

การศึกษาพฤติกรรมแนวโน้มการเกิดสนิมของสารเคลือบคอนกรีตในคลอไรด์ที่สภาวะเร่ง A Study of Accelerated Corrosion Behavior of Protective Coatings on Reinforced Concrete under Chloride Environment

พิชญุตม์ จรุงผล¹ นันทวัฒน์ ขมหวาน^{2,*} ณัฐพงศ์ แสนคำคุณ² สิริลักษณ์ เต็งน้อย², วงศ์วิศว์ รอดอนันต์³ และ วรางคณา สุตโต³

¹ บริษัท ก๊อดคิลลา จำกัด, ² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จ.นครปฐม,

³ การประปานครหลวง จ.กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: fengnwk@ku.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่มีการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบประเภทต่างๆ ภายใต้สภาวะเร่ง โดยทำการทดสอบกับตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กทรงกระบอกรูปทรงแปดเหลี่ยมที่มีเหล็กเสริมวางตำแหน่งกึ่งกลาง การศึกษานี้มุ่งเน้นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างคอนกรีตที่ไม่เคลือบผิว (ตัวอย่างควบคุม) และคอนกรีตที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 3 ประเภท ได้แก่ สารเคลือบประเภทซีเมนต์ (cement-based coating) อีพ็อกซี (epoxy) และโพลียูเรีย (polyurea) ในการทดสอบ ตัวอย่างทดสอบถูกแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ และทำการเร่งการเกิดสนิมด้วยกระแสไฟฟ้า โดยมีการติดตามผลการทดสอบผ่านการตรวจวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างอย่างต่อเนื่อง และทำการวัดแนวโน้มการเกิดสนิมด้วยวิธี Half-cell potential ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับตามมาตรฐานสากล การทดสอบดำเนินการภายใต้การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่คงที่ เพื่อลดผลกระทบจากปัจจัยภายนอก นอกจากนี้ยังมีการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของผิวคอนกรีตและการแตกร้าวที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ เพื่อประเมินความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดสนิมและความเสียหายของโครงสร้าง ผลการศึกษานี้จะเป็นประโยชน์ต่อการเลือกใช้สารเคลือบผิวคอนกรีตที่เหมาะสมสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องเผชิญกับสภาวะแวดล้อมที่มีคลอไรด์ รวมถึงการพัฒนาแนวทางการป้องกันการเกิดสนิมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีประสิทธิภาพและยั่งยืน อันจะนำไปสู่การยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างและลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาในระยะยาว

คำสำคัญ: แนวโน้มการเกิดสนิม, สารเคลือบ, คลอไรด์

Abstract

This research aims to investigate the corrosion tendency of steel reinforcement in concrete specimens coated with various protective materials under accelerated conditions. The study

examines cylindrical reinforced concrete specimens with centrally positioned steel reinforcement, comparing uncoated concrete (control specimens) with concrete coated using three different types of protective materials: cement-based coating, epoxy, and polyurea. In the experimental procedure, test specimens were immersed in a 5% sodium chloride solution and subjected to accelerated corrosion through electrical current application. The specimens were continuously monitored through electrical current measurements passing through the samples, and corrosion tendency was evaluated using the Half-cell potential method, which is internationally recognized as a standard testing procedure. The experiments were conducted under controlled temperature and relative humidity conditions to minimize external environmental influences. Additionally, physical surface characteristics and potential crack development were monitored throughout the testing period to assess the relationship between corrosion progression and structural deterioration. Observations included detailed examination of concrete surface conditions and any cracking that might occur during the testing phase, enabling comprehensive evaluation of the correlation between corrosion development and structural damage. The findings from this study will contribute to the optimal selection of concrete coating materials for reinforced concrete structures exposed to chloride-rich environments. Furthermore, this research will facilitate the development of effective and sustainable corrosion prevention strategies for reinforced concrete structures, ultimately leading to extended service life of structures and reduced long-term maintenance costs.

Keywords: corrosion, protective coating, chloride

1. คำนำ

การเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความมั่นคงและอายุการใช้งานของโครงสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะแวดล้อมที่มีคลอไรด์สูง เช่น บริเวณชายฝั่งทะเลหรือโครงสร้างทางทะเล การเกิดสนิมในเหล็กเสริมเป็นหนึ่งในปัจจัยหลักที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเกิดการแตกร้าวและเสื่อมสภาพ การป้องกันการเกิดสนิมสามารถทำได้โดยใช้สารเคลือบผิวคอนกรีตประเภทต่าง ๆ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้สารเคลือบผิวต่าง ๆ ภายใต้สภาวะเร่ง โดยใช้เทคนิค Half-Cell Potential Test เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารเคลือบและศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะทางกายภาพของคอนกรีตกับระดับการเกิดสนิม

การเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเนื่องจากการปนเปื้อนคลอไรด์ในส่วนผสม จากวารสารคอนกรีต สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย [1] ระบุว่าปัญหาการเกิดสนิมเนื่องจากการปนเปื้อนของคลอไรด์ในส่วนผสมคอนกรีตเป็นหนึ่งในสาเหตุสำคัญที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเสื่อมสภาพก่อนเวลาอันควร คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตได้จากหลายแหล่ง เช่น น้ำทะเล สารละลายเกลือที่ใช้ละลายน้ำแข็ง หรือวัสดุผสมที่มีคลอไรด์เป็นองค์ประกอบ เมื่อคลอไรด์สะสมถึงระดับวิกฤต จะทำให้ฟิล์มป้องกันบนพื้นผิวเหล็กเสริมถูกทำลาย นำไปสู่การเกิดสนิมและขยายตัวของเหล็กเสริม ซึ่งส่งผลให้คอนกรีตแตกร้าวและลดความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้าง การป้องกันปัญหานี้สามารถทำได้โดยใช้คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง ลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ใช้วัสดุเคลือบป้องกัน หรือเติมสารยับยั้งการกัดกร่อนลงในส่วนผสมคอนกรีต

ผู้วิจัยจึงได้สำรวจและศึกษางานวิจัยประสิทธิภาพของน้ำยาป้องกันสนิมในคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งการป้องกันการเกิดสนิมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงและอายุการใช้งานของโครงสร้าง โดยเน้นการใช้สารเคลือบป้องกันสนิมที่ทาบนผิวคอนกรีตเพื่อชะลอการกัดกร่อนของเหล็กเสริม การทดสอบประสิทธิภาพโดยเปรียบเทียบน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียไปหลังการเร่งการเกิดสนิมด้วยกระแสไฟฟ้าเคมี ซึ่งคอนกรีตที่ไม่ได้รับการเคลือบผิว CT มีอัตราการเกิดสนิมสูงที่สุด โดยค่าศักย์ไฟฟ้า Half-Cell Potential ลดลงต่ำกว่าค่า -650 mV หลังจากผ่านการทดสอบแค่ 300 ชั่วโมงและทำให้คอนกรีตเสียหายจากสนิมอย่างรุนแรง

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่มีการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบประเภทต่างๆ ภายใต้สภาวะเร่ง ซึ่งได้ทำการทดสอบกับตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กรูปทรงกระบอกที่มีเหล็กเสริมวางตำแหน่งกึ่งกลาง โดยมุ่งเน้นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างคอนกรีตที่ไม่เคลือบผิว และคอนกรีตที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการเลือกใช้สารเคลือบผิวคอนกรีตที่เหมาะสมสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องเผชิญกับสภาวะแวดล้อมที่มีคลอไรด์

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การศึกษาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตและการป้องกันโดยใช้สารเคลือบผิวป้องกันสนิมของโครงสร้างอาคารทอหล่อเย็นโรงไฟฟ้าบางปะกง

ชัยพัทธ์ (2550) ได้ทำการศึกษาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตและการป้องกันโดยใช้สารเคลือบผิวป้องกันสนิมของโครงสร้างอาคารทอหล่อเย็นโรงไฟฟ้าบางปะกง โดยใช้การทดสอบ Half-cell Potential กับแท่งคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการใช้สารเคลือบผิวป้องกันสนิมพบว่าเหล็กเสริมที่แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ภายใต้สภาวะเปียก-แห้งเกิดสนิมเร็วขึ้นและสารเคลือบผิวช่วยชะลอการเกิดสนิมได้เพียงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิ์ (2545) ได้ศึกษาผลกระทบของน้ำทะเลต่อการเกิด พบว่าเหล็กเสริมที่มีระยะหุ้ม 1.0 และ 2.0 เซนติเมตรเกิดสนิมเร็วกว่าระยะหุ้มที่มากกว่า 5.0 เซนติเมตร ซึ่งช่วยป้องกันการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดีขึ้น [1] นอกจากนี้ สราวุฒ (2551) ที่ทำการศึกษาการเกิดสนิมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเสริมเหล็กและพบว่าการใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ส่งผลให้ค่าความต่างศักย์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและทำให้รอยร้าวในคอนกรีตขยายตัวมากขึ้น สะท้อนให้เห็นว่าโซเดียมคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมอย่างมีนัยสำคัญ [2]

2.2 ประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมในการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์ [3]

โตมร บุญหนุน (2556) ได้ทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิม ซึ่งจะมีทั้งชนิดที่ผสมเพิ่มและชนิดทาที่ผิวของคอนกรีต โดยใช้ปริมาณตามผู้ผลิตแนะนำ และลดครึ่งหนึ่ง รวมทั้งการให้คลอไรด์เริ่มต้นให้คลอไรด์ซึมผ่านด้วยความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และใช้เกลือยวแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และใช้เหล็กเสริมแบบธรรมดาและเคลือบฟอสเฟต แล้ววัดอัตราการเกิดสนิมโดยมาตรฐาน ASTM G109 วัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ โดยมาตรฐาน ASTM C876 และหาปริมาณคลอไรด์วิกฤติของตัวอย่างคอนกรีต ซึ่งจากการทดสอบพบว่าสารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทผสมเพิ่มมีประสิทธิภาพในการลดอัตราการเกิดสนิมในคอนกรีตที่มีปริมาณคลอไรด์ซึมจากภายนอกปริมาณในการใช้ควรใช้ตามผู้ผลิตแนะนำ ส่วนสารยับยั้งประเภททาผิวคอนกรีตควรระวังในการใช้งานกับโครงสร้างใหม่ สำหรับเหล็กเสริมชนิดเคลือบฟอสเฟตช่วยชะลอการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในกรณีที่มีคลอไรด์จากภายนอก

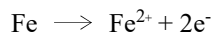
2.3 พฤติกรรมการเกิดสนิมในเหล็กเสริม

โดยปกติ เหล็กเสริมในคอนกรีตจะได้รับการปกป้องจากการเกิดสนิมเนื่องจากสภาพแวดล้อมที่เป็นด่างสูง (pH 12.5 - 13.5) ซึ่งป้องกันไม่ให้เหล็กเกิดปฏิกิริยา อะโนดิก (Anodic process) อย่างไรก็ตาม หากสภาพแวดล้อมเปลี่ยนแปลงจนความเป็นด่างลดลงต่ำกว่าค่า pH 9 - 10 ซึ่งเป็นระดับวิกฤต (Critical level) เหล็กเสริมอาจเกิดสนิมได้ภายใต้เงื่อนไข 3 ประการ:

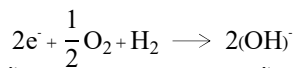
2.3.1 ค่าความเป็นด่างลดลง – สาเหตุหลักมาจาก คาร์บอนเนชั่น (Carbonation), การซึมผ่านของคลอไรด์ หรือการชะล้างของน้ำฝนในคอนกรีตที่มีความพรุนสูง

2.3.2 มีความชื้นเพียงพอ – น้ำช่วยให้เหล็กสามารถปล่อยไอออน (Fe^{2+}) เข้าสู่สารละลายและทำให้ปฏิกิริยาสนิมดำเนินไปได้

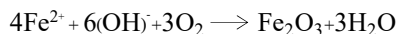
2.3.3 มีออกซิเจนเพียงพอ – ออกซิเจนสามารถแพร่เข้าสู่คอนกรีตผ่านช่องว่างที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated pores) หากช่องว่างอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated pores) ปริมาณออกซิเจนจะน้อย ทำให้เกิดสนิมได้ยาก เมื่อบริเวณรอบเหล็กเสริมมีความชื้นเพียงพอจะทำให้เหล็กเกิด Electrolysis ดังสมการ



หลังจากเหล็กแตกตัวเป็นไอออน (Fe^{2+}) เข้าสู่สภาพสารละลาย อิเล็กตรอนจะวิ่งไปตามเหล็กเกิดกระบวนการอะโนดิก (Anodic process) ได้เป็น $2e^-$ ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและน้ำที่บริเวณเดียวกันหรือใกล้เคียง ก่อให้เกิดไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เรียกว่ากระบวนการอะโนดิก (Anodic process) ดังสมการ



หลังจากนั้นปฏิกิริยาการเกิดสนิมจึงเกิดขึ้นก่อตัวเป็นเฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric oxide) หรือสนิม ดังสมการ



3. วิธีการดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์แนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้สารเคลือบผิวประเภทต่างๆ ภายใต้สภาวะเร่ง โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้:

3.1 การเตรียมตัวอย่าง

นำตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาด 15x30 เซนติเมตร และ 10x20 เซนติเมตร รวมทั้งรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 30x30x20 เซนติเมตร และ 50x50x20 เซนติเมตร โดยทั้ง 2 รูปทรงใช้เหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร วางตำแหน่งกึ่งกลางของคอนกรีต และให้แบ่งตัวอย่างออกเป็นกลุ่มที่ไม่เคลือบผิว (ตัวอย่างควบคุม) กับกลุ่มที่เคลือบผิวด้วยสาร Cement-base Coating, Epoxy และ Polyurea

3.2 การแช่สารละลายโซเดียมคลอไรด์

นำตัวอย่างคอนกรีตที่ถูกแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5% เพื่อจำลองสภาพแวดล้อมที่มีคลอไรด์สูง ซึ่งมีการทดสอบ 2 แบบ ได้แก่ แบบแช่ต่อเนื่อง และเปียกสลับแห้ง ยกตัวอย่างเช่น แช่เป็นระยะเวลา 2 วัน และปล่อยให้แห้งเป็นระยะ 5 วัน หรือแช่เป็นระยะเวลา 14 วัน แล้วปล่อยให้แห้ง

3.3 การเร่งการเกิดสนิมด้วยกระแสไฟฟ้า

ใช้วิธีการเร่งการกัดกร่อนตามมาตรฐาน NT BUILD 356 โดยติดตั้งตัวต้านทาน 10 โอห์ม และใช้เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า DC 6V เพื่อเร่งกระบวนการเกิดสนิม โดยการต่อวงจรเชื่อมต่อกับคอนกรีตเข้ากับแผ่นสังกะสีที่อยู่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์

3.4 การวัดค่าการเกิดสนิมด้วย Half-Cell Potential Test

ใช้วิธีการวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ตามมาตรฐาน ASTM C876-91 (1999) เพื่อประเมินแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริม โดยการนำตัวอย่างคอนกรีตติดตั้ง Half-Cell Copper-Copper Sulfate แล้วทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง

การทดสอบ Half-Cell Potential Test เป็นวิธีที่ใช้ตรวจสอบแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตโดยไม่ทำลายโครงสร้าง ซึ่งเป็นมาตรฐานตาม ASTM 876-91 โดยอาศัยหลักการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างเหล็กเสริมกับครึ่งเซลล์คอปเปอร์-คอปเปอร์ซัลเฟต (Cu-CuSO₄) ผ่านอุปกรณ์วัดศักย์ไฟฟ้าอุปกรณ์สำคัญที่ใช้ประกอบด้วยครึ่งเซลล์ที่มีสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต, วัสดุเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้า, สารละลายเพิ่มการนำไฟฟ้า และมาตรวัดศักย์ไฟฟ้า เพื่อให้การทดสอบมีความแม่นยำสูง วิธีการดำเนินการเริ่มจากการเชื่อมต่อสายไฟฟ้ากับเหล็กเสริมและปรับสภาพผิวคอนกรีตให้มีความชื้นที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เสถียร การประเมินค่าศักย์ไฟฟ้าต้องพิจารณาระยะห่างของจุดวัด ซึ่งในโครงสร้างขนาดเล็กอาจใช้ระยะ 50 - 100 มิลลิเมตร และโครงสร้างขนาดใหญ่อาจใช้ 0.5 - 1 เมตร การวิเคราะห์ค่าที่วัดได้สามารถบ่งชี้ถึงระดับความเป็นไปได้ของการเกิดสนิม แต่ไม่สามารถระบุตำแหน่งที่แน่นอนได้โดยตรง โดยเฉพาะในโครงสร้างใต้น้ำ การทดสอบนี้จึงมีประโยชน์ในการประเมินแนวโน้มการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต และช่วยในการกำหนดแนวทางซ่อมบำรุงหรือป้องกันการเสื่อมสภาพของโครงสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ

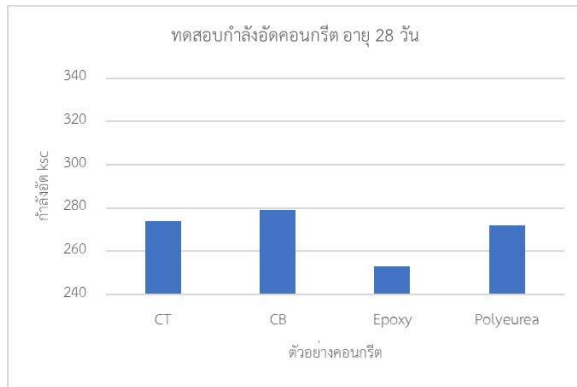
3.5 การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของคอนกรีต

สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่าการแตกร้าวและความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ผิวตัวอย่างคอนกรีตหลังการทดสอบ แล้วนำมาวิเคราะห์ผลกระทบของการเกิดสนิมที่มีต่อความแข็งแรงของคอนกรีตเสริมเหล็ก

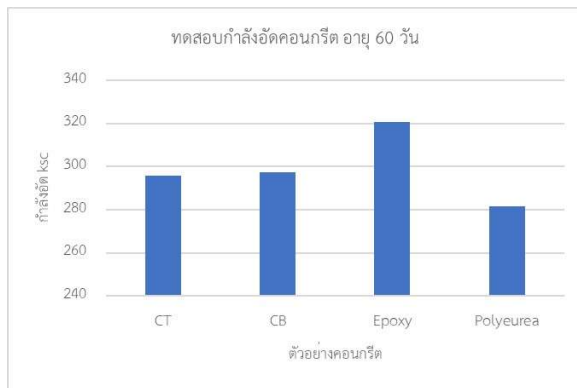
4. ผลการวิจัย การวิเคราะห์และอภิปรายผล

4.1 กำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างดังรูปที่ 1 และ 2 แสดงเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc) ของตัวอย่าง อายุ 28 และ รูปที่ 2 แสดงเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc) ที่อายุ 60 วัน โดยค่าจากการทดสอบของตัวอย่าง CT, CB (Cement-based), Epoxy และ Polyurea ที่ 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 268 ksc ตามลำดับ เมื่อตัวอย่างอายุ 60 วัน มีกำลังรับเฉลี่ยเท่ากับ 300 ksc ตามลำดับ



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวอย่างคอนกรีตที่เคลือบด้วยสาร และ ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีต อายุ 28 วัน



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวอย่างคอนกรีตที่เคลือบด้วยสาร และ ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีต อายุ 60 วัน

4.2 การวัดค่าการเกิดสนิมด้วยวิธี Half-Cell Potential Test

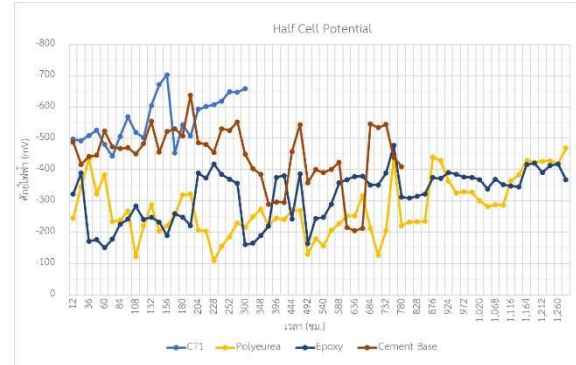
การทดสอบวัดค่าการเกิดสนิมในตัวอย่างแสดงผลเป็นศักย์ไฟฟ้าในรูปที่ 3 โดยตัวอย่าง CT ที่เวลา 100 200 และ 300 ชั่วโมง มีปริมาณศักย์ไฟฟ้าอยู่ที่ -500 mV -520 mV และ -650 mV ซึ่งค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เร่งไฟฟ้า การที่มีค่าเพิ่มขึ้นเกิดจากการซึมของน้ำที่ซึมผ่านเข้าไปในเนื้อคอนกรีต ทำให้สามารถวัดค่าศักย์ไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงว่าเหล็กเสริมภายในอาจได้โดนน้ำที่ซึมผ่านเข้าไปและทำให้เกิดความเสียหายได้

ตัวอย่าง CB ที่เวลา 300 400 และ 750 ชั่วโมง มีปริมาณศักย์ไฟฟ้าอยู่ที่ -300 mV -360 mV และ -500 mV ซึ่งค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เร่งไฟฟ้า

ตัวอย่าง Epoxy ที่เวลา 300 ชั่วโมง มีการเกิดสนิมที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับตัวอย่าง CB โดยที่เวลา 300 ชั่วโมง Epoxy มีปริมาณศักย์ไฟฟ้าอยู่ที่ -160 mV และเมื่อเวลานานขึ้นเป็น 400 ชั่วโมง ตัวอย่าง Epoxy มีค่าศักย์ไฟฟ้าใกล้เคียงกับตัวอย่าง CB เท่ากับ -350 mV และ -360 mV และมีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่าง CB เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เท่ากับ 750 ชั่วโมง เท่ากับ -450 mV และ -470 mV ตามลำดับ

ตัวอย่าง Polyurea ที่เวลา 300 ชั่วโมง มีการเกิดสนิมที่มากกว่าเมื่อเทียบกับตัวอย่าง Epoxy เท่ากับ -210 mV และ -160 mV และเมื่อ

ระยะเวลาเพิ่มขึ้นที่ 400 ชั่วโมง ตัวอย่าง Polyurea มีการเกิดสนิมที่น้อยกว่า ตัวอย่าง Epoxy เท่ากับ -250 mV และ -350 mV และมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเวลานานขึ้นที่ 750 ชั่วโมง เท่ากับ -440 mV และ -450 mV ตามลำดับ



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเกิดสนิมในตัวอย่าง ต่อปริมาณค่าศักย์ไฟฟ้า

4.3 การวัดค่าศักย์ไฟฟ้า

CT ค่ากระแสไฟฟ้า ในช่วง 100-200 ชั่วโมงแรก มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 0.029-0.036 A ต่อมาเมื่อมีแนวโน้มที่สูงขึ้นมากเนื่องจากความพรุนของคอนกรีตที่เข้ามาเป็นเวลานานทำให้น้ำซึมผ่านได้ง่ายขึ้น ที่เวลา 300 ชั่วโมง มีค่าอยู่ที่ 0.046 A และคอนกรีตก็แตกเกิดจากเหล็กเสริมด้านในคอนกรีตเกิดสนิมทำให้เหล็กขยายตัวจนดันคอนกรีตให้แตกออก

CB ค่ากระแสไฟฟ้า ในช่วง 100-200 ชั่วโมงแรก มีค่าที่คงที่อยู่ที่ประมาณ 0.015-0.018 A ต่อมาเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงชั่วโมงที่ 300 มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และเมื่อเวลา 800 ชั่วโมง คอนกรีตก็เกิดความเสียหายและแตกออกเพราะเหล็กเสริมด้านในตัวคอนกรีตเกิดสนิมจนดันให้คอนกรีตแตกออก

Epoxy ค่ากระแสไฟฟ้า ในช่วงแรก หรือ 100-200 ชั่วโมงแรก มีค่าคงที่อยู่ระหว่าง 0.010-0.013 A ต่อมาเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงเวลา 1350 ชั่วโมง โดยค่าขึ้นไปอยู่ที่ 0.018 A และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนตัวทดลองถึงจุดแตกจากสนิม มีค่าอยู่ที่ 0.042 A ในเวลา 1790 ชั่วโมง

Polyurea ค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงแรก 100-200 ชั่วโมงแรกค่าคงที่เหมือนทั้งสองตัวแรกที่กล่าวมา อยู่ที่ 0.011-0.013 A ต่อมาเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในช่วงเวลา 300 ชั่วโมง มีค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 0.015 A และในช่วงเวลา 1500 ชั่วโมง ค่ากระแสไฟฟ้าก็กลับมามีค่า 0.011 A ดังช่วงแรก และไม่มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงจนถึงปัจจุบัน

5. บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

จากการศึกษาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่มีการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบประเภทต่างๆ ภายใต้สภาวะเร่ง พบว่าการ

เลือกใช้สารเคลือบผิวมีผลต่อระดับการเกิดสนิมของเหล็กเสริมอย่างมีนัยสำคัญสรุปได้ดังนี้:

1. คอนกรีตที่ไม่ได้รับการเคลือบผิว CT มีอัตราการเกิดสนิมสูงที่สุด โดยค่าศักย์ไฟฟ้า Half-Cell Potential ลดลงต่ำกว่าค่า -650 mV หลังจากผ่านการทดสอบแค่ 300 ชั่วโมงและทำให้คอนกรีตเสียหายจากสนิมอย่างรุนแรง
2. คอนกรีตที่ไม่ได้รับการเคลือบผิว (CB) มีอัตราการเกิดสนิมต่ำกว่ากลุ่ม CT โดยค่าศักย์ไฟฟ้า Half-Cell Potential ลดลงต่ำกว่าค่า -500 mV หลังจากผ่านการทดสอบเป็นเวลา 750 ชั่วโมง แสดงถึงการเกิดสนิมอย่างรุนแรง
3. คอนกรีตที่เคลือบด้วย Epoxy มีแนวโน้มการเกิดสนิมต่ำกว่ากลุ่ม CB โดยในช่วงแรกของการทดสอบ (300 ชั่วโมง) ค่าศักย์ไฟฟ้าอยู่ที่ประมาณ -160 mV ซึ่งสูงกว่ากลุ่ม CB อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม เมื่อระยะเวลาทดสอบเพิ่มขึ้น ค่าศักย์ไฟฟ้าของ Epoxy ลดลงจนใกล้เคียงกับ CB ที่เวลา 750 ชั่วโมง -450 mV
4. คอนกรีตที่เคลือบด้วย Polyurea มีประสิทธิภาพในการชะลอการเกิดสนิมใกล้เคียงกับ Epoxy โดยในช่วง 300 ชั่วโมงแรกมีค่าศักย์ไฟฟ้าอยู่ที่ -210 mV แต่เมื่อเวลาผ่านไป ค่าศักย์ไฟฟ้าลดลงจนมีค่าใกล้เคียงกับ Epoxy และ CB ที่ 750 ชั่วโมง -440 mV
5. เมื่อพิจารณาความสามารถในการต้านทานสนิม พบว่า Epoxy และ Polyurea สามารถลดอัตราการเกิดสนิมได้ในช่วงแรกของการทดสอบ แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไป ประสิทธิภาพของสารเคลือบทั้งสองลดลง
6. ผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดพบว่า ตัวอย่างคอนกรีตที่เคลือบผิวด้วย Epoxy มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่อายุ 60 วัน เท่ากับ 321 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ขณะที่กลุ่ม CB และ Polyurea มีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าที่ 297 และ 281 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ การประปานครหลวง จังหวัดกรุงเทพมหานคร และศิษย์เก่าภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน รุ่นที่ 75 และ 76 ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์และเอื้อเฟื้อข้อมูลสำหรับงานวิจัย จนผลงานวิจัยฉบับนี้ออกมาสำเร็จตามเป้าหมายที่ได้วางไว้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ชัยพันธ์ ทิพย์โพธิ์ (2550). การเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตและการป้องกันโดยใช้สารเคลือบผิวป้องกันสนิมของโครงสร้างอาคารหล่อเย็น โรงไฟฟ้าบางปะกง. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [2] สิริศิลป์ กัลยาณกุล, สิริพงษ์ สุวรรณปัญญศิลป์, และ วันชัย ยอดสุดใจ (2555). ปัจจัยที่มีผลต่อการทดสอบแนวโน้มการเกิดสนิมด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์. *KKU ENGINEERING JOURNAL* October-December 2012. หน้า 401-406
- [3] โดมร บุญหนู (2556). ประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมในการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [4] พิษณุตม์ เอี่ยมเจริญ, เกียรติชัย สังข์ทอง และ ธนพล ไตรอด (2565). การทดสอบพฤติกรรมการเกิดสนิมในคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้สารผสมเพิ่มและเคลือบผิวหลายชนิด. *โครงการวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม*.
- [5] พิษณุตม์ จรูญผล, วัศพล เกาศรี และ ศิริมงคล สุขสงัด (2566). การศึกษาประเมินการเสื่อมสภาพคอนกรีตด้วยระบบ lot. *โครงการวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม*

กิตติกรรมประกาศ