

อิทธิพลของปริมาณสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเวลาการแช่ต่อการกัดกร่อนของเหล็กเส้นที่เกิดจากคลอไรด์ โดยใช้วิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

Influence of Sodium Chloride Solution Amount and Immersion Time on Chloride-Induced Rebar Corrosion using Half-Cell Potential Method

จิตติณัฐ ปล่องกระโทก^{1*} ฉัตรพริกา เพ็ญพิมาย² ทศพร ศรีคำมา³ ชัตติย ชมพวงส์⁴ ชูดาภัค เดชพันธ์⁵ ศศคุณ เดชพันธ์⁶ และ ธนกร ภูเงินขำ⁷

^{1,2,3,4,5,6,7} หน่วยวิจัยเทคโนโลยีวัสดุก่อสร้างอย่างยั่งยืน สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
*ผู้ติดต่อ: E-mail: noknoy11136@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของศึกษาปริมาณสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเวลาการแช่ที่มีผลต่อการเร่งการเกิดสนิมกัดกร่อนของเหล็กเส้นที่เกิดจากคลอไรด์ที่ทดสอบโดยใช้ด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตที่มีกำลังอัดไม่น้อยกว่า 21 เมกะปาสคาล ที่อายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน ในการเตรียมตัวอย่างจะใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงปริซึมขนาด 75x75x300 มิลลิเมตร และใช้เหล็กข้ออ้อยขนาด 12 มิลลิเมตร ผึงอยู่ในคอนกรีตให้มีระยะหุ้มคอนกรีตต่างกัน ในการศึกษาครั้งนี้จะดำเนินการแปรผันปริมาณสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (ความเข้มข้นร้อยละ 3.5) ร้อยละ 25, 50 และ 75 ของความสูงตัวอย่างคอนกรีต โดยดำเนินการทดสอบการต้านทานการกัดกร่อนแบบเร่งผลการทดสอบ (Accelerated Corrosion with Impressed Voltage, ACVTIV) ที่มีการแปรผันระยะเวลาในการเร่งการเกิดสนิมเท่ากับ 3, 6 และ 9 ชั่วโมง ผลการทดสอบ พบว่า ปริมาณสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเวลาการแช่ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า การใช้ปริมาณสารละลายโซเดียมคลอไรด์ไม่ควรเกินร้อยละ 50 ของความสูงตัวอย่างคอนกรีต และเร่งในระยะเวลาในการเร่งการเกิดสนิมไม่ควรเกิน 6 ชั่วโมง ขณะที่ระยะหุ้มคอนกรีตไม่ส่งผลต่อพื้นที่การเกิดสนิมด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์อย่างชัดเจน

คำสำคัญ : วิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์, การกัดกร่อนของเหล็กเส้นที่เกิดจากคลอไรด์, ปริมาณสารละลายโซเดียมคลอไรด์, เวลาการแช่

Abstract

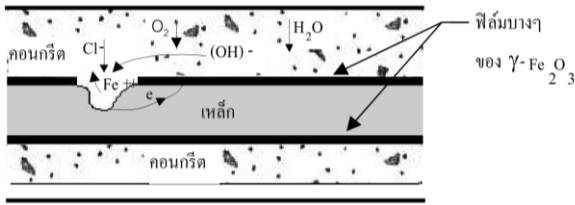
The objective of this paper is to study the influence of sodium chloride solution amount and immersion time on chloride-induced rebar corrosion using Half-Cell Potential (HCP). The concrete Samples with a required strength of 21 MPa after 28 days of curing were used. For specimen preparation, a 75 x 75 x 300 mm concrete prism was made. Then, 12 mm steel rebar with various concrete covering was embedded. In this study, different volumes of NaCl solution (3.5% concentration) were applied at 25, 50, and 75% of the height of the specimen. The Accelerated Corrosion with Impressed Voltage (ACVTIV) test was conducted with varying immersion times of 3, 6, and 9 hours. Test results showed that increasing both the amount of sodium chloride solution and

the immersion period influenced the HCP growth. From test results, it can be concluded that sodium chloride solution amount and immersion duration should not exceed 50% of the height of the specimen and 6 hours, respectively. In addition, the concrete covering had no significant effect on the area of rebar corrosion using the HCP method.
Keywords: half-cell potential method, chloride-induced rebar corrosion, sodium chloride solution amount, immersion time

1. คำนำ

โดยทั่วไปแล้วน้ำทะเลมีเกลือต่างๆละลายอยู่ประมาณร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนัก ยกเว้นน้ำทะเลที่ Dead Sea ที่มีเกลืออยู่สูงถึงร้อยละ 31.5 ซึ่งเกลือเหล่านี้มีอิออนของสารเคมีต่างๆ ละลายอยู่ได้แก่อิออนของคลอไรด์ โซเดียม ซัลเฟต แมกนีเซียม แคลเซียม โปแตสเซียม เป็นต้น ค่า pH ของน้ำทะเลอยู่ระหว่าง 7.5 ถึง 8.4 การแทรกซึมของน้ำทะเลเข้าไปในคอนกรีต อาจทำให้ค่า pH ของคอนกรีตลดลงบ้าง โดย pH ที่ตรวจพบมีค่าประมาณ 12 เป็นค่าต่ำสุด คอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำทะเลมีการกัดกร่อนจากสารเคมีที่มีอยู่ในน้ำทะเล เช่น การกัดกร่อนจากสารละลายซัลเฟต หรือจากการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปทำปฏิกิริยากับเหล็กจนเป็นสนิม [1]

ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล [1] รายงานไว้ว่าการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์แตกต่างจากการกัดกร่อนทางเคมีอื่นตรงที่คลอไรด์ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมและคอนกรีตบริเวณรอบๆ เหล็กเสริมเท่านั้นที่เสียหายเนื่องจากการขยายตัวของเหล็กเสริมและเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ลายองศาอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดฟิล์มบางๆ ของ $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ เคลือบผิวเหล็กไว้ และฟิล์มนี้ทำหน้าที่ป้องกันการเกิดสนิมเหล็ก อย่างไรก็ตามอิออนของคลอไรด์สามารถทำลายฟิล์มนี้ได้ และเมื่อน้ำและก๊าซออกซิเจนตรงบริเวณเหล็กเสริมที่ไม่มีฟิล์มป้องกันอยู่ทำให้เหล็กจะเป็นสนิม ซึ่งการเกิดสนิมในเหล็กเกิดจากความต่างศักย์ทางไฟฟ้าของเหล็กเสริมในคอนกรีตซึ่งทำให้เกิดเซลล์ไฟฟ้าเคมีขึ้นมีขั้วบวก (anode) และขั้วลบ (cathode) เชื่อมกันโดยน้ำซึ่งมีคลอไรด์ในโพรงของซีเมนต์ทำหน้าที่เป็นสื่ออิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) ประจุไฟฟ้า Fe^{++} ที่ขั้วบวกจะวิ่งไปสู่ขั้วลบอิเล็กโทรไลต์ และอิเล็กตรอนที่มีประจุไฟฟ้าลบล่วงตามเหล็กเสริมไปที่ขั้วบวก อิเล็กตรอนเหล่านี้จะรวมกับน้ำและออกซิเจนทำให้เกิด $(\text{OH})^-$ ซึ่งวิ่งผ่านสื่ออิเล็กโทรไลต์ไปรวมกับ Fe^{++} ทำให้เกิด $\text{Fe}(\text{OH})_3$ และทำปฏิกิริยากับออกซิเจนอีกทำให้เกิดสนิมของเหล็ก [2] ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การเกิดสนิมเหล็กเนื่องจากอิเล็กโทรไลต์เมื่อมีคลอไรด์ในคอนกรีต [1]

การประเมินความรุนแรงของการกัดกร่อนเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเป็นแนวทางที่สำคัญเพื่อเป็นแนวทางในการดำเนินการบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับความเสียหาย ดังนั้นการกำหนดแนวทางการตรวจสอบและการใช้ข้อมูลการกัดกร่อนเพื่อคาดการณ์อายุการใช้งานและปริมาณที่ต้องดำเนินการซ่อมแซมจึงมีความสำคัญอย่างมาก วิธีการวัดคลอไรด์และความต้านทานคลอไรด์สามารถทดสอบปริมาณคลอไรด์ที่ซึมเข้าไปในคอนกรีตในระยะความลึกต่างๆ นิยมใช้วิธีการวิเคราะห์ทางเคมีโดยต้องเจาะหรือเอาคอนกรีตบริเวณที่ต้องการหาปริมาณคลอไรด์ไปบดให้ละเอียดและวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์ที่มีอยู่ซึ่งการทดสอบกระทำตามมาตรฐาน ASTM C1152 [3] การทดสอบความต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์สามารถทำได้โดยใช้วิธีทดสอบตาม ASTM C1202 [4] ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ประจุไฟฟ้าที่วิ่งผ่านชั้นคอนกรีตระหว่างสารละลายโซเดียมคลอไรด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยใช้ความต่างศักย์ 60 โวลต์ ปริมาณประจุไฟฟ้าที่วัดเป็นคูลอมบ์จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการแทรกซึมของคลอไรด์วิธีนี้สามารถบอกผลได้อย่างรวดเร็วว่าคอนกรีตสามารถต้านทานต่อการแทรกซึมได้มากน้อยเพียงใด ในปัจจุบันวิธีการทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-cell potential) ตามมาตรฐาน ASTM C876-15 [5] เป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับการนิยมนิยมนเพราะเป็นวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย

วิธีการทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-cell potential) เป็นวิธีการที่มีความรวดเร็วในการตรวจสอบปริมาณของสนิมที่ได้รับการกัดกร่อนในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในภาคสนามแต่อย่างไรก็ตามหากต้องการทำนายอัตราการเกิดสนิมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในห้องปฏิบัติการจำเป็นต้องดำเนินการเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม เมื่อพิจารณาถึงข้อกำหนดต่างๆ ตามมาตรฐาน ASTM C876-15 [5] พบว่า ไม่มีข้อกำหนดที่แน่นอนโดยเป็นเพียงขอแนะนำในการดำเนินการทดสอบดังเช่นงานวิจัยของ Leelalerkiet et al. [6] และ Hussain [7] ดำเนินการทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-cell potential) เกี่ยวกับศักยภาพในการกัดกร่อนที่เกิดจากคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กใต้น้ำเมื่อแปรผันสภาวะความชื้นสัมพัทธ์อื่นๆ รวมถึงปริมาณความเข้มข้นของคลอไรด์ ระยะหุ้มคอนกรีตและกำลังอัดของคอนกรีต โดยจากวิจัยที่ผ่านมา [7-9] ได้แนะนำกระบวนการทดสอบต้องให้ต้องให้เหล็กเสริม 1 ด้านสัมผัสกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์โดยไม่ได้พิจารณาถึงความแปรปรวนของปริมาณสารละลายโซเดียมคลอไรด์และระยะเวลาในการเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม อย่างไรก็ตามการเร่งการเกิดสนิมที่มากเกินไปจะช่วยให้ค่าพื้นที่วัดได้จากการทดสอบเป็นสีแดงทั้งหมดซึ่งหมายถึงเหล็กเสริมเกิดเป็นสนิมทั้งหมดแล้ว ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงให้ความสนใจปริมาณสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเวลาการแช่ที่เหมาะสมต่อการเร่งการเกิดสนิมที่กัดกร่อนของเหล็กเส้นที่เกิดจากคลอไรด์ที่ดำเนินการทดสอบด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ ซึ่งผลการทดสอบที่ได้รับจะช่วยเป็นข้อมูลพื้นฐานในการดำเนินการทดสอบด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-Cell Potential) ต่อไปในอนาคต

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

1) วัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย

(1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15

(2) มวลรวมหยาบใช้หินปูนขนาดโตสุดไม่เกิน 19 มิลลิเมตร โดยสมบัติทางกายภาพมวลรวมหยาบที่ใช้ในงานวิจัยดังแสดงในตารางที่ 1 และค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบมาตรฐาน ASTM C127 [10]

(3) มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำ อ่างทองพิจิตร จังหวัดนครราชสีมา โดยสมบัติทางกายภาพมวลรวมละเอียดที่ใช้ในงานวิจัยดังแสดงในตารางที่ 1 และค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียดมาตรฐาน ASTM C128 [11]

(4) น้ำประปา

2) สายละลายที่ใช้ในการทดสอบเป็นสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยปริมาณสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ใช้ในการดำเนินการเร่งการกัดกร่อนของเหล็กเส้นเท่ากับร้อยละ 25, 50 และ 75 ของความสูงของตัวอย่างคอนกรีต

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพมวลรวมที่ใช้ในงานวิจัย

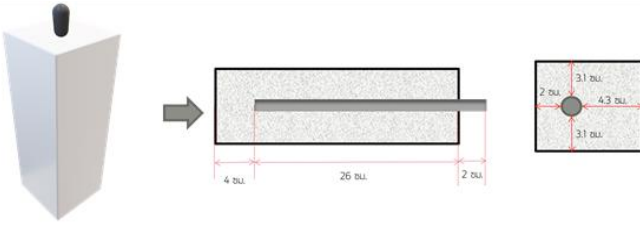
สมบัติทางกายภาพ	มวลรวมหยาบ	มวลรวมละเอียด
Bulk Specific Gravity (SSD)	2.77	2.57
Apparent Specific Gravity	2.80	2.61
Absorption (%)	0.64	0.96
Fineness Modulus (F.M.)	6.66	2.63
Maximum Size (mm)	19	-

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่มีการออกแบบกำลังอัดประลัยอายุที่ 28 วัน เท่ากับ 21 เมกะปาสคาล (kg/m³)

ปูนซีเมนต์ (kg)	น้ำประปา (kg)	มวลรวมละเอียด (kg)	มวลรวมหยาบ (kg)
304	214	830	997

2.2 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ

การศึกษาครั้งนี้ใช้อัตราส่วนผสมวัสดุประสานเท่ากับ 0.658 ค่าการยุบตัวระหว่าง 70 ถึง 100 มิลลิเมตร และกำลังรับแรงอัดประลัยไม่น้อยกว่า 21 เมกะปาสคาลที่อายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน โดยวิธีการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตดำเนินการตามมาตรฐาน ACI 211.1-91 [12] โดยสรุปส่วนผสมคอนกรีตในการทดสอบงานวิจัยนี้ดังแสดงในตารางที่ 2 สำหรับการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตเริ่มต้นฝังเหล็กเส้นข้ออ้อยขนาด 12 มิลลิเมตร เข้าไปในตัวอย่างคอนกรีตและมีระยะหุ้ม (Covering) ที่ด้านล่างตัวอย่างคอนกรีตเท่ากับ 40 มิลลิเมตร หลังจากนั้นเทคอนกรีตลงในแบบหล่อรูปทรงปริซึมขนาด 75x75x300 มิลลิเมตร โดยลักษณะตำแหน่งการวางเหล็กเสริมในตัวอย่างคอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 1 หลังจากครบ 24 ชั่วโมง ดำเนินการถอดแบบและห่อด้วยพลาสติกใสเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำความชื้นของตัวอย่างคอนกรีตและบ่มตัวอย่างไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิจนครบอายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน



รูปที่ 1 ลักษณะตำแหน่งการวางเหล็กเสริมในตัวอย่างคอนกรีต

2.3 การทดสอบความคงทนต่อการกัดกร่อนของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ของเหล็กเสริมในคอนกรีตด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-Cell Potential)

การทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตจากการกัดกร่อนของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 3.5 ด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-cell potential) เริ่มต้นด้วยดำเนินการทดสอบการต้านทานการกัดกร่อนแบบเร่งผลการทดสอบ Accelerated Corrosion with Impressed Voltage (ACVTIV) โดยใช้ตัวอย่างขนาดรูปทรงปริซึมขนาด 75x75x300 มิลลิเมตร และทำการวัดศักย์ไฟฟ้าก่อนเริ่มทำการเร่งผลการทดสอบแล้วบันทึกค่าที่ได้เป็น 0 ชั่วโมง จากนั้นต่อวงจรไฟฟ้าโดยให้เหล็กด้านบนเป็นขั้วบวก และใช้แผ่นอะลูมิเนียมแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 ในระดับความสูงร้อยละ 25, 50 และ 75 ของความสูงตัวอย่างคอนกรีตเป็นขั้วลบ โดยใช้สายไฟ 2 เส้นในการเชื่อมต่อวงจรระหว่างเหล็กเสริมและแผ่นอะลูมิเนียมเข้ากับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าขนาด 24 โวลต์ และทำการเร่งการเกิดสนิมและบันทึกค่าที่ 3, 6 และ 9 ชั่วโมง ซึ่งการดำเนินการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C876-15 [5] สำหรับเกณฑ์การประเมินค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ตามมาตรฐาน ASTM C876-15 [5] ดังแสดงในตารางที่ 3 และลักษณะการต่อวงจรไฟฟ้าเพื่อดำเนินการเร่งสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 2

ตารางที่ 3 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐาน ASTM C876-15 [5]

ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ตามมาตรฐาน (ASTM C876)	
ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์คอปเปอร์-คอปเปอร์ซัลเฟต (Cu/CuSO ₄)	สภาพการเกิดสนิม
ติดลบน้อยกว่า -250 mV	โอกาสร้อยละ 90 ที่จะไม่เกิดสนิม
-250 mV ถึง -350 mV	ไม่แน่นอน
มากกว่า -350 mV	โอกาสร้อยละ 90 ที่จะเกิดสนิม



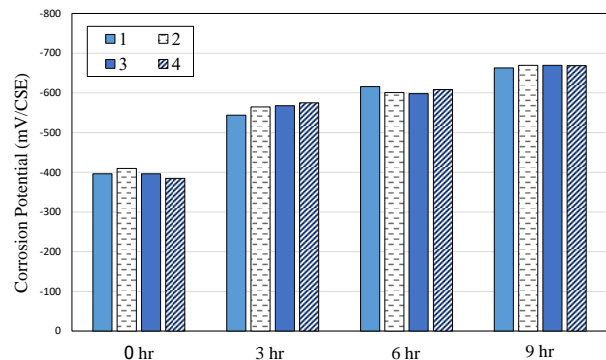
รูปที่ 2 ลักษณะการต่อวงจรไฟฟ้าเพื่อดำเนินการเร่งสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

3. ผลการศึกษา

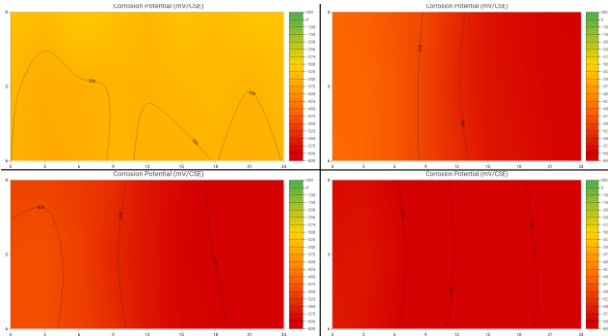
ผลการทดสอบปริมาณสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเวลาการแช่ที่มีผลต่อการเร่งการเกิดสนิมกัดกร่อนของเหล็กเส้นที่เกิดจากคลอไรด์ที่ทดสอบโดยใช้วิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่มีการแช่ตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 ในระดับความสูงร้อยละ 25, 50 และ 75 ของความสูงตัวอย่างคอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 3-9 พบว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของตัวอย่างมีแนวโน้มติดลบเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาในการแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์มากขึ้น โดยค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ติดลบมากกว่า 350 mV/CSE แสดงถึงโอกาสของเหล็กเสริมจะเกิดสนิมมากถึงร้อยละ 90 (ดังตารางที่ 3) นอกจากนี้จากผลการทดสอบยังพบว่า ปริมาณของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ใช้ในการเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ติดลบมากขึ้นทำนองเดียวกันระยะเวลาในการแช่มากขึ้น

จากรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่า การใช้สารละลายร้อยละ 25 ที่กำลังไฟ 24 โวลต์ ค่าการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมีแนวโน้มติดลบเพิ่มขึ้น และเมื่อครบ 9 ชั่วโมง พบว่า ค่าเฉลี่ยการเกิดสนิมทั้ง 4 ด้านทั้ง 3 ตัวอย่างคอนกรีตอยู่ระหว่าง -660 ถึง -670 mV/CSE ซึ่งอยู่ในช่วงสีแดงเข้มของพื้นที่การเกิดสนิมด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ดังแสดงในรูปที่ 4 นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่า เมื่อใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 25 ช่วยให้เหล็กเกิดสนิมสูงสุดที่เวลาการแช่เท่ากับ 9 ชั่วโมง และในการวัดค่าทั้ง 4 ด้านที่มีระยะหุ้มคอนกรีตต่างกัน พบว่า ค่าการกัดกร่อนไม่เห็นผลอย่างชัดเจนว่าด้านไหนให้ค่าการกัดกร่อนสูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pattarakittam et al. [13] ที่ได้มีการรายงานไว้ว่า ผลของระยะหุ้มคอนกรีตต่อค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ไม่ค่อยเห็นผลชัดเจนมากนักในช่วงระยะเวลาเริ่มต้นของการพัฒนากำลังคอนกรีต

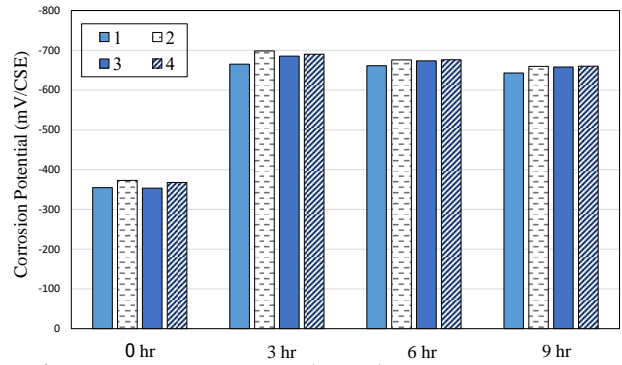
จากรูปที่ 5 และ 6 พบว่า การใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 50 ของความสูงของตัวอย่างคอนกรีตเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการใช้สารละลายที่ร้อยละ 25 กล่าวคือการเร่งการเกิดสนิมที่ระยะเวลาเท่ากับ 9 ชั่วโมง จะมีค่าเฉลี่ยทั้ง 3 ตัวอย่างคอนกรีตของการเกิดสนิมทั้ง 4 ด้านอยู่ระหว่าง -670 ถึง -690 mV/CSE นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการเร่งการเกิดสนิมเท่ากับ 9 ชั่วโมงอาจจะยังไม่ใช้เวลาสุดท้ายที่สามารถดำเนินการได้ โดยปกติเครื่องมือในการวัดพื้นที่การเกิดสนิมด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์จะต้องมีค่าไม่เกิน -750 mV/CSE หลังจากนั้นเครื่องมือจะไม่สามารถดำเนินการทดสอบได้กล่าวคือ ตัวอย่างคอนกรีตเกิดสนิมเกือบทั่วตัวอย่างคอนกรีตเรียบร้อยแล้ว ดังนั้น การเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมและดำเนินการวัดพื้นที่การเกิดสนิมด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่ระยะเวลาไม่เกิน 9 ชั่วโมงจึงเป็นแนวทางเหมาะสมสำหรับการดำเนินการทดสอบ



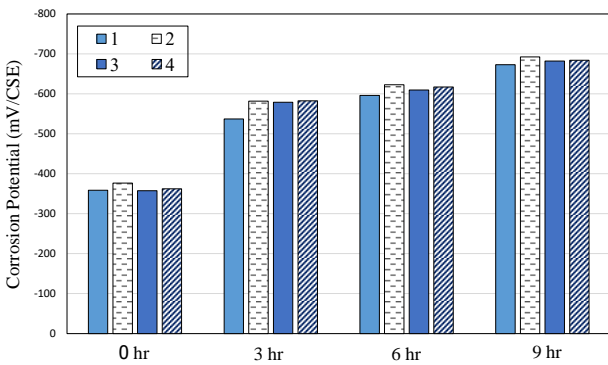
รูปที่ 3 การเกิดสนิมด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เมื่อใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 25 ของความสูงของตัวอย่างคอนกรีต



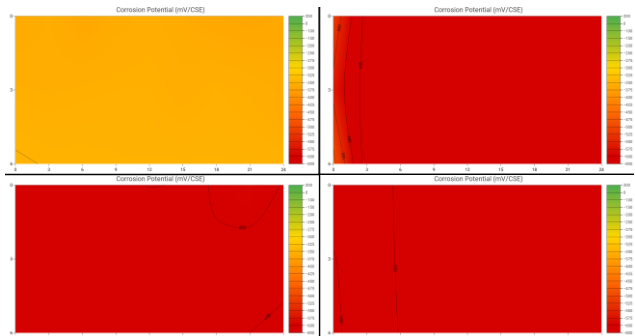
รูปที่ 4 พื้นที่ที่เกิดสนิมด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของการใช้ปริมาณสารละลายร้อยละ 25 ของความสูงตัวอย่างคอนกรีตที่ระยะเวลาการเร่งเท่ากับ 0 ชั่วโมง, 3 ชั่วโมง, 6 ชั่วโมง และ 9 ชั่วโมง



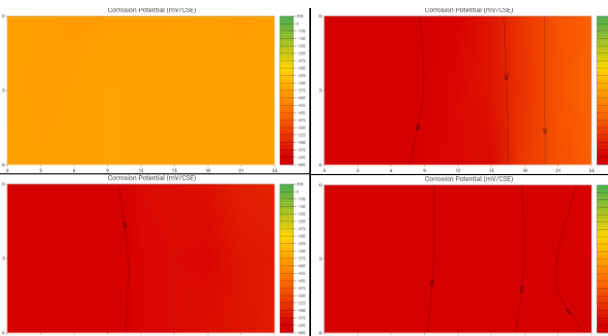
รูปที่ 7 การเกิดสนิมด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เมื่อใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 75 ของความสูงของตัวอย่างคอนกรีต



รูปที่ 5 การเกิดสนิมด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เมื่อใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 50 ของความสูงของตัวอย่างคอนกรีต



รูปที่ 8 พื้นที่ที่เกิดสนิมด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของการใช้ปริมาณสารละลายร้อยละ 75 ของความสูงตัวอย่างคอนกรีตที่ระยะเวลาการเร่งเท่ากับ 0 ชั่วโมง, 3 ชั่วโมง, 6 ชั่วโมง และ 9 ชั่วโมง

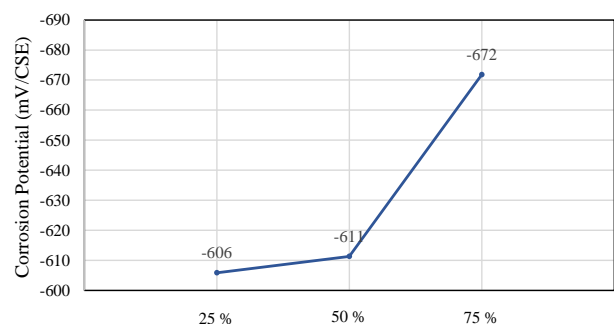


รูปที่ 6 พื้นที่ที่เกิดสนิมด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของการใช้ปริมาณสารละลายร้อยละ 50 ของความสูงตัวอย่างคอนกรีตที่ระยะเวลาการเร่งเท่ากับ 0 ชั่วโมง, 3 ชั่วโมง, 6 ชั่วโมง และ 9 ชั่วโมง

การใช้ปริมาณของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 75 ของความสูงของก้อนตัวอย่างคอนกรีตดังแสดงไว้ในรูปที่ 7 และ 8 พบว่า การวัดค่าก่อนเริ่มทำการเร่งการทดสอบจนเริ่มเร่งการเกิดสนิมเท่ากับ 3 ชั่วโมง จะมีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนติดลบเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและอยู่ในช่วงระหว่าง -680 ถึง -700 mV/CSE ของการเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ระยะเวลาเร่งเท่ากับ 3 ชั่วโมง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาที่การเร่งการเกิดสนิมที่ระยะเวลาเท่ากับ 6 และ 9 ชั่วโมง จะมีค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ติดลบเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาผลทดสอบพื้นที่ที่เกิดสนิมด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ พบว่า การใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 25 และ 50 จะมีพื้นที่การเกิดสนิมน้อยกว่าการใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 75 ที่ระยะเวลาการแช่เพื่อเร่งการเกิดสนิมของตัวอย่างคอนกรีตเท่ากับ 3 ชั่วโมง

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบปริมาณการใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์และระยะเวลาในการเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเท่ากับ 6 ชั่วโมงต่อการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่า การเกิดสนิมด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เมื่อใช้ปริมาณสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในการเร่งการเกิดสนิมร้อยละ 25 และ 50 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเร่งการเกิดสนิมของตัวอย่างคอนกรีต ส่วนการใช้ปริมาณสารละลายที่ใช้ในการเร่งการเกิดสนิมร้อยละ 75 จะมีค่าการเกิดสนิมด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับการใช้ปริมาณสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในการเร่งการเกิดสนิมร้อยละ 50

จากผลการทดสอบข้างต้นสามารถสรุปเบื้องต้นได้ว่า ปริมาณการใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ไม่ควรเกินร้อยละ 50 ของความสูงตัวอย่างคอนกรีต และระยะเวลาในการเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมไม่ควรเกิน 6 ชั่วโมง



รูปที่ 9 เปรียบเทียบการเกิดสนิมด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่ระยะเวลาในการแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เท่ากับ 6 ชั่วโมง

4. บทสรุป

จากการศึกษาปริมาณสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเวลาการแช่ที่มีผลต่อการเร่งการเกิดสนิมกักרוןของเหล็กเส้นที่เกิดจากคลอไรด์ที่ทดสอบโดยใช้ด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) การทดสอบการเร่งการเกิดสนิมที่กัลังไฟ 24 โวลต์ ควรใช้ปริมาณสารละลายโซเดียมคลอไรด์ไม่เกินร้อยละ 50 ของความสูงตัวอย่างคอนกรีต และระยะเวลาในการเร่งการเกิดสนิมไม่ควรเกิน 6 ชั่วโมง
- 2) การเร่งการเกิดสนิมที่ 9 ชั่วโมง จะมีค่าศักย์ไฟฟ้าการกักרוןติดลบมากกว่า - 650 mV/CSE และเหล็กเสริมจะเกิดสนิมเกือบทั้งตัวอย่าง โดยขอบเขตของการทดสอบการเร่งการเกิดสนิมเพียง 6 ชั่วโมงเพียงพอต่อการใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์และทำนายโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้
- 3) ระยะหุ้มคอนกรีตไม่ส่งผลต่อพื้นที่การเกิดสนิมด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์อย่างชัดเจน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณสนับสนุนจากสำนักงานนโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ โดยหน่วยงานบริหารและจัดการทุนด้านการพัฒนากำลังคนและทุนด้านการพัฒนาสถาบันอุดมศึกษา การวิจัยและการสร้างนวัตกรรม เลขที่สัญญา B05F640178 และขอขอบพระคุณหน่วยวิจัยวัสดุก่อสร้างอย่างยั่งยืน (SUSCON LAB) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา ที่อนุเคราะห์เครื่องมือสำหรับใช้ในการทดสอบงานวิจัยครั้งนี้ได้สำเร็จ

เอกสารอ้างอิง

- [1] ปริญญา จินดาประเสริฐ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, ปูนซีเมนต์ ปอชโซลาน และคอนกรีต. กรุงเทพมหานคร: สมาคมคอนกรีตไทย; 2552.
- [2] ACI 201.2R-92. Guide to Durable Concrete. American Concrete Institute. 1992:1-41.
- [3] ASTM C1152/C1152M-03. Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete. Annual Book of ASTM Standard. 2003;Vol.04.02:1-3.
- [4] ASTM C1202. Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. Annual Book of ASTM Standard. 2001;4(2):646-51.
- [5] ASTM C876-15. Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. Annual Book of ASTM Standard. 2015;Vol.04.02:1-8.
- [6] Leelalerkiet V, Kyung JW, Ohtsu M, Yokota M. Analysis of half-cell potential measurement for corrosion of reinforced concrete. Construction and Building Materials. 2004;18(3):155-62.
- [7] Hussain RR. Underwater half-cell corrosion potential bench mark measurements of corroding steel in concrete influenced by a variety of material science and

- environmental engineering variables. Measurement. 2011;44(1):274-80.
- [8] Adriman R, I. BMI, Huzni S, Fonna S, Ariffin AK. Improving half-cell potential survey through computational inverse analysis for quantitative corrosion profiling. Case Studies in Construction Materials. 2022;16:e00854.
- [9] Kim YY, Kim JM, Bang JW, Kwon SJ. Effect of cover depth, w/c ratio, and crack width on half cell potential in cracked concrete exposed to salt sprayed condition. Construction and Building Materials. 2014;54:636-45.
- [10] ASTM C127-01. Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate. Annual Book of ASTM Standard. 2003;Vol.04.01.
- [11] ASTM C128-07a. Density, relative density (specific gravity), and absorption of fine aggregate. Annual Book of ASTM Standard. 2007;Vol.04.01.
- [12] ACI 211.1-91. Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete. American Concrete Institute. 1991.
- [13] Pattarakittam T, Suwanvitaya P, Yodsudjai W. Factors influencing half-cell potential measurement analysis in reinforced concrete. Proceedings of International Conference on Highway Engineering 2012: Sustainable Innovation Toward Green Highways 2012. p. 443-8.