



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการใช้งานสาร
ยับยั้งการเกิดสนิม เพื่อป้องกัน และซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก
จากการเกิดสนิม

โดย ดร.ภักดิ์วัฒน์ แส่นเจริญ

พฤษภาคม 2557

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการใช้งานสารยับยั้งการเกิดสนิม
เพื่อป้องกัน และซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจากการเกิดสนิม

ดร.ภักดิ์ แสนเจริญ

ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา

สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

และสถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

ทางผู้วิจัยต้องขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และสถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร ที่สนับสนุนทุนในการดำเนินการวิจัยนี้โดยลุล่วงไปด้วยดี นอกจากนี้ต้องขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่สนับสนุนสถานที่ในการดำเนินการโครงการวิจัยในบางขั้นตอน รวมทั้งนักศึกษาที่เป็นส่วนหนึ่งในการดำเนินการวิจัยมา ณ ที่นี้

Abstract

Project Code : TRG5380014

Project Title : Study of factors affect performance of application of corrosion inhibitor to prevent and repair corrosion of reinforced concrete structure

Investigator : Dr.Pakawat Sancharoen, Construction and Maintenance Technology Research Center, Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasat University

E-mail Address : pakawat@siit.tu.ac.th

Project Period : 4 years

There are various methods of repair and protection of reinforcing steel corrosion. In this study, the application of corrosion inhibitor was studied. This research was conducted to study the effectiveness of corrosion inhibitors which were mixing type and concrete surface coating type. Dosage of corrosion inhibitors were according to the manufacturer's recommendations and half of it. Corrosion was accelerated by chloride solution ponding with the concentration of 10 percent by weight. Fly ash replacement ration were 0, 15 and 30 percent by weight of the binder. Carbon steel grade SD40 was used. Uncoated steel and phosphate coated steel were studied. Corrosion were measured according to standard ASTM G109 and ASTM C876 for corrosion current and half-cell potential, respectively. Also the amount of critical chloride content was measured according to ASTM C1152. The experiment showed that the mixing type corrosion inhibitor was effective to reduce the rate of corrosion in concrete with chloride penetration from outside. The dosage according to the manufacturer's recommendations was the most effective. The coating type inhibitor should be careful when using because it may accelerate the corrosion. Finally, guideline to select type of corrosion inhibitor is given. In the future, long term performance of corrosion inhibitor should be verified.

Keywords : corrosion, corrosion inhibitor, chloride, maintenance, repair

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ: TRG5380014

ชื่อโครงการ: การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการใช้งานสารยับยั้งการเกิดสนิม เพื่อป้องกัน และซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจากการเกิดสนิม

ชื่อนักวิจัย: ดร.พัชร์วัฒน์ แสนเจริญ, ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้าง และบำรุงรักษา, สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

E-mail Address : pakawat@siit.tu.ac.th

ระยะเวลาโครงการ: 4 ปี

การป้องกันและซ่อมแซมการเกิดสนิมของเหล็กเสริมนั้นมีหลายวิธี แต่งานวิจัยนี้ได้เน้นการศึกษาการใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยศึกษาประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิม ทั้งชนิดที่ผสมเพิ่มในคอนกรีตและชนิดทาที่ผิวของคอนกรีต โดยศึกษาผลของการใช้งานตามปริมาณที่ผู้ผลิตแนะนำ และปริมาณครึ่งหนึ่งของที่แนะนำ การเกิดสนิมถูกเร่งโดยการให้คลอไรด์ตั้งแต่ตอนผสมคอนกรีต และการขังสารละลายคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ผลของการใช้งานแก้รอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 0 15 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และการใช้เหล็กเสริมแบบธรรมดาและเคลือบฟอสเฟต ในการทดลองได้ดำเนินการวัดอัตราการเกิดสนิมโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM G109 และวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ตามมาตรฐาน ASTM C876 ภายหลังเหล็กเสริมเกิดสนิม ได้ดำเนินการหาปริมาณคลอไรด์วิกฤติของตัวอย่างคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1152 จากการทดสอบพบว่า สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทผสมเพิ่มมีประสิทธิภาพในการลดอัตราการเกิดสนิมในคอนกรีตที่เกิดจากคลอไรด์ที่ซึมจากภายนอกได้ดี และปริมาณในการใช้ควรใช้ตามที่ผู้ผลิตแนะนำ ส่วนสารยับยั้งประเภททาที่ผิวคอนกรีตควรระวังในการใช้งานกับโครงสร้างใหม่เพราะอาจเร่งให้เหล็กเสริมเกิดสนิมเร็วขึ้น สำหรับเหล็กเสริมชนิดเคลือบฟอสเฟตช่วยชะลอการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในกรณีมีคลอไรด์จากภายนอก ในบทสรุปได้ให้การแนะนำในการเลือกใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมเพื่อให้สามารถยับยั้งการเกิดสนิมได้ถูกต้องเหมาะสม อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมในระยะยาวต้องมีการศึกษาต่อไป

คำหลัก : การเกิดสนิม, สารยับยั้งการเกิดสนิม, คลอไรด์, บำรุงรักษา, ซ่อมแซม

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

ปัญหาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริม เป็นปัญหาที่มีความสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความปลอดภัย และความสามารถใช้งานได้ของโครงสร้าง การป้องกัน และแก้ไขความเสียหายจึงเป็นสิ่งจำเป็น ซึ่งจะสามารถเพิ่มความปลอดภัยของโครงสร้าง และลดค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาโครงสร้างได้

การใช้สารยับยั้งการเกิดสนิม (Corrosion Inhibitor) ถือเป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับการนิยมนำอย่างแพร่หลาย ทั้งในการป้องกันโครงสร้างใหม่ที่มีโอกาสเกิดสนิมสูง และในการซ่อมแซมโครงสร้างเก่าที่มีความเสียหายเนื่องจากการเกิดสนิมแล้ว ในปัจจุบันสารยับยั้งการเกิดสนิมมีหลายรูปแบบตามวิธีการใช้งาน ทั้งประเภทที่ใช้เป็นสารผสมเพิ่มในคอนกรีต ประเภททาเคลือบผิวเหล็กเสริม หรือประเภททาเคลือบผิวคอนกรีต โดยคุณสมบัติหลักของสารยับยั้งการเกิดสนิมได้แก่ สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทแอโนด, สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทแคโทด, และ สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทผสมทั้งแอโนด และแคโทด ซึ่งจะแบ่งตามประเภทของกลุ่มสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบ เช่นกลุ่มของไนไตรท์ เป็นต้น โดยผลกระทบหลักมีตั้งแต่การลดอัตราการเกิดสนิม จนถึงการป้องกันการเกิดสนิม

การใช้งานสารยับยั้งการเกิดสนิมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ต้องมีความเข้าใจถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการป้องกันการเกิดสนิมของสารยับยั้งการเกิดสนิม เช่น ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวเหล็กเสริม สภาพแวดล้อม สัดส่วนผสมของคอนกรีต เป็นต้น ปัจจุบันยังขาดความรู้ ความเข้าใจในปัจจัยดังกล่าว ส่งผลให้การใช้งานสารยับยั้งการเกิดสนิมเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพ ทำให้ โครงสร้างใหม่ หรือโครงสร้างที่ได้รับการซ่อมแซมด้วยสารดังกล่าว เกิดความเสียหายขึ้นโดยง่าย จากปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงพยายามศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมชนิดต่างๆ

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- ศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมแต่ละชนิด
- ศึกษาแนวทางในการก่อสร้าง และบำรุงรักษาโครงสร้าง ให้มีความคงทน ด้วยการประยุกต์ใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมอย่างมีประสิทธิภาพ
- ศึกษาค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน โดยเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างที่มีการใช้สารยับยั้งการเกิดสนิม กับการป้องกันการเกิดสนิมวิธีอื่นๆ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- ศึกษาเกี่ยวกับการใช้สารยับยั้งการเกิดสนิม ทั้งชนิดที่ผสมและชนิดทาที่ผิวคอนกรีต โดยจะคำนึงถึงชนิดของสารยับยั้งในแต่ละประเภท, ปริมาณที่ใช้ตามผู้ผลิตแนะนำ และครึ่งหนึ่งที่ผู้ผลิตแนะนำ สัดส่วนปริมาณคลอไรด์ที่ผสมลงในคอนกรีต โดยจะใช้ที่ร้อยละ 1, 2 และร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน
- วัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ โดยมาตรฐาน ASTM C876 สำหรับทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริม
- วัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ระหว่างขั้วแอโนด (ขั้วลบ) และแคโทด (ขั้วบวก) โดยมาตรฐาน ASTM G109-99 สำหรับวัดอัตราการเกิดสนิม
- ตรวจสอบปริมาณคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีต โดยการเก็บตัวอย่างผงฝุ่นที่ได้จากการเจาะคอนกรีต มาวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์วิกฤติโดยวิธีไทเทรชันในห้องปฏิบัติการ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

จากแนวทางป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยการใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมทั้งชนิดที่ผสมในคอนกรีตและชนิดทาที่ผิวคอนกรีต เนื่องจากสารยับยั้งหลายชนิด ที่นำมาทดสอบหาแนวทางป้องกันและยับยั้งการเกิดสนิม เพื่อที่จะได้คอนกรีตที่มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองนั้นจะนำไปวิเคราะห์และสรุปหาว่าสารยับยั้งชนิดไหนที่สามารถนำมาใช้งานที่ได้ผลดีที่สุด และนำไปเป็นทางเลือกหนึ่งกับการใช้งานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในปัจจุบัน

บทที่ 2

การดำเนินงานวิจัย

การศึกษาประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ในหัวข้องานวิจัยนี้จะทำการศึกษาทดสอบเกี่ยวกับสารยับยั้งทั้งประเภทที่ผสมลงในคอนกรีต และประเภท ทาที่ผิวของคอนกรีต ในรูปแบบของการทดสอบนั้นจะมีตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่นำมาพิจารณาทดสอบ ประกอบด้วย ชนิดและปริมาณของวัสดุประสานที่ใช้ทดสอบ, อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b), แหล่งที่มาของคลอไรด์ทั้งที่ผสมลงในตัวอย่างคอนกรีต และการให้คลอไรด์ซึมผ่านจากผิวคอนกรีตและปริมาณการใช้งานของสารยับยั้งการเกิดสนิมในปริมาณที่ผู้ผลิตแนะนำและครึ่งหนึ่งที่ผู้ผลิตแนะนำ จากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตไปทดสอบ หาอัตราการเกิดสนิมตามมาตรฐาน ASTM G109 และวัดหาค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ตามมาตรฐาน ASTM C876 สำหรับทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริม และนำผงจากตัวอย่างคอนกรีตที่ได้จากการเจาะ นำไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในห้องปฏิบัติการเพื่อเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์วิกฤติของตัวอย่างคอนกรีตทั้งที่มีการใช้สารยับยั้ง และไม่มีการใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมต่อไป ส่วนรายละเอียดและขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยมีดังต่อไปนี้

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

2.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน มอก. 80-2517 หรือ ASTM C150 ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

2.1.2 ถังลอยของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ชั้นคุณภาพ 2x มาตรฐาน มอก. 2135 ดังแสดงในรูปที่ 2.2

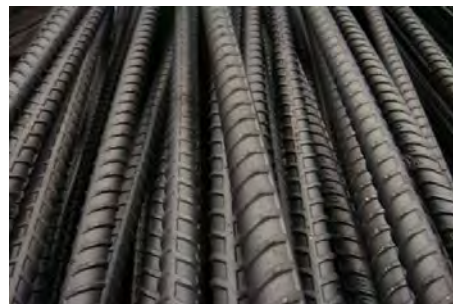


รูปที่ 2.2 แก้วลอยที่เป็นออกไซด์ของซิลิกา และอะลูมินา

2.1.3 สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทผสมเพิ่มในคอนกรีตที่ใช้งานคือ ชนิดที่ 1 เป็นสารยับยั้งประเภทผสมทั้งแอโนดและแคโทด จัดอยู่ในกลุ่มของสารเอมัลชัน จะป้องกันการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสนิมของโลหะ วิธีการใช้งานโดยผสมลงในคอนกรีต ส่วนปริมาณที่ผู้ผลิตแนะนำให้ใช้คือ 12 กก./ลบ.ม. และสารยับยั้งชนิดผสมเพิ่มชนิดที่ 2 ที่ใช้งานจะเป็นสารยับยั้งประเภทแอโนด มีส่วนผสมของแคลเซียมไนไตรต์ ทำหน้าที่เสมือนฟิล์มป้องกันอีกชั้นหนึ่ง ส่วนปริมาณที่ผู้ผลิตแนะนำให้ใช้งานคือ 5 กก./ลบ.ม.

2.1.4 สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภททาเคลือบที่ผิวของคอนกรีตที่ใช้งานในงานวิจัยครั้งนี้จะมีอยู่ชนิดเดียว สารยับยั้งที่มีส่วนผสมของสารอินทรีย์ และอนินทรีย์ ช่วยเคลือบผิวเหล็กเสริมป้องกันไม่ให้เกิดการกัดกร่อนได้ง่าย ปริมาณที่ผู้ผลิตแนะนำให้ใช้คือ 0.5 กก./ตร.ม.

2.1.5 เหล็กข้ออ้อย เส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ชั้นคุณภาพ SD 40 ตามมาตรฐาน มอก. 24-2538 ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 เหล็กข้ออ้อยตามมาตรฐาน มอก. 24-2538

2.1.6 มวลรวมหยาบ ตามมาตรฐาน ASTM C33 ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 มวลรวมหยาบที่ใช้ในการผสมคอนกรีต

2.1.7 มวลรวมละเอียด ที่นำมาผสมคอนกรีต ได้แก่ ทรายแม่น้ำที่มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มม. หรือที่สามารถลอดผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 แต่ต้องมีขนาดไม่เล็กกว่า 0.07 มม. ตามมาตรฐาน ASTM C33 ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 มวลรวมละเอียดที่ใช้ในการผสมคอนกรีต

2.1.8 น้ำสำหรับผสมคอนกรีต ต้องเป็นน้ำสะอาด เช่น น้ำประปา

2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

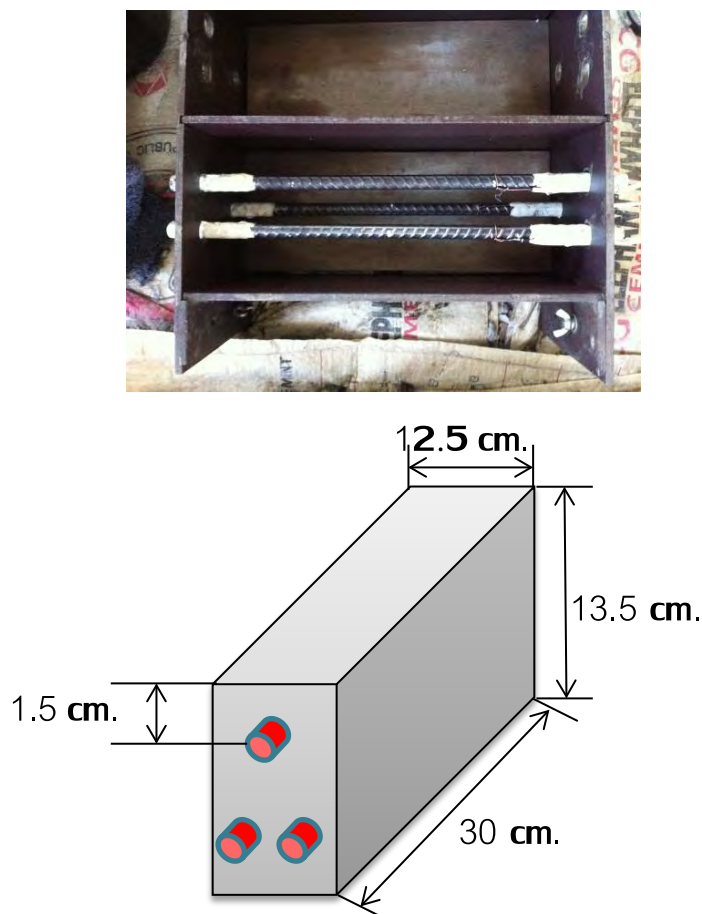
- 2.2.1 แบบสำหรับหล่อตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบ
- 2.2.2 เครื่องผสมคอนกรีต
- 2.2.3 เครื่องเขย่าคอนกรีต
- 2.2.4 โวลต์มิเตอร์ ความละเอียด 0.01 มิลลิโวลต์
- 2.2.5 เครื่อง Half-Cell Potential สำหรับทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริม
- 2.2.6 เครื่องไตเตรทหาปริมาณคลอไรด์
- 2.2.7 ตัวต้านทานขนาด 100 ($\pm$ 5%) โอห์ม
- 2.2.8 สายไฟทองแดง THW เบอร์ 1
- 2.2.9 กระสอบสำหรับใช้บ่มคอนกรีต
- 2.2.10 สว่านสำหรับเจาะคอนกรีต

2.3 เตรียมวัสดุอุปกรณ์ และตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบ

2.3.1 เตรียมแบบที่ใช้หล่อตัวอย่างคอนกรีต ขนาด 10×20×25 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยทำความสะอาด ล้างแล้วเช็ดให้แห้ง แล้วใช้น้ำมันทาที่ผิวแบบหล่อคอนกรีตด้านใน เพื่อความสะดวกในการถอดแบบ

2.3.2 เตรียมเหล็กเสริมที่ใช้ทดสอบ โดยตัดเหล็กให้ความยาวพอดีเท่ากับจำนวนที่ต้องการใช้ และใช้แปรงลวดขัดคราบสนิมออกจนถึงเนื้อเหล็กจริง แล้วทำความสะอาดผิวเหล็กด้วยสาร Acetone

เพื่อล้างคราบน้ำมันและสารที่เคลือบผิวเหล็กออกให้หมด จากนั้นให้ใช้อิพอกซีทาที่ปลายเหล็กเสริมทั้งสองด้านหัว-ท้าย โดยให้เว้นช่วงเหล็กที่จะต้องใช้ทดสอบไว้ประมาณ 15 ซม. ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ลักษณะของแบบหล่อคอนกรีตและเหล็กเสริมที่ใช้สำหรับทดสอบ

2.3.3 เตรียมเหล็กเสริมอีกชนิดหนึ่ง ที่ใช้ทดสอบคือ การนำเหล็กเสริมไปเคลือบฟอสเฟต เพราะวิธีการเคลือบฟอสเฟตนี้เป็นวิธีการทำที่ไม่ยุ่งยาก และมีราคาถูกกว่าการนำเหล็กเสริมไปเคลือบผิวด้วยวิธีอื่น เช่น เหล็กชุบสังกะสี เหล็กชุบโครเมียม เป็นต้น วิธีการเคลือบฟอสเฟตทำได้โดยทำความสะอาดเหล็กเสริมด้วย Acetone ให้ปราศจากคราบน้ำมัน แล้วนำเหล็กไปชุบสารละลาย Phosphoric Acid 85% โดยใช้อัตราส่วน Phosphoric Acid 1 mL ต่อ น้ำกรอง (RO) ประมาณ 84 mL โดยต้องเช็คค่า pH ให้อยู่ที่ 4-5 ตลอดเวลา จากนั้นผสม NaNO_2 ในสัดส่วน 2 กรัม ต่อสารละลายที่ผสมข้างต้น 1 ลิตร ในการชุบนั้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิขณะทำการชุบ อุณหภูมิยิ่งสูงจะใช้เวลาเคลือบน้อย โดยอุณหภูมิจะอยู่ที่ประมาณ 50-60 องศาเซลเซียส ให้ทำการชุบประมาณ 2-3 รอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ลักษณะเหล็กเสริมที่เคลือบฟอสเฟต

2.3.4 นำเหล็กเสริมไปติดตั้งในแบบหล่อคอนกรีต โดยให้บริเวณเหล็กที่ไม่ได้เคลือบผิว อยู่กึ่งกลางของชั้นตัวอย่าง ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การใส่เหล็กเสริมในแบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตที่เตรียมไว้

2.3.5 เทคอนกรีตลงในแบบหล่อที่เตรียมไว้ โดยขณะทำการเทให้ทำการจี้คอนกรีตเพื่อให้เนื้อคอนกรีตนั้นแน่น จากนั้นตกแต่งผิวหน้าให้ดีแล้วปล่อยให้คอนกรีตแข็งตัวประมาณ 24 ชั่วโมง จึงสามารถถอดแบบได้ ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ลักษณะของคอนกรีตที่เทเข้าแบบหล่อแล้วทำการตกแต่งผิวหน้าให้ดูเรียบร้อย

2.3.6 เมื่อถอดแบบแล้วให้นำตัวอย่างคอนกรีตมาทำการบ่ม โดยใช้พลาสติก หรือใช้กระสอบ เปียกคลุมตัวอย่างคอนกรีตเป็นเวลา 7 วัน ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การบ่มโดยใช้กระสอบที่ชุ่มด้วยน้ำคลุมที่ตัวอย่างคอนกรีต

2.3.7 นำชิ้นตัวอย่างมาบัดกรีตัวต้านทานไฟฟ้าเข้ากับเหล็กเสริม โดยจะมีเหล็กด้านบนซึ่งเป็นเหล็กที่จะทำการทดสอบ จำนวน 1 เส้น และเหล็กด้านล่างจำนวน 2 เส้น ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การเชื่อมต่อตัวต้านทานขนาด 100 โอห์ม เข้ากับสายไฟที่ต่อกับเหล็กเสริม

2.3.8 นำคอนกรีตที่บ่มได้อายุครบตามกำหนดแล้ว มาเร่งให้เกิดสนิม โดยให้ตัวอย่างอยู่ตามสภาพแวดล้อมภายในห้องปฏิบัติการ จะแบ่งวิธีการเร่งให้เหล็กเสริมเกิดสนิมออกเป็น 2 วิธี คือ

- 1) วิธีที่ 1 โดยการใช้กระสอบคลุม

สำหรับชั้นตัวอย่างที่มีการผสมคลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้น ให้ใช้กระสอบที่ชุ่มไปด้วยความชื้นคลุมตัวอย่างไว้เพื่อป้องกันไม่ให้คลอไรด์ออกมาได้ และก่อนที่จะนำตัวอย่างไปทดสอบ ให้นำไปแช่น้ำจนเปียกก่อน ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การบ่มตัวอย่างคอนกรีตโดยใช้กระสอบที่ชุ่มด้วยความชื้นคลุม

2) วิธีที่ 2 โดยการขังสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 10 %

สำหรับชั้นตัวอย่างที่ไม่ได้ผสมคลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้น โดยเริ่มจากการทำการ ขังน้ำเปล่า บนชั้นตัวอย่างด้านที่มีเหล็กเสริม 1 เส้น เป็นเวลา 1 สัปดาห์หลังจากบ่มเสร็จ หลังจากนั้นขังสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักจนกว่าจะทดสอบเสร็จ ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การขังสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 10 %

2.4 ชุดตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ

สำหรับตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบนั้นจะใช้ตัวแปรที่มีผลต่อสารยับยั้งการเกิดสนิมมาสรุปและออกแบบ เพื่อนำมาพิจารณาทดสอบนี้ประกอบด้วย ชนิดของปูนซีเมนต์ที่ใช้ทดสอบอัตราส่วน w/c, แหล่งที่มาของคลอไรด์ทั้งที่ผสมลงในตัวอย่างคอนกรีตและการให้คลอไรด์ซึมผ่านจากผิวคอนกรีตด้านบน, สัดส่วนผสมของสารยับยั้งการเกิดสนิม สามารถแบ่งชุดตัวอย่างได้ดังต่อไปนี้

2.4.1 ชุดตัวอย่างที่ 1 คอนกรีตธรรมดา

สำหรับชุดตัวอย่างนี้เป็นการผสมคอนกรีตตามสัดส่วนผสมที่ได้ออกแบบไว้ โดย ไม่มีการใส่สารยับยั้งการเกิดสนิมทุกชนิด และไม่มีการผสมคลอไรด์ แต่จะมีการใช้เหล็กเสริมแบบธรรมดา และเหล็กเสริมที่นำไปเคลือบฟอสเฟตอยู่ด้วย โดยเร่งให้เกิดสนิมโดยให้คลอไรด์ซึมผ่านจากด้านนอก สามารถสรุปขึ้นตัวอย่างของชุดตัวอย่างนี้ได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ชุดตัวอย่างที่ใช้ทดสอบในชุดที่ 1

รหัสตัวอย่าง	ชนิดเหล็ก	น้ำหนัก (กก./คอนกรีต 1 ลบ.ม.)				
		ซีเมนต์	เถ้า ลอย	น้ำ	ทราย	หิน
W0.4	ธรรมดา	385	-	154	743	1,157
W0.5	ธรรมดา	338	-	169	743	1,157
W0.6	ธรรมดา	301	-	181	743	1,157
W0.5fa15	ธรรมดา	283	50	166	743	1,157
W0.5fa30	ธรรมดา	230	98	164	743	1,157
W0.4FO	เคลือบฟอสเฟต	385	-	154	743	1,157
W0.5FO	เคลือบฟอสเฟต	338	-	169	743	1,157
W0.6FO	เคลือบฟอสเฟต	301	-	181	743	1,157
W0.5FOfa15	เคลือบฟอสเฟต	283	50	166	743	1,157
W0.5FOfa30	เคลือบฟอสเฟต	230	98	164	743	1,157

2.4.2 ชุดตัวอย่างที่ 2 ใช้สารยับยั้งการเกิดสนิม และเร่งให้เกิดสนิมโดยขังสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 10 % ทางด้านบนตัวอย่างคอนกรีต

สำหรับชุดตัวอย่างนี้ จะใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมทั้งชนิดทาที่ผิวคอนกรีตและผสมในสัดส่วนผสมคอนกรีต โดยจะแบ่งออกตามชนิดของสารยับยั้งที่นำมาใช้งาน แล้วนำมาเร่งให้เกิดสนิมโดยขังสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 10 % โดยน้ำหนัก สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.2, 2.3 และ 2.4 ดังนี้

ตารางที่ 2.2 ชุดตัวอย่างที่ใช้ทดสอบในชุดตัวอย่างที่ 2 (ชนิดหาที่ผิวคอนกรีต)

รหัสตัวอย่าง	ชนิดเหล็ก	ปริมาณ สารยับยั้ง (กก./ตร.ม.)	น้ำหนัก (กก./คอนกรีต 1 ลบ.ม.)				
			ซีเมนต์	เถ้า ลอย	น้ำ	ทราย	หิน
W0.5CSK0.5	ธรรมดา	0.25	338	-	169	743	1,157
W0.5CSK1	ธรรมดา	0.5	338	-	169	743	1,157
W0.5CSK0.5fa1 5	ธรรมดา	0.25	283	50	166	743	1,157
W0.5CSK1fa15	ธรรมดา	0.5	283	50	166	743	1,157
W0.5CSK0.5fa3 0	ธรรมดา	0.25	230	98	164	743	1,157
W0.5CSK1fa30	ธรรมดา	0.5	230	98	164	743	1,157

ตารางที่ 2.3 ชุดตัวอย่างที่ใช้ทดสอบในชุดตัวอย่างที่ 2 (ชนิดผสมในคอนกรีต)

รหัสตัวอย่าง	ชนิด เหล็ก	ปริมาณ สารยับยั้ง (กก./ลบ.ม.)	น้ำหนัก (กก./คอนกรีต 1 ลบ.ม.)				
			ซีเมนต์	เถ้า ลอย	น้ำ	ทราย	หิน
W0.5MSK0.5	ธรรมดา	6	338	-	169	743	1,157
W0.5MSK1	ธรรมดา	12	338	-	169	743	1,157
W0.5MSK0.5fa1 5	ธรรมดา	6	283	50	166	743	1,157
W0.5MSK1fa15	ธรรมดา	12	283	50	166	743	1,157
W0.5MSK0.5fa3 0	ธรรมดา	6	230	98	164	743	1,157
W0.5MSK1fa30	ธรรมดา	12	230	98	164	743	1,157

ตารางที่ 2.4 ชุดตัวอย่างที่ใช้ทดสอบในชุดตัวอย่างที่ 2 (ชนิดผสมในคอนกรีต)

รหัสตัวอย่าง	ชนิดเหล็ก	ปริมาณสารยับยั้ง (กก./ลบ.ม.)	น้ำหนัก (กก./คอนกรีต 1 ลบ.ม.)				
			ซีเมนต์	เถ้าลอย	น้ำ	ทราย	หิน
W0.5MG0.5	ธรรมดา	2.5	338	-	169	743	1,157
W0.5MG1	ธรรมดา	5	338	-	169	743	1,157
W0.5MG0.5fa15	ธรรมดา	2.5	283	50	166	743	1,157
W0.5MG1fa15	ธรรมดา	5	283	50	166	743	1,157
W0.5MG0.5fa30	ธรรมดา	2.5	230	98	164	743	1,157
W0.5MG1fa30	ธรรมดา	5	230	98	164	743	1,157

2.4.3 ชุดตัวอย่างที่ 3 มีการใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมโดยแรงให้เกิดสนิมโดยการผสม คอลไรต์ในคอนกรีตตั้งแต่เริ่มต้น

สำหรับตัวอย่างชุดนี้จะเป็นการผสมคอลไรต์ลงในคอนกรีตร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน แล้วใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมควบคู่ไปด้วย แต่จะทดสอบกับอัตราส่วน w/b เท่ากับ 0.5 เพียงอย่างเดียว และใช้ชนิดเหล็กแบบธรรมดา ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 แสดงชุดตัวอย่างที่ใช้ทดสอบในชุดตัวอย่างที่ 3 (ชนิดหาที่ผิวคอนกรีต)

รหัสตัวอย่าง	ปริมาณสารยับยั้ง (กก./ตร.ม.)	น้ำหนัก (กก./คอนกรีต 1 ลบ.ม.)					
		โซเดียมคลอไรด์	ซีเมนต์	เถ้าลอย	น้ำ	ทราย	หิน
W0.5CSKcl1	0.5	3.48	338	-	169	743	1,157
W0.5CSKcl2	0.5	6.96	338	-	169	743	1,157
W0.5CSKcl3	0.5	10.44	338	-	169	743	1,157
W0.5CSKcl1fa15	0.5	3.48	283	50	166	743	1,157
W0.5CSKcl2fa15	0.5	6.96	283	50	166	743	1,157
W0.5CSKcl3fa15	0.5	10.44	283	50	166	743	1,157
W0.5CSKcl1fa30	0.5	3.48	230	98	164	743	1,157
W0.5CSKcl2fa30	0.5	6.96	230	98	164	743	1,157
W0.5CSKcl3fa30	0.5	10.44	230	98	164	743	1,157

2.4.4 ชุดตัวอย่างที่ 4 ไม่มีการใช้สารยับยั้งการเกิดสนิม โดยเร่งการเกิดสนิมด้วยการให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้น

สำหรับตัวอย่างในชุดนี้จะเป็นการใส่คลอไรด์ในสัดส่วนผสมของคอนกรีตร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.5 เพียงอย่างเดียว โดยไม่มีการใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมทุกประเภท และใช้เหล็กเสริมธรรมดา กับเหล็กเสริมที่ชุบฟอสเฟต เพื่อนำมาเปรียบเทียบกัน ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ชุดตัวอย่างที่ใช้ทดสอบในชุดตัวอย่างที่ 4

รหัสตัวอย่าง	ชนิดเหล็ก	ปริมาณสารยับยั้ง	น้ำหนัก (กก./คอนกรีต 1 ลบ.ม.)					
			โซเดียมคลอไรด์	ซีเมนต์	ถั่วลย	น้ำ	ทราย	หิน
W0.5cl1	ธรรมดา	-	3.48	338	-	169	743	1,157
W0.5cl2	ธรรมดา	-	6.96	338	-	169	743	1,157
W0.5cl3	ธรรมดา	-	10.44	338	-	169	743	1,157
W0.5cl1fa15	ธรรมดา	-	3.48	283	50	166	743	1,157
W0.5cl2fa15	ธรรมดา	-	6.96	283	50	166	743	1,157
W0.5cl3fa15	ธรรมดา	-	10.44	283	50	166	743	1,157
W0.5cl1fa30	ธรรมดา	-	3.48	230	98	164	743	1,157
W0.5cl2fa30	ธรรมดา	-	6.96	230	98	164	743	1,157
W0.5cl3fa30	ธรรมดา	-	10.44	230	98	164	743	1,157
W0.5FOcl1	ฟอสเฟต	-	3.48	338	-	169	743	1,157
W0.5FOcl2	ฟอสเฟต	-	6.96	338	-	169	743	1,157
W0.5FOcl3	ฟอสเฟต	-	10.44	338	-	169	743	1,157
W0.5FOcl1fa15	ฟอสเฟต	-	3.48	283	50	166	743	1,157
W0.5FOcl2fa15	ฟอสเฟต	-	6.96	283	50	166	743	1,157
W0.5FOcl3fa15	ฟอสเฟต	-	10.44	283	50	166	743	1,157
W0.5FOcl1fa30	ฟอสเฟต	-	3.48	230	98	164	743	1,157
W0.5FOcl2fa30	ฟอสเฟต	-	6.96	230	98	164	743	1,157
W0.5FOcl3fa30	ฟอสเฟต	-	10.44	230	98	164	743	1,157

∴หมายเหตุ

W = อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ หรือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน คือ 0.4, 0.5 และ 0.6

C = สารยับยั้งการเกิดสนิมชนิดทาที่ผิวคอนกรีต

M = สารยับยั้งการเกิดสนิมชนิดผสมในสัดส่วนผสมคอนกรีต

SK = สารยับยั้งชนิดผสมเพิ่มของกลุ่มสารเอมายน

G = สารยับยั้งชนิดผสมเพิ่มของกลุ่มสารแคลเซียมไนไตรท์

FO = เหล็กเสริมที่นำไปชุบฟอสเฟต

cl = ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน คือ ร้อยละ 0,1,2 และ 3

fa = ร้อยละของเถ้าลอย โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน คือ ร้อยละ 15 และ 30

2.5 ขั้นตอนการทดสอบ

การทดสอบการเกิดสนิมในเหล็กเสริม สามารถทำการทดสอบได้ 2 วิธี ดังนี้

2.5.1 การวัดอัตราการเกิดสนิมตามมาตรฐาน ASTM G109-99

โดยนำตัวอย่างคอนกรีตที่ได้ทำการบ่มจนได้อายุครบตามที่ต้องการ มาวัดอัตราการเกิดสนิมโดยใช้โวลต์มิเตอร์ วัดค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแอโนดและแคโทด คร่อมตัวต้านทานขนาด 100 โอห์ม ที่ได้เชื่อมต่อไว้กับเหล็กเสริม โดยจะวัดทุกๆวันที่ 3 และ 7 ของแต่ละสัปดาห์ ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การวัดอัตราการเกิดสนิมโดยใช้โวลต์มิเตอร์วัดคร่อมตัวต้านทาน

โดยผลที่อ่านได้จากโวลต์มิเตอร์ เรานำมาคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในหน่วย $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ดังสมการที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ ดังนี้

$$I = \frac{(V/1000)}{R} \quad (2.1)$$

$$\text{Current density} = \frac{I}{A} \quad (2.2)$$

โดย I = ค่ากระแสไฟฟ้า (A)

V = ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)

R = ค่าความต้านทานไฟฟ้าในที่นี่เท่ากับ 100 โอห์ม

A = พื้นที่ผิวเหล็กเสริม (ตร.ม.)

Current Density = ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (พื้นที่ต่อตารางเมตร)

2.5.2 การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half Cell Potential) ตามมาตรฐาน ASTM C876

เพื่อทดสอบและประเมินโอกาสการเกิดสนิมในเหล็กเสริม โดยใช้เซลล์อ้างอิงชนิด Cu-CuSO₄ โดยการนำตัวอย่างคอนกรีตมาวัดหาอัตราการเกิดสนิม [12] จะวัดทุกๆ 2 เซนติเมตรตามความยาวของเหล็กเสริมด้านบน โดยจะทำการวัดทุกๆ สัปดาห์ ตามรูปที่ 2.15 โดยค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัดจะมีข้อกำหนดในตารางที่ 2.7



รูปที่ 2.15 เครื่อง Half-Cell Potential ใช้ทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

ตารางที่ 2.7 ข้อกำหนดในการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่วัดได้จากเครื่อง Half-Cell Potential

ค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัด (มิลลิโวลต์)	โอกาสที่เหล็กเสริมจะเกิดสนิม
น้อยกว่า -200 mv	ความน่าจะเป็นประมาณ 90% ที่ไม่มีการเกิดสนิม
ระหว่าง -200 ถึง -350 mv	อาจจะมีหรือไม่มีการเกิดสนิมก็ได้ ยังไม่แน่ชัด
มากกว่า -350 mv	ความน่าจะเป็นมากกว่า 90% ที่เหล็กเสริมเกิดสนิมขึ้นแล้ว

2.5.3 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์

เป็นการทดสอบแบบกึ่งทำลาย โดยเก็บตัวอย่างฝุ่นที่ได้จากการเจาะคอนกรีต จากด้านข้างของตัวอย่างคอนกรีตที่มีความลึกประมาณ 2-4 ซม. โดยจะเจาะนำไปจนถึงบริเวณที่ทำการขังน้ำแล้วนำผงปูนส่วนนั้นทิ้งไปก่อน แล้วเจาะต่อเข้าไปจนถึงบริเวณเหล็กเสริมให้นำผงปูนที่เจาะได้ในส่วนนี้นำไปทดสอบวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ โดยวิธีไตรเตอร์ชั้นในห้องปฏิบัติการ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 และ 2.17 ตามมาตรฐาน ASTM C1152



รูปที่ 2.16 ผงคอนกรีตที่นำมาไตรเตรชั่นเพื่อหาปริมาณคลอไรด์



รูปที่ 2.17 การหาปริมาณคลอไรด์วิกฤติโดยวิธีไตรเตรชั่น

บทที่ 3

ผลการทดสอบ

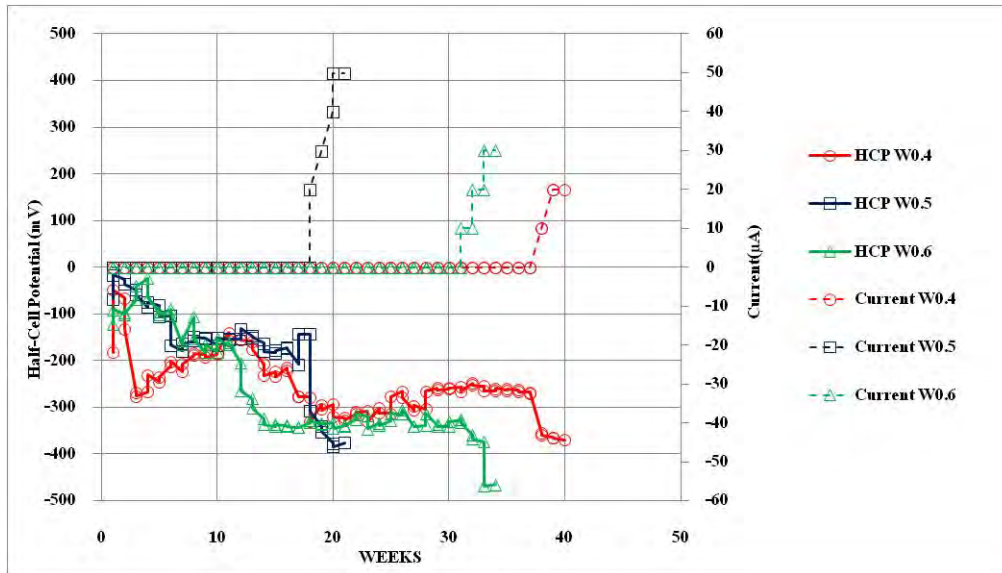
จากการทดสอบตัวอย่างคอนกรีต โดยทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ตามมาตรฐาน ASTM C876 วัดอัตราการเกิดสนิมโดยอ้างอิงวิธีการวัดค่าตามมาตรฐาน ASTM G109 และการวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากการนำผงคอนกรีตจากการเจาะตัวอย่างคอนกรีตมาไตรเตรชันในห้องปฏิบัติการ ทำการแปรผันความแตกต่างโดยปรับเปลี่ยนสัดส่วนผสมของคอนกรีต การแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่ร้อยละ 15 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ปริมาณคลอไรด์เริ่มต้น ปริมาณของสารยับยั้งการเกิดสนิมที่ใช้งาน และเหล็กเสริมชนิดเหล็กธรรมดา กับเหล็กที่ผ่านกระบวนการเคลือบพอสเฟต การทดลองในสภาวะเร่งให้เกิดสนิมโดยขังสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก สามารถนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์ตามจุดประสงค์ของการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

3.1 ผลการทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ และอัตราการเกิดสนิม

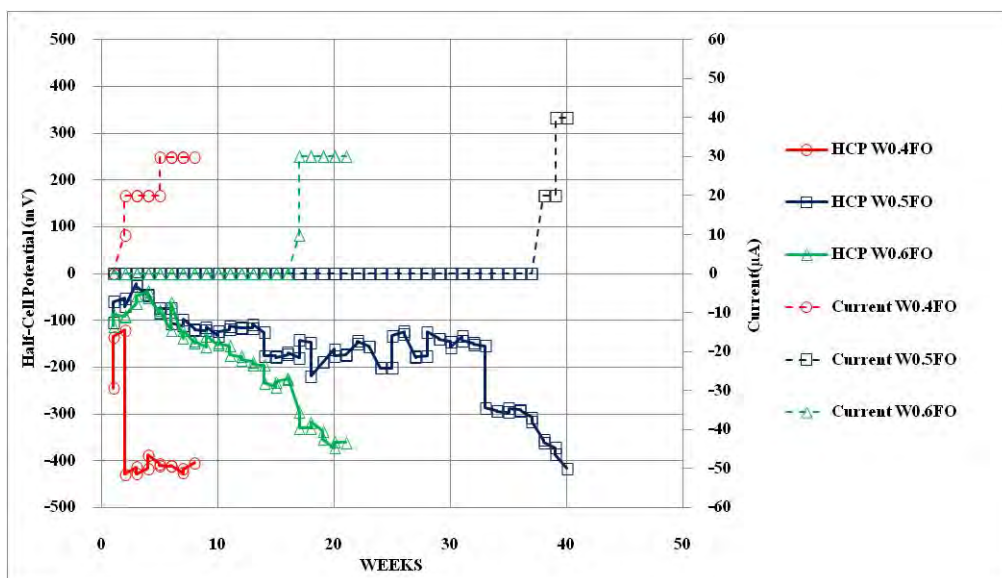
จากการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตด้วยการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เพื่อประเมินโอกาสในการเกิดสนิมและวัดอัตราการเกิดสนิม การไหลของกระแสไฟฟ้าภายในเหล็กเสริม ได้ผลการทดสอบดังนี้

3.1.1 ผลการทดสอบระหว่างเหล็กเสริมชนิดธรรมดา กับเหล็กเสริมชนิดชุบพอสเฟต โดยไม่มีการใช้สารยับยั้งการเกิดสนิม

จากรูปที่ 3.1 (ก) และ (ข) จะเห็นว่าในช่วงแรกจะมีค่าติดลบน้อยกว่า -350 mV ซึ่งแสดงว่าเหล็กเสริมยังไม่มีเกิดการเกิดสนิมขึ้นแต่อย่างใด แต่เมื่อเวลาผ่านไปจะสังเกตเห็นว่าค่าตัวเลขนั้นเริ่มติดลบมากขึ้น โดยในบางตัวอย่างจะมีค่าติดลบมากกว่า -350 mV พร้อมกับค่าอัตราการเกิดสนิมที่ติดลบเพิ่มขึ้นไปพร้อมกัน นั้นแสดงว่าเหล็กเสริมนั้นเกิดสนิมขึ้นแล้ว เนื่องมาจากในคอนกรีตมี คลอไรด์ไอออนเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ในขณะที่เหล็กเสริมที่ได้นำไปชุบพอสเฟตเมื่อดูจากกราฟ (ข) จะเห็นว่ามีการเกิดสนิม ที่เร็วกว่าเหล็กเสริมธรรมดา ในตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้เหล็กเสริมที่ชุบพอสเฟต ในอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.4 จะเกิดสนิมขึ้นเร็วที่สุด ส่วนอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.6 จะเกิดสนิมขึ้นเร็วกว่าตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้เหล็กเสริมธรรมดา ส่วนในตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5 เหล็กจะเกิดสนิมที่ช้ากว่า แต่เราไม่สามารถสรุปได้ว่าเหล็กเสริมที่นำไปชุบพอสเฟตนั้นจะนำไปใช้งานได้ดีกว่าเหล็กธรรมดา ซึ่งต้องทำการทดสอบต่อไป



(ก) เหล็กเสริมชนิดธรรมดา

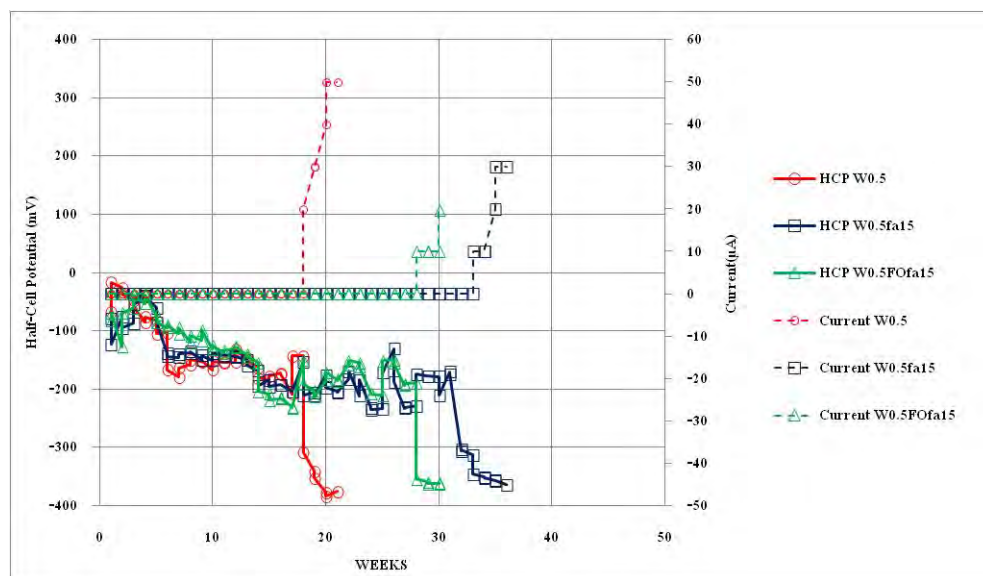


(ข) เหล็กเสริมชนิดชุบฟอสเฟต

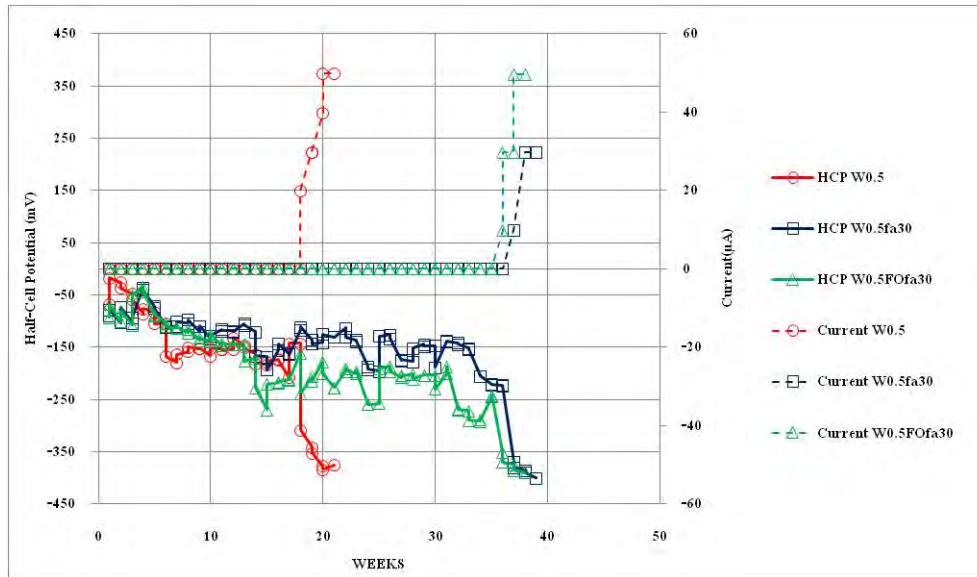
รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และอัตราการเกิดสนิมโดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและชนิดเหล็กที่แตกต่างกัน

3.1.2 ผลการทดสอบระหว่างเหล็กเสริมชนิดธรรมดา กับเหล็กเสริมชนิดชุบฟอสเฟต แบบแท่งที่ซีเมนต์ด้วยถั่วลยร้อยละ 15 และร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยไม่ใช้สารยับยั้งการเกิดสนิม

จากรูป 3.2 (ก) เป็นการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 เหมือนกัน แต่จะต่างกันที่ชนิดเหล็กเสริม โดยใช้ถั่วลยแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน จะเห็นว่าในช่วง 4 สัปดาห์แรกของการทดสอบวัดค่าในการเกิดสนิมยังคงที่ ไม่มีแนวโน้มในการเกิดสนิมแต่อย่างใด เมื่อทดสอบเป็นระยะเวลาเกือบ 10 สัปดาห์ ตัวอย่างที่ใช้เหล็กเสริมชนิดชุบฟอสเฟตนั้นเกิดสนิมขึ้นก่อน ซึ่งดูได้จากค่าศักย์ไฟฟ้าและอัตราการเกิดสนิมมีกราฟที่พุ่งลงและขึ้นอย่างชัดเจน นั้นแสดงว่ามีการเกิดสนิมขึ้นแล้ว ส่วนตัวอย่างที่ใช้เหล็กธรรมดา นั้นเกิดสนิมช้ากว่าประมาณ 2 สัปดาห์ ส่วนในรูปที่ 3.2 (ข) เป็นตัวอย่างที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยถั่วลยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และมีชนิดเหล็กเสริมต่างกัน จะเห็นว่าตัวอย่างทั้งสองยังคงไม่มีแนวโน้มในการเกิดสนิมขึ้นแต่อย่างใด ซึ่งต้องทำการทดสอบต่อไป เพื่อหาระยะเวลาที่เหล็กเสริมนั้นเริ่มเกิดสนิม



(ก) ตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยถั่วลยร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน



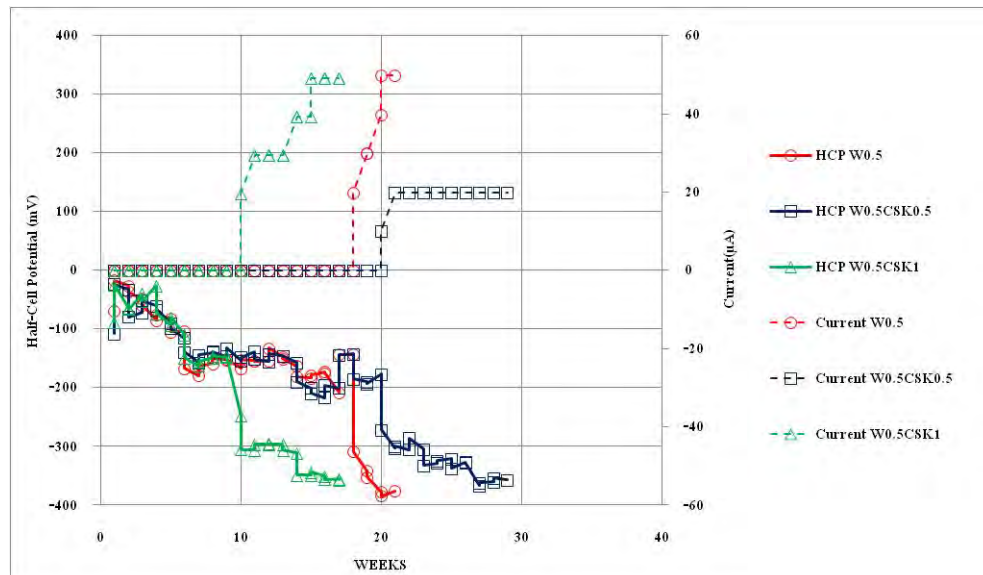
(ข) ตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และอัตราการเกิดสนิม โดยมีชนิดเหล็กและปริมาณเถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์แตกต่างกัน

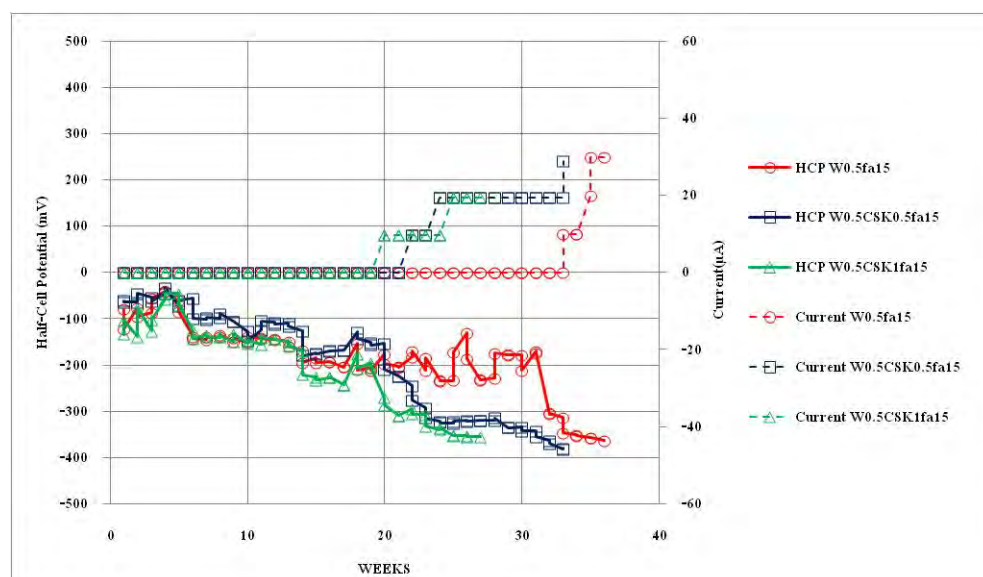
3.1.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมประเภททาที่ผิวในกลุ่ม เอ มายด์ (AMA) และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย

จากรูปที่ 3.3 (ก) เป็นตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมชนิดทาที่ผิว โดยไม่มีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยแต่อย่างใด แต่จะต่างกันที่ปริมาณสารยับยั้งที่ใช้ งาน จะเห็นว่าปริมาณที่ผู้ผลิตแนะนำให้ใช้นั้นจะเกิดสนิมขึ้นก่อนอย่างชัดเจนในสัปดาห์ที่ 10 ของการทดสอบ แต่เมื่อตัวอย่างที่ลดปริมาณลงครึ่งหนึ่งจะเกิดสนิมขึ้นในสัปดาห์ที่ 25 ของการทดสอบ และจากรูปที่ 3.3 (ข) เป็นตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยตัวอย่างที่เกิดสนิมเร็วที่สุดคือตัวอย่างที่ใช้สารยับยั้งปริมาณเท่าที่ผู้ผลิตแนะนำ และตัวอย่างที่ลดปริมาณสารลงครึ่งหนึ่งและตัวอย่างที่ใช้สารยับยั้งเท่าที่ผู้ผลิตแนะนำและแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 เกิดสนิมขึ้นพร้อมกันในสัปดาห์ที่ 22 ของการทดสอบ ส่วนตัวอย่างที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและใช้สารยับยั้งเท่าที่ผู้ผลิตแนะนำมีแนวโน้มเริ่มเกิดสนิมในสัปดาห์ที่ 34 ของการทดสอบ และรูปที่ 3.3 (ค) เป็นตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ตัวอย่างที่เกิดสนิมเร็วที่สุดคือ ตัวอย่างที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและใช้สารยับยั้งเท่าที่ผู้ผลิตแนะนำโดยเกิดสนิมขึ้นในสัปดาห์ที่ 8 ของการทดสอบ ส่วนตัวอย่างที่ใช้อ้างอิงที่ใช้สารยับยั้งเท่าที่ผู้ผลิตแนะนำ เกิดสนิมในสัปดาห์ที่ 36 ของการทดสอบ และตัวอย่างที่ใช้สารยับยั้งลดลงครึ่งหนึ่งเกิดสนิมขึ้นในสัปดาห์ที่ 37 ของการทดสอบ โดยเกิดสนิมช้ากว่า ส่วนตัวอย่างที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 โดยใช้สารยับยั้งในปริมาณครึ่งหนึ่งที่ผู้ผลิตแนะนำยังไม่เกิดสนิม ซึ่งต้องทำการทดสอบต่อไป ตัวอย่างคอนกรีตทั้งหมดจะเห็นว่าค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และอัตราการเกิดสนิมช่วง 1 สัปดาห์แรกติดลบน้อย แต่หลังจากเริ่มทำการขังสารละลายโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 10 โดย

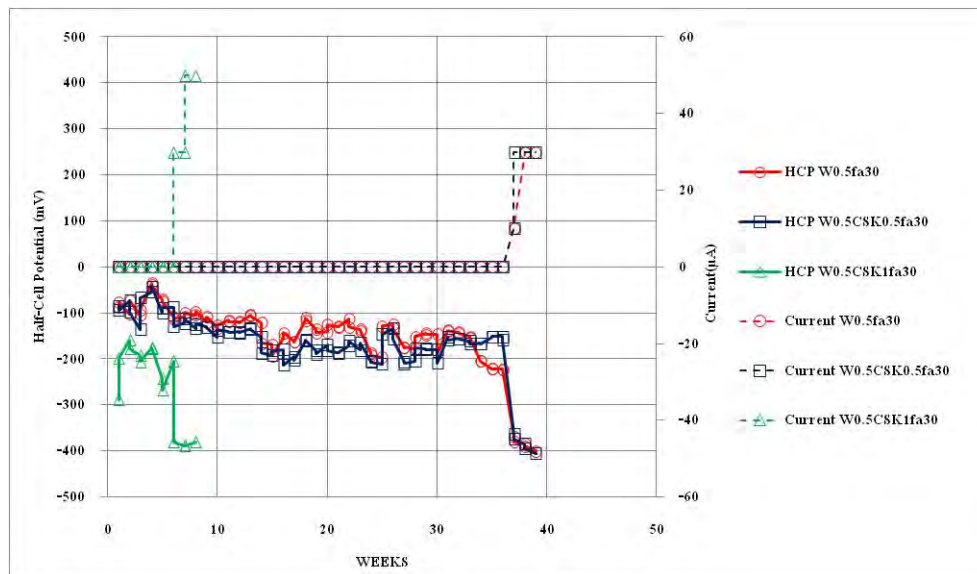
น้ำหนัก ในวันที่ 10 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เริ่มติดลบมากขึ้น จนกระทั่งค่าที่วัดได้อยู่ในเกณฑ์ที่มีโอกาสเกิดสนิมขึ้นแล้ว จะเห็นผลว่าในตัวอย่างที่ใช้สารยับยั้งลงครึ่งหนึ่งจะเกิดสนิมช้ากว่า และการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณที่น้อยกว่าจะเกิดสนิมช้ากว่า เนื่องจากสารยับยั้งนั้นอาจเป็นตัวเร่งให้เกิดสนิมเร็วขึ้น



(ก) ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภททาที่ผิวในกลุ่มเอมายด์ (AMA)



(ข) ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภททาที่ผิวในกลุ่มเอมายด์ (AMA) และแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน



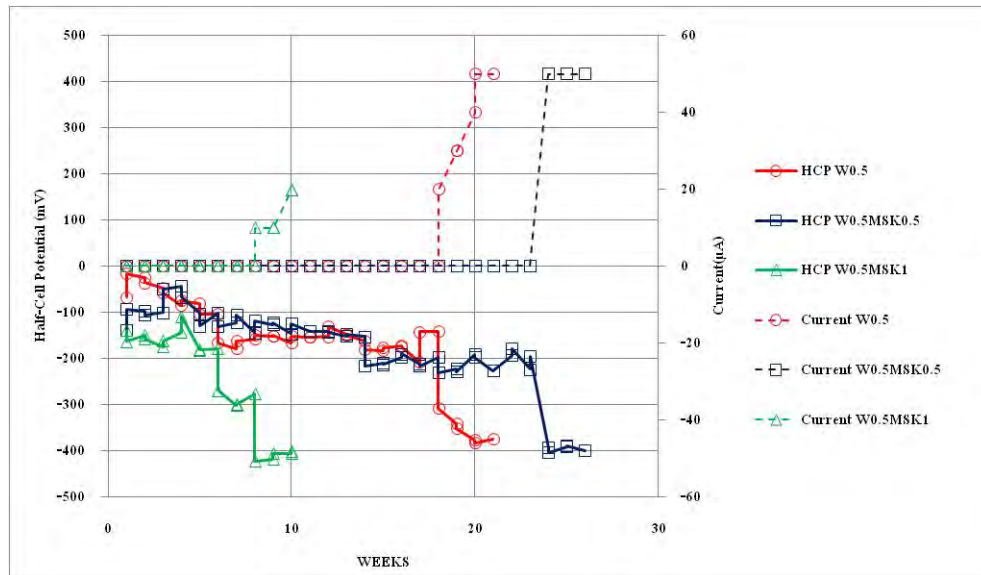
(ค) ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภททาที่ผิวในกลุ่มเอมายด์ (AMA) และแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และอัตราการเกิดสนิม โดยใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภททาที่ผิวในกลุ่มเอมายด์ (AMA) และปริมาณเถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์แตกต่างกัน

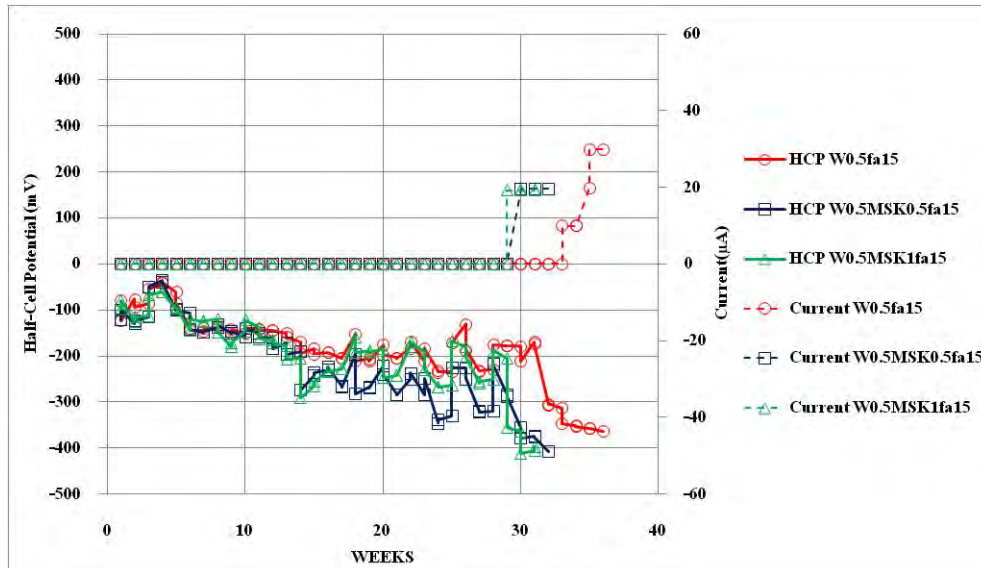
3.1.4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทผสมเพิ่มชนิดที่ 1 จัดอยู่ในกลุ่มสารเคลือบผิวในไตรท์ และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย

จากรูปที่ 3.4 (ก) เป็นการใช้งานสารยับยั้งประเภทผสมเพิ่มชนิดที่ 1 โดยเป็นการเปรียบเทียบด้านปริมาณการใช้งานระหว่างปริมาณที่ผู้ผลิตแนะนำให้ใช้กับปริมาณที่ลดลงครึ่งหนึ่ง จะเห็นว่าในช่วงสัปดาห์แรกยังคงไม่มีการเกิดสนิม แต่เมื่อมีการเร่งให้เกิดสนิมโดยขังสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ทำให้ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สารยับยั้งในปริมาณที่ผู้ผลิตแนะนำให้ใช้นั้นมีค่าศักย์ไฟฟ้าที่ติดลบที่อยู่ในเกณฑ์ของการเกิดสนิมอย่างชัดเจนขึ้นในสัปดาห์ที่ 8 ของการทดสอบ ส่วนตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สารยับยั้งในปริมาณที่ลดลงครึ่งหนึ่งจากผู้ผลิตแนะนำให้ใช้ หลังจากมีการเร่งให้เกิดสนิมโดยการขังสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พร้อมกันนั้น จะเห็นว่าเริ่มเกิดสนิมขึ้นในสัปดาห์ที่ 24 ของการทดสอบ โดยเกิดสนิมช้ากว่าประมาณ 4 สัปดาห์ ส่วนในรูปที่ 3.4 (ข) และ (ค) เป็นการทดสอบสารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทผสมเพิ่มชนิดที่ 1 และแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน หลังจากมีการเร่งให้เกิดสนิมโดยการขังสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่เกิดสนิมขึ้นเร็วที่สุดคือตัวอย่างที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสานและใช้ปริมาณสารยับยั้งที่ลดลงครึ่งหนึ่งจากผู้ผลิตแนะนำให้ใช้ โดยเริ่มเกิดสนิมในสัปดาห์ที่ 8 ของการทดสอบ ส่วนตัวอย่างที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสานและใช้ปริมาณสารยับยั้งที่ผู้ผลิตแนะนำให้ใช้ โดยเริ่มเกิดสนิมในสัปดาห์ที่ 26 ของการทดสอบ สำหรับตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสานและใช้ปริมาณสารยับยั้งที่ผู้ผลิตแนะนำให้ใช้และลดลงครึ่งหนึ่ง เกิดสนิมขึ้นพร้อมกัน โดยเริ่มเกิดสนิมในสัปดาห์ที่ 29 ของการ

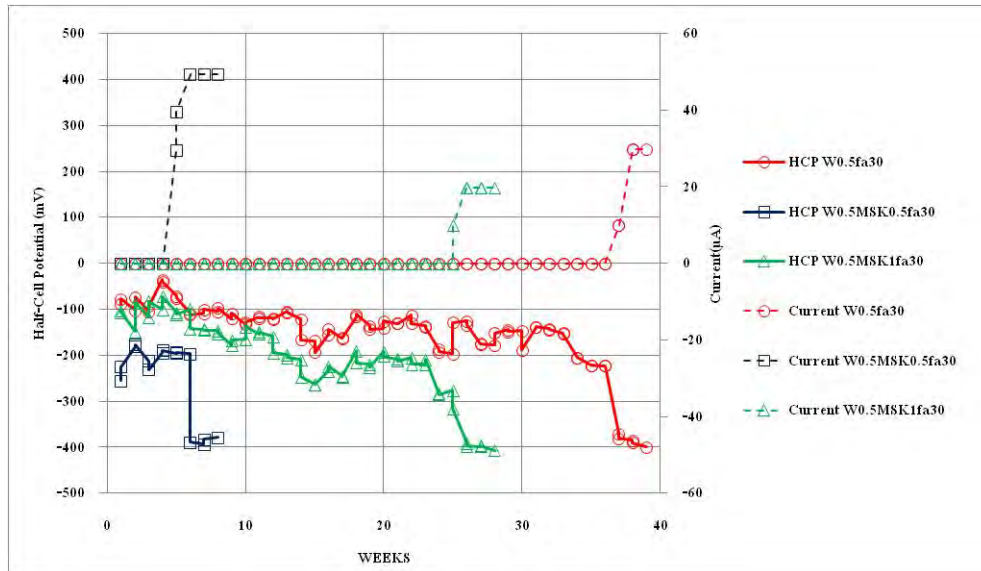
ทดสอบ และจากรูปที่ 3.4 (ค) นั้น เป็นการเปรียบเทียบตัวอย่างธรรมดาที่ใช้อ้างอิงกับตัวอย่างที่ใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทผสมเพิ่ม จะเห็นว่าตัวอย่างที่ใช้ปริมาณสารยับยั้งที่ผู้ผลิตแนะนำให้ใช้จะเกิดสนิมขึ้นเร็วกว่าตัวอย่างที่ใช้อ้างอิงและตัวอย่างที่ใช้ปริมาณสารยับยั้งที่ลดลงครึ่งหนึ่งเกิดสนิมช้าที่สุด



(ก) ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทผสมเพิ่มชนิดที่ 1



(ข) ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทผสมเพิ่มชนิดที่ 1 และแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

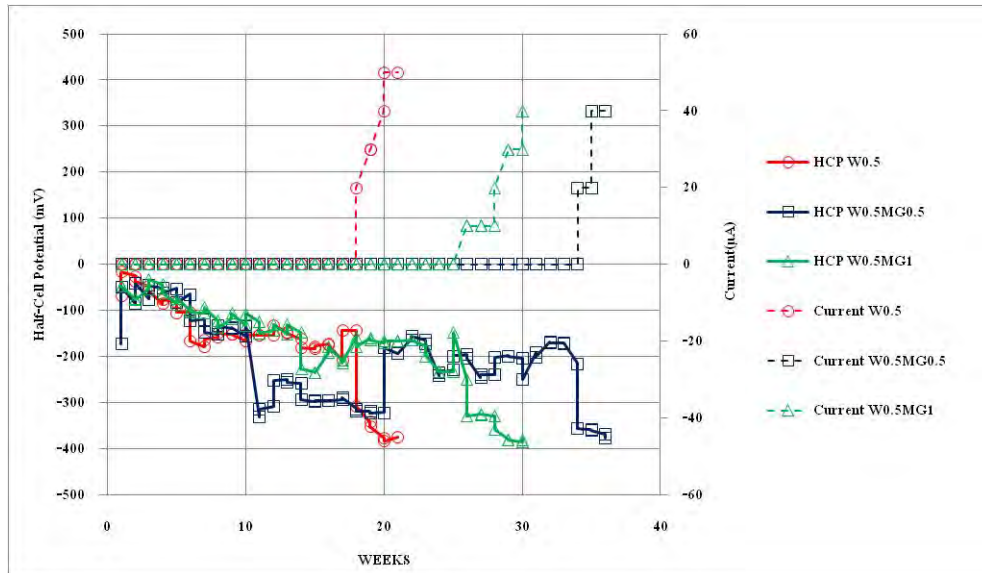


(ค) ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทผสมเพิ่มชนิดที่ 1 และแทนที่ซีเมนต์ด้วย
ถั่วลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

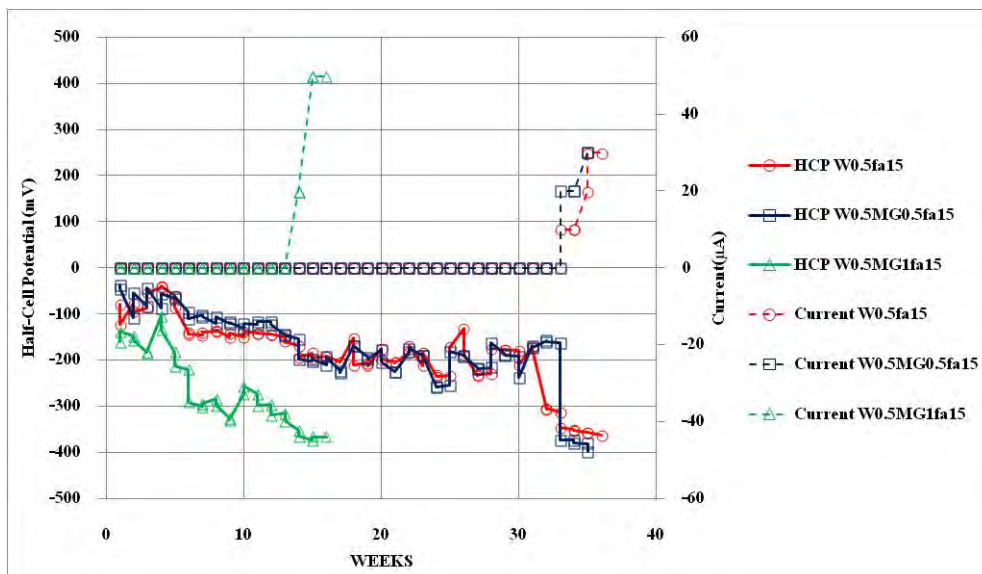
รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และอัตราการเกิดสนิม โดยใช้สารยับยั้งการเกิด
สนิมประเภทผสมเพิ่มชนิดที่ 1 และปริมาณถั่วลอยแทนที่ซีเมนต์แตกต่างกัน

3.1.5 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทผสมเพิ่มชนิดที่ 2 จัดอยู่ในกลุ่มสารแคลเซียมไนไตรต์ และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถั่วลอย

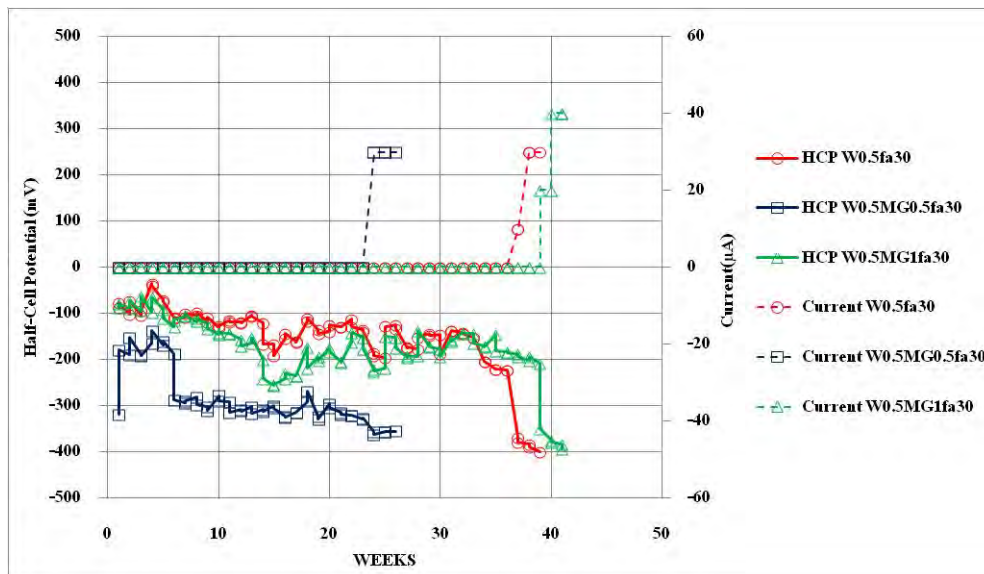
จากรูปที่ 3.5 (ก) ถึง (ค) เป็นการทดสอบการใช้งานสารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทผสมเพิ่มชนิดที่ 2 และมีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยถั่วลอยที่ร้อยละ 15 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เมื่อดูจากรูปที่ 3.5 (ก) ตัวอย่างที่ใช้ปริมาณสารยับยั้งที่ผู้ผลิตแนะนำให้ใช้จะมีการเกิดสนิมขึ้นในวันที่ 50 ของการทดสอบส่วนตัวอย่างที่ใช้สารยับยั้งลดลงครึ่งหนึ่งยังคงไม่มีการเกิดสนิม ซึ่งต้องทำการทดสอบต่อไป ส่วนในรูปที่ 3.5 (ข) และ (ค) เมื่อทำการเร่งให้เกิดสนิมพร้อมกันทุกตัวอย่าง โดยขังสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก หลังจากขังน้ำเปล่าเป็นเวลา 1 สัปดาห์ จะเห็นว่าตัวอย่างที่ใช้งานสารยับยั้งในปริมาณที่ผู้ผลิตแนะนำและใช้ถั่วลอยร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีการเกิดสนิมขึ้นเร็วที่สุดคือในสัปดาห์ที่ 15 ของการทดสอบ ลำดับต่อมาคือตัวอย่างที่ใช้สารยับยั้งในปริมาณที่ลดลงครึ่งหนึ่งที่ผู้ผลิตแนะนำและใช้ถั่วลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เกิดสนิมขึ้นเมื่อสัปดาห์ที่ 25 ของการทดสอบ ลำดับต่อมาคือตัวอย่างที่ใช้สารยับยั้งในปริมาณที่ลดลงครึ่งหนึ่งที่ผู้ผลิตแนะนำและใช้ถั่วลอยร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยเกิดสนิมขึ้นในสัปดาห์ที่ 33 ของการทดสอบ เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างที่ใช้อ้างอิงกับตัวอย่างที่ใช้สารยับยั้งในปริมาณที่ผู้ผลิตแนะนำกับลดลงครึ่งหนึ่ง ตัวอย่างที่ใช้สารยับยั้งจะเกิดสนิมขึ้นช้ากว่า



(ก) ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทผสมเพิ่มชนิดที่ 2



(ข) ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทผสมเพิ่มชนิดที่ 2 และแทนที่ซีเมนต์ด้วย
เถ้าลอยร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

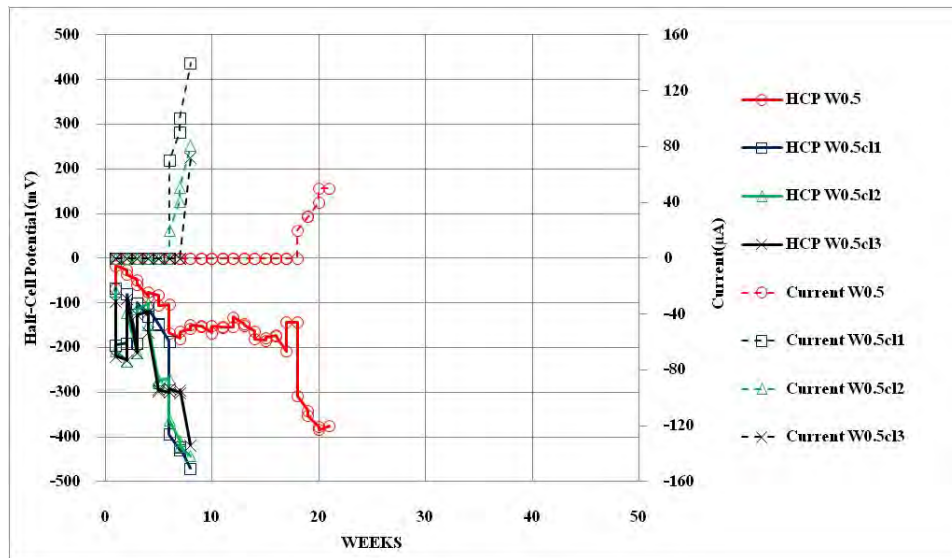


(ค) ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทผสมเพิ่มชนิดที่ 2 และแทนที่ซีเมนต์ด้วย
ถั่วลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

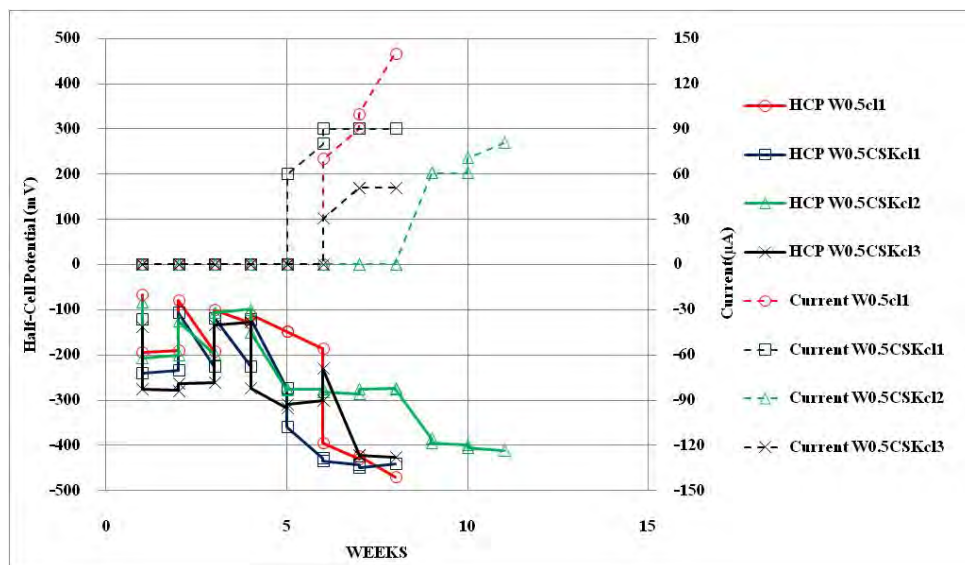
รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และอัตราการเกิดสนิม โดยใช้สารยับยั้งการเกิด
สนิมประเภทผสมเพิ่มชนิดที่ 2 และปริมาณถั่วลอยแทนที่ซีเมนต์แตกต่างกัน

3.1.6 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมประเภททาที่ผิวในกลุ่มสารเอ
มายด์ (AMA) สำหรับตัวอย่างคอนกรีตที่ให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้น โดยแตกต่างกันที่ชนิดเหล็กเสริม

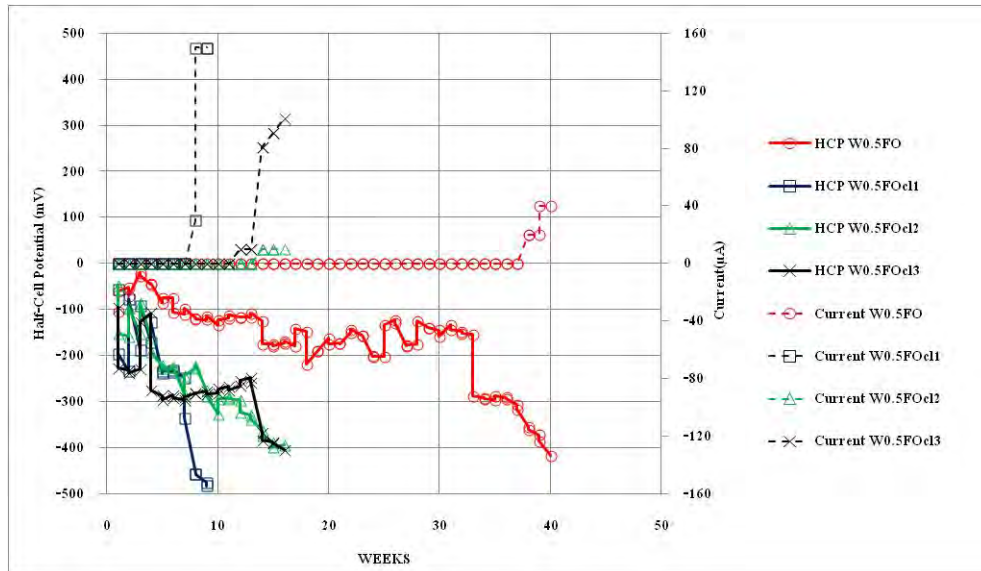
จากรูปที่ 3.6 (ก), (ข) และ(ค) เป็นการให้คลอไรด์ในคอนกรีตตั้งแต่เริ่มต้นที่ร้อยละ 1, 2 และ
ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยรูปที่ 3.6 (ก) ไม่มีการใช้สารยับยั้งการเกิดสนิม จะเห็นว่า
ตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้นที่ร้อยละ 1 และร้อยละ 2 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน จะเกิดสนิมขึ้น
พร้อมกันในสัปดาห์ที่ 8 ของการทดสอบ ส่วนตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้นที่ร้อยละ 3 จะเกิดสนิม
ขึ้นช้ากว่าโดยเกิดสนิมในสัปดาห์ที่ 9 ของการทดสอบ ส่วนรูปที่ 3.6 (ข) เป็นตัวอย่างคอนกรีตที่ให้คลอ
ไรด์ตั้งแต่เริ่มต้นและมีการใช้สารยับยั้งประเภททาที่ผิวในปริมาณที่ผู้ผลิตแนะนำให้ใช้ จะเห็นว่าใน
ตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้นที่ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เกิดสนิมขึ้นเร็วที่สุด โดยเกิดสนิม
ในสัปดาห์ที่ 3 ของการทดสอบ และตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้นที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักวัสดุ
ประสาน เกิดสนิมขึ้นในสัปดาห์ที่ 4 ส่วนตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้นที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักวัสดุ
ประสาน เกิดสนิมช้าที่สุด โดยเกิดสนิมในสัปดาห์ที่ 10ของการทดสอบ ส่วนรูปที่ 3.6 (ค) เป็นตัวอย่างที่
ใช้เหล็กเสริมที่ผ่านกระบวนการชุบฟอสเฟต และให้คลอไรด์ในคอนกรีตตั้งแต่เริ่มต้นที่ร้อยละ 1,2 และ3
เช่นเดียวกัน จะเห็นว่าตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ที่ร้อยละ 1 เกิดสนิมในสัปดาห์ที่ 9 ของการทดสอบ และ
ตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ที่ร้อยละ 2 เกิดสนิมขึ้นในสัปดาห์ที่ 13 ของการทดสอบ ส่วนตัวอย่างที่ให้คลอไรด์
ที่ร้อยละ 3 เกิดสนิมขึ้นในสัปดาห์ที่ 13 ของการทดสอบ สารยับยั้งหรือเหล็กที่เคลือบฟอสเฟตอาจจะเข้าไป
จับยึดคลอไรด์ได้มากขึ้น จึงทำให้ค่ากระแสของการเกิดสนิมค่อนข้างต่ำกว่า ซึ่งเป็นผลดีในการ
ทดสอบการเกิดสนิม



(ก) ตัวอย่างคอนกรีตที่ให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้น โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเหมือนกัน



(ข) ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมชนิดทาที่ผิว และให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้น

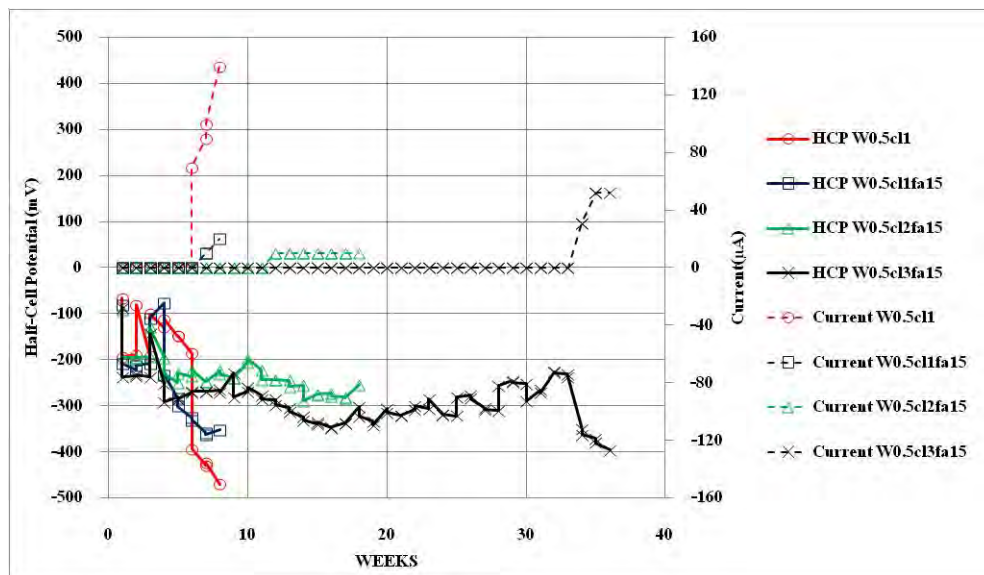


(ค) ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้เหล็กเสริมที่ชุบฟอสเฟต และให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้น
รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และอัตราการเกิดสนิม โดยใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมชนิดทาที่ผิว และชนิดเหล็กเสริมต่างกัน โดยให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้น

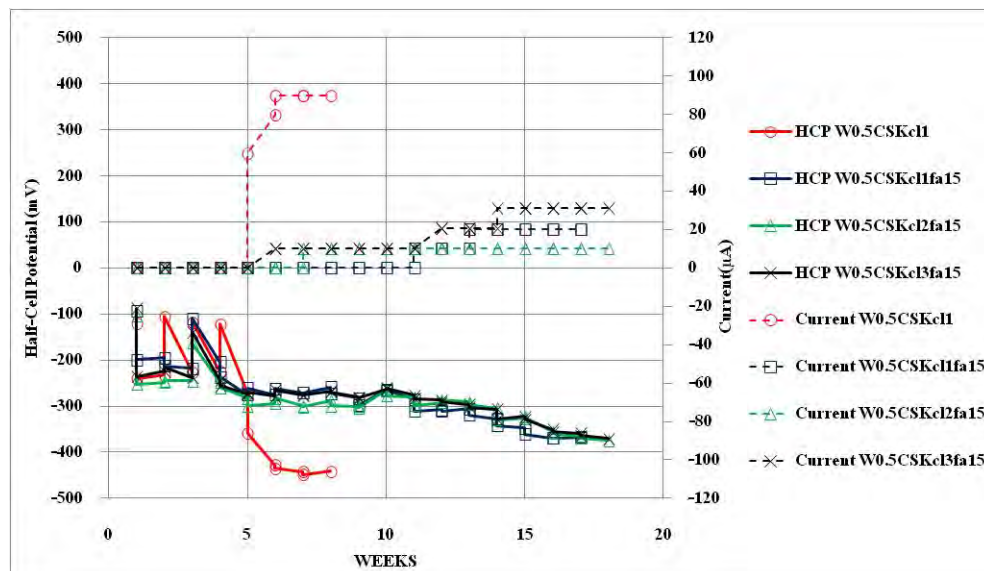
3.1.7 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมประเภททาที่ผิวในกลุ่มสารเอมายด์ (AMA) สำหรับตัวอย่างคอนกรีตที่ให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้น และแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

จากรูปที่ 3.7 (ก) เป็นการแสดงผลการทดสอบของตัวอย่างคอนกรีตที่มีการให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้นที่ร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และมีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน จะเห็นว่าตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ในคอนกรีตที่ร้อยละ 1 เกิดสนิมขึ้นเร็วที่สุดในสัปดาห์ที่ 8 ของการทดสอบ ส่วนตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ในคอนกรีตที่ร้อยละ 2 และร้อยละ 3 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เกิดสนิมขึ้นในสัปดาห์ที่ 12 และ 32 ตามลำดับ โดยตัวอย่างคอนกรีตไม่มีการใช้สารยับยั้งการเกิดสนิม ส่วนจากรูปที่ 3.7 (ข) เป็นการแสดงผลการทดสอบของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมชนิดทาที่ผิว และให้คลอไรด์ในคอนกรีตตั้งแต่เริ่มต้น และมีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน จะเห็นว่าตัวอย่างคอนกรีตที่เกิดสนิมขึ้นเร็วที่สุดคือตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ในคอนกรีตที่ร้อยละ 3 โดยเริ่มเกิดสนิมในสัปดาห์ที่ 7 ของการทดสอบ ลำดับต่อมาคือตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ในคอนกรีตที่ร้อยละ 2 เริ่มเกิดสนิมขึ้นในสัปดาห์ที่ 8 ของการทดสอบ ส่วนตัวอย่างคอนกรีตที่เกิดสนิมช้าที่สุดคือตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ในคอนกรีตตั้งแต่เริ่มต้นที่ร้อยละ 1 โดยเริ่มเกิดสนิมในสัปดาห์ที่ 11 ของการทดสอบ และจากรูปที่ 3.7 (ค) เป็นการแสดงผลการทดสอบของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมชนิดทาที่ผิว และให้คลอไรด์ในคอนกรีตตั้งแต่เริ่มต้น และมีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน แต่จะมีการใช้เหล็กเสริมที่ผ่านกระบวนการชุบฟอสเฟต โดยไม่มีการใช้สารยับยั้งการเกิดสนิม จากผลการทดสอบจะเห็นว่าตัวอย่างที่เกิดสนิมขึ้นเร็วที่สุดคือตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ที่ร้อยละ 3 เริ่มเกิดสนิมในสัปดาห์ที่ 6 ของการทดสอบ ส่วนตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ที่ร้อยละ 1

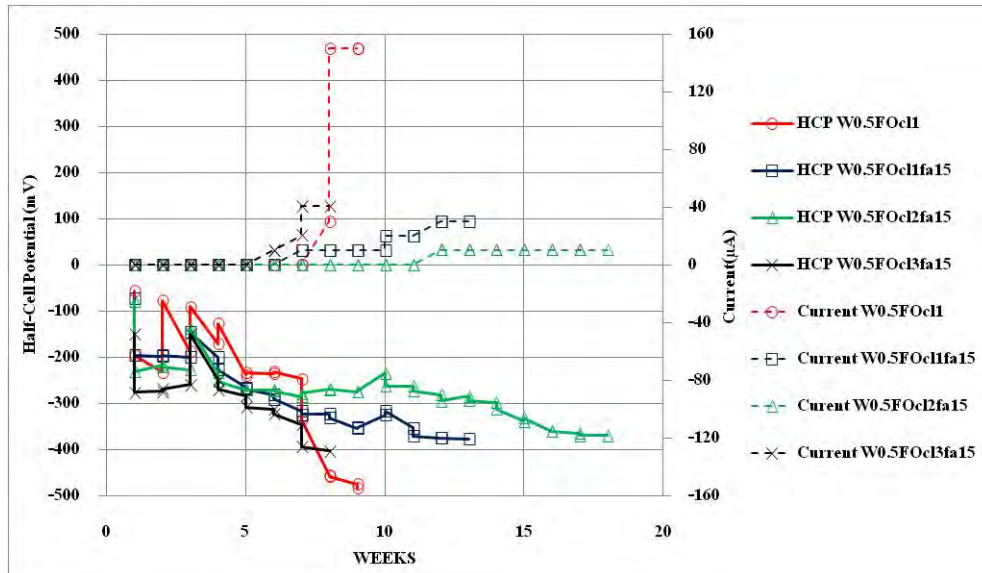
เริ่มเกิดสนิมในสัปดาห์ที่ 9 ของการทดสอบ และตัวอย่างที่เกิดสนิมช้าที่สุดคือตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ที่ร้อยละ 2 เริ่มเกิดสนิมในสัปดาห์ที่ 13 ของการทดสอบ



(ก) ตัวอย่างคอนกรีตที่มีการให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้น และแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15



(ข) ตัวอย่างที่มีการให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้น และแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 15 โดยน้ำหนักรั่วสุมประสาน โดยใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมชนิดทาที่ผิว



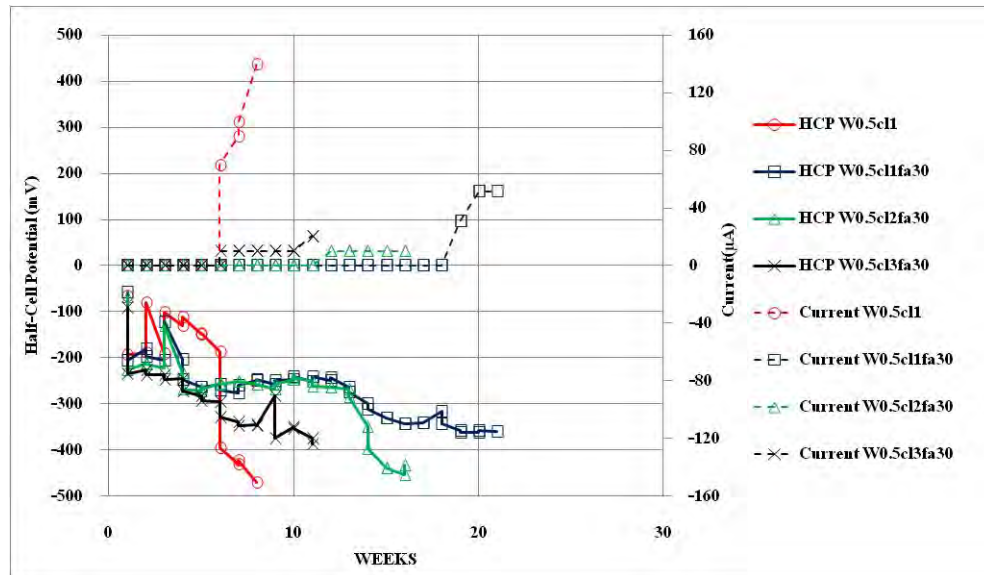
(ค) ตัวอย่างคอนกรีตที่มีการให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้น และใช้เหล็กเสริมที่ชุบฟอสเฟต

รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และอัตราการเกิดสนิม โดยใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมชนิดทาที่ผิว มีชนิดเหล็กเสริมต่างกัน และแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยมีการให้คลอไรด์ในคอนกรีตตั้งแต่เริ่มต้น

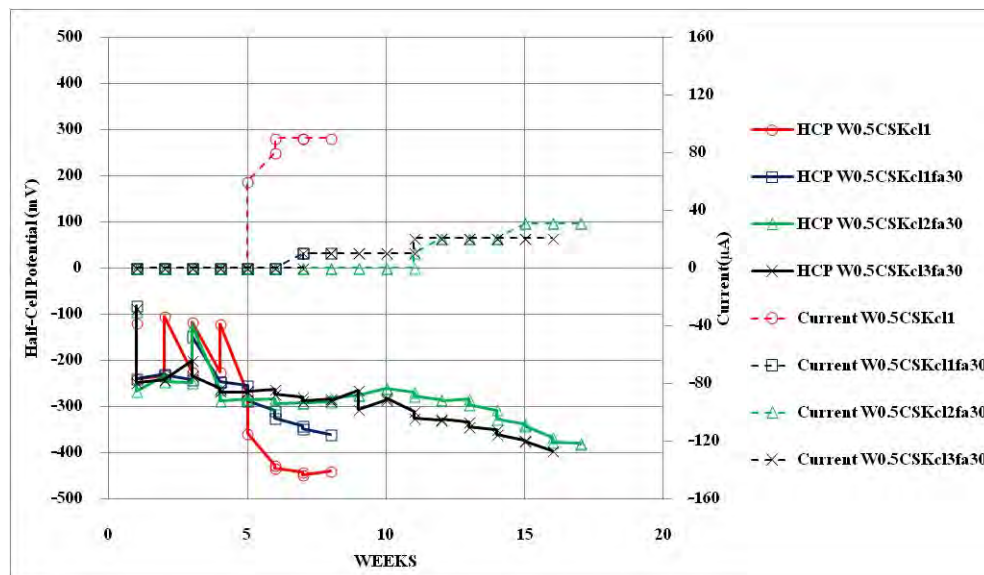
3.1.8 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมประเภททาที่ผิวในกลุ่มสารเอมายด์ (AMA) สำหรับตัวอย่างคอนกรีตที่ให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้น และแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

จากรูปที่ 3.8 (ก) เป็นการแสดงผลการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตที่ให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้น และแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตัวอย่างคอนกรีตที่เกิดสนิมเร็วที่สุดคือตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้นที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เริ่มเกิดสนิมขึ้นในสัปดาห์ที่ 6 ของการทดสอบ ส่วนตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้นที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เริ่มเกิดสนิมขึ้นในสัปดาห์ที่ 14 ของการทดสอบ ส่วนตัวอย่างคอนกรีตที่เกิดสนิมขึ้นช้าที่สุดคือตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้นที่ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เริ่มเกิดสนิมขึ้นในสัปดาห์ที่ 19 ของการทดสอบ โดยไม่มีการใช้สารยับยั้งการเกิดสนิม ส่วนรูปที่ 3.8 (ข) เป็นการแสดงผลการทดสอบการใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมชนิดทาที่ผิว โดยการให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้น และแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ใช้สารยับยั้งการเกิดสนิม ตัวอย่างที่ใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมจะเกิดสนิมขึ้นเร็วกว่า โดยตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ที่ร้อยละ 1 เริ่มเกิดสนิมขึ้นในสัปดาห์ที่ 6 ของการทดสอบ และตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ที่ร้อยละ 3 เริ่มเกิดสนิมขึ้นในสัปดาห์ที่ 12 ของการทดสอบ ส่วนตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ที่ร้อยละ 2 เริ่มเกิดสนิมขึ้นในสัปดาห์ที่ 15 ของการทดสอบ ส่วนรูปที่ 3.8 (ค) เป็นการแสดงผลการทดสอบชนิดของเหล็กเสริมที่นำไปชุบฟอสเฟต โดยการให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้น และแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยเกิดสนิมขึ้นเร็วกว่าการใช้เหล็ก

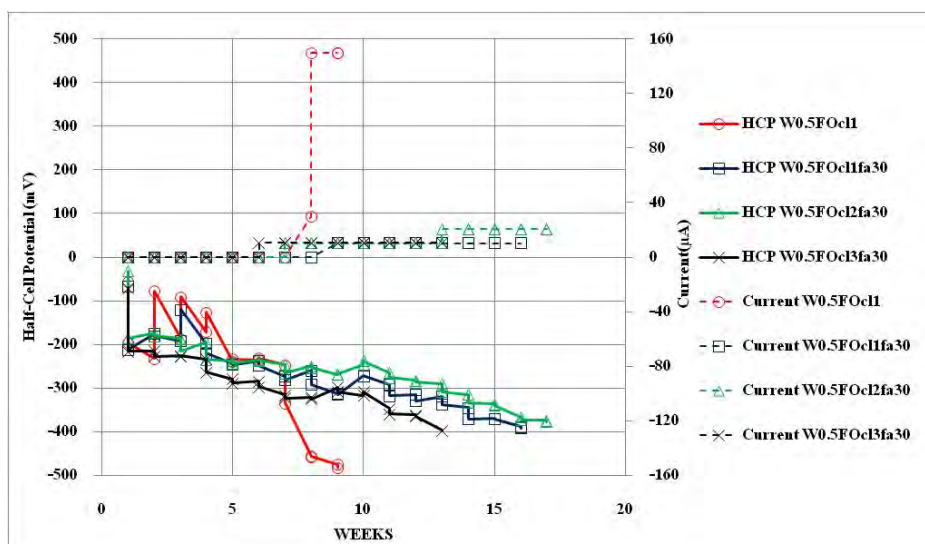
เสริมธรรมดา โดยตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ที่ร้อยละ 3 เริ่มเกิดสนิมขึ้นในสัปดาห์ที่ 11 ของการทดสอบ ตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ที่ร้อยละ 2 เริ่มเกิดสนิมขึ้นในสัปดาห์ที่ 13 ของการทดสอบ ส่วนตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ที่ร้อยละ 1 เริ่มเกิดสนิมขึ้นในสัปดาห์ที่ 14 ของการทดสอบ



(ก) ตัวอย่างคอนกรีตที่มีการให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้น และแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30



(ข) ตัวอย่างที่มีการให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้น และแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมชนิดทาที่ผิว



(ค) ตัวอย่างคอนกรีตที่มีการให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้น และใช้เหล็กเสริมที่ชุบฟอสเฟต

รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และอัตราการเกิดสนิม โดยใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมชนิดทาที่ผิว มีชนิดเหล็กเสริมต่างกัน และแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก วัสดุประสาน โดยมีการให้คลอไรด์ในคอนกรีตตั้งแต่เริ่มต้น

3.2 ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์โดยวิธีไทรเตรชันในห้องปฏิบัติการ

จากตัวอย่างคอนกรีตที่ได้ทำการทดสอบหาค่าการเกิดสนิม แล้วค่าที่วัดได้จากตัวอย่างคอนกรีตที่มีค่าเกินมาตรฐานนั้น ได้นำผงที่เจาะได้จากตัวอย่างคอนกรีตที่เกิดสนิมขึ้นแล้ว ไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในห้องปฏิบัติการ ได้ผลดังตารางที่ 3.1 ดังนี้

ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์วิกฤติในตัวอย่างคอนกรีต

รหัสตัวอย่างคอนกรีต	สัปดาห์ที่เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิม	สัปดาห์ที่เจาะคอนกรีต	% Chloride โดยน้ำหนัก sample
W0.4	38	40	0.0742
W0.4FO	5	7	0.0559
W0.5	18	20	0.0602
W0.5FO	38	40	0.0831
W0.6	32	34	0.1692
W0.5FO	38	40	0.0831
W0.5fa15	34	36	0.0780

ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในตัวอย่างคอนกรีต (ต่อ)

รหัสตัวอย่างคอนกรีต	สัปดาห์ที่เหล็กเสริม เริ่มเกิดสนิม	สัปดาห์ที่เจาะคอนกรีต	% Chloride โดย น้ำหนัก sample
W0.5FOfa15	28	30	0.0737
W0.5fa30	37	39	0.0760
W0.5FOfa30	36	38	0.0843
W0.5CSKcl1	6	8	0.2190
W0.5CSK1fa30	8	10	0.0610
W0.5MSK0.5fa30	6	8	0.0451
W0.5cl1	8	10	0.2593
W0.5cl2	8	10	0.1044
W0.5CSKcl3	7	9	0.2019
W0.5cl1fa15	7	9	0.0550
W0.5CSKcl3fa15	9	11	0.1220
W0.6FO	18	20	0.0604
W0.5MSK0.5	23	25	0.0590
W0.5CSKcl1fa30	6	8	0.0610
W0.5FOcl1	8	10	0.1541
W0.5cl3	8	10	0.0813
W0.5MSK1	9	11	0.3078
W0.5CSKcl2	7	9	0.0723
W0.5cl3fa30	7	9	0.1403
W0.5CSKcl2fa15	14	16	0.0583
W0.5FOcl3fa30	11	13	0.1259
W0.5cl2fa15	16	18	0.0535
W0.5FOcl2fa15	13	15	0.0981

ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในตัวอย่างคอนกรีต (ต่อ)

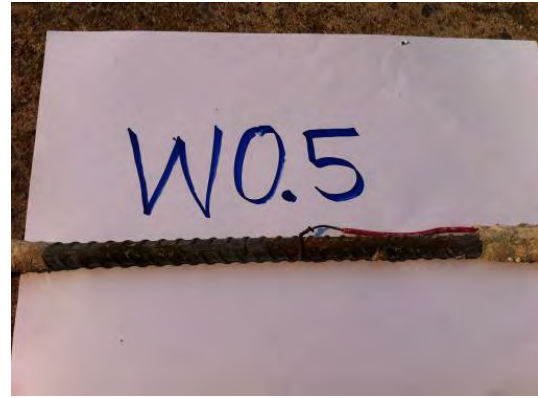
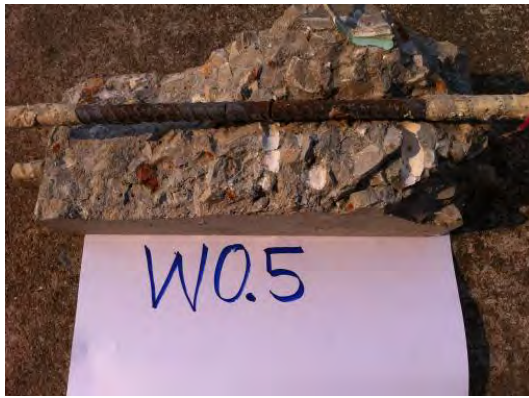
รหัสตัวอย่างคอนกรีต	สัปดาห์ที่เหล็กเสริม เริ่มเกิดสนิม	สัปดาห์ที่เจาะคอนกรีต	% Chloride โดย น้ำหนัก sample
W0.5FOcl2	12	14	0.1850
W0.5FOcl3	14	16	0.1227
W0.5CSKcl3fa30	13	15	0.1494
W0.5MG1fa15	15	17	0.1467
W0.5FOcl1fa30	9	11	0.0540
W0.5cl2fa30	14	16	0.0674
W0.5CSKcl1fa15	11	13	0.0849
W0.5CSK1	15	17	0.0803
W0.5CSKcl2fa30	13	15	0.0546
W0.5FOcl2fa30	10	12	0.0665
W0.5cl1fa30	18	20	0.0550
W0.5MG0.5fa30	23	25	0.0735
W0.5CSK1fa15	20	22	0.0748
W0.5MSK1fa30	26	28	0.0593
W0.5CSK0.5	21	23	0.0600
W0.5FOfa15	30	32	0.0737
W0.5MG1	29	31	0.0723
W0.5MSK1fa15	29	31	0.1072
W0.5MSK0.5fa15	30	32	0.0602
W0.5CSK0.5fa15	23	25	0.0724
W0.5MG0.5fa15	32	34	0.1168
W0.5cl3fa15	33	35	0.1178
W0.5MG0.5	35	37	0.0781

ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์วิกฤติในตัวอย่างคอนกรีต (ต่อ)

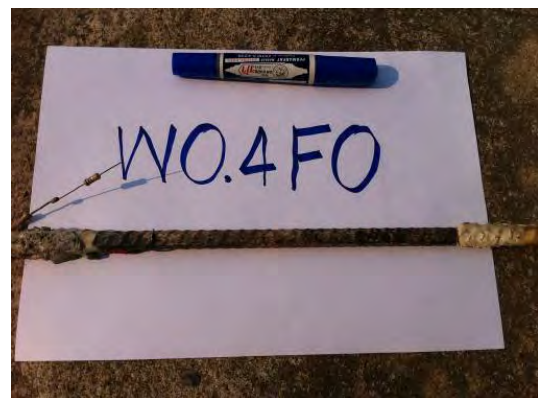
รหัสตัวอย่างคอนกรีต	สัปดาห์ที่เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิม	สัปดาห์ที่เจาะคอนกรีต	% Chloride โดยน้ำหนัก sample
W0.5FOfa30	37	38	0.0843
W0.5CSK0.5fa30	38	40	0.0906
W0.5MG1fa30	40	42	0.1134

จากการแสดงผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตดังตารางที่ 3.1 โดยวิธีไทเทรชันสามารถคำนวณออกมาเป็น %คลอไรด์ โดยน้ำหนักผงตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ โดยทุกตัวอย่างมี ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ มากพอที่จะทำให้เหล็กเสริมนั้นเกิดสนิมขึ้นได้ คือ ตั้งแต่ 0.05% โดยน้ำหนักตัวอย่างคอนกรีต ขึ้นไป ดังนั้นจากการไทเทรชันก็จะไปสอดคล้องกับผลการวัดอัตราการเกิดสนิม นั้นแสดงว่าเมื่อมีปริมาณคลอไรด์ ณ ตำแหน่งเหล็กเสริมมีปริมาณมากเกินไปปริมาณคลอไรด์วิกฤติ จะทำให้เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิมขึ้นได้

จากนั้นหลังจากทำการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในตัวอย่างคอนกรีต โดยวิธีไทเทรชันในห้องปฏิบัติการแล้วนั้น เมื่อทราบผลว่ามีปริมาณคลอไรด์เพียงพอที่จะทำให้เหล็กนั้นเกิดสนิมขึ้น เพื่อความแน่ชัดในการทดสอบ จึงทำลายตัวอย่างคอนกรีตเพื่อนำเหล็กเสริมออกมาดูว่ามีสนิมเกิดขึ้น ตามผลการทดสอบหรือไม่ และปรากฏว่าเมื่อดูเหล็กเสริมจากตัวอย่างคอนกรีตนั้น มีสนิมเกิดขึ้นจริงซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบการวัดอัตราการเกิดสนิม สำหรับตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 และใช้เหล็กเสริมธรรมดาซึ่งเป็นตัวอย่างที่ใช้อ้างอิงดังแสดงในรูปที่ 3.9 สำหรับตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.4 และใช้เหล็กเสริมที่ชุบโซเดียมฟอสเฟต ดังแสดงในรูปที่ 3.10 สำหรับตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 และใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทผสมเพิ่มปริมาณตามผู้ผลิตแนะนำ ดังแสดงในรูปที่ 3.11 สำหรับตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 และใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภททาผิวปริมาณตามผู้ผลิตแนะนำและมีการใช้ถั่วลอยแทนที่ซีเมนต์ที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ตามลำดับดังต่อไปนี้



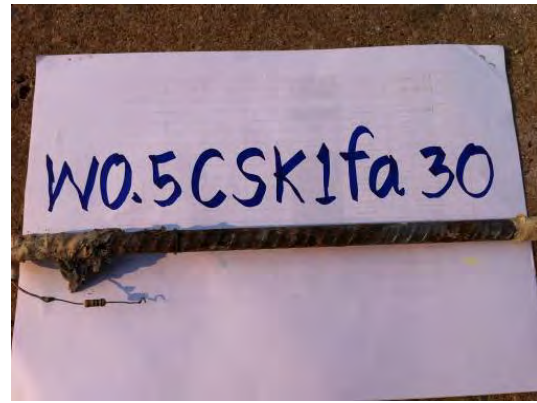
รูปที่ 3.9 ลักษณะเหล็กเสริมที่เกิดสนิมจากการทดสอบชนิดตัวอย่างที่ใช้อ้างอิง



รูปที่ 3.10 ลักษณะเหล็กเสริมที่เกิดสนิมจากการทดสอบชนิดที่ใช้เหล็กเคลือบฟอสเฟต



รูปที่ 3.11 ลักษณะเหล็กเสริมที่เกิดสนิมจากการทดสอบชนิดที่ใช้สารยับยั้งชนิดผสมเพิ่มชนิดที่ 1



รูปที่ 3.12 ลักษณะเหล็กเสริมที่เกิดสนิมจากการทดสอบชนิดใช้สารยับยั้งชนิดทาที่ผิว

บทที่ 4

สรุปผลการทดสอบ

4.1 สรุปผล

จากวัตถุประสงค์ของการศึกษาของงานวิจัย และขอบเขตของการศึกษา ภายใต้เงื่อนไขของการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

4.1.1 สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทผสมเพิ่มสามารถชะลอและลดอัตราการเกิดสนิมในสภาวะที่คลอไรด์จากภายนอกทั้งของสารยับยั้งจำพวกสารแคลเซียมไนไตรต์ และสารยับยั้งการเกิดสนิมจำพวกกลุ่มสารเอมีน (AMA)

4.1.2 สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภททาที่ผิวคอนกรีตควรจะใช้ร่วมกับโครงสร้างที่กำลังทำการซ่อมแซมน่าจะเหมาะสมกว่า ถ้าจะนำใช้กับโครงสร้างใหม่ควรระมัดระวังในการใช้งาน อาจเป็นองค์ประกอบที่จะทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมเร็วขึ้นได้ โดยประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับปริมาณคลอไรด์ ปริมาณการใช้งานของสารยับยั้งที่เหมาะสม และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

4.1.3 การใช้เหล็กเสริมธรรมดากับเหล็กเสริมที่ผ่านกระบวนการเคลือบโซเดียมฟอสเฟต สรุปว่าเหล็กเสริมที่ชุบโซเดียมฟอสเฟตมีแนวโน้มในการชะลอการเกิดสนิมได้ดีกว่าเหล็กธรรมดาในกรณีที่มีคลอไรด์เข้ามาจากภายนอก

4.1.4 ประเด็นที่ศึกษาประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิม โดยการใช้ถ้ำลอยแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 15 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทำให้สารยับยั้งการเกิดสนิมนั้นมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเกิดสนิมทั้งคลอไรด์ที่มาจากภายในและภายนอกลดลง แต่ขึ้นอยู่กับปริมาณที่ใช้งาน และปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต

4.2 สรุปผลการทดสอบของประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิม

จากการทดสอบประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมทั้งชนิดทาที่ผิวคอนกรีต และชนิดผสมเพิ่มในสัดส่วนผสมคอนกรีต และเปรียบเทียบระหว่างเหล็กเสริมแบบธรรมดา กับเหล็กเสริมที่เคลือบฟอสเฟต รวมทั้งการแทนที่ซีเมนต์ด้วยถ้ำลอย ได้ทำการสรุปผลมาดังตารางที่ 4.1 และ ตารางที่ 4.2 ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมในกรณีเหล็กเสริมยังไม่เกิดสนิม

ชนิดที่ใช้งาน	ปูนซีเมนต์ล้วน		เถ้าลอย ร้อยละ 15		เถ้าลอย ร้อยละ 30	
	HCP	Current	HCP	Current	HCP	Current
ผสมเพิ่ม (เอมายน์)	▲	▲	●	●	●	▲
ผสมเพิ่ม (แคลเซียมไนไตรต์)	●	●	●	●	●	▲
ทาที่ผิว	●	●	✕	✕	✕	▲
เหล็กเคลือบ ฟอสเฟต	●	●	●	●	●	●

ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมในกรณีเหล็กเสริมเกิดสนิมแล้ว

ชนิดที่ใช้งาน	คลอไรด์ (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ล้วน		เถ้าลอย ร้อยละ 15		เถ้าลอย ร้อยละ 30	
		HCP	Current	HCP	Current	HCP	Current
ทาที่ผิว	1	●	●	▲	✕	▲	▲
	2	●	●	✕	✕	▲	✕
	3	●	●	✕	✕	▲	✕
เหล็กเคลือบ ฟอสเฟต	1	✕	✕	●	●	●	●
	2	✕	✕	●	●	●	●
	3	✕	✕	●	●	●	●

∴ หมายถึง

- สัญลักษณ์ ● หมายถึง ประสิทธิภาพในการป้องกันสนิมดีขึ้น
 สัญลักษณ์ ▲ หมายถึง ประสิทธิภาพในการป้องกันสนิมใกล้เคียงกัน
 สัญลักษณ์ ✕ หมายถึง ประสิทธิภาพในการป้องกันสนิมแย่ง

จากตารางที่ 4.1 ในกรณีเหล็กเสริมยังไม่เกิดสนิมสามารถสรุปผลของสารยับยั้งชนิดผสมเพิ่มของกลุ่มสารเอมายน์ สามารถใช้กับตัวอย่างที่ใช้ซีเมนต์ล้วน และในตัวอย่างที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 15 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ได้มีประสิทธิภาพในการชะลอการเกิดสนิมได้ดี และมีผลทำให้อัตราการเกิดสนิมทั้งค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการเกิดสนิมมีอัตราการเกิดสนิมที่ใกล้เคียงกัน สำหรับสารผสมเพิ่มของกลุ่มสารแคลเซียมไนไตรต์มีประสิทธิภาพในการชะลอการเกิดสนิมดีขึ้นเมื่อใช้กับคอนกรีต

ซีเมนต์ล้วนและคอนกรีตที่ใช้แฉาลอยร้อยละ 15 และมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ใช้แฉาลอยร้อยละ 30 และมีผลทำให้อัตราการเกิดสนิมทั้งค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการเกิดสนิมมีอัตราการเกิดสนิมที่ใกล้เคียงกัน สำหรับสารยับยั้งชนิดทาที่ผิวให้ผลการยับยั้งการเกิดสนิมมีประสิทธิภาพลดลงกับการใช้ในตัวอย่างซีเมนต์ล้วน กับการใช้แฉาลอยร้อยละ 15 มีลักษณะเดียวกันเมื่อใช้กับตัวอย่างที่ใช้แฉาลอยร้อยละ 30 และมีผลทำให้อัตราการเกิดสนิมทั้งค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการเกิดสนิมมีอัตราการเกิดสนิมที่ไม่สูงมาก ส่วนกรณีศึกษาเหล็กเคลือบฟอสเฟตสามารถชะลอการเกิดสนิมได้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นเมื่อใช้แฉาลอยร้อยละ 15 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน แต่มีประสิทธิภาพที่แยกลงเมื่อใช้ในคอนกรีตตัวอย่างที่ใช้ซีเมนต์ล้วน และมีอัตราการเกิดสนิมใกล้เคียงกัน

จากตารางที่ 4.2 ในกรณีเหล็กเสริมเกิดสนิมแล้วโดยการให้คลอไรด์เริ่มต้นที่ร้อยละ 1, 2 และ ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยสารยับยั้งชนิดทาที่ผิวที่ให้คลอไรด์เริ่มต้นที่ร้อยละ 2 และ 3 มีประสิทธิภาพดีขึ้นและใกล้เคียงกับตัวอย่างซีเมนต์ล้วนและตัวอย่างที่ใช้แฉาลอยร้อยละ 30 แต่มีประสิทธิผลลดลงเมื่อใช้แฉาลอยร้อยละ 15 และมีค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ใกล้เคียงกันแต่มีกระแสการเกิดสนิมที่ลดลง สำหรับตัวอย่างที่ให้คลอไรด์เริ่มต้นที่ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีประสิทธิภาพในการชะลอการเกิดสนิมที่ดีขึ้นกับการใช้แฉาลอยร้อยละ 15 สำหรับการใช้งานเหล็กเคลือบฟอสเฟตมีประสิทธิภาพในการชะลอการเกิดสนิมที่ดีขึ้นสำหรับตัวอย่างที่ให้คลอไรด์เริ่มต้นที่ร้อยละ 2 และใช้แฉาลอยร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ถ้าใช้งานกับตัวอย่างที่ให้คลอไรด์เริ่มต้นที่ร้อยละ 1 และ 3 เมื่อใช้กับตัวอย่างอ้างอิง และใช้แฉาลอยร้อยละ 15 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทำให้มีประสิทธิภาพในการป้องกันการเกิดสนิมที่แยกลง และมีอัตราการเกิดสนิมทั้งค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และค่ากระแสการเกิดสนิมค่อนข้างสูงซึ่งไม่อาจจะไม่เป็นผลดีต่อการนำไปใช้งาน แต่อย่างไรก็ตามการใช้งานสารยับยั้งการเกิดสนิมควรศึกษาวิธีการใช้ และปริมาณในการใช้ ให้เหมาะสมกับประเภทของงาน

จากการสรุปผลการทดสอบทั้งค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และค่ากระแสการเกิดสนิมดังตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 สามารถสรุปได้ว่า ในกรณีที่เหล็กเสริมยังไม่เกิดสนิมทั้งสารยับยั้งชนิดผสมเพิ่มทั้ง 2 ชนิด ชนิดทาที่ผิว และการใช้เหล็กเคลือบฟอสเฟต สามารถช่วยให้ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และค่ากระแสการเกิดสนิมมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างที่ใช้อ้างอิง ซึ่งเป็นผลดี จะมีเพียงแต่การใช้สารยับยั้งชนิดทาที่ผิวที่ใช้ร่วมกับการแทนที่ซีเมนต์ด้วยแฉาลอยร้อยละ 30 ซึ่งมีค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่ติดลบมากกว่าตัวอย่างที่ใช้ซีเมนต์ล้วน ส่วนกรณีที่ให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้นจะมีเพียงแต่เหล็กเคลือบฟอสเฟตที่ใช้ในตัวอย่างที่ไม่มีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยแฉาลอย จะมีค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และค่ากระแสการเกิดสนิมที่ต่ำกว่าตัวอย่างที่ใช้เหล็กเคลือบฟอสเฟตและมีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยแฉาลอย สำหรับการใช้น้ำสารยับยั้งชนิดทาที่ผิวและมีการให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้นมีค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และค่ากระแสการเกิดสนิมที่ต่ำกว่าตัวอย่างที่ใช้อ้างอิงคือไม่มีการใช้น้ำสารยับยั้ง แต่ให้คลอไรด์เริ่มต้นเหมือนกัน ซึ่งเป็นผลดีเมื่อมีอัตราการเกิดสนิมที่ต่ำกว่า

4.3 ข้อเสนอแนะ

4.2.1 ควรศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมที่ใช้งานกับโครงสร้างที่ทำการซ่อมแซมควบคู่กับโครงสร้างใหม่ และทำการศึกษาในระยะเวลาที่ยาวขึ้น อาจจะทำให้ทราบผลชัดเจนมากยิ่งขึ้น

4.2.2 ควรมีการศึกษาประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทอื่น ที่นิยมใช้กันในประเทศไทยเพิ่มเติม

เอกสารอ้างอิง

- [1] มยผ.1507-51 มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย, กรมโยธาธิการและผังเมือง, กระทรวงมหาดไทย, 2551
- [2] M.Ormellesse. and M.Berra. "Corrosion inhibitors for chlorides induced corrosion in reinforced concrete structures ", 2005, pp 536-547
- [3] มยผ.1332-50 มาตรฐานงานคอนกรีตเมื่อพิจารณาความคงทนและอายุการใช้งาน, กรมโยธาธิการ และผังเมือง, กระทรวงมหาดไทย, 2550
- [4] คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, "ความคงทนของคอนกรีต", บริษัท จุดทอง จำกัด, กรุงเทพฯ, 2543, หน้า 40-48
- [5] Soloka. "Concrete in hot environments", Great Britain Alden Press, 1993
- [6] ทวีชัย สรรพวานิช, "Introduction to Chloride-Induced Corrosion of steel in concrete", 2547
- [7] ปริญญา จินดาประเสริฐ, "ถ้อยแถลงในงานคอนกรีต", สมาคมคอนกรีตไทย, กรุงเทพฯ, 2547
- [8] คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, "ข้อกำหนดมาตรฐานวัสดุและการก่อสร้างสำหรับโครงสร้างคอนกรีต, กรุงเทพฯ, 2540
- [9] บุรฉัตร จัตรวีระ, สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล, และสายัณห์ ทศนโกศล, "ความทนทานของคอนกรีตผสม ฝุ่นหิน", การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 5 ณ โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ ซิตี้ จอมเทียน, ชลบุรี, 2542
- [10] Bakker RFM. Initiation period,"Corrosion of steel in concrete", New York, 2006
- [11] R.Wongjeeraphat, "Effect of flyash on chloride ingress", Master Thesis, Kasetsart University, Thailand, 2002
- [12] Sancharoen, P., Tsai, S.H., W., Tangmitpracha, J., and Tangtermsirikul, S., 2009, APPLICATION OF HALF-CELL POTENTIAL MEASUREMENT TO INSPECT CORROSION OF REINFORCING STEEL, Proceedings of the 14th national conference in civil engineering of engineering institute of Thailand, Suranaree University of Technology, Thailand, pp.1837-1841.
- [13] C.M. Hansson, L. Mammoliti, & B.B. Hope, "CORROSION INHIBITORS IN CONCRETE-PART I: THE PRINCIPLES", Vol. 28, No. 12, pp. 1775–1781, 1998
- [14] C. Monticelli, A. Frignani, and G. Trabanelli, "A study on corrosion inhibitors for concrete application", pp 635-642, 2000
- [15] S.M. Trepanier, B.B. Hope, and C.M. Hansson, "Corrosion inhibitors in concrete Part III Effect on time to chloride-induced corrosion initiation and subsequent corrosion rates of steel in mortar", pp 713-718, 2001

Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

1. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ
-ไม่มี-
2. การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์
 - เชิงพาณิชย์ (มีการนำไปผลิต/ขาย/ก่อให้เกิดรายได้ หรือมีการนำไปประยุกต์ใช้โดยภาคธุรกิจ/บุคคลทั่วไป)
เป็นข้อมูลประกอบให้ทางตัวแทนผู้จำหน่ายสารยับยั้งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมนำไปแสดงต่อลูกค้า เพื่อประกอบการตัดสินใจเลือกใช้ผลิตภัณฑ์ดังกล่าว
 - เชิงนโยบาย (มีการกำหนดนโยบายอิงงานวิจัย/เกิดมาตรการใหม่/เปลี่ยนแปลงระเบียบข้อบังคับหรือวิธีทำงาน)
ข้อมูลเพื่อใช้เป็นรายละเอียดในการจัดทำมาตรฐานการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และคู่มือแนะนำต่างๆ ในอนาคต
 - เชิงสาธารณะ (มีเครือข่ายความร่วมมือ/สร้างกระแสความสนใจในวงกว้าง)
อบรมแก่ผู้สนใจ วิศวกร และหน่วยงานต่างๆ ถึงแนวทางในการป้องกัน และซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างถูกต้องเหมาะสม
 - เชิงวิชาการ (มีการพัฒนาการเรียนการสอน/สร้างนักวิจัยใหม่)
เนื้อหาการเรียนการสอนในรายวิชาของนักศึกษาชั้นปีที่ 4 ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
เป็นส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์ของนักศึกษาสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท 1 คน
3. อื่นๆ (เช่น หนังสือ การจดสิทธิบัตร)
 - โทมัส บุญหนุน, ปิติศานต์ กร้ามาตร, ภัควัฒน์ แสนเจริญ และ สมนึก ตั้งเต็มศิริกุล, ประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์, บทความนำเสนอในการประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติครั้งที่ 19, ขอนแก่น, ประเทศไทย, 2557.