การศึกษาประสิทธิภาพของน้ำยาป้องกันสนิมในคอนกรีตเสริมเหล็ก ด้วยวิธีการทาและการพ่น

The Effectiveness of Rust Inhibitors in Coating Reinforced Concrete Structures

ธันยบูรณ์ เสน่หา[1] ธนพล ดำทอง[2] วัชรากร ฉิมพันธ์ [3] และ วิทิต ปานสุข[4]

[1,2,3,4] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

บทคัดย่อ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นโครงสร้างที่มีความสำคัญต่อมนุษย์ เนื่องจากเป็นปัจจัยพื้นฐานในการดำเนินชีวิต จากการสืบค้นพบว่าสาเหตุหนึ่งที่ทำให้โครงสร้างกรีตเสริมเหล็กเกิดความเสื่อมสภาพ คือ การเกิดสนิมในเหล็กเสริม ซึ่งจะทำให้เหล็กเสริมสูญเสียพื้นที่หน้าตัด ส่งผลให้กำลังรับแรงดึงลดลง อีกทั้งการขยายตัวของสนิมจะทำให้ ซึ่งวิธีแก้ไขและป้องกันสนิมมีหลายวิธี รวมถึงการใช้น้ำยาป้องกันการเกิดสนิมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยการทาน้ำยาที่ผิวคอนกรีตซึ่งสะดวกรวดเร็ว อีกทั้งการใช้น้ำยาจะสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีสมัยใหม่ เช่น การใช้อากาศยานไร้คนขับในการพ่นน้ำยา เพื่อความสะดวกรวดเร็วและลดการใช้ทรัพยากรมนุษย์

งานวิจัยนี้จึงจะทำการศึกษาเกี่ยวกับสารประกอบของน้ำยาป้องกันสนิมในคอนกรีตเสริมเหล็ก กลไกการป้องกันสนิมของน้ำยา ซึ่งเป็นน้ำยาที่ใช้ในการทาผิวคอนกรีตเพื่อลดการเกิดสนิมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ในงานวิจัยยังศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการป้องกันสนิมของน้ำยาดังกล่าวกับคอนกรีตที่มีแหล่งส่วนผสมในประเทศไทย ด้วยการเปรียบเทียบน้ำหนักที่หายไปของเหล็กเสริมหลังจากการเร่งการเกิดสนิมด้วยกระแสไฟฟ้าเคมี ศึกษาพฤติกรรมการซึมของน้ำยาในคอนกรีตที่ใช้สำหรับก่อสร้างสะพานด้วยการตรวจสอบ โดย Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-ray Spectrometer (SEM-EDS) และศึกษาประสิทธิภาพของน้ำยาดังกล่าวเมื่อใช้กับคอนกรีตทั้งที่อยู่ในสภาพแวดล้อมปกติและทางทะเล อีกทั้งยังศึกษาความแตกต่างของประสิทธิภาพของน้ำยาระหว่างด้วยวิธีการทาและการพ่น เพื่อให้สอดคล้องกับการใช้อากาศยานไร้คนขับในการพ่นน้ำยาป้องกันสนิมในเหล็กเสริม

จากการศึกษาจะสามารถนำผลการทดลองมาใช้ในการสร้างความน่าเชื่อถือให้กับน้ำยาป้องกันสนิมในเหล็กเสริม เพื่อสามารถนำมาใช้กับโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทยได้อย่างมั่นใจและมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: น้ำยาป้องกันสนิมในเหล็กเสริม; การทดสอบการเร่งสนิมด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี; SEM-EDS

Abstract

Reinforcement concrete structures are important and there are plenty of reinforcement concrete structures in Thailand. Based on several critical literature reviews regarding reinforcement concrete structures deterioration, one of the causes is rust in reinforcement steel which reduces the effective cross-sectional area of the steel reinforcement. Hence, the available tensile capacity of steel reinforcement is reduced, and the steel reinforcement increase in volume generates significant bursting forces in the vicinity. Consequently, cracks are formed along the steel reinforcement when the tensile strength of concrete is exceeded. There are several methods of reparation and protection including coating the concrete surface with a Chemistry solution to protect against rust in reinforcement steel, which is convenient and quick. Furthermore, this method can be adapted to operating with new technology such as drones to have faster and less human use.

Firstly, this research is to study the chemical compound and mechanism of this Rust Inhibitor. Secondly, this research experiment is to study the efficiency of Rust Inhibitor with reinforcement concrete material in Thailand by comparing weight of steel before and after accelerated rust with Electrochemical acceleration. Moreover, is to study the efficiency of rust protection with reinforcement concrete in ordinary and marine environments. The third, experiment is to study the infiltration by Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-ray Spectrometer SEM-EDS.

Key words: Rust Inhibitor; Electrochemical acceleration; SEM - EDS

1. บทนำ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจัดว่าเป็นโครงสร้างพื้นฐานทางด้านวิศวกรรมที่มีความสำคัญอย่างมาก ซึ่งโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นคอนกรีตเสริมแรงรูปแบบหนึ่งที่ถูกเพิ่มประสิทธิภาพการรับน้ำหนักด้วยการใช้เหล็กเข้ามาช่วยในการรับแรง เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่รับแรงอัดได้สูง แต่มีความสามารถในการรับแรงดึงต่ำ อีกทั้งยังมีความเปราะเมื่อถูกกระทำด้วยแรงดึงจึงแตกหักได้ง่าย แต่ในขณะที่เหล็กมีความสามารถในการรับแรงดึงสูง เมื่อถูกนำมาใช้งานร่วมกันจะเกิดการการถ่ายเทแรงภายในระหว่างคอนกรีตและเหล็กจะช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงของวัสดุโดยรวมให้มากยิ่งขึ้น ซึ่งโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นมีเป็นประโยชน์อย่างมากและยังถูกใช้อย่างแพร่หลายสำหรับการก่อสร้างโครงสร้างทางด้านวิศวกรรม แต่ทั้งนี้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อใช้งานเป็นเวลานานโดยปราศจากการบำรุงรักษาอาจทำให้โครงสร้างเสื่อมสภาพจนเกิดสนิมขึ้นในเหล็กเสริมที่อยู่ภายในคอนกรีตขึ้นได้ ซึ่งจะเป็นสาเหตุให้เกิดการกะเทาะหรือแตกร้าวของคอนกรีต เนื่องจากการขยายตัวของเหล็กเสริมคอนกรีตที่เป็นสนิม และอาจสร้างความเสียหายต่อทรัพย์สินหรือชีวิตของผู้คนที่สัญจรอยู่บริเวณใกล้เคียงขณะนั้น ซึ่งเป็นที่มาของการศึกษาน้ำยาป้องกันสนิมในคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ช่วยในการป้องกันการเกิดสนิมบนเหล็กในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กผ่านการซึมผ่านผิวของคอนกรีตเข้าไปเคลือบผิวเหล็กเสริม ซึ่งน้ำยาป้องกันสนิมในคอนกรีตเสริมเหล็ก จะช่วยลดการสูญเสียอิเล็กตรอนของเหล็กเสริมคอนกรีต ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดสนิมได้ แต่ทั้งนี้ยังไม่มีการศึกษาประสิทธิภาพของน้ำยาป้องกันสนิมในคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีแหล่งผลิตในประเทศไทยอย่างแท้จริง จึงควรมีการศึกษาประสิทธิภาพของน้ำยาต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในไทย ซึ่งอาจเป็นแนวทางในการป้องกันปัญหาที่เกิดจากการที่เหล็กเสริมคอนกรีตเกิดสนิมตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น อีกทั้งยังสามารถช่วยยืดอายุการใช้งานของโครงสร้าง

ในการศึกษานี้จะมุ่งเน้นไปที่การศึกษาประสิทธิภาพของน้ำยาป้องกันการเกิดสนิมในคอนกรีตเสริมเหล็ก และวิธีการใช้น้ำยาให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) และอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer, EDS) เพื่อใช้ในการสังเกตุและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของน้ำยาป้องกันสนิมในคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ด้านในเนื้อโมเดลตัวอย่าง

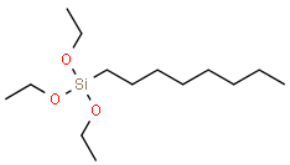
การศึกษานี้จะวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการป้องกันการเกิดสนิมของน้ำยากันสนิมผ่านแบบจำลองโมเดลคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่เนื่องจากกระบวนการในการเกิดสนิมในเหล็กเสริมนั้นใช้เวลาค่อนข้างนาน และเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ชัดเจน จึงได้เลือกใช้วิธีการผ่านกระแสไฟฟ้าลงในเหล็กเสริม (Electrolytic cell) ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนของเหล็กเสริมและทำให้เกิดสนิมบนเหล็กเสริมได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้น้ำยาป้องกันสนิมกับเครื่องฉีดพ่นเพื่อที่จะได้สามารถนำไปประยุกใช้กับโดรนในการบินฉีดพ่นตามโครงสร้างสะพาน โดยผลของการศึกษาประสิทธิภาพของน้ำยาป้องกันสนิมประกอบกับตัวแปรต่างๆ ภายใต้การผ่านกระแสไฟฟ้าลงในเหล็กเสริมเพื่อเร่งการเกิดสนิมและผลของการใช้น้ำยาผ่านวิธีการฉีดพ่น จะถูกนำเสนอในและอภิปรายผลในการศึกษานี้

2. ระเบียบวิธีวิจัย

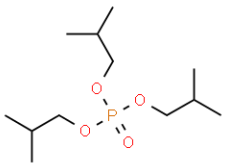
2.1 การศึกษาองค์ประกอบของน้ำยาโดยใช้กล้อง Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-ray Spectrometer (SEM-EDS)

เพื่อที่จะศึกษาองค์ประกอบและความสามารถในการซึมของน้ำยาป้องกันสนิม จึงจำเป็นต้องทำการศึกษาในระดับไมโครของชิ้นตัวอย่างเพื่อที่จะสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับเนื้อของคอนกรีตหลังจากที่ถูกทาน้ำยาป้อมกันสนิม โดยจะใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่จะสร้างภาพพื้นผิวของตัวอย่างจากอิเล็กตรอนที่สะท้อนกลับ และใช้ร่วมกับเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDS) ที่จะตรวจสอบธาตุที่อยู่บริเวณที่ทำการทดสอบ ซึ่งจะใช้ในการสังเกตการเปลี่ยนแปลงและวิเคราะห์องค์ประกอบของคอนกรีตที่ถูกทาด้วยน้ำยาป้องกันสนิม

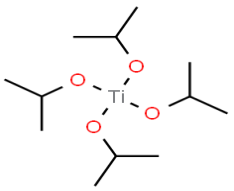
โดยทั้งนี้ตัวน้ำยาป้องกันสนิมที่ในการศึกษานี้มีสารที่เป็นองค์ประกอบหลักอยู่ 3 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 1, 2 และ 3



รูปที่ 1 โครงสร้างโมเลกุลของ Triethoxyoctylsilane
(National Center for Biotechnology Information)



รูปที่ 2 โครงสร้างโมเลกุลของ Triisobutyle Phosphate
(National Center for Biotechnology Information)



รูปที่ 3 โครงสร้างโมเลกุลของ Titanium Tetraisopropanolate
(National Center for Biotechnology Information)

2.1.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับทาน้ำยาป้องกันสนิม

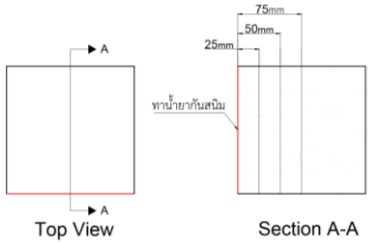
ในการเตรียมตัวอย่างเพื่อที่จะทำไปใช้ในการทำการทดสอบนั้นจะทำการทดสอบบนลูกบาศก์คอนกรีตที่มีขนาด 15x15x15 เซนติเมตร ซึ่งทำการหล่อจากคอนกรีตผสมเสร็จที่กำลัง 280 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากนั้นบ่มทิ้งไว้ 28 วัน จากนั้นทำการบ่นโดยการใช้เทปใส่ห่อหุ้มชิ้นตัวอย่าง เมื่อครบกำหนดจะนำชิ้นตัวอย่างคอนกรีตออกมาและทำ

การเคลือบด้วยอีพอกซี่ (Epoxy) ที่ด้านข้างของตัวอย่างทั้งสี่ด้านเหลือเพียงด้านบนกับด้านล่าง ดังรูปภาพที่ 4 จากนั้นเมื่อสารอีพอกซี่แห้งสนิทจะทำการนำก้อนคอนกรีตตัวอย่างมาทาน้ำยาป้องกันสนิมที่ด้านบนของตัวอย่าง โดยจะทำการทาน้ำยาในปริมาณ 5.24 มิลลิลิตร สำหรับการทา 1 ครั้ง ซึ่งจะทำการทาน้ำยาทั้งหมด 3 ครั้งต่อหนึ่งตัวอย่าง โดยในการทาแต่ละครั้งต้องรอน้ำยาที่ทาไปก่อนหน้าแห้งสนิทเสียก่อนถึงจะทำการทาครั้งต่อไป โดยในทดสอบนี้จะทำการเตรียมตัวอย่างก้อนคอนกรีตทั้งหมด 3 ก้อน จะทำการเก็บตัวอย่างหลังจากที่ทาน้ำยากันสนิมไปแล้วเป็นระยะเวลา 3 ,7 และ 14 วัน

รูปที่ 4 แสดงการทาน้ำยาป้องกันสนิมลงบนก้อนตัวอย่างคอนกรีต

2.1.2 การเก็บตัวอย่างเพื่อเข้าเครื่องทดสอบ

เมื่อตัวอย่างทาน้ำยาป้องกันสนิมไปแล้วเป็นระยะเวลา 3 ,7 และ 14 วัน จะนำก้อนคอนกรีตตัวอย่างมาทำการกดผ่ากลางในระนาบที่ตั้งฉากกับระนาบที่ได้ทาน้ำยา จากนั้นจะทำการสกัดเนื้อคอนกรีตที่ระยะ 2.50 , 5.00 และ7.50 เซนติเมตร ลึกเข้าไปจากระนาบที่ได้ทำการทาน้ำยา ดังแสดงในรูปที่ 5 จากนั้นนำตัวอย่างที่เก็บได้ไปทำการทดสอบ SEM-EDS



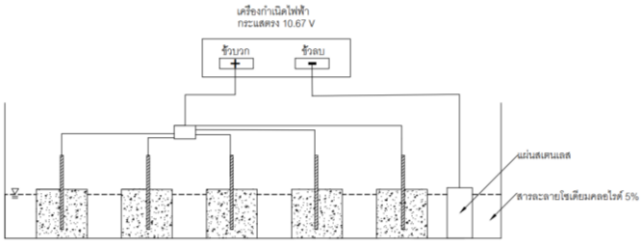
รูปที่ 5 ภาพแสดงแนวการตัด (A-A) และแนวการเก็บตัวอย่างก้อนคอนกรีต

2.2 การทดสอบประสิทธิภาพของน้ำยาป้องกันสนิมด้วยการเร่งสนิมด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี

การทดลองนี้จะเตรียมการทดลองเร่งสนิมด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM G31 ดังแสดงในรูปที่ 6 เพื่อเปรียบเทียบการประสิทธิภาพในการป้องกันสนิมของน้ำยาป้องกันสนิม โดยจะเปรียบเทียบจากความแตกต่างของค่าน้ำหนักของเหล็กเสริมระหว่างก่อนการทดสอบและหลังการทดสอบ โดยนำค่าปริมาณน้ำหนักที่หายไปมาเปรียบเทียบกับค่าน้ำหนักเหล็กที่หายไปจากการคำนวณตามหลักการของฟาราเดย์ ดังสมการที่ 1

$$\Delta W = \frac{ItA}{ZF} \quad (1)$$

โดยที่ ΔW คือ น้ำหนักของเหล็กที่หายไป (กรัม); I คือค่ากระแสไฟฟ้า (แอมแปร์); t คือ ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มวัดกระแส (วินาที); A คือ ค่าคงที่มวลอะตอมของโลหะ (55.85 กรัม สำหรับเหล็ก); F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,500 คูลอมป์); Z คือ ค่าเวเลนซ์อิเล็กตรอน (Z มีค่าเท่ากับ 2 สำหรับเหล็ก)



รูปที่ 6 การทดลองเร่งสนิมด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี

ในการทดลองนี้จะทำการเตรียมตัวอย่าง ขนาด 15x15x15 เซนติเมตร และใช้เหล็กเสริม DB12 เกรด SD40 ที่ระยะหุ้ม 2.50 เซนติเมตร มีตัวอย่างทั้งหมด 5 ตัวอย่าง ดังต่อไปนี้

1. ตัวอย่างคอนกรีตในสภาพแวดล้อมปกติและทาน้ำยาป้องกันสนิม
2. ตัวอย่างคอนกรีตในสภาพแวดล้อมปกติและไม่ทาน้ำยาป้องกันสนิม
3. ตัวอย่างคอนกรีตในสภาพแวดล้อมปกติและพ่นน้ำยาป้องกันสนิม
4. ตัวอย่างคอนกรีตที่จำลองสภาพแวดล้อมทางทะเล และทาน้ำยาป้องกันสนิม
5. ตัวอย่างคอนกรีตที่จำลองสภาพแวดล้อมทางทะเล และไม่ทาน้ำยาป้องกันสนิม

รูปที่ 7 ชิ้นตัวอย่างการทดลองทั้ง 5 ตัวอย่าง

2.2.1.การทดสอบเพื่อศึกษาความแตกต่างของประสิทธิภาพในการป้องกันสนิมในเชิงน้ำหนักที่หายไป

ทดลองเร่งสนิมด้วยไฟฟ้าจำนวณ 5 ตัวอย่างที่มีการจัดเตรียมไว้ทำการทดสอบจนกว่าจะมี 1 ตัวอย่างเกิดรอยร้าวที่เกิดจากการขยายตัวของสนิมในเหล็กเสริมเป็นระยะไม่เกิน 0.01 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 8 โดยอ้างอิงมาตรฐานกรมโยธาและผังเมืองกระทรวงมหาดไทย มยผ. 1332-55

จากนั้นหยุดทำการทดสอบและทำการเปรียบเทียบน้ำหนักที่หายไปของเหล็กเสริมแต่ละตัวอย่างทั้งจากการชั่งน้ำหนักและจากการคำนวณด้วยกฎของฟาราเดย์ การทดลองในลักษณะนี้จะเป็นการศึกษาปริมาณน้ำหนักเหล็กเสริมที่หายไปโดยการทดสอบให้ทุก ๆ ตัวอย่าง ถูกทดสอบในสภาวะเดียวกัน และระยะเวลาทดสอบที่เท่ากัน

รูปภาพที่ 8 รอยร้าวของคอนกรีต 0.01 มิลลิเมตร

2.2.2 การทดสอบเพื่อศึกษาความแตกต่างของระยะเวลาในการทำให้ตัวอย่างเกิดรอยแตกถึง 0.01 มิลลิเมตร

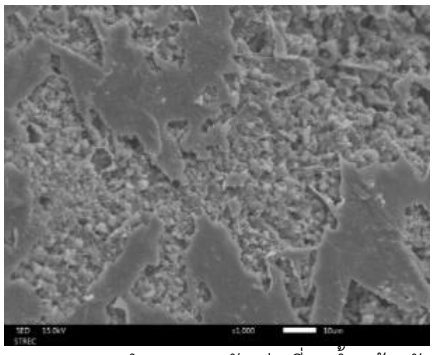
ทำการทดสอบด้วยการเร่งสนิมด้วยไฟฟ้าจนกว่า ทุกตัวอย่างจนกว่าจะเกิดรอยร้าวถึงระยะ 0.01 มิลลิเมตร และหยุดการทดสอบ การทดลองลักษณะนี้เพื่อศึกษาความแตกต่างของระยะเวลาในการที่จะทำให้ตัวอย่างเกิดรอยแตกถึง 0.01 มิลลิเมตร

จากนั้นนำเหล็กเสริมที่ถูกเร่งให้เกิดสนิมไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักที่หายไป ซึ่งจะทำให้สามารถวิเคราะห์ผล และเปรียบเทียบความแตกต่างของแต่ละตัวอย่างการทดลอง

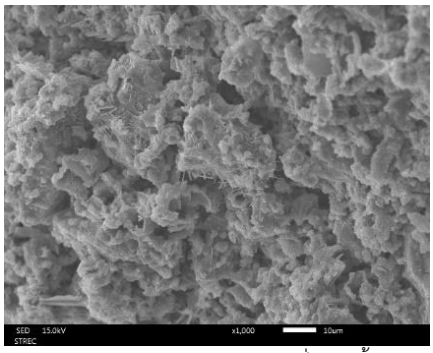
3. ผลการดำเนินงานวิจัย

3.1 การศึกษาองค์ประกอบของน้ำยาด้วยวิธี SEM และ EDS

จากการตรวจสอบทั้ง 9 ตัวอย่างด้วยการทดสอบ SEM ทำให้สามารถวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นผ่านภาพพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างได้ โดยจากการสังเกตพบบริเวณที่มีลักษณะเป็นชั้นฟิล์มเคลือบผิวคอนกรีต และไม่ใช่ลักษณะของสิ่งที่เป็นองค์ประกอบของคอนกรีต ดังที่แสดงในรูป 9 และ 10



รูปที่ 9 ภาพจากการทำ SEM ของตัวอย่างที่พบน้ำยาป้องกันสนิม



รูปที่ 10 ภาพจากการทำ SEM ของตัวอย่างที่ไม่พบน้ำยาป้องกันสนิม

จากรูปที่ 9 ชั้นฟิล์มนี้คาดว่าจะเป็นสารป้องกันสนิมที่อยู่ในเนื้อคอนกรีตจึงได้ทำการทดสอบ EDS เพื่อวิเคราะห์ธาตุบริเวณดังกล่าวบนตัวอย่างคอนกรีตที่ได้มีการทาน้ำยาและตัวอย่างที่ไม่ได้ทาน้ำยา ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังที่แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลลัพธ์การวิเคราะห์ธาตุจากการทดสอบ EDS

ตัวอย่าง	%Atomic							
	C	O	Si	Ca	Al	Mg	K	Fe
ทาน้ำยา 3 วัน	8.15	65.15	1.86	24.83	-	-	-	-
ทาน้ำยา 7 วัน	8.92	62.26	3.05	25.27	0.5	-	-	-
ไม่ได้ทาน้ำยา	15.5	58.67	5.74	17.23	1.44	0.45	0.31	0.65

จากการสังเกตส่วนประกอบของธาตุของตัวอย่างที่คาดว่ามีน้ำยาป้องกันสนิมและตัวอย่างที่ไม่มีน้ำยากันสนิมผสมอยู่ ที่แสดงในตารางที่ 1 พบว่าบริเวณเนื้อคอนกรีตที่คาดว่ามีสารป้องกันสนิมผสมอยู่จะมีอัตราส่วนของปริมาณธาตุออกซิเจน (O) ต่อธาตุคาร์บอน (C) มากกว่าของชิ้นตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านการทาน้ำยากันสนิม ซึ่งอัตราส่วนปริมาณ O/C ของตัวอย่างที่ทาน้ำยามาแล้ว 3 วันและ 7 วัน มีอัตราส่วนเท่ากับ 6.98 และ 7.99 ตามลำดับ ส่วนตัวอย่างที่ไม่ได้ทำการทาน้ำยากันสนิมมีอัตราส่วนเท่ากับ 3.79 โดยเมื่อพิจารณาร่วมกับโครงสร้างองค์ประกอบธาตุที่อยู่ในน้ำยาป้องกันสนิม ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนและออกซิเจนอยู่ในโมเลกุล ประกอบกับอัตราส่วน O/C ของบริเวณที่คาดว่าจะมีน้ำยาป้องกันสนิมมีค่ามากกว่าบริเวณที่ไม่มีน้ำยาป้องกันสนิม จึงสรุปได้ว่าลักษณะที่พบในเนื้อคอนกรีตที่มีลักษณะเป็นชั้นฟิล์มเคลือบผิวคอนกรีตนั้นคือน้ำยาป้องกันสนิมที่อยู่ในเนื้อคอนกรีต

เมื่อนำข้อสรุปเกี่ยวกับลักษณะของน้ำยาป้องกันสนิมไปพิจารณาร่วมกันกับผลของการทดสอบ SEM บนตัวอย่างก้อนคอนกรีตที่ได้ทำการทาน้ำยาป้องกันสนิมทั้ง 9 ตัวอย่างที่มาจากคอนกรีตที่ทาน้ำยากันสนิมมาแล้วเป็นระยะเวลา 3, 7 และ 14 วันโดยคอนกรีตแต่ละก้อนจะถูกเก็บตัวอย่างมาจากระยะ 2.50 , 5.00 และ7.50 เซนติเมตร ลึกเข้าไปจากระนาบที่ได้ทำการทาน้ำยา ซึ่งพบว่าคอนกรีตที่ทำการทาน้ำยามาแล้วเป็นระยะเวลา 3 วัน มีการตรวจพบน้ำยาป้องกันสนิมเพียงแค่ที่ระยะ 2.50 เซนติเมตร จากระนาบที่ทำการทาน้ำยา ส่วนตัวอย่างก้อนคอนกรีตที่ทาน้ำยามาป้องกันสนิมมาแล้ว 7 วันตรวจพบน้ำยากันสนิมที่ระยะ 2.50 เซนติเมตร และร่องรอยของน้ำยาเล็กน้อยที่ระยะ 5.00 เซนติเมตร และก้อนคอนกรีตที่ทาน้ำยาป้องกันสนิมมาแล้ว 14 วันได้มีการตรวจพบร่อยรอยของน้ำยาป้องกันสนิมอย่างชัดเจนที่ระยะ 2.50 และ 5.00 เซนติเมตร.แต่ไม่มีการพบร่องรอยของน้ำยาป้องกันสนิมที่ระยะ 7.50 เซนติเมตร

3.2 การทดลองเร่งสนิมด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี

หลังจากการทดสอบการเร่งสนิมด้วยไฟฟ้าเป็นเวลา 84 ชม. พบตรวจสอบด้วยการวัดได้ว่า ตัวอย่างคอนกรีตที่จำลองสภาพแวดลอมทางทะเล เกิดรอยแตกมากกว่า 0.01 มิลลิเมตร จึงทำการหยุดการทดลองทุกตัวอย่างพร้อมกัน และทำลายเนื้อคอนกรีตเพื่อนำเหล็กเสริมออกมาทำความสะอาดและชั่งน้ำหนักหลังจากผ่านการเร่งสนิมด้วยไฟฟ้าแล้ว และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ทดสอบเพื่อคำนวณพื้นที่ใต้กราฟ เมื่อนำค่าพื้นที่ใต้กราฟที่ได้จากการประมาณด้วยวิธีสี่เหลี่ยมคางหมู ไปทำการคำนวณน้ำหนักที่หายไปตามกฎของฟาราเดย์

ซึ่งพบว่าน้ำหนักที่หายไปของเหล็กเสริมจากการคำนวณตามกฎฟาราเดย์นั้นมีค่าคลาดเคลื่อนจากน้ำหนักที่ชั่งจริง ซึ่งอาจเกิดได้จากหลายปัจจัย เช่น ความไม่สม่ำเสมอของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเหล็กเสริมเนื่องจากการต่อวงจรเหล็กเสริมเพียงด้านเดียว ดังนั้นในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของน้ำยาป้องกันสนิมในเหล็กเสริม จะใช้ข้อมูลน้ำหนักเหล็กเสริมจากการชั่งในการวิเคราะห์ผลการทดลอง เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สอดคล้องกับความเป็นจริง

รูปที่ 11 เหล็กเสริมหลังผ่านการเร่งสนิมด้วยไฟฟ้าเคมี

*3.2.1 การเปรียบเทียบ*ประสิทธิภาพ*ของน้ำยา*

ชื่อตัวอย่าง	ชนิดคอนกรีต	รูปแบบการทาน้ำยา	น้ำหนักที่หายไป (กรัม)	ร้อยละน้ำหนักที่หายไป
13	ปกติ	พ่นน้ำยา	0.90	0.51
14	ปกติ	ทาน้ำยา	1.60	0.91
15	ปกติ	ไม่ทาน้ำยา	7.80	4.46
45	จำลองสภาพทางทะเล	ทาน้ำยา	5.20	3.01
64	จำลองสภาพทางทะเล	ไม่ทาน้ำยา	9.00	5.24
20	ปกติ	พ่นน้ำยา	23.20	12.71
17	ปกติ	ทาน้ำยา	9.10	5.08
5	ปกติ	ไม่ทาน้ำยา	29.10	16.28
48	จำลองสภาพทางทะเล	ทาน้ำยา	21.00	12.56
50	จำลองสภาพทางทะเล	ไม่ทาน้ำยา	17.70	10.66

รูปที่ 12 ข้อมูลตัวอย่างคอนกรีต และน้ำหนักเหล็กที่หายไป

1. การเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างคอนกรีตในสภาพแวดล้อมปกติที่ทาน้ำยาป้องกันสนิมและไม่ทาน้ำยาป้องกันสนิม

ตัวอย่างคอนกรีตสภาพแวดล้อมปกติที่ทำการทาน้ำยาป้องกันสนิมมีน้ำหนักเหล็กเสริมหายไปร้อยละ 0.91 ของน้ำหนักเริ่มต้น และตัวอย่างคอนกรีตสภาพแวดล้อมปกติที่ไม่ทำการทามีน้ำหนักเหล็กเสริมหายไปร้อยละ 4.46 ของน้ำหนักเริ่มต้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทาน้ำยาที่ผิวของตัวอย่างคอนกรีตสภาพแวดล้อมปกติ สามารถลดการเกิดสนิมได้ 79.60 %

2. การเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างคอนกรีตที่จำลองสภาพแวดล้อมทางทะเลที่ทาน้ำยาป้องกันสนิมและไม่ทาน้ำยาป้องกันสนิม

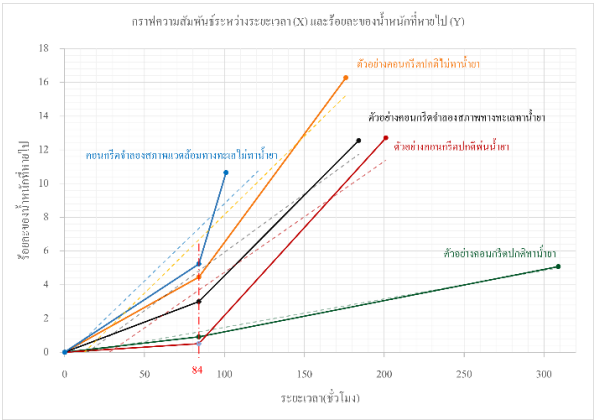
ตัวอย่างคอนกรีตที่จำลองสภาพแวดล้อมทางทะเลที่ทำการทาน้ำยาป้องกันสนิม มีน้ำหนักเหล็กเสริมหายไปร้อยละ 3.01 ของน้ำหนักเริ่มต้น และตัวอย่างคอนกรีตที่จำลองสภาพแวดล้อมทางทะเลที่ไม่ทำการทาน้ำยาป้องกันสนิมมีน้ำหนักเหล็กเสริมหายไปร้อยละ 5.24 ของน้ำหนักเริ่มต้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทาน้ำยาที่ผิวของตัวอย่างคอนกรีตที่จำลองสภาพแวดล้อมทางทะเล สามารถลดการเกิดสนิมได้ ถึง 42.56 %

3. การเปรียบเทียบตัวอย่างคอนกรีตในสภาพแวดล้อมปกติ และตัวอย่างคอนกรีตที่จำลองสภาพแวดล้อมทางทะเลที่ทำการทาน้ำยาป้องกันสนิม

ตัวอย่างคอนกรีตสภาพแวดล้อมปกติที่ทำการทาน้ำยาป้องกันสนิม มีน้ำหนักเหล็กเสริมหายไป ร้อยละ 0.91 ของน้ำหนักเริ่มต้น และตัวอย่างคอนกรีตที่จำลองสภาพแวดล้อมทางทะเลที่ทำการทาน้ำยาป้องกันสนิม มีน้ำหนักเหล็กเสริมหายไปเป็นร้อยละ 3.01 ของน้ำหนักเริ่มต้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสภาพของเนื้อคอนกรีตมีผลกับประสิทธิภาพในการป้องกันสนิมในเหล็กเสริม และน้ำยาป้องกันสนิมจะสามารถป้องกันสนิมสำหรับเหล็กเสริมที่อยู่ในสภาพแวดล้อมปกติได้ดีกว่าคอนกรีตในสภาพแวดล้อมทางทะเล ถึง 69.77%

4. การเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างคอนกรีตในสภาพแวดล้อมปกติที่ทาน้ำยาป้องกันสนิมและพ่นน้ำยาป้องกันสนิม ตัวอย่างคอนกรีตสภาพแวดล้อมปกติที่ใช้ผ่านการทาน้ำยา มีน้ำหนักเหล็กเสริมที่หายไปร้อยละ 0.91 ของน้ำหนักเริ่มต้น และตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้วิธีการพ่นน้ำยาป้องกันสนิม มีน้ำหนักเหล็กเสริมที่หายไปร้อยละ 1.63 ของน้ำหนักเริ่มต้น ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการป้องกันสนิมของน้ำยาป้องกันสนิมจะลดลงหากใช้วิธีการพ่นแทนวิธีการทาน้ำยาถึง 44.17%

เมื่อนำกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่หายไปของเหล็กเสริมและระยะเวลาของการทดลองทั้ง 2 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลา (X) และร้อยละของน้ำหนักที่หายไป (Y)

จากกราฟจะสังเกตได้ว่า ความชันของเส้นแนวโน้มของกราฟของตัวอย่างที่ทาน้ำยาทั้งในคอนกรีตสภาพแวดล้อมปกติ และสภาพแวดล้อมทางทะเลนั้น ต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้ทา ซึ่งแสดงให้เห็นว่าน้ำยาป้องกันสนิมมีส่วนช่วยในการลดอัตราการเกิดสนิมได้ทั้งในคอนกรีตสภาพแวดล้อมปกติและสภาพแวดล้อทางทะเล

อีกทั้งยังพบว่าความชันของเส้นแนวโน้มซึ่งแสดงถึงอัตราการเกิดสนิมในเหล็กเสริมของตัวอย่างที่ทำการพ่นน้ำยาสูงกว่าตัวอย่างที่ทำการทาน้ำยา แสดงให้เห็นว่าการพ่นทำให้ประสิทธิภาพในการป้องกันสนิมของน้ำยาลดลง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความไม่สม่ำเสมอของปริมาณน้ำยาบนพื้นผิวของตัวอย่าง เนื่องจากการพ่น

จากกราฟจะเห็นได้ว่าในตัวอย่างที่ไม่ทำการทาน้ำยาทั้งในสภาพแวดล้อมปกติและที่จำลองสภาพแวดล้อมทางทะเล เมื่อเหล็กเสริมเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีไปได้ระยะหนึ่งโดยสังเกตได้จากตั้งแต่ระยะเวลาที่ 84 เซนติเมตร กราฟจะเกิดการเปลี่ยนความชันที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งอาจเกิดจากการที่ Passive Layer ที่เคลือบเหล็กเสริมและส่วนช่วย

ในการป้องกันไม่ให้เหล็กเสริมเกิดสนิมนั้นถูกทำลาย ทำให้อัตราการเกิดสนิมเพิ่มสูงขึ้น แต่ในคอนกรีตที่ทำการทาน้ำยานั้น จะมีความชันที่ค่อนข้างคงที่ โดยพิจารณาได้จากตัวอย่างคอนกรีตปกติที่ทำการทาน้ำยา

หากพิจารณากราฟตัวอย่างคอนกรีตที่จำลองสภาพแวดล้อมทางทะเลและทำการทาน้ำยานั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงคความชันเช่นเดียวกับคอนกรีตที่ไม่ทำการทาน้ำยา ซึ่งอาจเป็นผลมาจากปริมาณคลอไรด์ผสมในเนื้อคอนกรีตเพื่อจำลองสภาพแวดล้อมทางทะเล นั้นได้ทำลาย Passive Layer บางส่วนตั้งแต่ตอนก่อนการทดลอง แต่พบว่าการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟของตัวอย่างที่จำลองสภาพแวดล้อมทางทะเลและการทาน้ำยานั้นยังน้อยกว่าคอนกรีตที่ไม่ทำการทาน้ำยา

จากการวิเคราะห์นี้จึงสามารถสรุปได้ว่าทำยาป้องกันสนิมในเหล็กเสริมมีส่วนช่วยในการทำให้อัตราการเกิดสนิมในเหล็กเสริมน้อยลงทั้งในคอนกรีตสภาพแวดล้อมปกติและที่จำลองสภาพแวดล้อมทางทะเล

4. บทสรุป

จากผลการวิจัยสามารถสรุปให้สอดคล้องตามวัตถุประสงค์ได้ดังนี้

1. องค์ประกอบหลักของน้ำยาป้องกันสนิม มี 3 ชนิดได้แก่ Triethoxyoctylsilane, Triisobutyle phosphate และ Titanium tetraisopropanolate โดยมีกลไกในการป้องกันสนิมคือ สารดังกล่าวมีส่วนช่วยในการป้องกันการซึมผ่านของน้ำ ซึ่งเมื่อน้ำไม่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริมจึงทำให้เกิดสนิมได้ยากขึ้น โดยจากการศึกษาน้ำยาป้องกันสนิมนี้ด้วยวิธี SEM และ EDS พบว่าตัวน้ำยาป้องกันสนิมสามารถซึมในเนื้อคอนกรีตได้ 5.00 เซนติเมตร ในเวลา 14 วัน

2. จากการทดลองเร่งการเกิดสนิมด้วยไฟฟ้าน้ำยาป้องกันสนิมในเหล็กเสริมมีประสิทธิภาพในการลดการเกิดสนิมได้จริง ทั้งในคอนกรีตสภาพแวดล้อมปกติและสภาพแวดล้อมทางทะเล

3. จากการทดลองเร่งการเกิดสนิมด้วยไฟฟ้าเคมี พบว่าประสิทธิภาพการป้องกันสนิมของน้ำยาป้องกันสนิมที่ใช้วิธีการพ่น น้อยกว่าการใช้วิธีการทา

กิตติกรรมประกาศ

วิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความอนุเคราะห์จาก รศ.ดร.วิทิต ปานสุข อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย ที่ได้ให้คำปรึกษา และข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในงานวิจัยมาโดยตลอด คณะผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

นอกจากนี้ขอขอบพระคุณ บริษัท เพอร์ฟอร์มแมกซ์ บิวดิ้ง เซอร์วิซ จำกัด ที่สนับสนุนน้ำยาป้องกันสนิม และคำแนะนำแก่คณะผู้วิจัยมาโดยตลอด และขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้ออุปกรณ์และสถานที่ในการทดลอง ทำให้งานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้อย่างดี

เอกสารอ้างอิง

A. K. Azad, S. A. (2007). Residual Strength of Corrosion-Damaged Reinforced Concrete. *ACI Materials Journal*, 303-310.

A. Raharinaivo, S. C. (2007). Influence of Impressed Current on the Initiation of Damage in Reinforced Mortar due. *Cement and Concrete Research*, 1598–1612.

Ahmad, S. (2009). IMPRESSED CURRENT TECHNIQUE. *TECHNIQUES FOR INDUCING ACCELERATED*, 98-102.

American Society for Testing and Materials. (2012). *Standard Test Method for Acid- Soluble Chloride in Mortar and Concrete.*

CPAC Academy. (2543). โครงสร้างคอนกรีตที่มีความทนทาน. ใน CPAC Academy, *คอนกรีตเทคโนโลยี Concrete technology* (หน้า 155-162).

J. Skalny, A. B. (Vol 28. 2007). *Environmental deterioration of concrete.*

วงเสียงดัง, พ. (2012). การเกิดสนิมในเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์. *ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเกิดสนิมของเหล็กและเหล็กเคลือบด้วยสังกะสีในคอนกรีตเสริมเหล็ก*, 3-18.

อานนท์ วงษ์แก้ว. (2014). การเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมในเหล็กเสริม. *การประเมินกำลังรับแรงดัดและความเหนียวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหล็กเสริมเกิดสนิม*, 25-51.

อานนท์ วงษ์แก้ว. (2015). การเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมในเหล็กเสริม. *ผลกระทบต่อการเกิดสนิมในเหล็กเสริมต่อพฤติกรรมการรับแรงของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ก่อสร้างบริเวณชายฝั่งทะเล*, 23-32.

เอี่ยมจะบก, อ. (n.d.). ความคงทนของคอนกรีตจากการกัดกร่อนด้วยคลอไรด์. *ความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก*, 10-13.