่อมแซมบางส่วน อาจส่งผลไม่ชัดเจนเนื่องจากมีค่าต่ำกว่าการซ่อมด้วยซีเมนต์มอร์ตาร์

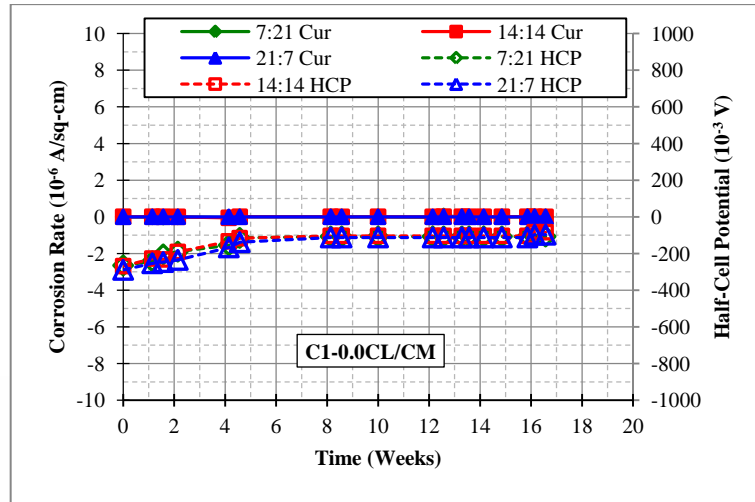
เมื่อเปรียบเทียบกับชุดตัวอย่างที่ปริมาณคลอไรด์ไอออนเท่ากับร้อยละ 0 พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ด้านแอนโอดมีค่าลดต่ำลง และกระแสการเกิดสุมิมีค่าสูงขึ้น ซึ่งก็เป็นไปตามการวิเคราะห์ผลกระทบจากปริมาณคลอไรด์ไอออนที่แตกต่างกัน และเห็นผลกระทบจากอัตราส่วนพื้นที่แอนโอดต่อแคโทดอย่างชัดเจนต่อค่ากระแสการเกิดสุมิ คือ เมื่อพื้นที่ที่ไม่ได้รับการซ่อมแซมเพิ่มขึ้น ค่ากระแสการเกิดสุมิมจะมีเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดการแตกร้าวเร็วขึ้น ส่วนผลจากเกลือที่แทนที่ร้อยละ 20 นั้น ยังไม่ชัดเจน

จาก รูปที่ 4.11 (ก-ค) ตัวอย่างที่ปริมาณคลอไรด์ไอออนปนเปื้อนร้อยละ 4 ผลกระทบจากอัตราส่วนพื้นที่ผิวแอนโอดต่อแคโทดเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับตัวอย่างที่ปริมาณคลอไรด์ไอออนปนเปื้อนร้อยละ 2 คือที่อัตราส่วนพื้นที่ผิวเหล็กเสริมเท่ากับ 7:21 ค่าอัตราการเกิดสุมิเหล็กจะมีค่ามากกว่า อัตราส่วน 21:7 เนื่องจากพื้นที่ผิวเหล็กเสริมที่รองรับการเกิดปฏิกิริยาแอนโอด มีสัดส่วนที่ต่ำเมื่อคำนวณหาอัตราการเกิดสุมิต่อพื้นที่แล้วทำให้ค่าที่ได้นั้นมีค่ามาก จากค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่วัดได้ประมาณ -500 mV ประเมินได้ว่าเหล็กเสริมมีโอกาสเกิดสุมิ ร้อยละ 90 และค่าอัตราการเกิดสุมิ

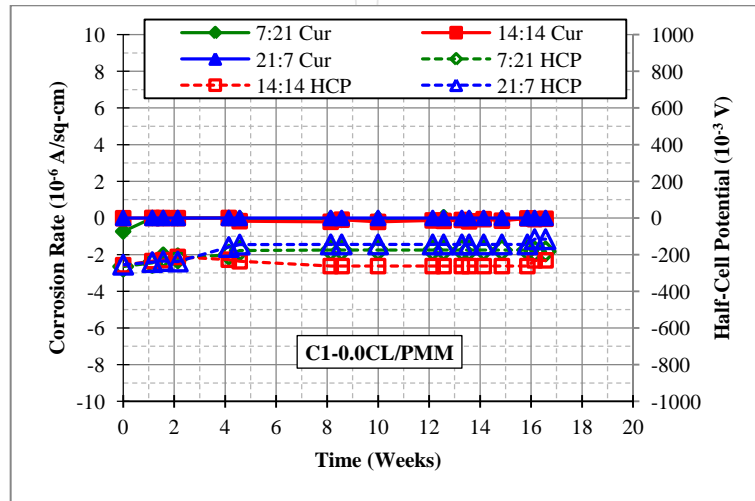
เหล็กเสริมมีค่าแตกต่างกันออกไปซึ่งอยู่ระหว่าง $0.5 - 6.0 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวเหล็กเสริม
แอโนด

จาก รูปที่ 4.12 (ก-ค) ตัวอย่างที่ปริมาณคลอไรด์ไอออนปนเปื้อนร้อยละ 4 และแทนที่ด้วยเถ้า
ลอยร้อยละ 20 เป็นผลในทิศทางเดียวกัน คือที่อัตราส่วนพื้นที่ผิวเหล็กเสริมเท่ากับ 7:21 ค่าอัตราการ
เกิดสนิมเหล็กจะมีค่ามากกว่า อัตราส่วน 21:7 เนื่องจากพื้นที่ผิวเหล็กเสริมที่รองรับการเกิดปฏิกิริยา
แอโนดิก มีสัดส่วนที่ต่ำเมื่อกำหนดหาอัตราการเกิดสนิมต่อพื้นที่แล้วทำให้ค่าที่ได้นั้นมีค่ามาก จากค่า
ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่วัดได้ประมาณ -500 mV ประเมินได้ว่าเหล็กเสริมมีโอกาสเกิดสนิม ร้อยละ 90
และค่าอัตราการเกิดสนิมเหล็กเสริมมีค่าแตกต่างกันออกไปซึ่งอยู่ระหว่าง $0.5 - 7.0 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ ขึ้นอยู่
กับพื้นที่ผิวเหล็กเสริมแอโนด

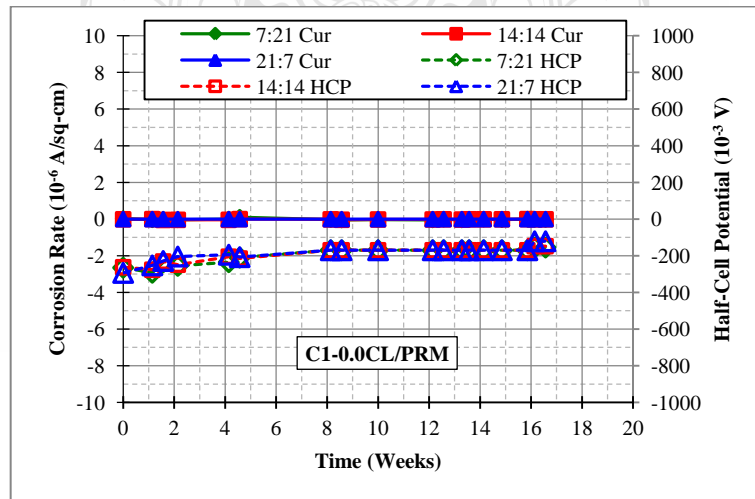
เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ปริมาณคลอไรด์ไอออนเท่ากับร้อยละ 0 และ 2 แล้ว มีแนวโน้ม
ในทิศทางเดียวกัน คือ ปริมาณคลอไรด์ไอออนที่เพิ่มขึ้นก็เป็นผลทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ด้าน
แอโนดลดต่ำลงและกระแสการเกิดสนิมมีค่าสูงขึ้น และสอดคล้องกับผลกระทบจากปริมาณคลอไรด์
ไอออนที่แตกต่างกันระหว่างแอโนดและแคโทด โดยชุดตัวอย่างที่ผลต่างของปริมาณคลอไรด์ไอออน
ร้อยละ 4 โดยเปรียบเทียบกับวัสดุซ่อมแซมชนิดเดียวกัน และปริมาณคลอไรด์ไอออนที่แตกต่างกัน
ระหว่างแอโนดและแคโทดที่เท่ากัน แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนคือเมื่อพื้นที่ส่วนที่ไม่ได้ซ่อมแซมลดลง
จะเป็นส่งผลกระทบต่อกระแสการเกิดสนิมโดยตรง คือมีค่าสูงขึ้น และเมื่อกระแสการเกิดสนิมมีค่า
สูงขึ้นจะส่งผลทำให้เกิดการแตกร้าวเร็วขึ้น ซึ่งเป็นผลจากพื้นที่ผิวเหล็กเสริมด้านแอโนดที่รองรับ
การเกิดปฏิกิริยาแคโทดิกที่มีพื้นที่น้อย ทำให้ความหนาแน่นของกระแสการเกิดสนิมมีค่าสูงนั่นเอง
ส่วนผลจากเถ้าลอยที่แทนที่ร้อยละ 20 ในส่วนผสมคอนกรีตนั้น ผลการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับกับ
ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน



(ก) ซีเมนต์มอร์ต้า

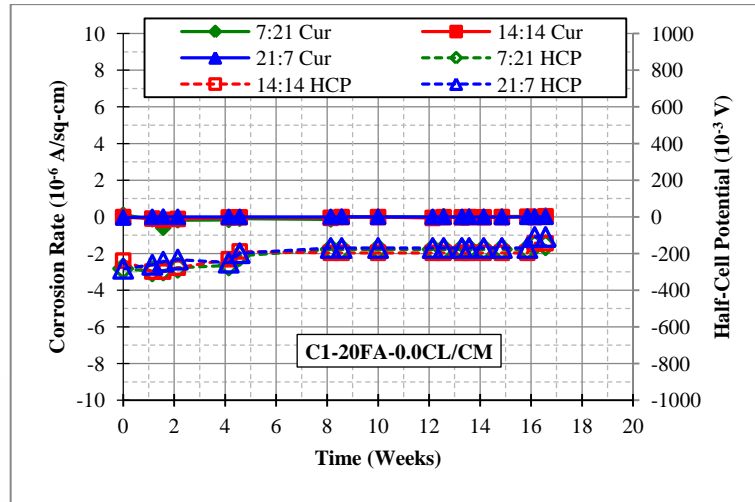


(ข) โพลีเมอร์โมดิไฟด์มอร์ต้า

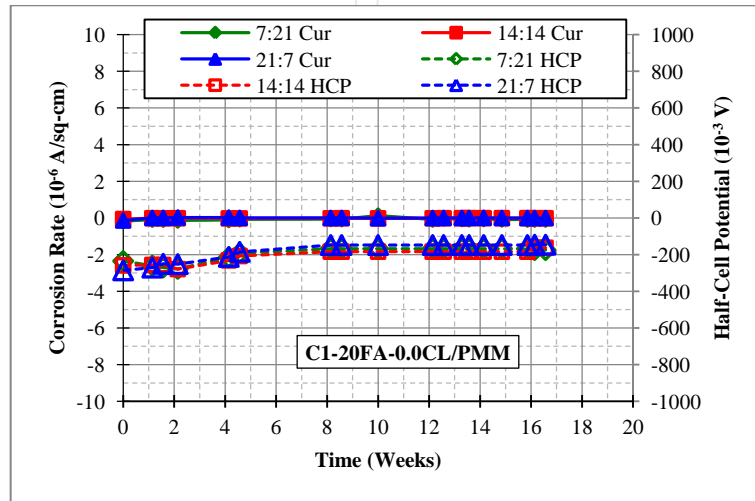


(ค) มอร์ต้าสำหรับการซ่อมแซมแบบบางส่วน

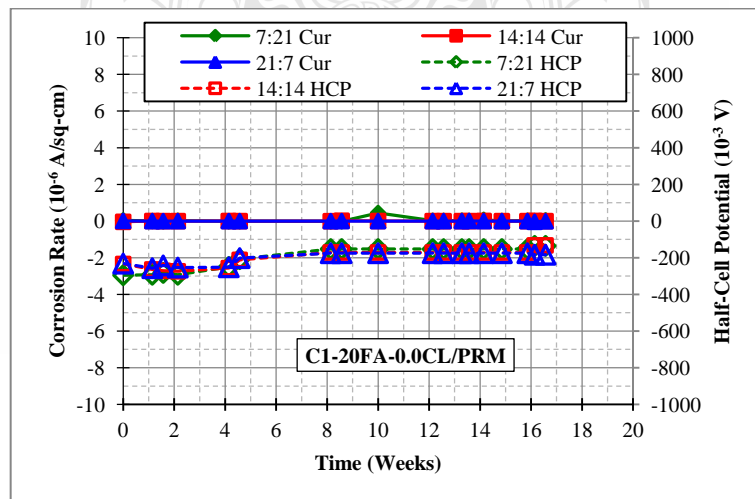
รูปที่ 4.7 กระแสการเกิดสนิมและค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ จากอัตราส่วนพื้นที่แอโนดต่อแคโทดที่แตกต่างกัน ของตัวอย่างที่ปริมาณคลอไรด์อินออนปนเปื้อนร้อยละ 0



(ก) ซีเมนต์มอร์ต้า

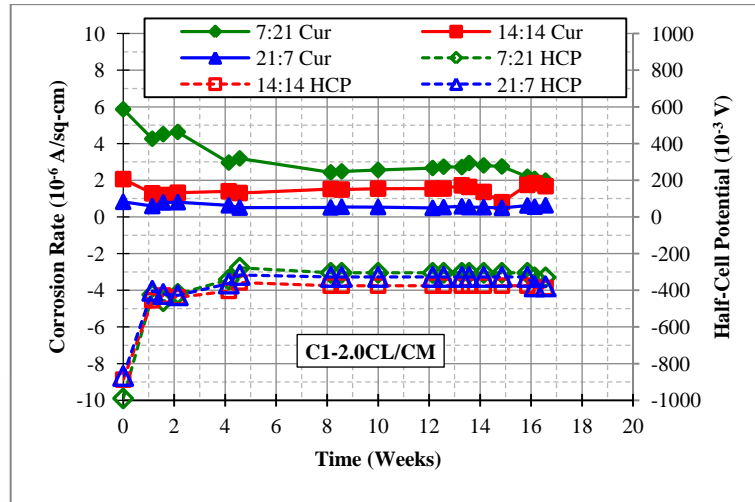


(ข) โพลีเมอร์โมดิฟายด์มอร์ต้า

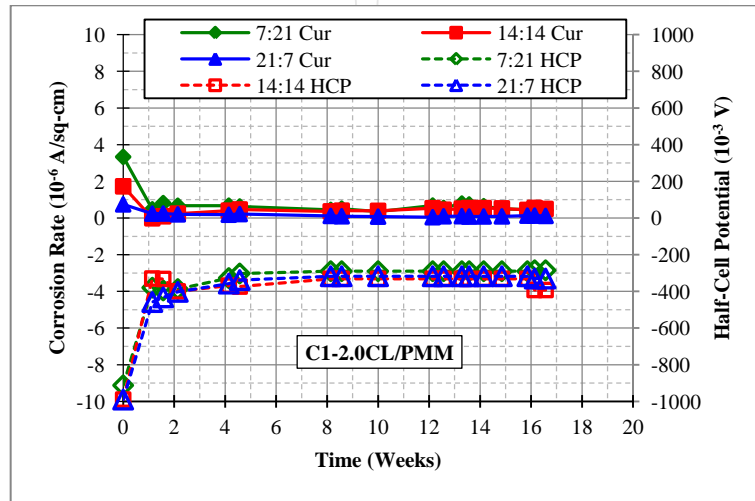


(ค) มอร์ต้าสำหรับการซ่อมแซมแบบบางส่วน

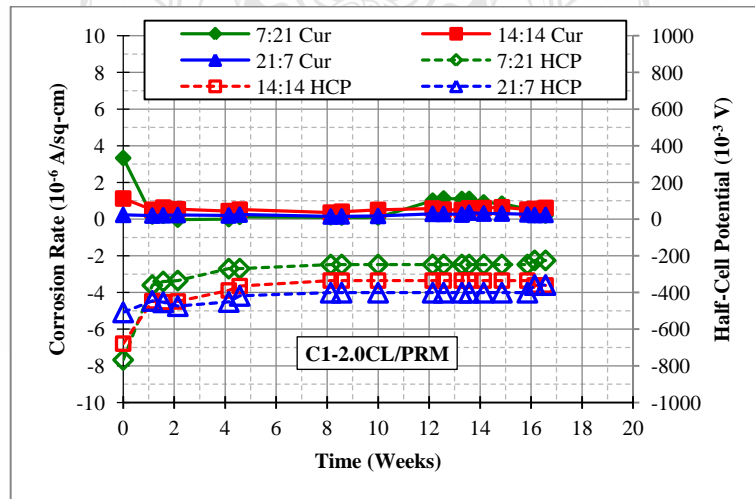
รูปที่ 4.8 กระแสการเกิดสนิมและค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ จากอัตราส่วนพื้นที่แอโนดต่อแคโทดที่แตกต่างกัน ของตัวอย่างที่แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 20 และปริมาณคลอไรด์อินทรีย์ออนปนเปื้อนร้อยละ 0



(ก) ซีเมนต์มอร์ต้า

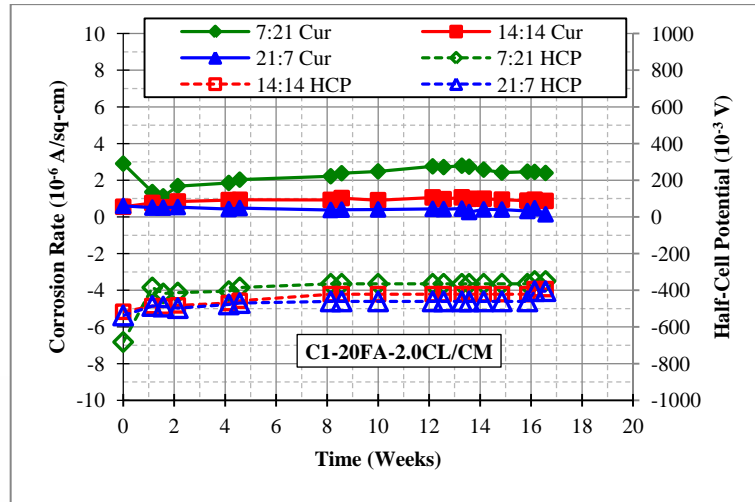


(ข) โพลีเมอร์โมดิฟายด์มอร์ต้า

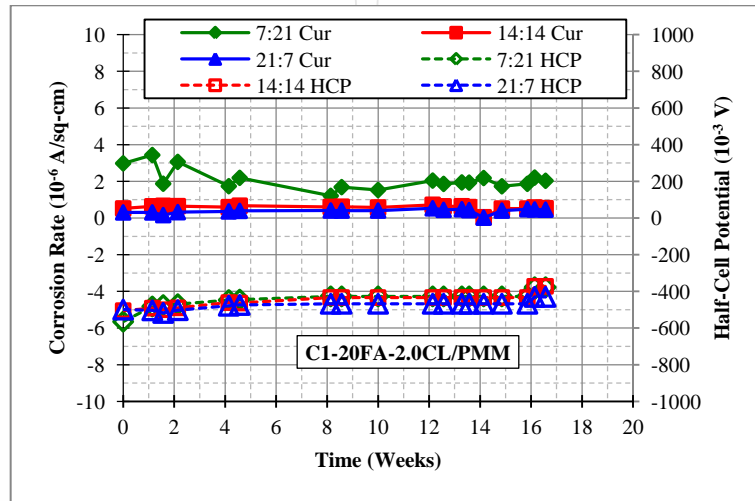


(ค) มอร์ต้าสำหรับการซ่อมแซมแบบบางส่วน

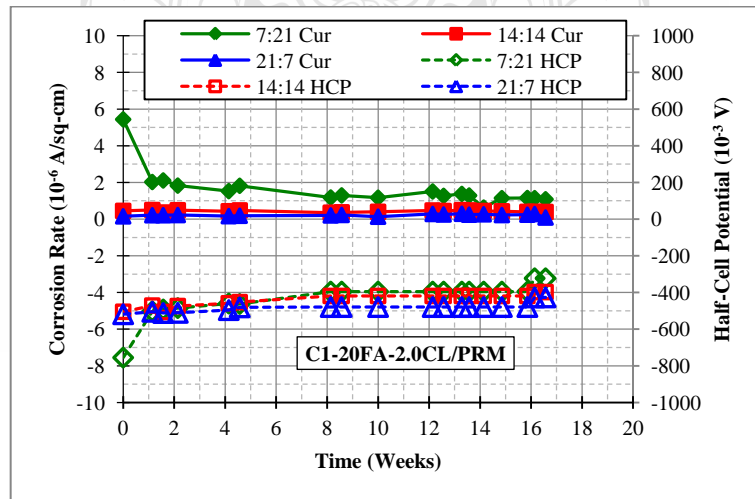
รูปที่ 4.9 กระแสการเกิดสนิมและค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ จากอัตราส่วนพื้นที่แอโนดต่อแคโทดที่แตกต่างกัน ของตัวอย่างที่ปริมาณคลอไรด์อ่อนปนเปื้อนร้อยละ 2



(ก) ซีเมนต์มอร์ต้า

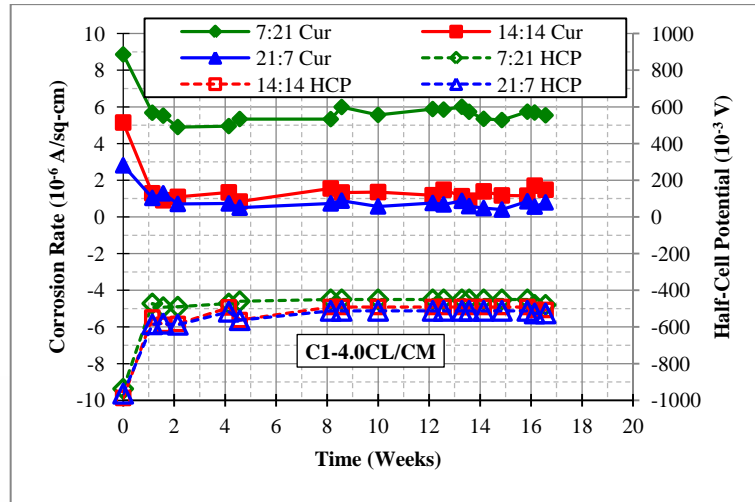


(ข) โพลีเมอร์โมดิฟายด์มอร์ต้า

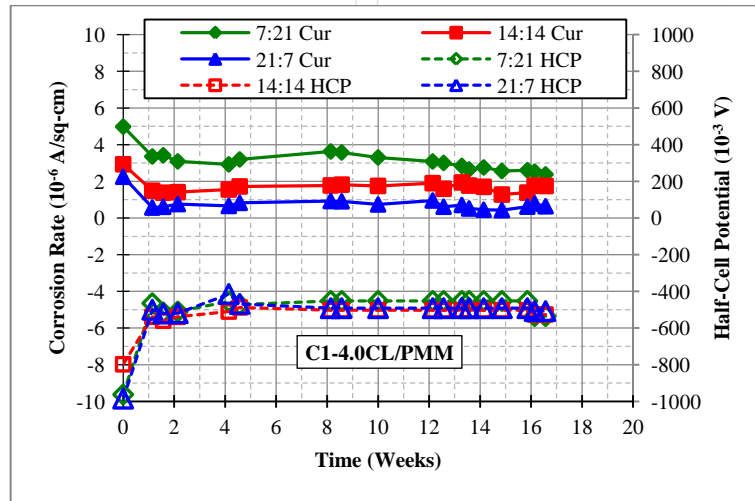


(ค) มอร์ต้าสำหรับการซ่อมแซมแบบบางส่วน

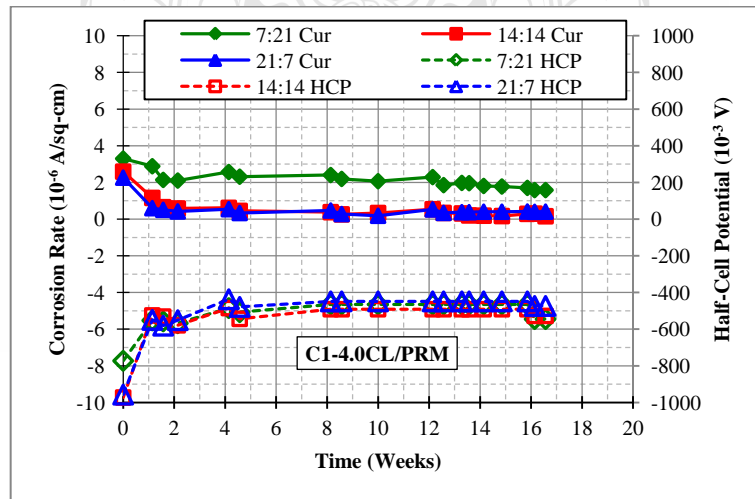
รูปที่ 4.10 กระแสการเกิดสนิมและค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ จากอัตราส่วนพื้นที่แอโนดต่อแคโทดที่แตกต่างกัน ของตัวอย่างที่แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 20 และปริมาณคลอไรด์ไอออนปนเปื้อนร้อยละ 2



(ก) ซีเมนต์มอร์ต้า

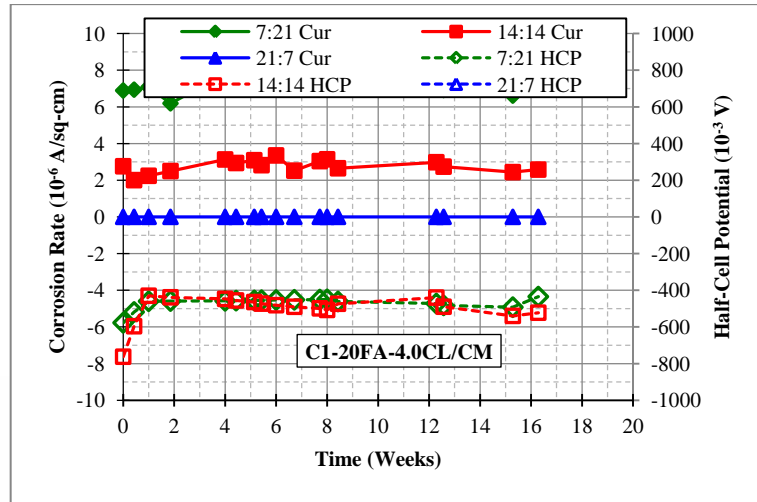


(ข) โพลีเมอร์โมดิฟายด์มอร์ต้า

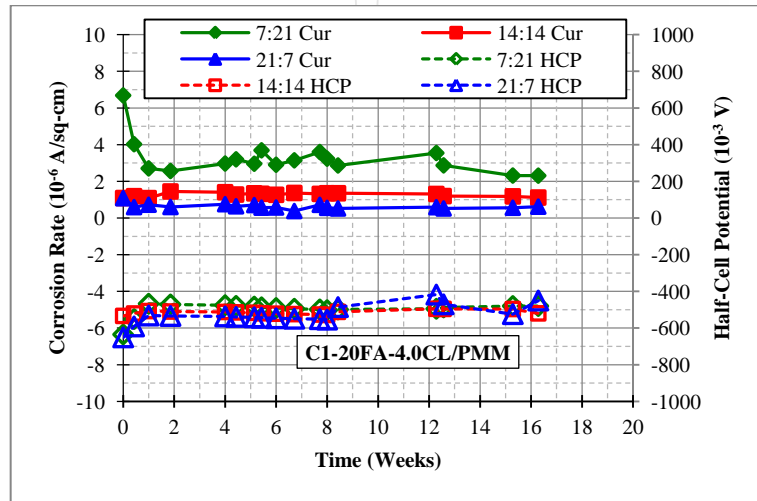


(ค) มอร์ต้าสำหรับการซ่อมแซมแบบบางส่วน

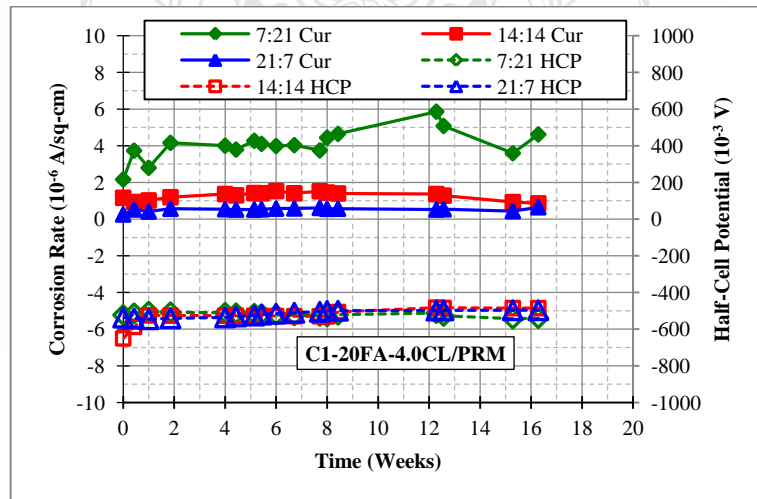
รูปที่ 4.11 กระจายการเกิดสนิมและค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ จากอัตราส่วนพื้นที่แอโนดต่อแคโทดที่แตกต่างกัน ของตัวอย่างที่ปริมาณคลอไรด์อินปนเป็นร้อยละ 4



(ก) ซีเมนต์มอร์ต้า



(ข) โพลีเมอร์โมดิฟายด์มอร์ต้า



(ค) มอร์ต้าสำหรับการซ่อมแซมแบบบางส่วน

รูปที่ 4.12 กระแสการเกิดสนิมและค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ จากอัตราส่วนพื้นที่แอโนดต่อแคโทดที่แตกต่างกัน ของตัวอย่างที่แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 20 และปริมาณคลอไรด์ไอออนปนเปื้อนร้อยละ 4

4.1.3 ผลกระทบจากวัสดุซ่อมแซมที่แตกต่างกัน

ตัวอย่างที่ใช้วัสดุประสานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 จาก รูปที่ 4.13 และ รูปที่ 4.14 ตัวอย่างที่ความแตกต่างของปริมาณคลอไรด์ไอออนปนเปื้อนเท่ากับ ร้อยละ 0 การผลการทดสอบศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ มีค่าสูงกว่า -200 mV เป็นส่วนใหญ่ซึ่งสามารถ ประเมินได้ว่า ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบไม่มีโอกาสเกิดสนิมร้อยละ 90 ส่วนค่ากระแสการเกิด สนิมมีค่าต่ำมาก ซึ่งเมื่อตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบไม่มีคลอไรด์ไอออนปนเปื้อนแล้วสามารถให้วัสดุ ชนิดซ่อมแซมได้ทุกชนิดขึ้น ซึ่งให้ผลต่างกันไม่มาก

ผลที่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกับตัวอย่างที่ วิเคราะห์ผลด้านอัตราส่วนพื้นที่ผิวแอโนดต่อ แคโทด ที่มีความแตกต่างปริมาณคลอไรด์ไอออนปนเปื้อนร้อยละ 0 คือไม่ว่าจะแปรผันอัตราส่วนพื้นที่ ผิวหรือใช้วัสดุซ่อมแซมที่แตกต่างกัน จะไม่ส่งผลกระทบต่อกระแสการเกิดสนิมและค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

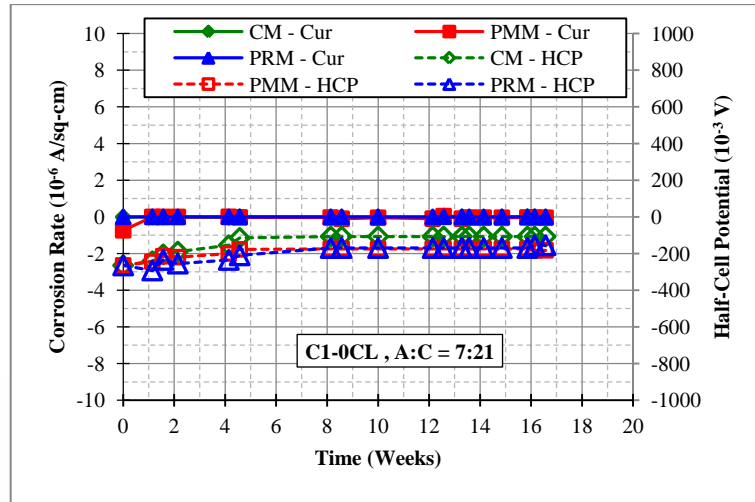
จาก รูปที่ 4.15 (ก-ค) ตัวอย่างคอนกรีตที่ปนเปื้อนปริมาณคลอไรด์ไอออนร้อยละ 2 พบว่า ปริมาณคลอไรด์ไอออนที่เพิ่มขึ้นส่งผลกระทบต่อค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่ลดลงและค่ากระแสการเกิด สนิมที่เพิ่มขึ้น ทำให้เห็นผลจากการเปลี่ยนแปลงวัสดุซ่อมแซมที่แตกต่างกันได้ชัดเจนมากขึ้น ซึ่ง เป็นไปในทิศทางเดียวกับผลกระทบจากปริมาณคลอไรด์ไอออนที่แตกต่างกันเพิ่มขึ้น โดยที่จะเห็นค่า ชัดเจนเมื่ออัตราส่วนพื้นที่ผิวเหล็กเสริมแอโนดต่อแคโทดที่ แอโนดมีค่าน้อย หรือพื้นที่ส่วนที่ ซ่อมแซมมีค่ามาก จะทำให้เห็นผลจากการเปลี่ยนแปลงชนิดวัสดุซ่อมแซมต่อค่ากระแสการเกิดสนิม อย่างชัดเจน คือ เมื่อใช้ซีเมนต์มอร์ตาร์ในการซ่อมแซม ค่ากระแสการเกิดสนิมจะมีค่าสูงที่สุด ส่วน หากเปลี่ยนวัสดุซ่อมแซมเป็นโพลีเมอร์โมดิฟายด์มอร์ตาร์ และ มอร์ตาร์สำหรับซ่อมแซมแบบ บางส่วน จะมีค่าลดลงตามลำดับ

จาก รูปที่ 4.16 (ก-ค) ตัวอย่างคอนกรีตที่ปนเปื้อนปริมาณคลอไรด์ไอออนร้อยละ 2 และแทนที่ ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 นั้นแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกับตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนเป็นวัสดุ ประสาน โดยค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ต่ำกว่า -350 mV ประเมินได้ว่าเหล็กเสริมมีโอกาสเกิดสนิม ร้อยละ 90 ส่วนค่ากระแสการเกิดสนิมมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนเล็กน้อย โดยการใช้ ซีเมนต์มอร์ตาร์ในการซ่อมแซม ค่ากระแสการเกิดสนิมจะมีค่าสูงที่สุดตามด้วยโพลีเมอร์โมดิฟายด์ มอร์ตาร์ และ มอร์ตาร์สำหรับซ่อมแซมแบบบางส่วน จะมีค่าลดลงตามลำดับ โดยจะเห็นชัดเจนใน ตัวอย่างที่อัตราส่วนพื้นที่ผิวแอโนดต่อแคโทดเท่ากับ 7:21 ซึ่งพื้นที่ส่วนที่ไม่ได้ซ่อมแซมมีค่าน้อย

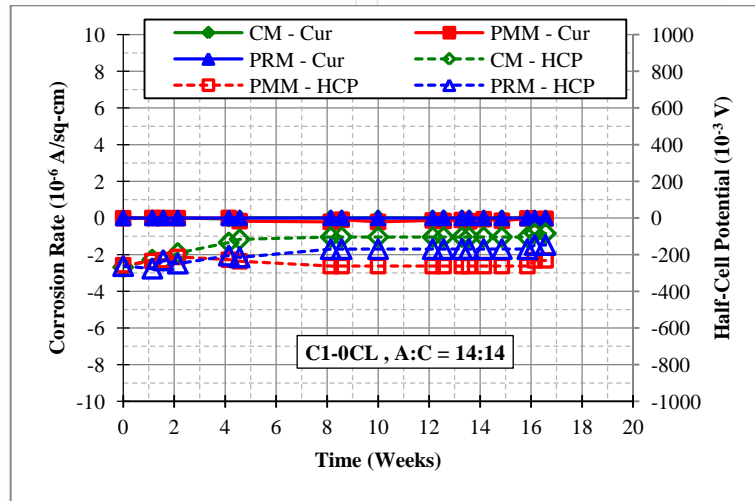
จาก รูปที่ 4.17 (ก-ค) ตัวอย่างที่ปริมาณคลอไรด์ไอออนปนเปื้อนร้อยละ 4 ผลกระทบจากชนิดของวัสดุซ่อมแซมนั้น จากกราฟทุกๆ อัตราส่วนพื้นที่ผิวแอโนดต่อแคโทดนั้นค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มีค่าประมาณ -450 mV ซึ่งประเมินได้ว่าตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบมีโอกาสเกิดสนิมร้อยละ 90 เป็นไปในทิศทางเดียวกับผลกระทบของปริมาณคลอไรด์ไอออนที่ปนเปื้อน สำหรับค่ากระแสการเกิดสนิม เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของวัสดุซ่อมแซมที่อัตราส่วนเดียวกัน การใช้วัสดุซ่อมแซมประเภทซีเมนต์มอร์ตาร์จะเกิดกระแสการเกิดสนิมสูงที่สุด ตามด้วยโพลีเมอร์โมดิฟายด์มอร์ตาร์ และมอร์ตาร์สำหรับงานซ่อมแซมบางส่วน

จาก รูปที่ 4.18 (ก-ค) ตัวอย่างที่ปริมาณคลอไรด์ไอออนปนเปื้อนร้อยละ 4 และแทนที่ด้วยเส้นลวดร้อยละ 20 เป็นผลในทิศทางเดียวกัน คือที่อัตราส่วนพื้นที่ผิวเหล็กเสริมเท่ากับ 7:21 ค่าอัตราการเกิดสนิมที่เกิดจากการใช้วัสดุซ่อมแซมประเภทซีเมนต์มอร์ตาร์จะเกิดกระแสการเกิดสนิมสูงที่สุด ตามด้วยโพลีเมอร์โมดิฟายด์มอร์ตาร์ และมอร์ตาร์สำหรับงานซ่อมแซมบางส่วน โดยที่ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มีค่าประมาณ -450 mV ในทุกๆ ตัวอย่าง ซึ่งประเมินโอกาสการเกิดสนิมถึงร้อยละ 90

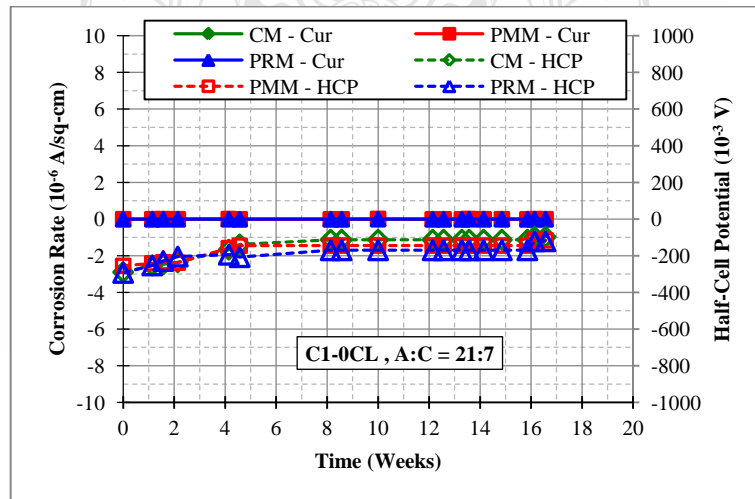
ผลจากความแตกต่างของวัสดุที่ใช้ในการซ่อมแซม คล้ายกลับผลกระทบจากอัตราส่วนพื้นที่ผิวเหล็กเสริมแอโนดต่อแคโทด คือจะเห็นผลชัดเจนเมื่อปริมาณคลอไรด์ไอออนที่ปนเปื้อนในตัวอย่างคอนกรีตมีค่าสูงขึ้นและเมื่อพื้นที่ส่วนที่ไม่ได้ซ่อมแซมลดลง จะเห็นได้ชัดเจนว่าการใช้วัสดุซ่อมแซมมอร์ตาร์สำหรับงานซ่อมแซมบางส่วน ทำให้ค่ากระแสการเกิดสนิมมีค่าลดลงช่วยยืดระยะเวลาการแตกร้าวของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบได้ ในกรณีที่ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบ มีปริมาณคลอไรด์ไอออนปนเปื้อนสูง และพื้นที่ที่ทำการซ่อมแซมเป็นบริเวณกว้างมากๆ สาเหตุที่วัสดุซ่อมแซมมีผลต่อค่ากระแสการเกิดสนิมอย่างชัดเจน เนื่องจากคุณสมบัติด้านความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุที่ใช้ในการซ่อมแซม ซึ่งวัสดุซ่อมแซมที่ดีต้องมีความต้านทานไฟฟ้าสูง เพื่อด้านทานกระแสการเกิดสนิมที่เกิดขึ้น หรือ ควรมีคุณสมบัติที่ดีด้วยความต้านทานการซึมผ่านของน้ำจากภายนอก เพื่อลดการเกิดปฏิกิริยาแคโทดิกได้ แม้ว่าปริมาณคลอไรด์ไอออนด้านแอโนดจะมีค่าสูง จนทำให้ผลต่างของศักย์ไฟฟ้าด้านแอโนดและแคโทดมีค่ามากก็ตาม คุณสมบัติด้านความต้านทานทางไฟฟ้า หรือ ความต้านทานการซึมผ่านของน้ำ จะช่วยลดค่ากระแสการเกิดสนิมดังที่แสดงให้เห็นจาก วัสดุประเภทโพลีเมอร์โมดิฟายด์มอร์ตาร์ และ มอร์ตาร์สำหรับงานซ่อมแซมแบบบางส่วน ที่ทำให้ค่ากระแสการเกิดสนิมลดลง เนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างที่ทดสอบจากอุปกรณ์ Four-Probe Wenner-Type Electrical Resistance นั้นมีค่าเพิ่มขึ้น จาก รูปที่ 4.21



(ก) อัตราส่วนแอมโนตต่อแคลโทดเท่ากับ 7:21

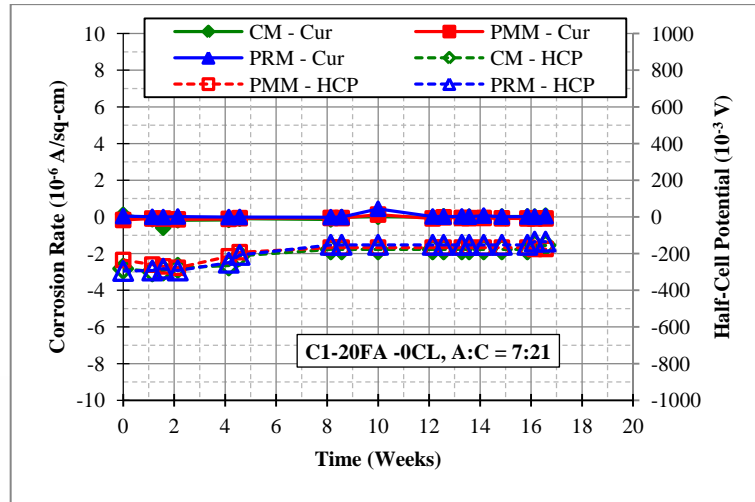


(ข) อัตราส่วนแอมโนตต่อแคลโทดเท่ากับ 14:14

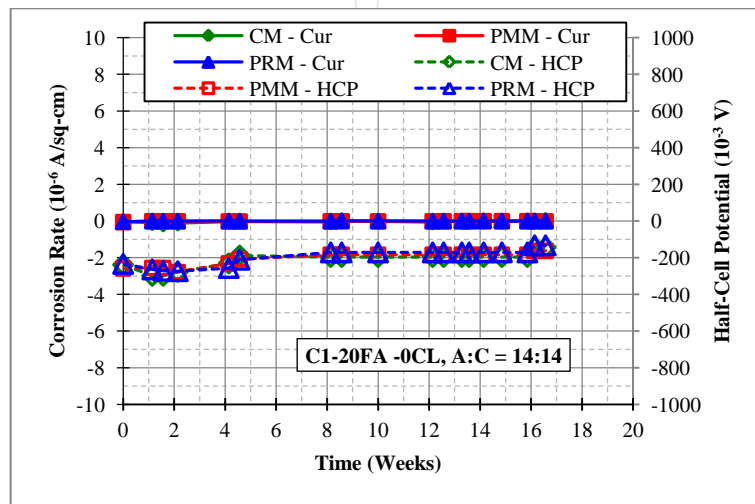


(ค) อัตราส่วนแอมโนตต่อแคลโทดเท่ากับ 21:7

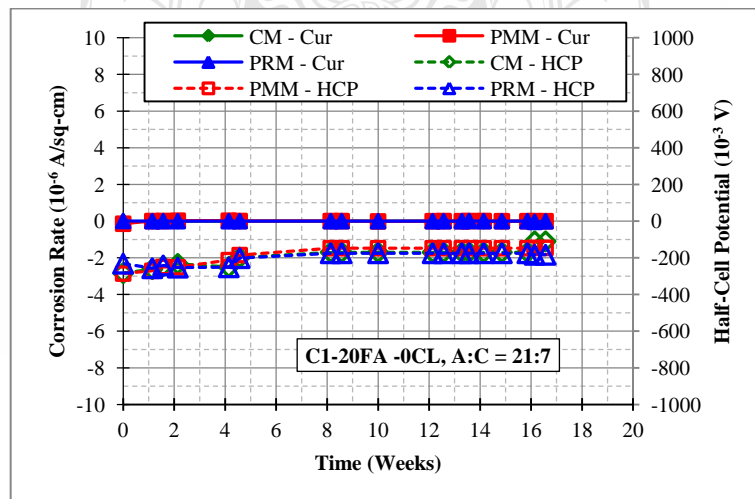
รูปที่ 4.13 กระแสการเกิดสนิมและค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ จากการใช้วัสดุซ่อมแซมที่แตกต่างกันของตัวอย่างที่ปริมาณคลอไรด์อิสระเป็นร้อยละ 0



(ก) อัตราส่วนแอนโนดต่อแคโทดเท่ากับ 7:21

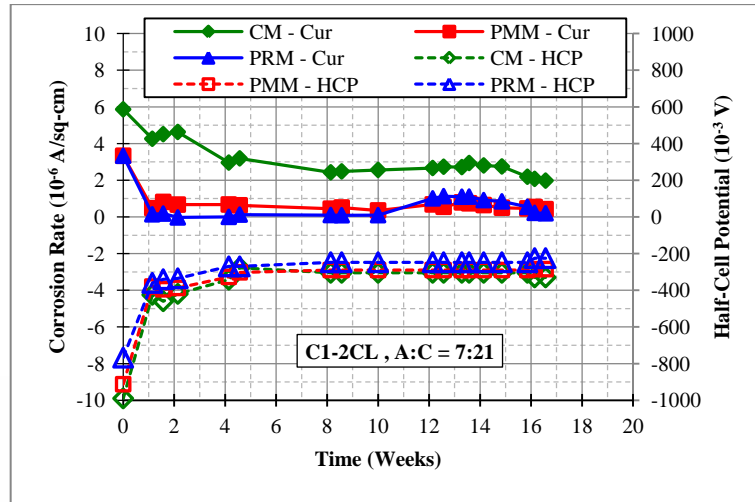


(ข) อัตราส่วนแอนโนดต่อแคโทดเท่ากับ 14:14

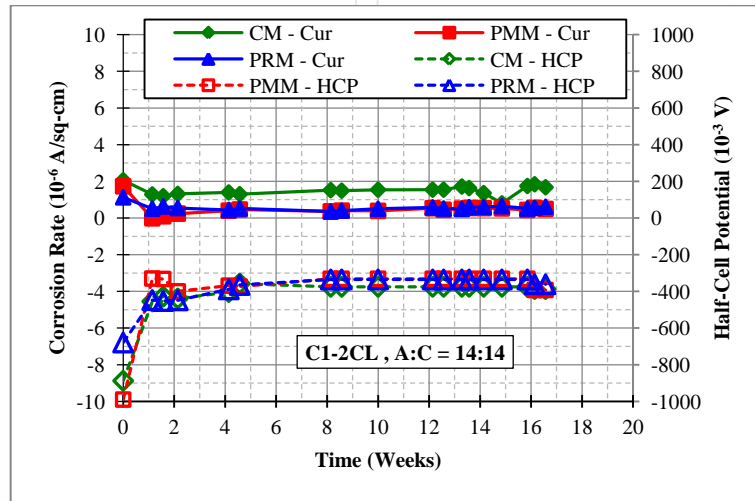


(ค) อัตราส่วนแอนโนดต่อแคโทดเท่ากับ 21:7

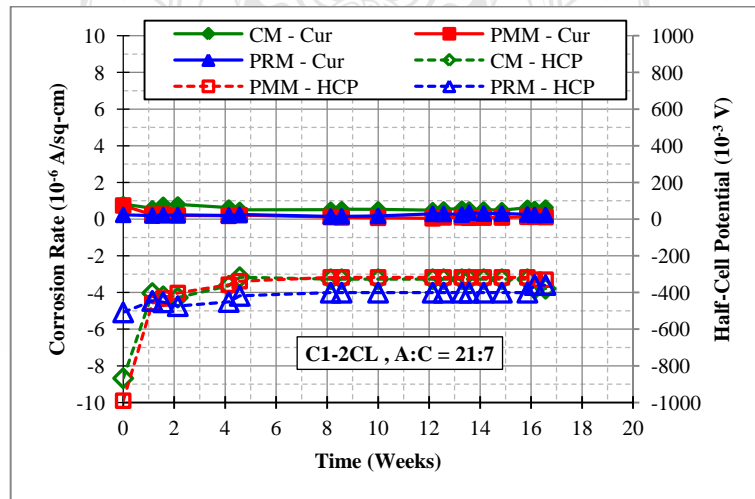
รูปที่ 4.14 กระแสการเกิดสนิมและค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ จากการใช้วัสดุซ่อมแซมที่แตกต่างกัน ของตัวอย่างที่แทนที่ด้วยถั่วลยร้อยละ 20 และปริมาณคลอไรด์อินอนปนเปื้อนร้อยละ 0



(ก) อัตราส่วนแอนโนดต่อแคโทดเท่ากับ 7:21

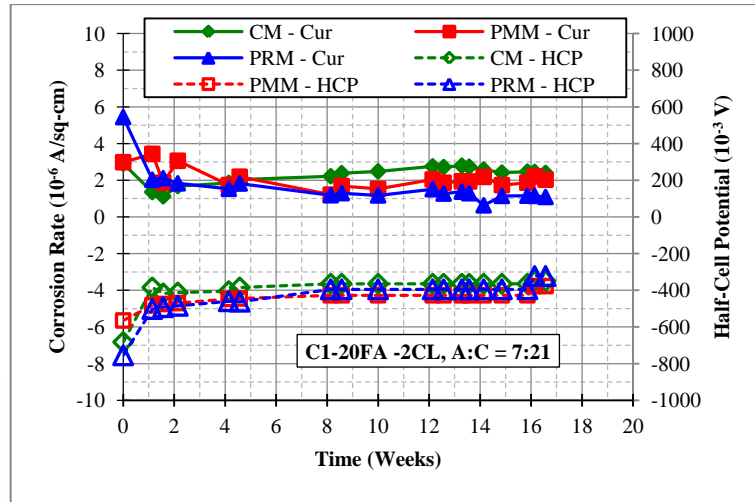


(ข) อัตราส่วนแอนโนดต่อแคโทดเท่ากับ 14:14

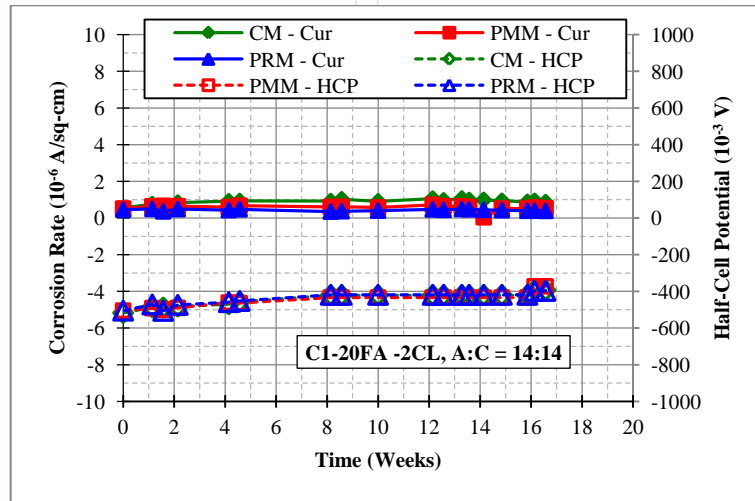


(ค) อัตราส่วนแอนโนดต่อแคโทดเท่ากับ 21:7

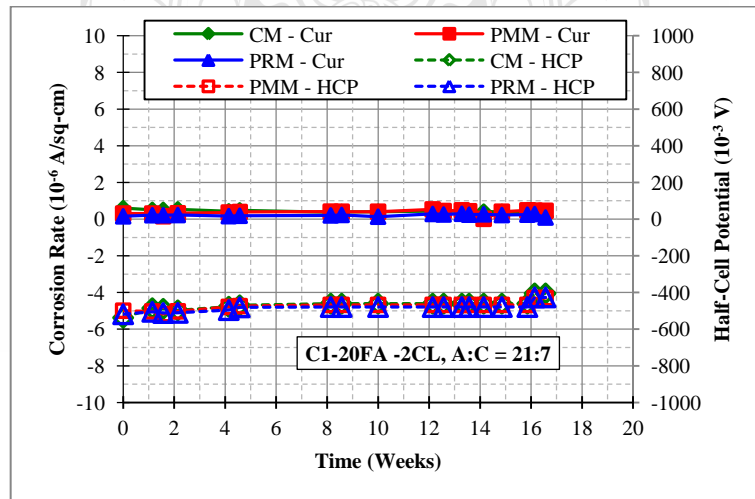
รูปที่ 4.15 กระแสการเกิดสนิมและค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ จากการใช้วัสดุซ่อมแซมที่แตกต่างกันของตัวอย่างที่ปริมาณคลอไรด์อินปนเป็นร้อยละ 2



(ก) อัตราส่วนแอนโนดต่อแคโทดเท่ากับ 7:21

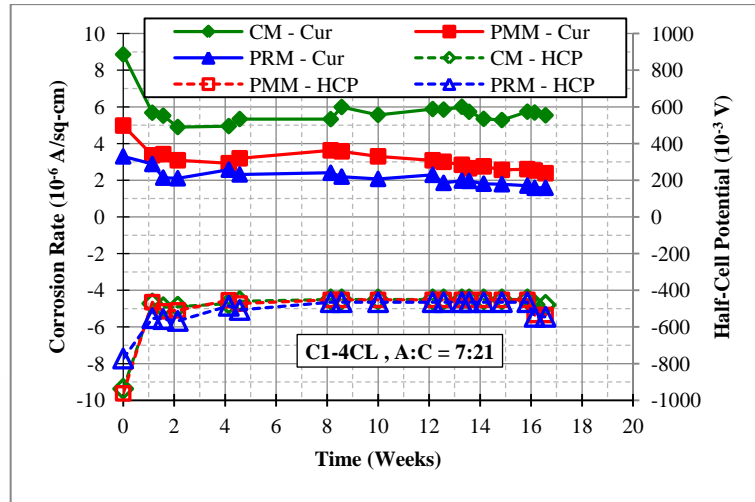


(ข) อัตราส่วนแอนโนดต่อแคโทดเท่ากับ 14:14

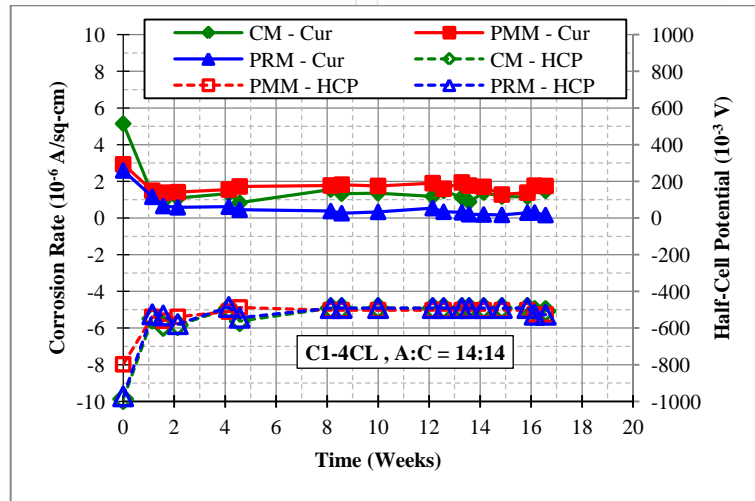


(ค) อัตราส่วนแอนโนดต่อแคโทดเท่ากับ 21:7

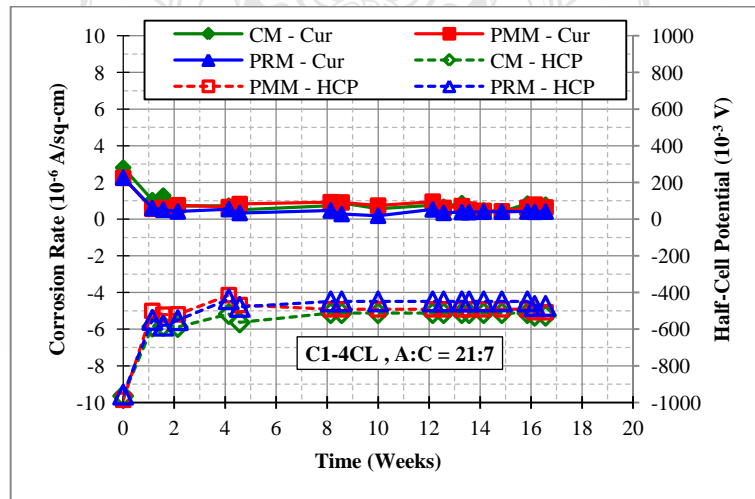
รูปที่ 4.16 กระแสการเกิดสนิมและค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ จากการใช้วัสดุซ่อมแซมที่แตกต่างกัน ของตัวอย่างที่แทนที่ด้วยถั่วลยร้อยละ 20 และปริมาณคลอไรด์อินออนปนเปื้อนร้อยละ 2



(ก) อัตราส่วนแอนโนดต่อแคโทดเท่ากับ 7:21

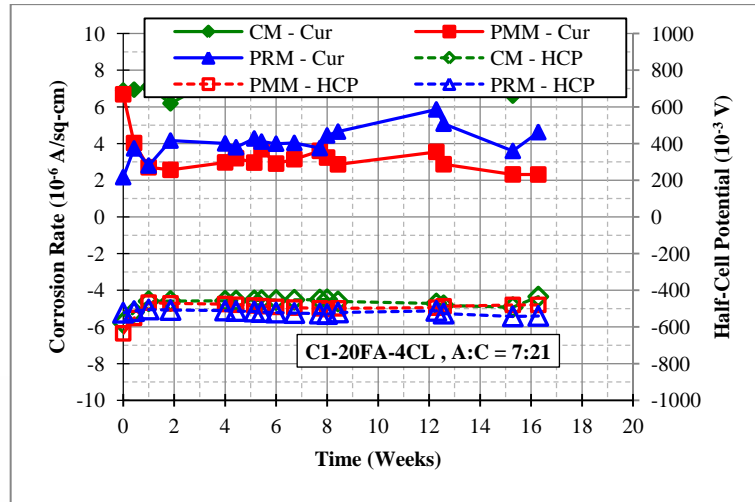


(ข) อัตราส่วนแอนโนดต่อแคโทดเท่ากับ 14:14

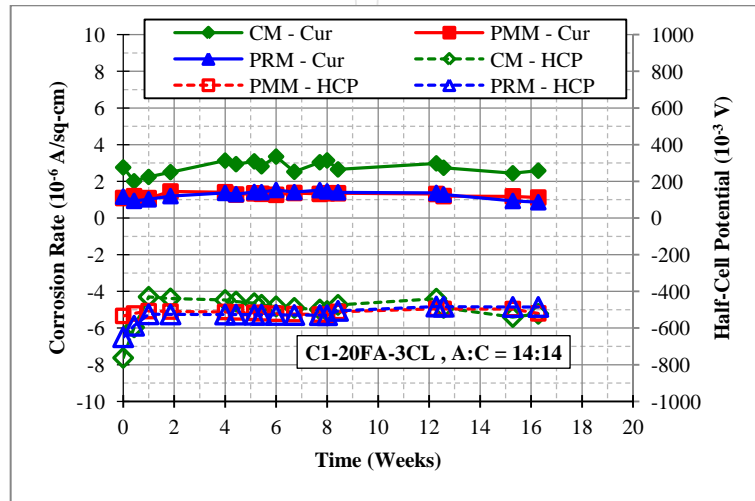


(ค) อัตราส่วนแอนโนดต่อแคโทดเท่ากับ 21:7

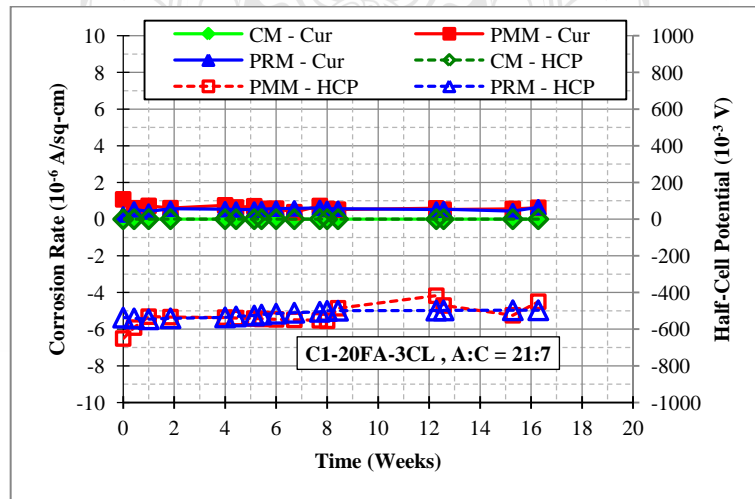
รูปที่ 4.17 กระแสการเกิดสนิมและค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ จากการใช้วัสดุซ่อมแซมที่แตกต่างกันของตัวอย่างที่ปริมาณคลอไรด์อินปนเป็นร้อยละ 4



(ก) อัตราส่วนแอมโนตต่อแคลโทดเท่ากับ 7:21



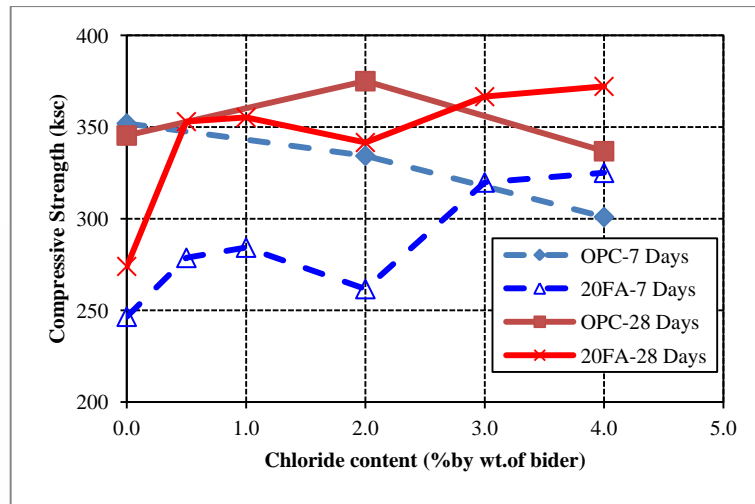
(ข) อัตราส่วนแอมโนตต่อแคลโทดเท่ากับ 14:14



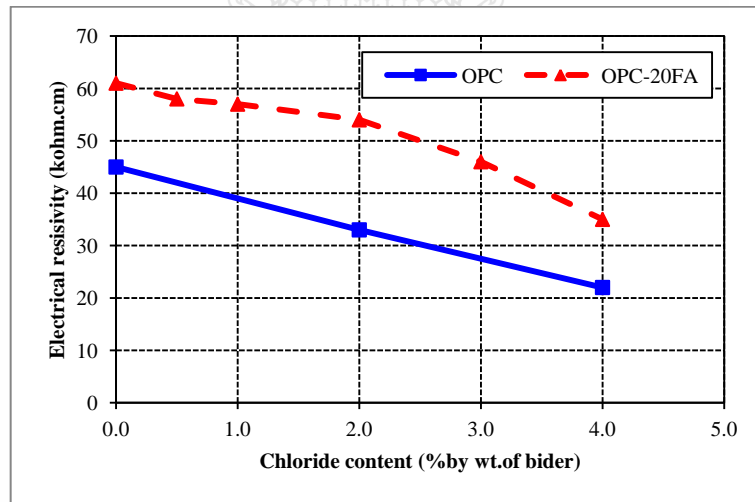
(ค) อัตราส่วนแอมโนตต่อแคลโทดเท่ากับ 21:7

รูปที่ 4.18 กระแสการเกิดสนิมและค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ จากการใช้วัสดุซ่อมแซมที่แตกต่างกัน ของตัวอย่างที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 และปริมาณคลอไรด์ไอออนปนเปื้อนร้อยละ 4

4.2 ความต้านทานไฟฟ้าและกำลังอัด ของคอนกรีต และมอร์ตาร์



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างคลอไรด์ไอออนกับกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต

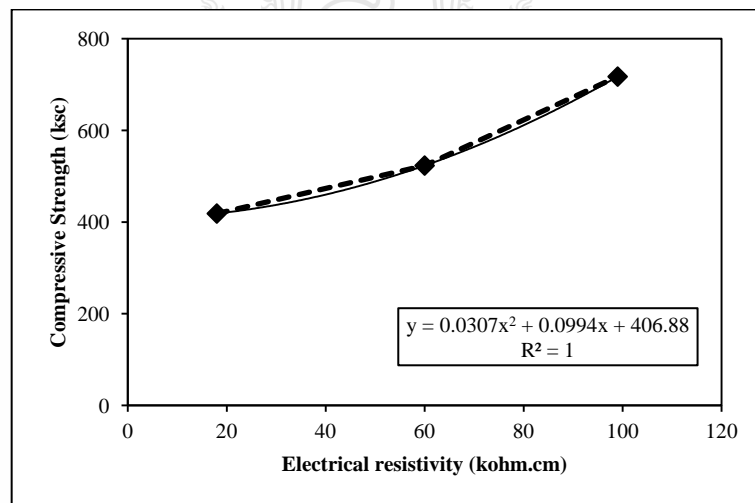


รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างคลอไรด์ไอออนกับความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างคอนกรีต

จาก รูปที่ 4.19 และ รูปที่ 4.20 แสดงผลการทดสอบค่ากำลังอัดและค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของตัวอย่างคอนกรีต ในตัวอย่างที่แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 20 เมื่อปริมาณคลอไรด์ไอออนเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มที่ค่ากำลังอัดของคอนกรีตจะมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความต้านทานทางไฟฟ้ามักลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน แต่ในตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ส่วนนั้นเมื่อปริมาณคลอไรด์ไอออนเพิ่มขึ้น ค่ากำลังอัดและค่าความต้านทานทางไฟฟ้ากลับมีแนวโน้มที่ลดลง แสดงให้เห็นว่าในตัวอย่างคอนกรีต

นั้น ยังไม่อาจสรุปแนวโน้มของผลกำลังอัดต่อค่าความต้านทานทางไฟฟ้าได้ เนื่องจากสัดส่วนผสมที่แตกต่างกันออกไป

ผลการทดสอบความต้านทานทางไฟฟ้าเปรียบเทียบกับปริมาณคลอไรด์ไอออนที่ต่างกันระหว่างแอโนดกับแคโทด ผลที่ได้คือเมื่อปริมาณคลอไรด์ไอออนที่สูงขึ้นส่งผลทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าลดลงด้วย และการแทนที่เกลือในคอนกรีตเก่าทำให้ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าสูงกว่านั้น ผลเกิดจากคุณสมบัติของเกลือที่ช่วยเพิ่มคุณสมบัติของคอนกรีตด้านความสามารถในการเท หรือความทึบน้ำในตัวอย่างคอนกรีต เป็นผลทำให้คอนกรีตที่ใช้เกลือนั้นมีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าสูงกว่า โดยคอนกรีตที่มีความทึบน้ำสูง น้ำมีโอกาสที่จะซึมเข้าภายในตัวอย่างได้น้อยเนื่องจากปริมาณรูพรุนในเนื้อคอนกรีตต่ำ ทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าต่ำลง ความต้านทานไฟฟ้าจึงเพิ่มขึ้น และผลจากการขึ้นของปริมาณคลอไรด์ไอออนในตัวอย่างคอนกรีตด้านแอโนดส่งผลต่อค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของตัวอย่างคอนกรีต เนื่องจากคลอไรด์ไอออนทำให้ค่าการนำไฟฟ้าในคอนเพิ่มขึ้นจากสารละลายในโพรงคอนกรีต โดยความต้านทานจากตัวอย่างที่แทนที่ด้วยเกลือมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ประมาณ 15 kohm.cm จากสัดส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบ



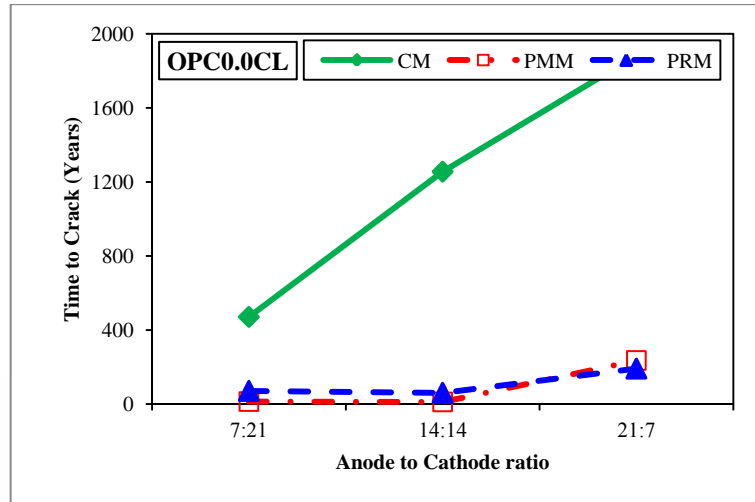
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์กำลังอัดต่อความต้านทานไฟฟ้าของมอร์ตาร์วัสดุซ่อมแซม

จาก รูปที่ 4.21 เมื่อนำตัวอย่างมอร์ตาร์วัสดุซ่อมแซมไปทำการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C109 และทดสอบค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่าง พบว่าในตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ให้กำลังอัดมากจะทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จากกราฟจะเห็นว่าตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ทดสอบกำลังอัดได้ค่าต่ำที่สุดคือ 419 ksc นั้นค่าความต้านทานทางไฟฟ้ามีค่าเพียง 18 kohm.cm คือซีเมนต์มอร์ตาร์ โพลีเมอร์มอร์ตาร์ทดสอบให้ค่ากำลังอัดและความต้านทานทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 523 ksc และ 60 kohm.cm ตัวอย่างมอร์ตาร์สำหรับงานซ่อมแซมบางส่วนให้ค่ากำลังอัดและความต้านทานทางไฟฟ้ามากที่สุดคือ 717 ksc และ 99 kohm.cm เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ทั้ง 3 ชนิด ที่ใช้เป็นวัสดุซ่อมแซมในการศึกษา ซึ่งในวัสดุที่ใช้ในการซ่อมแซม ซึ่งไม่มีคลอไรด์ไอออนปนเปื้อน ความต้านทานทางไฟฟ้าของตัวอย่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังอัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากตัวอย่างที่มีค่ากำลังอัดสูง คุณสมบัติด้านความทึบน้ำควรจะสูงตามด้วย ทำให้ค่าความต้านทานทางไฟฟ้านั้นสูงตามด้วย ดังที่กล่าวมาในข้างต้น โดยที่เมื่อใช้วัสดุที่มีความต้านทานสูงกว่าเพื่อการซ่อมแซม จะส่งผลให้ค่ากระแสการเกิดสนิมลดลง โดยกรณีตัวอย่างคอนกรีตด้านแอโนดและแคโทดมีค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ต่างกันมากๆ ความต้านทานทางไฟฟ้าจะช่วยลดการไหลของกระแสระหว่างแอโนดและแคโทด ซึ่งช่วยลดกระแสการเกิดสนิมได้

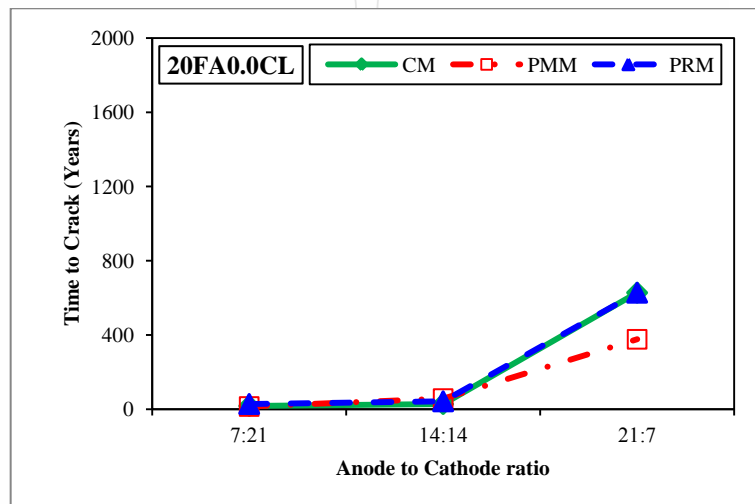
4.3 การประเมินอายุการใช้งานของตัวอย่างภายหลังการซ่อมแซม

จากการวัดค่ากระแสการเกิดสนิมของตัวอย่างและกฎของฟาราเดย์ ดัง สมการที่ (3.3) สามารถประเมินหาหน้าพื้นที่สูญเสียของเหล็กเสริมคอนกรีตจากการเกิดสนิมได้ จากมาตรฐาน JSCE กำหนดให้ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบจะเกิดการแตกร้าวที่ด้านแอโนด เมื่อสูญเสียหน้าพื้นที่ของเหล็กเสริมมากกว่า 10 มก./ตร.ซม. [26] ซึ่งได้ผลดังต่อไปนี้

จาก รูปที่ 4.22 (ก-ข) อายุการใช้งานของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบที่ผลต่างของปริมาณคลอไรด์ไอออนระหว่างแอโนดและแคโทดเท่ากับร้อยละ 0 มีค่าสูงมาก และแสดงให้เห็นว่ากรณีที่ตัวอย่างคอนกรีตไม่มีการปนเปื้อนของคลอไรด์ไอออน สามารถใช้วัสดุซ่อมแซมได้ทุกชนิดไม่มีข้อจำกัด



(ก) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์

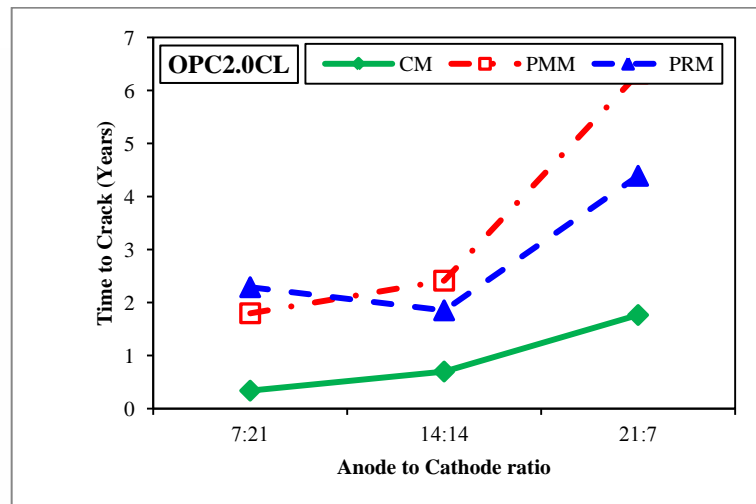


(ข) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20

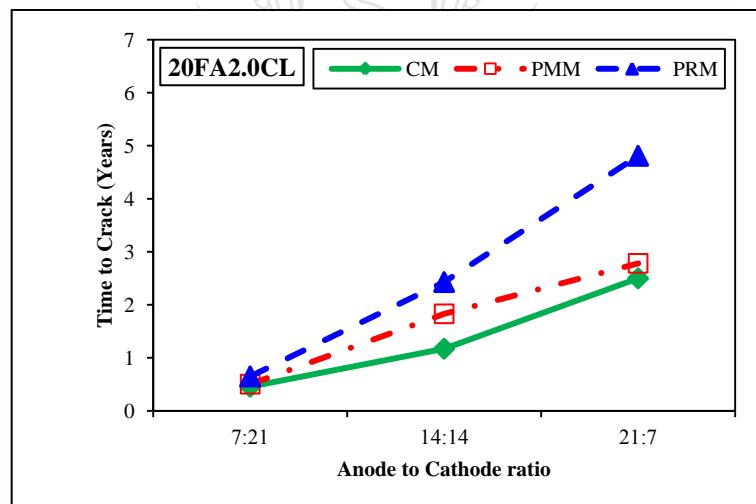
รูปที่ 4.22 ผลการประเมินอายุภายหลังการซ่อมแซมของ ตัวอย่างคอนกรีตเก่าที่มีคลอไรด์ร้อยละ 0

จาก รูปที่ 4.23 (ก-ข) ตัวอย่างที่ปนเปื้อนด้วยคลอไรด์ร้อยละ 2 ที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน เป็นวัสดุประสานและที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 พบว่าเมื่อปริมาณคลอไรด์เพิ่มขึ้น อายุการใช้งานของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบลดลงต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่มีคลอไรด์ปนเปื้อน และเมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างที่อัตราส่วนพื้นที่ผิวเหล็กเสริมแอนโอดต่อแคโทดต่างกัน พบว่าหากพื้นที่ที่ทำการซ่อมแซมมีพื้นที่มากกว่าพื้นที่ที่ไม่ได้รับการซ่อมแซมมาก จะทำให้เกิดความเสียหายในพื้นที่ที่ไม่ได้รับการซ่อมแซมเร็วขึ้น ส่วนความแตกต่างของวัสดุที่ใช้ในการซ่อมแซมพบว่าวัสดุที่มีความต้านทานสูงจะทำให้ระยะเวลาที่ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบจะเกิดรอยร้าวยาวนานขึ้น โดยจากกราฟอายุการใช้งานของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบที่น้อยที่สุดสำหรับตัวอย่างที่คลอไรด์ปนเปื้อนร้อยละ

2 คือ ที่อัตราส่วนแอโนดต่อแคโทด 7:21 และใช้ซีเมนต์มอร์ตาร์เป็นวัสดุซ่อมแซม เวลาประมาณ 6 เดือน ซึ่งเมื่อพื้นที่ส่วนที่ไม่ได้ซ่อมแซมเพิ่มมากขึ้น อายุการใช้งานก็เพิ่มขึ้น และเมื่อใช้วัสดุซ่อมแซมที่มีคุณสมบัติด้านความต้านทานทางไฟฟ้าที่ดี อายุการใช้งานของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบจะเพิ่มขึ้น



(ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

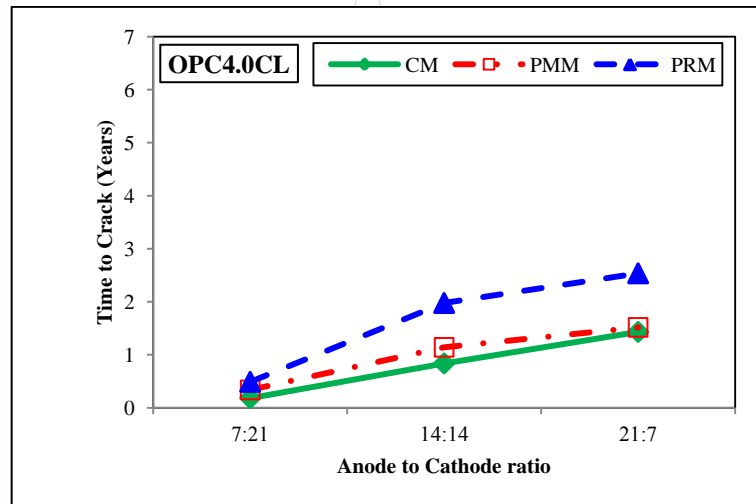


(ข) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20

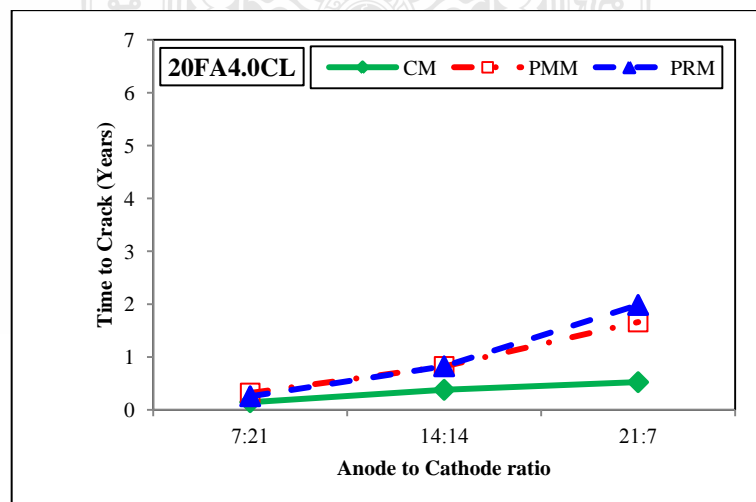
รูปที่ 4.23 ผลการประเมินอายุภายหลังการซ่อมแซมของ ตัวอย่างคอนกรีตเก่าที่มีคลอไรด์ร้อยละ 2

รูปที่ 4.24 (ก-ข) ตัวอย่างที่ปนเปื้อนด้วยคลอไรด์อออนร้อยละ 4 ที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนเป็นวัสดุประสานและที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 เมื่อปริมาณคลอไรด์อออนเพิ่มมากขึ้น เป็นสาเหตุทำให้อายุการใช้งานของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบลดลง เนื่องจากกระแสการเกิดสนิมสูงขึ้น

จากกราฟแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบมีอายุน้อยที่สุดไม่ถึง 1 ปี ก็เกิดการแตกร้าวในกรณีที่อัตราส่วนพื้นที่ผิวเหล็กเสริมแอโนดต่อแคโทด 7:21 หรือเมื่อพื้นที่ที่ไม่ได้รับการซ่อมแซมที่ค่าน้อยมากเนื่องจากพื้นที่เล็กๆ นี้เองทำให้ความเข้มข้นของกระแสการเกิดสนิมสูง อายุการใช้งานจึงสั้น ซึ่งสามารถเลือกใช้วัสดุที่มีความต้านทานทางไฟฟ้าสูง หรือ เลือกใช้วัสดุที่มีความต้านทานการซึมผ่านของน้ำที่ดี เพื่อลดค่ากระแสการเกิดสนิม ซึ่งจากกราฟแสดงให้เห็นว่าวัสดุประเภทโพลีเมอร์โมดิฟายด์มอร์ตาร์ และมอร์ตาร์สำหรับซ่อมแซมแบบบางส่วน ทำให้อายุการใช้งานของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าความต้านทานทางไฟฟ้า รูปที่ 4.21 มีค่าสูงกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์



(ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



(ข) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20

รูปที่ 4.24 ผลการประเมินอายุภายหลังการซ่อมแซมของ ตัวอย่างคอนกรีตเก่าที่มีคลอไรด์ร้อยละ 4

ตารางที่ 4.1 ตัวอย่างคอนกรีตด้านแอโนดที่เกิดรอยร้าว ที่ระยะเวลา 16 สัปดาห์

No.	Anode	Cathode	Cl ⁻ Diff	Anode to Cathode Ratio		
				7:21	14:14	21:7
1	OPC0.0CL	CM	0	-	-	-
2	OPC0.0CL	PMM	0	-	-	-
3	OPC0.0CL	PRM	0	-	-	-
4	OPC2.0CL	CM	2	-	C	-
5	OPC2.0CL	PMM	2	-	C	-
6	OPC2.0CL	PRM	2	-	-	-
7	OPC4.0CL	CM	4	-	C	-
8	OPC4.0CL	PMM	4	-	C	C
9	OPC4.0CL	PRM	4	-	-	-
10	OPC20FA0.0CL	CM	0	-	-	-
11	OPC20FA0.0CL	PMM	0	-	-	-
12	OPC20FA0.0CL	PRM	0	-	-	-
13	OPC20FA0.5CL	CM	0.5	-	-	-
14	OPC20FA0.5CL	PMM	0.5	-	-	-
15	OPC20FA0.5CL	PRM	0.5	-	-	-
16	OPC20FA1.0CL	CM	1	-	-	-
17	OPC20FA1.0CL	PMM	1	-	-	-
18	OPC20FA1.0CL	PRM	1	-	-	-
19	OPC20FA2.0CL	CM	2	-	-	-
20	OPC20FA2.0CL	PMM	2	-	-	-
21	OPC20FA2.0CL	PRM	2	-	-	-
22	OPC20FA3.0CL	CM	3	C	-	-
23	OPC20FA3.0CL	PMM	3	-	-	C
24	OPC20FA3.0CL	PRM	3	C	C	C

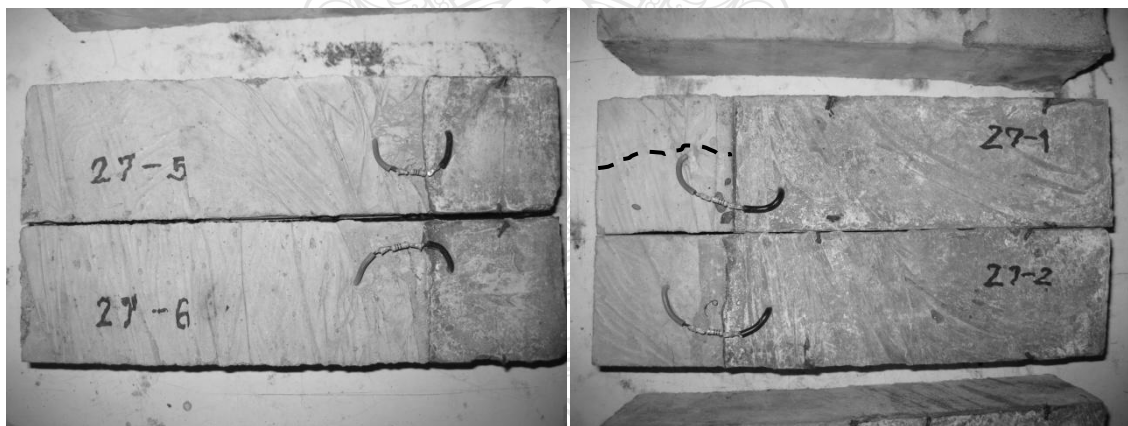
ตารางที่ 4.1 ตัวอย่างคอนกรีตด้านแอโนดที่เกิดรอยร้าว ที่ระยะเวลา 16 สัปดาห์ (ต่อ)

No.	Anode	Cathode	Cl ⁻ Diff	Anode to Cathode Ratio		
				7:21	14:14	21:7
25	OPC20FA4.0CL	CM	4	C	-	-
26	OPC20FA4.0CL	PMM	4	C	-	C
27	OPC20FA4.0CL	PRM	4	C	-	-

C หมายถึง คอนกรีตเกิดรอยร้าวขึ้นที่ตัวอย่างด้านแอโนด

- หมายถึง คอนกรีตยังไม่เกิดรอยร้าวขึ้นที่ตัวอย่างด้านแอโนด

จาก ตารางที่ 4.1 แสดงการเกิดรอยแตกร้าวของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ ตัวอย่างเริ่มปรากฏรอยแตกร้าวที่ด้านแอโนด เมื่อปริมาณคลอไรด์ไอออนที่ปนเปื้อน ในคอนกรีตด้านแอโนด สูงกว่าร้อยละ 2 โดยส่วนใหญ่แตกร้าวตัวอย่างที่พื้นที่ผิวแอโนดน้อยกว่าแคโทด เนื่องจากความเข้มข้นของกระแสมีค่าสูงกว่า และพบตัวอย่างที่อัตราส่วนแอโนดต่อแคโทด ที่เท่ากันหรือแอโนดมากกว่า เกิดรอยร้าวบริเวณใกล้เคียงกับรอยต่อระหว่างแอโนดกับแคโทด



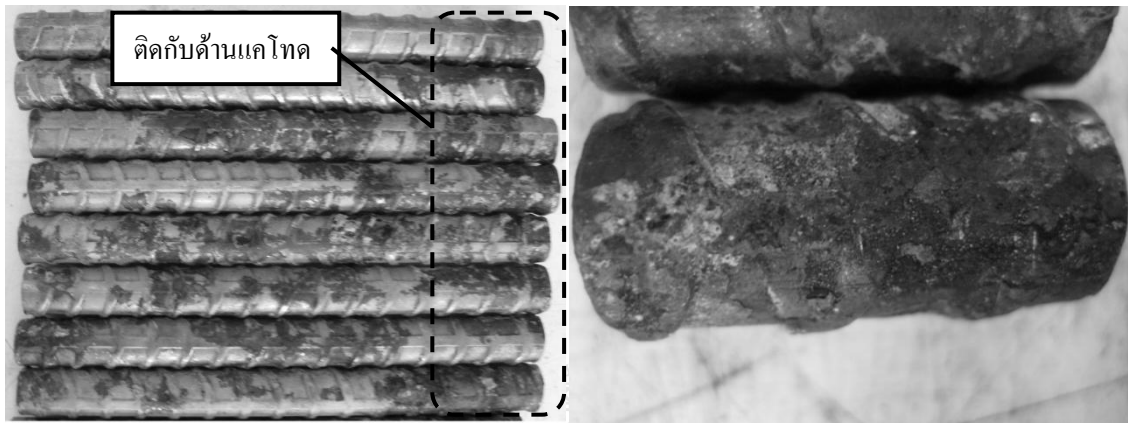
(ก) 21:7

(ข) 7:21

รูปที่ 4.25 รอยร้าวที่เกิดบนตัวอย่างที่แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 20 คลอไรด์ไอออนปนเปื้อนร้อยละ 4 และซ่อมด้วยซีเมนต์สำหรับงานซ่อมแซมบางส่วน

จาก รูปที่ 4.25 ตัวอย่างที่คลอไรด์ไอออนปนเปื้อนร้อยละ 4 เปรียบเทียบให้เห็นความแตกต่างระหว่างตัวอย่างคอนกรีตที่อัตราส่วนแอโนดต่อแคโทดแตกต่างกัน รูป 4.25 (ข) มีลักษณะร้าวเกิดตาม

แนวเหล็กเสริม สามารถประเมินได้ว่าเหล็กเสริมเกิดสนิมขึ้นที่ผิวตลอดความแนว สาเหตุส่วนหนึ่ง เนื่องจากอัตราส่วนพื้นที่ผิวเหล็กเสริมด้านแอนโนดที่น้อยกว่าด้านแคโทดทำให้เกิดสนิมและแตกร้าเร็วอย่างรวดเร็ว



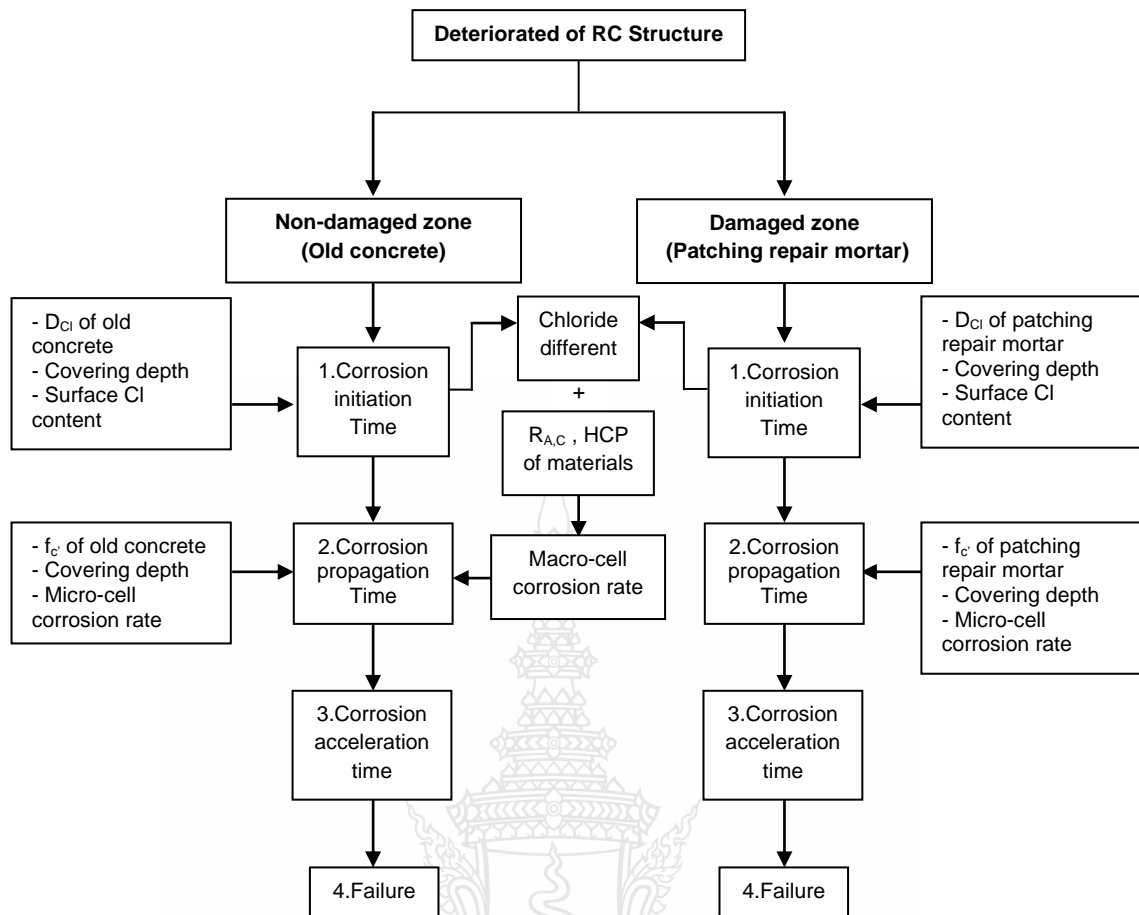
(ก) 21:7

(ข) 7:21

รูปที่ 4.26 เหล็กเสริมคอนกรีตด้านแอนโนดภายหลังการทดสอบ

จาก รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบให้เห็นความแตกต่างระหว่างเหล็กเสริมที่ใช้ในตัวอย่างด้านแอนโนดที่มีความยาวแตกต่างกัน โดยเหล็กเสริมที่สั้นกว่าจะเกิดสนิมทั่วทั้งผิว แต่เหล็กเสริมที่ยาวกว่าจะเกิดกระจายไปกันออกไปตลอดความยาว แต่ไม่เกิดโดยรอบพื้นที่ผิวเหล็กเสริม

การเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตภายหลังการซ่อมแซมแบบบางส่วน สามารถเขียนเป็นแผนผังแสดงถึงการคำนวณอัตราการเกิดสนิมเพื่อประเมินระยะเวลาการแตกร้าได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.27 กล่าวคือ ภายหลังจากคอนกรีตเกิดสนิมและได้รับการซ่อมแซมส่วนที่เสียหายแล้ว โครงสร้างจุดที่ซ่อมแซมจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ไม่ได้รับการซ่อมแซม และส่วนที่ได้รับการซ่อมแซม โดยส่วนที่ได้รับการซ่อมแซมด้วยวัสดุใหม่ สามารถคำนวณระยะเวลาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้จากสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคลอไรด์ไอออน ปริมาณคลอไรด์ที่ผิว เพื่อคำนวณการเกิดสนิมแบบ Microcell กำลังอัดของวัสดุซ่อม และระยะหุ้มเหล็กเสริม ณ ส่วนที่ไม่ได้รับการซ่อมแซมใช้การคำนวณระยะเวลาเริ่มต้นเกิดสนิมวิธีเดียวกับการคำนวณในส่วนที่ซ่อมแซม แต่ในส่วนนี้จะมีผลจากคุณสมบัติที่ต่างกันระหว่างคอนกรีตเก่าและวัสดุซ่อมแซม กล่าวคือผลจากปริมาณคลอไรด์ไอออนที่ต่างกันทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่ต่างกัน และความต้านทานไฟฟ้าที่ต่างกัน ส่งผลให้เกิดสนิมแบบ Macrocell เป็นการเร่งให้คอนกรีตเสื่อมสภาพเร็วยิ่งขึ้น



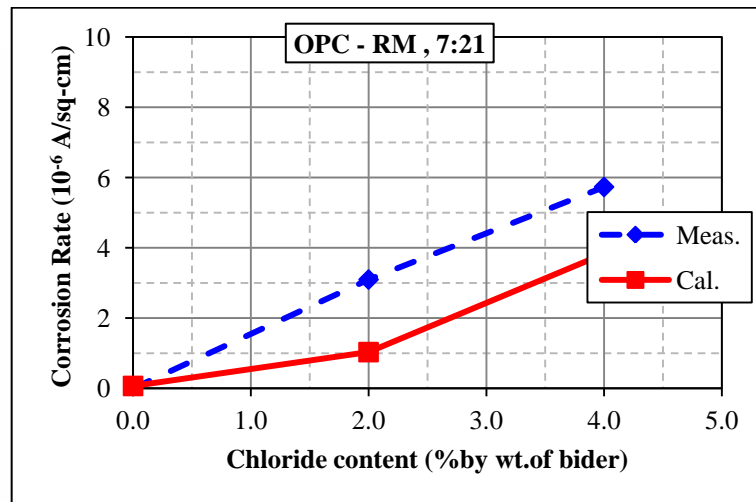
รูปที่ 4.27 ขั้นตอนการประเมินอายุโครงสร้างก่อน และภายหลังการซ่อมแซมเฉพาะที่

4.4 การประเมินอายุการใช้งาน จากผลการทดสอบศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และความต้านทานไฟฟ้า

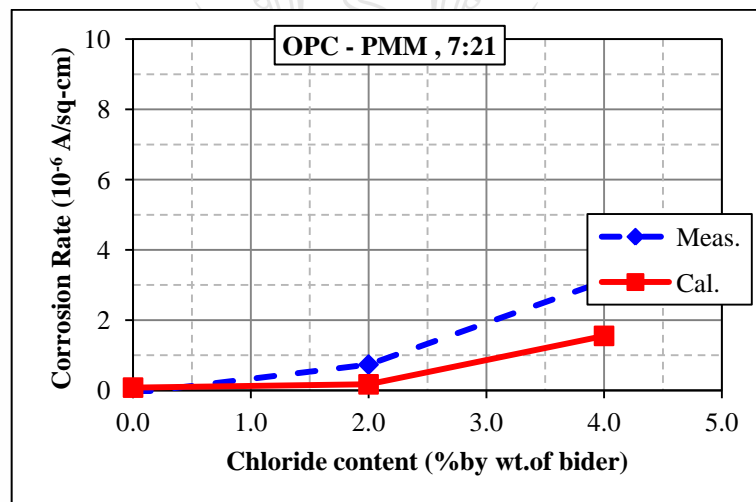
จาก รูปที่ 4.28 (ก-ค) ตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่อัตราส่วนพื้นที่ผิวแอนโอดต่อแคโทดเท่ากับ 7:21 พบว่าค่ากระแสการเกิดสนิมที่ได้จากการวัดโดยตรงด้วยโวลต์มิเตอร์ และการคำนวณจาก สมการที่ (3.3) โดยใช้ผลต่างของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ระหว่างแอนโอดกับแคโทด และค่าความต้านทานไฟฟ้า ที่วัดจากตัวอย่างนั้น ได้ผลไปในทิศทางเดียวกันและค่าใกล้เคียงกัน คือเมื่อปริมาณคลอไรด์ไอออนในตัวอย่างคอนกรีตเพิ่มขึ้น ค่ากระแสการเกิดสนิมจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณซึ่งมีค่าต่ำกว่า สาเหตุเกิดจากสภาวะความชื้นในตัวอย่างที่แตกต่างกัน เนื่องจากไม่ได้ทำการทดสอบไปพร้อมๆ กัน เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้

จากผลการวิเคราะห์นี้ทำให้ทราบว่า การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของตัวอย่างคอนกรีตด้านแอนโอดและแคโทด และวัดความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างคอนกรีตและมอร์ตาร์ สามารถ

นำค่าที่ได้ไปคำนวณหากระแสการเกิดสนิมของตัวอย่างคอนกรีตได้ค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งในการวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และความต้านทานไฟฟ้า ควรวัดไปพร้อมๆ กันเพื่อให้คอนกรีตอยู่ในสถานะเดียวกัน เป็นการลดความคลาดเคลื่อนที่จะเกิดขึ้น เมื่อได้ค่ากระแสการเกิดสนิมแล้ว ยังสามารถนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาอายุการใช้งานของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบได้

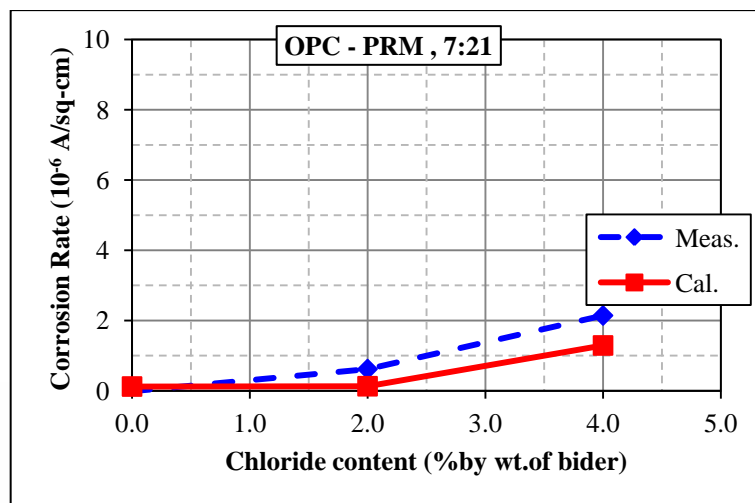


(ก) วัสดุซ่อมแซมซีเมนต์มอร์ตาร์



(ข) วัสดุซ่อมแซมโพลีเมอร์โมดิฟายด์มอร์ตาร์

รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบค่ากระแสการเกิดสนิม ระหว่างค่าที่ได้จากการวัดและการคำนวณของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่อัตราส่วนแอนโนดต่อแคโทดเท่ากับ 7:21

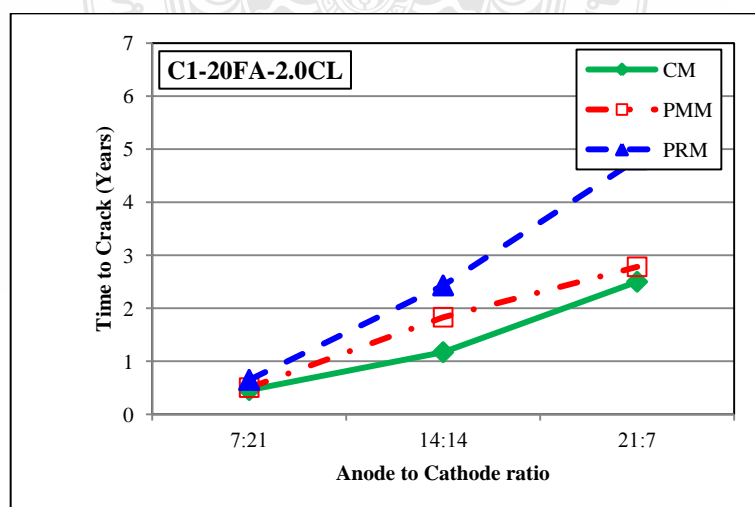


(ค) วัสดุซ่อมแซมมอร์ตาร์สำหรับซ่อมแซมบางส่วน

รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบค่ากระแสการเกิดสนิม ระหว่างค่าที่ได้จากการวัดและการคำนวณของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่อัตราส่วนแอนโนดต่อแคโทดเท่ากับ 7:21 (ต่อ)

4.5 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายสำหรับการซ่อมแซมบางส่วน

หลังจากคำนวณค่าอัตราการเกิดสนิม เพื่อหาอายุการใช้งานของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบ โดยกำหนดจากระยะเวลาที่ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบเกิดรอยร้าวขึ้นเมื่อสูญเสียน้ำหนักเหล็กเสริม 10 มก./ตร.ซม. [26] เมื่อทราบอายุการใช้งานแล้วจึงนำค่าที่ได้มาวางแผนและประเมินค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา



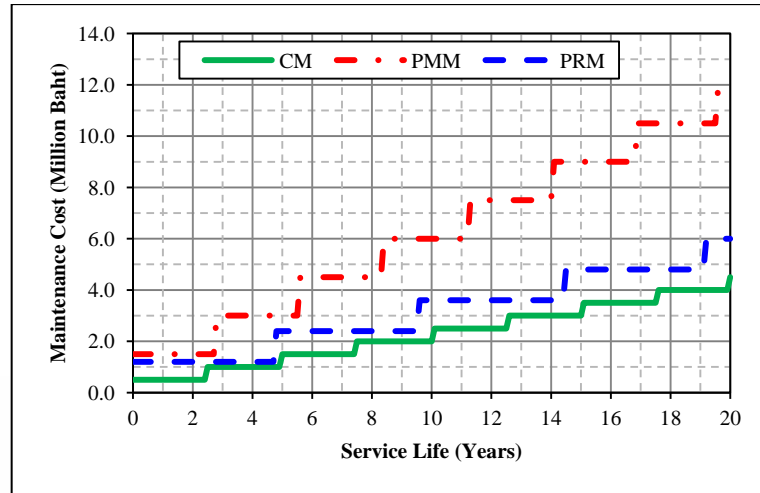
รูปที่ 4.29 อายุการใช้งานของตัวอย่างที่ปนเปื้อนคลอไรด์อ่อนร้อยละ 2

จาก รูปที่ 4.29 ตัวอย่างที่ปริมาณคลอรีนอออนปนเปื้อนร้อยละ 2 นั้น ที่อัตราส่วนแอนไอคต่อแคลโคทเท่ากับ 21:7 ตัวอย่างที่มีอายุการใช้งานเท่ากับ 2.5 ปี สำหรับตัวอย่างที่ซ่อมด้วยซีเมนต์มอร์ตาร์ 2.7 ปี สำหรับตัวอย่างที่ซ่อมด้วยโพลีเมอร์โมดิฟายด์มอร์ตาร์ และ 4.8 ปี สำหรับตัวอย่างที่ซ่อมด้วยมอร์ตาร์สำหรับซ่อมแซมบางส่วน เมื่อได้อายุการใช้งานของการซ่อมแซมแบบบางส่วนแล้ว จากนั้นเปรียบเทียบราคาของวัสดุซ่อมแซมแต่ละชนิดดัง ตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 งบประมาณที่ใช้ซ่อมแซมต่อครั้ง และวางแผนเพื่อการใช้งานเป็นเวลา 20 ปี

วัสดุซ่อมแซม	CM	PMM	PRM
ราคาต่อหน่วย (กก.)	5	15	12
พื้นที่ซ่อมแซม (ตร.ม., 5 ซม.)	1,000		
งบประมาณ (บาทต่อครั้ง)	500,000	1,500,000	1,200,000
อายุการใช้งานที่ต้องการ (ปี)	20		
อายุการใช้งานการซ่อม : ครั้ง (ปี)	2.5	2.8	4.8

จาก รูปที่ 4.30 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออายุการใช้งานของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบถึงเวลาที่ต้องการ คือ 20 ปีแล้ว ค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการซ่อมแซมเมื่อใช้วัสดุแต่ละชนิด จะแตกต่างกันออกไป เมื่อซ่อมด้วยซีเมนต์มอร์ตาร์ ค่าใช้จ่ายทั้งหมดเท่ากับ 4.5 ล้านบาท โพลีเมอร์โมดิฟายด์มอร์ตาร์ ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมเท่ากับ 12.0 ล้านบาท และเมื่อซ่อมแซมด้วยมอร์ตาร์สำหรับงานซ่อมแซมบางส่วน ค่าใช้จ่ายทั้งหมดเท่ากับ 6.0 ล้านบาท เมื่อเปรียบเทียบระหว่างวัสดุซ่อมแซมซีเมนต์มอร์ตาร์ และมอร์ตาร์สำหรับซ่อมแซมบางส่วนที่มีมูลค่างานซ่อมแซมใกล้เคียงกัน กรณีที่ต้องการควบคุมมูลค่างานซ่อมแซม สามารถใช้ได้ทั้งวัสดุประเภทซีเมนต์มอร์ตาร์และมอร์ตาร์สำหรับซ่อมแซมบางส่วน โดยที่ระยะเวลาต่อการซ่อมแซมต่อครั้งจะเป็นส่วนหนึ่งเพื่อเลือกวัสดุในการซ่อมแซมด้วย เมื่อประเมินจากแนวโน้มของกราฟถ้าอายุการใช้งานของโครงสร้างที่ต้องการเพิ่มขึ้นมากกว่า 20 ปี มูลค่างานซ่อมแซมจากการเลือกวัสดุซ่อมแซมซีเมนต์มอร์ตาร์และมอร์ตาร์สำหรับซ่อมแซมบางส่วนที่มีมูลค่างานซ่อมแซมยังคงมีมูลค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อซ่อมแซมด้วยมอร์ตาร์สำหรับงานซ่อมแซมบางส่วนจะมีค่าเพิ่มขึ้นมาก ซึ่งส่วนนี้เองจะเป็นการช่วยตัดสินใจเลือกวิธีการซ่อมแซมอีกทางหนึ่ง โดยปัจจัยหลักที่มีผลต่องบประมาณที่ใช้ซ่อมแซม ได้แก่อายุการใช้งานของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบภายหลังจากการซ่อมแซมและราคาของวัสดุที่ใช้ซ่อมแซม



รูปที่ 4.30 มูลค่างานซ่อมแซมกับอายุการใช้งานของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ



บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบ

5.1 สรุปผล

จากวัตถุประสงค์ของการศึกษาของงานวิจัย และขอบเขตของการศึกษา ภายใต้เงื่อนไขของการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 ปริมาณคลอไรด์ไอออนที่แตกต่างกันระหว่างแอนโอดและแคโทด มีผลกระทบต่อค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการเกิดสนิม คือ เมื่อค่าที่แตกต่างกันเพิ่มมากขึ้น ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ด้านแอนโอดจะมีค่าลดลง ทำให้ผลต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ระหว่างแอนโอดและแคโทดสูงขึ้น และค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตจะมีค่าสูงขึ้น

5.1.2 อัตราส่วนพื้นที่ผิวเหล็กเสริมด้านแอนโอดต่อแคโทด จะส่งผลกระทบต่อค่ากระแสการเกิดสนิม คือเมื่อขนาดพื้นที่ที่ทำการซ่อมแซมเพิ่มมากขึ้นและเหลือพื้นที่ที่ไม่ได้ซ่อมแซมน้อยลง ค่ากระแสการเกิดสนิมจะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากพื้นที่รองรับการเกิดปฏิกิริยาแคโทดิกที่ลดน้อยลง ทำให้ความเข้มของกระแสเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดสนิมจึงเพิ่มสูงขึ้น

5.1.3 คุณสมบัติด้านความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุซ่อมแซมที่สูงกว่าจะช่วยลดค่ากระแสการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีตเดิมได้ และค่ากำลังอัดของวัสดุซ่อมแซมที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

5.1.4 ตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีความต้านทานทางไฟฟ้าสูงกว่าตัวอย่างที่เป็นปูนซีเมนต์ล้วน ร้อยละ 25-50

5.1.5 การเลือกวัสดุซ่อมแซมและวิธีการซ่อมแซมที่เหมาะสม เป็นการลดอัตราการเกิดสนิมเหล็กเสริม ทำให้อายุการใช้งานของตัวอย่างที่ซ่อมแซมแบบเฉพาะที่มีอายุการใช้งานได้นานขึ้น

5.1.6 สามารถประเมินอายุการใช้งานของตัวอย่างคอนกรีต จากผลต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ด้านแอนโอดและแคโทด และความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างคอนกรีตได้

5.1.7 มูลค่างบประมาณ ที่ใช้ในการบำรุงรักษาขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก 2 ประการคือ อายุการใช้งานของตัวอย่างภายหลังการซ่อมแซมแบบบางส่วนและราคาต่อหน่วยของวัสดุที่ใช้ในการซ่อมแซม โดยที่ชนิดของวัสดุซ่อมแซมจะมีผลต่ออายุการใช้งานของตัวอย่างด้วยจากค่าความต้านทาน

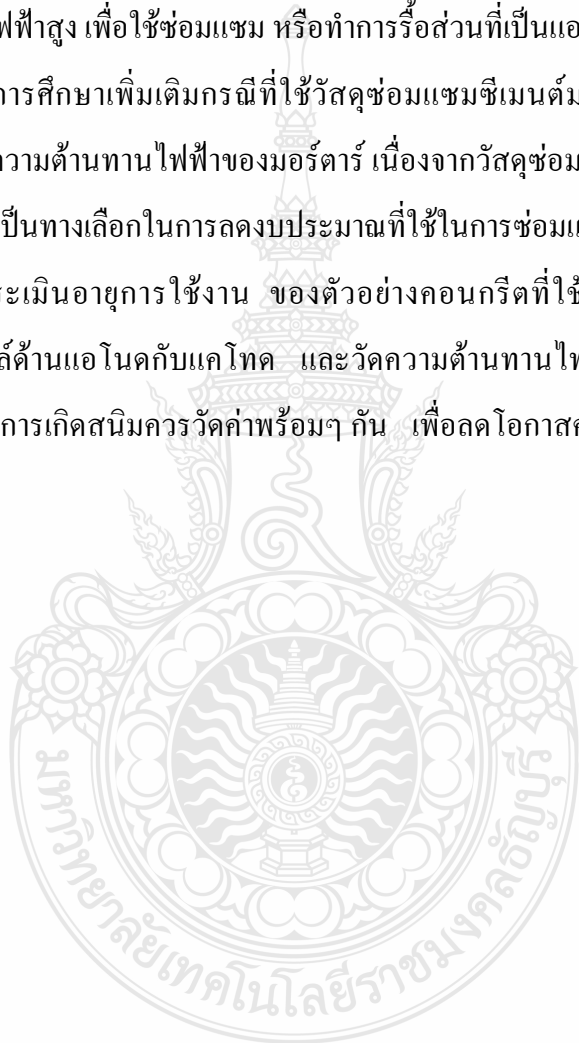
5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 คอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพจากการเกิดสนิมเนื่องจากคลอไรด์และต้องทำการซ่อมแซม หากส่วนที่ไม่ได้รับการซ่อมแซมมีปริมาณคลอไรด์ไอออนปนเปื้อนต่ำ สามารถเลือกใช้วัสดุชนิดใดซ่อมแซมก็ได้ โดยที่อัตราส่วนของพื้นที่ผิวเหล็กเสริมด้านแอโนดต่อแคโทดไม่มีผล

5.2.2 กรณีที่ปริมาณคลอไรด์ไอออนเพิ่มมากขึ้น ควรคำนึงถึงพื้นที่ที่ไม่ได้ซ่อมแซม กรณีที่พื้นที่แอโนดมีค่าน้อยมากๆ จะส่งผลทำให้อัตราการเกิดสนิมเพิ่มขึ้น ดังนั้นควรเลือกใช้วัสดุซ่อมแซมที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูง เพื่อใช้ซ่อมแซม หรือทำการรื้อส่วนที่เป็นแอโนดออกทั้งหมด

5.2.3 ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมกรณีที่ใช้วัสดุซ่อมแซมซีเมนต์มอร์ตาร์ โดยการออกแบบสัดส่วนผสมเพื่อเพิ่มความต้านทานไฟฟ้าของมอร์ตาร์ เนื่องจากวัสดุซ่อมแซมที่ขายตามท้องตลาดมีราคาต่อหน่วยสูง เพื่อเป็นทางเลือกในการลดงบประมาณที่ใช้ในการซ่อมแซม

5.2.4 การประเมินอายุการใช้งาน ของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ ด้วยการวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ด้านแอโนดกับแคโทด และวัดความต้านทานไฟฟ้าของแอโนดกับแคโทด เพื่อคำนวณหากระแสการเกิดสนิมควรวัดค่าพร้อมๆ กัน เพื่อลดโอกาสความผิดพลาดจากความชื้นที่แตกต่างกัน

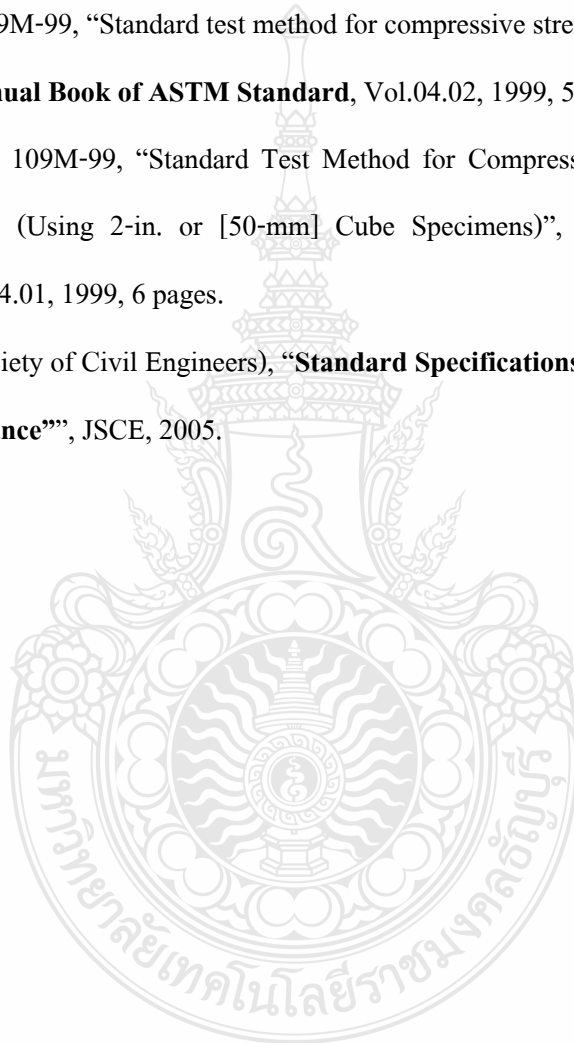


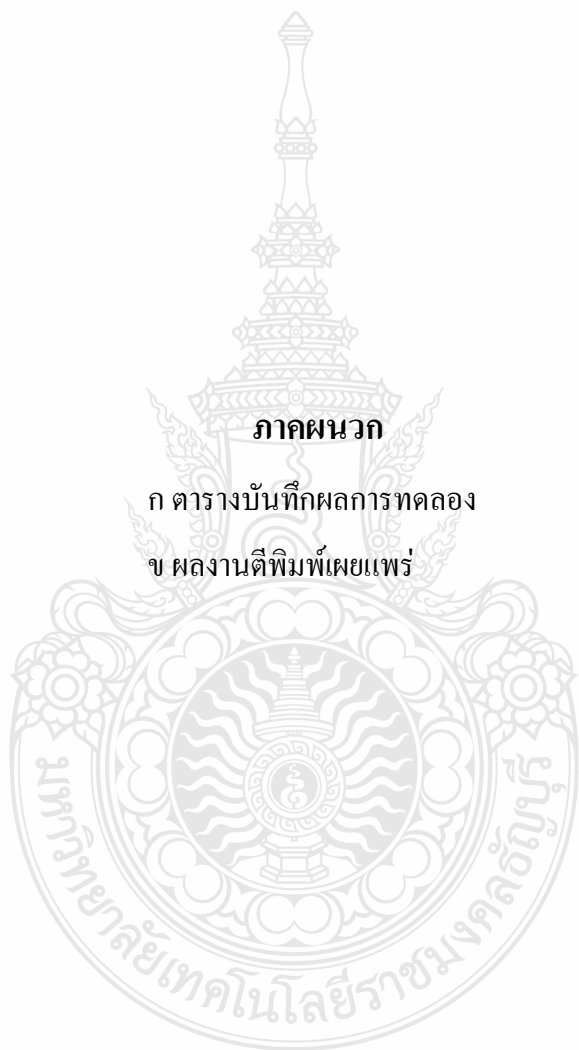
เอกสารอ้างอิง

- [1] Ha, W.S., and Saraswathy, V., “Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures – A Review”, **Int. J. Electrochem. Sci.**, Vol. 2, 2007, pp.1-28
- [2] Nanayakkara, O., and Kato, Y., “Effect of Cathodic-Anodic Ratio and Chloride Content on Macro-cell Corrosion”, **Seisan-Kenkyu**, 2008, pp.188-191
- [3] Raupach, M., “Chloride-induced macrocell corrosion of steel in concrete--theoretical background and practical consequences”, **Construction and Building Materials**, Vol. 10, No. 5, 1996, pp.329-338.
- [4] Emmons, P.H., “**Concrete Repair and Maintenance Illustrated ฉบับภาษาไทย**”, ห้างหุ้นส่วนจำกัด อินเตอร์-พับลิชชิ่ง, กรุงเทพฯ, พ.ศ.2551, 281 หน้า.
- [5] คณะอนุกรรมการคอนกรีตวัสดุ วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, “**ความทนทานของคอนกรีต**”, บริษัท จุดทอง จำกัด, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2543, 77 หน้า.
- [6] Taylor, P.C., M.A. Nagi, and D.A. Whiting, “Threshold Chloride Content for Corrosion of Steel in Concrete: A Literature Review”, **R&D Serial No.2169**, Portland Cement Association, Illinois, 1999.
- [7] ACI 201.2R-01, “**Guide to Durable Concrete – Report by ACI committee 201**”, American Concrete Institute, 2001, 41 pages.
- [8] คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ ในคณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา, ข้อกำหนดมาตรฐานวัสดุและการก่อสร้างสำหรับโครงสร้างคอนกรีต, **มาตรฐาน ว.ส.ท. 1014-40**, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, พิมพ์ครั้งที่ 1, พ.ศ. 2540.
- [9] ASTM C 876-91, “Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete”, **Annual Book of ASTM Standard**, Vol.03.02, 1999, pp.462-467.
- [10] Broomfield, A. P., “**Corrosion of Steel in Concrete**”, E&FN SPON, 1st Edition, London, United Kingdom, 1997, 240 pages.
- [11] Bentur, A., Diamond, S., and Berke N.S., “**Steel corrosion in concrete**”, E&FN SPON, 1st Edition, London, United Kingdom, 1997, 201 pages.

- [12] ASTM C 1152/C 1152M - 97, “Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete”, **Annual Book of ASTM Standard**, Vol.04.02, 1997.
- [13] Mays, G., “**Durability of Concrete Structures Investigation, Repair, Protection**”, E&FN SPON 1st Edition, London, United Kingdom, 1992, 270.
- [14] Nanayakkara, O., and Kato, Y., “Macro-cell Corrosion of Partially Repaired Concrete Member”, **Seisan-Kenkyu**, 2007, pp.263-266.
- [15] Nanayakkara, O., and Kato, Y., “Macro-cell Corrosion Considering Chloride Contents along the Reinforced Bar”, **New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia**, November, 2006, Phuket, Thailand.
- [16] Nanayakkara, O., and Kato, Y., “Time Dependency of Macro-cell Corrosion in Reinforce Concrete Member due to Material and Environmental Non-homogeneity”, **New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia**, November, 2006, Phuket, Thailand.
- [17] Qian, S., Zhang, J., and Qu, D., “Theoretical and Experimental Study of Microcell and Macrocell Corrosion in Patch Repair of Concrete Structures”, **Cement and Concrete Composites**, Vol.28, No.8, September 2006, pp.685-695.
- [18] Montemor, M.F., Simões, A.M.P., and Ferreira, M.G.S., “Chloride-induced corrosion on reinforcing steel: from the fundamentals to the monitoring techniques”, **Cement & Concrete Composites**, Vol.25, 2003, pp.491–502.
- [19] Jaggi, S., Bohno, H., and Elsener, B., “Macrocell Corrosion of Steel in Concrete – Experiments and Numerical Model”, **Associazione Italiana Metalurgia**, Eurocorr 2001, Riva di Garda, Italy.
- [20] Elsener, B., “Macrocell corrosion of steel in concrete – implications for corrosion monitoring”, **Cement & Concrete Composites**, Vol.24, 2002, pp.65–72.
- [21] ตามยศ สมยาภักดิ์, ภัควัฒน์ แสนเจริญ, ปิติศานต์ กร้ามาตร, สมนึก ตั้งเต็มศิริกุล, 2553. “ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดสนิมของการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแบบเฉพาะที่”. การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 15, 12-14 พฤษภาคม 2553, อุบลราชธานี, 2554.

- [22] ตามยศ สมยาภักดี, ภัควัฒน์ แสนเจริญ, ปิติศานต์ กร้ามาตร, สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล, 2553. “ปัจจัยที่มีผลต่ออายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับการซ่อมแซมบางส่วน”. การประชุมทางวิชาการคอนกรีตแห่งชาติครั้งที่ 6, 20-22 ตุลาคม 2553, เพชรบุรี, 2553.
- [23] ASTM G 109-99, “Standard test method for determining the effects of chemical admixtures on the corrosion of embedded steel reinforcement in concrete exposure to chloride environments”, **Annual Book of ASTM Standard**, Vol.03.02, 1997, 5 pages.
- [24] ASTM C 39/C 39M-99, “Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens”, **Annual Book of ASTM Standard**, Vol.04.02, 1999, 5 pages.
- [25] ASTM C 109/C 109M-99, “Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)”, **Annual Book of ASTM Standard**, Vol.04.01, 1999, 6 pages.
- [26] JSCE (Japan Society of Civil Engineers), “**Standard Specifications for Concrete Structures-2001 “Maintenance”**”, JSCE, 2005.







ภาคผนวก ก
ตารางบันทึกผลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ค่ากระแสการเกิดสนิมของตัวอย่าง (หน่วย $\mu\text{A}/\text{cm}^2$)

No.	Mix	A:C Ratio	Time (Days)										
			0	8	11	15	29	32	57	60	70	85	88
1	C1 / CM	7:21 Cur	-0.01	-0.01	-0.02	-0.01	-0.03	0.01	0.00	-0.01	0.00	-0.02	0.05
		14:14 Cur	0.01	0.01	0.01	0.00	-0.06	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01
		21:7 Cur	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	C1 / PMM	7:21 Cur	-0.74	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	-0.03	-0.04	-0.11	-0.05	-0.10	0.04
		14:14 Cur	-0.02	0.00	-0.01	-0.01	0.00	-0.18	-0.21	-0.10	-0.22	-0.14	-0.16
		21:7 Cur	-0.01	-0.01	0.00	-0.01	0.01	-0.01	-0.01	-0.01	0.01	-0.01	-0.01
3	C1 / PRM	7:21 Cur	0.03	-0.04	-0.02	-0.04	0.00	0.11	-0.03	-0.05	-0.03	-0.05	-0.01
		14:14 Cur	-0.01	0.00	-0.05	-0.04	-0.04	0.00	-0.02	-0.04	-0.02	-0.02	-0.01
		21:7 Cur	-0.06	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	0.03	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	0.01
4	C1-2CL / CM	7:21 Cur	5.86	4.26	4.51	4.63	2.96	3.19	2.43	2.48	2.56	2.67	2.74
		14:14 Cur	2.06	1.29	1.19	1.32	1.40	1.30	1.52	1.49	1.54	1.54	1.55
		21:7 Cur	0.82	0.59	0.79	0.80	0.63	0.51	0.52	0.55	0.54	0.49	0.53

ตารางที่ ก.1 ค่ากระแสการเกิดสนิมของตัวอย่าง (หน่วย $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) (ต่อ)

No.	Mix	A:C Ratio	Time (Days)										
			0	8	11	15	29	32	57	60	70	85	88
5	C1-2CL / PMM	7:21 Cur	3.33	0.48	0.82	0.67	0.68	0.63	0.45	0.51	0.35	0.68	0.55
		14:14 Cur	1.73	-0.02	0.10	0.24	0.40	0.47	0.36	0.40	0.39	0.54	0.45
		21:7 Cur	0.75	0.24	0.25	0.20	0.18	0.22	0.12	0.10	0.08	0.05	0.10
6	C1-2CL / PRM	7:21 Cur	3.33	0.14	0.18	-0.03	0.00	0.13	0.10	0.09	0.10	1.01	1.13
		14:14 Cur	1.13	0.51	0.63	0.55	0.44	0.52	0.36	0.41	0.51	0.58	0.52
		21:7 Cur	0.24	0.20	0.21	0.23	0.20	0.25	0.15	0.15	0.18	0.29	0.29
7	C1-4CL / CM	7:21 Cur	8.86	5.68	5.52	4.90	4.95	5.34	5.33	5.99	5.56	5.88	5.85
		14:14 Cur	5.15	1.29	0.91	1.09	1.34	0.84	1.55	1.33	1.35	1.18	1.48
		21:7 Cur	2.81	1.04	1.29	0.71	0.74	0.50	0.74	0.89	0.57	0.76	0.68
8	C1-4CL / PMM	7:21 Cur	4.98	3.36	3.42	3.09	2.93	3.20	3.63	3.57	3.30	3.09	3.00
		14:14 Cur	2.93	1.49	1.38	1.41	1.56	1.72	1.78	1.82	1.75	1.90	1.60
		21:7 Cur	2.25	0.57	0.61	0.76	0.66	0.83	0.93	0.91	0.74	0.96	0.62

ตารางที่ ก.1 ค่ากระแสการเกิดสนิมของตัวอย่าง (หน่วย $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) (ต่อ)

No.	Mix	A:C Ratio	Time (Days)										
			0	8	11	15	29	32	57	60	70	85	88
9	C1-4CL / PRM	7:21 Cur	3.30	2.89	2.14	2.11	2.57	2.32	2.41	2.20	2.07	2.29	1.86
		14:14 Cur	2.59	1.16	0.65	0.58	0.62	0.45	0.38	0.26	0.34	0.54	0.34
		21:7 Cur	2.27	0.60	0.51	0.42	0.55	0.34	0.47	0.28	0.19	0.53	0.34
10	C1-20FA / CM	7:21 Cur	0.11	-0.13	-0.59	-0.19	-0.17	-0.10	-0.14	-0.02	0.01	-0.02	0.03
		14:14 Cur	-0.02	-0.10	-0.17	-0.12	-0.04	-0.03	-0.06	-0.02	-0.02	-0.06	-0.02
		21:7 Cur	-0.04	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
11	C1-20FA / PMM	7:21 Cur	-0.17	-0.09	-0.09	-0.14	-0.11	-0.07	-0.06	-0.07	0.13	-0.09	-0.03
		14:14 Cur	-0.06	-0.02	-0.02	-0.02	-0.03	-0.03	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02
		21:7 Cur	-0.14	0.01	0.01	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01	-0.02	0.00	0.01
12	C1-20FA / PRM	7:21 Cur	0.04	0.01	-0.01	-0.02	-0.01	-0.01	-0.02	-0.01	0.44	0.02	0.02
		14:14 Cur	-0.04	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	-0.01	0.02	0.01	0.00	0.00
		21:7 Cur	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ ก.1 ค่ากระแสการเกิดสนิมของตัวอย่าง (หน่วย $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) (ต่อ)

No.	Mix	A:C Ratio	Time (Days)										
			0	8	11	15	29	32	57	60	70	85	88
16	C1-20FA-1.0CL / CM	7:21 Cur	0.13	-0.09	-0.26	-0.09	-0.14	0.04	0.04	0.02	0.08	0.05	0.10
		14:14 Cur	0.30	0.38	0.02	0.34	0.27	0.31	0.01	0.24	0.24	0.25	0.20
		21:7 Cur	0.08	0.18	0.10	0.15	0.11	0.13	0.06	0.09	0.09	0.11	0.11
17	C1-20FA-1.0CL / PMM	7:21 Cur	0.66	0.66	0.32	0.42	0.03	0.12	-0.03	-0.02	0.17	0.20	0.28
		14:14 Cur	0.08	0.11	-0.02	0.05	-0.03	0.05	0.01	0.07	0.02	0.04	0.05
		21:7 Cur	0.07	0.12	0.15	0.20	0.17	0.18	0.13	0.15	0.14	0.14	0.13
18	C1-20FA-1.0CL / PRM	7:21 Cur	0.41	0.04	-0.02	0.01	0.09	0.16	0.02	0.09	0.06	0.05	0.07
		14:14 Cur	0.08	0.04	0.05	0.03	-0.01	0.04	0.02	0.03	0.04	0.04	0.04
		21:7 Cur	0.04	0.04	0.02	0.01	0.04	0.04	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02

ตารางที่ ก.1 ค่ากระแสการเกิดสนิมของตัวอย่าง (หน่วย $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) (ต่อ)

No.	Mix	A:C Ratio	Time (Days)										
			0	8	11	15	29	32	57	60	70	85	88
19	C1-20FA-2.0CL / CM	7:21 Cur	2.91	1.36	1.12	1.68	1.85	2.03	2.22	2.38	2.48	2.76	2.72
		14:14 Cur	0.55	0.76	0.53	0.84	0.92	0.93	0.93	1.03	0.91	1.06	0.97
		21:7 Cur	0.60	0.51	0.51	0.54	0.43	0.48	0.38	0.40	0.41	0.44	0.42
20	C1-20FA-2.0CL / PMM	7:21 Cur	2.98	3.44	1.87	3.06	1.74	2.19	1.21	1.69	1.53	2.04	1.86
		14:14 Cur	0.52	0.64	0.67	0.65	0.59	0.67	0.61	0.62	0.58	0.72	0.64
		21:7 Cur	0.31	0.31	0.16	0.32	0.36	0.39	0.41	0.41	0.41	0.53	0.45
21	C1-20FA-2.0CL / PRM	7:21 Cur	5.44	2.03	2.11	1.83	1.53	1.82	1.18	1.30	1.17	1.51	1.27
		14:14 Cur	0.45	0.50	0.36	0.49	0.43	0.48	0.35	0.37	0.40	0.47	0.45
		21:7 Cur	0.16	0.22	0.22	0.23	0.17	0.19	0.21	0.23	0.14	0.29	0.26

ตารางที่ ก.1 ค่ากระแสการเกิดสนิมของตัวอย่าง (หน่วย $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) (ต่อ)

No.	Mix	A:C Ratio	Time (Days)										
			93	95	99	104	111	113	116				
1	C1 / CM	7:21 Cur	0.01	-0.01	-0.02	0.00	0.01	0.01	-0.01				
		14:14 Cur	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00				
		21:7 Cur	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00				
2	C1 / PMM	7:21 Cur	-0.10	-0.04	-0.05	-0.05	-0.04	-0.04	-0.05				
		14:14 Cur	-0.11	-0.19	-0.07	-0.15	-0.03	-0.07	-0.05				
		21:7 Cur	-0.01	0.01	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	-0.01				
3	C1 / PRM	7:21 Cur	-0.05	-0.03	0.00	-0.03	0.00	-0.02	-0.02				
		14:14 Cur	-0.03	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	-0.01	-0.01				
		21:7 Cur	0.00	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	0.00				
4	C1-2CL / CM	7:21 Cur	2.72	2.94	2.81	2.75	2.19	2.07	1.98				
		14:14 Cur	1.72	1.63	1.36	0.80	1.75	1.84	1.68				
		21:7 Cur	0.58	0.53	0.53	0.49	0.62	0.56	0.63				

ตารางที่ ก.1 ค่ากระแสการเกิดสนิมของตัวอย่าง (หน่วย $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) (ต่อ)

No.	Mix	A:C Ratio	Time (Days)										
			93	95	99	104	111	113	116				
5	C1-2CL / PMM	7:21 Cur	0.79	0.74	0.65	0.50	0.46	0.54	0.42				
		14:14 Cur	0.51	0.55	0.54	0.53	0.44	0.55	0.50				
		21:7 Cur	0.10	0.08	0.09	0.09	0.13	0.13	0.12				
6	C1-2CL / PRM	7:21 Cur	1.10	1.11	0.92	0.85	0.55	0.22	0.20				
		14:14 Cur	0.50	0.59	0.61	0.65	0.52	0.56	0.62				
		21:7 Cur	0.25	0.36	0.31	0.31	0.26	0.23	0.23				
7	C1-4CL / CM	7:21 Cur	6.00	5.73	5.35	5.28	5.74	5.69	5.54				
		14:14 Cur	1.13	0.88	1.39	1.17	1.16	1.70	1.48				
		21:7 Cur	0.88	0.59	0.48	0.40	0.85	0.56	0.79				
8	C1-4CL / PMM	7:21 Cur	2.84	2.65	2.76	2.57	2.60	2.53	2.38				
		14:14 Cur	1.94	1.77	1.70	1.28	1.39	1.77	1.75				
		21:7 Cur	0.71	0.52	0.45	0.43	0.62	0.79	0.64				

ตารางที่ ก.1 ค่ากระแสการเกิดสนิมของตัวอย่าง (หน่วย $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) (ต่อ)

No.	Mix	A:C Ratio	Time (Days)										
			93	95	99	104	111	113	116				
9	C1-4CL / PRM	7:21 Cur	1.98	1.96	1.81	1.78	1.71	1.59	1.59				
		14:14 Cur	0.31	0.21	0.19	0.17	0.29	0.30	0.16				
		21:7 Cur	0.38	0.38	0.41	0.41	0.42	0.40	0.41				
10	C1-20FA / CM	7:21 Cur	-0.04	0.01	0.00	-0.02	0.03	0.02	0.07				
		14:14 Cur	-0.03	-0.02	-0.03	-0.02	0.01	-0.02	0.03				
		21:7 Cur	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00				
11	C1-20FA / PMM	7:21 Cur	-0.06	-0.07	-0.06	-0.08	-0.09	-0.09	-0.09				
		14:14 Cur	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.02	-0.02				
		21:7 Cur	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00				
12	C1-20FA / PRM	7:21 Cur	0.03	0.01	0.07	-0.01	0.02	0.01	0.04				
		14:14 Cur	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00				
		21:7 Cur	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	-0.04	-0.01				

ตารางที่ ก.1 ค่ากระแสการเกิดสนิมของตัวอย่าง (หน่วย $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) (ต่อ)

No.	Mix	A:C Ratio	Time (Days)										
			93	95	99	104	111	113	116				
16	C1-20FA-1.0CL / CM	7:21 Cur	0.04	0.14	0.07	0.12	0.14	0.15	0.14				
		14:14 Cur	0.19	0.21	0.19	0.19	0.18	0.17	0.15				
		21:7 Cur	0.10	0.12	0.10	0.11	0.09	0.09	0.12				
17	C1-20FA-1.0CL / PMM	7:21 Cur	0.16	0.25	0.16	0.21	0.14	0.12	0.13				
		14:14 Cur	0.04	0.07	0.05	0.07	0.03	0.02	-0.02				
		21:7 Cur	0.12	0.10	0.11	0.09	0.10	0.12	0.09				
18	C1-20FA-1.0CL / PRM	7:21 Cur	0.05	0.07	0.22	0.11	0.08	0.11	0.16				
		14:14 Cur	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02				
		21:7 Cur	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03				
19	C1-20FA-2.0CL / CM	7:21 Cur	2.79	2.74	2.58	2.42	2.47	2.45	2.40				
		14:14 Cur	1.07	0.99	0.99	0.94	0.89	0.94	0.87				
		21:7 Cur	0.45	0.27	0.41	0.40	0.32	0.47	0.14				

ตารางที่ ก.1 ค่ากระแสการเกิดสนิมของตัวอย่าง (หน่วย $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) (ต่อ)

No.	Mix	A:C Ratio	Time (Days)										
			93	95	99	104	111	113	116				
20	C1-20FA-2.0CL / PMM	7:21 Cur	1.94	1.93	2.18	1.73	1.87	2.21	2.03				
		14:14 Cur	0.64	0.60	0.04	0.52	0.52	0.58	0.54				
		21:7 Cur	0.48	0.43	0.02	0.41	0.48	0.47	0.46				
21	C1-20FA-2.0CL / PRM	7:21 Cur	1.38	1.29	0.63	1.15	1.16	1.15	1.09				
		14:14 Cur	0.49	0.48	0.45	0.43	0.40	0.40	0.39				
		21:7 Cur	0.30	0.25	0.27	0.23	0.25	0.28	0.09				



ตารางที่ ก.1 ค่ากระแสการเกิดสนิมของตัวอย่าง (หน่วย $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) (ต่อ)

No.	Mix	A:C Ratio	Time (Days)										
			0	3	7	13	28	31	36	38	42	47	54
22	C1-20FA-3.0CL / CM	7:21 Cur	3.22	4.61	4.24	5.11	5.75	4.91	5.06	5.13	5.20	5.59	4.81
		14:14 Cur	1.01	1.61	1.28	1.61	1.84	2.03	1.88	1.78	1.68	1.72	1.37
		21:7 Cur	0.39	0.13	0.52	0.30	0.92	0.41	0.88	0.85	0.81	0.22	1.00
23	C1-20FA-3.0CL / PMM	7:21 Cur	1.76	1.72	1.88	3.33	3.90	3.66	3.73	3.52	3.31	3.44	3.19
		14:14 Cur	1.40	1.36	1.09	1.33	1.37	1.26	1.31	1.34	1.26	1.09	1.07
		21:7 Cur	0.33	0.84	0.70	0.45	0.63	0.52	0.41	0.28	0.40	0.25	0.55
24	C1-20FA-3.0CL / PRM	7:21 Cur	0.90	0.92	0.99	1.59	1.66	1.73	2.04	2.02	2.22	2.50	1.92
		14:14 Cur	1.05	1.12	0.77	0.93	0.86	0.78	0.82	0.85	0.85	0.86	0.78
		21:7 Cur	0.30	0.49	0.36	0.48	0.49	0.51	0.52	0.55	0.51	0.54	0.41
25	C1-20FA-4.0CL / CM	7:21 Cur	6.89	6.94	7.09	6.19	7.83	7.01	7.41	7.64	7.59	7.05	7.48
		14:14 Cur	2.76	2.00	2.24	2.50	3.13	2.94	3.09	2.82	3.35	2.52	3.04
		21:7 Cur	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ ก.1 ค่ากระแสการเกิดสนิมของตัวอย่าง (หน่วย $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) (ต่อ)

No.	Mix	A:C Ratio	Time (Days)										
			0	3	7	13	28	31	36	38	42	47	54
26	C1-20FA-4.0CL / PMM	7:21 Cur	6.69	4.03	2.71	2.57	2.97	3.20	2.96	3.69	2.91	3.15	3.60
		14:14 Cur	1.09	1.19	1.09	1.45	1.41	1.28	1.35	1.32	1.27	1.37	1.32
		21:7 Cur	1.08	0.60	0.73	0.60	0.76	0.64	0.71	0.57	0.58	0.38	0.72
27	C1-20FA-4.0CL / PRM	7:21 Cur	2.17	3.74	2.80	4.16	4.01	3.80	4.28	4.11	3.99	4.04	3.75
		14:14 Cur	1.17	0.94	1.02	1.20	1.37	1.30	1.42	1.41	1.53	1.41	1.52
		21:7 Cur	0.26	0.53	0.42	0.57	0.55	0.53	0.53	0.54	0.58	0.59	0.62



ตารางที่ ก.1 ค่ากระแสการเกิดสนิมของตัวอย่าง (หน่วย $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) (ต่อ)

No.	Mix	A:C Ratio	Time (Days)										
			56	59	86	88	107	114					
22	C1-20FA-3.0CL / CM	7:21 Cur	5.42	5.11	5.11	5.70	5.11	6.02					
		14:14 Cur	1.92	2.08	1.71	1.46	1.51	1.82					
		21:7 Cur	0.77	0.58	0.94	0.86	0.92	0.90					
23	C1-20FA-3.0CL / PMM	7:21 Cur	3.54	3.66	2.95	2.61	2.05	1.94					
		14:14 Cur	1.05	1.03	1.04	0.91	0.85	1.12					
		21:7 Cur	0.48	0.42	0.67	0.63	0.53	0.57					
24	C1-20FA-3.0CL / PRM	7:21 Cur	2.24	2.21	1.80	1.41	1.22	1.74					
		14:14 Cur	0.92	0.95	0.98	0.83	0.33	0.62					
		21:7 Cur	0.44	0.49	0.56	0.52	0.40	0.52					
25	C1-20FA-4.0CL / CM	7:21 Cur	7.35	7.54	7.52	6.92	6.61	7.34					
		14:14 Cur	3.14	2.65	2.98	2.74	2.44	2.58					
		21:7 Cur	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					

ตารางที่ ก.1 ค่ากระแสการเกิดสนิมของตัวอย่าง (หน่วย $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) (ต่อ)

No.	Mix	A:C Ratio	Time (Days)										
			56	59	86	88	107	114					
26	C1-20FA-4.0CL / PMM	7:21 Cur	3.24	2.87	3.55	2.87	2.32	2.31					
		14:14 Cur	1.35	1.35	1.31	1.20	1.18	1.12					
		21:7 Cur	0.56	0.52	0.59	0.52	0.56	0.62					
27	C1-20FA-4.0CL / PRM	7:21 Cur	4.44	4.65	5.86	5.08	3.60	4.62					
		14:14 Cur	1.45	1.40	1.37	1.28	0.93	0.86					
		21:7 Cur	0.57	0.57	0.53	0.54	0.44	0.65					



ตารางที่ ก.1 ค่ากระแสการเกิดสนิมของตัวอย่าง (หน่วย $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) (ต่อ)

No.	Mix	A:C Ratio	Time (Days)										
			0	5	12	14	17	44	46	65	72	94	121
13	C1-20FA-0.5CL / CM	7:21 Cur	0.27	0.44	0.40	0.39	0.39	0.07	0.12	0.10	0.06	0.03	0.02
		14:14 Cur	0.24	0.25	0.21	0.20	0.20	0.09	0.08	0.05	0.00	0.02	0.01
		21:7 Cur	0.07	0.14	0.06	0.09	0.07	0.06	0.05	0.05	0.04	0.02	0.03
14	C1-20FA-0.5CL / PMM	7:21 Cur	0.17	0.19	0.21	0.24	0.07	-0.30	-0.22	0.21	-0.24	-0.16	-0.08
		14:14 Cur	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		21:7 Cur	0.04	0.04	-0.01	-0.02	-0.04	-0.02	0.01	0.00	-0.03	-0.04	-0.02
15	C1-20FA-0.5CL / PRM	7:21 Cur	0.10	0.14	0.11	0.21	0.19	0.03	0.06	0.01	-0.02	0.02	0.03
		14:14 Cur	1.16	-0.01	-0.08	0.02	-0.03	0.03	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01
		21:7 Cur	0.07	-0.03	-0.01	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01

ตารางที่ ก.2 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของตัวอย่าง (หน่วย mV)

No.	Mix	A:C Ratio	Time (Days)										
			0	8	11	15	29	32	57	60	70	85	88
1	C1 / CM	7:21 HCP	-265.00	-242.50	-205.00	-190.00	-155.00	-115.00	-107.50	-107.50	-107.50	-107.50	-107.50
		14:14 HCP	-268.75	-227.50	-232.50	-191.25	-133.75	-116.25	-103.75	-103.75	-103.75	-103.75	-103.75
		21:7 HCP	-289.17	-253.33	-246.67	-235.00	-166.67	-138.33	-112.50	-112.50	-112.50	-112.50	-112.50
2	C1 / PMM	7:21 HCP	-265.00	-245.00	-215.00	-220.00	-200.00	-177.50	-175.00	-175.00	-175.00	-175.00	-175.00
		14:14 HCP	-257.50	-235.00	-230.00	-212.50	-227.50	-236.25	-262.50	-262.50	-262.50	-262.50	-262.50
		21:7 HCP	-255.00	-240.83	-235.00	-237.50	-158.33	-145.00	-144.17	-144.17	-144.17	-144.17	-144.17
3	C1 / PRM	7:21 HCP	-265.00	-292.50	-235.00	-255.00	-235.00	-210.00	-170.00	-170.00	-170.00	-170.00	-170.00
		14:14 HCP	-262.50	-276.25	-231.25	-248.75	-205.00	-215.00	-170.00	-170.00	-170.00	-170.00	-170.00
		21:7 HCP	-293.33	-252.50	-228.33	-204.17	-194.17	-207.50	-170.00	-170.00	-170.00	-170.00	-170.00
4	C1-2CL / CM	7:21 HCP	-990.00	-425.00	-460.00	-420.00	-342.50	-277.50	-305.00	-305.00	-305.00	-305.00	-305.00
		14:14 HCP	-887.50	-455.00	-428.75	-438.75	-403.75	-357.50	-375.00	-375.00	-375.00	-375.00	-375.00
		21:7 HCP	-867.50	-403.33	-420.83	-427.50	-363.33	-316.67	-327.50	-327.50	-327.50	-327.50	-327.50

ตารางที่ ก.2 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของตัวอย่าง (หน่วย mV) (ต่อ)

No.	Mix	A:C Ratio	Time (Days)										
			0	8	11	15	29	32	57	60	70	85	88
5	C1-2CL / PMM	7:21 HCP	-912.50	-380.00	-395.00	-387.50	-327.50	-302.50	-290.00	-290.00	-290.00	-290.00	-290.00
		14:14 HCP	-990.00	-330.00	-332.50	-400.00	-368.75	-373.75	-331.25	-331.25	-331.25	-331.25	-331.25
		21:7 HCP	-990.00	-458.33	-432.50	-402.50	-357.50	-338.33	-317.50	-317.50	-317.50	-317.50	-317.50
6	C1-2CL / PRM	7:21 HCP	-767.50	-360.00	-340.00	-335.00	-270.00	-270.00	-247.50	-247.50	-247.50	-247.50	-247.50
		14:14 HCP	-678.75	-447.50	-452.50	-448.75	-388.75	-365.00	-335.00	-335.00	-335.00	-335.00	-335.00
		21:7 HCP	-508.33	-445.83	-453.33	-474.17	-451.67	-418.33	-400.83	-400.83	-400.83	-400.83	-400.83
7	C1-4CL / CM	7:21 HCP	-937.50	-472.50	-492.50	-490.00	-472.50	-460.00	-450.00	-450.00	-450.00	-450.00	-450.00
		14:14 HCP	-987.50	-548.75	-588.75	-583.75	-493.75	-562.50	-491.25	-491.25	-491.25	-491.25	-491.25
		21:7 HCP	-964.17	-585.83	-582.50	-588.33	-517.50	-563.33	-512.50	-512.50	-512.50	-512.50	-512.50
8	C1-4CL / PMM	7:21 HCP	-962.50	-465.00	-515.00	-510.00	-455.00	-472.50	-452.50	-452.50	-452.50	-452.50	-452.50
		14:14 HCP	-797.50	-538.75	-560.00	-538.75	-510.00	-487.50	-502.50	-502.50	-502.50	-502.50	-502.50
		21:7 HCP	-985.00	-500.00	-520.83	-519.17	-414.17	-468.33	-491.67	-491.67	-491.67	-491.67	-491.67

ตารางที่ ก.2 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของตัวอย่าง (หน่วย mV) (ต่อ)

No.	Mix	A:C Ratio	Time (Days)										
			0	8	11	15	29	32	57	60	70	85	88
9	C1-4CL / PRM	7:21 HCP	-772.50	-552.50	-557.50	-567.50	-485.00	-507.50	-465.00	-465.00	-465.00	-465.00	-465.00
		14:14 HCP	-972.50	-525.00	-531.25	-578.75	-485.00	-543.75	-491.25	-491.25	-491.25	-491.25	-491.25
		21:7 HCP	-956.67	-549.17	-580.83	-550.83	-436.67	-478.33	-448.33	-448.33	-448.33	-448.33	-448.33
10	C1-20FA / CM	7:21 HCP	-282.50	-297.50	-292.50	-277.50	-265.00	-212.50	-177.50	-177.50	-177.50	-177.50	-177.50
		14:14 HCP	-238.75	-298.75	-298.75	-277.50	-231.25	-188.75	-196.25	-196.25	-196.25	-196.25	-196.25
		21:7 HCP	-283.33	-261.67	-245.00	-233.33	-250.00	-198.33	-170.00	-170.00	-170.00	-170.00	-170.00
11	C1-20FA / PMM	7:21 HCP	-235.00	-260.00	-270.00	-277.50	-215.00	-192.50	-167.50	-167.50	-167.50	-167.50	-167.50
		14:14 HCP	-258.75	-256.25	-256.25	-278.75	-231.25	-207.50	-183.75	-183.75	-183.75	-183.75	-183.75
		21:7 HCP	-285.83	-270.83	-250.00	-251.67	-212.50	-185.00	-147.50	-147.50	-147.50	-147.50	-147.50
12	C1-20FA / PRM	7:21 HCP	-295.00	-292.50	-282.50	-292.50	-250.00	-207.50	-152.50	-152.50	-152.50	-152.50	-152.50
		14:14 HCP	-233.75	-263.75	-271.25	-273.75	-256.25	-211.25	-171.25	-171.25	-171.25	-171.25	-171.25
		21:7 HCP	-231.67	-256.67	-241.67	-253.33	-251.67	-201.67	-175.00	-175.00	-175.00	-175.00	-175.00

ตารางที่ ก.2 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของตัวอย่าง (หน่วย mV) (ต่อ)

No.	Mix	A:C Ratio	Time (Days)										
			0	8	11	15	29	32	57	60	70	85	88
16	C1-20FA-1.0CL / CM	7:21 HCP	-347.50	-390.00	-385.00	-405.00	-395.00	-337.50	-325.00	-325.00	-325.00	-325.00	-325.00
		14:14 HCP	-427.50	-441.25	-420.00	-433.75	-406.25	-383.75	-346.25	-346.25	-346.25	-346.25	-346.25
		21:7 HCP	-443.33	-429.17	-432.50	-430.83	-413.33	-390.00	-347.50	-347.50	-347.50	-347.50	-347.50
17	C1-20FA-1.0CL / PMM	7:21 HCP	-425.00	-382.50	-382.50	-387.50	-375.00	-337.50	-302.50	-302.50	-302.50	-302.50	-302.50
		14:14 HCP	-416.25	-408.75	-408.75	-390.00	-383.75	-356.25	-340.00	-340.00	-340.00	-340.00	-340.00
		21:7 HCP	-466.67	-448.33	-444.17	-435.83	-421.67	-388.33	-360.83	-360.83	-360.83	-360.83	-360.83
18	C1-20FA-1.0CL / PRM	7:21 HCP	-402.50	-337.50	-335.00	-362.50	-352.50	-350.00	-247.50	-247.50	-247.50	-247.50	-247.50
		14:14 HCP	-387.50	-385.00	-388.75	-390.00	-357.50	-353.75	-305.00	-305.00	-305.00	-305.00	-305.00
		21:7 HCP	-393.33	-392.50	-403.33	-389.17	-373.33	-370.83	-312.50	-312.50	-312.50	-312.50	-312.50
19	C1-20FA-2.0CL / CM	7:21 HCP	-682.50	-385.00	-417.50	-412.50	-405.00	-385.00	-365.00	-365.00	-365.00	-365.00	-365.00
		14:14 HCP	-517.50	-486.25	-488.75	-482.50	-470.00	-457.50	-421.25	-421.25	-421.25	-421.25	-421.25
		21:7 HCP	-537.50	-485.83	-489.17	-497.50	-477.50	-470.00	-460.83	-460.83	-460.83	-460.83	-460.83

ตารางที่ ก.2 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของตัวอย่าง (หน่วย mV) (ต่อ)

No.	Mix	A:C Ratio	Time (Days)										
			0	8	11	15	29	32	57	60	70	85	88
20	C1-20FA-2.0CL / PMM	7:21 HCP	-565.00	-482.50	-475.00	-470.00	-447.50	-445.00	-427.50	-427.50	-427.50	-427.50	-427.50
		14:14 HCP	-505.00	-491.25	-500.00	-490.00	-461.25	-463.75	-433.75	-433.75	-433.75	-433.75	-433.75
		21:7 HCP	-499.17	-503.33	-517.50	-502.50	-478.33	-474.17	-467.50	-467.50	-467.50	-467.50	-467.50
21	C1-20FA-2.0CL / PRM	7:21 HCP	-755.00	-502.50	-492.50	-485.00	-460.00	-462.50	-395.00	-395.00	-395.00	-395.00	-395.00
		14:14 HCP	-505.00	-471.25	-506.25	-473.75	-458.75	-452.50	-418.75	-418.75	-418.75	-418.75	-418.75
		21:7 HCP	-518.33	-505.00	-511.67	-510.83	-495.83	-480.83	-479.17	-479.17	-479.17	-479.17	-479.17



ตารางที่ ก.2 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของตัวอย่าง (หน่วย mV) (ต่อ)

No.	Mix	A:C Ratio	Time (Days)											
			93	95	99	104	111	113	116					
1	C1 / CM	7:21 HCP	-107.50	-107.50	-107.50	-107.50	-107.50	-107.50	-107.50	-107.50				
		14:14 HCP	-103.75	-103.75	-103.75	-103.75	-103.75	-103.75	-83.75	-83.75				
		21:7 HCP	-112.50	-112.50	-112.50	-112.50	-112.50	-97.50	-97.50					
2	C1 / PMM	7:21 HCP	-175.00	-175.00	-175.00	-175.00	-175.00	-182.50	-182.50					
		14:14 HCP	-262.50	-262.50	-262.50	-262.50	-262.50	-231.25	-231.25					
		21:7 HCP	-144.17	-144.17	-144.17	-144.17	-144.17	-115.83	-115.83					
3	C1 / PRM	7:21 HCP	-170.00	-170.00	-170.00	-170.00	-170.00	-155.00	-155.00					
		14:14 HCP	-170.00	-170.00	-170.00	-170.00	-170.00	-147.50	-147.50					
		21:7 HCP	-170.00	-170.00	-170.00	-170.00	-170.00	-120.83	-120.83					
4	C1-2CL / CM	7:21 HCP	-305.00	-305.00	-305.00	-305.00	-305.00	-330.00	-330.00					
		14:14 HCP	-375.00	-375.00	-375.00	-375.00	-375.00	-387.50	-387.50					
		21:7 HCP	-327.50	-327.50	-327.50	-327.50	-327.50	-379.17	-379.17					

ตารางที่ ก.2 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของตัวอย่าง (หน่วย mV) (ต่อ)

No.	Mix	A:C Ratio	Time (Days)										
			93	95	99	104	111	113	116				
5	C1-2CL / PMM	7:21 HCP	-290.00	-290.00	-290.00	-290.00	-290.00	-285.00	-285.00				
		14:14 HCP	-331.25	-331.25	-331.25	-331.25	-331.25	-392.50	-392.50				
		21:7 HCP	-317.50	-317.50	-317.50	-317.50	-317.50	-330.00	-330.00				
6	C1-2CL / PRM	7:21 HCP	-247.50	-247.50	-247.50	-247.50	-247.50	-225.00	-225.00				
		14:14 HCP	-335.00	-335.00	-335.00	-335.00	-335.00	-361.25	-361.25				
		21:7 HCP	-400.83	-400.83	-400.83	-400.83	-400.83	-359.17	-359.17				
7	C1-4CL / CM	7:21 HCP	-450.00	-450.00	-450.00	-450.00	-450.00	-480.00	-480.00				
		14:14 HCP	-491.25	-491.25	-491.25	-491.25	-491.25	-507.50	-507.50				
		21:7 HCP	-512.50	-512.50	-512.50	-512.50	-512.50	-526.67	-526.67				
8	C1-4CL / PMM	7:21 HCP	-452.50	-452.50	-452.50	-452.50	-452.50	-535.00	-535.00				
		14:14 HCP	-502.50	-502.50	-502.50	-502.50	-502.50	-526.25	-526.25				
		21:7 HCP	-491.67	-491.67	-491.67	-491.67	-491.67	-507.50	-507.50				

ตารางที่ ก.2 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของตัวอย่าง (หน่วย mV) (ต่อ)

No.	Mix	A:C Ratio	Time (Days)										
			93	95	99	104	111	113	116				
9	C1-4CL / PRM	7:21 HCP	-465.00	-465.00	-465.00	-465.00	-465.00	-545.00	-545.00				
		14:14 HCP	-491.25	-491.25	-491.25	-491.25	-491.25	-527.50	-527.50				
		21:7 HCP	-448.33	-448.33	-448.33	-448.33	-448.33	-473.33	-473.33				
10	C1-20FA / CM	7:21 HCP	-177.50	-177.50	-177.50	-177.50	-177.50	-155.00	-155.00				
		14:14 HCP	-196.25	-196.25	-196.25	-196.25	-196.25	-143.75	-143.75				
		21:7 HCP	-170.00	-170.00	-170.00	-170.00	-170.00	-110.00	-110.00				
11	C1-20FA / PMM	7:21 HCP	-167.50	-167.50	-167.50	-167.50	-167.50	-175.00	-175.00				
		14:14 HCP	-183.75	-183.75	-183.75	-183.75	-183.75	-162.50	-162.50				
		21:7 HCP	-147.50	-147.50	-147.50	-147.50	-147.50	-145.83	-145.83				
12	C1-20FA / PRM	7:21 HCP	-152.50	-152.50	-152.50	-152.50	-152.50	-135.00	-135.00				
		14:14 HCP	-171.25	-171.25	-171.25	-171.25	-171.25	-132.50	-132.50				
		21:7 HCP	-175.00	-175.00	-175.00	-175.00	-175.00	-183.33	-183.33				

ตารางที่ ก.2 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของตัวอย่าง (หน่วย mV)ต่อ)

No.	Mix	A:C Ratio	Time (Days)										
			93	95	99	104	111	113	116				
16	C1-20FA-1.0CL / CM	7:21 HCP	-325.00	-325.00	-325.00	-325.00	-325.00	-237.50	-237.50				
		14:14 HCP	-346.25	-346.25	-346.25	-346.25	-346.25	-296.25	-296.25				
		21:7 HCP	-347.50	-347.50	-347.50	-347.50	-347.50	-304.17	-304.17				
17	C1-20FA-1.0CL / PMM	7:21 HCP	-302.50	-302.50	-302.50	-302.50	-302.50	-252.50	-252.50				
		14:14 HCP	-340.00	-340.00	-340.00	-340.00	-340.00	-262.50	-262.50				
		21:7 HCP	-360.83	-360.83	-360.83	-360.83	-360.83	-295.00	-295.00				
18	C1-20FA-1.0CL / PRM	7:21 HCP	-247.50	-247.50	-247.50	-247.50	-247.50	-212.50	-212.50				
		14:14 HCP	-305.00	-305.00	-305.00	-305.00	-305.00	-233.75	-233.75				
		21:7 HCP	-312.50	-312.50	-312.50	-312.50	-312.50	-280.00	-280.00				
19	C1-20FA-2.0CL / CM	7:21 HCP	-365.00	-365.00	-365.00	-365.00	-365.00	-350.00	-350.00				
		14:14 HCP	-421.25	-421.25	-421.25	-421.25	-421.25	-393.75	-393.75				
		21:7 HCP	-460.83	-460.83	-460.83	-460.83	-460.83	-405.00	-405.00				

ตารางที่ ก.2 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของตัวอย่าง (หน่วย mV) (ต่อ)

No.	Mix	A:C Ratio	Time (Days)										
			93	95	99	104	111	113	116				
20	C1-20FA-2.0CL / PMM	7:21 HCP	-427.50	-427.50	-427.50	-427.50	-427.50	-377.50	-377.50				
		14:14 HCP	-433.75	-433.75	-433.75	-433.75	-433.75	-372.50	-372.50				
		21:7 HCP	-467.50	-467.50	-467.50	-467.50	-467.50	-430.00	-430.00				
21	C1-20FA-2.0CL / PRM	7:21 HCP	-395.00	-395.00	-395.00	-395.00	-395.00	-322.50	-322.50				
		14:14 HCP	-418.75	-418.75	-418.75	-418.75	-418.75	-397.50	-397.50				
		21:7 HCP	-479.17	-479.17	-479.17	-479.17	-479.17	-426.67	-426.67				



ตารางที่ ก.2 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของตัวอย่าง (หน่วย mV) (ต่อ)

No.	Mix	A:C Ratio	Time (Days)										
			0	3	7	13	28	31	36	38	42	47	54
22	C1-20FA-3.0CL / CM	7:21 HCP	-482.50	-466.25	-450.00	-458.89	-467.78	-476.67	-485.56	-494.44	-503.33	-512.22	-521.11
		14:14 HCP	-457.50	-447.50	-437.50	-439.72	-441.94	-444.17	-446.39	-448.61	-450.83	-453.06	-455.28
		21:7 HCP	-488.33	-470.83	-453.33	-453.70	-454.07	-454.44	-454.81	-455.19	-455.56	-455.93	-456.30
23	C1-20FA-3.0CL / PMM	7:21 HCP	-437.50	-447.50	-457.50	-452.50	-447.50	-442.50	-437.50	-432.50	-427.50	-422.50	-417.50
		14:14 HCP	-490.00	-483.75	-477.50	-475.00	-472.50	-470.00	-467.50	-465.00	-462.50	-460.00	-457.50
		21:7 HCP	-495.83	-472.92	-450.00	-452.04	-454.07	-456.11	-458.15	-460.19	-462.22	-464.26	-466.30
24	C1-20FA-3.0CL / PRM	7:21 HCP	-427.50	-412.50	-397.50	-408.06	-418.61	-429.17	-439.72	-450.28	-460.83	-471.39	-481.94
		14:14 HCP	-561.25	-506.88	-452.50	-448.75	-445.00	-441.25	-437.50	-433.75	-430.00	-426.25	-422.50
		21:7 HCP	-503.33	-474.58	-445.83	-443.98	-442.13	-440.28	-438.43	-436.57	-434.72	-432.87	-431.02
25	C1-20FA-4.0CL / CM	7:21 HCP	-577.50	-518.75	-460.00	-458.89	-457.78	-456.67	-455.56	-454.44	-453.33	-452.22	-451.11
		14:14 HCP	-762.50	-596.25	-430.00	-438.61	-447.22	-455.83	-464.44	-473.06	-481.67	-490.28	-498.89
		21:7 HCP											

ตารางที่ ก.2 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของตัวอย่าง (หน่วย mV) (ต่อ)

No.	Mix	A:C Ratio	Time (Days)										
			0	3	7	13	28	31	36	38	42	47	54
26	C1-20FA-4.0CL / PMM	7:21 HCP	-635.00	-551.25	-467.50	-471.39	-475.28	-479.17	-483.06	-486.94	-490.83	-494.72	-498.61
		14:14 HCP	-533.75	-520.63	-507.50	-509.86	-512.22	-514.58	-516.94	-519.31	-521.67	-524.03	-526.39
		21:7 HCP	-650.83	-591.25	-531.67	-534.17	-536.67	-539.17	-541.67	-544.17	-546.67	-549.17	-551.67
27	C1-20FA-4.0CL / PRM	7:21 HCP	-522.50	-513.75	-505.00	-507.78	-510.56	-513.33	-516.11	-518.89	-521.67	-524.44	-527.22
		14:14 HCP	-650.00	-587.50	-525.00	-525.56	-526.11	-526.67	-527.22	-527.78	-528.33	-528.89	-529.44
		21:7 HCP	-536.67	-541.25	-545.83	-540.74	-535.65	-530.56	-525.46	-520.37	-515.28	-510.19	-505.09



ตารางที่ ก.2 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของตัวอย่าง (หน่วย mV) (ต่อ)

No.	Mix	A:C Ratio	Time (Days)										
			56	59	86	88	107	114					
22	C1-20FA-3.0CL / CM	7:21 HCP	-530.00	-481.25	-432.50	-478.75	-525.00	-470.00					
		14:14 HCP	-457.50	-411.25	-365.00	-418.75	-472.50	-342.50					
		21:7 HCP	-456.67	-401.67	-346.67	-397.50	-448.33	-346.67					
23	C1-20FA-3.0CL / PMM	7:21 HCP	-412.50	-425.00	-437.50	-425.00	-412.50	-490.00					
		14:14 HCP	-455.00	-473.13	-491.25	-473.75	-456.25	-521.25					
		21:7 HCP	-468.33	-365.42	-262.50	-372.92	-483.33	-352.50					
24	C1-20FA-3.0CL / PRM	7:21 HCP	-492.50	-450.00	-407.50	-416.25	-425.00	-465.00					
		14:14 HCP	-418.75	-380.00	-341.25	-421.25	-501.25	-398.75					
		21:7 HCP	-429.17	-398.75	-368.33	-414.17	-460.00	-432.50					
25	C1-20FA-4.0CL / CM	7:21 HCP	-450.00	-461.25	-472.50	-482.50	-492.50	-435.00					
		14:14 HCP	-507.50	-473.75	-440.00	-490.00	-540.00	-522.50					
		21:7 HCP											

ตารางที่ ก.2 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของตัวอย่าง (หน่วย mV) (ต่อ)

No.	Mix	A:C Ratio	Time (Days)										
			56	59	86	88	107	114					
26	C1-20FA-4.0CL / PMM	7:21 HCP	-502.50	-498.75	-495.00	-487.50	-480.00	-480.00					
		14:14 HCP	-528.75	-511.88	-495.00	-495.63	-496.25	-520.00					
		21:7 HCP	-554.17	-485.83	-417.50	-470.83	-524.17	-450.00					
27	C1-20FA-4.0CL / PRM	7:21 HCP	-530.00	-521.25	-512.50	-527.50	-542.50	-540.00					
		14:14 HCP	-530.00	-506.25	-482.50	-483.75	-485.00	-485.00					
		21:7 HCP	-500.00	-499.17	-498.33	-497.50	-496.67	-496.67					



ตารางที่ ก.2 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของตัวอย่าง (หน่วย mV) (ต่อ)

No.	Mix	A:C Ratio	Time (Days)										
			0	5	12	14	17	44	46	65	72	94	121
13	C1-20FA-0.5CL / CM	7:21 HCP	-345.00	-335.83	-326.67	-317.50	-308.33	-299.17	-290.00	-275.00	-265.00	-185.00	-65.00
		14:14 HCP	-326.25	-320.21	-314.17	-308.13	-302.08	-296.04	-290.00	-162.50	-225.00	-225.00	-230.00
		21:7 HCP	-265.83	-259.58	-253.33	-247.08	-240.83	-234.58	-228.33	-101.67	-215.83	-160.83	-252.50
14	C1-20FA-0.5CL / PMM	7:21 HCP	-310.00	-305.00	-300.00	-295.00	-290.00	-285.00	-280.00	-260.00	-250.00	-240.00	-185.00
		14:14 HCP											
		21:7 HCP	-215.00	-220.00	-225.00	-230.00	-235.00	-240.00	-245.00	-193.33	-243.33	-191.67	-166.67
15	C1-20FA-0.5CL / PRM	7:21 HCP	-345.00	-319.17	-293.33	-267.50	-241.67	-215.83	-190.00	-275.00	-155.00	-275.00	-190.00
		14:14 HCP	-276.25	-265.83	-255.42	-245.00	-234.58	-224.17	-213.75	-210.00	-178.75	-217.50	-152.50
		21:7 HCP	-215.83	-213.33	-210.83	-208.33	-205.83	-203.33	-200.83	-185.83	-173.33	-161.67	-161.67

ตารางที่ ก.3 ค่ากำลังอัดและความต้านทานไฟฟ้า

No.	Mix	Compressive Strength at 7 days (ksc)	Compressive Strength at 28 days (ksc)	Electrical Resistivity at 28 Days (kohm.cm)
1C	C1-0CL	352	345	45
2C	C1-2CL	334	375	33
3C	C1-4CL	301	337	22
4C	C1-20FA-0CL	247	274	61
5C	C1-20FA-0.5CL	279	353	58
6C	C1-20FA-1CL	284	355	57
7C	C1-20FA-2CL	262	342	54
8C	C1-20FA-3CL	320	367	46
9C	C1-20FA-4CL	325	372	35
1M	CM	396	419	18
2M	PMM	1011	523	60
3M	PRM	431	717	99



ภาคผนวก ข
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่





The 15th การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธา
 National Convention on Civil Engineering
 วิศวกรรมโยธากับการพัฒนาท้องถิ่น

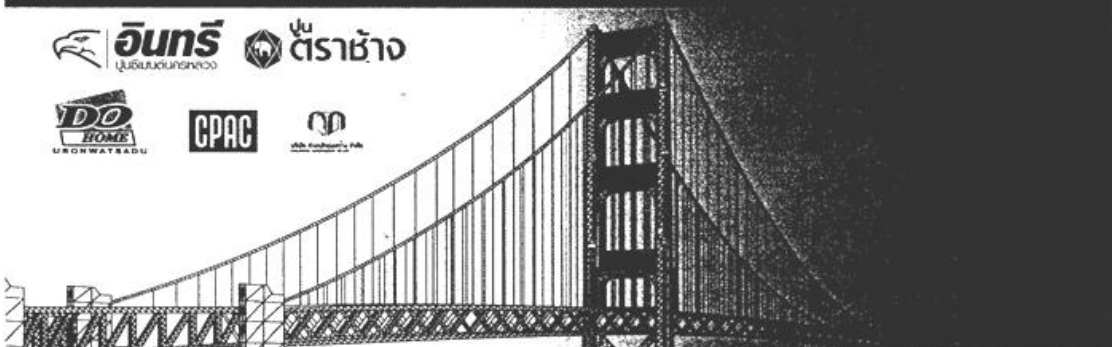


NCCE15

UBON RATCHATHANI วันที่ 12-14
 ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย
 ร่วมกับ วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์



สามพันโบก อ่างเก็บน้ำห้วยสามพันไร่ อ.เมือง จ.อุบลราชธานี





ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ
การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15

ดร.กษท เกตุชาติ
รศ.ดร.กมลวัลย์ ถือประเสริฐ
ดร.กรรณิภา รัตนพงษ์เลขา
รศ.ดร.กฤษยา เลิศโลกสมบัติ
ผศ.กฤษณ์ ศรีวรมาศ
รศ.ดร.ก่อโชค จันทร์วรรณ
ผศ.ดร.กอบป ศรีนาวัน
ดร.กำพล ทวีทรัพย์บุรณ
ผศ.ดร.กฤษณ์ ภู่วรรณ
ผศ.ดร.กิตติชัย ชนทรัพย์สิน
ผศ.ดร.กิตติศักดิ์ จันทร์วิชัย
ผศ.ดร.กิติเชษ ตันติชัยอนันต์
รศ.กิริติ ถิวิจนกุล
ผศ.ดร.เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย
ผศ.ดร.เกษม ชูจารุกุล
ดร.เกียรติศักดิ์ สหะศักดิ์มนตรี
ผศ.ดร.จรูญ รุ่งอมรรัตน์
นายจกฤกษ์ อัมบุษ
ดร.จำรัส ทิพย์ศฤงคาร
ดร.จิตติชัย รุจนกนกนาฏ
ดร.ฉัตร สุจินดา
ดร.ฉัตรภูมิ วิรัตนจันทร์
ผศ.ดร.เฉลิมเกียรติ วงศ์นิษฐาวิ
รศ.ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์
ผศ.ดร.เฉลิมชัย พาวัฒนา
ทันเอก (ผศ) ชวน จันทร์वालย์
รศ.ดร.ชาลิต นีดิรัตน์กระกุล
ศ.ดร.ชัย จาตุรทิพย์กุล
นายรัชชาญ ไชยดิถนอม

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
มหาวิทยาลัยธนบุรี
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
มหาวิทยาลัยรังสิต
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยรังสิต
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยศรีปทุม
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
มหาวิทยาลัยสยาม
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม



ดร. ชัยวัฒน์ เอกวัฒน์พานิชย์
 ดร.ชัยศรี สุขสาโรจน์
 รศ.ดร.ชิตชัย อนันตเศรษฐรัฐ
 รศ.ชินะวัฒน์ มุกตพันธุ์
 ผศ.ดร.ชีวินทร์ ถิ่นศิริ
 ผศ.ดร.ชูชัย สุจิรวงศ์
 นายชุกกลพัศ เจนจิวัฒนกุล
 รศ.ดร.จิรวัดกร บุญญะฐิติ
 พันตรี ฌรัฐพร นุคยะสกุล
 นายคณัย วันทยาการ
 ผศ.ดร.คณเดช ตั้งตระการพงษ์
 ดร.คณฤฎี สติรเศรษฐทวี
 ดร.ณนัฏกิจ ชารีรัตน์
 ดร.ถิรยุทธ ลิมานนท์
 นายทรงพล จารุวิศิษฎ์
 ผศ.ดร.ทรงวุฒิ เสงพระธานี
 ผศ.ดร.ทวีชัย สำราญวานิช
 ดร.ทวีศักดิ์ จิรชนถาวร
 ผศ.ดร.ทวีศักดิ์ วั่งไพศาล
 ดร.เทอดศักดิ์ รุ่งวิริยะพานิช
 ผศ.ดร.ธนกร ทวีวุฒิ
 ผศ.ดร.ธนาคล คงสมบูรณ์
 รศ.ดร.ธนิต เฉลิมยานนท์
 ผศ.ดร.ธเนศ ศรีศิริโรจนกร
 ดร.ธเนศ เสถียรนาม
 ดร.ธรรมบุญ สุสำเภา
 ดร.ธรรมบุญ รัตมีมาสเมือง
 ผศ.ดร.ธรรมศักดิ์ รุจิระขรรจง
 ดร.ธวัชชัย ต้นชัยสวัสดิ์
 ผศ.ดร.ธวัชวีร์ ถิละวัฒน์
 นายธินพัฒน์ ชวพิทักษ์ธรรม
 ดร.ธีรพงศ์ จันทร์เพ็ง
 นายธีรพล ไควสุวรรณ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 มหาวิทยาลัยขอนแก่น
 มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 มหาวิทยาลัยสยาม
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยนเรศวร
 มหาวิทยาลัยนเรศวร
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
 มหาวิทยาลัยบูรพา
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
 มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
 มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 มหาวิทยาลัยขอนแก่น
 มหาวิทยาลัยรังสิต
 มหาวิทยาลัยบูรพา
 มหาวิทยาลัยรังสิต
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
 มหาวิทยาลัยมหิดล
 มหาวิทยาลัยสยาม
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร



รศ.ดร.นคร กุวัโรดม
 ศศ.ดร.นท. แสงเทียน
 นายสนิท สุริยานนท์
 ศศ.ดร.นพดล จอกแก้ว
 ศศ.ดร.นเรศ ลิ้มสัมพันธ์เจริญ
 ศศ.นัฐวุฒิ ทิพย์โยธา
 ดร.นันทวัฒน์ ขมหวาน
 รศ.ดร.บรรเจิด พละการ
 รศ.ดร.บัญญัติ ขวัญยืน
 รศ.ดร.บุรฉัตร ฉัตรวีระ
 รศ.ดร.เบญจพล เวทย์วีวัฒน์
 ดร.ปกรณ์ คิชูกิจ
 ดร.ปนัดดา กสิกิจวิวัฒน์
 ดร.ประยงค์ กิระดิอุไร
 ดร.ประวีณ ชมปรีดา
 นายปริญญา สุภศรี
 ดร.ปรีดา พิษยาพันธ์
 ดร.ปรียาพร โภษา
 ดร.ปฤษฎัศว์ ศีตะปันย์
 ศศ.ดร.ปาจรีย์ ทองสนิท
 รศ.ดร.ปิติ สุคนธสุขกุล
 ดร.ปิยนุช เวทย์วีวัฒน์
 ศศ.ดร.ปิยะ โชติกไกร
 นายพงศกร พรรณรัตน์ศิลป์
 ศศ.ดร.พนกฤษณ คลังบุญครอง
 ศศ.ดร.พรเกษม จงประดิษฐ์
 ศศ.ดร.พรพจน์ ต้นเส็ง
 ดร.พฤทธิพงษ์ สิงหศิริราช
 ศศ.ดร.พลวิท บัวศรี
 รศ.ดร.พานิช วุฒิพฤษ์
 ดร.พิสิทธิ์ ชันฉวีพัฒนกุล
 ศศ.พุทธพร แสงเทียน
 ดร.พุทธพิล คำรงค์ชัย

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
 มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
 มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
 มหาวิทยาลัยมหิดล
 บริษัท SECCO จำกัด มหาชน
 มหาวิทยาลัยนเรศวร
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
 มหาวิทยาลัยนเรศวร
 มหาวิทยาลัยนเรศวร
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
 มหาวิทยาลัยขอนแก่น
 มหาวิทยาลัยขอนแก่น
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
 สำนักวางแผน กรมทางหลวง
 มหาวิทยาลัยศรีปทุม
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
 มหาวิทยาลัยรังสิต
 มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่



ผศ.ดร.ไพรัตน์ แก้วสาร
 ผศ.ภาคภูมิ มงคลสังข์
 ผศ.ดร.ภาสกร ชัยวิริยะวงศ์
 ผศ.ดร.มาโนช โลหเตปานนท์
 ดร.รังสรรค์ อุดมศรี
 ดร.รัฐภูมิ ปรีชาตปรีชา
 ผศ.ราชภัทร รัตนวราห
 ผศ.ดร.เรืองรุ่งณ์ ชีระโรจน์
 ผศ.ฤกษ์ชัย ศรีวรมาศ
 ดร.วรพงษ์ ศรีโสพล
 ผศ.ดร.วรพจน์ ประชาเสรี
 ผศ.ดร.วรมณวิทย์ เต็มทอง
 ดร.วรมณสิริ พันธุ์ไธ
 ดร.วรามศวรร วิเชียรแสน
 ดร.วิจันนท์ มัคคิตานนท์
 ผศ.ดร.วชรภูมิ เบญจโอฬาร
 รศ.ดร.วัชรินทร์ กาสลัก
 รศ.วัชรินทร์ วิทกุล
 รศ.ดร.วันชัย เทพรักษ์
 ผศ.ดร.วันชัย ขอดสุใจ
 ดร.วันชัย สะตะ
 ผศ.ดร.วัลยา วิริยะเสนกุล
 รศ.วิชัย เขี้ยววีรชน
 รศ.ดร.วิชัย กิจวัตรเวทย์
 ดร.วิชุดา ใคว์ชนพานิช
 ผศ.ดร.วิเชียร ปลื้มกมล
 ผศ.ดร.วินัย อวยพรประเสริฐ
 รศ.วินัย ศรีอำพร
 ผศ.ดร.วิภาดา สนั่นราษฎร์
 รศ.ดร.วิโรจน์ ศรีสุรภานนท์
 ผศ.ดร.วิวัฒน์ พัทธศานานนท์
 รศ.วิสูตร จิระคำแกง
 รศ.ดร.วีรยา ฉิมอ้อย

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
 มหาวิทยาลัยสยาม
 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 มหาวิทยาลัยนเรศวร
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
 มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
 มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
 มหาวิทยาลัยมหิดล
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
 มหาวิทยาลัยมหิดล
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
 มหาวิทยาลัยขอนแก่น
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
 มหาวิทยาลัยขอนแก่น
 มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
 มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
 มหาวิทยาลัยขอนแก่น
 มหาวิทยาลัยรังสิต
 มหาวิทยาลัยขอนแก่น
 มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
 มหาวิทยาลัยรังสิต
 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์



รศ.วีระ หอสกุลโท	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ดร.ศมณพร สิทธิบาท	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ดร.ศิริคล ศิริธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ดร.ศิริชัย ตันรัตนวงศ์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.ศิริลักษณ์ ชุ่มชื่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
รศ.ดร.ศุภกิจ นนทนานันท์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ดร.ศุภโชค มีอำพล	สำนักสำรวจและออกแบบ กรมทางหลวง
รศ.ดร.สงวน ปัทมธรรมกุล	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
รศ.ดร.สถาพร โภคา	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ.ดร.สนิท วงษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สมชาย ปฐมศิริ	มหาวิทยาลัยมหิดล
ดร.สมชาย ประสงค์พันธ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.สมชาย ปฐมศิริ	มหาวิทยาลัยมหิดล
ศ.ดร.สมนึก ตังเคิมสิริกุล	สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร
รศ.ดร.สมบัติ ชื่นชูกลิ่น	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.สมปรารถนา ฤทธิ์พริ้ง	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.สมภพ สอนงรายธุร์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ.สมศักดิ์ เอื้ออรรณาสัย	มหาวิทยาลัยรังสิต
ผศ.ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ดร.สยาม ยิ้มศิริ	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผศ.ดร.สรรเพชญ์ ชื่อนิติไพศาล	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ดร.สรันภกร เหมะวิบูลย์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผศ.ดร.สตีกรณีย์ เหลืองวิเศษเจริญ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.สหลาภ หอมวุฒิมังค์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รศ.ดร.สันติ ชินานูวัตินวงศ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ดร.สำเริง รักซ้อน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครเหนือ
ผศ.ดร.สิทธา เจนศิริศักดิ์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รศ.ดร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รศ.ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รศ.ดร.สุจิต คุนชนกุลวงศ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.สุชัยวีร์ สุวรรณสวัสดิ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.สุชาติ ถิมกตัญญู	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผศ.ดร.สุเชษฐ์ ถิชาติเลอสรวง	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ดร.สุภารัตน์ คำปลิว
ผศ.ดร.สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์
ผศ.ดร.สุนิรัตน์ กุศลาศัย
ดร.สุนภา สิริพัฒนากุล
ดร.สุเมธ อังกกิตติกุล
ดร.สุเมศวร์ พิริยะวัฒน์
รศ.ดร.สุวิมล สัจจวาณิชย์
ผศ.ดร.เสรี จันทโรยธา
ดร.เหมือนมาศ วิเชียรสินธุ์
ผศ.ดร.อดิษฐ์ พรพรหมินทร์
ผศ.ดร.อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง
รศ.ดร.อนิรุทธ์ ชงไชย
ผศ.ดร.อนุชิต อุชายภิชชาติ
ดร.อภินิติ โชติสังกาศ
ดร.อารีชา ฤทธิมา
ดร.อำพล การณสุนทวงษ์
ผศ.อิทธิพงษ์ พันธุ์นิกุล
ดร.อุมา สีนุญเรื่อง
ดร.เอกชัย สุมาลี
รศ.อเนก ศิริพานิชกร

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
สถาบันวิจัยเพื่อการพัฒนาประเทศไทย
มหาวิทยาลัยบูรพา
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยมหิดล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
Hong Kong Polytechnic University
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี



สารบัญบทคัดย่อ (ต่อ)

	หน้า
MAT022	194
ผลกระทบของปริมาณคลอไรด์และสัดส่วนผสมคอนกรีตต่อประสิทธิภาพของสารยับยั้ง การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ EFFECT OF CHLORIDE CONTENT AND MIX PROPORTION ON EFFECTIVENESS OF CORROSION INHIBITOR TO PREVENT CORROSION OF REINFORCING STEEL ปกานันท์ ปรารมภ์, วันศิริ วรรณวิจิตร, ภักวดีณ์ แสนเจริญ, วิทิต ปานสุข, สมนึก ตั้งเดิมศิริกุล	
MAT023	196
การซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยการดึงคลอไรด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี REHABILITATION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURE BY ELECTROCHEMICAL CHLORIDE REMOVAL METHOD วิศิษ แซ่ลิ้ม, วันชัย ยอดสุดใจ	
MAT024	197
การศึกษากำลังรับแรงคดของบล็อกดินซีเมนต์เสริมใยไหม THE STUDY OF FLEXURAL STRENGTH OF SOIL CEMENT BLOCKS REINFORCED WITH BAMBOO FIBER วัลลีย์ เขยชม, สำเนียง ณ ตะกั่วทุ่ง, วุฒินัย กกกำแหง	
MAT025	198
ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ผสมผงหินปูน CHLORIDE PENETRATION RESISTANCE AND CHLORIDE THRESHOLD CONTENT OF CONCRETE WITH LIMESTONE POWDER ชัยเฉลิม ราศรี, ทวีชัย สำราญวานิช, เฉลิมชัย วาณิชย์สำเภา, สมนึก ตั้งเดิมศิริกุล	
MAT026	199
ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดสนิมของการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก แบบเฉพาะที่ EFFECTS OF MACROCELL CORROSION ON DURABILITY OF PATCHING REPAIR OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURE คามยศ สมชายภักดี, ภักวดีณ์ แสนเจริญ, ปิติศานต์ กรำมาตร, สมนึก ตั้งเดิมศิริกุล	
MAT027	201
การศึกษาอิโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำขานอ้อยผสมตะกอนน้ำประปา A STUDY OF GEOPOLYMER MORTAR FROM BAGASSE ASH AND WATER SUPPLY SLUDGE อธิกา วงศ์กวานกลม, สหลาก หอมวุฒิวงษ์	
MAT029	202
PREDICTION OF CRACKING AGE OF CONCRETE DUE TO RESTRAINED SHRINKAGE Sontaya Tongaroonsri, Somnuk Tangtermsirikul	
MAT030	203
ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย CHLORIDE PENETRATION RESISTANCE AND CHLORIDE THRESHOLD OF FLYASH CONCRETE วสุ วิทย์เขตปลา, ทวีชัย สำราญวานิช, ภักวดีณ์ แสนเจริญ, สมนึก ตั้งเดิมศิริกุล	



ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดสนิมของการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแบบเฉพาะที่
EFFECTS OF MACROCELL CORROSION ON DURABILITY OF PATCHING REPAIR
OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURE

ตามยศ สมยาภักดี (Tamyot Somyapakdee)¹
ภักวิวัฒน์ แสนเจริญ (Pakawat Sanchareon)²
ปิศิษานต์ กร้ามาตร (Pitisan Krammart)³
สมนึก ตั้งเดิมสิริกุล (Somnuk Tangtermsirikul)⁴

¹นักศึกษารัฐวิद्याโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

(somyapakdee@hotmail.com)

²นักวิจัย ดร. ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
และ ห้องปฏิบัติการการผลิตและออกแบบสำหรับอุตสาหกรรมเซรามิกส์, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

(pakawat@siit.tu.ac.th)

³ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี(pitisan_k@mutt.ac.th)

⁴ศาสตราจารย์ ดร. ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

(somnuk@siit.tu.ac.th)

บทคัดย่อ : โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับการซ่อมแซมความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการกัดกร่อน มักพบปัญหาที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างคอนกรีตภายหลังการซ่อมแซมแบบเฉพาะที่ คือ การเกิดสนิมอีกครั้งในระยะเวลาอันสั้น โดยเฉพาะบริเวณรอยต่อระหว่างคอนกรีตเก่ากับวัสดุซ่อมแซม จุดประสงค์ของการวิจัยครั้งนี้ก็เพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเกิดสนิมในเหล็กเสริมของการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตแบบเฉพาะที่ ตัวอย่างที่ทดสอบแบ่งเป็นสองฝั่งคือคอนกรีตเก่าและวัสดุซ่อมแซม โดยแปรผันปริมาณคลอไรด์ไอออนในแง่ตัวอย่างคอนกรีตเก่า ร้อยละ 0, 2, 4 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวเหล็กเสริมของคอนกรีตเก่าและพื้นที่ผิวเหล็กเสริมของวัสดุซ่อมแซม ได้แก่ 3:17, 10:10 และ 17:3 วัสดุที่ใช้ซ่อมแซมได้แก่ ซีเมนต์มอร์ตาร์ มอร์ตาร์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยวัสดุโพลีเมอร์ และมอร์ตาร์สำหรับงานซ่อมแซม โดยทดสอบวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ และวัดค่ากระแสไฟฟ้า ผลการทดสอบพบว่า ปริมาณคลอไรด์ไอออนที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อค่าการกัดกร่อนของเหล็กเสริมคอนกรีตเพิ่มขึ้น อัตราส่วนพื้นที่ผิวเหล็กเสริมด้านแอโนดและแคโทดมีผลต่อค่าการกัดกร่อนเมื่อปริมาณคลอไรด์ไอออนเพิ่มขึ้น วัสดุซ่อมแซมที่มีความทึบน้ำมากมีผลทำให้กระแสที่เกิดขึ้นนั้นน้อยลง การเลือกใช้วัสดุสำหรับซ่อมแซมที่ถูกต้องเหมาะสมจะเป็นการลดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมอายุการใช้งานของโครงสร้างหลังซ่อมแซมจะนานขึ้น เป็นการลดค่าใช้จ่ายสำหรับซ่อมบำรุง สุดท้ายเพื่อเป็นแนวทางในการเสนอวิธีซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กให้มีความคงทน

ABSTRACT : Corrosion of reinforcing steel in RC structure due to chloride is one of major mechanisms deteriorating RC structure. After damaged structure had been repaired, re-deterioration of structure occurs rapidly. The purpose of this research is to clarify the effects of patching repair on durability of repaired RC structure to corrosion rate. Specimen was divided into two parts: old concrete

บทความนี้จะไม่สมบูรณ์ หากไม่มีจดหมายยืนยันการเข้าร่วมประชุม NCCCEIS

: 199 :



and repaired material. For old concrete, difference chloride content was mixed into the concrete as well as different concrete mix proportion (0%, 2%, 4% by weight of binder). Also difference repair materials (cement mortar, polymer modified mortar, and patch repair mortar) were studied. Embedded reinforcing steel were divided steel in old concrete and repair material portion. The length of embedded steel were varied to study the effect of ratio of the area between anode and cathode (3 : 17 , 10:10 , 17:3). Corrosion current and half-cell potential were measured. Results, increment of chloride ion content and anodic area to cathodic area has effect to corrosion current on reinforcement. Repair materials that are more permeability has decrease on corrosion. Selection of materials for repair appropriate reduce corrosion current of reinforcing steel and reduce costs of maintenance. Finally, guideline to evaluate service life of repaired structure was purpose in order to durable structure.

KEYWORDS : Patch repair, Corrosion, Chloride, Macro-cell, Half-cell potential



ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดสนิมของการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแบบเฉพาะที่
EFFECTS OF MACROCELL CORROSION ON DURABILITY OF PATCHING REPAIR
OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURE

ตามยศ สมยาภักดี (Tamyot Somyapakdee)¹

ภักววัฒน์ แสนเจริญ (Pakawat Sanchareon)²

ปิติสานต์ กร้ามาตร (Pitisan Krammart)³

สมนึก ตังติ่มสิริกุล (Somnuk Tangtermsirikul)⁴

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

somyapakdee@hotmail.com

²นักวิจัย คร. ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

และ ห้องปฏิบัติการการผลิตและออกแบบสำหรับอุตสาหกรรมเซรามิกส์, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

pakawat@siit.tu.ac.th

³ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คร. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี pitisan_k@rmu.ac.th

ศาสตราจารย์ คร. ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

somnuk@siit.tu.ac.th

บทคัดย่อ : โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับการซ่อมแซมความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการกัดกร่อน มักพบปัญหาที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างคอนกรีตภายหลังการซ่อมแซมแบบเฉพาะที่ คือ การเกิดสนิมอีกครั้งในระยะเวลาอันสั้น โดยเฉพาะบริเวณรอยต่อระหว่างคอนกรีตเก่ากับวัสดุซ่อมแซม จุดประสงค์ของการวิจัยครั้งนี้ก็เพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเกิดสนิมในเหล็กเสริมของการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตแบบเฉพาะที่ ตัวอย่างที่ทดสอบแบ่งเป็นสองฝั่งคือคอนกรีตเก่าและวัสดุซ่อมแซม โดยแปรผันปริมาณคลอไรด์ไอออนในแท่งตัวอย่างคอนกรีตเก่า ร้อยละ 0, 2, 4 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวเหล็กเสริมของคอนกรีตเก่าและพื้นที่ผิวเหล็กเสริมของวัสดุซ่อมแซม ได้แก่ 3:17, 10:10 และ 17:3 วัสดุที่ใช้ซ่อมแซมได้แก่ ซีเมนต์มอร์ตาร์ มอร์ตาร์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยวัสดุ โพลีเมอร์ และมอร์ตาร์สำหรับงานซ่อมแซม โดยทดสอบวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ และวัดค่ากระแสไฟฟ้า ผลการทดสอบพบว่า ปริมาณคลอไรด์ไอออนที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อค่าการกัดกร่อนของเหล็กเสริมคอนกรีตเพิ่มขึ้น อัตราส่วนพื้นที่ผิวเหล็กเสริมด้านแอโนดและแคโทดมีผลต่อค่าการกัดกร่อนเมื่อปริมาณคลอไรด์ไอออนเพิ่มขึ้น วัสดุซ่อมแซมที่มีความหิบน้ำมากมีผลทำให้กระแสที่เกิดขึ้นน้อยลง การเลือกใช้วัสดุสำหรับซ่อมแซมที่ถูกต้องเหมาะสมจะเป็นการลดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมอายุการใช้งานของโครงสร้างหลังซ่อมแซมจะนานขึ้น เป็นการลดค่าใช้จ่ายสำหรับซ่อมบำรุง สุดท้ายเพื่อเป็นแนวทางในการเสนอวิธีซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กให้มีความคงทน

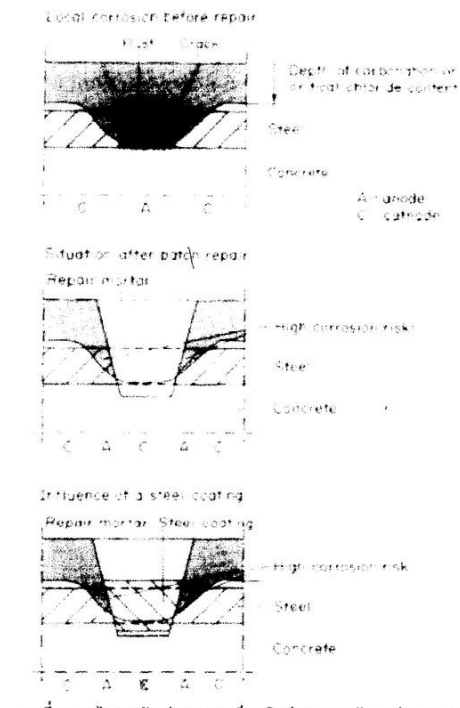
ABSTRACT : Corrosion of reinforcing steel in RC structure due to chloride is one of major mechanisms deteriorating RC structure. After damaged structure had been repaired, re-deterioration of structure occurs rapidly. The purpose of this research is to clarify the effects of patching repair on durability of repaired RC structure to corrosion rate. Specimen was divided into two parts: old concrete and repaired material. For old concrete, difference chloride content was mixed into the concrete as well as different concrete mix proportion (0%, 2%, 4% by weight of binder). Also difference repair materials (cement mortar, polymer modified mortar, and patch repair mortar) were studied. Embedded reinforcing steel were divided steel in old concrete and repair material portion. The length of embedded steel were varied to study the effect of ratio of the area between anode and cathode (3 :17 , 10:10 , 17:3). Corrosion current and half-cell potential were measured. Results, increment of chloride ion content and anodic area to cathodic area has effect to corrosion current on reinforcement. Repair materials that are more permeability has decrease on corrosion. Selection of materials for repair appropriate reduce corrosion current of reinforcing steel and reduce costs of maintenance. Finally, guideline to evaluate service life of repaired structure was purpose in order to durable structure.

KEYWORDS : Patch repair, Corrosion, Chloride, Macro-cell, Half-cell potential

1. บทนำ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีสมรรถภาพด้านความแข็งแรงเป็นอย่างมาก และทนต่อเงื่อนไขการทำอันตรายจากสิ่งแวดล้อมหลากหลายชนิด อย่างไรก็ตาม ความเสียหายในโครงสร้างยังคงมีโอกาสปรากฏขึ้นจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริม โดยคลอไรด์ไอออน ซึ่งเป็นหนึ่งในกลไกการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่สำคัญ ผลจากการกัดกร่อนทำให้เกิดการสูญเสียพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม การแตกร้าวหลุดร่อนของคอนกรีต การซ่อมแซมส่วนคอนกรีตที่เสียหายที่ใช้กันโดยทั่วไปคือการซ่อมแบบเฉพาะที่ด้วยวิธีฉาบปะ จากมอร์ตาร์หรือคอนกรีต [1,2]

หลังจาก โครงสร้างได้รับการซ่อมแซมเฉพาะส่วนที่ได้รับ ความเสียหายเกิดขึ้น ความเสี่ยงที่จะเกิดการกัดกร่อนภายหลังการซ่อมแซมเฉพาะที่ เนื่องจากที่คอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมนั้นไม่มีคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวกัน บริเวณที่ใกล้เคียงจุดที่ได้รับการซ่อมแซม จะเกิดความเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริมภายในระยะเวลาไม่นานภายหลังจากการซ่อม [3] ดังแสดงในภาพที่ 1 การวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาตัวอย่างคอนกรีตในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่ากระแสการกัดกร่อนบนเหล็กเสริมคอนกรีตหลังจากที่โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้รับการซ่อมแซมแบบเฉพาะที่



ภาพที่ 1 กลไกการกัดกร่อนของเหล็กเสริมก่อนและหลังการซ่อมแซม [3]



2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทัวไป

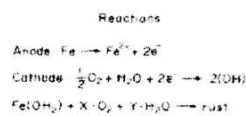
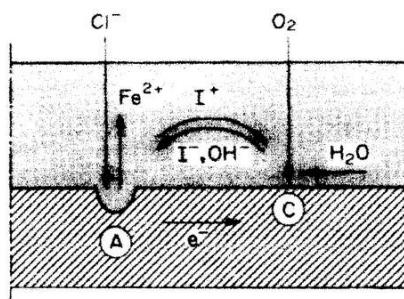
เหล็กที่อยู่ในสภาพแวดล้อมธรรมชาติมีแนวโน้มที่สนิมจะเกิดขึ้นได้ เนื่องจากความชื้นและออกซิเจนที่เพียงพอ แต่คุณสมบัติของคอนกรีตที่ดี จากคุณสมบัติความเป็นด่างของคอนกรีตที่อยู่ระหว่าง 12.5 – 13.5 จากเงื่อนไขนี้ทำให้เกิดการก่อตัวของชั้นออกไซด์บางๆ รอบผิวเหล็กเสริมและยับยั้งการละลายตัวของเหล็ก [2,3]

โดยทั่วไปชั้นของออกไซด์จะมีเสถียรภาพตลอดอายุการใช้งานของโครงสร้าง แต่มีกลไกการทำลายหลักๆ 2 ประการที่ชั้นออกไซด์ถูกทำลาย ได้แก่ การเกิดคาร์บอนขึ้นและปริมาณคลอไรด์วิกฤติ

2.2 กลไกการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์

คลอไรด์ที่ถูกชักนำเข้ามาในคอนกรีตทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการย่อย ดังแสดงในภาพที่ 2 [2,3]

- ที่ขั้วบวก, เหล็กจะแตกตัวเป็นเหล็กไอออนเข้าสู่ภาวะสารละลาย และจ่ายอิเล็กตรอนออกมา
- ที่ขั้วลบ, อิเล็กตรอน น้ำ และออกซิเจน รวมตัวกันเป็นไฮดรอกซิลไอออน
- ไฮดรอกซิลไอออนที่เกิดขึ้นเคลื่อนตัวจากขั้วลบไปยังขั้วบวก และทำปฏิกิริยากับเหล็กไอออนทำให้เกิดสนิม



ภาพที่ 2 กลไกการกัดกร่อนของเหล็กเสริมจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี [3]

2.3 ประเภทของการกัดกร่อน

เซลล์ของการกัดกร่อนประกอบด้วยส่วนที่มีความเป็นโลหะและสารละลายที่เป็นตัวนำไฟฟ้าเชื่อมต่อกันระหว่างขั้วบวกและขั้วลบ เกิดเป็น Microcells นำไปสู่การสูญเสียเหล็กอย่างสม่ำเสมอตลอดผิว และ Macrocells เกิดเป็นเฉพาะบางส่วนหรือเกิดเป็นสนิมหลุม [2,3]

- การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ ส่วนมากจะเกิดจากกระบวนการคาร์บอนขึ้นบนพื้นผิวคอนกรีตเป็นบริเวณกว้าง หรือปริมาณคลอไรด์ที่สูงมาก บริเวณใกล้ผิวเหล็กเสริม และกระจายตัวสม่ำเสมอ
- การกัดกร่อนแบบเฉพาะส่วนหรือสนิมหลุม จะเกิดในกรณีที่คลอไรด์ถูกชักนำเข้ามาในคอนกรีต เกิดปฏิกิริยาออกไซด์ ที่จุดที่มีปริมาณคลอไรด์มากกว่าค่าคลอไรด์วิกฤติ

3. ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

การศึกษานี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ทรายแม่น้ำ, หินปูนย่อย ¼", โขเดียมคลอไรด์, เหล็กเสริมข้ออ้อย ขนาด 16 มม ชั้นคุณภาพ SD30, สายไฟ THW 1x1 sq-mm., ตัวต้านทาน ขนาด 100 โอห์ม, วัสดุซ่อมแซมประเภทมอร์ตาร์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยวัสดุโพลีเมอร์ (Polymer modified mortar), และมอร์ตาร์สำหรับงานซ่อมแซม (Patch repair mortar)

3.2 สัดส่วนผสม

สำหรับส่วนที่เป็นคอนกรีตเก่ามีจำนวน 3 สัดส่วนผสม โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน ทรายหิน สัดส่วนผสม 1:2:2.9 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55 และผสมคลอไรด์ไอออนลงในคอนกรีตเก่าร้อยละ 0, 2, 4 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานตามลำดับ ดังแสดงใน ตารางที่ 1 ส่วนที่เป็นวัสดุซ่อมแซมมีจำนวน 3 ชนิด ได้แก่ ซีเมนต์มอร์ตาร์ (Cement mortar) ที่สัดส่วนผสมเดียวกับคอนกรีต คือ ซีเมนต์: ทราย:น้ำ เท่ากับ 1:2:0.55, มอร์ตาร์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยวัสดุโพลีเมอร์ (Polymer modified mortar), และมอร์ตาร์สำหรับงานซ่อมแซม (Patch repair mortar) โดยมีสัดส่วนผสมดังแสดงใน ตารางที่ 2



ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมคอนกรีตเก่า

ที่	สัญลักษณ์	น้ำหนัก (กก./ลบ.ม.)				
		โซเดียมคลอไรด์	ปูนซีเมนต์	ทราย	หิน	น้ำ
1	OPC0.0CL	0.0	380	780	1100	209
2	OPC2.0CL	12.38	380	780	1100	209
3	OPC4.0CL	24.77	380	780	1100	209

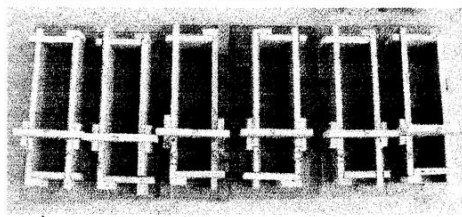
OPC : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, CL : ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่เติมต่อวัสดุประสานโดยน้ำหนัก, OPC2.0CL : ตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีคลอไรด์ที่เติมเป็นร้อยละ 2 ของวัสดุประสานโดยน้ำหนัก

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมวัสดุซ่อมแซม

ที่	ชนิดวัสดุซ่อมแซม	น้ำหนัก (กก./ลบ.ม.)		
		วัสดุประสาน	ทราย	น้ำ
1	Cement Mortar (CM)	600	1200	330
2	Polymer Modified Mortar (PMM)	1800	-	288
3	Patch Repair Mortar (PRM)	1800	-	252

3.3 วิธีการเตรียมตัวอย่างและการบ่ม

ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ ขนาด 70x70x280 มิลลิเมตร ดังแสดงใน ภาพที่ 3 โดยตัวอย่างถูกแบ่งเป็นสองส่วน ซึ่งติดกัน แต่ความยาวของทั้งสองส่วนจะไม่เท่ากัน ขึ้นกับความยาวของเหล็กเสริมที่ใส่เข้าไปในตัวอย่าง ซึ่งแบ่งเป็น 2 ส่วน และมีความยาวดังแสดงใน ตารางที่ 3 โดยเชื่อมต่อเหล็กเสริมด้วยสายไฟ การหล่อตัวอย่างต้องเท 2 ครั้ง โดยเทส่วนที่เป็นคอนกรีตเก่าก่อน เมื่อคอนกรีตแข็งตัวในแบบเป็นเวลา 1 วัน ถอดแผ่นกันแบบออก ทาด้วยน้ำยาประสานคอนกรีตแล้วเทส่วนวัสดุซ่อมแซมเมื่อครบ 1 วัน ถอดแบบ หลังจากนั้นทรมตัวอย่างด้วยน้ำและหุ้มตัวอย่างด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำ ความชื้นจากนั้นคลุมด้วยผ้าชุบน้ำหรือกระสอบป่านอีกชั้น เพื่อบ่มชื้นตัวอย่างจนครบ 28 วัน ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 3 แบบหล่อตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 3 แสดงชนิด อัตราส่วนความยาว และผลต่างของปริมาณคลอไรด์ที่เติม ระหว่างคอนกรีตเก่าและวัสดุซ่อมแซม

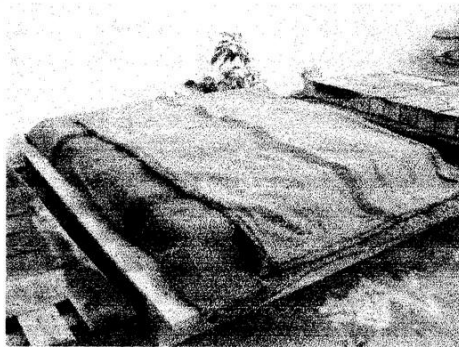
คอนกรีต	วัสดุที่ใช้	อัตราส่วน	
		ความยาวเหล็กเสริม (ซม)	ผลต่างของปริมาณคลอไรด์ (%)
1	OPC0.0CL CM	3:17	0.0
		10:10	
		17:3	
2	OPC0.0CL PMM	3:17	0.0
		10:10	
		17:3	
3	OPC0.0CL PRM	3:17	0.0
		10:10	
		17:3	
4	OPC2.0CL CM	3:17	2.0
		10:10	
		17:3	
5	OPC2.0CL PMM	3:17	2.0
		10:10	
		17:3	
6	OPC2.0CL PRM	3:17	2.0
		10:10	
		17:3	
7	OPC4.0CL CM	3:17	4.0
		10:10	
		17:3	
8	OPC4.0CL PMM	3:17	4.0
		10:10	
		17:3	
9	OPC4.0CL PRM	3:17	4.0
		10:10	
		17:3	

ชุดตัวอย่างที่ 7, OPC4.0CL-CM (3:17) : ตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คลอไรด์ที่เติมเป็นร้อยละ 4 ของวัสดุประสานโดยน้ำหนัก กับวัสดุซ่อมแซมซีเมนต์มอร์ตาร์ อัตราส่วนความยาวเหล็กเสริมของคอนกรีตเก่าต่อความยาวเหล็กเสริมของวัสดุซ่อมแซม เท่ากับ 3:17



3.4 เงื่อนไขและระยะเวลาการทดสอบ

หลังจากบ่มตัวอย่างครบ 28 วัน นำตัวอย่างมาเชื่อมต่อเหล็กเสริมระหว่างสองส่วนด้วยสายไฟที่บัดกรีไว้ โดยติดตัวต้านทานขนาด 100 โอห์ม สำหรับวัดค่ากระแสการกัดกร่อนของตัวอย่าง คอนกรีตที่เกิดขึ้น ทำการวัดผลทุกๆ 2 สัปดาห์ และใน 1 สัปดาห์ หรือ 1 รอบ ตัวอย่างต้องอยู่ในสภาวะชื้น 3 วัน สลับกับสภาวะแห้ง 4 วัน กรณีเปียกชื้นใช้วิธีบ่มด้วยผ้าหรือกระสอบป่านชุบน้ำ แทนการบ่มในน้ำ เพื่อป้องกันการซึมของคลอไรด์ที่อยู่ภายใน ออกมาจากตัวอย่างคอนกรีต ดังแสดงใน ภาพที่ 4 จนกระทั่งครบอายุ 16 สัปดาห์



ภาพที่ 4 การบ่มตัวอย่างในสภาวะชื้น 3 วันด้วยผ้าหรือกระสอบป่านชุบน้ำ สลับกับสภาวะแห้งในอากาศ 4 วัน ใน 1 สัปดาห์

3.5 วิธีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของตัวอย่างคอนกรีต เพื่อประเมินโอกาสที่เหล็กเสริมจะเกิดสนิม ดังแสดงใน ภาพที่ 5 ตามมาตรฐาน ASTM C876 [4] ค่าที่ได้สามารถแปลความหมายได้ดัง ตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แปลความหมายจากค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เทียบกับครึ่งเซลล์ $Cu/CuSO_4$

ค่าที่อ่านได้ (V)	การแปลความหมาย
> -0.20	โอกาส 90% ไม่เกิดการกัดกร่อน
-0.35 < x < -0.20	ไม่ชัดเจน
< -0.35	มีโอกาส 90% ที่จะเกิดการกัดกร่อน

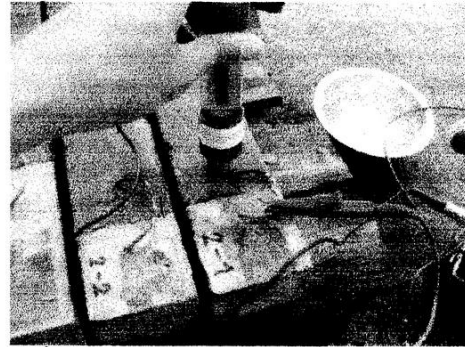
กระแสการเกิดการกัดกร่อน วัดได้จากค่าความต่างศักย์พร้อมตัวต้านทานระหว่างเหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตเท่ากับวัสดุซ่อมแซม ดังแสดงใน ภาพที่ 6 ด้วยโวลต์มิเตอร์ที่มีความละเอียด 0.01 mV และนำไปคำนวณหาค่ากระแสการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ดังแสดงใน สมการที่ 1

$$I = \frac{V}{R} \quad (1)$$

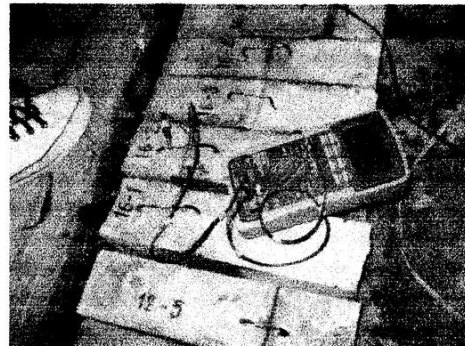
I คือ กระแสการกัดกร่อนของเหล็กเสริม (แอมแปร์)

V คือ ความต่างศักย์ระหว่างเหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตเท่ากับวัสดุซ่อมแซม (โวลต์)

R คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวต้านทาน (โอห์ม)



ภาพที่ 5 การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เพื่อประเมินโอกาสที่เหล็กเสริมจะเกิดสนิม

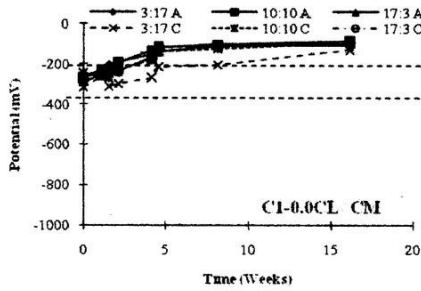


ภาพที่ 6 การต่อโวลต์มิเตอร์เพื่อวัดกระแสการเกิดสนิมระหว่างคอนกรีตเท่ากับวัสดุซ่อมแซม

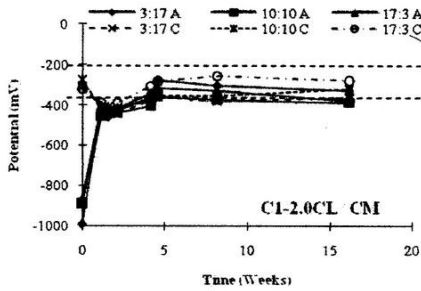


4. ผลการวิจัย

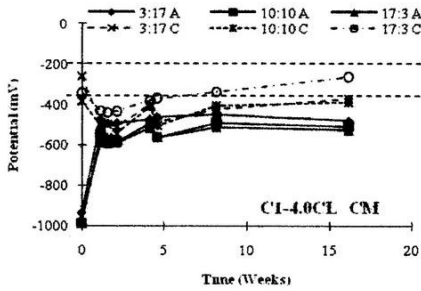
จากการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตด้วยการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เพื่อประเมินโอกาสที่ตัวอย่างจะเกิดสนิมและการวัดการไหลของกระแสการกัดกร่อน ได้ผลดังนี้



(ก) ตัวอย่างคอนกรีตค่าที่มีคลอไรด์ไอออนปนเปื้อนร้อยละ 0



(ข) ตัวอย่างคอนกรีตค่าที่มีคลอไรด์ไอออนปนเปื้อนร้อยละ 2

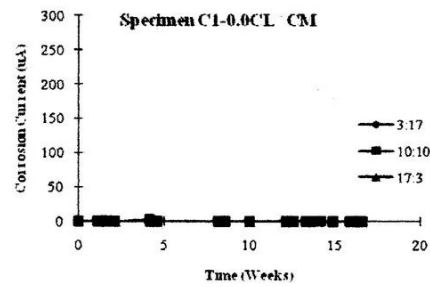


(ค) ตัวอย่างคอนกรีตค่าที่มีคลอไรด์ไอออนปนเปื้อนร้อยละ 4

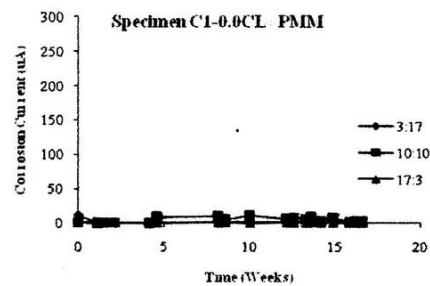
ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์กับระยะเวลาของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์ธรรมดาเป็นวัสดุซ่อมแซม

ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่วัดได้จากตัวอย่างคอนกรีตเปรียบเทียบกับเวลาพบว่าปริมาณคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นในตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบนั้นทำให้เห็นผลจากการทดสอบอย่างชัดเจนว่าเมื่อ คลอไรด์ไอออนในคอนกรีตเพิ่มขึ้น โอกาสที่เหล็กเสริมในคอนกรีตจะเกิดสนิมนั้นก็มากขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในภาพที่ 7 (ก) และ (ข) ตัวอย่างที่คลอไรด์ไอออนร้อยละ 0 มีค่าคิดลบน้อยกว่า -0.35 V ทั้งด้านแอโนด และด้านแคโทด แสดงว่าเหล็กเสริมทั้งสองส่วนไม่เกิดสนิม และในตัวอย่างที่มีคลอไรด์ไอออนร้อยละ 2 มีค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์คิดลบใกล้เคียง -0.35 V

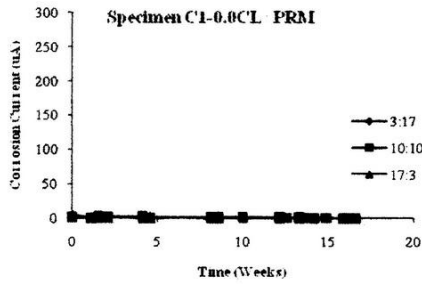
ตัวอย่างที่มีคลอไรด์ไอออนร้อยละ 4 ดังแสดงในภาพที่ 7 (ค) มีค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์คิดลบมากกว่า -0.35 V และยังพบอีกว่าค่าที่ได้เมื่อเริ่มวัดในครั้งแรกนั้นส่วนใหญ่ต่ำกว่า -0.35 V แต่กลับลดลงในเวลาต่อมา สาเหตุนี้เนื่องจากการอิมมูบิลิตี้ความชื้นของตัวอย่างจากบ่มตัวอย่าง โดยในตัวอย่างที่มีอัตราส่วนแอโนดต่อแคโทดที่แตกต่างกัน ผลการทดสอบจากการวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มีจะเป็นไปในทิศทางเดียวกัน



(ก) วัสดุซ่อมแซมซีเมนต์ธรรมดา



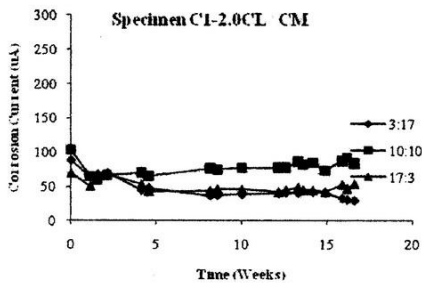
(ข) วัสดุซ่อมแซมธรรมดาที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยวัสดุโพลีเมอร์



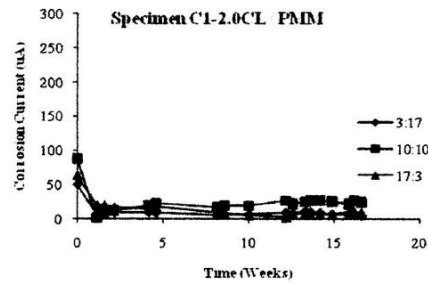
(ก) วัสดุซ่อมแซมเมอร์คาร์สำหรับงานซ่อมแซม

ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสการกัดกร่อนกับระยะเวลา ในตัวอย่างคอนกรีตที่คลอไรด์ไอออนเท่ากับ ร้อยละ 0

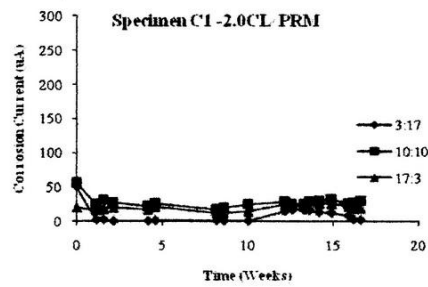
ภาพที่ 8 (ก-ค) เมื่อคลอไรด์ไอออนในส่วนผสมของคอนกรีตเท่ากับร้อยละ 0 พบว่าการเกิดสนิมที่ทดสอบได้มีค่าต่ำมากไม่ว่าซ่อมแซมด้วยวัสดุใดๆ หรือการแปรผันอัตราส่วนระหว่างความยาวของเหล็กเสริมของเหล็กเสริมค้ำยัน แอนโอดแคโทด ค่าที่ได้ก็มีค่าที่ต่ำและใกล้เคียงกันมาก เมื่อเทียบกับค่าที่ยังให้ค่าครึ่งเซลล์มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับ คือเหล็กเสริมไม่เป็สนิม จากผลการทดสอบสามารถวิเคราะห์ได้ว่า ตัวอย่างคอนกรีตเก่าที่ไม่มีคลอไรด์ไอออนปนเปื้อน ทำให้เหล็กเสริมค้ำยัน แอนโอดไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาแอนโอดิกได้อัตราส่วนระหว่างความยาวของเหล็กเสริม และความแตกต่างของวัสดุซ่อมแซมจึงไม่มีผลต่อค่ากระแสการกัดกร่อน ดังนั้น ปริมาณคลอไรด์ไอออนคือ ปัจจัยหลักที่มีผลต่อเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีต



(ง) วัสดุซ่อมแซมซีเมนต์เมอร์คาร์



(ข) วัสดุซ่อมแซมเมอร์คาร์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยวัสดุโพลีเมอร์



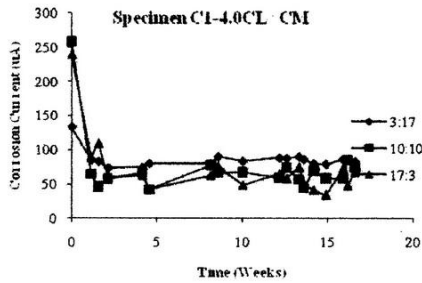
(ค) วัสดุซ่อมแซมเมอร์คาร์สำหรับงานซ่อมแซม

ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสการกัดกร่อนกับระยะเวลา ในตัวอย่างคอนกรีตที่คลอไรด์ไอออนเท่ากับ ร้อยละ 2

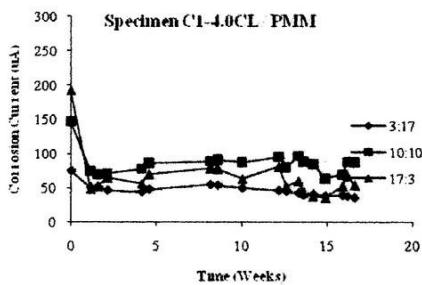
ภาพที่ 9 (ก-ค) ตัวอย่างคอนกรีตที่ปนเปื้อนคลอไรด์ไอออนร้อยละ 2 ผลคือ กระแสที่ไหลในตัวอย่างไม่เพิ่มขึ้นมากกว่าตัวอย่างที่คลอไรด์ไอออนเท่ากับร้อยละ 0 โดยเมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความยาวของเหล็กเสริมค้ำยัน แอนโอดแคโทด ความยาวที่เท่ากัน (10:10) นั้นกระแสจะเกิดมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบในส่วนผสมเดียวกัน เมื่อความยาวไม่เท่ากัน ค่าที่เกิดขึ้นมีค่าน้อย ผลเกิดจากพื้นที่ผิวค้ำยันแอนโอดที่น้อยกว่า (3:17) ทำให้เกิดปฏิกิริยาแอนโอดิกน้อย ในอัตราส่วนที่ค้ำยันแอนโอดน้อยกว่า และ ผลจากพื้นที่ผิวค้ำยันแคโทดที่น้อยกว่า (17:3) ทำให้เกิดปฏิกิริยาแคโทดิกได้น้อย ในอัตราส่วนที่ค้ำยันแคโทดน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบระหว่างวัสดุซ่อมแซม ตัวอย่างที่ใช้ซีเมนต์เมอร์คาร์มีค่ากระแสการเกิดสนิมมากที่สุด ส่วนที่ใช้วัสดุซ่อมแซมอีก 2 ชนิด เกิดขึ้นน้อยกว่า เนื่องจากคุณสมบัติความทึบ



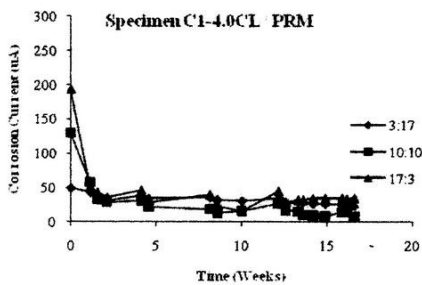
น้ำที่มากกว่า (จาก ตารางที่ 2) ทำให้น้ำซึมเข้ามาได้ยาก เป็นผลให้ปฏิกิริยาแคโทดิกเกิดขึ้นได้น้อย และคุณสมบัติด้านความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุซ่อมแซม



(ก) วัสดุซ่อมแซมซีเมนต์มอร์ตาร์



(ข) วัสดุซ่อมแซมมอร์ตาร์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยวัสดุโพลีเมอร์

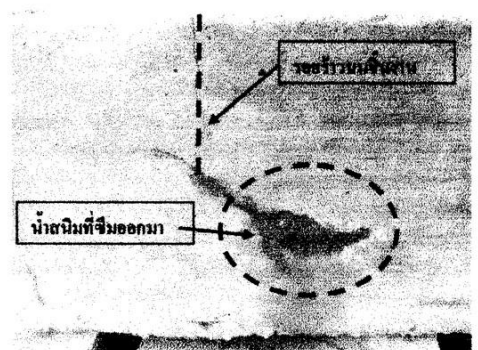


(ค) วัสดุซ่อมแซมมอร์ตาร์สำหรับงานซ่อมแซม

ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสการกัดกร่อนกับระยะเวลา ในตัวอย่างคอนกรีตที่คลอไรด์ไอออนเท่ากับ ร้อยละ 4

ภาพที่ 10 (ก-ค) ตัวอย่างที่ปนเปื้อนคลอไรด์ไอออนร้อยละ 4 พบว่า เมื่อซ่อมแซมด้วยซีเมนต์มอร์ตาร์ พื้นที่แคโทดนั้นมีผลต่อค่ากระแสที่เกิดขึ้นโดยเมื่อพื้นที่แคโทดที่มากกว่า กระแสที่เกิดขึ้นจะมากกว่า โดยที่พื้นที่ผิวด้านแอโนดนั้นไม่มีผลเลย เนื่องจากปริมาณคลอไรด์ไอออนนั้นมีค่ามากเพียงพอแล้ว แต่เมื่อใช้วัสดุซ่อมแซมมอร์ตาร์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยวัสดุโพลีเมอร์พบว่าพื้นที่ผิวด้านแอโนดนั้นมีผลมากกว่าด้านแคโทด ส่วนมอร์ตาร์สำหรับงานซ่อมแซมนั้นเกิดกระแสต่ำสุด ผลมาจากความต้านทานไฟฟ้า และความชื้นน้ำของตัวอย่าง ดังที่กล่าวมาแล้ว

เมื่อนำผลการวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่า ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของตัวอย่างคอนกรีตที่มีคลอไรด์ไอออนปนเปื้อนร้อยละ 4 ลดลงต่ำกว่า -0.35 V ภาพที่ 7 (ก) ซึ่งสามารถประเมินได้ว่าเหล็กเสริมเกิดสนิม โดยสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนจากรอยร้าวบนตัวอย่างเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น ที่คลอไรด์ไอออนปนเปื้อนร้อยละ 4 จะเกิดรอยร้าวในฝั่งแอโนดทั้งแนวตั้งฉากและตามแนวยาวของเหล็กเสริมปรากฏให้เห็นอย่างชัดเจน พร้อมกับคราบจากสนิมที่ซึมออกมาสู่ภายนอกชิ้นงานสาเหตุของรอยร้าวนี้ก็เกิดจากปริมาตรของเหล็กเสริมที่เปลี่ยนแปลงสภาพเป็นสนิมเพิ่มขึ้นและดึงคอนกรีตให้เกิดการแตกร้าวนั่นเอง ภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ตัวอย่างคอนกรีตที่เกิดรอยร้าวและน้ำสนิมที่ซึมออกมา

5. อภิปรายและสรุปผล

- จากการศึกษาสามารถสรุปผลได้ดังนี้
1. ปริมาณคลอไรด์ไอออนที่เพิ่มขึ้นมีผลให้ค่าการกัดกร่อนของเหล็กเสริมคอนกรีตเพิ่มขึ้น



2. อัตราส่วนพื้นที่ผิวเหล็กเสริมคานแอ โนดและแคโทดมีผลต่อค่ากระแสการกัดกร่อน เมื่อปริมาณคลอไรด์ไอออนเพิ่มขึ้น

3. วัสดุซ่อมแซมที่มีความทึบน้ำมาก มีผลทำให้กระแสที่เกิดขึ้นนั้นน้อย เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาคาโทดิกได้น้อยกว่า

4. การเลือกใช้วัสดุสำหรับซ่อมแซมที่ถูกต้องเหมาะสมจะเป็นการลดอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริม อายุการใช้งานของโครงสร้างหลังซ่อมแซมจะนานขึ้น เป็นการลดค่าใช้จ่ายสำหรับซ่อมบำรุงอีกวิธี

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC) สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Cleland, D.J., Yeoh, K.M., and Long, A.E., "Corrosion of Reinforcement in Concrete Repair", Construction and Building Materials, Vol.11, No. 4, pp. 233-238, 1997.
- [2] Bentur, A., Diamond, S., and Berke N.S., 1997, "Steel corrosion in concrete", E&FN SPON, 1st Edition, London, United Kingdom, 201.
- [3] Raupach, M., "Chloride-induced macrocell corrosion of steel in concrete - theoretical background and practical consequences", Construction and Building Materials, Vol. 10, No. 5, pp.329-338, 1996.
- [4] ASTM C876-91, 1999, "Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete", Annual Book of ASTM Standard, Vol.03.02, pp.462-467.
- [5] Nanayakkara, O., and Kato, Y., "Macro-cell Corrosion of Partially Repaired Concrete Member", Seisan-Kenkyu, 2007, pp.263-266.

การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่

ANNUAL CONCRETE CONFERENCE (ACC6)

ในวาระครบรอบ 50 ปี แห่งการสถาปนา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

20 - 22 ตุลาคม 2553
Grand Pacific Sovereign Resort & Spa
อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี



จัดโดย สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

- ร่วมกับ
- o ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาดารุศาสตร์โยธา และ ศูนย์การศึกษาต่อเนื่อง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 - o ACI Thailand Chapter
 - o ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมวลเบาอย่างยั่งยืน

คณะกรรมการผู้พิจารณาบทความ การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6

ศ.ดร.ชัย	จาคูรพิทักษ์กุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.เอนก	ศิริพานิชกร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.สมเกียรติ	รุ่งทองใบสุรีย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สุทัศน์	ลีลาทวีวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.ทวิช	พูลเงิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.วีรชาติ	ตั้งจิรภัทร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.ธรรมนุญ	เฮงษ์ภูกุล	ศูนย์การศึกษาต่อเนื่อง มจร.
อ.เอกชัย	ภัทรวรงค์ไพบุลย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.วิเชียร	ชาลี	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผศ.ดร.สมิตร	ส่งพิริยะกิจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.ปิติตานต์	กรำมาต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.พุทธพล	ทองอินทร์ดำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.จตุพล	ตั้งปกาศิต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.ธีรวัฒน์	สินสิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ดร.วันชัย	สะตะ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผศ.ดร.อุบลลักษณ์	รัตนศักดิ์	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผศ.ดร.เรืองรุชต์	ชีระโรจน์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ดร.สหलग	หอมวุฒิวงศ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รศ.ดร.ปิติ	สุคนธ์สุขกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.คมสัน	มาลีสี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.บูรฉัตร	ฉัตรวิระ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ดร.สำริง	รักซ้อน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
รศ.ดร.บุญไชย	สถิตมั่นในธรรม	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ดร.รัฐภูมิ	ปรีชาตปรีชา	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.ประวิณ	ชมปรีดา	มหาวิทยาลัยมหิดล
ผศ.ดร.วรรณสิริ	พันธ์ุอุไร	มหาวิทยาลัยมหิดล
ผศ.ดร.ธัชวีร์	ลีละวัฒน์	มหาวิทยาลัยมหิดล
คุณวันทยาอุษ	วงศ์ทองแก้ว	บริษัท บอรอล คอนกรีต (ประเทศไทย) จำกัด
คุณบุญรอด	คุปดีทัทธิ	บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด (CPAC)
ผศ.ดร.วันชัย	ยอดสุดใจ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ว่าที่ ร.ต.ดร.ศุภชัย	สินถาวร	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รศ.ดร.สุวิมล	สังจวานิชย์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.ฉัตร	สุจินดา	มหาวิทยาลัยศรีปทุม

คณะกรรมการผู้พิจารณาบทความ การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6 (ต่อ)

รศ.ดร.ไพบุลย์	ปัญญาคะโป	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ผศ.ดร.เกรียงศักดิ์	แก้วกุลชัย	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รศ.ดร.นคร	ภู่วโรดม	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผศ.ดร.วิรัช	เลิศไพฑูรย์พันธ์	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
รศ.ดร.อมร	พิมานมาศ	สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร
คุณมนตรี	เชื้อค้อยวรรณภา	บริษัท เข็มกริต (ประเทศไทย) จำกัด (CEMKRETE)
ดร.รภัทธิพงษ์	สหมิตรมงคล	ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC)
ดร.ณัฐวัฒน์	จุฑารัตน์	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
รศ.ดร.ประเสริฐ	สุวรรณเวทยา	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญบทความ (ต่อ)

บทความวิจัย สาขาโครงสร้างคอนกรีต (STR)		หน้า
STR-11	Shear Strengthening of RC Beams by Near Surface Mounted FRP Rods <i>Pongsak Wiwatrojanagul, Borvorn Israngkura Na Ayudhya, and Raktipong Sahamitmongkol</i>	505
STR-12	การพัฒนาองค์อาคารที่ยึดไว้การโก่งเดาะสำหรับการเสริมกำลังอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก <i>ชาติรี งามเสงี่ยม อานาจ คำพานิช สุทัศน์ สีสาทวิวัฒน์ และ เป็นหนึ่ง วานิชชัย</i>	511
บทความวิจัย สาขาบำรุงรักษา ซ่อมแซม และเสริมกำลังคอนกรีต (REP)		หน้า
REP-01	การเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตด้วยวัสดุซีเมนต์คอมโพสิตเสริมแรงเส้นใย ซูเปอร์ไฟเบอร์ (พีบีไอ) <i>ธรรมชาติ กุลประภา และ สดสวย สุจริตธรรมกุล</i>	519
REP-02	Self-Healing in Construction Materials: A Review <i>Kritsada Sisomphon</i>	527
REP-03	Rehabilitation of Infrastructures using Fibre Reinforced Polymer (FRP) Strengthening Technology <i>Wee Keong ONG</i>	533
REP-04	ผลของความเป็นลอนของผิวหน้าต่อพฤติกรรมการค้ำของคานคอนกรีตเสริม เหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ <i>ประวีณ ชมปรีดา และ ธัชวีร์ สีสาทวิวัฒน์</i>	539
REP-05	ปัจจัยที่มีผลต่ออายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับการ ซ่อมแซมบางส่วน <i>ตามยศ สมยาภักดี ภาคววัฒน์ แสนเจริญ ปิติศานต์ กร้ามาตร และ สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล</i>	545
REP-07	Effects of Different Mineral Additives and Cracking Ages on Self-Healing Performance of Mortar <i>Dechkhachorn Jaroenratanapirom and Raktipong Sahamitmongkol</i>	551

ปัจจัยที่มีผลต่ออายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับการซ่อมแซมบางส่วน
FACTORS AFFECTING SERVICE LIFE AFTER PATIAL REPAIR OF RC STRUCTURE

ตามยศ สมยาภักดี (Tamyot Somyapakdee)¹

ภักวัฒน์ แสนเจริญ (Pakawat Sancharoen)²

ปิติสานต์ กร้ามาต (Pitisan Krammart)³

สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล (Somnuk Tangtermsirikul)⁴

¹นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

somyapakdee@hotmail.com

²นักวิจัย คร. ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และห้องปฏิบัติการการผลิตและออกแบบสำหรับอุตสาหกรรมเซรามิกส์, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะ
และวัสดุแห่งชาติ pakawat@siit.tu.ac.th

³ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คร. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

pitisan_k@rmutt.ac.th

⁴ศาสตราจารย์ คร. ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา และภาควิชาวิศวกรรมโยธาและเทคโนโลยี สถาบัน

เทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ somnuk@siit.tu.ac.th

บทคัดย่อ : ในประเทศไทยมีการซ่อมแซมความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมพบเห็นได้โดยทั่วไป โดยเฉพาะโครงสร้างบริเวณชายทะเล และโครงสร้างที่มีอายุการใช้งานมานาน การซ่อมแซมซึ่งมักดำเนินการได้แก่ การซ่อมแซมแบบเฉพาะที่ (Patching repair) ซึ่งมีความง่ายและสะดวกที่สุด แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นแก่ปัญหาความเสียหายซ้ำกับบริเวณที่ได้รับการซ่อมแซม หรือบริเวณใกล้เคียง ภายหลังจากการซ่อมแซมไม่นาน ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงมุ่งเน้นการศึกษาปัญหาด้านความคงทนของการซ่อมแซมการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์แบบเฉพาะที่ โดยมีการปรับเปลี่ยนสัดส่วนผสมของคอนกรีต ชนิดของวัสดุประสาน และขนาดพื้นที่ของบริเวณซ่อมแซม จากผลการทดลองวัสดุซ่อมแซมที่มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าสูง จะลดการเกิดสนิมของเหล็กเสริมลงได้ และผลของการซ่อมแซมพื้นที่บริเวณกว้างและเหลือพื้นที่ที่ไม่ได้รับการซ่อมแซมน้อย จะทำให้เกิดความเสียหายในบริเวณที่ไม่ได้รับการซ่อมแซมเร็วขึ้น จากผลการศึกษาสามารถเป็นแนวทางในการเลือกวัสดุซ่อมแซมเพื่อให้การซ่อมแซมมีความคงทน

ABSTRACT : In Thailand, partial patching repair of damaged RC structures is widely applied especially for marine structures and aged structures. One of the major problems of patching repair is re-deterioration of area near the repaired section. The main objective in this study is to investigate the durability of patching repair by varying concrete mix proportion, type of binder, type of repair material and area of repair. The result showed that repair material with high

electrical resistance can reduce corrosion current. Large area of repair also accelerated the corrosion of steel in old concrete. The results from this study can be used for repair material selection in order to improve durability of repairing.

KEYWORDS : Patch repair, Corrosion, Chloride, Macro-cell, Half-cell potential, Maintenance, Service life

1. ทิวไป

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีสมรรถภาพด้านความแข็งแรงเป็นอย่างมาก และทนต่อเงื่อนไขการทำอันตรายจากสิ่งแวดล้อมหลายชนิด อย่างไรก็ตาม ความเสียหายในโครงสร้างยังคงมีโอกาสปราดถูกขึ้นจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริมโดยคลอไรด์ไอออน ซึ่งเป็นหนึ่งในกลไกการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่สำคัญ ผลจากการกัดกร่อนทำให้เกิดการสูญเสียพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม การแตกร้าว หลุดร่อนของคอนกรีต การซ่อมแซมส่วนคอนกรีตที่เสียหายที่ใช้กัน โดยทั่วไปคือการซ่อมแบบเฉพาะที่ด้วยวิธีฉาบปะ โดยใช้มอร์ตาร์หรือคอนกรีต [1,2]

หลังจากโครงสร้างได้รับการซ่อมแซมเฉพาะส่วนที่ได้รับความเสียหายเกิดขึ้น ความเสี่ยงที่จะเกิดการกัดกร่อนภายหลังการซ่อมแซมเฉพาะที่ เนื่องจากคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมนั้น ไม่มีคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวกันระหว่างของเดิมกับส่วนที่ได้รับการซ่อมแซม โดยความรุนแรงจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนพื้นที่ที่ได้รับการซ่อมแซมต่อส่วนที่ไม่ได้รับการซ่อมแซม ปริมาณคลอไรด์ไอออนที่ปนเปื้อนในโครงสร้างคอนกรีต เป็นต้น บริเวณที่ใกล้เชิงจุดที่ได้รับการซ่อมแซม จะเกิดความเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริมภายในระยะเวลาไม่นานภายหลังจากการซ่อม การวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาคืออย่างคอนกรีตในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาวิธีการประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับการซ่อมแซมเพียงบางส่วน

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, เถ้าลอย, ทราซแมนน้ำ, หินปูนย่อย ¼", โซเดียมคลอไรด์, เหล็กเสริมข้ออ้อยขนาด 16 มม ชั้นคุณภาพ SD30, สายไฟ THW 1x1 sq-mm., ตัวต้านทาน ขนาด 100 โอห์ม, วัสดุซ่อมแซมประเภทมอร์ตาร์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยวัสดุโพลีเมอร์ (Polymer modified mortar), และมอร์ตาร์สำหรับงานซ่อมแซม (Patch repair mortar)

2.2 สัดส่วนผสม

สำหรับส่วนที่เป็นคอนกรีตเก่ามีจำนวน 6 สัดส่วนผสม โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 โดยน้ำหนักเป็นวัสดุประสาน พร้อมทั้งผสมคลอไรด์ไอออนร้อยละ 0, 2, 4 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานตามลำดับ ดังแสดงใน ตารางที่ 1 ทราซ 700 กก. หิน 1,100 กก. น้ำ 209 ลิตร ต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม. ส่วนที่เป็นวัสดุซ่อมแซมมีจำนวน 3 ชนิด ได้แก่ ซีเมนต์มอร์ตาร์ (Cement mortar) ที่สัดส่วนผสมเดียวกันกับคอนกรีต คือ ซีเมนต์:ทราซ:น้ำ เท่ากับ 1:2:0.55, มอร์ตาร์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยวัสดุโพลีเมอร์ (Polymer modified mortar), และมอร์ตาร์สำหรับงานซ่อมแซม (Patch repair mortar) โดยมีสัดส่วนผสมดังแสดงใน ตารางที่ 2

ตารางที่ 1 สัดส่วนวัสดุประสานคอนกรีตเก่า

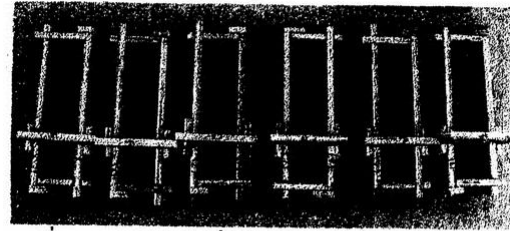
ที่	สัญลักษณ์	น้ำหนัก (กก./ลบ.ม.)		
		เกลือ	เถ้าลอย	ปูนซีเมนต์
1C	OPC-0.0CL	0.0	-	380
2C	OPC-2.0CL	12.38	-	380
3C	OPC-4.0CL	24.77	-	380
4C	OPC-20FA-0.0CL	0.0	76	304
5C	OPC-20FA-2.0CL	12.38	76	304
6C	OPC-20FA-4.0CL	24.77	76	304

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมวัสดุซ่อมแซม

ที่	ชนิดวัสดุซ่อมแซม	น้ำหนัก (กก./ลบ.ม.)		
		วัสดุประสาน	ทราย	น้ำ
1M	Cement Mortar (CM)	600	1200	330
2M	Polymer Mortar (PM)	1800	-	288
3M	Repair Material (RM)	1800	-	252

2.3 วิธีการเตรียมตัวอย่างและการบ่ม

ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ ขนาด 70x70x280 มิลลิเมตร ดังแสดงใน ภาพที่ 1 โดยตัวอย่างถูกแบ่งเป็นสองส่วนซึ่งติดกัน แต่ความยาวของทั้งสองส่วนจะไม่เท่ากัน ขึ้นกับความยาวของเหล็กเสริมที่ใส่เข้าไปในตัวอย่าง ซึ่งแบ่งเป็น 2 ส่วน [5] โดยเชื่อมต่อเหล็กเสริมด้วยสายไฟ การหล่อตัวอย่างต้องเท 2 ครั้ง โดยเทส่วนที่เป็นคอนกรีตเก่าก่อน เมื่อคอนกรีตแข็งตัวในแบบเป็นเวลา 1 วัน ถอดแผ่นกันแบบออก ทาด้วยน้ำยาประสานคอนกรีตแล้วเทส่วนวัสดุซ่อมแซมเมื่อครบ 1 วัน ถอดแบบ หลังจากนั้นพรมตัวอย่างด้วยน้ำและหุ้มตัวอย่างด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำ ความชื้นจากนั้นคลุมด้วยผ้าชุบน้ำหรือกระสอบป่านอีกชั้น เพื่อบ่มชื้นตัวอย่างจนครบ 28 วัน



ภาพที่ 1 แบบหล่อตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

2.4 เงื่อนไขและระยะเวลาการทดสอบ

หลังจากบ่มตัวอย่างครบ 28 วัน นำตัวอย่างมาเชื่อมต่อเหล็กเสริมระหว่างสองส่วนด้วยสายไฟที่บัดกรีไว้ โดยติดตัวต้านทานขนาด 100 โอห์ม สำหรับวัดค่ากระแสการกักตัวของตัวอย่างคอนกรีตที่เกิดขึ้น ทำการวัดผลทุกๆ 2 สัปดาห์ และใน 1 สัปดาห์หรือ 1 รอบตัวอย่างต้องอยู่ในสภาวะชื้น 3 วัน สลับกับสภาวะแห้ง 4 วัน ในช่วงสภาวะเปียกชื้นใช้วิธีบ่มด้วยผ้าหรือกระสอบป่านชุบน้ำแทนการบ่มในน้ำ เพื่อป้องกันการซึมของเกลือโรดที่อยู๋ภายในออกมาจากตัวอย่างคอนกรีตจนกระทั่งครบอายุ 16 สัปดาห์

2.5 วิธีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

ทดสอบกระแสไฟฟ้า ตามมาตรฐาน ASTM G109-99 [7] วัดได้จากค่าความต่างศักย์คร่อมตัวต้านทานระหว่างเหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตเก่ากับวัสดุซ่อมแซม ดังแสดงใน ภาพที่ 2 ด้วยโวลต์มิเตอร์ที่มีความละเอียด 0.01 mV และนำไปคำนวณหาค่ากระแสตามกฎของโอห์ม และค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในหน่วย $\mu\text{A}/\text{cm}^2$

ทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของตัวอย่างคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C876-91 เพื่อประเมินโอกาสที่เหล็กเสริมจะเกิดสนิม ดังแสดงใน ภาพที่ 3

ทดสอบความต้านทานกระแสไฟฟ้าของคอนกรีต วัดที่ผิวคอนกรีตดังแสดงใน ภาพที่ 4 ด้วยอุปกรณ์ Four-Probe มีหน่วยเป็น $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ ค่าที่ได้นำไปหาหา

ความสัมพันธ์กับผลต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ เพื่อเปรียบเทียบกับค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ตามมาตรฐาน ASTM G109-99

2.6 การประเมินอายุการใช้งานภายหลังการซ่อมแซม

ในการศึกษานี้ได้พิจารณาอายุการใช้งานของโครงสร้างเฉพาะระยะเวลาที่จะเกิดรอยร้าวจากการเกิดสนิมภายหลังจากการซ่อมแซม ดังนั้นจะไม่คำนึงถึงระยะเวลาการเกิดสนิมจะเริ่มขึ้น

ระยะเวลาที่ทำให้เกิดรอยร้าวจากการเกิดสนิม โดยเป็นเวลาภายหลังจากเริ่มมีการกัดกร่อนเกิดขึ้น และเกิดการสูญเสียน้ำหนัก 10 มก./คร.ซม. [6] ซึ่งทำให้เกิดรอยร้าว น้ำหนักที่สูญเสียจากการเกิดสนิมสามารถคำนวณได้ดัง สมการ (1)

$$W = \frac{I \cdot t \cdot MW}{F \cdot n} \quad (1)$$

W คือ น้ำหนักที่สูญเสียไป (กรัม), มีค่ามากกว่า 10 มก./ลบ.ซม. จะเกิดรอยร้าว

I คือ กระแสการเกิดสนิม (แอมป์), วัดจากตัวอย่าง

t คือ เวลา (วินาที)

MW คือ หน่วยน้ำหนักโมเลกุลของเหล็ก เท่ากับ 58.5

F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ เท่ากับ 96500

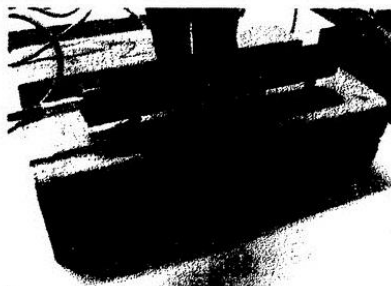
n คือ จำนวนของวาเลนซ์อิเล็กตรอนของเหล็ก เท่ากับ 2



ภาพที่ 2 การต่อโวลท์มิเตอร์เพื่อวัดกระแสการเกิดสนิมระหว่างคอนกรีตเก่ากับวัสดุซ่อมแซม



ภาพที่ 3 การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เพื่อประเมินโอกาสที่เหล็กเสริมจะเกิดสนิม



ภาพที่ 4 การวัดค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าของคอนกรีต

3. ผลการวิจัย

3.1 ค่ากระแสการเกิดสนิม และค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

ภาพที่ 5 (ก) ถึง (ค) แสดงผลการทดสอบกระแสการเกิดสนิม และค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของเหล็กเสริมในคอนกรีตเก่า จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเหล็กเสริมในส่วนที่เป็นคอนกรีตเดิมจะเป็นด้านแอโนด และส่วนในวัสดุซ่อมแซมจะเป็นด้านแคโทด กระแสการเกิดสนิมที่เกิดขึ้นจะแปรเปลี่ยนไปตามชนิดวัสดุซ่อมแซม โดยวัสดุประเภทซีเมนต์มอร์ต้า จะเป็นวัสดุที่มีค่ากระแสการเกิดสนิมสูงสุด และวัสดุประเภทโพลีเมอร์โมดิฟายด์ซีเมนต์มอร์ต้า และมอร์ต้าสำหรับการซ่อมแซมแบบ Patching ตามลำดับ

นอกจากนี้ภาพที่ 5 ยังแสดงถึงผลของพื้นที่การซ่อมแซม ดังจะเห็นได้ หากพื้นที่ที่ได้รับการซ่อมแซมมี

พื้นที่มากกว่าพื้นที่ที่ยังไม่ได้รับการซ่อมแซมมาก จะทำให้เกิดกระแสการเกิดสนิมมากขึ้นตาม ไปด้วย ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการแตกร้าวเร็วขึ้น

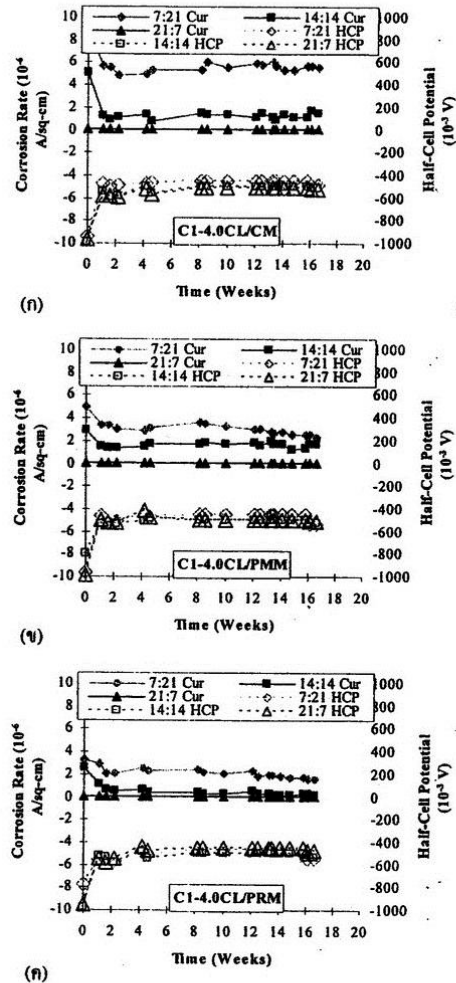
3.2 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ

ผลการทดสอบค่าความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตเก่า ดังแสดงในภาพที่ 6 จะเห็นได้ว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยจะมีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์ล้วน และเมื่อมีการเพิ่มปริมาณคลอไรด์ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าจะลดลง ซึ่งการลดลงของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของกระแสการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่มีคลอไรด์สูง [5]

นอกจากนี้ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุซ่อมแซมประเภทซีเมนต์มอร์ตาร์ โพลีเมอร์ โมดิฟายด์ ซีเมนต์มอร์ตาร์ และมอร์ตาร์สำหรับการซ่อมแซมแบบ Patching ได้ค่า 18, 60 และ 99 kOhm.cm ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่ากระแสการเกิดสนิมที่วัสดุประเภทมอร์ตาร์สำหรับการซ่อมแซมแบบ Patching มีค่ากระแสต่ำที่สุดเนื่องมาจากค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุสูงที่สุด

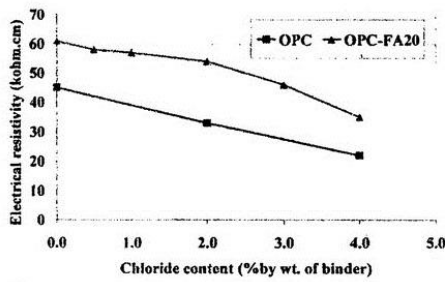
3.3 การประเมินอายุภายหลังการซ่อมแซม

จากผลการวัดกระแสของการเกิดสนิมของตัวอย่าง และกฎของฟาราเดย์ดังแสดงในสมการที่ (1) จะสามารถประเมินหาหน้าหนักที่สูญเสียของเหล็กเสริมจากการเกิดสนิมได้ โดยหากหน้าหนักที่สูญเสียเกินกว่า 10มก./ตร.ซม. จะก่อให้เกิดร้าวที่ผิวของคอนกรีต [6] โดยจากผลการประเมินดังแสดงในภาพที่ 7 และ 8 จากภาพแสดงให้เห็นว่า หากพื้นที่การซ่อมแซมมีพื้นที่มากกว่าพื้นที่ที่ไม่ได้รับการซ่อมแซมมาก จะทำให้เกิดความเสียหายในพื้นที่ที่ไม่ได้รับการซ่อมแซมเร็วขึ้น และการใช้วัสดุที่มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าสูง จะทำให้อายุการใช้งานของโครงสร้างยาวขึ้นได้

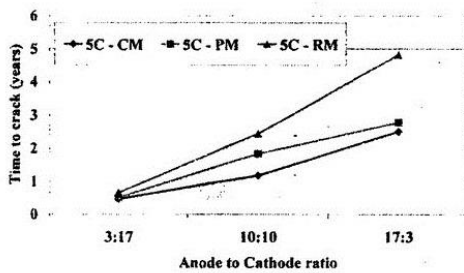


ภาพที่ 5 ผลการวัดกระแสการเกิดสนิม และค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของการซ่อมแซมด้วย (ก) ซีเมนต์มอร์ตาร์ (ข) โพลีเมอร์ โมดิฟายด์ซีเมนต์มอร์ตาร์ (ค) มอร์ตาร์สำหรับการซ่อมแซมแบบ Patching

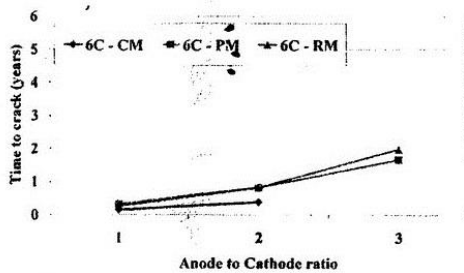
ภาพที่ 8 แสดงให้เห็นว่าในกรณีที่คลอไรด์ในคอนกรีตเก่าสูงขึ้น จะเป็นตัวเร่งให้เกิดสนิมเกิดในอัตราที่สูงขึ้น ซึ่งทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวเร็วขึ้นเมื่อเทียบกับผลการประเมินดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 6 ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า



ภาพที่ 7 ผลการประเมินอายุภายหลังการซ่อมแซมของตัวอย่างคอนกรีตเก่าที่มีคลอไรด์ร้อยละ 2



ภาพที่ 8 ผลการประเมินอายุภายหลังการซ่อมแซมของตัวอย่างคอนกรีตเก่าที่มีคลอไรด์ร้อยละ 4

4. สรุปผล

จากผลการทดลอง พบว่าปัจจัยที่มีผลสำคัญต่อความคงทนของการซ่อมแซมแบบเฉพาะที่ได้แก่ ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตเก่า ค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุซ่อมแซม และขนาดพื้นที่ของการซ่อมแซม โดยวัสดุที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงจะช่วยลดการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเดิมได้ รวมทั้งการซ่อมแซมพื้นที่

กว้างยังมีผลต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในบริเวณที่ไม่ได้รับการซ่อมแซมสูง ดังนั้นควรเลือกวัสดุ และวิธีการซ่อมแซมให้เหมาะสมเพื่อให้การซ่อมแซมแบบเฉพาะมีอายุการใช้งานได้นานขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล และศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC) สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Cleland, D.J., Yeoh, K.M., and Long, A.E., 1997, "Corrosion of Reinforcement in Concrete Repair", *Construction and Building Materials*, Vol.11, No. 4, pp. 233-238.

[2] Bentur, A., Diamond, S., and Berke N.S., 1997, "Steel corrosion in concrete", E&FN SPON, 1st Edition, London, United Kingdom, 201.

[3] Raupach, M., 1996, "Chloride-induced macrocell corrosion of steel in concrete - theoretical background and practical consequences", *Construction and Building Materials*, Vol. 10, No. 5, pp.329-338.

[4] Nanayakkara, O., and Kato, Y., 2007, "Macro-cell Corrosion of Partially Repaired Concrete Member", *Seisan-Kenkyu*, pp.263-266.

[5] ตามชช สมชายภักดี และคณะ, 2553. ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดสนิมของการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแบบเฉพาะที่. *การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 15*, อุบลราชธานี.

[6] JSCE (Japan Society of Civil Engineers), 2005, "Standard Specifications for Concrete Structures-2001 "Maintenance"", JSCE.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายตามยศ สมยาภักดิ์
วัน เดือน ปีเกิด 27 มกราคม 2524
ที่อยู่ 60/119 ซอยเสนาทิพย์ ถ.ติวานนท์ ต.ท่าทราย อ.เมือง จ.นนทบุรี 11000
ประวัติการศึกษา - สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา
จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เมื่อ พ.ศ. 2550

ประวัติการทำงาน

ศ.ศ. 2550 – ก.ศ. 2552 ห้างหุ้นส่วนจำกัด พี เค พี บิวท์, วิศวกรโยธา
ศ.ศ. 2552 – พ.ศ. 2553 บริษัท โชน เอนจิเนีย แอนด์ คอนสตรัคชั่น จำกัด, วิศวกรโยธา
มี.ย. 2553 – ปัจจุบัน บริษัท เร็ปคอน เซอร์วิส จำกัด, วิศวกรเทคนิค

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

ตามยศ สมยาภักดิ์, ภัควัฒน์ แสนเจริญ, ปิติสานต์ กร้ามาตร, สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล, **ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดสนิมของการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแบบเฉพาะที่**. การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 15 ระหว่างวันที่ 12-14 พฤษภาคม 2553 ณ โรงแรมสุโขทัยแกรนด์ คอนเวนชั่น เซนเตอร์ อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี.

ตามยศ สมยาภักดิ์, ภัควัฒน์ แสนเจริญ, ปิติสานต์ กร้ามาตร, สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล, **ปัจจัยที่มีผลต่ออายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับการซ่อมแซมบางส่วน**. การประชุมทางวิชาการคอนกรีตแห่งชาติครั้งที่ 6 ระหว่างวันที่ 20-22 ตุลาคม 2553 ณ Grand Pacific Several & Spa อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี.