

## คำนำ

การเกิดสนิมของเหล็กเสริมอันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมบริเวณริมทะเลเป็นอีกหนึ่งใน ความเสียหายที่ทำให้ความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กลดลง ผลกระทบโดยรวมของ การเกิดสนิมคือกำลังรับแรงของโครงสร้างลดลงอันเนื่องมาจากการเกิดสนิมนั้นทำให้ประสิทธิภาพ ของโครงสร้างในการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างลดลง และกรณีที่เหล็กเสริมเกิดสนิมยังทำให้ เกิดการแตกร้าวและหลุดออกของคอนกรีตที่หุ้มอยู่ด้วย

งานวิจัยนี้เสนอวิธีการฟื้นฟูสมรรถภาพโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผลกระทบจาก การแทรกซึมของคลอไรด์เนื่องจากน้ำทะเล โดยใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีด้วยการทดสอบหาเงื่อนไขของ ชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมในห้องปฏิบัติการและนำ เงื่อนไขที่คาดว่าเหมาะสมที่สุดเพื่อนำไปทำการบำรุงรักษาและฟื้นฟูโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากคลอไรด์ ผลการทดลองพบว่าการลดปริมาณคลอไรด์ใน โครงสร้าง คอนกรีตเสริมเหล็กนั้นมีแนวโน้มที่ดี โดยใช้ระยะเวลาเพียงช่วงสั้นๆก็สามารถลดปริมาณคลอไรด์ ได้ในอัตราที่น่าพอใจ

ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่ารายงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่ศึกษา และผู้ที่ปฏิบัติงานจริง ที่เกี่ยวข้องกับการบำรุงรักษา และซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาพแวดล้อมริม ทะเล หากมีข้อผิดพลาดประการใดผู้วิจัยต้องขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณนายวิศิษ แซ่ลิ้ม ผู้ทำวิจัยร่วมในโครงการวิจัยชิ้นนี้ ที่เป็นผู้ได้สละเวลา กำลังกาย กำลังใจ ในการทุ่มเทให้งานวิจัยชิ้นนี้ออกมาได้ผลเป็นอย่างดี ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่และบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ทุกท่านที่ให้การสนับสนุนในด้านของ เครื่องมือ สถานที่ การทำหนังสือขออนุญาตในด้านต่างๆ ในการทำการทดสอบทำให้สามารถทำการวิจัยในครั้งนี้เป็นไปอย่างราบรื่นรวมถึงขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำสำหรับการอนุเคราะห์สถานที่ในการเตรียมตัวอย่างในการทดสอบและภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำการวิจัยในครั้งนี้

วันชัย ยอดสุดใจ

กันยายน 2555

## สารบัญ

	หน้า
คำนำ	1
กิตติกรรมประกาศ	2
บทที่ 1 บทนำ	4
บทที่ 2 วิธีวิจัย	29
บทที่ 3 ผลการวิจัย	41
บทที่ 4 สรุปผลการวิจัย	61
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	62
ภาคผนวก ก-การประยุกต์ใช้วิธีการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีใน ต่างประเทศ	66
ภาคผนวก ข-แนวทางการพัฒนาการลดปริมาณคลอไรด์อออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี	74
ภาคผนวก ค-แนวทางการออกแบบการดึงคลอไรด์อออนด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีในภาคสนาม	79

## บทที่ 1 บทนำ

การเกิดสนิมของเหล็กเสริมใน โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นปัญหาด้านความคงทนของคอนกรีตในเรื่องของกำลังและลักษณะทางกายภาพต่างๆ โดยเฉพาะเรื่องของความสามารถในการรับน้ำหนักตามที่ออกแบบไว้จะลดลง ทำให้เกิดความไม่ปลอดภัยกับ โครงสร้างดังกล่าว เนื่องจากการเกิดสนิมทำให้เกิดการขยายตัวของผิวเหล็กเสริมคอนกรีตมีปริมาตรเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดแรงดึงขึ้นในคอนกรีตซึ่งทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวขึ้นได้ โดยเฉพาะ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องสัมผัสน้ำทะเล น้ำกร่อย หรืออยู่บริเวณชายฝั่ง รวมทั้ง โครงสร้างใต้ดินบริเวณนั้น จะประสบปัญหาความเสียหายอย่างมากจากสภาพแวดล้อม

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

การบำรุงรักษาอย่างมีแบบแผนและซ่อมแซม โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นมีความสำคัญอย่างยิ่งเนื่องจากสามารถยืดอายุเวลาของโครงสร้างให้มีความสามารถในการรับน้ำหนักที่กระทำต่อโครงสร้างตามที่วิศวกรได้ออกแบบไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพและยังส่งผลในเรื่องของความมั่นใจของผู้ใช้งาน โครงสร้างดังกล่าวอีกด้วย วิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electro Chemical) เป็นวิธีการป้องกันการกัดกร่อนที่มีการใช้กันอย่างกว้างขวางเนื่องจากเป็นวิธีการที่สามารถประยุกต์ใช้กับโลหะและโลหะผสมทุกชนิดในทุกสภาพการใช้งาน โดยมีข้อแม้ว่าต้องสัมผัสอยู่กับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) และเมื่อใช้แล้วยังสามารถลดอัตราการกัดกร่อนได้จนมีค่าใกล้ศูนย์หรือไม่เกิดการกัดกร่อนเลยได้

การลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Chloride Removal) คือการดึงเฉพาะคลอไรด์ไอออนออกจากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งมีขั้วไฟฟ้าอยู่ในสารละลายซึ่งอยู่นอกคอนกรีตและมีการเชื่อมต่อไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างขั้วไฟฟ้าและเหล็กเสริมภายในคอนกรีตมีการให้ไฟฟ้าตรงกับขั้วไฟฟ้าและเหล็กเสริมคอนกรีตโดยให้ขั้วไฟฟ้าภายนอกเป็นขั้วบวก (Anode) และเหล็กเสริมเป็นขั้วลบ (Cathode) จากการต่อระบบ

ดังกล่าวนี้ เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่สูงพอคลอไรด์ไอออนที่มีสภาพเป็นขั้วลบจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วบวก (Anode) ซึ่งอยู่ภายนอกส่งผลทำให้ความปนเปื้อนของคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตมีค่าลดลง โดยเฉพาะบริเวณเหล็กเสริมซึ่งเป็นขั้วลบ นอกจากนี้ยังมี Hydroxyl Ions เกิดขึ้นจากระบบเพิ่มขึ้นอีกซึ่งจะทำให้ค่า pH สูงขึ้น ความเป็นด่างในคอนกรีตสูงขึ้นส่งผลให้มีความต้านทานการเกิดสนิมที่ดีขึ้น แต่เนื่องจากการศึกษาภายในประเทศยังไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับการลดปริมาณคลอไรด์ไอออน ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในส่วนของชนิดของสารละลายที่เหมาะสม และความสัมพันธ์ของการสูญเสียของกระแสไฟฟ้าในคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากความสามารถในการดึงคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นแปรผันตรงกันกับขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ปล่อยเข้าไปในระบบ และข้อมูลของประสิทธิภาพของวิธีทางไฟฟ้าเคมีในการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตในบริเวณที่ไม่สัมผัสกับสารละลายโดยตรง

จากเหตุผลข้างต้นจึงจำเป็นต้องมีการทำวิจัยเกี่ยวกับเรื่อง “อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าในการดึงคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในคอนกรีตเสริมเหล็ก” เพื่อนำมาเป็นแนวทางในการบำรุงรักษา และซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพเนื่องจากวิธีดังกล่าวสามารถบำรุงรักษาและซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจากความเสียหายจากสนิมในเหล็กเสริมก่อนที่เหล็กเสริมในคอนกรีตจะเป็นสนิม นอกจากนี้ข้อมูลจากงานวิจัยนี้ยังอาจใช้ข้อมูลเพื่อเป็นแนวทางในการวางแผนการบำรุงรักษาซ่อมแซมโครงสร้างอย่างประจำ (Routine Maintenance) เนื่องจากเมื่อทราบความสัมพันธ์ของปริมาณของกระแสไฟฟ้ากับปริมาณคลอไรด์ไอออนที่สามารถดึงออกมาในสารละลาย และการแพร่กระจายของคลอไรด์ไอออนเข้าสู่คอนกรีตที่ผ่านกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี จะสามารถนำมาวางแผนการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อช่วยลดค่าใช้จ่ายและพลังงานของประเทศในการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตที่เสียหายมากเนื่องจากการบำรุงรักษา

## 1.1 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เป็นสนิมด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี (Electro Chemical Removal)

2. เพื่อหาศึกษาหาเงื่อนไข (Condition) ที่เหมาะสมระหว่างชนิดของสารละลาย (Electrolyte) กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ปล่อยเข้าไปในระบบ (Current) ที่จะทำให้ปริมาณคลอไรด์ที่นำออกมาสูงที่สุด

3. หาผลการของระยะทางที่เชื่อมต่อกระแสไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพของการดึงคลอไรด์ออกจากคอนกรีตเสริมเหล็ก

## 1.2 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้จะคำนึงถึงปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กอันเนื่องมาจากคลอไรด์ไอออนเป็นหลัก ซึ่งปัญหานี้จะพบบ่อยมากในอาคาร โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กชายทะเล และการวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบหาเงื่อนไขต่างๆ ในการบำรุงรักษาและซ่อมแซม โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีด้วยวิธีที่เรียกว่า Electrochemical Chloride Removal หรือที่เรียกว่า Desalination เพื่อเป็นทางเลือกในการบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ยังไม่พบรอยแตกร้าว เนื่องจากปัญหาของเหล็กเสริมเป็นสนิมนั้นกว่าจะพบปัญหามักจะเป็นช่วงที่วิกฤติแล้ว และไม่ได้พิจารณาถึงกำลังรับแรงดัด แรงอัดหลังจากการซ่อมแซมแล้ว หรือโอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างต่างกับมวลรวม (Alkali Aggregate Reaction, AAR) แต่จะพิจารณาเฉพาะความสามารถในการบำรุงรักษา ซ่อมแซมด้วยวิธี Electrochemical Chloride Removal ในส่วนของความสัมพันธ์ของการสูญเสียกระแสไฟฟ้าที่ส่งผลต่อการดึงคลอไรด์ไอออนออกจากคอนกรีตเสริมเหล็ก

## 1.3 การตรวจเอกสาร

เดิมมีความเข้าใจกันว่า คอนกรีตที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ซึ่งมีปริมาณ  $C_3A$  ที่ต่ำจะเหมาะสำหรับโครงสร้างที่สัมผัสน้ำทะเล แต่เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบในน้ำทะเลโดยแท้จริงแล้ว น้ำทะเลมีปริมาณซัลเฟตอยู่ประมาณ 10% ส่วนคลอไรด์นั้นกลับมีปริมาณถึง 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 และซ่อมแซม โครงสร้าง

คอนกรีตที่ดีควรมีกำลังตามต้องการและทนทานต่อสภาวะแวดล้อมตลอดอายุการใช้งาน โดยยังสามารถรูปร่างและคุณสมบัติต่างๆ รวมถึงการใช้งานได้ดีเช่นเดิม ความเสียหายของคอนกรีตอาจเกิดขึ้นจากปัจจัยภายนอกหรืออาจเกิดจากปัจจัยภายในของคอนกรีตเองก็ได้ โดยทั่วไปอาจแบ่งสาเหตุของการเสื่อมสภาพของคอนกรีตออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ ดังต่อไปนี้

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

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

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

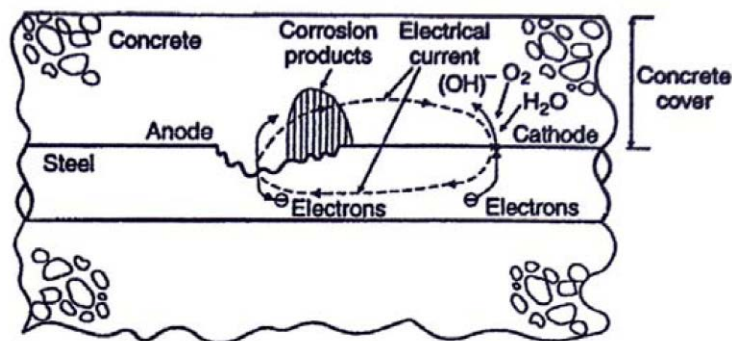
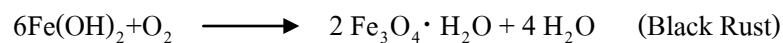
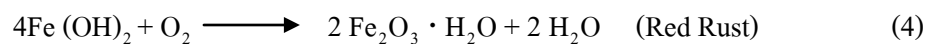
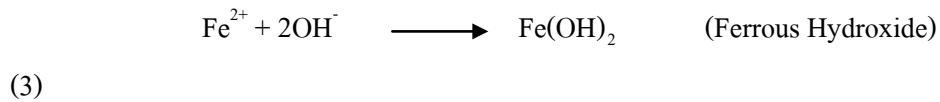
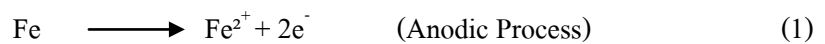
### 1.3.1 การกัดกร่อนและการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

การเกิดสนิมในเหล็กเสริมเป็นปัญหาสำคัญต่อความคงทนและอายุการใช้งาน ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทย โดยเฉพาะโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมชายฝั่ง ทะเลรวมไปถึงโครงสร้างที่อยู่ในพื้นที่น้ำกร่อยด้วย เนื่องจากผิวคอนกรีตต้องสัมผัสกับน้ำทะเล หรืออยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีไอเกลือและความชื้นตลอดเวลา การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตจึงเป็นปัจจัยสำคัญอันดับแรก ๆ ที่ทำให้ความคงทนและอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตลดลง ซึ่งต้องสิ้นเปลืองงบประมาณค่อนข้างมากในการซ่อมบำรุงและแก้ไขปัญหา

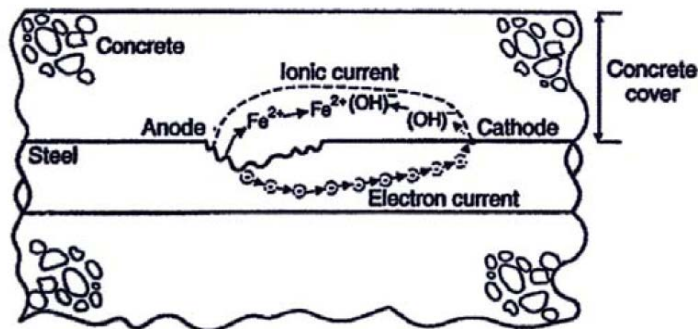
การเกิดสนิมของเหล็กเสริมอันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมบริเวณริมทะเลเป็นอีกหนึ่งใน ความเสียหายที่ทำให้ความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กลดลง ผลกระทบโดยรวมของ การเกิดสนิมคือกำลังรับแรงของโครงสร้างลดลงอันเนื่องมาจากการเกิดสนิมนั้นทำให้น้ำตักของ เหล็กเสริมในคอนกรีตลดลง ทำให้ประสิทธิภาพของโครงสร้างในการรับน้ำหนักบรรทุกของ โครงสร้างลดลง และการที่เหล็กเสริมเกิดสนิมยังทำให้เกิดการแตกร้าวและหลุดออกของคอนกรีต ที่หุ้มอยู่ด้วย (Spalling) เนื่องจากปริมาตรที่เพิ่มขึ้นของเหล็กเสริมจากการเกิดสนิมซึ่งทำให้ คอนกรีตหุ้มที่มีความหนาแน่นขึ้นเกิดการแตกร้าว เป็นผลทำให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้างมาก ยิ่งขึ้น (A. Bentur et al., 1997)

A.M. Neville (1995) อธิบายขบวนการของการเกิดสนิมในเหล็กดังนี้คือ เมื่อมีวัสดุสอง อย่างที่ต่างกัน (คอนกรีตและเหล็กเสริม) จะเกิดความต่างศักย์ในลักษณะของเซลล์ไฟฟ้าเคมีขึ้นได้ เนื่องจากความแตกต่างของความชื้น ออกซิเจน ความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลต์ ทำให้เกิดขั้วบวก และขั้วลบโดยมีสื่ออิเล็กโตรไลต์คือความชื้นและคลอไรด์ไอออนเพื่อให้ไอเลคตรอน วิ่งผ่าน ประจุ บวกของเซลล์ไฟฟ้า ( $Fe^{2+}$ ) จะวิ่งไปตามสื่อ ขณะที่ประจุลบ ( $e^-$ ) จะเดินทางผ่านจากเหล็กไปยัง ขั้วบวกเมื่อคลอไรด์ไอออนเคลื่อนผ่านเข้าไปถึงระดับผิวของเหล็กเสริม ชั้นของฟิล์มออกไซด์ที่ เกิดขึ้นจากปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำจะทำให้เกิดฟิล์มของ  $\gamma-Fe_2O_3$  (Passivation Film) โดยฟิล์ม ดังกล่าวทำหน้าที่ป้องกันการเป็นสนิมของเหล็กเสริม จะถูกทำลายและในบริเวณนั้นมีโอกาสที่จะ เกิดสนิมได้ เรียกว่า Depassivation เมื่อมีปริมาณความชื้นและออกซิเจนที่พอเหมาะ กระบวนการ ทางไฟฟ้าเคมีก็จะเกิดขึ้น โดยบริเวณที่ฟิล์มที่หุ้มเหล็กเสริมถูกทำลายจะมีศักย์ไฟฟ้าเป็นขั้วลบ เรียกว่า ปฏิกิริยาแอโนด (Anodic Reaction) ดังแสดงในสมการที่ 1 และ  $e^-$  ที่เกิดขึ้นนี้จะวิ่งไปยัง บริเวณที่ฟิล์มไม่ถูกทำลาย ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นขั้วบวก (Cathodic) และหากรวมตัวกับน้ำก็จะเกิด เป็นไฮดรอกซิลไอออน ( $OH^-$ ) ดังสมการที่ 2

หลังจากนั้นจะเกิดการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าทั้งภายในและภายนอกเหล็กเสริม กระแสภายในเป็นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากอโนดไปคาโทด ส่วนกระแสภายนอกเป็นการเคลื่อนที่ของ  $Fe^{2+}$  และ  $OH^-$  ผ่านสารละลายในช่องว่างของคอนกรีต ซึ่ง  $Fe^{2+}$  จะเคลื่อนที่จากอโนดสู่คาโทด และ  $OH^-$  จะเคลื่อนที่จากคาโทดไปสู่อโนด ดังภาพที่ 1 (ข) โดยที่มีสารละลายในช่องว่างของคอนกรีต ช่วยทำให้ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าครบวงจรและเกิดการกัดกร่อนขึ้น (A. 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 ซึ่งผลิตภัณฑ์สนิมที่เกิดขึ้นจากการกัดกร่อนนี้ มีปริมาณมากกว่าเหล็กก่อนเกิดปฏิกิริยา 4 ถึง 6 เท่า (Nielsen, 1985) ทำให้เกิดการแตกร้าวและหลุดออกของคอนกรีตหุ้ม



(ก.) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วอโนดและคาโทด



(ข.) การเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าทั้งภายนอกและภายในเหล็กเสริม

### ภาพที่ 1 ปฏิริยาไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต

ที่มา: A. Bentur et al., 1997

โดยทั่วไปแล้ว เหล็กเป็นโลหะที่เกิดการกัดกร่อนได้ตามธรรมชาติและการกัดกร่อนนี้เกิดขึ้นตลอดเวลาในบริเวณที่มีความชื้น (ชัยยุทธ และ เลิศณรงค์, 2543) แต่สำหรับเหล็กที่เสริมอยู่ในคอนกรีตนั้นจะอยู่ในสถานะไม่เกิดสนิมเนื่องจากมี Passivation Film ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ของซีเมนต์กับน้ำในระหว่างการพัฒนากำลังของคอนกรีต ซึ่งคอนกรีตมีความเป็นด่างสูง มีค่า pH ประมาณ 13.5 ซึ่งสามารถป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ (A. Bentur et al., 1997) เนื่องจากในสถานะของการเป็นด่างสูง เหล็กจะไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ นั่นคือเหล็กจะไม่แตกตัวเป็นไอออนทำให้ปฏิกิริยาการเกิดสนิมไม่เกิดขึ้น

อย่างไรก็ตามคอนกรีตอาจเองมีคลอไรด์เนื่องจากการใช้ส่วนผสมของวัสดุที่มีคลอไรด์ เช่น น้ำ ทราช 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<sup>-</sup>) ที่ละลายน้ำได้ในคอนกรีต  
(ร้อยละต่อน้ำหนักของปูนซีเมนต์)

ชนิดขององค์อาคาร	ปริมาณสูงสุดของคลอไรด์ไอออน (Cl <sup>-</sup> ) ที่ละลายน้ำได้ในคอนกรีต
คอนกรีตอัดแรง	0.06
คอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสกับคลอไรด์ ในขณะที่ใช้งาน	0.15
คอนกรีตเสริมเหล็กในสถานะแห้งหรือที่มีการ ป้องกันความชื้นในขณะที่ใช้งาน	1.00
งานก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอื่นๆ	0.30

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

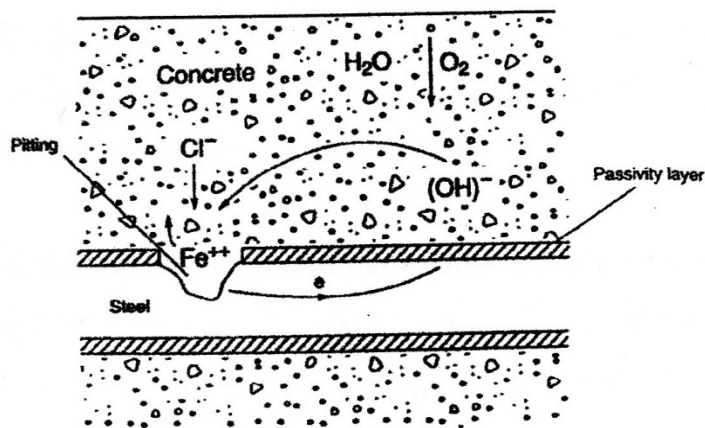
### 1.3.2 การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ (Chloride Attack)

คลอไรด์อาจมีอยู่ในคอนกรีตเอง เช่น ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต หรือที่ปนเปื้อนมากับหินทราย (โดยเฉพาะทรายที่มีแหล่งที่มาจากบริเวณใกล้ทะเล) รวมถึงมีแหล่งที่มาจากน้ำยาผสมคอนกรีตบางประเภท เช่น แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl<sub>2</sub>) ที่พบอยู่ในสารเร่งการก่อตัว แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อความคงทนของคอนกรีตนั้น ส่วนมากจากสภาพแวดล้อมภายนอกคอนกรีตในช่วงของการใช้งาน เช่น จากน้ำทะเลหรือน้ำกร่อย จากดิน หรือจากเกลือที่ใช้ในการช่วยละลายน้ำแข็ง (De-Icing Salt) ในประเทศที่มีอากาศหนาว ทั้งนี้โดยทั่วไปแล้วแหล่งคลอไรด์ที่มีผลกระทบที่รุนแรงต่อโครงสร้างนั้น (คณะกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2543) โดยที่ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในเนื้อของคอนกรีต (Total Chloride) ดังกล่าวนั้น เป็นผลรวมของคลอไรด์สองประเภทคือ

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

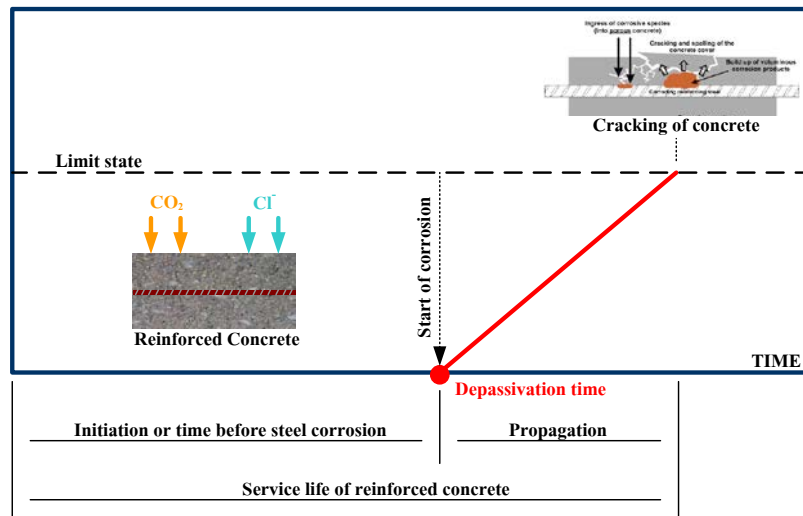
2. Free Chloride คือคลอไรด์ที่ละลายอยู่ในน้ำในโพรงของคอนกรีต (Pore Solution) คลอไรด์ในส่วนนี้สามารถที่จะแพร่เข้าไปยังคอนกรีต ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ต่ำกว่า และเป็นส่วนที่ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตลดลง

การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์แตกต่างจากการกัดกร่อนทางเคมีอื่นตรงที่ คลอไรด์ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมและคอนกรีตบริเวณรอบๆเหล็กเสริมเท่านั้นที่เสียหายเนื่องจากการขยายตัวของเหล็กเสริมและเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เมื่อซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำ จะเกิดฟิล์มบางๆ (Passivation Film) ของ  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  เคลือบผิวเหล็กไว้และฟิล์มนี้ทำหน้าที่ปกป้องการเกิดสนิมของเหล็ก อย่างไรก็ตามอิออนของคลอไรด์สามารถทำลายฟิล์มนี้ได้ และเมื่อน้ำและออกซิเจนตรงบริเวณเหล็กเสริมที่ไม่มีฟิล์มนี้ป้องกันอยู่เหล็กจะเป็นสนิมได้ ซึ่งโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปนั้น มักจะอยู่ในสภาพแวดล้อมที่อาจจะสัมผัสสารเคมี สภาพที่เป็นกรดหรือสภาพแวดล้อมที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิม เช่น โครงสร้างที่อยู่บริเวณชายฝั่งทะเลนั้น ความเข้มข้นของคลอไรด์จะเป็นตัวทำลายสภาพความเป็นด่างของคอนกรีต เป็นต้น ซึ่งเป็นตัวเร่งให้การเกิดสนิมในเหล็กเสริมเร็วขึ้นดังแบบจำลองการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 2 ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์  
ที่มา: Neville, 1997

### Conceptual Service Life Model of Steel in Concrete



ภาพที่ 3 แบบจำลองช่วงชีวิตการใช้งานของเหล็กเสริมในคอนกรีต

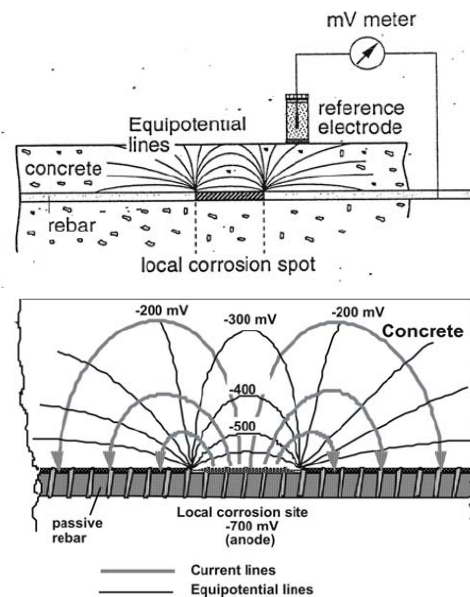
จากภาพที่ 3 แสดงแบบจำลองช่วงชีวิตการใช้งานของเหล็กเสริมในคอนกรีต อธิบายได้ว่าเมื่อคลอไรด์ไอออนซึมเข้าไปในผิวของคอนกรีตมากขึ้นเรื่อยๆจนเข้าไปถึงเหล็กเสริมภายในจะทำลายฟิล์มที่เคลือบผิวของเหล็กเสริมและเมื่อปริมาณของคลอไรด์ที่ซึมผ่านเข้าไปมีปริมาณมากถึงจุดวิกฤต (Depassivation Time) ก็จะเริ่มเกิดสนิมขึ้นที่ผิวของเหล็กเสริมจนดันให้ผิวคอนกรีตระเบิดออก (Crushing) ส่งผลให้โครงสร้างสร้างเกิดความเสียหายจนอาจเกิดการวิบัติไปในที่สุด

#### 1.3.3 การทดสอบการผุกร่อนของเหล็กเสริมเนื่องจากการเกิดสนิม

การผุกร่อนของเหล็กเสริมเป็นการเสื่อมสภาพของเหล็กเสริมด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Electro Chemical Reaction) เกิดขึ้นเมื่อ Passivation Film ที่เกิดขึ้นในขณะที่เกิดปฏิกิริยา Hydration และเคลือบหุ้มเหล็กเสริมอยู่ถูกทำลาย ซึ่งอาจเกิดจาก ขบวนการ Carbonation หรือจากคลอไรด์ไอออน ( $\text{Cl}^-$ ) เมื่อเหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดการผุกร่อนแสดงว่าเกิดความต่างศักย์ ระหว่างพื้นที่ 2 ส่วนบนแท่งเหล็กเดียวกันหรือข้างเคียง ทำให้เกิดเป็น Anodic Half-Cell และ Cathodic Half-Cell (ขั้วบวก และ ขั้วลบ) เทคนิคการทดสอบการผุกร่อนของเหล็กเสริม อาจทำได้หลายวิธีทั้งการตรวจวัดค่าความต่างศักย์โดยตรง หรือการ ตรวจสอบสภาพแวดล้อมที่อาจทำให้ Passivity Film ถูกทำลาย อาทิเช่น การตรวจสอบด้วยวิธีครึ่งเซลล์หรือการหาปริมาณของคลอไรด์ในคอนกรีตดังมีรายละเอียดดังนี้

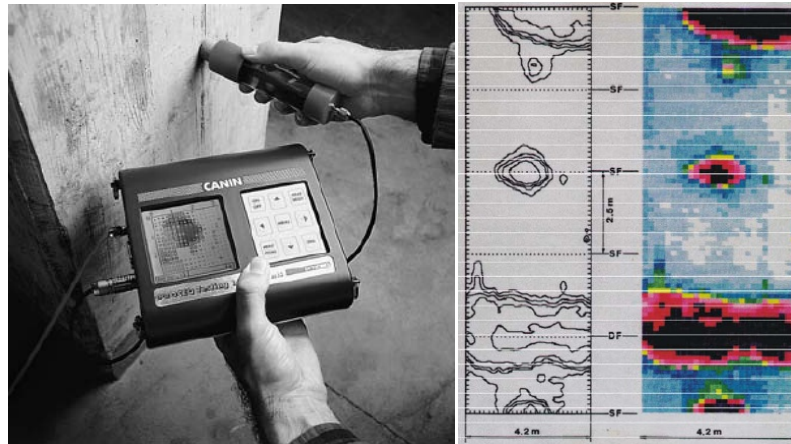
## 1. การตรวจสอบด้วยวิธีครึ่งเซลล์ (Half-Cell Potential Measurement)

ในคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีทั้งพื้นที่ที่ถูกและไม่ถูกกัดกร่อนอยู่ด้วยกัน ประกอบกับการเกิดสนิมยังไม่รุนแรง การดูด้วยตาเปล่าทำได้ยากจึงต้องใช้เครื่องมืออย่างง่ายที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการตรวจสอบเรียกว่า การตรวจสอบโดยวิธีครึ่งเซลล์ (The Half-Cell Potential Measurement) โดยจะใช้ด้านที่ต่อกับเหล็กเสริมเป็นขั้วบวก (Anode) และใช้ด้านที่ไม่เกิดการกัดกร่อนเป็นขั้วลบ (Cathode) โดยต่อกับผิวคอนกรีตและปล่อยกระแสไฟฟ้าความต่างศักย์ประมาณ 0.5V หรือมากกว่าเข้าไป จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและคาโทดซึ่งช่วยให้วัดและประมาณค่าการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ (B. Elsener, 2001)



ภาพที่ 4 แผนภูมิการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

ที่มา: B. Elsener, 2001



**ภาพที่ 5** 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

**ตารางที่ 2.** อัตราความเสี่ยงที่จะเกิดสนิมตามแนวทาง ASTM C876

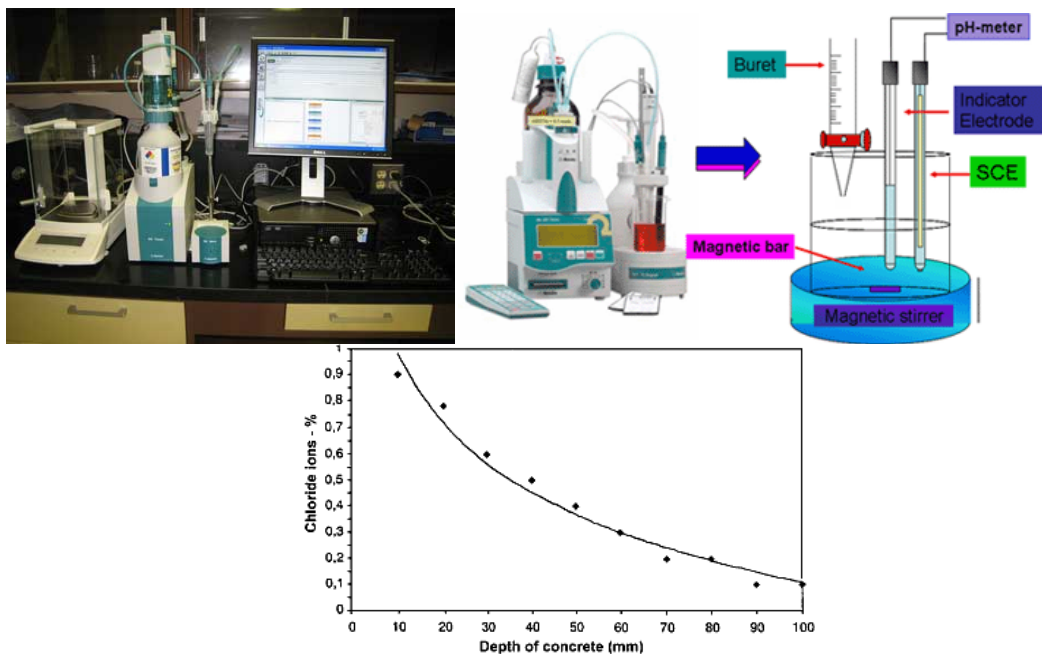
ค่าความต่างศักย์ (Volt)	สภาพการผุกร่อนของเหล็กเสริม
น้อยกว่า -0.20	ความเป็นไปได้ร้อยละ 90 ที่จะไม่เกิดสนิม
-0.20 ถึง -0.35	ไม่แน่นอน
มากกว่า -0.35	ความเป็นไปได้ร้อยละ 90 ที่เกิดสนิมแล้ว

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

อย่างไรก็ตามการทดสอบด้วยวิธีนี้ไม่สามารถบอกอัตราการผุกร่อนหรือพื้นที่หน้าตัดที่เหลืออยู่ของ เหล็กเสริม เป็นเทคนิคการทดสอบที่บอกแนวโน้มการผุกร่อนของเหล็กเสริมเท่านั้น นอกจากนี้ยังไม่สามารถ ตรวจสอบการผุกร่อนของลวดอัดแรง (Post Tension) และของที่เหล็กเสริมในกรณีที่ไม่ต่อเนื่องกัน

## 2. การหาปริมาณของคลอไรด์ (Chloride Content)

ปริมาณของคลอไรด์ เป็นส่วนที่สำคัญที่ทำให้เหล็กเสริมเกิดการผุกร่อนส่งผลให้เหล็กเสริมเป็นสนิม ถ้ามีปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตมากพอจนทำให้ Passivation Film ที่ทำหน้าที่ป้องกันการเป็นสนิมของเหล็กเสริมเสียหาย หรือถ้าเกิดการแทรกซึมของคลอไรด์จากน้ำทะเลจนถึงตำแหน่งของเหล็กเสริม จะส่งผลให้เหล็กเสริมเกิดสนิมอย่างรวดเร็ว การหาปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ทำได้โดยการใช้ส่วนเจาะคอนกรีตที่ระดับความลึกต่างๆและนำผงคอนกรีตที่ได้มาทดสอบหาปริมาณของคลอไรด์อิสระ และเขียนกราฟความสัมพันธ์ของปริมาณคลอไรด์อิสระกับระดับความลึกต่างๆ ซึ่งจะทำให้สามารถประมาณระยะเวลาที่เหล็กอยู่ก่อนที่เหล็กเสริมจะเกิดสนิมได้ ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระในห้องปฏิบัติการและกราฟความสัมพันธ์ของปริมาณคลอไรด์เปรียบเทียบกับระดับความลึกต่างๆ

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

#### 1.3.4 การใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electro Chemical) ในการบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

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

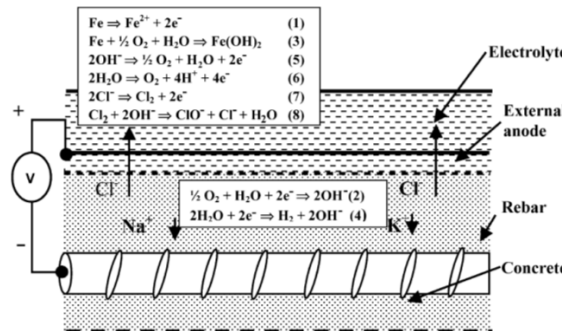
- แบบให้โลหะเป้าหมายเป็นขั้วลบ เรียกว่าการป้องกันแบบคาโทดิก (Cathodic Protection)

- แบบให้โลหะเป้าหมายเป็นขั้วบวก เรียกว่าการป้องกันแบบอโนดิก (Anodic Protection)

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

#### 1.3.5 การลดปริมาณคลอไรด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Chloride Removal)

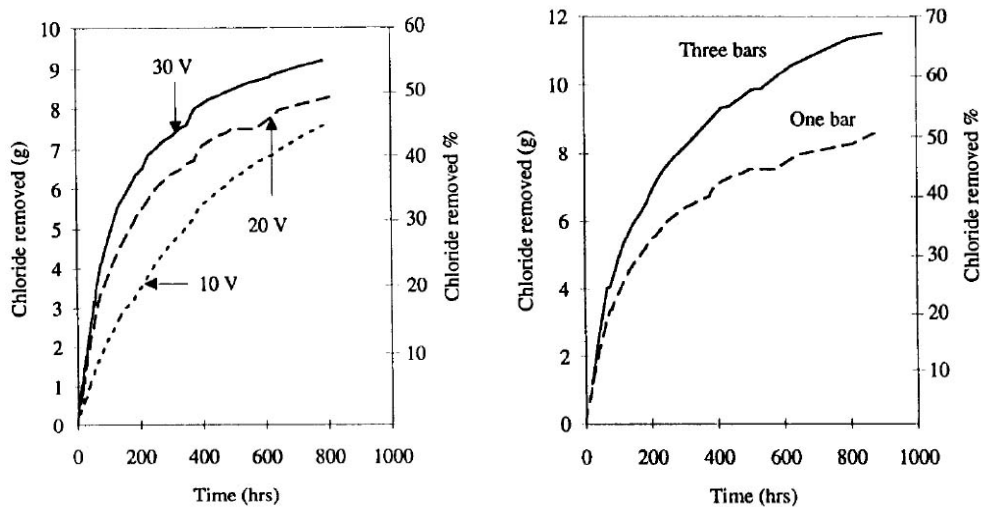
การลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Chloride Removal) คือการเอาเฉพาะคลอไรด์ออกนอกจากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งมีขั้วไฟฟ้าอยู่ในสารละลายซึ่งอยู่ภายนอกคอนกรีตและมีการเชื่อมต่อไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างขั้วไฟฟ้าและเหล็กเสริมภายในคอนกรีตมีการให้ไฟฟ้าตรงกับขั้วไฟฟ้าและเหล็กเสริมคอนกรีตโดยให้ขั้วไฟฟ้าภายนอกเป็นขั้วบวก (Anode) และเหล็กเสริมเป็นขั้วลบ (Cathode) จากการต่อระบบดังนี้ เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่สูงพอคลอไรด์ออกที่มีสภาพเป็นขั้วลบจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วบวกซึ่งอยู่ภายนอกมีผลทำให้ความปนเปื้อนของคลอไรด์ออกในคอนกรีตมีค่าลดลง ดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 แสดงขบวนการของวิธี Electrochemical Chloride Removal (ECR)

ที่มา: J.M. Miranda et. al, 2005

ความสามารถในการซ่อมแซมด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมียังขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างนั้นๆด้วย Arya. C. และ Sa'id-shawqi (1996) ได้เสนอการกำหนดลักษณะทางกายภาพเพื่อหาความสามารถในการดึงคลอไรด์ไอออนออกจากคอนกรีตตามลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างการทดลอง โดยกำหนดให้มีจำนวนเหล็กเสริมที่ต่างกัน หรือระยะหุ้มคอนกรีตไม่เท่ากัน และในแต่ละตัวอย่างการทดลองก็จะมีกรจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบในขนาดต่างๆรวมทั้งขนาดของคลอไรด์ในส่วนผสมของคอนกรีตที่ไม่เท่ากันกันเพื่อหาเส้นอิทธิพลเพื่อที่จะนำมาเป็นข้อมูลเพื่อเป็นการตรวจสอบหรืออ้างอิง จากการศึกษาพบว่าเมื่อมีสื่อที่จะนำกระแสไฟฟ้าขั้วลบ มากขึ้นเท่าใดความสามารถในการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนจากคอนกรีตออกสู่สารละลายจะมากขึ้น โดยแปรผันตรงกันกับกระแสไฟฟ้าและจำนวนของสื่อในการนำกระแสไฟฟ้าไม่ว่าจะเป็นกรณีที่มีเหล็กเสริมในคอนกรีตมากกว่า 1 หรือ 2 เส้นในการทดลองอื่นๆ หรือเมื่อเทียบกับการปล่อยกระแสไฟที่ 10 V, 20 V, และ 30 V. ตามลำดับดังแสดงในภาพที่ 8 จะเห็นได้ว่าคลอไรด์ไอออนจากคอนกรีตออกสู่สารละลายได้มากขึ้นตามปริมาณของกระแสไฟฟ้าและสื่อที่จะเป็นขั้วลบ



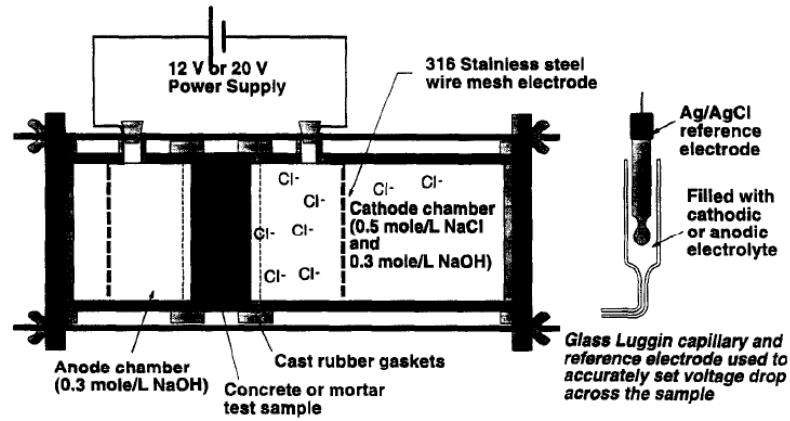
ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่จ่ายในระบบกับปริมาณคลอไรด์ ที่ออกจากตัวอย่าง ในการทดลองและความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสื่อที่เป็นขั้วลบกับปริมาณคลอไรด์ที่ ออกจากตัวอย่างการทดลอง

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

จากภาพที่ 8 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ความต่างศักย์สูงหรือมีพื้นที่ในการนำไฟฟ้ามากขึ้น เท่าใดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความสามารถในการดึงคลอไรด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีซึ่ง ต่อมาในปี 1996 Rob B. Polder ยังได้รายงานผลการศึกษานอกห้องทดลองที่ใช้ชิ้นตัวอย่างที่แช่ใน ทะเลนานถึง 16ปี (บริเวณ North Sea 1796-1992) เพื่อให้คลอไรด์ในน้ำทะเลธรรมชาติแทรกซึมเข้าไป ในแท่งตัวอย่างการทดลองขนาด 50 ซม. x 100 ซม. x 100 ซม. แล้วนำมาเข้ากระบวนการดึง คลอไรด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และน้ำประปาเป็น อิเล็กโทรไลต์เป็นเวลา 39 วันด้วยการจ่ายกระแสไฟฟ้า 1 และ 4 A/m.<sup>2</sup> ในเบื้องต้นสามารถดึง คลอไรด์ออกนอกจากเนื้อคอนกรีตได้ถึงร้อยละ 40-70 สำหรับตัวอย่างที่มีน้ำประปาเป็นอิเล็ก โทโรไลต์ และร้อยละ 70-90 สำหรับสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิมมัวเป็นอิเล็กโทรไลต์ ซึ่ง รายงานผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับ Arya. C. และ Sa'id-shawqi (1996) เนื่องจากปริมาณ กระแสไฟฟ้าที่มากกว่าคือขนาด 4 A/m.<sup>2</sup> สามารถดึงปริมาณคลอไรด์จากคอนกรีตมาสะสมอยู่ใน สารละลายอิเล็กโทรไลต์มากกว่าขนาด 1 A/m.<sup>2</sup>

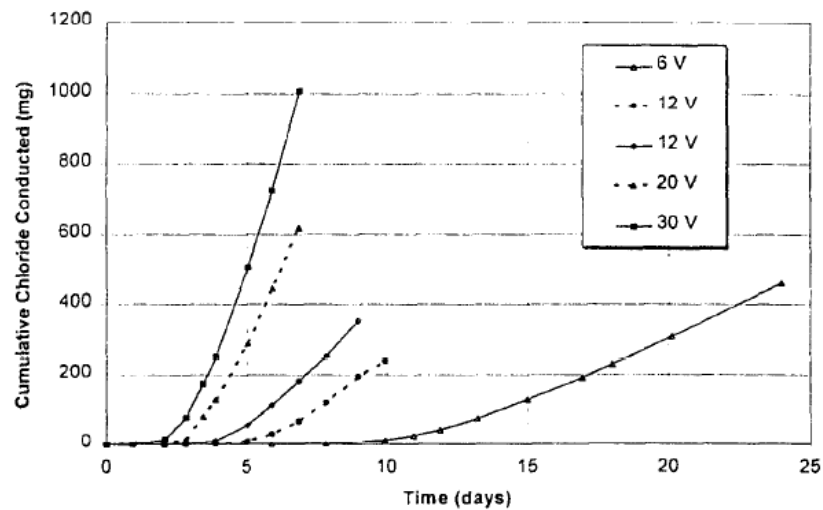
โดยในปีเดียวกัน P.F. McGrath and R.D. Hooton (1996) ได้ทำการทดสอบ Chloride Migration Test โดยใช้คอนกรีตที่มีปฏิกิริยาส่วนผสมเดียวกันทุกตัวอย่างการทดลองและทำการจ่าย

กระแสไฟฟ้าขนาดต่างๆกันในการทดลองและทำการวัดปริมาณคลอไรด์ที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตมาสะสมอยู่ในสารละลายประจุบวกวาก (Anolyte) ในการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 9



ภาพที่ 9 แสดงการทดสอบ Chloride Migration Test

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

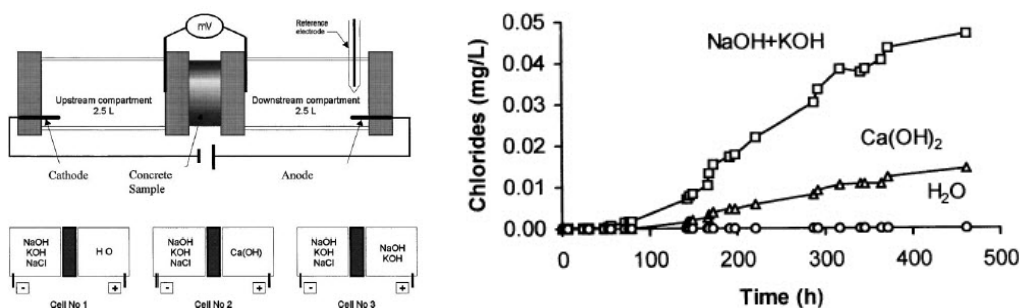


ภาพที่ 9 ปริมาณคลอไรด์ที่ออกจากคอนกรีตมาสะสมอยู่ในสารละลายของการทดสอบ Chloride migration test

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

จากภาพที่ 9 สามารถอธิบายได้ว่าความสามารถในการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนผ่านคอนกรีตนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสไฟฟ้าโดยขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองในครั้งนี้คือ 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

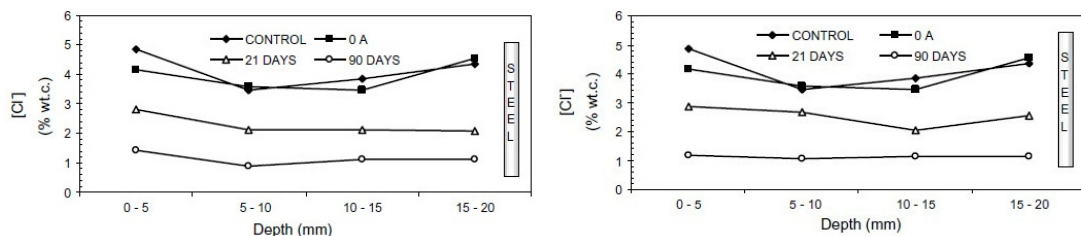
การทดสอบ Chloride Migration Test นั้นสารละลายที่ใช้ในการทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ยังมีผลต่อการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ซึ่ง W. Prince และ R. Gagne (2000) ได้รายงานผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตด้วยวิธี Chloride Migration Test ของคอนกรีตที่ใช้ปฏิกิริยาส่วนผสมเดียวกันโดยใช้สารละลายที่มีศักย์ไฟฟ้าขั้วบวกบวก 3 ชนิดและใช้กระแสไฟฟ้าในการทดสอบขนาด 12 โวลต์ในทุกตัวอย่างโดยผลการทดลองพบว่าผลกระทบบของสารละลายมีผลต่อการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตดังแสดงในภาพที่ 10 โดยในรายงานผลการทดลองได้รายงานผลว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นการจำลองสารละลายในช่องว่างของคอนกรีตสามารถดึงปริมาณคลอไรด์ไอออนมาสะสมอยู่ในสารละลายได้มากกว่าสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์และการใช้น้ำเป็นสารละลาย



ภาพที่ 10 แสดงอิทธิพลของสารละลายที่ใช้ในการทดสอบ Chloride Migration Test

ที่มา: W. Prince and R. Gagne, 2000

G.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. และนำไปแช่ในสถานะน้ำทะเลเทียมโดยมีองค์ประกอบทางเคมีซึ่งเป็นการจำลองคุณสมบัติให้เหมือนน้ำทะเลในมหาสมุทรแอตแลนติกโดยนำไปแช่อยู่ในน้ำทะเลเทียมเป็นเวลา 3 วัน และนำมาอบในตู้อบอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 วัน ซึ่งเป็นการเร่งการซึมผ่านของคลอไรด์ให้เข้าสู่ตัวอย่างในการทดลองในสถานะเปียกกลับแห้งตลอดระยะเวลาในการทดลอง 300 วัน และทำการหาปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการลดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีระหว่างเปลี่ยนสารละลายในระหว่างการทดลองและไม่เปลี่ยนสารละลายดังแสดงในภาพที่ 11



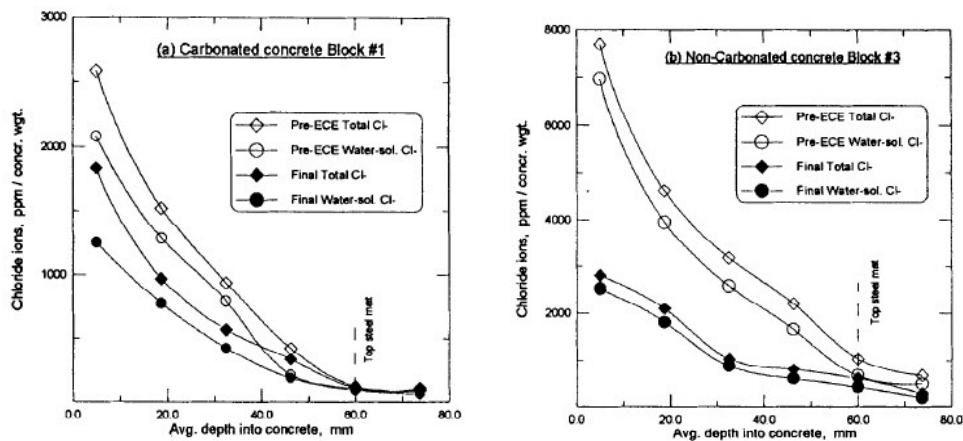
ภาพที่ 11 ปริมาณคลอไรด์ที่สะสมอยู่ในคอนกรีตก่อนและหลังขบวนการทางไฟฟ้าเคมีโดยการเปลี่ยนสารละลายใหม่และไม่เปลี่ยนสารละลาย

ที่มา: G.Fajardo et al (2004)

ภาพที่ 11 แสดงประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีที่อยู่ภายในคอนกรีตที่ใช้ในการทดลอง โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ออกระหว่างการเปลี่ยนสารละลายในการทดลองทุก 2 วัน จะเห็นได้ว่าระหว่างการเปลี่ยนสารละลายและไม่ได้เปลี่ยนสารละลาย ประสิทธิภาพของการดึงคลอไรด์ในคอนกรีตไม่ได้ลดลง แต่อิทธิพลที่ส่งผลต่อการดึงคลอไรด์นั้นคือระยะเวลาในการทำการจ่ายกระแสไฟฟ้า มีประสิทธิภาพไปในทางเดียวกัน กล่าวคือ การทำการดึงคลอไรด์ที่ระยะเวลา 90 วัน สามารถดึงคลอไรด์ที่อยู่ในคอนกรีตมากกว่าการทดลองที่ 21 วัน ในทุกระยะความลึกต่างๆ

ยังมีนักวิจัยที่ศึกษาผลกระทบต่อการดึงคลอไรด์ออกในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี โดย N.M. Ihekwa et al. ในปี 1996 พบว่าการดึงคลอไรด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีจากคอนกรีตที่ได้รับผลกระทบจากคาร์บอนเข่นจะลดประสิทธิภาพลดลง โดยได้ทำการเตรียมตัวอย่าง

คอนกรีตเป็น 2 กลุ่มคือกลุ่มที่คอนกรีตมีสภาพคาร์บอนเนชั่นโดยนำไปบ่มในตู้อบคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเวลา 6 เดือนหลังจากนั้นนำตัวอย่างที่ผ่านการเข้าตู้อบคาร์บอนไดออกไซด์และคอนกรีตที่ไม่มีสภาพคาร์บอนเนชั่นมาทำการแช่อยู่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์อิ่มตัว (Saturated NaCl) เป็นเวลา 18 เดือนจากนั้นทำการหาปริมาณคลอไรด์ก่อนทำการดึงคลอไรด์ อีออนจากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีดังแสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังการดึงคลอไรด์จากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีระหว่างคอนกรีตที่มีสภาพคาร์บอนเนชั่นและคอนกรีตปกติ

ที่มา: N.M. Ihekwa et. al, 1996

ภาพที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณก่อนและหลังการดึงคลอไรด์จากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีระหว่างคอนกรีตที่มีสภาพคาร์บอนเนชั่นและคอนกรีตปกติจะเห็นได้ว่าคอนกรีตที่มีสภาพคาร์บอนเนชั่นนั้นส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์อีออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยสามารถลดปริมาณคลอไรด์ได้น้อยกว่าคอนกรีตที่ไม่มีสภาพคาร์บอนเนชั่น 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. แสดงการเปรียบเทียบศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี

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: N.M. Ihekwaba et. al, 1996

### 1.3.6 การประยุกต์ใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

การประยุกต์ใช้วิธีการดึงคลอไรด์ที่ปนเปื้อนอยู่ในคอนกรีตเสริมเหล็กภายในประเทศยังมีไม่มากนักแต่ในประเทศอเมริกาโดยมีรายงานฉบับสมบูรณ์ของ Virginia Transportation Research Council ได้นำวิธีทางไฟฟ้าเคมีเพื่อลดปริมาณคลอไรด์ที่ปนเปื้อนอยู่ในคอนกรีตของโครงสร้างพื้นฐานของประเทศอเมริกาเช่น โครงสร้างสะพาน 34<sup>th</sup> 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 แสดงการประยุกต์ใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีในการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต

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

ภาพที่ 13 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ในการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีของ สะพาน I-365 ซึ่งสามารถลดปริมาณคลอไรด์ได้เป็นที่น่าพอใจ โดยรายละเอียดของการติดตั้งและประสิทธิภาพในการลดปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างสะพาน I-365 ได้แสดงไว้ในภาคผนวก จ

การประยุกต์ใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีในการลดปริมาณคลอไรด์ที่ปนเปื้อนอยู่ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมที่อยู่ในสภาพที่มีการเปิดการใช้งาน โครงสร้างแล้วภายในประเทศยังมีไม่มากนักเนื่องจากเป็นวิธีที่ยังไม่เป็นที่นิยมภายในประเทศ แต่ในต่างประเทศได้มีการใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีเพื่อลดปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ในคอนกรีตโดยในปี 2002 โดย Stephen R. Sharp et. al. ได้รวบรวมการใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีเพื่อลดปริมาณคลอไรด์ในทวีปอเมริกาเหนือ ซึ่งได้รวบรวมโครงสร้างที่ใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีเพื่อลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตในส่วนของประสิทธิภาพของการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตและการลดลงของโอกาสการเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้วิธีวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ในการประเมิน โอกาสการเป็นสนิมของเหล็กเสริมดังแสดงในตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4. แสดงการใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีเพื่อลดปริมาณคลอไรด์ในทวีปอเมริกาเหนือ

Location	Date	Area of Treatment (m <sup>2</sup> )	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

N/A = Not Available

ที่มา: Stephen R. Sharp et. al, 2002

ตารางที่ 4. (ต่อ) แสดงการใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีเพื่อลดปริมาณคลอไรด์ในทวีปอเมริกาเหนือ

Location	Date	Area of Treatment (m <sup>2</sup> )	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.)

N/A = Not Available

ที่มา: Stephen R. Sharp et. al, 2002

ตารางที่ 5. แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ก่อนและหลังกระบวนการวิธีทางไฟฟ้าเคมีเพื่อลดปริมาณคลอไรด์ในทวีปอเมริกาเหนือ

ECE Date	Location	Test Date	Half Cell, mV (vs. Cu/CuSO <sub>4</sub> )
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
1991	Portage Avenue & Rt. 90 Underpass Retaining Wall, Winnipeg, Manitoba	Untreated	84% < -350
		Treated	100% > -280
1995	Hwy #6 & #11 Overpass Piers, Regina, Saskatchewan		49% > -200
		Untreated	27% between -200 and -350 24% < -350
			99% > -200
		Treated	1% between -200 and -350 0% < -350
1997	Starbuck Bridge Deck, Traffic Bearing System, Winnipeg, Manitoba		6% > -200
		Untreated	75% between -200 and -350 19% < -350
			96% > -200
		Treated	4% between -200 and -350 0% < -350

ที่มา: Stephen R. Sharp et. al, 2002

## บทที่ 2 วิธีวิจัย

### 2.1 อุปกรณ์

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

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

## 2.2 วิธีการ

### 2.2.1 วัสดุและปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต

#### 1 วัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีต

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

#### 2 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต

ในการศึกษาในครั้งนี้ได้กำหนดคอนกรีตให้มีกำลังรับแรงอัด 320 กก./ซม.<sup>2</sup> โดยออกแบบตามมาตรฐาน ACI มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และค่าการยุบตัวเท่ากับ 8 ซม. โดยมีปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตและคุณสมบัติของเหล็กเสริมที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ดังแสดงในตารางที่ 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. <sup>2</sup> )	Yielding strength (kg./cm. <sup>2</sup> )	Ultimate strength (kg./cm. <sup>2</sup> )
RB6	28.3	2400	3900
RB9	63.6	2400	3900

## 2.2.2 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก

### 1. ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 30 x 30 x 10 ซม.

จัดทำตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก ขนาด 30 x 30 x 10 ซม. จำนวน 9 ตัวอย่าง โดยมีปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตดังแสดงในตารางที่ 3 และน้ำที่ใช้ในการเตรียมคอนกรีตเป็นน้ำประปาโดยใช้เหล็กเสริมชนิด SR24 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม. ผูกเป็นตะแกรงโดยทำการตัดเหล็กให้งอขึ้นมาด้านบนเพื่อทำเป็นสื่อนำไฟฟ้าและผสมโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ในอัตราส่วนร้อยละ 5 ต่อน้ำหนักซีเมนต์โดยใช้เครื่องผสมคอนกรีตในการเตรียมคอนกรีตและการทดสอบค่ายุบตัวด้วยอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัว (Slump test)

โดยในการศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการผสมผสมโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ในอัตราร้อยละ 5 ต่อน้ำหนักซีเมนต์เพื่อแทนการแช่ตัวอย่างในสารละลายเนื่องจากความจำกัดด้านเวลาในการซึมผ่านของคลอไรด์เนื่องจากต้องการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารละลายและขนาดของกระแสไฟฟ้ที่ต่างกันในการวิจัยครั้งนี้ โดยวิธีดังกล่าวเป็นที่ยอมรับได้ในงานวิจัยของต่างประเทศ (C. Arya et al.,

1996) โดยทำการบ่มตัวอย่างในน้ำประปาเป็นเวลา 28 วัน และนำขึ้นมาทำเครื่องหมายแสดงตำแหน่งตามตำแหน่งของจุดต่อเหล็กเสริมและเจาะนำผงคอนกรีตที่ระยะ 1, 2,3 และ 4 ซม. จากด้านบนของตัวอย่างในการทดลองเพื่อนำมาแช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

## 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. ผูกเป็นผูกเป็นตะแกรงโดยมีระยะห่างเหล็กเสริมเท่ากับ 15 ซม. โดยทำการต่อสายไฟเพื่อทำการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างทำการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 19 มีระยะหุ้มเหล็กเสริมเท่ากับ 3 ซม. โดยใช้ปฏิกิริยาคู่ผสมเดียวกันกับตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 30 x 30 x 10 ซม. โดยทำการการระบุตำแหน่งการเจาะผงคอนกรีตเพื่อทำการเจาะผงคอนกรีตซึ่งกำหนดให้มีระยะห่างเท่ากับ 15 ซม. และทำการเจาะเอาผงคอนกรีตจากด้านบนซึ่งเป็นด้านเหนือเหล็กที่ระยะ 1,2 และ 3 ซม. ซึ่งเป็นตำแหน่งของเหล็กเสริมเพื่อนำมาหาปริมาณคลอไรด์อิสระที่อยู่ภายในคอนกรีตเพื่อนำมาเป็นข้อมูลเปรียบเทียบก่อนและหลังในการดึงคลอไรด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยเมื่อได้ผงคอนกรีตที่ได้จากการเจาะนำมาชั่งน้ำหนักและทำการแช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและทำการกรองด้วยกระดาษกรองโดยใช้เครื่องดูดสุญญากาศในการกรองผงคอนกรีตเพื่อเตรียมทำการไทเทรต (Titration) หาปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free Chloride) จากนั้นทำการอุดรูที่ทำการเจาะแล้วด้วยปูนฉาบซ่อมแซมทั่วไป

### 2.2.3 การเตรียมสารละลายในการทดลอง

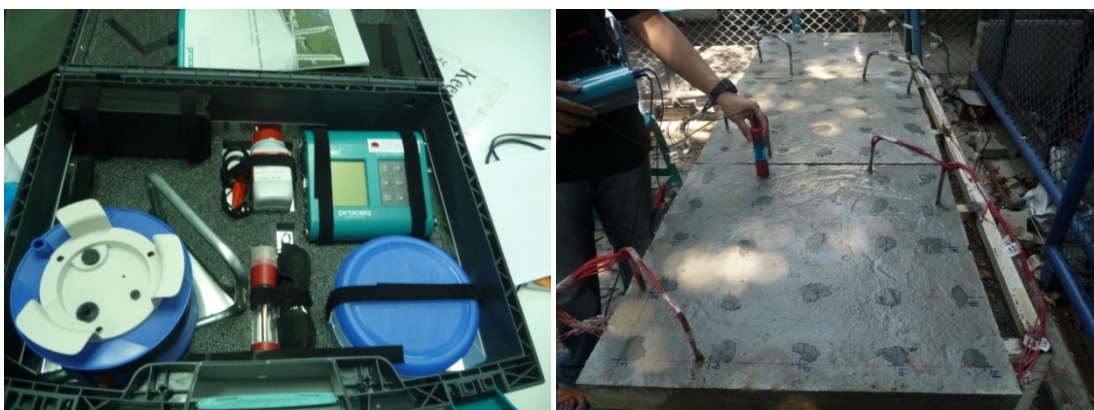
ทำการเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพื่อนำมาเป็นสื่อในการนำไฟฟ้าในการดึงคลอไรด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้สารละลายจำนวน 3 ชนิดซึ่งเป็นสารละลายต่างแก่ที่หาได้ง่ายในห้องทดลองเพื่อให้ง่ายต่อการใช้งานทั่วไปคือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ), และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์, ( $\text{KOH}$ ) โดยทำการเตรียมสารละลายดังกล่าวกับน้ำกลั่นตามความเข้มข้นดังแสดงในตารางที่ 8

## ตารางที่ 8 สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการดิ่งคลอไรด์ไอออน

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

### 2.2.4 การวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

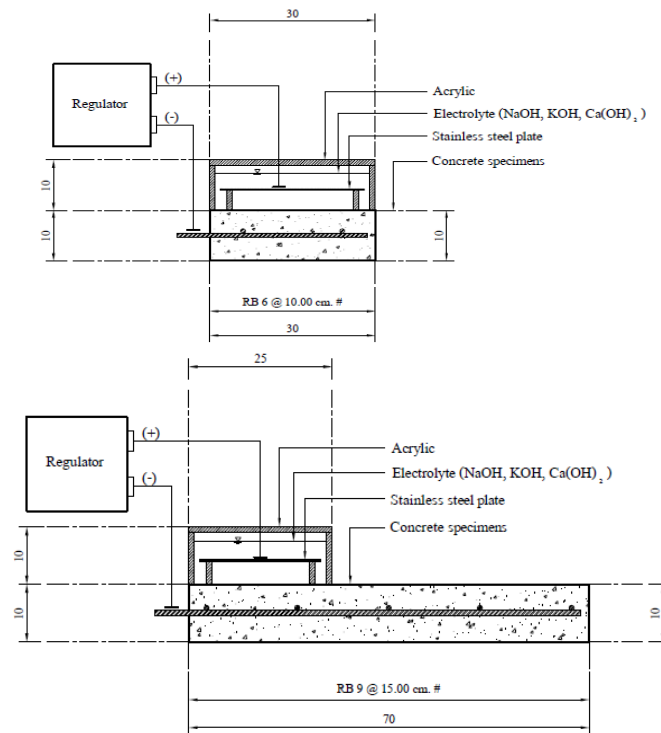
ทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-Cell Potential) เพื่อประเมินโอกาสในการเป็นสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM-C876 ในระหว่างทำการทดสอบการดิ่งคลอไรด์ไอออนก่อนและหลังกระบวนการดิ่งคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีเพื่อบันทึกเป็นข้อมูลเพื่อเปรียบเทียบโอกาสในการเป็นสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตก่อนและหลังการดิ่งคลอไรด์ไอออนออกจากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี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



ภาพที่ 14 เครื่องมือวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

## 2.2.5 การต่อวงจรไฟฟ้าเพื่อดึงคลอไรด์ไอออนในการดึงคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

ทำการขังสารละลายไว้ด้านบนตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กและต่อวงจรไฟฟ้าเพื่อทำการดึงคลอไรด์ไอออนด้วยในคอนกรีต โดยทำการต่อกระแสไฟฟ้าขั้วลบเข้าที่เหล็กเสริมคอนกรีตและต่อกระแสไฟฟ้าขั้วบวกเข้าที่แผ่นสแตนเลสที่จมอยู่ในสารละลายเพื่อเป็นสื่อนำไฟฟ้าในการดึงคลอไรด์ไอออนที่สะสมอยู่ในคอนกรีตเข้าสู่สารละลายภายนอกของตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 30 x 30 x 10 ซม. และขนาด 70 x 70 x 7.5 ซม. โดยใช้เครื่องแปลงไฟฟ้ากระแสตรงดังแสดงในภาพที่ 15



ภาพที่ 15 ภาพการต่อวงจรไฟฟ้าและขังสารละลายเพื่อดึงคลอไรด์จากตัวอย่างคอนกรีตขนาด 30 x 30 x 10 ซม. และ 70 x 70 x 7.5 ซม.

## 2.2.6 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/(cm<sup>2</sup> year))

$D_e$  = Effective Diffusion Coefficient (cm<sup>2</sup>/year)

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

$z_{Cl}$  = Charge of Chloride ion (=1)

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

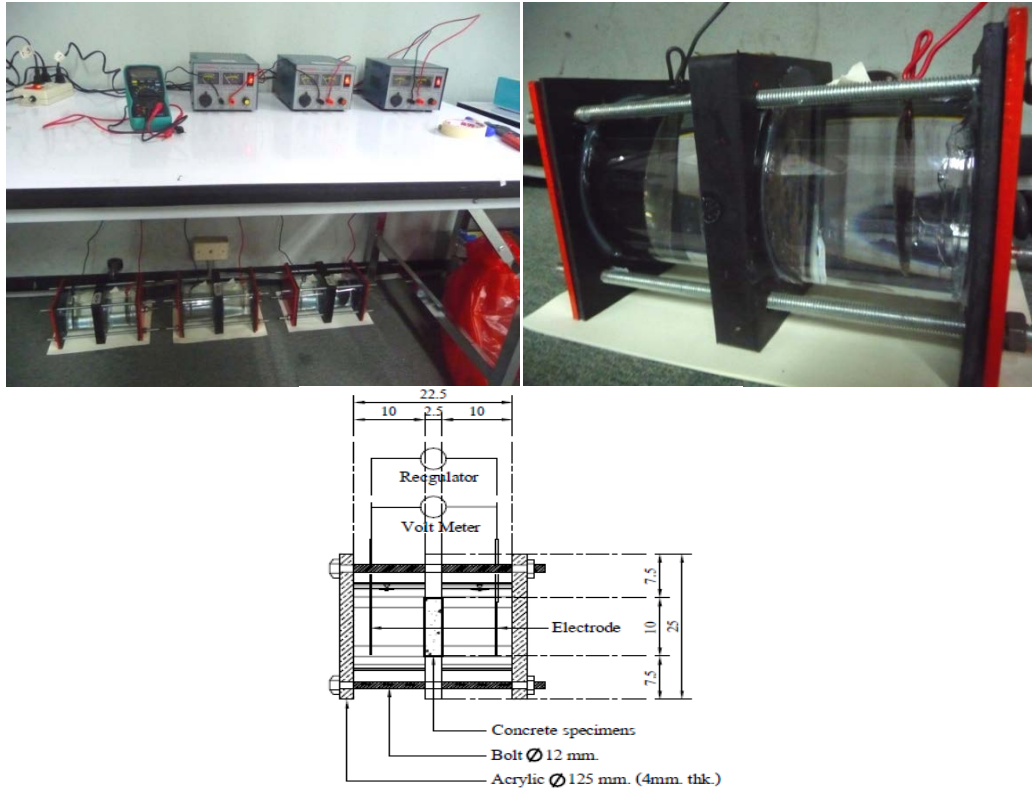
$C_{Cl}$  = Chloride Ion Concentration (mol/l)

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

l = Length (mm.)

T = Time

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



ภาพที่ 16 ภาพตัวอย่างการทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์อิออนด้วยไฟฟ้า  
(Chloride Migration Test)

## 2.2.7 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในผงคอนกรีต

### 1. การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในผงคอนกรีตด้วยวิธี Argentometric หรือ Mohr Method

1.1 นำน้ำปูนตัวอย่าง (ผงปูน 4-5 กรัมแช่ทิ้งไว้ในน้ำกลั่น 75 มิลลิตร เป็นเวลา 1 วัน) มากรองด้วยกระดาษกรองลงในขวดรูปกรวยขนาด 250 มิลลิตรและวัดปริมาตรของสารละลายที่กรองมาได้ในกระบอกตวง และบันทึกปริมาตรของสารตัวอย่างไว้

1.2 ปรับ pH ของสารละลายตัวอย่างให้เป็นกลาง เพราะ  $\text{Ag}^+$  จะตกตะกอนเป็น  $\text{AgOH}$  ที่ pH สูงและ  $\text{CrO}_4^{2-}$  จะถูกเปลี่ยนไปเป็น  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$  ที่ pH ต่ำ ดังนั้นจึงไทเทรตที่สภาวะเป็นกลาง ด้วยการหยดฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์ลงในสารตัวอย่าง 1 หยด สังเกตการเปลี่ยนแปลงของสีสารละลายตัวอย่าง

1.2.1 ถ้าเปลี่ยนเป็นสีชมพูแสดงว่าสารละลายมีค่า pH สูงกว่า 7 หรือมีสถานะเป็นเบสให้เติมกรดกำมะถันที่หยดจนสารตัวอย่างกลับมาใสเหมือนเดิม

1.2.2 ถ้าสารตัวอย่างไม่เปลี่ยนสีแสดงว่าสารละลายมีค่า pH ต่ำกว่า 7 หรือมีสถานะเป็นเบสให้เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่หยดจนกระทั่งสารตัวอย่างเปลี่ยนเป็นสีชมพู จากนั้นให้ปรับค่า pH กลับเหมือนกับข้อ 7.1.2.1

1.3 นำ  $\text{AgNO}_3$  ที่เตรียมไว้เทผ่านกรวยลงในบิวเรตขนาด 50 มิลลิลิตร

1.4 เติมโปตัสเซียมโครเมตจำนวน 1 มิลลิลิตรที่เตรียมไว้ลงในสารละลายตัวอย่าง จะได้สารละลายสีเหลือง

1.5 หยด  $\text{AgNO}_3$  ลงในสารละลายตัวอย่างไปเรื่อยๆ สารละลายตัวอย่างจะเริ่มเปลี่ยนจากสีเหลืองใสเป็นสีเหลืองขุ่นและเริ่มตกตะกอนเป็น  $\text{AgCl}$  จนกระทั่งสารละลายเป็นสีน้ำตาลแดงทั้งหมดถือว่าเป็นจุด End Point อ่านค่าปริมาตรของ  $\text{AgNO}_3$  ที่ใช้ไปและบันทึกปริมาตร

1.6 ทำการหา Blank คือส่วนที่เกินมาของ  $\text{AgNO}_3$  ในปฏิกิริยาการตกตะกอน  $\text{AgCl}$  เนื่องจากสารละลายที่เปลี่ยนเป็นตะกอนสีน้ำตาลแดงนั้นคือ  $\text{Ag}_2\text{CrO}_4$  โดยการใช้น้ำกลั่นในการไทเทรต บันทึกปริมาตรของสารละลาย  $\text{AgNO}_3$  ที่ถูกใช้ไปเป็น Blank



ภาพที่ 17 แสดงการเตรียมตัวอย่างในการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในผงคอนกรีต, การปรับสภาพความเป็นกรดค่า (pH) และการทำ Blank



ภาพที่ 18 แสดงตัวอย่างหลังการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในสารละลาย

1.7 ทำการคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ในสารละลายโดยใช้สมการที่ 6 และบันทึกปริมาณคลอไรด์ในสารละลายตามระดับความลึกต่างของทุกตัวอย่างในการทดลอง

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

โดยที่ A = มิลลิลิตรของ  $AgNO_3$  ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่าง

B = มิลลิลิตรของ  $AgNO_3$  ที่ใช้ในการไทเทรต Blank

C = นอร์มัลลิตีของ  $AgNO_3$

2. การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในผงคอนกรีต โดยเครื่อง Chloride Analyzer (Metrohm 781 pH/Ion Meter)

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

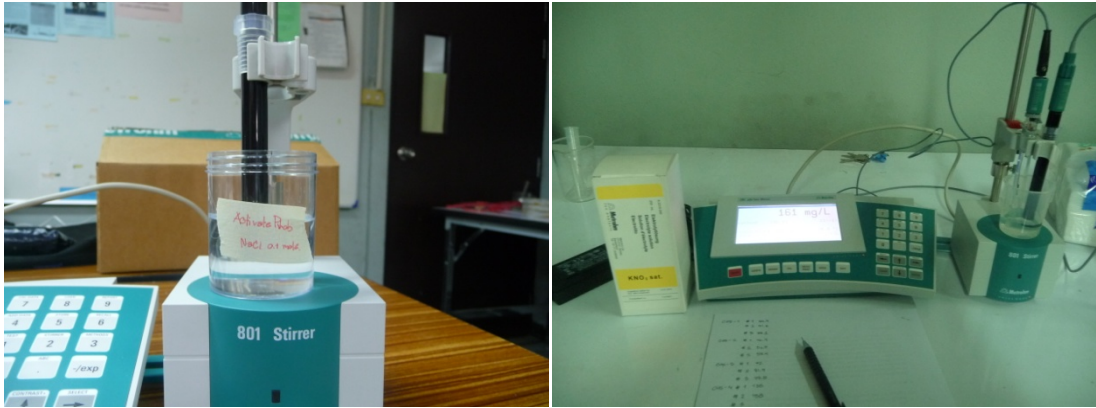
2.2 นำสารละลายที่ทำการกรองแล้ว โดยใช้สารละลายที่ทำการกรองจำนวน 10 มิลลิลิตร โดยผสมกับสารละลายโซเดียมไนเตรต ( $\text{NaNO}_3$ ) จำนวน 10 มิลลิลิตร เพื่อกำจัดตัวขัดขวางและแยกไอออนของคลอไรด์ออกมาให้สามารถวัดปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ในสารละลายได้อย่างชัดเจนขึ้น

2.3 ทำการกระตุ้นการทำงานของเครื่อง Chloride ISE ด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ( $\text{NaCl}$ ) ความเข้มข้น 0.1 โมล ก่อนการไทเทรตเป็นเวลาอย่างน้อย 10 นาทีก่อนการทำหาปริมาณคลอไรด์ไอออนด้วยเครื่อง Chloride Analyzer (Metrohm 781 pH/Ion Meter)

2.4 ทำการไทเทรตหาปริมาณคลอไรด์อิสระของตัวอย่างผงคอนกรีตในวันที่ 7, 14, 21 และวันที่ 28 ของการทดสอบซึ่งเป็นวันสุดท้ายในการดึงคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี เพื่อหาปริมาณคลอไรด์เปรียบเทียบกับปริมาณคลอไรด์ก่อนดึงออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี



ภาพที่ 19 ตัวอย่างการกรองผงคอนกรีตด้วยเครื่องดูดสุญญากาศและการเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการไทเทรต (Titration) หาปริมาณคลอไรด์อิสระ

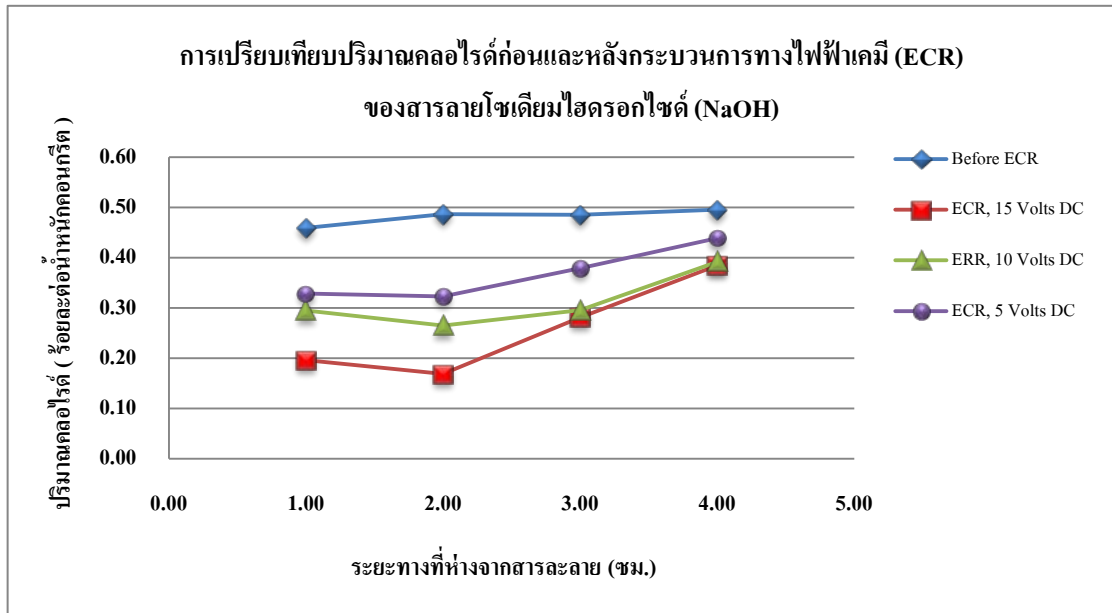


ภาพที่ 20 การกระตุ้นการทำงานของ Chloride ISE ด้วยสารละลายคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร และการหาปริมาณคลอไรด์อิสระด้วยเครื่อง Chloride Analyzer (Metrohm 781 pH/Ion Meter)

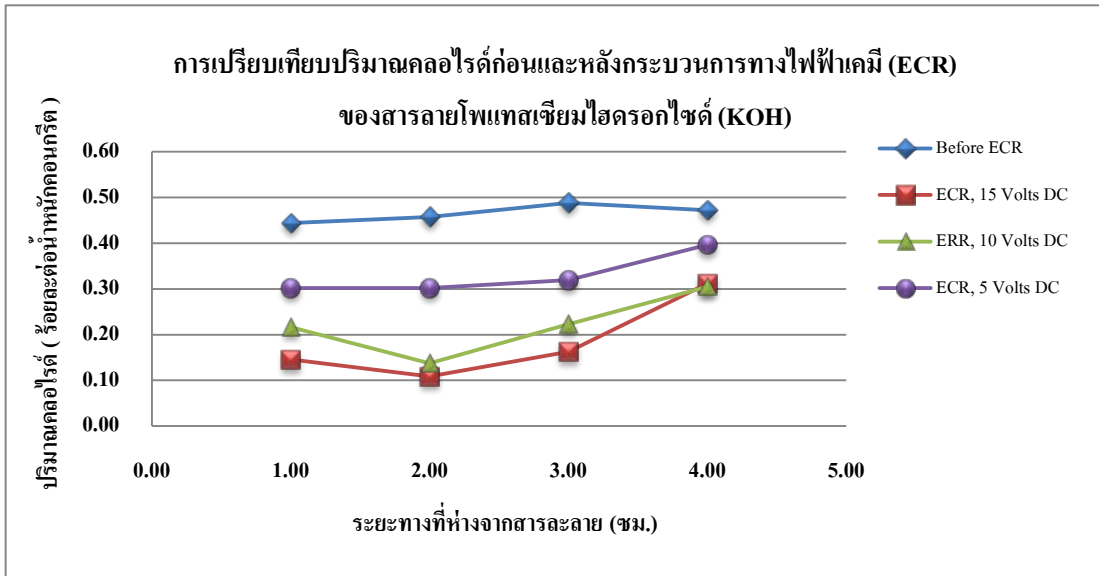
## บทที่ 3 ผลการวิจัย

### 3.1 ผลการเปรียบเทียบสารละลายและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง

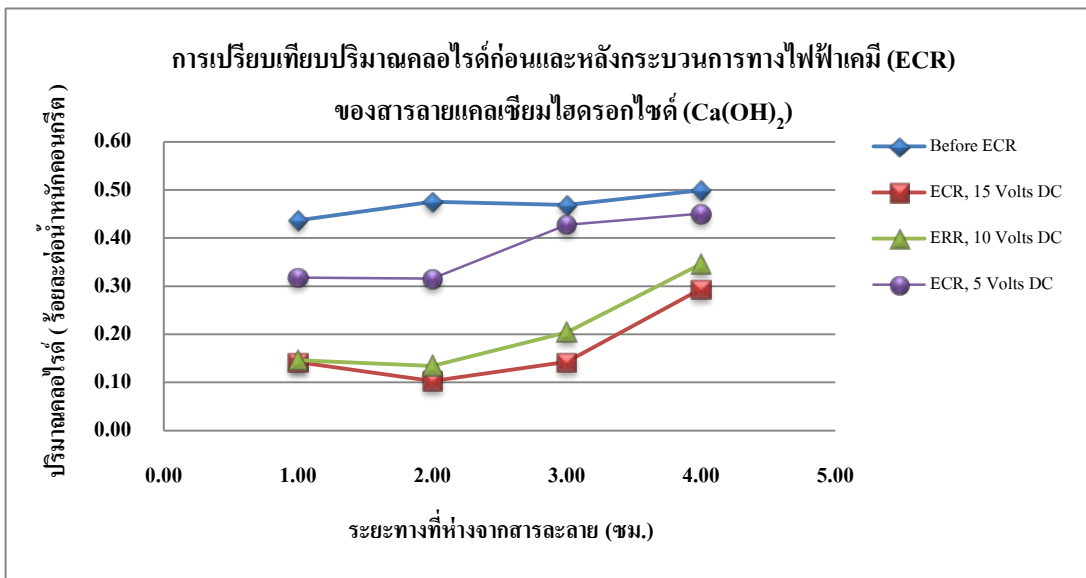
จากการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ (Strong Base Electrolyte) ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ซึ่งได้แก่สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$  Electrolyte), สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH Electrolyte) และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH Electrolyte) โดยทำการจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5, 10, 15 โวลต์ พบว่าสารละลายทั้ง 3 ชนิดมีแนวโน้มที่สามารถดึงคลอไรด์ไอออนจากคอนกรีตเป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือประสิทธิภาพของการดึงคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตของสารละลายทั้ง 3 ชนิดใช้ในการทดลองมีผลกระทบโดยตรงจากขนาดของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปในระบบและระยะทางของคลอไรด์ที่เคลื่อนที่สู่สารละลายโดยพบว่าขนาดกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นจะสามารถลดปริมาณคลอไรด์ได้มากและระยะทางที่ใกล้กับสารละลายจะสามารถลดปริมาณคลอไรด์ไอออนได้มากกว่าระยะทางที่ไกลออกไปดังแสดงในภาพที่ 21-23



ภาพที่ 21 การเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังการดึงคลอไรด์ภายในคอนกรีตเมื่อใช้ตัวกลางสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และใช้ขนาดความต่างศักย์ 5, 10, 15 โวลต์ตามลำดับ



ภาพที่ 22 การเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังการดึงคลอไรด์ภายในคอนกรีตเมื่อใช้ตัวกลางสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และขนาดความต่างศักย์ 5, 10, 15 โวลต์ตามลำดับ



ภาพที่ 23 การเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังการดึงคลอไรด์ภายในคอนกรีตเมื่อใช้ตัวกลางสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์และขนาดความต่างศักย์ 5, 10, 15 โวลต์ตามลำดับ

ตารางที่ 9 การเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยใช้ความต่างศักย์กระแสตรง 15, 10, 5 โวลต์

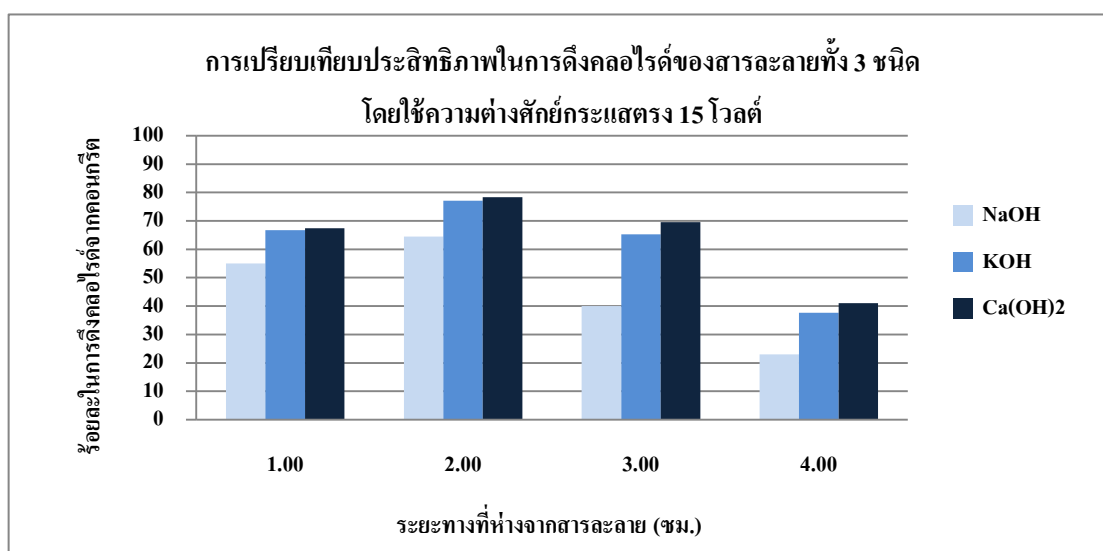
สารละลาย	ระยะทางห่าง จากสารละลาย ชม.	ปริมาณคลอไรด์ ( ร้อยละต่อน้ำหนักคอนกรีต)			
		ก่อนกระบวนการ ทางไฟฟ้าเคมี	ความต่างศักย์	ความต่างศักย์	ความต่างศักย์
			กระแสตรง 15 โวลต์	กระแสตรง 10 โวลต์	กระแสตรง 5 โวลต์
โซเดียม	1	0.459	0.196	0.295	0.329
ไฮดรอกไซด์	2	0.487	0.169	0.265	0.323
(NaOH)	3	0.486	0.281	0.296	0.379
	4	0.496	0.385	0.392	0.439

ตารางที่ 10 การเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์โดยใช้ความต่างศักย์กระแสตรง 15, 10, 5 โวลต์

สารละลาย	ระยะทางห่าง จากสารละลาย ชม.	ปริมาณคลอไรด์ ( ร้อยละต่อน้ำหนักคอนกรีต)			
		ก่อนกระบวนการ ทางไฟฟ้าเคมี	ความต่างศักย์	ความต่างศักย์	ความต่างศักย์
			กระแสตรง 15 โวลต์	กระแสตรง 10 โวลต์	กระแสตรง 5 โวลต์
โพแทสเซียม	1	0.444	0.145	0.138	0.302
ไฮดรอกไซด์	2	0.458	0.109	0.216	0.302
(KOH)	3	0.488	0.163	0.223	0.319
	4	0.472	0.311	0.305	0.397

ตารางที่ 11 การเปรียบเทียบปริมาณคลอรีนก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีของ สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยใช้ความต่างศักย์กระแสตรง 15, 10, 5 โวลต์

สารละลาย	ระยะทางห่าง จากสารละลาย ซม.	ปริมาณคลอรีน ( ร้อยละต่อน้ำหนักคอนกรีต)			
		ก่อน	ความต่างศักย์	ความต่างศักย์	ความต่างศักย์
		กระบวนการ ทางไฟฟ้าเคมี	กระแสตรง 15 โวลต์	กระแสตรง 10 โวลต์	กระแสตรง 5 โวลต์
Ca(OH) <sub>2</sub>	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 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดึงคลอรีนของสารละลายทั้ง 3 ชนิด โดยใช้ความต่างศักย์กระแสตรง 15 โวลต์

ภาพที่ 21-23 และตารางที่ 9-11 แสดงปริมาณคลอรีนก่อนและหลังกระบวนการดึงคลอรีนจากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี ความสามารถในการดึงคลอรีนออกโดยใช้ตัวกลางเป็นสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>) สามารถดึงคลอรีนออกมาได้มากที่สุดในทุกค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ในส่วนบริเวณระยะทาง (ความลึก) ใกล้กับสารละลาย และความสามารถในการดึงคลอรีนลดลงตามระยะทางที่ห่างจากสารละลายตามลำดับ เมื่อพิจารณาความต่างศักย์ที่แตกต่างกันพบว่าความสามารถในการดึงคลอรีนแปรผันตรงกันกับขนาดความต่าง

ศักย์ที่ใช้ โดยความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สามารถดึงคลอไรด์จากเนื้อคอนกรีตได้มากที่สุดคือขนาด 15 โวลต์และประสิทธิภาพลดลงตามขนาดความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 และ 5 โวลต์ตามลำดับ

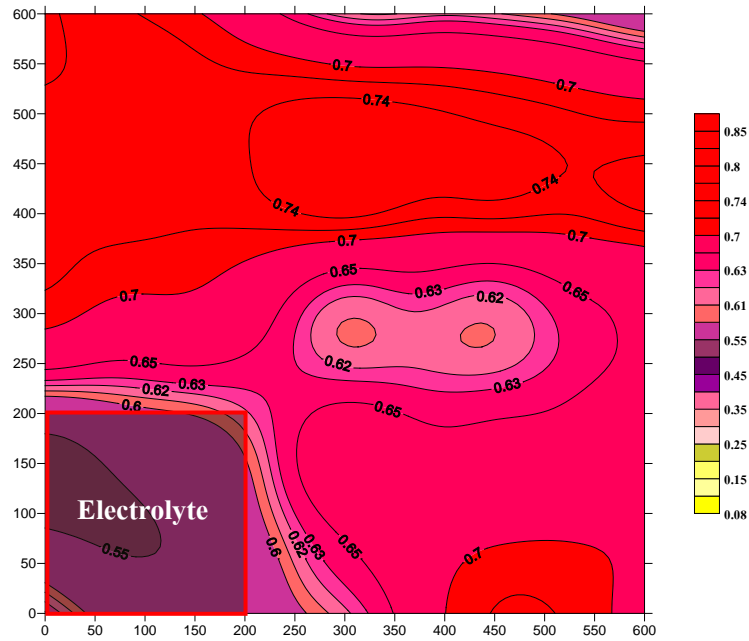
สำหรับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ในภาพที่ 21, 22 ให้ผลการทดลองเป็นไปในทางเดียวกันกับสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) โดยผลการวิจัยครั้งนี้สอดคล้องกับ P.F. McGrath and R.D. Hooton (1996) และ C. Arya et al. (1996) ซึ่งได้อธิบายการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนด้วยกระแสไฟฟ้า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

ภาพที่ 24 แสดงความสามารถในการดึงคลอไรด์ไอออนของสารละลายทั้ง 3 ชนิด พบว่า สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) สามารถดึงคลอไรด์ไอออนออกมาได้มากที่สุด กล่าวคือสามารถดึงคลอไรด์ไอออนออกมาเฉลี่ยร้อยละ 76 ที่เวลา 28 วันโดยใช้ความต่างศักย์ 15 โวลต์จากประสิทธิภาพดังกล่าวสามารถลดระดับคลอไรด์ไอออนให้ต่ำกว่าระดับคลอไรด์วิกฤติ (ร้อยละ 0.4-0.6 ต่อน้ำหนักซีเมนต์)

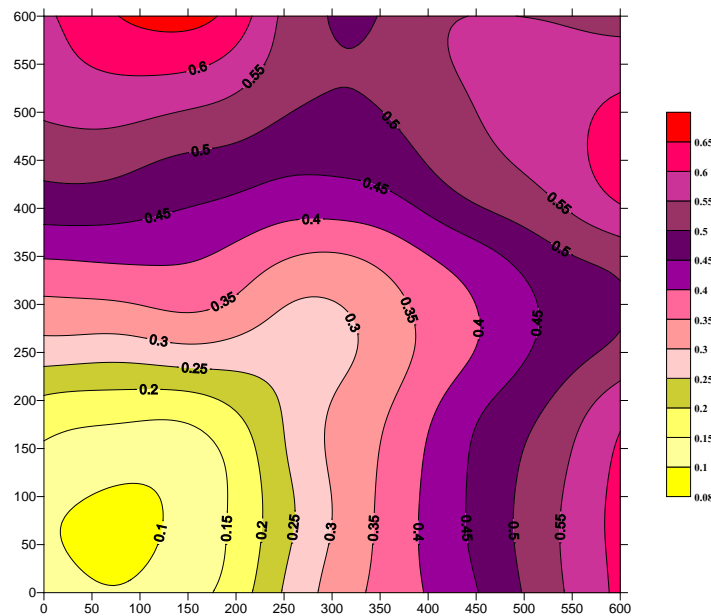
### 3.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ไอออนบริเวณที่ไม่ได้สัมผัสกับสารละลายโดยตรง

จากการทดลองดึงคลอไรด์ที่อยู่ภายในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยทำการติดตั้งแหล่งสารละลายไว้ที่ขอบของชิ้นตัวอย่างเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการดึงคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในส่วนที่ไม่ได้สัมผัสกับสารละลายโดยตรง โดยเลือกสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) เป็นตัวกลางและใช้ความต่างศักย์ 15 โวลต์ซึ่งเป็นสารละลายและขนาดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สามารถดึงคลอไรด์ได้มากที่สุดจากการทดลองข้างต้นและใช้ระยะเวลาในการดึงคลอไรด์จากคอนกรีตเท่ากับการทดลองข้างต้นคือ 28 วัน พบว่าปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตในส่วนที่ทำการขังสารละลายลดลงในปริมาณที่น่าพอใจ เนื่องจากสามารถลดปริมาณคลอไรด์ที่สะสมอยู่ในคอนกรีตถึงร้อยละ 65 – 78 ของปริมาณคลอไรด์ที่สะสมอยู่ในคอนกรีตและปริมาณคลอไรด์ในบริเวณที่ห่างจากสารละลายออกไปลดลงตามระยะทางอันเนื่องมาจากระยะทางในการเดินทางของคลอไรด์ในสารละลายในช่องว่างภายในคอนกรีตและปริมาณกระแสไฟฟ้าที่สูญเสียไป

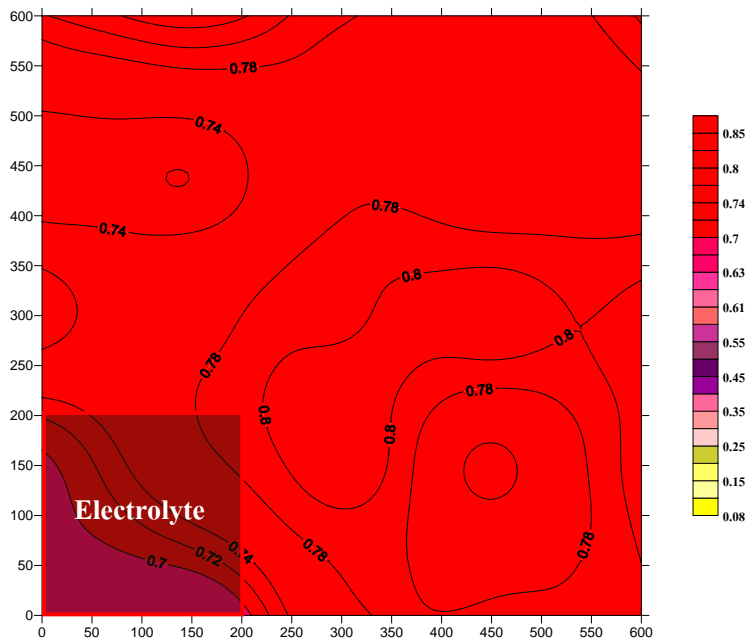
ตามระยะทางที่ห่างออกจากบริเวณที่ทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าโดยได้เปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ ก่อนและหลังการดึงคลอไรด์จากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีดังแสดงในภาพที่ 25-30



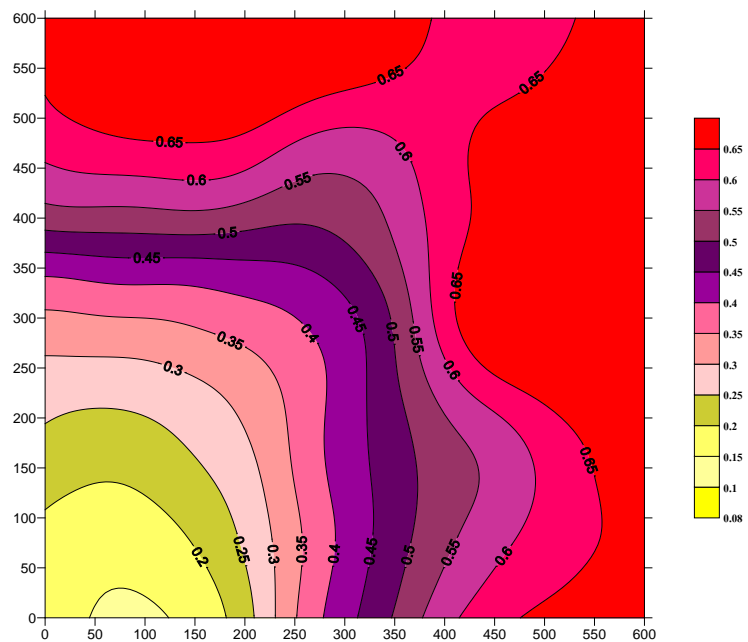
ภาพที่ 25 เส้นชั้นระดับปริมาณคลอไรด์โดยเฉลี่ยที่ระยะความลึก 1 ซม. ก่อนทำการดึงคลอไรด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี



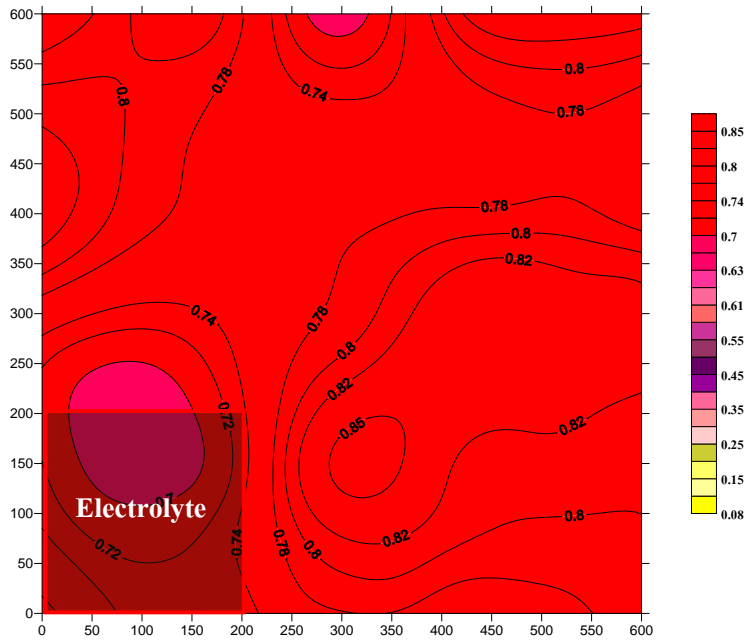
ภาพที่ 26 เส้นชั้นระดับปริมาณคลอไรด์โดยเฉลี่ยที่ระยะความลึก 1 ซม. หลังทำการดึงคลอไรด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี



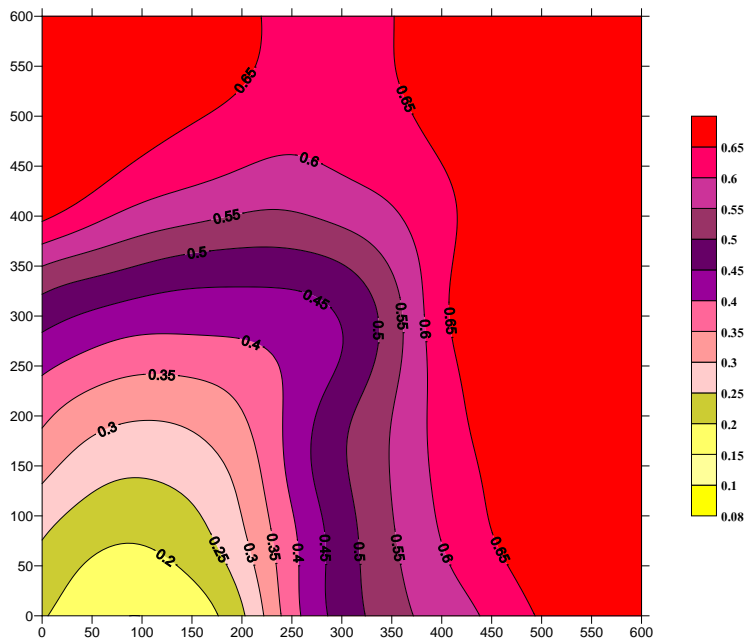
ภาพที่ 27 เส้นชั้นระดับปริมาณคลอโรไฟด์โดยเฉลี่ยที่ระยะความลึก 2 ซม. ก่อนทำการดึงคลอโรไฟด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี



ภาพที่ 28 เส้นชั้นระดับปริมาณคลอโรไฟด์โดยเฉลี่ยที่ระยะความลึก 2 ซม. หลังทำการดึงคลอโรไฟด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี



ภาพที่ 29 เส้นชั้นระดับปริมาณคลอโรฟิลล์โดยเฉลี่ยที่ระยะความลึก 3 ซม. ก่อนทำการดึงคลอโรฟิลล์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี



ภาพที่ 30 เส้นชั้นระดับปริมาณคลอโรฟิลล์โดยเฉลี่ยที่ระยะความลึก 3 ซม. หลังทำการดึงคลอโรฟิลล์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

ภาพที่ 25, 27, 29 แสดงปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ภายในคอนกรีตที่ระดับความลึก 1, 2 และ 3 ซม.ตามลำดับโดยปริมาณคลอไรด์ที่มีอยู่ในคอนกรีตก่อนการทำการดึงคลอไรด์ภายในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีมีปริมาณคลอไรด์เกินระดับคลอไรด์วิกฤติโดยในบริเวณขอบของตัวอย่างในการทดลองมีปริมาณคลอไรด์น้อยกว่าบริเวณด้านในอันเนื่องมาจากการละลายของเกลือที่ใช้ผสมในคอนกรีตอาจเกิดละลายออกสู่ภายนอกระหว่างระยะเวลาที่ทำการบ่มในน้ำประปา 28 วัน

ภาพที่ 26, 28, 30 แสดงปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ภายในคอนกรีตที่ระดับความลึก 1, 2 และ 3 ซม.ตามลำดับโดยปริมาณคลอไรด์ที่มีอยู่ในคอนกรีตหลังการทำการดึงคลอไรด์ภายในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยในบริเวณที่ทำการติดตั้งสารละลายจะสามารถลดปริมาณที่อยู่ภายในคอนกรีตได้ถึงร้อยละ 73-81, 68-75, 56-76 ตามระยะที่ห่างจากสารละลาย (ความลึก) 1, 2, 3 ซม.ตามลำดับ ส่วนที่ระยะห่างออกมาจากบริเวณที่ทำการซังสารละลายนั้นประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ออ้อนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีนั้นสามารถดึงคลอไรด์ออ้อนตามระดับความลึกต่างๆ โดยสรุปตามระดับความลึกต่างๆได้ในตารางที่ 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.

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

ตารางที่ 14 ประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ในคอนกรีตเปรียบเทียบเป็นร้อยละก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี) ที่ระดับความลึก 3 ซม.

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

ตารางที่ 12-14 แสดงประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ภายในคอนกรีตที่สามารถดึงออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยลดลงตามระยะทางที่ห่างออกจากสารละลายเนื่องจากการเดินทางของคลอไรด์ภายในช่องว่างของคอนกรีตมายังบริเวณที่ทำการขังสารละลายและปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ลดลงตามระยะทางที่ห่างออกจากบริเวณที่ทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าทำให้ประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์อ้อนลดลง รวมทั้งความต่อเนื่องของช่องว่างภายในคอนกรีตทำให้การเดินทางของคลอไรด์ในคอนกรีตไม่เป็นแบบแผนที่ชัดเจน ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าปริมาณของกระแสไฟฟ้าและความต่อเนื่องของช่องว่างภายในคอนกรีตส่งผลกระทบต่อตรงกับการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ในคอนกรีตโดยวิธีการทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยไฟฟ้า (Chloride Migration Test)

สามารถอธิบายการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ในคอนกรีตได้เฉพาะการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตด้วยกระแสไฟฟ้า

### 3.3 ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนด้วยไฟฟ้า (Chloride Migration Test)

การทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนผ่านคอนกรีตโดยใช้กระแสไฟฟ้าในการขับเคลื่อนคลอไรด์ไอออนเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองการดึงคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนผ่านคอนกรีตที่ใช้ในการทดลอง จะทำให้ทราบถึงปริมาณของคลอไรด์ไอออนที่ผ่านคอนกรีตตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองเพื่อที่จะทราบถึงสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Diffusion Coefficient) ของคอนกรีตและทราบถึงความเร็วในการไหล (Flux) ของคลอไรด์ไอออนเพื่อที่จะมาเป็นแนวทางในการออกแบบการดึงคลอไรด์ไอออนกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาพแวดล้อมจริงและเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองในครั้งนี้โดยผลการทดลองการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนด้วยไฟฟ้างแสดงในตารางที่ 15-17

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

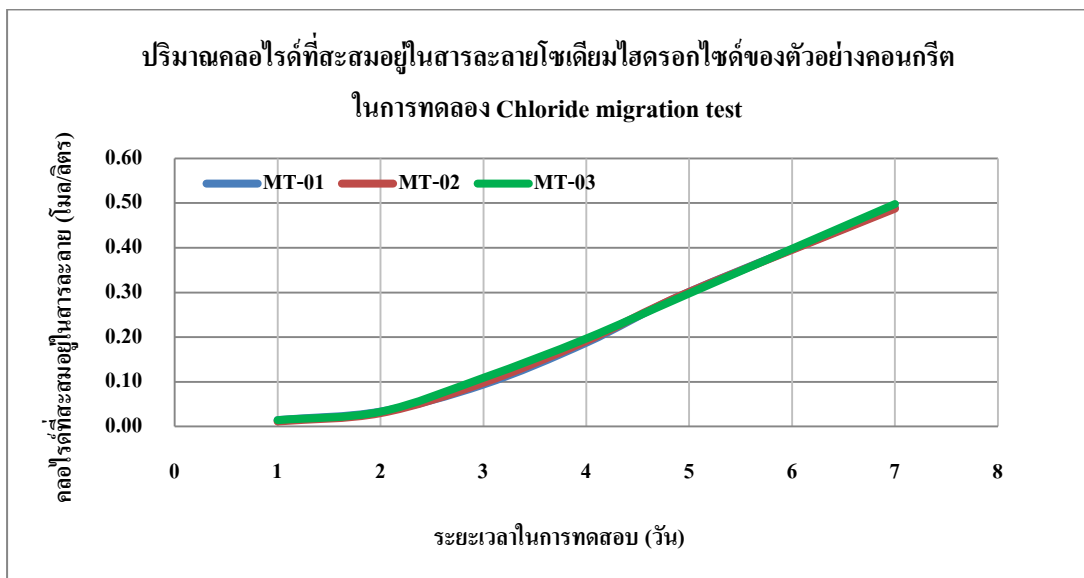
ระยะเวลา	ความต่างศักย์ไฟฟ้า	ปริมาณคลอไรด์ในสารละลาย	
day	Volts (V)	มิลลิกรัม/ลิตร	โมล/ลิตร
1	13.56	782	0.0134
2	13.56	1103	0.0189
3	12.36	3983	0.0681
4	12.26	5360	0.0916
5	12.23	6330	0.1082
7	12.21	11200	0.1915
Flux of chloride ion in steady state, $J_{Cl}$ :			0.149 (โมล/ลิตร)/ปี
Effective diffusion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

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

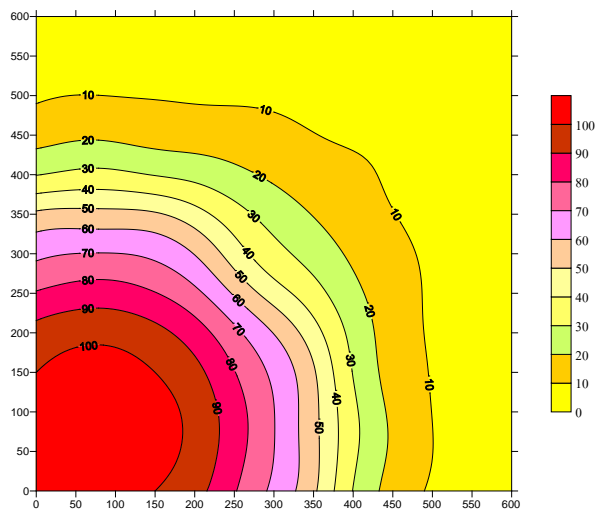
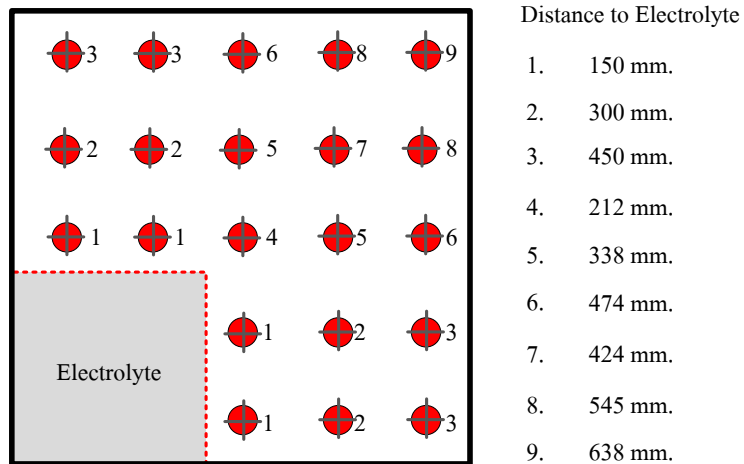
ระยะเวลา	ความต่างศักย์ไฟฟ้า	ปริมาณคลอไรด์ในสารละลาย	
day	Volts (V)	มิลลิกรัม/ลิตร	โมล/ลิตร
1	13.56	832	0.0142
2	13.56	1110	0.0190
3	12.36	4440	0.0759
4	12.26	5140	0.0879
5	12.23	5900	0.1009
7	12.21	11700	0.2000
Flux of chloride ion in steady state, $J_{Cl}$ :			0.152 (โมล/ลิตร)/ปี
Effective diffusion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



ภาพที่ 31 แสดงปริมาณคลอไรด์ที่สะสมอยู่ในสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)  
ของตัวอย่างคอนกรีตในการทดสอบ Chloride Migration Test

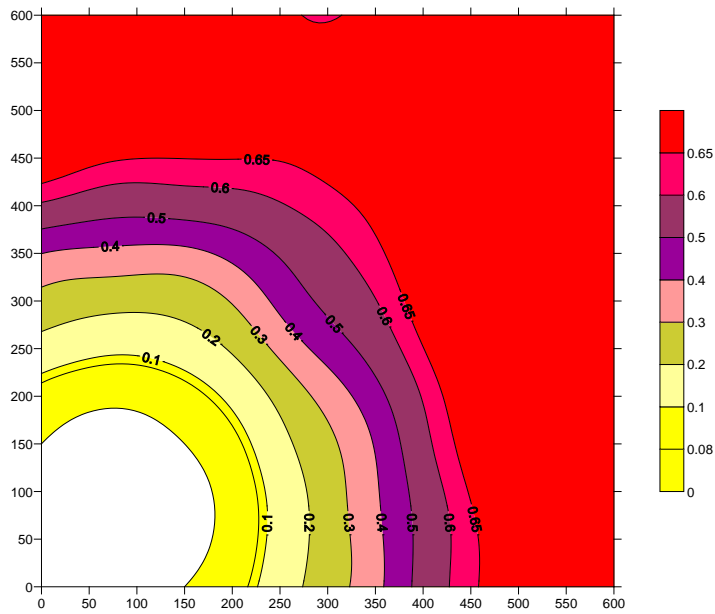
จากภาพที่ 31 แสดงปริมาณคลอไรด์ที่ผ่านคอนกรีตในการทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์อไอออนผ่านคอนกรีตโดยใช้กระแสไฟฟ้า Chloride Migration Test จะเห็นได้ว่าปริมาณคลอไรด์ที่ผ่านคอนกรีตในช่วงเริ่มต้นมีปริมาณน้อย เนื่องจากในช่วงเริ่มต้นคอนกรีตอ้อมตัวด้วยน้ำทำให้ช่องว่างในคอนกรีตไม่มีปริมาณคลอไรด์สะสมอยู่ความสามารถในการเดินทางของคลอไรด์ผ่านช่องว่างในคอนกรีตจึงใช้ระยะเวลาเพื่อที่จะเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างภายในคอนกรีตออกมาสู่สารละลายภายนอก และเมื่อมีปริมาณคลอไรด์อไอออนจนเต็มช่องว่างภายในคอนกรีตทำให้การเดินทางในการเดินทางของคลอไรด์เป็นไปได้ง่ายขึ้น แล้วจะสามารถผ่านคอนกรีตออกมาสะสมอยู่ในสารละลายอย่างรวดเร็ว จากนั้นทำการหาสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Diffusion Coefficient) ของคอนกรีตที่มีปฏิภาคส่วนผสมเดียวกับตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการทดลองการดึงคลอไรด์อไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีจะทำให้ทราบถึงความเร็วในการไหล (Flux) ของคลอไรด์อไอออนเพื่อที่จะนำมาเป็นข้อมูลในการทำนายระยะเวลาและประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์อไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีด้วยการอธิบายการเคลื่อนที่ของอไอออนตามสมมติฐานของ Nernst planck โดยจากการศึกษาของ A.M. Hassanein et, al ในปี 2002 ที่พบว่ากระแสไฟฟ้าในกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีเกิดการสูญเสีย 80 มิลลิโวลต์ต่อระยะทาง 40 มม. ในคอนกรีตจึงได้ทำการทำนายประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้อัตราการไหลของคลอไรด์อไอออน (Flux) และสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Diffusion Coefficient) ของคอนกรีตเพื่อที่จะเปรียบเทียบกับผลการทดลองการดึงคลอไรด์อไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าทางเคมีในห้องปฏิบัติการ

โดยการเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์หลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีระหว่างผลการทดลองการลดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีและการทำนายจากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ Chloride Migration Test ได้ระบุตำแหน่งให้ตรงกับ การเจาะผงคอนกรีตเพื่อหาปริมาณคลอไรด์ในผงคอนกรีต โดยได้กำหนดจุดที่ทำการเปรียบเทียบระหว่างการทำนายและผลการทดลองโดยตำแหน่งและระยะทาง โดยประสิทธิภาพของการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีจากการทำนายดังแสดงในภาพที่ 32

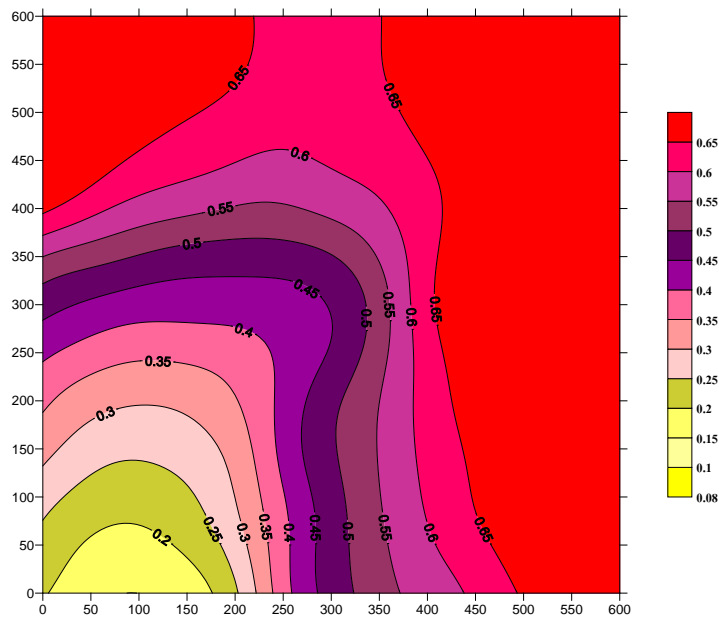


ภาพที่ 32 ประสิทธิภาพของการลดปริมาณคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีจากการทำนายโดยใช้ข้อมูลการทดสอบ Chloride Migration Test โดยแสดงเป็นร้อยละของคลอไรด์ที่สามารถดึงออกจากคอนกรีตได้โดยพิจารณาจากระยะทางที่ห่างจากสารละลาย

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



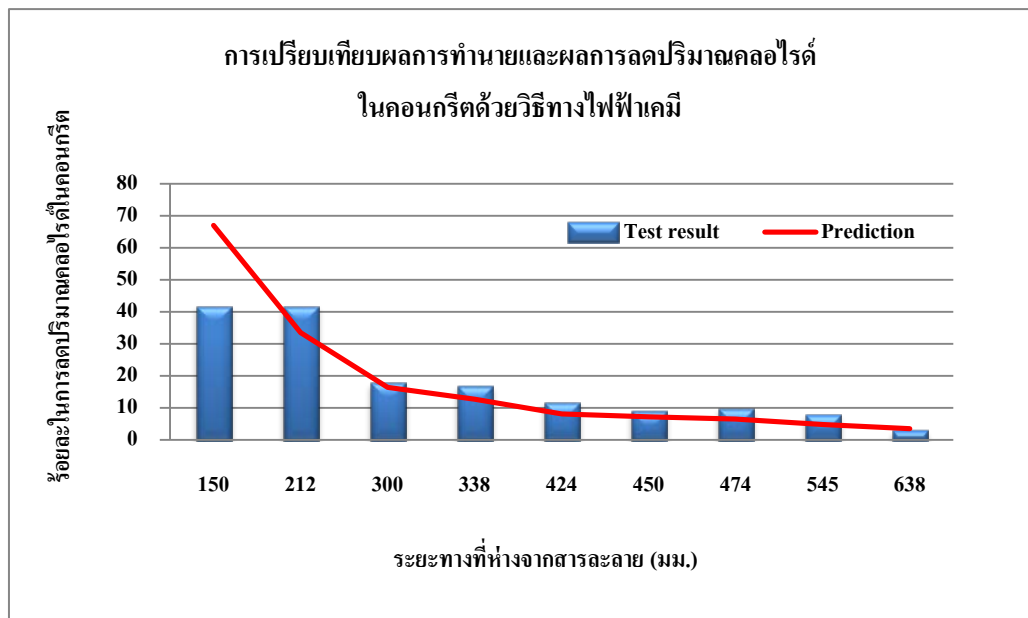
ภาพที่ 33 ปริมาณคลอไรด์หลังขบวนการทางไฟฟ้าเคมีที่ระยะเวลา 28 วัน ที่ระดับความลึก 3 ซม. จากการทำนาย



ภาพที่ 34 ปริมาณคลอไรด์หลังขบวนการทางไฟฟ้าเคมีที่ระยะเวลา 28 วัน ที่ระดับความลึก 3 ซม. จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ

จากภาพที่ 33-34 แสดงการเปรียบเทียบการทำนายการดิ่งคลอไรด์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้อัตราการไหล (Flux) และสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Diffusion Coefficient) ของคลอไรด์ อีออนจากการทดสอบ Chloride Migration Test และผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะเห็นได้ว่าการทดสอบดังกล่าวสามารถอธิบายการเคลื่อนที่ของคลอไรด์อีออนผ่านคอนกรีตได้ในส่วนของการใช้ไฟฟ้าในการขับเคลื่อนคลอไรด์ผ่านคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบแต่เนื่องจากผลการทดสอบการดิ่งคลอไรด์อีออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีนั้นตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน กล่าวคือวิธีการทดสอบ Chloride Migration Test นั้นได้ทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้คลอไรด์ที่อยู่ในสารละลายผ่านคอนกรีตไปอยู่ในสารละลายอีกด้านหนึ่ง

ส่วนทดสอบการลดปริมาณคลอไรด์อีออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีนั้นทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นตัวจ่ายกระแสไฟฟ้าทำการขับเคลื่อนคลอไรด์ที่อยู่ในคอนกรีตออกมาสู่สารละลายภายนอกทำให้ความแปรปรวนในส่วนของช่องว่างภายในคอนกรีตและองค์ประกอบต่างๆของคอนกรีตส่งผลให้ผลการทำนายประสิทธิภาพในการดิ่งคลอไรด์อีออนออกมาจากคอนกรีตมากกว่าการทดสอบการใช้ไฟฟ้าในการขับเคลื่อนคลอไรด์ผ่านคอนกรีตโดยผลการเปรียบเทียบการดิ่งคลอไรด์จากคอนกรีตตามระยะทางต่างๆดังแสดงในภาพที่ 35



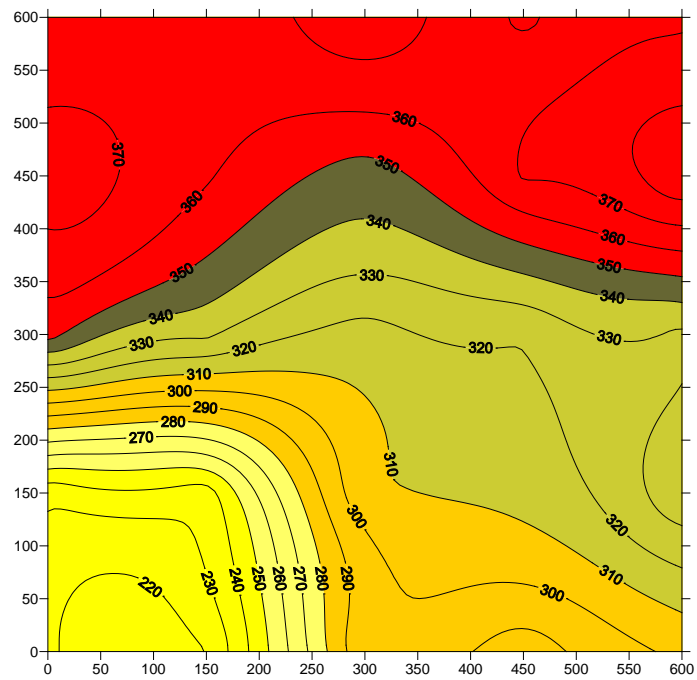
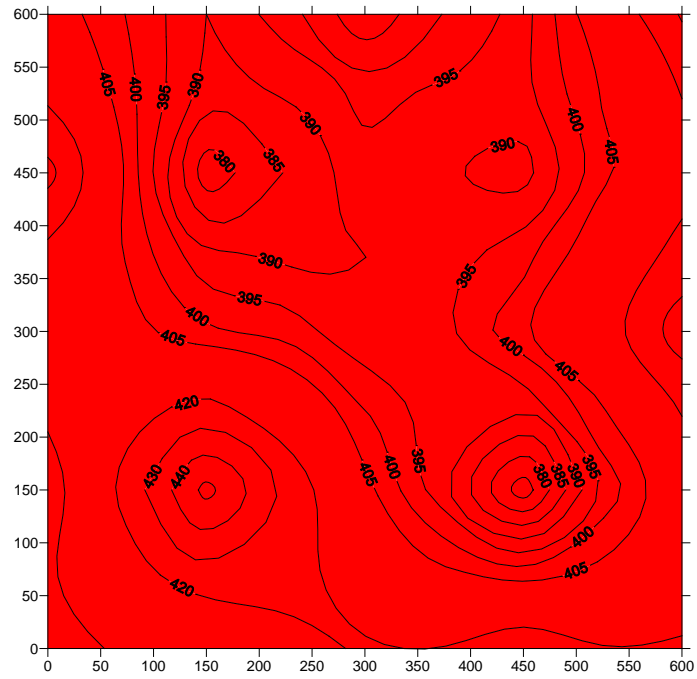
ภาพที่ 35 แสดงปริมาณคลอไรด์หลังขบวนการทางไฟฟ้าเคมีที่ระยะเวลา 28 วัน ที่ระดับความลึก 3 ซม. จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ

จากภาพที่ 35 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีจากการนำอัตราการไหลของคลอไรด์ในคอนกรีตและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคอนกรีตจากการทดสอบ Chloride Migration Test มาทำนายประสิทธิภาพในการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีพบว่าบริเวณที่ทำการติดตั้งสารละลายการทำนายประสิทธิภาพสูงกว่าการทดลองในห้องปฏิบัติการและลดลงตามระยะทางที่ห่างออกจากสารละลายสอดคล้องกับการทดลองในห้องปฏิบัติการเนื่องจากระยะทางในการทำนายประสิทธิภาพการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตใช้สมการของ Nernst planck ซึ่งใช้ความยาวของระยะทางสู่สารละลายเป็นตัวกำหนดความเร็วในการทำนายในครั้งนี้ซึ่งที่ตำแหน่งที่ติดตั้งสารละลายมีระยะทางที่ใช้ในการทำนายเพียง 30 มม. จึงทำให้ค่าที่ได้มากกว่าการทดลองในห้องปฏิบัติการ

#### **ผลการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคอนกรีตเสริมเหล็กในการทดลอง**

การวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคอนกรีตเสริมเหล็กในการทดลองการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตเป็นการบอกแนวโน้มการลดลงของอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมหลังการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้ระยะห่างของตำแหน่งในการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เท่ากับ 15 ซม. ซึ่งเท่ากับระยะห่างของเหล็กเสริมคอนกรีตเพื่อนำมาพล็อตเส้นระดับชั้นความต่างศักย์ครึ่งเซลล์เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพของการลดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในส่วนของความเสี่ยงของการเป็นสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตเนื่องจากปริมาณคลอไรด์

โดยผลการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของการทดสอบในครั้งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยในต่างประเทศซึ่งสามารถลดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ภายหลังการลดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีเนื่องจากมีโอกาสเป็นไปได้ที่ความเป็นด่างของคอนกรีตสูงขึ้นจากขบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดย J.C. Orellan et. al (2003) ซึ่งพบว่าไอดรอกซิลไอออนที่เกิดขึ้นจากขบวนการทางไฟฟ้าเคมีในการดึงคลอไรด์ไอออนทำให้คอนกรีตมีสภาพความเป็นด่างมากขึ้นมีโอกาสที่จะสร้างฟิล์มหุ้มเหล็กเสริม (Re-Passivation) ขึ้นภายในคอนกรีตส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์หลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีมีโอกาสที่จะลดลง โดยค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีของการทดลองในครั้งนี้ดังแสดงในภาพที่ 46



ภาพที่ 46 การเปรียบเทียบผลของการวัดการสั่นด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ก่อนและหลังการ  
ดึงคลอไรด์จากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

ภาพที่ 46 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ก่อนและหลังการดึงคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยสามารถอธิบายได้ว่าวิธีการดึงคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีสามารถชะลอการเป็นสนิมของเหล็กเสริมลงอย่างชัดเจน จะเห็นได้ว่าบริเวณที่ทำการขังสารละลายค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีลดลงอย่างมาก โดยสามารถลดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์จาก  $-430 \text{ mV}$ . เหลือเพียง  $-220 \text{ mV}$ . กล่าวคือลดจากเกณฑ์ความเป็นไปได้ที่จะเกิดสนิมร้อยละ 90 เหลืออยู่ในเกณฑ์ไม่แน่นอนที่จะเป็นสนิม สอดคล้องกับปริมาณคลอไรด์ที่สามารถดึงออกจากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในห้องปฏิบัติการและการทำนายและสอดคล้องกับผลการวิจัยในต่างประเทศ

## บทที่ 4 สรุปผลการวิจัย

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

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กัญญา ตระกูล. 2534. เทคโนโลยีการกัดกร่อน. พิมพ์ครั้งที่ 2. ห้างหุ้นส่วนจำกัด เอ็กซ์เพรส มีเดีย กรุงเทพฯ

คณะกรรมการคอนกรีตและวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาสาขาวิศวกรรมโยธา  
วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. 2543. ความคงทนของคอนกรีต.  
พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัทจุดทอง จำกัด, กรุงเทพฯ

ชัยยุทธ ช่างสาร และ เลิศณรงค์ ศรีพนม. 2543. เคมีประยุกต์. บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด, กรุงเทพฯ

นันทชัย สกานพงษ์ และ ศิวกรณ์ ก้องเอกภพ. 2550. การศึกษาเชิงปฏิบัติการของการลดปริมาณ  
คลอไรด์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี. โครงการงานวิศวกรรมโยธา. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

มาตรฐาน ว.ส.ท. 1007-34 . มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน.  
วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. 2536. พิมพ์ครั้งที่ 2

มาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38. มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง.  
วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. 2538. พิมพ์ครั้งที่ 1

วันชัย ยอดสุดใจ. 2548. การลดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี. โยธาสาร: 49-51

สุรพงษ์ สุวจิตตานนท์. ไฟฟ้าเคมี. 2531. โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ

A. Bentur, 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

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

- A.M. Hassanein, G.K. Glass, 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
- B. Elsener. 2001. Half-cell Potential Mapping to Assess Repair Work on RC Structure. **Construction and Building Materials**. Elsevier Ltd. Vol. 15: 133-139
- B. Elsener and U.Angst. 2007. Mechanism of Electrochemical Chloride Removal. **Corrosion Science**. Elsevier Ltd. Corrosion Science 49: 4504-4522
- CPAC. 2008. CPAC Marine Concrete. Available Source:  
<http://www.cpac.co.th/techno/marine/marine.html>, 2008
- C. Arya, Q. Sa'id-Shawqi and P.R.W. Vassie. 1996. Factors Influencing Electrochemical removal of Chloride Removal of Chloride from Concrete. **Cement and Concrete Research**. Elsevier Ltd. Cement and Concrete Research 26 No. 6: 851-860
- Gerodo G. Clemena and Donald R. Jackson, 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
- G. Fajardo, 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
- J.C. Orellan, 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

- J.M. Miranda, 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
- N.M. Ihekwha, 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
- O. Mejlhede Jensena, P. Freiesleben Hansenb, A.M. Coatsc, F.P. Glasserc. 1999. Chloride Ingress in Cement Paste and Mortar. **Cement and Concrete Research**. Pergamon. Cement and Concrete Research 29: 1497-1504
- P.F. Megrath 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
- Rob B. Polder. 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. Sharp, Gerry G. Clemeña, Y. Paul Virmani, Glenn E. Stoner, Robert G. Kelly. 2002. Electrochemical Chloride Extraction: Influence of Concrete Surface on Treatment. **Virginia Transportation Research Council**. U.S. Department of Transportation. FHWA-RD-02-107
- S. Mindess, J.F. Young and D. Darwin. 2003. **Concrete**. Prentice Hall, Inc., New Jersey

W. Prince 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

### ภาคผนวก ก

การประยุกต์ใช้วิธีการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในต่างประเทศ

## การลดปริมาณคลอไรด์ไฟฟ้าด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในคอนกรีตเสริมเหล็ก

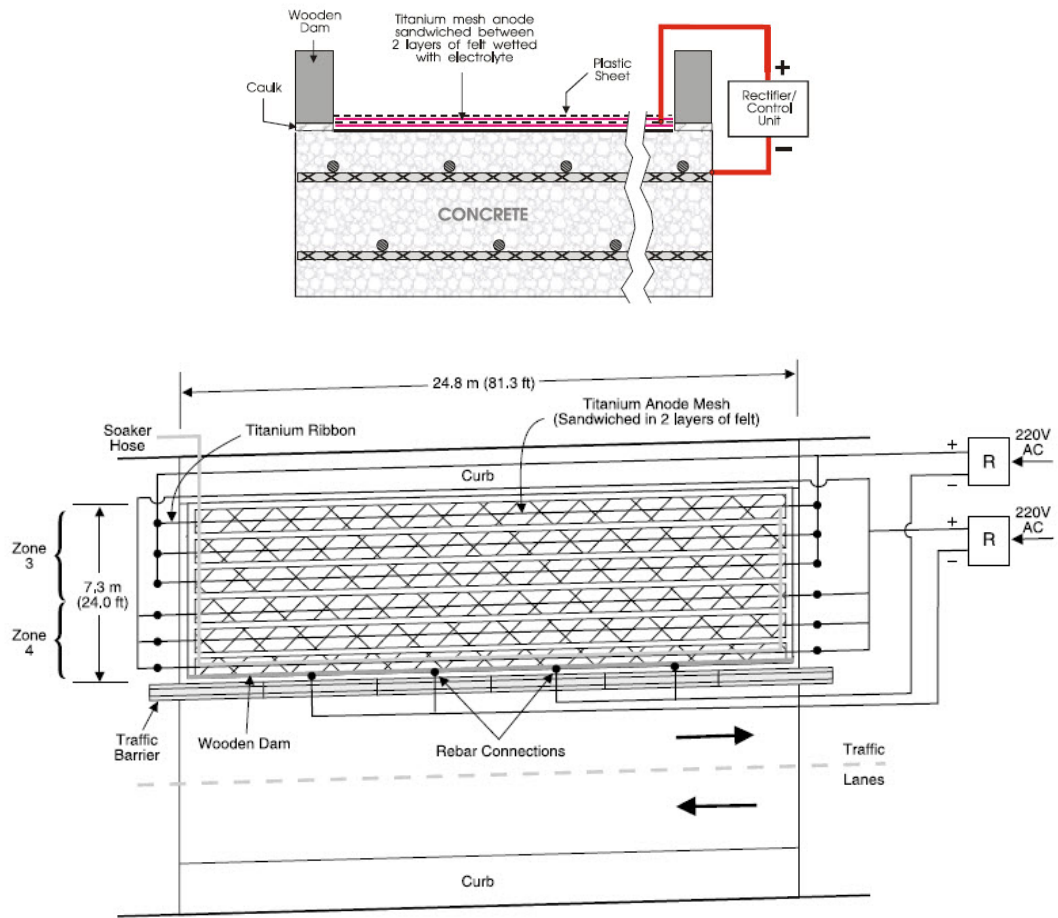
การนำวิธีทางไฟฟ้าเคมีเพื่อลดปริมาณโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในโครงสร้างที่เปิดการใช้งานและมีคลอไรด์ปนเปื้อนอยู่ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและมีแนวโน้มที่จะเกิดความเสียหายจากปัญหาของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดย Virginia Transportation Research Council ได้นำวิธีทางไฟฟ้าเคมีเพื่อลดปริมาณคลอไรด์ที่ปนเปื้อนอยู่ในคอนกรีตของโครงสร้างพื้นฐานของประเทศอเมริกาเช่น โครงสร้างสะพาน I-365 (34<sup>th</sup> 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) เป็นโครงสร้างที่มีคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นส่วนประกอบของโครงสร้างที่จะใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีในการลดปริมาณคลอไรด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในครั้งนี้



ภาพที่ ก1 แสดงลักษณะทางกายภาพของสะพาน I-365 (34<sup>th</sup> Street Bridge Over I-365)

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

ภาพที่ ก-1 แสดงลักษณะทางการภาพของโครงสร้างสะพาน I-365 เพื่อนำมาวางแผนในการใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีเพื่อเป็นวางแผนในการเลือกชนิดของการติดตั้งอุปกรณ์และวิธีในการติดตั้งเพื่อให้เหมาะสมกับโครงสร้างแต่ละประเภทโดยโครงสร้างที่จะใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตคือ โครงสร้างพื้นและ โครงสร้างตอม่อสะพานโดยวิธีในการติดตั้งอุปกรณ์ในการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตของโครงสร้างทั้ง 2 ลักษณะดังกล่าวดังแสดงในภาพที่ ก2 ถึง ก6



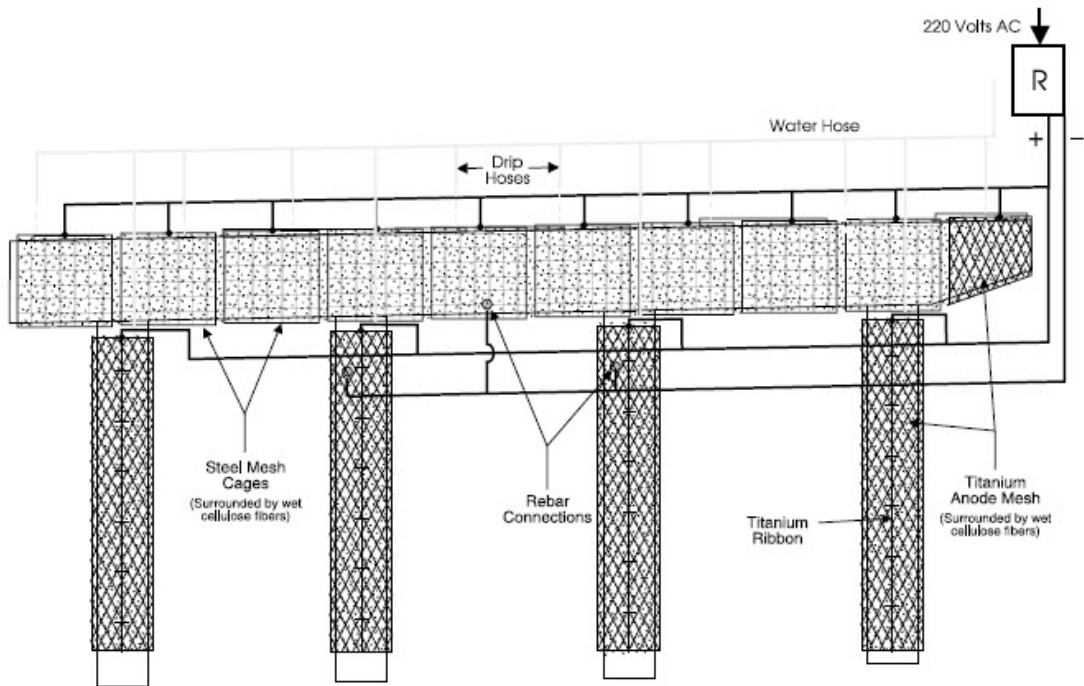
ภาพที่ ก2 แสดงการต่อวงจรไฟฟ้าและแผนภูมิของการติดตั้งอุปกรณ์ในการลดปริมาณคลอไรด์ใน  
โครงสร้างพื้นสะพาน I-365

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



ภาพที่ ก3 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ในการติดตั้งอุปกรณ์ในการลดปริมาณคลอไรด์ใน โครงสร้าง  
พื้นสะพาน I-365

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



ภาพที่ ก4 แสดงแผนภูมิของการติดตั้งอุปกรณ์ในการลดปริมาณคลอไรด์ใน โครงสร้างต่อม่อ  
สะพาน I-365

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



ภาพที่ ก5 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ในการติดตั้งอุปกรณ์ในการลดปริมาณคลอไรด์ใน โครงสร้าง  
ต่อม่อสะพาน I-365

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



ภาพที่ ก6 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ในการติดตั้งอุปกรณ์ในการลดปริมาณคลอไรด์ใน โครงสร้าง  
ตอม่อสะพาน I-365

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

จากภาพที่ ก3-ก6 แสดงแผนภูมิการติดตั้งอุปกรณ์ในการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีของสะพาน I-365 โดยในส่วนของพื้นสะพานใช้วิธีการปูแผ่นผ้าสังเคราะห์ เป็นตัวนำไฟฟ้าและใช้ตะแกรงลวดไทเทเนียมเป็นสื่อในการนำกระแสไฟฟ้าขั้วบวกเพื่อทำการดึง คลอไรด์ที่อยู่ในคอนกรีตส่วน โครงสร้างตอม่อสะพานใช้เซลลูโลส (Cellulose) เป็นตัวนำไฟฟ้า และใช้ตะแกรงลวดไทเทเนียมและตะแกรงเหล็กเป็นสื่อในการนำกระแสไฟฟ้าขั้วบวกโดยทำการ จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 40 โวลต์เข้าสู่กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีเพื่อลดปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ใน คอนกรีตโดยใช้ระยะเวลาในการลดปริมาณคลอไรด์จากคอนกรีตเป็นเวลา 8 อาทิตย์

หลังจากทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อทำการลดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีพบว่า ปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างสะพาน I-365 พบว่าสามารถลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตลง ประมาณร้อยละ 80 สำหรับโครงสร้างพื้นสะพานและประมาณร้อยละ 40 สำหรับโครงสร้างตอม่อ สะพานโดยรายละเอียดของปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังกระบวนการลดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธี ทางไฟฟ้าเคมีของสะพาน I-365 ได้แสดงไว้ในตารางที่ ก1 – ก2

ตารางที่ ก1 Mean Chloride Concentration at Various in Deck Areas Before and After Treatment (kg./m.<sup>3</sup>)

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 G. Clemena and Donald R. Jackson, 2000

ตารางที่ ก2 Mean Chloride Concentration at Various in Pears Before and After Treatment (kg./m.<sup>3</sup>)

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 G. Clemena and Donald R. Jackson, 2000

**ภาคผนวก ข**

แนวทางการพัฒนาการลดปริมาณคลอรีนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

### แนวทางการพัฒนาการดึงคลอไรด์ออกจากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

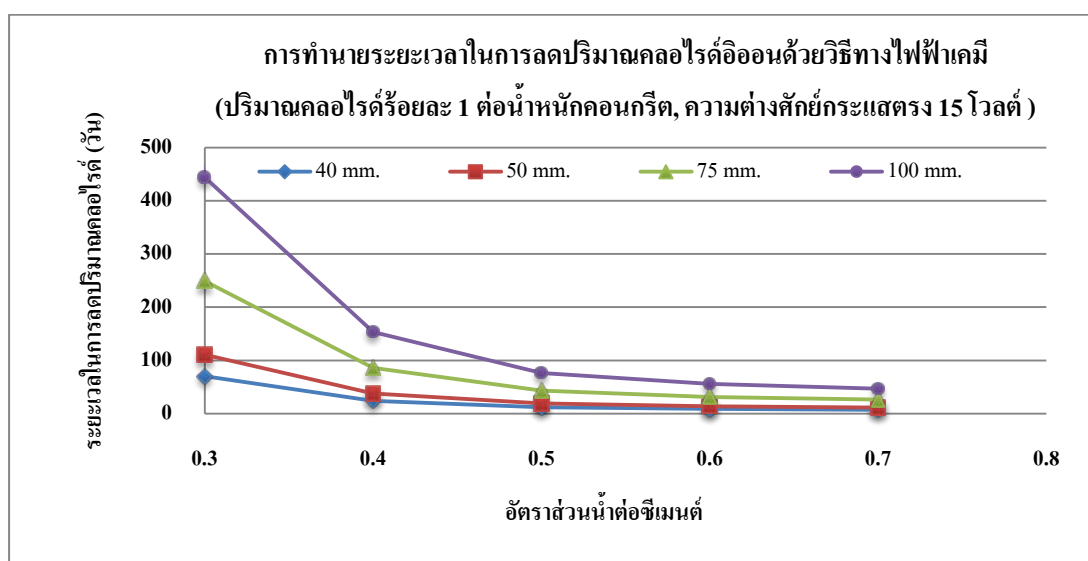
จากรายงานงานผลการศึกษาของ O. Mejlhede Jensen (1999) เกี่ยวกับสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C Ratio) แตกต่างกัน พบว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำจะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่ต่ำไปด้วย และวิธีการดึงคลอไรด์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีนั้นสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคอนกรีตมีผลโดยตรงต่อระยะเวลาในการดึงคลอไรด์ออกจากคอนกรีตจึงได้นำผลการศึกษาดังกล่าวมาใช้เป็นแนวทางในการทำนายระยะเวลาในการดึงคลอไรด์จากคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่แตกต่างกัน และยังกำหนดค่าให้ระยะหุ้มเหล็กเสริมที่แตกต่างกันซึ่งระยะหุ้มเหล็กเสริมนั้นก็คือระยะทางในการเดินทางของคลอไรด์มาสู่สารละลายจากสมการของ Nernst planck จึงได้ทำนายระยะเวลาในการดึงคลอไรด์จากคอนกรีตโดยใช้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคอนกรีตงานวิจัยของ O. Mejlhede Jensen โดยสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่แตกต่างกันดังได้แสดงในไวยาตารางที่ ข1

ตารางที่ ข1 สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างๆ

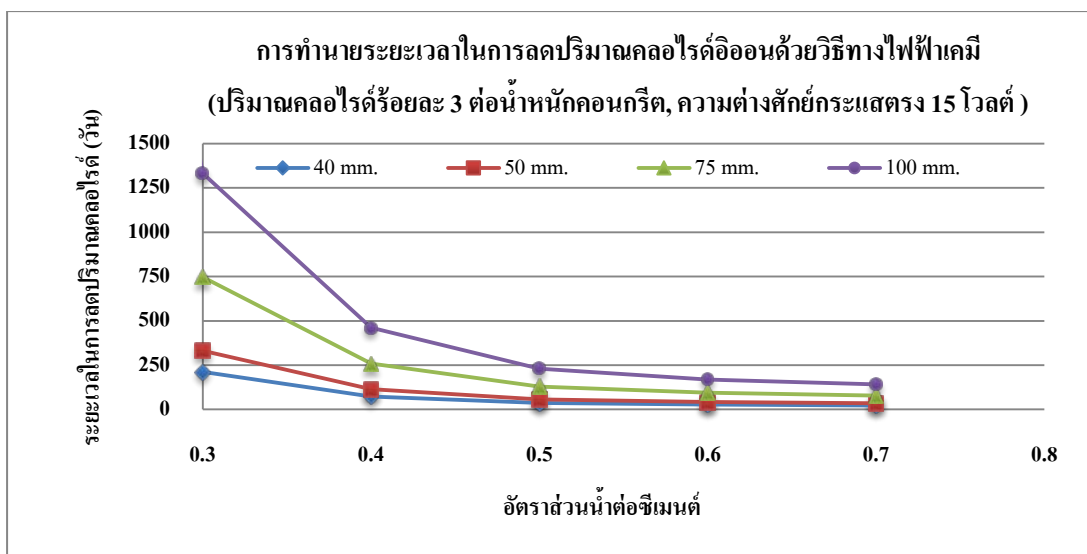
อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c ratio)	สัมประสิทธิ์การแพร่ Diffusion Coefficient ( $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ )
0.2	0.8
0.3	3.8
0.4	11
0.5	22
0.6	30
0.7	36

ที่มา: ผล O. Mejlhede Jensen, 1999

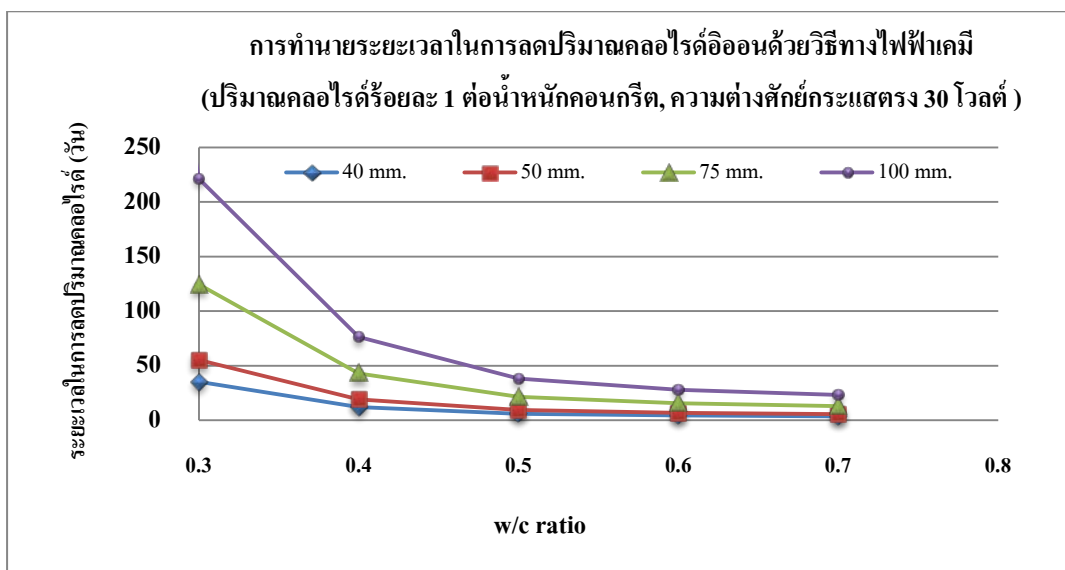
จากการทดลองทำนายระยะเวลาในการตั้งคลอไรด์อออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าขนาด 15 และ 30 โวลต์ กับคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างๆ โดยมีระยะหุ้มเหล็กเสริมเท่ากับ 40, 50, 75, และ 100 มม. ตามลำดับและกำหนดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตเท่ากับร้อยละ 1 และร้อยละ 3 โดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าขนาด 15 โวลต์ และร้อยละ 1 โดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าขนาด 30 โวลต์เพื่อให้เห็นถึงผลกระทบต่างๆในการตั้งคลอไรด์อออนจากคอนกรีต โดยมีผลการทำนายดังแสดงในภาพที่ ข1-ข3



ภาพที่ ข1 แสดงระยะเวลาในการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 โวลต์และปริมาณคลอไรด์ร้อยละ 1 ต่อน้ำหนักคอนกรีต



ภาพที่ ข2 แสดงระยะเวลาในการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 โวลต์และปริมาณคลอไรด์ร้อยละ 3 ต่อนํ้าหนักคอนกรีต



ภาพที่ ข3 แสดงระยะเวลาในการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 โวลต์และปริมาณคลอไรด์ร้อยละ 1 ต่อนํ้าหนักคอนกรีต

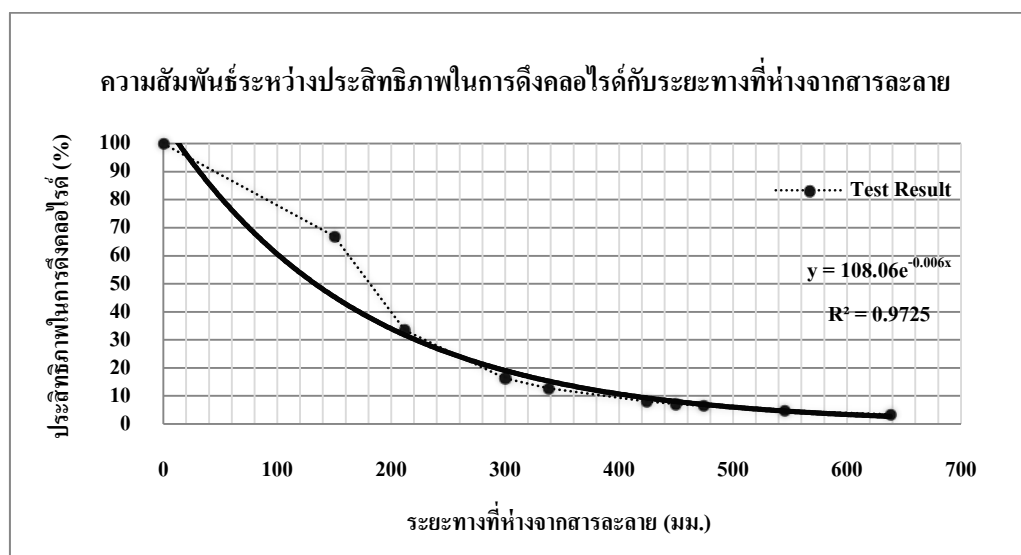
ภาพที่ ข1-ข3 แสดงระยะเวลาในการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีตามระยะความลึกที่ห่างออกจากสารละลายของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ระหว่าง 0.3-0.7 พบว่าความสามารถในการดึงคลอไรด์ไอออนแปรผกผันตามระยะทางที่ห่างออกจากสารละลายและผลกระทบของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างกันทำให้มีสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ต่างกัน โดยจากงานวิจัยของ O. Mejlhede Jensen ในปี 1999 พบว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงจะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านสูงตามไปด้วย และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านนั้นส่งผลโดยตรงกับการดึงคลอไรด์ไอออนออกจากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี โดยจากการทำนายระยะเวลาในการดึงคอนกรีตดังแสดงในภาพที่ ข1-ข3 พบว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงจะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านสูงส่งผลให้ระยะเวลาในการดึงคลอไรด์ไอออนออกมาได้มากกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำเนื่องจากสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่ต่ำกว่า โดยระยะหุ้มเหล็กเสริมและปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตยังส่งผลต่อระยะเวลาในการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตอีกด้วยดังแสดงการเปรียบเทียบในภาพที่ ข1-ข2 แต่ขนาดของกระแสไฟฟ้ายังเป็นสาเหตุหลักในการลดปริมาณคลอไรด์ไอออนจากคอนกรีตโดยเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าจาก 15 เป็น 30 โวลต์ดังแสดงในภาพที่ ข1 และภาพที่ ข3 พบว่าลดระยะเวลาในการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของความต่างศักย์ไฟฟ้าจาก 15 โวลต์

#### ภาคผนวก ค

แนวทางการออกแบบการดึงคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีในภาคสนาม

### แนวทางการออกแบบการดึงคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีในภาคสนาม

การลดปริมาณคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในโครงสร้างในภาคสนามนั้นควรทำให้วิธีการในการติดอุปกรณ์ให้สามารถทำได้ง่ายและใช้ระยะเวลาในการทำได้น้อยที่สุดโดยอาจจะประเมินปริมาณคลอไรด์ที่มีอยู่เบื้องต้นและจัดทำเส้นชั้นระดับของปริมาณคลอไรด์ที่มีอยู่ในคอนกรีตเพื่อที่จะเลือกพื้นที่ในการติดตั้งสารละลายในการดึงคลอไรด์ไอออนจากคอนกรีตเพื่อที่จะให้เกิดประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ไอออนจากคอนกรีตและงบประมาณที่ใช้ในการซ่อมแซมโครงสร้างเกิดประสิทธิภาพสูงสุด งานวิจัยในครั้งนี้จึงนำเสนอแนวทางในการออกแบบการดึงคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในงานภาคสนามโดยได้นำผลการทดลองในห้องปฏิบัติการมาเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบวิธีดังกล่าวซึ่งการทดลองในห้องปฏิบัติการพบว่าประสิทธิภาพของการดึงคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในบริเวณที่ทำการติดตั้งสารละลายมีแนวโน้มที่จะสามารถดึงคลอไรด์จากคอนกรีตจนหมดในบริเวณที่ทำการติดตั้งสารละลายและลดลงตามระยะทางที่ห่างออกจากคอนกรีตโดยได้นำผลการทดลองในส่วนของประสิทธิภาพของการดึงคลอไรด์ในระยะทางที่ห่างออกจากสารละลายและนำมาพล็อตเส้นแนวโน้มเพื่อหาสมการที่จะลดทอดประสิทธิภาพของการดึงคลอไรด์ในคอนกรีตบริเวณที่ไม่ได้สัมผัสสารละลายโดยตรงดังแสดงในภาพที่ ก1



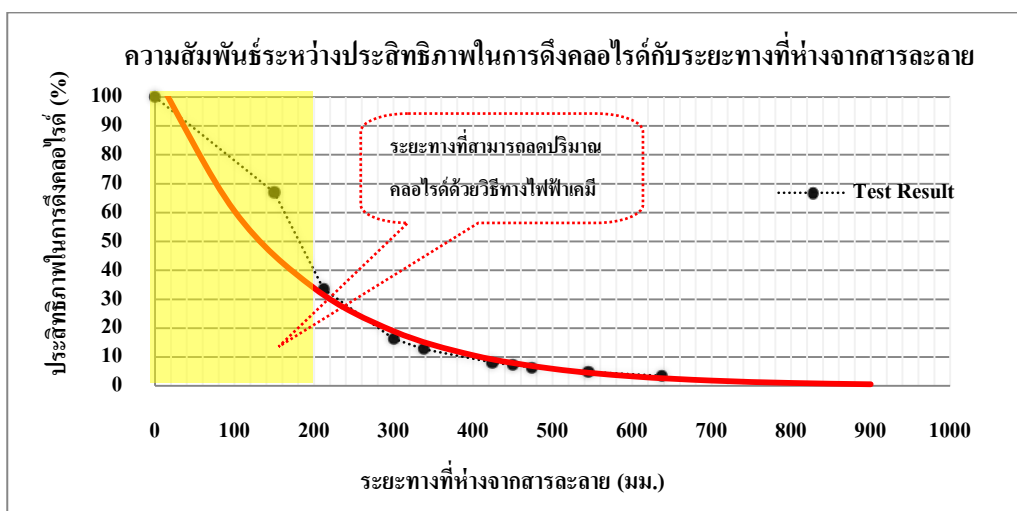
ภาพที่ ก1 เส้นแนวโน้มของการลดลงของประสิทธิภาพในการลดทอดของประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์จากคอนกรีตในบริเวณที่ไม่ได้สัมผัสกับสารละลายโดยตรง

ภาพที่ ค1 แสดงการลดลงของประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตเนื่องจากระยะทางในการเดินทางของคลอไรด์สู่สารละลาย โดยพบว่าเส้นแนวโน้มในการลดลงเป็นการลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential) โดยความสัมพันธ์ของการลดลงของประสิทธิภาพดังกล่าวแสดงในสมการที่ ค1

$$P_{\text{Decrease}} = 108.06e^{-0.006x} \quad (\%) \quad (\text{ค1})$$

เมื่อ  $P_{\text{Decrease}}$  = ร้อยละของประสิทธิภาพที่ลดลงเนื่องจากระยะทางที่ห่างจากสารละลาย (%)  
 $x$  = ระยะทางที่ห่างออกจากสารละลาย (มม.)

โดยเบื้องต้นพบว่าประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ไอออนจากคอนกรีตจากบริเวณที่ไม่ได้สัมผัสกับสารละลายพบว่ามีระยะประสิทธิภาพเท่ากับ 200 มม. จากบริเวณที่ทำการติดตั้งสารละลายดังแสดงในภาพที่ ค2 แต่อย่างไรก็ตามสมการ ค1 เป็นสมการที่ได้จากการทดลองภายใต้เงื่อนไขในการทดลองครั้งนี้แต่เมื่อมีการเปลี่ยนตัวแปรในการทดลองเช่นขนาดของกระแสไฟฟ้า สารละลายอิเล็กโทรไลต์ หรือระยะเวลาในการทดลองอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นแต่อย่างไรก็ตามการลดลงของประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีจากระยะทางที่ห่างจากสารละลายมีแนวโน้มที่จะลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential)



ภาพที่ ค2 ระยะทางที่มีประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ไอออนจากคอนกรีตตามระยะทางที่ห่างจากสารละลาย

จากการนำสมการ ค1 มาหาประสิทธิภาพของการดึงคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีพบว่า มีระยะทางที่มีประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์เท่ากับ 200 มม. จากสารละลาย กล่าวคือสามารถลดลงได้ร้อยละ 40 ที่ระยะ 200 มม. และสามารถลดลงได้ร้อยละ 100 ในบริเวณที่ทำการติดตั้งสารละลายโดยประสิทธิภาพที่ลดลงตามระยะทางดังกล่าวดังแสดงในตารางที่ ค1

**ตารางที่ ค1** การลดลงของประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตที่ลดลงจากระยะทางที่ห่างจากสารละลาย

ระยะทางที่ห่างจากสารละลาย (มม.)	ร้อยละของประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ ตามระยะทางที่ห่างจากสารละลาย
0	108.06
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

จากข้อมูลดังในตารางที่ ๑ สามารถนำมาเป็นแนวทางในการวางแผนการดึงคลอไรด์ อีออนจากคอนกรีต โดยที่ไม่ต้องทำการติดตั้งสารละลายทั่วบริเวณที่ต้องการดึงคลอไรด์อีออน และเมื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาออกแบบการดึงคลอไรด์อีออนจากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีจะทำให้ทราบถึงระยะห่างที่จะทำการติดตั้งสารละลายในการดึงคลอไรด์อีออนจากคอนกรีตโดยตัวอย่าง ในการออกแบบระยะห่างในการติดตั้งสารละลายควรทำการตรวจสอบปริมาณคลอไรด์ของ โครงสร้างที่จะทำการซ่อมแซมเพื่อที่จะทราบถึงตำแหน่งที่ติดตั้งสารละลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ที่สุดตามที่กล่าวมาข้างต้น

### แนวทางการออกแบบการดึงคลอไรด์อีออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

ชนิดของโครงสร้าง : พื้นคอนกรีตเสริมเหล็กท่าเรือเอกชนขนาด 10 ม. x 10 ม.  
(สมมุติขึ้นเพื่อการวิจัย)การวางแผนในการซ่อมแซมโครงสร้าง

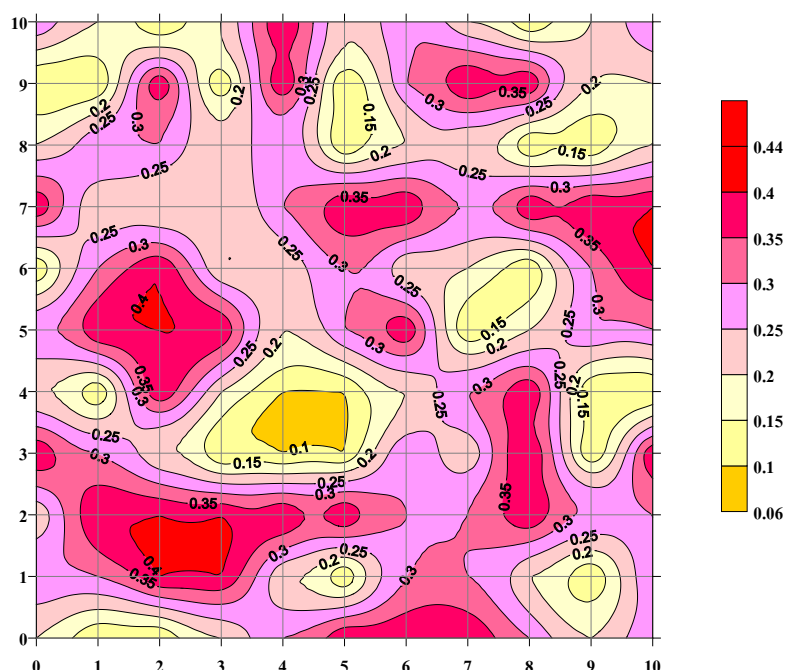
ระยะเวลาในการซ่อมแซม : 28 วัน



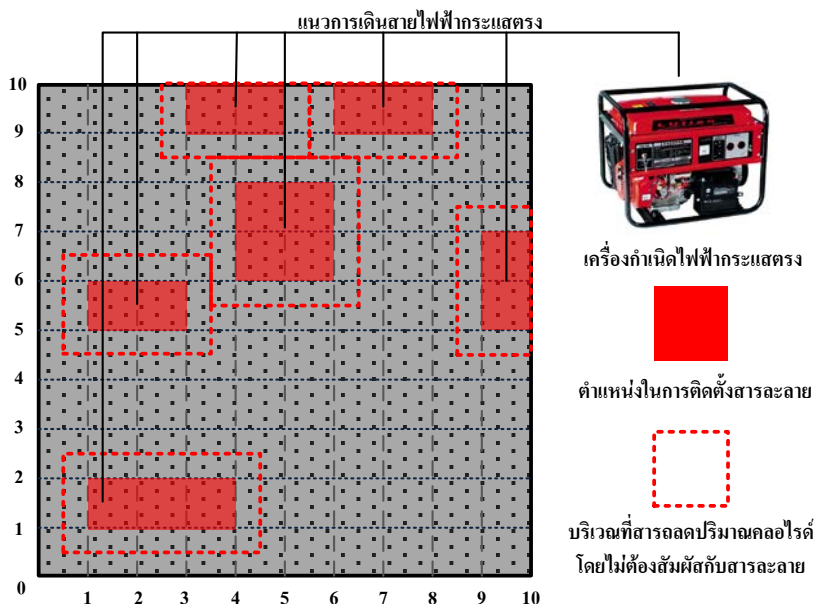
ภาพที่ ๓๓ ตัวอย่างของโครงสร้างที่จะทำการวางแผนการซ่อมแซมโครงสร้างด้วยการดึงคลอไรด์ อีออนจากคอนกรีต

โดยทั่วไปจะต้องทำการประเมินความเสียหายทางการภาพเบื้องต้นเพื่อหาสาเหตุ ประกอบในการที่จะประเมินความเสียหายของโครงสร้างนั้นๆเมื่อทำการสำรวจเบื้องต้นแล้วก่อน

การวางแผนการซ่อมแซมโครงสร้างด้วยการดึงคลอไรด์ไอออนจากคอนกรีตควรที่จะทำการสำรวจหาปริมาณคลอไรด์ที่ปนเปื้อนอยู่ในคอนกรีตเพื่อที่จะทราบถึงปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตและทำการพล็อตเส้นระดับชั้นของปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ในพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กดังแสดงในภาพที่ ค4 เพื่อที่จะหาตำแหน่งที่จะติดตั้งสารละลายเพื่อดึงคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี และทำจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงเข้ากับสื่อนำไฟฟ้าที่ใช้เช่นแอสตนเลส หรือโลหะนำไฟฟ้าชนิดอื่นที่นำไฟฟ้าและทนต่อการกัดกร่อนในการถูกร่งด้วยกระแสไฟฟ้าโดยเลือกบริเวณติดตั้งสารละลายจากบริเวณที่คลอไรด์มีความเข้มข้นสูงดังภาพที่ ค5

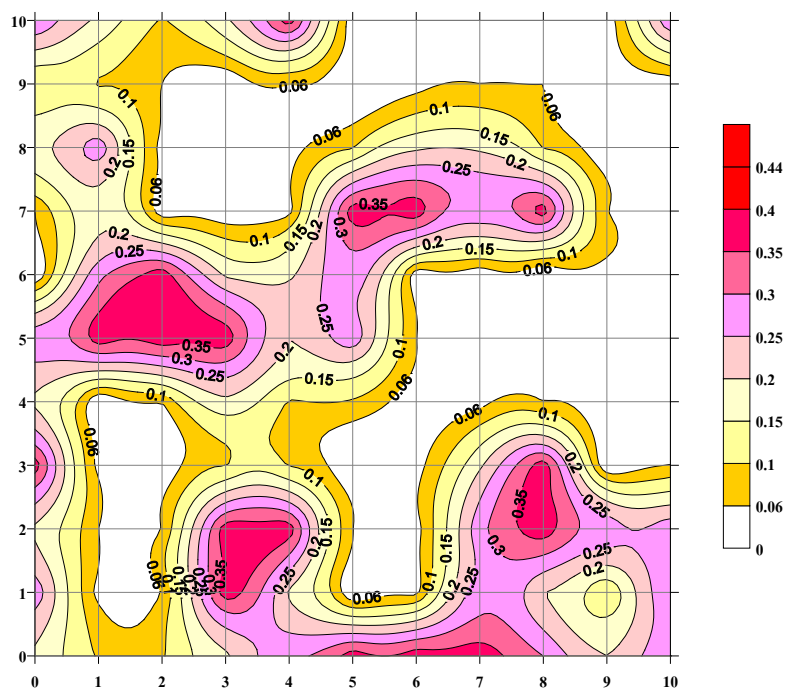


ภาพที่ ค4 เส้นชั้นระดับปริมาณคลอไรด์โดยเฉลี่ยที่ระดับเหล็กเสริมคอนกรีตก่อนการดึงคลอไรด์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี



ภาพที่ ค5 แนวทางการติดตั้งสารละลายโดยพิจารณาจากบริเวณที่คลอไรด์มีความเข้มข้นสูง

ภาพที่ ค5 แสดงแนวทางในการเลือกบริเวณที่จะทำการติดตั้งสารละลายโดยพิจารณาจากบริเวณที่คลอไรด์มีความเข้มข้นสูง เนื่องจากมีโอกาสที่จะเป็นสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตสูง โดยทำการจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงขั้วบวกเข้าที่โลหะที่จมอยู่ในสารละลายและทำการสกัดคอนกรีตในบริเวณที่จะทำการติดตั้งสารละลายให้ถึงตำแหน่งของเหล็กเสริม เพื่อทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าขั้วลบเข้าที่เหล็กเสริมคอนกรีต โดยใช้เวลาในการจ่ายกระแสไฟฟ้าเป็นเวลา 28 วัน โดยแนวโน้มการลดลงของปริมาณคลอไรด์อ่อนในคอนกรีตจากการแนวทางการติดตั้งสารละลายในภาพที่ ค5 โดยแสดงแนวโน้มของปริมาณคลอไรด์หลังจากทำการดึงคลอไรด์อ่อนในคอนกรีตในภาพที่ ค6



ภาพที่ ค6 แนวโน้มของเส้นชั้นระดับปริมาณคลอไรด์โดยเฉลี่ยที่ระดับเหล็กเสริมคอนกรีตหลังการดึงคลอไรด์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

ภาพที่ ค6 แสดงแนวโน้มการลดลงของปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีหลังจากทำการจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงเข้าสู่ระบบโดยใช้สมการและเงื่อนไขจากผลการทดลองในห้องปฏิบัติการในการทำการคำนวณแนวโน้มในการลดลงของคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตพบว่าที่ระยะเวลา 28 วันสามารถลดปริมาณคลอไรด์ในพื้นที่คอนกรีตเสริมเหล็กให้ต่ำกว่าระดับคลอไรด์วิกฤติ (0.4-0.5% ต่อน้ำหนักซีเมนต์) โดยสามารถลดต่ำกว่าระดับดังกล่าวทั่วทั้งหมุดของพื้นคอนกรีตที่ทำการซ่อมแซม แต่เนื่องจากในการทำงานในภาคสนามจริงยังมีตัวแปรที่มีผลกระทบต่อกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีอีกมากเช่น ความต่อเนื่องของเหล็กเสริมคอนกรีต ระยะห่างของเหล็กเสริม หรือความต่อเนื่องของโครงสร้างเนื่องจากเช่นการแบ่งรอยต่อของการเทคอนกรีตซึ่งจะส่งผลโดยตรงกับกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีในการดึงคลอไรด์ไอออนในคอนกรีต จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการวิจัยหรือศึกษาผลกระทบต่างๆที่จะทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ไอออนจากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีซึ่งจะทำให้สามารถวางแผนในการซ่อมแซมบำรุงรักษาโครงสร้างอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด ส่งผลให้เกิดความปลอดภัยจากการเป็นสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีตซึ่งเป็นปัญหาที่ทำการแก้ไขได้ยากและมีราคาในการซ่อมแซมปัญหา

ดังกล่าวสูงและปัญหาดังกล่าวไม่มีสัญญาณเตือนทางกายภาพถึงปัญหาการเป็นสนิมของเหล็กเสริม  
คอนกรีตให้รู้ล่วงหน้าแต่อย่างใด