

การประเมินการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่เกิดจากคลอไรด์ด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าแบบครึ่งเซลล์: ปัจจัยของปริมาณสารละลายโซเดียมคลอไรด์และระยะเวลาการเร่ง

Evaluation of Chloride-Induced Corrosion of Reinforced Steel Bars in Concrete Using Half-Cell Potential Method: Factor of Sodium Chloride Solution Amount and Acceleration Period

ธนากร ภูเงินขำ¹ จิตตินัฐ ปล่องกระโทก¹ ฉัตรทริกา เพียงพิมาย² ชัตติย ชมพูนงค์¹ ชูดาภัก์ เดชพันธ์¹ ศตคุณ เดชพันธ์¹ และสกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์^{1*}

Tanakorn Phoo-ngernkham¹ Chittinat Plongkrathok¹ Chattarika Phiangphimai²

Khattiya Chompoovong¹ Chudapak Detphan¹ Satakhun Detphan¹ and Sakonwan Hanjitsuwan^{1*}

Received: September 23, 2024; Revised: October 31, 2024; Accepted: November 4, 2024

บทคัดย่อ

บทความนี้มีจุดประสงค์เพื่อประเมินการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่เกิดจากคลอไรด์ด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าแบบครึ่งเซลล์ ในแง่ของปัจจัยของปริมาณสารละลายโซเดียมคลอไรด์และระยะเวลาการเร่ง โดยแปรผันปริมาณสารละลายโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 25 50 และ 75 ของความสูงของตัวอย่างคอนกรีต ระยะเวลาการเร่งการเกิดสนิมเท่ากับ 0 3 6 และ 9 ชั่วโมง และระยะหุ้มของคอนกรีตเสริมเหล็กต่อการกัดกร่อนที่เกิดจากคลอไรด์ของเหล็กเสริมในคอนกรีต ผลการทดสอบพบว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กมีแนวโน้มเกิดสนิมเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณสารละลายโซเดียมคลอไรด์ และระยะเวลาในการเร่งการเกิดสนิมมากขึ้น ส่วนระยะหุ้มของคอนกรีตเสริมเหล็กช่วยเพิ่มความสามารถต้านทานการกัดกร่อนของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ จากผลการทดสอบข้างต้นสามารถให้ข้อแนะนำได้ว่า ปริมาณการใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ในระดับความสูงร้อยละ 25 ของความสูงตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก และระยะเวลาในการเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเท่ากับ 3 ชั่วโมง เป็นขอบเขตที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการในการทดสอบซึ่งตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กมีค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เฉลี่ยต่ำกว่า -400 mV/CSE ณ เวลาที่ตรวจวัด

คำสำคัญ : โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก; วิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์; การกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต; ปริมาณสารละลายโซเดียมคลอไรด์; ระยะเวลาการเร่ง

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

² คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

¹ Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan

² Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep

* Corresponding Author, Tel. 06 1478 9888, E - mail: sakonwan.ha@rmuti.ac.th

Abstract

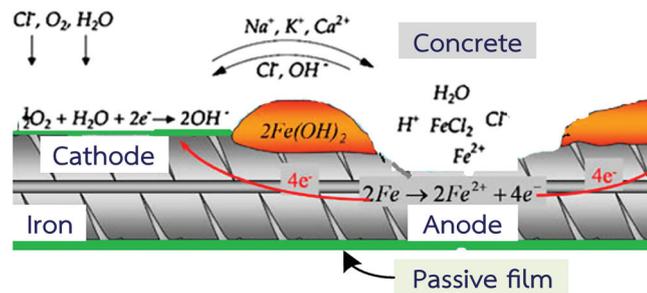
This paper aims to evaluate the chloride-induced corrosion of reinforced steel bars in concrete using the half-cell potential (HCP) method. The corrosion of reinforced steel bars in concrete was examined in connection with the amount of sodium chloride (NaCl) solution and the acceleration period. The differences in NaCl solution amounts of 25 %, 50 %, and 75 % by the height of the concrete sample, acceleration periods of 3, 6, and 9 hours, and concrete covering depths were investigated in this study. Test results found that the corrosion probability of reinforced concrete tended to increase with increasing NaCl solution proportion and acceleration period. Furthermore, an increase in the depth of concrete covering could reduce the corrosion of reinforced steel bars in concrete. According to test results, it is recommended that the NaCl solution amount at 25 % of the height of the concrete sample and the acceleration period at 3 hours are suitable conditions for testing in the laboratory regarding cost-effectiveness and testing period. The average HCP readings of reinforced concrete samples were below -400 mV/CSE at the time of measurement.

Keywords: Reinforced Concrete Structures; Half-Cell Potential Method; Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete; Sodium Chloride Solution Amount; Accelerated Duration

บทนำ

คลอไรด์ไอออนเป็นหนึ่งในสาเหตุของการเกิดสนิมของคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งเกิดจากการลดความเป็นต่างของคอนกรีตและการทำลายฟิล์มบาง ๆ ของ $\gamma-Fe_2O_3$ เคลือบผิวเหล็กไว้ซึ่งทำหน้าที่ป้องกันเหล็กเสริมไม่ให้เกิดสนิมเพื่อไม่ให้ถูกทำลายหรือลดลงจนถึงระดับวิกฤตและเมื่อน้ำและก๊าซออกซิเจนตรงบริเวณเหล็กเสริมที่ไม่มีฟิล์มป้องกันอยู่เหล็กจะเป็นสนิมส่งผลให้เกิดความเสียหายจากการขยายตัวของเหล็กเสริมและเป็นสาเหตุหลักที่ทำลายองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

โดยปกติหลักการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตมีผลเนื่องจากความต่างศักย์ทางไฟฟ้าของเหล็กเสริมในคอนกรีตซึ่งทำให้เกิดเซลล์ไฟฟ้าเคมีขึ้น เริ่มจากการมีความชื้นเพียงพอทำให้อะตอมของเหล็กเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนกลายเป็น Fe^{2+} ซึ่งละลายอยู่ในน้ำและอยู่รอบเหล็กเสริมซึ่งจะเรียกบริเวณนี้เป็นขั้วแอโนด (ขั้วบวก) และอิเล็กตรอนนี้จะสะสมอยู่บริเวณผิวบนเหล็กเสริมทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าและส่วนของเหล็กเสริมที่ไม่มีการแตกตัวจะมีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าและทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด (ขั้วลบ) ซึ่งการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของกระแสภายในเหล็กเสริมเป็นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากแคโทดไปแอโนด ขณะที่กระแสภายนอกเหล็กเสริมเป็นการเคลื่อนที่ของไอออน Fe^{2+} ร่วมกับไอออนของ OH^- และน้ำในโพรงของคอนกรีตเกิดเป็นผลผลิต $Fe(OH)_3$ และทำปฏิกิริยากับออกซิเจนอีกทำให้เกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ดังรูปที่ 1 นอกจากนั้นสารละลายอัลคาไลน์และแคลเซียมไฮดรอกไซด์หลังการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตเป็นหนึ่งในปัจจัยที่ส่งผลให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวเมื่ออยู่ในสภาวะความชื้นที่เหมาะสม หลังจากนั้นคลอไรด์ไอออนจะสามารถเข้าไปทำลายชั้นฟิล์มป้องกันของผิวเหล็กเสริมส่งผลให้เหล็กเสริมเกิดเป็นสนิม แต่อย่างไรก็ตามน้ำในโพรงแห้งหรือโครงสร้างภายในของคอนกรีตที่บ่มแน่นรวมถึงโพรงภายในมีความไม่ต่อเนื่องจะสามารถช่วยชะลอหรือยับยั้งการไหลของคลอไรด์ไอออนผ่านโพรงของคอนกรีตได้ยากขึ้นทำให้สามารถลดการเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้ (Tho-in et al., 2021; Naidu Gopu and Joseph, 2022; Hanjitsuwan et al., 2022; Pangdaeng et al., 2022)



รูปที่ 1 การกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต (Naidu Gopu and Joseph, 2022)

ในปัจจุบันการประเมินการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่เกิดจากคลอไรด์เป็นแนวทางสำคัญเพื่อเป็นแนวทางสำหรับการซ่อมบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับความเสียหาย ดังนั้น การกำหนดแนวทางการตรวจสอบและการใช้ข้อมูลการประเมินการกัดกร่อนเพื่อคาดการณ์อายุการใช้งานและปริมาณพื้นที่ที่ได้รับความเสียหายที่ต้องดำเนินการซ่อมบำรุงรักษาจึงมีความสำคัญอย่างมาก โดยวิธีการวัดคลอไรด์และความสามารถต้านทานคลอไรด์สามารถทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตที่ระดับความลึกต่าง ๆ ซึ่งวิธีการที่นิยมใช้ ได้แก่ วิธีการวิเคราะห์ทางเคมี สำหรับการทดสอบนี้จำเป็นต้องเจาะคอนกรีตที่บริเวณต้องการหาปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตไปบดให้ละเอียดและวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์ตั้งรายละเอียดในมาตรฐาน ASTM C1152 (Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete, 2020) นอกจากนี้ยังมีวิธีการทดสอบความสามารถต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ตามรายละเอียดในมาตรฐาน ASTM C1202 (Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, 2022) โดยเป็นวิธีการที่ใช้ประจุไฟฟ้าวิ่งผ่านเนื้อคอนกรีตระหว่างสารละลายโซเดียมคลอไรด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความต่างศักย์เท่ากับ 60 โวลต์ หน่วยของปริมาณประจุไฟฟ้าวัดเป็นคูลอมป์และแปรผกผันโดยตรงกับการแทรกซึมของคลอไรด์ ซึ่งวิธีนี้สามารถทราบผลการแทรกซึมของคลอไรด์ได้อย่างรวดเร็ว ในปัจจุบันวิธีการประเมินการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่เกิดจากคลอไรด์ที่ได้รับความนิยมอย่างมาก ได้แก่ การประเมินการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ตั้งรายละเอียดระบุในมาตรฐาน ASTM C876-15 (Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, 2022) ซึ่งวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายและไม่ต้องเจาะเนื้อคอนกรีตเพื่อมาวิเคราะห์การแทรกซึมของคลอไรด์

วิธีการประเมินการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เป็นวิธีการทดสอบที่มีความรวดเร็วในการตรวจสอบปริมาณของสนิมที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและมีความเหมาะสมสำหรับการทดสอบในภาคสนามอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตามการทำนายอัตราการเกิดสนิมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในห้องปฏิบัติการจำเป็นต้องดำเนินการเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต เมื่อพิจารณาถึงข้อกำหนดต่าง ๆ ตามมาตรฐาน ASTM C876-15 (Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, 2022) พบว่า ไม่มีข้อกำหนดที่แน่นอนโดยเป็นเพียงข้อเสนอแนะในการดำเนินการทดสอบ ซึ่งรายงานวิจัยของ Leelalerkiet et al. (2004) และ Hussain (2011) ที่ได้ดำเนินการทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่เกิดจากคลอไรด์ภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้น้ำเมื่อแปรผันสภาวะความชื้นสัมพัทธ์อื่น ๆ รวมถึงปริมาณความเข้มข้นของคลอไรด์ ระยะหุ้มคอนกรีตและกำลังอัดของคอนกรีต จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ทุกปัจจัยส่งผลต่ออัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตและควรได้รับการศึกษามากขึ้นเพื่อระบับขอบเขตของการทดสอบด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ นอกจากนี้จากงานวิจัยที่ผ่านมา (Hussain, 2011; Adriman et al., 2022; Kim et al., 2014) ได้ดำเนินการทดสอบอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่มีการใช้การสัมผัสกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์จำนวน 1 ด้าน โดยไม่ได้พิจารณาถึงปริมาณสารละลายโซเดียมคลอไรด์และระยะเวลาที่ตัวอย่างคอนกรีตแช่ในสารละลาย แต่อย่างไรก็ตามหากพิจารณาความคุ้มค่าทั้งในด้านงบประมาณและระยะเวลาในการทดสอบจำเป็นต้องมีการศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อเป็นข้อเสนอแนะที่เหมาะสม

สำหรับการทดสอบและงานวิจัยต่อไป ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและประเมินการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่เกิดจากคลอไรด์ด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าแบบครึ่งเซลล์โดยมุ่งเน้นศึกษาปัจจัยของปริมาณสารละลายโซเดียมคลอไรด์ของความสูงของตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก ระยะเวลาการเร่งการเกิดสนิมในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ และระยะหุ้มของคอนกรีตเสริมเหล็ก ผลการทดสอบที่ได้รับจะเป็นข้อมูลที่สำคัญและเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการประเมินและวิเคราะห์โอกาสการเกิดสนิมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ดำเนินการในห้องปฏิบัติการในแง่ของความคุ้มทุนของงบประมาณและระยะเวลาในการทดสอบก่อนนำข้อมูลไปใช้ในการออกแบบการซ่อมบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับความเสียหายต่อไป

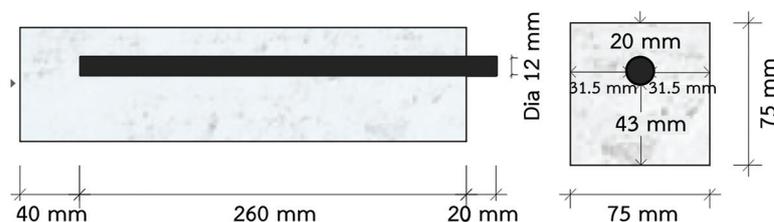
วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุตั้งต้นที่ใช้ในงานวิจัย ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำจากอำเภอนิคมาย จังหวัดนครราชสีมา มวลรวมหยาบใช้หินปูนขนาดโตสุดไม่เกิน 19 มิลลิเมตร โดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 ส่วนค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบดำเนินการทดสอบและวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM C128 (Standard Test Methods for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate, 2022) และ ASTM C127 (Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate, 2015) ซึ่งมวลรวมละเอียดมีค่าความถ่วงจำเพาะแบบอิมมิตัวผิวแห้ง ค่าความถ่วงจำเพาะปรากฏ ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ และค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.57 2.61 0.96 และ 2.63 ตามลำดับ สำหรับมวลรวมหยาบมีค่าความถ่วงจำเพาะแบบอิมมิตัวผิวแห้ง ค่าความถ่วงจำเพาะปรากฏ ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ และค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.77 2.80 0.64 และ 6.66 ตามลำดับ ขณะที่สารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่เข้มข้นร้อยละ 3.5 ใช้ในการเร่งการกัดกร่อนของเหล็กเส้นในคอนกรีตและแปรผันปริมาณของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 25 50 และ 75 ของความสูงของตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก

2. การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

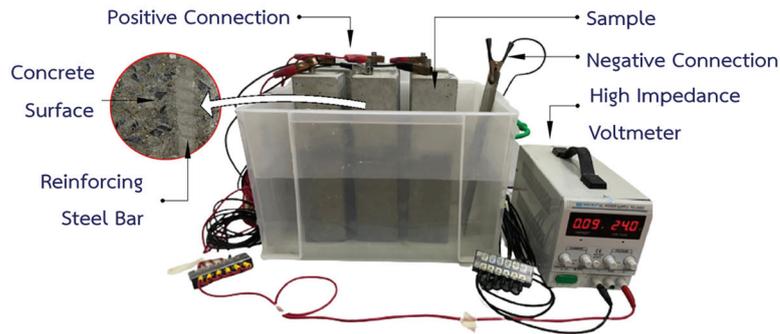
คอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยนี้ถูกออกแบบส่วนผสมคอนกรีตตามมาตรฐาน ACI 211.1-91 (Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete, 2021) ให้มีกำลังอัดประลัยไม่น้อยกว่า 21 เมกะปาสคาล ที่อายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน และมีค่าการยุบตัวของคอนกรีตอยู่ระหว่าง 70 ถึง 100 มิลลิเมตร โดยผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วัน เท่ากับ 22.8 เมกะปาสคาล สำหรับการเตรียมตัวอย่างการเร่งการกัดกร่อนของเหล็กเส้นในคอนกรีตด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่เข้มข้นร้อยละ 3.5 เริ่มต้นด้วยการฝังเหล็กข้ออ้อยขนาด 12 มิลลิเมตร ลงในแบบหล่อรูปทรงปริซึมขนาด 75 x 75 x 300 มิลลิเมตร โดยตัวอย่างคอนกรีตจะมีการแปรผันระยะหุ้ม (Covering) เป็น 3 ระยะหุ้ม (รูปที่ 2) ประกอบด้วย (1) ด้านขวาและซ้ายของตัวอย่างคอนกรีตมีระยะหุ้มเท่ากับ 31.5 มิลลิเมตร (2) ด้านบนตัวอย่างคอนกรีตมีระยะหุ้มเท่ากับ 20 มิลลิเมตร (3) ด้านล่างตัวอย่างคอนกรีตมีระยะหุ้มเท่ากับ 43 มิลลิเมตร หลังจากนั้นดำเนินการเทคอนกรีตลงในแบบหล่อและทิ้งไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิจนครบ 24 ชั่วโมง จึงดำเนินการถอดแบบและห่อตัวอย่างด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นของตัวอย่างคอนกรีตและบ่มตัวอย่างไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิจนครบอายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน



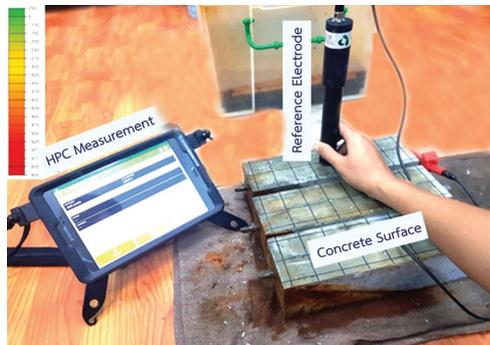
รูปที่ 2 การวางเหล็กเสริมในคอนกรีตและระยะหุ้มคอนกรีต

3. การทดสอบความเป็นไปได้การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-Cell Potential) หลังการเร่งการกักกร่อนด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์

การทดสอบความเป็นไปได้การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-Cell Potential) หลังการเร่งการกักกร่อนด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ โดยการทดสอบดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C876-15 (Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, 2022) สำหรับเกณฑ์การประเมินค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ หลังจากขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างคอนกรีต จะเริ่มต้นด้วยการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กก่อนดำเนินการเร่งสนิมและดำเนินการบันทึกค่าที่ได้เป็น 0 ชั่วโมง หลังจากนั้นดำเนินการต่อวงจรไฟฟ้าโดยให้เหล็กด้านบนเป็นขั้วบวกและให้แผ่นอะลูมิเนียมถูกแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3.5 ที่มีการแปรผันปริมาณของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 25 50 และ 75 ของความสูงของตัวอย่างคอนกรีตเป็นขั้วลบ การเชื่อมต่อกับชุดควบคุมการเร่งการกักกร่อนจะใช้สายไฟ 2 เส้นในการเชื่อมต่อวงจรระหว่างเหล็กเสริมและแผ่นอะลูมิเนียมเข้ากับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าขนาด 24 โวลต์ (รูปที่ 3(ก)) และดำเนินการเร่งการเกิดสนิมที่ระยะเวลาเท่ากับ 3 6 และ 9 ชั่วโมง หลังครบระยะเวลาการเร่งการกักกร่อนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตแต่ละช่วงเวลา ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กจะถูกนำออกจากการแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และดำเนินการซับผิวคอนกรีตให้แห้ง และบันทึกค่าศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีการค่าศักย์ไฟฟ้าจะวางอิเล็กโทรดอ้างอิงบนพื้นผิวคอนกรีต และอีกขั้วหนึ่งเชื่อมต่อโดยตรงกับพื้นผิวของคอนกรีตเสริมเหล็ก และดำเนินการวัดตัวอย่างทั้ง 4 ด้าน โดยแต่ละด้านมีระยะหุ้ม (Covering) คือ ด้านที่ 1 ระยะหุ้ม 43 มิลลิเมตร ด้านที่ 2 ระยะหุ้ม 31.5 มิลลิเมตร ด้านที่ 3 ระยะหุ้ม 20 มิลลิเมตร และด้านที่ 4 ระยะหุ้ม 31.5 มิลลิเมตร (รูปที่ 3(ข)) โดยผลการทดสอบใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่าง และแต่ละตัวอย่างดำเนินการวัดจำนวน 24 จุด



(ก) การแช่ตัวอย่างในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และการติดตั้งเครื่องมือทดสอบ

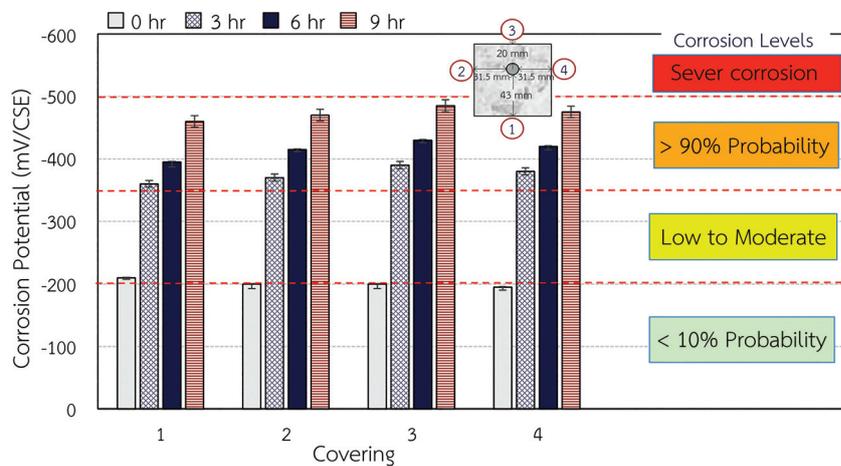


(ข) การวัดพื้นที่การเกิดสนิมหลังจากการเร่งการกักกร่อนด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์

รูปที่ 3 ทดสอบความคงทนต่อการกักกร่อนของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Phiangphimai et al., 2023)

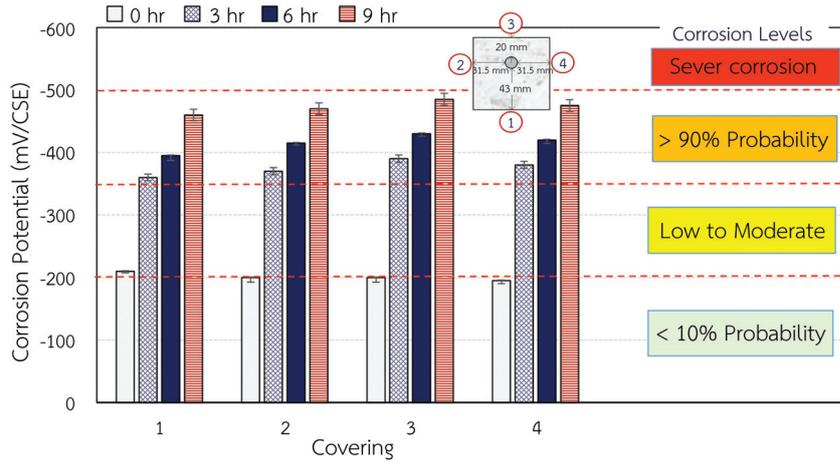
ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลการทดสอบการแปรผันปริมาณสารละลายโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 25 50 และ 75 ของความสูงของตัวอย่างคอนกรีต และระยะเวลาการเร่งเท่ากับ 0 3 6 และ 9 ชั่วโมง ต่อความสามารถในการกัดกร่อนที่เกิดจากคลอไรด์ของคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ ดังรูปที่ 4 - 6 จากผลการทดสอบพบว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กมีแนวโน้มเกิดสนิมเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาในการเร่งในสารละลายโซเดียมคลอไรด์มากขึ้น (หมายเหตุ: ค่าติดลบเพิ่มขึ้นแสดงถึงโอกาสในการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตมากขึ้น) โดยค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์หลังจากรังการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตมากกว่า 3 ชั่วโมงขึ้นไปจะมีค่าติดลบมากกว่า 350 mV/CSE แสดงถึงโอกาสของเหล็กเริ่มจะเกิดสนิมมากถึงร้อยละ 90 ตามรายละเอียดโอกาสการเกิดสนิมของมาตรฐาน ASTM C876-15 (Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, 2022) นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณของสารละลายโซเดียมคลอไรด์สำหรับใช้ในเร่งการเกิดสนิมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ติดลบมากขึ้นเช่นเดียวกันกับปัจจัยของระยะเวลาในการเร่ง



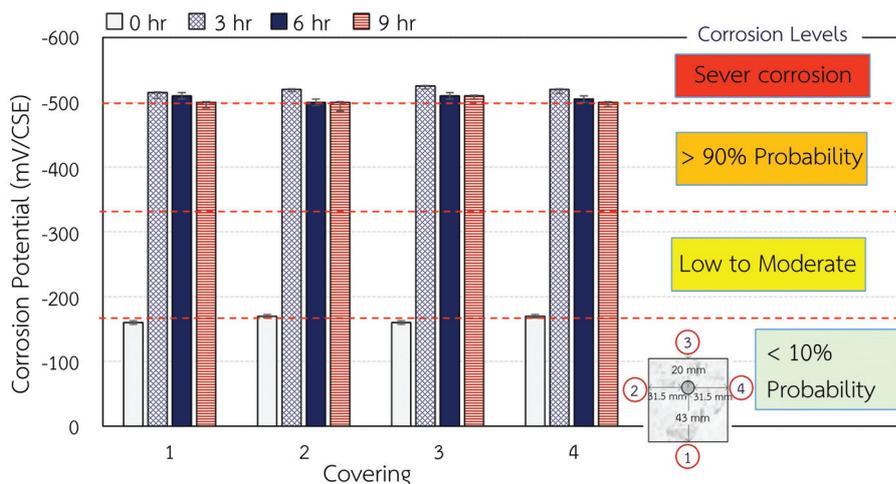
รูปที่ 4 การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ ในระดับความสูงร้อยละ 25 ของความสูงของตัวอย่างคอนกรีต

จากรูปที่ 4 พบว่า การใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ในระดับความสูงร้อยละ 25 ของความสูงของตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กจะมีแนวโน้มของค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ติดลบเพิ่มขึ้น และเมื่อระยะเวลาในการเร่งการเกิดสนิมเท่ากับ 9 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เฉลี่ยทั้ง 4 ด้านของตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กอยู่ระหว่าง -460 ถึง -485 mV/CSE ซึ่งอยู่ในช่วงสีเหลืองเข้มของพื้นที่การเกิดสนิมด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์แสดงถึงความน่าจะเป็นมากกว่าร้อยละ 90 ณ เวลาที่ตรวจวัดที่จะเกิดสนิม นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่า เมื่อใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ในระดับความสูงร้อยละ 25 และระยะเวลาการเร่งการเกิดสนิมเท่ากับ 9 ชั่วโมง มีแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตสูงสุด นอกจากนี้รูปที่ 4 ยังพบว่าระยะหุ้มของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นสามารถช่วยลดโอกาสการเกิดสนิมได้แต่อย่างไรก็ตามค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของทุกระยะหุ้มของคอนกรีตไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pattarakittam et al. (2012) ที่รายงานไว้ว่าผลของระยะหุ้มคอนกรีตต่อค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ไม่ค่อยเห็นผลชัดเจนในช่วงระยะการเริ่มต้นของการพัฒนากำลังคอนกรีต แต่อย่างไรก็ตามผลการทดสอบข้างนี้สามารถยืนยันได้ว่า ระยะหุ้มของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการสัมผัสกับคลอไรด์สามารถเพิ่มความสามารถด้านทานการกัดกร่อนของสารละลายคลอไรด์ได้ตามข้อแนะนำของงานวิจัยที่ผ่านมา (Chindaprasirt et al., 2024)



รูปที่ 5 การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ในระดับความสูงร้อยละ 50 ของความสูงของตัวอย่างคอนกรีต

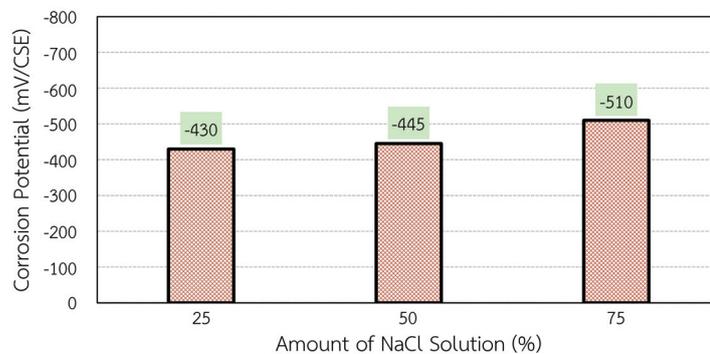
จากรูปที่ 5 พบว่า การใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ในระดับความสูงร้อยละ 50 ของความสูงของตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ในระดับความสูงร้อยละ 25 ของความสูงของตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก กล่าวคือ การเร่งการเกิดสนิมที่ระยะเวลาเท่ากับ 9 ชั่วโมง จะมีค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เฉลี่ยทั้ง 4 ด้านของตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กอยู่ระหว่าง -505 ถึง -525 mV/CSE ซึ่งอยู่ในช่วงสีแดงเข้มของพื้นที่การเกิดสนิมด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์แสดงถึงเกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรง ณ เวลาที่ตรวจวัด บ่งบอกถึงตัวอย่างเหล็กเสริมในคอนกรีตมีโอกาสเกิดสนิมเกือบทั้งหมด นอกจากนี้ความสามารถสูงสุดของเครื่องมือในการวัดพื้นที่การเกิดสนิมด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มีค่าไม่เกิน -750 mV/CSE ดังนั้น การดำเนินการทดสอบการวัดพื้นที่การเกิดสนิมด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่มีการใช้แรงดันไฟฟ้าขนาด 24 โวลต์ ควรใช้เวลาไม่เกิน 9 ชั่วโมง ในการเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมของตัวอย่างเนื่องด้วยค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มากกว่า -500 ถึง -750 mV/CSE จะไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้รูปที่ 5 ยังพบว่า ระยะหุ้มของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีแนวโน้มสามารถชะลอการกัดกร่อนจากสารละลายโซเดียมคลอไรด์ทำนองเดียวกันกับการใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ในระดับความสูงร้อยละ 25 ของความสูงของตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก



รูปที่ 6 การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ในระดับความสูงร้อยละ 75 ของความสูงของตัวอย่างคอนกรีต

รูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อแปรผันปริมาณสารละลายโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 25 50 และ 75 ของความสูงของตัวอย่างคอนกรีตที่ระยะเวลาในการเร่งการเกิดสนิมเท่ากับ 6 ชั่วโมง ซึ่งการเลือกนำเสนอที่ระยะเวลาในการเร่งการเกิดสนิมเท่ากับ 6 ชั่วโมงเนื่องด้วยจะมีโอกาสการเกิดสนิม

มากกว่าร้อยละ 90 ณ เวลาที่ตรวจวัดที่จะเกิดสนิม เมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาในการเร่งการเกิดสนิมเท่ากับ 9 ชั่วโมง จะเกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรง ณ เวลาที่ตรวจวัดผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า การใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ ในระดับความสูงร้อยละ 75 ของความสูงของตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กมีแนวโน้มแตกต่างกับการใช้สารละลาย โซเดียมคลอไรด์ในระดับความสูงร้อยละ 25 และ 50 ของความสูงของตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก กล่าวคือ เหล็กเสริม ในคอนกรีตมีแนวโน้มเกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรง ณ เวลาที่ตรวจวัดอย่างรวดเร็วตั้งแต่ระยะการเร่งเท่ากับ 3 ชั่วโมง โดยมีค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์อยู่ในช่วงระหว่าง -515 ถึง -525 mV/CSE และเมื่อเพิ่มระยะเวลาการเร่งเป็น 6 ชั่วโมง และ 9 ชั่วโมง ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับพื้นที่การเกิดสนิมด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ จะอยู่ในช่วงสีแดงเข้มทั้งหมดแสดงถึงเกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรง ณ เวลาที่ตรวจวัด นอกจากนี้เมื่อพิจารณาปัจจัย ของระยะหุ้มของคอนกรีตเสริมเหล็กพบว่า ความแตกต่างของระยะหุ้มของคอนกรีตเสริมเหล็กไม่ส่งผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้า ครึ่งเซลล์อย่างมีนัยสำคัญ อาจเนื่องจากปริมาณการใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่สูงแสดงถึงความสามารถการแทรกซึม ของคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตมากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Chindaprasirt et al. (2024) ที่ได้สรุปไว้ว่า ความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนมีแนวโน้มส่งเสริมการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากขึ้น



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อแปรผันปริมาณสารละลายโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 25 50 และ 75 ของความสูงของตัวอย่างคอนกรีตที่ระยะเวลาในการเร่งการเกิดสนิมเท่ากับ 6 ชั่วโมง

รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อแปรผันปริมาณสารละลายโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 25 50 และ 75 ของความสูงของตัวอย่างคอนกรีตที่ระยะเวลาในการเร่งการเกิดสนิมเท่ากับ 6 ชั่วโมง และพิจารณาระยะหุ้มเท่ากับ 20 มิลลิเมตร พบว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อใช้ปริมาณสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในระดับความสูงร้อยละ 25 และ 50 ของความสูงตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ขณะที่การใช้ปริมาณสารละลายในระดับความสูงร้อยละ 75 จะมีค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคอนกรีตเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับปริมาณสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในระดับความสูงร้อยละ 50 ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ข้างต้นไว้ว่า ปัจจัยของความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนมีแนวโน้มส่งผลต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต (Chindaprasirt et al., 2024)

จากผลการทดสอบข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ปริมาณการใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ในระดับความสูงไม่ควรเกินร้อยละ 50 ของความสูงตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก และระยะเวลาในการเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมไม่ควรเกิน 6 ชั่วโมง เนื่องด้วยค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคอนกรีตไม่ถึงช่วงเกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรง ณ เวลาที่ตรวจวัด หรือมีโอกาสการเกิดสนิมมากกว่าร้อยละ 90 ณ เวลาที่ตรวจวัดที่จะเกิดสนิม ทำให้สามารถพิจารณาความแตกต่างของโอกาสการเกิดสนิมได้อย่างชัดเจนเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับปริมาณการใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ในระดับความสูงร้อยละ 75 ของความสูงตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กและระยะเวลาในการเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมมากกว่า 9 ชั่วโมง ที่มีแนวโน้มของเหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรง ณ เวลาที่ตรวจวัดอย่างรวดเร็วตั้งแต่ระยะการเร่งเท่ากับ 3 ชั่วโมง

สรุปผล

จากการศึกษาการแปรผันปริมาณสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ร้อยละ 25 50 และ 75 ของความสูงของตัวอย่างคอนกรีต ระยะเวลาการเร่งการเกิดสนิมเท่ากับ 0 3 6 และ 9 ชั่วโมง และระยะหุ้มของคอนกรีตเสริมเหล็กต่อการกัดกร่อนที่เกิดจากคลอไรด์ของคอนกรีตเสริมด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ สามารถสรุปได้ว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กมีแนวโน้มเกิดสนิมเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณสารละลายไฮเดียมคลอไรด์และระยะเวลาในการเร่งการเกิดสนิมมากขึ้น จากผลการทดสอบข้างต้นสามารถให้ข้อแนะนำสำหรับการทดสอบการประเมินการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่เกิดจากคลอไรด์ด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าแบบครึ่งเซลล์ได้ว่า ปริมาณการใช้สารละลายไฮเดียมคลอไรด์ในระดับความสูงร้อยละ 25 ของความสูงตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก และระยะเวลาในการเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเท่ากับ 3 ชั่วโมง เป็นขอบเขตที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (มีค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เฉลี่ยทั้ง 4 ด้านของตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กต่ำกว่า -400 mV/CSE ณ เวลาที่ตรวจวัด) นอกจากนี้ผลการพิจารณาระยะหุ้มของคอนกรีตเสริมเหล็กต่อความสามารถต้านทานการกัดกร่อนของสารละลายไฮเดียมคลอไรด์พบว่า ระยะหุ้มของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการสัมผัสกับคลอไรด์สามารถเพิ่มความสามารถต้านทานการกัดกร่อนของสารละลายคลอไรด์ได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากงบประมาณโครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2567 เลขที่ FF67/P1-042

References

- Adriman, R., Ibrahim, I.B.M., Huzni, S., Fonna, S. and Ariffin, A.K. (2022). Improving Half-Cell Potential Survey Through Computational Inverse Analysis for Quantitative Corrosion Profiling. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00854. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00854>
- Chindaprasirt, P., Hanjitsuwan, S., Damrongwiriyapap, N., Li, L.-Y. and Phoo-Ngernkham, T. (2024). Fly Ash-Based Alkali-Activated Repair Material for Concrete Exposed to Aggressive Environment. In *Eco-Efficient Repair and Rehabilitation of Concrete Infrastructures* (pp. 251-272). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13470-8.00001-0>
- Hanjitsuwan, S., Tho-in, T. and Phoo-ngernkham, T. (2022). Influence of NaOH Concentration and Sand to Binder Ratio on Hybrid Cement Mortar for Filled Materials in Notched Concrete Beam. *RMUTI JOURNAL Science and Technology*, 15(1), 1-10. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/article/view/245286/168422> (in Thai)
- Hussain, R.R. (2011). 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*, 44(1), 274-280. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2010.10.002>
- Kim, Y.Y., Kim, J.M., Bang, J.W. and Kwon, S.J. (2014). 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*, 54, 636-645. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.009>
- Leelalerkiet, V., Kyung, J.W., Ohtsu, M. and Yokota, M. (2004). Analysis of Half-Cell Potential Measurement for Corrosion of Reinforced Concrete. *Construction and Building Materials*, 18(3), 155-162. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2003.10.004>

- Naidu Gopu, G. and Joseph, S.A. (2022). Corrosion Behavior of Fiber-Reinforced Concrete - A Review. *Fibers*, 10(5), 38; <https://doi.org/10.3390/fb10050038>
- Pangdaeng, S., Ngamtavee, S., Tho-in, T., Hanjitsuwan, S. and Phoo-ngernkham, T. (2022). Mechanical Properties of Fly Ash Geopolymer Concrete Incorporating Clay Residue and Silica Fume. *RMUTI JOURNAL Science and Technology*, 15(2), 1-10. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/article/view/245139/169243> (in Thai)
- Pattarakittam, T., Suwanvitaya, P. and Yodsudjai, W. (2012). Factors Influencing Half-Cell Potential Measurement Analysis in Reinforced Concrete. *Proceedings of International Conference on Highway Engineering 2012, Sustainable Innovation Toward Green Highways*. 443-448. Bangkok, Thailand.
- Phiangphimai, C., Joinok, G., Phoo-ngernkham, T., Damrongwiriyanupap, N., Hanjitsuwan, S., Suksiripattanapong, C., Sukontasukkul, P. and Chindaprasirt, P. (2023). Durability Properties of Novel Coating Material Produced by Alkali-Activated/Cement Powder. *Construction and Building Material*, 363, 129837. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129837>
- Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate. (2015). *American Society for Testing and Materials*. ASTM C127-15.
- Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete. (2020). *American Society for Testing and Materials*. ASTM C1152/C1152M-20.
- Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete. (2021). *American Concrete Institute*. ACI 211.1-91.
- Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. (2022). *American Society for Testing and Materials*. ASTM C1202-22.
- Standard Test Methods for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate. (2022). *American Society for Testing and Materials*. ASTM C128-22.
- Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. (2022). *American Society for Testing and Materials*. ASTM C876-22.
- Tho-in, T., Latulee, C., Phoo-ngernkham, T., Amornpinyo, P., Phonkasi, S. and Yodsiri, P. (2021). Influence of Ordinary Portland Cement and Different Alkali Solution Ratio in Geopolymer Mortar on Time of Setting and Compressive Strength for use as a Repaired Materials. *RMUTI JOURNAL Science and Technology*, 14(3), 18-31. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/article/view/245178/168086> (in Thai)