

การประเมินการกีดกร่อนของเหล็กกล้าในคอนกรีตเสริมแรงในน้ำเค็ม

นางสาวดาปณีย์ พังกิ่ง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2566

CORROSION ASSESSMENT OF STEEL IN REINFORCED CONCRETE
IN BRINE WATER



DAPANEE PHANGKING

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Materials Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2023

การประเมินการคัดกรองของเหล็กล้ำในคอนกรีตเสริมแรงในน้ำเค็ม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ศาสตราจารย์ ดร.สมฤกษ์ จันทรอัมพร)

ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.พรวิสา วงศ์ปัญญา)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สงบ คำค้อ)

กรรมการ

(อาจารย์ ดร.เชษฐา ชุมกระโทก)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ

(รองศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ดาปณีย์ ผั่งกิ่ง : การประเมินการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในคอนกรีตเสริมแรงในน้ำเค็ม
(CORROSION ASSESSMENT OF STEEL IN REINFORCED CONCRETE IN BRINE
WATER)

อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.พรวิสา วงศ์ปัญญา, 70 หน้า

คำสำคัญ: การทดสอบการกัดกร่อน/คอนกรีตเสริมแรง/เหล็กกล้าในคอนกรีตเสริมแรง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในคอนกรีตเสริมแรงและประเมินอายุการใช้งานของคอนกรีตเสริมแรงที่ถูกแช่ในน้ำเค็มจำลองจากสภาพความเค็มของแหล่งน้ำตามธรรมชาติในเขตอำเภอโนนไทย จังหวัดนครราชสีมา ประเทศไทย ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีปริมาณคลอไรด์ในน้ำสูงมาก จึงถือว่าเป็นบริเวณที่มีความเสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพของคอนกรีตเสริมแรง การทดสอบเพื่อประเมินการกัดกร่อนและอายุการใช้งานของคอนกรีตเสริมแรงจะใช้เทคนิคศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-Cell Potential), โพเทนชิโอสแตติกลิเนียร์โพลาริเซชัน (Potentiostatic Linear Polarization) และอีเล็กโตรเคมีคอลอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปี (Electrochemical Impedance Spectroscopy) โดยประเมินผลเป็นอัตราการกัดกร่อนหน่วยมิลลิเมตรต่อปี และความต้านทานการกัดกร่อน นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์พื้นผิวของเหล็กกล้าฝังภายในด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) และเอ็กซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโตรสโกปี (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS) รวมถึงวิเคราะห์ปริมาณไอออนของเหล็กและไอออนขององค์ประกอบสารน้ำในน้ำเค็มจำลองทั้งก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโมเลกุลาร์แอบซอร์ฟชันสเปกโตรโฟโตเมตรี (Molecular Absorption Spectrophotometry) และไอออนโครมาโทกราฟี Ion Chromatography (IC) ตามลำดับ จากผลการทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กกล้าที่ฝังในคอนกรีต พบว่าเหล็กกล้าที่ฝังในคอนกรีตซึ่งแช่ในน้ำเค็มที่มีคลอไรด์ไอออน (Cl^-) สูงเป็นระยะเวลานาน มีอัตราการกัดกร่อนมากกว่ากรณีที่ถูกแช่ในน้ำเค็มที่มี Cl^- ต่ำ และผลน้ำเค็มจำลองหลังทดสอบการกัดกร่อนยังพบว่าปริมาณคลอไรด์ไอออนและไอออนอื่น ๆ มีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากไอออนบางส่วนแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตและทำปฏิกิริยากับเหล็กกล้าที่ฝังในคอนกรีต จึงสรุปได้ว่า โครงสร้างทางวิศวกรรมที่เป็นคอนกรีตเสริมแรงด้วยเหล็กมีความเสี่ยงสูงต่อการเสื่อมสภาพและพังทลายจากการอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีปริมาณคลอไรด์ไอออนสูงเป็นเวลานาน

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ

ปีการศึกษา 2566

ลายมือชื่อนักศึกษา...ดาปณีย์ ผั่งกิ่ง

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา...พรวิสา

DAPANEE PHANGKING : CORROSION ASSESSMENT OF STEEL IN REINFORCED
CONCRETE IN BRINE WATER.

THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. PORNWASA WONGPANYA, Dr.-ing, 70 PP.

Keywords: Corrosion testing/Reinforced concrete/Steel in reinforced concrete

The objective of this research is to assess the corrosion of steel in reinforced concrete and to estimate the service life of reinforced concrete immersed in synthetic brine water that simulated the salinity of natural water in Non-Thai District, Nakhon Ratchasima Province, Thailand. Non-Thai is an area in which a very high chloride content in the water is exist; therefore, the risk of deterioration of reinforced concrete is possible. Half-Cell Potential, Potentiostatic Linear Polarization, and Electrochemical Impedance Spectroscopy are performed to evaluate the corrosion and service life of reinforced concrete. The corrosion rate in millimeters per year and corrosion resistance are taken into account for corrosion assessment. In addition, the surface of the embedded steel is analyzed using Scanning Electron Microscope (SEM) and X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS), including the iron ion content and other ion components in the synthetic brine water before and after the corrosion test analyzed by using the Molecular Absorption Spectrophotometry and Ion Chromatography (IC) techniques, respectively. According to the corrosion results, steel embedded in concrete immersed in synthetic brine water with a high chloride ion content for a long time had a higher corrosion rate than in a low chloride ion content immersion case. The corrosion results were consistent with the results of the synthetic brine water analysis after the corrosion test, the amount of chloride ions and other ions were found and tended to decrease because some of the ions penetrated the concrete and reacted with the steel embedded in the concrete. In conclusion, steel-reinforced

concrete engineering structures are at high risk of deterioration and collapse from being in environments with high chloride ion content for long periods.



School of Metallurgical Engineering
Academic Year 2023

Student's Signature ดาปริญญ์ พงษ์ภักดิ์
Advisor's Signature พร

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องด้วยได้รับความอนุเคราะห์ ความเมตตา ความรู้คำปรึกษาโดยละเอียด และกำลังใจตลอดการเรียนในหลักสูตรมหาบัณฑิตจาก รองศาสตราจารย์ ดร.พรวิสา วงศ์ปัญญา ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ คำแนะนำ การสนับสนุนและประสบการณ์ต่าง ๆ ของท่านมีประโยชน์ต่อการแก้ไข และจัดการปัญหาเป็นอย่างมาก หากไม่มีความเมตตาและกรุณาของท่าน การศึกษาและการทำวิทยานิพนธ์ในระดับมหาบัณฑิตศึกษา ในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีมีอาจสำเร็จได้ด้วยดี จึงต้องขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พรวิสา วงศ์ปัญญา เป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งที่ ศาสตราจารย์ ดร.สมฤกษ์ จันทอัมพร อาจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและเทคโนโลยีการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าพระนครเหนือ ให้เกียรติเป็นประธานกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิในการสอบวิทยานิพนธ์ ครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เดช เผือกภูมิ และ อาจารย์ ดร.เชษฐา ชุมกระโทก อาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความรู้และความช่วยเหลือในการดำเนินการสำรวจพื้นที่ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย และ ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สงบ คำค้อ ที่ใช้เกียรติเป็นกรรมการในการสอบป้องกัน วิทยานิพนธ์ ซึ่งมีประโยชน์เป็นอย่างยิ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

นอกจากนี้ ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (อาคาร เครื่องมือ 6 10 และ 11) สำหรับการให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ ตลอดการวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและสำนักงานคณะกรรมการวิจัย แห่งชาติ ผู้ซึ่งให้โอกาสทางการศึกษาและทุนสนับสนุนในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้

คุณค่า คุณงามความดี และประโยชน์อันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอน้อมบูชา คุณ บิดามารดา และคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ และความเมตตาแก่ผู้วิจัย มาโดยตลอด อันเป็นกำลังใจสำคัญที่ทำให้การทำวิจัยครั้งนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

ดาปณีย์ ผังกิ่ง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	9
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	9
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	11
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12
2.1 น้ำบาดาลธรรมชาติ (Groundwater).....	12
2.2 เหล็กเส้นที่ใช้ในงานคอนกรีตเสริมแรง.....	13
2.3 คอนกรีต.....	13
2.4 การกัดกร่อนของเหล็กกล้าในคอนกรีตเสริมแรง.....	16
2.5 การทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กในคอนกรีตเสริมแรง.....	18
2.6 การตรวจสอบหลังทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในคอนกรีตเสริมแรง.....	25
2.7 การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	30
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	34
3.1 เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	34
3.2 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย.....	35
3.3 การเตรียมผิวชิ้นงานเหล็กข้ออ้อย.....	37
3.4 การเตรียมชิ้นงานคอนกรีตเสริมแรง.....	37

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5 การเตรียมน้ำเค็มจำลอง.....	39
3.6 ทดสอบการกัดกร่อนของคอนกรีตเสริมแรง.....	41
3.7 การตรวจสอบพื้นผิวหลังการกัดกร่อน.....	42
3.8 การตรวจสอบสารละลายก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อน.....	43
4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	44
4.1 ผลการทดสอบการกัดกร่อน.....	44
4.2 ผลการวิเคราะห์พื้นผิวหลังทดสอบการกัดกร่อน.....	50
4.3 ผลการวิเคราะห์ไอออนในน้ำเค็มจำลอง.....	57
4.4 การประเมินอายุการใช้งานของคอนกรีต.....	57
5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	59
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	59
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	60
รายการอ้างอิง.....	61
ภาคผนวก ก รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	67
ประวัติผู้เขียน.....	70

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	สมบัติทางกลของเหล็กข้ออ้อย (Deformed Bar).....15
2.2	สมบัติทางกลของเหล็กเส้นกลม (Round Bar).....16
2.3	ชนิดของงานก่อสร้างและขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหายาบ.....16
2.4	ความน่าจะเป็นของการเกิดการกัดกร่อน (สนิม) ด้วย Half-Cell Potential.....19
2.5	ส่วนผสมทางเคมีของน้ำบาดาลจำลอง33
3.1	ส่วนผสมที่ใช้ในการหล่อคอนกรีตเสริมแรงต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร (m ³)38
3.2	แสดงปริมาณไอออนลบและบวกที่พบในตัวอย่างน้ำบาดาลตามแหล่งน้ำธรรมชาติใน อำเภอโนนไทย จังหวัดนครราชสีมา ประเทศไทย.....40
3.3	ส่วนผสมทางเคมีของน้ำเค็มจำลองต่อน้ำปราศจากไอออน 1 ลิตร.....41
4.1	ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และความน่าจะเป็นในการเกิดการกัดกร่อนของเหล็กกล้าที่ผ่าน การแช่ในน้ำเค็มที่ระยะเวลา 1-16 สัปดาห์จากการวัดด้วยเทคนิค Half-Cell Potential...45
4.2	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิค Linear Polarization ของเหล็กกล้าที่ฝังในคอนกรีตเสริมแรง.....51
4.3	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าสมมูลจากการทดสอบการ กัดกร่อนด้วยเทคนิค EIS ของชิ้นงานคอนกรีตเสริมแรง.....52
4.4	ปริมาณไอออนต่าง ๆ ในน้ำเค็มจำลองก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อน.....58
4.5	การเปรียบเทียบอายุการใช้งานของคอนกรีตเสริมแรงระหว่างขนาดทดลองกับขนาดจริง...58

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 สภาพหลังเกิดการถล่มลงของอาคารแชมเพลนทาวเวอร์ส์ใต้ (Champlain Towers South) ไมอามี-เดด เมืองเซิร์ฟไซด์ รัฐฟลอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกา.....	2
1.2 การขยายตัวของเหล็กเส้นเสริมแรงที่ฝังอยู่ในคอนกรีต.....	2
1.3 แผนที่การแพร่กระจายดินเค็มภาคตะวันออกเฉียงเหนือโดยพิจารณาจากคราบเกลือ.....	4
1.4 แผนที่การกระจายของคราบเกลือในจังหวัดนครราชสีมา.....	5
1.5 แผนที่แสดงปริมาณคลอไรด์ในแหล่งน้ำบาดาลของจังหวัดนครราชสีมา.....	6
1.6 แผนที่แสดงปริมาณเหล็กในแหล่งน้ำบาดาลของจังหวัดนครราชสีมา.....	7
1.7 ความเสียหายของพื้นสะพานที่เกิดจากการกัดกร่อนของน้ำบาดาลเค็ม ณ ฝ่ายห้วยท่าแค-ห้วยกองแก้ว บ้านสันเทียะ ต.โนนไทย อ.โนนไทย จ.นครราชสีมา (สำรวจวันที่ 12 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2565).....	8
2.1 แสดงหลักการเกิดการกัดกร่อนของเหล็กกล้าภายในคอนกรีตเสริมแรง.....	17
2.2 ปริมาตรของเหล็กและปริมาตรของผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนของเหล็กชนิดต่าง ๆ.....	17
2.3 กลไกการกัดกร่อนของเหล็กกล้าที่เกิดจากคลอไรด์ไอออนในคอนกรีต.....	18
2.4 วิธีวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคอนกรีตเสริมแรงด้วยเทคนิค Half-Cell Potential ตามมาตรฐาน ASTM C876-15.....	19
2.5 การทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิค Potentiostatic Linear Polarization.....	21
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (เส้นโค้งโพลาไรเซชันสำหรับการกัดกร่อน)	21
2.7 เส้นโค้งโพลาไรเซชันสำหรับการกัดกร่อนที่เกิดแพสซีฟฟิล์ม	22
2.8 กราฟโนควิสต์พล็อตแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ส่วนจริงและค่าอิมพีแดนซ์ส่วนจินตภาพ.....	24
2.9 ตัวอย่างโนควิสต์พล็อตของวงจรไฟฟ้าเทียบเท่า.....	24
2.10 เครื่องมือสำหรับเทคนิค Ion Chromatography (IC).....	26
2.11 เครื่อง Spectrophotometer.....	27
2.12 ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	28

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.13	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM).....28
2.14	หลักการทำงานของ XPS.....30
3.1	แผนภาพแสดงรายละเอียดระเบียบวิธีการวิจัย.....36
3.2	แบบหล่อคอนกรีตเสริมแรงขนาด 112 x 112 x 165 มิลลิเมตร38
3.3	ภาพตัดขวางจำลองของชิ้นงานคอนกรีตเสริมแรงที่ใช้ในการทดสอบด้วยเทคนิค Half-Cell Potential (ก) และเทคนิค LP และ EIS (ข).....39
3.4	แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบปริมาณไอออนต่าง ๆ ในตัวอย่างน้ำบาดาลตามแหล่งน้ำธรรมชาติ ในอำเภอโนนไทย จังหวัดนครราชสีมา ประเทศไทย.....41
4.1	ตัวอย่างเส้นโค้งโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าที่ฝังในคอนกรีตหลังจุ่มแช่ในน้ำเค็มจำลองที่ระยะเวลา 1 8 และ 16 สัปดาห์ ที่มีความเข้มข้นของ Cl^- ต่างกัน.....48
4.2	(ก) กราฟพैनควิสซ์ของเหล็กกล้าที่ฝังในคอนกรีตหลังจุ่มแช่ในน้ำเค็มจำลองที่ระยะเวลา และความเข้มข้นของ Cl^- ต่างกัน (ข) วงจรไฟฟ้าฟ้าสมมูล.....48
4.3	กราฟแสดงอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าที่ฝังในคอนกรีตเสริมแรงหลังผ่านการทดสอบ แบบจุ่มแช่เป็นเวลา 1 2 4 8 12 และ 16 สัปดาห์ในน้ำเค็มจำลองที่มีความเข้มข้นของ คลอไรด์ไอออนแตกต่างกัน.....49
4.4	กราฟแสดงอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าที่ฝังในคอนกรีตเสริมแรงเทียบกับน้ำเค็ม จำลองที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนแตกต่างกัน.....49
4.5	ภาพถ่ายพื้นผิวของเหล็กกล้าฝังในและผลวิเคราะห์ธาตุหลังผ่านการทดสอบการกัดกร่อน ในน้ำเค็มจำลอง (ก) Low Cl^- (ข) Medium Cl^- (ค) High Cl^- เป็นระยะเวลา 16 สัปดาห์....55
4.6	สเปกตรัม EIS แบบละเอียดจากการวิเคราะห์พื้นผิวของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตเสริมแรงที่ผ่านการทดสอบการกัดกร่อนด้วยน้ำเค็มจำลองที่ความเข้มข้นต่างกันเป็นระยะเวลา 16 สัปดาห์...56

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

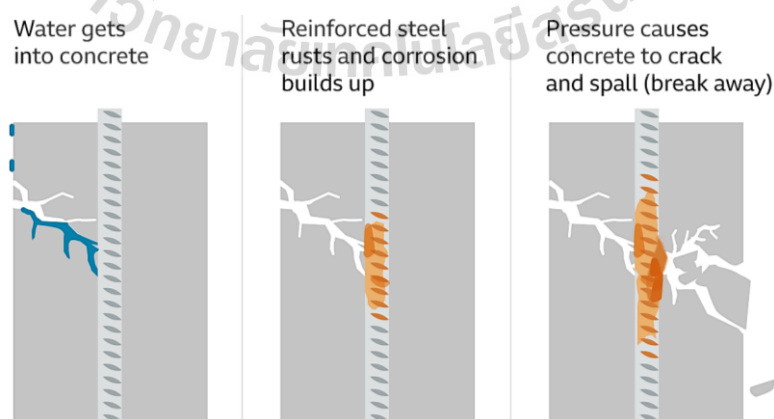
สิ่งปลูกสร้างที่เป็นคอนกรีตเสริมแรง เช่น อาคารขนาดใหญ่ สะพาน เสา ตอม่อสะพาน เป็นต้น สิ่งปลูกสร้างเหล่านี้จำเป็นต้องมีโครงสร้างที่เป็นคอนกรีตเสริมแรง เนื่องจากต้องการความแข็งแรงทนทานเพื่อให้รับแรงทางกลหรือน้ำหนักได้มากขึ้น และอายุการใช้งานที่ยาวนาน อย่างไรก็ตาม สิ่งปลูกสร้างเหล่านี้หากอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อนทำให้เกิดการเสื่อมสภาพโดยการเสื่อมสภาพเริ่มเกิดจากเนื้อในที่เปราะบางเส้นเสริมแรงที่ถูกฝังอยู่ในคอนกรีต เมื่ออยู่ในสิ่งแวดล้อมที่กระตุ้นให้เกิดการกัดกร่อน เช่น มีความชื้นในดิน หรือโครงสร้างถูกฝังอยู่ในน้ำ ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าระหว่างเหล็ก น้ำ อากาศ และคลอไรด์ไอออนที่ปนเปื้อนอยู่ในบริเวณดังกล่าว ส่งผลให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมแรงถูกกัดกร่อนและเสื่อมสภาพ ตัวอย่างความเสียหายจากการกัดกร่อนแสดงในรูปที่ 1.1 แสดงสภาพหลังเกิดการถล่มของคอนโดมิเนียมแชมเพลนทาวเวอร์สใต้ (Champlain Towers South) ไมอามี-เบด เมืองเซิร์ฟไซด์ รัฐฟลอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกา เมื่อวันที่ 24 มิถุนายน พ.ศ. 2564 เวลา 01.30 น. ตามเวลาท้องถิ่น (12.30 น. ตามเวลาประเทศไทย) เกร็ก บาติสตา (วิศวกรโครงสร้าง) ได้กล่าวถึงความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมแรงของคอนโดมิเนียมนี้ว่า “เหล็กเส้นที่เสริมในคอนกรีตโดยพื้นฐานนั้นถ้าหากได้รับความชื้นทำให้เกิดสนิมและสนิมที่เกิดขึ้นสามารถขยายตัวได้ถึงเจ็ดเท่าของปริมาตรของเหล็กเส้น ส่งผลให้คอนกรีตที่ล้อมรอบเหล็กเส้นนั้นเกิดการแตกและเสื่อมสภาพ (ดังรูปที่ 1.2) อย่างมีนัยสำคัญ ในความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคาร เช่น คานหรือเสา ซึ่งเมื่อเกิดความเสียหายในคานหรือเสาเพียงหนึ่งส่วนก็จะส่งผลต่อโครงสร้างทั้งหมดจนเกิดการพังทลายที่เรียกว่า ปรากฏการณ์โดมิโน (Domino Effect)” (The Visual Journalism Team, 2021) จากข้อความดังกล่าวบ่งชี้ว่าโครงสร้างคอนกรีตเสริมแรงของคอนโดมิเนียมนี้ถูกกัดกร่อนเนื่องจากความชื้นของดินหรือทรายที่ฐานรากที่อยู่ใกล้ชายฝั่งทะเล ซึ่งมีคลอไรด์ไอออนปนเปื้อนเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้โครงสร้างของคอนโดมิเนียมนี้ถล่ม

เช่นเดียวกันกับการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมแรงที่เป็นอาคาร บ้านเรือน หรือสะพานในประเทศไทย การพังทลายหรือเสื่อมสภาพของชิ้นส่วนดังกล่าวมีการกัดกร่อนเป็นสาเหตุร่วม แม้ว่าในหลายจังหวัดของประเทศไทยจะไม่ได้มีภูมิประเทศติดกับทะเล หรือมีความชื้นในอากาศมากก็ตาม แต่ทว่าหลายจังหวัดในประเทศไทยมีปัญหาในเรื่องคุณสมบัติของดิน เช่น ดินเป็นกรด ดินเปรี้ยว ดินเค็มหรือปัญหาของน้ำใต้ดิน (น้ำบาดาลที่มีความเค็ม) ดังเช่น ในจังหวัดนครราชสีมา

จากการออกสำรวจของสำนักสำรวจและวางแผนการใช้ที่ดินได้รายงานถึงการกระจายตัวของดินเค็มบนบกในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งมีดินเค็มที่จำแนกโดยดูจากคราบเกลือเป็นหลักและมีเนื้อที่ 11,506,882 ไร่ กระจายอยู่ตามจังหวัดต่าง ๆ โดยดินเค็มมีสาเหตุจากการแพร่กระจายของน้ำบาดาลหรือน้ำใต้ดินที่มีความเค็ม (สำนักสำรวจและวางแผนการใช้ที่ดิน, 2549) ดังแสดงในรูปที่ 1.3 และ 1.4 เห็นชัดว่าในบริเวณจังหวัดนครราชสีมา มีพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากดินเค็ม และน้ำบาดาลเค็มอยู่มาก เนื่องจากน้ำบาดาลมีองค์ประกอบที่เป็นเกลือที่มีคลอไรด์ไอออนเจือปนจึงกระตุ้นให้เกิดการกัดกร่อนได้เป็นอย่างดี จากการสำรวจสภาพน้ำบาดาลโดยกรมทรัพยากรน้ำบาดาล (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2558) พบว่าสภาพน้ำบาดาลของหลายอำเภอในจังหวัดนครราชสีมา เช่น อำเภอโนนไทย



รูปที่ 1.1 สภาพหลังเกิดการถล่มลงของอาคารแชมเพลนทาวเวอร์สใต้ (Champlain Towers South ไมอามี-เดด เมืองเซิร์ฟไซด์ รัฐฟลอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกา (The Visual Journalism Team, 2021)



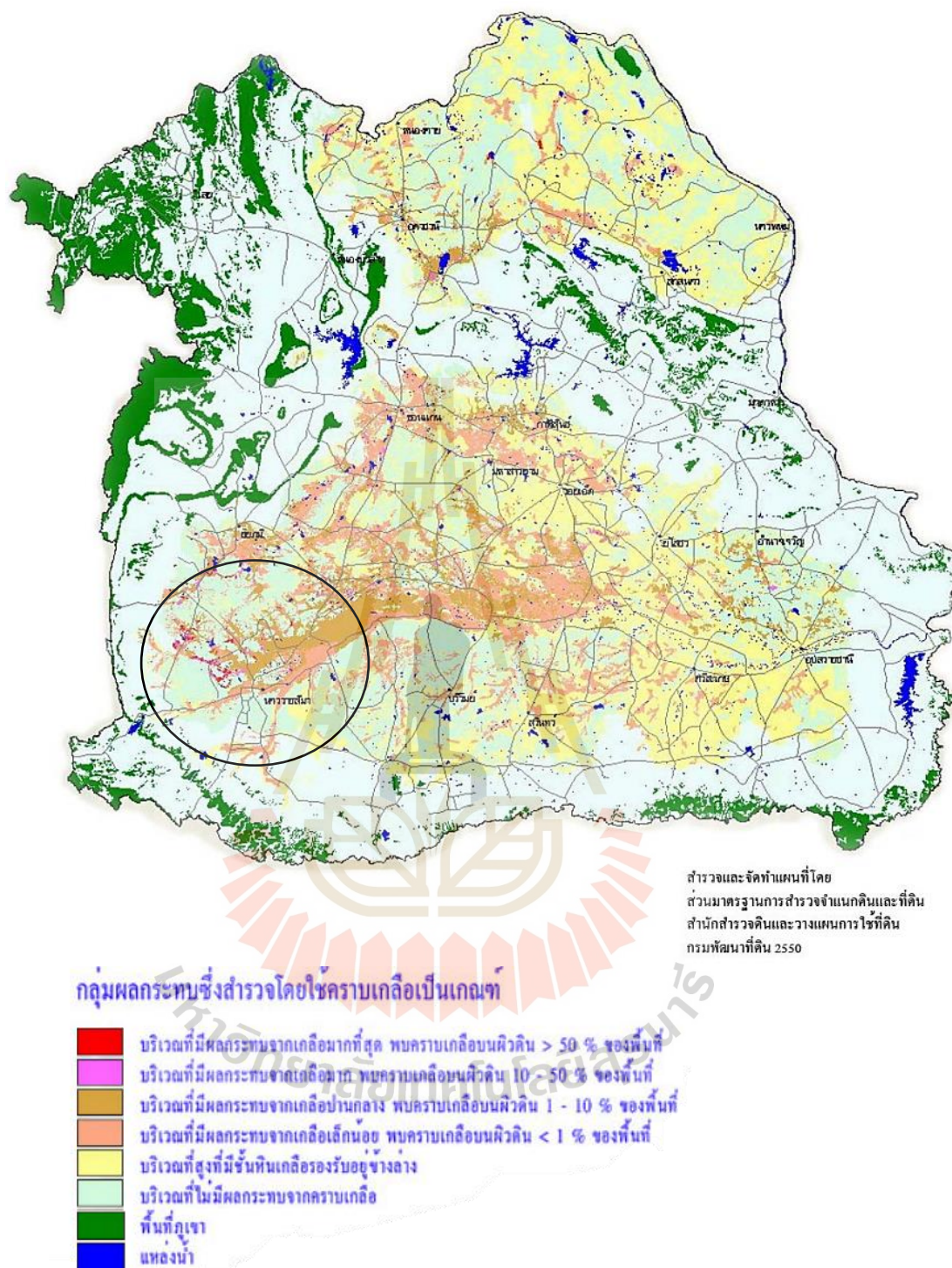
รูปที่ 1.2 การขยายตัวของเหล็กเส้นเสริมแรงที่ฝังในคอนกรีต (The Visual Journalism Team, 2021)

อำเภอพระทองคำ อำเภอด่านขุนทด อำเภอโนนสูง อำเภอพิมาย อำเภอคง อำเภอขามทะเลสอ อำเภอจักราช อำเภอบัวใหญ่ และอำเภอประทาย เป็นต้น มีปริมาณของคลอไรด์สูงมากกว่า 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 1.5 ทำให้พื้นที่บริเวณดังกล่าวมีความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนและเสื่อมสภาพของโครงสร้างอาคารบ้านเรือน ถนน สะพาน เสาไฟฟ้า ที่ทำจากคอนกรีตเสริมแรง เป็นต้น นอกจากนี้ ยังมีรายงานเกี่ยวกับปริมาณเหล็กในน้ำบาดาล (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2558) ดังแสดงในรูปที่ 1.6 พบว่าทุกอำเภอในจังหวัดนครราชสีมาปริมาณเหล็กเจือปนในน้ำบาดาลมากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร คาดว่าปริมาณเหล็กเหล่านี้อาจเป็นธาตุเจือปนในดินและเป็นผลผลิตที่เกิดจากการกัดกร่อนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมแรงที่ใช้ทำฐานราก

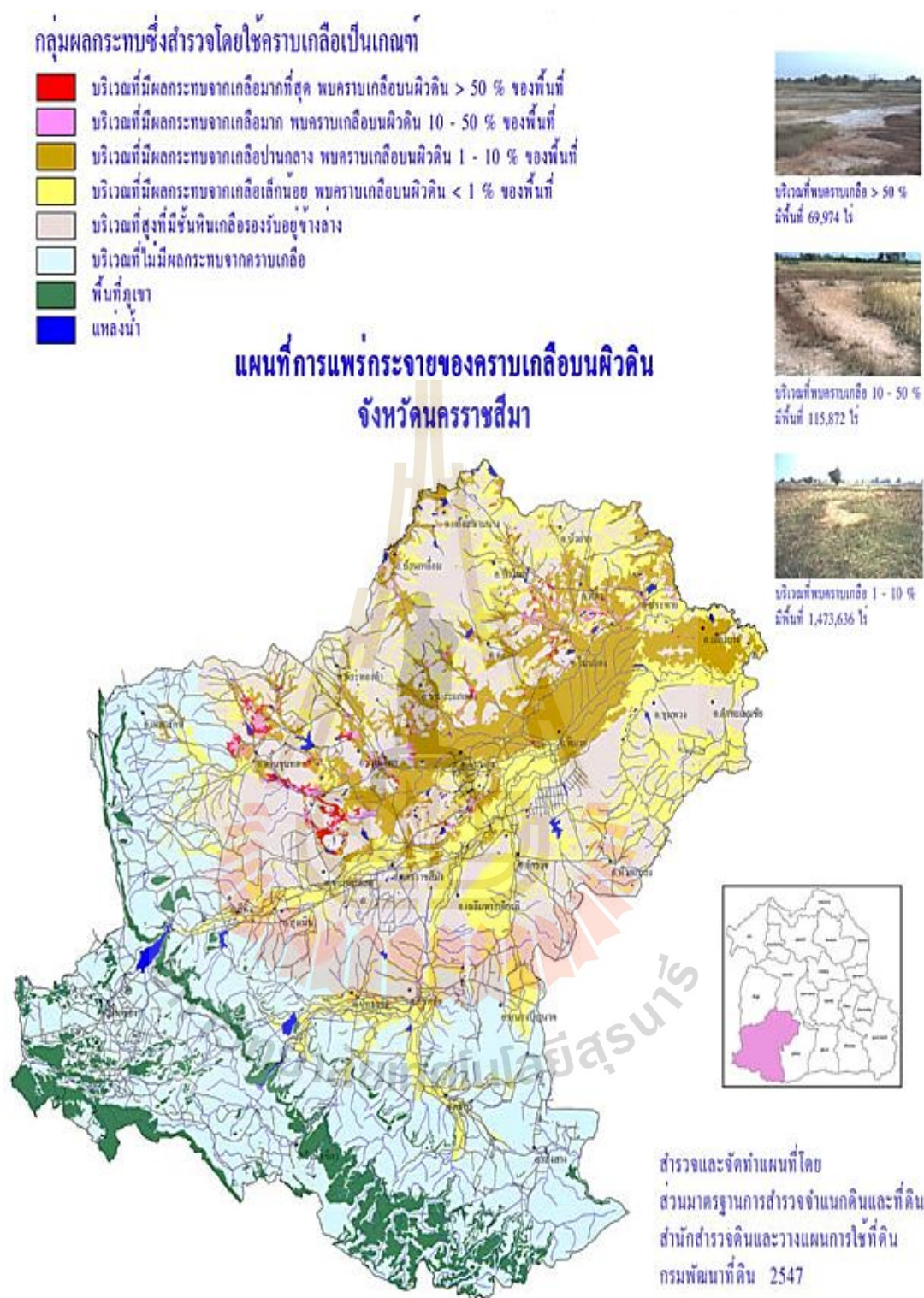
จากข้อมูลข้างต้น พื้นที่บริเวณอำเภอโนนไทย จึงเป็นที่น่าสนใจในการศึกษาพฤติกรรม และการประเมินการกัดกร่อนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมแรงด้วยเหล็กเป็นอย่างมากเนื่องจากมีปริมาณคลอไรด์สูงซึ่งเป็นตัวเร่งให้เกิดการกัดกร่อนและทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมแรงเกิดการเสื่อมสภาพก่อนเวลาอันควร ดังแสดงในรูปที่ 1.7 เห็นชัดว่าพื้นสะพานมีสภาพผุพังจนเห็นเหล็กที่ฝังอยู่ด้านใน ซึ่งเกิดจากการถูกกัดกร่อนด้วยน้ำบาดาลที่ล้อมรอบอย่างรุนแรง หากไม่ได้รับการซ่อมแซมอาจเกิดอุบัติเหตุและสร้างความเสียหายแก่ผู้ใช้งาน (กิตติเทพ เพ็ญขจร, พรวิสา วงศ์ปัญญา, เดโช เผือกภูมิ, และธนัชฐา ทองประภา, 2566) ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาเกี่ยวกับการกัดกร่อนของเหล็กกล้าที่ฝังในคอนกรีตเสริมแรงเพื่อประเมินการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในคอนกรีตเสริมแรงในสิ่งแวดล้อมการกัดกร่อนเป็นน้ำเค็มจำลองที่มีส่วนผสมใกล้เคียงกับน้ำเค็มในพื้นที่อำเภอโนนไทย จังหวัดนครราชสีมาด้วยเทคนิคดังต่อไปนี้

1) วัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคอนกรีตเสริมแรง (Half-Cell Potential) ตามมาตรฐาน ASTM C876-15 (ASTM C876-15, 2015)

2) วิธีการทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Techniques) ได้แก่ โพเทนชิโอสแตติกลิเนียร์โพลาริเซชัน (Potentiostatic Linear Polarization, LP) ตามมาตรฐาน ASTM G61-82 (ASTM G61-86, 2018) และอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปี (Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS) ตามมาตรฐาน ASTM G106-89 (ASTM G102-89, 2015)

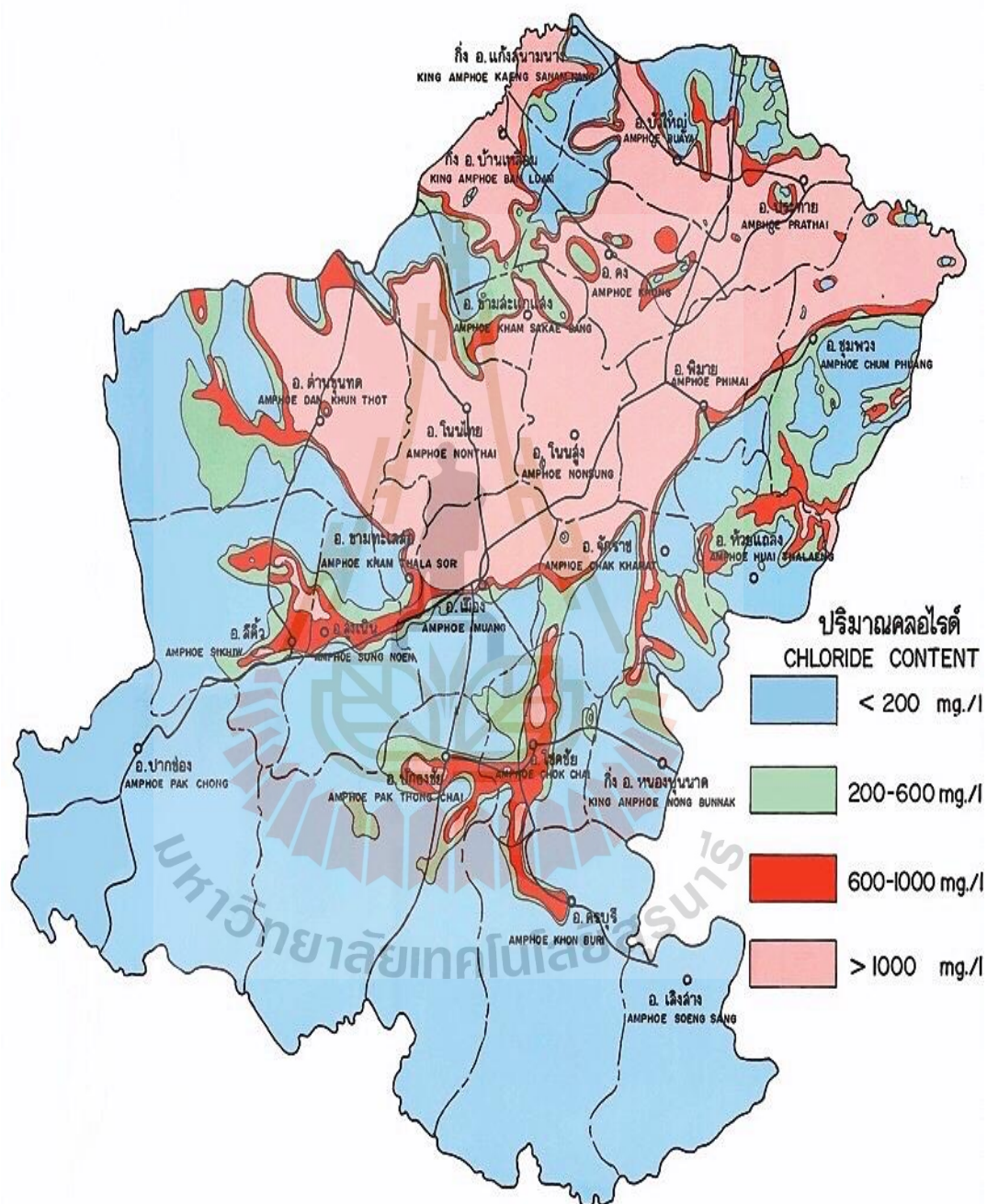


รูปที่ 1.3 แผนที่การแพร่กระจายดินเค็มภาคตะวันออกเฉียงเหนือโดยพิจารณาจากคราบเกลือ (ไพรัช พงษ์วิเชียร, 2560), (กิตติเทพ เพ็ญขจร, พรวิสา วงศ์ปัญญา, เดโช เผือกภูมิ, และ ธนิษฐา ทองประภา, 2566)

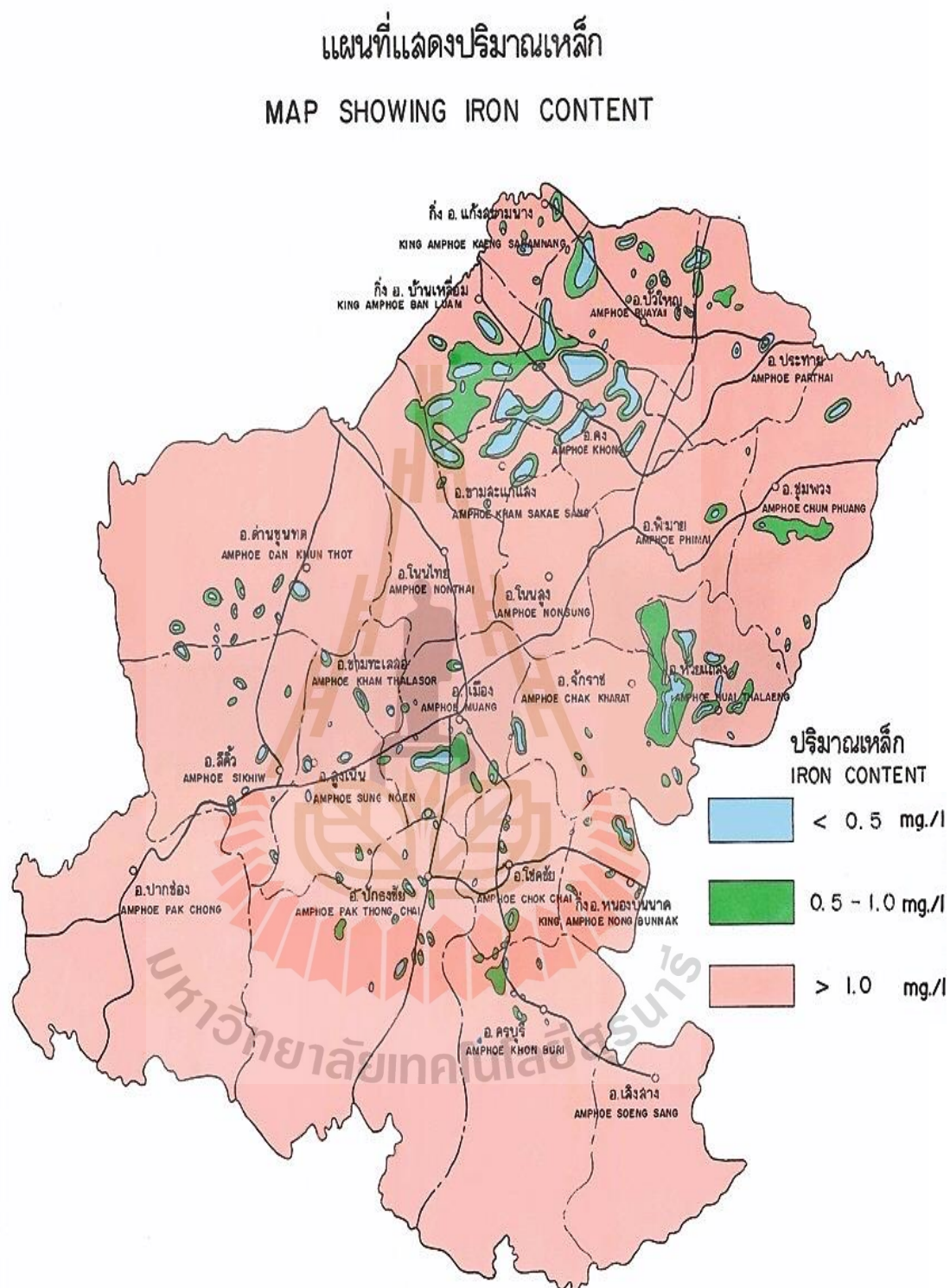


รูปที่ 1.4 แผนที่การกระจายของคราบเกลือในจังหวัดนครราชสีมา (สำนักสำรวจและวางแผนการใช้ที่ดิน, 2553), (กิตติเทพ เฟื่องขจร, พรวิสา วงศ์ปัญญา, เดโช เผือกภูมิ, และธนัชราทองประภา, 2566)

แผนที่แสดงปริมาณคลอไรด์
MAP SHOWING CHLORIDE CONTENT



รูปที่ 1.5 แผนที่แสดงปริมาณคลอไรด์ในแหล่งน้ำบาดาลของจังหวัดนครราชสีมา (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2558), (กิตติเทพ เพ็ญขจร, พรพสา วงศ์ปัญญา, เดโช เผือกภูมิ, และธนัชฐา ทองประภา, 2566)



รูปที่ 1.6 แผนที่แสดงปริมาณเหล็กในแหล่งน้ำบาดาลของจังหวัดนครราชสีมา (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2558), (กิตติเทพ เฟื่องขจร, พรพสา วงศ์ปัญญา, เดโช เผือกภูมิ, และธนัชฐา ทองประภา, 2566)



รูปที่ 1.7 ความเสียหายของพื้นสะพานที่เกิดจากการกัดกร่อนของน้ำบาดาลเค็ม ณ ฝายห้วยท่าแค - ห้วยก้องแก่ง บ้านสันเทียะ ต.โนนไทย อ.โนนไทย จ.นครราชสีมา (สำรวจ วันที่ 12 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2565), (กิตติเทพ เฟื่องขจร, พรวิสา วงศ์ปัญญา, เดโช เผือกภูมิ, และธนัชฐา ทองประภา, 2566)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กกล้าที่ฝังในคอนกรีตเสริมแรงด้วยเทคนิค Half-Cell Potential, Potentiostatic Linear Polarization Resistance และ Electrochemical Impedance Spectroscopy และประเมินอายุการใช้งานของคอนกรีตเสริมแรงด้วยเหล็กในสิ่งแวดล้อมการกัดกร่อนที่เป็นน้ำเค็มจำลอง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ชิ้นงานคอนกรีตเสริมแรงด้วยเหล็กกล้า ขนาด $112 \times 112 \times 165$ มิลลิเมตร ยาว 195 และ 165 มิลลิเมตร สำหรับการทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิค Half-Cell Potential และ Potentiostatic Linear Polarization และ Electrochemical Impedance Spectroscopy ตามลำดับ โดยมีระยะครอบคลุมของคอนกรีตอยู่ที่ 50 มิลลิเมตร ถูกหล่อขึ้นรูปโดยใช้วัสดุดังนี้ 1. เหล็กข้ออ้อยขนาดหน้าตัด 12 มิลลิเมตร 2. ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 3. มวลรวมหยาบหรือหินสำหรับก่อสร้างขนาด 3/16 ถึง 3/4 นิ้ว 4. มวลรวมละเอียดหรือทรายสำหรับก่อสร้าง และ 5. น้ำปราศจากไอออน

1.3.2 สิ่งแวดล้อมที่ใช้ในการกัดกร่อนเหล็กกล้าที่ฝังในคอนกรีตเสริมแรงคือ น้ำเค็มจำลองจากแหล่งน้ำตามธรรมชาติของอำเภอโนนไทย จังหวัดนครราชสีมา ประเทศไทย ที่ผ่านการวิเคราะห์ปริมาณไอออนต่าง ๆ ได้แก่ คลอไรด์ไอออน (Cl^-), ซัลเฟต (SO_4^{2-}), โซเดียม (Na^+), แมกนีเซียม (Mg^{2+}) และแคลเซียม (Ca^{2+}) ด้วยเทคนิคไอออนโครมาโทกราฟี (Ion Chromatography, IC) โดยการจำลองใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นตัวทำละลาย และใช้สารเคมี ได้แก่ NaCl , MgCl_2 , CaCl_2 และ CaSO_4

1.3.3 ความเข้มข้นของน้ำเค็มจำลองที่ใช้ในการทดสอบมีทั้งหมด 3 ความเข้มข้นดังต่อไปนี้

1.3.3.1 ตามมาตรฐานการวัดของกรมน้ำบาดาลในรูปที่ 1.5 ปริมาณความเข้มข้น Cl^- ที่มีค่าสูง คือ มากกว่า 1000 mg/L ดังนั้น น้ำเค็มจำลองที่มีความเข้มข้น Cl^- เท่ากับ 13,010.35 mg/L จึงถูกใช้เป็นสิ่งแวดล้อมการกัดกร่อนที่มี Cl^- สูง (High Cl^-)

1.3.3.2 ตามมาตรฐานการวัดของกรมน้ำบาดาลในรูปที่ 1.5 ปริมาณความเข้มข้น Cl^- ที่มีค่าปานกลาง คือ อยู่ในช่วง 200 - 1000 mg/L และจากการสำรวจ 5 พื้นที่และวิเคราะห์ผลน้ำเค็มและหาค่าเฉลี่ยของปริมาณความเข้มข้น Cl^- ได้เท่ากับ 3,714.46 mg/L ดังนั้น น้ำเค็มจำลองที่มีความเข้มข้น Cl^- ดังกล่าวจึงถูกใช้เป็นสิ่งแวดล้อมการกัดกร่อนที่มี Cl^- ปานกลาง (Medium Cl^-)

1.3.3.3 ตามมาตรฐานการวัดของกรมน้ำบาดาลในรูปที่ 1.5 ปริมาณความเข้มข้น Cl^- ที่มีค่าต่ำ คือ น้อยกว่า 200 mg/L และจากการสำรวจ 5 พื้นที่และวิเคราะห์ผลน้ำเค็ม พบว่า

พื้นที่ที่มีปริมาณความเข้มข้น Cl^- ต่ำสุด มีค่าเท่ากับ 244.31 mg/L ดังนั้น น้ำเค็มจำลองที่มีความเข้มข้น Cl^- ดังกล่าวจึงถูกใช้ป็นสิ่งแวดล้อมการกัดกร่อนที่มี Cl^- ต่ำ (Low Cl^-)

1.3.4 ชิ้นงานคอนกรีตเสริมแรงด้วยเหล็กกล้าที่ผ่านการหล่อขึ้นรูปตามหัวข้อ 1.3.1 ชิ้นงานถูกบ่มเป็นเวลา 28 วัน จากนั้นถูกจุ่มแช่ในน้ำเค็มจำลองเป็นระยะเวลา 1, 2, 4, 8, 12 และ 16 สัปดาห์ก่อนทดสอบการกัดกร่อน

1.3.5 การทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในคอนกรีตเสริมแรงใช้เทคนิคดังนี้

1.3.5.1 เทคนิค Half-cell potential โดยวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ในคอนกรีตเสริมแรงด้วยดิจิทัลโวลต์มิเตอร์อิมพีแดนซ์สูง (High Impedance Digital Voltmeter) เทียบกับอิเล็กโทรดอ้างอิง Cu/CuSO_4 จากนั้นพิจารณาความน่าจะเป็นในการเกิดการกัดกร่อน

1.3.5.2 เทคนิค Potentiostatic Linear Polarization โดยใช้เครื่องวิเคราะห์แบบโพเทนชิโอสเตท (Potentiostat Analyzer) โดยป้อนค่าศักย์ไฟฟ้าแล้ววัดกระแสไฟฟ้าของชิ้นงาน ผลที่ได้แสดงเป็นกราฟโพลาริเซชันแล้วประมวลผลการกัดกร่อนจากค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า โดยเทคนิคนี้มีตัวแปรที่ต้องควบคุมดังนี้

- 1) ระยะเวลาหา Open Circuit Potential (OCP) เท่ากับ 300 s
- 2) อัตราการสแกน (Scan Rate) เท่ากับ 0.167 mV/s
- 3) ศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น (Start Potential): -250 mV
- 4) ศักย์ไฟฟ้าสิ้นสุด (Stop Potential): 1500 mV
- 5) ขั้นศักย์ไฟฟ้า (Step Potential): 1 mV
- 6) ช่วงกระแสไฟฟ้าสูงสุด (Highest Current Range): 10 mA
- 7) ช่วงกระแสไฟฟ้าต่ำสุด (Lowest Current Range): 100 nA

1.3.5.3 เทคนิค EIS โดยใช้เครื่อง Potentiostat Analyzer ซึ่งจะทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์ส่วนจริง (Real Impedance, Z') เทียบกับอิมพีแดนซ์ส่วนจินตภาพ (Imaginary Impedance, Z'') จะทำให้ทราบความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับของชิ้นงาน ผลที่ได้เป็นกราฟไนควิสต์ ซึ่งเทคนิคนี้มีตัวแปรสำคัญที่ต้องควบคุม ดังนี้

1) การกำหนดศักย์ไฟฟ้าที่ OCP ของชิ้นงานที่วัดได้จากเทคนิค Potentiostatic Linear Polarization

- 2) ช่วงความถี่ (Frequency Range) เท่ากับ 0.1–10,000 Hz
- 3) แอมพลิจูด (Amplitude) เท่ากับ 0.02 V

1.3.6 การวิเคราะห์พื้นผิว และสารน้ำหลังทดสอบการกัดกร่อนเป็นไปดังนี้

1.3.6.1 วิเคราะห์พื้นผิวของเหล็กกล้าที่ฝังในคอนกรีตเสริมแรงหลังทดสอบการกัดกร่อนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) และเอ็กซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโตรสโกปี (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS)

1.3.6.2 วิเคราะห์สารน้ำหลังทดสอบการกักกรองด้วยโมเลกุลาร์แอบซอร์พ-
สเปกโตรโฟโตเมตรี (Molecular Absorption Spectrophotometry) และ IC

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ผลที่ได้จะแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของการกักกรองของชิ้นงานคอนกรีตเสริมแรงที่
สัมผัสในสิ่งแวดล้อมการกักกรองที่เป็นน้ำเค็มจำลองที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ

1.4.2 ผลสำเร็จของงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์โดยตรงในส่วน of วิศวกรรมวัสดุ วิศวกรรม
โยธา ตลอดจนการคมนาคมต่าง ๆ ที่ต้องใช้โครงสร้างคอนกรีตเสริมแรง ซึ่งงานวิจัยนี้อาจเป็นข้อมูล
เบื้องต้น หรือเป็นข้อมูลที่สำคัญเกี่ยวกับคอนกรีตเสริมเหล็กได้ในอนาคต

1.4.3 คาดว่าจะได้รับประโยชน์เกี่ยวกับวิธีการ ขั้นตอนในการทดสอบการกักกรองใน
คอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านการซ่อมบำรุงหรือประเมินอายุการใช้งานของ
โครงสร้างคอนกรีตเสริมแรง

1.4.4 คาดว่าจะจะเป็นประโยชน์ต่อการวางแผนในการซ่อมบำรุงหรือสร้างใหม่ได้อย่าง
เหมาะสม ทำให้ประหยัดงบประมาณแผ่นดิน เพิ่มคุณภาพชีวิตให้แก่ประชาชนในพื้นที่ที่
ประสบปัญหาดินเค็ม ตลอดจนก่อให้เกิดประโยชน์ต่อประเทศในเชิงการนำความรู้จากหน่วยงาน
ภาครัฐ มหาวิทยาลัย นำไปประยุกต์ใช้ในงานจริงแก่ประชาชนต่อไป

1.4.5 ในเชิงวิชาการ ทำให้เกิดทักษะการเรียนรู้ มีความรู้เพิ่มเติม แนวคิดในการวิเคราะห์
วิจัย และพัฒนาระหว่างกระบวนการวิจัย โดยผลงานได้ช่วยสร้างความเข้มแข็งให้กับนักวิชาการและ
นักศึกษาในแง่ของการผสมผสานความรู้ในทางทฤษฎี ภาควิชาปฏิบัติและเทคโนโลยีที่นำไปใช้จริงใน
ด้านวิศวกรรมวัสดุ วิศวกรรมโยธา และการคมนาคม

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำบาดาลธรรมชาติ (Groundwater)

น้ำบาดาล (Groundwater) คือ น้ำใต้ดินที่ถูกกักเก็บ และสะสมอยู่ในช่องว่างและรอยแตกของชั้นหินและชั้นดินตะกอนลึกลงไปใต้พื้นดิน จากการหมุนเวียนของ “วัฏจักรน้ำ” (Hydrologic Cycle) ในธรรมชาติ ซึ่งมีจุดกำเนิดจากหยาดน้ำฟ้า (Precipitations) หรือน้ำในบรรยากาศ (Atmospheric Water) ไม่ว่าจะอยู่ในรูปของน้ำฝน หิมะ เมฆหมอก หรือไอน้ำที่ตกลงสู่ผิวดินจนกลายเป็นน้ำผิวดิน (Surface Water) ให้กำเนิดแม่น้ำ ลำคลอง และมหาสมุทร น้ำผิวดินบางส่วนไหลลงสู่ใต้ดิน ซึมอยู่ในช่องว่างของเม็ดดินกลายเป็นน้ำในดินที่สามารถระเหยกลับไปเป็นน้ำฟ้าอีกครั้งเมื่อได้รับความร้อนจากแสงแดด แต่น้ำบางส่วนที่ไหลลึกลงไปสู่ชั้นหินและชั้นดินตะกอนด้านล่าง เติมเต็มช่องว่างและรอยแตกของชั้นหินเหล่านั้นจนกลายเป็นจุดกำเนิดของแหล่งน้ำบาดาล (Subsurface Water) หรือน้ำบาดาล (National Geographic Thailand, 2020) โดยคุณลักษณะทางเคมีที่สำคัญของน้ำบาดาล (สำนักงานอนุรักษ์และฟื้นฟูทรัพยากรน้ำบาดาล, 2558) ได้แก่

2.1.1 แคลเซียม (Ca)

แคลเซียม (Calcium, Ca) เป็นธาตุที่พบมากตามธรรมชาติเพราะมีอยู่ทั่วไปในหินดิน โดยเฉพาะหินปูนซึ่งเป็นหินประกอบแร่แคลไซต์ (Calcite, CaCO_3) โดโลไมต์ (Dolomite, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) ยิปซัม (Gypsum, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และอะนอร์ไทต์ (Anorthite, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) ซึ่งแคลเซียมเป็นธาตุที่ก่อให้เกิดความกระด้างในน้ำ

2.1.2 แมกนีเซียม (Mg)

แมกนีเซียม (Magnesium, Mg) ส่วนใหญ่พบในหินที่มีส่วนประกอบของแร่คลอไรต์ (Chlorite, $(\text{Mg, Fe, Al})_6(\text{OH})_8(\text{SiAl})_4\text{O}_{10}$) เซอร์เพนทีน (Serpentine, $\text{Mg}_6(\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8)$) และโดโลไมต์ (Dolomite, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) ซึ่งแมกนีเซียมเป็นธาตุที่ก่อให้เกิดการระคายเคืองหรือมีผลต่อการขับปัสสาวะได้ ทั้งนี้แมกนีเซียมเป็นต้นเหตุของความกระด้างในน้ำและการเกิดตะกอน

2.1.3 โซเดียม (Na)

โซเดียม (Sodium, Na) ส่วนใหญ่พบในหินที่เป็นส่วนประกอบของแร่เฮไลต์ (Halite, NaCl) เป็นส่วนใหญ่ โดยทั่วไปในน้ำบาดาลมีโซเดียมน้อยกว่า 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่เป็นอันตรายต่อการบริโภค แต่หากมีปริมาณสูงจะเป็นปัญหาต่อการนำน้ำไปใช้เพื่อการเกษตร

2.1.4 เหล็ก (Fe)

เหล็ก (Iron, Fe) ไม่เป็นอันตรายต่อร่างกาย เป็นแหล่งอาหารของแบคทีเรียที่เรียกว่า Iron Bacteria การเจริญเติบโตของแบคทีเรียดังกล่าวทำให้น้ำประปามีกลิ่นและมรสไม่พึงประสงค์ หากร่างกายได้รับเหล็กปริมาณมากเกินไปและไม่สามารถขับถ่ายออกหมดจะสะสมไว้ที่ตับ ทำให้เป็นโรคเกี่ยวกับตับได้

2.1.5 คลอไรด์ไอออน (Cl⁻)

คลอไรด์ไอออน (Chloride, Cl⁻) พบทั่วไปในน้ำธรรมชาติทั้งในน้ำผิวดินและน้ำบาดาล โดยเฉพาะบริเวณปากแม่น้ำที่น้ำทะเลหนุน ปริมาณคลอไรด์ในน้ำจะไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ แต่อาจใช้เป็นดัชนีของความสกปรกในน้ำได้

2.1.6 ซัลเฟต (SO₄²⁻)

ซัลเฟต (Sulfate, SO₄²⁻) พบทั่วไปในน้ำธรรมชาติโดยเฉพาะแหล่งน้ำที่มีแร่ยิปซัม จะมีปริมาณซัลเฟตสูง นอกจากนี้ยังพบซัลเฟตในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมและน้ำทิ้งจากการทำเหมืองต่าง ๆ ในอุตสาหกรรมซัลเฟตมีความสำคัญมาก เนื่องจากทำให้เกิดตะกอนในหม้อน้ำก่อให้เกิดปัญหาเรื่องกลิ่น และการกัดกร่อนในท่อน้ำเสีย

2.2 เหล็กเส้นที่ใช้ในงานคอนกรีตเสริมแรง

โดยทั่วไปเหล็กเส้นที่ใช้ในงานคอนกรีตเสริมแรงในประเทศไทยต้องมีคุณลักษณะตามมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ.) คือ มยผ. 1103 มาตรฐานเหล็กเสริมคอนกรีต (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2552) เป็นมาตรฐานที่ประเทศไทยอ้างอิงจาก ASTM A615/615 (ASTM A615/A615M, 2015) โดยระบุรายละเอียดดังนี้

2.2.1 ข้อกำหนดสำหรับเหล็กข้ออ้อย (Deformed Bar) โดยคุณสมบัติของเหล็กข้ออ้อยต้องไม่น้อยกว่าค่าที่กำหนดในตารางที่ 2.1

2.2.2 ข้อกำหนดสำหรับเหล็กเส้นกลม (Round Bar) คุณสมบัติของเหล็กเส้นกลมต้องไม่น้อยกว่าค่าที่กำหนดในตารางที่ 2.2

2.3 คอนกรีต

2.3.1 ปูนซีเมนต์

ในส่วนของคอนกรีตนั้นหล่อจากปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ที่นิยมใช้ในงานก่อสร้างโครงสร้างอาคาร หรือบ้านเรือน ซึ่งมีการกำหนดให้เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 15 เล่ม 1) (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2564) โดยแบ่งออกเป็น 5 ประเภท ดังนี้

1) ประเภท 1 (Type I): เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาสำหรับการใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างทั่วไป

2) ประเภท 2 (Type II): เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ให้ความร้อนปานกลางขณะทำปฏิกิริยากับน้ำหรือเมื่อต้องการความทนซัลเฟตปานกลาง

3) ประเภท 3 (Type III): เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ให้ค่ากำลังอัดสูงได้เร็วสำหรับใช้งานคอนกรีตที่ต้องการให้รับน้ำหนักเร็วหรืองานต้องการถอดแบบเร็วในช่วงแรก

4) ประเภท 4 (Type IV): เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ให้ความร้อนต่ำขณะทำปฏิกิริยากับน้ำสำหรับใช้งานเทคอนกรีตเป็นปริมาณมาก เช่น งานคอนกรีตหยาบ (Mass Concrete)

5) ประเภท 5 (Type V): เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้เมื่อต้องการความทนซัลเฟตสูง เช่นงานคอนกรีตสัมผัสน้ำบาดาลหรือน้ำเสียที่มีปริมาณซัลเฟตสูง

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในงานก่อสร้างทั้งหมดถ้าแบบหรือรายการประกอบแบบเฉพาะงานไม่ได้กำหนดว่าเป็นปูนซีเมนต์ประเภทใดให้ถือว่าเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1

2.3.2 มวลรวมหยาบ

มวลรวมหยาบ หมายถึงวัสดุที่ใช้ในส่วนผสมของคอนกรีตที่มีขนาดเม็ดโตกว่า 4.75 มิลลิเมตร ขึ้นไป โดยตามมาตรฐานกำหนดคุณลักษณะเฉพาะของวัสดุใช้งานโครงสร้างอาคารของกรมโยธาธิการและผังเมือง (สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคารกรมโยธาธิการและผังเมือง, 2564) ระบุเกี่ยวกับมวลรวมหยาบไว้ดังนี้

2.3.2.1 มวลรวมหยาบที่ใช้ต้องเป็นหินหรือกรวดที่แข็งแกร่ง ทนทาน ไม่ผุ มีความคงตัวเฉื่อย ไม่ทำปฏิกิริยากับด่างในคอนกรีต สะอาด ปราศจากวัสดุอื่นและสารอื่นเจือปนในปริมาณที่มีผลกระทบต่อกำลัง และความคงทนของคอนกรีตและเหล็กเสริม

2.3.2.2 มวลรวมจะต้องมีส่วนคละและรูปร่างที่เหมาะสม

2.3.2.3 ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบที่ใช้ต้องเป็นไปตามตารางที่ 3 แต่ทั้งนี้จะต้องไม่ใหญ่เกินกว่าร้อยละ 20 ของด้านในที่แคบที่สุดของแบบหล่อ และต้องไม่ใหญ่กว่าร้อยละ 75 ของระยะช่องว่าง (Clear Spacing) ระหว่างเหล็กเสริมแต่ละเส้นหรือแต่ละมัด

2.3.2.4 มวลรวมหยาบที่ใช้ต้องผ่านการทดสอบตาม มยผ.1201 ถึง มยผ.1209

2.3.2.5 หากต้องการนำมวลรวมที่นำกลับมาใช้ใหม่มาใช้เป็นมวลรวมหยาบสำหรับเป็นส่วนผสมในคอนกรีตมวลรวมที่นำกลับมาใช้ใหม่ต้องเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 566: มวลรวมผสมคอนกรีตหรือมาตรฐานวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ส.ท.) 1014: ข้อกำหนดมาตรฐานวัสดุและการก่อสร้างสำหรับโครงสร้างคอนกรีตด้วยเรื่องมวลรวมที่นำกลับมาใช้ใหม่ (Recycled Aggregate)

2.3.3 มวลรวมละเอียด

มวลรวมละเอียด หมายถึงวัสดุที่ใช้ในส่วนผสมของคอนกรีตที่มีขนาดเม็ดโตตั้งแต่ 0.075 ถึง 4.75 มิลลิเมตร โดยตามมาตรฐานกำหนดคุณลักษณะเฉพาะของวัสดุใช้งานโครงสร้างอาคารของกรมโยธาธิการและผังเมือง (สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคารกรมโยธาธิการและผังเมือง, 2564) ระบุเกี่ยวกับมวลรวมละเอียดไว้ดังนี้

2.3.3.1 มวลรวมละเอียดที่ใช้ควรเป็นทรายน้ำจืดหรือทรายบกที่มีเม็ดหยาบคม แข็งแกร่งมีความคงตัวเฉื่อยไม่ทำปฏิกิริยากับด่างในส่วนผสมคอนกรีต สะอาดปราศจากวัสดุอื่นหรือสารอื่นเจือปนในปริมาณที่จะมีผลกระทบต่อกำลังและความคงทนของคอนกรีตและเหล็กเสริม

2.3.3.2 ในกรณีที่ไม่สามารถหาแหล่งทรายน้ำจืด หรือ ทรายบก สามารถใช้ทรายทะเลผสมคอนกรีตได้ แต่ต้องทดสอบไม่ให้ปริมาณคลอไรด์ไอออนเกินกว่าร้อยละ 0.02 ของน้ำหนักทรายแห้ง หรือเกินกว่าร้อยละ 0.03 ในรูปของโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

2.3.3.3 ทรายที่ใช้ในการก่อสร้างควรมีค่ามอดุลัสความละเอียด (Fineness Modulus) ตั้งแต่ 2.15 ถึง 3.45 แต่หากไม่อยู่ในช่วงดังกล่าว จะต้องทำการทดลองผสมเพื่อยืนยันความสามารถในการเทได้ และกำลังของคอนกรีต

2.3.3.4 ทรายที่ใช้ต้องผ่านการทดสอบสมบัติตาม มยพ.1201 ถึง มยพ.1209

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกลของเหล็กข้ออ้อย (Deformed Bar) (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2552)

Grade	Yield strength MPa (kg/cm ²)	Ultimate tensile strength MPa (kg/cm ²)	Elongation ในช่วงความยาว 5 เท่า ของเส้น ผ่านศูนย์กลาง (%)	Cold bending test		
				Diameter (mm)	Bending angle (degree)	Bending diameter
SD 30	295 (3000)	480 (4900)	17	≤ 16	180	3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง
				> 16	180	4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง
SD 40	390 (4000)	560 (5700)	15	ทุกขนาด	180	5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง
SD 50	490 (5000)	620 (6300)	13	≤ 25	90	5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง
				> 25	90	6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกลของเหล็กเส้นกลม (Round Bar) (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2552)

Grade	Yield strength MPa (kg/cm ²)	Ultimate tensile strength MPa (kg/cm ²)	Elongation ในช่วงความยาว 5 เท่า ของเส้น ผ่านศูนย์กลาง (%)	Cold bending test	
				Bending angle (degree)	Bending diameter
SR 24	235 (2400)	385 (3900)	21	180	3 เท่าของ diameter ระบุ

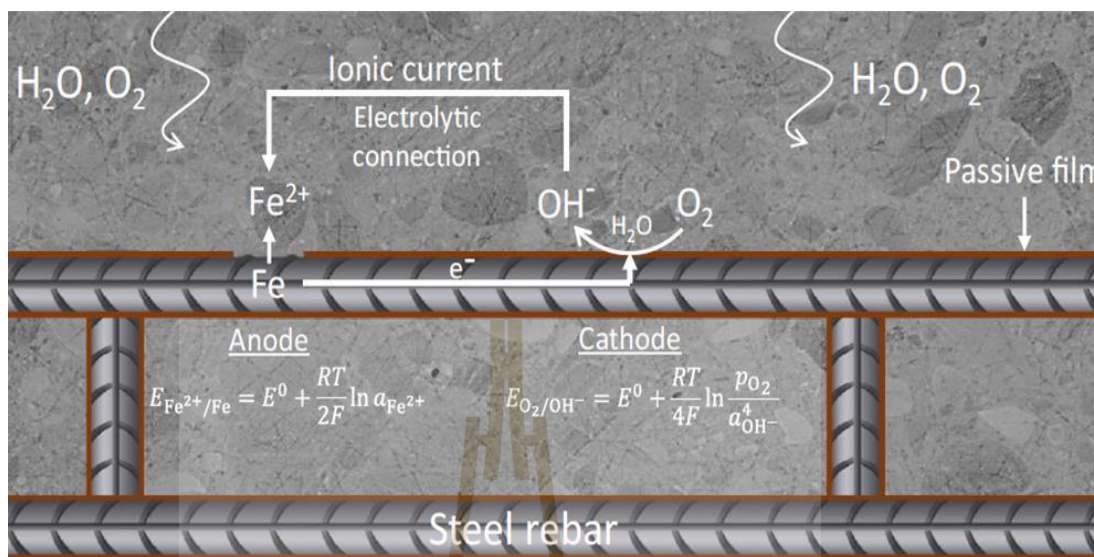
ตารางที่ 2.3 ชนิดของงานก่อสร้างและขนาดใหญ่มากที่สุดของมวลรวมหยาบ (สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคารกรมโยธาธิการและผังเมือง, 2564)

ชนิดของงานก่อสร้าง	ขนาดมวลรวมหยาบใหญ่สุด (มิลลิเมตร)
1) ฐานราก เสา และคาน	40
2) ผนังที่มีความหนาตั้งแต่ 125 มม. ขึ้นไป	40
3) ผนังที่มีความหนาน้อยกว่า 125 มม.	25
4) แผ่นพื้นและคืบ	25

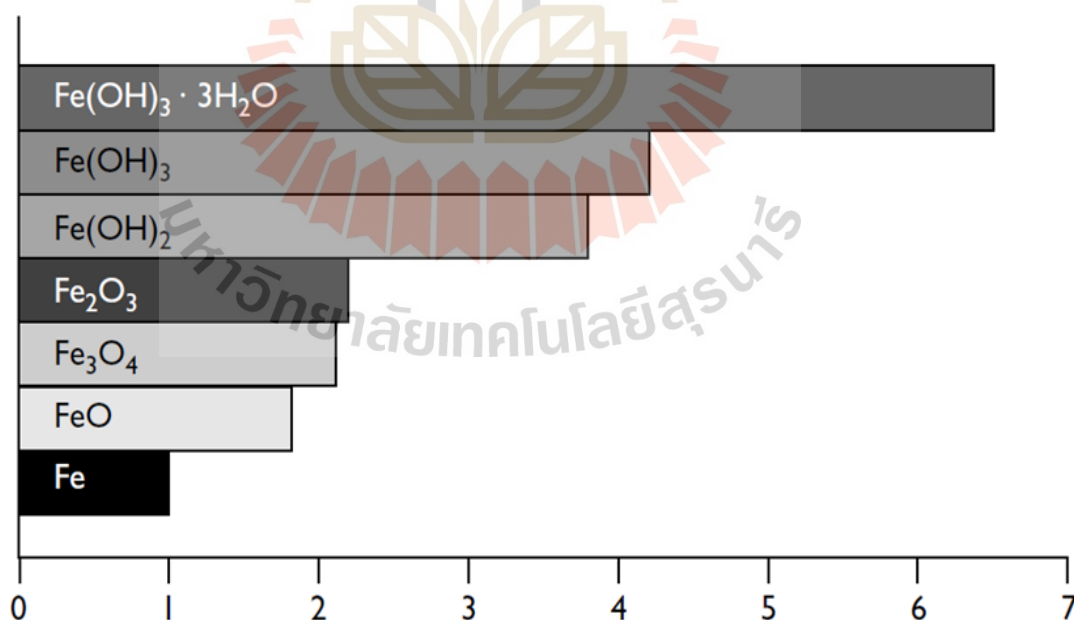
2.4 การกัดกร่อนของเหล็กกล้าในคอนกรีตเสริมแรง

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของเหล็กกล้าในคอนกรีตเสริมแรงที่มีการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมที่มีความชื้นหรือมีฤทธิ์กัดกร่อน โดยปฏิกิริยานี้จะเริ่มจากการที่คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) แพร่ซึมเข้าสู่คอนกรีตที่มีความพรุนและทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในน้ำหรือสิ่งแวดล้อมเกิดเป็นกรดคาร์บอนิก (H₂CO₃) เรียกปฏิกิริยานี้ว่าการเกิด Carbonation ทำให้เหล็กที่อยู่ในคอนกรีตถูกกัดกร่อนจนแพสซีฟฟิล์ม (Passive Film) ถูกทำลาย และเกิดสนิมจาก Ferrous Hydroxide (Fe(OH)₂) เป็น Ferric Hydroxide (Fe(OH)₃) และสุดท้ายเป็น Hydrated Ferric Oxide (Fe₂O₃·H₂O) ดังแสดงลำดับการเกิดในสมการที่ 2.1-2.3 และดังรูปที่ 2.1 (Rodrigues, R., Gaboreau, S., Gance, J., Ignatiadis, I., & Betelu, S., 2020)

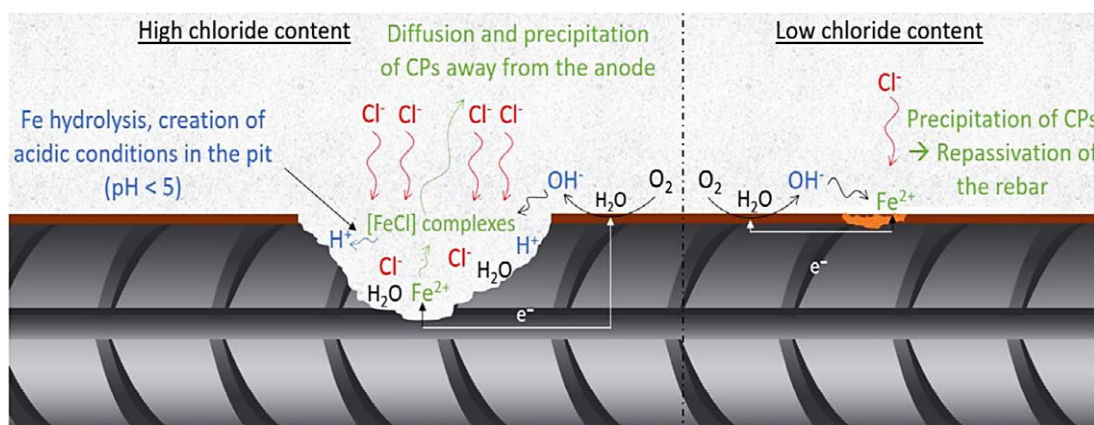




รูปที่ 2.1 แสดงหลักการเกิดการกัดกร่อนของเหล็กกล้าภายในคอนกรีตเสริมแรง (Rodrigues, R., Gaboreau, S., Gance, J., Ignatiadis, I., & Betelu, S., 2020)



รูปที่ 2.2 ปริมาตรของเหล็กและปริมาณของผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนของเหล็กชนิดต่าง ๆ (Broomfield, J.P., 2007)



รูปที่ 2.3 กลไกการกัดกร่อนของเหล็กกล้าที่เกิดจากคลอไรด์ไอออนในคอนกรีต (Rodrigues, R., Gaboreau, S., Gance, J., Ignatiadis, I., & Betelu, S., 2020)

เนื่องจาก Hydrated Ferric Oxide ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) มีปริมาณมากกว่าผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนอื่น ๆ (Corrosion Products: Ferrous Hydroxide ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) และ Ferric Hydroxide ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) ของเหล็กในคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ปริมาตรของสนิมที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดแรงดันภายในดัน ส่งผลให้คอนกรีตเกิดความเสียหายในรูปแบบต่าง ๆ เช่น แตกร้าว หลุดร่อน และอาจก่อให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงจนไม่สามารถใช้งานต่อไปได้ (Broomfield, J.P., 2007)

การกัดกร่อนที่เกิดจากคลอไรด์ สามารถพบได้ในพื้นที่ที่มีความเค็มหรือมีสารประกอบคลอไรด์ปนเปื้อน คอนกรีตเป็นวัสดุที่มีรูพรุนหรือมีรอยแตกเนื่องจากเป็นวัสดุเปราะ ทำให้เกิดช่องว่างให้คลอไรด์ไอออนแทรกเข้ามาทำปฏิกิริยาร่วมกับน้ำหรือไฮดรอกไซด์ไอออน แล้วแพร่กระจายไปตามตำแหน่งที่ใกล้กับเหล็ก หรือตำแหน่งที่รอยแตกขยายไปถึงเนื้อเหล็กที่ฝังภายใน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 นอกจากนี้ในบริเวณที่มีปริมาณคลอไรด์ไอออนต่ำจะเกิดการพังและการสร้างแพสซีฟฟิล์มของเหล็กที่ฝังภายในอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากการตกตะกอนของผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนบนแพสซีฟฟิล์มที่เหลือนอยู่ ส่วนในบริเวณที่มีปริมาณคลอไรด์ไอออนสูงเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting Corrosion) การสร้างแพสซีฟฟิล์มนั้นเกิดได้ช้าเนื่องจากปริมาณคลอไรด์ไอออนที่สูงเร่งให้เกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรง (Rodrigues, R., Gaboreau, S., Gance, J., Ignatiadis, I., & Betelu, S., 2020)

2.5 การทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กในคอนกรีตเสริมแรง

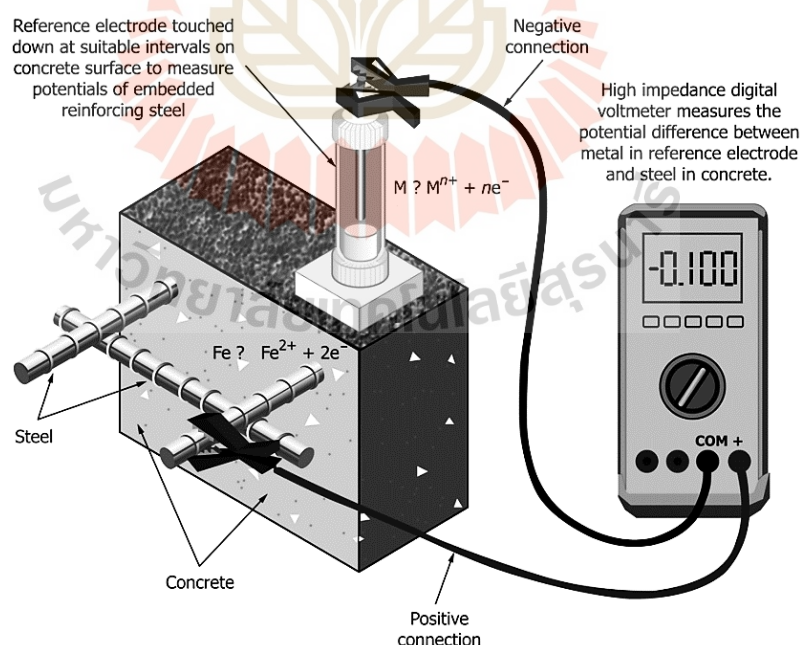
2.5.1 การทดสอบด้วยเทคนิคศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-Cell Potential)

เป็นการทดสอบการกัดกร่อนในคอนกรีตอย่างง่าย สามารถใช้ทดสอบภาคสนามได้ โดยเทคนิคนี้จะใช้เครื่อง High Impedance Digital Voltmeter ที่สามารถวัดค่าศักย์ไฟฟ้าในวัสดุที่

ด้อยความสามารถในการนำไฟฟ้าหรือวัสดุพูนได้ โดยวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคอนกรีตเสริมแรง ซึ่งตามมาตรฐาน ASTM C876-15 คือ เมื่อเหล็กที่ฝังภายในคอนกรีตเกิดการกัดกร่อน (แอโนด) จะเกิดความต่างศักย์ระหว่างบริเวณเหล็กที่เป็นแอโนดและเหล็กที่เป็นแคโทด การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์นิยมวัดเทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงที่เป็น Cu/CuSO_4 ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยชิ้นงานทดสอบต้องถูกทำให้เปียกด้วยสารที่ทำให้เกิดการนำไฟฟ้า จากนั้นสามารถพิจารณาการเกิดการกัดกร่อนหรือความเสียหายของเหล็กในคอนกรีตเสริมแรง จากค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่อ่านได้จากโวลต์มิเตอร์ แล้วเปรียบเทียบกับค่าตามมาตรฐานในตารางที่ 2.4 (ASTM C876-15, 2015), (Poursaei, A., 2011)

ตารางที่ 2.4 ความน่าจะเป็นของการเกิดการกัดกร่อน (สนิม) ด้วย Half-Cell Potential (ASTM C876-15, 2015), (Poursaei, A., 2011)

Half-Cell Potential ที่อ่านได้จาก โวลต์มิเตอร์ เทียบกับ Cu/CuSO_4	ความน่าจะเป็นในการเกิดการกัดกร่อน (สนิม)
มีค่ามากกว่า -200 มิลลิโวลต์	90% ไม่เกิดการกัดกร่อน (สนิม)
อยู่ระหว่าง -200 ถึง -350 มิลลิโวลต์	มีโอกาสเกิดการกัดกร่อน (สนิม)
มีค่าน้อยกว่า -350 มิลลิโวลต์	90% เกิดการกัดกร่อน (สนิม)



รูปที่ 2.4 วิธีวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคอนกรีตเสริมแรงด้วยเทคนิค Half-Cell Potential ตามมาตรฐาน ASTM C876-15 (ASTM C 876-15, 2015)

2.5.2 การทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติกลิเนียร์โพลาริเซชัน (Potentiostatic Linear Polarization, LP)

การทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติกลิเนียร์โพลาริเซชันเป็นการทดสอบการกัดกร่อนของโลหะโดยใช้เทคนิคเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Technique) เป็นวิธีที่ช่วยประเมินอัตราการกัดกร่อนได้ดีและรวดเร็ว และเป็นการจำลองการเกิดกระบวนการกัดกร่อนของโลหะโดยปกติแล้วการเกิดกัดกร่อนเป็นปฏิกิริยาทางกายภาพของโลหะกับสภาพแวดล้อมรอบ ๆ โลหะ ซึ่งเกิดจากการถ่ายเทประจุไฟฟ้าหรือแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนในสารละลายของน้ำ เรียกว่า ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Reaction) การเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของการกัดกร่อนเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน เมื่อน้ำหรือสารละลายที่สัมผัสกับโลหะ หลักการของการทดสอบการกัดกร่อนของโลหะโดยใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า คือการป้อนศักย์ไฟฟ้าแรงกระตุ้นการกัดกร่อน โดยใช้เครื่อง Potentiostat Analyzer ในสถานะที่มีสารละลายอิเล็กโทรไลต์หรือสิ่งแวดล้อมการกัดกร่อนที่ทำหน้าที่เป็นสะพานของไอออน และเป็นการเชื่อมต่อเซลล์เคมีไฟฟ้า (Electrochemical Cell) ทำให้สามารถคำนวณหาอัตราการกัดกร่อน (Corrosion Rate, CR) ได้ โดยเซลล์เคมีไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบการกัดกร่อนของโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ประกอบด้วย

1) ขั้วทำงาน (Working Electrode หรือ Specimen Electrode) เป็นขั้วแอโนด คือชิ้นงานทดสอบ เป็นขั้วที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและให้อิเล็กตรอน

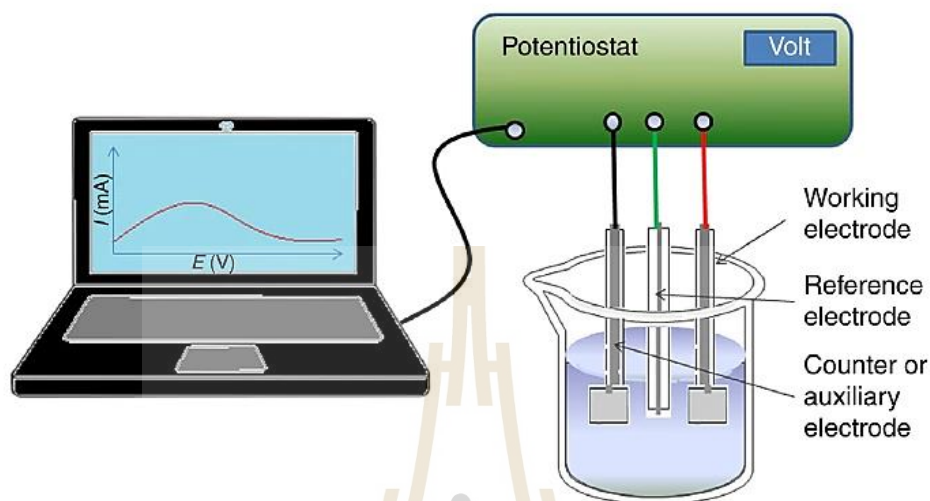
2) ขั้วไฟฟ้ามาตรฐานอ้างอิง (Standard Reference Electrode) เป็นขั้วแคโทด (Cathode) ที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันและรับอิเล็กตรอน เช่น SHE (Saturated Hydrogen Electrode) หรือ Ag/AgCl ที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่

3) ขั้วอิเล็กโทรดกระแส (Counter Electrode) มักใช้โลหะที่เสถียร เช่น แกรไฟต์

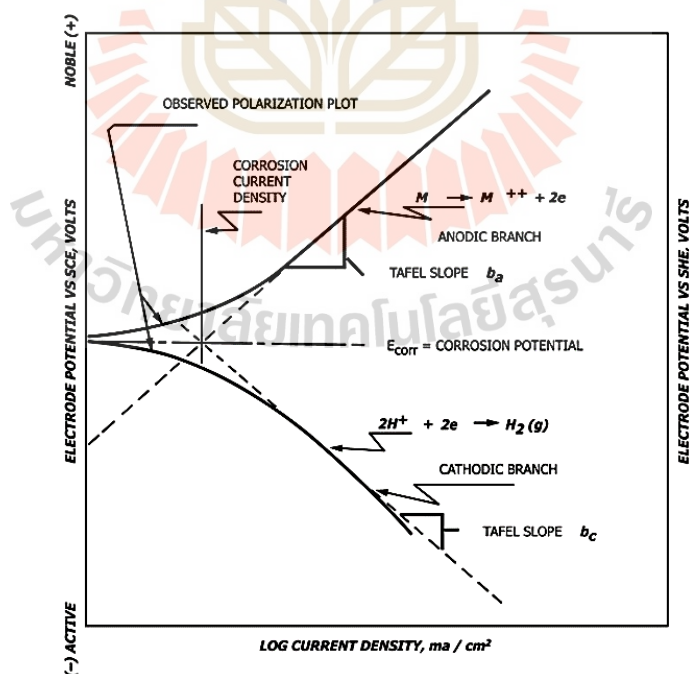
4) สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ซึ่งเป็นทางในการเคลื่อนที่ของไอออน

ค่าที่วัดได้จากการทดสอบนี้ จะแสดงผลเป็นเส้นโค้งโพลาริเซชัน (Polarization Curve) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.6 เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าจนกระทั่งโลหะเริ่มเกิดการกัดกร่อน เรียกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion Potential, E_{corr}) ณ จุดนี้จะได้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion Current Density, i_{corr}) ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาอัตราการกัดกร่อน ในขณะเดียวกัน ถ้าหากโลหะที่มีแพสซีฟฟิล์มที่ทนต่อการกัดกร่อน เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม ถ้าหากป้อนศักย์ไฟฟ้าต่อไปอีกโลหะนั้นจะสร้างแพสซีฟฟิล์ม และหาค่ากระแสไฟฟ้าแพสซีฟ (Passive Current Density, i_p) ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 เพื่อป้องกันการกัดกร่อน เป็นผลให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่หรือลดลง และเมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจนถึงระดับหนึ่งที่ทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเริ่มเพิ่มขึ้นอีกครั้ง แสดงว่าเกิดการสลายของแพสซีฟฟิล์มที่เป็นรูเข็ม (Pitting) และอ่านค่าศักย์ไฟฟ้าที่

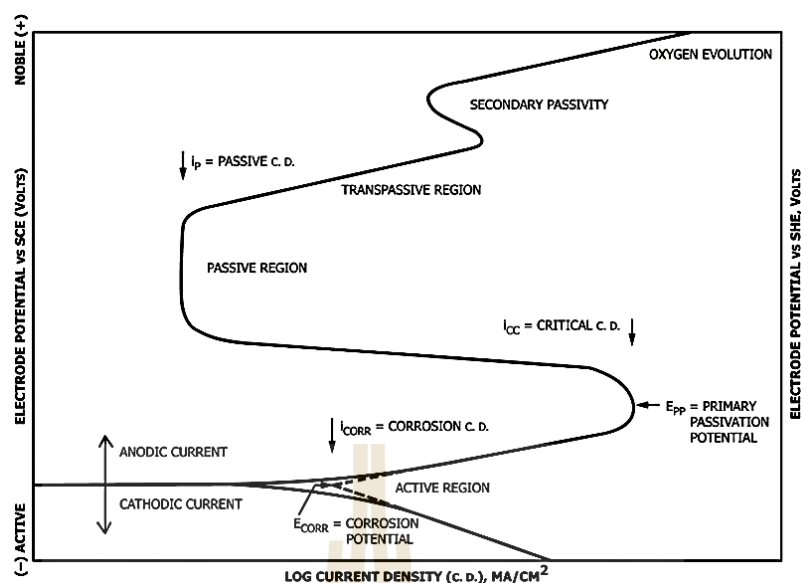
เกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting Potential, E_p) ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.7 (รุจิภรณ์ นาคขุนทด, 2560)



รูปที่ 2.5 การทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิค Potentiostatic Linear Polarization (ที่มา: <https://th.aliexpress.com>)



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (เส้นโค้งโพลาริเซชันสำหรับการกัดกร่อน) (ASTM G3-14, 2019)



รูปที่ 2.7 เส้นโค้งโพลาริเซชันสำหรับการกัดกร่อนที่เกิดแพสซีฟฟิล์ม (ASTM G3-14, 2019)

จากรูปที่ 2.6 ลักษณะของเส้นโค้งโพลาริเซชัน (Polarization Curve) แสดงพฤติกรรมของการกัดกร่อนของโลหะ โดยมีรายละเอียด (ASTM G3-14, 2019) ดังนี้

1) ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion Potential, E_{corr}) เป็นค่าศักย์ไฟฟ้าที่โลหะเริ่มเกิดการกัดกร่อน ซึ่งถ้าโลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนต่ำจะไวต่อการกัดกร่อนมากกว่าโลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนสูง

2) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion Current Density, i_{corr}) เป็นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ณ จุดเกิด E_{corr} โดยค่า i_{corr} จะแสดงถึงการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้า (Uniform Corrosion) และสามารถใช้อัตราการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้าต่อปีของขึ้นทดสอบได้

อัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate, CR) คำนวณตามสมการที่ 4 (ASTM G102-89, 2015)

$$CR = \frac{k \times i_{corr} \times EW}{A \times D} \quad (2.4)$$

โดยที่ k คือ ค่าคงที่ของการคำนวณในการเปลี่ยนหน่วยต่าง ๆ เช่น มีค่า 13 ถ้าอัตราการกัดกร่อนมีหน่วยเป็นมิลต่อปี (mil per year, mpy) หรือมีค่า 0.00327 ถ้าหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อปี (millimeter per year, mm/y)

i_{corr} คือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion Current Density) หน่วยเป็นไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ($\mu A/cm^2$)

- A คือ พื้นที่ผิวของชิ้นงานโลหะ หน่วยเป็นตารางเซนติเมตร (cm²)
- D คือ ความหนาแน่นของชิ้นงานโลหะ หน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm³)
- EW คือ ค่ามวลสมมูล (Equivalent Weight) ของชิ้นงานโลหะที่ผ่านการทดสอบ ซึ่งหาได้จากสมการที่ 5

$$EW = \frac{W}{n} \quad (2.5)$$

โดยที่ W คือ น้ำหนักอะตอมธาตุองค์ประกอบ
n คือ จำนวนเวเลนซ์อิเล็กตรอนของธาตุ

2.5.3 การทดสอบด้วยเทคนิคอิเล็กโตรเคมีคอลอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี (Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS)

เทคนิคอิเล็กโตรเคมีคอลอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี เป็นเทคนิควิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าที่ระบบเซลล์เคมีไฟฟ้า หลักการของเทคนิคนี้ คือ การใช้ไฟฟ้ากระแสสลับในรูปแบบฟังก์ชันไซน์ (Sine Wave) โดยควบคุมศักย์ไฟฟ้าโดยมีค่าแอมพลิจูดอยู่ที่ 10 มิลลิโวลต์ และความถี่อยู่ช่วง 0.1-10000 เฮิร์ตซ์ ตามมาตรฐาน ASTM G106-89 อย่างไรก็ตามสามารถปรับค่าตัวแปรต่าง ๆ ให้เหมาะสมกับวัสดุที่ต้องการทดสอบ โดยกำหนดค่าศักย์ไฟฟ้าในรูปของกระแสสลับให้ระบบตามด้วยวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้แล้วนำไปวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบเซลล์เคมีไฟฟ้านั้น (ASTM G106-89, 2015)

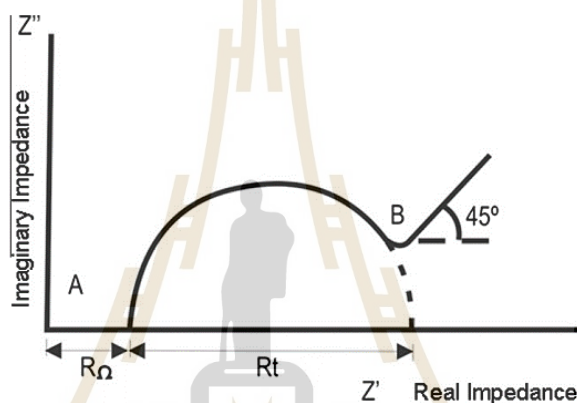
อิมพีแดนซ์ (Impedance) คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating Current, AC) โดยแสดงค่าอิมพีแดนซ์ตามกฎของโอห์ม (Ohm's law) (ASTM G106-89, 2015) ดังสมการที่ 2.6

$$E = IZ \quad (2.6)$$

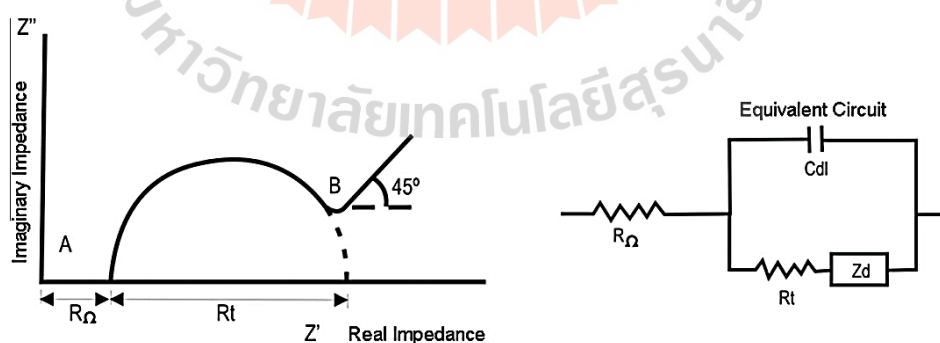
- โดยที่ E คือ ศักย์ไฟฟ้ามีหน่วยเป็น โวลต์ (V)
- I คือ กระแสไฟฟ้ามีหน่วยเป็น แอมป์ (A)
- Z คือ อิมพีแดนซ์หรือค่าความต้านทานในรูปของกระแสสลับมีหน่วยเป็น โอห์ม (Ω)

ขนาดอิมพีแดนซ์ประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ส่วนจริง (Real impedance, Z') และอิมพีแดนซ์ส่วนจินตภาพ (Imaginary Impedance, Z'') โดยอิมพีแดนซ์ส่วนจริง คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าอยู่ในเฟสเดียวกับกระแสไฟฟ้า (In Phase) ซึ่งตรงกันข้ามกับอิมพีแดนซ์จินตภาพที่อยู่ต่างเฟสกับกระแสไฟฟ้า (Out Phase) เมื่อนำค่าอิมพีแดนซ์ทั้งสองมาสร้างกราฟโดยให้ค่าอิมพีแดนซ์จริงอยู่ในแนวแกน X และค่าอิมพีแดนซ์จินตภาพอยู่ในแนวแกน Y จะได้กราฟที่เรียกว่า ไนควิสต์พล็อต (Nyquist Plot) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 และสมการที่ 2.7

$$Z = Z' + Z'' \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.8 กราฟไนควิสต์พล็อตแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ส่วนจริงและค่าอิมพีแดนซ์ส่วนจินตภาพ (Ribeiro, D.V., Abrantes, J.C. & C., 2016)



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างไนควิสต์พล็อตของวงจรไฟฟ้าเทียบเท่า (Ribeiro, D.V., Abrantes, J.C. & C., 2016)

ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้สามารถแปลงให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ของวงจรไฟฟ้าเพื่อทำนายพฤติกรรมของขั้วไฟฟ้าภายใต้สภาวะที่ศึกษา เพียงใช้ลักษณะของกราฟไนควิสต์พล็อตเทียบหาวงจรไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบต่าง ๆ ที่เรียกว่า วงจรไฟฟ้าเทียบเท่า (Equivalent Circuit) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยมีตัวแปรในวงจรเทียบเท่าดังนี้

- R_Ω หรือ R_s คือ ค่าความต้านทานของสารละลาย (Solution Resistance, R_s) ระหว่างขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (RE) กับขั้วไฟฟ้าชิ้นงาน (WE) มีหน่วยเป็น โอห์มตารางเซนติเมตร ($\Omega \text{ cm}^2$)
- R_t หรือ R_p คือ ค่าความต้านทานโพลาริเซชันบนพื้นผิวชิ้นงาน (Polarization Resistance, R_p) หน่วย โอห์มตารางเซนติเมตร ($\Omega \text{ cm}^2$)
- C คือ ตัวเก็บประจุ (Capacitance) สำหรับค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุแสดงในสมการที่ 8 มีหน่วยเป็น ฟาร์ดต่อตารางเซนติเมตร (F/cm^2)

$$Z = \frac{1}{j\omega C} \quad ; \quad j = \sqrt{-1} \quad (2.8)$$

โดยที่ ω คือ ความถี่เชิงมุมมีหน่วยเป็น เรเดียนต่อวินาที (rad/s) หรือ $2\pi f$, โดย f คือ ความถี่ มีหน่วยเป็น เฮิรตซ์ (Hz)

สำหรับ CPE หรือ Constant Phase Element ถูกนำมาใช้อธิบายเคมีไฟฟ้าแทนตัวเก็บประจุอุดมคติ (C) ตัวเก็บประจุอุดมคติจะถูกใช้เมื่อพื้นผิวมีลักษณะเหมือนกันตลอดทั้งแผ่น อย่างไรก็ตามในปฏิกิริยาแล้วเป็นไปไม่ได้ที่จะมีพื้นผิวลักษณะเดียวกันทั้งหมด ดังนั้น CPE จึงถูกนำมาใช้สำหรับในกรณีที่มีพื้นผิวไม่สม่ำเสมอโดยแสดงในสมการที่ 2.9 (Holm, S., Holm, T., Martinsen, Ø.G., 2021)

$$Z = \frac{1}{(j\omega C)^\alpha} \quad ; \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (2.9)$$

2.6 การตรวจสอบหลังทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในคอนกรีตเสริมแรง

สำหรับการวิเคราะห์ภายหลังทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในคอนกรีตเสริมแรง จะทำการวิเคราะห์ไอออนในน้ำเค็มจำลองหลังทดสอบด้วยเทคนิคไอออนโครมาโทกราฟี (Ion Chromatography, IC) วิเคราะห์ปริมาณเหล็ก (Total Iron) ในน้ำเค็มจำลองหลังทดสอบด้วยเครื่องมือสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) วิเคราะห์ความเสียหายและองค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning

Electron Microscope, SEM) และเทคนิคเอ็กซ์เรย์อิเล็กตรอนพลังงานแสง (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS)

2.6.1 การวิเคราะห์ไอออนที่ไม่ใช่โลหะในน้ำเค็มจำลองหลังทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคไอออนโครมาโทกราฟี (Ion Chromatography, IC)

หลักการของไอออนโครมาโทกราฟี คือ เป็นวิธีที่ใช้การแยกสารผสมในสภาวะการแตกตัวเป็นไอออน โดยอาศัยหลักการแลกเปลี่ยนประจุภายในคอลัมน์ ในระบบจะประกอบด้วยตัวพาซึ่งเป็นเฟสเคลื่อนที่ในที่นี้เรียกว่า Eluent ส่วนมากจะเป็นสารละลายบัฟเฟอร์ ซึ่งเป็นตัวพาสารตัวอย่าง เข้าสู่คอลัมน์ (เฟสคงที่) ไอออนที่อยู่ในเฟสเคลื่อนที่และไอออนในสารตัวอย่างจะแข่งขันกันเข้าแลกเปลี่ยนกับประจุที่อยู่ผิวของเฟสคงที่โดยทั่วไปไอออนที่มีขนาดเล็กจะแยกออกมาก่อน และแปรผลออกมาในรูปของโครมาโทแกรม (วรเทพ พรประเสริฐ, 2556) ลักษณะเครื่องมือวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 เครื่องมือสำหรับเทคนิค Ion Chromatography (IC) (Wikipedia, 2022)

2.6.2 วิเคราะห์ปริมาณเหล็ก (Total Iron) ในน้ำเค็มจำลองหลังทดสอบการกัดกร่อนด้วยเครื่องมือสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)

Spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดปริมาณการดูดซับแสงของสารเคมีโดยการวัดความเข้มของแสงเมื่อลำแสงลอดผ่านสารละลายตัวอย่าง หลักการพื้นฐานคือสารประกอบแต่ละชนิดดูดซับหรือส่งแสงผ่านช่วงความยาวคลื่นที่จำเพาะ โดยใช้แสงเหนือช่วงอัลตราไวโอเลต (185-400 นาโนเมตร) และช่วงที่มองเห็นได้ (400-700 นาโนเมตร) ของสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เครื่องมือทดสอบดังแสดงในรูปที่ 2.11 การวัดนี้ใช้เพื่อวัดปริมาณของสารเคมีที่รู้จัก เช่น

การหาปริมาณเหล็กจะใช้ช่วงความยาวคลื่นจำเพาะที่เหล็กดูดกลืนแสง คือ 510 นาโนเมตร (The LibreTexts Libraries, 2022)



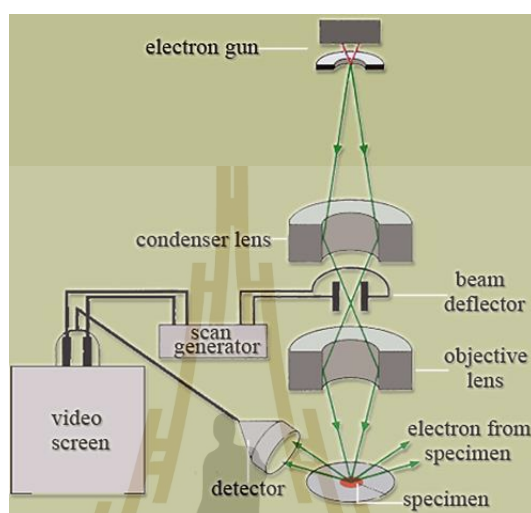
รูปที่ 2.11 เครื่อง Spectrophotometer

2.6.3 การวิเคราะห์พื้นผิวหลังทดสอบการกัดกร่อนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร การเตรียมตัวอย่างเพื่อที่จะดูด้วยเครื่อง SEM ไม่จำเป็นต้องมีขนาดที่บาง (เพราะไม่ได้ตรวจวัดจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง) การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจดังแสดงในรูปที่ 2.12 ภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้เป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัญญาณและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง นิยมนำมาตรวจสอบลักษณะผิวภายนอกของตัวอย่าง ตรวจสอบการเรียงตัวของผลึกด้วยระบบการรับสัญญาณเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงตัวอย่างจากการดิ่ง ด้วยเทคนิคพลังงานแบบกระจายสเปกโตรเมตรี (Energy Dispersive Spectrometry, EDS) ลักษณะของผลที่ได้ คือได้ภาพ 3 มิติจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron, SE) หรือได้ภาพ 2 มิติจากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back Scattered Electron, BSE) และธาตุต่าง ๆ ที่อยู่ในสารตัวอย่าง

ลักษณะชิ้นงานที่นำมาทำการทดสอบ ปริมาณชิ้นงานที่ต้องเตรียมเพื่อทำการวิเคราะห์ หากเป็นของแข็ง ควรเตรียมมาโดยมีขนาดไม่เกิน 3 ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งแล้วแต่ภาชนะที่รองรับ และถ้าชิ้นงานตัวอย่างไม่นำไฟฟ้าอาจต้องมีการเคลือบผิวตัวอย่างด้วยทองหรือคาร์บอน

การประยุกต์ใช้งาน มักนิยมนำมาตรวจสอบลักษณะผิวภายนอกของตัวอย่าง ตรวจสอบการเรียงตัวของผลึกด้วยระบบการรับสัญญาณเลี้ยวเบนของ BSE ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลง ตัวอย่างที่ผ่านการดอง หรือเกิดความเสียหาย (สถาบันนวัตกรรมและพัฒนาระบบการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล, ม.ป.ป.) ลักษณะเครื่องมือวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.12 ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
(สถาบันนวัตกรรมและพัฒนาระบบการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล, ม.ป.ป.)



รูปที่ 2.13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)
(CAE, 2024)

2.6.4 การวิเคราะห์พื้นผิวหลังทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคเอกซเรย์โฟโตอิเล็กตรอน (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS) (สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน, 2562)

เทคนิคนี้สามารถทำได้โดยฉายแสงที่มีค่าพลังงานหรือความยาวคลื่นค่าเดียว (Mono-Energetic) ที่โดยทั่วไปอยู่ในย่านของ UV ถึง X-ray ลงบนพื้นผิวของวัสดุหรือตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ หากแสงที่ฉายมีค่าพลังงานสูงกว่าค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding Energy, BE) ของอิเล็กตรอนในอะตอมที่เป็นองค์ประกอบของตัวอย่าง อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นให้หลุดออกจากอะตอมและพื้นผิวของวัสดุจากปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเรียกว่าโฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) ซึ่งอิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจวัดค่าพลังงานจลน์ (Kinetic Energy, KE) ด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า Electron Energy Analyzer ดังแสดงในรูปที่ 2.14 โดยค่าพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่วัดได้มีความสัมพันธ์กับค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนคำนวณตามสมการที่ 2.10

$$KE = h\nu - BE - e\phi \quad (2.10)$$

โดยที่ $h\nu$ คือ ค่าพลังงานของแสงที่ใช้

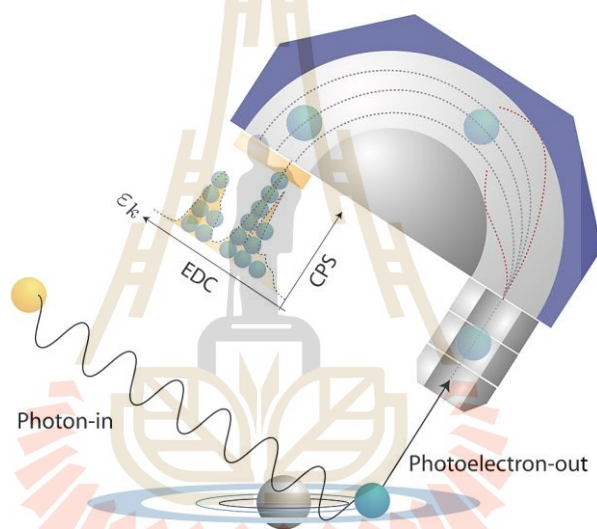
$e\phi$ คือ ค่า Work Function ของ Electron Energy Analyzer

เทคนิค XPS หรือที่รู้จักกันในชื่อ Electron Spectroscopy for Chemical Analysis (ESCA) ใช้แสงในย่านของ Soft X-ray เพื่อการกระตุ้นให้เกิดโฟโตอิเล็กตรอนและเน้นที่การวิเคราะห์ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนชั้นในสุด (Core Electron) เนื่องจากค่าพลังงานดังกล่าวเป็นค่าเฉพาะของอะตอมในแต่ละธาตุและขึ้นอยู่กับสถานะทางเคมีของอะตอมนั้น การวิเคราะห์ดังกล่าวจึงสามารถระบุชนิดและสถานะทางเคมีของธาตุที่เป็นองค์ประกอบบริเวณพื้นผิวของสารที่ต้องการวิเคราะห์ได้ ทั้งนี้เทคนิค XPS สามารถประยุกต์ใช้กับพื้นผิววัสดุหลากหลายชนิด เช่น โลหะสารกึ่งตัวนำ เซรามิกส์ แก้ว ฟัน กระดูก ผ้า ฯลฯ

ข้อมูลและลักษณะเฉพาะของเทคนิค XPS มีดังนี้

- 1) สามารถระบุชนิดของธาตุ (ตั้งแต่ Li ถึง U) ที่เป็นองค์ประกอบบนพื้นผิวของวัสดุ
- 2) สามารถระบุสถานะทางเคมี (Chemical State) เช่น สถานะทางออกซิเดชัน (Oxidation State) หรือ พันธะทางเคมีระหว่างอะตอม ของธาตุที่เป็นองค์ประกอบได้ ตัวอย่างเช่น สามารถระบุหรือแยก Al-Metal ออกจาก Al-Oxide ได้
- 3) สามารถระบุร้อยละที่มีอยู่ของธาตุที่สนใจเทียบกับธาตุอื่นที่เป็นองค์ประกอบ

- 4) เป็นเทคนิคที่วัดคุณสมบัติของสารในระดับพื้นผิว (Surface Sensitive) ที่ระดับ 5–100 อังสตรอม (Angstroms) เหมาะสำหรับสารตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นฟิล์มบาง
- 5) ไม่ทำลายคุณสมบัติของสารในการวัด
- 6) สามารถตรวจวิเคราะห์สารที่มีปริมาณน้อย ๆ หรือความเข้มข้นต่ำในระดับร้อยละ 0.1
- 7) การทดลองทำในระบบสุญญากาศความดันต่ำกว่า 10^{-9} มิลลิบาร์
- 8) สามารถระบุการกระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบบนพื้นผิว การกระจายตัวของธาตุตัวด้านข้างจากการปรับตำแหน่งของการวัดและการกระจายตัวของธาตุตัวในแนวลึกจากการใช้เทคนิค Depth Profile



รูปที่ 2.14 หลักการทำงานของ XPS (สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน, 2562)

2.7 การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับแผนงานวิจัยการประเมินการกัดกร่อนของเหล็กในคอนกรีตเสริมแรง สามารถสรุป ได้ดังนี้

Zaki Ahmad (Ahmad, Z., 2006) การผสมคอนกรีตนั้นควรใช้น้ำที่ปราศจากไอออนหรือแร่ธาตุอื่น (Unmineralized Water) และสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (Water-Cement Ratio, W/C Ratio) จะต้องอยู่ในช่วง 0.40-0.50 และควรทำการบ่มคอนกรีตเป็นเวลาอย่างน้อย 28 วัน เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีความแข็งแรงสูงและมีรพุนน้อย นอกจากนี้ยังมีการกล่าวถึงความทนทานและการเสื่อมสภาพของคอนกรีตเสริมแรง คือ คอนกรีตนั้นเป็นวัสดุที่มีความทนทานมาก และเหล็กที่ฝังอยู่ในคอนกรีตนั้นทำหน้าที่เป็นวัสดุเสริมแรง ซึ่งเหล็กเสริมแรงจะถูกล้อมรอบด้วยคอนกรีตที่มีสภาพเป็น

ต่างทำให้ลดความเสี่ยงในการเกิดการกัดกร่อนของเหล็กได้ โดยมีเงื่อนไขอยู่ 2 ประการที่ช่วยยืดอายุการใช้งานคอนกรีตเสริมแรง ดังนี้ 1.) คอนกรีตเสริมแรงต้องไม่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพ และ 2.) เหล็กเสริมแรงต้องไม่ถูกทำให้กัดกร่อนโดยจะต้องมีการรักษาสภาพความเป็นด่างไว้เพื่อให้ไม่เกิดการกัดกร่อน

เมทิตา และคณะ (เมทิตา แก้วพันธ์ และ วันชัย ยอดสุขใจ, 2561) ทดสอบประสิทธิภาพของสารยับยั้งการกัดกร่อนในการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM G109-99a (ASTM G109-99a, 1997) พบว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนเกิดการกัดกร่อนได้เร็วกว่าคอนกรีตที่ใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน กล่าวคือ มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนสูงและค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ต่ำ และยังพบอีกว่าคอนกรีตที่ใช้สารยับยั้งประเภททาเคลือบที่ผิว (Corrosion Inhibitor impregnation) ไม่เหมาะสมสำหรับใช้งานคอนกรีตบริเวณที่ต้องแช่น้ำ และคอนกรีตประเภทที่มีประสิทธิภาพให้การยับยั้งการกัดกร่อนได้ดีที่สุด คือ คอนกรีตที่ใช้สารยับยั้งประเภทผสมเพิ่มในคอนกรีตทั้งแอโนดและแคโทด

สหลาภ (สหลาภ หอมวุฒิมังค์, 2559) ทดสอบการสึกกร่อนของคอนกรีตตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C1138 (Under Water Method) ในน้ำ โดยนำตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 มิลลิเมตร หนา 100 มิลลิเมตร ไปติดตั้งไว้ในชุดทดสอบ ที่มีเหล็กกล้าไร้สนิมก้อนกลม 3 ขนาด ที่มีจำนวนแตกต่างกันวางบนผิวหน้าของก้อนตัวอย่างคอนกรีต แล้วเติมน้ำสะอาดให้สูงกว่าผิวคอนกรีตประมาณ 16 เซนติเมตร แล้วกวนน้ำในถังด้วยใบพัดตามมาตรฐานด้วยความเร็ว $1,000 \pm 100$ รอบต่อนาที เหล็กกล้าไร้สนิมจะเคลื่อนที่ตามการไหลวนของน้ำปะทะบนผิวของตัวอย่างคอนกรีตจนครบเวลาที่กำหนด จึงนำตัวอย่างคอนกรีตออกมาทำความสะอาดและประเมินความเสียหายด้วยการชั่งน้ำหนัก

M. A. El-Gelany (M. A. El-Gelany, n.d.) ทดสอบการกัดกร่อนของคอนกรีตเสริมแรงด้วยเหล็กโดยใช้ Electrochemical Technique: Linear Polarization Resistance Technique โดยเตรียมตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร สูง 300 มิลลิเมตร แล้วนำเหล็กเส้นความยาว 330 มิลลิเมตร จำนวน 1 เส้นฝังไว้ตรงกลางของแท่งคอนกรีตโดยกำหนดให้เหล็กเส้นเปลือยความยาว 130 มิลลิเมตร สัมผัสโดยตรงกับคอนกรีตที่ระยะห่างจากฐานด้านล่างคอนกรีต 70 มิลลิเมตร โดยความยาวอีก 200 มิลลิเมตรที่เหลือจะถูกเคลือบด้วยอีพอกซี จากนั้นนำแท่งคอนกรีตเสริมเหล็กนี้ไปติดตั้งทดสอบด้วย Linear Polarization Resistance Technique โดยจุ่มแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1-5%wt แล้วประมวลผลจากเส้นโค้งโพลาไรเซชัน เป็นอัตราการกัดกร่อน พบว่าสามารถทดสอบและประมวลผลการกัดกร่อนของเหล็กในคอนกรีตได้ และพบว่าอัตราการกัดกร่อนแปรตามปริมาณโซเดียมคลอไรด์ที่ใช้ในการทดสอบ

A. Poursaei (Poursaei, A., 2010), (Poursaei, A., 2011) ทดสอบการกัดกร่อนของคอนกรีตเสริมแรงด้วยเหล็กโดยใช้หลายเทคนิคประกอบกัน แล้วหาความสัมพันธ์ของผลลัพธ์ที่ได้ เทคนิคที่ใช้ คือ Electrochemical Technique และ Half-Cell Potential โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2.5%wt ที่ระยะเวลาในการทดสอบต่างๆ ตั้งแต่ระยะเวลา 17-120 สัปดาห์ พบว่าสามารถทดสอบและประมวลผลการกัดกร่อนของเหล็กในคอนกรีตได้

Qiufa Xu et al. (Xu, Q., Gao, K., Lv, W., & Pang, X., 2016) ได้ทำการศึกษาผลของธาตุผสมโครเมียม (Cr) และทองแดง (Cu) ต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าธาตุผสมต่ำ (Low-Alloy Steel) ในน้ำบาดาลจำลอง โดยน้ำบาดาลนั้นจำลองมาจากน้ำบาดาลทางภาคตะวันตกเฉียงเหนือของจีน และเตรียมสารละลายน้ำบาดาลจำลองจากสารเคมีเกรดงานวิเคราะห์ (Analytical Reagents) และน้ำปราศจากไอออน (Deionized Water) องค์ประกอบทางเคมีของน้ำบาดาลจำลองที่ใช้เป็นสิ่งแวดล้อมการกัดกร่อนดังแสดงในตารางที่ 2.5 โดยที่ค่า pH ของสารละลายถูกปรับด้วย H_2SO_4 ถึง 7.2 โดยใช้วิธีการจุ่มแช่และประเมินการกัดกร่อนด้วยวิธีการทางเคมีไฟฟ้า พบว่าเหล็กกล้าธาตุผสมต่ำมีความต้านทานการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform Corrosion) สูงกว่าเหล็กกล้าคาร์บอน และจากการศึกษาพื้นฐานวิทยาของการกัดกร่อนในที่แคบ (Crevice Corrosion) ทำให้ทราบว่า การกัดกร่อนแบบรูพรุนเกิดขึ้นเฉพาะกับเหล็กกล้าที่มีธาตุโครเมียมสูงเท่านั้น ดังนั้น ธาตุโครเมียมและ ทองแดงมีผลในการเพิ่มผลกระทบจากการกัดกร่อนในที่แคบของเหล็กกล้า

K.T. Chiang et al. (Chiang, K.T., Dunn, D.S., & Cragnolino, G.A., 2007) ได้ทำการทดสอบ Slow strain rate เพื่อประเมินผลของการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของน้ำบาดาลจำลองต่อความไวต่อการแตกร้าวเนื่องจากการกัดกร่อนแบบมีความเค้นร่วม (Stress Corrosion Cracking, SCC) ของ annealed Alloy 22 (UNS N06022) โดยการทดสอบประกอบด้วยประจุลบที่เป็นส่วนประกอบในน้ำจำลองเข้มข้น การแตกร้าวเนื่องจากการกัดกร่อนแบบมีความเค้นร่วมนั้นพบว่าการเกิดในน้ำจำลองเข้มข้น และเกิดการเปลี่ยนแปลง (เกิดการกำจัดไนเตรต ซัลเฟต ฟลูออไรด์ หรือคลอไรด์) ที่ศักย์ไฟฟ้าขั้วบวกเท่ากับ 356 มิลลิโวลต์ เทียบกับ Saturated Calomel Electrode (SCE) ที่ 95°C (203°F) แม้ว่าไบคาร์บอเนตไอออนจะเป็นองค์ประกอบหลักในน้ำจำลองเข้มข้นที่ก่อให้เกิดการแตกร้าวเนื่องจากการกัดกร่อนแบบมีความเค้นร่วม แต่มีผลเสริมฤทธิ์กันระหว่างไบคาร์บอเนตและคลอไรด์ไอออน ที่ความเข้มข้นไบคาร์บอเนตคงที่ ความไวของ Alloy 22 ต่อการเกิดการแตกร้าวเนื่องจากการกัดกร่อนแบบมีความเค้นร่วมจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนที่เพิ่มขึ้น และลดลงตามอุณหภูมิ ในสารละลายไบคาร์บอเนตบวกคลอไรด์ การแตกร้าวเนื่องจากการกัดกร่อนแบบมีความเค้นร่วมถูกพบที่ศักย์ไฟฟ้าขั้วบวกสูงเท่านั้น และไม่พบการแตกร้าวเนื่องจากการกัดกร่อนแบบมีความเค้นร่วมในโซเดียมคลอไรด์กับสารละลายโซเดียมไนเตรตในกรณีที่ไม่มีไบคาร์บอเนต

ตารางที่ 2.5 ส่วนผสมทางเคมีของน้ำบาดาลจำลอง (Xu, Q., Gao, K., Lv, W., & Pang, X., 2016)

องค์ประกอบทางเคมี	ความเข้มข้น (mg/L)
NaNO_3	41.4
$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	353.4
NaCl	1780.9
CaF_2	3.9
Na_2CO_3	243.8
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	876.2
KBr	0.1
Na_2SO_4	647.2
K_2SO_4	35.8

จากผลที่รายงานในวรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้น พบว่าส่วนใหญ่เป็นการทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กในคอนกรีตเสริมแรงในสิ่งแวดล้อมแบบจำลอง เช่น น้ำสะอาด สารละลายไฮเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ และน้ำเค็มจำลองในพื้นที่เฉพาะของงานวิจัย ในขณะเดียวกันที่ประเทศไทยก็มีพื้นที่ที่มีปริมาณคลอไรด์ในดินหรือน้ำสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอำเภอโนนไทย จังหวัดนครราชสีมา ที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายจากการกัดกร่อนที่รุนแรงกว่าปกติ และยังขาดการประเมินการกัดกร่อนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมแรงที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีความเค็มจากเกลือคลอไรด์สูง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงต้องการประเมินการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในคอนกรีตเสริมแรงในน้ำเค็ม โดยจำลองจากน้ำเค็มในพื้นที่บริเวณอำเภอโนนไทย จังหวัดนครราชสีมา ที่ผ่านการสำรวจและวิเคราะห์ผลตามรายงานการวิจัยเรื่องผลกระทบของน้ำเค็มต่อคุณสมบัติของวัสดุทางวิศวกรรม (กิตติเทพ เฟื่องขจร, พรวิสา วงศ์ปัญญา, เดโช เฟื่องภูมิ, และธนัชฐา ทองประภา, 2566) และประเมินอายุการใช้งานของคอนกรีตเสริมแรงด้วยเหล็ก ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการวางแผนการซ่อมบำรุงหรือสร้างใหม่ได้เหมาะสม ทำให้ประหยัดงบประมาณแผ่นดิน เพิ่มคุณภาพชีวิตให้แก่ประชาชนในชุมชน ตลอดจนก่อให้เกิดประโยชน์ต่อประเทศไทยในเชิงการนำความรู้จากหน่วยงานภาครัฐ มหาวิทยาลัย ไปประยุกต์ใช้งานจริงแก่ประชาชนต่อไป

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มตามลักษณะการใช้งานในแต่ละขั้นตอนการวิจัย ดังต่อไปนี้

3.1.1 อุปกรณ์สำหรับการเตรียมชิ้นงานคอนกรีตเสริมแรง

- 3.1.1.1 เหล็กข้ออ้อยหน้าตัด 12 มิลลิเมตร (DB12 SD40T)
- 3.1.1.2 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดาประเภท 1
- 3.1.1.3 ทรายละเอียด
- 3.1.1.4 หินขนาด 3/16 ถึง 3/4
- 3.1.1.5 น้ำปราศจากไอออน
- 3.1.1.6 เครื่องตัดชิ้นงาน Wire-Cut EDM Machine
- 3.1.1.7 ลวดตัดเหล็กสำหรับเครื่องตัดชิ้นงาน Wire-Cut EDM Machine
- 3.1.1.8 เครื่องตัดโลหะแบบเลื่อย
- 3.1.1.9 เครื่องขัดผิวชิ้นงานแบบหยาบและละเอียด
- 3.1.1.10 เครื่องชั่งน้ำหนัก 3 และ 4 ตำแหน่ง
- 3.1.1.11 เลื่อยมือ
- 3.1.1.12 แปรงลวดขัดเหล็ก
- 3.1.1.13 ถังสำหรับตวงปูน หิน และทราย
- 3.1.1.14 กระบะผสมคอนกรีต
- 3.1.1.15 เกียงสำหรับตักคอนกรีต
- 3.1.1.16 แผ่นอะคริลิกหรือไม้ทนความชื้น ใช้สำหรับประกอบเป็นแบบหล่อคอนกรีตเสริมแรง
- 3.1.1.17 เทปกั้นซึม
- 3.1.1.18 เชือก

3.1.1.19 กระดาษทรายเบอร์ 400, 600, 800, 1000, และ 1200

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดสอบการกัดกร่อน

3.1.2.1 เครื่องโพเทนชิโอสแตท Autolab รุ่น PGSTAT302N

3.1.2.2 อิเล็กโทรดอ้างอิง (Reference Electrode, RE) คือ Ag/AgCl (3.0M KCl)

3.1.2.3 อิเล็กโทรดวัดกระแส (Counter Electrode, CE) คือ แท่งแกรไฟต์

3.1.2.4 อิเล็กโทรดตัวอย่าง (Working Electrode, WE) คือ เหล็กข้ออ้อย DB12 SD40T

3.1.2.5 เครื่องวัดค่าพีเอชของสารละลาย ยี่ห้อ METTLER TOLEDO รุ่น S220

3.1.2.6 เครื่องวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ High Impedance Digital Multimeter ยี่ห้อ FLUKE รุ่น 1587

3.1.3 สารเคมีที่ใช้ในการจำลองน้ำบาดาล

3.1.3.1 โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

3.1.3.2 แมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2$)

3.1.3.3 แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$)

3.1.3.4 แคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$)

3.1.3.5 โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl)

3.1.3.6 แอลกอฮอล์

3.1.4 เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์พื้นผิวการกัดกร่อนและองค์ประกอบทางเคมีในน้ำ

3.1.4.1 กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope, OM)

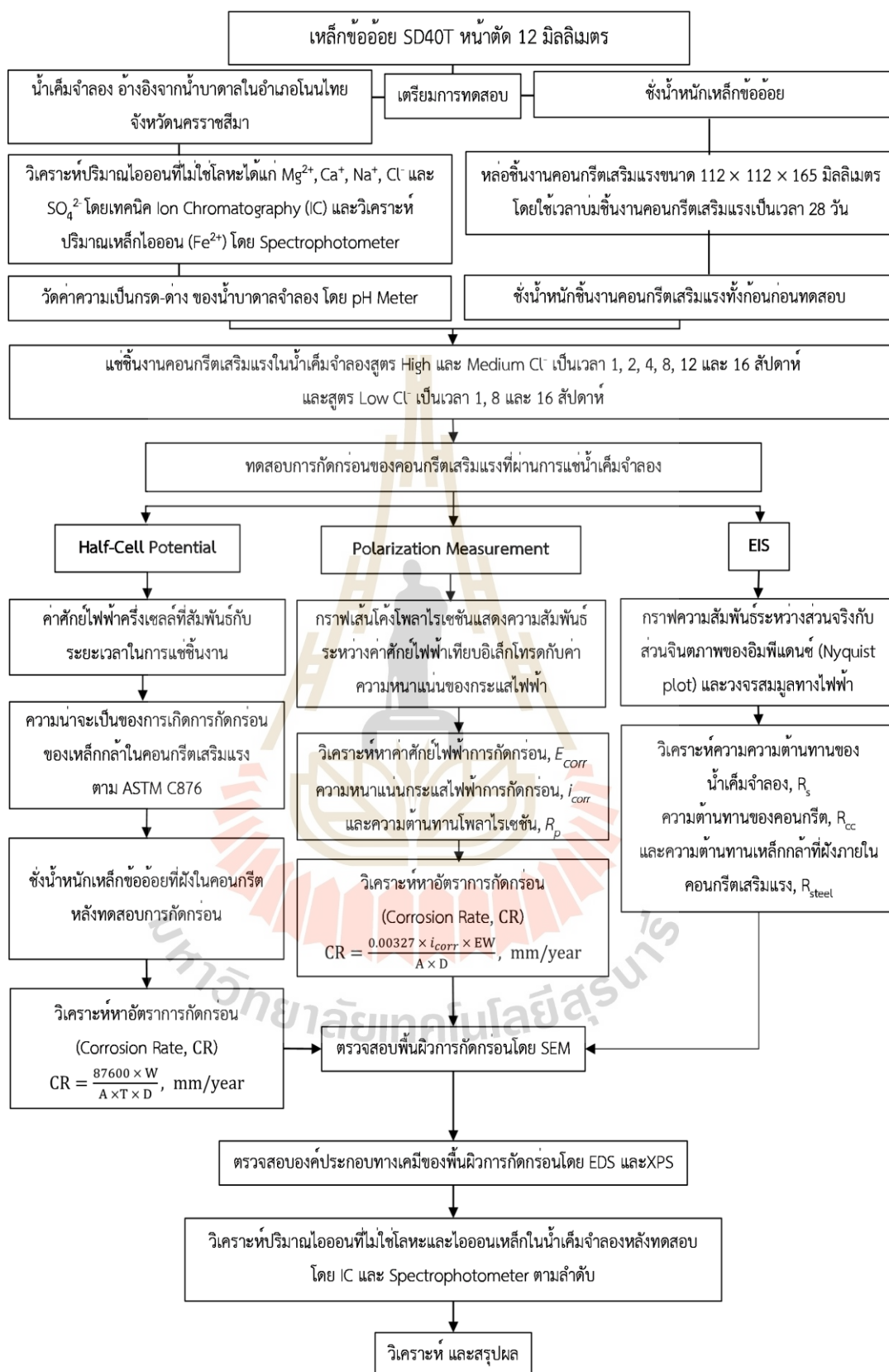
3.1.4.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุโดยใช้รังสีเอกซ์ (Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-ray Spectrometer, SEM-EDS)

3.1.4.3 เครื่องเอ็กซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโตรสโกปี (X-ray Photoemission Spectroscopy, XPS)

3.1.4.4 เครื่องวิเคราะห์ไอออนที่ไม่ใช่โลหะ เครื่องไอออนโครมาโตกราฟี (Ion Chromatography, IC)

3.2 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงรายละเอียดระเบียบวิธีการวิจัย

จากรูปที่ 3.1 เป็นแผนภาพแสดงรายละเอียดระเบียบวิธีการวิจัย โดยเริ่มต้นจากการนำเหล็กข้ออ้อยหน้าตัด 12 มิลลิเมตร ตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค IC และ Spectrophotometer ซึ่งนำหน้าก่อนหล่อเป็นชิ้นงานคอนกรีตเสริมแรง เมื่อหล่อเป็นชิ้นงานคอนกรีตเสริมแรงแล้วจะถูกนำไปบ่มเป็นเวลา 28 วัน หลังจากนั้นจะจุ่มแช่ในน้ำเค็มจำลองสูตร High Cl^- และ Medium Cl^- เป็นระยะเวลา 1, 2, 4, 8, 12 และ 16 สัปดาห์ สูตร Low Cl^- เป็นระยะเวลา 1, 8 และ 16 สัปดาห์ เนื่องจากเน้นทดสอบในสิ่งแวดล้อมการกัดกร่อนที่รุนแรงจึงสนใจที่ศึกษาการกัดกร่อนในน้ำจำลองสูตร High Cl^- และ Medium Cl^- ส่วนสูตร Low Cl^- นั้นใช้เป็นตัวเปรียบเทียบให้เห็นความแตกต่างระหว่างการกัดกร่อนที่มีฤทธิ์รุนแรงกับมีฤทธิ์ไม่รุนแรง โดยในระหว่างที่แช่นั้นจะทำการวัดค่าพีเอชของน้ำเค็มจำลอง เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดด่างที่เกิดขึ้น เมื่อครบระยะเวลาในการจุ่มแช่ที่กำหนด จากนั้นนำไปทดสอบการกัดกร่อนโดยแบ่งออกเป็น 3 เทคนิคได้แก่ เทคนิค Half-Cell Potential เทคนิค LP และเทคนิค EIS

การทดสอบการกัดกร่อนในแต่ละเงื่อนไขการทดลองจะทดสอบซ้ำจำนวน 3 ครั้ง จากนั้นจะนำผลการทดสอบที่ได้มาประมวลผลเป็นความน่าจะเป็นในการเกิดการกัดกร่อน อัตราการกัดกร่อนและความต้านทานการกัดกร่อน เป็นต้น หลังทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีดังกล่าวจะนำเหล็กกล้าที่ฝังภายในออกมาซึ่งนำหน้าภายหลังการทดสอบเพื่อใช้ในการคำนวณอัตราการกัดกร่อนจากน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง ตรวจสอบพื้นผิวหลังกัดกร่อนด้วย SEM-EDS และ XPS รวมทั้งวิเคราะห์ไอออนในน้ำเค็มจำลองหลังการทดสอบเพื่อดูปริมาณไอออนต่าง ๆ ด้วย IC และ Spectrophotometer

3.3 การเตรียมผิวชิ้นงานเหล็กข้ออ้อย

ขัดเตรียมผิวของเหล็กข้ออ้อยหน้าตัด 12 มิลลิเมตร ด้วยแปรงลวดขัดเหล็กเพื่อกำจัดสนิมออกไป จากนั้นล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนตามด้วยแอลกอฮอล์จากนั้นเป่าแห้ง และขัดหน้าตัดบริเวณที่ต้องทำการต่อข้อเซลล์ไฟฟ้าด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400, 600, 800, 1000 และ 1200 เพื่อให้หน้าไฟฟ้าและได้สัญญาณจากเครื่องมือทดสอบที่ดีขึ้น

3.4 การเตรียมชิ้นงานคอนกรีตเสริมแรง

ชิ้นงานคอนกรีตเสริมแรงด้วยเหล็กขนาด $112 \times 112 \times 165$ มิลลิเมตร โดยมีระยะครอบคลุมของคอนกรีตอยู่ที่ 50 มิลลิเมตร ถูกหล่อขึ้นรูปโดยใช้วัสดุดังนี้ 1. เหล็กข้ออ้อยเกรด SD40T ขนาดหน้าตัด 12 มิลลิเมตร ยาว 195 และ 165 มิลลิเมตร สำหรับการทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิค Half-Cell Potential และ LP และ EIS ตามลำดับ 2. ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 เนื่องจากเป็นปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดาสำหรับใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างทั่วไป 3.มวลรวมหยาบหรือหินสำหรับก่อสร้างขนาด 3/16 ถึง 3/4 นิ้ว 4. มวลรวมละเอียด

หรือทรายสำหรับก่อสร้าง และ 5. น้ำปราศจากไอออน โดยมีส่วนผสมดังตารางที่ 3.1 โดยมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (Water Cement Ratio, W/C Ratio) เท่ากับ 0.50 (Ahmad, Z., 2006) แบบหล่อคอนกรีตเสริมแรงขนาด $112 \times 112 \times 165$ มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ทั้งนี้ชิ้นงานคอนกรีตเสริมแรงทั้งหมดจะถูกบ่มเป็นเวลา 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C876-15 ก่อนนำไปจุ่มแช่ในสิ่งแวดล้อมการกัดกร่อน

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมที่ใช้ในการหล่อคอนกรีตเสริมแรงต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร (m^3) (Wongpanya P., Phangking D., & Phueakphum, D., 2024)

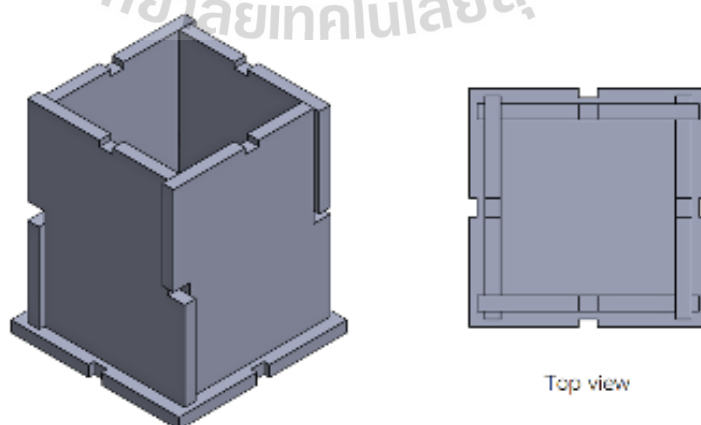
ปริมาตร (m^3)	ปูนซีเมนต์ (kg)	น้ำ (kg)	หิน (kg)	ทราย (kg)
1	305	153	1275	635

3.4.1 ชิ้นงานคอนกรีตเสริมแรงสำหรับเทคนิค Half-Cell Potential

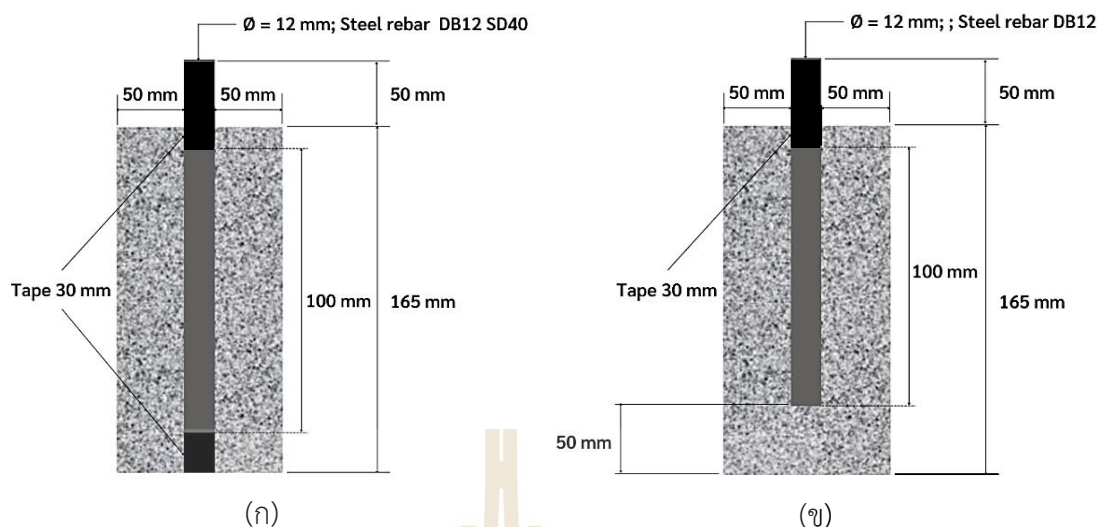
ชิ้นงานมีขนาด $112 \times 112 \times 165$ มิลลิเมตร โดยมีเหล็กข้ออ้อย หน้าตัด 12 มิลลิเมตร ยาว 195 มิลลิเมตร ฝังอยู่ในคอนกรีตจำนวน 1 เส้นต่อ 1 ชิ้นงาน โดยมีระยะครอบคลุมของคอนกรีตอยู่ที่ 50 มิลลิเมตร ลักษณะชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.3 (ก)

3.4.2 ชิ้นงานคอนกรีตเสริมแรงสำหรับเทคนิค Potentiostatic Linear Polarization และ Electrochemical Impedance Spectroscopy

ชิ้นงานมีขนาด $112 \times 112 \times 165$ มิลลิเมตร โดยมีเหล็กข้ออ้อย หน้าตัด 12 มิลลิเมตร ยาว 165 มิลลิเมตร ฝังอยู่ในคอนกรีตจำนวน 1 เส้นต่อ 1 ชิ้นงาน โดยมีระยะครอบคลุมของคอนกรีตอยู่ที่ 50 มิลลิเมตร ลักษณะชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.3 (ข)



รูปที่ 3.2 แบบหล่อคอนกรีตเสริมแรงขนาด $112 \times 112 \times 165$ มิลลิเมตร (ผู้วิจัยออกแบบเอง)



รูปที่ 3.3 ภาพตัดขวางจำลองของชิ้นงานคอนกรีตเสริมแรงที่ใช้ในการทดสอบด้วยเทคนิค Half-Cell Potential (ก) และเทคนิค LP และ EIS (ข) (ผู้วิจัยสเก็ตช์ภาพเอง)

3.5 การเตรียมน้ำเค็มจำลอง

ผู้วิจัยต้องการศึกษาการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในคอนกรีตเสริมแรงที่แช่ในน้ำเค็มจำลอง โดยจำลองจากน้ำบาดาลที่ได้จากการสำรวจในพื้นที่อำเภอโนนไทย จังหวัดนครราชสีมา ทั้งนี้ น้ำบาดาลตัวอย่างถูกวิเคราะห์ปริมาณไอออนต่าง ๆ ด้วยเทคนิค IC ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 3.2 และรูปที่ 3.4 ซึ่งเป็นข้อมูลที่ใช้อ้างอิงในการจำลองน้ำเค็ม โดยแปลงค่าจากปริมาณไอออนที่พบในน้ำตามแหล่งน้ำธรรมชาติในอำเภอโนนไทย จังหวัดนครราชสีมา ประเทศไทย ในตารางที่ 3.2 ให้เป็นปริมาณสารประกอบทางเคมีของน้ำเค็มจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ดังแสดงในตารางที่ 3.3 เพื่อให้สามารถผสมน้ำจำลองได้ง่าย สารเคมีที่ใช้จำลองน้ำเค็ม ได้แก่ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl), แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2), แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) และ แคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) ซึ่งการผสมน้ำเค็มจำลองใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นตัวทำละลาย

การจำลองน้ำเค็มในงานวิจัยนี้ สนใจที่ปริมาณคลอไรด์ไอออนที่อยู่ในสารน้ำจำลองเป็นหลัก ผู้วิจัยจึงจำลองน้ำบาดาลที่มีปริมาณคลอไรด์ไอออนที่ละลายอยู่ในน้ำเค็มจำลองที่แตกต่างกัน โดยแบ่งออกเป็น 3 สูตร ดังแสดงในตารางที่ 3.3 และมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.5.1 สูตรที่ 1: High Cl^- เป็นน้ำเค็มจำลองที่มีปริมาณคลอไรด์ไอออนสูงที่สุด คือ มีปริมาณคลอไรด์ไอออนละลายอยู่ในสารน้ำเท่ากับ 13,010.35 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำเค็มจำลอง สูตรที่ 1: High Cl^- ประกอบด้วย NaCl 19,472.50 มิลลิกรัม, MgCl_2 970.00 มิลลิกรัม, CaCl_2 743.60 มิลลิกรัม และ CaSO_4 1,032.50 มิลลิกรัม ในน้ำปราศจากไอออน 1 ลิตร

โดยอ้างอิงปริมาณคลอไรด์ไอออนและปริมาณไอออนอื่น ๆ จากน้ำบาดาลในบริเวณใกล้เคียงเมืองเกลื้อ-สยามทรัพย์มณี (รอยต่อระหว่างอำเภอโนนไทยกับอำเภพระทองคำ)

3.5.2 สูตรที่ 2: Medium Cl⁻ เป็นน้ำเค็มจำลองที่มีปริมาณคลอไรด์ไอออนโดยเฉลี่ยจากทั้งหมด 5 บริเวณที่ทำการสำรวจ คือ มีปริมาณคลอไรด์ไอออนละลายอยู่ในสารน้ำเท่ากับ 3,714.46 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำเค็มจำลองสูตรที่ 2: Medium Cl⁻ ประกอบด้วย NaCl 5,403.60 มิลลิกรัม, MgCl₂ 312.40 มิลลิกรัม, CaCl₂ 319.00 มิลลิกรัม และ CaSO₄ 227.20 มิลลิกรัม ในน้ำปราศจากไอออน 1 ลิตร โดยอ้างอิงปริมาณคลอไรด์ไอออนและปริมาณไอออนอื่น ๆ

3.5.3 สูตรที่ 3: Low Cl⁻ เป็นน้ำเค็มจำลองที่มีปริมาณคลอไรด์ไอออนต่ำที่สุด คือ มีปริมาณคลอไรด์ไอออนละลายอยู่ในสารน้ำเท่ากับ 244.31 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำเค็มจำลองสูตรที่ 3: Low Cl⁻ ประกอบด้วย NaCl 300.70 มิลลิกรัม, MgCl₂ 40.80 มิลลิกรัม, CaCl₂ 43.90 มิลลิกรัม และ CaSO₄ 17.30 มิลลิกรัม ในน้ำปราศจากไอออน 1 ลิตร โดยอ้างอิงปริมาณคลอไรด์ไอออนและปริมาณไอออนอื่น ๆ จากน้ำบาดาลในห้วยกระเจา

ในการทดสอบการกัดกร่อนชิ้นงานคอนกรีตเสริมแรงจะผ่านการแช่น้ำเค็มจำลองสูตร High และ Medium Cl⁻ เป็นเวลา 1, 2, 4, 8, 12 และ 16 สัปดาห์ ส่วนสูตร Low Cl⁻ จะผ่านการแช่น้ำเค็มจำลองเป็นเวลา 1, 8 และ 16 สัปดาห์ เพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบเพื่อให้เห็นแนวโน้มของการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในคอนกรีตเสริมแรงที่ผ่านการแช่น้ำบาดาลสูตร High และ Medium Cl⁻

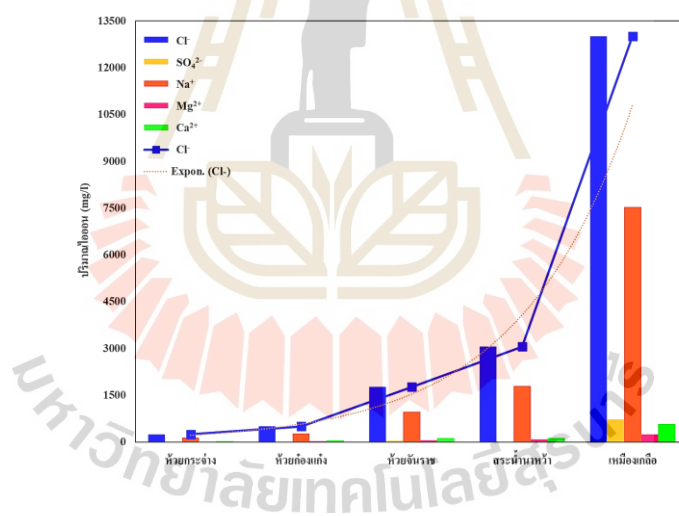
ตารางที่ 3.2 แสดงปริมาณไอออนลบและบวกที่พบในตัวอย่างน้ำบาดาลตามแหล่งน้ำธรรมชาติในอำเภอโนนไทย จังหวัดนครราชสีมา ประเทศไทย (กิตติเทพ เพ็ญขจร, พรพสา วงศ์ปัญญา, เดโซ เผือกภูมิ, และธนัชฐา ทองประภา, 2566)

แหล่งน้ำ	ไอออนลบ (mg/L)		ไอออนบวก (mg/L)		
	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
ห้วยกระเจา	244.31	12.23	136.72	10.43	22.91
ห้วยก่องแก้ง	499.58	7.91	273.11	17.35	56.38
ห้วยจันราช	1,764.17	45.48	972.26	46.73	127.93
บริเวณใกล้เคียงเมืองเกลื้อ-สยามทรัพย์มณี	13,010.35	728.53	7,532.33	247.58	572.48
สระน้ำนาหว้า	3,053.89	7.59	1,795.00	76.62	130.81
ค่าเฉลี่ยแต่ละไอออน	3,714.46	160.35	2,141.88	79.74	182.10

ทั้งนี้ เพื่อเพื่อความสะดวกและไม่ก่อให้เกิดความสับสน ผู้วิจัยจึงตั้งชื่อของชิ้นงานทดสอบที่ถูกแช่อยู่ในน้ำเค็มจำลองที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนแตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น ชิ้นงานที่จุ่มแช่ในน้ำเค็มสูตร High Cl^- เป็นเวลา 1 สัปดาห์ ใช้ชื่อว่า H_1W ชิ้นงานที่จุ่มแช่ในน้ำเค็มสูตร Medium Cl^- เป็นเวลา 1 สัปดาห์ ใช้ชื่อว่า M_1W และชิ้นงานที่จุ่มแช่ในน้ำเค็มสูตร Low Cl^- เป็นเวลา 1 สัปดาห์ ใช้ชื่อว่า L_1W เป็นต้น

ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมทางเคมีของน้ำเค็มจำลองต่อน้ำปราศจากไอออน 1 ลิตร (Wongpanya P., Phangking D., & Phueakphum, D., 2024)

น้ำเค็มจำลอง	ตัวย่อ	NaCl (mg)	MgCl_2 (mg)	CaCl_2 (mg)	CaSO_4 (mg)
High Cl^-	H	19,474.00	2,070.00	985.00	1305.00
Medium Cl^-	M	5,404.00	667.00	423.00	287.00
Low Cl^-	L	303.00	84.00	65.00	22.00



รูปที่ 3.4 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบปริมาณไอออนต่าง ๆ ในตัวอย่างน้ำบาดาลตามแหล่งน้ำธรรมชาติในอำเภอโนนไทย จังหวัดนครราชสีมา ประเทศไทย (กิตติเทพ เฟื่องขจร, พรวิสา วงศ์ปัญญา, เดโซ เผือกภูมิ, และธนัชฐา ทองประภา, 2566)

3.6 ทดสอบการกัดกร่อนของคอนกรีตเสริมแรง

ชิ้นงานคอนกรีตเสริมแรงต้องผ่านการบ่มเป็นเวลา 28 วัน และผ่านการจุ่มแช่ในน้ำเค็มจำลองทั้งหมด 3 สูตร ดังแสดงในตารางที่ 3.3 ซึ่งเน้นศึกษาการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับ

คอนกรีตเสริมแรงตามปริมาณคลอไรด์ไอออนที่แตกต่างกัน เป็นระยะเวลา 1, 2, 4, 8, 12 และ 16 สัปดาห์ ก่อนนำไปทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

3.6.1 เทคนิค Half-cell potential โดยการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ในคอนกรีตเสริมแรงด้วย High Impedance Digital Voltmeter เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Cu/CuSO_4 และนำมาพิจารณาความน่าจะเป็นในการเกิดการกัดกร่อน

3.6.2 เทคนิค LP โดยใช้เครื่อง Potentiostat Analyzer บัณฑิตศักย์ไฟฟ้าและวัดค่ากระแสไฟฟ้า ผลที่ได้ถูกพล็อตเป็นกราฟฟิโလာไรเซชันแล้วประมวลผลการกัดกร่อนจากค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ซึ่งเทคนิคนี้มีตัวแปรที่ต้องควบคุมดังนี้

- 1) ระยะเวลาหา OCP เท่ากับ 300 s
- 2) Scan Rate เท่ากับ 0.167 mV/s
- 3) Start Potential: -250 mV
- 4) Stop Potential: 1500 mV
- 5) Step Potential: 1 mV
- 6) Highest Current Range: 10 mA
- 7) Lowest Current Range: 100 nA

3.6.3 เทคนิค EIS โดยใช้เครื่อง Potentiostat Analyzer ซึ่งจะทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์ส่วนจริงเทียบกับอิมพีแดนซ์ส่วนจินตภาพจะทำให้ทราบความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับของชิ้นงาน ผลที่ได้เป็นกราฟไนควิสต์ ซึ่งเทคนิคนี้มีตัวแปรสำคัญที่ต้องควบคุมดังนี้

- 1) การกำหนดศักย์ไฟฟ้าที่ OCP ของชิ้นงานที่วัดได้จากเทคนิค Potentiostatic Linear Polarization
- 2) ช่วงความถี่ (Frequency Range) เท่ากับ 0.1–10,000 Hz
- 3) แอมพลิจูด (Amplitude) เท่ากับ 0.02 V

3.7 การตรวจพื้นผิวหลังการกัดกร่อน

สำหรับการวิเคราะห์ภายหลังทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในคอนกรีตเสริมแรงจะทำการวิเคราะห์ไอออนในน้ำเค็มจำลองหลังทดสอบในทุกเงื่อนไขการทดลองด้วยเทคนิคดังต่อไปนี้

3.7.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

ใช้ตรวจสอบลักษณะพื้นผิวและวิเคราะห์ธาตุบนพื้นผิวเหล็กกล้าหลังกัดกร่อนในเงื่อนไขการทดลอง Low, medium และ High Cl^- ที่ 16 สัปดาห์ โดยใช้สัญญาณ BSE ในการประมวลผลเพื่อแยกธาตุที่มีมวลอะตอมที่ต่างกันบนพื้นผิวกัดกร่อนด้วยเฉดสีเทา (Gray Scale)

ที่ความต่างศักย์เร่ง 20 keV และวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDS ในหน่วยของร้อยละอะตอม (atomic percent, at. %)

3.7.2 เอ็กซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโตรสโกปี (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS)

ใช้องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวเหล็กกล้าหลังกัดกร่อนในเงื่อนไขการทดลอง Low, medium และ High Cl⁻ ที่ 16 สัปดาห์ โดยวิเคราะห์สเปกตรัมของ Fe 2p ที่ช่วงค่าพลังงานพันธะ 705 – 730 eV เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและสถานะออกซิเดชันบนพื้นผิวกัดกร่อน

3.8 การตรวจสอบสารละลายก่อนและหลังการทดสอบการกัดกร่อน

สำหรับการวิเคราะห์ภายหลังทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในคอนกรีตเสริมแรงจะทำการวิเคราะห์ไอออนในน้ำเค็มจำลองหลังทดสอบในทุกเงื่อนไขการทดลองด้วยเทคนิคดังต่อไปนี้

3.8.1 ไอออนโครมาโทกราฟี (Ion Chromatography, IC)

ใช้วิเคราะห์น้ำก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อน โดยวิเคราะห์แยกเป็นประจุ ดังนี้

1) ไอออนลบ ได้แก่ Cl⁻

2) ไอออนบวก ได้แก่ Mg²⁺, Ca²⁺ และ Na²⁺

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์น้ำเค็มจำลองถูกคำนวณออกมาเป็นความเข้มข้นของไอออนในหน่วย mg/L

3.8.2 สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)

ใช้วิเคราะห์ไอออนเหล็ก (Fe²⁺) ก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อน โดยใช้แสงเหนือช่วงอัลตราไวโอเล็ตของสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่องผ่านสารน้ำในช่วงความยาวคลื่นจำเพาะที่ไอออนเหล็กสามารถดูดกลืนได้คือ 510 nm ผลที่ได้ออกมาเป็นความเข้มข้นของ Fe²⁺ ที่ละลายอยู่ในสารน้ำในหน่วย mg/L

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดสอบการกัดกร่อน

4.1.1 การประเมินการกัดกร่อนด้วยเทคนิค Half-Cell Potential

คอนกรีตเสริมแรงที่เปียกชุ่มด้วยน้ำเค็มจำลองถูกวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ด้วยมัลติมิเตอร์เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Cu/CuSO_4 โดยผลที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิคนี้จะพิจารณาเป็นโอกาสหรือความน่าจะเป็นในการเกิดการกัดกร่อนในคอนกรีตเสริมแรง ตามช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่วัดได้ซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C876-15 คือ หากค่าศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้มีค่ามากกว่า -200 mV ขึ้นไป แสดงว่า ร้อยละ 90 ของชิ้นงานไม่เกิดการกัดกร่อน แต่ถ้าหากอยู่ระหว่าง -200 ถึง -350 mV แสดงว่าชิ้นงานมีโอกาสเกิดการกัดกร่อน และค่าศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้มีค่าน้อยกว่า -350 mV แสดงว่า ร้อยละ 90 ของชิ้นงานเกิดการกัดกร่อน (ASTM Standard C876-15, 2015), (Poursaei A., 2010), (Wongpanya P., Phangking D., & Phueakphum, D., 2024)

จากผลการวัดในตารางที่ 4.1 เหล็กในคอนกรีตเสริมแรงมีแนวโน้มเกิดการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่จุ่มแช่และปริมาณคลอไรด์ไอออนที่เพิ่มขึ้น โดยช่วงแรกของการจุ่มแช่ชิ้นงาน L_1W, L_1W และ L_2W แทบไม่เกิดการกัดกร่อน ส่วนการจุ่มแช่ใน High Cl^- พบว่ามีโอกาสที่จะเกิดการกัดกร่อนตั้งแต่ในสัปดาห์แรกด้วยค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่ $-283.053 \pm 1.685 \text{ mV}$ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าของ Low Cl^- และ Medium Cl^- สอดคล้องกับผลของความต้านทานโพลาไรเซชันของเหล็ก (R_{steel}) ที่ได้จากการทดสอบ LP และ EIS ที่พบว่า M_1W และ H_2W มีค่าสูงกว่าที่ระยะเวลาอื่น เนื่องจากหากการกัดกร่อนมีโอกาสเกิดต่ำแสดงว่าเหล็กที่ฝังในคอนกรีตมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนจากสิ่งแวดล้อมที่เป็นน้ำเค็มในระยะเวลาจุ่มแช่ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น เมื่อระยะเวลาเวลานานและความเข้มข้นของคลอไรด์เพิ่มขึ้นยิ่งส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าลดต่ำลง (ติดลบมากขึ้น) พร้อมทั้งค่า R_{steel} เช่น H_1W เท่ากับ 0.574 ± 0.006 แต่ใน H_16W ลดลงเหลือ $0.045 \pm 0.001 \text{ M}\Omega\cdot\text{cm}^2$ เห็นได้ชัดว่าการทดสอบในน้ำเค็มจำลอง High Cl^- มีโอกาสเกิดการกัดกร่อนได้ง่ายและรุนแรงที่สุด อีกทั้งผลของการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่ได้จากงานวิจัยนี้มีแนวโน้มคล้ายกับงานวิจัยของ Hussain (Hussain R.R., 2011) กับ Pradhan (Pradhan B., 2014) ที่กล่าวว่าค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ลดลงตามปริมาณความเข้มข้นของคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เทคนิค

นี่เป็นที่ยอมรับสำหรับการทดสอบในภาคสนามที่บอกแนวโน้มการกัดกร่อนเพื่อคาดคะเนการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีต ดังนั้นในช่วงคาบเกี่ยวระหว่างเกณฑ์ที่กำหนดว่า ร้อยละ 90 ไม่เกิดการกัดกร่อน (คือ มีค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์น้อยกว่า -200 mV) กับมีโอกาสเกิดการกัดกร่อน (คือมีค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ระหว่าง -200 ถึง -350 mV) จึงไม่สามารถบ่งบอกได้ชัดเจนว่าเริ่มเกิดการกัดกร่อนไปแล้วหรือไม่ สังเกตได้จากค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่คาบเกี่ยวกันเพียงเล็กน้อยของชิ้นงาน M_2W กับ M_4W คือ -196.860 ± 0.630 mV และ -211.833 ± 0.468 mV ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ห่างกันเพียงเล็กน้อยแต่โอกาสในการเกิดการกัดกร่อนอยู่ในสถานะที่ต่างกันนั้นหมายความว่าหากต้องการความแม่นยำในการระบุการเกิดการกัดกร่อนหรืออัตราการกัดกร่อนควรใช้เทคนิคอื่นร่วมด้วย

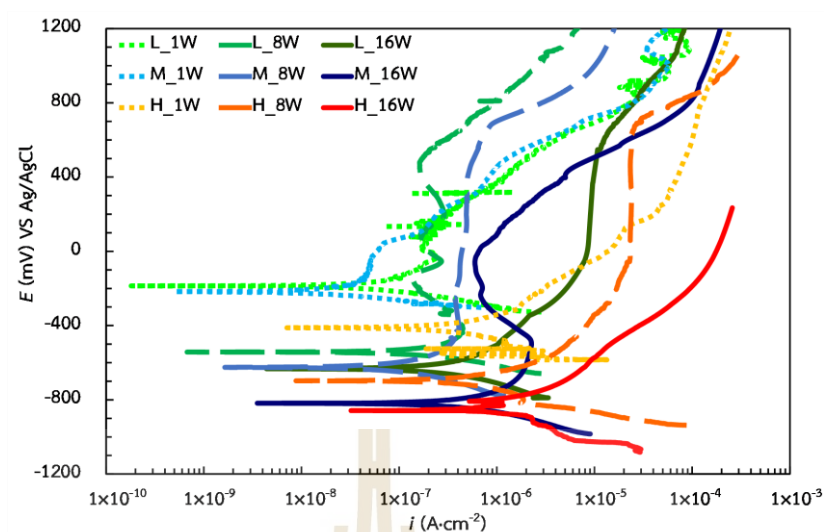
ตารางที่ 4.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และความน่าจะเป็นในการเกิดการกัดกร่อนของเหล็กกล้าที่ผ่านการแช่น้ำเค็มที่ระยะเวลา 1-16 สัปดาห์จากการวัดด้วยเทคนิค Half-Cell Potential (Wongpanya P., Phangking D., & Phueakphum, D., 2024)

ชิ้นงาน	Half-Cell Potential (mV) VS Cu/CuSO ₄	ความน่าจะเป็นของการเกิดการกัดกร่อน
L_1W	-188.120 ± 0.626	ร้อยละ 90 ไม่เกิดการกัดกร่อน
L_8W	-205.827 ± 0.869	มีโอกาสเกิดการกัดกร่อน
L_16W	-252.067 ± 0.825	มีโอกาสเกิดการกัดกร่อน
M_1W	-195.067 ± 0.371	ร้อยละ 90 ไม่เกิดการกัดกร่อน
M_2W	-196.860 ± 0.630	ร้อยละ 90 ไม่เกิดการกัดกร่อน
M_4W	-211.833 ± 0.468	มีโอกาสเกิดการกัดกร่อน
M_8W	-219.333 ± 1.161	มีโอกาสเกิดการกัดกร่อน
M_12W	-256.373 ± 0.704	มีโอกาสเกิดการกัดกร่อน
M_16W	-273.493 ± 0.989	มีโอกาสเกิดการกัดกร่อน
H_1W	-283.053 ± 1.685	มีโอกาสเกิดการกัดกร่อน
H_2W	-290.707 ± 0.482	มีโอกาสเกิดการกัดกร่อน
H_4W	-265.953 ± 0.796	มีโอกาสเกิดการกัดกร่อน
H_8W	-356.120 ± 2.343	ร้อยละ 90 เกิดการกัดกร่อน
H_12W	-361.440 ± 1.302	ร้อยละ 90 เกิดการกัดกร่อน
H_16W	-370.420 ± 0.410	ร้อยละ 90 เกิดการกัดกร่อน

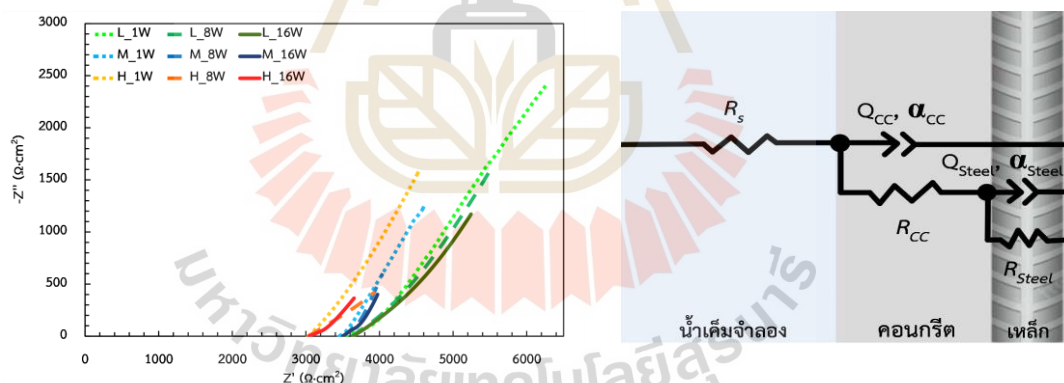
4.1.2 การประเมินการกัดกร่อนด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า (LP และ EIS)

จากรูปที่ 4.1 แสดงตัวอย่างเส้นโค้งโพลาริเซชันของเหล็กในคอนกรีตเสริมแรงที่ผ่านการจุ่มแช่ในน้ำเค็มจำลองที่สภาวะ Low, Medium และ High Cl^- เป็นเวลา 1, 8 และ 16 สัปดาห์ผลวิเคราะห์ที่ได้จากเส้นโค้งโพลาริเซชันแสดงในรูปที่ 4.1 ประกอบด้วยพารามิเตอร์การกัดกร่อนที่สำคัญได้แก่ ค่าความชันของปฏิกิริยาแอนอดิกและแคโทดิก (b_a และ b_c ตามลำดับ), ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion Potential, E_{corr}), ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion Current Density, i_{corr}), อัตราการกัดกร่อน (Corrosion Rate, CR) และค่าความต้านทานโพลาริเซชัน (Polarization Resistance, R_p) ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.2 ผลการกัดกร่อนของชิ้นงานทั้งหมดเป็นไปในทางที่น้อยลงตามเวลาและความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนที่เพิ่มขึ้น โดยเริ่มจากค่า E_{corr} ที่มีแนวโน้มติดลบมากขึ้นคล้ายแนวโน้มของค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่อ่านได้จากการวัดด้วยเทคนิค Half-cell potential (ตารางที่ 4.1) เมื่อเริ่มเกิดปฏิกิริยากัดกร่อนแล้วเหล็กที่ถูกกัดกร่อนจะมีพื้นที่สำหรับทำปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีที่ลดลงจึงส่งผลให้ค่า i_{corr} ที่คิดต่อพื้นที่ผิวสัมผัสนั้นเพิ่มมากขึ้นด้วย เนื่องจาก i_{corr} เป็นตัวแปรสำคัญที่เกี่ยวข้องความสามารถในการต้านทานโพลาริเซชัน คือ i_{corr} แปรผกผันกับ R_p ดังนั้นหาก i_{corr} เพิ่มขึ้น R_p เหล็กก็จะลดลง จากผลในตารางที่ 4.2 เห็นได้ชัดว่า ในทุกการทดสอบมีอัตราการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น หมายความว่าเหล็กต้านทานการกัดกร่อนได้น้อยลง เนื่องจากระยะเวลาและอิทธิพลความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนเพิ่มขึ้นและไอออนอื่น ๆ ในน้ำเค็มจำลองที่เป็นตัวเหนี่ยวนำไอออนที่มีฤทธิ์กัดกร่อนผิวของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต ดังแสดงด้วยอัตราการกัดกร่อนเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของ Cl^- ต่าง ๆ กัน ในรูปที่ 4.4 (Poursaei A., 2010), (Adrade C., 2004), (Klein N., Gómez E.D., Duffó G.S., & Farina S.B., 2022) เช่นเดียวกับการทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิค EIS ที่มีแนวโน้มการกัดกร่อนที่สอดคล้องกับเทคนิค Half-Cell Potential และ LP ดังแสดงในตารางที่ 4.3 การประมวลผลการกัดกร่อนด้วยเทคนิค EIS แสดงผลเป็นกราฟในควิสดังรูปที่ 4.2 (ก) โดยใช้วงจรไฟฟ้าสมมูลในรูปที่ 4.2 (ข) ซึ่งเหล็กถูกหุ้มด้วยคอนกรีตและชิ้นงานถูกจุ่มแช่ในสารละลายก่อนนำขึ้นมาทดสอบเป็นเวลาต่าง ๆ ทั้งนี้ มิใช่การวัดในขณะที่เพิ่งจุ่มแช่ ผู้วิจัยจึงใช้วงจรไฟฟ้าแบบขนานโดยจัดให้วงจรของเหล็ก (R_{steel} และค่าคงตัวของเฟสธาตุประกอบของเหล็ก, Q_{steel}) ต่อขนานกับวงจรของคอนกรีต (ความต้านทานโพลาริเซชันของคอนกรีต, R_{CC} และค่าคงตัวของเฟสธาตุประกอบของคอนกรีต, Q_{CC}) และชิ้นงานคอนกรีตเสริมแรงอนุกรมกับความต้านทานของสารละลายน้ำเค็มจำลอง (R_s) (Ribeiro D.V., 2016), (Wongpanya P., Phangking D., & Phueakphum, D., 2024) ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.3 การทดสอบโดยใช้เทคนิค EIS ให้ผลเพิ่มเติมในส่วน of ค่าคงตัวของเฟสธาตุประกอบ (Constant phase element, Q) ที่ใช้อธิบายการสะสมประจุหรือไอออนที่สะสมบนผิวคอนกรีตและบริเวณรอยต่อระหว่างผิวของคอนกรีตกับเหล็กและเลขยกกำลังใน

สมการของตัวเก็บประจุ (exponent equaling for a capacitor, α) บ่งชี้ความหนาของผิวคอนกรีตและเหล็ก (Barsoukov E., 2005) จากโนควิสต์พล็อตในรูปที่ 4.2 ลักษณะสเปกตรัมของชั้นงานทุกชั้นมีลักษณะเกือบเป็นครึ่งวงกลม โดยที่ชั้นงาน 1 สัปดาห์ของทุกความเข้มข้นคลอไรด์พบว่า EIS สเปกตรามีรัศมีกว้างกว่าที่ระยะเวลาอื่นๆ บ่งชี้ว่าชั้นงาน L_1W, M_1W, และ H_1W มี R_{CC} และ R_{steel} สูงที่สุด จากนั้นรัศมีของสเปกตรัมจะแคบลงเรื่อย ๆ เมื่อเวลาและความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการสะสมประจุหรือไอออนของสารละลายที่อยู่ในน้ำเค็มบริเวณผิวของคอนกรีตและบริเวณรอยต่อระหว่างผิวคอนกรีตกับเหล็กซึ่งบ่งชี้ด้วยค่า Q_{CC} และ Q_{steel} ตามลำดับ (Aperador W., 2013), (Wongpanya P., Phangking D., & Phueakphum, D., 2024) ชั้นงานที่ทดสอบในน้ำเค็มจำลองที่ทุกความเข้มข้นของคลอไรด์ พบว่าค่า Q_{steel} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามความรุนแรงของการกัดกร่อนที่เพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างจากการพิจารณาค่าในตารางที่ 4.3 ในกรณีค่า Q_{steel} ของ L_1W ที่มีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับ L_16W คือ จาก 141.292 ± 1.626 เป็น $277.595 \pm 3.722 \mu\Omega^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^\alpha$ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาผิวของเหล็กฝังใน (α_{Steel}) จากตอนแรกที่มีแนวโน้มหนาผิวลงเรื่อย ๆ ตามระยะเวลาแต่เมื่อผ่านไป 12 สัปดาห์ที่ Medium และ High Cl^- โดยในกลุ่มของการทดสอบใน Medium Cl^- มีค่า α_{Steel} เพิ่มขึ้นจาก 0.705 ± 0.002 ที่ 8 สัปดาห์ เป็น 0.741 ± 0.007 ที่ 12 สัปดาห์ และในกลุ่มของการทดสอบใน High Cl^- มีค่า α_{Steel} เพิ่มขึ้นจาก 0.511 ± 0.006 เป็น 0.527 ± 0.010 แล้วกลับมามีค่าลดลงอีกครั้งในสัปดาห์ที่ 16 การมีพฤติกรรมดังกล่าวข้างต้น เนื่องจากกลไกการต้านทานของเหล็กที่ถูกกัดกร่อนเป็นเวลานานแล้วเกิดการสะสมออกไซด์ที่ผิวเปรียบเสมือนฟิล์มป้องกันทำให้ประจุสะสมได้น้อยลงเนื่องจากออกไซด์ปกคลุมจุดที่เหนี่ยวนำทางไฟฟ้า และเมื่อฟิล์มเริ่มเสียเสถียรภาพประจุก็สามารถแพร่ซึมเข้าไปสะสมที่ผิวเหล็กได้ดังเดิมส่งผลให้ค่า α_{Steel} ที่ 16 สัปดาห์ลดลงอีกครั้ง แล้วเกิดการกัดกร่อนต่อไปแต่จะดำเนินไปอย่างช้า ๆ (Jorcin J., 2006), (Zhang F., 2023) จากผลดังกล่าวบ่งชี้ว่าที่บริเวณรอยต่อระหว่างผิวคอนกรีตกับเหล็กนั้นมีการสะสมของประจุหรือไอออนที่ส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนที่น้อยลงของเหล็กในคอนกรีตเสริมแรง โดยกลไกสำคัญที่มีการกล่าวถึงอย่างแพร่หลายเช่นในงานวิจัยของ Franco (Franco-Lujan V.A., 2022), Yu et al. (Yu K., 2012), Costa et al. (Costa A. and Appleton J., 1999) และRodrigues et al. (Rodrigues R., 2021) ได้กล่าวถึงกลไกหลักที่ทำให้เหล็กที่ฝังในคอนกรีตเกิดการกัดกร่อนคืออิทธิพลของคลอไรด์ไอออนที่เจือปนอยู่ในน้ำเค็ม โดยหากคอนกรีตเสริมแรงจุ่มแช่ในสิ่งแวดล้อมที่มีคลอไรด์ไอออนสูง การโจมตีของคลอไรด์ไอออนที่แพร่ซึมผ่านรูพรุนของคอนกรีตเป็นตัวส่งเสริมให้เกิดการกัดกร่อนบนผิวเหล็กที่ฝังอยู่ในคอนกรีต กล่าวคือ คลอไรด์ไอออนแพร่ซึมเข้าไปทำลายแพสซีฟฟิล์มของเหล็กแล้วกัดกร่อนเนื้อเหล็กโดยแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนทำให้เมื่อเวลานานขึ้นค่าความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กเส้นจึงลดลง



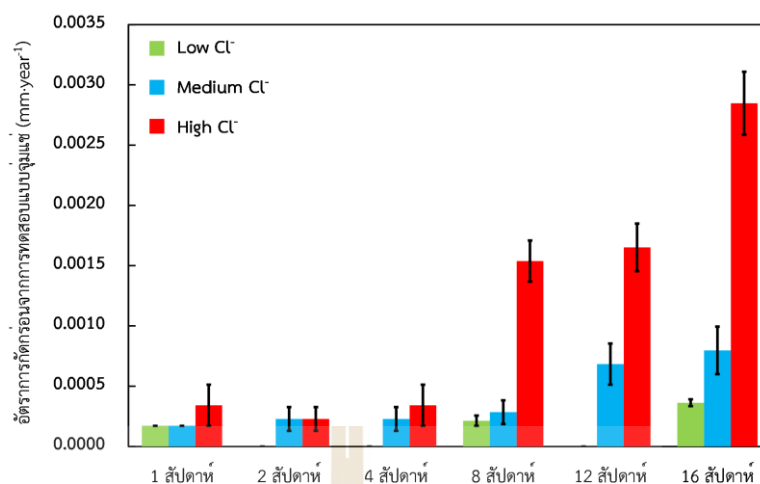
รูปที่. 4.1 ตัวอย่างเส้นโค้งโพลาริเซชันของเหล็กกล้าที่ฝังในคอนกรีตหลังจุ่มแช่ในน้ำเค็มจำลองที่ระยะเวลา 1 8 และ 16 สัปดาห์ ที่มีความเข้มข้นของ Cl^- ต่างกัน (Wongpanya P., Phangking D., & Phueakphum, D., 2024)



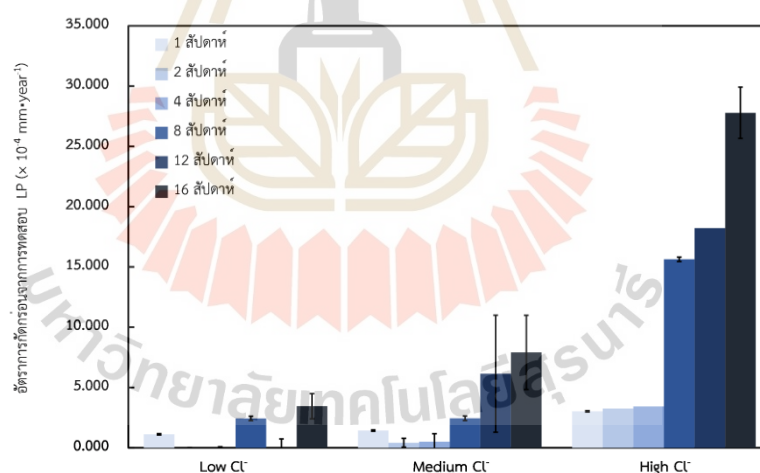
(ก)

(ข)

รูปที่ 4.2 (ก) กราฟไนควิสซ์ของเหล็กกล้าที่ฝังในคอนกรีตหลังจุ่มแช่ในน้ำเค็มจำลองที่ระยะเวลาและความเข้มข้นของ Cl^- ต่างกัน (ข) วงจรไฟฟ้าฟาสมมูล (Wongpanya P., Phangking D., & Phueakphum, D., 2024)



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าที่ฝังในคอนกรีตเสริมแรงหลังการทดสอบแบบจุ่มแช่เป็นเวลา 1 2 4 8 12 และ 16 สัปดาห์ในน้ำเค็มจำลองที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนแตกต่างกัน (Wongpanya P., Phangking D., & Phueakphum, D., 2024)



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าที่ฝังในคอนกรีตเสริมแรงเทียบกับน้ำเค็มจำลองที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนแตกต่างกัน (Wongpanya P., Phangking D., & Phueakphum, D., 2024)

นอกจากนี้ การทดสอบแบบจุ่ม (Immersion corrosion testing) ยังเป็นการทดสอบที่ช่วยสนับสนุนข้อมูลของการทดสอบด้วยเทคนิคทางไฟฟ้าเคมีข้างต้น โดยสามารถคำนวณอัตรา

การกัดกร่อนที่ได้จากการทดสอบแบบจุ่มตามมาตรฐาน ASTM G31-12 (ASTM G31-12, 2021) โดยใช้น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากจุ่มแช่ โดยผลในรูปที่ 4.3 คำนวณด้วยการใช้ความหนาแน่นของเหล็ก พบว่าสอดคล้องกับอัตราการกัดกร่อนที่คำนวณได้จากเส้นโค้งโพลาไรเซชัน โดยที่ความรุนแรงของการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการจุ่มแช่ของชิ้นงานและความเข้มข้น Cl^- เช่นกัน แต่หากคำนวณด้วยการใช้ความหนาแน่นของออกไซด์เหล็กที่พบเป็นส่วนมากในทุกความเข้มข้น Cl^- ที่จุ่มแช่คือ แมกนีไทต์ (Magnetite, Fe_3O_4) ซึ่งมีความหนาแน่นเท่ากับ 5.17 g/cm^3 (Nadin, E., 2007) พบว่าการฉี L_16W, M_16W และ H_16W มีอัตราการกัดกร่อนเท่ากับ $5.519 \pm 0.248 \times 10^{-4}$, $12.121 \pm 1.732 \times 10^{-4}$ และ $43.290 \pm 0.229 \times 10^{-4} \text{ mm/year}$ ตามลำดับ ผลที่ได้มีค่ามากกว่าที่คำนวณจากความหนาแน่นของเหล็กเล็กน้อย แต่แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอัตราการกัดกร่อนยังเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

4.2 ผลการวิเคราะห์พื้นผิวหลังทดสอบการกัดกร่อน

เหล็กกล้าที่ฝังในคอนกรีต L_16W, M_16W และ H_16W ถูกกัดกร่อนแล้วเกิดเป็นผลิตภัณฑ์การกัดกร่อน ถูกนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนด้วยเทคนิค EDS ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ตามลำดับ โดยในบริเวณสว่างบ่งบอกว่าพบ Fe (ธาตุเหล็ก) ส่วนบริเวณที่สว่างน้อยลงนั้นจะพบธาตุเบา เช่น C, Ca, Na, Mg, Al, S, O และ Cl บนพื้นผิว แต่มีกรณีที่คอนทราสต์ไม่แยกชัดออกจากกันเป็นผลมาจากทิศทางของตัวตรวจจับสัญญาณอิเล็กตรอน หากเป็นแบบควอดแรนต์เดียว (single quadrant) ความสูงต่ำของพื้นผิวอาจบดบังสัญญาณ BSE ได้ และการกำหนดระยะห่างระหว่างผิวชิ้นงานกับหัวโพรบ (Working Distance, WD) มีค่ามากเกินไป หากกำหนด WD ให้สั้นลงจะทำให้สามารถรับอิเล็กตรอนที่กระจายตัวแบบยัดเยียด (Single Scattered Electrons) ที่ให้คอนทราสต์ทางพื้นผิวและผลึกศาสตร์บนพื้นผิวได้มากขึ้น จึงสามารถแยกคอนทราสต์บนพื้นผิวเดียวกันได้ชัดเจน (Kejzlar P., Švec M., & Macajová E., 2014) จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM-EDS พบว่าการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นคลอไรด์ไอออนมีผลทำให้สัดส่วนของเหล็กกับออกซิเจน (Fe/O ratio) เพิ่มขึ้น โดย 003_16W มี $\text{Fe/O} = 0.03\text{-}0.46$, 054_16W มี $\text{Fe/O} = 0.56\text{-}1.39$ และ 195_16W มี $\text{Fe/O} = 0.49\text{-}2.10$ เนื่องจากเหล็กที่ฝังในเกิดการกัดกร่อนมันจะถูกออกซิไดซ์เพิ่มขึ้นทำให้ประจุของเหล็กเกิดการเปลี่ยนสถานะ (Nguyen T.H.Y., Bui V.H.L., Tran V.M., Cao T., Pansuk W., & Jongvivatsakul P., 2021) ดังนั้นการที่เหล็กถูกออกซิไดซ์มากขึ้นมีสัดส่วน Fe/O ที่เพิ่มขึ้น แสดงว่าเหล็กที่ฝังในเกิดการกัดกร่อนที่รุนแรงขึ้น ทั้งนี้ในงานวิจัยของ A.M. Bazán et al. (Bazán A.M., Gálvez J.C., Reyes E., & Galé-Lamuela D., 2018) พบว่าผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนที่ประกอบด้วยเหล็กออกไซด์สามารถแทรกซึมเข้าไปในรูพรุนของคอนกรีตได้

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิค Linear Polarization ของเหล็กกล้าที่ฝังในคอนกรีตเสริมแรง (Wongpanya P., Phangking D., & Phueakphum, D., 2024)

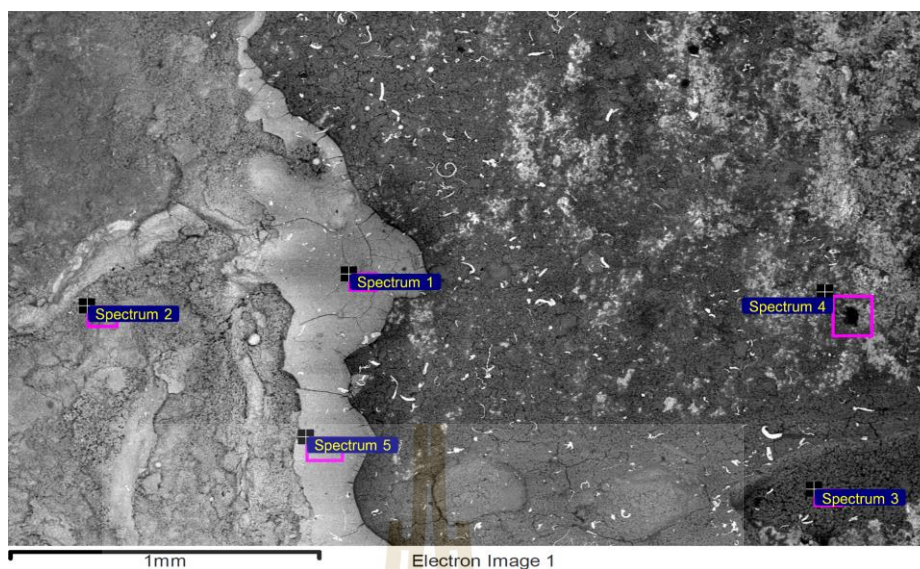
ชิ้นงาน	b_a (mV dec ⁻¹)	b_c (mV dec ⁻¹)	E_{corr} (mV)	i_{corr} (μ A cm ⁻²)	R_p (M Ω cm ²)	CR ($\times 10^{-4}$ mm yr ⁻¹)
L_1W	59.33 $\pm$ 5.07	80.22 $\pm$ 5.99	-180.205 $\pm$ 4.81	0.0096 $\pm$ 0.0005	1.5426 $\pm$ 0.0482	1.115 $\pm$ 0.055
L_8W	57.90 $\pm$ 4.00	40.08 $\pm$ 2.25	-548.66 $\pm$ 4.90	0.0210 $\pm$ 0.0016	0.4897 $\pm$ 0.0067	2.439 $\pm$ 0.183
L_16W	54.74 $\pm$ 2.70	56.43 $\pm$ 4.99	-626.91 $\pm$ 4.75	0.0297 $\pm$ 0.0090	0.4062 $\pm$ 0.1109	3.450 $\pm$ 1.048
M_1W	77.21 $\pm$ 0.29	76.13 $\pm$ 0.74	-218.44 $\pm$ 0.66	0.0123 $\pm$ 0.0001	1.3532 $\pm$ 0.0217	1.429 $\pm$ 0.013
M_2W	18.77 $\pm$ 2.48	18.17 $\pm$ 2.26	-248.19 $\pm$ 1.60	0.0036 $\pm$ 0.0002	1.1136 $\pm$ 0.0761	0.418 $\pm$ 0.025
M_4W	11.67 $\pm$ 0.62	14.91 $\pm$ 0.11	-482.21 $\pm$ 3.56	0.0044 $\pm$ 0.0007	0.6460 $\pm$ 0.0962	0.511 $\pm$ 0.088
M_8W	52.86 $\pm$ 5.84	56.77 $\pm$ 5.22	-619.98 $\pm$ 4.27	0.0211 $\pm$ 0.0053	0.5633 $\pm$ 0.0934	2.451 $\pm$ 0.850
M_12W	55.45 $\pm$ 0.31	51.22 $\pm$ 5.06	-669.04 $\pm$ 3.31	0.0529 $\pm$ 0.0063	0.2186 $\pm$ 0.0389	6.146 $\pm$ 0.737
M_16W	42.95 $\pm$ 1.96	36.41 $\pm$ 2.82	-812.21 $\pm$ 4.84	0.0681 $\pm$ 0.0264	0.1256 $\pm$ 0.0528	7.912 $\pm$ 3.073
H_1W	68.73 $\pm$ 5.53	67.88 $\pm$ 5.23	-417.27 $\pm$ 4.37	0.0260 $\pm$ 0.0096	0.5703 $\pm$ 0.1854	3.021 $\pm$ 1.121
H_2W	66.69 $\pm$ 2.53	64.30 $\pm$ 2.80	-608.38 $\pm$ 2.33	0.0280 $\pm$ 0.0032	0.5077 $\pm$ 0.0801	3.253 $\pm$ 0.370
H_4W	66.40 $\pm$ 4.87	69.53 $\pm$ 2.93	-611.82 $\pm$ 4.99	0.0295 $\pm$ 0.0056	0.4999 $\pm$ 0.0697	3.427 $\pm$ 0.653
H_8W	116.83 $\pm$ 0.27	117.23 $\pm$ 1.75	-703.38 $\pm$ 4.81	0.1346 $\pm$ 0.0238	0.1888 $\pm$ 0.0338	15.637 $\pm$ 2.770
H_12W	47.88 $\pm$ 3.36	46.38 $\pm$ 5.23	-680.25 $\pm$ 4.22	0.1568 $\pm$ 0.0418	0.0652 $\pm$ 0.0120	18.216 $\pm$ 4.857
H_16W	63.04 $\pm$ 5.05	43.76 $\pm$ 1.25	-860.73 $\pm$ 4.08	0.2393 $\pm$ 0.0183	0.0469 $\pm$ 0.0013	27.789 $\pm$ 2.130

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ห้วงจรไฟฟ้าสมมูลจากการทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิค EIS ของชิ้นงานคอนกรีตเสริมแรง (Wongpanya P., Phangking D., & Phueakphum, D., 2024)

ชิ้นงาน	R_s ($k\Omega \cdot cm^2$)	R_{cc} ($M\Omega \cdot cm^2$)	R_{steel} ($M\Omega \cdot cm^2$)	Q_{cc} ($\mu\Omega^{-1} cm^{-2} s^\alpha$)	Q_{steel} ($\mu\Omega^{-1} cm^{-2} s^\alpha$)	α_{cc}	α_{steel}	χ^2
L_1W	3.767 ± 0.004	40.422 ± 0.668	1.506 ± 0.018	1.773 ± 0.344	141.292 ± 1.626	0.443 ± 0.023	0.798 ± 0.012	$(0.19 \pm 6.17) \times 10^{-3}$
L_8W	3.763 ± 0.021	34.491 ± 0.832	0.491 ± 0.005	2.899 ± 0.118	122.816 ± 0.422	0.257 ± 0.007	0.744 ± 0.069	$(0.10 \pm 5.63) \times 10^{-3}$
L_16W	3.793 ± 0.004	31.000 ± 0.518	0.446 ± 0.009	2.802 ± 0.032	277.595 ± 3.722	0.277 ± 0.006	0.717 ± 0.004	$(8.01 \pm 0.74) \times 10^{-4}$
M_1W	3.439 ± 0.005	38.490 ± 0.572	1.221 ± 0.094	1.999 ± 0.235	81.988 ± 2.070	0.333 ± 0.008	0.752 ± 0.019	$(1.51 \pm 0.16) \times 10^{-3}$
M_2W	3.542 ± 0.007	33.342 ± 1.790	1.110 ± 0.009	3.874 ± 0.222	91.111 ± 0.567	0.326 ± 0.009	0.685 ± 0.002	$(3.07 \pm 0.07) \times 10^{-3}$
M_4W	3.503 ± 0.037	29.162 ± 0.959	0.691 ± 0.014	4.637 ± 1.229	233.499 ± 3.864	0.331 ± 0.012	0.711 ± 0.004	$(2.82 \pm 0.35) \times 10^{-3}$
M_8W	3.553 ± 0.014	27.839 ± 0.094	0.569 ± 0.005	5.552 ± 0.249	283.930 ± 0.948	0.307 ± 0.003	0.705 ± 0.002	$(2.56 \pm 0.72) \times 10^{-3}$
M_12W	3.527 ± 0.004	27.607 ± 0.809	0.202 ± 0.004	5.972 ± 0.427	303.159 ± 3.393	0.330 ± 0.004	0.741 ± 0.007	$(0.77 \pm 0.34) \times 10^{-3}$
M_16W	3.534 ± 0.010	23.846 ± 0.166	0.119 ± 0.002	7.909 ± 0.450	348.202 ± 3.907	0.349 ± 0.005	0.722 ± 0.025	$(1.47 \pm 0.58) \times 10^{-3}$
H_1W	3.067 ± 0.013	19.814 ± 0.416	0.574 ± 0.006	2.242 ± 0.033	78.264 ± 0.258	0.358 ± 0.009	0.783 ± 0.010	$(0.14 \pm 2.98) \times 10^{-3}$
H_2W	2.947 ± 0.022	18.827 ± 0.039	0.507 ± 0.003	2.913 ± 0.028	186.874 ± 3.673	0.240 ± 0.012	0.789 ± 0.006	$(3.54 \pm 0.86) \times 10^{-3}$
H_4W	3.027 ± 0.039	14.797 ± 0.085	0.471 ± 0.017	3.237 ± 0.141	238.563 ± 4.020	0.239 ± 0.011	0.742 ± 0.010	$(2.82 \pm 0.35) \times 10^{-3}$
H_8W	3.029 ± 0.026	14.137 ± 0.235	0.188 ± 0.004	5.270 ± 0.184	258.700 ± 1.273	0.248 ± 0.024	0.511 ± 0.006	$(2.21 \pm 0.86) \times 10^{-3}$
H_12W	3.092 ± 0.025	10.955 ± 0.527	0.065 ± 0.007	18.260 ± 1.027	270.730 ± 4.278	0.234 ± 0.021	0.527 ± 0.010	$(7.75 \pm 3.37) \times 10^{-4}$
H_16W	3.135 ± 0.008	10.483 ± 0.199	0.045 ± 0.001	13.466 ± 1.416	541.918 ± 4.181	0.276 ± 0.039	0.509 ± 0.003	$(1.47 \pm 0.58) \times 10^{-3}$

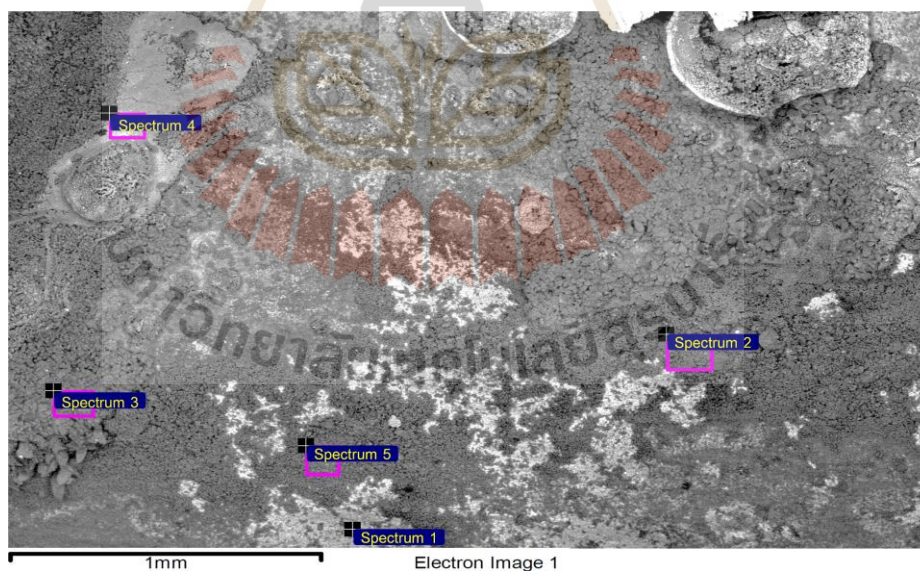
คอนกรีตได้ ดังนั้น สัดส่วน Fe/O ที่อาจพบได้ในชิ้นงานทดสอบอาจมีค่ามากกว่าที่รายงานข้างต้น ส่วนการพบ Al และ Ca นั้นคือธาตุองค์ประกอบของซีเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Ahmad Z., 2006) และการเสื่อมสภาพจากการถูกกัดกร่อนโดยคลอไรด์ไอออนเป็นตัวการทำให้เฟส AFm ในซีเมนต์ถูกทำลายหรือเสื่อมสภาพแล้วปลดปล่อย Ca^{2+} กับ SO_4^{2-} ออกมาตกค้างอยู่บนผิวรอยต่อระหว่างคอนกรีตกับเหล็กที่ฝังใน (Shi X., Fay L., Peterson M.M., Berry M., & Mooney M., 2010), (Ault A.P., Peters T.M., Sawvel E.J., Casuccio G.S., Willis R.D., Norris G.A., Grassian V.H., 2012) จากผล EDS จึงพบ Ca และ S (Wongpanya P., Phangking D., & Phueakphum, D., 2024) ที่เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออน นอกจากนี้ยังพบการเพิ่มขึ้นของ C เนื่องจากกระบวนการคาร์บอนเนชันของคอนกรีตที่ทำให้คอนกรีตมีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) รวมถึงสารประกอบคาร์บอนิกออกมา จึงทำให้พบธาตุ C ปะปนอยู่ในพื้นผิวผลิตภัณฑ์การกัดกร่อน (Glass, G.K., Page, C.L., & Short, N.R., 1991), (Zhou, Y., Gencturk, B., ASCE, A.M., Willam, K., ASCE, F., & Attar, A. 2014)

การวิเคราะห์ผิวด้วยเอ็กซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอน (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS) ทำให้ทราบวิวัฒนาการของผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนบนเหล็กในคอนกรีตเสริมแรงตามระยะเวลาต่าง ๆ ได้ โดยระบุเป็นค่าพลังงานพันธะที่บ่งบอกสารประกอบบนพื้นผิวของชิ้นงานหลังทดสอบการกัดกร่อน รูปที่ 4.6 แสดงสเปกตรัม Fe 2p ของชิ้นงาน L_16W, M_16W และ H_16W ภาพรวมของผล XPS พบว่าเหล็กฝังในเมื่อถูกกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมที่มีคลอไรด์ไอออนจะเกิดผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนที่เป็นสารประกอบของเหล็กออกไซด์และเพอริกคลอไรด์ โดยสามารถระบุเป็นสารประกอบเหล็กได้ด้วยสเปกตรัมของ Fe 2p ซึ่งแต่ละสารประกอบที่พบข้างต้น ช่วยให้เข้าใจถึงแนวทางการเกิดการกัดกร่อนของเหล็กในคอนกรีตเสริมแรงได้ โดยพบว่า Fe(II) Fe_3O_4 บางส่วนเกิดการเปลี่ยนสถานะจากการถูกออกซิไดซ์ให้กลายเป็น Fe(III) Fe_2O_3 ใน 16 สัปดาห์ของชิ้นงาน M_16W และ H_16W และเนื่องจากความเข้มข้นของคลอไรด์ของ H_16W สูง จึงช่วยเร่งให้เหล็กถูกออกซิไดซ์ได้เร็วและรุนแรงกว่า M_16W นอกจากนี้ยังพบว่าเกิด FeOOH ใน M_16W กับ H_16W และ FeOOH นี้จะก่อให้เกิด Fe_2O_3 ในภายหลังด้วยเช่นกัน กระบวนการนี้จะวนซ้ำไปเรื่อยอย่างเป็นวัฏจักร และถ้าหากเกิดเป็น Fe_2O_3 ร่วมกับ FeCl_3 ในปริมาณมาก ดังในผลของ H_16W จะทำให้อัตราการกัดกร่อนเพิ่มสูงขึ้น (Xu W., Daub K., Zhang X., Noel J.J., Shoesmith D.W., & Wren J.C., 2009), (Avila-Mendoza J., Flores J.M., & Castillo U.C.) ซึ่งเป็นผลสอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วย Half-cell potential, Linear polarization, และ EIS ที่ให้ผลทางการกัดกร่อนที่แย่งเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออน



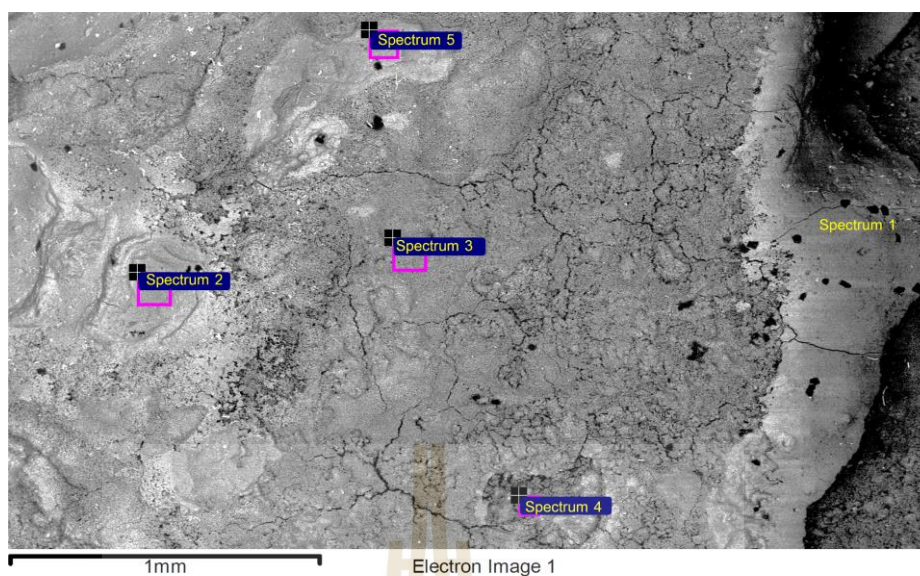
Spectrum	Elements (at.%)								
	C	O	Na	Mg	Al	S	Cl	Ca	Fe
1	6.84	67.76	0.44	-	-	-	-	0.39	24.57
2	20.47	52.24	-	-	-	0.21	0.28	2.78	24.02
3	20.04	49.36	0.29	0.42	-	1.40	-	27.19	1.30
4	31.47	50.19	0.15	0.96	-	0.86	-	6.15	10.22
5	25.62	52.06	0.02	0.82	-	0.91	0.10	9.08	11.39

(ก)



Spectrum	Elements (at.%)								
	C	O	Na	Mg	Al	S	Cl	Ca	Fe
1	14.03	34.15	0.19	4.27	3.45	0.23	-	24.65	19.03
2	18.31	26.80	0.24	2.04	1.73	-	0.02	29.74	21.12
3	11.18	35.21	0.37	-	-	0.04	0.17	30.14	22.89
4	15.01	33.31	0.23	-	0.35	0.08	0.21	4.57	46.24
5	8.12	28.75	0.16	2.09	0.28	0.36	-	33.21	27.03

(ข)

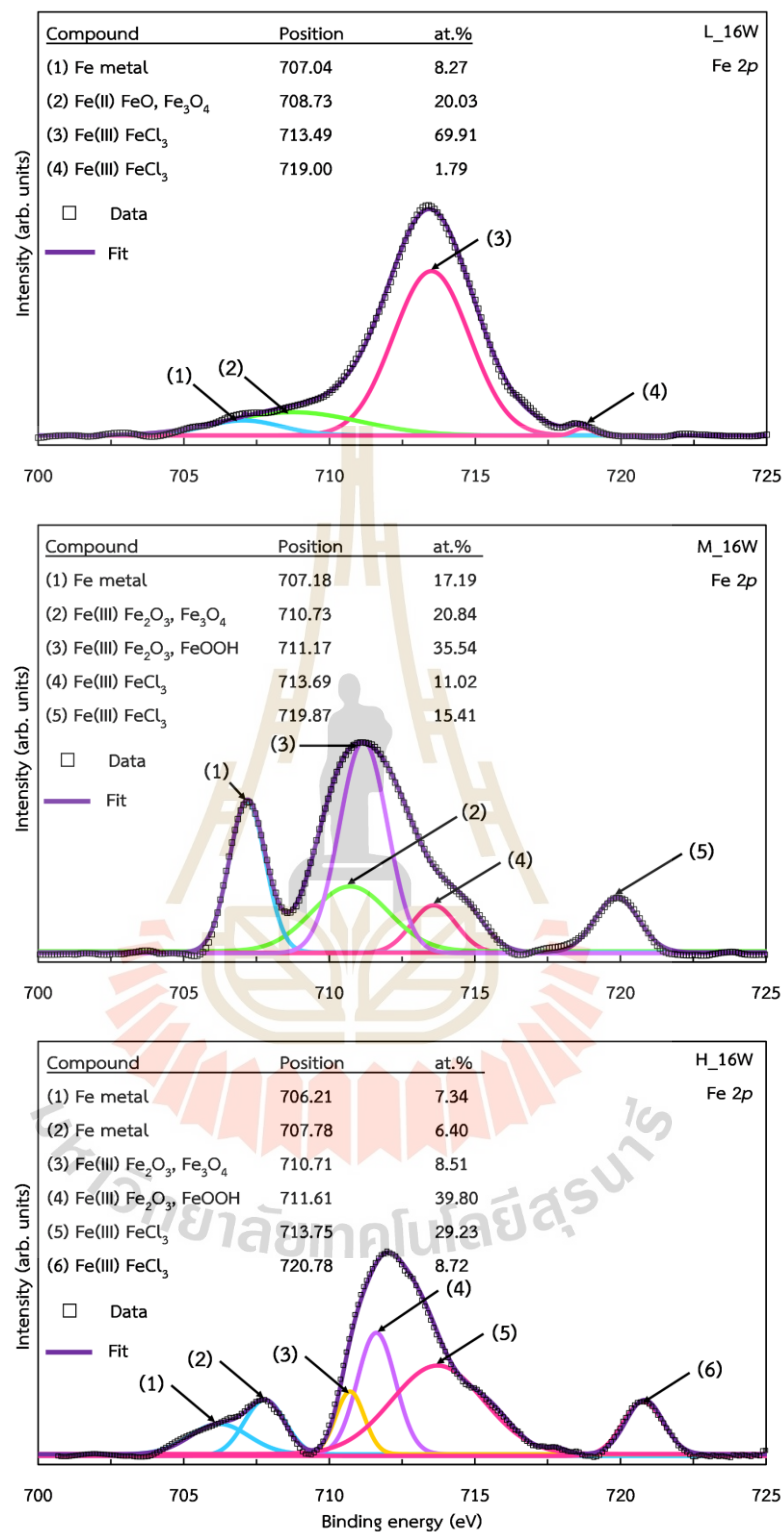


Spectrum	Elements (at.%)								
	C	O	Na	Mg	Al	S	Cl	Ca	Fe
1	8.36	45.23	-	0.29	1.64	-	-	22.18	22.30
2	10.33	40.12	-	0.32	0.41	0.28	3.44	23.31	21.79
3	20.43	18.99	-	0.21	0.19	0.31	0.12	35.14	24.61
4	11.13	15.46	0.29	-	0.45	0.17	4.23	35.86	32.41
5	6.95	37.80	0.90	0.06	0.11	0.34	2.98	30.24	20.62

(ค)

รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายพื้นผิวของเหล็กกล้าฝังในและผลวิเคราะห์ธาตุหลังจากการทดสอบการกัดกร่อนในน้ำเค็มจำลอง (ก) Low Cl^- (ข) Medium Cl^- (ค) High Cl^- เป็นระยะเวลา 16 สัปดาห์ (ต่อ)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.6 สเปกตรัม XPS แบบละเอียดจากการวิเคราะห์พื้นผิวของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตเสริมแรงที่ผ่านการทดสอบการกัดกร่อนด้วยน้ำเค็มจำลองที่ความเข้มข้นต่างกันเป็นระยะเวลา 16 สัปดาห์

4.3 ผลการวิเคราะห์ไอออนในน้ำเค็มจำลอง

หลังจากการทดสอบการกัดกร่อนในทุกสภาวะการทดสอบ สารน้ำที่แช่คอนกรีตเสริมเหล็กถูกรวบรวมเพื่อวิเคราะห์ไอออนที่ตกค้างด้วยเทคนิค Ion Chromatography (IC) ผลลัพธ์ในตารางที่ 4.4 ประกอบด้วยไอออนต่อไปนี้: คลอไรด์ไอออน (Cl^-), ซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}), โซเดียมไอออน (Na^+), แมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}), แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และไอออนของเหล็ก (Fe^{2+}) ผลการทดลองพบว่า ไอออนทั้งหมดยกเว้นไอออนเหล็กลดลงจากก่อนการทดสอบ เนื่องจากการแพร่ของไอออนเข้าสู่คอนกรีตเสริมเหล็กลดลงเมื่อเวลาผ่านไป เมื่อไอออนเหล่านี้ซึมเข้าไปจะสะสมอยู่ในรูพรุนและรอยต่อระหว่างเหล็กกับคอนกรีต เป็นผลให้อัตราการกัดกร่อนของเหล็กในคอนกรีตเสริมเหล็กในการทดสอบทั้งหมดเพิ่มขึ้นตามเวลา น้ำเค็มจำลองก่อนการทดสอบไม่มีไอออนของเหล็ก แต่หลังทดสอบเป็นเวลานาน พบว่ามีไอออนของเหล็กละลายอยู่ในน้ำเค็มจำลอง ไอออนของเหล็กไม่ปรากฏในสัปดาห์แรกของการทดสอบทั้งหมด เนื่องจากการกัดกร่อนน้อยกว่า และด้วยระยะเวลาการกัดกร่อนที่สั้น ไอออนของเหล็กจึงไม่สามารถแพร่กระจายออกนอกคอนกรีตได้ทันเวลา เมื่อเวลาผ่านไป สังเกตว่าไอออนของเหล็กเริ่มแพร่กระจายจากคอนกรีตเสริมเหล็กและมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามอัตราการกัดกร่อนที่เพิ่มขึ้น สิ่งที่น่าสนใจคือปริมาณไอออนคลอไรด์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากประเภทของซีเมนต์ที่ใช้ในการทดลองนี้คือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (OPC) ที่มีสารประกอบไตรแคลเซียม อะลูมิเนต (C_3A) สามารถสกัดคลอไรด์เพื่อเพิ่มความหนาแน่นในความพรุนของคอนกรีตได้ นอกจากนี้ แมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) ได้รับการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการก่อตัวของแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ซึ่งส่งเสริมผลการเชื่อมสภาพของไอออนคลอไรด์ ส่งผลให้ฟิล์มป้องกันของเหล็กที่ฝังตัวอยู่และเกิดการกัดกร่อนไม่เสถียร (Klein N., Gómez E.D., Duffó G.S., & Farina S.B., 2022)

4.4 การประเมินอายุการใช้งานของคอนกรีตเสริมแรง

หลังจากทดสอบการกัดกร่อนในทุกสภาวะการทดสอบ และได้ผลลัพธ์เป็นอัตราการกัดกร่อนดังที่อธิบายข้างต้น สามารถประเมินอายุการใช้งานของคอนกรีตเสริมแรงจากอัตราการกัดกร่อนที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค LP ในหน่วย mm/year โดยเทียบระหว่างคอนกรีตเสริมแรงขนาดทดลองที่มีเหล็กฝังในยาว 100 mm กับคอนกรีตเสริมแรงขนาดจริง (สำหรับบ้าน 1 ชั้น) มีเหล็กฝังในยาว 3000 mm (3 m) และกำหนดให้หน้าตัดของเหล็กลดลงเหลือร้อยละ 75 จะทำให้ทราบระยะเวลาที่สามารถซ่อมแซมหรือเปลี่ยนโครงสร้างคอนกรีตเสริมรานั้นได้ โดยผลการคำนวณอายุการใช้งานในทุกความเข้มข้นของ Cl^- ที่ศึกษา เป็นระยะเวลา 16 สัปดาห์ ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.4 ปริมาณไอออนต่าง ๆ ในน้ำเค็มจำลองก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อน

ชิ้นงาน	ความเข้มข้นของไอออน (mg L ⁻¹)					
	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Fe ²⁺
ก่อนทดสอบ	326.547	26.560	162.210	17.609	53.619	-
L_1W	248.967	18.678	130.640	14.559	51.121	-
L_8W	246.754	17.774	117.170	13.498	63.497	0.010
L_16W	240.829	24.137	106.800	12.620	79.822	0.035
ก่อนทดสอบ	3915.380	191.424	2239.290	95.445	261.741	-
M_1W	3479.120	155.292	1985.280	81.738	223.430	0.010
M_2W	3476.760	156.100	1967.890	84.504	231.382	0.100
M_4W	3431.110	142.322	1940.460	71.726	235.610	0.100
M_8W	3181.920	111.212	1750.110	61.189	274.716	0.240
M_12W	3167.920	99.728	1671.050	59.891	349.133	0.320
M_16W	3155.920	94.662	1653.190	48.451	376.471	0.350
หลังทดสอบ	12319.500	689.590	7544.100	244.315	596.613	-
H_1W	12084.100	670.600	7112.000	205.953	629.898	0.030
H_2W	11978.231	669.800	7110.100	201.030	658.528	0.098
H_4W	11951.500	605.090	7103.300	89.110	761.358	0.200
H_8W	10608.150	412.700	6352.000	64.174	698.600	0.350
H_12W	9634.500	410.290	5894.900	52.845	686.695	1.000
H_16W	9565.250	441.820	5817.300	56.840	703.550	1.500

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบอายุการใช้งานของคอนกรีตเสริมแรงระหว่างขนาดทดลองกับขนาดจริง

ข้อกำหนด	CR ของ Low Cl ⁻ (L_16W)	CR ของ Medium Cl ⁻ (M_16W)	CR ของ High Cl ⁻ (H_16W)
ขนาดทดลอง	0.0003 mm/year	0.0008 mm/year	0.0027 mm/year
ขนาดจริง	0.0095 mm/year	0.8850 mm/year	3.1504 mm/year
เมื่อหน้าตัดของเหล็ก	315 ปี	3.4 ปี	0.95 ปี
ฝังในลดลงเหลือ 75%		(~ 3 ปี 4 เดือน 24 วัน)	(~ 11 เดือน 24 วัน)

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การทดสอบการกัดกร่อนทั้ง 3 เทคนิค ได้แก่ Half-cell potential, LP, และ EIS ให้ผลลัพธ์ไปในทิศทางเดียวกันคือ เหล็กกล้าที่ฝังในคอนกรีตเสริมแรงมีอัตราการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น และมีความต้านทานการกัดกร่อนลดลง โดยขึ้นอยู่กับเวลาและความเข้มข้นของ Cl^- ที่เพิ่มขึ้น ดังเช่น

อัตราการกัดกร่อนของ L_1W และ L_16W เท่ากับ $1.115 \times 10^{-4} \pm 0.055 \times 10^{-4}$ และ $3.450 \times 10^{-4} \pm 1.048 \times 10^{-4}$ มิลลิเมตรต่อปี ตามลำดับ

อัตราการกัดกร่อนของ M_1W และ M_16W เท่ากับ $1.429 \times 10^{-4} \pm 0.013 \times 10^{-4}$ และ $7.912 \times 10^{-4} \pm 3.073 \times 10^{-4}$ มิลลิเมตรต่อปี ตามลำดับ

อัตราการกัดกร่อนของ H_1W และ H_16W เท่ากับ $3.021 \times 10^{-4} \pm 1.121 \times 10^{-4}$ และ $27.789 \times 10^{-4} \pm 2.130 \times 10^{-4}$ มิลลิเมตรต่อปี ตามลำดับ

ความต้านทานการกัดกร่อนของ L_1W และ L_16W เท่ากับ 1.5426 ± 0.0482 และ 0.4062 ± 0.1109 เมกะโอห์มตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

ความต้านทานการกัดกร่อนของ M_1W และ M_16W เท่ากับ 1.3532 ± 0.0217 และ 0.1256 ± 0.0528 เมกะโอห์มตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

ความต้านทานการกัดกร่อนของ H_1W และ H_16W เท่ากับ 0.5703 ± 0.1854 และ 0.0469 ± 0.0013 เมกะโอห์มตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

5.1.2 Cl^- เป็นตัวการสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการมีพฤติกรรมการกัดกร่อนที่แย่งของ เหล็กกล้าในคอนกรีตเสริมแรง เนื่องจากการทำงานร่วมกันของ Mg^{2+} กับ SO_4^{2-} ที่กระตุ้นให้ Cl^- สามารถเข้าไปตามรูพรุนและทำปฏิกิริยากับสารน้ำแล้วลดค่าความเป็นกรดต่างที่รอยต่อระหว่าง เหล็กกล้ากับคอนกรีตแล้วทำให้เกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรงสังเกตได้จากผลวิเคราะห์พื้นผิวของ เหล็กกล้าฝังในหลังกัดกร่อนด้วย SEM-EDS และ XPS พบว่ามีธาตุและองค์ประกอบทางเคมีที่เป็น คลอไรด์เจือปนอยู่

5.1.3 พื้นผิวของเหล็กกล้าฝังในหลังการทดสอบการกัดกร่อนมีผิวขรุขระไม่เรียบ มีรอยแตกร้าวละเอียด และส่วนใหญ่เกิดเป็นสารประกอบเหล็กออกไซด์ หมายความว่าฟิล์ม ป้องกันของเหล็กกล้าดังกล่าวมีความเปราะ ไม่เสถียร และต้านทานการกัดกร่อนได้น้อย

5.1.4 อายุการใช้งานโดยกำหนดเป็นระยะเวลาเพื่อซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมแรง เทียบระหว่างขนาดทดลองกับขนาดจริงที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมการกัดกร่อน Low Cl^- , Medium Cl^- และ High Cl^- เป็นเวลา 16 สัปดาห์ มีอายุการใช้งานเท่ากับ 315, 3.4 และ 0.95 ปี ตามลำดับ

5.1.5 ข้อมูลผลการทดสอบในงานวิจัยฉบับนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการจัดการงบประมาณ ซ่อมแซม และปรับปรุงวัสดุทางวิศวกรรมที่เป็นคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีไอออนเกลือปนอยู่ให้ดีขึ้นได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการจำลองโครงสร้างทางวิศวกรรมที่เป็นคอนกรีตเสริมแรงด้วยเหล็ก ซึ่งเป็นชิ้นงานขนาดทดลอง และสภาพแวดล้อมการกัดกร่อนด้วยน้ำเค็มจำลองที่มีการกำหนดปริมาณสารอย่างคงที่ ผลการกัดกร่อนที่ได้จากการใช้งานโครงสร้างทางวิศวกรรมในสภาพแวดล้อมการกัดกร่อนจริงอาจให้ผลรุนแรงมากหรือน้อยกว่าในงานวิจัยนี้ ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่า ผู้อ่านสามารถนำผลและวิธีการดำเนินการทดสอบการกัดกร่อนไปพิจารณาและปฏิบัติตามได้



รายการอ้างอิง

- กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. (2558). *แผนที่น้ำบาดาลจังหวัดนครราชสีมา*. สืบค้นจาก กรมทรัพยากรน้ำบาดาล: <http://app.dgr.go.th/newpasutara/xml/show2.php?ddlGeo=19&btn1=กรมโยธาธิการและผังเมือง>. (2552). *มยผ. 1103-52 มาตรฐานงานเหล็กเสริมคอนกรีต*.
- กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2564). *มาตรฐานกำหนดคุณลักษณะเฉพาะของวัสดุที่ใช้ในงานโครงสร้างอาคาร มยผ. 1101-64 ถึง 1106-64*.
- กิตติเทพ เพ็ญขจร, พรวิสา วงศ์ปัญญา, เดโช เพ็ญภูมิ, และธนัชฐา ทองประภา. (2566). *รายงานการวิจัยผลกระทบของน้ำเค็มต่อคุณสมบัติของวัสดุทางวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (รหัสโครงการ FF7-713-65-24-25)*.
- รุจิภรณ์ นาคขุนทด. (2560). การประเมินผลพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะจากเส้นโค้งโพลาไรเซชัน (polarization curve). ศูนย์พัฒนาและวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ. สืบค้นจาก <https://www.tistr.or.th/tistrblog>
- วรจกานา อนุชิตโอฬาร. (2546). MTEC. สืบค้นจาก Materials characterization: https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/212_67-70.pdf
- วรเทพ พรประเสริฐ. (2556). การวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนและไนเตรทในเขม่าป่นที่ติดบนผ้าโดยเทคนิค Ion chromatography. สืบค้นจาก คลังปัญญามหาวิทยาลัยศิลปากร: <http://www.thapra.lib.su.ac.th/objects/thesis/fulltext/.pdf>
- สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล, (ม.ป.ป.). *Nano technology*. สืบค้นจาก: <https://il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>
- สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน, (2562). *Thai Synchrotron National Lab*. สืบค้นจาก: <https://www.slri.or.th/th/beamline/bl32a-pes.html>
- สหภาพ หอมวุฒิวงศ์. (2559). การสึกกร่อนของคอนกรีตและการทดสอบ ASTM C1138 (Under water method). *วารสารคอนกรีต TCA e-magazine*, 11.
- ไพรัช พงษ์วิเชียร. (2560). *การเกษตรในพื้นที่ดินเค็มของประเทศไทยเพื่อรับมือกับความต้องการทางอาหาร*. กองวิจัยและพัฒนาการจัดการที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน.
- เมทิดา แก้วพันธ์, และ ยอดสุขใจ วันชัย. (2561). การกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่มีส่วนผสมของสารยับยั้ง. *การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 56*.

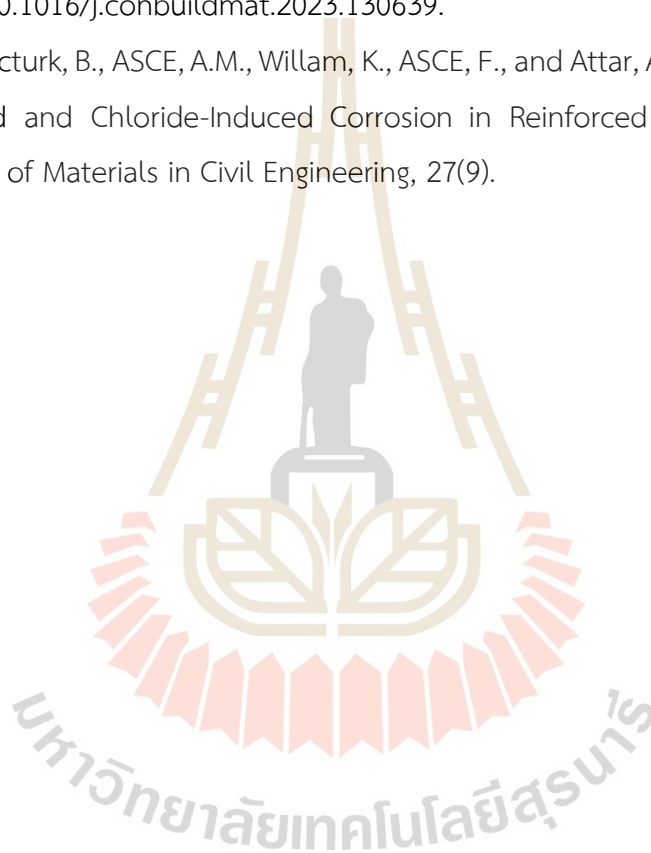
- สำนักสำรวจและวางแผนการใช้ที่ดิน. (2549). *ดินปัญหาของประเทศไทย*, กรมพัฒนาที่ดิน. สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคารกรมโยธาธิการและผังเมือง. (2564). *มาตรฐานกำหนดคุณลักษณะเฉพาะของวัสดุที่ใช้ในงานโครงสร้างอาคารของกรมโยธาธิการและผังเมืองหรือมยผ. 1101-1106*. กรมโยธาธิการและผังเมือง
- สำนักงานอนุรักษ์และฟื้นฟูทรัพยากรน้ำบาดาล. (2558). *รายงานสถานการณ์น้ำบาดาลประเทศไทย*. สืบค้นจาก <https://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2016/16697/1/รายงานสถานการณ์น้ำบาดาลไทย%20พ.ศ.%202558.pdf>
- สำนักสำรวจและวางแผนการใช้ที่ดิน. (2553). *ศูนย์ศึกษาค้นคว้าและพัฒนาเกษตรกรรม ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ*. สืบค้นจาก สำนักสำรวจและวางแผนการใช้ที่ดิน: http://osl101.ldd.go.th/web_salt_NE/nakron%20ratchasima.htm
- Ault, A.P., Peters, T.M., Sawvel, E.J., Casuccio, G.S., Willis, R.D., Norris, G.A., and Grassian, V.H. (2012). Single-particle SEM-EDX analysis of iron-containing coarse particulate matter in an urban environment: sources and distribution of iron within Cleveland, Ohio. *Environ Sci Technol*. Vol. 46, No. 48. doi: 10.1021/es204006k.
- Ahmad, Z. (2006). *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*. Elsevier Science & Technology Books. doi: 10.1016/B978-075065924-6/50013-1.
- Andrade, C., and Alonso, C. (2004). Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. *Mat. Struct*, Vol. 37, 623 – 643. doi: 10.1007/BF02483292.
- Aperador, W., Delgado, A., Carrillo, J. (2013). Corrosion Evaluation of the Rebar Embedded in Self Consolidating Concrete under Marine Environment. *Int. J. Electrochem. Sci.*, Vol. 8, 8401 – 8413. doi: 10.1007/BF02483292.
- ASTM A615/A615M. (2015). *Standard Specification for Deformed and Plain Carbon-Steel Bars for Concrete Reinforcement*.
- ASTM C876-15. (2015). *Standard test method for corrosion potentials of uncoated reinforcing steel in concrete*.
- ASTM G102- 89. (2015) . *Standard Practice for Calculation of Corrosion Rated Information from Electrochemical Measurements*.
- ASTM G3-14. (2019). *Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing*.

- ASTM G31-12. (2021). *Standard Guide for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals*.
- ASTM G61-86. (2020). *Standard test method for conducting cyclic potentiodynamic polarization measurements for localized corrosion susceptibility of iron-, nickel-, or cobalt-based alloys*.
- Avila-Mendoza, J., Flores, J.M., and Castillo, U.C. (1994). Effect of superficial oxides on corrosion of steel reinforcement embedded in concrete, *Corros. Eng. Vol. 50, No. 11*. 879 - 885. doi: 10.5006/1.3293478.
- Bazán A.M., Gálvez J.C., Reyes E., and Galé-Lamuela D. (2018). Study of the rust penetration and circumferential stresses in reinforced concrete at early stages of an accelerated corrosion test by means of combined SEM, EDS and strain gauges, *Constr. Build. Mater. Vol. 184*, 655 - 667. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.195.
- Broomfield, J.P. (2007). *Corrosion of steel in concrete*. New York: Taylor & Francis.
- CAE, (2024). สืบค้นจาก <https://caeonline.com/buy/scanning-electron-microscopes/jeol-jsm-6010-plus-lv/9233065>.
- Chiang, K.T., Dunn, D.S., and Cragolino, G.A. (2007). Effect of Simulated Groundwater Chemistry on Stress Corrosion Cracking of Alloy 22. *Corrosion, Vol. 63, No. 10*, 940 - 950. NACE International.
- Costa, A., and Appleton, J. (1998). Chloride penetration into concrete in marine environment - Part I: Main parameters affecting chloride penetration. *Materials and Structures, Vol. 32*, 252 - 259. doi: 10.1007/BF02479594.
- El-Gelany, M. A., (2001). Short-term corrosion rate measurement of OPC and HPC reinforced concrete specimens by electrochemical techniques. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions, Vol. 34*, 426-432.
- Franco-Luján, V.A., Maldonado-García, M.A., Mendoza-Rangel, J.M., and García, P.M. (2022). Effect of Cl^- -induced corrosion on the mechanical properties of reinforcing steel embedded in ternary concretes containing FA and UtSCBA. *Construction and Building Materials, Vol. 339*. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127655.

- Glass, G.K., Page, C.L., and Short, N.R., (1991). Factors affecting the corrosion rate of steel in carbonated mortars. *Corrosion Science*, 32(12), 1283-1294.
- Holm, S., Holm, T., and Martinsen, Ø.G. (2021). Simple circuit equivalents for the constant phase element. *PLoS ONE*. Vol 16, No. 3. doi: 10.1371/journal.pone.0248786
- Hussain, R.R. (2011). Influence of chloride ions and hot weather on isolated rusting steel bar in concrete based on NDT and electro-chemical model evaluation. *NDT & E International*, Vol. 44, No. 2. doi: 10.1016/j.ndteint.2010.11.010.
- Jorcin, J.B., Orazem, M.E., Pébère, N., and Tribollet, B. (2016). CPE analysis by local electrochemical impedance spectroscopy. *Electrochim Acta*, Vol. 51, 511473 – 1479. doi: 10.1016/j.electacta.2005.02.128.
- Klein, N., Gómez, E.D., Duffó, G.S., and Farina, S.B. (2022). Effect of sulphate on the corrosion of reinforcing steel in concrete. *Construction and Building Materials*. Vol. 354, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129214
- Kejzlar P., Švec M., and Macajová E. (2014). The usage of backscattered electrons in scanning electron microscopy, *Manuf. Technol.* Vol. 14, No. 3, 333 - 336. doi: 10.21062/ujep/x.2014/a/1213-2489/MT/14/3/333.
- Nadin, E. (2007). The Secret Lives of Minerals. Engineering and Science, Vol. 70, No. 1. Retrieve from: <https://calteches.library.caltech.edu/4253/1/Minerals.pdf>
- National Geographic Thailand. (2020). *National Geographic*. Retrieved from <https://ngthai.com/science/30365/groundwater/>
- Nguyen, T. H. Y., Bui, V. H. L., Tran, V. M., Cao, N. T., Pansuk W., and Jongvivatsakul P., (2021). Verifying the reliability of impressed current method to simulate natural corrosion in reinforced concrete, *Eng. J.* Vol. 25, No. 3. 105 - 116. doi: 10.4186/ej.2021.25.3.105.
- Pradhan, B. (2014). Corrosion behavior of steel reinforcement in concrete exposed to composite chloride–sulfate environment. *Construction and Building Materials*, Vol. 72, 398 - 410. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.026.
- Poursaei, A. (2010). Corrosion measurement techniques in steel reinforced concrete. *Journal of ASTM International*, Vol. 8, No. 5 Paper ID JAI103283.

- Poursaei, A. (2011). Determining the appropriate scan rate to perform cyclic polarization test on the steel bars in concrete. *Electrochimica Acta*, 1200-1206.
- Ribeiro, D.V., Abrantes, J.C., and C. (2016). Application of electrochemical impedance spectroscopy (EIS) to monitor the corrosion of reinforced concrete: A new approach. *Construction and Building Materials*, 98-104.
- Rodrigues, R., Gaboreau, S., Gance, J., Ignatiadis, I., and Betelu, S. (2020). Reinforced concrete structures: A review of corrosion mechanisms and advances in electrical methods for corrosion monitoring. *Construction and Building Materials*.
- Rodrigues, R., Gaboreau, S., Gance, J., Ignatiadis, I., and Betelu, S. (2021). Reinforced concrete structures: A review of corrosion mechanisms and advances in electrical methods for corrosion monitoring. *Construction and Building Materials*, Vol. 269. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121240
- Shi, X., Fay, L., Peterson, M.M., Berry, M., and Mooney, M., (2021). A FESEM/EDX investigation into how continuous deicer exposure affects the chemistry of Portland cement concrete, *Constr. Build. Mater.* Vol. 25. 957 – 966. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.086.
- Technological University Dublin, (2022). *Perkin Elmer Spectrum GX FT-IR Microscope*. Retrieve from: FOCAS Research Institute: <https://www.tudublin.ie/research/>
- The LibreTexts Libraries. (2022). Experimental Determination of Kinetics: Spectrophotometry. Retrieve from: <https://chem.libretexts.org/>
- The Visual Journalism Team. (2021). Miami building collapse: what could have caused it. *BBC News*, 2021. Retrieve from: <https://www.bbc.com/news>.
- Wikipedia, (2022). Ion chromatography. Retrieve from: <https://en.wikipedia.org/wiki/IC>
- Wongpanya, P., Phangking, D., and Phueakphum, D. (2024). A comparative analysis of corrosion assessment techniques for steel in reinforced concrete exposed to brine water environments. *Materials Testing*. doi: 10.1515/mt-2024-0044
- Xu, W., Daub, K., Zhang, X., Noel, J.J., Shoesmith, D.W., and Wren, J.C. (2009). Oxide formation and conversion on carbon steel in mildly basic solutions, *Electrochim. Acta*. Vol. 54. 5727 - 5738. doi: 10.1016/j.electacta.2009.05.020.

- Yu, H., Chiang, K.K., and Yang, L. (2012). Threshold chloride level and characteristics of reinforcement corrosion initiation in simulated concrete pore solutions. *Constr. Build. Mater.*, Vol. 26, No. 1. 723 - 729. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.06.079.
- Zhang, F., Myers, J.J., Liao, W., Hui, C., and Ma, H. (2023) Investigation of corrosion mechanism of ribbed mild steel bars coated with magnesium potassium phosphate cement paste. *Constr. Build. Mater.* Vol. 371. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130639.
- Zhou, Y., Gencturk, B., ASCE, A.M., Willam, K., ASCE, F., and Attar, A. (2014). Carbonation-Induced and Chloride-Induced Corrosion in Reinforced Concrete Structures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(9).



ภาคผนวก ก

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Wongpanya, P., Phangking, D., and Phueakphum, D. (2024). **A comparative analysis of corrosion assessment techniques for steel in reinforced concrete exposed to brine water environments.** doi: 10.1515/mt-2024-0044.



Corrosion Testing

Pornwasa Wongpanya*, Dapanee Phangking and Decho Phueakphum

A comparative analysis of corrosion assessment techniques for steel in reinforced concrete exposed to brine water environments

<https://doi.org/10.1515/mt-2024-0044>
Published online April 26, 2024

Abstract: Corrosion assessment of steel-reinforced concrete specimens submerged in synthetic brine water with various chloride concentrations for 1–16 weeks was performed. Mass loss measurements combined with electrochemical techniques – half-cell potential, linear polarization (LP), and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) – were employed. The results obtained from all corrosion assessments – on-site testing (half-cell potential measurements), laboratory scale (LP and EIS measurements), and destructive testing (mass loss or immersion measurements) – exhibited remarkable consistency, complementarity, and mutual supportiveness. Corrosion rate (CR) values from mass loss were close to those obtained from LP and EIS. The corrosion resistance decreased with increasing chloride concentration and immersion time, as indicated by the highest CR, Ca^{2+} , and Fe^{2+} concentrations, and the lowest half-cell potential and polarization resistance. X-ray photoelectron spectroscopy investigation on the corroded steel surface revealed Fe(III) oxides and hydroxides and Fe(III) (FeCl_3), corresponding to the reduction in polarization resistance in the LP and EIS results.

Keywords: corrosion; reinforcement steel; brine environments; chloride concentration; polarization

1 Introduction

Reinforced concrete is widely used as a building material in construction, for example, in pillars, highways, bridges, footings, buildings, and piers because of its stability and durability. It deteriorates over time because of steel corrosion in concrete caused by electrochemical reactions between steel and the environment, including water, air, and soil, especially chloride ions (Cl^-) that contaminate high-salinity water and soil sources [1–4]. However, the steel reinforcement within concrete is typically protected from corrosion by a protective passive film on the steel surface when exposed to a highly alkaline environment ($\text{pH} > 12.5$). However, such passive film would not be able to prevent the steel in concrete from corrosion for an extended period because aggressive environmental components, such as Cl^- and carbon dioxide gas (CO_2), diffuse and then react with water (H_2O) to form carbonic acid (H_2CO_3). This leads to decreased pH, degradation of passive film, and corrosion of the steel reinforcement [3], [5–7]. Subsequently, rust, composed of ferrous hydroxide ($\text{Fe}(\text{OH})_2$), ferric hydroxide ($\text{Fe}(\text{OH})_3$), and hydrated ferric oxide ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$), forms. Unfortunately, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ has a larger volume than other corrosion products ($\text{Fe}(\text{OH})_2$ and $\text{Fe}(\text{OH})_3$) of steel in concrete, causing high internal pressure and resulting in concrete damage, including cracking, spalling, and peeling [3], [8], [9]. Finally, the performance of reinforced concrete in support structures decreases. Further, there is a risk of structural damage, exacerbating the repair cost and affecting the safety of property and life [1], [5].

Over recent years, significant improvements have been achieved in the quality of concrete [1], [2], and corrosion assessment techniques have been extensively applied [1], [2], [5], [6], [9], facilitating the mitigation of degradation and prediction of the lifetimes of reinforced concrete structures with regard to corrosion damage. Numerous researchers [1], [2], [5–10] have investigated the corrosion detriment to the steel reinforcements within the concrete, particularly steel rebars such as epoxy-coated steel (EC), high-chromium steel (HC), HRB400 hot-rolled ribbed, mild steel (MS), and stainless

*Corresponding author: Pornwasa Wongpanya, School of Metallurgical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, 111 University Avenue, Muang, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand, E-mail: pornwasa@sut.ac.th

Dapanee Phangking, School of Metallurgical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, 111 University Avenue, Muang, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

Decho Phueakphum, School of Geotechnology, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, 111 University Avenue, Muang, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

เนื่องจากระเบียบเกี่ยวกับลิขสิทธิ์ของสำนักพิมพ์ DE GRUYTER จึงไม่สามารถแสดงเนื้อหา
ทั้งหมดของบทความได้ ดังนั้นรายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับงานวิจัยที่ได้ตีพิมพ์เผยแพร่ สามารถดาวน์โหลดและอ่านต่อได้ที่ <http://doi.org/10.1515/mt-2024-0044>

ประวัติผู้เขียน

นางสาวดาปณีย์ ผังกิ่ง เกิดวันที่ 20 เดือนตุลาคม พุทธศักราช 2541 สำเร็จการศึกษา ระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนมารีย์วิทยาจังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พุทธศักราช 2556 และ 2559 ตามลำดับ จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี เกียรตินิยมอันดับสอง สาขาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปีพุทธศักราช 2564 หลังจากสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี ได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมวัสดุ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปีพุทธศักราช 2564 โดยได้รับทุนค่าศึกษาเล่าเรียนในระดับบัณฑิตศึกษา (ทุนกิตติบัณฑิต) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และทุนการศึกษาประเภท นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาที่มหาวิทยาลัยและคณาจารย์ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากรัฐบาลด้วยทุนสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund, FF) โดยมีบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติที่มี Peer Review และอยู่ในฐานข้อมูล ISI, Web of science คือ Material Testing ที่มี Impact Factor อยู่ที่ 2.5 Quartile 2 ดังนี้

- (1) Wongpanya, P., Phangking, D., and Phueakphum, D. (2024). A comparative analysis of corrosion assessment techniques for steel in reinforced concrete exposed to brine water environments. doi: 10.1515/mt-2024-0044.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี