สารบัญ

หน้า

สารบัญ i

สารบัญรูป iii

สารบัญตาราง v

บทที่ 1 บทนำ 1-1

1.1 ความเป็นมาของโครงการ 1-1

1.2 วัตถุประสงค์ 1-2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 1-2

1.4 ประโยชน์คาดว่าจะได้รับ 1-3

1.5 โครงสร้างของรายงาน 1-3

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 2-1

2.1 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต 2-2

2.2 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยคลอไรด์ ..... Error! Bookmark not defined.

2.2.1 กลไกลการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ..... Error! Bookmark not defined.

2.2.2 กลไกลการกัดกร่อนของเหล็หเสริมจากคลอไรด์ ..... Error! Bookmark not defined.

2.2.3 การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของคลอไรด์ที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์Error! Bookmark not defined

2.2.4 กำลังการยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริม ..... Error! Bookmark not defined.

2.3 การใช้ใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมี (**Electro Chemical**) ..... Error! Bookmark not defined.

2.3.1 การลดปริมาณคลอไรด์อิออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (**Electrochemical Chemical Removal**) ..... Error! Bookmark not defined.

2.3.2 การประยุต์ใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กError! Bookmark not defined

2.3.3 การตรวจสอบทางไฟฟ้าเคมี (**Evaluate of Electrochemical**)Error! Bookmark not defined.

2.3.4 การหาปริมาณของคลอไรด์ (**Chloride Content**)..... Error! Bookmark not defined.

บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการ 3-29

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำโครงการ 3-29

3.2 วัศดุและปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต 3-29

3.2.1 วัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีต ..... Error! Bookmark not defined.

3.2.2 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต ..... Error! Bookmark not defined.

3.3 การแตรียมตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก ..... Error! Bookmark not defined.

3.3.1 ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 40**x40x10 cm.** Error! Bookmark not defined.

3.3.2 ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 70**x**70**x**10 **cm .** Error! Bookmark not defined.

3.3.3 การเตรียมสารละลายในการทดลอง ..... Error! Bookmark not defined.

3.3.4 การต่อวงจรไฟฟ้าเพื่อดึงคลอไรด์อิออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้โซล่าเซลล์Error! Bookmark not de

3.3.5 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในผงคอนกรีต ..... Error! Bookmark not defined.

บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง..... **4-1**

4.1 ผลการทดลอง..... Error! Bookmark not defined.

4.1.1 ผลการทดลองของตัวอย่างคอนกรีตที่สัมผัสสารละลายโดยตรงError! Bookmark not defined.

4.1.2 ผลการทดลองของตัวอย่างคอนกรีตที่ไม่สัมผัสสารละลายโดยตรงError! Bookmark not defined.

บทที่ **5** สรุปผลและข้อเสนอแนะ **5-1**

5.1 ความสามารถในการดึงคลอไรด์อิออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี Error! Bookmark not defined.

5.1.1 ผลการทดลองของตัวอย่างคอนกรีตที่สัมผัสสารละลายโดยตรงError! Bookmark not defined.

5.1.2 ผลการทดลองของตัวอย่างคอนกรีตที่ไม่สัมผัสสารละลายโดยตรงError! Bookmark not defined.

5.2 ข้อเสนอแนะ ..... Error! Bookmark not defined.

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อนบนผิวเหล็กเสริม Bentur et al. (1997)**Error! Bookmark not defined.**
รูปที่ 2.2 ปริมาตรของเหล็กที่เกิดสนิม Nielsen (1985).....**Error! Bookmark not defined.**
รูปที่ 2.3 ความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริม**Error! Bookmark not defined.**
รูปที่ 2.4 แบบจำลองการกัดกร่อนของเหล็กเสริม Tuutti (1982).....**Error! Bookmark not defined.**
รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตจากคลอไรด์ Raupach (1996) **Error! Bookmark no**
รูปที่ 2.6 กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริม Pourbaix (1972).....**Error! Bookmark not defined.**
รูปที่ 2.7 โครงสร้างคอนกรีตที่สภาวะเปียกสลับแห้งด้วยน้ำทะเล .....**Error! Bookmark not defined.**
รูปที่ 2.8 Bond stress-slip model CEB (1993)..... 2-13
รูปที่ 2.9 แสดงขบวนการของวิธี Electrochemical Chloride Removal (ECR) J.M. Miranda (2005) 2-14
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่จ่ายในระบบกับปริมาณคลอไรด์ ที่ออกจากตัวอย่าง ..... ในการทดลองและความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสื่อที่เป็นขั้วลบกับปริมาณคลอไรด์ที่ออก จากตัวอย่างการทดลอง Arya.C (1996).....**Error! Bookmark not defined.**
รูปที่ 2.11 แสดงการทดสอบ Chloride Migration Test R.D. Hooton (1996)**Error! Bookmark not defined.**
รูปที่ 2.12 ปริมาณคลอไรด์ที่ออกจากคอนกรีตมาสะสมอยู่ในสารละลายของการทดสอบ Chloride migration test R.D. Hooton (1996) .....**Error! Bookmark not defined.**
รูปที่ 2.13 แสดงอิทธิพลของสารละลายที่ใช้ในการทดสอบ Chloride Migration Test R.Gagne (2000) **Error! Bookmark no**
รูปที่ 2.14 ปริมาณคลอไรด์ที่สะสมอยู่ในคอนกรีตก่อนและหลังขบวนการทางไฟฟ้าเคมีโดยการเปลี่ยน สารละลายใหม่และไม่เปลี่ยนสารลาย G.Fajardo at, el (2004)**Error! Bookmark not defined.**
รูปที่ 2.15 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังการดึงคลอไรด์จากคอนกรีตด้วยวิธีทาง ไฟฟ้าเคมีระหว่างคอนกรีตที่มีสภาพคาร์บอเนชั่นและคอนกรีตปกติ N.M. (1996)**Error! Bookmark not define**
รูปที่ 2.15 แสดงการประยุกต์ใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีในการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต Gerodo G. Clemena and Donald R. Jackson, (2000).....**Error! Bookmark not defined.**
รูปที่ 2.16 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังการดึงคลอไรด์จากคอนกรีตด้วยวิธีทาง ไฟฟ้าเคมีระหว่างคอนกรีตที่มีสภาพคาร์บอเนชั่นและคอนกรีตปกติ N.M. (1996)**Error! Bookmark not define**
รูปที่ 2.17 แผนภูมิการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ B. Elsener, (2001).....**Error! Bookmark not defined.**
รูปที่ 2.18 การตรวจสอบโดยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (The Half-Cell Potential Measurement) และการ พล็อตเส้นชั้นความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-Cell Potential Contour) B. Elsener, (2001) .....**Error! Bookmark not defined.**

รูปที่ 2.16 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิออนในห้องปฏิบัติการและกราฟความสัมพันธ์ของปริมาณคลอไรด์เปรียบเทียบกับระดับความลึกต่างๆ .....**Error! Bookmark not defined.**
รูปที่ 3.1 แสดงการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตทรงกระบอกของตัวอย่างการทดลอง**Error! Bookmark not defined.**
รูปที่ 3.2 แสดงการเตรียมแบบหล่อคอนกรีตแบบแผ่นพื้น.....**Error! Bookmark not defined.**
รูปที่ 3.3 แสดงการเตรียมตัวอย่างคอนกรีต, และการบ่มคอนกรีตที่ใช้ในการวิจัย**Error! Bookmark not defined.**
รูปที่ 3.4 ภาพการต่อวงจรไฟฟ้าและขังสารละลายเพื่อดึงคลอไรด์จากตัวอย่างคอนกรีตขนาด 40x40x10 ซม. .....**Error! Bookmark not defined.**
รูปที่ 3.5 ภาพการต่อวงจรไฟฟ้าและขังสารละลายเพื่อดึงคลอไรด์จากตัวอย่างคอนกรีตขนาด 70x70x10 ซม.....**Error! Bookmark not defined.**
รูปที่ 3.6 ภาพการต่อวงจรไฟฟ้าและขังสารละลายเพื่อดึงคลอไรด์จากตัวอย่างคอนกรีต.**Error! Bookmark not defined.**
รูปที่ 3.7 แสดงการเตรียมตัวอย่างในการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในผงคอนกรีต**Error! Bookmark not defined.**
รูปที่ 3.7 แสดงการปรับสภาพความเป็นกรดด่างค่า (pH) และการทำ Blank**Error! Bookmark not defined.**
รูปที่ 3.8 แสดงการเตรียมตัวอย่างและการไตเตรต.....**Error! Bookmark not defined.**
รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังการดึงคลอไรด์ภายในคอนกรีตเมื่อใช้ตัวกลางสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระยะเวลา 7, 14, 28 วันตามลำดับ**Error! Bookmark not defined.**
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังการดึงคลอไรด์ภายในคอนกรีตเมื่อใช้ตัวกลางสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ระยะเวลา 7, 14, 28 วันตามลำดับ**Error! Bookmark not defined.**
รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (ECR)ของสารลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่เวลา 28 วัน**Error! Bookmark not define**
รูปที่ 4.4 แสดงประสิทธิภาพของการลดคลอไรด์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในบริเวณที่ห่างออกจากสารละลาย **Error! Bookmark n**

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี N.M. Ihekwaba et. al, (1996).....**Error! Bookmark not defined.**

ตารางที่ 2.2 แสดงการใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีเพื่อลดปริมาณคลอไรด์ในทวีปอเมริกาเหนือ**Error! Bookmark not defined.**4

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) แสดงการใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีเพื่อลดปริมาณคลอไรด์ในทวีปอเมริกาเหนือ**Error! Bookmark not defined.**5

ตารางที่ 2.3 อัตราความเสี่ยงที่จะเกิดสนิมตามแนวทาง ASTM C876..... **Error! Bookmark not defined.**7

ตารางที่ 3.1 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต (ขนาด 40x40x10 cm).....**Error! Bookmark not defined.**

ตารางที่ 3.2 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต (ขนาด 70x70x10 cm).....**Error! Bookmark not defined.**

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติเหล็กเสริมคอนกรีต.....**Error! Bookmark not defined.**

ตารางที่ 3.2 สารละลายอิเล็คโทรไลต์ที่ใช้ในการดึงคลอไรด์อิออน.....**Error! Bookmark not defined.**

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ระยะเวลา 7, 14, 28 วันตามลำดับ 4-4

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ระยะเวลา 7, 14, 28 วันตามลำดับ.....4-4

ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์อิออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในบริเวณที่ไม่ได้สัมผัสสารละลายโดยตรง.....4-6

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นปัญหาด้านความคงทนของคอนกรีตในด้านการรับกำลังและลักษณะทางกายภาพ โดยเฉพาะเรื่องของความสามารถในการรับน้ำหนักตามที่ออกแบบไว้จะลดลง ทำให้เกิดความไม่ปลอดภัยกับโครงสร้างดังกล่าว เนื่องจากการเกิดสนิมทำให้เกิดการขยายตัวของผิวเหล็กเสริมคอนกรีตมีปริมาตรเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดแรงดึงในคอนกรีตทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวโดยเฉพาะโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องสัมผัสน้ำทะเล น้ำกร่อย หรืออยู่บริเวณชายฝั่ง รวมทั้งโครงสร้างใต้ดินบริเวณนั้น จะประสบปัญหาความเสียหายอย่างมากจากสภาพแวดล้อม การซ่อมแซมโครงสร้างที่เสื่อมสภาพหรือเกิดสนิมต้องการความเข้าใจในสาเหตุหลักและสภาพปัจจุบันของโครงสร้างนั้น เพื่อให้สามารถแก้ไขได้ตรงจุดและหยุดความเสียหายได้อย่างถาวร

กระบวนการซ่อมแซมโครงสร้างที่เสียหายจากสนิมเหล็กเสริมสามารถจำแนกเป็น 3 ลักษณะคือ การซ่อมแซม (Concrete Repair) การเสริมกำลัง (Strengthening) และการป้องกัน (Protection) การบำรุงรักษาอย่างมีแบบแผนและซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นมีความสำคัญอย่างยิ่งเนื่องจากสามารถยืดอายุเวลาของโครงสร้างให้มีความสามารถในการรับน้ำหนักที่กระทำต่อโครงสร้างตามที่วิศวกรได้ออกแบบไว้อย่างมีประสิทธิภาพและยังส่งผลในเรื่องของความมั่นใจของผู้ใช้งานโครงสร้างดังกล่าวอีกด้วย วิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electro Chemical) เป็นวิธีการป้องกันการกัดกร่อนที่มีการใช้กันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเป็นวิธีการที่สามารถประยุกต์ใช้กับโลหะและโลหะผสมทุกชนิดในทุกสภาพการใช้งานโดยมีข้อแม้ว่าต้องสัมผัสอยู่กับสารละลายอิเลคโทรไลต์ (Electrolyte) และเมื่อใช้แล้วยังสามารถลดอัตราการกัดกร่อนได้จนมีค่าใกล้ศูนย์หรือไม่เกิดการกัดกร่อนเลยได้

การลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Chloride Removal) คือการดึงเฉพาะคลอไรด์อิออนออกจากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งมีขั้วไฟฟ้าอยู่ในสารละลายซึ่งอยู่ภายนอกคอนกรีตและมีการเชื่อมต่อไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างขั้วไฟฟ้าและเหล็กเสริมภายในคอนกรีตมีการให้ไฟฟ้าตรงกับขั้วไฟฟ้าและเหล็กเสริมคอนกรีตโดยให้ขั้วไฟฟ้าภายนอกเป็นขั้วบวก (Anode) และเหล็กเสริมเป็นขั้วลบ (Cathode) จากการต่อระบบดังกล่าวนี้ เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่สูงพอคลอไรด์อิออนที่มีสภาพเป็นขั้วลบจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วบวก (Anode) ซึ่งอยู่ภายนอกส่งผลทำให้ความปนเปื้อนของคลอไรด์อิออนในคอนกรีตมีค่าลดลงโดยเฉพาะบริเวณเหล็กเสริมซึ่งเป็นขั้วลบ นอกจากนั้นยังมี Hydroxyl Ions เกิดขึ้นจากระบบเพิ่มขึ้นอีกซึ่งจะทำให้ค่า pH สูงขึ้น ความเป็นด่างในคอนกรีตสูงขึ้นส่งผลให้มีแนวโน้มที่จะเพิ่มความต้านทานการเกิดสนิมที่ดีขึ้น และเนื่องจากการศึกษาภายในประเทศยังไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับการลดปริมาณคลอไรด์อิออนด้วยวิธีดังกล่าวมากนัก จึงมีความจำเป็นในการทำการวิจัยเกี่ยว

วิธีดังกล่าวเนื่องจากประเทศไทยมีพื้นที่ชายฝั่งทะเลอยู่เป็นจำนวนมากจึงเกิดผลกระทบกับโครงสร้างที่อยู่บริเวณชายฝั่งทะเล ทำให้โครงสร้างเหล่านี้เสื่อมสภาพอย่างรวดเร็วจากการเป็นสนิมของเหล็กเสริมอันเนื่องมาจากคลอไรด์ในน้ำทะเล

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นทางเลือกใหม่ในการสร้างกระแสไฟฟ้าให้กับระบบดังกล่าวเนื่องจากบริเวณชายฝั่งทะเลมักจะมีสภาพเป็นพื้นที่เปิดโล่งและมีปริมาณแสงอาทิตย์ที่เพียงพอเหมาะสมที่จะนำเอาพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้เป็นตัวผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้ในกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีเนื่องจากเป็นพลังงานสะอาดและยังลดอัตราการใช้ไฟฟ้าจากแหล่งผลิตไฟฟ้าอื่น จากเหตุผลข้างต้นจึงจำเป็นต้องมีการทำวิจัยเกี่ยวกับเรื่อง “การลดปริมาณคลอไรด์อิออนในคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์” เพื่อนำมาเป็นแนวทางในการบำรุงรักษา และซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพเนื่องจากวิธีดังกล่าวสามารถบำรุงรักษาและซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจากความเสียหายจากสนิมในเหล็กเสริมก่อนที่เหล็กเสริมในคอนกรีตจะเป็นสนิม นอกจากนั้นข้อมูลจากงานวิจัยนี้ยังอาจเป็นข้อมูลเพื่อเป็นแนวทางในการวางแผนการบำรุงรักษาซ่อมแซมโครงสร้างอย่างประจำ (Routine Maintenance) เพื่อที่จะสามารถนำมาวางแผนการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อช่วยลดค่าใช้จ่ายและพลังงานของประเทศในการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตที่เสียหายมากเนื่องจากขาดการบำรุงรักษา

1.2 วัตถุประสงค์

1) เพื่อศึกษาความเป็นไปในในการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการลดปริมาณคลอไรด์อิออนที่ปนเปื้อนอยู่ในคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical, Solar Cell)
2) เพื่อหาประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์อิออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในบริเวณที่ไม่ได้สัมผัสกับสารละลายโดยตรง
3) เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของคลอไรด์อิออนผ่านคอนกรีตเสริมเหล็กจากการจ่ายกระแสไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้จะคำนึงถึงปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กอันเนื่องมาจากคลอไรด์อิออนเป็นหลัก ซึ่งปัญหานี้จะพบบ่อยมากในอาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กชายทะเล และการวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบหาเงื่อนไขต่างๆ ในการบำรุงรักษาและซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีด้วยวิธีที่เรียกว่า Electrochemical Chloride Removal หรือที่เรียกว่า Desalination จากการจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากธรรมชาติโดยเลือกใช้พลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์เพื่อเป็นทางเลือกในการบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ยังไม่พบรอยแตกร้าว เนื่องจากปัญหาของเหล็กเสริมเป็นสนิมนั้นกว่าจะพบปัญหามักจะเป็นช่วงที่วิกฤติแล้ว และไม่ได้พิจารณาถึงกำลังรับแรงดัด แรงอัดหลังจากการซ่อมแซมแล้ว หรือโอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างด่างกับมวลรวม (Alkali Aggregate Reaction, AAR) แต่จะพิจารณาเฉพาะความสามารถในการบำรุงรักษา ซ่อมแซมด้วยวิธี Electrochemical Chloride Removal ในส่วนของประสิทธิภาพของการดึงคลอไรด์จากคอนกรีตในบริเวณที่ไม่ได้สัมผัสกับสารละลายโดยตรงอันเนื่องมาจากอิทธิพลจากกระแสไฟฟ้าที่ส่งผลต่อการดึงคลอไรด์อิออนออกจากคอนกรีตเสริมเหล็ก

1.4 ประโยชน์คาดว่าจะได้รับ

จากเหตุผลข้างต้นที่ได้กล่าวมาแล้วมีความจำเป็นต้องมีการทำวิจัยเกี่ยวกับเรื่อง “การลดปริมาณคลอไรด์อิออนในคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์” เพื่อนำ มาเป็นแนวทางในการบำรุงรักษาและซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพเนื่อง จากวิธีดังกล่าวสามารถบำรุงรักษาและซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจากความเสียหาย ของเหล็กเสริมก่อนที่เหล็กเสริมในคอนกรีตจะเป็นสนิมนอกจากนี้ยังสามารถนำเอาข้อมูลจากงานวิจัยนี้ ไปประยุกต์ ใช้เพื่อเป็นแนวทางในการวางแผนการบำรุงรักษาซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่เกิดการเสื่อม สภาพให้มีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น และจากการที่ทราบความสัมพันธ์ของปริมาณของกระแสไฟฟ้ากับปริมาณคลอไรด์อิออนที่สามารถดึงออกมาในสารละลายและการแพร่กระจายของคลอไรด์อิออนเข้าสู่คอน กรีตที่ผ่านกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีจะสามารถนำมาวางแผนการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อช่วยลดค่าใช้จ่ายและพลังงานของประเทศ ในการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตที่เสื่อมสภาพและเสีย หายเป็นจำนวนมากเนื่องจากขาดการวางแผนการบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยเฉพาะบริเวณชายฝั่งทะเล

1.5 โครงสร้างของรายงาน

การศึกษาผลกระทบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้เป็นโครงสร้างในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเลนี้ แบ่งการนำเสนอเนื้อหาสาระในเรื่องต่างๆ ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการ

บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

โดยปรกติคอนกรีตที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ซึ่งมีปริมาณ C3A ที่ต่ำจะเหมาะสำหรับโครงสร้างที่สัมผัสน้ำทะเล แต่เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบในน้ำทะเลโดยแท้จริงแล้ว น้ำทะเลมีปริมาณซัลเฟตอยู่ประมาณ 10% ส่วนคลอไรด์นั้นกลับมีปริมาณถึง 90% ดังนั้นการคำนึงถึงทุกองค์ประกอบของน้ำทะเลจะมีเหตุผลมากกว่าการพิจารณาแต่เพียงซัลเฟตเท่านั้น โดยที่ น้ำทะเลมีเกลือคลอไรด์ซึ่งอยู่ในรูปสารประกอบ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ประมาณ 27,000 ppm แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl2) ประมาณ 3,200 ppm และแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl2) ประมาณ 500 ppm ส่วนซัลเฟตอยู่ในรูปของสารประกอบแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO4) ประมาณ 2,200 ppm และแคลเซียมซัลเฟต (CaSO4) 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) คาร์บอเนชั่น (carbonation) การกัดกร่อนโดยกรด (Acid Attack) การกัดกร่อนโดยซัลเฟต (Sulfate Attack) ปฏิกิริยาระหว่างด่างกับมวลรวม (Alkali-Aggregate Reaction) การเป็นสนิมของเหล็กเสริมจากคลอไรด์ในน้ำทะเล (Chloride Attack)

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

2.1 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

การเกิดสนิมของเหล็กเหล็กเสริมเกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Process) โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วนคือ ปฏิกริยา Anodic Reaction ปฏิกริยา Cathodic Reaction และ Electrolyte กระบวนการเกิดสนิมเริ่มจากการมีความชื้นเพียงพอที่จะทำให้อะตอมของเหล็กสูญเสียอิเลคตรอนกลายเป็น Fe^{2+} ละลายอยู่ในน้ำรอบเหล็กเสริมเรียกบริเวณนี้เป็นขั้ว Anode และอิเลคตรอนนี้จะสะสมอยู่บริเวณผิวบนเหล็กเสริมทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าขึ้นและส่วนของเหล็กเสริมที่ไม่มีการแตกตัวจะมีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าและทำหน้าที่เป็นขั้ว Cathode อธิบายได้ดัง**Error! Reference source not found.** ซึ่งเทียบได้กับการเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต ดัง**Error! Reference source not found.** (ก) ซึ่งเกิดจากการที่อะตอมของเหล็กเกิดการแตกตัวเป็น Fe^{2+} และเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนทำให้บริเวณนั้นเกิดเป็นขั้ว Anode ดังสมการที่ 1 อิเล็กตรอนนี้จะมีมากขึ้นบริเวณผิวของเหล็กเสริมทำให้เกิดศักย์ทางไฟฟ้าขึ้นในบริเวณที่ไม่เกิดการแตกตัวของเหล็กจะมีศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำกว่าจะทำหน้าที่เป็นขั้ว Cathode อิเล็กตรอนที่เกิดจาก Anode จะเคลื่อนที่ตามเหล็กเสริมมายัง Cathode ที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าและทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (O_2) และน้ำ (H_2O) ที่อยู่บริเวณนี้เกิดไฮดรอกซิลอิออน (OH^-) ขึ้น ดังสมการที่ 2 การเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าเกิดขึ้นทั้งกระแสภายในเหล็กและกระแสภายนอกเหล็กเสริม กระแสภายในเหล็กเสริมเป็นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จาก Anode ไปสู่ Cathode ในขณะที่กระแสภายนอกเหล็กเสริมเป็นการเคลื่อนที่ของอิออน Fe^{2+} และ (OH^-) ผ่านสารละลายในช่องว่าง Pore Solution ของคอนกรีตรอบๆเหล็กเสริม (Bentur et al., 1997) ดัง**Error! Reference source not found.** (ข) โดยประจุลบคือ (OH^-) จะเคลื่อนที่จาก Cathode สู่ Anode และประจุบวก Fe^{2+} จะเคลื่อนที่จาก Anode สู่ Cathode การเคลื่อนที่ของอิออนผ่าน Pore Solution ของคอนกรีตเป็นปัจจัยที่สำคัญของการเกิดการกัดกร่อน สารละลายในช่องว่างส่วนใหญ่เป็นสารละลายของ Alkali และ Calcium Hydroxide เปรียบเหมือนเป็นสารละลาย Electrolyte ทำให้เกิดการครบวงจรของ Galvanic Cell และเกิดการกัดกร่อนขึ้นได้ แต่ถ้าน้ำในช่องว่างนี้แห้งหรือโครงสร้างภายในของคอนกรีตทึบแน่นและช่องว่างภายในเกิดขึ้นไม่ต่อเนื่องการไหลของอิออน ผ่านจะเกิดขึ้นได้ยากขึ้นซึ่งทำให้การเกิดการกัดกร่อนช้าลงจนหยุดการกัดกร่อน

$$Fe^0 \longrightarrow Fe^{2+} + 2e^- \qquad (1)$$

$$2H_2O+O_2+4e^- \longrightarrow 4OH^- \qquad (2)$$

จากการที่เกิด Fe^{2+} และ OH^- จาก Anode และ Cathode อิออนทั้งสองจะเคลื่อนที่เข้าหากันและทำปฏิกิริยาเกิดเป็น $Fe(OH)_2$ ดังสมการที่ 3 ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาต่อไปเป็น hydrate ferric oxide ($Fe_2O_3 \cdot H_2O$) หรือเรียกว่า red-brown rust และ black magnetite (Fe_3O_4) ซึ่งเกิดจาก Green hydrate magnetite ($Fe_3O_4 \cdot H_2O$) ดังสมการที่ 4, 5 และ 6 ผลิตภัณฑ์ซึ่งเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของการกัดกร่อนคือสนิมในรูปแบบต่างๆ ซึ่งมีปริมาตรมากกว่าเหล็กก่อนเกิดปฏิกิริยา 4 ถึง 6 เท่า (Nielsen,1985) ดัง**Error! Reference**

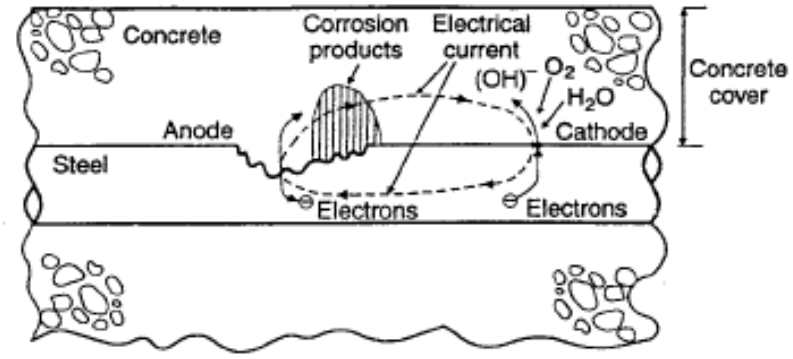
source not found. ซึ่งทำให้เกิดแรงดันภายในและคอนกรีตเกิดการแตกร้าวเสียหายได้ นอกจากนี้ในส่วนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบางจุดเกิดการสูญเสียเนื้อที่หน้าตัดเหล็ก และหน้าตัดของเหล็กเสริมลดลง ส่งผล ต่อการรับแรงของโครงสร้างซึ่งถ้าไม่ได้ซ่อมแซมให้ถูกวิธีโครงสร้างอาจเกิดการวิบัติได้

$$Fe^{2+} + 2OH^{-} \longrightarrow Fe(OH)_2 \quad (3)$$

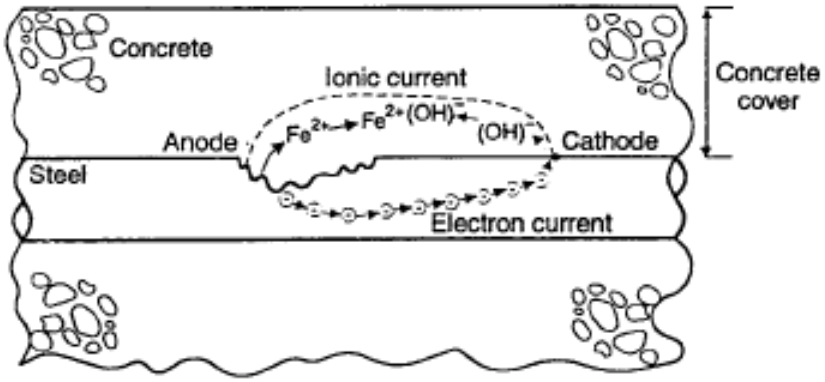
$$4Fe(OH)_2 + O_2 \longrightarrow Fe_2O_3 \cdot H_2O + 2H_2O \quad (4)$$

$$6Fe(OH)_2 + O_2 \longrightarrow 2Fe_3O_4 \cdot H_2O + 4H_2O \quad (5)$$

$$Fe_3O_4 \cdot H_2O \longrightarrow Fe_3O_4 + H_2O \quad (6)$$

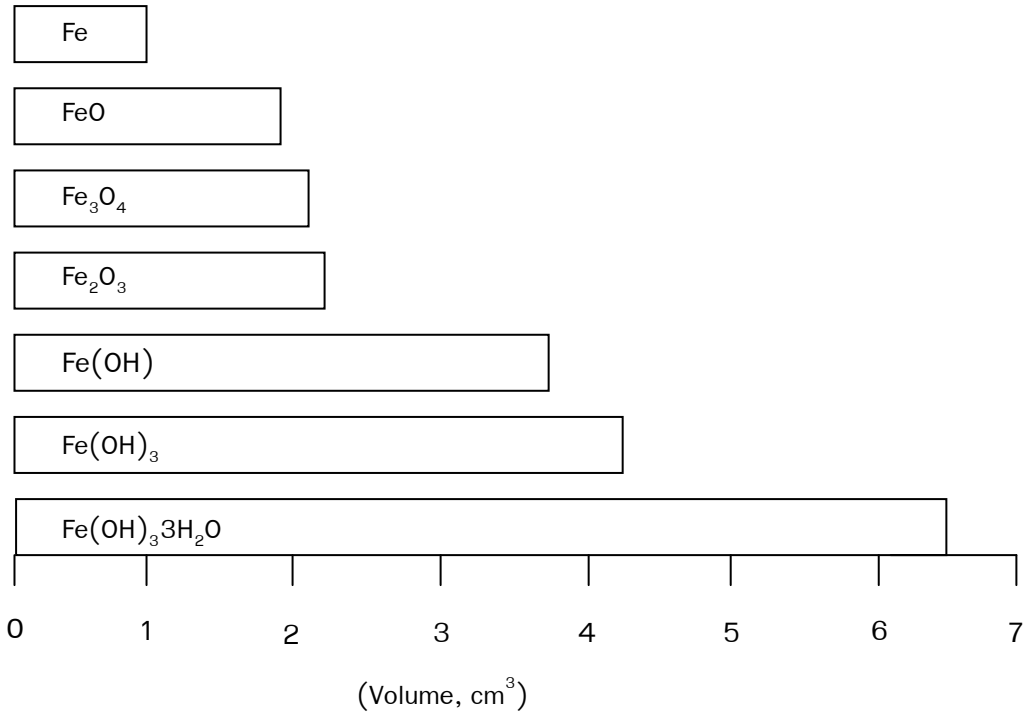


(ก) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้ว Anode และ Cathode



(ข) การเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าภายในและภายนอกเหล็กเสริม

รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อนบนผิวเหล็กเสริม Bentur et al. (1997)



รูปที่ 2.2 ปริมาตรของเหล็กที่เกิดสนิม Nielsen (1985)

2.2 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยคลอไรด์

การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริม โดยอิออนของคลอไรด์ (Chloride Ions) เป็นตัวที่ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตที่ป้องกันเหล็กเสริมไม่ให้เกิดสนิมถูกทำลายลดลงจนถึงระดับวิกฤตและถ้ามีน้ำและออกซิเจนเพียงพอก็จะทำให้เหล็กเกิดสนิมได้ แหล่งที่มาของคลอไรด์อาจมีอยู่เองในคอนกรีต หิน ทราย หรือน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่นแคลเซียมคลอไรด์ที่มักมีอยู่ในสารเร่งการก่อตัว แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความทนทานของคอนกรีตนั้นส่วนมากจะมาจากภายนอกคอนกรีตในช่วงที่ใช้งาน เช่น จากน้ำทะเลจากดินหรือจากเกลือที่ใช้ละลายน้ำแข็งในประเทศที่มีอากาศหนาว (De-icing Salt) ซึ่งคลอไรด์อาจจะเข้าสู่คอนกรีตได้โดยวิธี การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตที่แห้งของน้ำที่มีคลอไรด์ (Capillary Suction) การแพร่ของอิออนของคลอไรด์ (Chloride Ions Diffusion) จากภายนอกที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าภายในของคอนกรีต การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตของน้ำที่มีคลอไรด์โดยแรงดันของน้ำ โดยทั่วไปแล้วสำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในทะเลตลอดเวลานั้นถึงแม้คลอไรด์จะสามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ดีแต่ถ้าไม่มีออกซิเจนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ ความเสี่ยงที่จะเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากที่สุด มักพบในบริเวณคลื่นและละอองน้ำ (Splash Zone) รองลงมาเป็นบรรยากาศทะเล (Atmospheric Zone) และบริเวณน้ำขึ้น-น้ำลง (Tidal Zone) ส่วนบริเวณใต้น้ำทะเล (Submerged Zone) จะมีความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนเหล็กเสริมน้อย

มาก สำหรับในกรณีของสภาพเปียกสลับแห้งนั้น น้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตที่แห้งโดย Absorption หรือ Capillary Suction จนกระทั่งคอนกรีตอยู่ในสภาพอิ่มตัว เมื่อสภาพภายนอกเปลี่ยนเป็นแห้ง น้ำที่ผิวคอนกรีตก็จะระเหยออกไปทิ้งไว้แต่คราบเกลือเมื่ออยู่ในสภาพเปียกอีก ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ ใกล้ผิวก็จะสูงขึ้น คลอไรด์ไอออนซึ่งมีความเข้มข้นสูงที่บริเวณผิวจะซึมเข้าสู่ภายในโดยการแพร่ซึ่งในแต่ละรอบของการเปียกและแห้งจะทำให้บริเวณใกล้ผิวมีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อยๆ และจะเข้าไปสู่ภายในคอนกรีตและสู่บริเวณเหล็กเสริมมากขึ้น โดยปกติแล้วคอนกรีตจะเปียกได้เร็วแต่จะแห้งได้ช้ากว่ามากและภายในคอนกรีตนั้นไม่สามารถทำให้แห้งได้โดยสมบูรณ์ ดังนั้นการแพร่เข้าไปในคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลาจึงช้ากว่าการเข้าไปของโดยการเปียกสลับแห้งโดยน้ำทะเล โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่สภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียกมักเร่งให้คลอไรด์ไอออนเข้าสู่คอนกรีตได้เร็ว ดังนั้นคอนกรีตที่ถูกน้ำทะเลเป็นบางครั้งหรือช่วงแห้งนานจะมีโอกาศเกิดปัญหาการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากกว่าคอนกรีตที่ประสบกับสภาวะช่วงแห้งสั้น การกัดกร่อนจะเริ่มเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อปริมาณคลอไรด์อิอน มีมากพอที่ผิวของเหล็กเสริม (Threshold Content of Chloride Ions)

สภาวะของคลอไรด์ในคอนกรีตนั้น จะมีคลอไรด์บางส่วนที่ถูกจับยึด (Fixed Chloride) โดยกลไกต่อไปนี้

- Chemical Binding คลอไรด์บางส่วนจะถูกจับโดยผลผลิตของปฏิกริยาไฮเดรชั่น
- Physical Binding คลอไรด์บางส่วนสามารถถูกยึดด้วยแรงทางกายภาพ (Surface Force) ได้บนผิวของ Hydration Product เช่น C-S-H และ C-A-H อีกทั้งสามารถถูกยึดอยู่บนผิวของวัสดุที่เป็นของแข็งที่ไม่มีปฏิกริยาเช่น มวลรวม หรือ ผงฝุ่นหินได้ด้วย

การป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์แบ่งออกเป็น 2 แนวทาง โดยการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตและเหล็กเสริม อาทิเช่น

- ออกแบบและใช้คอนกรีตที่มีความซึมน้ำต่ำมากๆ จะทำให้คลอไรด์แพร่เข้าไปในคอนกรีต ได้ยาก การใช้ปริมาณน้ำในคอนกรีตที่ต่ำ การลดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์
- การใช้สารประเภท Filler เพื่อเพิ่มความทึบน้ำ เช่น ซิลิกาฟูม สารปอซโซลานในปริมาณที่เหมาะสม นอกจากจะช่วยให้คอนกรีตทึบน้ำมากขึ้นแล้วยังช่วยจับยึดคลอไรด์ได้มากกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์อย่างเดียว
- ใช้สารเคลือบผิวคอนกรีตเช่น Epoxy เป็นต้น
- ใช้สารผสมในคอนกรีตบางชนิด เช่น Calcium หรือ Sodium Nitrite ที่สามารถช่วยทำให้ปฏิกริยา Anodic นั้นเกิดยากขึ้น
- ออกแบบคอนกรีตไม่ให้เกิดการแตกร้าวเพราะรอยแตกร้าวจะเป็นบริเวณที่คลอไรด์สามารถเข้าไปในคอนกรีตได้ง่ายขึ้น

การป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยอาศัยขบวนการทางไฟฟ้าเคมี มี 3 วิธี ได้แก่

1) Cathodic Protection

กระบวนการลดอัตราการเกิดสนิมโดยเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าของขั้วลบให้เท่ากับศักย์ไฟฟ้าของขั้วบวก (วันชัย, 2548) จากกลไกของการเกิดสนิมในเหล็กเสริม พบว่าการเกิดสนิมจะเกิดขึ้นเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลหมุนเวียน เพราะการเกิดสนิมเป็น (Electrochemical Process) ดังนั้นหากสามารถทำให้ทุกๆ จุดบนเหล็กเสริมมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากันได้ ก็จะไม่เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าขึ้น สามารถทำได้โดย (ii) ติดโลหะซึ่งสามารถเกิดสนิมได้ง่ายกว่าเหล็ก ซึ่งสูญเสียอิเล็กตรอนได้ง่ายกว่าไว้กับ เหล็กเสริม เรียกโลหะนี้ว่า Sacrificial Anode โดยโลหะชนิดนี้จะทำหน้าที่แทนเหล็กในขบวนการ Anodic โลหะที่สูญเสียอิเล็กตรอนได้ดีกว่าเหล็กเสริมเช่น สังกะสี เป็นต้น เมื่อใช้โลหะเหล่านี้ ปฏิกริยา Anodic จะเปลี่ยนเป็น $Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$ ดังนั้นต้องมีการเปลี่ยนโลหะที่เสียอิเล็กตรอนแทนเหล็กเมื่อโลหะชนิดนี้ผุกร่อนจนหมด

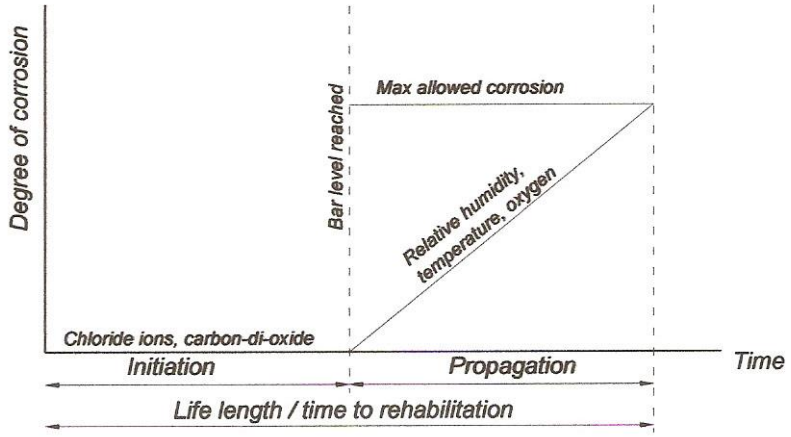
2) โดยการติดตั้งไฟฟ้ากระแสตรงสู่เหล็กเสริม

Electrodeposition เริ่มจากเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าสู่น้ำทะเล แคลเซียมอิออน (Ca^{2+}) และแมกนีเซียมอิออน (Mg^{2+}) ซึ่งมีประจุบวกในน้ำทะเลจะตกผลึกเป็น แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) หรือแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ Mg $(OH)_2$ ที่ผิวบริเวณขั้วลบ (ผิวคอนกรีต) เนื่องจากผลึก ที่เกิดขึ้นนี้มีความสามารถละลายน้ำได้น้อยมาก และยังช่วยเพิ่มความทึบน้ำให้กับคอนกรีต จึงสามารถเป็นเครื่องป้องกันคลอไรด์อิออนจากน้ำทะเลได้ (วันชัยและคณะ,2548)

การกัดกร่อนในเหล็กเสริมเป็นหนึ่งในความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งส่งผลกระทบโดยรวมของการเกิดสนิมในเหล็ก คือ กำลังรับแรงของโครงสร้างลดลงเนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมน้อยลงโดยเฉพาะการต้านทานความล้า (Fatigue strength) และความสามารถในการแอ่นตัวหรือการเปลี่ยนรูปร่าง (Elongation ability) ของโครงสร้างก็ลดลงด้วย (Neal et al., 1990) นอกจากนี้การเกิดสนิมของเหล็กเสริมยังทำให้เกิดการแตกร้าวและหลุดออกของคอนกรีตหุ้มภายนอก ดัง**Error! Reference source not found.** เนื่องจากปริมาตรที่เพิ่มขึ้นของเหล็กเสริมจากการเกิดสนิม จะทำให้เกิดแรงดึงในเนื้อคอนกรีตซึ่งทำให้คอนกรีตที่มีระยะหุ้มที่มีความหนาน้อยนั้นเกิด การแตกร้าวเป็นผลให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้างมากยิ่งขึ้น (Scannell and Sohanghpurwala, 1993)

รูปที่ 2.3 ความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

แต่โดยทั่วไปแล้ว เหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น จะอยู่ในสภาวะที่ไม่เกิดสนิมเนื่องจากมี Passivation film ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ของซีเมนต์กับน้ำในระหว่างการพัฒนากำลังของคอนกรีต ซึ่งมีความเป็นด่างสูง มีค่า pH ประมาณ 13 ซึ่งสามารถป้องกัน การเกิดสนิมได้ (Bentur et al., 1997) อย่างไรก็ตามโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปนั้น มักจะอยู่ในสภาพแวดล้อมที่อาจจะสัมผัสสารเคมี สรูปที่เป็นกรด หรือสภาพแวดล้อมที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิม เช่น โครงสร้างที่อยู่บริเวณชายฝั่งทะเลนั้น ความเข้มข้นของคลอไรด์จะเป็นตัวทำลายสภาพความเป็นด่างของคอนกรีต เป็นต้น ซึ่งเป็นตัวเร่งให้การเกิดสนิมในเหล็กเสริมเร็วขึ้น ดังแบบจำลองการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ดัง**Error! Reference source not found.**

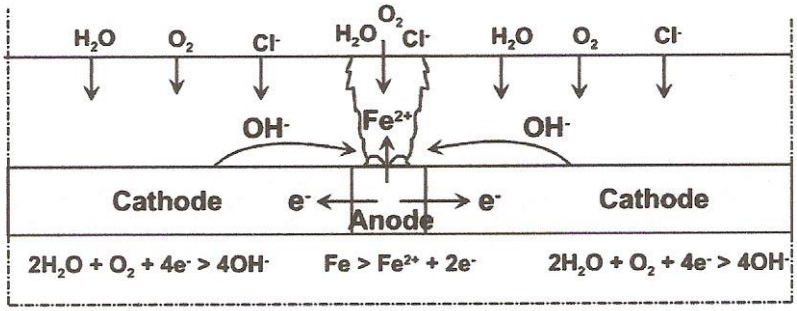


รูปที่ 2.4 แบบจำลองการกัดกร่อนของเหล็กเสริม Tuutti (1982)

2.2.1 กลไกการกัดกร่อนของเหล็กเสริม

การกัดกร่อนในเหล็กเสริมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น เกิดได้หลายสาเหตุด้วยกัน โดยที่สาเหตุหลักของการเกิดสนิม คือ การเกิดรอยแตกร้าวของโครงสร้าง (Pullar-Strecker, 1987) ที่มักเกิดจากการหดตัวในขณะที่คอนกรีตแข็งตัว (สำหรับโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่) รอยต่อของคอนกรีตที่เกิดจากการก่อสร้าง สภาวะแวดล้อม หรือเกิดจากสภาวะการใช้งานเป็นต้น โดยปกติน้ำและอากาศสามารถซึมผ่านเนื้อคอนกรีตไปถึงเหล็กเสริมได้ในปริมาณที่น้อยขึ้นอยู่กับความทึบของเนื้อคอนกรีต แต่การเกิดการแตกร้าวของโครงสร้างจะเป็นการเร่งให้น้ำและออกซิเจนเข้าไปถึงบริเวณเหล็กได้รวดเร็วและมากยิ่งขึ้น ทำให้การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเร็วและรุนแรงมากขึ้น และอีกสาเหตุหนึ่งของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก คือ การสูญเสียสภาพการเป็นด่าง (Depassivation) เนื่องจากสภาพแวดล้อม โดยเฉพาะคาร์บอนไดออกไซด์ ในอากาศและการซึมผ่านของคลอไรด์อิออนในสารละลาย เข้าสู่ช่องว่างในคอนกรีต ทั้งสองสาเหตุนี้ (คาร์บอนไดออกไซด์และคลอไรด์อิออน) ถ้าความเข้มข้นมากพอ จะทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตลดลง ซึ่งสาเหตุนี้นำไปสู่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตได้ (คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2543)

คลอไรด์เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้ โดยการกัดกร่อนจะเริ่มขึ้นเมื่อคลอไรด์อิออนมีความเข้มข้นมากพอ (Threshold concentration) ที่ผิวหน้าของเหล็กเสริม (Neville, 2002) ซึ่งจะทำให้ค่า pH ลดลงจนถึงระดับวิกฤต ทำให้สภาพการเป็นด่างของคอนกรีตที่ป้องการการเกิดสนิมของเหล็กเสริมถูกทำลาย (Depassivation) ถ้ามีน้ำและออกซิเจนเพียงพอก็จะทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ ดัง**Error! Reference source not found.** โดยที่คลอไรด์ในคอนกรีตมีแหล่งที่มาได้จากทั้งภายในและภายนอก แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความทนทานของคอนกรีตนั้น ส่วนมากเป็นคลอไรด์ที่มาจากแหล่งภายนอกเข้าสู่เนื้อคอนกรีตในช่วงการใช้งาน เช่น จากน้ำทะเล พื้นดิน หรือเกลือที่ใช้ละลายน้ำแข็งในประเทศที่มีอากาศหนาวเย็น เป็นต้น



รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตจากคลอไรด์ Raupach (1996)

เหล็กเสริมในคอนกรีตจะเป็นสนิมได้ก็ต่อเมื่อเงื่อนไข 3 ประการดังต่อไปนี้

ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลงจนปฏิกิริยาอะโนดิค (Anodic process) สามารถเกิดขึ้นได้ ซึ่งความเป็นด่างในระดับที่จะทำให้ปฏิกิริยาอะโนดิคเกิดขึ้นได้นั้น จะมีค่าของ pH ต่ำกว่าระดับ 9 ถึง 10 และมักจะเรียกระดับวิกฤต (Critical level) ของความเป็นด่าง

มีความชื้นเพียงพอที่ทำให้อิออนของเหล็ก (Fe^{2+}) เข้าสู่สภาวะสารละลายและเพียงพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาในการเกิดสนิม ซึ่งโดยปกติความชื้นมักจะเพียงพออยู่ในบริเวณคอนกรีตที่หุ้มรอบๆ เหล็กเสริมอยู่แล้ว

มีปริมาณออกซิเจนเพียงพอในการทำปฏิกิริยาเพื่อการเกิดสนิม ซึ่งปกติแล้วออกซิเจน ในปริมาณที่เพียงพอในการเกิดสนิมมักจะแพร่เข้าสู่คอนกรีตบริเวณเหล็กเสริมโดยผ่านทางช่องว่างที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated pores) นั้นคือแพร่ผ่านอากาศในช่องว่างแต่การแพร่ของออกซิเจนผ่านทางช่องว่างที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated pores) จะเป็นไปได้ยาก เนื่องจากออกซิเจนละลายในน้ำได้น้อยมาก ดังนั้นคอนกรีตที่อิ่มตัวด้วยน้ำอยู่ตลอดเวลาจะไม่เกิดสนิมในเหล็กเสริม

กลไกของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ดัง**Error! Reference source not found.** จะเริ่มต้นด้วยการที่ความเป็นด่างของคอนกรีตทีบริเวณที่หุ้มรอบๆ เหล็กเสริมอยู่ลดลงจนถึงระดับวิกฤตและมีความชื้นเพียงพอทำให้เหล็กเกิดปฏิกิริยา Electrolysis ขึ้น ดังสมการที่ 7

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-} \qquad (7)$$

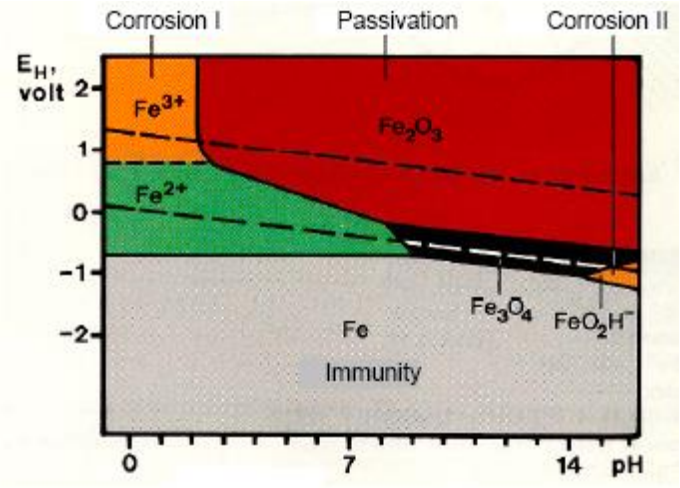
โดยเหล็กจะแตกตัวเป็นอิออน (Fe^{2+}) และอิเลคตรอนจะวิ่งไปตามเหล็กปฏิกิริยานี้เรียกว่ากระบวนการอะโนดิค (Anodic process) ต่อจากนั้น $2e^{-}$ ที่เกิดจากปฏิกิริยาอะโนดิคจะไปรวมตัวกับน้ำและออกซิเจนทำให้เกิดเป็นไฮดรอกซิลอิออน ($(OH)^{-}$) ดังสมการที่ 8

$$2e^{-} + \frac{1}{2}O_2 + H_2O \rightarrow 2(OH)^{-} \qquad (8)$$

ซึ่งปฏิกิริยานี้เรียกว่ากระบวนการคะโธดิค (Cathodic process) หลังจากนั้น ปฏิกิริยาการเกิดสนิมเกิดขึ้นดังสมการที่ 9

$$4Fe^{2+} + 6(OH)^{-} + 3O_2 \rightarrow 2Fe_2O_3 + 3H_2O \qquad (9)$$

โดยที่ Fe_2O_3 คือ เฟอริกออกไซด์ หรือสนิมที่เกิดขึ้นกับเหล็กเสริม



รูปที่ 2.6 กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริม Pourbaix (1972)

โดยทั่วๆไปแล้วแหล่งของคลอไรด์ ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตนั้นมาจากน้ำทะเล สำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลานั้น ถึงแม้คลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ดี แต่ถ้าไม่มีออกซิเจน การเกิดสนิมของเหล็กเสริมก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ จึงไม่เป็นปัญหานัก

2.2.2 กลไกการกัดกร่อนของเหล็กเสริม

ชนิดของคลอไรด์ในคอนกรีต

ชนิดของคลอไรด์ในคอนกรีตประกอบไปด้วย Bound Chloride คือคลอไรด์ที่ถูกจับยึดอยู่ในปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงในรูปของ CAH หรือถูกดูดซับด้วยผิวของGel Pore ซึ่งคลอไรด์ส่วนนี้จะไม่มีผลต่อการเกิดสนิมและคลอไรด์อิสระ Free Chloride คือคลอไรด์ที่ละลายอยู่ในโพรงของคอนกรีตซึ่งสามารถแพร่กระจายเข้าไปในคอนกรีตและทำให้ความเป็นด่างลดลงทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดสนิมได้ สำหรับการวัดระยะที่คลอไรด์ซึมผ่านเข้าสู่คอนกรีตทำได้โดยใช้น้ำยาซิลเวอร์ไนเตรดฉีดลงบนผิวคอนกรีตที่สกัดไว้แล้วและระยะที่คลอไรด์ซึมผ่านจะปรากฏเป็นสีเทาที่ผิวของคอนกรีตที่มีคลอไรด์อยู่ ซึ่งในการหาปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีตมีวิธีการที่ง่ายและสะดวกโดยการใช้สว่านเจาะคอนกรีตที่ระดับความลึกต่างๆ และนำผงคอนกรีตที่ได้มาทดสอบหาปริมาณของคลอไรด์อิออนและเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ปริมาณคลอไรด์อิออนเปรียบเทียบกับระดับความลึกต่างๆซึ่งจะทำให้สามารถประมาณระยะเวลาที่เหลืออยู่ก่อนที่เหล็กเสริมจะเกิดสนิม

ความเสี่ยงที่จะเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากที่สุด มักพบในบริเวณคลื่นและละอองน้ำ (Splash zone) รองลงมาเป็นบริเวณบรรยากาศทะเล (Atmospheric zone) และบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal zone) ส่วนบริเวณใต้น้ำทะเล (Submerged zone) จะมีความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนเหล็กเสริมน้อยมาก ในบริเวณใต้น้ำทะเลความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมมีน้อย เนื่องจากมีความเข้มข้นของออกซิเจนน้อย และ

อัตราการแพร่ของออกซิเจนเข้าไปในคอนกรีตต่ำมาก เนื่องจากช่องว่างภายในคอนกรีตเป็นช่องว่างอิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งออกซิเจนละลายน้ำได้น้อยมากทำให้อัตราการแพร่เกิดขึ้นน้อยถึงแม้ว่าจะมีปริมาณออกซิเจนมาก ในบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง แต่การเกิดสนิมก็ถูกจำกัดโดยอัตราการแพร่ที่ต่ำของออกซิเจนผ่านช่องว่างที่อิ่มตัวด้วยน้ำของคอนกรีตในช่วงที่คอนกรีตเปียก

ในกรณีของสภาพเปียกสลับแห้งนั้น น้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตที่แห้งโดย Absorption หรือ Capillary suction จนกระทั่งคอนกรีตอยู่ในสรูปที่อิ่มตัว (Saturated) เมื่อสภาพภายนอกเปลี่ยนเป็นแห้ง น้ำที่ผิวคอนกรีตก็จะระเหยออกไปทิ้งไว้แต่คราบเกลือ เมื่ออยู่ในสภาพเปียกอีก ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ใกล้ผิวก็จะสูงขึ้น ดังนั้นอิออนของคลอไรด์ (Chloride ions) ซึ่งมีความเข้มข้นสูงที่บริเวณผิว จะซึมเข้าสู่ภายในโดยการแพร่ ซึ่งในแต่ละรอบของการเปียกและการแห้ง จะทำให้คลอไรด์บริเวณใกล้ผิวมีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อยๆ และจะเข้าไปสู่ภายในคอนกรีตและสู่บริเวณเหล็กเสริมมากขึ้น โดยปกติแล้วคอนกรีตจะเปียก (Saturated) ได้เร็ว แต่จะแห้งได้ช้ากว่ามาก และภายในของคอนกรีตนั้นไม่สามารถทำให้แห้งได้โดยสมบูรณ์ ดังนั้นการแพร่ของอิออนของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลาจึงช้ากว่าการเข้าไปของคลอไรด์โดยการเปียกสลับแห้งโดยน้ำทะเล

การเคลื่อนตัวของอิออนของคลอไรด์ไปในคอนกรีตนั้น ขึ้นอยู่กับระยะเวลาของสภาพเปียกและแห้ง ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานที่และสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น การไหลของน้ำทะเล ทิศทางลม ทิศทางแสงอาทิตย์ และการใช้งานของโครงสร้าง เป็นต้น ทำให้ในโครงสร้างเดียวกัน แต่ละส่วนอาจจะประสบกับสภาวะเปียกและแห้งได้ไม่เหมือนกัน โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่สภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียกมักจะเร่งให้อิออนของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้เร็วขึ้น ดังนั้นคอนกรีตที่ถูกน้ำทะเลเป็นบางครั้ง (ช่วงแห้งนาน) จะมีโอกาสเกิดปัญหาการกัดกร่อนของเหล็กเสริม มากกว่าคอนกรีตที่ประสบกับสภาวะช่วงแห้งสั้น การกัดกร่อนจะเริ่มเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อ ปริมาณอิออนของคลอไรด์ (Chloride ions) มีมากพอที่ผิวของเหล็กเสริม (Threshold content of chloride ions) ซึ่งทำให้ค่าความเป็นด่างของคอนกรีตลดลงจนถึงระดับวิกฤต

2.2.3 การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของคลอไรด์ที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์

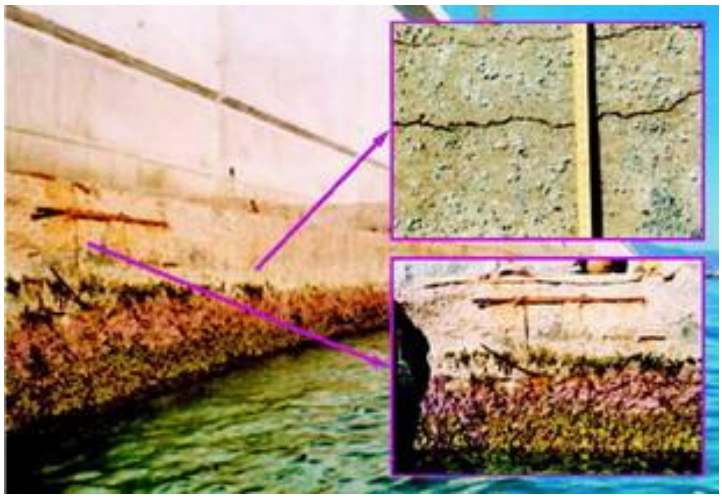
ความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณผิวของคอนกรีตที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ เช่น ทะเล เป็นเวลานานจะมีความเข้มข้นของคลอไรด์ในสารละลายที่อยู่ในช่องว่างของคอนกรีตสูงกว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมได้ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Chloride Condensation ซึ่งเกิดได้ใน 2 ลักษณะ ดังนี้

1) ในกรณีของสภาวะเปียกสลับกับแห้งด้วยน้ำทะเล

ดัง**Error! Reference source not found.** ในขณะที่บริเวณผิวคอนกรีตแห้ง คอนกรีตจะสูญเสียเฉพาะน้ำซึ่งจะระเหยออกจากผิวของคอนกรีต ทิ้งเกลือไว้ ในบริเวณผิวคอนกรีตที่แห้ง แต่พอคอนกรีตเข้าสู่สภาวะเปียกน้ำเกลือจะซึมเข้าไปในคอนกรีตอย่างรวดเร็ว เมื่อสภาวะเปียกสลับแห้งดำเนินไปหลายๆ รอบ ก็จะทำให้ความเข้มข้นของคลอไรด์ในบริเวณผิวของคอนกรีตสูงกว่าในสิ่งแวดล้อมได้

2) ในกรณีของสภาวะเปียกตลอดเวลาในน้ำทะเลหรือน้ำใต้ดินที่มีเกลือ

ในกรณีนี้คลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมสามารถถูกดึงเข้าไปในช่องว่างของคอนกรีตได้ด้วยแรงทางประจุไฟฟ้า เนื่องจากผิวของช่องว่างในคอนกรีตซึ่งมักจะเป็นผลผลิตทางไฮเดรชั่น เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (C-S-H) จะมีคุณสมบัติทางศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกซึ่งสามารถดึงคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมซึ่งมีประจุเป็นลบเข้าไปได้ อย่างไรก็ดีในสภาพของสิ่งแวดล้อมที่เปียกตลอดเวลา ถึงแม้คลอไรด์จะเข้าไปในคอนกรีตได้มากก็มักไม่เป็นอันตรายต่อเหล็กเสริม เนื่องจากไม่มีออกซิเจนเพียงพอในการเกิดสนิม ยกเว้นแต่ว่าในบริเวณที่ติดกับคอนกรีตจะมีส่วนที่มีสภาวะแห้งได้ด้วย เช่น บริเวณผิวดินซึ่งคลอไรด์ที่เข้าไปอาจแพร่เข้าไปสู่บริเวณที่สามารถแห้งได้ ทำให้ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตบริเวณผิวดินมีมากขึ้น และในบริเวณผิวดินซึ่งมีออกซิเจนมากเพียงพอ จึงอาจนำพาให้โครงสร้างบริเวณผิวดินเกิดสนิมในเหล็กเสริมได้



รูปที่ 2.7 โครงสร้างคอนกรีตที่สภาวะเปียกสลับแห้งด้วยน้ำทะเล

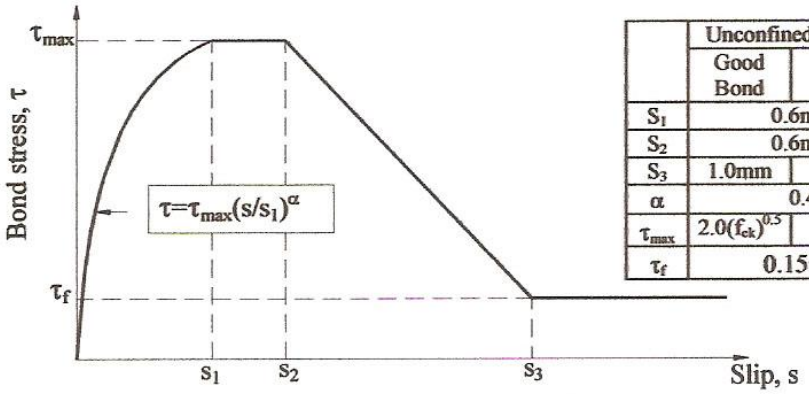
2.2.4 กำลังการยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริม

การออกแบบเพื่อหาเหล็กเสริมตามยาวที่ใช้ต้านทานโมเมนต์ดัด และเหล็กเสริมทางขวาง ที่ใช้เพื่อต้านทานแรงเฉือนส่วนที่เกินกว่าความต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีต อาศัยสมมุติฐานการยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมเป็นไปอย่างสมบูรณ์ นั่นหมายความว่าในขณะที่โครงสร้างรับน้ำหนักบรรทุกจะ

สมมุติว่าเหล็กเสริมไม่เกิดการครูดหรือลื่นหลุด (Slip) จากคอนกรีตที่หุ้มห่อแต่อย่างใด หรือมีการลื่นไถลเกิดขึ้นมีค่าน้อยมาก มิฉะนั้นเหล็กเสริมจะไม่มีกำลังรับแรงได้ตามต้องการอันเป็นสาเหตุให้ส่วนโครงสร้างไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ตามต้องการ

ความต้านทานต่อการลื่นไถลดังกล่าวได้จากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริม ซึ่งเป็นแรงเฉือนรอบผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมในขณะที่ร่วมกันรับน้ำหนักบรรทุก กำลังยึดเหนี่ยวได้จาก ก) การยึดเกาะทางเคมี (Chemical adhesion) เมื่อคอนกรีตแข็งตัว ข) การยึดเกาะโดยอาศัยแรงฝืด (Friction) รอบผิวเหล็กเสริมกับคอนกรีต และ ค) การยึดรั้งทางกล (Machanical anchorage) กำลังยึดเหนี่ยวสำหรับเหล็กกลมผิวเรียบกับคอนกรีตได้จากสองแบบแรกซึ่งขึ้นกับ การทำคอนกรีต (การผสม การเท และการทำให้แน่น) แต่กำลังของเหล็กกลมผิวเรียบมีค่าไม่มากนัก อย่างไรก็ดีสามารถเพิ่มกำลังยึดเหนี่ยวให้มากขึ้นโดยการทำให้เกิดการยึดรั้งทางกล เช่น การของอที่ปลายเหล็กเสริมกลมผิวเรียบและให้มีระยะฝังยึดในคอนกรีตอย่างเพียงพอ หรือการใช้เหล็กข้ออ้อย เป็นต้น

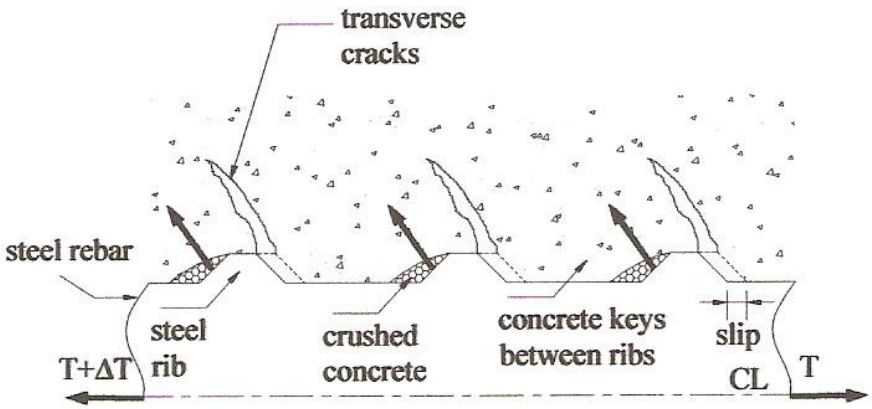
การวิบัติเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยว (Bond failure) เป็นการปริแยกของคอนกรีต (Splitting) ตามแนวยาวของเหล็กเสริม และมักเกิดขึ้นหลังจากที่ปรากฏรอยร้าวในแนวทแยงที่เป็นผลมาจากแรงดึงทแยง ซึ่งเมื่อรวมผลของการเฉือนในเหล็กเสริม (Dowel action) ก็จะช่วยให้รอยปริแยกเคลื่อนตัวเข้าหาจุดรองรับเร็วขึ้น หากปลายของส่วนของโครงสร้างนั้นปราศจากการยึดรั้งที่เพียงพอก็จะเกิดการวิบัติทันทีดังแบบจำลองกำลังการยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริม (Bond stress-slip model) ดังรูปที่ 2.8



	Unconfined Concrete		Confined Concrete	
	Good Bond	Other cases	Good Bond	Other cases
S_1	0.6mm		1.0mm	
S_2	0.6mm		3.0mm	
S_3	1.0mm	2.5mm	Clear rib spacing	
α	0.4		0.4	
τ_{max}	$2.0(f_{ck})^{0.5}$	$1.0(f_{ck})^{0.5}$	$2.5(f_{ck})^{0.5}$	$1.25(f_{ck})^{0.5}$
τ_f	$0.15\tau_{max}$		$0.40\tau_{max}$	

รูปที่ 2.8 Bond stress-slip model CEB (1993)

สำหรับคานที่เสริมเหล็กข้ออ้อยซึ่งมีผิวของเหล็กเสริมเป็นข้อหรือปล้อง กำลังยึดเหนี่ยว จะมีค่ามากขึ้น เพราะเมื่อกำลังยึดเหนี่ยวที่ได้จากการยึดเกาะทางเคมีและจากแรงฝืดถูกทำลายไป ก็จะยังเหลือกำลังยึดเหนี่ยวที่ได้จากส่วนของข้อหรือปล้องของเหล็กเสริมอีก กล่าวคือเมื่อเหล็กเสริมเริ่มจะเลื่อนไถล ส่วนของข้อหรือปล้องของเหล็กเสริมโดยรอบจะดันคอนกรีตที่หุ้มห่อให้ต้องรับแรงกดอัดหรือแรงแบกทาน (Bearing) และแรงเฉือน ดังรูปที่ 2.9 จนกว่าแรงที่กระทำนั้นมีค่าเกินกว่ากำลังต้านทานของคอนกรีต คอนกรีตในบริเวณนั้นจึงค่อยๆปริแยกและแตกออก (Wedging action) ทั้งนี้ความกว้างของรอยร้าวและการโก่งตัวจะน้อยกว่าที่เกิดขึ้นในคานที่เสริมด้วยเหล็กกลมผิวเรียบ



รูปที่ 2.9 การแตกร้าวของคอนกรีตเนื่องจากแรงกดอัด fib (2000)

ผลจากการทดลองพบว่าปัจจัยที่สำคัญนอกเหนือจากกำลังวัสดุและขนาดของเหล็กเสริมที่ใช้ กำลังยึดหนี่ยวยังขึ้นกับระยะคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริม ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมและเสริมเหล็กตามขวาง หากระยะของคอนกรีตใต้เหล็กเสริมมีค่ามากพอ คอนกรีตจะสามารถต้านทานแรงดึงได้มากขึ้นและช่วยชะลอการแตกหรือปริแยกออกในแนวตั้งได้ และเมื่อระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมมากขึ้นซึ่งจะทำให้มีเนื้อที่คอนกรีตหุ้มเหล็กแต่ละเส้นมากขึ้นก็จะช่วยต้านทานการแตกหรือปริออกของคอนกรีตในแนวนอนได้ นอกจากนี้ หากส่วนโครงสร้างนั้นมีเหล็กเสริมทางขวาง เช่น เหล็กปลอก กำลังต้านทานแรงดึงจะมากขึ้นซึ่งช่วยชะลอการเกิดรอยร้าวจากแรงดึงได้ นั้นเสมือนว่าเหล็กเสริมทางขวางช่วยชะลอการแตกหรือปริแยกออกทั้งในแนวตั้งและแนวนอน ทำให้ช่วยลดระยะที่จะต้องฝังเหล็กเสริมในคอนกรีตลงได้

2.3 การใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electro Chemical)

การใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electro Chemical)ในการบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นวิธีการป้องกันการกัดกร่อนที่มีการใช้กันอย่างกว้างขวางเนื่องจากเป็นวิธีการที่สามารถประยุกต์ใช้กับโลหะและโลหะผสมทุกชนิดในทุกสภาพ (ศิริลักษณ์, 2545) การใช้งานโดยมีข้อแม้ว่าต้องสัมผัสอยู่กับสารละลายอิเลคโทรไลต์ (Electrolyte) และเมื่อใช้แล้วยังสามารถลดอัตราการกัดกร่อนได้จนมีค่าใกล้ศูนย์หรือไม่เกิดการกัดกร่อนเลยได้ นอกจากนั้นการทำงานของวิธีนี้ยังสามารถทำได้นานตลอดความต้องการ การควบคุมและการติดตามการทำงานอย่างสะดวกและง่ายโดยการให้โลหะเป้า หมายที่ต้องการการปกป้องขั้วหนึ่งขั้วใดในเซลล์เคมีไฟฟ้า ซึ่งมีวิธีการทำอยู่ 2 แบบคือ

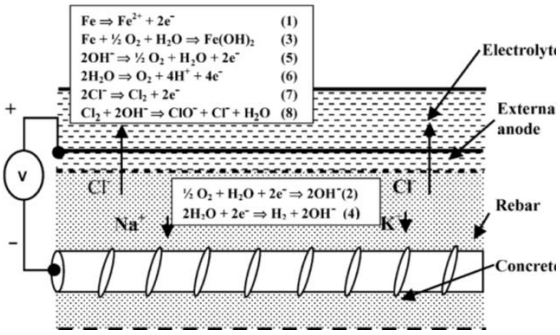
- แบบให้โลหะเป้าหมายเป็นขั้วลบ เรียกว่าการป้องกันแบบคาโทดิก (Cathodic Protection)

- แบบให้โลหะเป้าหมายเป็นขั้วบวก เรียกว่าการป้องกันแบบอาโนดิก (Anodic Protection)

ซึ่งการประยุกต์ใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีในการป้องกันหรือซ่อมแซมการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตนั้นมีหลายวิธี เช่น Electrodeposition, Cathodic Protection หรือ Electrochemical Chloride Removal เป็นต้นซึ่งมีข้อมูลเกี่ยวกับการซ่อมแซมวิธีการดึงคลอไรดอิออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี ในต่างประเทศต่างๆดังนี้

2.3.1 การลดปริมาณคลอไรด์อิออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Chloride Remocal)

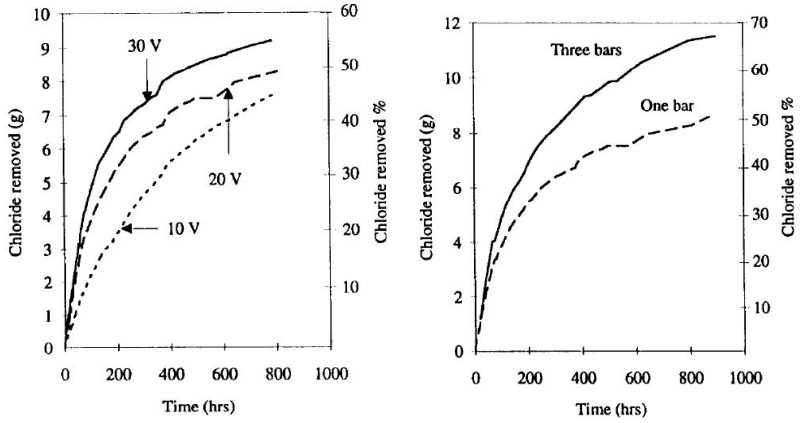
การลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Chloride Removal) คือการเอาเฉพาะคลอไรด์อิออนออกจากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งมีขั้วไฟฟ้าอยู่ในสารละลายซึ่งอยู่ภายนอกคอนกรีตและมีการเชื่อมต่อไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างขั้วไฟฟ้าและเหล็กเสริมภายในคอนกรีตมีการให้ไฟฟ้าตรงกับขั้วไฟฟ้าและเหล็กเสริมคอนกรีตโดยให้ขั้วไฟฟ้าภายนอกเป็นขั้วบวก (Anode) และเหล็กเสริมเป็นขั้วลบ (Cathode) จากการต่อระบบดังนี้ เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่สูงพอคลอไรด์อิออนที่มีสภาพเป็นขั้วลบจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วบวกซึ่งอยู่ภายนอกมีผลทำให้ความปนเปื้อนของคลอไรด์อิออนในคอนกรีตมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงขบวนการของวิธี Electrochemical Chloride Removal (ECR)

ที่มา: J.M. Miranda et. al, 2005

ความสามารถในการซ่อมแซมด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมียังขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างนั้นๆด้วย Arya. C. และ Sa'id-shawqi (1996) ได้เสนอการกำหนดลักษณะทางกายภาพเพื่อหาความสามารถในการดึงคลอไรด์อิออนออกจากคอนกรีตตามลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างการทดลองโดยกำหนดให้มีจำนวนเหล็กเสริมที่ต่างกัน หรือระยะหุ้มคอนกรีตไม่เท่ากันและในแต่ละตัวอย่างการทดลองก็จะมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบในขนาดต่างๆรวมทั้งขนาดของคลอไรด์ในส่วนผสมของคอนกรีตที่ไม่เท่ากันกันเพื่อหาเส้นอิทธิพลเพื่อที่จะนำมาเป็นข้อมูลเพื่อเป็นการตรวจสอบหรืออ้างอิง จากการศึกษาพบว่าเมื่อมีสื่อที่จะนำกระแสไฟฟ้าขั้วลบ มากขึ้นเท่าใดความสามารถในการเคลื่อนที่ของคลอไรด์อิออนจากคอนกรีตออกสู่สารละลายจะมากขึ้นโดยแปรผันตรงกันกับกระแสไฟฟ้าและจำนวนของสื่อในการนำกระแสไฟฟ้าไม่ว่าจะเป็นกรณีที่มีเหล็กเสริมในคอนกรีตมากกว่า 1 หรือ 2 เส้นในการทดลองอื่นๆ หรือเมื่อเทียบกับการปล่อยกระแสไฟที่ 10 V. 20 V. และ 30 V. ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 2.10 จะเห็นได้ว่าคลอไรด์อิออนจากคอนกรีตออกสู่สารละลายได้มากขึ้นตามปริมาณของกระแสไฟฟ้าและสื่อที่จะเป็นขั้วลบ



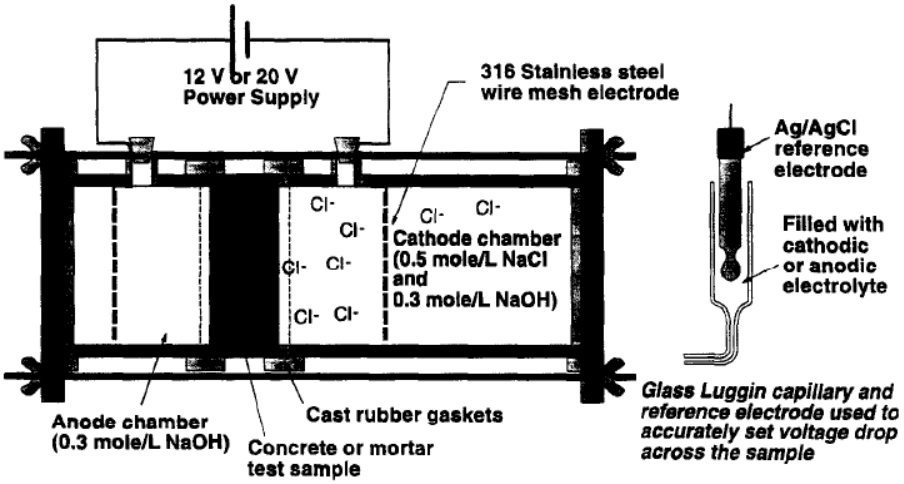
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่จ่ายในระบบกับปริมาณคลอไรด์ ที่ออกจากตัวอย่าง ในการทดลองและความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสื่อที่เป็นขั้วลบกับปริมาณคลอไรด์ที่ออกจากตัวอย่างการทดลอง

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

จากรูปที่ 2.10 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ความต่างศักย์สูงหรือมีพื้นที่ในการนำไฟฟ้ามากขึ้นเท่าใดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความสามารถในการดึงคลอไรด์อิออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีซึ่งต่อมาในปี 1996 Rob B. Polder ยังได้รายงานผลการศึกษานอกห้องทดลองที่ใช้ชิ้นตัวอย่างที่แช่ในทะเลนานถึง 16 ปี (บริเวณ North Sea 1796-1992) เพื่อให้คลอไรด์ในน้ำทะเลธรรมชาติแทรกซึมเข้าไปในแท่งตัวอย่างการทดลองขนาด 50 x 100 x 100 ซม.แล้วนำมาเข้ากระบวนการดึงคลอไรด์อิออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และน้ำประปาเป็นอิเลคโทรไลต์เป็นเวลา 39 วันด้วยการจ่ายกระแสไฟฟ้า 1 และ 4 $A/m.^2$ ในเบื้องต้นสามารถดึงคลอไรด์อิออนออกจากเนื้อคอนกรีตได้ถึงร้อยละ 40-

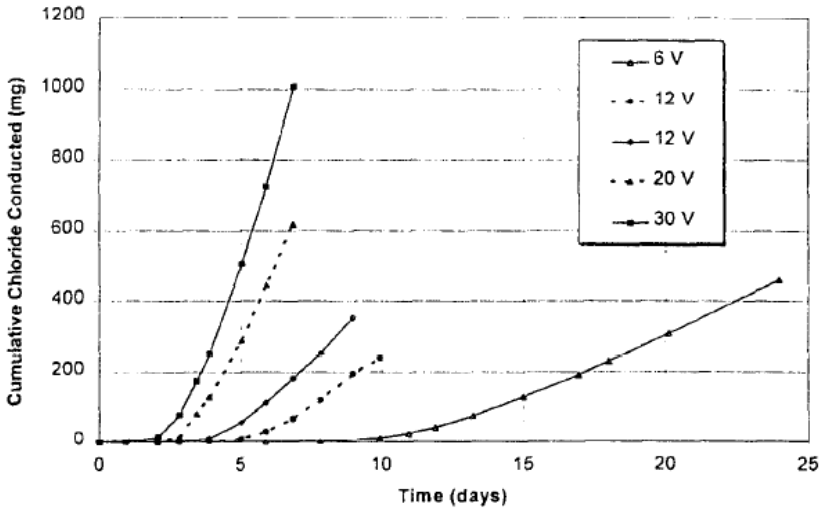
70 สำหรับตัวอย่างที่มีน้ำประปาเป็นอิเล็คโทรไลต์ และร้อยละ 70-90 สำหรับสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิ่มตัวเป็นอิเลคโทรไลต์ ซึ่งรายงานผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับ Arya. C. และ Sa'id-shawqi (1996) เนื่องจากปริมาณกระแสไฟฟ้าที่มากกว่าคือขนาด 4 $A/m.^2$ สามารถดึงปริมาณคลอไรด์จากคอนกรีตมาสะสมอยู่ในสารละลายอิเล็คโทรไลต์มากกว่าขนาด 1 $A/m.^2$

โดยในปีเดียวกัน P.F. McGrath and R.D. Hooton (1996) ได้ทำการทดสอบ Chloride Migration Test โดยใช้คอนกรีตที่มีปฏิภาคส่วนผสมเดียวกันทุกตัวอย่างการทดลองและทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาดต่างๆกันในการทดลองและทำการวัดปริมาณคลอไรด์ที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตมาสะสมอยู่ในสารละลายประจุบวกบวก (Anolyte) ในการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงการทดสอบ Chloride Migration Test

ที่มา: P.F. McGrath and R.D. Hooton (1996)



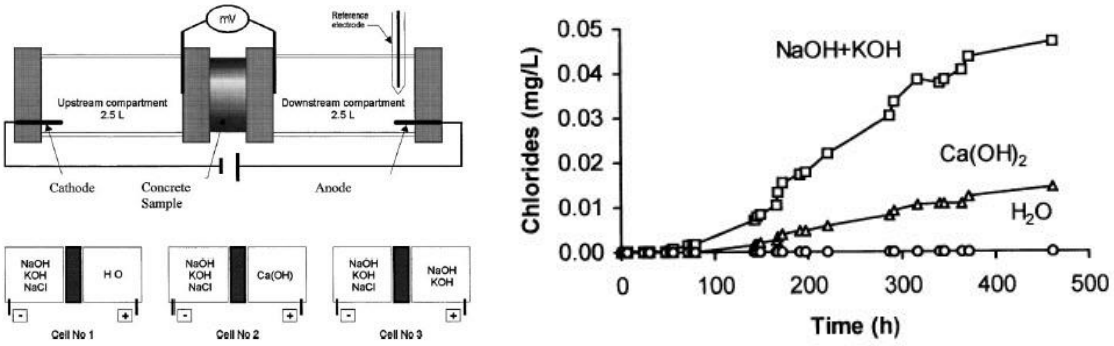
รูปที่ 2.12ปริมาณคลอไรด์ที่ออกจากคอนกรีตมาสะสมอยู่ในสารละลายของการทดสอบ Chloride migration test

ที่มา: P.F. McGrath and R.D. Hooton (1996)

จากรูปที่ 2.12 สามารถอธิบายได้ว่าความสามารถในการเคลื่อนที่ของคลอไรด์อิออนผ่านคอนกรีตนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสไฟฟ้าโดยขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองในครั้งนี้คือ 6, 12, 20 และ 30 โวลต์ซึ่งความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลอไรด์อิออนผ่านคอนกรีตเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสไฟฟ้าที่

จ่ายเข้าไปในการทดลองเนื่องจากการผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากระแสไฟฟ้าขนาด 30 โวลต์สามารถดึงคลอไรด์มาสะสมอยู่ในสารละลายที่มีประจุบวกได้มากกว่าขนาดกระแสไฟฟ้าขนาด 5 โวลต์ กล่าวคือในวันที่ 4 ของการทดสอบคลอไรด์สามารถเดินทางผ่านคอนกรีตมาสะสมอยู่ในสารละลายที่มีประจุบวกของตัวอย่างที่ใช้กระแสไฟฟ้าขนาด 30 โวลต์และในวันที่ 7 ของการทดลองตัวอย่างที่ใช้กระแสไฟฟ้า 30 โวลต์สามารถดึงคลอไรด์ได้มากถึง 1000 มิลลิกรัม ในขณะที่ตัวอย่างที่ใช้กระแสไฟฟ้า 6 โวลต์ต้องใช้ระยะเวลาในการทำให้คลอไรด์เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตมากกว่า 10 วันเพื่อที่จะทำให้คลอไรด์เดินทางผ่านคอนกรีตมาสะสมอยู่ในสารละลายที่มีประจุบวก

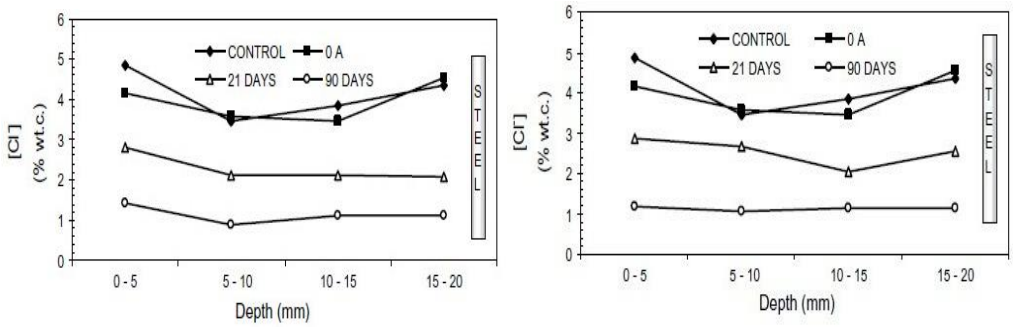
การทดสอบ Chloride Migration Test นั้นสารละลายที่ใช้ในการทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ยังมีผลต่อการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ซึ่ง W. Prince และ R. Gagne (2000) ได้รายงานผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตด้วยวิธี Chloride Migration Test ของคอนกรีตที่ใช้ปฏิภาคส่วนผสมเดียวกันโดยใช้สารละลายที่มีศักย์ไฟฟ้าขั้วบวกบวก 3 ชนิดและใช้กระแสไฟฟ้าในการทดสอบขนาด 12 โวลต์ในทุกตัวอย่างโดยผลการทดลองพบว่าผลกระทบของสารละลายมีผลต่อการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 2.13 โดยในรายงานผลการทดลองได้รายงานผลว่าสารละลายโซเดียมไอดรอกไซด์ผสมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นการจำลองสารละลายในช่องว่างของคอนกรีตสามารถดึงปริมาณคลอไรด์อิออนมาสะสมอยู่ในสารละลายได้มากกว่าสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์และการใช้น้ำเป็นสารละลาย



รูปที่ 2.13 แสดงอิทธิพลของสารละลายที่ใช้ในการทดสอบ Chloride Migration Test

ที่มา: W. Prince and R. Gagne, 2000

G.Fajardo et. al (2004) ได้เสนองานวิจัยเรื่องElectrochemical Chloride Extraction (ECE) from Steel-Reinforced Concrete Specimens Contaminated by "Artificial" Sea-Water โดยทำการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตขนาด 5 ซม. และ 11 ซม. และนำไปแช่ในสภาวะน้ำทะเลเทียมโดยมีองค์ประกอบทางเคมีซึ่งเป็นการจำลองคุณสมบัติให้เหมือนน้ำทะเลในมหาสมุทรแอตแลนติกโดยนำไปแช่อยู่ในน้ำทะเลเทียมเป็นเวลา 3วัน และนำมาอบในตู้อบอุณหภูมิ 40องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 วันซึ่งเป็นการเร่งการซึมผ่านของคลอไรด์ให้เข้าสู่ตัวอย่างในการทดลองในสภาวะเปียกสลับแห้งตลอดระยะเวลาในการทดลอง 300 วันและทำการหาปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการลดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีระหว่างเปลี่ยนสารละลายในระหว่างการทดลองและไม่เปลี่ยนสารละลายดังแสดงในรูปที่ 2.14



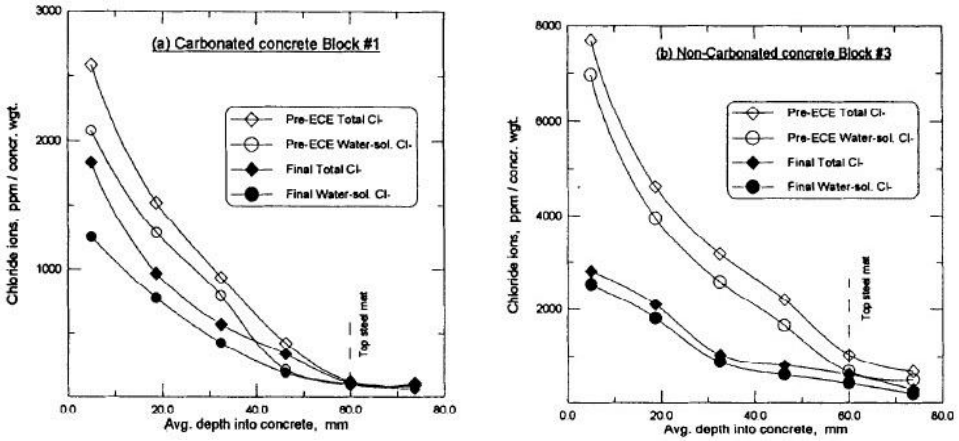
รูปที่ 2.14 ปริมาณคลอไรด์ที่สะสมอยู่ในคอนกรีตก่อนและหลังขบวนการทางไฟฟ้าเคมีโดยการเปลี่ยนสารละลายใหม่และไม่เปลี่ยนสารลาย

ที่มา: G.Fajardo at, el (2004)

รูปที่ 2.14 แสดงประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์อิออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีที่อยู่ภายในคอนกรีตที่ใช้ในการทดลองโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์อิออนระหว่างการเปลี่ยนสารละลายในการทดลองทุก 2 วันจะเห็นได้ว่าระหว่างการเปลี่ยนสารละลายและไม่ได้เปลี่ยนสารละลาย ประสิทธิภาพของการดึงคลอไรด์ในคอนกรีตไม่ได้น้อยลง แต่อิทธิผลที่ส่งผลต่อการดึงคลอไรด์นั่นคือระยะเวลาในการทำการจ่ายกระแสไฟฟ้า มีประสิทธิภาพไปในทางเดียวกันกล่าวคือการทำการดึงคลอไรด์ที่ระยะเวลา 90 วันสามารถดึงคลอไรด์ที่อยู่ในคอนกรีตมากว่าการทดลองที่ 21 วันในทุกระยะความลึกต่างๆ

ยังมีนักวิจัยที่ศึกษาผลกระทบต่อการดึงคลอไรด์อิออนในคอนกรีตด้วยวีธีทางไฟฟ้าเคมีโดย N.M. Ihekwaba et. al. ในปี 1996 พบว่าการดึงคลอไรด์อิออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีจากคอนกรีตที่ได้รับผลกระทบจากคาร์บอเนชั่นจะลดประสิทธิภาพลดลง โดยได้ทำการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตเป็น 2 กลุ่มคือกลุ่มที่คอนกรีตมีสภาพคาร์บอเนชั่นโดยนำไปบ่มในตู้อบคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเวลา 6 เดือนหลังจากนั้นนำตัวอย่างที่ผ่านการเข้าตู้อบคาร์บอนไดออกไซด์และคอนกรีตที่ไม่มีสภาพคาร์บอเนชั่นมาทำการแช่อยู่ในสารละลาย

โซเดียมคลอไรด์อิ่มตัว (Saturated NaCl) เป็นเวลา 18 เดือนจากนั้นทำการหาปริมาณคลอไรด์ก่อนทำการดึงคลอไรด์อิออนจากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15แสดงการเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังการดึงคลอไรด์จากคอนกรีตด้วยวิธี ทางไฟฟ้าเคมีระหว่างคอนกรีตที่มีสภาพคาร์บอเนชั่นและคอนกรีตปกติ

ที่มา: N.M. Ihekwaba et. al, 1996

รูปที่ 2.15 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณก่อนและหลังการดึงคลอไรด์จากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีระหว่างคอนกรีตที่มีสภาพคาร์บอเนชั่นและคอนกรีตปกติจะเห็นได้ว่าคอนกรีตที่มีสภาพคาร์บอเนชั่นนั้นส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์อิออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยสามารถลดปริมาณคลอไรด์ได้น้อยกว่าคอนกรีตที่ไม่มีสภาพคาร์บอเนชั่นโดยคอนกรีตที่มีสภาพคาร์บอเนชั่นสามารถลดปริมาณคลอไรด์จากปริมาณคลอไรด์เริ่มต้นประมาณ 2600 ppm. ต่อน้ำหนักคอนกรีตเหลือประมาณ 1800 ppm. ต่อน้ำหนักคอนกรีตส่วนคอนกรีตที่ไม่มีสภาพคาร์บอเนชั่นสามารถลดปริมาณคลอไรด์จากปริมาณคลอไรด์เริ่มต้นประมาณ 7800 ppm. ต่อน้ำหนักคอนกรีตเหลือประมาณ 2900 ppm.ต่อน้ำหนักคอนกรีต

และ N.M. Ihekwaba at, el ได้ทำการเปรียบเทียบศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์โดยพบว่าคอนกรีตที่ผ่านกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีของทั้ง 2 กลุ่มตัวอย่างมีค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์น้อยลงในทุกตัวอย่างการทดลองโดยค่าศักย์ไฟฟ้าที่ทำการเปรียบเทียบก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีดังแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งการลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของตัวอย่างในการทดลองสอดคล้องกับ Rob B. Polder ในปีเดียวกัน

ตารางที่ 2.1. แสดงการเปรียบเทียบศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี

ที่มา: N.M. Ihekwaba et. al, 1996

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

2.3.2 การประยุต์ใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

การประยุกต์ใช้วิธีการดึงคลอไรด์ที่ปนเปื้อนอยู่ในคอนกรีตเสริมเหล็กถายในประเทศยังมีไม่มากนักแต่ในประเทศอเมริกาโดยมีรายงานฉบับสมบูรณ์ของ 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 ดังแสดงในรูปที่ 2.16

โครงสร้างสะพาน I-365 เป็นสะพานที่มีอายุการใช้งาน 28 ปีโดยพบว่าวิธีการดังกล่าวสามารถลดปริมาณคลอไรด์จากปริมาณคลอไรด์ที่ปนเปื้อนอยู่ภายในคอนกรีตเริ่มต้นได้ร้อยละ 41 ถึงร้อยละ 80 และยังพบว่าโอกาสในการเป็นสนิมของเหล็กเสริมโดยใช้วิธีวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ในการประเมินค่าดังกล่าวพบว่าไม่พบโอกาสการในการเป็นสนิมของเหล็กเสริมเหลืออีกเลยหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี

รูปที่ 2.16 แสดงการประยุกต์ใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีในการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต

ที่มา: Gerodo G. Clemena and Donald R. Jackson, 2000

รูปที่ 2.16 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ในการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีของสะพาน I-365 ซึ่งสามารถลดปริมาณคลอไรด์ได้เป็นที่น่าพอใจ

การประยุกต์ใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีในการลดปริมาณคลอไรด์ที่ปนเปื้อนอยู่ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมที่อยู่ในสรูปที่มีการเปิดการใช้งานโครงสร้างแล้วภายในประเทศยังมีไม่มากนักเนื่องจากเป็นวิธีที่ยังไม่เป็นที่นิยมภายในประเทศ แต่ในต่างประเทศได้มีการใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีเพื่อลดปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ในคอนกรีตโดยในปี 2002 โดย Stephen R. Sharp et. al. ได้รวบรวมการใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีเพื่อลดปริมาณคลอไรด์ในทวีปอเมริกาเหนือ ซึ่งได้รวบรวมโครงสร้างที่ใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีเพื่อลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตในส่วนของประสิทธิภาพของการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตและการลดลงของโอกาสการเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้วิธีวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ในการประเมินโอกาสการเป็นสนิมของเหล็กเสริมดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2. แสดงการใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีเพื่อลดปริมาณคลอไรด์ในทวีปอเมริกาเหนือ

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 (at0-25 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

N/A = Not Available

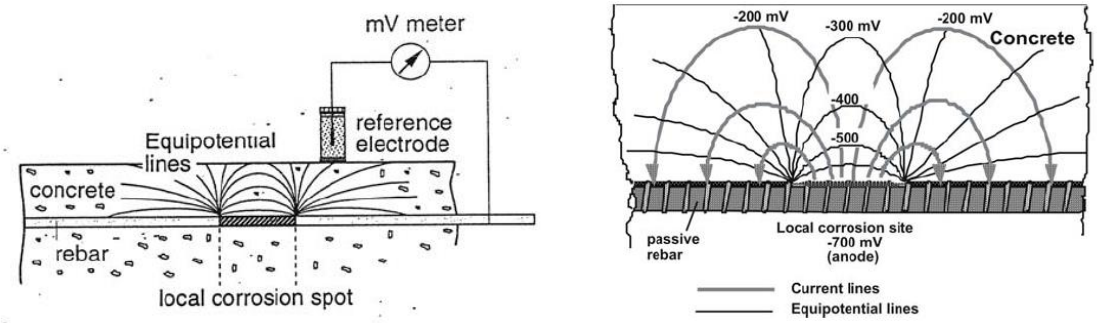
ที่มา: Stephen R. Sharp et. al, 2002

ตารางที่ 2.2. (ต่อ) แสดงการใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีเพื่อลดปริมาณคลอไรด์ในทวีปอเมริกาเหนือ

Location	Date	Area of Treatment (m^2)	Chloride Removed (%)
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.)
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.)

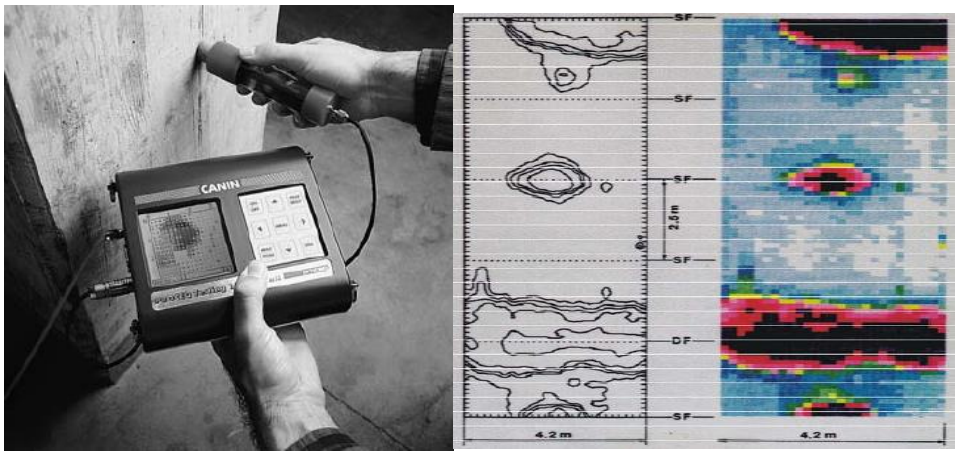
2.3.3 การตรวจสอบทางไฟฟ้าเคมี (Evaluate of Electrochemical)

การผุกร่อนของเหล็กเสริมเป็นการเสื่อมสภาพของเหล็กเสริมด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Electro Chemical Reaction) เกิดขึ้นเมื่อ Passivation Film ที่เกิดขึ้นในขณะเกิดปฏิกิริยา Hydration และเคลือบหุ้มเหล็กเสริมอยู่ถูกทำลาย ซึ่งอาจเกิดจาก ขบวนการ Carbonation หรือจากคลอไรด์อิออน (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 การตรวจสอบด้วยวิธีครึ่งเซลล์ (Half-Cell Potential Measurement) ในคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีทั้งพื้นที่ที่ถูกและไม่ถูกกัดกร่อนอยู่ด้วยกัน ประกอบกับการเกิดสนิมยังไม่รุนแรง การดูด้วยตาเปล่าทำได้ยากจึงต้องใช้เครื่องมืออย่างง่ายที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการตรวจสอบเรียกว่า การตรวจสอบโดยวิธีครึ่งเซลล์ (The Half-Cell Potential Measurement) โดยจะใช้ด้านที่ต่อกับเหล็กเสริมเป็นขั้วบวก (Anode) และใช้ด้านที่ไม่เกิดการกัดกร่อนเป็นขั้วลบ (Cathode) โดยต่อกับผิวคอนกรีตและปล่อยกระแสไฟฟ้าความต่างศักย์ประมาณ 0.5V หรือ มากกว่าเข้าไป จะทำให้เกิดปฏิกิริยาอาโนด และคาโทดซึ่งช่วยให้วัดและประมาณค่าการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ (B. Elsener, 2001) ดังแสดงในรูปที่ 2.17 และ 2.18



รูปที่ 2.17 แผนภูมิการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

ที่มา: B. Elsener, 2001



รูปที่ 2.18 การตรวจสอบโดยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (The Half-Cell Potential Measurement) และการพล็อตเส้นชั้นความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-Cell Potential Contour)

ที่มา: B. Elsener, 2001

วิธีการทดสอบด้วยวิธีการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์โดยทำเป็นเส้นตารางทุกช่วง 1.0 x 1.0 เมตร แล้วนำความต่างศักย์มาพล็อตแสดง เส้นชั้นค่าความต่างศักย์ (Potential Gradient) หรือที่เรียก Corrosion Mapping ซึ่งจะหมายถึงขอบเขตพื้นที่เหล็กเสริมเกิดการผุกร่อนเป็นสนิม โดยมาตรฐาน ASTM C876 กำหนดอัตราความเสี่ยงที่จะเกิดสนิมไว้ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3. อัตราความเสี่ยงที่จะเกิดสนิมตามแนวทาง ASTM C876

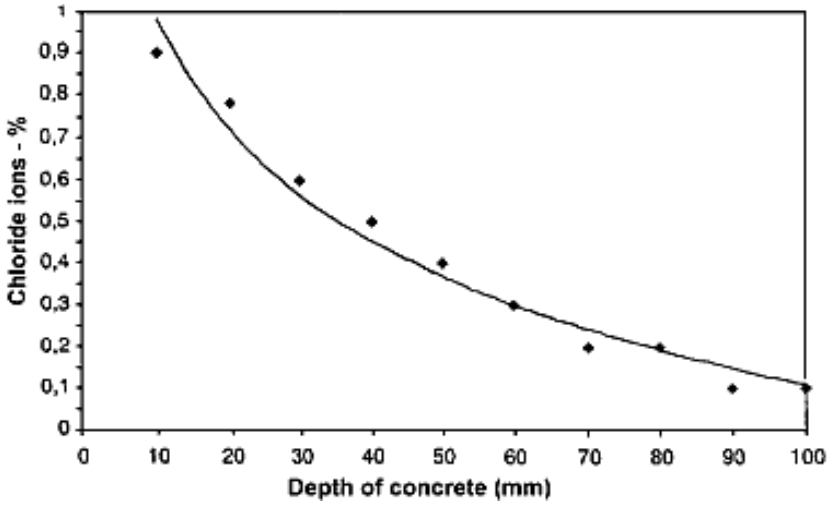
ค่าความต่างศักย์ (Volt)	สภาพการผุกร่อนของเหล็กเสริม
น้อยกว่า – 0.20	ความเป็นไปได้ร้อยละ 90 ที่จะไม่เกิดสนิม
-0.20 ถึง –0.35	ไม่แน่นอน
มากกว่า –0.35	ความเป็นไปได้ร้อยละ 90 ที่เกิดสนิมแล้ว

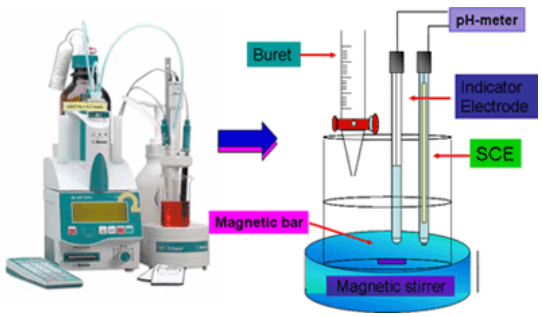
ที่มา: ASTM C876-91 (Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete)

อย่างไรก็ตามการทดสอบด้วยวิธีนี้ไม่สามารถบอกอัตราการผุกร่อนหรือพื้นที่หน้าตัดที่เหลืออยู่ของ เหล็กเสริม เป็นเทคนิคการทดสอบที่บอกแนวโน้มการผุกร่อนของเหล็กเสริมเท่านั้น นอกจากนี้ยังไม่สามารถตรวจสอบการผุกร่อนของลวดอัดแรง (Post Tension) และของที่เหล็กเสริมในกรณีที่ไม่ต่อเนื่องกัน

2.3.4 การหาปริมาณของคลอไรด์ (Chloride Content)

ปริมาณของคลอไรด์ เป็นส่วนที่สำคัญที่ทำให้เหล็กเสริมเกิดการผุกร่อนส่งผลให้เหล็กเสริมเป็นสนิม ถ้ามีปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตมากพอจนทำให้ Passivition Film ที่ทำหน้าที่ป้องกันการเป็นสนิมของเหล็กเสริมเสียหาย หรือถ้าเกิดการแทรกซึมของคลอไรด์จากน้ำทะเลจนถึงตำแหน่งของเหล็กเสริม จะส่งผลให้เหล็กเสริมเกิดสนิมอย่างรวดเร็ว การหาปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ทำได้โดยการใช้สว่านเจาะคอนกรีตที่ระดับความลึกต่างๆและนำผงคอนกรีตที่ได้มาทดสอบหาปริมาณของคลอไรด์อิออน และเขียนกราฟความสัมพันธ์ของปริมาณคลอไรด์อิออนกับระดับความลึกต่างๆ ซึ่งจะทำให้สามารถประมาณระยะเวลาที่เหลืออยู่ก่อนที่เหล็กเสริมจะเกิดสนิมได้ ดังแสดงในรูปที่2.19





รูปที่ 2.19 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิออนในห้องปฏิบัติการและกราฟความสัมพันธ์ของปริมาณคลอไรด์เปรียบเทียบกับระดับความลึกต่างๆ

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

บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

วิธีการการดำเนินการศึกษาผลกระทบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้เป็นโครงสร้างในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล สำหรับอุปกรณ์และวิธีการทดลองดังนี้

3.1 อุปกรณ์

3.1.1 แบบหล่อแท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอก ขนาด 15 × 30 เซนติเมตร

3.1.2 แบบหล่อแท่งตัวอย่างแผ่นพื้น ขนาด 40 x 40 x 10 เซนติเมตร

3.1.3 แบบหล่อแท่งตัวอย่างแผ่นพื้น ขนาด 70 x 70 x 10 เซนติเมตร

3.1.4 ถังสำหรับแช่ตัวอย่าง ขนาด 120 × 150 เซนติเมตร

3.1.5 เครื่องชั่งน้ำหนัก สามารถอ่านค่าได้ละเอียด 0.1 กรัม

3.1.6 แผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar cells)

3.1.7 เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้ากระแสตรงและสายไฟฟ้า

3.1.8 แบตเตอร์รี่เก็บประจุไฟฟ้า

3.1.9 สารเคมีสำหรับการไทเทรตหาปริมาณคลอไรด์ (รายละเอียดแสดงในส่วนถัดไป)

3.1.10 ชุดเครื่องมือเก็บตัวอย่างผงคอนกรีต เช่น สว่านเจาะคอนกรีต แปรงปัดฝุ่น เป็นต้น

3.1.11 อุปกรณ์สำหรับเตรียมสารละลาย

3.1.12 ฟิวเจอร์บอร์ด, ซิลิโคน และแผ่นแสตนเลสสตีลสำหรับการติดตั้งสารละลายบนตัวอย่าง

3.2 วัศดุและปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต

3.2.1 วัศดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีต

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราช้างของบริษัทปูนซีเมนต์ไทยจำกัด

- วัสดุมวลรวมหยาบ ใช้ หินปูนย่อย (Crushed limestone) ขนาดใหญ่สุด 3/8 นิ้ว

- มวลรวมละเอียด ทรายแม่น้ำร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (SSD)

- เหล็กผิวเรียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม.

3.2.2 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต

ในการศึกษาในครั้งนี้ได้กำหนดคอนกรีตให้มีกำลังรับแรงอัด 320 กก./ซม.^{2} โดยมีปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตและคุณสมบัติของเหล็กเสริมที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ดังแสดงในตารางที่ 3.1-3.2

ตารางที่ 3.1 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต (ขนาด 40x40x10 cm)

วัสดุในการผสมคอนกรีต	ปริมาณน้ำหนัก (กก./ 1 ตัวอย่างการทดลอง)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	7.40
มวลรวมหยาบ	16.50
มวลรวมละเอียด	11.90
น้ำ	3.30
สารละลายโซเดียมคลอไรด์	0.37

ตารางที่ 3.2 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต (ขนาด 70x70x10 cm)

วัสดุในการผสมคอนกรีต	ปริมาณน้ำหนัก (กก./1 ตัวอย่างการทดลอง)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	22.20
มวลรวมหยาบ	49.60
มวลรวมละเอียด	35.90
น้ำ	10.00
สารละลายโซเดียมคลอไรด์	1.10

รูปที่ 3.1 แสดงการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตทรงกระบอกของตัวอย่างการทดลอง

ตารางที่ 3.3-- คุณสมบัติเหล็กเสริมคอนกรีต

Diameter	Cross section area	Yielding strength	Ultimate strength
(mm.)	($mm.^2$)	($kg./cm.^2$)	($kg./cm.^2$)
RB9	63.6	2400	3900

3.3 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก

3.3.1 ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 40x40x10 cm.

จัดทำตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก ขนาด 40 x 40 x 10 ซม. จำนวน 12 ตัวอย่างโดยมีปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตดังแสดงในตารางที่ 3.2 และน้ำที่ใช้ในการเตรียมคอนกรีตเป็นน้ำประปาโดยใช้เหล็กเสริมชนิด RB ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม. ผูกเป็นตะแกรงโดยทำการดัดเหล็กให้งอขึ้นมาด้านบนเพื่อทำเป็นสื่อในการนำไฟฟ้าโดยในการศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการผสมผสมโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ในอัตราร้อยละ 5 ต่อน้ำหนักซีเมนต์เพื่อแทนการแช่ตัวอย่างในสารละลายเนื่องจากความจำกัดด้านเวลาในการซึมผ่านของคลอไรด์ โดยทำการบ่มตัวอย่างในน้ำประปาเป็นเวลา 7 วัน และนำขึ้นมาทำเครื่องหมายแสดงตำแหน่งตามตำแหน่งของจุดต่อเหล็กเสริมและเจาะนำผงคอนกรีตที่ระยะ 1, 2,3 และ 4 ซม. จากด้านบนของตัวอย่างในการทดลองเพื่อนำมาแช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและทำการกรองด้วยกระดาษกรองในการกรองผงคอนกรีตเพื่อเตรียมทำการไทเทรต (Titration) หาปริมาณคลอไรด์

3.3.2 ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 70x70x10 cm.

จัดทำตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก ขนาด 70 x 70 x 10 ซม. จำนวน 3 ตัวอย่าง โดยใช้เหล็กเสริมชนิด RB ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม. ผูกเป็นผูกเป็นตะแกรงโดยมีระยะห่างเหล็กเสริมเท่ากับ 10 ซม. โดยทำการต่อสายไฟเพื่อทำการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างทำการทดสอบ มีระยะหุ้มเหล็กเสริมเท่ากับ 5 ซม. โดยใช้ปฏิภาคส่วนผสมตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 70 x 70 x 10 ซม. โดยทำการการระบุตำแหน่งการเจาะผงคอนกรีตเพื่อทำการเจาะผงคอนกรีตซึ่งกำหนดให้มีระยะห่างเท่ากับ 15 ซม และทำการเจาะเอาผงคอนกรีตจากด้านบนซึ่งเป็นด้านเหนือเหล็กที่ระยะ1,2,3 และ 4 ซม. ซึ่งเป็นตำแหน่งของเหล็กเสริมเพื่อนำมาหาปริมาณคลอไรด์อิสระที่อยู่ภายในคอนกรีตเพื่อนำมาเป็นข้อมูลเปรียบเทียบก่อนและหลังในการดึงคลอไรด์อิออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าโดยใช้โซล่าเซลล์ โดยเมื่อได้ผงคอนกรีตที่ได้จากการเจาะนำมาชั่งน้ำหนักและทำการแช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและทำการกรองด้วยกระดาษกรองในการกรองผงคอนกรีตเพื่อเตรียมทำการไทเทรต (Titration) หาปริมาณคลอไรด์

รูปที่ 3.2 แสดงการเตรียมแบบหล่อคอนกรีตแบบแผ่นพื้น

รูปที่ 3.3 แสดงการเตรียมตัวอย่างคอนกรีต, และการบ่มคอนกรีตที่ใช้ในการวิจัย

3.3.3 การเตรียมสารละลายในการทดลอง

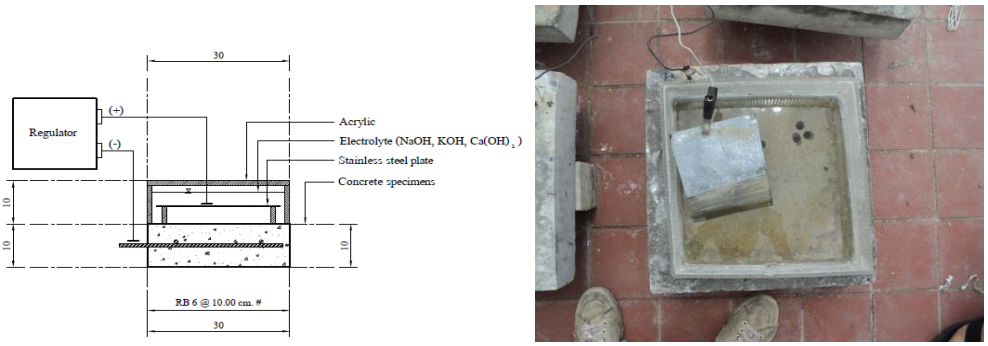
ทำการเตรียมสารละลายอิเล็คโทรไลต์เพื่อนำมาเป็นสื่อในการนำไฟฟ้าในการดึงคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้า โดยใช้โซล่าเซลล์โดยในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้สารละลายจำนวน 2 ชนิดซึ่งเป็นสารละลายด่างแก่ที่หาได้ง่ายในท้องตลาดเพื่อให้ง่ายต่อการใช้งานทั่วไปคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH), และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ , (KOH) โดยทำการเตรียมสารละลายดังกล่าวกับน้ำกลั่นตามความเข้มข้นดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 สารละลายอิเล็คโทรไลต์ที่ใช้ในการดึงคลอไรด์ไอออน

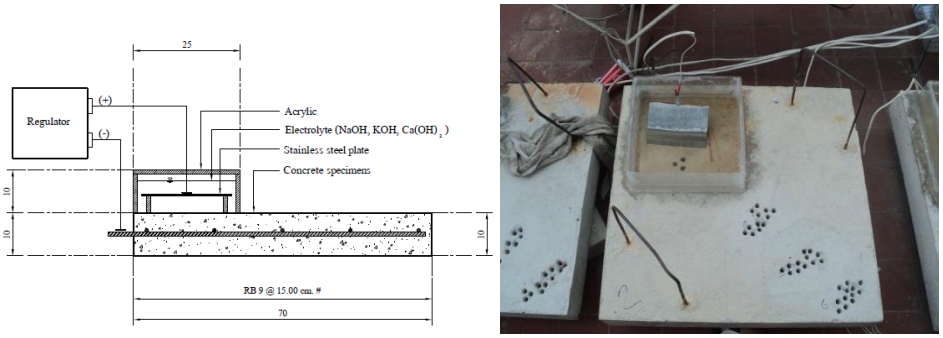
ชนิดของสารละลาย	ความเข้มข้น
สารละลายโซเดียมดรอกไซด์, (NaOH)	0.1 molar
สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์, (KOH)	0.1 molar

3.3.4 การต่อวงจรไฟฟ้าเพื่อดึงคลอไรด์อิออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้โซล่าเซลล์

ทำการขังสารละลายไว้ด้านบนตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กและต่อวงจรไฟฟ้าเพื่อทำการดึงคลอไรด์อิออนในคอนกรีตโดยทำการต่อกระแสไฟฟ้าขั้วลบเข้าที่เหล็กเสริมคอนกรีตและต่อกระแสไฟฟ้าขั้วบวกเข้าที่แผ่นแสตนเลสสตีลที่จมอยู่ในสารละลายเพื่อเป็นสื่อนำไฟฟ้าในการดึงคลอไรด์อิออนที่สะสมอยู่ภายในคอนกรีตเข้าสู่สารละลายภายนอกของตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 30 x 30 x 10 ซม.และขนาด 70 x 70 x 10 ซม. โดยใช้เครื่องแปลงไฟฟ้ากระแสตรงดังแสดงในรูปที่ 3.4 และ 3.5



รูปที่ 3.4 ภาพการต่อวงจรไฟฟ้าและขังสารละลายเพื่อดึงคลอไรด์จากตัวอย่างคอนกรีต ขนาด 30 x 30 x 10 ซม



รูปที่ 3.5 ภาพการต่อวงจรไฟฟ้าและขังสารละลายเพื่อดึงคลอไรด์จากตัวอย่างคอนกรีต ขนาด 70 x 70 x 10 ซม.

รูปที่ 3.6 ภาพการต่อวงจรไฟฟ้าและขังสารละลายเพื่อดึงคลอไรด์จากตัวอย่างคอนกรีต

3.3.5 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในผงคอนกรีต

การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในผงคอนกรีตด้วยวิธี Argentometic หรือ Mohr Method

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

2. ปรับ pH ของสารละลายตัวอย่างให้เป็นกลาง เพราะ Ag^{+} จะตกตะกอนเป็น AgOH ที่ pH สูงและ CrO_4^{2-} จะถูกเปลี่ยนไปเป็น $Cr_2O_7^{2-}$ ที่ pH ต่ำ ดังนั้นจึงไทเทรตที่สภาวะเป็นกลาง ด้วยการหยดฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์ลงในสารตัวอย่าง 1 หยด สังเกตการเปลี่ยนแปลงของสีสารละลายตัวอย่าง

2.1 ถ้าเปลี่ยนเป็นสีชมพูแสดงว่าสารละลายมีค่า pH สูงกว่า 7 หรือมีสภาวะเป็นเบสให้เติมกรดกำมะถันทีละหยดจนสารตัวอย่างกลับมาใสเหมือนเดิม

2.2 ถ้าสารตัวอย่างไม่เปลี่ยนสีแสดงว่าสารละลายมีค่า pH ต่ำกว่า 7หรือมีสภาวะเป็นกรดให้เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ทีละหยดจนกระทั่งสารตัวอย่างเปลี่ยนเป็นสีชมพู จากนั้นให้ปรับค่า pH กลับเหมือนกับข้อ 2.1

3. นำ $AgNO_3$ ที่เตรียมไว้ทผ่านกรวยลงในบิวเรตขนาด 50 มิลลิลิตร

4. เติมโปตัสเซียมโครเมตจำนวน 1 มิลลิลิตรที่เตรียมไว้ลงในสารละลายตัวอย่างจะได้สารละลายสีเหลือง

5. หยด $AgNO_3$ ลงในสารละลายตัวอย่างไปเรื่อยๆ สารละลายตัวอย่างจะเริ่มเปลี่ยนจากสีเหลืองใสเป็นสีเหลืองขุ่นและเริ่มตกตะกอนเป็น AgCl จนกระทั่งสารละลายเป็นสีน้ำตาลแดงทั้งหมดถือว่าเป็นจุด End Point อ่านค่าปริมาตรของ $AgNO_3$ ที่ใช้ไปและบันทึกปริมาตร

6. ทำการหา Blank คือส่วนที่เกินมาของ $AgNO_3$ ในปฏิกิริยาการตกตะกอน AgCl เนื่องจากสารละลายที่เปลี่ยนเป็นตะกอนสีน้ำตาลแดงนั้นคือ Ag_2CrO_4 โดยการใช้น้ำกลั่นในการไทเทรต บันทึกปริมาตรของสารละลาย $AgNO_3$ ที่ถูกใช้ไปเป็น Blank

7 ทำการคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ในสารละลายโดยใช้สมการที่ 6 และบันทึกปริมาณคลอไรด์ในสารละลายตามระดับความลึกต่างของทุกตัวอย่างในการทดลอง

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

โดยที่ A = มิลลิลิตรของ $AgNO_3$ ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่าง

B = มิลลิลิตรของ $AgNO_3$ ที่ใช้ในการไทเทรต Blank

C = นอร์มัลลิตี้ของ $AgNO_3$

รูปที่ 3.7 แสดงการเตรียมตัวอย่างในการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในผงคอนกรีต

รูปที่ 3.8 แสดงการปรับสภาพความเป็นกรดด่างค่า (pH) และการทำ Blank

รูปที่ 3.9 แสดงการเตรียมตัวอย่างและการไตเตรต

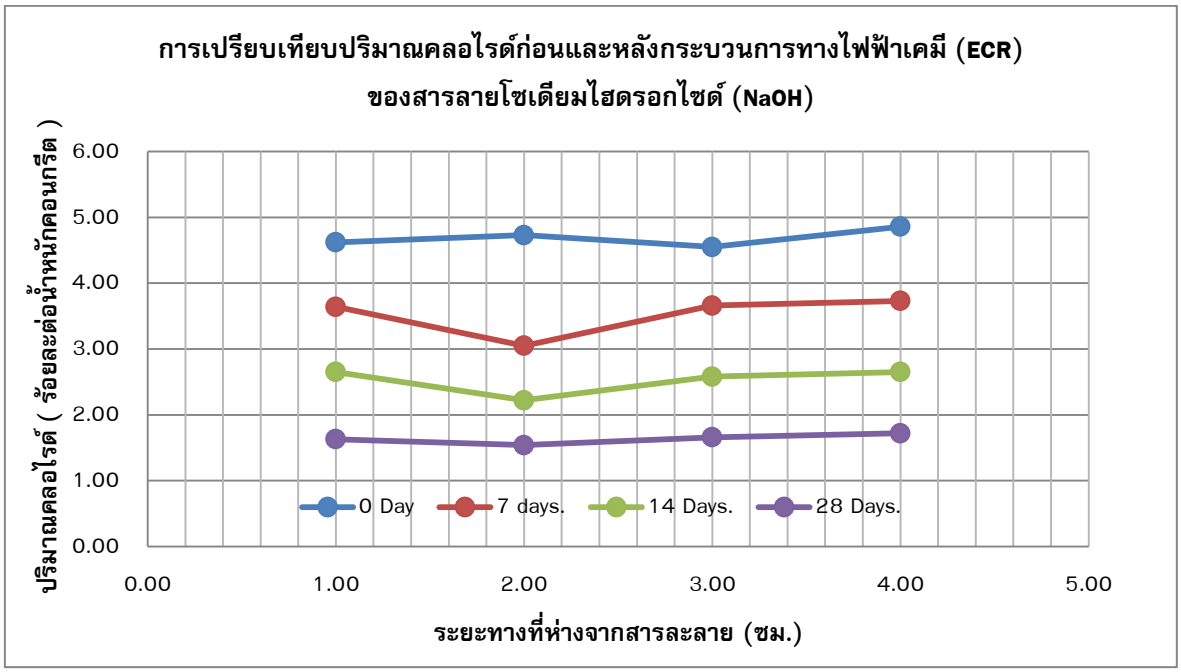
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การดำเนินการทดลองลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้ไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ให้ผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจโดยจากการทดลองที่เวลาที่ 28 วันสามารลดปริมาณคลอไรด์บริเวณรอบๆผิวของเหล็กเสริมเสริมต่ำกว่าประมาณคลอไรด์ระดับวิกฤติ (Threshold Chloride) ในทุกตัวอย่างการทดลอง

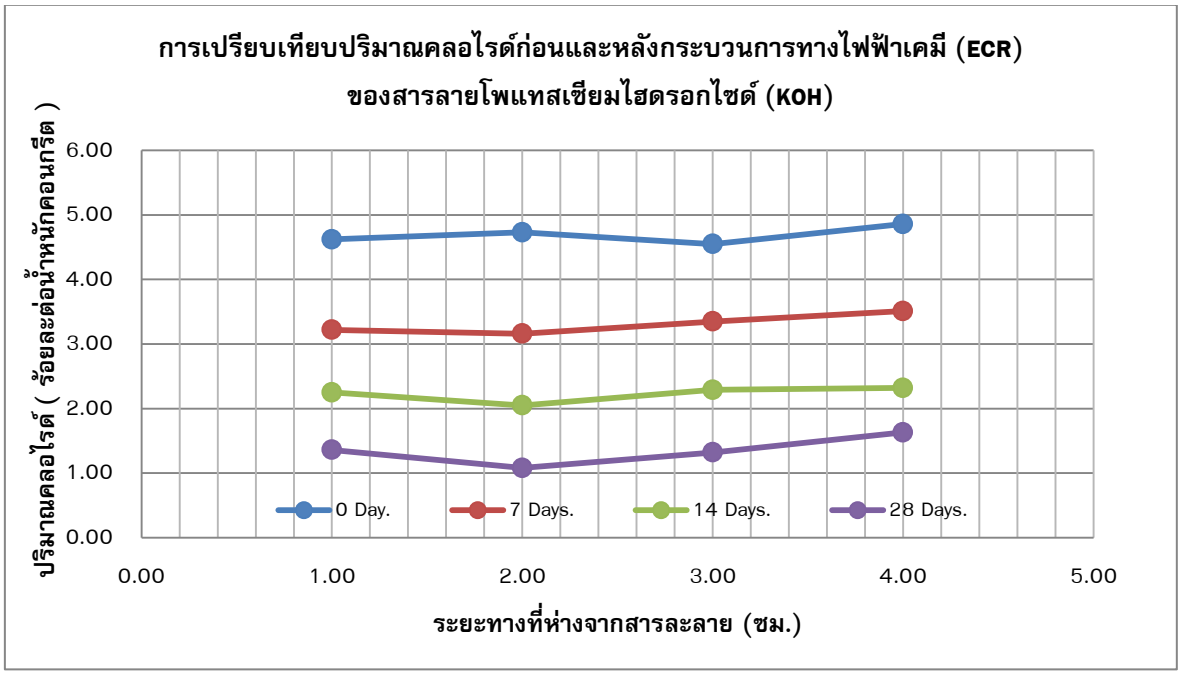
4.1 ผลการทดลอง

4.1.1 ผลการทดลองของตัวอย่างคอนกรีตที่สัมผัสสารละลายโดยตรง

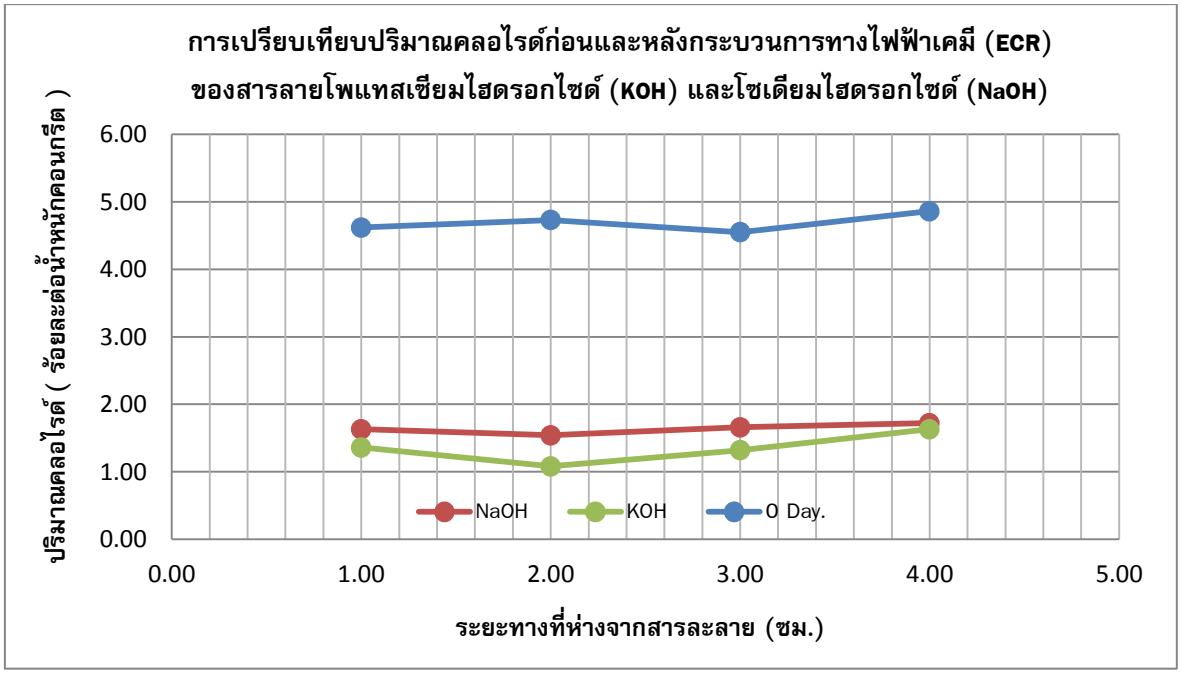
จากการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารละลายอิเลคโทรไลต์ด่างแก่ (Strong Base Electrolyte) ที่ใช้ในการทดลองครั้งในครั้งนี้ซึ่งได้แก่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH Electrolyte) และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH Electrolyte) โดยทำการจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12 โวลต์ โดยใช้แหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์พบว่าสารละลายทั้ง 2 ชนิดมีแนวโน้มที่สามารถดึงคลอไรด์อิออนจากคอนกรีตเป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือประสิทธิภาพของการดึงคลอไรด์อิออนในคอนกรีตของสารละลายทั้ง 2 ชนิดใช้ในการทดลองมีผลกระทบโดยตรงจากระยะเวลาของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปในระบบและระยะทางของคลอไรด์ที่เคลื่อนที่สู่สารละลายโดยพบว่าขนาดระยะเวลาในการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นจะสามารถลดปริมาณคลอไรด์ได้มากและระยะทางที่ใกล้กับสารละลายจะสามารถลดปริมาณคลอไรด์อิออนได้มากกว่าระยะทางที่ไกลออกไปดังแสดงในรูปที่ 4.1-4.4



รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังการดึงคลอไรด์ภายในคอนกรีตเมื่อใช้ตัวกลางสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระยะเวลา 7, 14, 28 วันตามลำดับ



รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังการดึงคลอไรด์ภายในคอนกรีตเมื่อใช้ตัวกลางสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ระยะเวลา 7, 14, 28 วันตามลำดับ



รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (ECR)ของสารลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่เวลา 28 วัน

รูปที่ 4.1-4.3 และตารางที่ 4.1-4.2 แสดงปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังกระบวนการดึงคลอไรด์จากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี ความสามารถในการดึงคลอไรด์อิออนโดยใช้ตัวกลางเป็นสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) สามารถดึงคลอไรด์อิออนออกมาได้มากที่กว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในบริเวณระยะทาง (ความลึก) ใกล้กับสารละลาย และความสามารถในการดึงคลอไรด์อิออนลดลงตามระยะทางที่ห่างจากสารละลายตามลำดับ เมื่อพิจารณาระยะเวลาในการทดลองพบว่าความสามารถในการดึงคลอไรด์อิออนแปรผันตรงกันกับระยะเวลาในการทดลอง โดยความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สามารถดึงคลอไรด์จากเนื้อคอนกรีต 12 โวลต์มีแนวโน้มที่จะสามารถลดปริมาณคลอไรด์คอนกรีตได้จนมีระดับต่ำกว่าระดับคลอไรด์วิกฤติ

โดยผลการวิจัยครั้งนี้สอดคล้องกับ P.F. McGrath and R.D. Hooton (1996) และ C. Arya et al. (1996) ซึ่งได้อธิบายการเคลื่อนที่ของคลอไรด์อิออนด้วยกระแสไฟฟ้า โดยการเคลื่อนที่ของคลอไรด์อิออนผ่านคอนกรีตนั้นแปรผันตรงกันกับขนาดของความต่างศักย์กระแสไฟฟ้าและระยะเวลาที่จ่ายเข้าไปในระบบและสอดคล้องกับสมการของ Nernst plannck (Modified Fick"s second law)

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ระยะเวลา 7, 14, 28 วันตามลำดับ

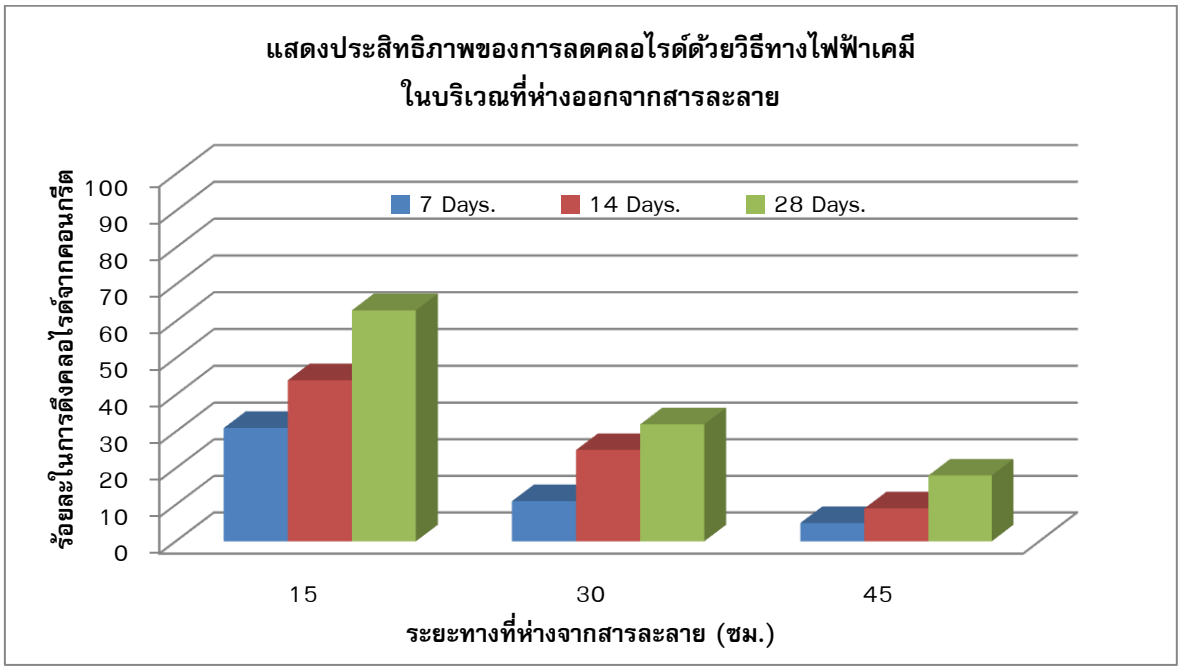
สารละลาย	ระยะทางห่างจากสารละลาย	ปริมาณคลอไรด์ (ร้อยละต่อน้ำหนักคอนกรีต)			
	ซม.	ก่อนกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี	ระยะเวลา 7 วัน	ระยะเวลา 14 วัน	ระยะเวลา 28 วัน
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)	1	4.62	3.64	2.65	1.63
	2	4.73	3.03	2.22	1.54
	3	4.55	3.66	2.58	1.66
	4	4.86	3.73	2.65	1.72

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ระยะเวลา 7, 14, 28 วันตามลำดับ

สารละลาย	ระยะทางห่างจากสารละลาย	ปริมาณคลอไรด์ (ร้อยละต่อน้ำหนักคอนกรีต)			
	ซม.	ก่อนกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี	ระยะเวลา 7 วัน	ระยะเวลา 14 วัน	ระยะเวลา 28 วัน
โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)	1	4.62	3.22	2.25	1.36
	2	4.73	3.16	2.05	1.08
	3	4.55	3.35	2.29	1.32
	4	4.86	3.51	2.32	1.63

4.1.2 ผลการทดลองของตัวอย่างคอนกรีตที่ไม่สัมผัสสารละลายโดยตรง

จากการทดลองดึงคลอไรด์ที่อยู่ภายในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยทำการติดตั้งแหล่งสารละลายไว้ที่ขอบของชิ้นตัวอย่างเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการดึงคลอไรด์อิออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในส่วนที่ไม่ได้สัมผัสกับสารละลายโดยตรง โดยเลือกสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นตัวกลางและใช้ความต่างศักย์ 12 โวลต์ซึ่งเป็นสารละลายและขนาดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง จากการทดลองข้างต้นและใช้ระยะเวลาในการดึงคลอไรด์จากคอนกรีตเท่ากับการทดลองข้างต้นคือ 28 วัน พบว่าปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตในส่วนที่ทำการขังสารละลายลดลงในปริมาณที่น่าพอใจ เนื่องจากสามารถลดปริมาณคลอไรด์ที่สะสมอยู่ในคอนกรีตถึงร้อยละ 31 – 63 ของปริมาณคลอไรด์ที่สะสมอยู่ภายในคอนกรีตและปริมาณคลอไรด์ในบริเวณที่ห่างจากสารละลายออกไปลดลงตามระยะทางอันเนื่องมาจากระยะทางในการเดินทางของคลอไรด์ในสารละลายในช่องว่างภายในคอนกรีตและปริมาณกระแสไฟฟ้าที่สูญเสียไปตามระยะทางที่ห่างออกจากบริเวณที่ทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าโดยได้เปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังการดึงคลอไรด์จากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงประสิทธิภาพของการลดคลอไรด์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในบริเวณที่ห่างออกจากสารละลาย

รูปที่ 4.4 แสดงปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ภายในคอนกรีตที่ระดับความลึก 4 ซม.โดยปริมาณคลอไรด์ที่มีอยู่ในคอนกรีตหลังการทำการดึงคลอไรด์ภายในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยในบริเวณที่ทำการติดตั้งสารละลายจะสามารถลดปริมาณที่อยู่ภายในคอนกรีตได้ถึงร้อยละ 63 ตามระยะที่ห่างจากสารละลาย (ความลึก) 3 ซม. ส่วนที่ระยะห่างออกมาจากบริเวณที่ทำการขังสารละลายนั้นประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์อิออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีนั้นสามารถดึงคลอไรด์อิออนตามระยะทางที่ห่าวออกจากสารละลานอิเลคโทรไลต์โดยสรุปตามระดับความลึกต่างๆได้ในตารางที่

ตารางที่ 4.3ประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์อิออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในบริเวณที่ไม่ได้สัมผัสสารละลายโดยตรง

ระยะทางที่ห่างออกจากละลายอิเลคโทรไลต์ (ซ.ม.)	ประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ในคอนกรีต (ร้อยละก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี)
15	31-63
30	11-32
45	5-18

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 ความสามารถในการดึงคลอไรด์อิออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

จากการทำการศึกษาเรื่องอิทธิพลของกระแสไฟฟ้าในการดึงคลอไรด์อิออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์นั้นสามารถสรุปผลการทดลองได้ในครั้งนี้

5.1.1 ผลการทดลองของตัวอย่างคอนกรีตที่สัมผัสสารละลายโดยตรง

1. สารละลายอิเลคโทรไลต์ที่ใช้ในการทดลองในการดึงคลอไรด์อิออนที่สามารถดึงคลอไรด์ออกมาจากคอนกรีตให้ผลไกล้เคียงกันโดยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระยะเวลาเดียวกันคือที่ระยะเวลา 28 วัน โดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถหาได้ง่าย เตรียมสารละลายได้ง่าย และมีราคาถูกมากกว่าสารละลายชนิดอื่นๆ จึงสามารถลดต้นทุนในการทดลองหรือนำไปใช้ในโครงสร้างจริง

2. การเคลื่อนที่ของคลอไรด์ภายในคอนกรีตออกมาสู่สารละลายแปรผันตรงกันกับระยะเวลาในการทดลองโดยการทดลองที่ระยะเวลา 28 วันสามารถลดปริมาณคลอไรด์ได้มากกว่าร้อยละ 60 โดยให้ผลการทดลองสอดคล้องกันทั้ง 2 สารละลายอิเล็คโทรไลต์

5.1.2 ผลการทดลองของตัวอย่างคอนกรีตที่ไม่สัมผัสสารละลายโดยตรง

1.ประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ที่อยู่ภายในคอนกรีตในบริเวณที่ไม่ได้สัมผัสกับสารละลายลดลงตามระยะทางที่ห่างออกจากสารละลายโดยสามารถอธิบายได้โดยใช้อัตราการไหล (Flux) ของอิออนและสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Diffusion coefficient) จากสมการของ Nernst plannck โดยใช้งานวิจัยของต่างประเทศเป็นแนวทางในการลดขนาดไฟฟ้าตามระยะทางที่ห่างออกจากสารละลาย

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทดสอบการดึงคลอไรด์อิออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีจะเห็นได้ว่าปริมาณคลอไรด์ที่ออกมาอยู่ในสารละลายภายนอกนั้นมีกระแสไฟฟ้าหรือพื้นที่ของสารละลายเป็นตัวกำหนดการลดลงของประมาณคลอไรด์ดังนั้นควรพัฒนาสารละลายหรือพื้นที่กระแสไฟฟ้าบวก (Anode area)ให้สามารถติดตั้งได้ง่ายและศึกษาถึงผลกระทบอื่นๆของการดึงคลอไรด์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีเช่นอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ หรือองค์ประกอบอื่นของสารผสมเพิ่มที่ใช้ในการผสมคอนกรีตเนื่องจากการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ใช้ช่องว่างภายในคอนกรีตในการเดินทางออกมาอยู่ในสารละลาย และออกแบบการทดลองให้สามารถวัดกระแสไฟฟ้าตามตำแหน่งต่างๆให้สามารถติดตามขนาดของกระแสไฟฟ้าตามตำแหน่งต่างๆเพื่อให้สามารถหาความสัมพันธ์ของปริมาณคลอไรด์ที่ดึงออกจากคอนกรีตกับขนาดของกระแสไฟฟ้า

โดยแนวทางการพัฒนาการลดปริมาณคลอไรด์อิออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีอาจจะทำการศึกษาจากผลกระทบหลายๆด้านเช่นคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่แตกต่างกันจะส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านแตกต่างกัน ดังนั้นระยะเวลาและประสิทธิในการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตในคอนกรีตจะแตกต่างกันออกไป และยังขึ้นปริมาณคลอไรด์ที่ปนเปื้อนอยู่ในคอนกรีตก่อนกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีเนื่องจากระดับปริมาณที่มากจะส่งผลให้ใช้ระยะเวลาในการดึงคลอไรด์ออกจากคอนกรีตมากขึ้นไปด้วยหรือยังสามารถศึกษาเกี่ยวกับระยะห่างของเหล็กเสริมคอนกรีตเนื่องจากระยะห่างของคอนกรีตที่มีมากเกินไปอาจจะลดทอนประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ได้เนื่องจากเหล็กเสริมในคอนกรีตทำหน้าที่ในการเป็นสื่อนำไฟฟ้าในการผลักคลอไรด์อิออนในคอนกรีตออกสู่สารละลายภายนอก