

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออาการเกิดสนิมของเหล็กและเหล็กเคลือบผิวด้วยสังกะสี  
ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

นายพัฒนพงษ์ วงษ์เสียงดัง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

FACTORS AFFECT CORROSION OF STEEL AND ZINC-COATED STEEL  
IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURE

MR. PHATTHANAPHONG WONGSIANGDANG

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออาการเกิดสนิมของเหล็กและเหล็กเคลือบผิวด้วยสังกะสีในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

โดย

นายพัฒน์พงษ์ วงษ์เสียงดัง

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิฑิต ปานสุข

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ดร. ภาควัฒน์ แสนเจริญ

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญไชย สถิตมั่นในธรรม)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิฑิต ปานสุข)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ดร. ภาควัฒน์ แสนเจริญ)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปฐมมา วิสุทธิพิทักษ์กุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุวิมล สัจจาภิษฐ์)

พัฒนาพงษ์ วงษ์เสียงดัง : ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเกิดสนิมของเหล็กและเหล็กเคลือบผิวด้วยสังกะสีในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (FACTORS AFFECT CORROSION OF STEEL AND ZINC-COATED STEEL IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURE), อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.วิฑิต ปานสุข, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ดร. ภัควัฒน์ แสนเจริญ, 80 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเกิดสนิมของเหล็กและเหล็กเคลือบผิวด้วยสังกะสีด้วยวิธีจุ่มร้อน และทาสีสังกะสีเหลวในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยดำเนินการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตที่สัดส่วนผสมแตกต่างกันทั้ง อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และชนิดของวัสดุประสาน การเกิดสนิมในเหล็กเสริมจะถูกเร่งโดยการขังสารละลายโซเดียมคลอไรด์ และดำเนินการวัดการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่เวลาต่างๆ กันโดยการตรวจวัดค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน (Corrosion current density) และค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-cell potentials) เมื่อเหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิม จะดำเนินการเก็บผงตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทำการวิเคราะห์หาค่าคลอไรด์วิกฤติของเหล็กเสริมแต่ละชนิด ซึ่งผลในการศึกษาสามารถวิเคราะห์หาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ชนิดของวัสดุประสาน ต่อค่าคลอไรด์วิกฤติของเหล็กเสริม และเหล็กเสริมเคลือบผิวด้วยสังกะสี เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และกำหนดวิธีการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้อย่างถูกต้องเหมาะสมต่อไป

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา.....  
ปีการศึกษา.....2555.....

ลายมือชื่อนิสิต.....  
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

# # 5270623021 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS : CORROSION / CRITICAL CHLORIDE CONTENT / GALVANIZED  
STEEL / MAINTENANCE / SERVICE LIFE

PHATTHANAPHONG WONGSIANGDANG : FACTORS AFFECT CORROSION  
OF STEEL AND ZINC-COATED STEEL IN REINFORCED CONCRETE  
STRUCTURE. ADVISOR : ASST.PROF.WITHIT PANSUK, Ph.D., CO-ADVISOR  
PAKAWAT SANCHAROEN, Ph.D., 80 pp.

This research aims to study factors affecting corrosion of steel and zinc-coated steel in reinforced concrete structures. Reinforced concrete specimens were prepared by varying concrete mix proportions, types of binder and types of steel. Corrosion of reinforcing steel was accelerated by ponding concentrated NaCl solution. Corrosion current and half-cell potential of reinforcing steel were measured at the interval of time. Critical chloride content was determined after the reinforcing steel has been corroded. Effects of various parameters were analyzed together with the result of critical chloride content. Finally, critical chloride content that initiates corrosion of reinforcing steel in Thailand was proposed. Engineers can design reinforcement concrete structures by considering service life and durability of structures accordingly.

Department : .....	Civil Engineering .....	Student's Signature .....
Field of Study : .....	Civil Engineering .....	Advisor's Signature .....
Academic Year : .....	2012 .....	Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

กราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิฑิต ปานสุข ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร. ภัควัฒน์ แสนเจริญ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้สละเวลาให้ความรู้ แนวทางการดำเนินงาน และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ ตลอดระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี อีกทั้งขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. บุญไชย สถิตมั่นในธรรม ที่รับเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล กรรมการสอบ รวมถึง รองศาสตราจารย์ ดร. สุวิมล สัจจาภิษฐ์ ที่ได้สละเวลาเพื่อเป็นกรรมการสอบในครั้งนี้ด้วย อีกทั้งคณะกรรมการทุกท่านยังให้คำแนะนำ และข้อเสนอแนะที่ดีในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต จากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่สนับสนุนทุนวิจัยเพื่อดำเนินงานวิจัยนี้ รวมถึง ดร. ภัควัฒน์ แสนเจริญ ที่ให้ความช่วยเหลือในเครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบ นายอนุวัฒน์ อรรถไชยวุฒิ นายศุภณัฐ วุ่นประเสริฐ ตลอดจนเพื่อนนิสิตปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโครงสร้างที่ช่วยดำเนินการผสมคอนกรีตและทดสอบตลอดมา

สุดท้ายนี้กราบขอบพระคุณ บิดา มารดา พี่น้อง ที่ให้กำลังใจในการทำงานและสนับสนุนในด้านการศึกษา ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน และบุคคลต่างๆ ที่ให้ความช่วยเหลือที่ผู้วิจัยไม่สามารถกล่าวนามได้หมดในที่นี้ ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของการศึกษา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 การเกิดสนิมในเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์.....	3
2.2 แหล่งที่มาของคลอไรด์.....	5
2.2.1 บริเวณที่สัมผัสกับคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash Zone)	6
2.2.2 บริเวณที่อยู่เหนือผิวน้ำ (Marine Atmospheric Zone).....	7
2.2.3 บริเวณที่อยู่ระหว่างระดับน้ำขึ้นสูงสุดและระดับน้ำลงต่ำสุด (Tidal Zone).....	7
2.2.4 บริเวณที่จมอยู่ใต้น้ำทะเลตลอดเวลา (Submerged Zone).....	7
2.3 ชนิดของคลอไรด์.....	8
2.3.1 คลอไรด์ที่ถูกยึดอยู่กับที่ (Fixed Chloride).....	8

	หน้า
2.3.2 คลอไรด์อิสระ (Free Chloride).....	9
2.4 การเคลื่อนที่ของคลอไรด์.....	9
2.4.1 การแพร่ (Diffusion).....	9
2.4.2 การซึมผ่าน (Permeability) .....	9
2.4.3 การดูดซึม (Absorption).....	9
2.5 การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณใกล้ผิวที่สัมผัสกับ สิ่งแวดล้อมที่มีคลอไรด์.....	10
2.5.1 สภาวะเปียกสลับกับแห้ง.....	10
2.5.2 สภาวะเปียกตลอดเวลา.....	10
2.6 ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ.....	10
2.6.1 Chloride Threshold Level (CTL).....	11
2.6.2 การตรวจสอบหาปริมาณคลอไรด์.....	12
2.7 การคาดการณ์การเกิดสนิมในเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์.....	13
2.8 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ที่ซึมผ่านเข้าสู่คอนกรีต.....	14
2.9 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์.....	15
2.9.1 ชนิดของปูนซีเมนต์ วัสดุประสานและคุณภาพคอนกรีต.....	15
2.9.2 อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b).....	15
2.9.3 ระยะเวลาเหล็กเสริม.....	15
2.9.4 สภาพแวดล้อม.....	15
2.10 การป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์.....	16
2.10.1 การปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตและเหล็กเสริม.....	16
2.10.2 การป้องกันภายนอก.....	16
2.10.3 การเคลือบผิวเหล็กเสริม.....	17
2.10.4 การป้องกันโดยอาศัยขบวนการทางไฟฟ้าเคมี.....	17
2.11 การวัดการเกิดสนิม.....	18



2.11.1 ASTM C876 Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.....	18
2.11.2 ASTM G109 Standard Test Method for Determining The Effects of Chemical Admixtures on the Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments.....	21
2.11.3 ASTM C1152 Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete ASTM C1218 Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete.....	22
2.11.4 Linear Polarization Resistance (LPR) Monitoring.....	22
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	23
3.1 การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	23
3.1.1 วัสดุประสาน.....	23
3.1.2 มวลรวม.....	23
3.1.3 เหล็กเสริม.....	23
3.1.4 สารเคมี.....	23
3.1.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการหล่อตัวอย่าง.....	23
3.1.6 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ.....	23
3.1.7 วัสดุอื่นๆ.....	24
3.2 การเตรียมตัวอย่างที่ใช้ทดลอง.....	25
3.2.1 สัดส่วนผสม.....	25
3.2.2 การเตรียมแบบหล่อและเหล็กเสริม.....	32

	หน้า
3.2.3 การผสมคอนกรีต.....	32
3.2.4 การหล่อก้อนตัวอย่าง.....	33
3.2.5 การบ่มตัวอย่างคอนกรีต.....	34
3.2.6 สภาวะตัวอย่างคอนกรีต.....	35
3.3 การทดสอบ.....	35
3.3.1 ทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมด้วยวิธี (Half-Cell Potential) ตามมาตรฐาน ASTM C876.....	36
3.3.2 ทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมด้วยวิธี (Current Density) ตามมาตรฐาน ASTM G109.....	37
3.3.3 การเจาะลวดระยะหุ้มของคอรกรูต.....	38
3.3.4 ทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต.....	38
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	39
บทที่ 4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์.....	40
4.1 ผลกระทบของการบ่ม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35.....	40
4.2 ผลกระทบของการบ่ม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45.....	42
4.3 ผลกระทบของการบ่ม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55.....	45
4.4 ผลกระทบของการบ่ม แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10.....	48
4.5 ผลกระทบของการบ่ม แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20.....	50
4.6 ผลกระทบของการบ่ม แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30.....	53
4.7 ผลการทดสอบเปรียบเทียบ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35, 0.45 และ 0.55.....	56
4.8 ผลการทดสอบเปรียบเทียบการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10, 20 และ 30.....	58
4.9 ผลการเปรียบเทียบเหล็ก 3 ชนิด.....	60

	หน้า
4.10 เปรียบเทียบค่าคลอไรด์วิกฤติจากงานวิจัยที่ผ่านมา.....	60
4.10.1 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน.....	61
4.10.2 ผลของระยะเวลาการบ่ม.....	61
4.10.3 ผลของการใช้แก้วลดยแทนที่วัสดุประสานด้วยอัตราส่วน ต่างๆ.....	62
4.11 เภณที่ใช้ในการตรวจสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยวิธีค่า ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์.....	62
บทที่ 5 การคำนวณอายุการใช้งาน.....	70
5.1 อายุการใช้งานก่อนการเกิดสนิม.....	70
5.2 อายุการใช้งานหลังการเกิดสนิม.....	71
บทที่ 6 สรุปผลงานวิจัย.....	76
6.1 สรุปผลงานวิจัย.....	76
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	77
รายการอ้างอิง.....	78
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	80

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ปริมาณคลอไรด์ที่ละลายน้ำได้ที่ยอมให้ในคอนกรีต.....	6
2.2	ปริมาณคลอไรด์ที่ละลายน้ำได้ที่ยอมให้ในคอนกรีต.....	14
2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และความน่าจะเป็นของการเกิด สนิมในโครงสร้าง.....	19
2.4	ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต่างศักย์และความน่าจะเป็นในการเกิดสนิม.....	20
3.1	รายละเอียดสัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ทดสอบ.....	25
3.2	รายละเอียดตัวอย่างที่ใช้ทดสอบใน Mix.1.....	26
3.3	รายละเอียดตัวอย่างที่ใช้ทดสอบใน Mix.2.....	27
3.4	รายละเอียดตัวอย่างที่ใช้ทดสอบใน Mix.3.....	28
3.5	รายละเอียดตัวอย่างที่ใช้ทดสอบใน Mix.4.....	29
3.6	รายละเอียดตัวอย่างที่ใช้ทดสอบใน Mix.5.....	30
3.7	รายละเอียดตัวอย่างที่ใช้ทดสอบใน Mix.6.....	31
3.8	ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และความน่าจะเป็นของการเกิด สนิมในโครงสร้าง.....	36
4.1	ปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีต อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35.....	42
4.2	ปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีต อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45.....	45
4.3	ปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีต อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55.....	47
4.4	ปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีต แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 10.....	50
4.5	ปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีต แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 20.....	53

ตารางที่	หน้า
4.6 ปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีต แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 30.....	55
4.7 ปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ (จากการทดสอบของงานวิจัยนี้).....	61
4.8 ปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่ระยะการบ่มต่างๆ (จากการทดสอบ ของงานวิจัยนี้).....	62
4.9 ปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยใน ปริมาณต่างๆ(จากการทดสอบของงานวิจัยนี้).....	62
4.10 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ตามมาตรฐาน ASTM C876.....	63
4.11 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่ใช้พิจารณาโอกาสการเกิดสนิมในงานวิจัยนี้.....	63
5.1 อายุการใช้งานของเหล็ก 3 ชนิด อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35.....	72
5.2 อายุการใช้งานของเหล็ก 3 ชนิด อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45.....	73
5.3 อายุการใช้งานของเหล็ก 3 ชนิด อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55.....	73
5.4 อายุการใช้งานของเหล็ก 3 ชนิด แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย ร้อยละ10.....	74
5.5 อายุการใช้งานของเหล็ก 3 ชนิด แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย ร้อยละ20.....	74
5.6 อายุการใช้งานของเหล็ก 3 ชนิด แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย ร้อยละ30.....	75
6.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่ใช้พิจารณาโอกาสการเกิดสนิมของเหล็กแต่ละ ชนิด.....	77

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แผนภาพแสดงการกัดกร่อนของเหล็กเสริม.....	4
2.2	การเกิดสนิมเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล.....	5
2.3	การจำแนกความเสี่ยงของโครงสร้างที่มีการสัมผัสคลอไรด์จากน้ำทะเล.....	8
2.4	การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half Cell Potential).....	19
2.5	ขนาดของชิ้นตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบปรับจาก ASTM G109.....	21
2.6	การวัดอัตราการเกิดสนิมปรับจาก ASTM G109.....	21
3.1	Half-Cell Potential.....	24
3.2	โวลท์มิเตอร์.....	24
3.3	การเตรียมเหล็กเสริมและแบบหล่อ.....	32
3.4	การผสมคอนกรีตตามสัดส่วนผสม.....	33
3.5(ก)	ขนาดตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ.....	33
3.5(ข)	การวางเหล็กเสริม.....	34
3.6	การหล่อตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ.....	34
3.7	การปมตัวอย่างก่อนนำไปทดสอบ.....	35
3.8	สภาวะแวดล้อมที่ทำการทดสอบ.....	35
3.9	การวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า โดย Half-cell potential.....	36
3.10	การวัดค่าความต่างศักย์ที่คร่อมตัวต้านทานโดยใช้โวลท์มิเตอร์.....	37
3.11	การเจาะผิวคอนกรีตเพื่อลดระยะหุ้มคอนกรีต.....	38
3.12	การเจาะเก็บผงตัวอย่างคอนกรีตเพื่อไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์.....	38
4.1	ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Carbon Steel ที่ ระยะเวลาปมต่างกัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35.....	40
4.2	ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Galvanized Steel ที่ ระยะเวลาปมต่างกัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35.....	41

รูปที่	หน้า
4.3 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Zinc Paint Steel ที่ ระยะเวลาบ่มต่างกัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35.....	41
4.4 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Carbon Steel ที่ ระยะเวลาบ่มต่างกัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45.....	43
4.5 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Galvanized Steel ที่ ระยะเวลาบ่มต่างกัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45.....	43
4.6 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Zinc Paint Steel ระยะเวลาบ่มต่างกัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45.....	44
4.7 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Carbon Steel ที่ ระยะเวลาบ่มต่างกัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55.....	46
4.8 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Galvanized Steel ที่ ระยะเวลาบ่มต่างกัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55.....	46
4.9 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Zinc Paint Steel ที่ ระยะเวลาบ่มต่างกัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55.....	47
4.10 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Carbon Steel ที่ ระยะเวลาบ่มต่างกัน แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10.....	48
4.11 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Galvanized Steel ที่ ระยะเวลาบ่มต่างกัน แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10.....	49
4.12 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Zinc Paint Steel ที่ ระยะเวลาบ่มต่างกัน แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10.....	49
4.13 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Carbon Steel ที่ ระยะเวลาบ่มต่างกัน แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20.....	51
4.14 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Galvanized Steel ที่ ระยะเวลาบ่มต่างกัน แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20.....	51

รูปที่	หน้า	
4.15	ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Zinc Paint Steel ที่ ระยะเวลาบ่มต่างกัน แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20.....	52
4.16	ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Carbon Steel ที่ ระยะเวลาบ่มต่างกัน แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30.....	54
4.17	ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Galvanized Steel ที่ ระยะเวลาบ่มต่างกัน แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30.....	54
4.18	ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Zinc Paint Steel ที่ ระยะเวลาบ่มต่างกัน แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30.....	55
4.19	ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Carbon Steel ที่ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ.....	56
4.20	ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Galvanized Steel ที่ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ.....	57
4.21	ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Zinc Paint Steel ที่ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ.....	57
4.22	ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Carbon Steel แทนที่ วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆ.....	58
4.23	ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Galvanized Steel แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆ.....	59
4.24	ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Zinc Paint Steel แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆ.....	59
4.25	ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนเปรียบเทียบเหล็ก 3 ชนิด....	60
4.26	การกระจายตัวค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของ Carbon Steel ก่อนเกิดสนิม.....	64
4.27	พิจารณาโอกาสการเกิดสนิมของ Carbon Steel ก่อนเกิดสนิม.....	64
4.28	การกระจายตัวค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของ Carbon Steel เริ่มเกิดสนิม.....	65
4.29	พิจารณาโอกาสการเกิดสนิมของ Carbon Steel เริ่มเกิดสนิม.....	65



รูปที่		หน้า
4.30	การกระจายตัวค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของ Galvanized Steel ก่อนเกิดสนิม.....	66
4.31	พิจารณาโอกาสการเกิดสนิมของ Galvanized Steel ก่อนเกิดสนิม.....	66
4.32	การกระจายตัวค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของ Galvanized Steel เริ่มเกิดสนิม.....	67
4.33	พิจารณาโอกาสการเกิดสนิมของ Galvanized Steel เริ่มเกิดสนิม.....	67
4.34	การกระจายตัวค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของ Zinc Paint Steel ก่อนเกิดสนิม.....	68
4.35	พิจารณาโอกาสการเกิดสนิมของ Zinc Paint Steel ก่อนเกิดสนิม.....	68
4.36	การกระจายตัวค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของ Zinc Paint Steel เริ่มเกิดสนิม.....	69
4.37	พิจารณาโอกาสการเกิดสนิมของ Zinc Paint Steel เริ่มเกิดสนิม.....	69

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของการศึกษา

การเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ถือเป็นปัญหาสำคัญในอุตสาหกรรมก่อสร้างของประเทศไทย โดยเฉพาะโครงสร้างที่อยู่ใกล้ทะเล ซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเป็นจำนวนมาก โดยทางกรมโยธาธิการและผังเมืองอยู่ระหว่างศึกษาเพื่อประกาศใช้ข้อกำหนดอาคารในเรื่องการออกแบบโครงสร้างโดยการคำนึงถึงอายุการใช้งานซึ่งการออกแบบดังกล่าวจำเป็นต้องระบุค่าคลอไรด์วิกฤติที่จะก่อให้เกิดสนิมในเหล็กเสริม [1] ซึ่งค่าคลอไรด์วิกฤติจะขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร เช่น อุณหภูมิ ความชื้น คุณสมบัติของวัสดุ เป็นต้น [2] โดยค่าคลอไรด์วิกฤติที่เหมาะสมสำหรับสภาพแวดล้อมในประเทศไทยซึ่งมีสภาพอากาศร้อนชื้นตลอดปี รวมทั้งวัสดุที่ใช้ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีความแตกต่างกับโครงสร้างในประเทศอื่นๆ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาค่าคลอไรด์วิกฤติที่จะก่อให้เกิดสนิมในเหล็กเสริมสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทย เพื่อใช้ออกแบบอายุการใช้งานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้อย่างเหมาะสม

ค่าคลอไรด์วิกฤติมีการศึกษากันอย่างกว้างขวางในต่างประเทศ โดยมีค่าแตกต่างกันไปซึ่งค่าคลอไรด์วิกฤติจะแปรเปลี่ยนตามคุณสมบัติวัสดุที่ใช้ผสมคอนกรีต และสภาพแวดล้อมเป็นหลัก ดังนั้นค่าที่ได้จึงไม่สามารถนำมาออกแบบอายุการใช้งานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กภายในประเทศไทยได้อย่างถูกต้องเหมาะสม นอกจากนี้วิธีการซ่อมแซมโครงสร้างที่ได้รับความเสียหายเนื่องจากการเกิดสนิมเนื่องจากคลอไรด์ถือเป็นเรื่องสำคัญมากในอนาคตสำหรับประเทศไทยเพราะโครงสร้างที่มีอยู่ในปัจจุบันเริ่มเกิดความเสียหายและต้องมีการซ่อมแซม การศึกษาถึงประสิทธิภาพของวิธีการซ่อมแซมแต่ละวิธีที่นิยมในประเทศไทยจึงมีความจำเป็น เพื่อให้การซ่อมแซมมีประสิทธิภาพ

ผลจากการดำเนินงานวิจัยนี้จะทำให้วิศวกรของประเทศไทยสามารถออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยคำนึงถึงอายุการใช้งาน และปัญหาด้านความคงทนของโครงสร้างได้อย่างเหมาะสมมากขึ้น ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในระยะยาว

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาค่าคลอไรด์วิกฤติที่ก่อให้เกิดสนิมและอัตราการเกิดสนิมในเหล็กเสริมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยคำนึงถึงผลของชนิดของเหล็กเสริมที่ไม่มีการเคลือบผิว และมีการเคลือบผิวด้วยสังกะสี อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และชนิดของวัสดุประสาน

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

ศึกษาค่าคลอไรด์วิกฤติที่ก่อให้เกิดสนิมในเหล็กเสริมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยคำนึงถึงผลของชนิดของเหล็กเสริมที่ไม่มีการเคลือบผิว และมีการเคลือบผิวด้วยสังกะสี อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และชนิดของวัสดุประสาน โดยดำเนินการทดสอบในห้องปฏิบัติการและเร่งการเกิดสนิมด้วยการขังสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ค่าคลอไรด์วิกฤติที่ก่อให้เกิดสนิมในเหล็กเสริมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยคำนึงถึงผลของชนิดของเหล็กเสริมที่ไม่มีการเคลือบผิว และมีการเคลือบผิวด้วยสังกะสี อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และชนิดของวัสดุประสาน

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การเกิดสนิมในเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ถือเป็นปัญหาหนึ่งที่สำคัญสำหรับโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมชายฝั่งทะเล เนื่องจากผิวของของโครงสร้างซึ่งเป็นคอนกรีตต้องสัมผัสกับน้ำทะเลหรือละอองน้ำที่มีเกลือทะเลผสมอยู่ และมีความชื้นอยู่ตลอดเวลา ซึ่งทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้เร็วขึ้นกว่าปกติ ดังนั้นการเกิดสนิมในเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจึงมีความสำคัญอย่างมากที่ทำให้ความคงทน กำลังรับน้ำหนักและอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กลดลง ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายเป็นอย่างมากในการซ่อมแซม บำรุงรักษา

ปัญหาของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่บริเวณชายฝั่ง หรือริมทะเลนั้น คือการเกิดสนิมของเหล็กเสริมอันเนื่องมาจากคลอไรด์ เนื่องจากในน้ำทะเลมีอนุภาคของคลอไรด์เป็นส่วนประกอบหลัก แต่อย่างไรก็ตามคลอไรด์เพียงอย่างเดียวไม่ได้เกิดปฏิกิริยาโดยตรงกับเหล็กเสริม แต่คลอไรด์มีคุณสมบัติในการเร่งให้เกิดสนิมได้เร็วขึ้น ถ้ามีน้ำและออกซิเจนเพียงพอ ก็จะทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้

#### 2.1 การเกิดสนิมในเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์

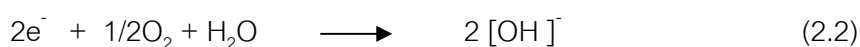
การเกิดสนิมในเหล็กเสริมเป็นขบวนการทางไฟฟ้า-เคมีที่มีองค์ประกอบคือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าภายใน ความชื้นและออกซิเจน โดยปกติแล้วคอนกรีตจะมีสถานะความเป็นด่างสูงอันเนื่องมาจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งมีค่า pH ประมาณ 12.5 - 13.5 ทำให้เกิดฟิล์มออกไซด์ของเหล็กเสริม ( $\gamma$  -  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  : Gamma ferric oxide) [3] ซึ่งเป็นแผ่นบางๆที่เรียกว่า Passivation Layer โดยที่แผ่นฟิล์มนี้ทำหน้าที่เคลือบผิวเหล็กเสริมไว้ไม่ให้เกิดสนิมจากการสัมผัสกับออกซิเจนและความชื้นโดยตรง ซึ่งจะทำให้ช่วยต้านทานการเกิดสนิมได้ดีในระดับหนึ่ง แต่ถ้าหากเมื่อใดที่มีปริมาณคลอไรด์อิออนอิสระสามารถแทรกซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตจนถึงผิวของเหล็กเสริมได้มากเพียงพอ จะทำให้ชั้นฟิล์มออกไซด์ถูกทำลายลงและจะเกิดสนิมได้ง่าย เรียกกระบวนการนี้เรียกว่า Depassivation และในขณะเดียวกันหากบริเวณดังกล่าวมีออกซิเจนและความชื้นในปริมาณที่พอเหมาะก็จะทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ [4]

การเกิดสนิมในเหล็กเสริมในคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นเกิดจากการไหลของกระแสอิเล็กตรอนผ่านตัวนำไฟฟ้าจากขั้วแอโนด (Anode) ไปยัง ขั้วแคโทด (Cathode) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และการ

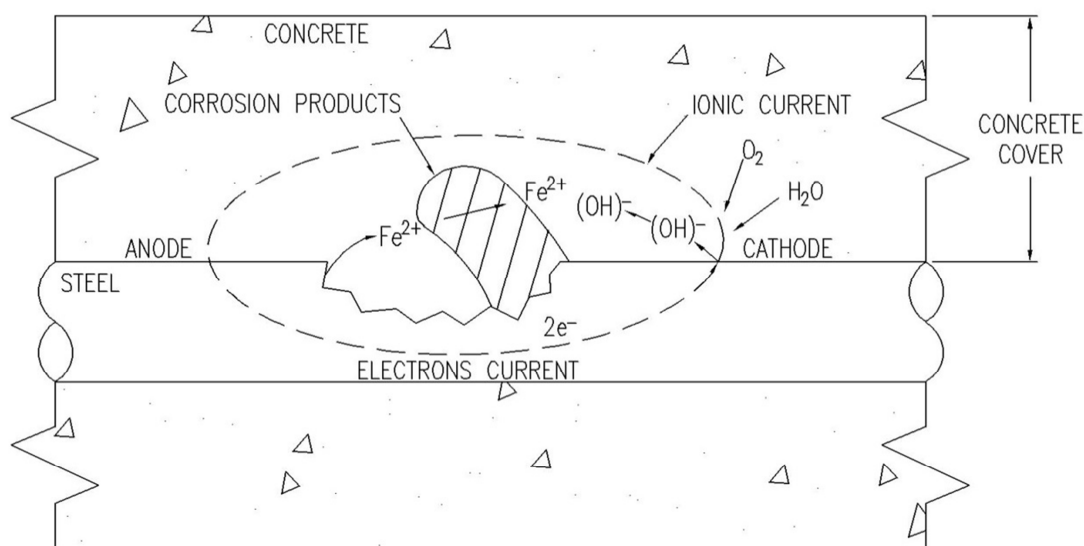
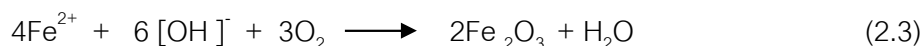
ไหลของอิออนผ่านอิเล็กโทรไลต์เมื่อชั้นฟิล์มของเหล็กเสริมถูกทำลายจะมีศักย์ทางไฟฟ้าเป็นขั้วลบ เรียกว่า “ปฏิกิริยาอะโนดิก (Anodic Reaction)” เหล็กจะสูญเสียอิเล็กตรอน ดังสมการ (2.1)



อิเล็กตรอน ( $\text{e}^-$ ) ที่เกิดขึ้นนี้ จะวิ่งไปยังบริเวณที่ชั้นฟิล์มไม่ได้ถูกทำลาย ซึ่งมีศักย์ทางไฟฟ้าเป็นขั้วบวก (Cathodic) และทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจนก็เกิดเป็นไฮดรอกซิลอิออน  $[\text{OH}^-]$  เรียกว่า “ปฏิกิริยาแคโทดิก (Cathodic Reaction)” ดังสมการ (2.2)



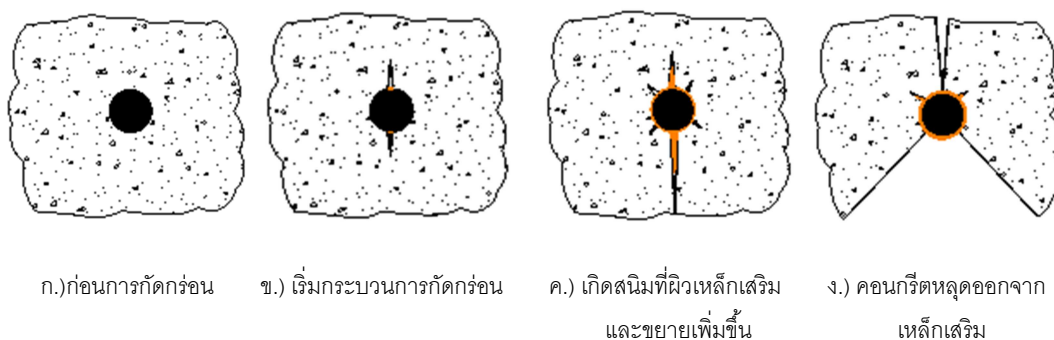
จากผลของสมการที่ (2.1) และ (2.2) เหล็กไฮดรอกไซด์ก็จะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลอิออนและออกซิเจน เกิดเป็นเหล็กออกไซด์ซึ่งก็คือสนิม ดังสมการ (2.3)



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงการกัดกร่อนของเหล็กเสริม

เมื่อคลอไรด์อิสระสามารถแทรกซึมผ่านเข้าไปถึงผิวของเหล็กเสริม และมีปริมาณคลอไรด์อิสระเพิ่มขึ้นจนมีความเข้มข้นถึงระดับวิกฤติ (Critical Chloride Content) และเป็นสาเหตุทำให้ชั้นฟิล์มถูกทำลาย ณ จุดที่คลอไรด์เข้าถึงเหล็กเสริม เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิมอย่างต่อเนื่อง หากมีปริมาณความชื้นและออกซิเจนเพียงพอ หลังจากนั้นพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมบริเวณที่เป็นขั้วลบหรือแอโนด (ซึ่งสูญเสียอิเล็กตรอน) จะลดลง ส่วนเหล็กเสริมบริเวณที่เป็นขั้วบวกหรือแคโทดจะ

เป็นสนิมพอกพูนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยสนิมจะขยายตัวเพิ่มปริมาตรถึง 4-6 เท่า และจะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยว (Bonding) ระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตในส่วนนี้ลดลงด้วย จากนั้นสนิมจะปรากฏให้เห็นอย่างเด่นชัด และในขั้นสุดท้ายคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมจะหลุดร่อนจนกระทั่งหลุดจากชั้นเหล็กเสริมและพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมก็จะลดลงอย่างรวดเร็วจนนำไปสู่การวิบัติของโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การเกิดสนิมเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล

## 2.2 แหล่งที่มาของคลอไรด์

โดยทั่วไปแล้วแหล่งที่มาของคลอไรด์มี 2 แหล่งด้วยกัน คือ คลอไรด์จากภายในและภายนอก

คลอไรด์จากภายในนั้นอาจมีอยู่ในคอนกรีตเอง เช่น มีอยู่ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต หิน หรือทราย (โดยเฉพาะทรายที่มีแหล่งที่มาจากบริเวณใกล้ทะเล) หรือมาจากน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$ ) ที่มีอยู่ในสารเร่งการก่อตัว ซึ่งมาตรฐานด้านอายุการใช้งานและความคงทนของอาคารได้กำหนดปริมาณคลอไรด์ที่ละลายน้ำได้ที่ยอมให้ดังแสดงในตารางที่

2.1

ตารางที่ 2.1 ปริมาณคลอไรด์ที่ละลายน้ำได้ที่ยอมให้ในคอนกรีต

ลักษณะงานก่อสร้าง	ปริมาณคลอไรด์ที่ละลายน้ำได้ที่ยอมให้ในคอนกรีต (ร้อยละของน้ำหนักวัสดุประสาน)
(ก) คอนกรีตอัดแรง	0.06
(ข) คอนกรีตเสริมเหล็กที่ขณะใช้งานมีการสัมผัสกับคลอไรด์ เช่น กำแพงกันคลื่น ( Sea-Retaining Wall )	0.15
(ค) คอนกรีตเสริมเหล็กที่มีสภาพแห้ง หรือขณะใช้งานมีการป้องกันความชื้น	1.00
(ง) การก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอื่น	0.30

หมายเหตุ : โดยการทดสอบเพื่อหาปริมาณคลอไรด์รวมที่ละลายน้ำได้ให้เป็นไปตามมาตรฐาน

ASTM C1218/C 1218M : Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete

อ้างอิง จากมาตรฐานด้านอายุการใช้งานและความคงทนของอาคาร

แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความทนทานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทยนั้น ส่วนมากมาจากสภาพแวดล้อมภายนอกในช่วงของการใช้งาน เช่น มาจากน้ำทะเลหรือน้ำกร่อย โดยคลอไรด์จากน้ำทะเลจะมีผลกระทบต่อโครงสร้างอย่างรุนแรง เนื่องจากมีปริมาณคลอไรด์มากถึง 3-5 % [3] ซึ่งละลายอยู่ในรูปของสารประกอบโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl<sub>2</sub>) และแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl<sub>2</sub>) ซึ่งทำให้ผิวของคอนกรีตที่อยู่ใกล้และสัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่มีคลอไรด์มีการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของคลอไรด์ สำหรับโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมทะเลนั้นสามารถแบ่งตามลักษณะความเสี่ยงที่จะเกิดการกัดกร่อนได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 4 บริเวณเรียงตามลำดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดการกัดกร่อน ดังนี้ [4]

**2.2.1 บริเวณที่สัมผัสกับคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash Zone)** บริเวณนี้เป็นบริเวณที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมมากที่สุด เนื่องจากเกิดสภาวะเปียกสลับแห้ง (Wetting and Drying Process) โดยที่น้ำทะเลจะเข้าสู่ภายในเนื้อคอนกรีตด้วยวิธีการดูดซึม (Capillary Adsorption) จนกระทั่งเนื้อคอนกรีตเกิดการอิ่มตัว (Saturated) เมื่อสภาพภายนอกแห้ง น้ำที่ผิวคอนกรีตก็จะระเหยออกไปทิ้งคราบเกลือไว้ภายในผิวคอนกรีต ดังนั้นเมื่ออยู่ในสภาวะเปียกอีกครั้ง ความเข้มข้นของปริมาณคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีตก็จะสูงขึ้น ดังนั้นคลอไรด์ก็อาจจะซึมเข้าสู่ภายใน

เนื้อคอนกรีตด้วยการแพร่ สภาวะเปียกสลับกับแห้งในแต่ละรอบนั้นจะทำให้คลอไรด์บริเวณที่ผิวเกิดการสะสมของเกลือคลอไรด์เพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ ทำให้ซึมเข้าสู่เนื้อคอนกรีตและเหล็กเสริมมากขึ้นโดยปกติแล้วเมื่อคอนกรีตเปียกแล้วจะแห้งช้ามากและภายในคอนกรีตไม่สามารถทำให้แห้งสมบูรณ์ได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นกลไกการแพร่ของไอออนคลอไรด์ในบริเวณนี้จึงมากกว่าบริเวณอื่น จึงทำให้บริเวณที่สัมผัสกับคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash Zone) มีโอกาสเกิดสนิมมากที่สุด

**2.2.2 บริเวณที่อยู่เหนือผิวน้ำ (Marine Atmospheric Zone)** บริเวณนี้ไม่มีการสัมผัสกับน้ำทะเลโดยตรงแต่ละอองหรือไอทะเลสามารถส่งผ่านอากาศได้ โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น ระยะห่างของโครงสร้างจากชายฝั่งทะเลโดยระดับความเข้มข้นของคลอไรด์จะแปรผกผันกับระยะห่าง ความเร็วลม การซึมผ่านจะเป็นกลไกการแพร่ของไอทะเลและคลอไรด์ (Gas Diffusion) เนื่องจากการเคลื่อนที่ของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตจำเป็นต้องใช้ความชื้นเป็นตัวกลางในการแพร่ ดังนั้นการแพร่ของไอน้ำจากภายนอกเข้าสู่ภายในเนื้อคอนกรีตจึงทำให้เกิดความชื้นและเหมาะต่อการแพร่ของคลอไรด์ไอออนด้วย

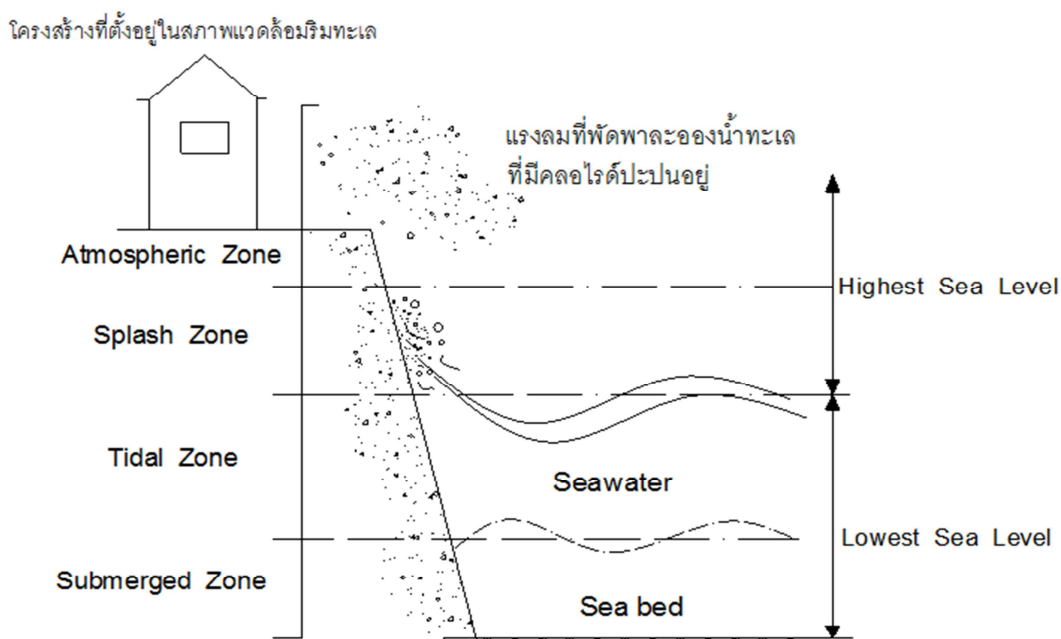
**2.2.3 บริเวณที่อยู่ระหว่างระดับน้ำขึ้นสูงสุดและระดับน้ำลงต่ำสุด (Tidal Zone)** บริเวณนี้มีกลไกการแพร่คล้ายกับบริเวณที่สัมผัสกับคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash Zone) แต่บริเวณนี้อัตราการแพร่ของออกซิเจนจะถูกจำกัดเนื่องจากคอนกรีตจะอยู่ในสภาวะเปียกมากกว่าสภาวะแห้ง จึงทำให้ออกซิเจนแพร่เข้าสู่ภายในเนื้อคอนกรีตได้น้อย ดังนั้นจึงทำให้บริเวณนี้มีโอกาสเกิดสนิมน้อยกว่าบริเวณที่สัมผัสกับคลื่นและละอองน้ำทะเล และบริเวณที่อยู่เหนือผิวน้ำ

**2.2.4 บริเวณที่จมอยู่ใต้น้ำทะเลตลอดเวลา (Submerged Zone)** บริเวณนี้เป็นบริเวณที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมน้อยที่สุด เนื่องจากบริเวณนี้มีความเข้มข้นของออกซิเจนน้อยและอัตราการแพร่ของออกซิเจนเข้าสู่เนื้อคอนกรีตต่ำมาก เนื่องจากช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตทั้งหมดเป็นช่องว่างที่อิมมิดด้วยน้ำซึ่งออกซิเจนจะละลายน้ำได้น้อยมาก ทำให้การแพร่ของออกซิเจนเกิดขึ้นได้น้อยด้วย

การเคลื่อนตัวของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตนั้นขึ้นอยู่กับระยะเวลาของสภาพเปียกและแห้ง ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานที่และสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น การไหลของน้ำทะเล ทิศทางลม และการใช้งานของโครงสร้าง เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่สภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียกมักจะเป็นสภาพที่เร่งให้คลอไรด์เข้าสู่เนื้อคอนกรีตได้เร็วขึ้น ดังนั้นคอนกรีตที่ถูกน้ำทะเลเป็นบางครั้งหรือมีช่วงแห้งที่ยาวนานกว่าช่วงที่เปียกจะมีโอกาสเกิดปัญหาการกัดกร่อนของสนิมมากกว่าคอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำทะเลซึ่งเป็นช่วงเปียกที่ยาวนานกว่าช่วงแห้ง โดยการกัดกร่อนจะ



เริ่มขึ้นเมื่อคลอไรด์ไอออนมีปริมาณมากพอที่ผิวเหล็กเสริม (Threshold Content of Chloride Ions) ซึ่งพบว่าช่วงนี้ความเป็นด่างของคอนกรีตลดลงจนถึงระดับวิกฤติ



รูปที่ 2.3 การจำแนกความเสี่ยงของโครงสร้างที่มีการสัมผัสคลอไรด์จากน้ำทะเล

## 2.3 ชนิดของคลอไรด์

คลอไรด์ทั้งหมดที่อยู่ภายในเนื้อคอนกรีต (Total Chloride) อาจแยกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

2.3.1 คลอไรด์ที่ถูกยึดอยู่กับที่ (Fixed Chloride) เป็นคลอไรด์ที่ถูกจับยึดอยู่ในผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน และที่เกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนไปในรูปแบบของสารประกอบแคลเซียมคลอโรลูมินาตไฮเดรต (Calcium Chloro-Aluminate Hydrate) ซึ่งรู้จักกันโดยทั่วไปว่าเป็นเกลือของฟรีเดล (Fridel's Salts) หรือถูกดูดซับด้วยผิวของโพรงเจล (Gel Pores) และบางส่วนอาจถูกดูดซับที่ผิวของผลผลิตจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก ซึ่งคลอไรด์ประเภทนี้ไม่สามารถละลายน้ำได้ทำให้ไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าไปลึกถึงเหล็กเสริมได้ จึงทำให้คลอไรด์ส่วนนี้ไม่มีผลกระทบต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้

โดยปกติในปูนซีเมนต์จะมี  $C_3A$  เป็นองค์ประกอบ ซึ่งความสามารถในการกักเก็บปริมาณคลอไรด์จะขึ้นอยู่กับ  $C_3A$  ในซีเมนต์ [7] โดยที่หลังจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน คลอไรด์บางส่วนจะเข้ามารวมกับสารผลิตภัณฑ์ของ  $C_3A$  เกือบทั้งหมด กลายเป็นเกลือของฟรีเดล (Fridel's Salt)

ดังนั้นถ้าปูนซีเมนต์สามารถกักเก็บคลอไรด์ได้มากก็จะทำให้การซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตช้าลง และทำให้ช่วงเริ่มต้นของการกัดกร่อนช้าลงไปด้วย [3]

**2.3.2 คลอไรด์อิสระ (Free Chloride)** เป็นคลอไรด์ที่มีสภาพเป็นสารละลายอยู่ในน้ำที่อยู่ในโพรงของคอนกรีต (Pore Solution) คลอไรด์อิสระนี้สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่เนื้อคอนกรีตจนถึงผิวของเหล็กเสริมได้ อย่างไรก็ตามคลอไรด์อิสระนั้นสามารถถูกจับยึดและเปลี่ยนเป็นคลอไรด์ที่ถูกยึดอยู่กับที่ไว้ได้โดยไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $C_3A$ ) จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งมีอยู่ในปูนซีเมนต์โดยอาศัยกระบวนการทางเคมี ดังนั้นถ้าสามารถจับยึดคลอไรด์ส่วนนี้ไว้ได้เป็นจำนวนมาก ก็จะสามารถยืดเวลาของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมออกไปได้

## 2.4 การเคลื่อนที่ของคลอไรด์

คลอไรด์เป็นองค์ประกอบหลักในน้ำทะเลที่มีความสามารถที่จะแทรกซึมเข้าสู่ภายในเนื้อของคอนกรีตได้หากอยู่ในสภาพหรือมีปัจจัยที่เหมาะสม การซึมผ่านของคลอไรด์อิออนจะขึ้นกับคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้ เช่น ความพรุนของเนื้อคอนกรีตเอง ชนิดและองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ สภาพของการบ่ม สภาพของอุณหภูมิในขณะที่เหมาะสม-เท-บ่ม ความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์โดยรอบ เป็นต้น ซึ่งหากคลอไรด์อิออนที่ผิวเหล็กเสริมมีปริมาณที่มากเพียงพอแล้วจะทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดสนิมได้

การแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตนั้น โดยทั่วไปอิออนของคลอไรด์จะเข้าสู่ภายในเนื้อคอนกรีตด้วยการซึมผ่านในลักษณะต่างๆ ดังนี้

**2.4.1 การแพร่ (Diffusion)** เกิดขึ้นจากความแตกต่างของระดับความเข้มข้นของคลอไรด์ในคอนกรีต โดยคลอไรด์อิออนจะแพร่จากภายนอกที่มีความเข้มข้นคลอไรด์สูงเข้าสู่ภายในเนื้อคอนกรีตถ้ามีความเข้มข้นต่ำ

**2.4.2 การซึมผ่าน (Permeability)** เกิดขึ้นจากความแตกต่างของความดัน ทำให้น้ำที่มีเกลือคลอไรด์ละลายปนอยู่เกิดแรงดันเข้าสู่เนื้อคอนกรีตได้ หากภายในเนื้อคอนกรีตมีแรงดันที่ต่ำกว่า

**2.4.3 การดูดซึม (Absorption)** เกิดขึ้นจากผลของวัฏจักรเปียกสลับแห้ง (Wetting and Drying Process) ในคอนกรีตซึ่งทำให้เกิดแรงดึงดูดคาпилลารี (Capillary Suction) ขึ้นภายในเนื้อคอนกรีตทำให้อิออนของคลอไรด์เข้าสู่เนื้อคอนกรีตได้ด้วยการพา (Convection) และเกิดขึ้นจาก

ความแตกต่างของระดับความชื้นระหว่างผิวทั้งสอง อย่างไรก็ตามการแทรกซึมของคลอไรด์อาจเกิดจากวิธีใดวิธีหนึ่งหรือมากกว่านั้นก็ได้ในเวลาเดียวกัน

## 2.5 การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณใกล้ผิวที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมที่มีคลอไรด์

เมื่อคอนกรีตสัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่มีคลอไรด์เป็นเวลานานก็จะทำให้ความเข้มข้นของคลอไรด์ในสารละลายที่อยู่ในช่องว่างของคอนกรีตสามารถมีค่าสูงกว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมได้ซึ่งเกิดได้ใน 2 ลักษณะ ดังนี้

**2.5.1 สภาวะเปียกสลับกับแห้ง** เมื่อคอนกรีตเปียกจนสภาพภายนอกเปลี่ยนเป็นแห้ง น้ำที่ผิวคอนกรีตก็จะระเหยออกไปทิ้งไว้แต่คราบเกลือ เมื่ออยู่ในสภาพเปียกอีก ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ใกล้ผิวก็จะสูงขึ้น ดังนั้นคลอไรด์ไอออน (Chloride Ions) ซึ่งมีความเข้มข้นสูงที่บริเวณผิวจะซึมเข้าสู่ภายในโดยการแพร่ ซึ่งแต่ละรอบของการเปียกและการแห้ง จะทำให้คลอไรด์บริเวณใกล้ผิวมีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อยๆ และจะเข้าไปสู่ภายในคอนกรีตและบริเวณเหล็กเสริมมากขึ้น โดยปกติแล้วคอนกรีตจะเปียกได้เร็ว แต่จะแห้งได้ช้ากว่ามากและภายในของคอนกรีตนั้นไม่สามารถทำให้แห้งโดยสมบูรณ์ได้

**2.5.2 สภาวะเปียกตลอดเวลา** เมื่อคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมสามารถถูกดึงเข้าไปในช่องว่างของคอนกรีตได้ด้วยแรงทางประจุไฟฟ้า เนื่องจากผิวของของแข็งที่อยู่ติดกับช่องว่างในคอนกรีตมักจะเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) จะมีคุณสมบัติทางศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกซึ่งสามารถดึงคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมซึ่งมีประจุเป็นลบเข้าไปได้ แต่อย่างไรก็ดีในสภาพของสิ่งแวดล้อมที่เปียกตลอดเวลา ถึงแม้คลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตได้มากก็มักไม่เป็นอันตรายต่อเหล็กเสริมเนื่องจากไม่มีออกซิเจนเพียงพอในการเกิดสนิม

## 2.6 ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ

คลอไรด์ไอออนสามารถเร่งการเกิดสนิมโดยการเข้าไปทำลายชั้นฟิล์มที่เคลือบผิวเหล็กเสริมไว้ หรือที่เรียกว่า Depassivate ซึ่งปริมาณคลอไรด์ในระดับที่ทำให้ชั้นฟิล์มถูกทำลายนั้นเรียกว่า ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (Chloride Threshold) ซึ่งแสดงค่าได้หลายแบบทั้งในรูปของอัตราส่วน  $[Cl^-]/[OH^-]$  ในรูปของ Total chloride และในรูปของ Free chloride เป็นต้น [7]

### 2.6.1 Chloride Threshold Level (CTL)

Ann และ Song [5] กล่าวว่า การแสดงค่า Chloride Threshold Level (CTL) เป็นปัจจัยสำคัญในการทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างที่มีการสัมผัสคลอไรด์ British Standard (1985) ได้จำกัดปริมาณคลอไรด์ให้น้อยกว่า 0.4% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ สำหรับโครงสร้างคอนกรีตเหล็กเสริมและ 0.1% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ สำหรับโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง การศึกษาของ Patterson (1993) ได้แสดงถึงช่วงของค่า CTL ในรูปของความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระ ความกว้างของช่วงตั้งแต่ 0.28-1.8 M ในมอร์ต้าที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ตั้งแต่ 0.3 ถึง 0.75 ส่วนผลการศึกษาของ Alonso et al (2002) แสดงถึงค่า CTL ในรูปของปริมาณคลอไรด์อิสระตั้งแต่ 0.3% ถึง 2.0% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ จากที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่าคลอไรด์อิสระมีผลต่อการเกิดการกัดกร่อน แต่ค่า Chloride Threshold Level (CTL) ที่นิยมแสดงนั้นส่วนใหญ่เป็นปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด โดยแสดงเป็นร้อยละของน้ำหนักของซีเมนต์ เนื่องจากสะดวกและง่ายในการหาค่า สาเหตุที่แสดงค่า CTL ด้วยค่าคลอไรด์ทั้งหมดเนื่องจากการรวมผลเกี่ยวกับความเสี่ยงในการกัดกร่อนของ Bound Chloride และ ผลของตัวบ่งชี้ใน Cement Hydration Products โดยในช่วงแรกของการกัดกร่อนค่า pH ที่อยู่ผิวเหล็กลดลงซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีกับคลอไรด์และไอออนของเหล็ก [5] การกัดกร่อนจะเริ่มเกิดในที่ถูกกัดกร่อนที่มีค่า pH ต่ำกว่า 10 โดยการลดลงของค่า pH ทำให้เกิดการปล่อยคลอไรด์ไอออนที่ถูกยึดอยู่กับที่โดยรอบอย่างน้อยประมาณ 90% ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งที่มีส่วนร่วมในกระบวนการกัดกร่อน เมื่อรวมกับออกซิเจนและน้ำ ซึ่งเป็นตัวเร่งในการกัดกร่อน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total Chloride) โดยน้ำหนักของซีเมนต์ เป็นการบอกค่า Chloride Threshold Level (CTL) ที่ดี เพราะรวมผลของคุณสมบัติของซีเมนต์ที่สามารถจับยึดคลอไรด์ได้ และผลของ Bound Chloride ที่อาจแตกตัวเป็นคลอไรด์ไอออนแล้วทำให้เกิดการกัดกร่อนได้

Thomas [6] ได้ศึกษา Chloride Threshold ในคอนกรีตที่อยู่ในสภาพแวดล้อมทะเล ทดสอบชิ้นตัวอย่างที่สภาวะ Tidal Zone ช่วงเวลาที่ศึกษา 1 ถึง 4 ปี โดยทำการเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมที่เสียไป มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 0% 15% 30% และ 50% ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า Chloride Threshold มีค่าลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยมีเพิ่มขึ้น แม้ค่า Chloride Threshold ที่ต่ำลง แต่การป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมดีขึ้น เนื่องจากการเพิ่มเถ้าลอยให้มากขึ้นสามารถเพิ่มความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ไอออนได้เป็นอย่างดี

Alonso et al [7] ได้ศึกษาค่า Chloride Threshold ที่ทำให้เหล็กเสริมที่ฝังในมอดาร์ OPC เกิดการ Depassivate ในการศึกษาค่า Chloride Threshold สำหรับการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ยังมีค่าไม่แน่นอน เนื่องจากขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น สัดส่วนผสมคอนกรีต ชนิดปูนซีเมนต์ ปริมาณ  $C_3A$  ในปูนซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อุณหภูมิ ความชื้น เป็นต้น ในการศึกษา นี้ใช้การวัดการเกิดสนิมแบบกระแสกัดกร่อน (Corrosion Current) และได้แสดงค่า Chloride Threshold ในรูปของคลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์อิสระ และอัตราส่วนของ  $[Cl^-]:[OH^-]$  จากการศึกษา พบว่า Chloride Threshold ในรูปของคลอไรด์ทั้งหมด อยู่ในช่วง 1.24%-3.08% โดยน้ำหนักของ ซีเมนต์ คลอไรด์อิสระ อยู่ในช่วง 0.39%-1.16% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ และอัตราส่วนของ  $[Cl^-]:[OH^-]$  อยู่ในช่วง 1.17-3.98 ซึ่งพิจารณาว่าเหล็กเสริมเกิด Depassivate เมื่ออัตราการกัดกร่อน ในเหล็กเสริมสูงกว่า  $0.1 \mu A/cm^2$

Oh et al [8] ทำการทดสอบโดยใช้ Half-Cell Monitoring เพื่อตรวจสอบช่วงเริ่มต้นของการกัดกร่อน ซึ่งพบว่า fly ash ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นจาก 15% เป็น 30% ทำให้ค่า Chloride Threshold Level ลดลงจาก 0.90% เป็น 0.67% โดยน้ำหนักของซีเมนต์

### 2.6.2 การตรวจสอบหาปริมาณคลอไรด์

Ann และ Song [5] ได้กล่าวถึงการวัดปริมาณคลอไรด์เมื่อเริ่มเกิดการกัดกร่อนว่า มี 2 ขั้นตอนในการวัดปริมาณคลอไรด์ คือ การเจาะส้อมตัวอย่าง และการวิเคราะห์ โดยทั่วไปการส้อมตัวอย่างจะเก็บตัวอย่างคอนกรีตที่ความลึกต่างๆมาวัดให้เป็นผง

การวัดความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระสามารถวัดได้จากสารละลายที่ได้จากการสกัดเอา ผงของตัวอย่างคอนกรีต หรือมอร์ต้ามาละลายน้ำ การหาความเข้มข้นของคลอไรด์นั้นทำโดยใช้ Potentiometer หรือ Chloride Ion Selective Electrode ความเข้มข้นของคลอไรด์จะแสดงเป็น เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักปูนซีเมนต์หรือคอนกรีต การวัดคลอไรด์ที่ละลายน้ำจะขึ้นอยู่กับผงตัวอย่าง ปริมาณน้ำที่เติม อุณหภูมิ วิธีการกวน และเวลาที่ใช้สำหรับการสกัด

วิธี Pore Press นั้นเกี่ยวข้องกับการสกัด Pore Solution ออกจาก Cement Paste ภายใต ความดันสูง และมีความแม่นยำกว่าวิธีการสกัดมอร์ต้ามาละลายน้ำ แต่ในขั้นตอนนี้ Bound Chloride จะแตกตัวรวมกับคลอไรด์อิสระทำให้ปริมาณคลอไรด์อิสระมีปริมาณมากเกินไป

วิธีการวัดปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุดคือการสกัดจากกรด โดยให้ Bound Chlorides และ Free Chlorides ละลายอยู่ในกรด วัดคลอไรด์ทั้งหมดที่ละลายใน กรดโดยใช้ Chloride Ion Selective Electrode หรือ Titration นอกจากนี้รังสี X-ray สามารถใช้ใน

การหาปริมาณคลอโรไนด์ได้ อย่างไรก็ตามวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายสูงและต้องมีความเชี่ยวชาญมาก รวมถึงวิธีการใช้งานที่ต้องควบคุมโดยเจ้าหน้าที่ห้องแลป

## 2.7 การคาดการณ์การเกิดสนิมในเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์

ในสถานะที่คอนกรีตต้องอยู่ในสภาพแวดล้อมทะเล และต้องเผชิญต่อคลอไรด์ที่ซึมเข้าสู่คอนกรีต หากปริมาณคลอไรด์ ณ ตำแหน่งเหล็กเสริมมีปริมาณมากเกินกว่าค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤติ จะทำให้เหล็กเสริมเริ่มเป็นสนิมได้ ดังนั้นเพื่อให้โครงสร้างคอนกรีตที่ใกล้ทะเลหรือสัมผัสกับน้ำทะเลที่มีคลอไรด์โดยตรงมีความคงทนต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะต้องถูกออกแบบให้ปริมาณคลอไรด์ ณ ตำแหน่งเหล็กเสริมที่อยู่ใกล้ผิวคอนกรีตที่สุด มีค่าไม่เกินค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤติที่จะทำให้เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิมได้ ในช่วงระยะเวลาอายุการใช้งานที่ปลอดการบำรุงรักษา (Maintenance-free service life) ดังสมการ (2.4) คือ [1]

$$C_d \leq C_{lim} \quad (2.4)$$

โดยที่

$C_{lim}$  คือ ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ หมายถึง ปริมาณคลอไรด์ที่จะทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเริ่มเกิดสนิมได้ ซึ่งในที่นี้กำหนดให้เท่ากับร้อยละ 0.4 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

$C_d$  คือ ปริมาณเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่สะสมในคอนกรีตบริเวณผิวเหล็กเสริม (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.5)

$$C_d = (C_s - C_0) \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{0.1c}{2\sqrt{D_a t}} \right) \right] + C_0 \quad (2.5)$$

โดยที่	$c$	ระยะหุ้มเหล็กเสริม (มม.)
	$D_a$	สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต (ซม. <sup>2</sup> /ปี)
	$t$	อายุการใช้งานปลอดการบำรุงรักษาของโครงสร้างคอนกรีต (ปี)
	$C_0$	ปริมาณคลอไรด์เริ่มต้นในคอนกรีต (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)
	$C_s$	ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

## 2.8 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ที่ซึมผ่านเข้าสู่คอนกรีต

วิธีที่ 1 การใช้ไนยาซิลเวอร์ไนเตรต (Silver nitrate) ความเข้มข้น 0.1N ฉีดลงบนผิวของคอนกรีตที่ทำการสกัดเตรียมผิวไว้แล้ว ระยะที่สารละลายดังกล่าวเปลี่ยนเป็นสีเทา คือระยะที่คลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้าไปในเนื้อของคอนกรีต

วิธีที่ 2 สามารถกระทำได้ง่ายด้วยเครื่องมือที่เรียกว่า Chloride Analyser หรืออาจใช้ขบวนการทางเคมีตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C114 และ ASTM C1152 โดยนำคอนกรีตที่ระดับความลึกต่างๆมาทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและทำการพล็อตกราฟเทียบกับระยะความลึกก็จะได้แนวโน้มของการซึมผ่านของคลอไรด์ซึ่งจะทำให้สามารถประเมินระยะเวลาที่เหลืออยู่ ก่อนที่เหล็กเสริมจะเกิดการผุกร่อนเป็นสนิมได้โดยประมาณซึ่งเกณฑ์ในการพิจารณาปริมาณคลอไรด์ที่ยอมรับได้คือไม่เกิน 0.4% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน [1]

ปริมาณคลอไรด์ที่ละลายน้ำได้ที่ยอมให้ในคอนกรีตใหม่เป็นการควบคุมปริมาณคลอไรด์ตั้งแต่ขั้นตอนการผลิตคอนกรีต มาตรฐานด้านอายุการใช้งานและความคงทนของอาคาร จึงได้กำหนดค่าไว้สำหรับปริมาณคลอไรด์ที่ละลายน้ำได้ในคอนกรีตที่มาจากส่วนผสมแต่ละชนิด (ไม่รวมที่ซึมผ่านเข้ามาจากสิ่งแวดล้อมในภาวะการใช้งานของโครงสร้าง) โดยจะต้องมีค่าไม่เกินกว่าที่กำหนดในตารางที่ 2.2

### ตารางที่ 2.2 ปริมาณคลอไรด์ที่ละลายน้ำได้ที่ยอมให้ในคอนกรีต

ลักษณะงานก่อสร้าง	ปริมาณคลอไรด์ที่ละลายน้ำได้ที่ยอมให้ในคอนกรีต (ร้อยละของน้ำหนักวัสดุประสาน)
(ก) คอนกรีตอัดแรง	0.06
(ข) คอนกรีตเสริมเหล็กที่ขณะใช้งานมีการสัมผัสกับคลอไรด์ เช่น กำแพงกันคลื่น ( Sea-Retaining Wall )	0.15
(ค) คอนกรีตเสริมเหล็กที่มีสภาพแห้ง หรือขณะใช้งานมีการป้องกันความชื้น	1.00
(ง) การก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอื่น	0.30

หมายเหตุ : โดยการทดสอบเพื่อหาปริมาณคลอไรด์รวมที่ละลายน้ำได้ให้เป็นไปตามมาตรฐาน

ASTM C1218/C 1218M : Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete

อ้างอิง จากมาตรฐานด้านอายุการใช้งานและความคงทนของอาคาร

## 2.9 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์

ปัจจัยต่างๆที่เป็นสาเหตุทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดสนิมในเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ได้นั้นมีหลายสาเหตุด้วยกัน ซึ่งแต่ละสาเหตุนี้จะทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้เร็วหรือช้าแตกต่างกันไปด้วย [3]

### 2.9.1 ชนิดของปูนซีเมนต์ วัสดุประสานและคุณภาพคอนกรีต

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (ประเภทที่ 1) ด้านทานการแพร่ของคลอไรด์ได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟต (ประเภทที่ 5) เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (ประเภทที่ 1) มี  $C_3A$  สูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟต (ประเภทที่ 5) ทำให้สามารถจับยึดคลอไรด์ได้มากกว่า ส่วนเถ้าลอยสามารถช่วยลดการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดี โดยปริมาณการแทนด้วยเถ้าลอยระหว่างร้อยละ 15-35 โดยน้ำหนัก [3] จะทำให้การซึมผ่านของคลอไรด์ต่ำที่สุด ซึ่งมีผลดีว่าการลดอัตราส่วน  $w/b$  แต่การใส่เถ้าลอยนั้นจะทำให้ปริมาณไฮดรอกซิลไอออนน้อยลง ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก โดยปริมาณคลอไรด์วิกฤติจะขึ้นอยู่กับปริมาณไฮดรอกซิลไอออนในโพรงคอนกรีต สำหรับการบ่มคอนกรีตก็สามารถช่วยลดการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ เนื่องจากการบ่มจะเพิ่มระดับของปฏิกิริยาไฮเดชันจะทำให้ความสามารถการซึมผ่านได้ลดลง หากบ่มคอนกรีตไว้นานการซึมผ่านของคลอไรด์ก็จะลดลงด้วย

### 2.9.2 อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสาน ( $w/b$ )

สามารถบอกคุณภาพของคอนกรีตได้ การที่คอนกรีตแน่นไม่เพียงพอจะทำให้การแพร่ของคลอไรด์เพิ่มขึ้น ซึ่งในอัตราส่วนที่เท่ากันคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานจะมีการซึมผ่านของคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่มีวัสดุปอซโซลาน

### 2.9.3 ระยะเวลาหุ้มเหล็กเสริม

สำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสภาพแวดล้อมที่สัมผัสกับคลอไรด์นั้น ระยะเวลาหุ้มเหล็กเสริมที่เหมาะสมสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้นานขึ้น คอนกรีตที่มีความทึบแน่นก็ยังสามารถป้องกันการเกิดสนิมได้

### 2.9.4 สภาพแวดล้อม

เนื่องจากกระบวนการการเกิดสนิมเนื่องจากคลอไรด์นั้นเป็นปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ดังนั้นอัตราการเกิดสนิมจะขึ้นกับอุณหภูมิและความชื้น โดยที่อุณหภูมิสูงจะพบว่าอัตราการเกิดสนิมนั้นจะมีค่ามาก และต้องมีความชื้นที่พอเหมาะ



## 2.10 การป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์

วิธีการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์สามารถแบ่งได้เป็น 3 วิธี คือ

### 2.10.1 การปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตและเหล็กเสริม

การออกแบบทำได้โดยออกแบบให้คอนกรีตมีความสามารถในการซึมน้ำต่ำมากๆ เช่น ลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน w/b ใช้ซิลิกาฟูม แกลลอย หรือวัสดุปอลิไซลันในปริมาณที่เหมาะสม นอกจากทำให้คอนกรีตที่บ่มแล้วยังช่วยจับยึดคลอไรด์ได้มากกว่าใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว

การใช้สารผสมเพิ่มบางชนิด เช่น Calcium Nitrite หรือ Sodium Nitrite ซึ่งจะทำให้ปฏิกิริยาอะโนดิกนั้นเกิดยากขึ้น

ใช้เหล็กเสริมที่ไม่เป็นสนิม การทำเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) โดยการเติมธาตุอื่นๆ เช่น โครเมียม นิกเกิล ธาตุเหล่านี้จะสร้างฟิล์มบางๆ ที่ติดแน่นบนผิวเหล็ก ช่วยป้องกันไม่ให้เนื้อเหล็กสัมผัสกับบรรยากาศโดยตรง ซึ่งผิวเคลือบชนิดนี้มีความคงทนทั้งทางกายภาพและเคมี

Arya และ Xu [9] ได้ศึกษาผลกระทบการกัดกร่อนในเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ต่อปูนซีเมนต์ที่มีส่วนผสมต่างๆ โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) GGBS 65%, PFA 35%, SF 10% และใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.5 และใช้เวลาในการบ่ม 3, 7, 14, 28, 90 และ 180 วัน ตามลำดับ ส่วนปริมาณคลอไรด์ที่ใช้ในการทดสอบ ใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 1% และ 3% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ โดยทำการเติมโซเดียมคลอไรด์เข้าไปน้ำที่ใช้ทำการผสมขึ้นตัวอย่าง เก็บชิ้นตัวอย่างโดยควบคุมอุณหภูมิที่  $\pm 20$  องศาเซลเซียส และมีความชื้นสัมพัทธ์  $95 \pm 2\%$  ตรวจสอบการกัดกร่อนโดยการวัด Galvanic Current ใน Macro Corrosion Cell ผลการทดสอบพบว่า สำหรับส่วนผสมที่มีคลอไรด์ 1% มีอัตราการกัดกร่อนเกิดกับ OPC ได้ต่ำกว่า PFA และ GGBS แต่ในส่วนผสมที่มีคลอไรด์ 3% GGBS และ SF ใช้เวลาการเกิดกัดกร่อนนานกว่า OPC ซึ่งโดยทั่วไป PFA จะเกิดการกัดกร่อนได้ค่อนข้างต่ำเนื่องจากปริมาณของ Chloride Binding มีไม่มากและความเข้มข้นของ  $\text{OH}^-$  ยังลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาปอลิไซลัน

### 2.10.2 การป้องกันภายนอก

ใช้สารเคลือบผิวคอนกรีต (Surface Coating) เป็นการเคลือบผิวเป็นฟิล์มบางๆ เพื่อป้องกันไม่ให้สัมผัสกับออกซิเจน และความชื้น ทำให้ซึมเข้าไปในคอนกรีตได้ยากขึ้น เช่น การเคลือบผิวด้วยพลาสติก การเคลือบผิวด้วยสี การเคลือบผิวด้วยน้ำมัน การเคลือบผิวด้วยการรมดำ

แต่วิธีนี้ก็ยังมีข้อเสีย คือ ผิวเคลือบหลุดออกได้ง่าย และผิวเคลือบบางชนิด เช่น ดีบุก ยังเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดสนิมเร็วขึ้นอีกด้วย

### 2.10.3 การเคลือบผิวเหล็กเสริม

Ann และ Song [5] ได้กล่าวถึงค่า CTL ของเหล็กเคลือบผิวด้วยสังกะสีจากการศึกษาในห้องปฏิบัติการพบว่า การเคลือบสังกะสีนั้นทำให้ค่า CTL เพิ่มขึ้น และอ้างอิงจาก Treadaway et al (1978) พบว่าเหล็กที่ทำการชุบเคลือบสังกะสีที่อยู่ในโครงสร้างคอนกรีตจะทำให้เกิดการกัดกร่อนช้าขึ้นและมีค่า CTL 0.9% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ผลการตรวจสอบของโครงสร้างคอนกรีตในสภาพแวดล้อมทะเลในช่วง 8–23 ปีพบว่าเมื่อใช้เหล็กชุบสังกะสีจะมีค่า CTL 0.64% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ในขณะที่เหล็กที่ไม่ได้ทำการเคลือบสังกะสีพบว่ามีค่า CTL 0.2% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ และ Bautista and Gonzalez (1996) พบว่าอัตราการกัดกร่อนของเหล็กชุบเคลือบสังกะสีจะต่ำกว่าเหล็กที่ไม่ได้ชุบเคลือบสังกะสี โดยอัตราการกัดกร่อนของเหล็กชุบเคลือบสังกะสีมีค่าระหว่าง 0.2 ถึง 1.2  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  ในขณะที่เหล็กที่ไม่ได้ทำการเคลือบพบค่าอยู่ในช่วง 0.4 ถึง 10  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  ซึ่งผลของการชุบเคลือบสังกะสีทำให้คอนกรีตมีประสิทธิภาพสูงขึ้น เนื่องจากทำให้การกัดกร่อนเกิดขึ้นช้าลง

N. Gowripalan และ H.M. Mohamed [10] ได้ศึกษาการกัดกร่อนของเหล็กเสริมที่เคลือบผิวด้วยสังกะสีและเหล็กเสริมที่ไม่ได้เคลือบผิวเนื่องจากคลอไรด์ในคอนกรีตสมรรถนะสูง โดยแบ่งการผสมคอนกรีตที่มีกำลังอัดแยกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นคอนกรีตปกติมีกำลังอัดที่ 30 และ 40 Mpa และส่วนที่สองเป็นคอนกรีตกำลังสูงมีกำลังอัดที่ 50 และ 80 Mpa โดยนำผลของการเร่งการแทรกซึมของคลอไรด์อิออนแบบรวดเร็วเปรียบเทียบกับผลของขึ้นตัวอย่างที่แช่ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 4 ที่ระยะเวลา 1 ปี วัดการเกิดสนิมด้วย Half-Cell Potential จากการศึกษพบว่า คอนกรีตสมรรถนะสูงลดการแทรกซึมของคลอไรด์อิออนได้ และจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมร้อยละ 10 นั้นทำให้ค่า pH ของคอนกรีตลดลงจากที่ระยะเวลา 90 วัน แต่ก็ถือว่าน้อยเมื่อเทียบกับอัตราการกัดกร่อน ส่วนเหล็กที่เคลือบผิวด้วยสังกะสีเมื่อใช้ร่วมกับคอนกรีตสมรรถนะสูงสามารถลดการกัดกร่อนจากคลอไรด์อิออนได้

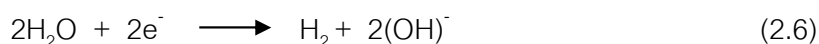
### 2.10.4 การป้องกันโดยอาศัยขบวนการทางไฟฟ้าเคมี [4]

Cathodic Protection คือขบวนการลดอัตราการเกิดสนิมโดยการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าของขั้วลบให้เท่ากับขั้วบวก โดยหลักการทำงานของระบบ Cathodic Protection คือการจ่ายกระแสอิเล็กตรอนจากแหล่งภายนอกเพื่อยับยั้งการเสียอิเล็กตรอนของส่วนที่มีแนวโน้มเป็น

ขั้วแอโนดในเหล็กเสริมโดยหยุดขั้นตอนปฏิกิริยา  $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$  และทำให้กระบวนการเกิดสนิมยุติลง ดังนั้นถ้าไม่ต้องการให้เกิดการผุกร่อนจึงต้องให้โลหะนั้นมีสภาวะเป็นแคโทด โดยใช้โลหะที่เสียอิเล็กตรอนได้ง่ายกว่าเหล็กเป็นขั้วแอโนดแทน

Electrodeposition ใช้หลักการโดยผ่านไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างเหล็กเสริม (ขั้วลบ) ในคอนกรีต กับขั้วไฟฟ้า (ขั้วบวก) โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อให้สารละลายในน้ำทะเลแตกตัวเป็นไอออน และไอออนของโลหะนั้นจะเป็นตัวป้องกันการซึมผ่านของคลอไรด์จากน้ำทะเล เพื่อลดอัตราการเกิดสนิม วิธีการนี้เหมาะสำหรับโครงสร้างที่อยู่ใต้น้ำทะเล

Desalination and Realkalization การป้องกันการเกิดสนิมด้วยวิธีนี้มีหลักการคือ เมื่อแท่งคอนกรีตที่มีไอออนของคลอไรด์ ( $Cl^-$ ) ถูกวางอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ไอออนของคลอไรด์ซึ่งมีประจุลบจะเคลื่อนที่ไปสู่ขั้วบวก และถ้าแรงดันไฟฟ้าสูงพอไอออนของคลอไรด์จะเคลื่อนที่ออกจากคอนกรีตไปสะสมในขั้วบวก ในขณะเดียวกันที่บริเวณเหล็กเสริมที่เป็นขั้วลบ อิเล็กตรอนก็จะรวมตัวกับน้ำทำให้เกิดเป็นก๊าซไฮโดรเจน และไฮดรอกซิลไอออน ดังสมการ (2.6) และยังทำให้บริเวณรอบเหล็กเสริมมีความเป็นด่างสูงขึ้นด้วย



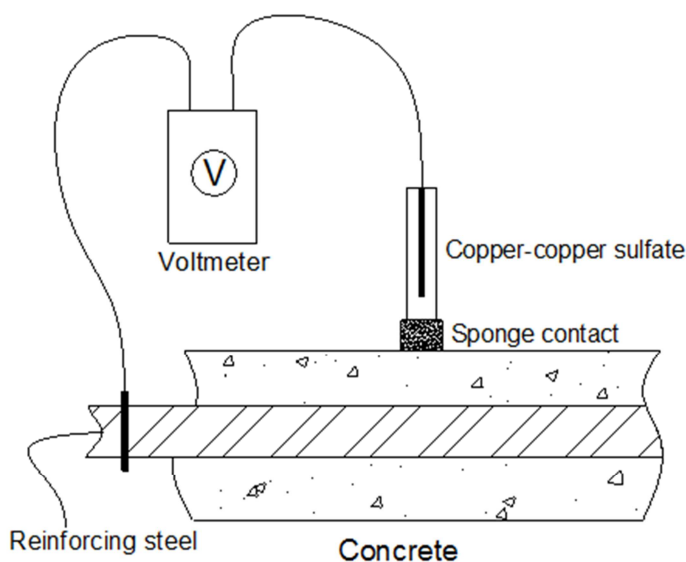
## 2.11 การวัดการเกิดสนิม

2.11.1 ASTM C876 Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete เป็นการตรวจสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริม โดยใช้เครื่องมือ Corrosion Analyzing Instrument ดังแสดงในรูปที่ 2.4 เป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย ซึ่งจะใช้บอกปริมาณการเกิดสนิมเหล็กที่เกิดจากการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในเหล็กบริเวณที่ต้องการตรวจสอบได้ เช่น เหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก รวมถึงความต้านทานของคอนกรีตเพื่อประเมินโอกาสการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในบริเวณที่ทำการตรวจสอบใช้หลักการทดสอบโดยเครื่องมือตรวจวัดความผุกร่อนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก จะวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างเหล็กเสริมและบริเวณผิวคอนกรีตเพื่อประเมินค่าการกัดกร่อนและสภาพของชั้นหุ้มเหล็กเสริมคอนกรีต โดยขั้วลบของโวลต์มิเตอร์ต่อกับเหล็กเสริม ส่วนขั้วบวกต่อกับอิเล็กโทรด ใช้อิเล็กโทรดวัดผิวคอนกรีตจะได้ความต่างศักย์ในแต่ละจุดของชั้นคอนกรีตเสริมเหล็กมา โดยที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้านี้เป็นผลจากขบวนการกัดกร่อนเหล็กเสริม ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าติดลบมากจะบ่งบอกถึงความเสี่ยงมากในการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และความน่าจะเป็นของการเกิดสนิมในโครงสร้าง

ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์คอปเปอร์-คอปเปอร์ซัลเฟต (Cu/CuSO <sub>4</sub> )	สภาพการเกิดสนิม
น้อยกว่า -250 mV	โอกาสร้อยละ 90 ที่เหล็กเสริมจะไม่เกิดสนิม
-250 mV ถึง -350 mV	ไม่แน่นอน
มากกว่า -350 mV	มีโอกาสร้อยละ 90 ที่เหล็กเสริมจะเกิดสนิม

ที่มา: ASTM C876-91 Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete



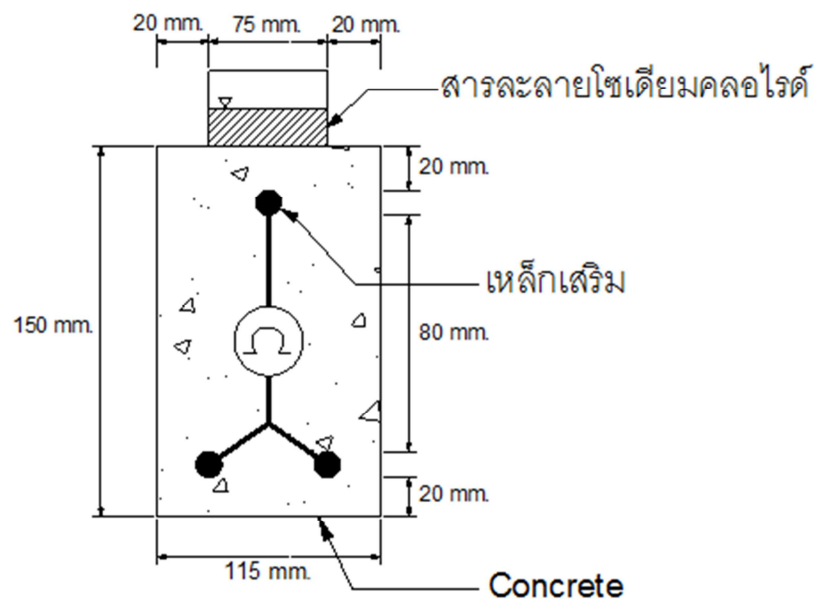
รูปที่ 2.4 การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half Cell Potential)

เนื่องจากมีหลายปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต่างศักย์ ดังนั้นการตีความต้องให้ผู้เชี่ยวชาญจากตารางจะพบว่าถ้ามีความเข้มข้นคลอไรด์มาก จะสามารถใช้มาตรฐาน ASTM ได้ ในทางกลับกันเมื่อพิจารณาที่คอนกรีตมีความทึบแน่นหรือผิวคอนกรีตแห้งจะไม่สามารถใช้มาตรฐาน ASTM ได้ จึงต้องมีการทดสอบอื่นมาพิจารณาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมประกอบกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.4

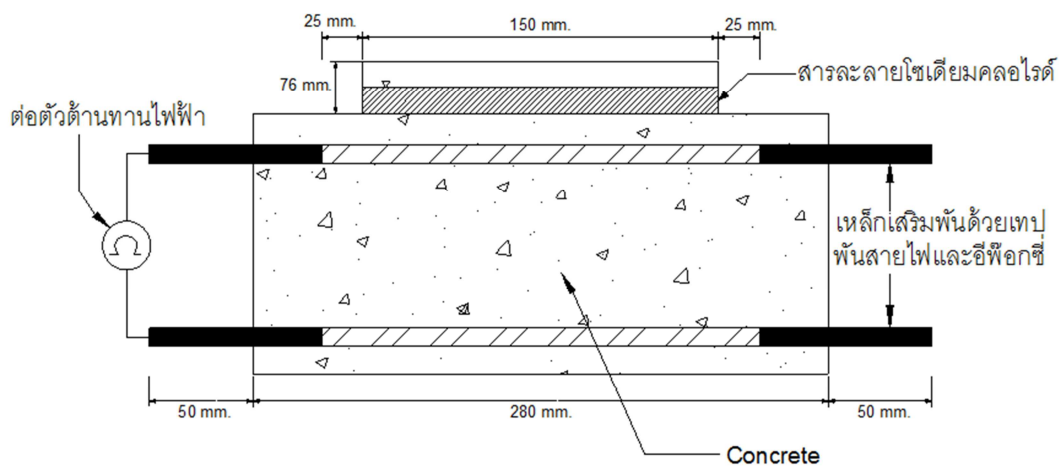
ตารางที่ 2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต่างศักย์และความน่าจะเป็นในการเกิดสนิม [12]

สภาวะ	การเปลี่ยนแปลง ของค่าศักย์ไฟฟ้า ครึ่งเซลล์	การเกิดสนิมของ เหล็กเสริม	เป็นไปตาม มาตรฐาน ASTM C876
ความเข้มข้นของออกซิเจนลดลง	ลดลงเพิ่มขึ้น	อาจไม่เพิ่มขึ้น	ไม่ใช่
คาร์บอนเนชั่น/pH ลดลง	ลดลงเพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น	ใช่
ความเข้มข้นของคลอไรด์เพิ่มขึ้น	ลดลงเพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น	ใช่
การใช้งานสารยับยั้งการกัดกร่อน ประเภทแอนโนดิก	ลดลงน้อยลง	ลดลง	ใช่
การใช้งานสารยับยั้งการกัดกร่อน ประเภทแคโทดิก	ลดลงเพิ่มขึ้น	ลดลง	ไม่ใช่
การใช้การผสมสารยับยั้งการกัด กร่อนประเภทผสม	ลดลงน้อยลง หรือ ติด ลบเพิ่มขึ้น	ลดลง	ไม่ใช่
เหล็กเคลือบผิวด้วยอีพ็อกซี	ลดลงน้อยลง	ไม่มีผล	ไม่ใช่
เหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน	ลดลงเพิ่มขึ้น	ไม่มีผล	ไม่ใช่
ระยะหุ้มของคอนกรีตมาก	ลดลงเพิ่มขึ้น	ไม่มีผล	ไม่ใช่
ความต้านทานคอนกรีต	ลดลงน้อยลง	ไม่มีผล	ไม่ใช่
คอนกรีตแห้ง	ลดลงน้อยลง	ไม่มีผล	ไม่ใช่
ตำแหน่งของอิเล็กโทรดอ้างอิง	ลดลงน้อยลง	ไม่มีผล	ไม่ใช่
การใช้งานวัสดุเคลือบผิว	ลดลงน้อยลง	ไม่มีผล	ไม่ใช่
คอนกรีตซ่อมแซมเฉพาะจุด	ลดลงน้อยลง หรือ ติด ลบเพิ่มขึ้น	ไม่มีผล	ไม่ใช่
การป้องกันการเกิดสนิมด้วยวิธีแค โทดิก	ลดลงเพิ่มขึ้น	ไม่มีผล	ไม่ใช่
กระแสอิสระ (Stray Current)	ผันผวน ระหว่างติดลบ น้อยลงและติดลบ เพิ่มขึ้น	ไม่มีผล	ไม่ใช่

2.11.2 ASTM G109: Standard Test Method for Determining the Effects of Chemical Admixtures on the Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments เป็นการวัดการอัตราการเกิดสนิมโดยการวัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างเหล็กคาร์บอนกับเหล็กคาร์บอนซึ่งเป็นจุดอ้างอิงที่ฝังอยู่ในชิ้นตัวอย่าง ดังรูปที่ 2.5 และ 2.6



รูปที่ 2.5 ขนาดของชิ้นตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบปรับจาก ASTM G109



รูปที่ 2.6 การวัดอัตราการเกิดสนิมปรับจาก ASTM G109

### 2.11.3 ASTM C1152:Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete

#### ASTM C1218:Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete

เป็นการทดสอบหาความเข้มข้นของปริมาณคลอไรด์ โดยวิธี ASTM C1152 เป็นการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total Chloride) และวิธี ASTM C1218 เป็นการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free Chloride) ซึ่งจะทำให้การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ที่ซึมเข้าไปในคอนกรีตในระยะความลึกต่างๆนิยมใช้วิธีการทางเคมี โดยต้องเจาะคอนกรีตบริเวณที่ต้องการหาปริมาณคลอไรด์ไปบดให้ละเอียด และวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์ที่มีอยู่และนำผลการทดสอบที่ได้มาเทียบกับค่ามาตรฐาน ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ซึ่งจะแสดงถึงคอนกรีตใหม่ เป็นการควบคุมปริมาณคลอไรด์ตั้งแต่แรกไม่ให้มีค่าสูงจนเกินไป โดยคอนกรีตที่มีคลอไรด์สูงนั้นจะมีความเสี่ยงสูงที่จะเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริม

2.11.4 Linear Polarization Resistance (LPR) Monitoring ทำการวัดด้วยการใช้สารละลาย Ag/AgCl โดยใส่กระแสไฟฟ้าเข้าไปกระตุ้น จะได้กราฟระหว่างกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปกับความต่างศักย์ที่เปลี่ยนไป วัดจนกระทั่งค่าความต่างศักย์เริ่มนิ่ง จากนั้นหาค่า Polarization Resistance จากความชันกราฟ แล้วแปรผลจากค่า Corrosion Current โดยถ้ายังมีชั้นฟิล์มอยู่จะทำให้ได้ค่าน้อย เนื่องจากวิธีนี้ค่อนข้างยุ่งยากเนื่องจากต้องทำการพลอตกราฟ และมีข้อจำกัดหากใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีการปนเปื้อนจะทำให้ไม่สามารถวัดค่าได้ ส่วนวิธี ASTM C876 Half Cell Potential ค่อนข้างเป็นที่นิยม เพราะสะดวกและใช้ง่าย สามารถวัดความต่างศักย์แล้วนำมาประมวลความน่าจะเป็นในการเกิดสนิมได้รวดเร็ว รวมถึงสามารถใช้ได้กับพื้นที่ที่มีขนาดใหญ่และไม่ต่อเนื่องกันได้

## บทที่ 3

### ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาค่าคลอไรด์วิกฤตที่ก่อให้เกิดสนิมในเหล็กเสริมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งเป็นการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ทำการทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมตามมาตรฐาน ASTM G109 และมาตรฐาน ASTM C876 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุและการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

##### 3.1.1 วัสดุประสาน

- 1) ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน มอก.15
- 2) etailoy ใช้etailoyผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามมาตรฐาน มอก.2135

##### 3.1.2 มวลรวม

- 1) มวลรวมหยาบใช้หินขนาดโตสุด 0.75 นิ้ว มีขนาดคละตามมาตรฐาน มอก.566
- 2) มวลรวมละเอียดใช้ทรายสะอาด มีขนาดคละตามมาตรฐาน มอก.566

##### 3.1.3 เหล็กเสริม

- 1) เหล็กเสริมข้อ้อยย ชั้นคุณภาพ SD40 เส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน มอก.24
- 2) เหล็กเสริมข้อ้อยยชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนหนา 150  $\mu\text{m}$
- 3) เหล็กเสริมข้อ้อยยทาสังกะสีที่ห้องปฏิบัติการหนา 80  $\mu\text{m}$

##### 3.1.4 สารเคมี

- 1) สารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นของปริมาณคลอไรด์ในสารละลายเข้มข้นร้อยละ 10.5 โดยน้ำหนัก
- 2) สารลดน้ำ (Superplasticizer)

##### 3.1.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการหล่อก้อนตัวอย่าง

- 1) โม่ผสมคอนกรีต ขนาดความจุ 100 ลิตร
- 2) แบบเหล็กหล่อก้อนตัวอย่างขนาด 120x150x300 มิลลิเมตร

##### 3.1.6 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ



- 1) เครื่อง Half-Cell Potential ดังแสดงในรูปที่ 3.1
- 2) โวลท์มิเตอร์ มีความละเอียด 0.01 mV. ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 Half-Cell Potential



รูปที่ 3.2 โวลท์มิเตอร์

- 3) ตัวต้านทานขนาด 100 ( $\pm 5\%$ ) โอห์ม
- 4) สายไฟ และเทปพันสายไฟ

### 3.1.7 วัสดุอื่นๆ

- 1) น้ำสะอาดผสมคอนกรีต

### 3.2 การเตรียมตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ

#### 3.2.1 สัดส่วนผสม

ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ใช้อยู่ที่ 0.35, 0.45 และ 0.55 ตามลำดับ ซึ่งรายละเอียดสัดส่วนผสมคอนกรีตในปริมาณต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และรายละเอียดของก้อนตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ถึงตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดสัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ทดสอบ

Mix. No.	w/b	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Fly Ash (kg/m <sup>3</sup> )	Sand (kg/m <sup>3</sup> )	Gravel (kg/m <sup>3</sup> )	Water (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )
Mix.1	0.35	446	-	698	1117	156	4.5
Mix.2	0.45	388	-	698	1117	174	1.6
Mix.3	0.55	343	-	698	1117	189	0.3
Mix.4	0.45	384	38	714	1121	173	1.5
Mix.5	0.45	380	76	714	1121	171	0.8
Mix.6	0.45	377	113	714	1121	169	0.4

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดตัวอย่างที่ใช้ทดสอบใน Mix.1

สัญลักษณ์	เหล็กเสริม			ระยะหุ้ม (cm.)	ระยะเวลา ในการบ่ม (วัน)	สภาวะแวดล้อม	
	ชนิด	ขนาด	จำนวน (เส้น)			ปริมาณ คลอไรด์ (%)	วัฏจักร เปียก-แห้ง
M1-C1	Carbon Steel	DB12	3	3	7	10.5	เปียกตลอดเวลา
M1-C2	Carbon Steel	DB12	3	3	7	10.5	เปียกตลอดเวลา
M1-C3	Carbon Steel	DB12	3	3	14	10.5	เปียกตลอดเวลา
M1-C4	Carbon Steel	DB12	3	3	14	10.5	เปียกตลอดเวลา
M1-CZ1	Galvanized Steel	DB12	3	3	7	10.5	เปียกตลอดเวลา
M1-CZ2	Galvanized Steel	DB12	3	3	7	10.5	เปียกตลอดเวลา
M1-CZ3	Galvanized Steel	DB12	3	3	14	10.5	เปียกตลอดเวลา
M1-CZ4	Galvanized Steel	DB12	3	3	14	10.5	เปียกตลอดเวลา
M1-CP1	Zinc Paint Steel	DB12	3	3	7	10.5	เปียกตลอดเวลา
M1-CP2	Zinc Paint Steel	DB12	3	3	7	10.5	เปียกตลอดเวลา
M1-CP3	Zinc Paint Steel	DB12	3	3	14	10.5	เปียกตลอดเวลา
M1-CP4	Zinc Paint Steel	DB12	3	3	14	10.5	เปียกตลอดเวลา

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดตัวอย่างที่ใช้ทดสอบใน Mix.2

สัญลักษณ์	เหล็กเสริม			ระยะหุ้ม (cm.)	ระยะเวลา ในการบ่ม (วัน)	สภาวะแวดล้อม	
	ชนิด	ขนาด	จำนวน (เส้น)			ปริมาณ คลอไรด์ (%)	วัฏจักร เปียก-แห้ง
M2-C1	Carbon Steel	DB12	3	3	7	10.5	เปียกตลอดเวลา
M2-C2	Carbon Steel	DB12	3	3	7	10.5	เปียกตลอดเวลา
M2-C3	Carbon Steel	DB12	3	3	14	10.5	เปียกตลอดเวลา
M2-C4	Carbon Steel	DB12	3	3	14	10.5	เปียกตลอดเวลา
M2-C5	Carbon Steel	DB12	3	3	28	10.5	เปียกตลอดเวลา
M2-C6	Carbon Steel	DB12	3	3	28	10.5	เปียกตลอดเวลา
M2-CZ1	Galvanized Steel	DB12	3	3	7	10.5	เปียกตลอดเวลา
M2-CZ2	Galvanized Steel	DB12	3	3	7	10.5	เปียกตลอดเวลา
M2-CZ3	Galvanized Steel	DB12	3	3	14	10.5	เปียกตลอดเวลา
M2-CZ4	Galvanized Steel	DB12	3	3	14	10.5	เปียกตลอดเวลา
M2-CZ5	Galvanized Steel	DB12	3	3	28	10.5	เปียกตลอดเวลา
M2-CZ6	Galvanized Steel	DB12	3	3	28	10.5	เปียกตลอดเวลา
M2-CP1	Zinc Paint Steel	DB12	3	3	7	10.5	เปียกตลอดเวลา
M2-CP2	Zinc Paint Steel	DB12	3	3	7	10.5	เปียกตลอดเวลา
M2-CP3	Zinc Paint Steel	DB12	3	3	14	10.5	เปียกตลอดเวลา
M2-CP4	Zinc Paint Steel	DB12	3	3	14	10.5	เปียกตลอดเวลา
M2-CP5	Zinc Paint Steel	DB12	3	3	28	10.5	เปียกตลอดเวลา
M2-CP6	Zinc Paint Steel	DB12	3	3	28	10.5	เปียกตลอดเวลา

ตารางที่ 3.4 รายละเอียดตัวอย่างที่ใช้ทดสอบใน Mix.3

สัญลักษณ์	เหล็กเสริม			ระยะหุ้ม (cm.)	ระยะเวลา ในการบ่ม (วัน)	สภาวะแวดล้อม	
	ชนิด	ขนาด	จำนวน (เส้น)			ปริมาณ คลอไรด์ (%)	วัฏจักร เปียก-แห้ง
M3-C1	Carbon Steel	DB12	3	3	7	10.5	เปียกตลอดเวลา
M3-C2	Carbon Steel	DB12	3	3	7	10.5	เปียกตลอดเวลา
M3-C3	Carbon Steel	DB12	3	3	14	10.5	เปียกตลอดเวลา
M3-C4	Carbon Steel	DB12	3	3	14	10.5	เปียกตลอดเวลา
M3-CZ1	Galvanized Steel	DB12	3	3	7	10.5	เปียกตลอดเวลา
M3-CZ2	Galvanized Steel	DB12	3	3	7	10.5	เปียกตลอดเวลา
M3-CZ3	Galvanized Steel	DB12	3	3	14	10.5	เปียกตลอดเวลา
M3-CZ4	Galvanized Steel	DB12	3	3	14	10.5	เปียกตลอดเวลา
M3-CP1	Zinc Paint Steel	DB12	3	3	7	10.5	เปียกตลอดเวลา
M3-CP2	Zinc Paint Steel	DB12	3	3	7	10.5	เปียกตลอดเวลา
M3-CP3	Zinc Paint Steel	DB12	3	3	14	10.5	เปียกตลอดเวลา
M3-CP4	Zinc Paint Steel	DB12	3	3	14	10.5	เปียกตลอดเวลา

ตารางที่ 3.5 รายละเอียดตัวอย่างที่ใช้ทดสอบใน Mix.4

สัญลักษณ์	เหล็กเสริม			ระยะหุ้ม (cm.)	ระยะเวลา ในการบ่ม (วัน)	สภาวะแวดล้อม	
	ชนิด	ขนาด	จำนวน (เส้น)			ปริมาณ คลอไรด์ (%)	วัฏจักร เปียก-แห้ง
M4-C1	Carbon Steel	DB12	3	3	7	10.5	เปียกตลอดเวลา
M4-C2	Carbon Steel	DB12	3	3	7	10.5	เปียกตลอดเวลา
M4-C3	Carbon Steel	DB12	3	3	14	10.5	เปียกตลอดเวลา
M4-C4	Carbon Steel	DB12	3	3	14	10.5	เปียกตลอดเวลา
M4-C5	Carbon Steel	DB12	3	3	28	10.5	เปียกตลอดเวลา
M4-C6	Carbon Steel	DB12	3	3	28	10.5	เปียกตลอดเวลา
M4-CZ1	Galvanized Steel	DB12	3	3	7	10.5	เปียกตลอดเวลา
M4-CZ2	Galvanized Steel	DB12	3	3	7	10.5	เปียกตลอดเวลา
M4-CZ3	Galvanized Steel	DB12	3	3	14	10.5	เปียกตลอดเวลา
M4-CZ4	Galvanized Steel	DB12	3	3	14	10.5	เปียกตลอดเวลา
M4-CZ5	Galvanized Steel	DB12	3	3	28	10.5	เปียกตลอดเวลา
M4-CZ6	Galvanized Steel	DB12	3	3	28	10.5	เปียกตลอดเวลา
M4-CP1	Zinc Paint Steel	DB12	3	3	7	10.5	เปียกตลอดเวลา
M4-CP2	Zinc Paint Steel	DB12	3	3	7	10.5	เปียกตลอดเวลา
M4-CP3	Zinc Paint Steel	DB12	3	3	14	10.5	เปียกตลอดเวลา
M4-CP4	Zinc Paint Steel	DB12	3	3	14	10.5	เปียกตลอดเวลา
M4-CP5	Zinc Paint Steel	DB12	3	3	28	10.5	เปียกตลอดเวลา
M4-CP6	Zinc Paint Steel	DB12	3	3	28	10.5	เปียกตลอดเวลา

ตารางที่ 3.6 รายละเอียดตัวอย่างที่ใช้ทดสอบใน Mix.5

สัญลักษณ์	เหล็กเสริม			ระยะหุ้ม (cm.)	ระยะเวลา ในการบ่ม (วัน)	สภาวะแวดล้อม	
	ชนิด	ขนาด	จำนวน (เส้น)			ปริมาณ คลอไรด์ (%)	วัฏจักร เปียก-แห้ง
M5-C1	Carbon Steel	DB12	3	3	7	10.5	เปียกตลอดเวลา
M5-C2	Carbon Steel	DB12	3	3	7	10.5	เปียกตลอดเวลา
M5-C3	Carbon Steel	DB12	3	3	14	10.5	เปียกตลอดเวลา
M5-C4	Carbon Steel	DB12	3	3	14	10.5	เปียกตลอดเวลา
M5-C5	Carbon Steel	DB12	3	3	28	10.5	เปียกตลอดเวลา
M5-C6	Carbon Steel	DB12	3	3	28	10.5	เปียกตลอดเวลา
M5-CZ1	Galvanized Steel	DB12	3	3	7	10.5	เปียกตลอดเวลา
M5-CZ2	Galvanized Steel	DB12	3	3	7	10.5	เปียกตลอดเวลา
M5-CZ3	Galvanized Steel	DB12	3	3	14	10.5	เปียกตลอดเวลา
M5-CZ4	Galvanized Steel	DB12	3	3	14	10.5	เปียกตลอดเวลา
M5-CZ5	Galvanized Steel	DB12	3	3	28	10.5	เปียกตลอดเวลา
M5-CZ6	Galvanized Steel	DB12	3	3	28	10.5	เปียกตลอดเวลา
M5-CP1	Zinc Paint Steel	DB12	3	3	7	10.5	เปียกตลอดเวลา
M5-CP2	Zinc Paint Steel	DB12	3	3	7	10.5	เปียกตลอดเวลา
M5-CP3	Zinc Paint Steel	DB12	3	3	14	10.5	เปียกตลอดเวลา
M5-CP4	Zinc Paint Steel	DB12	3	3	14	10.5	เปียกตลอดเวลา
M5-CP5	Zinc Paint Steel	DB12	3	3	28	10.5	เปียกตลอดเวลา
M5-CP6	Zinc Paint Steel	DB12	3	3	28	10.5	เปียกตลอดเวลา

ตารางที่ 3.7 รายละเอียดตัวอย่างที่ใช้ทดสอบใน Mix.6

สัญลักษณ์	เหล็กเสริม			ระยะหุ้ม (cm.)	ระยะเวลา ในการบ่ม (วัน)	สภาวะแวดล้อม	
	ชนิด	ขนาด	จำนวน (เส้น)			ปริมาณ คลอไรด์ (%)	วัฏจักร เปียก-แห้ง
M6-C1	Carbon Steel	DB12	3	3	7	10.5	เปียกตลอดเวลา
M6-C2	Carbon Steel	DB12	3	3	7	10.5	เปียกตลอดเวลา
M6-C3	Carbon Steel	DB12	3	3	14	10.5	เปียกตลอดเวลา
M6-C4	Carbon Steel	DB12	3	3	14	10.5	เปียกตลอดเวลา
M6-C5	Carbon Steel	DB12	3	3	28	10.5	เปียกตลอดเวลา
M6-C6	Carbon Steel	DB12	3	3	28	10.5	เปียกตลอดเวลา
M6-CZ1	Galvanized Steel	DB12	3	3	7	10.5	เปียกตลอดเวลา
M6-CZ2	Galvanized Steel	DB12	3	3	7	10.5	เปียกตลอดเวลา
M6-CZ3	Galvanized Steel	DB12	3	3	14	10.5	เปียกตลอดเวลา
M6-CZ4	Galvanized Steel	DB12	3	3	14	10.5	เปียกตลอดเวลา
M6-CZ5	Galvanized Steel	DB12	3	3	28	10.5	เปียกตลอดเวลา
M6-CZ6	Galvanized Steel	DB12	3	3	28	10.5	เปียกตลอดเวลา
M6-CP1	Zinc Paint Steel	DB12	3	3	7	10.5	เปียกตลอดเวลา
M6-CP2	Zinc Paint Steel	DB12	3	3	7	10.5	เปียกตลอดเวลา
M6-CP3	Zinc Paint Steel	DB12	3	3	14	10.5	เปียกตลอดเวลา
M6-CP4	Zinc Paint Steel	DB12	3	3	14	10.5	เปียกตลอดเวลา
M6-CP5	Zinc Paint Steel	DB12	3	3	28	10.5	เปียกตลอดเวลา
M6-CP6	Zinc Paint Steel	DB12	3	3	28	10.5	เปียกตลอดเวลา



### 3.2.2 การเตรียมแบบหล่อและเหล็กเสริม

ทำความสะอาดแบบเหล็กโดยการเช็ดให้สะอาด ทาน้ำมันเคลือบที่ผิวบริเวณที่ต้องสัมผัสกับคอนกรีตจนทั่ว จากนั้นทำความสะอาดเหล็กเสริมโดยการล้างด้วยสาร Acetone เพื่อล้างคราบออกไซด์ คราบน้ำมัน และสารป้องกันสนิมที่อาจเคลือบอยู่บนผิวเหล็กเสริมออก หุ้มปลายทั้งสองข้างด้วยอีพ็อกซีและพันด้วยเทปพันสายไฟ โดยให้เหลือส่วนกลางของเหล็กเสริมที่ฝังไว้ในคอนกรีตมีความยาวประมาณ 15 เซนติเมตร สำหรับเหล็กเสริมที่เคลือบผิวด้วยสังกะสีแบบจุ่มร้อน และเคลือบผิวด้วยการทาสังกะสีนั้น หลังจากทำความสะอาดแล้วจะทำการวัดความหนาของสังกะสีที่เคลือบผิว เพื่อตรวจสอบว่าได้ความหนาตามต้องการหรือไม่ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 (ก) จากนั้นนำเหล็กเสริมที่เตรียมเรียบร้อยแล้วเสียบเข้าไปที่แบบหล่อ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 (ข)



(ก) วัดความหนาของสังกะสีที่เคลือบผิว



(ข) เสียบเหล็กเข้าไปในแบบหล่อ

รูปที่ 3.3 การเตรียมเหล็กเสริมและแบบหล่อ

### 3.2.3 การผสมคอนกรีต

ทำการผสมคอนกรีตด้วยไม้ผสมคอนกรีต ในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิและความชื้นห้องการผสมทำตามมาตรฐาน ASTM C192/C192M-02:Standard Practice For Making and Curing Concrete Test Specimens In The Laboratory ดังแสดงในรูปที่ 3.4

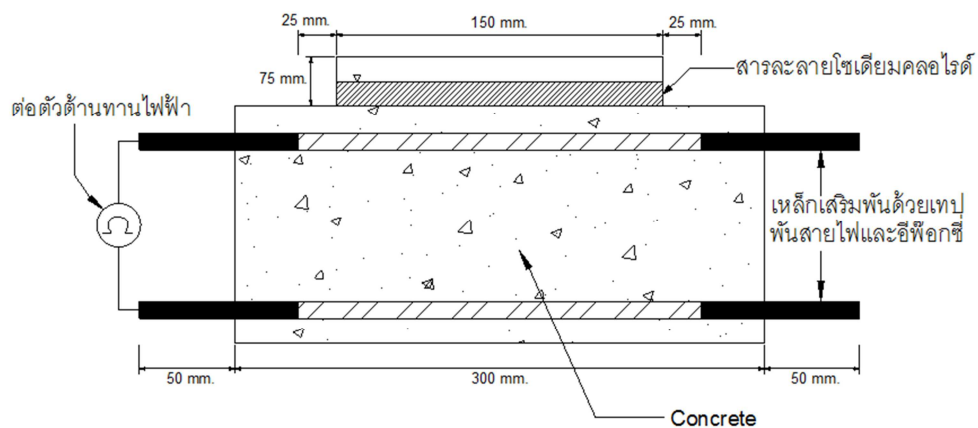


รูปที่ 3.4 การผสมคอนกรีตตามสัดส่วนผสม

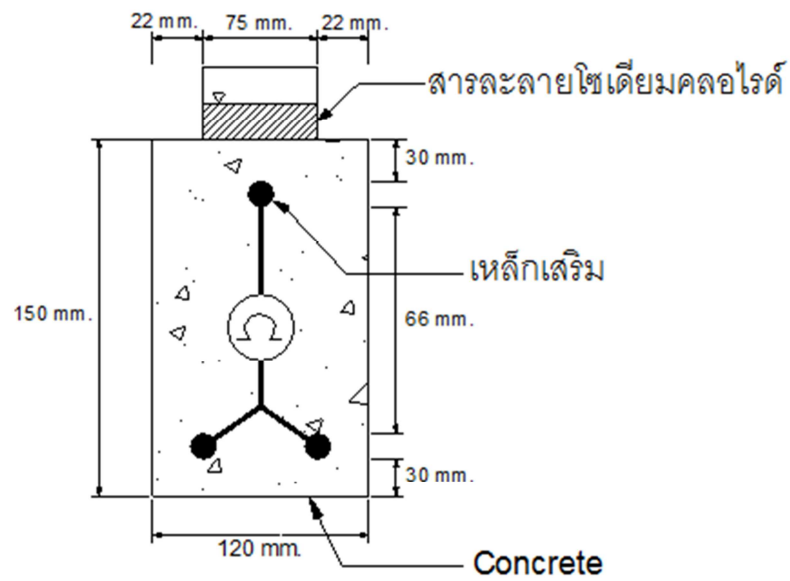
### 3.2.4 การหล่อก้อนตัวอย่าง

หล่อตัวอย่างคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM G109 โดยมีขนาด 120x150x300 มิลลิเมตร ทำการเสริมเหล็กด้วยเหล็กเสริมข้ออ้อยชั้นคุณภาพ SD40 เส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร 3 เส้น มีระยะหุ้มของคอนกรีตถึงผิวเหล็ก 3 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (ก) และ (ข) ซึ่งเหล็กเสริมที่ใช้มี 3 แบบ คือ เหล็กข้ออ้อยธรรมดา เหล็กข้ออ้อยที่ชุบด้วยสังกะสีแบบจุ่มร้อน และเหล็กข้ออ้อยทาเคลือบผิวด้วยสังกะสี เทคอนกรีตที่ผสมลงในแบบหล่อจนเต็ม แล้วจึงคอนกรีตให้แน่น ทิ้งไว้ให้คอนกรีตแข็งตัว 24 ชั่วโมง แล้วจึงถอดแบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.6

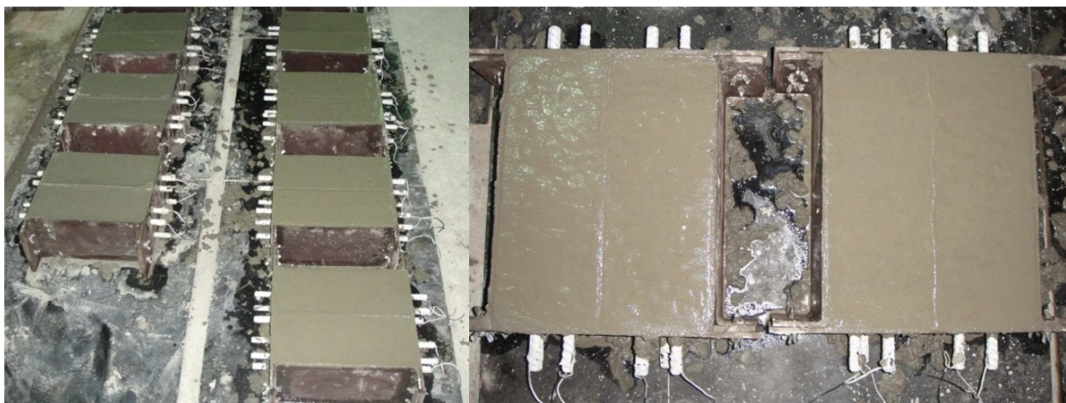
การหล่อก้อนตัวอย่างสำหรับทดสอบกำลังอัด โดยเทลงแบบหล่อมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร แล้วจึงคอนกรีตให้แน่น ทิ้งไว้ให้คอนกรีตแข็งตัว 24 ชั่วโมง แล้วจึงถอดแบบ



รูปที่ 3.5 (ก) ขนาดตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.5 (ข) การวางเหล็กเสริม



รูปที่ 3.6 การหล่อตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

### 3.2.5 การบ่มตัวอย่างคอนกรีต

หลังจากถอดแบบแล้ว จึงนำตัวอย่างคอนกรีตไปบ่มโดยการใช้กระสอบเปียกน้ำคลุม ตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง โดยบ่มตัวอย่างเป็นเป็นเวลา 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน เมื่ออายุบ่มครบตามกำหนด จึงนำออกมาเพื่อทำการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.7 (ก) และ (ข)



(ก) ถอดแบบหลังจาก 24 ชั่วโมง

(ข) บ่มด้วยกระสอบเปียก

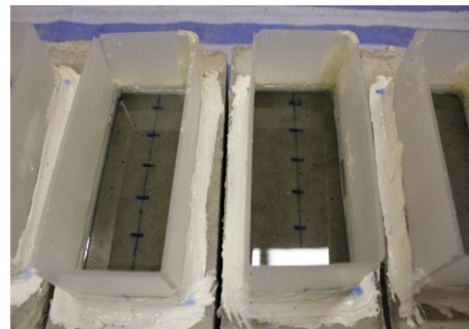
**รูปที่ 3.7** การบ่มตัวอย่างก่อนนำไปทดสอบ

### 3.2.6 สภาวะตัวอย่างคอนกรีต

ในระหว่างที่ทำการทดสอบอัตราการเกิดสนิมจะทำการเก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิและความชื้นของห้องปฏิบัติการ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 (ก) ทำการขังสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นของปริมาณคลอไรด์ในสารละลายเข้มข้นร้อยละ 10.5 โดยน้ำหนัก ไว้บนตัวอย่างทดสอบตามมาตรฐาน ASTM G109 ซึ่งทำการทดสอบที่สภาวะเปียกตลอดเวลา (Submerged Zone) ดังแสดงในรูปที่ 3.8 (ข)



(ก) เก็บที่อุณหภูมิห้อง



(ข) สภาวะเปียกตลอดเวลา

**รูปที่ 3.8** สภาวะแวดล้อมที่ทำการทดสอบ

### 3.3 การทดสอบ

สำหรับก่อนตัวอย่างที่ทดสอบการเกิดสนิมจะทำการทดสอบที่อุณหภูมิและความชื้นห้องปฏิบัติการ จากนั้นทำการวัดทั้งค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-cell potential) และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current density) ซึ่งไหลผ่านตัวต้านทาน 100 โอห์มที่เชื่อมต่อกันระหว่างเหล็กเสริมทดสอบด้านบนและเหล็กเสริมอ้างอิงด้านล่างซึ่งกำหนดให้เหล็กเสริมด้านบนนั้นจะเป็นสนิม เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันขึ้นกับค่าของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-cell

potential) และค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current density) พร้อมกันทั้งสองค่าจึงหยุดทำการทดสอบ

### 3.3.1 ทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมด้วยวิธี (Half-Cell Potential) ตามมาตรฐาน ASTM C876

ทำการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างเหล็กเสริมเส้นบนและบริเวณผิวคอนกรีตทุกๆ 2 วัน โดยการเทสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นของปริมาณคลอไรด์ในสารละลายเข้มข้นร้อยละ 10.5 โดยน้ำหนักออกแล้วทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที จากนั้นทำการวัดทุกๆ 3 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ตามความยาวเหล็กเสริมเพื่อประเมินการเกิดสนิมของเหล็กเสริม จากนั้นทำการประเมินค่าการกัดกร่อนและสภาพของชั้นหุ้มเหล็กเสริมคอนกรีต ดังแสดงในตารางที่ 3.8 (สำหรับเหล็กธรรมดา) สำหรับการประเมินเหล็กที่เคลือบผิวด้วยสังกะสีอีก 2 ชนิดนั้น จะสังเกตการเปลี่ยนแปลงของค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์อย่างฉับพลัน

ตารางที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และความน่าจะเป็นของการเกิดสนิมในโครงสร้าง [12]

ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์คอปเปอร์-คอปเปอร์ซัลเฟต (Cu/CuSO <sub>4</sub> )	สภาพการเกิดสนิม
น้อยกว่า -250 mV	โอกาสร้อยละ 90 ที่เหล็กเสริมจะไม่เกิดสนิม
-250 mV ถึง -350 mV	ไม่แน่นอน
มากกว่า -350 mV	มีโอกาสร้อยละ 90 ที่เหล็กเสริมจะเกิดสนิม



รูปที่ 3.9 การวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า โดย Half-cell potential

### 3.3.2 ทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมด้วยวิธี (Current Density) ตามมาตรฐาน ASTM G109

โดยทำการทดสอบการเกิดสนิมทุกๆ 2 วัน หลังจากทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เสร็จเรียบร้อยแล้ว บันทึกค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้จากโวลท์มิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.10 จากนั้นนำผลที่ได้มาคำนวณค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ดังสมการที่ 3.1 และ 3.2 แล้ววิเคราะห์สภาพเหล็กเสริม

$$V = IR \quad (3.1)$$

โดยที่  $I$  = ค่ากระแสไฟฟ้า (mA)  
 $V$  = ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (mV)  
 $R$  = ค่าความต้านทาน 100 โอห์ม

$$\text{Current Density} = I / A \quad (3.2)$$

โดยที่ Current Density = ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )

$I$  = ค่ากระแสไฟฟ้าจากสมการ (3.1)

$A$  = พื้นที่ผิวของเหล็กเสริม ( $\text{cm}^2$ )



รูปที่ 3.10 การวัดค่าความต่างศักย์ที่คร่อมตัวต้านทานโดยใช้โวลท์มิเตอร์

### 3.3.3 การเจาะลดระยะหุ้มของคอนกรีต

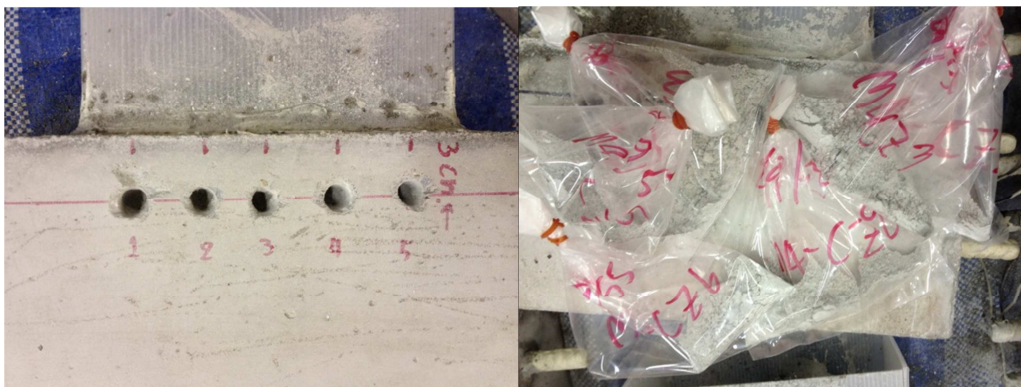
เนื่องจากการทดลองนี้ใช้เวลาในการเกิดการกัดกร่อนเป็นเวลานาน ดังนั้นจึงทำการเจาะผิวบนของคอนกรีตบริเวณที่ทำการขังสารละลายไฮเดียมคลอไรด์เพื่อลดระยะหุ้มระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีต โดยเจาะลึกประมาณ 2 เซนติเมตร จำนวน 5 รู ดังแสดงในรูปที่ 3.11 และทำการเจาะแบบเดียวกันทุกก้อนตัวอย่าง



รูปที่ 3.11 การเจาะผิวคอนกรีตเพื่อลดระยะหุ้มคอนกรีต

### 3.3.4 ทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต

เมื่อเหล็กเสริมเริ่มเกิดการกัดกร่อนแล้ว โดยสังเกตจากจากอัตราการเกิดสนิมทั้ง 2 วิธี คือ กระแสการกัดกร่อน และ ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ จากนั้นทำการเจาะก้อนตัวอย่างเพื่อเก็บผงคอนกรีตที่บริเวณผิวด้านบนของเหล็กเสริม ดังแสดงในรูปที่ 3.12 นำผงคอนกรีตที่ได้มาทำการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดด้วยวิธีบอจุดยุติทางศักย์ไฟฟ้า (Potentionmetric Titration) ตามมาตรฐาน ASTM C1152



รูปที่ 3.12 การเจาะเก็บผงตัวอย่างคอนกรีตเพื่อไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์

### 3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

จากการทดสอบ สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าต่างๆมา วิเคราะห์ผลได้ดังนี้

1. นำผลจากการทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ตามมาตรฐาน ASTM C876 มาเปรียบเทียบเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่างกัน
2. นำผลจากการทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ตามมาตรฐาน ASTM C876 มาเปรียบเทียบเมื่อใช้ปริมาณเกลือยแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่ต่างกัน
3. นำผลจากการทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ตามมาตรฐาน ASTM C876 มาเปรียบเทียบเมื่อใช้เหล็กเสริมที่มีคุณสมบัติที่ต่างกัน
4. นำผลจากการทดสอบความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนตามมาตรฐาน ASTM G109 มาเปรียบเทียบกับการวัดแบบศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ว่ามีแนวโน้มการเกิดสนิมไปในทิศทางเดียวกันหรือไม่
5. แสดงผลของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total Chloride)
6. วิเคราะห์ค่าคลอไรด์วิกฤตว่ามีแนวโน้มที่สามารถนำไปใช้ในการออกแบบได้หรือไม่



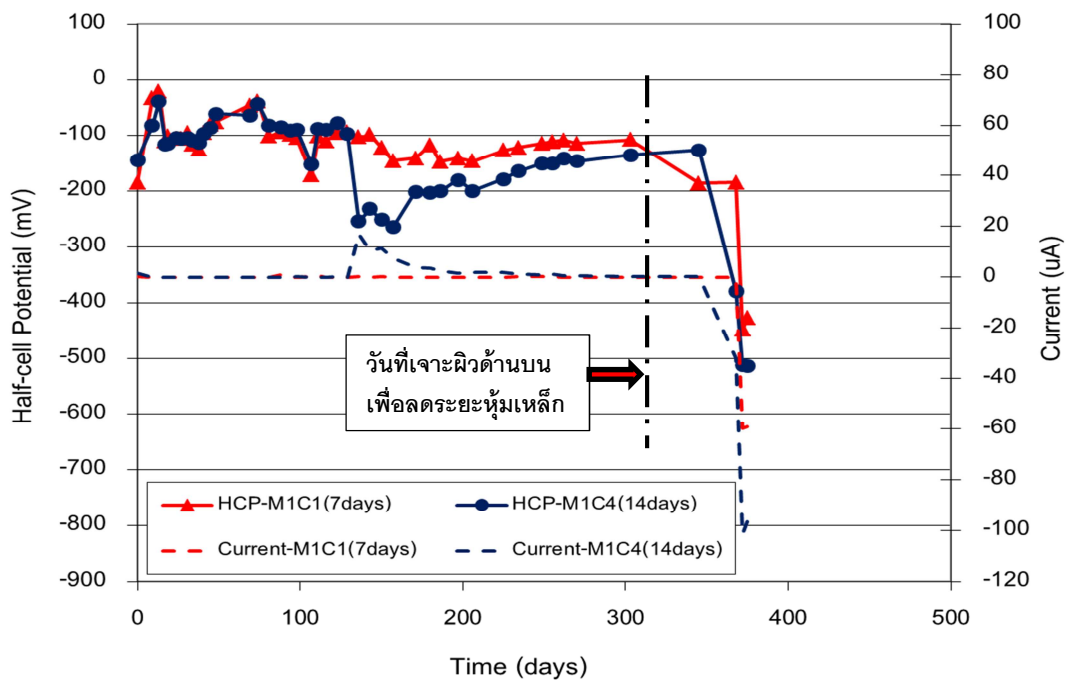
## บทที่ 4

### ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

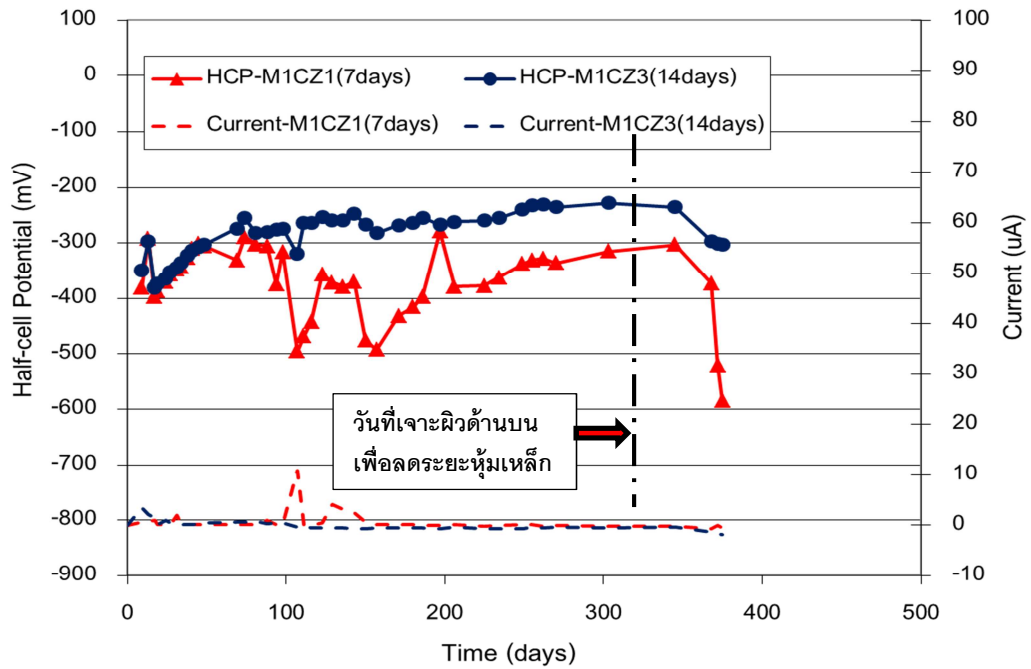
จากการทดสอบตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ โดยทำการวัดอัตราการเกิดสนิมโดยอ้างอิงวิธีการวัดค่าตามมาตรฐาน ASTM G109 และมาตรฐาน ASTM C876 ผลการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

#### 4.1 ผลกระทบของการบ่ม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35

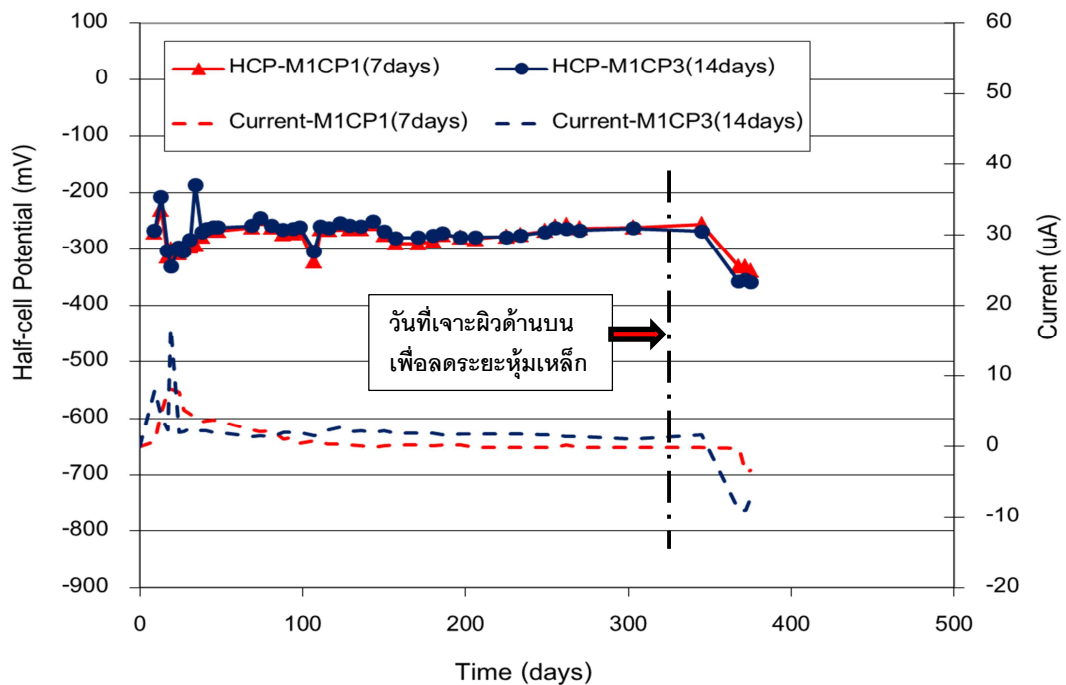
จากรูปที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 แสดงผลการทดสอบการเกิดสนิมของชิ้นตัวอย่างที่ใช้ Carbon Steel, Galvanized Steel และ Zinc Paint Steel เป็นเหล็กเสริม มีสัดส่วนผสมคอนกรีตชนิดเดียวกัน แต่ระยะเวลาการบ่มแตกต่างกัน ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และค่ากระแสการกัดกร่อนของการบ่มที่ 7 วัน และ 14 ในช่วง 100 วันแรกค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และค่ากระแสการกัดกร่อนมีค่าที่ใกล้เคียงกันของเหล็กทั้ง 3 ชนิด แต่หลังจาก 100 วันขึ้นไปจนเหล็กเริ่มเป็นสนิมค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ แต่ Zinc Paint Steel จะมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งในการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่าการบ่มที่แตกต่างกันจะมีผลกับ Carbon Steel และ Galvanized Steel แต่ Zinc Paint Steel ไม่มีผลกระทบ



รูปที่ 4.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Carbon Steel ที่ระยะเวลาบ่มต่างกัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35



รูปที่ 4.2 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Galvanized Steel ที่ระยะเวลาบ่มต่างกัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35



รูปที่ 4.3 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Zinc Paint Steel ที่ระยะเวลาบ่มต่างกัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35

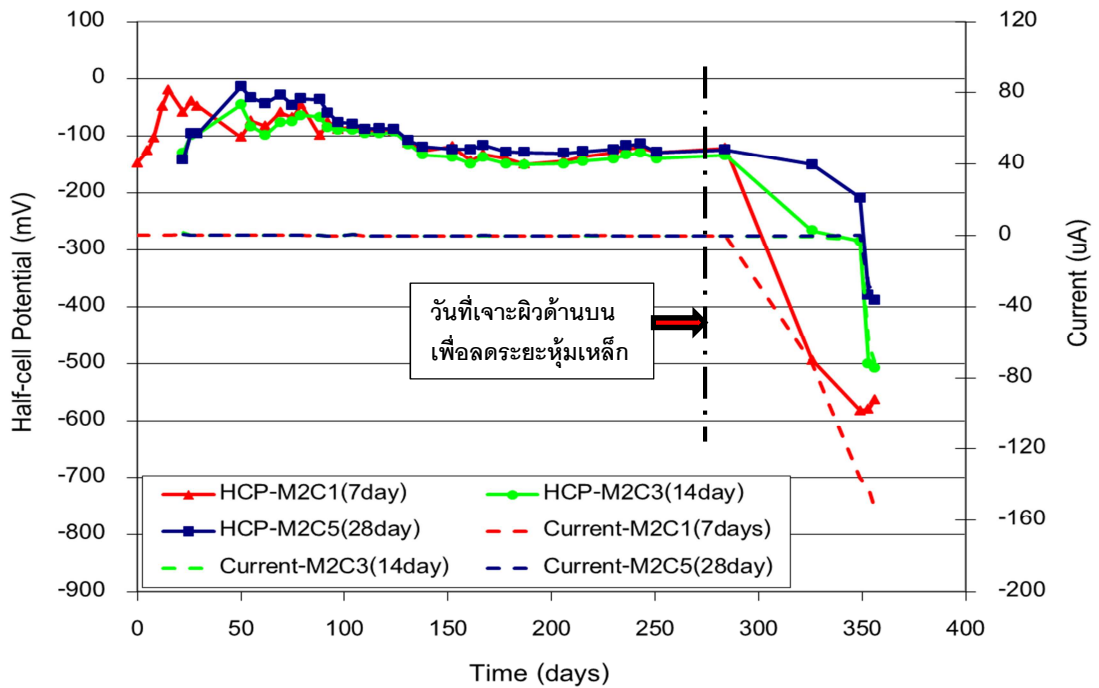
จากตารางที่ 4.1 แสดงค่าคลอไรด์วิกฤติที่ได้จากการทดสอบของเหล็ก 3 ชนิดที่ระยะเวลาบ่มต่างกัน ซึ่งจากการทดสอบนี้แสดงว่าค่าคลอไรด์วิกฤติของ Carbon Steel จะมีค่าสูงกว่าเหล็กชนิดอื่น เนื่องจาก Galvanized Steel และ Zinc Paint Steel จะเกิดสนิมเร็วกว่าเหล็กธรรมดา

**ตารางที่ 4.1** ปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีต อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35

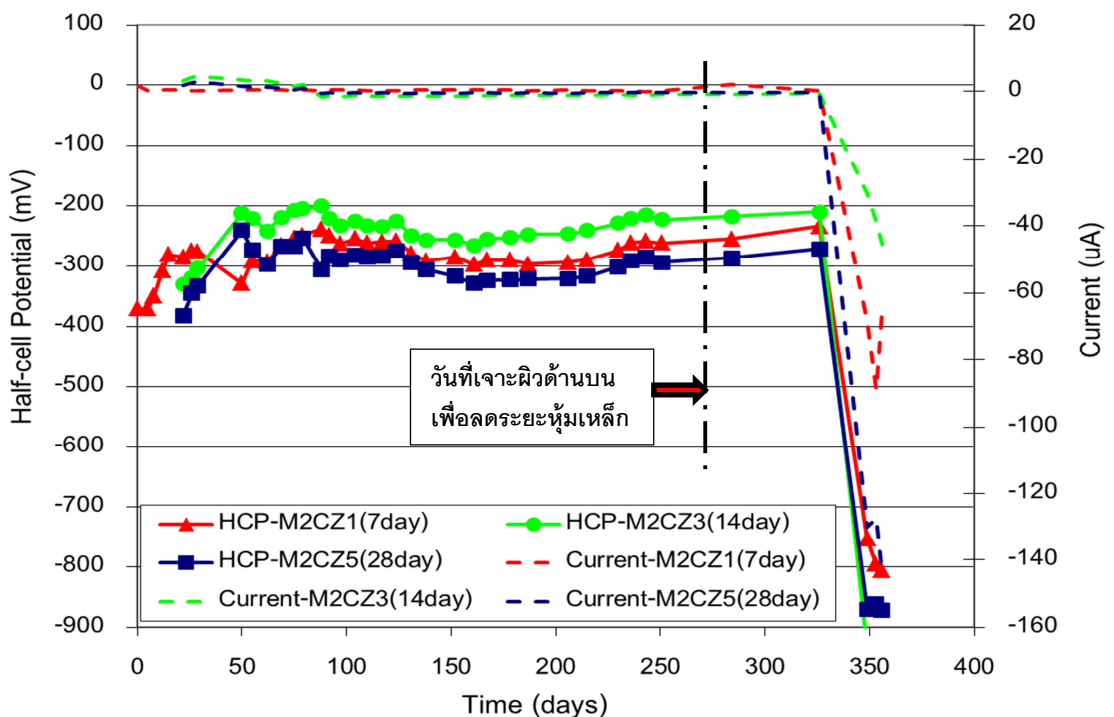
Mix. ID	ชนิดเหล็ก	ระยะเวลาในการบ่ม (วัน)	ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (คลอไรด์ทั้งหมด)	
			(% น้ำหนักคอนกรีต)	(% น้ำหนักวัสดุประสาน)
M1-C1	Carbon Steel	7	0.030	0.16
M1-C4	Carbon Steel	14	0.039	0.21
M1-CZ1	Galvanized Steel	7	0.011	0.06
M1-CZ3	Galvanized Steel	14	0.009	0.05
M1-CP1	Zinc Paint Steel	7	0.002	0.01
M1-CP3	Zinc Paint Steel	14	0.008	0.05

#### 4.2 ผลกระทบของการบ่ม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45

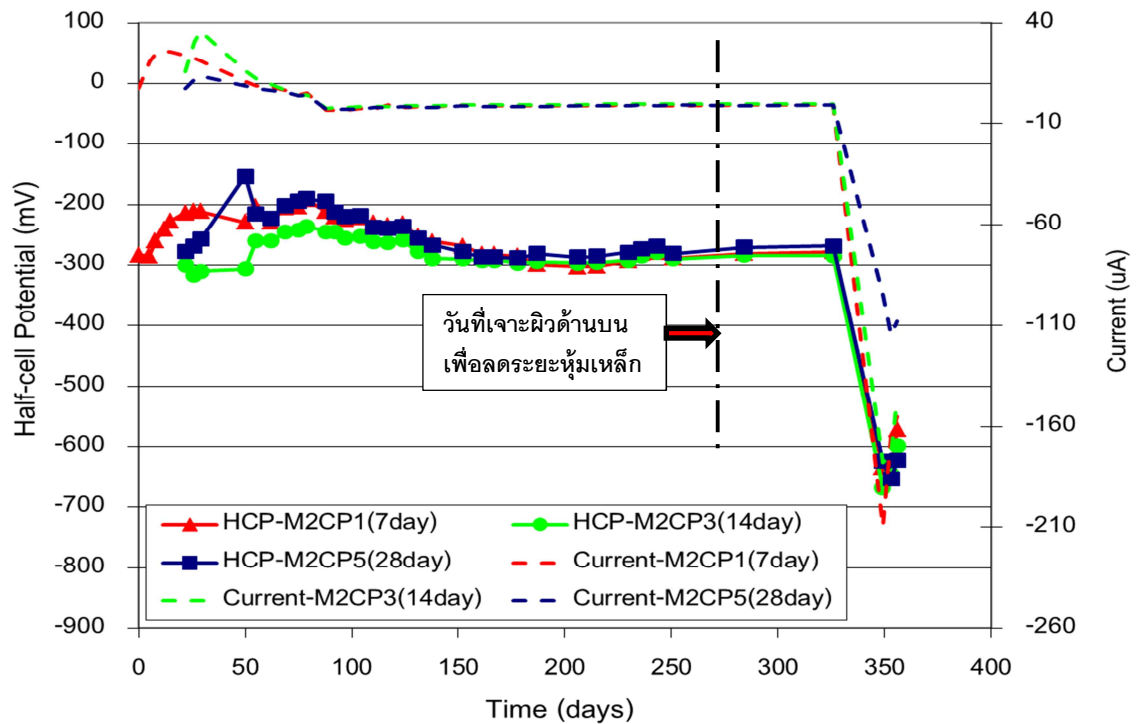
จากรูปที่ 4.4, 4.5 และ 4.6 แสดงผลการทดสอบการเกิดสนิมของชิ้นตัวอย่างที่ใช้ Carbon Steel, Galvanized Steel และ Zinc Paint Steel เป็นเหล็กเสริม มีสัดส่วนผสมคอนกรีตชนิดเดียวกัน แต่ระยะเวลาการบ่มแตกต่างกัน ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ในการทดสอบนี้ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มากขึ้นทำให้เกิดสนิมได้เร็วขึ้นเมื่อเทียบกับผลค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของผลการทดสอบชุดตัวอย่างที่ 1 ระยะเวลาบ่มที่ต่างกันนั้นจะเห็นได้ชัดเจนในผลการทดลองของ Carbon Steel ซึ่งตัวอย่างบ่มที่ 28 วันจะทำการเริ่มเกิดสนิมช้ากว่า และตัวอย่างที่บ่ม 7 วันก็จะเริ่มเกิดสนิมเร็วที่สุด และค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และค่ากระแสการกัดกร่อนช่วงก่อนเริ่มการเกิดสนิมมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วน Galvanized Steel และ Zinc Paint Steel การบ่มที่ต่างกันไม่ได้ทำให้เวลาการเกิดสนิมต่างกัน สืบเนื่องจากค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และค่ากระแสการกัดกร่อนมีการเปลี่ยนแปลงพร้อมกัน แต่ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของ Galvanized Steel มีผลกระทบเนื่องจากการบ่มโดยค่าจะสลับขึ้นลงบ่มที่ 28 วันจะมีค่าติดลบมากที่สุดแต่บ่มที่ 14 วันจะมีค่าติดลบน้อยที่สุด



รูปที่ 4.4 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Carbon Steel ที่ระยะเวลาบ่มต่างกัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45



รูปที่ 4.5 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Galvanized Steel ที่ระยะเวลาบ่มต่างกัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45



รูปที่ 4.6 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Zinc Paint Steel ที่ระยะเวลาบ่มต่างกัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45

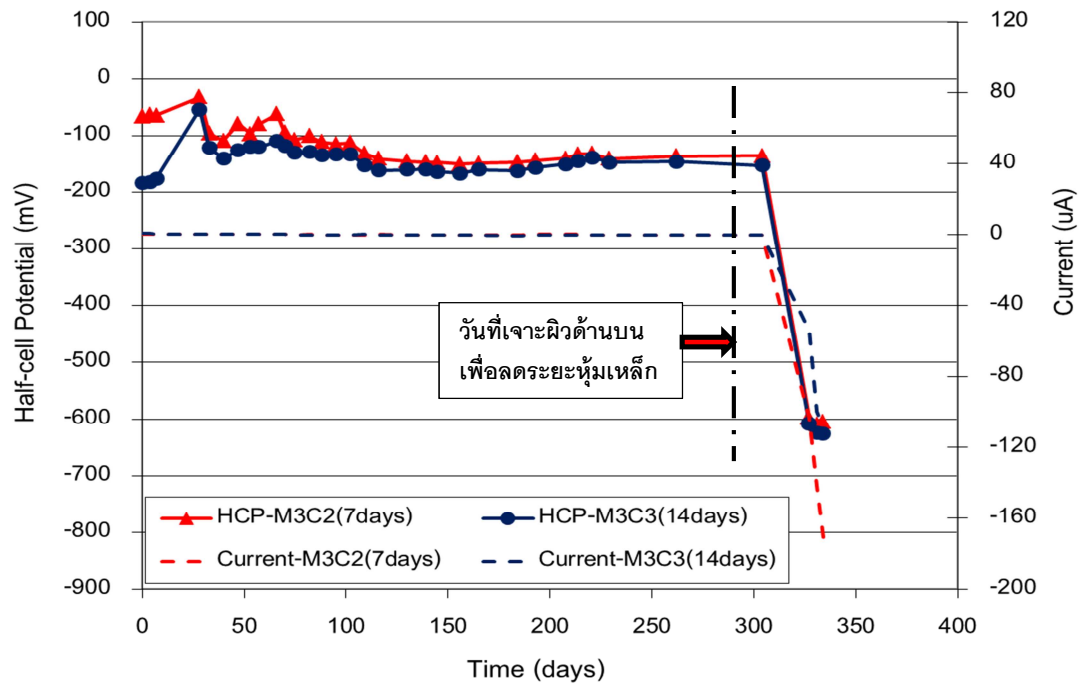
จากตารางที่ 4.2 แสดงค่าคลอไรด์วิกฤติของเหล็กเสริม 3 ชนิดที่ระยะเวลาบ่มต่างกัน ซึ่งจากการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่าค่าคลอไรด์วิกฤติที่ระยะเวลาบ่ม 7 วันจะมีค่ามากกว่าบ่มที่ 14 และ 28 วัน อาจเนื่องจากการบ่มสั้นสามารถจับยึดคลอไรด์ได้มากกว่าการบ่มเป็นเวลานานๆ แต่คลอไรด์ที่ทำให้เกิดสนิมคือ คลอไรด์อิสระ ปริมาณคลอไรด์วิกฤตินั้นมีการนำเสนอทั้งปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด และปริมาณคลอไรด์อิสระ ซึ่งมาตรฐานส่วนใหญ่แสดงค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤติเป็นปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเนื่องจากสามารถนำไปใช้ได้ง่าย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเป็นค่าคลอไรด์วิกฤติในรูปแบบของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และค่าคลอไรด์วิกฤติของ Carbon Steel จะมีค่ามากกว่า Galvanized Steel และ Zinc Paint Steel ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีต อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45

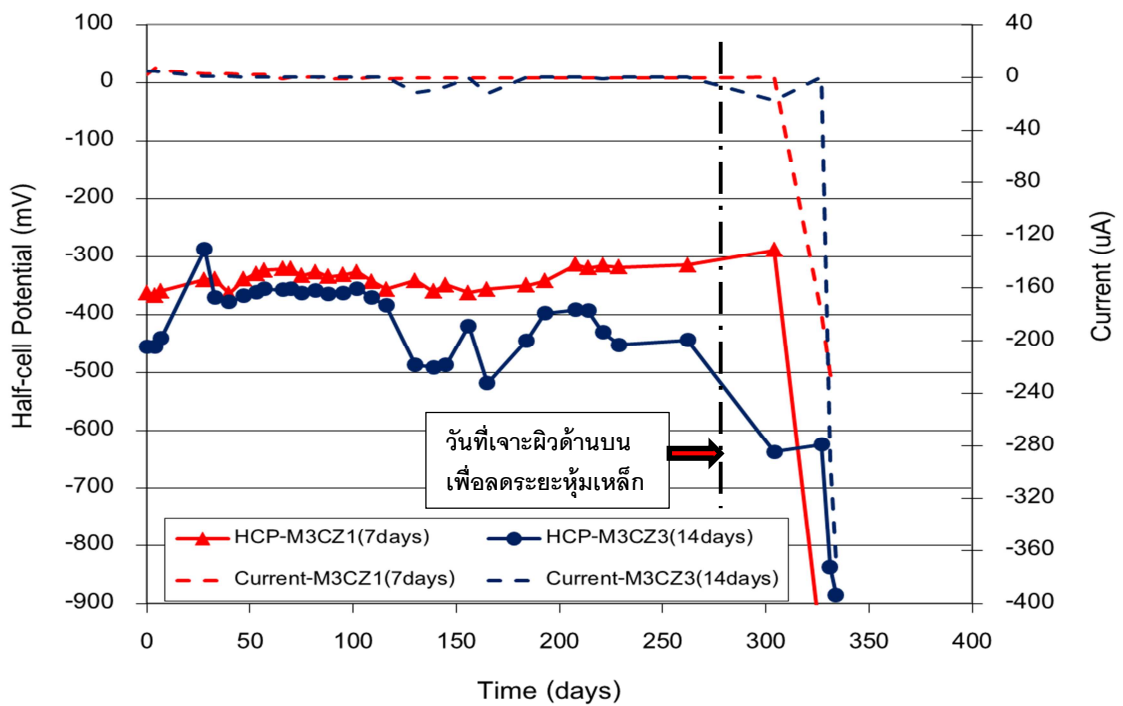
Mix. ID	ชนิดเหล็ก	ระยะเวลา ในการบ่ม (วัน)	ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (คลอไรด์ทั้งหมด)	
			(% น้ำหนักคอนกรีต)	(% น้ำหนักวัสดุประสาน)
M2-C1	Carbon Steel	7	0.094	0.58
M2-C3	Carbon Steel	14	0.044	0.27
M2-C5	Carbon Steel	28	0.023	0.14
M2-CZ1	Galvanized Steel	7	0.051	0.32
M2-CZ3	Galvanized Steel	14	0.046	0.29
M2-CZ5	Galvanized Steel	28	0.041	0.25
M2-CP1	Zinc Paint Steel	7	0.036	0.22
M2-CP3	Zinc Paint Steel	14	0.044	0.27
M2-CP5	Zinc Paint Steel	28	0.041	0.25

#### 4.3 ผลกระทบของการบ่ม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

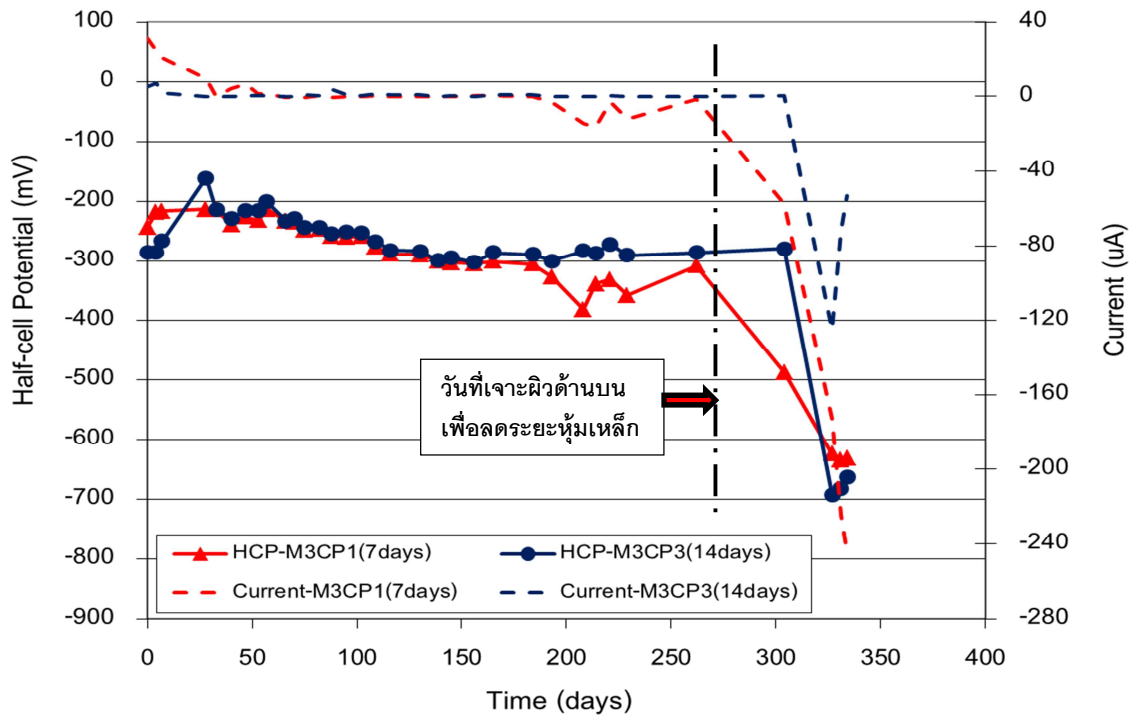
จากรูปที่ 4.7, 4.8 และ 4.9 แสดงผลการทดสอบการเกิดสนิมของเหล็ก 3 ชนิด ที่ใช้ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และระยะเวลาที่บ่มต่างกัน จากการทดสอบนี้ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มากขึ้น ซึ่งช่วงก่อนเริ่มเกิดสนิมนั้นไม่มีผลกระทบต่อค่าศักย์ไฟฟ้าฟาคริงเซลล์และค่ากระแสการกัดกร่อนของ Carbon Steel และ Zinc Paint Steel แต่จะมีผลต่อ Galvanized Steel เหมือนกับชุดตัวอย่างที่ผ่านมา แต่เวลาที่ทำให้เกิดสนิมจะเร็วขึ้นเมื่อเทียบกับชุดตัวอย่างที่ 1 และชุดตัวอย่างที่ 2 ซึ่งอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มากขึ้นอาจทำให้คอนกรีตมีช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตมากขึ้น จึงทำคลอไรด์สามารถแทรกซึมผ่านเข้าไปถึงเหล็กเสริมได้เร็วกว่าทั้ง 2 ชุดตัวอย่าง



รูปที่ 4.7 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Carbon Steel ที่ระยะเวลาบ่มต่างกัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55



รูปที่ 4.8 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Galvanized Steel ที่ระยะเวลาบ่มต่างกัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55



รูปที่ 4.9 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Zinc Paint Steel ที่ระยะเวลาบ่มต่างกัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

จากตารางที่ 4.3 ค่าคลอไรด์วิกฤติที่ได้จากการทดสอบนี้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งการบ่มที่ต่างการไม่มีผลที่จะทำให้ค่าคลอไรด์วิกฤติต่างกัน

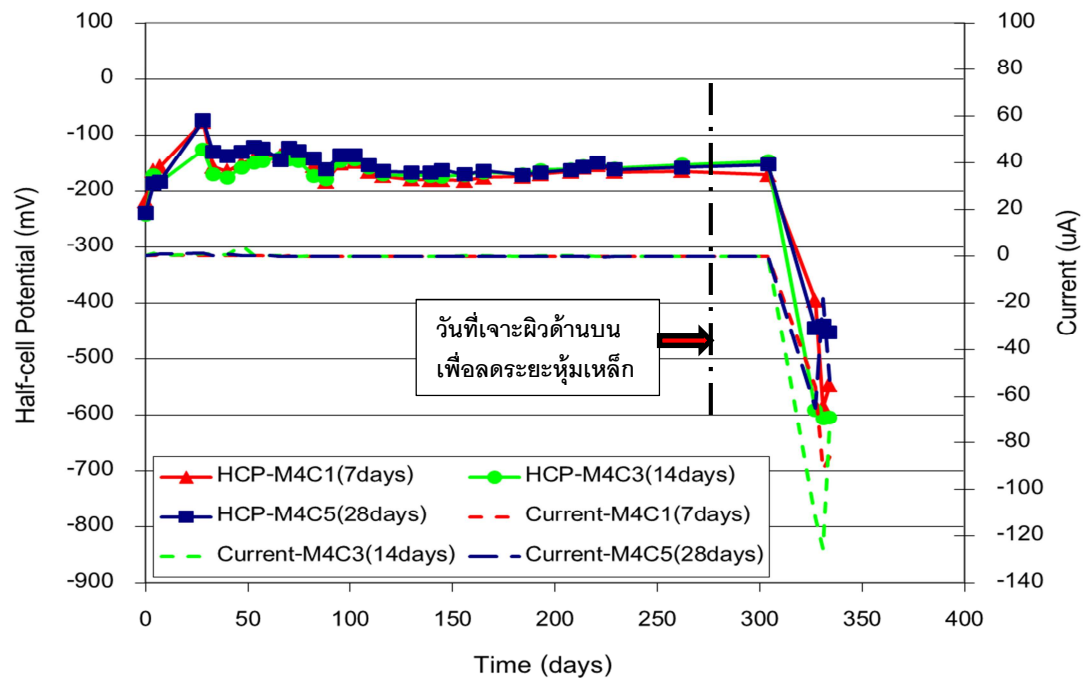
ตารางที่ 4.3 ปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีต อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

Mix. ID	ชนิดเหล็ก	ระยะเวลาในการบ่ม (วัน)	ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (คลอไรด์ทั้งหมด)	
			(% น้ำหนักคอนกรีต)	(% น้ำหนักวัสดุประสาน)
M3-C2	Carbon Steel	7	0.064	0.45
M3-C3	Carbon Steel	14	0.064	0.45
M3-CZ1	Galvanized Steel	7	0.058	0.41
M3-CZ3	Galvanized Steel	14	0.061	0.42
M3-CP1	Zinc Paint Steel	7	0.085	0.60
M3-CP3	Zinc Paint Steel	14	0.057	0.40

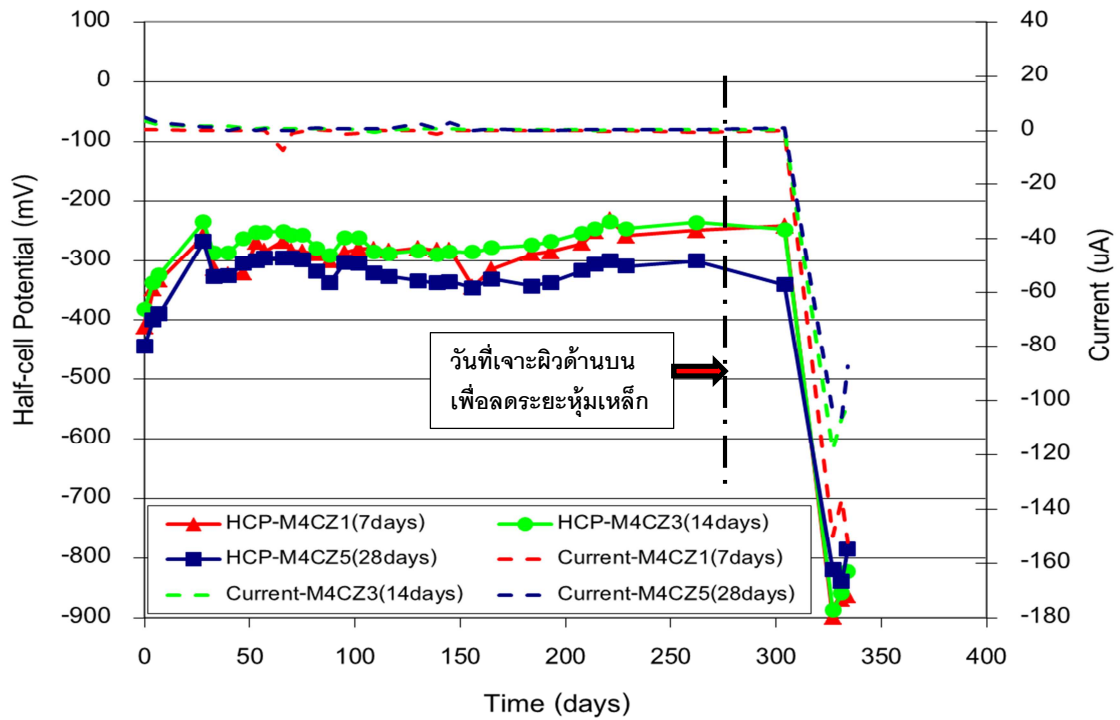


#### 4.4 ผลกระทบของการบ่ม แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10

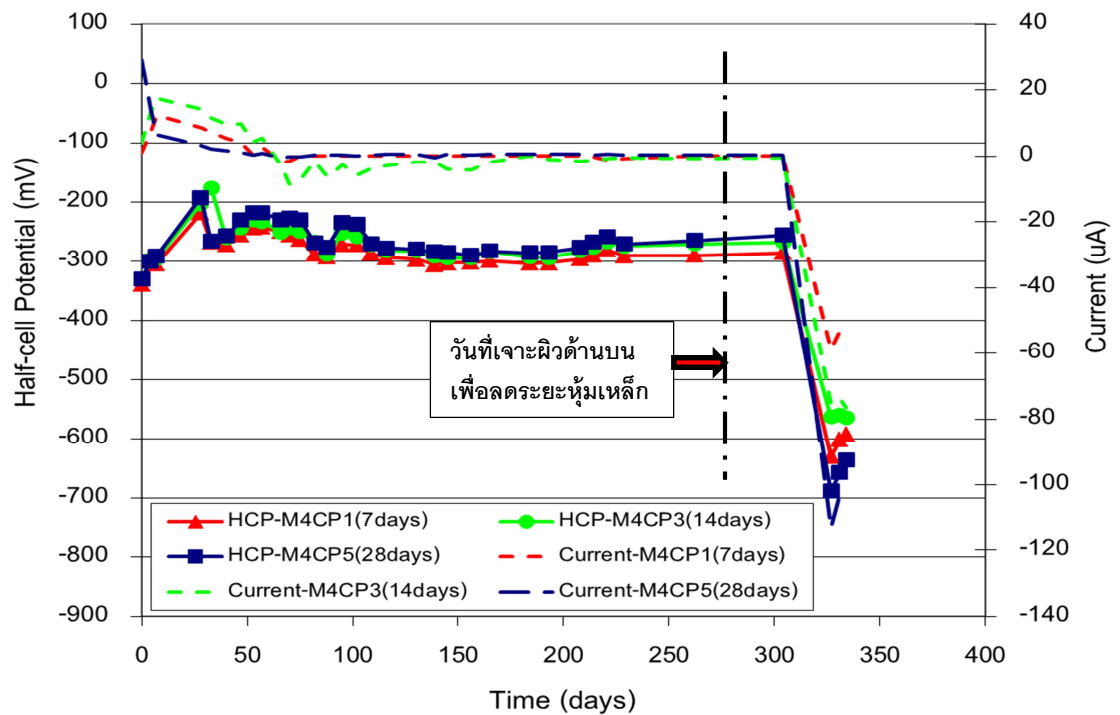
จากรูปที่ 4.10, 4.11 และ 4.12 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และค่ากระแสการกัดกร่อน ซึ่งจากการทดสอบนี้ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และค่ากระแสการกัดกร่อนของ Carbon Steel และ Zinc Paint Steel ช่วงก่อนเริ่มเกิดสนิมมีค่าใกล้เคียงกัน และเริ่มเกิดสนิมพร้อมกันแสดงว่าการบ่มที่ต่างกันและมีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยไม่มีผลกระทบต่อเหล็กทั้ง 2 ชนิด ส่วน Galvanized Steel ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์จะมีการสลับไปมาโดยที่บ่ม 28 วันจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มากที่สุด ส่วนบ่มที่ 14 วันมีค่าน้อยที่สุดเหมือนกับชุดตัวอย่างที่ผ่านมา และการบ่มที่ต่างกันและแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยก็ไม่มีผลต่อ Galvanized Steel เหมือนกับเหล็กอีก 2 ชนิด



รูปที่ 4.10 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Carbon Steel ที่ระยะเวลาบ่มต่างกัน แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10



รูปที่ 4.11 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Galvanized Steel ที่ระยะเวลาบ่มต่างกัน แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10



รูปที่ 4.12 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Zinc Paint Steel ที่ระยะเวลาบ่มต่างกัน แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10

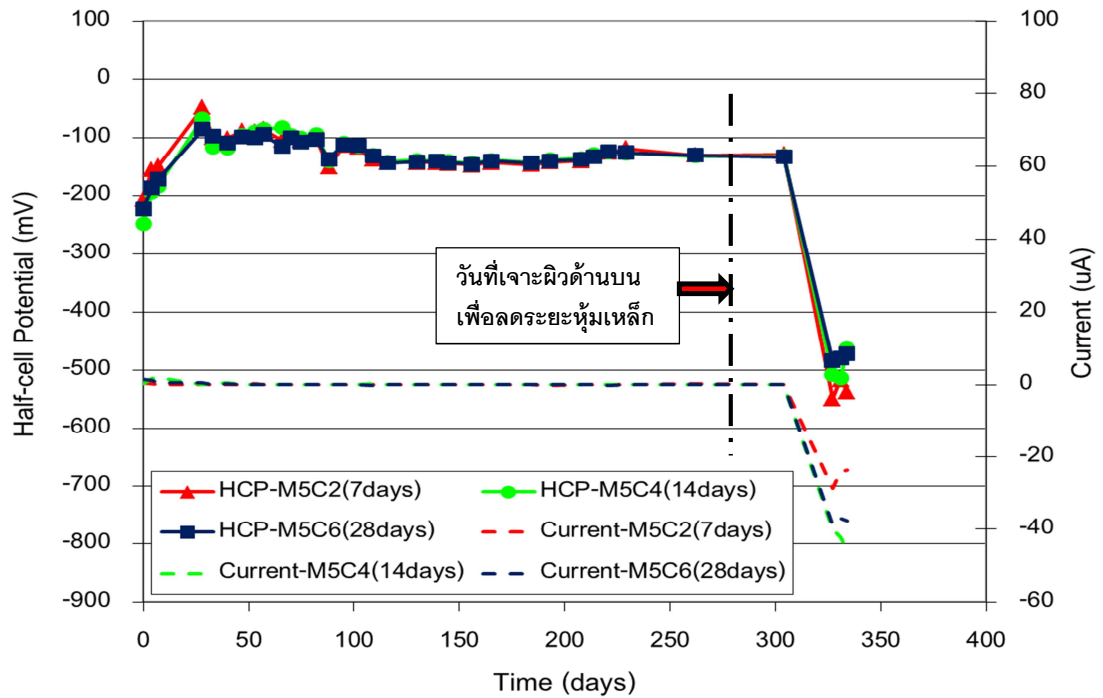
จากตารางที่ 4.4 ค่าคลอไรด์วิกฤติที่ได้จากการทดสอบนี้มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าลอย และระยะเวลาบ่มที่ต่างกันก็ทำให้ค่าคลอไรด์วิกฤติต่างกัน Carbon Steel มีค่าคลอไรด์วิกฤติที่สูงที่สุด Zinc Paint Steel มีค่าคลอไรด์วิกฤติน้อยที่สุด

**ตารางที่ 4.4** ปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีต แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10

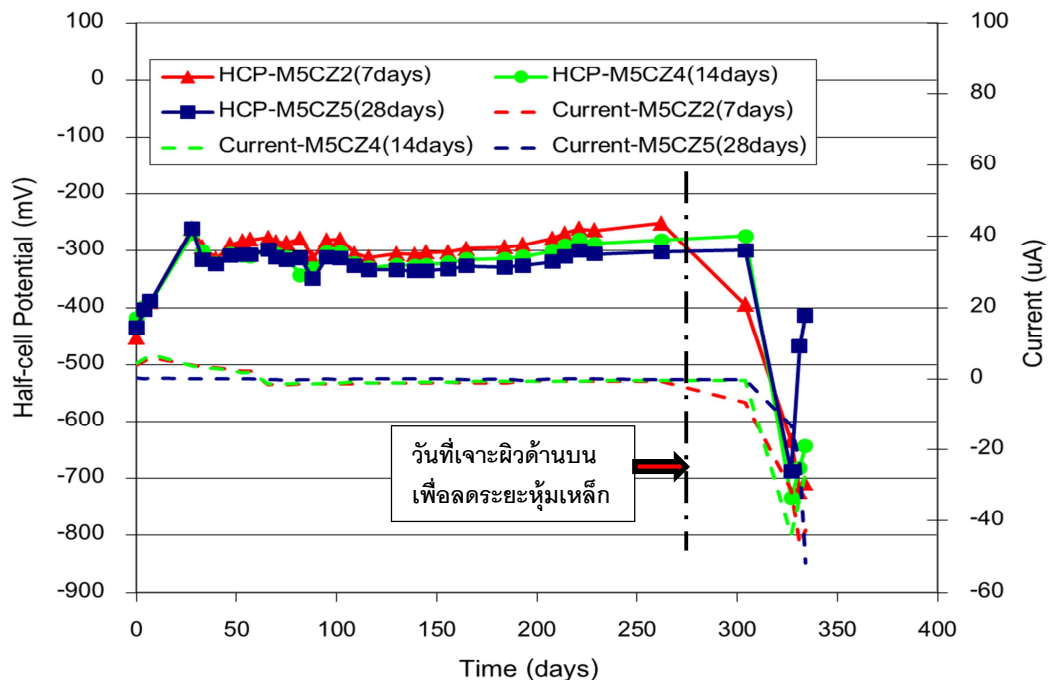
Mix. ID	ชนิดเหล็ก	ระยะเวลาในการบ่ม (วัน)	ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (คลอไรด์ทั้งหมด)	
			(% น้ำหนักคอนกรีต)	(% น้ำหนักวัสดุประสาน)
M4-C1	Carbon Steel	7	0.050	0.31
M4-C3	Carbon Steel	14	0.055	0.34
M4-C5	Carbon Steel	28	0.026	0.17
M4-CZ1	Galvanized Steel	7	0.032	0.20
M4-CZ3	Galvanized Steel	14	0.019	0.12
M4-CZ5	Galvanized Steel	28	0.035	0.22
M4-CP1	Zinc Paint Steel	7	0.009	0.06
M4-CP3	Zinc Paint Steel	14	0.015	0.09
M4-CP5	Zinc Paint Steel	28	0.015	0.09

#### 4.5 ผลกระทบของการบ่ม แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20

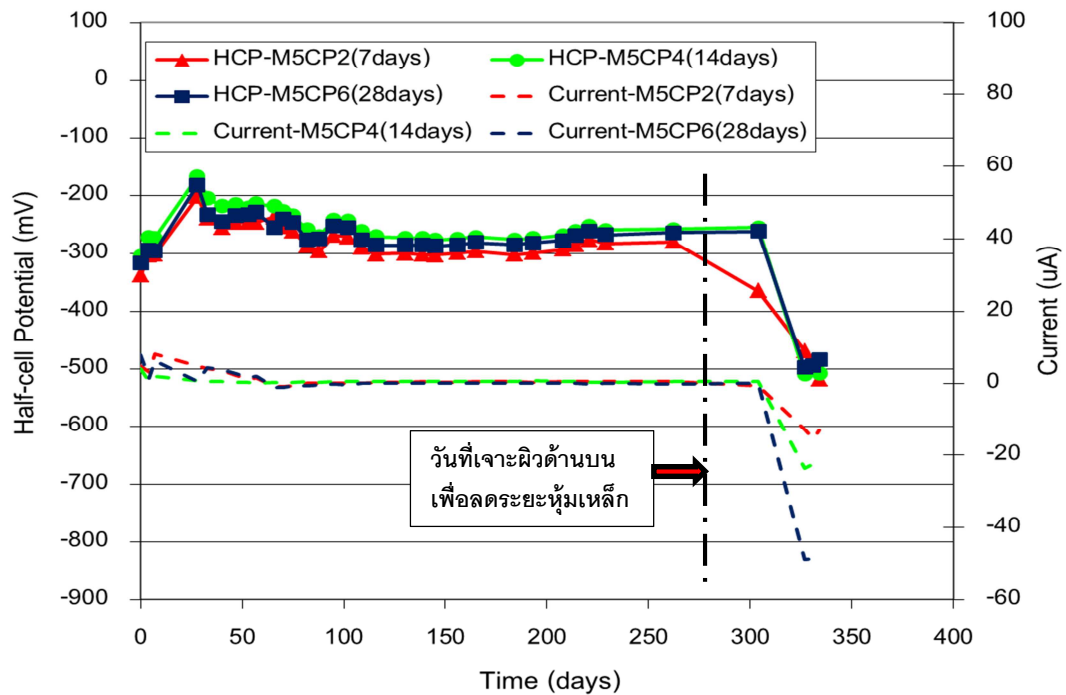
จากรูปที่ 4.13, 4.14 และ 4.15 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และค่ากระแสการกัดกร่อนจากการทดสอบนี้แทนที่ด้วยเถ้าลอยเพิ่มขึ้นจากชุดตัวอย่างที่ 4 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ก่อนเกิดสนิมที่ระยะเวลาบ่มต่างกัน Carbon Steel และ Zinc Paint Steel มีค่าใกล้เคียงกันเหมือนชุดตัวอย่างที่ 4 และ Galvanized Steel มีค่าแตกต่างกันเหมือน และช่วงเริ่มเกิดสนิมของ Carbon Steel จะเกิดพร้อมกัน แต่ Galvanized Steel และ Zinc Paint Steel ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วันจะเริ่มเกิดสนิมเร็วกว่าที่ระยะเวลาบ่ม 14 และ 28 วัน



รูปที่ 4.13 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Carbon Steel ที่ระยะเวลาบ่มต่างกัน แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20



รูปที่ 4.14 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Galvanized Steel ที่ระยะเวลาบ่มต่างกัน แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20



รูปที่ 4.15 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Zinc Paint Steel ที่ระยะเวลาบ่มต่างกัน แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20

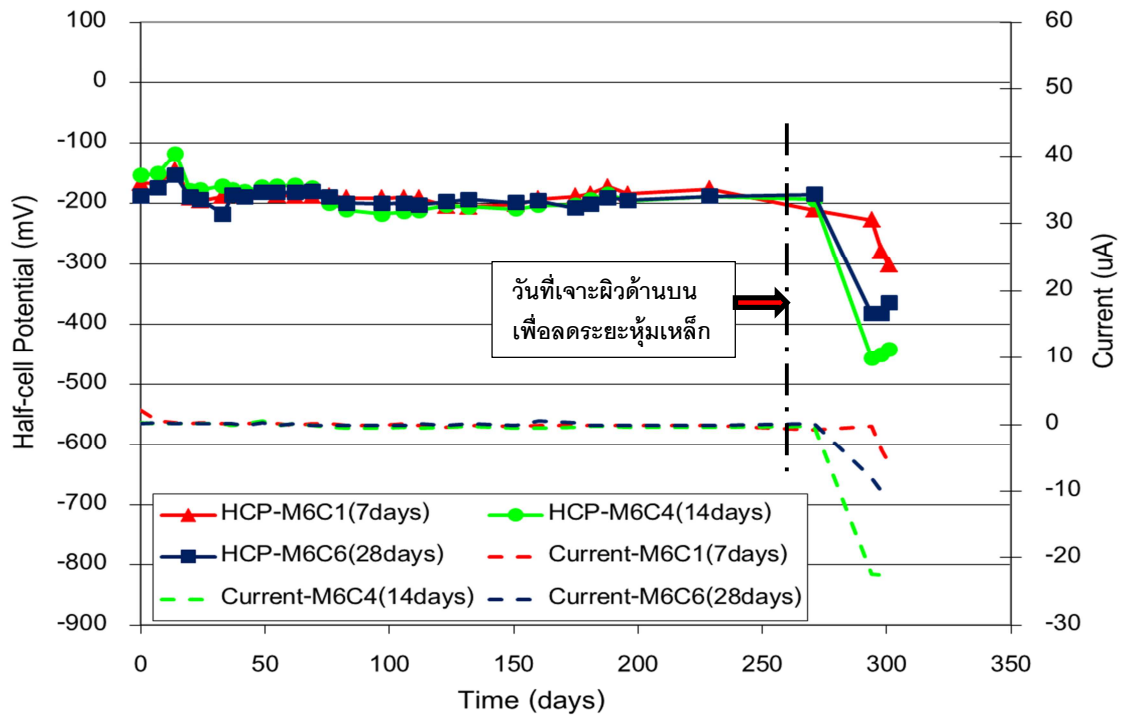
จากตารางที่ 4.5 ค่าคลอไรด์วิกฤติมีค่าลดลงเมื่อผสมเถ้าลอยมากขึ้น เมื่อเทียบกับชุดตัวอย่างที่ 4 และค่าคลอไรด์วิกฤติของ Carbon Steel ยังมีค่ามากกว่าเหล็กอีก 2 ชนิดเหมือนกับชุดตัวอย่างที่ 4 และผลของการบ่มที่ 7 วันของ Carbon Steel มีค่าคลอไรด์วิกฤติมากที่สุด ส่วนการบ่มที่ 14 และ 28 วัน ได้ค่าคลอไรด์วิกฤติเท่ากัน

ตารางที่ 4.5 ปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีต แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20

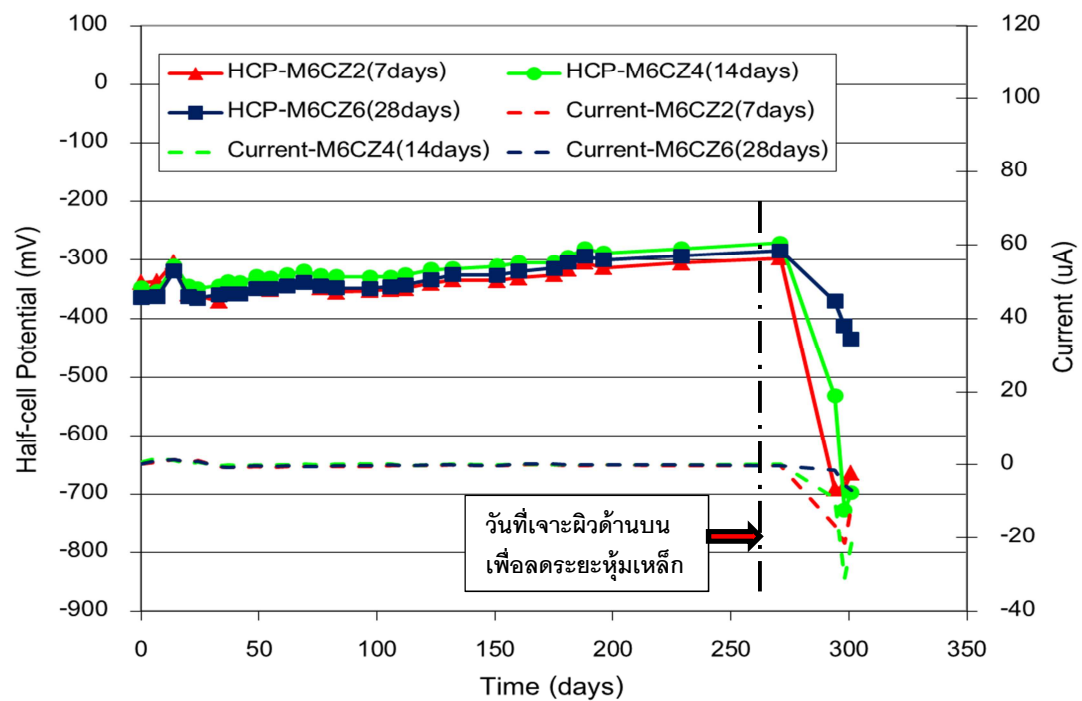
Mix. ID	ชนิดเหล็ก	ระยะเวลา ในการบ่ม (วัน)	ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (คลอไรด์ทั้งหมด)	
			(% น้ำหนักคอนกรีต)	(% น้ำหนักวัสดุประสาน)
M5-C2	Carbon Steel	7	0.054	0.34
M5-C4	Carbon Steel	14	0.021	0.13
M5-C6	Carbon Steel	28	0.021	0.13
M5-CZ2	Galvanized Steel	7	0.014	0.09
M5-CZ4	Galvanized Steel	14	0.019	0.12
M5-CZ5	Galvanized Steel	28	0.027	0.17
M5-CP2	Zinc Paint Steel	7	0.007	0.04
M5-CP4	Zinc Paint Steel	14	0.010	0.06
M5-CP6	Zinc Paint Steel	28	0.009	0.06

#### 4.6 ผลกระทบของการบ่ม แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30

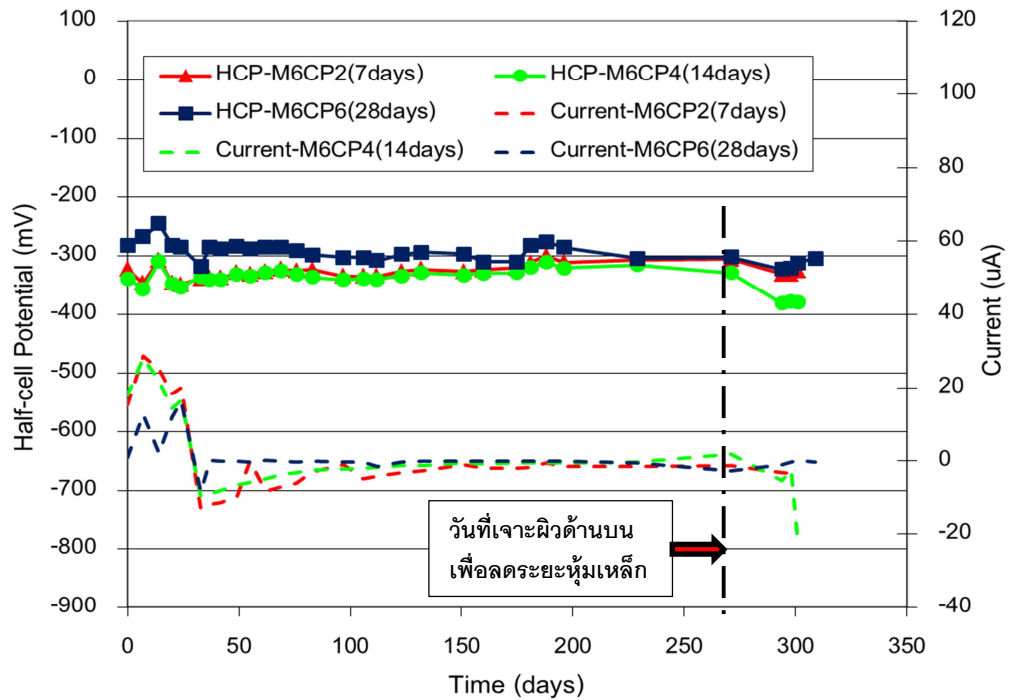
จากรูปที่ 4.16, 4.17 และ 4.18 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และค่ากระแสการกัดกร่อน ซึ่งจากการทดสอบนี้แทนที่ด้วยเถ้าลอยเพิ่มขึ้นมากกว่าชุดตัวอย่างที่ 4 และ 5 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และค่ากระแสการกัดกร่อนก่อนเริ่มเกิดสนิมไม่มีผลกระทบที่ระยะบ่มต่างกัน ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และค่ากระแสการกัดกร่อนมีค่าใกล้เคียงกันและเหมือนกับชุดตัวอย่างที่ 4 และ 5 แต่ Carbon Steel และ Galvanized Steel จะเริ่มเกิดสนิมเร็วกว่า Zinc Paint Steel



รูปที่ 4.16 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Carbon Steel ที่ระยะเวลาบ่มต่างกัน แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30



รูปที่ 4.17 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Galvanized Steel ที่ระยะเวลาบ่มต่างกัน แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30



รูปที่ 4.18 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Zinc Paint Steel ที่ระยะเวลาบ่มต่างกัน แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 จากตารางที่ 4.6 ซึ่งในการทดสอบนี้ค่าคลอไรด์วิกฤติมีค่าน้อยที่สุดจากทั้ง 5 ชุดตัวอย่างข้างต้น และมีค่าสลับกันไปมา

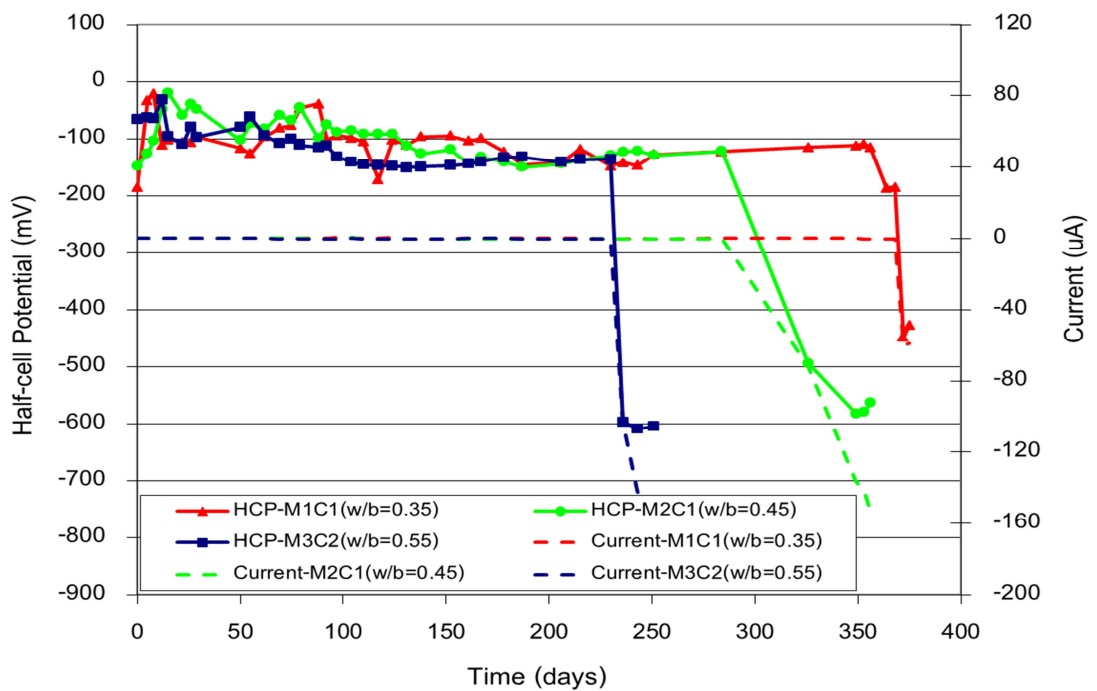
ตารางที่ 4.6 ปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีต แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30

Mix. ID	ชนิดเหล็ก	ระยะเวลาในการบ่ม (วัน)	ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (คลอไรด์ทั้งหมด)	
			(% น้ำหนักคอนกรีต)	(% น้ำหนักวัสดุประสาน)
M6-C1	Carbon Steel	7	0.012	0.08
M6-C4	Carbon Steel	14	0.029	0.19
M6-C6	Carbon Steel	28	0.009	0.06
M6-CZ2	Galvanized Steel	7	0.001	0.01
M6-CZ4	Galvanized Steel	14	0.019	0.12
M6-CZ6	Galvanized Steel	28	0.010	0.07
M6-CP2	Zinc Paint Steel	7	0.025	0.16
M6-CP4	Zinc Paint Steel	14	0.008	0.05
M6-CP6	Zinc Paint Steel	28	0.029	0.18

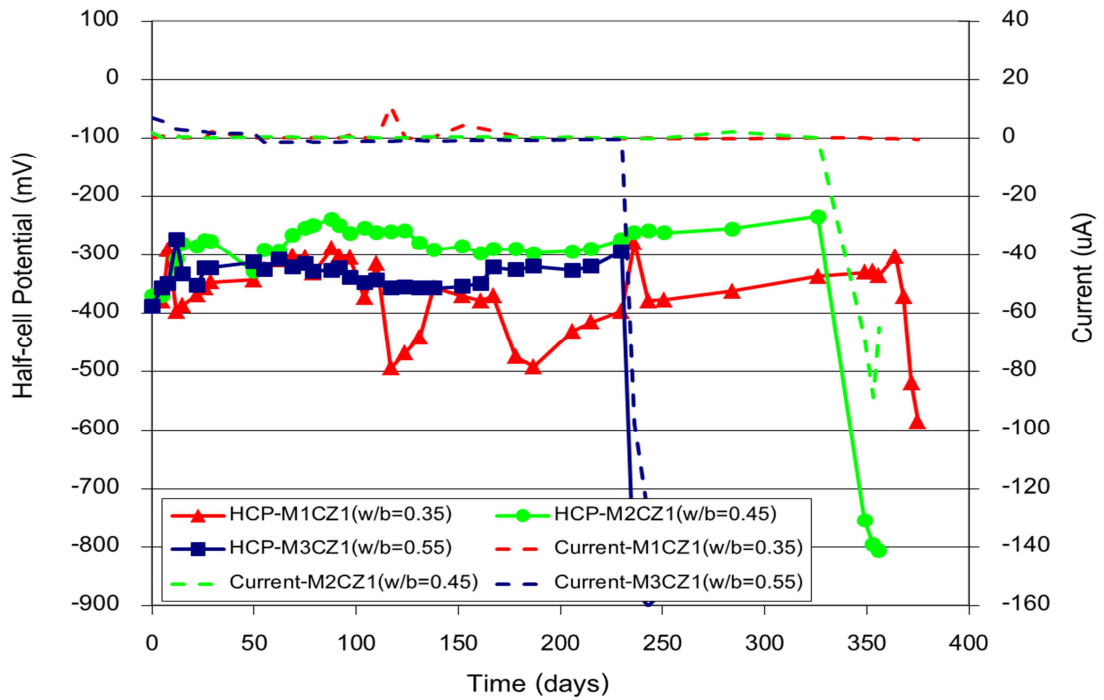


#### 4.7 ผลการทดสอบเปรียบเทียบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35, 0.45 และ 0.55

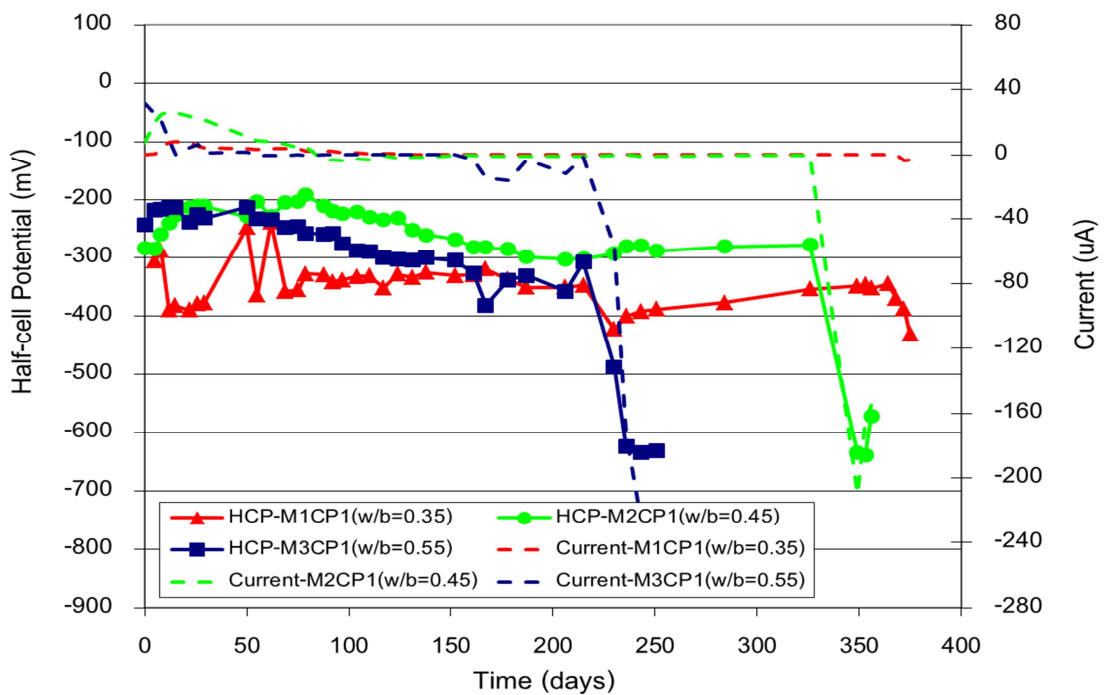
จากรูป 4.19, 4.20 และ 4.21 ในการทดสอบนี้ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่น้อยกว่าจะใช้เวลาเกิดสนิมนานกว่าค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงกว่า ซึ่งอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มีค่ามากจะทำให้คอนกรีตมีความพรุนกว่า ทำให้คลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้าไปได้ง่าย จึงทำให้ระยะเวลาใช้ในการเกิดสนิมน้อยกว่า และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานยังมีผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ และค่ากระแสการกัดกร่อนเล็กน้อย



รูปที่ 4.19 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Carbon Steel ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ



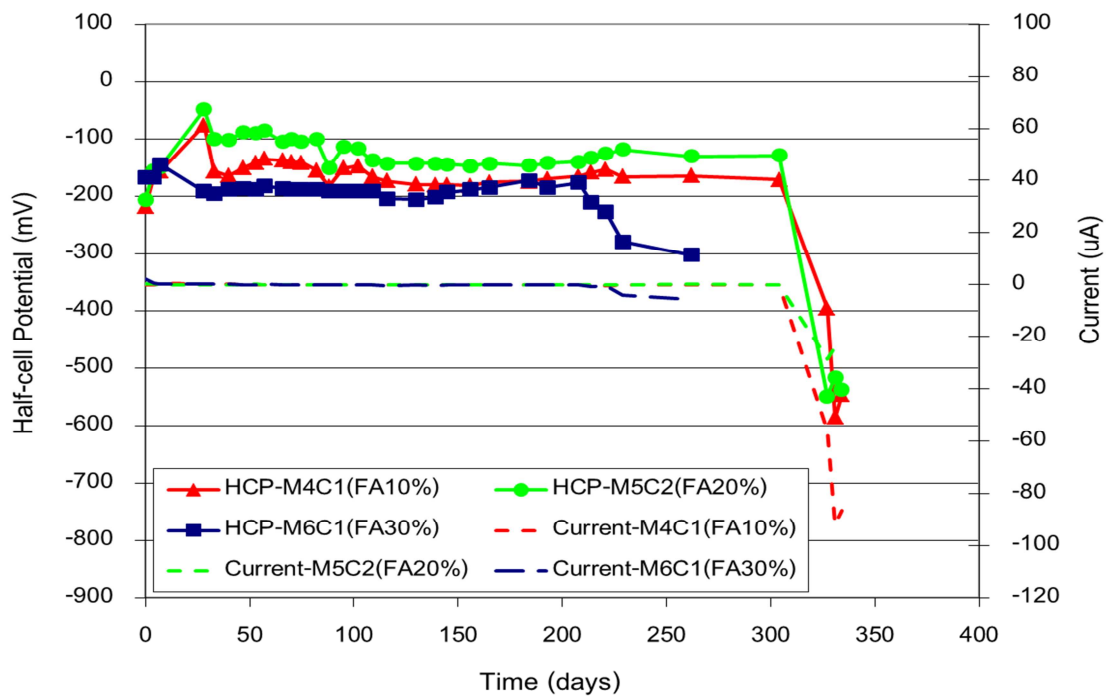
รูปที่ 4.20 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Galvanized Steel ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ



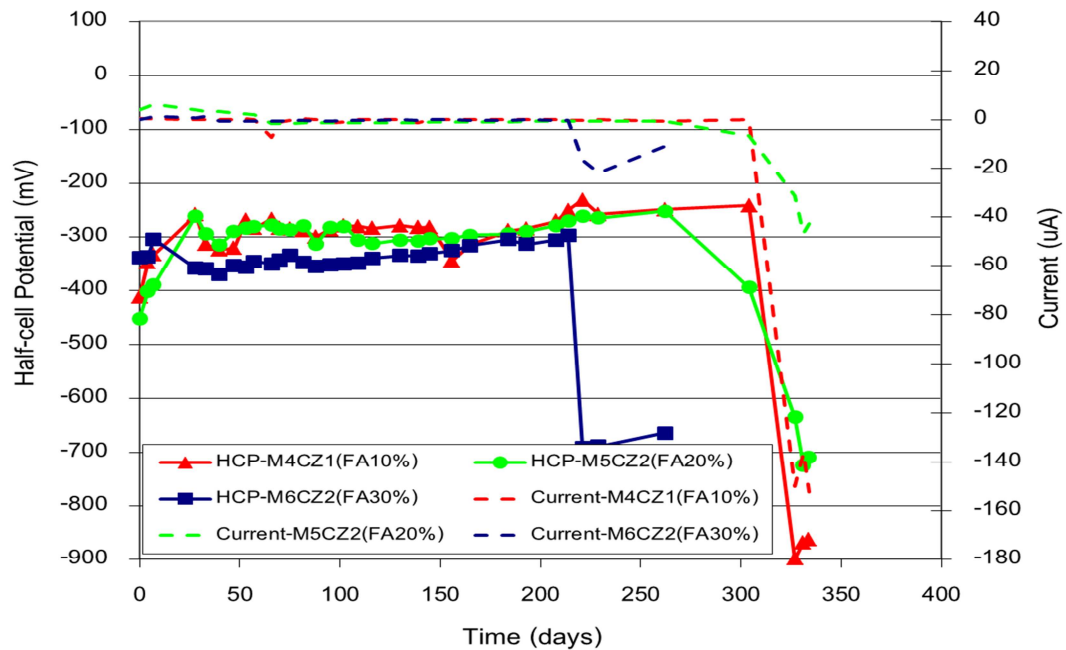
รูปที่ 4.21 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Zinc Paint Steel ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ

#### 4.8 ผลการทดสอบเปรียบเทียบการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10, 20 และ 30

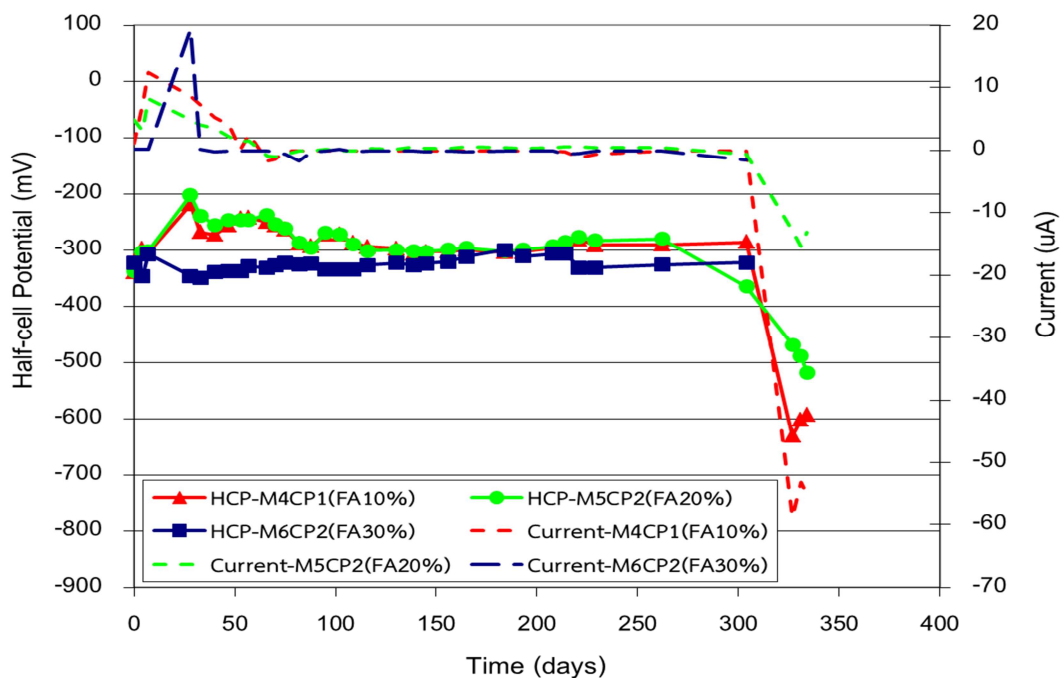
จากรูป 4.22, 4.23 และ 4.24 ซึ่งในการทดสอบนี้เมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณต่างๆ ไม่มีผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และค่ากระแสการกัดกร่อน แต่ระยะเวลาที่เหล็กเริ่มเกิดสนิมของ Galvanized Steel ที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 เริ่มเกิดสนิมเร็วกว่าเหล็กชนิดอื่นๆ



รูปที่ 4.22 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Carbon Steel แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆ



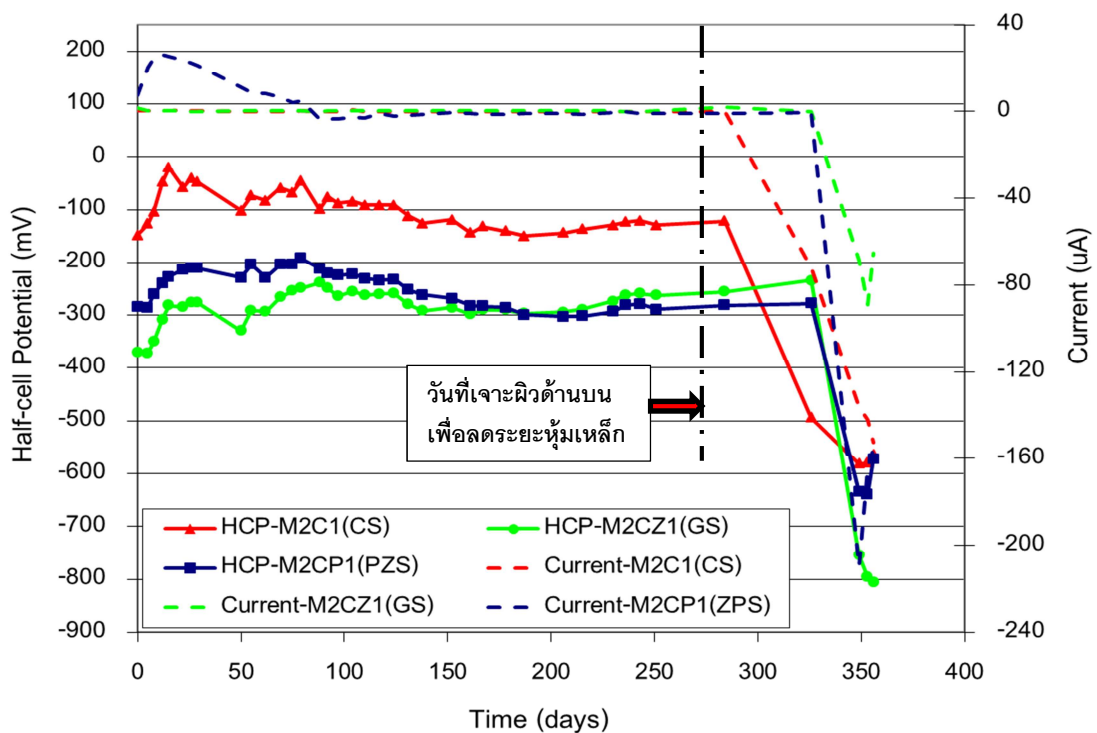
รูปที่ 4.23 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Galvanized Steel แทนที่วัสดุ  
ประสานด้วยเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.24 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนของ Zinc Paint Steel แทนที่วัสดุ  
ประสานด้วยเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆ

#### 4.9 ผลการทดสอบเปรียบเทียบเหล็ก 3 ชนิด

จากรูป 4.25 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของเหล็กทั้ง 3 ชนิดมีค่าแตกต่างกันเมื่อเหล็กเริ่มเกิดสนิมซึ่ง ในการทดสอบนี้ Carbon Steel, Galvanized Steel และ Zinc Paint Steel ช่วงก่อนการเกิดสนิม Carbon Steel จะมีค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ อยู่ระหว่าง -50 ถึง -150 ส่วน Galvanized Steel และ Zinc Paint Steel จะมีค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ใกล้เคียงกัน ซึ่งจะอยู่ระหว่าง -200 ถึง -300 mV เมื่อเหล็กเริ่มเกิดสนิม Carbon Steel จะมีค่าตั้งแต่ -400 ขึ้นไป สำหรับ Galvanized Steel เมื่อเกิดสนิมจะมีค่าอยู่ระหว่าง -800 ถึง -900 mV และ Zinc Paint Steel เมื่อเกิดสนิมจะมีค่าอยู่ระหว่าง -600 ถึง -700 mV เมื่อเทียบกับ  $\text{Cu}/\text{SO}_4$



รูปที่ 4.25 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และกระแสการกัดกร่อนเปรียบเทียบเหล็ก 3 ชนิด

#### 4.10 เปรียบเทียบค่าคลอไรด์วิกฤติจากงานวิจัยที่ผ่านมา

จากการศึกษาหาค่าคลอไรด์วิกฤติในการทดสอบนี้สามารถสรุปเพื่อเปรียบเทียบกับ การศึกษาที่ผ่านมาได้ดังนี้

สถาบันวิจัยและให้คำปรึกษาแห่งมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ได้ศึกษาปริมาณคลอไรด์ วิกฤติในโครงสร้างคอนกรีตสำหรับจัดทำข้อบังคับและมาตรฐานสำหรับการก่อสร้างอาคาร คอนกรีตที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเล ผลของการศึกษามีดังนี้

#### 4.10.1 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

ทดสอบตัวอย่างโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่างกัน

จากตารางที่ 4.7 ค่าคลอไรด์วิกฤติจะมีค่ามากเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และค่าคลอไรด์วิกฤติจะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของสถาบันวิจัยและให้คำปรึกษาแห่งมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 ค่าคลอไรด์วิกฤติมีค่ามากที่สุด แต่ค่าคลอไรด์วิกฤติจะลดลงเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.7 ปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ (จากการทดสอบของงานวิจัยนี้)

ชนิดเหล็ก	w/b	ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (คลอไรด์ทั้งหมด)		จากการศึกษาของ สถาบันวิจัยและให้คำปรึกษาแห่งมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
		(% น้ำหนักคอนกรีต)	(% น้ำหนักวัสดุประสาน)	(% น้ำหนักวัสดุประสาน)
Carbon Steel	0.35	0.03	0.16	0.97
Carbon Steel	0.45	0.09	0.58	0.99
Carbon Steel	0.55	0.06	0.45	0.93

#### 4.10.2 ผลของระยะเวลาการบ่ม

ทดสอบตัวอย่างโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และทำการบ่มตัวอย่างเป็นระยะเวลาที่ต่างกัน

จากตารางที่ 4.8 เมื่อระยะเวลาการบ่มคอนกรีตเพิ่มขึ้นค่าคลอไรด์วิกฤติจะมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของสถาบันวิจัยและให้คำปรึกษาแห่งมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ เมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มมากขึ้นจาก 7 วันเป็น 28 วัน ค่าคลอไรด์วิกฤติมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาการบ่มเป็น 91 วัน ค่าคลอไรด์วิกฤติมีค่าลดลง

ตารางที่ 4.8 ปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่ระยะการบ่มต่างๆ (จากการทดสอบของงานวิจัยนี้)

ชนิดเหล็ก	ระยะเวลาในการบ่ม (วัน)	ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (คลอไรด์ทั้งหมด)		จากการศึกษาของ สถาบันวิจัย และให้คำปรึกษาแห่ง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
		(% น้ำหนักคอนกรีต)	(% น้ำหนักวัสดุประสาน)	(% น้ำหนักวัสดุประสาน)
Carbon Steel	7	0.09	0.58	0.93
Carbon Steel	14	0.04	0.27	1.76
Carbon Steel	28	0.02	0.14	0.83

#### 4.10.3 ผลของการใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานด้วยอัตราส่วนต่าง ๆ

ทดสอบตัวอย่างโดยการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยในปริมาณต่างๆ

จากตารางที่ 4.9 ค่าคลอไรด์วิกฤติจะมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยในปริมาณร้อยละ 10 และ 20 แต่จะมีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณเถ้าลอยมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของสถาบันวิจัยและให้คำปรึกษาแห่งมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ เมื่อปริมาณเถ้าลอยมากขึ้นค่าคลอไรด์วิกฤติจะมีค่าลดลง

ตารางที่ 4.9 ปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยในปริมาณต่างๆ(จากการทดสอบของงานวิจัยนี้)

ชนิดเหล็ก	อัตราส่วนของเถ้าลอย(ร้อยละ)	ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (คลอไรด์ทั้งหมด)		จากการศึกษาของ สถาบันวิจัย และให้คำปรึกษาแห่ง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
		(% น้ำหนักคอนกรีต)	(% น้ำหนักวัสดุประสาน)	(% น้ำหนักวัสดุประสาน)
Carbon Steel	10	0.05	0.31	1.23
Carbon Steel	20	0.05	0.34	1.20
Carbon Steel	30	0.012	0.08	0.29

#### 4.11 เกณฑ์ที่ใช้ในการตรวจสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยวิธีค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

จากการวัดการเกิดสนิมของเหล็กเสริมทั้ง 3 ชนิด ด้วยเครื่อง Haft-Cell Potential สามารถพิจารณาโอกาสการเกิดสนิมจากค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ตามมาตรฐาน ASTM C876 ที่ได้ระบุเกณฑ์การพิจารณา ดังแสดงในตารางที่ 4.10 ซึ่งมาตรฐานนี้ได้แสดงเฉพาะค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของเหล็กธรรมดา และไม่ได้แสดงถึงค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของเหล็กที่มีการเคลือบผิวด้วยสังกะสี

ตารางที่ 4.10 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ตามมาตรฐาน ASTM C876 [12]

ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์คอปเปอร์-คอปเปอร์ซัลเฟต (Cu/CuSO <sub>4</sub> )	สภาพการเกิดสนิม
ติดลบน้อยกว่า -250 mV	โอกาสร้อยละ 90 ที่เหล็กเสริมจะไม่เกิดสนิม
-250 mV ถึง -350 mV	ไม่แน่นอน
ติดลบมากกว่า -350 mV	มีโอกาสร้อยละ 90 ที่เหล็กเสริมจะเกิดสนิม

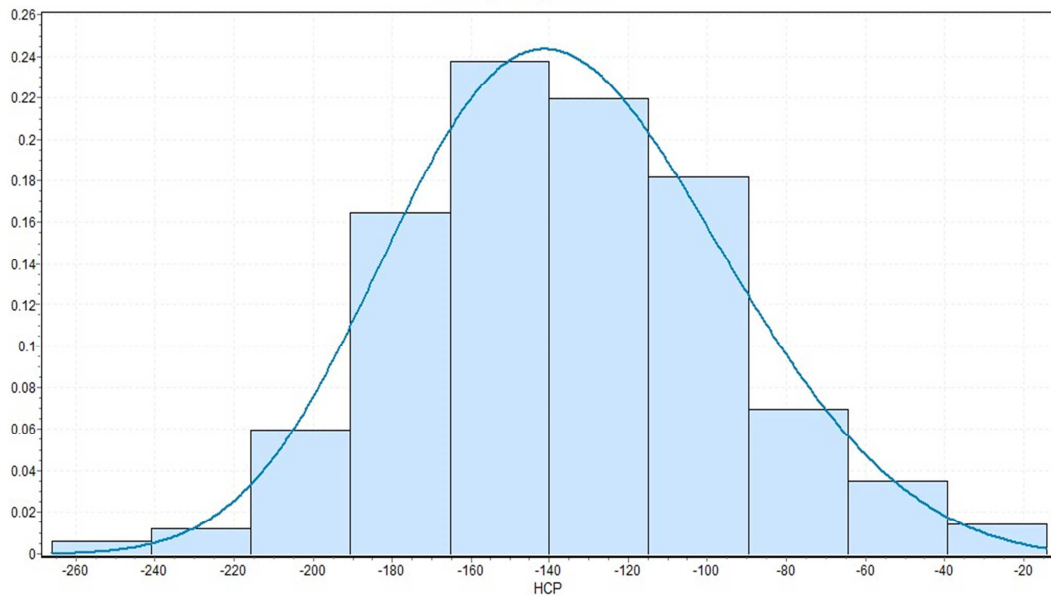
จากงานวิจัยนี้ได้แบ่งเกณฑ์การพิจารณาโอกาสการเกิดสนิมจากค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของเหล็กทั้ง 3 ชนิดที่วัดได้จากห้องปฏิบัติการ โดยทำการวัดในช่วงก่อนการเกิดสนิมและหลังการเกิดสนิม จากนั้นนำค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่ได้มาแบ่งเกณฑ์การพิจารณาโอกาสการเกิดสนิมโดยวิธีสถิติทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Easy Fit (Evaluation Version) เพื่อเอารูปแบบการกระจายตัวที่เหมาะสมที่สุดสำหรับข้อมูลแต่ละชุด ดังแสดงในรูปที่ 4.26 ถึง รูปที่ 4.37 และสามารถแบ่งเกณฑ์การพิจารณาโอกาสการเกิดสนิมได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.11 ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นเกณฑ์ในการตรวจสอบการเกิดสนิมสำหรับโครงสร้างที่ใช้เหล็กธรรมดาและเหล็กที่เคลือบผิวด้วยสังกะสีได้

ตารางที่ 4.11 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่ใช้พิจารณาโอกาสการเกิดสนิมในงานวิจัยนี้

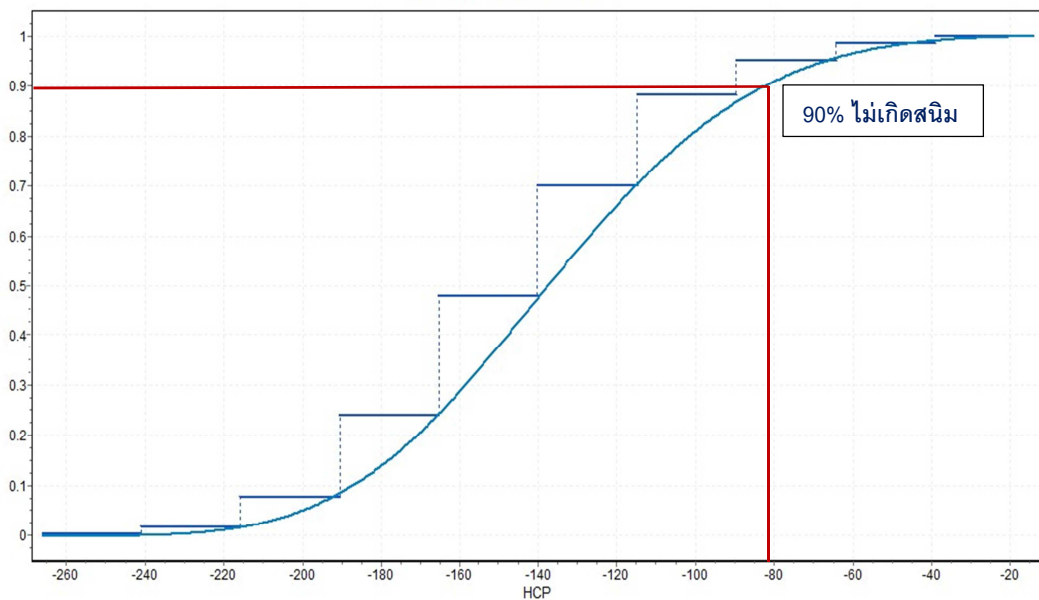
โอกาสการเกิดสนิม	ASTM C876	Carbon Steel	Galvanized Steel	Zinc Paint Steel
90% ไม่เกิดสนิม	ติดลบน้อยกว่า -250 mV.	ติดลบน้อยกว่า -82 mV.	ติดลบน้อยกว่า -255 mV.	ติดลบน้อยกว่า -240 mV.
ไม่แน่นอน	-250 mV. ถึง -350 mV.	-82 mV. ถึง -400 mV.	-255 mV. ถึง -655 mV.	-240 mV. ถึง -480 mV.
90% เริ่มเกิดสนิม	ติดลบมากกว่า -350 mV.	ติดลบมากกว่า -400 mV.	ติดลบมากกว่า -655 mV.	ติดลบมากกว่า -480 mV.



จากรูปที่ 4.26 และ 4.27 เป็นการพิจารณาโอกาสการเกิดสนิมของ Carbon Steel ก่อนการเกิดสนิมซึ่งมีจำนวน 1,002 ข้อมูลของค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์จากการทดสอบ และเป็นการกระจายตัวแบบ Gen. Extreme Value.

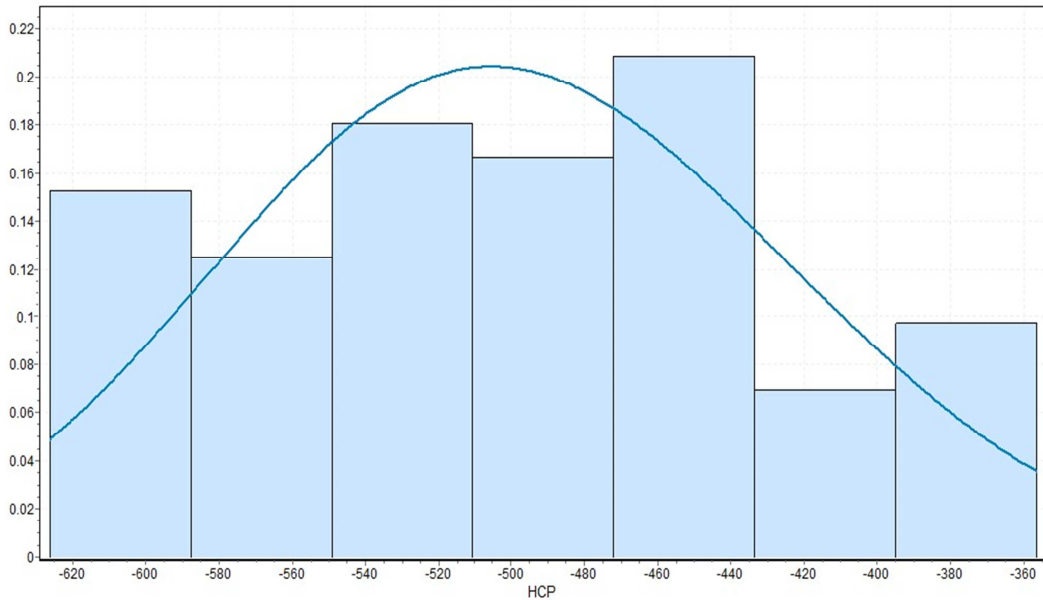


รูปที่ 4.26 การกระจายตัวค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของ Carbon Steel ก่อนเกิดสนิม

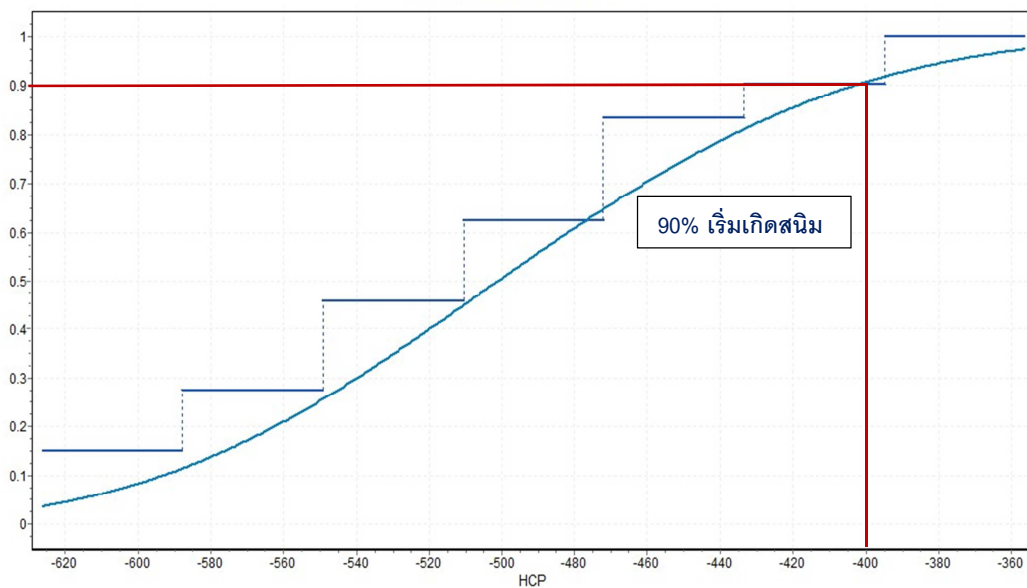


รูปที่ 4.27 พิจารณาโอกาสการเกิดสนิมของ Carbon Steel ก่อนเกิดสนิม

จากรูปที่ 4.28 และ 4.29 เป็นการพิจารณาโอกาสการเกิดสนิมของ Carbon Steel เริ่มเกิดสนิมซึ่งมีจำนวน 72 ข้อมูลของค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์จากการทดสอบ และเป็นการกระจายตัวแบบ Gen. Extreme Value.

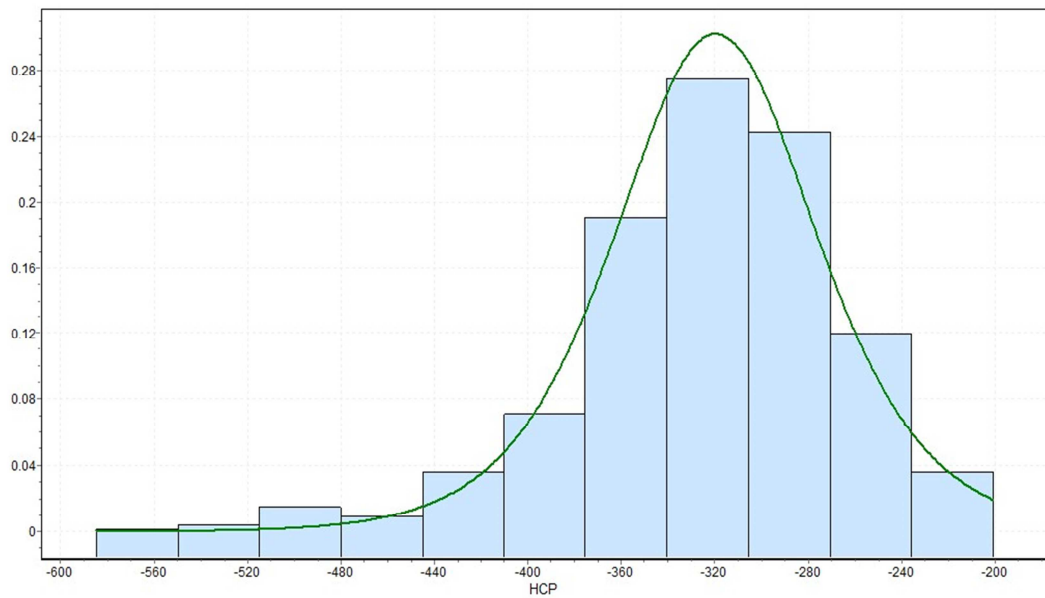


รูปที่ 4.28 การกระจายตัวค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของ Carbon Steel เริ่มเกิดสนิม

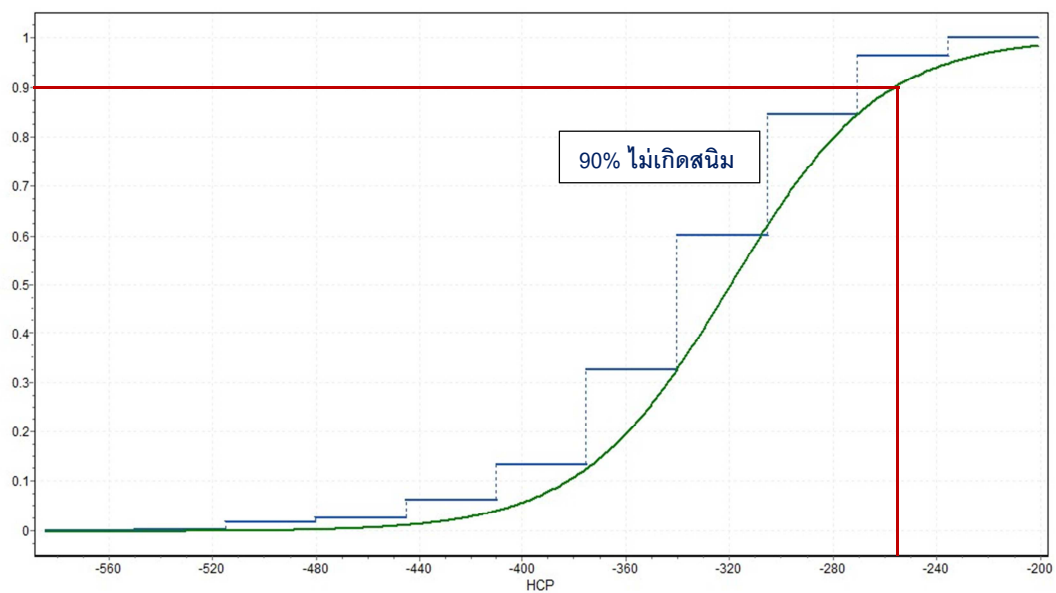


รูปที่ 4.29 พิจารณาโอกาสการเกิดสนิมของ Carbon Steel เริ่มเกิดสนิม

จากรูปที่ 4.30 และ 4.31 เป็นการพิจารณาโอกาสการเกิดสนิมของ Galvanized Steel ก่อนการเกิดสนิมซึ่งมีจำนวน 1,026 ข้อมูลของค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์จากการทดสอบ และเป็น การกระจายตัวแบบ Log-Logistic(3P).

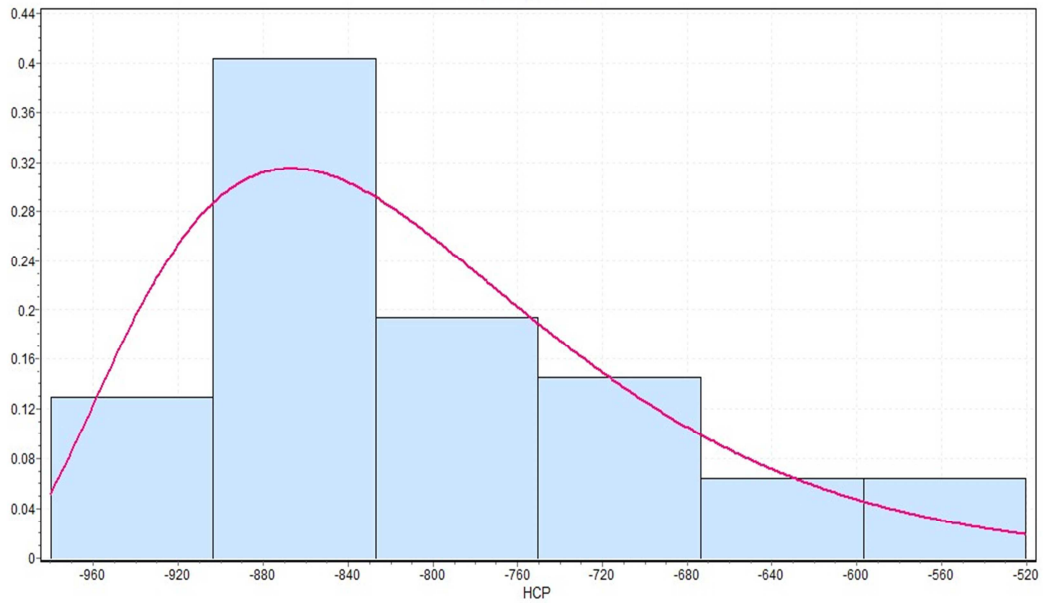


รูปที่ 4.30 การกระจายตัวค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของ Galvanized Steel ก่อนเกิดสนิม

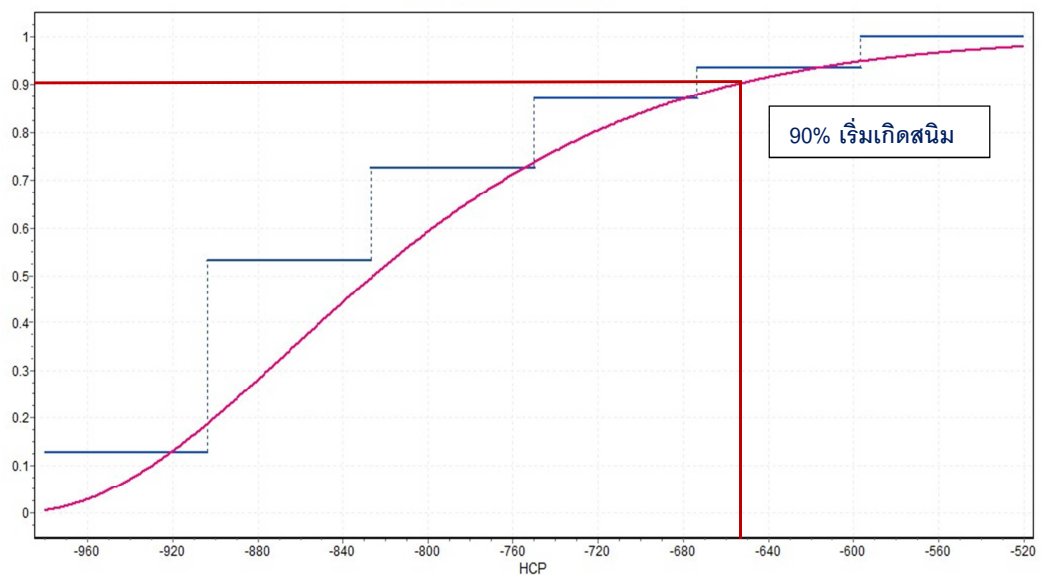


รูปที่ 4.31 พิจารณาโอกาสการเกิดสนิมของ Galvanized Steel ก่อนเกิดสนิม

จากรูปที่ 4.32 และ 4.33 เป็นการพิจารณาโอกาสการเกิดสนิมของ Galvanized Steel เริ่มเกิดสนิมซึ่งมีจำนวน 62 ข้อมูลของค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์จากการทดสอบ และเป็นการกระจายตัวแบบ Gamma(3P).

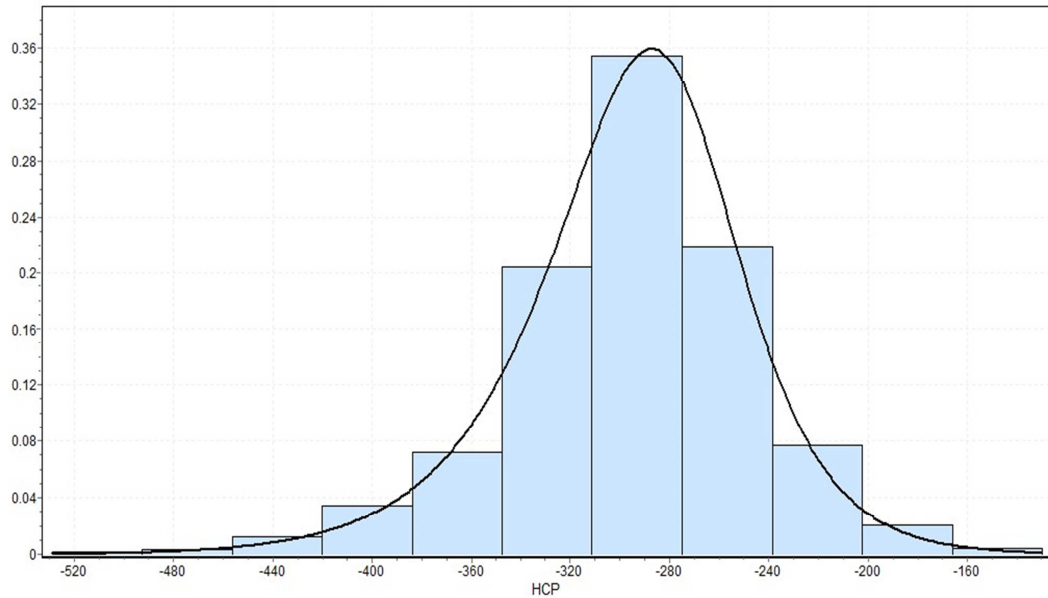


รูปที่ 4.32 การกระจายตัวค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของ Galvanized Steel เริ่มเกิดสนิม

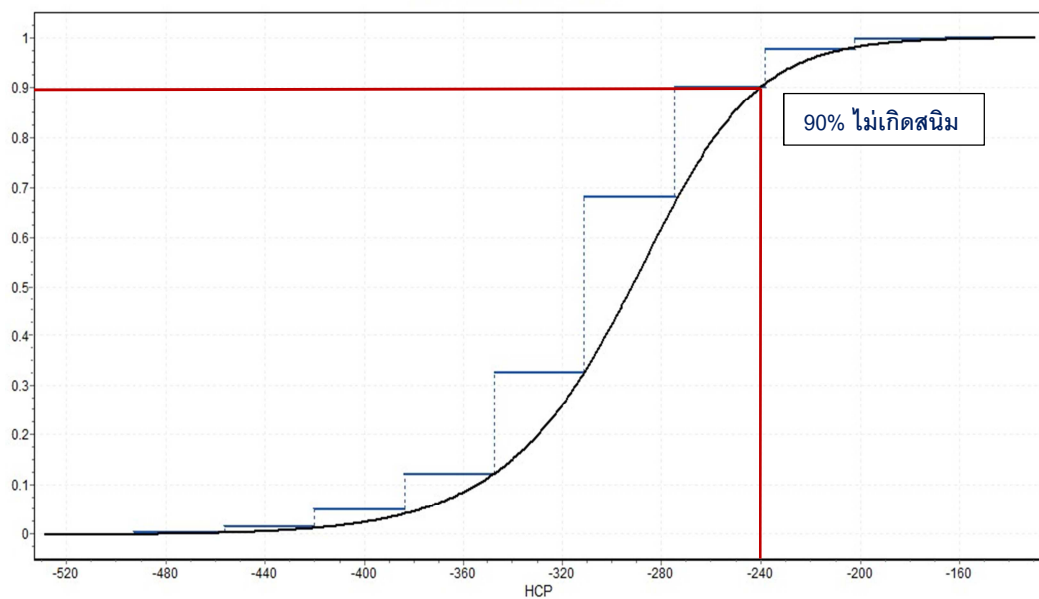


รูปที่ 4.33 พิจารณาโอกาสการเกิดสนิมของ Galvanized Steel เริ่มเกิดสนิม

จากรูปที่ 4.34 และ 4.35 เป็นการพิจารณาโอกาสการเกิดสนิมของ Zinc Paint Steel ก่อนการเกิดสนิมซึ่งมีจำนวน 1,741 ข้อมูลของค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์จากการทดสอบ และเป็นการกระจายตัวแบบ Dagum(4P).

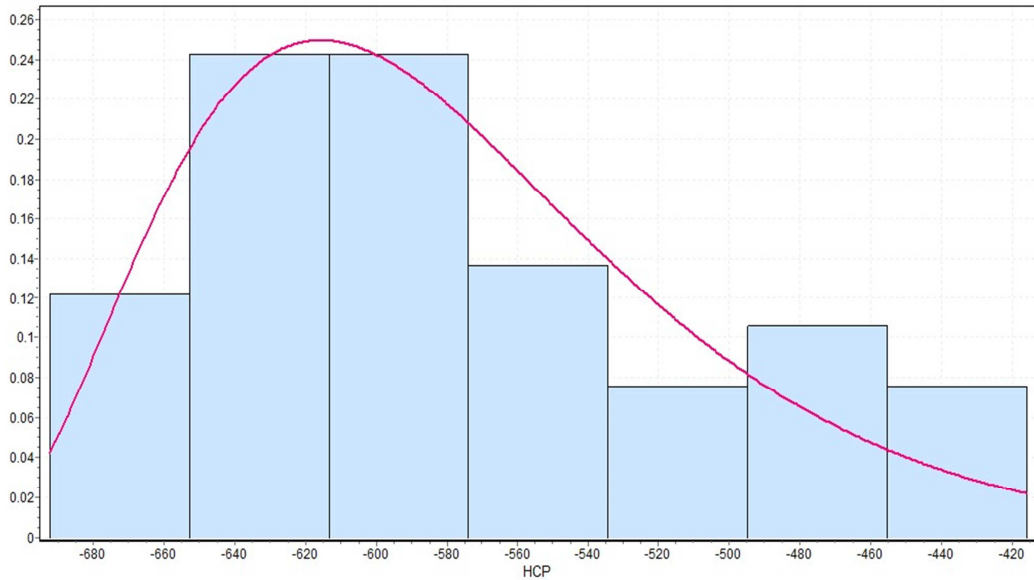


รูปที่ 4.34 การกระจายตัวค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของ Zinc Paint Steel ก่อนเกิดสนิม

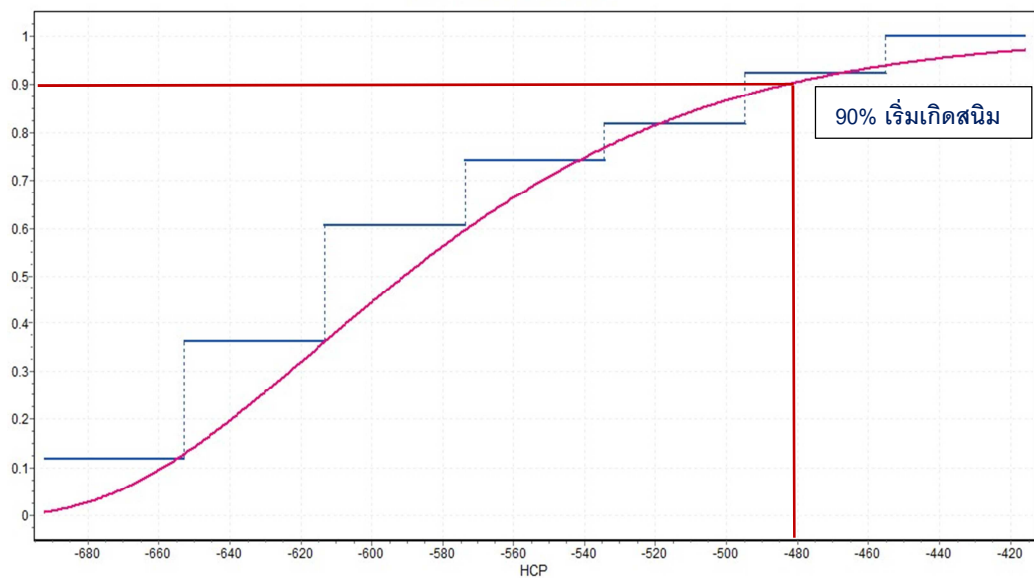


รูปที่ 4.35 พิจารณาโอกาสการเกิดสนิมของ Zinc Paint Steel ก่อนเกิดสนิม

จากรูปที่ 4.36 และ 4.37 เป็นการพิจารณาโอกาสการเกิดสนิมของ Zinc Paint Steel เริ่มเกิดสนิมซึ่งมีจำนวน 66 ข้อมูลของค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์จากการทดสอบ และเป็นการกระจายตัวแบบ Gamma(3P).



รูปที่ 4.36 การกระจายตัวค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของ Zinc Paint Steel เริ่มเกิดสนิม



รูปที่ 4.37 พิจารณาโอกาสการเกิดสนิมของ Zinc Paint Steel เริ่มเกิดสนิม

## บทที่ 5

### การคำนวณอายุการใช้งาน

การคำนวณอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถคำนวณได้จากค่าคลอไรด์วิกฤติ ในการศึกษานี้จะใช้ค่าคลอไรด์วิกฤติจากผลการทดสอบในบทที่ 4 การคำนวณอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ติดทะเล และโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ห่างจากทะเล 500 เมตร ตามมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง สามารถคำนวณได้ดังนี้

#### 5.1 อายุการใช้งานก่อนการเกิดสนิม

อายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในช่วงระยะเวลาปลอดการบำรุงรักษาหรือก่อนการเกิดสนิมของเหล็กเสริม สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$C_d \leq C_{lim} \quad 5.1$$

โดยที่  $C_{lim}$  ปริมาณคลอไรด์วิกฤติที่จะทำให้เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิมได้

$C_d$  ปริมาณคลอไรด์วิกฤติที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

$$C_d = (C_s - C_0) \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{0.1c}{2\sqrt{D_a t}} \right) \right] + C_0 \quad 5.2$$

โดยที่  $c$  ระยะหุ้มเหล็กเสริม (มม.)

$D_a$  สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีต ซม<sup>2</sup>/ปี

$t$  อายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซมของโครงสร้างคอนกรีตที่ต้องการ (ปี)

$C_0$  ปริมาณคลอไรด์เริ่มต้นในคอนกรีต (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

$C_s$  ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$C_s = C_{s'} \times \frac{\rho_{concrete}}{b} \quad 5.3$$

โดยที่  $C_{s'}$  ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวของโครงสร้าง (ร้อยละโดยน้ำหนักของคอนกรีต)

$\rho_{concrete}$  ความหนาแน่นของคอนกรีต (kg/m<sup>3</sup>) หากไม่ทราบค่าให้ใช้ 2,400 kg/m<sup>3</sup>

$b$  น้ำหนักวัสดุประสานในคอนกรีตหนึ่งลูกบาศก์เมตร

สัมประสิทธิ์ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต ( $C_s$ ) ของโครงสร้างจะมีค่าแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมของพื้นที่ต่างๆ ในการคำนวณอายุการใช้งานในการทดลองนี้ ค่าสัมประสิทธิ์ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต ( $C_s$ ) ที่ใช้ในการคำนวณนั้นจะใช้ค่าตามมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง ดังนี้

$C_s$  ติดกับทะเลมีค่าเท่ากับร้อยละ 10.92 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

$C_s$  ห่างจากทะเล 500 เมตรมีค่าเท่ากับร้อยละ 0.52 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

$$D_a = D_k + \left(\frac{w}{l}\right) \cdot \left(\frac{w}{w_a}\right)^2 \cdot D_0 \quad 5.4$$

$$D_k = D_{k,c} \times \alpha_{fa} \quad 5.5$$

$$D_{k,c} = (w/b)^{3.5} \times 10 \times \left(\frac{1}{t}\right)^{0.40} \quad 5.6$$

โดยที่	$w/b$	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน
	$t$	อายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซมของโครงสร้างคอนกรีตที่ต้องการ (ปี)
	$D_{k,c}$	สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ไม่แตกร้าว และใช้ปูนซีเมนต์ล้วน
	$D_0$	ค่าปรับแก้สำหรับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีตแตกร้าว ในที่นี้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 200 ซม <sup>2</sup> /ปี
	$\alpha_{fa}$	สัมประสิทธิ์ผลของการใช้เกลือ

\*\* ในการคำนวณอายุการใช้งานในงานวิจัยนี้ไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบของรอยแตกร้าว

## 5.2 อายุการใช้งานหลังการเกิดสนิม

อายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กหลังการเกิดสนิมนั้นน่าจะพิจารณาผลกระทบของโครงสร้างอย่างละเอียด เช่น พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมลดลง การรับน้ำหนักของโครงสร้างยังสามารถใช้งานได้ต่อหรือไม่ โครงสร้างเสียรูปไปจากเดิมหรือไม่ เป็นต้น ในการทดลองนี้จะกล่าวถึงอายุการใช้งานเนื่องจากพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมลดลงเท่านั้น การคำนวณอายุการใช้งานจะสมมติพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมที่มีความเสี่ยงที่สามารถทำให้โครงสร้างเสียหายได้ ดังนั้นสามารถคำนวณอายุการใช้งานหลังการเกิดสนิมได้จากสมการดังนี้



อัตราการเกิดสนิมโดยยอมให้พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมลดลงได้ไม่เกินร้อยละ 10 สามารถคำนวณอายุการใช้งานหลังการเกิดสนิม ได้จากสมการที่ 5.7

$$1 \text{ mA/cm}^2 = (3.28 \text{ M/nd}) \text{ mm/year} \quad 5.7$$

โดยที่ M Atomic mass (Steel=55.85 g, Zinc=65.38 g)  
 n Number of Electrons Freed (Steel=Zinc=2)  
 d Density (Steel=7.88 g/cm<sup>3</sup>, Zinc=7.14 g/cm<sup>3</sup>)

(Ref. <http://www.corrosion-doctors.org/Principles/Conversion.htm>)

อายุการใช้งานที่คำนวณได้จากค่าคลอไรด์วิกฤติในการทดลองนี้สามารถสรุปอายุการใช้งานทั้งหมดได้ ดังแสดงในตารางที่ 5.1 ถึง ตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.1 อายุการใช้งานของเหล็ก 3 ชนิด อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35

Mix. ID	ชนิดเหล็ก	ติดทะเล Initial Time (t <sub>1</sub> ) (years)	ห่างทะเล 500 m. Initial Time (t <sub>1</sub> ) (years)	Corrosion Rate (mm/year)	t <sub>2</sub> <sup>*</sup> (years)	Total Time	
						ติดทะเล (years)	ห่างทะเล 500 m (years)
M1-C1	Carbon Steel	6.16	112.42	0.009	34.15	40.32	146.57
M1-C4	Carbon Steel	7.09	218.95	0.015	20.86	27.94	239.81
M1-CZ1	Galvanized Steel	4.01	26.52	0.000	1574.70	1578.72	1601.22
M1-CZ3	Galvanized Steel	3.74	22.07	0.000	426.27	430.01	448.33
M1-CP1	Zinc Paint Steel	2.22	7.08	0.001	143.76	145.99	150.84
M1-CP3	Zinc Paint Steel	3.74	22.07	0.002	65.92	69.66	87.99

\*(t<sub>1</sub>) อายุการใช้งานก่อนการเกิดสนิม

\*(t<sub>2</sub>) อายุการใช้งานหลังการเกิดสนิม

ตารางที่ 5.2 อายุการใช้งานของเหล็ก 3 ชนิด อัตราส่วนน้ำต่วัสดุประสาน 0.45

Mix. ID	ชนิดเหล็ก	ติดทะเล Initial Time ( $t_1$ ) <sup>*</sup> (years)	ห่างทะเล 500 m. Initial Time ( $t_1$ ) <sup>*</sup> (years)	Corrosion Rate (mm/year)	$t_2$ <sup>*</sup> (years)	Total Time	
						ติดทะเล (years)	ห่างทะเล 500 m (years)
M2-C1	Carbon Steel	3.09	ไม่มีผล	0.023	13.20	16.30	ไม่มีผล
M2-C3	Carbon Steel	1.88	119.36	0.011	28.38	30.26	147.74
M2-C5	Carbon Steel	1.33	19.90	0.005	64.79	66.12	84.69
M2-CZ1	Galvanized Steel	2.08	272.86	0.018	21.87	23.94	294.73
M2-CZ3	Galvanized Steel	1.96	163.48	0.009	45.35	47.30	208.83
M2-CZ5	Galvanized Steel	1.80	88.59	0.029	70.12	71.92	158.71
M2-CP1	Zinc Paint Steel	1.68	57.96	0.042	15.14	16.81	73.10
M2-CP3	Zinc Paint Steel	1.88	119.36	0.035	30.66	32.54	150.02
M2-CP5	Zinc Paint Steel	1.80	88.59	0.023	68.32	70.12	156.91

\*( $t_1$ ) อายุการใช้งานก่อนการเกิดสนิม

\*( $t_2$ ) อายุการใช้งานหลังการเกิดสนิม

ตารางที่ 5.3 อายุการใช้งานของเหล็ก 3 ชนิด อัตราส่วนน้ำต่วัสดุประสาน 0.55

Mix. ID	ชนิดเหล็ก	ติดทะเล Initial Time ( $t_1$ ) <sup>*</sup> (years)	ห่างทะเล 500 m. Initial Time ( $t_1$ ) <sup>*</sup> (years)	Corrosion Rate (mm/year)	$t_2$ <sup>*</sup> (years)	Total Time	
						ติดทะเล (years)	ห่างทะเล 500 m (years)
M3-C2	Carbon Steel	0.80	3057.66	0.026	11.78	12.58	3069.44
M3-C3	Carbon Steel	0.80	3057.66	0.017	18.59	19.39	3076.25
M3-CZ1	Galvanized Steel	0.75	674.64	0.047	15.57	16.32	690.21
M3-CZ3	Galvanized Steel	0.76	930.34	0.074	20.56	21.32	950.90
M3-CP1	Zinc Paint Steel	0.98	ไม่มีผล	0.049	13.26	14.24	ไม่มีผล
M3-CP3	Zinc Paint Steel	0.74	502.31	0.025	21.60	22.34	523.91

\*( $t_1$ ) อายุการใช้งานก่อนการเกิดสนิม

\*( $t_2$ ) อายุการใช้งานหลังการเกิดสนิม

ตารางที่ 5.4 อายุการใช้งานของเหล็ก 3 ชนิด แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10

Mix. ID	ชนิดเหล็ก	ติดทะเล	ห่างทะเล 500 m.	Corrosion Rate	$t_2^*$	Total Time	
		Initial Time ( $t_1$ ) <sup>*</sup>	Initial Time ( $t_1$ ) <sup>*</sup>			ติดทะเล	ห่างทะเล 500 m
		(years)	(years)	(mm/year)	(years)	(years)	(years)
M4-C1	Carbon Steel	2.72	305.68	0.014	22.02	24.75	327.70
M4-C3	Carbon Steel	2.88	531.86	0.019	16.06	18.94	547.91
M4-C5	Carbon Steel	1.96	39.61	0.010	31.00	32.96	70.61
M4-CZ1	Galvanized Steel	2.13	59.04	0.030	27.06	29.19	86.10
M4-CZ3	Galvanized Steel	1.66	20.30	0.024	22.65	24.31	42.95
M4-CZ5	Galvanized Steel	2.24	77.50	0.021	37.55	39.79	115.05
M4-CP1	Zinc Paint Steel	1.24	8.19	0.012	28.92	30.15	37.10
M4-CP3	Zinc Paint Steel	1.46	13.25	0.015	21.95	23.41	35.20
M4-CP5	Zinc Paint Steel	1.46	13.25	0.023	35.85	37.31	49.10

\*( $t_1$ ) อายุการใช้งานก่อนการเกิดสนิม

\*( $t_2$ ) อายุการใช้งานหลังการเกิดสนิม

ตารางที่ 5.5 อายุการใช้งานของเหล็ก 3 ชนิด แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20

Mix. ID	ชนิดเหล็ก	ติดทะเล	ห่างทะเล 500 m.	Corrosion Rate	$t_2^*$	Total Time	
		Initial Time ( $t_1$ ) <sup>*</sup>	Initial Time ( $t_1$ ) <sup>*</sup>			ติดทะเล	ห่างทะเล 500 m
		(years)	(years)	(mm/year)	(years)	(years)	(years)
M5-C2	Carbon Steel	3.81	703.87	0.004	70.45	74.27	774.33
M5-C4	Carbon Steel	2.28	30.79	0.007	43.99	46.27	74.78
M5-C6	Carbon Steel	2.28	30.79	0.006	51.67	53.94	82.46
M5-CZ2	Galvanized Steel	1.93	17.54	0.009	90.94	92.88	108.48
M5-CZ4	Galvanized Steel	2.20	26.87	0.009	59.28	61.48	86.15
M5-CZ5	Galvanized Steel	2.60	52.42	0.010	66.73	69.33	119.15
M5-CP2	Zinc Paint Steel	1.41	7.35	0.003	96.63	98.04	103.98
M5-CP4	Zinc Paint Steel	1.64	10.83	0.005	55.49	57.13	66.32
M5-CP6	Zinc Paint Steel	1.64	10.83	0.010	60.94	62.58	71.77

ตารางที่ 5.6 อายุการใช้งานของเหล็ก 3 ชนิด แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30

Mix. ID	ชนิดเหล็ก	ติดทะเล	ห่างทะเล 500 m.	Corrosion Rate (mm/year)	$t_2^*$ (years)	Total Time	
		Initial Time ( $t_1^*$ ) (years)	Initial Time ( $t_1^*$ ) (years)			ติดทะเล (years)	ห่างทะเล 500 m (years)
M6-C1	Carbon Steel	2.31	18.88	0.001	347.40	349.71	366.28
M6-C4	Carbon Steel	3.44	85.67	0.003	89.55	93.00	175.22
M6-C6	Carbon Steel	2.05	13.58	0.002	199.50	201.55	213.08
M6-CZ2	Galvanized Steel	1.14	3.62	0.004	374.58	375.72	378.21
M6-CZ4	Galvanized Steel	2.75	33.68	0.006	108.18	110.93	141.86
M6-CZ6	Galvanized Steel	2.18	16.09	0.001	306.01	308.19	322.10
M6-CP2	Zinc Paint Steel	3.16	57.57	0.001	457.10	460.26	514.67
M6-CP4	Zinc Paint Steel	1.92	11.30	0.004	112.64	114.56	123.94
M6-CP6	Zinc Paint Steel	3.35	75.00	0.001	435.62	438.97	510.62

\*( $t_1$ ) อายุการใช้งานก่อนการเกิดสนิม

\*( $t_2$ ) อายุการใช้งานหลังการเกิดสนิม

## บทที่ 6

### สรุปผลงานวิจัย

#### 6.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาค่าคลอไรด์วิกฤติที่ก่อให้เกิดสนิมและอัตราการเกิดสนิมในเหล็กเสริมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยคำนึงถึงผลของชนิดของเหล็กเสริมที่ไม่มีการเคลือบผิว และมีการเคลือบผิวด้วยสังกะสี อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และชนิดของวัสดุประสาน ผลการวิจัยดังกล่าวสามารถนำไปออกแบบและคำนวณอายุการใช้งานเบื้องต้นได้ ดังนั้นจากผลการวิจัยสามารถสรุปให้สอดคล้องตามวัตถุประสงค์ดังนี้

1. เหล็กเสริมที่เคลือบผิวด้วยการจุ่มร้อนด้วยสังกะสี (Galvanized Steel) หรือการทาเคลือบผิวด้วยสังกะสีเหลว (Zinc Paint Steel) จะมีค่าคลอไรด์วิกฤติต่ำกว่าเหล็กเสริมที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว
2. คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มีค่ามากขึ้นจะมีค่าคลอไรด์วิกฤติสูงขึ้น แต่จะเกิดสนิมเร็วกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มีค่าน้อย
3. การแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้นเกินกว่าร้อยละ 20 จะทำให้ค่าคลอไรด์วิกฤติมีค่าลดลง
4. อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และชนิดของวัสดุประสานไม่มีผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และค่ากระแสการกัดกร่อนของ Carbon Steel, Galvanized Steel และ Zinc Paint Steel ในช่วงก่อนการเกิดสนิม แต่ค่ากระแสการกัดกร่อนและค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์จะมีการเปลี่ยนแปลงทันทีเมื่อเหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิม ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของเหล็กแต่ละชนิดเมื่อเหล็กเริ่มเกิดสนิมจะมีค่าที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่ใช้พิจารณาโอกาสการเกิดสนิมของเหล็กแต่ละชนิด

โอกาสการเกิดสนิม	ASTM C876	Carbon Steel	Galvanized Steel	Zinc Paint Steel
90% ไม่เกิดสนิม	ติดลบน้อยกว่า -250 mV.	ติดลบน้อยกว่า -82 mV.	ติดลบน้อยกว่า -255 mV.	ติดลบน้อยกว่า -240 mV.
ไม่แน่นอน	-250 mV. ถึง -350 mV.	-82 mV. ถึง -400 mV.	-255 mV. ถึง -655 mV.	-240 mV. ถึง -480 mV.
90% เริ่มเกิดสนิม	ติดลบมากกว่า -350 mV.	ติดลบมากกว่า -400 mV.	ติดลบมากกว่า -655 mV.	ติดลบมากกว่า -480 mV.

5. ในการพิจารณาเลือกชนิดของเหล็กเสริมให้คำนึงถึงความรุนแรงของสภาพแวดล้อม ความทนทานของคอนกรีตและอายุการใช้งานที่คำนวณจากค่าคลอไรด์วิกฤติ โดยหากเป็น โครงสร้างที่ติดทะเลและต้องการอายุการใช้งานมากกว่า 50 ปี มีความเหมาะสมที่จะใช้เหล็กเสริม ที่เคลือบผิวด้วยสังกะสี ซึ่งมีอายุการใช้งานที่นานกว่าเหล็กเสริมธรรมดา และลดปัญหาการ ซ่อมแซมบ่อยครั้ง ส่วนโครงสร้างที่ห่างจากทะเล 500 เมตร สามารถใช้เหล็กเสริมธรรมดาได้โดย ไม่ต้องมีการเคลือบผิว เนื่องจากมีอายุการใช้งานที่เพียงพอเมื่อเทียบกับเหล็กเสริมที่มีการเคลือบ ผิวด้วยสังกะสี

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ศึกษาค่าคลอไรด์วิกฤติของเหล็กเสริมที่มีการเคลือบผิวด้วยการจุ่มร้อนด้วย สังกะสีและการทาเคลือบผิวด้วยสังกะสีเหลวเปรียบเทียบกับเหล็กเสริมที่ไม่มีการเคลือบผิวใน ห้องปฏิบัติการเบื้องต้นเท่านั้น ผู้วิจัยจึงขอเสนอปัจจัยที่ควรศึกษาเพิ่มเติมดังนี้

1. ศึกษาปริมาณคลอไรด์วิกฤติของเหล็กเสริมธรรมดา เหล็กเสริมที่มีการเคลือบผิวด้วย การจุ่มร้อนด้วยสังกะสีและการทาเคลือบผิวด้วยสังกะสีเหลว ในสภาวะแวดล้อมจริง
2. ศึกษาปริมาณคลอไรด์อิสระ และปริมาณไฮดรอกซิลอิออนต่อการเกิดสนิมของเหล็ก เสริม

## รายการอ้างอิง

- [1] มยผ. 1332, มาตรฐานงานคอนกรีตเมื่อพิจารณาความคงทนและอายุการใช้งาน, กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย 2550.
- [2] G.K. Glass, and N.R. Buenfeld, The presentation of the chloride threshold level for corrosion of steel in concrete, Corrosion Science, 39 (1997): 1001-1013.
- [3] ปภาณันท์ ปารมภ์, วันศิริ วรรณวิจิตร. การศึกษาประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2552.
- [4] ความคงทนของคอนกรีต, คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ 2000.
- [5] Ki Yong Ann and Ha-Won Song. Chloride Threshold Level for Corrosion of Steel in Concrete. Corrosion Science, 49 (2007): 4113-4133.
- [6] Michael Thomas. Chloride Threshold in Marine Concrete. Cement and Concrete Research, 26, 4, (1996): 513-519.
- [7] Alonso C., Andrade C., Castellote M. and Castro P. Chloride Threshold Values to Depassivate Reinforcing Bars Embedded in a Standardized OPC Motar. Cement and Concrete Research, 30 (2000): 1047-1055.
- [8] B.H. Oh, S.Y. Jang, Y.S. Shin, Experimental Investigation of the Threshold Chloride Concentration for Corrosion Initiation in Reinforced Concrete Structure, Magazine of Concrete Research, 55 (1982): 21-28.
- [9] Arya C. and Xu Y. Effect of Cement Type on Chloride Binding and Corrosion of Steel in Concrete. Cement and Concrete Research, 25, 4 (1994): 893-902.
- [10] Gowripalan N. and Mohamed H.M. Chloride-Ion Induced Corrosion of Galvanized and Ordinary Steel Reinforcement in High-Performance Concrete. Cement and Concrete Research, 28, 8 (1998): 1119-1131.

- [11] Hussain S.E., Rasheeduzzafar, Al-Musallam A. and Al-Gahtani A.S. Factors Affecting Threshold Chloride for Reinforcement Corrosion in Concrete. Cement and Concrete Research, 25, 7 (1995): 1543-1555.
- [12] ASTM C876 Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete American Society for Testing and Material, 2009.
- [13] ASTM G109 Standard Test Method for Determining the Effects of Chemical Admixtures on the Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments American Society for Testing and Material, 2009.
- [14] ASTM C1152 Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete American Society for Testing and Material, 2009.
- [15] ASTM C1218 Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete American Society for Testing and Material, 2009.
- [16] ชัยเฉลิม ราศรี. ปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่ผสมวัสดุประสานสามชนิด, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6, 2010.
- [17] ชัยเฉลิม ราศรี. ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่ผสมผงหินปูน, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15, 2010.
- [18] วสุ วิทย์เขตปภา. ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15, 2010.



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพัฒน์พงษ์ วงษ์เสียงดั่ง เกิดวันที่ 19 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2528 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนประจักษ์ศิลปาคาร จังหวัดอุดรธานี และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณนบุรี ในปีการศึกษา 2550 และเข้ารับการศึกษต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2552 จบฉบับปัจจุบัน