



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง ปัจจัยที่มีผลต่อการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคอนกรีตเสริมเหล็ก

Factors Influencing Half-Cell Potential Measurement in Reinforced Concrete

นามผู้วิจัย นายธนวิศว์ ภัทรกิจธรรม

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ยอดสุดใจ, D.Eng.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ประเสริฐ สุวรรณวิทยา, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ยอดสุดใจ, D.Eng.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ปัจจัยที่มีผลต่อการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคอนกรีตเสริมเหล็ก

Factors Influencing Half-Cell Potential Measurement in Reinforced Concrete

โดย

นายธนวิศว์ ภัทรกิจธรรม

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ธนวิศว์ ภัทรกิจธรรม 2555: ปัจจัยที่มีผลต่อการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคอนกรีตเสริมเหล็ก ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วันชัย ยอดสุใจ, D.Eng. 90 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบผลกระทบต่างๆ ได้แก่ระยะหุ้มเหล็กเสริม ปริมาณคลอไรด์ กำลังรับแรงอัด การซ่อมแซม ความชื้น และรูปแบบการกัดกร่อน ต่อการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ ซึ่งเป็นการทดสอบการสึกกร่อนของเหล็กเสริมแบบไม่ทำลาย และเพื่อหาความสัมพันธ์ของสนิมกับค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ มีวิธีการทดสอบโดยเตรียมตัวอย่างแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 30 x 30 x 10 และ 30 x 30 x 12.5 ซม. ทำการเร่งสนิมโดยใช้สภาพเปียกสลับแห้ง ดำเนินการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าในทุกๆ สัปดาห์ สำหรับตัวอย่างที่มีการเร่งสนิมด้วยไฟฟ้าดำเนินการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าทุกวัน จากผลการวิจัยพบว่าเมื่อคอนกรีตมีปริมาณคลอไรด์และความชื้นสูงขึ้นส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าลดลง (เป็นลบมากขึ้น) ในขณะที่กำลังรับแรงอัดจะส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น (เป็นลบน้อยลง) แต่ระยะหุ้มเหล็กเสริมยังเห็นผลไม่ชัดเจน ส่วนการซ่อมแซมจะทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้วัสดุที่มีสภาพความต้านทานสูงกว่าคอนกรีตเดิม แต่ยังเห็นผลไม่ชัดเจนเมื่อใช้วัสดุมากกว่า 1 ชนิด เมื่อเหล็กเสริมเกิดการกัดกร่อนแบบหลุมจะมีการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ แม้ว่าค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยของทั้ง 2 ชนิดจะมีค่าใกล้เคียงกัน และยังพบว่าเมื่อคอนกรีตมีระยะหุ้มเหล็กเสริม ปริมาณคลอไรด์ และความชื้นสูงจะทำให้ความแปรปรวนของค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ใน 1 ก้อนตัวอย่างมีค่าลดลง ในขณะที่กำลังรับแรงอัดสูงจะทำให้ความแปรปรวนมีค่าสูง และสนิมแบบหลุมจะมีความแปรปรวนสูงกว่าสนิมแบบสม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กับความรุนแรงของสนิม เมื่อเหล็กเสริมเป็นสนิมรุนแรงขึ้นจะทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้ามีค่าลดลง และเหล็กเสริมมีโอกาสเกิดการสูญเสียน้ำหนัก เมื่อค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยในสภาพแห้งมีค่าน้อยกว่า -450 มิลลิโวลต์

Tanavit Pattarakittam 2012: Factors Influencing Half-Cell Potential Measurement Analysis in Reinforced Concrete. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Wanchai Yodsudjai, D.Eng. 90 pages.

The purposes of this research are to find the influences of covering, chloride content, moisture content, compressive strength and type of corrosion on the half-cell potential measurement in reinforced concrete structure and find the relationship between level of corrosion and the potential value. Two sizes of concrete slabs; 30x30x10 and 30x30x12.5 cm were prepared. The potential was measured every week for the corrosion that accelerated by switching the concrete specimens between wet and dry conditions and was measured every day for the corrosion that accelerated by electricity. As a result, the potential decreases (more negative) with the increase of chloride content and moisture content. In the other hand, the potential increases (more positive) with the increase of compressive strength. However, the influences of covering are still unconvinced. The potential increase as the electrical resistance of the repaired material is higher than that of the old concrete. However, the repaired concrete using more than one material is still unconvinced. Although the potential measurement of the pitting corrosion are similar to that of the uniform corrosion the weight loss of the pitting corrosion is higher than that of the uniform corrosion. The variations of potential measurement (difference of potential measurements of each point in 1 specimen) decrease with the higher covering, chloride content and moisture content. In the other hand, the variations of potential measurement increase with the higher compressive strength. The variation of potential measurement of the pitting corrosion is higher than that of the uniform corrosion. In addition, there is relationship between the level of corrosion and the potential; that is, the level of corrosion increases with the decrease of the potential and there is a chance for the reinforcement to lose their weight if the average of potential is lower than -450 mV in dry condition.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ วันชัย ยอดสุดใจ ประธานกรรมการที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลักสำหรับแนวความคิดในการทำงานวิจัยพร้อมทั้งชี้แนวทางในการวิจัย ตลอดจน
ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้บรรลุไปได้ด้วยดี และรองศาสตราจารย์ประเสริฐสุวรรณวิทยาที่
คอยให้คำแนะนำและตรวจทานผลการวิจัยในครั้งนี้ให้ผ่านไปได้ด้วยดียิ่งขึ้น

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่และบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ทุกท่านที่ให้การสนับสนุนในด้านของเครื่องมือ สถานที่ การทำหนังสือขออนุญาตในด้านต่างๆ และ
คำแนะนำในการทำการทดสอบทำให้การวิจัยเป็นไปอย่างราบรื่น

ขอขอบคุณเพื่อนๆ นิสิตวิศวกรรมโครงสร้างและวิศวกรรมบริหารที่สละเวลาและหยาด
เหงื่อแรงกายให้ความร่วมมือเรื่องการเตรียมตัวอย่าง รวมไปถึงให้ความช่วยเหลือด้านต่างๆ อย่าง
เห็นัดเห็น้อยตลอดเวลาที่ผู้วิจัยศึกษาอยู่ในมหาวิทยาลัยแห่งนี้

ท้ายที่สุดขอขอบคุณงามความดีทั้งหมดให้แก่บิดามารดาที่ให้การสนับสนุนและคอยให้
กำลังใจกับผู้วิจัยในทุกๆ ด้านพร้อมทั้งให้ทัศนคติในการดำรงชีวิตและการศึกษาจนประสบ
ความสำเร็จในทุกวันนี้

ธนวิศว์ ภัทรกิจธรรม

ตุลาคม 2555

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	23
อุปกรณ์	23
วิธีการ	24
ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	36
สรุปและข้อเสนอแนะ	82
สรุป	82
ข้อเสนอแนะ	84
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	87
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	90

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	อัตราความเสี่ยงที่จะเกิดสนิมตามแนวทาง ASTM C876	12
2	อิทธิพลที่มีผลกระทบต่อการวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ และอัตราการเกิดสนิม	14
3	ปฏิกิริยาส่วนผสมคอนกรีต	25
4	คุณสมบัติเหล็กเสริมคอนกรีต	25
5	รายละเอียดแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก	26
6	การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมกับค่าศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่างระยะหุ้มเหล็กเสริม	58
7	การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมกับค่าศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่างคลอไรด์	62
8	การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมกับค่าศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่างกำลังรับแรงอัด	66
9	การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมกับค่าศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่างการซ่อมแซม	70
10	การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมกับค่าศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่างชนิดแรงสนิมด้วยไฟฟ้า	74
11	เกณฑ์การแบ่งระดับสนิม	78
12	ความสัมพันธ์ของสนิมกับค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ย	80

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 กระบวนการการกัดกร่อนเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์	5
2 แบบจำลองช่วงชีวิตการใช้งานของเหล็กเสริมในคอนกรีต	9
3 ส่วนประกอบของเครื่องมือวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์	10
4 แผนภาพวงจรศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์	11
5 แผนภูมิศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของเหล็กเสริมในคอนกรีต	11
6 การตรวจสอบโดยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-Cell Potential Measurement)	12
7 เส้นชั้นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-Cell Potential Contour)	13
8 อิทธิพลของระยะระหว่างผิวคอนกรีตและเหล็กเสริมและความต่างศักย์	16
9 อิทธิพลของความต้านทานของคอนกรีต	17
10 อัตราส่วนแอมโนดกับแคโทด (A/C) เทียบกับค่าเฉลี่ยค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ชนิด Calomel (Hg/Hg ₂ Cl ₂) KCL sat. (S.C.E.)	19
11 Pourbaix Diagram ของสนิมในเหล็กเสริมตามมาตรฐาน ASTM C876	21
12 Pourbaix Diagram ของสนิมในเหล็กเสริมตามมาตรฐาน ASTM C876 (2)	21
13 รายละเอียดแบบแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก 2.5 ซม.	27
14 รายละเอียดแบบแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก 5 ซม.	28
15 รายละเอียดแบบแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดเคลือบอีพ็อกซี	29
16 รายละเอียดแบบแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก 10 ซม.	30
17 ตัวอย่างในสภาพเปียก (ซ้าย) และสภาพแห้ง (กลาง)	31
18 เครื่องมือการวัดค่าศักย์ไฟฟ้า (ซ้าย) และการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (ขวา)	31
19 กระบวนการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าในการทดลอง	32
20 ตำแหน่งค่าศักย์ไฟฟ้าต่างๆในคอนกรีต 1 ตัวอย่าง	32
21 ระยะเวลาที่ทำการซ่อมแซมของตัวอย่างที่ไม่ผ่านการซ่อมแซม (0) ตัวอย่างที่ทำการซ่อมแซมวันที่ 70 และตัวอย่างที่ทำการซ่อมแซมวันที่ 244	33
22 กระบวนการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าในการทดลองของตัวอย่างการซ่อมแซม	33
23 กระบวนการเร่งการเกิดสนิมในเหล็กเสริมด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าและเคมี	34

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
24 ค่าศักย์ไฟฟ้าต่างๆในคอนกรีต 1 ตัวอย่าง	36
25 แผนภูมิการวัดค่าศักย์ไฟฟ้า	38
26 ความสัมพันธ์ของค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยของทุกสัปดาห์กับระยะหุ้มเหล็กเสริม	39
27 ความสัมพันธ์ของค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยของทุกสัปดาห์กับปริมาณคลอไรด์ปนเปื้อนในคอนกรีต	40
28 ความสัมพันธ์ของค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยของทุกสัปดาห์กับกำลังรับแรงอัด	41
29 กราฟเปรียบเทียบของค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยในแต่ละวันกับระยะเวลาของตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมหลังผ่านไป 70 วัน กับตัวอย่างที่ไม่ได้ทำการซ่อมแซม	42
30 กราฟเปรียบเทียบของค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยในแต่ละวันกับระยะเวลาของตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมหลังผ่านไป 244 วัน กับตัวอย่างที่ไม่ได้ทำการซ่อมแซม	43
31 ความสัมพันธ์ของค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยของทุกสัปดาห์กับกับความชื้นของคอนกรีต	44
32 กราฟเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้ากับระยะเวลาของคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดเคลือบและไม่เคลือบอีพ็อกซีกับระยะเวลา ของตัวอย่างที่ทำการเร่งสนิมด้วยไฟฟ้า	45
33 ความสัมพันธ์ของความแปรปรวนเฉลี่ยของทุกสัปดาห์กับระยะหุ้มเหล็กเสริม	48
34 ความสัมพันธ์ของความแปรปรวนเฉลี่ยของทุกสัปดาห์กับปริมาณคลอไรด์ปนเปื้อนต่อน้ำหนักซีเมนต์	49
35 ความสัมพันธ์ของความแปรปรวนเฉลี่ยของทุกสัปดาห์กับกำลังรับแรงอัด	50
36 ความสัมพันธ์ของความแปรปรวนเฉลี่ยของทุกสัปดาห์กับความชื้นของคอนกรีต	51
37 ความสัมพันธ์ของความแปรปรวนเฉลี่ยในแต่ละวันกับระยะเวลาของคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดเคลือบ และไม่เคลือบไม่อีพ็อกซี ของตัวอย่างที่ทำการเร่งสนิมด้วยไฟฟ้า	52
38 ความสัมพันธ์ของผลต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างแคโทดและแอโนดเฉลี่ยของทุกสัปดาห์กับระยะหุ้มเหล็กเสริม	55
39 ความสัมพันธ์ของผลต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างแคโทดและแอโนดเฉลี่ยของทุกสัปดาห์กับปริมาณคลอไรด์ปนเปื้อนต่อน้ำหนักซีเมนต์	56

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
40 ความสัมพันธ์ของผลต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างแคโทดและแอโนดเฉลี่ยของทุกสัปดาห์กับกำลังรับแรงอัด	57
41 สภาพเหล็กเสริมของตัวอย่างระยะหุ้มเหล็กเสริม 2.5 ซม. ด้านที่ทำการวัด (แฉวบน) และด้านตรงข้าม (แฉวล่าง)	59
42 เส้นชั้นความสูงของค่าศักย์ไฟฟ้าจากในสภาพเปียก (แฉวบน) และแห้ง (แฉวล่าง) จากตัวอย่างระยะหุ้มเหล็กเสริม 2.5 ซม. ในการวัดครั้งสุดท้าย	59
43 สภาพเหล็กเสริมของตัวอย่างระยะหุ้มเหล็กเสริม 5 ซม. และคลอไรด์ปนเปื้อนร้อยละ 6 ค่อน้ำหนักซีเมนต์ ด้านที่ทำการวัด (แฉวบน) และด้านตรงข้าม (แฉวล่าง)	60
44 เส้นชั้นความสูงของค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพเปียก (แฉวบน) และแห้ง (แฉวล่าง) จากตัวอย่างระยะหุ้มเหล็กเสริม 5 ซม. และคลอไรด์ปนเปื้อนร้อยละ 6 ค่อน้ำหนักซีเมนต์ในการวัดครั้งสุดท้าย	60
45 สภาพเหล็กเสริมของตัวอย่างระยะหุ้มเหล็กเสริม 10 ซม. ด้านที่ทำการวัด (แฉวบน) และด้านตรงข้าม (แฉวล่าง)	61
46 เส้นชั้นความสูงของค่าศักย์ไฟฟ้าจากในสภาพเปียก (แฉวบน) และแห้ง (แฉวล่าง) จากตัวอย่างระยะหุ้มเหล็กเสริม 10 ซม. ในการวัดครั้งสุดท้าย	61
47 สภาพเหล็กเสริมของตัวอย่างคลอไรด์ปนเปื้อนร้อยละ 1.2 ค่อน้ำหนักซีเมนต์ ด้านที่ทำการวัด (แฉวบน) และด้านตรงข้าม (แฉวล่าง)	63
48 เส้นชั้นความสูงของค่าศักย์ไฟฟ้าจากในสภาพเปียก (แฉวบน) และแห้ง (แฉวล่าง) จากตัวอย่างคลอไรด์ปนเปื้อนร้อยละ 1.2 ค่อน้ำหนักซีเมนต์ ในการวัดครั้งสุดท้าย	63
49 สภาพเหล็กเสริมของตัวอย่างคลอไรด์ปนเปื้อนร้อยละ 1.8 ค่อน้ำหนักซีเมนต์ ด้านที่ทำการวัด (แฉวบน) และด้านตรงข้าม (แฉวล่าง)	64
50 เส้นชั้นความสูงของค่าศักย์ไฟฟ้าจากในสภาพเปียก (แฉวบน) และแห้ง (แฉวล่าง) จากตัวอย่างคลอไรด์ปนเปื้อนร้อยละ 1.8 ค่อน้ำหนักซีเมนต์ ในการวัดครั้งสุดท้าย	64
51 ภาพขยายตำแหน่งสนิมของตัวอย่าง 1.2-A และ 1.8-A	65

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
52 สภาพเหล็กเสริมของตัวอย่างกำลังรับแรงอัด 180 กก./ชม ² . ด้านที่ทำการวัด (แฉกบน) และด้านตรงข้าม (แฉกล่าง)	67
53 เส้นชั้นความสูงของค่าศักย์ไฟฟ้าจากในสภาพเปียก (แฉกบน) และแห้ง (แฉกล่าง) จากตัวอย่างกำลังรับแรงอัด 180 กก./ชม ² ในการวัดครั้งสุดท้าย	67
54 สภาพเหล็กเสริมของตัวอย่างกำลังรับแรงอัด 210 กก./ชม ² . ด้านที่ทำการวัด (แฉกบน) และด้านตรงข้าม (แฉกล่าง)	68
55 เส้นชั้นความสูงของค่าศักย์ไฟฟ้าจากในสภาพเปียก (แฉกบน) และแห้ง (แฉกล่าง) จากตัวอย่างกำลังรับแรงอัด 210 กก./ชม ² ในการวัดครั้งสุดท้าย	68
56 ภาพขยายตำแหน่งสนิมของตัวอย่าง 180-A และ 180-C	69
57 สภาพเหล็กเสริมของตัวอย่างที่ไม่ผ่านการซ่อมแซม (0) ด้านที่ทำการวัด (แฉกบน) และด้านตรงข้าม (แฉกล่าง)	71
58 เส้นชั้นความสูงของค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพเปียก (แฉกบน) และสภาพแห้ง (แฉกล่าง) จากตัวอย่างที่ไม่ผ่านการซ่อมแซม (0) ในการวัดครั้งสุดท้าย	71
59 สภาพเหล็กเสริมของตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมวันที่ 60 ด้านที่ทำการวัด (แฉกบน) และด้านตรงข้าม (แฉกล่าง)	72
60 เส้นชั้นความสูงของค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพเปียก (แฉกบน) และสภาพแห้ง (แฉกล่าง) จากตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมวันที่ 70 ในการวัดครั้งสุดท้าย	72
61 สภาพเหล็กเสริมของตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมในวันที่ 244 ด้านที่ทำการวัด (แฉกบน) และด้านตรงข้าม (แฉกล่าง)	73
62 เส้นชั้นความสูงของค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพเปียก (แฉกบน) และสภาพแห้ง (แฉกล่าง) จากตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมวันที่ 244 ในการวัดครั้งสุดท้าย	73
63 สภาพเหล็กเสริมของตัวอย่างชนิดเหล็กเสริมไม่เคลือบอีพ็อกซีด้านที่ทำการวัด (แฉกบน) และด้านตรงข้าม (แฉกล่าง)	75
64 เส้นชั้นความสูงของค่าศักย์ไฟฟ้าของวันที่ 13 (แฉกบน) และวันที่ 14 (แฉกล่าง) จากตัวอย่างชนิดเหล็กเสริมไม่เคลือบอีพ็อกซี	75

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
65 สภาพเหล็กเสริมของตัวอย่างชนิดเหล็กเสริมเคลือบอีพ็อกซีด้านที่ทำการวัด (แถวบน) และด้านตรงข้าม (แถวล่าง)	76
66 เส้นชั้นความสูงของค่าศักย์ไฟฟ้าของวันที่ 13 (แถวบน) และวันที่ 14 (แถวล่าง) จากตัวอย่างชนิดเหล็กเสริมเคลือบอีพ็อกซี	76
67 สภาพเหล็กเสริมของตัวอย่างชนิดเคลือบอีพ็อกซีบริเวณที่เกิดสนิมแบบหลุม	77
68 สนิมในเหล็กเสริมของตัวอย่างที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าสูงกว่า -350 มิลลิโวลต์ทั้งในสภาพแห้งและเปียก	79
69 สนิมในเหล็กเสริมของตัวอย่างที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพแห้งสูงกว่า -350 มิลลิโวลต์ แต่ค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพเปียกต่ำกว่า -350 มิลลิโวลต์	80

ปัจจัยที่มีผลต่อการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคอนกรีตเสริมเหล็ก

Factors Influencing Half-Cell Potential Measurement in Reinforced Concrete

คำนำ

เนื่องจากคอนกรีตทนต่อสภาพแวดล้อมได้ดี และยังมีอายุการใช้งานที่ยาวนานเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดอื่นๆ และจากที่คอนกรีตมีอายุการใช้งานที่ยาวนานนี้เองจึงจำเป็นต้องมีการดูแลรักษา และตรวจสอบสภาพโครงสร้างเพื่อความปลอดภัย ซึ่งการเกิดสนิมในเหล็กเสริมก็เป็นปัญหาที่พบได้บ่อย และมีผลต่ออายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ส่งผลให้คอนกรีตเกิดการเสื่อมสภาพ โดยเฉพาะเมื่อโครงสร้างอยู่ในสภาพแวดล้อมชายฝั่งทะเลรวมไปถึงโครงสร้างที่อยู่ในพื้นที่น้ำกร่อย เพราะบริเวณเหล่านี้จะมีการกัดกร่อนสูงกว่าปกติ เช่น การเกิดสนิมเนื่องจากคลอไรด์ไอออน (Cl⁻) ในโครงสร้างที่อยู่ใกล้ชายฝั่งทะเล หรือคาร์บอนชั้นในโครงสร้างที่อยู่ในมลภาวะของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เมื่อคลอไรด์ไอออน (Cl⁻) หรือคาร์บอนชั้น (CO₂) ซึมผ่านถึงตัวเหล็กเสริมจนมีปริมาณมากพอที่เริ่มขบวนการกัดกร่อน จะทำให้เหล็กเสริมขยายตัวและดันให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าว จนทำให้กำลังของคอนกรีตและเหล็กเสริมจะลดลง ก่อให้เกิดอันตรายตามมาภายหลังได้

ปัญหาการเกิดสนิมเหล็กในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นปัญหาซึ่งมีผลกระทบต่อความแข็งแรงของโครงสร้างอาคาร โดยเฉพาะโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กจึงเป็นสิ่งที่วิศวกรและผู้เกี่ยวข้องทั้งหลายจะต้องศึกษาถึงปัญหาการเกิดสนิมเหล็ก ว่ามีผลกระทบอย่างไร มีสาเหตุการเกิดอย่างไร จะแก้ไขป้องกันได้อย่างไร จำเป็นที่จะต้องซ่อมแซมได้หรือไม่ ตามที่กล่าวมาข้างต้นเนื่องจากเหล็กเสริมอยู่ในคอนกรีตทำให้ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าได้ และกว่าจะมองเห็นก็ต่อเมื่อคอนกรีตมีการหลุดร่อนจนเห็นเหล็กเสริมส่งผลให้ทำการซ่อมแซมได้ลำบาก และหากต้องการซ่อมก็สามารถทำการซ่อมแซมได้โดยสกัดสนิมในเหล็กเสริมและหล่อคอนกรีตในส่วนที่หลุดร่อนใหม่ ทั้งนี้ควรทำการเคลือบผิวเหล็กด้วยเพราะการหล่อคอนกรีตใหม่เชื่อมกับคอนกรีตเก่าจะทำให้การซึมผ่านของสารต่างๆ ทำได้รวดเร็วขึ้น ซึ่งมักจะซึมผ่านรอยต่อนั่นเอง

การตรวจหาสนิมในเหล็กเสริมที่อยู่ภายในคอนกรีต ปัจจุบันนี้มีการตรวจหาสนิมโดยวิธีทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non Destructive Testing) อยู่หลายวิธีด้วยกัน และการวัดค่าแนวโน้มการ

เกิดสนิมโดยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-Cell Potential, HCP) นี้ค่อนข้างเป็นที่นิยม ซึ่งการประเมินนี้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C876-91 “Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in concrete” สำหรับเหล็กที่ไม่มีการเคลือบผิว สำหรับประเทศไทยจะเป็นไปตามมาตรฐาน มยผ. 1506-51 “มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย วิธีการทดสอบนี้เป็นที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน เพราะสามารถที่จะทำการตรวจสอบได้ง่าย และรวดเร็ว ซึ่งวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เป็นการใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมี โดยตัวเครื่องมือเปรียบเสมือนครึ่งเซลล์ไฟฟ้า และคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นอีกครึ่งเซลล์ไฟฟ้า มารวมกันเป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมี โดยตัวเครื่องมือนั้นจะประกอบไปด้วยมีแท่ง Reference Electrode ใช้เป็นตัวอ้างอิง ซึ่งที่นิยมใช้คือ แท่งคอปเปอร์ในสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (Cu/CuSO_4 , CSE) โวลต์มิเตอร์ใช้วัดค่าศักย์ไฟฟ้าจากการไหลเวียนของอิเล็กตรอน (e^-) ระหว่างเหล็กเสริม และแท่งคอปเปอร์ ปกติเหล็กเสริมจะมีฟิล์ม (Passivation Film) เคลือบมีผลให้ศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าแท่งทองแดง แต่ในเมื่อเหล็กเสริมมีคลอไรด์ไอออน และคาร์บอนชั้นปนเปื้อนจะทำให้ฟิล์มถูกทำลายจนเป็นสนิม ศักย์ไฟฟ้าของทองแดงจะสูงกว่าศักย์ไฟฟ้าของเหล็กเสริม ในที่สุดอิเล็กตรอนจะวิ่งจากเหล็กเสริมไปสู่แท่งคอปเปอร์

แต่ทว่าวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์นั้น หากอ่านค่าที่ศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้อย่างเดียวโดยไม่คำนึงถึงสภาพแวดล้อมของคอนกรีต รวมถึงตัวคอนกรีตเองจะทำให้มีโอกาสผิดพลาดได้ ซึ่งยังมีหลายปัจจัยที่ส่งผลให้ผลลัพธ์ยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่มาก และบอกการเกิดสนิมได้เพียงมีโอกาสเกิดสนิมหรือไม่ แต่ไม่ได้ระบุถึงความรุนแรงของการเกิดสนิมจึงเป็นผลให้การประเมินสภาพโครงสร้าง หรือทำการซ่อมแซมได้ลำบาก และอาจเป็นการสิ้นเปลืองงบประมาณโดยใช้เหตุ

งานวิจัยนี้จึงมุ่งหวังในการลดความคลาดเคลื่อนของปัจจัยต่างๆ ให้ผลลัพธ์มีความเที่ยงตรง และสามารถบอกถึงความรุนแรงของสนิมที่เกิด เพื่อที่จะประเมินสภาพโครงสร้างได้อย่างแม่นยำ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการซ่อมแซมต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อประเมินถึงอิทธิพลต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์
2. เพื่อประเมินถึงความแปรปรวนของค่าศักย์ไฟฟ้าจากอิทธิพลต่างๆ
3. เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้า และความรุนแรงของสนิมในเหล็กเสริม

ขอบเขตของการวิจัย

ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาความแปรปรวนของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ ของการทดลองในห้องปฏิบัติการตามมาตรฐาน ASTM C876-91 การวิจัยนี้จะศึกษาอิทธิพลที่มีผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อน ซึ่งได้แก่ ระยะเวลาหุ้มเหล็กเสริม (Covering) ปริมาณคลอไรด์ (Chloride Content) ความชื้น (Moisture Content) กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (Compressive Strength) และคอนกรีตที่ผ่านการซ่อมแซม (ชั้นคอนกรีตเก่าและชั้นคอนกรีตใหม่) และรูปแบบการกัดกร่อน (ตัวอย่างอิพ็อกซี) นำมาเปรียบเทียบและหาความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับอิทธิพลต่างๆดังที่กล่าวมา รวมถึงประเมินความรุนแรงของสนิมในเหล็กเสริมกับค่าศักย์ไฟฟ้าด้วยตาเปล่า (Visual Inspection) และวิธีการทดสอบการสูญเสียน้ำหนัก (Weigh Loss)

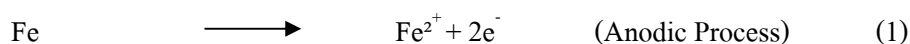
การตรวจเอกสาร

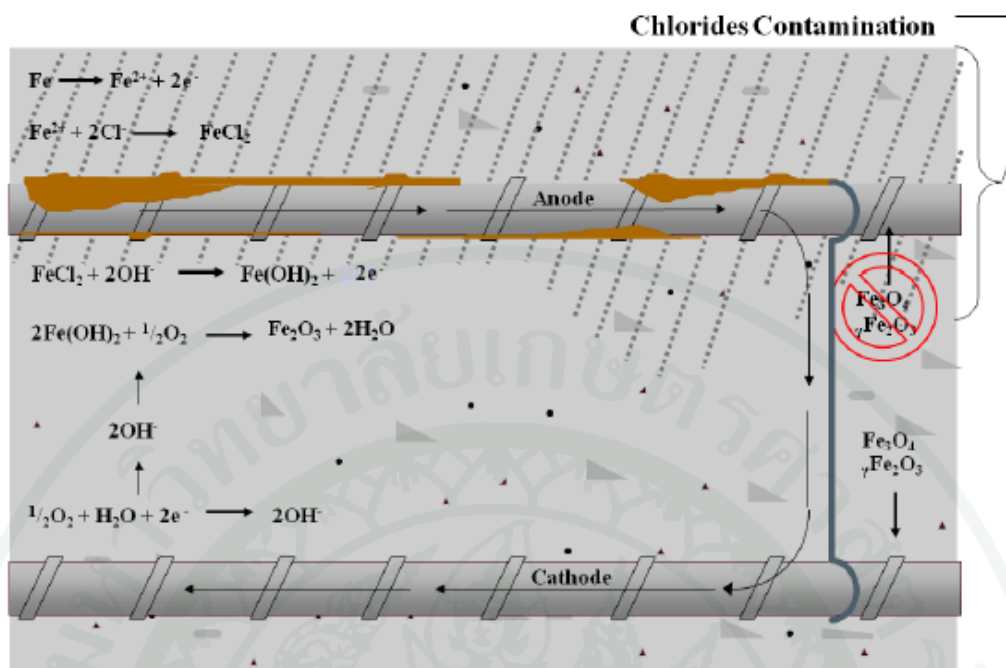
การกัดกร่อนและการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

อาคารที่มีการใช้งานมานานและไม่ได้มีการบำรุงรักษาอย่างต่อเนื่อง อาจมีการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งาน โดยเฉพาะอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในตัวเมืองมักพบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอนชั้น เช่นเดียวกับโครงสร้างที่อยู่ติดชายทะเล หรือน้ำกร่อยก็จะมีสาเหตุจากคลอไรด์ เป็นเหตุให้เหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัด ซึ่งเรียกว่าการกัดกร่อน

การกัดกร่อน (Corrosion) คือ การเสื่อมสภาพของโลหะที่ทำให้สมบัติของโลหะ เปลี่ยนไปในทางเลวลง โดยโลหะเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบของโลหะหรือที่เรียกว่าสนิม ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของการกัดกร่อนเป็นเหตุให้โลหะเกิดความเสียหาย หรืออาจกล่าวในเชิงเคมีได้ว่าเมื่อโลหะเกิดการกัดกร่อนเป็นปฏิกิริยาการให้อิเล็กตรอนหรือปฏิกิริยาออกซิเดชันนั่นเอง (Oxidation Reaction) ซึ่งปฏิกิริยานี้ ทำให้อะตอมโลหะเปลี่ยนเป็นไอออนโลหะประจุบวก เมื่อมีการให้และรับอิเล็กตรอนครบเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่เรียกว่า เซลล์การกัดกร่อน โลหะที่ให้อิเล็กตรอนเป็นขั้วแอโนด (Anode) อิเล็กตรอนเดินทางไปตามเนื้อโลหะ สิ่งแวดล้อมที่รับอิเล็กตรอนเป็นขั้วแคโทด (Cathode) และความชื้นหรือสารละลายที่ผิวโลหะเป็นอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ให้อิออนเดินทางให้ครบเซลล์

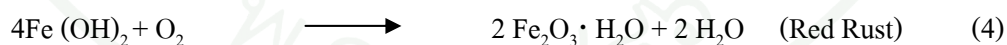
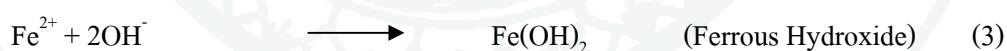
Neville (1995) อธิบายว่าการเกิดสนิมในเหล็กเสริมเป็นกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อเหล็กเสริมมีศักย์ไฟฟ้าไม่เท่ากัน ซึ่งสามารถเกิดบนเส้นเดียวกันหรือต่างเส้นก็ได้ดังภาพที่ 1 ทำให้เกิดบริเวณขั้วลบ (Anode) และขั้วบวก (Cathodic) ประกอบกับอิเล็กโทรไลต์ในรูปน้ำ (H_2O) ที่อยู่ในรูพรุนของซีเมนต์เพสต์ จึงเกิดเป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีขึ้นมา โดยเหล็กเสริม (Fe) ส่วนที่เป็นขั้วลบจะทำหน้าที่ถ่ายประจุอิเล็กตรอน (e^-) ดังสมการที่ 1 อิเล็กตรอนนี้วิ่งไปยังเหล็กเสริม ที่มีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวก และหากรวมตัวกับน้ำ และออกซิเจน (O_2) ก็จะเกิดเป็นไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เข้าสู่เหล็กเสริมที่เป็นขั้วบวกได้ผลผลิตเป็น $Fe(OH)_2$ (Ferrous Hydroxide) ดังสมการที่ 2 ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำ และออกซิเจนต่อได้ผลผลิตเป็น $Fe(OH)_3$ (Ferric Hydroxide) ดังสมการที่ 3 แต่เนื่องจากสารประกอบเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ไม่เสถียรภาพ จึงทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นสนิมเหล็ก (Fe_2O_3) ดังสมการที่ 4





ภาพที่ 1 กระบวนการการกัดกร่อนเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์

ที่มา: EUS – VECTOR (2008)



Elsener (2002) จำแนกประเภทตามลักษณะของการกัดกร่อนได้ดังนี้

1. การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Microcell or Uniform Corrosion) จะเกิดเมื่อขั้วแคโทดและแอโนดทำปฏิกิริยากันทันที มีสาเหตุจากการบ่อน้ำ และปริมาณคลอไรด์ไอออนปนเปื้อนที่มีค่อนข้างสูงในเหล็กเสริม การกัดกร่อนชนิดนี้จะเกิดขึ้นทั่วทั้งผิวหน้าของวัสดุ

2. การกัดกร่อนในบริเวณจำเพาะ (Macrocell or Local Corrosion) เป็นปฏิกิริยาระหว่างสนิมในเหล็กเสริม (แอโนด) และส่วนที่ไม่เป็นสนิมหรือส่วนที่มีฟิล์มปกคลุมอยู่ (แคโทด) มีสาเหตุจากมีคลอไรด์ไอออนปนเปื้อนจนเกิดสนิมแบบหลุม (Pitting Corrosion) ซึ่งการกัดกร่อนชนิดนี้จะสังเกตและตรวจพบได้ยาก ซึ่งในบางกรณีจะไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า

โดยปกติแล้วเหล็กเสริมในคอนกรีตจะมีฟิล์มบางๆ (Passivation Film) ของ $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ เคลือบอยู่ ฟิล์มที่วอนี้เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ของซีเมนต์กับน้ำในระหว่างการพัฒนา กำลังคอนกรีต ทำให้เหล็กเสริมมีความเป็นด่างสูงมีค่า pH ประมาณ 12.6 ถึง 13.5 ซึ่งสูงพอที่จะป้องกันการสูญเสียอิเล็กตรอนของเหล็กเสริม หรือไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) (Bentur *et al.*, 1997) ดังที่กล่าวมาสาเหตุหลักๆของการเกิดสนิมก็คือ ปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน และคลอไรด์ เพราะคาร์บอนเนชัน และคลอไรด์ไอออนจะเข้าไปทำลายฟิล์มที่เคลือบเหล็กเสริมนั่นเอง

การกัดกร่อนจากปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน

คาร์บอนเนชัน (Carbonation) ก็คือการที่คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึมผ่านคอนกรีตเข้าไปทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว โดยทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นหลักทำให้ได้แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ดังสมการที่ 5



การเกิดคาร์บอนเนชันนี้ไม่ได้ทำให้เหล็กเป็นสนิมจากตัวมันเอง แต่จะทำให้ค่าความเป็นด่างของซีเมนต์เพสต์ลดลงค่า ซึ่งปกติซีเมนต์เพสต์นั้นจะมีค่า pH อยู่ระหว่าง 12.5 ถึง 13.5 ลดลงเหลือเพียงประมาณ 8 ถึง 9 หากเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันมากเพียงพอจนซีเมนต์เพสต์สูญเสียคาร์บอนไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) จนหมด โดยมีปัจจัยต่อการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันในคอนกรีตเสริมเหล็กดังต่อไปนี้

1. ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ โดยความชื้นสัมพัทธ์ที่ไม่ชื้นและแห้งเกินไปจะทำให้เกิดคาร์บอนเนชันที่รุนแรง

2. ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ ยิ่งมีปริมาณมากก็จะทำให้เกิดคาร์บอนชั้นที่รุนแรง

3. อุณหภูมิ ยิ่งอุณหภูมิสูงก็จะทำให้ปฏิกิริยาคาร์บอนชั้นดำเนินไปเร็วขึ้น

4. ความพรุนของคอนกรีต คอนกรีตที่มีความหิบน้ำต่ำจะเกิดคาร์บอนชั้นได้เร็ว

จากที่กล่าวมาผลกระทบของการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั้นจะทำให้คอนกรีตสูญเสียความแข็งแรง ซึ่งจะทำให้ความชื้นและออกซิเจนสามารถทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริมได้ง่าย จนทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมในที่สุด และเมื่อเหล็กเสริมเป็นสนิมจะมีผลทำให้เหล็กเสริมเกิดการบวมตัว ส่งผลให้คอนกรีตเกิดรอยร้าวหรือหลุดร่อนออกมาเกิดความเสียหายได้

การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์

เกิดจากคลอไรด์ไอออนอิสระในอากาศ หรือคอนกรีตมีโอกาสดัมผัสกับน้ำทะเล หรืออาจจะมีการปนเปื้อนตั้งแต่แรกแล้ว การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์จะทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมเนื่องจากไอออนของคลอไรด์สามารถทำลายฟิล์มที่หุ้มเหล็กเสริม และยังสามารถทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริม เมื่อน้ำและก๊าซออกซิเจนตรงบริเวณเหล็กเสริมที่ไม่มีฟิล์มป้องกันอยู่ เหล็กจะเป็นสนิม ซึ่งแสดงกระบวนการการกัดกร่อนของคลอไรด์ดังภาพที่ 1 เหล็กเส้นล่างยังมีฟิล์มเคลือบผิวอยู่ ต่างจากเหล็กเส้นบนที่มีปริมาณคลอไรด์ปนเปื้อนจนเหล็กไม่อาจรักษาสภาพฟิล์มที่เคลือบผิวได้ส่งผลให้เหล็กเป็นสนิม การเกิดสนิมในเหล็กเกิดจากความต่างศักย์ทางไฟฟ้าของเหล็กเสริมในคอนกรีตซึ่งจะทำให้เกิดเซลล์ไฟฟ้าเคมีขึ้น การเกิดความต่างศักย์เกิดจากการที่คอนกรีตมีความแตกต่างกัน ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุเช่นจากความแตกต่างของความชื้น ความแตกต่างของความเข้มข้นของเกลือของน้ำในโพรง ความแตกต่างของสภาพแวดล้อม และความแตกต่างของความหนาของคอนกรีตหุ้ม เป็นต้น

คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ (2543) ได้อธิบายถึงคลอไรด์ไอออนที่ซึมผ่านเข้าเนื้อคอนกรีตไว้ว่าความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณใกล้ผิวสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ เช่น ทะเลเป็นเวลานาน จะมีความเข้มข้นของคลอไรด์ในสารละลายที่อยู่ในช่องว่างของคอนกรีตสูงกว่าความ

เข้มข้นของคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อม ได้ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Chloride Condensation เกิดใน 2 ลักษณะดังนี้

1. กรณีของสภาวะเปียกสลับแห้งโดยน้ำทะเลในขณะที่บริเวณผิวคอนกรีตแห้ง คอนกรีตจะสูญเสียเฉพาะน้ำซึ่งจะระเหยออกจากผิวคอนกรีต ทั้งเกลือไวนบนบริเวณผิวคอนกรีตที่แห้ง แต่พอคอนกรีตเข้าสู่ภาวะเปียก น้ำเกลือจะซึมเข้าไปในคอนกรีตอย่างรวดเร็ว

2. ในกรณีของสภาวะเปียกตลอด เวลาในน้ำทะเลหรือน้ำใต้ดินที่มีเกลือ ในกรณีนี้คลอไรด์ในสิ่งแวดล้อม สามารถถูกดึงเข้าไปในช่องว่างของคอนกรีตได้ด้วยแรงทางประจุไฟฟ้า เนื่องจากผิวของช่องว่างในคอนกรีตซึ่งมักจะเป็นผลผลิตทางไฮเดรชัน จะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นบวกจึงสามารถดึงคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมซึ่งมีประจุลบ เข้าไปได้ อย่างไรก็ตามในสภาพของสิ่งแวดล้อมที่เปียกตลอดเวลา ถึงแม้คลอไรด์จะเข้าไปในคอนกรีตได้มากก็มักไม่เป็นอันตรายต่อเหล็กเสริม เนื่องจากไม่มีออกซิเจนเพียงพอในการเกิดสนิม ยกเว้นแต่ในบริเวณที่ติดกับคอนกรีตจะมีส่วนที่มีสภาพแห้งด้วย

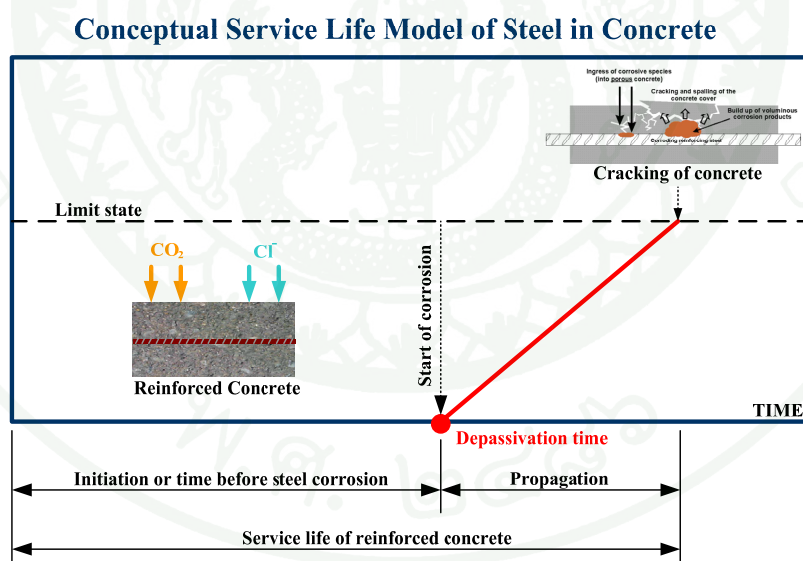
นอกจากคลอไรด์จะซึมผ่านเข้าไปในเนื้อคอนกรีต คอนกรีตเองก็อาจมีคลอไรด์ปนเปื้อนอยู่ก่อนแล้ว เนื่องจากการใช้ส่วนผสมของวัสดุที่มีคลอไรด์ เช่น น้ำ ทราช หิน ปูน หรือสารเคมีผสมเพิ่มที่มีคลอไรด์ปนอยู่ ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบปริมาณคลอไรด์ว่ามีอยู่ในปริมาณที่ไม่ทำให้เกิดอันตรายต่อคอนกรีต BS 8110: Part 1 (1997) ได้กำหนดปริมาณคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตเสริมเหล็กไม่เกินร้อยละ 0.35 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ BA 35/90 (1990) กำหนดไว้ที่ร้อยละ 0.3 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ และ Concrete Society Technical Report No. 32 (1986) ได้ให้คำแนะนำไว้ว่าคอนกรีตจะมีความเสี่ยงเมื่อมีปริมาณคลอไรด์เกินกว่าร้อยละ 0.6

คณะกรรมการคอนกรีตและวัสดุ (2543) ยังอธิบายถึงปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในเนื้อของคอนกรีตดังกล่าวนี้ เป็นผลรวมของคลอไรด์สองประเภทคือ

1. Bound Chloride คือคลอไรด์บางส่วนที่ถูกจับยึดอยู่ในผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และที่เกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนไปในรูปของ Calcium Chloro-Aluminate Hydrate (Friedel's Salt) หรือถูกดูดซับด้วยผิวของ gel pores ซึ่งคลอไรด์ในส่วนนี้จะไม่มีผลต่อกระบวนการเกิดสนิม

2. Free Chloride คือคลอไรด์ที่ละลายอยู่ในน้ำในโพรงของคอนกรีต (Pore Solution) คลอไรด์ในส่วนนี้สามารถที่จะแพร่เข้าไปยังคอนกรีต ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ต่ำกว่า และเป็นส่วนที่ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตลดลง

เนื่องจากทั้งคลอไรด์และคาร์บอนชั้นไม่ได้ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมโดยตรง แต่จะเป็นการเร่งกระบวนการของสนิมซึ่งอธิบายได้ดังภาพที่ 2 สามารถแบ่งเป็นช่วงเริ่มต้น หรือช่วยก่อนเหล็กเสริมเป็นสนิม ช่วงเหล็กเสริมเป็นสนิม และช่วงสุดท้ายเหล็กเสริมเป็นสนิมมากพอที่จะดันคอนกรีตจนเกิดการระเบิด ซึ่งคลอไรด์อิสระและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นี้เองจะไปเร่งกระบวนการการเกิดสนิมในช่วงเริ่มต้น เมื่อคลอไรด์อิสระและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึมเข้าไปในผิวของคอนกรีตมากขึ้นเรื่อยๆจนเข้าไปถึงเหล็กเสริมภายในจะไปทำลายฟิล์มที่เคลือบผิวของเหล็กเสริมและเมื่อปริมาณของคลอไรด์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ซึมผ่านเข้าไปมีปริมาณมากถึงจุดวิกฤต (Depassivation Time) ก็จะเริ่มเกิดสนิมขึ้นที่ผิวของเหล็กเสริมจนดันให้ผิวคอนกรีตระเบิดออก ส่งผลให้โครงสร้างเกิดความเสียหายจนอาจเกิดการวิบัติไปในที่สุด



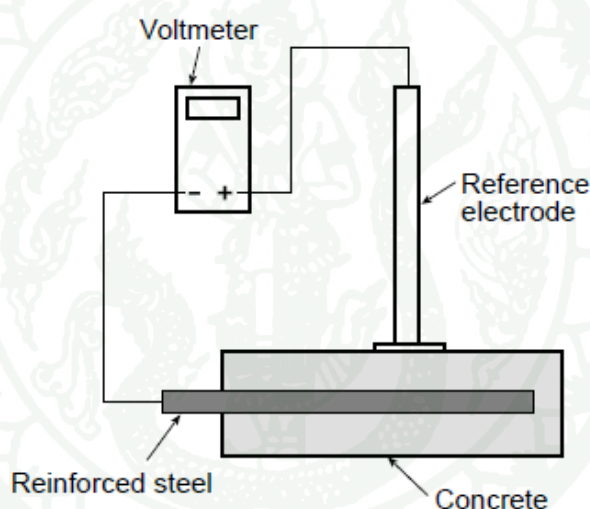
ภาพที่ 2 แบบจำลองช่วงชีวิตการใช้งานของเหล็กเสริมในคอนกรีต

ที่มา: วิศิษฐ์ (2553)

การประเมินการเกิดสนิมในเหล็ก

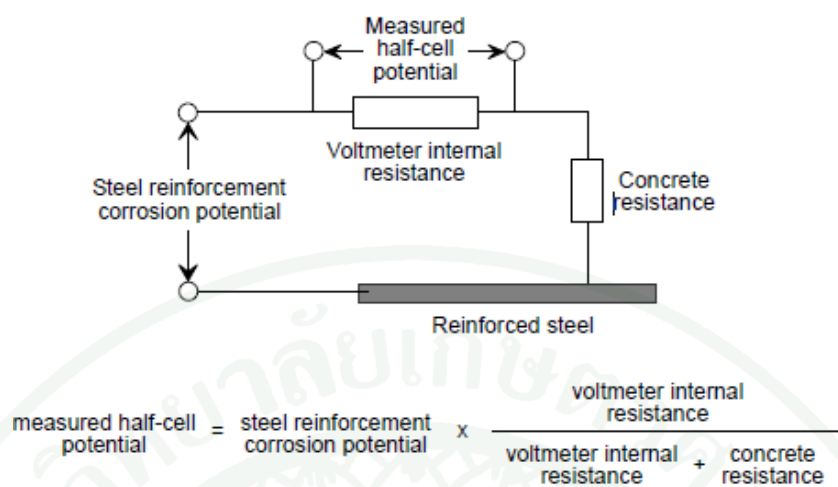
1. การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

เป็นเครื่องมือตรวจวัดความผุกร่อนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ตามมาตรฐาน ASTM C876-91 “Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete” จะวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างเหล็กเสริมและบริเวณผิวคอนกรีตเพื่อประเมินค่าการกัดกร่อนและสภาพของชั้นหุ้มเหล็กเสริม โดยค่าความต่างศักย์ไฟฟ้านี้เป็นผลจากขบวนการการกัดกร่อนเหล็กเสริม ซึ่งสามารถแสดงวงจรเบื้องต้นได้ดังภาพที่ 3 และอย่างละเอียดดังภาพที่ 4



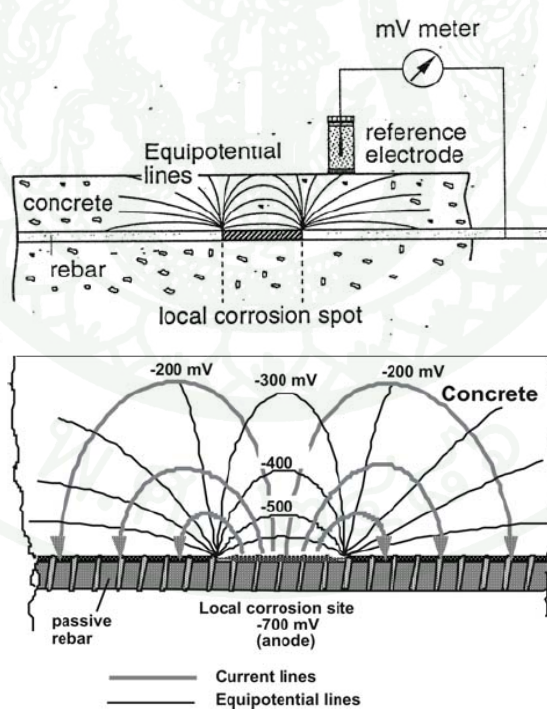
ภาพที่ 3 ส่วนประกอบของเครื่องมือวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

ที่มา: Gu and Beaudoin (1998)



ภาพที่ 4 แผนภาพวงจรศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

ที่มา: Gu and Beaudoin (1998)



ภาพที่ 5 แผนภูมิศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของเหล็กเสริมในคอนกรีต

ที่มา: Elsener *et al.* (2003)

ภาพที่ 5 อธิบายถึงการไหลเวียนของกระแสไฟฟ้า (Current Flow) ในเหล็กเสริม สำหรับการเกิดสนิมแบบหลุม ซึ่งอาจกล่าวอย่างง่ายได้ว่าค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ คือค่าของเส้นสมศักย์ (Equipotential Lines) นั้นๆ และยังแสดงถึงสนิมเมื่อมีขนาดเล็ก อาจทำให้ตรวจไม่พบ เช่น ค่าที่ -400 ถึง -500 มิลลิโวลต์ สำหรับภาพที่ 6 แสดงตัวอย่างขณะทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ในโครงสร้างเสา



ภาพที่ 6 การตรวจสอบโดยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-Cell Potential Measurement)

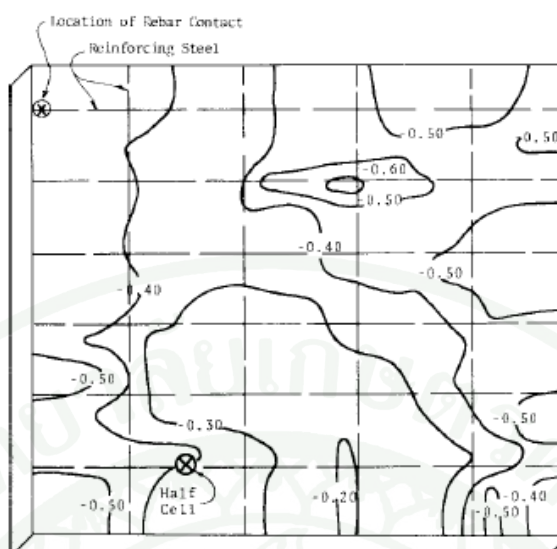
ที่มา: Elsener (2001)

ในการวัดค่าแนวโน้มการเกิดสนิมโดยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ สำหรับโครงสร้างขนาดเล็ก จุดที่ทำการวัดจะห่างกันประมาณ 5 ถึง 10 เซนติเมตร (มยผ. 1506-51, 2551) โดยทำเป็นเส้นตาราง และนำมาพล็อตค่าความต่างศักย์ในรูปของเส้นชั้นความสูง หรือเส้นชั้นค่าความต่างศักย์ (Corrosion Mapping) ดังภาพที่ 7 ตามมาตรฐาน ASTM C876 ได้กำหนดเกณฑ์ค่าศักย์ไฟฟ้าไว้ดังตารางที่ 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 (1999)



ภาพที่ 7 เส้นชั้นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-Cell Potential Contour)

ที่มา: ASTM (1999)

2. ความคลาดเคลื่อนในการวัด

การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ ดังภาพที่ 3 และ 4 วงจรเซลล์ไฟฟ้าไม่ได้เชื่อมต่อกันโดยตรง แต่ต้องผ่านคอนกรีตซึ่งมีความต้านทานไฟฟ้า รวมถึงความต้านทานไฟฟ้าของโวลต์มิเตอร์เองด้วย จึงทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อน และสภาพแวดล้อมบางอย่างยังมีผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ เช่น ปริมาณคลอไรด์ไอออน ปริมาณออกซิเจน ความชื้น เป็นต้น

3. ปัจจัยที่มีผลต่อความคลาดเคลื่อนการวัด

Gu and Beaudoin (1998) ทำการวิจัยเกี่ยวกับการวัดแนวโน้มการเกิดสนิมโดยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ โดยทำการศึกษาถึงอิทธิพลต่างๆที่มีผลต่อการวัดค่าศักย์ไฟฟ้า และได้แนะนำว่า ก่อนทำการสำรวจสนิมและแปลผลของค่าศักย์ไฟฟ้านั้น ควรศึกษาถึงข้อมูลเบื้องต้นของโครงสร้างเช่น ตำแหน่งของเหล็กเสริม ระยะหุ้มเหล็ก ส่วนผสมคอนกรีต คอนกรีตเคยผ่านซ่อมแซมมาก่อนหรือไม่ รวมไปถึงข้อมูลจากการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ครั้งก่อนๆ นอกจากนี้ยังควรทำการสำรวจด้วยตาเปล่า ปริมาณคลอไรด์ปนเปื้อน ระยะคาร์บอนชั้น ความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต ระยะ

หุ้มเหล็กเสริม และอัตราการเกิดสนิมประกอบกับการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการสำรวจ เพราะการอ่านจากค่าศักย์ไฟฟ้าอย่างเดียวโดยไม่คำนึงถึงสภาวะแวดล้อม รวมถึงอิทธิพลอื่นๆจากตัวคอนกรีตเองดังตารางที่ 2 อาจทำให้การตีความผิดพลาดได้ และยังเสริมว่าการสำรวจเป็นระยะเวลาอย่างสม่ำเสมอจะช่วยให้การประเมินสนิมมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

ตารางที่ 2 อิทธิพลที่มีผลกระทบต่อการใช้ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ และอัตราการเกิดสนิม

Situation	Half-Cell Potential Shift	Corrosion of steel reinforcement	Applicable to ASTM C876
Decrease in oxygen concentration	To negative	May not increase	No
Carbonation/decrease in PH	To negative	Increase	Yes
Increase in chloride concentration	To negative	Increase	Yes
Anodic corrosion inhibitor	To positive	Decrease	Yes
Cathodic corrosion inhibitor	To negative	Decrease	No
Mixed corrosion inhibitor	To positive or negative	Decrease	No
Epoxy-coated rebar	To positive	Not related	No
Galvanized rebar	To negative	Not related	No
Dense concrete cover	To negative	Not related	No
Concrete resistance	To positive	Not related	No
Coatings and sealers	To positive	Not related	No

ตารางที่ 2 (ต่อ)

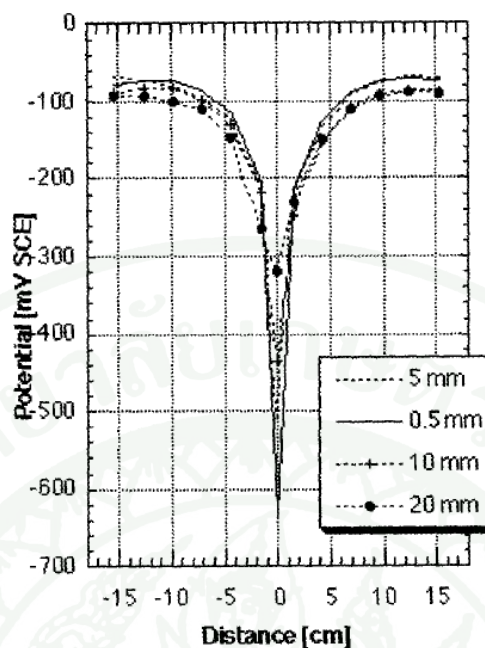
Situation	Half-Cell Potential Shift	Corrosion of steel reinforcement	Applicable to ASTM C876
Concrete repair patch	To positive or negative	Not related	No
Cathodic protection	To negative	Not related	No
Stray current	Fluctuating between positive and negative	Not related	No

ที่มา: Gu and Beaudoin (1998)

จากตารางที่ 2 ช่องแรกคือคอนกรีตที่ถูกอิทธิพลจากสภาวะต่างๆรอบกวน ช่องที่สองคือผลกระทบต่อค่าศักย์ไฟฟ้าว่าเป็นเช่นใด มีผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าจากความเป็นจริง ช่องที่สามบอกถึงอิทธิพลดังกล่าวมีพอต่ออัตราการเกิดสนิมอย่างไร และช่องที่สี่คือผลของอิทธิพลดังกล่าวมีการกล่าวถึงในมาตรฐาน ASTM C876 หรือไม่

และจากงานวิจัยของ Elsener *et al.* (2003) มีความสอดคล้องกันกับ Gu and Beaudoin (1998) จึงได้สรุปเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

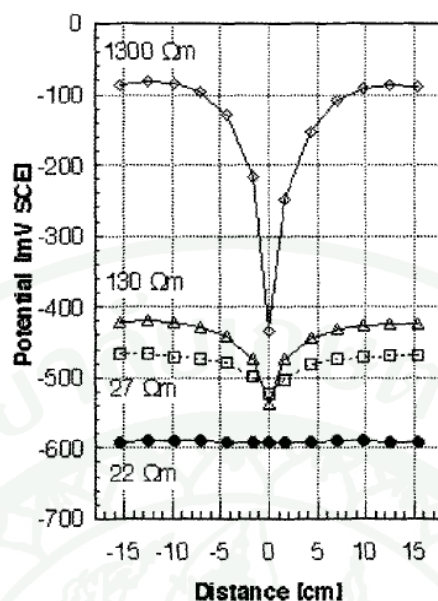
1. ระยะห่างระหว่างผิวคอนกรีตกับเหล็กเสริม (Concrete Cover Depth) เมื่อระยะห่างเหล็กเสริมกับผิวคอนกรีตเพิ่มขึ้น ค่าความต่างศักย์ที่วัดได้จากส่วนที่เหล็กเสริมเป็นสนิม และส่วนที่ไม่เกิดสนิมมีค่าความต่างศักย์ใกล้เคียงกันมากขึ้น ทำให้ไม่สามารถตรวจหาสนิมที่เป็นจุดเล็กๆได้ ดังภาพที่ 8 ช่วงระยะ 0 มม. คอนกรีตที่มีระยะหุ้มเหล็ก 20 มม. วัดค่าศักย์ไฟฟ้าได้ประมาณ -300 มิลลิโวลต์ และที่ระยะหุ้มเหล็ก 5 มม. สามารถอ่านค่าได้ถึง -600 มิลลิโวลต์ ซึ่งค่าศักย์ไฟฟ้าจะวัดได้ต่ำลงเรื่อยๆ เมื่อเทียบกับระยะหุ้มเหล็กเสริมที่น้อยลง



ภาพที่ 8 อิทธิพลของระยะระหว่างผิวคอนกรีตและเหล็กเสริมและความต่างศักย์

ที่มา: Elsener *et al.* (2003)

2. ความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต (Concrete Resistivity) จากภาพที่ 9 ความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตจะส่งผลต่อการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์โดยตรง นอกจากนี้ความชื้นและสารละลายในรูพรุนของคอนกรีตก็มีผลต่อความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต และความต้านทานนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา คอนกรีตที่มีความชื้นจะมีความต้านทานต่ำและจะช่วยให้ตรวจหาจุดที่เกิดสนิมขนาดเล็กได้ดีกว่าคอนกรีตที่แห้ง สำหรับคอนกรีตที่มีขนาดใหญ่ในคอนกรีตที่มีความต้านทานไฟฟ้าสูงจะบ่งบอกความเป็นแอโนด และแคโทดได้ชัดเจนกว่าคอนกรีตที่มีความต้านทานไฟฟ้าต่ำ แต่มีข้อจำกัดคือจะต้องตรวจเป็นบริเวณเล็กมากจึงจะพบ ดังภาพที่ 8 แสดงไว้ว่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า 1300 โอห์มเมตร (Ωm) จะพบความเป็นไปได้ที่จะเกิดสนิมในช่วง -5 ถึง 5 ซม. กลับกันที่สภาพความต้านทานไฟฟ้า 22 โอห์มเมตร (Ωm) แม้ว่าจะมีระยะห่างถึง 30 ซม. (-15 ถึง 15 ซม.) ก็ยังสามารถตรวจพบได้ง่าย



ภาพที่ 9 อิทธิพลของความต้านทานของคอนกรีต

ที่มา: Elsener *et al.* (2003)

3. ผิวคอนกรีตมีความต้านทานสูง (High Resistive Surface Layers) จะส่งผลให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็นบวกมาก ซึ่งมีผลให้ไม่สามารถตรวจพบสนิม

4. ปริมาณออกซิเจน (Oxygen Availability) โครงสร้างที่อยู่ใต้น้ำหรือใต้ดินจะทำให้ออกซิเจนที่เข้าไปมีปริมาณน้อย ค่าความต่างศักย์ที่วัดได้บริเวณเหนือน้ำหรือพื้นดินจะส่งผลให้ค่าเป็นลบมากกว่าความเป็นจริง เนื่องจากคอนกรีตมีความเป็นด่างน้อยเกินไปกว่าที่จะรักษาฟิล์มที่หุ้มเหล็กเสริม ภายใต้สภาวะนี้ส่งผลให้ค่าความต่างศักย์เป็นลบ แต่ไม่ได้หมายความว่าเหล็กเสริมเป็นสนิม

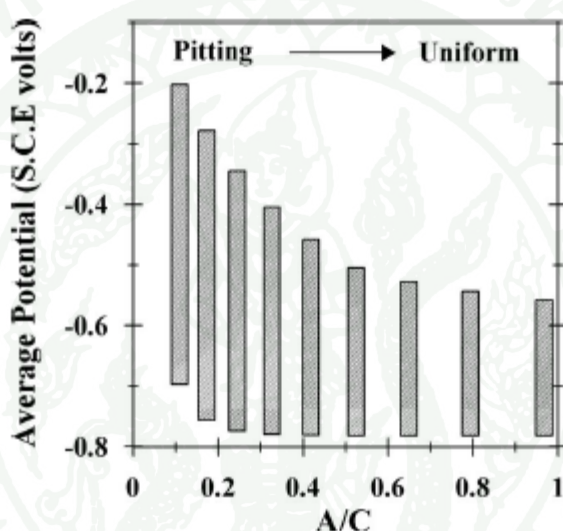
5. คาร์บอนเนชั่นและความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออน (Carbonation and Chloride Ion Concentration) เช่นเดียวกันกับปริมาณออกซิเจนในคอนกรีต คาร์บอนเนชั่นและคลอไรด์เมื่อทำปฏิกิริยาไปถึงชั้นเหล็กเสริมจะเข้าไปทำลายฟิล์มที่หุ้มเหล็กเสริม ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ต่ำกว่าความเป็นจริง ซึ่งตัวเหล็กเสริมอาจจะยังไม่เกิดสนิม แต่ว่าปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นและคลอไรด์นี้ เป็นส่วนสำคัญในการเร่งอัตราการเกิดสนิม

6. คอนกรีตที่ผ่านการซ่อมแซม (Concrete Repair Patch) โดยปกติแล้วคอนกรีตไม่ได้มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous) เมื่อมีการซ่อมแซมจึงทำให้เนื้อคอนกรีตเปลี่ยนไป รวมถึงทำให้เกิดชั้นคอนกรีตเก่า และชั้นคอนกรีตใหม่ ซึ่งในสภาพไม่ปกติเช่นนี้จึงทำให้การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มีความคลาดเคลื่อน

นอกจากที่กล่าวมาชนิดของการเกิดสนิมก็มีผลต่อความคลาดเคลื่อนได้เช่นกัน ในปี 2002 Elsener ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของการเกิดสนิมแบบหลุม (Macrocell or Local Corrosion) มีลักษณะแอโนดเป็นจุดเล็กๆและที่เหลือเป็นแคโทด ซึ่งการเกิดสนิมแบบนี้มีผลให้เหล็กเกิดการสูญเสียหน้าตัดที่รวดเร็ว การวิจัยนี้ได้ออกแบบการทดลองแท่งเหล็ก (Macrocell Bar) แช่อยู่ในน้ำ และทำให้เกิดสนิมแบบหลุมจากการกัดกร่อนในบริเวณจำเพาะ มีสัดส่วนพื้นที่แคโทดต่อแอโนดเป็น 60 โดยใช้ 3 ชนิดคือ น้ำกลั่น น้ำผสม(น้ำกลั่นและน้ำประปา) และน้ำประปา ทำการปรับเปลี่ยนระยะเหล็กเสริมที่ค่าต่างๆ และเหล็กเสริมในมอร์ต้าที่มีปริมาณคลอไรด์ปนเปื้อนร้อยละ 3 ตามลำดับ ได้ข้อสรุปว่าสามารถทราบตำแหน่งของแอโนดจากวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ แต่มีข้อแม้ว่าคอนกรีตจะต้องมีความต้านทานสูงและระยะเหล็กเสริมน้อย แต่ในความเป็นจริงแล้วในการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าโดยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มักถูกใช้กับคอนกรีตที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นแอโนดที่มีขนาดเล็กจึงถูกพบได้ง่ายในคอนกรีตที่มีความต้านทานต่ำ เนื่องจากบริเวณรอบๆของแอโนดจะมีแคโทดอยู่ และในกรณีของสนิมแบบหลุม ความต้านทานหลัก (Primary Resistance) เป็นตัวควบคุมวงจรไฟฟ้าของสนิมแบบหลุม (Macrocell Current) เฉพาะคอนกรีตที่มีความต้านทานสูงปฏิกิริยาแคโทดิก (Reduction Reaction) จะเป็นตัวควบคุมของปฏิกิริยาทั้งหมดในการกัดกร่อนในบริเวณจำเพาะ

Pour-Ghaz *et al.* (2009) ได้ศึกษาการแปลความหมายของแนวโน้มการเกิดสนิมโดยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และพบว่าค่าที่ได้ใกล้เคียงความจริง ในกรณีที่สนิมเกิดจากการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform Corrosion) แต่ยังไม่มีความถูกต้องนักกับสนิมแบบหลุมหรือการกัดกร่อนในบริเวณจำเพาะ (Localized Corrosion) และได้ทำการศึกษาปัจจัยอื่นๆอีกเช่น ระยะเหล็กเสริม ความต้านทานของคอนกรีต อัตราส่วนพื้นที่ระหว่างแอโนดและแคโทด (A/C) ปริมาณออกซิเจน ได้ผลสรุปว่าคอนกรีตที่มีความต้านทานต่ำจะให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ถูกต้องกว่าโดยเฉพาะบริเวณระหว่างแอโนดและแคโทด (Transition Zone) และบริเวณแคโทดค่าที่ได้จะมีความคลาดเคลื่อนมากกว่าแอโนด สำหรับระยะเหล็กเสริมยังระยะห่างมากค่าของศักย์ไฟฟ้า ก็ยังคลาดเคลื่อนมากเช่นเดียวกับความต้านทานของคอนกรีต แต่ปริมาณของออกซิเจนกลับพบว่าไม่ใช่ปัจจัยที่สำคัญนักนอกจากคอนกรีตจะไม่มีออกซิเจนอยู่เลย สำหรับผลของค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้ค่าเฉลี่ยมาก หมายความว่า

แนวโน้มการเกิดสนิมต่ำ แต่อัตราการเกิดสนิม (Corrosion Rate) กลับสูงเป็นผลมาจากการเกิดสนิมแบบหลุม เช่นเดียวกัน เมื่อค่าเฉลี่ยของค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำ และมีแนวโน้มการเกิดสนิมสูง แต่อัตราการเกิดสนิมต่ำ เป็นผลมาจากการเกิดสนิมแบบสม่ำเสมอ และสามารถทราบรูปแบบของสนิมได้จากการตีความสัดส่วนระหว่างแอโนดต่อแคโทด (A/C) ดังภาพที่ 10 ที่ค่าเฉลี่ยศักย์ไฟฟ้า -0.2 ถึง -0.4 มิลลิโวลต์ สัดส่วนของแอโนดต่อแคโทดที่พบจะน้อยกว่า 0.3 กล่าวคือเหล็กเสริมมีสิทธิ์เกิดสนิมแบบหลุม ถึงอย่างไรก็ตามเมื่อค่าศักย์ไฟฟ้าเข้าใกล้ -0.6 มิลลิโวลต์ เหล็กเสริมสามารถเกิดสนิมได้ทั้งแบบสม่ำเสมอและแบบหลุม



ภาพที่ 10 อัตราส่วนแอโนดกับแคโทด (A/C) เทียบกับค่าเฉลี่ยค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ชนิด Calomel (Hg/Hg₂Cl₂) KCL sat. (S.C.E.)

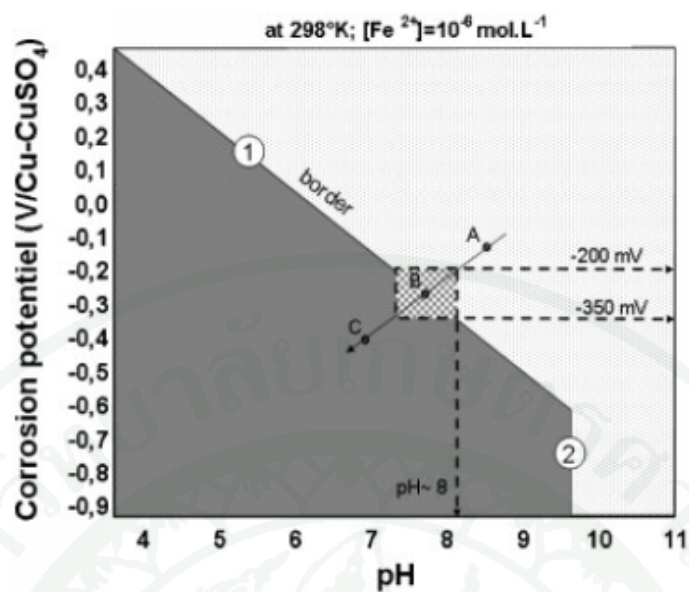
ที่มา: Pour-Ghaz *et al.* (2009)

Frölund *et al.* (2003) ทำการเปรียบเทียบระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าจากวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์กับอัตราการเกิดสนิม (Corrosion Rate, I_{corr}) พบว่าการประมาณค่าโดยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์อาจจะให้ค่าที่ผิดพลาดได้ในกรณีที่คอนกรีตอึดตัว ความลึกของการบอบเนชันถึงบริเวณเหล็กเสริมและคอนกรีตอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิที่ต่ำมาก

Nakamura *et al.* (2008) ได้ทำการทดลองวิเคราะห์การเกิดสนิมของสะพานคอนกรีตอัดแรงใกล้กับแนวชายฝั่งทะเล พบว่าบริเวณที่ค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นลบสูงส่วนใหญ่จะมีคลอไรด์สูง

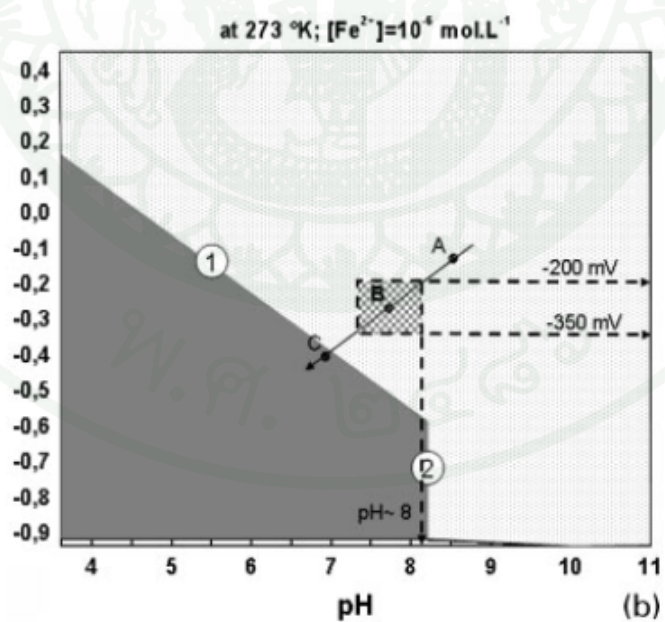
และเป็นสนิม แม้ว่าค่าศักย์ไฟฟ้าจะมีความแปรปรวนเนื่องจากหลายๆปัจจัยเช่น อุณหภูมิ ชนิดสารละลายของครึ่งเซลล์ และระยะเวลาหลังจากทำให้ผิวคอนกรีตเปียก และยังได้ข้อสังเกตว่าค่าที่ได้เป็นตัวเลขนั้นไม่เหมาะสมที่จะนำมาตัดสินแนวโน้มของการเกิดสนิม แต่ควรดูจากเส้นชั้นความสูง (Contour Map) ซึ่งให้ผลชัดเจนกว่า

ในปี 2008 เช่นกัน Assouli *et al.* ได้กล่าวถึงการตรวจสอบสนิมโดยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ ซึ่งค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการวัดนั้นมีหลายปัจจัยที่ทำให้เกิดการคลาดเคลื่อน จนมีผลให้การแปลค่าศักย์ไฟฟ้าผิดไปจากมาตรฐานเช่น อุณหภูมิ สารละลายในรูปของคอนกรีต ระยะหุ้มเหล็กเสริม รวมถึงลักษณะของโครงสร้างด้วย เพราะฉะนั้นในการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ ควรพิจารณาถึงสภาพแวดล้อม เช่น สภาพอากาศ (อุณหภูมิ ความชื้น) ของช่วงที่ทำการทดสอบ และควรทำการตรวจสอบเครื่องมือว่ามีความถูกต้องและเที่ยงตรงหรือไม่ ก่อนนำไปใช้ทำการทดสอบ นอกจากนี้การสำรวจตรวจสอบสภาพเหล็กเสริมโดยตรง และทางเคมีโดยการเจาะตัวอย่างคอนกรีตจะเป็นตัวกำหนดว่าผลของค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์สามารถเชื่อถือได้หรือไม่ และยังอธิบายถึงที่มาของค่าศักย์ไฟฟ้าตามมาตรฐาน ASTM C876 ในตารางที่ 1 คิดมาจาก Pourbaix Diagram ที่ได้มาจากการทดลองเกี่ยวกับ อุณหภูมิ ความดัน และความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน (Ferrous Concentration) โดยใช้หลักการของอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic) ดังภาพที่ 11 เป็นการนำ pourbaix diagram ในการอธิบายมาตรฐาน ASTM C876 โดยกำหนดสภาวะแวดล้อมตามมาตรฐานคือ ที่อุณหภูมิเท่ากับ 298k มีความดันบรรยากาศ 1 atm ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน 10^{-6} โมล และ Fe, $\text{Fe}(\text{OH})_2$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ มีสถานะเป็นของแข็ง มีแนวราบเป็นค่า pH และแนวดิ่งเป็นค่าศักย์ไฟฟ้า ที่ค่า pH ประมาณ 8 โอกาสการเกิดสนิมจะถูกแบ่งเป็น 3 ส่วน โดย A คือบริเวณที่ไม่เกิดสนิม B คือบริเวณที่อาจจะเกิดสนิมหรือยังไม่เกิดก็ได้ และ C คือ บริเวณที่เกิดสนิม ซึ่งเป็นที่มาของตารางที่ 1 นั้นเอง และยังแสดงให้เห็นถึงผลของสภาพแวดล้อมดังภาพที่ 12 เมื่อมีอุณหภูมิเท่ากับ 273 k จะทำให้การนำค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาแปลความหมายตามมาตรฐานนั้นทำให้ผิดพลาดได้ เนื่องจากค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าศักย์ไฟฟ้าเกิน -350 มิลลิโวลต์ แปลว่าเหล็กมีโอกาสเป็นสนิมมากกว่าร้อยละ 90 แต่จากกราฟเหล็กยังไม่สามารถเกิดสนิมได้นั่นเอง



ภาพที่ 11 Pourbaix Diagram ของสนิมในเหล็กเสริมตามมาตรฐาน ASTM C876

ที่มา : Assouli *et al.* (2008)



ภาพที่ 12 Pourbaix Diagram ของสนิมในเหล็กเสริมตามมาตรฐาน ASTM C876 (2)

ที่มา : Assouli *et al.* (2008)

การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าหลังจากการซ่อมแซมคอนกรีตก็มีงานวิจัยเช่นกันในปี 2011 Hussain ได้จำลองคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผ่านการซ่อมแซมเหล็กเสริม และมีการเทคอนกรีตทับใหม่ โดยการหล่อคอนกรีตมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ตรงกลางไม่มีปริมาณคลอไรด์ปนเปื้อนเปรียบเสมือนคอนกรีตใหม่ และส่วนริมทั้งสองข้างมีปริมาณคลอไรด์ปนเปื้อนร้อยละ 5 ของน้ำหนัก (Mass of Blinder) เปรียบเสมือนคอนกรีตเก่าที่มีการปนเปื้อนคลอไรด์ การจำลองเช่นนี้สนิมที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นสนิมแบบหลุม ซึ่งผลของค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้ในส่วนตรงกลาง (ส่วนที่เป็นคอนกรีตใหม่) เท่ากับ -0.55 โวลต์ ส่วนริมเท่ากับ -0.62 โวลต์ แต่เมื่อเปิดเหล็กสำรวจพบว่าเหล็กเสริมตรงกลางไม่ได้เป็นสนิมเลยเนื่องจากมีพฤติกรรมเป็นแคโทด ส่วนริมทั้งสองด้านมีสนิมเกิดขึ้นเนื่องจากเป็นแอโนด ซึ่งการซ่อมแซมคอนกรีตเสริมเหล็กเช่นนี้จะมีผลให้เหล็กเสริมในส่วนคอนกรีตเก่าเป็นสนิมมากกว่าก่อนซ่อมแซมนั่นเอง

ในปีเดียวกัน Hussain ยังได้ทำการทำการศึกษาค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ใต้น้ำ โดยการเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ตั้งทิ้งไว้ในอากาศปกติ คอนกรีตที่มีความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 95 และคอนกรีตที่ผ่านวงจรของเปียกและแห้ง ในหลายรูปแบบที่แตกต่างกัน เช่น ระยะหุ้มเหล็กเสริม ปริมาณคลอไรด์ปนเปื้อน เป็นต้น ผู้วิจัยได้พบว่าคอนกรีตที่อยู่ใต้น้ำนั้นจะให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่สูงกว่าความเป็นจริงมาก ยังพบอีกว่าค่าศักย์ไฟฟ้ากับปริมาณคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นไม่ได้เป็นส่วนหนึ่งของเส้นตรงแบบ 1 ต่อ 1 สำหรับคอนกรีตที่มีปริมาณคลอไรด์มากจะทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างเปียกและแห้งใกล้เคียงกว่าคอนกรีตที่มีปริมาณคลอไรด์น้อย

จากงานวิจัยต่างๆจะกล่าวในลักษณะคล้ายกันคือการประเมินสภาพเหล็กเสริม โดยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ด้วยค่าศักย์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวอาจทำให้ประเมินสภาพเหล็กเสริมผิดพลาดได้ และวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์นี้ก็เป็วิธีที่มีความละเอียดอ่อนและค่อนข้างแปรปรวน ยิ่งตัวคอนกรีตมีโอกาสสัมผัสกับอิทธิพลต่างๆดังที่กล่าวมาก็มีโอกาสที่จะทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ไม่เป็นไปตามความจริง ซึ่งอิทธิพลต่างๆก็จะขึ้นกับสภาพแวดล้อมที่ต่างกันไป ประกอบกับงานวิจัยในประเทศไทยเกี่ยวกับเรื่องศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์นั้นยังมีไม่มากนัก ตรงข้ามกับการทดสอบซึ่งมีการใช้กันอย่างแพร่หลาย การวิจัยนี้จึงทำขึ้นเพื่อเป็นกรณีศึกษา หรือข้อมูลเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ร่วมกับค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ เพื่อให้ได้ค่าแนวโน้มการเกิดสนิมที่มีความถูกต้อง และน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องจี้คอนกรีต (Vibrator)
2. อุปกรณ์วัดค่าการยุบตัว (Slump Test)
3. แบบหล่อแท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอก ขนาด 15 x 30 เซนติเมตร
4. แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด 30 x 30 x 10 เซนติเมตร
5. แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด 30 x 30 x 12.5 เซนติเมตร
6. ถังสำหรับแช่ตัวอย่างคอนกรีตขนาด 120 x 150 เซนติเมตร
7. เครื่องวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-cell Potential Test)
8. สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride, NaCl)
9. เครื่องชั่งน้ำหนัก สามารถอ่านค่าได้ละเอียด 0.01 กิโลกรัม
10. เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้ากระแสตรงและสายไฟฟ้า
11. แผ่นเหล็กขนาด 50 x 100 x 1 เซนติเมตร
12. โวลต์มิเตอร์ (Volt Meter)

วิธีการ

1. วัสดุและปฏิกาส่วนผสมคอนกรีต

1.1 วัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีต

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทรานกอนทรีน้ำเงินของบริษัทนครหลวงจำกัด
- มวลรวมหยาบขนาดโตสุด 3/4 นิ้ว
- เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร (SD30)

1.2 ปฏิกาส่วนผสมคอนกรีต

ในการศึกษาในครั้งนี้ได้กำหนดคอนกรีตส่วนผสมที่ 1, 2 และ 3 ให้มีกำลังรับแรงอัดที่ 28 วันเท่ากับ 210 กก./ชม.² โดยออกแบบตามมาตรฐาน ACI มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.57 และค่าการยุบตัวเท่ากับ 7.5 เซนติเมตร ซึ่งมีการใส่คลอไรด์ปนในเนื้อซีเมนต์แตกต่างกันไป สำหรับส่วนผสมที่ 4 คอนกรีตจะมีกำลังอัดที่ 28 วันเท่ากับ 180 กก./ชม.² มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.63 โดยมีปฏิกาส่วนผสมคอนกรีตและคุณสมบัติของเหล็กเสริมที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ดังแสดงในตารางที่ 3 และ 4

2. การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก

2.1 ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 30 x 30 x 10 เซนติเมตร

แผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 30 x 30 x 10 เซนติเมตร จำนวน 33 ตัวอย่าง ขนาดเหล็กเสริม 12 มิลลิเมตร วางเหล็กเป็นรูปตะแกรงมีระยะหุ้มเหล็กเสริมด้านข้าง 5 เซนติเมตร มีสายไฟทองแดงผูกติดกับเหล็กเสริมโยงออกมาด้านนอกผิวคอนกรีต โดยที่ฝั่งซ้ายมือจะเป็นคอนกรีตผสมโดยใช้ประปา และฝั่งขวามือเป็นคอนกรีตผสมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

ตารางที่ 3 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต

วัสดุในการผสม	ส่วนผสมที่ (กก./ลบ.ม.)			
	1	2	3	4
ชนิดปูนซีเมนต์	น้ำเงิน	น้ำเงิน	น้ำเงิน	น้ำเงิน
ปูนซีเมนต์	285	285	285	260
มวลรวมหยาบ	1090	1090	1090	895
มวลรวมละเอียด	880	880	880	1095
น้ำ	163	163	163	163
โซเดียมคลอไรด์	1.71	3.42	5.13	4.68

ตารางที่ 4 คุณสมบัติเหล็กเสริมคอนกรีต

Diameter (mm.)	Cross section area (mm. ²)	Yielding strength (kg./cm. ²)	Ultimate strength (kg./cm. ²)
DB12	113.1	2950	4800

2.2 ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 30 x 30 x 12.5 เซนติเมตร

แผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 30 x 30 x 12.5 เซนติเมตร จำนวน 3 ตัวอย่าง ขนาดเหล็กเสริม 12 มิลลิเมตร วางเหล็กเป็นรูปตะแกรงมีระยะหุ้มเหล็กเสริมด้านข้าง 5 เซนติเมตร มีสายไฟทองแดงผูกติดกับเหล็กเสริมโยงออกมาด้านนอกผิวคอนกรีต โดยที่ฝั่งซ้ายมือจะเป็นคอนกรีตผสมกับน้ำประปา และฝั่งขวามือเป็นคอนกรีตผสมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

โดยสามารถแบ่งตัวอย่างของการทดลองนี้ได้ดังตารางที่ 5 ได้แก่ ระยะหุ้มเหล็กเสริม ปริมาณคลอไรด์ปนเปื้อน กำลังรับแรงอัด คอนกรีตที่ผ่านการซ่อมแซม และคอนกรีตที่เหล็กเสริมมีการเคลือบอีพ็อกซี ซึ่งในแต่ละชนิดของตัวอย่างจะให้ปัจจัยที่ทำการศึกษามีค่าต่างกันไป แต่ปัจจัยอื่นๆจะมีค่าเท่าๆกัน เช่น ตัวอย่างระยะหุ้มเหล็กเสริมก็จะมีระยะหุ้มเหล็กที่ต่างกันไป แต่จะมีปริมาณคลอไรด์ปนเปื้อนซึ่งคิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนักซีเมนต์ และกำลังรับแรงอัดที่เท่ากัน ในส่วนของตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่านการซ่อมแซมคือวันที่ตัวอย่างจะถูกทำการซ่อมแซม 0 หมายถึง ตัวอย่าง

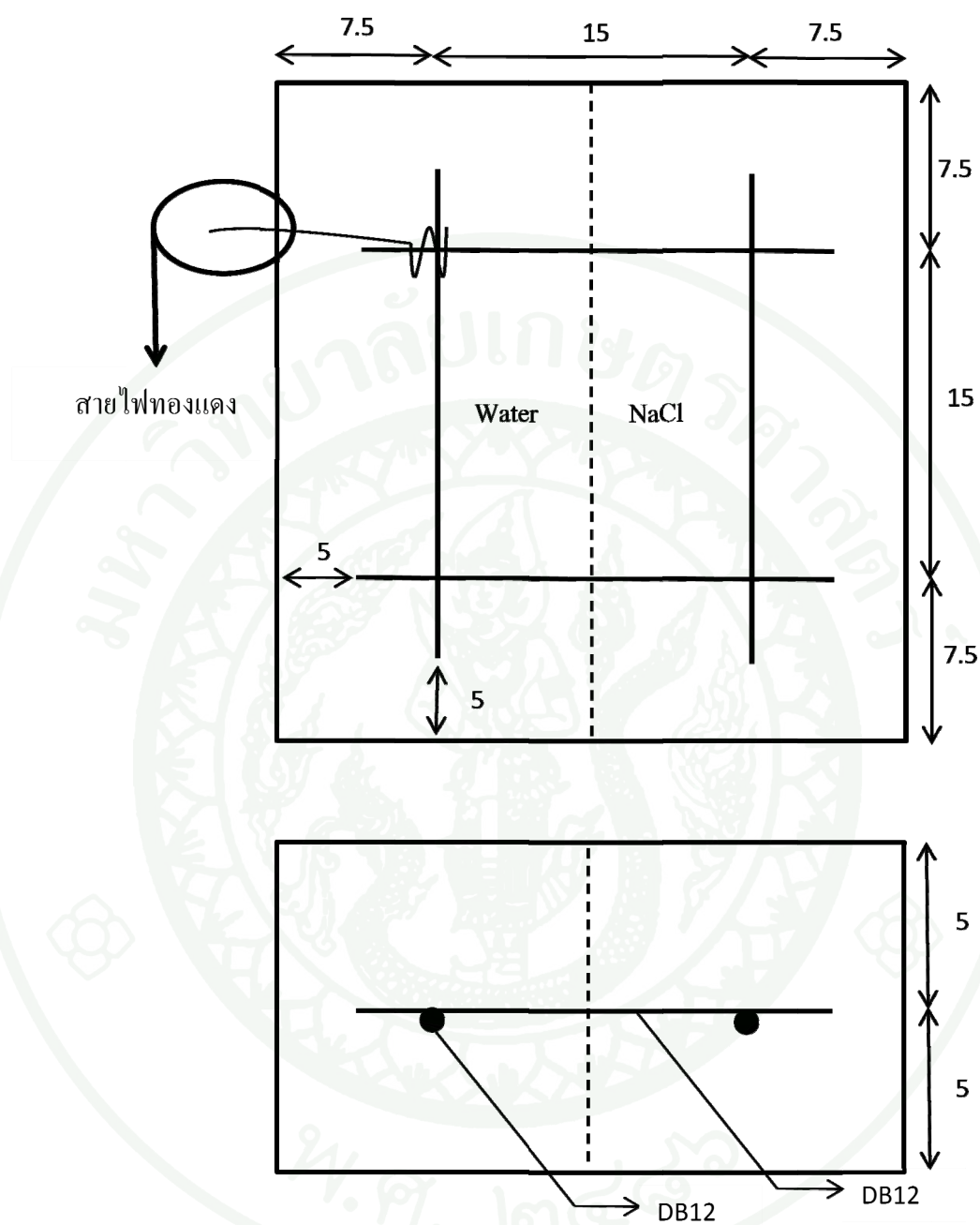
จะไม่ทำการซ่อมแซมใดๆ จนถึงสิ้นสุดการทดลอง 70 และ 226 หมายถึงตัวอย่างจะมีการซ่อมแซมในวันที่ 70 และ 226 ของการทดลอง ตัวอย่างสุดท้ายคืออีพ็อกซีเป็นการเปรียบเทียบรูปแบบของสนิมจากการเปรียบเทียบโดยใช้ตัวอย่างที่เหล็กเสริมทำการเคลือบ และไม่เคลือบอีพ็อกซี ตัวอย่างในการทดลองทั้งหมดมีรายละเอียดของแบบดังภาพที่ 13 ถึง 16

ตารางที่ 5 รายละเอียดแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

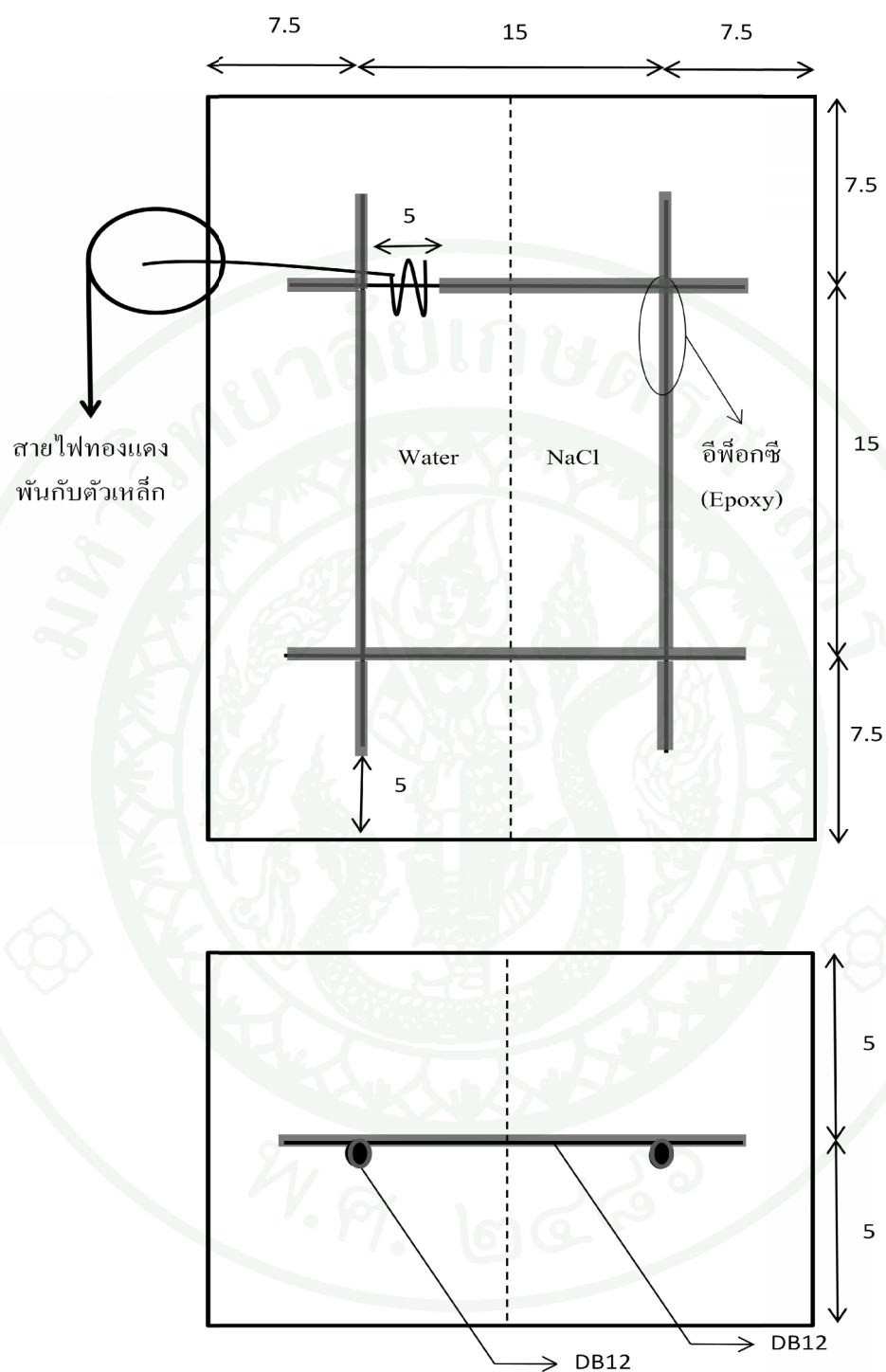
อิทธิพล	ชนิด	หน่วย	แบบ	ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต	จำนวนตัวอย่าง
ระยะหุ้มเหล็ก	2.5	ชม.	2.5 ชม.	ส่วนผสมที่ 1	3
	5		5 ชม.	ส่วนผสมที่ 1	3
	10		10 ชม.	ส่วนผสมที่ 1	3
	ร้อยละ 0.6		5 ชม.	ส่วนผสมที่ 1	¹
คลอไรด์	ร้อยละ 1.2	โดยน้ำหนักซีเมนต์	5 ชม.	ส่วนผสมที่ 2	3
	ร้อยละ 1.8		5 ชม.	ส่วนผสมที่ 3	3
	180		5 ชม.	ส่วนผสมที่ 4	3
กำลังรับแรงอัด	210	กก./ชม ² .	5 ชม.	ส่วนผสมที่ 3	3
	0		5 ชม.	ส่วนผสมที่ 3	3
คอนกรีตที่ผ่านการซ่อมแซม	70	-	5 ชม.	ส่วนผสมที่ 3	3
	226		5 ชม.	ส่วนผสมที่ 3	3
อีพ็อกซี	ไม่เคลือบอีพ็อกซี	-	5 ชม.	ส่วนผสมที่ 1	3
	เคลือบอีพ็อกซี		อีพ็อกซี	ส่วนผสมที่ 1	3

หมายเหตุ ¹ ตัวอย่างคลอไรด์ร้อยละ 0.6 โดยน้ำหนักซีเมนต์ ใช้ตัวอย่างเดียวกับตัวอย่างระยะหุ้มเหล็กเสริม 5 ชม.

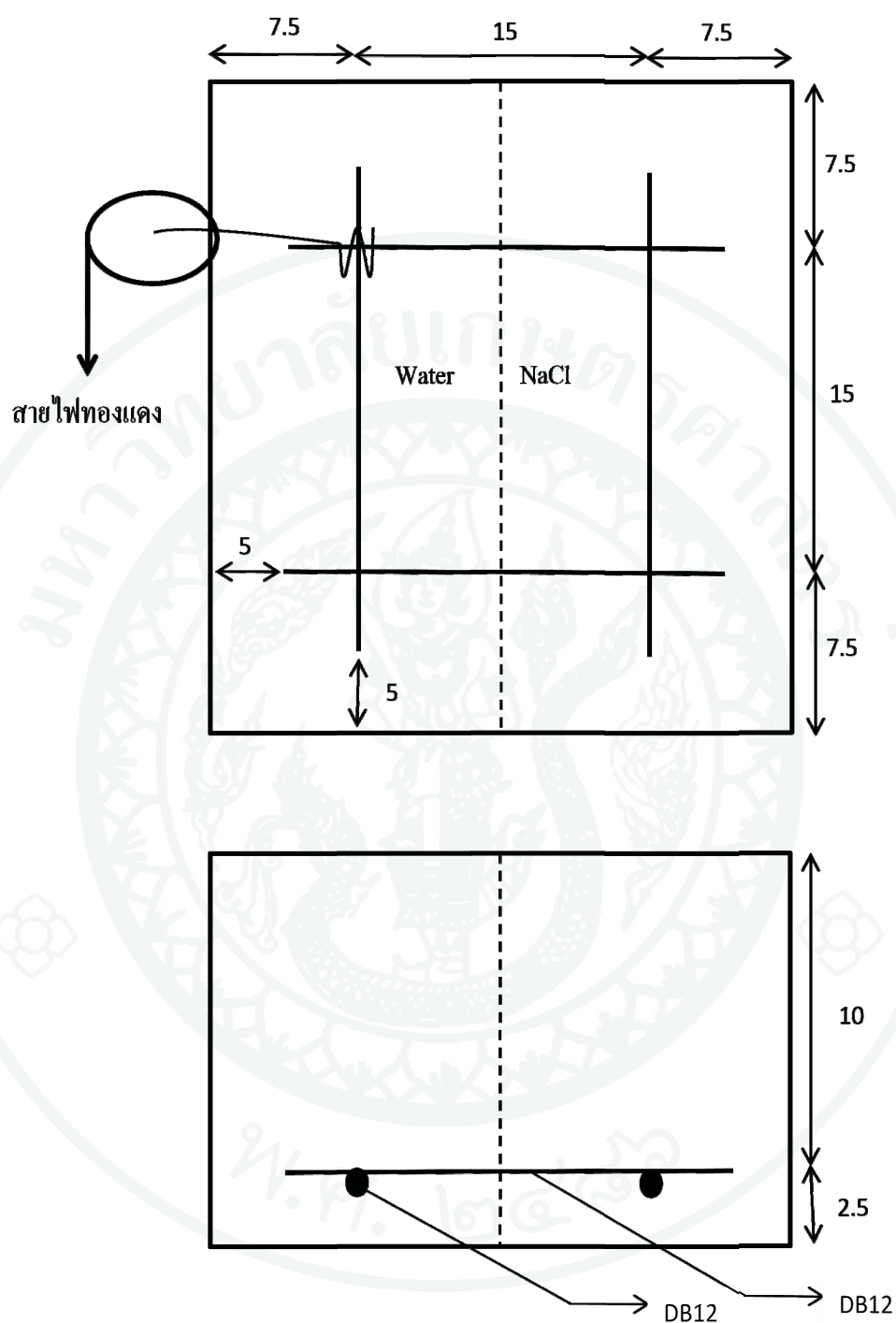
ตัวอย่างแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กมีการแบ่งส่วนที่ใช้น้ำประปาและส่วนที่ใช้ส่วนผสมคลอไรด์เพื่อเป็นการกำหนดสัดส่วนแอโนดต่อแคโทด และยังช่วยเร่งการเกิดสนิม หลังจากบ่มเป็นระยะเวลา 28 วันแล้ว ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก จะถูกปล่อยให้อยู่ในสภาพแห้ง 1 สัปดาห์ หลังจากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3 เปอร์เซ็นต์ อีก 1 สัปดาห์



ภาพที่ 14 รายละเอียดแผ่นแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก 5 ซม.



ภาพที่ 15 รายละเอียดแผ่นแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดเคลือบอีพ็อกซี



ภาพที่ 16 รายละเอียดแผ่นแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก 10 ซม.

3. ขั้นตอนเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผล

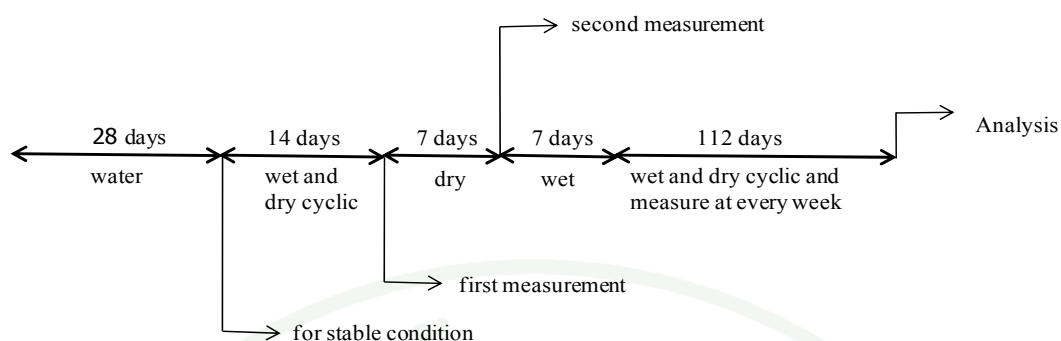
หลังจากตัวอย่างแผ่นคอนกรีตถูกบ่มเป็นระยะเวลา 28 วันแล้วหลังจากนั้นคอนกรีตจะถูกปล่อยให้อยู่ในสภาพแห้งและเปียกอย่างละ 1 สัปดาห์ ดังภาพที่ 17 เพื่อให้ตัวอย่างคงสภาวะของวงรอบเปียกและแห้งเสียก่อน จึงจะเริ่มทำการวัดแนวโน้มการเกิดสนิมโดยวิธีการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ในสภาพเปียกเป็นครั้งแรก หลังจากนั้นคอนกรีตจะถูกปล่อยให้อยู่ในสภาพแห้งและทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าอีกครั้งหนึ่งดังภาพที่ 18 ทำเช่นนี้สลับกันไปโดยจะทำการวัดทุกสัปดาห์ สัปดาห์ละ 1 ครั้ง เป็นระยะเวลา 4 เดือน หรือ 126 วัน โดยตัวอย่างคอนกรีตจะอยู่ในสภาพแห้ง 8 สัปดาห์ และเปียก 9 สัปดาห์ ดังภาพที่ 19 การทดลองนี้จะปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM C876-91 ใช้ใช้แท่งอิเล็กโทรดครดเป็นคอปเปอร์-คอปเปอร์ซัลเฟต (CSE) ค่าศักย์ไฟฟ้าจะถูกวัดที่ผิวบนคอนกรีต โดย 1 ก้อนตัวอย่างจะแบ่งออกเป็น 25 จุดที่ทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้างดภาพที่ 20 โดยใช้ค่าเฉลี่ยเป็นเกณฑ์พื้นฐานในการพิจารณาในแต่ละกรณี



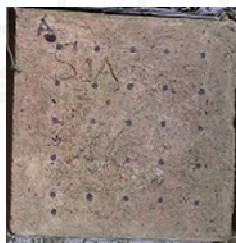
ภาพที่ 17 ตัวอย่างในสภาพเปียก (ซ้าย) และสภาพแห้ง (กลาง)



ภาพที่ 18 เครื่องมือการวัดค่าศักย์ไฟฟ้า (ซ้าย) และการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (ขวา)



ภาพที่ 19 กระบวนการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าในการทดลอง



ภาพที่ 20 ตำแหน่งค่าศักย์ไฟฟ้าต่างๆในคอนกรีต 1 ตัวอย่าง

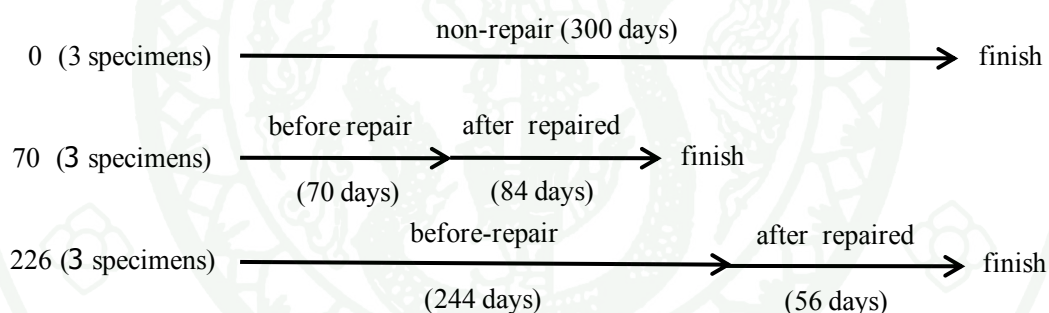
หลังจากทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพแห้งตามปกติแล้วตัวอย่างระยะหุ้มเหล็กเสริม 5 ซม. จำนวน 3 ตัวอย่างจะถูกทำให้เปียกชื้น และทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าทันที และจากนั้นแช่ตัวอย่างในน้ำประปาอีกครั้งหนึ่งจนครบระยะเวลา 15 นาที ทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าอีกครั้งอีกครั้ง เป็นจำนวน 7 สัปดาห์ด้วยกัน เมื่อสิ้นสุดการทดลองตัวอย่างจะถูกนำไปทดสอบหาความชื้นในเนื้อคอนกรีตเป็นจำนวน 1 ตัวอย่าง โดยมีวิธีการดังนี้

$$M = \frac{(M_o - M_c)}{M_o} \times 100 \quad (6)$$

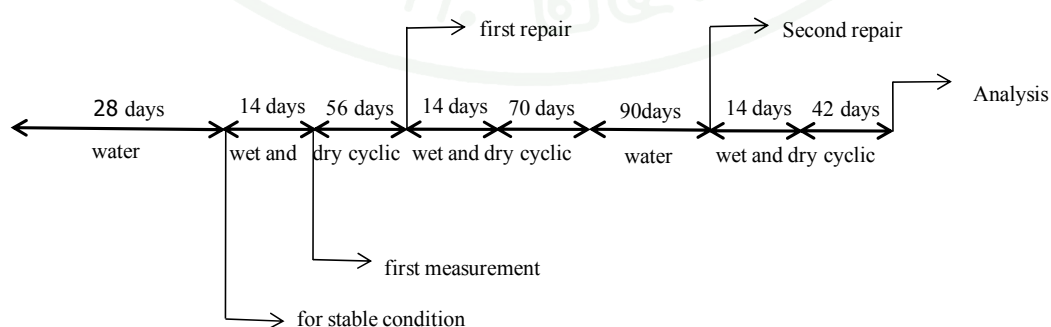
เมื่อ	M	คือ	ปริมาณความชื้นในเนื้อคอนกรีต (ร้อยละ)
	M _o	คือ	น้ำหนักคอนกรีตของตัวอย่าง
	M _c	คือ	น้ำหนักคอนกรีตแห้ง

โดยที่น้ำหนักคอนกรีตแห้งหาได้จากนำตัวอย่างมาอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 80-100 °C จนกระทั่งน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลง

เฉพาะชนิดตัวอย่างการซ่อมแซมจะเป็นการเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่างที่ไม่ผ่านการซ่อมแซมจำนวน 3 ตัวอย่าง กับตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมจำนวน 6 ตัวอย่าง ซึ่งแบ่งเป็นการซ่อมแซมครั้งที่ 1 หรือ วันที่ 70 และครั้งที่ 2 หรือ วันที่ 244 อย่างละ 3 ตัวอย่าง ดังภาพที่ 21 เมื่อครบระยะเวลา 70 วัน จะทำการเจาะตัวอย่างคอนกรีตจนถึงชั้นเหล็กเสริม แล้วทำการซ่อมแซมปิดผิวคอนกรีต หลังจากนั้นตัวอย่างจะถูกครอบสภาวะเปียกและแห้งอย่างละ 1 สัปดาห์ก่อนแล้วจึงค่อยเริ่มทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าอีกครั้งหนึ่งจนครบระยะเวลา 154 วัน จึงหยุดสภาวะเปียกและแห้ง รวมถึงการวัดค่าศักย์ไฟฟ้า นำตัวอย่างแช่ในน้ำประปาเป็นเวลา 3 เดือน หลังจากนั้นทำการเจาะตัวอย่างและซ่อมแซมในครั้งที่ 2 หรือวันที่ 244 และเริ่มครอบสภาวะเปียกและแห้งอย่างละ 1 สัปดาห์อีกครั้ง จึงทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครั้งเซลล์ต่อไป จนครบระยะเวลา 300 วัน ดังภาพที่ 22 โดยในการซ่อมแซมครั้งที่ 1 ตัวอย่างจะทำการซ่อมแซมโดยใช้ซีเมนต์ชนิดไม่หดตัว แต่สำหรับตัวอย่างการซ่อมแซมครั้งที่ 2 จะหล่อคอนกรีตโดยมีส่วนผสมเหมือนของเดิมมีความหนา 3 ซม. เพื่อแบ่งชั้นคอนกรีตเป็นชั้นเก่าและใหม่ จากนั้นใช้ปูนซีเมนต์ชนิดไม่หดตัวเทปิดผิวหน้าอีก 2 ซม.

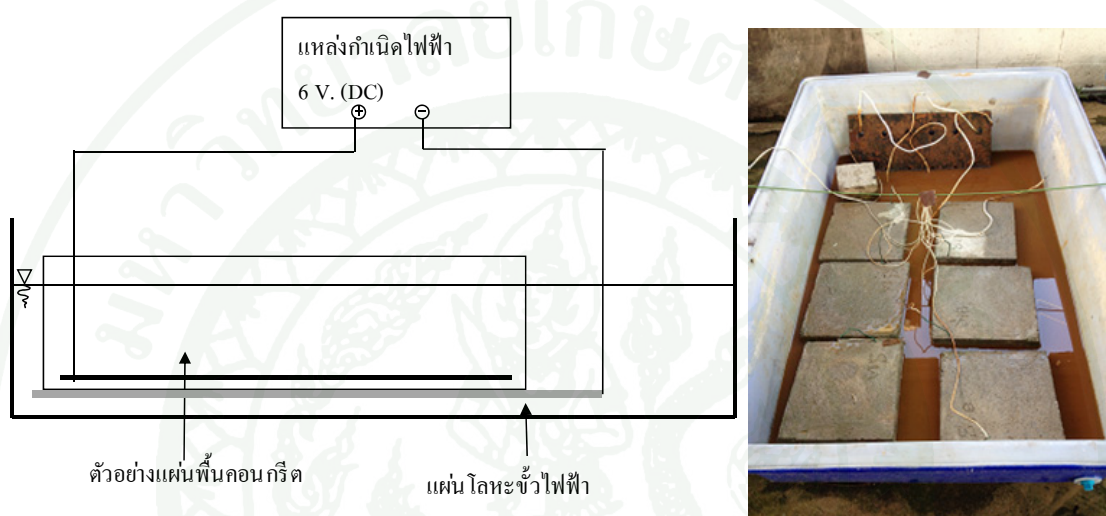


ภาพที่ 21 ระยะเวลาที่ทำการซ่อมแซมของตัวอย่างที่ไม่ผ่านการซ่อมแซม (0) ตัวอย่างที่ทำการซ่อมแซมวันที่ 70 และตัวอย่างที่ทำการซ่อมแซมวันที่ 244



ภาพที่ 22 กระบวนการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าในการทดลองของตัวอย่างการซ่อมแซม

สำหรับตัวอย่างอีพ็อกซี จะแบ่งเป็นตัวอย่างที่เหล็กเสริมทำการเคลือบอีพ็อกซีจำนวน 3 ตัวอย่าง และไม่เคลือบอีพ็อกซีอีก 3 ตัวอย่าง ทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครั้งแรก โดยตัวอย่างจะอยู่ในสภาพแห้งแล้วทำการราดน้ำให้ตัวอย่างมีความชื้น หลังจากนั้นตัวอย่างคอนกรีตจะถูกนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 3 และทำการเร่งสนิมโดยการผ่านกระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 6 โวลต์ ดังภาพที่ 23 เป็นเวลา 2 สัปดาห์ โดยจะทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าทุกวันตลอดการทดลอง



ภาพที่ 23 กระบวนการเร่งการเกิดสนิมในเหล็กเสริมด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าและเคมี

4. ขั้นตอนหลัง การวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และการสำรวจเหล็กเสริม

หลังจากทำการเก็บข้อมูลค่าศักย์ไฟฟ้าในทุกตัวอย่างแล้ว ทำการเจาะตัวอย่างคอนกรีตสำรวจการเกิดสนิมด้วยตาเปล่า และตรวจสอบเหล็กเสริมโดยวิธีการทดสอบการสูญเสียน้ำหนัก (Weigh Loss) ดังสมการที่ 7 เพื่อเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์ต่างๆ และประเมินถึงระดับความรุนแรงของสนิม

$$\text{Weight loss} = \frac{(W_o - W_c)}{W_o} \times 100 \quad (7)$$

เมื่อ	Weight loss	คือ	การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม
	W_o	คือ	น้ำหนักเหล็กเสริมที่ไม่เกิดสนิม
	W_c	คือ	น้ำหนักเหล็กเสริมที่เกิดสนิมที่ระดับต่างๆ

หลังจากนั้นนำค่าศักย์ไฟฟ้าที่ทำการวัดครั้งสุดท้ายของสภาพเปียกและแห้งจากการทดลองของแต่ละตัวอย่าง มาพิจารณาค่าศักย์ไฟฟ้าโดยใช้กราฟเส้นชั้นความสูง (Contour Line)

5. ขั้นตอนการเปรียบเทียบผลต่างๆ และการปรับแก้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

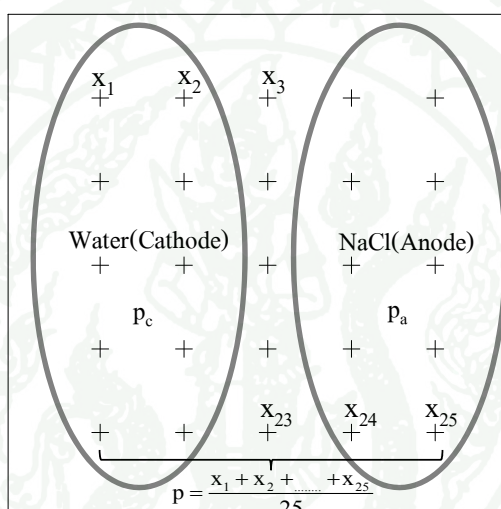
หลังวัดค่าศักย์ไฟฟ้าต่างๆ นำค่าศักย์ไฟฟ้าจากผลกระทบบ้างๆ ได้แก่ ระยะหุ้มเหล็กเสริม ปริมาณคลอไรด์ กำลังรับแรงอัด ความชื้น การซ่อมแซม และคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดเคลือบและไม่เคลือบอีพ็อกซีมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน และผลต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างแคโทดและแอโนด จากนั้นนำมาเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์ต่างๆ

หลังจากทำการสำรวจด้วยตาเปล่า และทดสอบการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริม นำผลของค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้เปรียบเทียบหาความสัมพันธ์กับความรุนแรงของสนิม จากการใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ย และจากกราฟเส้นชั้นความสูงของค่าศักย์ไฟฟ้าของปัจจัยดังต่อไปนี้ ระยะหุ้มเหล็กเสริม ปริมาณคลอไรด์ปนเปื้อน สภาพเปียกและแห้ง กำลังรับแรงอัด ความชื้น คอนกรีตที่ผ่านการซ่อมแซม และคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดเคลือบและไม่เคลือบอีพ็อกซี

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ย

เป็นการใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยมาหาความสัมพันธ์กับอิทธิพลต่างๆ ได้แก่ ระยะเวลาแห้ง เสริม ปริมาณคลอไรด์ปนเปื้อนในเนื้อซีเมนต์ กำลังรับแรงอัด คอนกรีตที่ผ่านการซ่อมแซม ความชื้น และชนิดของสนิม (ตัวอย่างอีพ็อกซี) โดยมีหลักการหาค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยดังต่อไปนี้



ภาพที่ 24 ค่าศักย์ไฟฟ้าต่างๆในคอนกรีต 1 ตัวอย่าง

1. ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ย

นำค่าศักย์ไฟฟ้าที่จุดใดๆบนผิวคอนกรีต x ของตัวอย่างดังภาพที่ 24 มาเฉลี่ยกันดังสมการที่ 8 จะได้ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยใน 1 ก้อนตัวอย่าง p

$$p = \frac{\sum_{i=1}^{25} x_i}{25} \quad (8)$$

เมื่อ p คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยของ 1 ก้อนตัวอย่าง
 x คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่จุดใดๆบนผิวของตัวอย่าง

เนื่องจากตัวอย่างมีการทำซ้ำอย่างละ 3 ตัวอย่าง จึงนำค่าศักย์ไฟฟ้าในแต่ละตัวอย่างมาเฉลี่ยกันอีกครั้งหนึ่ง โดยค่าศักย์ไฟฟ้าก็จะแบ่งเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าของสภาพแห้ง และเปียก

$$P = \frac{p_1 + p_2 + p_3}{3} \quad ; P = P_d = P_e \quad (9)$$

เมื่อ	P	คือ	ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยจาก 3 ก่อนตัวอย่าง
	P_d	คือ	ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยในสภาพแห้งของแต่ละสัปดาห์
	P_e	คือ	ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยในสภาพเปียกของแต่ละสัปดาห์

จากสมการ 9 นำค่าศักย์ไฟฟ้าของแต่ละสัปดาห์มาเฉลี่ยกันอีกครั้งหนึ่งจะได้

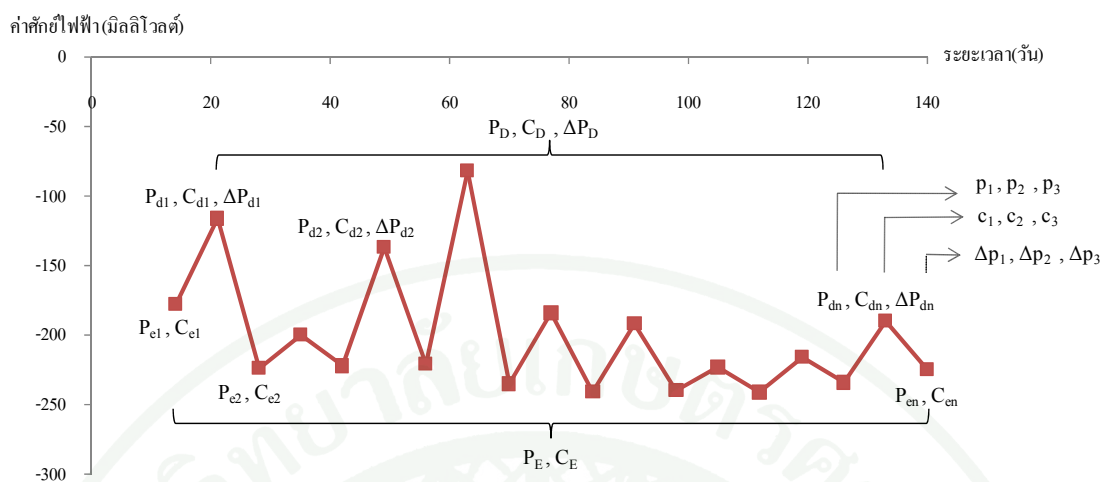
$$P_D = \frac{\sum_{i=1}^{n_D} P_{di}}{n_D} \quad (10)$$

$$P_E = \frac{\sum_{i=1}^{n_E} P_{ei}}{n_E} \quad (11)$$

เมื่อ	P_D	คือ	ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยในสภาพแห้งของทุกสัปดาห์
	P_E	คือ	ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยในสภาพเปียกของทุกสัปดาห์
	n_D	คือ	จำนวนสัปดาห์ที่ตัวอย่างอยู่ในสภาพแห้ง
	n_E	คือ	จำนวนสัปดาห์ตัวอย่างอยู่ในสภาพเปียก

จากภาพที่ 25 เป็นการแสดงแผนภูมิการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าในการทดลองตั้งแต่เริ่มต้นจนได้ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยในสภาพแห้ง P_D และเปียก P_E รวมถึงค่าความแปรปรวนเฉลี่ยในสภาพแห้ง และเปียก และผลต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างแอโนด และแคโทดเฉลี่ยซึ่งจะกล่าวในบทต่อไป

ตัวอย่างความชื้นจะเป็นการใช้ตัวอย่างระยะหุ้มเหล็กเสริม 5 ซม. ในสภาพแห้งมาหาค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยที่ความชื้นต่างๆได้แก่ ตัวอย่างในสภาพแห้ง ตัวอย่างในสภาพแห้งถูกทำให้เปียกขึ้นทันที ตัวอย่างในสภาพแห้งถูกนำไปแช่น้ำประปาเป็นเวลา 15 นาที และตัวอย่างในสภาพเปียก



ภาพที่ 25 แผนภูมิการวัดค่าศักย์ไฟฟ้า

ของสัปดาห์ถัดไป โดยตัวอย่างในสภาพแห้ง และสภาพเปียกสามารถหาดังสมการที่ 10 และ 11 ส่วนตัวอย่างหลังถูกทำให้เปียกขึ้นในระยะเวลาต่างๆ สามารถหาค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยได้โดยวิธีการเดียวกันเพียงแต่เป็นค่าศักย์ไฟฟ้าจากสภาวะนั้นๆ โดยการใช้สมการที่ 12, 13 และ 14 แทนในสมการที่ 9, 10 และ 11 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามในการทดลองนี้ใช้เวลาเพียง 6 สัปดาห์ ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยจากตัวอย่างในสภาพเปียกและแห้งก็จะคิดในช่วง 6 สัปดาห์นี้เช่นกัน

$$P = \frac{p_1 + p_2 + p_3}{3} ; P = P_{dm} = P_{d15} \quad (12)$$

$$P_{DM} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{dmi}}{n} \quad (13)$$

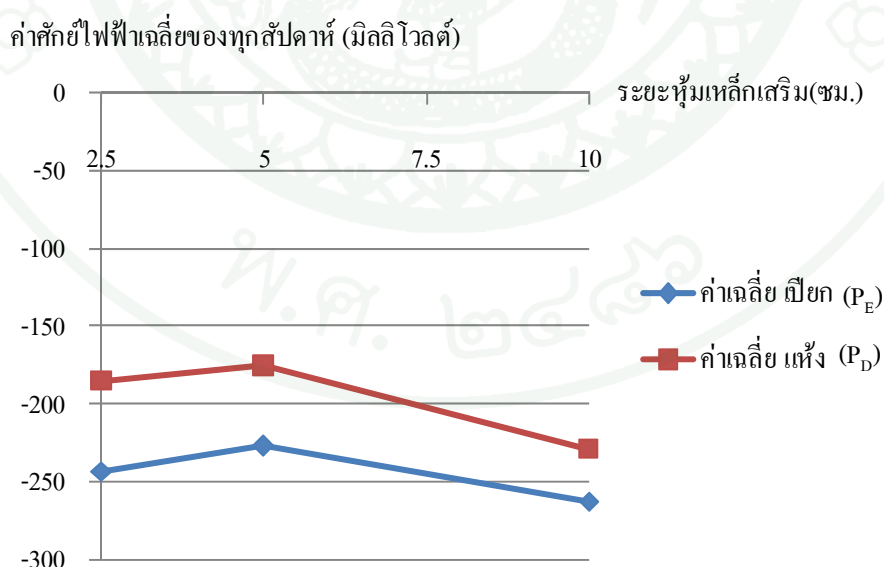
$$P_{D15} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{d15i}}{n} \quad (14)$$

เมื่อ	P_{dm}	คือ	ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยของแต่ละสัปดาห์ของตัวอย่างที่ทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าหลังตัวอย่างถูกทำให้เปียกขึ้นทันที
	P_{d15}	คือ	ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยของแต่ละสัปดาห์ของตัวอย่างที่ทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าหลังจากตัวอย่างเปียกขึ้นเป็นเวลา 15 นาที

P_{DM}	คือ	ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยของทุกสัปดาห์ของตัวอย่างที่ทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าหลังถูกทำให้เปียกขึ้นทันที
P_{D15}	คือ	ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยของทุกสัปดาห์ของตัวอย่างที่ทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าหลังถูกทำให้เปียกขึ้นเป็นเวลา 15 นาที
n	คือ	จำนวนสัปดาห์ที่ทำการวัด

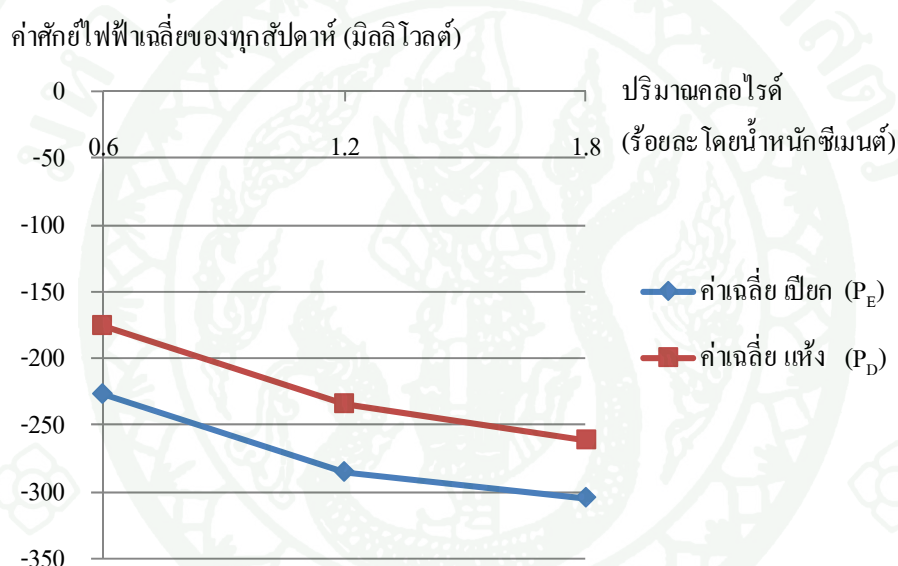
2. ผลของค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยกับอิทธิพลต่างๆ

จากการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของค่าศักย์ไฟฟ้ากับระยะหุ้มเหล็กเสริม 2.5, 5 และ 10 ซม. พบว่าระยะหุ้มเหล็กเสริมมีผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้า ดังภาพที่ 26 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับระยะหุ้มเหล็กเสริม โดยที่ค่าศักย์ไฟฟ้าจะเป็นค่าเฉลี่ยของสภาพเปียกและแห้ง จากการนำค่าศักย์ไฟฟ้าที่ทำการวัดค่าตลอดการทดลองมาเฉลี่ยกันโดยแยกเป็นค่าเฉลี่ยของสภาพเปียกและแห้ง จากภาพพบว่าระยะหุ้มเหล็กเสริม 2.5 ซม. ได้ค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าระยะหุ้มเหล็กเสริม 5 ซม. แต่ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ระยะ 10 ซม. กลับให้ค่าต่ำกว่าที่ระยะหุ้มเหล็กเสริม 2.5 และ 5 ซม. ซึ่งไม่ได้แสดงถึงความสัมพันธ์ใดๆ กล่าวคือเมื่อระยะหุ้มเหล็กเสริมเพิ่มขึ้น ก็ไม่สามารถคาดการณ์ได้ว่าจะทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นหรือลดลง จึงยังต้องทำการศึกษาเพิ่มเติมในกรณีของระยะหุ้มเหล็กเสริม



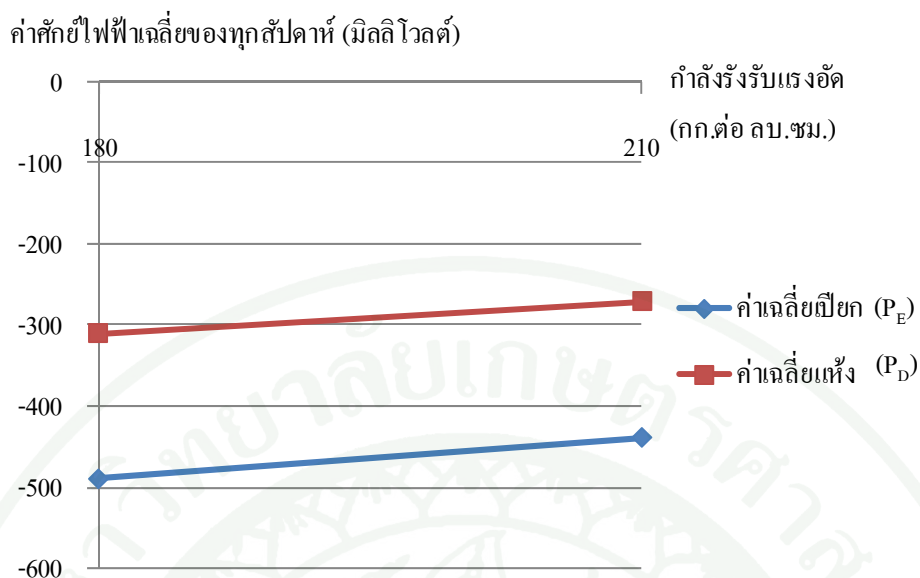
ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ของค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยของทุกสัปดาห์กับระยะหุ้มเหล็กเสริม

นอกจากระยะหุ้มเหล็กเสริมแล้วปริมาณคลอไรด์ปนเปื้อนในเนื้อคอนกรีตก็มีผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าเช่นกัน จากภาพที่ 27 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่ออนต่อน้ำหนักซีเมนต์ โดยที่ค่าศักย์ไฟฟ้าจะเป็นค่าเฉลี่ยของสภาพเปียกและแห้ง เมื่อพิจารณารูปดังกล่าว พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่อคอนกรีตมีปริมาณคลอไรด์เพิ่มขึ้นทั้งสภาพเปียกและแห้ง เนื่องจากคลอไรด์มีส่วนทำให้ความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตลดลง และยังมีส่วนทำให้ฟิล์มหุ้มเหล็กเสริมถูกทำลายจนค่า pH ในคอนกรีตเปลี่ยนไป จึงได้ค่าศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าที่ควรจะเป็น (Gu and Beaudoin, 1998; Elsener, 2003) และค่าศักย์ไฟฟ้าจะไม่ได้เพิ่มขึ้นเป็นอัตราส่วนของเส้นตรงแบบ 1 ต่อ 1 กับปริมาณคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้น (Hussain, 2010)



ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ของค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยของทุกสัปดาห์กับปริมาณคลอไรด์ปนเปื้อนในเนื้อคอนกรีต

กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตก็มีผลเช่นเดียวกันดังภาพที่ 28 เป็นความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดกับค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยในสภาพเปียกและแห้ง พบว่าความแตกต่างระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าของกำลังอัด 180 และ 210 กก.ต่อลบ.ซม. ยังไม่ต่างกันมากนัก แต่เมื่อพิจารณาเป็นแนวโน้มก็พอจะกล่าวได้ว่าค่าศักย์ไฟฟ้าจะมีค่ามากขึ้นเมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดที่สูงขึ้น เนื่องจากคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าจะมีความหนาแน่นมากกว่า และ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ยังมีผลโดยตรงต่อความต้านทานไฟฟ้าคอนกรีต ซึ่งอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่มีค่าสูงก็จะทำให้น้ำที่อยู่ในคอนกรีตมีมากขึ้น (Polder, 2001) จึงทำให้ความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตต่ำลงนั่นเอง

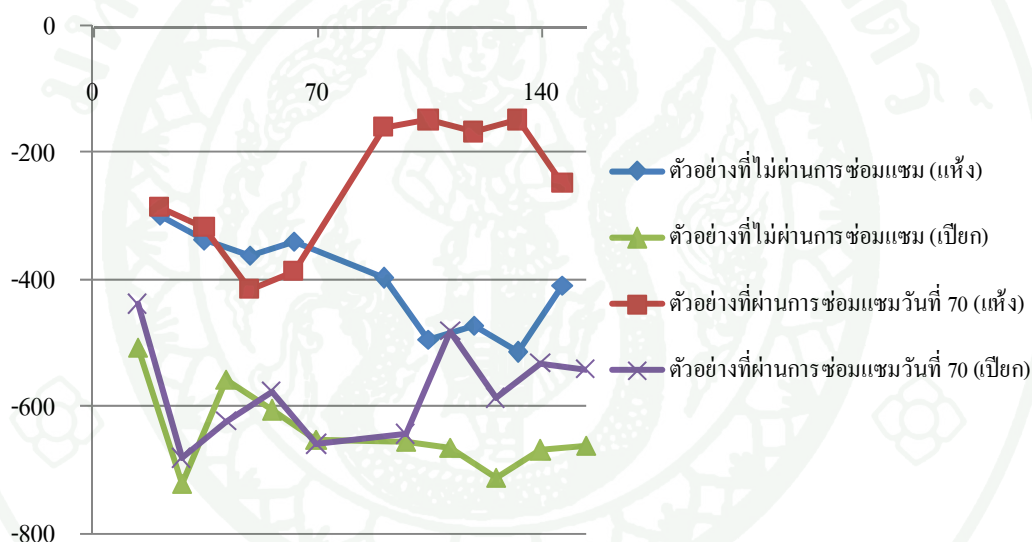


ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ของค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยของทุกสัปดาห์กับกำลังรับแรงอัด

จากภาพที่ 26, 27 และ 28 พบว่าคอนกรีตในสภาพเปียกค่าศักย์ไฟฟ้ามีค่าลดลงมาก เพราะความชื้นจะส่งผลต่อความต้านทานไฟฟ้าคอนกรีตโดยตรง ความต้านทานนี้เปลี่ยนไปตามความชื้น ยิ่งความชื้นมากคอนกรีตก็就会有ความต้านทานไฟฟ้าต่ำ (Gu and Beaudoin, 1998; Elsener *et al.*, 2003) แต่ว่าความคลาดเคลื่อนของค่าศักย์ไฟฟ้าจาก ระยะหุ้มเหล็กเสริม ปริมาณคลอไรด์ และกำลังรับแรงอัด จะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามความชื้น กล่าวคือ ผลกระทบต่อการอ่านค่าศักย์ไฟฟ้าของ ระยะหุ้มเหล็กเสริม ปริมาณคลอไรด์ และกำลังรับแรงอัด ไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปแม้ว่าคอนกรีตจะมีความชื้นมากขึ้น และยังพบว่าตัวอย่างคอนกรีตในสภาพเปียกนอกจากจะส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นกว่าปกติมากแล้ว ยังมีผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าในแต่ละจุดจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันมากขึ้น ซึ่งจะกล่าวถึงในส่วนของการแปรปรวนของค่าศักย์ไฟฟ้าต่อไป

ปัจจัยที่มีผลกระทบอีกอย่างหนึ่งก็คือคอนกรีตที่ผ่านการซ่อมแซม จากการเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพเปียกและแห้งของตัวอย่างคอนกรีตที่ไม่ทำการซ่อมแซม กับตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่านการซ่อมแซม ดังภาพที่ 29 พบว่าช่วงก่อนการซ่อมแซม (วันที่ 1 ถึงวันที่ 70) ค่าศักย์ไฟฟ้าจากตัวอย่างทั้ง 2 ชนิด มีค่าใกล้เคียงกันทั้งในสภาพเปียกและแห้ง เนื่องจากตัวอย่างทั้ง 2 ยังมีองค์ประกอบต่างๆเหมือนกัน เมื่อทำการเจาะคอนกรีตถึงชั้นเหล็กเสริม และทำการซ่อมแซมด้วยซีเมนต์ชนิดไม่หดตัวกับตัวอย่างแล้ว พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วงหลังการซ่อมแซมครั้งที่ 1 (วันที่ 70 ถึง วันที่ 154) ของตัวอย่างที่ทำการซ่อมแซมวันที่ 70 มีค่าเพิ่มขึ้นทั้งในสภาพเปียกและแห้ง

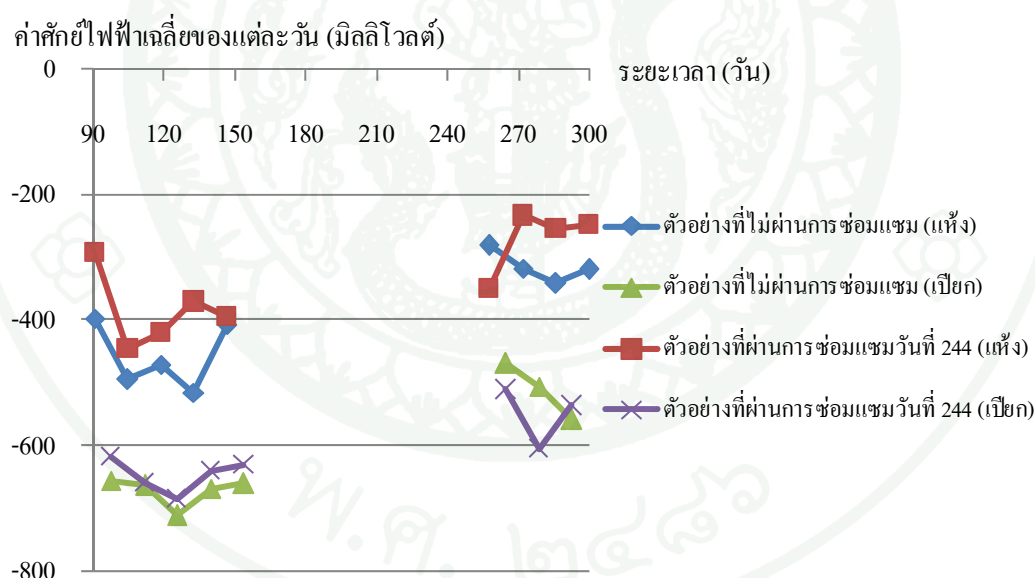
ค่อนข้างมาก ในขณะที่ตัวอย่างที่ไม่ทำการซ่อมแซม ค่าศักย์ไฟฟ้าจะน้อยลงทั้งในสภาพเปียกและแห้ง เนื่องจากตัวอย่างยังไม่ได้ทำการเจาะคอนกรีตเพื่อทำการซ่อมแซม แต่ยังคงถูกแรงสนิมโดยสภาพเปียกและแห้งอย่างต่อเนื่อง เมื่อพิจารณาที่ตัวคอนกรีตใหม่ของตัวอย่างที่ทำการซ่อมแซม พบว่ามีความหนาแน่นมากขึ้น รวมถึงมีปริมาณคลอไรด์ลดลง และมีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้น กล่าวคือ คอนกรีตมีความต้านทานไฟฟ้าสูงขึ้นนั่นเอง ซึ่งส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าจากตัวอย่างที่ทำการซ่อมแซม มีค่ามากกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการซ่อมแซมมากในสภาพแห้ง และต่างกันน้อยลงเมื่ออยู่ในสภาพเปียกจากความต้านทานไฟฟ้าที่ลดลง ในกรณีเช่นนี้ก็พอกล่าวได้ว่าคอนกรีตที่ผ่านการซ่อมแซมจะทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้ามีแนวโน้มไปในทิศทางใด แต่มีข้อสังเกตว่าการซ่อมแซมนั้นเป็นการซ่อมถึงชั้นเหล็กเสริม ทำให้เหล็กอยู่ในสภาพเดียวกับวัสดุซ่อมทั้งหมด



ภาพที่ 29 กราฟเปรียบเทียบของค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยในแต่ละวันกับระยะเวลาของตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมหลังผ่านไป 70 วัน กับตัวอย่างที่ไม่ได้ทำการซ่อมแซม

จากภาพที่ 30 หลังจากผ่านไป 140 ตัวอย่างในการทดลองจะถูกหยุดกระบวนการกัดกร่อนของสนิม ซึ่งตัวอย่างจะถูกแช่อยู่ในน้ำประปาเป็นเวลา 3 เดือน และจะนำตัวอย่างไปทำการซ่อมแซมวันที่ 244 ทำการเจาะตัวอย่างเพื่อทำการซ่อมแซม โดยผสมคอนกรีตใหม่มีส่วนผสมเหมือนเดิมในชั้นแรก ซึ่งเปรียบเสมือนคอนกรีตเก่า และเททับคอนกรีตใหม่อีกชั้นด้วยซีเมนต์ชนิดไม่หดตัว และทำการแรงสนิมจากสภาพเปียกและแห้งอีกครั้ง จากกราฟค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วงวันที่ 90 ถึง 154 ค่าศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่างที่ไม่ทำการซ่อมแซมจะมีค่าต่ำกว่าของตัวอย่างที่จะทำการซ่อมแซมในวันที่ 244 แต่มีค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพเปียกที่ใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากในช่วงนี้ตัวอย่าง

ทั้งสองยังไม่มีอาการช้อมแซมใดๆ จึงมีองค์ประกอบโดยรวมเหมือนกัน เมื่อพิจารณาค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วงหลังการช้อมแซมครั้งที่สอง (วันที่ 258 ถึง 300) พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพแห้งของทั้ง 2 ตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นเท่าๆกัน กล่าวคือ การช้อมแซมอาจจะไม่ส่งผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าในตัวอย่างที่ได้รับการช้อมแซม แต่เมื่อพิจารณาที่ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยในสภาพเปียกแล้ว ตัวอย่างที่ทำการช้อมแซมกลับมีค่าศักย์ไฟฟ้าน้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่ทำการช้อมแซมเล็กน้อย กล่าวคือ การช้อมแซมอาจส่งผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่าง ซึ่งไม่สอดคล้องกับผลของค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพแห้ง และเนื่องจากตัวอย่างที่ทำการช้อมแซม ควรจะมีความต้านทานไฟฟ้าสูงขึ้นจากชั้นคอนกรีตชนิดไม่หดรตัว และยังมีปริมาณคลอไรด์ที่ลดลง ซึ่งค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วงหลังการช้อมแซมครั้งที่สอง แม้ว่าค่าศักย์ไฟฟ้าจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบกับค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วงหลังการช้อมแซมครั้งที่ 2 ของตัวอย่างที่ไม่ทำการช้อมแซมในสภาพเปียก ผลของค่าศักย์ไฟฟ้ายังคงไม่ชัดเจนพอจะสรุปความสัมพันธ์ได้ จึงยังคงต้องทำการศึกษาเพิ่มเติมในกรณีของคอนกรีตที่ผ่านการช้อมแซมมีชั้นของคอนกรีตเก่าและใหม่ก่อนถึงชั้นเหล็กเสริม

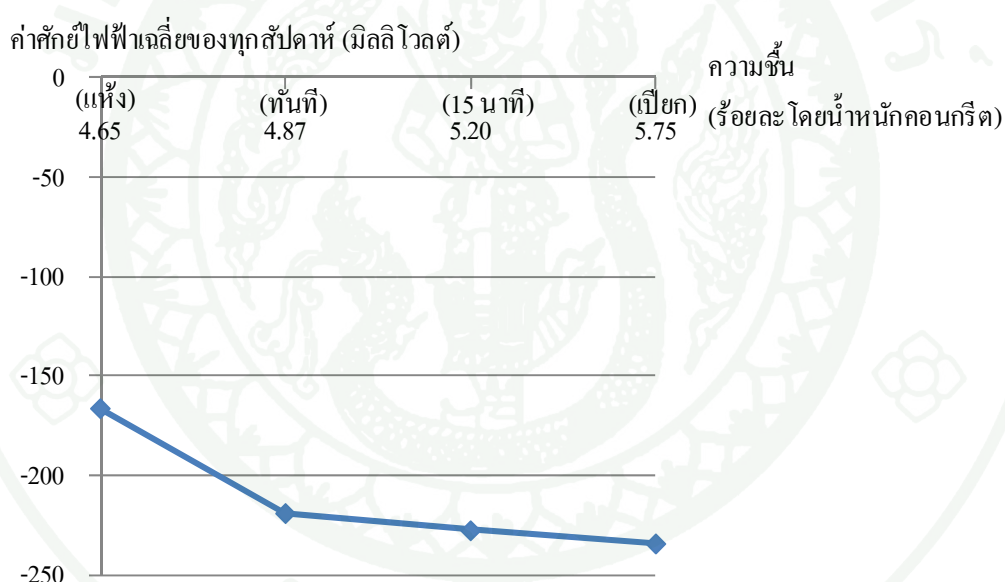


ภาพที่ 30 กราฟเปรียบเทียบของค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยในแต่ละวันกับระยะเวลาของตัวอย่างที่ผ่านการช้อมแซมหลังผ่านไป 244 วัน กับตัวอย่างที่ไม่ได้ทำการช้อมแซม

นอกจากนี้จากภาพที่ 30 ค่าศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่างชนิดไม่ทำการช้อมแซมมีค่าศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นยังแสดงว่าค่าศักย์ไฟฟ้าก็ขึ้นกับอัตราการเกิดสนิมเช่น เพราะในภาพจะเห็นว่าหลังจาก

ตัวอย่างหยุดการเร่งสนิมเป็นเวลา 3 เดือน ไม่ได้หมายความว่าตัวอย่างจะเป็นสนิมน้อยลง แต่เป็นอัตราการเกิดสนิมที่ลดลงนั่นเอง

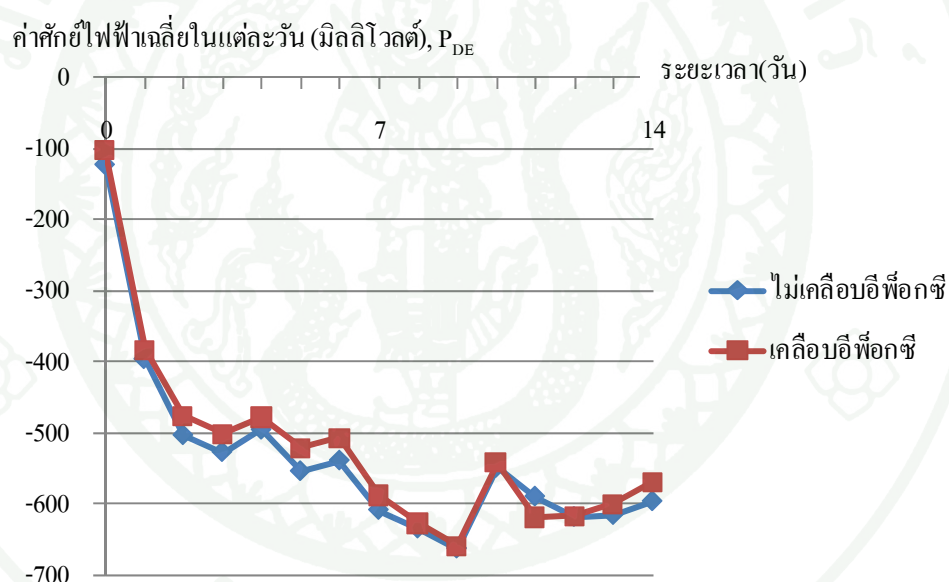
นอกจากการเปรียบเทียบความขึ้นของค่าเฉลี่ยศักย์ไฟฟ้าของสภาพเปียกและแห้งแล้ว ความขึ้นยังสามารถหาความสัมพันธ์กับค่าศักย์ไฟฟ้าได้ดังภาพที่ 31 โดยแนวราบเป็นความขึ้นในขณะทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพต่างๆ ได้แก่ ตัวอย่างในสภาพแห้ง (4.65) ตัวอย่างในสภาพแห้งหลังทำให้เปียกขึ้น (4.87) ตัวอย่างในสภาพแห้งหลังทำให้เปียกเป็นเวลา 15 นาที และตัวอย่างในสภาพเปียกของสัปดาห์ถัดไป (5.75) พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยจะมีค่าน้อยลง เมื่อตัวอย่างมีความขึ้นมากขึ้น ซึ่งเป็นการยืนยันถึงผลของความขึ้นในอิทธิพลต่างๆ ก่อนหน้านี้ เพราะว่าความขึ้นมีผลต่อความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตนั่นเอง (Elsener *et al.*, 2003)



ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ของค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยของทุกสัปดาห์กับกับความขึ้นของคอนกรีต

ตัวอย่างสุดท้ายเป็นความสัมพันธ์ของค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยกับระยะเวลา ของคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดเคลือบ และไม่เคลือบอีพ็อกซี จากภาพที่ 32 มีระยะเวลาเริ่มต้นเป็นศูนย์เนื่องจากตัวอย่างยังไม่มีกระแสไฟฟ้า ค่าศักย์ไฟฟ้าจึงยังมีค่าที่มากทั้ง 2 ชนิด เมื่อเร่งไฟฟ้าในช่วง 9 วันแรก ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จะลดลงอย่างมาก แต่สำหรับที่ 10 เป็นต้นไปค่าไฟฟ้ามีแนวโน้มที่สูงขึ้นแต่ไม่เพิ่มขึ้นมากนัก เนื่องจากตัวอย่างทั้ง 2 ชนิดจะมีการผูกมัดทองแดงจากเหล็กเสริมเปลือยออกมาภายนอกตัวอย่างด้วยเหตุผลทางการทดลอง ตัวลวดทองแดงนี้เริ่มเสื่อมสภาพ ซึ่งอาจมีผลต่ออัตราการเร่งของสนิม จนทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาที่ชนิดของตัวอย่างแล้วค่า

ศักย์ไฟฟ้าของคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดเคลือบอีพ็อกซี จะมีค่าศักย์ไฟฟ้าที่มากกว่าชนิดไม่เคลือบอีพ็อกซีเล็กน้อยจนค่าเข้าใกล้กันที่สุดในที่สุด แต่ไม่ได้หมายความว่าตัวอย่างชนิดไม่เคลือบอีพ็อกซี ซึ่งเกิดการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอจะมีความรุนแรงของสนิมมากกว่า ในทางกลับกันตัวอย่างชนิดเคลือบอีพ็อกซีกลับมีสนิมที่รุนแรงกว่าชนิดไม่เคลือบเนื่องเกิดการกัดกร่อนแบบหลุม (Elsener, 2002) เพราะว่าสนิมแบบสม่ำเสมอจะให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกันในทุกๆจุดที่ทำกันวัด แต่สำหรับสนิมแบบหลุมค่าศักย์ไฟฟ้าจะต่ำเฉพาะบริเวณที่เกิดสนิม แต่บริเวณอื่นๆ ค่าศักย์ไฟฟ้าจะยังมีค่าสูงอยู่จึงทำให้ค่าเฉลี่ยมีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยของสนิมแบบสม่ำเสมอเมื่อมีความรุนแรงของสนิมที่ใกล้เคียงกัน ในทางกลับกันเมื่อค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยของสนิมทั้ง 2 ชนิดมีค่าใกล้เคียงกันก็หมายความว่าเหล็กที่เกิดการกัดกร่อนแบบหลุมนั้นจะมีความรุนแรงมากกว่าการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ



ภาพที่ 32 กราฟเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้ากับระยะเวลาของคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดเคลือบ และไม่เคลือบอีพ็อกซีกับระยะเวลา ของตัวอย่างที่ทำการเร่งสนิมด้วยไฟฟ้า

ผลของความแปรปรวนของค่าศักย์ไฟฟ้าใน 1 ก้อนตัวอย่าง

อิทธิพลต่างๆนอกจากจะส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นหรือลดลงแล้ว ยังส่งผลต่อความแปรปรวนของค่าศักย์ไฟฟ้าใน 1 ก้อนตัวอย่าง กล่าวคือ อิทธิพลต่างๆยังส่งผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าในแต่ละจุดบน 1 ก้อนตัวอย่างให้มีค่าศักย์ไฟฟ้าในแต่ละจุดเข้าใกล้หรือออกห่างกันอีกด้วย และความ

แปรปรวนในงานวิจัยนี้อาจจะไม่ได้มีความหมายตรงกับความแปรปรวนในทางสถิติเพียงแต่มีการนำสมการทางสถิติมาใช้คำนวณเพื่อหาความสัมพันธ์เท่านั้น

เมื่อพิจารณาค่าศักย์ไฟฟ้าทุกๆจุดบน 1 ก้อนตัวอย่าง จากการใช้สมการทางสถิติในการหาความแปรปรวนของค่าศักย์ไฟฟ้ากับอิทธิพลต่างๆ ได้แก่ ระยะหุ้มเหล็กเสริม ปริมาณคลอไรด์ปนเปื้อนในเนื้อซีเมนต์ กำลังรับแรงอัด ความชื้น และชนิดของสนิม (ตัวอย่างอีพ็อกซี) ซึ่งความแปรปรวนจาก 1 ก้อนตัวอย่างหาได้จากร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่อค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยจาก 1 ก้อนตัวอย่าง โดยมีหลักการหาดังต่อไปนี้

1. ความแปรปรวนของค่าศักย์ไฟฟ้า

ความแปรปรวนของค่าศักย์ไฟฟ้าจาก 1 ก้อนตัวอย่าง c หาได้จากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน s ของค่าศักย์ไฟฟ้า และค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ย p จาก 1 ก้อนตัวอย่าง

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{25} (x_i - p)^2}{25}} \quad (15)$$

$$c = \frac{s}{p} \quad (16)$$

เมื่อ	s	คือ	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ 1 ก้อนตัวอย่าง
	x	คือ	ค่าศักย์ไฟฟ้าที่จุดใดๆบนก้อนตัวอย่าง
	p	คือ	ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยของ 1 ก้อนตัวอย่าง
	c	คือ	ความแปรปรวนของ 1 ก้อนตัวอย่าง (ร้อยละ)

เนื่องจากตัวอย่างมีการทำซ้ำอย่างละ 3 ตัวอย่าง จากสมการที่ 16 จะได้

$$C = \frac{c_1 + c_2 + c_3}{3} \quad ; C = C_d = C_e \quad (17)$$

เมื่อ	C	คือ	ความแปรปรวนเฉลี่ยของ 3 ตัวอย่าง (ความแปรปรวนของแต่ละสัปดาห์)
	C_d	คือ	ความแปรปรวนของค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพแห้งของแต่ละสัปดาห์
	C_e	คือ	ความแปรปรวนของค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพเปียกของแต่ละสัปดาห์

จากสมการที่ 17 นำค่าความแปรปรวนของแต่ละสัปดาห์มาเฉลี่ยกันอีกครั้งหนึ่ง

$$C_D = \frac{\sum_{i=1}^{n_D} C_{di}}{n_D} \quad (18)$$

$$C_E = \frac{\sum_{i=1}^{n_E} C_{ei}}{n_E} \quad (19)$$

เมื่อ	C_D	คือ	ความแปรปรวนของค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพแห้งของทุกสัปดาห์
	C_E	คือ	ความแปรปรวนของค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพเปียกของทุกสัปดาห์
	n_D	คือ	จำนวนสัปดาห์ของสภาพแห้ง
	n_E	คือ	จำนวนสัปดาห์ของสภาพเปียก

สำหรับตัวอย่างความชื้นจะเป็นการใช้ตัวอย่างระยะหุ้มเหล็กเสริม 5 ซม. ซึ่งใช้หลักการเดียวกับการหาค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ย โดยค่าความแปรปรวนเฉลี่ยของตัวอย่างในสภาพแห้ง และสภาพเปียกสามารถหาได้ดังสมการที่ 18 และ 19 ส่วนตัวอย่างหลังถูกทำให้เปียกขึ้นในระยะเวลาต่างๆ หาได้จากการใช้สมการที่ 20, 21 และ 22 แทนในสมการที่ 17, 18 และ 19 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามในการทดลองนี้ใช้เวลาเพียง 6 สัปดาห์ ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยจากตัวอย่างในสภาพเปียกและแห้งก็จะคิดในช่วง 6 สัปดาห์นี้เช่นกัน

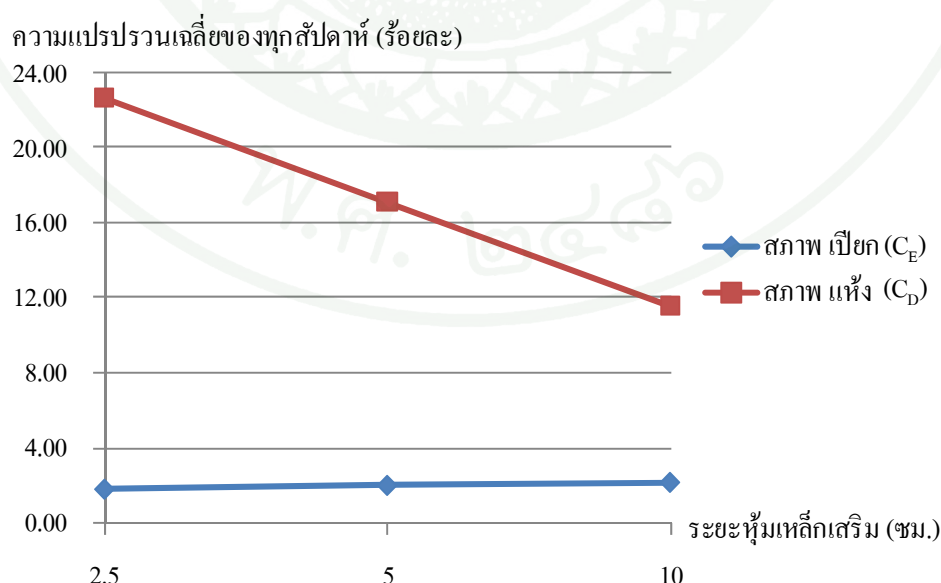
$$C = \frac{c_1 + c_2 + c_3}{3} \quad ; C = C_{dm} = C_{dl5} \quad (20)$$

$$C_{DM} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{dmi}}{n} \quad (21)$$

$$C_{D15} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{d15i}}{n} \quad (22)$$

เมื่อ	C_{dm}	คือ	ความแปรปรวนของแต่ละสัปดาห์จากตัวอย่างที่ทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าหลังถูกทำให้เปียกขึ้นทันที
	C_{d15}	คือ	ความแปรปรวนของแต่ละสัปดาห์จากตัวอย่างที่ทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าหลังถูกทำให้เปียกขึ้นเป็นเวลา 15 นาที
	C_{DM}	คือ	ความแปรปรวนเฉลี่ยของทุกสัปดาห์จากตัวอย่างที่ทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าหลังถูกทำให้เปียกขึ้นทันที
	C_{D15}	คือ	ความแปรปรวนเฉลี่ยของทุกสัปดาห์จากตัวอย่างที่ทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าหลังถูกทำให้เปียกขึ้นเป็นเวลา 15 นาที
	n	คือ	จำนวนสัปดาห์ที่ทำการวัด

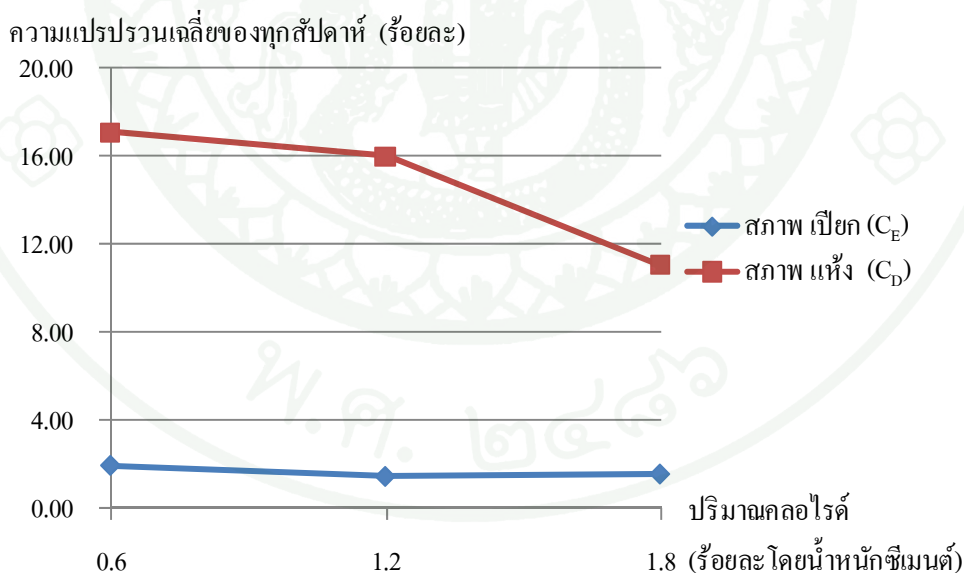
2. ผลของค่าความแปรปรวนเฉลี่ยกับอิทธิพลต่างๆ



ภาพที่ 33 ความสัมพันธ์ของความแปรปรวนเฉลี่ยของทุกสัปดาห์กับระยะหุ้มเหล็กเสริม

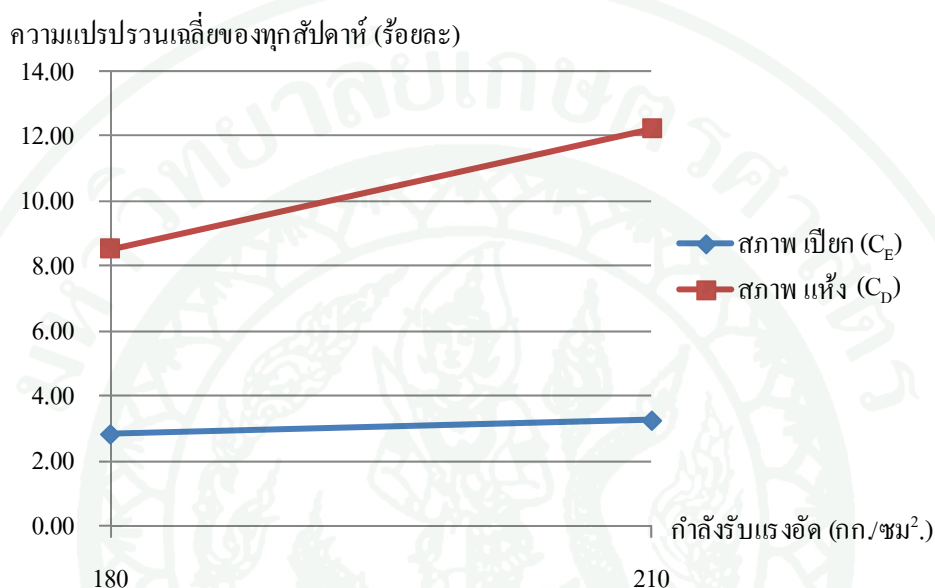
จากภาพที่ 33 ความสัมพันธ์ของความแปรปรวนเฉลี่ยกับระยะหุ้มเหล็กเสริมของสภาพเปียกและแห้ง เมื่อพิจารณาจากภาพจะทราบว่าในสภาพเปียก อิทธิพลของระยะหุ้มเหล็กเสริมจะส่งผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ในแต่ละจุดนั้นน้อยมาก แต่สำหรับคอนกรีตในสภาพแห้งค่าความแปรปรวนเฉลี่ยจะลดลงเมื่อระยะหุ้มเหล็กเสริมมากขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าหลังจากทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพเปียก คอนกรีตจะถูกทิ้งไว้ในอากาศ 1 อาทิตย์เพื่อวัดค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพแห้ง ตัวอย่างที่มีระยะหุ้มเหล็กเสริมมากจึงเก็บความชื้นได้มากกว่า ทำให้น้ำในคอนกรีตระเหยออกได้น้อยกว่า ค่าความแปรปรวนที่ได้จึงมีค่าน้อยกว่า

จากภาพที่ 34 เป็นความสัมพันธ์ของความแปรปรวนเฉลี่ยกับร้อยละของปริมาณคลอไรด์ปนเปื้อนต่อน้ำหนักซีเมนต์ของสภาพเปียกและแห้ง พบว่าในสภาพแห้งตัวอย่างที่มีปริมาณคลอไรด์ปนเปื้อนสูงขึ้นไป จะมีค่าความแปรปรวนเฉลี่ยลดลง กล่าวคือ เมื่อตัวอย่างมีปริมาณคลอไรด์ปนเปื้อนสูงค่าศักย์ไฟฟ้าในแต่ละจุดของตัวอย่างจะมีความใกล้เคียงกันมากกว่าตัวอย่างที่มีปริมาณคลอไรด์น้อย สำหรับสภาพเปียกค่าความแปรปรวนไม่ต่างกันมากนัก หรืออาจกล่าวได้ว่าเมื่อคอนกรีตอมตัวปริมาณคลอไรด์จะส่งผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าในแต่ละจุดที่ทำการวัดน้อยมาก



ภาพที่ 34 ความสัมพันธ์ของความแปรปรวนเฉลี่ยของทุกสัปดาห์กับปริมาณคลอไรด์ปนเปื้อนต่อน้ำหนักซีเมนต์

จากภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ของความแปรปรวนเฉลี่ยกับกำลังรับแรงอัดของสภาพเปื่อย และแห้ง พบว่าตัวอย่างในสภาพเปื่อยค่าความแปรปรวนไม่ต่างกันมากนัก แต่สำหรับสภาพแห้งค่าความแปรปรวนจะสูงขึ้นเมื่อตัวอย่างมีกำลังรับแรงอัดที่สูงขึ้น กล่าวคือ ค่าศักย์ไฟฟ้าในแต่ละจุดของคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดต่ำ จะมีค่าใกล้เคียงกันมากกว่าคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดสูง

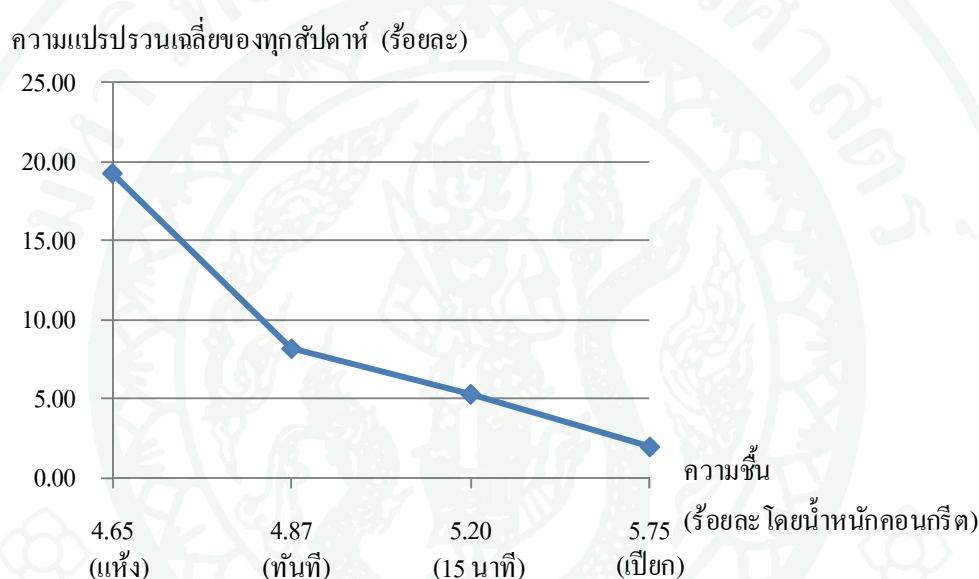


ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ของความแปรปรวนเฉลี่ยของทุกสัปดาห์กับกำลังรับแรงอัด

จากภาพที่ 34 และ 35 ยังพบอีกว่าค่าความแปรปรวนเฉลี่ยของคอนกรีตในสภาพแห้งจะน้อยลงเมื่อตัวอย่างคอนกรีตความต้านทานไฟฟ้าลดลง กล่าวคือ เมื่อคอนกรีตมีกำลังต้านทานไฟฟ้าต่ำค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ในแต่ละจุดจะเข้าใกล้กันมากกว่าคอนกรีตที่มีกำลังต้านทานไฟฟ้าสูง เนื่องจากคอนกรีตที่มีปริมาณคลอไรด์ปนเปื้อนสูงจะส่งผลให้มีความต้านทานไฟฟ้าต่ำ เช่นเดียวกับคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดน้อยก็จะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่น้อยกว่าคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดสูง

จากภาพ 33, 34 และ 35 พบว่าเมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพเปื่อย หรืออิมมัวค่าศักย์ไฟฟ้าแต่ละจุดในก้อนนั้นๆ จะมีความแปรปรวนน้อยมาก เมื่อเทียบกับคอนกรีตในสภาพแห้ง กล่าวคือในสภาพเปื่อยค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ในแต่ละจุดจะใกล้เคียงกันมาก เมื่อคอนกรีตถูกทิ้งไว้ให้แห้ง 1 สัปดาห์ค่าศักย์ไฟฟ้าในแต่ละก้อนนั้นก็จะมีความแปรปรวนมากขึ้น หรือค่าศักย์ไฟฟ้าในแต่ละจุดจะมีความแตกต่างกันมากขึ้น แต่ไม่ได้หมายความว่าในสภาพเปื่อยค่าศักย์ไฟฟ้าจะถูกต้องเพราะใน

สภาพเช่นนี้คอนกรีตมีความต้านทานไฟฟ้าต่ำมาก (Elsener *et al.*, 2003; Hussain, 2011) สำหรับสาเหตุที่ค่าศักย์ไฟฟ้าในขณะคอนกรีตอิมมัลมีค่าใกล้เคียงกันมากนั้น เพราะว่าในขณะที่คอนกรีตมีสภาพแห้ง ขณะทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าบนผิวคอนกรีตกระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลไปสู่จุดที่ศักย์ไฟฟ้าต่างกันมากที่สุดได้ เพราะคอนกรีตยังคงความต้านทานไฟฟ้าอยู่ และความต้านทานไฟฟ้านี้เองเป็นตัวกำหนดทิศทางที่กระแสสามารถไหลไปได้ ในขณะที่คอนกรีตอิมมัลจะมีความต้านทานไฟฟ้าต่ำมาก กระแสไฟฟ้าสามารถเดินทางได้ง่ายขึ้น จึงไหลไปสู่จุดที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าต่างกันมากที่สุด ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้บนทุกๆจุดที่ผิวคอนกรีตมีความใกล้เคียงกันมาก



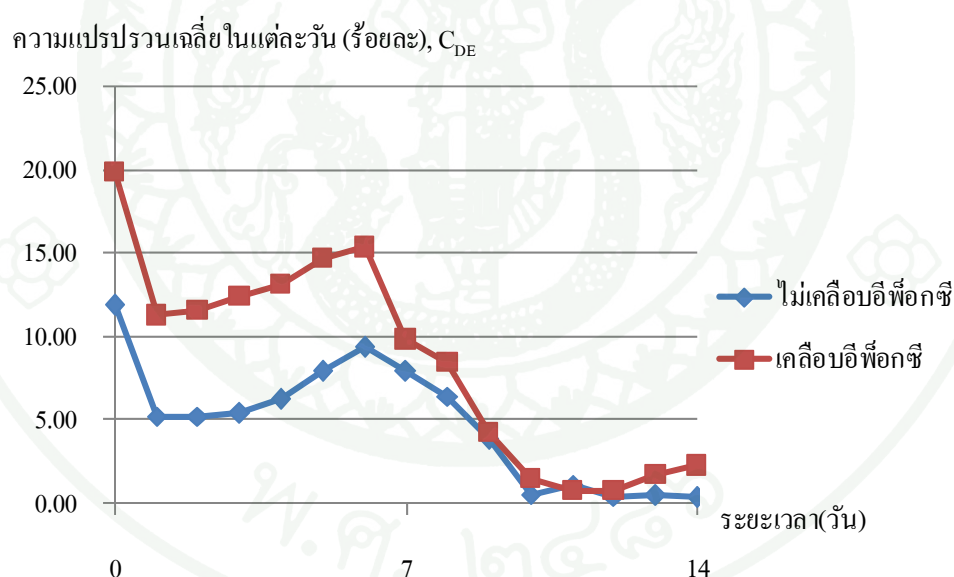
ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์ของความแปรปรวนเฉลี่ยของทุกสัปดาห์กับความชื้นของคอนกรีต

จากภาพที่ 36 แนวราบเป็นความชื้นของตัวอย่างในขณะที่ทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าได้ คือ ตัวอย่างในสภาพแห้ง (4.65) ตัวอย่างในสภาพแห้งหลังทำให้เปียกขึ้น (4.87) ตัวอย่างในสภาพแห้งหลังทำให้เปียกเป็นเวลา 15 นาที (5.20) และตัวอย่างในสภาพเปียกของสัปดาห์ถัดไป (5.75) พบว่าความแปรปรวนเฉลี่ยจะมีค่าลดลงเมื่อตัวอย่างมีความชื้นมากขึ้น กล่าวคือ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ในแต่ละจุดบนตัวอย่าง จะมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้นเมื่อตัวอย่างมีความชื้นมากขึ้น

จากอิทธิพลต่างๆ ได้แก่ ระยะเวลาแห้งแล้งเสริม ปริมาณคลอไรด์ ความชื้น และกำลังรับแรงอัด พบว่ามีผลต่อความแปรปรวนของค่าศักย์ไฟฟ้า โดยเฉพาะเมื่อคอนกรีตมีความชื้นสูงจะมีความแปรปรวนต่ำมาก ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยก็จะมีค่าน้อยลงมากเช่นกัน ซึ่งความแปรปรวนของค่า

ศักย์ไฟฟ้ายังเป็นตัวกำหนดว่าค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยมีความน่าเชื่อถือหรือไม่ โดยการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง หากความแปรปรวนของค่าศักย์ไฟฟ้าในแต่ละครั้งที่ทำการวัดมีค่าใกล้เคียงกัน ก็หมายความว่า ตัวคอนกรีตที่ทำการวัดจะอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ใกล้เคียงกัน เช่น มีความชื้นที่ใกล้เคียงกัน ก็จะทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยมีความน่าเชื่อถือมากขึ้นนั่นเอง

นอกจากนี้อิทธิพลระยะหุ้มเหล็กเสริม ปริมาณคลอไรด์ และกำลังรับแรงอัด ยิ่งคอนกรีตมีความแปรปรวนสูงค่าศักย์ไฟฟ้าในแต่ละจุดที่ทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกันมากก็จะทำให้สามารถบ่งบอกถึงตำแหน่งของแคโทด และแอโนดได้ดีกว่าตัวคอนกรีตที่มีความแปรปรวนน้อยที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าในแต่ละจุดใกล้เคียงกัน ซึ่งจะกล่าวถึงในบทต่อไป แต่สำหรับความชื้นซึ่งมีผลต่อความแปรปรวนของค่าศักย์ไฟฟ้าอย่างมาก เมื่อคอนกรีตมีความชื้นแม้ว่าจะทำให้บ่งบอกตำแหน่งของแคโทด และแอโนดได้ไม่ชัดเจน แต่ว่างก็สามารถทำให้ตรวจพบสนิมที่เป็นบริเวณเล็กๆ ได้ดีกว่าคอนกรีตที่มีความแปรปรวนสูง



ภาพที่ 37 ความสัมพันธ์ของความแปรปรวนเฉลี่ยในแต่ละวันกับระยะเวลาของคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดเคลือบ และไม่เคลือบอีพ็อกซี ของตัวอย่างที่ทำการเร่งสนิมด้วยไฟฟ้า

ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดเคลือบ และไม่เคลือบอีพ็อกซีก็สามารถหาความสัมพันธ์ได้กับความแปรปรวนได้เช่นเดียวกันดังภาพที่ 37 ค่าความแปรปรวนก่อนการเร่งสนิม พบว่ามีความแปรปรวนสูง เนื่องจากตัวอย่างอยู่ในสภาพแห้งแล้วค่อยทำให้เปียกขึ้นแต่ก็เป็นเพียงแค่การทำ

ให้ตัวอย่างเป็ยกขึ้นแบบทันทีแล้ววัดค่าศักย์ไฟฟ้าจึงยังมีความชื้นไม่มากนัก หลังจากเร่งสนิมแล้ว ตัวอย่างชนิดเคลือบอีพ็อกซีจะมีค่าที่สูงกว่าพอสมควร และค่อยๆลดลงมาเท่ากับตัวอย่างชนิดไม่เคลือบอีพ็อกซี อาจเป็นเพราะสนิมที่เกิดในตัวอย่างชนิดเคลือบอีพ็อกซีเป็นสนิมแบบหลุม จึงมีผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้ามีความแปรปรวนสูงกว่าตัวอย่างชนิดไม่เคลือบอีพ็อกซีที่เกิดสนิมแบบสม่ำเสมอ เมื่อเข้าสู่สัปดาห์ที่ 2 สนิมของตัวอย่างชนิดเคลือบอีพ็อกซีสนิมเริ่มกระจายตัวไปบนเหล็กเสริมมากขึ้น จึงมีผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ในแต่ละจุดบนตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกัน จนทำให้ค่าความแปรปรวนของสนิมแบบหลุมมีค่าใกล้เคียงกับสนิมแบบสม่ำเสมอ จากผลข้างต้นอาจจะพอกล่าวได้ว่าคอนกรีตที่เกิดสนิมแบบหลุมจะมีความแปรปรวนสูงกว่าแบบสม่ำเสมอ

ผลต่างระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าบริเวณแอโนดกับแคโทด

เป็นการนำผลต่างเฉลี่ยของค่าศักย์ไฟฟ้าบริเวณแอโนด (บริเวณที่สูญเสียอิเล็กตรอน) และแคโทด (บริเวณที่รับอิเล็กตรอน) มาหาความสัมพันธ์กับอิทธิพลต่างๆ ได้แก่ ระยะหุ้มเหล็กเสริม ปริมาณคลอไรด์ปนเปื้อนในเนื้อซีเมนต์ กำลังรับแรงอัด โดยที่ผลต่างระหว่างแคโทดและแอโนดคือ ผลต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยบริเวณแอโนดกับแคโทด ซึ่งเป็นผลต่างจาก 1 ก่อนตัวอย่าง ดังภาพที่ 24 และนำผลต่างของแต่ละตัวอย่างมาเฉลี่ยกันอีกครั้งหนึ่ง มีหลักการหาค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยดังต่อไปนี้

1. ค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างแคโทดและแอโนด

ค่าศักย์ไฟฟ้าที่จุดใดๆบนบริเวณแคโทด x_c และค่าศักย์ไฟฟ้าที่จุดใดๆบนบริเวณแอโนด x_a ของตัวอย่างดังภาพที่ 24 นำมาหาค่าเฉลี่ยของ 1 ก่อนตัวอย่างจะได้

$$p_c = \frac{\sum_{i=1}^{10} x_{ci}}{10} \quad (23)$$

$$p_a = \frac{\sum_{i=1}^{10} x_{ai}}{10} \quad (24)$$

เมื่อ p_c คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าบริเวณแคโทดจาก 1 ก่อนตัวอย่าง

p_a	คือ	ค่าศักย์ไฟฟ้าบริเวณแอโนดจาก 1 ก้อนตัวอย่าง
x_c	คือ	ค่าศักย์ไฟฟ้าที่จุดใดจุดบนของบริเวณแคโทด
x_a	คือ	ค่าศักย์ไฟฟ้าที่จุดใดจุดบนบริเวณแอโนด

นำสมการที่ 23 และ 24 มาหาผลต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างแคโทดกับแอโนด Δp จาก 1 ก้อนตัวอย่างจะได้

$$\Delta p = |p_c - p_a| \quad (25)$$

โดย Δp คือ ผลต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างแคโทดกับแอโนด

เนื่องจากตัวอย่างมีการทำซ้ำอย่างละ 3 ตัวอย่าง ผลต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพแห้งของแต่ละสัปดาห์ ΔP_d จึงหาได้จาก

$$\Delta P_d = \frac{\Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3}{3} \quad (26)$$

โดย ΔP_d คือ ของค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพแห้งของแต่ละสัปดาห์

จากนั้นนำผลต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าในแต่ละสัปดาห์มาเฉลี่ยกันอีกครั้งหนึ่งจะได้

$$\Delta P_D = \frac{\sum_{i=1}^9 \Delta P_{di}}{9} \quad (27)$$

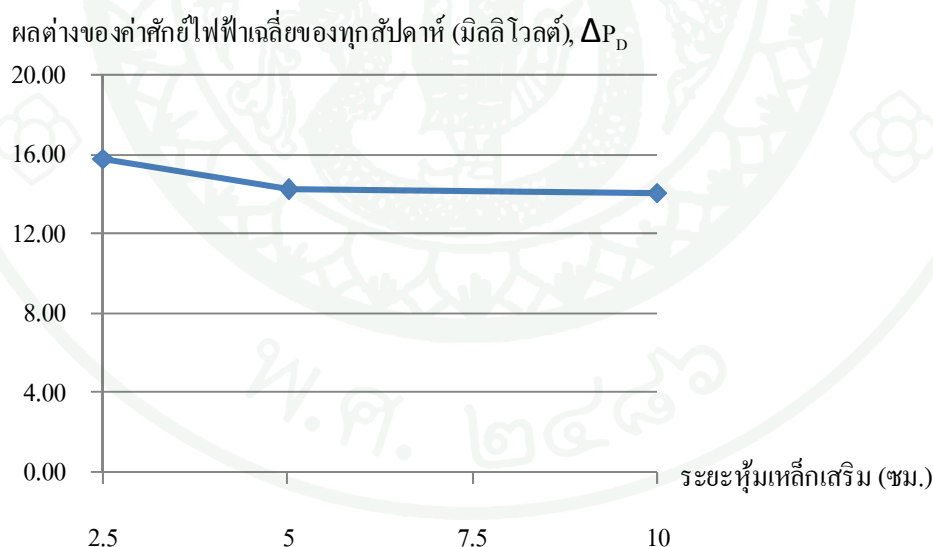
เมื่อ P_D คือ ผลต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพแห้งของทุกสัปดาห์
 n คือ จำนวนสัปดาห์ของสภาพแห้ง

เนื่องจากค่าผลของค่าความแปรปรวนเฉลี่ยกับอิทธิพลต่างๆ ในสภาพเปียกนั้น ค่าศักย์ไฟฟ้าจะในทุกๆจุดบน 1 ก้อนตัวอย่างจะมีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งส่งผลให้ผลต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าบริเวณแอโนดและแคโทดใน 1 ก้อนตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกันมากจนทำให้ผลของ

อิทธิพลต่างๆ ไม่ชัดเจน ดังนั้นผลต่างเฉลี่ยของค่าศักย์ไฟฟ้าจะมาจากค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพแห้งเท่านั้น

2. ผลของผลต่างเฉลี่ยจากค่าศักย์ไฟฟ้าบริเวณแอโนดและแคโทดกับอิทธิพลต่างๆ

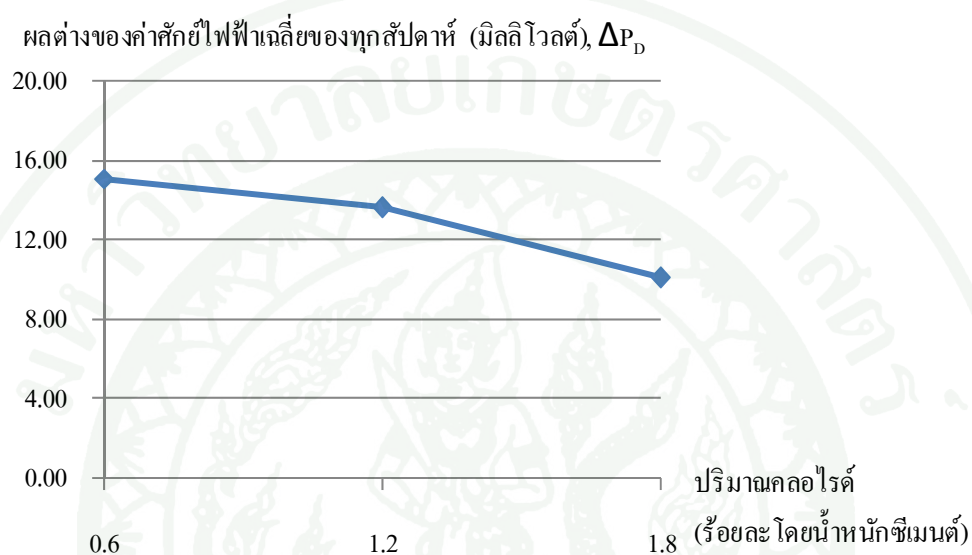
จากภาพที่ 38 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยระหว่างแคโทดกับแอโนด กับระยะหุ้มเหล็กเสริม พบว่าผลต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างแคโทดและแอโนด จะให้ค่าศักย์ไฟฟ้าใกล้เคียงกันมากขึ้นเมื่อตัวอย่างมีระยะหุ้มเหล็กเสริมมากขึ้น ในทางกลับกันค่าศักย์ไฟฟ้าก็ต่างกันมากขึ้นเมื่อระยะหุ้มเหล็กเสริมมีค่าน้อยลง ผลการทดลองนี้เป็นไปในทางเดียวกันกับงานวิจัยของ Pour-Ghaz *et al.* (2003) ซึ่งอธิบายไว้ดังนี้ เพราะวาระยะหุ้มเหล็กเสริมยิ่งมากจะส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคลาดเคลื่อนมากขึ้น ในช่วงแคโทดค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะต่ำกว่าความเป็นจริง (มีค่าเป็นลบมากขึ้น) ในทางกลับกันช่วงแอโนดค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะสูงกว่าความเป็นจริง (มีค่าเป็นบวกมากขึ้น) สาเหตุนี้เองที่ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างแคโทดและแอโนดมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้นเมื่อระยะหุ้มเหล็กเสริมมีค่ามาก



ภาพที่ 38 ความสัมพันธ์ของผลต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างแคโทดและแอโนดเฉลี่ยของทุกสัปดาห์กับระยะหุ้มเหล็กเสริม

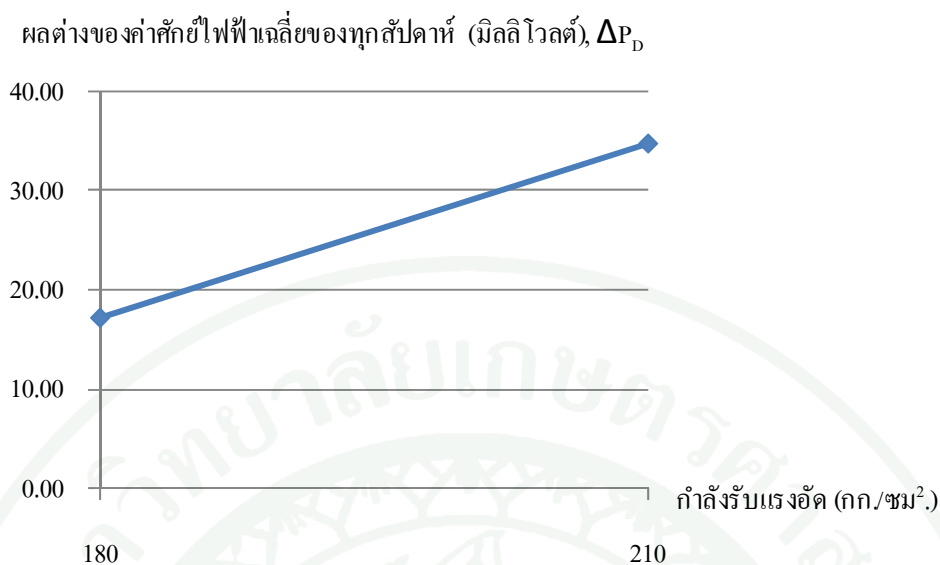
ปริมาณคลอไรด์ปนเปื้อนในคอนกรีตก็มีผลเช่นเดียวกัน ดังภาพที่ 39 ความสัมพันธ์ของผลต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างบริเวณแอโนดและแคโทดกับปริมาณคลอไรด์ปนเปื้อนต่อน้ำหนัก

ซีเมนต์ พบว่าผลต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าจะน้อยลงเมื่อคอนกรีตมีปริมาณคลอไรด์ปนเปื้อนสูง กล่าวคือ ค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างบริเวณแคโทดและแอโนดจะมีค่าแตกต่างกันมากขึ้น เมื่อคอนกรีตมีปริมาณคลอไรด์ปนเปื้อนต่ำ เนื่องจากปริมาณคลอไรด์ปนเปื้อนมีผลต่อความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งจะกล่าวต่อไป



ภาพที่ 39 ความสัมพันธ์ของผลต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างแคโทดและแอโนดเฉลี่ยของทุกสัปดาห์กับปริมาณคลอไรด์ปนเปื้อนต่อน้ำหนักซีเมนต์

จากภาพที่ 40 เป็นความสัมพันธ์ของผลต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างแคโทดและแอโนดกับกำลังรับแรงอัด พบว่าผลต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าจะมากขึ้นเมื่อคอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้น กล่าวคือ ค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างแคโทด และแอโนดจะมีค่าเข้าใกล้กันมากขึ้น เมื่อคอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดต่ำ เนื่องจากปริมาณคลอไรด์ปนเปื้อน และกำลังรับแรงอัดมีผลต่อความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต และความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตมีผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าบริเวณระหว่างแอโนดและแคโทด เพราะว่าคอนกรีตที่มีความต้านทานไฟฟ้าสูงจะให้ค่าศักย์ไฟฟ้าบริเวณแคโทดกับแอโนดแตกต่างกันมากกว่าคอนกรีตที่มีความต้านทานไฟฟ้าต่ำ ซึ่งงานวิจัยของ Pour-Ghaz *et al.* (2003) ได้อธิบายว่าเมื่อคอนกรีตมีความต้านทานไฟฟ้าสูงค่าศักย์ไฟฟ้าบริเวณแอโนดจะให้ค่าที่สูงกว่าความเป็นจริง (มีค่าเป็นลบมากขึ้น) เช่นเดียวกันกับบริเวณแคโทดก็จะทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าความเป็นจริง (มีค่าเป็นบวกมากขึ้น) ด้วยสาเหตุนี้ค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างแคโทดและแอโนดสูงจึงแตกต่างกันมากขึ้นเมื่อคอนกรีตมีความต้านทานไฟฟ้าสูง



ภาพที่ 40 ความสัมพันธ์ของผลต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างแคโทดและแอโนดเฉลี่ยของทุกสัปดาห์กับกำลังรับแรงอัด

จากผลของอิทธิพลระยะหุ้มเหล็กเสริม ปริมาณคลอไรด์ และกำลังรับแรงอัดกับผลต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยระหว่างแคโทดและแอโนดจะมีความสัมพันธ์เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับความแปรปรวน เมื่อคอนกรีตมีความแปรปรวนสูง ค่าศักย์ไฟฟ้าบริเวณแคโทดและแอโนดก็จะแตกต่างกันมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะทำให้สามารถบอกถึงตำแหน่งของสนิม (บริเวณแอโนด) ได้อย่างชัดเจน ในทางกลับกันเมื่อคอนกรีตมีความแปรปรวนต่ำ ค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างแคโทดและแอโนดจะมีค่าเข้าใกล้กันมาก ก็จะทำให้ระบุตำแหน่งบริเวณที่เหล็กเสริมเป็นสนิมได้ลำบาก

ผลการเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้ากับสภาพเหล็กเสริม

เนื่องจากตัวอย่างแต่ละชนิดจะมีการทำซ้ำ 3 ตัวอย่างต่อ 1 ชนิด จึงใช้สัญลักษณ์ A, B และ C แทนตัวอย่างทั้ง 3 ชั้นแรกจะเป็นการเปรียบเทียบศักย์ศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ย P กับการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม (ร้อยละ) โดยที่ค่า P คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยในการวัดครั้งสุดท้ายของแต่ละตัวอย่าง แบ่งเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยในสภาพเปียก P_e และแห้ง P_d ดังสมการที่ 9 จากนั้นจะใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าจากสัปดาห์สุดท้ายของสภาพเปียกและแห้ง มาแสดงในกราฟเส้นชั้นความสูงเพื่อทำการเปรียบเทียบกับตำแหน่งสนิมในเหล็กเสริมที่เกิดขึ้นจริงจากการสำรวจด้วยตาเปล่า

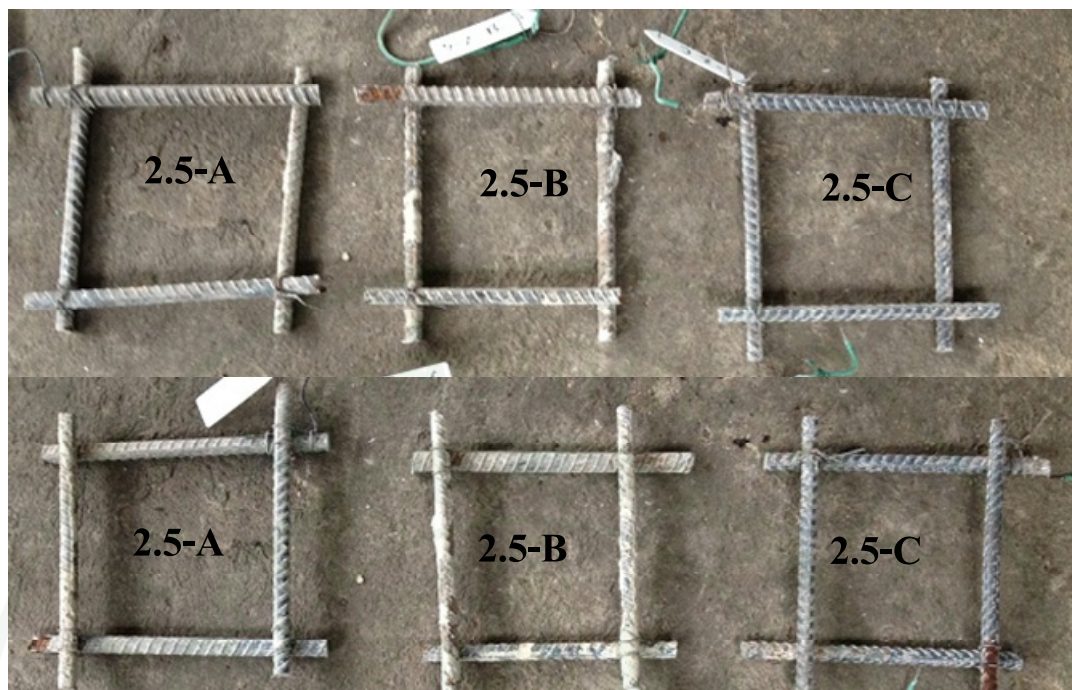
โดยค่าศักย์ศักย์ไฟฟ้าของสัปดาห์สุดท้ายจะตรงกับการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าในวันที่ 119 สำหรับสภาพแห้ง และ 126 สำหรับสภาพเปียก ยกเว้นตัวอย่างกำลังรับแรงอัดซึ่งยังคงทำการเร่งเสริมด้วยสภาวะเปียกสลับแห้งอย่างต่อเนื่อง จึงใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ทำการวัดเป็นครั้งสุดท้ายก่อนการสำรวจเหล็กเสริม สำหรับตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่านการซ่อมแซมจะตรงกับวันที่ 293 สำหรับสภาพเปียก และ 300 สำหรับสภาพแห้ง

กรณีของตัวอย่างอีพ็อกซีจะใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าของวันที่ 13 และ 14 ในการหาค่าค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ย P_{de} ดังสมการที่ 15 รวมถึงใช้แสดงในกราฟเส้นชั้นความสูง

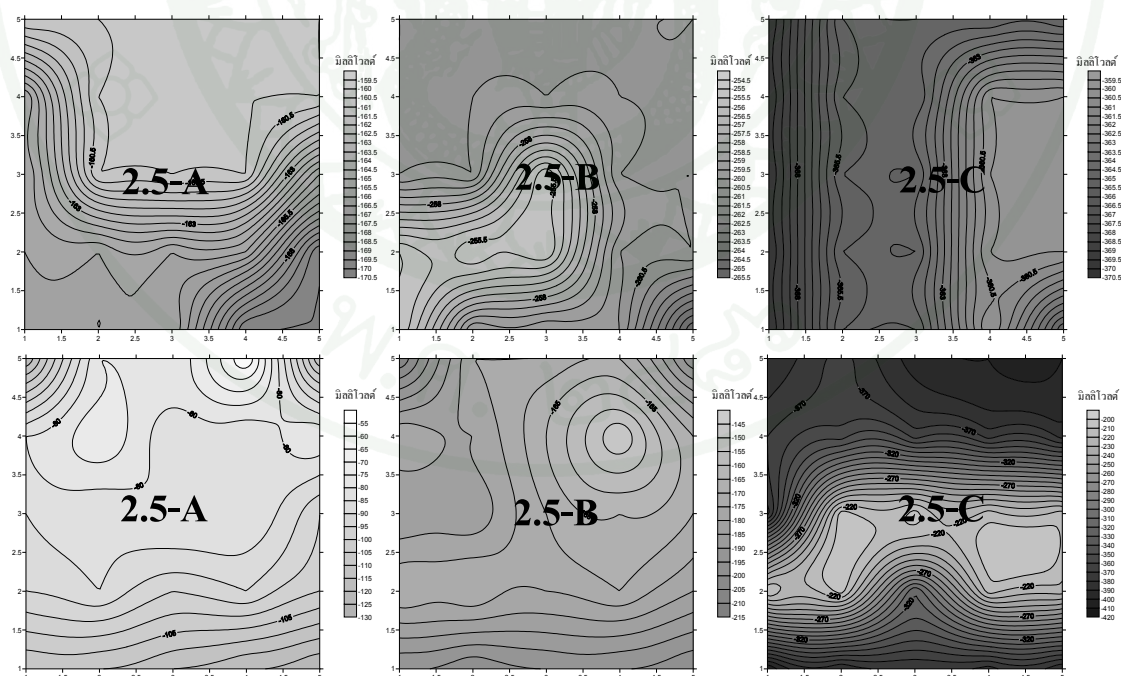
ตารางที่ 6 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมกับค่าศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่างระยะหุ้มเหล็กเสริม

ลำดับ	ระยะหุ้มเหล็กเสริม (ซม.)	การสูญเสียน้ำหนัก ของเหล็กเสริม (ร้อยละ)	ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ย (มิลลิโวลต์)		ลักษณะของสนิม
			แห้ง	เปียก	
A	2.5	0	-92	-163	เป็นจุดเล็กๆตามแนวเหล็ก
B	2.5	0	-180	-259	แนวเส้นๆที่มุมซ้ายบน
C	2.5	0	-326	-365	แนวเส้นๆที่มุมซ้ายล่าง
A	5	0	-184	-189	เป็นจุดเล็กๆตามแนวเหล็ก
B	5	0	-216	-258	เป็นจุดเล็กๆตามแนวเหล็ก
C	5	0	-170	-230	เป็นจุดเล็กๆตามแนวเหล็ก
A	10	0	-176	-256	เป็นจุดเล็กๆตามแนวเหล็ก
B	10	0	-178	-262	เป็นจุดเล็กๆตามแนวเหล็ก
C	10	0	-297	-275	เป็นจุดเล็กๆตามแนวเหล็ก

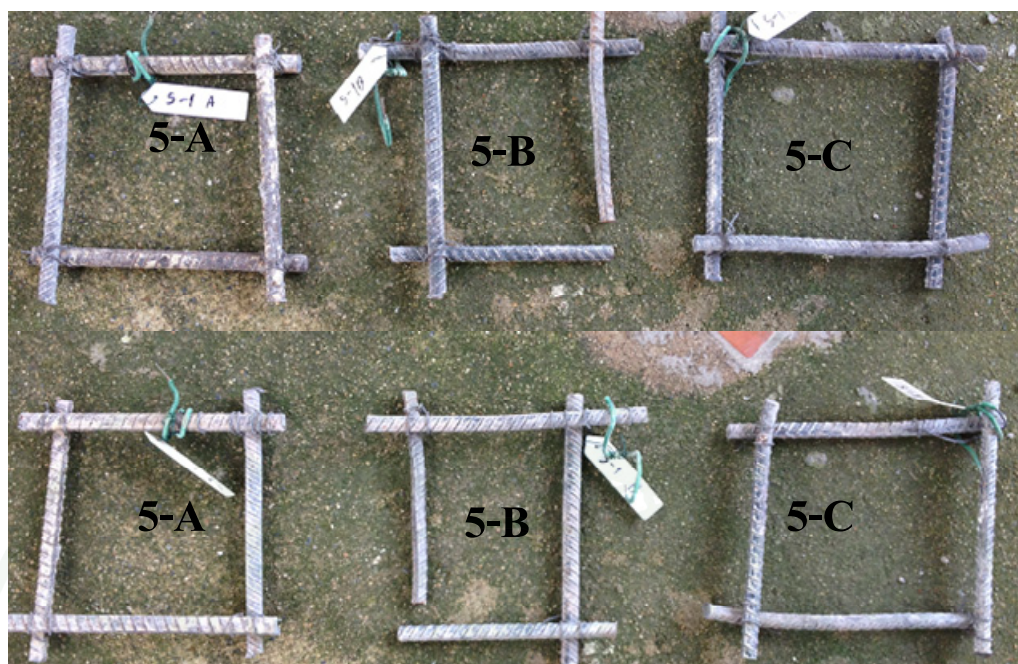
จากตารางที่ 6 โดยรวมยังมีค่าศักย์ไฟฟ้าไม่ถึง -350 มิลลิโวลต์ มีเพียงตัวอย่าง 2.5-C ในสภาพเปียกเท่านั้นที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยสูงกว่า กล่าวคือ ตัวอย่าง 2.5-C มีโอกาสเกิดสนิมมากกว่าร้อยละ 90 จากภาพที่ 41, 43 และ 45 พบว่าตัวอย่าง 2.5-C มีสนิมจริงบริเวณด้านซ้ายล่างของตัวอย่าง (ด้านขวาของด้านตรงข้ามที่ทำการวัดคือด้านซ้ายของด้านที่ทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้า) นอกจากนี้ยังพบสนิมบริเวณด้านซ้ายบนของตัวอย่าง 2.5-B สำหรับตัวอย่างอื่นก็มีสนิมบ้างเล็กน้อย เป็นจุดสีเหลืองอ่อนๆกระจายอยู่เป็นหย่อมๆของเหล็กเสริม ซึ่งสอดคล้องกับตารางที่ 6 เหล็กเสริมยังไม่มี การสูญเสีย น้ำหนักจากเดิม กล่าวคือ เหล็กเสริมยังคงมีประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักเช่นเดิม



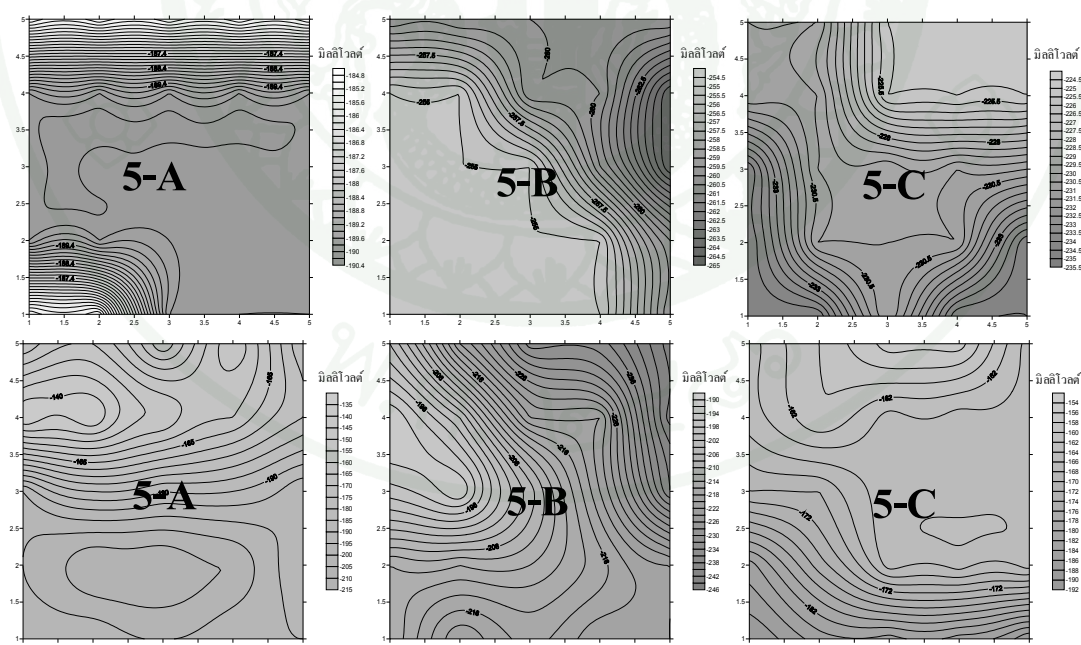
ภาพที่ 41 สภาพเหล็กเสริมของตัวอย่างระยะหุ้มเหล็กเสริม 2.5 ซม. ด้านที่ทำการวัด (แถวบน) และ ด้านตรงข้าม (แถวล่าง)



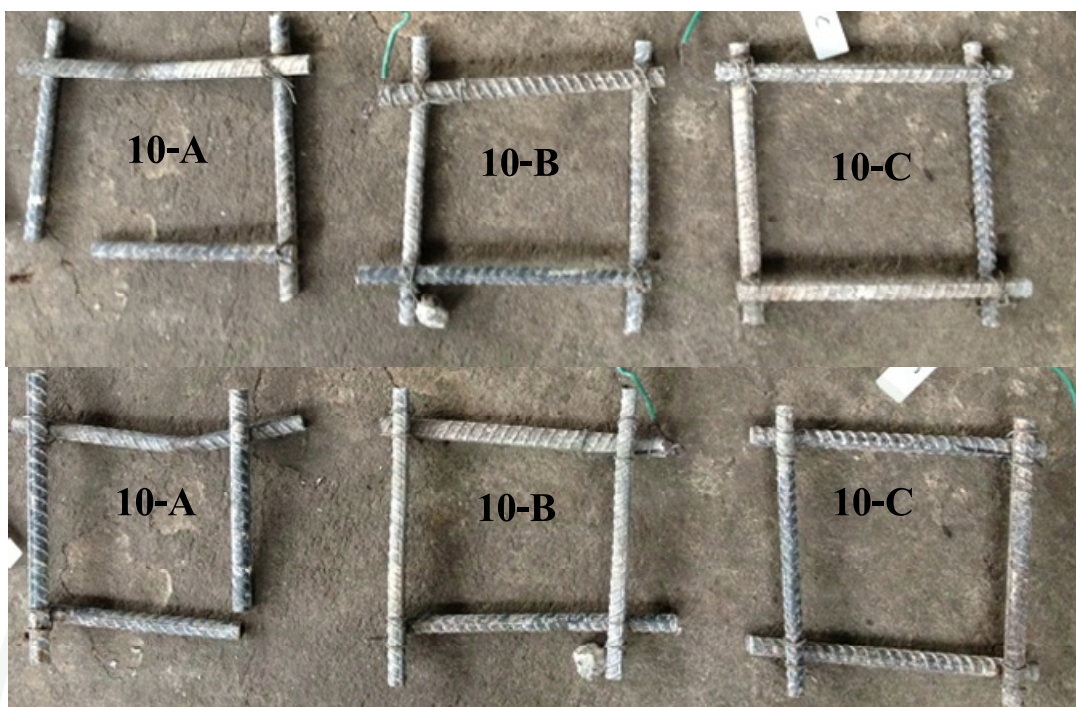
ภาพที่ 42 เส้นชั้นความสูงของค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพเปียก (แถวบน) และแห้ง (แถวล่าง) จาก ตัวอย่างระยะหุ้มเหล็กเสริม 2.5 ซม. ในการวัดครั้งสุดท้าย



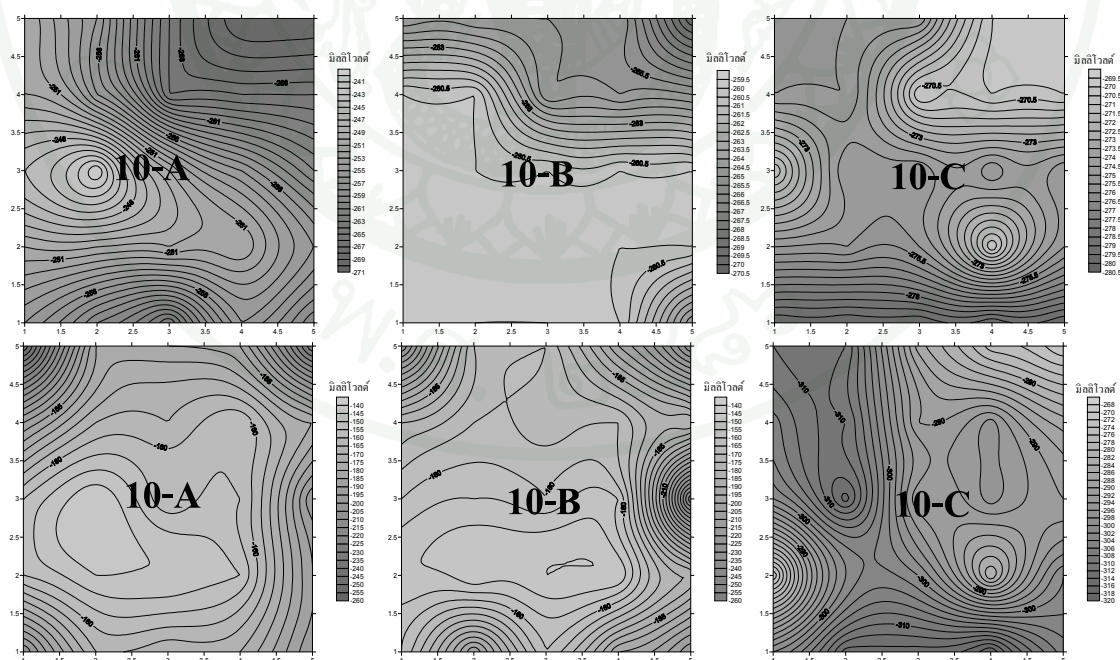
ภาพที่ 43 สภาพเหล็กเสริมของตัวอย่างระยะหุ้มเหล็กเสริม 5 ซม. และคลอไรด์ปนเปื้อนร้อยละ 6 ต่อน้ำหนักซีเมนต์ ด้านที่ทำการวัด (แถวบน) และด้านตรงข้าม (แถวล่าง)



ภาพที่ 44 เส้นชั้นความสูงของค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพเปียก (แถวบน) และแห้ง (แถวล่าง) จากตัวอย่างระยะหุ้มเหล็กเสริม 5 ซม. และคลอไรด์ปนเปื้อนร้อยละ 6 ต่อน้ำหนักซีเมนต์ ในการวัดครั้งสุดท้าย



ภาพที่ 45 สภาพเหล็กเสริมของตัวอย่างระยะหุ้มเหล็กเสริม 10 ซม. ด้านที่ทำการวัด (แถวบน) และด้านตรงข้าม (แถวล่าง)



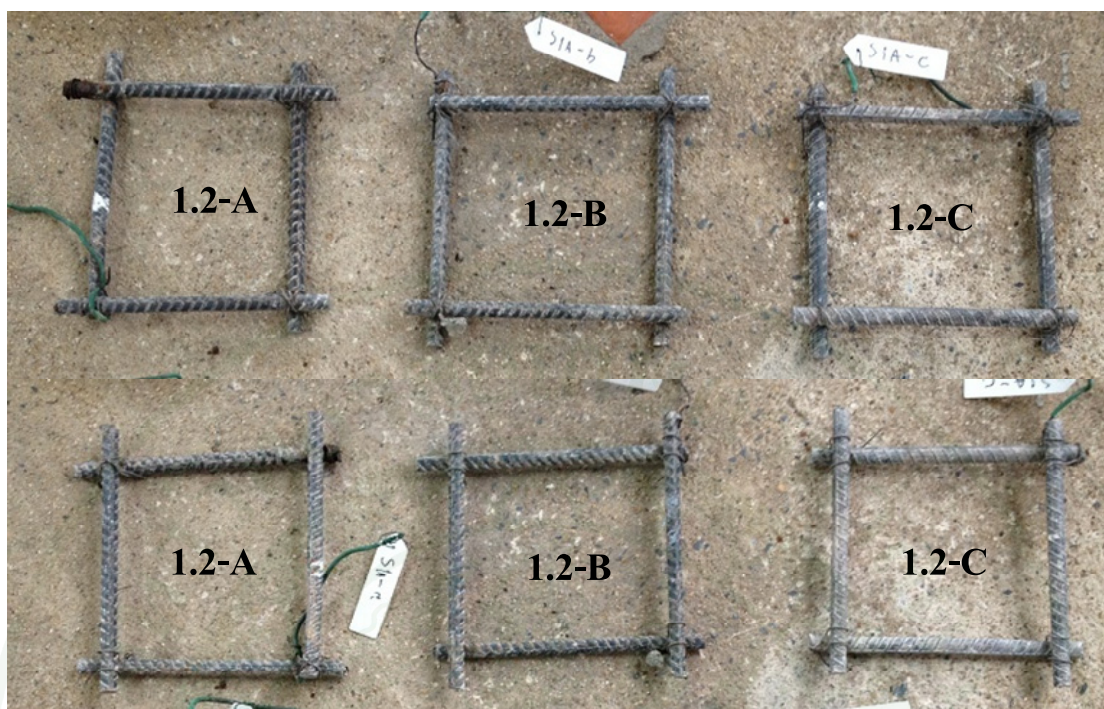
ภาพที่ 46 เส้นชั้นความสูงของค่าศักย์ไฟฟ้าจากในสภาพเปียก (แถวบน) และแห้ง (แถวล่าง) จากตัวอย่างระยะหุ้มเหล็กเสริม 10 ซม. ในการวัดครั้งสุดท้าย

เนื่องจากตัวอย่างโดยส่วนใหญ่ยังมีค่าศักย์ไฟฟ้าไม่ถึง -350 มิลลิโวลต์ รวมถึงกราฟในสภาพเปียกของตัวอย่าง 2.5 C ที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าสูงเกิน -350 มิลลิโวลต์ เกือบทั้งตัวอย่าง เมื่อพิจารณาพร้อมกับกราฟเส้นชั้นความสูงจึงใช้บริเวณที่ตัวอย่างมีความเข้มข้นของค่าศักย์ไฟฟ้าสูง (บริเวณที่ค่าศักย์ไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่าบริเวณอื่นๆ) มาวิเคราะห์ จากภาพที่ 42, 44 และ 46 ตัวอย่าง 2.5-C กราฟเส้นชั้นความสูงของค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพแห้งพบว่ามีค่าศักย์ไฟฟ้าเกิน -350 มิลลิโวลต์ บริเวณด้านบน และด้านล่าง สำหรับกราฟในสภาพเปียกให้ค่าศักย์ไฟฟ้าเกิน -350 มิลลิโวลต์ เกือบทั้งแผ่น จึงพิจารณาถึงความเข้มข้นซึ่งจะมีความเข้มข้นมากที่ด้านซ้าย แม้ว่าบริเวณที่เกิดสนิมในเหล็กเสริมซึ่งอยู่บริเวณซ้ายล่างจะถูกตรวจพบแต่ยังคลาดเคลื่อนกับตำแหน่งของสนิมอยู่พอสมควร สำหรับตัวอย่าง 2.5-B กลับไม่พบค่าศักย์ไฟฟ้าเกิน -350 มิลลิโวลต์ ทั้งสภาพเปียกและแห้ง แต่เมื่อดูจากความเข้มข้นพบว่าตำแหน่งของสนิมรวมอยู่ในบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงทั้งในสภาพเปียก และแห้ง เพียงแต่อาจมีความคลาดเคลื่อนอยู่มาก สำหรับตัวอย่างอื่นๆ ไม่มีตำแหน่งใดที่ค่าศักย์ไฟฟ้าเกิน -350 มิลลิโวลต์ ทั้งในสภาพแห้งและเปียก และเมื่อใช้ความเข้มข้นมาพิจารณาพบว่าจะมีความเข้มข้นไปตามแกนเหล็กเสริม ในขณะที่ตัวอย่างมีสนิมเป็นจุดสีเหลืองอ่อนๆ เล็กน้อยไปตามแกนเหล็กเสริมเช่นกัน

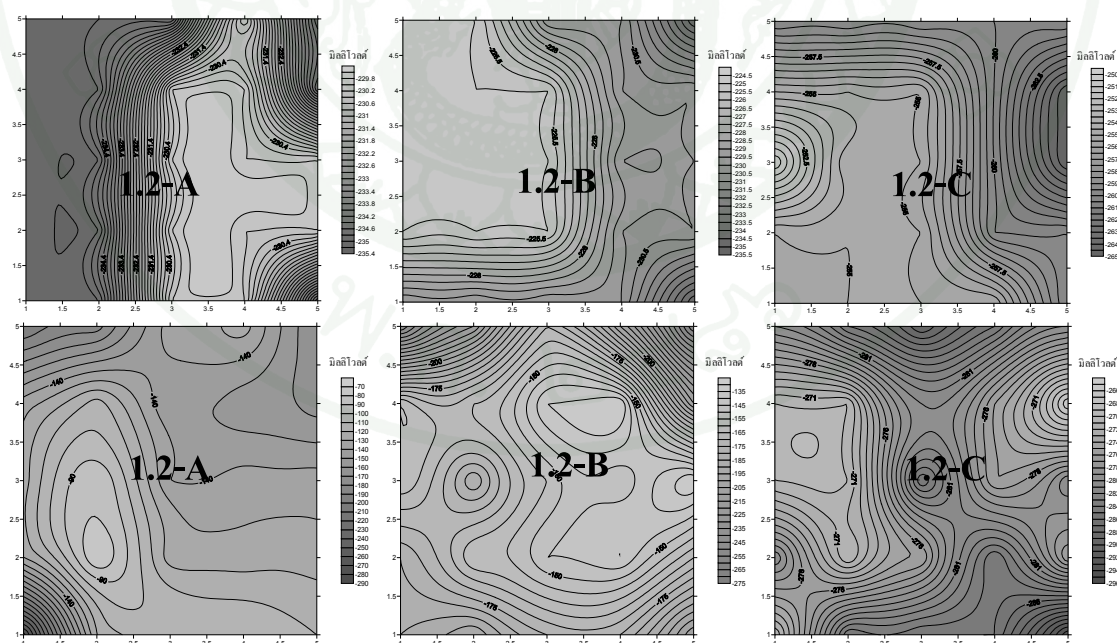
ตารางที่ 7 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมกับค่าศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่างคลอไรด์

ลำดับ	ปริมาณคลอไรด์ ต่อน้ำหนักซีเมนต์ (ร้อยละ)	การสูญเสียน้ำหนัก ของเหล็กเสริม (ร้อยละ)	ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ย (มิลลิโวลต์)		ลักษณะของสนิม
			แห้ง	เปียก	
A	0.6	0	-183	-189	เป็นจุดเล็กๆตามแนวเหล็ก
B	0.6	0	-216	-258	เป็นจุดเล็กๆตามแนวเหล็ก
C	0.6	0	-170	-230	เป็นจุดเล็กๆตามแนวเหล็ก
A	1.2	0	-137	-233	แนวเส้นๆที่มุมซ้ายบน
B	1.2	0	-176	-228	เป็นจุดเล็กๆตามแนวเหล็ก
C	1.2	0	-279	-258	เป็นจุดเล็กๆตามแนวเหล็ก
A	1.8	0	-308	-311	แนวเส้นๆที่มุมซ้ายล่าง
B	1.8	0	-227	-286	เป็นจุดเล็กๆตามแนวเหล็ก
C	1.8	0	-234	-263	เป็นจุดเล็กๆตามแนวเหล็ก

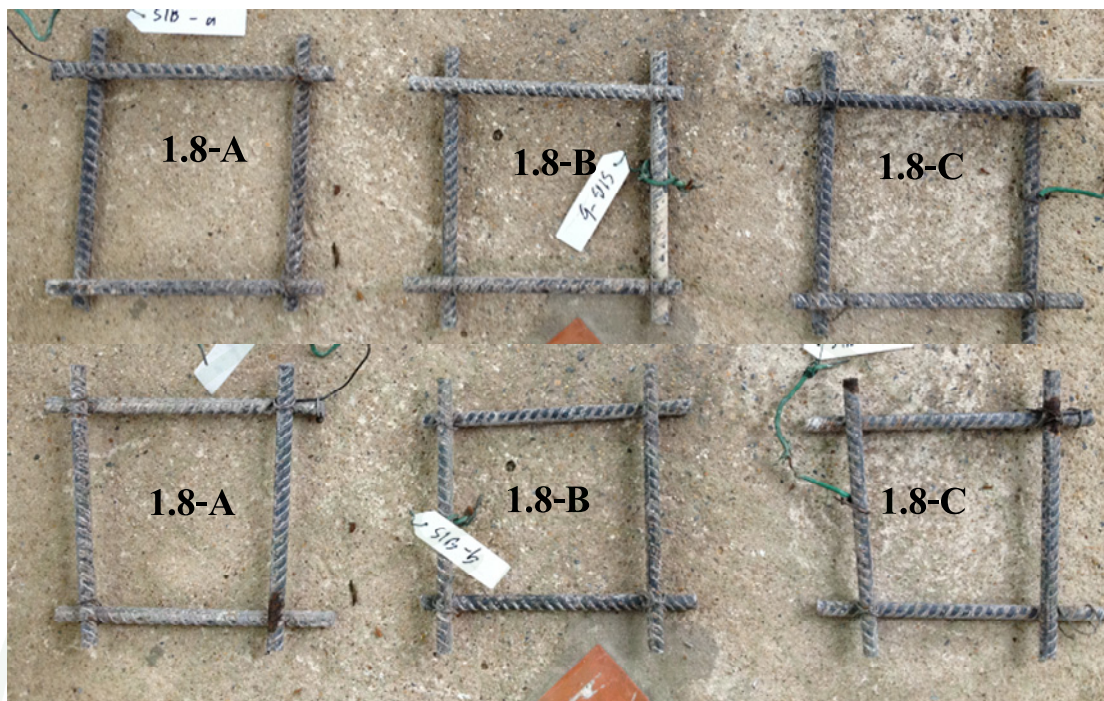
จากตารางที่ 7 ไม่มีค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยของตัวอย่างใดเลยมีค่าถึง -350 มิลลิโวลต์ ซึ่งหมายความว่าเหล็กเสริมมีโอกาสเป็นสนิมน้อยกว่าร้อยละ 10 เมื่อพิจารณาพร้อมกับภาพที่ 43, 47 และ 49 พบว่าเหล็กส่วนใหญ่ยังไม่เป็นสนิม และมีสนิมเพียงแค่ผิวเล็กน้อยในทุกตัวอย่าง มีเพียงตัว



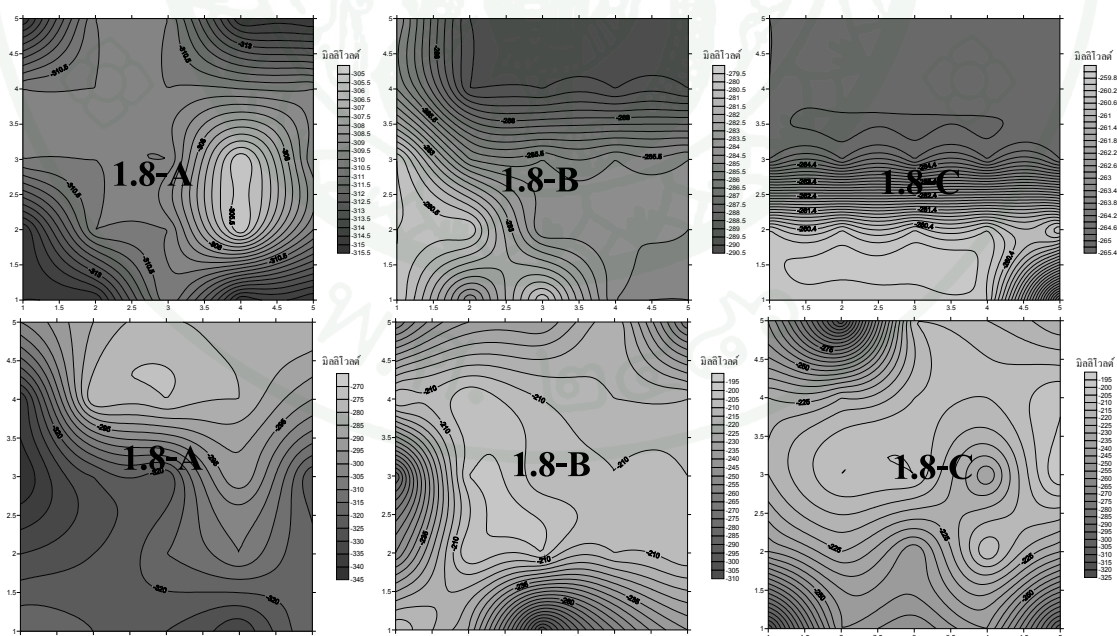
ภาพที่ 47 สภาพเหล็กเสริมของตัวอย่างคลอไรด์ปนเปื้อนร้อยละ 1.2 ต่อน้ำหนักซีเมนต์ ด้านที่ทำการวัด (แถวบน) และด้านตรงข้าม (แถวล่าง)



ภาพที่ 48 เส้นชั้นความสูงของค่าศักย์ไฟฟ้าจากในสภาพเปียก (แถวบน) และแห้ง (แถวล่าง) จากตัวอย่างคลอไรด์ปนเปื้อนร้อยละ 1.2 ต่อน้ำหนักซีเมนต์ ในการวัดครั้งสุดท้าย



ภาพที่ 49 สภาพเหล็กเสริมของตัวอย่างคอลไรด์ปนเปื้อนร้อยละ 1.8 ต่อน้ำหนักซีเมนต์ ด้านที่ทำการวัด (แถวบน) และด้านตรงข้าม (แถวล่าง)



ภาพที่ 50 เส้นชั้นความสูงของค่าศักย์ไฟฟ้าจากในสภาพเปียก (แถวบน) และแห้ง (แถวล่าง) จากตัวอย่างคอลไรด์ปนเปื้อนร้อยละ 1.8 ต่อน้ำหนักซีเมนต์ ในการวัดครั้งสุดท้าย



ภาพที่ 51 ภาพขยายตำแหน่งสนิมของตัวอย่าง 1.2-A และ 1.8-A

อย่าง 1.2-A บริเวณด้านขวาบน และ 1.8-A บริเวณด้านซ้ายล่าง ที่เป็นสนิมชัดเจนกว่าแต่ก็ไม่ได้รุนแรงกว่าตัวอย่างอื่นๆมากนัก และยังเหมือนลักษณะของสนิมแบบหลุมมากกว่าแบบสม่ำเสมอ ดังภาพ 51 ซึ่งโดยรวมตัวอย่างก็มีความสอดคล้องกับอัตราการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม กล่าวคือเหล็กเสริมยังคงมีประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักเช่นเดิม

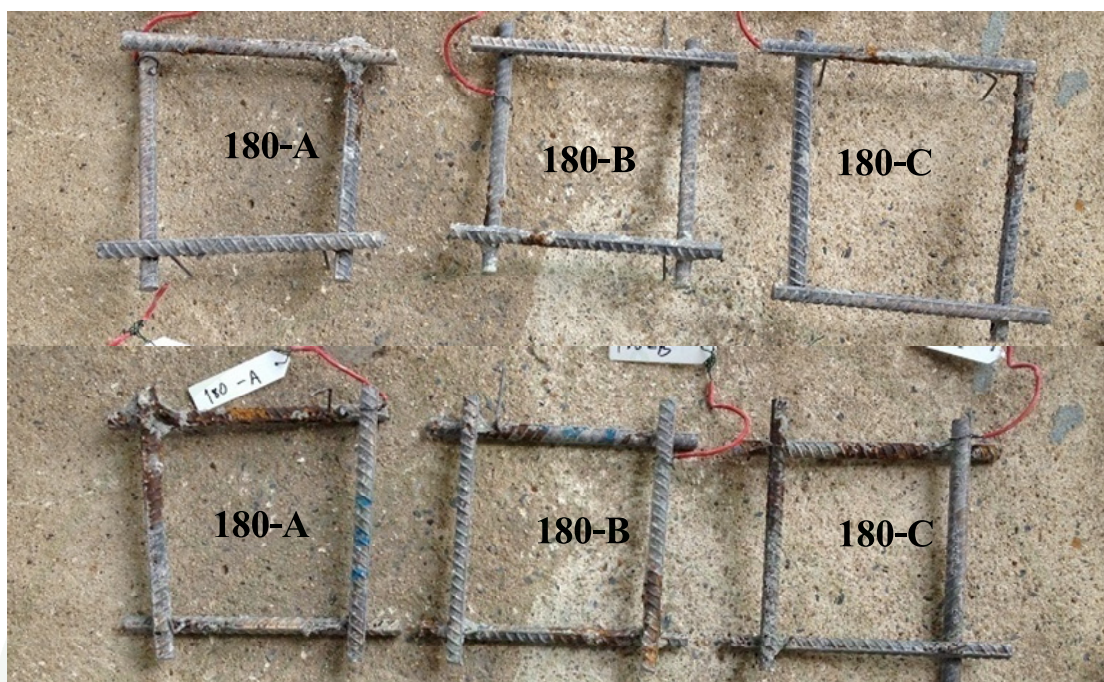
จากภาพ 44, 48 และ 50 กราฟเส้นชั้นความสูงของค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพแห้งและเปียกไม่มีตัวอย่างใดมีค่าถึง -350 มิลลิโวลต์ โดยค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพเปียกมีค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยสูงกว่า แต่ค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพแห้งกลับมีค่ามากที่สุดสูงกว่า เมื่อพิจารณากราฟเส้นชั้นความสูงในสภาพแห้งตัวอย่างโดยรวมจะมีความเข้มของค่าศักย์ไฟฟ้าสูงบริเวณรอบๆ ซึ่งเป็นไปตามแนวของเหล็กเสริม มีแค่ตัวอย่าง 1.2-C เท่านั้นที่ค่อนข้างกระจายตัวไปทั้งตัวอย่าง สำหรับกราฟในสภาพเปียกส่วนใหญ่จะมีความเข้มสอดคล้องกับกราฟในสภาพแห้ง ซึ่งเป็นการเน้นย้ำถึงตำแหน่งของความเข้มเดิม มีทั้งกระจายตัวมากขึ้นและแคบลง ซึ่งตำแหน่งสนิมจริงของเหล็กเสริมนั้นมีที่ผิวเล็กน้อยกระจายตัวไปทั้งเหล็กเสริม จึงมีความสอดคล้องกับกราฟเส้นชั้นความสูงอยู่พอสมควร ซึ่งบริเวณที่เป็นสนิมชัดเจนกว่าส่วนอื่นจะตรวจพบ เช่น บริเวณซ้ายบนของตัวอย่าง 1.2-A ตัวอย่าง เพียงแต่ค่าศักย์ไฟฟ้าไม่ได้ละเอียดจนขนาดระบุได้ว่ามีสนิมรุนแรงกว่าตำแหน่งอื่น แต่ต้องอย่าลืมว่าสำหรับกรณีนี้ รวมถึงกรณีของตัวอย่างระยะหุ้มเหล็กเสริมเป็นการวิเคราะห์ค่าศักย์ไฟฟ้าโดยที่ยังมีค่าไม่ถึง -350 มิลลิโวลต์ ทั้งในสภาพเปียกและแห้ง นอกจากนี้ยังเป็นการยืนยันถึงผลการวิเคราะห์ในบทของค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยกับปริมาณคลอไรด์ปนเปื้อน เพราะว่าสนิมของตัวอย่างคลอไรด์ทั้ง 3 ชนิดไม่มีความต่างมากนักแต่ค่าศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่างที่มีปริมาณคลอไรด์ปนเปื้อนมากกว่าจะมีผลทำให้ได้ค่าศักย์ไฟฟ้าสูงกว่า

ตารางที่ 8 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมกับค่าศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่างกำลังรับแรงอัด

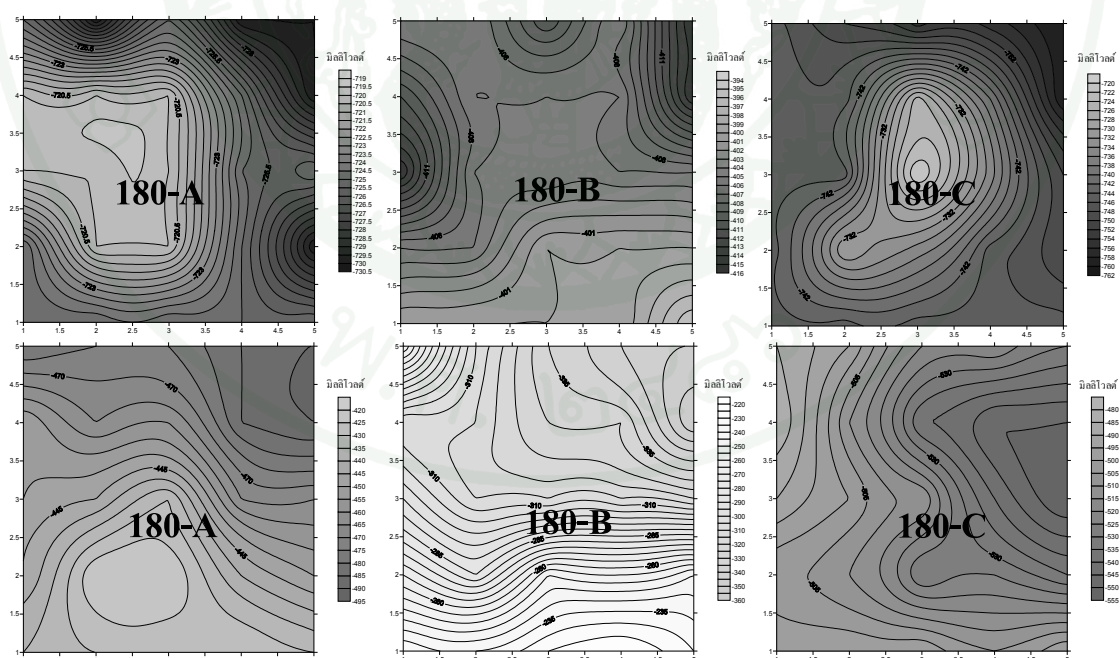
ลำดับ	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม ²)	การสูญเสียน้ำหนัก ของเหล็กเสริม (ร้อยละ)	ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ย (มิลลิโวลต์)		ลักษณะของสนิม
			แห้ง	เปียก	
A	180	0.69	-453	-724	ยาวตลอดแนวเหล็กด้านบน
B	180	0	-290	-395	เป็นสนิมบริเวณซ้ายล่าง
C	180	0.69	-515	-744	ตามแนวเหล็กด้านบน
A	210	0	-325	-505	มุมขวาบนและด้านล่าง
B	210	0	-322	-648	ตามแนวด้านซ้ายและด้านขวา
C	210	0	-345	-508	ตามแนวด้านซ้ายและด้านขวา

จากตารางที่ 8 มีเพียงตัวอย่างชนิดกำลังรับแรงอัด 180 กก./ซม². จำนวน 2 ตัวอย่าง ได้แก่ 180-A และ 180-B เท่านั้นที่เหล็กเสริมเกิดการสูญเสียน้ำหนัก และค่าศักย์ไฟฟ้ามีค่าเกิน -350 มิลลิโวลต์ทั้งในสภาพเปียกและแห้ง นอกจากนี้ตัวอย่างในสภาพเปียกนั้นได้ค่าแนวโน้มมีโอกาสเป็นสนิมมากกว่า 90 % ทุกตัวอย่าง หรือมีค่าศักย์ไฟฟ้าสูงกว่า -350 มิลลิโวลต์ นั้นเอง เมื่อนำไปพิจารณากับภาพที่ 52 และ 54 พบว่าเหล็กเสริมเป็นสนิมจริงเพียงแต่ยังเป็นสนิมที่ผิว และยังเป็นแค่บางส่วนของตัวเหล็กเท่านั้น โดยสนิมจะมีความรุนแรงมากขึ้นในตัวอย่าง 180-A และ 180-C ซึ่งเหล็กเสริมโดนสนิมกัดกร่อนเล็กน้อยดังภาพที่ 56

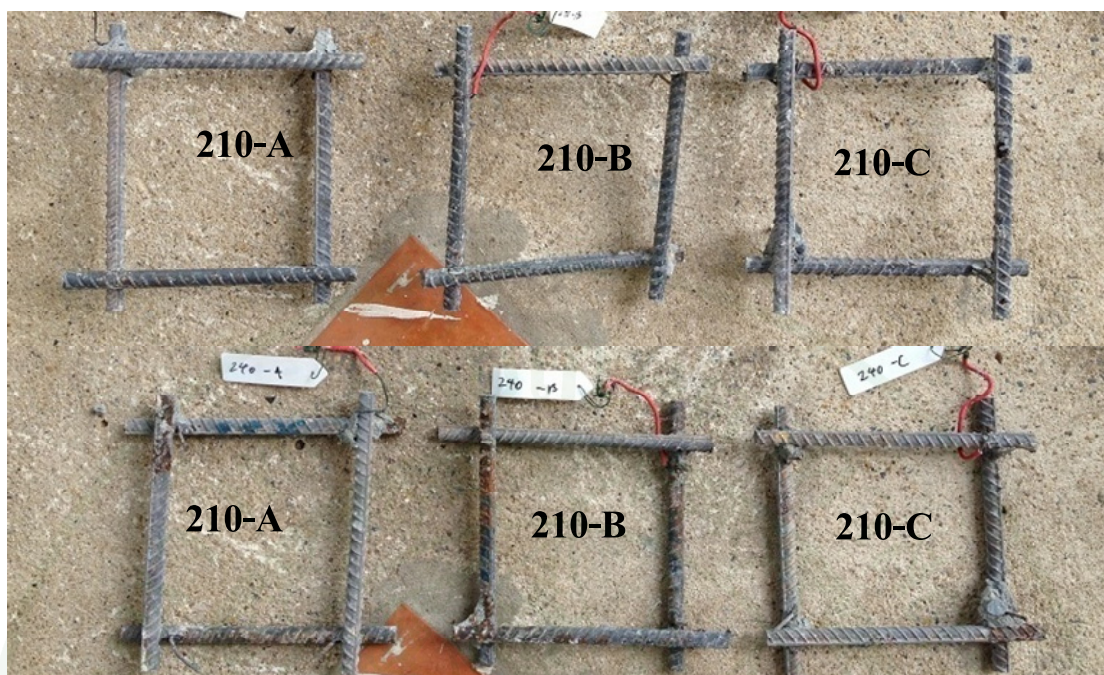
จากกราฟเส้นชั้นความสูงของค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพแห้งและเปียกดังภาพที่ 53 และ 55 กราฟในสภาพแห้งของตัวอย่าง 180-A พบว่ามีค่าเกิน -350 มิลลิโวลต์ทั้งกราฟแต่จะมีความเข้มสูงบริเวณครึ่งบน เช่นเดียวกันกับตัวอย่าง 180-C มีความเข้มมากที่ด้านขวาค่อนไปทางด้านบน ในขณะที่ตัวอย่าง 180-B มีเพียงแค่บริเวณขวาบนของตัวอย่างที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าเกิน -350 มิลลิโวลต์ สำหรับตัวอย่าง 210-A บริเวณที่ค่าศักย์ไฟฟ้าเกิน -350 มิลลิโวลต์ จะอยู่บริเวณช่วงบนประมาณ 1 ใน 4 ของแผ่นคอนกรีต ขวาบนในตัวอย่าง 210-B และซ้ายบนสำหรับตัวอย่าง 210-C ในขณะที่สภาพเปียกแม้ว่าทุกตัวอย่างจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าเกิน -350 มิลลิโวลต์ทั้งหมด แต่ก็ยังสามารถบอกตำแหน่งของสนิมได้จากความเข้มของกราฟ ซึ่งโดยส่วนใหญ่บริเวณที่มีค่าเกินศักย์ไฟฟ้าเกิน -350 มิลลิโวลต์ ในสภาพแห้งจะตรงกับบริเวณที่มีความเข้มสูงในสภาพเปียก และยังมีบางตำแหน่งที่มีเข้มสูงในขณะที่กราฟในสภาพแห้งมีค่าศักย์ไฟฟ้าไม่ถึง -350 มิลลิโวลต์ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับตำแหน่งของสนิมที่เกิดขึ้นจริงดังภาพ พบว่าโดยส่วนใหญ่บริเวณของสนิมมีความสอดคล้องกันดัง



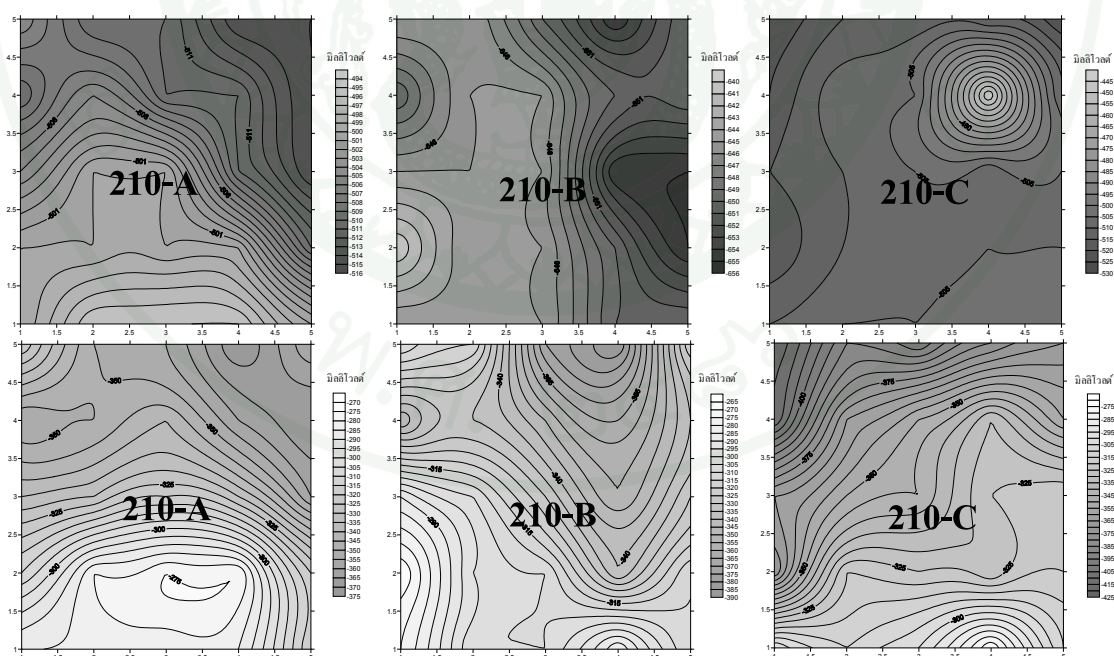
ภาพที่ 52 สภาพเหล็กเสริมของตัวอย่างกำลังรับแรงอัด 180 กก./ชม². ด้านที่ทำการวัด (แถวบน) และด้านตรงข้าม (แถวล่าง)



ภาพที่ 53 เส้นชั้นความสูงของค่าศักย์ไฟฟ้าจากในสภาพเปียก (แถวบน) และแห้ง (แถวล่าง) จากตัวอย่างกำลังรับแรงอัด 180 กก./ชม² ในการวัดครั้งสุดท้าย



ภาพที่ 54 สภาพเหล็กเสริมของตัวอย่างกำลังรับแรงอัด 210 กก./ชม². ด้านที่ทำการวัด (แถวบน) และด้านตรงข้าม (แถวล่าง)



ภาพที่ 55 เส้นชั้นความสูงของค่าศักย์ไฟฟ้าจากในสภาพเปียก (แถวบน) และแห้ง (แถวล่าง) จากตัวอย่างกำลังรับแรงอัด 210 กก./ชม² ในการวัดครั้งสุดท้าย



ภาพที่ 56 ภาพขยายตำแหน่งสนิมของตัวอย่าง 180-A และ 180-C

ต่อไปนี้ ตัวอย่าง 180-A พบสนิมที่ช่วงบนของเหล็กเสริมเช่นเดียวกันกับตัวอย่าง 180-C สำหรับตัวอย่าง 180-B อยู่ที่ตำแหน่งด้านบนก่อนไปทางขวา และด้านซ้ายล่าง ในขณะที่ตัวอย่าง 210-A พบสนิมอยู่บริเวณด้านขวาบน และด้านล่าง ตัวอย่าง 210-B อยู่ที่ด้านซ้ายและขวา และตัวอย่าง 210-C อยู่ที่ด้านซ้าย และด้านขวาล่าง

นอกจากนี้กราฟเส้นชั้นความสูงในสภาพเปียกจากภาพที่ 53 และ 55 ยังสามารถนำมาวิเคราะห์ตำแหน่งของสนิมร่วมกับกราฟเส้นชั้นความสูงในสภาพแห้งได้อีกด้วย เช่นในตัวอย่าง 210-B กราฟในสภาพแห้งไม่พบสนิมที่ตำแหน่งบริเวณด้านขวา แต่กลับพบในกราฟของสภาพเปียก และยังช่วยเน้นย้ำถึงตำแหน่งของสนิมในส่วนของด้านบนของตัวอย่าง เช่นเดียวกับตัวอย่าง 180-A และ 180-C ที่กราฟทั้ง 2 กรณีมีความสอดคล้องและเป็นไปในทางเดียวกัน แต่ก็ยังพบความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง เช่นในตัวอย่าง 180-B กราฟในสภาพแห้งไม่พบสนิมช่วงซ้ายล่างของเหล็กเสริม แต่กลับพบในตำแหน่งซ้ายและขวาของกราฟในสภาพเปียกซึ่งมีความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งอยู่พอสมควรเมื่อเทียบกับตำแหน่งของสนิมที่เกิดขึ้นจริง และยังพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพแห้งของตัวอย่าง 210-B บริเวณด้านขวามีค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าตัวอย่าง 180-A และ 180-C มาก และใกล้เคียงกันมากขึ้นเมื่อตัวอย่างอยู่ในสภาพเปียก ซึ่งเมื่อนำมาเทียบกับภาพของสนิมที่เกิดขึ้นจริงค่าศักย์ไฟฟ้าไม่ควรจะต่างกันมากขนาดนี้สำหรับค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพแห้ง หมายความว่าตัวอย่าง 210-B มีความต้านทานสูงกว่า 180-A และ 180-C จึงทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่า เมื่อตัวอย่างทั้ง 3 มีความชื้นค่าศักย์ไฟฟ้าจึงขยับใกล้เคียงกันมากขึ้น

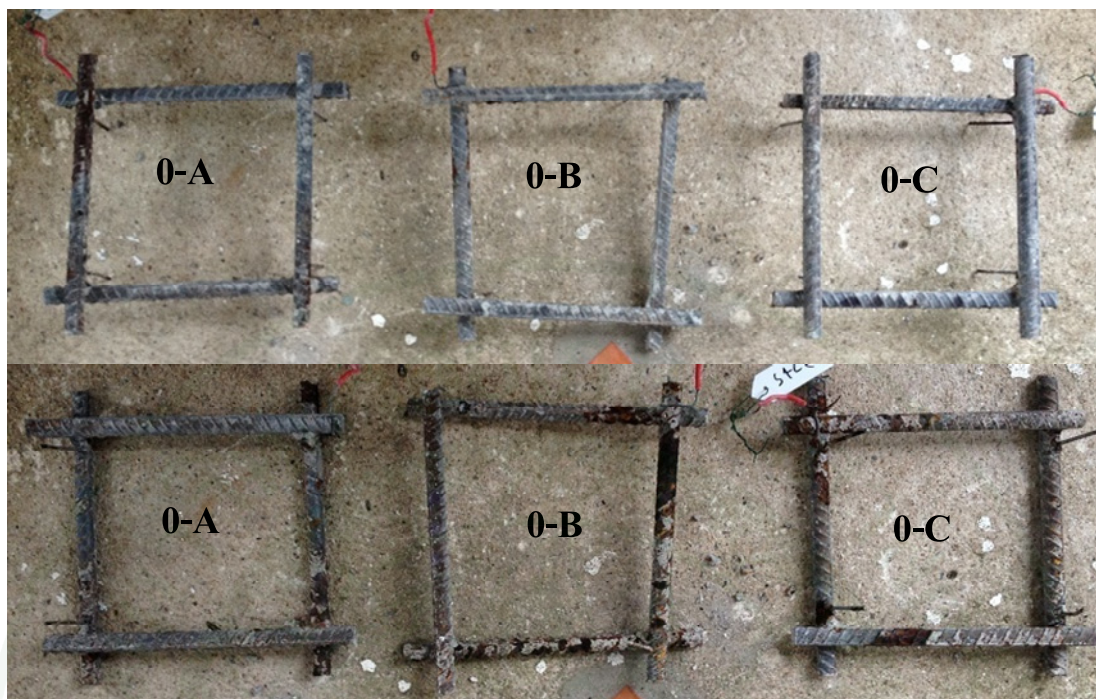
จากตารางที่ 9 เป็นตารางการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างที่ไม่ผ่านการซ่อมแซม (0) กับตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมในวันที่ 70 และ 244 พบว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการซ่อมแซม 0-A เพียงตัวอย่างเดียวที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยเกิน -350 มิลลิโวลต์ในสภาพแห้ง แต่ทุกตัวอย่างมีค่าศักย์ไฟฟ้า

ตารางที่ 9 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมกับค่าศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่างการซ่อมแซม

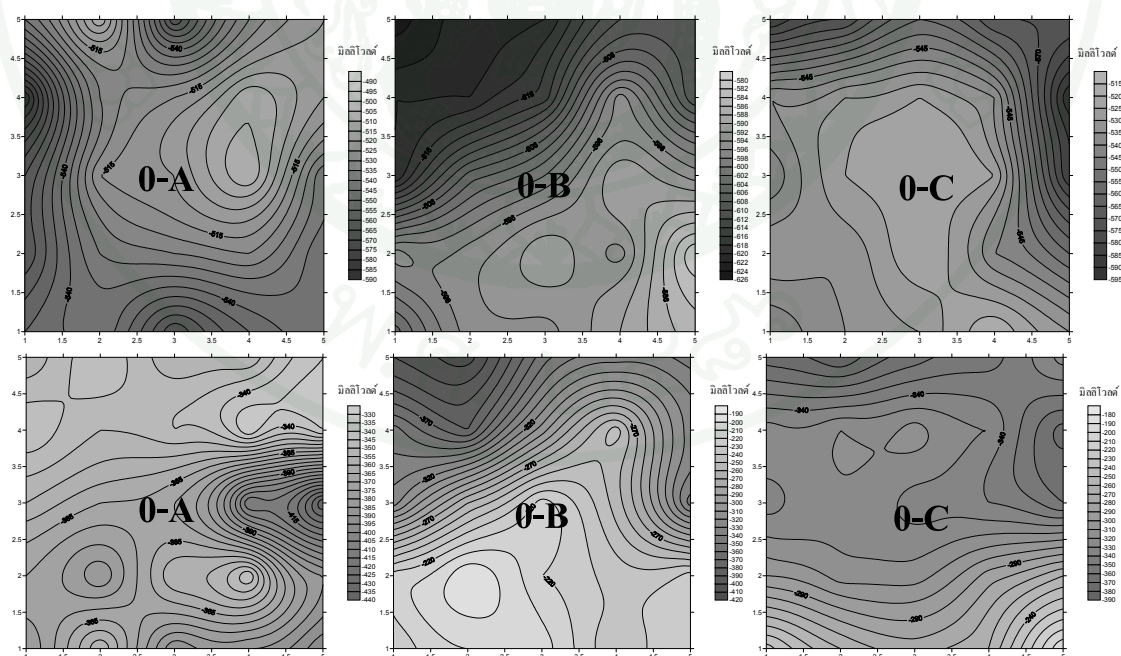
ลำดับ	ตัวอย่าง	การสูญเสียน้ำหนัก ของเหล็กเสริม (ร้อยละ)	ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ย (มิลลิโวลต์)		ลักษณะของสนิม
			แห้ง	เปียก	
A	0	0	-365	-531	มุมด้านซ้ายบนและซ้ายล่าง
B	0	0	-282	-603	ตลอดแนวด้านซ้ายจนถึงด้านล่าง
C	0	0	-314	-545	กระจายตัวตามแนวเหล็ก
A	70	0	-209	-350	แนวยาวด้านขวาบน
B	70	0	-234	-526	แนวยาวด้านซ้าย
C	70	0	-203	-467	แนวยาวด้านซ้าย
A	244	0	-243	-522	ตามแนวซ้ายบนและขวาบน
B	244	0	-253	-551	กระจายตัวตามแนวเหล็ก
C	244	0	-279	-529	กระจายตัวตามแนวเหล็ก

เกิน -350 มิลลิโวลต์ ในสภาพเปียก ยกเว้นตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซม 70-A ที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ย เท่ากับ -350 มิลลิโวลต์ พอดี เมื่อสำรวจเหล็กเสริมดังภาพที่ 57, 59 และ 61 พบว่าเหล็กเสริมเป็น สนิมพอสมควรแต่ยังไม่ถึงขั้นสูญเสียน้ำหนักดังตารางด้านบน มีตัวอย่าง 0-A และ 70-B เท่านั้นที่มี สนิมอย่างชัดเจนของด้านที่ทำการวัด แต่มีเพียงตัวอย่าง 0-A ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพแห้งระบุว่า มี โอกาสเป็นสนิมมากกว่าร้อยละ 90 เพราะว่าตัวอย่าง 60-B หลังการซ่อมแซมผิวหน้าคอนกรีต เปลี่ยนเป็นซีเมนต์ชนิดไม่หดรัดซึ่งมีความแน่นมาก หรือมีความต้านทานไฟฟ้าสูงนั่นเอง จึงทำให้ ค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าความเป็นจริง รวมถึงช่วยลดอัตราการเกิดสนิมด้วย สำหรับด้านตรงข้ามที่ทำ การวัดพบสนิมในทุกตัวอย่าง โดยที่ชนิดของตัวอย่างที่เป็นสนิมมากที่สุดคือ 0, 70 และ 244 ตามลำดับ แต่ก็ยังไม่ต่างกันมากนัก ซึ่งเป็นการเน้นย้ำถึงผลที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ของตัวอย่างการ ซ่อมแซมในบทของค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ย

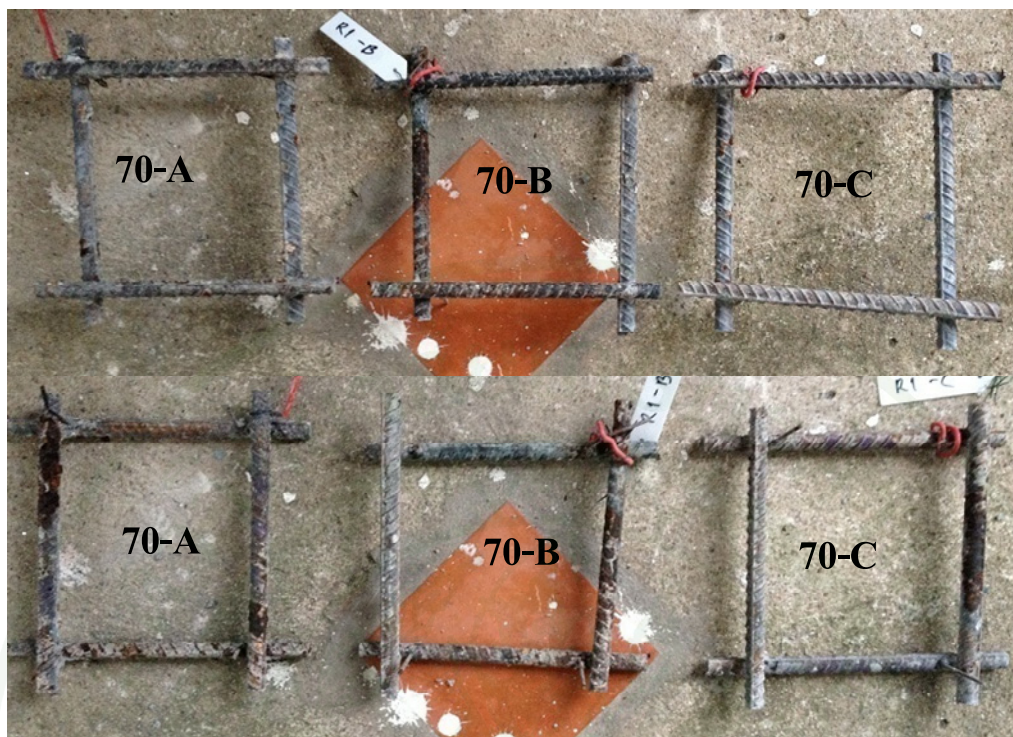
จากภาพที่ 58, 60 และ 62 พบว่าตัวอย่าง 0-A มีค่าศักย์ไฟฟ้าเกิน -350 มิลลิโวลต์เกือบทั้ง แผ่น โดยเฉพาะบริเวณด้านขวามีค่าสูงเกิน -400 มิลลิโวลต์ ตัวอย่าง 0-B พบที่ด้านบนเฉียงไป ด้านซ้าย และ 0-C พบบริเวณด้านบนเฉียงไปทางซ้ายและด้านขวาเล็กน้อย สำหรับตัวอย่างที่เหลือมี เพียงตัวอย่าง 70-C เท่านั้นที่อยู่ที่มีมุมขวาบนเป็นบริเวณเล็กๆ ซึ่งบริเวณที่มีค่าเกิน -350 มิลลิโวลต์ พบว่ามีเป็นสนิมจริง เพียงแต่ว่าบริเวณที่มีความชื้นสูงอาจจะไม่สัมพันธ์กับตำแหน่งที่เกิดสนิมมาก ที่สุด สำหรับกราฟในสภาพเปียก เมื่อพิจารณาที่ความชื้นแล้วส่วนใหญ่มีความสอดคล้องกับสภาพ



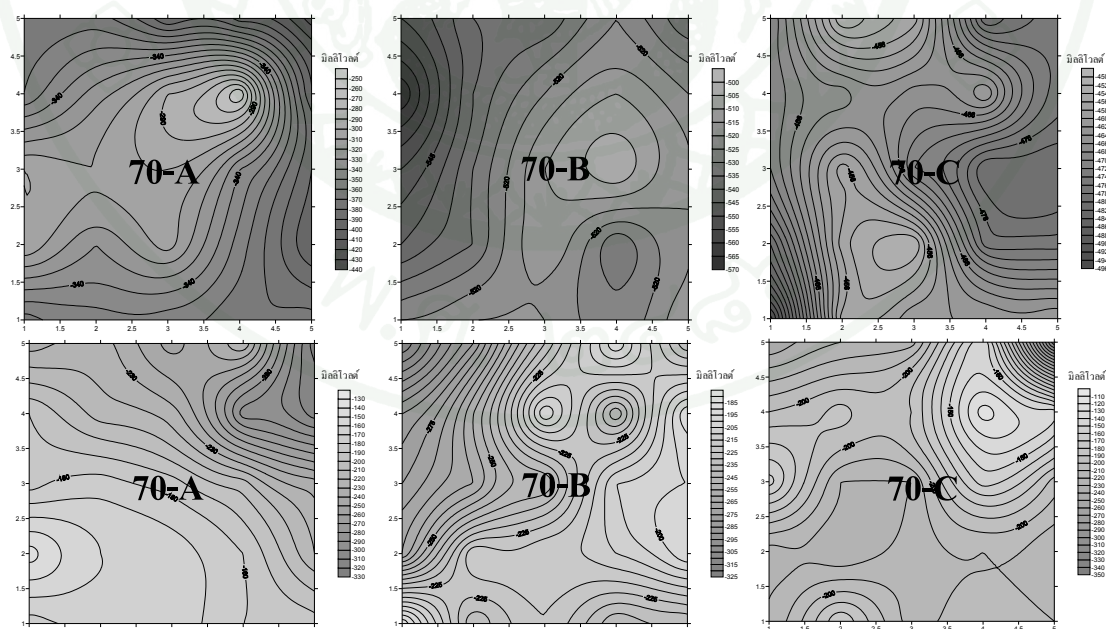
ภาพที่ 57 สภาพเหล็กเสริมของตัวอย่างที่ไม่ผ่านการซ่อมแซม (0) ด้านที่ทำการวัด (แถวบน) และด้านตรงข้าม (แถวล่าง)



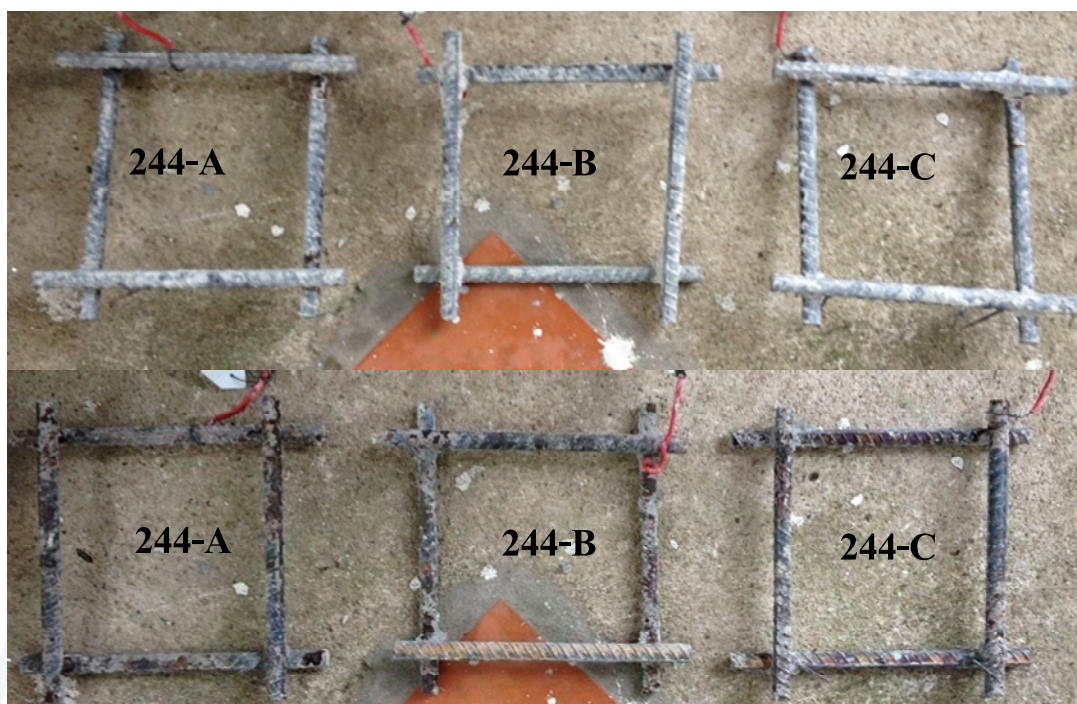
ภาพที่ 58 เส้นชั้นความสูงของค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพเปียก (แถวบน) และสภาพแห้ง (แถวล่าง) จากตัวอย่างที่ไม่ผ่านการซ่อมแซม (0) ในการวัดครั้งสุดท้าย



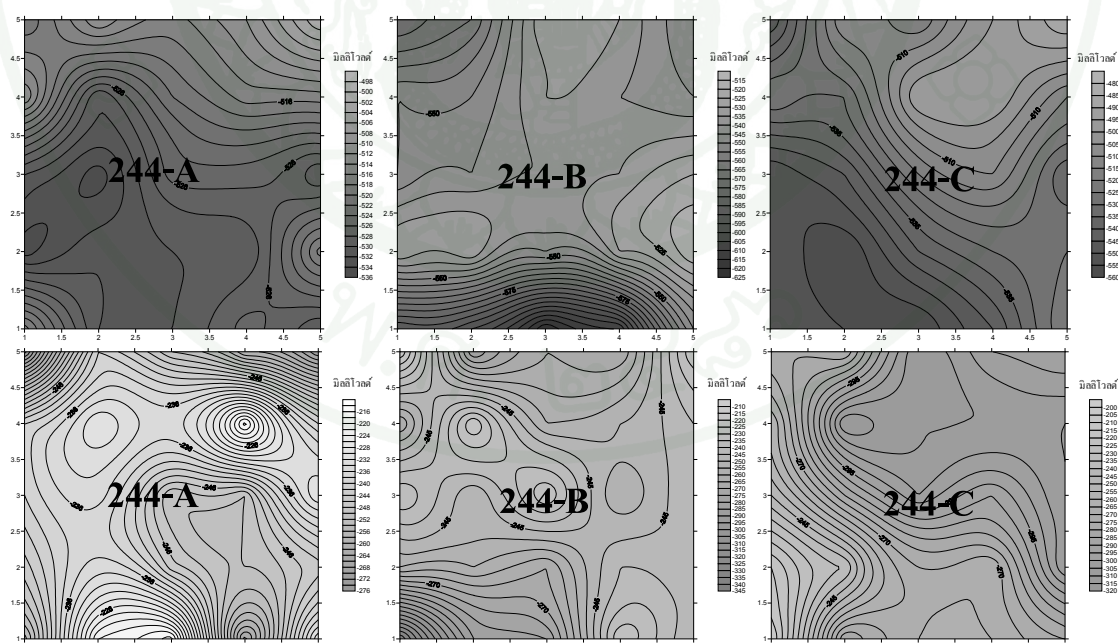
ภาพที่ 59 สภาพเหล็กเสริมของตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมวันที่ 70 ด้านที่ทำการวัด (แถวบน) และด้านตรงข้าม (แถวล่าง)



ภาพที่ 60 เส้นชั้นความสูงของค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพเปียก (แถวบน) และสภาพแห้ง (แถวล่าง) จากตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมวันที่ 70 ในการวัดครั้งสุดท้าย



ภาพที่ 61 สภาพเหล็กเสริมของตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมวันที่ 244 ด้านที่ทำการวัด (แถวบน) และด้านตรงข้าม (แถวล่าง)



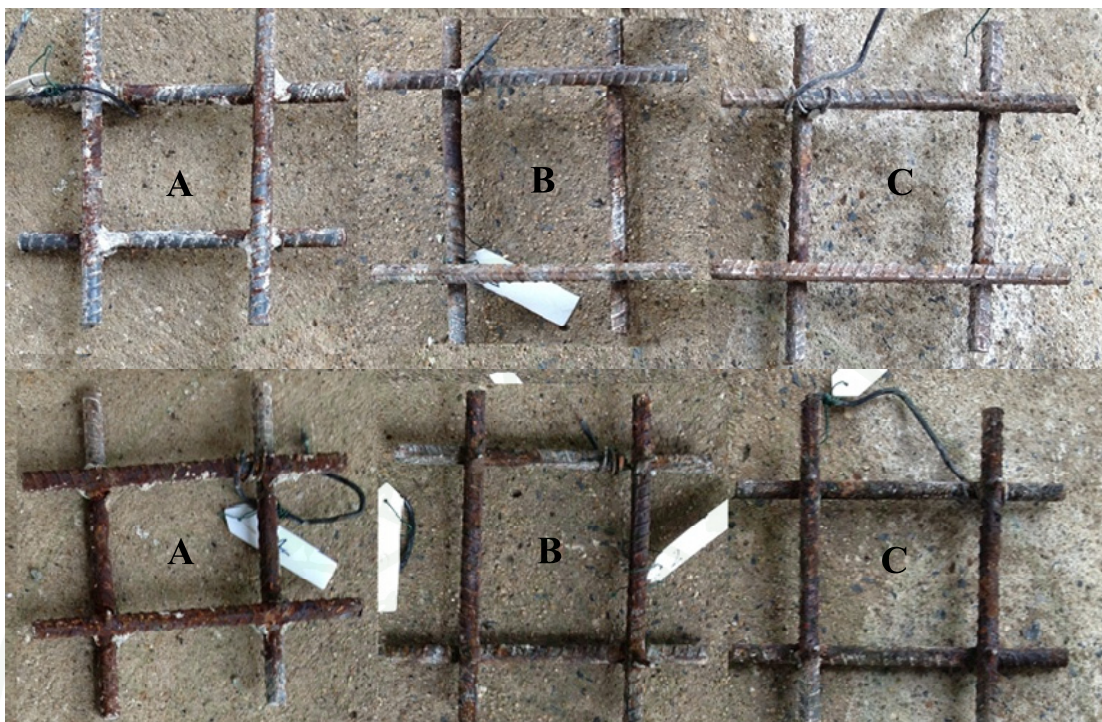
ภาพที่ 62 เส้นชั้นความสูงของค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพเปียก (แถวบน) และสภาพแห้ง (แถวล่าง) จากตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมวันที่ 244 ในการวัดครั้งสุดท้าย

แห้งมีทั้งขยายบริเวณกว้างขึ้นและแคบลง และยังพบสนิมในส่วนที่กราฟในสภาพแห้งไม่พบ โดยเฉพาะตัวอย่าง 0-A ซึ่งมีความสอดคล้องกับสนิมที่เพิ่มขึ้นจริงอย่างมากเช่นเดียวกับตัวอย่าง 70-A ซึ่งพบสนิมบริเวณด้านขวาเยื้องไปทางด้านบน และตัวอย่าง 70-B พบบริเวณด้านซ้ายของตัวอย่าง นอกจากนี้ตัวอย่าง 70-C ก็พบตำแหน่งของสนิมบริเวณด้านซ้ายล่างของตัวอย่างเช่นกัน เพียงแต่มีความคลาดเคลื่อนกับตำแหน่งเล็กของสนิมที่เกิดขึ้นจริงซึ่งอยู่บริเวณด้านซ้าย แต่ว่าด้านขวาของตัวอย่างก็พบที่มีความเข้มสูงเช่นกันซึ่งตัวเหล็กเสริมนั้นยังไม่เป็นสนิมมากนัก สำหรับตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมในวันที่ 244 พบว่าสนิมที่เกิดขึ้นจริงกับความเข้มของกราฟในสภาพเปียกมีความถูกต้องน้อยกว่าตัวอย่างอื่นๆ เช่น ตัวอย่าง 244-C ตำแหน่งของสนิมจะอยู่ด้านบนและล่าง แต่กราฟในสภาพเปียกกลับมีความเข้มสูงบริเวณด้านล่างอย่างเดียว สวนทางกับกราฟในสภาพแห้งที่จะมีค่าศักย์ไฟฟ้าสูงบริเวณด้านบนขวาของตัวอย่าง ซึ่งอาจเป็นเพราะว่าตัวอย่างชนิดนี้หลังการซ่อมแซมจะมีลักษณะเป็นคอนกรีตสองชั้นจึงทำให้มีความแม่นยำน้อยลง

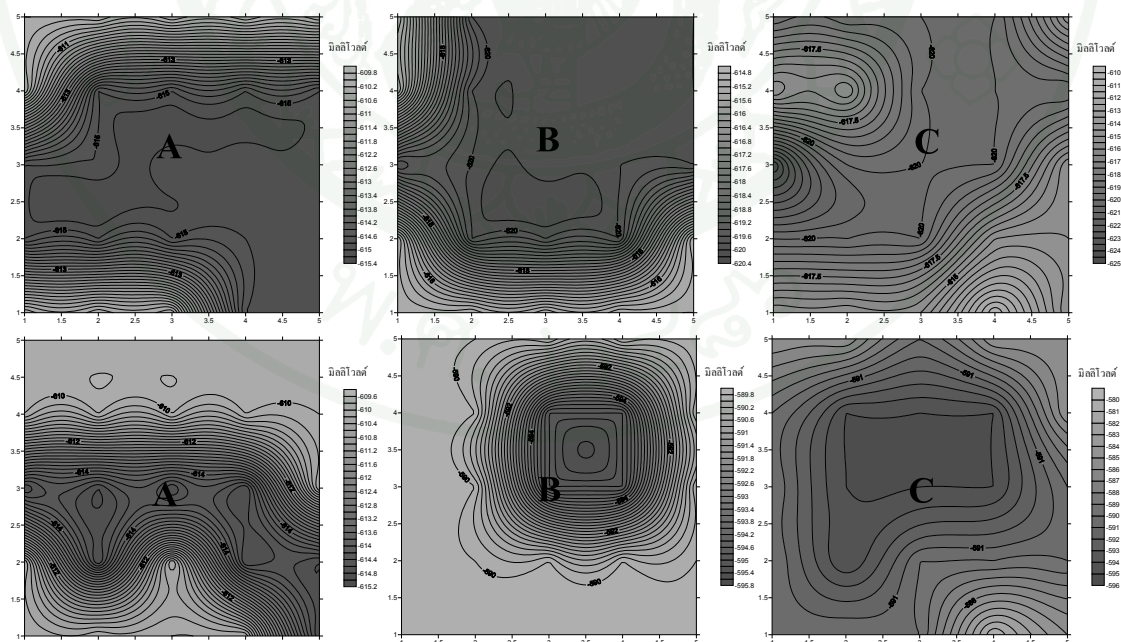
ตารางที่ 10 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมกับค่าศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่างชนิดเร่งสนิมด้วยไฟฟ้า

ลำดับ	ตัวอย่างอีพ็อกซี	การสูญเสียน้ำหนัก ของเหล็กเสริม (ร้อยละ)	ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ย (มิลลิโวลต์)			ลักษณะของสนิม
			ครั้งที่ 9	ครั้งที่ 13	ครั้งที่ 14	
A	ไม่เคลือบ	1.49	-672	-613	-612	ตลอดแนวเหล็ก
B	ไม่เคลือบ	1.49	-657	-618	-591	ตลอดแนวเหล็ก
C	ไม่เคลือบ	1.49	-662	-618	-590	ตลอดแนวเหล็ก
A	เคลือบ	5.97	-668	-587	-566	ตลอดแนวซิกแซก
B	เคลือบ	4.38	-649	-612	-565	ตลอดแนวเหล็ก
C	เคลือบ	1.47	-662	-606	-581	ตามแนวซ้ายและขวา

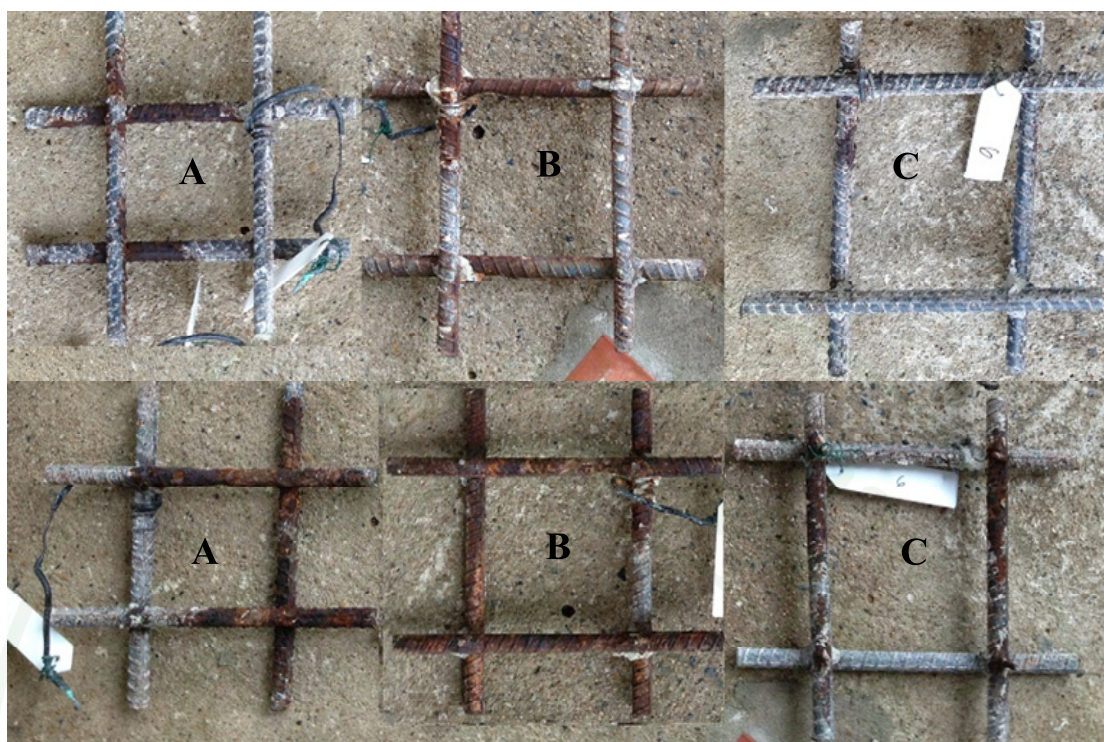
จากตารางที่ 10 การสูญเสียน้ำหนักโดยรวมของเหล็กเสริมชนิดเคลือบอีพ็อกซีมีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมมากกว่า ซึ่งจากการสำรวจเหล็กเสริมดังภาพที่ 63 และ 65 พบว่าตัวอย่างชนิดไม่เคลือบอีพ็อกซีสนิมจะกระจายตัวไปทั่วทั้งเหล็กเสริมและไม่ได้มีส่วนใดรุนแรงเป็นพิเศษ ในขณะที่ตัวอย่างชนิดเคลือบอีพ็อกซีแม้ว่าสนิมจะกระจายตัวไปส่วนอื่นๆของเหล็กเสริมบ้างแต่ จะพบว่าจุดที่ไม่ได้ทำการเคลือบนั้นจะมีการกัดกร่อนที่รุนแรงกว่าจุดอื่นๆ ดังภาพที่ 67 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการทดลองเหล็กเสริมชนิดเคลือบอีพ็อกซีไม่ได้เคลือบปิดเหล็กทั้งหมด โดยจะเปลือยเหล็กไว้เพียงเล็กน้อยจึงทำให้เกิดสนิมแบบหลุม ในขณะที่เหล็กเสริมชนิดไม่เคลือบ



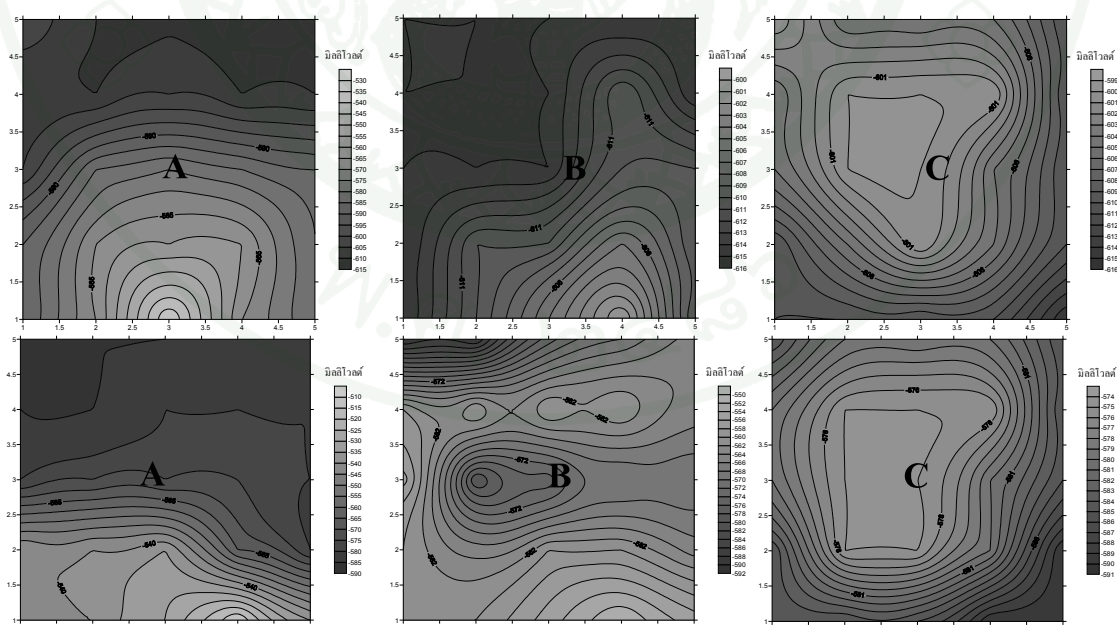
ภาพที่ 63 สภาพเหล็กเสริมของตัวอย่างชนิดเหล็กเสริมไม่เคลือบอีพ็อกซีด้านที่ทำการวัด (แถวบน) และด้านตรงข้าม (แถวล่าง)



ภาพที่ 64 เส้นชั้นความสูงของค่าศักย์ไฟฟ้าของวันที่ 13 (แถวบน) และวันที่ 14 (แถวล่าง) จากตัวอย่างชนิดเหล็กเสริมไม่เคลือบอีพ็อกซี



ภาพที่ 65 สภาพเหล็กเสริมของตัวอย่างชนิดเหล็กเสริมเคลือบอีพ็อกซีด้านที่ทำกรวด (แถวบน) และด้านตรงข้าม (แถวล่าง)



ภาพที่ 66 เส้นชั้นความสูงของค่าศักย์ไฟฟ้าของวันที่ 13 (แถวบน) และวันที่ 14 (แถวล่าง) จากตัวอย่างชนิดเหล็กเสริมเคลือบอีพ็อกซี



ภาพที่ 67 สภาพเหล็กเสริมของตัวอย่างชนิดเคลือบอีพ็อกซีบริเวณที่เกิดสนิมแบบหลุม

อีพ็อกซีเกิดสนิมแบบสม่ำเสมอ เมื่อพิจารณาค่าศักย์ไฟฟ้าแล้ว กลับพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าของเหล็กเสริมชนิดไม่เคลือบอีพ็อกซีให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่สูงกว่าชนิดเคลือบอีพ็อกซีทั้งๆที่ ชนิดเคลือบอีพ็อกซีมีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมมากกว่า กล่าวคือ การพิจารณาค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยจะต้องพิจารณาด้วยว่าสนิมที่เกิดขึ้น เป็นสนิมแบบสม่ำเสมอ หรือเป็นสนิมแบบหลุม (Elsener, 2002) และยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pour-Ghaz *et al.*, (2009) ซึ่งอธิบายว่าค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยจะให้ค่าที่ใกล้เคียงความจริง ในกรณีที่สนิมเกิดจากการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอแต่ยังไม่มี ความถูกต้องนักกับสนิมแบบหลุมหรือการกัดกร่อนในบริเวณจำเพาะ

จากภาพที่ 64 และ 66 กราฟเส้นชั้นความสูงของค่าศักย์ไฟฟ้าจากตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดไม่เคลือบอีพ็อกซี และเคลือบอีพ็อกซี โดยเรียงลำดับค่าศักย์ไฟฟ้าตามความเข้มของสี เมื่อพิจารณาจากภาพแล้ว ค่าศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่างชนิดไม่เคลือบอีพ็อกซีจะค่อนข้างกระจายตัว ไม่ได้เกาะกลุ่มที่บริเวณใดบริเวณหนึ่ง ในขณะที่ตัวอย่างชนิดเคลือบอีพ็อกซีค่าศักย์ไฟฟ้าจะไปกระจุกอยู่ที่มุมของคอนกรีตเพราะว่าบริเวณดังกล่าวเป็นส่วนที่เหล็กเสริมไม่มีการเคลือบอีพ็อกซี (ซ้ายบน) กล่าวคือ เหล็กเสริมของตัวอย่างชนิดไม่เคลือบอีพ็อกซีจะเกิดสนิมบริเวณดังกล่าวนั่นเอง บางครั้งเส้นชั้นความสูงของค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างสนิมแบบสม่ำเสมอ และแบบหลุมอาจไม่เป็นเช่นนี้เสมอ เนื่องจากยังมีอีกหลายปัจจัยที่มีผลกระทบ เช่น ความชื้นเมื่อตัวอย่างคอนกรีตมีความชื้นที่มากพอ ค่าศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่างชนิดเคลือบอีพ็อกซีจะมีลักษณะคล้ายกับตัวอย่างชนิดไม่เคลือบอีพ็อกซีจนไม่สามารถแยกได้ว่าเป็นสนิมประเภทใด

จากภาพที่ 64 และ 66 เมื่อนำไปเทียบกับภาพที่ 63 และ 65 พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้ามีความแม่นยำในระดับหนึ่ง แต่ก็ยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่มาก เช่น ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยของการวัดครั้งที่ 14 ของตัวอย่างชนิดไม่เคลือบ และเคลือบอีพ็อกซี มีค่าเกิน -350 มิลลิโวลต์ พบว่าเหล็กเสริมเป็นสนิมจริง โดยเฉพาะสนิมแบบสม่ำเสมอในตัวอย่างชนิดไม่เคลือบอีพ็อกซี แต่ยังคงพบเหล็กบางส่วนที่ยังไม่เกิดสนิม โดยเฉพาะในตัวอย่างชนิดเคลือบอีพ็อกซีแต่ได้ค่าศักย์ไฟฟ้าเกิน -350 ในทุกๆจุด เมื่อพิจารณาที่ความเข้มของค่าศักย์ไฟฟ้าของกราฟเส้นชั้นความสูง พบว่ามีความแม่นยำพอสมควร เช่น ในตัวอย่างที่ 4 ค่าศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงบริเวณด้านบนของกราฟ เมื่อนำไปเทียบกับภาพเหล็กเสริมทั้งด้านที่ทำการวัดและด้านล่าง (กลับซ้ายไปขวา) พบว่าบริเวณนี้เป็นสนิมมากกว่าจุดอื่นๆ เช่นเดียวกันกับตัวอย่างที่ 5 ค่าศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงบริเวณด้านบนของกราฟ และพบว่าเหล็กเสริมในบริเวณนี้โดนสนิมกัดกร่อนมากกว่าบริเวณอื่นๆอย่างชัดเจน ดังภาพที่ 67

จากผลของกราฟเส้นชั้นความสูงของค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพเปียกและแห้ง มีหลายตัวอย่างที่กราฟเส้นชั้นความสูงในสภาพเปียก ก็สามารถบอกถึงตำแหน่งของสนิมในเหล็กเสริมได้ และยังเป็นที่ยืนยันถึงตำแหน่งของสนิมของกราฟเส้นชั้นความสูงในสภาพแห้งในอีกทางหนึ่ง ดังที่กล่าวไปก่อนหน้านี้ แต่จะต้องพิจารณาที่ความเข้มโดยไม่สนใจว่าค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นเท่าไรเพราะเมื่อคอนกรีตมีความชื้นสูงจะทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้ามีค่าน้อยกว่าความเป็นจริงมาก และค่าศักย์ไฟฟ้าในแต่ละจุดยังมีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพแห้งยังคงเป็นตัวกำหนดว่าควรทำการสำรวจสนิมในเหล็กเสริมหรือไม่ เพียงแต่สามารถนำกราฟเส้นชั้นความสูงของค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพเปียกมาช่วยยืนยันถึงตำแหน่งของสนิมได้นั่นเอง

ความสัมพันธ์ของการกัดกร่อนกับค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ย

ตารางที่ 11 เกณฑ์การแบ่งระดับสนิม

ระดับของสนิม	ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยในการวัดครั้งสุดท้าย (มิลลิโวลต์)	
	สภาพแห้ง	สภาพเปียก
1	มากกว่า -350	มากกว่า -350
2	มากกว่า -350	น้อยกว่า -350
3	น้อยกว่า -350	น้อยกว่า -350

ในการหาความสัมพันธ์ในขั้นแรกจะใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าในการวัดครั้งสุดท้ายของตัวอย่างที่ทำการเร่งสนิมโดยใช้สภาวะเปียกสลับแห้ง และใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ -350 มิลลิโวลต์ จากค่ามาตรฐานดังตารางที่ 1 เป็นเกณฑ์ในการแบ่งระดับของสนิมได้ดังตารางที่ 11

สนิมในระดับที่ 1 พบว่าเหล็กเสริมที่ยังไม่เกิดการสูญเสียน้ำหนัก เหล็กเสริมส่วนใหญ่จะเริ่มมีสนิมเล็กน้อยเป็นจุดเล็กๆ ไปตามแนวเหล็ก แต่ก็ยังมีบางตัวอย่างที่เป็นสนิมชัดเจนดังภาพที่ 68 แต่ยังเป็นแค่ส่วนเล็กๆ ของเหล็กเสริมเท่านั้น และยังมีลักษณะคล้ายสนิมแบบหลุมมากกว่า สำหรับในระดับที่ 2 ที่สองสนิมจะมีความชัดเจนขึ้นและกระจายตัวไปรอบๆ เหล็กเสริมมากขึ้นดังภาพที่ 69 และเหล็กเสริมยังไม่เกิดการสูญเสียน้ำหนักเช่นเดียวกับสนิมในระดับที่ 1 สำหรับสนิมในระดับที่ 3 พบว่าสนิมกระจายตัวมากขึ้นกว่าในระดับที่ 2 และ ยังพบอีกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าที่ -450 มิลลิโวลต์ ในสภาพแห้ง ซึ่งได้จากตารางที่ 8 ตัวอย่างกำลังรับแรงอัด 180 กก./ชม.² เหล็กเสริมมีโอกาสเกิดการสูญเสียหน้าตัดไปบ้างแล้ว

สนิมในระดับที่ 1 พบว่าเหล็กเสริมที่ยังไม่เกิดการสูญเสียน้ำหนัก เหล็กเสริมส่วนใหญ่จะเริ่มมีสนิมเล็กน้อยเป็นจุดเล็กๆ ไปตามแนวเหล็ก แต่ก็ยังมีบางตัวอย่างที่เป็นสนิมชัดเจนดังภาพที่ 68 แต่ยังเป็นแค่ส่วนเล็กๆ ของเหล็กเสริมเท่านั้น และยังมีลักษณะคล้ายสนิมแบบหลุมมากกว่า สำหรับในระดับที่ 2 ที่สองสนิมจะมีความชัดเจนขึ้นและกระจายตัวไปรอบๆ เหล็กเสริมมากขึ้นดังภาพที่ 69 และเหล็กเสริมยังไม่เกิดการสูญเสียน้ำหนักเช่นเดียวกับสนิมในระดับที่ 1 สำหรับสนิมในระดับที่ 3 พบว่าสนิมกระจายตัวมากขึ้นกว่าในระดับที่ 2 และ ยังพบอีกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าที่ -450 มิลลิโวลต์ ในสภาพแห้ง ซึ่งได้จากตารางที่ 8 ตัวอย่างกำลังรับแรงอัด 180 กก./ชม.² เหล็กเสริมมีโอกาสเกิดการสูญเสียหน้าตัดไปบ้างแล้ว



ภาพที่ 68 สนิมในเหล็กเสริมของตัวอย่างที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าสูงกว่า -350 มิลลิโวลต์ทั้งในสภาพแห้งและเปียก

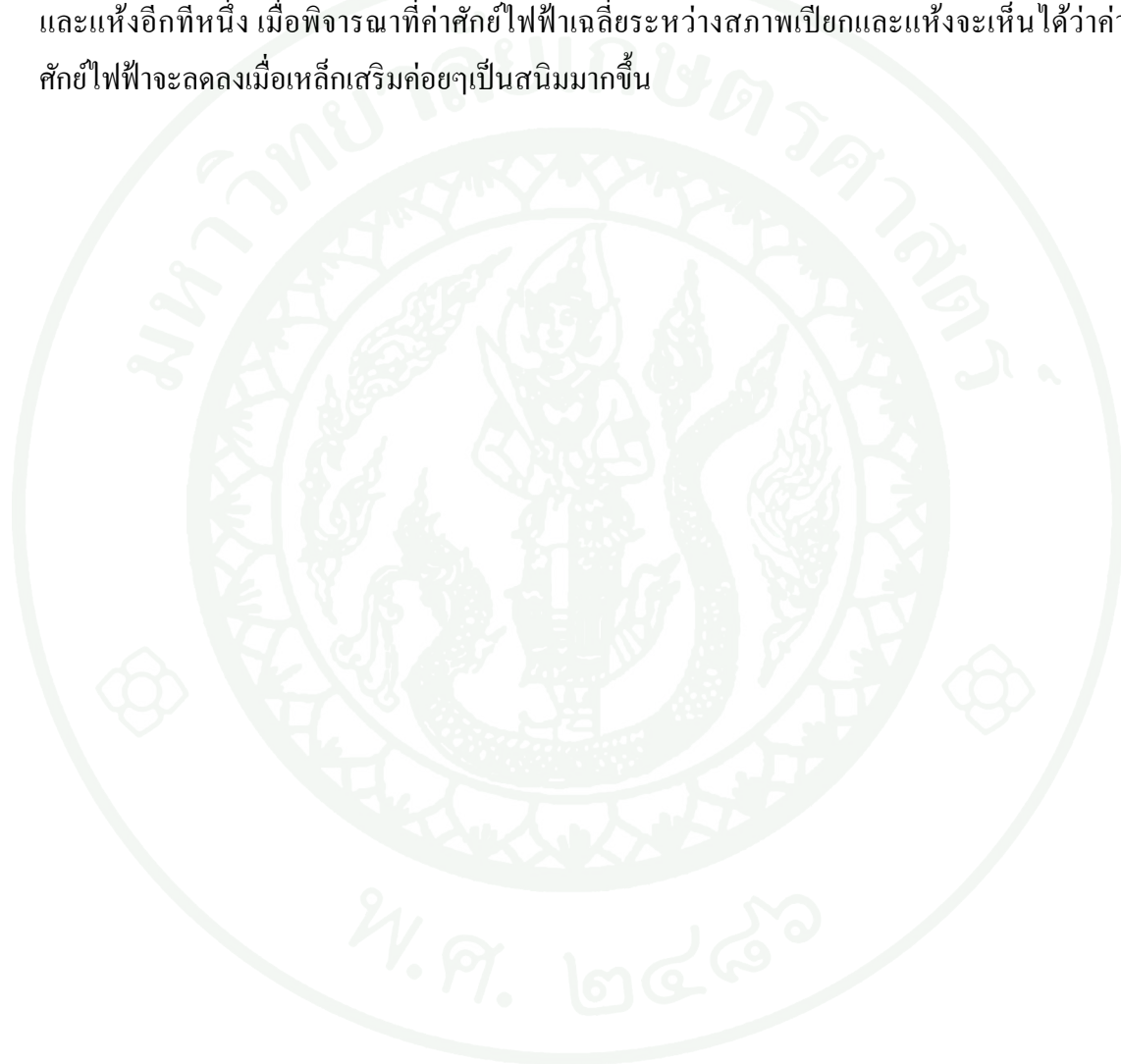


ภาพที่ 69 สนิมในเหล็กเสริมของตัวอย่างที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพแห้งสูงกว่า -350 มิลลิโวลต์ แต่ค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพเปียกต่ำกว่า -350 มิลลิโวลต์

ตารางที่ 12 ความสัมพันธ์ของสนิมกับค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ย

ระดับ	รูป	ลักษณะของสนิม	ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ย (มิลลิโวลต์)		
			แห้ง	ระหว่างเปียกกับแห้ง	เปียก
1		เหล็กเสริมเริ่มที่จะเป็นสนิมจุดเล็กๆตามแกนเหล็กเสริมและมีโอกาสเป็นสนิมที่ผิวเป็นช่วงสั้นๆประมาณร้อยละ 3 ของความยาวเหล็กเสริม	-204	-226	-248
2		เป็นสนิมอย่างชัดเจนแต่ยังเป็นผิวเท่านั้น โดยคิดเป็นสัดส่วนของพื้นที่ผิวประมาณร้อยละ 10 ถึง 15 ของความยาวเหล็กเสริม	-285	-394	-504
3		เหล็กเสริมเป็นสนิมอย่างชัดเจน โดยคิดเป็นสัดส่วนของพื้นที่ผิวประมาณร้อยละ 25 ถึง 30 ของความยาวเหล็กเสริมและเริ่มเกิดการสูญเสียน้ำหนัก	-484	-609	-734

นอกจากนี้จากค่าศักย์ไฟฟ้ากับความรุนแรงของสนิมที่เกิดขึ้นก็พอกล่าวได้ว่าเมื่อสนิมมีความรุนแรงมากขึ้นค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้ก็จะมีค่าลดลงตามไปด้วย ตารางที่ 12 ช่องแรกแบ่งเป็นระดับสนิมจากตารางที่ 11 ช่องที่ 2 เป็นรูปของสนิม ช่องที่ 3 เป็นลักษณะ และปริมาณของสนิมจากการประมาณด้วยสายตา ช่องที่ 4 เป็นค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพเปียกเฉลี่ยและค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพแห้งเฉลี่ยของทุกอย่างในแต่ละระดับสนิม จากการวัดครั้งสุดท้าย และค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยของสภาพเปียกและแห้งอีกทีหนึ่ง เมื่อพิจารณาที่ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยระหว่างสภาพเปียกและแห้งจะเห็นได้ว่าค่าศักย์ไฟฟ้าจะลดลงเมื่อเหล็กเสริมค่อยๆเป็นสนิมมากขึ้น



สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาเรื่องอิทธิพลที่มีผลต่อการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นสามารถสรุปผลการทดลองได้ในครั้งนี้

1. พบว่าอิทธิพลต่างๆ มีผลต่อการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

1.1 อิทธิพลของระยะหุ้มเหล็กต่อค่าศักย์ไฟฟ้ายังเห็นผลไม่ชัดเจน

1.2 อิทธิพลของปริมาณคลอไรด์ปนเปื้อนในเนื้อคอนกรีตมีผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าลดลง (ค่าเป็นลบมากขึ้น) เมื่อคอนกรีตมีปริมาณคลอไรด์ปนเปื้อนที่สูงขึ้น

1.3 อิทธิพลของกำลังรับแรงอัดมีผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น (ค่าเป็นลบน้อยลง) เมื่อคอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดที่สูงขึ้น

1.4 อิทธิพลการซ่อมแซมคอนกรีตมีผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น (ค่าเป็นลบน้อยลง) เมื่อใช้วัสดุซ่อมแซมที่มีความต้านทานไฟฟ้าสูงกว่าตัวคอนกรีตเก่า แต่สำหรับการซ่อมแซมที่มีวัสดุมากกว่า 1 ชนิด ยังคงเห็นผลกระทบต่อค่าศักย์ไฟฟ้าไม่ชัดเจน

1.5 อิทธิพลของความชื้นมีผลอย่างมากต่อค่าศักย์ไฟฟ้าเมื่อคอนกรีตมีความชื้น จะส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าลดลง (เป็นลบนมากขึ้น) อย่างมาก โดยค่าศักย์ไฟฟ้ามีโอกาสลดลงได้ตั้งแต่ -50 ถึง -250 มิลลิโวลต์

1.6 อิทธิพลของรูปแบบการเกิดสนิม ไม่ได้ส่งผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าโดยตรง แต่จะส่งผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ย ซึ่งค่อนข้างแม่นยำเมื่อเหล็กเสริมเกิดการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ แต่ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยจะมีค่าสูงกว่าความเป็นจริง (ค่าเป็นลบน้อยลง) เมื่อเหล็กเสริมเกิดการกัดกร่อนแบบหลุม

1.7 ค่าศักย์ไฟฟ้าในสภาพแห่งที่เกิดความคลาดเคลื่อนจากอิทธิพลต่างๆ ความคลาดเคลื่อนนี้จะลดลงเมื่อคอนกรีตมีความชื้นมากขึ้น อย่างไรก็ตามค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยยังคงได้รับผลของอิทธิพลต่างๆอยู่

2. พบว่าอิทธิพลต่างๆ มีผลต่อความแปรปรวนของค่าศักย์ไฟฟ้า

2.1 อิทธิพลของระยะหุ้มเหล็กเสริมมีผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าในแต่ละจุดมีค่าเข้าใกล้กันมากขึ้นเมื่อคอนกรีตมีระยะหุ้มเหล็กเสริมที่น้อยลง

2.2 อิทธิพลของปริมาณคลอไรด์ปนเปื้อนในเนื้อคอนกรีตมีผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าในแต่ละจุดมีค่าเข้าใกล้กันเมื่อคอนกรีตมีปริมาณคลอไรด์ปนเปื้อนสูงขึ้น

2.3 อิทธิพลของกำลังรับแรงอัดมีผลให้ศักย์ไฟฟ้าในแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกันมากขึ้นเมื่อคอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้น

2.4 อิทธิพลของความชื้นมีผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าในแต่ละจุดมีค่าเข้าใกล้กันมากขึ้น เมื่อคอนกรีตมีความชื้นสูงขึ้น และความแปรปรวนจากระยะหุ้มเหล็กเสริม ปริมาณคลอไรด์ และกำลังรับแรงอัดที่มีผลกระทบต่อคอนกรีตจะลดลง

2.5 อิทธิพลของรูปแบบการกักร่อนแบบหลุมค่าศักย์ไฟฟ้าในแต่ละจุดมีความต่างกันมากกว่าการกักร่อนแบบสมำเสมอ แต่ในขณะที่คอนกรีตมีความชื้นสูงค่าศักย์ไฟฟ้าในแต่ละจุดของการกักร่อนแบบหลุมจะมีค่าเข้าใกล้จนใกล้เคียงกับการกักร่อนแบบสมำเสมอ

3. ค่าศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าลดลง (ค่าเป็นลบมากขึ้น) เมื่อเหล็กเสริมเป็นสนิมมากขึ้นในกรณีของการกักร่อนแบบสมำเสมอ

3.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยมีค่ามากกว่า -350 มิลลิโวลต์ ทั้งในสภาพเปียกและแห้งพบว่าเหล็กเสริมมีโอกาสเกิดสนิมเล็กน้อย เป็นจุดเล็กๆไปตามแนวเหล็กเสริม

3.2 ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยมีค่ามากกว่า -350 มิลลิโวลต์ในสภาพแห้ง แต่น้อยกว่า -350 มิลลิโวลต์ในสภาพเปียก พบว่าเหล็กเป็นสนิมอย่างชัดเจน แต่ยังเป็นเพียงแค่บางส่วนของเหล็กเสริม

3.3 ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่า -350 มิลลิโวลต์ ทั้งในสภาพเปียกและแห้ง พบว่าเหล็กเสริมเป็นสนิมอย่างชัดเจน

3.4 ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยมีค่ามากกว่า -450 มิลลิโวลต์ ในสภาพแห้ง พบว่าเหล็กเสริมมีโอกาสเกิดการสูญเสียน้ำหนัก

ข้อเสนอแนะ

สำหรับการพัฒนางานวิจัยศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

1. สำหรับอิทธิพลระยะหุ้มเหล็กเสริม และคอนกรีตที่ผ่านการซ่อมแซมในกรณีที่ตัวคอนกรีตมีการทับกันของชั้นเก่าและใหม่นั้น อาจจะต้องทำการทดลองมากกว่าชนิดละ 3 ตัวอย่าง หรืออาจจะต้องนำวิธีทดสอบวิธีอื่นๆมาพิจารณาาร่วมด้วยเพื่อหาผลของอิทธิพลดังกล่าว
2. ยังมีอีกหลายปัจจัยที่น่าสนใจ เช่น อุณหภูมิ เพราะปฏิกิริยาของเซลล์ไฟฟ้าเคมีขึ้นกับอุณหภูมิจึงมีผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าเช่นกัน ความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตเองก็เช่นกัน จะเห็นได้ว่าผลของงานวิจัยนี้หลายปัจจัยมีผลค่าศักย์ไฟฟ้าเพราะส่งผลต่อความต้านทานไฟฟ้าคอนกรีตนั่นเอง
3. เนื่องจากความชื้น ปริมาณคลอไรด์ และกำลังรับแรงอัดมีผลต่อสภาพความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต และยังมีผลต่อความแปรปรวนของค่าศักย์ไฟฟ้า (ความแตกต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าในแต่ละจุดที่ทำการวัด) ดังนั้นการใช้ความแปรปรวนนี้ก็น่าจะทำให้รู้ถึงสภาพความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตได้ โดยการหาความสัมพันธ์ของความชื้น ปริมาณคลอไรด์ และกำลังรับแรงอัด กับสภาพความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต และความสัมพันธ์ของสภาพความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตกับความแปรปรวนของค่าศักย์ไฟฟ้า หากความสัมพันธ์ทั้งสองมีความสอดคล้องกัน ก็จะสามารถใช้ความแปรปรวนของค่าศักย์ไฟฟ้าในการบอกถึงสภาพความต้านทานคอนกรีตได้นั่นเอง

4. จากการทดลองการใช้หลอดทองแดงเพื่อความสะดวกในการวัดค่าศักย์ไฟฟ้า หากผู้ทดลองต้องการควบคุมสนิมแล้ว อาจจะไม่เหมาะนักเพราะจะทำให้เหล็กเสริมบริเวณที่สัมผัสกับหลอดทองแดงเกิดสนิม แต่ก็ยังเป็นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นการเปลี่ยเหล็กเสริมออกมาภายนอกคอนกรีต และทำการเคลือบอีพ็อกซีบริเวณที่มีการสัมผัสกับอากาศจะป้องกันสนิมในเหล็กเสริมได้ดีกว่า แต่ผู้วิจัยจะต้องควบคุมการทดลองให้ดี ไม่เช่นนั้นหากเหล็กเสริมที่อยู่ภายนอกเป็นสนิมก็มีโอกาสที่สนิมจะกระจายตัวเข้าไปในส่วนของเหล็กเสริมที่อยู่ภายในคอนกรีตได้เช่นกัน จึงขึ้นกับดุลยาพินิจของผู้ที่จะทำการวิจัยว่าจะใช้วิธีการใด

จากงานวิจัยพบว่าอิทธิพลต่างๆมีผลต่อการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ผู้วิจัยจึงมีคำแนะนำสำหรับการนำเครื่องมือไปใช้ในงานสำรวจสนิมดังนี้

1. ผู้ทำการวัดควรสำรวจถึงสภาพแวดล้อมของคอนกรีตว่าเป็นเช่นใด รวมไปถึงคุณสมบัติของคอนกรีตที่ทำการวัดด้วยเพราะว่าอิทธิพลต่างๆมีผลต่อการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

2. การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เพียงครั้งเดียวแล้วนำมาแปลผลนั้น จะสามารถทำได้แต่ว่าการสำรวจสำรวจสนิมเป็นระยะเวลาอย่างสม่ำเสมอจะสามารถเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับค่าศักย์ไฟฟ้าได้

3. ในการสำรวจสนิมเป็นระยะเวลาอย่างสม่ำเสมอ โดยใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยจะช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของข้อมูล เพราะหากค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยในครั้งถัดไปมีค่าลดลง (เป็นลบมากขึ้น) ก็หมายความว่าเหล็กเสริมมีโอกาสเกิดการกัดกร่อนนั่นเอง ในทางกลับกันหากค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยในครั้งถัดไปมีค่าเพิ่มขึ้น (เป็นลบน้อยลง) ก็หมายความว่าเหล็กเสริมอาจจะไม่ได้เป็นสนิมจริง หรือเหล็กเสริมอาจจะเป็นสนิม แต่การกัดกร่อนนั้นได้หยุดไปแล้วก็ได้ ซึ่งยังสำรวจเป็นระยะเวลาต่อเนื่องเท่าไรก็จะยิ่งเพิ่มความน่าเชื่อถือของข้อมูลมากขึ้น

4. สำหรับการอ่านค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยผู้ทำการวัดต้องคำนึงถึงอิทธิพลต่างๆในข้อ 1 ด้วย โดยเฉพาะอิทธิพลของความชื้นเพราะจะส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยมีค่าลดลงมาก และการใช้ความแปรปรวนของค่าศักย์ไฟฟ้าจะสามารถช่วยยืนยันถึงความชื้นของคอนกรีตได้ เพราะคอนกรีตที่มีความชื้นสูงจะมีความแปรปรวนของค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำมาก (ประมาณร้อยละ 3 ถึงร้อยละ 6) และความแปรปรวนยังช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยสำหรับการสำรวจสนิมเป็น

ระยะเวลาอย่างสม่ำเสมอ หากว่าค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยที่ทำการวัดในแต่ละครั้งมีแค่ความแปรปรวนใกล้เคียงกันก็เท่ากับว่าข้อมูลมีความน่าเชื่อถือนั่นเอง

5. เมื่อพบว่าคอนกรีตมีโอกาสเกิดสนิมก่อนข้างสูงแล้ว ควรใช้เส้นชั้นความสูงของค่าศักย์ไฟฟ้าในการระบุตำแหน่งของสนิม และการใช้เส้นชั้นความสูงจากค่าศักย์ไฟฟ้าของคอนกรีตที่มีความชื้นสูง จะช่วยยืนยัน และเพิ่มความน่าเชื่อถือของตำแหน่งเหล็กเสริมที่เกิดสนิมจากกราฟเส้นชั้นความสูงของค่าศักย์ไฟฟ้าในการวัดตามปกติ



เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย. 2551. **มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรมโยธาธิการและผังเมือง สำนักวิศวกรรมโครงสร้างและงานระบบ, กรุงเทพฯ.
- คณะกรรมการคอนกรีตและวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาชีพวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. 2543. **ความคงทนของคอนกรีต**. บริษัทอุตสาหกรรม จำกัด, กรุงเทพฯ.
- วินิต ช่อวิเชียร. 2545. **คอนกรีตเทคโนโลยี**. พิมพ์ครั้งที่ 9. ห้างหุ้นส่วน จำกัด, กรุงเทพฯ.
- วิศิษฐ์ แซ่ลิ้ม. 2553. **อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าในการดึงคลอไรด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในคอนกรีตเสริมเหล็ก**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- American Society for Testing and Materials (ASTM). 1999. **ASTM C876-91 Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete**. ASTM, Maine, United State
- Assouli, B., G. Ballivy and P. Rivard. 2008. Influence of environmental parameters on application of standard ASTM C876-91: half-cell potential measurements. **Corrosion Engineering, Science and Technology**. 43 (1): 93-96
- Bentur, A., S. Diamond and N.S. Berke. 1997. **Steel Corrosion in Concrete: Fundamentals and Civil Engineering Practice**. E & FN Spon, an imprint of Chapman & Hall, London.
- EUS-Vector. 2008. **Corrosion in Reinforce Concrete**. Available Source: <http://www.eus-corrosion.com/cvs/eus-concrete-article.pdf>, February 1, 2008

Elsener, B. 2001. Half-cell potential mapping to assess repair work on RC structure.

Construction and Building Materials. 15: 133-139.

_____. 2002. Macrocell corrosion of steel in concrete – implications for corrosion monitoring.

Cement & Concrete Composites. 24: 65-72.

_____, C. Andrade, J. Gulikers, R. Polder and M. Raupach. 2003. Half-cell potential measurements – potential mapping on reinforced concrete structures. RILEM TC 154-EMC: 'Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion'. **Materials and Structures.** 36: 461-471.

Frølund, T., O.Klinghoffer, E.Sørensen. 2003. Pro's and con's of half-cell potential and corrosion rate measurements. Structural Faults + Repairs. **International Conference.** 1-3 July 2003, London, U.K.

Gu, P. and J.J. Beaudoin. 1998. Obtaining effective half-cell potential measurements in reinforced concrete structures. Construction Technology Update No. 18. **Institute for Research in Construction.**

Leelalerkiet, V., Je-Woon Kyung, M. Ohtsu and M. Yokota. 2004. Analysis of half-cell potential measurement for corrosion of reinforced concrete. **Construction and Building Materials.** 18: 155-162.

MG Associates. 2010. **Half-cell potential.** Available Source: http://www.concrete-testing.com/halfcell_potential1.htm, January 4, 2010.

Neville, A.M. 1997. **Properties of Concrete.** 4th and Final Edition. John Wiley and Sonc, Inc., New York.

- Nakamura, E., H. Watanabe, H. Koga, M. Nakamura and K. Ikawa. 2008. Half-cell potential measurements to assess corrosion risk of reinforcement steels in a PC Bridge. Sacomatis 2008. **International RILEM Conference**. 1-2 September 2008, Como Lake, Italy
- Pour-Ghaz, M., O. Burkan Isgor and P. Ghods. 2009. Quantitative interpretation of half-cell potential measurements in concrete structures. **Journal of Materials in Civil Engineering**. 21 (9): 467-475.
- Ohtsu, M. and T. Yamamoto. 1997. Compensation procedure for half-cell potential measurement. **Construction and Building Materials**. 11: 395-402.
- Polder, Rob B. 2001. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete – a RILEM TC-154 technical recommendation. **Construction and Building Materials**. 15: 125-131.
- Hussian, R.R. 2011. Electrochemical experimental measurement of macrocell corrosion half-cell potential replicating the re-corrosion of actual refurbished works in RC structures. **International journal of Electrochemical Science**. 6 (2011): 199-205.
- _____. 2011. Underwater half-cell corrosion potential bench mark measurements of corroding steel in concrete influenced by a variety of material science and environmental variables. **Measurement**. 44 (2011): 274-280.

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อสกุล	นายธนวิศว์ ภัทรกิจธรรม
เกิดวันที่	วันพฤหัสบดีที่ 30 มกราคม พ.ศ. 2529
สถานที่เกิด	จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

