

ประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมในการป้องกันการเกิดสนิม
ของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์

PERFORMANCE OF CORROSION INHIBITORS TO PREVENT
CORROSION OF REINFORCING STEEL
IN CONCRETE DUE TO CHLORIDE

โตมร บุญหนุน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมในการป้องกันการเกิดสนิม
ของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์



โตมร บุญหนุน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมในการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์
Performance of Corrosion Inhibitors to Prevent Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete due to chloride

ชื่อ - นามสกุล นายโตมร บุญหนุน

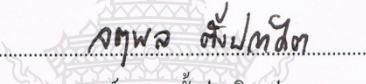
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

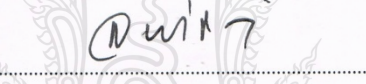
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิติสานต์ กร้ามาตร, ปร.ค.

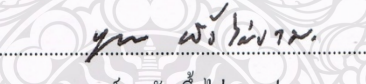
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์กัควัฒน์ แสนเจริญ, Ph.D.

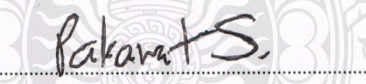
ปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์จตุพล ตั้งปกาศิต, ปร.ค.)


..... กรรมการ
(ศาสตราจารย์สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล, Ph.D.)


..... กรรมการ
(อาจารย์บุญชัย ผึ้งไผ่งาม, ปร.ค.)


..... กรรมการ
(อาจารย์กัควัฒน์ แสนเจริญ, Ph.D.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิติสานต์ กร้ามาตร, ปร.ค.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 27 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2557

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมในการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์
ชื่อ - นามสกุล	นายโตมร บุญหนุน
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิติสานต์ กร้ามาตร, ปร.ด.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์กัควัฒน์ แสนเจริญ, Ph.D.
ปีการศึกษา	2556

บทคัดย่อ

ความเสียหายที่พบบ่อยมากในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กคือการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในระยะเวลาที่รวดเร็ว จึงต้องมีการป้องกันและซ่อมแซมในส่วนที่เกิดขึ้น การป้องกันและซ่อมแซมนั้นมีหลายวิธี แต่ที่งานวิจัยนี้เน้นการใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิม ซึ่งจะมีทั้งชนิดที่ผสมเพิ่มและชนิดทาที่ผิวของคอนกรีต โดยใช้ปริมาณตามที่ผู้ผลิตแนะนำ และลดลงครึ่งหนึ่ง รวมทั้งการให้คลอไรด์เริ่มต้น ให้คลอไรด์ซึมผ่านด้วยความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และใช้เถ้าลอยแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และใช้เหล็กเสริมแบบธรรมดาและเคลือบฟอสเฟต แล้ววัดอัตราการเกิดสนิมโดยมาตรฐาน ASTM G109 วัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์โดยมาตรฐาน ASTM C876 และหาปริมาณคลอไรด์วิกฤติของตัวอย่างคอนกรีต

จากการทดสอบพบว่า สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทผสมเพิ่มมีประสิทธิภาพในการลดอัตราการเกิดสนิมในคอนกรีตที่มีปริมาณคลอไรด์ซึมจากภายนอก ปริมาณในการใช้ควรใช้ตามที่ผู้ผลิตแนะนำ ส่วนสารยับยั้งประเภททาที่ผิวคอนกรีตควรระวังในการใช้งานกับโครงสร้างใหม่สำหรับเหล็กเสริมชนิดเคลือบฟอสเฟตช่วยชะลอการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในกรณีมีคลอไรด์จากภายนอก ดังนั้นการป้องกันและการยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างนั้น ควรเลือกใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมให้เหมาะสมกับชนิดของโครงสร้างนั้นๆ

คำสำคัญ: การเกิดสนิมของเหล็กเสริม สารยับยั้งการเกิดสนิม คลอไรด์ คลอไรด์วิกฤติ

Thesis Title	Performance of Corrosion Inhibitors to Prevent Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete due to Chloride
Name - Surname	Mr. Tomorn Boonnun
Program	Civil Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Pitisan Krammart, Ph.D.
Thesis Co-advisor	Mr. Pakawat Sancharoen, Ph.D.
Academic Year	2013

ABSTRACT

The damage of reinforced concrete structure that mostly found is the corrosion of steel within shorter period. Therefore, the repair and protection is needed for deteriorated structure. There are various methods of repair and protection. In this study, the application of corrosion inhibitor was studied for reinforced concrete structure.

This research was conducted to study the effectiveness of corrosion inhibitors, which will be both added and the mixture applied to the surface of the concrete volume using the manufacturer's recommendations and reduce by half. Including the starting chloride, the chloride permeability with the concentration of 10 percent by weight of the cement and fly ash replaced 15 and 30 percent by weight of the binder and conventional reinforcing steel and phosphate coated. Measured by the standard ASTM G109 corrosion rate measured by the standard ASTM C876 half cell voltage and the amount of critical chloride concrete examples.

The experiment showed that the Mixed type corrosion inhibitor to be effective in reducing the rate of corrosion in concrete with chloride penetration from outside the amount you use should be used according to the manufacturer's recommendations. The inhibitor type paint on the concrete surface should be careful to use the new structure. Required for iron phosphate coated to retard corrosion of reinforcement in case of external chloride. Therefore to protect and prolong the lifetime of the structure. Rust inhibitors should be used to suit the type of structure.

Keywords: corrosion of steel, corrosion inhibitor, chloride, critical chloride

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาค้นคว้าวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณา ของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิติสานต์ กร้ามาตโร อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ภัควัฒน์ แสนเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต ดร.บุญชัย ผึ้งไผ่งาม กรรมการสอบ และ ศาสตราจารย์ ดร.สมนึก ตั้งเดิมสิริกุล ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษาแนะนำ และให้ ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพบุลย์ ศรีอรุ โนนทัย ที่ได้ให้ข้อมูลและคำแนะนำ เกี่ยวกับกระบวนการเคลือบเหล็กเสริมด้วยฟอสเฟต และขอขอบพระคุณศูนย์วิจัยเทคโนโลยี การก่อสร้าง และบำรุงรักษา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้สนับสนุนเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย รวมทั้งบริษัท ชิก้า ประเทศไทย จำกัด และบริษัท ดับบลิว อาร์ เกรซ ประเทศไทย จำกัด ที่ได้สนับสนุนผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการทดสอบ และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและประสิทธิ์ประสาทความรู้วิชาการ ต่างๆ ให้ตลอดระยะเวลาหลายปีที่ผ่านมา และมอบความดีทั้งหมดนี้ให้แก่ คุณพ่อ คุณแม่ ภรรยาและลูก พี่น้อง ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่เป็นแหล่งให้ข้อมูลความรู้ ตลอดช่วงเวลาของการศึกษา

โตมร บุญหนุน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(12)
บทที่ 1 บทนำ.....	13
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	13
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	14
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	14
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	14
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	15
2.1 พฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีต.....	15
2.2 ความคงทนของคอนกรีต.....	15
2.3 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต.....	17
2.4 แหล่งที่มาของคลอไรด์.....	18
2.5 การซึมผ่านของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต.....	18
2.6 สภาพคลอไรด์ที่มีอยู่ในคอนกรีต.....	20
2.7 กระบวนการเกิดสนิมเนื่องจากคลอไรด์.....	21
2.8 ปัจจัยที่มีผลต่อความต้านทานการกัดกร่อน เนื่องจากคลอไรด์ของคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	23
2.9 การป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์.....	25
2.10 สารยับยั้งการเกิดสนิม.....	30
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	36
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ.....	36
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	38
3.3 เตรียมวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ.....	39
3.4 ชุดตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ.....	43
3.5 ขั้นตอนการทดสอบ.....	49
บทที่ 4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	52
4.1 ผลการทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ และอัตราการเกิดสนิม.....	52
4.2 ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์โดยวิธีไตรเตรชันในห้องปฏิบัติการ.....	69
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบ.....	75
5.1 สรุปผล.....	75
5.2 สรุปผลการทดสอบของประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิม.....	75
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	78
รายการอ้างอิง.....	79
ภาคผนวก.....	81
ภาคผนวก ก ตารางบันทึกผลการทดลอง.....	82
ภาคผนวก ข ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	97
ประวัติผู้เขียน.....	126

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แหล่งที่มาของคลอไรด์	18
ตารางที่ 2.2 ปริมาณคลอไรด์ที่ยอมรับได้ในคอนกรีตสด.....	21
ตารางที่ 2.3 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่คอนกรีตต้องการ แบ่งตามลักษณะของคอนกรีต...	24
ตารางที่ 2.4 ระยะหุ้มเหล็กเสริมสำหรับโครงสร้างคอนกรีตทั่วไป (คอนกรีตหล่อในที่).....	24
ตารางที่ 3.1 ชุดตัวอย่างที่ใช้ทดสอบในชุดที่ 1.....	44
ตารางที่ 3.2 ชุดตัวอย่างที่ใช้ทดสอบในชุดตัวอย่างที่ 2 (ชนิดทาที่ผิวคอนกรีต).....	45
ตารางที่ 3.3 ชุดตัวอย่างที่ใช้ทดสอบในชุดตัวอย่างที่ 2 (ชนิดผสมในคอนกรีต).....	45
ตารางที่ 3.4 ชุดตัวอย่างที่ใช้ทดสอบในชุดตัวอย่างที่ 2 (ชนิดผสมในคอนกรีต).....	46
ตารางที่ 3.5 ชุดตัวอย่างที่ใช้ทดสอบในชุดตัวอย่างที่ 3 (ชนิดทาที่ผิวคอนกรีต).....	47
ตารางที่ 3.6 ชุดตัวอย่างที่ใช้ทดสอบในชุดตัวอย่างที่ 4.....	48
ตารางที่ 3.7 ข้อกำหนดในการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่วัดได้จากเครื่อง Half-Cell Potential....	50
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์วิกฤติในตัวอย่างคอนกรีต.....	69
ตารางที่ 5.1 ประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมในกรณีเหล็กเสริมยังไม่เกิดสนิม.....	76
ตารางที่ 5.2 ประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมในกรณีเหล็กเสริมเกิดสนิมแล้ว.....	76

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 กระบวนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต.....	17
รูปที่ 2.2 กระบวนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเลหรือน้ำกร่อย.....	22
รูปที่ 2.3 การเกิดปฏิกิริยาเคมีของการกัดกร่อนของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์.....	22
รูปที่ 2.4 สารผสมเพิ่มความตึบน้ำ เช่น สารปอซโซลาน หรือ ซิลิกาฟูม.....	25
รูปที่ 2.5 สารผสมเพิ่มที่ขยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ทำให้เกิดสนิม.....	26
รูปที่ 2.6 การเคลือบผิวเหล็กเสริมด้วยสังกะสี.....	26
รูปที่ 2.7 การใช้เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel).....	27
รูปที่ 2.8 การติดตั้ง Sacrificial Anode ไว้กับเหล็กเสริม.....	28
รูปที่ 2.9 การติดตั้งไฟฟ้ากระแสตรงสู่เหล็กเสริม.....	28
รูปที่ 2.10 วิธีการป้องกันสนิมโดยวิธี Desalination และ Realkalization.....	29
รูปที่ 2.11 วิธีการป้องกันสนิมของเหล็กเสริมด้วยวิธี Electrodeposition.....	30
รูปที่ 2.12 ผลของการใช้งานสารขยับยั้งการเกิดสนิม.....	31
รูปที่ 2.13 การผสมสารขยับยั้งการเกิดสนิมลงในคอนกรีต.....	32
รูปที่ 2.14 การทำสารขยับยั้งการเกิดสนิมที่พื้นผิวคอนกรีต.....	33
รูปที่ 2.15 การทำสารขยับยั้งการเกิดสนิมที่ผิวของเหล็กเสริม.....	33
รูปที่ 3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1.....	36
รูปที่ 3.2 แก้วลอยที่เป็นออกไซด์ของซิลิกาและอะลูมินา.....	37
รูปที่ 3.3 เหล็กข้ออ้อยตามมาตรฐาน มอก.24-2538.....	37
รูปที่ 3.4 มวลรวมหยาบที่ใช้ในการผสมคอนกรีต.....	38
รูปที่ 3.5 มวลรวมละเอียดที่ใช้ในการผสมคอนกรีต.....	38
รูปที่ 3.6 ลักษณะของแบบหล่อคอนกรีตและเหล็กเสริมที่ใช้สำหรับทดสอบ.....	39
รูปที่ 3.7 ลักษณะเหล็กเสริมที่เคลือบฟอสเฟต.....	40
รูปที่ 3.8 การใส่เหล็กเสริมในแบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตที่เตรียมไว้.....	40
รูปที่ 3.9 ลักษณะของคอนกรีตที่เทเข้าแบบหล่อแล้วทำการตกแต่งผิวหน้าให้ดูเรียบร้อย.....	41
รูปที่ 3.10 การบ่มโดยใช้กระสอบที่ชุ่มด้วยน้ำคลุมที่ตัวอย่างคอนกรีต.....	41
รูปที่ 3.11 การเชื่อมต่อตัวต้านทานขนาด 100 โอห์ม เข้ากับสายไฟที่ต่อกับเหล็กเสริม.....	42

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.12 การบ่มตัวอย่างคอนกรีตโดยใช้กระสอบที่ชุ่มด้วยความชื้นคลุม.....	42
รูปที่ 3.13 การขังสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 10 %.....	43
รูปที่ 3.14 การวัดอัตราการเกิดสนิมโดยใช้โวลต์มิเตอร์วัดคร่อมตัวต้านทาน.....	49
รูปที่ 3.15 เครื่อง Half-Cell Potential ใช้ทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริม.....	50
รูปที่ 3.16 ผงคอนกรีตที่นำมาไตรเตรชันเพื่อหาปริมาณคลอไรด์.....	51
รูปที่ 3.17 การหาปริมาณคลอไรด์วิกฤติโดยวิธีไตรเตรชัน.....	51
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และอัตราการเกิดสนิม โดยมีอัตราส่วน น้ำต่อวัสดุประสานและชนิดเหล็กที่แตกต่างกัน.....	53
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และอัตราการเกิดสนิม โดยมีชนิดเหล็กและปริมาณเกลือแทนที่ซีเมนต์แตกต่างกัน.....	55
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และอัตราการเกิดสนิม โดยใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภททาที่ผิวในกลุ่มเอมาค (AMA) และปริมาณเกลือแทนที่ซีเมนต์แตกต่างกัน.....	57
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และอัตราการเกิดสนิม โดยใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทผสมเพิ่มชนิดที่ 1 และปริมาณเกลือแทนที่ซีเมนต์แตกต่างกัน.....	60
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และอัตราการเกิดสนิม โดยใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทผสมเพิ่มชนิดที่ 2 และปริมาณเกลือแทนที่ซีเมนต์แตกต่างกัน.....	62
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และอัตราการเกิดสนิม โดยใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมชนิดทาที่ผิว และชนิดเหล็กเสริมต่างกัน โดยให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้น.....	64
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และอัตราการเกิดสนิม โดยใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมชนิดทาที่ผิว มีชนิดเหล็กเสริมต่างกัน และแทนที่ซีเมนต์ด้วยเกลือร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยมีการให้คลอไรด์ในคอนกรีตตั้งแต่เริ่มต้น.....	66

สารบัญญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และอัตราการเกิดสนิม โดยใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมชนิดทาที่ผิว มีชนิดเหล็กเสริมต่างกัน และแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยมีการให้เกลือไรต์ในคอนกรีตตั้งแต่เริ่มต้น.....	69
รูปที่ 4.9 ลักษณะเหล็กเสริมที่เกิดสนิมจากการทดสอบชนิดตัวอย่างที่ใช้อ้างอิง.....	73
รูปที่ 4.10 ลักษณะเหล็กเสริมที่เกิดสนิมจากการทดสอบชนิดที่ใช้เหล็กเคลือบฟอสเฟต.....	73
รูปที่ 4.11 ลักษณะเหล็กเสริมที่เกิดสนิมจากการทดสอบ ชนิดที่ใช้สารยับยั้งชนิดผสมเพิ่มชนิดที่ 1.....	73
รูปที่ 4.12 ลักษณะเหล็กเสริมที่เกิดสนิมจากการทดสอบชนิดใช้สารยับยั้งชนิดทาที่ผิว.....	74



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

กก./ตร.ม.	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
กก./ลบ.ม.	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
ซม. ² /ปี	ตารางเซนติเมตรต่อหนึ่งปี
ม.	เมตร
มม.	มิลลิเมตร
มอก.	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
ASTM	American Society for Testing and Material
CaCl ₂	แคลเซียมคลอไรด์
C-A-H	แคลเซียม อลูมินา ไฮดรอกไซด์
C ₃ A	ไตรแคลเซียม ซิลิเกต
C ₄ AF	เตตระแคลเซียม อลูมินา เฟอไรต์
Cl ⁻	คลอไรด์ อีออน
C _{lim}	ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ
C-S-H	แคลเซียม ซิลิเกต ไฮดรอกไซด์
erf	ฟังก์ชันคลาดเคลื่อน
FeCl ₂	เฟอริกคลอไรด์
Fe ²⁺	อูออนของเหล็ก
H ₂ O	น้ำ, ความชื้น
MgCl ₂	แมกนีเซียมคลอไรด์
mV	มิลลิโวลต์
NaCl	โซเดียมคลอไรด์
NaNO ₂	โซเดียมไนไตรต์
O ₂	ออกซิเจน
ppm.	part per million
R.O.	Reverse Osmosis (น้ำกรอง)
μA/cm. ²	ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร
w/b	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

การเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นปัญหาที่ต้องแก้ไขหรือปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้น รวมทั้งในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก นอกจากจะคำนึงถึงกำลังความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกแล้ว ยังควรคำนึงถึงความคงทนของโครงสร้างต่อสภาพแวดล้อมบริเวณใช้งานเพื่ออายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น ดังเห็นได้จากโครงสร้างต่างๆ ที่ต้องสัมผัสกับน้ำทะเลหรือน้ำกร่อยซึ่งจะมีคลอไรด์ผสมอยู่ จะมีผลกระทบโดยตรงต่อการเกิดสนิม สนิมที่เกิดขึ้นนอกจากจะทำให้หน้าตัดเหล็กเสริมลดลงแล้วปริมาณของสนิมที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดแรงดันภายในดันให้คอนกรีตเกิดความเสียหายในรูปแบบต่างๆ เช่น แตกร้าว หลุดร่อน ทั้งยังอาจเป็นสาเหตุให้โครงสร้างถึงขั้นวิบัติ ความรุนแรงของขบวนการดังกล่าวอาจใช้ระยะเวลาในการดำเนินการแตกต่างกัน ซึ่งอาจจะขึ้นกับคุณสมบัติของคอนกรีต ความเข้มข้นของคลอไรด์และสภาวะแวดล้อมที่มีความชื้นและแห้งสลับกัน

ความเสียหายที่มักพบในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก คือ การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในระยะเวลาที่รวดเร็ว ทำให้หน้าตัดเหล็กเดิมนั้นเพิ่มขึ้น ดันให้คอนกรีตแตกตัวออก ก่อให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้างและการเกิดสนิมนั้นจะลุกลามอย่างรวดเร็ว จึงต้องมีการป้องกันและซ่อมแซมในส่วนที่เกิดขึ้น อย่างถูกวิธีและให้ได้ผลดีที่สุด การซ่อมแซมโครงสร้างเก่าสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การสกัดส่วนที่เสียหายออกแล้วเทคอนกรีตใหม่เข้าไปแทนที่ หรือใช้วิธีการบวกรวมทางไฟฟ้าเคมีเข้าไปซ่อมแซมส่วนที่เสียหาย แต่ก็จะมีข้อเสียก็คือ อาจะยุ่งยากและค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง หรืออาจซ่อมแซมได้ไม่ทั่วถึง ซึ่งในทางปฏิบัติควรพิจารณาให้ดี

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นเกี่ยวกับการเกิดปัญหาและการซ่อมแซมโครงสร้างส่วนที่เสียหายจากการกัดกร่อน โดยคลอไรด์ ซึ่งจะมีอีกวิธีหนึ่งที่จะทำการทดสอบ คือ การใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมจะเป็นสารที่ผสมเพิ่มลงในคอนกรีตและทาที่ผิวคอนกรีต ซึ่งผลิตภัณฑ์ดังกล่าวจะมีอยู่หลายชนิด ในแต่ละชนิดจะมีสารประกอบที่แตกต่างกันออกไป จะนำมาทดสอบดูว่าสารยับยั้งการเกิดสนิมแบบไหนที่สามารถใช้งานได้ดีและก่อให้เกิดผลประโยชน์สูงสุด และสามารถนำไปพัฒนาได้อย่างต่อเนื่อง

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

วัตถุประสงค์หลักของการศึกษาและทดสอบ ประกอบด้วยหัวข้อต่างๆดังนี้

1.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมที่มีความแตกต่างกันในเรื่องของแหล่งที่มาของคลอไรด์, ชนิด, ประเภท, ปริมาณ และวิธีการใช้งานของสารยับยั้งการเกิดสนิม

1.2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม ในการยับยั้งการเกิดสนิมในระยะยาว

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาเกี่ยวกับการใช้สารยับยั้งการเกิดสนิม ทั้งชนิดที่ผสมและชนิดทาที่ผิวคอนกรีต โดยจะคำนึงถึงชนิดของสารยับยั้งในแต่ละประเภท, ปริมาณที่ใช้ตามผู้ผลิตแนะนำ และครั้งหนึ่งที่ผู้ผลิตแนะนำ สัดส่วนปริมาณคลอไรด์ที่ผสมลงในคอนกรีต โดยจะใช้ที่ร้อยละ 1, 2 และร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

1.3.2 วัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ โดยมาตรฐาน ASTM C876-91 สำหรับทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

1.3.3 วัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ระหว่างขั้วแอโนด (ขั้วลบ) และแคโทด (ขั้วบวก) โดยมาตรฐาน ASTM G109-99 สำหรับวัดอัตราการเกิดสนิม

1.3.4 ตรวจสอบปริมาณคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีต โดยการเก็บตัวอย่างผงฝุ่นที่ได้จากการเจาะคอนกรีต มาวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์วิกฤติโดยวิธีไตเตรชันในห้องปฏิบัติการ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

จากแนวทางป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยการใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมทั้งชนิดที่ผสมในคอนกรีตและชนิดทาที่ผิวคอนกรีต เนื่องจากสารยับยั้งหลายชนิด ที่นำมาทดสอบหาแนวทางป้องกันและยับยั้งการเกิดสนิม เพื่อที่จะได้คอนกรีตที่มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองนั้นจะนำไปวิเคราะห์และสรุปหาว่าสารยับยั้งชนิดไหนที่สามารถนำมาใช้งานที่ได้ผลดีที่สุด และนำไปเป็นทางเลือกหนึ่งกับการใช้งาน โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในปัจจุบัน

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

2.1 พฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีต

พฤติกรรมความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ แบ่งไปตามลักษณะความเสียหายที่พบเห็นได้บ่อยในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก อาทิเช่น จุดบกพร่องจากการก่อสร้าง (Construction Faults), รอยร้าว (Cracking), การสลายตัวของคอนกรีต (Disintegration), การบิดเบี้ยวหรือเคลื่อนตัวของโครงสร้าง (Distortion and Movement), การสูญเสียผิวคอนกรีตเนื่องจากการกัดเซาะ (Erosion), การวิบัติของวัสดุอุดรอยต่อ (Joint Sealant Failure), การรั่วซึมของน้ำ (Seepage), การหลุดร่อนของคอนกรีต (Spalling) และการเกิดรอยร้าวขนานกับผิวเหล็กเสริมในคอนกรีต (Delamination) [1] และปัจจุบันในการก่อสร้างต้องการคอนกรีตที่มีคุณภาพที่สูงขึ้น ก็คือคอนกรีตที่มีคุณสมบัติต่างๆเหมาะสมและตรงตามลักษณะการใช้งานในประเภทนั้นๆ คุณสมบัติของคอนกรีตที่ต้องการ โดยทั่วไป คือ ในสภาพเหลวหรือคอนกรีตสด ต้องมีความสามารถเทได้ (Workability), ไม่มีการแยกตัว (Segregation), ใช้พลังงานในการทำงานน้อย ส่วนคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว คือ ต้องมีกำลัง (Strength) สูงพอ, ต้องมีความทึบน้ำ (Impermeability), หดตัวน้อย และปราศจากรอยแตกร้าวภายใน ไม่มีโพรงหรือช่องว่างจากการเท ดังนั้นจึงควรทำความเข้าใจเกี่ยวกับคุณสมบัติและพฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีต เพื่อที่จะนำไปใช้งานให้เหมาะสมซึ่งจะทำให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

2.2 ความคงทนของคอนกรีต

ความคงทนของคอนกรีตเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างยิ่ง ที่ควรคำนึงถึงต่อการนำไปใช้งานให้เกิดประโยชน์อันสูงสุด ความคงทนเป็นความสามารถของคอนกรีตในการต้านทานการเสื่อมสภาพ คุณสมบัติในด้านความคงทนนั้นจะประกอบไปด้วย ความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม ทนต่อการกัดกร่อนโดยสารเคมีต่างๆ ทนทานต่อแรงกระแทก หรือการกระทำต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นทั้งทางเคมี และทางกลตลอดอายุการใช้งาน ดังนั้นในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กควรที่จะคำนึงถึงด้านความคงทนด้วย เพื่อที่จะยืดอายุในการใช้งานให้ยาวนานขึ้น และป้องกันไม่ให้เกิดการสิ้นเปลืองงบประมาณในการซ่อมบำรุงและแก้ไขปัญหาโดยเปล่าประโยชน์

สาเหตุที่สำคัญที่สุดในการเสื่อมสภาพทางด้านความทนทานในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กคือการกัดกร่อน ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายเป็นอย่างมาก เป็นผลมาจากการเกิดสนิมเหล็กในโครงสร้างก่อนเวลาอันควร ในด้านการบำรุงรักษาและการซ่อมแซมโครงสร้างในส่วนที่เสียหาย เพื่อความปลอดภัยจึงต้องมีการตรวจสอบประสิทธิภาพและประเมินผลของการเกิดสนิมด้วย [2]

คุณลักษณะด้านความคงทนของคอนกรีตสำหรับการใช้งานในระยะยาวขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมที่คอนกรีตจะต้องเผชิญ คอนกรีตจะต้องถูกออกแบบให้มีคุณภาพสูง มีการซึมผ่านของสารที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีตหรือเหล็กเสริมต่ำ และมีระยะหุ้มเหล็กเสริมที่เพียงพอ ในการเผชิญกับสภาพแวดล้อมชนิดและระดับต่างๆ เพื่อให้คอนกรีตมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพในสภาพแวดล้อมของการใช้งานและสามารถป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ [2] โดยพิจารณาเกี่ยวกับหัวข้อดังต่อไปนี้

2.2.1 การหัดตัวแบบพลาสติก

2.2.2 การหัดตัวแบบแห้ง

2.2.3 การเป็นสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากการเกิดคาร์บอนขึ้น

2.2.4 การเป็นสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์

2.2.5 ปฏิกริยาระหว่างด่างกับมวลรวม

2.2.6 การสึกกร่อน

2.2.7 การเผชิญกับซัลเฟต

2.2.8 การเผชิญกับสารเคมีอื่นๆ

2.2.9 การแข็งตัวและหลอมละลายของน้ำในคอนกรีต

2.2.10 การเสื่อมสภาพโดยกระบวนการทางชีววิทยา

สาเหตุที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่กระทบต่อทางด้านความคงทนของคอนกรีตโดยตรง ซึ่งจะทำให้คอนกรีตมีอายุการใช้งานที่สั้นลงอย่างรวดเร็ว นั่นก็คือการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ซึ่งโดยปกติแล้วเหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตจะถูกปกป้องไม่ให้เกิดสนิมด้วยความเป็นด่างที่สูง ความเป็นด่างในคอนกรีตมักอยู่ในช่วง 12.5-13.5 จะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ผสมและส่วนผสมของคอนกรีต แต่กระบวนการที่จะทำให้เหล็กเสริมนั้นเกิดสนิมได้อย่างสมบูรณ์นั้นจะมีองค์ประกอบอย่างไรบ้าง ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

2.3 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

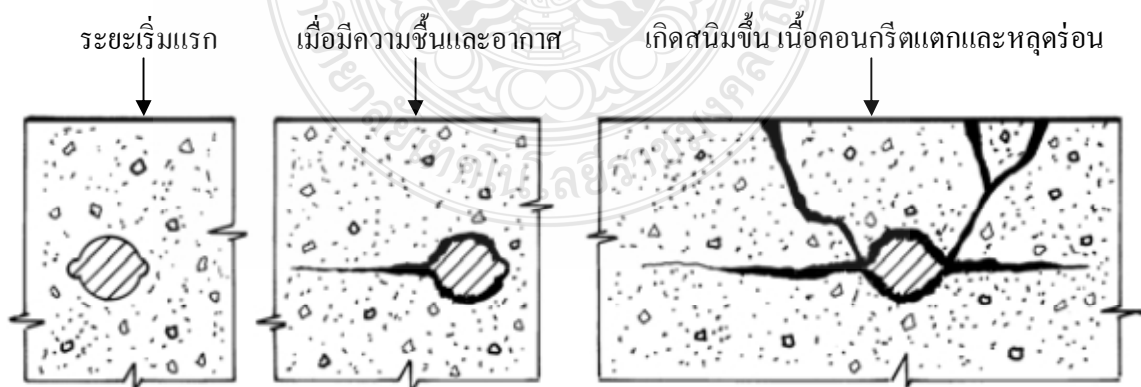
โอกาสที่เหล็กเสริมจะเกิดสนิมได้ก็ต้องประกอบด้วยเงื่อนไขทั้ง 3 ประการดังต่อไปนี้

2.3.1 Passive Film ที่เคลือบผิวเหล็กเสริมถูกทำลาย เนื่องจากการเกิดกระบวนการเกิดคาร์บอนขึ้น ซึ่งจะทำให้ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลง หรือปริมาณคลอไรด์ที่ผิวเหล็กมากเกินไปกว่าปริมาณคลอไรด์วิกฤติ

2.3.2 มีออกซิเจน (O_2) มากพอในการทำปฏิกิริยาในการเกิดสนิม โดยออกซิเจนมักจะแพร่เข้าสู่คอนกรีตบริเวณเหล็กเสริม ผ่านทางโพรงอากาศในคอนกรีตที่ไม่อิมมัลด้วยน้ำหรือแพร่ผ่านอากาศในช่องว่างที่มีอยู่ ส่วนโพรงอากาศที่มีการอิมมัลด้วยน้ำอยู่ อากาศหรือออกซิเจนจะแพร่ผ่านเข้าไปได้ยากมาก ดังจะเห็นได้จากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่จมอยู่ในน้ำตลอดเวลาจะไม่เกิดสนิมขึ้นในเหล็กเสริม แต่จะไปเกิดสนิมขึ้นอย่างรุนแรงกับโครงสร้างที่ต้องสัมผัสกับอากาศอยู่ตลอดเวลา

2.3.3 มีความชื้น (H_2O) เพียงพอที่จะทำให้ไอออนของเหล็ก (Fe^{2+}) เข้าสู่สถานะสารละลาย และทำปฏิกิริยากับอากาศในการเกิดสนิม โดยปกติจะมียูบริเวณคอนกรีตที่หุ้มรอบๆ เหล็กเสริม ดังนั้น โครงสร้างบริเวณเปียกสลับแห้ง (Splash Zone) มีโอกาสเกิดสนิมขึ้นรุนแรงกว่าบริเวณอื่น

กระบวนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่แสดงในรูปที่ 2.1 จากรูปจะเห็นว่า รูปทางด้านซ้ายมือเหล็กเสริมยังอยู่ในสภาพปกติโดยมีเนื้อคอนกรีตหุ้มอยู่รอบเหล็กเสริม ถัดมาคือเมื่อมีเงื่อนไขที่ทำให้เหล็กเกิดสนิมขึ้นได้ นั่นก็คือมีความชื้นและอากาศในปริมาณที่เพียงพอ และชั้นฟิล์มที่ป้องกันการเกิดสนิมถูกทำลาย ทำให้พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมลดลง แต่สนิมที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นแทนที่ผิวเหล็กเสริม จึงทำให้เนื้อคอนกรีตนั้นแตกออก และก่อให้เกิดรอยร้าว ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาในภายหลัง



รูปที่ 2.1 กระบวนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต [3]

2.4 แหล่งที่มาของคลอไรด์

คลอไรด์อาจมีอยู่ในคอนกรีตเองตั้งแต่ช่วงที่ผสมคอนกรีต เช่น ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต หรือที่ปนเปื้อนมากับหินและทราย รวมถึงมีแหล่งที่มาจากน้ำยาผสมคอนกรีตบางประเภท เช่น แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) ที่พบอยู่ในสารเร่งการก่อตัว แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อความคงทนของคอนกรีตนั้น ส่วนมากจะมาจากสภาพแวดล้อมภายนอกคอนกรีตในช่วงของการใช้งาน เช่น จากน้ำทะเลหรือน้ำกร่อย จากดิน หรือจากเกลือที่ใช้ในการช่วยละลายน้ำแข็ง (De-Icing Salt) ในประเทศที่มีอากาศหนาว แต่คลอไรด์ที่รุนแรงต่อโครงสร้างนั้นจะมาจากน้ำทะเล เพราะปริมาณของคลอไรด์น้ำทะเลมีประมาณ 90% สารประกอบต่างๆ ในน้ำทะเลประกอบด้วย เกลือของคลอไรด์ในรูปของสารประกอบโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ประมาณ 27,000 ppm. แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2) ประมาณ 3,200 ppm. และแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) ประมาณ 500 ppm. แต่ยกเว้น โครงสร้างที่จมอยู่ในน้ำทะเลอยู่ตลอดเวลาจะไม่สามารถเกิดสนิมขึ้นได้ เนื่องจากไม่มีปริมาณออกซิเจนที่เพียงพอที่จะไปทำปฏิกิริยากับความชื้น เพราะไม่สามารถซึมผ่านเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้ [4] ดังนั้นเราสามารถสรุปถึงแหล่งที่มาของคลอไรด์ที่มีอยู่ทั่วไปโดยที่สามารถทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตนั้นเกิดสนิมขึ้นได้ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แหล่งที่มาของคลอไรด์

คลอไรด์ที่มาจากภายในคอนกรีต	คลอไรด์ที่มาจากภายนอกคอนกรีต
-น้ำที่ใช้ผสมในคอนกรีต -วัสดุที่ใช้ผสมคอนกรีต ได้แก่ หินและทราย -น้ำยาที่ใช้เพิ่มผสมคอนกรีต เช่น น้ำยาเร่งหรือหน่วงการก่อตัว น้ำยากันซึม เป็นต้น	-จากน้ำทะเลหรือน้ำกร่อย โดยเฉพาะโครงสร้างที่อยู่ติดกับทะเล -มาจากช่วงเวลาที่ใช้งานเป็นส่วนมาก เช่น จากเกลือที่ใช้ละลายน้ำแข็งในประเทศที่มีอากาศหนาว

2.5 การซึมผ่านของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต

การซึมผ่านของคลอไรด์ไอออนจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อ มีน้ำอยู่ในระบบโพรงที่อยู่หนึ่งในคอนกรีตที่ค่อนข้างแห้ง น้ำจะเป็นตัวพาคลอไรด์ไอออนเข้าไปในคอนกรีต และเมื่อคอนกรีตอึดตัวด้วยน้ำ น้ำจะเป็นตัวกลางให้คลอไรด์ไอออนผ่านเข้าไปในคอนกรีต สำหรับคอนกรีตที่อยู่ในสภาพเปียกสลับแห้งจะเกิดกลไกทั้งสองกรณี ซึ่งอัตราการซึมผ่านของคลอไรด์ไอออนจะมีค่าเพิ่มขึ้น [5]

การซึมผ่านของคลอไรด์ไอออน ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของคอนกรีตในหลายๆด้าน เช่น ความพรุนของเนื้อคอนกรีต ชนิดของปูนซีเมนต์ สภาพของการบ่ม สภาพของอุณหภูมิทั้งในขณะผสม เท และบ่ม ความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์โดยรอบ เป็นต้น ซึ่งหากคลอไรด์ไอออนมีปริมาณที่เพียงพอแล้ว จะทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดสนิมขึ้นได้ [5]

คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ กล่าวไว้ว่า โดยทั่วไปแล้วรูปแบบการซึมผ่านของคลอไรด์ไอออนนั้นสามารถแบ่งออกได้ใน 4 ลักษณะดังนี้

2.5.1 โดยการแพร่ (Diffusion) เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างระหว่างปริมาณของความเข้มข้นคลอไรด์ในคอนกรีต

2.5.2 โดยการเคลื่อนย้าย (Migration) เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างทางศักย์ไฟฟ้า หรือปริมาณของไอออนในคอนกรีต

2.5.3 โดยการพา (Convection) เกิดขึ้นเนื่องจากผลของการเกิดวัฏจักรเปียกสลับแห้งในคอนกรีต ซึ่งนำไปสู่ขบวนการเกิด Capillary Suction นั่นเอง

2.5.4 โดยการซึมผ่าน (Permeability) เกิดขึ้นเนื่องจากผลของความแตกต่างทางด้าน Hydraulic Pressure ในคอนกรีต

โดยจากมาตรฐานได้มีแนะนำสมการของการคาดการณ์ การซึมผ่านของคลอไรด์ไอออนเข้าสู่เนื้อของคอนกรีตเนื่องจากการแพร่ [6] ได้ดังสมการที่ 2.1

$$C_d = (C_s - C_0) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1c}{2\sqrt{D_a t}} \right) \right] + C_0 \quad (2.1)$$

เมื่อ

C_d = ปริมาณเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่สะสมในคอนกรีตบริเวณผิวเหล็กเสริม (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน) คำนวณได้จากสมการที่ 2.1

c = ระยะหุ้มเหล็กเสริม (มม.)

C_0 = ปริมาณคลอไรด์เริ่มต้นในคอนกรีต (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

C_s = ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

t = อายุการใช้งานที่ตลอดการบำรุงรักษาของโครงสร้างคอนกรีต (ปี)

D_a = สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต (ซม.²/ปี)

erf = ฟังก์ชันคลาดเคลื่อน

คลอไรด์สามารถซึมเข้าสู่คอนกรีตได้โดยสภาพแวดล้อมต่างๆ และเมื่อปริมาณคลอไรด์ ณ ตำแหน่งเหล็กเสริมมีปริมาณมากเกินกว่าปริมาณคลอไรด์วิกฤติ จะทำให้เริ่มเกิดสนิมขึ้นที่เหล็กเสริม ดังนั้นเพื่อให้คอนกรีตมีความคงทนต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะต้องถูกออกแบบให้ปริมาณคลอไรด์ ณ ตำแหน่งเหล็กเสริมที่อยู่ใกล้ผิวคอนกรีตที่สุด มีค่าไม่เกินค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤติที่จะทำให้เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิมได้ ในช่วงระยะเวลาอายุการใช้งานที่ปลอดการบำรุงรักษา (Maintenance Free Service Life) จึงมีข้อกำหนดของค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤติขึ้น ดังสมการที่ 2.2

$$C_d \leq C_{lim} \quad (2.2)$$

โดยที่

C_{lim} = ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ หมายถึง ปริมาณคลอไรด์ที่จะทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเริ่มเกิดสนิมได้ [7] (ตามมาตรฐานอยู่ที่ร้อยละ 0.4 ของน้ำหนักวัสดุประสาน)

2.6 สถานะคลอไรด์ที่มีอยู่ในคอนกรีต

เมื่อคลอไรด์ซึมผ่านเข้าไปสู่เนื้อคอนกรีต สามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.6.1 Bound Chloride หรือ Fixed Chloride คือ คลอไรด์ในบางส่วนที่ถูกจับยึดอยู่ในผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ และที่เกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนไปในรูปของ Calcium Chloro-Aluminate Hydrate (Friedel's salt) หรือถูกดูดซับด้วยผิวของ Gel Pores ซึ่งคลอไรด์ในส่วนนี้จะไม่มีผลต่อกระบวนการเกิดสนิม คลอไรด์ถูกจับยึดได้โดยกลไกดังต่อไปนี้

2.6.1.1 การจับยึดทางเคมี (Chemical Binding) โดยคลอไรด์บางส่วนจะถูกจับยึดโดยผลผลิตของปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ เช่น ผลผลิตของ C_3A และ C_4AF

2.6.1.2 การจับยึดทางกายภาพ (Physical Binding) มาจากผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ของปูนซีเมนต์ โดยถูกจับยึดได้บนพื้นผิว เช่น C-S-H, C-A-H

2.6.2 Free Chloride คือ คลอไรด์ที่ละลายอยู่ในน้ำในโพรงของคอนกรีต (Pore Solution) คลอไรด์ในส่วนนี้สามารถแพร่เข้าไปยังคอนกรีต ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ต่ำกว่า และเป็นส่วนที่ทำให้ชั้นฟิล์มที่ป้องกันผิวเหล็กเสริมถูกทำลาย ถ้าหากสามารถจับยึดคลอไรด์ในส่วนนี้ได้เป็นจำนวนมาก ก็จะสามารถช่วยยืดระยะเวลาของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมออกไปได้ [7]

ขณะอนุกรมการคอนกรีตและวัสดุ ระบุการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในสภาวะละลายน้ำ หรือละลายกรด คลอไรด์ที่อยู่ในสารผสมเพิ่มจะเป็นคลอไรด์ที่ละลายน้ำ ในขณะที่คลอไรด์ที่พบในมวลรวมอาจเป็นคลอไรด์ที่ละลายในกรด คลอไรด์ที่ละลายในน้ำเป็นชนิดที่ทำความเสียหายกับชิ้นส่วนโครงสร้างได้มากกว่า เนื่องจากสามารถละลายมาจากเนื้อคอนกรีตได้มาก และได้ระบุปริมาณการปนเปื้อนของคลอไรด์ในคอนกรีตสด ควรมีปริมาณไม่เกินค่าที่จะแสดงในตารางที่ 2.2 [8]

ตารางที่ 2.2 ปริมาณคลอไรด์ที่ยอมรับได้ในคอนกรีตสด

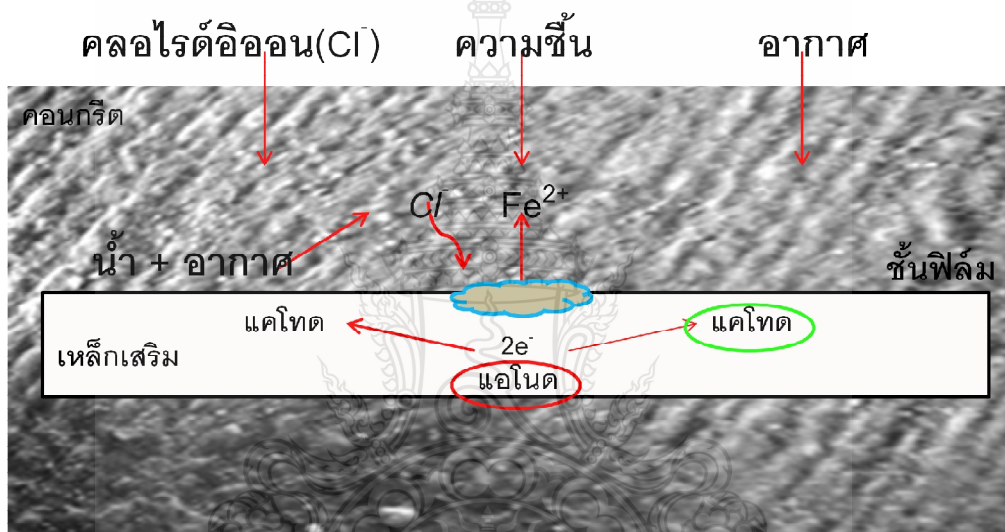
ลักษณะงานก่อสร้าง	ปริมาณคลอไรด์ที่ละลายน้ำที่ยอมรับได้ในคอนกรีตสด (ร้อยละของวัสดุประสาน)
คอนกรีตอัดแรง	0.06
คอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสกับคลอไรด์ในขณะใช้งาน เช่น กำแพงกันคลื่น	0.15
คอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแห้งหรือมีการป้องกันความชื้นในขณะใช้งาน	1.00
งานก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอื่นๆ	0.30

2.7 กระบวนการของการเกิดสนิมเนื่องจากคลอไรด์

โดยปกติคอนกรีตจะมีสภาพความเป็นด่างสูง คือ มีค่า pH ระหว่าง 12.5-13.5 ทำให้เกิดชั้นฟิล์มของออกไซด์ (Protective Passivity Layer) บางๆเคลือบอยู่ที่ผิวเหล็กเสริม เรียกว่า ฟิล์มออกไซด์ของเหล็ก ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$; Gamma Ferric Oxide) แต่เมื่อคลอไรด์ไอออนสามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตจนถึงผิวของเหล็กเสริมได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และ 2.3 โดยชั้นของฟิล์มออกไซด์ดังกล่าวจะถูกทำลาย จนกระทั่งเมื่อความหนาของชั้นฟิล์มดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าระดับวิกฤติ เหล็กเสริมในบริเวณนั้นก็จะเกิดสนิมได้ ซึ่งเรียกว่า Depassivation และในขณะเดียวกันหากบริเวณดังกล่าวมีออกซิเจนและความชื้นในปริมาณที่พอเหมาะ กระบวนการทางไฟฟ้า-เคมีก็จะเกิดขึ้น [9]



รูปที่ 2.2 กระบวนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเลหรือน้ำกร่อย [9]



รูปที่ 2.3 การเกิดปฏิกิริยาเคมีของการกัดกร่อนของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์

บริเวณที่ Passive Film ถูกทำลายจะมีศักย์ทางไฟฟ้าเป็นขั้วลบ เรียกว่า “ปฏิกิริยาแอโนดิก (Anodic Reaction)” สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.3



ส่วนบริเวณที่ Passive Film ไม่ถูกทำลาย จะมีศักย์ทางไฟฟ้าเป็นขั้วบวก รับอิเล็กตรอนและทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจนเกิดเป็นไฮดรอกไซด์ไอออน เรียกว่า “ปฏิกิริยาคาโทดิก (Cathodic Reaction)” สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.4



และในขณะเดียวกัน Fe^{2+} ที่เกิดที่ขั้วลบส่วนหนึ่ง ทำปฏิกิริยากับน้ำออกซิเจน กลายเป็น “เฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ (Ferric Hydroxide)” ดังสมการ 2.5 และ 2.6



และเมื่อ Fe^{2+} ที่เกิดอีกส่วนหนึ่งที่ขั้วลบก็จะทำปฏิกิริยากับ Cl^- จะเกิดเป็น “เฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_2$)” และเมื่อสารประกอบดังกล่าวทำปฏิกิริยากับน้ำ ก็จะกลายเป็นสนิมเหล็ก ดังสมการ 2.7 และ 2.8



2.8 ปัจจัยที่มีผลต่อความต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ของคอนกรีตเสริมเหล็ก

2.8.1 ชนิดของปูนซีเมนต์และคุณภาพของคอนกรีต

คลอไรด์บางส่วนถูกจับยึดโดยผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน คลอไรด์จะเข้ามารวมกับสารผลิตภัณฑ์ของ C_3A เกือบทั้งหมดกลายเป็นเกลือหรือสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง ความสามารถในการกักเก็บปริมาณคลอไรด์ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะขึ้นอยู่กับปริมาณ C_3A ยิ่งถ้ามีในปริมาณมากก็จะยิ่งกักเก็บปริมาณคลอไรด์ได้มาก ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาที่มี C_3A สูงกว่าย่อมดีกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภททนซัลเฟต [9]

2.8.2 อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสาน (Water/Binder Ratio)

อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสาน และประเภทของปูนซีเมนต์ จะเป็นตัวบอกคุณภาพด้านความซึมผ่านได้ต่ำของคอนกรีต คุณภาพของคอนกรีตขึ้นอยู่กับทำให้คอนกรีตแน่น การบ่มคอนกรีต ความซึมผ่านได้ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานจะกำหนดมาเพื่อให้ได้กำลังอัดของคอนกรีตตามต้องการ และเพื่อให้คอนกรีตมีความคงทนต่อการเสื่อมสภาพและสามารถป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ จำเป็นต้องกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานให้ต่ำ โดยจะมีข้อกำหนดของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงสุดเป็นไปตามข้อกำหนดในตารางที่ 2.3 [9] ดังนี้

ตารางที่ 2.3 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่คอนกรีตต้องการ แบ่งตามลักษณะของคอนกรีต

ลักษณะของคอนกรีต	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงสุด
คอนกรีตที่ต้องการความทึบน้ำ	0.50
คอนกรีตในสภาวะที่เสี่ยงต่อการเกิดสนิมหรือการเสื่อมสภาพของคอนกรีตในระดับปานกลาง	0.50
คอนกรีตในสภาวะที่เสี่ยงต่อการเกิดสนิมหรือการเสื่อมสภาพของคอนกรีตในระดับรุนแรง	0.45

2.8.3 ระยะเวลาหุ้มเหล็กเสริม (Covering)

ระยะเวลาของเหล็กเสริมมีอิทธิพลต่อแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริมสูง โดยในการออกแบบคอนกรีตเพื่อให้คอนกรีตมีความคงทนต่อการเสื่อมสภาพและสามารถป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะต้องมีระยะเวลาหุ้มเหล็กเสริมไม่น้อยกว่าระยะเวลาหุ้มเหล็กเสริมน้อยสุด และค่า w/b และระยะเวลาหุ้มเป็นสองปัจจัยที่สำคัญยิ่งต่อการต้านทานการผุกร่อนของเหล็ก [10] โดยมีข้อกำหนดของระยะเวลาหุ้มของคอนกรีตต่ำสุดตามมาตรฐานสมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ ดังที่ได้แสดงในตารางที่ 2.4 ดังนี้

ตารางที่ 2.4 ระยะเวลาหุ้มเหล็กเสริมสำหรับโครงสร้างคอนกรีตทั่วไป (คอนกรีตหล่อในที่)

ลักษณะงานก่อสร้าง	ระยะเวลาหุ้มต่ำสุด (มิลลิเมตร)
คอนกรีตที่หล่อติดกับดิน	75
คอนกรีตที่สัมผัสดิน หรือถูกแดด ฝน	
- สำหรับเหล็กเสริมใหญ่กว่า $\varnothing 16$ มม.	50
- สำหรับเหล็กเสริมเล็กกว่า $\varnothing 16$ มม.	40
คอนกรีตที่ไม่สัมผัสดิน หรือแดด ฝน	
- สำหรับเหล็กเสริม $\varnothing 40$ มม. ขึ้นไป	40
- เหล็กเสริมหลัก เหล็กลูกตั้ง (ในคาน)	40
- เหล็กปลอกเดี่ยวยหรือปลอกเกลียว (ในเสา)	40

2.8.4 เถ้าลอย (Fly Ash)

เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย ซึ่งมีรูปร่างกลมทำให้มีความสามารถเทได้ของคอนกรีตได้ดี อีกทั้งยังสามารถลดการซึม (Bleeding) และแนวโน้มการแยกตัว (Segregation) ของคอนกรีตสด เนื่องจากค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย ต่ำกว่าของปูนซีเมนต์ และยังลดอัตราการผลิตปฏิกิริยาไฮเดรชันลงทำให้คอนกรีตลดการแตกร้าวลง นอกจากนี้เถ้าลอยยังช่วยเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุมากกว่า 28 วันและเพิ่มความทนทาน (Durability) ของคอนกรีต จากปฏิกิริยาปอซโซลานิก

2.8.5 สารยับยั้งการเกิดสนิม

ได้มีผู้นำเสนอสารผสมเพิ่ม เพื่อต่อต้านการถูกทำลายของ Passive Film จากคลอไรด์ ไม่ว่าจะเป็นการป้องกัน หรือการหน่วงให้เหล็กเสริมได้ผุกร่อนช้าลง มีสารผสมเพิ่ม 2-3 ประเภทที่มีการนำมาใช้ แต่ที่แพร่หลาย คือ ประเภทไนไตรท์ ได้แก่ แคลเซียมไนไตรท์ และโซเดียมไนไตรท์ เพราะไนไตรท์อาจขัดขวางการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ได้ [10]

2.9 การป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์

วิธีป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ แบ่งออกเป็น 2 แนวทางคือ

2.9.1 ปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตและเหล็กเสริม

ออกแบบและใช้คอนกรีตที่มีความชื้นน้ำต่ำมากๆ จะทำให้คลอไรด์แพร่เข้าไปในคอนกรีตได้ยาก ทำได้โดย การใช้ปริมาณน้ำในคอนกรีตน้อย การลดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ การใช้สารเพิ่มความทึบน้ำ เช่น สารปอซโซลานหรือซิลิกาฟูม ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 สารผสมเพิ่มความทึบน้ำ เช่น สารปอซโซลาน หรือ ซิลิกาฟูม

การใช้สารผสมเพิ่มบางชนิด ที่ช่วยยับยั้งการเกิดสนิม เช่น Calcium Nitrite หรือ Sodium Nitrite ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 สารผสมเพิ่มที่ยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ทำให้เกิดสนิม

การเคลือบผิวเหล็ก เพื่อป้องกันไม่ให้ผิวเหล็กสัมผัสกับน้ำและอากาศโดยตรง ทำได้หลายวิธี เช่น การเคลือบ Epoxy, การชุบด้วยโลหะ อาทิ สังกะสี ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การเคลือบผิวเหล็กเสริมด้วยสังกะสี

การใช้เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) ที่มีส่วนผสมที่ทำให้เกิดชั้นฟิล์มบางๆ ขึ้นบนผิวเหล็ก เช่น โครเมียม นิกเกิล ช่วยป้องกันไม่ให้เนื้อเหล็กสัมผัสกับบรรยากาศโดยตรง แต่มีข้อเสียคือราคาแพง ดังแสดงในรูปที่ 2.7



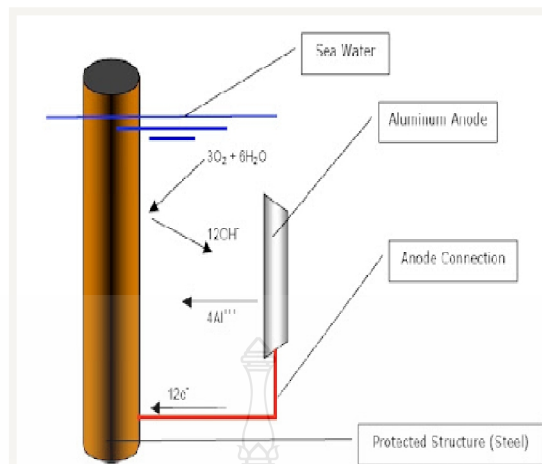
รูปที่ 2.7 การใช้เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel)

2.9.2 การป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

โดยอาศัยขบวนการทางไฟฟ้า มี 3 วิธี ได้แก่

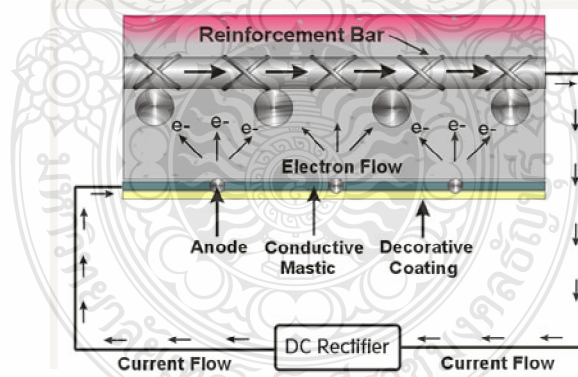
2.9.2.1 วิธี Cathodic Protection เป็นกระบวนการในการปรับความต่างศักย์ทางไฟฟ้า ทั้งสองขั้วให้เท่ากัน จากกลไกการเกิดสนิมในเหล็กเสริม จะเกิดขึ้นเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลหมุนเวียนขึ้น เพราะการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเป็นขบวนการทางไฟฟ้าเคมี ดังนั้นหากสามารถทำให้ทุกๆ จุดบนเหล็กเสริมมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากันได้ ก็จะไม่เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าขึ้น วิธีที่จะป้องกันไม่ให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าสามารถทำได้โดย การติดโลหะที่สามารถเกิดสนิมได้เร็วกว่าเหล็ก เช่น สังกะสี, อะลูมิเนียม หรือแมกนีเซียม นำไปติดไว้กับเหล็กเสริม เรียกโลหะนี้ว่า “Sacrificial Anode” ดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยโลหะชนิดนี้จะทำหน้าที่แทนเหล็กในขบวนการอะโนดิก ซึ่งเป็นโลหะที่สูญเสียอิเล็กตรอนแทนเหล็กเสริม และปฏิกิริยาอะโนดิกจะเปลี่ยนเป็นตามสมการที่ 2.9 ดังนี้





รูปที่ 2.8 การติดตั้ง Sacrificial Anode ไว้กับเหล็กเสริม

ส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้าสู่เหล็กเสริม ซึ่งเรียกว่า “Impressed Current Anode” โดยจะเข้าไปทำให้ทุกๆจุดบนเหล็กเสริมให้มีศักย์ไฟฟ้าที่เท่ากัน การไหลของกระแสไฟฟ้าภายในเหล็กเสริมก็ จะไม่เกิดขึ้น เพราะการเกิดสนิมของเหล็กเสริมจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลเวียนเกิดขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การติดตั้งไฟฟ้ากระแสตรงสู่เหล็กเสริม

2.9.2.2 วิธี Desalination และ Realkalization จะช่วยเพิ่มความเป็นด่างในคอนกรีต และสามารถลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตได้ โดยเฉพาะบริเวณรอบผิวของเหล็กเสริมที่มีประจุเป็นลบ วิธีนี้มีหลักการคือ เมื่อแท่งคอนกรีตที่มีไอออนของคลอไรด์ (Cl⁻) วางอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ไอออนของคลอไรด์ซึ่งมีประจุลบ จะเคลื่อนที่ไปสะสมในขั้วบวกถ้ามีแรงดันไฟฟ้าสูงพอ และบริเวณ

ที่เหล็กเสริมเป็นขั้วลบ อิเล็กตรอนจะรวมตัวกับน้ำ ทำให้เกิดเป็นก๊าซไฮโดรเจน และไฮดรอกซิลไอออน ซึ่งจะเพิ่มความแตกต่างให้กับคอนกรีต ดังสมการที่ 2.10

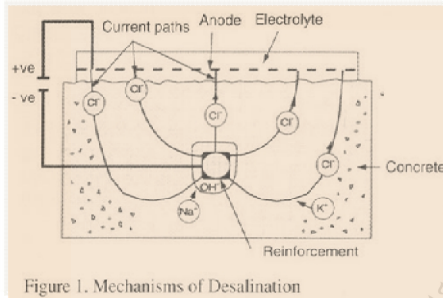
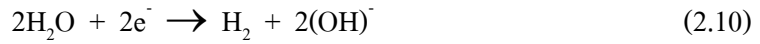


Figure 1. Mechanisms of Desalination

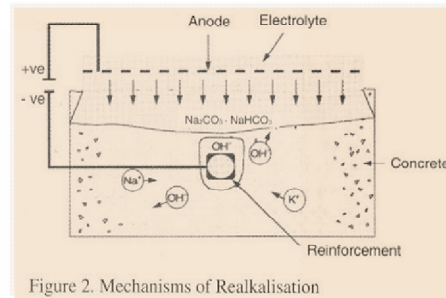
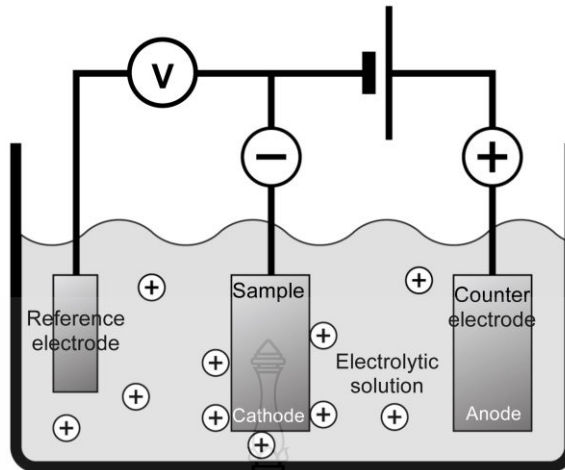


Figure 2. Mechanisms of Realkalisation

รูปที่ 2.10 วิธีการป้องกันสนิมโดยวิธี Desalination และ Realkalization [11]

จากรูปที่ 2.10 นั้นจะแสดงการติดตั้งอุปกรณ์แยกส่วนที่เป็นเกลือ คลอไรด์ถูกแยกออกจากคอนกรีตโดยการเคลื่อนที่ของไอออน เนื่องจากขั้วลบต่ออยู่กับเหล็กเสริมภายในคอนกรีต ไอออนของคลอไรด์โดยรอบผิวเหล็กเสริมถูกผลักออกจากคอนกรีต จึงทำให้ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตลดลง โดยเฉพาะที่รอบผิวเหล็กเสริมที่มีประจุเป็นลบ และจากปฏิกิริยาไฮดรอกซิลไอออน ซึ่งจะช่วยเพิ่มความแตกต่างให้กับคอนกรีต และลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตไปในขณะเดียวกัน

2.9.2.3 วิธี Electrodeposition เป็นกระบวนการผ่านกระแสไฟฟ้าตรงระหว่างเหล็กเสริม (ขั้วลบ) ในคอนกรีต กับขั้วไฟฟ้า (ขั้วบวก) ที่ติดตั้งอยู่ใต้ทะเล เนื่องจากคอนกรีตเป็นตัวนำไฟฟ้า ดังนั้นชั้นของแข็งจากปฏิกิริยาไฟฟ้า จึงสะสมอยู่บนผิวส่วนที่จมน้ำของโครงสร้างคอนกรีต ขบวนการนี้ยังช่วยซ่อมแซมรอยแตก เพราะการสะสมของแข็งจากปฏิกิริยาไฟฟ้า มีแนวโน้มที่จะสะสมอยู่ที่บริเวณรอยแตกกว้าง เนื่องจากความนำไฟฟ้าบริเวณรอยแตกกว้างจะสูงกว่าบริเวณอื่น แต่วิธีการนี้จะเหมาะสมสำหรับใช้งานกับโครงสร้างที่อยู่ใต้ทะเล [11] โดยในรูปที่ 2.11 จะเป็นตัวอย่างที่แสดงวิธีการป้องกันสนิมด้วยวิธี Electrodeposition



รูปที่ 2.11 วิธีการป้องกันสนิมของเหล็กเสริมด้วยวิธี Electrodeposition [11]

2.10 สารยับยั้งการเกิดสนิม (Corrosion Inhibitor)

ได้มีการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับสารยับยั้งการเกิดสนิมอย่างต่อเนื่อง รวมถึงในด้านการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กให้มีความคงทนตลอดอายุการใช้งาน โดยได้ทำการศึกษาในตัวของสารที่ใช้เคลือบที่ผิวเหล็กเสริม ในการป้องกันการซึมผ่านของความชื้น และออกซิเจนที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยาในการเกิดสนิมที่เหล็กเสริม และหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกลไกของสารยับยั้งการเกิดสนิม

2.10.1 สารยับยั้งการเกิดสนิม หรือ Corrosion Inhibitor เป็นสารที่ใช้งานในลักษณะผสมเพิ่มในคอนกรีต และแบบทาที่ผิวคอนกรีต ซึ่งจะช่วยป้องกันและยับยั้งกระบวนการในการเกิดสนิมได้ ซึ่งสามารถจำแนกประเภทของสารยับยั้งการเกิดสนิมได้ตามกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีออกเป็น 3 ประเภท คือ

2.10.1.1 สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทแอโนด โดยสามารถยับยั้งกระบวนการเกิดปฏิกิริยาแอโนดของกระบวนการไฟฟ้าเคมี หรือเข้าไปยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาของโลหะ สารเคมีในกลุ่มนี้จะมีองค์ประกอบของโครเมต และไนไตรท์

2.10.1.2 สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทแคโทด สามารถยับยั้งกระบวนการเกิดปฏิกิริยาแคโทดของกระบวนการไฟฟ้าเคมี ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับไอออนที่ละลายอยู่ในสารละลายแล้วก่อให้เกิดฟิล์มของเกลือซึ่งละลายน้ำได้น้อยลง สารเคมีในกลุ่มนี้ ได้แก่ สารที่มีองค์ประกอบของฟอสเฟต คาร์บอเนต ซิลิเกต และโพลีฟอสเฟต เป็นต้น

2.10.1.3 สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทผสมทั้งแอโนดและแคโทด เป็นสารเคมีที่รวมทั้งสองอย่างเข้าด้วยกัน โดยป้องกันการเกิดปฏิกิริยาของโลหะ และในขณะเดียวกันก็ไปทำปฏิกิริยากับไอออนในสารละลายที่ทำให้เกิดสนิม สารเคมีในกลุ่มนี้ ได้แก่ สารที่มีองค์ประกอบอยู่ในกลุ่มของเอมามีน

2.10.2 คุณสมบัติพิเศษต่างๆ ของสารยับยั้งการเกิดสนิม

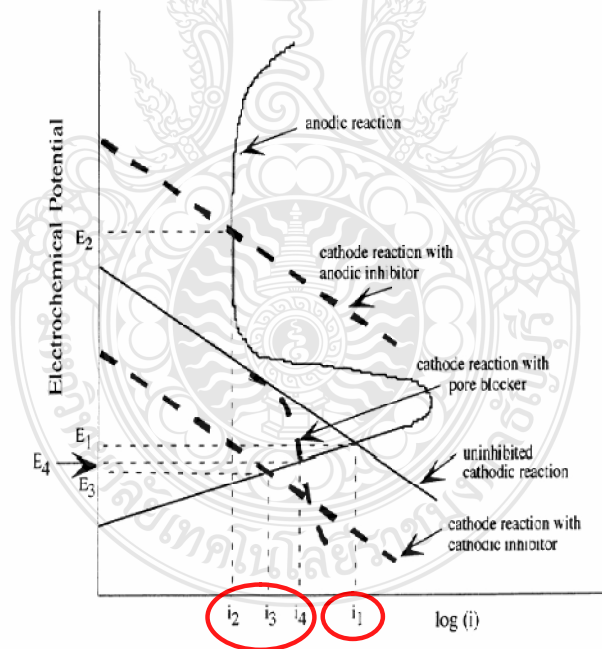
2.10.2.1 สร้าง Protective Film โดยการดูดซับ Inhibitors จะช่วยลดการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของโลหะ โดยการหน่วงปฏิกิริยา Anodic Dissolution ของโลหะหรือโดยปฏิกิริยา Cathodic Evolution ของไฮโดรเจน หรือทั้งสองกระบวนการ

2.10.2.2 เพิ่มความสามารถในการจับยึดคลอไรด์ของคอนกรีต

2.10.2.3 ยับยั้งการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนที่จะผ่านช่องว่างในคอนกรีต

2.10.2.4 ลดปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในสารละลายภายในช่องว่างของคอนกรีต

2.10.2.5 ยับยั้งการซึมผ่านของคลอไรด์ไอออน หรือก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์



รูปที่ 2.12 ผลของการใช้งานสารยับยั้งการเกิดสนิม [12]

จากรูปที่ 2.12 เป็นกราฟแสดงผลของสารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทแอโนดและแคโทดต่ออัตราการเกิดสนิม สามารถอธิบายได้ว่าจากกราฟบริเวณ i_1 จะมีอัตราในการเกิดสนิมสูงที่สุด

เนื่องจากไม่มีการใช้สารยับยั้งการเกิดสนิม ส่วนพื้นที่บริเวณ i_2, i_3 และ i_4 จะมีอัตราในการเกิดสนิมที่ลดลง เพราะมีการใช้สารยับยั้งการเกิดสนิม เนื่องจากผลของสารยับยั้งการเกิดสนิมต่อปฏิกิริยาแอโนดและแคโทด

2.10.3 การใช้งานสารยับยั้งการเกิดสนิม (Corrosion Inhibitor)

ในทศวรรษที่ผ่านมา มีการใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมกันมากที่สุด คือ Aminoalcohols (AMA), ไนไตรแคลเซียม (CN) และ โซเดียม Monoflu Orophosphates (MFP) และได้ศึกษากลไกขั้นพื้นฐานเกี่ยวกับการป้องกันการเกิดสนิม รวมถึงประสิทธิผลของการยับยั้งของการกัดกร่อนของ คลอไรด์ที่ปนเปื้อนในคอนกรีต มีการศึกษาในการป้องกันในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันออกไป อิทธิพลที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสด และคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วซึ่งเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตสด, ประสิทธิภาพเชิงกลและความทนทาน ทั้งที่มี และไม่มีสารยับยั้งการเกิดสนิม ซึ่งในการทดลองจะศึกษาประสิทธิภาพในระยะยาวของสารยับยั้งการเกิดสนิม ในการเริ่มต้นการกัดกร่อนของคลอไรด์ที่มีต่อเหล็กเสริม โดยฟิล์มที่ป้องกันเหล็กเสริมถูกทำลายลง ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลงเพราะการทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์แล้วก็ทำให้เหล็กเสริมนั้นเกิดสนิมขึ้นได้ [12] ดังนั้นในการใช้งานสารยับยั้งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต เราสามารถแบ่งตามลักษณะการใช้งานออกเป็น 3 ประเภท คือ

2.10.3.1 การใช้งานด้วยวิธีผสมลงในคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 2.13 สามารถลดอัตราการเกิดสนิมได้ แต่จะขึ้นอยู่กับปริมาณคลอไรด์ที่ปนเปื้อนในคอนกรีต ทั้งที่มาจากภายในและมาจากภายนอก จะช่วยป้องกันการเกิดสนิมสำหรับเหล็กเสริม โดยเฉพาะอิทธิพลของคลอไรด์ที่เหนี่ยวนำทำให้เหล็กเกิดสนิม



รูปที่ 2.13 การผสมสารยับยั้งการเกิดสนิมลงในคอนกรีต

2.10.3.2 การใช้งานด้วยวิธีทาที่ผิวคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันการเกิดสนิมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่เหนือดิน และได้ดินโดยการสร้าง Protective Film มีลักษณะเป็น โม่เลกุลที่คูดซับอยู่บนผิวหน้าของเหล็ก ซึ่งวิธีนี้เหมาะกับการใช้งานโครงสร้างเก่า หรือ โครงสร้างที่ได้รับการซ่อมแซม แล้วช่วยยืดอายุการใช้งานของคอนกรีตได้



รูปที่ 2.14 การทาสารยับยั้งการเกิดสนิมที่พื้นผิวคอนกรีต

2.10.3.3 การใช้งานด้วยวิธีการทาที่ผิวเหล็กเสริม สารยับยั้งแบบทาที่ผิวเหล็กจะคุณสมบัติที่สามารถป้องกันการซึมผ่านของน้ำและคลอไรด์ได้เป็นอย่างดี ให้การยึดเกาะที่ดีกับเหล็กเสริม มอเตอร์ หรือคอนกรีต เหมาะสำหรับงานซ่อมแซมคอนกรีตเสริมเหล็ก ลักษณะการใช้งาน คือ ใช้ทาเคลือบเพื่อป้องกันสนิมของเหล็กเสริม ใช้ทาป้องกันสนิมของเหล็กที่เกิดสนิมอยู่ก่อนแล้ว และยังสามารถใช้เป็นตัวยึดประสานระหว่างคอนกรีตเก่ากับคอนกรีตใหม่ เพื่อช่วยเพิ่มการยึดเกาะให้ดีขึ้น โดยในรูปที่ 2.15 จะแสดงการทาเคลือบที่ผิวเหล็กเสริมในลักษณะของ โครงสร้างที่ได้รับการซ่อมแซม



รูปที่ 2.15 การทาสารยับยั้งการเกิดสนิมที่ผิวของเหล็กเสริม

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สาเหตุที่สำคัญที่สุดในการเสื่อมสภาพทางด้านความทนทานในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กคือการกัดกร่อน ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายเป็นอย่างมาก เป็นผลมาจากการเกิดสนิมเหล็กในโครงสร้างก่อนเวลาอันควร ในด้านการบำรุงรักษาและการซ่อมแซมโครงสร้างในส่วนที่เสียหาย เพื่อความปลอดภัยจึงต้องมีการตรวจสอบประสิทธิภาพและประเมินผลของการเกิดสนิมด้วย ดังนั้นวิศวกรจึงควรต้องมีความรู้ และต้องทำการศึกษามาเป็นอย่างดีในการประเมินสภาพของโครงสร้างที่ใช้งานหรือต้องทำการซ่อมแซม อย่างถูกวิธีและเหมาะสมกับสภาพหน้างานปัจจุบันเป็นที่สุด จึงได้ทำการศึกษาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมจากคลอไรด์ จากทฤษฎีเพื่อเทคนิคในการติดตามผล ผลของการศึกษา คือ ส่วนประกอบของชั้นฟิล์มที่ปกป้องเหล็กเสริมและกลไกที่ทำให้เกิดความเสียหายจากคลอไรด์สามารถอธิบายได้โดยแบบจำลอง [13]

ในทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมกันมากที่สุด คือ Aminoalcohols (AMA), ไนไตรแคลเซียม (CN) และ โซเดียม Monoflu Orophosphates (MFP) และได้ศึกษากลไกขั้นพื้นฐานเกี่ยวกับการป้องกันการเกิดสนิม รวมถึงประสิทธิภาพของการยับยั้งของการกัดกร่อนของคลอไรด์ที่ปนเปื้อนในคอนกรีต มีการศึกษาในการป้องกันในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันออกไป อิทธิพลที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วซึ่งเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตสด ประสิทธิภาพเชิงกลและความทนทาน ทั้งที่มีและไม่มีสารยับยั้งการเกิดสนิม ซึ่งในการทดลองจะศึกษาประสิทธิภาพในระยะยาวของสารยับยั้งการเกิดสนิม ในการเริ่มต้นการกัดกร่อนของคลอไรด์ที่มีต่อเหล็กเสริม โดยฟิล์มที่ป้องกันเหล็กเสริมถูกทำลายลง ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลงเนื่องจากเกิดการทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แล้วก็ทำให้เหล็กเสริมนั้นเกิดสนิมขึ้นได้ [13]

นอกจากสารยับยั้งแบบแคลเซียมไนไตรด์ที่เคยใช้กันมา สำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สารยับยั้งหลายอย่างได้รับการทดสอบในการต่อต้านการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ไม่ว่าจะเป็นโซเดียม โมโนฟลูออโรฟอสเฟตที่ไปลดอัตราการเกิดสนิมทั้งที่เกิดจากการกัดกร่อนโดยคลอไรด์ และการเกิดคาร์บอนชั้น ทั้งที่ปะปนมาในสัดส่วนผสมคอนกรีตและที่ซึมลงบนพื้นผิวคอนกรีต และสารจำพวก เช่น อัลคาโนลาไมด์, ไดทาโนลาไมด์, เมทิลไดทาโนลาไมด์, ไดเมทิลทาโนลาไมด์ และไตรทาโนลาไมด์ ที่ได้นำมาทดสอบเป็นสารยับยั้งการเกิดสนิม ซึ่งสามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้เป็นอย่างดี [14]

ทางผู้วิจัยและวิศวกรได้มีการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับสารยับยั้งการเกิดสนิมมาอย่างต่อเนื่อง รวมถึงในด้านการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กให้มีความคงทนตลอดอายุการใช้งาน โดยได้ทำการศึกษาในตัวของสารที่ใช้เคลือบที่ผิวเหล็กเสริม ในการป้องกันการซึมผ่านของความชื้น และ

ออกซิเจนที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยาในการเกิดสนิมที่เหล็กเสริม และหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกลไกของสารยับยั้งการเกิดสนิม โดยสารยับยั้งทั้งหลายสามารถจัดหมวดหมู่ออกเป็นประเภทอะโนดิก ประเภทคาโทดิกและประเภทแบบผสม สารยับยั้งที่ใช้ทดสอบมีอยู่ 4 ชนิดแบ่งออกเป็น แคลเซียมไนไตรต์ 2 ชนิด คือ (CN1), (CN2) และส่วนประกอบที่มีสารอินทรีย์ผสมอยู่ 2 ชนิด คือ ORG(1), ORG(2) โดยสัดส่วนการผสมจะใช้อัตราส่วน w/c 0.5 และ 0.7 ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ TYPE 10 โดยในตัวอย่างคอนกรีตจะแบ่งออกเป็นแบบไม่ใส่สารยับยั้งกับใส่สารยับยั้งตามปริมาณที่ผู้ผลิตแนะนำ ตัวอย่างละ 3 ชั้น โดยขนาดตัวอย่างเป็นทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 51 มม. ความยาว 23 ซม. และใช้เหล็กขนาด 12 มม. 1 ท่อนต่อหนึ่งตัวอย่าง ยาวประมาณ 25 ซม. โดยทาสีเหล็กความยาว 15 ซม. ส่วนนี้จะจมอยู่ในคอนกรีต ส่วนที่เหลือให้เคลือบผิวเหล็กด้วยอีพ็อกซี นำตัวอย่างคอนกรีตที่ได้ไปทดสอบอัตราการเกิดสนิมโดยมาตรฐาน ASTM C876 เพื่อทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมต่อไป [15]

จากที่ผู้ค้นคว้าและวิศวกรได้ทำการศึกษาหาทางป้องกัน โครงสร้างที่เสื่อมสภาพลงอย่างรวดเร็วก่อนอายุการใช้งานจะสิ้นสุด จึงได้ทำการออกแบบ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กให้มีความคงทนตลอดอายุการใช้งานให้ได้อย่างน้อย 15-20 ปี โดยวิธีการใช้อีพ็อกซีเคลือบที่ผิวเหล็กเสริมก่อนทำการเทคอนกรีต ซึ่งจะช่วยป้องกันความชื้นภายในและคลอไรด์ที่ปนเปื้อน อีกทั้งองค์ประกอบต่างๆ ที่จะทำให้เหล็กเสริมนั้นเกิดสนิมขึ้นได้ ทำการทดสอบโดยหล่อตัวอย่างเป็นมอดาร์รูปทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 51 มิลลิเมตร ยาว 230 มิลลิเมตร และใช้เหล็กเส้นกลมขนาด 12 มิลลิเมตร เหล็กส่วนที่ฝังอยู่ในตัวอย่างอยู่ในสภาพปกติ ส่วนเหล็กที่พ้นจากตัวอย่างให้เคลือบอีพ็อกซี โดยใช้ อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.5 และ 0.7 มาเปรียบเทียบกัน เมื่อหล่อตัวอย่างเสร็จแล้วให้ทำการบ่มตามเวลาที่กำหนด และนำมาทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมต่อไป [15]

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การศึกษาประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ในหัวข้องานวิจัยนี้จะทำการศึกษาทดสอบเกี่ยวกับสารยับยั้งทั้งประเภทที่ผสมลงในคอนกรีต และประเภททาที่ผิวของคอนกรีต ในรูปแบบของการทดสอบนั้นจะมีตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่นำมาพิจารณาทดสอบ ประกอบด้วย ชนิดและปริมาณของวัสดุประสานที่ใช้ทดสอบ, อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b), แหล่งที่มาของคลอไรด์ทั้งที่ผสมลงในตัวอย่างคอนกรีตและการให้คลอไรด์ซึมผ่านจากผิวคอนกรีตและปริมาณการใช้งานของสารยับยั้งการเกิดสนิมในปริมาณที่ผู้ผลิตแนะนำและครั้งหนึ่งของผู้ผลิตแนะนำ จากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตไปทดสอบหาอัตราการเกิดสนิมตามมาตรฐาน ASTM G109 และวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ตามมาตรฐาน ASTM C876 สำหรับทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริม และนำผงจากตัวอย่างคอนกรีตที่ได้จากการเจาะ นำไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในห้องปฏิบัติการเพื่อเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์วิกฤติของตัวอย่างคอนกรีตทั้งที่มีการใช้สารยับยั้ง และไม่มีการใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมต่อไป ส่วนรายละเอียดและขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยมีดังต่อไปนี้

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน มอก. 80-2517 หรือ ASTM C150 ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

3.1.2 ถั่วลอ่ยของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ชั้นคุณภาพ 2x มาตรฐาน มอก. 2135 ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ถั่วลอ่ยที่เป็นออกไซด์ของซิลิกา และอะลูมินา

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

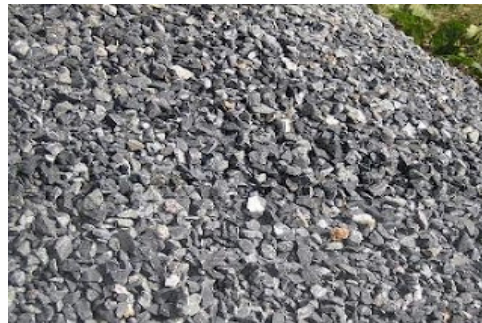
3.1.4 สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภททาเคลือบที่ผิวของคอนกรีตที่ใช้งานในงานวิชัยครั้งนี้ จะมีอยู่ชนิดเดียว สารยับยั้งที่มีส่วนผสมของสารอินทรีย์และอนินทรีย์ ช่วยเคลือบผิวเหล็กเสริม ป้องกันไม่ให้เกิดการกัดกร่อนได้ง่าย ปริมาณที่ผู้ผลิตแนะนำให้ใช้คือ 0.5 กก./ตร.ม.

3.1.5 เหล็กข้ออ้อย เส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ชั้นคุณภาพ SD 40 ตามมาตรฐาน มอก. 24-2538 ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เหล็กข้ออ้อยตามมาตรฐาน มอก. 24-2538

3.1.6 มวลรวมหยาบ ตามมาตรฐาน ASTM C33 ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 มวลรวมหยาบที่ใช้ในการผสมคอนกรีต

3.1.7 มวลรวมละเอียด ที่นำมาผสมคอนกรีต ได้แก่ ทรายแม่น้ำที่มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มม. หรือที่สามารถลอดผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 แต่ต้องมีขนาดไม่เล็กกว่า 0.07 มม. ตามมาตรฐาน ASTM C33 ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 มวลรวมละเอียดที่ใช้ในการผสมคอนกรีต

3.1.8 น้ำสำหรับผสมคอนกรีต ต้องเป็นน้ำสะอาด เช่น น้ำประปา

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

3.2.1 แบบสำหรับหล่อตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบ

3.2.2 เครื่องผสมคอนกรีต

3.2.3 เครื่องเขย่าคอนกรีต

3.2.4 โวลต์มิเตอร์ ความละเอียด 0.01 มิลลิโวลต์

- 3.2.5 เครื่อง Half-Cell Potential สำหรับทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริม
- 3.2.6 เครื่องไตรเตรทหาปริมาณคลอไรด์
- 3.2.7 ตัวต้านทานขนาด 100 ($\pm 5\%$) โอห์ม
- 3.2.8 สายไฟทองแดง THW เบอร์ 1
- 3.2.9 กระจกสำหรับใช้ปมคอนกรีต
- 3.2.10 สว่านสำหรับเจาะคอนกรีต

3.3 เตรียมวัสดุอุปกรณ์ และตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบ

3.3.1 เตรียมแบบที่ใช้หล่อตัวอย่างคอนกรีต ขนาด 10×20×25 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยทำความสะอาด ล้างแล้วเช็ดให้แห้ง แล้วใช้น้ำมันทาที่ผิวแบบหล่อคอนกรีตด้านใน เพื่อความสะดวกในการถอดแบบ

3.3.2 เตรียมเหล็กเสริมที่ใช้ทดสอบ โดยตัดเหล็กให้ความยาวพอดีเท่ากับจำนวนที่ต้องการใช้ และใช้แปรงลวดขัดคราบสนิมออกจนถึงเนื้อเหล็กจริง แล้วให้ทำความสะอาดผิวเหล็กด้วยสาร Acetone เพื่อล้างคราบน้ำมันและสารที่เคลือบผิวเหล็กออกให้หมด จากนั้นให้ใช้ฟ็อกซ์ทาที่ปลายเหล็กเสริมทั้งสองด้านหัว-ท้าย โดยให้เว้นช่วงเหล็กที่จะต้องใช้ทดสอบไว้ประมาณ 15 ซม. ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ลักษณะของแบบหล่อคอนกรีตและเหล็กเสริมที่ใช้สำหรับทดสอบ

3.3.3 เตรียมเหล็กเสริมอีกชนิดหนึ่ง ที่ใช้ทดสอบคือ การนำเหล็กเสริมไปเคลือบฟอสเฟต เพราะวิธีการเคลือบฟอสเฟตนี้เป็นวิธีการทำที่ไม่ยุ่งยาก และมีราคาถูกกว่าการนำเหล็กเสริมไปเคลือบผิวด้วยวิธีอื่น เช่น เหล็กชุบสังกะสี เหล็กชุบโครเมียม เป็นต้น วิธีการเคลือบฟอสเฟตทำได้โดย

ทำความสะอาดเหล็กเสริมด้วย 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 3.7



รูปที่ 3.7 ลักษณะเหล็กเสริมที่เคลือบฟอสเฟต

3.3.4 นำเหล็กเสริมไปติดตั้งในแบบหล่อคอนกรีต โดยให้บริเวณเหล็กที่ไม่ได้เคลือบผิว อยู่กึ่งกลางของชิ้นตัวอย่าง ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การใส่เหล็กเสริมในแบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตที่เตรียมไว้

3.3.5 เทคอนกรีตลงในแบบหล่อที่เตรียมไว้ โดยขณะทำการเทให้ทำการจี้คอนกรีตเพื่อให้เนื้อคอนกรีตนั้นแน่น จากนั้นตักแต่งผิวหน้าให้ดีแล้วปล่อยให้คอนกรีตแข็งตัวประมาณ 24 ชั่วโมง จึงสามารถถอดแบบได้ ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ลักษณะของคอนกรีตที่เทเข้าแบบหล่อแล้วทำการตกแต่งผิวหน้าให้ดูเรียบร้อย

3.3.6 เมื่อถอดแบบแล้วให้นำตัวอย่างคอนกรีตมาทำการบ่ม โดยใช้พลาสติก หรือใช้กระสอบเปียกคลุมตัวอย่างคอนกรีตเป็นเวลา 7 วัน ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การบ่มโดยใช้กระสอบที่ชุ่มด้วยน้ำคลุมที่ตัวอย่างคอนกรีต

3.3.7 นำชิ้นตัวอย่างมาบัดกรีตัวต้านทานไฟฟ้าเข้ากับเหล็กเสริม โดยจะมีเหล็กด้านบนซึ่งเป็นเหล็กที่จะทำการทดสอบ จำนวน 1 เส้น และเหล็กด้านล่างจำนวน 2 เส้น ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การเชื่อมต่อตัวต้านทานขนาด 100 โอห์ม เข้ากับสายไฟที่ต่อกับเหล็กเสริม

3.3.8 นำคอนกรีตที่บ่มได้อายุครบตามกำหนดแล้ว มาเร่งให้เกิดสนิม โดยให้ตัวอย่างอยู่ตามสภาพแวดล้อมภายในห้องปฏิบัติการ จะแบ่งวิธีการเร่งให้เหล็กเสริมเกิดสนิมออกเป็น 2 วิธี คือ

1) วิธีที่ 1 โดยการใช้กระสอบคลุม

สำหรับชิ้นตัวอย่างที่มีการผสมคลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้น ให้ใช้กระสอบที่ชุ่มไปด้วยความชื้นคลุมตัวอย่างไว้เพื่อป้องกันไม่ให้คลอไรด์ออกมาได้ และก่อนที่จะนำตัวอย่างไปทดสอบให้นำไปแช่น้ำจนเปียกก่อน ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การบ่มตัวอย่างคอนกรีตโดยใช้กระสอบที่ชุ่มด้วยความชื้นคลุม

2) วิธีที่ 2 โดยการขังสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 10 %

สำหรับขึ้นตัวอย่างที่ไม่ได้ผสมคลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้น โดยเริ่มจากการขังน้ำเปล่า บนขึ้นตัวอย่างด้านที่มีเหล็กเสริม 1 เส้น เป็นเวลา 1 สัปดาห์หลังจากบ่มเสร็จ หลังจากนั้นขังสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักจนกว่าจะทดสอบเสร็จ ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 การขังสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 10 %

3.4 ชุดตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ

สำหรับตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบนั้นจะใช้ตัวแปรที่มีผลต่อสารยับยั้งการเกิดสนิมมาสรุปและออกแบบ เพื่อนำมาพิจารณาทดสอบนี้ประกอบด้วย ชนิดของปูนซีเมนต์ที่ใช้ทดสอบ อัตราส่วน w/c, แหล่งที่มาของคลอไรด์ทั้งที่ผสมลงในตัวอย่างคอนกรีตและการให้คลอไรด์ซึมผ่านจากผิวคอนกรีตด้านบน, สัดส่วนผสมของสารยับยั้งการเกิดสนิม สามารถแบ่งชุดตัวอย่างได้ดังต่อไปนี้

3.4.1 ชุดตัวอย่างที่ 1 คอนกรีตธรรมดา

สำหรับชุดตัวอย่างนี้เป็นการผสมคอนกรีตตามสัดส่วนผสมที่ได้ออกแบบไว้ โดยไม่มีการใส่สารยับยั้งการเกิดสนิมทุกชนิด และไม่มีการผสมคลอไรด์ แต่จะมีการใช้เหล็กเสริมแบบธรรมดาและเหล็กเสริมที่นำไปเคลือบฟอสเฟตอยู่ด้วย โดยเร่งให้เกิดสนิมโดยให้คลอไรด์ซึมผ่านจากด้านบนอก สามารถสรุปขึ้นตัวอย่างของชุดตัวอย่างนี้ได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ชุดตัวอย่างที่ใช้ทดสอบในชุดที่ 1

รหัสตัวอย่าง	ชนิดเหล็ก	น้ำหนัก (กก./คอนกรีต 1 ลบ.ม.)				
		ซีเมนต์	เถ้าลอย	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

3.4.2 ชุดตัวอย่างที่ 2 ใช้สารยับยั้งการเกิดสนิม และเร่งให้เกิดสนิมโดยขังสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 10 % ทางด้านบนตัวอย่างคอนกรีต

สำหรับชุดตัวอย่างนี้ จะใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมทั้งชนิดทาที่ผิวคอนกรีตและผสมในสัดส่วนผสมคอนกรีต โดยจะแบ่งออกตามชนิดของสารยับยั้งที่นำมาใช้งาน แล้วนำมาเร่งให้เกิดสนิมโดยขังสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 10 % โดยน้ำหนัก สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.2, 3.3 และ 3.4 ดังนี้

ตารางที่ 3.2 ชุดตัวอย่างที่ใช้ทดสอบในชุดตัวอย่างที่ 2 (ชนิดทาที่ผิวคอนกรีต)

รหัสตัวอย่าง	ชนิดเหล็ก	ปริมาณ สารยับยั้ง (กก./ตร.ม.)	น้ำหนัก (กก./คอนกรีต 1 ลบ.ม.)				
			ซีเมนต์	เถ้าลอย	น้ำ	ทราย	หิน
W0.5CSK0.5	ธรรมดา	0.25	338	-	169	743	1,157
W0.5CSK1	ธรรมดา	0.5	338	-	169	743	1,157
W0.5CSK0.5fa15	ธรรมดา	0.25	283	50	166	743	1,157
W0.5CSK1fa15	ธรรมดา	0.5	283	50	166	743	1,157
W0.5CSK0.5fa30	ธรรมดา	0.25	230	98	164	743	1,157
W0.5CSK1fa30	ธรรมดา	0.5	230	98	164	743	1,157

ตารางที่ 3.3 ชุดตัวอย่างที่ใช้ทดสอบในชุดตัวอย่างที่ 2 (ชนิดผสมในคอนกรีต)

รหัสตัวอย่าง	ชนิดเหล็ก	ปริมาณ สารยับยั้ง (กก./ลบ.ม.)	น้ำหนัก (กก./คอนกรีต 1 ลบ.ม.)				
			ซีเมนต์	เถ้าลอย	น้ำ	ทราย	หิน
W0.5MSK0.5	ธรรมดา	6	338	-	169	743	1,157
W0.5MSK1	ธรรมดา	12	338	-	169	743	1,157
W0.5MSK0.5fa15	ธรรมดา	6	283	50	166	743	1,157
W0.5MSK1fa15	ธรรมดา	12	283	50	166	743	1,157
W0.5MSK0.5fa30	ธรรมดา	6	230	98	164	743	1,157
W0.5MSK1fa30	ธรรมดา	12	230	98	164	743	1,157

ตารางที่ 3.4 ชุดตัวอย่างที่ใช้ทดสอบในชุดตัวอย่างที่ 2 (ชนิดผสมในคอนกรีต)

รหัสตัวอย่าง	ชนิดเหล็ก	ปริมาณ สารยับยั้ง (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

3.4.3 ชุดตัวอย่างที่ 3 มีการใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมโดยเร่งให้เกิดสนิมโดยการผสมคลอไรด์ในคอนกรีตตั้งแต่เริ่มต้น

สำหรับตัวอย่างชุดนี้จะเป็นการผสมคลอไรด์ลงในคอนกรีตร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน แล้วใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมควบคู่ไปด้วย แต่จะทดสอบกับอัตราส่วน w/b เท่ากับ 0.5 เพียงอย่างเดียว และใช้ชนิดเหล็กแบบธรรมดา ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 แสดงชุดตัวอย่างที่ใช้ทดสอบในชุดตัวอย่างที่ 3 (ชนิดทาที่ผิวคอนกรีต)

รหัสตัวอย่าง	ปริมาณ สารยับยั้ง (กก./ตร.ม.)	น้ำหนัก (กก./คอนกรีต 1 ลบ.ม.)					
		โซเดียม คลอไรด์	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

3.4.4 ชุดตัวอย่างที่ 4 ไม่มีการใช้สารยับยั้งการเกิดสนิม โดยเร่งการเกิดสนิมด้วยการให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้น

สำหรับตัวอย่างในชุดนี้จะเป็นการใส่คลอไรด์ในสัดส่วนผสมของคอนกรีตร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.5 เพียงอย่างเดียว โดยไม่มีการใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมทุกประเภท และใช้เหล็กเสริมธรรมดา กับเหล็กเสริมที่ชุบฟอสเฟต เพื่อนำมาเปรียบเทียบกัน ดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ชุดตัวอย่างที่ใช้ทดสอบในชุดตัวอย่างที่ 4

รหัสตัวอย่าง	ชนิดเหล็ก	ปริมาณสารยับยั้ง	น้ำหนัก (กก./คอนกรีต 1 ลบ.ม.)					
			โซเดียมคลอไรด์	ซีเมนต์	เถ้าลอย	น้ำ	ทราย	หิน
W0.5c11	ธรรมดา	-	3.48	338	-	169	743	1,157
W0.5c12	ธรรมดา	-	6.96	338	-	169	743	1,157
W0.5c13	ธรรมดา	-	10.44	338	-	169	743	1,157
W0.5c11fa15	ธรรมดา	-	3.48	283	50	166	743	1,157
W0.5c12fa15	ธรรมดา	-	6.96	283	50	166	743	1,157
W0.5c13fa15	ธรรมดา	-	10.44	283	50	166	743	1,157
W0.5c11fa30	ธรรมดา	-	3.48	230	98	164	743	1,157
W0.5c12fa30	ธรรมดา	-	6.96	230	98	164	743	1,157
W0.5c13fa30	ธรรมดา	-	10.44	230	98	164	743	1,157
W0.5FOc11	ฟอสเฟต	-	3.48	338	-	169	743	1,157
W0.5FOc12	ฟอสเฟต	-	6.96	338	-	169	743	1,157
W0.5FOc13	ฟอสเฟต	-	10.44	338	-	169	743	1,157
W0.5FOc11fa15	ฟอสเฟต	-	3.48	283	50	166	743	1,157
W0.5FOc12fa15	ฟอสเฟต	-	6.96	283	50	166	743	1,157
W0.5FOc13fa15	ฟอสเฟต	-	10.44	283	50	166	743	1,157
W0.5FOc11fa30	ฟอสเฟต	-	3.48	230	98	164	743	1,157
W0.5FOc12fa30	ฟอสเฟต	-	6.96	230	98	164	743	1,157
W0.5FOc13fa30	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 = สารยับยั้งชนิดผสมเพิ่มของกลุ่มสารเอมาซีน

G = สารยับยั้งชนิดผสมเพิ่มของกลุ่มสารแคลเซียมไนไตรต์

FO = เหล็กเสริมที่นำไปชุบฟอสเฟต

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

fa = ร้อยละของเถ้าลอย โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน คือ ร้อยละ 15 และ 30

3.5 ขั้นตอนการทดสอบ

การทดสอบการเกิดสนิมในเหล็กเสริม สามารถทำการทดสอบได้ 2 วิธี ดังนี้

3.5.1 การวัดอัตราการเกิดสนิมตามมาตรฐาน ASTM G109-99

โดยนำตัวอย่างคอนกรีตที่ได้ทำการบ่มจนได้อายุครบตามที่ต้องการ มาวัดอัตราการเกิดสนิมโดยใช้โวลต์มิเตอร์ วัดค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแอโนดและแคโทด คร่อมตัวต้านทานขนาด 100 โอห์ม ที่ได้เชื่อมต่อไว้กับเหล็กเสริม โดยจะวัดทุกๆวันที่ 3 และ 7 ของแต่ละสัปดาห์ ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การวัดอัตราการเกิดสนิมโดยใช้โวลต์มิเตอร์วัดคร่อมตัวต้านทาน

โดยผลที่อ่านได้จากโวลต์มิเตอร์ เรานำมาคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในหน่วย $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ดังสมการที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ ดังนี้

$$I = \frac{(V/1000)}{R} \quad (3.1)$$

$$\text{Current density} = \frac{I}{A} \quad (3.2)$$

โดย I = ค่ากระแสไฟฟ้า (A)

V = ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)

R = ค่าความต้านทานไฟฟ้าในที่นี่เท่ากับ 100 โอห์ม

A = พื้นที่ผิวเหล็กเสริม (ตร.ม.)

Current Density = ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (พื้นที่ต่อตารางเมตร)

3.5.2 การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half Cell Potential) ตามมาตรฐาน ASTM C876

เพื่อทดสอบและประเมินโอกาสการเกิดสนิมในเหล็กเสริม โดยใช้เซลล์อ้างอิงชนิด $Cu-CuSO_4$ โดยการนำตัวอย่างคอนกรีตมาวัดหาอัตราการเกิดสนิม [12] จะวัดทุกๆ 2 เซนติเมตรตามความยาวของเหล็กเสริมด้านบน โดยจะทำการวัดทุกๆ สัปดาห์ ตามรูปที่ 3.15 โดยค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัดจะมีข้อกำหนดในตารางที่ 3.7



รูปที่ 3.15 เครื่อง Half-Cell Potential ใช้ทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

ตารางที่ 3.7 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

3.5.3 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์

เป็นการทดสอบแบบกึ่งทำลาย โดยเก็บตัวอย่างฝุ่นที่ได้จากการเจาะคอนกรีต จากด้านข้างของตัวอย่างคอนกรีตที่มีความลึกประมาณ 2-4 ซม. โดยจะเจาะนำไปจนถึงบริเวณที่ทำการขังน้ำแล้วนำผงปูนส่วนนั้นทิ้งไปก่อน แล้วเจาะต่อเข้าไปจนถึงบริเวณเหล็กเสริมให้นำผงปูนที่เจาะได้ในส่วนนี้นำไปทดสอบวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ โดยวิธีไตรเตรชันในห้องปฏิบัติการ ดังแสดงในรูปที่ 3.16 และ 3.17 ตามมาตรฐาน ASTM C1152



รูปที่ 3.16 ผงคอนกรีตที่นำมาไตรเตรชันเพื่อหาปริมาณคลอไรด์



รูปที่ 3.17 การหาปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีไตรเตรชัน

บทที่ 4

วิเคราะห์ผลการทดสอบ

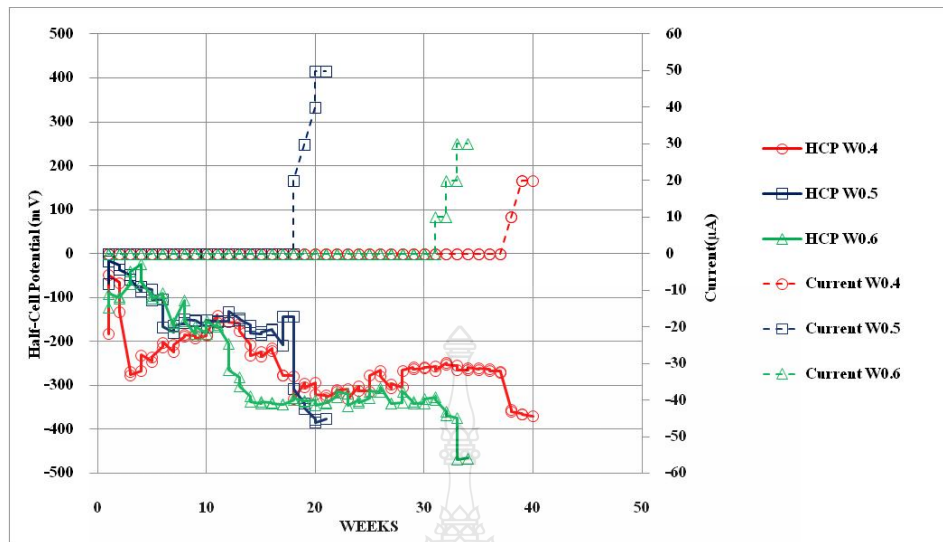
จากการทดสอบตัวอย่างคอนกรีต โดยทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ตามมาตรฐาน ASTM C876 วัดอัตราการเกิดสนิมโดยอ้างอิงวิธีการวัดค่าตามมาตรฐาน ASTM G109 และการวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากการนำผงคอนกรีตจากการเจาะตัวอย่างคอนกรีตมาไตรเตรชันในห้องปฏิบัติการ ทำการแปรผันความแตกต่างโดยปรับเปลี่ยนสัดส่วนผสมของคอนกรีต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

4.1 ผลการทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ และอัตราการเกิดสนิม

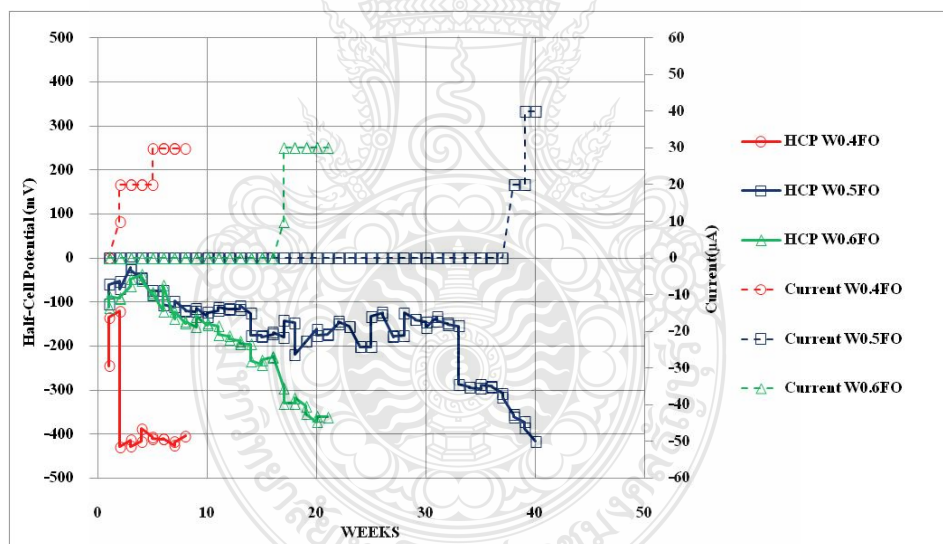
จากการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตด้วยการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เพื่อประเมินโอกาสในการเกิดสนิมและวัดอัตราการเกิดสนิม การไหลของกระแสไฟฟ้าภายในเหล็กเสริม ได้ผลการทดสอบดังนี้

4.1.1 ผลการทดสอบระหว่างเหล็กเสริมชนิดธรรมดา กับเหล็กเสริมชนิดชุบฟอสเฟต โดยไม่มีการใช้สารยับยั้งการเกิดสนิม

จากรูปที่ 4.1 (ก) และ (ข) จะเห็นว่าในช่วงแรกจะมีค่าศักย์น้อยกว่า -350 mV ซึ่งแสดงว่าเหล็กเสริมยังไม่มีเกิดการเกิดสนิมขึ้นแต่อย่างใด แต่เมื่อเวลาผ่านไปจะสังเกตเห็นว่าค่าตัวเลขนั้นเริ่มติดลบมากขึ้น โดยในบางตัวอย่างจะมีค่าติดลบมากกว่า -350 mV พร้อมกับค่าอัตราการเกิดสนิมที่ติดลบเพิ่มขึ้นไปพร้อมกัน นั่นแสดงว่าเหล็กเสริมนั้นเกิดสนิมขึ้นแล้ว เนื่องจากจากในคอนกรีตมีคลอไรด์ไอออนเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ในขณะที่เหล็กเสริมที่ได้นำไปชุบฟอสเฟตเมื่อดูจากกราฟ (ข) จะเห็นว่ามีการเกิดสนิม ที่เร็วกว่าเหล็กเสริมธรรมดา ในตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้เหล็กเสริมที่ชุบฟอสเฟต ในอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.4 จะเกิดสนิมขึ้นเร็วที่สุด ส่วนอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.6 จะเกิดสนิมขึ้นเร็วกว่า ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้เหล็กเสริมธรรมดา ส่วนในตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5 เหล็กจะเกิดสนิมที่ช้ากว่า แต่เราไม่สามารถสรุปได้ว่าเหล็กเสริมที่นำไปชุบฟอสเฟตนั้นจะนำไปใช้งานได้ดีกว่าเหล็กธรรมดา ซึ่งต้องทำการทดสอบต่อไป



(ก) เหล็กเสริมชนิดธรรมดา

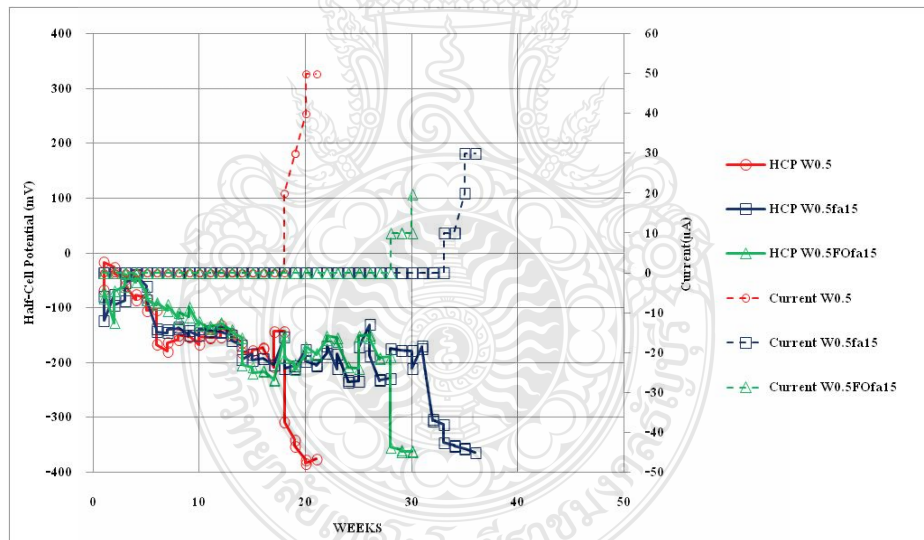


(ข) เหล็กเสริมชนิดชุบฟอสเฟต

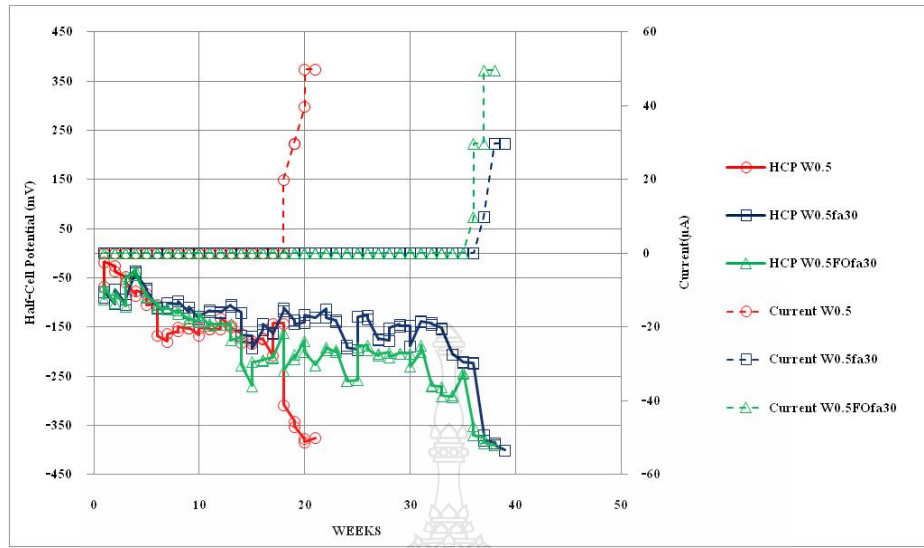
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และอัตราการเกิดสนิมโดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและชนิดเหล็กที่แตกต่างกัน

4.1.2 ผลการทดสอบระหว่างเหล็กเสริมชนิดธรรมดา กับเหล็กเสริมชนิดชุบฟอสเฟต แบบ แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 และร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยไม่ใช้สารยับยั้งการ เกิดสนิม

จากรูป 4.2 (ก) เป็นการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 เหมือนกัน แต่จะต่างกันที่ชนิดเหล็กเสริม โดยใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุ ประสาน จะเห็นว่าในช่วง 4 สัปดาห์แรกของการทดสอบวัดค่าในการเกิดสนิมยังคงที่ ไม่มีแนวโน้ม ในการเกิดสนิมแต่อย่างใด เมื่อทดสอบเป็นระยะเวลาเกือบ 10 สัปดาห์ ตัวอย่างที่ใช้เหล็กเสริมชนิด ชุบฟอสเฟตนั้นเกิดสนิมขึ้นก่อน ซึ่งดูได้จากค่าศักย์ไฟฟ้าและอัตราการเกิดสนิมมีกราฟที่พุ่งลงและ ขึ้นอย่างชัดเจน นั้นแสดงว่ามีการเกิดสนิมขึ้นแล้ว ส่วนตัวอย่างที่ใช้เหล็กธรรมดา นั้นเกิดสนิมช้ากว่า ประมาณ 2 สัปดาห์ ส่วนในรูปที่ 4.2 (ข) เป็นตัวอย่างที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 โดย น้ำหนักวัสดุประสาน และมีชนิดเหล็กเสริมต่างกัน จะเห็นว่าตัวอย่างทั้งสองยังคงไม่มีแนวโน้มใน การเกิดสนิมขึ้นแต่อย่างใด ซึ่งต้องทำการทดสอบต่อไป เพื่อหาระยะเวลาที่เหล็กเสริมนั้นเริ่มเกิดสนิม



(ก) ตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน



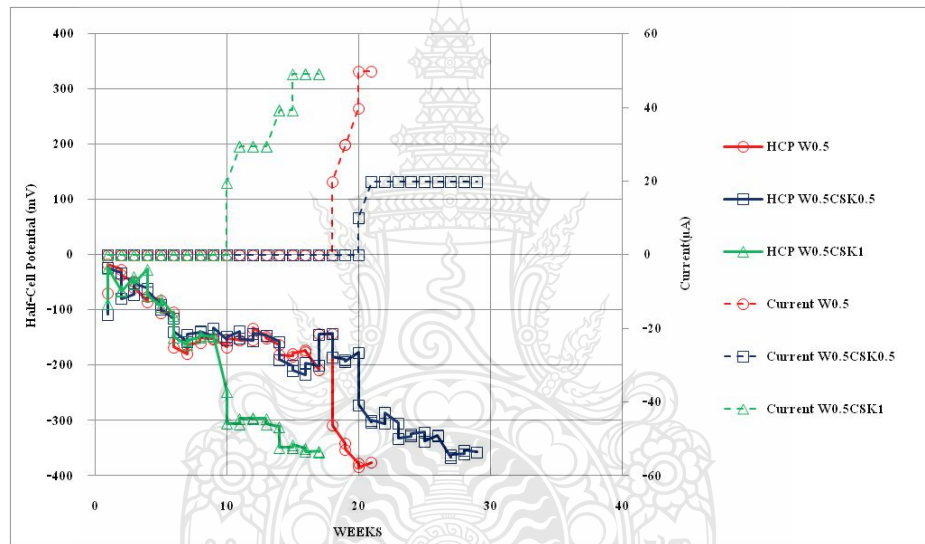
(ข) ตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และอัตราการเกิดสนิม โดยมีชนิดเหล็กและปริมาณเถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์แตกต่างกัน

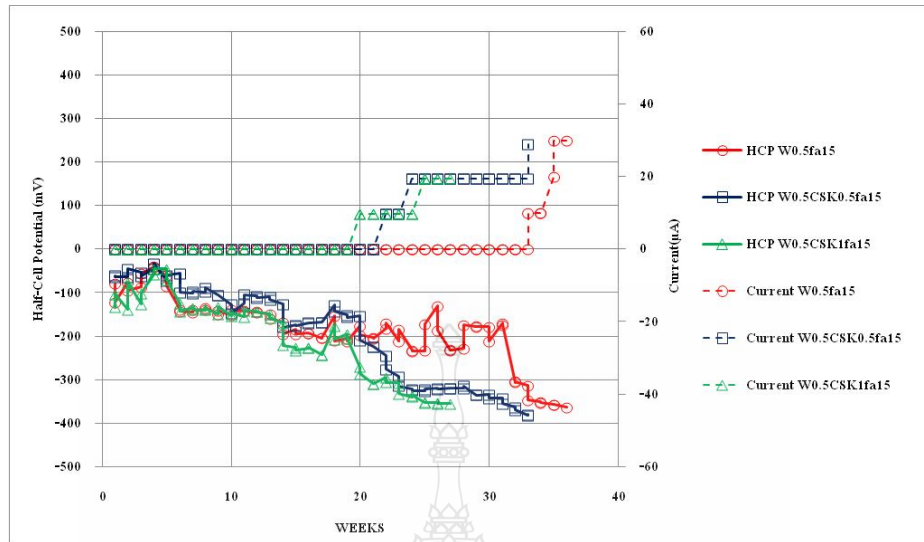
4.1.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมประเภททาที่ผิวในกลุ่มเอมาค (AMA) และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย

จากรูปที่ 4.3 (ก) เป็นตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมชนิดทาที่ผิว โดยไม่มีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยแต่อย่างใด แต่จะต่างกันที่ปริมาณสารยับยั้งที่ใช้งาน จะเห็นว่าปริมาณที่ผู้ผลิตแนะนำให้ใช้นั้นจะเกิดสนิมขึ้นก่อนอย่างชัดเจนในสัปดาห์ที่ 10 ของการทดสอบ แต่เมื่อตัวอย่างที่ลดปริมาณลงครึ่งหนึ่งจะเกิดสนิมขึ้นในสัปดาห์ที่ 25 ของการทดสอบ และจากรูปที่ 4.3 (ข) เป็นตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยตัวอย่างที่เกิดสนิมเร็วที่สุดคือตัวอย่างที่ใช้สารยับยั้งปริมาณเท่าที่ผู้ผลิตแนะนำ และตัวอย่างที่ลดปริมาณสารลงครึ่งหนึ่งและตัวอย่างที่ใช้สารยับยั้งเท่าที่ผู้ผลิตแนะนำและแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 เกิดสนิมขึ้นพร้อมกันในสัปดาห์ที่ 22 ของการทดสอบ ส่วนตัวอย่างที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและใช้สารยับยั้งเท่าที่ผู้ผลิตแนะนำมีแนวโน้มเริ่มเกิดสนิมในสัปดาห์ที่ 34 ของการทดสอบ และรูปที่ 4.3 (ค) เป็นตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ตัวอย่างที่เกิดสนิมเร็วที่สุดคือ ตัวอย่างที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและใช้สารยับยั้งเท่าที่ผู้ผลิตแนะนำ โดยเกิดสนิมขึ้นในสัปดาห์ที่ 8 ของการทดสอบ ส่วนตัวอย่างที่ใช้เถ้าลอยที่ผู้ผลิตแนะนำเกิดสนิมในสัปดาห์ที่ 36 ของการ

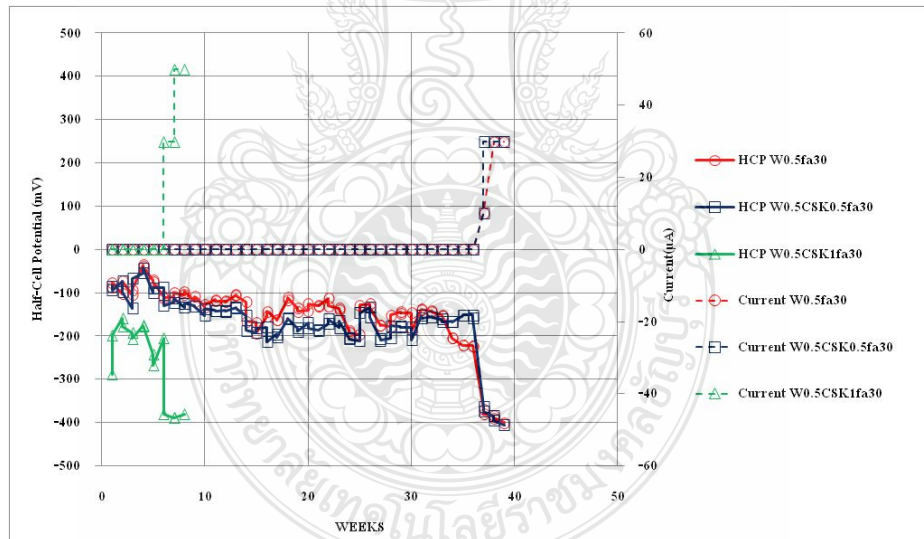
ทดสอบ และตัวอย่างที่ใช้สารยับยั้งลดลงครึ่งหนึ่งเกิดสนิมขึ้นในสัปดาห์ที่ 37 ของการทดสอบ โดยเกิดสนิมช้ากว่า ส่วนตัวอย่างที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 โดยใช้สารยับยั้งในปริมาณครึ่งหนึ่งที่ผู้ผลิตแนะนำยังไม่เกิดสนิมซึ่งต้องทำการทดสอบต่อไป ตัวอย่างคอนกรีตทั้งหมดจะเห็นว่าค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และอัตราการเกิดสนิมช่วง 1 สัปดาห์แรกติดลบน้อย แต่หลังจากเริ่มทำการขังสารละลายโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ในวันที่ 10 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เริ่มติดลบมากขึ้น จนกระทั่งค่าที่วัดได้อยู่ในเกณฑ์ที่มีโอกาสเกิดสนิมขึ้นแล้ว จะเห็นผลว่าในตัวอย่างที่ใช้สารยับยั้งลงครึ่งหนึ่งจะเกิดสนิมช้ากว่า และการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณที่น้อยกว่าจะเกิดสนิมช้ากว่า เนื่องจากสารยับยั้งนั้นอาจเป็นตัวเร่งให้เกิดสนิมเร็วขึ้น



(ก) ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภททาที่ผิวในกลุ่มเอมายด์ (AMA)



(ข) ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภททาที่ผิวในกลุ่มเอมาค (AMA) และแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

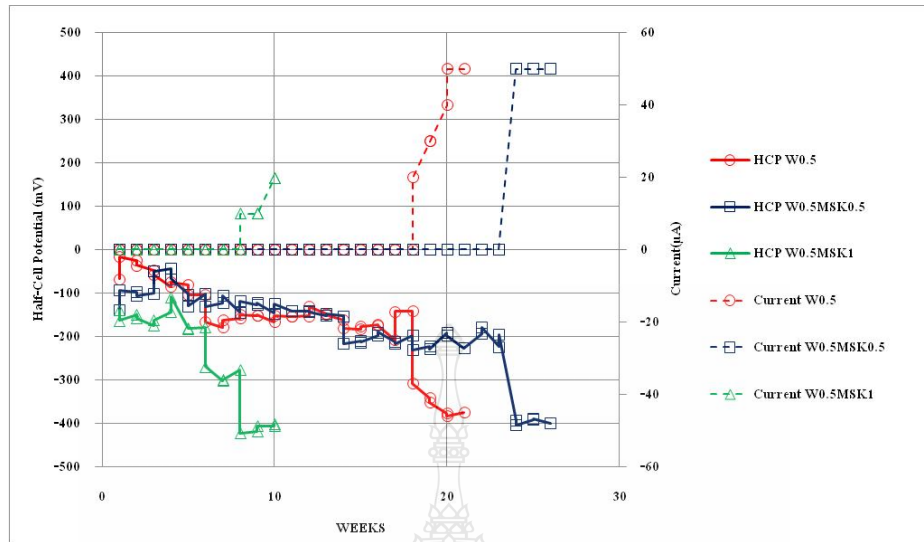


(ค) ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภททาที่ผิวในกลุ่มเอมาค (AMA) และแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

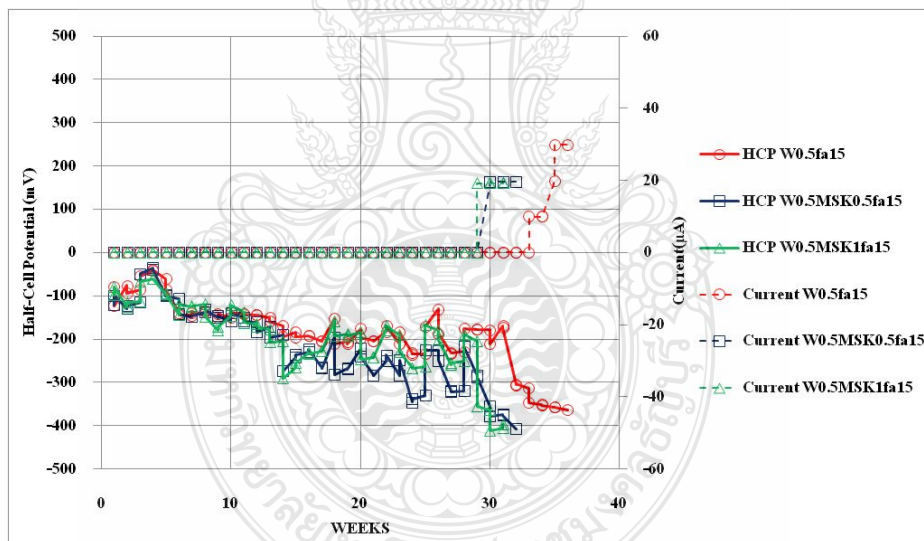
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และอัตราการเกิดสนิม โดยใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภททาที่ผิวในกลุ่มเอมาค (AMA) และปริมาณเถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์แตกต่างกัน

4.1.4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทผสมเพิ่มชนิดที่ 1 จัดอยู่ในกลุ่มสารเคลือบผิวในไตรท์ และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย

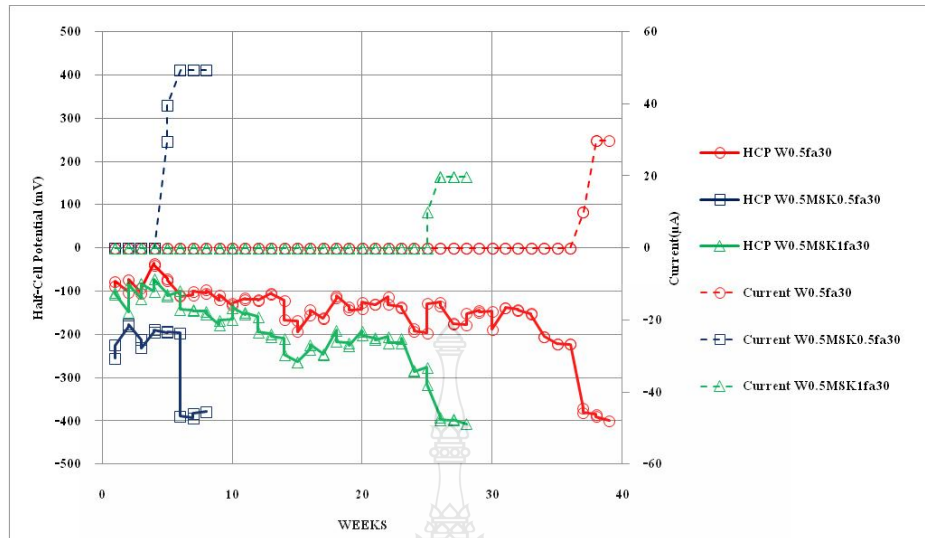
จากรูปที่ 4.4 (ก) เป็นการใช้งานสารยับยั้งประเภทผสมเพิ่มชนิดที่ 1 โดยเป็นการเปรียบเทียบด้านปริมาณการใช้งานระหว่างปริมาณที่ผู้ผลิตแนะนำให้ใช้กับปริมาณที่ลดลงครึ่งหนึ่ง จะเห็นว่าในช่วงสัปดาห์แรกยังคงไม่มีการเกิดสนิม แต่เมื่อมีการเร่งให้เกิดสนิมโดยขังสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ทำให้ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สารยับยั้งในปริมาณที่ผู้ผลิตแนะนำให้ใช้นั้นมีค่าศักย์ไฟฟ้าที่ลดลงที่อยู่ในเกณฑ์ของการเกิดสนิมอย่างชัดเจนขึ้นใน สัปดาห์ที่ 8 ของการทดสอบ ส่วนตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สารยับยั้งในปริมาณที่ลดลงครึ่งหนึ่งจากผู้ผลิตแนะนำให้ใช้ หลังจากมีการเร่งให้เกิดสนิมโดยการขังสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พร้อมกันนั้น จะเห็นว่าเริ่มเกิดสนิมขึ้นในสัปดาห์ที่ 24 ของการทดสอบ โดยเกิดสนิม ช้ำกว่าประมาณ 4 สัปดาห์ ส่วนในรูปที่ 4.4 (ข) และ (ค) เป็นการทดสอบสารยับยั้งการเกิดสนิม ประเภทผสมเพิ่มชนิดที่ 1 และแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน หลังจากมีการเร่งให้เกิดสนิมโดยการขังสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่เกิดสนิมขึ้นเร็วที่สุดคือตัวอย่างที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสานและใช้ ปริมาณสารยับยั้งที่ลดลงครึ่งหนึ่งที่ผู้ผลิตแนะนำให้ใช้ โดยเริ่มเกิดสนิมในสัปดาห์ที่ 8 ของการ ทดสอบ ส่วนตัวอย่างที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสานและใช้ปริมาณสารยับยั้งที่ ผู้ผลิตแนะนำให้ใช้ โดยเริ่มเกิดสนิมในสัปดาห์ที่ 26 ของการทดสอบ สำหรับตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ เถ้าลอยร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสานและใช้ปริมาณสารยับยั้งที่ผู้ผลิตแนะนำให้ใช้และลดลง ครึ่งหนึ่ง เกิดสนิมขึ้นพร้อมกัน โดยเริ่มเกิดสนิมในสัปดาห์ที่ 29 ของการทดสอบ และจากรูปที่ 4.4 (ค) นั้น เป็นการเปรียบเทียบตัวอย่างธรรมดาที่ใช้อ้างอิงกับตัวอย่างที่ใช้สารยับยั้งการเกิดสนิม ประเภทผสมเพิ่ม จะเห็นว่าตัวอย่างที่ใช้ปริมาณสารยับยั้งที่ผู้ผลิตแนะนำให้ใช้จะเกิดสนิมขึ้นเร็วกว่า ตัวอย่างที่ใช้อ้างอิงและตัวอย่างที่ใช้ปริมาณสารยับยั้งที่ลดลงครึ่งหนึ่งเกิดสนิมช้าที่สุด



(ก) ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทผสมเพิ่มชนิดที่ 1



(ข) ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทผสมเพิ่มชนิดที่ 1 และแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน



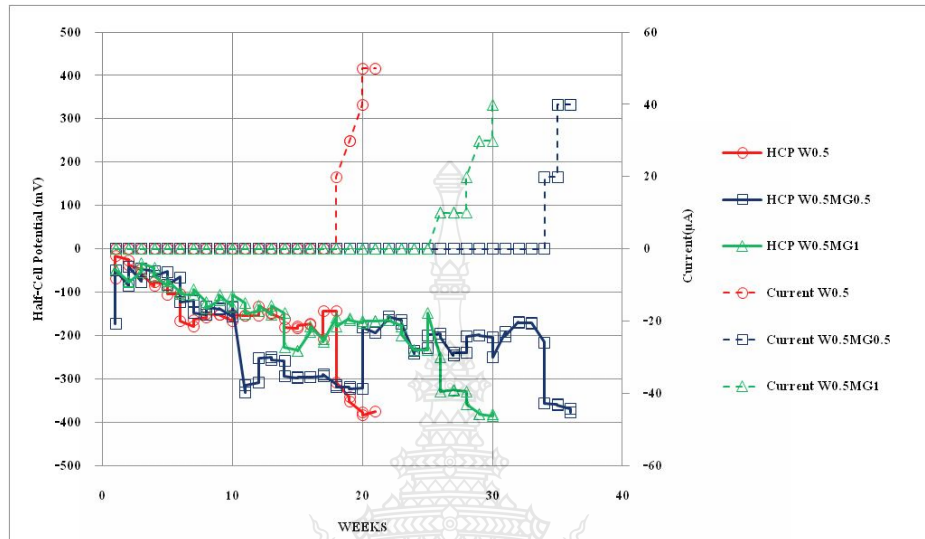
(ค) ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทผสมเพิ่มชนิดที่ 1 และแทนที่ซีเมนต์ด้วย
 เถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และอัตราการเกิดสนิม โดยใช้สารยับยั้งการเกิด
 สนิมประเภทผสมเพิ่มชนิดที่ 1 และปริมาณเถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์แตกต่างกัน

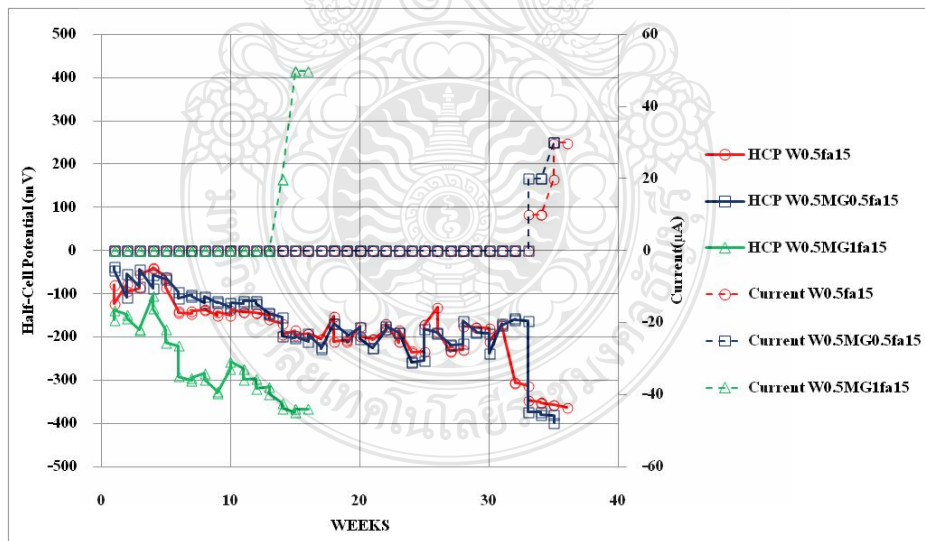
4.1.5 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทผสมเพิ่มชนิดที่ 2 จัด
 อยู่ในกลุ่มสารเคลือบผิวในไตรท์ และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย

จากรูปที่ 4.5 (ก) ถึง (ค) เป็นการทดสอบการใช้งานสารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทผสมเพิ่ม
 ชนิดที่ 2 และมีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่ร้อยละ 15 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เมื่อดูจาก
 รูปที่ 4.5 (ก) ตัวอย่างที่ใช้ปริมาณสารยับยั้งที่ผู้ผลิตแนะนำให้ใช้จะมีการเกิดสนิมขึ้นในวันที่ 50 ของ
 การทดสอบส่วนตัวอย่างที่ใช้สารยับยั้งลดลงครั้งหนึ่งยังคงไม่มีการเกิดสนิม ซึ่งต้องทำการทดสอบ
 ต่อไป ส่วนในรูปที่ 4.5 (ข) และ (ค) เมื่อทำการเร่งให้เกิดสนิมพร้อมกันทุกตัวอย่าง โดยขังสารละลาย
 โซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก หลังจากขังน้ำเปล่าเป็นเวลา 1 สัปดาห์ จะเห็นว่า
 ตัวอย่างที่ใช้งานสารยับยั้งในปริมาณที่ผู้ผลิตแนะนำและใช้เถ้าลอยร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุ
 ประสาน มีการเกิดสนิมขึ้นเร็วที่สุดคือในสัปดาห์ที่ 15 ของการทดสอบ ลำดับต่อมาคือตัวอย่างที่ใช้
 สารยับยั้งในปริมาณที่ลดลงครั้งหนึ่งของผู้ผลิตแนะนำและใช้เถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุ
 ประสาน เกิดสนิมขึ้นเมื่อสัปดาห์ที่ 25 ของการทดสอบ ลำดับต่อมาคือตัวอย่างที่ใช้สารยับยั้งใน
 ปริมาณที่ลดลงครั้งหนึ่งของผู้ผลิตแนะนำและใช้เถ้าลอยร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยเกิด

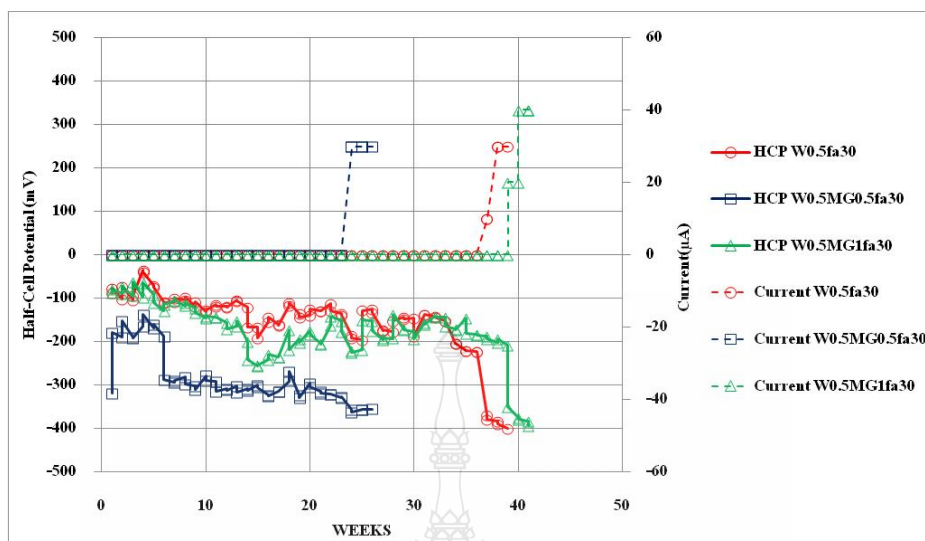
สนิมขึ้นในสัปดาห์ที่ 33 ของการทดสอบ เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างที่ใช้อ้างอิงกับตัวอย่างที่ใช้สารยับยั้ง ในปริมาณที่ผู้ผลิตแนะนำกับลดครึ่งหนึ่ง ตัวอย่างที่ใช้สารยับยั้งจะเกิดสนิมขึ้นช้ากว่า



(ก) ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทผสมเพิ่มชนิดที่ 2



(ข) ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทผสมเพิ่มชนิดที่ 2 และแทนที่ซีเมนต์ด้วย เถ้าลอยร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

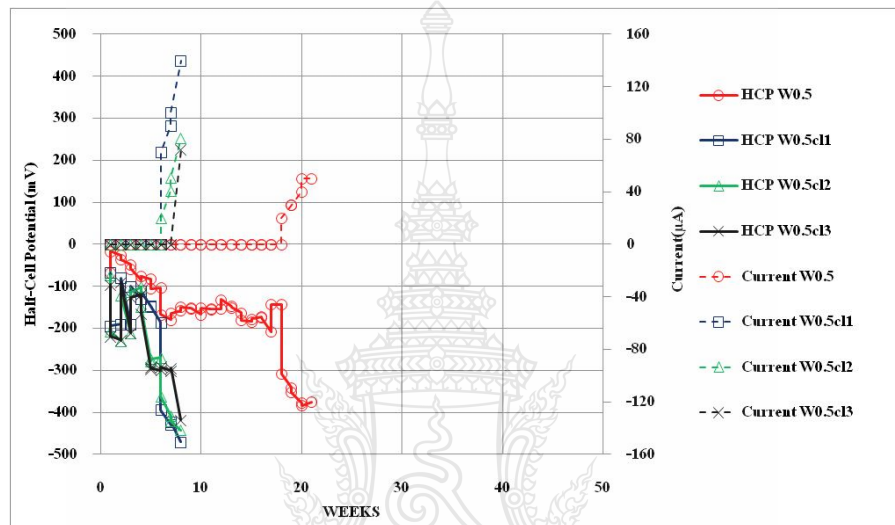


(ค) ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทผสมเพิ่มชนิดที่ 2 และแทนที่ซีเมนต์ด้วย
 เถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

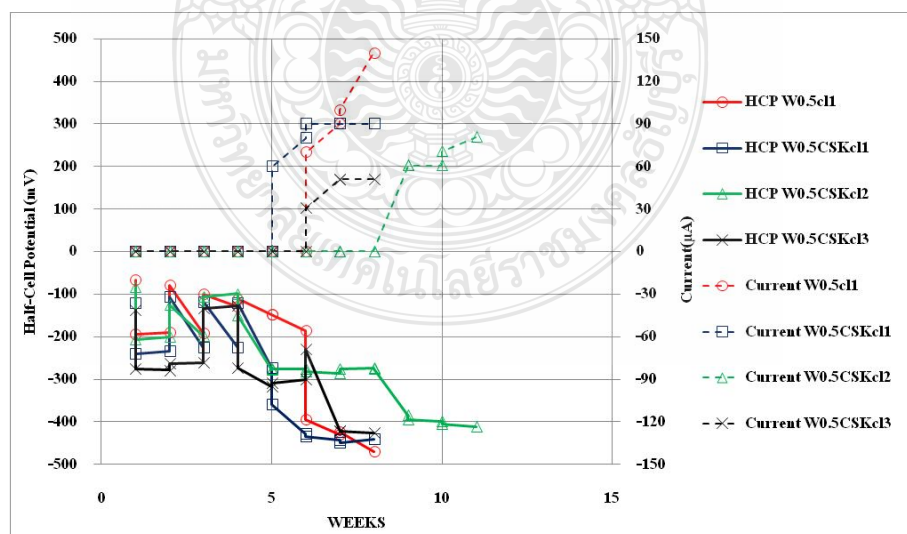
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และอัตราการเกิดสนิม โดยใช้สารยับยั้งการเกิด
 สนิมประเภทผสมเพิ่มชนิดที่ 2 และปริมาณเถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์แตกต่างกัน

4.1.6 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมประเภททาที่ผิวในกลุ่มสาร
 เอมายด์ (AMA) สำหรับตัวอย่างคอนกรีตที่ให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้น โดยแตกต่างกันที่ชนิดเหล็กเสริม
 จากรูปที่ 4.6 (ก), (ข) และ (ค) เป็นการให้คลอไรด์ในคอนกรีตตั้งแต่เริ่มต้นที่ร้อยละ 1, 2
 และร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยรูปที่ 4.6 (ก) ไม่มีการใช้สารยับยั้งการเกิดสนิม จะ
 เห็นว่าตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้นที่ร้อยละ 1 และร้อยละ 2 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน จะเกิด
 สนิมขึ้นพร้อมกันในสัปดาห์ที่ 8 ของการทดสอบ ส่วนตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้นที่ร้อยละ 3
 จะเกิดสนิมขึ้นช้ากว่าโดยเกิดสนิมในสัปดาห์ที่ 9 ของการทดสอบ ส่วนรูปที่ 4.6 (ข) เป็นตัวอย่าง
 คอนกรีตที่ให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้นและมีการใช้สารยับยั้งประเภททาที่ผิวในปริมาณที่ผู้ผลิตแนะนำ
 ให้ใช้ จะเห็นว่าในตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้นที่ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เกิดสนิม
 ขึ้นเร็วที่สุด โดยเกิดสนิมในสัปดาห์ที่ 3 ของการทดสอบ และตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้นที่ร้อย
 ละ 3 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เกิดสนิมขึ้นในสัปดาห์ที่ 4 ส่วนตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้นที่
 ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เกิดสนิมช้าที่สุด โดยเกิดสนิมในสัปดาห์ที่ 10 ของการทดสอบ
 ส่วนรูปที่ 4.6 (ค) เป็นตัวอย่างที่ใช้เหล็กเสริมที่ผ่านกระบวนการชุบฟอสเฟต และให้คลอไรด์ใน

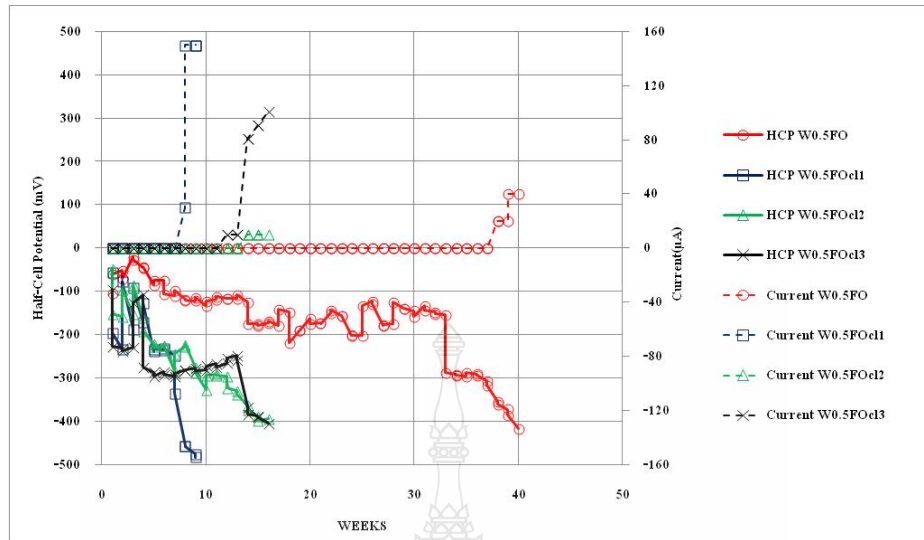
คอนกรีตตั้งแต่เริ่มต้นที่ร้อยละ 1,2 และ3 เช่นเดียวกัน จะเห็นว่าตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ที่ร้อยละ 1 เกิดสนิมในสัปดาห์ที่ 9 ของการทดสอบ และตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ที่ร้อยละ 2 เกิดสนิมขึ้นในสัปดาห์ที่ 13 ของการทดสอบ ส่วนตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ที่ร้อยละ 3 เกิดสนิมขึ้นในสัปดาห์ที่ 13 ของการทดสอบ สารยับยั้งหรือเหล็กที่เคลือบฟอสเฟตอาจจะเข้าไปจับยึดคลอไรด์ได้มากขึ้น จึงทำให้ค่ากระแสของการเกิดสนิมค่อนข้างต่ำกว่า ซึ่งเป็นผลดีในการทดสอบการเกิดสนิม



(ก) ตัวอย่างคอนกรีตที่ให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้น โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเหมือนกัน



(ข) ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมชนิดทาที่ผิว และให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้น



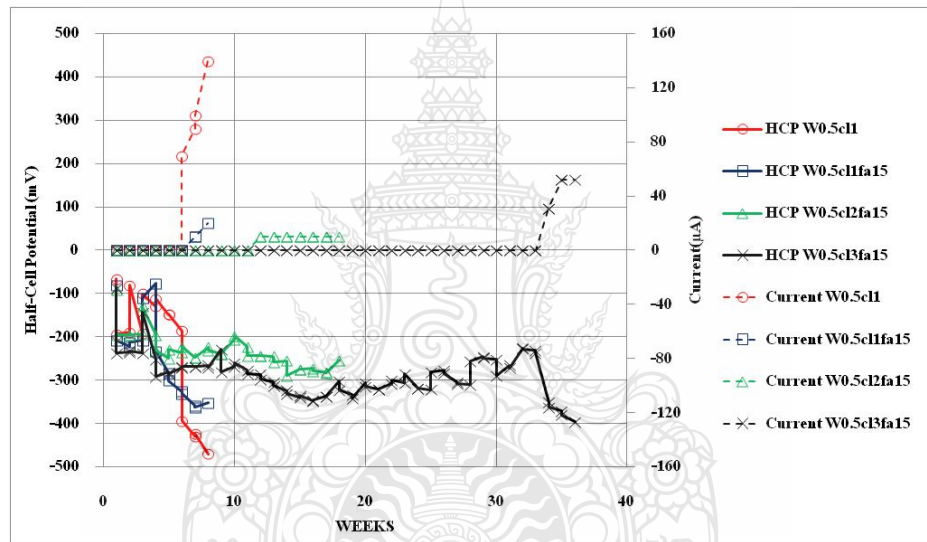
(ก) ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้เหล็กเสริมที่ชุบฟอสเฟต และให้เกลือ ไรต์ตั้งแต่เริ่มต้น

รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และอัตราการเกิดสนิม โดยใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมชนิดทาที่ผิว และชนิดเหล็กเสริมต่างกัน โดยให้เกลือ ไรต์ตั้งแต่เริ่มต้น

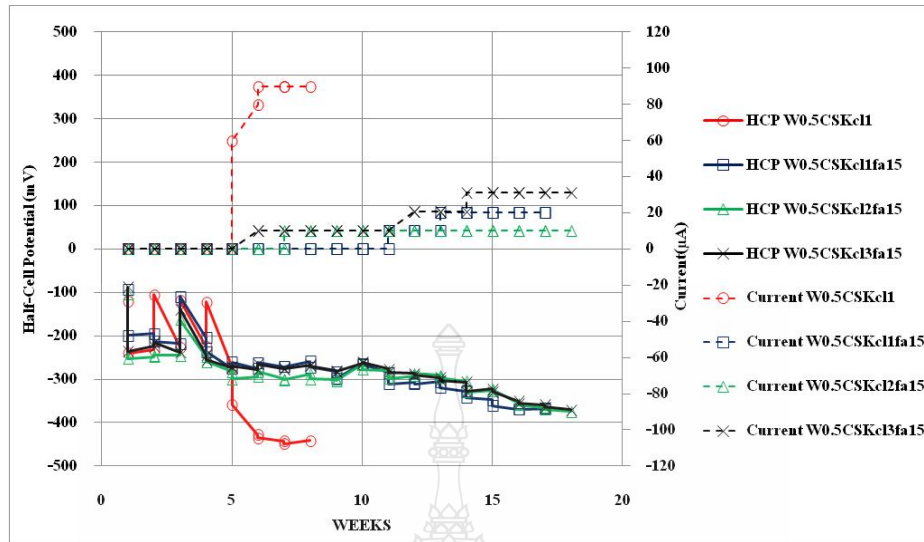
4.1.7 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมประเภททาที่ผิวในกลุ่มสารเอมายด์ (AMA) สำหรับตัวอย่างคอนกรีตที่ให้เกลือ ไรต์ตั้งแต่เริ่มต้น และแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

จากรูปที่ 4.7 (ก) เป็นการแสดงผลการทดสอบของตัวอย่างคอนกรีตที่มีการให้เกลือ ไรต์ตั้งแต่เริ่มต้นที่ร้อยละ 1,2 และ 3 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และมีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน จะเห็นว่าตัวอย่างที่ให้เกลือ ไรต์ในคอนกรีตที่ร้อยละ 1 เกิดสนิมขึ้นเร็วที่สุดในสัปดาห์ที่ 8 ของการทดสอบ ส่วนตัวอย่างที่ให้เกลือ ไรต์ในคอนกรีตที่ร้อยละ 2 และร้อยละ 3 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เกิดสนิมขึ้นในสัปดาห์ที่ 12 และ 32 ตามลำดับ โดยตัวอย่างคอนกรีตไม่มีการใช้สารยับยั้งการเกิดสนิม ส่วนจากรูปที่ 4.7 (ข) เป็นการแสดงผลการทดสอบของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมชนิดทาที่ผิว และให้เกลือ ไรต์ในคอนกรีตตั้งแต่เริ่มต้น และมีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน จะเห็นว่าตัวอย่างคอนกรีตที่เกิดสนิมขึ้นเร็วที่สุดคือตัวอย่างที่ให้เกลือ ไรต์ในคอนกรีตที่ร้อยละ 3 โดยเริ่มเกิดสนิมในสัปดาห์ที่ 7 ของการทดสอบ ลำดับต่อมาคือตัวอย่างที่ให้เกลือ ไรต์ในคอนกรีตที่ร้อยละ 2 เริ่มเกิดสนิมขึ้นในสัปดาห์ที่ 8 ของการทดสอบ ส่วนตัวอย่างคอนกรีตที่เกิดสนิมช้าที่สุดคือตัวอย่างที่ให้เกลือ ไรต์ในคอนกรีตตั้งแต่

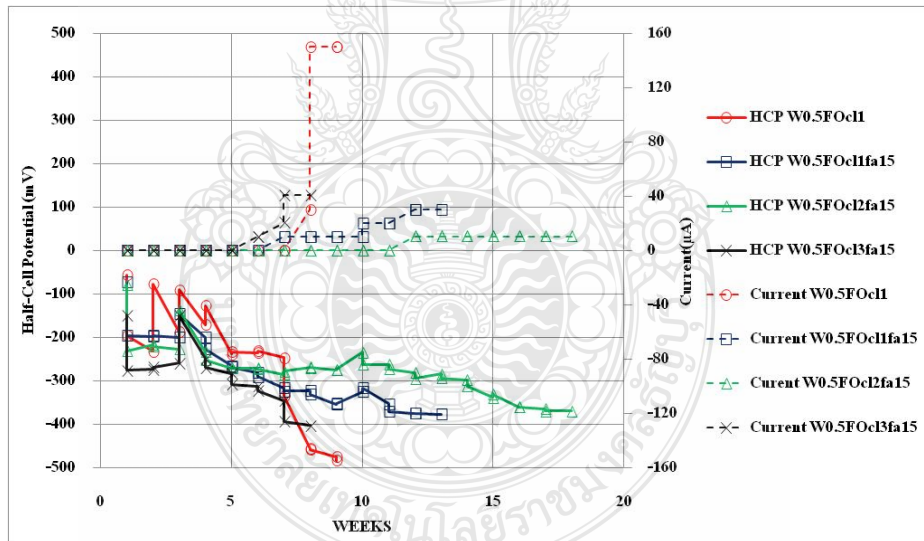
เริ่มต้นที่ร้อยละ 1 โดยเริ่มเกิดสนิมในสัปดาห์ที่ 11 ของการทดสอบ และจากรูปที่ 4.7 (ก) เป็นการแสดงผลการทดสอบของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมชนิดทาที่ผิวและให้คลอไรด์ในคอนกรีตตั้งแต่เริ่มต้น และมีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน แต่จะมีการใช้เหล็กเสริมที่ผ่านกระบวนการชุบฟอสเฟต โดยไม่มีการใช้สารยับยั้งการเกิดสนิม จากผลการทดสอบจะเห็นว่าตัวอย่างที่เกิดสนิมขึ้นเร็วที่สุดคือตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ที่ร้อยละ 3 เริ่มเกิดสนิมในสัปดาห์ที่ 6 ของการทดสอบ ส่วนตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ที่ร้อยละ 1 เริ่มเกิดสนิมในสัปดาห์ที่ 9 ของการทดสอบ และตัวอย่างที่เกิดสนิมช้าที่สุดคือตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ที่ร้อยละ 2 เริ่มเกิดสนิมในสัปดาห์ที่ 13 ของการทดสอบ



(ก) ตัวอย่างคอนกรีตที่มีการให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้น และแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15



(ข) ตัวอย่างที่มีการให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้น และแทนที่เกลือยूर้อยละ 15 โดยน้ำหนักรวสคูประสาน โดยใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมชนิดทาที่ผิว

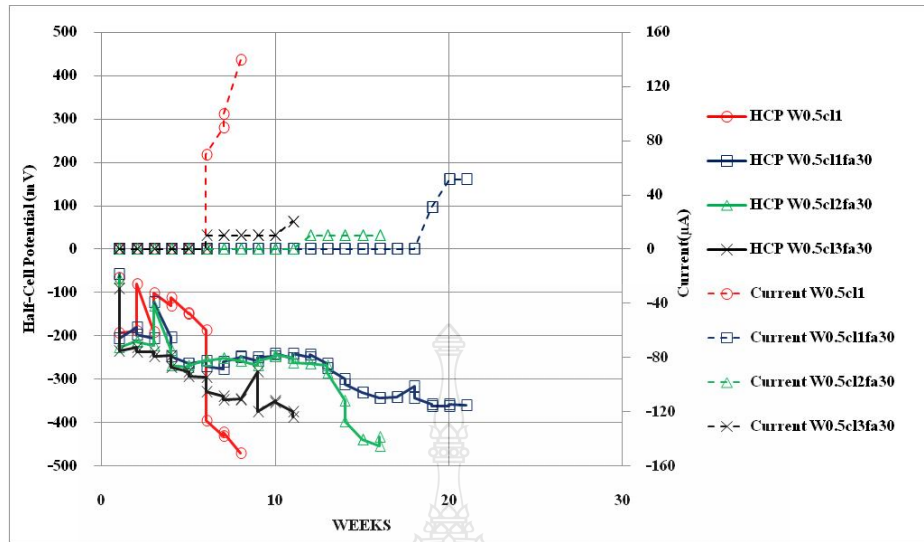


(ค) ตัวอย่างคอนกรีตที่มีการให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้น และใช้เหล็กเสริมที่ชุบฟอสเฟต

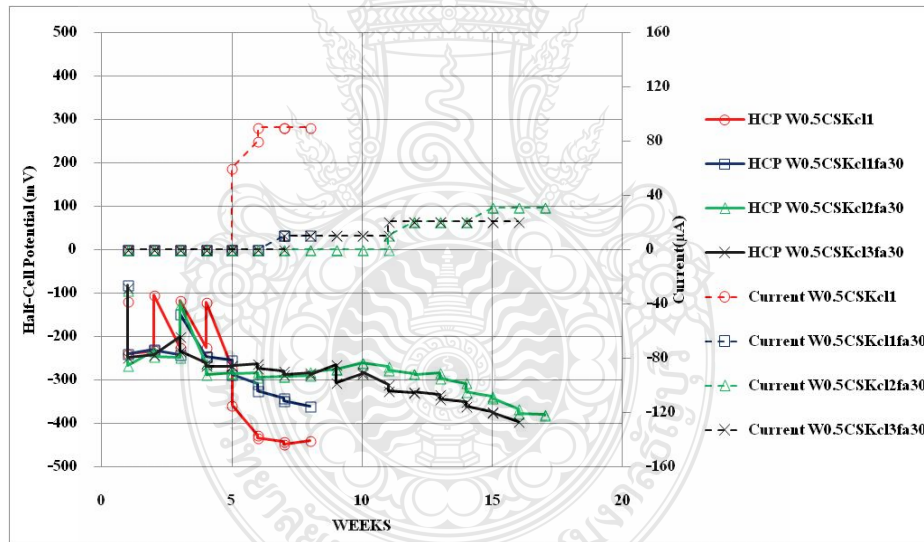
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และอัตราการเกิดสนิม โดยใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมชนิดทาที่ผิว มีชนิดเหล็กเสริมต่างกัน และแทนที่ซีเมนต์ด้วยเกลือยूर้อยละ 15 โดยน้ำหนักรวสคูประสาน โดยมีกรให้คลอไรด์ในคอนกรีตตั้งแต่เริ่มต้น

4.1.8 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมประเภททาที่ผิวในกลุ่มสารเอมายด์ (AMA) สำหรับตัวอย่างคอนกรีตที่ให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้น และแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

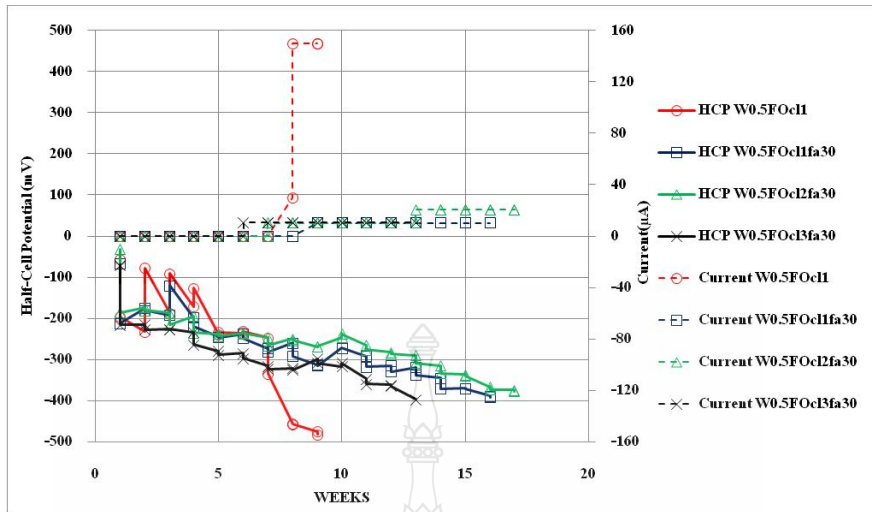
จากรูปที่ 4.8 (ก) เป็นการแสดงผลการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตที่ให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้น และแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตัวอย่างคอนกรีตที่เกิดสนิมเร็วที่สุดคือตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้นที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เริ่มเกิดสนิมขึ้นในสัปดาห์ที่ 6 ของการทดสอบ ส่วนตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้นที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เริ่มเกิดสนิมขึ้นในสัปดาห์ที่ 14 ของการทดสอบ ส่วนตัวอย่างคอนกรีตที่เกิดสนิมขึ้นช้าที่สุดคือตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้นที่ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เริ่มเกิดสนิมขึ้นในสัปดาห์ที่ 19 ของการทดสอบ โดยไม่มีการใช้สารยับยั้งการเกิดสนิม ส่วนรูปที่ 4.8 (ข) เป็นการแสดงผลการทดสอบการใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมชนิดทาที่ผิว โดยการให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้น และแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ใช้สารยับยั้งการเกิดสนิม ตัวอย่างที่ใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมจะเกิดสนิมขึ้นเร็วกว่า โดยตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ที่ร้อยละ 1 เริ่มเกิดสนิมขึ้นในสัปดาห์ที่ 6 ของการทดสอบ และตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ที่ร้อยละ 3 เริ่มเกิดสนิมขึ้นในสัปดาห์ที่ 12 ของการทดสอบ ส่วนตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ที่ร้อยละ 2 เริ่มเกิดสนิมขึ้นในสัปดาห์ที่ 15 ของการทดสอบ ส่วนรูปที่ 4.8 (ค) เป็นการแสดงผลการทดสอบชนิดของเหล็กเสริมที่นำไปชุบฟอสเฟต โดยการให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้น และแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยเกิดสนิมขึ้นเร็วกว่าการใช้เหล็กเสริมธรรมดา โดยตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ที่ร้อยละ 3 เริ่มเกิดสนิมขึ้นในสัปดาห์ที่ 11 ของการทดสอบ ตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ที่ร้อยละ 2 เริ่มเกิดสนิมขึ้นในสัปดาห์ที่ 13 ของการทดสอบ ส่วนตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ที่ร้อยละ 1 เริ่มเกิดสนิมขึ้นในสัปดาห์ที่ 14 ของการทดสอบ



(ก) ตัวอย่างคอนกรีตที่มีการให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้น และแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30



(ข) ตัวอย่างที่มีการให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้น และแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักรั่วสุมประสาน โดยใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมชนิดทาที่ผิว



(ค) ตัวอย่างคอนกรีตที่มีการให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้น และใช้เหล็กเสริมที่ชุบฟอสเฟต

รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และอัตราการเกิดสนิม โดยใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมชนิดทาที่ผิว มีชนิดเหล็กเสริมต่างกัน และแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยมีการให้คลอไรด์ในคอนกรีตตั้งแต่เริ่มต้น

4.2 ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์โดยวิธีไตรเตรชันในห้องปฏิบัติการ

จากตัวอย่างคอนกรีตที่ได้ทำการทดสอบหาค่าการเกิดสนิม แล้วค่าที่วัดได้จากตัวอย่างคอนกรีตที่มีค่าเกินมาตรฐานนั้น ได้นำผงที่เจาะได้จากตัวอย่างคอนกรีตที่เกิดสนิมขึ้นแล้ว ไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในห้องปฏิบัติการ ได้ผลดังตารางที่ 4.1 ดังนี้

ตารางที่ 4.1 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

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์วิกฤติในตัวอย่างคอนกรีต (ต่อ)

รหัสตัวอย่างคอนกรีต	สัปดาห์ที่เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิม	สัปดาห์ที่เจาะคอนกรีต	% Chloride โดยน้ำหนัก sample
W0.6	32	34	0.1692
W0.5FO	38	40	0.0831
W0.5fa15	34	36	0.0780
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

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์วิกฤติในตัวอย่างคอนกรีต (ต่อ)

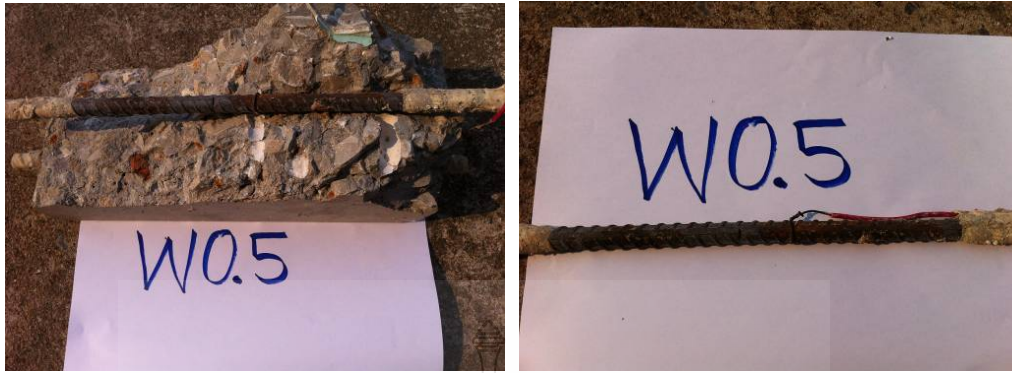
รหัสตัวอย่างคอนกรีต	สัปดาห์ที่เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิม	สัปดาห์ที่เจาะคอนกรีต	% Chloride โดยน้ำหนัก sample
W0.5FOcl3fa30	11	13	0.1259
W0.5cl2fa15	16	18	0.0535
W0.5FOcl2fa15	13	15	0.0981
W0.5FOcl2	12	14	0.1850
W0.5FOcl3	14	16	0.1227
W0.5CSKcl3fa30	13	15	0.1494
W0.5MG1fa15	15	17	0.1467
W0.5FOcl1fa30	9	11	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

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์วิกฤติในตัวอย่างคอนกรีต (ต่อ)

รหัสตัวอย่างคอนกรีต	สัปดาห์ที่เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิม	สัปดาห์ที่เจาะคอนกรีต	% Chloride โดยน้ำหนัก sample
W0.5MG0.5fa15	32	34	0.1168
W0.5cl3fa15	33	35	0.1178
W0.5MG0.5	35	37	0.0781
W0.5FOfa30	37	38	0.0843
W0.5CSK0.5fa30	38	40	0.0906
W0.5MG1fa30	40	42	0.1134

จากการแสดงผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตดังตารางที่ 4.1 โดยวิธีไตรเตรชั่น สามารถคำนวณออกมาเป็น %คลอไรด์ โดยน้ำหนักผงตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ โดยทุกตัวอย่างมีปริมาณคลอไรด์วิกฤติ มากพอที่จะทำให้เหล็กเสริมนั้นเกิดสนิมขึ้นได้ คือ ตั้งแต่ 0.05% โดยน้ำหนักตัวอย่างคอนกรีต ขึ้นไป ดังนั้นจากผลการไตรเตรชั่นก็จะไปสอดคล้องกับผลการวัดอัตราการเกิดสนิม นั้นแสดงว่าเมื่อมีปริมาณคลอไรด์ ณ ตำแหน่งเหล็กเสริมมีปริมาณมากเกินไปปริมาณคลอไรด์วิกฤติ จะทำให้เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิมขึ้นได้

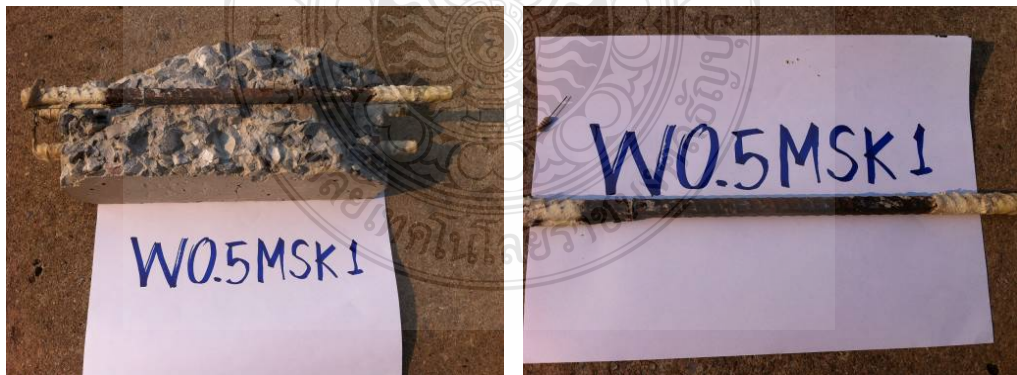
จากนั้นหลังจากทำการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในตัวอย่างคอนกรีต โดยวิธีไตรเตรชั่นในห้องปฏิบัติการแล้วนั้น เมื่อทราบผลว่ามีปริมาณคลอไรด์เพียงพอที่ทำให้เหล็กนั้นเกิดสนิมขึ้น เพื่อความแน่ชัดในการทดสอบ จึงทำลายตัวอย่างคอนกรีตเพื่อนำเหล็กเสริมออกมาดูว่ามีสนิมเกิดขึ้นตามผลการทดสอบหรือไม่ และปรากฏว่าเมื่อดูเหล็กเสริมจากตัวอย่างคอนกรีตนั้น มีสนิมเกิดขึ้นจริงซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบการวัดอัตราการเกิดสนิม สำหรับตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 และใช้เหล็กเสริมธรรมดาซึ่งเป็นตัวอย่างที่ใช้อ้างอิงดังแสดงในรูปที่ 4.9 สำหรับตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.4 และใช้เหล็กเสริมที่ชุบโซเดียมฟอสเฟต ดังแสดงในรูปที่ 4.10 สำหรับตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 และใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทผสมเพิ่มปริมาณตามที่ผู้ผลิตแนะนำ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 สำหรับตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 และใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภททาที่ผิวปริมาณตามที่ผู้ผลิตแนะนำและมีการใช้เกลือแทนที่ซีเมนต์ที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ตามลำดับดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.9 ลักษณะเหล็กเสริมที่เกิดสนิมจากการทดสอบชนิดตัวอย่างที่ใช้อ้างอิง



รูปที่ 4.10 ลักษณะเหล็กเสริมที่เกิดสนิมจากการทดสอบชนิดที่ใช้เหล็กเคลือบฟอสเฟต



รูปที่ 4.11 ลักษณะเหล็กเสริมที่เกิดสนิมจากการทดสอบชนิดที่ใช้สารยับยั้งชนิดผสมเพิ่มชนิดที่ 1



รูปที่ 4.12 ลักษณะเหล็กเสริมที่เกิดสนิมจากการทดสอบชนิดใช้สารยับยั้งชนิดทาที่ผิว



บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบ

5.1 สรุปผล

จากวัตถุประสงค์ของการศึกษาของงานวิจัย และขอบเขตของการศึกษา ภายใต้เงื่อนไขของการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทผสมเพิ่มสามารถชะลอและลดอัตราการเกิดสนิมในสถานะที่คลอไรด์จากภายนอกทั้งของสารยับยั้งจำพวกสารแคลเซียมไนไตรต์ และสารยับยั้งการเกิดสนิมจำพวกกลุ่มสารเอมีน (AMA)

5.1.2 สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภททาที่ผิวคอนกรีตควรจะใช้งานกับโครงสร้างที่กำลังทำการซ่อมแซมน่าจะเหมาะสมกว่า ถ้าจะนำใช้กับโครงสร้างใหม่ควรระมัดระวังในการใช้งาน อาจเป็นองค์ประกอบที่จะทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมเร็วขึ้นได้ โดยประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับปริมาณคลอไรด์ ปริมาณการใช้งานของสารยับยั้งที่เหมาะสม และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

5.1.3 การใช้เหล็กเสริมธรรมดากับเหล็กเสริมที่ผ่านกระบวนการเคลือบโซเดียมฟอสเฟต สรุปว่าเหล็กเสริมที่ชุบโซเดียมฟอสเฟตมีแนวโน้มในการชะลอการเกิดสนิม ได้ดีกว่าเหล็กธรรมดาในกรณีที่มีคลอไรด์เข้ามาจากภายนอก

5.1.4 ประเด็นที่ศึกษาประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิม โดยการใช้ถ้ำลยแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 15 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทำให้สารยับยั้งการเกิดสนิมนั้นมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเกิดสนิมทั้งคลอไรด์ที่มาจากภายในและภายนอกลดลง แต่ขึ้นอยู่กับปริมาณที่ใช้งาน และปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต

5.2 สรุปผลการทดสอบของประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิม

จากการทดสอบประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมทั้งชนิดทาที่ผิวคอนกรีต และชนิดผสมเพิ่มในสัดส่วนผสมคอนกรีต และเปรียบเทียบระหว่างเหล็กเสริมแบบธรรมดากับเหล็กเสริมที่เคลือบฟอสเฟต รวมทั้งการแทนที่ซีเมนต์ด้วยถ้ำลย ได้ทำการสรุปผลมาดังตารางที่ 5.1 และ ตารางที่ 5.2 ดังนี้

ตารางที่ 5.1 ประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมในกรณีเหล็กเสริมยังไม่เกิดสนิม

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

ตารางที่ 5.2 ประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมในกรณีเหล็กเสริมเกิดสนิมแล้ว

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

∴.หมายเหตุ

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

จากตารางที่ 5.1 ในกรณีเหล็กเสริมยังไม่เกิดสนิมสามารถสรุปผลของสารยับยั้งชนิดผสมเพิ่มของกลุ่มสารเอมายนี สามารถใช้กับตัวอย่างที่ใช้ซีเมนต์ล้วน และในตัวอย่างที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 15 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ได้มีประสิทธิภาพในการชะลอการเกิดสนิมได้ดี และมีผลทำให้อัตราการเกิดสนิมทั้งค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการเกิดสนิมมีอัตราการเกิดสนิมที่ใกล้เคียงกัน สำหรับสารผสมเพิ่มของกลุ่มสารแคลเซียมไนไตรท์มีประสิทธิภาพในการชะลอการเกิดสนิมดีขึ้นเมื่อใช้กับคอนกรีตซีเมนต์ล้วนและคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 15 และมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 30 และมีผลทำให้อัตราการเกิดสนิมทั้งค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการเกิดสนิมมีอัตราการเกิดสนิมที่ใกล้เคียงกัน สำหรับสารยับยั้งชนิดทาที่ผิวให้ผลการยับยั้งการเกิดสนิมมีประสิทธิภาพลดลงกับการใช้ในตัวอย่างซีเมนต์ล้วน กับการใช้เถ้าลอยร้อยละ 15 มีลักษณะเดียวกันเมื่อใช้กับตัวอย่างที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 30 และมีผลทำให้อัตราการเกิดสนิมทั้งค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการเกิดสนิมมีอัตราการเกิดสนิมที่ไม่สูงมาก ส่วนกรณีศึกษาเหล็กเคลือบฟอสเฟตสามารถชะลอการเกิดสนิมได้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นเมื่อใช้เถ้าลอยร้อยละ 15 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน แต่มีประสิทธิภาพที่แยกลงเมื่อใช้ในคอนกรีตตัวอย่างที่ใช้ซีเมนต์ล้วน และมีอัตราการเกิดสนิมใกล้เคียงกัน

จากตารางที่ 5.2 ในกรณีเหล็กเสริมเกิดสนิมแล้ว โดยการให้คลอไรด์เริ่มต้นที่ร้อยละ 1, 2 และร้อยละ 3 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยสารยับยั้งชนิดทาที่ผิวที่ให้คลอไรด์เริ่มต้นที่ร้อยละ 2 และ 3 มีประสิทธิภาพดีขึ้นและใกล้เคียงกับตัวอย่างซีเมนต์ล้วนและตัวอย่างที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 30 แต่มีประสิทธิภาพลดลงเมื่อใช้เถ้าลอยร้อยละ 15 และมีค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ใกล้เคียงกันแต่มีกระแสการเกิดสนิมที่ลดลง สำหรับตัวอย่างที่ให้คลอไรด์เริ่มต้นที่ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีประสิทธิภาพในการชะลอการเกิดสนิมที่ดีขึ้นกับการใช้เถ้าลอยร้อยละ 15 สำหรับการใช้งานเหล็กเคลือบฟอสเฟตมีประสิทธิภาพในการชะลอการเกิดสนิมที่ดีขึ้นสำหรับตัวอย่างที่ให้คลอไรด์เริ่มต้นที่ร้อยละ 2 และใช้เถ้าลอยร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ถ้าใช้งานกับตัวอย่างที่ให้คลอไรด์เริ่มต้นที่ร้อยละ 1 และ 3 เมื่อใช้กับตัวอย่างอ้างอิง และใช้เถ้าลอยร้อยละ 15 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทำให้มีประสิทธิภาพในการป้องกันการเกิดสนิมที่แยกลง และมีอัตราการเกิดสนิมทั้งค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และค่ากระแสการเกิดสนิมค่อนข้างสูงซึ่งไม่อาจจะไม่เป็นผลดีต่อการนำไปใช้งาน แต่อย่างไรก็ตามการใช้งานสารยับยั้งการเกิดสนิมควรศึกษาวิธีการใช้ และปริมาณในการใช้ ให้เหมาะสมกับประเภทของงาน

จากการสรุปผลการทดสอบทั้งค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และค่ากระแสการเกิดสนิมดังตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.2 สามารถสรุปได้ว่า ในกรณีที่เหล็กเสริมยังไม่เกิดสนิมทั้งสารยับยั้งชนิดผสมเพิ่ม

ทั้ง 2 ชนิด ชนิดทาทึบ และการใช้เหล็กเคลือบฟอสเฟต สามารถช่วยให้ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และค่ากระแสการเกิดสนิมมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างที่ใช้อ้างอิง ซึ่งเป็นผลดี จะมีเพียงแต่การใช้สารยับยั้งชนิดทาทึบที่ใช้ร่วมกับการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ซึ่งมีค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่ติดลบมากกว่าตัวอย่างที่ใช้ซีเมนต์ล้วน ส่วนกรณีที่ให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้นจะมีเพียงแต่เหล็กเคลือบฟอสเฟตที่ใช้ในตัวอย่างที่ไม่มีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย จะมีค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และค่ากระแสการเกิดสนิมที่ต่ำกว่าตัวอย่างที่ใช้เหล็กเคลือบฟอสเฟตและมีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย สำหรับการใช้น้ำสารยับยั้งชนิดทาทึบและมีการให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้นมีค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และค่ากระแสการเกิดสนิมที่ต่ำกว่าตัวอย่างที่ใช้อ้างอิงคือไม่มีการใช้น้ำสารยับยั้ง แต่ให้คลอไรด์เริ่มต้นเหมือนกัน ซึ่งเป็นผลดีเมื่อมีอัตราการเกิดสนิมที่ต่ำกว่า

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมที่ใช้งานกับโครงสร้างที่ทำการซ่อมแซมควบคู่กับ โครงสร้างใหม่ และทำการศึกษาในระยะเวลาที่ยาวขึ้น อาจจะทำให้ทราบผลชัดเจนมากยิ่งขึ้น

5.2.2 ควรมีการศึกษาประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทอื่น ที่นิยมใช้กันในประเทศไทยเพิ่มเติม

รายการอ้างอิง

- [1] มยพ.1507-51 มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย, กรมโยธาธิการและผังเมือง, กระทรวงมหาดไทย, 2551
- [2] M.Ormellese. and M.Berra. "Corrosion inhibitors for chlorides induced corrosion in reinforced concrete structures ", 2005, pp 536-547
- [3] มยพ.1332-50 มาตรฐานงานคอนกรีตเมื่อพิจารณาความคงทนและอายุการใช้งาน, กรมโยธาธิการและผังเมือง, 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 สำราญวานิช, "Introduction to Chloride-Induced Corrosion of steel in concrete", 2547
- [7] ปริญญา จินดาประเสริฐ, "แก้alogyในงานคอนกรีต", สมาคมคอนกรีตไทย, กรุงเทพฯ, 2547
- [8] คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, "ข้อกำหนดมาตรฐานวัสดุและการก่อสร้างสำหรับโครงสร้างคอนกรีต, กรุงเทพฯ, 2540
- [9] บุรฉัตร ฉัตรวีระ, สมนึก ตั้งเต็มศิริกุล, และสายัณห์ พิศน โภศล, "ความทนทานของคอนกรีตผสมฝุ่นหิน", การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 5 ณ โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ซิตี้ 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] Sanchaoren, 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

รายการอ้างอิง (ต่อ)

- [14] C. Monticelli, A. Frinani, 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



ตารางที่ ก.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของตัวอย่าง (หน่วย mV) ชั่งน้ำเปล่า

NO.	specimen	26/06/56	28/06/56	29/06/56	30/06/56	1/07/56	2/07/56	3/07/56
1	W0.4	-182	-48	-66	-133	-269	-276	-267
2	W0.4FO	-245	-135	-121	-429	-414	-427	-417
3	W0.5	-68	-17	-26	-37	-48	-59	-85
4	W0.5CSK0.5	-107	-23	-32	-79	-72	-51	-61
5	W0.5CSK1	-88	-24	-64	-66	-40	-52	-26
6	W0.5FO	-105	-60	-52	-70	-21	-27	-46
7	W0.6	-122	-91	-101	-98	-70	-40	-24
8	W0.6FO	-112	-87	-92	-90	-64	-47	-37
9	W0.5fa15	-79	-123	-76	-95	-86	-55	-42
10	W0.5FOfa15	-82	-70	-128	-70	-61	-38	-53
11	W0.5CSK0.5fa15	-61	-64	-64	-45	-54	-62	-44
12	W0.5CSK1fa15	-134	-104	-139	-77	-126	-101	-57
13	W0.5fa30	-89	-78	-103	-73	-104	-93	-36
14	W0.5FOfa30	-93	-68	-101	-81	-108	-50	-34
15	W0.5CSK0.5fa30	-85	-94	-73	-98	-136	-68	-54
16	W0.5CSK1fa30	-289	-197	-159	-178	-193	-206	-177

ตารางที่ ก.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของตัวอย่าง (หน่วย mV) ชั่งน้ำเปล่า (ต่อ)

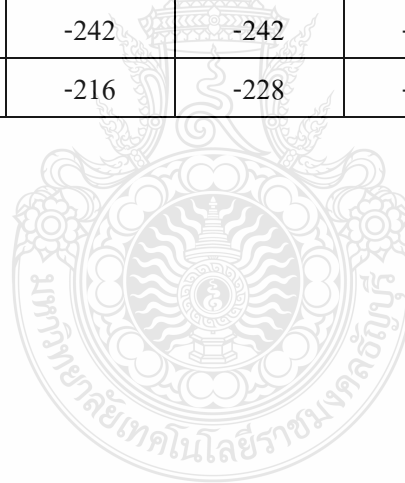
NO.	specimen	26/06/56	28/06/56	29/06/56	30/06/56	1/07/56	2/07/56	3/07/56
17	W0.5MSK0.5	-139	-95	-98	-106	-101	-51	-43
18	W0.5MSK1	-141	-164	-150	-159	-175	-163	-144
19	W0.5MSK0.5fa15	-121	-99	-129	-123	-116	-49	-36
20	W0.5MSK1fa15	-98	-79	-124	-116	-112	-67	-61
21	W0.5MSK0.5fa30	-255	-225	-181	-177	-213	-231	-194
22	W0.5MSK1fa30	-103	-107	-148	-86	-117	-83	-101
23	W0.5MG0.5	-173	-49	-86	-42	-76	-46	-52
24	W0.5MG1	-47	-48	-75	-76	-53	-34	-43
25	W0.5MG0.5fa15	-36	-46	-108	-55	-82	-44	-87
26	W0.5MG1fa15	-160	-138	-148	-156	-183	-181	-104
27	W0.5MG0.5fa30	-320	-180	-189	-153	-190	-192	-166
28	W0.5MG1fa30	-87	-79	-90	-73	-95	-62	-99
29	W0.5cl1	-67	-194	-190	-80	-192	-100	-130
30	W0.5CSKcl1	-120	-240	-233	-106	-226	-118	-225
31	W0.5FOcl1	-56	-196	-233	-78	-187	-91	-172
32	W0.5cl2	-74	-207	-230	-122	-211	-113	-102

ตารางที่ ก.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของตัวอย่าง (หน่วย mV) ชั่งน้ำเปล่า (ต่อ)

NO.	specimen	26/06/56	28/06/56	29/06/56	30/06/56	1/07/56	2/07/56	3/07/56
33	W0.5CSKcl2	-83	-206	-200	-124	-198	-107	-99
34	W0.5FOcl2	-49	-153	-158	-95	-152	-86	-161
35	W0.5cl3	-96	-220	-228	-91	-211	-126	-119
36	W0.5CSKcl3	-137	-275	-279	-263	-261	-134	-127
37	W0.5FOcl3	-96	-228	-232	-239	-230	-126	-107
38	W0.5cl1fa15	-81	-207	-222	-211	-208	-110	-77
39	W0.5CSKcl1fa15	-93	-199	-195	-213	-218	-109	-204
40	W0.5FOcl1fa15	-74	-196	-199	-196	-200	-146	-200
41	W0.5cl2fa15	-92	-195	-195	-196	-193	-130	-196
42	W0.5CSKcl2fa15	-104	-252	-249	-245	-245	-162	-248
43	W0.5FOcl2fa15	-79	-231	-217	-221	-228	-139	-234
44	W0.5cl3fa15	-87	-236	-235	-232	-237	-144	-253
45	W0.5CSKcl3fa15	-87	-236	-224	-215	-238	-139	-244
46	W0.5FOcl3fa15	-150	-277	-275	-269	-260	-151	-250
47	W0.5cl1fa30	-57	-205	-181	-198	-205	-122	-204
48	W0.5CSKcl1fa30	-83	-240	-231	-232	-242	-148	-247

ตารางที่ ก.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของตัวอย่าง (หน่วย mV) ชั่งน้ำเปล่า (ต่อ)

NO.	specimen	26/06/56	28/06/56	29/06/56	30/06/56	1/07/56	2/07/56	3/07/56
49	W0.5FOcl1fa30	-66	-212	-176	-181	-192	-121	-198
50	W0.5cl2fa30	-68	-227	-212	-213	-222	-131	-232
51	W0.5CSKcl2fa30	-94	-266	-235	-246	-249	-125	-264
52	W0.5FOcl2fa30	-31	-186	-173	-181	-187	-216	-195
53	W0.5cl3fa30	-90	-234	-227	-236	-236	-247	-245
54	W0.5CSKcl3fa30	-89	-248	-242	-242	-201	-234	-261
55	W0.5FOcl3fa30	-71	-217	-216	-228	-227	-227	-234



ตารางที่ ก.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของตัวอย่าง (หน่วย mV) ชั่งน้ำเกลือ (ต่อ)

NO.	specimen	8/07/56	12/07/56	16/07/56	20/07/56	24/07/56	29/07/56	1/08/56
1	W0.4	-231	-241	-235	-211	-211	-211	-207
2	W0.4FO	-388	-398	-410	-399	-405	-414	-418
3	W0.5	-76	-83	-105	-90	-101	-109	-164
4	W0.5CSK0.5	-67	-89	-99	-80	-121	-125	-144
5	W0.5CSK1	-73	-87	-80	-113	-110	-113	-155
6	W0.5FO	-44	-90	-75	-79	-84	-70	-98
7	W0.6	-66	-94	-102	-84	-81	-90	-157
8	W0.6FO	-51	-79	-79	-126	-124	-120	-121
9	W0.5fa15	-40	-54	-85	-125	-132	-133	-140
10	W0.5FOfa15	-38	-71	-85	-98	-93	-91	-94
11	W0.5CSK0.5fa15	-33	-67	-60	-57	-58	-60	-97
12	W0.5CSK1fa15	-46	-51	-70	-129	-124	-122	-139
13	W0.5fa30	-40	-66	-75	-108	-108	-108	-101
14	W0.5FOfa30	-43	-98	-87	-111	-108	-103	-111
15	W0.5CSK0.5fa30	-43	-99	-89	-87	-87	-87	-113
16	W0.5CSK1fa30	-176	-244	-268	-209	-207	-201	-388

ตารางที่ ก.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของตัวอย่าง (หน่วย mV) ชั่งน้ำเกลือ (ต่อ)

NO.	specimen	5/08/56	8/08/56	12/08/56	15/08/56	19/08/56	22/08/56	26/08/56
1	W0.4	-189	-184	-184	-185	-186	-186	-185
2	W0.4FO	-404	เกิดสนิม					
3	W0.5	-158	-150	-148	-148	-150	-152	-150
4	W0.5CSK0.5	-140	-140	-138	-138	-138	-138	-138
5	W0.5CSK1	-149	-147	-147	-145	-145	-146	-146
6	W0.5FO	-119	-128	-118	-119	-117	-119	-120
7	W0.6	-107	-156	-155	-152	-153	-154	-154
8	W0.6FO	-148	-149	-147	-142	-142	-142	-144
9	W0.5fa15	-138	-131	-134	-133	-139	-140	-135
10	W0.5FOfa15	-120	-113	-109	-108	-107	-106	-109
11	W0.5CSK0.5fa15	-98	-87	-86	-88	-92	-95	-90
12	W0.5CSK1fa15	-140	-137	-133	-134	-138	-139	-136
13	W0.5fa30	-104	-97	-98	-97	-98	-98	-98
14	W0.5FOfa30	-123	-119	-115	-113	-114	-114	-115
15	W0.5CSK0.5fa30	-134	-123	-123	-124	-126	-126	-124
16	W0.5CSK1fa30	-381	เกิดสนิม					

ตารางที่ ก.2 ค่ากระแสการเกิดสนิมของตัวอย่าง (หน่วย μA) ชั่งน้ำเปล่า

NO.	specimen	26/06/56	28/06/56	29/06/56	30/06/56	1/07/56	2/07/56	3/07/56
1	W0.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	W0.4FO	0.00	0.00	-9.97	-19.90	-19.90	-19.90	-19.90
3	W0.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	W0.5CSK0.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	W0.5CSK1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	W0.5FO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	W0.6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	W0.6FO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	W0.5fa15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	W0.5FOfa15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	W0.5CSK0.5fa15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	W0.5CSK1fa15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13	W0.5fa30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	W0.5FOfa30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	W0.5CSK0.5fa30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16	W0.5CSK1fa30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ ก.2 ค่ากระแสการเกิดสนิมของตัวอย่าง (หน่วย μA) ชั่งน้ำเปล่า (ต่อ)

NO.	specimen	26/06/56	28/06/56	29/06/56	30/06/56	1/07/56	2/07/56	3/07/56
17	W0.5MSK0.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18	W0.5MSK1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19	W0.5MSK0.5fa15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20	W0.5MSK1fa15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21	W0.5MSK0.5fa30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22	W0.5MSK1fa30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23	W0.5MG0.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24	W0.5MG1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25	W0.5MG0.5fa15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
26	W0.5MG1fa15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
27	W0.5MG0.5fa30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
28	W0.5MG1fa30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
29	W0.5cl1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	W0.5CSKcl1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
31	W0.5FOcl1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
32	W0.5cl2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ ก.2 ค่ากระแสการเกิดสนิมของตัวอย่าง (หน่วย μA) ชั่งน้ำเปล่า (ต่อ)

NO.	specimen	26/06/56	28/06/56	29/06/56	30/06/56	1/07/56	2/07/56	3/07/56
33	W0.5CSKcl2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
34	W0.5FOcl2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
35	W0.5cl3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
36	W0.5CSKcl3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
37	W0.5FOcl3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
38	W0.5cl1fa15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
39	W0.5CSKcl1fa15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
40	W0.5FOcl1fa15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
41	W0.5cl2fa15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
42	W0.5CSKcl2fa15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
43	W0.5FOcl2fa15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
44	W0.5cl3fa15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
45	W0.5CSKcl3fa15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
46	W0.5FOcl3fa15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
47	W0.5cl1fa30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
48	W0.5CSKcl1fa30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ ก.2 ค่ากระแสการเกิดสนิมของตัวอย่าง (หน่วย μA) ชั่งน้ำเปล่า (ต่อ)

NO.	specimen	26/06/56	28/06/56	29/06/56	30/06/56	1/07/56	2/07/56	3/07/56
49	W0.5FOc11fa30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
50	W0.5cl2fa30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
51	W0.5CSKc12fa30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
52	W0.5FOc12fa30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
53	W0.5cl3fa30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
54	W0.5CSKc13fa30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
55	W0.5FOc13fa30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00



ตารางที่ ก.2 ค่ากระแสการเกิดสนิมของตัวอย่าง (หน่วย μA) ชั่งน้ำเกลือ (ต่อ)

NO.	specimen	8/07/56	12/07/56	16/07/56	20/07/56	24/07/56	29/07/56	1/08/56
1	W0.4	0	0	0	0	0	0	0
2	W0.4FO	-19.9	-19.9	-29.9	-29.9	-29.9	-29.9	-29.9
3	W0.5	0	0	0	0	0	0	0
4	W0.5CSK0.5	0	0	0	0	0	0	0
5	W0.5CSK1	0	0	0	0	0	0	0
6	W0.5FO	0	0	0	0	0	0	0
7	W0.6	0	0	0	0	0	0	0
8	W0.6FO	0	0	0	0	0	0	0
9	W0.5fa15	0	0	0	0	0	0	0
10	W0.5FOfa15	0	0	0	0	0	0	0
11	W0.5CSK0.5fa15	0	0	0	0	0	0	0
12	W0.5CSK1fa15	0	0	0	0	0	0	0
13	W0.5fa30	0	0	0	0	0	0	0
14	W0.5FOfa30	0	0	0	0	0	0	0
15	W0.5CSK0.5fa30	0	0	0	0	0	0	0
16	W0.5CSK1fa30	0	0	0	0	29.9	29.9	49.9

ตารางที่ ก.2 ค่ากระแสการเกิดสนิมของตัวอย่าง (หน่วย μA) ชั่งน้ำเกลือ (ต่อ)

NO.	specimen	5/08/56	8/08/56	12/08/56	15/08/56	19/08/56	22/08/56	26/08/56
1	W0.4	0	0	0	0	0	0	0
2	W0.4FO	-29.9	เกิดสนิม					
3	W0.5	0	0	0	0	0	0	0
4	W0.5CSK0.5	0	0	0	0	0	0	0
5	W0.5CSK1	0	0	0	0	0	19.7	29.5
6	W0.5FO	0	0	0	0	0	0	0
7	W0.6	0	0	0	0	0	0	0
8	W0.6FO	0	0	0	0	0	0	0
9	W0.5fa15	0	0	0	0	0	0	0
10	W0.5FOfa15	0	0	0	0	0	0	0
11	W0.5CSK0.5fa15	0	0	0	0	0	0	0
12	W0.5CSK1fa15	0	0	0	0	0	0	0
13	W0.5fa30	0	0	0	0	0	0	0
14	W0.5FOfa30	0	0	0	0	0	0	0
15	W0.5CSK0.5fa30	0	0	0	0	0	0	0
16	W0.5CSK1fa30	49.9	เกิดสนิม					

ตารางที่ ก.2 ค่ากระแสการเกิดสนิมของตัวอย่าง (หน่วย μA) ชั่งน้ำเกลือ (ต่อ)

NO.	specimen	29/08/56	2/09/56	5/09/56	9/09/56	12/09/56	16/09/56	19/09/56
1	W0.4	0	0	0	0	0	0	0
3	W0.5	0	0	0	0	0	0	0
4	W0.5CSK0.5	0	0	0	0	0	0	0
5	W0.5CSK1	29.5	29.5	29.5	29.5	29.5	39.4	39.4
6	W0.5FO	0	0	0	0	0	0	0
7	W0.6	0	10	10	10	20	20	20
8	W0.6FO	0	0	0	0	0	0	0
9	W0.5fa15	0	0	0	0	0	0	0
10	W0.5FOfa15	0	0	0	0	0	0	0
11	W0.5CSK0.5fa15	0	0	0	0	0	0	0
12	W0.5CSK1fa15	0	0	0	0	0	0	0
13	W0.5fa30	0	0	0	0	0	0	0
14	W0.5FOfa30	0	0	0	0	0	0	0
15	W0.5CSK0.5fa30	0	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ ก.2 ค่ากระแสการเกิดสนิมของตัวอย่าง (หน่วย μA) ชั่งน้ำเกลือ (ต่อ)

NO.	specimen	23/09/56	26/09/56	30/09/56	3/10/56	7/10/56	10/10/56	14/10/56
1	W0.4	0	0	0	0	0	0	0
3	W0.5	0	0	0	0	0	0	0
4	W0.5CSK0.5	0	0	0	0	0	0	0
5	W0.5CSK1	39.4	49.2	49.2	49.2	49.2	49.2	เกิดสนิม
6	W0.5FO	0	0	0	0	0	0	0
7	W0.6	0	0	0	0	0	0	0
8	W0.6FO	20	20	20	20	20	20	20
9	W0.5fa15	0	0	0	0	10	30	30
10	W0.5FOfa15	0	0	0	0	0	0	0
11	W0.5CSK0.5fa15	0	0	0	0	0	0	0
12	W0.5CSK1fa15	0	0	0	0	0	0	0
13	W0.5fa30	0	0	0	0	0	0	0
14	W0.5FOfa30	0	0	0	0	0	0	0
15	W0.5CSK0.5fa30	0	0	0	0	0	0	0

เอกสารประกอบการประชุม

การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 19

The 19th National Convention on Civil Engineering

เนื่องในโอกาสเฉลิมฉลองครบรอบ 50 ปี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น



วิศวกรรมโยธา กับ ประชาคมเศรษฐกิจอาเซียน
Civil Engineering and ASEAN Economic Community



14-16 พฤษภาคม 2557
ณ โรงแรมพูลแมน ขอนแก่น ราชา ออคิด
May 14-16, 2014
Pullman Khon Kaen Raja Orchid Hotel

จัดโดย
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
และวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.)



คณะกรรมการอำนวยการ วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์
ประจำปี พ.ศ. 2557-2559

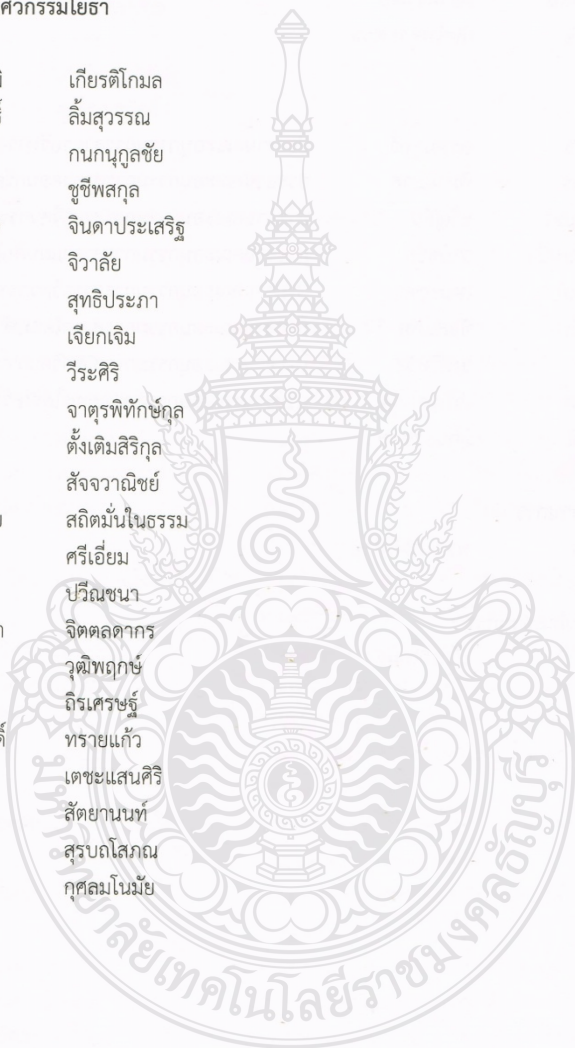
1.	ศ.ดร.สุขชัยวีร์	สุวรรณสวัสดิ์	นายก
2.	รศ.ดร.วัชรินทร์	กาสลัก	อุปนายกคนที่ 1
3.	ศ.ดร.เอกสิทธิ์	ลิ้มสุวรรณ	อุปนายกคนที่ 2
4.	รศ.ดร.สุทธิศักดิ์	ศรีลัมพ์	อุปนายกคนที่ 3 และประธานกรรมการต่างประเทศ
5.	รศ.สิริวัฒน์	ไชยชนะ	เลขาธิการ
6.	ผศ.ศักดิ์ชัย	สกาณพงษ์	เหรัญญิก
7.	นางสาวบุษกร	แสนสุข	นายทะเบียน
8.	ดร.พงศ์ธร	ธाराไชย	ประชาสัมพันธ์และโฆษก
9.	รศ.ดร.อมร	พิมานมาศ	สารานุกรม
10.	นายัชชาวัลย์	คุณคำชู	ประธานกรรมการสิทธิ และจรรยาบรรณ
11.	ดร.ชวลิต	รัตนธรรมสกุล	ประธานกรรมการโครงการ
12.	รศ.ดร.ปิติ	สุคนธ์สุขกุล	ปฏิคม
13.	ผศ.ดร.คมสัน	มาลีสี	ประธานสมาชิกสัมพันธ์
14.	นายไกร	ตั้งสง่า	ประธานกรรมการสวัสดิการ
15.	ศ.ดร.ต่อกุล	กาญจนาลัย	กรรมการกลาง
16.	รศ.ดร.สุขุม	สุขพันธ์ไพฑาราม	กรรมการกลาง
17.	นายสืบศักดิ์	พรหมบุญ	กรรมการกลาง
18.	ดร.ชวลิต	ทีสยากร	กรรมการกลาง
19.	นางจินตนา	ศิริสันธนะ	ประธานวิศวกรรมหญิง
20.	นายประสิทธิ์	เหมวารพรชัย	ประธานวิศวกรอาวุโส
21.	ผศ.ดร.วิฑิต	ปานสุข	ประธานยุววิศวกร
22.	รศ.เอนก	ศิริพานิชกร	ประธานสาขาวิศวกรรมโยธา
23.	นายกิตติพงษ์	วีระโพธิ์ประสิทธิ์	ประธานสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
24.	นายบุญพงษ์	กิจวัฒนาชัย	ประธานสาขาวิศวกรรมเครื่องกล
25.	รศ.ดร.ตรีเทศ	เหล่าศิริหงษ์ทอง	ประธานสาขาวิศวกรรมอุตสาหการ
26.	นายสุรชัย	พรจินดาโชติ	ประธานสาขาวิศวกรรมเหมืองแร่ โลหะการ และปิโตรเลียม
27.	รศ.ดร.อัญชลีพร	วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ	ประธานสาขาวิศวกรรมเคมี
28.	ผศ.ยุทธนา	มหัจฉริยวงศ์	ประธานสาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
29.	ผศ.ดร.ก่อเกียรติ	บุญชูกุล	ประธานสาขาวิศวกรรมยานยนต์
30.	นายพิศาล	จ่อโภชาอุดม	ประธานสาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
31.	ผศ.ดร.ณัฐ	วรายศ	ประธานสาขาภาคเหนือ 1 (เชียงใหม่)
32.	รศ.ดร.ศรินทร์ทิพย์	แทนธานี	ประธานสาขาภาคเหนือ 2 (พิษณุโลก)
33.	นายชัยชาญ	วรนิทัศน์	ประธานสาขาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 1 (ขอนแก่น)
34.	ศ.ดร.สุขสันต์	ห่อพิบูลสุข	ประธานสาขาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 2 (นครราชสีมา)

คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา
วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์
ประจำปี พ.ศ. 2557-2559

คณะกรรมการสาขาวิศวกรรมโยธา

ที่ปรึกษา

- | | |
|-------------------|-----------------|
| 1. รศ.ดร.ไกรวุฒิ | เกียรติโกมล |
| 2. ศ.ดร.เอกสิทธิ์ | ลิมสุวรรณ |
| 3. ศ.ดร.วรศักดิ์ | กนกนุกุลชัย |
| 4. ศ.ดร.สมชาย | ชูชีพสกุล |
| 5. ศ.ดร.ปริญญา | จินดาประเสริฐ |
| 6. รศ.ดร.วิชา | จิวัลย์ |
| 7. นายธวัชชัย | สุทธิประภา |
| 8. ดร.วิฑูร | เจียกเจิม |
| 9. นายธเนศ | วีระศิริ |
| 10. ศ.ดร.ชัย | จาดรพิทักษ์กุล |
| 11. ศ.ดร.สมนึก | ตั้งเต็มสิริกุล |
| 12. รศ.ดร.สุวิมล | สังจวานิชย์ |
| 13. รศ.ดร.บุญไชย | สถิตมันโนธรรม |
| 14. นายทศพร | ศรีเอี่ยม |
| 15. นายธิตติ | ปวีณชนา |
| 16. รศ.ดร.สุวัฒนา | จิตตลดากร |
| 17. รศ.ดร.พานิช | วุฒิพฤษ์ |
| 18. รศ.สุวัฒน์ | จิตรเศรษฐ์ |
| 19. นายวรรณศักดิ์ | ทรายแก้ว |
| 20. นายบัณฑิต | เตชะแสนศิริ |
| 21. นายวีระวิทย์ | สัตยานนท์ |
| 22. นายสุเมธ | สุรบถโสภณ |
| 23. นายวรัช | กุศลมนมัย |





ประธานคณะกรรมการ

รศ.เอนก

ศิริพานิชกร

รองประธานคณะกรรมการ

1. รศ.ดร.สุทธิศักดิ์
2. รศ.ดร.สุทัศน์
3. ผศ.ดร.วีรัช

ศรลัมพ์
ลีลาทวีวัฒน์
เลิศไพฑูรย์พันธ์

ประธานคณะกรรมการสาขาวิศวกรรมปฐพี

คณะกรรมการ

1. นายณัฐพร
2. รศ.ดร.อมร
3. รศ.ดร.บัญญัติ
4. รศ.ดร.เป็นหนึ่ง
5. นายอรวิทย์
6. รศ.ดร.ทวีป
7. ผศ.ปรีชา
8. นายอนุชิต
9. รศ.ดร.ปิติ

พรหมสุทธิ
พิมานมาศ
ขวัญยืน
วานิชชัย
เหมะจุฑา
ชัยสมภพ
วงศ์วิวัฒน์
เจริญศุภกุล
สุคนธ์สุกุล

ประธานคณะกรรมการสาขาบริหารงานก่อสร้าง
ประธานคณะกรรมการสาขาคอนกรีตและวัสดุ
ประธานคณะกรรมการสาขาวิศวกรรมแหล่งน้ำ
ประธานคณะกรรมการสาขาแผ่นดินไหวและแรงลม
ประธานคณะกรรมการสาขาวิศวกรรมจราจรและขนส่ง
ประธานคณะกรรมการสาขาโครงสร้างเหล็ก
ประธานคณะกรรมการสาขาวิศวกรรมสำรวจ
ประธานคณะกรรมการสาขาโครงสร้างและสะพาน

กรรมการและเลขานุการ

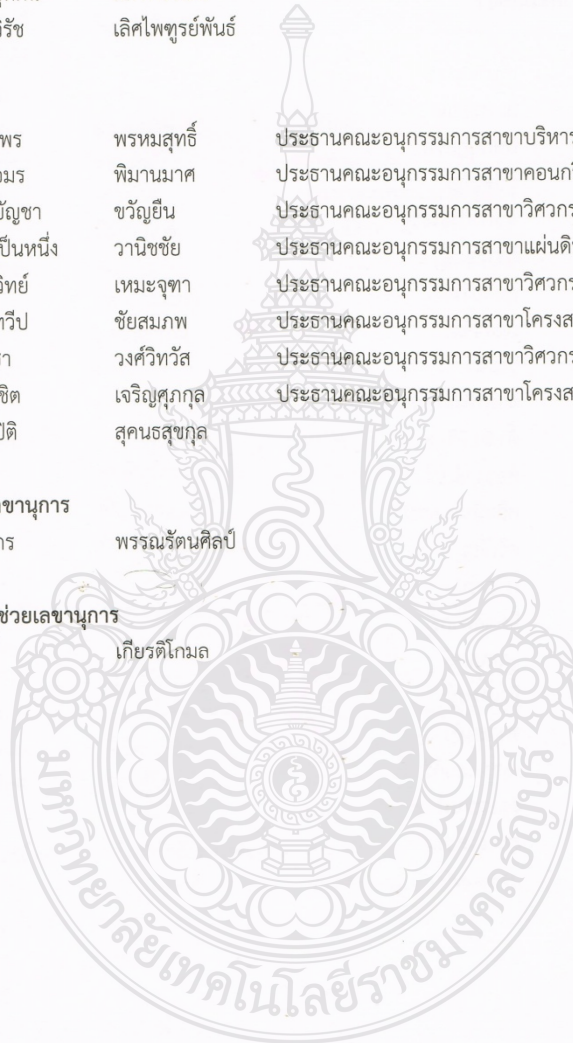
รศ.ดร.พงศกร

พรธรรัตน์ศิลป์

กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

ดร.วศิน

เกียรติโกมล





คณะกรรมการกลางจัดการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 19

ที่ปรึกษา

- | | |
|-----------------------|-------------------|
| 1. ดร.กำพล | ทรัพย์สมบูรณ์ |
| 2. ผศ.ดร.เกรียงศักดิ์ | แก้วกุลชัย |
| 3. ดร.พิสิทธิ์ | ขันดีวัฒนะกุล |
| 4. รศ.ดร.วัชรินทร์ | กาสลัก |
| 5. ผศ.ดร.วิรัช | เลิศไพฑูรย์พันธุ์ |
| 6. ศ.ดร.สุชชีวีร์ | สุวรรณสวัสดิ์ |

ประธานคณะกรรมการ

รศ.เอนก

ศิริพานิชกร

ประธานคณะกรรมการ

คณะกรรมการ

- | | |
|---|---|
| 1. หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา | คณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 2. หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ | คณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 3. หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ | คณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 4. หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา | คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 5. หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ | คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 6. หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา | คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิทยาเขตกำแพงแสน |
| 7. หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม | คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัย
เกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร |
| 8. หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา | คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต |
| 9. หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา | คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| 10. หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา | คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| 11. หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา | คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าธนบุรี |
| 12. หัวหน้าภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธา
และสิ่งแวดล้อม | วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 13. หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา | คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 14. หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา | คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร |
| 15. หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา | คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ศรีวิชัย |
| 16. หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา | คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 17. หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา | คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน |



- | | |
|---|--|
| 18. หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา | คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
อีสาน วิทยาเขตขอนแก่น |
| 19. หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา | สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี |
| 20. หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง | สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี |
| 21. หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา | คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 22. หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา | คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยนเรศวร |
| 23. หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา | คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยบูรพา |
| 24. หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา | คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ |
| 25. ประธานหลักสูตรสาขาวิศวกรรมโยธา | คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยมหาสารคาม |
| 26. หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา | คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยมหิดล |
| 27. หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา | วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 28. หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา | คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยรามคำแหง |
| 29. หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา | คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล |
| 30. คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และทรัพยากร | มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ |
| 31. หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา | คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 32. หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา | คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยศรีปทุม |
| 33. หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา | คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ |
| 34. หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา | คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสยาม |
| 35. หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา | คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| 36. หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา | คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเอเซียอาคเนย์ |
| 37. ผู้อำนวยการกองวิชาวิศวกรรมโยธา ส่วนการศึกษา | โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า |
| 38. หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา | กองวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและโยธากองการศึกษา
โรงเรียนนายเรืออากาศ |
| 39. หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีโยธา | สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธรมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 40. ประธานสาขาวิศวกรรมโยธา | คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 41. หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโครงสร้าง | คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีสถาบันเทคโนโลยี
แห่งเอเชีย |
| 42. หัวหน้าภาควิชาครุศาสตร์โยธา | คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยีมหาวิทยาลัย
เทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี |
| 43. หัวหน้าภาควิชาครุศาสตร์โยธา | คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 44. หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา | คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิทยาเขตศรีราชา |

กรรมการและเลขานุการ

รศ.ดร. พงศกร

พรรณรัตน์ ศิลป์



คณะกรรมการอำนวยการจัดการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 19
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

- | | |
|--------------------------------------|-------------------------|
| 1. อธิการบดี | เป็นที่ปรึกษา |
| 2. คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ | เป็นประธานกรรมการ |
| 3. รองคณบดีฝ่ายบริหาร | เป็นกรรมการ |
| 4. รองคณบดีฝ่ายวิจัยและวิเทศสัมพันธ์ | เป็นกรรมการ |
| 5. รองคณบดีฝ่ายวิชาการ | เป็นกรรมการ |
| 6. รองคณบดีฝ่ายพัฒนานักศึกษา | เป็นกรรมการ |
| 7. รองคณบดีฝ่ายกิจการพิเศษ | เป็นกรรมการ |
| 8. รองคณบดีฝ่ายแผนและสารสนเทศ | เป็นกรรมการ |
| 9. หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา | เป็นกรรมการและเลขานุการ |





คณะกรรมการจัดการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 19
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

คณะกรรมการดำเนินการ

1.	หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา		เป็นประธานอนุกรรมการ
2.	นายพงศกร	พรรณรัตน์ศิลป์	เป็นรองประธานอนุกรรมการ
3.	นายดำรงค์	หอมดี	เป็นที่ปรึกษา
4.	นายดิลก	ศรีนาวิน	เป็นที่ปรึกษา
5.	นายรังษี	นันทสาร	เป็นที่ปรึกษา
6.	นางสุวรรณา	ศรีนาวิน	เป็นอนุกรรมการ
7.	นายชยาทิตย์	วัฒน์วิทย์กิจ	เป็นอนุกรรมการ
8.	นายนิพนธ์	สุวรรณสุขโรจน์	เป็นอนุกรรมการ
9.	นายประกอบ	มณีเนตร	เป็นอนุกรรมการ
10.	นายประเสริฐ	ดำรงชัย	เป็นอนุกรรมการ
11.	นายปริญญา	จินดาประเสริฐ	เป็นอนุกรรมการ
12.	นายปิติ	อังสุไวยัย	เป็นอนุกรรมการ
13.	นายพิชิต	ลัทธิสงเนิน	เป็นอนุกรรมการ
14.	นายไพฑูรย์	โล่ห์สุนทร	เป็นอนุกรรมการ
15.	นายยิ่งศักดิ์	พรรณเชษฐ์	เป็นอนุกรรมการ
16.	นายวิโรจน์	ชัยธรรม	เป็นอนุกรรมการ
17.	นายสวงน	ปัทมธรรมกุล	เป็นอนุกรรมการ
18.	นายสอาด	ธรรมกนก	เป็นอนุกรรมการ
19.	นายสังจะ	เสถบุตร	เป็นอนุกรรมการ
20.	นางลัดดา	ต้นวานิชกุล	เป็นอนุกรรมการ
21.	นางวิชุดา	เสถียรนาม	เป็นอนุกรรมการ
22.	นางสาวตฤดี	หอมดี	เป็นอนุกรรมการ
23.	นางสาวธัญดา	พรรณเชษฐ์	เป็นอนุกรรมการ
24.	นางสาวรัตมณี	นันทสาร	เป็นอนุกรรมการ
25.	นายกิตติเวช	ขันตยวิชัย	เป็นอนุกรรมการ
26.	นายจารึก	ธีระวงษ์	เป็นอนุกรรมการ
27.	นายเฉลิมชัย	พาวัฒนา	เป็นอนุกรรมการ
28.	นายชาติชาย	ไวยสุระสิงห์	เป็นอนุกรรมการ

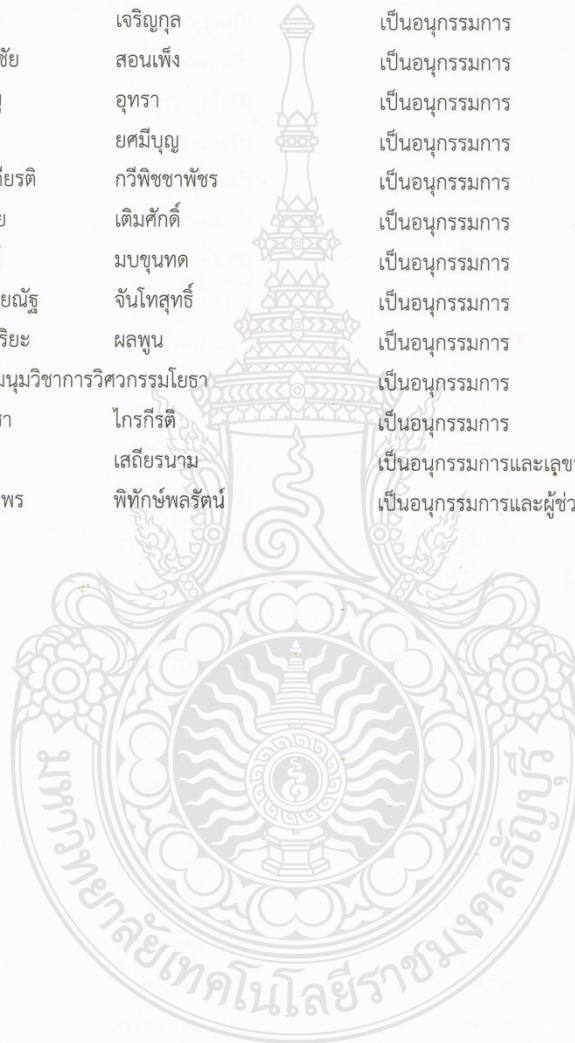


29. นายณรงค์	เหลื่องบุตรนาค	เป็นอนุกรรมการ
30. นายณัฐพงษ์	อารีมิตร	เป็นอนุกรรมการ
31. นายธัญลักษณ์	ราษฎร์ภักดี	เป็นอนุกรรมการ
32. นายปิยะวัชร	ฝอยทอง	เป็นอนุกรรมการ
33. นายพนกฤษณ	คลังบุญครอง	เป็นอนุกรรมการ
34. นายพิศพันธ์	ชาญวสุนันท์	เป็นอนุกรรมการ
35. นายเมธี	บุญพิเชษฐวงศ์	เป็นอนุกรรมการ
36. นายวัชรินทร์	กาสลัก	เป็นอนุกรรมการ
37. นายวันชัย	สะตะ	เป็นอนุกรรมการ
38. นายวินัย	ศรีอำพร	เป็นอนุกรรมการ
39. นายวีระ	หอสกุลไท	เป็นอนุกรรมการ
40. นายสุรเชษฐ์	มังมีศรี	เป็นอนุกรรมการ
41. นายสุรัตน์	ประมวลศักดิ์กุล	เป็นอนุกรรมการ
42. ว่าที่ ร.ต.กอปร	ศรีนาวิน	เป็นอนุกรรมการ
43. นางจรรวรณ	ก้อนจันทร์	เป็นอนุกรรมการ
44. นางสาวจรรณี	นวลบุญมา	เป็นอนุกรรมการ
45. นางสาวจุฑารัตน์	รุ่งเรือง	เป็นอนุกรรมการ
46. นางสาวพัชรี	นิมา	เป็นอนุกรรมการ
47. นางสาวยุวธิดา	นามสีฐาน	เป็นอนุกรรมการ
48. นางสาวลัดดาภรณ์	อินตาทามแห	เป็นอนุกรรมการ
49. นางสาวสุกัญญา	คำมูล	เป็นอนุกรรมการ
50. นางสาวสุนันทา	มัธยมย์	เป็นอนุกรรมการ
51. นางสาวเสาวนา	เสียงสนั่น	เป็นอนุกรรมการ
52. นางสาวอรุณศรี	กวานดา	เป็นอนุกรรมการ
53. นางเสาวรภย์	เจริญกุล	เป็นอนุกรรมการ
54. นางอนุรักษ์	ไยแก้ว	เป็นอนุกรรมการ
55. นายเจริญ	นามสีฐาน	เป็นอนุกรรมการ
56. นายชัยยา	คำสมน้อย	เป็นอนุกรรมการ
57. นายณัฐพงษ์	ฝ่ายบุญ	เป็นอนุกรรมการ
58. นายณัฐพล	พรสัตยวงศ์	เป็นอนุกรรมการ
59. นายตรกรวิทย์	คำก้อน	เป็นอนุกรรมการ
60. นายธีรฉัตร	อนิวรรณเมธี	เป็นอนุกรรมการ



จัดโดย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
และวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.)

61.	นายประดิษฐ์ กาบจันทร์	เป็นอนุกรรมการ
62.	นายพงศ์พันธ์ คำสิงห์	เป็นอนุกรรมการ
63.	นายพงษ์ศักดิ์ มณีกุล	เป็นอนุกรรมการ
64.	นายพิทักษ์ นามสิงห์พันธ์	เป็นอนุกรรมการ
65.	นายพิพัฒน์พงศ์ พันธุ์รัตน์	เป็นอนุกรรมการ
66.	นายมานพ เจริญกุล	เป็นอนุกรรมการ
67.	นายมานะชัย สอนเพ็ง	เป็นอนุกรรมการ
68.	นายวรัญญู อุทรา	เป็นอนุกรรมการ
69.	นายวิรุฬห์ ยศมีบุญ	เป็นอนุกรรมการ
70.	นายสกลเกียรติ กวีพิชชาพัชร	เป็นอนุกรรมการ
71.	นายสมชาย เต็มศักดิ์	เป็นอนุกรรมการ
72.	นายสุวัฒน์ มบขุนทด	เป็นอนุกรรมการ
73.	ว่าที่ ร.ต.ปิยณัฐ จันทโสทธิ	เป็นอนุกรรมการ
74.	ว่าที่ ร.ต.สุริยะ ผลพูน	เป็นอนุกรรมการ
75.	ประธานชุมนุมวิชาการวิศวกรรมโยธา	เป็นอนุกรรมการ
76.	นางสาวนิชา ไกรกীরดี	เป็นอนุกรรมการ
77.	นายธเนศ เสถียรนาม	เป็นอนุกรรมการและเลขานุการ
78.	นางสาวจตุพร พิทักษ์พลรัตน์	เป็นอนุกรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ





ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 19

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ

1	ศ.ดร.ธีรพงศ์	เสนจันทร์ดีไชย	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2	ศ.ดร.เอกสิทธิ์	ลิ่มสุวรรณ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
3	รศ.ดร.เกษม	ชูจารุกุล	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
4	รศ.ดร.ธีรวัตร	บุญยะฐี	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
5	รศ.ดร.ธัญวัฒน์	โพธิศิริ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
6	รศ.ดร.บรรเจิด	พละการ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
7	รศ.ดร.บุญไชย	สถิตมันโนธรรม	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
8	รศ.ดร.วิสุทธิ	ช่อวิเชียร	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
9	รศ.ดร.ศักดิ์สิทธิ์	เฉลิมพงศ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
10	รศ.ดร.สรวิศ	นฤปิติ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
11	รศ.ดร.สุเชษฐ์	ลิขิตเลอสรวง	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
12	รศ.ดร.อัศววัชร	เล่นวารี	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
13	รศ.วิชัย	เยี่ยงวีรชน	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
14	ผศ.ดร.จิตติชัย	รจนกนกนาฏ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
15	ผศ.ดร.ฉัตรพันธ์	จินตนาภักดี	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
16	ผศ.ดร.ธเนศ	ศรีศิริโรจนากร	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
17	ผศ.ดร.นพดล	จอกแก้ว	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
18	ผศ.ดร.มาโนช	โลหเตปานนท์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
19	ผศ.ดร.วัชรระ	เพียรสุภาพ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
20	ผศ.ดร.ศรีเลิศ	โชติพันธ์รัตน์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
21	อ.ดร.เบญจพร	สุวรรณศิลป์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
22	อ.ดร.อรอนงค์	ลาภปริสุทธิ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
23	ศ.ดร.วิโรจน์	รุโจปการ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
24	รศ.ดร.ก่อโชค	จันทรวงกูร	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
25	รศ.ดร.ชวเลข	วนิชเวทิน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
26	รศ.ดร.ตีบุญ	เมธากุลชาติ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
27	รศ.ดร.วัชรินทร์	วิทย์กุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
28	รศ.ดร.สุธาริน	สถาปัตตานนท์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
29	รศ.ดร.สุทธิศักดิ์	ศรีลัมพ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
30	รศ.ดร.สุวัฒนา	จิตตลดากร	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
31	รศ.ดร.สุวิมล	สัจจวาณิชย์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



จัดโดย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
และวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.)

32	ผศ.ดร.กิจพัฒน์	ภู่วรรณ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
33	ผศ.ดร.ปิยนุช	เวทย์วิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
34	ผศ.ดร.วราเมศวร์	วิเชียรแสน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
35	ผศ.ดร.วันชัย	ยอดสุดใจ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
36	ผศ.ดร.วีระเกษตร	สวนผกา	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
37	ผศ.ดร.เหมือนมาศ	วิเชียรสินธุ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
38	ผศ.ดร.อดิษฐ์	พรพรหมินทร์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
39	ผศ.ดร.เอกสิทธิ์	โฆสิตสกุลชัย	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
40	ผศ.ทีฆวุฒิ	พุทธภิมย์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
41	อ.ดร.จิระกานต์	ศิริวิชญ์ไมตรี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
42	อ.ดร.จิระวัฒน์	กณะสุด	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
43	อ.ดร.ปนัดดา	กลกิจวิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
44	อ.ดร.พรรณทิพย์ พุทธรักษา	มะเปี่ยม	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
45	อ.ดร.ยวดี	แช่ตั้ง	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
46	อ.ดร.วิษุวัตม์	แต่สมบัติ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
47	อ.ดร.สมชาย	ดอนเจดีย์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
48	อ.ดร.สโรช	บุญศิริพันธ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
49	อ.ดร.สุภาพร	แก้วกอ เลี้ยวไพโรจน์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
50	อ.ดร.สุรียน	เปรมปรีชาโมทย์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
51	อ.ดร.เอกชัย	ศิริกิจพานิชย์กุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
52	อ.ฐิตาภรณ์	พอบุตรี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
53	อ.ต่อศักดิ์	ประเสริฐสังข์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
54	อ.ทศพล	จตุระบุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
55	ศ.ดร.ปริญญา	จินดาประเสริฐ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
56	รศ.ดร.เฉลิมชัย	พาวัฒนา	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
57	รศ.ดร.พงศกร	พรรณรัตน์ศิลป์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
58	รศ.พัชรี	ทอวิจิตร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
59	รศ.วินัย	ศรีอำพร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
60	รศ.วีระ	หอสกุลไท	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
61	ผศ.ดร.กอบปร	ศรีนาวิน	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
62	ผศ.ดร.จารึก	ถิระวงษ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
63	ผศ.ดร.ชาติชาย	ไวยสุระสิงห์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
64	ผศ.ดร.ณรงค์	เหลือ่งบุตรนาค	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
65	ผศ.ดร.ณัฐพงษ์	อารีมิตร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
66	ผศ.ดร.ตลฤดี	หอมดี	มหาวิทยาลัยขอนแก่น



67	ผศ.ดร.ธนศ	เสถียรนาม	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
68	ผศ.ดร.ธัญดา	พรรณเชษฐ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
69	ผศ.ดร.พนกฤษณ	คลังบุญครอง	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
70	ผศ.ดร.รัตมณี	นันทสาร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
71	ผศ.ดร.ลัดดา	ต้นวาณิชกุล	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
72	ผศ.ดร.วันชัย	สะตะ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
73	ผศ.ดร.วิชุดา	เสถียรนาม	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
74	อ.ดร.กิตติเวช	ขันตยวิชัย	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
75	อ.ดร.ธนากร	เมธาธรรม	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
76	อ.ดร.ธัญลักษณ์	ราษฎร์ภักดี	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
77	อ.ดร.ปิยะวัชร	ฝอยทอง	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
78	อ.ดร.พัศพันธ์	ชาญวสุนันท์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
79	อ.สุรัตน์	ประมวลศักดิ์กุล	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
80	รศ.ชูโชค	อายุพงศ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
81	รศ.ดร.ธนพร	สุปรียศิลป์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
82	ผศ.ดร.พุทธิพล	ดำรงชัย	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
83	อ.ดร.เกรียงไกร	อรุณทยานันท์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
84	อ.ดร.ปรีดา	พิชยาพันธ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
85	อ.ดร.รังสรรค์	อุดมศรี	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
86	อ.ดร.อรรถวิทย์	อุปโยคิน	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
87	ศ.ดร.ชัย	จาดูรพิทักษ์กุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
88	ศ.ดร.ชัยยุทธ	ชินณะราศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
89	รศ.ดร.พรเกษม	จงประดิษฐ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
90	รศ.ดร.วีโรจน์	ศรีสุรภานนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
91	ผศ.ดร.ธิดารัตน์	บุญศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
92	ผศ.ดร.พิชญ์	สุธีรวรรณนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
93	ผศ.ดร.วรัช	ก้องกิจกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
94	ผศ.ดร.วิลานี	อยู่ชัชวาล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
95	ผศ.ดร.วีรชาติ	ตั้งจิรภัทร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
96	ผศ.ดร.วุฒิพงศ์	เมื่อน้อย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
97	อ.ดร.ชัยวัฒน์	เอกวัฒน์พานิชย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
98	อ.ดร.ทรงเกียรติ	ภัทรปัทมาวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
99	อ.ดร.ประพัทธ์	พงษ์เกียรติกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
100	รศ.ดร.กิตติชัย	ธนทรัพย์สิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
101	รศ.ดร.ปิติ	สุนทรสุขกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



102	รศ.ดร.พานิช	วุฒิปฤกษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
103	รศ.ดร.วรรณวิทย์	แต่มทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
104	รศ.ดร.สมิตร	ส่งพิริยะกิจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
105	รศ.ดร.สุพรชัย	อุทัยนฤมล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
106	ผศ.ดร.เทอดศักดิ์	รองวิริยะพานิช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
107	อ.ดร.ณัฐพงศ์	มกระธัช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
108	รศ.ดร.สายสุนีย์	พุทธาคุณเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
109	ผศ.ดร.ปิติศานต์	กร้ามาตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
110	อ.ดร.จตุพล	ตั้งปกาศิต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
111	ผศ.ดร.สำเร็จ	รักซ้อน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
112	รศ.จรรุญ	เจริญเนตรกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
113	ผศ.นัฐวุฒิ	ทิพย์โยธา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
114	อ.ดร.เกียรติสุดา	สมนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
115	อ.ดร.รัฐพล	สมนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
116	รศ.ดร.วชรภูมิ	เบญจโอฬาร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
117	รศ.ดร.วัฒน์วงศ์	รัตนวราห	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
118	รศ.ดร.สิทธิชัย	แสงอาทิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
119	รศ.ดร.อวิรุทธิ์	ชินกุลกิจนิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
120	ผศ.ดร.ฉัตรชัย	โชติชอุษากร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
121	ผศ.ดร.ธีรวัฒน์	สินศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
122	ผศ.ดร.ปรียาพร	โกษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
123	ผศ.ดร.พรพจน์	ตันเส็ง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
124	ผศ.ดร.รัฐพล	ภูบุผาพันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
125	อ.ดร.ศิริดล	ศิริธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
126	รศ.ดร.ชวลิต	ชาลีรักษ์ตระกูล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
127	รศ.ดร.นคร	ภู่วโรตม	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
128	รศ.ดร.บุรฉัตร	ฉัตรวีระ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
129	รศ.ดร.วีรยา	ฉิมอ้อย	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
130	รศ.ดร.สายันต์	ศิริมนตรี	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
131	ผศ.ดร.กฤตยาฤทธิ์	ชมภูนึ่ง	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
132	ผศ.ดร.ภาวิณี	เอี่ยมตระกูล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
133	ผศ.ดร.สสิกรณณ์	เหลื่องวิซชเจริญ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
134	อ.ดร.ดุชฎี	สลิเรษฐทวี	มหาวิทยาลัยนเรศวร
135	ผศ.ดร.ทวีชัย	ล้ำราญวานิช	มหาวิทยาลัยบูรพา
136	ผศ.ดร.ธรรมบุญ	รัศมีมาสเมือง	มหาวิทยาลัยบูรพา



137	ผศ.ดร.วิเชียร	ชาติ	มหาวิทยาลัยบูรพา
138	ผศ.ดร.สยาม	ยิ้มศิริ	มหาวิทยาลัยบูรพา
139	ผศ.ดร.สุรเมศวร์	พิริยะวัฒน์	มหาวิทยาลัยบูรพา
140	อ.ดร.ฐิติมา	วงศ์อินตา	มหาวิทยาลัยบูรพา
141	อ.ดร.ปิติ	โรจน์วรรณสินธุ์	มหาวิทยาลัยบูรพา
142	อ.ดร.พัชรพงษ์	อาสนจินดา	มหาวิทยาลัยบูรพา
143	อ.ดร.เพชรรัตน์	ลิ้มสุปรียรัตน์	มหาวิทยาลัยบูรพา
144	อ.เรือเอก ดร.สรารัฐ	ลักษณะโต	มหาวิทยาลัยบูรพา
145	ผศ.ดร.ณัฐพงษ์	ดำรงวิริยะนุภาพ	มหาวิทยาลัยพะเยา
146	ผศ.ดร.ธนกร	ชมภูรัตน์	มหาวิทยาลัยพะเยา
147	ผศ.ดร.สมบูรณ์	เซียงฉิน	มหาวิทยาลัยพะเยา
148	ผศ.ดร.กริสัน	ชัยมูล	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
149	ผศ.ดร.เรืองรุชดี	ชีระโรจน์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
150	ผศ.ดร.สพลาภ	หอมวุฒิวงศ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
151	ผศ.ดร.ธัชวีร์	ลิละวัฒน์	มหาวิทยาลัยมหิดล
152	ผศ.ดร.สมชาย	ปฐมศิริ	มหาวิทยาลัยมหิดล
153	อ.ดร.ชลลดา	เลาะพอ	มหาวิทยาลัยมหิดล
154	ผศ.ดร.วรรณิ	ศุขสาคร	มหาวิทยาลัยรังสิต
155	ผศ.สมศักดิ์	เอื้ออัมมาลัย	มหาวิทยาลัยรังสิต
156	อ.ดร.กรกนก	บุญเสริม	มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
157	อ.ดร.สกลวรรณ	ห่านจิตสุวรรณ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
158	ผศ.ดร.वलันต์	ธีระเจตกุล	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
159	ศ.ดร.พิชัย	ธานีรณานนท์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
160	ผศ.ดร.ธนนท์	ชูอุปการ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
161	ผศ.ดร.ภาสกร	ชัยวิริยะวงศ์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
162	อ.ดร.ปรเมศวร์	เหลือเทพ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
163	อ.ดร.วิชัยรัตน์	แก้วเจือ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
164	อ.ดร.ฐกมลพัศ	เจนจิวัฒนกุล	มหาวิทยาลัยสยาม
165	รศ.ดร.สถาพร	โกศา	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
166	ผศ.ดร.เกรียงศักดิ์	แก้วกุลชัย	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
167	ผศ.ดร.สิทธา	เจนศิริศักดิ์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
168	อ.ดร.ถนัดกิจ	ชาวีรัตน์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
169	พ.อ.ผศ.ดร.ไท	ชาญกุล	โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
170	อ.ดร.ภัควัฒน์	แสนเจริญ	สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร
171	อ.ดร.รักติพงษ์	สหมิตรมงคล	สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร



จัดโดย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
และวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.)

172	อ.ดร.วรางคณา	แสงสร้อย	สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร
173	รศ.ดร.จักรพงษ์	พงษ์เพ็ง	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
174	รศ.ดร.เอกชัย	สุมาลี	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
175	รศ.แหลมทอง	เหล่าคงถาวร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
176	ผศ.ดร.อุมา	สินุญเรื่อง	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
177	อ.ดร.จรัส	พิทักษ์ศฤงคาร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
178	ดร.สุเมธ	องกิตติกุล	สถาบันวิจัยเพื่อการพัฒนาประเทศไทย

หมายเหตุ: เรียงลำดับตามชื่อสถาบันการศึกษา หน่วยงานราชการ และหน่วยงานเอกชน (ก-ฮ)





จัดโดย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
และวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.)

Technical Session 5: Fiber and Applications

Room: ERAWAN 1

Chairperson: Prof. Somnuk Tangtermsirikul, Dr. Rattapon Somna

Time	Paper ID	Title	Page No
10:30 - 11:00	Invited 1	Fibre Reinforced Bulletproof Concrete Panel with Cushion Layer Made of Rubberized Concrete	86
11:00 - 11:15	88	An Improvement of Mechanical Properties of Oil Palm Wood by Squeeze Method and Using Bioresin	149
11:15 - 11:30	137	Flexural Toughness Enhancement of Hooked-End SFRC	149
11:30 - 11:45	449	Experimental Study on Durability Properties of Fiber Reinforced Concrete	150
11:45 - 12:00	589	Development of Physic – Nut Composite Plastic Material for Construction Industry	150

Technical Session 6: Concrete Durability II

Room: ERAWAN 1

Chairperson: Assoc. Prof. Prasert Suwanvitaya, Asst. Prof. Sahalap Homvutivong

Time	Paper ID	Title	Page No
13:00 - 13:30	Invited 2	Analytical Simulation of Thermal Cracking in Mass Concrete	87
13:30 - 13:45	133	Performance of Corrosion Inhibitors to Prevent Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete due to Chloride	151
13:45 - 14:00	161	Chloride Penetration, Corrosion of Reinforcing Steel and Compressive Strength of Concrete Containing Fly Ash and Concrete with Slag Cement after 4-Year Exposure in Marine Environment	151
14:00 - 14:15	179	Time to Initial Corrosion of Steel Reinforcement in Concrete Containing Rice Husk-Bark Ash under Marine Environment	152
14:15 - 14:30	188	Effect of Concentration of Sulfate Solution on Expansion and Weight Loss of Mortar	152
14:30 - 14:45	516	A Study of Compressive Strength and Chloride Resistance of Concretes Cured in Water and Air	153
14:45 - 15:00	517	Effect of Various Pozzolanic Materials on Alkali-Silica Reaction	153



Performance of Corrosion Inhibitors to Prevent Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete Due to Chloride

Tomorn Boonnun¹, Pitisan Krammart², Pakawat Sancharoen³, Somnuk Tangtermsirikul⁴

¹Rajamangala University of Technology Thanyaburi

²Rajamangala University of Technology Thanyaburi

³Construction And Maintenance Technology Research Center, Sirindhorn International Institute of Technology Thammasat University

⁴Department of Civil Engineering And Technology, Sirindhorn International Institute of Technology Thammasat University

E-mail: ¹tomorncivil@gmail.com, ²pitisan.k@mutt.ac.th, ³pakawat@siit.tu.ac.th, ⁴somnuk@siit.tu.ac.th

ABSTRACT

One of damages usually found on reinforced concrete structure is corrosion of reinforcing steel. Therefore, corrosion prevention method to extend service lifetime of structure is important to be studied. Corrosion inhibitor is one of possible prevention methods. This research studied the effectiveness of corrosion inhibitors, both of admixture type and concrete surface coating type. Concrete mix proportion was varied by fly ash replacement ratio, water to binder ratio, amount of internal chloride and amount of applied corrosion inhibitors. Moreover, normal carbon reinforcing steel and phosphate coated reinforcing steel were studied. Corrosion acceleration was done by ponding 10% by weight of sodium chloride solution above the top surface of specimen. Corrosion of reinforcing steel was measured by corrosion current measurement according to ASTM G109 and half-cell potential measurement according to ASTM C876. Finally, critical chloride content was determined by concrete powder drilling after corrosion of reinforcing steel was initiated by titration method. Obtained results can be used as a guideline to select corrosion inhibitor effectively to prevent corrosion of reinforcing steel.

Keywords: Corrosion, Corrosion Inhibitor, Maintenance, Chloride

Chloride Penetration, Corrosion of Reinforcing Steel and Compressive Strength of Concrete Containing Fly Ash and Concrete with Slag Cement After 4-Year Exposure in Marine Environment

Nattapon Wongwan¹, Taweechai Sumranwanich², Sontaya Tongaroonsri³, Somnuk Tangtermsirikul⁴

^{1,2}Department of Civil Engineering, Burapha University

³Department of Civil And Environmental Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna

⁴Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasat University

E-mail: ¹muicivil@hotmail.com, ²twc@buu.ac.th, ³sontaya@mutl.ac.th, ⁴somnuk@siit.tu.ac.th

ABSTRACT

This research aims to study chloride penetration resistance, corrosion of reinforcing steel and compressive strength in concrete exposed to marine environment for 4 years. The binders were Portland cement type 1, fly ash and slag cement. Fly ash to binder ratio of 0.20, 0.40 and 0.60 were used. Water to binder ratio was varied at 0.40, 0.50 and 0.60. Reinforcing steels of RB12 were embedded in concrete cube specimens of 20 cm size at covering depths of 1, 2, 5 and 7.5 cm exposed in tidal zone of marine environment. From the experimental results, it was found that concrete with fly ash had higher chloride penetration resistance than concrete with Portland cement type 1 only. Concrete with slag cement had low chloride diffusion coefficient and close to concrete with fly ash replacement of 60%. The increase of compressive strength of concrete resulted in higher chloride penetration resistance and lower weight loss of reinforcing steel.

Keywords: Chloride Penetration, Compressive Strength, Fly Ash, Concrete



ประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมในการป้องกัน
การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์

PERFORMANCE OF CORROSION INHIBITORS TO PREVENT

CORROSION OF REINFORCING STEEL IN CONCRETE DUE TO CHLORIDE

โตมร บุญหนู่น^{1*} ปิติศักดิ์ กร่ำมาตร์² ภักดิ์พันธ์ แสนเจริญ³ และสมนึก ตั้งเดิมสิริกุล⁴

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

³ ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

⁴ ภาควิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

ความเสียหายที่มักพบในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก คือ การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในระยะเวลาที่รวดเร็ว ก่อให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้างเป็นอย่างมาก ดังนั้นวิธีที่จะยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างได้นั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องทำการศึกษา โดยงานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมทั้งชนิดที่ผสมเพิ่มในคอนกรีตและการทาผิวคอนกรีต โดยปรับเปลี่ยนสัดส่วนผสมของคอนกรีต การแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่ร้อยละ 15 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ปริมาณคลอไรด์เริ่มต้น ปริมาณของสารยับยั้งการเกิดสนิมที่ใช้งาน และเหล็กเสริมชนิดเหล็กธรรมดา และเหล็กที่ผ่านกระบวนการชุบโซเดียมฟอสเฟต การทดลองในสภาวะเร่งให้เกิดสนิมโดยขังสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จากนั้นทำการทดสอบโดยการวัดกระแสการเกิดสนิมตามมาตรฐาน ASTM G109 และการวิเคราะห์หาศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ตามมาตรฐาน ASTM C876 และการวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากการนำผงคอนกรีตที่ได้จากการเจาะจากตัวอย่างคอนกรีตมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ เพื่อนำมาเปรียบเทียบระหว่างเหล็กเสริมธรรมดา กับเหล็กเสริมที่ชุบโซเดียมฟอสเฟต และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมแต่ละชนิด

คำสำคัญ: การเกิดสนิมของเหล็กเสริม, สารยับยั้งการเกิดสนิม, การบำรุงรักษา, คลอไรด์

Abstract

One of damages usually found on reinforced concrete structure is corrosion of reinforcing steel. Therefore, corrosion prevention method to

* ผู้เขียนผู้รับผิดชอบบทความ (Corresponding author)

E-mail address: tomorncivil@gmail.com

extend service lifetime of structure is important to be studied. Corrosion inhibitor is one of possible prevention methods. This research studied the effectiveness of corrosion inhibitors, both of admixture type and concrete surface coating type. Concrete mix proportion was varied by fly ash replacement ratio, water to binder ratio, amount of internal chloride and amount of applied corrosion inhibitors. Moreover, normal carbon reinforcing steel and phosphate coated reinforcing steel were studied. Corrosion acceleration was done by ponding 10% by weight of sodium chloride solution above the top surface of specimen. Corrosion of reinforcing steel was measured by corrosion current measurement according to ASTM G109 and half-cell potential measurement according to ASTM C876. Finally, critical chloride content was determined by concrete powder drilling after corrosion of reinforcing steel was initiated by titration method. To be compared between conventional steel reinforcement impregnated with sodium phosphate. And compare the performance of different types of rust inhibitors.

KEYWORDS: Corrosion, Corrosion Inhibitor, Maintenance, Chloride

1. บทนำ

การเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นปัญหาที่ต้องปรับปรุงแก้ไขและป้องกันโดยการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้น นอกจากนี้ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะคำนึงถึงคำนึงถึงความคงทนของโครงสร้างต่อสภาพแวดล้อมบริเวณใช้งาน นอกเหนือจากความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก เพื่อให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานตามวัตถุประสงค์ขึ้น ความเสียหายที่มักพบในโครงสร้าง

คอนกรีตเสริมเหล็ก คือ การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในระยะเวลาที่รวดเร็ว ทำให้หน้าตัดเหล็กเดิมนั้นเพิ่มขึ้น คัดให้คอนกรีตให้แตกตัวออก ทำให้การรับกำลังของโครงสร้างลดลง การเกิดสนิมนั้นจะถูกลามอย่างรวดเร็ว จำเป็นต้องมีการป้องกันและซ่อมแซมในส่วนที่เสียหาย อย่างถูกวิธี การซ่อมแซมโครงสร้างสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การสกัดส่วนที่เสียหายออกแล้วเทคอนกรีตใหม่เข้าไปแทนที่ หรือใช้วิธีการทาสีกันสนิมไฟฟ้าเคมีเข้าไปซ่อมแซม แต่จะมีข้อเสีย คือ อาจจะต้องขุดและค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง หรืออาจซ่อมแซมได้ไม่ทั่วถึง ซึ่งในทางปฏิบัติควรพิจารณาให้ดี [1]

สิ่งที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นเกี่ยวกับการเกิดปัญหาในการป้องกันการเกิดสนิมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เผชิญกับสภาพแวดล้อมคลอรีน ที่นิยมใช้กัน และมีการศึกษาอย่างแพร่หลาย คือ การใช้สารผสมเพิ่มที่ช่วยป้องกันการเกิดสนิมที่ผสมในคอนกรีต และเป็นสารที่ใช้ทาที่ผิวคอนกรีต ซึ่งผลิตภัณฑ์ดังกล่าวจะมีอยู่หลายชนิด ในแต่ละชนิดจะมีสารประกอบที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งในการวิจัยนี้จะทำการทดสอบประสิทธิภาพของสารช่วยป้องกันการเกิดสนิมว่าชนิดใดที่สามารถใช้งานได้จริง และได้ดีและก่อให้เกิดผลประโยชน์สูงสุด และซึ่งสามารถนำไปสู่การพัฒนาได้อย่างต่อเนื่อง

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 พฤติกรรมความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีต

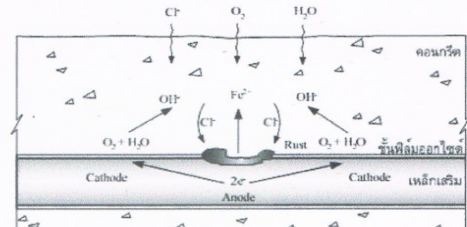
พฤติกรรมความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ซึ่งจำแนกตามลักษณะความเสียหายที่พบเห็นกันอยู่บ่อย ได้แก่ ความบกพร่องจากการก่อสร้าง (Construction Faults), รอยร้าว (Cracking), การสลายตัวของคอนกรีต (Disintegration), การบิดเบี้ยวหรือเคลื่อนตัวของโครงสร้าง (Distortion and Movement), การสูญเสียผิวคอนกรีตเนื่องจากการกัดเซาะ (Erosion), การวิบัติของวัสดุอุดรอยต่อ (Joint Sealant Failure), การรั่วซึมของน้ำ (Seepage), การหลุดร่อนของคอนกรีต (Spalling) และการเกิดรอยร้าวขนานกับผิวเหล็กเสริมในคอนกรีต (Delamination) [2]

สาเหตุที่สำคัญที่สุดในการเสื่อมสภาพทางด้านความคงทนในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กคือการกัดกร่อน ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายเป็นอย่างมาก เป็นผลมาจากการเกิดสนิมเหล็กในโครงสร้างก่อนเวลาอันควร ในด้านการบำรุงรักษาและการซ่อมแซมโครงสร้างในส่วนที่เสียหายเพื่อความปลอดภัยจึงต้องมีการตรวจสอบประสิทธิภาพและประสิทธิผลของการเกิดสนิมด้วย [3]

2.2 กระบวนการเกิดสนิมเนื่องจากคลอรีน

โดยปกติคอนกรีตจะมีสภาพความเป็นด่างสูง คือ มีค่า pH ระหว่าง 12.5-13.5 ทำให้เกิดชั้นฟิล์มของออกไซด์ (Protective Passivity Layer) บางๆเคลือบอยู่ที่ผิวเหล็กเสริม เรียกว่า ฟิล์มออกไซด์ของเหล็ก ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$: Gamma ferric oxide) แต่เมื่อคลอรีนสามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตจนถึงผิวของเหล็กเสริมได้ โดยชั้นของฟิล์มออกไซด์ดังกล่าวจะถูกทำลาย จนกระทั่งเมื่อความหนาของชั้นฟิล์มดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าระดับวิกฤติ เหล็กเสริมในบริเวณนั้นก็จะเกิดสนิมได้ ซึ่งเรียกว่า

Depassivation และในขณะที่เดียวกันหากบริเวณดังกล่าวมีออกซิเจนและความชื้นในปริมาณที่พอเหมาะ กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีก็จะเกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 1 [4]



รูปที่ 1 การเกิดปฏิกิริยาเคมีของการกัดกร่อนเหล็กเสริมเนื่องจากคลอรีน [4]

2.3 การป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอรีน

2.3.1 ปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตและเหล็กเสริม

ทำได้โดยออกแบบและใช้คอนกรีตที่มีความชื้นน้ำต่ำมากๆ โดยการลดอัตราส่วน w/b, การใช้วัสดุผงทดแทนปูนซีเมนต์, การใช้สารผสมเพิ่มบางชนิด, การเคลือบผิวเหล็ก และการใช้เหล็กกล้าไร้สนิม

2.3.2 การอาศัยขบวนการทางไฟฟ้าเคมี มีอยู่ 2 วิธี ได้แก่

1. วิธี Cathodic Protection คือ คิดโลหะที่สามารถเกิดสนิมได้เร็วกว่าเหล็กไว้กับเหล็กเสริม เรียกโลหะนี้ว่า "Sacrificial Anode" และการส่งไฟฟ้ากระแสตรงสู่เหล็กเสริม ซึ่งเรียกว่า "Impressed current Anode" เป็นการปรับความต่างศักย์ไฟฟ้าของทั้งสองขั้วให้เท่ากัน จะช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าขึ้นได้

2. วิธี Desalination และ Realkalization หลักการคือ เมื่อแท่งคอนกรีตที่มีไอออนคลอรีน ถูกวางอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ไอออนของคลอรีนซึ่งมีประจุลบ จะเคลื่อนที่ไปสู่ขั้วบวก จะช่วยเพิ่มความดันในคอนกรีต และลดปริมาณคลอรีนในคอนกรีตได้ โดยเฉพาะรอบผิวของเหล็กเสริมที่มีประจุเป็นลบ

2.3.3 การใช้สารยับยั้งการเกิดสนิม

สารยับยั้งการเกิดสนิม หรือ Corrosion Inhibitor เป็นสารที่ใช้งานในลักษณะผสมเพิ่มในคอนกรีต และแบบทาที่ผิวคอนกรีต ซึ่งจะช่วยป้องกันและยับยั้งกระบวนการในการเกิดสนิมได้ โดยจะช่วยลดอัตราการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของโลหะ เพิ่มความสามารถในการจับยึดคลอรีน ช่วยยับยั้งและลดปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในสารละลายภายในช่องว่างของคอนกรีตได้ เป็นต้น ได้มีการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับสารยับยั้งการเกิดสนิมมาอย่างต่อเนื่อง รวมถึงในด้านการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กให้มีความคงทนตลอดอายุการใช้งาน โดยได้ทำการศึกษานในตัวของสารที่ใช้เคลือบที่ผิวเหล็กเสริม ในการป้องกันการซึมผ่านของความชื้น และออกซิเจนที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยาในการเกิดสนิมที่เหล็กเสริม และหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกลไกของสารยับยั้งการเกิดสนิม โดยสารยับยั้งทั้งหลายสามารถจัดหมวดหมู่ออกเป็นประเภทอะโนดิก ประเภทคาโทดิกและประเภทแบบผสม [5]

3. การดำเนินงานวิจัย

โดยวิธีการใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมเป็นส่วนหนึ่งในงานวิจัยนี้ ซึ่งได้ทำการศึกษาสารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทผสมเพิ่มและหาที่ผิวคอนกรีตในการลดอัตราการเกิดสนิมของตัวอย่างที่มีปริมาณคลอไรด์จากภายในตั้งแต่ขั้นคอนกรีตผสมคอนกรีตและตัวอย่างที่มีการซึมผ่านของคลอไรด์จากภายนอกของคอนกรีตที่มีสัดส่วนผสมแตกต่างกัน

3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้จะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C150, มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบตามมาตรฐาน ASTM C33, โซเดียมคลอไรด์, เหล็กเสริมข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ชั้นคุณภาพ SD 40 ใช้แบบธรรมดาโดยไม่ผ่านการเคลือบผิวกับการนำเหล็กเสริมไปชุบโซเดียมฟอสเฟต, สายไฟ THW 1x1 sq-mm., ตัวต้านทาน ขนาด 100 โอห์ม(± 5%), สารยับยั้งการเกิดสนิมชนิดผสมเพิ่มเป็นสารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทแอนโอดที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมไนไตรต์ และชนิดหาที่ผิวเป็นสารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทผสมทั้งแอนโอดและแคโทดที่มีองค์ประกอบของสารกลุ่มเอมาซี (AMA)

การเตรียมเหล็กเสริมแบบชุบโซเดียมฟอสเฟต ทำได้โดยให้หาค่าความสะอาดเหล็กเสริมด้วย ACETONE ให้ปราศจากคราบน้ำมัน แล้วนำเหล็กไปชุบสารละลาย กรดฟอสฟอริกเข้มข้น 85% โดยใช้อัตราส่วน phosphoric acid 1mL ต่อ น้ำที่ผ่านการกรอง (RO) ประมาณ 84 ส่วน โดยต้องเช็คค่า pH ให้อยู่ที่ 4-5 ตลอดเวลา จากนั้นผสม NaNO_2 ในสัดส่วน 2 กรัม ต่อสารละลายที่ผสมข้างต้น 1 ลิตร ในการชูนั่นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิขณะทำการชุบ อุณหภูมิยิ่งสูงจะใช้เวลาเคลือบน้อย โดยอุณหภูมิจะถูกควบคุมอยู่ที่ประมาณ 50-60 องศาเซลเซียส ทำการชุบประมาณ 2-3 รอบเมื่อทำการชุบเสร็จแล้วลักษณะของเหล็กดังแสดงในรูปที่ 2 ด้านขวามือ



รูปที่ 2 เปรียบเทียบลักษณะเหล็กเสริมธรรมดากับเหล็กเสริมที่ชุบฟอสเฟต

3.2 สัดส่วนผสม

ในการวิจัยนี้ได้แบ่งประเด็นการศึกษาดังนี้สำหรับตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบนั้นจะเปรียบเทียบสารเคลือบเหล็กเสริม โดยใช้เหล็กเสริมธรรมดาและเหล็กเสริมที่เคลือบโซเดียมฟอสเฟต โดยใช้คอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.40, 0.50 และ 0.6 คงที่มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด สัดส่วนผสม ดังแสดงในตารางที่ 1

ในการวิจัยเป็นการศึกษาเปรียบเทียบสารยับยั้งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน โดยส่วนที่ 1 เป็นการใส่สารยับยั้งการเกิดสนิมชนิดหาที่ผิวคอนกรีตตามปริมาณที่ผู้ผลิตแนะนำและใช้ครั้งหนึ่งตาม

คำแนะนำ คอนกรีตที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในอัตราร้อยละ 0.15 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ คือ 0.50 มีสัดส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 2 สำหรับส่วนที่ 2 เป็นการใส่สารยับยั้งการเกิดสนิมชนิดสารผสมเพิ่มที่ผสมลงในเนื้อคอนกรีต ศึกษาเปรียบเทียบโดยใช้สารยับยั้งกลุ่มแคลเซียมไนไตรต์ของผู้ผลิต 2 บริษัท ปริมาณที่ใช้ตามคำแนะนำของผู้ผลิตทั้ง 2 บริษัท และใช้ในปริมาณครึ่งหนึ่งตามคำแนะนำของทั้ง 2 บริษัท โดยคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) คงที่ คือ 0.50 มีสัดส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 3 และ 4

ตารางที่ 1 ชุดตัวอย่างแบบคอนกรีตที่ใช้ยังอิง

รหัสตัวอย่าง	ชนิดเหล็กเสริม	ปริมาณ (กก./ม. ³)			
		ซีเมนต์	ทราย	หิน	น้ำ
W0.4	ธรรมดา	385	743	1,157	154
W0.5	ธรรมดา	338	743	1,157	169
W0.6	ธรรมดา	301	743	1,157	181
W0.4FO	ชุบฟอสเฟต	385	743	1,157	154
W0.5FO	ชุบฟอสเฟต	338	743	1,157	169
W0.6FO	ชุบฟอสเฟต	301	743	1,157	181

ตารางที่ 2 ชุดตัวอย่างทดสอบสารยับยั้งชนิดหาที่ผิวคอนกรีตของกลุ่มสารเอมาซี (AMA)

รหัสตัวอย่าง	สารยับยั้ง (กก./ม. ³)	ปริมาณ (กก./ม. ³)				
		ซีเมนต์	เถ้าลอย	ทราย	หิน	น้ำ
W0.5CSK0.5	0.25	338	-	743	1,157	169
W0.5CSK1	0.5	338	-	743	1,157	169
W0.5CSK0.5 fa15	0.25	287	51	743	1,157	166
W0.5CSK1 fa15	0.5	287	51	743	1,157	166
W0.5CSK0.5 fa30	0.25	237	101	743	1,157	164
W0.5CSK1 fa30	0.5	237	101	743	1,157	164

ตารางที่ 3 ชุดตัวอย่างทดสอบสารยับยั้งชนิดผสมในคอนกรีตกลุ่มสารแคลเซียมไนไตรต์ชนิดที่ 1

รหัสตัวอย่าง	สารยับยั้ง (กก./ม. ³)	ปริมาณ (กก./ม. ³)			
		ซีเมนต์	ทราย	หิน	น้ำ
W0.5MSK0.5	6	338	743	1,157	169
W0.5MSK1	12	338	743	1,157	169

โดยชุดตัวอย่างนี้เป็นการเปรียบเทียบสารยับยั้งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ที่มีคลอไรด์ในส่วนผสมคอนกรีต โดยมีคลอไรด์ในอัตราร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยสารยับยั้งการ

เกิดสนิมที่ใช้เป็นชนิดทาเคลือบผิวคอนกรีต โดยใช้ในปริมาณที่บริษัทผู้ผลิตแนะนำ มีสัดส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 4 ชุดตัวอย่างทดสอบสารยับยั้งชนิดผสมในคอนกรีตกลุ่มสารเคลือบผิวในโครงชนิดที่ 2

รหัสตัวอย่าง	สารยับยั้ง (กก./ม. ³)	ปริมาณ (กก./ม. ³)			
		ซีเมนต์	ทราย	หิน	น้ำ
W0.5MG0.5	2.5	338	743	1,157	169
W0.5MG1	5	338	743	1,157	169

ตารางที่ 5 ชุดตัวอย่างทดสอบสารยับยั้งชนิดทาที่ผิวคอนกรีตของกลุ่มสารเอมัลชัน ในกรณีมีคลอไรด์เริ่มต้น

รหัสตัวอย่าง	คลอไรด์เริ่มต้น (กก./ม. ³)	สารยับยั้ง (กก./ม. ³)	ปริมาณ (กก./ม. ³)			
			ซีเมนต์	ทราย	หิน	น้ำ
W0.5 CSKc1	3.48	0.5	338	743	1,157	169
W0.5 CSKc2	6.96	0.5	338	743	1,157	169
W0.5 CSKc3	10.44	0.5	338	743	1,157	169

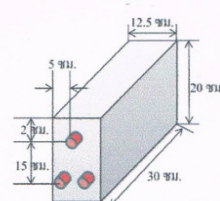
ชุดตัวอย่างนี้เป็นการเปรียบเทียบชนิดเหล็กเสริมที่ใช้ระหว่างเหล็กเสริมธรรมดา กับเหล็กเสริมที่เคลือบโซเดียมฟอสเฟตที่ฝังในคอนกรีตที่มีคลอไรด์ในส่วนผสมในอัตราร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ซึ่งมีสัดส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ชุดตัวอย่างทดสอบผสมคลอไรด์ในคอนกรีตตั้งแต่เริ่มต้น

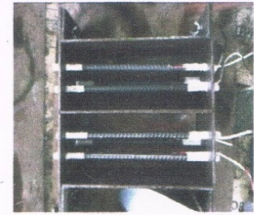
รหัสตัวอย่าง	คลอไรด์เริ่มต้น (กก./ม. ³)	ปริมาณ (กก./ม. ³)			
		ซีเมนต์	ทราย	หิน	น้ำ
W0.5cl1	3.48	338	743	1,157	169
W0.5cl2	6.96	338	743	1,157	169
W0.5cl3	10.44	338	743	1,157	169
W0.5FOcl1	3.48	338	743	1,157	169
W0.5FOcl2	6.96	338	743	1,157	169
W0.5FOcl3	10.44	338	743	1,157	169

3.3 เตรียมตัวอย่างคอนกรีตและการบ่ม

เตรียมแบบที่ใช้หล่อตัวอย่างคอนกรีต ขนาด 12.5×20×30 ซม. เตรียมเหล็กเสริมที่ใช้ทดสอบ ทำความสะอาดผิวเหล็กด้วยสาร ACETONE เพื่อล้างคราบน้ำมันและสารที่เคลือบผิวเหล็กออกให้หมด จากนั้นให้ใช้สิ่วที่ออกแบบที่ปลายเหล็กเสริมทั้งสองด้านหัว-ท้าย โดยให้เว้นช่วงเหล็กที่จะต้องใช้ทดสอบไว้ประมาณ 15 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แบบหล่อคอนกรีตและลักษณะการวางเหล็กเสริมก่อนเทคอนกรีต



เมื่อถอดแบบแล้วให้นำตัวอย่างคอนกรีตมาทำการบ่ม โดยใช้กระสอบเปียกคลุมตัวอย่างคอนกรีตเป็นเวลา 7 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4

ภายหลังจากการบ่มตัวอย่างคอนกรีตเสร็จแล้ว เริ่มทำการชั่งน้ำเปล่าบนชิ้นตัวอย่างด้านที่มีเหล็กเสริม 1 เส้น เป็นเวลา 1 สัปดาห์หลังจากบ่มเสร็จ หลังจากนั้นชั่งสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักจนกว่าจะทดสอบเสร็จ ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 4 การบ่มโดยใช้กระสอบที่ชุ่มด้วยน้ำคลุมที่ตัวอย่างคอนกรีต



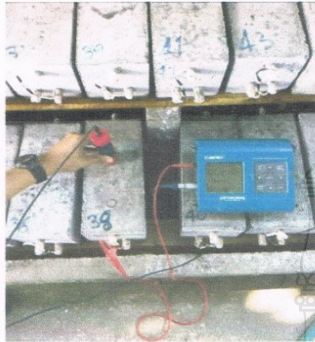
รูปที่ 5 การชั่งสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 10 %

3.4 ขั้นตอนการทดสอบ

3.4.1 วัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-Cell Potential) ตามมาตรฐาน ASTM C876-91

เพื่อทดสอบและประเมินโอกาสการเกิดสนิมของเหล็กเสริม โดยใช้เซลล์อ้างอิงชนิด Cu-CuSO₄ โดยการนำตัวอย่างคอนกรีตมาวัดหาอัตราการเกิดสนิม [6] จะวัดทุกๆ 2 เซนติเมตร ตามความยาวของเหล็กเสริมด้านบน

และนำค่าที่ได้มาเฉลี่ย ดังแสดงในรูปที่ 6 และมีข้อกำหนดในการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่วัดได้จากเครื่อง Half-Cell Potential ดังแสดงในตารางที่ 7



รูปที่ 6 การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

ตารางที่ 7 ข้อกำหนดของการวัดค่าในการเกิดสนิมของเหล็กเสริมจากเครื่อง Half-Cell Potential

ค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัด (mV)	โอกาสที่เหล็กเสริมจะเกิดสนิม
น้อยกว่า -200 mV	ความน่าจะเป็นประมาณ 90% ไม่มี การเกิดสนิม
ระหว่าง -200 ถึง -350 mV	อาจจะไม่มีหรือไม่มีเกิดสนิมก็ได้
มากกว่า -350 mV	ความน่าจะเป็นมากกว่า 90% ที่ เหล็กเสริมเกิดสนิมขึ้นแล้ว

3.4.2 วัดอัตราการเกิดสนิมตามมาตรฐาน ASTM G109-99

วัดอัตราการเกิดสนิมโดยใช้โวลต์มิเตอร์ วัดค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแอโนดและแคโทด คร่อมตัวต้านทานขนาด 100 โอห์ม ที่ได้เชื่อมต่อกับเหล็กเสริมดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 การวัดอัตราการเกิดสนิมโดยใช้โวลต์มิเตอร์คร่อมตัวต้านทาน โดยผลที่อ่านได้จากโวลต์มิเตอร์ นำมาคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ดังสมการที่ (1)

$$I = \frac{V}{R} \quad (1)$$

โดย I คือ ค่ากระแสการเกิดสนิม (A), V คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V), R คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าในที่นี้ = 100 Ω

3.4.3 ทดสอบหารีมาคอลลอไรด์

เป็นการทดสอบแบบกึ่งทำลาย โดยเก็บตัวอย่างปูนที่ได้จากการเจาะคอนกรีต จากด้านข้างของตัวอย่างคอนกรีตที่มีความลึกประมาณ 2-4 ซม. โดยจะเจาะนำไปจนถึงบริเวณที่ทำการขังน้ำแล้วนำผงปูนส่วนนั้นทิ้งไปก่อน แล้วจะต่อเข้าไปจนถึงบริเวณผิวเหล็กเสริม นำผงปูนที่เจาะได้ในส่วนนั้นนำไปทดสอบวิเคราะห์หารีมาคอลลอไรด์ โดยวิธี ไตรเรชั่น ในห้องปฏิบัติการ ตามมาตรฐาน ASTM C1152 ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 การวิเคราะห์หารีมาคอลลอไรด์โดยวิธี ไตรเรชั่น

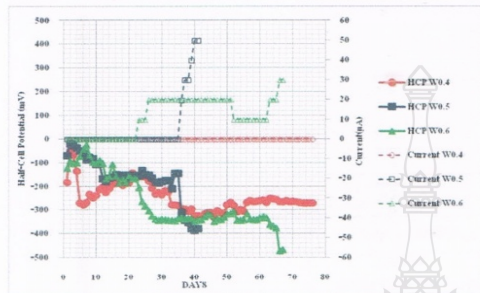
4. ผลการวิจัย

จากการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตด้วยการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ เพื่อประเมินโอกาสในการเกิดสนิมและวัดอัตราการเกิดสนิม การไหลของกระแสไฟฟ้าภายในเหล็กเสริม ได้ผลการทดสอบดังนี้

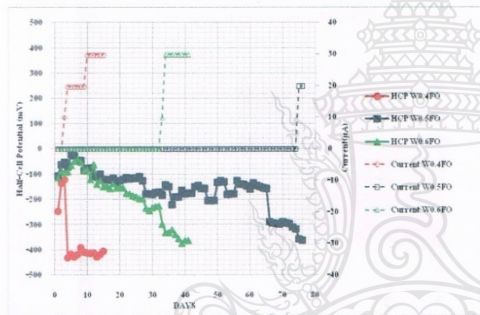
4.1 ผลการทดสอบการใช้งานระหว่างเหล็กเสริมธรรมดา กับเหล็กเสริมที่ชุบโซเดียมฟอสเฟต

ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์กับอัตราการเกิดสนิมเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับระยะเวลาในรูปที่ 9 จะเห็นว่าในช่วง 1 สัปดาห์แรกของการทดสอบจะมีค่าติดลบน้อยกว่า -350 mV ซึ่งแสดงว่าเหล็กเสริมยังไม่มีเกิดสนิมขึ้นแต่อย่างใด แต่เมื่อเวลาผ่านไปจะสังเกตเห็นว่าในวันที่ 10 ของการทดสอบ ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ ตัวเลขนั้นเริ่มติดลบมากขึ้น โดยในบางตัวอย่างจะมีค่าติดลบมากกว่า -350 mV พร้อมกับค่าอัตราการเกิดสนิมที่ติดลบเพิ่มขึ้นไปพร้อมกัน นั่นแสดงว่าเหล็กเสริมนั้นเกิดสนิมขึ้นแล้ว เนื่องมาจากในคอนกรีตมีคลอไรด์ไอออนเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ในขณะที่เหล็กเสริมที่ได้นำไปชุบโซเดียมฟอสเฟตเมื่อดูจากกราฟ (ข) จะเห็นว่ามีการเกิดสนิมที่เร็วกว่าเหล็กเสริมธรรมดา ในตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้เหล็กเสริมที่ชุบโซเดียมฟอสเฟต ในอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.4 จะเกิดสนิมขึ้นเร็วที่สุด ส่วนอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.6 จะเกิดสนิมขึ้นเร็วกว่า ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้เหล็กเสริมธรรมดา ส่วนในตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5 เหล็กจะเกิดสนิมที่ช้ากว่า แต่เราไม่สามารถสรุปได้ว่าเหล็กเสริมที่นำไป

ขุบโซเดียมฟอสเฟตนั้นจะนำไปใช้งานได้ดีกว่าเหล็กธรรมดา ซึ่งต้องทำการทดสอบต่อไป หลังจากทดสอบในตัวอย่างที่มีอัตราการเกิดสนิมสูงขึ้น จึงได้ทำการทวนนำเหล็กที่อยู่ในตัวอย่างคอนกรีตออกมาตรวจสอบดูว่ามีสนิมเกิดขึ้นตามที่ได้วัดค่าการทดสอบหรือไม่ จะเห็นว่าเหล็กเสริมเกิดสนิมขึ้นแล้ว ซึ่งแสดงผลเช่นเดียวกับค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และอัตราการเกิดสนิม ดังแสดงในรูปที่ 10



(ก) เหล็กเสริมชนิดธรรมดา

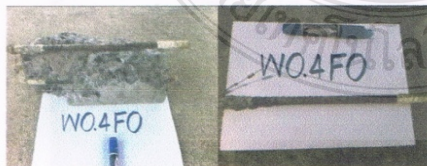


(ข) เหล็กเสริมชนิดขุบโซเดียมฟอสเฟต

รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และอัตราการเกิดสนิม โดยมีส่วนนำตัวอย่างประสานและชนิดเหล็กที่แตกต่างกัน



(ก) เหล็กในตัวอย่างคอนกรีตที่เกิดสนิมแล้ว

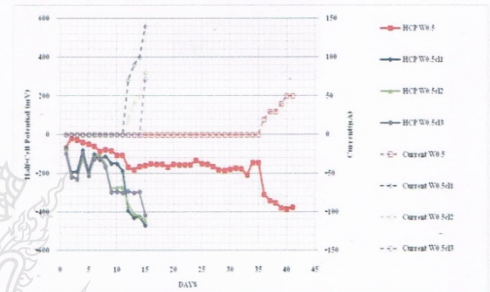


(ข) เหล็กในตัวอย่างคอนกรีตที่เกิดสนิมแล้ว

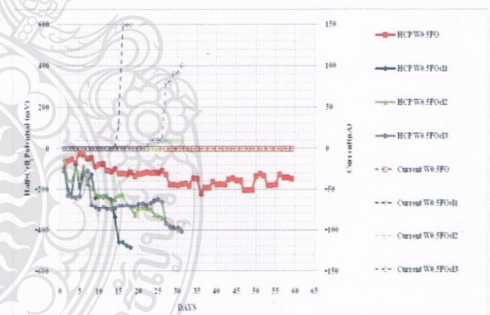
รูปที่ 10 ลักษณะของเหล็กเสริมที่เกิดสนิมแล้ว

4.2 ผลการทดสอบการให้คลอไรด์ในคอนกรีตตั้งแต่เริ่มต้น เปรียบเทียบระหว่างเหล็กเสริมธรรมดา กับเหล็กเสริมที่ขุบโซเดียมฟอสเฟต

ในรูปที่ 11 เป็นการแสดงผลของชุดตัวอย่างที่มีการผสมคลอไรด์ในคอนกรีตตั้งแต่เริ่มต้นที่อัตราส่วนร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยนำหน้าวัสดุประสาน ระหว่างเหล็กเสริมแบบธรรมดา กับเหล็กเสริมที่ขุบโซเดียมฟอสเฟต มาเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ใช้อ้างอิง จะเห็นว่าตัวอย่างคอนกรีตที่มีการผสมคลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้นจะมีการเกิดสนิมจะค่อนข้างเร็วทั้งสองแบบ ทั้งแบบเหล็กธรรมดา กับเหล็กที่ขุบโซเดียมฟอสเฟต โดยในวันที่ 10 ของการทดสอบตัวอย่างที่ผสมคลอไรด์ที่ร้อยละ 1 และ 2 นั้นเกิดสนิมขึ้นพร้อมกัน ส่วนตัวอย่างที่ผสมคลอไรด์ที่ร้อยละ 3 จะเกิดสนิมประมาณวันที่ 14 ของการทดสอบ จากกราฟจะเห็นว่าตัวอย่างที่ให้ปริมาณคลอไรด์มากกว่าเกิดสนิมช้ากว่าจะเป็นเพราะการปนเปื้อนของคลอไรด์ในคอนกรีตในตัวอย่างที่ให้ปริมาณคลอไรด์น้อยกว่า มีปริมาณคลอไรด์ปนเปื้อนอยู่มาก ทำให้ตัวอย่างคอนกรีตดังกล่าวเกิดสนิมขึ้น [7]



(ก) เหล็กเสริมชนิดธรรมดา



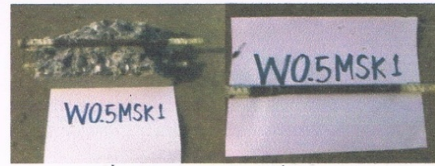
(ข) เหล็กเสริมชนิดขุบฟอสเฟต

รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และอัตราการเกิดสนิม ในตัวอย่างที่ให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้นระหว่างเหล็กธรรมดา กับเหล็กที่ขุบฟอสเฟต

4.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทผสมเต็มของกลุ่มแคลเซียมไนไตรต์

ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์กับอัตราการเกิดสนิมเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับระยะเวลา ได้ผลของค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เป็นดังแสดงในรูปที่ 12 (ก)

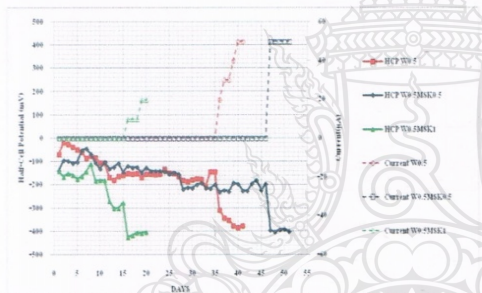
และ(ข) จะเห็นว่าค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และอัตราการเกิดสนิมช่วง 1 สัปดาห์แรกคิดลบน้อย แต่หลังจากเริ่มทำการขังสารละลายโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ในวันที่ 10 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เริ่มคิดลบมากขึ้น แต่ในช่วงแรกของการขังสารละลายดังกล่าวค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ในแต่ละวันตัวอย่างในส่วนผสมเดียวกันยังใกล้เคียงกัน แล้วจึงเริ่มเห็นความแตกต่าง ตัวอย่างที่ใช้สารยับยั้งเพียงครึ่งเท่าของปริมาณที่ผู้ผลิตแนะนำนั้นจะเกิดสนิมช้ากว่าตัวอย่างอ้างอิงในสารยับยั้งการเกิดสนิมผสมเพิ่มชนิดที่ 1 ส่วนตัวอย่างที่ใช้สารผสมเพิ่มของแคลเซียมไนไตรท์ชนิดที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ใช้อ้างอิง จะเกิดสนิมเร็วกว่าทั้งสองตัวอย่างที่มีการใช้ปริมาณสารยับยั้งเท่าที่ผู้ผลิตแนะนำให้ใช้กับผลลดครึ่งหนึ่ง โดยในตัวอย่างที่ยังไม่เกิดสนิมอาจเกิดจากในคอนกรีตนั้นมีความที่น้ำสูงทำให้คลอไรด์ซึมผ่านได้ยาก และมีปริมาณคลอไรด์อิสระไม่มากพอที่จะก่อให้เกิดสนิม ดังนั้นสารยับยั้งการเกิดสนิมมีผลช่วยชะลอการเกิดสนิมของเหล็กเสริม แต่ผลของปริมาณสารยับยั้งการเกิดสนิมที่ใช้ นั้นยังไม่สามารถสรุปได้อย่างชัดเจน เนื่องจากบางตัวอย่างยังไม่เกิดสนิมสำหรับตัวอย่างที่วัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และมีอัตราการเกิดสนิมขึ้นแล้ว ได้ทำการพูนน้ำเหล็กเสริมตัวอย่างคอนกรีต มาตรวจสอบดูว่าเหล็กนั้นเกิดสนิมขึ้นแล้วหรือไม่ ดังแสดงในรูปที่ 13



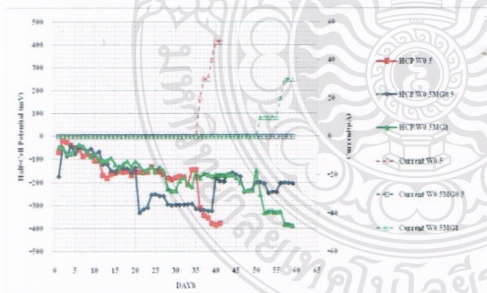
รูปที่ 13 ลักษณะของเหล็กเสริมที่เกิดสนิมแล้ว

4.4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทที่ 4 ฝิวในกลุ่มสารเอมยัค (AMA)

โดยรูปที่ 14 นั้นจะแสดงผลของสารยับยั้งประเภทที่ฝิว และตัวอย่างคอนกรีตในชุดนี้จะเป็นการให้คลอไรด์จากภายในตั้งแต่เริ่มต้นในปริมาณร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 เพียงอย่างเดียว โดยปริมาณสารยับยั้ง จะใช้ตามสัดส่วนที่ผู้ผลิตแนะนำให้ใช้ จากกราฟแสดงผลจะเห็นว่าในช่วงแรกยังคงไม่มีการเกิดสนิม แต่เมื่อเวลาผ่านไปจะเห็นว่ากราฟทั้งสองเริ่มคิดลบมากขึ้นเพราะว่าในคอนกรีตนั้นมีคลอไรด์อยู่ แต่สารยับยั้งที่ฝิวนั้น ไม่เห็นผลเท่าไรในการช่วยชะลอการเกิดสนิม อาจจะเป็นเพราะตัวอย่างคอนกรีตนั้นเป็นโครงสร้างที่หล่อขึ้นมาใหม่ เหมือนเป็นการเร่งให้เกิดสนิมเร็วขึ้น ส่วนรูปที่ 15 จะเปรียบเทียบระหว่างการใส่และไม่ใส่ งานสารยับยั้งการเกิดสนิมชนิดทาที่ฝิว จะเห็นว่าตัวอย่างที่นำมาเปรียบเทียบจะเป็นการให้คลอไรด์ตั้งแต่เริ่มต้นที่ปริมาณร้อยละ 1 และ ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เมื่อให้คลอไรด์เหมือนกันจะเห็นว่าตัวอย่างที่มีการใช้งานสารยับยั้งนั้น เหล็กเสริมจะเกิดสนิมเร็วกว่าตัวอย่างที่ไม่มีการใช้งานสารยับยั้ง แสดงว่าสารยับยั้งการเกิดสนิมที่ใช้ตามปริมาณที่ผู้ผลิตแนะนำให้ใช้นั้น อาจมีปริมาณมากเกินไปสำหรับคอนกรีตที่หล่อขึ้นมาใหม่และกลับเป็นตัวอย่างที่เร่งให้เกิดสนิมเร็วขึ้น

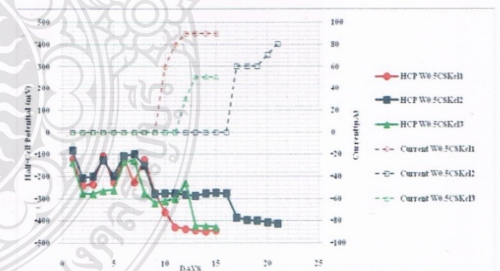


(ก) สารยับยั้งการเกิดสนิมชนิดผสมเพิ่มในคอนกรีตชนิดที่ 1

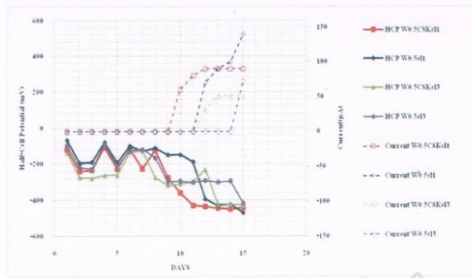


(ข) สารยับยั้งการเกิดสนิมชนิดผสมเพิ่มในคอนกรีตชนิดที่ 2

รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และอัตราการเกิดสนิม โดยใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทผสมเพิ่ม



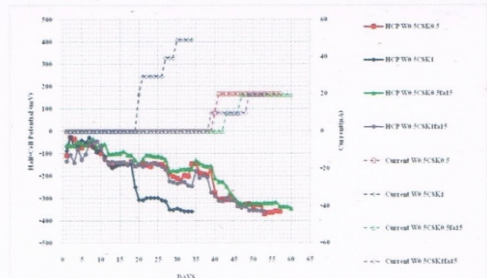
รูปที่ 14 ผลการทดสอบสารยับยั้งการเกิดสนิมชนิดทาที่ฝิว โดยให้คลอไรด์จากภายในตั้งแต่เริ่มต้น



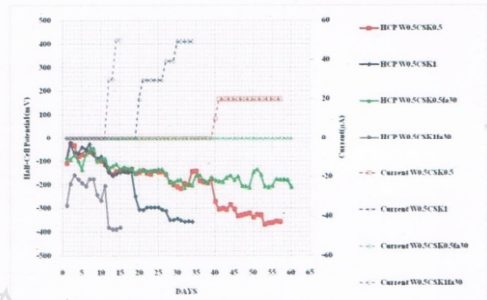
รูปที่ 15 เปรียบเทียบตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้และไม่ใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมชนิด ทาที่ผิว โดยให้เกลือโรจจากภายในตั้งแต่เริ่มต้น

4.5 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมประเภททาที่ผิวในกลุ่มเอมามซี (AMA) และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย

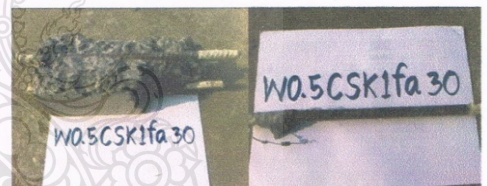
จากรูปที่ 16 (ก) เป็นตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยตัวอย่างที่เกิดสนิมเร็วที่สุดคือ ตัวอย่างที่ใช้สารยับยั้งปริมาณเท่าที่ผู้ผลิตแนะนำ และตัวอย่างที่ลดปริมาณ สารลงครึ่งหนึ่งและตัวอย่างที่ใช้สารยับยั้งเท่าที่ผู้ผลิตแนะนำและแทนที่ ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 เกิดสนิมขึ้นพร้อมกันในวันที่ 40 ของการ ทดสอบ ส่วนตัวอย่างที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและใช้สารยับยั้งเท่าที่ ผู้ผลิตแนะนำมีแนวโน้มเริ่มเกิดสนิมในวันที่ 60 ของการทดสอบ และรูปที่ 16 (ข) เป็นตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ตัวอย่าง ที่เกิดสนิมเร็วที่สุดคือ ตัวอย่างที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและใช้สารยับยั้ง เท่าที่ผู้ผลิตแนะนำโดยเกิดสนิมขึ้นในวันที่ 12 ของการทดสอบ ส่วน ตัวอย่างที่ใช้ยังอิงที่ใช้สารยับยั้งเท่าที่ผู้ผลิตแนะนำ เกิดสนิมในวันที่ 28 ของการทดสอบ และตัวอย่างที่ใช้สารยับยั้งลดลงครึ่งหนึ่งเกิดสนิมขึ้นใน วันที่ 53 ของการทดสอบ โดยเกิดสนิมช้ากว่า ส่วนตัวอย่างที่แทนที่ซีเมนต์ ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 โดยใช้สารยับยั้งในปริมาณครึ่งหนึ่งที่ผู้ผลิตแนะนำ ยังไม่เกิดสนิมซึ่งต้องทำการทดสอบต่อไป ตัวอย่างคอนกรีตทั้งหมดจะ เห็นว่าค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และอัตราการเกิดสนิมช่วง 1 สัปดาห์แรกคิด ลบน้อย แต่หลังจากเริ่มทำการขังสารละลายโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ในวันที่ 10 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เริ่มคิดลบมากขึ้น จนกระทั่งค่าที่ได้อยู่ในเกณฑ์ที่มีโอกาสเกิดสนิมขึ้นแล้ว จะเห็นผลว่า ในตัวอย่างที่ใช้สารยับยั้งลงครึ่งหนึ่งจะเกิดสนิมช้ากว่า และการแทนที่ ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณที่น้อยกว่าจะเกิดสนิมช้ากว่า เนื่องมาจากสาร ยับยั้งนั้นอาจเป็นตัวเร่งให้เกิดสนิมเร็วขึ้น หลังจากที่ได้ทดสอบวัดค่า ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ และอัตราการเกิดสนิมแล้ว สำหรับตัวอย่างที่เกิดสนิม แล้ว ได้ทำการทูลบน้ำเหล็กเสริมภายในออกมาตรวจสอบว่าเกิดสนิม หรือไม่ จะเห็นว่าเหล็กเสริมนั้นเกิดสนิมขึ้นจริง ซึ่งสอดคล้องกับวิธีการวัดค่า การเกิดสนิม ดังแสดงในรูปที่ 17



(ก) สารยับยั้งชนิดทาที่ผิว และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15



(ข) สารยับยั้งชนิดทาที่ผิว และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30
รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และอัตราการเกิดสนิม โดย ใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภททาที่ผิว และการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย



รูปที่ 17 ลักษณะของเหล็กเสริมที่เกิดสนิมแล้ว

4.6 ทดสอบหาปริมาณเกลือโรจโดยวิธีโครเมอกราฟีในห้องปฏิบัติการ

จากตัวอย่างคอนกรีตที่ได้ทำการทดสอบหาอัตราการเกิดสนิม โดย มาตรฐาน ASTM C876 และวัดอัตราการเกิดสนิมโดยมาตรฐาน ASTM G109 แล้วค่าที่วัดได้จากตัวอย่างคอนกรีตที่มีค่าเกินมาตรฐานนั้น ได้นำ ผงที่จะได้จากตัวอย่างคอนกรีตที่เกิดสนิมขึ้นแล้ว ไปทดสอบหาปริมาณ เกลือโรจในห้องปฏิบัติการ โดยวิธีการทดสอบ คือ ชั่งผงตัวอย่างที่จะได้ 3 กรัม ผสมกับน้ำกรอง (RO) 100 ml ใส่ Nitric acid 12.5 ml ผสมกับน้ำ กรอง 12.5 ml แล้วเทลงในบีกเกอร์ที่มีผงตัวอย่างคอนกรีต จากนั้นนำไป คั้นที่ Hot plate ประมาณ 3 นาที แล้วปล่อยให้เย็น แล้วนำไปกรอง จากนั้นนำน้ำที่กรองได้ไปเข้าเครื่องโครเมอกราฟี เพื่อตรวจสอบหาปริมาณ เกลือโรจในคอนกรีต ซึ่งได้ผลดังตารางที่ 8 ดังนี้

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในตัวอย่างคอนกรีต

ตัวอย่างทดสอบ	ค่าคลอไรด์วิกฤติ (ร้อยละโดยน้ำหนักของตัวอย่าง)
W0.4	ยังไม่เกิดสนิม
W0.5	0.21
W0.6	ยังไม่เกิดสนิม
W0.4FO	0.05
W0.5FO	0.22
W0.6FO	0.31
W0.5CSK0.5	0.06
W0.5CSK1	0.08
W0.5CSK0.5fa15	ยังไม่เกิดสนิม
W0.5CSK1fa15	0.12
W0.5CSK0.5fa30	ยังไม่เกิดสนิม
W0.5CSK1fa30	0.56
W0.5MSK0.5	0.25
W0.5MSK1	0.31
W0.5MG0.5	ยังไม่เกิดสนิม
W0.5MG1	0.19
W0.5cl1	0.08
W0.5cl2	0.11
W0.5cl3	0.26
W0.5FOcl1	0.12
W0.5FOcl2	0.16
W0.5FOcl3	0.19
W0.5CSKcl1	0.12
W0.5CSKcl2	0.17
W0.5CSKcl3	0.20

จากผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตดังตารางที่ 8 โดยวิธีโครเมอกราฟี สามารถคำนวณออกมาเป็น %Chloride โดยน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ โดยทุกตัวอย่างมี %Chloride มากพอที่จะทำให้เหล็กเสริมนั้นเกิดสนิมขึ้นได้ คือ ตั้งแต่ 0.05% โดยน้ำหนัก ขึ้นไป ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์จะพบว่าคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมด้วยวัสดุเสริมที่มีปริมาณมากเกินกว่าปริมาณคลอไรด์วิกฤติ จะทำให้เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิมขึ้นได้

5. บทสรุป

จากที่ได้ทำการทดสอบในการวิจัย เกี่ยวกับการทดสอบประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมทั้ง 2 ชนิด คือ ชนิดที่ผสมเพิ่มลงในเนื้อคอนกรีตและชนิดทาเคลือบผิวคอนกรีต และเปรียบเทียบการใช้งานเหล็กเสริมธรรมดา กับเหล็กเสริมที่ชุบโซเดียมฟอสเฟต

สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภทผสมเพิ่มสามารถชะลอและลดอัตราการเกิดสนิมในสภาวะที่คลอไรด์จากภายนอกและคลอไรด์ภายในทั้งของสารยับยั้งจำพวกสารแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และสารยับยั้งการเกิดสนิมจำพวกกลุ่มสารเอมีน (AMA) ทั้งนี้ควรพิจารณาในเรื่องของปริมาณการใช้งาน และให้เหมาะกับงานโครงสร้างที่จะใช้ ส่วนสารยับยั้งการเกิดสนิม

ประเภทที่ผิวคอนกรีตควรจะใช้ร่วมกับโครงสร้างเก่าหรือโครงสร้างที่กำลังทำการซ่อมแซมน่าจะเหมาะสมกว่า ถ้าจะนำใช้กับโครงสร้างใหม่นั้นยังไม่แนะนำให้ใช้ เพราะโครงสร้างใหม่ไม่มีคลอไรด์ที่มากพอที่จะทำให้เหล็กเสริมนั้นเกิดสนิมขึ้นได้ แต่กลับเป็นองค์ประกอบที่จะทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมเร็วขึ้นอีกด้วย โดยประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมขึ้นอยู่กับปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน [7] ส่วนประเด็นที่ศึกษาการใช้เหล็กเสริมธรรมดา กับเหล็กเสริมที่ผ่านกระบวนการชุบโซเดียมฟอสเฟตนั้น จากการศึกษาทดสอบเหล็กเสริมที่ชุบโซเดียมฟอสเฟตมีแนวโน้มในการเกิดสนิมเร็วกว่าเหล็กเสริมธรรมดา ไม่ว่าจะทดสอบโดยการให้คลอไรด์จากภายในหรือภายนอก แต่ใช้งานได้ดีกับสัดส่วนผสมคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 โดยที่ไม่มีการใช้สารยับยั้งการเกิดสนิม และประเด็นที่ศึกษาประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิม โดยการให้ค่าลดยุทธศาสตร์ที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 15 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สารยับยั้งการเกิดสนิมนั้นมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเกิดสนิมทั้งคลอไรด์ที่มาจากภายในและภายนอก แต่ขึ้นอยู่กับปริมาณที่ใช้งาน และปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท ชิก้า (ประเทศไทย) จำกัด และบริษัท ดับบลิว อาร์ เกรซ (ประเทศไทย) จำกัด ที่ได้ให้การสนับสนุนในส่วนของผลิตภัณฑ์สารยับยั้งการเกิดสนิม และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่สนับสนุนทุนวิจัยมา ณ ที่นี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] C.M. Hansson, L. Mammoliti, and B.B. Hope, "CORROSION INHIBITORS IN CONCRETE-PART I: THE PRINCIPLES", Vol. 28, No. 12, pp. 1775-1781, 1998
- [2] มข.1501-51 มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย การตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีตรวจพินิจ (Visual Inspection Method), กรมโยธาธิการและผังเมือง, กระทรวงมหาดไทย, พ.ศ.2551
- [3] M.Ormeliese, and M.Berra "Corrosion inhibitors for chlorides induced corrosion reinforced concrete structures", 2005, pp. 536-547
- [4] Soloka. "Concrete in hot environments", Great Britain Alden Press, 1993
- [5] 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

- [6] ASTM C876-91, 1999, "Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete", Annual Book of ASTM Standard, Vol.03.02, pp. 462-467
- [7] Prarom, P., Wanaratwiji, P., Sancharoen, P., Pansuk, W., and Tangtermsirikul, S., Effect of chloride content and mix proportion on effectiveness of corrosion inhibitor to prevent corrosion of reinforcing steel, Proceedings of the 15th national conference in civil engineering of engineering institute of Thailand, Ubonratchathani, Thailand, 2010.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล นายโตมร บุญหนุน
วัน เดือน ปีเกิด 22 มกราคม 2528
ที่อยู่ 43/20 หมู่ 2 ตำบลสว่างอารมณ์ อำเภอสว่างอารมณ์
จังหวัดอุทัยธานี 61150
การศึกษา ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา
พ.ศ. 2550 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์การทำงาน วิศวกรควบคุมงานก่อสร้าง บริษัท มิลเลนเนียม โฮมเวิร์ค จำกัด
พ.ศ. 2551 - 2554
เบอร์โทรศัพท์ 08-1045-9898
อีเมล tomorncivil@gmail.com

