



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

อิทธิพลของระบบการป้องกันการเกิดสนิมต่อระดับคลอไรด์ในคอนกรีต

**Influence of Sacrificial Anode Cathodic Protection
on the Chloride Profile in Concrete**

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรพันธ์ แสงสุวรรณ

ได้รับทุนอุดหนุนวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

พ.ศ.2556

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

อิทธิพลของระบบการป้องกันการเกิดสนิมต่อระดับคลอไรด์ในคอนกรีต

**Influence of Sacrificial Anode Cathodic Protection on the Chloride Profile
in Concrete**

คณะผู้วิจัย

สังกัด

ผศ.จักรพันธ์ แสงสุวรรณ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

นายศุภชัย หอวิมานพร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ได้รับทุนอุดหนุนวิจัยจาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

พ.ศ.2556

บทคัดย่อ

ในโครงการวิจัยนี้เป็นการพัฒนาการลดปริมาณการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีทางไฟฟ้า (artificial anode) คือการดึงอ็อกซิเจนออกจากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าด้วยการออกแบบการถ่ายเทสไปนไปสู่อ่างสังกะสีภายนอก โดยใช้หลักการแลกเปลี่ยนอ็อกซิเจนในวัสดุที่เสียอ็อกซิเจนได้ง่ายกว่า จากคุณสมบัติทางไฟฟ้าจะประกอบด้วยขั้วบวก (Anode) และเหล็กเสริมเป็นขั้วลบ (Cathode) จากการต่อระบบดังกล่าวนี้ส่งผลให้มีความต้านทานการเกิดสนิมในเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ดีขึ้น ความสัมพันธ์ของการสูญเสียของกระแสไฟฟ้าในคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากความสามารถในการดึงสนิมของแท่งสังกะสีในคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นแปรผันตรงกันกับขนาดของการเกิดสนิมในเหล็กเสริม

การวิจัยนี้จะคำนึงถึงการแก้ไขปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องมาจากคลอไรด์อ็อกซิเจนโดยการนำเอาอุปกรณ์สังกะสีที่สูญเสียอ็อกซิเจนได้ง่ายกว่าเหล็กเพื่อสำหรับป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กเสริม โดยศึกษาผลการเกิดสนิมจากการออกแบบแท่งสังกะสีที่มีขนาดต่างกันและระยะเวลาการวางที่ต่างกันของการฝังลงในคอนกรีตเสริมเหล็กตัวอย่าง ซึ่งตัวแปรดังกล่าวนี้จะพบบ่อยมากเมื่อต้องนำไปใช้กับอาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กชายฝั่งทะเลและการวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบหาเงื่อนไขต่าง ๆ ในการบำรุงรักษาและซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยจะคำนึงถึงการเกิดสนิมของเหล็กเสริมซึ่งพบมากในอาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไปและการวิจัยนี้ทดสอบการเกิดสนิมในคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยการเร่งการเกิดสนิมด้วยวิธีการทางไฟฟ้าซึ่งพฤติกรรมอาจจะแตกต่างจากสภาพจริงเนื่องจากถูกจำกัดในด้านระยะเวลา สำหรับวิธีการตรวจสอบแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในแผ่นพื้นคอนกรีตใช้วิธีการของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half Cell Potential) และวิธีความต้านทานโพลาไรซ์เชิงเส้น (Linear Polarization Resistance) สำหรับวัดค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

ABSTRACT

In this research propose developed method for reduction of corrosion of reinforcement in concrete using electrical electron theory (artificial anode). That is electrochemical reaction in the concrete with current electron of electricity, designing interchanges galvanized steel by install zinc anode. Zinc is one of the first materials to be used in ion exchange processes easily. Properties of Electrica will include the anode (Anode) and specimen concrete is negative (Cathode). The system is effects to results; reduce superior resistance corrosion in reinforcing steel in concrete more the better then traditional. The relationship of the electric reduction in the reinforcement concrete depen on capable of zinc electricchemical reduction in the steel of reinforced concrete. Zinc anade size is use to install, concrete corrosion rate in steel reinforcement is direct variation of size.

This research is focus to extend life of structure, the issue as a result of chloride in reinforcement concrete. Zinc is one of the first materials to be used in ion exchange processes easily remove and reduce corrossions of reinforcement. Experimental result from studies the corrosion rate, design zinc anode different size and different distance install into the example concrete. These variables condition are very common when applied to concrete buildings structures, coastal and this research has been tested for various conditions of maintenance and repair of concrete structures. It respect to building structure of reinforced concrete structures This research impement and calculate the corrosion in reinforced concretefrom the simulation of corrossion enveronment by apply the of electric for simmulation condition like actual conditions. This method may be different from actual conditions because they are limited in time duration. The method for measure value of corrossion rate steel reinforcement using to half-cell potential (HCP) and Linear Polarization Resistance (LPR).

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ที่ริเริ่มและนำเสนอแนวคิดการตรวจสอบคอนกรีตเสริมเหล็กแบบไม่ทำลายและผู้ร่วมทำให้งานวิจัยนี้เสร็จสิ้น สำหรับแนวความคิดในการทำงานวิจัยให้ผู้วิจัยมีแนวทางในการวิจัย ทั้งยังทำงานวิจัยต้นแบบและแบบอย่างในงานวิจัยและพัฒนาให้บรรลุไปได้ด้วยดี และผู้ช่วยนักวิจัยอาจารย์ในสาขาวิชาสาขาวิศวกรรมโยธา และวิศวกรรมไฟฟ้า ที่คอยให้คำแนะนำและตรวจทานผลการวิจัยในครั้งนี้ให้ผ่านไปได้อย่างดียิ่งขึ้นรวมทั้งเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่สละเวลาในการประสานงานและติดต่อกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยนี้ ที่ได้ให้ความกรุณาอนุเคราะห์ข้อมูลเพื่อให้วิจัยให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่และบุคลากรคณะวิศวกรรมศาสตร์และคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครทุกท่านที่ให้การสนับสนุนในด้านของเครื่องมือ สถานที่ การทำหนังสือขออนุญาตในด้านต่างๆ และคำแนะนำในการทำการทดสอบทำให้สามารถทำการวิจัยในครั้งนี้เป็นไปอย่างราบรื่นรวมถึงขอขอบคุณครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณงามความดีทั้งหมดให้แก่มารดาและญาติของผู้วิจัยที่ให้การสนับสนุนให้ผู้วิจัยได้มีวันที่ผู้วิจัยได้มีวันนี้ รวมถึงให้กำลังใจกับผู้วิจัยในทุก ๆ ด้านตลอดมาตั้งแต่ผู้วิจัยได้เกิดมาบนโลกใบนี้และให้ทัศนคติในการดำรงชีวิตให้สามารถดำรงชีวิตมาจนวันนี้ได้

จักรพันธ์และคณะ

กรกฎาคม 2557

สารบัญ

บทที่ 1 บทนำ.....	7
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	7
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	8
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	8
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	9
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	10
2.1 การประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีต.....	11
2.2 ทฤษฎีการเกิดสนิม.....	11
2.3 หลักการเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยคลอไรด์ (STEEL CORROSION DUE TO CHLORIDE).....	13
2.3.1 โดยการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตและเหล็กเสริม อาทิเช่น.....	15
2.3.2 ป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริม.....	15
2.4 แบบจำลองการเสื่อมสภาพของคอนกรีตเสริมเหล็ก	17
2.5 กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริม	19
2.6 การทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริม.....	20
2.6.1 การตรวจสอบด้วยวิธีครึ่งเซลล์ (Half-Cell Potential Measurement)	20
2.6.2 การหาปริมาณของคลอไรด์ (Chloride Content).....	23
2.7 วิธีทางไฟฟ้าเคมี (ELECTRO CHEMICAL)	23
2.8 การวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์.....	26
2.9 การวิเคราะห์ข้อมูลของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์.....	28
2.10 ความต้านทานของคอนกรีต.....	31
2.11 วิธีการวัดความกัดกร่อนด้วยโพลาไรซ์เซชัน.....	35
2.12 อุปกรณ์ป้องกันสนิมในเหล็กเสริม (GALVA SHIELD).....	37
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	40
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานจัดสร้างและทดสอบ	40



วิธีการสร้างแบบจำลองผสมคอนกรีต.....	40
3.2 การเตรียมอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	42
ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	42
3.3 วัสดุและส่วนผสมคอนกรีตตัวอย่าง.....	45
3.4 การจำลองสภาวะการเกิดสนิมเหล็กและเตรียมตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	46
3.5 การออกแบบและจัดทำ GALVA SHIELD หรือ ZINC TAP	47
3.6 วิธีการวัดค่าด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์.....	49
3.7 การวัดค่าทดสอบด้วยเครื่องมือวัดค่าด้วยคลื่นสัญญาณไฟฟ้า.....	50
บทที่ 4 ผลการทดลอง	54
4.1 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์.....	54
4.2 วัดค่าด้วยโพลาลาไลน์เซนส์.....	61
บทที่ 5 บทสรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	88
บรรณานุกรม.....	89
ภาคผนวก ก.....	92
ภาคผนวก ข.....	97



สารบัญญภาพ

รูปที่ 2-1 กลไกการเกิดสนิม	11
รูปที่ 2-2 ปฏิกริยาไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อนบนผิวเหล็กเสริม.....	13
รูปที่ 2-3 ปฏิกริยาไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์.....	15
รูปที่ 2-4 แบบจำลองการป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กเสริมโดยการติดตั้งตาข่ายสังกะสีและการ ป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กเสริมโดยการติดตั้งไฟฟ้ากระแสตรงสู่เหล็กเสริม.....	16
รูปที่ 2-5 รูปแบบจำลองกระบวนการเกิดสนิมของเสริมเหล็กในคอนกรีต.....	17
รูปที่ 2-6 รูปแบบจำลองระยะเวลาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ที่มา : Tuutti, K.(1982)	18
รูปที่ 2-7 แบบจำลองกระบวนการเสื่อมสภาพโดยคลอไรด์.....	19
รูปที่ 2-8 แผนภาพกลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริม ที่มา: (Pourbaix, M., 1976)	20
รูปที่ 2-9 แผนภูมิการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์.....	21
รูปที่ 2-10 การตรวจสอบโดยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (The Half-Cell Potential Measurement) และ การพล็อตเส้นชั้นความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-Cell Potential Contour)	21
รูปที่ 2-11 แบบจำลองช่วงชีวิตการใช้งานของเหล็กเสริมในคอนกรีต	22
รูปที่ 2-12 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ไอออนในห้องปฏิบัติการและกราฟความสัมพันธ์ของ	23
รูปที่ 2-13 แสดงขบวนการของวิธี Electrochemical Chloride Removal (ECR)	24
รูปที่ 2-14 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่จ่ายในระบบกับปริมาณคลอไรด์ ที่ออกจากตัวอย่าง ทดลองและความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสื่อที่เป็นขั้วลบกับปริมาณคลอไรด์ที่ออกจาก ตัวอย่าง	25
รูปที่ 2-15 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับใช้ทดสอบด้วยวิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ ตามมาตรฐาน ASTM C 876 โดยการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีต ที่มา: (ASTM C 876, 2002)	27
รูปที่ 2-16 ตัวอย่างแผนที่เส้นชั้นความสูงของศักย์ไฟฟ้าที่สำรวจได้จาก half-cell potential.....	29
รูปที่ 2-17 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม(i_{corr})กับ ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ ที่มา : (Feliu,S.,Gonzalaz,J.A.,and Andrade,C.,1996).....	30



รูปที่ 2-18 เปรียบเทียบความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม (i_{corr}) และค่าความต้านทานของ ชั้นส่วนคอนกรีตที่มา : (Feliu, S., Gonzalez, J.A., and Andrade, C., 1996)	34
รูปที่ 2-19 การวัดค่าความต้านทานโพลาไรซ์ของเหล็กเสริมในคอนกรีตโดยไม่มี.....	36
รูปที่ 2-20 อุปกรณ์ป้องกันการเกิดสนิม Galvashield หรือ Zinc Tape.....	38
รูปที่ 2-21 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตโดยไม่มี Galvashield หรือ Zinc Tape	39
รูปที่ 2-22 แสดง Galvashield หรือ Zinc Tape ของเหล็กเสริมในคอนกรีต	39
รูปที่ 3-1 การหล่อคอนกรีตตัวอย่างเพื่อทดลอง.....	41
รูปที่ 3-2 ตำแหน่งการวัดค่า Half-cell Potential และ LPR	43
รูปที่ 3-3 การวัดด้วยโพลาลาईนเซชัน.....	44
รูปที่ 3-4 การวัดด้วย Half cell	44
รูปที่ 3-5 แท่งคอนกรีตที่ฝังขั้วเพื่อวัดสัญญาณที่ใช้ในการทดลอง.....	45
รูปที่ 3-6 การบ่มแท่งคอนกรีตให้เกิดสภาวะการเกิดสนิมเสมือนจริง.....	46
รูปที่ 3-7 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตและการเร่งการเกิดสนิมด้วยกระแสไฟฟ้า.....	47
รูปที่ 3-8 การออกแบบโครงสร้างของ Galvashield หรือ Zinc Tap.....	47
รูปที่ 3-9 ตัวอย่างของ Zinc Tap ที่ขนาดความหนาต่างๆ.....	48
รูปที่ 3-10 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Zinc Tap	48
รูปที่ 3-11 การเชื่อมต่อระหว่างแท่งสังกะสีกับลวดตัวนำ.....	49
รูปที่ 3-12 การวัดการเกิดสนิมด้วยวิธีความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์.....	49
รูปที่ 3-13 การเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือโดยใช้วิธีความต้านทานโพลาไรซ์.....	50
รูปที่ 3-14 การเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือโดยใช้วิธีการส่งคลื่นเพื่อหาความต้านทานโพลาไรซ์... ..	51
รูปที่ 3-15 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าเปรียบเทียบผล.....	51
รูปที่ 3-16 การวัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้า.....	52
รูปที่ 3-17 การสร้างความสัมพันธ์การรับค่าจากเซนเซอร์ทดสอบจากสัญญาณไฟฟ้า.....	52
รูปที่ 3-18 การสร้างความสัมพันธ์และเงื่อนไขในการคำนวณค่า.....	53
รูปที่ 4-1 ความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคอนกรีตขนาด 70*70*10 cm ที่เร่งการเกิดสนิมโดยวิธีการของ Half-Cell Potential.....	60



รูปที่ 4-2 ความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคอนกรีตขนาด 50*50*10 cm ที่เร่งการเกิดสนิมโดยวิธีการของ Half-Cell Potential.....	60
รูปที่ 4-3 ความสัมพันธ์ของความต้านทานโพลาไลซ์ระหว่างการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคอนกรีต ขนาด 70*70*10 cm ที่ทดสอบ Zinc ขนาด หน้า 2 cm หน้าตัด 1 นิ้ว.....	70
รูปที่ 4-4 ความสัมพันธ์ของความต้านทานโพลาไลซ์ระหว่างการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคอนกรีต ขนาด 70*70*10 cm ที่ทดสอบ Zinc ขนาด หน้า 2 cm หน้าตัด 2 นิ้ว.....	70
รูปที่ 4-5 ความสัมพันธ์ของความต้านทานโพลาไลซ์ระหว่างการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคอนกรีต ขนาด 70*70*10 cm ที่ทดสอบ Zinc ขนาด หน้า 1 cm หน้าตัด 2 นิ้ว.....	71
รูปที่ 4-6 ความสัมพันธ์ของความต้านทานโพลาไลซ์ระหว่างการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคอนกรีต ขนาด 70*70*10 cm ที่ทดสอบ Zinc ขนาด หน้า 1 cm หน้าตัด 1 นิ้ว.....	71
รูปที่ 4-7 ความสัมพันธ์ของความต้านทานโพลาไลซ์ระหว่างการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคอนกรีต ขนาด 50*50*10 cm ที่ทดสอบ Zinc ขนาด หน้า 2 cm หน้าตัด 2 นิ้ว.....	72
รูปที่ 4-8 ความสัมพันธ์ของความต้านทานโพลาไลซ์ระหว่างการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคอนกรีต ขนาด 50*50*10 cm ที่ทดสอบ Zinc ขนาด หน้า 1 cm หน้าตัด 2 นิ้ว.....	72
รูปที่ 4-9 ความสัมพันธ์ของความต้านทานโพลาไลซ์ระหว่างการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคอนกรีต ขนาด 50*50*10 cm ที่ทดสอบ Zinc ขนาด หน้า 2 cm หน้าตัด 1 นิ้ว.....	73
รูปที่ 4-10 ความสัมพันธ์ของความต้านทานโพลาไลซ์ระหว่างการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคอนกรีต ขนาด 50*50*10 cm ที่ทดสอบ Zinc ขนาด หน้า 2 cm หน้าตัด 1 นิ้ว.....	73
รูปที่ 4-11 ความสัมพันธ์ของกระแสการกัดกร่อนโพลาไลซ์ระหว่างการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่น คอนกรีตขนาด 70*70*10 cm ที่ทดสอบ Zinc ขนาด หน้า 2 cm หน้าตัด 2 นิ้ว.....	83
รูปที่ 4-12 ความสัมพันธ์ของกระแสการกัดกร่อนโพลาไลซ์ระหว่างการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่น คอนกรีตขนาด 70*70*10 cm ที่ทดสอบ Zinc ขนาด หน้า 1 cm หน้าตัด 2 นิ้ว.....	84
รูปที่ 4-13 ความสัมพันธ์ของกระแสการกัดกร่อนโพลาไลซ์ระหว่างการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่น คอนกรีตขนาด 70*70*10 cm ที่ทดสอบ Zinc ขนาด หน้า 2 cm หน้าตัด 1 นิ้ว.....	84
รูปที่ 4-14 ความสัมพันธ์ของกระแสการกัดกร่อนโพลาไลซ์ระหว่างการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่น คอนกรีตขนาด 70*70*10 cm ที่ทดสอบ Zinc ขนาด หน้า 1 cm หน้าตัด 1 นิ้ว.....	85
รูปที่ 4-15 ความสัมพันธ์ของกระแสการกัดกร่อนโพลาไลซ์ระหว่างการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่น คอนกรีตขนาด 50*50*10 cm ที่ทดสอบ Zinc ขนาด หน้า 2 cm หน้าตัด 2 นิ้ว.....	85



- รูปที่ 4-16 ความสัมพันธ์ของกระแสการกัดกร่อนโพลาลิเนเซชันการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่น
คอนกรีตขนาด 50*50*10 cm ที่ทดสอบ Zinc ขนาด หน้า 1 cm หน้าตัด 2 นิ้ว..... 86
- รูปที่ 4-17 ความสัมพันธ์ของกระแสการกัดกร่อนโพลาลิเนเซชันการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่น
คอนกรีตขนาด 50*50*10 cm ที่ทดสอบ Zinc ขนาด หน้า 2 cm หน้าตัด 1 นิ้ว..... 86
- รูปที่ 4-18 ความสัมพันธ์ของกระแสการกัดกร่อนโพลาลิเนเซชันการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่น
คอนกรีตขนาด 50*50*10 cm ที่ทดสอบ Zinc ขนาด หน้า 1 cm หน้าตัด 1 นิ้ว..... 87



บทที่ 1 บทนำ

การศึกษาอิทธิพลของระบบการป้องกันการเกิดสนิมต่อระดับคลอไรด์ในคอนกรีต ในโครงสร้างคอนกรีตโดยทั่วไป มักจะเป็นที่นิยมเนื่องจากมีโอกาสลดปัจจัยและผลกระทบที่รบกวนต่อการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็ก ที่ทำให้เกิดข้อผิดพลาด เป็นส่วนมาก อิทธิพลต่างๆที่มีผลต่อ ความถูกต้องจึงเป็น สิ่งสำคัญ โดยเฉพาะโครงสร้างที่อยู่บริเวณชายฝั่งทะเล โดยสาเหตุสำคัญส่วนใหญ่ที่ทำให้เหล็กเกิดสนิมจะเกิดจากการที่คลอไรด์ซึมผ่านคอนกรีตเข้าไปถึงเหล็กเสริมและไปทำลายชั้นฟิล์มที่ป้องกันที่ผิวเหล็กเสริม เมื่อคลอไรด์ที่ซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตนั้นมีปริมาณมากเพียงพอก็จะทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นเกิดสนิมขึ้นสะสมในช่องว่างที่จำกัดของคอนกรีตรอบๆ เหล็กเสริมจนทำให้เกิดหน่วยแรงและดันให้คอนกรีตเกิดความเสียหายแตกหลุดล่อนออกมาเป็นผลทำให้กำลังของโครงสร้างลดน้อยลงจนไม่สามารถรับกำลังได้ อีกและโครงสร้างจะเกิดการวิบัติ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไป มักจะได้รับผลกระทบจากการเกิดสนิมของเหล็กเป็นส่วนมากเป็นผลให้กำลังของโครงสร้างคอนกรีตลดน้อยและโครงสร้างเกิดการเสื่อมสภาพไปอย่างแพร่หลายในวงการก่อสร้างทุกแห่งทั่วโลก โดยเฉพาะโครงสร้างที่อยู่บริเวณชายฝั่งทะเล โดยสาเหตุสำคัญส่วนใหญ่ที่ทำให้เหล็กเกิดสนิมจะเกิดจากการที่คลอไรด์ซึมผ่านคอนกรีตเข้าไปถึงเหล็กเสริมและไปทำลายฟิล์มที่ป้องกันที่ผิวเหล็กเสริม เมื่อคลอไรด์ที่ซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตนั้นมีปริมาณมากเพียงพอก็จะทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นเกิดสนิมขึ้นสะสมในช่องว่างที่จำกัดของคอนกรีตรอบๆ เหล็กเสริมจนทำให้เกิดหน่วยแรงและดันให้คอนกรีตเกิดความเสียหายแตกหลุดล่อนออกมาเป็นผลทำให้กำลังของโครงสร้างลดน้อยลงจนไม่สามารถรับกำลังได้อีกและโครงสร้างจะเกิดการวิบัติ ในการบำรุงรักษาซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตในปัจจุบันจึงมีค่าใช้จ่ายสูงมากและเป็นงบประมาณหลักของประเทศ จะอยู่ในส่วนของระบบสาธารณสุขภาค การที่จะทำให้คอนกรีตโครงสร้างที่เสื่อมสภาพกลับคืนมาอยู่ในสภาพที่ใช้งานได้ นั้นต้องมีการวางแผนในการบำรุงรักษาและซ่อมแซมที่ดีจะช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายได้เป็นอย่างมาก

จึงเป็นปัญหาที่น่าสนใจที่ จะต้องแก้ไขเร่งด่วนเพราะในอนาคตจำนวนโครงสร้างคอนกรีตที่เสื่อมสภาพมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นทุกๆปี โดยเฉพาะโครงสร้างที่อยู่บริเวณชายฝั่งทะเล ดังนั้นในการวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบจากการติดตั้งโลหะที่สามารถสูญเสียอิเล็กตรอน (Sacrificial Point Anode) ได้ง่ายกว่าเหล็กเสริม สามารถช่วยลดการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในโครงสร้างคอนกรีตจึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง สำหรับวิธีการตรวจสอบใช้วิธีการวัดค่าความต้านทานแบบโพลาไรซ์เซชันและความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เป็นวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายสามารถบอกเตือนให้รู้ค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีตได้



นอกจากนั้นผลที่ได้จากโครงการวิจัยนี้ยังสามารถนำไปใช้เป็นฐานข้อมูลที่จำเป็นต่อไปเพื่อเป็นแนวทางในการใช้งานของ (Sacrificial Point Anode) ให้เหมาะสมโครงสร้างที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมชายฝั่งทะเลในประเทศไทยให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาถึงผลกระทบระหว่างปริมาณความเข้มข้นของคลอไรด์กับเวลาที่ระยะแตกต่างกัน ที่อยู่ห่างจากขั้ว Anode ที่ฝังในแผ่นพื้นคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่ผสมด้วยเถ้าลอยและดินขาว ตามร้อยละการแทนที่ของปูนซีเมนต์
2. ศึกษาถึงปริมาณสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่แพร่ผ่านเข้าไปในแผ่นพื้นคอนกรีตที่ระดับความลึกต่างๆ
3. ศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสนิมกับเวลาของคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่ผสมด้วยเถ้าลอยและดินขาวตามร้อยละการแทนที่ของปูนซีเมนต์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ในการวิจัยนี้จะคำนึงถึงปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กอันเนื่องมาจากคลอไรด์ไอออนเป็นหลักซึ่งปัญหานี้จะพบบ่อยมากในอาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กชายฝั่งทะเลและการวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบหาเงื่อนไขต่างๆในการบำรุงรักษาและซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมี เนื่องจากปัญหาของเหล็กเสริมเป็นสนิมนั้นกว่าจะพบปัญหามักจะเป็นช่วงที่วิกฤติแล้วและไม่ได้พิจารณาถึงกำลังรับแรงดัดหรือแรงอัดหลังจากการซ่อมแซมแล้วหรือโอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างต่างกับมวลรวม (Alkali Aggregate Reaction, AAR) แต่จะพิจารณาเฉพาะความสามารถในการบำรุงรักษาซ่อมแซมด้วยวิธี Cathodic Protection

การศึกษานี้จะคำนึงถึงการเกิดสนิมของเหล็กเสริม ซึ่งพบมากในอาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไปและการวิจัยนี้ทดสอบการเกิดสนิมในคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยการเร่งการเกิดสนิมด้วยวิธีการทางไฟฟ้า ซึ่งพฤติกรรมอาจจะแตกต่างจากสภาพจริงเนื่องจากถูกจำกัดในด้านระยะเวลา สำหรับวิธีการตรวจสอบแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในแผ่นพื้นคอนกรีตใช้วิธีการของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half Cell Potential) และวิธีความต้านทานโพลาไรซ์เชิงเส้น (Linear Polarization Resistance) สำหรับวัดค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริม



1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การศึกษานี้เป็นประโยชน์และองค์ความรู้ในการวิจัยสำหรับการตัดสินใจถึงความเหมาะสมของปริมาณ ขนาดและระยะห่างของ (Sacrificial Point Anode) ที่ติดตั้งในโครงสร้างคอนกรีต ที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยและดินขาวเพื่อเพิ่มความคงทนและอายุการใช้งานเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไป และนำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ ในการที่นำวัสดุที่เหลือทิ้ง (by product) นำกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งเป็นการลดต้นทุนในการผลิตปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ หรือในอีกมุมหนึ่งสามารถช่วยในการวางแผนการบำรุงรักษาและซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการก่อสร้างได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้ผลของงานวิจัยยังสามารถใช้เป็นฐานข้อมูลที่สำคัญต่อไปเพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดเป็นมาตรฐานสำหรับใช้งานในโครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ในบริเวณชายฝั่งทะเลในประเทศไทยต่อไป



บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

โดยปกติคอนกรีตที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ซึ่งมีปริมาณ C3A ที่ต่ำจะเหมาะสำหรับโครงสร้างที่สัมผัสน้ำทะเล แต่เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบในน้ำทะเลโดยแท้จริงแล้วน้ำทะเลมีปริมาณซัลเฟตอยู่ประมาณ 10% ส่วนคลอไรด์นั้นมีปริมาณถึง 90% ดังนั้นการคำนึงถึงทุกองค์ประกอบของน้ำทะเลจะมีเหตุผลมากกว่าการพิจารณาแต่เพียงซัลเฟตเท่านั้น โดยที่ น้ำทะเลมีเกลือคลอไรด์ซึ่งอยู่ในรูปสารประกอบโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ประมาณ 27,000 ppm แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl₂) ประมาณ 3,200 ppm และแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂) ประมาณ 500 ppm ส่วนซัลเฟตอยู่ในรูปของสารประกอบ แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO₄) ประมาณ 2,200 ppm และแคลเซียมซัลเฟต (CaSO₄) ประมาณ 1,100 ppm (CPAC, 2008)

อย่างไรก็ตามจากความเจริญก้าวหน้าในด้านคอนกรีตเทคโนโลยีในปัจจุบัน การศึกษาวิจัยด้านวิศวกรรมคอนกรีตสามารถทำการศึกษาได้อย่างกว้างขวางขึ้น การศึกษาคอนกรีตสามารถลงลึกได้ถึงระดับโครงสร้างภายในเนื้อของคอนกรีต (Micro Structure) ทำให้เป็นที่ตระหนักว่าคอนกรีตไม่ใช่วัสดุ ก่อสร้างที่มีความทนทานสูงเสมอไปและต้องการการบำรุงรักษาเช่นเดียวกับวัสดุก่อสร้างชนิดอื่น ซึ่งในกลุ่มประเทศแถบยุโรปหรือกลุ่มประเทศที่พัฒนาแล้วการบำรุงรักษาสภาพของโครงสร้างอย่างสม่ำเสมอมีมูลค่าใกล้เคียงกับการก่อสร้างใหม่ แต่สำหรับในประเทศไทยวิศวกรโครงสร้างยังขาดความรู้และข้อมูลในเรื่องเกี่ยวกับการดูแลรักษาและเรื่องความทนทานของคอนกรีต จึงมีความจำเป็นในการทำการวิจัยเพื่อเป็นข้อมูลสำหรับวิศวกรเพื่อที่จะเป็นฐานข้อมูลในการวางแผนการบำรุงรักษาและซ่อมแซมโครงสร้าง

คอนกรีตที่ดีควรมีกำลังตามต้องการและทนทานต่อสภาวะแวดล้อมตลอดอายุการใช้งาน โดยยังสามารถคงรูปร่างและคุณสมบัติต่างๆ รวมถึงการใช้งานได้ดีเช่นเดิม ความเสียหายของคอนกรีตอาจเกิดขึ้นจากปัจจัยภายนอกหรืออาจเกิดจากปัจจัยภายในของคอนกรีตเองก็ได้ โดยทั่วไปอาจแบ่งสาเหตุของการเสื่อมสภาพของคอนกรีตออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ ดังต่อไปนี้

1. การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางกายภาพ (Physical Deterioration) เช่น การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) การทรุดตัว (Settlement) การหดตัวพลาสติก (Plastic Shrinkage) การแข็งตัวและเหลวของน้ำในคอนกรีต (Freezing and Thawing)

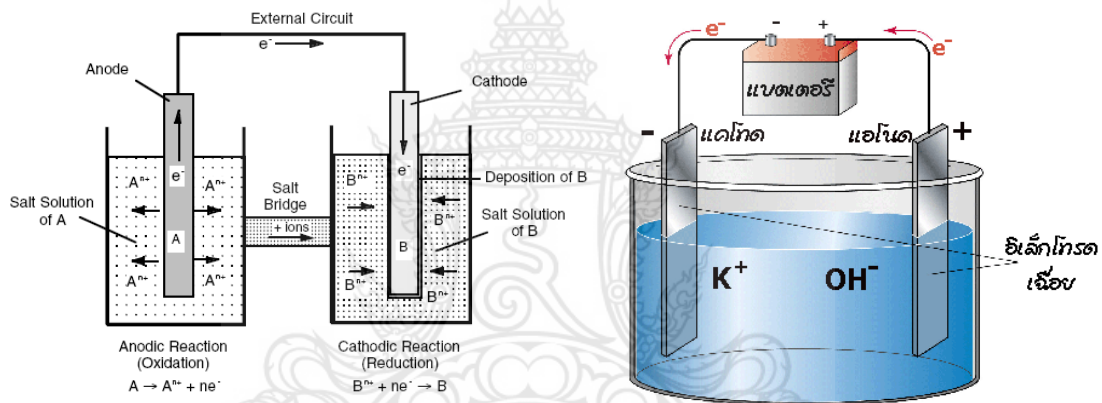


2. การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางเคมี (Chemical Deterioration) คาร์บอนเนชั่น (carbonation) การกัดกร่อนโดยกรด (Acid Attack) การกัดกร่อนโดยซัลเฟต (Sulfate Attack) ปฏิกริยาระหว่างด่างกับมวลรวม (Alkali-Aggregate Reaction) การเป็นสนิมของเหล็กเสริมจากคลอไรด์ในน้ำทะเล (Chloride Attack)

3. การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางกล (Mechanical Deterioration) เช่น การขัดสี (Abrasion) การชะด้วยกระแสน้ำและกรวดทราย (Erosion) การแตกตัวของฟองอากาศในน้ำ (Cavitation)

2.1 การประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีต

สำหรับเนื้อหาส่วนนี้ประกอบไปด้วยกลไกการเกิดสนิมและหลักการที่ใช้ในการวัดค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริม



รูปที่ 2-1 กลไกการเกิดสนิม

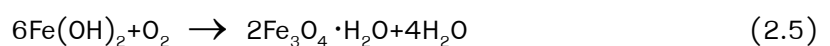
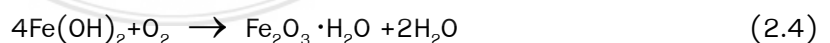
2.2 ทฤษฎีการเกิดสนิม

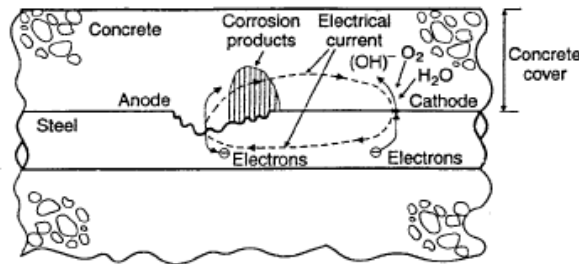
การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Process) โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วนคือ ปฏิกิริยา Anodic Reaction ปฏิกิริยา Cathodic Reaction และ Electrolyte กระบวนการเกิดสนิมเริ่มจากการมีความชื้นเพียงพอที่จะทำให้อะตอมของเหล็กสูญเสียอิเล็กตรอนกลายเป็น Fe^{2+} ละลายอยู่ในน้ำรอบเหล็กเสริมเรียกบริเวณนี้เป็นขั้ว Anode และอิเล็กตรอนนี้จะสะสมอยู่บริเวณผิวบนเหล็กเสริมทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าขึ้นและส่วนของเหล็กเสริมที่ไม่มีการแตกตัวจะมีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าและทำหน้าที่เป็นขั้ว Cathode อธิบายได้ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งเทียบได้กับการเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตซึ่งเกิดจากการที่อะตอมของเหล็กเกิดการแตกตัวเป็น Fe^{2+} และเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนทำให้บริเวณนั้นเกิดเป็นขั้ว Anode ดังสมการที่ 2.1 อิเล็กตรอนนี้จะมีมากขึ้นบริเวณผิวของเหล็กเสริมทำให้เกิดศักย์ทางไฟฟ้าขึ้นในบริเวณที่ไม่เกิดการแตกตัวของเหล็กจะมีศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำกว่าจะทำหน้าที่เป็นขั้ว Cathode อิเล็กตรอนที่เกิดจาก

Anode จะเคลื่อนที่ตามเหล็กเสริมมายัง Cathode ที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าและทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (O_2) และน้ำ (H_2O) ที่อยู่บริเวณนี้เกิดไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ขึ้น ดังสมการที่ 2.2 การเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าเกิดขึ้นทั้งกระแสภายในเหล็กและกระแสภายนอกเหล็กเสริมกระแสภายในเหล็กเสริมเป็นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จาก Anode ไปสู่ Cathode ในขณะที่กระแสภายนอกเหล็กเสริมเป็นการเคลื่อนที่ของไอออน Fe^{2+} และ (OH^-) ผ่านสารละลายในช่องว่าง Pore Solution ของคอนกรีตรอบๆเหล็กเสริมโดยประจุลบคือ (OH^-) จะเคลื่อนที่จาก Cathode สู่ Anode และประจุบวก Fe^{2+} จะเคลื่อนที่จาก Anode สู่ Cathode การเคลื่อนที่ของไอออนผ่าน Pore Solution ของคอนกรีตเป็นปัจจัยที่สำคัญของการเกิดการกัดกร่อน สารละลายในช่องว่างส่วนใหญ่เป็นสารละลายของ Alkali และ Calcium Hydroxide เปรียบเหมือนเป็นสารละลาย Electrolyte ทำให้เกิดการครบวงจรของ Galvanic Cell และเกิดการกัดกร่อนขึ้นได้ แต่ถ้าในช่องว่างนี้ แห้งหรือโครงสร้างภายในของคอนกรีตที่บดแน่นและช่องว่างภายในเกิดขึ้นไม่ต่อเนื่องการไหลของไอออน ผ่านจะเกิดขึ้นได้ยากขึ้นซึ่งทำให้การเกิดการกัดกร่อนช้าลงจนหยุดการกัดกร่อน

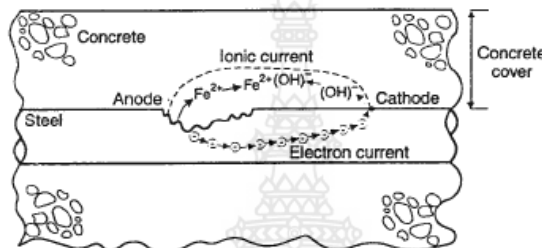


จากการที่เกิด Fe^{2+} และ OH^- จาก Anode และ Cathode ไอออนทั้งสองจะเคลื่อนที่เข้าหากันและทำปฏิกิริยาเกิดเป็น $Fe(OH)_2$ ดังสมการที่ 2.3 ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาต่อไปเป็น hydrate ferric oxide ($Fe_2O_3 \cdot H_2O$) หรือเรียกว่า red-brown rust และ black magnetite (Fe_3O_4) ซึ่งเกิดจาก Green hydrate magnetite ($Fe_3O_4 \cdot H_2O$) ดังสมการที่ 2.4, 2.5 และ 2.6 ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของการกัดกร่อนคือสนิมในรูปแบบต่างๆ ซึ่งมีปริมาณมากกว่าเหล็กก่อนเกิดปฏิกิริยา 4 ถึง 6 เท่า แสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งทำให้เกิดแรงดันภายในและคอนกรีตเกิดการแตกร้าวเสียหายได้ นอกจากนี้ในส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบางจุดเกิดการสูญเสียเนื้อที่หน้าตัดเหล็ก และหน้าตัดของเหล็กเสริมลดลงส่งผลต่อการรับแรงของโครงสร้างซึ่งถ้าไม่ได้ซ่อมแซมให้ถูกวิธีโครงสร้างอาจเกิดการวิบัติได้





(ก) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้ว Anode และ Cathode



(ข) การเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าภายในและภายนอกเหล็กเสริม

รูปที่ 2-2 ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อนบนผิวเหล็กเสริม

2.3 หลักการเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยคลอไรด์ (Steel Corrosion due to Chloride)

การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมโดยไอออนของคลอไรด์ (Chloride Ions) เป็นตัวที่ทำให้มีความเป็นด่างของคอนกรีตที่ป้องกันเหล็กเสริมไม่ให้เกิดสนิมถูกทำลายลดลงจนถึงระดับวิกฤตและถ้ามีน้ำและออกซิเจนเพียงพอก็จะทำให้เหล็กเกิดสนิมได้ แหล่งที่มาของคลอไรด์อาจมีอยู่เองในคอนกรีต หิน ทราาย หรือน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่นแคลเซียมคลอไรด์ที่มักมีอยู่ในสารเร่งการก่อตัว แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความทนทานของคอนกรีตนั้นส่วนมากจะมาจากภายนอกคอนกรีตในช่วงที่ใช้งาน เช่น จากน้ำทะเลจากดินหรือจากเกลือที่ใช้ละลายน้ำแข็งในประเทศที่มีอากาศหนาว (De-icing Salt) ซึ่งคลอไรด์อาจจะเข้าสู่คอนกรีตได้โดยวิธี การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตที่แห้งของน้ำที่มีคลอไรด์ (Capillary Suction) การแพร่ของไอออนของคลอไรด์ (Chloride Ions Diffusion) จากภายนอกที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าภายในของคอนกรีต การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตของน้ำที่มีคลอไรด์โดยแรงดันของน้ำ โดยทั่วไปแล้วสำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในทะเลตลอดเวลาจนถึงแม้คลอไรด์จะสามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ดีแต่ถ้าไม่มีออกซิเจนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ ความเสี่ยงที่จะเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากที่สุด มักพบในบริเวณคลื่นและละอองน้ำ (Splash Zone) รองลงมาเป็นบรรยากาศทะเล (Atmospheric Zone) และบริเวณน้ำขึ้น - น้ำลง (Tidal

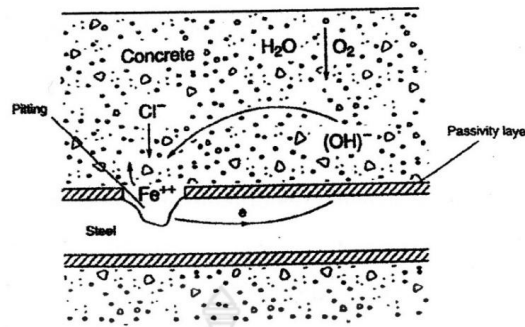
Zone) ส่วนบริเวณใต้น้ำทะเล (Submerged Zone) จะมีความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนเหล็กเสริมน้อยมาก สำหรับในกรณีของสภาพเปียกสลับแห้งนั้น น้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตที่แห้งโดย Absorption หรือ Capillary Suction จนกระทั่งคอนกรีตอยู่ในสภาพอิ่มตัว เมื่อสภาพภายนอกเปลี่ยนเป็นแห้ง น้ำที่ผิวคอนกรีตก็จะระเหยออกไปทิ้งไว้แต่คราบเกลือเมื่ออยู่ในสภาพเปียกอีก ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ใกล้ผิวก็จะสูงขึ้น คลอไรด์อิออนซึ่งมีความเข้มข้นสูงที่บริเวณผิวจะซึมเข้าสู่ภายในโดยการแพร่ซึ่งในแต่ละรอบของการเปียกและแห้งจะทำให้บริเวณใกล้ผิวมีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อยๆ และจะเข้าไปสู่ภายในคอนกรีตและสู่บริเวณเหล็กเสริมมากขึ้น โดยปกติแล้วคอนกรีตจะเปียกได้เร็วแต่จะแห้งได้ช้ากว่ามากและภายในคอนกรีตนั้นไม่สามารถทำให้แห้งได้โดยสมบูรณ์ ดังนั้นการแพร่เข้าไปในคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลาจึงช้ากว่าการเข้าไปของโดยการเปียกสลับแห้งโดยน้ำทะเล โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่สภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียกมักเร่งให้คลอไรด์อิออน เข้าสู่คอนกรีตได้เร็ว ดังนั้นคอนกรีตที่ถูกน้ำทะเลเป็นบางครั้งหรือช่วงแห้งนาน จะมีโอกาสเกิดปัญหาการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากกว่าคอนกรีตที่ประสบกับสภาวะช่วงแห้งสั้น การกัดกร่อนจะเริ่มเกิด ขึ้นก็ต่อเมื่อปริมาณคลอไรด์อิออนมีมากกว่าพอที่ผิวของเหล็กเสริม (Threshold Content of Chloride Ions)

สภาวะของคลอไรด์ในคอนกรีตนั้น จะมีคลอไรด์บางส่วนที่ถูกจับยึด (Fixed Chloride) โดยกลไกต่อไปนี้

1. Chemical Binding คลอไรด์บางส่วนจะถูกจับโดยผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน
2. Physical Binding คลอไรด์บางส่วนสามารถถูกยึดด้วยแรงทางกายภาพ (Surface Force) ได้บนผิวของ Hydration Product เช่น C-S-H และ C-A-H อีกทั้งสามารถถูกยึดอยู่บนผิวของวัสดุที่เป็นของแข็งที่ไม่มีปฏิกิริยาเช่น มวลรวมหรือผงฝุ่นหินได้ด้วย

การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์แตกต่างจากการกัดกร่อนทางเคมีอื่นตรงที่คลอไรด์ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมและคอนกรีตบริเวณรอบๆ เหล็กเสริมเท่านั้นที่เสียหายเนื่องจากการขยายตัวของเหล็กเสริมและเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ลายโครงสร้าง ่างคอนกรีตเสริมเหล็ก เมื่อซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดฟิล์มบางๆ (Passivation Film) ของ $\sqrt{+Fe_2O_3}$ เคลือบผิวเหล็กไว้และฟิล์มนี้ทำหน้าที่ป้องกันการเกิดสนิมของเหล็ก อย่างไรก็ตามอิออนของคลอไรด์สามารถทำลายฟิล์มนี้ได้ และเมื่อมีน้ำและออกซิเจนตรงบริเวณเหล็กเสริมที่ไม่มีฟิล์มนี้ ป้องกันอยู่เหล็กจะเป็นสนิมได้ ซึ่งโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปนั้น มักจะอยู่ในสภาพแวดล้อมที่อาจจะสัมผัสสารเคมี สภาพที่เป็นกรดหรือสภาพแวดล้อมที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิม เช่น โครงสร้างที่อยู่บริเวณชายฝั่งทะเลนั้น ความเข้มข้นของคลอไรด์จะเป็น ตัวทำลายสภาพความเป็นต่างของคอนกรีต เป็นต้น ซึ่งเป็นตัวเร่งให้เกิดสนิมในเหล็กเสริมเร็วขึ้นดังแบบจำลองการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ดังภาพที่ 2.3





รูปที่ 2-3 ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์

ที่มา: Neville, 1997

การป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์แบ่งออกเป็น 2 แนวทาง

2.3.1 โดยการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตและเหล็กเสริม อาทิเช่น

- ออกแบบและใช้คอนกรีตที่มีความชื้นน้ำต่ำมาก ๆ จะทำให้คลอไรด์แพร่เข้าไปในคอนกรีต ได้ยาก การใช้ปริมาณน้ำในคอนกรีตที่ต่ำ การลดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์
- การใช้สารประเภท Filler เพื่อเพิ่มความทึบน้ำ เช่น ซิลิกาฟุ่ม สารบอชโซลานในปริมาณที่เหมาะสม นอกจากจะช่วยให้คอนกรีตทึบน้ำมากขึ้นแล้วยังช่วยจับยึดคลอไรด์ได้ ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์อย่างเดียว
- ใช้สารเคลือบผิวคอนกรีตเช่น Epoxy เป็นต้น
- ใช้สารผสมในคอนกรีตบางชนิด เช่น Calcium หรือ Sodium Nitrite ที่สามารถช่วยทำให้ ปฏิกิริยา Anodic นั้นเกิดยากขึ้น

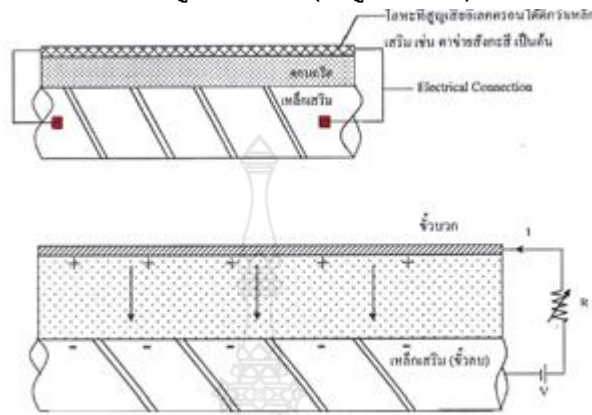
2.3.2 ป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

โดยอาศัยขบวนการทางไฟฟ้าเคมี มี 3 วิธี ได้แก่ (i) Cathodic Protection คือกระบวนการลดอัตราการเกิดสนิมโดยเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าของขั้วลบให้เท่ากับศักย์ไฟฟ้าของขั้วบวก (วันชัย, 2548) จากกลไกของการเกิดสนิมในเหล็กเสริม พบว่าการเกิดสนิมจะเกิดขึ้นเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลหมุนเวียน เพราะการเกิดสนิมเป็น (Electrochemical Process) ดังนั้นหากสามารถทำให้ทุกๆ จุดบนเหล็กเสริมมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากันได้ ก็จะไม่เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าขึ้น สามารถทำได้โดย

- ติดโลหะซึ่งสามารถเกิดสนิมได้ง่ายกว่าเหล็ก ซึ่งสูญเสียอิเล็กตรอนได้ง่ายกว่าไว้กับเหล็กเสริม เรียกโลหะนี้ว่า Sacrificial Anode โดยโลหะชนิดนี้จะทำหน้าที่แทนเหล็กในขบวนการ Anodic โลหะที่สูญเสียอิเล็กตรอนได้ดีกว่าเหล็กเสริมเช่น สังกะสี เป็นต้น เมื่อใช้โลหะเหล่านี้ ปฏิกิริยา Anodic จะเปลี่ยนเป็น Zn

→ $Zn^{2+} + 2e^-$ ดังนั้นต้องมีการเปลี่ยนโลหะที่เสียอิเล็กตรอนแทนเหล็กเมื่อโลหะชนิดนี้ผุกร่อนจนหมด (ดังรูปที่ 2-4)

- โดยการติดตั้งไฟฟ้ากระแสตรงสู่เหล็กเสริม(ดังรูปที่ 2-4)

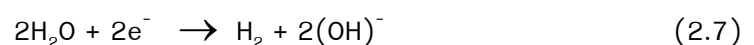


รูปที่ 2-4 แบบจำลองการป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กเสริมโดยการติดตั้งตาข่ายสังกะสีและการป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กเสริมโดยการติดตั้งไฟฟ้ากระแสตรงสู่เหล็กเสริม

ที่มา: คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุฯ วสท.

(ii) Electrodeposition เริ่มจากเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าสู่น้ำทะเล แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) ซึ่งมีประจุบวกในน้ำทะเลจะตกผลึกเป็น แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) หรือแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ $Mg(OH)_2$ ที่ผิวบริเวณขั้วลบ (ผิวคอนกรีต) เนื่องจากผลึกที่เกิดขึ้นนี้มีความสามารถละลายน้ำได้น้อยมาก และยังช่วยเพิ่มความทึบน้ำให้กับคอนกรีต จึงสามารถเป็นเครื่องป้องกัน คลอไรด์ไอออนจากน้ำทะเลได้ (วันชัยและคณะ, 2548)

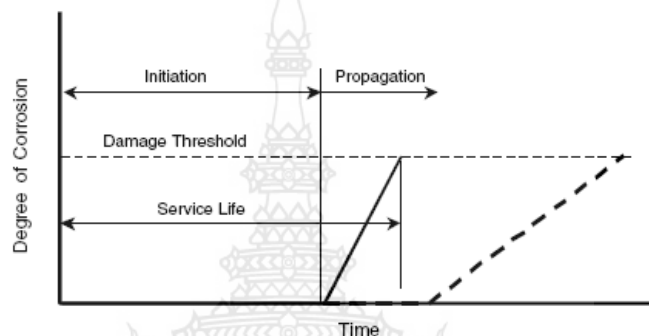
(iii) Desalination and Realkalization เป็นวิธีการป้องกันการเกิดสนิมโดยมีหลักการเมื่อแท่งคอนกรีตที่มีไอออนของคลอไรด์ถูกวางอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วไอออนของคลอไรด์ซึ่งมีประจุลบจะเคลื่อนที่ไปสู่ขั้วบวกและถ้าแรงดันไฟฟ้าสูงพอไอออนของคลอไรด์จะเคลื่อนที่ออกจากคอนกรีตไปสะสมในขั้วบวกในขณะเดียวกันที่บริเวณเหล็กเสริมที่เป็นขั้วลบอิเล็กตรอนก็จะรวมตัวกับน้ำทำให้เกิดเป็นก๊าซไฮโดรเจนและไฮดรอกซิลไอออนดังสมการ



ซึ่งทำให้บริเวณรอบเหล็กเสริมมีความเป็นด่างสูงขึ้นด้วย และข้อควรระวังสำหรับวิธีการนี้คือ ถ้าแรงดันไฟฟ้าสูงมากเกินไปก๊าซไฮโดรเจน (H_2) เกิดมากเกินไปอาจทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวเหล็กกับคอนกรีตเสียหายได้

2.4 แบบจำลองการเสื่อมสภาพของคอนกรีตเสริมเหล็ก

แนวความคิดโดยการจำลองรูปแบบแทนด้วยอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตที่มีความไวต่อการเกิดสนิมของเหล็กและจากรูปแสดงให้เห็นถึงระดับของการเกิดสนิมเป็นฟังก์ชันกับเวลาซึ่งในช่วงระยะเวลาเริ่มแรกเหล็กเสริมจะยังไม่เกิดสนิมและถ้าคลอไรด์ไอออนหรือเกิดคาร์โบเนชั่นที่ผิวหน้าคอนกรีตและซึมผ่านไปจนถึงเหล็กเสริมและเมื่อเหล็กสูญเสียชั้นฟิล์มบางๆที่ป้องกันที่ผิวเหล็กเสริมจะทำให้เกิดสภาวะของการแพร่เริ่มต้นขึ้นและระดับของการเกิดสนิมจะพัฒนาเพิ่มขึ้นในอัตราที่รวดเร็ว



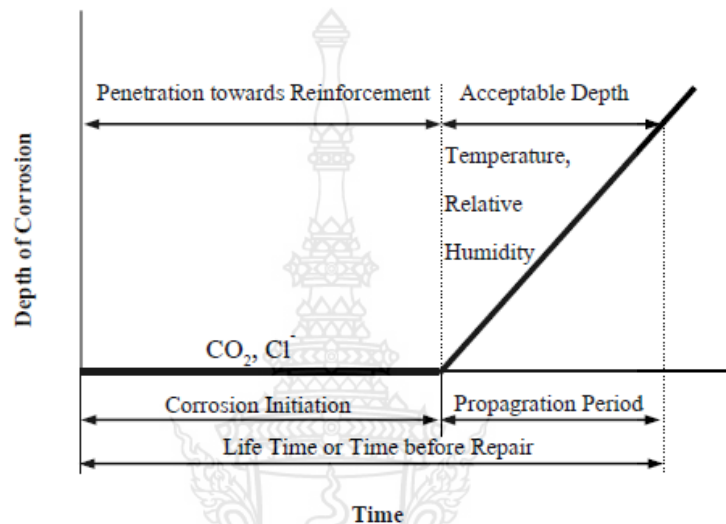
รูปที่ 2-5 รูปแบบจำลองกระบวนการเกิดสนิมของเสริมเหล็กในคอนกรีต

ที่มา : (Tutti, K., 1980)

อัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมขึ้นอยู่กับสภาวะของการแพร่ของคลอไรด์ซึ่งเป็นปัจจัยหลักส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยแทนด้วยระยะเวลา เมื่อระดับความเสี่ยงของการเกิดสนิมสูงขึ้นจนมีผลกระทบต่อกำลังของเหล็กเสริมหรือเป็นเหตุให้อายุการใช้งานของโครงสร้างลดต่ำลงจนกระทั่งถึงระดับวิกฤติ ดังนั้นเส้นประ ะ แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างที่มีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า เพราะวาระยะเวลาช่วงเริ่มต้นเป็นช่วงเวลาที่ยาวมากกว่าและอัตราการเกิดสนิมจะลดลงในสภาวะที่มีการแพร่จากรูปแบบจำลองอธิบายได้ว่าระยะหุ้มของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ของคอนกรีตมีค่าต่ำ จะช่วยยืดเวลาอายุการใช้งานยาวนานขึ้น

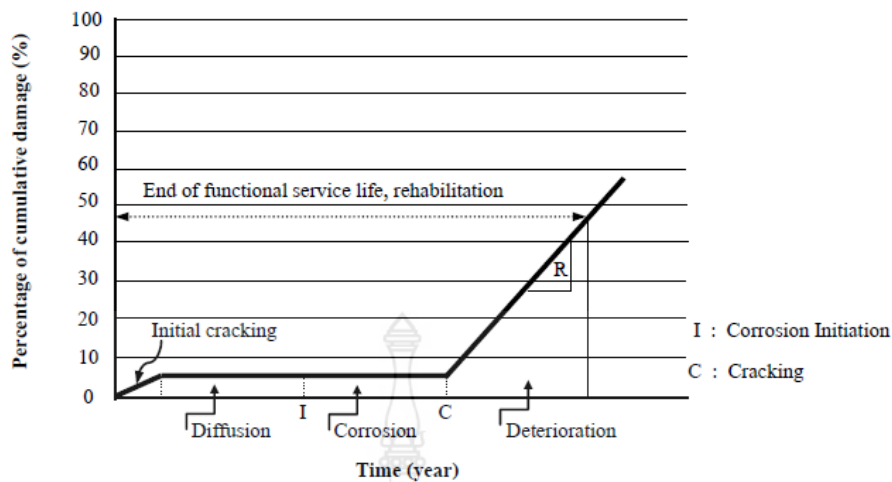
รูปแบบจำลองใช้สำหรับทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กตาม รูปที่ 8 การเกิดสนิมในระดับสูงสุดที่ยอมรับได้ต้องมีความสัมพันธ์กับรอยแตกกว้างที่ปรากฏให้เห็นซึ่งช่วงเวลาของการเสื่อมสภาพประกอบไปด้วย 2 ช่วงคือช่วงเวลาเริ่มต้นและช่วงเวลาการแพร่โดยที่ความยาวในช่วงเวลาเริ่มต้นเป็นช่วงเวลาโดยประมาณที่ต้องการให้เกิดแทรกซึมของสารละลายเข้าไปถึงผิวของเหล็กเสริมและกระตุ้นให้เกิดการกัดกร่อน ในขณะที่ช่วงเวลาการแพร่เป็นช่วงเวลาที่สนิมมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นจึงเป็นช่วงเวลาของการซ่อมแซมซึ่งกลายมาเป็นเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการซ่อมแซมและรูปแบบจำลองนี้สามารถนำไปใช้ประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของโครงสร้าง สะพานคอนกรีตในสภาวะสิ่งแวดล้อมที่ทำให้เกิดสนิมเป็นรูป

แบบจำลองการเสื่อมสภาพที่พัฒนาโดย การแทรกซึมของคลอไรด์มีอิทธิพลทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้พื้นผิวสะพานคอนกรีตเกิดการเสื่อมสภาพและแบบจำลองที่ใช้ทำนายการเสื่อมสภาพโดยพิจารณาเป็นเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ผิวทั้งหมดที่เกิดการแตกหลุดลอกแตกออกมาเป็นชั้นๆ และเกิดรอยแตกร้าวหลายๆ แนวนำมารวมกันเป็นความเสียหายทั้งหมดเพื่อใช้ในการทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างที่เหลืออยู่สำหรับใช้งานต่อไป



รูปที่ 2-6 รูปแบบจำลองระยะเวลาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ที่มา: Tuutti, K.(1982)

แบบจำลองกระบวนการเสื่อมสภาพโดยคลอไรด์สำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีระยะหุ้มคอนกรีตหนา 2 นิ้ว (50 มม.) รูปแบบการจำลองการแบ่งแยกที่ชัดเจนของระยะเวลาการเกิดสนิมมี 3 ระยะ ได้แก่ ช่วงระยะเวลาที่เกิดการแพร่ (Diffusion Phase) ช่วงระยะเวลาการเกิดสนิม (Corrosion Phase) และช่วงระยะเวลาของการเสื่อมสภาพ (Deterioration Phase) สำหรับช่วงระยะเวลาการแพร่ผ่านถูกกำหนดให้เป็นช่วงเวลาที่คลอไรด์ไอออนแทรกซึมผ่านความหนาของคอนกรีตจนคลอไรด์อยู่ในระดับเพียงพอที่ทำให้เริ่มเกิดสนิมบนผิวของเหล็กเสริม ซึ่งปกติช่วงเวลาของการแพร่ผ่านสามารถที่จะหาได้จากสูตร Fick's second Law (Crank, J.1956) สำหรับช่วงระยะเวลาที่ 2 เป็นช่วงระยะเวลาเริ่มแรกของการเกิดสนิมจนกระทั่งเริ่มเกิดรอยแตกร้าวและช่วงระยะเวลาที่ 3 เป็นช่วงระยะเวลาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างในระดับที่เกิดความเสียหายซึ่งในช่วงระยะเวลานี้ต้องทำการซ่อมแซมโครงสร้างให้กลับคืนสู่สภาพปกติ ข้อสังเกตให้พิจารณารอยแตกร้าวของระยะหุ้มคอนกรีตที่มีค่าตั้งแต่ 2.5% ของความลึกของระยะหุ้มคอนกรีตทั้งหมด



รูปที่ 2-7 แบบจำลองกระบวนการเสื่อมสภาพโดยคลอไรด์

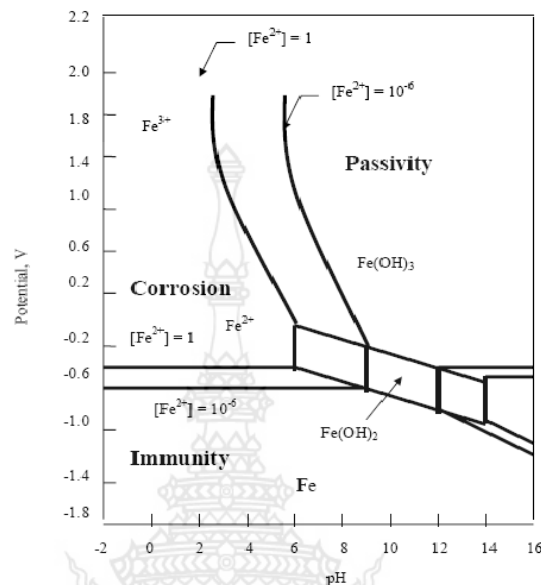
สำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีระยะหุ้มคอนกรีตหนา 2 นิ้ว (50 มม.) ที่มา : Cady, P.D., and Weyers R.E. (1983)

แบบจำลองทางฟิสิกส์-คณิตศาสตร์ ในการหาค่าของช่วงระยะเวลาที่ทำให้คอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการแตกร้าว โดยคลอไรด์แทรกซึมผ่านระยะหุ้มของคอนกรีตไปจนถึงผิวของเหล็กทำให้เกิดสนิมบนพื้นฐานของสถานะการเกิดสนิม แบบจำลองนี้เป็นช่วงระยะเวลาที่ทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าว เป็นฟังก์ชันของอัตราการเกิดสนิม ระยะหุ้มคอนกรีต ระยะห่างของเหล็กเสริมและคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตเช่น โมดูลัสยืดหยุ่น อัตราส่วนการขยายตัว (Poisson's ratio) และสัมประสิทธิ์การหดตัว สำหรับการวิเคราะห์ควมไวของตัวแปรโดยใช้ทฤษฎีของ Bazant's เป็นสมการที่แสดงถึงตัวแปรของกำลังของคอนกรีต ระยะหุ้มคอนกรีต ขนาดของเหล็กเสริมระยะห่างเหล็กเสริมและอัตราการเกิดสนิมซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญในการหาช่วงระยะเวลาที่ทำให้เกิดการรอยแตกร้าว (Time to cracking) ของระยะหุ้มคอนกรีต

2.5 กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

บนพื้นฐานของข้อมูลของปฏิกิริยาระหว่างโลหะกับน้ำ (Pourbaix, M., 1976) ได้พัฒนาความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าเปรียบเทียบกับแผนภาพของสถานะบริเวณความเป็นกรดและด่าง (pH) ซึ่งชี้ให้เห็นถึงช่วงที่มีความเสถียรภาพของเทอร์โมไดนามิกส์เป็นฟังก์ชันของศักย์ไฟฟ้าและค่า pH และแผนภาพพอร์แบร์กของเหล็ก ซึ่งถูกแบ่งแยกออกเป็น 3 สถานะคือบริเวณส่วนที่เกิดสนิม บริเวณส่วนที่เกิดปฏิกิริยากับสารละลายน้อยและบริเวณส่วนที่ไม่เกิดสนิม สนิมที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่มีสภาพเป็นกรดจากแผนภาพจะเห็นเป็นช่องที่แคบสภาพความเป็นด่างจะผันแปรและทำให้บริเวณดังกล่าวเกิดสนิมมากในขณะที่บริเวณอีก 2 ส่วนนั้นจะมีชั้นฟิล์มกอดตัวอยู่ซึ่งจะมีความเป็นด่างมากอยู่ในบริเวณ 2 ส่วนเหล่านี้จะอยู่ในสภาวะปกติไม่มีปฏิกิริยาเกิดขึ้นและในส่วนที่ 3 จะเป็นส่วนที่ปราศจากสนิม (Immunity) เนื่องจากในส่วนนี้มีสภาพความเป็น

ต่างที่มีเสถียรภาพสูงมากจึงเป็นสาเหตุทำให้เหล็กไม่เกิดสนิม ดังนั้นแผนภาพพอร์แบร์กจึงเป็นวิธีการเตรียมข้อมูลพื้นฐานภายใต้ความเข้าใจปฏิกิริยาการเกิดสนิมและจัดทำเป็นข้อกำหนด หลัก 2 ข้อสำหรับใช้กับแผนภาพนี้



รูปที่ 2-8 แผนภาพกลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริม ที่มา: (Pourbaix, M., 1976)

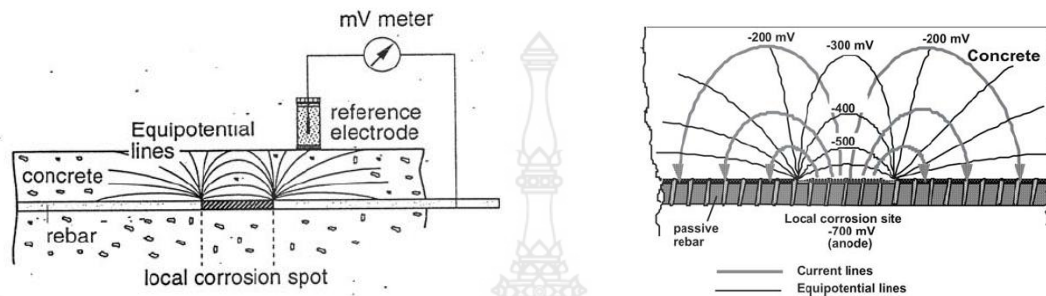
2.6 การทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเป็น การเสื่อมสภาพของเหล็กเสริมด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Reaction) เกิดขึ้นเมื่อ Passivation Film ที่เกิดขึ้นในขณะเกิดปฏิกิริยา Hydration และเคลือบหุ้มเหล็กเสริมอยู่ถูกทำลายซึ่งอาจเกิดจากขบวนการ Carbonation หรือจากคลอไรด์ไอออน (Cl⁻) เมื่อเหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดการผุกร่อนแสดงว่าเกิดความต่างศักย์ระหว่างพื้นที่ 2 ส่วนบนแท่งเหล็กเดียวกันหรือข้างเคียง ทำให้เกิดเป็น Anodic Half-Cell และ Cathodic Half-Cell (ขั้วบวก และ ขั้วลบ) เทคนิคการทดสอบการผุกร่อนของเหล็กเสริม อาจทำได้หลายวิธีทั้งการตรวจวัดค่าความต่างศักย์โดยตรง หรือการ ตรวจสอบสภาพแวดล้อมที่อาจทำให้ Passivity Film ถูกทำลาย อาทิเช่น การตรวจสอบด้วยวิธีครึ่งเซลล์, การหาปริมาณของคลอไรด์ในคอนกรีตและการตรวจสอบด้วยวิธีโพลาไลเซชันดังมีรายละเอียดดังนี้

2.6.1 การตรวจสอบด้วยวิธีครึ่งเซลล์ (Half-Cell Potential Measurement)

ในคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีทั้งพื้นที่ที่ถูกและไม่ถูกกัดกร่อนอยู่ด้วยกัน ประกอบกับการเกิดสนิมยังไม่รุนแรง การดูด้วยตาเปล่าทำได้ยากจึงต้องใช้เครื่องมืออย่างง่ายที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการตรวจสอบเรียกว่า การ

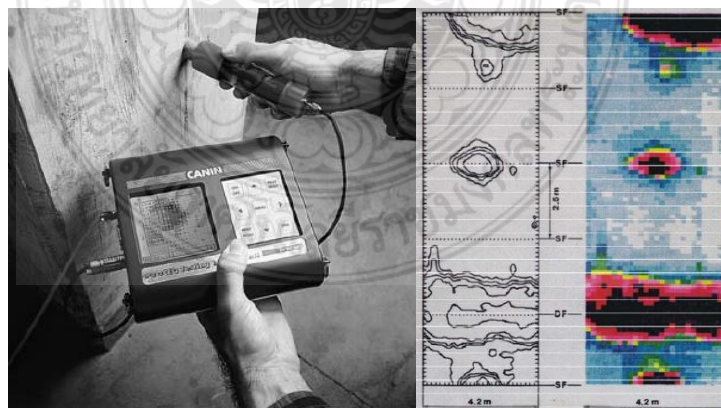
ตรวจสอบโดยวิธีครึ่งเซลล์ (The Half-Cell Potential Measurement) โดยจะใช้ด้านที่ต่อกับเหล็กเสริมเป็นขั้วบวก (Anode) และใช้ด้านที่ไม่เกิดการกัดกร่อนเป็นขั้วลบ (Cathode) โดยต่อกับผิวคอนกรีตและปล่อยกระแสไฟฟ้าความต่างศักย์ประมาณ 0.5V หรือ มากกว่าเข้าไป จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกไซด์ และคาโทดซึ่งช่วยให้วัดและประมาณค่าการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ (B. Elsener, 2001) ดังแสดงในภาพที่ 2-9



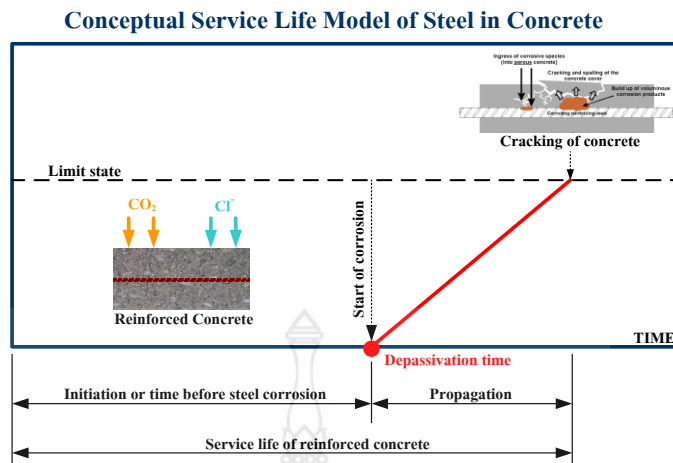
รูปที่ 2-9 แผนภูมิการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

ที่มา: B. Elsener, 2001

จากภาพที่ 2-10 แสดงแบบจำลองช่วงชีวิตการใช้งานของเหล็กเสริมในคอนกรีต อธิบายได้ว่าเมื่อคลอไรด์ไอออนซึมเข้าไปในผิวของคอนกรีตมากขึ้นเรื่อยๆจนเข้าไปถึงเหล็กเสริมภายในจะไปทำลายฟิล์มที่เคลือบผิวของเหล็กเสริมและเมื่อปริมาณของคลอไรด์ที่ซึมผ่านเข้าไปมีปริมาณมากถึงจุดวิกฤต (Depassivation Time) ก็จะมีเริ่มเกิดสนิมขึ้นที่ผิวของเหล็กเสริมจนต้นให้ผิวคอนกรีตระเบิดออก (Crushing) ส่งผลให้โครงสร้างสร้างเกิดความเสียหายจนอาจเกิดการวิบัติไปในที่สุด



รูปที่ 2-10 การตรวจสอบโดยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (The Half-Cell Potential Measurement) และการพล็อตเส้นชั้นความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-Cell Potential Contour)



รูปที่ 2-11 แบบจำลองช่วงชีวิตการใช้งานของเหล็กเสริมในคอนกรีต

ที่มา <http://www.bucc4.buu.ac.th~twc,.2547>

วิธีการทดสอบด้วยวิธีการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์โดยทำเป็นเส้นตารางทุกช่วง 1.0 x 1.0 เมตร แล้วนำความต่างศักย์มาพล็อตแสดง เส้นชั้น ค่าความต่างศักย์ (Potential Gradient) หรือที่เรียก Corrosion Mapping ซึ่งจะหมายถึงขอบเขตพื้นที่ที่เหล็กเสริมเกิดการผุกร่อนเป็นสนิม โดยมาตรฐาน ASTM C876 กำหนดอัตราความเสี่ยงที่จะเกิดสนิมไว้ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1. อัตราความเสี่ยงที่จะเกิดสนิมตามแนวทาง ASTM C876

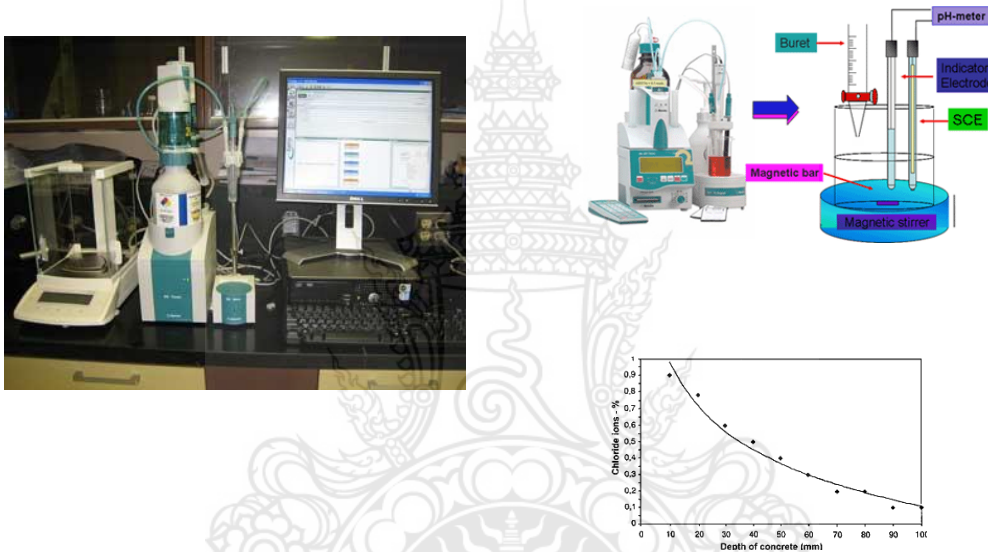
ค่าความต่างศักย์ (Volt)	สภาพการผุกร่อนของเหล็กเสริม
น้อยกว่า - 0.20	ความเป็นไปได้ร้อยละ 90 ที่จะไม่เกิดสนิม
-0.20 ถึง -0.35	ไม่แน่นอน
มากกว่า -0.35	ความเป็นไปได้ร้อยละ 90 ที่เกิดสนิมแล้ว

ที่มา : ASTM C876-91(Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete)

อย่างไรก็ตามการทดสอบด้วยวิธีนี้ไม่สามารถบอกอัตราการผุกร่อนหรือพื้นที่หน้าตัดที่เหล็อยู่ของเหล็กเสริม เป็นเทคนิคการทดสอบที่บอกแนวโน้มการผุกร่อนของเหล็กเสริมเท่านั้น

2.6.2 การหาปริมาณของคลอไรด์ (Chloride Content)

ปริมาณของคลอไรด์ เป็นส่วนที่สำคัญที่ทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมส่งผลให้เหล็กเสริมเป็นสนิม ถ้ามีปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตมากพอจนทำให้ Passivation Film ที่ทำหน้าที่ป้องกันการเป็นสนิมของเหล็กเสริมเสียหาย หรือถ้าเกิดการแทรกซึมของคลอไรด์จากน้ำทะเลจนถึงตำแหน่งของเหล็กเสริม จะส่งผลให้เหล็กเสริมเกิดสนิมอย่างรวดเร็ว การหาปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ทำได้โดยการใช้ส่วงานเจาะคอนกรีตที่ระดับความลึกต่างๆและนำผงคอนกรีตที่ได้มาทดสอบหาปริมาณของคลอไรด์อออน และเขียนกราฟความสัมพันธ์ของปริมาณคลอไรด์อออนกับระดับความลึกต่างๆ ซึ่งจะทำให้สามารถประมาณระยะเวลาที่เหลืออยู่ก่อนที่เหล็กเสริมจะเกิดสนิมได้ ดังแสดงในภาพที่ 2-12



รูปที่ 2-12 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อออนในห้องปฏิบัติการและกราฟความสัมพันธ์ของปริมาณคลอไรด์เปรียบเทียบกับระดับความลึกต่างๆ
ที่มา: <http://www.caer.uky.edu/renewablefuels/lab.shtml>

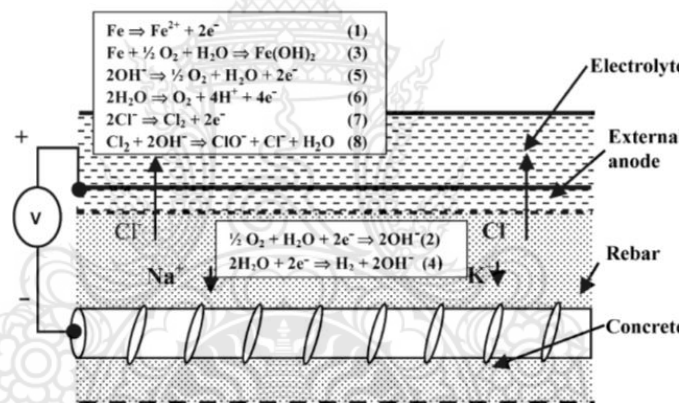
2.7 วิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electro Chemical)

ในการบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นวิธีการป้องกันการกัดกร่อนที่มีการใช้กันอย่างกว้างขวางเนื่องจากเป็นวิธีการที่สามารถประยุกต์ใช้กับโลหะและโลหะผสมทุกชนิด ในทุกสภาพ (ศิริลักษณ์, 2545) การใช้งานโดยมีข้อแม้ว่าต้องสัมผัสอยู่กับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) และเมื่อใช้แล้วยังสามารถลดอัตราการกัดกร่อนได้จนมีค่าใกล้เคียงศูนย์หรือไม่เกิดการกัดกร่อนเลยได้ นอกจากนี้การทำงานของวิธีนี้ยังสามารถทำได้ตลอดความต้องการ การควบคุมและการติดตามการทำงานอย่างสะดวกและง่ายโดยการให้โลหะเป้าหมายที่ต้องการการปกป้องชั่วหนึ่งชั่วโมงในเซลล์เคมีไฟฟ้าซึ่งมีวิธีการทำอยู่ 2 แบบคือ

- แบบให้โลหะเป้าหมายเป็นขั้วลบ เรียกว่าการป้องกันแบบคาโทดิก (Cathodic Protection)
- แบบให้โลหะเป้าหมายเป็นขั้วบวก เรียกว่าการป้องกันแบบอโนดิก (Anodic Protection)

ซึ่งการประยุกต์ใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีในการป้องกันหรือซ่อมแซมการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตนั้นมีหลายวิธี เช่น Electrode position, Cathodic Protection หรือ Electrochemical Chloride Removal เป็นต้นซึ่งมีข้อมูลเกี่ยวกับการซ่อมแซมวิธีการดึงคลอไรด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในต่างประเทศต่างๆ คือ

การลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Chloride Removal) คือการเอาเฉพาะคลอไรด์ออกนอกจากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งมีขั้วไฟฟ้าอยู่ในสารละลายซึ่งอยู่ภายนอกคอนกรีตและมีการเชื่อมต่อไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างขั้วไฟฟ้าและเหล็กเสริมภายในคอนกรีตมีการให้ไฟฟ้าตรงกับขั้วไฟฟ้าและเหล็กเสริมคอนกรีตโดยให้ขั้วไฟฟ้าภายนอกเป็นขั้วบวก (Anode) และเหล็กเสริมเป็นขั้วลบ (Cathode) จากการต่อระบบดังนี้ เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่สูงพอคลอไรด์ไอออนที่มีสภาพเป็นขั้วลบจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วบวกซึ่งอยู่ภายนอกมีผลทำให้ความปนเปื้อนของคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตมีค่าลดลง ดังแสดงในภาพที่ 2-13

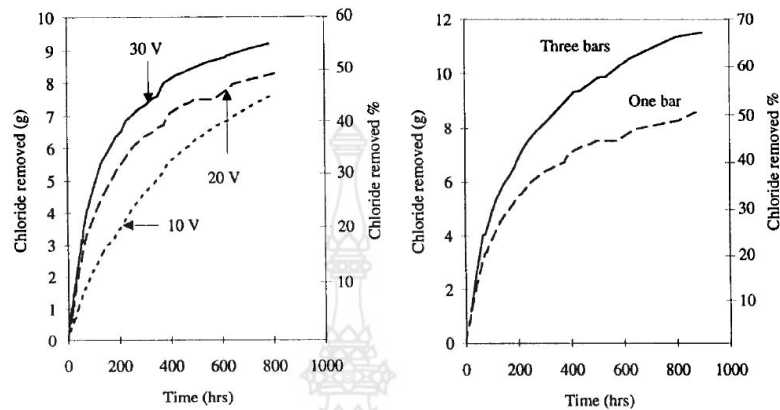


รูปที่ 2-13 แสดงขบวนการของวิธี Electrochemical Chloride Removal (ECR)

ที่มา: J.M. Miranda et. al, 2005

ความสามารถในการซ่อมแซมด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมียังขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างนั้นๆ ด้วยการกำหนดลักษณะทางกายภาพเพื่อหาความสามารถในการดึงคลอไรด์ออกนอกจากคอนกรีตตามลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างการทดลองโดยกำหนดให้มีจำนวนเหล็กเสริมที่ต่างกัน หรือระยะหุ้มคอนกรีตไม่เท่ากันและในแต่ละตัวอย่างการทดลองก็จะมีกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบในขนาดต่างๆ รวมทั้งขนาดของคลอไรด์ในส่วนผสมของคอนกรีตที่ไม่เท่ากันกันเพื่อหาเส้นอิทธิพลเพื่อที่จะนำมาเป็นข้อมูลเพื่อเป็นการตรวจสอบหรืออ้างอิง จากการศึกษาพบว่าเมื่อมีสื่อที่จะนำกระแสไฟฟ้า ขั้วลบ มากขึ้นเท่าใดความสามารถในการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนจากคอนกรีตออกสู่สารละลายจะมากขึ้นโดยแปรผันตรงกับกระแสไฟฟ้าและจำนวนของสื่อในการนำกระแสไฟฟ้าไม่ว่าจะเป็นกรณีที่มีเหล็กเสริมในคอนกรีตมากกว่า

1 หรือ 2 เส้นในการทดลองอื่นๆ หรือเมื่อเทียบกับการปล่อย ยกกระแสไฟฟ้าที่ 10 V, 20 V, และ 30 V. ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 2-14 จะเห็นได้ว่าคลอไรด์ที่ออกจากรีดออกสู่สารละลายได้มากขึ้นตามปริมาณของกระแสไฟฟ้าและสัปดาห์ที่จะเป็นซ้ำ



รูปที่ 2-14 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่จ่ายในระบบกับปริมาณคลอไรด์ ที่ออกจากตัวอย่างทดลอง และความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสัปดาห์ที่เป็นซ้ำกับปริมาณคลอไรด์ที่ออกจากตัวอย่าง

ที่มา: Arya. C. and Sa'id-shawqi, 1996

จากรูปที่ 2-14 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ความต่างศักย์สูงหรือมีพื้นที่ในการนำไฟฟ้ามากขึ้นเท่าใดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความสามารถในการดึงคลอไรด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี รายงานผลการศึกษาในห้องทดลองที่ใช้ขึ้นตัวอย่างที่แช่ในทะเลนานถึง 16 ปี (บริเวณ North Sea 1796-1992) เพื่อให้คลอไรด์ในน้ำทะเลธรรมชาติแทรกซึมเข้าไปในแท่งตัวอย่างการทดลองขนาด 50 ซม. x 100 ซม. x 100 ซม. แล้วนำมาเข้ากระบวนการดึงคลอไรด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และน้ำประปาเป็นอิเล็กโทรไลต์เป็นเวลา 39 วันด้วยการจ่ายกระแสไฟฟ้า 1 และ 4 A/m.² ในเบื้องต้นสามารถดึงคลอไรด์ออกออกจากเนื้อคอนกรีตได้ถึงร้อยละ 40-70 สำหรับตัวอย่างที่มีน้ำประปาเป็นอิเล็กโทรไลต์ และร้อยละ 70-90 สำหรับสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิมมิตัวเป็นอิเล็กโทรไลต์และร้อยละ 70-90 สำหรับสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิมมิตัวเป็นอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งรายงานผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับ Arya. C. และ Sa'id-shawqi (1996) เนื่องจากปริมาณกระแสไฟฟ้าที่มากกว่าคือ ขนาด 4 A/m.² สามารถดึงปริมาณคลอไรด์จากคอนกรีตมาสะสมอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์มากกว่าขนาด 1 A/m.²

2.8 การวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

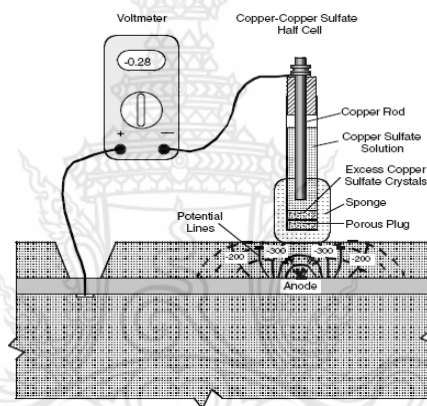
การวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากปฏิกิริยาไฟฟ้าในลักษณะศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (half-cell Potentials) ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ไม่สามารถที่จะวัดค่าได้ด้วยขั้วไฟฟ้าเดี่ยว ดังนั้นหากนำเอาครึ่งเซลล์ต่างชนิดมาต่อกันให้เป็นวงจรผลของศักย์ไฟฟ้าที่ได้มีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของครึ่งเซลล์ที่นำมาต่อกันซึ่งเป็นศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กัลวานิกมีหน่วยในการวัดค่าเป็นโวลต์ ทั้งนี้หากนำศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ไฮโดรเจนมาตรฐานไปเปรียบเทียบกับครึ่งเซลล์ชนิดใดชนิดหนึ่งโดยนำไปต่อเป็นเซลล์ไฟฟ้าคู่กับครึ่งเซลล์ไฮโดรเจนมาตรฐานค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่วัดได้จะเป็นศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานครึ่งเซลล์นั้น ศักย์ไฟฟ้าเหล่านี้มีผลต่อการกัดกร่อนที่ขั้วไฟฟ้า anode เมื่อมีกระแสไฟฟ้าจากภายนอกครบวงจร โดยปกติศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์จะแสดงในรูปของปฏิกิริยา Oxidation ซึ่งเกิดจากอะตอมของโลหะเกิดการแตกตัวปล่อยอิเล็กตรอนและ ไอออนบวกออกมาพร้อมกันโดยที่ผลกระทบบของค่าของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไอออนบวกในสารละลายที่มีขั้วไฟฟ้าแช่อยู่และอุณหภูมิของสารละลาย ดังนั้นค่าของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐานเป็นการวัดความเข้มข้นของสารละลายที่อุณหภูมิมาตรฐาน และสำหรับค่าที่วัดได้จะมีค่าที่เป็นลบมากกว่าซึ่งจะชี้ให้เห็นถึงแนวโน้มของโลหะเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนและส่งผลต่อการกัดกร่อนของโลหะ

สมมติให้วงจรไฟฟ้าภายนอกจาก แทนด้วยโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานไฟฟ้าที่มีความละเอียดสูงซึ่งไม่มีกระแสไฟฟ้าจากภายนอกผ่านเข้ามาในวงจรเป็นเงื่อนไขของสภาวะที่เรียกว่า (Open-circuit Potential) ค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จากโวลต์มิเตอร์เป็นค่าของศักย์ไฟฟ้าของแต่ละขั้วไฟฟ้าที่มีความแตกต่างกันระหว่างปฏิกิริยา anodic และปฏิกิริยา Cathodic

จากตัวอย่างลักษณะนี้ตาม ถ้าสมมติให้ขั้วไฟฟ้าอันหนึ่งเป็นเหล็กแช่ ในสารละลายที่มีไอออนของเหล็กและอีกขั้วไฟฟ้าเป็นสังกะสีแช่ในสารละลายซึ่งมีซิงค์ไอออนละลายอยู่จะให้ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐานสำหรับปฏิกิริยา Oxidation ของเหล็กอ่านได้ -0.44 โวลต์ และค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ มาตรฐานสำหรับปฏิกิริยา Oxidation ของสังกะสีอ่านได้ -0.76 โวลต์ (Fontana, M.G., 1986) ศักย์ไฟฟ้าของสังกะสีจะมีค่าเป็นลบมากกว่าเหล็ก เพราะว่าแนวโน้มการสูญเสียอิเล็กตรอนของสังกะสีมีมากกว่าเหล็กและถ้าปลายด้านบวกของโวลต์มิเตอร์มีการเชื่อมต่อเข้ากับขั้วไฟฟ้าสังกะสี ค่าของศักย์ไฟฟ้าอ่านได้ -0.32 โวลต์ และถ้าปลายด้านบวกของโวลต์มิเตอร์เชื่อมต่อเข้ากับขั้ว cathode ค่าศักย์ไฟฟ้าอ่านได้ $+0.32$ โวลต์ ดังนั้นขั้วไฟฟ้าสังกะสีจะเป็นขั้ว anode และขั้วไฟฟ้าของเหล็กจะเป็นขั้ว cathode แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนของอิเล็กตรอนที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเคลื่อนที่จากขั้วไฟฟ้าสังกะสี (anode) ผ่านวงจรไฟฟ้าภายนอกไปยังขั้วไฟฟ้าของเหล็ก (cathode) ซึ่งสวนทางกับการไหลของกระแสไฟฟ้าซึ่งไหลจากขั้วบวกไปยังขั้วลบ ดังนั้นสังกะสีจึงเป็นขั้วลบและเหล็กเป็นขั้วบวกหรือกล่าวได้ว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากขั้วที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าไปยังขั้วศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าสรุปได้ว่าครึ่งเซลล์ที่รับอิเล็กตรอน (cathode) มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าครึ่งเซลล์ที่ให้อิเล็กตรอน (anode)



หลักการพื้นฐานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ดังที่ได้กล่าวมาแล้วสามารถที่จะตรวจสอบเพื่อพิสูจน์ได้ โดยนำเอาวิธีการนี้มาใช้ในการตรวจประเมินสภาพการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีเมื่อเหล็กเสริมถูกกัดกร่อนก็จะเกิดการไหลของกระแส ไฟฟ้าอยู่ทั่วในคอนกรีต(การแพร่กระจายของไอออน) ระหว่างบริเวณขั้วแอโนดและขั้วแคโทดโดยมีศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสนิมเกิดขึ้นโดยรอบๆเหล็กเสริม แสดงให้เห็นถึงแนวเส้นของศักย์ไฟฟ้าที่ตัดผ่านกันจากผิวคอนกรีตถึงเหล็กเสริมและทุกๆจุดที่มีศักย์ไฟฟ้าสามารถวัดค่าได้ ด้วยวิธีการของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นที่เส้นชั้นความสูงทำได้โดยใช้ค่าของศักย์ไฟฟ้าบนผิวคอนกรีตที่ วัดค่าได้นำมากำหนดจุดลงบนแผนที่ซึ่งจะแสดงให้เห็นค่าของศักย์ไฟฟ้าที่จุดต่างๆบนโครงสร้าง ความเป็นไปได้ของการเกิดสนิมให้พิจารณาจากค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดค่าได้บนผิวคอนกรีตโครงสร้างถ้าหากมีค่าเป็นลบมากกว่าแสดงว่าบริเวณนั้นจะมีโอกาสที่จะเกิดสนิมมากที่สุด (Elsener, B.et al,1990 and Browne, R.D, et. al,1983)



รูปที่ 2-15 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับใช้ทดสอบด้วยวิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ ตามมาตรฐาน ASTM C 876 โดยการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีต ที่มา: (ASTM C 876, 2002)

วิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C-876 ดัง เครื่องมือและอุปกรณ์ ประกอบด้วย Copper-Copper Sulfate มีการเชื่อมต่อสายไฟกับโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานต่อไฟฟ้าสลับประสิทธิภาพสูงและในส่วนของ half-cell มีแท่งทองแดงแช่อยู่ในสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่อยู่ในสภาพอิมมัวส์ใช้เป็นเซลล์อ้างอิงสำหรับการวัดศักย์ไฟฟ้าของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในคอนกรีต การวัดค่าของศักย์ไฟฟ้าขึ้นอยู่กับชนิดของครึ่งเซลล์ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของศักย์ไฟฟ้าที่อ่านค่าได้และสำหรับกรเชื่อมต่อของระบบ Half-Cell ทำได้โดยการเชื่อมต่อด้านที่เป็นบวกของ โวลต์มิเตอร์ให้ติดกับเหล็กเสริมและอีกด้านของ โวลต์มิเตอร์ที่เป็นลบให้เชื่อมติดต่อกับ Copper-Copper Sulfate โวลต์มิเตอร์ที่ใช้มีความละเอียดและประสิทธิภาพสูงเพียงพอสำหรับใช้อ่านค่าของศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าต่ำมากๆ แสดงได้ดังรูปการวัดศักย์ไฟฟ้าของเหล็กเสริมในคอนกรีตทำได้โดยใช้ Copper-copper sulfate half-cell เชื่อมต่อที่ผิวคอนกรีตเพื่อให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าครบวงจรโดยใช้ Porous Plug และฟองน้ำที่เปียกชื้นด้วยสารละลาย detergent เป็นสื่อตัวนำไฟฟ้า

ถ้าหากเหล็กเสริมเกิดสนิมแสดง ว่าอิเล็กตรอนในเหล็กจะเคลื่อนที่จากเหล็กเสริมไปยัง half-cell เพราะว่าด้านปลายของโวลต์มิเตอร์มีการเชื่อมต่อกับในวงจรไฟฟ้า ค่าที่อ่านได้จากโวลต์มิเตอร์แสดงให้เห็นว่า แรงดันหรือศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าเป็นลบ (ASTM G3) ในการวัดค่า half-cell potential เป็นการวัดศักย์ไฟฟ้าแบบ open circuit potential เพราะเป็นการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขที่ไม่มีกระแสไฟฟ้าในวงจร (ASTM G15) ค่าของแรงดันไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้ที่ผิวของคอนกรีตจะมีค่าเป็นลบมากขึ้นสามารถ อธิบายได้ว่าเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตยังมีอิเล็กตรอนส่วนเกินอีกมากจึงมีความเป็นไปได้สูงที่เหล็กเสริมจะยังเป็นสนิมต่อไปได้อีก ในการอ่านค่าศักย์ไฟฟ้าแสดงให้เห็นถึงความน่าจะเป็นของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่อยู่ในตำแหน่งภายใต้ Copper-copper sulfate reference cell (Van Daveer, J.R.,1975) อย่างไรก็ตามค่าที่ถูกต้องๆเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C876 และวิธีการวัดค่าศักย์ไฟฟ้านี้ไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับ คอนกรีตและเหล็กเสริมที่มี epoxy เคลือบอยู่ที่พื้นผิว

วิธีเตรียมการทดสอบทำได้โดยกำหนดตำแหน่งของจุดให้มีลักษณะเป็นตารางโดยมีระยะห่างให้เหมาะสมตามลักษณะของโครงสร้างและปัจจัยที่ทำให้เกิดความผิดพลาด เช่นจุดที่กำหนดถ้ามีระยะห่างมากเกินไปหรือการเตรียมข้อมูลไม่เหมาะสมเพียงพอสำหรับการประเมินค่าในขณะที่การกำหนดระยะห่างของเหล็กเสริมเต็มพื้นที่ก็จะทำให้มีค่าใช้จ่ายในการสำรวจเพิ่มขึ้นเช่นในการสำรวจพื้นผิวคอนกรีตของสะพานโดยทำตามมาตรฐาน ASTM C 876 แนะนำให้ใช้ระยะห่าง 1.20 ม. ถ้าความแตกต่างของแรงดันระหว่างจุดที่อยู่ใกล้กันมีค่าเกินกว่า 150 มิลลิโวลต์ ให้ถือว่าระยะห่างนั้นใช้ได้ อย่างไรก็ตามมีคำแนะนำอื่นๆ ที่กำหนดให้ระยะห่างควรจะมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของ .20 ม. สามารถให้ค่าความน่าเชื่อถือสำหรับการประเมินค่าการเกิดสนิมที่ยังดำเนินการอยู่และขยายออกไป (Clemena, G.G., Jackson, D.R, et al., 1992)

ค่าที่ยอมรับได้จากการทดสอบคือคอนกรีตต้องมีความชื้นอย่างเพียงพอที่จะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลครบวงจรเป็นเหตุผลที่สำคัญในการวัดค่าและถ้าการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ด้วยเวลาต้องทำตามมาตรฐาน ASTM C 876 ก่อนการทดสอบคอนกรีตต้องมีความเปียกชื้นเพียงพอและในขณะ การทดสอบค่าที่วัดได้ไม่ควรเปลี่ยนแปลงมากกว่า ± 20 มิลลิโวลต์ ภายใน 5 วินาที (ASTM C 876) ถ้าหากค่าที่วัดได้มีความเสถียรไม่เพียงพอ อาจเป็นเพราะว่ากระแสไฟฟ้าภายในวงจรเกิดการหันเหทิศทางหรือ ความต้านทานของกระแสไฟฟ้าภายในวงจรมีมากเกินไป สำหรับในกรณีที่ไม่ควรนำมาใช้กับวิธีการของ ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ทำการทดสอบอยู่ภายนอกช่วง 17 ถึง 28^o C วิธีการทำให้การทดสอบ ถูกต้องมีความน่าเชื่อถือให้ทำตามมาตรฐาน ASTM C 876 สำหรับใช้วัดค่าแรงดันไฟฟ้า

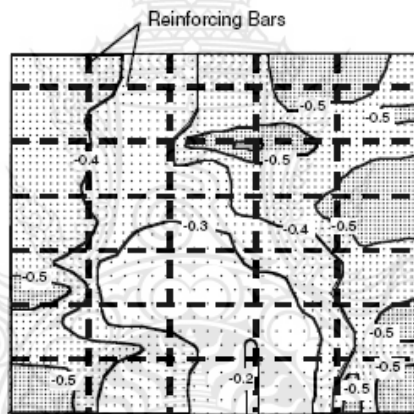
2.9 การวิเคราะห์ข้อมูลของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

การวิเคราะห์ข้อมูลตามมาตรฐาน ASTM C-876 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่อ่านได้สามารถ นำมาใช้ ร่วมกับข้อมูลอื่นๆเช่นปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตความลึกของคาร์โบเนชั่นในคอนกรีต สํารวจหาการแตก



และหลุดล่อนของชั้นคอนกรีตที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมเปิดเผยซึ่งการรวบรวมสรุปข้อมูลเกี่ยวกับการเกิดสนิมที่ได้จากการสำรวจอย่างเป็นระบบด้วยวิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์สามารถแสดงให้เห็นได้ 2 แนวทางคือ 1. มีลักษณะเป็นแผนที่เส้นชั้นความสูงของศักย์ไฟฟ้าเท่ากันตลอดทั้งเส้น 2. เป็นไดอะแกรมของความถี่สะสมของศักย์ไฟฟ้า ในขณะเดียวกันการรายงานค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการสำรวจต้องระบุให้ชัดเจนในการใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode)

ผลลัพธ์ที่ได้จากการสำรวจนำเอามาสรุปจัดทำเป็นแผนที่เส้นชั้นความสูงของศักย์ไฟฟ้าซึ่งสามารถทำได้โดยนำเอาค่าที่ได้จากการทดสอบในแต่ละจุดมาสร้างลงบนแปลนตามมาตรฐานของพื้นที่ทั้งหมดที่ได้ทำการทดสอบ สำหรับค่าแรงดันที่อ่านได้จาก half-cell ในแต่ละจุดของการทดสอบให้ทำเครื่องหมายไว้บนแปลนและเขียนเส้นชั้นความสูงซึ่งมีค่าความต่างศักย์เท่ากันโดย ใช้ค่าของแรงดันที่วัดได้ เป็นตัวอย่างของแผนที่เส้นชั้นความสูงที่มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากันตลอดความยาวทั้งเส้นตามมาตรฐาน ASTM C-876 แรงดันไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าในแต่ละจุดที่วัดค่าได้ในแต่ละช่วงของเส้นชั้นความสูงไม่ควรมีความต่างเกิน 100 มิลลิโวลต์



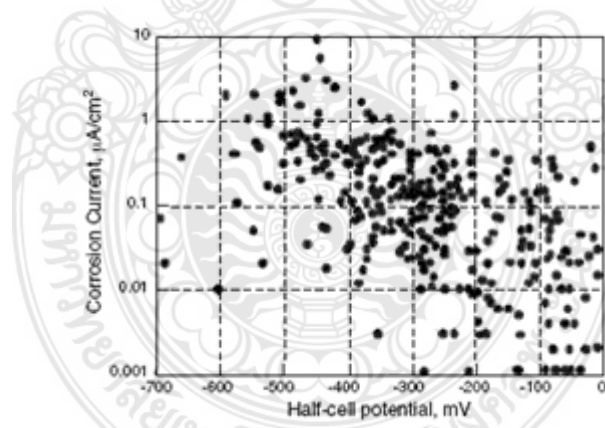
รูปที่ 2-16 ตัวอย่างแผนที่เส้นชั้นความสูงของศักย์ไฟฟ้าที่สำรวจได้จาก half-cell potential
ที่มา : (ASTM C 876, 2002)

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

มาตรฐานASTM C-876 ให้เป็นแนวทางในการทดสอบดังนี้ ใช้สำหรับกรณีขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Copper-copper sulfate reference electrode ดังนี้

- ถ้าศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็นบวกมากกว่า -200 มิลลิโวลต์ มีความเป็นไปได้สูงที่เหล็กจะไม่เกิดสนิม
 - ถ้าศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็นลบมากกว่า 350 มิลลิโวลต์ มีความเป็นไปได้สูงที่เหล็กจะเกิดสนิม
 - ความไม่แน่นอนในการเกิดสนิมเมื่อค่าแรงดันอยู่ในช่วง 200 ถึง -350 มิลลิโวลต์
- อย่างไรก็ตามขอแนะนำให้ไปประยุกต์ใช้งานบนหลักการเชิงตัวเลขไม่ควรใช้ในสภาวะเงื่อนไขดังต่อไปนี้
- การเกิด Carbonation ได้ขยายกว้างออกไปจนถึงระดับของเหล็กเสริมในคอนกรีต
 - การประเมินสภาพคอนกรีตที่อยู่ภายในที่จับเก็บไม่ได้อยู่ในสภาพเปียกชื้น
 - เปรียบเทียบการกัดกร่อนของคอนกรีตที่อยู่ภายนอกกับความชื้นที่มีความแปรผันสูงหรือปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ในคอนกรีต

จากข้อความข้างบนเป็นข้อแนะนำการระวังป้องกันในขณะทดสอบเพราะว่าเป็นสิ่งที่สำคัญต่อความต้านทานของคอนกรีตและออกซิเจนที่มีอยู่ทำให้เกิดอัตราการเกิดสนิมและแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่ไม่ดีระหว่างวิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์กับวิธีการวัดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม โดยวิธีการวัดค่าความต้านทานโพลาไรซ์ (Feliu, S., Gonzalaz, J.A., and Andrade, C, 1996) สามารถอธิบายได้ว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมมีค่าน้อยกว่า $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ให้พิจารณาว่าเหล็กเสริมไม่เกิดสนิมแต่ถ้ามีค่ามากกว่า $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ให้พิจารณาว่าเหล็กเสริมจะมีโอกาสเกิดสนิมสูงมากดังแสดงตาม รูปด้านล่าง การนำไปประยุกต์ใช้งานต้องทำตามข้อแนะนำตามมาตรฐาน ASTM C-876



รูปที่ 2-17 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม(i_{corr})กับ ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ ที่มา : (Feliu,S.,Gonzalaz,J.A.,and Andrade,C.,1996)

วิธีการของศักย์ไฟฟ้าที่มีความแตกต่างกัน (potential difference technique) สำหรับบริเวณพื้นที่ ๆ เกิดสนิมพื้นที่บริเวณนั้นจะแสดงให้เห็นถึงความลาดเอียงของศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าแตกต่างกันซึ่งเป็นพื้นฐานของแผนภูมิเส้นชั้นความสูงของศักย์ไฟฟ้าสำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นเส้นชั้นความสูง (equipotential contour) ระยะห่างของเส้นชั้นความสูงของค่าแรงดันที่เป็นรูปปิดแสดงให้เห็นว่าบริเวณนี้มีความลาดเอียงสูง

ซึ่งบางครั้งในทางปฏิบัติค่าของแรงดันไฟฟ้าที่วัดค่าได้เปลี่ยนแปลงมากเกินไป ดังนั้นตัวบ่งชี้ที่แสดงให้เห็นการเกิดสนิมจะเป็นพื้นที่ผิว เช่นแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงมากกว่า 100 มิลลิโวลต์จะต้องมีพื้นที่มากกว่า 5 ตารางเมตร ดังนั้นวิธีการของ potential difference technique เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปในการบ่งชี้ให้เห็นถึงบริเวณที่เกิดสนิมซึ่งมีความน่าเชื่อถือมากกว่าการใช้เทคนิคเชิงตัว เลข (Elsener, B., Dawson, J.L., et al., 1990)

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

ปัจจัยหลากหลายที่มีผลกระทบต่อวิธีการทดสอบการเกิดสนิมโดยผู้เชี่ยวชาญทางด้านการศึกษาการเกิดสนิมได้ให้คำแนะนำที่เหมาะสมของวิธีการสำรวจด้วยศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ภายใต้เงื่อนไขดังต่อไปนี้ (ASTM C-876)

- คอนกรีตต้องอยู่ในรูปที่อิมมิดีด้วยน้ำ
- คอนกรีตเกิด Carbonated ที่ระดับความลึกของเหล็กเสริม
- เหล็กเสริมที่เคลือบด้วย (galvanized)

ในการสำรวจค่าศักย์ไฟฟ้าควรมีการทดสอบเพิ่มเติมด้วยการทดสอบ Carbonation และปริมาณคลอไรด์ไอออนในคอนกรีต ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบควรสรุปเป็นข้อมูลให้ชัดเจนของค่าศักย์ไฟฟ้าที่สำรวจวัดค่าได้ซึ่งแสดงให้เห็นถึงบริเวณที่เกิดสนิมขณะที่ทำการทดสอบเวลานั้นและเงื่อนไขสภาพสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง

2.10 ความต้านทานของคอนกรีต

วิธีการของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เป็นวิธีการที่แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ถึงบริเวณที่เหล็กจะเกิดสนิมในช่วงเวลานั้นที่ทำการวัดค่า จากที่ได้มีการอธิบายมาแล้วนั้น สรุปได้ว่าหลังจากที่เหล็กเกิดการสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิม (Depassivation) และอัตราการเกิดสนิมจะขึ้นอยู่กับออกซิเจนที่ยังทำปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทดและยังขึ้นอยู่กับความต้านทานทางไฟฟ้าของคอนกรีตด้วยทำให้ง่ายต่อการแพร่ของไอออนที่มีอยู่ทั่วไปในคอนกรีตระหว่างบริเวณขั้วแอโนดและขั้วแคโทด นอกจากนี้ความต้านทานทางไฟฟ้าของคอนกรีตยังขึ้นอยู่กับผิวของโพรงช่องว่างเล็ก ๆ ซึ่งเป็นโครงสร้างเล็ก ๆ ของเพสต์และปริมาณความชื้นของคอนกรีต ดังนั้นประโยชน์ที่ได้จากการทดสอบและสำรวจด้วยวิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เป็นการวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของคอนกรีต ค่าความต้านทานไฟฟ้ามีหน่วยเป็นลูกบาศก์ของวัสดุของความต้านทาน(โอห์ม)ต่อความ



ยาว (Millard, S.G., et. al., 1989) โดยที่ ตัวนำทางไฟฟ้าเป็นความต้านทาน R ของพื้นที่ คือ A และความยาวเป็น L ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทาน ρ ดังสมการ 2.8

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2.8)$$

มาตรฐานวิธีการทดสอบการวัดค่าความต้านทานของคอนกรีตยังไม่มีการจัดทำเป็นมาตรฐาน แต่มีเทคนิคที่ใช้แล้วประสบความสำเร็จจากพื้นฐานของหลักการนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันเป็นระบบของ 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) มีหลักการทำงานคือ ขั้วไฟฟ้าที่อยู่ภายนอกจะเชื่อมต่อกับแหล่งที่ให้กระแสไฟฟ้าและขั้วไฟฟ้าที่อยู่ภายใน 2 ขั้วจะเชื่อมต่อกับเครื่องมืออ่านค่าแรงดันไฟฟ้า (โวลต์มิเตอร์) ดังนั้นค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของคอนกรีตสามารถแสดงได้ดังสมการ (Millard, S.G., Wenner, F., A., et. al., 1990)

$$\rho = \frac{2\pi sV}{I} \quad (2.9)$$

จากสมการด้านบน ได้มาจาก Wenner ภายใต้สมมุติฐานของวัสดุเป็นแบบ (semi-infinite) และมีคุณสมบัติเหมือนกัน ดังนั้นความสัมพันธ์ที่ให้มาจะทำให้การวัดค่าความต้านทานได้ค่าที่ถูกต้องเมื่อสมมุติฐานมีข้อมูลเป็นที่เพียงพอและทุกๆค่าของการเบี่ยงเบนจากข้อสมมุติฐานของ Wenner's จะนำไปสู่ความแตกต่างระหว่างค่าความต้านทานที่ได้จากการคำนวณและค่าความต้านทานที่แท้จริงของวัสดุ (Millard, S.G., Ghassemi, M.H., and Bungey, J.H., 1990)

Millard, S.G., et al., 1990. นำเสนอผลที่ได้จากการทดลองศึกษาและวิเคราะห์ให้เป็นที่ยอมรับของอันดับขนาดที่มีความผิดพลาดระหว่างค่าความต้านทานที่ได้จากการคำนวณและค่าความต้านทานที่แท้จริงเมื่อนำสมการ ไปประยุกต์ใช้กับชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตขนาดเล็ก ซึ่งมีหนึ่งตัวแปรที่ต้องพิจารณาคือระยะห่างที่ น้อยที่สุดของขั้วไฟฟ้า เพราะว่าส่วนประกอบของเพสต์และมวลรวมจะให้ค่าความต้านทานที่แตกต่างกัน จึงต้องให้ความสำคัญกับระยะห่างของขั้วไฟฟ้าอย่างเพียงพอ ดังนั้นค่าความต้านทานของคอนกรีตควรจะเป็นค่าเฉลี่ย สำหรับระยะห่างน้อยที่สุดของขั้วไฟฟ้าขึ้นอยู่กับขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบใช้เป็นค่าต่ำที่สุดของระยะห่าง ในขณะที่ระยะห่างก็ยังเป็นตัวแปรที่กำหนดระดับความลึกซึ่งมีผลกระทบต่อผลการวัดค่าด้วยเหมือนกัน ในขณะที่ชิ้นส่วนที่มีลักษณะตันหรือบางก็ต่อมีความสอดคล้องกับระยะห่างของขั้วไฟฟ้าด้วย



บนพื้นฐานจากการศึกษา Millard, S.G., et al., 1990. ได้แนะนำระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่สามารถนำไปใช้ได้อย่างเหมาะสมมีค่าประมาณ 50 มิลลิเมตร ขนาดความกว้างและความลึกของชั้นส่วนโครงสร้างควรมีอย่างน้อย 4 เท่าของระยะห่างขั้วไฟฟ้า นอกจากนี้ระยะจากขอบชั้นส่วนไม่ควรน้อยกว่า 2 เท่าของระยะห่างของขั้วไฟฟ้า เมื่อขนาดต่างๆ เหล่านี้ไม่น้อยไม่เพียงพอ ค่าความต้านทานที่คำนวณได้ตามสมการก็จะให้ค่ามากเกินไปปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลกระทบต่อการคำนวณค่าความต้านทานแสดงให้เห็นได้ชัดเจน เช่น ชั้นพื้นผิวที่บางมีผลทำให้ความต้านทานของคอนกรีตและเหล็กเสริมมีค่าต่ำกว่าค่าที่แท้จริง ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ให้ผลลัพธ์โดยตรงกับค่าความต้านทาน สำหรับปัจจัยอื่นที่มีผลกระทบต่อเหล็กเสริม เช่น ความลึกของระยะหุ้มคอนกรีตรวมถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมที่สูญเสียไปจะทำให้ชั้นส่วนโครงสร้างรับกำลังลดลง

เทคนิคที่ใช้วัดค่าความต้านทานที่ได้จัดทำขึ้นเป็นวิธีการ Linear polarization (Broomfield, J., 1966) โดยใช้โพรบ (Probe) เป็นอุปกรณ์ที่มีสายเชื่อมต่อกับเครื่องมือโพลาร์ไลต์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่อยู่โดยรอบและวัดค่าความต้านทานของคอนกรีตด้วยวิธีการ Linear polarization ผลกระทบจากการวัดค่าความต้านทานของคอนกรีตระหว่างเหล็กเสริมและตำแหน่งที่ probe วางบนผิวคอนกรีต ยังไม่ผู้แต่งใดเผยแพร่หรือตีพิมพ์บทความโดยเปรียบเทียบการวัดค่าความต้านทานโดยใช้ 4 probe และ 1 probe การพัฒนาวิธีการของ single-probe และได้ให้ข้อเสนอแนะดังแสดงในตารางซึ่ง แสดงถึงความสัมพันธ์ของความต้านทานคอนกรีตกับความเสียหายของการเกิดสนิม

ตารางความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของคอนกรีตและความเสียหายของการเกิดสนิม

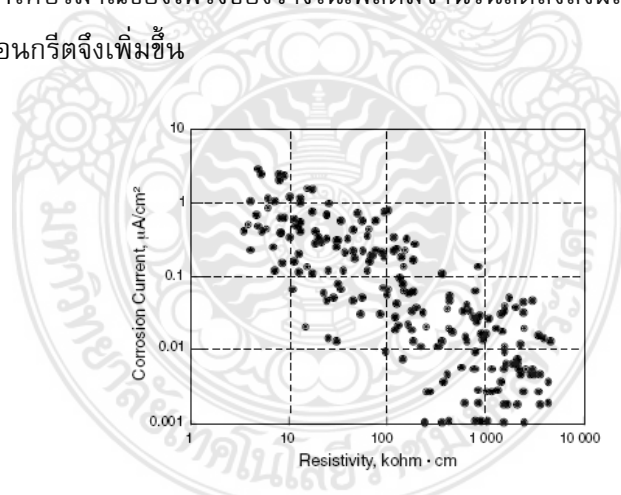
ความต้านทาน ($k\Omega \cdot cm$)	ความเสียหายของการเกิดสนิม
>100 ถึง 200	ไม่เกิดสนิม ; คอนกรีตมีสภาพแห้ง
50 ถึง 100	อัตราการเกิดสนิมต่ำ
10 ถึง 50	ความเหมาะสมในการเกิดสนิมสูงเมื่อเหล็กเริ่มกัดกร่อน
< 50	ความต้านทานไม่สามารถควบคุมอัตราการเกิดสนิมได้

ในอีกกรณีหนึ่ง Bungey ได้ให้แนวทางถึงความแตกต่างกันของข้อมูลระหว่างความต้านทานของคอนกรีตและความเสียหายของการเกิดสนิม เมื่อเหล็กเสริมสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิมดังแสดงในตาราง ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของคอนกรีตและความเป็นไปได้ในการเกิดสนิม



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

ความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดสนิมของคอนกรีตและความต้านทานของคอนกรีต จะเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อเหล็กเสริมสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิม ความต้านทานของคอนกรีตจะมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดสนิมได้ด้วยการวัดค่าความต้านทานของคอนกรีตเป็นการจัดเตรียมข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อใช้ในการประเมินความเป็นไปได้ของระดับการเกิดสนิมที่มีความแตกต่างกัน ซึ่งเป็นการนำเอาประโยชน์ที่ได้จากการสำรวจด้วยวิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาใช้ ค่าความต้านทานที่สูงที่ได้จากการสำรวจศักย์ไฟฟ้าแต่อัตราการเกิดสนิมอาจจะมีค่าต่ำ การอ้างอิงถึงความต้านทานของคอนกรีตที่มีความสัมพันธ์กับการแพร่กระจายของไอออนไปโดยทั่วคอนกรีตภายใต้การกระทำของศักย์ไฟฟ้าโดยรอบๆขั้วแอโนดและขั้วแคโทด คอนกรีตที่มีความต้านทานเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณของโพรงช่องว่างในเพลสต์มีจำนวนลดลงส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบแน่นอายุการใช้งานของคอนกรีตจึงเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2-18 เปรียบเทียบความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม (i_{corr}) และค่าความต้านทานของชิ้นส่วนคอนกรีตที่มา : (Feliu, S., Gonzalez, J.A., and Andrade, C., 1996)



2.1.1 วิธีการวัดความกัดกร่อนด้วยโพลาริไซเซชัน

เนื่องจากวิธีการของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (half-cell potential) เป็นวิธีการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสนิมที่ให้ค่าโดยประมาณ ซึ่งมีข้อเสียกล่าวคือวิธีการของ (half-cell potential) ไม่สามารถที่จะแสดงค่าของอัตราการเกิดสนิมได้โดยตรงซึ่งมีหลายวิธีการที่พยายามหาค่ากระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิมเพื่อนำเอาไปคำนวณหาอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ซึ่งวิธีการของ Linear polarization resistance (LPR) เป็นอีกวิธีการหนึ่งเป็นที่ยอมรับและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันและได้จัดทำเป็นมาตรฐานวิธีการทดสอบ

หลักการของเทคนิคความต้านทานโพลาริไซเซชันเป็นวิธีการที่ดีสำหรับใช้หาค่าอัตราการเกิดสนิม (Corrosion rate) ของเหล็กเสริม สอดคล้องตามมาตรฐาน ASTM G-59 เป็นเทคนิคพื้นฐานของการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงใน Open Circuit potential (OCP) ของเซลล์ตัวนำไฟฟ้าแบบ Short-Circuited เมื่อมีกระแสไฟฟ้าจากภายนอกไหลผ่านเซลล์ จะทำให้ไฟฟ้าครบวงจรซึ่งวิธีการวัดของ LPR ที่นิยมใช้กันมี 2 วิธีการเรียกว่า Potentiostatically ทำได้โดยเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเป็นช่วงทำให้ศักย์ไฟฟ้า (ΔE) เกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งแปรผันไปตามค่าของกระแสไฟฟ้า (ΔI) ในขณะเวลานั้นสำหรับวิธีที่ 2 เรียกว่า Galvanostatically ทำได้โดยเพิ่มกระแสไฟฟ้าเป็นช่วงทำให้กระแสไฟฟ้า (ΔI) เกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งแปรผันไปตามค่าศักย์ไฟฟ้า (ΔE) ในขณะเวลานั้นโดยที่ค่าของแรงดันที่เปลี่ยนแปลงต้องอยู่ภายในช่วง 10-30 มิลลิโวลต์เท่านั้นค่าที่วัดได้ถึงจะมีความถูกต้อง ซึ่งค่าเหล่านี้มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงระหว่างการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน (ΔE) และการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า (ΔI) ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่าง $\Delta E/\Delta I$ เรียกว่าความต้านทานโพลาริไซเซชัน (R_p) ดังสมการ เพราะว่ากระแสไฟฟ้าจะแสดงในเทอมต่อหน่วยพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าเป็น Polarized โดยที่ (R_p) มีหน่วยเป็นโอห์มพื้นที่ (ohms.cm²) ตามมาตรฐาน ASTM G15

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I} \quad (2.10)$$

Stern and Geary (1957) ได้จัดทำขึ้นภายใต้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดสนิมของขั้วแอโนดและความต้านทานโพลาริไซเซชัน ซึ่งอธิบายได้จากความสัมพันธ์ของการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนดและแคโทด และหาได้จากความลาดชันของกราฟเส้นโพลาริไซเซชันของปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด เมื่ออัตราการเกิดสนิมแสดงอยู่ในรูปความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมซึ่งแปรผันโดยตรงกับความต้านทานโพลาริไซเซชัน (R_p) (ASTM G59) แสดงไว้ดังสมการ

$$I_{\text{corr}} = \frac{B}{R_p} \quad (2.11)$$



โดยที่

$$I_{corr} = \text{ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม } (\mu\text{A}/\text{cm}^2)$$

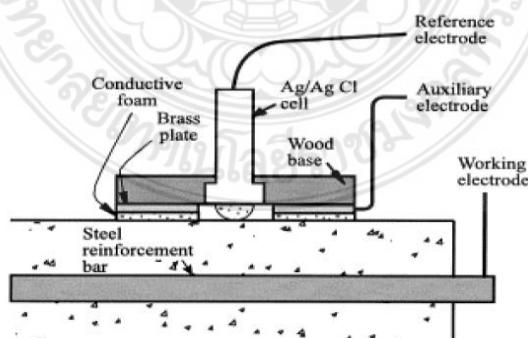
$$B = \text{ค่าคงที่ของแรงดันไฟฟ้า (mV)}$$

$$R_p = \text{ความต้านทานโพลาไรซ์ (Ohms.cm}^2)$$

โดยค่า B เป็นค่าคงที่ของ Stern-Geary โดยทั่วไปใช้ค่าเท่ากับ 25 mV เป็นช่วงที่เหล็กเสริมในคอนกรีตเริ่มเกิดสนิม (Active steel) และใช้ค่าเท่ากับ 50 mV สำหรับเหล็กเสริมในคอนกรีตยังไม่เกิดสนิม (passive steel) (K.R. Gowars, S.G. Millard., et al., 1994) และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิม (i_{corr}) หาได้จากพื้นที่ของเหล็กเสริมตรงบริเวณที่วัดค่าซึ่งคำนวณได้ตามสมการ

$$i_{corr} = \frac{I_{corr}}{A} \tag{2.12}$$

สิ่งที่ชี้ให้เห็นถึงกำลังของโครงสร้างที่เหลืออยู่ทำได้อาศัยการประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้างด้วยวิธีการทดสอบของ LPR ซึ่งเป็นวิธีการที่มีลักษณะเฉพาะโดยการนำเอาขั้วไฟฟ้า (Electrode) ซึ่งเป็นอุปกรณ์เสริมนำมาประยุกต์ใช้เพื่อช่วยในการวัดค่าความต้านทานของคอนกรีตให้ดีขึ้น ดังแสดงรูปเป็นการตั้งสมมุติฐานพื้นที่ผิวของเหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตให้อยู่ภายใต้ขั้วไฟฟ้า จะเห็นได้ชัดเจนว่าการไหลของกระแสไฟฟ้าจากขั้วไฟฟ้าไปยังพื้นผิวเหล็กเสริมซึ่งเป็นการส่งสัญญาณในลักษณะที่ไม่มีการจำกัดขอบเขตกระแสไฟฟ้าให้อยู่ภายใต้ขั้วไฟฟ้าส่งผลให้กระแสไฟฟ้าแพร่กระจายเกินออกไปทางด้านข้างซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ทราบ โดยเฉพาะเหล็กเสริมที่มีพื้นที่ขนาดกว้างมาก (S. Feliu, J.A. Gonzalez, C. Andrade., et al., 1988) เป็นเหตุให้ได้ผลลัพธ์ที่ไม่ถูกต้องเพราะว่าพื้นผิวของเหล็กเสริมบริเวณที่โพลาไรด์ (Polarized) ไม่ถูกต้องซึ่งทำให้การคำนวณค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิม (i_{corr}) เกิดการผิดพลาดในขณะเดียวกันผลของการประเมินตรวจสอบโครงสร้างจะไม่ถูกต้องด้วย



รูปที่ 2-19 การวัดค่าความต้านทานโพลาไรซ์ของเหล็กเสริมในคอนกรีตโดยไม่มี guard ring ที่มา : S.G. Milliard, D.W.Law. et al.(2001)

จากปัญหาของการส่งสัญญาณที่ไม่จำกัดขอบเขตสามารถแก้ไขได้โดยเพิ่มอุปกรณ์เสริมมีลักษณะเป็นวงแหวนล้อมรอบขั้วไฟฟ้าและhalf-cell ซึ่งสามารถช่วยจำกัดขอบเขตการส่งสัญญาณของกระแสไฟฟ้าให้อยู่ในขอบเขตซึ่งได้มีการพัฒนาโดย J.A. Gonzalez, S. Feliu, Jr, C. Andrade. And et al.1990 หลักการทำงานของ Guard ring ที่ล้อมรอบอยู่ภายนอกขั้วไฟฟ้าจะช่วยรักษาการกระจายของกระแสไฟฟ้าในระหว่างการวัดค่า R_{eq} ให้อยู่ในขอบเขตของ Guard ring ซึ่งทำให้ได้ค่าของกระแสไฟฟ้ากระทำต่อพื้นผิวได้ค่าที่ถูกต้อง การจำกัดขอบเขตของกระแสไฟฟ้าให้อยู่ภายใน Guard ring เป็นการป้องกันสัญญาณรบกวนของกระแสไฟฟ้าจากขั้วไฟฟ้าที่อยู่ภายใน

2.12 อุปกรณ์ป้องกันสนิมในเหล็กเสริม (Galvashield)

ระบบ Impress Current ใช้กันแพร่หลายมาเป็นเวลานานแล้ว สำหรับการบำรุงรักษาระบบท่อใต้ดินใต้ทะเล รวมไปถึงโครงสร้างเหล็กที่อยู่ในดินหรือจุดที่สัมผัสกับน้ำตลอดเวลา เช่น ลำตัวเรือ แต่สำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแล้ว การใช้ Galvanic Anode ถือเป็นเทคโนโลยีที่ค่อนข้างใหม่สำหรับการบำรุงรักษาโครงสร้าง โดยแต่เดิมจะใช้ระบบของ Impress Current ซึ่งมีราคาสูง และค่อนข้างซับซ้อนทั้งจำเป็นต้องมีการควบคุมระบบโดยผู้ชำนาญอยู่ตลอดเวลา Galvanic Anode สำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ส่วนใหญ่จะใช้สังกะสี (Zinc) เป็นโลหะ Anode ใช้ในการจ่าย อิเล็กตรอนแทนที่เหล็ก เพื่อหยุดยั้งปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของการเกิดสนิม สามารถติดตั้งเข้าไปในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้ในขณะทำการซ่อมแซมโครงสร้างติดตั้งเข้าไปในโครงสร้างโดยตรง เพื่อเป็นการหยุดยั้งสนิมและกระทั่งติดตั้งในช่วงระหว่างการก่อสร้างแต่เริ่มแรก ซึ่งจะสะดวกต่อการติดตั้งมากที่สุดและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานที่สุด โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะพบกับปัญหาสนิมที่ขยายตัวต้นคอนกรีตแตกร้าวหลุดร่อนออกมานั้น จะเกิดจากปัญหาหลัก ๆ สองประการนั้นคือ

Carbonation เป็นปัญหาซึ่งพบได้ในโครงสร้างอาคารที่มีอายุการใช้งานมายาวนาน เกิดจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศรวมตัวกับความชื้นทำปฏิกิริยากับซีเมนต์ในคอนกรีต และทำให้คอนกรีตมีค่าความเป็นด่างลดลง จึงทำให้เหล็กเสริมคอนกรีตเกิดสภาวะเป็นสนิมขึ้น

Chloride เกิดจากไอออนของคลอไรด์แทรกซึมเข้าสู่เนื้อคอนกรีต ทำให้เกิดสนิมขึ้น โดยจะเกิดขึ้นรวดเร็วกว่าในกรณีของ Carbonation และเป็นอันตรายต่อโครงสร้างมากกว่า พบได้มากในสิ่งปลูกสร้างที่สัมผัสกับบรรยากาศของน้ำทะเล หรือน้ำกร่อยเป็นประจำ เช่น ท่าเรือสะพาน เป็นต้น

ประโยชน์ของการติดตั้งระบบ Galvanic Anode Cathodic Protection

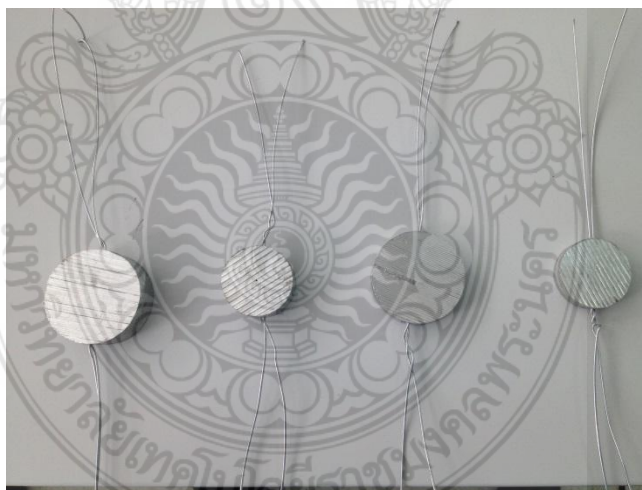
ลดค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าเคมีของเหล็กเสริมในคอนกรีต ลดปัญหาการเกิดสนิมจากสภาวะปกติ และหยุดยั้งปัญหาการเร่งสนิมหรือ Incipient Anode ซึ่งเกิดกับบริเวณรอบ ๆ จุดที่ซ่อมคอนกรีต โดยหลักการคือ



ผลกักตุนคลอไรด์ที่สะสมอยู่ในเนื้อคอนกรีต ให้เคลื่อนตัวออกห่างจากผิวเหล็กเสริม ลดปัญหาจากคลอไรด์สะสม อันจะทำให้เกิดสนิมเหล็กเสริมได้ง่าย

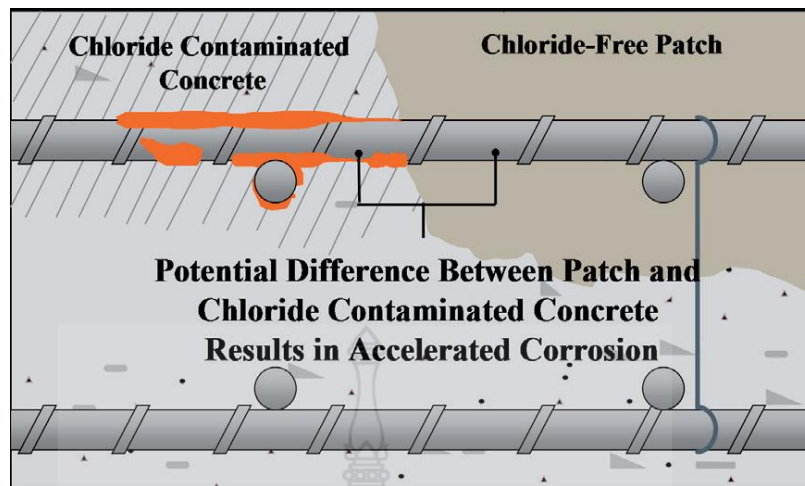
การใช้งาน Galvashield XP ที่ฝังลงในคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นจะใช้หลักการออกแบบใช้ขั้วบวกไฟฟ้าไหล ผ่านไปยังวัสดุ Galvashield XP ที่มักทำด้วยสังกะสีโดยจะถูกเททับลงด้วยปูนซีเมนต์เพื่อให้ลดการกัดกร่อนที่จะเสริมโครงสร้างคอนกรีตโดยปัญหา Chlorides ที่ทำให้เกิดสนิมในเหล็กเสริมพบมากกับโครงสร้างที่อยู่ในบริเวณ ใกล้ทะเล, คูคลองในเขตน้ำกร่อย และแหล่งน้ำใต้ดินที่อยู่ในพื้นที่ใกล้ทะเล เช่น สะพาน ท่าเทียบเรือ เป็นต้น หรืออาจจะพบอ็อกซิเจนของ Chlorides ปนเปื้อนมากระหว่างขั้นตอนการก่อสร้าง หรือในรูปเคมีที่สัมผัสกับโครงสร้าง คอนกรีตโดยตรง เช่น ในการผลิตน้ำประปา การใช้ Galvashield หรือ Zinc Tape เป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้วิธีการ ป้องกันการเกิดสนิมเหล็กแบบ Cathodic Protection ซึ่งสามารถป้องกันสนิมเหล็กทั้งแบบ Passive และ Active Protection เนื่องจากผลิตภัณฑ์ Zinc Tape นี้หลังจากติดตั้งบนผิวเหล็กแล้วจะสามารถป้องกันไม่ให้น้ำ และ ออกซิเจน ซึมผ่านไปได้ และ Zinc Tape เป็นโลหะที่สามารถสูญเสียอิเล็กตรอนได้ง่ายกว่าเหล็ก โดยการส่งถ่าย อิเล็กตรอนของ Zinc Tape ไปสู่เหล็กผ่านทางชั้นกาวที่มีอนุภาคของ Zinc อยู่ จึงทำให้เหล็กไม่เกิดสนิม

การติดตั้ง Zinc Tape สามารถทำได้ง่ายจึงเหมาะสำหรับใช้งานกับโครงสร้างได้ในหลายรูปแบบ เช่น ท่อเหล็กในระบบ Cooling Tower, โครงสร้างเหล็กต่างๆ, ห้อง AHU, ระบบท่อต่างๆในโรงงานอุตสาหกรรม, อุตสาหกรรมปิโตรเคมี โรงกลั่นน้ำมัน รวมถึงอุตสาหกรรมผลิตรถยนต์ และตู้คอนเทนเนอร์ เป็นต้น

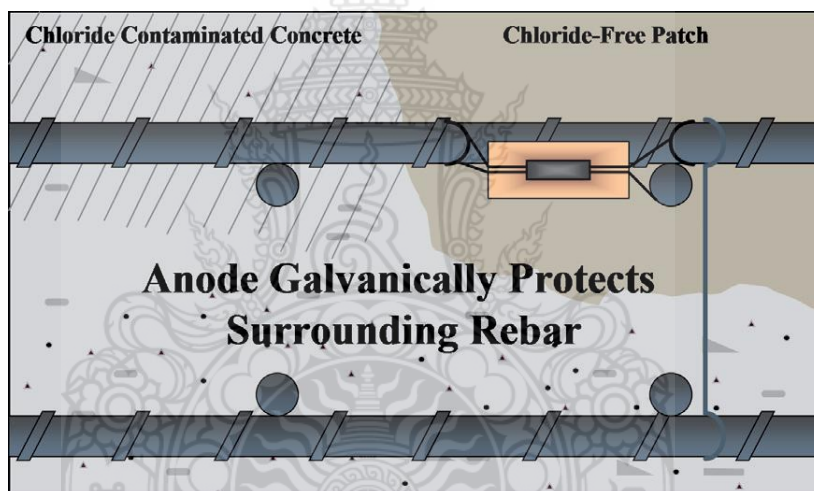


รูปที่ 2-20 อุปกรณ์ป้องกันการเกิดสนิม Galvashield หรือ Zinc Tape

ระบบป้องกันสนิมในคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยหลักการของ Cathodic Protection ในรูปแบบ Galvanic Anode ตามข้อกำหนดมาตรฐานยุโรป EN (ISO) 12696 เพื่อการปกป้องโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กให้ปลอดสนิม สามารถแสดงได้ในรูปที่ 2-21, 2-22



รูปที่ 2-21 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตโดยไม่มี Galvashield หรือ Zinc Tape
ที่มา: www.concreteplus.co.nz



รูปที่ 2-22 แสดง Galvashield หรือ Zinc Tape ของเหล็กเสริมในคอนกรีต
ที่มา: www.concreteplus.co.nz

การป้องกันสนิมนั้นหลักการคือจะปล่อยอิเล็กตรอนเข้าสู่เหล็กเสริมและสลายตัวเข้ามาในรูปประจุของสังกะสี เพื่อทดแทนสถานะที่เหล็กจะผุกร่อนโดยตัวมันเองเมื่อโครงสร้างเหล็กมีสภาวะแวดล้อมการเกิดสนิมด้วยปัจจัยต่างๆ เช่น คลอไรด์ หรือ คาร์บอนเนชั่น ซึ่งเกิดเป็นสนามไฟฟ้าขึ้นรอบๆ บริเวณที่ติดตั้ง Galvashield หรือ Zinc Tape สามารถใช้ได้ทั้งโครงสร้างใหม่ที่ยังไม่เกิดปัญหาสนิม หรือโครงสร้างเก่าที่เกิดการผุกร่อนของสนิมแล้ว โดยจะต้องหาค่าที่เหมาะสมกระจายในเนื้อคอนกรีตเพื่อปกป้องการเกิดในเหล็กเสริม ตลอดอายุการใช้งาน โดยเนื้อของ Zinc จะหายไปตามอัตราการปล่อยอิเล็กตรอนของการเกิดสนิมนั่นเอง

บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินการศึกษาพัฒนาคลีนส์สัญญาณไฟฟ้าเพื่อใช้ในการวัดการเกิดสนิมเพื่อหาค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตสำหรับอุปกรณ์และวิธีการทดลองดังนี้

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานจัดสร้างและทดสอบ

อุปกรณ์และวิธีการอุปกรณ์

1. เครื่องผสมคอนกรีตขนาดผสม 140-150 ลิตร
2. เครื่องจี้คอนกรีต (Vibrator)
3. อุปกรณ์วัดค่าการยุบตัว (Slump test)
4. แบบหล่อแท่งตัวอย่างรูปทรงสี่เหลี่ยม ขนาด 75 × 75 เซนติเมตร
5. แบบหล่อแท่งตัวอย่างรูปทรงสี่เหลี่ยม ขนาด 60 x 60 เซนติเมตร
6. ถังสำหรับแช่ตัวอย่าง ขนาด 150 × 120 เซนติเมตร
7. เครื่องชั่งน้ำหนัก สามารถอ่านค่าได้ละเอียด 0.01 กรัม
8. เครื่องทดสอบค่าวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-cell potential test)
9. เครื่องทดสอบค่าวัดความต้านทานโพลาไลเซชัน (LPR)
10. เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้ากระแสตรง แบตเตอรี่
11. ชุดเครื่องมือช่างคอนกรีต เช่น สว่านเจาะคอนกรีต แปรงบัดฝุ่น เป็นต้น
12. ชุดควบคุมและจำลองสภาวะการเกิดสนิมเหล็ก

วิธีการสร้างแบบจำลองผสมคอนกรีต

วัสดุและปฏิกิริยาส่วนผสมคอนกรีต

วัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีต

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราช้างของบริษัทปูนซีเมนต์ไทยจำกัด
- วัสดุมวลรวมหยาบ ใช้ หินปูนย่อย (Crushed limestone)
- มวลรวมละเอียด ทรายแม่น้ำร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (SSD)
- เหล็กผิวเรียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม. และ 9 มม.



ในการศึกษาในครั้งนี้ได้กำหนดคอนกรีตให้มีกำลังรับแรงอัด 240 กก./ซม². โดยออกแบบตามมาตรฐาน ACI มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และค่าการยุบตัวเท่ากับ 8 ซม. โดยมีปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตและคุณสมบัติของเหล็กเสริมที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ดังแสดงในตารางที่ 6



รูปที่ 3-1 การหล่อคอนกรีตตัวอย่างเพื่อทดลอง

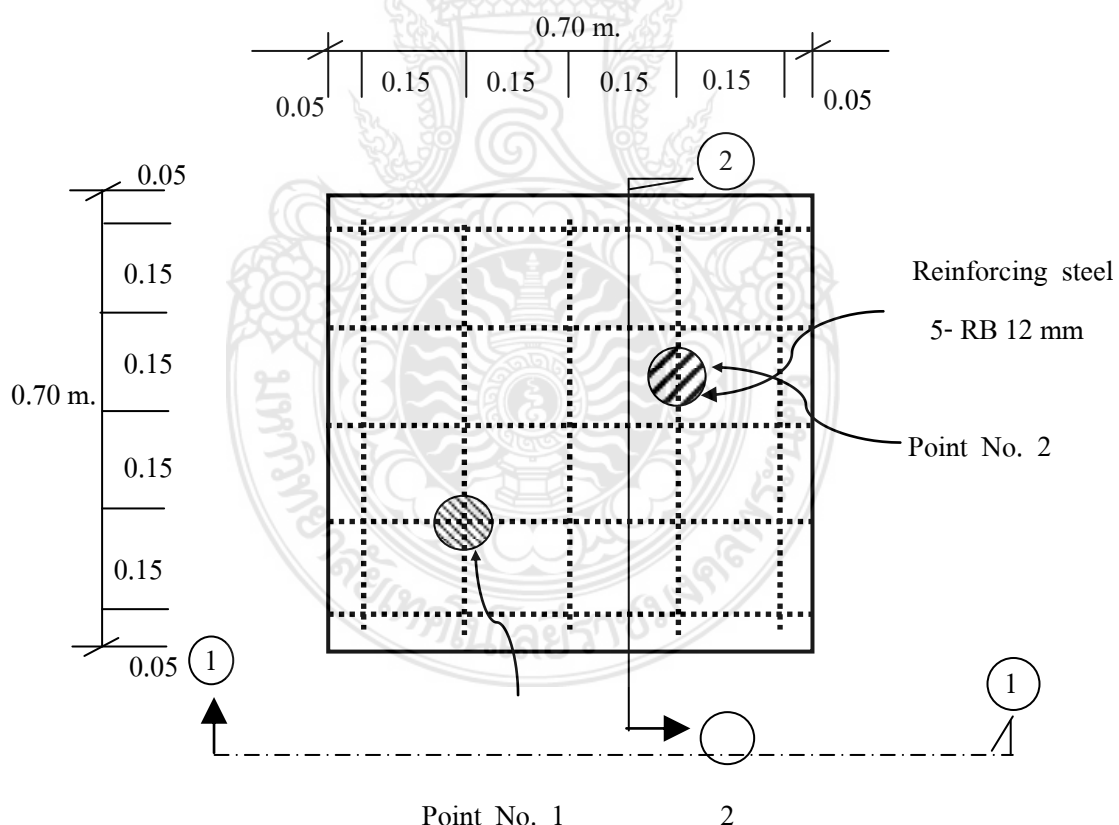
ตารางที่ 6 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต (w/c = 0.45), (ปริมาณน้ำหนัก กก. ต่อลูกบาศก์เมตร)

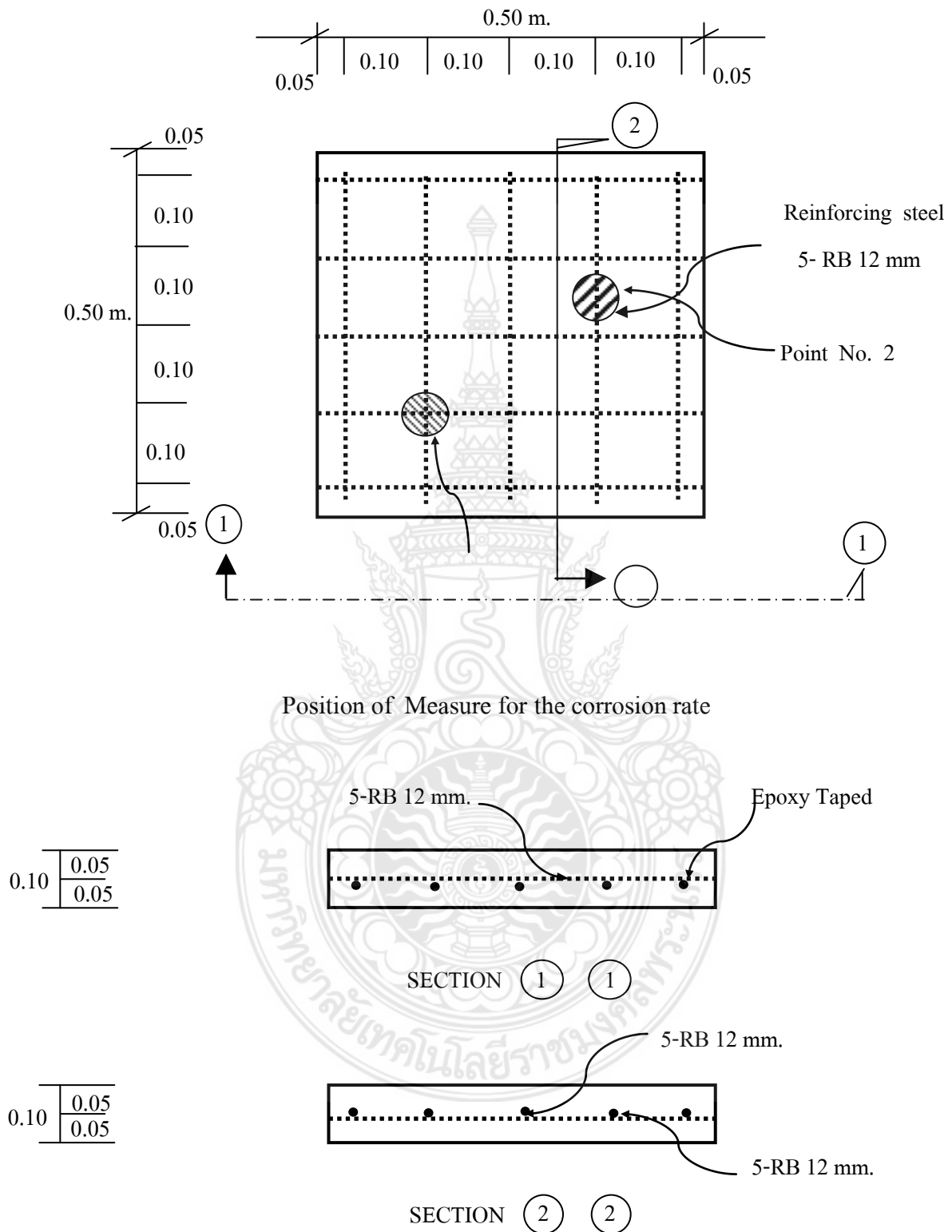
กลุ่มตัวอย่าง คอนกรีต	ซีเมนต์	มวลรวม หยาบ	มวลรวม ละเอียด	น้ำ
OPC	444	992	719	200
OPC+FA20	355	992	719	200
OPC+FA30	288	992	719	200
OPC+FA40	288	992	719	200
OPC+FA50	222	992	719	200
OPC+FHA20	288	992	719	200
OPC+RHA30	355	992	719	200
OPC+RHA40	288	992	719	200
OPC+RHA50	222	992	719	200

3.2 การเตรียมอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก

ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก

จัดทำตัวอย่างพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก ขนาด 70 x 70 x 10 ซม. จำนวน 2 ชนิด โดยแต่ละชนิดแบ่งตามขนาดของ Zinc ชนิดละ 4 ตัว และขนาด 50 x 50 x 10 ซม. จำนวน 2 ชนิด ทุกละ 4 ตัว ทั้งหมด 16 ตัวอย่าง อย่างโดยมีปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตดังแสดงในตารางที่ 6 และน้ำที่ใช้ในการเตรียมคอนกรีตเป็นน้ำประปาโดยใช้เหล็กเสริมชนิด SR24 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. โดยยื่นปลายเหล็กออกจากตัวอย่างเพื่อทำเป็นสื่อนำในการนำไฟฟ้า และกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีโดยผสมโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ในอัตราส่วนร้อยละ 5 ต่อน้ำหนักซีเมนต์ซึ่ง ใช้เครื่องผสมคอนกรีตในการเตรียมคอนกรีต โดยในการศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการผสมผสมโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ในอัตราส่วนร้อยละ 5 ต่อน้ำหนักซีเมนต์เพื่อแทนการแช่ตัวอย่างในสารละลายคลอไรด์เนื่องจากต้องการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของของผลกระทบจากการป้องกันสนิมด้วยวิธีใช้ Galvashield หรือ Zinc Tape ที่แตกต่างกัน ใน 2 ขนาด ในการวิจัยครั้งนี้โดยทำการปมตัวอย่างและจำลองการเกิดสนิมเหล็กเป็นเวลา 28 วัน และนำขึ้นมาวัดค่าการเกิดสนิมด้วยวิธี Half Cell และ LPR ที่ระยะเวลาและจุดวัดบนตัวอย่างคอนกรีตที่ต่าง ๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ





รูปที่ 3-2 ตำแหน่งการวัดค่า Half-cell Potential และ LPR



รูปที่ 3-3 การวัดด้วยโพลาลาไลเซชัน



รูปที่ 3-4 การวัดด้วย Half cell

3.3 วัสดุและส่วนผสมคอนกรีตตัวอย่าง

วัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีต

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราช้างของบริษัทปูนซีเมนต์ไทย
- วัสดุมวลรวมหยาบใช้หินปูนย่อยขนาดโตสุด 3/4 นิ้ว
- มวลรวมละเอียดทรายแม่น้ำร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (SSD)
- เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม.



รูปที่ 3-5 แท่งคอนกรีตที่ฝังขั้วเพื่อวัดสัญญาณที่ใช้ในการทดลอง

ปฏิกิริยาส่วนผสมคอนกรีต

ในการศึกษาครั้งนี้ได้กำหนดคอนกรีตให้มีกำลังรับแรงอัด 240 กก./ซ.ม.² โดยออกแบบตามมาตรฐานของ ACI มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ w/c เท่ากับ 0.40 โดยมีปฏิกิริยาส่วนผสมคอนกรีตและคุณสมบัติของเหล็กเสริมที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้



รูปที่ 3-6 การบ่มแท่งคอนกรีตให้เกิดสภาวะการเกิดสนิมเสมือนจริง

ตารางแสดงปฏิกษาคส่วนผสมคอนกรีตต่อปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร

วัสดุในการผสมคอนกรีต	ปริมาณน้ำหนัก(กก./ลบ.ม.)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	450
มวลรวมหยาบ	992
มวลรวมละเอียด	750
น้ำ	180
อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์(w/c = 0.30)	
สารละลายโซเดียมคลอไรด์	5%

ตารางแสดงคุณสมบัติของเหล็กเสริมคอนกรีต

Diameter (mm.)	Cross section area (mm. ²)	Yield Strength (kg/cm. ²)	Ultimate strength (kg/cm. ²)
RB -9	28.3	2400	3900
DB-12 (SD30)	113.10	3000	4900

3.4 การจำลองสภาวะการเกิดสนิมเหล็กและเตรียมตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก

จัดทำตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 10 x 10 x 35 ซม.ดั่งแสดง จำนวน 8 ตัวอย่างโดยมีปฏิกษาคส่วนผสมคอนกรีตดั่งแสดงในตารางและน้ำที่ใช้ในการจำลอง โดยใช้เหล็กเสริมชนิด RB ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม.โดยยื่นปลายเหล็กออกจากตัวอย่างเพื่อทำเป็นจุดเชื่อมต่อกระแสไฟฟ้าสำหรับใช้เร่งให้เหล็กเกิดสนิมและหลังเกิดกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีดในการศึกษาในครั้งนี้ได้ ทำการผสมโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ในอัตราส่วนร้อยละ 5 ต่อน้ำหนัก เพื่อการจำลองสภาพให้คอนกรีตเสริมเหล็กให้อยู่ในสภาวะลึงแวลล้อม

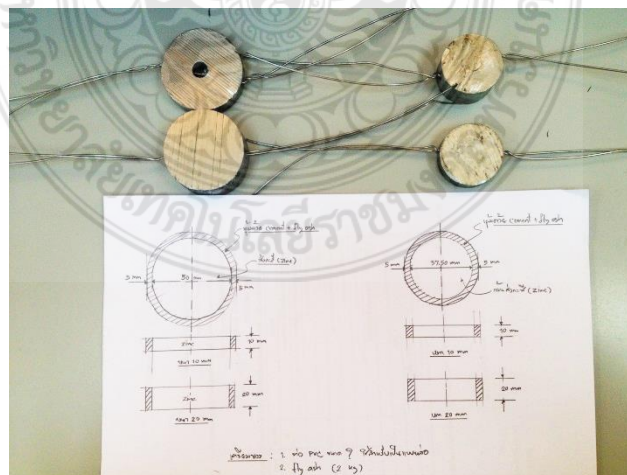
ทะเลด้วยการใช้คลอไรด์เป็นส่วนผสมอยู่ในคอนกรีตแทนน้ำทะเลจริง เนื่องจากความจำกัดด้านเวลาในการซึมผ่านของคลอไรด์โดยทำการบ่มตัวอย่างหลังจากนั้นจึงจ่ายกระแสไฟฟ้าไปที่เหล็กเสริมเพื่อช่วยเร่งให้เหล็กเกิดสนิมเร็วขึ้นดังรูปที่ 3-7



รูปที่ 3-7 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตและการเร่งการเกิดสนิมด้วยกระแสไฟฟ้า

3.5 การออกแบบและจัดทำ Galva shield หรือ Zinc Tap

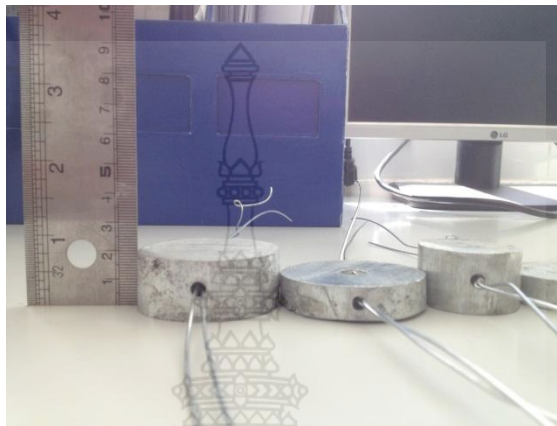
ในขั้นตอนของการออกแบบมีปัจจัยสำคัญอยู่สองสามปัจจัยที่ต้องให้ความสำคัญเป็นอย่างมากในขั้นต้นรูปสังกะสีเพื่อให้ได้ตามขนาดที่ออกแบบเพื่อทดสอบการป้องกันสนิมเหล็กการเจาะช่องและรูเพื่อการผูกมัดกับเหล็กเสริมในคอนกรีตการออกแบบจุดเจาะและหารจัดวางองค์ประกอบรวมถึงขนาดที่แตกต่างของแท่งสังกะสีเพื่อทำการเปรียบเทียบ ความสามารถในการดิ่งสนิมให้ สอดคล้องเป็นไปตามทฤษฎี ผู้ออกแบบการทำงานเตรียมงานในขั้นตอนการออกแบบเพื่อที่จะได้ผลิตเพื่อให้มีขนาดและรูปทรงเหมือนกัน โดยมีสิ่งสำคัญหลักๆที่ต้องพิจารณาในขั้นตอนการออกแบบก่อขึ้นรูปสังกะสี



รูปที่ 3-8 การออกแบบโครงสร้างของ Galvashield หรือ Zinc Tap

ขนาดและรูปร่าง

จากการออกแบบในรูปที่ 3-8 แสดงโครงสร้างของการออกแบบตามลักษณะของรูปร่างและข้อกำหนดในการเกิดปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดสนิม เทคนิคเกี่ยวกับกาออกแบบรูปทรงสังกะสี เพื่อให้มั่นใจได้ว่าการออกแบบการฝังสังกะสีในคอนกรีตสามารถนำประจุจากเหล็กเสริมในคอนกรีตเข้าสู่สังกะสีต้นแบบได้



รูปที่ 3-9 ตัวอย่างของ Zinc Tap ที่ขนาดความหนาต่าง ๆ

วัสดุของชิ้นงาน

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Zinc Tap ที่มีส่วนประกอบของสังกะสีเป็นส่วนหลัก โดยขึ้นรูปด้วย PVC โดยแท่งสังกะสี รูปที่ 3-10 เมื่อขึ้นรูปเรียบร้อยแล้วจะต้องเจาะรูเพิ่มจะนำไปติดทั้งกับคอนกรีตตัวอย่างต่อไป



รูปที่ 3-10 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Zinc Tap

ข้อได้เปรียบที่เห็นชัดที่สุดของการใช้สังกะสีฉีดขึ้นรูปอุปกรณ์เพื่อป้องกันสนิมในคอนกรีตเสริมเหล็ก คือสามารถรับปฏิกิริยาการเกิดสนิมมาจากโครงสร้างเหล็กในคอนกรีต

ความยืดหยุ่นในการออกแบบอุปกรณ์

การขึ้นรูป Zinc Tap นั้นจะต้องระวังเรื่องพื้นผิวขนาตามความยาวตลอดแนวของแท่งสังกะสี จากนั้นจึงค่อยตัดให้ได้ขนาดตามต้องการ ส่วนกาขึ้นรูปจะต้องระวังปริมาตรที่มีความแตกต่าง ต่างกันของแต่ละก้อน แต่ต้องคำนึงถึงปริมาตรรวม รูปที่ 3-11 แสดงการเชื่อมต่อระหว่างแท่งสังกะสีกับลวดตัวนำ



รูปที่ 3-11 การเชื่อมต่อระหว่างแท่งสังกะสีกับลวดตัวนำ

3.6 วิธีการวัดค่าด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-Cell Potential) เพื่อตรวจสอบโอกาสในการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM-C876



รูปที่ 3-12 การวัดการเกิดสนิมด้วยวิธีความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งสองชุดที่ไม่ได้เร่งด้วยกระแสไฟฟ้าและชุดที่เร่งด้วยกระแสไฟฟ้า การเก็บค่าการวัดให้เก็บค่าทุกๆ 7 วันเป็นเวลา 2 เดือนและทำการเปรียบเทียบแต่ละตัวอย่างที่มีปริมาณคลอไรด์ร้อยละ 5 ตามลำดับของชุดตัวอย่างที่เร่งด้วยกระแสไฟฟ้า

ขั้นตอนและวิธีการวัดค่ามีดังนี้

1. ทำเครื่องหมายที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนที่ต้องการทำการวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ โดยกำหนดตำแหน่งตรงจุดตัดและบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริมที่มีการเชื่อมต่อกับกระแสไฟฟ้า
2. ราดน้ำให้ทั่วให้ชุ่มเพื่อให้น้ำซึมเข้าไปภายในคอนกรีตหน้าผ้าชนิดหนาชุบน้ำมาคลุมไว้เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำจาก และรีบทดสอบทันที
3. เตรียมเครื่องมือในการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของคอนกรีตด้วยวิธีครึ่งเซลล์ (Half Cell Potential) โดยใช้ Copper (II) Sulphate ลงไปในหลอดเครื่องมือโดยให้สารละลายอยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ แล้วใส่ น้ำลงไป ในขวดอุปกรณ์แล้วจึงประกอบอุปกรณ์ต่างๆเข้าด้วยกัน
4. ต่อเครื่องวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เข้ากับเหล็กที่ยื่นออกมาจากคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้ขั้วลบต่อเข้ากับเหล็กเสริมและขั้วบวกต่อเข้ากับเครื่องมือวัดและนำไปวางบนตำแหน่งที่ได้กำหนดไว้แล้วอ่านค่าที่ได้ แล้วจดบันทึกค่าโดยหาค่าเฉลี่ย 5 ครั้งต่อการวัดค่าหนึ่งจุด

3.7 การวัดค่าทดสอบด้วยเครื่องมือวัดค่าด้วยคลื่นสัญญาณไฟฟ้า

ขั้นตอนหลักในการใช้งานเครื่องมือวัดค่าด้วยคลื่นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อหา ความต้านทาน เพื่อคำนวณอัตราการกัดกร่อนดังต่อไปนี้



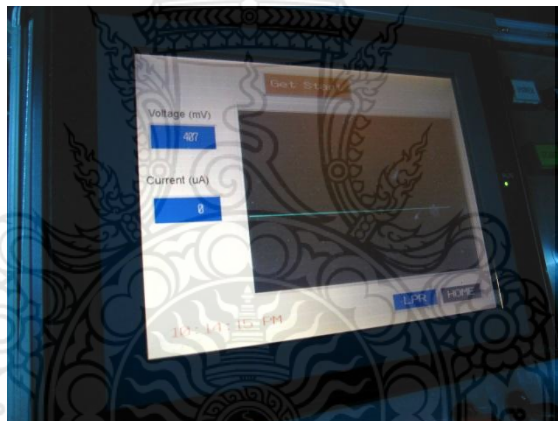
รูปที่ 3-13 การเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือโดยใช้วิธีความต้านทานโพลารไรซ์

1. ทำการเชื่อมต่อกระแสไฟฟ้ากับเหล็กเสริม(WE) ของตรงปลายเหล็กที่ยื่น
2. กำหนดบริเวณเหล็กเสริมสำหรับวัดค่าการเกิดสนิม โดยให้ผิวคอนกรีตอยู่ในสภาวะที่เปียกและกำหนดตำแหน่งเครื่องมือให้อยู่ตรงกึ่งกลางเหนือเหล็กเสริมที่ต้องการทดสอบ
3. ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กอยู่ในสภาวะเปียกชื้นตลอดเวลาในการวัดค่า
4. วัดค่า Open Circuit Potential, E_0 จะมีความสัมพันธ์กับ Reference electrode I_0 เป็นการวัดแบบศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์



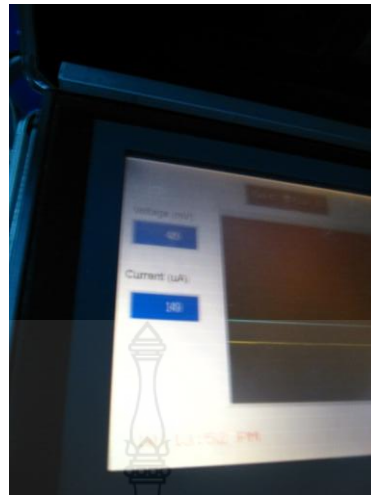
รูปที่ 3-14 การเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือโดยใช้วิธีการส่งคลื่นเพื่อหาความต้านทานโพลาไรซ์

5. ทำการวัดกระแสไฟฟ้าจาก CE ไปยัง WE โดยใช้แรงดันที่มีความแตกต่างกันอยู่ในช่วงไม่เกิน -10 ถึง -30 mV ในการเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้าของ WE โดยเพิ่มแรงดันให้อยู่ในอัตรา เท่าๆกัน บันทึกค่าของ ศักย์ไฟฟ้า (E) ที่จ่ายไปและบันทึกค่ากระแสไฟฟ้า (I) ที่อ่านค่าได้ในขณะนั้น



รูปที่ 3-15 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าเปรียบเทียบผล

6. ทำซ้ำตามขั้นตอนเดิมโดย เปลี่ยนแปลง ค่าสัญญาณ ความถี่ อย่างน้อย 5 ครั้ง เพื่อค่าไป คำนวณหาค่าความชันของเส้นตรง (Slope) เป็นค่าความต้านทาน Polarization (R_p) ที่ตรง ตำแหน่งนั้น ในขณะที่หากความชันที่คำนวณได้ไม่เป็นเส้นตรงให้ปรับแก้ค่าในช่วงนั้นโดยการ วัดค่าใหม่



รูปที่ 3-16 การวัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้า

7. คำนวณหาตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ของเหล็กเสริมที่มีผลกระทบกับการวัดค่ากระแสไฟฟ้า โดยดูจากที่ของเหล็กเสริมที่อยู่ใต้ Probe โดยอ้างอิงจากเส้นผ่านศูนย์กลางของ Probe นำมา คำนวณหาค่าเหล็กเสริม
8. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า(E) กับกระแสไฟฟ้า (I) ต่อหน่วยของเหล็ก และหาความชันของเส้นตรง(Slope) เป็นค่าความต้านทาน Polarization (R_p)



รูปที่ 3-17 การสร้างความสัมพันธ์การรับค่าจากเซนเซอร์ทดสอบจากสัญญาณไฟฟ้า

9. คำนวณหาค่าอัตราการกัดสนิม (i_{corr}) โดยพิจารณาจากค่า สัมประสิทธิ์ B ส่วนด้วยความต้านทาน Polarization (R_p) โดยที่ค่า $B = 26 \text{ mV}$



รูปที่ 3-18 การสร้างความสัมพันธ์และเงื่อนไขในการคำนวณค่า

10. นำค่าอัตราการเกิดสนิม (i_{corr}) ที่คำนวณได้ไปเปรียบเทียบกับเงื่อนไขของสถานะของเกิดสนิม โดยพิจารณาจาก $i_{orr} < 0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ แสดงถึงสถานะที่เหล็กยังไม่เกิดสนิม และหาก $i_{orr} > 0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ แสดงถึงสถานะที่เหล็กเกิดสนิมแล้ว

บทที่ 4 ผลการทดลอง

4.1 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

การทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเสริมเหล็กโดยการใช้การวัดค่าด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และแบบโพลาลาइनเซชันของคอนกรีตเสริมเหล็ก ต้นแบบชนิดคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่ผ่านการจำลองอยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์โดยนำค่าที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐานและแบบโพลาลาइनเซชันโดยมีเงื่อนไขขอบเขตของแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กถูกจำลองให้อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเลได้ถูกกำหนดให้ มีส่วนผสมของปริมาณคลอไรด์ร้อยละ 5% ของน้ำหนักซีเมนต์ตามลำดับ ตัวอย่างแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กแบ่งออกเป็น 2 ชุด คือชุดแรกกำหนด ขนาดของแผ่นคอนกรีตเป็น 2 ขนาดเพื่อไว้ตรวจสอบแนวโน้มว่าเป็นไปในทิศทางเดียวกันหรือไม่ และชุดที่สองคือคอนกรีตแต่ละแผ่นจะฝัง Zinc Anode โดยกำหนดขนาดแตกต่างกัน สำหรับวิธีการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและโพลาลาइनเซชันกำหนดให้วัดตรงบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริมซึ่งเป็นเหล็กเสริมที่เหมือนกันดังผลการทดสอบตามตารางที่ 4-1 ถึงตารางที่ 4-9

ตารางที่ 4.1 ค่าความต่างศักย์ของไฟฟ้าครึ่งเซลล์และความน่าจะเป็นที่จะเกิดการกัดกร่อน

Half-Cell Potential (mV)	Percentage Chance of active Corrosion
< -350	90 %
-200 to -350	50 %
> -200	10 %

ตารางที่ 4.2 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กที่ วางระยะ Zinc ห่าง 20 cm ที่แผ่นขนาด 70*70 mm

ค่าของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์									
ค่าของ R_p ที่วางระยะ 20 cm									
เวลา ขนาด	ระยะเวลา (สัปดาห์)								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
หนา 2cm f 5 cm	-555	-545	-547	-565	-543	-549	-557	-559	-543
หนา 1cm f 5 cm	-577	-544	-545	-562	-544	-545	-554	-549	-546
หนา 2cm f 2.5 cm	-544	-533	-546	-544	-543	-549	-511	-502	-497
หนา 1cm f 2.5 cm	-565	-566	-562	-565	-544	-521	-518	-515	-511

ตารางที่ 4.3 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กที่ วางระยะ Zinc ห่าง 15 cm ที่แผ่นขนาด 50*50 mm

ค่าของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์									
ค่าของ R_p ที่วางระยะ 15 cm									
เวลา ขนาด	ระยะเวลา (สัปดาห์)								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
หนา 2cm f 5 cm	-511	-510	-507	-506	-507	-511	-505	-502	-501
หนา 1 cm f 5 cm	-522	-520	-500	-493	-488	-481	-475	-471	-455
หนา 2cm f 2.5 cm	-533	-535	-523	-515	-514	-511	-510	-511	-513
หนา 1cm f 2.5 cm	-532	-529	-502	-500	-499	-494	-482	-476	-468



ตารางที่ 4.4 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กที่ วางระยะ Zinc ห่าง 40 cm ที่แผ่นขนาด 70*70 mm

ค่าของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์									
ค่าของ R_p ที่วางระยะ 40 cm									
เวลา ขนาด	ระยะเวลา (สัปดาห์)								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
หนา 2cm f 5 cm	-567	-561	-558	-552	-548	-543	-546	-502	-498
หนา 1cm f 5 cm	-588	-555	-543	-553	-531	-511	-502	-500	-493
หนา 2cm f 2.5 cm	-545	-561	-558	-552	-503	-500	-492	-489	-477
หนา 1cm f 2.5 cm	-561	-562	-558	-552	-544	-543	-522	-497	-491

ตารางที่ 4.5 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กที่ วางระยะ Zinc ห่าง 30 cm ที่แผ่นขนาด 50*50 mm

ค่าของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์									
ค่าของ R_p ที่วางระยะ 30 cm									
เวลา ขนาด	ระยะเวลา (สัปดาห์)								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
หนา 2cm f 5 cm	-513	-511	-510	-502	-501	-503	-490	-489	-475
หนา 1 cm f 5 cm	-524	-522	-497	-492	-489	-479	-477	-456	-451
หนา 2cm f 2.5 cm	-535	-530	-525	-521	-503	-500	-492	-489	-488
หนา 1cm f 2.5 cm	-536	-511	-503	-497	-488	-482	-477	-466	-456



ตารางที่ 4.6 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กที่ วางระยะ Zinc ห่าง 60 cm ที่แผ่นขนาด 70*70 mm

ค่าของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์									
ค่าของ R_p ที่วางระยะ 60 cm									
เวลา ขนาด	ระยะเวลา (สัปดาห์)								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
หนา 2cm f 5 cm	-538	-533	-530	-532	-552	-501	-497	-489	-482
หนา 1cm f 5 cm	-598	-523	-518	-510	-505	-501	-494	-499	-471
หนา 2cm f 2.5 cm	-539	-533	-501	-497	-488	-470	-473	-469	-464
หนา 1cm f 2.5 cm	-571	-532	-522	-523	-511	-502	-491	-482	-475

ตารางที่ 4.7 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กที่ วางระยะ Zinc ห่าง 45 cm ที่แผ่นขนาด 50*50 mm

ค่าของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์									
ค่าของ R_p ที่วางระยะ 45 cm									
เวลา ขนาด	ระยะเวลา (สัปดาห์)								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
หนา 2cm f 5 cm	-508	-504	-505	-500	-495	-486	-482	-472	-469
หนา 1 cm f 5 cm	-522	-521	-495	-490	-483	-472	-473	-460	-450
หนา 2cm f 2.5 cm	-529	-522	-500	-498	-488	-477	-473	-469	-464
หนา 1cm f 2.5 cm	-543	-509	-500	-497	-486	-463	-459	-450	-450



ตารางที่ 4.6 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กที่ วางระยะ Zinc ห่าง 80 cm ที่แผ่นขนาด 70*70 mm

ค่าของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์									
ค่าของ R_p ที่วางระยะ 80 cm									
เวลา ขนาด	ระยะเวลา (สัปดาห์)								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
หนา 2cm f 5 cm	-566	-549	-534	-499	-485	-482	-477	-472	-469
หนา 1cm f 5 cm	-590	-539	-512	-480	-471	-462	-452	-439	-420
หนา 2cm f 2.5 cm	-578	-499	-492	-487	-482	-468	-462	-458	-452
หนา 1cm f 2.5 cm	-582	-572	-534	-490	-472	-464	-455	-431	-427

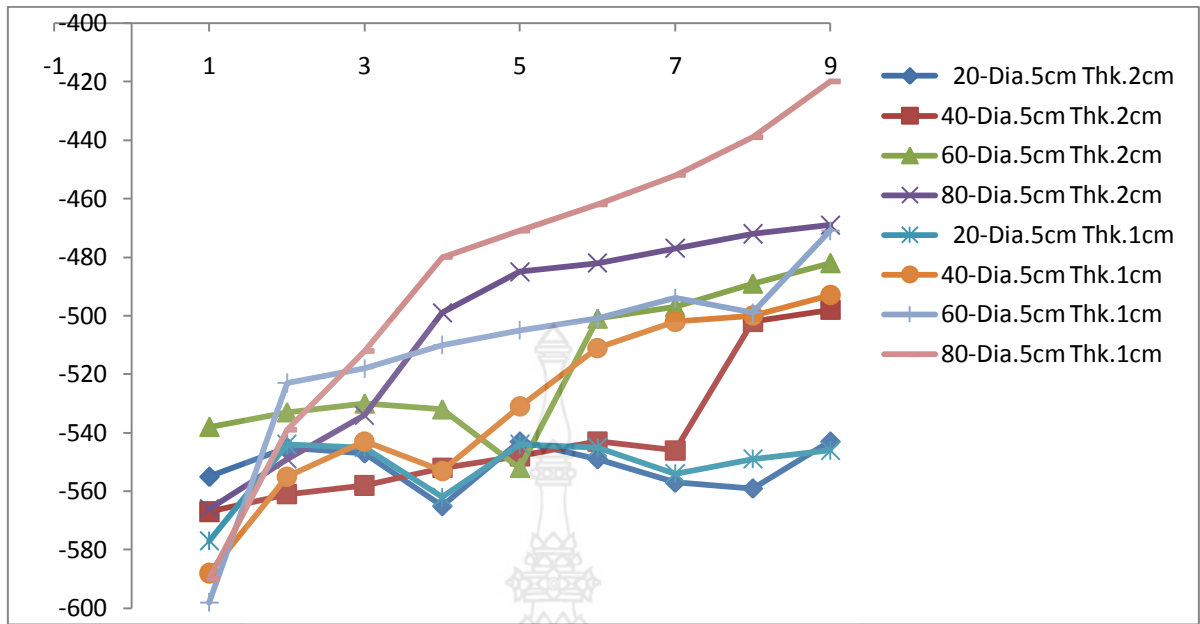
ตารางที่ 4.7 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กที่ วางระยะ Zinc ห่าง 60 cm ที่แผ่นขนาด 50*50 mm

ค่าของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์									
ค่าของ R_p ที่วางระยะ 60 cm									
เวลา ขนาด	ระยะเวลา (สัปดาห์)								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
หนา 2cm f 5 cm	-512	-510	-499	-495	-482	-480	-472	-471	-461
หนา 1 cm f 5 cm	-527	-500	-497	-482	-475	-468	-453	-444	-426
หนา 2cm f 2.5 cm	-522	-498	-491	-481	-482	-467	-455	-451	-450
หนา 1cm f 2.5 cm	-533	-500	-499	-486	-472	-463	-455	-450	-430

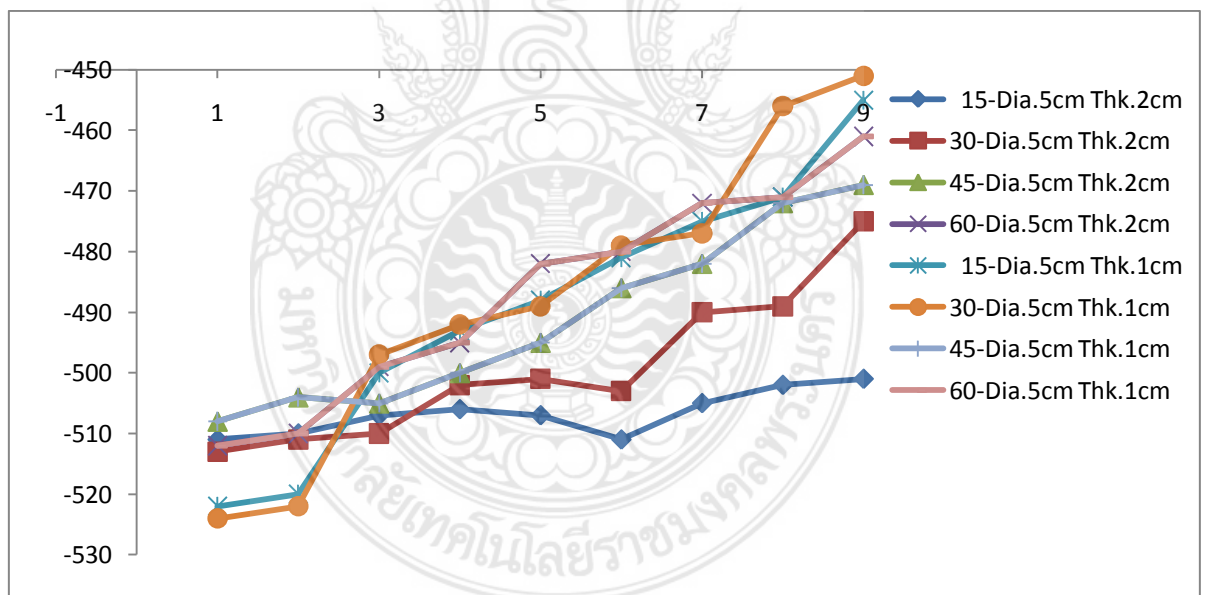


จากผลการทดสอบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในแผ่นคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่มีส่วนผสมคลอไรด์เป็นส่วนผสมที่ร้อยละ 5% ที่อายุของคอนกรีต 0 1 2 4 5 6 7 8 และ 9 สัปดาห์ตามลำดับ โดยทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่งเดียวกันทุกครั้ง พบว่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ทุกตัวอย่างที่วัดค่าได้มีค่าติดลบสูงมากกว่า - 350 mV ที่ระยะเวลาเริ่มตั้งแต่ 2 สัปดาห์ ทุกตัวอย่างมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันแสดงให้เห็นว่าเหล็กเสริมมีความน่าจะเป็นที่จะมีโอกาสเกิดสนิมสูงถึง 90% เมื่อระยะเวลาการบ่มของแผ่นของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นแนวโน้มของค่าศักย์ไฟฟ้าไม่แปรผันไปตามระยะเวลาและเมื่อพิจารณาถึงแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กที่เร่งการเกิดสนิมด้วยกระแสไฟฟ้ามีแนวโน้มการเกิดสนิมสูงกว่าตัวอย่างแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้เร่งด้วยกระแสไฟฟ้า เนื่องจากเหล็กเสริมที่เร่งด้วยกระแสไฟฟ้าสูญเสียอิเล็กตรอนมากกว่า และในกรณีของบริเวณตำแหน่งที่ทำการวัดค่าความต่างศักย์แตกต่างกันที่จุดตัดและตรงกลางของเหล็กเสริมให้ค่าความต่างศักย์ใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน

จากผลการทดสอบวัดค่าดังแสดงในรูปที่ 4.1 เมื่อเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมของตัวอย่างแผ่นคอนกรีตที่ไม่ได้เร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่มีส่วนผสมของคลอไรด์เมื่อวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของเหล็กเสริมพบว่า แผ่นคอนกรีตที่มีเปอร์เซ็นต์ของคลอไรด์ในส่วนผสมที่มีค่าสูงจะมีแนวโน้มของการเกิดสนิมสูงกว่าโดยไม่แปรผันไปตามเวลาทั้งนี้อาจเกิดเนื่องจากผลกระทบจากปัจจัยที่หลากหลายเช่นปริมาณความชื้นที่ไม่เพียงพอมีผลทำให้คอนกรีตมีความต้านทานสูงค่าความต่างศักย์จะต่ำ ความหนาของคอนกรีต ผิวของคอนกรีตมีความต้านทานสูงมีผลทำให้ค่าความต่างศักย์ตรงจุดนั้นมีค่าต่ำ บริเวณผิวโดยรอบเหล็กเสริมที่เกิดสนิมจะมีความต้านทานสูงจะมีผลกระทบต่อค่าความต่างศักย์ที่ทำการวัดค่าในขณะนั้น สาเหตุทั้งหมดดังที่กล่าวมานี้มีผลต่อการตัดสินใจในการประเมินการเสื่อมสภาพของโครงสร้าง



รูปที่ 4-1 ความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคอนกรีตขนาด 70*70*10 cm ที่เร่งการเกิดสนิมโดยวิธีการของ Half-Cell Potential



รูปที่ 4-2 ความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคอนกรีตขนาด 50*50*10 cm ที่เร่งการเกิดสนิมโดยวิธีการของ Half-Cell Potential

4.2 วัดค่าด้วยโพลาริเซชัน

หลักการของเทคนิคการวัดด้วยคลื่นสัญญาณไฟฟ้า คือเมื่อคลื่นส่งสัญญาณไปสู่เหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตสัญญาณคลื่นจะถูกเหี่ยวหน้าและส่งปริมาณสัญญาณค่าการสะท้อนออกมา ในรูปแบบความเข้มแสงที่มีต่อเหล็กเสริมในคอนกรีตกับช่วงระยะเวลาในการตอบสนอง ผู้วิจัยได้ทำการสเกลค่าจากพารามิเตอร์ทั้งสองแบบเพื่อให้เกิดค่าความสอดคล้องในรูปแบบของความต้านทานแบบโพลาไรซ์ และนำสัญญาณแปลงมาเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นด้วยหลักการของ LPR โดยที่ความต้านทานโพลาไรซ์เป็นวิธีการสำหรับใช้หาอัตราการเกิดสนิม (Corrosion rate) ของเหล็กเสริมสอดคล้องตามมาตรฐาน ASTM G-59 เป็นวิธีการหาค่ากระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิมเพื่อนำเอาไปคำนวณหาอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ซึ่งจากงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการของ Linear polarization resistance (LPR) เป็นหลักการของ Potential statically ทำได้โดยเพิ่มแรงดันไฟฟ้าแต่ในงานวิจัยนี้เป็นการเพิ่มสัญญาณความถี่ของคลื่นให้ได้ค่าเทียบเคียงกับค่าศักย์ไฟฟ้า (ΔE) เกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งแปรผันไปตามค่าของกระแสไฟฟ้า (ΔI) ซึ่งค่าเหล่านี้มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงระหว่างการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน (ΔE) และการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าต่อหน่วยที่ของขั้วไฟฟ้า (ΔI) ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่าง $\Delta E/\Delta I$ เรียกว่าความต้านทานโพลาไรซ์ (R_p) มีหน่วยเป็นโอห์มพื้นที่ (ohms.cm²)

การผลการทดสอบค่าที่คำนวณได้ของ การส่งคลื่นเพื่อ ค่าความต้านทานโพลาไรซ์เซชัน (R_p) เมื่อพิจารณาความต้านทานโพลาไรซ์ พิจารณาตัวอย่างคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่มีเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมของคลอไรด์เพิ่มมากขึ้นพบว่าค่าความต้านทานโพลาไรซ์มีแนวโน้มลดลงตามลำดับ ทั้งนี้ไม่แปรผันไปตามระยะเวลาที่ทำการทดสอบวัดค่า และเมื่อพิจารณาในกรณีใช้ คลื่นสัญญาณไฟฟ้า ตาม พบว่าให้ค่าความต้านทานโพลาไรซ์มีแนวโน้มสอดคล้องกันแต่ค่าความต้านทานโพลาไรซ์มีแนวโน้มให้ค่าที่ต่ำกว่า

ตารางที่ 4-10 ค่าความต้านทานโพลาไรซ์เซชัน (R_p) ของคอนกรีตเสริมเหล็กที่วางระยะ Zinc ห่าง 20 cm ที่แผ่นขนาด 70*70 mm

การใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม					
เวลา (สัปดาห์)	ค่าของ R_p ที่วางระยะ 20 cm				
	ปกติ	หน้า 1cm หน้าตัด 1'	หน้า 1cm หน้าตัด 2'	หน้า 2cm หน้าตัด 1'	หน้า 2 cm หน้าตัด 2'
0	-	5.31	4.91	5.31	4.82
1	-	2.32	3.43	3.77	4.43
2	-	2.11	2.74	2.99	4.74
3	-	1.98	2.77	2.98	5.57
4	-	1.87	2.33	2.43	2.43
5	-	1.57	2.13	2.31	2.54
6	-	1.55	2.08	1.99	2.21
7	-	1.43	1.99	1.85	2.11
8	-	1.22	1.32	1.5	1.91



ตารางที่ 4-11 ค่าความต้านทานโพลาไรซ์เซชัน (R_p) ของคอนกรีตเสริมเหล็กที่วางระยะ Zinc ห่าง 40 cm ที่แผ่นขนาด 70*70 mm

การใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม					
เวลา (สัปดาห์)	ค่าของ R_p ที่วางระยะ 40 cm				
	ปกติ	หน้า 1cm หน้าตัด 1'	หน้า 1cm หน้าตัด 2'	หน้า 2cm หน้าตัด 1'	หน้า 2 cm หน้าตัด 2'
0	-	23.32	34.21	29.32	31.1
1	-	3.12	12.13	15.32	14.6
2	-	2.14	8.12	10.13	13.1
3	-	2.09	7.33	9.12	12.52
4	-	1.89	3.12	4.22	9.12
5	-	1.77	2.01	2.32	2.03
6	-	1.53	1.89	1.76	2.01
7	-	1.46	1.77	1.77	2.03
8	-	1.19	1.22	1.31	1.88



ตารางที่ 4-12 ค่าความต้านทานโพลาไรซ์เซชัน (R_p) ของคอนกรีตเสริมเหล็กที่วางระยะ Zinc ห่าง 60 cm ที่แผ่นขนาด 70*70 mm

การใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม					
เวลา (สัปดาห์)	ค่าของ R_p ที่วางระยะ 60 cm				
	ปกติ	หน้า 1cm หน้าตัด 1'	หน้า 1cm หน้าตัด 2'	หน้า 2cm หน้าตัด 1'	หน้า 2 cm หน้าตัด 2'
0	-	29.73	41.58	33.84	38.57
1	-	11.21	32.14	17.12	25.06
2	-	2.18	6.12	5.89	25.57
3	-	1.99	3.12	3.33	9.02
4	-	1.87	2.11	2.82	6.79
5	-	1.69	1.78	1.73	4.29
6	-	1.59	1.55	1.45	4.09
7	-	1.22	1.43	1.34	4.09
8	-	1.18	1.21	1.32	3.01



ตารางที่ 4-13 ค่าความต้านทานโพลาไรซ์เซชัน (R_p) ของคอนกรีตเสริมเหล็กที่วางระยะ Zinc ห่าง 80 cm ที่แผ่นขนาด 70*70 mm

การใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม					
เวลา (สัปดาห์)	ค่าของ R_p ที่วางระยะ 80 cm				
	ปกติ	หน้า 1cm หน้าตัด 1'	หน้า 1cm หน้าตัด 2'	หน้า 2cm หน้าตัด 1'	หน้า 2 cm หน้าตัด 2'
0	-	24.55	45.42	34.43	42.85
1	-	9.12	22.13	12.12	34.5
2	-	2.02	7.2	3.22	16.21
3	-	1.88	2.42	2.11	9.03
4	-	1.53	2.13	1.94	7.52
5	-	1.45	1.93	1.83	3.21
6	-	1.39	1.81	1.44	3.79
7	-	1.22	1.23	1.11	3.21
8	-	1.11	1.31	1.12	3.11



ตารางที่ 4-14 ค่าความต้านทานโพลาไรซ์เซชัน (R_p) ของคอนกรีตเสริมเหล็กที่วางระยะ Zinc ห่าง 15 cm ที่แผ่นขนาด 50*50 mm

การใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม					
เวลา (สัปดาห์)	ค่าของ R_p ที่วางระยะ 15 cm				
	ปกติ	หน้า 1cm หน้าตัด 1'	หน้า 1cm หน้าตัด 2'	หน้า 2cm หน้าตัด 1'	หน้า 2 cm หน้าตัด 2'
0	-	4.98	4.92	4.12	4.22
1	-	2.44	3.52	3.12	4.35
2	-	2.31	2.45	2.78	4.67
3	-	1.82	2.21	2.74	3.44
4	-	1.74	2.11	2.23	2.12
5	-	1.64	1.94	2.21	2.32
6	-	1.55	1.92	1.83	2.12
7	-	1.44	1.93	1.73	2.04
8	-	1.34	1.89	1.53	1.94



ตารางที่ 4-15 ค่าความต้านทานโพลาไรซ์เซชัน (R_p) ของคอนกรีตเสริมเหล็กที่วางระยะ Zinc ห่าง 30 cm ที่แผ่นขนาด 50*50 mm

การใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม					
เวลา (สัปดาห์)	ค่าของ R_p ที่วางระยะ 30 cm				
	ปกติ	หน้า 1cm หน้าตัด 1'	หน้า 1cm หน้าตัด 2'	หน้า 2cm หน้าตัด 1'	หน้า 2 cm หน้าตัด 2'
0	-	22.13	30.12	21.86	28.32
1	-	2.89	10.12	13.21	15.23
2	-	2.11	7.12	8.12	12.11
3	-	2.04	7.21	7.32	11.98
4	-	1.99	2.13	3.22	8.99
5	-	1.88	1.92	2.39	1.96
6	-	1.56	1.93	1.82	1.94
7	-	1.44	1.56	1.72	1.92
8	-	1.22	1.32	1.25	1.83



ตารางที่ 4-16 ค่าความต้านทานโพลาไรซ์เซชัน (R_p) ของคอนกรีตเสริมเหล็กที่วางระยะ Zinc ห่าง 45 cm ที่แผ่นขนาด 50*50 mm

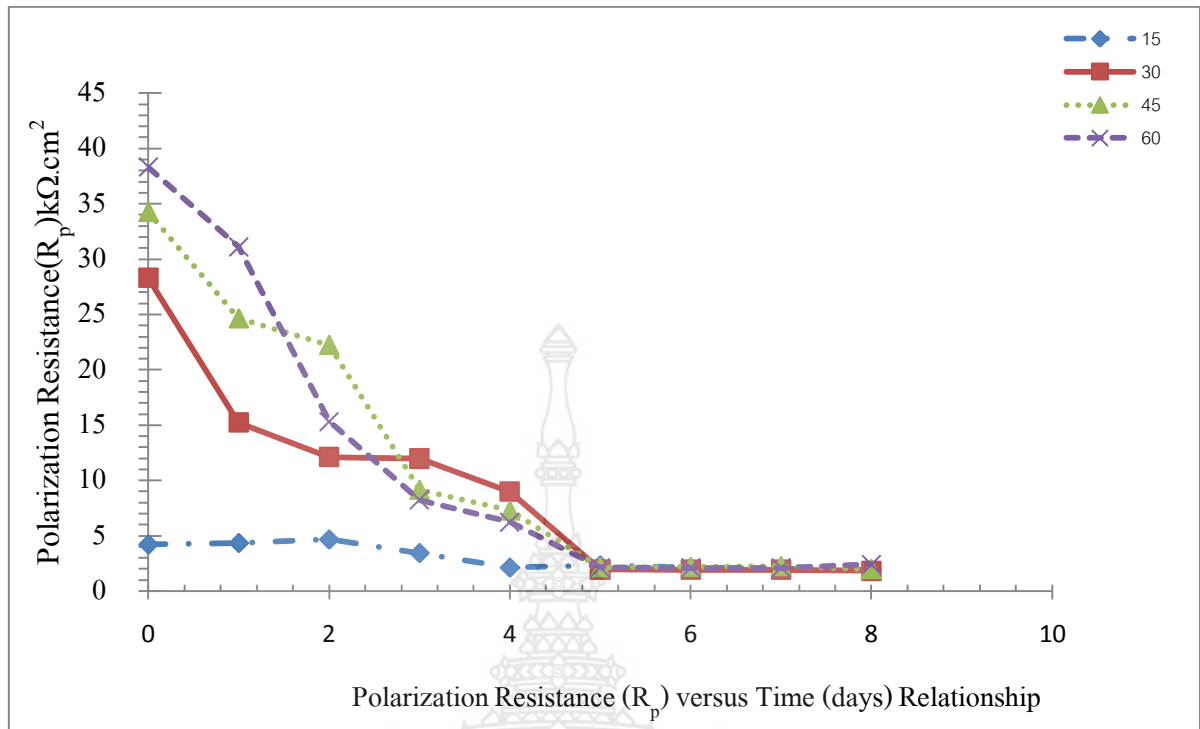
การใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม					
เวลา (สัปดาห์)	ค่าของ R_p ที่วางระยะ 45 cm				
	ปกติ	หน้า 1cm หน้าตัด 1'	หน้า 1cm หน้าตัด 2'	หน้า 2cm หน้าตัด 1'	หน้า 2 cm หน้าตัด 2'
0	-	20.12	35.47	31.42	34.26
1	-	2.01	31.21	16.23	24.64
2	-	1.94	5.21	4.37	22.24
3	-	1.92	2.85	3.12	9.15
4	-	1.85	2.01	2.59	7.27
5	-	1.56	1.75	1.82	2.15
6	-	1.48	1.45	1.44	2.19
7	-	1.27	1.43	1.42	2.25
8	-	1.23	1.23	1.41	1.98



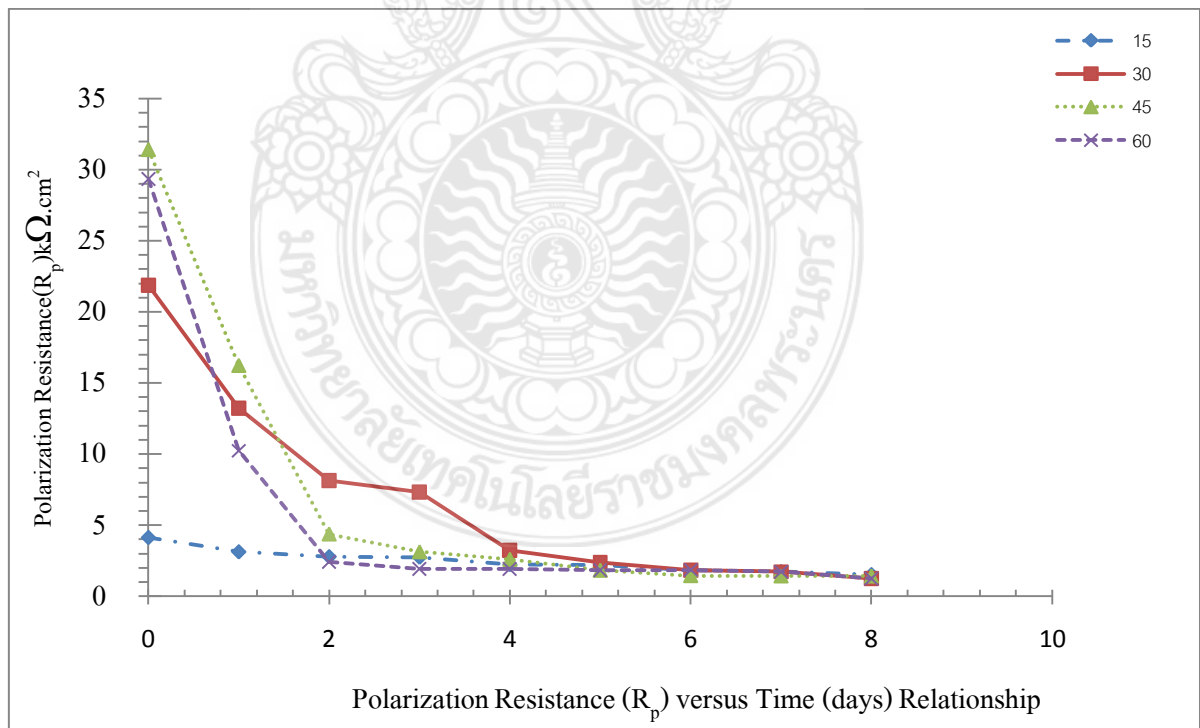
ตารางที่ 4-17 ค่าความต้านทานโพลาไรซ์เซชัน (R_p) ของคอนกรีตเสริมเหล็กที่วางระยะ Zinc ห่าง 60 cm ที่แผ่นขนาด 50*50 mm

การใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม					
เวลา (สัปดาห์)	ค่าของ R_p ที่วางระยะ 60 cm				
	ปกติ	หน้า 1cm หน้าตัด 1'	หน้า 1cm หน้าตัด 2'	หน้า 2cm หน้าตัด 1'	หน้า 2 cm หน้าตัด 2'
0	-	19.21	32.13	29.35	38.32
1	-	1.98	3.13	10.23	31.11
2	-	1.78	3.02	2.42	15.32
3	-	1.82	2.55	1.93	8.24
4	-	1.59	2.15	1.93	6.23
5	-	1.43	1.94	1.82	2.12
6	-	1.33	1.82	1.85	2.11
7	-	1.22	1.22	1.72	2.11
8	-	1.21	1.21	1.23	2.42

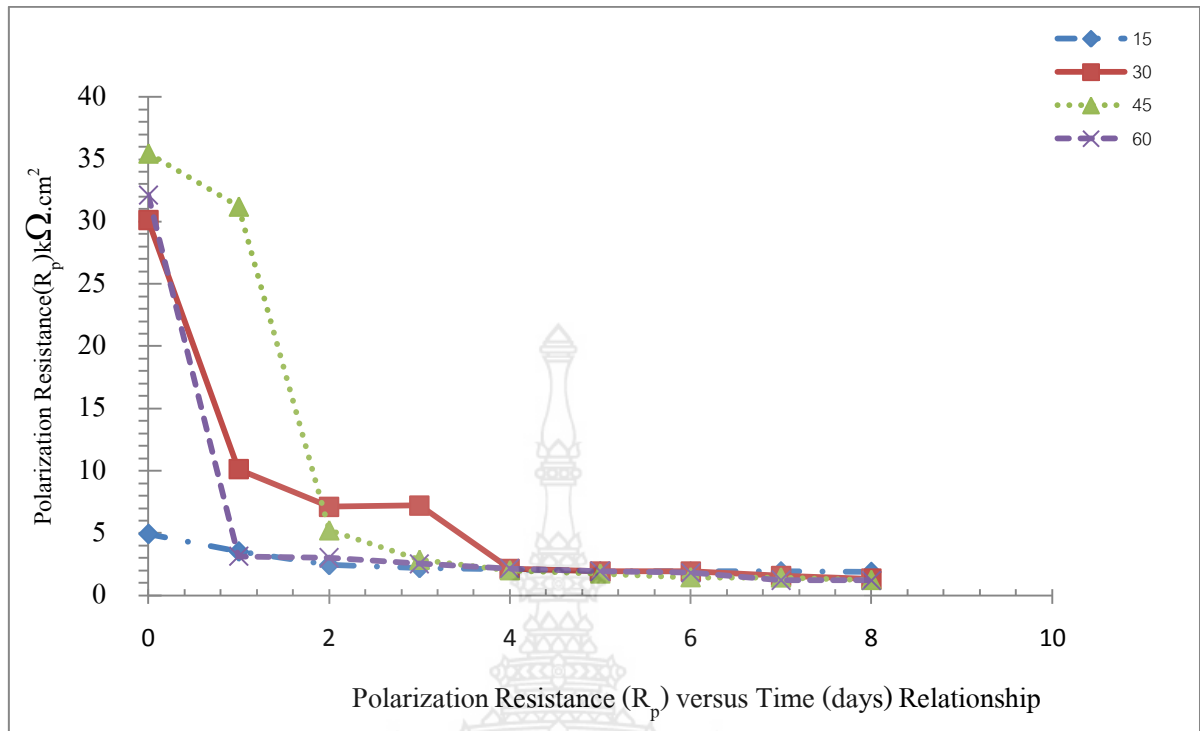




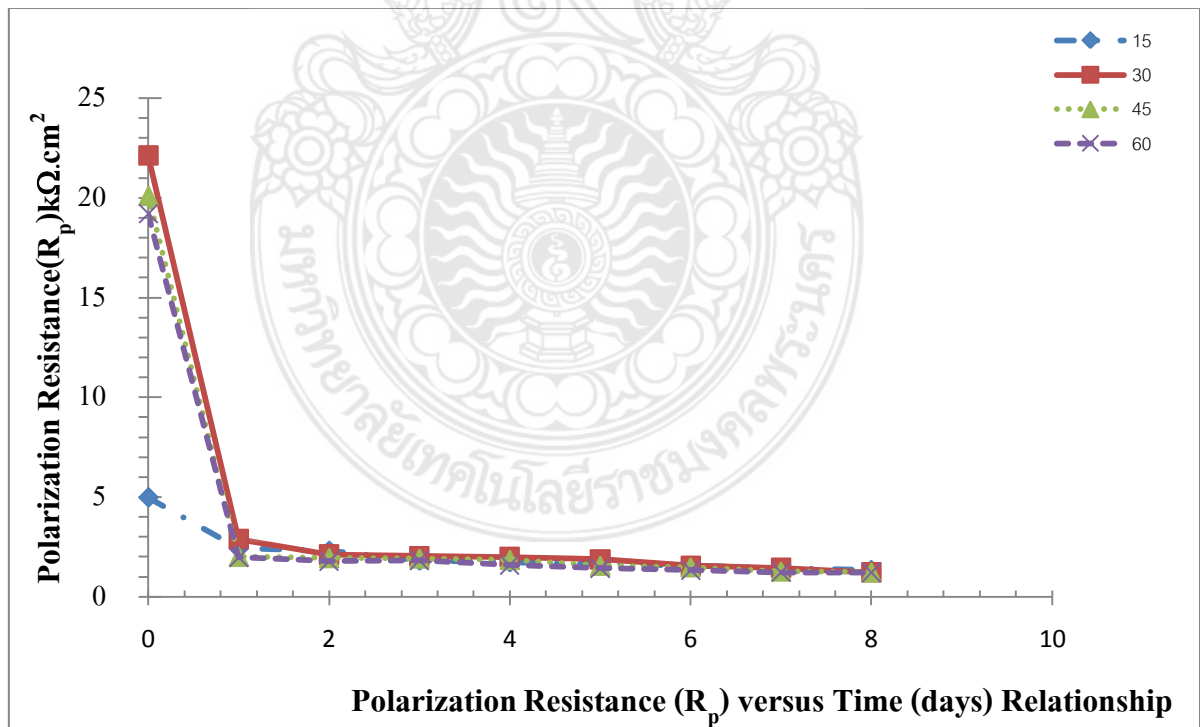
รูปที่ 4-3 ความสัมพันธ์ของความต้านทานโพลาไรเซชันการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคอนกรีตขนาด 70*70*10 cm ที่ทดสอบ Zinc ขนาดหนา 2 cm หนาตัด 1 นิ้ว



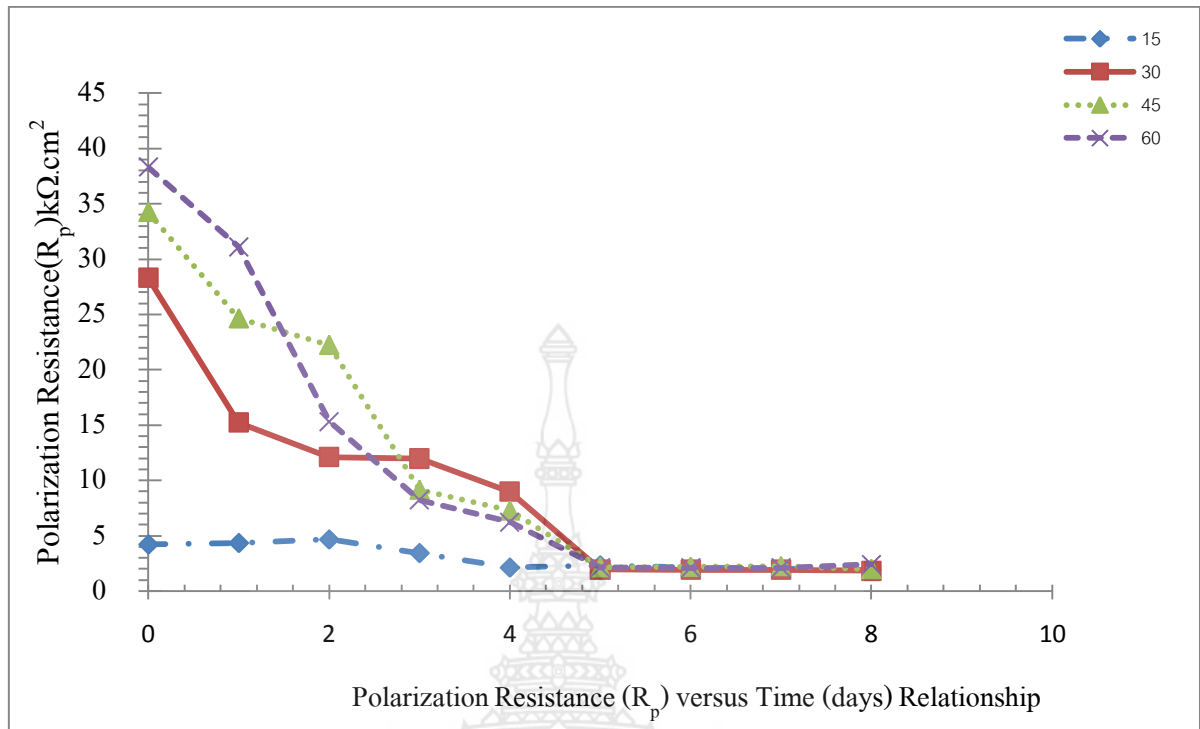
รูปที่ 4-4 ความสัมพันธ์ของความต้านทานโพลาไรเซชันการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคอนกรีตขนาด 70*70*10 cm ที่ทดสอบ Zinc ขนาดหนา 2 cm หนาตัด 2 นิ้ว



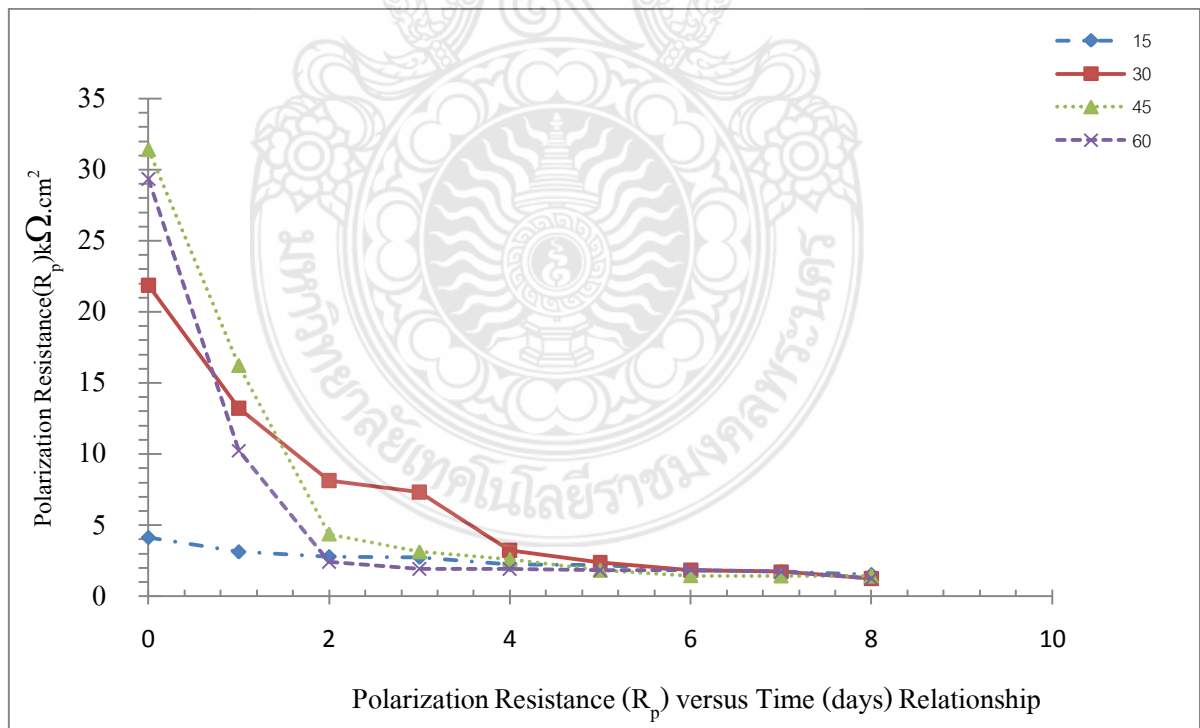
รูปที่ 4-5 ความสัมพันธ์ของความต้านทานโพลาไรเซชันการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคอนกรีตขนาด 70*70*10 cm ที่ทดสอบ Zinc ขนาด หน้า 1 cm หน้าตัด 2 นิ้ว



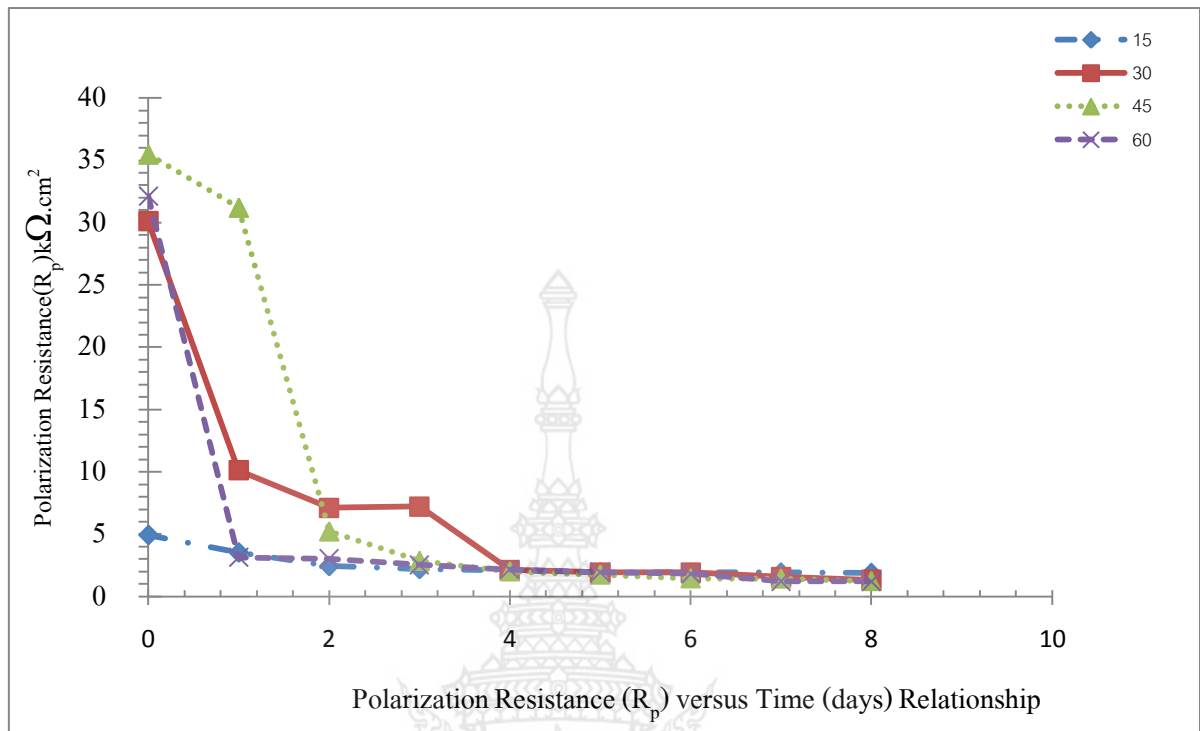
รูปที่ 4-6 ความสัมพันธ์ของความต้านทานโพลาไรเซชันการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคอนกรีตขนาด 70*70*10 cm ที่ทดสอบ Zinc ขนาด หน้า 1 cm หน้าตัด 1 นิ้ว



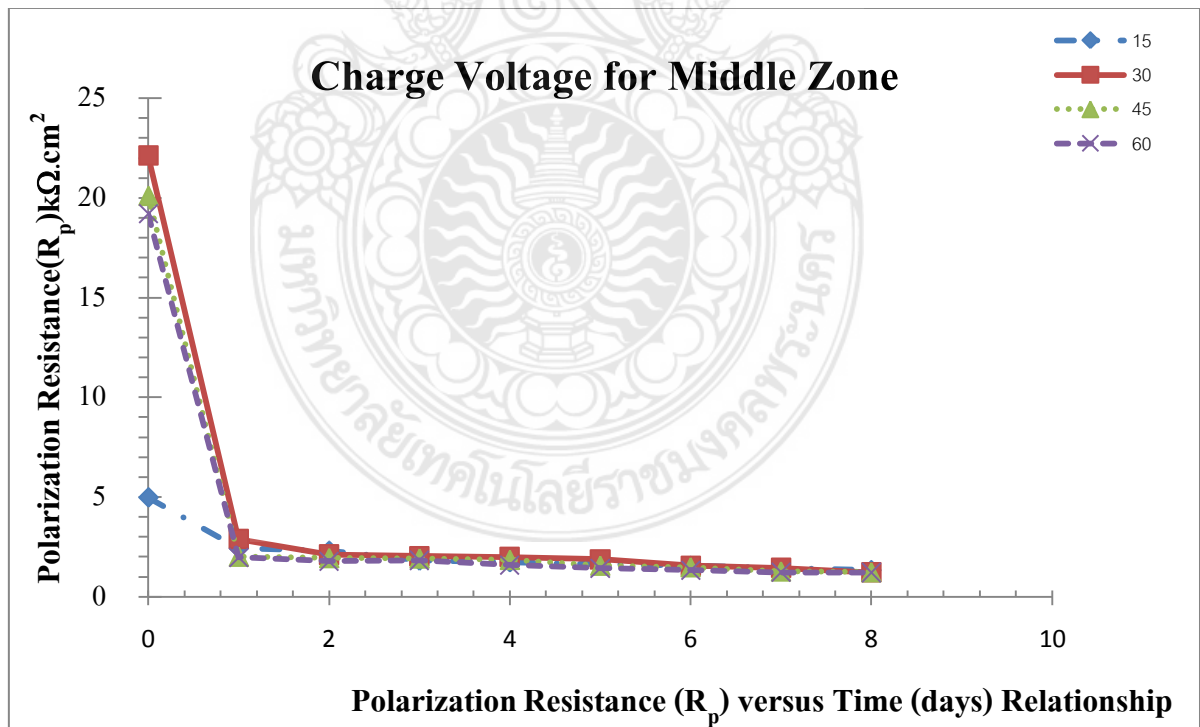
รูปที่ 4-7 ความสัมพันธ์ของความต้านทานโพลาไรเซชันการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคอนกรีตขนาด 50*50*10 cm ที่ทดสอบ Zinc ขนาดหนา 2 cm หนาตัด 2 นิ้ว



รูปที่ 4-8 ความสัมพันธ์ของความต้านทานโพลาไรเซชันการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคอนกรีตขนาด 50*50*10 cm ที่ทดสอบ Zinc ขนาดหนา 1 cm หนาตัด 2 นิ้ว



รูปที่ 4-9 ความสัมพันธ์ของความต้านทานโพลาไรเซชันเชิงการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคอนกรีตขนาด 50*50*10 cm ที่ทดสอบ Zinc ขนาด หน้า 2 cm หน้าตัด 1 นิ้ว



รูปที่ 4-10 ความสัมพันธ์ของความต้านทานโพลาไรเซชันเชิงการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคอนกรีตขนาด 50*50*10 cm ที่ทดสอบ Zinc ขนาด หน้า 2 cm หน้าตัด 1 นิ้ว

จากผลการทดสอบค่าอัตราการเกิดสนิมของแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล เป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์โดยนำค่าที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบกับค่าอัตราการเกิดสนิมตามตารางที่ 4-5 โดยมีเงื่อนไขขอบเขตการวิจัยของแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กถูกจำลองให้อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเลได้ถูกกำหนดให้มีส่วนผสมของปริมาณคลอไรด์ร้อยละ 15% ของน้ำหนักซีเมนต์ตามลำดับ

ตารางที่ 4-6 กระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม เปรียบเทียบภายใต้เงื่อนไขการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

อัตราการเกิดสนิม(I_{corr})	เงื่อนไขสถานะของเหล็กเสริม
$I_{corr} < 0.1 \mu A/cm^2$	สถานะยังไม่เกิดสนิม
$I_{corr} 0.1 - 0.5 \mu A/cm^2$	อัตราการเกิดสนิมต่ำถึงปานกลาง
$I_{corr} 0.5 - 1.0 \mu A/cm^2$	อัตราการเกิดสนิมปานกลางถึงสูง
$I_{corr} > 1.0 \mu A/cm^2$	อัตราการเกิดสนิมสูง

ที่มา : (C.Andrade, M.C.Alonso. et al,1990)

จากผลการทดสอบที่คำนวณหาค่าอัตราการเกิดสนิมของแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้เงื่อนไขตัวอย่างอยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเลโดยการแปรผันส่วนผสมของปริมาณคลอไรด์

ตารางที่ 4-18 ค่าอัตราการเกิดสนิม (i_{corr}) ของคอนกรีตเสริมเหล็กที่วางระยะ Zinc ห่าง 20 cm ที่แผ่นขนาด 70*70 mm

การใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม					
เวลา (สัปดาห์)	ค่า i_{corr} ($\mu A/cm^2$) ที่วางระยะ 20 cm				
	ปกติ	หน้า 1cm หน้าตัด 1'	หน้า 1cm หน้าตัด 2'	หน้า 2cm หน้าตัด 1'	หน้า 2 cm หน้าตัด 2'
0	-	0.44	0.39	0.35	0.44
1	-	8.23	0.41	0.36	0.56
2	-	9.11	0.69	0.59	0.66
3	-	9.99	0.98	0.99	0.86
4	-	10.31	1.87	1.54	1.28
5	-	11.53	2.13	1.89	1.56
6	-	12.22	3.42	3.63	1.76
7	-	12.53	4.43	4.44	2.88
8	-	13.04	4.94	5.02	3.84



ตารางที่ 4-19 ค่าอัตราการเกิดสนิม (i_{corr}) ของคอนกรีตเสริมเหล็กที่วางระยะ Zinc ห่าง 40 cm ที่แผ่นขนาด 70*70 mm

การใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม					
เวลา (สัปดาห์)	ค่า i_{corr} ($\mu A/cm^2$) ที่วางระยะ 40 cm				
	ปกติ	หน้า 1cm หน้าตัด 1'	หน้า 1cm หน้าตัด 2'	หน้า 2cm หน้าตัด 1'	หน้า 2 cm หน้าตัด 2'
0	-	0.52	0.49	0.43	0.45
1	-	9.12	0.67	0.54	0.53
2	-	9.63	0.98	0.68	0.75
3	-	10.02	1.95	1.73	1.35
4	-	11.21	2.77	3.11	1.28
5	-	11.95	5.31	6.02	3.56
6	-	13.04	7.24	7.53	3.74
7	-	13.55	7.42	7.22	3.91
8	-	13.97	8.11	7.97	4.34



ตารางที่ 4-20 ค่าอัตราการเกิดสนิม (i_{corr}) ของคอนกรีตเสริมเหล็กที่วางระยะ Zinc ห่าง 60 cm ที่แผ่นขนาด 70*70 mm

การใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม					
เวลา (สัปดาห์)	ค่า i_{corr} ($\mu A/cm^2$) ที่วางระยะ 60 cm				
	ปกติ	หน้า 1cm หน้าตัด 1'	หน้า 1cm หน้าตัด 2'	หน้า 2cm หน้าตัด 1'	หน้า 2 cm หน้าตัด 2'
0	-	0.54	0.52	0.48	0.42
1	-	9.12	0.63	0.77	0.48
2	-	12.03	1.4	1.75	1.75
3	-	13.34	3.35	4.02	1.44
4	-	14.02	5.63	7.12	2.13
5	-	14.32	7.22	7.77	2.16
6	-	14.24	8.52	8.99	2.56
7	-	14.54	9.01	9.12	3.21
8	-	15.34	9.15	10.22	6.12



ตารางที่ 4-21 ค่าอัตราการเกิดสนิม (i_{corr}) ของคอนกรีตเสริมเหล็กที่วางระยะ Zinc ห่าง 80 cm ที่แผ่นขนาด 70*70 mm

การใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม					
เวลา (สัปดาห์)	ค่า i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) ที่วางระยะ 80 cm				
	ปกติ	หน้า 1cm หน้าตัด 1'	หน้า 1cm หน้าตัด 2'	หน้า 2cm หน้าตัด 1'	หน้า 2 cm หน้าตัด 2'
0	-	0.54	0.66	0.63	0.64
1	-	11.32	5.32	3.12	2.15
2	-	12.44	7.24	8.11	3.28
3	-	14.88	8.32	9.64	6.11
4	-	14.98	9.42	10.21	8.94
5	-	15.04	9.55	10.57	9.55
6	-	15.28	9.97	11.01	11.99
7	-	15.88	12.42	12.03	13.12
8	-	15.98	14.04	13.02	13.02



ตารางที่ 4-22 ค่าอัตราการเกิดสนิม (i_{corr}) ของคอนกรีตเสริมเหล็กที่วางระยะ Zinc ห่าง 15 cm ที่แผ่นขนาด 50*50 mm

การใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม					
เวลา (สัปดาห์)	ค่า i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) ที่วางระยะ 15 cm				
	ปกติ	หนา 1cm หน้าตัด 1'	หนา 1cm หน้าตัด 2'	หนา 2cm หน้าตัด 1'	หนา 2 cm หน้าตัด 2'
0	-	0.49	0.41	0.37	0.32
1	-	9.23	0.53	0.43	0.45
2	-	9.45	0.72	0.43	0.55
3	-	10.73	1.01	0.89	0.76
4	-	11.19	1.52	1.23	1.17
5	-	11.63	2.83	1.75	1.46
6	-	13.21	4.21	3.42	1.63
7	-	14.43	4.98	4.52	2.15
8	-	14.02	5.09	4.82	2.89



ตารางที่ 4-23 ค่าอัตราการเกิดสนิม (i_{corr}) ของคอนกรีตเสริมเหล็กที่วางระยะ Zinc ห่าง 30 cm ที่แผ่นขนาด 50*50 mm

การใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม					
เวลา (สัปดาห์)	ค่า i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) ที่วางระยะ 30 cm				
	ปกติ	หน้า 1cm หน้าตัด 1'	หน้า 1cm หน้าตัด 2'	หน้า 2cm หน้าตัด 1'	หน้า 2 cm หน้าตัด 2'
0	-	0.49	0.53	0.43	0.34
1	-	10.21	0.69	0.64	0.43
2	-	10.35	1.27	0.74	0.64
3	-	10.78	2.93	1.84	1.27
4	-	11.32	3.32	4.85	1.29
5	-	11.99	6.12	6.84	2.98
6	-	13.97	8.32	8.15	3.12
7	-	14.98	8.55	9.12	3.64
8	-	15.03	8.98	9.99	3.99



ตารางที่ 4-24 ค่าอัตราการเกิดสนิม (i_{corr}) ของคอนกรีตเสริมเหล็กที่วางระยะ Zinc ห่าง 45 cm ที่แผ่นขนาด 50*50 mm

การใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม					
เวลา (สัปดาห์)	ค่า i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) ที่วางระยะ 45 cm				
	ปกติ	หน้า 1cm หน้าตัด 1'	หน้า 1cm หน้าตัด 2'	หน้า 2cm หน้าตัด 1'	หน้า 2 cm หน้าตัด 2'
0	-	0.51	0.55	0.43	0.35
1	-	10.32	0.72	0.84	0.39
2	-	10.87	1.35	1.77	1.34
3	-	14.32	4.32	5.02	1.37
4	-	14.99	7.12	8.21	1.97
5	-	15.03	8.23	7.98	2.11
6	-	15.66	8.98	9.03	2.22
7	-	15.89	9.64	10.11	2.99
8	-	15.92	9.99	10.23	3.36



ตารางที่ 4-25 ค่าอัตราการเกิดสนิม (i_{corr}) ของคอนกรีตเสริมเหล็กที่วางระยะ Zinc ห่าง 60 cm ที่แผ่นขนาด 50*50 mm

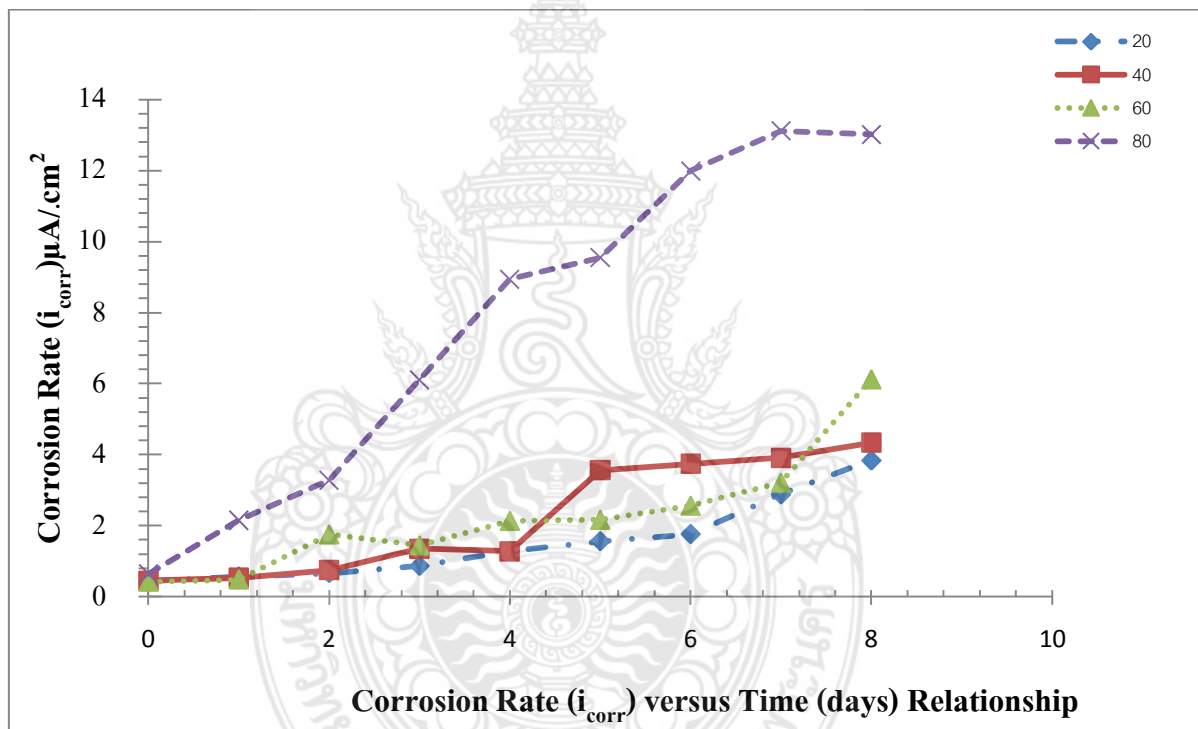
การใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม					
เวลา (สัปดาห์)	ค่า i_{corr} ($\mu A/cm^2$) ที่วางระยะ 60 cm				
	ปกติ	หน้า 1cm หน้าตัด 1'	หน้า 1cm หน้าตัด 2'	หน้า 2cm หน้าตัด 1'	หน้า 2 cm หน้าตัด 2'
0	-	0.52	0.64	0.56	0.41
1	-	10.77	6.34	3.32	1.94
2	-	10.54	8.13	9.12	3.02
3	-	14.99	9.02	9.21	5.89
4	-	15.03	9.34	12.75	7.34
5	-	15.04	10.42	12.99	9.33
6	-	15.48	10.98	12.98	12.12
7	-	15.75	13.89	13.02	13.21
8	-	15.91	15.22	13.01	13.53

ผลการทดสอบวัดค่าจากตัวอย่างแผ่นคอนกรีตเสริม จากตัวอย่างที่สภาวะแตกต่างกันและคำนวณได้ ค่าอัตราการการเกิดสนิมของเหล็กเสริมพบว่าค่าอัตราการเกิดสนิมมีแนวโน้มสอดคล้องกับค่าของความต้านทานโพลาไรท์เซชัน ที่ได้มาจากการวัดด้วยคลื่นสัญญาณไฟฟ้า และจากความสัมพันธ์ระหว่างสภาพสิ่งแวดล้อมของตัวอย่างที่มีความ

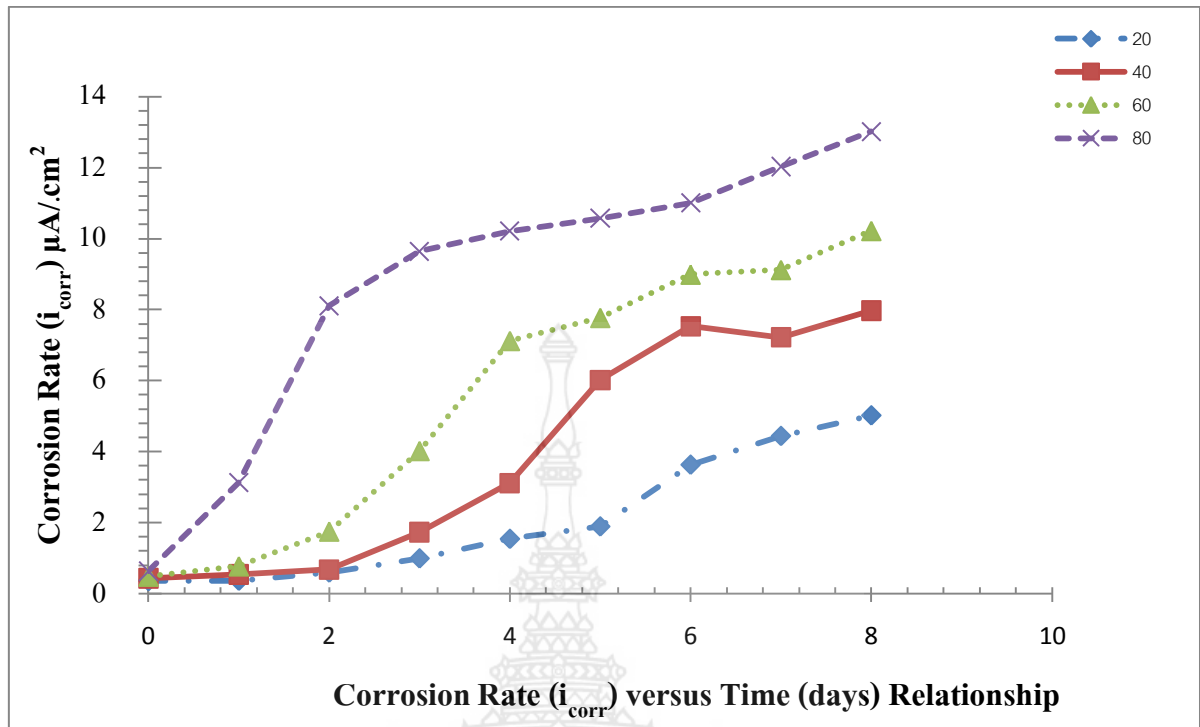
อย่างไรก็ตามค่าอัตราการเกิดสนิมที่คำนวณได้มีค่าไม่สม่ำเสมอเนื่องจากปัจจัยที่หลากหลายดังเช่น สภาพแวดล้อมในขณะทดสอบจะมีผลต่อการบันทึกค่าเช่น ปริมาณความชื้นในคอนกรีต อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจน และเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าเช่น เครื่องที่ใช้วัดค่าต้องมีความละเอียดสูง และการใช้คลื่นสามารถแก้ปัญหาได้ดีกว่าการส่งสัญญาณแรงดันและกระแสแบบตรงเข้าสู่คอนกรีตเสริมเหล็กเพราะว่าค่าความ



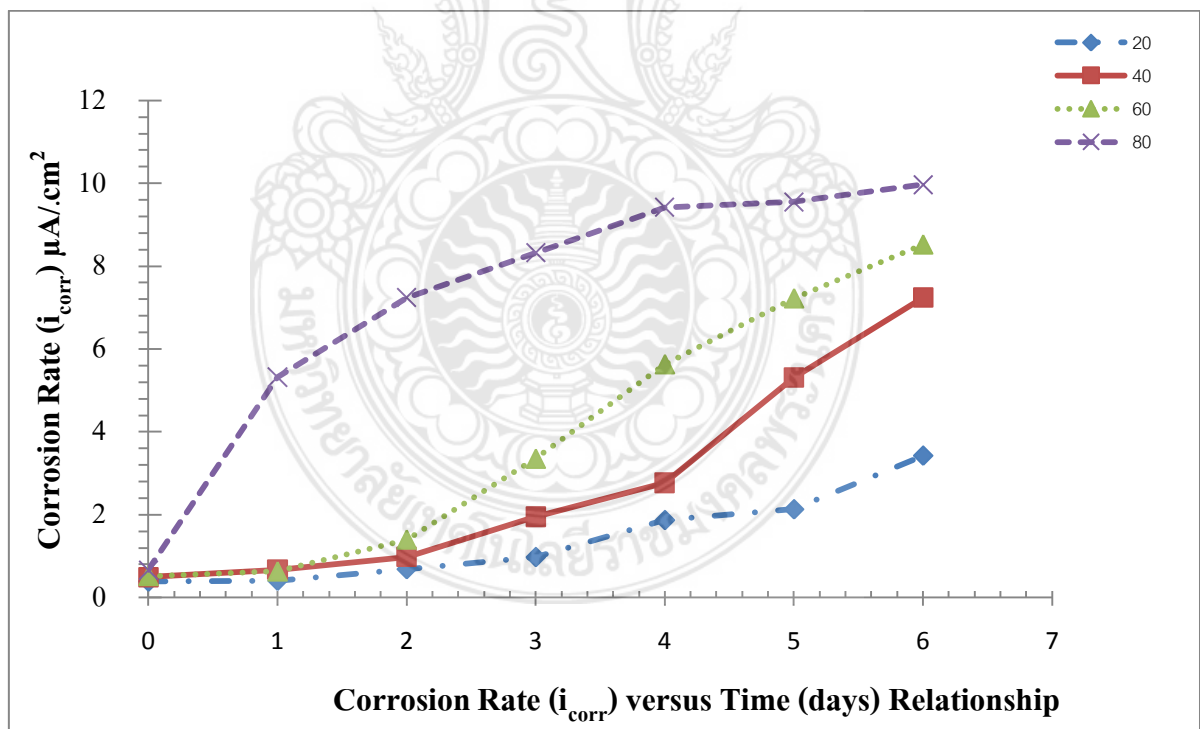
ด้านทานของคอนกรีตและเหล็กเสริมมีค่าต่ำมากการวัดค่าแต่ละครั้งต้องวัดที่เดียวทั้งระบบซึ่งมีความยุ่งยากซับซ้อนโดยเฉพาะอย่างยิ่งอุปกรณ์ที่ใช้เป็นสื่อ Probe เพื่อส่งสัญญาณผ่านคอนกรีต ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่าการไหลของกระแสไฟฟ้าจากขั้วไฟฟ้าไปยังผิวเหล็กเสริมซึ่งเป็นการส่งสัญญาณในลักษณะที่ไม่มีการจำกัดขอบเขตของกระแสไฟฟ้าให้อยู่ภายใต้ขั้วไฟฟ้าส่งผลให้กระแสไฟฟ้าแพร่กระจายเกินออกไปทางด้านข้างซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ทราบโดยเฉพาะเหล็กเสริมที่มีที่ขนาดกว้างมาก (S. Feliu, J.A. Gonzalez, C. Andrade., et al., 1988) เป็นเหตุให้ได้ผลลัพธ์ที่ไม่ถูกต้องเพราะว่าพื้นผิวของเหล็กเสริมบริเวณที่โพลาร์ไลต์ (Polarized) ไม่ถูกต้องซึ่งทำให้การคำนวณค่าความหนาแน่นเกิดการผิดพลาดการใช้คลื่นสัญญาณในการวัดในครั้งนี้ ปัจจัยที่หลากหลายดังเช่นสภาพแวดล้อมในขณะทดสอบจะมีผลต่อการบันทึกค่าได้น้อยลง และสามารถวัดค่าได้อย่างสอดคล้องและถูกต้องตามหลักการยิ่งขึ้น



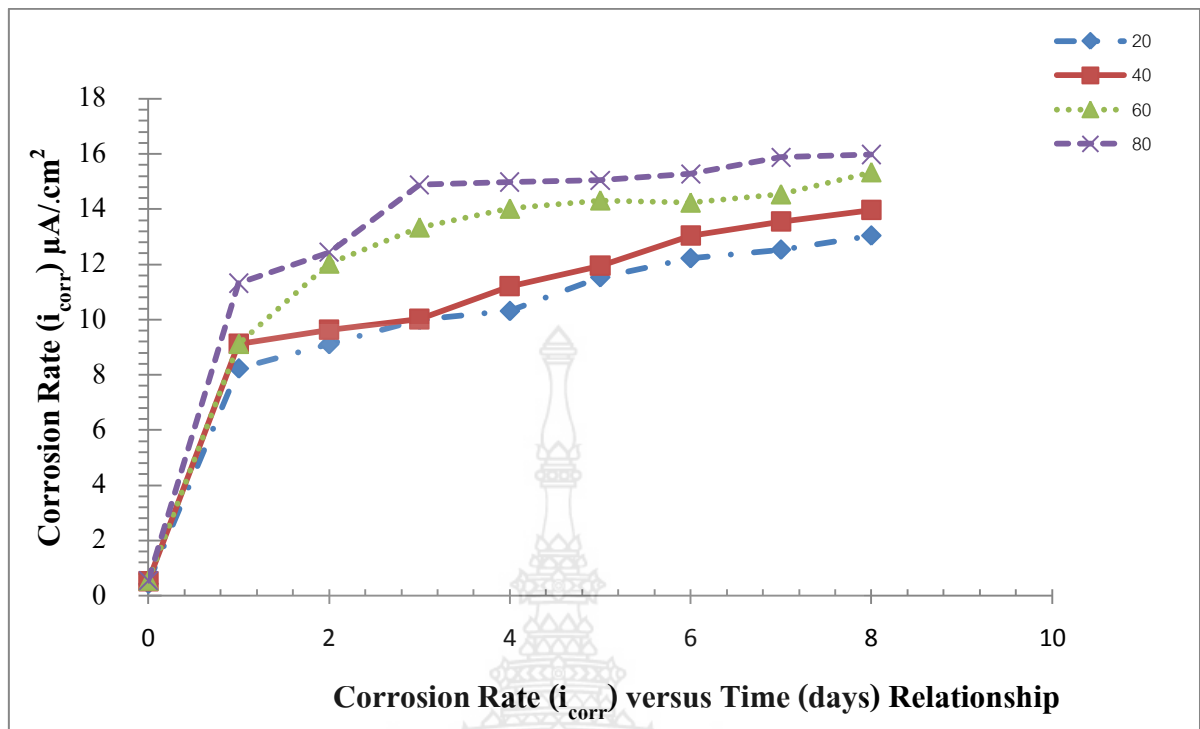
รูปที่ 4-11 ความสัมพันธ์ของกระแสการกัดกร่อนโพลาร์ไลต์เซชันการกัดสนิมของเหล็กในแผ่นคอนกรีตขนาด 70*70*10 cm ที่ทดสอบ Zinc ขนาด หน้า 2 cm หน้าตัด 2 นิ้ว



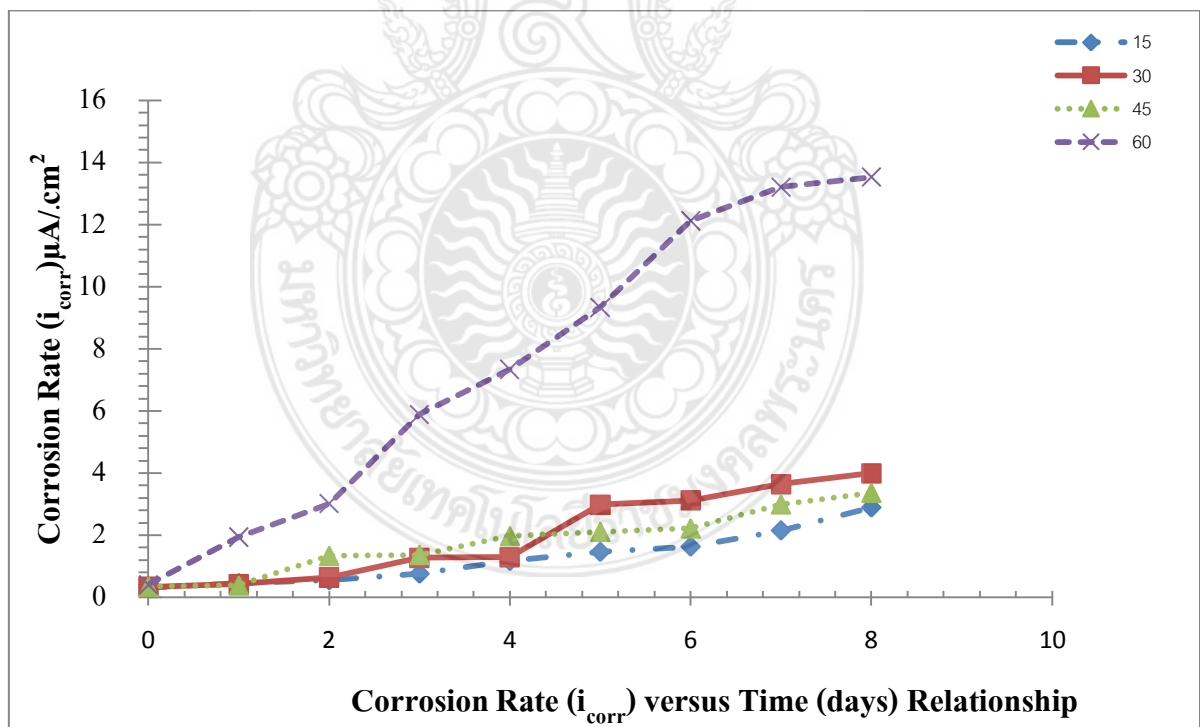
รูปที่ 4-12 ความสัมพันธ์ของกระแสการกัดกร่อนโพลีเอทิลีนเซชันการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคอนกรีตขนาด 70*70*10 cm ที่ทดสอบ Zinc ขนาดหนา 1 cm หน้าตัด 2 นิ้ว



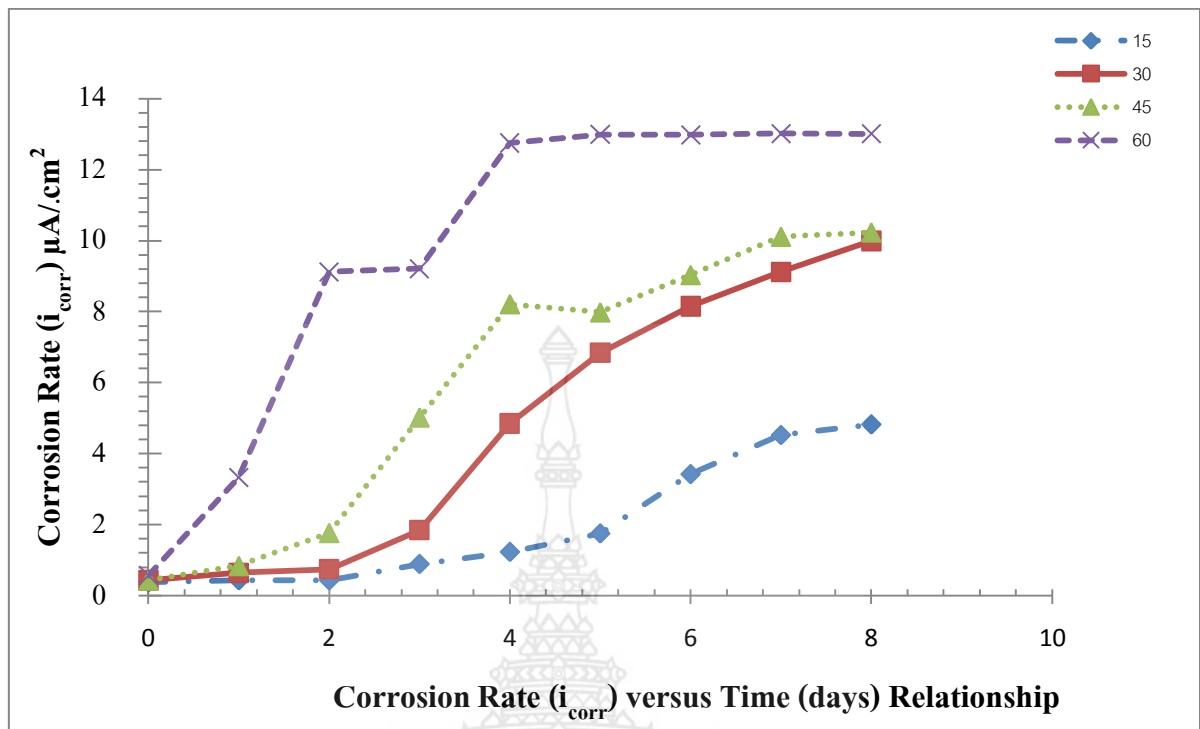
รูปที่ 4-13 ความสัมพันธ์ของกระแสการกัดกร่อนโพลีเอทิลีนเซชันการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคอนกรีตขนาด 70*70*10 cm ที่ทดสอบ Zinc ขนาดหนา 2 cm หน้าตัด 1 นิ้ว



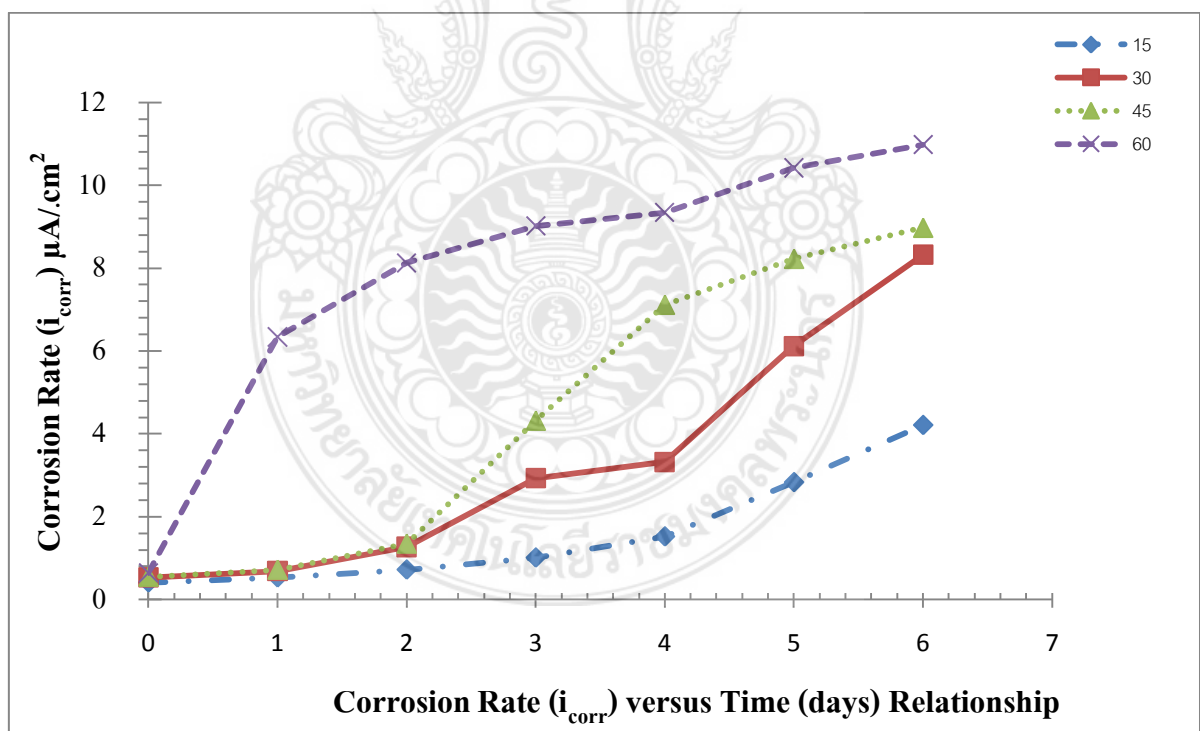
รูปที่ 4-14 ความสัมพันธ์ของกระแสการกัดกร่อนโพลีเอทิลีนเซชันการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคอนกรีต ขนาด 70*70*10 cm ที่ทดสอบ Zinc ขนาด หน้า 1 cm หน้าตัด 1 นิ้ว



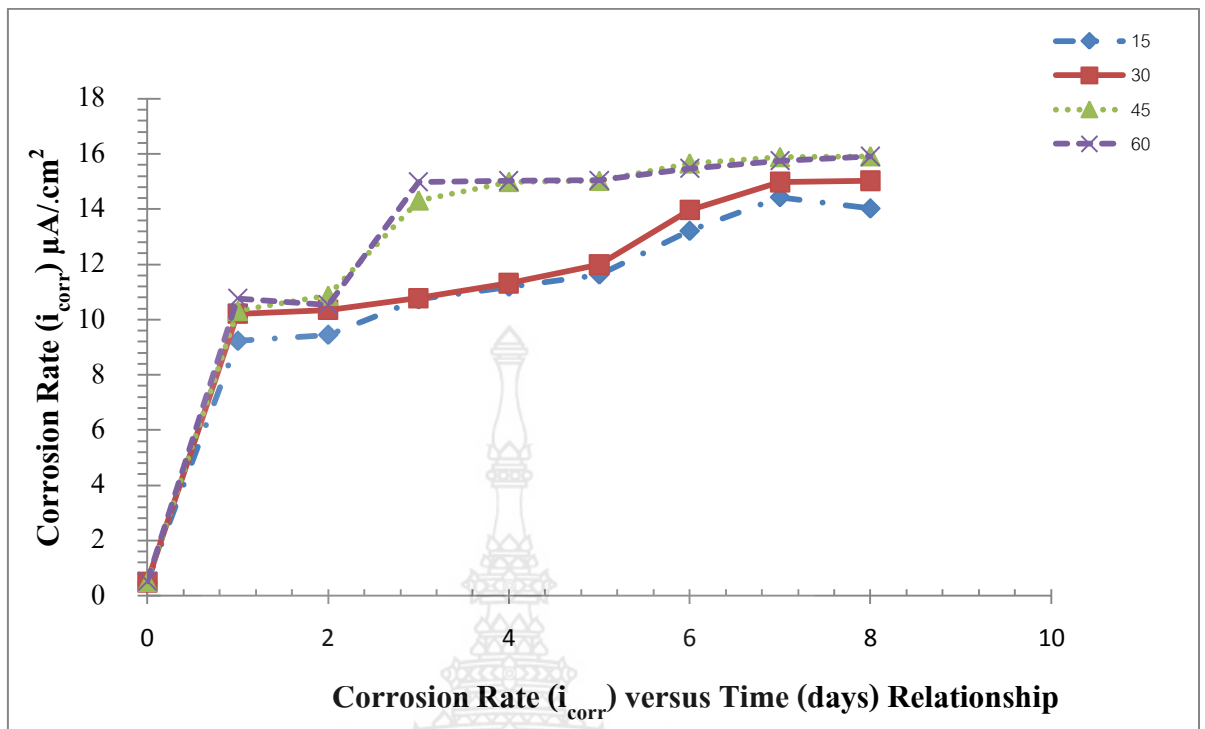
รูปที่ 4-15 ความสัมพันธ์ของกระแสการกัดกร่อนโพลีเอทิลีนเซชันการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคอนกรีต ขนาด 50*50*10 cm ที่ทดสอบ Zinc ขนาด หน้า 2 cm หน้าตัด 2 นิ้ว



รูปที่ 4-16 ความสัมพันธ์ของกระแสการกัดกร่อนโพลีเอทิลีนเซชันการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคอนกรีต ขนาด 50*50*10 cm ที่ทดสอบ Zinc ขนาด หน้า 1 cm หน้าตัด 2 นิ้ว



รูปที่ 4-17 ความสัมพันธ์ของกระแสการกัดกร่อนโพลีเอทิลีนเซชันการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคอนกรีต ขนาด 50*50*10 cm ที่ทดสอบ Zinc ขนาด หน้า 2 cm หน้าตัด 1 นิ้ว



รูปที่ 4-18 ความสัมพันธ์ของกระแสการกัดกร่อนโพลาร์ไลน์เซชันการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคอนกรีต ขนาด 50*50*10 cm ที่ทดสอบ Zinc ขนาด หุนา 1 cm หน้าตัด 1 นิ้ว

บทที่ 5 บทสรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาหาอิทธิพลของระบบการป้องกันการเกิดสนิมต่อระดับคลอไรด์ในคอนกรีต โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบ Zinc Anode 4 ขนาดและต่อเข้าโดยตรงกับโครงสร้างเหล็กในคอนกรีตเสริมเหล็ก จากการทดสอบและศึกษาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในแผ่นคอนกรีตที่อยู่ในสภาพการจำลองสิ่งแวดล้อมทะเล โดยการวิจัยในครั้งนี้ได้ออกแบบแท่งคอนกรีตเสริมเหล็ก 2 ขนาดและออกแบบให้วาง Zinc Anode ห่างกัน 4 ระยะ คือ $70 \times 70 \times 10$ โดยแบ่งระยะเป็น 20, 40, 60, 80 และ $50 \times 50 \times 10$ โดยแบ่งระยะเป็น 15, 30, 45, 60 ตามลำดับ ส่วนเครื่องมือและอุปกรณ์ในการตรวจสอบและวัดค่า แบบ Half-Cell Potential และได้เปรียบเทียบกับวิธีการใช้ LPR เพื่อหาค่าความต้านทานโพลาไลต์เซชัน (R_p) และค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริม (i_{corr}) สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

จากผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตตัวอย่างที่มีการติดตั้ง Zinc Anode ต้นแบบที่ติดตั้งสามารถป้องกันการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตได้ดี ส่วนขนาดและปริมาณก่อน Zinc Anode ที่ใหญ่กว่าสามารถป้องกันการเกิดสนิมได้มากและนานกว่า ส่วนระยะการวาง Zinc Anode นั้น ก็แปรผกผันกับ โอกาสเกิดที่เหล็กเสริมเกิดสนิมน้อยกว่าโครงสร้างคอนกรีต อย่างไรก็ตามค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสามารถบอกความเป็นไปได้ของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมแต่ไม่ได้บอกสถานะในปัจจุบันว่ามีสนิมมากน้อยเพียงใดค่าที่วัดได้เป็นค่าที่สรุปในลักษณะแนวโน้มของการเกิดสนิม ซึ่งอาจเป็นค่าของการเกิดสนิมที่ไม่แท้จริง เนื่องจากอาจมีผลกระทบต่อปัจจัยที่หลากหลาย เช่นสภาพความชื้นของคอนกรีตในขณะการทดสอบต้องควบคุมอย่างประณีตให้มีความสม่ำเสมอ และผิวของโครงสร้างคอนกรีตและความหนาของคอนกรีตที่มีความต้านทานสูงจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวคอนกรีตต่ำซึ่งมีผลทำให้การประเมินแนวโน้มของการเกิดสนิมมีความผิดพลาด



บรรณานุกรม

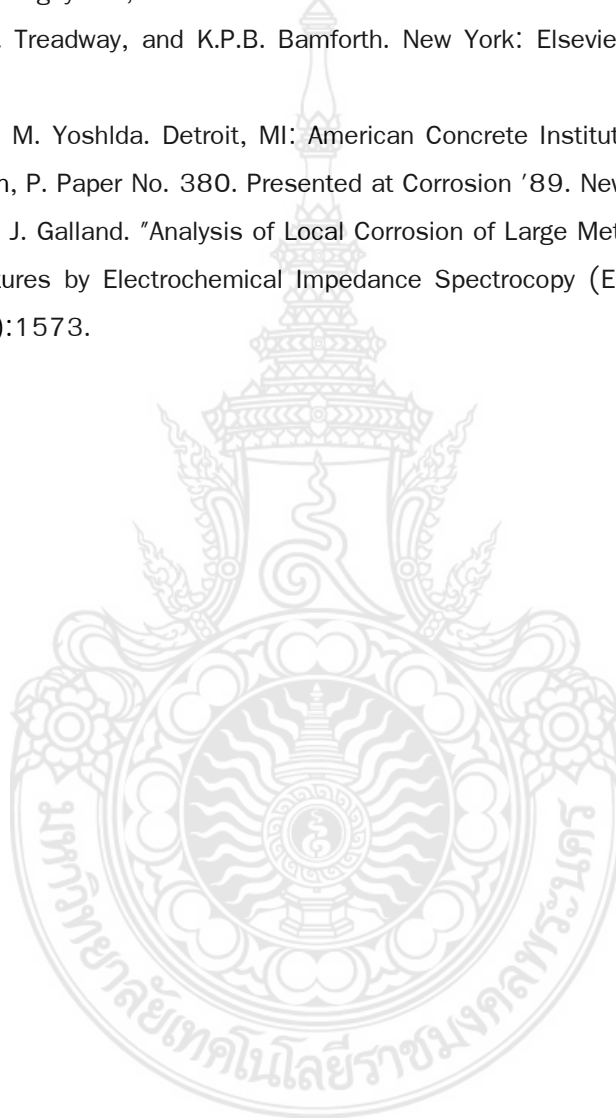
1. วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ “โยธาสาร วิศวกรรมสารแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์” ปีที่ 22 ฉบับที่ 4 กค.-สค. 2553
2. Andrade, C. and J.A. Gaonzalez. "Quantitative Measurements of Corrosion Rates of Reinforcing Steels
3. Andrade, C., V. Castelo, C. Alonso, and Y. Gonzalez. ASTM STP 906. philadelphia, PA: ASTM, 1984, pp. 43-63.
4. Borgard, B., C. Warren, S. Somayaji, and R. Heidersbach. Corrosion Rates of Steel in Concrete. ASTM STP 1065.
5. Broomfield, J. P. "The Determination of Rates of Highway Bridge Deterioration. Rehabilitation and Life Cycle Costing Under the Strategic Highway Resea_h Program."
6. Babskow, A. "Some Achievements in the Field of Logging and Processing the Focused Resistivity Logs." Revie Roumaine de Geologie Geophysique et Geographie 25 (1981): 115.
7. Berke, N.S., D.F. Shen, and K.M. Sundberg. Corrosion Rates of Steel in Concrete. ASTM STP 1065. Edited by N.S. Berke, V. Chaker, and D. Whiting. Philadelphia, PA: ASTM, 1990, pp. 38
8. C.Andrade, M.C.Alonso, J.A.Gonzalez, An initial effort to use corrosion rate measurements for estimating rebar durability corrosion rates of steel in concrete, *ASTM STP 1065*, N.S.Berke et al. editors. ASTM, Philadelphia 1990. 29-37.
9. Cady, P.D. Chloride Corrosion of Steel in Concrete. ASTM STP 629. Edited by D.E. TolInni and S.W. Dean, Jr., Philadelphia, PA: ASTM, 1977, pp. 3-11.
10. De Witte, L., K.P. Fournier, and H. Tejada-Flores. "Potential Distribution Due to a Cylindrical Electrode Mounted on an Insulating Probe." Geophysics XXII No. 1 (1957): 67.
11. Danson, J.L., D.G. John, M.I. Jafar, K. Hladky, and L. Sherwood. "Electrochemical Methods for the Inspection and Monitoring of Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete." In Corrosion of Reinforcement in Concrete, edited by C.L. Page et al. London: Elsevier, 1990, pp. 358-371.
12. Escalante, E., E. Whiteton, and F. Qui. NBS Report NBSIR 86-3456. Washington, D.C.: NBS, October 1986, pp. 1-27.
13. Esealante, E. "Effectiveness of Potential Measurements for Estimating Corrosion of Steel in Concrete." In Corrosion of Reinforcement in Concrete, edited by C.L. Page et al. London: Elsevier, 1990, pp.281-292.
14. Embedded in Concrete Using Polarization Resistance Measurements." *Weri_toffe and Korrosion* 29 (1978): 515.
15. Elsener, B., S. Muller, M. Suter, and H. Bohni. Measurement and Testing in Civil Engineering, RILEM, Lyon, France (1988).



16. Feliu, S., J.A. Gonzalez, S. Feliu, Jr., and M. C. Andrade. "Polarization Resistance in Reinforced Concrete." *ACI Materials Journal* No. 87 –M47 (Sept./Oct. 1990): 457–460.
17. Feliu, S., J.A. Gonzalez, M.L. Escudero, and C. Andrade. Influence of Counter Electrode size on the on-site Measurement of
18. Feliu, S., J.A. Gonzalez, M.L. Eseudero, S. Feliu, Jr., and C. Andrade. _Possibilities of the Guard Ring for Electrical Signal Confinement in the Polarization Measurements of Reinforcements. _ *Corrosion* 46 No. 12 (1990): 1015.
19. F. Mansfeld. In: Polarization Resistance Measurement, Electrochemical Techniques for
20. Corrosion, National Association of Corrosion Engineers, Houston (1977), p. 18–26.
21. Guyod, H. "Factors Affecting the Responses of Laterolog-Type Logging Systems (LI3 and LL7)." *Journal of Petroleum Technology* 16 (1964): 211.
22. Guoyd, H. "Examples of Current Distribution About Laterolog Sondes." *The Log Analyst* 7 No. 1 (1966): 27
23. Holm, J. Corrosion, Concrete and Chlorides. American Concrete Institute SP 102. Edited by F.W. Gibson. Detroit, MI: ACI, 1987, p. 35.
24. Jasinski, R.J., and K.D. Efird. "Eleetroehemieal Corrosion Measurements in Crude Oil." *Corrosion* 43 No. 8 (1987): 476.
25. Jasinski, R.L, and K.D. Efird. "Eleetroehemieal Corrosion Probe for High Resistivity
26. Hydrocarbon/Water Mixtures. _ *Corrosion* 44 No. 9 (1988): 658.
27. K.C.Clear, "Time to corrosion of reinforcing steel in concrete slabs", Report No. FHWA/RD-
28. 82/028, *Federal Highway Administration, Washington, D.C.*, 1982.
29. Litvan, G. and J. Bickley. Concrete Durability. Detroit, MI: American Concrete Institute SP 100. Edited by J. Scalon. 1987, pp. 1503–1515.
30. Matsuoka, K., H. Kihira, S. Ito, and T. Murata. Corrosion Rates of Steel in Concrete. ASTM STP 1065. Edited by N.S. Berke, V. Chaker, and D. Whiting. Philadelphia, PA: ASTM, 1990,pp.103– 117.
31. Moran, J.H., and R.E. Chemali. "More on the Laterlog Device.*" *Geophysical Prospecting* 27 (1979): 902.
32. M. Stern and A.L. Geary, *J. Electrochem. Soc.* 104 (1) (1957) 56.
33. M.G.Grantham and J.Broomfield, *Construction and Materials* 11 (1997) 215
34. Millard, S.G., M.H. Ghassemi, J.H. Bnngey, and M.I. Jafar. "Assessing the Electrical Resistivity of Concrete Structures for Corrosion Durability Studies." In *Corrosion*
35. Sagues, A.A. Critical Issues in Electrochemical Corrosion Measurements Techniques.
36. SchieB1, P. "Chlorindinduzierte Korrosion yon Stab1in Beton." *Betonwerk und Fertigteil Technik* 10 (1986): 626.
37. Slater, J. Corrosion of Metals in Association with Concrete. ASTM STP 818. Philadelphia, PA: ASTM, 1983, 83 pp.



38. Sehgal, A., Y.T. Kho, K. Osseo-Asare, and H.W. Picketing. Paper 39.1. Presented at the 29th Annual Conference of Canadian Institute of Metallurgists, Hamilton, Canada, 1990.
39. S. Feliu, J.A. Gonzalez, C. Andrade and V. Feliu. *Corrosion* 44 (1988) 761
40. S. Feliu, J.A. Gonzalez and C. Andrade. *ACI Special Publication* SP151-10 (1994) 183
41. S. Feliu, J.A. Gonzalez, S. Feliu, Jr and C. Andrade. *ACI Mat J* 87 (1990) 457
42. S. Feliu, J.A. Gonzalez and C. Andrade. *J Appl Electrochem* 26 (1996) 305
43. Tamura, M., M. Nagayama, and K. Shimozawa. Corrosion of Reinforcement in Concrete. Edited by C.L. Page, K.W. Treadway, and K.P.B. Bamforth. New York: Elsevier Applied Science, 1990, p. 372.
44. Tamura, H. and M. Yoshida. Detroit, MI: American Concrete Institute. SP-82. 1984, pp. 689-702. 66. Simon, P. Paper No. 380. Presented at Corrosion '89. New Orleans, April 1989.
45. Wenger, F., and J. Galland. "Analysis of Local Corrosion of Large Metallic Structures or Reinforced Concrete Structures by Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)." *Electrochimica Acta* 35 No. 10 (1990):1573.



ภาคผนวก ก

ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคอนกรีต

ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคอนกรีต ที่วัด ด้วย Half-cell Potential

Zinc of Diameter 5 cm Concrete (70*70*10)							
thk. 2 cm				thk. 1 cm			
20	40	60	80	20	40	60	80
-555	-567	-538	-566	-577	-588	-598	-590
-545	-561	-533	-549	-544	-555	-523	-539
-547	-558	-530	-534	-545	-543	-518	-512
-565	-552	-532	-499	-562	-553	-510	-480
-543	-548	-552	-485	-544	-531	-505	-471
-549	-543	-501	-482	-545	-511	-501	-462
-557	-546	-497	-477	-554	-502	-494	-452
-559	-502	-489	-472	-549	-500	-499	-439
-543	-498	-482	-469	-546	-493	-471	-420



ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม

Zinc of Diameter 2.5 cm Concrete (70*70*10)							
thk. 2 cm				thk. 1 cm			
20	40	60	80	20	40	60	80
-544	-545	-539	-578	-565	-561	-571	-582
-533	-561	-533	-499	-566	-562	-532	-572
-546	-558	-501	-492	-562	-558	-522	-534
-544	-552	-497	-487	-565	-552	-523	-490
-543	-503	-488	-482	-544	-544	-511	-472
-549	-500	-470	-468	-521	-543	-502	-464
-511	-492	-473	-462	-518	-522	-491	-455
-502	-489	-469	-458	-515	-497	-482	-431
-497	-477	-464	-452	-511	-491	-475	-427



ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม

Zinc of Diameter 5 cm Concrete (50*50*10)							
thk. 2 cm				thk. 1 cm			
15	30	45	60	15	30	45	60
-511	-513	-508	-512	-522	-524	-522	-527
-510	-511	-504	-510	-520	-522	-521	-500
-507	-510	-505	-499	-500	-497	-495	-497
-506	-502	-500	-495	-493	-492	-490	-482
-507	-501	-495	-482	-488	-489	-483	-475
-511	-503	-486	-480	-481	-479	-472	-468
-505	-490	-482	-472	-475	-477	-473	-453
-502	-489	-472	-471	-471	-456	-460	-444
-501	-475	-469	-461	-455	-451	-450	-426



ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม

Zinc of Diameter 2.5 cm (50*50*10)							
thk. 2 cm				thk. 1 cm			
15	30	45	60	15	30	45	60
-533	-535	-529	-522	-532	-536	-543	-533
-535	-530	-522	-498	-529	-511	-509	-500
-523	-525	-500	-491	-502	-503	-500	-499
-515	-521	-498	-481	-500	-497	-497	-486
-514	-503	-488	-482	-499	-488	-486	-472
-511	-500	-477	-467	-494	-482	-463	-463
-510	-492	-473	-455	-482	-477	-459	-455
-511	-489	-469	-451	-476	-466	-450	-450
-513	-488	-464	-450	-468	-456	-450	-430



SLABS NO.1 SIZE 0.70X0.70

20-Dia.5cm Thk.2cm	20-Dia.2.5cm Thk.2cm
40-Dia.5cm Thk.2cm	40-Dia.2.5cm Thk.2cm
60-Dia.5cm Thk.2cm	60-Dia.2.5cm Thk.2cm
80-Dia.5cm Thk.2cm	80-Dia.2.5cm Thk.2cm
20-Dia.5cm Thk.1cm	20-Dia.2.5cm Thk.1cm
40-Dia.5cm Thk.1cm	40-Dia.2.5cm Thk.1cm
60-Dia.5cm Thk.1cm	60-Dia.2.5cm Thk.1cm
80-Dia.5cm Thk.1cm	80-Dia.2.5cm Thk.1cm

SLABS NO.1 SIZE 0.50X0.50

15-Dia.5cm Thk.2cm	15-Dia.2.5cm Thk.2cm
30-Dia.5cm Thk.2cm	30-Dia.2.5cm Thk.2cm
45-Dia.5cm Thk.2cm	45-Dia.2.5cm Thk.2cm
60-Dia.5cm Thk.2cm	60-Dia.2.5cm Thk.2cm
15-Dia.5cm Thk.1cm	15-Dia.2.5cm Thk.1cm
30-Dia.5cm Thk.1cm	30-Dia.2.5cm Thk.1cm
45-Dia.5cm Thk.1cm	45-Dia.2.5cm Thk.1cm
60-Dia.5cm Thk.1cm	60-Dia.2.5cm Thk.1cm

ภาคผนวก ข

ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคอนกรีต ด้วย PLR

Polarization Resistanc (RP) versus Time(days) Relationship

Zinc of Diameter 5 thickness 2 (cm)				Zinc of Diameter 2.5 thickness 2 (cm)			
20	40	60	80	20	40	60	80
4.82	31.1	38.57	42.85	5.31	29.32	33.84	34.43
4.43	14.6	25.06	34.5	3.77	15.32	17.12	12.12
4.74	13.1	25.57	16.21	2.99	10.13	5.89	3.22
5.57	12.52	9.02	9.03	2.98	9.12	3.33	2.11
2.43	9.12	6.79	7.52	2.43	4.22	2.82	1.94
2.54	2.03	4.29	3.21	2.31	2.32	1.73	1.83
2.21	2.01	4.09	3.79	1.99	1.76	1.45	1.44
2.11	2.03	4.09	3.21	1.85	1.77	1.34	1.11
1.91	1.88	3.01	3.11	1.5	1.31	1.32	1.12



Polarization Resistanc (RP) versus Time(days) Relationship 70*70*10

Zinc of Diameter 5 thickness 1 (cm)				Zinc of Diameter 2.5 thickness 1 (cm)			
20	40	60	80	20	40	60	80
4.91	34.21	41.58	45.42	5.31	23.32	29.73	24.55
3.43	12.13	32.14	22.13	2.32	3.12	11.21	9.12
2.74	8.12	6.12	7.2	2.11	2.14	2.18	2.02
2.77	7.33	3.12	2.42	1.98	2.09	1.99	1.88
2.33	3.12	2.11	2.13	1.87	1.89	1.87	1.53
2.13	2.01	1.78	1.93	1.57	1.77	1.69	1.45
2.08	1.89	1.55	1.81	1.55	1.53	1.59	1.39
1.99	1.77	1.43	1.23	1.43	1.46	1.22	1.22
1.32	1.22	1.21	1.31	1.22	1.19	1.18	1.11



Polarization Resistanc (RP) versus Time(days) Relationship 70*70*10

Zinc of Diameter 5 thickness 2 (cm)				Zinc of Diameter 2.5 thickness 2 (cm)			
20	40	60	80	20	40	60	80
0.44	0.45	0.42	0.64	0.35	0.43	0.48	0.63
0.56	0.53	0.48	2.15	0.36	0.54	0.77	3.12
0.66	0.75	1.75	3.28	0.59	0.68	1.75	8.11
0.86	1.35	1.44	6.11	0.99	1.73	4.02	9.64
1.28	1.28	2.13	8.94	1.54	3.11	7.12	10.21
1.56	3.56	2.16	9.55	1.89	6.02	7.77	10.57
1.76	3.74	2.56	11.99	3.63	7.53	8.99	11.01
2.88	3.91	3.21	13.12	4.44	7.22	9.12	12.03
3.84	4.34	6.12	13.02	5.02	7.97	10.22	13.02



Corrosion Rate (Icorr) versus Time(days) Relationship 70*70*10

Zinc of Diameter 5 thickness 2 (cm)				Zinc of Diameter 2.5 thickness 2 (cm)			
20	40	60	80	20	40	60	80
4.82	31.1	38.57	42.85	5.31	29.32	33.84	34.43
4.43	14.6	25.06	34.5	3.77	15.32	17.12	12.12
4.74	13.1	25.57	16.21	2.99	10.13	5.89	3.22
5.57	12.52	9.02	9.03	2.98	9.12	3.33	2.11
2.43	9.12	6.79	7.52	2.43	4.22	2.82	1.94
2.54	2.03	4.29	3.21	2.31	2.32	1.73	1.83
2.21	2.01	4.09	3.79	1.99	1.76	1.45	1.44
2.11	2.03	4.09	3.21	1.85	1.77	1.34	1.11
1.91	1.88	3.01	3.11	1.5	1.31	1.32	1.12



Corrosion Rate (icorr) versus Time(days) Relationship 70*70*10

Zinc of Diameter 5 thickness 1 (cm)				Zinc of Diameter 2.5 thickness 1 (cm)			
20	40	60	80	20	40	60	80
0.39	0.49	0.52	0.66	0.44	0.52	0.54	0.54
0.41	0.67	0.63	5.32	8.23	9.12	9.12	11.32
0.69	0.98	1.4	7.24	9.11	9.63	12.03	12.44
0.98	1.95	3.35	8.32	9.99	10.02	13.34	14.88
1.87	2.77	5.63	9.42	10.31	11.21	14.02	14.98
2.13	5.31	7.22	9.55	11.53	11.95	14.32	15.04
3.42	7.24	8.52	9.97	12.22	13.04	14.24	15.28
4.43	7.42	9.01	12.42	12.53	13.55	14.54	15.88
4.94	8.11	9.15	14.04	13.04	13.97	15.34	15.98



Polarization Resistanc (RP) versus Time(days) Relationship 50*50*10

Zinc of Diameter 5 thickness 2 (cm)				Zinc of Diameter 2.5 thickness 2 (cm)			
15	30	45	60	15	30	45	60
4.22	28.32	34.26	38.32	4.12	21.86	31.42	29.35
4.35	15.23	24.64	31.11	3.12	13.21	16.23	10.23
4.67	12.11	22.24	15.32	2.78	8.12	4.37	2.42
3.44	11.98	9.15	8.24	2.74	7.32	3.12	1.93
2.12	8.99	7.27	6.23	2.23	3.22	2.59	1.93
2.32	1.96	2.15	2.12	2.21	2.39	1.82	1.82
2.12	1.94	2.19	2.11	1.83	1.82	1.44	1.85
2.04	1.92	2.25	2.11	1.73	1.72	1.42	1.72
1.94	1.83	1.98	2.42	1.53	1.25	1.41	1.23



Polarization Resistanc (RP) versus Time(days) Relationship 50*50*10

Zinc of Diameter 5 thickness 1 (cm)				Zinc of Diameter 2.5 thickness 1 (cm)			
15	30	45	60	15	30	45	60
4.92	30.12	35.47	32.13	4.98	22.13	20.12	19.21
3.52	10.12	31.21	3.13	2.44	2.89	2.01	1.98
2.45	7.12	5.21	3.02	2.31	2.11	1.94	1.78
2.21	7.21	2.85	2.55	1.82	2.04	1.92	1.82
2.11	2.13	2.01	2.15	1.74	1.99	1.85	1.59
1.94	1.92	1.75	1.94	1.64	1.88	1.56	1.43
1.92	1.93	1.45	1.82	1.55	1.56	1.48	1.33
1.93	1.56	1.43	1.22	1.44	1.44	1.27	1.22
1.89	1.32	1.23	1.21	1.34	1.22	1.23	1.21



Corrosion Rate (icorr) versus Time(days) Relationship 50*50*10

Zinc of Diameter 5 thickness 2 (cm)				Zinc of Diameter 2.5 thickness 2 (cm)			
15	30	45	60	15	30	45	60
0.32	0.34	0.35	0.41	0.37	0.43	0.43	0.56
0.45	0.43	0.39	1.94	0.43	0.64	0.84	3.32
0.55	0.64	1.34	3.02	0.43	0.74	1.77	9.12
0.76	1.27	1.37	5.89	0.89	1.84	5.02	9.21
1.17	1.29	1.97	7.34	1.23	4.85	8.21	12.75
1.46	2.98	2.11	9.33	1.75	6.84	7.98	12.99
1.63	3.12	2.22	12.12	3.42	8.15	9.03	12.98
2.15	3.64	2.99	13.21	4.52	9.12	10.11	13.02
2.89	3.99	3.36	13.53	4.82	9.99	10.23	13.01



Corrosion Rate (icorr) versus Time(days) Relationship 50*50*10

Zinc of Diameter 5 thickness 1 (cm)				Zinc of Diameter 2.5 thickness 1 (cm)			
15	30	45	60	15	30	45	60
0.41	0.53	0.55	0.64	0.49	0.49	0.51	0.52
0.53	0.69	0.72	6.34	9.23	10.21	10.32	10.77
0.72	1.27	1.35	8.13	9.45	10.35	10.87	10.54
1.01	2.93	4.32	9.02	10.73	10.78	14.32	14.99
1.52	3.32	7.12	9.34	11.19	11.32	14.99	15.03
2.83	6.12	8.23	10.42	11.63	11.99	15.03	15.04
4.21	8.32	8.98	10.98	13.21	13.97	15.66	15.48
4.98	8.55	9.64	13.89	14.43	14.98	15.89	15.75
5.09	8.98	9.99	15.22	14.02	15.03	15.92	15.91

