



การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

3.1 ความนำ

โดยปกติเหล็กเสริมในคอนกรีต จะมีความสามารถต้านทานการเกิดสนิมเป็นอย่างมาก โดยจะมีแผ่นฟิล์มที่ผิวหน้าของเหล็กเสริม ด้วยความหนาประมาณ 10,000 อังสตรอม [14] ซึ่งประกอบด้วย ออกไซด์ของเหล็ก (Fe_2O_3) เป็นส่วนใหญ่ ทำหน้าที่ช่วยต่อต้านการเกิดสนิม แต่หากการควบคุมสภาพในการใช้งานได้ไม่ดี อาจจะทำให้เกิดการเกิดสนิม ซึ่งปรากฏอยู่ทั่วไป และสามารถแยกขบวนการเกิดสนิมออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

1. เกิดจากความเป็นต่างของสารละลายภายในรูพรุนคอนกรีตลดลง สืบเนื่องมาจากการเกิดคาร์บอนขึ้น ทำให้แผ่นฟิล์มที่ผิวหน้าของเหล็กเสริมถูกทำลาย และก่อให้เกิดการเกิดสนิมตามแบบทั่ว ๆ ไป (General corrosion) ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการเกิดสนิมของเหล็กเปลือยภายใต้สภาวะความชื้นที่มีคุณสมบัติเป็นกลาง [15]

2. เกิดจากการที่สารละลายอิเล็กโทรไลต์ ดังตัวอย่างเช่น ประจุของคลอไรด์ (Cl^-) จำนวนมาก ทำให้ศักย์ของขั้วอิเล็กโทรดเพิ่มมากขึ้น เกินกว่าศักย์ของการกัดกร่อน (Pitting potential) ทำให้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยต่อพื้นที่อาโนดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากการละลายเฉพาะที่ของเหล็ก (Pitting corrosion) [15] การเกิดสนิมแบบนี้เป็นรูปแบบที่รุนแรง และสามารถเร่งปฏิกิริยาได้เอง ก่อให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรง [16]

3.2 การเกิดสนิมทางไฟฟ้าเคมีในคอนกรีต

การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นขบวนการทางไฟฟ้าเคมี อาจแบ่งออกตามขบวนการอาโนด และคาโทด โดยสารละลายต่างในรูพรุนของคอนกรีตเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ที่อาโนดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และที่คาโทดจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน บริเวณผิวหน้าของเหล็กที่กำลังเกิดสนิม จะมีคุณสมบัติเป็นขั้วอิเล็กโทรดผสม คือมีทั้งอาโนด และคาโทด [15,17] พร้อมกับเป็นตัวเชื่อมทางไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.1

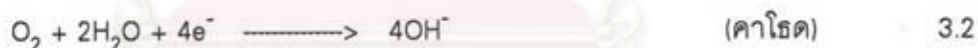
ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่แอโนด จะทำให้เกิดประจุของเหล็ก (Fe^{2+}) ละลายอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ภายในรูพรุนคอนกรีต ดังสมการที่ 3.1 [14,16,18]



ทั้งนี้เมื่อ



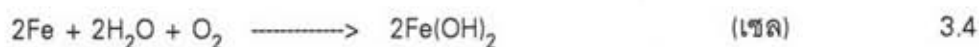
ปฏิกิริยาดังกล่าวทำให้พื้นที่แอโนดเล็ก ๆ มีคุณสมบัติเป็นขั้วลบ พื้นที่ผิวเหล็กเสริมที่ติดกับพื้นที่แอโนด เริ่มที่จะทำหน้าที่เป็นคาโธด แม้ฟิล์มออกไซด์ยังคงอยู่ อิเล็กตรอนที่ปลดปล่อยในพื้นที่แอโนด (สมการที่ 3.1) จะเคลื่อนตัวผ่านเหล็กเสริมไปยังพื้นที่คาโธด ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า (i_{corr}) ในเหล็กเสริมไหลจากพื้นที่คาโธดไปยังพื้นที่แอโนด ในขณะที่เดียวกันก๊าซออกซิเจนจะแพร่ผ่านคอนกรีตตรงไปยังเหล็กเสริม ในบริเวณพื้นที่คาโธดซึ่งออกซิเจนจะละลายน้ำภายในรูพรุนคอนกรีตอยู่ จะทำปฏิกิริยากับอิเล็กตรอนจากเหล็กเสริมที่กำลังเข้ามาในพื้นที่คาโธด กลายเป็นประจุของไฮดรอกซิล(OH^-) และเกิดปฏิกิริยารีดักชันของ ออกซิเจนในสารละลายที่เป็นกลางหรือด่าง ดังสมการที่ 3.2 [14,16,18]



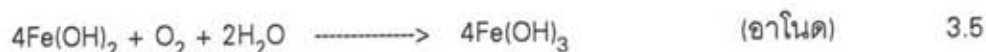
กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่าน สารละลายอิเล็กโทรไลต์ภายในรูพรุนคอนกรีต โดยวิธีการส่งผ่านประจุของไฮดรอกซิลไปยังแอโนด [14] ประจุของไฮดรอกซิลที่เคลื่อนตัวมาถึงพื้นที่แอโนดจะรวมตัวกับ Fe^{2+} ที่ละลายอยู่ในน้ำภายในรูพรุนคอนกรีต ทำให้เกิดสารละลายเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) ดังสมการที่ 3.3 [14,16]



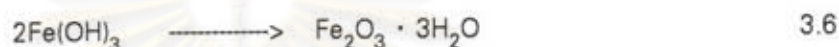
ดังนั้นปฏิกิริยาเกี่ยวกับประจุภายในรวม จากสมการที่ 3.1 - 3.3 คือ [14,16]



จากปฏิกิริยาประจรรวม สารประกอบเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ไม่มีเสถียรภาพในสารละลายออกซิเจน [16] ดังนั้นจะถูกออกซิไดซ์ต่อไปอีก จะได้สนิมเหล็ก ($\text{Fe(OH)}_3 = \text{FeOOH} + \text{H}_2\text{O}$) ตกตะกอนอยู่ เป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายดังสมการที่ 3.5 [14,16]



สามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไป คือ



นอกจากนั้น ผลิตภัณฑ์ของการเกิดสนิม ยังมีองค์ประกอบอื่นอีก ได้แก่ FeO(OH) , HFeOOH , HFeO_2 , FeSO_4 และ สนิมดำ (Fe_3O_4 ; $3\text{Fe} + 8\text{OH}^- \longrightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 8\text{e}^- + 4\text{H}_2\text{O}$) ในความเป็นจริงผลิตภัณฑ์ของสนิมดำ (ทำให้ฟิล์มออกไซด์หนาขึ้น) จะเกิดในสถานะที่จมอยู่ในน้ำ ลึกอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีปริมาณออกซิเจนที่จำกัด ดังนั้น ในการวิเคราะห์ต่อไปนี้จะอยู่บนพื้นฐานของสนิมแดงเท่านั้น ตามปกติสนิมแดงจะมีอันตรายมากกว่าทำให้คอนกรีตแตกร้าวเพราะ ปริมาตรของสนิมแดงจะเพิ่มขึ้นเป็นสี่เท่าของปริมาตรเหล็ก ในขณะที่สนิมดำปริมาตรจะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าของปริมาตรเหล็กเท่านั้น [14]

จากสมการที่ 3.2 และ 3.5 เห็นได้ชัดว่า ออกซิเจนเป็นสิ่งจำเป็นต่อขบวนการการเกิดสนิม ออกซิเจนจะถูกเผาผลาญทั้งในพื้นที่คาโธด และอาโนด ดังนั้น การขาดออกซิเจนในบริเวณดังกล่าวจะช่วยลดการเกิดสนิมได้ [14] สำหรับความต้องการน้ำตามสมการที่ 3.2 และ 3.5 ไม่ได้เป็นองค์ประกอบในการควบคุมเพราะว่ามีน้ำอยู่เป็นจำนวนมาก แต่กระนั้นก็ยังมียุทธพลทางอ้อมต่อขบวนการการเกิดสนิมอย่างน้อย 2 ประการ [14] ได้แก่

1. ระดับความอึดตัวของน้ำจะมีผลกระทบต่อพิภักต์ความต้านทานกระแสไฟฟ้าของคอนกรีต
2. เป็นตัวกีดขวางการแพร่ของก๊าซออกซิเจนในรูพรุนของคอนกรีต

3.3 มวลสะสม การกัดกร่อนเหล็ก และการเกิดสนิมที่ขั้วอิเล็กโทรด

ก๊าซออกซิเจนจะถูกเผาผลาญโดยขบวนการการเกิดสนิมที่คาโธดด้วยอัตรา

$$j_o^C = -K_{oi}^C i^C \quad (\text{คาโธด}) \quad 3.7$$

โดยที่

$$j_o^C = \text{อัตราการเผาผลาญก๊าซออกซิเจนที่คาโธด (กรัม / ซม.}^2\text{วินาที)}$$

$$K_{oi}^C = \text{ค่าคงที่ของปฏิกิริยาการเผาผลาญออกซิเจนที่คาโธด (กรัม/คูลอมป์)}$$

$$i^C = \text{ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่คาโธด (แอมป์ / ซม.}^2\text{)}$$

เครื่องหมายลบแสดงถึงการสลายตัว ในขณะที่เครื่องหมายบวกแสดงถึงการผลิตเพิ่มขึ้น สมการที่ 3.2 อิเล็กโทรด 4 ตัว ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน 1 โมเลกุล นั่นคือประจุไฟฟ้า 4 ฟาราเดย์ หรือ $4 \times 96,500$ คูลอมป์ จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน 1 โมล หรือ 32 กรัม ดังนั้นจะได้ว่า

$$K_{oi}^C = 32 / (4 \times 96,500) = 8.290 \times 10^{-5} \text{ กรัม / คูลอมป์}$$

การไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าที่อานอดทำให้เกิดการกัดกร่อนเหล็ก (Fe) และการผลิตประจุของเหล็ก (Fe^{2+}) เข้าไปในชั้นการแพร่ ซึ่งยังคงอยู่ใกล้ผิวหน้าอานอด ทำให้เกิดการสะสมของเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_2$) ในชั้นดังกล่าว ดังนั้น อัตราการกัดกร่อนเหล็ก และอัตราการผลิตเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ คือ

$$j_s = -K_{si} i^A \quad (\text{อานอด}) \quad 3.8$$

$$j_t = K_{ti} i^A \quad (\text{อานอด}) \quad 3.9$$

โดยที่

$$\begin{aligned}
 i_s &= \text{อัตราการกัดกร่อนเหล็กที่อาโนด (กรัม / ซม.}^2\text{-วินาที)} \\
 i_r &= \text{อัตราการผลิตเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ที่อาโนด (กรัม/ซม.}^2\text{-วินาที)} \\
 K_{si} &= \text{ค่าคงที่ของการกัดกร่อนเหล็ก (กรัม / คูลอมป์)} \\
 K_{fi} &= \text{ค่าคงที่ของปฏิกิริยาการผลิตเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ (กรัม/คูลอมป์)} \\
 i^A &= \text{ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่อาโนด (แอมป์ / ซม.}^2\text{)}
 \end{aligned}$$

ตามสมการที่ 3.1 อิเล็กตรอน 2 ตัว เกิดจากเหล็ก 1 โมเลกุล นั่นคือ ประจุไฟฟ้า 2 ฟาราเดย์ หรือ $2 \times 96,500$ คูลอมป์ เกิดจากเหล็ก 1 โมล หรือ 55.85 กรัม ดังนั้น

$$K_{si} = 55.85 / (2 \times 96,500) = 2.8938 \times 10^{-4} \text{ กรัม / คูลอมป์}$$

ตามสมการที่ 3.1 และ 3.3 อิเล็กตรอน 2 ตัว จะผลิตเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ 1 โมเลกุล นั่นคือประจุไฟฟ้า 2 ฟาราเดย์ หรือ $2 \times 96,500$ คูลอมป์ จะผลิตเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ 1 โมล ซึ่งหนัก 89.86 กรัม ดังนั้น จะได้ว่า

$$K_{fi} = 89.86 / (2 \times 96,500) = 4.656 \times 10^{-4} \text{ กรัม / คูลอมป์}$$

และถ้าเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ทั้งหมดเปลี่ยนเป็นสนิมเหล็กตามสมการที่ 3.5 แทนที่จะได้อัตราการเผาผลาญก๊าซออกซิเจน และอัตราการ ผลิตสนิมเหล็ก คือ

$$i_o^A = -K_{of} i_f = -K_{of}^A i^A \quad (\text{อาโนด}) \quad 3.10$$

$$i_r = K_{fi} i_f = K_{fi}^A i^A \quad (\text{อาโนด}) \quad 3.11$$

เมื่อ

$$j_o^A = \text{อัตราการเผาผลาญก๊าซออกซิเจนที่เอาโนด (กรัม / ซม.}^2\cdot\text{วินาที)}$$

$$j_r = \text{อัตราการผลิตสนิมเหล็กที่เอาโนด (กรัม / ซม.}^2\cdot\text{วินาที)}$$

$$K_{of} = \text{ค่าคงที่ของปฏิกิริยาการเผาผลาญก๊าซออกซิเจนที่เอาโนด}$$

$$K_{rf} = \text{ค่าคงที่ของปฏิกิริยาการผลิตสนิมเหล็กที่เอาโนด}$$

$$K_{oi}^A = K_{of} \cdot K_{ri}$$

$$K_{ri} = K_{rf} \cdot K_{oi}$$

ตามสมการที่ 3.5 ออกซิเจน 1 โมล หรือ 32 กรัม รวมกับเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ 4 โมล หรือ 4×89.86 กรัม ดังนั้น

$$K_{of} = 32 / (4 \times 89.86) = 0.08903$$

และเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ 1 โมลหรือ 89.86 กรัม จะผลิตสนิมเหล็ก 1 โมลหรือ 106.87 กรัม ดังนั้น

$$K_{rf} = 106.87 / 89.86 = 1.189$$

และ $K_{oi}^A = 0.08903 \times 4.656 \times 10^{-4} = 4.145 \times 10^{-5}$ กรัม / คูลอมป์

$$K_{ri} = 1.189 \times 4.656 \times 10^{-4} = 5.537 \times 10^{-4}$$
 กรัม / คูลอมป์

3.4 องค์ประกอบที่มีผลต่อการกัดกร่อนเหล็ก

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ขบวนการการเกิดสนิมของเหล็กที่ฝังอยู่ในคอนกรีต ถูกควบคุมโดยสภาวะแวดล้อมในเนื้อคอนกรีตที่หุ้มเหล็ก และอัตราการกัดกร่อนของเหล็กจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (i_{corr}) Escalante และ Ito [19] ได้ทำการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการกัดกร่อนของเหล็ก พบว่าค่า pH เป็นตัวควบคุมที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กในชั้นดิน ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิ่มตัว (pH=12.5) จะไม่สามารถสังเกตเห็นการกัดกร่อนของเหล็ก แต่เมื่อค่า pH ลดลง จะทำให้ช่วงเวลาเริ่มต้นก่อนการกัดกร่อน (Initial period) ลดลง และเมื่อสารละลายดังกล่าวมีประจุของคลอไรด์ปนอยู่ด้วย จะช่วยกระตุ้นให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กในช่วงเวลาเริ่มต้นเร็วขึ้น ภายใต้การควบคุมของค่า pH ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ภายหลังจากการกัดกร่อนได้เกิดขึ้นแล้ว ความเข้มข้นของออกซิเจนจะเป็นตัวควบคุมอัตราการกัดกร่อนอย่างรุนแรง ดังรูปที่ 3.4 ปัจจัยที่สำคัญอีกประการหนึ่ง คือ วงจรการเปลี่ยนแปลง

ความชื้น-แห้ง ภายใต้สภาวะที่ความชื้นอิ่มตัวอย่างต่อเนื่อง การกัดกร่อนของเหล็กจะไม่เกิดขึ้น แต่เมื่อความชื้นลดลงทำให้การส่งผ่านออกซิเจนดีขึ้น ส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.5 นอกจากนี้ ยังได้กล่าวเพิ่มเติมอีกว่า จากคุณสมบัติของมอร์ตาร์ที่ไม่มีความสม่ำเสมอเมื่อความเข้มข้นของคลอไรด์เพิ่มขึ้น จะทำให้ปริมาณของตำแหน่งที่ถูกกัดกร่อนในช่วงเริ่มต้นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้พื้นที่การกัดกร่อนรวมมีขนาดใหญ่

Gonzales et al. [20] ได้ทำการศึกษาถึงปัจจัยของความชื้นที่มีผลต่อการกัดกร่อนของเหล็กที่ฝังอยู่ในมอร์ตาร์ ซึ่งให้ผลคล้ายคลึงกัน คือ ประจุของคลอไรด์จะช่วยเร่งให้เกิดการกัดกร่อน จากรูปที่ 3.6 ตำแหน่ง A แสดงถึงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ภายหลังการบ่มสิ้นสุด และเมื่อทำให้น้ำภายในรูปพรุนลดลง พร้อมกับเพิ่มออกซิเจนขึ้น จะทำให้มอร์ตาร์ที่ไม่มีประจุของคลอไรด์มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลดลง (ตำแหน่ง B') ซึ่งเป็นผลมาจากฟิล์มออกไซด์ที่สร้างเพิ่มขึ้นจากออกซิเจนที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่มอร์ตาร์ที่ผสมประจุของคลอไรด์ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะตกลงเล็กน้อย (ตำแหน่ง B'') เป็นผลมาจากฟิล์มออกไซด์ และจะกลับเพิ่มมากขึ้น อย่างเห็นได้ชัด (ตำแหน่ง B) เนื่องจากการทำให้เหล็กเสริมอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น อย่างไรก็ตาม ความชื้นภายในรูปพรุนยังคงเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (ตำแหน่ง B-C-D) และได้สรุปเพิ่มเติมว่า เนื้อคอนกรีตที่หุ้มเหล็กซึ่งมีลักษณะเป็นรูปพรุน ทำให้ความชื้นสามารถระเหยออกไปได้ยาก จะเพิ่มความเสียหายแก่ขบวนการการเกิดสนิมของเหล็กที่ฝังอยู่ในคอนกรีตได้เป็นอย่างมากเมื่อฟิล์มออกไซด์ถูกทำลายลง

นอกจากนี้ การซ่อมแซมโครงสร้างเฉพาะจุด ของโครงสร้างที่เกิดสนิมอันเนื่องมาจากการเกิดคาร์บอนขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ยังส่งผลให้ตำแหน่งที่ซ่อมแซมใหม่มีสถานะเป็นพื้นที่คาโรต เนื่องจากมีฟิล์มออกไซด์สร้างขึ้นใหม่ ในขณะที่พื้นผิวเหล็กเสริมบริเวณที่เกิดคาร์บอนขึ้นที่เหลือนอยู่จะมีสถานะเป็นพื้นที่แอโนด ทำให้โครงสร้างอยู่ภายใต้สภาวะ การเกิดสนิมแบบเซลล์ขนาดใหญ่ [21,22] (Macrocell) เมื่อโครงสร้างดังกล่าวได้รับความชื้นที่เหมาะสม [22] ดังนั้นการซ่อมแซมโครงสร้างที่มีสาเหตุมาจากการเกิดคาร์บอนขึ้น จะต้องนำคอนกรีตที่เกิดคาร์บอนขึ้นออกให้หมด สำหรับการซ่อมแซมโครงสร้างเฉพาะจุดของโครงสร้างที่เกิดสนิมอันเนื่องมาจากการประจุของคลอไรด์จะให้ผลที่คล้ายคลึงกับกรณีการเกิดคาร์บอนขึ้น แต่เนื่องจากการเกิดสนิมอันเนื่องมาจากการประจุของคลอไรด์ เป็นการเกิดสนิมเฉพาะที่ (Pitting corrosion) ดังนั้น บริเวณที่อยู่ถัดไปจากตำแหน่งที่ซ่อมแซมจะพัฒนาเป็นพื้นที่แอโนด สำหรับพื้นที่ที่อยู่ไกลออกไป และที่



ซ่อมแซมใหม่ จะเป็นพื้นที่คาโรต ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ดังนั้น การซ่อมแซมโครงสร้างที่มีสาเหตุจากประจุของคลอไรด์ จะต้องนำคอนกรีตที่มีปริมาณประจุของคลอไรด์มากเกินไปกว่าค่าวิกฤตออกให้หมด [22]

3.5 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นขบวนการทางไฟฟ้าเคมี ส่วนประกอบที่สำคัญของขบวนการ ประกอบด้วย พื้นที่อาโนด ซึ่งเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และพื้นที่คาโรต ซึ่งเกิดปฏิกิริยารีดักชันโดยมีตัวนำสำหรับส่งผ่านประจุระหว่างอาโนด และคาโรต ในกรณีของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สารละลายอิเล็กโทรไลต์ภายในรูพรุนคอนกรีตที่ล้อมรอบเหล็กเสริมจะทำหน้าที่เป็นตัวนำประจุ ดังนั้น ในการพิจารณาอัตราการกัดกร่อนของเหล็ก จึงพิจารณาในรูปของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในปฏิกิริยา ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ได้จากการทดลอง

Andrade et al. [23] ได้ทำการทดลองหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า โดยการใช้เทคนิคทางไฟฟ้าเคมี และเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่างๆ ที่คาดว่าจะมีผลกระทบต่ออัตราการเกิดสนิมของเหล็ก เช่น ปริมาณคลอไรด์ที่ผสมอยู่ การซึมผ่านของคลอไรด์ ความจุความชื้นในคอนกรีต ชนิดของซีเมนต์ ฯลฯ และได้สรุปว่า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ต่ำกว่า 0.1 ถึง 0.2 ไมโครแอมป์ / ซม.² การเกิดสนิมจะเกิดขึ้นน้อยมาก ถ้ามากกว่า 0.2 ไมโครแอมป์ / ซม.² จะสามารถตรวจพบการเกิดสนิมได้ และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มากที่สุด ซึ่งวัดในสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง มีค่าประมาณ 100 ถึง 200 ไมโครแอมป์ / ซม.² ดังแสดงในรูปที่ 3.9 สำหรับเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในคาร์บอนเนตมอร์ตาในความชื้นที่แตกต่างกัน จะให้ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าประมาณ 0.1 ถึง 0.2 ไมโครแอมป์/ ซม.² ดังรูปที่ 3.10

เนื่องจากน้ำภายในรูพรุนคอนกรีตจะเป็นตัวควบคุมการผ่านเข้าออกของก๊าซ โดยเฉพาะก๊าซออกซิเจน ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่ควบคุมอัตราการกัดกร่อน ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้น จึงได้มีการศึกษาถึงความชื้นที่มีผลต่อความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า. Tuutti [6] ได้ผลการทดสอบ ดังรูปที่ 3.11 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแปรตามความชื้นสัมพัทธ์อย่างใกล้ชิด นอกจากนี้ Gonzalez et.al. [20] ได้ศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่น

กระแสไฟฟ้า และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ภายในรูปพูนคอนกรีต โดยพิจารณาถึงระดับความอิ่มตัวของรูปพูน ดังรูปที่ 3.6 โดยแบ่งตามสภาวะที่เป็นตัวควบคุมการกัดกร่อน แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่

1. การควบคุมการกัดกร่อนโดยคาโธด (Cathodic Control) เกิดขึ้นในกรณีที่ออกซิเจนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี มีน้อยมาก จะพบในโครงสร้างที่จมอยู่ในน้ำอย่างต่อเนื่องทำให้ออกซิเจนเข้าถึงเหล็กเสริมได้ยาก หรือในกรณีคอนกรีตที่ล้อมรอบเหล็กเสริมเกิดการบอบเนชันโดยสมบูรณ์ทำให้มีพื้นที่คาโธดน้อยเกินไป ออกซิเจนที่มีอยู่ในอากาศเข้าทำปฏิกิริยาได้น้อย ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าไม่มากกว่า 6×10^{-7} แอมป์ / ซม.²

2. การควบคุมการกัดกร่อนโดยแอโนด (Anodic Control) เกิดขึ้นในกรณีที่พื้นที่แอโนดซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนมีอยู่น้อยมาก สภาวะดังกล่าวจะพบเมื่อฟิล์มออกไซด์ที่เคลือบเหล็กเสริมยังคงอยู่ จนกว่าจะถูกทำลายไปโดยการเกิดการบอบเนชันของคอนกรีต หรือการสะสมประจุของคลอไรด์ที่ผิวเหล็กเสริมมากเกินไปกว่าค่าวิกฤต ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าประมาณ 10^{-7} แอมป์ / ซม.²

3. การควบคุมการกัดกร่อนโดยความต้านทาน (Resistance Control) เกิดขึ้นในกรณีที่พื้นที่คาโธด พื้นที่แอโนด และออกซิเจนมีมากเพียงพอ สภาวะดังกล่าว จะมีความชื้นภายในรูปพูน (สารละลายอิเล็กโทรไลต์) เป็นตัวควบคุม ดังนั้น การเกิดการบอบเนชันของคอนกรีตที่ล้อมรอบเหล็กเสริมบางส่วน หรือการกัดกร่อนเฉพาะที่โดยประจุของคลอไรด์ผนวกกับความชื้นที่เหมาะสม จะส่งผลให้ระบบปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเกิดขึ้นโดยสมบูรณ์ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะอยู่ในช่วง 10^{-8} ถึง 10^{-5} แอมป์ / ซม.² ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำภายในรูปพูนคอนกรีต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย