



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าในการดึงคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี
ในคอนกรีตเสริมเหล็ก

Influence of Electric Current on Electrochemical Chloride Removal
in Reinforced Concrete

นามผู้วิจัย นายวิศิษ แซ่ลิ้ม

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ยอดสุดใจ, D.Eng.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์สุวิมล สัจจาณิชย์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทรวงูร, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าในการดึงคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในคอนกรีตเสริมเหล็ก

Influence of Electric Current on Electrochemical Chloride Removal in Reinforced Concrete

โดย

นายวิศิษ แซ่ลิ่ม

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2553

วิทยุ แซ่ลิม 2553: อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าในการดึงคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในคอนกรีตเสริมเหล็ก ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ยอดสุดใจ, D.Eng. 106 หน้า

งานวิจัยนี้เสนอวิธีการฟื้นฟูสมรรถภาพโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผลกระทบจากการแทรกซึมของคลอไรด์เนื่องจากน้ำทะเล โดยใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีด้วยการทดสอบหาเงื่อนไขของชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมในห้องปฏิบัติการ และนำเงื่อนไขที่คาดว่าเหมาะสมที่สุดเพื่อนำไปทำการบำรุงรักษาและฟื้นฟูโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากคลอไรด์ ผลการทดลองพบว่าการลดปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นมีแนวโน้มที่ดี โดยใช้ระยะเวลาเพียงช่วงสั้นๆก็สามารถลดปริมาณคลอไรด์ได้ในอัตราที่น่าพอใจ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่เกี่ยวข้องเช่น ชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ระยะเวลาของกระบวนการลดปริมาณคลอไรด์ หรือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า โดยผลการทดลองที่ระยะเวลา 28 วันพบว่าวิธีการนี้สามารถดึงคลอไรด์ไอออนจากคอนกรีตได้ถึงร้อยละ 76 โดยใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) เป็นอิเล็กโทรไลต์และขนาดความต่างศักย์ 15 โวลต์

ส่วนการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ที่ลดลงในบริเวณที่ห่างจากบริเวณที่ติดตั้งสารละลายพบว่าบริเวณที่ห่างออกจากบริเวณที่ติดตั้งสารละลาย ประสิทธิภาพของการดึงคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีลดลงตามระยะทางที่ห่างไปจากบริเวณที่ทำการติดตั้งสารละลายอิเล็กโทรไลต์ซึ่งสอดคล้องกับสมการของ Nernst planck ซึ่งอธิบายการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนผ่านคอนกรีตด้วยกระแสไฟฟ้า

Wisit Saelim 2010: Influence of Electric Current on Electrochemical Chloride Removal in Reinforced Concrete. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Wanchai Yodsudjai, D.Eng. 106 pages.

This research presents the method of rehabilitation of reinforced concrete structure deteriorated from chloride attack. The electrochemical chloride removal is used to remove chloride ion from the reinforced concrete structure. The objective of this research is to find the appropriate parameters for this method; that is, type of electrolyte solution, electrical potential and charging duration. As a result, there is a good tendency for using the electrochemical chloride removal method to remove chloride ion from the reinforced concrete structure. For 28 days charging duration, this method can remove chloride ion up to 76% by using $\text{Ca}(\text{OH})_2$ solution as electrolyte with 15 Volts DC electrical potential.

In addition, the decrease chloride content in areas far from the installed electrolyte area is conducted. It is found that, Efficiency of extraction chloride in concrete decreases as the distance from the installed solution electrode increase. This is consistent with the equation of Nernst planck which describes the movement of chloride ions mobility through the concrete by electric current.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ วันชัย ยอดสุดใจ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักสำหรับแนวความคิดในการทำงานวิจัยให้ผู้วิจัยมีแนวทางในการวิจัย ทั้งยังคอยตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้บรรลุไปได้ด้วยดี และรองศาสตราจารย์สุวิมล สัจจาพาณิชย์ ที่คอยให้คำแนะนำและตรวจทานผลการวิจัยในครั้งนี้ให้ผ่านไปได้ด้วยดียิ่งขึ้นและยังเป็นครูที่สอนให้ผู้วิจัยได้รู้จักคำว่าคอนกรีตตีขึ้น รวมทั้งรองศาสตราจารย์ ดิบุญ เมธากุลชาติ ที่สละเวลาเป็นประธานในการสอบและช่วยพิจารณาให้คำแนะนำในงานวิจัยนี้และ ดร.วิวัฒน์ แสงเทียน ที่ได้ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่และบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ทุกท่านที่ให้การสนับสนุนในด้านของเครื่องมือ สถานที่ การทำหนังสือขออนุญาตในด้านต่างๆ และคำแนะนำในการทำการทดสอบทำให้สามารถทำการวิจัยในครั้งนี้เป็นไปอย่างราบรื่นรวมถึงขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำสำหรับการอนุเคราะห์สถานที่ในการเตรียมตัวอย่างในการทดสอบและภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และอุปกรณ์ต่างๆในการทำการวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ นิสิตวิศวกรรมโครงสร้างในรหัส 50 ทุกท่านที่สละเวลาและหยาดเหงื่อแรงงานในการที่ช่วยกันในการเตรียมตัวอย่างและทำงานด้วยกันอย่างเหน็ดเหนื่อยในทุกๆ เรื่องตลอดเวลาที่ผู้วิจัยศึกษาอยู่ในมหาวิทยาลัยแห่งนี้ทำให้การศึกษาที่มหาวิทยาลัยแห่งนี้เปรียบเสมือนบ้านหลังที่ 2 ของผู้วิจัย

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณงามความดีทั้งหมดให้แก่มารดาและญาติของผู้วิจัยที่ให้การสนับสนุนให้ผู้วิจัยได้มีวันที่ผู้วิจัยได้มีวันนี้ รวมถึงให้กำลังใจกับผู้วิจัยในทุกๆ ด้านตลอดมาตั้งแต่ผู้วิจัยได้เกิดมาบน โลกใบนี้และให้ทัศนคติในการดำรงชีวิตให้สามารถดำรงชีวิตมาจนวันนี้ได้

วิศิษ แซ่ลิ่ม

เมษายน 2553

สารบัญ

หน้า

| | |
|---|-----|
| สารบัญ | (1) |
| สารบัญตาราง | (3) |
| สารบัญภาพ | (6) |
| คำนำ | 1 |
| วัตถุประสงค์ | 3 |
| การตรวจเอกสาร | 4 |
| อุปกรณ์และวิธีการ | 27 |
| อุปกรณ์ | 27 |
| วิธีการ | 28 |
| ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง | 39 |
| สรุปผลการทดลอง | 59 |
| ข้อเสนอแนะ | 60 |
| เอกสารและสิ่งอ้างอิง | 61 |
| ภาคผนวก | 65 |
| ภาคผนวก ก ปริมาณคลอไรด์อิสระในตัวอย่างคอนกรีตขนาด 30 x 30 x10 ซม. ก่อนและหลังกระบวนการดิงคลอไรด์อออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี ประวัติการศึกษา | 66 |
| ภาคผนวก ข ปริมาณคลอไรด์อิสระในตัวอย่างคอนกรีตขนาด 75 x 75 x7.5 ซม. ก่อนและหลังกระบวนการดิงคลอไรด์อออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี | 70 |
| ภาคผนวก ค ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 75 x 75 x 7.5 ซม. ก่อนและหลังกระบวนการดิงคลอไรด์อออน ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี | 74 |
| ภาคผนวก ง การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ | 76 |
| ภาคผนวก จ การประยุกต์ใช้วิธีการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธี ทางไฟฟ้าเคมีในต่างประเทศ | 79 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | |
|--|-----|
| ภาคผนวก ฉ การเตรียมตัวอย่างในการทดสอบ การหาปริมาณคลอไรด์ ในผงคอนกรีต การทดสอบการดึงคลอไรด์จากคอนกรีตด้วยวิธี ทางไฟฟ้าเคมีและการทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ (Chloride Migration Test) | 86 |
| ภาคผนวก ช แนวทางการพัฒนาการลดปริมาณคลอไรด์อ่อนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี | 93 |
| ภาคผนวก ช แนวทางการออกแบบการดึงคลอไรด์อ่อนด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี ในภาคสนาม | 98 |
| ประวัติการศึกษาและการทำงาน | 106 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | | หน้า |
|----------|--|------|
| 1 | แสดงปริมาณสูงสุดของคลอไรด์ไอออน (Cl ⁻) ที่ละลายน้ำได้ในคอนกรีต | 8 |
| 2 | แสดงอัตราความเสี่ยงที่จะเกิดสนิมตาม ASTM C876 | 13 |
| 3 | การเปรียบเทียบศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี | 22 |
| 4 | การใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีเพื่อลดปริมาณคลอไรด์ในทวีปอเมริกาเหนือ | 24 |
| 5 | ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ก่อนและหลังกระบวนการวิธีทางไฟฟ้าเคมีเพื่อลดปริมาณคลอไรด์ในทวีปอเมริกาเหนือ | 25 |
| 6 | ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต (w/c = 0.45) | 29 |
| 7 | คุณสมบัติเหล็กเสริมคอนกรีต | 29 |
| 8 | สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการดึงคลอไรด์ไอออน | 31 |
| 9 | การเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยใช้ความต่างศักย์กระแสตรง 15, 10, 5 โวลต์ | 41 |
| 10 | การเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยใช้ความต่างศักย์กระแสตรง 15, 10, 5 โวลต์ | 41 |
| 11 | การเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยใช้ความต่างศักย์กระแสตรง 15, 10, 5 โวลต์ | 42 |
| 12 | ประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ในคอนกรีตเปรียบเทียบเป็นร้อยละก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี ที่ระดับความลึก 1 ซม. | 48 |
| 13 | ประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ในคอนกรีตเปรียบเทียบเป็นร้อยละก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี ที่ระดับความลึก 2 ซม. | 48 |
| 14 | ประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ในคอนกรีตเปรียบเทียบเป็นร้อยละก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี ที่ระดับความลึก 3 ซม. | 48 |

สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่ | | หน้า |
|--------------|---|------|
| 15 | ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ด้วยกระแสไฟฟ้า (Chloride Migration Test) ของตัวอย่างการทดลองที่ 1 (MT-01) | 50 |
| 16 | ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ด้วยกระแสไฟฟ้า (Chloride Migration Test) ของตัวอย่างการทดลองที่ 2 (MT-02) | 50 |
| 17 | ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ด้วยกระแสไฟฟ้า (Chloride Migration Test) ของตัวอย่างการทดลองที่ 3 (MT-03) | 51 |
| ตารางผนวกที่ | | |
| ก1 | ปริมาณคลอไรด์อิสระในตัวอย่างคอนกรีตขนาด 30 x 30 x10 ซม. ก่อนและหลังกระบวนการดึงคลอไรด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิ่มตัวเป็นอิเล็กโทรไลต์ | 67 |
| ก2 | ปริมาณคลอไรด์อิสระในตัวอย่างคอนกรีตขนาด 30 x 30 x10 ซม. ก่อนและหลังกระบวนการดึงคลอไรด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นอิเล็กโทรไลต์ | 68 |
| ก3 | ปริมาณคลอไรด์อิสระในตัวอย่างคอนกรีตขนาด 30 x 30 x10 ซม. ก่อนและหลังกระบวนการดึงคลอไรด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นอิเล็กโทรไลต์ | 69 |
| ข1 | ปริมาณคลอไรด์อิสระในตัวอย่างคอนกรีตขนาด 75 x 75 x 7.5 ซม. ก่อนและหลังกระบวนการดึงคลอไรด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยเฉลี่ยที่ระดับความลึก 1 ซม. | 71 |
| ข2 | ปริมาณคลอไรด์อิสระในตัวอย่างคอนกรีตขนาด 75 x 75 x 7.5 ซม. ก่อนและหลังกระบวนการดึงคลอไรด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยเฉลี่ยที่ระดับความลึก 2 ซม. | 72 |

สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางผนวกที่ | | หน้า |
|--------------|---|------|
| ข3 | ปริมาณคลอไรด์อิสระในตัวอย่างคอนกรีตขนาด 75 x 75 x 7.5 ซม. ก่อนและหลังกระบวนการดึงคลอไรด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยเฉลี่ยที่ระดับความลึก 3 ซม. | 73 |
| ค1 | แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 75 x 75 x 7.5 ซม. ก่อนและหลังกระบวนการดึงคลอไรด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี | 75 |
| ง1 | แสดงผลการทดสอบกำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ | 78 |
| จ1 | Mean Chloride Concentration at Various in Deck Areas Before and After Treatment (kg./m.³) | 85 |
| จ2 | Mean Chloride Concentration at Various in Pears Before and After Treatment (kg./m.³) | 85 |
| ช1 | สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างๆ | 94 |
| ซ1 | การลดลงของประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ออกในคอนกรีตที่ลดลงจากระยะทางที่ห่างจากสารละลาย | 101 |

สารบัญภาพ

| ภาพที่ | | หน้า |
|--------|---|------|
| 1 | ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต | 7 |
| 2 | ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต เนื่องจากคลอไรด์ | 10 |
| 3 | แสดงแบบจำลองช่วงชีวิตการใช้งานของเหล็กเสริมในคอนกรีต | 10 |
| 4 | แผนภูมิศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของเหล็กเสริมในคอนกรีต | 12 |
| 5 | การตรวจสอบโดยวิธีครึ่งเซลล์ (The Half-Cell Potential Measurement) และการพล็อตเส้นชั้นความต่างศักย์ (Half-Cell Potential Contour) | 12 |
| 6 | การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ไอออนในห้องปฏิบัติการและแสดงกราฟ ความสัมพันธ์ปริมาณคลอไรด์ไอออนเปรียบเทียบกับระดับความลึกต่างๆ | 14 |
| 7 | แสดงขบวนการของวิธี Electrochemical Chloride Removal (ECR) | 15 |
| 8 | แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (Current) ที่จ่ายในระบบกับ ปริมาณคลอไรด์ที่ออกจากชิ้นตัวอย่าง (Specimen) และ ความสัมพันธ์ ประมาณของสื่อที่เป็นขั้วลบ (Cathode) กับปริมาณคลอไรด์ที่ออกจาก ชิ้นตัวอย่าง (Specimen) | 16 |
| 9 | แสดงการทดสอบ Chloride Migration Test และปริมาณคลอไรด์ ที่ออกจากคอนกรีตมาสะสมอยู่ในสารละลายของการทดสอบ Chloride Migration Test | 17 |
| 10 | แสดงอิทธิพลของสารละลายที่ใช้ในการทดสอบ Chloride Migration Test | 19 |
| 11 | ปริมาณคลอไรด์ที่สะสมอยู่ในคอนกรีตก่อนและหลังขบวนการทาง ไฟฟ้าเคมีระหว่างการเปลี่ยนสารละลายใหม่และไม่เปลี่ยนสารละลาย | 20 |
| 12 | แสดงการเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังการดึงคลอไรด์จาก คอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีระหว่างคอนกรีตที่มีสภาพคาร์บอนชั้น และคอนกรีตปกติ | 21 |
| 13 | แสดงการประยุกต์ใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีในการลดปริมาณคลอไรด์ใน คอนกรีต | 23 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ | | หน้า |
|--------|---|------|
| 14 | เครื่องมือวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ | 31 |
| 15 | ภาพการต่อวงจรไฟฟ้าและขังสารละลายเพื่อดึงคลอไรด์จากตัวอย่างคอนกรีตขนาด 30 x 30 x 10 ซม. และ 70 x 70 x 7.5 ซม. | 32 |
| 16 | ภาพตัวอย่างการทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนด้วยไฟฟ้า (Chloride Migration Test) | 34 |
| 17 | แสดงการเตรียมตัวอย่างในการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในผงคอนกรีต, การปรับสภาพความเป็นกรดต่างค่า (pH) และการทำ Blank | 35 |
| 18 | แสดงตัวอย่างหลังการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในสารละลาย | 36 |
| 19 | ตัวอย่างการกรองผงคอนกรีตด้วยเครื่องดูดสุญญากาศและการเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการไทเทรต (Titration) หาปริมาณคลอไรด์อิสระ | 37 |
| 20 | การกระตุ้นการทำงานของ Chloride ISE ด้วยสารละลายคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร และการหาปริมาณคลอไรด์อิสระด้วยเครื่อง Chloride Analyzer (Metrohm 781 pH/Ion Meter) | 38 |
| 21 | การเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังการดึงคลอไรด์ภายในคอนกรีตเมื่อใช้ตัวกลางสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และใช้ขนาดความต่างศักย์ 5, 10, 15 โวลต์ตามลำดับ | 39 |
| 22 | การเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังการดึงคลอไรด์ภายในคอนกรีตเมื่อใช้ตัวกลางสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และใช้ขนาดความต่างศักย์ 5, 10, 15 โวลต์ตามลำดับ | 40 |
| 23 | การเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังการดึงคลอไรด์ภายในคอนกรีตเมื่อใช้ตัวกลางสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์และใช้ขนาดความต่างศักย์ 5, 10, 15 โวลต์ตามลำดับ | 40 |
| 24 | การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ของสารละลายทั้ง 3 ชนิดโดยใช้ความต่างศักย์กระแสตรง 15 โวลต์ | 42 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ | | หน้า |
|--------|---|------|
| 25 | เส้นชั้นระดับปริมาณคลอไรด์โดยเฉลี่ยที่ระยะความลึก 1 ซม. ก่อนทำการดิ่งคลอไรด์อออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี | 44 |
| 26 | เส้นชั้นระดับปริมาณคลอไรด์โดยเฉลี่ยที่ระยะความลึก 1 ซม. หลังทำการดิ่งคลอไรด์อออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี | 45 |
| 27 | เส้นชั้นระดับปริมาณคลอไรด์โดยเฉลี่ยที่ระยะความลึก 2 ซม. ก่อนทำการดิ่งคลอไรด์อออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี | 45 |
| 28 | เส้นชั้นระดับปริมาณคลอไรด์โดยเฉลี่ยที่ระยะความลึก 2 ซม. หลังทำการดิ่งคลอไรด์อออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี | 46 |
| 29 | เส้นชั้นระดับปริมาณคลอไรด์โดยเฉลี่ยที่ระยะความลึก 3 ซม. ก่อนทำการดิ่งคลอไรด์อออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี | 46 |
| 30 | เส้นชั้นระดับปริมาณคลอไรด์โดยเฉลี่ยที่ระยะความลึก 3 ซม. หลังทำการดิ่งคลอไรด์อออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี | 47 |
| 31 | แสดงปริมาณคลอไรด์ที่สะสมอยู่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ของตัวอย่างคอนกรีตในการทดสอบ Chloride Migration Test | 51 |
| 32 | ประสิทธิภาพของการลดปริมาณคลอไรด์อออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีจาก การทำนายโดยใช้ข้อมูลการทดสอบ Chloride Migration Test โดยแสดง เป็นร้อยละของคลอไรด์ที่สามารถดึงออกจากคอนกรีตได้โดยพิจารณา จากระยะทางที่ห่างจากสารละลาย | 53 |
| 33 | ปริมาณคลอไรด์หลังขบวนการทางไฟฟ้าเคมีที่ระยะเวลา 28 วัน ที่ระดับ ความลึก 3 ซม. จากการทำนาย | 54 |
| 34 | ปริมาณคลอไรด์หลังขบวนการทางไฟฟ้าเคมีที่ระยะเวลา 28 วัน ที่ระดับ ความลึก 3 ซม. จากการทำนายในห้องปฏิบัติการ | 54 |
| 35 | แสดงปริมาณคลอไรด์หลังขบวนการทางไฟฟ้าเคมีที่ระยะเวลา 28 วัน ที่ ระดับความลึก 3 ซม. จากการทำนายในห้องปฏิบัติการ | 55 |
| 36 | การเปรียบเทียบผลของการวัดการสึกกร่อนด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ ก่อนและหลังการดิ่งคลอไรด์จากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี | 57 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพผนวกที่ | | หน้า |
|------------|---|------|
| ง1 | ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ | 77 |
| ง2 | การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ | 77 |
| จ1 | ลักษณะทางกายภาพของสะพาน I-365 (34 th Street Bridge Over I-365) | 80 |
| จ2 | การต่อวงจรไฟฟ้าและแผนภูมิของการติดตั้งอุปกรณ์ในการลดปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างพื้นสะพาน I-365 | 81 |
| จ3 | การติดตั้งอุปกรณ์ในการติดตั้งอุปกรณ์ในการลดปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างพื้นสะพาน I-365 | 82 |
| จ4 | แผนภูมิของการติดตั้งอุปกรณ์ในการลดปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างตอม่อสะพาน I-365 | 83 |
| จ5 | การติดตั้งอุปกรณ์ในการติดตั้งอุปกรณ์ในการลดปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างตอม่อสะพาน I-365 | 83 |
| จ6 | การติดตั้งอุปกรณ์ในการติดตั้งอุปกรณ์ในการลดปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างตอม่อสะพาน I-365 | 84 |
| ฉ1 | การเตรียมส่วนผสมโดยเตรียมตามน้ำหนักตามปฏิกิริยาส่วนผสมที่กำหนดไว้ | 87 |
| ฉ2 | การผสมคอนกรีตตามส่วนผสมที่ชั่งน้ำหนักไว้แล้ว | 88 |
| ฉ3 | การผสมคอนกรีตและการทดสอบค่าการยุบของคอนกรีต | 88 |
| ฉ4 | การเตรียมแบบเทคอนกรีตและการเทคอนกรีตตัวอย่างขนาด 30 x 30 x 10 ซม. | 88 |
| ฉ5 | การเตรียมแบบเทคอนกรีตและการเทคอนกรีตตัวอย่างขนาด 70 x 70 x 7.5 ซม. | 89 |
| ฉ6 | เตรียมตัวอย่างไปบ่มในน้ำประปาเป็นเวลา 28 วัน | 89 |

สารบัญญภาพ (ต่อ)

| ภาพผนวกที่ | | หน้า |
|------------|--|------|
| ฉ7 | การหาปริมาณคลอไรด์ในผงคอนกรีตก่อนการตั้งคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีและการชั่งสารละลายด้านบนตัวอย่างเพื่อทำการตั้งคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี | 89 |
| ฉ8 | การเจาะคอนกรีตเพื่อนำผลคอนกรีตไปหาปริมาณคลอไรด์อิสระ | 90 |
| ฉ9 | นำผงคอนกรีตมาแช่ในน้ำกลั่นและแช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชม. และทำการกรอง | 90 |
| ฉ10 | นำตัวอย่างที่ทำการกรองผงคอนกรีตมาหาปริมาณคลอไรด์ในน้ำกลั่นที่แช่ผงคอนกรีต | 90 |
| ฉ11 | ทำการระบุตำแหน่งในการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์โดยเตรียมตัวอย่างให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ | 91 |
| ฉ12 | การชั่งสารละลายด้านบนของตัวอย่างคอนกรีตและทำการจ่ายไฟฟ้าด้วยเครื่องแปลงไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 โวลต์เป็นเวลา 28 วัน | 91 |
| ฉ13 | เตรียมตัวอย่างคอนกรีตความหนา 1 นิ้วและทำการอุดรอยร้าวด้วยซิลิโคน | 92 |
| ฉ14 | นำตัวอย่างไปประกอบในอุปกรณ์ในการทดลองที่เตรียมไว้และทำการเติมสารละลายในท่ออะคลีติกและทำการจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 15 โวลต์ | 92 |
| ช1 | ระยะเวลาในการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 โวลต์และปริมาณคลอไรด์ร้อยละ 1 ต่อน้ำหนักคอนกรีต | 95 |
| ช2 | ระยะเวลาในการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 โวลต์และปริมาณคลอไรด์ร้อยละ 3 ต่อน้ำหนักคอนกรีต | 96 |
| ช3 | ระยะเวลาในการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 โวลต์และปริมาณคลอไรด์ร้อยละ 1 ต่อน้ำหนักคอนกรีต | 96 |

สารบัญญภาพ (ต่อ)

| ภาพผนวกที่ | หน้า |
|--|------|
| ซ1 เส้นแนวโน้มของการลดลงของประสิทธิภาพในการลดลงของประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์จากคอนกรีตในบริเวณที่ไม่ได้สัมผัสกับสารละลายโดยตรง | 99 |
| ซ2 ระยะทางที่มีประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ออกจากคอนกรีตตามระยะทางที่ห่างจากสารละลาย | 100 |
| ซ3 ตัวอย่างของโครงสร้างที่จะทำการวางแผนการซ่อมแซมโครงสร้างด้วยการดึงคลอไรด์ออกจากคอนกรีต | 102 |
| ซ4 เส้นชั้นระดับปริมาณคลอไรด์โดยเฉลี่ยที่ระดับเหล็กเสริมคอนกรีตก่อนการดึงคลอไรด์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี | 103 |
| ซ5 แนวทางการติดตั้งสารละลายโดยพิจารณาจากบริเวณที่คลอไรด์มีความเข้มข้นสูง | 103 |
| ซ6 แนวโน้มของเส้นชั้นระดับปริมาณคลอไรด์โดยเฉลี่ยที่ระดับเหล็กเสริมคอนกรีตหลังการดึงคลอไรด์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี | 104 |

อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าในการดึงคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี ในคอนกรีตเสริมเหล็ก

Influence of Electric Current on Electrochemical Chloride Removal in Reinforced Concrete

คำนำ

การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นปัญหาด้านความคงทนของคอนกรีตในเรื่องของกำลังและลักษณะทางกายภาพต่างๆ โดยเฉพาะเรื่องความสามารถในการรับน้ำหนักตามที่ออกแบบไว้จะลดลง ทำให้เกิดความไม่ปลอดภัยกับโครงสร้างดังกล่าว เนื่องจากการเกิดสนิมทำให้เกิดการขยายตัวของผิวเหล็กเสริมคอนกรีตมีปริมาตรเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดแรงดึงขึ้นในคอนกรีตซึ่งทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวขึ้นได้ โดยเฉพาะโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องสัมผัสน้ำทะเล น้ำกร่อย หรืออยู่บริเวณชายฝั่ง รวมทั้งโครงสร้างใต้ดินบริเวณนั้นจะประสบปัญหาความเสียหายอย่างมากจากสภาพแวดล้อม

การซ่อมแซมโครงสร้างที่เสื่อมสภาพหรือเกิดสนิมต้องการความเข้าใจในสาเหตุหลักและสภาพปัจจุบันของโครงสร้างนั้น เพื่อให้สามารถแก้ไขได้ตรงจุดและหยุดยั้งความเสียหายได้อย่างถาวร กระบวนการซ่อมแซมโครงสร้างที่เสียหายจากสนิมเหล็กเสริมสามารถจำแนกเป็น 3 ลักษณะ คือ การซ่อมแซม (Concrete Repair) การเสริมกำลัง (Strengthening) และการป้องกัน (Protection)

การบำรุงรักษาอย่างมีแบบแผนและซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นมีความสำคัญอย่างยิ่งเนื่องจากสามารถยืดอายุเวลาของโครงสร้างให้มีความสามารถในการรับน้ำหนักที่กระทำต่อโครงสร้างตามที่วิศวกรได้ออกแบบไว้อย่างมีประสิทธิภาพและยังส่งผลในเรื่องของความมั่นใจของผู้ใช้งาน โครงสร้างดังกล่าวอีกด้วย วิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electro Chemical) เป็นวิธีการป้องกันการกัดกร่อนที่มีการใช้กันอย่างกว้างขวางเนื่องจากเป็นวิธีการที่สามารถประยุกต์ใช้กับโลหะและโลหะผสมทุกชนิดในทุกสภาพการใช้งาน โดยมีข้อแม้ว่าต้องสัมผัสอยู่กับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) และเมื่อใช้แล้วยังสามารถลดอัตราการกัดกร่อนได้จนมีค่าใกล้ศูนย์หรือไม่เกิดการกัดกร่อนเลยได้

การลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Chloride Removal) คือการดึงเฉพาะคลอไรด์ไอออนออกจากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งมีขั้วไฟฟ้าอยู่ในสารละลายซึ่งอยู่ภายนอกคอนกรีตและมีการเชื่อมต่อไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างขั้วไฟฟ้าและเหล็กเสริมภายในคอนกรีตมีการให้ไฟฟ้ากระแสตรงกับขั้วไฟฟ้าและเหล็กเสริมคอนกรีตโดยให้ขั้วไฟฟ้าภายนอกเป็นขั้วบวก (Anode) และเหล็กเสริมเป็นขั้วลบ (Cathode) จากการต่อระบบดังกล่าวนี้ เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่สูงพอคลอไรด์ไอออนที่มีสภาพเป็นขั้วลบจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วบวก (Anode) ซึ่งอยู่ภายนอกส่งผลทำให้ความปนเปื้อนของคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตมีค่าลดลงโดยเฉพาะบริเวณเหล็กเสริมซึ่งเป็นขั้วลบ นอกจากนี้ยังมี Hydroxyl ions เกิดขึ้นจากระบบเพิ่มขึ้นอีกซึ่งจะทำให้ค่า pH สูงขึ้น ความเป็นด่างในคอนกรีตสูงขึ้นส่งผลให้มีความต้านทานการเกิดสนิมที่ดีขึ้น แต่เนื่องจากการศึกษาภายในประเทศยังไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับการลดปริมาณคลอไรด์ไอออน ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในส่วนของชนิดของสารละลายที่เหมาะสม และความสัมพันธ์ของการสูญเสียของกระแสไฟฟ้าในคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากความสามารถในการดึงคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นแปรผันตรงกันกับขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ปล่อยเข้าไปในระบบ และข้อมูลของประสิทธิภาพของวิธีทางไฟฟ้าเคมีในการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตในบริเวณที่ไม่สัมผัสกับสารละลายโดยตรง

จากเหตุผลข้างต้นจึงจำเป็นต้องมีการทำวิจัยเกี่ยวกับเรื่อง "อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าในการดึงคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในคอนกรีตเสริมเหล็ก" เพื่อนำมาเป็นแนวทางในการบำรุงรักษา และซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพเนื่องจากวิธีดังกล่าวสามารถบำรุงรักษาและซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจากความเสียหายจากสนิมในเหล็กเสริมก่อนที่เหล็กเสริมในคอนกรีตจะเป็นสนิม นอกจากนี้ข้อมูลจากงานวิจัยนี้ยังอาจใช้ข้อมูลเพื่อเป็นแนวทางในการวางแผนการบำรุงรักษาซ่อมแซมโครงสร้างอย่างประจำ (Routine Maintenance) เนื่องจากเมื่อทราบความสัมพันธ์ของปริมาณของกระแสไฟฟ้ากับปริมาณคลอไรด์ไอออนที่สามารถดึงออกมาในสารละลาย และการแพร่กระจายของคลอไรด์ไอออนเข้าสู่คอนกรีตที่ผ่านกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี จะสามารถนำมาวางแผนการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อช่วยลด

วัตถุประสงค์

1. เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมระหว่างชนิดของสารละลายกับขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ปล่อยเข้าไปในระบบเพื่อที่จะทำให้สามารถดึงคลอไรด์ไอออนออกจากคอนกรีตเสริมเหล็กมากที่สุด
2. เพื่อหาประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในบริเวณที่ไม่ได้สัมผัสกับสารละลายโดยตรง
3. เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนผ่านคอนกรีตเสริมเหล็กจากการจ่ายกระแสไฟฟ้า

ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้จะคำนึงถึงปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กอันเนื่องมาจากคลอไรด์ไอออนเป็นหลัก ซึ่งปัญหานี้จะพบบ่อยมากในอาคาร โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กชายทะเล และการวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบหาเงื่อนไขต่างๆในการบำรุงรักษาและซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีด้วยวิธีที่เรียกว่า **Electrochemical Chloride Removal** หรือที่เรียกว่า **Desalination** เพื่อเป็นทางเลือกในการบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ยังไม่พบรอยแตกร้าว เนื่องจากปัญหาของเหล็กเสริมเป็นสนิมนั้นกว่าจะพบปัญหามักจะเป็นช่วงที่วิกฤติแล้ว และไม่ได้พิจารณาถึงกำลังรับแรงคัด แรงอัดหลังการซ่อมแซมแล้ว หรือโอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างค่างกับมวลรวม (**Alkali Aggregate Reaction, AAR**) แต่จะพิจารณาเฉพาะความสามารถในการบำรุงรักษาซ่อมแซมด้วยวิธี **Electrochemical Chloride Removal** ในส่วนของประสิทธิภาพของการดึงคลอไรด์จากคอนกรีตในบริเวณที่ไม่ได้สัมผัสกับสารละลายโดยตรงอันเนื่องมาจากอิทธิพลจากกระแสไฟฟ้าที่ส่งผลต่อการดึงคลอไรด์ไอออนออกจากคอนกรีตเสริมเหล็ก

การตรวจเอกสาร

เดิมมีความเข้าใจกันว่า คอนกรีตที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ซึ่งมีปริมาณ C_3A ที่ต่ำจะเหมาะสำหรับโครงสร้างที่สัมผัสน้ำทะเล แต่เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบในน้ำทะเลโดยแท้จริงแล้ว น้ำทะเลมีปริมาณซัลเฟตอยู่ประมาณร้อยละ 10 ส่วนคลอไรด์นั้นกลับมีปริมาณถึงร้อยละ 90 ดังนั้นการคำนึงถึงทุกองค์ประกอบของน้ำทะเลจะมีเหตุผลมากกว่าการพิจารณาแต่เพียงซัลเฟตเท่านั้น โดยที่ น้ำทะเลมีเกลือคลอไรด์ซึ่งอยู่ในรูปสารประกอบ โซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$) ประมาณ 27,000 ppm แมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2$) ประมาณ 3,200 ppm และแคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) ประมาณ 500 ppm ส่วนซัลเฟตอยู่ในรูปของสารประกอบ แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ประมาณ 2,200 ppm และแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) ประมาณ 1,100 ppm (CPAC, 2008)

อย่างไรก็ตามจากความเจริญก้าวหน้าในด้านคอนกรีตเทคโนโลยีในปัจจุบัน การศึกษาวิจัยด้านวิศวกรรมคอนกรีตสามารถทำการศึกษาได้อย่างกว้างขวางขึ้น การศึกษาคอนกรีตสามารถลงลึกได้ถึงระดับโครงสร้างภายในเนื้อของคอนกรีต (Micro Structure) ทำให้เป็นที่ตระหนักว่าคอนกรีตไม่ใช่วัสดุก่อสร้างที่มีความทนทานสูงเสมอไป และต้องการการบำรุงรักษาเช่นเดียวกับวัสดุก่อสร้างชนิดอื่น ซึ่งในกลุ่มประเทศแถบยุโรปหรือกลุ่มประเทศที่พัฒนาแล้วการบำรุงรักษาสภาพของโครงสร้างอย่างสม่ำเสมอมีมูลค่าใกล้เคียงกับการก่อสร้างใหม่ แต่สำหรับในประเทศไทยวิศวกรโครงสร้างยังขาดความรู้และข้อมูลในเรื่องเกี่ยวกับการดูแลรักษา และเรื่องความคงทนของคอนกรีต จึงมีความจำเป็นในการทำการวิจัยเพื่อเป็นข้อมูลสำหรับวิศวกรเพื่อที่จะเป็นฐานข้อมูลในการวางแผนการบำรุงรักษา และซ่อมแซมโครงสร้าง

คอนกรีตที่ดีควรมีกำลังตามต้องการและทนทานต่อสภาวะแวดล้อมตลอดอายุการใช้งาน โดยยังสามารถคงรูปร่างและคุณสมบัติต่างๆ รวมถึงการใช้งานได้ดีเช่นเดิม ความเสียหายของคอนกรีตอาจเกิดขึ้นจากปัจจัยภายนอกหรืออาจเกิดจากปัจจัยภายในของคอนกรีตเองก็ได้ โดยทั่วไปอาจแบ่งสาเหตุของการเสื่อมสภาพของคอนกรีตออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ ดังต่อไปนี้

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

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

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

การกัดกร่อนและการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

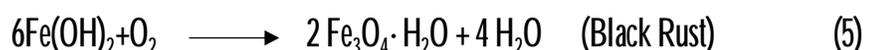
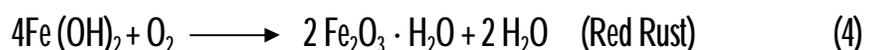
การเกิดสนิมในเหล็กเสริมเป็นปัญหาสำคัญต่อความคงทนและอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทย โดยเฉพาะโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมชายฝั่งทะเลรวมถึงโครงสร้างที่อยู่ในพื้นที่น้ำกร่อยด้วย เนื่องจากผิวคอนกรีตต้องสัมผัสกับน้ำทะเลหรืออยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีไอเกลือและความชื้นตลอดเวลา การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตจึงเป็นปัจจัยสำคัญอันดับแรก ๆ ที่ทำให้ความคงทนและอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตลดลง ซึ่งต้องสิ้นเปลืองงบประมาณค่อนข้างมากในการซ่อมบำรุงและแก้ไขปัญหา

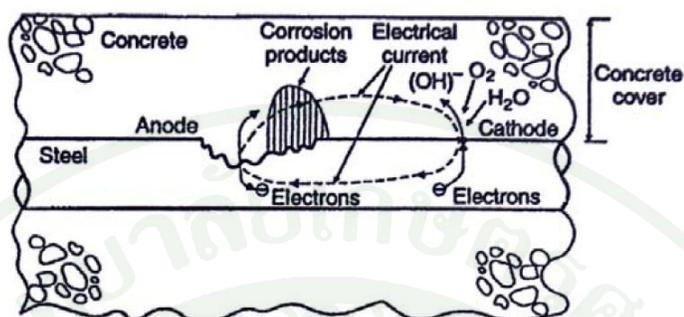
การเกิดสนิมของเหล็กเสริมอันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมบริเวณริมทะเลเป็นอีกหนึ่งใน ความเสียหายที่ทำให้ความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กลดลง ผลกระทบโดยรวมของ การเกิดสนิมคือกำลังรับแรงของโครงสร้างลดลงอันเนื่องมาจากการเกิดสนิมนั้นทำให้หน้าตัดของ เหล็กเสริมในคอนกรีตลดลง ทำให้ประสิทธิภาพของโครงสร้างในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของ โครงสร้างลดลง และการที่เหล็กเสริมเกิดสนิมยังทำให้เกิดการแตกร้าวและหลุดออกของคอนกรีต ที่หุ้มอยู่ด้วย (Spalling) เนื่องจากปริมาตรที่เพิ่มขึ้นของเหล็กเสริมจากการเกิดสนิมซึ่งทำให้ คอนกรีตหุ้มที่มีความหนาแน่นนั้นเกิดการแตกร้าว เป็นผลทำให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้างมากยิ่งขึ้น (Bentur *et al.*, 1997)

Neville (1995) อธิบายขบวนการของการเกิดสนิมในเหล็กดังนี้คือ เมื่อมีวัสดุสองอย่างที่แตกต่างกัน (คอนกรีตและเหล็กเสริม) จะเกิดความต่างศักย์ในลักษณะของเซลล์ไฟฟ้าเคมีขึ้นได้ เนื่องจากความแตกต่างของความชื้น ออกซิเจน ความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลต์ ทำให้เกิดขั้วบวก และขั้วลบโดยมีตัวอิเล็กโตรไลต์คือความชื้นและคลอไรด์ไอออนเพื่อให้อิเล็กตรอน วิ่งผ่าน ประจุ

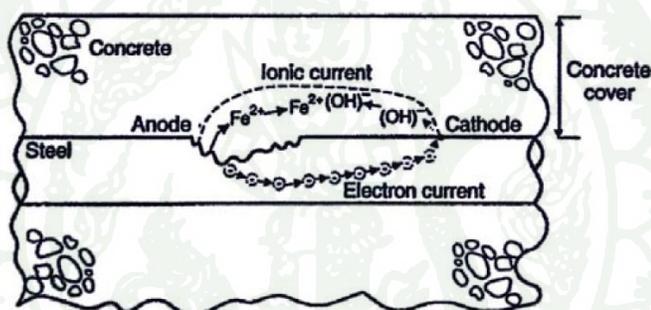
บวกของเซลล์ไฟฟ้า (Fe^{2+}) จะวิ่งไปตามล่อ ขณะที่ประจุลบ (e^-) จะเดินทางผ่านจากเหล็กไปยังขั้วบวกเมื่อคลอรีนเคลื่อนผ่านเข้าไปถึงระดับผิวของเหล็กเสริม ชั้นของฟิล์มออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำจะทำให้เกิดฟิล์มของ $\gamma-Fe_2O_3$ (Passivation Film) โดยฟิล์มดังกล่าวทำหน้าที่ป้องกันการเป็นสนิมของเหล็กเสริม จะถูกทำลายและในบริเวณนั้นมีโอกาสที่จะเกิดสนิมได้ เรียกว่า **Depassivation** เมื่อมีปริมาณความชื้นและออกซิเจนที่พอเหมาะ กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีก็จะเกิดขึ้น โดยบริเวณที่ฟิล์มที่หุ้มเหล็กเสริมถูกทำลายจะมีศักย์ไฟฟ้าเป็นขั้วลบ เรียกว่า ปฏิกิริยาแอโนด (Anodic Reaction) ดังแสดงในสมการที่ 1 และ e^- ที่เกิดขึ้นนี้จะวิ่งไปยังบริเวณที่ฟิล์มไม่ถูกทำลาย ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นขั้วบวก (Cathodic) และหากรวมตัวกับน้ำก็จะเกิดเป็นไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ดังสมการที่ 2

หลังจากนั้นจะเกิดการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าทั้งภายในและภายนอกเหล็กเสริม กระแสภายในเป็นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากแอโนดไปคาโทด ส่วนกระแสภายนอกเป็นการเคลื่อนที่ของ Fe^{2+} และ OH^- ผ่านสารละลายในช่องว่างของคอนกรีต ซึ่ง Fe^{2+} จะเคลื่อนที่จากแอโนดสู่คาโทด และ OH^- จะเคลื่อนที่จากคาโทดไปสู่แอโนด ดังภาพที่ 1 (ข) โดยที่มีสารละลายในช่องว่างของคอนกรีต ช่วยทำให้ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าครบวงจรและเกิดการกัดกร่อนขึ้น (Bentur *et al.*, 1997) ซึ่งการเคลื่อนที่ของ Fe^{2+} และ OH^- เข้าหากันเกิดผลเป็น $Fe(OH)_2$ (Ferrous Hydroxide) ดังสมการที่ 3 ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับ O_2 ต่อได้ เกิดเป็นสนิมเหล็ก Fe_2O_3 (Red Rust) และ Fe_3O_4 (Black Rust) ดังสมการที่ 4 และ 5 ตามลำดับซึ่งผลิตภัณฑ์สนิมที่เกิดขึ้นจากการกัดกร่อนนี้มีปริมาณมากกว่าเหล็กก่อนเกิดปฏิกิริยา 4 ถึง 6 เท่า (Nielsen, 1985) ทำให้เกิดการแตกร้าวและหลุดออกของคอนกรีตหุ้ม





(ก.) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดและคาโทด



(ข.) การเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าทั้งภายนอกและภายในเหล็กเสริม

ภาพที่ 1 ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต

ที่มา: Bentur *et al.* (1997)

โดยทั่วไปแล้ว เหล็กเป็น โลหะที่เกิดการกัดกร่อนได้ตามธรรมชาติและการกัดกร่อนนี้เกิดขึ้นตลอดเวลาในบริเวณที่มีความชื้น (ชัชยุทธ และเลิศณรงค์, 2543) แต่สำหรับเหล็กที่เสริมอยู่ในคอนกรีตนั้นจะอยู่ในสภาวะไม่เกิดสนิมเนื่องจากมี **Passivation Film** ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (**Hydration**) ของซีเมนต์กับน้ำในระหว่างการพัฒนา กำลังของคอนกรีต ซึ่งคอนกรีตมีความเป็นด่างสูง มีค่า **pH** ประมาณ 13.5 ซึ่งสามารถป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ (Bentur *et al.*, 1997) เนื่องจากในสภาวะของการเป็นด่างสูง เหล็กจะไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาแอโนดได้ นั่นคือเหล็กจะไม่แตกตัวเป็นไอออนทำให้ปฏิกิริยาการเกิดสนิมไม่เกิดขึ้น

อย่างไรก็ตามคอนกรีตอาจจะมีคลอไรด์เนื่องจากการใช้ส่วนผสมของวัสดุที่มีคลอไรด์ เช่น น้ำ ทราย หิน ปูน หรือสารเคมีผสมเพิ่มที่มีคลอไรด์ปนอยู่ ดังนั้นปริมาณคลอไรด์จึงต้องทำการตรวจสอบว่ามีอยู่ในปริมาณที่ไม่ทำให้เกิดอันตรายต่อคอนกรีต BS 8100:Part 1 และมาตรฐานยุโรป ENV 206 ได้กำหนดให้ปริมาณคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตเสริมเหล็กไม่เกินร้อยละ 0.40 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (มาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38, 2538) ได้กำหนดปริมาณคลอไรด์ไอออนที่ละลายน้ำได้ในคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อป้องกันการเกิดสนิม ต้องมีค่าไม่เกินพิคัดดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงปริมาณสูงสุดของคลอไรด์ไอออน (Cl⁻) ที่ละลายน้ำได้ในคอนกรีต (ร้อยละต่อน้ำหนักของปูนซีเมนต์)

| ชนิดขององค์อาคาร | ปริมาณสูงสุดของคลอไรด์ไอออน (Cl ⁻) ที่ละลายน้ำได้ในคอนกรีต |
|--|--|
| คอนกรีตอัดแรง | 0.06 |
| คอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสกับคลอไรด์ | 0.15 |
| ในขณะใช้งาน | |
| คอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแห้งหรือที่มีการ | 1.00 |
| ป้องกันความชื้นในขณะใช้งาน | |
| งานก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอื่นๆ | 0.30 |

ที่มา: มาตรฐานวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ส.ท.) 1008-38 (2538)

การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์

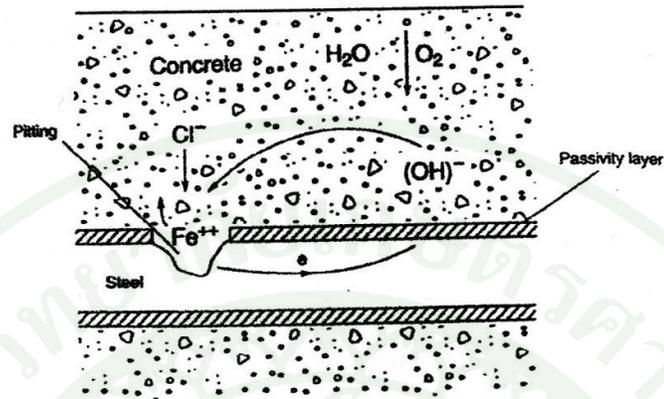
การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ (Chloride Attack) คลอไรด์อาจมีอยู่ในคอนกรีตเอง เช่น ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต หรือที่ปนเปื้อนมากับหิน ทราย (โดยเฉพาะทรายที่มีแหล่งที่มาจากบริเวณใกล้ทะเล) รวมถึงมีแหล่งที่มาจากน้ำยาผสมคอนกรีตบางประเภท เช่น แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂) ที่พบอยู่ในสารเร่งการก่อตัว แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อความคงทนของคอนกรีตนั้น ส่วนมากจากสภาพแวดล้อมภายนอกคอนกรีตในช่วงของการใช้งาน เช่น จากน้ำทะเลหรือน้ำกร่อย

จากดิน หรือจากเกลือที่ใช้ในการช่วยละลายน้ำแข็ง (De-Icing Salt) ในประเทศที่มีอากาศหนาว ทั้งนี้โดยทั่วไปแล้วแหล่งคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างนั้น (คณะกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2543) โดยที่ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในเนื้อของคอนกรีต (Total Chloride) ดังกล่าวนั้น เป็นผลรวมของคลอไรด์สองประเภทคือ

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

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

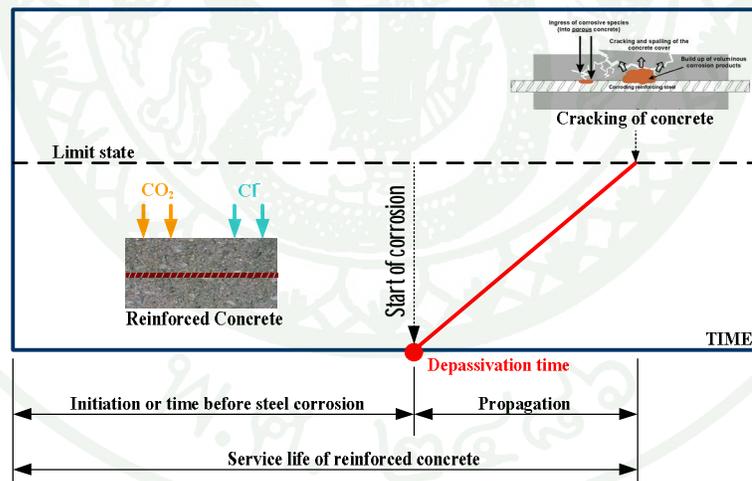
การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์แตกต่างจากการกัดกร่อนทางเคมีอื่นตรงที่ คลอไรด์ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมและคอนกรีตบริเวณรอบๆเหล็กเสริมเท่านั้นที่เสียหายเนื่องจากการขยายตัวของเหล็กเสริมและเป็นสาเหตุหลักที่ทำลายโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เมื่อซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำ จะเกิดฟิล์มบางๆ (**Passivation Film**) ของ $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ เคลือบผิวเหล็กไว้และฟิล์มนี้ทำหน้าที่ปกป้องการเกิดสนิมของเหล็ก อย่างไรก็ตามอิออนของคลอไรด์สามารถทำลายฟิล์มนี้ได้ดังภาพที่ 2 และเมื่อมีน้ำและออกซิเจนตรงบริเวณเหล็กเสริมที่ไม่มีฟิล์มนี้ป้องกันอยู่เหล็กจะเป็นสนิมได้ ซึ่งโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปนั้น มักจะอยู่ในสภาพแวดล้อมที่อาจจะสัมผัสสารเคมี สภาพที่เป็นกรด หรือสภาพแวดล้อมที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิม เช่น โครงสร้างที่อยู่บริเวณชายฝั่งทะเล นั้น ความเข้มข้นของคลอไรด์จะเป็นตัวทำลายสภาพความเป็นด่างของคอนกรีต เป็นต้น ซึ่งเป็นตัวเร่งให้เกิดสนิมในเหล็กเสริมเร็วขึ้นดังแบบจำลองการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 2 ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์

ที่มา: Neville (1997)

Conceptual Service Life Model of Steel in Concrete



ภาพที่ 3 แบบจำลองช่วงชีวิตการใช้งานของเหล็กเสริมในคอนกรีต

จากภาพที่ 3 แสดงแบบจำลองช่วงชีวิตการใช้งานของเหล็กเสริมในคอนกรีต อธิบายได้ว่าเมื่อคลอไรด์ไอออนซึมเข้าไปในผิวของคอนกรีตมากขึ้นเรื่อยๆจนเข้าไปถึงเหล็กเสริมภายในจะไปทำลายฟิล์มที่เคลือบผิวของเหล็กเสริมและเมื่อปริมาณของคลอไรด์ที่ซึมผ่านเข้าไปมีปริมาณมากถึง

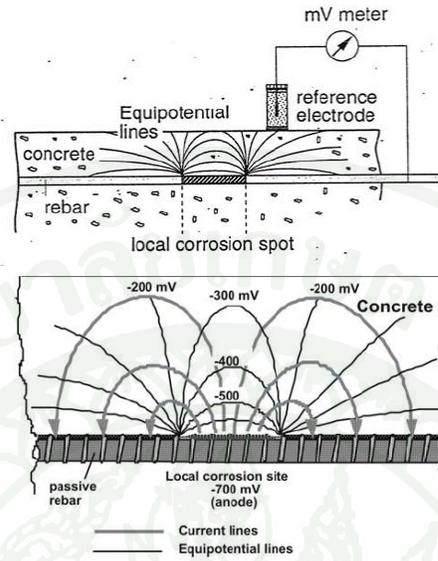
จุดวิกฤต (Depassivation Time) ก็จะเริ่มเกิดสนิมขึ้นที่ผิวของเหล็กเสริมจนดันให้ผิวคอนกรีตระเบิดออก (Crushing) ส่งผลให้โครงสร้างสร้างเกิดความเสียหายจนอาจเกิดการวิบัติไปในพื้นที่สุด

การทดสอบการผุกร่อนของเหล็กเสริมเนื่องจากการเกิดสนิม

การผุกร่อนของเหล็กเสริมเป็นการเสื่อมสภาพของเหล็กเสริมด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Electro Chemical Reaction) เกิดขึ้นเมื่อ Passivation Film ที่เกิดขึ้นในขณะเกิดปฏิกิริยา Hydration และเคลือบหุ้มเหล็กเสริมอยู่ถูกทำลาย ซึ่งอาจเกิดจาก ขบวนการ Carbonation หรือจากคลอไรด์ อีออน (Cl⁻) เมื่อเหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดการผุกร่อนแสดงว่าเกิดความต่างศักย์ ระหว่างพื้นที่ 2 ส่วนบนแท่งเหล็กเดียวกันหรือข้างเคียง ทำให้เกิดเป็น Anodic Half-Cell และ Cathodic Half-Cell (ขั้วบวก และ ขั้วลบ) เทคนิคการทดสอบการผุกร่อนของเหล็กเสริม อาจทำได้หลายวิธีทั้งการตรวจวัดค่าความต่างศักย์โดยตรง หรือการ ตรวจสอบสภาพแวดล้อมที่อาจทำให้ Passivity Film ถูกทำลาย อาทิเช่น การตรวจสอบด้วยวิธีครึ่งเซลล์หรือการหาปริมาณของคลอไรด์ในคอนกรีตดังมีรายละเอียดดังนี้

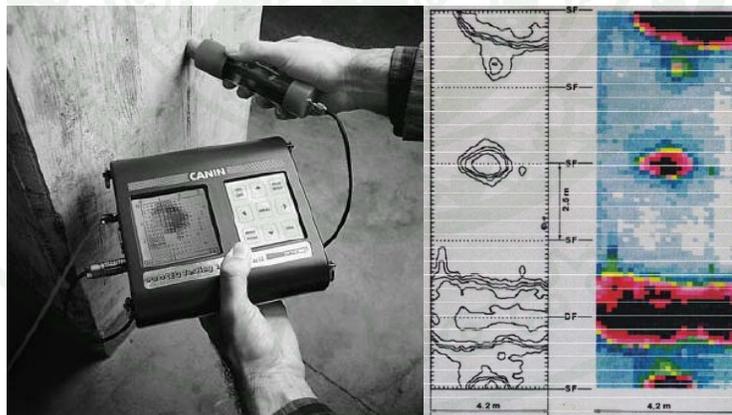
1. การตรวจสอบด้วยวิธีครึ่งเซลล์ (Half-Cell Potential Measurement)

ในคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีทั้งพื้นที่ที่ถูกและไม่ถูกกัดกร่อนอยู่ด้วยกัน ประกอบกับการเกิดสนิมยังไม่รุนแรง การดูด้วยตาเปล่าทำได้ยากจึงต้องใช้เครื่องมืออย่างง่ายที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการตรวจสอบเรียกว่า การตรวจสอบโดยวิธีครึ่งเซลล์ (The Half-Cell Potential Measurement) โดยจะใช้ด้านที่ต่อกับเหล็กเสริมเป็นขั้วบวก (Anode) และใช้ด้านที่ไม่เกิดการกัดกร่อนเป็นขั้วลบ (Cathode) โดยต่อกับผิวคอนกรีตและปล่อยกระแสไฟฟ้าความต่างศักย์ประมาณ 0.5 โวลต์ หรือมากกว่าเข้าไป จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และคาโทดซึ่งช่วยให้วัดและประมาณค่าการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ (Elsener, 2001)



ภาพที่ 4 แผนภูมิศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของเหล็กเสริมในคอนกรีต

ที่มา: Elsener (2001)



ภาพที่ 5 การตรวจสอบโดยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (The Half-Cell Potential Measurement) และการพล็อตเส้นชั้นความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-Cell Potential Contour)

ที่มา: Elsener (2001)

วิธีการทดสอบด้วยวิธีการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์โดยทำเป็นเส้นตารางทุกช่วง 1.0 x 1.0 เมตร แล้วนำความต่างศักย์มาพล็อตแสดง เส้นชั้นค่าความต่างศักย์ (Potential Gradient) หรือที่เรียก Corrosion Mapping ซึ่งจะหมายถึงขอบเขตพื้นที่เหล็กเสริมเกิดการผุกร่อนเป็นสนิม โดยมาตรฐาน ASTM C876 กำหนดอัตราการความเสี่ยงที่จะเกิดสนิมไว้ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 อัตราความเสี่ยงที่จะเกิดสนิมตามแนวทาง ASTM C876

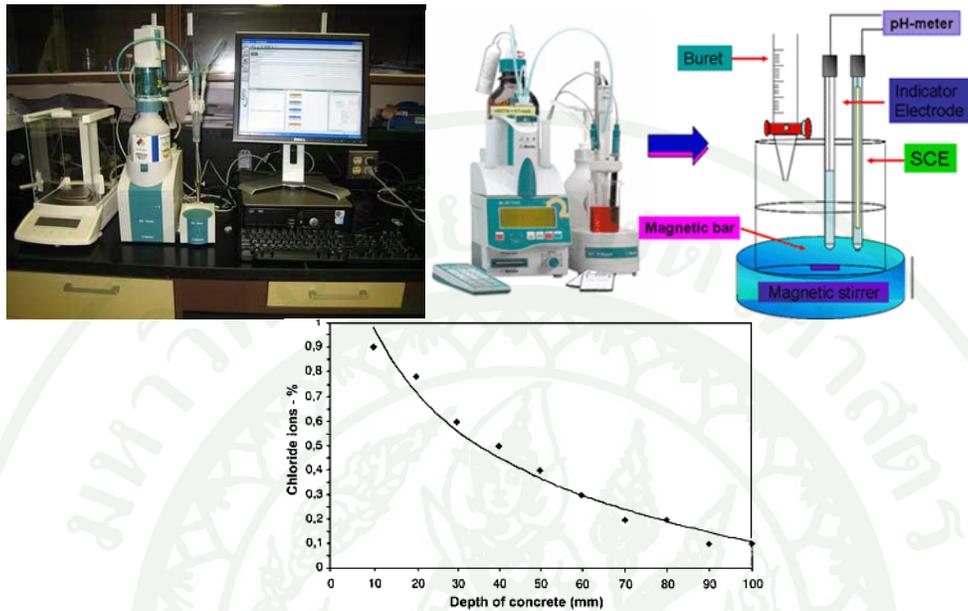
| ค่าความต่างศักย์ (Volt) | สภาพการผุกร่อนของเหล็กเสริม |
|-------------------------|---|
| น้อยกว่า -0.20 | ความเป็นไปได้ร้อยละ 90 ที่จะไม่เกิดสนิม |
| -0.20 ถึง -0.35 | ไม่แน่นอน |
| มากกว่า -0.35 | ความเป็นไปได้ร้อยละ 90 ที่เกิดสนิมแล้ว |

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

อย่างไรก็ตามการทดสอบด้วยวิธีนี้ไม่สามารถบอกอัตราการผุกร่อนหรือพื้นที่หน้าตัดที่เหลือน้อยของ เหล็กเสริม เป็นเทคนิคการทดสอบที่บอกแนวโน้มการผุกร่อนของเหล็กเสริมเท่านั้น นอกจากนี้ยังไม่สามารถ ตรวจสอบการผุกร่อนของลวดอัดแรง (Post Tension) และของที่เหล็กเสริมในกรณีที่ไม่ต่อเนื่องกัน

2. การหาปริมาณของคลอไรด์ (Chloride Content)

ปริมาณของคลอไรด์ เป็นส่วนที่สำคัญที่ทำให้เหล็กเสริมเกิดการผุกร่อนส่งผลให้เหล็กเสริมเป็นสนิม ถ้ามีปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตมากพอจนทำให้ Passivation Film ที่ทำหน้าที่ป้องกันการเป็นสนิมของเหล็กเสริมเสียหาย หรือถ้าเกิดการแทรกซึมของคลอไรด์จากน้ำทะเลจนถึงตำแหน่งของเหล็กเสริม จะส่งผลให้เหล็กเสริมเกิดสนิมอย่างรวดเร็ว การหาปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ทำได้โดยการใช้ส่วานเจาะคอนกรีตที่ระดับความลึกต่างๆและนำผงคอนกรีตที่ได้มาทดสอบหาปริมาณของคลอไรด์ไอออน และเขียนกราฟความสัมพันธ์ของปริมาณคลอไรด์ไอออนกับระดับความลึกต่างๆ ซึ่งจะทำให้สามารถประมาณระยะเวลาที่เหลือน้อยก่อนที่เหล็กเสริมจะเกิดสนิมได้ ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ไอออนในห้องปฏิบัติการและกราฟความสัมพันธ์ของปริมาณคลอไรด์เปรียบเทียบกับระดับความลึกต่างๆ

ที่มา: <http://www.caer.uky.edu/renewablefuels/lab.shtml>

การใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electro Chemical) ในการบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

วิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electro Chemical) เป็นวิธีการป้องกันการกัดกร่อนที่มีการใช้กันอย่างกว้างขวางเนื่องจากเป็นวิธีการที่สามารถประยุกต์ใช้กับโลหะและโลหะผสมทุกชนิดในทุกสภาพ (ศิริลักษณ์, 2545) การใช้งานโดยมีข้อแม้ว่าต้องสัมผัสอยู่กับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) และเมื่อใช้แล้วยังสามารถลดอัตราการกัดกร่อนได้จนมีค่าใกล้เคียงศูนย์หรือไม่เกิดการกัดกร่อนเลยได้นอกจากนั้นการทำงานของวิธีนี้ยังสามารถทำได้นานตลอดความต้องการ การควบคุมและการติดตามการทำงานอย่างสะดวกและง่ายโดยการให้โลหะเป้าหมายที่ต้องการการปกป้องชั่วหนึ่งชั่วใดในเซลล์เคมีไฟฟ้า ซึ่งมีวิธีการทำอยู่ 2 แบบคือ

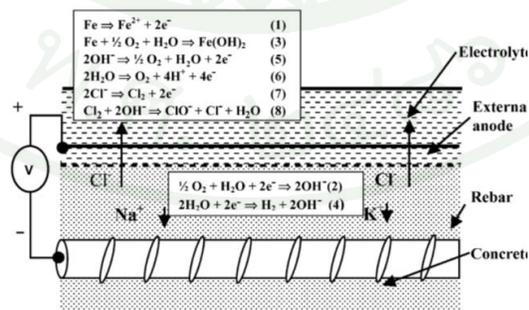
- แบบให้โลหะเป้าหมายเป็นขั้วลบ เรียกว่าการป้องกันแบบคาโทดิก (Cathodic Protection)

- แบบให้โลหะเป้าหมายเป็นขั้วบวก เรียกว่าการป้องกันแบบอโนดิก (Anodic Protection)

ซึ่งการประยุกต์ใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีในการป้องกันหรือซ่อมแซมการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตนั้นมีหลายวิธี เช่น **Electrodeposition, Cathodic Protection** หรือ **Electrochemical Chloride Removal** เป็นต้นซึ่งมีข้อมูลเกี่ยวกับการซ่อมแซมวิธีการดึงคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี ในต่างประเทศต่าง ๆ ดังนี้

การลดปริมาณคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

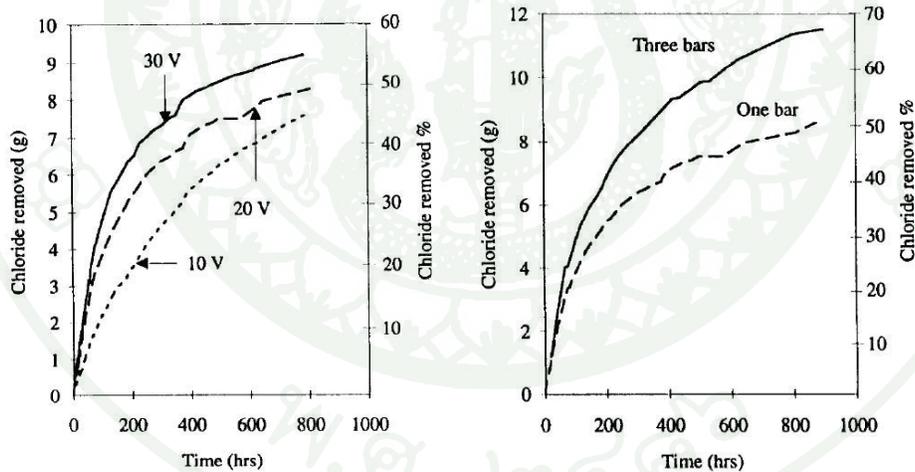
การลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (**Electrochemical Chloride Removal**) คือการเอาเฉพาะคลอไรด์ไอออนออกจากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งมีขั้วไฟฟ้าอยู่ในสารละลายซึ่งอยู่ภายนอกคอนกรีตและมีการเชื่อมต่อไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างขั้วไฟฟ้าและเหล็กเสริมภายในคอนกรีตมีการให้ไฟฟ้าตรงกับขั้วไฟฟ้าและเหล็กเสริมคอนกรีตโดยให้ขั้วไฟฟ้าภายนอกเป็นขั้วบวก (**Anode**) และเหล็กเสริมเป็นขั้วลบ (**Cathode**) จากการต่อระบบดังนี้ เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่สูงพอคลอไรด์ไอออนที่มีสภาพเป็นขั้วลบจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วบวกซึ่งอยู่ภายนอกมีผลทำให้ความหนาแน่นของคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตมีค่าลดลง ดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 แสดงขบวนการของวิธี Electrochemical Chloride Removal (ECR)

ที่มา: Miranda *et al.* (2005)

ความสามารถในการซ่อมแซมด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมียังขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างนั้นๆ ด้วย Arya. C. และ Sa'id-shawqi (1996) ได้เสนอการกำหนดลักษณะทางกายภาพเพื่อหาความสามารถในการดึงคลอไรด์ไอออนออกจากคอนกรีตตามลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างการทดลองโดยกำหนดให้มีจำนวนเหล็กเสริมที่ต่างกัน หรือระยะหุ้มคอนกรีตไม่เท่ากัน และในแต่ละตัวอย่างการทดลองก็จะมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบในขนาดต่างๆรวมทั้งขนาดของคลอไรด์ในส่วนผสมของคอนกรีตที่ไม่เท่ากันกันเพื่อหาเส้นอิทธิพลเพื่อที่จะนำมาเป็นข้อมูลเพื่อเป็นการตรวจสอบหรืออ้างอิง จากการศึกษาพบว่าเมื่อมีสื่อที่จะนำกระแสไฟฟ้าขั้วลบ มากขึ้นเท่าใดความสามารถในการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนจากคอนกรีตออกสู่สารละลายจะมากขึ้น โดยแปรผันตรงกันกับกระแสไฟฟ้าและจำนวนของสื่อในการนำกระแสไฟฟ้าไม่ว่าจะเป็นกรณีที่มีเหล็กเสริมในคอนกรีตมากกว่า 1 หรือ 2 เส้นในการทดลองอื่นๆ หรือเมื่อเทียบกับการปล่อยกระแสไฟฟ้าที่ 10 V, 20 V, และ 30 V. ตามลำดับดังแสดงในภาพที่ 8 จะเห็นได้ว่าคลอไรด์ไอออนจากคอนกรีตออกสู่สารละลายได้มากขึ้นตามปริมาณของกระแสไฟฟ้าและสื่อที่เป็นขั้วลบ

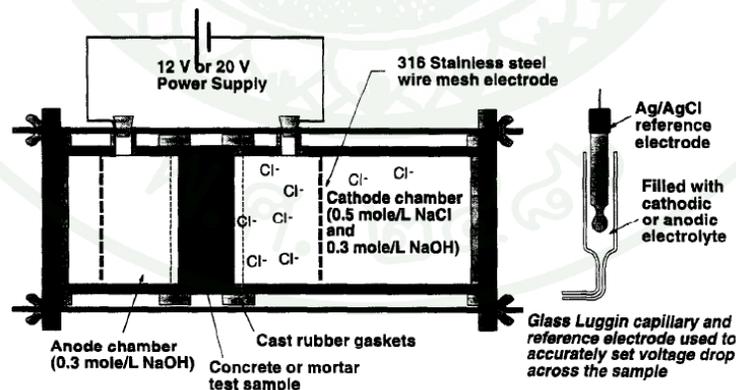


ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่จ่ายในระบบกับปริมาณคลอไรด์ ที่ออกจากตัวอย่างในการทดลองและความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสื่อที่เป็นขั้วลบกับปริมาณคลอไรด์ที่ออกจากตัวอย่างการทดลอง

ที่มา: Arya and Sa'id-shawqi (1996)

จากภาพที่ 8 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ความต่างศักย์สูงหรือมีพื้นที่ในการนำไฟฟ้ามากขึ้นเท่าใดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความสามารถในการดึงคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งต่อมาในปี 1996 Rob B. Polder ยังได้รายงานผลการศึกษานอกห้องทดลองที่ใช้หินตัวอย่างที่แช่ในทะเลนานถึง 16 ปี (บริเวณ North Sea 1796-1992) เพื่อให้คลอไรด์ในน้ำทะเลธรรมชาติแทรกซึมเข้าไปในแท่งตัวอย่างการทดลองขนาด 50 ซม. x 100 ซม. x 100 ซม. แล้วนำมาเข้ากระบวนการดึงคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และน้ำประปาเป็นอิเล็กโทรไลต์เป็นเวลา 39 วันด้วยการจ่ายกระแสไฟฟ้า 1 และ 4 A/m.² ในเบื้องต้นสามารถดึงคลอไรด์ไอออนออกจากเนื้อคอนกรีตได้ถึงร้อยละ 40-70 สำหรับตัวอย่างที่มีน้ำประปาเป็นอิเล็กโทรไลต์ และร้อยละ 70-90 สำหรับสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิ่มตัวเป็นอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งรายงานผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับ Arya. C. และ Sa'id-shawqi (1996) เนื่องจากปริมาณกระแสไฟฟ้าที่มากกว่าคือขนาด 4 A/m.² สามารถดึงปริมาณคลอไรด์จากคอนกรีตมาสะสมอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์มากกว่าขนาด 1 A/m.²

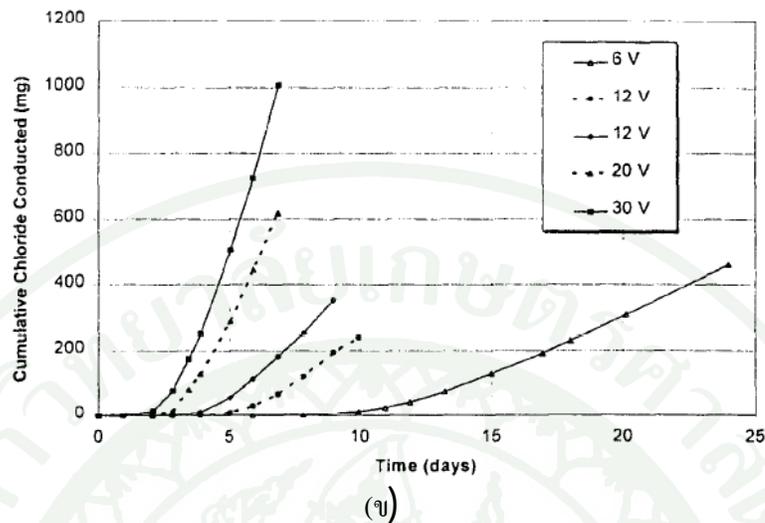
โดยในปีเดียวกัน McGrath and Hooton (1996) ได้ทำการทดสอบ Chloride Migration Test โดยใช้คอนกรีตที่มีปฏิกิริยาส่วนผสมเดียวกันทุกตัวอย่างการทดลองและทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาดต่างๆกัน ในการทดลองและทำการวัดปริมาณคลอไรด์ที่เกิดขึ้นผ่านคอนกรีตมาสะสมอยู่ในสารละลายประจุบวก (Anolyte) ในการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 9 (ก)



(ก)

ภาพที่ 9 (ก) แสดงการทดสอบ Chloride Migration Test

(ข) ปริมาณคลอไรด์ที่ออกจากคอนกรีตมาสะสมอยู่ในสารละลายของการทดสอบ Chloride Migration Test



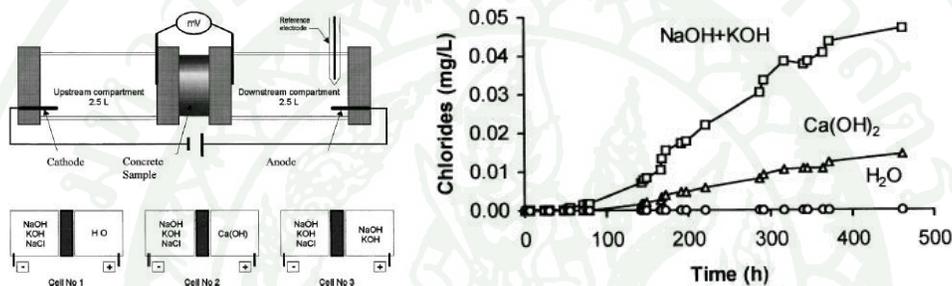
ภาพที่ 9 (ต่อ)

ที่มา: McGrath and Hooton (1996)

จากภาพที่ 9 (ข) สามารถอธิบายได้ว่าความสามารถในการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนผ่านคอนกรีตนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสไฟฟ้า โดยขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองในครั้งนี้คือ 6, 12, 20 และ 30 โวลต์ซึ่งความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนผ่านคอนกรีตเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปในการทดลองเนื่องจากการผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากระแสไฟฟ้าขนาด 30 โวลต์สามารถดึงคลอไรด์มาสะสมอยู่ในสารละลายที่มีประจุบวกได้มากกว่าขนาดกระแสไฟฟ้าขนาด 5 โวลต์ กล่าวคือในวันที่ 4 ของการทดสอบคลอไรด์สามารถเดินทางผ่านคอนกรีตมาสะสมอยู่ในสารละลายที่มีประจุบวกของตัวอย่างที่ใช้กระแสไฟฟ้าขนาด 30 โวลต์และในวันที่ 7 ของการทดลองตัวอย่างที่ใช้กระแสไฟฟ้า 30 โวลต์สามารถดึงคลอไรด์ได้มากถึง 1000 มิลลิกรัม ในขณะที่ตัวอย่างที่ใช้กระแสไฟฟ้า 6 โวลต์ต้องใช้ระยะเวลาในการทำให้คลอไรด์เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตมากกว่า 10 วันเพื่อที่จะทำให้คลอไรด์เดินทางผ่านคอนกรีตมาสะสมอยู่ในสารละลายที่มีประจุบวก

การทดสอบ Chloride Migration Test นั้นปัจจัยจากสารละลายที่ใช้ในการทดสอบ Chloride Migration Test ยังมีผลต่อการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ซึ่ง W. Prince และ R. Gagne (2000) ได้รายงานผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตด้วยวิธี Chloride Migration Test ของคอนกรีตที่ใช้ปฏิกิริยาส่วนผสมเดียวกัน โดยใช้สารละลายที่มีศักย์ไฟฟ้าขั้วบวกบวก 3 ชนิดและ

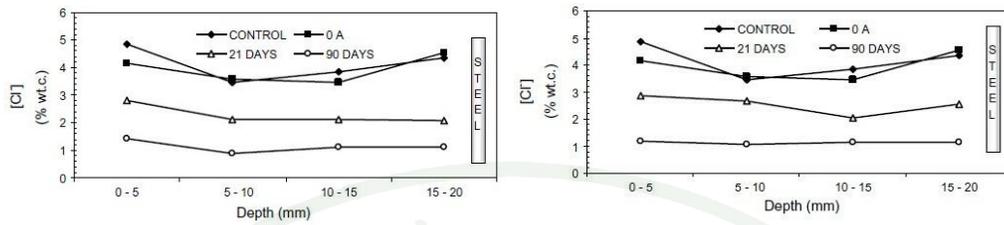
ใช้กระแสไฟฟ้าในการทดสอบขนาด 12 โวลต์ในทุกตัวอย่างโดยผลการทดลองพบว่าผลกระทบของสารละลายมีผลต่อการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตดังแสดงในภาพที่ 10 โดยในรายงานผลการทดลองได้รายงานผลว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นการจำลองสารละลายในช่องว่างของคอนกรีตสามารถดึงปริมาณคลอไรด์ไอออนมาสะสมอยู่ในสารละลายได้มากกว่าสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์และการใช้น้ำเป็นสารละลาย



ภาพที่ 10 แสดงอิทธิพลของสารละลายที่ใช้ในการทดสอบ Chloride Migration Test

ที่มา: Prince and Gagne (2000)

Fajardo *et al.* (2004) ได้เสนองานวิจัยเรื่อง Electrochemical Chloride Extraction (ECE) from Steel-Reinforced Concrete Specimens Contaminated by "Artificial" Sea-Water โดยทำการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตขนาด 5 ซม. และ 11 ซม. และนำไปแช่ในสภาวะน้ำทะเลเทียมโดยมีองค์ประกอบทางเคมีซึ่งเป็นการจำลองคุณสมบัติให้เหมือนน้ำทะเลในมหาสมุทรแอตแลนติก โดยนำไปแช่อยู่ในน้ำทะเลเทียมเป็นเวลา 3 วัน และนำมาอบในตู้อบอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 วันซึ่งเป็นการเร่งการซึมผ่านของคลอไรด์ให้เข้าสู่ตัวอย่างในการทดลองในสภาวะเปียกสลับแห้งตลอดระยะเวลาในการทดลอง 300 วันและทำการหาปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการลดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีระหว่างเปลี่ยนสารละลายในระหว่างการทดลองและไม่เปลี่ยนสารละลายดังแสดงในภาพที่ 11

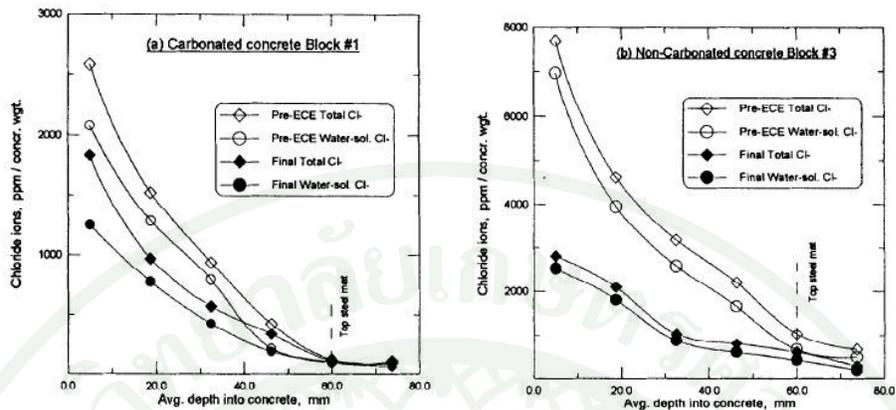


ภาพที่ 11 ปริมาณคลอไรด์ที่สะสมอยู่ในคอนกรีตก่อนและหลังขบวนการทางไฟฟ้าเคมีระหว่างการเปลี่ยนสารละลายใหม่และไม่เปลี่ยนสารละลาย

ที่มา: Fajardo *et al.* (2004)

ภาพที่ 11 แสดงประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีที่อยู่ภายในคอนกรีตที่ใช้ในการทดลอง โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ไอออนระหว่างการเปลี่ยนสารละลายในการทดลองทุก 2 วันจะเห็นได้ว่าระหว่างการเปลี่ยนสารละลายและไม่ได้เปลี่ยนสารละลาย ประสิทธิภาพของการดึงคลอไรด์ในคอนกรีตไม่ได้น้อยลง แต่ที่ผลลัพธ์ที่ส่งผลกระทบต่อ การดึงคลอไรด์นั้นคือระยะเวลาในการทำการจ่ายกระแสไฟฟ้า มีประสิทธิภาพไปในทางเดียวกัน กล่าวคือ การทำการดึงคลอไรด์ที่ระยะเวลา 90 วันสามารถดึงคลอไรด์ที่อยู่ในคอนกรีตมากกว่าการทดลองที่ 21 วันในทุกๆระยะความลึกต่างๆ

ยังมีนักวิจัยที่ศึกษาผลกระทบต่อ การดึงคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี โดย N.M. Ihekwa *et al.* ในปี 1996 พบว่าการดึงคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีจากคอนกรีตที่ได้รับผลกระทบจากคาร์บอนเนชั่นจะลดประสิทธิภาพลดลง โดยได้ทำการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตเป็น 2 กลุ่มคือกลุ่มที่คอนกรีตมีสภาพคาร์บอนเนชั่น โดยนำไปบ่มในตู้อบคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเวลา 6 เดือนหลังจากนั้นนำตัวอย่างที่ผ่านการเข้าตู้อบคาร์บอนไดออกไซด์และคอนกรีตที่ไม่มีสภาพคาร์บอนเนชั่นมาทำการแช่อยู่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์อิ่มตัว (Saturated NaCl) เป็นเวลา 18 เดือนจากนั้นทำการหาปริมาณคลอไรด์ก่อนทำการดึงคลอไรด์ไอออนจากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีดังแสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังการดึงคลอไรด์จากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีระหว่างคอนกรีตที่มีสภาพคาร์บอนเนชั่นและคอนกรีตปกติ

ที่มา: Ihekwa *et al.* (1996)

ภาพที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณก่อนและหลังการดึงคลอไรด์จากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีระหว่างคอนกรีตที่มีสภาพคาร์บอนเนชั่นและคอนกรีตปกติจะเห็นได้ว่าคอนกรีตที่มีสภาพคาร์บอนเนชั่นนั้นส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยสามารถลดปริมาณคลอไรด์ได้น้อยกว่าคอนกรีตที่ไม่มีสภาพคาร์บอนเนชั่น โดยคอนกรีตที่มีสภาพคาร์บอนเนชั่นสามารถลดปริมาณคลอไรด์จากปริมาณคลอไรด์เริ่มต้นประมาณ 2600 ppm. ต่อน้ำหนักคอนกรีตเหลือประมาณ 1800 ppm. ต่อน้ำหนักคอนกรีตส่วนคอนกรีตที่ไม่มีสภาพคาร์บอนเนชั่นสามารถลดปริมาณคลอไรด์จากปริมาณคลอไรด์เริ่มต้นประมาณ 7800 ppm. ต่อน้ำหนักคอนกรีตเหลือประมาณ 2900 ppm. ต่อน้ำหนักคอนกรีต

และ N.M. Ihekwa *et al.* ได้ทำการเปรียบเทียบศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์โดยพบว่าคอนกรีตที่ผ่านกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีของทั้ง 2 กลุ่มตัวอย่างมีค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์น้อยลงในทุกตัวอย่าง การทดลองโดยค่าศักย์ไฟฟ้าที่ทำการเปรียบเทียบก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งการลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของตัวอย่างในการทดลองสอดคล้องกับ Rob B. Polder ในปีเดียวกัน

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี

| Block no. | Corrosion Potential mV (vs Copper Sulphate Electrode) | |
|-----------|--|-------------|
| | Pre-ECR | Post-ECR |
| 1 | -341 / -180 | -255 / -148 |
| 2 | -376 / -288 | -293 / -247 |
| 3 | -293 / -103 | -205 / -48 |
| 4 | -290 / -86 | -205 / -50 |

ที่มา: Ihekwaba *et al.* (1996)

การประยุกต์ใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

การประยุกต์ใช้วิธีการดึงคลอไรด์ที่ปนเปื้อนอยู่ในคอนกรีตเสริมเหล็กภายในประเทศยังมีไม่มากนักแต่ในประเทศอเมริกาโดยมีรายงานฉบับสมบูรณ์ของ Virginia Transportation Research Council ได้นำวิธีทางไฟฟ้าเคมีเพื่อลดปริมาณคลอไรด์ที่ปนเปื้อนอยู่ในคอนกรีตของโครงสร้างพื้นฐานของประเทศอเมริกาเช่น โครงสร้างสะพาน 34th Street Bridge Over I-365 ในปี 2000 ภายใต้การดูแลของ Gerodo G. Clemena และ Donald R. Jackson ที่ทำการลดปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างสะพานดังกล่าวด้วยวิธี Electrochemical Chloride Extraction ดังแสดงในภาพที่ 13

โครงสร้างสะพาน I-365 เป็นสะพานที่มีอายุการใช้งาน 28 ปีโดยพบว่าวิธีการดังกล่าวสามารถลดปริมาณคลอไรด์จากปริมาณคลอไรด์ที่ปนเปื้อนอยู่ภายในคอนกรีตเริ่มต้นได้ร้อยละ 41 ถึงร้อยละ 80 และยังพบว่าโอกาสในการเป็นสนิมของเหล็กเสริมโดยใช้วิธีวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ในการประเมินค่าดังกล่าวพบว่าไม่พบโอกาสการในการเป็นสนิมของเหล็กเสริมเหลืออีกเลยหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี



ภาพที่ 13 แสดงการประยุกต์ใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีในการลดปริมาณคอลลอยด์ในคอนกรีต

ที่มา: Gerodo and Donald, 2000

ภาพที่ 13 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ในการลดปริมาณคอลลอยด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีของ สะพาน I-365 ซึ่งสามารถลดปริมาณคอลลอยด์ได้เป็นที่น่าพอใจ โดยรายละเอียดของการติดตั้งและประสิทธิภาพในการลดปริมาณคอลลอยด์ใน โครงสร้างสะพาน I-365 ได้แสดงไว้ใน ภาคผนวก จ

การประยุกต์ใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีในการลดปริมาณคอลลอยด์ที่ปนเปื้อนอยู่ใน โครงสร้างคอนกรีตเสริมที่อยู่ในสภาพที่มีการเปิดการใช้งาน โครงสร้างแล้วภายในประเทศยังมีไม่มากนักเนื่องจากเป็นวิธีที่ยังไม่เป็นที่นิยมภายในประเทศ แต่ในต่างประเทศได้มีการใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีเพื่อลดปริมาณคอลลอยด์ที่อยู่ในคอนกรีต โดยในปี 2002 โดย Stephen R. Sharp *et al.* ได้รวบรวม การใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีเพื่อลดปริมาณคอลลอยด์ในทวีปอเมริกาเหนือ ซึ่งได้รวบรวมโครงสร้างที่ใช้ วิธีทางไฟฟ้าเคมีเพื่อลดปริมาณคอลลอยด์ในคอนกรีตในส่วนของคุณภาพของการลดปริมาณ คอลลอยด์ในคอนกรีตและการลดลงของโอกาสการเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตหลัง กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้วิธีวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ในการประเมิน โอกาสการเป็น สนิมของเหล็กเสริมดังแสดงในตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4 การใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีเพื่อลดปริมาณคลอไรด์ในทวีปอเมริกาเหนือ

| Location | Date | Area of Treatment (m ²) | Chloride Removed (%) |
|--|------|-------------------------------------|---|
| Hwy #192 Bridge Substructure, Council Bluffs, Iowa | 2000 | 1209 | N/A |
| Highway 11 Bridge Abutments, North Bay, Ontario | 2000 | 646 | N/A |
| Eastern Avenue Bridge #576 Abutments, Washington DC | 2000 | 220 | N/A |
| 3rd St. Viaduct, Bridge Substructure, Minot, North Dakota | 1999 | 100 | N/A |
| St. Adolphe Bridge Deck, St. Adolphe, Manitoba | 1999 | 14704 | N/A |
| S02 of 38061 Substructure, Jackson County, Michigan | 1999 | 109 | N/A |
| I-480 Bridge Substructure, Omaha, Nebraska | 1999 | 1400 | N/A |
| Burlington Skyway Substructure, Burlington, Ontario | 1999 | 1533 | N/A |
| Hwy #192 Bridge Substructure, Council Bluffs, Iowa | 1998 | 463 | N/A |
| I-480 Bridge Substructure, Omaha, Nebraska | 1998 | 1525 | 74 (at 0-25 mm.) 63 (at 50-75 mm.) |
| St. Adolphe Bridge Deck, St. Adolphe, Manitoba | 1998 | 1115 | N/A |
| Pembina Highway Overpass Structure, Winnipeg, Manitoba | 1998 | 220 | N/A |
| Industrial Spur Bridge Substructure, Peoria, Illinois | 1998 | 462 | N/A |
| Starbuck Bridge Deck, Winnipeg, Manitoba | 1997 | 270 | N/A |
| I-395 & Dunwoody Substructure, Minneapolis, Minnesota | 1997 | 225 | N/A |
| Carousel Center Parking Deck, Syracuse, New York | 1997 | 100 | N/A |
| Islington Ave. Bridge Interceptor Chambers, Toronto, Ontario | 1997 | 180 | N/A |
| Burlington Skyway Substructure, Burlington, Ontario | 1997 | 268 | N/A |
| Tulls Highway Overpass Deck, Seaford, Delaware | 1997 | 1550 | N/A |
| Hwy #6 & #11 Overpass Piers, Regina, Saskatchewan | 1995 | 180 | Up to 80 |
| 5th Street & I-64 Substructure, Charlottesville, Virginia | 1995 | 488 | 26-60 (at 6-19 mm.) 15-33 (at 25-38 mm.) |
| Hwy #1 & #6 Overpass Piers, Regina, Saskatchewan | 1995 | 370 | N/A |
| Hwy #2 Overpass Piers, Morinville, Alberta | 1995 | 55 | 62-96 |
| 34th Street & I-395 Bridge Deck, Arlington, Virginia | 1995 | 733 | 76-82 (at 6-19 mm.) 32-72 (at 19-32 mm.) |

ตารางที่ 4 (ต่อ)

| Location | Date | Area of Treatment (m ²) | Chloride Removed (%) |
|--|------|-------------------------------------|--|
| Hwy #11 & #16 Overpass Piers, Saskatoon, Saskatchewan | 1994 | 150 | 62-88 |
| Pier Columns, SHRP, USA | 1992 | 49 | N/A |
| Abutment Area, SHRP, USA | 1992 | 17 | N/A |
| Deck Area, SHRP, USA | 1991 | 136 | 60 (25 mm from bar) |
| Portage Avenue & Rt. 90 Retaining Wall, Winnipeg, Manitoba | 1991 | N/A | 20-76 |
| Burlington Skyway Pier, Burlington, Ontario | 1989 | 31 | 27 (East face) 59-60 (West Face) 57 (South Face) |
| U.S. Route No.33 Bridge Deck. (ODOT No. UNI-33.1138-R) Marysville, Ohio | 1975 | 18 | 31 in 12 hr (at 0-25 mm.) 51 in 24 hr (at 0-25 mm.) |

N/A = Not Available

ที่มา: Stephen *et al.* (2002)

ตารางที่ 5 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ก่อนและหลังกระบวนการวิธีทางไฟฟ้าเคมีเพื่อลดปริมาณคลอไรด์ในทวีปอเมริกาเหนือ

| ECE Date | Location | Test Date | Half Cell, mV (vs. Cu/CuSO ₄) |
|----------|---|-----------|---|
| 1989 | Burlington Skyway Pier, Burlington, Ontario | | 0% > -200 |
| | | Untreated | 96% between -200 and -350 4% < -350 |
| | | | 96% > -200 |
| | | Treated | 4% between -200 and -350 0% < -350 |

ตารางที่ 5 (ต่อ)

| ECE Date | Location | Test Date | Half Cell, mV (vs. Cu/CuSO ₄) |
|----------|--|-----------|---|
| 1991 | Portage Avenue & Rt. 90 Underpass Retaining Wall, Winnipeg, Manitoba | Untreated | 84% < -350 |
| | | Treated | 100% > -280 |
| 1995 | Hwy #6 & #11 Overpass Piers, Regina, Saskatchewan | Untreated | 49% > -200 |
| | | | 27% between -200 and -350 |
| | | Treated | 24% < -350 |
| | | | 99% > -200 |
| 1997 | Starbuck Bridge Deck, Traffic Bearing System, Winnipeg, Manitoba | Untreated | 6% > -200 |
| | | | 75% between -200 and -350 |
| | | Treated | 19% < -350 |
| | | | 96% > -200 |
| | | | 4% between -200 and -350 |
| | | | 0% < -350 |

ที่มา: Stephen *et al.* (2002)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องผสมคอนกรีตขนาดผสม 140-150 ลิตร
2. เครื่องจี้คอนกรีต (Vibrator)
3. อุปกรณ์วัดค่าการยุบตัว (Slump test)
4. แบบหล่อแท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอก ขนาด 10×20 เซนติเมตร
5. แบบหล่อแท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอก ขนาด 15×30 เซนติเมตร
6. แบบหล่อแท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอก ขนาด $30 \times 30 \times 10$ เซนติเมตร
7. แบบหล่อแท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอก ขนาด $75 \times 75 \times 75$ เซนติเมตร
8. ถังสำหรับแช่ตัวอย่าง ขนาด 120×150 เซนติเมตร
9. เครื่องชั่งน้ำหนัก สามารถอ่านค่าได้ละเอียด 0.01 กรัม
10. เครื่องทดสอบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-cell potential test)
11. เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้ากระแสตรงและสายไฟฟ้า
12. เครื่องวัดค่าศักย์ไฟฟ้า
13. สารเคมีสำหรับเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (รายละเอียดแสดงในส่วนถัดไป)

14. สารเคมีสำหรับการไทเทรตหาปริมาณคลอไรด์ (รายละเอียดแสดงในส่วนถัดไป)
15. ชุดเครื่องมือเก็บตัวอย่างผงคอนกรีต เช่น สว่านเจาะคอนกรีต แปรงปิดฝุ่น เป็นต้น
16. อุปกรณ์สำหรับเตรียมสารละลาย
17. เครื่องหาปริมาณคลอไรด์อัตโนมัติในสารละลาย (Metrohm 781 pH/Ion Meter)
18. อะคลีติก, ซิลิโคน และแผ่นสแตนเลสสตีลสำหรับการติดตั้งสารละลายบนตัวอย่าง

วิธีการ

1. วัสดุและปฏิกิริยาส่วนผสมคอนกรีต

1.1 วัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีต

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราช้างของบริษัทปูนซีเมนต์ไทยจำกัด
- วัสดุมวลรวมหยาบ ไซ้ หินปูนย่อย (Crushed limestone) ขนาดใหญ่สุด 3/8 นิ้ว
- มวลรวมละเอียด ทรายแม่น้ำร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (SSD)
- เหล็กผิวเรียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม. และ 9 มม.

1.2 ปฏิกิริยาส่วนผสมคอนกรีต

ในการศึกษาในครั้งนี้ได้กำหนดคอนกรีตให้มีกำลังรับแรงอัด 320 กก./ซม.^2 โดยออกแบบตามมาตรฐาน ACI มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และค่าการยุบตัวเท่ากับ 8 ซม. โดยมีปฏิกิริยาส่วนผสมคอนกรีตและคุณสมบัติของเหล็กเสริมที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้แสดงในตารางที่ 6-7

ตารางที่ 6 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต (w/c = 0.45)

| วัสดุในการผสมคอนกรีต | ปริมาณน้ำหนัก (กก./ลบ.ม.) |
|---------------------------------|---------------------------|
| ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 | 444 |
| มวลรวมหยาบ | 992 |
| มวลรวมละเอียด | 719 |
| น้ำ | 200 |
| สารละลายโซเดียมคลอไรด์ | 22 |

ตารางที่ 7 คุณสมบัติเหล็กเสริมคอนกรีต

| Diameter (mm.) | Cross section area (mm. ²) | Yielding strength (kg./cm. ²) | Ultimate strength (kg./cm. ²) |
|-------------------|---|--|--|
| RB6 | 28.3 | 2400 | 3900 |
| RB9 | 63.6 | 2400 | 3900 |

2. การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก

2.1 ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 30 x 30 x 10 ซม.

จัดทำตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก ขนาด 30 x 30 x 10 ซม. จำนวน 9 ตัวอย่าง โดยมี ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตดังแสดงในตารางที่ 6 และน้ำที่ใช้ในการเตรียมคอนกรีตเป็นน้ำประปา โดยใช้เหล็กเสริมชนิด SR24 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม. ผูกเป็น ตะแกรงโดยทำการตัดเหล็กให้งอขึ้นมาด้านบนเพื่อทำเป็นสื่อนำไฟฟ้าและผสมโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ในอัตราส่วนร้อยละ 5 ต่อน้ำหนักซีเมนต์โดยใช้เครื่องผสมคอนกรีตในการเตรียม คอนกรีตและทำการทดสอบค่ายุบตัวด้วยอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัว (Slump test)

โดยในการศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการผสมผสมโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ในอัตราร้อยละ 5 ต่อน้ำหนักซีเมนต์เพื่อแทนการแช่ตัวอย่างในสารละลายเนื่องจากความจำกัดด้านเวลาในการซึม ผ่านของคลอไรด์เนื่องจากต้องการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารละลายและขนาดของ

กระแสไฟที่ต่างกันในการวิจัยครั้งนี้ โดยวิธีดังกล่าวเป็นที่ยอมรับได้ในงานวิจัยของต่างประเทศ (C. Arya et al., 1996) โดยทำการบ่มตัวอย่างในน้ำประปาเป็นเวลา 28 วัน และนำขึ้นมาทำเครื่องหมาย แสดงตำแหน่งตามตำแหน่งของจุดต่อเหล็กเสริมและเจาะนำผงคอนกรีตที่ระยะ 1,2,3 และ 4 ซม. จากด้านบนของตัวอย่างในการทดลองเพื่อนำมาแช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2.2 ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 70 x 70 x 7.5 ซม.

จัดทำตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก ขนาด 70 x 70 x 7.5 ซม. จำนวน 3 ตัวอย่าง โดยใช้เหล็กเสริมชนิด SR24 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม. ผูกเป็นตะแกรงโดยมีระยะห่างเหล็กเสริม เท่ากับ 15 ซม. มีระยะหุ้มเหล็กเสริมเท่ากับ 3 ซม. โดยใช้ปฏิภาคส่วนผสมเดียวกันกับตัวอย่าง คอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 30 x 30 x 10 ซม. โดยทำการการระบุตำแหน่งการเจาะผงคอนกรีตเพื่อทำ การเจาะผงคอนกรีตซึ่งกำหนดให้มีระยะห่างเท่ากับ 15 ซม. และทำการเจาะเอาผงคอนกรีตจาก ด้านบนซึ่งเป็นด้านเหนือเหล็กเสริมคอนกรีตที่ระยะ 1,2 และ 3 ซม. ซึ่งเป็นตำแหน่งของเหล็กเสริม เพื่อนำมาหาปริมาณคลอไรด์อิสระที่อยู่ภายในคอนกรีตเพื่อนำมาเป็นข้อมูลเปรียบเทียบปริมาณ คลอไรด์ก่อนและหลังในการดึงคลอไรด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยเมื่อได้ผงคอนกรีตที่ได้จาก การเจาะนำมาชั่งน้ำหนักและทำการแช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและทำการกรองด้วยกระดาษ กรองโดยใช้เครื่องดูดสุญญากาศในการกรองผงคอนกรีตเพื่อเตรียมทำการไทเทรต (Titration) หา ปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free Chloride) จากนั้นทำการอุดรูที่ทำการเจาะแล้วด้วยปูนฉาบซ่อมแซม ทั่วไป

3. การเตรียมสารละลายในการทดลอง

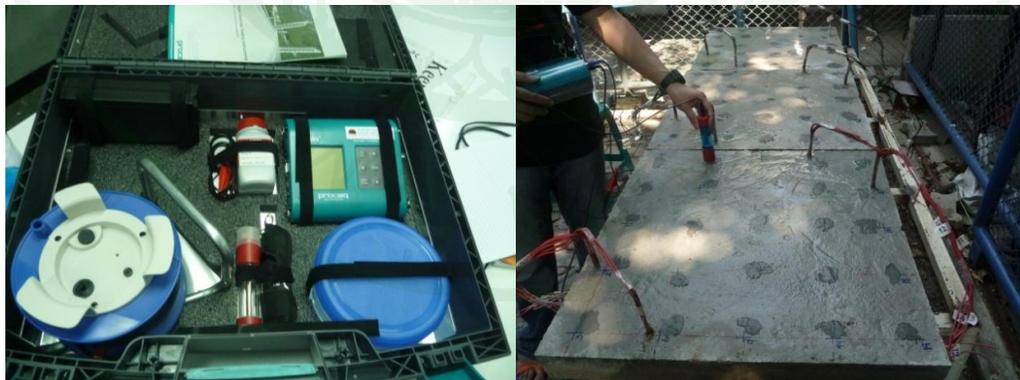
ทำการเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพื่อนำมาเป็นสื่อในการนำไฟฟ้าในการดึงคลอไรด์ ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยในการศึกษานี้ได้ใช้สารละลายจำนวน 3 ชนิดซึ่งเป็นสารละลาย ต่างแก่ที่หาได้ทั่วไปเพื่อให้ง่ายต่อการใช้งานคือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2), โซเดียม ไฮดรอกไซด์ (NaOH), และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์, (KOH) โดยทำการเตรียมสารละลาย ดังกล่าวกับน้ำกลั่นตามความเข้มข้นดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการดิ่งคลอไรด์ไอออน

| ชนิดของสารละลาย | ความเข้มข้น |
|--|-------------|
| สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ | Saturated |
| สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์, (NaOH) | 0.1 molar |
| สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์, (KOH) | 0.1 molar |

4. การวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

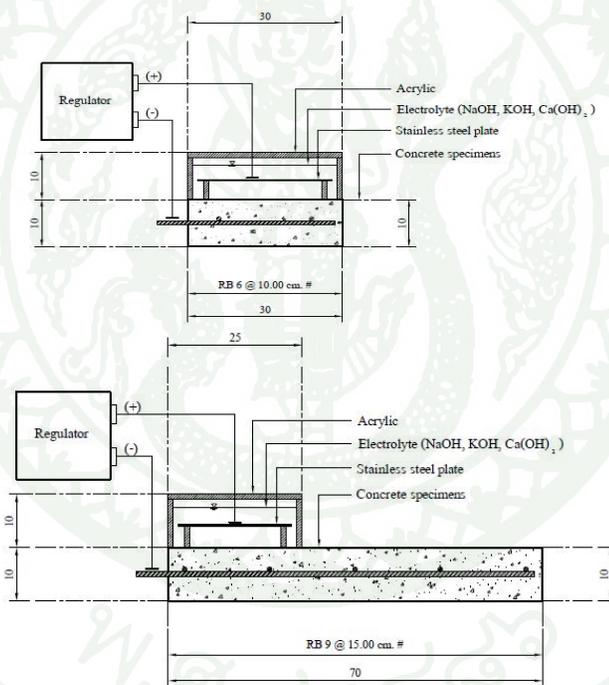
ทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-Cell Potential) เพื่อประเมินโอกาสในการเป็นสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM-C876 ก่อนและหลังกระบวนการดิ่งคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีเพื่อบันทึกเป็นข้อมูลเพื่อเปรียบเทียบโอกาสในการเป็นสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตก่อนและหลังการดิ่งคลอไรด์ไอออนออกจากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์การกัดกร่อน (Corrosion Analyzing Instrument) ในการทดสอบหาค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ดังแสดงในภาพที่ 14 และทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์โดยใช้ระยะห่างเท่ากับที่ทำกรเจาะเอาผงคอนกรีตคือ 15 ซม



ภาพที่ 14 เครื่องมือวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

5. การต่อวงจรไฟฟ้าเพื่อดึงคลอไรด์ไอออนในการดึงคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

ทำการขังสารละลายไว้ด้านบนตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กและต่อวงจรไฟฟ้าเพื่อทำการดึงคลอไรด์ไอออนด้วยในคอนกรีต โดยทำการต่อกระแสไฟฟ้าขั้วลบเข้ากับเหล็กเสริมคอนกรีตและต่อกระแสไฟฟ้าขั้วบวกเข้ากับแผ่นสแตนเลสที่จมอยู่ในสารละลายเพื่อเป็นสื่อนำไฟฟ้าในการดึงคลอไรด์ไอออนที่สะสมอยู่ในคอนกรีตเข้าสู่สารละลายภายนอกของตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด $30 \times 30 \times 10$ ซม. และขนาด $70 \times 70 \times 7.5$ ซม. โดยใช้เครื่องแปลงไฟฟ้ากระแสตรงดังแสดงในภาพที่ 15



ภาพที่ 15 ภาพการต่อวงจรไฟฟ้าและขังสารละลายเพื่อดึงคลอไรด์จากตัวอย่างคอนกรีตขนาด $30 \times 30 \times 10$ ซม. และ $70 \times 70 \times 7.5$ ซม.

6. การทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนด้วยไฟฟ้า (Chloride Migration Test)

ทำการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้วจำนวน 3 ตัวอย่าง โดยใช้ปฏิภาคส่วนผสมเดียวกันกับข้างต้นและทำการบ่มคอนกรีตเป็นเวลา 28 วันหลังจากนั้นทำการตัดคอนกรีตด้วยเครื่องตัดคอนกรีตเพื่อทำการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนด้วยไฟฟ้าโดยวิธี Chloride Migration Test โดยใช้สมการของ Nernst planck ดังแสดงในสมการที่ 5 (Modified Fick's second law) จากมาตรฐาน JSCE -G571-2003 เพื่อยืนยันผลการทดลองการเคลื่อนที่ของคลอไรด์โดยนำคอนกรีตที่ทำการตัดมาเคลือบอีพ็อกซีที่ด้านข้าง ทำการแช่น้ำกลั่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมงจากนั้นทำการจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าขนาด 15 โวลต์ดังแสดงในภาพที่ 16 และทำการวัดปริมาณคลอไรด์ไอออนที่อยู่ในสารละลายทุกวันด้วยเครื่อง Chloride Analyzer

$$J_{Cl} = D_e \frac{z_{cl} F C_{cl} (\Delta E - \Delta E_c)}{RTl} \quad (5)$$

เมื่อ J_{Cl} = Flux of Chloride Ions in Steady State (mol/(cm² year))

D_e = Effective Diffusion Coefficient (cm²/year)

R = Gas Constant (8.31 J/(mol K))

Z_{Cl} = Charge of Chloride ion (=1)

F = Faraday Constant (96,500 C/mol)

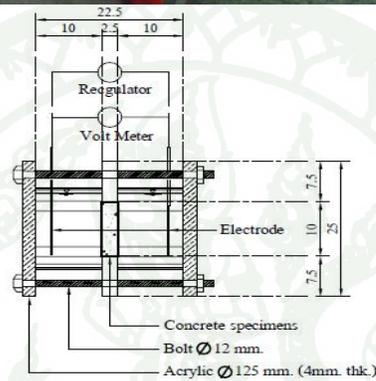
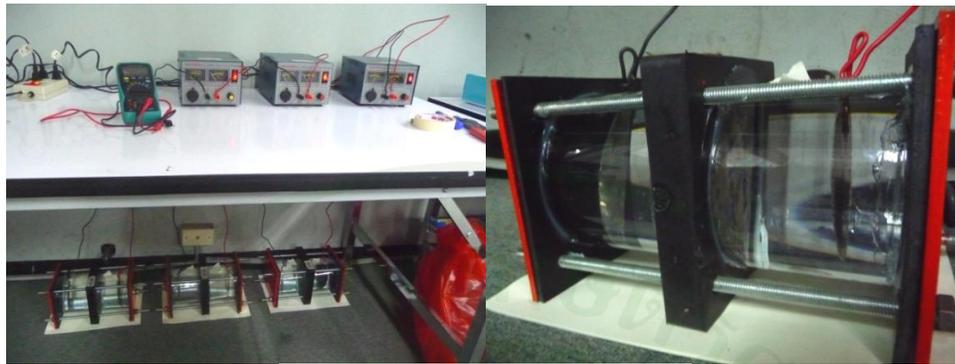
C_{Cl} = Chloride Ion Concentration (mol/l)

$\Delta E - \Delta E_c$ = Potential Gradient (V)

l = Length (mm.)

T = Time

โดยนำผลการทดสอบ Chloride Migration Test ในส่วนของอัตราการไหล (Flux, J_{Cl}) ของคลอไรด์ไอออนและสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Diffusion Coefficient, D_e) ของคอนกรีตในการทดสอบมาเป็นข้อมูลในการทำนายการลดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ



ภาพที่ 16 ภาพตัวอย่างการทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนด้วยไฟฟ้า
(Chloride Migration Test)

7. การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในผงคอนกรีต

7.1 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในผงคอนกรีตด้วยวิธี Argentometric หรือ Mohr Method

7.1.1 นำน้ำปูนตัวอย่าง (ผงปูน 4-5 กรัมแช่ทิ้งไว้ในน้ำกลั่น 75 มิลลิลิตร เป็นเวลา 1 วัน) มากรองด้วยกระดาษกรองลงในขวดรูปกรวยขนาด 250 มิลลิลิตรและวัดปริมาตรของสารละลายที่กรองมาได้ในกระบอกตวง และบันทึกปริมาตรของสารตัวอย่างไว้

7.1.2 ปรับ pH ของสารละลายตัวอย่างให้เป็นกลาง เพราะ Ag^+ จะตกตะกอนเป็น AgOH ที่ pH สูงและ CrO_4^{2-} จะถูกเปลี่ยนไปเป็น $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ที่ pH ต่ำ ดังนั้นจึงไทเทรตที่สภาวะเป็นกลาง ด้วยการหยดฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์ลงในสารตัวอย่าง 1 หยด สังเกตการเปลี่ยนแปลงของสีสารละลายตัวอย่าง

7.1.2.1 ถ้าเปลี่ยนเป็นสีชมพูแสดงว่าสารละลายมีค่า pH สูงกว่า 7 หรือมีสถานะเป็นเบสให้เติมกรดกำมะถันที่ละหยดจนสารตัวอย่างกลับมาใสเหมือนเดิม

7.1.2.2 ถ้าสารตัวอย่างไม่เปลี่ยนสีแสดงว่าสารละลายมีค่า pH ต่ำกว่า 7 หรือมีสถานะเป็นเบสให้เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ละหยดจนกระทั่งสารตัวอย่างเปลี่ยนเป็นสีชมพู จากนั้นให้ปรับค่า pH กลับเหมือนกับข้อ 7.1.2.1

7.1.3 นำ AgNO_3 ที่เตรียมไว้เทผ่านกรวยลงในบิวเรตขนาด 50 มิลลิลิตร

7.1.4 เติมโปตัสเซียมโครเมตจำนวน 1 มิลลิลิตรที่เตรียมไว้ลงในสารละลายตัวอย่าง จะได้สารละลายสีเหลือง

7.1.5 หยด AgNO_3 ลงในสารละลายตัวอย่างไปเรื่อยๆ สารละลายตัวอย่างจะเริ่มเปลี่ยนจากสีเหลืองใสเป็นสีเหลืองขุ่นและเริ่มตกตะกอนเป็น AgCl จนกระทั่งสารละลายเป็นสีน้ำตาลแดงทั้งหมดถือว่าเป็นจุด **End Point** อ่านค่าปริมาตรของ AgNO_3 ที่ใช้ไปและบันทึกปริมาตร

7.1.6 ทำการหา **Blank** คือส่วนที่เกินมาของ AgNO_3 ในปฏิบัติการตกตะกอน AgCl เนื่องจากสารละลายที่เปลี่ยนเป็นตะกอนสีน้ำตาลแดงนั้นคือ Ag_2CrO_4 โดยการใช้ น้ำกลั่น ในการไทเทรต บันทึกปริมาตรของสารละลาย AgNO_3 ที่ถูกใช้ไปเป็น **Blank**



ภาพที่ 17 แสดงการเตรียมตัวอย่างในการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในผงคอนกรีต, การปรับสภาพความเป็นกรดต่างค่า (pH) และการทำ Blank



ภาพที่ 18 แสดงตัวอย่างหลังการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในสารละลาย

7.1.7 ทำการคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ในสารละลายโดยใช้สมการที่ 6 และบันทึกปริมาณคลอไรด์ในสารละลายตามระดับความลึกต่างของทุกตัวอย่างในการทดลอง

$$\text{mg/l } \text{Cl}^- = \frac{(A - B) \times C \times 35400}{\text{ml sample}} \quad (6)$$

โดยที่ A = มิลลิลิตรของ AgNO_3 ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่าง

B = มิลลิลิตรของ AgNO_3 ที่ใช้ในการไทเทรต Blank

C = นอร์มัลลิตีของ AgNO_3

7.2 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในผงคอนกรีตโดยเครื่อง Chloride Analyzer (Metrohm 781 pH/Ion Meter)

7.2.1 นำน้ำปูนตัวอย่าง (เตรียมโดยใช้ผงปูน 4-5 กรัมแช่ทิ้งไว้ในน้ำกลั่น 75 มิลลิลิตร เป็นเวลา 1 วัน) มากรองด้วยกระดาษกรองลงในขวดรูปกรวยขนาด 250 มิลลิลิตรและวัดปริมาตรของสารละลายที่กรองมาได้ในกระบอกตวง และบันทึกปริมาตรของสารตัวอย่างไว้

7.2.2 นำสารละลายที่ทำการกรองแล้ว โดยใช้สารละลายที่ทำการกรองจำนวน 10 มิลลิลิตร โดยผสมกับสารละลายโซเดียมไนเตรด (NaNO_3) จำนวน 10 มิลลิลิตร เพื่อกำจัดตัวขัดขวางและแยกไอออนของคลอไรด์ออกมาให้สามารถวัดปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ในสารละลายได้อย่างชัดเจนขึ้น

7.2.3 ทำการกระตุ้นการทำงานของเครื่อง Chloride ISE ด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 0.1 โมล ก่อนการไทเทรตเป็นเวลายาวอย่างน้อย 10 นาทีก่อนการหาปริมาณคลอไรด์ไอออนด้วยเครื่อง Chloride Analyzer (Metrohm 781 pH/Ion Meter)

7.2.4 ทำการไทเทรตหาปริมาณคลอไรด์อิสระของตัวอย่างผงคอนกรีตในวันที่ 7, 14, 21 และวันที่ 28 ของการทดสอบซึ่งเป็นวันสุดท้ายในการดึงคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีเพื่อหาปริมาณคลอไรด์เปรียบเทียบกับปริมาณคลอไรด์ก่อนดึงออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี



ภาพที่ 19 ตัวอย่างการกรองผงคอนกรีตด้วยเครื่องดูดสุญญากาศและการเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการไทเทรต (Titration) หาปริมาณคลอไรด์อิสระ

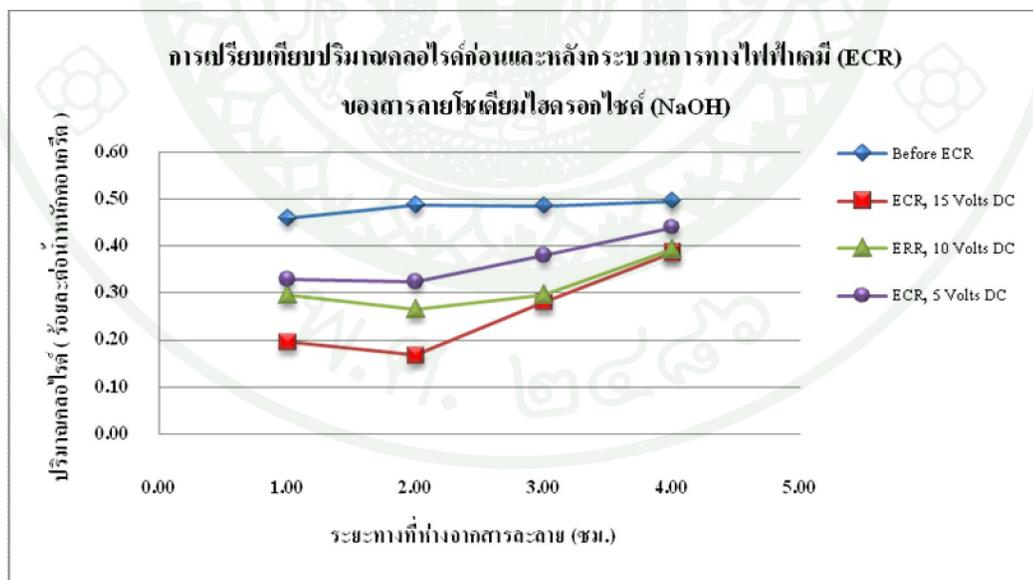


ภาพที่ 20 การกระตุ้นการทำงานของ Chloride ISE ด้วยสารละลายคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร และการหาปริมาณคลอไรด์อิสระด้วยเครื่อง Chloride Analyzer (Metrohm 781 pH/Ion Meter)

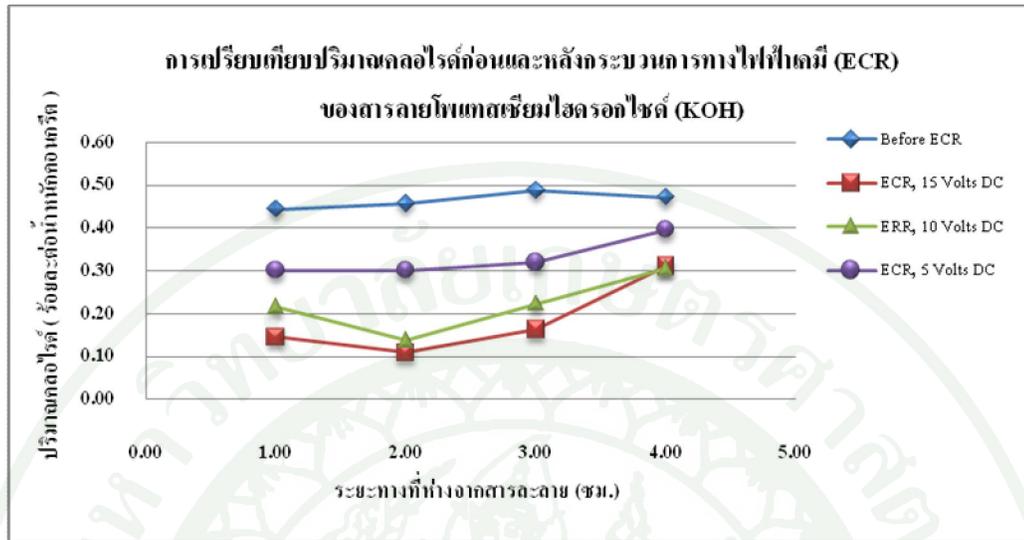
ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการเปรียบเทียบสารละลายและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง

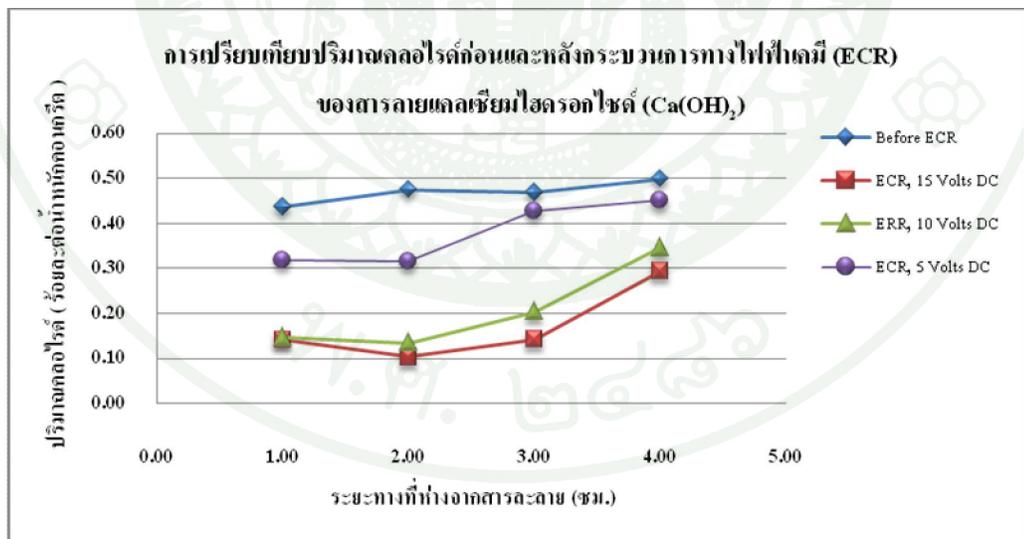
จากการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่างแก่ (Strong Base Electrolyte) ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ซึ่งได้แก่สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2 Electrolyte), สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH Electrolyte) และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH Electrolyte) โดยทำการจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5, 10, 15 โวลต์ พบว่าสารละลายทั้ง 3 ชนิดมีแนวโน้มที่สามารถดึงคลอไรด์ไอออนจากคอนกรีตเป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือประสิทธิภาพของการดึงคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตของสารละลายทั้ง 3 ชนิดใช้ในการทดลองมีผลกระทบโดยตรงจากขนาดของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปในระบบและระยะทางของคลอไรด์ที่เคลื่อนที่สู่สารละลายโดยพบว่าขนาดกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นจะสามารถลดปริมาณคลอไรด์ได้มากและระยะทางที่ใกล้กับสารละลายจะสามารถลดปริมาณคลอไรด์ไอออนได้มากกว่าระยะทางที่ไกลออกไปดังแสดงในภาพที่ 21-23



ภาพที่ 21 การเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังการดึงคลอไรด์ภายในคอนกรีตเมื่อใช้ตัวกลางสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และใช้ขนาดความต่างศักย์ 5, 10, 15 โวลต์ ตามลำดับ



ภาพที่ 22 การเปรียบเทียบปริมาณคลอรีนก่อนและหลังการดึงคลอรีนภายในคอนกรีตเมื่อใช้ตัวกลางสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และขนาดความต่างศักย์ 5, 10, 15 โวลต์ตามลำดับ



ภาพที่ 23 การเปรียบเทียบปริมาณคลอรีนก่อนและหลังการดึงคลอรีนภายในคอนกรีตเมื่อใช้ตัวกลางสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์และขนาดความต่างศักย์ 5, 10, 15 โวลต์ตามลำดับ

ตารางที่ 9 การเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยใช้ความต่างศักย์กระแสตรง 15, 10, 5 โวลต์

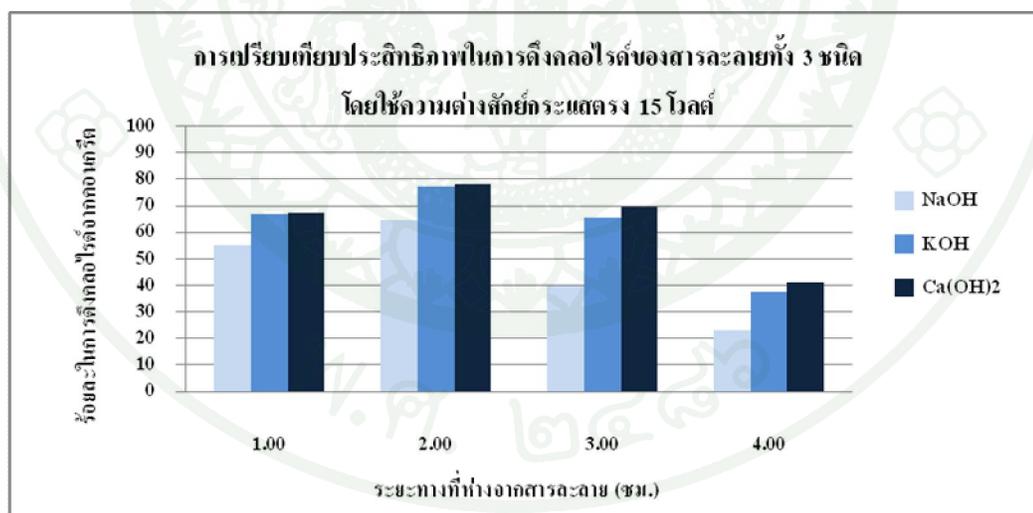
| สารละลาย | ระยะทางห่างจากสารละลาย ชม. | ปริมาณคลอไรด์ (ร้อยละต่อน้ำหนักคอนกรีต) | | | |
|--------------------------|----------------------------|---|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| | | ก่อนกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี | ความต่างศักย์กระแสตรง 15 โวลต์ | ความต่างศักย์กระแสตรง 10 โวลต์ | ความต่างศักย์กระแสตรง 5 โวลต์ |
| โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) | 1 | 0.459 | 0.196 | 0.295 | 0.329 |
| | 2 | 0.487 | 0.169 | 0.265 | 0.323 |
| | 3 | 0.486 | 0.281 | 0.296 | 0.379 |
| | 4 | 0.496 | 0.385 | 0.392 | 0.439 |

ตารางที่ 10 การเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์โดยใช้ความต่างศักย์กระแสตรง 15, 10, 5 โวลต์

| สารละลาย | ระยะทางห่างจากสารละลาย ชม. | ปริมาณคลอไรด์ (ร้อยละต่อน้ำหนักคอนกรีต) | | | |
|----------------------------|----------------------------|---|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| | | ก่อนกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี | ความต่างศักย์กระแสตรง 15 โวลต์ | ความต่างศักย์กระแสตรง 10 โวลต์ | ความต่างศักย์กระแสตรง 5 โวลต์ |
| โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) | 1 | 0.444 | 0.145 | 0.138 | 0.302 |
| | 2 | 0.458 | 0.109 | 0.216 | 0.302 |
| | 3 | 0.488 | 0.163 | 0.223 | 0.319 |
| | 4 | 0.472 | 0.311 | 0.305 | 0.397 |

ตารางที่ 11 การเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยใช้ความต่างศักย์กระแสตรง 15, 10, 5 โวลต์

| สารละลาย | ระยะทางห่างจากสารละลาย ซม. | ปริมาณคลอไรด์ (ร้อยละต่อน้ำหนักคอนกรีต) | | | |
|---------------------|----------------------------|---|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| | | ก่อนกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี | ความต่างศักย์กระแสตรง 15 โวลต์ | ความต่างศักย์กระแสตรง 10 โวลต์ | ความต่างศักย์กระแสตรง 5 โวลต์ |
| Ca(OH) ₂ | 1 | 0.437 | 0.142 | 0.146 | 0.318 |
| | 2 | 0.476 | 0.103 | 0.135 | 0.316 |
| | 3 | 0.469 | 0.143 | 0.204 | 0.428 |
| | 4 | 0.499 | 0.294 | 0.346 | 0.451 |



ภาพที่ 24 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ของสารละลายทั้ง 3 ชนิดโดยใช้ความต่างศักย์กระแสตรง 15 โวลต์

ภาพที่ 21-23 และตารางที่ 9-11 แสดงปริมาณคลอรีนก่อนและหลังกระบวนการดึงคลอรีนจากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี ความสามารถในการดึงคลอรีนโดยใช้ตัวกลางเป็นสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) สามารถดึงคลอรีนออกมาได้มากที่สุดในทุกค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ในส่วนบริเวณระยะทาง (ความลึก) ใกล้กับสารละลายและความสามารถในการดึงคลอรีนลดลงตามระยะทางที่ห่างจากสารละลายตามลำดับ เมื่อพิจารณาความต่างศักย์ที่แตกต่างกันพบว่าความสามารถในการดึงคลอรีนแปรผันตรงกันกับขนาดความต่างศักย์ที่ใช้ โดยความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สามารถดึงคลอรีนจากเนื้อคอนกรีตได้มากที่สุดคือขนาด 15 โวลต์และประสิทธิภาพลดลงตามขนาดความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 และ 5 โวลต์ตามลำดับ

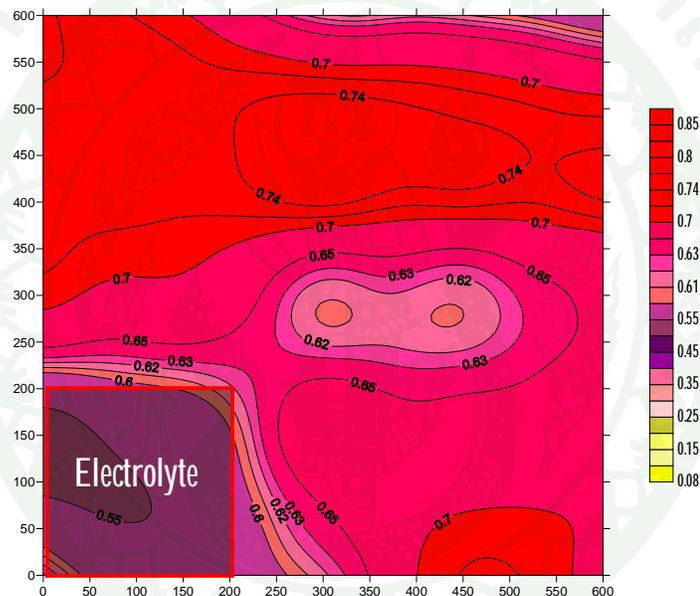
สำหรับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ในภาพที่ 21, 22 ให้ผลการทดลองเป็นไปในทางเดียวกันกับสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) โดยผลการวิจัยครั้งนี้สอดคล้องกับ P.F. McGrath and R.D. Hooton (1996) และ C. Arya et al. (1996) ซึ่งได้อธิบายการเคลื่อนที่ของคลอรีนด้วยกระแสไฟฟ้า โดยการเคลื่อนที่ของคลอรีนผ่านคอนกรีตนั้นแปรผันตรงกันกับขนาดของความต่างศักย์กระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปในระบบและสอดคล้องกับสมการของ Nernst planck (Modified Fick's second law)

ภาพที่ 24 แสดงความสามารถในการดึงคลอรีนของสารละลายทั้ง 3 ชนิด พบว่าสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) สามารถดึงคลอรีนออกมาได้มากที่สุดกล่าวคือสามารถดึงคลอรีนออกมาเฉลี่ยร้อยละ 76 ที่เวลา 28 วัน โดยใช้ความต่างศักย์ 15 โวลต์จากประสิทธิภาพดังกล่าวสามารถลดระดับคลอรีนให้ต่ำกว่าระดับคลอรีนวิกฤติ (ร้อยละ 0.4-0.6 ต่อน้ำหนักซีเมนต์)

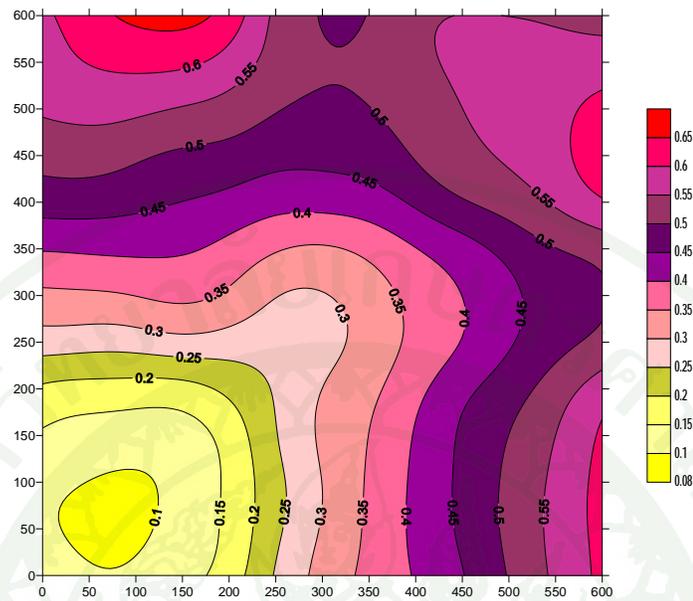
ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการดึงคลอรีนบริเวณที่ไม่ได้สัมผัสกับสารละลายโดยตรง

จากการทดลองดึงคลอรีนที่อยู่ภายในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี โดยทำการติดตั้งแหล่งสารละลายไว้ที่ขอบของชิ้นตัวอย่างเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการดึงคลอรีนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในส่วนที่ไม่ได้สัมผัสกับสารละลายโดยตรง โดยเลือกสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) เป็นตัวกลางและใช้ความต่างศักย์ 15 โวลต์ซึ่งเป็นสารละลายและขนาดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สามารถดึงคลอรีนได้มากที่สุดจากการทดลองข้างต้น และใช้ระยะเวลาในการดึง

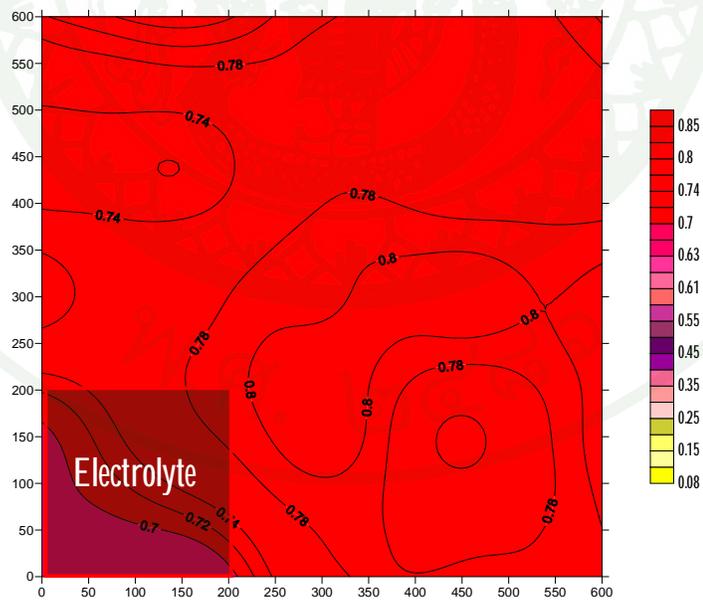
คลอไรด์จากคอนกรีตเท่ากับการทดลองข้างต้นคือ 28 วัน พบว่าปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตในส่วนที่ทำการขังสารละลายลดลงในปริมาณที่น่าพอใจ เนื่องจากสามารถลดปริมาณคลอไรด์ที่สะสมอยู่ในคอนกรีตถึงร้อยละ 65 - 78 ของปริมาณคลอไรด์ที่สะสมอยู่ในคอนกรีตและปริมาณคลอไรด์ในบริเวณที่ห่างจากสารละลายออกไปลดลงตามระยะทางอันเนื่องมาจากกระยะทางในการเดินทางของคลอไรด์ในสารละลายในช่องว่างภายในคอนกรีตและปริมาณกระแสไฟฟ้าที่สูงสูญเสียไปตามระยะทางที่ห่างออกจากบริเวณที่ทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าโดยได้เปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังการดึงคลอไรด์จากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีดังแสดงในภาพที่ 25-30



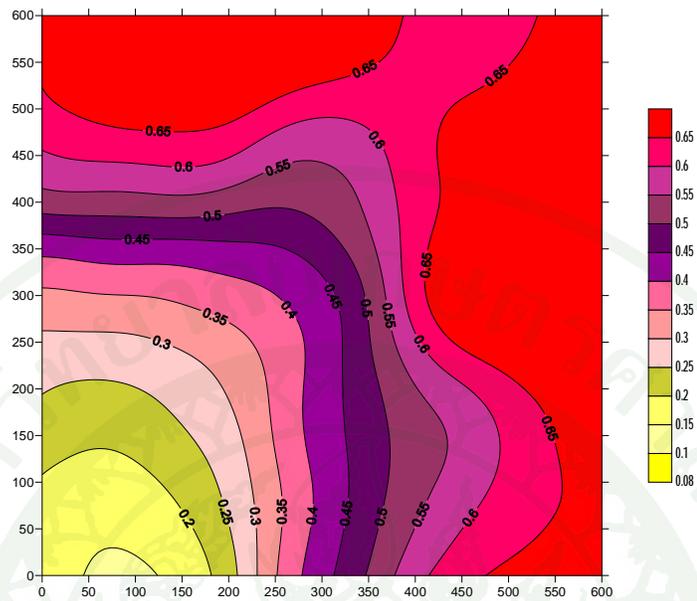
ภาพที่ 25 เส้นชั้นระดับปริมาณคลอไรด์โดยเฉลี่ยที่ระยะความลึก 1 ซม. ก่อนทำการดึงคลอไรด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี



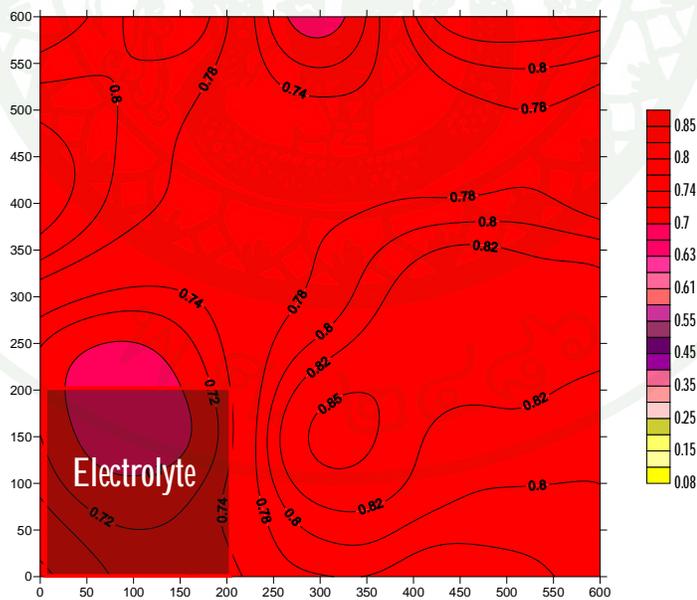
ภาพที่ 26 เส้นชั้นระดับปริมาณคลอไรด์โดยเฉลี่ยที่ระยะความลึก 1 ซม. หลังทำการดึงคลอไรด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี



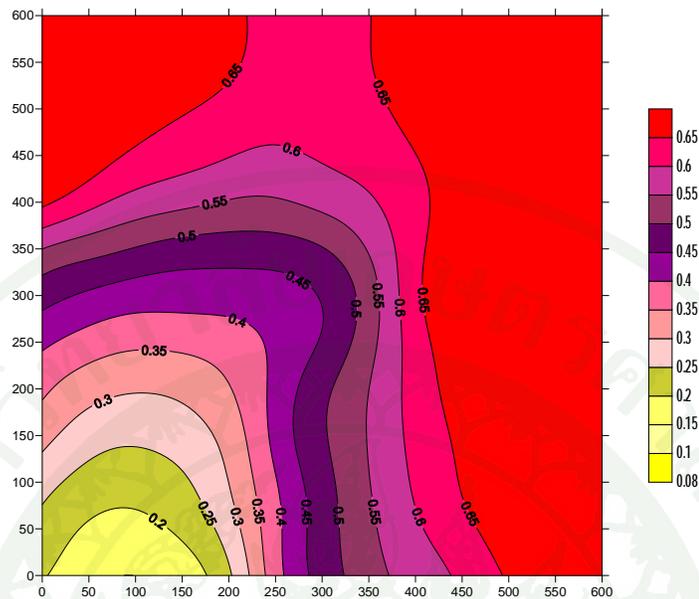
ภาพที่ 27 เส้นชั้นระดับปริมาณคลอไรด์โดยเฉลี่ยที่ระยะความลึก 2 ซม. ก่อนทำการดึงคลอไรด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี



ภาพที่ 28 เส้นชั้นระดับปริมาณคลอรีนโดยเฉลี่ยที่ระยะความลึก 2 ซม. หลังทำการดึงคลอรีนออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี



ภาพที่ 29 เส้นชั้นระดับปริมาณคลอรีนโดยเฉลี่ยที่ระยะความลึก 3 ซม. ก่อนทำการดึงคลอรีนออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี



ภาพที่ 30 เส้นชั้นระดับปริมาณคลอรีนไอออนโดยเฉลี่ยที่ระยะความลึก 3 ซม. หลังทำการดึงคลอรีนไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

ภาพที่ 25, 27, 29 แสดงปริมาณคลอรีนไอออนที่อยู่ในคอนกรีตที่ระดับความลึก 1, 2 และ 3 ซม. ตามลำดับ โดยปริมาณคลอรีนไอออนที่มีอยู่ในคอนกรีตก่อนการทำการดึงคลอรีนไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีมีปริมาณคลอรีนไอออนระดับคลอรีนไอออนโดยในบริเวณขอบของตัวอย่างในการทดลองมีปริมาณคลอรีนไอออนน้อยกว่าบริเวณด้านในอันเนื่องมาจากการละลายของเกลือที่ใช้ผสมในคอนกรีตอาจเกิดละลายออกสู่ภายนอกระหว่างระยะเวลาที่ทำการบ่มในน้ำประปา 28 วัน

ภาพที่ 26, 28, 30 แสดงปริมาณคลอรีนไอออนที่อยู่ในคอนกรีตที่ระดับความลึก 1, 2 และ 3 ซม. ตามลำดับ โดยปริมาณคลอรีนไอออนที่มีอยู่ในคอนกรีตหลังการทำการดึงคลอรีนไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี โดยในบริเวณที่ทำการติดตั้งสารละลายจะสามารถลดปริมาณที่อยู่ในคอนกรีตได้ถึงร้อยละ 73-81, 68-75, 56-76 ตามระยะที่ห่างจากสารละลาย (ความลึก) 1, 2, 3 ซม. ตามลำดับ ส่วนที่ระยะห่างออกมาจากบริเวณที่ทำการขังสารละลายนั้นประสิทธิภาพในการดึงคลอรีนไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีนั้นสามารถดึงคลอรีนไอออนตามระดับความลึกต่างๆ โดยสรุปตามระดับความลึกต่างๆ ได้ในตารางที่ 12-14

ตารางที่ 12 ประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ในคอนกรีตเปรียบเทียบเป็นร้อยละก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี ที่ระดับความลึก 1 ซม.

| ระยะทางที่ห่างออกจากละลายอิเล็กโทรไลต์ (ซ.ม.) | ประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ในคอนกรีต (ร้อยละก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี) |
|---|--|
| 15 | 49-55 |
| 30 | 31-28 |
| 45 | 5-25 |

ตารางที่ 13 ประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ในคอนกรีตเปรียบเทียบเป็นร้อยละก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี ที่ระดับความลึก 2 ซม.

| ระยะทางที่ห่างออกจากละลายอิเล็กโทรไลต์ (ซ.ม.) | ประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ในคอนกรีต (ร้อยละก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี) |
|---|--|
| 15 | 44-50 |
| 30 | 14-28 |
| 45 | 3-18 |

ตารางที่ 14 ประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ในคอนกรีตเปรียบเทียบเป็นร้อยละก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี ที่ระดับความลึก 3 ซม.

| ระยะทางที่ห่างออกจากละลายอิเล็กโทรไลต์ (ซ.ม.) | ประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ในคอนกรีต (ร้อยละก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี) |
|---|--|
| 15 | 39-42 |
| 30 | 12-21 |
| 45 | 3-12 |

ตารางที่ 12-14 แสดงประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ภายในคอนกรีตที่สามารถดึงออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยลดลงตามระยะทางที่ห่างออกจากสารละลาย โดยแยกตามระยะทางในแนวราบและความลึก เนื่องจากการเดินทางของคลอไรด์ภายในช่องว่างของคอนกรีตมายังบริเวณที่ทำการขังสารละลายและปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ลดลงตามระยะทางที่ห่างออกจากบริเวณที่ทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าทำให้ประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์อออนลดลง รวมทั้งความต่อเนื่องของช่องว่างภายในคอนกรีตทำให้การเดินทางของคลอไรด์ในคอนกรีตไม่เป็นแบบแผนที่ชัดเจน ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าปริมาณของกระแสไฟฟ้าและความต่อเนื่องของช่องว่างภายในคอนกรีตส่งผลกระทบโดยตรงกับการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ในคอนกรีต โดยวิธีการทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยไฟฟ้า (Chloride Migration Test) สามารถอธิบายการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ในคอนกรีตได้เฉพาะการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตด้วยกระแสไฟฟ้า

ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์อออนด้วยไฟฟ้า (Chloride Migration Test)

การทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์อออนผ่านคอนกรีตโดยใช้กระแสไฟฟ้าในการขับเคลื่อนคลอไรด์อออนเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองการดึงคลอไรด์อออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยการเคลื่อนที่ของคลอไรด์อออนผ่านคอนกรีตที่ใช้ในการทดลอง จะทำให้ทราบถึงปริมาณของคลอไรด์อออนที่ผ่านคอนกรีตตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองเพื่อที่จะทราบถึงสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Diffusion Coefficient) ของคอนกรีตและทราบถึงความเร็วในการไหล (Flux) ของคลอไรด์อออนเพื่อที่จะมาเป็นแนวทางในการออกแบบการดึงคลอไรด์อออนกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาพแวดล้อมจริงและเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองในครั้งนี้โดยผลการทดลองการเคลื่อนที่ของคลอไรด์อออนด้วยไฟฟ้างี้แสดงในตารางที่ 15-17

ตารางที่ 15 ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ด้วยกระแสไฟฟ้า (Chloride Migration Test)
ของตัวอย่างการทดลองที่ 1 (MT-01)

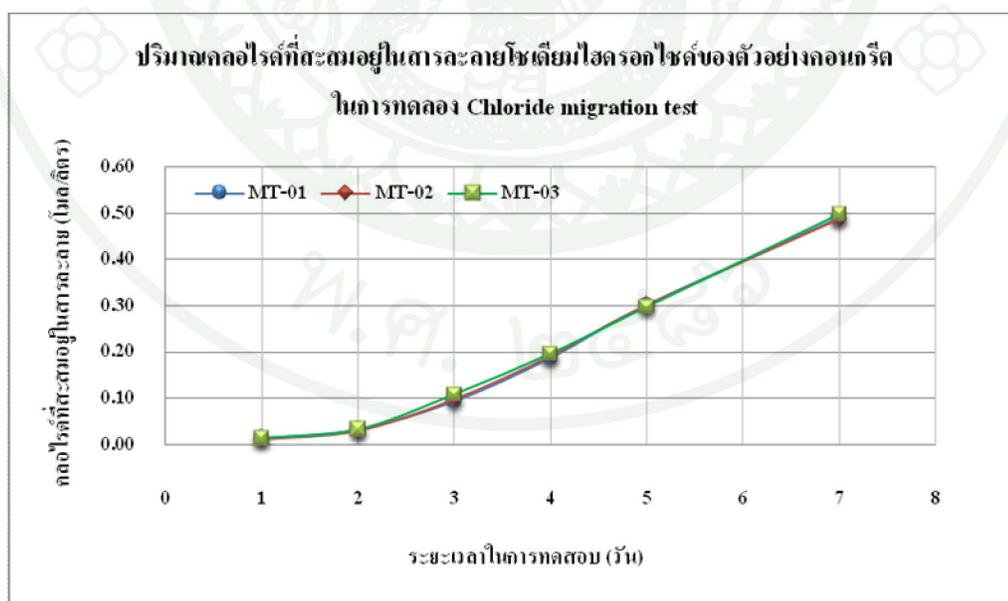
| ระยะเวลา | ความต่างศักย์ไฟฟ้า | ปริมาณคลอไรด์ในสารละลาย | |
|--|--------------------|-------------------------|----------------------------|
| day | Volts (V) | มิลลิกรัม/ลิตร | โมล/ลิตร |
| 1 | 13.56 | 782 | 0.0134 |
| 2 | 13.56 | 1103 | 0.0189 |
| 3 | 12.36 | 3983 | 0.0681 |
| 4 | 12.26 | 5360 | 0.0916 |
| 5 | 12.23 | 6330 | 0.1082 |
| 7 | 12.21 | 11200 | 0.1915 |
| Flux of chloride ion in steady state, J_{Cl} : | | | 0.149 (โมล/ลิตร)/ปี |
| Effective diffusion coefficient, D_e : | | | 3.065 ซม. ² /ปี |

ตารางที่ 16 ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ด้วยกระแสไฟฟ้า (Chloride Migration Test)
ของตัวอย่างการทดลองที่ 2 (MT-02)

| ระยะเวลา | ความต่างศักย์ไฟฟ้า | ปริมาณคลอไรด์ในสารละลาย | |
|--|--------------------|-------------------------|----------------------------|
| day | Volts (V) | มิลลิกรัม/ลิตร | โมล/ลิตร |
| 1 | 13.56 | 665 | 0.0114 |
| 2 | 13.56 | 1090 | 0.0186 |
| 3 | 12.36 | 3970 | 0.0679 |
| 4 | 12.26 | 5470 | 0.0935 |
| 5 | 12.23 | 6430 | 0.1099 |
| 7 | 12.21 | 10900 | 0.1863 |
| Flux of chloride ion in steady state, J_{Cl} : | | | 0.145 (โมล/ลิตร)/ปี |
| Effective diffusion coefficient, D_e : | | | 3.021 ซม. ² /ปี |

ตารางที่ 17 ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ด้วยกระแสไฟฟ้า (Chloride Migration Test) ของตัวอย่างการทดลองที่ 3 (MT-03)

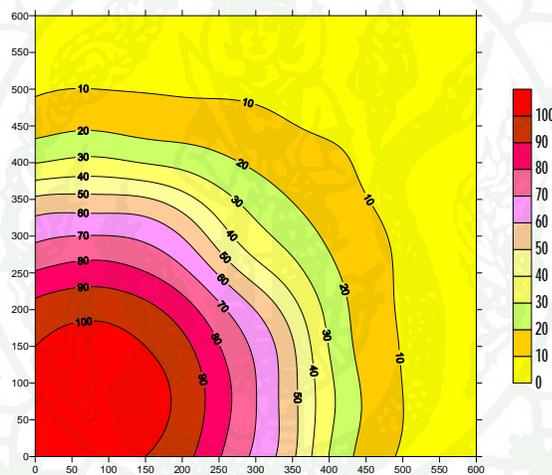
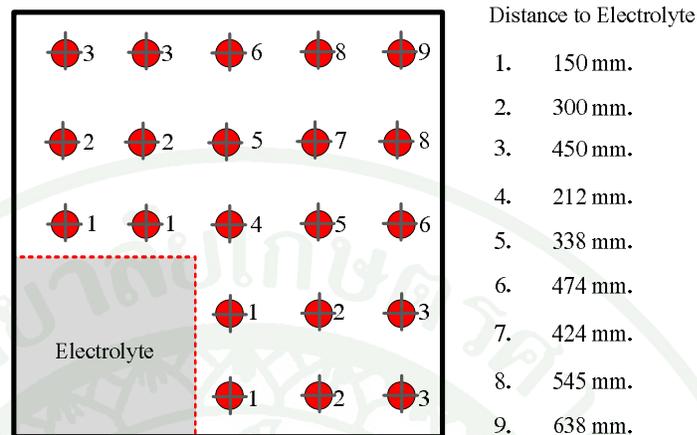
| ระยะเวลา | ความต่างศักย์ไฟฟ้า | ปริมาณคลอไรด์ในสารละลาย | |
|--|--------------------|-------------------------|----------------------------|
| day | Volts (V) | มิลลิกรัม/ลิตร | โมล/ลิตร |
| 1 | 13.56 | 832 | 0.0142 |
| 2 | 13.56 | 1110 | 0.0190 |
| 3 | 12.36 | 4440 | 0.0759 |
| 4 | 12.26 | 5140 | 0.0879 |
| 5 | 12.23 | 5900 | 0.1009 |
| 7 | 12.21 | 11700 | 0.2000 |
| Flux of chloride ion in steady state, J_{Cl} : | | | 0.152 (โมล/ลิตร)/ปี |
| Effective diffusion coefficient, D_e : | | | 3.084 ซม. ² /ปี |



ภาพที่ 31 แสดงปริมาณคลอไรด์ที่สะสมอยู่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ของตัวอย่างคอนกรีตในการทดสอบ Chloride Migration Test

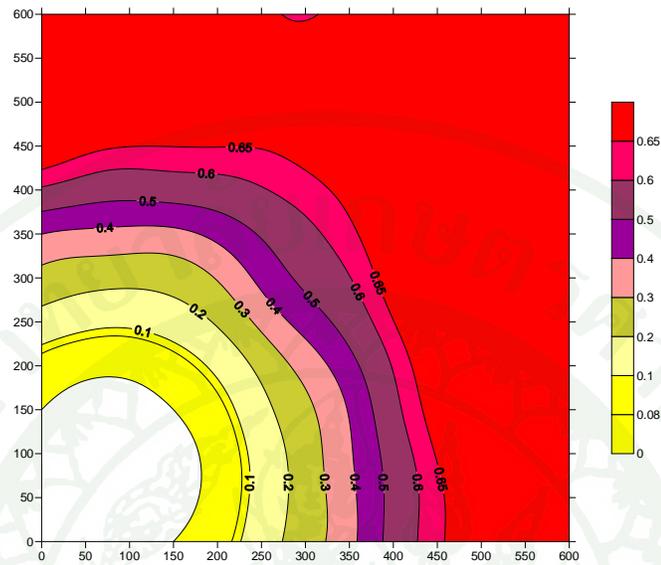
จากภาพที่ 31 แสดงปริมาณคลอไรด์ที่ผ่านคอนกรีตในการทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์อ็อนผ่านคอนกรีตโดยใช้กระแสไฟฟ้า **Chloride Migration Test** จะเห็นได้ว่าปริมาณคลอไรด์ที่ผ่านคอนกรีตในช่วงเริ่มต้นมีปริมาณน้อย เนื่องจากในช่วงเริ่มต้นคอนกรีตอิมมัวด้วยน้ำทำให้ช่องว่างในคอนกรีตไม่มีปริมาณคลอไรด์สะสมอยู่ความสามารถในการเดินทางของคลอไรด์ผ่านช่องว่างในคอนกรีตจึงใช้ระยะเวลาเพื่อที่จะเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างภายในคอนกรีตออกมาสู่สารละลายภายนอก และเมื่อมีปริมาณคลอไรด์อ็อนจนเต็มช่องว่างภายในคอนกรีตทำให้การเดินทางในการเดินทางของคลอไรด์เป็นไปได้ง่ายขึ้น แล้วจะสามารถผ่านคอนกรีตออกมาสะสมอยู่ในสารละลายอย่างรวดเร็ว จากนั้นทำการหาสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (**Diffusion Coefficient**) ของคอนกรีตที่มีปฏิภาคส่วนผสมเดียวกับตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการทดลองการดึงคลอไรด์อ็อนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีจะทำให้ทราบถึงความเร็วในการไหล (**Flux**) ของคลอไรด์อ็อนเพื่อที่จะนำมาเป็นข้อมูลในการทำนายระยะเวลาและประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์อ็อนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีด้วยการอธิบายการเคลื่อนที่ของอ็อนตามสมมุติฐานของ **Nernst planck** โดยจากการศึกษาของ **Hassanein et al. (2002)** ที่พบว่ากระแสไฟฟ้าในกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีเกิดการสูญเสีย 80 มิลลิโวลต์ต่อระยะทาง 40 มม. ในคอนกรีตจึงได้ทำการทำนายประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้อัตราการไหลของคลอไรด์อ็อน (**Flux**) และสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (**Diffusion Coefficient**) ของคอนกรีตเพื่อที่จะเปรียบเทียบกับผลการทดลองการดึงคลอไรด์อ็อนด้วยวิธีทางไฟฟ้าทางเคมีในห้องปฏิบัติการ

โดยการเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์หลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีระหว่างผลการทดลองการลดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีและการทำนายจากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ **Chloride Migration Test** ได้ระบุตำแหน่งให้ตรงกับการเจาะผงคอนกรีตเพื่อหาปริมาณคลอไรด์ในผงคอนกรีต โดยได้กำหนดจุดที่ทำการเปรียบเทียบระหว่างการทำนายและผลการทดลองโดยตำแหน่งและระยะทางโดยประสิทธิภาพของการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีจากการทำนายดังแสดงในภาพที่ 32

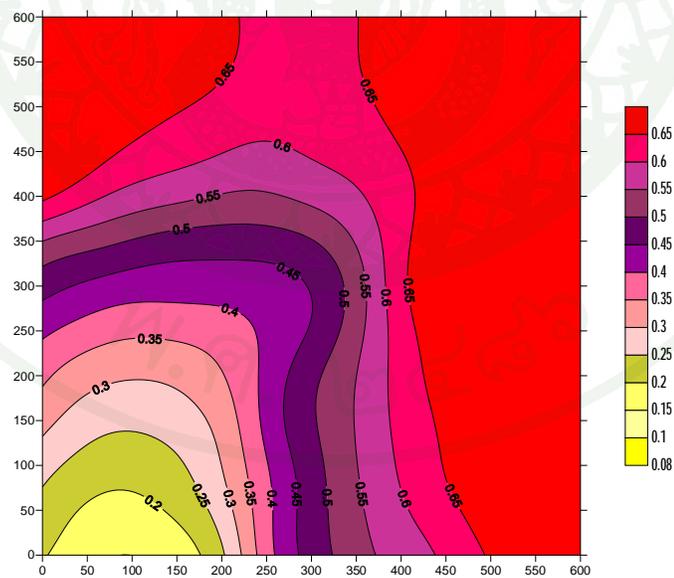


ภาพที่ 32 ประสิทธิภาพของการลดปริมาณคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีจากการทำนายโดยใช้ข้อมูลการทดสอบ Chloride Migration Test โดยแสดงเป็นร้อยละของคลอไรด์ที่สามารถดึงออกจากคอนกรีตได้โดยพิจารณาจากระยะทางที่ห่างจากสารละลาย

จากภาพที่ 32 แสดงประสิทธิภาพของการลดปริมาณคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี อันเนื่องมาจากการสูญเสียกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปในเหล็กเสริมอันเนื่องมาจากระยะทางและความต้านทานไฟฟ้าโดยใช้สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Diffusion Coefficient) และความเร็วในการไหล (Flux) ของคลอไรด์ไอออนของคอนกรีตที่ทำการทดสอบ Chloride Migration Test จะเห็นได้ว่าผลการทำนายสอดคล้องกับผลการทดสอบการลดปริมาณคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในห้องปฏิบัติการ โดยได้แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดลองและผลการทำนายในภาพที่ 33-34



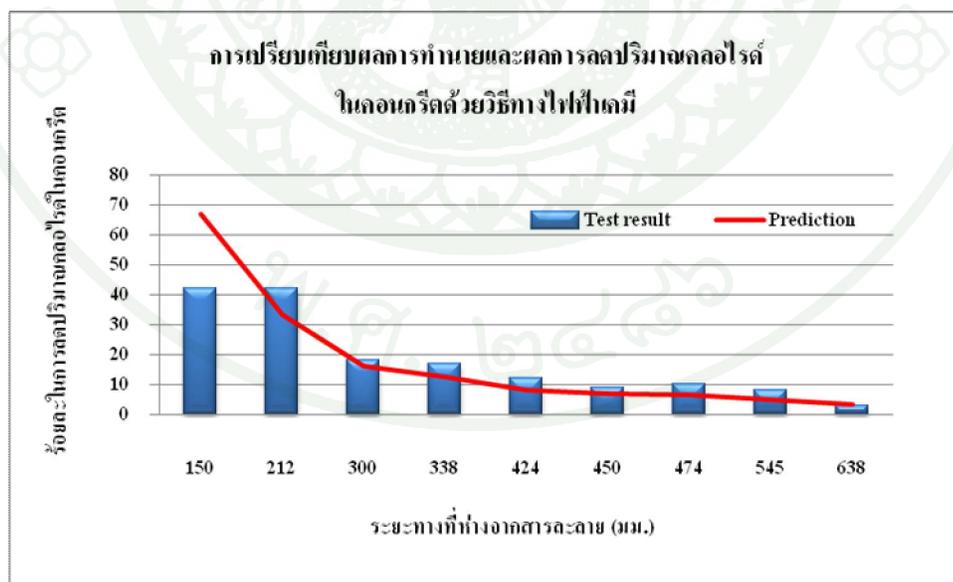
ภาพที่ 33 ปริมาณคลอไรด์หลังขบวนการทางไฟฟ้าเคมีที่ระยะเวลา 28 วัน ที่ระดับ
ความลึก 3 ซม. จากการทำงาน



ภาพที่ 34 ปริมาณคลอไรด์หลังขบวนการทางไฟฟ้าเคมีที่ระยะเวลา 28 วัน ที่ระดับ
ความลึก 3 ซม. จากการทำงานในห้องปฏิบัติการ

จากภาพที่ 33-34 แสดงการเปรียบเทียบการทำนายการดิ่งคลอไรด์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้อัตราการไหล (Flux) และสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Diffusion Coefficient) ของคลอไรด์ อีออนจากการทดสอบ Chloride Migration Test และผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ จะเห็นได้ว่าการทดสอบดังกล่าวสามารถอธิบายการเคลื่อนที่ของคลอไรด์อีออนผ่านคอนกรีตได้ในส่วนของ การใช้ไฟฟ้าในการขับเคลื่อนคลอไรด์ผ่านคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ แต่เนื่องจากผลการทดสอบ การดิ่งคลอไรด์อีออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีนั้นตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบอยู่ใน สภาพแวดล้อมที่ต่างกัน กล่าวคือวิธีการทดสอบ Chloride Migration Test นั้นได้ทำการจ่าย กระแสไฟฟ้าให้คลอไรด์ที่อยู่ในสารละลายผ่านคอนกรีตไปอยู่ในสารละลายอีกด้านหนึ่ง

ส่วนทดสอบการลดปริมาณคลอไรด์อีออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีนั้นทำการจ่ายกระแสไฟฟ้า ให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นตัวจ่ายกระแสไฟฟ้าทำการขับเคลื่อนคลอไรด์ที่อยู่ในคอนกรีตออกมาสู่สารละลายภายนอกทำให้ความแปรปรวนในส่วนของช่องว่างภายในคอนกรีตและองค์ประกอบ ต่างๆของคอนกรีตส่งผลให้ผลการทำนายประสิทธิภาพในการดิ่งคลอไรด์อีออนออกมาจาก คอนกรีตมากกว่าการทดสอบการใช้ไฟฟ้าในการขับเคลื่อนคลอไรด์ผ่านคอนกรีต โดยผลการ เปรียบเทียบการดิ่งคลอไรด์จากคอนกรีตตามระยะทางต่างๆดังแสดงในภาพที่ 35



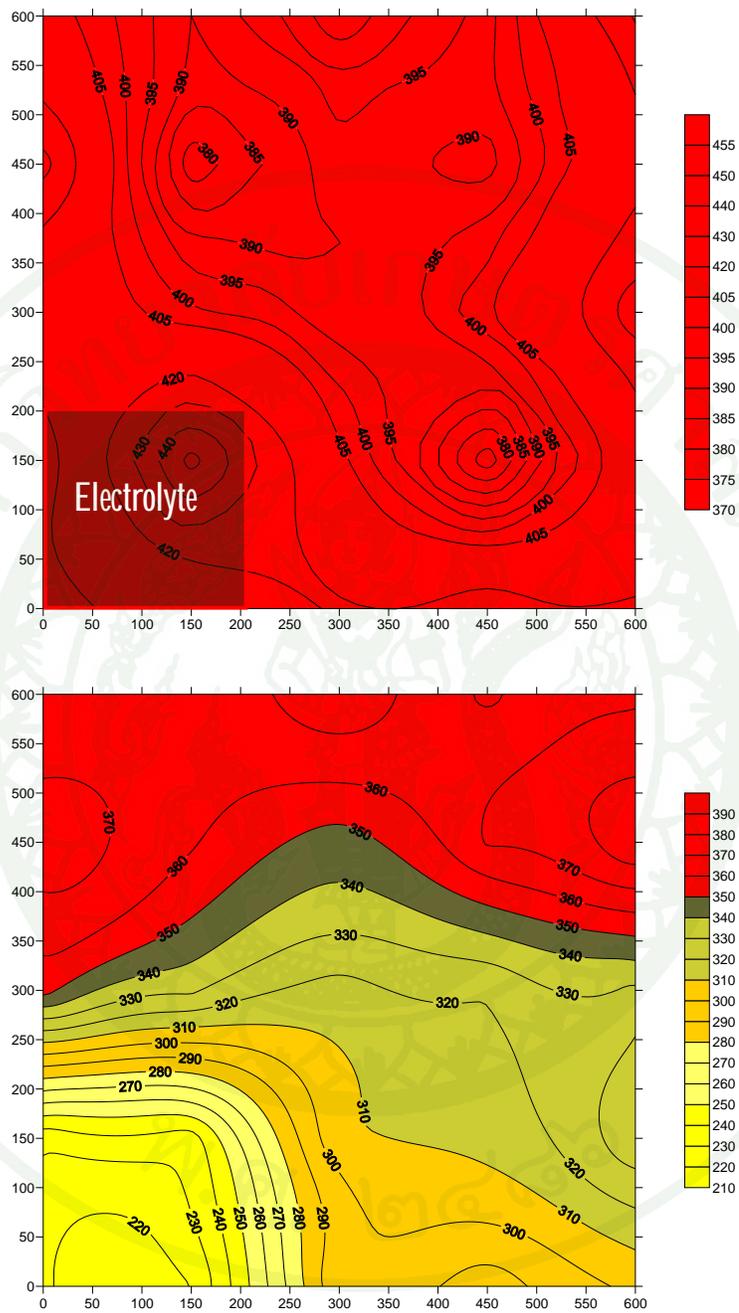
ภาพที่ 35 แสดงปริมาณคลอไรด์หลังขบวนการทางไฟฟ้าเคมีที่ระยะเวลา 28 วัน ที่ระดับ ความลึก 3 ซม. จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ

จากภาพที่ 35 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีจากการนำอัตราการไหลของคลอไรด์ในคอนกรีตและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคอนกรีตจากการทดสอบ **Chloride Migration Test** มาทำนายประสิทธิภาพในการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี พบว่าบริเวณที่ทำการติดตั้งสารละลายให้ผลการทำนายการดึงคลอไรด์จากเนื้อคอนกรีตด้วยไฟฟ้ามีประสิทธิภาพสูงกว่าผลการทดลองในห้องปฏิบัติการและลดลงตามระยะทางที่ห่างออกจากสารละลาย สอดคล้องกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากการทำนายประสิทธิภาพการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตใช้สมการของ **Nernst planck** ในการทำนาย ซึ่งใช้ความยาวของระยะทางสู่สารละลายเป็นตัวกำหนดความเร็วในการเดินทางของคลอไรด์ไอออนในคอนกรีต โดยการทำนายในครั้งนี้ซึ่งที่ตำแหน่งที่ติดตั้งสารละลายมีระยะทางที่ใช้ในการทำนายเพียง 30 มม. จึงทำให้ค่าที่ได้มากกว่าการทดลองในห้องปฏิบัติการ

ผลการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคอนกรีตเสริมเหล็กในการทดลอง

การวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคอนกรีตเสริมเหล็กในการทดลองการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตเป็นการบอกแนวโน้มการลดลงของอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมหลังการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ระยะห่างของตำแหน่งในการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เท่ากับ 15 ซม. ซึ่งเท่ากับระยะห่างของเหล็กเสริมคอนกรีตเพื่อนำมาพล็อตเส้นระดับชั้นความต่างศักย์ครึ่งเซลล์เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพของการลดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในส่วนของความเสี่ยงของการเป็นสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตเนื่องจากปริมาณคลอไรด์

โดยผลการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของการทดสอบในครั้งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยในต่างประเทศซึ่งสามารถลดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ภายหลังการลดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีเนื่องจากมีโอกาสเป็นไปได้ที่ความเป็นด่างของคอนกรีตสูงขึ้นจากขบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดย **Orellan et al. (2003)** ซึ่งพบว่าไฮดรอกซิลไอออนที่เกิดขึ้นจากขบวนการทางไฟฟ้าเคมีในการดึงคลอไรด์ไอออนทำให้คอนกรีตมีสภาพความเป็นด่างมากขึ้นมีโอกาสที่จะสร้างฟิล์มหุ้มเหล็กเสริม (**Re-Passivation**) ขึ้นภายในคอนกรีตส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์หลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีมีโอกาสที่จะลดลง โดยค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีของการทดลองในครั้งนี้ดังแสดงในภาพที่ 36



ภาพที่ 36 การเปรียบเทียบผลของการวัดการสึกกร่อนด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ก่อนและหลังการดึงกลไกจากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

ภาพที่ 36 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ก่อนและหลังการดึงคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี โดยสามารถอธิบายได้ว่าวิธีการดึงคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีสามารถชะลอการเป็นสนิมของเหล็กเสริมลงอย่างชัดเจน จะเห็นได้ว่าบริเวณที่ทำการขังสารละลายค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีลดลงอย่างมาก โดยสามารถลดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์จาก -430 mV. เหลือเพียง -220 mV. กล่าวคือลดจากเกณฑ์ความเป็นไปได้ที่จะเกิดสนิมร้อยละ 90 เหลืออยู่ในเกณฑ์ไม่แน่นอนที่จะเป็นสนิม สอดคล้องกับปริมาณคลอไรด์ที่สามารถดึงออกจากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในห้องปฏิบัติการและการทำนายและสอดคล้องกับผลการวิจัยในต่างประเทศ

สรุปผลการทดลอง

จากการทำการศึกษาเรื่องอิทธิพลของกระแสไฟฟ้าในการดึงคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นสามารถสรุปผลการทดลองได้ในครั้งนี้

1. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการทดลองในการดึงคลอไรด์ไอออนที่สามารถดึงคลอไรด์ออกมาจากคอนกรีตได้มากที่สุดคือสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิ่มตัวที่ระยะเวลาเดียวกันคือที่ระยะเวลา **28** วันเนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์นั้นมีความเข้มข้นน้อยกว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ถึง **5** เท่า และสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ยังสามารถหาได้ง่ายและมีราคาถูกกว่าสารละลายอื่นที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้

2. การเคลื่อนที่ของคลอไรด์ภายในคอนกรีตออกมาสู่สารละลายแปรผันตรงกันกับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองโดยเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้าขนาด **15** โวลต์ซึ่งเป็นกระแสไฟฟ้าที่มากที่สุดในการทดลองครั้งนี้จะเห็นได้ว่าสามารถลดปริมาณคลอไรด์ได้มากที่สุดในทุกสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการทดลอง และสอดคล้องกับสมการของ **Nernst planck** ซึ่งมีขนาดของความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นตัวกำหนดอัตราการไหลของไอออนผ่านคอนกรีต

3. ประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ที่อยู่ภายในคอนกรีตในบริเวณที่ไม่ได้สัมผัสกับสารละลายลดลงตามระยะทางที่ห่างออกจากสารละลายโดยสามารถอธิบายได้ใช้อัตราการไหล (**Flux**) ของไอออนและสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (**Diffusion coefficient**) จากสมการของ **Nernst planck** โดยใช้งานวิจัยของต่างประเทศเป็นแนวทางในการลดขนาดไฟฟ้าตามระยะทางที่ห่างออกจากสารละลาย

ข้อเสนอแนะ

ในการทดสอบการดึงคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีจะเห็นได้ว่าปริมาณคลอไรด์ที่ออกมาอยู่ในสารละลายภายนอกนั้นมีกระแสไฟฟ้าหรือพื้นที่ของสารละลายเป็นตัวกำหนดการลดลงของปริมาณคลอไรด์ดังนั้นควรพัฒนาสารละลายหรือพื้นที่ที่กระแสไฟฟ้าบวก (Anode Area) ให้สามารถติดตั้งได้ง่ายและ ศึกษาถึงผลกระทบอื่นๆของการดึงคลอไรด์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีเช่น อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ หรือองค์ประกอบอื่นของสารผสมเพิ่มที่ใช้ในการผสมคอนกรีตเนื่องจากการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ใช้ช่องว่างภายในคอนกรีตในการเดินทางออกมาอยู่ในสารละลาย และ ออกแบบการทดลองให้สามารถวัดกระแสไฟฟ้าตามตำแหน่งต่างๆให้สามารถติดตามขนาดของกระแสไฟฟ้าตามตำแหน่งต่างๆเพื่อให้สามารถหาความสัมพันธ์ของปริมาณคลอไรด์ที่ดึงออกจากคอนกรีตกับขนาดของกระแสไฟฟ้า

โดยแนวทางการพัฒนาการลดปริมาณคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีอาจจะ ทำการศึกษาจากผลกระทบหลายๆด้านเช่นคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่แตกต่างกันจะ ส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านแตกต่างกัน ดังนั้นระยะเวลาและประสิทธิภาพในการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตในคอนกรีตจะแตกต่างกันออกไป และยังขึ้นปริมาณคลอไรด์ที่ปนเปื้อนอยู่ในคอนกรีตก่อนกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีเนื่องจากระดับปริมาณที่มากจะส่งผลให้ใช้ระยะเวลาในการดึงคลอไรด์ออกจากคอนกรีตมากขึ้นไปด้วย หรือยังสามารถศึกษาเกี่ยวกับระยะห่างของเหล็กเสริมคอนกรีตเนื่องจากระยะห่างของคอนกรีตที่มีมากเกินไปอาจจะลดทอนประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ได้เนื่องจากเหล็กเสริมในคอนกรีตทำหน้าที่ในการเป็นสื่อนำไฟฟ้าในการผลักคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตออกสู่สารละลายภายนอกโดยได้เสนอแนวทางการพัฒนาการลดปริมาณคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีไว้ในภาคผนวก ข

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

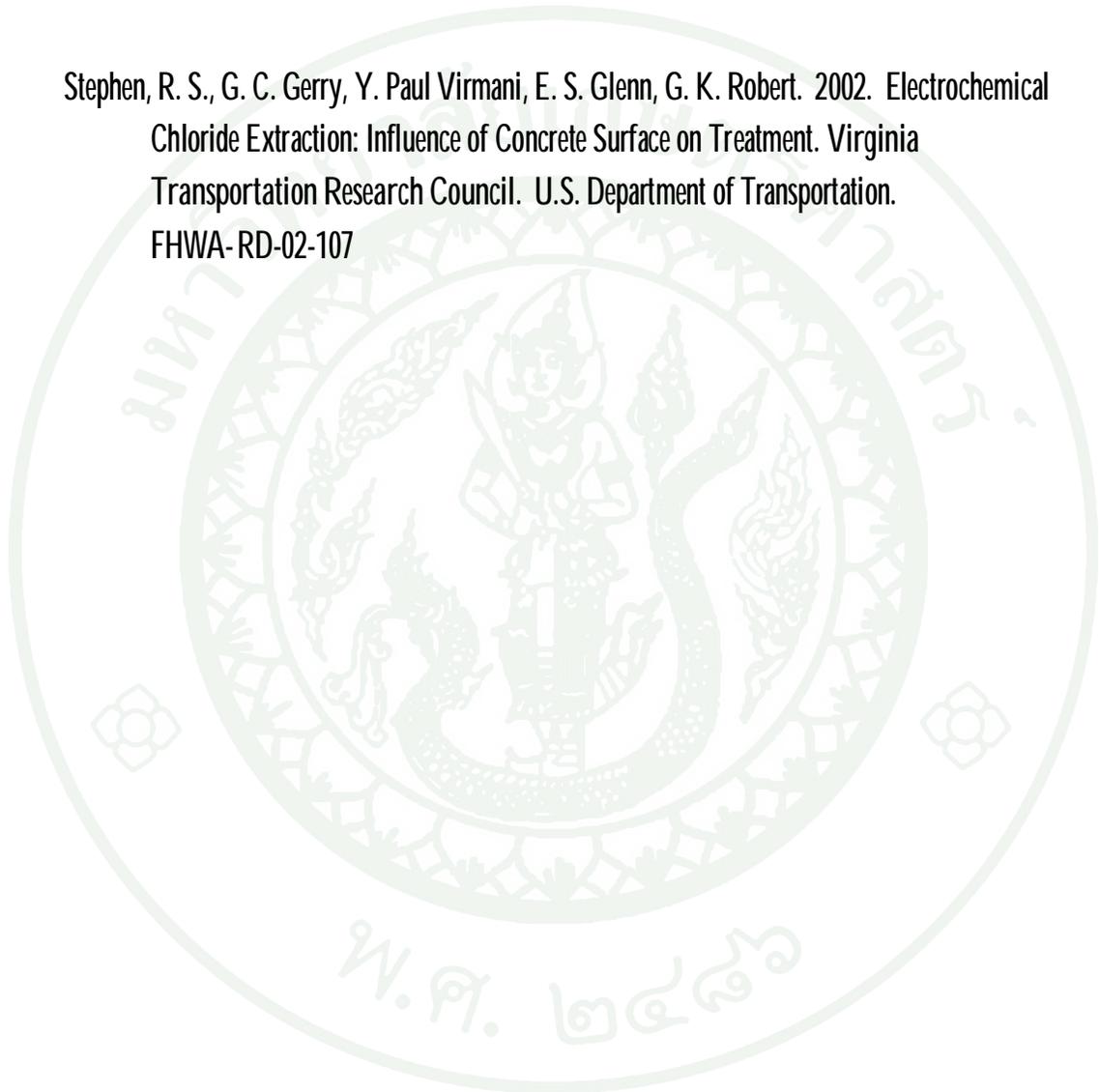
- กัญจนา ตระกูลดู. 2534. เทคโนโลยีการกัดกร่อน . พิมพ์ครั้งที่ 2. ห้างหุ้นส่วนจำกัด เอ็กซ์เพรส มีเดีย, กรุงเทพฯ.
- คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาสาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. 2543. ความคงทนของคอนกรีต. บริษัทจุดทอง จำกัด, กรุงเทพฯ.
- ชัยยุทธ ช่างสาร และ เลิศณรงค์ ศรีพนม. 2543. เคมีประยุกต์. บริษัทซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด, กรุงเทพฯ.
- นันทชัย สกานูพงษ์ และ ศิวกรณ์ ก้องเอกภพ. 2550. การศึกษาเชิงปฏิบัติการของการลดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี. โครงการงานวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- มาตรฐาน ว.ส.ท. 1007-34 . 2536. มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน. พิมพ์ครั้งที่ 2. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.
- มาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38. 2538. มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.
- วันชัย ยอดสุดใจ. 2548. การลดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี. โยธาสาร 49-51.
- สุรพงษ์ สุวจิตตานนท์. 2531. ไฟฟ้าเคมี. โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.
- ศิริลักษณ์ นิวิฐจรยงค์. 2545. การกัดกร่อนและการเลือกใช้วัสดุ. ศูนย์ผลิตตำราเรียน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ.

- Arya, C., Q. Sa'id-Shawqi and P.R.W. Vassie. 1996. Factors Influencing Electrochemical removal of Chloride from Concrete. Cement and Concrete Research. Elsevier Ltd. Cement and Concrete Research 26 No. 6: 851-860
- 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 & Hill, London.
- CPAC. 2008. CPAC Marine Concrete. Available Source: <http://www.cpac.co.th/techno/marine/marine.html>, March 1, 2008.
- Elsener, B. 2001. Half-cell Potential Mapping to Assess Repair Work on RC Structure. Construction and Building Materials. Elsevier Ltd. Vol. 15: 133-139
- _____. and U. Angst. 2007. Mechanism of Electrochemical Chloride Removal. Corrosion Science. Elsevier Ltd. Corrosion Science 49: 4504-4522
- Fajardo, G., G. Escadeillas and G. Arliguie. 2006. Electrochemical Chloride Extraction (ECE) from Steel-Reinforced Concrete Specimens Contaminated by Artificial Sea-Water. Corrosion Science. Elsevier Ltd. Corrosion Science 48: 110-125
- Gerodo, G. C. and R. J. Donald. 2000. Trial Application of Electrochemical Chloride Extraction on Concrete Bridge Components in Virginia. Virginia Transportation Research Council. U.S. Department of Transportation. VTRC 00-R18
- Hassanein, A.M., G.K. Glass and N.R. Buenfeld. 2002. Protection Current Distribution in Reinforced Concrete Cathodic Protection Systems. Cement and Concrete Research. Elsevier Ltd. Cement and Concrete Research 24: 159-167.

- Ihekwhaha, N.M., B.B. Hope and C.M. Hansson. 1996. Carbonation and Electrochemical Chloride Extraction from Concrete. Cement and Concrete Research. Pergamon. Cement and Concrete Research 27 No.8. 1095-1107
- Neville, A.M. 1997. Properties of Concrete. 4th and Final Edition. John Wiley and Sonc, Inc., New York.
- Miranda, J.M., J.A. Gonzalez, A. Cobo and E. Otero. 2006. Several Question about Electrochemical Rehabilitation Methods for Reinforced Concrete Structure. Corrosion Science. Elsevier Ltd. Corrosion Science 48: 2172-2188.
- Mejlhede Jensena, O., P. Freiesleben Hansenb, A.M. Coatsc and F.P. Glasserc. 1999. Chloride Ingress in Cement Paste and Mortar. Cement and Concrete Research. Pergamon. Cement and Concrete Research 29: 1497-1504.
- Megrath, P.F. and R.D. Hooton. 1996. Influence of Voltage on Chloride Diffusion Coefficients from Chloride Migration Tests. Cement and Concrete Research. Elsevier Ltd. Cement and Concrete Research 26 No.8: 1239-1244
- Mindess, S., J.F. Young and D. Darwin. 2003. Concrete. Prentice Hall, Inc., New Jersey
- Orellan, J.C., G. Escadeillas and G. Arliguie. 2004. Electrochemical Chloride Extraction: Efficiency and Side Effects. Cement and Concrete Research. Pergamon. Cement and Concrete Research 34: 227-234.
- Prince, W. and R. Gagne. 2001. The Effects of Types of Solutions used in Accelerated Chloride Migration Tests for Concrete. Cement and Concrete Research. Pergamon. Cement and Concrete Research 31. 775-780

Rob, B. P. 1995. Electrochemical Chloride Removal from Concrete Prisms Containing Chloride Penetrated from Sea Water. *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd. Vol. 10. No. 1: 83-88

Stephen, R. S., G. C. Gerry, Y. Paul Virmani, E. S. Glenn, G. K. Robert. 2002. Electrochemical Chloride Extraction: Influence of Concrete Surface on Treatment. Virginia Transportation Research Council. U.S. Department of Transportation. FHWA-RD-02-107





ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ปริมาณคลอไรด์อิสระในตัวอย่างคอนกรีตขนาด 30 x 30 x 10 ซม.
ก่อนและหลังกระบวนการดึงคลอไรด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

ตารางผนวกที่ ก1 ปริมาณคลอไรด์อิสระในตัวอย่างคอนกรีตขนาด 30 x 30 x10 ซม. ก่อนและหลัง กระบวนการดึงคลอไรด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้สารละลายแคลเซียม ไฮดรอกไซด์อิ่มตัวเป็นอิเล็กโทรไลต์

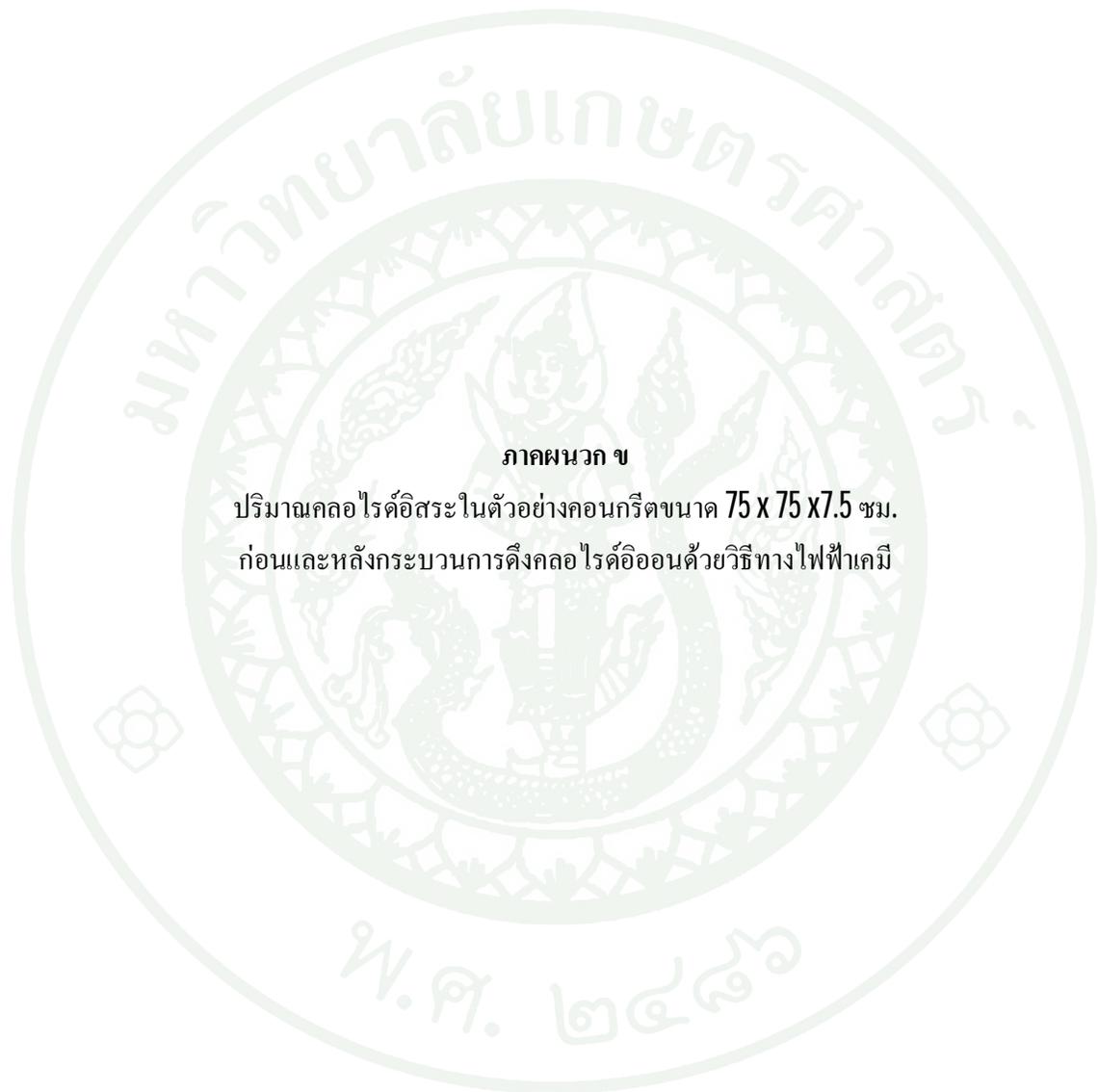
| Sample Name | Depth (cm.) | Voltage (Volts) | Percent of Chloride by weight of concrete | |
|-------------|-------------|-----------------|---|-----------|
| | | | Before ECR | After ECR |
| C-05 | 1 | 5 | 0.4880 | 0.318 |
| | 2 | | 0.4765 | 0.316 |
| | 3 | | 0.5032 | 0.428 |
| | 4 | | 0.5025 | 0.451 |
| C-10 | 1 | 10 | 0.4366 | 0.146 |
| | 2 | | 0.4755 | 0.135 |
| | 3 | | 0.4685 | 0.204 |
| | 4 | | 0.4992 | 0.346 |
| C-15 | 1 | 15 | 0.4228 | 0.142 |
| | 2 | | 0.4209 | 0.103 |
| | 3 | | 0.4391 | 0.143 |
| | 4 | | 0.4955 | 0.294 |

ตารางผนวกที่ ก2 ปริมาณคลอไรด์อิสระในตัวอย่างคอนกรีตขนาด 30 x 30 x10 ซม. ก่อนและหลังกระบวนการดึงคลอไรด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นอิเล็กโทรไลต์

| Sample Name | Depth (cm.) | Voltage (Volts) | Percent of Chloride by weight of concrete | |
|-------------|-------------|-----------------|---|-----------|
| | | | Before ECR | After ECR |
| N-05 | 1 | 5 | 0.4680 | 0.329 |
| | 2 | | 0.4868 | 0.323 |
| | 3 | | 0.4722 | 0.379 |
| | 4 | | 0.4955 | 0.439 |
| N-10 | 1 | 10 | 0.4234 | 0.330 |
| | 2 | | 0.4785 | 0.328 |
| | 3 | | 0.4882 | 0.284 |
| | 4 | | 0.5025 | 0.376 |
| N-15 | 1 | 15 | 0.4594 | 0.196 |
| | 2 | | 0.5045 | 0.169 |
| | 3 | | 0.4857 | 0.281 |
| | 4 | | 0.4853 | 0.385 |

ตารางผนวกที่ 3 ปริมาณคลอไรด์อิสระในตัวอย่างคอนกรีตขนาด 30 x 30 x10 ซม. ก่อนและหลัง กระบวนการดึงคลอไรด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้สารละลาย โปแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นอิเล็กโทรไลต์

| Sample Name | Depth (cm.) | Voltage (Volts) | Percent of Chloride by weight of concrete | |
|-------------|-------------|-----------------|---|-----------|
| | | | Before ECR | After ECR |
| K-05 | 1 | 5 | 0.5015 | 0.302 |
| | 2 | | 0.4318 | 0.302 |
| | 3 | | 0.4353 | 0.319 |
| | 4 | | 0.4535 | 0.397 |
| K-10 | 1 | 10 | 0.4438 | 0.216 |
| | 2 | | 0.5039 | 0.138 |
| | 3 | | 0.4883 | 0.223 |
| | 4 | | 0.4722 | 0.305 |
| K-15 | 1 | 15 | 0.3895 | 0.145 |
| | 2 | | 0.4576 | 0.109 |
| | 3 | | 0.5084 | 0.163 |
| | 4 | | 0.5425 | 0.311 |



ภาคผนวก ข

ปริมาณคลอรีนอิสระในตัวอย่างคอนกรีตขนาด 75 x 75 x 7.5 ซม.
ก่อนและหลังกระบวนการดึงคลอรีนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

ตารางผนวกที่ ข1 ปริมาณคลอไรด์อิสระในตัวอย่างคอนกรีตขนาด 75 x 75 x 7.5 ซม. ก่อนและหลัง กระบวนการคั่งคลอไรด์อ่อนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีเฉลี่ยที่ระดับความลึก 1 ซม.

| Coordinate | | Chloride Content (% by weight of cement) | |
|------------|--------|--|-----------|
| X-Axis | Y-Axis | Before ECR | After ECR |
| 0 | 0 | 0.48 | 0.14 |
| 150 | 0 | 0.53 | 0.13 |
| 300 | 0 | 0.59 | 0.27 |
| 450 | 0 | 0.60 | 0.35 |
| 600 | 0 | 0.60 | 0.31 |
| 0 | 150 | 0.55 | 0.12 |
| 150 | 150 | 0.59 | 0.21 |
| 300 | 150 | 0.62 | 0.34 |
| 450 | 150 | 0.67 | 0.37 |
| 600 | 150 | 0.65 | 0.38 |
| 0 | 300 | 0.66 | 0.34 |
| 150 | 300 | 0.64 | 0.36 |
| 300 | 300 | 0.62 | 0.34 |
| 450 | 300 | 0.65 | 0.39 |
| 600 | 300 | 0.55 | 0.34 |
| 0 | 450 | 0.49 | 0.25 |
| 150 | 450 | 0.50 | 0.29 |
| 300 | 450 | 0.43 | 0.30 |
| 450 | 450 | 0.45 | 0.27 |
| 600 | 450 | 0.61 | 0.39 |
| 0 | 600 | 0.61 | 0.42 |
| 150 | 600 | 0.43 | 0.33 |
| 300 | 600 | 0.44 | 0.34 |
| 450 | 600 | 0.55 | 0.38 |
| 600 | 600 | 0.58 | 0.42 |

ตารางผนวกที่ ข2 ปริมาณคลอไรด์อิสระในตัวอย่างคอนกรีตขนาด 75 x 75 x 7.5 ซม. ก่อนและหลัง กระบวนการคั่งคลอไรด์อออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีเฉลี่ยที่ระดับความลึก 2 ซม.

| Coordinate | | Chloride Content (% by weight of cement) | |
|------------|--------|--|-----------|
| X-Axis | Y-Axis | Before ECR | After ECR |
| 0 | 0 | 0.63 | 0.20 |
| 150 | 0 | 0.68 | 0.18 |
| 300 | 0 | 0.77 | 0.34 |
| 450 | 0 | 0.80 | 0.35 |
| 600 | 0 | 0.77 | 0.45 |
| 0 | 150 | 0.62 | 0.20 |
| 150 | 150 | 0.71 | 0.21 |
| 300 | 150 | 0.85 | 0.40 |
| 450 | 150 | 0.70 | 0.40 |
| 600 | 150 | 0.70 | 0.45 |
| 0 | 300 | 0.79 | 0.34 |
| 150 | 300 | 0.77 | 0.36 |
| 300 | 300 | 0.76 | 0.46 |
| 450 | 300 | 0.63 | 0.44 |
| 600 | 300 | 0.69 | 0.52 |
| 0 | 450 | 0.85 | 0.48 |
| 150 | 450 | 0.74 | 0.43 |
| 300 | 450 | 0.61 | 0.45 |
| 450 | 450 | 0.75 | 0.51 |
| 600 | 450 | 0.71 | 0.54 |
| 0 | 600 | 0.79 | 0.58 |
| 150 | 600 | 0.72 | 0.51 |
| 300 | 600 | 0.66 | 0.46 |
| 450 | 600 | 0.62 | 0.53 |
| 600 | 600 | 0.72 | 0.51 |

ตารางผนวกที่ ๓ ปริมาณคลอไรด์อิสระในตัวอย่างคอนกรีตขนาด 75 x 75 x 7.5 ซม. ก่อนและหลัง กระบวนการดึงคลอไรด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีเฉลี่ยที่ระดับความลึก 3 ซม.

| Coordinate | | Chloride Content (% by weight of cement) | |
|------------|--------|--|-----------|
| X-Axis | Y-Axis | Before ECR | After ECR |
| 0 | 0 | 0.72 | 0.25 |
| 150 | 0 | 0.76 | 0.23 |
| 300 | 0 | 0.72 | 0.40 |
| 450 | 0 | 0.74 | 0.47 |
| 600 | 0 | 0.72 | 0.49 |
| 0 | 150 | 0.81 | 0.24 |
| 150 | 150 | 0.74 | 0.24 |
| 300 | 150 | 0.80 | 0.47 |
| 450 | 150 | 0.72 | 0.51 |
| 600 | 150 | 0.78 | 0.43 |
| 0 | 300 | 0.73 | 0.40 |
| 150 | 300 | 0.71 | 0.42 |
| 300 | 300 | 0.68 | 0.40 |
| 450 | 300 | 0.73 | 0.47 |
| 600 | 300 | 0.83 | 0.64 |
| 0 | 450 | 0.76 | 0.51 |
| 150 | 450 | 0.85 | 0.56 |
| 300 | 450 | 0.75 | 0.58 |
| 450 | 450 | 0.81 | 0.55 |
| 600 | 450 | 0.83 | 0.62 |
| 0 | 600 | 0.71 | 0.57 |
| 150 | 600 | 0.73 | 0.61 |
| 300 | 600 | 0.75 | 0.66 |
| 450 | 600 | 0.80 | 0.68 |
| 600 | 600 | 0.72 | 0.68 |



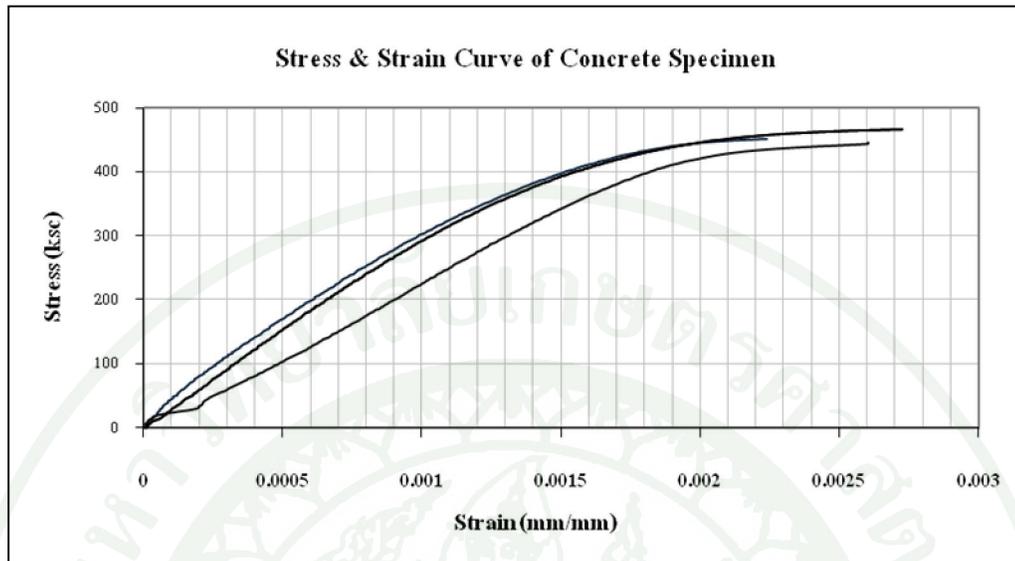
ภาคผนวก ค

ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 75 x 75 x 7.5 ซม.
ก่อนและหลังกระบวนการดึงคลอไรด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

ตารางผนวกที่ ๑1 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 75 x 75 x 7.5 ซม. ก่อนและหลังกระบวนการดิงคลอไรด์อออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

| Coordinate | | Half-Cell Potential (-mV) | |
|------------|--------|---------------------------|-----------|
| X-Axis | Y-Axis | Before ECR | After ECR |
| 0 | 0 | 409 | 221.00 |
| 150 | 0 | 390 | 220.00 |
| 300 | 0 | 490 | 299.00 |
| 450 | 0 | 393 | 284.00 |
| 600 | 0 | 431 | 302.00 |
| 0 | 150 | 433 | 233.00 |
| 150 | 150 | 377 | 235.00 |
| 300 | 150 | 393 | 308.00 |
| 450 | 150 | 388 | 313.00 |
| 600 | 150 | 415 | 338.00 |
| 0 | 300 | 408 | 354.00 |
| 150 | 300 | 401 | 332.00 |
| 300 | 300 | 391 | 316.00 |
| 450 | 300 | 404 | 321.00 |
| 600 | 300 | 435 | 328.00 |
| 0 | 450 | 400 | 377.00 |
| 150 | 450 | 453 | 361.00 |
| 300 | 450 | 407 | 345.00 |
| 450 | 450 | 372 | 371.00 |
| 600 | 450 | 412 | 389.00 |
| 0 | 600 | 401 | 361.00 |
| 150 | 600 | 407 | 362.00 |
| 300 | 600 | 421 | 378.00 |
| 450 | 600 | 427 | 358.00 |
| 600 | 600 | 421 | 368.00 |





ภาพผนวกที่ 1 ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ



ภาพผนวกที่ 2 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ

ตารางผนวกที่ 1 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ

| Sample | Ultimate Compressive Strength (f_c') | Ultimate Compressive Strain (ϵ_c) | Modulus of Elasticity (E_c) | Poisson's Ratio (ν) |
|---------|--|--|---------------------------------------|------------------------------|
| No. | ksc. | mm./mm. | ksc. | |
| 1 | 450.85 | 0.00224 | 318334 | 0.1083 |
| 2 | 466.80 | 0.00273 | 307786 | 0.1701 |
| 3 | 445.34 | 0.00260 | 208929 | 0.0381 |
| Average | 454.33 | 0.00252 | 278349 | 0.079 |

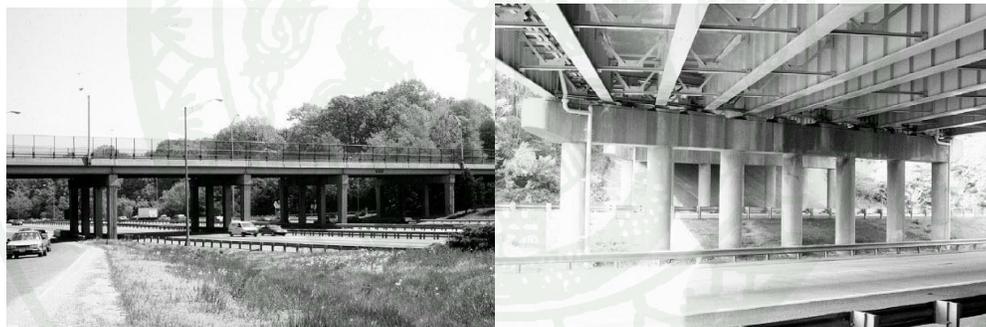


ภาคผนวก จ

การประยุกต์ใช้วิธีการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในต่างประเทศ

การลดปริมาณคลอไรด์ไฟฟ้าด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในคอนกรีตเสริมเหล็ก

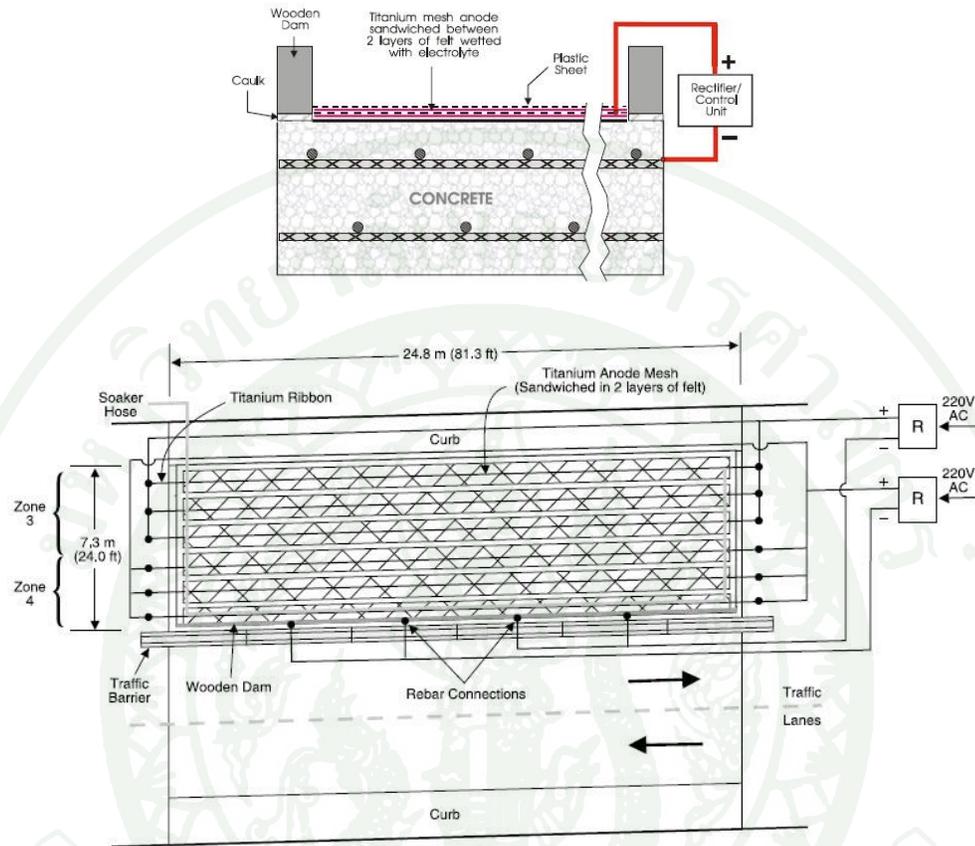
การนำวิธีทางไฟฟ้าเคมีเพื่อลดปริมาณ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในโครงสร้างที่เปิดการใช้งานและมีคลอไรด์ปนเปื้อนอยู่ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและมีแนวโน้มที่จะเกิดความเสียหายจากปัญหาของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดย Virginia Transportation Research Council ได้นำวิธีทางไฟฟ้าเคมีเพื่อลดปริมาณคลอไรด์ที่ปนเปื้อนอยู่ในคอนกรีตของโครงสร้างพื้นฐานของประเทศอเมริกาเช่น โครงสร้างสะพาน I-365 (34th Street Bridge Over I-365) ในปี 2000 ภายใต้การดูแลของ Gerodo G. Clemena และ Donald R. Jackson ซึ่งได้ใช้วิธี Electrochemical Chloride Extraction (ECE) เพื่อลดปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างสะพานซึ่งสะพาน I-365 เป็นสะพานเชิงประกอบ (Composite Structure) โดยมีพื้นถนน (Deck) และตอม่อ (Pier) เป็นโครงสร้างที่มีคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นส่วนประกอบของโครงสร้างที่จะใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีในการลดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในครั้งนี้



ภาพผนวกที่ จ1 ลักษณะทางกายภาพของสะพาน I-365 (34th Street Bridge Over I-365)

ที่มา: Gerodo and Donald (2000)

ภาพผนวกที่ จ1 แสดงลักษณะทางการภาพของ โครงสร้างสะพาน I-365 เพื่อนำมาวางแผนในการใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีเพื่อเป็นวางแผนในการเลือกชนิดของการติดตั้งอุปกรณ์และวิธีในการติดตั้งเพื่อให้เหมาะสมกับโครงสร้างแต่ละประเภทโดยโครงสร้างที่จะใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตคือ โครงสร้างพื้นและ โครงสร้างตอม่อสะพาน โดยวิธีในการติดตั้งอุปกรณ์ในการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตของโครงสร้างทั้ง 2 ลักษณะดังกล่าวดังแสดงในภาพผนวกที่ จ2 ถึง จ6



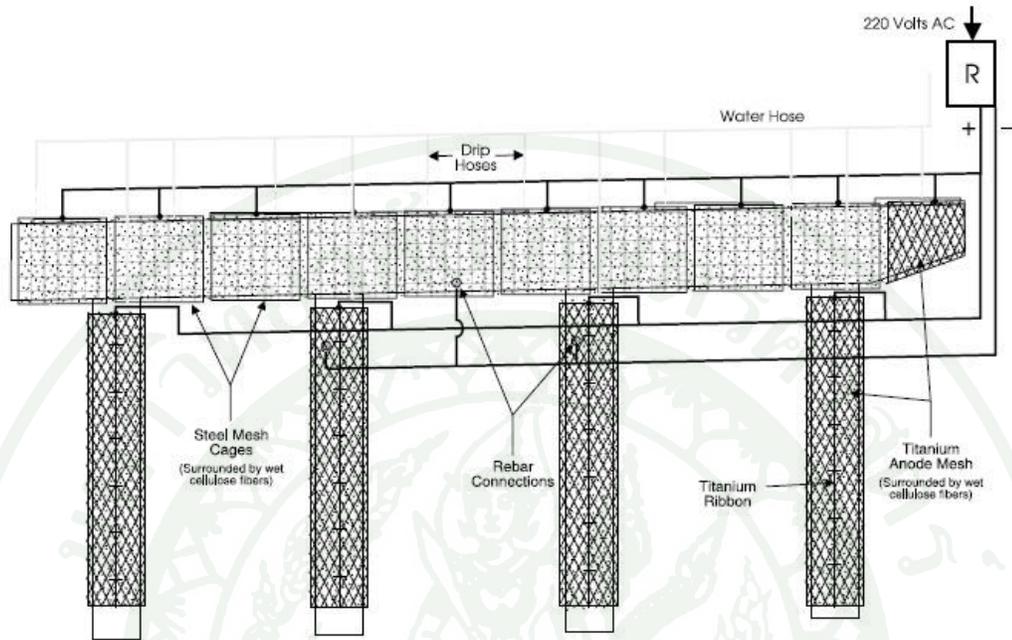
ภาพผนวกที่ ๒ การต่อวงจรไฟฟ้าและแผนภูมิของการติดตั้งอุปกรณ์ในการลดปริมาณคลอไรด์ใน
โครงสร้างพื้นสะพาน I-365

ที่มา: Gerodo and Donald (2000)



ภาพผนวกที่ 3 การติดตั้งอุปกรณ์ในการติดตั้งอุปกรณ์ในการลดปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้าง
พื้นสะพาน I-365

ที่มา: Gerodo and Donald Jackson (2000)



ภาพผนวกที่ ๔ แผนภูมิของการติดตั้งอุปกรณ์ในการลดปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีต
สะพาน I-365

ที่มา: Gerodo and Donald Jackson (2000)



ภาพผนวกที่ ๕ การติดตั้งอุปกรณ์ในการติดตั้งอุปกรณ์ในการลดปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้าง
คอนกรีตสะพาน I-365

ที่มา: Gerodo and Donald Jackson (2000)



ภาพผนวกที่ จ6 การติดตั้งอุปกรณ์ในการติดตั้งอุปกรณ์ในการลดปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้าง
ตอม่อสะพาน I-365

ที่มา: Gerodo and Donald Jackson (2000)

จากภาพผนวกที่ จ3-จ6 แสดงแผนภูมิการติดตั้งอุปกรณ์ในการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีของสะพาน I-365 โดยในส่วนของพื้นสะพานใช้วิธีการปูแผ่นผ้าสังเคราะห์เป็นตัวนำไฟฟ้าและใช้ตะแกรงลวดไทเทเนียมเป็นสื่อในการนำกระแสไฟฟ้าขั้วบวกเพื่อทำการดึงคลอไรด์ที่อยู่ในคอนกรีตส่วนโครงสร้างตอม่อสะพานใช้เซลลูโลส (Cellulose) เป็นตัวนำไฟฟ้าและใช้ตะแกรงลวดไทเทเนียมและตะแกรงเหล็กเป็นสื่อในการนำกระแสไฟฟ้าขั้วบวก โดยทำการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 40 โวลต์เข้าสู่กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีเพื่อลดปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ในคอนกรีตโดยใช้ระยะเวลาในการลดปริมาณดึงคลอไรด์จากคอนกรีตเป็นเวลา 8 อาทิตย์

หลังจากทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อทำการลดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีพบว่าปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างสะพาน I-365 พบว่าสามารถลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตลงประมาณร้อยละ 80 สำหรับโครงสร้างพื้นสะพานและประมาณร้อยละ 40 สำหรับโครงสร้างตอม่อสะพาน โดยรายละเอียดของปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังกระบวนการลดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีของสะพาน I-365 ได้แสดงไว้ในตารางผนวกที่ จ1 - จ2

ตารางผนวกที่ ๑1 Mean Chloride Concentration at Various in Deck Areas Before and After Treatment (kg./m.³)

| Concrete Component | At 6 to 19 mm. | | | At 19 to 32 mm. | | |
|--------------------|----------------|---------|------------|-----------------|---------|------------|
| | Before | After | Change (%) | Before | After | Change (%) |
| Deck 4N | 5.20 | 1.04 | -80.0 | 2.68 | 0.59 | -78.0 |
| Deck 4N | 5.92 | 1.06 | -82.1 | 3.78 | 0.69 | -81.7 |
| Deck 4N | 5.03 | 1.07 | -78.7 | 3.05 | 0.71 | -76.7 |
| Deck 4N | 4.97 | 1.20 | -75.8 | 2.34 | 0.65 | -72.2 |
| | | Average | -79.2 | | Average | -77.2 |
| | | SD | 2.6 | | SD | 3.9 |

ที่มา: Gerodo and Donald Jackson (2000)

ตารางผนวกที่ ๑2 Mean Chloride Concentration at Various in Pears Before and After Treatment (kg./m.³)

| Concrete Component | At 6 to 19 mm. | | | At 19 to 32 mm. | | |
|--------------------|----------------|---------|------------|-----------------|---------|------------|
| | Before | After | Change (%) | Before | After | Change (%) |
| Pier 1 | 1.35 | 0.88 | -34.6 | 0.85 | 0.74 | -12.6 |
| Pier 2 | 1.97 | 0.79 | -59.7 | 1.10 | 0.52 | -52.9 |
| Pier 3 | 1.47 | 1.07 | -27.2 | 1.12 | 0.73 | -34.8 |
| | | Average | -40.5 | | Average | -33.4 |
| | | SD | 17.0 | | SD | 20.2 |

ที่มา: Gerodo and Jackson (2000)



ภาคผนวก จ

การเตรียมตัวอย่างในการทดสอบ การหาปริมาณคลอไรด์ในผงคอนกรีต
การทดสอบการดึงคลอไรด์จากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี
และการทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ (Chloride Migration Test)

การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กในการทดสอบ



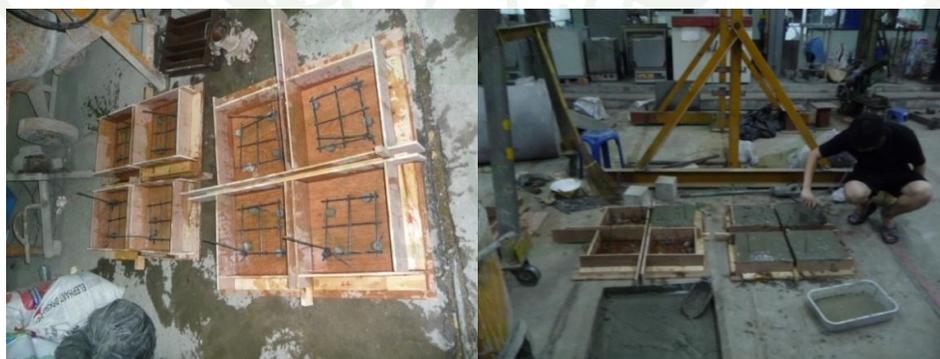
ภาพผนวกที่ ๑ การเตรียมส่วนผสมโดยเตรียมตามน้ำหนักตามปฏิภาคส่วนผสมที่กำหนดไว้



ภาพผนวกที่ ๒ การผสมคอนกรีตตามส่วนผสมที่ชั่งน้ำหนักไว้แล้ว



ภาพผนวกที่ ๓ การผสมคอนกรีตและการทดสอบค่าการยุบของคอนกรีต



ภาพผนวกที่ ๔ การเตรียมแบบเทคอนกรีตและการเทคอนกรีตตัวอย่างขนาด 30 x 30 x 10 ซม.



ภาพผนวกที่ ๕ การเตรียมแบบเทคอนกรีตและการเทคอนกรีตตัวอย่างขนาด 70 x 70 x 7.5 ซม.



ภาพผนวกที่ ๖ เตรียมตัวอย่างไปบ่มในน้ำประปาเป็นเวลา 28 วัน



ภาพผนวกที่ ๗ การหาปริมาณคลอไรด์ในผงคอนกรีตก่อนการดึงคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีและการชั่งสารละลายด้านบนตัวอย่างเพื่อทำการดึงคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในผงคอนกรีต



ภาพผนวกที่ ๘ การเจาะคอนกรีตเพื่อนำผลคอนกรีตไปหาปริมาณคลอไรด์อิสระ



ภาพผนวกที่ ๙ นำผงคอนกรีตมาแช่ในน้ำกลั่นและแช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชม. และทำการกรอง

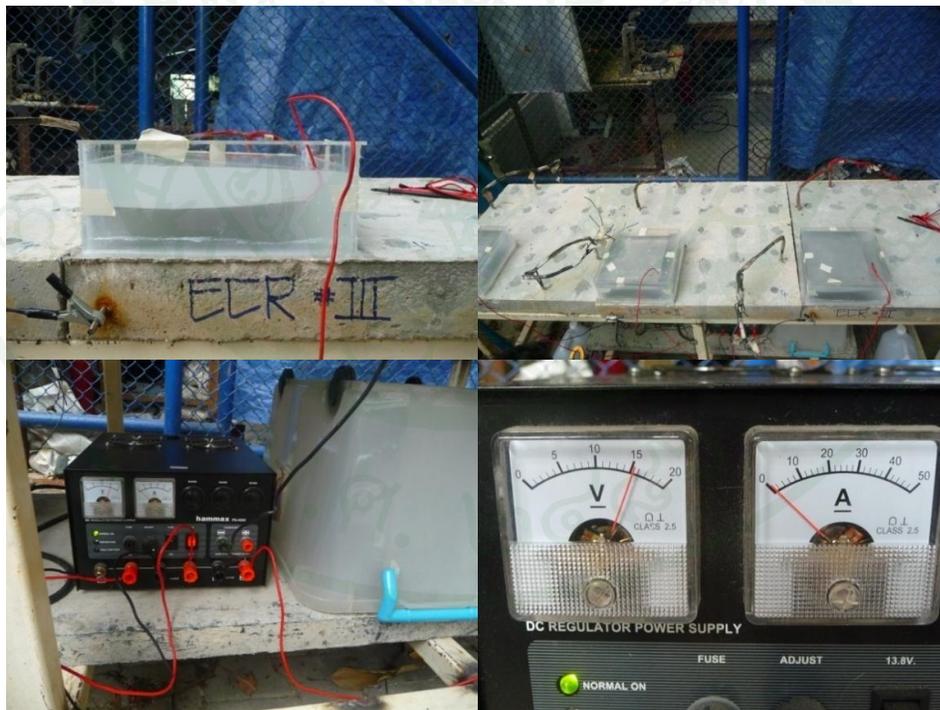


ภาพผนวกที่ ๑๐ นำตัวอย่างที่ทำการกรองผงคอนกรีตมาหาปริมาณคลอไรด์ในน้ำกลั่นที่แช่ผงคอนกรีต

การวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเครื่องเซลล์และการดึงคลอไรต์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี



ภาพผนวกที่ ๑1 ทำการระบุตำแหน่งในการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเครื่องเซลล์โดยเตรียมตัวอย่างให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ

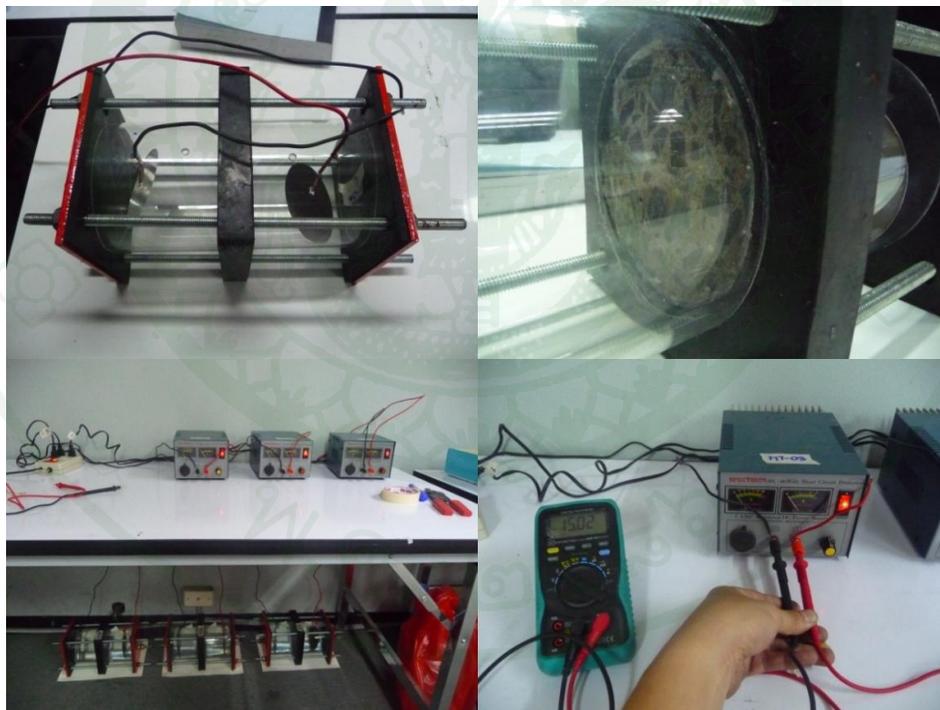


ภาพผนวกที่ ๑2 การขังสารละลายด้านบนของตัวอย่างคอนกรีตและทำการจ่ายไฟฟ้าด้วยเครื่องแปลงไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 โวลต์เป็นเวลา 28 วัน

การทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนด้วยไฟฟ้า (Chloride Migration Test)



ภาพผนวกที่ ๑๓ เตรียมตัวอย่างคอนกรีตความหนา 1 นิ้วและทำการอุดรอยร้าวด้วยซิลิโคน



ภาพผนวกที่ ๑๔ นำตัวอย่างไปประกอบในอุปกรณ์ในการทดลองที่เตรียมไว้และทำการเติมสารละลายในท่ออะคลิลิกและทำการจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 15 โวลต์



ภาคผนวก ข

แนวทางการพัฒนาการลดปริมาณคลอไรด์อินทรีย์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

แนวทางการพัฒนาการดิ่งคลอไรด์ไอออนจากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

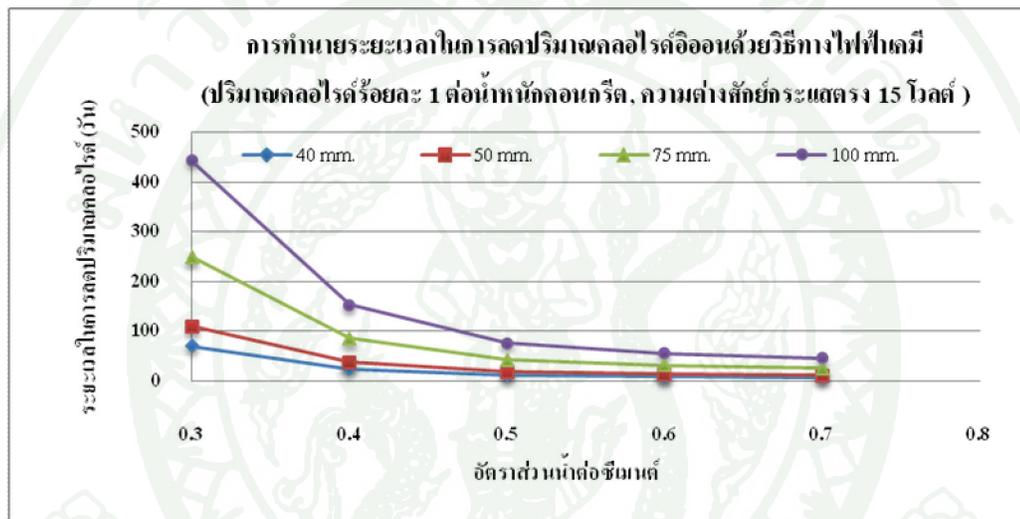
จากรายงานผลการศึกษาศึกษาของ Jenson (1999) เกี่ยวกับสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C Ratio) แตกต่างกัน พบว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำจะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่ต่ำไปด้วย และวิธีการดิ่งคลอไรด์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีนั้นสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคอนกรีตมีผลโดยตรงต่อระยะเวลาในการดิ่งคลอไรด์ไอออนจากคอนกรีตจึงได้นำผลการศึกษาดังกล่าวมาใช้เป็นแนวทางในการทำนายระยะเวลาในการดิ่งคลอไรด์จากคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่แตกต่างกัน และยังกำหนดให้ระยะหุ้มเหล็กเสริมที่แตกต่างกันซึ่งระยะหุ้มเหล็กเสริมนั้นก็คือระยะทางในการเดินทางของคลอไรด์มาสู่สารละลายจากสมการของ Nernst planck จึงได้ทำนายระยะเวลาในการดิ่งคลอไรด์จากคอนกรีตโดยใช้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคอนกรีตงานวิจัยของ O. Mejlhede Jenson โดยสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่แตกต่างกันดังได้แสดงในไว้ตารางที่ ข1

ตารางผนวกที่ ข1 สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างๆ

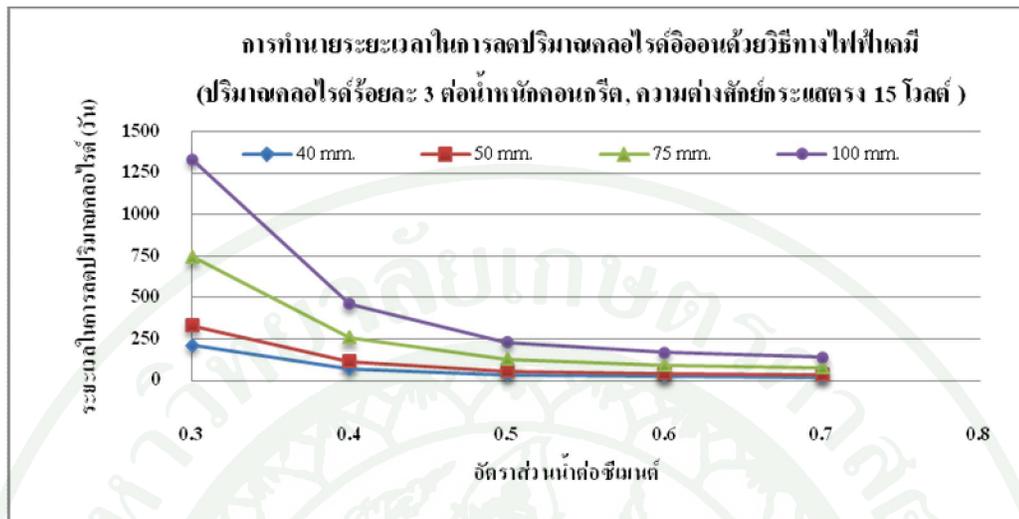
| อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c ratio) | สัมประสิทธิ์การแพร่ Diffusion Coefficient ($\times 10^{-12}$ m ² /s) |
|---------------------------------------|---|
| 0.2 | 0.8 |
| 0.3 | 3.8 |
| 0.4 | 11 |
| 0.5 | 22 |
| 0.6 | 30 |
| 0.7 | 36 |

ที่มา: Jenson (1999)

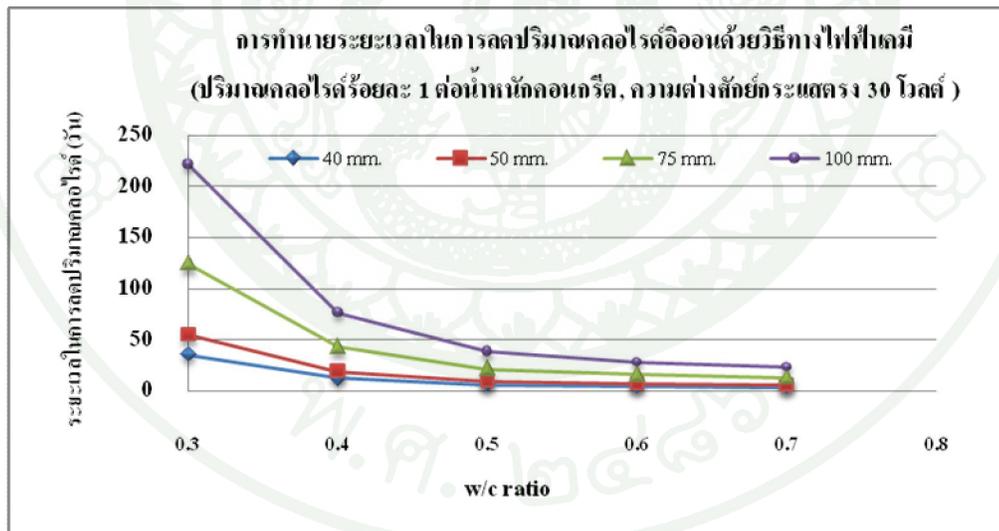
จากการทดลองทำนายระยะเวลาในการดิ่งคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าขนาด 15 และ 30 โวลต์ กับคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างๆ โดยมีระยะหุ้มเหล็กเสริมเท่ากับ 40, 50, 75, และ 100 มม. ตามลำดับและกำหนดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตเท่ากับร้อยละ 1 และร้อยละ 3 โดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าขนาด 15 โวลต์ และร้อยละ 1 โดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าขนาด 30 โวลต์เพื่อให้เห็นถึงผลกระทบต่างๆ ในการดิ่งคลอไรด์ไอออนจากคอนกรีต โดยมีผลการทำนายดังแสดงในภาพผนวกที่ ช1-ช3



ภาพผนวกที่ ช1 ระยะเวลาในการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 โวลต์และปริมาณคลอไรด์ร้อยละ 1 ต่อน้ำหนักคอนกรีต



ภาพผนวกที่ ๒ ระยะเวลาในการลดปริมาณคลอรีนในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 โวลต์และปริมาณคลอรีนร้อยละ 3 ต่อน้ำหนักคอนกรีต



ภาพผนวกที่ ๓ ระยะเวลาในการลดปริมาณคลอรีนในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 โวลต์และปริมาณคลอรีนร้อยละ 1 ต่อน้ำหนักคอนกรีต

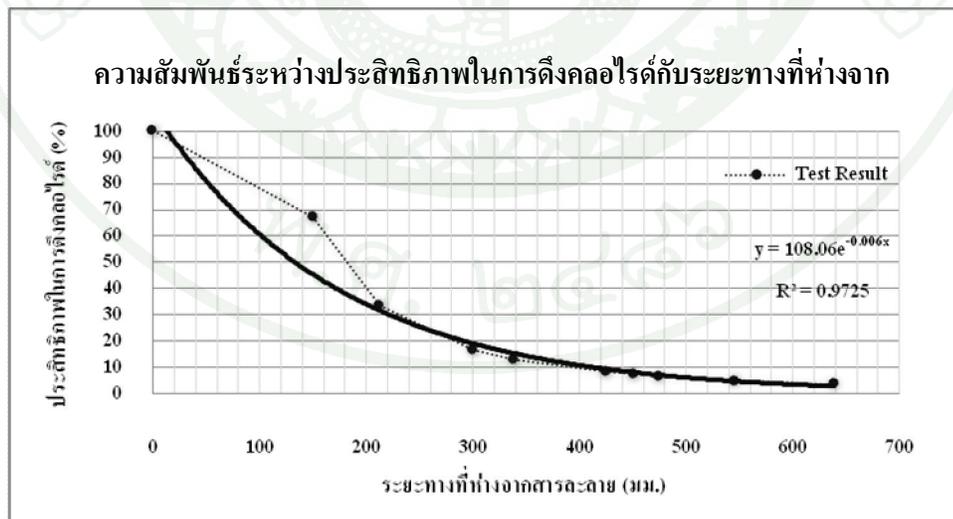
ภาพผนวกที่ ช1-ช3 แสดงระยะเวลาในการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีตามระยะความลึกที่ห่างออกจากสารละลายของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ระหว่าง 0.3-0.7 พบว่าความสามารถในการดึงคลอไรด์ไอออนแปรผกผันตามระยะทางที่ห่างออกจากสารละลาย และผลกระทบของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างกันทำให้มีสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ต่างกัน โดยจากงานวิจัยของ Jenson ในปี 1999 พบว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงจะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านสูงตามไปด้วย และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านนั้นส่งผลโดยตรงกับการดึงคลอไรด์ไอออนออกจากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี โดยจากการทำนายระยะเวลาในการดึงคอนกรีตดังแสดงในภาพที่ ช1-ช3 พบว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงจะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านสูงส่งผลให้ระยะเวลาในการดึงคลอไรด์ไอออนออกมาได้มากกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำเนื่องจากสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่ต่ำกว่า โดยระยะหุ้มเหล็กเสริมและปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตยังส่งผลต่อระยะเวลาในการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตอีกด้วยดังแสดงการเปรียบเทียบในภาพผนวกที่ ช1-ช2 แต่ขนาดของกระแสไฟฟ้ายังเป็นสาเหตุหลักในการลดปริมาณคลอไรด์ไอออนจากคอนกรีตโดยเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าจาก 15 เป็น 30 โวลต์ดังแสดงในภาพที่ ช1 และภาพที่ ช3 พบว่าลดระยะเวลาในการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของความต่างศักย์ไฟฟ้าจาก 15 โวลต์



ภาคผนวก ข
แนวทางการออกแบบการดึงคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีในภาคสนาม

แนวทางการออกแบบการดึงคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีในภาคสนาม

การลดปริมาณคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในโครงสร้างในภาคสนามนั้นควรทำให้วิธีการในการติดอุปกรณ์ให้สามารถทำได้ง่ายและใช้ระยะเวลาในการทำได้น้อยที่สุดโดยอาจจะประเมินปริมาณคลอไรด์ที่มีอยู่เบื้องต้นและจัดทำเส้นชั้นระดับของปริมาณคลอไรด์ที่มีอยู่ในคอนกรีตเพื่อที่จะเลือกพื้นที่ในการติดตั้งสารละลายในการดึงคลอไรด์ไอออนจากคอนกรีตเพื่อที่จะให้เกิดประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ไอออนจากคอนกรีตและงบประมาณที่ใช้ในการซ่อมแซมโครงสร้างเกิดประสิทธิภาพสูงสุด งานวิจัยในครั้งนี้จึงนำเสนอแนวทางในการออกแบบการดึงคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในงานภาคสนาม โดยได้นำผลการทดลองในห้องปฏิบัติการมาเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบวิธีดังกล่าวซึ่งการทดลองในห้องปฏิบัติการพบว่าประสิทธิภาพของการดึงคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในบริเวณที่ทำการติดตั้งสารละลายมีแนวโน้มที่จะสามารถดึงคลอไรด์จากคอนกรีตจนหมดในบริเวณที่ทำการติดตั้งสารละลายและลดลงตามระยะทางที่ห่างออกจากคอนกรีตโดยได้นำผลการทดลองในส่วนของประสิทธิภาพของการดึงคลอไรด์ในระยะทางที่ห่างออกจากสารละลายและนำมาพล็อตเส้นแนวโน้มเพื่อหาสมการที่จะลดทอดประสิทธิภาพของการดึงคลอไรด์ในคอนกรีตบริเวณที่ไม่ได้สัมผัสสารละลายโดยตรงดังแสดงในภาพที่ ๑



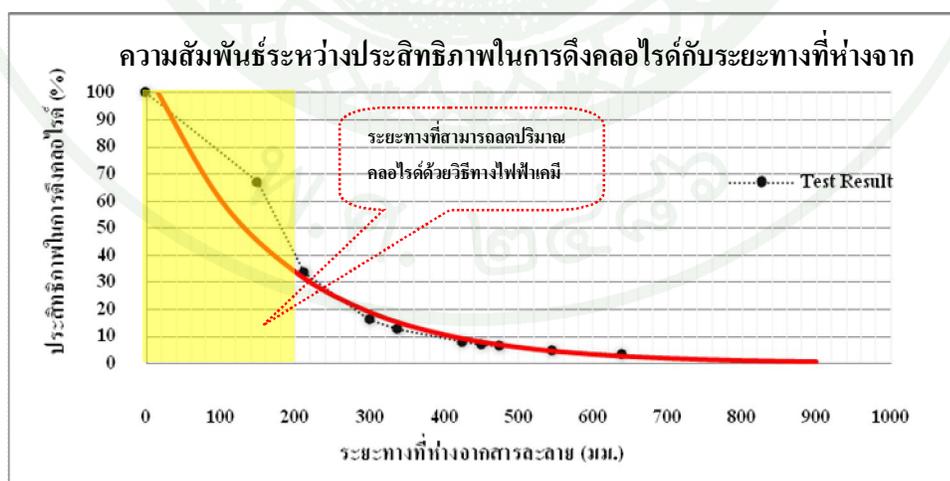
ภาพผนวกที่ ๑1 เส้นแนวโน้มของการลดลงของประสิทธิภาพในการลดลงของประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์จากคอนกรีตในบริเวณที่ไม่ได้สัมผัสกับสารละลายโดยตรง

ภาพผนวกที่ ซ1 แสดงการลดลงของประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ไอออนในคอนกรีต เนื่องจากระยะทางในการเดินทางของคลอไรด์สู่สารละลายโดยพบว่าเส้นแนวโน้มในการลดลงเป็นการลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential) โดยความสัมพันธ์ของการลดลงของประสิทธิภาพดังกล่าวแสดงในสมการที่ ซ1

$$P_{\text{Decrease}} = 108.06e^{-0.006x} \quad (\%) \quad (\text{ซ1})$$

เมื่อ P_{Decrease} = ร้อยละของประสิทธิภาพที่ลดลงเนื่องจากระยะทางที่ห่างจากสารละลาย (%)
 X = ระยะทางที่ห่างออกจากสารละลาย (มม.)

โดยเบื้องต้นพบว่าประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ไอออนจากคอนกรีตบริเวณที่ไม่ได้สัมผัสกับสารละลายพบว่ามีระยะประสิทธิภาพเท่ากับ 200 มม. จากบริเวณที่ทำการติดตั้งสารละลายดังแสดงในภาพที่ ซ2 แต่อย่างไรก็ตามสมการ ซ1 เป็นสมการที่ได้จากการทดลองภายใต้เงื่อนไขในการทดลองครั้งนี้แต่เมื่อมีการเปลี่ยนตัวแปรในการทดลองเช่นขนาดของกระแสไฟฟ้า สารละลายอิเล็กโทรไลต์ หรือระยะเวลาในการทดลองอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นแต่อย่างไรก็ตามการลดลงของประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีจากระยะทางที่ห่างจากสารละลายมีแนวโน้มที่จะลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential)



ภาพผนวกที่ ซ2 ระยะทางที่มีประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ไอออนจากคอนกรีตตามระยะทางที่ห่างจากสารละลาย

จากการนำเสนอผลการ ช1 มาหาประสิทธิภาพของการดึงคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีพบว่า มีระยะทางที่มีประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์เท่ากับ 200 มม. จากสารละลาย กล่าวคือสามารถลดลงได้ร้อยละ 40 ที่ระยะ 200 มม. และสามารถลดลงได้ร้อยละ 100 ในบริเวณที่ทำการติดตั้งสารละลายโดยประสิทธิภาพที่ลดลงตามระยะทางดังกล่าวดังแสดงในตารางผนวกที่ ช1

ตารางผนวกที่ ช1 การลดลงของประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตที่ลดลงจาก ระยะทางที่ห่างจากสารละลาย

| ระยะทางที่ห่างจากสารละลาย (มม.) | ร้อยละของประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ ตามระยะทางที่ห่างจากสารละลาย |
|------------------------------------|---|
| 0 | 100.00 |
| 100 | 60.50 |
| 200 | 33.88 |
| 300 | 18.97 |
| 400 | 10.62 |
| 500 | 5.95 |
| 600 | 3.33 |
| 700 | 1.86 |
| 800 | 1.04 |
| 900 | 0.58 |
| 1000 | 0.33 |

จากข้อมูลดังในตารางผนวกที่ ช1 สามารถนำมาเป็นแนวทางในการวางแผนการดึงคลอไรด์ไอออนจากคอนกรีต โดยที่ไม่ต้องทำการติดตั้งสารละลายทั่วบริเวณที่จะต้องการดึงคลอไรด์ไอออนและเมื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาออกแบบการดึงคลอไรด์ไอออนจากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี จะทำให้ทราบถึงระยะห่างที่จะทำการติดตั้งสารละลายในการดึงคลอไรด์ไอออนจากคอนกรีต โดยตัวอย่างในการออกแบบระยะห่างในการติดตั้งสารละลายควรทำการตรวจสอบปริมาณคลอไรด์ของ โครงสร้างที่จะทำการซ่อมแซมเพื่อที่จะทราบถึงตำแหน่งที่ติดตั้งสารละลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ที่สุดตามที่กล่าวมาข้างต้น

แนวทางการออกแบบการดึงคลอไรด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

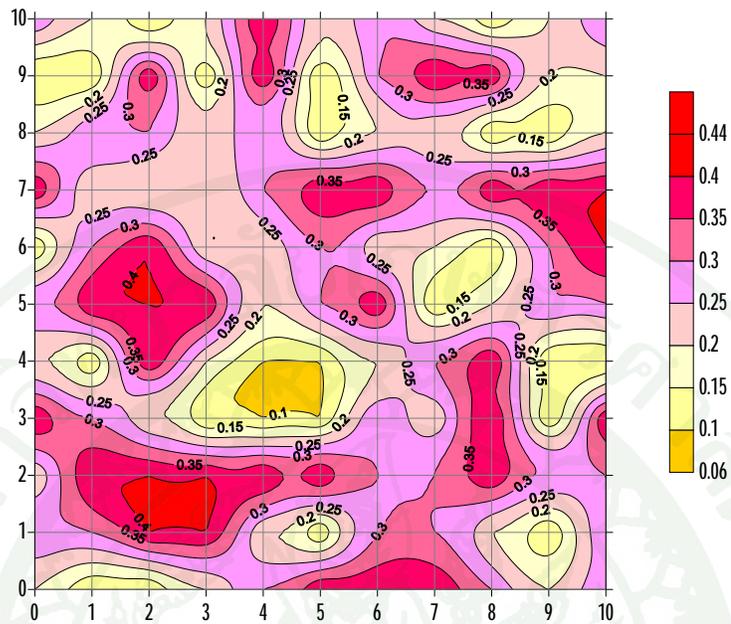
ชนิดของ โครงสร้าง : พื้นคอนกรีตเสริมเหล็กทำเรือเอกชนขนาด 10 ม. x 10 ม.
(สมมุติขึ้นเพื่อการวิจัย)การวางแผนในการซ่อมแซมโครงสร้าง

ระยะเวลาในการซ่อมแซม : 28 วัน

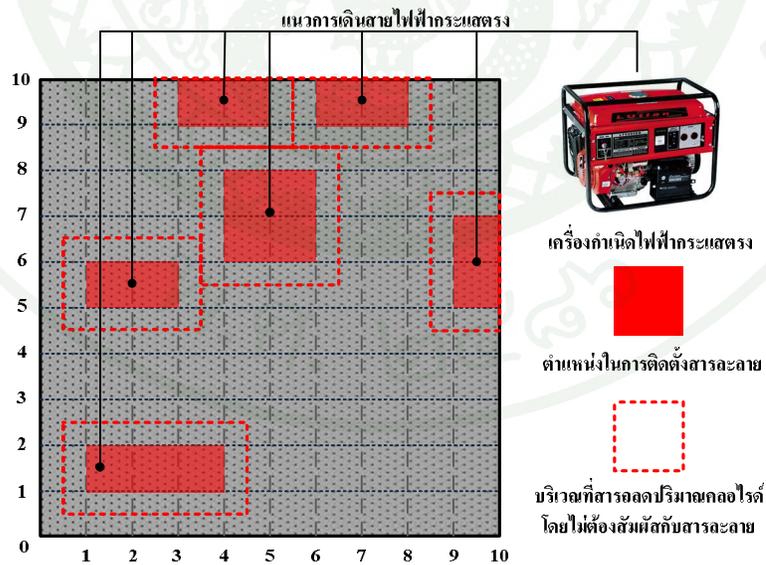


ภาพผนวกที่ ๓ ตัวอย่างของโครงสร้างที่จะทำการวางแผนการซ่อมแซมโครงสร้างด้วยการดึงคลอไรด์ออกจากคอนกรีต

โดยทั่วไปจะต้องทำการประเมินความเสียหายทางการภาพเบื้องต้นเพื่อหาสาเหตุประกอบในการที่จะประเมินความเสียหายของโครงสร้างนั้นๆเมื่อทำการสำรวจเบื้องต้นแล้วก่อนการวางแผนการซ่อมแซมโครงสร้างด้วยการดึงคลอไรด์ออกจากคอนกรีตควรที่จะทำการสำรวจหาปริมาณคลอไรด์ที่ปนเปื้อนอยู่ในคอนกรีตเพื่อที่จะทราบถึงปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตและทำการพล็อตเส้นระดับชั้นของปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ในพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กดังแสดงในภาพผนวกที่ ๔ เพื่อที่จะหาตำแหน่งที่จะติดตั้งสารละลายเพื่อดึงคลอไรด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี และทำจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงเข้ากับสื่อนำไฟฟ้าที่ใช้เช่น แสตนเลส หรือ โลหะนำไฟฟ้าชนิดอื่นที่นำไฟฟ้าและทนต่อการกัดกร่อนในการถูกแรงด้วยกระแสไฟฟ้าโดยเลือกบริเวณติดตั้งสารละลายจากบริเวณที่คลอไรด์มีความเข้มข้นสูงดังภาพผนวกที่ ๕

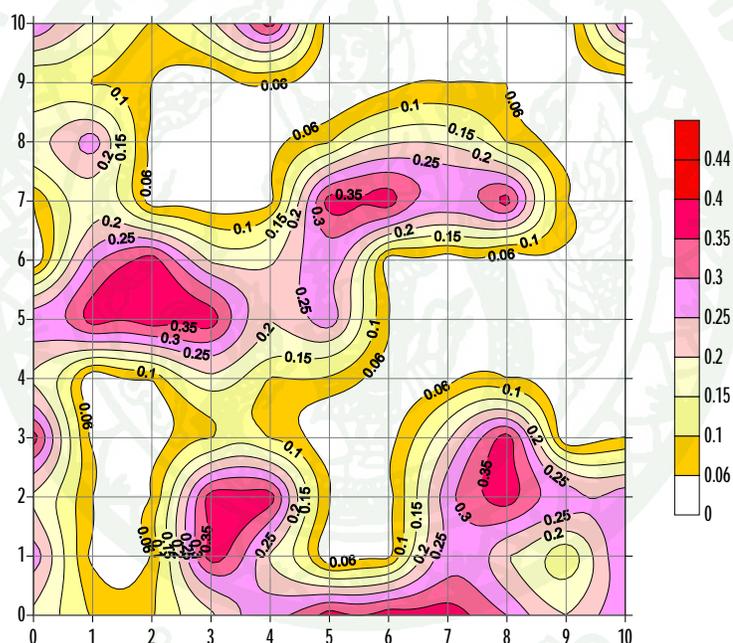


ภาพผนวกที่ ๔4 เส้นชั้นระดับปริมาณคลอรีนโดยเฉลี่ยที่ระดับแหล่งเสริมคอนกรีตก่อนการดึงคลอรีนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี



ภาพผนวกที่ ๕5 แนวทางการติดตั้งสารละลายโดยพิจารณาจากบริเวณที่คลอรีนมีความเข้มข้นสูง

ภาพผนวกที่ ๕ แสดงแนวทางในการเลือกบริเวณที่จะทำการติดตั้งสารละลายโดยพิจารณาจากบริเวณที่คลอไรด์มีความเข้มข้นสูง เนื่องจากมีโอกาสที่จะเป็นสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตสูง โดยทำการจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงขั้วบวกเข้ากับโลหะที่จมอยู่ในสารละลายและทำการสัต์คอนกรีตในบริเวณที่จะทำการติดตั้งสารละลายให้ถึงตำแหน่งของเหล็กเสริม เพื่อทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าขั้วลบเข้ากับเหล็กเสริมคอนกรีต โดยใช้เวลาในการจ่ายกระแสไฟฟ้าเป็นเวลา 28 วัน โดยแนวโน้มการลดลงของปริมาณคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตจากการแนวทางการติดตั้งสารละลายในภาพผนวกที่ ๕ โดยแสดงแนวโน้มของปริมาณคลอไรด์หลังจากทำการดึงคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตในภาพผนวกที่ ๖



ภาพผนวกที่ ๖ แนวโน้มของเส้นชั้นระดับปริมาณคลอไรด์โดยเฉลี่ยที่ระดับเหล็กเสริมคอนกรีต หลังการดึงคลอไรด์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

ภาพผนวกที่ ๖ แสดงแนวโน้มการลดลงของปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีหลังจากทำการจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงเข้าสู่ระบบโดยใช้สมการและเงื่อนไขจากผลการทดลองในห้องปฏิบัติการในการทำการคำนวณแนวโน้มในการลดลงของคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตพบว่าที่ระยะเวลา 28 วันสามารถลดปริมาณคลอไรด์ในพื้นที่คอนกรีตเสริมเหล็กให้ต่ำกว่าระดับคลอไรด์วิกฤติ (0.4-0.5% ต่อน้ำหนักซีเมนต์) โดยสามารถลดลงต่ำกว่า

ระดับดังกล่าวทั่วทั้งหมดยกของพื้นคอนกรีตที่ทำการซ่อมแซม แต่เนื่องจากในการทำงานในภาคสนามจริงยังมีตัวแปรที่มีผลกระทบต่อกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีอีกมากเช่น ความต่อเนื่องของเหล็กเสริมคอนกรีต ระยะห่างของเหล็กเสริม หรือความต่อเนื่องของโครงสร้างเนื่องจากเช่นการแบ่งรอยต่อของการเทคอนกรีตซึ่งจะส่งผลโดยตรงกับกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีในการดึงคลอไรด์ อีออนในคอนกรีต จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการวิจัยหรือศึกษาผลกระทบต่างๆที่จะทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์อีออนจากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีซึ่งจะทำให้สามารถวางแผนในการซ่อมแซมบำรุงรักษาโครงสร้างอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด ส่งผลให้เกิดความปลอดภัยจากการเป็นสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีตซึ่งเป็นปัญหาที่ทำการแก้ไขได้ยากและมีราคาในการซ่อมแซมปัญหาดังกล่าวสูงและปัญหาดังกล่าวไม่มีสัญญาณเตือนทางกายภาพถึงปัญหาการเป็นสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตให้รู้ล่วงหน้าแต่อย่างใด

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

| | |
|--------------------------------|---|
| ชื่อสกุล | นายวิศิษ แซ่ลิ้ม |
| เกิดวันที่ | วันพุธที่ 22 กรกฎาคม พ.ศ. 2524 |
| สถานที่เกิด | จังหวัดกรุงเทพมหานคร |
| ประวัติการศึกษา | วศ.บ. (โยธา) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร |
| ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน | - |
| สถานที่ทำงานปัจจุบัน | - |
| ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ | - |
| ทุนการศึกษา | - |