

พฤติกรรมการกัดกร่อนในสารละลายกรด เบส และโซเดียมคลอไรด์ของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กจากการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า

CORROSION BEHAVIOR OF ELECTRODEPOSITED
COBALT-IRON ALLOYS IN ACIDIC, BASIC AND SODIUM
CHLORIDE SOLUTIONS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นว่าไม่เหมาะสมต่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเอกสารฉบับนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ปีการศึกษา 2560

CORROSION BEHAVIOR OF ELECTRODEPOSITED
COBALT-IRON ALLOYS IN ACIDIC, BASIC AND SODIUM
CHLORIDE SOLUTIONS



RATCHAPOL RACHANIKORN
SUTIT RUNGTVAGORNUTHAI
SUPATRA DEESUNJUNGPAK

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDRUSTRIAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2017

หัวข้อโครงการพิเศษ

พฤติกรรมการกัดกร่อนในสารละลายกรด เบส และโซเดียมคลอไรด์ของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก จากการศึกษาด้วยไฟฟ้า
Corrosion Behavior of Electrodeposited Cobalt-Iron Alloys in Acidic, Basic and Sodium Chloride Solutions

ชื่อนักศึกษา

นายรัชพล ราชานิกรณ์ รหัสนักศึกษา 57050496
นายสุธิษณ์ รุ่งทิวากรอุทัย รหัสนักศึกษา 57050540
นางสาวสุพัตรา ตีสรรจึงพาสุข รหัสนักศึกษา 57050542

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา

เคมี

ปีการศึกษา

2560

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.สุธา สุทธิเรืองวงศ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2560

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุพห์ ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.สุภารัตน์ รัชชลธิ กรรมการ	
ผศ.ดร.สุธา สุทธิเรืองวงศ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	พฤติกรรมการณ์กัดกร่อนในสารละลายกรด เบส และโซเดียมคลอไรด์ของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก จากการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า
ชื่อนักศึกษา	นายรัชพล ราชานิกรณ์ รหัสนักศึกษา 57050496 นายสุวิชัย รุ่งทิวากรอุทัย รหัสนักศึกษา 57050540 นางสาวสุพัชรา ตีสรจิงพาสุข รหัสนักศึกษา 57050542
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2560
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.สุธา สุทธิเรืองวงศ์

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการณ์กัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กที่มีอัตราส่วนประมาณ 40:60 โดยน้ำหนัก ที่ได้จากการเคลือบผิวด้วยเทคนิคโซลอิเล็กโทรไลต์นาโนโพลาริเซชัน และทำการทดสอบการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนซิโอดินามิกโพลาริเซชัน ในสารละลาย pH เท่ากับ 5 6 8 9 น้ำกลั่น และโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 0.1% 1% 2% และ 3% โดยน้ำหนัก และทำการทดสอบการสูญเสียเหล็กของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก โดยใช้เทคนิคโพเทนซิโอสแตติกโพลาริเซชัน ด้วยสารละลายที่ความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 6 ซึ่งนำไปพิสูจน์เอกลักษณ์ก่อนและหลังทำการทดสอบกัดกร่อนด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดและติดตั้งร่วมกับเครื่องเอกซเรย์สเปคโตรสโกปีแบบกระจายพลังงาน พบว่าที่ค่าความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 5 9 และในน้ำกลั่น มีค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน เท่ากับ 2.81×10^{-7} 5.96×10^{-8} และ 1.11×10^{-7} แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ที่ความเข้มข้น NaCl 0.1% และ 3% โดยน้ำหนัก มีค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน 1.38×10^{-7} และ 5.80×10^{-6} แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ และผลการทดสอบการสูญเสียเหล็ก พบว่าอัตราส่วนของโคบอลต์:เหล็กก่อนทำการทดสอบจากเทคนิค XRF และ EDS เท่ากับ 48.4:51.6 และ 53.7:48.3 โดยน้ำหนักตามลำดับ และอัตราส่วนของโคบอลต์:เหล็กหลังทำการทดสอบจากเทคนิค XRF และ EDS เท่ากับ 56.1:43.9 และ 62.4:37.6 โดยน้ำหนักตามลำดับ จากผลการทดลอง ค่า pH สูง และความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์น้อยให้ค่าอัตราการกัดกร่อนที่น้อยกว่า และเกิดการสูญเสียเหล็กเนื่องจากอัตราส่วนของโคบอลต์:เหล็กหลังทำการทดสอบการกัดกร่อนมีปริมาณของเหล็กที่ลดลง

คำสำคัญ : การกัดกร่อน การเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า การสูญเสียเหล็กในโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก फिल्म โลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Corrosion Behavior of Electrodeposited Cobalt-Iron Alloys in Acidic, Basic and Sodium Chloride Solutions		
Students	Mr. Ratchapol Rachanikorn	Student ID 57050496	
	Mr. Sutit Rungtivagornuthai	Student ID 57050540	
	Miss Supatra Deesunjungpasuk	Student ID 57050542	
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)		
Department	Chemistry		
Faculty	Science		
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
Academic Year	2017		
Advisor	Asst. Prof. Dr. Sutha Sutthiruangwong		

Abstract

This research aim to study the corrosion behavior of Co-Fe alloys with Co:Fe ratio of about 40:60 by weight from electrodeposition by cyclic galvanodynamic polarization method. The solutions with pH 5, 6, 8, 9, distilled water, and NaCl with concentrations equal to 0.1% 1% 2% and 3% by weight were selected for corrosion study by using potentiodynamic polarization method. The deironification was studied in pH 6 solution using potentiostatic polarization method. All of compositions of electrodeposited Co-Fe alloys were determined before and after deironification test by X-ray fluorescence spectrometry (XRF) and scanning electron microscope with energy dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDS). The current densities from pH 5, 9 solutions and distilled water were 2.81×10^{-7} , 5.96×10^{-8} , and 1.11×10^{-7} A/cm², respectively and the current densities from NaCl solutions with 0.1% and 3% by weight were 1.38×10^{-7} and 5.80×10^{-6} A/cm², respectively. The deironification test found that the Co-Fe weight ratio from XRF and SEM-EDS before corrosion was 48.4:51.6 and 53.7:48.3. And the Co-Fe weight ratios after deironification test from XRF and SEM-EDS were 56.1:43.9 and 62.4:37.6. This study showed that high pH and low concentration of NaCl solution gave low corrosion rate and the Co-Fe weight ratio after deironification test was lower than the original electrodeposited Co-Fe alloys.

Keyword : Corrosion, Electrodeposition, Deironification of Co-Fe alloys, Co-Fe alloys film.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องมาจากการได้รับความอนุเคราะห์และความร่วมมือจากบุคคลและหน่วยงานต่าง ๆ ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุธา สุทธิเรืองวงศ์ ที่ได้มอบหมายงานนี้ให้แก่กลุ่มของข้าพเจ้า และให้เกียรติเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ เป็นผู้ให้ความรู้ และสอนทักษะต่าง ๆ ในการทำโครงการพิเศษครั้งนี้ จึงขอขอบคุณเป็นอย่างสูง ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ และ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ์ ที่ให้เกียรติมาเป็นคณะกรรมการในการสอบ และตรวจทานแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้การสนับสนุน ทั้งทางด้านทุนวิจัย สารเคมี อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ อีกทั้งยังอำนวยความสะดวกตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี และเจ้าหน้าที่ห้องธุรการ สาขาวิชาเคมี ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวก ในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จไปได้ด้วยดี และบุคคลอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวมา ผู้จัดทำโครงการขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่ให้ได้รับการศึกษา ตลอดจนคอยเลี้ยงดูและอบรมสั่งสอนและเป็นกำลังใจเป็นแรงผลักดันในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมถึงเพื่อน ๆ และบุคคลอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวมา ผู้จัดทำโครงการขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

รัชพล ราชานุกรณ์
สุริษณ์ รุ่งทิวากรอุทัย
สุพัตรา ดีสรจิงพาสุข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
คำย่อและสัญลักษณ์.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ทฤษฎีและหลักการกัดกร่อน.....	5
2.1.1 การกัดกร่อน (Mechanism of corrosion).....	6
2.1.1.1 การกัดกร่อนเกิดจากปฏิกิริยาเคมีโดยตรง.....	6
2.1.1.2 การกัดกร่อนเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า.....	7
2.1.2 โพลาริเซชัน (Polarization).....	10
2.1.3 การประเมินผลพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะจากเส้นโค้งโพลาริเซชัน (Polarization curve).....	11
2.1.3.1 เซลล์เคมีไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบการกัดกร่อนของโลหะ.....	11
2.1.3.2 ลักษณะของเส้นโค้งโพลาริเซชันของพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะ.....	13
2.2 การกัดกร่อนแบบจำเพาะ (Selective leaching or Dealloying).....	14
2.2.1 การกัดกร่อนของทองเหลือง (Dezincification)	14
2.2.1.1 ประเภทของการกัดกร่อนของทองเหลือง (Type of dezincification).....	15
2.2.1.2 กลไกการเกิดการกัดกร่อนของทองเหลือง (Mechanism of dezincification).....	16
2.2.1.3 ปัจจัยที่มีผลกับการเกิดการกัดกร่อนของทองเหลือง.....	16
2.3 ทฤษฎีการเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า (Electrodeposition)	18
2.3.1 หลักการเบื้องต้นของการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า.....	18
2.3.1.1 อีเล็กโทรไลต์.....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้ง 2.3.1.1 อีเล็กโทรไลต์ และตัวเลขอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไป

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.1.2 ค่าของความเป็นกรด-เบส (pH values).....	19
2.3.1.3 ความหนาแน่นของกระแส (Current density).....	19
2.3.1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของชิ้นงานและกำลังการเคลือบผิว.....	19
2.3.2 เทคนิคการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า.....	19
2.3.2.1 เทคนิคการเคลือบผิวแบบไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic voltammetry).....	19
2.3.2.2 เทคนิคการเคลือบไฟฟ้าแบบพัลส์ (Pulse).....	20
2.4 โคบอลต์ (Cobalt, Co).....	21
2.4.1 การค้นพบ.....	21
2.4.2 การใช้ประโยชน์.....	21
2.4.3 ความเป็นพิษ.....	22
2.5 เหล็ก (Iron, Fe).....	22
2.5.1 การค้นพบ.....	22
2.5.2 การใช้ประโยชน์.....	23
2.5.3 ความเป็นพิษ.....	24
2.6 เทคนิคการพิสูจน์เอกลักษณ์ของโลหะผสม.....	25
2.6.1 การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุและองค์ประกอบของสารด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์.....	25
2.6.2 การวิเคราะห์การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM).....	27
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	31
3.1 สารเคมี.....	31
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	31
3.3 การสังเคราะห์ฟิล์มโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก.....	33
3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมผิวชิ้นงาน.....	33
3.3.2 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายผสมโคบอลต์-เหล็ก.....	34
3.3.3 ขั้นตอนการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า.....	34
3.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก.....	35
3.5 การศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อน.....	35
3.6 การศึกษาพฤติกรรมการสูญเสียเหล็กของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก.....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	36
4.1 พฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก.....	36
4.1.1 สารละลายกรดและเบส.....	36
4.1.2 สารละลายโซเดียมคลอไรด์.....	39
4.2 พฤติกรรมการเกิดการสูญเสียเหล็กของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก.....	41
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	43
5.1 สรุปผลการวิจัย	43
5.1.1 พฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กในสารละลายกรด-เบส และน้ำกลั่น.....	43
5.1.2 พฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ และน้ำกลั่น.....	43
5.1.3 พฤติกรรมการเกิดการสูญเสียเหล็กของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก.....	43
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	43
เอกสารอ้างอิง.....	44
ภาคผนวก.....	47
ภาคผนวก ก.....	48
ภาคผนวก ข.....	50
ภาคผนวก ค.....	52
ภาคผนวก ง.....	53
ภาคผนวก จ.....	55
คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ.....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์รีดอกซ์.....	9
2.2 ปฏิกิริยาครึ่งเซลล์ที่มักเกิดขึ้นในการกัดกร่อนของทองเหลือง.....	16
4.1 ตัวแปรแสดงพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก ในสารละลายที่ pH ต่างกัน และน้ำกลั่น.....	37
4.2 ตัวแปรแสดงพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่างกัน.....	39
4.3 อัตราส่วนของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กบนผิวเคลือบจากเทคนิค XRF.....	42
4.4 อัตราส่วนของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กบนผิวเคลือบจากเทคนิค EDS.....	42
ง1 ปริมาณโคบอลต์ และเหล็กของชั้นฟิล์มโลหะผสมก่อนทำการทดสอบ.....	53
ง2 ปริมาณโคบอลต์ และเหล็กของชั้นฟิล์มโลหะผสมหลังทำการทดสอบ.....	54



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 เฟสไดอะแกรม (Phase diagram) ของ Co-Fe.....	2
2.1 วัฏจักรของการกัดกร่อนของโลหะ.....	5
2.2 ลักษณะการกัดกร่อนแบบกัลวานิก.....	8
2.3 ตัวอย่างการกัดกร่อนแบบกัลวานิกโดยการยึดติดแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าคาร์บอน.....	9
2.4 เซลล์เคมีไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบการกัดกร่อน.....	11
2.5 เส้นโค้งโพลาริเซชันสำหรับการกัดกร่อน แบบหัวผิวหน้าของโลหะ.....	12
2.6 เส้นโค้งโพลาริเซชันสำหรับการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นป้องกันคลุมหัวผิวหน้าโลหะ.....	12
2.7 การเกิดการกัดกร่อนของทองเหลือง.....	14
2.8 การกัดกร่อนของทองเหลืองแบบสม่ำเสมอ.....	15
2.9 การกัดกร่อนของทองเหลืองแบบบางส่วน.....	15
2.10 แนวโน้มการเกิดการกัดกร่อนของทองเหลืองเมื่อมีสิ่งก่ะสีปริมาณต่าง ๆ.....	17
2.11 การเกิดการกัดกร่อนของทองเหลืองแบบเมอร์แรง.....	18
2.12 โวลเทจโปรแกรมของไซคลิกโวลแทมเมตรี.....	19
2.13 ไซคลิกโวลแทมโมแกรม.....	20
2.14 กราฟทั่วไปของการเคลือบผิวแบบพัลส์.....	20
2.15 โคบอลต์.....	21
2.16 เหล็ก.....	23
2.17 ขั้นตอนการเกิดรังสีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์.....	25
2.18 การจัดต่อประกอบอุปกรณ์การวิเคราะห์โดยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์.....	26
2.19 องค์ประกอบของหลอดรังสีเอกซ์.....	26
2.20 ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด.....	27
2.21 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด.....	27
2.22 ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด.....	28
3.1 ชุดทดลองการกัดกร่อน.....	32
3.2 อุปกรณ์บรรจุตัวอย่าง.....	32
3.3 ชุดควบคุมก๊าซไนโตรเจน.....	33
3.4 ตัวอย่างทองแดง.....	33
3.5 ตัวอย่างการจับชิ้นงาน.....	33
3.6 การต่อขั้วไฟฟ้า.....	34
4.1 กราฟโพลาริเซชันของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก ในสารละลายกรดเบส และน้ำกลั่น.....	36
4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง pH กับความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน.....	37
4.3 แผนภาพพัวเบ.....	38

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 กราฟโพลาริเซชันของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่างกัน.....	39
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ NaCl กับความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน.....	40
4.6 กราฟโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชันในสารละลายกรด.....	41
4.7 พื้นผิวของโลหะผสม Co-Fe ก่อนและหลังทำการทดสอบการกัดกร่อน ก) กำลังขยาย 1000 เท่า ข) กำลังขยาย 5000 เท่า ค) กำลังขยาย 1000 เท่า และ ง) กำลังขยาย 5000 เท่า.....	41
ง1 EDS ของชั้นฟิล์มโลหะผสมก่อนทำการทดสอบ.....	53
ง2 EDS ของชั้นฟิล์มโลหะผสมหลังทำการทดสอบ.....	54



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
i_{corr}	ค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน
E_{corr}	ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน
Co-Fe	โลหะที่ผสมระหว่างโคบอลต์และเหล็ก
ocp	Open circuit potential
V_{SCE}	ศักย์ไฟฟ้าเมื่อเทียบกับขั้วคาโลเมลล์อิ่มตัว
V_{SHE}	ศักย์ไฟฟ้าเมื่อเทียบกับขั้วไฮโดรเจนมาตรฐาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การกัดกร่อน (Corrosion) คือ ปฏิกิริยาระหว่างวัสดุกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงที่สามารถวัดค่าได้ และยังสามารถส่งผลให้ความสามารถในการทำงานของวัสดุลดลง ส่วนใหญ่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า แต่บางครั้งยังสามารถเป็นปฏิกิริยาเคมีทั่วไปได้ [1]

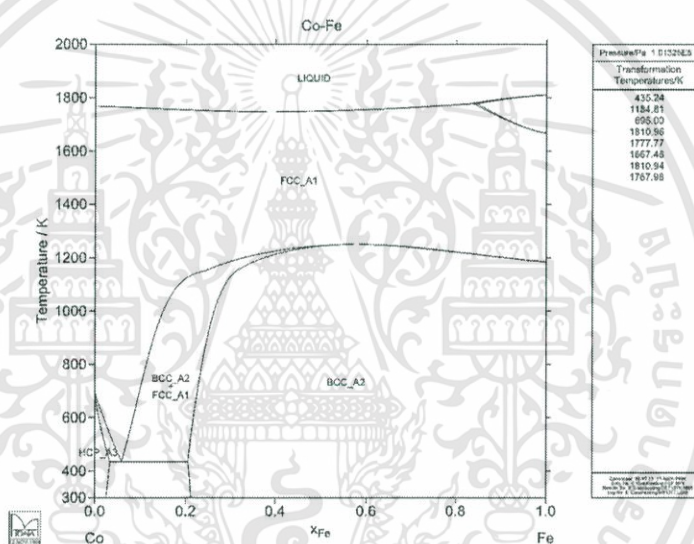
อุตสาหกรรมหลักในประเทศมีการสูญเสียเนื่องจากการกัดกร่อนประมาณ 3% ของผลิตภัณฑ์มวลรวมภายในประเทศ (Gross domestic product, GDP) คิดเป็นมูลค่าประมาณ 137.9 พันล้านบาทต่อปี ซึ่งส่วนใหญ่มาจาก 5 ภาคอุตสาหกรรมหลัก ไฟฟ้าและประปา 34% การขนส่ง 22% สาธารณูปโภค 16% ภาครัฐ 15% และภาคการผลิต 13% และมีการสูญเสียจากทางอ้อม เช่น การหยุดโรงงาน สูญเสียผลิตภัณฑ์ สูญเสียประสิทธิภาพในการผลิต การปนเปื้อน และการออกแบบเกินความจำเป็น [2]

เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลที่เป็นที่นิยมใช้ในการเก็บข้อมูลในระบบคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันนั้นคือ เทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard disk drive, HDD) ซึ่งการพัฒนาเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลในปัจจุบันจะมุ่งเน้นความสำคัญมากในเรื่องการเพิ่มความจุของข้อมูล การลดขนาดของอุปกรณ์การเพิ่มความน่าเชื่อถือในการบันทึกข้อมูล การอ่านและบันทึกข้อมูลที่เร็ว และใช้พลังงานน้อย เทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มุ่งเน้นการพัฒนาในด้านดังกล่าวเช่นกัน ซึ่งพบว่า หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์นั้นมีการรับคำสั่งจากตัวคอนโทรลเลอร์ ก่อนเกิดความเหนียวหนืดทางแม่เหล็ก และไปเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสนามแม่เหล็ก และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของข้อมูล ดังนั้นการกัดกร่อนเป็นปัญหาสำคัญ ส่งผลให้ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์สูญเสียประสิทธิภาพในการทำงาน [3] หากต้องการเพิ่มคุณสมบัติแม่เหล็กของโลหะผสม ต้องเพิ่มอัตราส่วนของเหล็กให้มากขึ้น ทำให้เกิดการสูญเสียเหล็กในโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก (Deironification) [1] ดังนั้นหากต้องการผลิตวัสดุที่มีคุณสมบัติแม่เหล็กสูงต้องคำนึงถึงการกัดกร่อนแบบเลือก (Selective leaching) [4]

ตั้งแต่อดีตมาจนถึงปัจจุบัน ได้มีการศึกษา และพัฒนาเพื่อให้ฮาร์ดดิสก์มีขนาดเล็กลง และสามารถบรรจุข้อมูลได้จำนวนมากขึ้น ยุคแรกการอ่านข้อมูลที่อยู่ในฮาร์ดดิสก์เป็นการวัดกระแสไฟฟ้าโดยตรงจากหัวอ่านทำให้สัญญาณที่บันทึกในดิสก์มีขนาดใหญ่ ดังนั้นพื้นที่บรรจุจึงต้องใหญ่ตาม ต่อมาเมื่อเทคโนโลยีหัวอ่านแบบ Magnetoresistive (MR) โดยหลักการการทำงานคือ เมื่อหัวอ่านอยู่ในสนามแม่เหล็กจะทำให้ความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนไป จึงเกิดการแปลงข้อมูลจากกระแสไฟฟ้ามาเป็นความต้านทานไฟฟ้าทำให้ง่ายต่อการวัดมากขึ้น จึงสามารถลดขนาดสัญญาณของข้อมูลในตัวดิสก์ให้เล็กลงได้เพราะหัวอ่านมีความไวต่อสนามแม่เหล็กมากขึ้น และในปัจจุบันได้ใช้หัวอ่านฮาร์ดดิสก์แบบ Giant magnetoresistive (GMR) ซึ่งทำงานเหมือนกับ MR แต่วัสดุที่ใช้จะเปลี่ยนความต้านทานมากขึ้นมากกว่า ส่งผลให้หัวอ่านไวต่อสนามแม่เหล็กมากขึ้นและทำให้ข้อมูลที่บันทึกในดิสก์สามารถลดขนาดสัญญาณที่บันทึกได้ลงไปอีก ทำให้ดิสก์มีขนาดเล็กลงและบรรจุข้อมูลได้มากขึ้น ซึ่งโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กนั้นเป็นส่วนสำคัญในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์แบบ GMR ที่ใช้เป็นหัวอ่านในปัจจุบัน [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้มีผู้ศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของชั้นฟิล์มโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก (Co-Fe alloy) งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะเตรียมวัสดุโลหะผสม Co-Fe เพื่อนำไปทดสอบพฤติกรรมการกัดกร่อนในสารละลายที่อยู่ในกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ การศึกษานี้เลือกวิธีเคลือบผิวด้วยเทคนิค การเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าโดยให้กระแสแบบวนรอบ (Cyclic galvanodynamic polarization) เนื่องจากเป็นเทคนิคที่สามารถกำหนดช่วงของกระแสในการเคลือบผิวได้จึงสามารถควบคุมการจ่ายกระแสแบบวนรอบในช่วงกระแสที่ต้องการได้ หลังจากได้ชิ้นงานโลหะผสม Co-Fe แล้ว นำชิ้นงานที่ได้ไปศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนในสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ค่า pH เท่ากับ 3 4 และ 5 โดยทดสอบแบบโพเทนชิโอดีนามิกโพลาริเซชัน พบว่าโลหะผสม Co-Fe นั้นมีคุณสมบัติแม่เหล็กเป็นพาราแมกเนติก (Paramagnetic) อัตราการกัดกร่อนจะแปรผันตรงกับปริมาณเหล็ก แต่จะแปรผกผันกับค่าความเป็นกรด-เบส และเมื่อปริมาณเหล็กสูงกว่าหรือเท่ากับ 37.7% เกิดการสูญเสียเหล็กในโลหะผสม Co-Fe [4]



รูปที่ 1.1 เฟสไดอะแกรม (Phase diagram) ของ Co-Fe [6]

โครงการพิเศษนี้มุ่งศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของชั้นฟิล์มโลหะผสม Co-Fe ในอัตราส่วน 40:60 โดยน้ำหนัก จากการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า เนื่องจากที่อัตราส่วนนี้สามารถเกิดการสูญเสียเหล็กได้ด้วย และทำการทดสอบภายใต้สภาวะความเป็นกรด-เบส และโซเดียมคลอไรด์ โดยใช้เทคนิคโพเทนชิโอดีนามิกโพลาริเซชัน (Potentiodynamic polarization) ทำให้ได้กราฟโพลาริเซชัน โดยพบว่า ที่ค่า pH ต่ำจะเกิดการกัดกร่อนมากกว่า ที่ค่า pH สูง ซึ่งเป็นข้อมูลที่มีความสำคัญในการพัฒนาและป้องกันการกัดกร่อนของวัสดุต่อไป เพื่อลดความเสียหายในกระบวนการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) ศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของชั้นฟิล์มโลหะผสม Co-Fe ในสารละลายกรด-เบส และโซเดียมคลอไรด์ โดยใช้เทคนิคการวัดโพลาริเซชัน
- 2) ศึกษาพฤติกรรมการสูญเสียเหล็กในชั้นฟิล์มโลหะผสม Co-Fe ในสารละลายกรด โดยใช้เทคนิคโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชัน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) เตรียมชิ้นงานโลหะผสม Co-Fe ด้วยเทคนิคการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า โดยมีอัตราส่วนของ Co:Fe ในสารละลายเท่ากับ 40:60 โดยน้ำหนัก
- 2) นำชิ้นงานไปทดสอบการกัดกร่อนของชั้นฟิล์มโลหะผสม Co-Fe ในสารละลายกรดซัลฟิวริก โซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ค่าความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 5 6 8 9 และน้ำกลั่น และโซเดียมคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 0.1% 1% 2% และ 3% โดยน้ำหนัก
- 3) ศึกษาการสูญเสียเหล็กในชั้นฟิล์มโลหะผสม Co-Fe โดยใช้เทคนิคโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชันในสารละลายที่ค่าความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 6
- 4) วิเคราะห์หาปริมาณธาตุและองค์ประกอบของโคบอลต์ และเหล็กด้วยเทคนิคเอกซเรย์-ฟลูออเรสเซนส์ (X-Ray Fluorescence Spectrometry, XRF)
- 5) การวิเคราะห์การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ และอัตราส่วนของธาตุบนชั้นฟิล์ม ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดและติดตั้งร่วมกับเครื่องเอกซเรย์สเปกโทรสโกปีแบบกระจายพลังงาน (Scanning Electron Microscope and energy dispersive X-ray spectroscopy, SEM-EDS)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทราบพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-Fe

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีดำเนินการ

วิธีการดำเนินงานวิจัย	ระยะเวลา									
	ต.ค. 60	พ.ย. 60	ธ.ค. 60	ม.ค. 61	ก.พ. 61	มี.ค. 61	เม.ย. 61	พ.ค. 61	มิ.ย. 61	
1. ศึกษาข้อมูล ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง										
2. วางแผนการทดลอง										
3. ทำวิจัยบทที่ 1 2 3										
4. ทำการทดลองตามแผน										
5. วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมี										
6. วิเคราะห์ผลการทดลอง										
7. สรุปงานวิจัย										

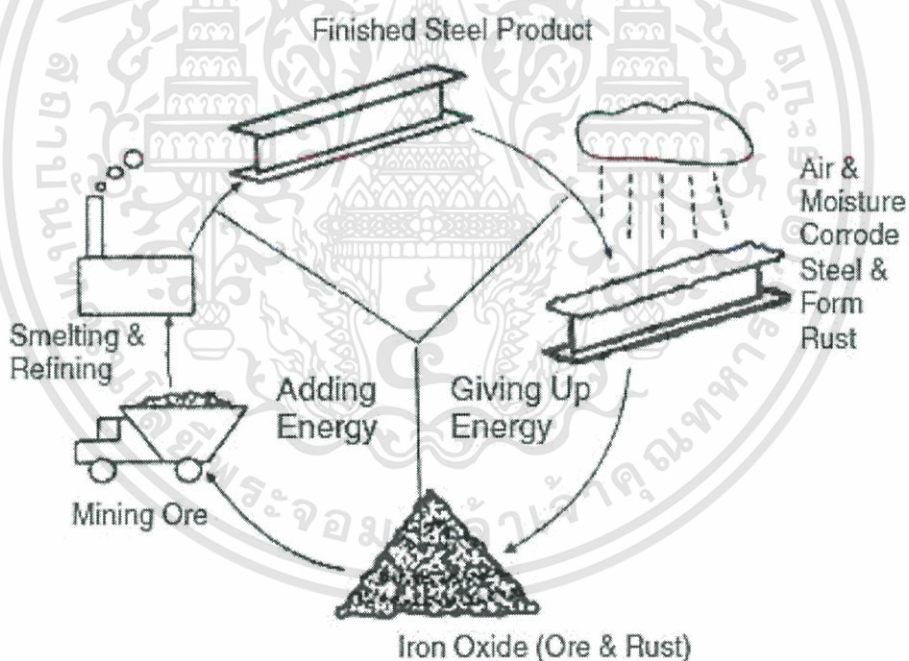
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีและหลักการกัดกร่อน

การกัดกร่อน (Corrosion) คือ การเสื่อมสภาพของโลหะซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของโลหะ โดยโลหะเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบของโลหะหรือที่เรียกว่าสนิม ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของการกัดกร่อนเป็นเหตุให้โลหะเกิดความเสียหาย โดยวัฏจักรของการกัดกร่อนแสดงในรูปที่ 2.1 ในแต่ละปีโลกมีค่าใช้จ่าย จากปัญหาการกัดกร่อนมากมาย ทั้งที่เป็นการบำรุงรักษา หรือการจัดซื้อเพื่อทดแทนส่วนที่ชำรุดเสียหายจนไม่อาจใช้งานได้อีกต่อไป บางครั้งยังเป็นค่าใช้จ่ายที่มากเกินไป เช่น การออกแบบเพื่อใช้โลหะหนาเกินความจำเป็น นอกจากนี้ยังมีค่าใช้จ่ายของการค้นคว้าวิจัย เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ได้พัฒนาให้มีความต้านทานการกัดกร่อนสูง สามารถใช้ได้แม้ในสิ่งแวดล้อมที่มีสภาวะเกิดการกัดกร่อน การกัดกร่อนจึงสามารถเกิดขึ้นได้ทั่วไป อาจกล่าวได้ว่าโลหะเกือบทุกชนิดเกิดการกัดกร่อนได้เสมอต่างกันที่ความยากง่ายของการเกิดการกัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อนเร็วหรือช้า ดังนั้นสาเหตุของการกัดกร่อนจึงมาจากทั้งโลหะและสิ่งแวดล้อม [7]



รูปที่ 2.1 วัฏจักรของการกัดกร่อนของโลหะ [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 การกัดกร่อน (Mechanism of corrosion) [8]

การกัดกร่อนพอสรูปและแบ่งสาเหตุออกได้เป็น 2 ประการคือ การกัดกร่อนเกิดจากปฏิกิริยาเคมีโดยตรง (Chemical attack) และการกัดกร่อนเกิดจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (Electrochemical attack)

2.1.1.1 การกัดกร่อนเกิดจากปฏิกิริยาเคมีโดยตรง

การกัดกร่อนอาจเกิดจากปฏิกิริยาเคมีโดยตรง ทำให้โลหะเกิดการเสียหายโดยการอาศัยแก๊สเป็นสื่อบนผิวโลหะ ซึ่งมักเกิดจากสภาพอากาศเป็นตัวแปรสำคัญ เช่น ความชื้นในอากาศมีมาก ทำให้โลหะเป็นสนิมได้เร็วขึ้น แก๊สออกซิเจนในอากาศเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนโดยอาศัยปฏิกิริยาเคมีกับโลหะ การกัดกร่อนจะมากน้อยขึ้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิยิ่งสูงการรวมตัวระหว่างออกซิเจนกับโลหะยิ่งสะดวกรวดเร็ว เช่น เหล็กที่ถูกเผาจนร้อนจะเกิดสนิมเหล็กได้ง่ายกว่าเหล็กที่อยู่ในอากาศปกติ ซึ่งการกัดกร่อนจากปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นได้ดังนี้

1) เกิดจากการรวมตัวระหว่างโลหะ (Metal) กับออกซิเจน (O_2) แบ่งออกได้ 2 ลักษณะคือ

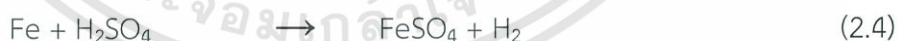
1.1) โดยมีน้ำเป็นตัวร่วมทำปฏิกิริยา (Reaction) เช่น การเกิดสนิมเหล็กในอากาศปกติที่มีความชื้น



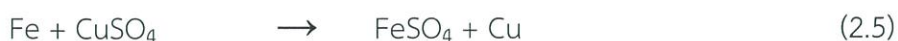
1.2) โดยไม่มีความชื้นร่วมทำปฏิกิริยา เช่น การรวมตัวของออกซิเจนกับเหล็ก เมื่ออุณหภูมิสูง ๆ และอากาศแห้งมาก ๆ ทำให้เกิดเป็นสนิมเหล็กขึ้น (Ferric oxide)



2) เกิดจากการแตกตัวของไฮโดรเจน (H_2) ในกรด เช่นการกัดกร่อนของเหล็กที่แช่อยู่ในกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid)



3) เกิดจากการถ่ายโอนไอออนจากโลหะชนิดหนึ่งไปแทนที่ไอออนของโลหะอีกชนิดหนึ่ง ระหว่างการเกิดปฏิกิริยาในสารละลาย (Electrolyte) เช่น การกัดกร่อนของเหล็กที่แช่ในสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (Coppers sulphate)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.2 การกัดกร่อนเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า

1) หลักการเบื้องต้นของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า สามารถแยกลักษณะการเกิดปฏิกิริยาได้ 2 ลักษณะคือ

1.1) ลักษณะของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic cell) เกิดโดยการนำโลหะสองชนิดมาเชื่อมในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ แล้วต่อขั้วของโลหะทั้งสองให้เชื่อมถึงกันจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น เราจะพบในแบตเตอรี่รถยนต์ หรือถ่านไฟฉาย ในการเรียกชื่ออิเล็กโทรไลต์จะเป็นไปตามค่าความต่างศักย์ของโลหะทั้งสองคืออิเล็กโทรด ที่มีค่าความต่างศักย์สูงจะเป็นขั้วบวก ส่วนอิเล็กโทรดที่มีค่าความต่างศักย์ต่ำจะเป็นขั้วลบ

การกัดกร่อนของโลหะเกือบทั้งหมด มีขั้นตอนการถ่ายเทประจุไฟฟ้า (Electrochemical reaction) ธรรมชาติของการกัดกร่อนแบบเคมีไฟฟ้าอธิบายได้ด้วยตัวอย่างของเหล็กในสารละลายกรด เมื่อแช่เหล็กในสารละลายกรดเจือจางหรือกรดไฮโดรคลอริก จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สไฮโดรเจนและสารประกอบของเหล็กคลอไรด์ ดังสมการ



ปฏิกิริยาของไอออนอย่างง่ายเป็นดังนี้

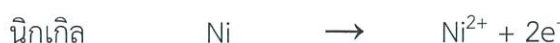


ดังนั้นเมื่อเหล็กเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนกับกรดใด ๆ จะเกิดปฏิกิริยาอย่างง่าย 2 ปฏิกิริยาดังนี้



ปฏิกิริยาแอนอดคือปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) ของเหล็กที่เกิดปฏิกิริยาให้อิเล็กตรอน แล้วมีเลขออกซิเดชันเพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น +2 ส่วนปฏิกิริยาแคโทดเป็นปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction) ของไฮโดรเจนไอออนที่เกิดปฏิกิริยารับอิเล็กตรอนแล้วมีเลขออกซิเดชันลดลงจาก +1 เป็น 0 ปฏิกิริยาทั้งสองเกิดควบคู่กัน คือมีการให้และรับอิเล็กตรอนในเวลาเดียวกันที่ผิวของโลหะ

ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่โลหะถูกกัดกร่อนมีดังนี้



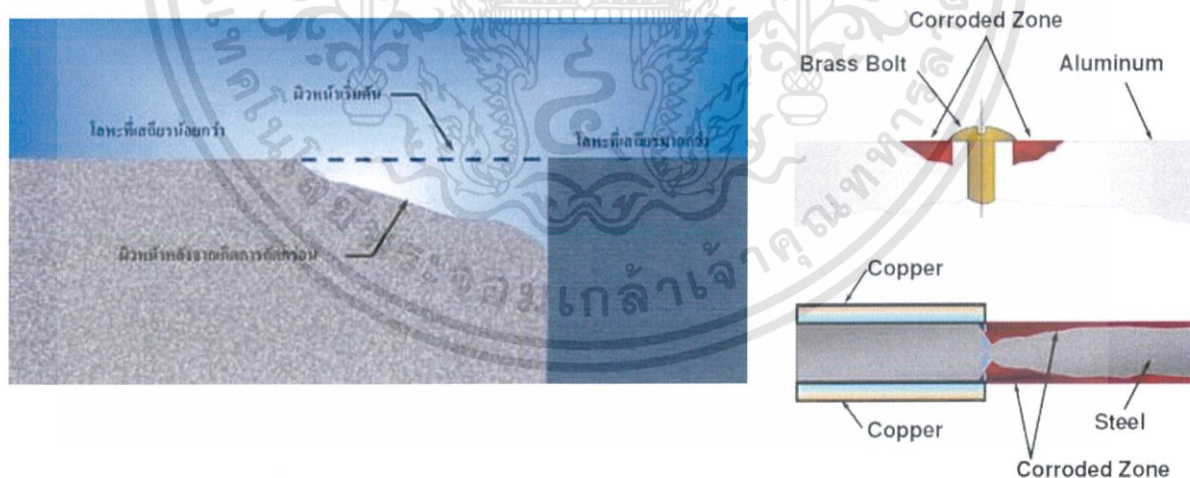
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ **สะสม** เก็บไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นเท่ากับจำนวนเลขออกซิเดชันของไอออนโลหะ

ปฏิกิริยาแคโทดหรือรีดักชันของสิ่งแวดล้อมเป็นได้หลายแบบ ได้แก่



1.2) การกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic corrosion หรือ Two-metal corrosion) เป็นรูปแบบหนึ่งของการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเมื่อมีวัสดุที่ต่างกัน 2 ชนิด (เช่น เหล็กกล้าไร้สนิมและแมกนีเซียม) มาเชื่อมทางไฟฟ้าต่อกัน หรือสัมผัสกันทางกายภาพ หรือสัมผัสกับสารละลายที่นำไฟฟ้า เช่น อิเล็กโทรไลต์ เมื่อครบองค์ประกอบดังกล่าวจะเกิดการสร้างเซลล์ทางเคมีไฟฟ้า ให้วัสดุที่มีศักย์ทางไฟฟ้าต่ำกว่าซึ่งมีแสดงตัวเป็นขั้วแอโนดมีอัตราการเกิดออกซิเดชันเพิ่มขึ้น ในขณะที่วัสดุที่มีศักย์ทางไฟฟ้าสูงกว่าซึ่งแสดงตัวเป็นขั้วแคโทดจะมีความต้านทานการกัดกร่อนดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.2 ในขณะที่ตัวอย่างการกัดกร่อนแบบกัลวานิกที่เกิดขึ้นจริงแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งส่วนใหญ่มักจะสังเกตเห็นได้ในบริเวณที่วัสดุต่างชนิดกันสัมผัสกัน เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวเกี่ยวข้องกับกระแสไฟฟ้าและความแตกต่างของโลหะ จึงมีการเรียกการกัดกร่อนแบบนี้ว่า การกัดกร่อนแบบกัลวานิก



รูปที่ 2.2 ลักษณะการกัดกร่อนแบบกัลวานิก [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างการกัดกร่อนแบบกัลวานิกโดยการยึดติดแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าคาร์บอน [7]

ตารางที่ 2.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์รีดักชัน [9]

ปฏิกิริยารีดักชัน		E^0 (v)
$F_2(g) + 2e^-$	$\rightarrow 2F^-(aq)$	+2.89
$S_2O_8^{2-}(aq) + 2e^-$	$\rightarrow 2SO_4^{2-}(aq)$	+2.01
$PbO_2(aq) + 4H^+(aq) + SO_4^{2-}(aq) + 2e^-$	$\rightarrow PbSO_4(s) + 2H_2O(l)$	+1.69
$MnO_4^-(aq) + 8H^+(aq) + 5e^-$	$\rightarrow Mn^{2+}(aq) + 4H_2O(l)$	+1.51
$PbO_2(s) + 4H^+(aq) + 2e^-$	$\rightarrow Pb^{2+}(aq) + 2H_2O(l)$	+1.46
$Cl_2(g) + 2e^-$	$\rightarrow 2Cl^-(aq)$	+1.36
$Cr_2O_7^{2-}(aq) + 14H^+(aq) + 6e^-$	$\rightarrow 2Cr^{3+}(aq) + 7H_2O(l)$	+1.36
$MnO_2(s) + 4H^+(aq) + 6e^-$	$\rightarrow Mn^{2+}(aq) + 2H_2O(l)$	+1.28
$O_2(g) + 4H^+(aq) + 4e^-$	$\rightarrow 2H_2O(l)$	+1.23
$Br_2(l) + 2e^-$	$\rightarrow 2Br^-(aq)$	+1.08
$NO_3^-(aq) + 4H^+(aq) + 3e^-$	$\rightarrow NO(g) + 2H_2O(l)$	+0.96
$2Hg^{2+}(aq) + 2e^-$	$\rightarrow Hg_2^{2+}(aq)$	+0.91
$Hg_2^{2+}(aq) + 2e^-$	$\rightarrow Hg(l)$	+0.85
$Ag^+(aq) + e^-$	$\rightarrow Ag(s)$	+0.80
$2Hg^{2+}(aq) + 2e^-$	$\rightarrow 2Hg(l)$	+0.80
$Fe^{3+}(aq) + e^-$	$\rightarrow Fe^{2+}(aq)$	+0.77
$I_2(s) + 2e^-$	$\rightarrow 2I^-(aq)$	+0.54
$Cu^+(aq) + e^-$	$\rightarrow Cu(s)$	+0.52
$O_2(g) + 2H_2O(l) + 4e^-$	$\rightarrow 4OH^-(aq)$	+0.40
$Cu^{2+}(aq) + 2e^-$	$\rightarrow Cu(s)$	+0.34
$Hg_2Cl_2(s) + 2e^-$	$\rightarrow 2Hg(s) + 2Cl^-(aq)$	+0.27
$AgCl(s) + e^-$	$\rightarrow Ag(s) + Cl^-(aq)$	+0.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด เว้นแต่
 อนุญาตโดย บัณฑิต อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงที่มาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำข้อมูลไปใช้

ตารางที่ 2.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์รีดักชัน (ต่อ)

ปฏิกิริยารีดักชัน		E ⁰ (v)
$\text{Sn}^{4+}_{(aq)} + 2e^-$	$\rightarrow \text{Sn}^{2+}_{(aq)}$	+0.15
$2\text{H}^+_{(aq)} + 2e^-$	$\rightarrow \text{H}_{2(g)}$	0.00
$\text{Fe}^{3+}_{(aq)} + 3e^-$	$\rightarrow \text{Fe}_{(s)}$	-0.04
$\text{Pb}^{2+}_{(aq)} + 2e^-$	$\rightarrow \text{Pb}_{(s)}$	-0.13
$\text{Sn}^{2+}_{(aq)} + 2e^-$	$\rightarrow \text{Sn}_{(s)}$	-0.14
$\text{Ni}^{2+}_{(aq)} + 2e^-$	$\rightarrow \text{Ni}_{(s)}$	-0.24
$\text{Co}^{2+}_{(aq)} + 2e^-$	$\rightarrow \text{Co}_{(s)}$	-0.28
$\text{PbSO}_{4(s)} + 2e^-$	$\rightarrow \text{Pb}_{(s)} + \text{SO}_4^{2-}_{(aq)}$	-0.36
$\text{Cd}^{2+}_{(aq)} + 2e^-$	$\rightarrow \text{Cd}_{(s)}$	-0.40
$\text{Fe}^{2+}_{(aq)} + 2e^-$	$\rightarrow \text{Fe}_{(s)}$	-0.44
$\text{Cr}^{3+}_{(aq)} + 3e^-$	$\rightarrow \text{Cr}_{(s)}$	-0.74
$\text{Zn}^{2+}_{(aq)} + 2e^-$	$\rightarrow \text{Zn}_{(s)}$	-0.76
$2\text{H}_2\text{O}_{(l)} + 2e^-$	$\rightarrow \text{H}_{2(g)} + 2\text{OH}^-_{(aq)}$	-0.83
$\text{Al}^{3+}_{(aq)} + 3e^-$	$\rightarrow \text{Al}_{(s)}$	-1.68
$\text{Mg}^{2+}_{(aq)} + 2e^-$	$\rightarrow \text{Mg}_{(s)}$	-2.36
$\text{Na}^+_{(aq)} + e^-$	$\rightarrow \text{Na}_{(s)}$	-2.71
$\text{Ca}^{2+}_{(aq)} + 2e^-$	$\rightarrow \text{Ca}_{(s)}$	-2.87
$\text{Ba}^{2+}_{(aq)} + 2e^-$	$\rightarrow \text{Ba}_{(s)}$	-2.91
$\text{K}^+_{(aq)} + e^-$	$\rightarrow \text{K}_{(s)}$	-2.94
$\text{Li}^+_{(aq)} + e^-$	$\rightarrow \text{Li}_{(s)}$	-3.04

2.1.2 โพลาริเซชัน (Polarization) [10]

โพลาริเซชันเป็นปรากฏการณ์ทางเคมีไฟฟ้าที่สำคัญด้านการกัดกร่อนในโลหะและโลหะผสมในสารละลายและสภาพแวดล้อมต่าง ๆ แคโทดิกโพลาริเซชันจะทำให้อัตราการเกิดการกัดกร่อนลดลง การป้องกันการกัดกร่อนแบบแคโทดิก คือตัวอย่างการนำไปใช้ของแคโทดิกโพลาริเซชันในระบบของการกัดกร่อน โพลาริเซชันสามารถเกิดได้ 3 ลักษณะ คือ

- 1) โพลาริเซชันของความเข้มข้น (Concentration polarization)
- 2) โพลาริเซชันของความต้านทาน (Resistance polarization)
- 3) โพลาริเซชันของการกระตุ้น (Activation polarization)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

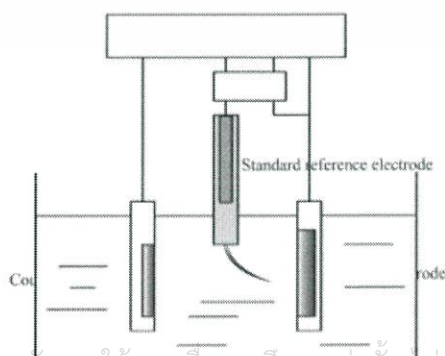
2.1.3 การประเมินผลพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะจากเส้นโค้งโพลาไรเซชัน (Polarization curve) [11]

การกัดกร่อนของโลหะสามารถเกิดขึ้นได้ตลอดเพราะเป็นพฤติกรรมธรรมชาติของโลหะ เมื่อเกิดขึ้นแล้วย่อมทำให้เกิดความเสียหายได้ทั้งในด้านอุตสาหกรรม เศรษฐกิจ ถ้าเราสามารถประเมินความเสียหายจากการกัดกร่อนของโลหะได้ก่อนจะช่วยลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในอนาคต การประเมินอัตราการกัดกร่อนของโลหะสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การทดสอบการกัดกร่อนโดยการเปิดในบรรยากาศ การทดสอบความทนของน้ำเกลือ การใช้คู่มือการกัดกร่อน การทดสอบด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้าโดยประเมินผลจากการกัดกร่อนจากเส้นโค้งโพลาไรเซชัน ที่ช่วยลดปัญหาที่จะเกิดขึ้นได้

การทดสอบการกัดกร่อนของโลหะโดยเทคนิคเคมีไฟฟ้า (Electrochemical technique) เป็นวิธีหนึ่งซึ่งช่วยประเมินอัตราการกัดกร่อนได้ดี และเป็นการจำลองการเกิดกระบวนการกัดกร่อนของโลหะ โดยปกติแล้วการเกิดการกัดกร่อนเป็นปฏิกิริยาทางกายภาพของโลหะกับสภาพแวดล้อมรอบ ๆ โลหะ ซึ่งเกิดจากการถ่ายเทประจุไฟฟ้าหรือแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนในสารละลายของน้ำ เรียกว่า ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า การเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของการกัดกร่อนเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน เมื่อน้ำหรือสารละลายที่สัมผัสกับโลหะ หลักการของการทดสอบการกัดกร่อนโลหะโดยใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า คือการป้อนศักย์ไฟฟ้าแรงกระตุ้น การกัดกร่อน โดยใช้เครื่องโพเทนชิโอสแตต/กัลวานอสแตต (Potentiostat/Galvanostat) ในสถานะที่มีสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ทำหน้าที่เป็นทางเดินของไอออน และเป็นการเชื่อมต่อเซลล์เคมีไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.4 ทำให้เราสามารถคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนได้

2.1.3.1 เซลล์เคมีไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบการกัดกร่อนของโลหะ

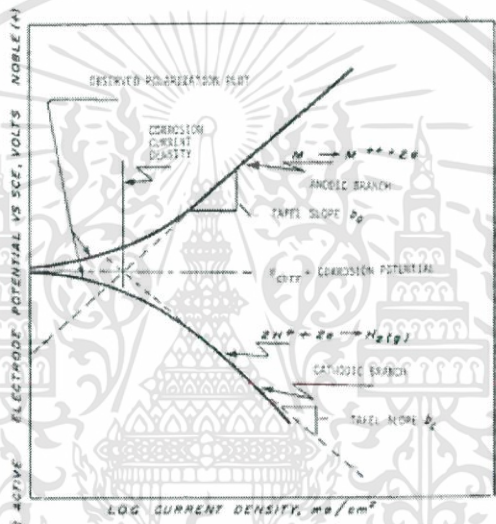
- 1) ขั้วทำงาน (Working electrode หรือ Specimen electrode) เป็นขั้วแอโนดคือขั้วตัวอย่างทดสอบ เป็นขั้วที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและให้อิเล็กตรอน
- 2) ขั้วมาตรฐานอ้างอิง (Standard reference electrode) เป็นขั้วแคโทดที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน และรับอิเล็กตรอน เช่น ขั้วไฟฟ้าคาลอเมลอิ่มตัว (Saturated calomel electrode, SCE) หรือ ขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag/AgCl) ที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่
- 3) ขั้วอิเล็กโทรดตรงข้าม (Counter electrode) ส่วนใหญ่จะใช้โลหะที่เสถียร เช่น แพลทินัม หรือแกรไฟต์ หรือเหล็กกล้าไร้สนิม
- 4) สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) เป็นทางเดินของไอออน



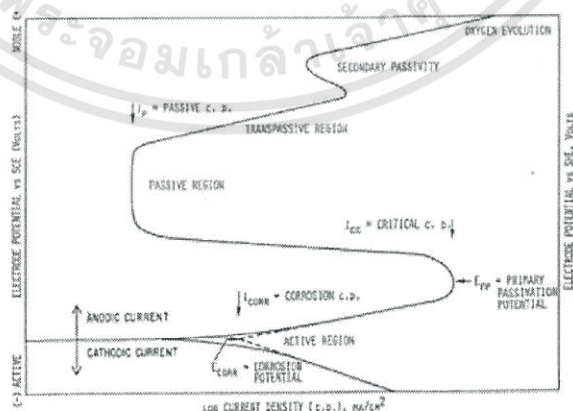
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อธิบายเพิ่มเติมในเอกสารอ้างอิงที่แนบมา

รูปที่ 2.4 เซลล์เคมีไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบการกัดกร่อน [11]

ค่าที่วัดได้จากการทดสอบ ได้เป็นเส้นโค้งโพลาริเซชัน ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้า เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าจนกระทั่งโลหะเริ่มเกิดการกัดกร่อนเราเรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion potential, E_{corr}) ที่จุดนี้จะได้ค่าความหนาแน่นของ กระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion current density, I_{corr}) ด้วย ซึ่งนำไปคำนวณหาอัตราการ กัดกร่อน แสดงดังรูปที่ 2.5 ในขณะที่เดียวกันถ้าโลหะที่มีชั้นป้องกัน (Passive film) ที่ทนต่อ การกัดกร่อน เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม ถ้าป้อนศักย์ไฟฟ้าต่อไปอีกโลหะนั้นสร้างฟิล์มพาสซีฟ เพื่อป้อง การกัดกร่อนทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่หรือลดลง ในขณะที่ให้ศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจนถึงระดับ หนึ่งที่ทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าเริ่มเพิ่มขึ้นอีกครั้ง แสดงว่าฟิล์มพาสซีฟถูกทำลายเป็นรูเข็ม (Pitting) นั่นคือค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting potential, E_p) และค่ากระแสไฟฟ้าพาสซีฟ (Passive current density, I_p) แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 เส้นโค้งโพลาริเซชันสำหรับการกัดกร่อน แบบทั่วผิวหน้าของโลหะ [11]



รูปที่ 2.6 เส้นโค้งโพลาริเซชันสำหรับการกัดกร่อนที่เกิดชั้นป้องกันคลุมทั่วผิวหน้าโลหะ [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3.2 ลักษณะของเส้นโค้งโพลาริเซชันของพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะ

- 1) ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน เป็นค่าศักย์ไฟฟ้าที่โลหะเริ่มเกิดการกัดกร่อน ซึ่งถ้าโลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนต่ำจะไวต่อการกัดกร่อนมากกว่าโลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนสูง
- 2) ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน เป็นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่จุดเกิด E_{corr} โดยค่า I_{corr} แสดงถึงการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้า (Uniform corrosion) และสามารถนำมาคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้าต่อปีของตัวอย่างทดสอบได้ จากสูตร [12] ดังนี้

$$\text{อัตราการกัดกร่อน (Corrosion Rate)} = (k \times I_{corr} \times EW) / (A \times D) \quad (2.16)$$

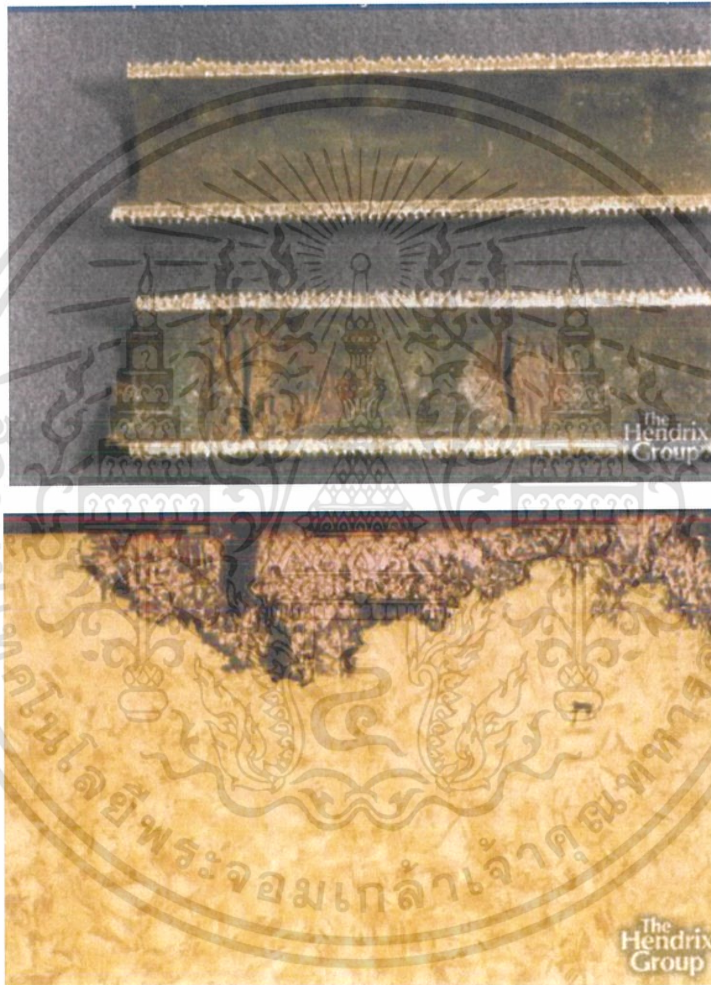
- k คือค่าคงที่ของการคำนวณเปลี่ยนหน่วยต่าง ๆ เช่น มีค่า 13 ถ้าอัตราการกัดกร่อนมีหน่วย มิลต่อปี (mil per year, mpy) หรือมีค่า 0.00327 ถ้าหน่วย มิลลิเมตรต่อปี (millimeter per year, mm/y)
- I_{corr} คือค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน หน่วยเป็นไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
- EW คือค่ามวลสมมูล (Equivalent weight) ของโลหะตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบ ถ้าโลหะผสมต้องคำนวณตามสัดส่วน
- A คือพื้นที่ผิวของโลหะตัวอย่าง หน่วยเป็นตารางเซนติเมตร (cm^2)
- D คือความหนาแน่นของโลหะตัวอย่าง หน่วยเป็น กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การกัดกร่อนแบบจำเพาะ (Selective leaching or Dealloying)

2.2.1 การกัดกร่อนของทองเหลือง (Dezincification) [13-14]

การกัดกร่อนของเหลือง เกิดจากสังกะสีถูกกัดกร่อนอย่างจำเพาะในโลหะผสมที่มีส่วนผสมของสังกะสี มักจะเกิดในทองเหลือง ส่วนใหญ่จะเกิดกับโลหะผสมที่มีทองแดงน้อยกว่า 85% โดยทั่วไปมักพบในทองเหลืองที่มีสังกะสี 30% และทองแดง 70% สามารถเห็นได้ด้วยตาเปล่าจากสีของโลหะผสมที่เปลี่ยนจากเหลืองเป็นแดง (รูปที่ 2.7) การสูญเสียสังกะสีจะทำให้เหลือเพียงทองแดงในโลหะผสม ทำให้เป็นรูพรุน (รูปที่ 2.7) รูปทรงวัสดุจะไม่เปลี่ยนแปลงแต่ความแข็งแรงจะลดลง



รูปที่ 2.7 การเกิดการกัดกร่อนของทองเหลือง [13]

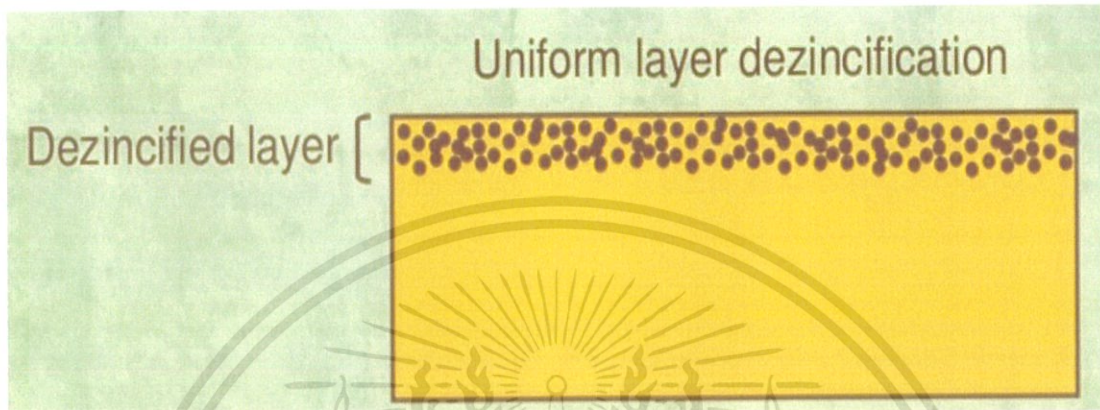
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.1 ประเภทของการกัดกร่อนของทองเหลือง (Type of dezincification)

[14]

1) การกัดกร่อนของทองเหลืองแบบสม่ำเสมอ (Uniform layer dezincification)

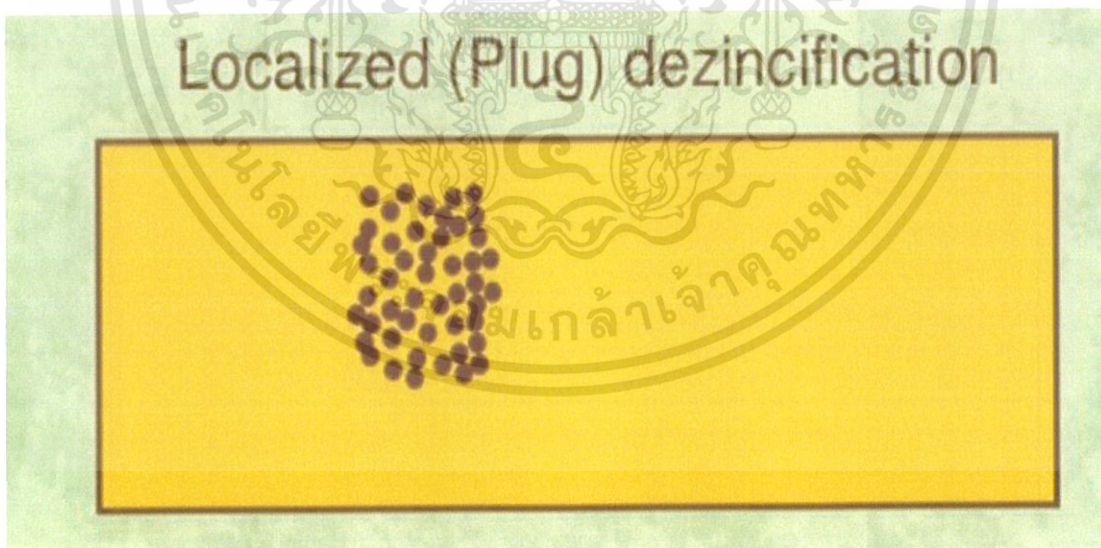
การกัดกร่อนของทองเหลืองจะเกิดแบบสม่ำเสมอ เกิดผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อนกระจายตัวทั่วไปในชิ้นงาน (รูปที่ 2.8)



รูปที่ 2.8 การกัดกร่อนของทองเหลืองแบบสม่ำเสมอ [15]

2) การกัดกร่อนของทองเหลืองแบบบางส่วน (Localized dezincification)

การกัดกร่อนของทองเหลืองจะเกิดเป็นกระจุกบางส่วน ไม่กระจายตัว ผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อนจึงเกิดเป็นบางส่วนเท่านั้น (รูปที่ 2.9)



รูปที่ 2.9 การกัดกร่อนของทองเหลืองแบบบางส่วน [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.2 กลไกการเกิดการกัดกร่อนของทองเหลือง (Mechanism of dezincification) [16]

กลไกการเกิดการกัดกร่อนของทองเหลืองถูกอธิบายไว้หลายแบบ แบบที่ง่ายที่สุดคือ กลไกแบบเดี่ยว (Singular mechanism) ซึ่งมีนัยสำคัญเฉพาะกับปฏิกิริยาแอโนดิกเท่านั้น เกี่ยวกับการออกซิเดชันของสังกะสีและละลายจากผิวหน้าของทองเหลือง (ตารางที่ 2.2) อิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยจากปฏิกิริยานี้จะถูกรับไปโดยปฏิกิริยาแคโทดิก คือปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน หรือคลอรีนที่อยู่ในสารละลาย

การกัดกร่อนของทองเหลืองสามารถอธิบายได้ด้วยกลไกแบบคู่ (Dual mechanism) เกิดโดยทั้งทองแดงและสังกะสีถูกออกซิไดซ์และละลายจากผิวหน้าทองเหลือง และทองแดงที่ละลายจะไปสะสมอยู่ในสารละลายใกล้กับบริเวณที่เกิดการกัดกร่อน และถ้าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชันต่ำพอจะเกิดสมดุลของคิวปริกไอออนกับโลหะทองแดง หลังจากนั้นจะทำให้ทองแดงที่ละลายจำนวนมากจะสามารถกลับมาเคลือบใหม่อีกครั้งที่ผิวหน้าของโลหะที่ถูกกัดกร่อน ทำให้การสูญเสียโลหะทั้งหมดมีแค่สังกะสีเท่านั้น

ตารางที่ 2.2 ปฏิกิริยาครึ่งเซลล์ที่มีจะเกิดขึ้นในการกัดกร่อนของทองเหลือง [9]

Half Reaction	Standard Potential (vs.SHE)	Name	Location
$Zn^0 \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$	0.762 V	Zinc Oxidation	Dezincifying surface
$\frac{1}{2}O_2 + 2e^- + 2H^+ \rightarrow H_2O$	0.814 V (pH=7)	Oxidant Reduction	Cathodic surface
$Cl_2 + 2e^- \rightarrow 2Cl^-$	1.36 V		
$Cu^0 \rightarrow Cu^{2+} + 2e^-$	-0.340 V	Copper Oxidation	Dezincifying surface
$Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu^0$	0.340 V	Copper Deposition	Dezincifying surface

2.2.1.3 ปัจจัยที่มีผลกับการเกิดการกัดกร่อนของทองเหลือง

1) การเกิดสารประกอบซิงค์คาร์บอเนต (Zinc carbonate)

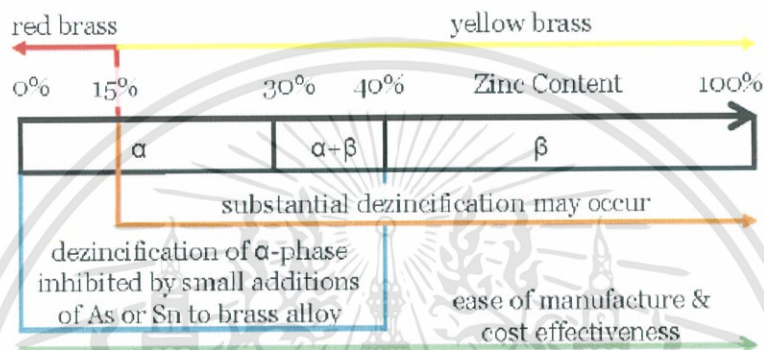
สารประกอบซิงค์คาร์บอเนตมีสีขาวขนาดใหญ่และเหนียว มักจะรวมตัวกันเป็นก้อนคล้ายกับขนเมอ์แรง (Meringue) มักจะเกิดที่ค่าความเป็นกรด-เบสสูงและเมื่อสังกะสีละลายได้น้อย ซึ่งการเกิดสารประกอบชนิดนี้จะทำให้เกิดการอุดตันในท่อ และทำให้วัสดุเกิดการกัดกร่อนของทองเหลืองได้ง่ายยิ่งขึ้น (รูปที่ 2.11)

2) ส่วนประกอบของโลหะผสม

ทองเหลือง คือ โลหะผสมระหว่างสังกะสีและทองแดงในสัดส่วนต่าง ๆ และอาจมีธาตุอื่น ๆ ที่มีอยู่แล้วในธรรมชาติหรือเติมเพิ่มเข้าไปในโลหะเจือปนอยู่ด้วย ส่วนประกอบของโลหะผสมเป็นปัจจัยที่สำคัญมากในการพิจารณาความแข็งแรงของทองเหลืองไปถึงความทนทานต่อการกัดกร่อนของทองเหลือง

2.1) ปริมาณสังกะสี

ปริมาณของสังกะสีในทองเหลืองส่วนมากแล้วจะอยู่ในช่วง 3-45% และปริมาณของสังกะสีในโลหะผสมส่งผลอย่างมากกับสมบัติของโลหะผสมทั้งความแข็งแรงต่อน้ำดึงและความยืดหยุ่น เมื่อเพิ่มปริมาณสังกะสีให้มากขึ้นความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นด้วย ปริมาณสังกะสีจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการพิจารณาความทนทานต่อการเกิดการกัดกร่อนของทองเหลือง (รูปที่ 2.10) ทองเหลืองที่มีปริมาณสังกะสีน้อยกว่า 15% เป็นทองเหลืองที่สามารถทนทานการกัดกร่อนของทองเหลืองได้ และทองเหลืองแอลฟา (สังกะสี 15-30%) และทองเหลืองแบบคอปเปอร์ (สังกะสีมากกว่า 30%) เป็นทองเหลืองที่ง่ายต่อการเกิดการกัดกร่อนของทองเหลือง



รูปที่ 2.10 แนวโน้มการเกิดการกัดกร่อนของทองเหลืองเมื่อมีสังกะสีปริมาณต่าง ๆ [16]

2.2) การใส่สารเติมแต่งที่เป็นโลหะผสม

การใส่สารเติมแต่งเพื่อยับยั้งการเกิดการกัดกร่อนของทองเหลืองได้มีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง โดยอะซิติกและดีบุกเป็นสารเติมแต่งสองชนิดที่นิยมใช้ ซึ่งสามารถยับยั้งการกัดกร่อนในทองเหลืองแบบแอลฟาได้ดีมาก

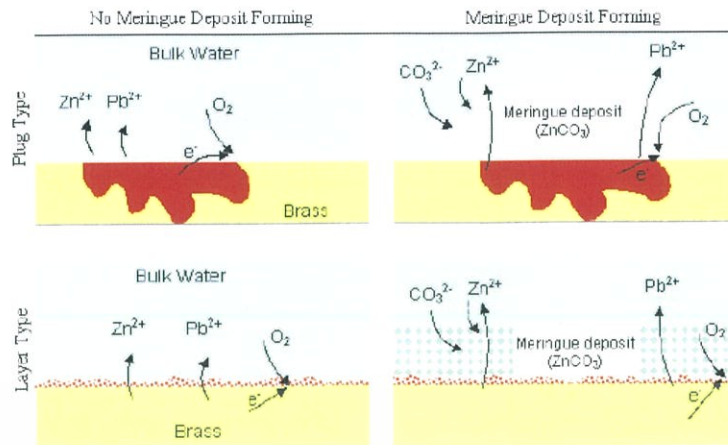
3) สมบัติทางเคมีของน้ำ

ถึงแม้ว่าทองเหลืองจะง่ายต่อการเกิดการกัดกร่อน แต่สมบัติทางเคมีของน้ำเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญอย่างมากในทั้งด้านชนิดและขอบเขตของการเกิดการกัดกร่อน

3.1) คลอรีนและความเป็นด่าง (Chlorine and alkalinity)

อัตราส่วนของคลอรีนกับความกระด้างชั่วคราวเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของทองเหลือง ความกระด้างชั่วคราวหรือการวัดปริมาณความกระด้างของน้ำ (Ca^{2+} , Mg^{2+}) ที่หายไปเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งการที่อัตราส่วนของคลอรีนกับความกระด้างชั่วคราวของน้ำสูงจะนำไปสู่การเกิดเมอร์แรง (Meringue) ที่เป็นผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อน (รูปที่ 2.11) ทำให้เกิดการกัดกร่อนของทองเหลืองได้มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 การเกิดการกัดกร่อนของทองเหลืองแบบเมอร์แรง [16]

3.2) ค่าความเป็นกรด-เบส อุณหภูมิ และอากาศ (pH, Temperature, and Aeration)

การกัดกร่อนของทองเหลืองแบบเมอร์แรง (Meringue dezincification) จะเกิดเมอร์แรงเคลือบอยู่ที่ผิวได้ดีเมื่อค่าความเป็นกรด-เบส (pH) สูง ซึ่งการที่จะยับยั้งการเกิดเมอร์แรงควรควบคุมให้ pH ต่ำกว่า 8.0 และที่ pH เท่ากับ 8.3 คือจุดที่จะเกิดเมอร์แรงจำนวนมาก

ด้านอุณหภูมิ การกัดกร่อนของทองเหลืองสามารถเกิดได้ทั้งในน้ำร้อนและน้ำเย็น แต่ส่วนใหญ่แล้วมักเกิดในที่อุณหภูมิสูงมากกว่า เนื่องจากอุณหภูมิสูงนั้นจะไปเร่งให้เกิดเมอร์แรงได้มาก ซึ่งทำให้เกิดการกัดกร่อนได้มากขึ้นด้วย

ด้านอากาศในสารละลาย ปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของทองเหลืองคือ ปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ ยิ่งมีปริมาณออกซิเจนในน้ำมากจะทำให้เกิดเมอร์แรงได้มาก นำไปสู่การเกิดการกัดกร่อนของทองเหลืองของวัสดุ

2.3 ทฤษฎีการเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า (Electrodeposition)

2.3.1 หลักการเบื้องต้นของการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า [17-18]

การเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า หมายถึง การนำเอาชิ้นงานหรือวัสดุที่สามารถนำไฟฟ้าได้มาเคลือบผิวด้วยโลหะโดยใช้กระแสไฟฟ้าเข้าช่วย มีหลักการคือนำชิ้นงานที่ต้องการทำการเคลือบต่อเข้ากับขั้วลบของแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า ส่วนโลหะที่จะนำไปเคลือบจะต่อเข้ากับขั้วบวก (ขั้วบวกไม่จำเป็นต้องเป็นโลหะชนิดเดียวกันกับโลหะที่จะนำไปเคลือบ) เรียกว่า ตัวล่อ จากนั้นนำชิ้นงานและตัวล่อจุ่มลงในสารอิเล็กโทรไลต์ แล้วปรับปริมาณทางไฟฟ้าให้เหมาะสมจะทำให้ไอออนของโลหะที่จะเคลือบบนชิ้นงานวิ่งไปยังขั้วลบซึ่งเป็นชิ้นงาน แล้วรับอิเล็กตรอนที่ผิวของชิ้นงานกลายเป็นโลหะเคลือบติดอยู่บนผิวชิ้นงาน

2.3.1.1 อิเล็กโทรไลต์

อิเล็กโทรไลต์แต่ละชนิดจะมีโลหะไม่เหมือนกัน ขึ้นอยู่กับว่าต้องการเคลือบผิวด้วยโลหะชนิดใด เช่น ถ้าต้องการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล ต้องใช้อิเล็กโทรไลต์เป็นเกลือของนิกเกิล อิเล็กโทรไลต์

เป็นหลักฐานที่สำคัญที่สุดในเรื่องการเคลือบ เพราะเมื่อสารเหล่านี้จะแตกตัวเมื่ออยู่ในน้ำเป็นไอออนบวกและไอออนลบ และไอออนบวกจะเคลื่อนที่ไปเคลือบเกาะบนชิ้นงานที่เป็นโลหะ

2.3.1.2 ค่าของความเป็นกรด-เบส (pH values)

ค่าของความเป็นกรด-เบส มีอิทธิพลต่อสารละลายที่ใช้เคลือบโลหะมาก ถ้าค่า pH น้อย แสดงว่าเป็นกรดมากเกินไป จะทำให้ประสิทธิภาพของแคโทดลดลง ถ้าค่า pH มากแสดงว่าเป็นด่างมากเกินไปจะลดประสิทธิภาพแอโนดเช่นเดียวกัน ด้วยเหตุนี้การควบคุมค่า pH จึงสำคัญมาก สารละลายทุกชนิดจะมีค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมอยู่ค่าหนึ่ง ฉะนั้นจึงควรควบคุมความเป็นกรด-เบสให้อยู่ในขอบเขตที่ต้องการให้ได้

2.3.1.3 ความหนาแน่นของกระแส (Current density)

ความหนาแน่นของกระแสของขั้วแคโทด คือกระแสที่ช่วยให้เกิดการเคลือบที่ขั้วไฟฟ้า ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ เนื่องจากชิ้นงานมีพื้นที่ต่างกันจึงต้องคำนวณพื้นที่ก่อนเพื่อควบคุมความหนาแน่นของกระแส

2.3.1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของชิ้นงานและกำลังการเคลือบผิว

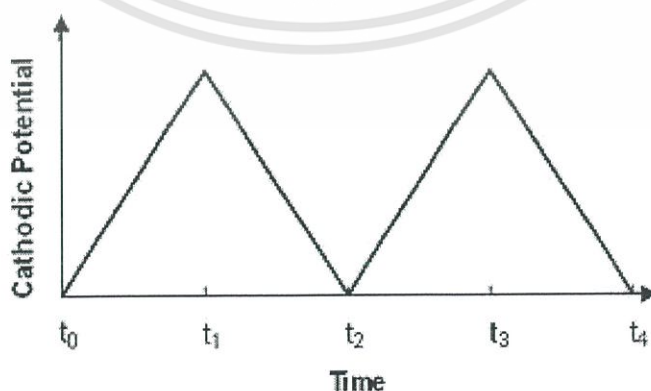
รูปร่างของชิ้นงานที่จะต้องทำการเคลือบผิวนั้นมักมีรูปร่างต่าง ๆ กันออกไป ตามธรรมชาติแล้วกระแสในการเคลือบโลหะเดินทางไปจุดที่ใกล้เคียงที่สุดอย่างหนาแน่น จุดที่ห่างออกไปจะมีกระแสเบาบางลงไป ส่วนใดที่มีกระแสเดินไปหาอย่างหนาแน่น จะมีการเกาะจับหนามาก ส่วนที่มีกระแสเดินทางไปเบาบาง จะมีการเกาะกันเบาบาง

2.3.2 เทคนิคการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า

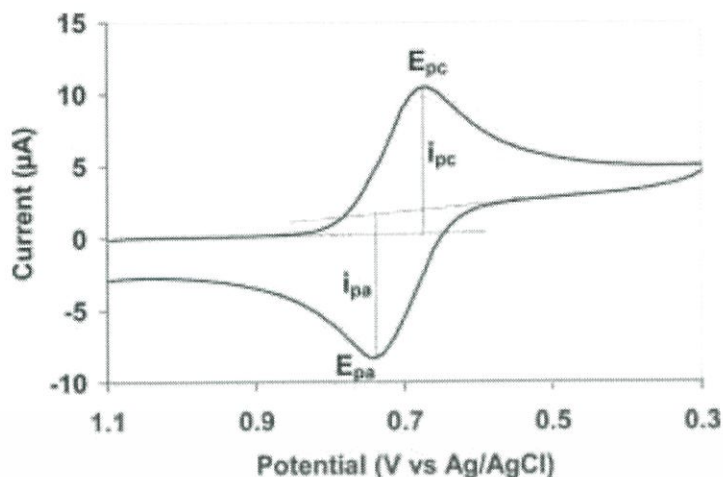
2.3.2.1 เทคนิคการเคลือบผิวแบบไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic voltammetry)

[19]

ไซคลิกโวลแทมเมตรี เป็นเทคนิคที่ให้ศักย์ไฟฟ้าในลักษณะสามเหลี่ยมหน้าจั่วแก่ขั้วไฟฟ้าทำงาน เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมอย่างมากเพื่อใช้ในการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าของสารบริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าทำงาน ตลอดจนใช้ในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการวิเคราะห์โดยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าอื่น ๆ ต่อไป การบันทึกกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการให้ศักย์ไฟฟ้าแก่ขั้วทำงานโดยจะทำการพลอตค่ากระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่าไซคลิกโวลแทมโแกรม การให้ศักย์ไฟฟ้าในไซคลิกโวลแทมเมตรีจะเป็นการให้ศักย์ไฟฟ้าตามค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟฟ้า เมื่อเทียบกับเวลาจนถึงจุดสูงสุดและลดศักย์ไฟฟ้าในทิศทางตรงข้ามด้วยอัตราการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟฟ้าเดียวกัน



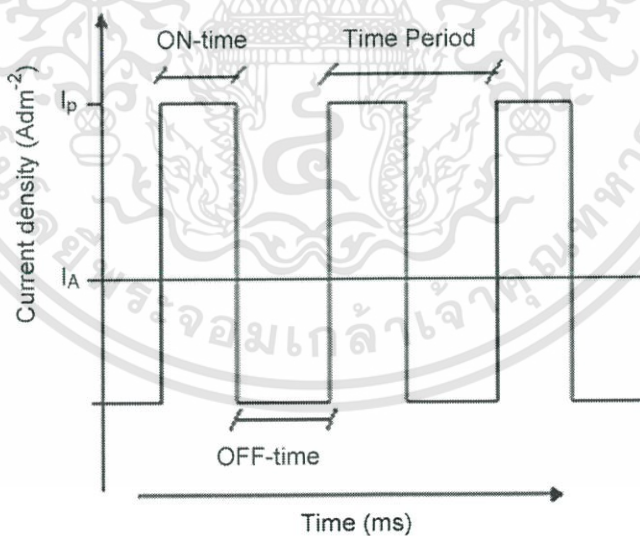
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภายในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.12 โวลแทจโแกรมของไซคลิกโวลแทมเมตรี [20]
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 ไชคลิกโวลแทมโมแกรม [19]

2.3.2.2 เทคนิคการเคลือบไฟฟ้าแบบพัลส์ (Pulse) [20]

เทคนิคการเคลือบไฟฟ้าแบบพัลส์ ศักย์ไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าจะถูกเลือกให้เปลี่ยนไปมาระหว่างค่าสองค่า ทำให้เห็นเป็นชุดของพัลส์ที่มีแอมพลิจูดเท่ากัน ในพัลส์นั้นจะประกอบด้วย ON-time (T_{ON}) ในระหว่างที่มีการให้ศักย์ไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้า และ OFF-time (T_{OFF}) ในระหว่างที่ไม่มีการให้กระแสไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.15 ในการเคลือบผิวแบบพัลส์สามารถควบคุมองค์ประกอบและความหนาของชั้นฟิล์มได้ โดยการกำหนดแอมพลิจูดและความกว้างของพัลส์



รูปที่ 2.14 กราฟทั่วไปของการเคลือบผิวแบบพัลส์ [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 โคบอลต์ (Cobalt, Co) [19, 21]

เลขอะตอม	27 เป็นธาตุในหมู่ 9 คาบที่ 4 ในตารางธาตุ จัดเป็นโลหะทรานซิชัน
น้ำหนักอะตอม	58.9332 g/mol
จุดหลอมเหลว	1493 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	3100 องศาเซลเซียส
ความหนาแน่น	8.90 g/cm ³
เลขออกซิเดชันสามัญ	+2 +3
ค่าศักย์ไฟฟ้า E ^o (volts)	+2 -0.277 +3 +0.414

2.4.1 การค้นพบ

การวิเคราะห์รูปปั้นที่ทำด้วยแก้วสีน้ำเงินและเครื่องปั้นดินเผาของสมัยอียิปต์โบราณ และบาบิโลน (Babylonia) ก่อนคริสต์ศักราช 1450 ปี โดยวิธีสเปกโทรสโกปี พบว่าได้มีการใช้สีที่มีสารประกอบของโคบอลต์ เกือบหลายชนิดของโคบอลต์เป็นตัวให้สีน้ำเงินแก่เซรามิกส์ (Ceramics) และเมื่อผสมกับสารประกอบของนิกเกิล โครเมียมหรือแมงกานีสให้สีน้ำเงินและสีเขียว

ในปี ค.ศ. 1735 Brandt เป็นคนแรกที่ค้นพบธาตุโคบอลต์ และในปี ค.ศ. 1742 เขายังสามารถสกัดธาตุโคบอลต์ในรูปของธาตุอิสระได้ในปี ค.ศ. 1750 Bergman ได้ศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของธาตุที่ค้นพบได้ใหม่นี้ ชื่อของธาตุนี้ตรงกับคำเยอรมัน "Kobalt" ซึ่งมาจากคำกรีก "cobalos" มีความหมายว่า "เหมือง" คำเยอรมัน "Kobalt" หมายถึงปีศาจแห่งเหมืองเป็นชื่อที่ใช้เรียกสินแร่บางชนิด โดยนักขุดเหมืองของเมือง Saxony เพราะสินแร่เหล่านี้ก่ออันตรายต่อมือและเท้าได้ ต่อมาพบว่าสินแร่เหล่านี้มีสารประกอบของโคบอลต์ และอะตอมเป็นองค์ประกอบ



รูปที่ 2.15 โคบอลต์ [21]

2.4.2 การใช้ประโยชน์

ตามปกติเราจะไม่ใช้โคบอลต์ในรูปสารบริสุทธิ์แต่จะผสมกับธาตุอื่นเพื่อทำเป็นโลหะผสม (Alloy) ประโยชน์ของโคบอลต์ คือใช้เป็นสารให้สีสำหรับทาหรือเขียน หมึกพิมพ์ และสีย้อมสำหรับผ้าฝ้าย (Cotton) ในอุตสาหกรรมจะใช้โคบอลต์ออกไซด์เติมลงไประหว่างกระบวนการทำเซรามิกส์ เพื่อให้สีขาว นอกจากนี้ยังมีการใช้โคบอลต์ในผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี และใช้ทำเป็นแม่เหล็กถาวร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โคบอลต์ยังใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการทางเคมีต่าง ๆ เช่น ไฮโดรจิเนชัน (Hydrogenation) และดีไฮโดรจิเนชัน (Dehydrogenation) ส่วน Co-60 ยังใช้เป็นแหล่งรังสีแกมมาในการรักษาโรคมะเร็ง และใช้ในการฆ่าเชื้อโรคในอาหาร

โคบอลต์เป็นโลหะสีชาวน้ำเงินเล็กน้อย เป็นสารประเภทเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) มีความแข็ง (Strength) และค่อนข้างเฉื่อยต่อปฏิกิริยา แต่สามารถรวมตัวกับอโลหะได้บ้างเมื่อได้รับความร้อน ตัวอย่างสารประกอบของโคบอลต์เช่น Co_3O_4 CoF_2 CoX_2 ($X = \text{Cl}$ Br I) เป็นต้น โลหะโคบอลต์ไม่ละลายในกรดเข้มข้นและเบส แต่ละลายช้า ๆ ในกรดเจือจางได้ออออน $[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6]^{+2}$ ซึ่งมีสีชมพู ถ้าเทียบกับธาตุอื่นแล้วโคบอลต์จัดว่ามีปริมาณค่อนข้างน้อยในโลก ส่วนใหญ่จะปนอยู่กับแร่ชนิดอื่น เช่น สารหนู (As) นิกเกิล (Ni) ทองแดง (Cu) และตะกั่ว (Pb) เป็นต้น การถลุงออกมาเป็นโลหะบริสุทธิ์ค่อนข้างยุ่งยากจึงทำให้มีราคาแพง โดยทั่วไปมักใช้วิธีนำสินแร่มาเผาไหม้ในอากาศเพื่อให้ได้ออกไซด์ผสม Co_3O_4 ($\text{CoO} \cdot \text{Co}_2\text{O}_3$) แล้วนำไปรีดิวซ์โดยใช้ถ่านหรืออะลูมิเนียม

เมื่อนำโคบอลต์เจือกับเหล็ก (Fe) Ni และอะลูมิเนียม (Al) จะได้โลหะเจืออะลูมิเนียม-นิกเกิล-โคบอลต์โลหะ (Alnico) ที่มี Al 6-12%, Ni 14-30%, Co 5-35% ที่เหลือเป็นเหล็กซึ่งใช้ทำแม่เหล็กถาวร นอกจากนี้ยังใช้เจือกับโลหะอื่นเป็นโลหะเจือที่ให้ความแข็งแรงทนทาน เช่น Satellite เป็นโลหะเจือที่ประกอบด้วย Co 55%, W 15%, Cr 25%, และ Mo 5% มีความแข็งแรงมากแม้จะเผาจนร้อนแดงทนต่อการผุกร่อน Perminvars เป็นโลหะเจือที่มีโลหะ 3 ชนิดเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ Ni 45% Co 25% เหล็ก 30% Supermedur ประกอบด้วย Co 49%, Fe 49%, และ V 2% นอกจากนี้ สารประกอบของโคบอลต์เป็นสารที่พืชต้องการในปริมาณเล็กน้อย (Trace element) จึงเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในดินที่อุดมสมบูรณ์

2.4.3 ความเป็นพิษ

สภาวะปกติ (ในปริมาณเล็กน้อย) ไม่เป็นพิษต่อทั้งคนและสัตว์ แต่ Co ในรูปผงติดไฟได้ ระดับความทนได้ของ Co ในอากาศเท่ากับ 0.1 mg/m^3 ของอากาศ

2.5 เหล็ก (Iron, Fe) [22-23]

เลขอะตอม	26 เป็นธาตุในหมู่ 8 ในตารางธาตุ จัดเป็นโลหะทรานซิชัน
น้ำหนักอะตอม	55.847 g/mol
จุดหลอมเหลว	1536 ± 1 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	3000 องศาเซลเซียส
ความหนาแน่น	7.8733 g/cm^3
เลขออกซิเดชันสามัญ	+2 +3
ค่าศักย์ไฟฟ้า E° (volts)	-0.440

2.5.1 การค้นพบ

มนุษย์รู้จักเหล็กตั้งแต่อ่อนประวัติศาสตร์ มีหลักฐานยืนยันว่ามนุษย์เรารู้จักโลหะนี้ไม่น้อยกว่า 8,000 ปี อย่างไรก็ตาม 1,000 - 2,000 ปีก่อนคริสตกาลเหล็กจัดเป็นโลหะที่หายาก และในสมัยนั้นแหล่งสำคัญของเหล็กมาจากสะเก็ดดาว (Meteorites)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตั้งแต่ 1,000 - 2,000 ปีก่อนคริสตศักราชเป็นต้นมา มนุษย์เริ่มรู้จักวิธีถลุงเหล็กจากแร่เหล็ก และนำเหล็กมาใช้ประโยชน์ในทุกยุคทุกสมัย กระบวนการถลุงเหล็กที่ใช้กันมามีหลักการไม่แตกต่างกันไปจากที่ใช้กันในปัจจุบัน



รูปที่ 2.16 เหล็ก [23]

2.5.2 การใช้ประโยชน์

เหล็กมีประโยชน์อย่างมากในปัจจุบันเป็นธาตุที่พบเห็นได้ในทุกวันโดยเฉพาะในการก่อสร้างในโรงงานอุตสาหกรรมอีกทั้งยังเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องใช้ในการสร้างบ้าน อาคารต่าง ๆ เหล็กจึงเป็นธาตุที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง นอกจากนี้แล้วยังใช้ในการทำเป็นวัสดุต่าง ๆ ทำเป็นชิ้นส่วนของเครื่องจักร และอื่น ๆ อีกมากมายซึ่งการใช้งานแต่ละรูปแบบนั้นจะคำนึงถึงชนิดของเหล็กเป็นหลักสามารถแบ่งแยกประเภทของเหล็กได้ดังนี้

1) เหล็กหล่อ คือเหล็กที่มีปริมาณธาตุคาร์บอนมากกว่า 1.7% หรือ 2% ซึ่งเหล็กชนิดนี้จะขึ้นรูปได้ด้วยวิธีหล่อเท่านั้นเพราะปริมาณคาร์บอนที่สูงทำให้โครงสร้างมีคุณสมบัติแข็งแต่เปราะ จึงไม่สามารถขึ้นรูปด้วยวิธีการรีดหรือวิธีทางกลอื่น ๆ ได้ยังสามารถแบ่งย่อยเหล็กหล่อออกได้อีกหลายประเภท โดยพิจารณาจากโครงสร้างทางจุลภาค กรรมวิธีทางความร้อน ชนิดและปริมาณของธาตุผสมได้แก่

1.1) เหล็กหล่อเทา (Grey cast iron) เป็นเหล็กหล่อที่มีปริมาณคาร์บอนและซิลิคอนสูง ทำให้มีโครงสร้างคาร์บอนอยู่ในรูปของแกรไฟต์

1.2) เหล็กหล่อขาว (White cast iron) เป็นเหล็กหล่อที่มีปริมาณซิลิคอนต่ำกว่าเหล็กหล่อเทา ทำให้ไม่เกิดโครงสร้างคาร์บอนในรูปแกรไฟต์ โดยคาร์บอนจะอยู่ในรูปคาร์ไบด์ของเหล็ก (Fe_3C) ที่เรียกว่า ซีเมนไต เป็นเหล็กที่มีความแข็งสูง ทนการเสียดสี แต่จะเปราะ

1.3) เหล็กหล่อแกรไฟต์กลมหรือเหล็กหล่อเหนียว (Spheroidal graphite cast iron, ductile cast iron) เป็นเหล็กหล่อเทาที่ผสมธาตุแมกนีเซียม หรือธาตุซีเรียมลงไปลงในน้ำเหล็ก ทำให้แกรไฟต์ที่เกิดเป็นกลุ่มและมีรูปร่างกลม ซึ่งส่งผลถึงคุณสมบัติทางกลในทางที่ดีขึ้น

1.4) เหล็กหล่ออบเหนียว (Malleable cast iron) เป็นเหล็กหล่อขาวที่นำไปอบในบรรยากาศพิเศษเพื่อให้คาร์บอนในโครงสร้างคาร์ไบด์แตกตัวออกมารวมกันเป็นแกรไฟต์เม็ดกลม และทำให้เหล็กรอบ ๆ ที่มีปริมาณคาร์บอนลดลงปรับโครงสร้างกลายเป็นเฟอร์ไรต์ หรือเพิร์ลไลต์ เหล็กชนิดนี้จะมีความเหนียวดีกว่าเหล็กหล่อขาว แต่จะด้อยกว่าเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับกรใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ใบอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์เพื่อการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5) เหล็กหล่อโลหะผสม (Alloy cast iron) เป็นเหล็กหล่อที่เติมธาตุผสมอื่น ๆ ลงไปในปริมาณที่ค่อนข้างมาก เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเฉพาะด้านให้ดียิ่งขึ้น และโครเมียมเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติต้านทานการเสียดสี และทนความร้อน เป็นต้น

2) เหล็กกล้า คือเหล็กที่มีปริมาณธาตุคาร์บอนน้อยกว่า 1.7% หรือ 2% เหล็กชนิดนี้มีความเหนียวมากกว่าเหล็กหล่อทำให้สามารถทำการขึ้นรูปโดยใช้กรรมวิธีทางกลได้ ทำให้เหล็กชนิดนี้ถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง จึงพบเห็นได้ทั่วไปในชีวิตประจำวัน เช่น เหล็กเส้น เหล็กแผ่น เหล็กโครงสร้างต่าง ๆ เป็นต้น เหล็กกล้าสามารถแบ่งได้เป็นกลุ่มต่าง ๆ ได้คือ

2.1) เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel) เป็นเหล็กที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสมหลัก โดยอาจมีธาตุอื่นผสมอยู่บ้าง แต่ไม่ได้เจาะจงจะผสมลงไป มักติดตามจากกรรมวิธีการถลุงและการผลิต เราสามารถแบ่งย่อยกว้าง ๆ ออกได้ 3 ประเภทโดยพิจารณาตามปริมาณของธาตุคาร์บอนที่ผสม คือ

- เหล็กคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel) เป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำกว่า 0.2% เหล็กชนิดนี้มีความแข็งแรงต่ำสามารถรีดหรือตีเป็นแผ่นได้ง่าย เช่น เหล็กเส้น เหล็กแผ่นที่ใช้กันทั่วไป เป็นต้น

- เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium carbon steel) เป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนอยู่ระหว่าง 0.2-0.5% เป็นเหล็กที่มีความแข็งแรงสูงกว่าเหล็กคาร์บอนต่ำ ใช้ทำชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลทั่วไป เหล็กประเภทนี้สามารถทำการอบชุบความร้อนได้

- เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High carbon steel) เป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนสูงกว่า 0.5% มีความแข็งแรงและความแข็งสูง สามารถทำการอบชุบความร้อนให้คุณสมบัติความแข็งแรงเพิ่มขึ้นได้ ใช้ทำพวกเครื่องมือเครื่องใช้ต่าง ๆ ที่ต้องการผิวแข็ง และความต้านทานการสึกกร่อนสูง

2.2) เหล็กกล้าผสม (Alloy steel) เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีธาตุอื่นผสมอยู่เพื่อวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงคุณสมบัติต่าง ๆ เช่น ความสามารถในการชุบแข็ง (Hardenability) ความต้านทานการกัดกร่อน คุณสมบัติการนำไฟฟ้า และคุณสมบัติทางแม่เหล็ก เป็นต้น ธาตุผสมที่เติมลงไป เช่น โครเมียม นิกเกิล โมลิบดีนัม วาเนเดียม โคบอลต์ แมงกานีส และซิลิคอน โดยแมงกานีส และซิลิคอน จะต้องมีปริมาณมากพอสมควรจึงจะจัดได้ว่าเป็นเหล็กกล้าผสม เพราะในเหล็กกล้าคาร์บอนก็มีปริมาณธาตุทั้งสองผสมอยู่พอสมควร เราสามารถแบ่งย่อยกว้าง ๆ ออกได้ 2 ประเภทโดยพิจารณาตามปริมาณของธาตุผสม คือ

- เหล็กกล้าผสมต่ำ (Low alloy steel) เป็นเหล็กกล้าผสมที่มีปริมาณธาตุผสมน้อยกว่า 10%

- เหล็กกล้าผสมสูง (High alloy steel) เป็นเหล็กกล้าผสมที่มีปริมาณธาตุผสมสูงกว่า 10%

2.5.3 ความเป็นพิษ

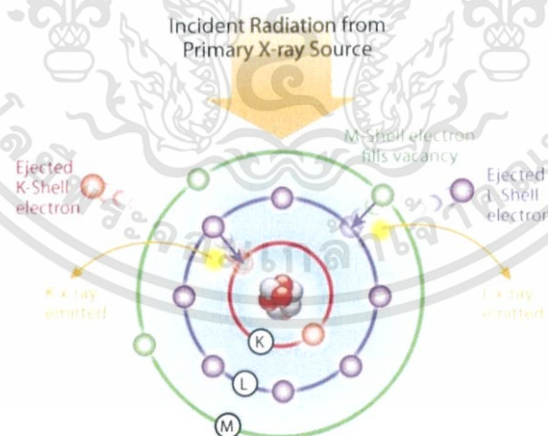
เหล็กไม่ปรากฏเป็นพิษต่อร่างกาย ยิ่งไปกว่านั้น ยังเป็นธาตุที่ร่างกายเราต้องการในปริมาณเล็กน้อย (Trace element) เป็นโลหะจำเป็นสำหรับระบบการย่อยอาหาร เม็ดเลือดแดงของคนและสัตว์ มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ ทำหน้าที่นำออกซิเจนไปสู่เซลล์ต่าง ๆ ของร่างกาย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 เทคนิคการพิสูจน์เอกลักษณ์ของโลหะผสม

2.6.1 การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุและองค์ประกอบของสารด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ [24-25]

เทคนิค XRF เป็นเทคนิคที่ใช้ในการหาชนิด และปริมาณของธาตุในสารตัวอย่างทั้งที่เป็นของแข็ง ของเหลว และสารแขวนลอยได้ อาศัยหลักการของการที่เมื่อรังสีเอกซ์ ที่มีพลังงานสูงไปกระทบชิ้นงานทำให้ชิ้นงานเกิดการปล่อยโฟตอนออกมา เนื่องจากโฟตอนที่ถูกปล่อยออกมาจากธาตุต่างชนิดในชิ้นงานจะมีความยาวคลื่น (พลังงาน) เฉพาะสำหรับธาตุนั้น ๆ จึงทำให้สามารถบ่งชี้ชนิดของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ ทั้งนี้ปริมาณโฟตอนเปล่งออกมาขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุนั้นในสารตัวอย่าง

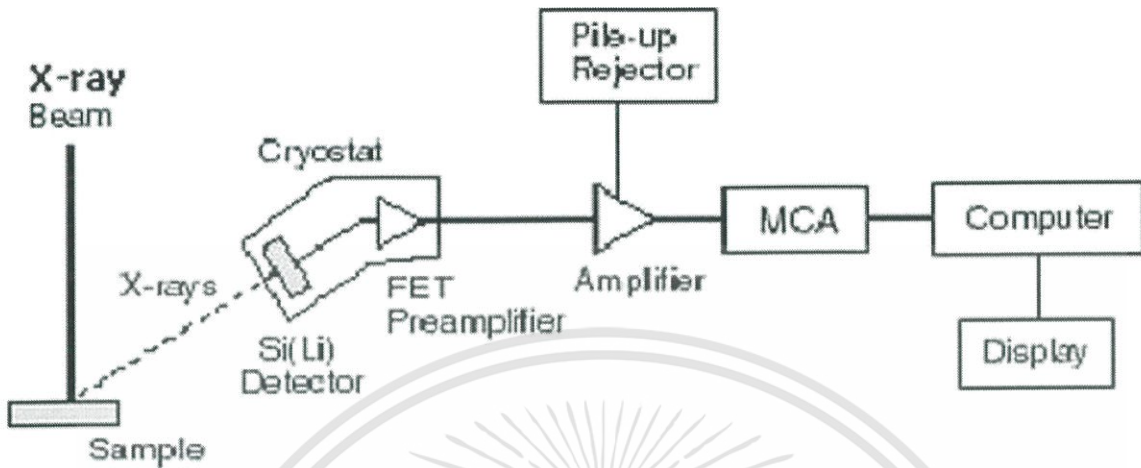
รังสีเอกซ์ปฐมภูมิ (Primary X-ray photon) จากหลอดรังสีเอกซ์พุ่งเข้าชนสารตัวอย่างจะเป็นผลให้อิเล็กตรอนวงในสุด (K-shell) ของอะตอมภายในสารตัวอย่างหลุดออกจากอะตอมในรูปของโฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นในวงอิเล็กตรอนนั้น ซึ่งที่สภาวะนี้ อะตอมจะไม่เสถียร อะตอมจะกลับสู่สภาวะที่เสถียรขึ้นโดยการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนวงนอกเข้ามาแทนที่ช่องว่างดังกล่าว ซึ่งในการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจะมีการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ทุติยภูมิ (Secondary X-ray photon) ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “ฟลูออเรสเซนซ์” (Fluorescence) พลังงานของรังสีเอกซ์ทุติยภูมิที่ปลดปล่อยออกมาจะมีค่าแตกต่างกันขึ้นกับความแตกต่างของระดับพลังงานเริ่มต้นของอิเล็กตรอนวงนอกที่เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานกับระดับพลังงานของช่องว่างที่เกิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ รังสีเอกซ์ทุติยภูมิที่เกิดจากปรากฏการณ์ฟลูออเรสเซนซ์จะเป็นรังสีเอกซ์ที่มีเอกลักษณ์เฉพาะของธาตุแต่ละชนิด อย่างไรก็ตามเทคนิค XRF จะไม่สามารถวิเคราะห์ธาตุ 11 ธาตุแรกของตารางธาตุได้



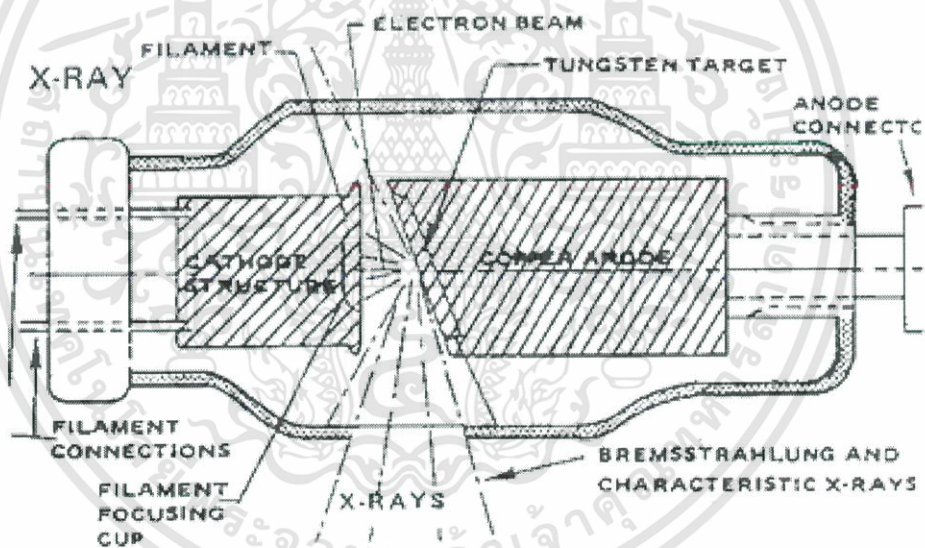
รูปที่ 2.17 ขั้นตอนการเกิดรังสีเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ [25]

รังสีเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ที่เกิดขึ้นจะถูกส่งผ่านคอลลิเมเตอร์ (Collimator) ถ้ารังสีขนานไปยังดิฟแฟรคติ้งคริสตัล (Diffracting crystal) ซึ่งมีระยะห่างระหว่างระนาบผลึกที่แน่นอน เช่น ควอทซ์ ลิเทียม-ฟลูออไรด์ ไมกา เป็นต้น โดยดิฟแฟรคติ้งคริสตัลจะทำให้รังสีเอกซ์เกิดการเลี้ยวเบน

เข้าสู่เครื่องตรวจวัดรังสีเอกซ์ (X-ray detector) โดยปกติดีฟแฟรคติงคริสตัลจะท่ามุม Theta กับ ระนาบของรังสีที่ขนานจากคอลิเมเตอร์ และท่ามุม 2 Theta กับเครื่องตรวจวัด



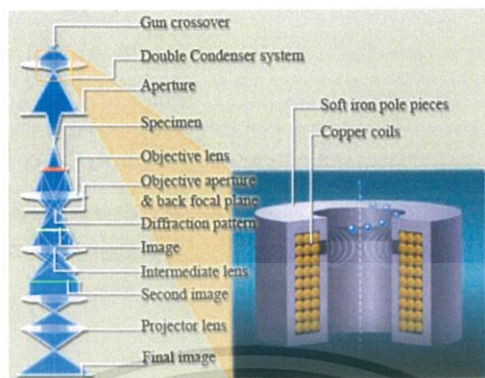
รูปที่ 2.18 การจัดต่อประกอบอุปกรณ์การวิเคราะห์โดยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ [24]



รูปที่ 2.19 องค์ประกอบของหลอดรังสีเอกซ์ [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 การวิเคราะห์การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) [26]



รูปที่ 2.20 ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด [26]

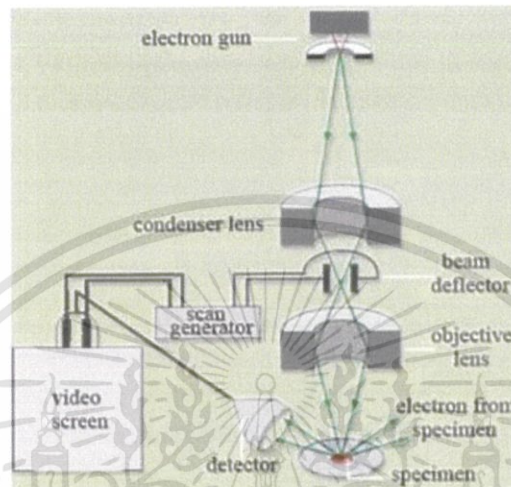
SEM เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายไม่สูงเท่ากับเครื่อง TEM (เครื่อง SEM มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร) การเตรียมตัวอย่างเพื่อที่จะดูด้วยเครื่อง SEM นี้ไม่จำเป็นต้องที่ตัวอย่างจะต้องมีขนาดบางเท่ากับเมื่อดูด้วยเครื่อง TEM ได้ (เพราะไม่ได้ตรวจวัดจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง) การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อ และเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น



รูปที่ 2.21 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด [26]

หลักการการทำงานของเครื่อง SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก จากนั้นลำอิเล็กตรอน

จะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้นซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไปและสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอตริทัศน์ได้เลย [31]



รูปที่ 2.22 ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด [26]

ข้อดีของเครื่อง SEM เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่อง TEM คือ ภาพโครงสร้างที่เห็นจากเครื่อง SEM จะเป็นภาพลักษณะ 3 มิติ ในขณะที่ภาพจากเครื่อง TEM จะให้ภาพลักษณะ 2 มิติ อีกทั้งวิธีการใช้งานเครื่อง SEM จะมีความรวดเร็วและใช้งานง่ายกว่าเครื่อง TEM มาก

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Chandrasekar และ Pushpavanam [20] ได้ทำบทความวิเคราะห์ที่เรื่องแนวคิด ประโยชน์ และการประยุกต์ใช้ของการเคลือบโลหะแบบพัลส์ ได้วิเคราะห์ว่าการเคลือบโลหะแบบพัลส์ทำให้อิออนสามารถเคลื่อนที่ผ่านชั้นผิวไปติดที่ชิ้นงานได้ดีกว่าการเคลือบโลหะแบบให้กระแสโดยตรง (Direct current) ส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้จากการเคลือบแบบพัลส์ทำให้โครงสร้างของโลหะละเอียด โครงสร้างแข็งแรงกว่าในปัจจุบันการเคลือบโลหะแบบพัลส์จึงเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการเคลือบโลหะ

Chansena และ Sutthiruangwong [4] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-Fe ในสารละลายที่มีการเติมอากาศ โดยใช้ชิ้นงานตัวอย่าง คือทองแดง 99.5% มีขั้นตอนในการทำมาสะอาดทองแดงโดย นำมาขัดด้วยกระดาษทราย จากนั้นนำมาล้างด้วยสารลดแรงตึงผิวและน้ำกลั่น หลังจากนั้นล้างโดยใช้ ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (C_3H_6OH) ด้วยเครื่องล้างความถี่สูงเป็นเวลา 5 นาที แล้วเป่าด้วยลมร้อนให้แห้ง นำมาเคลือบผิวด้วยวิธีการเคลือบด้วยไฟฟ้าด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี โดยใช้โลหะทองแดงเป็นขั้วทำงาน ขั้วซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ ($Ag/AgCl$) เป็นขั้วอ้างอิง และโลหะแพลทินัมเป็นขั้วตรงข้าม โดยใช้สารตั้งต้นเป็น $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ และ $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ เป็นสารละลายเอกลาสำหรับการเคลือบผิว และพ่นแก๊สไนโตรเจนก่อนการเคลือบผิวเป็นเวลา 30 นาที โดยศึกษาอัตราส่วนคาร์บอนของ Co:Fe ที่แตกต่างกัน คือ 80:20 60:40 40:60 และ 20:80 โดยน้ำหนัก กระแสที่ใช้อยู่ใช้

ฝั่งแคโทดิก (0 ถึง -5 mA) อัตราการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟฟ้าตั้งค่าอยู่ที่ 1.0×10^{-4} A/s เป็นเวลา 5 ชั่วโมง และศึกษาการกัดกร่อนของโลหะผสมโดยการวัดโพเทนชิโอสแตติก โพลาริเซชันในสารละลายกรดที่มี pH เท่ากับ 3 4 5 และน้ำปราศจากไอออน พบว่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนของโลหะผสม Co-Fe ใน สารละลายกรดมีค่าสูงกว่าในน้ำปราศจากไอออน และความหนาแน่นของกระแสของโลหะผสม Co-Fe ในแต่ละ pH แปรผันตรงกับปริมาณ Fe นั่นคือ ทั้งในสารละลายกรดและน้ำปราศจากไอออน อัตราการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-Fe เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเหล็กเพิ่มขึ้น เมื่อค่า pH ลดลง ความหนาแน่นของกระแสการกัดกร่อน (i_{corr}) ของโลหะผสม Co-Fe เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการบ่งบอกว่า โลหะมีความเสี่ยงต่อการถูกกัดกร่อน

Bai และ Hu [27] ได้ทำการศึกษาเรื่องการควบคุมองค์ประกอบของโลหะผสม Co-Ni และ Co-Fe โดยใช้การชุบโลหะแบบพัลส์ โดยในการศึกษามีการใช้ชิ้นงานเป็นทองแดง 99.5 % มีพื้นที่ผิว 1×2 cm² และมีการทำความสะอาดชิ้นงานโดยล้างด้วยไตรคลอโรเอทิลีน (C₂HCl₃) และนำไปล้างด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำไปแอโนไดซ์ที่ 30 mA/cm² ในสารละลายโซเดียม-ไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เป็นเวลา 5 นาที หลังจากแอโนไดซ์จึงนำตัวอย่างไปให้กระแสในฝั่งแคโทดที่ 75 mA/cm² ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เป็นเวลา 10 วินาที และนำไปล้างในเครื่องล้างความถี่สูง (Ultrasonic bath) เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำไปล้างด้วยกรดซัลฟิวริก (H₂SO₄) ความเข้มข้น 5 โมลาร์ เป็นเวลา 1 นาที ล้างด้วยน้ำกลั่น และนำไปล้างในเครื่องล้างความถี่สูง 5 นาที อีกครั้ง แล้วเคลือบชิ้นงานด้วย เทฟลอนให้ชิ้นงานมีพื้นที่ผิวสัมผัสเพียง 1×1 cm² และนำไปทำการชุบผิวด้วยไฟฟ้า โดยใช้เซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิด 3 ขั้ว โดยมีขั้วไฟฟ้า ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์เป็นขั้วอ้างอิง ใช้แพลทินัมเป็นขั้วตรงข้าม และชิ้นงานทองแดงเป็นขั้วทำงาน และใช้สารตั้งต้นเป็น CoCl₂·6H₂O NiCl₂·4H₂O และ FeCl₂·6H₂O เป็นสารที่ใช้เคลือบผิวโลหะ ใช้เวลาในการเคลือบทั้งหมด 20 นาที ต่อชิ้นงาน จากนั้นได้ศึกษาช่วงการใช้ศักย์ไฟฟ้าและเวลาในการเคลือบผิวโลหะ และพบว่า การเพิ่มเวลาและลดช่วงของศักย์ไฟฟ้า ทำให้การเคลือบผิวของโลหะ Ni เกิดได้ดีขึ้น และยังพบว่าอัตราส่วนของ Co-Fe ในสารละลายจะเท่ากับชิ้นงานตัวอย่าง

Otieno-Alego และคณะ [28] ได้ทำการศึกษาเรื่องปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีและ Surface enhanced raman scattering (SERS) ของ ผลกระทบ ในการเติมสาร L-[N,N-bis-(hydroxyethyl)aminomethyl]-benzotriazole (BTLy) เกี่ยวกับการกัดกร่อนของกรดและการสูญเสียสังกะสีของทองเหลืองในอัตราส่วน 60/40 โดยน้ำหนัก โดยในการศึกษานั้นใช้เป็นแผ่นทองเหลืองที่มีพื้นที่ผิว 0.773 cm² ขัดผิวทองเหลืองด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1200 ล้างด้วยอะซิโตนเกรดวิเคราะห์ (Acetone) และตามด้วยน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) โดยการศึกษาจะทำในหลอดทดลองขนาด 15x2.5 cm แขนงลอยในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และทำการวัดกระแสความหนาแน่นการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชัน โดยใช้เครื่อง potentiostat/galvanostat รุ่น 273A โดยคาโบลเมลลิ่งเล็กโทรดเป็นขั้วอ้างอิง และแพลทินัมเป็นขั้วตรงข้าม และตัวชิ้นงานเป็นขั้วทำงาน ใช้กรดซัลฟิวริก เข้มข้น 0.5 โมลาร์ เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ อัตราการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟฟ้า 20 mV/min เป็นเวลา 48 ชั่วโมง วัด SERS ด้วยเครื่อง Perkin Elmer 2000 FT-Raman spectrometer โดยใช้ขั้ว Ag/AgCl มีการศึกษาผลของ pH ช่วง 0-8 ความเข้มข้นของ BTLy 1.0×10^{-3} ถึง 1.0×10^{-6} โมลาร์ พบว่า BTLy ช่วยชะลอการละลายของสังกะสีที่

เอกสารควมเข้มข้นต่ำและระดับ pH ต่ำได้ตั้ง แต่ไม่สามารถลดการสูญเสียสังกะสีได้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Kumar และคณะ [29] ได้ทำการศึกษาเรื่องปริมาณของตะกั่วที่มีผลต่อพฤติกรรมการสูญเสียสังกะสีที่สภาวะกลางและกรด ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 % โดยศึกษาปริมาณตะกั่วที่ 2, 2.4, 2.8, และ 4.85 โดยน้ำหนัก ชัดขึ้นงานทองเหลืองที่มีความหนา 2 mm ด้วยกระดาษทรายเบอร์ 60 220 400 600 1/0 2/0 3/0 และ 4/0 ล้างด้วยอะซิโตนเกรดวิเคราะห์ (Acetone) และตามด้วยน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) จากนั้นวัดทางไฟฟ้าเคมีวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง potentiostat/galvanostat/frequency response analyzer ใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 % เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ ทั้งในสภาวะเป็นกลาง (pH 6.5) และกรด (pH 3.0) ปรับ pH ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ให้พื้นที่ผิวของชิ้นตัวอย่างขนาด 1 cm² สัมผัสกับสารอิเล็กโทรไลต์ โดยชิ้นงานทำหน้าที่เป็นขั้วทำงาน คาโทดเล็กโทรดเป็นขั้วอ้างอิง และแกรไฟต์เป็นขั้วตรงข้าม ทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 27±1 องศาเซลเซียส ในการวัดโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชัน ใช้อัตราการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟฟ้า 100 mV/min เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ใช้นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer (AAS) เพื่อหาปริมาณสังกะสี และทองแดง แล้วนำไปพลอตกราฟระหว่างกระแสกับเวลาจากศักย์ไฟฟ้าที่ -250 -100 และ 0 mV พบว่าทองเหลืองที่มีการเจือตะกั่วลงไปช่วยลดการละลายของสังกะสีในทองเหลืองได้ ทำให้ลดการสูญเสียสังกะสี ได้มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของฟิล์มโลหะผสม Co-Fe จากวิธีการเคลือบด้วยไฟฟ้า โดยศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของชั้นฟิล์มด้วยเทคนิคโพลาไรเซชัน และศึกษาการสูญเสียเหล็กในชั้นฟิล์มด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติกโพลาไรเซชัน

3.1 สารเคมี

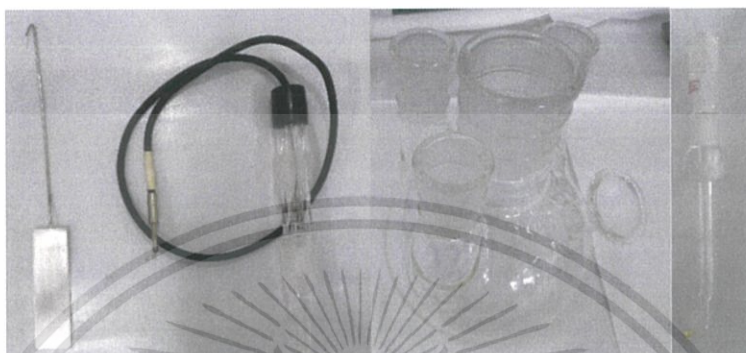
- 1) โคบอลต์ (II) คลอไรด์ เฮกซะไฮเดรต ($\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) เกรดวิเคราะห์ จาก Carlo erba Co., Ltd
- 2) เฟอร์ริกคลอไรด์ เตตระไฮเดรต ($\text{FeCl}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) เกรดวิเคราะห์ จาก Acros organic Co., Ltd
- 3) เอทิลแอลกอฮอล์ 99.2% ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ absolute) เกรดวิเคราะห์ จาก Carlo erba Co., Ltd
- 4) กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 37% (conc.HCl) เกรดวิเคราะห์ จาก Fisher chemical Co., Ltd
- 5) กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 96% (conc. H_2SO_4) เกรดวิเคราะห์ จาก Carlo erba Co., Ltd
- 6) โซเดียมไฮดรอกไซด์ แอนไฮไดรรัส (NaOH anhydrous) เกรดวิเคราะห์ จาก Carlo erba Co., Ltd
- 7) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เกรดวิเคราะห์ จาก Fisher chemical Co., Ltd
- 8) น้ำกลั่น
- 9) แก๊สไนโตรเจน 99.5% เกรดการค้า บริษัท ยูไนเต็ท อินดัสเตรียลแก๊ส จำกัด
- 10) ทองแดงแท่ง 99.9% บริษัท พรพูนอนันต์ จำกัด
- 11) สลวดทองแดง

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 1) บีกเกอร์ขนาด 25 50 150 250 600 800 1,000 มิลลิลิตร
- 2) หลอดหยด
- 3) แท่งแก้วคนสาร
- 4) ขวดน้ำกลั่น
- 5) กรวยแก้ว 50 100 มิลลิเมตร
- 6) ขวดวัดปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร
- 7) กระจกบอทวง 10 มิลลิลิตร
- 8) กระจกนาฬิกา
- 9) ปิเปตขนาด 1 10 มิลลิลิตร
- 10) ช้อนตักสาร
- 11) คีมคีบสาร (Forceps)
- 12) กระจดาชทรายหมายเลข 280 600 1200 2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 13) ชุดทดลองการกักกร่อน ดังรูปที่ 3.1
- ขั้วแพลทินัม (Platinum electrode)
 - ขั้วคาโบลเมลิอิมตัว
 - ขวด 5 คอ
 - ลิกกินแคปิลลารี (Luggin capillary)



รูปที่ 3.1 ชุดทดลองการกักกร่อน

- 14) อุปกรณ์บรรจุตัวอย่าง (Sample holder)



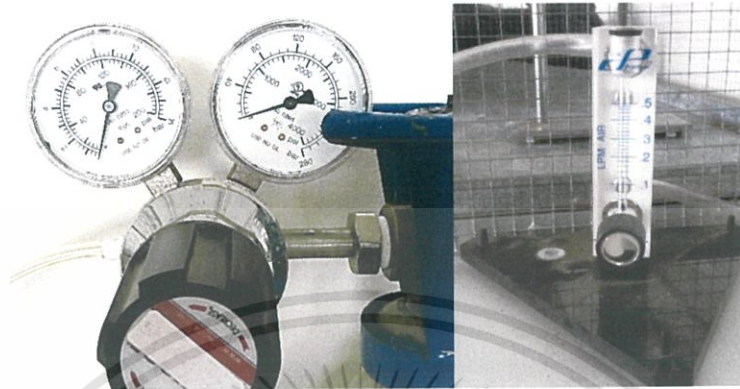
รูปที่ 3.2 อุปกรณ์บรรจุตัวอย่าง

- 15) เครื่องเป่าลมร้อน
- 16) ขาตั้ง (Stand)
- 17) แคลมป์จับ (Clamp)
- 18) ที่ยึดแคลมป์กับขาตั้ง (Clamp holder)
- 19) เครื่องปั่นกวนและแท่งแม่เหล็ก
- 20) เครื่องล้างความถี่สูง 44 kHz
- 21) เครื่องวัดความเป็นกรด-เบส (pH meter)
- 22) กรงฟาราเดย์
- 23) เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
- 24) ตู้ดูดควัน (Hood)
- 25) เครื่องโพเทนชิโอสแตต/กัลวานอสแตต (รุ่น PGSTAT12 ; Autolab Co., Ltd.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งหากมีให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

26) ชุดควบคุมก๊าซไนโตรเจน

- เครื่องควบคุมความดัน (Regulator)
- เครื่องควบคุมอัตราการไหล (Rotameter)



รูปที่ 3.3 ชุดควบคุมก๊าซไนโตรเจน

3.3 การสังเคราะห์ฟิล์มโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก

3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมผิวชิ้นงาน

ใช้โลหะทองแดงบริสุทธิ์ 99.9% มีลักษณะเป็นวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร หนา 3 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.4 โดยมีขั้นตอนการเตรียมดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างทองแดง

- 1) ขัดผิวของชิ้นงานด้วยกระดาษทรายแบบขัดเปียกหมายเลข 280 600 1200 และ 2000 ขัดตามลำดับโดยใช้น้ำร่วมในการขัด
- 2) ล้างชิ้นงานที่ขัดแล้วด้วยสารลดแรงตึงผิวและน้ำกลั่น เป่าให้แห้ง
- 3) นำชิ้นงานไปชั่งน้ำหนัก
- 4) จับตัวชิ้นงานด้วยลวดทองแดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างการจับชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

- 5) ล้างด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ โดยใช้เครื่องล้างความถี่สูง เป็นเวลา 5 นาที
- 6) เป่าชิ้นงานให้แห้งด้วยลมร้อน

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามจำหน่ายหรือดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายผสมโคบอลต์-เหล็ก

เตรียมสารละลายผสมที่สัดส่วน Co:Fe เท่ากับ 40:60 โดยน้ำหนัก โดยมีความเข้มข้นโดยรวม 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร โดยใช้โคบอลต์ (II) คลอไรด์ เฮกซะไฮเดรต ($\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) และเฟอร์รัสคลอไรด์ เตตระไฮเดรต ($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) เป็นสารตั้งต้น จากนั้นปรับ pH เท่ากับ 2.0 โดยการใช้กรดไฮโดรคลอริก (HCl)

3.3.3 ขั้นตอนการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า

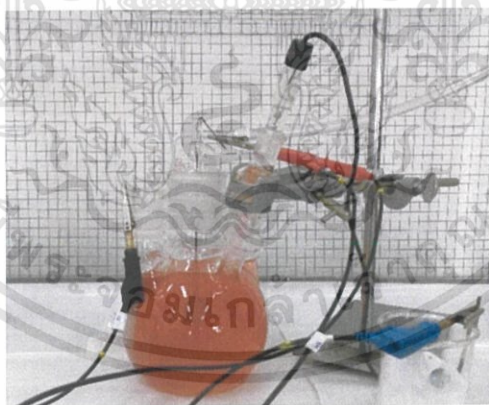
ใช้เครื่องโพเทนชิโอสแตต/กัลวานอสแตตรุ่น PGSTAT12 ในการเคลือบผิวด้วยเทคนิคการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าโดยให้กระแสแบบวนรอบ

เตรียมขั้วไฟฟ้าเคมีดังนี้

- ชิ้นงานทองแดงทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode)
- โลหะแพลทินัมทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าตรงข้าม (Counter electrode)
- ขั้วไฟฟ้าคาโลเมอลิมตัว (Saturated calomel electrode, SCE) ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้า

อ้างอิง (Reference electrode)

- 1) นำสารละลายที่เตรียมไว้ไปพ่นก๊าซไนโตรเจน ด้วยอัตราการไหล 4 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที
- 2) ต่อชุดอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.6 โดยจัดขั้วอ้างอิงอยู่ห่างจากชิ้นงานทองแดงประมาณ 3 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.6 การต่อขั้วไฟฟ้า

- 3) เริ่มการเคลือบผิวโดยการให้กระแสไฟฟ้าแบบวนรอบในฝั่งแคโทดิก ในช่วง 0 ถึง -10 mA ใช้เวลา 5 ชั่วโมง โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.0001 A/s
- 4) นำชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิว มาทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่น เป่าให้แห้งด้วยลมร้อน
- 5) นำไปพิสูจน์เอกลักษณ์ของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก

- 1) วิเคราะห์หาปริมาณธาตุและองค์ประกอบของโคบอลต์ และเหล็กด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์
- 2) การวิเคราะห์การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ และอัตราส่วนของธาตุบนชั้นฟิล์ม ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดและติดตั้งร่วมกับเครื่องเอกซเรย์สเปคโตรสโกปีแบบกระจายพลังงาน

3.5 การศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อน

ศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-Fe ด้วยกรดซัลฟิวริก โซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีค่า pH เท่ากับ 5 6 8 และ 9 น้ำกลั่น และโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.1% 1% 2% และ 3% โดยน้ำหนัก ใช้เครื่องโพเทนชิโอสแตต/กัลวานอสแตตรุ่น PGSTAT12 เป็นเครื่องมือสำหรับทดสอบการกัดกร่อน โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

- 1) เตรียมขั้วไฟฟ้าโดยใช้
 - ชิ้นงานตัวอย่างโลหะผสม Co-Fe เป็นขั้วทำงาน
 - โลหะแพลทินัมเป็นขั้วตรงข้าม
 - ขั้วอ้างอิง SCE เป็นขั้วอ้างอิง
- 2) ฟันก๊าซไนโตรเจน ด้วยอัตราการไหล 4 ลิตรต่อนาที ในสารละลายที่ใช้ทำการทดสอบการกัดกร่อนก่อนเป็นเวลา 30 นาที
- 3) ต่อชุดอุปกรณ์สำหรับการทดสอบการกัดกร่อน โดยให้ปลายของลัทธิแกปิลารีของขั้วอ้างอิงห่างจากตัวชิ้นงานประมาณ 3 มิลลิเมตร
- 4) ทำการทดสอบการกัดกร่อนโดยใช้เทคนิคโพเทนชิโอดินามิกโพลาริเซชัน ด้วยกรดซัลฟิวริก โซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีค่า pH เท่ากับ 5 6 8 และ 9 น้ำกลั่น และโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.1% 1% 2% และ 3% โดยน้ำหนัก โดยให้ศักย์ไฟฟ้าดังนี้
 - Start -500 mV จาก Open circuit potential
 - Stop 1,000 mV จาก Open circuit potential
 - Scan rate 12,000 mV/hr

3.6 การศึกษาพฤติกรรมการสูญเสียเหล็กของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก

ศึกษาพฤติกรรมการสูญเสียเหล็กของโลหะผสม Co-Fe ด้วยสารละลายที่มีค่า pH เท่ากับ 6 โดยใช้เทคนิคโพเทนชิโอสแตตโพลาริเซชัน มีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

- 1) เตรียมสารละลายที่มี pH เท่ากับ 6 ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร
- 2) ฟันก๊าซไนโตรเจน ด้วยอัตราการไหล 4 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที
- 3) ให้ศักย์ไฟฟ้า +200 mV จาก Open circuit potential เป็นเวลา 3 นาที
- 4) นำชิ้นงานตัวอย่างไปตรวจสอบหาราคาองค์ประกอบด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์

5) นำตัวอย่างไปวิเคราะห์การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดและติดตั้งร่วมกับเครื่องเอกซเรย์สเปคโตรสโกปีแบบกระจายพลังงาน

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

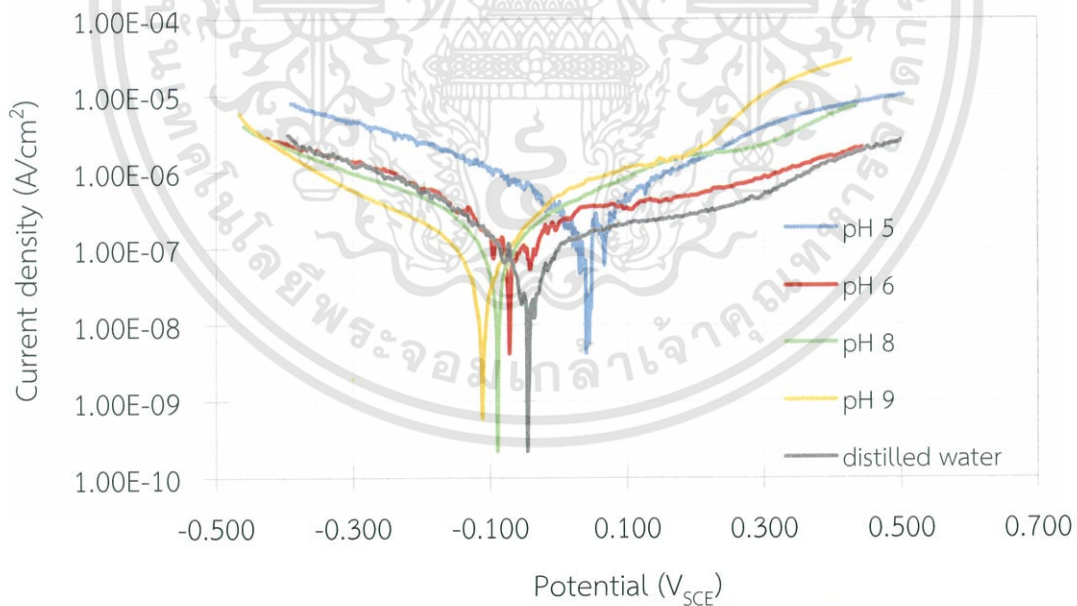
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

โครงการพิเศษนี้ทำการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กบนผิวของทองแดงจากการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า โดยใช้สารตั้งต้นคือ โคบอลต์ (II) คลอไรด์ เฮกซะไฮเดรต ($\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) และเฟอร์รัสคลอไรด์ เตตระไฮเดรต ($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) โดยผลของโครงการพิเศษนี้ได้กล่าวถึงพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก จากเทคนิคโพเทนชิโอดินามิกโพลาริเซชัน การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุของโคบอลต์และเหล็กด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์และการวิเคราะห์การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ และอัตราส่วนของธาตุบนชั้นฟิล์ม ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดและติดตั้งร่วมกับเครื่องเอกซเรย์สเปกโทรสโกปีแบบกระจายพลังงาน

4.1 พฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก

4.1.1 สารละลายกรดและเบส

ศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนในสารละลายที่มีค่า pH 5 6 8 9 และน้ำกลั่น โดยใช้เทคนิคโพเทนชิโอดินามิกโพลาริเซชัน ในการหาศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน



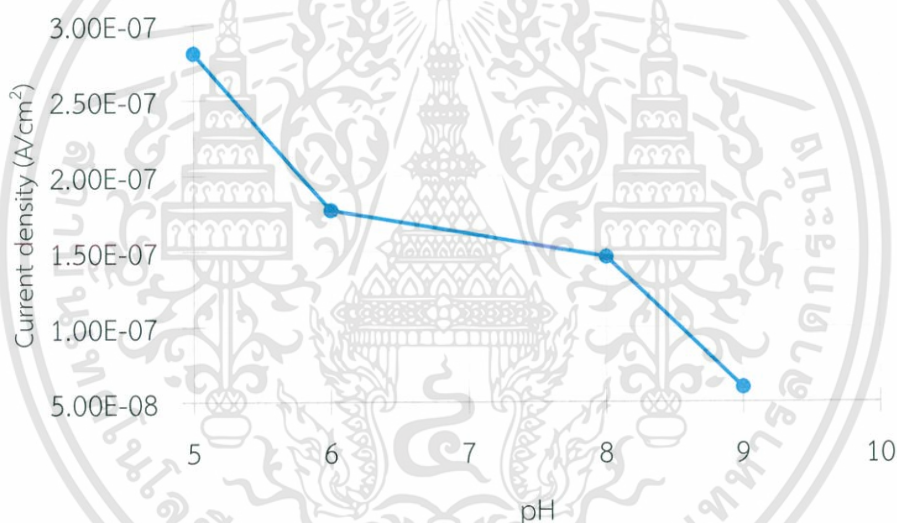
รูปที่ 4.1 กราฟโพลาริเซชันของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก ในสารละลายกรด เบส และน้ำกลั่น

รูปที่ 4.1 แสดงพฤติกรรมการกัดกร่อน ในสารละลายที่ pH ต่างกัน และน้ำกลั่นสามารถใช้หาค่าสัมประสิทธิ์การกัดกร่อนดังตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ตัวแปรแสดงพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก ในสารละลายกรดเบส และน้ำกลั่น

ค่าความกรด-เบส	ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr} , V)	ค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน (i_{corr} , A/cm ²)
น้ำกลั่น	-0.046	1.11×10^{-7}
5	0.046	2.81×10^{-7}
6	-0.068	1.77×10^{-7}
8	-0.088	1.46×10^{-7}
9	-0.122	5.96×10^{-8}



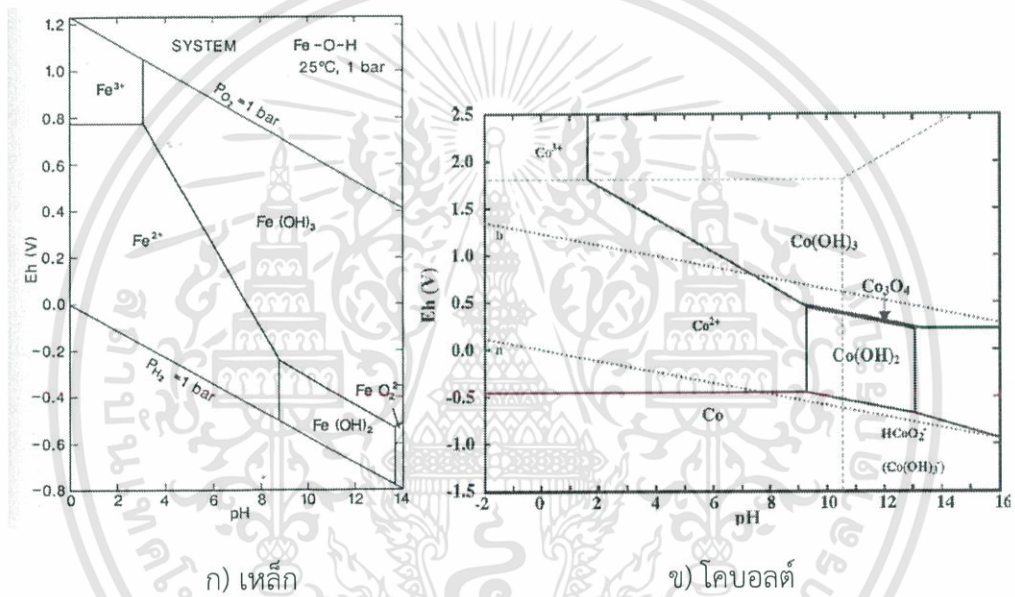
รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง pH กับความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน

จากตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบผลการทดสอบการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-Fe ซึ่งมีความหนาจากการคำนวณประมาณ 50 ไมครอน โดยทดสอบในสารละลาย pH ต่าง ๆ และน้ำกลั่น พบว่า ความเป็นกรด-เบสมีผลโดยตรงต่ออัตราการกัดกร่อน สารละลายที่มีค่า pH ต่ำ ทำให้เกิดการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-Fe มากกว่าสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-เบสสูง ซึ่งสังเกตได้จากค่า i_{corr} ของ pH 5 ค่ามากกว่า ที่ pH 6 8 น้ำกลั่น และ 9 ตามลำดับ ที่มีแนวโน้มดังรูปที่ 4.2 ทั้งนี้ค่า E_{corr} มีการเลื่อนไปทางซ้ายเมื่อค่าความเป็นกรด-เบสเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นชัดเจนว่าความสามารถในการออกซิไดซ์ของสารละลายมีค่าลดลง เนื่องจาก pH ของน้ำกลั่นไม่สามารถวัดค่าได้จึงประมาณว่า น้ำกลั่นมีค่า pH น้อยกว่า 6 แต่ไม่น้อยไปกว่า 5 ทำให้น้ำกลั่นมีความสามารถในการออกซิไดซ์มากกว่าสารละลายที่ pH เท่ากับ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่าการเกิดการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-Fe ในสารละลายที่มีความเป็นกรดและเบส เกิดขึ้นเนื่องจากโลหะผสม Co-Fe เกิดการกัดกร่อนได้เป็นไอออนของโลหะ (Me^{2+}) ตามปฏิกิริยาออกซิเดชันของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ดังสมการที่ 2.7 ($Me \rightarrow Me^{2+} + 2e^-$)

การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-เบส มีผลต่อปฏิกิริยารีดอกซ์ และค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนที่สภาวะความเป็นกรด มีผลต่อปฏิกิริยารีดักชันของโปรตอน (H^+) ซึ่งส่งผลต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะ เนื่องจาก H^+ เป็นตัวออกซิไดซ์โลหะ เมื่อ H^+ เกิดปฏิกิริยารีดักชันได้มากขึ้น ดังสมการที่ 4.1 ทำให้ออกซิไดซ์โลหะให้เป็น Me^{2+} ได้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น [4]



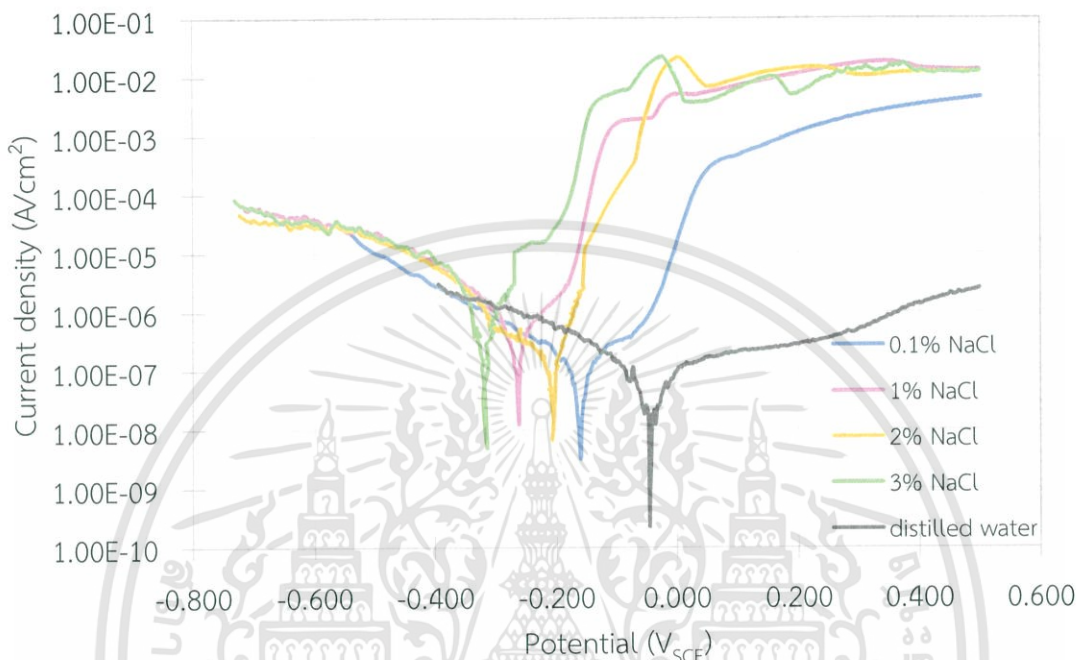
รูปที่ 4.3 แผนภาพพัวเบ [30-31]

สภาวะเบส สารละลายที่ pH เท่ากับ 8 พบว่า i_{corr} มีค่ามากกว่าในน้ำกลั่นและที่ pH เท่ากับ 8 สามารถเทียบเป็นค่า E_{corr} สำหรับขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนมาตรฐานได้เท่ากับ $-0.329 V_{SHE}$ จากรูปที่ 4.3 เห็นว่าเหล็กและโคบอลต์เสถียรอยู่ในรูปของ Fe^{2+} และ Co^{2+} ตามลำดับ [12] ทำให้เกิดการละลายของชั้นโลหะออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนผิว ส่งผลให้ออกซิเจนสามารถออกซิไดซ์โลหะได้มากขึ้น และ i_{corr} มีค่าเพิ่มขึ้นที่ pH เท่ากับ 9 จะเห็นว่า i_{corr} มีค่าน้อยกว่าทั้งใน pH เท่ากับ 8 และในน้ำกลั่น สามารถเทียบเป็นค่า E_{corr} สำหรับขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนมาตรฐานได้เท่ากับ $-0.363 V_{SHE}$ จากรูป 4.3 เหล็กสามารถเสถียรอยู่ในรูปของ $Fe(OH)_2$ ในส่วนของโคบอลต์นั้นยังคงเสถียรอยู่ในรูปของ Co^{2+} การเกิดของ $Fe(OH)_2$ นั้นทำให้เกิดชั้นป้องกันที่ผิวโลหะขึ้น ส่งผลต่อปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทด โดยทำให้เกิดปฏิกิริยาได้น้อยลง หรือออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์ในปฏิกิริยารีดักชันของโลหะกับออกซิเจนได้ยากขึ้น เนื่องจากเกิดการบดบังของชั้นป้องกันที่ผิวของโลหะ [12]

การกัดกร่อนในสภาวะเบสมิแนวโน้มเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นกับความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออนในสารละลาย ซึ่งความเป็นเบสของสารละลายส่งผลต่อการละลายของชั้นป้องกันของโลหะ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 สารละลายโซเดียมคลอไรด์

ศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนในสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.1 1 2 3 โดยน้ำหนัก และน้ำกลั่น โดยใช้เทคนิคโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชัน ในการหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน



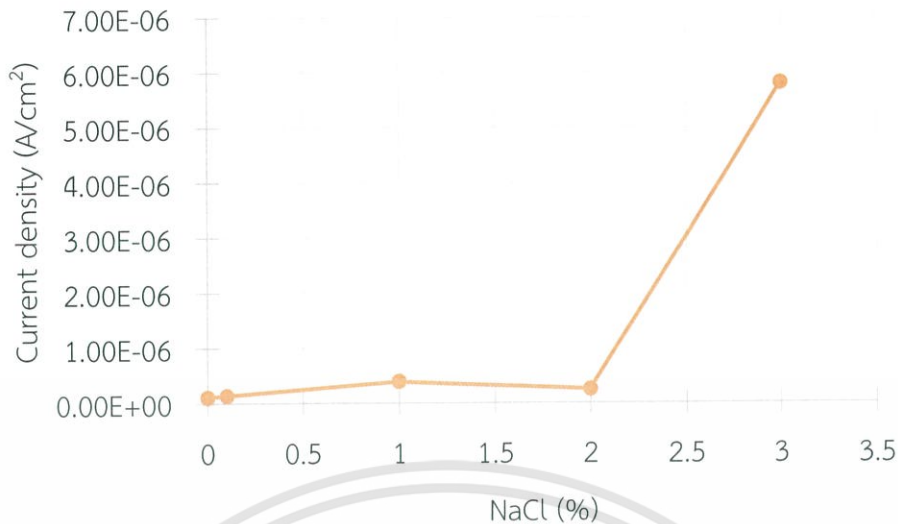
รูปที่ 4.4 กราฟโพลาริเซชันของโลหะผสมโคบอลต์-นิกเกิล ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นต่างกัน

รูปที่ 4.4 แสดงพฤติกรรมการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นต่างกัน เห็นได้ชัดว่าสามารถหาค่าตัวแปรแสดงพฤติกรรมการกัดกร่อนดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ตัวแปรแสดงพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-นิกเกิล ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นต่างกัน

ความเข้มข้น NaCl (โดยน้ำหนัก)	ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr} , V)	ค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน (i_{corr} , A/cm ²)
น้ำกลั่น	-0.046	1.11×10^{-7}
0.1	-0.164	1.38×10^{-7}
1	-0.262	3.94×10^{-7}
2	-0.211	2.50×10^{-7}
3	-0.352	5.80×10^{-6}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ NaCl กับความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน

จากตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบผลการทดสอบการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-Fe ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ และน้ำกลั่น พบว่าสารละลายที่มีความเข้มข้นมากทำให้มีปริมาณคลอไรด์ไอออน (Cl⁻) ในสารละลายมาก จึงส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-Fe มากกว่าในสารละลายที่มีความเข้มข้นน้อย สืบเนื่องจากค่า i_{corr} ของความเข้มข้น 3% โดยน้ำหนัก มีค่ามากกว่าที่ความเข้มข้น 1% 2% 0.1% โดยน้ำหนัก และน้ำกลั่นตามลำดับ มีแนวโน้มดังรูปที่ 4.5 ทั้งนี้ค่า E_{corr} มีการเลื่อนไปทางซ้ายเมื่อค่าความเข้มข้นเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นชัดเจนว่าความสามารถในการรีดิวซ์ของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น

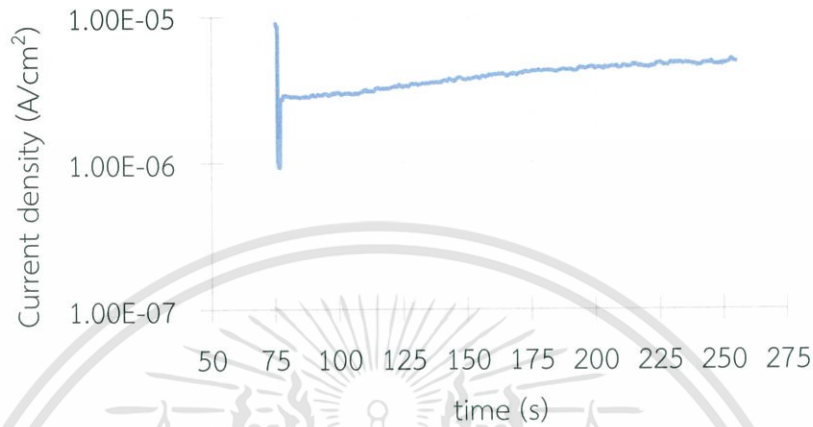


จากสมการที่ 4.2 เห็นว่าเมื่อโซเดียมคลอไรด์แตกตัวในน้ำได้โซเดียมไอออน (Na⁺) และคลอไรด์ไอออน เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มทำให้มีปริมาณของไอออนในสารละลายมากขึ้น ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายมากขึ้นด้วย ส่งผลให้ประสิทธิภาพของขั้วแคโทดและแอโนดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น i_{corr} มีค่าสูงขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วในสภาวะที่มีออกซิเจน โลหะสามารถสร้างชั้นออกไซด์ที่เป็นชั้นป้องกันเคลือบที่ผิวเพื่อลดอัตราการกัดกร่อน แต่ในสภาวะที่มีคลอไรด์ไอออน จากความสามารถในการรีดิวซ์ของคลอไรด์ไอออนทำให้คลอไรด์ไอออนสามารถไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยรีดิวซ์ชั้นออกไซด์ของโลหะส่งผลให้เกิดการเสียหายของชั้นป้องกันของโลหะ ดังนั้นออกซิเจนจึงสามารถเข้าไปออกซิไดส์โลหะได้มากขึ้น ทำให้ค่า i_{corr} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

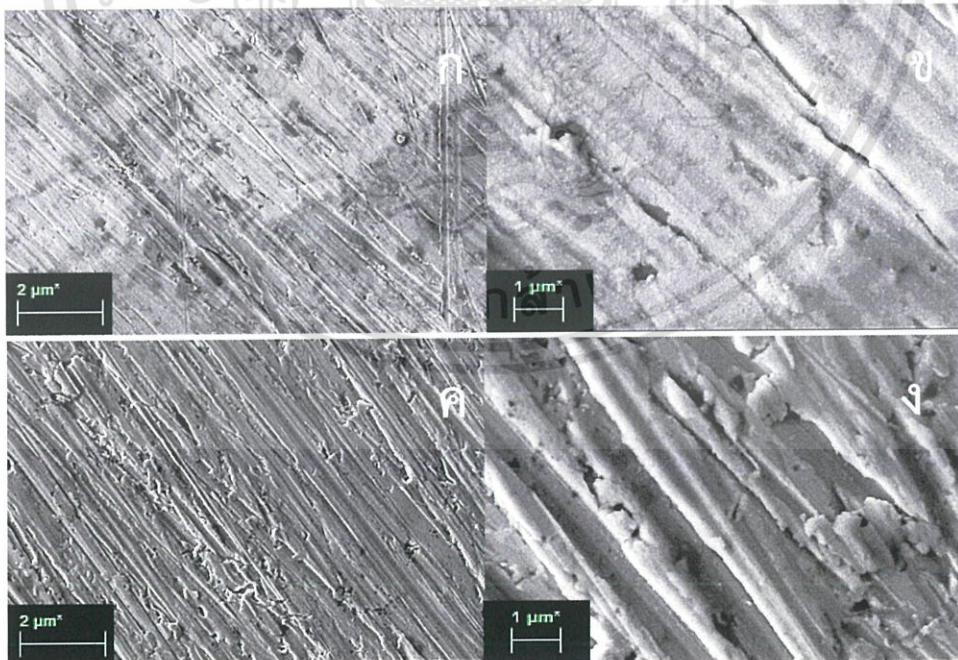
4.2 พฤติกรรมการสูญเสียเหล็กของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก

จากการศึกษาในสารละลาย pH เท่ากับ 6 ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชัน และ พิสูจน์เอกลักษณ์ก่อนทำการทดสอบและหลังทำการทดสอบ เพื่อทำการเปรียบเทียบได้ผลการทดลอง ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.6 กราฟโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชัน ในสารละลายกรด

การศึกษาการสูญเสียเหล็กในสารละลายที่มีค่า pH เท่ากับ 6 โดยทำการเลือกค่าศักย์ไฟฟ้าจากรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดการกัดกร่อนของชั้นฟิล์มโลหะผสม Co-Fe คือช่วง +200 mV จาก ocp เพื่อนำไปศึกษาหาอัตราส่วนองค์ประกอบของ Co:Fe ที่เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.7 พื้นผิวของโลหะผสม Co-Fe ก่อนและหลังทำการทดสอบการกัดกร่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ก) กำลังขยาย 1000 เท่า ข) กำลังขยาย 5000 เท่า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามใช้ข้อมูลไปเผยแพร่หาและต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 ค) กำลังขยาย 1000 เท่า และ ง) กำลังขยาย 5000 เท่า

รูปที่ 4.7 ก) และ ข) แสดงลักษณะพื้นผิวของโลหะผสมก่อนทำการทดสอบการสูญเสียเหล็กในโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก ส่วนรูปที่ 4.7 ค) และ ง) แสดงลักษณะพื้นผิวของโลหะผสมหลังทำการทดสอบการสูญเสียเหล็กในโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก เห็นว่า รูปที่ 4.7 ข) สภาพพื้นผิวมีลักษณะที่ค่อนข้างขรุขระ ทำให้มีพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับสารละลายมาก ส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนมากขึ้น และรูปที่ 4.7 ง) มีสภาพพื้นผิวมีลักษณะที่ขรุขระมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.7 ข) นั้นแสดงให้เห็นว่าชั้นฟิล์มโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กเกิดการกัดกร่อน โดยเนื้อโลหะผสมบางส่วนหลุดออกจากชั้นฟิล์มลงสู่สารละลาย

ตารางที่ 4.3 อัตราส่วนของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กบนผิวเคลือบจากเทคนิค XRF

ธาตุองค์ประกอบ	ก่อนทำการทดสอบ	หลังทำการทดสอบ
Co	48.4	56.1
Fe	51.6	43.9

ตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบก่อนและหลังทำการทดสอบพฤติกรรมของการสูญเสียเหล็กของโลหะผสม Co-Fe พบว่าปริมาณของ Fe ลดลง 7.7% จาก 51.6% เหลือ 43.9% ทำให้ปริมาณของ Co เพิ่มขึ้นจาก 48.4% เป็น 56.1%

ตารางที่ 4.4 อัตราส่วนของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กบนผิวเคลือบจากเทคนิค EDS

ธาตุองค์ประกอบ	ก่อนทำการทดสอบ	หลังทำการทดสอบ
Co	52.7	62.4
Fe	48.3	37.6

ตารางที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบก่อนและหลังทำการทดสอบพฤติกรรมของการสูญเสียเหล็กของโลหะผสม Co-Fe พบว่าปริมาณของ Fe ลดลง 10.7% จาก 48.3% เหลือ 37.6% ทำให้ปริมาณของ Co เพิ่มขึ้นจาก 52.7% เป็น 62.4%

การให้ศักย์ไฟฟ้าในช่วงแอโนดิกนั้นมีผลต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะ จากค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์รีดักชัน (E^0) ของ Fe และ Co เท่ากับ $-0.44 V_{SHE}$ และ $-0.28 V_{SHE}$ ตามลำดับ [9] โดยที่ Fe ที่มีค่า E^0 น้อยกว่า Co จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้เร็วกว่า Co ที่มี E^0 มาก ดังนั้น Fe จึงเกิดการละลายออกมาในสารละลายได้มากกว่า Co ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Deironification [4] ซึ่งคล้ายกับการสูญเสียสังกะสีของทองเหลืองในทองเหลืองที่มีสังกะสีเป็นองค์ประกอบมากกว่า 40.1% นั้นไวต่อการเกิดปฏิกิริยาการสูญเสียสังกะสี ซึ่งสังกะสีมีค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์รีดักชันน้อยกว่าเป็นขั้วแอโนดทำให้เกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนได้ง่ายกว่า และทองแดงที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์รีดักชันมากกว่าเป็นขั้วแคโทด ทำให้สังกะสีเกิดความจำเพาะเจาะจงในการละลายออกมาในสารละลาย [32]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 พฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กในสารละลายกรด-เบสและน้ำกลั่น

จากผลของการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก โดยใช้เทคนิคโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชัน ในสารละลายที่ pH 5 6 8 9 และน้ำกลั่น เมื่อพิจารณาจากค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน พบว่า ที่ pH 5 ถูกกัดกร่อนมากที่สุดเมื่อเทียบกับสารละลายอื่น และน้ำกลั่น

5.1.2 พฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และน้ำกลั่น

จากผลของการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก โดยใช้เทคนิคโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชัน ในสารละลายที่มีความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ และน้ำกลั่น เมื่อพิจารณาจากค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน พบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3% โดยน้ำหนัก โลหะผสมถูกกัดกร่อนมากที่สุดเมื่อเทียบกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในช่วงที่ได้ทำการศึกษา 0.1% - 3% โดยน้ำหนัก

5.1.3 พฤติกรรมการเกิดการสูญเสียเหล็กของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก

จากผลของการศึกษาการสูญเสียเหล็กของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก โดยใช้เทคนิคโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชัน ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 6 พบว่ามีการสูญเสียเหล็กเกิดขึ้น โดยเหล็กมีปริมาณลดลงประมาณ 7.7% เมื่อตรวจวัดด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ และเหล็กมีปริมาณลดลงประมาณ 10.7% เมื่อตรวจวัดด้วยเครื่องเอกซเรย์สเปคโตรสโกปีแบบกระจายพลังงาน

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรเพิ่มเติม Additive บางชนิดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในขั้นตอนการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า
- 2) ควรศึกษาโครงสร้างความเป็นผลึกของชั้นฟิล์ม Co-Fe ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ก่อนและหลังทำการกัดกร่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] กัญจนา ตระกูลคุ. 2530. เทคโนโลยีการกัดกร่อน. กรุงเทพฯ : คราฟแมนเพรส.
- [2] ปริญญา บุญสา, ตรีนตร ยิ่งสัมพันธ์เจริญ, และอภิชาติ โรจนโรวรรณ. 2560. "ภาพรวมของการใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนในอุตสาหกรรม." *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*. 13(1) : 83-95.
- [3] ธัญญาทิพ พิซิตการคำ, สุภัททา ปินทะแพทย์, และอรรถกร เก่งพล. 2558. "การพัฒนาแบบการแบ่งปันความรู้ในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์." *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*. 25(3) : 475-483.
- [4] A. Chansena and S. Sutthiruangwong. 2017. "Corrosion behavior of electrodeposited Co-Fe alloys in aerated solutions." *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. Vol. 429 : 251-256.
- [5] U. Hartmann. 2010. *Magnetic multilayers and Giant magnetoresistance fundamentals and industrial applications*. Germany : Verlag Berlin Heidelberg
- [6] National Physical Laboratory. 2010. *Calculated Co-Fe phase diagram*. [online]. Available : <http://resource.npl.co.uk/mtdata/phdiagrams/cofe.htm>.
- [7] สยาม แก้วคำไสย์. 2553. การกัดกร่อนของวัสดุ (โลหะ). [online]. Available : <http://siamk aewkumsai.blogspot.com/2010/05/blog-post.html>.
- [8] รวมเรื่องรถยนต์ รถจักรยานต์ พาหนะอื่น ๆ. 2556. การกัดกร่อนและการป้องกัน. [online]. Available : <http://www.auto2drive.com/การกัดกร่อนและการป้องกัน/>.
- [9] ไชยา พรหมโส. 2557. ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์และศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของครึ่งเซลล์. [online]. Available : <http://sckchemistry.blogspot.com/2010/10/9312.html>.
- [10] Corrosionpedia. 2008. *Polarization*. [online]. Available : <https://www.corrosionpedia.com/definition/896/polarization>.
- [11] ศิริลักษณ์ นิวิฐจรรยงค์. 2545. การกัดกร่อนและการเลือกใช้วัสดุ. [online]. Available : <http://www.tistr.or.th/tistrblog/?tag=เส้นโค้งโพลาไรเซชัน>.
- [12] D. Jones. 1992. *Principles and Prevention of Corrosion*. Singapore : Macmillan publishing.
- [13] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2556. การกัดกร่อน. [online]. Available : <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%81%E0%B8%B1%E0%B8%94%E0%B8%81%E0%B8%A3%E0%B9%88%E0%B8%AD%E0%B8%99>.
- [14] Z. Ahmad. 2006. *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*. United Kingdom : Butterworth-Heinemann.
- [15] M. Labeeb. 2014. *Selective leaching (Dezincification)*. [online]. Available : <https://www.slideshare.net/labeebmlp/selective-leaching-or-dezincification>.

- [16] Y. Zhang. 2009. "Dezincification and Brass Lead Leaching in Premise Plumbing Systems: Effects of Alloy, Physical Conditions and Water Chemistry." Master of Science Environmental Engineering. Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [17] อนันต์ ทองมอญ. 2544. *ชุบโลหะด้วยไฟฟ้า*. กรุงเทพมหานคร : สำนักพัฒนาอุตสาหกรรมสนับสุนน.
- [18] สาโรช พันธุ์แพ และอภิชาติ ธรรมวิทย์กุล. 2526. *การชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า*. กรุงเทพมหานคร : ห้างหุ้นส่วนจำกัด โรงพิมพ์ชวนพิมพ์.
- [19] สุวรรณ ไชยสิทธิ์. 2556. "การสังเคราะห์และศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของอนุภาคโคบอลต์ออกไซด์ปรับแต่งขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนสำหรับตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์." คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [20] M.S. Chandrasekar and M. Pushpavanam. 2007. "Pulse and pulse reverse plating-Conceptual, advantages and applications." *Electrochimica Acta*. Vol. 53 : 3313-3322.
- [21] ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์. 2543. *โคบอลต์*. [online]. Available : <https://web.ku.ac.th/schoolnet/snet5/topic2/Co.html>.
- [22] บริษัท ธนาสารเซ็นทรัลสตีล จำกัด. 2560. *การแบ่งประเภทของเหล็ก*. [online]. Available : <http://www.thanasarn.co.th/%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B9%81%E0%B8%9A%E0%B9%88%E0%B8%87%E0%B8%9B%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B9%80%E0%B8%A0%E0%B8%97%E0%B8%82%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B9%80%E0%B8%AB%E0%B8%A5%E0%B9%87%E0%B8%81/>.
- [23] ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์. 2543. *เหล็ก*. [online]. Available : <https://web.ku.ac.th/schoolnet/snet5/topic2/Fe.html>.
- [24] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2557. *เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันและเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRD/XRF Techniques, X-ray)*. [online]. Available : <https://www.mtec.or.th/mcu/phcl/index.php/th/2014-09-04-06-23-37/14-uncategorised/28-x-ray>.
- [25] บริษัท ซินเทค อินโนเวชั่น จำกัด. 2553. *ทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์ X-ray fluorescence spectrometry (XRF)*. [online]. Available : <http://www.cleversci.com/index.php?lay=show&ac=article&id=538907996&Ntype=17>.
- [26] สถาบันนวัตกรรมและพัฒนาระบบการเรียนรู้อัจฉริยะ. 2552. *กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน*. [online]. Available : <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>.
- [27] A. Bai and C. Hu. 2005. "Composition controlling of Co-Ni and Fe-Co alloys using pulse-reverse electroplating through means of experimental strategies."

เอกสารนี้เป็นเอกสารของ *Electrochimica Acta*, Vol. 50, 1335-1345. นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [28] V. Otieno-Alego, G. Hope, T. Notoya, and D. Schweinsberg. 1996. "An electrochemical and x-ray fluorescence study of the effect of 1-[N,N-bis-(hydroxyethyl)aminomethyl]-benzotriazole on the acid corrosion and dezincification of 60/40 brass." *Corrosion Science*. Vol. 38 : 213-223.
- [29] S. Kumar, T. Narayanan, A. Manimaran, and M. Kumar. 2007. "Effect of lead content on the dezincification behaviour of leaded brass in neutral and acidified 3.5% NaCl solution." *Materials Chemistry and Physics*. Vol. 106 : 134-141.
- [30] I. Madisch and S. Hofmayer. 2008. **Pourbaix diagram for Cobalt**. [online]. Available : https://www.researchgate.net/figure/Pourbaix-diagram-for-Cobalt-H-2-O-system_fig1_257223563.
- [31] D. Brookins. 1988. **Eh-pH Diagrams for Geochemistry**. United States of America : springer-verlag berlin Heidelberg.
- [32] R. Dinnappa and S. Mayanna. 1987. "The Dezincification of brass and its inhibition in acidic chloride and sulphate solutions." *Corrosion Science*. Vol. 27 : 349-361.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การคำนวณหาน้ำหนักสารที่ใช้ ด้วยวิธีสุ่ม (Trial and Error)

อัตราส่วน Co:Fe เท่ากับ 40:60 ที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์

- หามวลอะตอมเฉลี่ย (MW_{av})

$$\begin{aligned} MW_{av} &= (237.839 \times 0.4) + (198.751 \times 0.6) \\ &= 214.3862 \text{ g}_{\text{Co-Fe}}/\text{mol} \end{aligned}$$

- ทำการประมาณน้ำหนักจากความเข้มข้น

$$0.1 \text{ mol/L} \approx 21.4386 \text{ g}_{\text{Co-Fe}}/\text{mol}$$

$$\text{Fe} : 0.6 \times 21.4386 = 12.8632 \text{ กรัม} \approx 0.06 \text{ mol}$$

$$\text{Co} : 0.4 \times 21.4386 = 8.5754 \text{ กรัม} \approx 0.04 \text{ mol}$$

- Trial and Error

สาร $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 198.751 กรัม มี Fe อยู่ 55.843 กรัม

$$\text{ถ้า } 12.8632 \text{ กรัม มี } (12.8632 \times 55.843) / 198.751 \approx 3.61 \text{ กรัม}$$

สาร $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 237.839 กรัม มี Co อยู่ 58.933 กรัม

$$\text{ถ้า } 8.5754 \text{ กรัม มี } (8.5754 \times 58.933) / 237.839 \approx 2.12 \text{ กรัม}$$

เทียบสัดส่วน Co:Fe น้ำหนักรวม $2.12 + 3.61 = 5.73 \text{ กรัม}$

$$\text{Fe} : 3.61 / 5.73 = 0.63$$

$$\text{Co} : 2.12 / 5.73 = 0.36$$

เทียบหาน้ำหนักจากอัตราส่วนที่คำนวณได้

Fe : สารมีอะตอม 0.63 ในสาร 3.61 กรัม

$$\text{ถ้า } 0.6 \text{ ในสาร } (0.6 \times 3.61) / 0.63 \approx 3.43 \text{ กรัม}$$

Co : สารมีอะตอม 0.36 ในสาร 2.12 กรัม

$$\text{ถ้า } 0.4 \text{ ในสาร } (0.4 \times 2.12) / 0.36 \approx 2.36 \text{ กรัม}$$

เทียบสัดส่วน Co:Fe น้ำหนักรวม $3.43 + 2.36 = 5.8 \text{ กรัม}$

$$\text{Fe} : 3.43 / 5.8 = 0.59$$

$$\text{Co} : 2.36 / 5.8 = 0.41$$

Fe : สารมีอะตอม 0.59 ในสาร 3.43 กรัม

$$\text{ถ้า } 0.6 \text{ ในสาร } (0.6 \times 3.43) / 0.59 \approx 3.49 \text{ กรัม}$$

Co : สารมีอะตอม 0.41 ในสาร 2.36 กรัม

$$\text{ถ้า } 0.4 \text{ ในสาร } (0.4 \times 2.36) / 0.41 \approx 2.30 \text{ กรัม}$$

เทียบสัดส่วน Co:Fe น้ำหนักรวม $3.49 + 2.30 = 5.79 \text{ กรัม}$

$$\text{Fe} : 3.49 / 5.79 = 0.60$$

$$\text{Co} : 2.30 / 5.79 = 0.40$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาร $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ มี Fe อยู่ 55.843 กรัม ในสาร 198.751 กรัม
 ถ้า 3.49 กรัม ในสาร $(3.49 \times 198.751) / 55.843 \approx 12.20$ กรัม
 สาร $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ มี Co อยู่ 58.933 กรัม ในสาร 237.839 กรัม
 ถ้า 2.30 กรัม ในสาร $(2.30 \times 237.839) / 58.933 \approx 9.22$ กรัม
 ดังนั้น ชั่ง $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 12.20 กรัม และชั่ง $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 9.22 กรัม ปรับปริมาตรด้วยน้ำ 1,000 มิลลิลิตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

คำนวณปริมาตรกรดซัลฟิวริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทดสอบพฤติกรรมการกัดกร่อน

1) คำนวณหาปริมาตรที่ต้องใช้สำหรับปรับ pH ของกรดซัลฟิวริกเข้มข้น

$$C_{H^+} = \frac{MW_{SO_4^{2-}} \times 10 \times d}{MW_{H_2SO_4}}$$

โดย

C_{H^+}	คือ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน
$MW_{H_2SO_4}$	คือ มวลโมเลกุลของซัลเฟตไอออนเท่ากับ 98 g/mole
10	คือ ค่าคงที่
d	คือ ความหนาแน่นของกรดซัลฟิวริกเข้มข้นเท่ากับ 1.84 g/cm ³
$MW_{SO_4^{2-}}$	คือ มวลโมเลกุลของกรดซัลฟิวริกเข้มข้นเท่ากับ 96 g/mole

$$C_{H^+} = \frac{96 \times 10 \times 1.84}{98}$$

$$C_{H^+} = 18.02 \sim 18 \frac{\text{mol}}{\text{L}}$$

$$C_{H^+} = 18 \frac{\text{mol}}{\text{L}}$$

$$C_{2H^+} = 2 \times 18 \text{ M}$$

$$= 36 \frac{\text{mol}}{\text{L}}$$

คำนวณหาปริมาตรสำหรับใช้ปรับ pH = 1

$$\text{pH} = -\log [H^+]$$

$$1 = -\log [H^+]$$

$$[H^+] = 1 \times 10^{-1}$$

แทนค่า $C_2 = 1 \times 10^{-6}$

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$36 \times V_1 = (1 \times 10^{-1}) \times 1000$$

$$V_1 = 2.78 \text{ ml}$$

pH= 1 ปิเปตปริมาตรของสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 2.78 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตรียมสารละลาย pH 5 จาก pH = 1

$$\begin{aligned} C_1V_1 &= C_2V_2 \\ (1 \times 10^{-1}) \times V_1 &= (1 \times 10^{-5}) \times 1000 \\ V_1 &= 0.1 \text{ ml} \end{aligned}$$

เตรียมสารละลาย pH 6 จาก pH = 1

$$\begin{aligned} C_1V_1 &= C_2V_2 \\ (1 \times 10^{-5}) \times V_1 &= (1 \times 10^{-6}) \times 1000 \\ V_1 &= 10 \text{ ml} \end{aligned}$$

ดังนั้น เตรียม pH = 5 จาก pH = 1 โดยปิเปตสารละลาย pH 1 มา 0.1 มิลลิลิตร และ pH 6 จาก pH 5 โดยปิเปตสารละลาย pH 5 มา 10 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร

2) คำนวณหาปริมาณที่ต้องใช้สำหรับปรับ pH ของโซเดียมไฮดรอกไซด์

ซึ่ง NaOH anhydrous 0.4 กรัม ละลายน้ำ 1,000 มิลลิลิตร จะได้สาร pH = 12

$$\begin{aligned} \text{pOH} &= -\log [\text{OH}^-] \\ 2 &= -\log [\text{OH}^-] \\ [\text{OH}^-] &= 10^{-2} \text{ mol/L} \end{aligned}$$

pH = 8 จะได้ pOH = 14-8 = 6 ดังนั้น $[\text{OH}^-] = 10^{-6} \text{ mol/L}$

เตรียมสารละลาย pH 8 จาก pH 12

$$\begin{aligned} C_1V_1 &= C_2V_2 \\ (1 \times 10^{-2}) \times V_1 &= (1 \times 10^{-6}) \times 1000 \\ V_1 &= 0.1 \text{ ml} \end{aligned}$$

pH = 9 จะได้ pOH = 14-9 = 5 ดังนั้น $[\text{OH}^-] = 10^{-5} \text{ mol/L}$

เตรียมสารละลาย pH 8 จาก pH 12

$$\begin{aligned} C_1V_1 &= C_2V_2 \\ (1 \times 10^{-2}) \times V_1 &= (1 \times 10^{-5}) \times 1000 \\ V_1 &= 10 \text{ ml} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

คำนวณปริมาณโซเดียมคลอไรด์ที่ใช้ในการทดสอบพฤติกรรมการกัดกร่อน

$$\text{น้ำหนัก (g)} = \% \times 10 \times d$$

% คือ ร้อยละโดยมวล

d คือ ความหนาแน่นของสารละลาย

1) ความเข้มข้น 0.1% NaCl

$$\text{น้ำหนัก (g)} = 0.1\% \times 10 \times 0.9989$$

$$\text{น้ำหนัก (g)} \approx 1 \text{ กรัม}$$

2) ความเข้มข้น 1% NaCl

$$\text{น้ำหนัก (g)} = 1\% \times 10 \times 1.00409$$

$$\text{น้ำหนัก (g)} \approx 10.04 \text{ กรัม}$$

3) ความเข้มข้น 2% NaCl

$$\text{น้ำหนัก (g)} = 2\% \times 10 \times 1.01112$$

$$\text{น้ำหนัก (g)} \approx 20.22 \text{ กรัม}$$

4) ความเข้มข้น 3% NaCl

$$\text{น้ำหนัก (g)} = 3\% \times 10 \times 1.01821$$

$$\text{น้ำหนัก (g)} \approx 30.55 \text{ กรัม}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบก่อนทำการทดสอบ

Spectrum processing :

Peaks possibly omitted : 0.268, 1.741, 8.041, 8.899 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 2

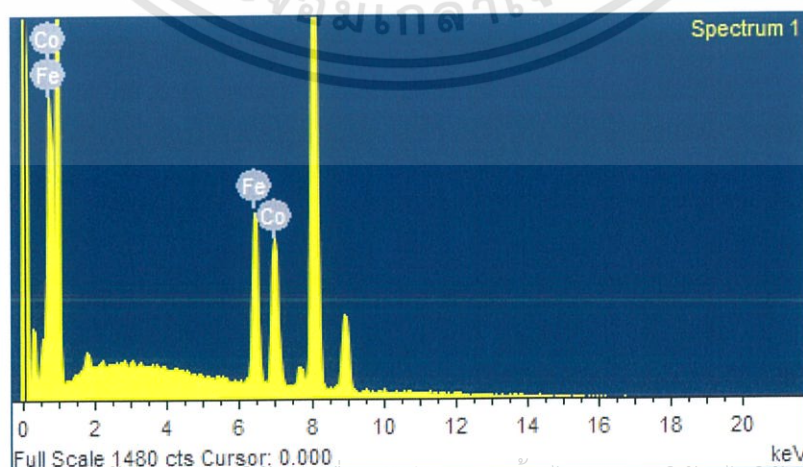
Standard :

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Co Co 1-Jun-1999 12:00 AM

ตารางที่ ง1 ปริมาณโคบอลต์ และเหล็กของชั้นฟิล์มโลหะผสมก่อนทำการทดสอบ

Element	Weight %	Atomic %
Fe K	48.27	49.61
Co K	51.73	50.39
Totals	100.00	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกที่รูปที่ ง1 EDS ของชั้นฟิล์มโลหะผสมก่อนทำการทดสอบ

ผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบหลังทำการทดสอบ

Spectrum processing :

Peaks possibly omitted : 0.270, 1.760, 8.040, 8.904, 9.660 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 1

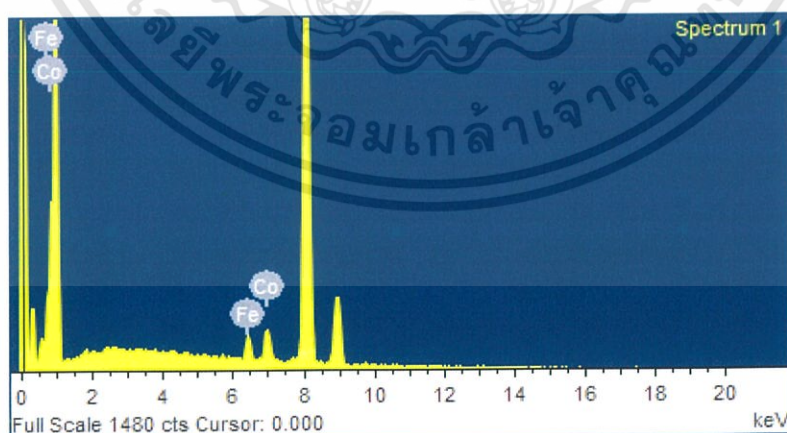
Standard :

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Co Co 1-Jun-1999 12:00 AM

ตารางที่ ง2 ปริมาณโคบอลต์ และเหล็กของชั้นฟิล์มโลหะผสมหลังทำการทดสอบ

Element	Weight %	Atomic %
Fe K	37.62	38.89
Co K	62.38	61.11
Totals	100.00	



รูปที่ ง2 EDS ของชั้นฟิล์มโลหะผสมหลังทำการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

การคำนวณหาความหนาของชั้นฟิล์ม Co-Fe

1) หาความหนาของทองแดง

$$\begin{aligned}
 v &= \frac{m_1}{\rho} \quad \text{เมื่อ } m_1 \text{ คือ น้ำหนักทองแดงก่อนเคลือบผิว} \\
 &= \frac{5.1813 \text{ g}}{8.62 \text{ g/cm}^3} \\
 &= 0.601 \text{ cm}^3 \\
 h_1 &= \frac{v}{A} \\
 &= \frac{0.601 \text{ cm}^3}{\frac{\pi}{4} \times (1.6)^2 \text{ cm}^2} \\
 &= 0.30 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

2) หาความหนาของตัวอย่างชิ้นงาน

- ความหนาแน่นเฉลี่ย

$$\begin{aligned}
 \rho_{av} &= \rho_{Co} + \rho_{Fe} \\
 &= (0.48 \times 8.9) + (0.52 \times 7.86) \\
 &= 8.4 \text{ g/cm}^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 v &= \frac{m_2}{\rho_{av}} \quad \text{เมื่อ } m_2 \text{ คือ น้ำหนักทองแดงหลังเคลือบผิว} \\
 &= \frac{5.1819 \text{ g}}{8.4 \text{ g/cm}^3} \\
 &= 0.62 \text{ cm}^3 \\
 h_2 &= \frac{v}{A} \\
 &= \frac{0.62 \text{ cm}^3}{\frac{\pi}{4} \times (1.6)^2 \text{ cm}^2} \\
 &= 0.31 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

3) หาความหนาของชั้นฟิล์ม Co-Fe รวม 2 ด้าน

$$\begin{aligned}
 m_{\text{Co-Fe}} &= m_2 - m_1 \\
 &= 0.31 - 0.30 \text{ cm} \\
 &= 0.01 \text{ cm} = 100 \text{ } \mu\text{m}
 \end{aligned}$$

4) หาความหนาของชั้นฟิล์ม Co-Fe 1 ด้าน

$$m_{\text{Co-Fe}} = 100 \text{ } \mu\text{m} / 2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้