

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เป็นที่ทราบกันดีว่าการบำรุงรักษาและการบูรณะซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับความเสียหายจากการเกิดสนิมในเหล็กเสริมให้กลับมามีความแข็งแรงเหมือนสภาพเดิมนั้นต้องเสียค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะโครงสร้างที่อยู่ในสภาวะสิ่งแวดล้อมทะเล ซึ่งการกำหนดต้นทุนค่าก่อสร้างในแต่ละปีจะประกอบไปด้วยงบประมาณที่ใช้ในการบำรุงรักษาและบูรณะซ่อมแซมโครงสร้างที่เสื่อมสภาพเนื่องจากสนิม ซึ่งใช้งบประมาณในการก่อสร้างมีมูลค่ามากกว่าโครงการก่อสร้างใหม่

การพัฒนาเครื่องมือเพื่อใช้ตรวจสอบหาค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ซึ่งเป็นการตรวจสอบด้วยวิธีทดสอบแบบไม่ทำลายสามารถบอกเตือนให้ทราบล่วงหน้าของการเกิดสนิมด้วยการวัดค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กซึ่งมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในต่างประเทศเมื่อประมาณ ค.ศ. 1993 โดย (Broomfield JP., et al, 1993) โดยทั่วไปเครื่องมือที่นิยมใช้อาจแบ่งตามวิธีการเป็น 3 วิธีการคือ วิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (half-cell potential) วิธีการวัดค่าความต้านทานของคอนกรีต (Concrete Resistivity) และวิธีการวัดค่าความต้านทานโพลาไรซ์ (Polarization Resistance)

สำหรับเนื้อหาวิทยานิพนธ์ส่วนนี้ประกอบไปด้วยกลไกการเกิดสนิมและหลักการที่ใช้ในการวัดค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

2.1 การเสื่อมสภาพของโครงสร้างเนื่องจากคลอไรด์ (Chloride Attack)

โดยธรรมชาติเหล็กเสริมในคอนกรีตจะมี Passivation Film ปกป้องเหล็กเสริมจากการเกิดสนิมโดย Passive Layer ที่เคลือบที่ผิวเหล็กเสริมนี้ช่วยป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดย Passive Layer มีเสถียรภาพอยู่ในสภาวะที่มีความเป็นด่างสูงซึ่งเป็นธรรมชาติของคอนกรีตที่มี PH อยู่ในช่วง 12 ถึง 13 คอนกรีตจึงเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติป้องกันเหล็กเสริมจากการเกิดสนิมตามธรรมชาติเนื่องจากการเสื่อมสภาพของคอนกรีตจากสนิมเหล็กในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น มีผลกระทบส่วนใหญ่มาจากปริมาณคลอไรด์บริเวณเหล็กเสริม โดยเมื่อคลอไรด์ไอออนนั้นจะซึมผ่านเข้าไปภายในของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและเมื่อซึมเข้าไปถึงผิวของเหล็กเสริมในปริมาณมากพอ (Threshold concentration) ซึ่งจะทำให้ Passive layer ที่ป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมถูกทำลาย (Depassivation) และคลอไรด์ไอออนจะทำลายฟิล์มที่เคลือบผิวของเหล็กเสริมซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดสนิมขึ้นที่เหล็กเสริมได้หากมีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเกิดสนิม กล่าวคือมีน้ำและออกซิเจนเพียงพอ การเกิดสนิมจะส่งผลให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นมีความสามารถในการใช้งานลดลงและอายุการใช้งานน้อยลง



แหล่งที่มาของคลอไรด์

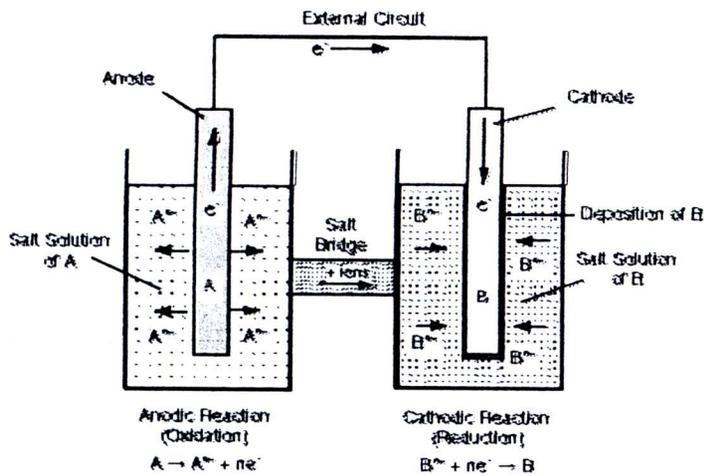
- 1) น้ำที่ใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีต
- 2) ทราบายและหินที่ใช้ในการผสมคอนกรีต (โดยเฉพาะทราบายที่มาจากบริเวณใกล้ทะเล)
- 3) น้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ที่พบในการเร่งการก่อตัว
- 4) สภาพการใช้งาน ซึ่งเป็นปัจจัยที่ได้รับปริมาณคลอไรด์มากที่สุด เช่น จากน้ำทะเล น้ำกร่อยและดิน

2.2 หลักการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

ขบวนการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าของเซลล์ (Electrolytic Cell) ในการเกิดสนิมเป็นขบวนการเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้า-เคมี ที่มีความยุ่งยากซับซ้อนเนื่องจากเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในคอนกรีตมีการสูญเสียอิเล็กตรอนซึ่งจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าทั้งระบบของคอนกรีตเสริมเหล็ก

ในระบบของการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าเป็นวิธีการที่นิยมใช้กันซึ่งจะต้องมีความเข้าใจถึงกลไกของการกัดกร่อนสามารถอธิบายได้จากขบวนการของเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ เซลล์กัลวานิก (Galvanic cell) และเซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic Cell) โดยที่เซลล์ไฟฟ้าเคมีเมื่อเกิดปฏิกิริยาเคมีจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า ในขณะที่เซลล์อิเล็กโทรไลต์เป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ต้องผ่านกระแสไฟฟ้าจากภายนอกเข้าไปจึงจะเกิดปฏิกิริยาเคมี และจากรูปที่ 2.1 แสดงแผนภูมิการเกิดปฏิกิริยาการถ่ายโอนอิเล็กตรอนในเซลล์กัลวานิก โดยที่โลหะที่เกิดการกัดกร่อนเป็นขบวนการที่เกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (การรับและเสียอิเล็กตรอน) เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านสื่อตัวนำไฟฟ้าที่อยู่ภายนอกและการเคลื่อนที่ของไอออนที่อยู่ภายในโดยมีสารละลายเป็นตัวนำ โดยแนวคิดพื้นฐานนี้เป็นที่นิยมใช้กันและจะต้องเข้าใจถึงกลไกของการกัดกร่อนเป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาสื่อตัวนำทางไฟฟ้าในระบบของเซลล์กัลวานิก ในระบบนี้จะประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ชนิด เมื่อพิจารณาการเกิดปฏิกิริยาเคมีโดยที่ขั้ว anode ของโลหะ A จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำหน้าที่เป็นขั้วลบสูญเสียอิเล็กตรอน (e^-) กลายเป็นไอออน (A^{n+}) อยู่ในสารละลายซึ่งเกิดขึ้นพร้อมกันเสมอและอิเล็กตรอน (e^-) ที่สูญเสียไปจะเคลื่อนที่ผ่านตัวนำไฟฟ้าที่อยู่ภายนอกไปยังขั้ว cathode เป็นขั้วไฟฟ้าที่รับอิเล็กตรอนเรียกปฏิกิริยานี้ว่าปฏิกิริยารีดักชัน





รูปที่ 2.1 ระบบของเซลล์กัลวานิก; การเกิดปฏิกิริยา Oxidation ที่ขั้ว anode และการเกิดปฏิกิริยา Reduction ที่ขั้ว cathode

จากรูปที่ 2.1 แสดงแผนภูมิที่มีส่วนประกอบพื้นฐานของระบบเซลล์กัลวานิก โดยที่ในสารละลาย A จะมีไอออน (A^{n+}) ที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเนื่องจากโลหะ A สูญเสียอิเล็กตรอนและกลายเป็นไอออน (A^{n+}) ออกมาทำให้ประจุสุทธิของสารละลายมีค่าเป็นบวกเพิ่มขึ้น

การเชื่อมโยงของสารละลาย A และ B โดยสะพานไอออน (Salt bridge) ซึ่งมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์ บรรจุอยู่ และจะเกิดปฏิกิริยาการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างโลหะทั้งสองที่แช่อยู่ในสารละลายที่ทิศทางเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Anode) ไปยังขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (cathodes) เมื่อโลหะ A ที่แช่ในสารละลาย A เริ่มสึกกร่อน เนื่องจากโลหะ A สูญเสียอิเล็กตรอนกลายเป็นไอออนบวก (A^{n+}) อยู่ในสารละลาย เขียนสมการปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ดังสมการที่ 1 ในขณะที่ขั้วไฟฟ้า cathode มีไอออน (B^{n+}) อยู่ในสารละลาย B จะถูกใช้ไปรวมกับอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่มาจากขั้วไฟฟ้า anode และกลายเป็นอะตอมเกาะติดอยู่ที่โลหะ B จนกระทั่งไอออนบวก (B^{n+}) ในสารละลาย B ลดลง สมการปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเขียนได้ดังสมการที่ 2



โดยที่ A และ B แทนด้วยอะตอมของโลหะ A และ B

A^{n+} และ B^{n+} แทนด้วยไอออนบวกของโลหะ A และ B



ne^- แสดงถึงจำนวนการสูญเสียอิเล็กตรอนของโลหะ A

สะพานไอออน (Salt bridge) ทำหน้าที่รักษาการสมดุลระหว่างไอออนบวกและไอออนลบในแต่ละครึ่งเซลล์ให้คงที่ เนื่องจากจากโลหะ A สูญเสียอิเล็กตรอนและกลายเป็นไอออน (A^{n+}) ออกมาอยู่ในสารละลาย A ทำให้ไอออน (A^{n+}) ในสารละลายมีค่าเป็นบวกเพิ่มขึ้น ในขณะที่ไอออน (B^{m+}) ในสารละลาย B ถูกใช้ไปรวมกับอิเล็กตรอนที่ขั้วไฟฟ้า cathode มีค่าเป็นลบและกลายเป็นอะตอมเกาะติดกับโลหะ B ส่งผลทำให้ไอออนบวก (B^{m+}) ในสารละลาย B ลดลงและเหลือไอออนบวก (B^{m+}) น้อยกว่าที่มีอยู่ในสารละลาย B ผลก็คือทำให้ประจุสุทธิในสารละลาย B เป็นลบหรือมีค่าเป็นบวกลดลง ดังนั้นเพื่อให้เกิดการสมดุล สารละลายโปรตัสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่อยู่ในสะพานไอออน (Salt bridge) จะเกิดการแตกตัวจะส่งให้ไอออนลบ (Cl^-) ลงไปในสารละลาย A ซึ่งเป็นด้านที่มีไอออนบวกเพิ่มขึ้นในขณะเดียวกันไอออนบวก (B^{m+}) ในสารละลาย B ถูกใช้ไปจนทำให้ไอออนบวกลดลง สะพานไอออนก็จะทำหน้าที่ส่งไอออนบวก (K^+) ลงมาในสารละลาย B ทำให้มีปริมาณไอออนบวกในสารละลาย A และ B สมดุลย์กันผลก็คือปริมาณไอออนสุทธิในสารละลายทั้งสองจะคงที่ พิจารณาได้จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทั้งหมดนี้สามารถแยกออกมาเป็นครึ่งปฏิกิริยาดังนี้

ผลของทั้งสองปฏิกิริยาที่มีไอออนบวกเพิ่มขึ้นในสารละลาย A ที่ขั้วไฟฟ้า anode ในขณะที่ไอออนบวกถูกใช้หมดไปในสารละลาย B ที่ขั้วไฟฟ้า Cathode ปฏิกิริยาครึ่งเซลล์ยังคงทำหน้าที่เชื่อมต่ออยู่ระหว่างสองสารละลายเพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลครบวงจร แต่ถ้าสื่อที่เป็นตัวนำไม่สามารถเชื่อมต่อระหว่างขั้วไฟฟ้าก็จะไม่เกิดการกักต่อนขึ้นที่ขั้ว Cathode และก็จะไม่มีอะตอมสะสมอยู่ที่ ขั้ว Cathode ก็จะไม่มีเกิดปฏิกิริยากักต่อน

2.3 ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์

การวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากปฏิกิริยาไฟฟ้าในลักษณะศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (half-cell Potentials) ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ไม่สามารถที่จะวัดค่าได้ด้วยขั้วไฟฟ้าเดียว ดังนั้นหากนำเอาครึ่งเซลล์ต่างชนิดมาต่อกันให้เป็นวงจรผลของศักย์ไฟฟ้าที่ได้มีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของครึ่งเซลล์ที่นำมาต่อกันซึ่งเป็นศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ก็วานิกมีหน่วยในการวัดค่าเป็นโวลต์ ทั้งนี้หากนำศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ไฮโดรเจนมาตรฐานไปเปรียบเทียบกับครึ่งเซลล์ชนิดใดชนิดหนึ่งโดยนำไปต่อเป็นเซลล์ไฟฟ้าคู่กับครึ่งเซลล์ไฮโดรเจนมาตรฐานค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่วัดได้จะเป็นศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานครึ่งเซลล์นั้น ศักย์ไฟฟ้าเหล่านี้มีผลต่อการกักต่อนที่ขั้วไฟฟ้า anode เมื่อมีกระแสไฟฟ้าจากภายนอกครบวงจร โดยปรกติศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์จะแสดงในรูปของปฏิกิริยา Oxidation ซึ่งเกิดจากอะตอมของโลหะเกิดการแตกตัวปล่อยอิเล็กตรอนและไอออนบวกออกมาพร้อมกันโดยที่ผลกระทบของค่าของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไอออนบวกในสารละลายที่มีขั้วไฟฟ้าแช่อยู่และอุณหภูมิของสารละลาย ดังนั้นค่าของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐานเป็นการวัดความเข้มข้นของสารละลายที่อุณหภูมิมาตรฐาน และสำหรับค่าที่วัดได้จะมีค่าที่เป็นลบมากกว่าซึ่งจะชี้ให้เห็นถึงแนวโน้มของโลหะเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนและส่งผลต่อการกักต่อนของโลหะ

สมมุติให้วงจรไฟฟ้าภายนอกจากภาพที่ 1 แทนด้วยโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานไฟฟ้าที่มีความละเอียดสูงซึ่งไม่มีกระแสไฟฟ้าจากภายนอกผ่านเข้ามาในวงจรเป็นเงื่อนไขของสภาวะที่เรียกว่า (Open-circuit



Potential) ค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จากโวลต์มิเตอร์เป็นค่าของศักย์ไฟฟ้าของแต่ละขั้วไฟฟ้าที่มีความแตกต่างกันระหว่างปฏิกิริยา anodic และปฏิกิริยacathodic (Brown,T.L.and LeMay,H.E.,Jr.,1988)

จากตัวอย่างลักษณะนี้ดังรูปที่ 2.1 ถ้าสมมุติให้ขั้วไฟฟ้าอันหนึ่งเป็นเหล็กแช่ในสารละลายที่มีไอออนของเหล็กและอีกขั้วไฟฟ้าเป็นสังกะสีแช่ในสารละลายซึ่งมีซิงค์ไอออนละลายอยู่จะให้ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐานสำหรับปฏิกิริยา Oxidation ของเหล็กอ่านได้ -0.44 โวลต์ และค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ มาตรฐานสำหรับปฏิกิริยา Oxidation ของสังกะสีอ่านได้ -0.76 โวลต์ (Fontana, M.G.,1986) ศักย์ไฟฟ้าของสังกะสีจะมีค่าเป็นลบมากกว่าเหล็ก เพราะว่าแนวโน้มการสูญเสียอิเล็กตรอน

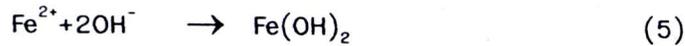
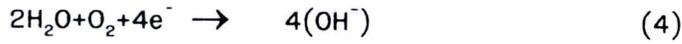
ของสังกะสีมีมากกว่าเหล็ก และถ้าปลายด้านบวกของโวลต์มิเตอร์มีการเชื่อมต่อเข้ากับขั้วไฟฟ้าสังกะสี ค่าของศักย์ไฟฟ้าอ่านได้ -0.32 โวลต์ และถ้าปลายด้านบวกของโวลต์มิเตอร์เชื่อมต่อเข้ากับขั้ว cathodeค่าศักย์ไฟฟ้าอ่านได้ +0.32 โวลต์ ดังนั้นขั้วไฟฟ้าสังกะสีจะเป็นขั้ว anode และขั้วไฟฟ้าของเหล็กจะเป็นขั้ว cathode แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนของอิเล็กตรอนที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเคลื่อนที่จากขั้วไฟฟ้าสังกะสี (anode) ผ่านวงจรไฟฟ้าภายนอกไปยังขั้วไฟฟ้าของเหล็ก (cathode) ซึ่งสวนทางกับการไหลของกระแสไฟฟ้าซึ่งไหลจากขั้วบวกไปยังขั้วลบ ดังนั้นสังกะสีจึงเป็นขั้วลบและเหล็กเป็นขั้วบวกหรือกล่าวได้ว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากขั้วที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าไปยังขั้วศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าสรุปได้ว่าครึ่งเซลล์ที่รับอิเล็กตรอน (cathode) มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าครึ่งเซลล์ที่ให้อิเล็กตรอน (anode)

2.4 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต (Corrosion of Steel in Concrete)

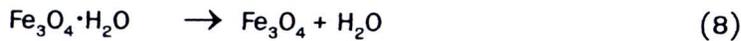
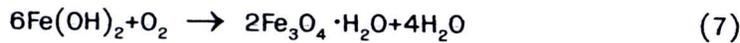
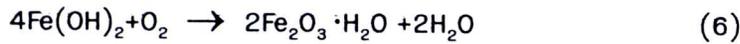
การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีประกอบด้วยปฏิกิริยาแอโนดิก (Anodic Reaction) และปฏิกิริยาแคโทดิก (Cathodic Reaction) กระบวนการเกิดสนิมเริ่มจากการมีความชื้นเพียงพอที่จะทำให้อะตอมของเหล็กสูญเสียอิเล็กตรอนกลายเป็นไอออน (Fe^{2+}) ดังสมการที่ (3) ละลายอยู่ในสารละลาย Electrolyte รอบๆเหล็กเสริมเรียกบริเวณนี้เป็นแอโนดและอิเล็กตรอนนี้ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้า ในขณะที่บริเวณเหล็กเสริมที่ไม่มีการแตกตัวของอิเล็กตรอนและไอออนบริเวณนั้นจะมีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าซึ่งทำหน้าที่เป็นแคโทด อธิบายได้ดังรูปที่ 4 แสดงถึงกระบวนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ดังรูปที่ 2.2 อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นที่แอโนดซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าที่สูงจะเคลื่อนที่ไปตามเหล็กเสริมซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้าและเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าซึ่งเป็นแคโทดและทำปฏิกิริยากับน้ำ (H_2O) และออกซิเจน (O_2) ที่อยู่บริเวณนี้เกิดเป็นไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) ขึ้นดังสมการที่ 4 และหลังจากนั้นจะเกิดการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าซึ่งเกิดขึ้นทั้งภายในและภายนอกเหล็กเสริม สำหรับกระแสภายในเหล็กเสริมเป็นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่จากแอโนดไปสู่แคโทด ในขณะที่กระแสภายนอกเหล็กเสริมเป็นการเคลื่อนที่ของ (Fe^{2+}) และ (OH^-) ผ่านสารละลายในช่องว่าง (Pore Solution) ของคอนกรีตรอบๆเหล็กเสริม โดยประจุลบคือ(OH^-)จะเคลื่อนที่จากขั้วแคโทดไปสู่แอโนดและประจุบวก (Fe^{2+}) จะเคลื่อนที่จากแอโนดไปสู่แคโทด ดังรูปที่ 2.3 การเคลื่อนที่ของไอออนโดยผ่านสารละลายในช่องว่างของคอนกรีตเป็นปัจจัยที่สำคัญของการเกิดการกัดกร่อน สารละลายในช่องว่างส่วนใหญ่เป็นสารละลายของ Alkali และ Calcium Hydroxide เปรียบเหมือนเป็นสารละลาย Electrolyte ทำให้เกิดการครบวงจรของกัลวานิกเซลล์และเกิดการกัดกร่อนขึ้น (Bentur et al., 1997) แต่ถ้าน้ำในช่องว่างนี้แห้งหรือโครงสร้างภายในของคอนกรีตที่บ่มแน่นและ



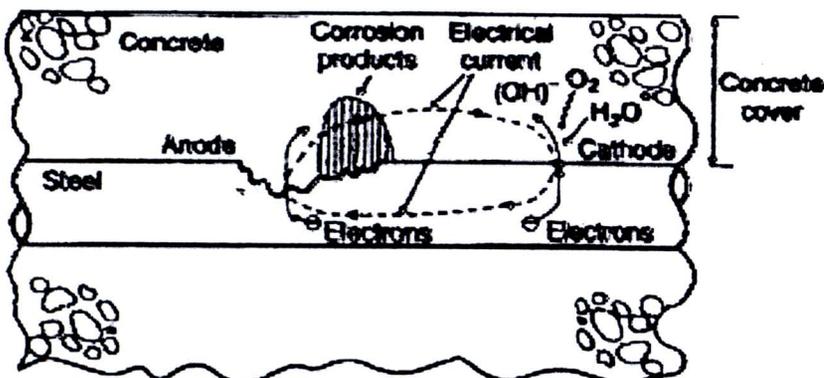
ช่องว่างภายในเกิดขึ้นไม่ต่อเนื่องการไหลของไอออนผ่านสารละลายในช่องว่างจะเกิดขึ้นได้ยากขึ้นซึ่งทำให้การเกิดการกัดกร่อนช้าลงจนหยุดการกัดกร่อน



จากการเคลื่อนที่ของ Fe^{2+} และ OH^- จากแอโนดและแคโทดตามลำดับ โดยที่ OH^- จากแคโทดเคลื่อนที่ไปรวมตัวกับ Fe^{2+} และทำปฏิกิริยาเกิดเป็น $\text{Fe}(\text{OH})_2$ (ferrous hydroxide) ดังสมการที่ 5 ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับ O_2 ต่อได้และเกิดเป็นสนิมเหล็ก $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (hydrate ferric oxide) หรือ red-brown rust และ Fe_3O_4 (black magnetite) ซึ่งเกิดจาก $\text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (Green hydrate magnetite) ดังสมการที่ 6, 7 และ 8



ซึ่งผลิตภัณฑ์สนิมเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของการกัดกร่อนคือสนิมในรูปแบบต่างๆ มีปริมาณมากกว่าเหล็กก่อนเกิดปฏิกิริยา 4 ถึง 6 เท่า (Nielsen., A, 1985) ดังรูปที่ 2.4 ทำให้เกิดแรงดันภายในและคอนกรีตเกิดการแตกร้าวเสียหายได้ นอกจากนี้ในส่วนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบางจุดเหล็กเสริมมีพื้นที่หน้าตัดลดลงส่งผลต่อการรับแรงของโครงสร้างซึ่งถ้าหากไม่ได้ซ่อมแซมให้ถูกต้องตามวิธีโครงสร้างอาจเกิดการวิบัติได้

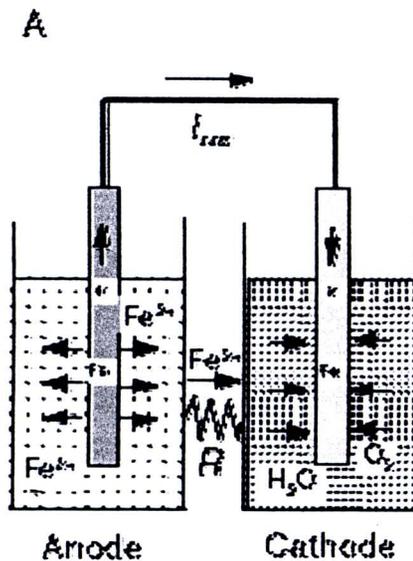


รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ Anode และ Cathode

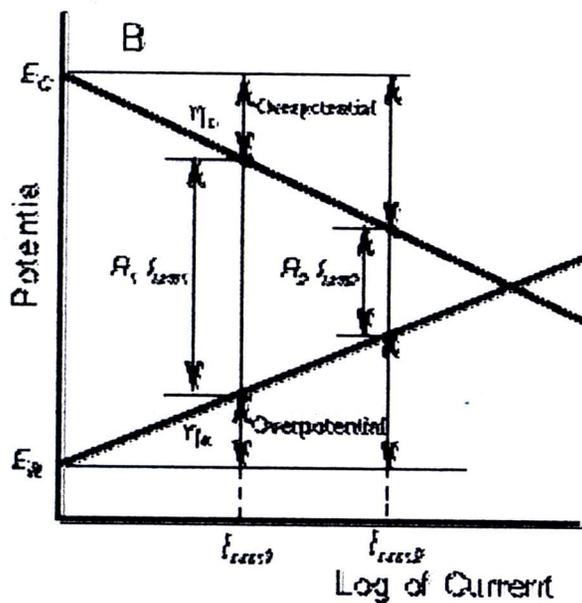
Short-Circuited Electrolytic Cell ดังรูปที่ 2.5 แสดงถึงการไหลของไอออนในสารละลายระหว่างเซลล์ตัวนำไฟฟ้า โดยมีสะพานเกลือเป็นตัวเชื่อมทำหน้าที่ช่วยรักษาความสมดุลของเซลล์ตัวนำไฟฟ้าให้มีความเสถียรภาพ ในกรณีของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในคอนกรีตโดยที่คอนกรีตทำหน้าที่เป็นสื่อตัวนำทางไฟฟ้าของไอออนระหว่างแอโนดและแคโทดซึ่งทำหน้าที่เหมือนสะพานให้ไอออนสามารถเคลื่อนที่ไปมาได้ระหว่างครึ่งเซลล์ สำหรับในโพรงเล็กๆของโครงสร้าง (Pore Structure) ของเพสต์ (paste) มีสารละลายอยู่ภายในซึ่งโพรงเล็กๆนี้จะอยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยสารละลายจะเป็นตัวนำไอออนให้เคลื่อนที่ได้ง่ายโดยทั่วไปในคอนกรีต การเคลื่อนที่ของไอออนถูกควบคุมด้วยสื่อตัวนำทางไฟฟ้าของ paste ดังรูปที่ 2.5 แสดงถึงสื่อตัวนำไฟฟ้าของสะพานที่เชื่อมต่อนี้อยู่ระหว่างสารละลายซึ่งแทนด้วยอุปกรณ์ต้านทานกระแสไฟฟ้าในวงจร (R) ทำหน้าที่เป็นตัวจำกัดการไหลของไอออนระหว่างครึ่งเซลล์และช่วยลดค่าของกระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิมโดยเปรียบเทียบกับสื่อตัวนำไฟฟ้าดังรูปที่ 2.6 กราฟเส้นโพลาริไซซ์ดังรูปที่ 2.7 ได้อธิบายถึงการลดลงของกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม เนื่องจากแรงดันไฟฟ้ามีความแตกต่างกันระหว่าง ครึ่งเซลล์ของศักย์ไฟฟ้าที่สมดุล equilibrium potential ของซั้วแคโทดและแอโนด ($E_c - E_a$) เป็นการทำให้แรงดันไฟฟ้าหมดไปที่ซั้ว electrode และความต้านทานของตัวนำไฟฟ้าของคอนกรีตจะลดลง (West., J.M., 1986)

$$E_c - E_a = \eta_a + |\eta_c| + I_{corr}R \tag{9}$$

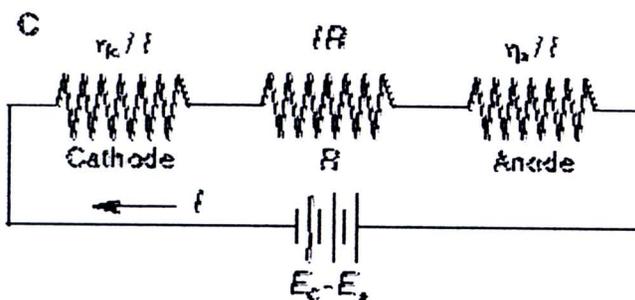
โดยที่ η_a และ η_c เป็น Overpotentials ของซั้วไฟฟ้าอ้างอิง, $|\eta_c|$ มีค่าเป็นบวกเสมอ, R เป็นความต้านทานของสื่อตัวนำไฟฟ้าและ I_{corr} เป็นกระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิมแท้จริง ซึ่งกระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิมมีค่าต่ำกว่าซึ่งค่าความต้านทานจะเท่ากับศูนย์ ดังรูปที่ 2.6 และรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.5 เซลล์ตัวนำไฟฟ้าที่ทำให้เหล็กเกิดสนิมในคอนกรีต



รูปที่ 2.6 เส้นกราฟโพลารไรซ์แสดงถึงผลกระทบของความต้านทานทางไฟฟ้าของคอนกรีต



รูปที่ 2.7 วงจรไฟฟ้าเทียบเท่าของการเกิดสนิมของเหล็ก

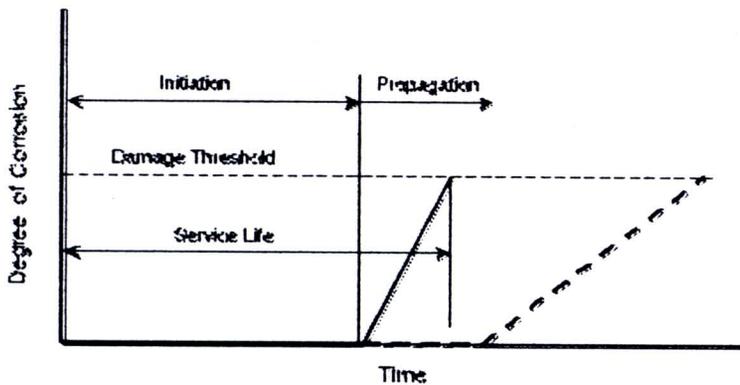
จากรูปที่ 2.7 แสดงถึงวงจรไฟฟ้าเทียบเท่าของเหล็กเสริมที่เป็นสนิม (Wwst, J.M., 1986) ขั้วไฟฟ้าที่มีสภาวะตรงกันข้าม (Polarized electrode) แสดงเป็นอุปกรณ์ต้านทานทางไฟฟ้าโดยปกติใช้อ้างอิงเป็น 'reaction resistance' (Elsener, B., Muller, S., 1990) ถ้าหากสื่อตัวนำไฟฟ้ามีความต้านทานลดลงจาก R_1 เป็น R_2 ค่าแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าลดลง ในขณะที่เดียวกันค่า Overpotential และกระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิมก็จะเพิ่มขึ้นตามลำดับ นอกจากนี้ถ้าจำนวนออกซิเจนในคอนกรีตมีค่าน้อยกว่าความต้องการในการทำปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด เป็นเงื่อนไขที่ทราบกันว่าขั้วไฟฟ้าจะเกิดสภาวะที่มีคุณลักษณะที่ขัดแย้งกันและเป็นสาเหตุทำให้กระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิมมีค่าลดลง (Fontana, M.G., 1986, Uhlig, H.H., 1971 and West, J.M., 1986)





2.5 แบบจำลองการเสื่อมสภาพของคอนกรีตเสริมเหล็ก

Tutti.,k.,1980 ได้เสนอแนวความคิดโดยการจำลองรูปแบบแทนด้วยอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตที่มีความไวต่อการเกิดสนิมของเหล็กดังรูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นถึงระดับของการเกิดสนิมเป็นฟังก์ชันกับเวลาซึ่งในช่วงระยะเวลาเริ่มแรกเหล็กเสริมจะยังไม่เกิดสนิมและถ้าคลอไรด์ไอออนหรือเกิดการโบนซ์ขึ้นที่ผิวหน้าคอนกรีตและซึมผ่านไปจนถึงเหล็กเสริมและเมื่อเหล็กสูญเสียชั้นฟิล์มบาง ๆ ที่ป้องกันที่ผิวเหล็กเสริมจะทำให้เกิดสถานะของการแพร่เริ่มต้นขึ้นและระดับของการเกิดสนิมจะพัฒนาเพิ่มขึ้นในอัตราที่รวดเร็ว



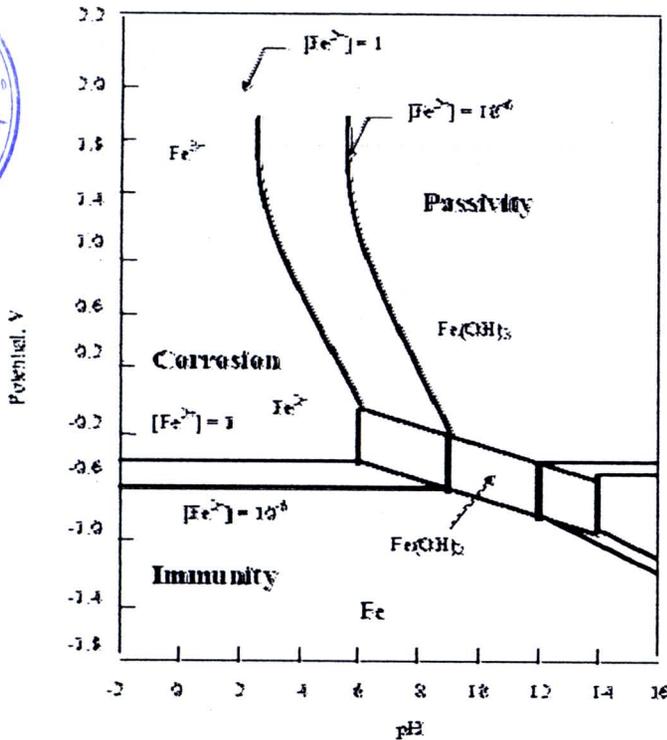
รูปที่ 2.8 แบบจำลองกระบวนการเกิดสนิมของเสริมเหล็กในคอนกรีต

อัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมขึ้นอยู่กับสถานะของการแพร่ของคลอไรด์ซึ่งเป็นปัจจัยหลักส่งผลกระทบต่อโดยตรงกับอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยแทนด้วยระยะเวลา เมื่อระดับความเสี่ยงของการเกิดสนิมสูงขึ้นจนมีผลกระทบต่อกำลังของเหล็กเสริมหรือเป็นเหตุให้อายุการใช้งานของโครงสร้างลดต่ำลงจนกระทั่งถึงระดับวิกฤติ ดังนั้นเส้นประรูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างที่มีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าเพราะว่าระยะเวลาช่วงเริ่มต้นเป็นช่วงเวลาที่ยาวมากกว่าและอัตราการเกิดสนิมจะลดลงในสถานะที่มีการแพร่ จากรูปแบบจำลองอธิบายได้ว่าระยะเวลาหุ้มของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ของคอนกรีตมีค่าต่ำจะช่วยให้ยืดเวลาอายุการใช้งานยาวนานขึ้น

Tuutti, k. (1982) ได้นำเสนอรูปแบบจำลองใช้สำหรับทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กดังรูปที่ 2.9 การเกิดสนิมในระดับสูงสุดที่ยอมรับได้ต้องมีความสัมพันธ์กับรอยแตกกว้างที่ปรากฏให้เห็นซึ่งช่วงเวลาของการเสื่อมสภาพประกอบไปด้วย 2 ช่วงคือช่วงเวลาเริ่มต้นและช่วงเวลาการแพร่โดยที่ความยาวในช่วงเวลาเริ่มต้นเป็นช่วงเวลาโดยประมาณที่ต้องการให้เกิดแทรกซึมของสารละลายเข้าไปถึงผิวของเหล็กเสริมและกระตุ้นให้เกิดการกัดกร่อน ในขณะที่ช่วงเวลาการแพร่เป็นช่วงเวลาที่สนิมมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นจึงเป็นช่วงเวลาของการซ่อมแซมซึ่งกลายมาเป็นเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการซ่อมแซมและรูปแบบจำลองนี้สามารถนำไปใช้ประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของโครงสร้างสะพานคอนกรีตในสถานะสิ่งแวดล้อมที่ทำให้เกิดสนิมเป็นรูปแบบจำลองการเสื่อมสภาพที่พัฒนาโดย Cady and Weyers (Cady,P.D. and Weyers R.E.,1983) การแทรกซึมของคลอไรด์มีอิทธิพลทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่



เกิดสนิมมากในขณะที่บริเวณอีก 2 ส่วนนั้นจะมีชั้นฟิล์มก่อดำวยูซึ่งจะมีความเป็นต่างมากอยู่ในบริเวณ 2 ส่วนเหล่านี้จะอยู่ในสภาวะปรกติไม่มีปฏิกิริยาเกิดขึ้นและใน ส่วนที่ 3 จะเป็นส่วนที่ปราศจากสนิม (Immunity) เนื่องจากในส่วนนี้มีสภาพความเป็นต่างที่มีเสถียรภาพสูงมากจึงเป็นสาเหตุทำให้เหล็กไม่เกิดสนิม ดังนั้นแผนภาพพอร์แบร์กจึงเป็นวิธีการเตรียมข้อมูลพื้นฐานภายใต้ความเข้าใจปฏิกิริยาการเกิดสนิม และจัดทำเป็นข้อกำหนดหลัก 2 ข้อสำหรับใช้กับแผนภาพนี้



รูปที่ 2.11 กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

2.7 เทคนิคการตรวจเตือนสภาพการเกิดสนิม

การเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในคอนกรีตไม่สามารถคาดการณ์ได้ชัดเจนต้องรองนกว่าคอนกรีตจะเกิดการเสียหายซึ่งสิ่งที่สามารถบ่งชี้ถึงการเสื่อมสภาพของโครงสร้างเช่น สนิมที่มีรอยต่างเป็นจุดๆที่ผิวของเหล็กเสริม รอยร้าวแตกแยกหลุดล่อนออกมาเป็นชิ้นๆ สำหรับในการทำนายอายุการใช้งานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดสนิมนั้นควรที่จะต้องกำหนดวิธีการซ่อมแซมหรือการทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กกลับคืนสู่สภาพใช้งานได้ตามปรกติ ซึ่งจำเป็นที่จะต้องใช้เทคนิควิธีทดสอบแบบไม่ทำลายสำหรับใช้ประเมินความสภาพการเกิดสนิมของเหล็กเสริมและใช้วัดค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็ก

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
 ห้องสมุดวิจัย
 วันที่..... 25 กค. 2555

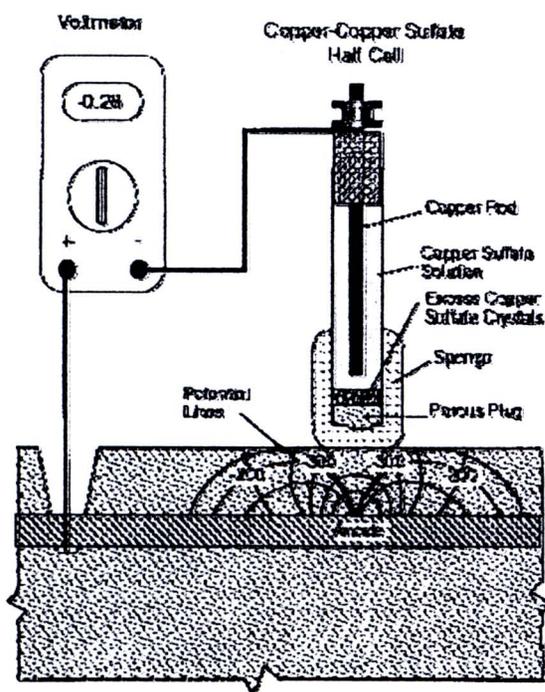
เลขทะเบียน..... 247548

เลขเรียกหนังสือ.....



2.7.1 วิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

หลักการพื้นฐานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ดังที่ได้กล่าวมาแล้วสามารถที่จะตรวจสอบเพื่อพิสูจน์ได้ โดยนำเอาวิธีการนี้มาใช้ในการตรวจประเมินสภาพการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีเมื่อเหล็กเสริมถูกกัดกร่อนก็จะเกิดการไหลของกระแส ไฟฟ้าอยู่ทั่วในคอนกรีต (การแพร่กระจายของไอออน) ระหว่างบริเวณขั้วแอโนดและขั้วแคโทดโดยมีศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสนิมเกิดขึ้นโดยรอบๆเหล็กเสริมดังรูปที่ 2.12 แสดงให้เห็นถึงแนวเส้นของศักย์ไฟฟ้าที่ตัดผ่านกันจากผิวคอนกรีตถึงเหล็กเสริมและทุกๆจุดที่มีศักย์ไฟฟ้าสามารถวัดค่าได้ ด้วยวิธีการของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นที่เส้นชั้นความสูงทำได้โดยใช้ค่าของศักย์ไฟฟ้าบนผิวคอนกรีตที่วัดค่าได้นำมากำหนดจุดลงบนแผนที่ซึ่งจะแสดงให้เห็นค่าของศักย์ไฟฟ้าที่จุดต่างๆบนโครงสร้าง ความเป็นไปได้ของการเกิดสนิมให้พิจารณาจากค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดค่าได้บนผิวคอนกรีตโครงสร้าง ถ้าหากมีค่าเป็นลบมากกว่าแสดงว่าบริเวณนั้นจะมีโอกาสที่จะเกิดสนิมมากที่สุด (Elsener, B.et al,1990 and Browne ,R.D,et. al,1983)



รูปที่ 2.12 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับใช้ทดสอบด้วยวิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ ตามมาตรฐาน ASTM C 876 โดยการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีต

วิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C-876 ดังรูปที่ 2.12 เครื่องมือและอุปกรณ์ประกอบด้วย Copper-Copper Sulfate มีการเชื่อมต่อสายไฟกับโวลท์มิเตอร์ที่มีความต้านทานต่อไฟฟ้าสลับประสิทธิภาพสูง และในส่วนของ half-cell มีแท่งทองแดงที่อยู่ในสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวใช้เป็นเซลล์อ้างอิงสำหรับการวัดศักย์ไฟฟ้าของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในคอนกรีต การวัดค่าของศักย์ไฟฟ้าขึ้นอยู่กับชนิดของครึ่งเซลล์ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของศักย์ไฟฟ้าที่อ่านค่าได้ และสำหรับการเชื่อมต่อของระบบ Half-Cell

ทำได้โดยการเชื่อมต่อด้านที่เป็นบวกของโวลท์มิเตอร์ให้ติดกันกับเหล็กเสริมและอีกด้านของโวลท์มิเตอร์ที่เป็นลบให้เชื่อมติดต่อกับ Copper-Copper Sulfate โวลท์มิเตอร์ที่ใช้มีความละเอียดและประสิทธิภาพสูงเพียงพอสำหรับใช้อ่านค่าของศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าต่ำมากๆ การวัดศักย์ไฟฟ้าของเหล็กเสริมในคอนกรีตทำได้โดยใช้ Copper-copper sulfate half-cell เชื่อมต่อที่ผิวคอนกรีตเพื่อให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าครบวงจรโดยใช้ Porous Plug และฟองน้ำที่เปียกชื้นด้วยสารละลาย detergent เป็นสื่อตัวนำไฟฟ้า

ถ้าหากเหล็กเสริมเกิดสนิมแสดงว่าอิเล็กตรอนในเหล็กจะเคลื่อนที่จากเหล็กเสริมไปยัง half-cell เพราะว่าด้านปลายของโวลท์มิเตอร์มีการเชื่อมต่อภายในวงจรไฟฟ้า ค่าที่อ่านได้จากโวลท์มิเตอร์แสดงให้เห็นว่าแรงดันหรือศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าเป็นลบ (ASTM G3) ในการวัดค่า half-cell potential เป็นการวัดศักย์ไฟฟ้าแบบ open circuit potential เพราะเป็นการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขที่ไม่มีการวัดค่าของกระแสไฟฟ้าในวงจร (ASTM G15) ค่าของแรงดันไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้ที่ผิวของคอนกรีตจะมีค่าเป็นลบมากขึ้นสามารถอธิบายได้ว่าเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตยังมีอิเล็กตรอนส่วนเกินอีกมากจึงมีความเป็นไปได้สูงที่เหล็กเสริมจะยังเป็นสนิมต่อไปได้อีก ในการอ่านค่าศักย์ไฟฟ้าแสดงให้เห็นถึงความน่าจะเป็นของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่อยู่ในตำแหน่งภายใต้ Copper-copper sulfate reference cell (Van Daveer, J.R., 1975) อย่างไรก็ตามค่าที่ถูกต้องจะเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C876 และวิธีการวัดค่าศักย์ไฟฟ้านี้ไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับคอนกรีตและเหล็กเสริมที่มี epoxy เคลือบอยู่ที่พื้นผิว

วิธีเตรียมการทดสอบทำได้โดยกำหนดตำแหน่งของจุดให้มีลักษณะเป็นตารางโดยมีระยะห่างที่เหมาะสมตามลักษณะของโครงสร้างและปัจจัยที่ทำให้เกิดความผิดพลาด เช่นจุดที่กำหนดถ้ามีระยะห่างมากเกินไปหรือการเตรียมข้อมูลไม่เหมาะสมเพียงพอสำหรับการประเมินค่าในขณะที่การกำหนดระยะห่างของเหล็กเสริมเต็มพื้นที่ก็จะทำให้มีค่าใช้จ่ายในการสำรวจเพิ่มขึ้นเช่นในการสำรวจพื้นผิวคอนกรีตของสะพานโดยทำตามมาตรฐาน ASTM C 876 แนะนำให้ใช้ระยะห่าง 1.20 ม. ถ้าความแตกต่างของแรงดันระหว่างจุดที่อยู่ใกล้กันมีค่าเกินกว่า 150 มิลลิโวลท์ ให้ถือวาระยะห่างนั้นใช้ได้ อย่างไรก็ตามมีคำแนะนำอื่นๆ ที่กำหนดให้ระยะห่างควรจะมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของ 1.20 ม. สามารถให้ค่าความน่าเชื่อถือสำหรับการประเมินค่าการเกิดสนิมที่ยังดำเนินการอยู่และขยายออกไป (Clemena, G.G., Jackson, D.R, et al., 1992)

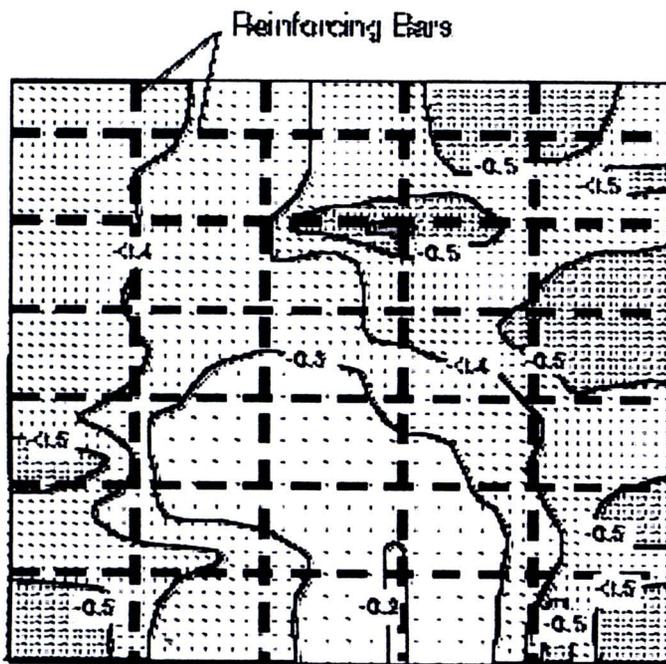
ค่าที่ยอมรับได้จากการทดสอบคือคอนกรีตต้องมีความชื้นอย่างเพียงพอที่จะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลครบวงจรเป็นเหตุผลที่สำคัญในการวัดค่าและถ้าการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ด้วยเวลาต้องทำตามมาตรฐาน ASTM C 876 ก่อนการทดสอบคอนกรีตต้องมีความเปียกชื้นเพียงพอและในขณะการทดสอบค่าที่วัดได้ไม่ควรเปลี่ยนแปลงมากกว่า ± 20 มิลลิโวลท์ ภายใน 5 วินาที (ASTM C 876) ถ้าหากค่าที่วัดได้มีความเสถียรไม่เพียงพอ อาจเป็นเพราะว่ากระแสไฟฟ้าภายในวงจรเกิดการหันเหทิศทางหรือความต้านทานของกระแสไฟฟ้าภายในวงจรมีมากเกินไป สำหรับในกรณีที่ไม่ควรนำมาใช้กับวิธีการของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ทำการทดสอบอยู่ภายนอกช่วง 17 ถึง 28° C วิธีการทำให้การทดสอบถูกต้องมีความน่าเชื่อถือให้ทำตามมาตรฐาน ASTM C 876 สำหรับใช้วัดค่าแรงดันไฟฟ้า



2.7.2 การวิเคราะห์ข้อมูลของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

การวิเคราะห์ข้อมูลตามมาตรฐาน ASTM C-876 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่อ่านได้สามารถนำมาใช้ร่วมกับข้อมูลอื่นๆ เช่น ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต ความลึกของคาร์โบเนชันในคอนกรีต สำหรับหาการแตกและหลุดล่อนของชั้นคอนกรีตที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมเปิดเผย ซึ่งการรวบรวมสรุปข้อมูลเกี่ยวกับการเกิดสนิมที่ได้จากการสำรวจอย่างเป็นระบบด้วยวิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์สามารถแสดงให้เห็นได้ 2 แนวทาง คือ 1. มีลักษณะเป็นแผนที่เส้นชั้นความสูงของศักย์ไฟฟ้าเท่ากันตลอดทั้งเส้น 2. เป็นไดอะแกรมของความถี่สะสมของศักย์ไฟฟ้า ในขณะที่ตีพิมพ์การรายงานค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการสำรวจต้องระบุให้ชัดเจนในการใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode)

ผลลัพธ์ที่ได้จากการสำรวจนำมาสรุปจัดทำเป็นแผนที่เส้นชั้นความสูงของศักย์ไฟฟ้าซึ่งสามารถทำได้โดยนำเอาค่าที่ได้จากการทดสอบในแต่ละจุดมาสร้างลงบนแปลนตามมาตรฐานของพื้นที่ทั้งหมดที่ได้ทำการทดสอบ สำหรับค่าแรงดันที่อ่านได้จาก half-cell ในแต่ละจุดของการทดสอบให้ทำเครื่องหมายไว้บนแปลนและเขียนเส้นชั้นความสูงซึ่งมีค่าความต่างศักย์เท่ากันโดยใช้ค่าของแรงดันที่วัดได้ดังรูปที่ 2.13 เป็นตัวอย่างของแผนที่เส้นชั้นความสูงที่มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากันตลอดความยาวทั้งเส้นตามมาตรฐาน ASTM C-876 แรงดันไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าในแต่ละจุดที่วัดค่าได้ในแต่ละช่วงของเส้นชั้นความสูงไม่ควรมีค่าต่างกันเกิน 100 มิลลิโวลต์



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างแผนที่เส้นชั้นความสูงของศักย์ไฟฟ้าที่สำรวจได้จาก half-cell potential

วิธีการของไดอะแกรมความถี่สะสมของศักย์ไฟฟ้าทำได้โดยการนำข้อมูลของศักย์ไฟฟ้ามาเขียนเป็นแผนผังแบบร่างลงบนกระดาษเพื่อหาความน่าจะเป็นสอดคล้องตามมาตรฐาน ASTM C-876 โดยนำข้อมูลที่ได้จากการ

สำรวจทั้งหมดมาเขียนเป็นกราฟเส้นที่มีการปรับเปลี่ยนให้เข้ามาตรฐานพอดี (best-fit straight line) จากโดอะแกรมความถี่สะสมนำมาใช้โดยกำหนดค่าที่อ่านได้ของศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็นร้อยละซึ่งเป็นค่าที่ให้ความแน่นอนเมื่อมีความเป็นลบมากกว่าและสามารถใช้ระบุเป็นค่าของการเกิดสนิมที่ระดับต่างๆ กัน (Elsener, B., et al, 1990) จากทั้งสองวิธีการจะสอดคล้องกับมาตรฐาน ASTM C 876 สามารถที่จะใช้ในการประเมินผลได้คือ เป็นวิธีการเชิงตัวเลขและเป็นเทคนิคที่แสดงความแตกต่างกันของศักย์ไฟฟ้า (potential difference technique) สำหรับวิธีการเชิงตัวเลขจะบ่งชี้ให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการเกิดสนิม

มาตรฐาน ASTM C-876 ให้เป็นแนวทางในการทดสอบดังนี้ ใช้สำหรับกรณีขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Copper-copper sulfate reference electrode ดังนี้

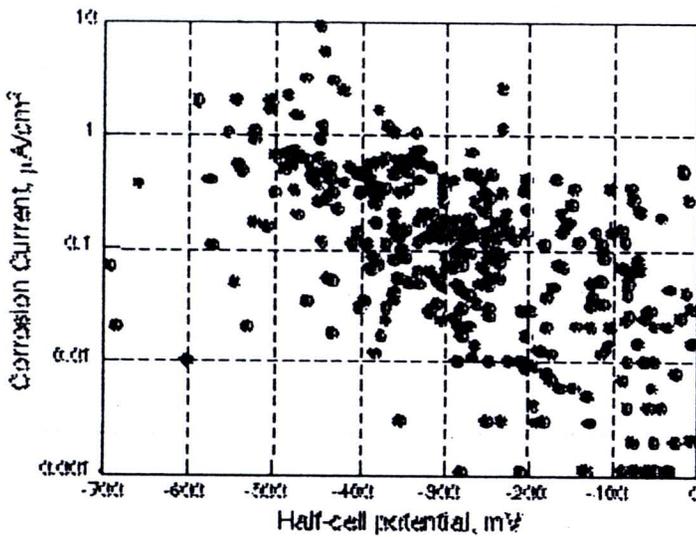
- ❖ ถ้าศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็นบวกมากกว่า -200 มิลลิโวลต์ มีความเป็นไปได้สูงที่เหล็กจะไม่เกิดสนิม
- ❖ ถ้าศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็นลบมากกว่า -350 มิลลิโวลต์ มีความเป็นไปได้สูงที่เหล็กจะเกิดสนิม
- ❖ ความไม่แน่นอนในการเกิดสนิมเมื่อค่าแรงดันอยู่ในช่วง -200 ถึง -350 มิลลิโวลต์

อย่างไรก็ตามข้อแนะนำให้ไปประยุกต์ใช้งานบนหลักการเชิงตัวเลขไม่ควรใช้ในสภาวะเงื่อนไขดังต่อไปนี้

- ❖ การเกิด Carbonation ได้ขยายกว้างออกไปจนถึงระดับของเหล็กเสริมในคอนกรีต
- ❖ การประเมินสภาพคอนกรีตที่อยู่ภายในที่จัดเก็บไม่ได้อยู่ในสภาพเปียกชื้น
- ❖ เปรียบเทียบการกัดกร่อนของคอนกรีตที่อยู่ภายนอกกับความชื้นที่มีความแปรผันสูงหรือปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ในคอนกรีต

จากข้อความข้างบนเป็นข้อแนะนำการระวังป้องกันในขณะทดสอบเพราะว่าเป็นสิ่งที่สำคัญต่อความต้านทานของคอนกรีตและออกซิเจนที่มีอยู่ทำให้เกิดอัตราการเกิดสนิมและรูปที่ 2.14 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่ไม่ดีระหว่างวิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์กับวิธีการวัดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม โดยวิธีการวัดค่าความต้านทานโพลาไรซ์ (Feliu, S., Gonzalaz, J.A., and Andrade, C, 1996) สามารถอธิบายได้ว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมมีค่าน้อยกว่า $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ให้พิจารณาว่าเหล็กเสริมไม่เกิดสนิม แต่ถ้ามีค่ามากกว่า $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ให้พิจารณาว่าเหล็กเสริมจะมีโอกาสเกิดสนิมสูงมากดังรูปที่ 2.14 การนำไปประยุกต์ใช้งานต้องทำตามข้อแนะนำตามมาตรฐาน ASTM C-876





รูปที่ 2.14 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม(i_{corr})กับศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

วิธีการของศักย์ไฟฟ้าที่มีความแตกต่างกัน (potential difference technique) สำหรับบริเวณพื้นที่ที่เกิดสนิมพื้นที่บริเวณนั้นจะแสดงให้เห็นถึงความลาดเอียงของศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าแตกต่างกันซึ่งเป็นพื้นฐานของแผนภูมิเส้นชั้นความสูงของศักย์ไฟฟ้าสำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นเส้นชั้นความสูง (equipotential contour) ระยะห่างของเส้นชั้นความสูงของค่าแรงดันที่เป็นรูปปิดแสดงให้เห็นว่าบริเวณนี้มีความลาดเอียงสูง ซึ่งบางครั้งในทางปฏิบัติค่าของแรงดันไฟฟ้าที่วัดค่าได้เปลี่ยนแปลงมากเกินไป ดังนั้นตัวบ่งชี้ที่แสดงให้เห็นการเกิดสนิมจะเป็นพื้นที่ผิว เช่นแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงมากกว่า 100 มิลลิโวลต์จะต้องมีพื้นที่มากกว่า 5 ตารางเมตร ดังนั้นวิธีการของ potential difference technique เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปในการบ่งชี้ให้เห็นถึงบริเวณที่เกิดสนิมซึ่งมีความน่าเชื่อถือมากกว่าการใช้เทคนิคเชิงตัวเลข (Elsener, B., Dawson, J.L., et. al., 1990)

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

ปัจจัยหลากหลายที่มีผลกระทบต่อวิธีการทดสอบการเกิดสนิมโดยผู้เชี่ยวชาญทางด้านการศึกษาการเกิดสนิมได้ให้คำแนะนำที่เหมาะสมของวิธีการสำรวจด้วยศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ภายใต้เงื่อนไขดังต่อไปนี้ (ASTM C-876)

- ❖ คอนกรีตต้องอยู่ในสภาพที่อิ่มตัวด้วยน้ำ
- ❖ คอนกรีตเกิด Carbonated ที่ระดับความลึกของเหล็กเสริม



❖ เหล็กเสริมที่เคลือบด้วย (galvanized)

ในการสำรวจค่าศักย์ไฟฟ้าควรมีการทดสอบเพิ่มเติมด้วยการทดสอบ Carbonation และปริมาณคลอไรด์ไอออนในคอนกรีต ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบควรสรุปเป็นข้อมูลให้ชัดเจนของค่าศักย์ไฟฟ้าที่สำรวจวัดค่าได้ ที่แสดงให้เห็นถึงบริเวณที่เกิดสนิมขณะที่ทำการทดสอบเวลานั้นและเงื่อนไขสภาพสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง

2.8 ความต้านทานของคอนกรีต

วิธีการของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เป็นวิธีการที่แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ถึงบริเวณที่เหล็กจะเกิดสนิมในช่วงเวลานั้นที่ทำการวัดค่า จากที่ได้มีการอธิบายมาแล้วนั้น สรุปได้ว่าหลังจากที่เหล็กเกิดการสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิม(Depassivation)และอัตราการเกิดสนิมจะขึ้นอยู่กับออกซิเจนที่ยังทำปฏิกิริยาที่ซั้วแคโทดและยังขึ้นอยู่กับความต้านทานทางไฟฟ้าของคอนกรีตด้วยทำให้ง่ายต่อการแพร่ของอิออนที่มีอยู่ทั่วไปในคอนกรีตระหว่างบริเวณซั้วแอโนดและซั้วแคโทด นอกจากนี้ความต้านทานทางไฟฟ้าของคอนกรีตยังขึ้นอยู่กับผิวของโพรงช่องว่างเล็กๆซึ่งเป็นโครงสร้างเล็กๆของเพสต์และปริมาณความชื้นของคอนกรีต ดังนั้นประโยชน์ที่ได้จากการทดสอบและสำรวจด้วยวิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เป็นการวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของคอนกรีต ค่าความต้านทานไฟฟ้ามักหน่วยเป็นลูกบาศก์ของวัสดุของความต้านทาน (โอมท์) ต่อความยาว (Millard, S.G., et. al., 1989) โดยที่ ตัวนำทางไฟฟ้าเป็นความต้านทาน R ของพื้นที่ คือ A และความยาวเป็น L ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทาน ρ ดังสมการที่ 10

$$R = \rho \frac{L}{A} \tag{10}$$

มาตรฐานวิธีการทดสอบการวัดค่าความต้านทานของคอนกรีตยังไม่มีการจัดทำเป็นมาตรฐาน แต่มีเทคนิคที่ใช้แล้วประสบความสำเร็จ ดังแสดงในภาพที่ 14 (Millard, S.G. and et al., 1989)

จากพื้นฐานของหลักการนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันเป็นระบบของ 4 ชั้วไฟฟ้า (Wenner, F.,1915) ซึ่งได้จัดทำขึ้นเป็นมาตรฐานสำหรับใช้ในการวัดค่าความต้านทานของดิน (ASTM G-57, 2002) โดยที่ตำแหน่งของชั้วไฟฟ้าทั้ง 4 มีระยะห่างเท่ากันเป็นระบบการเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้ากับผิวของคอนกรีต โดยใช้ (cream) เป็นสื่อตัวนำไฟฟ้า (Millard, S.G., Ghassemi, M.H., and Bungey, J.H., 1990) จากรูปที่ 2.15 มีหลักการทำงานคือ ชั้วไฟฟ้าที่อยู่ภายนอกจะเชื่อมต่อกับแหล่งที่ให้กระแสไฟฟ้าและชั้วไฟฟ้าที่อยู่ภายใน 2 ชั้วจะเชื่อมต่อกับเครื่องมืออ่านค่าแรงดันไฟฟ้า (โวลท์มิเตอร์) ดังนั้นค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของคอนกรีตสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 11 (Millard, S.G., Wenner, F.A., et. al., 1990)

$$\rho = \frac{2\pi sV}{I} \tag{11}$$



ของระยะหุ้มคอนกรีตรวมถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมที่สูญเสียไปจะทำให้ชิ้นส่วนโครงสร้างรับกำลังลดลง

เทคนิคที่ใช้วัดค่าความต้านทานที่ได้จัดทำขึ้นเป็นวิธีการ Linear polarization (Broomfield, J., 1966) โดยใช้โพรบ (Probe) เป็นอุปกรณ์ที่มีสายเชื่อมต่อกับเครื่องมือโพลาริซัดอูดทงูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่อยู่โดยรอบและวัดค่าความต้านทานของคอนกรีตด้วยวิธีการ Linear polarization ผลกระทบจากการวัดค่าความต้านทานของคอนกรีตระหว่างเหล็กเสริมและตำแหน่งที่ probe วางบนผิวคอนกรีต ยังไม่ผู้แต่งใดเผยแพร่หรือตีพิมพ์บทความโดยเปรียบเทียบการวัดค่าความต้านทานโดยใช้ 4 probe และ 1 probe การพัฒนาวิธีการของ single-probe และได้ให้ข้อเสนอแนะดังตารางที่ 2.1 แสดงถึงความสัมพันธ์ของความต้านทานคอนกรีตกับความเสียหายของการเกิดสนิม (Feliu, S., Gonzalez, J.A., and Andrade, C., 1996)

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของคอนกรีตและความเสียหายของการเกิดสนิม

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

ที่มา : Feliu, S. et al., 1996.

ในอีกกรณีหนึ่ง Bungey ได้ให้แนวทางถึงความแตกต่างกันของข้อมูลระหว่างความต้านทานของคอนกรีตและความเสียหายของการเกิดสนิม เมื่อเหล็กเสริมสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิมดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของคอนกรีตและความเป็นไปได้ในการเกิดสนิม

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

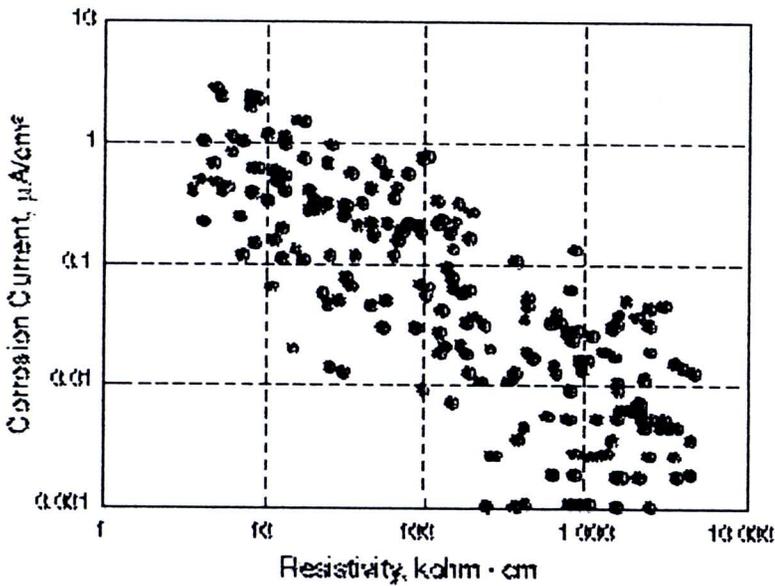
ที่มา : Bungey, J.H., 1989.

จากรูปที่ 2.16 แสดงถึงความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดสนิมของคอนกรีตและความต้านทานของคอนกรีต (Feliu, S., Gonzalez, J.A., and Andrade, C., 1996) เปรียบเทียบกับรูปที่ 13 จะเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อ



เหล็กเสริมสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิม ความต้านทานของคอนกรีตจะมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดสนิมได้ดีกว่าการวัดค่าด้วยวิธีการ half-cell potential

สรุปโดยย่อ การวัดค่าความต้านทานของคอนกรีตเป็นการจัดเตรียมข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อใช้ในการประเมินความเป็นไปได้ของระดับการเกิดสนิมที่มีความแตกต่างกัน ซึ่งเป็นการนำเอาประโยชน์ที่ได้จากการสำรวจด้วยวิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาใช้ ค่าความต้านทานที่สูงที่ได้จากการสำรวจศักย์ไฟฟ้าต่ออัตราการเกิดสนิมอาจจะมีค่าต่ำ การอ้างอิงถึงความต้านทานของคอนกรีตที่มีความสัมพันธ์กับการแพร่กระจายของไอออนไปโดยทั่วคอนกรีตภายใต้การกระทำของศักย์ไฟฟ้าโดยรอบๆ ชั่วแฉกและชั่วคราว คอนกรีตที่มีความต้านทานเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณของโพรงช่องว่างในเพสต์มีจำนวนลดลงส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบแน่นอายุการใช้งานของคอนกรีตจึงเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.16 เปรียบเทียบความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม (i_{cor}) และค่าความต้านทานของชิ้นส่วนคอนกรีต

