

บทที่ 2

การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

2.1 การตรวจประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีต

เป็นที่ทราบกันดีว่าการบำรุงรักษาและการบูรณะซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับความเสียหายจากการเกิดสนิมในเหล็กเสริมให้กลับมามีความแข็งแรงเหมือนสภาพเดิมนั้นต้องเสียค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะโครงสร้างที่อยู่ในสภาวะสิ่งแวดล้อมทะเล ซึ่งการกำหนดต้นทุนค่าก่อสร้างในแต่ละปีจะประกอบไปด้วยงบประมาณที่ใช้ในการบำรุงรักษาและบูรณะซ่อมแซมโครงสร้างที่เสื่อมสภาพเนื่องจากสนิม ซึ่งใช้งบประมาณในการก่อสร้างมีมูลค่ามากกว่าโครงการก่อสร้างใหม่

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

สำหรับเนื้อหา รายงานวิจัยส่วนนี้ประกอบไปด้วยกลไกการเกิดสนิมและหลักการที่ใช้ในการวัดค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

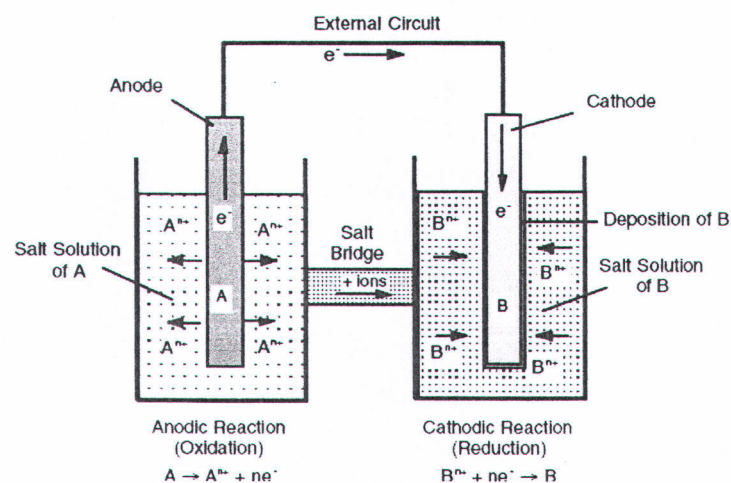
2.2 หลักการของการเกิดสนิม

ขบวนการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าของเซลล์ (Electrolytic Cell) ในการเกิดสนิมเป็นขบวนการเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้า-เคมี ที่มีความยุ่งยากซับซ้อนเนื่องจากเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในคอนกรีตมีการสูญเสียอิเล็กตรอนซึ่งจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าทั้งระบบของคอนกรีตเสริมเหล็ก

ในระบบของการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าเป็นวิธีการที่นิยมใช้กันซึ่งจะต้องมีความเข้าใจถึงกลไกของการกัดกร่อนสามารถอธิบายได้จากขบวนการของเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ เซลล์กัลวานิก (Galvanic cell) และเซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic Cell) โดยที่เซลล์ไฟฟ้าเคมีเมื่อเกิดปฏิกิริยาเคมีจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า ในขณะที่เซลล์อิเล็กโทรไลต์เป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ต้องผ่านกระแสไฟฟ้าจากภายนอกเข้าไปจึงจะเกิดปฏิกิริยาเคมี และจากรูปที่ 1 แสดงแผนภูมิการ



เกิดปฏิกิริยาการถ่ายโอนอิเล็กตรอนในเซลล์กัลวานิก โดยที่โลหะที่เกิดการกัดกร่อนเป็นขบวนการที่เกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (การรับและเสียอิเล็กตรอน) เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านสื่อตัวนำไฟฟ้าที่อยู่ภายนอกและการเคลื่อนที่ของไอออนที่อยู่ภายใน โดยมีสารละลายเป็นตัวนำ โดยแนวคิดพื้นฐานนี้เป็นที่นิยมใช้กันและจะต้องเข้าใจถึงกลไกของการกัดกร่อนเป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาสื่อตัวนำทางไฟฟ้าในระบบของเซลล์กัลวานิก ในระบบนี้จะประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ชนิด เมื่อพิจารณาการเกิดปฏิกิริยาเคมีโดยที่ขั้ว anode ของโลหะ A จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำหน้าที่เป็นขั้วลบสูญเสียอิเล็กตรอน (e^-) กลายเป็นไอออน (A^{n+}) อยู่ในสารละลายซึ่งเกิดขึ้นพร้อมกันเสมอและอิเล็กตรอน (e^-) ที่สูญเสียไปจะเคลื่อนที่ผ่านตัวนำไฟฟ้าที่อยู่ภายนอกไปยังขั้ว cathode เป็นขั้วไฟฟ้าที่รับอิเล็กตรอนเรียกปฏิกิริยานี้ว่าปฏิกิริยารีดักชัน



ภาพที่ 2-1 แผนภาพที่แสดงระบบของเซลล์กัลวานิก; การเกิดปฏิกิริยา Oxidation ที่ขั้ว anode และการเกิดปฏิกิริยา Reduction ที่ขั้ว cathode

ที่มา : Brown, T.L. and LeMay, H.E.Jr., (1988)

จากภาพที่ 2-1 แสดงแผนภูมิที่มีส่วนประกอบพื้นฐานของระบบเซลล์กัลวานิก โดยที่ในสารละลาย A จะมีไอออน (A^{n+}) ที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากโลหะ A สูญเสียอิเล็กตรอนและกลายเป็นไอออน (A^{n+}) ออกมาทำให้ประจุสุทธิของสารละลายมีค่าเป็นบวกเพิ่มขึ้น

การเชื่อมโยงของสารละลาย A และ B โดยสะพานไอออน (Salt bridge) ซึ่งมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์ บรรจุอยู่และจะเกิดปฏิกิริยาการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างโลหะทั้งสองที่แช่อยู่ในสารละลายทิศทางเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Anode) ไปยังขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (cathode) เมื่อโลหะ A ที่แช่ในสารละลาย A เริ่มสึกกร่อน เนื่องจากโลหะ A สูญเสียอิเล็กตรอนกลายเป็นไอออนบวก (A^{n+}) อยู่ในสารละลาย เขียน

สมการปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ดังสมการที่ 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 เนื่องจากโลหะ A สูญเสียอิเล็กตรอนและกลายเป็นไอออน (A^{n+}) ออกมาอยู่ในสารละลาย A ทำให้ไอออน (A^{n+}) ในสารละลายมีค่าเป็นบวกเพิ่มขึ้น ในขณะที่ ไอออน (B^{n+}) ในสารละลาย B ถูกใช้ไปรวมกับอิเล็กตรอนที่ขั้วไฟฟ้า cathode มีค่าเป็นลบและกลายเป็นอะตอมเกาะติดกับโลหะ B ส่งผลทำให้ไอออนบวก (B^{n+}) ในสารละลาย B ลดลงและเหลือไอออนบวก (B^{n+}) น้อยกว่าที่มีอยู่ในสารละลาย B ผลก็คือทำให้ประจุสุทธิในสารละลาย B เป็นลบหรือมีค่าเป็นบวกลดลง ดังนั้นเพื่อให้เกิดการสมดุล สารละลายโปรตัสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่อยู่ในสะพานไอออน (Salt bridge) จะเกิดการแตกตัวจะส่งให้ไอออนลบ (Cl^-) ลงไปในสารละลาย A ซึ่งเป็นด้านที่มีไอออนบวกเพิ่มขึ้นในขณะเดียวกันไอออนบวก (B^{n+}) ในสารละลาย B ถูกใช้ไปจนทำให้ไอออนบวกลดลง สะพานไอออนก็จะทำหน้าที่ส่งไอออนบวก (K^+) ลงมาในสารละลาย B ทำให้มีปริมาณไอออนบวกในสารละลาย A และ B สมดุลกันผลก็คือปริมาณไอออนสุทธิในสารละลายทั้งสองจะคงที่ พิจารณาได้ว่าจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทั้งหมดนี้สามารถแยกออกมาเป็นครึ่งปฏิกิริยาดังนี้

ผลของทั้งสองปฏิกิริยาที่มีไอออนบวกเพิ่มขึ้นในสารละลาย A ที่ขั้วไฟฟ้า anode ในขณะที่ไอออนบวกถูกใช้หมดไปในสารละลาย B ที่ขั้วไฟฟ้า Cathode ปฏิกิริยาดังกล่าวยังคงทำหน้าที่เชื่อมต่ออยู่ระหว่างสองสารละลายเพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลครบวงจร แต่ถ้าสื่อที่เป็นตัวนำไม่สามารถเชื่อมต่อระหว่างขั้วไฟฟ้าก็จะไม่เกิดการกักกร่อนขึ้นที่ขั้ว Cathode และก็จะไม่มีอะตอมสะสมอยู่ที่ ขั้ว Cathode ก็จะไม่มีเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อน



2.3 ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์

การวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากปฏิกิริยาไฟฟ้าในลักษณะศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (half-cell Potentials) ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ไม่สามารถวัดค่าได้ด้วยขั้วไฟฟ้าเดียว ดังนั้นหากนำเอาครึ่งเซลล์ต่างชนิดมาต่อกันให้เป็นวงจรผลของศักย์ไฟฟ้าที่ได้มีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของครึ่งเซลล์ที่นำมาต่อกันซึ่งเป็นศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กัลวานิกมีหน่วยในการวัดค่าเป็นโวลต์ ทั้งนี้หากนำศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ไฮโดรเจนมาตรฐานไปเปรียบเทียบกับครึ่งเซลล์ชนิดใดชนิดหนึ่งโดยนำไปต่อเป็นเซลล์ไฟฟ้าคู่กับครึ่งเซลล์ไฮโดรเจนมาตรฐานค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่วัดได้จะเป็นศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานครึ่งเซลล์นั้น ศักย์ไฟฟ้าเหล่านี้มีผลต่อการกัดกร่อนที่ขั้วไฟฟ้า anode เมื่อมีกระแสไฟฟ้าจากภายนอกครบวงจร โดยปรกติศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์จะแสดงในรูปของปฏิกิริยา Oxidation ซึ่งเกิดจากอะตอมของโลหะเกิดการแตกตัวปล่อยอิเล็กตรอนและไอออนบวกออกมาพร้อมกันโดยที่ผลกระทบของค่าของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไอออนบวกในสารละลายที่มีขั้วไฟฟ้าแช่อยู่และอุณหภูมิของสารละลาย ดังนั้นค่าของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐานเป็นการวัดความเข้มข้นของสารละลายที่อุณหภูมิมาตรฐาน และสำหรับค่าที่วัดได้จะมีค่าที่เป็นลบมากกว่าซึ่งจะชี้ให้เห็นถึงแนวโน้มของโลหะเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนและส่งผลการกัดกร่อนของโลหะ

สมมุติให้วงจรไฟฟ้าภายนอกจากภาพที่ 2-1 แทนด้วยโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานไฟฟ้าที่มีความละเอียดสูงซึ่งไม่มีกระแสไฟฟ้าจากภายนอกผ่านเข้ามาในวงจรเป็นเงื่อนไขของสภาวะที่เรียกว่า (Open-circuit Potential) ค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จากโวลต์มิเตอร์เป็นค่าของศักย์ไฟฟ้าของแต่ละขั้วไฟฟ้าที่มีความแตกต่างกันระหว่างปฏิกิริยา anodic และปฏิกิริยา Cathodic (Brown, T.L. and LeMay, H.E., Jr., 1988)

จากตัวอย่างลักษณะนี้ตามภาพที่ 2-1 ถ้าสมมุติให้ขั้วไฟฟ้าอันหนึ่งเป็นเหล็กแช่ในสารละลายที่มีไอออนของเหล็กและอีกขั้วไฟฟ้าเป็นสังกะสีแช่ในสารละลายซึ่งมีซิงค์ไอออนละลายอยู่จะให้ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐานสำหรับปฏิกิริยา Oxidation ของเหล็กอ่านได้ -0.44 โวลต์ และค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ มาตรฐานสำหรับปฏิกิริยา Oxidation ของสังกะสีอ่านได้ -0.76 โวลต์ (Fontana, M.G., 1986) ศักย์ไฟฟ้าของสังกะสีจะมีค่าเป็นลบมากกว่าเหล็ก เพราะว่าแนวโน้มการสูญเสียอิเล็กตรอน

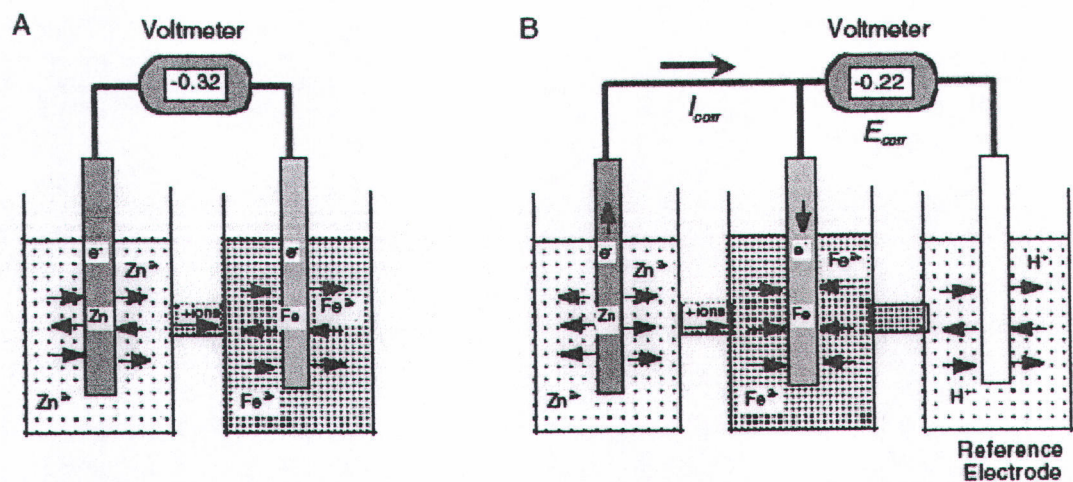
ของสังกะสีมีมากกว่าเหล็ก และถ้าปลายด้านบวกของโวลต์มิเตอร์มีการเชื่อมต่อเข้ากับขั้วไฟฟ้าสังกะสี ค่าของศักย์ไฟฟ้าอ่านได้ -0.32 โวลต์ และถ้าปลายด้านบวกของโวลต์มิเตอร์เชื่อมต่อเข้ากับขั้ว cathode ค่าศักย์ไฟฟ้าอ่านได้ +0.32 โวลต์ ดังนั้นขั้วไฟฟ้าสังกะสีจะเป็นขั้ว anode และขั้วไฟฟ้าของเหล็กจะเป็นขั้ว cathode แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนของอิเล็กตรอนที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเคลื่อนที่จากขั้วไฟฟ้าสังกะสี (anode) ผ่านวงจรไฟฟ้าภายนอกไปยังขั้วไฟฟ้าของเหล็ก (cathode)



ซึ่งสวนทางกับการไหลของกระแสไฟฟ้าซึ่งไหลจากขั้วบวกไปยังขั้วลบ ดังนั้นสัณฐานจึงเป็นขั้วลบ และเหล็กเป็นขั้วบวกหรือกล่าวได้ว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากขั้วที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าไปยังขั้วที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าสรุปได้ว่าครึ่งเซลล์ที่รับอิเล็กตรอน (cathode) มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าครึ่งเซลล์ที่ให้อิเล็กตรอน (anode)

2.4 หลักการโพลาไรซ์ขั้น

เมื่อตัวนำไฟฟ้ามีกระแสไฟฟ้าที่อยู่ภายนอกครบวงจร ทำให้สามารถหาค่าอัตราการเกิดสนิมของขั้วไฟฟ้า anode ได้และจากรูปที่ 2-2 (A) แสดงถึงเซลล์ตัวนำไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อกับขั้วไฟฟ้าและโวลต์มิเตอร์ที่มีความละเอียดสูงค่าศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้จากโวลต์มิเตอร์ได้มาจากศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยาซึ่งเป็นความต่างศักย์ของวงจรไฟฟ้าแบบเปิด (Open-circuit Potential) (Fontana, M.G., 1986) การวัดค่าความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้าโดยมีขั้วไฟฟ้าอ้างอิงและอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2-2 (B) ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าอยู่ระหว่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของขั้วไฟฟ้า ซึ่งที่ขั้วไฟฟ้า แอโนดจะมีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกมากกว่าและที่ขั้วไฟฟ้า แคโทดจะมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบมากกว่าซึ่งมีผลทำให้กระแสไฟฟ้าที่อยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงความสมดุลของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของแต่ละขั้วไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้านี้เรียกว่าโพลาไรซ์ Polarization (Fontana, M. G., 1986 and ASTM G15, 2002., et al.) ความแตกต่างระหว่างความสมดุลของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และศักย์ของขั้วไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าเป็น Over potential



ภาพที่ 2-2 เซลล์ตัวนำไฟฟ้า: (A) ศักย์ไฟฟ้าที่สมดุลซึ่งอ่านค่าได้จากโวลต์มิเตอร์

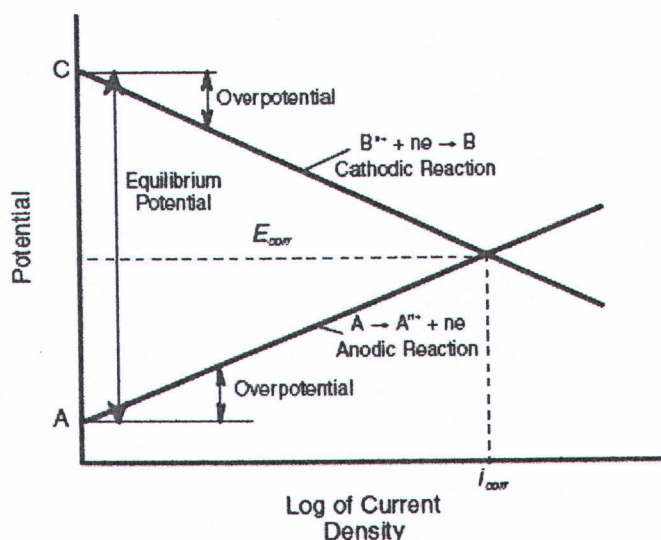
(B) วงจรไฟฟ้า Short-Circuit cell กับขั้วไฟฟ้าที่มีศักย์ไฟฟ้า

ที่มา : Nicholas J.Carino, 2004

ในทุกๆกระบวนการของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์จะมีคุณลักษณะเฉพาะเป็นกราฟเส้นโพลาไรซ์ (Polarization Curve) ซึ่งแทนด้วยความสัมพันธ์ระหว่าง Overpotential และกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกและไหลเข้าที่ขั้วไฟฟ้าดังรูปที่ 3 แสดงให้เห็นแนวคิดที่เข้าใจได้ง่ายของ Polarization Curve สำหรับเซลล์ตัวนำไฟฟ้าที่มีขั้วไฟฟ้าแอโนดและขั้วไฟฟ้าแคโทด (Rosenberg, A., Hansson, C., Andrade, C., et al., 1989) จากภาพที่ 2-3 แสดงแกนแนวนอนเป็น Log scale มีความสัมพันธ์เป็นแบบไม่เชิงเส้นตรง (Nonlinear) ในเทอมของกระแสไฟฟ้าที่แท้จริง นอกจากนี้โดยปกติกระแสไฟฟ้าจะแสดงอยู่ในรูปของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (current density) ซึ่งมีหน่วยเป็นกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าโดยที่จุด A และ C มีความสอดคล้องด้วยเงื่อนไขของความสมดุลของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์โดยไม่มีกระแสไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงและความแตกต่างระหว่างค่าของความต่างศักย์เป็นความสมดุลของศักย์ไฟฟ้า (equilibrium potential) ของเซลล์ตัวนำไฟฟ้าและกราฟเส้นทั้งคู่นี้แสดงให้เห็นถึงกระแสไฟฟ้าที่ออกจากขั้วไฟฟ้าแอโนดให้ค่าของความต่างศักย์เพิ่มขึ้นทำให้มีค่าเป็นบวกและในขณะที่กระแสไฟฟ้าที่รับเข้ามาในขั้วไฟฟ้าแคโทดให้ค่าความต่างศักย์เพิ่มขึ้นเช่นกันแต่จะให้ค่าเป็นลบ กราฟเส้นโพลาไรซ์นี้ เป็นกราฟที่ยอมรับได้ซึ่งสามารถที่จะนำไปหาค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม (Corrosion Current Density) และศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสนิม (Corrosion Potential) ของเซลล์ตัวนำไฟฟ้าโดยเงื่อนไขของเซลล์วงจรไฟฟ้านี้ ต้องมีความเสถียรเพียงพอและกระแสไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจากขั้วไฟฟ้าแอโนดมีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่รับเข้าไปในขั้วไฟฟ้าแคโทด ดังนั้นตำแหน่งของจุดตัดกันของเส้นโค้งโพลาไรซ์เชิงแรงดันถูกกำหนดให้เป็นกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม (Corrosion Current Density, i_{corr}) และศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสนิม (Corrosion Potential, E_{corr}) ของเซลล์ตัวนำไฟฟ้า

จากรูปที่ 2-3 แสดงถึงเส้นกราฟทั้งสองมีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่มีค่าเท่ากับเงื่อนไขของความสมดุลของครึ่งเซลล์ (ที่จุด A และ C) ซึ่งในความเป็นจริงความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่จุด A และ C แสดงให้เห็นว่ากระแสไฟฟ้าทำให้ความสมดุลเกิดการเปลี่ยนแปลงในครึ่งเซลล์ไฟฟ้าและความสมดุลไม่จำเป็นที่จะต้องมีค่าเท่ากัน (Fontana, M.G., 1986)





รูปที่ 2-3 กราฟเส้นโพลาไรซ์สำหรับ Short-Circuited Electrolytic Cell แสดงถึงความเสถียรของศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิม
ที่มา : (Rosenberg et al., 1989)

ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมสามารถที่จะคำนวณย้อนกลับไปหาค่าของการสูญเสียของ Electrode ในเทอมของมวลหรือความหนาต่อหน่วยของเวลาโดยใช้กฎของ Faraday's Law (Evans, U.R., 1980., ASTM G102, 2002., Andrade, C. and Alonso., C., 1996)

2.5 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต (Corrosion of Steel in Concrete)

การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีประกอบด้วยปฏิกิริยาแอโนดิก (Anodic Reaction) และปฏิกิริยาแคโทดิก (Cathodic Reaction) กระบวนการเกิดสนิมเริ่มจากการมีความชื้นเพียงพอที่จะทำให้อะตอมของเหล็กสูญเสียอิเล็กตรอนกลายเป็นไอออน (Fe^{2+}) ดังสมการที่ (2-3) ละลายอยู่ในสารละลาย Electrolyte รอบๆเหล็กเสริมเรียกบริเวณนี้เป็นแอโนดและอิเล็กตรอนนี้ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้า ในขณะที่บริเวณเหล็กเสริมที่ไม่มีการแตกตัวของอิเล็กตรอนและไอออนบริเวณนั้นจะมีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าซึ่งทำหน้าที่เป็นแคโทด อธิบายได้ดังรูปที่ 4 แสดงถึงกระบวนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ดังภาพที่ 4(A) อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นที่แอโนดซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าที่สูงจะเคลื่อนที่ไปตามเหล็กเสริมซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้าและเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าซึ่งเป็นแคโทดและทำปฏิกิริยากับน้ำ (H_2O) และออกซิเจน (O_2) ที่อยู่บริเวณนี้เกิดเป็นไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ขึ้นดังสมการที่ 4 และหลังจากนั้นจะเกิดการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าซึ่งเกิดขึ้นทั้งภายในและภายนอกเหล็กเสริม สำหรับกระแสภายในเหล็กเสริมเป็นการเคลื่อนที่ของ

อิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่จากแอโนดไปสู่แคโทด ในขณะที่กระแสภายนอกเหล็กเสริมเป็นการเคลื่อนที่ของ (Fe^{2+}) และ (OH^-) ผ่านสารละลายในช่องว่าง (Pore Solution) ของคอนกรีตรอบๆ เหล็กเสริม โดยประจุลบคือ (OH^-) จะเคลื่อนที่จากขั้วแคโทดไปสู่แอโนดและประจุบวก (Fe^{2+}) จะเคลื่อนที่จากแอโนดไปสู่แคโทด ดังภาพที่ 4(B) การเคลื่อนที่ของไอออนโดยผ่านสารละลายในช่องว่างของคอนกรีตเป็นปัจจัยที่สำคัญของการเกิดการกัดกร่อน สารละลายในช่องว่างส่วนใหญ่เป็นสารละลายของ Alkali และ Calcium Hydroxide เปรียบเหมือนเป็นสารละลาย Electrolyte ทำให้เกิดการครบวงจรของกัลวานิกเซลล์และเกิดการกัดกร่อนขึ้น (Bentur et al., 1997) แต่ถ้าน้ำในช่องว่างนี้แห้งหรือโครงสร้างภายในของคอนกรีตบีบแน่นและช่องว่างภายในเกิดขึ้นไม่ต่อเนื่องการไหลของไอออนผ่านสารละลายในช่องว่างจะเกิดขึ้นได้ยากขึ้นซึ่งทำให้การเกิดการกัดกร่อนช้าลงจนหยุดการกัดกร่อน

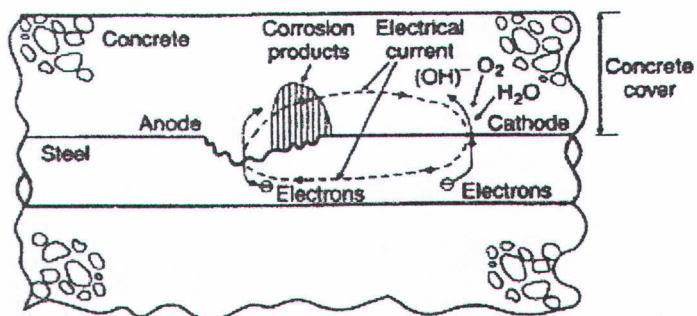


จากการเคลื่อนที่ของ Fe^{2+} และ OH^- จากแอโนดและแคโทดตามลำดับ โดยที่ OH^- จากแคโทดเคลื่อนที่ไปรวมตัวกับ Fe^{2+} และทำปฏิกิริยาเกิดเป็น $Fe(OH)_2$ (ferrous hydroxide) ดังสมการที่ 5 ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับ O_2 ต่อได้และเกิดเป็นสนิมเหล็ก $Fe_2O_3 \cdot H_2O$ (hydrate ferric oxide) หรือ red-brown rust และ Fe_3O_4 (black magnetite) ซึ่งเกิดจาก $Fe_3O_4 \cdot H_2O$ (Green hydrate magnetite) ดังสมการที่ 6, 7 และ 8

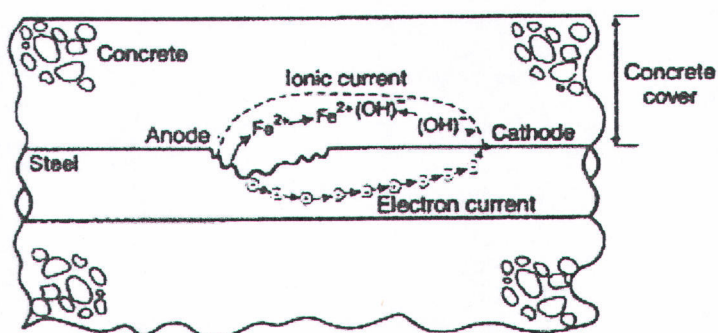


ซึ่งผลิตภัณฑ์สนิมเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของการกัดกร่อนคือสนิมในรูปแบบต่างๆ มีปริมาณมากกว่าเหล็กก่อนเกิดปฏิกิริยา 4 ถึง 6 เท่า (Nielsen., A, 1985) ดังแสดงในภาพที่ 2-5 ทำให้เกิดแรงดันภายในและคอนกรีตเกิดการแตกร้าวเสียหายได้ นอกจากนี้ในส่วนหนึ่งของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบางจุดเหล็กเสริมมีพื้นที่หน้าตัดลดลงส่งผลต่อการรับแรงของโครงสร้างซึ่งถ้าหากไม่ได้ซ่อมแซมให้ถูกต้องตามวิธีโครงสร้างอาจเกิดการวิบัติได้



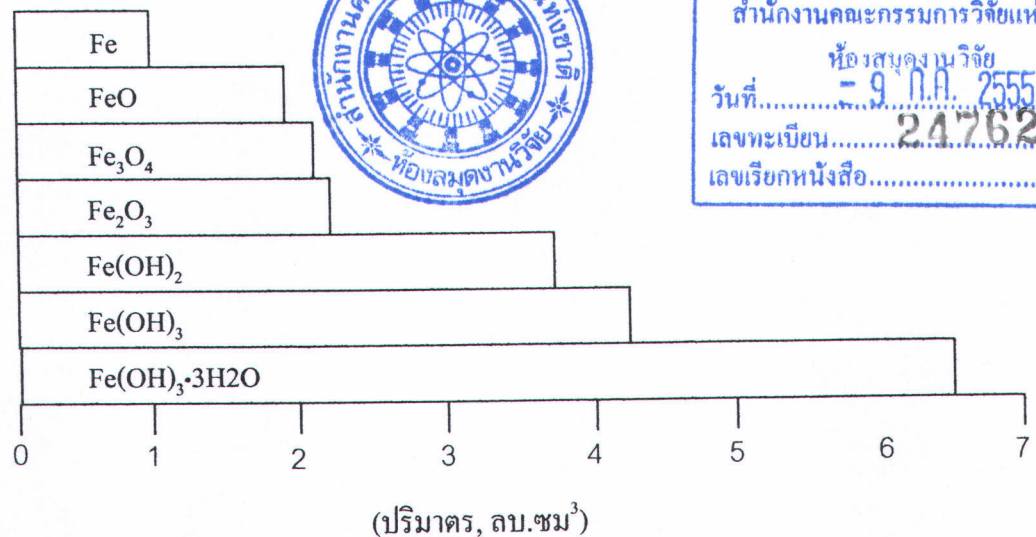


(A)



(B)

ภาพที่ 2-4 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อนบนผิวเหล็กเสริม (A) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ Anode และ Cathode (B) การเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าทั้งภายในและภายนอกเหล็ก ที่มา: Bentur et al. (1997)



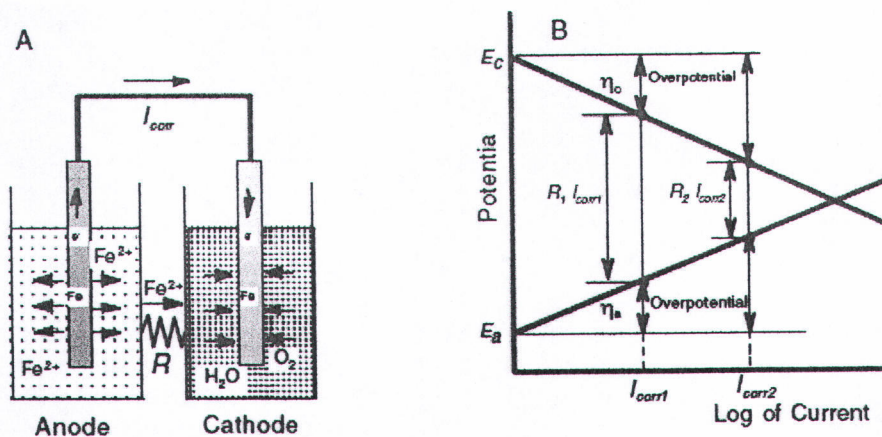
ภาพที่ 2-5 ปริมาตรของเหล็กเสริมที่เกิดสนิม
ที่มา : Nielsen A., (1985)

จากรายละเอียดข้างต้นที่ได้อธิบายถึงกระบวนการกัดกร่อนของเหล็กเสริมซึ่งโดยทั่วไปแล้วการกัดกร่อนของเหล็กเสริมสามารถเกิดขึ้นเองได้ในธรรมชาติและเกิดขึ้นได้ตลอดเวลาในบริเวณที่มีความชื้นแต่สำหรับเหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตนั้น จะอยู่ในสถานะที่ไม่เกิดสนิมเนื่องจากมี Passivation film ที่อยู่โดยรอบเหล็กเสริมในคอนกรีตซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ และในช่วงที่คอนกรีตมีการพัฒนากำลัง คอนกรีตจะมีความเป็นด่างสูงมีค่า PH ประมาณ 13 ซึ่งสามารถช่วยป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ (Bentur et al., 1997) เนื่องจากในสถานะของการเป็นด่างสูงเหล็กจะไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาอะโนดิกได้ นั่นคือเหล็กจะไม่แตกตัวเป็นไอออนทำให้ปฏิกิริยาการเกิดสนิมไม่สามารถเกิดขึ้นได้ อย่างไรก็ตามโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไปนั้นมักอยู่ในสภาพแวดล้อมที่อาจสัมผัสกับสารเคมี กรด หรือในสภาพสิ่งแวดล้อมที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมเช่น โครงสร้างที่อยู่บริเวณชายฝั่งทะเล จะเกิดผลกระทบเนื่องจากคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นจะเป็นตัวทำลายสภาพความเป็นด่างของคอนกรีตทำให้ค่า PH ลดลงมีค่าน้อยกว่า 13 จึงเป็นเหตุผลทำให้เร่งการเกิดสนิมได้เร็วขึ้น จากเซลล์ตัวนำทางไฟฟ้าแบบ Short-Circuited Electrolytic Cell ดังภาพที่ 2-2 แสดงถึงการไหลของไอออนในสารละลายระหว่างเซลล์ตัวนำไฟฟ้าโดยมีสะพานเกลือเป็นตัวเชื่อมทำหน้าที่ช่วยรักษาความสมดุลของเซลล์ตัวนำไฟฟ้าให้มีความเสถียรภาพ ในกรณีของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในคอนกรีตโดยที่คอนกรีตทำหน้าที่เป็นสื่อตัวนำทางไฟฟ้าของไอออนระหว่างแอโนดและแคโทดซึ่งทำหน้าที่เหมือนสะพานให้ไอออนสามารถเคลื่อนที่ไปมาได้ระหว่างครึ่งเซลล์ สำหรับในโพรงเล็กๆของโครงสร้าง (Pore Structure) ของเพสต์ (paste) มีสารละลายอยู่ภายในซึ่งโพรงเล็กๆนี้จะอยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยสารละลายจะเป็น

ตัวนำไอออนให้เคลื่อนที่ได้ง่ายโดยทั่วไปในคอนกรีต การเคลื่อนที่ของไอออนถูกควบคุมด้วยสื่อตัวนำทางไฟฟ้าของ paste ในภาพที่ 6 (a) แสดงถึงสื่อตัวนำไฟฟ้าของสะพานที่เชื่อมต่อเนื่องกันระหว่างสารละลายซึ่งแทนด้วยอุปกรณ์ต้านทานกระแสไฟฟ้าในวงจร(R)ทำหน้าที่เป็นตัวจำกัดการไหลของไอออนระหว่างครึ่งเซลล์และช่วยลดค่าของกระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิมโดยเปรียบเทียบกับสื่อตัวนำไฟฟ้างดภาพที่ 2(b) กราฟเส้นโพลาริซ์ในภาพที่ 6(b) ได้อธิบายถึงการลดลงของกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม เนื่องจากแรงดันไฟฟ้ามีความแตกต่างกันระหว่าง ครึ่งเซลล์ของสัคย์ไฟฟ้าที่สมดุล equilibrium potential ของขั้วแคโทดและแอโนด ($E_c - E_a$) เป็นการทำให้แรงดันไฟฟ้าหมดไปที่ขั้ว electrode และความต้านทานของตัวนำไฟฟ้าของคอนกรีตจะลดลง (West., J.M., 1986)

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

โดยที่ η_a และ η_c เป็น Overpotentials ของขั้วไฟฟ้าอ้างอิง, $|\eta_c|$ มีค่าเป็นบวกเสมอ, R เป็นความต้านทานของสื่อตัวนำไฟฟ้าและ I_{corr} เป็นกระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิมแท้จริง ซึ่งกระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิมมีค่าต่ำกว่าซึ่งค่าความต้านทานจะเท่ากับศูนย์ ดังภาพที่ 2 และ 3



ภาพที่ 2-6 (A) เซลล์ตัวนำไฟฟ้าที่ทำให้เหล็กเกิดสนิมในคอนกรีต; (B) เส้นกราฟโพลาริซ์แสดงถึงผลกระทบของความต้านทานทางไฟฟ้าของคอนกรีต;

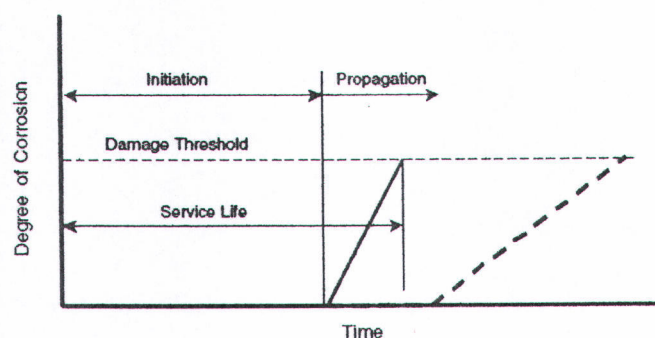
ที่มา : Wwst, J.M., 1986

จากภาพที่ 6(B) แสดงถึงวงจรไฟฟ้าเทียบเท่าของเหล็กเสริมที่เป็นสนิม (Wwst, J.M., 1986) ขั้วไฟฟ้าที่มีสภาวะตรงกันข้าม (Polarized electrode) แสดงเป็นอุปกรณ์ต้านทานทางไฟฟ้าโดยปกติใช้อ้างอิงเป็น 'reaction resistance' (Elsener, B., Muller, S., 1990) ถ้าหากสื่อตัวนำไฟฟ้ามีความต้านทานลดลงจาก R_1 เป็น R_2 ค่าแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าน้อยลง ในขณะที่เดียวกันค่า Overpotential และกระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิมก็จะเพิ่มขึ้นตามลำดับ นอกจากนั้นถ้าจำนวนออกซิเจนในคอนกรีตมีค่า

น้อยกว่าความต้องการในการทำปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด เป็นเงื่อนไขที่ทราบกันว่าขั้วไฟฟ้าจะเกิดสถานะที่มีคุณลักษณะที่ขัดแย้งกันและเป็นสาเหตุทำให้กระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิมมีค่าลดลง (Fontana., M.G., 1986, Uhig, H.H., 1971 and West, J.M., 1986)

2.6 แบบจำลองการเสื่อมสภาพของคอนกรีตเสริมเหล็ก

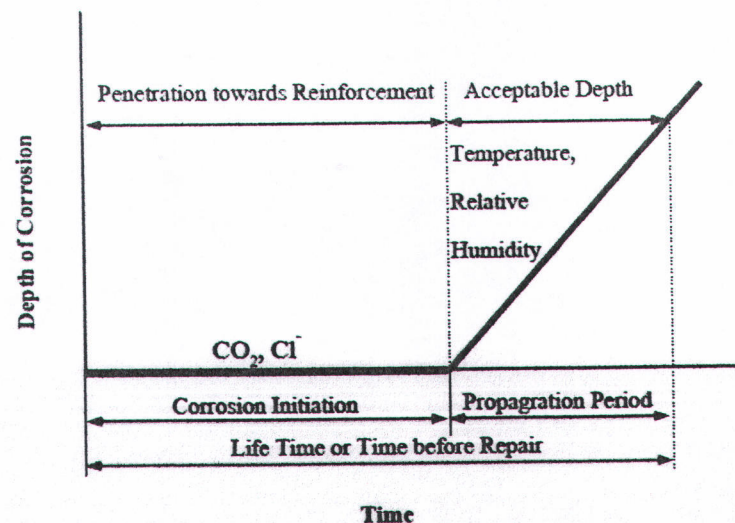
Tutti, k., 1980 ได้เสนอแนวความคิดโดยการจำลองรูปแบบแทนด้วยอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตที่มีความไวต่อการเกิดสนิมของเหล็กและจากภาพที่ 2-7 แสดงให้เห็นถึงระดับของการเกิดสนิมเป็นฟังก์ชันกับเวลาซึ่งในช่วงระยะเวลาเริ่มแรกเหล็กเสริมจะยังไม่เกิดสนิมและถ้าคลอไรด์ไอออนหรือเกิดคาร์บอนขึ้นที่ผิวหน้าคอนกรีตและซึมผ่านไปจนถึงเหล็กเสริมและเมื่อเหล็กสูญเสียชั้นฟิล์มบางๆที่ป้องกันที่ผิวเหล็กเสริมจะทำให้เกิดสถานะของการแพร่เริ่มต้นขึ้นและระดับของการเกิดสนิมจะพัฒนาเพิ่มขึ้นในอัตราที่รวดเร็ว



ภาพที่ 2-7 รูปแบบจำลองกระบวนการเกิดสนิมของเสริมเหล็กในคอนกรีต
ที่มา : (Tutti, K., 1980)

อัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมขึ้นอยู่กับสถานะของการแพร่ของคลอไรด์ซึ่งเป็นปัจจัยหลักส่งผลกระทบต่อโดยตรงกับอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยแทนด้วยระยะเวลา เมื่อระดับความเสี่ยงของการเกิดสนิมสูงขึ้นจนมีผลกระทบต่อกำลังของเหล็กเสริมหรือเป็นเหตุให้อายุการใช้งานของโครงสร้างลดต่ำลงจนกระทั่งถึงระดับวิกฤติ ดังนั้นเส้นประในภาพที่ 2-7 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างที่มีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าเพราะว่าระยะเวลาช่วงเริ่มต้นเป็นช่วงเวลาที่ยาวนานกว่าและอัตราการเกิดสนิมจะลดลงในสถานะที่มีการแพร่ จากรูปแบบจำลองอธิบายได้ว่าระยะหุ้มของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ของคอนกรีตมีค่าต่ำจะช่วยยืดเวลาอายุการใช้งานยาวนานขึ้น

Tuutti, k. (1982) ได้นำเสนอรูปแบบจำลองใช้สำหรับทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กตามภาพที่ 8 การเกิดสนิมในระดับสูงสุดที่ยอมรับได้ต้องมีความสัมพันธ์กับรอยแตกร้าวที่ปรากฏให้เห็นซึ่งช่วงเวลาของการเสื่อมสภาพประกอบไปด้วย 2 ช่วงคือช่วงเวลาเริ่มต้นและช่วงเวลาการแพร่โดยที่ความยาวในช่วงเวลาเริ่มต้นเป็นช่วงเวลาโดยประมาณที่ต้องการให้เกิดแทรกซึมของสารละลายเข้าไปถึงผิวของเหล็กเสริมและกระตุ้นให้เกิดการกัดกร่อน ในขณะที่ช่วงเวลาการแพร่เป็นช่วงเวลาที่สนิมมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นจึงเป็นช่วงเวลาของการซ่อมแซมซึ่งกลายมาเป็นเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการซ่อมแซมและรูปแบบจำลองนี้สามารถนำไปใช้ประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของโครงสร้างสะพานคอนกรีตในสถานะสิ่งแวดล้อมที่ทำให้เกิดสนิมเป็นรูปแบบจำลองการเสื่อมสภาพที่พัฒนาโดย Cady and Weyers (Cady, P.D. and Weyers R.E., 1983) การแทรกซึมของคลอไรด์มีอิทธิพลทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้พื้นผิวสะพานคอนกรีตเกิดการเสื่อมสภาพและแบบจำลองที่ใช้ทำนายการเสื่อมสภาพโดยพิจารณาเป็นเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ผิวทั้งหมดที่เกิดการแตกหลุดลอกแตกออกมาเป็นชั้นๆ และเกิดรอยแตกร้าวหลายๆ แนวนำมารวมกันเป็นความเสียหายทั้งหมดเพื่อใช้ในการทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างที่เหลืออยู่สำหรับใช้งานต่อไป

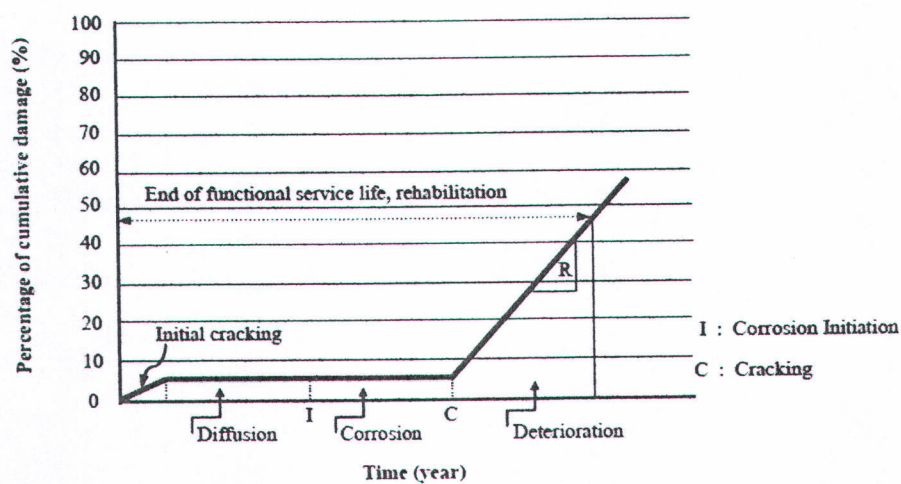


ภาพที่ 2-8 รูปแบบจำลองระยะเวลาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ที่มา : Tuutti, K.(1982)

Cady, P.D., and Weyers R.E. (1983) ได้นำเสนอแบบจำลองกระบวนการเสื่อมสภาพโดยคลอไรด์สำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีระยะหุ้มคอนกรีตหนา 2 นิ้ว (50 มม.) จากภาพที่ 2-9 เป็นรูปแบบการจำลองการแบ่งแยกที่ชัดเจนของระยะเวลาการเกิดสนิมมี 3 ระยะ ได้แก่ ช่วงระยะเวลาที่เกิดการแพร่ (Diffusion Phase) ช่วงระยะเวลาการเกิดสนิม (Corrosion Phase) และ



ช่วงระยะเวลาของการเสื่อมสภาพ (Deterioration Phase) สำหรับช่วงระยะเวลาการแพร่ผ่านถูกกำหนดให้เป็นช่วงเวลาที่คลอไรด์ไอออนแทรกซึมผ่านความหนาของคอนกรีตจนคลอไรด์อยู่ในระดับเพียงพอที่จะทำให้เริ่มเกิดสนิมบนผิวของเหล็กเสริม ซึ่งปกติช่วงระยะเวลาของการแพร่ผ่านสามารถที่จะหาได้จากสูตร Fick's second Law (Crank, J.1956) สำหรับช่วงระยะเวลาที่ 2 เป็นช่วงระยะเวลาเริ่มแรกของการเกิดสนิมจนกระทั่งเริ่มเกิดรอยแตกร้าวและช่วงระยะเวลาที่ 3 เป็นช่วงระยะเวลาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างในระดับที่เกิดความเสียหายซึ่งในช่วงระยะเวลานี้ต้องทำการซ่อมแซมโครงสร้างให้กลับคืนสู่สภาพปกติ ข้อสังเกตให้พิจารณารอยแตกร้าวของระยะหุ้มคอนกรีตที่มีค่าตั้งแต่ 2.5% ของความลึกของระยะหุ้มคอนกรีตทั้งหมด

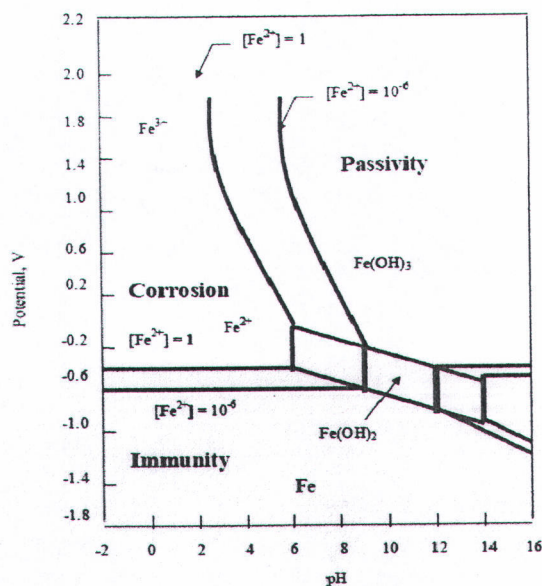


ภาพที่ 2-9 แบบจำลองกระบวนการเสื่อมสภาพโดยคลอไรด์สำหรับชิ้นส่วน โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีระยะหุ้มคอนกรีตหนา 2 นิ้ว (50 มม.) ที่มา : Cady, P.D., and Weyers R.E. (1983)

Bazant ได้พัฒนาแบบจำลองทางฟิสิกส์-คณิตศาสตร์ ในการหาค่าของช่วงระยะเวลาที่ทำให้คอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการแตกร้าว โดยคลอไรด์แทรกซึมผ่านระยะหุ้มของคอนกรีตไปจนถึงผิวของเหล็กทำให้เกิดสนิมบนพื้นฐานของสภาวะการเกิดสนิม (Bazant., Z.P.,1979) แบบจำลองนี้เป็นช่วงระยะเวลาที่ทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าว (time to cracking) เป็นฟังก์ชันของอัตราการเกิดสนิม ระยะหุ้มคอนกรีต ระยะห่างของเหล็กเสริมและคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตเช่น โมดูลัสยืดหยุ่น อัตราส่วนการขยายตัว (Poisson's ratio) และสัมประสิทธิ์การหดตัว สำหรับการวิเคราะห์ความไวของตัวแปร โดยใช้ทฤษฎีของ Bazant's เป็นสมการที่แสดงถึงตัวแปรของกำลังของคอนกรีต ระยะหุ้มคอนกรีต ขนาดของเหล็กเสริมระยะห่างเหล็กเสริมและอัตราการเกิดสนิมซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญในการหาช่วงระยะเวลาที่ทำให้เกิดรอยแตกร้าว (Time to cracking) ของระยะหุ้มคอนกรีต

2.7 กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

บนพื้นฐานของข้อมูลของปฏิกิริยาระหว่างโลหะกับน้ำ (Pourbaix, M., 1976) ได้พัฒนาความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าเปรียบเทียบกับแผนภาพของสภาวะบริเวณความเป็นกรดและด่าง (pH) ซึ่งชี้ให้เห็นถึงช่วงที่มีความเสถียรภาพของเทอร์โมไดนามิกส์เป็นฟังก์ชันของศักย์ไฟฟ้าและค่า pH และจากภาพที่ 2-10 แสดงถึงแผนภาพพอร์แบร์กของเหล็ก ซึ่งถูกแบ่งแยกออกเป็น 3 สภาวะคือ บริเวณส่วนที่เกิดสนิม บริเวณส่วนที่เกิดปฏิกิริยากับสารละลายน้อยและบริเวณส่วนที่ไม่เกิดสนิม สนิมที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่มีสภาพเป็นกรดจากแผนภาพจะเห็นเป็นช่องที่แคบสภาพความเป็นด่างจะผันแปรและทำให้บริเวณดังกล่าวเกิดสนิมมากในขณะที่บริเวณอีก 2 ส่วนนั้นจะมีชั้นฟิล์มก่อตัวอยู่ซึ่งจะมีความเป็นด่างมากอยู่ในบริเวณ 2 ส่วนเหล่านี้จะอยู่ในสภาวะปกติไม่มีปฏิกิริยาเกิดขึ้นและในส่วนที่ 3 จะเป็นส่วนที่ปราศจากสนิม (Immunity) เนื่องจากในส่วนนี้มีสภาพความเป็นด่างที่มีเสถียรภาพสูงมากจึงเป็นสาเหตุทำให้เหล็กไม่เกิดสนิม ดังนั้นแผนภาพพอร์แบร์กจึงเป็นวิธีการเตรียมข้อมูลพื้นฐานภายใต้ความเข้าใจปฏิกิริยาการเกิดสนิมและจัดทำเป็นข้อกำหนดหลัก 2 ข้อสำหรับใช้กับแผนภาพนี้



ภาพที่ 2-10 แผนภาพกลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริม ที่มา: (Pourbaix, M., 1976)

