

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการศึกษาผลกระทบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตโครงสร้าง
ที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล

The Effect of Steel Corrosion in Concrete Structure
for Marine Environment

คณะผู้วิจัย

สังกัด

ผศ.จักรพันธ์ แสงสุวรรณ

ม.ราชมงคลพระนคร

รศ.นกุล ชูทอง

ม.ราชมงคลพระนคร

ได้รับทุนวิจัยจาก

เงินผลประโยชน์คณะกรรมการอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

พ.ศ.2554

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	i
สารบัญรูป	iii
สารบัญตาราง	v
บทที่ 1 บทนำ	1-1
1.1 ความเป็นมาของโครงการ	1-1
1.2 วัตถุประสงค์	1-2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	1-2
1.4 โครงสร้างของรายงาน.....	1-2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	2-1
2.1 การเสื่อมสภาพของโครงสร้างเนื่องจากคลอไรด์ (Chloride Attack).....	2-1
2.2 หลักการเกิดสนิมของเหล็กเสริม	2-2
2.3 ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์.....	2-4
2.4 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต (Corrosion of Steel in Concrete).....	2-5
2.5 แบบจำลองการเสื่อมสภาพของคอนกรีตเสริมเหล็ก	2-10
2.6 กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริม.....	2-12
2.7 เทคนิคการตรวจเดือนสภาพการเกิดสนิม	2-13
2.7.1 วิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์.....	2-14
2.7.2 การวิเคราะห์ข้อมูลของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์	2-16
2.8 ความต้านทานของคอนกรีต.....	2-19
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการ	3-1
3.1 อุปกรณ์.....	3-1
3.2 วิธีการ.....	3-2
3.2.1 วัสดุ.....	3-2
3.2.2 อัตราส่วนผสม.....	3-3
3.3 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต.....	3-3
3.3.1 การเตรียมวัสดุผสม.....	3-3
3.3.2 การผสม.....	3-3
3.4 การเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม	3-5
3.4.1 การติดตั้งสายไฟฟ้า.....	3-6
3.4.2 การเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม	3-6
3.5 การตรวจสอบแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริม	3-7



	3.5.1 การเตรียมสารละลาย.....	3-7
	3.5.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ.....	3-7
	3.5.3 การตรวจสอบแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริม.....	3-7
บทที่ 4	ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	4-1
	4.1 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในตัวอย่างพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	4-1
	4.1.1 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์.....	4-1
บทที่ 5	สรุปผลและข้อเสนอแนะ	5-1
	5.1 การเกิดสนิมในเหล็กเสริมค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสนิมของแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล	5-1
	5.2 ข้อเสนอแนะ.....	5-1
	5.2.1 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์.....	5-1
	5.2.2 การเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม	5-1
	5.2.3 แนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริม	5-1
	5.2.4 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	5-2



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ระบบของเซลล์กัลวานิก; การเกิดปฏิกิริยา Oxidation ที่ขั้ว anode และการเกิดปฏิกิริยา Reduction ที่ขั้ว cathode	2-3
รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ Anode และ Cathode.....	2-6
รูปที่ 2.3 การเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าทั้งภายในและภายนอกเหล็กเสริม.....	2-7
รูปที่ 2.4 ปริมาตรของเหล็กเสริมที่เกิดสนิม.....	2-7
รูปที่ 2.5 เซลล์ตัวนำไฟฟ้าที่ทำให้เหล็กเกิดสนิมในคอนกรีต.....	2-8
รูปที่ 2.6 เส้นกราฟโพลารไรซ์แสดงถึงผลกระทบของความต้านทานทางไฟฟ้าของคอนกรีต	2-9
รูปที่ 2.7 วงจรไฟฟ้าเทียบเท่าของการเกิดสนิมของเหล็ก.....	2-9
รูปที่ 2.8 แบบจำลองกระบวนการเกิดสนิมของเสริมเหล็กในคอนกรีต	2-10
รูปที่ 2.9 แบบจำลองระยะเวลาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต	2-11
รูปที่ 2.10 แบบจำลองกระบวนการเสื่อมสภาพโดยคลอไรด์สำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีระยะหุ้มคอนกรีตหนา 2 นิ้ว (50 มม.).....	2-12
รูปที่ 2.11 กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริม.....	2-13
รูปที่ 2.12 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับใช้ทดสอบด้วยวิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ ตามมาตรฐาน ASTM C 876 โดยการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีต.....	2-14
รูปที่ 2.13 ตัวอย่างแผนที่เส้นชั้นความสูงของศักย์ไฟฟ้าที่สำรวจได้จาก half-cell potential.....	2-16
รูปที่ 2.14 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม(i_{cor})กับศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์	2-18
รูปที่ 2.15 การทดสอบวัดค่าความต้านทานของคอนกรีตด้วย 4 ขั้วไฟฟ้า.....	2-20
รูปที่ 2.16 เปรียบเทียบความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม (i_{cor}) และค่าความต้านทานของชิ้นส่วนคอนกรีต	2-22
รูปที่ 3.1 การผสมคอนกรีต.....	3-4
รูปที่ 3.2 ตัวอย่างพื้นคอนกรีต	3-4
รูปที่ 3.3 รายละเอียดแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กและตำแหน่งการวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้า	3-5
รูปที่ 3.4 การเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม	3-6
รูปที่ 3.5 การตรวจสอบความสม่ำเสมอของกระแสไฟฟ้า.....	3-6
รูปที่ 3.6 สารละลายคอมเปอร์ซัลเฟต (Copper Sulfate).....	3-7
รูปที่ 3.7 การเชื่อมต่อสายไฟฟ้าขั้วบวกและขั้วลบกับตัวอย่างทดสอบ	3-8
รูปที่ 3.8 การตรวจสอบแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริมด้วยเครื่องมือ Half-cell Potential Test....	3-8
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นพื้นคอนกรีตที่ไม่เร่งการเกิดสนิมบริเวณตำแหน่งจุดตัดกันของเหล็กเสริมโดยวิธีการของ Half-Cell Potential	4-4



- รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นพื้นคอนกรีตที่ไม่เร่งการเกิดสนิม บริเวณตำแหน่งตรงกลางของเหล็กเสริมโดยวิธีการของ Half-Cell Potential 4-4
- รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นพื้นคอนกรีตที่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมบริเวณตำแหน่งจุดตัดกันของเหล็กเสริมโดยวิธีการของ Half-Cell Potential 4-5
- รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นพื้นคอนกรีตที่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมบริเวณตำแหน่งตรงกลางของเหล็กเสริมโดยวิธีการของ Half-Cell Potential 4-5



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของคอนกรีตและความเสี่ยงของการเกิดสนิม	2-21
ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของคอนกรีตและความเป็นไปได้ในการเกิดสนิม	2-21
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	3-2
ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของเหล็กเสริม	3-2
ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต.....	3-3
ตารางที่ 3.4 ความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริม ASTM C 876	3-8
ตารางที่ 4.1 ความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริม ASTM C 876	4-1
ตารางที่ 4.2 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล	4-2
ตารางที่ 4.3 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล	4-2
ตารางที่ 4.4 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล	4-2
ตารางที่ 4.5 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล	4-3



บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

ในอดีตจนถึงปัจจุบันโครงสร้างโดยทั่วไปส่วนมากเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กเพราะผู้ออกแบบโครงสร้างในอดีตมีความเข้าใจว่าจะมีอายุการใช้งานได้นานหากอยู่ในสภาวะปกติ แต่ในความเป็นจริงนั้น การออกแบบโดยส่วนมากจะไม่คำนึงถึงความต้านทานทางด้านความคงทนของคอนกรีต เช่นถ้าหากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องสัมผัสกับน้ำทะเล น้ำกร่อยหรือก่อสร้างอยู่บริเวณชายฝั่งงทะเล รวมทั้งโครงสร้างใต้ดินบริเวณนั้นจะประสบปัญหาความเสียหายอย่างมากจากสภาพแวดล้อม ซึ่งจะมีผลทำให้คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตถูกทำลายและการรับกำลังจะลดลงอย่างต่อเนื่อง จึงต้องแก้ปัญหาเบื้องต้นในการบำรุงรักษาและซ่อมแซมเป็นการช่วยยืดอายุให้โครงสร้างสามารถใช้งานได้ต่อไปอีก โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตมีความสามารถในการป้องกันการเกิดสนิมเหล็กเสริมได้เป็นอย่างดี ด้วยเหตุผลที่ว่าในคอนกรีตเองมีค่าความเป็นด่าง (alkaline) ที่สูงมาก ซึ่งทำให้เกิดเป็นฟิล์มช่วยป้องกันผิวของเหล็กเสริมไว้ไม่ให้เกิดเป็นสนิมขึ้นได้โดยง่าย แต่อย่างไรก็ดี การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตก็อาจเกิดขึ้นเนื่องจากคุณภาพของตัวคอนกรีตเอง เช่นการปนเปื้อนของคลอไรด์ ที่มีอยู่ในวัสดุดิบที่ใช้ผสมคอนกรีต คอนกรีตมีความพรุน (porosity) มาก เป็นต้น หรือโครงสร้างคอนกรีตอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีคลอไรด์รุนแรงซึ่งเอื้ออำนวยต่อการแพร่เข้าไปในเนื้อคอนกรีต ทั้งนี้การเกิดสนิมของเหล็กเสริมมีสาเหตุเนื่องจากปริมาณของคลอไรด์ที่แพร่เข้าไปสะสมอยู่ที่บริเวณเหล็กเสริมมีค่ามากเพียงพอที่จะทำให้ฟิล์มที่ช่วยป้องกันผิวเหล็กเสริมถูกทำลายและเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Process) ขึ้น ส่งผลให้เหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีต กับเหล็กเสริม โดยที่ปริมาณคลอไรด์ที่มากเพียงพอจะทำให้เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิมนี้ โดยทั่วไปเรียกว่า ปริมาณคลอไรด์วิกฤต และนอกจากนี้ยังทำให้ชิ้นส่วนของโครงสร้างเกิดการแอ่นตัวเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเหล็กเกิดสนิมเพิ่มขึ้นเป็นผลทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเสื่อมสภาพและอายุการใช้งานลดน้อยลง

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นพบว่าการซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตจึงทำให้ความคงทนและอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ติดอยู่ชายฝั่งทะเลนั้นได้รับผลกระทบจากคลอไรด์มากกว่าปกติ เนื่องจากสาเหตุหลัก ๆ ของการเกิดสนิมที่เหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีสาเหตุมาจากคลอไรด์ ในการวิจัยนี้จึงมีการศึกษาเกี่ยวกับปริมาณของคลอไรด์โดยวิธีทางไฟฟ้าเคมีเพื่อหาค่าระดับของความเปราะกรวด และค่าของตัวอย่างคอนกรีตตามระดับชั้นความลึก และตรวจสอบด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าด้วยวิธีครึ่งเซลล์ในการวัดแนวโน้มการเกิดสนิม



1.2 วัตถุประสงค์

- 1) ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสนิม (Corrosion Potential, E_{corr}) ในเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในคอนกรีตกับระยะเวลาโดยวิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (half-Cell Potential)

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษาวิจัยนี้จะคำนึงถึงการเกิดสนิมของเหล็กเสริม ซึ่งพบมากในอาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยทั่วไป และการวิจัยนี้ทดสอบการเกิดสนิมในคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการเร่งการเกิดสนิมด้วยวิธีทางไฟฟ้าด้วยกระแสไฟฟ้า 6 โวลต์ โดยมีปริมาณคลอไรด์ผสมอยู่ในคอนกรีตที่ร้อยละ 0, 1, 3 และ 5 ซึ่งพฤติกรรมอาจจะแตกต่างจากสภาพจริงเนื่องจากถูกจำกัดในด้านระยะเวลา และสำหรับวิธีการตรวจสอบแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตใช้วิธีการของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ และใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีในการลดปริมาณคลอไรด์ในคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้การควบคุมความเข้มข้นพื้นที่ผิวคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการศึกษาและระยะเวลาในการศึกษา

1.4 โครงสร้างของรายงาน

การศึกษามลกระทบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเลนี้ แบ่งการนำเสนอเนื้อหาสาระในเรื่องต่างๆ ดังต่อไปนี้

- บทที่ 1 บทนำ
- บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
- บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการ
- บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง
- บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ



บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เป็นที่ทราบกันดีว่าการบำรุงรักษาและการบูรณะซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับความเสียหายจากการเกิดสนิมในเหล็กเสริมให้กลับมามีความแข็งแรงเหมือนสภาพเดิมนั้นต้องเสียค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะโครงสร้างที่อยู่ในสภาวะสิ่งแวดล้อมทะเล ซึ่งการกำหนดต้นทุนค่าก่อสร้างในแต่ละปีจะประกอบไปด้วยงบประมาณที่ใช้ในการบำรุงรักษาและบูรณะซ่อมแซมโครงสร้างที่เสื่อมสภาพเนื่องจากสนิม ซึ่งใช้งบประมาณในการก่อสร้างมีมูลค่ามากกว่าโครงการก่อสร้างใหม่

การพัฒนาเครื่องมือเพื่อใช้ตรวจสอบหาค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ซึ่งเป็นการตรวจสอบด้วยวิธีทดสอบแบบไม่ทำลายสามารถบอกเดือนให้ทราบล่วงหน้าของการเกิดสนิมด้วยการวัดค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กซึ่งมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในต่างประเทศเมื่อประมาณ ค.ศ. 1993 โดย (Broomfield JP., et al, 1993) โดยทั่วไปเครื่องมือที่นิยมใช้อาจแบ่งตามวิธีการเป็น 3 วิธีการคือ วิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (half-cell potential) วิธีการวัดค่าความต้านทานของคอนกรีต (Concrete Resistivity) และวิธีการวัดค่าความต้านทานโพลาไรซ์ (Polarization Resistance)

สำหรับเนื้อหารายงานวิจัยส่วนนี้ประกอบไปด้วยกลไกการเกิดสนิมและหลักการที่ใช้ในการวัดค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

2.1 การเสื่อมสภาพของโครงสร้างเนื่องจากคลอไรด์ (Chloride Attack)

โดยธรรมชาติเหล็กเสริมในคอนกรีตจะมี Passivation Film ปกป้องเหล็กเสริมจากการเกิดสนิมโดย Passive Layer ที่เคลือบที่ผิวเหล็กเสริมนี้ช่วยป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดย Passive Layer มีเสถียรภาพอยู่ในสภาวะที่มีความเป็นด่างสูงซึ่งเป็นธรรมชาติของคอนกรีตที่มี PH อยู่ในช่วง 12 ถึง 13 คอนกรีตจึงเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติป้องกันเหล็กเสริมจากการเกิดสนิมตามธรรมชาติเนื่องจากการเสื่อมสภาพของคอนกรีตจากสนิมเหล็กในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นมีผลกระทบส่วนใหญ่มาจากปริมาณคลอไรด์บริเวณเหล็กเสริม โดยเมื่อคลอไรด์ไอออนนั้นจะซึมผ่านเข้าไปภายในของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและเมื่อซึมเข้าไปถึงผิวของเหล็กเสริมในปริมาณมากพอ (Threshold concentration) ซึ่งจะทำให้ Passive layer ที่ป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมถูกทำลาย (Depassivation) และคลอไรด์ไอออนจะทำลายฟิล์มที่เคลือบผิวของเหล็กเสริมซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดสนิมขึ้นที่เหล็กเสริมได้หากมีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเกิดสนิม กล่าวคือมีน้ำและออกซิเจนเพียงพอ การเกิดสนิมจะส่งผลให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นมีความสามารถในการใช้งานลดลงและอายุการใช้งานน้อยลง



แหล่งที่มาของคลอไรด์

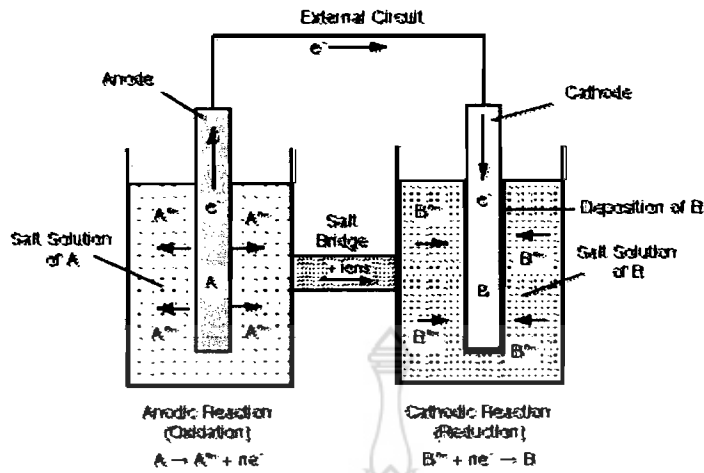
- 1) น้ำที่ใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีต
- 2) ทราบและหินที่ใช้ในการผสมคอนกรีต (โดยเฉพาะทรายที่มาจากบริเวณใกล้ทะเล)
- 3) น้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ที่พบในการเร่งการก่อตัว
- 4) สภาพการใช้งาน ซึ่งเป็นปัจจัยที่ได้รับปริมาณคลอไรด์มากที่สุด เช่น จากน้ำทะเล น้ำกร่อยและดิน

2.2 หลักการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

ขบวนการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าของเซลล์ (Electrolytic Cell) ในการเกิดสนิมเป็นขบวนการเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้า-เคมี ที่มีความยุ่งยากซับซ้อนเนื่องจากเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในคอนกรีตมีการสูญเสียอิเล็กตรอนซึ่งจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าทั้งระบบของคอนกรีตเสริมเหล็ก

ในระบบของการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าเป็นวิธีการที่นิยมใช้กันซึ่งจะต้องมีความเข้าใจถึงกลไกของการกัดกร่อนสามารถอธิบายได้จากขบวนการของเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ เซลล์กัลวานิก (Galvanic cell) และเซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic Cell) โดยที่เซลล์ไฟฟ้าเคมีเมื่อเกิดปฏิกิริยาเคมีจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า ในขณะที่เซลล์อิเล็กโทรไลต์เป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ต้องผ่านกระแสไฟฟ้าจากภายนอกเข้าไปจึงจะเกิดปฏิกิริยาเคมี และจากรูปที่ 2.1 แสดงแผนภูมิการเกิดปฏิกิริยาการถ่ายโอนอิเล็กตรอนในเซลล์กัลวานิก โดยที่โลหะที่เกิดการกัดกร่อนเป็นขบวนการที่เกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (การรับและเสียอิเล็กตรอน) เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านสื่อนำไฟฟ้าที่อยู่ภายนอกและการเคลื่อนที่ของไอออนที่อยู่ภายในโดยมีสารละลายเป็นตัวนำ โดยแนวคิดพื้นฐานนี้เป็นที่นิยมใช้กันและจะต้องเข้าใจถึงกลไกของการกัดกร่อนเป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาสื่อนำทางไฟฟ้าในระบบของเซลล์กัลวานิก ในระบบนี้จะประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ชนิด เมื่อพิจารณาการเกิดปฏิกิริยาเคมีโดยที่ขั้ว anode ของโลหะ A จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำหน้าที่เป็นขั้วลบสูญเสียอิเล็กตรอน (e^-) กลายเป็นไอออน (A^{n+}) อยู่ในสารละลายซึ่งเกิดขึ้นพร้อมกันเสมอและอิเล็กตรอน (e^-) ที่สูญเสียไปจะเคลื่อนที่ผ่านตัวนำไฟฟ้าที่อยู่ภายนอกไปยังขั้ว cathode เป็นขั้วไฟฟ้าที่รับอิเล็กตรอนเรียกปฏิกิริยานี้ว่าปฏิกิริยารีดักชัน





รูปที่ 2.1 ระบบของเซลล์กัลวานิก; การเกิดปฏิกิริยา Oxidation ที่ขั้ว anode และการเกิดปฏิกิริยา Reduction ที่ขั้ว cathode

จากรูปที่ 2.1 แสดงแผนภูมิที่มีส่วนประกอบพื้นฐานของระบบเซลล์กัลวานิก โดยที่ในสารละลาย A จะมีไอออน (A^{n+}) ที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากโลหะ A สูญเสียอิเล็กตรอนและกลายเป็นไอออน (A^{n+}) ออกมาทำให้ประจุสุทธิของสารละลายมีค่าเป็นบวกเพิ่มขึ้น

การเชื่อมโยงของสารละลาย A และ B โดยสะพานไอออน (Salt bridge) ซึ่งมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์ บรรจุอยู่ และจะเกิดปฏิกิริยาการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างโลหะทั้งสองที่แช่อยู่ในสารละลายทิศทางเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Anode) ไปยังขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (cathode) เมื่อโลหะ A ที่แช่ในสารละลาย A เริ่มสึกกร่อน เนื่องจากโลหะ A สูญเสียอิเล็กตรอนกลายเป็นไอออนบวก (A^{n+}) อยู่ในสารละลาย เขียนสมการปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ดังสมการที่ 1 ในขณะที่ขั้วไฟฟ้า cathode มีไอออน (B^{m+}) อยู่ในสารละลาย B จะถูกใช้ไปร่วมกับอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่มาจากขั้วไฟฟ้า anode และกลายเป็นอะตอมเกาะติดอยู่ที่โลหะ B จนกระทั่งไอออนบวก (B^{m+}) ในสารละลาย B ลดลง สมการปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเขียนได้ดังสมการที่ 2



โดยที่ A และ B แทนด้วยอะตอมของโลหะ A และ B

A^{n+} และ B^{m+} แทนด้วยไอออนบวกของโลหะ A และ B



ne^- แสดงถึงจำนวนการสูญเสียอิเล็กตรอนของโลหะ A

สะพานไอออน (Salt bridge) ทำหน้าที่รักษาการสมดุลระหว่างไอออนบวกและไอออนลบในแต่ละครึ่งเซลล์ให้คงที่ เนื่องจากโลหะ A สูญเสียอิเล็กตรอนและกลายเป็นไอออน (A^{n+}) ออกมาอยู่ในสารละลาย A ทำให้ไอออน (A^{n+}) ในสารละลายมีค่าเป็นบวกเพิ่มขึ้น ในขณะที่ไอออน (B^{m+}) ในสารละลาย B ถูกใช้ไปรวมกับอิเล็กตรอนที่ขั้วไฟฟ้า cathode มีค่าเป็นลบและกลายเป็นอะตอมเกาะติดกับโลหะ B ส่งผลทำให้ไอออนบวก (B^{m+}) ในสารละลาย B ลดลงและเหลือไอออนบวก (B^{m+}) น้อยกว่าที่มีอยู่ในสารละลาย B ผลก็คือทำให้ประจุสุทธิในสารละลาย B เป็นลบหรือมีค่าเป็นบวกลดลง ดังนั้นเพื่อให้เกิดการสมดุล สารละลายโพตัสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่อยู่ในสะพานไอออน (Salt bridge) จะเกิดการแตกตัวจะส่งให้ไอออนลบ (Cl^-) ลงไปในสารละลาย A ซึ่งเป็นด้านที่มีไอออนบวกเพิ่มขึ้นในขณะเดียวกันไอออนบวก (B^{m+}) ในสารละลาย B ถูกใช้ไปจนทำให้ไอออนบวกลดลง สะพานไอออนก็จะทำหน้าที่ส่งไอออนบวก (K^+) ลงมาในสารละลาย B ทำให้มีปริมาณไอออนบวกในสารละลาย A และ B สมดุลย์กันผลก็คือปริมาณไอออนสุทธิในสารละลายทั้งสองจะคงที่ พิจารณาได้ว่าจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทั้งหมดนี้สามารถแยกออกมาเป็นครึ่งปฏิกิริยาดังนี้

ผลของทั้งสองปฏิกิริยาที่มีไอออนบวกเพิ่มขึ้นในสารละลาย A ที่ขั้วไฟฟ้า anode ในขณะที่ไอออนบวกถูกใช้หมดไปนสารละลาย B ที่ขั้วไฟฟ้า Cathode ปฏิกิริยาครึ่งเซลล์ยังคงทำหน้าที่เชื่อมต่ออยู่ระหว่างสองสารละลายเพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลครบวงจร แต่ถ้าลือที่เป็นตัวนำไม่สามารถเชื่อมต่อระหว่างขั้วไฟฟ้าก็จะไม่เกิดการกัดกร่อนขึ้นที่ขั้ว Cathode และก็จะไม่มีอะตอมสะสมอยู่ที่ ขั้ว Cathode ก็จะไม่เกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อน

2.3 ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์

การวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากปฏิกิริยาไฟฟ้าในลักษณะศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (half-cell Potentials) ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ไม่สามารถที่จะวัดค่าได้ด้วยขั้วไฟฟ้าเดี่ยว ดังนั้นหากนำเอาครึ่งเซลล์ต่างชนิดมาต่อกันให้เป็นวงจรผลของศักย์ไฟฟ้าที่ได้มีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของครึ่งเซลล์ที่นำมาต่อกันซึ่งเป็นศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ก็ลาวานิกมีหน่วยในการวัดค่าเป็นโวลต์ ทั้งนี้หากนำศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ไฮโดรเจนมาตรฐานไปเปรียบเทียบกับครึ่งเซลล์ชนิดใดชนิดหนึ่งโดยนำไปต่อเป็นเซลล์ไฟฟ้าคู่กับครึ่งเซลล์ไฮโดรเจนมาตรฐานค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่วัดได้จะเป็นศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานครึ่งเซลล์นั้น ศักย์ไฟฟ้าเหล่านี้มีผลต่อการกัดกร่อนที่ขั้วไฟฟ้า anode เมื่อมีกระแสไฟฟ้าจากภายนอกครบวงจร โดยปรกติศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์จะแสดงในรูปของปฏิกิริยา Oxidation ซึ่งเกิดจากอะตอมของโลหะเกิดการแตกตัวปล่อยอิเล็กตรอนและไอออนบวกออกมาพร้อมกันโดยที่ผลกระทบบของค่าของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไอออนบวกในสารละลายที่มีขั้วไฟฟ้าแช่อยู่และอุณหภูมิของสารละลาย ดังนั้นค่าของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐานเป็นการวัดความเข้มข้นของสารละลายที่อุณหภูมิมาตรฐาน และสำหรับค่าที่วัดได้จะมีค่าที่เป็นลบมากกว่าซึ่งจะชี้ให้เห็นถึงแนวโน้มของโลหะเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนและส่งผลต่อการกัดกร่อนของโลหะ

สมมุติให้วงจรไฟฟ้าภายนอกจากภาพที่ 1 แทนด้วยโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานไฟฟ้าที่มีความละเอียดสูงซึ่งไม่มีกระแสไฟฟ้าจากภายนอกผ่านเข้ามาในวงจรเป็นเงื่อนไขของสภาวะที่เรียกว่า (Open-circuit



Potential) ค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จากโวลต์มิเตอร์เป็นค่าของศักย์ไฟฟ้าของแต่ละขั้วไฟฟ้าที่มีความแตกต่างกันระหว่างปฏิกิริยา anodic และปฏิกิริยา cathodic (Brown, T.L. and LeMay, H.E., Jr., 1988)

จากตัวอย่างลักษณะนี้ดังรูปที่ 2.1 ถ้าสมมุติให้ขั้วไฟฟ้าอันหนึ่งเป็นเหล็กแช่ในสารละลายที่มีไอออนของเหล็กและอีกขั้วไฟฟ้าเป็นสังกะสีแช่ในสารละลายซึ่งมีซิงค์ไอออนละลายอยู่จะให้ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐานสำหรับปฏิกิริยา Oxidation ของเหล็กอ่านได้ -0.44 โวลต์ และค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐานสำหรับปฏิกิริยา Oxidation ของสังกะสีอ่านได้ -0.76 โวลต์ (Fontana, M.G., 1986) ศักย์ไฟฟ้าของสังกะสีจะมีค่าเป็นลบมากกว่าเหล็ก เพราะว่าแนวโน้มการสูญเสียอิเล็กตรอน

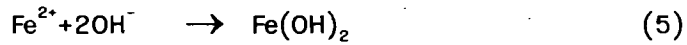
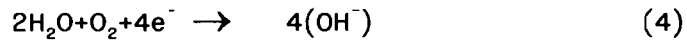
ของสังกะสีมีมากกว่าเหล็ก และถ้าปลายด้านบวกของโวลต์มิเตอร์มีการเชื่อมต่อเข้ากับขั้วไฟฟ้าสังกะสี ค่าของศักย์ไฟฟ้าอ่านได้ -0.32 โวลต์ และถ้าปลายด้านบวกของโวลต์มิเตอร์เชื่อมต่อเข้ากับขั้ว cathode ค่าศักย์ไฟฟ้าอ่านได้ $+0.32$ โวลต์ ดังนั้นขั้วไฟฟ้าสังกะสีจะเป็นขั้ว anode และขั้วไฟฟ้าของเหล็กจะเป็นขั้ว cathode แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนของอิเล็กตรอนที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเคลื่อนที่จากขั้วไฟฟ้าสังกะสี (anode) ผ่านวงจรไฟฟ้าภายนอกไปยังขั้วไฟฟ้าของเหล็ก (cathode) ซึ่งสวนทางกับการไหลของกระแสไฟฟ้าซึ่งไหลจากขั้วบวกไปยังขั้วลบ ดังนั้นสังกะสีจึงเป็นขั้วลบและเหล็กเป็นขั้วบวกหรือกล่าวได้ว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากขั้วที่มีศักย์ไฟฟ้าน้อยกว่าไปยังขั้วที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าสรุปได้ว่าครึ่งเซลล์ที่รับอิเล็กตรอน (cathode) มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าครึ่งเซลล์ที่ให้อิเล็กตรอน (anode)

2.4 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต (Corrosion of Steel in Concrete)

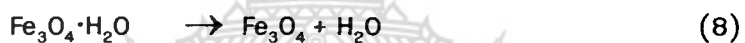
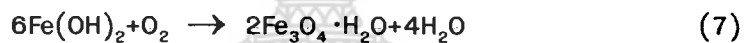
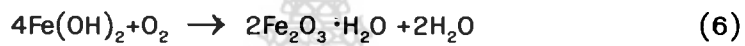
การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีประกอบด้วยปฏิกิริยาแอนอดิก (Anodic Reaction) และปฏิกิริยาแคโทดิก (Cathodic Reaction) กระบวนการเกิดสนิมเริ่มจากการมีความชื้นเพียงพอที่จะทำให้อะตอมของเหล็กสูญเสียอิเล็กตรอนกลายเป็นไอออน (Fe^{2+}) ดังสมการที่ (3) ละลายอยู่ในสารละลาย Electrolyte รอบๆเหล็กเสริมเรียกบริเวณนี้เป็นแอโนดและอิเล็กตรอนนี้ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้า ในขณะที่บริเวณเหล็กเสริมที่ไม่มีการแตกตัวของอิเล็กตรอนและไอออนบริเวณนั้นจะมีศักย์ไฟฟ้าน้อยกว่าซึ่งทำหน้าที่เป็นแคโทด อธิบายได้ดังรูปที่ 4 แสดงถึงกระบวนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ดังรูปที่ 2.2 อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นที่แอโนดซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าที่สูงจะเคลื่อนที่ไปตามเหล็กเสริมซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้าและเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีศักย์ไฟฟ้าน้อยกว่าซึ่งเป็นแคโทดและทำปฏิกิริยากับน้ำ (H_2O) และออกซิเจน (O_2) ที่อยู่บริเวณนี้เกิดเป็นไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ขึ้นดังสมการที่ 4 และหลังจากนั้นจะเกิดการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าซึ่งเกิดขึ้นทั้งภายในและภายนอกเหล็กเสริม สำหรับกระแสภายในเหล็กเสริมเป็นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่จากแอโนดไปสู่แคโทด ในขณะที่กระแสภายนอกเหล็กเสริมเป็นการเคลื่อนที่ของ (Fe^{2+}) และ (OH^-) ผ่านสารละลายในช่องว่าง (Pore Solution) ของคอนกรีตรอบๆเหล็กเสริม โดยประจุลบคือ (OH^-) จะเคลื่อนที่จากขั้วแคโทดไปสู่แอโนดและประจุบวก (Fe^{2+}) จะเคลื่อนที่จากแอโนดไปสู่แคโทด ดังรูปที่ 2.3 การเคลื่อนที่ของไอออนโดยผ่านสารละลายในช่องว่างของคอนกรีตเป็นปัจจัยที่สำคัญของการเกิดการกัดกร่อน สารละลายในช่องว่างส่วนใหญ่เป็นสารละลายของ Alkali และ Calcium Hydroxide เปรียบเหมือนเป็นสารละลาย Electrolyte ทำให้เกิดการครบวงจรของกัลวีวานิกเซลล์และเกิดการกัดกร่อนขึ้น (Bentur et al., 1997) แต่ถ้าน้ำในช่องว่างนี้แห้งหรือโครงสร้างภายในของคอนกรีตที่บ่มแน่นและ



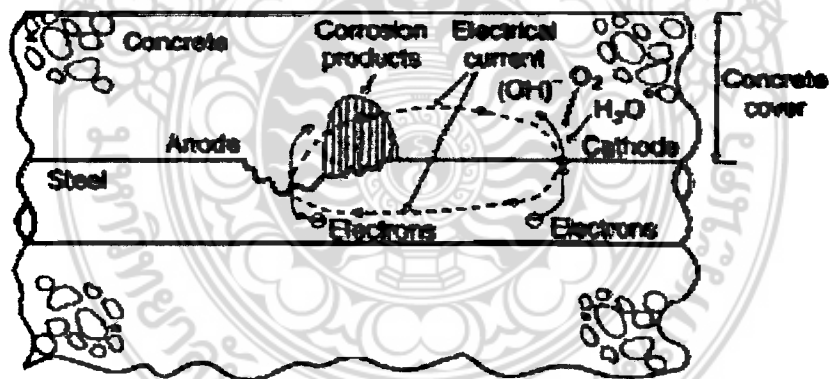
ช่องว่างภายในเกิดขึ้นไม่ต่อเนื่องการไหลของไอออนผ่านสารละลายในช่องว่างจะเกิดขึ้นได้ยากขึ้นซึ่งทำให้การเกิดการกัดกร่อนช้าลงจนหยุดการกัดกร่อน



จากการเคลื่อนที่ของ Fe^{2+} และ OH^- จากแอโนดและแคโทดตามลำดับ โดยที่ OH^- จากแคโทดเคลื่อนที่ไปรวมตัวกับ Fe^{2+} และทำปฏิกิริยาเกิดเป็น $\text{Fe}(\text{OH})_2$ (ferrous hydroxide) ดังสมการที่ 5 ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับ O_2 ต่อได้และเกิดเป็นสนิมเหล็ก $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (hydrate ferric oxide) หรือ red-brown rust และ Fe_3O_4 (black magnetite) ซึ่งเกิดจาก $\text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (Green hydrate magnetite) ดังสมการที่ 6, 7 และ 8

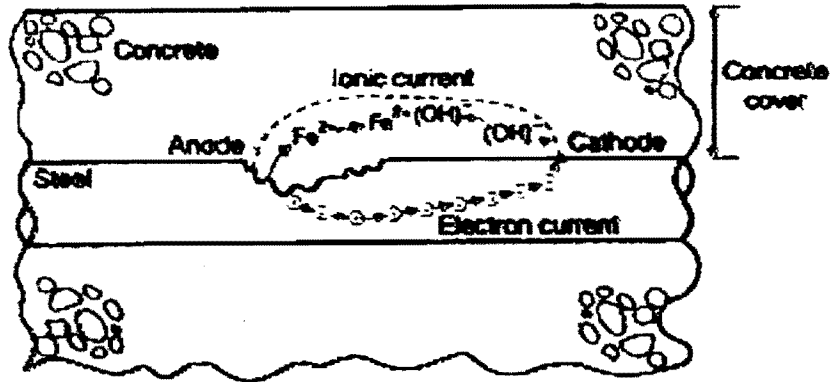


ซึ่งผลิตภัณฑ์สนิมเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของการกัดกร่อนคือสนิมในรูปแบบต่างๆ มีปริมาณมากกว่าเหล็กก่อนเกิดปฏิกิริยา 4 ถึง 6 เท่า (Nielsen., A, 1985) ดังรูปที่ 2.4 ทำให้เกิดแรงดันภายในและคอนกรีตเกิดการแตกร้าวเสียหายได้ นอกจากนี้ในส่วนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบางจุดเหล็กเสริมมีพื้นที่หน้าตัดลดลงส่งผลต่อการรับแรงของโครงสร้างซึ่งถ้าหากไม่ได้ซ่อมแซมให้ถูกต้องตามวิธีโครงสร้างอาจเกิดการวิบัติได้

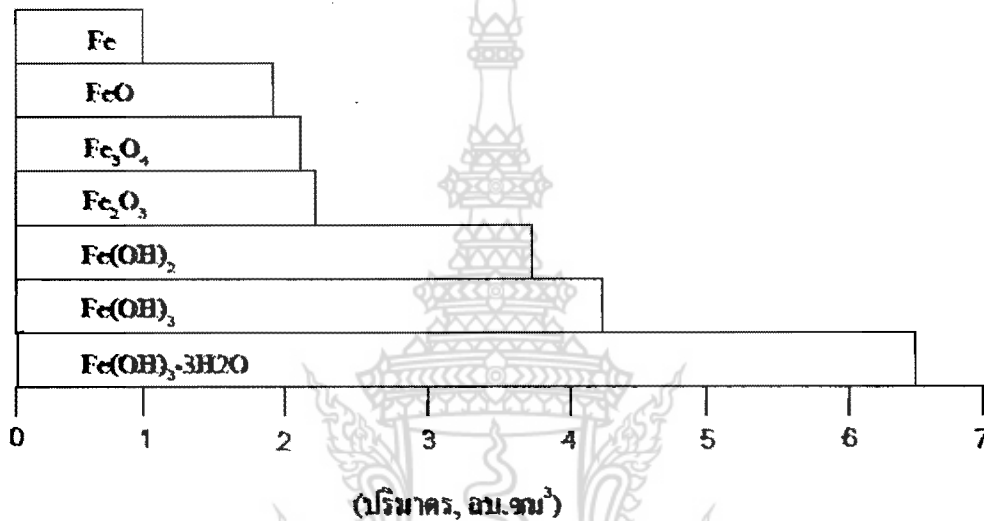


รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ Anode และ Cathode





รูปที่ 2.3 การเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าทั้งภายในและภายนอกเหล็กเสริม



รูปที่ 2.4 ปริมาตรของเหล็กเสริมที่เกิดสนิม

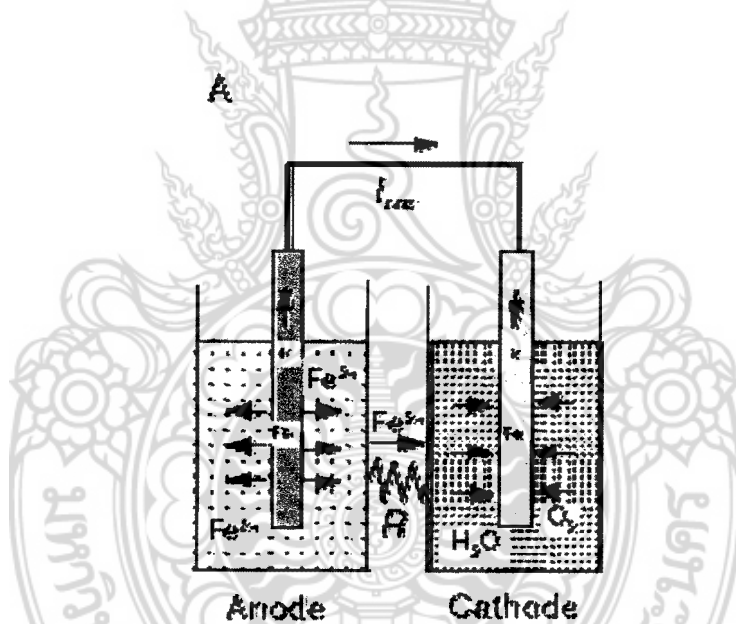
จากรายละเอียดข้างต้นที่ได้อธิบายถึงกระบวนการกัดกร่อนของเหล็กเสริมซึ่งโดยทั่วไปแล้วการกัดกร่อนของเหล็กเสริมสามารถเกิดขึ้นเองได้ในธรรมชาติและเกิดขึ้นได้ตลอดเวลาในบริเวณที่มีความชื้นแต่สำหรับเหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตนั้น จะอยู่ในสภาวะที่ไม่เกิดสนิมเนื่องจากมี Passivation film ที่อยู่โดยรอบเหล็กเสริมในคอนกรีตซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ และในช่วงที่คอนกรีตมีการพัฒนากำลัง คอนกรีตจะมีความเป็นด่างสูงมีค่า PH ประมาณ 13 ซึ่งสามารถช่วยป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ (Bentur et al.,1997) เนื่องจากในสภาวะของการเป็นด่างสูงเหล็กจะไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาอะโนดิกได้ นั่นคือเหล็กจะไม่แตกตัวเป็นไอออนทำให้ปฏิกิริยาการเกิดสนิมไม่สามารถเกิดขึ้นได้ อย่างไรก็ตามโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไปนั้นมักอยู่ในสภาพแวดล้อมที่อาจสัมผัสกับสารเคมีกรด หรือในสภาพสิ่งแวดล้อมที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมเช่นโครงสร้างที่อยู่บริเวณชายฝั่งทะเล จะเกิดผลกระทบเนื่องจากคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นจะเป็นตัวทำลายสภาพความเป็นด่างของคอนกรีตทำให้ค่า PH ลดลงมีค่าน้อยกว่า 13 จึงเป็นเหตุผลทำให้เร่งการเกิดสนิมได้เร็วขึ้น จากเซลล์ตัวนำทางไฟฟ้าแบบ



Short-Circuited Electrolytic Cell ดังรูปที่ 2.5 แสดงถึงการไหลของไอออนในสารละลายระหว่างเซลล์ตัวนำไฟฟ้าโดยมีสะพานเกลือเป็นตัวเชื่อมทำหน้าที่ช่วยรักษาความสมดุลของเซลล์ตัวนำไฟฟ้าให้มีความเสถียรภาพ ในกรณีของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในคอนกรีตโดยที่คอนกรีตทำหน้าที่เป็นสื่อตัวนำทางไฟฟ้าของไอออนระหว่างแอโนดและแคโทดซึ่งทำหน้าที่เหมือนสะพานให้ไอออนสามารถเคลื่อนที่ไปมาได้ระหว่างครึ่งเซลล์ สำหรับในโพรงเล็กๆของโครงสร้าง (Pore Structure) ของเพสต์ (paste) มีสารละลายอยู่ภายในซึ่งโพรงเล็กๆนั้นจะอยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยสารละลายจะเป็นตัวนำไอออนให้เคลื่อนที่ได้ง่ายโดยทั่วไปในคอนกรีต การเคลื่อนที่ของไอออนถูกควบคุมด้วยสื่อตัวนำทางไฟฟ้าของ paste ดังรูปที่ 2.5 แสดงถึงสื่อตัวนำไฟฟ้าของสะพานที่เชื่อมต่อเนื่องกันระหว่างสารละลายซึ่งแทนด้วยอุปกรณ์ต้านทานกระแสไฟฟ้าในวงจร(R)ทำหน้าที่เป็นตัวจำกัดการไหลของไอออนระหว่างครึ่งเซลล์และช่วยลดค่าของกระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิมโดยเปรียบเทียบกับสื่อตัวนำไฟฟ้างดรูปที่ 2.6 กราฟเส้นโปลาไรซ์ดังรูปที่ 2.7 ได้อธิบายถึงการลดลงของกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม เนื่องจากแรงดันไฟฟ้ามีความแตกต่างกันระหว่าง ครึ่งเซลล์ของศักย์ไฟฟ้าที่สมดุล equilibrium potential ของขั้วแคโทดและแอโนด ($E_c - E_a$) เป็นการทำให้แรงดันไฟฟ้าหมดไปที่ขั้ว electrode และความต้านทานของตัวนำไฟฟ้าของคอนกรีตจะลดลง (West., J.M., 1986)

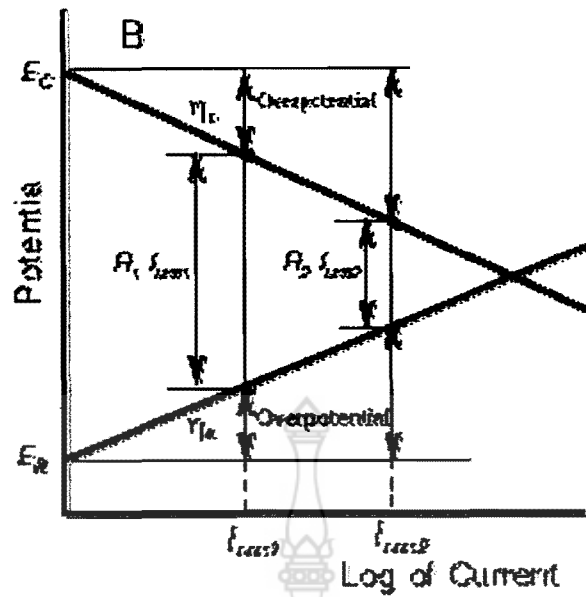
$$E_c - E_a = \eta_a + |\eta_c| + I_{cor}R \quad (9)$$

โดยที่ η_a และ η_c เป็น Overpotentials ของขั้วไฟฟ้าอ้างอิง, $|\eta_c|$ มีค่าเป็นบวกเสมอ, R เป็นความต้านทานของสื่อตัวนำไฟฟ้าและ I_{cor} เป็นกระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิมแท้จริง ซึ่งกระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิมมีค่าต่ำกว่าซึ่งค่าความต้านทานจะเท่ากับศูนย์ ดังรูปที่ 2.6 และรูปที่ 2.7

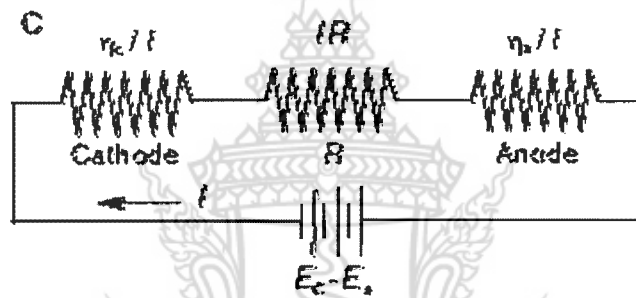


รูปที่ 2.5 เซลล์ตัวนำไฟฟ้าที่ทำให้เหล็กเกิดสนิมในคอนกรีต





รูปที่ 2.6 เส้นกราฟโพลารไรซ์แสดงถึงผลกระทบของความต้านทานทางไฟฟ้าของคอนกรีต



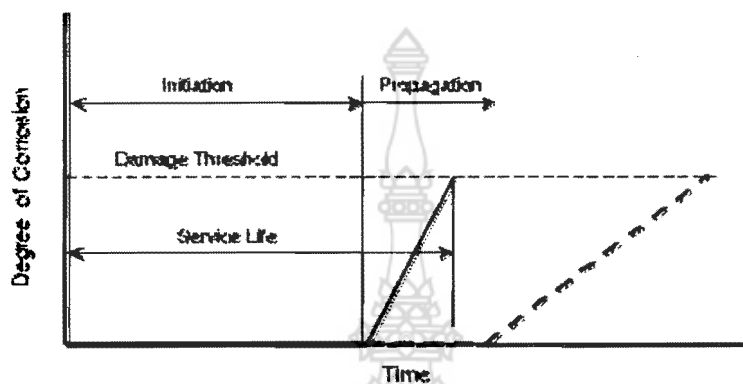
รูปที่ 2.7 วงจรไฟฟ้าเทียบเท่าของการเกิดสนิมของเหล็ก

จากรูปที่ 2.7 แสดงถึงวงจรไฟฟ้าเทียบเท่าของเหล็กเสริมที่เป็นสนิม (Wwst, J.M., 1986) ขั้วไฟฟ้าที่มีสภาวะตรงกันข้าม (Polarized electrode) แสดงเป็นอุปกรณ์ต้านทานทางไฟฟ้าโดยปกติใช้อ้างอิงเป็น 'reaction resistance' (Elsener, B., Muller, S., 1990) ถ้าหากสื่อตัวนำไฟฟ้ามีความต้านทานลดลงจาก R_1 เป็น R_2 ค่าแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าลดน้อยลง ในขณะที่เดียวกันค่า Overpotential และกระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิมก็จะเพิ่มขึ้นตามลำดับ นอกจากนี้ถ้าจำนวนออกซิเจนในคอนกรีตมีค่าน้อยกว่าความต้องการในการทำปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด เป็นเงื่อนไขที่ทราบกันว่าขั้วไฟฟ้าจะเกิดสภาวะที่มีคุณลักษณะที่ขัดแย้งกันและเป็นสาเหตุทำให้กระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิมมีค่าลดลง (Fontana, M.G., 1986, Uhlig, H.H., 1971 and West, J.M., 1986)



2.5 แบบจำลองการเสื่อมสภาพของคอนกรีตเสริมเหล็ก

Tutti, k., 1980 ได้เสนอแนวความคิดโดยการจำลองรูปแบบแทนด้วยอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตที่มีความไวต่อการเกิดสนิมของเหล็กดังรูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นถึงระดับของการเกิดสนิมเป็นฟังก์ชันกับเวลาซึ่งในช่วงระยะเวลาเริ่มแรกเหล็กเสริมจะยังไม่เกิดสนิมและถ้าคลอไรด์ไอออนหรือเกิดคาร์บอนเข้พื้นที่ผิวหน้าคอนกรีตและซึมผ่านไปจนถึงเหล็กเสริมและเมื่อเหล็กสูญเสียชั้นฟิล์มบางๆที่ป้องกันที่ผิวเหล็กเสริมจะทำให้เกิดสภาวะของการแพร่เริ่มต้นขึ้นและระดับของการเกิดสนิมจะพัฒนาเพิ่มขึ้นในอัตราที่รวดเร็ว



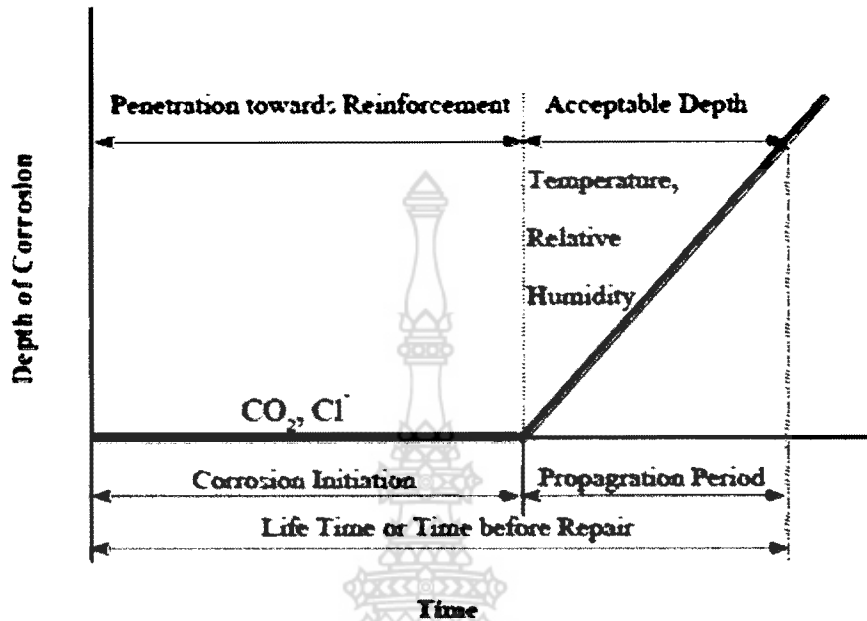
รูปที่ 2.8 แบบจำลองกระบวนการเกิดสนิมของเสริมเหล็กในคอนกรีต

อัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมขึ้นอยู่กับสภาวะของการแพร่ของคลอไรด์ซึ่งเป็นปัจจัยหลักส่งผลกระทบต่อโดยตรงกับอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยแทนด้วยระยะเวลา เมื่อระดับความเสี่ยงของการเกิดสนิมสูงขึ้นจะมีผลกระทบต่อกำลังของเหล็กเสริมหรือเป็นเหตุให้อายุการใช้งานของโครงสร้างลดต่ำลงจนกระทั่งถึงระดับวิกฤติ ดังนั้นเส้นประรูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างที่มีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าเพราะว่าระยะเวลาช่วงเริ่มต้นเป็นช่วงเวลาที่ยาวมากกว่าและอัตราการเกิดสนิมจะลดลงในสภาวะที่มีการแพร่ จากรูปแบบจำลองอธิบายได้ว่าระยะหุ้มของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ของคอนกรีตมีค่าต่ำจะช่วยยืดเวลาอายุการใช้งานยาวนานขึ้น

Tuutti, k. (1982) ได้นำเสนอรูปแบบจำลองใช้สำหรับทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กดังรูปที่ 2.9 การเกิดสนิมในระดับสูงสุดที่ยอมรับได้ต้องมีความสัมพันธ์กับรอยแตกกว้างที่ปรากฏให้เห็นซึ่งช่วงเวลาของการเสื่อมสภาพประกอบไปด้วย 2 ช่วงคือช่วงเวลาเริ่มต้นและช่วงเวลาการแพร่โดยที่ความยาวในระยะเวลาเริ่มต้นเป็นช่วงเวลาโดยประมาณที่ต้องการให้เกิดแทรกซึมของสารละลายเข้าไปถึงผิวของเหล็กเสริมและกระตุ้นให้เกิดการกัดกร่อน ในขณะที่ช่วงเวลาการแพร่เป็นช่วงเวลาที่สนิมมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นจึงเป็นช่วงเวลาของการซ่อมแซมซึ่งกลายมาเป็นเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการซ่อมแซมและรูปแบบจำลองนี้สามารถนำไปใช้ประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของโครงสร้างสะพานคอนกรีตในสภาวะสิ่งแวดล้อมที่ทำให้เกิดสนิมเป็นรูปแบบจำลองการเสื่อมสภาพที่พัฒนาโดย Cady and Weyers (Cady, P.D. and Weyers R.E., 1983) การแทรกซึมของคลอไรด์มีอิทธิพลทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่



ทำให้พื้นผิวสะพานคอนกรีตเกิดการเสื่อมสภาพและแบบจำลองที่ใช้ทำนายการเสื่อมสภาพโดยพิจารณาเป็นเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ผิวทั้งหมดที่เกิดการแตกหลุดล่อนแตกออกมาเป็นชั้นๆ และเกิดรอยแตกร้าวหลายๆ แนวนำมารวมกันเป็นความเสียหายทั้งหมดเพื่อใช้ในการทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างที่เหลืออยู่สำหรับใช้งานต่อไป

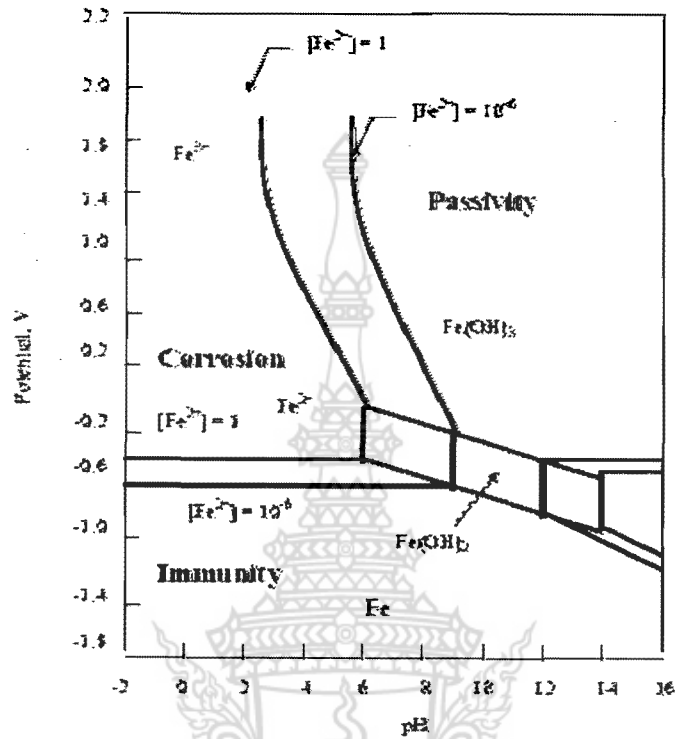


รูปที่ 2.9 แบบจำลองระยะเวลาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

Cady, P.D., and Weyers R.E. (1983) ได้นำเสนอแบบจำลองกระบวนการเสื่อมสภาพโดยคลอไรด์สำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีระยะหุ้มคอนกรีตหนา 2 นิ้ว (50มม.) จากรูปที่ 2.10 เป็นรูปแบบการจำลองการแบ่งแยกที่ชัดเจนของระยะเวลาการเกิดสนิมมี 3 ระยะได้แก่ ช่วงระยะเวลาที่เกิดการแพร่ (Diffusion Phase) ช่วงระยะเวลาการเกิดสนิม (Corrosion Phase) และช่วงระยะเวลาของการเสื่อมสภาพ (Deterioration Phase) สำหรับช่วงระยะเวลาการแพร่ผ่านถูกกำหนดให้เป็นช่วงเวลาที่คลอไรด์ไอออนแทรกซึมผ่านความหนาของระยะหุ้มของคอนกรีตจนคลอไรด์อยู่ในระดับเพียงพอที่ทำให้เริ่มเกิดสนิมบนผิวของเหล็กเสริม ซึ่งปกติช่วงระยะเวลาการแพร่ผ่านสามารถที่จะหาได้จากสูตร Fick's second Law (Crank, J.1956) สำหรับช่วงระยะเวลาที่ 2 เป็นช่วงระยะเวลาเริ่มแรกของการเกิดสนิมจนกระทั่งเริ่มเกิดรอยแตกร้าวและช่วงระยะเวลาที่ 3 เป็นช่วงระยะเวลาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างในระดับที่เกิดความเสียหายซึ่งในช่วงระยะเวลานี้ต้องทำการซ่อมแซมโครงสร้างให้กลับคืนสู่สภาพปกติ ข้อสังเกตให้พิจารณารอยแตกร้าวของระยะหุ้มคอนกรีตที่มีค่าตั้งแต่ 2.5เปอร์เซ็นต์ ของความลึกของระยะหุ้มคอนกรีตทั้งหมด



เกิดสนิมมากในขณะที่บริเวณอีก 2 ส่วนนั้นจะมีชั้นฟิล์มก่อดัวอยู่ซึ่งจะมีความเป็นต่างมากอยู่ในบริเวณ 2 ส่วนเหล่านี้จะอยู่ในสภาวะปกติไม่มีปฏิกิริยาเกิดขึ้นและในส่วนที่ 3 จะเป็นส่วนที่ปราศจากสนิม (Immunity) เนื่องจากในส่วนนี้มีสภาพความเป็นด่างที่มีเสถียรภาพสูงมากจึงเป็นสาเหตุทำให้เหล็กไม่เกิดสนิม ดังนั้นแผนภาพพอร์แบร์กจึงเป็นวิธีการเตรียมข้อมูลพื้นฐานภายใต้ความเข้าใจปฏิกิริยาการเกิดสนิม และจัดทำเป็นข้อกำหนดหลัก 2 ข้อสำหรับใช้กับแผนภาพนี้



รูปที่ 2.11 กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

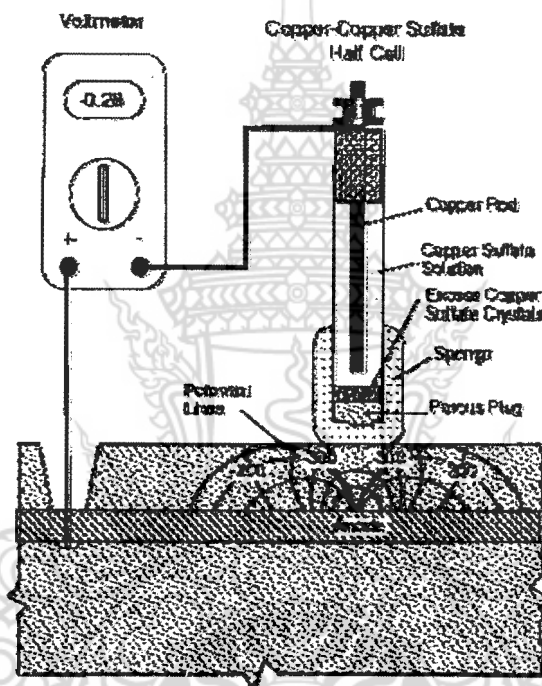
2.7 เทคนิคการตรวจเดือนสภาพการเกิดสนิม

การเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในคอนกรีตไม่สามารถคาดการณ์ได้ชัดเจนต้องรองนกว่าคอนกรีตจะเกิดการเสียหายซึ่งสิ่งที่สามารถบ่งชี้ถึงการเสื่อมสภาพของโครงสร้างเช่น สนิมที่มีรอยต่างเป็นจุดๆที่ผิวของเหล็กเสริม รอยร้าวแตกแยกหลุดล่อนออกมาเป็นชิ้นๆ สำหรับการทำนายอายุการใช้งานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดสนิมนั้นควรที่จะต้องกำหนดวิธีการซ่อมแซมหรือการทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กกลับคืนสู่สภาพใช้งานได้ตามปกติ ซึ่งจำเป็นที่จะต้องใช้เทคนิควิธีทดสอบแบบไม่ทำลายสำหรับใช้ประเมินความสภาพการเกิดสนิมของเหล็กเสริมและใช้วัดค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็ก



2.7.1 วิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

หลักการพื้นฐานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ดังที่ได้กล่าวมาแล้วสามารถที่จะตรวจสอบเพื่อพิสูจน์ได้ โดยนำเอาวิธีการนี้มาใช้ในการตรวจประเมินสภาพการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีเมื่อเหล็กเสริมถูกกัดกร่อนก็จะเกิดการไหลของกระแส ไฟฟ้าอยู่ทั่วในคอนกรีต (การแพร่กระจายของไอออน) ระหว่างบริเวณขั้วแอโนดและขั้วแคโทดโดยมีศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสนิมเกิดขึ้นโดยรอบๆเหล็กเสริมดังรูปที่ 2.12 แสดงให้เห็นถึงแนวเส้นของศักย์ไฟฟ้าที่ตัดผ่านกันจากผิวคอนกรีตถึงเหล็กเสริมและทุกๆจุดที่มีศักย์ไฟฟ้าสามารถวัดค่าได้ ด้วยวิธีการของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นที่เส้นชั้นความสูงทำได้โดยใช้ค่าของศักย์ไฟฟ้าบนผิวคอนกรีตที่วัดค่าได้นำมากำหนดจุดลงบนแผนที่ซึ่งจะแสดงให้เห็นค่าของศักย์ไฟฟ้าที่จุดต่างๆบนโครงสร้าง ความเป็นไปได้ของการเกิดสนิมให้พิจารณาจากค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดค่าได้บนผิวคอนกรีตโครงสร้าง ถ้าหากมีค่าเป็นลบมากกว่าแสดงว่าบริเวณนั้นจะมีโอกาสที่จะเกิดสนิมมากที่สุด (Elsener, B.et al,1990 and Browne ,R.D,et. al,1983)



รูปที่ 2.12 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับใช้ทดสอบด้วยวิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ ตามมาตรฐาน ASTM C 876 โดยการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีต

วิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C-876 ดังรูปที่ 2.12 เครื่องมือและอุปกรณ์ประกอบด้วย Copper-Copper Sulfate มีการเชื่อมต่อสายไฟกับโวลท์มิเตอร์ที่มีความต้านทานต่อไฟฟ้าสลับประสิทธิภาพสูง และในส่วนของ half-cell มีแท่งทองแดงแช่อยู่ในสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวใช้เป็นเซลล์อ้างอิงสำหรับการวัดศักย์ไฟฟ้าของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในคอนกรีต การวัดค่าของศักย์ไฟฟ้าขึ้นอยู่กับชนิดของครึ่งเซลล์ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของศักย์ไฟฟ้าที่อ่านค่าได้ และสำหรับการเชื่อมต่อของระบบ Half-Cell



ทำได้โดยการเชื่อมต่อด้านที่เป็นบวกของโวลต์มิเตอร์ให้ติดกันกับเหล็กเสริมและอีกด้านของโวลต์มิเตอร์ที่เป็นลบให้เชื่อมติดต่อกับ Copper-Copper Sulfate โวลต์มิเตอร์ที่ใช้มีความละเอียดและประสิทธิภาพสูงเพียงพอสำหรับใช้อ่านค่าของศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าต่ำมาก ๆ การวัดศักย์ไฟฟ้าของเหล็กเสริมในคอนกรีตทำได้โดยใช้ Copper-copper sulfate half-cell เชื่อมต่อที่ผิวคอนกรีตเพื่อให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าครบวงจรโดยใช้ Porous Plug และฟองน้ำที่เปียกชื้นด้วยสารละลาย detergent เป็นสื่อตัวนำไฟฟ้า

ถ้าหากเหล็กเสริมเกิดสนิมแสดงว่าอิเล็กตรอนในเหล็กจะเคลื่อนที่จากเหล็กเสริมไปยัง half-cell เพราะว่าด้านปลายของโวลต์มิเตอร์มีการเชื่อมต่อภายในวงจรไฟฟ้า ค่าที่อ่านได้จากโวลต์มิเตอร์แสดงให้เห็นว่าแรงดันหรือศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าเป็นลบ (ASTM G3) ในการวัดค่า half-cell potential เป็นการวัดศักย์ไฟฟ้าแบบ open circuit potential เพราะเป็นการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขที่ไม่มีการวัดค่าของกระแสไฟฟ้าในวงจร (ASTM G15) ค่าของแรงดันไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้ที่ผิวของคอนกรีตจะมีค่าเป็นลบมากขึ้นสามารถอธิบายได้ว่าเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตยังมีอิเล็กตรอนส่วนเกินอีกมากจึงมีความเป็นไปได้สูงที่เหล็กเสริมจะยังเป็นสนิมต่อไปได้อีก ในการอ่านค่าศักย์ไฟฟ้าแสดงให้เห็นถึงความน่าจะเป็นของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่อยู่ในตำแหน่งภายใต้ Copper-copper sulfate reference cell (Van Daveer, J.R., 1975) อย่างไรก็ตามค่าที่ถูกต้อง ๆ เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C876 และวิธีการวัดค่าศักย์ไฟฟ้านี้ไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับคอนกรีตและเหล็กเสริมที่มี epoxy เคลือบอยู่ที่พื้นผิว

วิธีเตรียมการทดสอบทำได้โดยกำหนดตำแหน่งของจุดให้มีลักษณะเป็นตารางโดยมีระยะห่างให้เหมาะสมตามลักษณะของโครงสร้างและปัจจัยที่ทำให้เกิดความผิดพลาด เช่นจุดที่กำหนดถ้ามีระยะห่างมากเกินไปหรือการเตรียมข้อมูลไม่เหมาะสมเพียงพอสำหรับการประเมินค่าในขณะที่การกำหนดระยะห่างของเหล็กเสริมเต็มพื้นที่ก็จะทำให้มีค่าใช้ง่ายในการสำรวจเพิ่มขึ้นเช่นในการสำรวจพื้นผิวคอนกรีตของสะพานโดยทำตามมาตรฐาน ASTM C 876 แนะนำให้ใช้ระยะห่าง 1.20 ม. ถ้าความแตกต่างของแรงดันระหว่างจุดที่อยู่ใกล้กันมีค่าเกินกว่า 150 มิลลิโวลต์ ให้ถือว่าระยะห่างนั้นใช้ได้ อย่างไรก็ตามมีคำแนะนำอื่น ๆ ที่กำหนดให้ระยะห่างควรมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของ 1.20 ม. สามารถให้ค่าความน่าเชื่อถือสำหรับการประเมินค่าการเกิดสนิมที่ยังดำเนินการอยู่และขยายออกไป (Clemena, G.G., Jackson, D.R, et al., 1992)

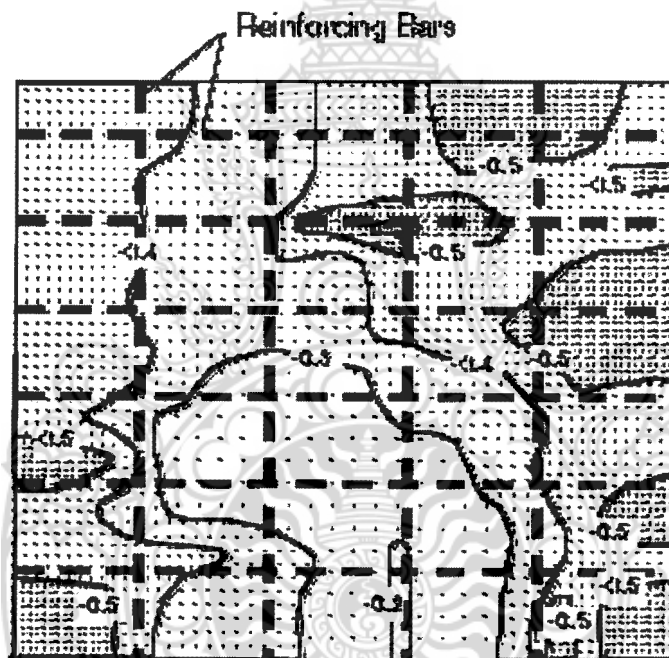
ค่าที่ขอมอบได้จากการทดสอบคือคอนกรีตต้องมีความชื้นอย่างเพียงพอที่จะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลครบวงจรเป็นเหตุผลที่สำคัญในการวัดค่าและถ้าการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ด้วยเวลาต้องทำตามมาตรฐาน ASTM C 876 ก่อนการทดสอบคอนกรีตต้องมีความเปียกชื้นเพียงพอและในขณะที่การทดสอบค่าที่วัดได้ไม่ควรเปลี่ยนแปลงมากกว่า ± 20 มิลลิโวลต์ ภายใน 5 วินาที (ASTM C 876) ถ้าหากค่าที่วัดได้มีความเสถียรไม่เพียงพอ อาจเป็นเพราะว่ากระแสไฟฟ้าภายในวงจรเกิดการหันเหทิศทางหรือความต้านทานของกระแสไฟฟ้าภายในวงจรมีมากเกินไป สำหรับในกรณีที่ไม่ควรนำมาใช้กับวิธีการของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ทำการทดสอบอยู่ภายนอกช่วง 17 ถึง 28^o C วิธีการทำให้การทดสอบถูกต้องมีความน่าเชื่อถือให้ทำตามมาตรฐาน ASTM C 876 สำหรับใช้วัดค่าแรงดันไฟฟ้า



2.7.2 การวิเคราะห์ข้อมูลของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

การวิเคราะห์ข้อมูลตามมาตรฐาน ASTM C-876 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่อ่านได้สามารถนำมาใช้ร่วมกับข้อมูลอื่นๆ เช่น ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต ความลึกของคาร์บอนในคอนกรีต สำหรับหาการแตกและหลุดลอกของชั้นคอนกรีตที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมเปิดเผย ซึ่งการรวบรวมสรุปข้อมูลเกี่ยวกับการเกิดสนิมที่ได้จากการสำรวจอย่างเป็นระบบด้วยวิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์สามารถแสดงให้เห็นได้ 2 แนวทาง คือ 1. มีลักษณะเป็นแผนที่เส้นชั้นความสูงของศักย์ไฟฟ้าเท่ากับตลอดทั้งเส้น 2. เป็นไดอะแกรมของความถี่สะสมของศักย์ไฟฟ้า ในขณะที่เดียวกันการรายงานค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการสำรวจต้องระบุให้ชัดเจนในการใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode)

ผลลัพธ์ที่ได้จากการสำรวจนำเอามาสรุปจัดทำเป็นแผนที่เส้นชั้นความสูงของศักย์ไฟฟ้าซึ่งสามารถทำได้โดยนำเอาค่าที่ได้จากการทดสอบในแต่ละจุดมาสร้างลงบนแปลนตามมาตรฐานของพื้นที่ทั้งหมดที่ได้ทำการทดสอบ สำหรับค่าแรงดันที่อ่านได้จาก half-cell ในแต่ละจุดของการทดสอบให้ทำเครื่องหมายไว้บนแปลนและเขียนเส้นชั้นความสูงซึ่งมีค่าความต่างศักย์เท่ากันโดยใช้ค่าของแรงดันที่วัดได้ตั้งรูปที่ 2.13 เป็นตัวอย่างของแผนที่เส้นชั้นความสูงที่มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับตลอดความยาวทั้งเส้นตามมาตรฐาน ASTM C-876 แรงดันไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าในแต่ละจุดที่วัดค่าได้ในแต่ละช่วงของเส้นชั้นความสูงไม่ควรมีความต่างกันเกิน 100 มิลลิโวลท์



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างแผนที่เส้นชั้นความสูงของศักย์ไฟฟ้าที่สำรวจได้จาก half-cell potential

วิธีการของไดอะแกรมความถี่สะสมของศักย์ไฟฟ้าทำได้โดยการนำข้อมูลของศักย์ไฟฟ้ามาเขียนเป็นแผนผังแบบร่างลงบนกระดาษเพื่อหาความน่าจะเป็นสอดคล้องตามมาตรฐาน ASTM C-876 โดยนำข้อมูลที่ได้จากการ



สำรวจทั้งหมดมาเขียนเป็นกราฟเส้นที่มีการปรับเปลี่ยนให้เข้ามาตรฐานพอดี (best-fit straight line) จากไดอะแกรมความถี่สะสมนำมาใช้โดยกำหนดค่าที่อ่านได้ของศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็นร้อยละซึ่งเป็นค่าที่ให้ความแม่นยำเมื่อมีความเป็นลบมากกว่าและสามารถใช้ระบุเป็นค่าของการเกิดสนิมที่ระดับต่างๆ กัน (Elsener, B., et al, 1990) จากทั้งสองวิธีการจะสอดคล้องกับมาตรฐาน ASTM C 876 สามารถที่จะใช้ในการประเมินผลได้ คือ เป็นวิธีการเชิงตัวเลขและเป็นเทคนิคที่แสดงความแตกต่างกันของศักย์ไฟฟ้า (potential difference technique) สำหรับวิธีการเชิงตัวเลขจะบ่งชี้ให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการเกิดสนิม

มาตรฐาน ASTM C-876 ให้เป็นแนวทางในการทดสอบดังนี้ ใช้สำหรับกรณีขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Copper-copper sulfate reference electrode ดังนี้

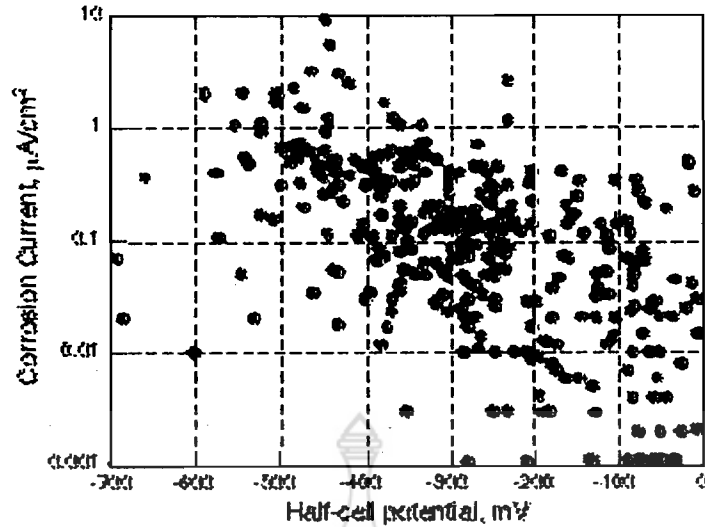
- ❖ ถ้าศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็นบวกมากกว่า -200 มิลลิโวลต์ มีความเป็นไปได้สูงที่เหล็กจะไม่เกิดสนิม
- ❖ ถ้าศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็นลบมากกว่า -350 มิลลิโวลต์ มีความเป็นไปได้สูงที่เหล็กจะเกิดสนิม
- ❖ ความไม่แน่นอนในการเกิดสนิมเมื่อค่าแรงดันอยู่ในช่วง -200 ถึง -350 มิลลิโวลต์

อย่างไรก็ตามข้อแนะนำให้ไปประยุกต์ใช้งานบนหลักการเชิงตัวเลขไม่ควรใช้ในสภาวะเงื่อนไขดังต่อไปนี้

- ❖ การเกิด Carbonation ได้ขยายกว้างออกไปจนถึงระดับของเหล็กเสริมในคอนกรีต
- ❖ การประเมินสภาพคอนกรีตที่อยู่ภายในที่จับเก็บไม่ได้อยู่ในสภาพเปียกชื้น
- ❖ เปรียบเทียบการกัดกร่อนของคอนกรีตที่อยู่ภายนอกกับความชื้นที่มีความแปรผันสูงหรือปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ในคอนกรีต

จากข้อความข้างบนเป็นข้อแนะนำการระวังป้องกันในขณะทดสอบเพราะว่าเป็นสิ่งสำคัญต่อความต้านทานของคอนกรีตและออกซิเจนที่มีอยู่ทำให้เกิดอัตราการเกิดสนิมและรูปที่ 2.14 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่ไม่ดีระหว่างวิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์กับวิธีการวัดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม โดยวิธีการวัดค่าความต้านทานโพลาไรซ์ (Feliu, S., Gonzalaz, J.A., and Andrade, C, 1996) สามารถอธิบายได้ว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมมีค่าน้อยกว่า $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ให้พิจารณาว่าเหล็กเสริมไม่เกิดสนิม แต่ถ้ามีค่ามากกว่า $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ให้พิจารณาว่าเหล็กเสริมจะมีโอกาสเกิดสนิมสูงมากดังรูปที่ 2.14 การนำไปประยุกต์ใช้งานต้องทำตามข้อแนะนำตามมาตรฐาน ASTM C-876





รูปที่ 2.14 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม(i_{corr})กับศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

วิธีการของศักย์ไฟฟ้าที่มีความแตกต่างกัน (potential difference technique) สำหรับบริเวณพื้นที่ที่เกิดสนิมพื้นที่บริเวณนั้นจะแสดงให้เห็นถึงความลาดเอียงของศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าแตกต่างกันซึ่งเป็นพื้นฐานของแผนภูมิเส้นชั้นความสูงของศักย์ไฟฟ้าสำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นเส้นชั้นความสูง (equipotential contour) ระยะห่างของเส้นชั้นความสูงของค่าแรงดันที่เป็นรูปปิดแสดงให้เห็นว่าบริเวณนี้มีความลาดเอียงสูง ซึ่งบางครั้งในทางปฏิบัติค่าของแรงดันไฟฟ้าที่วัดค่าได้เปลี่ยนแปลงมากเกินไป ดังนั้นตัวบ่งชี้ที่แสดงให้เห็นการเกิดสนิมจะเป็นพื้นที่ผิว เช่นแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงมากกว่า 100 มิลลิโวลต์จะต้องมีพื้นที่มากกว่า 5 ตารางเมตร ดังนั้นวิธีการของ potential difference technique เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปในการบ่งชี้ให้เห็นถึงบริเวณที่เกิดสนิมซึ่งมีความน่าเชื่อถือมากกว่าการใช้เทคนิคเชิงตัวเลข (Elsener, B., Dawson, J.L., et al., 1990)

การอ่านค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาวะที่เหล็กเกิดสนิมอย่างมีเหตุผลนั้นสามารถพิจารณาได้จากคอนกรีตจะต้องมีความชื้นอย่างเพียงพอและผู้ใช้ต้องมีความเข้าใจและยอมรับวิธีการใช้งานเมื่อคอนกรีตมีความชื้นไม่เพียงพอสำหรับใช้ในการวัดค่าซึ่งเป็นสิ่งสำคัญ นอกจากนี้มีหลายองค์ประกอบที่มีผลกระทบต่อขนาดของศักย์ไฟฟ้าที่อ่านค่าได้ ดังนั้นองค์ประกอบดังกล่าวจึงไม่สามารถที่จะให้ค่าที่ถูกต้องแท้จริงตามสภาพการเกิดสนิมได้ (Elsener, B., Dawson, J.L., et al., 1990)

ปัจจัยหลากหลายที่มีผลกระทบต่อวิธีการทดสอบการเกิดสนิมโดยผู้เชี่ยวชาญทางด้านการศึกษาการเกิดสนิมได้ให้คำแนะนำที่เหมาะสมของวิธีการสำรวจด้วยศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ภายใต้เงื่อนไขดังต่อไปนี้ (ASTM C-876)

- ❖ คอนกรีตต้องอยู่ในสภาพที่อิ่มตัวด้วยน้ำ
- ❖ คอนกรีตเกิด Carbonated ที่ระดับความลึกของเหล็กเสริม



❖ เหล็กเสริมที่เคลือบด้วย (galvanized)

ในการสำรวจค่าศักย์ไฟฟ้าควรมีการทดสอบเพิ่มเติมด้วยการทดสอบ Carbonation และปริมาณคลอไรด์ไอออนในคอนกรีต ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบควรสรุปเป็นข้อมูลให้ชัดเจนของค่าศักย์ไฟฟ้าที่สำรวจวัดค่าได้ ที่แสดงให้เห็นถึงบริเวณที่เกิดสนิมขณะที่ทำการทดสอบเวลานั้นและเงื่อนไขสภาพสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง

2.8 ความต้านทานของคอนกรีต

วิธีการของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เป็นวิธีการที่แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ถึงบริเวณที่เหล็กจะเกิดสนิมในช่วงเวลานั้นที่ทำการวัดค่า จากที่ได้มีการอธิบายมาแล้วนั้น สรุปได้ว่าหลังจากที่เหล็กเกิดการสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิม (Depassivation) และอัตราการเกิดสนิมจะขึ้นอยู่กับออกซิเจนที่ยังทำปฏิกิริยาที่ซั้วแคโทดและยังขึ้นอยู่กับความต้านทานทางไฟฟ้าของคอนกรีตด้วยทำให้ง่ายต่อการแพร่ของอิออนที่มีอยู่ทั่วไปในคอนกรีตระหว่างบริเวณซั้วแอโนดและซั้วแคโทด นอกจากนี้ความต้านทานทางไฟฟ้าของคอนกรีตยังขึ้นอยู่กับผิวของโพรงช่องว่างเล็กๆซึ่งเป็นโครงสร้างเล็กๆของเพสต์และปริมาณความชื้นของคอนกรีต ดังนั้นประโยชน์ที่ได้จากการทดสอบและสำรวจด้วยวิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เป็นการวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของคอนกรีต ค่าความต้านทานไฟฟ้ามักหน่วยเป็นลูกบาศก์ของวัสดุของความต้านทาน (โอมท์) ต่อความยาว (Millard, S.G., et al., 1989) โดยที่ ตัวนำทางไฟฟ้าเป็นความต้านทาน R ของพื้นที่ คือ A และความยาวเป็น L ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทาน ρ ดังสมการที่ 10

$$R = \rho \frac{L}{A} \tag{10}$$

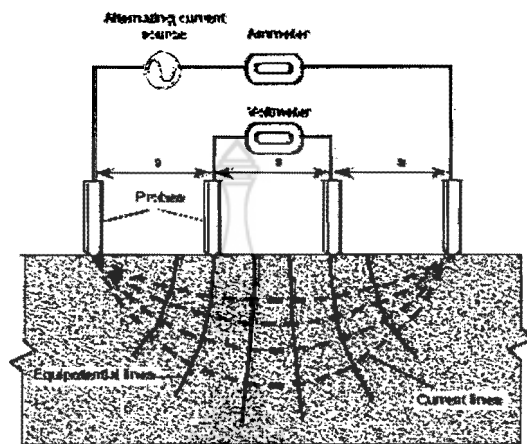
มาตรฐานวิธีการทดสอบการวัดค่าความต้านทานของคอนกรีตยังไม่มีการจัดทำเป็นมาตรฐาน แต่มีเทคนิคที่ใช้แล้วประสบความสำเร็จ ดังแสดงในภาพที่ 14 (Millard, S.G. and et al., 1989)

จากพื้นฐานของหลักการนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันเป็นระบบของ 4 ขั้วไฟฟ้า (Wenner, F., 1915) ซึ่งได้จัดทำขึ้นเป็นมาตรฐานสำหรับใช้ในการวัดค่าความต้านทานของดิน (ASTM G-57, 2002) โดยที่ตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าทั้ง 4 มีระยะห่างเท่ากันเป็นระบบการเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้ากับผิวของคอนกรีต โดยใช้ (cream) เป็นสื่อตัวนำไฟฟ้า (Millard, S.G., Ghassemi, M.H., and Bungey, J.H., 1990) จากรูปที่ 2.15 มีหลักการทำงานคือ ขั้วไฟฟ้าที่อยู่ภายนอกจะเชื่อมต่อกับแหล่งที่ให้กระแสไฟฟ้าและขั้วไฟฟ้าที่อยู่ภายใน 2 ขั้วจะเชื่อมต่อกับเครื่องมืออ่านค่าแรงดันไฟฟ้า (โวลท์มิเตอร์) ดังนั้นค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของคอนกรีตสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 11 (Millard, S.G., Wenner, F.A., et al., 1990)

$$\rho = \frac{2\pi sV}{I} \tag{11}$$



จากสมการที่ 11 ได้มาจาก Wenner ภายใต้สมมติฐานของวัสดุเป็นแบบ (semi-infinite) และมีคุณสมบัติเหมือนกัน ดังนั้นความสัมพันธ์ที่ให้มา จะทำให้การวัดค่าความต้านทานได้ค่าที่ถูกต้องเมื่อสมมติฐานมีข้อมูลเป็นที่เพียงพอและทุกๆค่าของการเบี่ยงเบนจากข้อสมมติฐานของ Wenner's จะนำไปสู่ความแตกต่างระหว่างค่าความต้านทานที่ได้จากการคำนวณและค่าความต้านทานที่แท้จริงของวัสดุ (Millard, S.G., Ghassemi, M.H., and Bungey, J.H., 1990)



รูปที่ 2.15 การทดสอบวัดค่าความต้านทานของคอนกรีตด้วย 4 ขั้วไฟฟ้า

Millard, S.G., et al., 1990. นำเสนอผลที่ได้จากการทดลองศึกษาและวิเคราะห์ให้เป็นที่ยอมรับของอันดับขนาดที่มีความผิดพลาดระหว่างค่าความต้านทานที่ได้จากการคำนวณและค่าความต้านทานที่แท้จริงเมื่อสมการที่ 11 ไปประยุกต์ใช้กับชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตขนาดเล็ก ซึ่งมีหนึ่งตัวแปรที่ต้องพิจารณาคือระยะห่างที่น้อยที่สุดของขั้วไฟฟ้า เพราะเป็นส่วนประกอบของเพสต์และมวลรวมจะให้ค่าความต้านทานที่แตกต่างกัน จึงต้องให้ความสำคัญกับระยะห่างของขั้วไฟฟ้าอย่างเพียงพอ ดังนั้นค่าความต้านทานของคอนกรีตควรจะเป็นค่าเฉลี่ย สำหรับระยะห่างที่น้อยที่สุดของขั้วไฟฟ้าขึ้นอยู่กับขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบ ใช้เป็นค่าต่ำสุดของระยะห่าง ในขณะที่ระยะห่างก็ยังเป็นตัวแปรที่กำหนดระดับความลึกซึ่งมีผลกระทบต่อ การวัดค่าด้วยเหมือนกัน ในขณะที่ชิ้นส่วนที่มีลักษณะคั่นหรือบางก็ต้องมีความสอดคล้องกับระยะห่างของขั้วไฟฟ้าด้วย

บนพื้นฐานจากการศึกษา Millard, S.G., et al., 1990. ได้แนะนำระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่สามารถนำไปใช้ได้เหมาะสมมีค่าประมาณ 50 มิลลิเมตร ขนาดความกว้างและความลึกของชิ้นส่วนโครงสร้างควรจะมีอย่างน้อย 4 เท่าของระยะห่างขั้วไฟฟ้า นอกจากนี้ระยะจากขอบชิ้นส่วนไม่ควรน้อยกว่า 2 เท่าของระยะห่างของขั้วไฟฟ้า เมื่อขนาดต่างๆเหล่านั้นน้อยไม่เพียงพอ ค่าความต้านทานที่คำนวณได้จากสมการที่ 11 ก็จะทำให้ค่ามากเกินไป ปัจจัยอื่นๆที่มีผลกระทบต่อ การคำนวณค่าความต้านทานแสดงให้เห็นได้ชัดเจน เช่น ชิ้นพื้นผิวที่บางมีผลทำให้ความต้านทานของคอนกรีตและเหล็กเสริมมีค่าต่ำกว่าค่าที่แท้จริง ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ผลลัพธ์โดยตรงกับค่าความต้านทาน สำหรับปัจจัยอื่นที่มีผลกระทบต่อเหล็กเสริม เช่น ความลึก



ของระยะหุ้มคอนกรีตรวมถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมที่สูญเสียไปจะทำให้ชิ้นส่วนโครงสร้างรับกำลังลดลง

เทคนิคที่ใช้วัดค่าความต้านทานที่ได้จัดทำขึ้นเป็นวิธีการ Linear polarization (Broomfield, J., 1966) โดยใช้โพรบ (Probe) เป็นอุปกรณ์ที่มีสายเชื่อมต่อกับเครื่องมือโพลาไรซ์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่อยู่โดยรอบและวัดค่าความต้านทานของคอนกรีตด้วยวิธีการ Linear polarization ผลกระทบจากการวัดค่าความต้านทานของคอนกรีตระหว่างเหล็กเสริมและตำแหน่งที่ probe วางบนผิวคอนกรีต ยังไม่ผู้แต่งได้เผยแพร่หรือตีพิมพ์บทความโดยเปรียบเทียบการวัดค่าความต้านทานโดยใช้ 4 probe และ 1 probe การพัฒนาวิธีการของ single-probe และได้ให้ข้อเสนอแนะดังตารางที่ 2.1 แสดงถึงความสัมพันธ์ของความต้านทานคอนกรีตกับความเสียหายของการเกิดสนิม (Feliu, S., Gonzalez, J.A., and Andrade, C., 1996)

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของคอนกรีตและความเสียหายของการเกิดสนิม

ความต้านทาน ($k\Omega \cdot cm$)	ความเสียหายของการเกิดสนิม
>100 ถึง 200	ไม่เกิดสนิม ; คอนกรีตมีสภาพแห้ง
50 ถึง 100	อัตราการเกิดสนิมต่ำ
10 ถึง 50	ความเหมาะสมในการเกิดสนิมสูงเมื่อเหล็กเริ่มกัดกร่อน
< 50	ความต้านทานไม่สามารถควบคุมอัตราการเกิดสนิมได้

ที่มา : Feliu, S. et al., 1996.

ในอีกกรณีหนึ่ง Bungey ได้ให้แนวทางถึงความแตกต่างกันของข้อมูลระหว่างความต้านทานของคอนกรีตและความเสียหายของการเกิดสนิม เมื่อเหล็กเสริมสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิมดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของคอนกรีตและความเป็นไปได้ในการเกิดสนิม

ความต้านทาน ($k\Omega \cdot cm$)	ความเป็นไปได้ของการเกิดสนิม (Nonsaturated Concrete)
> 20	ต่ำ
10 ถึง 20	ต่ำ / เหมาะสม
50 ถึง 10	สูง
< 5	สูงมาก

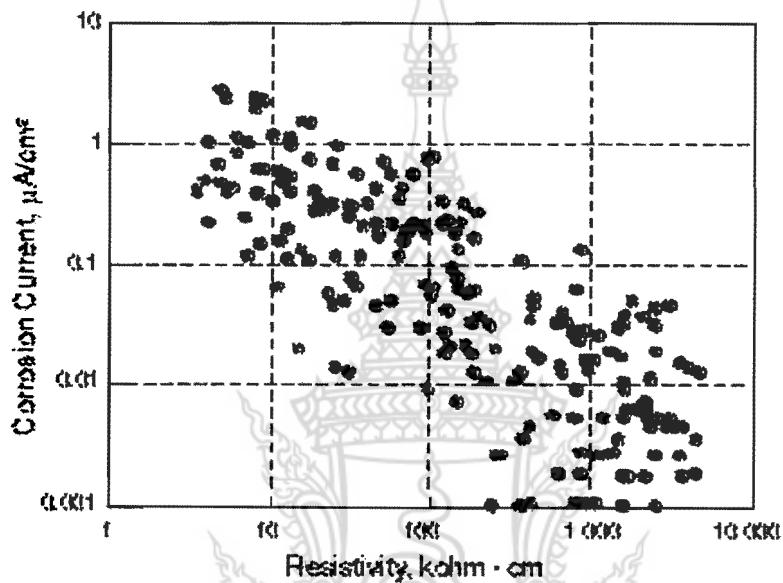
ที่มา : Bungey, J.H., 1989.

จากรูปที่ 2.16 แสดงถึงความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดสนิมของคอนกรีตและความต้านทานของคอนกรีต (Feliu, S., Gonzalez, J.A., and Andrade, C., 1996) เปรียบเทียบกับรูปที่ 13 จะเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อ



เหล็กเสริมสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิม ความต้านทานของคอนกรีตจะมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดสนิมได้ดีกว่าการวัดค่าด้วยวิธีการ half-cell potential

สรุปโดยย่อ การวัดค่าความต้านทานของคอนกรีตเป็นการจัดเตรียมข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อใช้ในการประเมินความเป็นไปได้ของระดับการเกิดสนิมที่มีความแตกต่างกัน ซึ่งเป็นการนำเอาประโยชน์ที่ได้จากการสำรวจด้วยวิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาใช้ ค่าความต้านทานที่สูงที่ได้จากการสำรวจศักย์ไฟฟ้าแต่อัตราการเกิดสนิมอาจจะมีค่าต่ำ การอ้างอิงถึงความต้านทานของคอนกรีตที่มีความสัมพันธ์กับการแพร่กระจายของไอออนไปโดยทั่วคอนกรีตภายใต้การกระทำของศักย์ไฟฟ้าโดยรอบๆ ชั่วแอนด์ชั่วคราว คอนกรีตที่มีความต้านทานเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณของโพรงช่องว่างในเพสต์มีจำนวนลดลงส่งผลให้คอนกรีตมีความทนทานอายุการใช้งานของคอนกรีตจึงเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.16 เปรียบเทียบความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม (i_{corr}) และค่าความต้านทานของชิ้นส่วนคอนกรีต



บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการ

การดำเนินการศึกษาผลกระทบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้เป็นโครงสร้างในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล สำหรับอุปกรณ์และวิธีการทดลองดังนี้

3.1 อุปกรณ์

1. เครื่องทดสอบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-cell potential test)
2. DC Power Supply 0-60 Vdc สามารถปรับแหล่งจ่ายกระแสได้
3. Volt meter ที่มีความละเอียดในย่าน mV
4. Amp meter ที่มีความละเอียดในย่าน μ A
5. เครื่องวัดค่าศักย์ไฟฟ้า
6. เครื่องทดสอบการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า
7. สายวัดสัญญาณที่มีสารละลายตัวนำไฟฟ้า
8. เครื่องผสมคอนกรีต
9. แบบหล่อแท่งตัวอย่างพื้นคอนกรีต ขนาด 40 x 40 x 10 เซนติเมตร
10. เครื่องจี้คอนกรีต (Vibrator)
11. เครื่องชั่งน้ำหนัก สามารถอ่านค่าได้ละเอียด 0.01 กรัม
12. อุปกรณ์สำหรับบัดกรี
13. ถังสำหรับแช่ตัวอย่าง ขนาด 1200 x 1500 เซนติเมตร
14. อุปกรณ์สำหรับผสมสารละลาย
15. อุปกรณ์วัดค่าการยุบตัวของคอนกรีต
16. แผ่นพลาสติกใส
17. เทปพันสายไฟ
18. เกรียงเหล็ก
19. ถังมือยาง



3.2 วิธีการ

3.2.1 วัสดุ

วัสดุสำหรับการศึกษาค้นคว้าการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตอยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเลประกอบด้วย

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Oxides	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
%	20	5	3	60	1.10	1.50	2.40	2

2) มวลรวม

2.1) มวลรวมหยาบ

หินปูนย่อย (Crushed limestone) ขนาด 3/8 นิ้ว (SSD)

2.2) มวลรวมละเอียด

ทรายแม่น้ำร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (SSD) อิมตัวผิวแห้ง

3) เหล็กเสริม

เหล็กผิวเรียบและเหล็กข้ออ้อย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร และ 12 มิลลิเมตร คุณสมบัติของเหล็ก ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของเหล็กเสริม

Diameter (mm)	Cross Section Area (mm ²)	Yield Strength (ksc)	Ultimate Strength (ksc)
RB9	28.30	2400	3900
DB12	113.10	3000	4900

4) สารละลาย

4.1) สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride, NaCl)



สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride, NaCl) มีความเข้มข้นร้อยละ 0, 1, 3, และ 5 ของน้ำหนักซีเมนต์

4.2) สารละลายอิเล็กโทรไลต์

สารละลายอิเล็กโทรไลต์เจลสำหรับเป็นสื่อวัดค่าความต้านทานของกระแสไฟฟ้า

3.2.2 อัตราส่วนผสม

1) คอนกรีต

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการออกแบบอัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่กำลังรับแรงอัดคอนกรีตที่อายุ 28 วัน 240 กก./ซม² ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต

Compressive Strength (ksc)	Materials (kg/m ³)				Slump (cm)	Water Cement Ratio
	Cement	Aggregates 3/8"	Sand	Water		
240	450	992	750	180	3-5	0.40

3.3 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

การดำเนินการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตการศึกษามลกระทบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตอยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล ดังนี้

3.3.1 การเตรียมวัสดุผสม

การเตรียมหิน ททราย ซีเมนต์และน้ำ ตามอัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยให้หินและทรายอยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งเพื่อป้องกันการดูดซึมน้ำของมวลรวมหินและทราย

3.3.2 การผสม

นำส่วนผสมใส่ลงในอุปกรณ์ผสมคอนกรีต พร้อมทั้งสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride, NaCl) มีความเข้มข้นร้อยละ 0, 1, 3, และ 5 ของน้ำหนักซีเมนต์ ทำการผสมให้เข้ากันโดยใช้เวลาในการผสม 3-5 นาที หลังจากนั้นจึงใส่น้ำลงไปผสมให้เข้ากันอีกครั้งพร้อมใส่หิน ทำการผสมจนกว่าส่วนผสมเข้ากันได้ดี ดังรูปที่ 3.1





รูปที่ 3.1 การผสมคอนกรีต

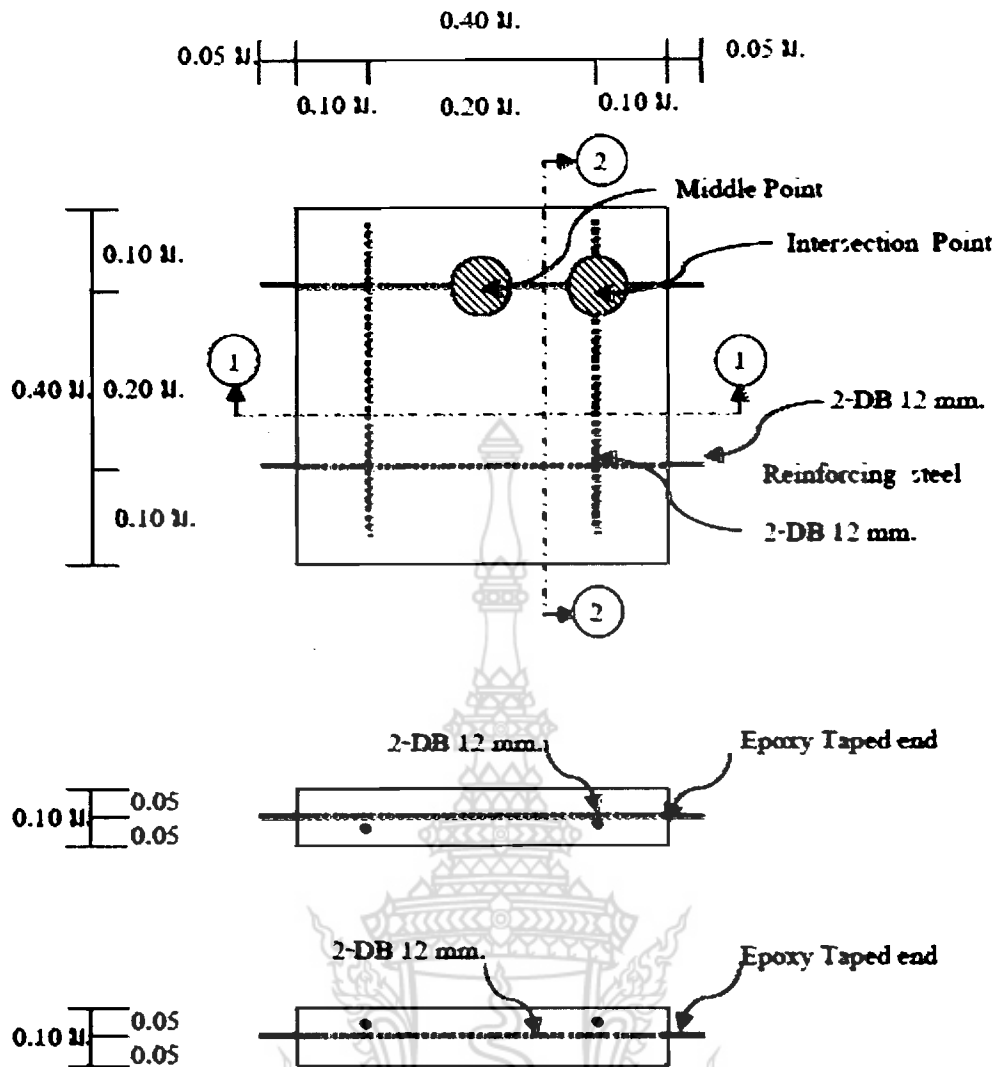
1) การเทลงแบบหล่อ

นำคอนกรีตเทลงแบบหล่อตัวอย่างพื้นคอนกรีตขนาด $40 \times 40 \times 10$ เซนติเมตร และเก็บไว้ในอุณหภูมิปกติเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างพื้นคอนกรีต





รูปที่ 3.3 รายละเอียดแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กและตำแหน่งการวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้า

2) การบ่ม

การบ่มตัวอย่างรูปคานคอนกรีตและคอนกรีตรูปทรงกระบอก เลือกการบ่มตัวอย่างด้วยน้ำระยะเวลา 28 วัน

3.4 การเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

การเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในพื้นที่คอนกรีต เนื่องจากสภาพความเป็นจริงการเกิดสนิมของเหล็กเสริมตามธรรมชาติของโครงสร้างสิ่งแวดลอมทะเลมีระยะเวลานาน ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ได้ดำเนินการเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมด้วยไฟฟ้ากระแสตรงโดยอ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมา

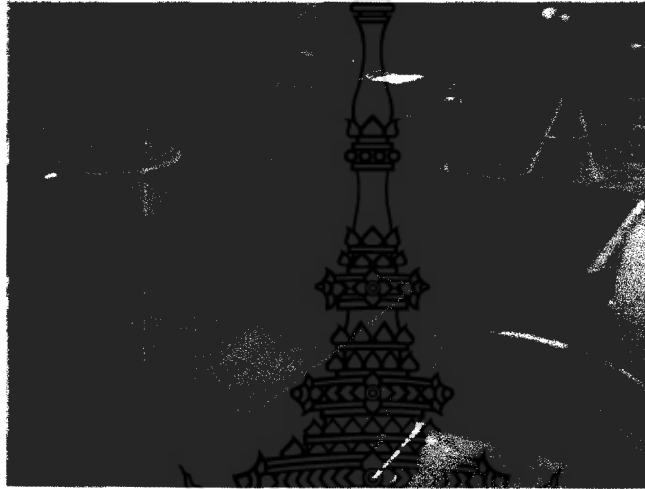


3.4.1 การติดตั้งสายไฟฟ้า

การติดตั้งสายไฟฟ้าเพื่อเชื่อมต่อกระแสไฟฟ้าชั่วคราวกับแท่งทองแดงและชั่วคราวกับเหล็กเสริมที่อยู่ในตัวอย่างพื้นคอนกรีต

3.4.2 การเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

การเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงอย่างสม่ำเสมอเป็นระยะเวลา 60 วัน ด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้า 6 โวลต์ ดังรูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 การเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม



รูปที่ 3.5 การตรวจสอบความสม่ำเสมอของกระแสไฟฟ้า



3.5 การตรวจสอบแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

การตรวจสอบแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริม โดยทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อยู่ในตัวอย่างทดสอบจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย ถ้ำกลบ ดินขาว และคอนกรีต ซึ่งใช้เครื่องมือตรวจสอบแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริม Half Cell Potential Test ตามมาตรฐาน ASTM C 876

3.5.1 การเตรียมสารละลาย

สารละลายคอมเปอร์ซัลเฟต (Copper Sulfate) ในการเตรียมสารละลายนั้นทุกครั้งในการผสมสารละลายต้องทำการผสมให้สารละลายอิ่มตัวก่อนที่จะนำสารละลายไปใช้ในการทดสอบ ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 สารละลายคอมเปอร์ซัลเฟต (Copper Sulfate)

3.5.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

นำตัวอย่างพื้นคอนกรีตขึ้นจากการให้กระแสไฟฟ้าทำความสะอาดตัวอย่างด้วยน้ำ และทำเครื่องหมายที่ตำแหน่งต่างๆ บนแผ่นพื้นที่ต้องการทำการวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ โดยกำหนดตำแหน่งตรงจุดตัดและบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริมที่มีการเชื่อมต่อกับกระแสไฟฟ้า

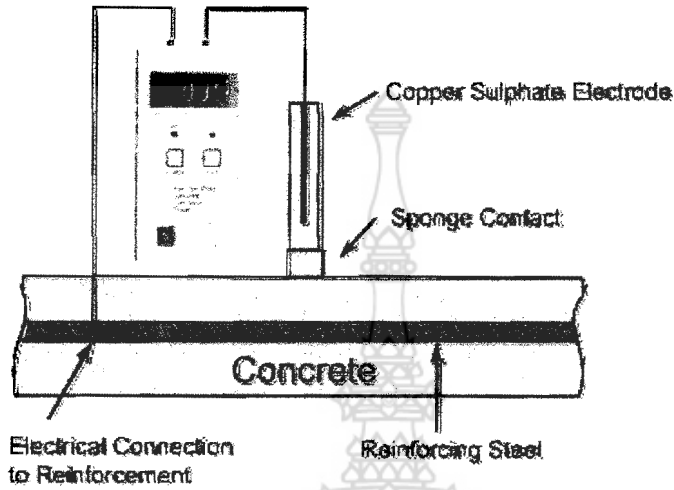
3.5.3 การตรวจสอบแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

การตรวจสอบแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริมของตัวอย่างพื้นคอนกรีต รดน้ำให้ทั่วแผ่นพื้นที่ชุ่มเพื่อให้น้ำซึมเข้าไปภายในตัวอย่างพื้นคอนกรีต นำผ้าชนิดหนาชุบน้ำมาคลุมไว้เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำจากแผ่นพื้นที่และรีบทดสอบทันที การตรวจสอบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าด้านบนของตัวอย่าง ทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า จนครบ 60 วัน ดังรูปที่ 3.8 จากการตรวจสอบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C 876 สามารถแบ่งระดับของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมดังตารางที่ 3.4

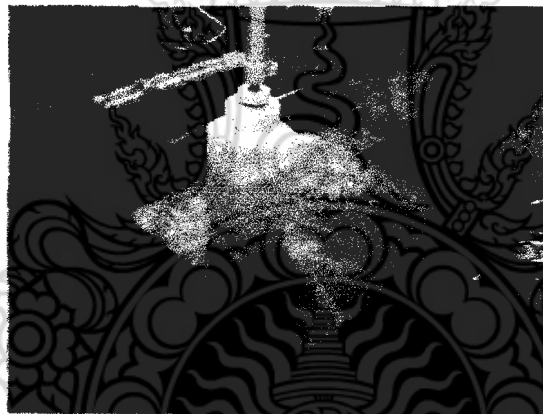


ตารางที่ 3.4 ความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริม ASTM C 876

Half-cell Potential (mV)	Percentage chance of active corrosion
>-350	90%
-200 to -350	50%
>-200	10%



รูปที่ 3.7 การเชื่อมต่อสายไฟฟ้าชั่วคราวและชั่วคราวกับตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 3.8 การตรวจสอบแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริมด้วยเครื่องมือ Half-cell Potential Test



บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การดำเนินการศึกษาผลกระทบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตอยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล สำหรับผลและวิจารณ์ผลการทดลองดังนี้

4.1 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในตัวอย่างพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

4.1.1 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

จากผลการทดสอบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล เป็นระยะเวลา 50 วันโดยนำค่าที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐาน ASTM C 876 ดังตารางที่ 4.1 และโดยมีเงื่อนไขขอบเขตของแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กถูกจำลองให้อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเลได้ถูกกำหนดให้มีส่วนผสมของปริมาณคลอไรด์ร้อยละ 0, 1, 3 และ 5 ของน้ำหนักซีเมนต์ตามลำดับ ตัวอย่างแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กแบ่งออกเป็น 2 ชุด คือ ชุดแรกกำหนดให้เร่งการเกิดสนิมด้วยวิธีการใช้กระแสไฟฟ้าที่ระดับแรงดัน 6 โวลต์ และชุดที่สองกำหนดให้ไม่ใช้กระแสไฟฟ้าสำหรับวิธีการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากำหนดให้วัดค่าบริเวณจุดตัดของเหล็กเสริมและบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริมซึ่งเป็นเหล็กเสริมที่เหมือนกันดังผลการทดสอบดังตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.1 ความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริม ASTM C 876

Half-cell Potential (mV)	Percentage chance of active corrosion
>-350	90%
-200 to -350	50%
>-200	10%



ตารางที่ 4.2 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล

ค่าของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่บริเวณจุดตัดกันของเหล็กเสริม							
ไม่มีการเร่งการเกิดสนิมด้วยกระแสไฟฟ้า							
Condition	ระยะเวลา (วัน)						
	7	14	21	28	35	42	49
Control	-	-569	-608	-593	-538	-498	-457
1% Cl ⁻	-	-647	-636	-613	-601	-611	-481
3% Cl ⁻	-	-707	-642	-656	-521	-587	-550
5% Cl ⁻	-	-772	-656	-663	-548	-649	-474

ตารางที่ 4.3 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล

ค่าของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่บริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม							
ไม่มีการเร่งการเกิดสนิมด้วยกระแสไฟฟ้า							
Condition	ระยะเวลา (วัน)						
	7	14	21	28	35	42	49
Control	-	-594	-620	-606	-526	-497	-465
1% Cl ⁻	-	-662	-632	-613	-604	-624	-499
3% Cl ⁻	-	-712	-655	-469	-545	-597	-552
5% Cl ⁻	-	-772	-669.4	-673	-558	-651	-482

ตารางที่ 4.4 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล

ค่าของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่บริเวณจุดตัดกันของเหล็กเสริม							
ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิม							
Condition	ระยะเวลา (วัน)						
	7	17	21	25	41	48	52
Control	-	-357	-535	-469	-550	-689	-669
1% Cl ⁻	-	-1037	-1089	-1056	-892	-1034	-1038
3% Cl ⁻	-	-1095	-945	-872	-740	-811	-694
5% Cl ⁻	-	-968	-1168	-1110	-868	-787	-757



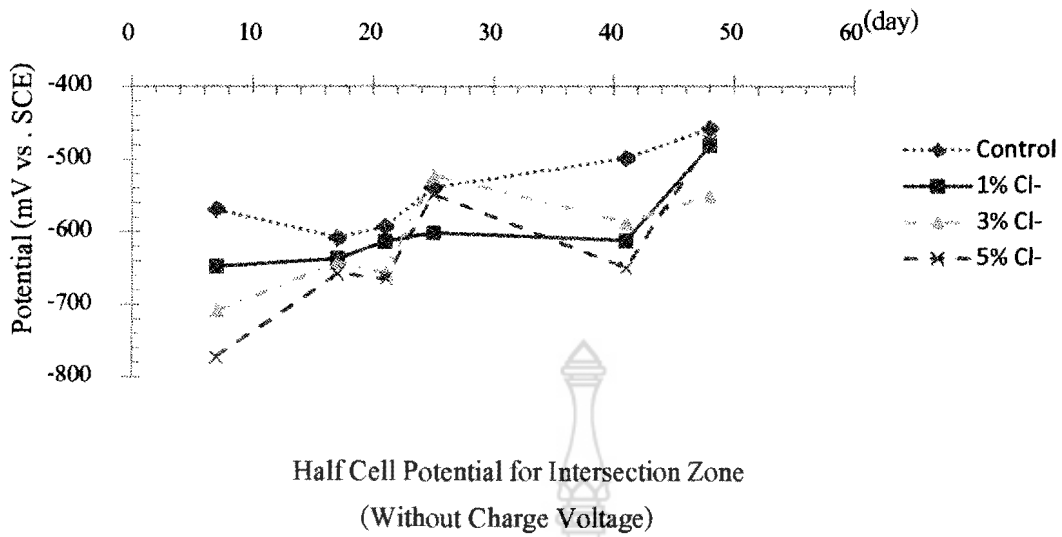
ตารางที่ 4.5 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล
ค่าของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่บริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม

Condition	ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิม						
	ระยะเวลา (วัน)						
	7	17	21	25	41	48	52
Control	-	-444	-540	-496	-536	-688	-659
1% Cl ⁻	-	-915	-1085	-999	-870	-1026	-1084
3% Cl ⁻	-	-1094	-928	-831	-757	-811	-700
5% Cl ⁻	-	-960	-1161	-1110	-875	-818	-713

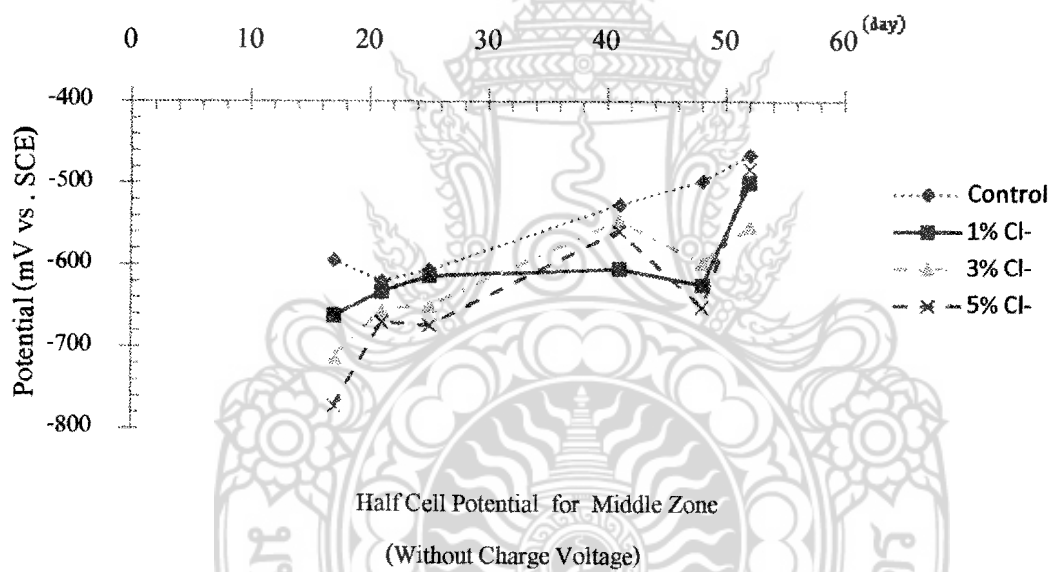
จากผลการทดสอบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กของคอนกรีตที่ใช้กระแสไฟฟ้าและไม่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในแผ่นพื้นคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่มีคลอไรด์เป็นส่วนผสมที่ร้อยละ 1, 3, และ 5 ตามลำดับที่อายุของคอนกรีต 7, 17, 21, 25, 41, 48 และ 52 วัน ตามลำดับ โดยทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่งเดียวกันทุกครั้งที่บริเวณจุดตัดกันของเหล็กเสริมและบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม พบว่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ทุกตัวอย่างที่วัดค่าได้มีค่าติดลบสูงมากกว่า -350 mV ที่ระยะเวลาเริ่มตั้งแต่ 17 วัน ทุกตัวอย่างมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันแสดงให้เห็นว่าเหล็กเสริมมีความน่าจะเป็นที่จะมีโอกาสเกิดสนิมสูงถึง 90 เปอร์เซ็นต์ อ้างอิงจากตารางที่ 4.1 ดังรูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.4 เมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาการบ่มของแผ่นพื้นของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นแนวโน้มของค่าศักย์ไฟฟ้าไม่แปรผันไปตามระยะเวลาและเมื่อพิจารณาถึงแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่เร่งการเกิดสนิมด้วยกระแสไฟฟ้ามีแนวโน้มการเกิดสนิมสูงกว่าตัวอย่างแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้เร่งด้วยกระแสไฟฟ้า เนื่องจากเหล็กเสริมที่เร่งด้วยกระแสไฟฟ้าสูญเสียอิเล็กตรอนมากกว่า และในกรณีของบริเวณตำแหน่งที่ทำการวัดค่าความต่างศักย์แตกต่างกันที่จุดตัดและตรงกลางของเหล็กเสริมให้ค่าความต่างศักย์ใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน

จากผลการทดสอบวัดค่าศักย์ไฟฟ้า เมื่อเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมของตัวอย่างแผ่นพื้นคอนกรีตที่ไม่ได้เร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่มีส่วนผสมของคลอไรด์เมื่อวัดค่าศักย์ไฟฟ้าตรงบริเวณจุดตัดกันและตรงกลางของเหล็กเสริมพบว่า แผ่นพื้นคอนกรีตที่มีเปอร์เซ็นต์ของคลอไรด์ในส่วนผสมที่มีค่าสูงจะมีแนวโน้มของการเกิดสนิมสูงกว่าโดยไม่แปรผันไปตามเวลาทั้งนี้อาจเกิดเนื่องจากผลกระทบจากปัจจัยที่หลากหลายเช่นปริมาณความชื้นที่ไม่เพียงพอมีผลทำให้คอนกรีตมีความต้านทานสูงค่าความต่างศักย์จะต่ำ ความหนาของคอนกรีต พื้นผิวของคอนกรีตมีความต้านทานสูงมีผลทำให้ค่าความต่างศักย์ตรงจุดนั้นมีค่าต่ำ บริเวณผิวโดยรอบเหล็กเสริมที่เกิดสนิมจะมีความต้านทานสูงจะมีผลกระทบต่อค่าความต่างศักย์ที่ทำการวัดค่าในขณะนั้น สาเหตุทั้งหมดดังที่กล่าวมานี้มีผลต่อการตัดสินใจในการประเมินการเสื่อมสภาพของโครงสร้าง



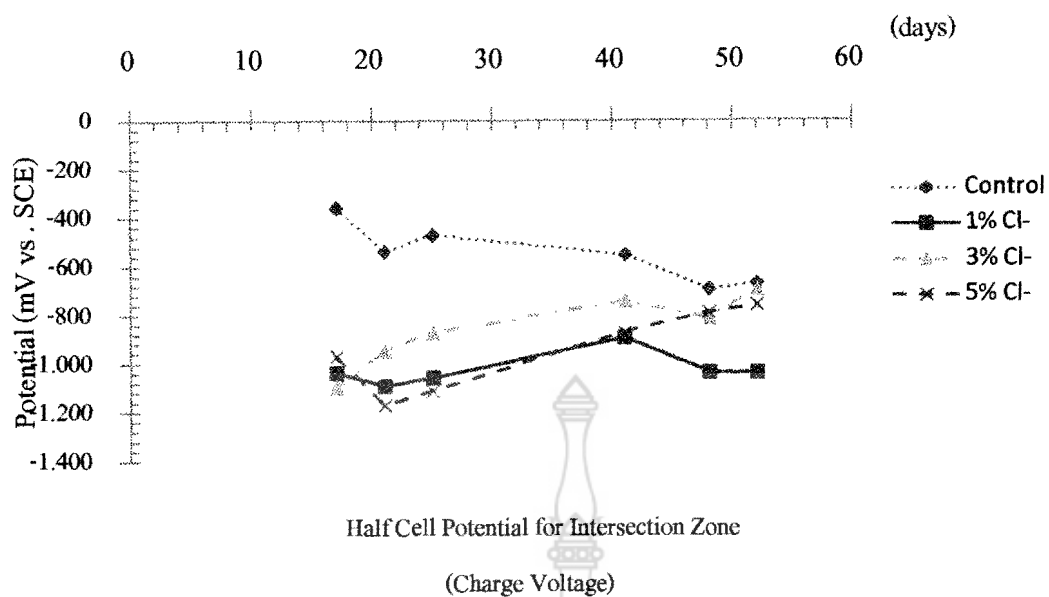


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นพื้นคอนกรีตที่ไม่แรงการเกิดสนิมบริเวณตำแหน่งจุดตัดกันของเหล็กเสริมโดยวิธีการของ Half-Cell Potential

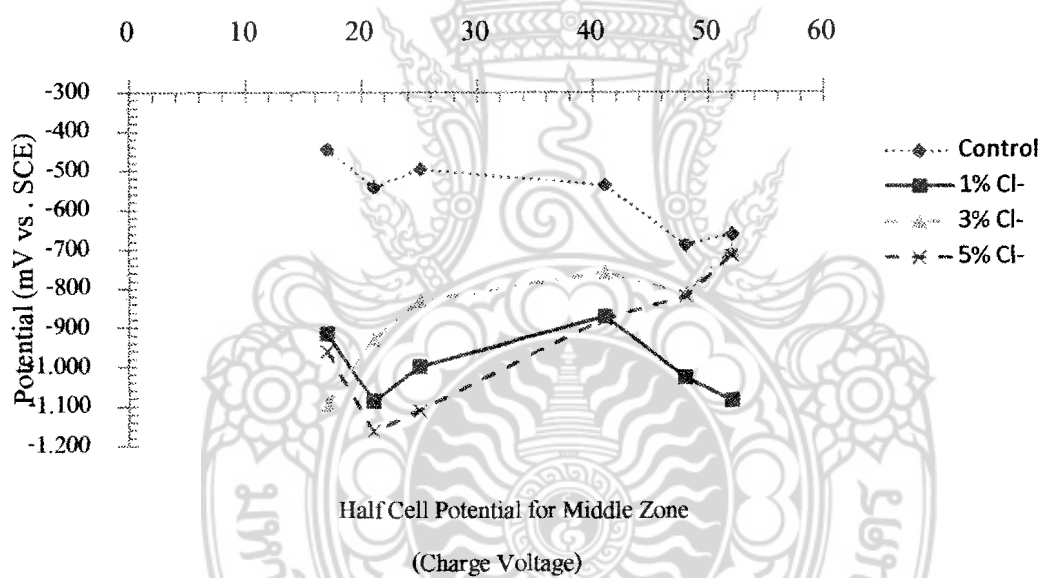


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นพื้นคอนกรีตที่ไม่แรงการเกิดสนิมบริเวณตำแหน่งตรงกลางของเหล็กเสริมโดยวิธีการของ Half-Cell Potential





รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นพื้นคอนกรีตที่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิม บริเวณตำแหน่งจุดตัดกันของเหล็กเสริมโดยวิธีการของHalf-Cell Potential



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นพื้นคอนกรีตที่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิม บริเวณตำแหน่งตรงกลางของเหล็กเสริมโดยวิธีการของHalf-Cell Potential



บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 การเกิดสนิมในเหล็กเสริมค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสนิมของแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล

จากผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตตัวอย่างที่มีเปอร์เซ็นต์ของคลอไรด์มากกว่าจะมีโอกาสเกิดที่เหล็กเสริมเกิดสนิมมากกว่าโครงสร้างคอนกรีตที่มีคลอไรด์ปนเปื้อนอยู่น้อยกว่า เมื่อพิจารณาด้วยเงื่อนไขที่เร่งการเกิดสนิมด้วยกระแสไฟฟ้าก็จะทำให้ค่าความต่างศักย์ที่วัดได้มีค่าติดลบสูงมากกว่าตัวอย่างคอนกรีตที่ไม่ได้มีการเร่งด้วยกระแสไฟฟ้า อย่างไรก็ตามค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสามารถบอกความเป็นไปได้ของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมแต่ไม่ได้บอกสถานะในปัจจุบันว่ามีสนิมมากน้อยเพียงใดค่าที่วัดได้เป็นค่าที่สรุปในลักษณะแนวโน้มของการเกิดสนิมโดยประมาณเท่านั้น ซึ่งอาจเป็นค่าของการเกิดสนิมที่ไม่แท้จริง เนื่องจากอาจมีผลกระทบต่อบัจจัยที่หลากหลาย เช่น สภาพความชื้นของคอนกรีตในขณะการทดสอบต้องควบคุมอย่างปราณีตให้มีความสม่ำเสมอ และผิวของโครงสร้างคอนกรีตและความหนาของคอนกรีตที่มีความต้านทานสูงจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวคอนกรีตต่ำซึ่งมีผลทำให้การประเมินแนวโน้มของการเกิดสนิมมีความผิดพลาด

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

การตรวจวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์สำหรับการทดสอบแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริมค่อนข้างมีความแปรปรวนของข้อมูล เนื่องจากปัจจัยสภาวะแวดล้อม เช่น ความชื้น อุณหภูมิ เพื่อลดความแปรปรวนของข้อมูลควรเพื่อจำนวนของข้อมูลให้มากขึ้น

5.2.2 การเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

การเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมควรมีการเปลี่ยนแปลงของไฟฟ้ากระแสตรงหลายระดับ เพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของไฟฟ้ากระแสตรง

5.2.3 แนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสามารถบอกความเป็นไปได้ของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมแต่ไม่ได้บอกสถานะของเหล็กเสริมในปัจจุบันว่าเหล็กเกิดสนิมมากน้อยเพียงใด



5.2.4 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าต้องสามารถอ่านค่าได้อย่างละเอียดเพียงพอ เนื่องจากการวัดค่าของคอนกรีตต้องทำการวัดค่าทั้งระบบของคอนกรีตและเหล็กเสริมซึ่งมีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่ต่ำมาก ดังนั้นประสิทธิภาพของเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ต้องมีความเสถียรที่เพียงพอ



เอกสารและสิ่งอ้างอิง

คณะกรรมการคอนกรีตและวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. 2543. ความคงทนของคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ.

คณะกรรมการสาขาคอนกรีตและวัสดุภายใต้คณะกรรมการวิชาการวิศวกรรมโยธาวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. 2546. การซ่อมโครงสร้างคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ.

ชัชวาลย์ เศรษฐบุต. 2544. คอนกรีตเทคโนโลยี. CPAC. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ .

วันชัย ยอดสุดใจ. 2548. การศึกษาการแทรกซึมของคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตที่แตกร้าวเนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมและได้ซ่อมแซมด้วยวัสดุซ่อมแซม, เอกสารการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 1, ระยอง, REP 5-REP 10

วันชัย ยอดสุดใจ. 2548. การลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Chloride Removal), โยธาสาร พฤศจิกายน-ธันวาคม 2548 : 49-50

ACI Committee 363. 1992. State of Art Report on High-Strength Concrete. American Concrete Institute, Detroit, USA.

Bentur, A., S. Diamond and N.S. Berke. 1997. Steel Corrosion in Concrete: Fundamentals and Civil Engineering Practice. E & FN Spon, an imprint of Chapman & Hall, London.

B.Elsener.Half-cell potential measurements-potential mapping on reinforced Concrete structure,Material and Structures Vol.36 : pp 461-471

Malhotra, V. M. 2002. Introduction: Sustainable Development and Concrete Technology. ACI Concrete International 24 (7): 22.

Mehta, P. K. 2002. Greening of the Concrete Industry for Sustainable Development. ACI Concrete International 24 (7): 23-28.

Neal, S. B., C. Victor and W. David. 1990. Corrosion Rate of Steel in Concrete. American Society For Testing and Materials.

Neville, A.M. 2002. Properties of Concrete. 4th and Final Edition. John Wiley and Sons, Inc.,New York.



Pullar-Strcker. 1987. Corrosion Damaged Concrete Assessment and Repair. Construction Industry Research and Information Association. Anchor Brendon Ltd, Tiptree, Essex. London.

Pourbaix, M. 1972. Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions. ergamon press, Oxford, NACE, Houston.

Scannell, W.T. and A. Sohaghpurwala. 1993. Cathodic protection as a corrosion control alternative. Concrete Corrosion Specialists, Concorr, Inc. International Conference on Durability of Building Materials and Component, Lyon France.

Tuutti, K. 1982. Corrosion of steel in concrete. Stockholm: Cement chbetonginst.





ตารางภาคผนวกที่ ก1 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสั่นและกระแสไฟฟ้าการเกิดสั่นของแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก
กรณีวัดค่าตรงบริเวณจุดตัดกันของเหล็กเสริม

ไม่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสั่นของเหล็กเสริมที่อายุ 17 วัน										
Condition	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A
Control	-403	252	-402	254	-401	254	-400	256	-398	257
1% Cl ⁻	-467	326	-466	325	-465	326	-464	326	-463	327
3% Cl ⁻	-515	404	-514	406	-514	407	-513	408	-512	409
5% Cl ⁻	-511	355	-506	354	-501	351	-499	352	-496	352

Condition	ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสั่น (mV)					กระแสไฟฟ้าของการเกิดสั่น (μ A)				
	Control	-403	-402	-401	-400	-398	252	254	254	256
1% Cl ⁻	-467	-466	-465	464	-463	326	325	326	326	327
3% Cl ⁻	-515	-514	-514	-513	-512	404	406	407	408	409
5% Cl ⁻	-511	-506	-501	-499	-496	350	350	351	352	352

ตารางภาคผนวกที่ ก2 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสั่นและกระแสไฟฟ้าการเกิดสั่นของแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก
กรณีวัดค่าตรงบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม

ไม่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสั่นของเหล็กเสริมที่อายุ 17 วัน										
Condition	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A
Control	-394	253	-392	256	-392	257	-391	258	-390	260
1% Cl ⁻	-459	315	-458	317	-458	318	-457	319	-456	321
3% Cl ⁻	-549	402	-549	404	-549	405	-548	405	-548	407
5% Cl ⁻	-540	380	-540	383	-540	383	-539	384	-537	385

Condition	ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสั่น (mV)					กระแสไฟฟ้าของการเกิดสั่น (μ A)				
	Control	-394	-393	-392	-391	-390	254	256	257	258
1% Cl ⁻	-460	-459	-458	-457	-456	316	317	318	319	321
3% Cl ⁻	-550	-549	-549	-548	-548	402	404	405	405	407
5% Cl ⁻	-541	-540	-540	-539	-537	380	383	383	384	385



ตารางภาคผนวกที่ ก3 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก
กรณีวัดค่าตรงบริเวณจุดตัดกันของเหล็กเสริม

ไม่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่อายุ 21 วัน										
Condition	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A
Control	-317	213	-314	213	-312	213	-310	214	-308	214
1% Cl ⁻	-447	306	-447	305	-446	304	-445	305	-444	306
3% Cl ⁻	-425	281	-423	283	-422	283	-421	285	-419	286
5% Cl ⁻	-538	356	-538	355	-537	355	-536	356	-535	358
Condition	ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสนิม (mV)					กระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิม (μ A)				
Control	-315	-312	-311	-310	-310	213	213	213	214	214
1% Cl ⁻	-447	-447	-446	-445	-444	304	305	304	305	306
3% Cl ⁻	-425	-423	-422	-421	-419	281	283	283	285	286
5% Cl ⁻	-538	-538	-537	-536	-535	356	355	355	356	358

ตารางภาคผนวกที่ ก4 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก
กรณีวัดค่าตรงบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม

ไม่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่อายุ 21 วัน										
Condition	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A
Control	-333	217	-328	211	-326	211	-322	210	-319	210
1% Cl ⁻	-448	306	-447	308	-446	308	-445	310	-444	311
3% Cl ⁻	-446	288	-443	290	-442	291	-440	292	-438	294
5% Cl ⁻	-543	380	-541	383	-540	385	-539	386	-539	388
Condition	ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสนิม (mV)					กระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิม (μ A)				
Control	-333	-328	-326	-322	-321	210	210	211	211	216
1% Cl ⁻	-448	-447	-446	-445	-444	306	308	308	310	311
3% Cl ⁻	-446	-443	-442	-440	-438	288	290	291	292	294
5% Cl ⁻	-543	-541	-540	-539	-539	380	383	385	386	388



ตารางภาคผนวกที่ 65 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก
กรณีวัดค่าตรงบริเวณจุดตัดกันของเหล็กเสริม

ไม่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่อายุ 25 วัน										
Condition	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A
Control	-377	295	-374	295	-373	296	-371	296	-370	297
1% Cl ⁻	-364	235	-361	237	-361	238	-361	239	-359	241
3% Cl ⁻	-403	295	-401	297	-400	298	-399	299	-398	301
5% Cl ⁻	-460	447	-459	449	-459	450	-457	451	-457	453
Condition	ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสนิม (mV)					กระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิม (μ A)				
Control	-377	-374	-373	-371	-370	295	295	296	296	297
1% Cl ⁻	-364	-361	-361	-361	-359	235	237	238	239	241
3% Cl ⁻	-403	-401	-400	-399	-398	295	297	298	299	301
5% Cl ⁻	-460	-459	-459	-457	-457	447	449	450	451	453

ตารางภาคผนวกที่ 66 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก
กรณีวัดค่าตรงบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม

ไม่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่อายุ 25 วัน										
Condition	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A
Control	-427	321	-426	322	-426	324	-425	324	-424	325
1% Cl ⁻	-358	217	-356	224	-354	227	-352	230	-350	234
3% Cl ⁻	-414	275	-414	278	-414	279	-413	282	-411	285
5% Cl ⁻	-506	502	-504	504	-503	505	-501	506	-498	507
Condition	ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสนิม (mV)					กระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิม (μ A)				
Control	-427	-426	-426	-425	-424	321	322	324	324	325
1% Cl ⁻	-358	-356	-354	-352	-350	217	224	227	230	234
3% Cl ⁻	-414	-414	-414	-413	-411	275	278	279	282	285
5% Cl ⁻	-506	-504	-503	-501	-498	502	504	505	506	507



ตารางภาคผนวกที่ ๓7 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสั่นและกระแสไฟฟ้าการเกิดสั่นของแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก
กรณีวัดค่าตรงบริเวณจุดตัดกันของเหล็กเสริม

ไม่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสั่นของเหล็กเสริมที่อายุ 41 วัน										
Condition	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A
Control	-455	248	-444	250	-433	251	-442	252	-441	253
1% Cl ⁻	-404	212	-403	214	-402	215	-401	216	-400	218
3% Cl ⁻	-430	210	-429	211	-429	212	-428	213	-427	214
5% Cl ⁻	-455	234	-455	236	-454	237	-454	238	-454	240
Condition	ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสั่น (mV)					กระแสไฟฟ้าของการเกิดสั่น (μ A)				
Control	-455	-444	-433	-442	-441	248	250	251	252	253
1% Cl ⁻	-404	-403	-402	-401	-400	212	214	215	216	218
3% Cl ⁻	-430	-429	-429	-428	-427	210	211	212	213	214
5% Cl ⁻	-455	-455	-454	-454	-454	234	236	237	238	240

ตารางภาคผนวกที่ ๓8 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสั่นและกระแสไฟฟ้าการเกิดสั่นของแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก
กรณีวัดค่าตรงบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม

ไม่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสั่นของเหล็กเสริมที่อายุ 41 วัน										
Condition	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A
Control	-463	249	-462	251	-461	252	-460	252	-459	253
1% Cl ⁻	-402	213	-401	214	-400	215	-400	216	-399	217
3% Cl ⁻	-433	221	-431	223	-430	222	-429	223	-428	224
5% Cl ⁻	-487	248	-477	250	-476	251	-476	252	-475	254
Condition	ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสั่น (mV)					กระแสไฟฟ้าของการเกิดสั่น (μ A)				
Control	-463	-462	-461	-460	-459	249	251	252	252	253
1% Cl ⁻	-402	-401	-400	-400	-399	213	214	215	216	217
3% Cl ⁻	-433	-431	-430	-429	-428	221	223	222	223	224
5% Cl ⁻	-487	-477	-476	-476	-475	248	250	251	252	254



ตารางภาคผนวกที่ ๙ ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณจุดตัดกันของเหล็กเสริม

ไม่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่อายุ 48 วัน										
Condition	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A
Control	-298	315	-291	317	-281	318	-277	319	-276	320
1% Cl ⁻	-336	260	-334	262	-333	263	-332	264	-331	265
3% Cl ⁻	-432	306	-430	309	-430	309	-429	311	-428	312
5% Cl ⁻	-520	394	-519	396	-518	397	-516	398	-515	400
Condition	ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสนิม (mV)					กระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิม (μ A)				
Control	-298	-291	-281	-277	-276	315	317	318	319	320
1% Cl ⁻	-336	-334	-333	-332	-331	260	262	263	264	265
3% Cl ⁻	-432	-430	-430	-429	-428	306	309	309	311	312
5% Cl ⁻	-520	-519	-518	-516	-515	394	396	397	398	400

ตารางภาคผนวกที่ 10 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม

ไม่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่อายุ 48 วัน										
Condition	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A
Control	-413	336	-412	338	-411	339	-410	340	-410	341
1% Cl ⁻	-330	244	-329	246	-328	247	-327	248	-328	249
3% Cl ⁻	-458	320	-458	321	-457	322	-456	324	-456	325
5% Cl ⁻	-528	379	-528	382	-527	383	-526	384	-526	385
Condition	ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสนิม (mV)					กระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิม (μ A)				
Control	-413	-412	-411	-410	-410	336	338	339	340	341
1% Cl ⁻	-330	-329	-328	-327	-328	244	246	247	248	249
3% Cl ⁻	-458	-458	-457	-456	-456	320	321	322	324	325
5% Cl ⁻	-528	-528	-527	-526	-526	379	382	383	384	385



ตารางภาคผนวกที่ ก11 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กกรณีวัดค่าตรงบริเวณจุดตัดกันของเหล็กเสริม

ไม่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่อายุ 48 วัน										
Condition	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A
Control	-231	231	-231	231	-231	232	-231	232	-231	233
1% Cl ⁻	-190	190	-190	191	-190	191	-190	191	-190	191
3% Cl ⁻	-261	261	-261	262	-260	261	-260	261	-260	262
5% Cl ⁻	-185	184	-185	185	-184	185	-184	186	-184	186
Condition	ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสนิม (mV)					กระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิม (μ A)				
Control	-231	-231	-231	-231	-231	231	231	232	232	233
1% Cl ⁻	-190	-190	-190	-190	-190	190	191	191	191	191
3% Cl ⁻	-261	-261	-260	-260	-260	261	262	262	262	262
5% Cl ⁻	-185	-185	-184	-184	-184	184	185	185	186	186

ตารางภาคผนวกที่ ก12 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม

ไม่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่อายุ 48 วัน										
Condition	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A
Control	-223	223	-222	223	-222	223	-222	224	-222	224
1% Cl ⁻	-191	191	-190	191	-190	191	-190	192	-190	192
3% Cl ⁻	-230	230	-230	230	-229	230	-229	230	-229	230
5% Cl ⁻	-204	204	-204	204	-203	205	-203	205	-202	206
Condition	ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสนิม (mV)					กระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิม (μ A)				
Control	-223	-222	-222	-222	-222	223	223	223	224	224
1% Cl ⁻	-191	-190	-190	-190	-190	191	191	191	192	192
3% Cl ⁻	-230	-230	-229	-229	-229	230	230	230	230	231
5% Cl ⁻	-204	-204	-203	-203	-202	204	204	205	205	206

