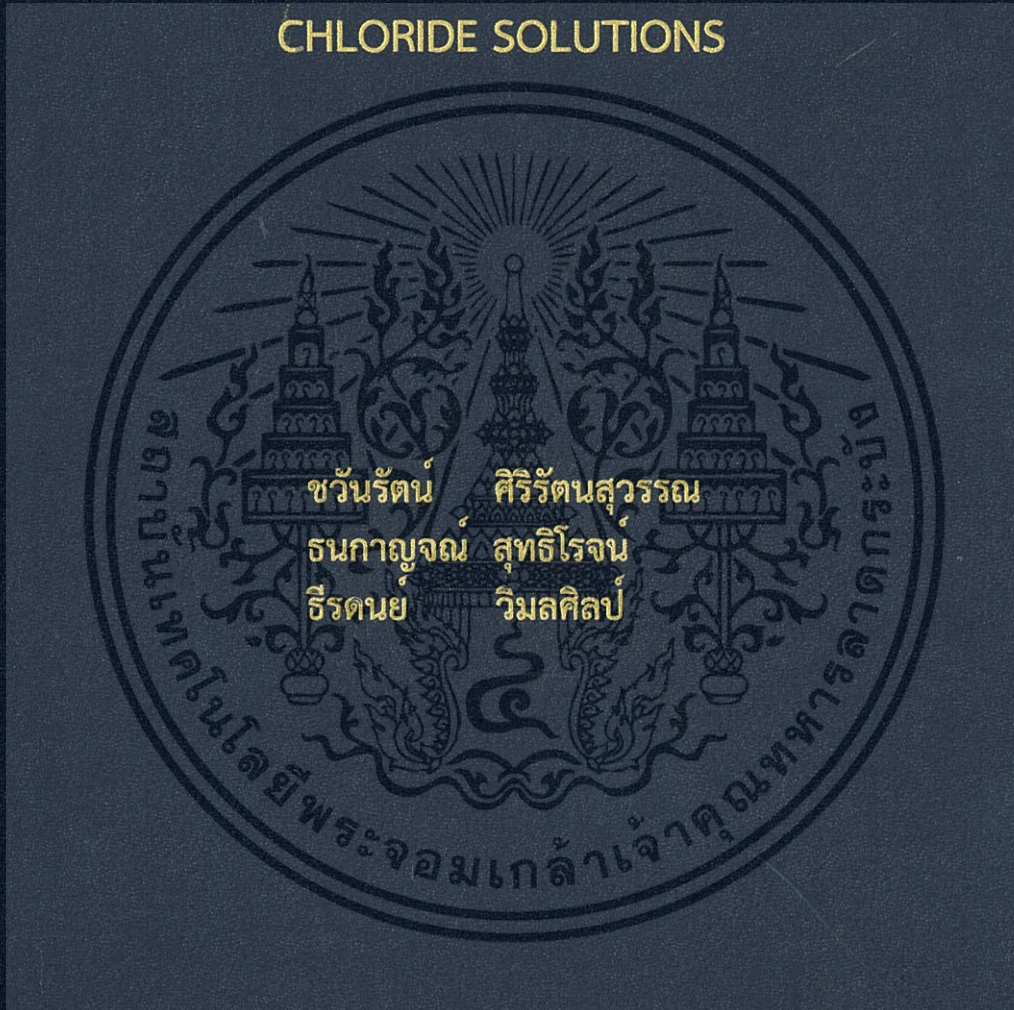


พฤติกรรมการกัดกร่อนในสารละลายกรด เบส และโซเดียม
คลอไรด์ของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กจากการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า

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



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

พฤติกรรมการกัดกร่อนในสารละลายกรด เบส และโซเดียม
คลอไรด์ของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กจากการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า

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



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

พฤติกรรมการกัดกร่อนในสารละลายกรด เบส และโซเดียม
คลอไรด์ของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กจากการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า
Corrosion Behavior of Electrodeposited Nickel-Iron
Alloys in Acidic, Basic and Sodium Chloride Solutions

ชื่อนักศึกษา

นางสาววันรัตน์ ศิริรัตนสุวรรณ รหัสนักศึกษา 57050398
นายชนกกาญจน์ สุทธิโรจน์ รหัสนักศึกษา 57050419
นายธีรตนย์ วิมลศิลป์ รหัสนักศึกษา 57050426

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา

เคมี

ปีการศึกษา

2560

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.สุธา สุทธิเรืองวงศ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
(เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2560

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ชลลดา ฤทธิวิรุฬห์ ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ กรรมการ	
ผศ.ดร.สุธา สุทธิเรืองวงศ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	พฤติกรรมการณ์กัดกร่อนในสารละลายกรด เบส และโซเดียมคลอไรด์ของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กจากการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า		
ชื่อนักศึกษา	นางสาววันรัตน์	ศิริรัตนสุวรรณ	รหัสนักศึกษา 57050398
	นายชนกกาญจน์	สุทธิโรจน์	รหัสนักศึกษา 57050419
	นายธีรณัย	วิมลศิลป์	รหัสนักศึกษา 57050426
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)		
ภาควิชา	เคมี		
คณะ	วิทยาศาสตร์		
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)		
ปีการศึกษา	2560		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.สุธา สุทธิเรืองวงศ์		

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการณ์กัดกร่อนของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็ก และพฤติกรรมการณ์สูญเสียของเหล็กในชั้นโลหะผสมนิกเกิล-เหล็ก โดยใช้โลหะผสมนิกเกิล-เหล็กจากการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าลงบนโลหะทองแดงที่สัดส่วนโดยมวล 75:25 จากนั้นนำโลหะผสมที่ผ่านการเคลือบผิวมาทำการศึกษาพฤติกรรมการณ์กัดกร่อนด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าโพเทนชิโอดินามิกโพลาริเซชันในสารละลายกรด เบส โซเดียมคลอไรด์ และน้ำกลั่น จากนั้นศึกษาพฤติกรรมการณ์สูญเสียของเหล็กในชั้นโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กในสารละลายกรดที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 5 พร้อมทั้งตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดติดตั้งร่วมกับเครื่องเอกซเรย์สเปกโทรสโคปแบบกระจายพลังงาน จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความเป็นกรด ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเลื่อนไปทางด้านแอโนดิก และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่าสูงขึ้น เมื่อเพิ่มความเป็นเบส ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเลื่อนไปทางด้านแคโทดิก และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่าลดลง ส่วนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเลื่อนไปทางด้านแคโทดิก และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย และไม่พบการสูญเสียของเหล็กในชั้นโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กแต่อย่างใด

คำสำคัญ : การเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า การสูญเสียเหล็กในชั้นโลหะผสม พฤติกรรมการณ์กัดกร่อน โลหะผสมนิกเกิล-เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Corrosion Behavior of Electrodeposited Nickel-Iron Alloys in Acidic, Basic and Sodium Chloride Solutions		
Students	Miss Chawanrat Sirirattanasuwan	Student ID 57050398	
	Mr. Thanakarn Suthirojn	Student ID 57050419	
	Mr. Theeradon Wimonnsin	Student ID 57050426	
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)		
Department	Chemistry		
Faculty	Science		
University	King Monkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
Academic Year	2017		
Advisor	Asst.Prof.Dr.Sutha Sutthiruangwong		

Abstract

The objectives of this special project were the corrosion behavior and the deironification of Nickel-Iron alloys. Electrodeposition of Nickel-Iron alloys at 75:25 mass fraction was investigated. The potentiodynamic polarization was applied for this study. The corrosion rate study was performed in acidic solutions, basic solutions, sodium chloride and distilled water. The deironification study was then performed in acidic solution with the pH of 5. The characterization was investigated by using scanning electron microscope with energy dispersive x-ray (SEM-EDX). It was found that corrosion potential (E_{corr}) shifts to anodic side and corrosion current density (i_{corr}) has been increased with increasing acidity. In basic solutions, corrosion potential shifts to cathodic side and corrosion current density has been decreased with increasing basicity. In sodium chloride solutions, corrosion potential shifts to cathodic side and corrosion current density has been increased with increasing sodium chloride concentration. The deironification has not been found in Nickel-Iron alloys.

Keywords : Electrodeposition, Deironification, Corrosion behavior, Ni-Fe alloys

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์จากกลุ่มบุคคล และหน่วยงานต่าง ๆ ซึ่งคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุธา สุทธิเรืองวงศ์ ที่ให้คำปรึกษา ดูแล ให้ความรู้ สอนทักษะการทำงานให้แก่กลุ่มของข้าพเจ้า และตรวจทานแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชลลดา ฤทธิพิรุฬห์ และ ผศ.ดร.สุภาภรณ์ รักชลธิ ที่ช่วยเป็นคณะกรรมการในการสอบ และตรวจทาน รวมทั้งให้คำแนะนำอื่น ๆ เพื่อนำไปปรับปรุงแก้ไขจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ให้ความรู้ และคำแนะนำ

ขอขอบคุณ หน่วยวิจัยเฉพาะทางด้านการกักต้อน วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการพิสูจน์เอกลักษณ์ของชิ้นงานโดยใช้เครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดติดตั้งร่วมกับเครื่องเอกซเรย์สเปกโตรสโคปแบบกระจายพลังงาน

ขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องมือเพื่อการวิจัยทางวิศวกรรม ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการพิสูจน์เอกลักษณ์ของชิ้นงานโดยใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่อำนวยความสะดวกในด้านอุปกรณ์ และสารเคมี

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และทุกคนในครอบครัวที่เป็นผู้อยู่เบื้องหลังความสำเร็จที่ได้สนับสนุนให้โอกาสได้ศึกษาเรียนรู้ทุกสิ่งทุกอย่าง และคอยให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ รุ่นพี่ทุกคนที่กรุณาให้คำแนะนำ และคอยช่วยเหลือมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ ภาควิชาเคมี ทั้งสาขาเคมีอุตสาหกรรม และเคมีสิ่งแวดล้อม ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และให้กำลังใจอยู่ตลอด

ชวันรัตน์ ศิริรัตนสุวรรณ

ธนกาญจน์ สุทธิโรจน์

ธีรตนย์ วิมลศิลป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทฤษฎีและหลักการของการกักความร้อน.....	4
2.1.1 การจำแนกประเภทการกักความร้อน.....	4
2.1.1.1 การกักความร้อนในสภาพชื้น.....	4
2.1.1.2 การกักความร้อนในสภาพแห้ง.....	4
2.1.2 ปฏิกริยาเคมีไฟฟ้า.....	4
2.1.3 การกักความร้อนจากปฏิกริยาเคมีไฟฟ้า.....	4
2.1.4 รูปแบบการกักความร้อน.....	5
2.1.4.1 การกักความร้อนแบบสม่ำเสมอ.....	5
2.1.4.2 การกักความร้อนในบริเวณจำเพาะ.....	5
2.1.5 โพลาริเซชัน.....	7
2.1.6 กฎของฟาราเดย์.....	9
2.2 การเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า.....	10
2.2.1 หลักการเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า.....	10
2.2.2 ลักษณะการเข้าเกาะเคลือบผิวที่ขั้วลบ.....	12
2.2.2.1 น้ำยาเคลือบที่เป็นเกลือแบบธรรมดา.....	12
2.2.2.2 น้ำยาเคลือบที่เป็นเกลือเชิงซ้อน.....	12
2.2.3 ประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าที่ขั้วลบและขั้วบวก.....	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.4 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า.....	13
2.2.5 การกระจายของกระแสไฟฟ้า.....	14
2.3 กรดซัลฟิวริก.....	15
2.3.1 กระบวนการผลิต.....	16
2.3.1.1 Contact Process.....	16
2.3.1.2 Wet Sulfuric acid process.....	16
2.4 นิกเกิลและโลหะผสมนิกเกิล.....	17
2.4.1 นิกเกิล.....	17
2.4.1.1 สมบัติทางฟิสิกส์.....	17
2.4.1.2 สมบัติเชิงกล.....	18
2.4.2 โลหะผสมนิกเกิล-เหล็ก.....	18
2.5 ชนิดของสภาวะแม่เหล็ก.....	19
2.5.1 Diamagnetism.....	19
2.5.2 Paramagnetism.....	20
2.5.3 Ferromagnetism.....	20
2.5.4 Antiferromagnetism.....	21
2.5.5 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติแม่เหล็ก.....	21
2.6 เส้นโค้งฮีสเทอรีซิสของแม่เหล็ก.....	21
2.6.1 สภาพบังคับหรือแรงบังคับ.....	22
2.6.2 ความแตกต่างของสมบัติเฉพาะของเส้นโค้งฮีสเทอรีซิสแม่เหล็กชั่วคราว และแม่เหล็กถาวร.....	22
2.7 ทองแดง.....	23
2.7.1 สมบัติเชิงฟิสิกส์ของทองแดง.....	23
2.7.2 สมบัติเชิงกลของทองแดง.....	23
2.8 การสูญเสียของสังกะสีชั้นโลหะผสม.....	24
2.9 การตรวจสอบและพิสูจน์เอกลักษณ์ชิ้นงาน.....	25
2.9.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	25
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	31
3.1 สารเคมี.....	31
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	31
3.3 วิธีการทดลอง.....	32
3.3.1 การเตรียมสารละลายสำหรับการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า.....	32
3.3.2 การเตรียมผิวชิ้นงานของโลหะ.....	33
3.3.3 การเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า.....	33
3.3.4 การศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนในสารละลายกรดและเบส.....	34
3.3.5 การศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์.....	34
3.3.6 การศึกษาพฤติกรรมการสูญเสียของเหล็กในชั้นโลหะผสม นิกเกิล-เหล็กโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชัน.....	35
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	36
4.1 ผลกระทบของความเข้มข้นสารละลายโลหะผสมต่อการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า.....	36
4.2 การศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็ก.....	37
4.2.1 พฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กในสารละลายกรด.....	37
4.2.2 พฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กในสารละลายเบส.....	39
4.2.3 พฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์.....	42
4.3 การศึกษาความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนกับสารละลาย กรด เบส และโซเดียมคลอไรด์.....	44
4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและ pH... 44	
4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์.....	45
4.4 การศึกษาพฤติกรรมการสูญเสียของเหล็กในชั้นโลหะผสม.....	46
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	48
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	48
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	49
เอกสารอ้างอิง.....	50
ภาคผนวก.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

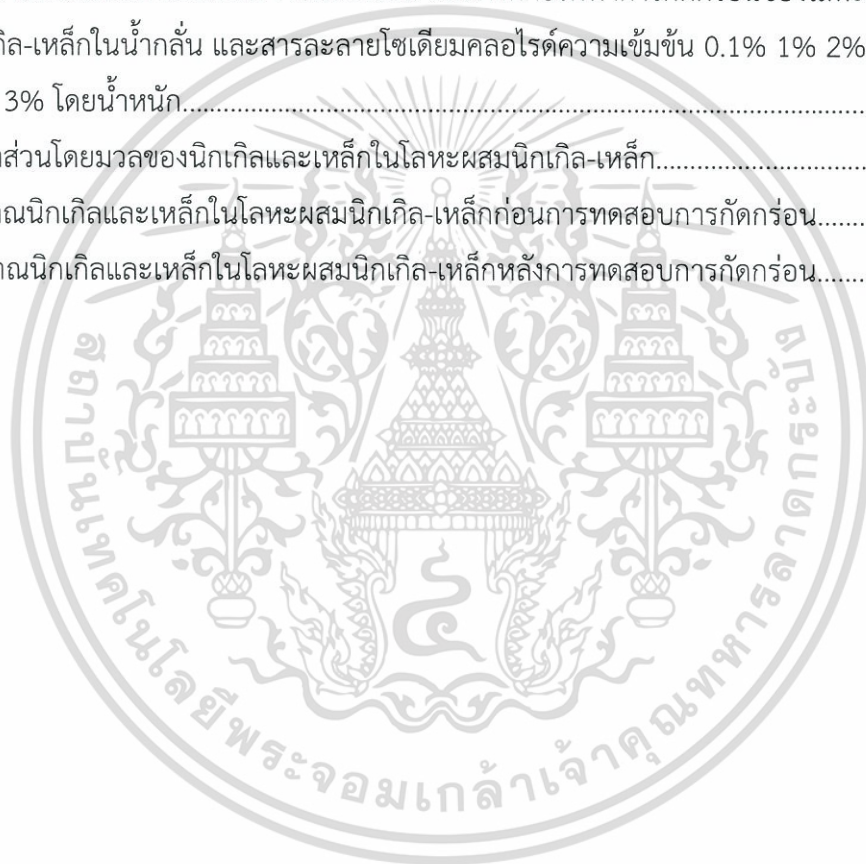
	หน้า
ภาคผนวก ก.....	55
ภาคผนวก ข.....	57
ภาคผนวก ค.....	59
ภาคผนวก ง.....	60
ภาคผนวก จ.....	61
คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ.....	62



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐาน.....	8
4.1 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของโลหะผสม นิกเกิล-เหล็กในน้ำกลั่น และสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ pH เท่ากับ 5 และ 6.....	38
4.2 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน และค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของโลหะผสม นิกเกิล-เหล็กในน้ำกลั่น และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ pH เท่ากับ 8 และ 9.....	40
4.3 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน และค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของโลหะผสม นิกเกิล-เหล็กในน้ำกลั่น และสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1% 1% 2% และ 3% โดยน้ำหนัก.....	43
4.4 อัตราส่วนโดยมวลของนิกเกิลและเหล็กในโลหะผสมนิกเกิล-เหล็ก.....	47
ง.1 ปริมาณนิกเกิลและเหล็กในโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กก่อนการทดสอบการกัดกร่อน.....	60
จ.1 ปริมาณนิกเกิลและเหล็กในโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กหลังการทดสอบการกัดกร่อน.....	61



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กราฟโพลาริเซชัน.....	7
2.2 หลักการเคลื่อนย้าย.....	10
2.3 ลักษณะการเข้าเกาะเคลื่อนผิวที่ขั้วลบของไอออนบวก (M^+) ที่เป็นเกลือ แบบธรรมดา.....	12
2.4 ลักษณะการกระจายของกระแสไฟฟ้าและความหนาที่เคลื่อนในบริเวณต่าง ๆ ของชิ้นงาน.....	14
2.5 แผนภูมิสมดุลเหล็ก-นิกเกิล.....	18
2.6 เส้นโค้งฮีสเทอรีซิสของแม่เหล็ก.....	22
2.7 เส้นโค้งฮีสเทอรีซิสของแม่เหล็กชั่วคราวและแม่เหล็กถาวร.....	23
3.1 การบรรจุเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิด 3 ขั้ว.....	33
3.2 ชิ้นงานที่ได้จากการเคลื่อนผิวด้วยไฟฟ้า.....	34
4.1 กราฟโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กในน้ำกลั่น และสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ pH เท่ากับ 5 และ 6.....	37
4.2 โลหะผสมนิกเกิล-เหล็กที่เคลือบบนผิวโลหะทองแดงหลังจากทำการทดสอบการกัดกร่อน ในสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ pH ต่าง ๆ.....	38
4.3 กราฟโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กในน้ำกลั่น และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ pH เท่ากับ 8 และ 9.....	39
4.4 แผนภาพพัลเบของเหล็ก.....	40
4.5 แผนภาพพัลเบของนิกเกิล.....	40
4.6 โลหะผสมนิกเกิล-เหล็กที่เคลือบบนผิวโลหะทองแดงหลังจากทำการทดสอบการกัดกร่อน ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ pH ต่าง ๆ.....	41
4.7 กราฟโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กในน้ำกลั่น และสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1% 1% 2% และ 3% โดยน้ำหนัก.....	42
4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและ pH.....	44
4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและความเข้มข้น ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์.....	45
4.10 ลักษณะพื้นผิวของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็ก.....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.1 การหาความชันของทาเฟิล.....	56
ง.1 สเปกตรัมของนิกเกิลและเหล็กก่อนการทดสอบการกัดกร่อน.....	61
จ.1 สเปกตรัมของนิกเกิลและเหล็กหลังการทดสอบการกัดกร่อน.....	62



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การกัดกร่อน (Corrosion) หมายถึง การสูญเสียเนื้อโลหะโดยการเกิดปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อมซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นปฏิกิริยาเคมี ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า หรือปฏิกิริยาทางกายภาพของวัสดุ ซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการทำหน้าที่ของวัสดุดังกล่าวเสียไป [1]

การกัดกร่อนเป็นปัญหาหนึ่งที่เกิดขึ้นค่อนข้างบ่อยในอุตสาหกรรมทั่วไป และสามารถพบเห็นได้ในชีวิตประจำวัน เมื่อเกิดขึ้นแล้วทำให้มีผลกระทบต่อด้านเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม บางครั้งยังทำให้มีการสูญเสียชีวิต อันเป็นผลมาจากสาเหตุมากมายหลายประการ เช่น การขาดความรู้พื้นฐานของศาสตร์ด้านการกัดกร่อน ขาดความรู้ความเข้าใจอย่างถูกต้องในการเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมในสภาวะสิ่งแวดล้อมนั้น ๆ และมีการบำรุงรักษา การป้องกันที่ไม่ถูกต้อง และเหมาะสม เป็นต้น จากการสำรวจในประเทศที่กำลังพัฒนาพบว่าการสูญเสียงบประมาณที่เกิดจากการกัดกร่อนประมาณร้อยละ 3-5 ของผลิตภัณฑ์มวลรวมประชาชาติ (Gross National Product, GNP) และในประเทศที่พัฒนาแล้ว เช่น สหรัฐอเมริกา ได้มีการสำรวจมูลค่าความเสียหายจากการกัดกร่อนในปี พ.ศ. 2545 พบว่าการสูญเสียงบประมาณที่เกิดจากการกัดกร่อนประมาณร้อยละ 3.1 ของผลิตภัณฑ์มวลรวมประชากร ซึ่งคิดเป็นเงิน 276 พันล้านเหรียญสหรัฐหรือสามารถคิดเป็นเงินไทยประมาณ 11 ล้านล้านบาท [2]

ในปัจจุบันการใช้โลหะผสมนิกเกิล-เหล็ก (Ni-Fe alloys) มีความเกี่ยวข้องกับการนำสมบัติทางแม่เหล็กมาประยุกต์ใช้สมบัติทางแม่เหล็กของสารที่ใช้เคลือบผิวสามารถปรับปรุงได้โดยการลดสภาพบังคับ (Coercivity) เพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอิมพัลส์ และเพิ่มความหนาแน่นสภาพแม่เหล็กอิมพัลส์ โลหะผสมนิกเกิล-เหล็กถูกนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์สำหรับหน่วยความจำ อุปกรณ์บันทึก และจัดเก็บข้อมูล หม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับกระแสไฟฟ้าตกค้าง (Null-balance transformer for residual current) ทรานสดิวเซอร์ (Transducers) ตัวแปลงสัญญาณทางไฟฟ้า (Pulse transformer) รีเลย์ในวงจรไฟฟ้า (Relay parts) มอเตอร์ในนาฬิกาควอตซ์ ส่วนป้องกันสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในงานที่มีอุณหภูมิต่ำ เช่น ไนโตรเจน หรือฮีเลียมเหลว ตัวนำพลาสม่า และชิ้นส่วนหัวในวาล์วแม่เหล็ก เครื่องพิมพ์ วาล์วไฟฟ้า (Electro valve) และหัวแม่เหล็กสำหรับการบันทึกเทป [3]

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมหน่วยความจำ อุปกรณ์บันทึก และจัดเก็บข้อมูลได้ประยุกต์ใช้โลหะผสมที่มีความเป็นแม่เหล็ก เช่น โลหะผสมนิกเกิล-เหล็ก และโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก (Co-Fe alloys) ในการผลิตอุปกรณ์เพื่อใช้ในการอ่าน และบันทึกข้อมูล ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวต้องผ่านกระบวนการผลิตหลายขั้นตอน และจำเป็นจะต้องสัมพันธ์กับสารเคมีหลายชนิดที่มีความเข้มข้นต่างกัน เช่น สารละลายเอ็กสตรานี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรด สารละลายเบส หรืออาจสัมผัสกับสารละลายที่มีคลอไรด์ไอออนเป็นองค์ประกอบ [4] ในขั้นตอนการผลิต จึงมีโอกาสทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ และการกัดกร่อนทำให้ความสามารถในการทำงานของอุปกรณ์ดังกล่าวเสียไป ดังนั้นจึงส่งผลกระทบต่ออุตสาหกรรม

การเลือกใช้วัสดุในการผลิตอุปกรณ์เพื่อใช้ในการอ่าน และบันทึกข้อมูลจำเป็นต้องอาศัยสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุหลายชนิด โลหะที่มีสมบัติเป็นสารแม่เหล็ก (Ferromagnetic) เช่น นิกเกิล (Ni) โคบอลต์ (Co) และเหล็ก (Fe) ได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางเพื่อการผลิตอุปกรณ์เพื่อใช้ในการอ่าน และบันทึกข้อมูล ประกอบกับปัจจุบันอุตสาหกรรมหน่วยความจำ อุปกรณ์บันทึก และจัดเก็บข้อมูลในเครื่องคอมพิวเตอร์มีความต้องการใช้วัสดุที่มีโมเมนต์แม่เหล็กสูงขึ้นเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของข้อมูลซึ่งสามารถทำได้โดยการเพิ่มสัดส่วนของเหล็กในโลหะผสม งานวิจัยและพัฒนาส่วนใหญ่จึงมุ่งไปที่การศึกษาโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กที่มีสัดส่วนของเหล็กในปริมาณที่สูง ซึ่งการประยุกต์ใช้โลหะผสมในลักษณะแบบนี้อาจจะนำไปสู่ความเสียหายเนื่องมาจากการกัดกร่อนที่อาจจะเพิ่มมากขึ้นได้ในกระบวนการผลิต โลหะผสมนิกเกิล-เหล็กเป็นหนึ่งในองค์ประกอบของอุปกรณ์เพื่อใช้ในการอ่าน และบันทึกข้อมูลในปัจจุบัน โดยวิธีการเตรียมโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กสามารถทำได้ด้วยวิธีการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า (Electrodeposition) ซึ่งวิธีการนี้เอื้อต่อการผลิตจำนวนมากโดยมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่า [5]

เนื่องจากในปัจจุบันมีเพียงงานวิจัยที่ศึกษาพฤติกรรมการสูญเสียของสังกะสีในชั้นโลหะผสม (Dezincification) และการสูญเสียของเหล็กในชั้นโลหะผสม (Deironification) แต่เป็นการสูญเสียของเหล็กในชั้นโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กเมื่อใช้สัดส่วนของเหล็กที่ต่างกัน และเกิดการสูญเสียของเหล็กในชั้นโลหะผสมเมื่อใช้สัดส่วนของเหล็กตั้งแต่ร้อยละ 40 โดยมวลขึ้นไป [6]

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมนิกเกิลและเหล็ก
- 2) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการสูญเสียของเหล็กในชั้นโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กที่เคลือบด้วยวิธีการทางไฟฟ้า (Electrodeposition) หลังจากการกัดกร่อน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) เคลือบผิวทองแดงโดยวิธีการทางไฟฟ้าเคมีด้วยโลหะผสมนิกเกิลและเหล็กในอัตราส่วนเชิงมวล 75:25 ตามลำดับ
- 2) ศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อน ในน้ำกลั่น สารละลายกรดซัลฟิวริกที่ pH เท่ากับ 5 และ 6 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ pH เท่ากับ 8 และ 9 และสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นเท่ากับ 0.1% 1% 2% และ 3% โดยน้ำหนัก
- 3) ศึกษาพฤติกรรมการสูญเสียของเหล็กในชั้นโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กที่เคลือบด้วยวิธีการทางไฟฟ้าด้วยเทคนิคโพเทนซิโอดนามิกโพลาริเซชันในสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ pH เท่ากับ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้ทราบถึงพฤติกรรมการการกัดกร่อนของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กในสารละลายกรดซัลฟิวริก โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมคลอไรด์
- 2) ได้ทราบถึงพฤติกรรมการสูญเสียของเหล็กในชั้นโลหะผสมนิกเกิล-เหล็ก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีและหลักการของการกัดกร่อน [1,7]

การกัดกร่อน (Corrosion) คือ ปฏิกิริยาระหว่างวัสดุโลหะกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งนำไปสู่การเสื่อมสภาพของวัสดุ ส่งผลให้ความสามารถในการทำหน้าที่ของวัสดุดังกล่าวเสียไป โดยส่วนใหญ่ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะเป็นปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า

2.1.1 การจำแนกประเภทการกัดกร่อน

ประเภทของการกัดกร่อน (Classification of corrosion) สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การกัดกร่อนในสภาพชื้น และการกัดกร่อนในสภาพแห้ง

2.1.1.1 การกัดกร่อนในสภาพชื้น

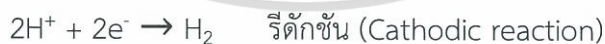
การกัดกร่อนในสภาพชื้น (Wet corrosion) เกิดขึ้นเมื่อโลหะอยู่ในสภาพเปียกจากของเหลวซึ่งหมายถึงสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ยกตัวอย่างเช่น การกัดกร่อนของเหล็กที่อยู่ในน้ำ

2.1.1.2 การกัดกร่อนในสภาพแห้ง

การกัดกร่อนในสภาพแห้ง (Dry corrosion) เกิดขึ้นเมื่อโลหะไม่ได้อยู่ในวัฏภาคของของเหลวส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง ยกตัวอย่างเช่น การกัดกร่อนของเหล็กเนื่องจากก๊าซในเตาเผาที่มีอุณหภูมิสูง

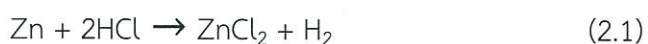
2.1.2 ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า

ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (Electrochemical reactions) เป็นปฏิกิริยาเคมีที่มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างสารตั้งต้น ทำให้เลขออกซิเดชันมีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะทำให้มีอะตอมของธาตุบางตัวสูญเสียหรือได้รับอิเล็กตรอน เรียกปฏิกิริยาที่เกิดการเสียอิเล็กตรอนว่าปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) และเรียกปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอนว่าปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ดังตัวอย่าง



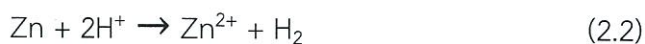
2.1.3 การกัดกร่อนจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า

การกัดกร่อนในโลหะ (Electrochemical corrosion) ส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้น จะมีขั้นตอนการถ่ายเทประจุไฟฟ้า (Electronic charge) ในสารละลาย พิจารณาจากตัวอย่างการกัดกร่อนระหว่างสังกะสี (Zn) กับกรดไฮโดรคลอริก (HCl)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อสังกะสีทำปฏิกิริยากับสารละลายกรดไฮโดรคลอริก จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบระหว่างสังกะสีกับคลอไรด์ ($ZnCl_2$) และก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และเมื่อพิจารณาแล้วว่าคลอไรด์ไอออนไม่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาดังกล่าว สามารถเขียนให้อยู่ในปฏิกิริยาอย่างง่ายได้ดังนี้



จากสมการเมื่อสังกะสีทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออน (H^+) ที่ได้จากสารละลายกรด ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสังกะสีไอออน (Zn^{2+}) และก๊าซไฮโดรเจน พิจารณาจากปฏิกิริยาข้างต้นจะเห็นได้ว่าการเกิดปฏิกิริยา สังกะสี (Zn) จะถูกออกซิไดซ์กลายเป็นสังกะสีไอออน (Zn^{2+}) และไฮโดรเจนไอออน (H^+) ถูกรีดิวซ์ กลายเป็นก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ดังนั้นเพื่อความง่าย จึงแบ่งปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นสองปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาออกซิเดชันของสังกะสี และปฏิกิริยารีดักชันของไฮโดรเจนไอออน



ปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือแอโนดิก จะพิจารณาจากการเพิ่มขึ้นของอิเล็กตรอนวงนอกสุด (Valence electron) และในทางกลับกัน ปฏิกิริยารีดักชันหรือแคโทดิกจะพิจารณาจากการลดลงของอิเล็กตรอนวงนอกสุดเช่นเดียวกัน

2.1.4 รูปแบบการกัดกร่อน [7]

รูปแบบการกัดกร่อน (Forms of corrosion) สามารถจำแนกตามลักษณะทางกายภาพของการกัดกร่อนหรือตามตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการกัดกร่อนดังนี้

2.1.4.1 การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ

การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform corrosion) เป็นบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนทั่วทั้งผิวหน้าของวัสดุอย่างสม่ำเสมอ มีผลให้โลหะนั้นบางลงเรื่อย ๆ การกัดกร่อนประเภทนี้จะไม่ค่อยอันตรายเนื่องจากสามารถหาอัตราการกัดกร่อนได้และทำนายอายุการใช้งานของโลหะชิ้นที่ถูกกัดกร่อนนี้ได้

2.1.4.2 การกัดกร่อนในบริเวณจำเพาะ

การกัดกร่อนในบริเวณจำเพาะ (Localized corrosion) เกิดขึ้นเฉพาะบริเวณใดบริเวณหนึ่ง ไม่เกิดขึ้นทั่วทั้งผิวหน้าของวัสดุ สามารถแบ่งออกเป็น

- การกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic corrosion)

โลหะสองชนิดที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าต่างกันมาเชื่อมติดกัน ทำให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนระหว่างสองโลหะ โลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าจะทำหน้าที่เป็นแคโทด โลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าจะทำหน้าที่เป็นแอโนด โดยระดับการกัดกร่อนนั้นจะขึ้นอยู่กับสภาพสิ่งแวดล้อมที่โลหะทั้งสองสัมผัสและระยะห่างจากรอยต่อเป็นต้น

- การสูญเสียส่วนเจือ (Dealloying)

การกัดกร่อนลักษณะนี้คือการที่มีโลหะสูญเสียออกจากโลหะผสม ตัวอย่างที่เห็นได้มากที่สุดคือการสูญเสียสังกะสีของทองเหลือง (Dezincification) เมื่อโลหะผสมสูญเสียส่วนเจือทำให้คุณสมบัติในการต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมลดลง

- การกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting corrosion)

การกัดกร่อนแบบหลุมเป็นการกัดกร่อนโลหะในปริมาณเล็กน้อยแต่สร้างความเสียหายในปริมาณที่มาก ส่วนใหญ่มักจะเกิดกับโลหะที่สามารถสร้างชั้นป้องกันเองได้ (Passivation) หลุมของการกัดกร่อนมีขนาดค่อนข้างเล็กแต่ภายในเป็นโพรงขนาดใหญ่จึงทำให้ตรวจสอบและทำนายความเสียหายได้ยาก แต่ในเหล็กกล้าไร้สนิมจะมีการประมาณค่าความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุมจะเรียกว่า (PREN, Pitting Resistance Equivalent Number) เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกวัสดุ

- การกัดกร่อนบริเวณซอก (Crevice corrosion)

การกัดกร่อนบริเวณซอกมักจะเกิดกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกิดขึ้นในบริเวณที่การถ่ายเทของเหลวทำได้ไม่ดี ด้านในและด้านนอกของซอกจะส่งผลให้การแพร่ของสารเคมีบางชนิดทำได้ยาก ซึ่งการกัดกร่อนประเภทนี้จะเกี่ยวข้องกับปริมาณของสารละลายที่ค้างอยู่ตามพื้นที่ที่เป็นซอกอยู่เป็นเวลานานโดยไม่มีการถ่ายเท จะทำให้ด้านในและด้านนอกมีความสามารถในการออกซิไดซ์ที่ต่างกัน และนำไปสู่การกัดกร่อนเฉพาะบริเวณด้านในซอก

- การกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน (Intergranular corrosion)

การกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนมักจะเกิดกับท่อเหล็กกล้าไร้สนิมที่ได้รับการ Heat treatment มาอย่างไม่ถูกต้อง ตัวอย่างเช่น การเชื่อมเป็นเวลานาน ทำให้คาร์บอนที่เจืออยู่ในเหล็กกล้าไร้สนิมสามารถเข้าไปแพร่จับกับโครเมียม เกิดเป็นสารประกอบที่โครเมียมลดลงซึ่งอาจจะต่ำกว่า 12 เปอร์เซ็นต์ ทำให้บริเวณนั้นไม่มีคุณสมบัติที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิม ส่งผลให้ความต้านทานต่อการกัดกร่อนลดลงไป เมื่อเหล็กกล้าไร้สนิมสัมผัสกับสารละลายที่เอื้อต่อการกัดกร่อน บริเวณข้างขอบเกรนจะถูกกัดกร่อนก่อนเป็นอันดับแรก

- การกัดกร่อนเนื่องจากความเค้น (Stress corrosion cracking)

การกัดกร่อนลักษณะนี้เกิดขึ้นจากสามปัจจัยหลัก คือ ความเค้นจากแรงดึง วัสดุที่มีความอ่อนไหว และสภาพแวดล้อมที่เอื้อต่อการกัดกร่อน ระหว่างการเกิดการกัดกร่อนลักษณะแบบนี้โลหะไม่ได้ถูกรับแรงในปริมาณที่มากก็สามารถเกิดการแตกร้าวขึ้นได้

- การกัดกร่อนเนื่องจากการล้า (Corrosion fatigue)

วัสดุที่ได้รับความเค้นแบบวนรอบและใช้งานที่ระยะเวลาในสภาพแวดล้อมที่เอื้อต่อการกัดกร่อน โดยมีระดับของความเค้นที่อยู่ต่ำกว่า yield point เมื่อได้รับความเค้นเข้าไปเรื่อยๆ จนกระทั่งพื้นที่หน้าตัดของโลหะลดลงจนถึงจุดที่โลหะจะสามารถรับแรงสูงสุดได้ หลังจากนั้นจะเปราะและแตกอย่างรวดเร็ว

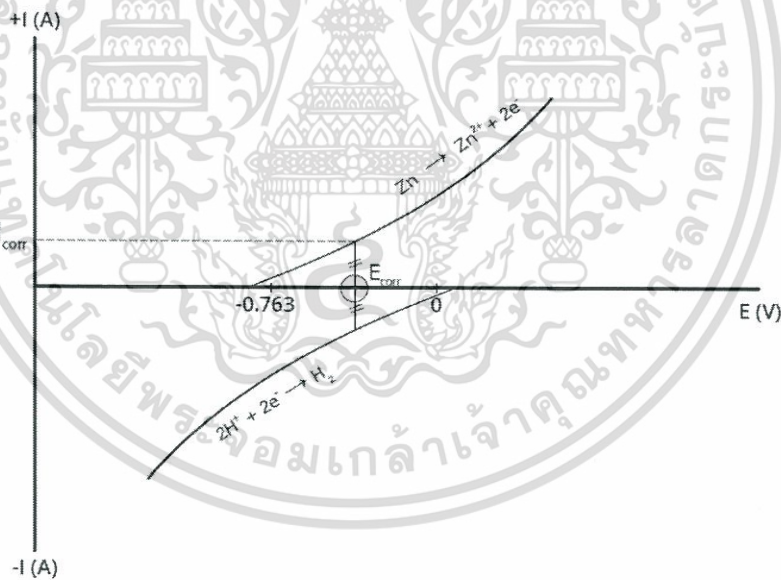
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความเสียหายจากไฮโดรเจน (Hydrogen damage)

การกัดกร่อนแบบนี้เกิดจากอะตอมไฮโดรเจนที่แพร่เข้าไปในเนื้อโลหะ ซึ่งจะลดความเหนียวและความแข็งแรงของโลหะลง นอกจากนี้เมื่อมีการรวมตัวกันของอะตอมไฮโดรเจนภายในเนื้อโลหะจะเกิดก๊าซไฮโดรเจนที่มีแรงดันสูง โลหะจึงสามารถแตกหรือระเบิดออกได้

2.1.5 โพลาริเซชัน [7]

โพลาริเซชัน (Polarization) คือการทำนายพฤติกรรมของการกัดกร่อนของโลหะ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) และค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าจนกระทั่งโลหะเริ่มเกิดการกัดกร่อนเราจะเรียกว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) ที่จุดนี้ก็จะได้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนได้ ซึ่ง E_{corr} คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่โลหะเริ่มเกิดการกัดกร่อน ซึ่งถ้าโลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนต่ำจะไวต่อการกัดกร่อนมากกว่าโลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนสูง โดย E_{corr} เป็นค่าศักย์ไฟฟ้าที่มีอัตราการรวมของปฏิกิริยาทั้งหมดในส่วนของแอโนดิกเท่ากับอัตราการรวมของปฏิกิริยาทั้งหมดในส่วนของแคโทดิก ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดการกัดกร่อนที่สมดุล และ I_{corr} เป็นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่จุด E_{corr}



รูปที่ 2.1 กราฟโพลาริเซชัน [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐาน [7]

ครึ่งเซลล์ของปฏิกิริยารีดักชัน	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
$PbO_2(s) + 4H^+_{(aq)} + 2e^- \rightarrow Pb^{2+}_{(aq)} + 2H_2O$	+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
$2Hg^{2+}_{(aq)} + 2e^- \rightarrow Hg^{2+}_{(aq)}$	+0.91
$Hg^{2+}_{(aq)} + 2e^- \rightarrow Hg(l)$	+0.85
$Ag^+_{(aq)} + e^- \rightarrow Ag(s)$	+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
$Sn^{4+}_{(aq)} + 2e^- \rightarrow Sn^{2+}_{(aq)}$	+0.15
$2H^+_{(aq)} + 2e^- \rightarrow H_2(g)$	0.00
$Fe^{3+}_{(aq)} + 3e^- \rightarrow Fe(s)$	-0.04
$Pb^{2+}_{(aq)} + 2e^- \rightarrow Pb(s)$	-0.13
$Sn^{2+}_{(aq)} + 2e^- \rightarrow Sn(s)$	-0.14
$Ni^{2+}_{(aq)} + 2e^- \rightarrow Ni(s)$	-0.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครึ่งเซลล์ของปฏิกิริยารีดักชัน	E^0 (V)
$\text{Co}^{2+}_{(aq)} + 2e^- \rightarrow \text{Co}_{(s)}$	-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

2.1.6 กฎของฟาราเดย์ [8]

เราอาจเขียนปฏิกิริยาการกัดกร่อนโลหะ M ไปเป็นไอออน M^{n+} ในสารละลายได้ว่า



จากสมการดังกล่าวจะเห็นว่า การกัดกร่อนโลหะ M ไปเป็น M^{n+} จำนวน 1 โมล เกิดขึ้นพร้อมกับการปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปฏิกิริยาซึ่งสามารถวัดได้จากการทดลองจำนวน n โมล ถ้าเราสามารถวัดได้ในระยะเวลาหนึ่งๆ อิเล็กตรอนถูกปลดปล่อยออกมาเท่าใด ก็จะสามารถเทียบหา M^{n+} ที่เกิดขึ้นในสารละลาย หรือ M ที่ถูกกัดกร่อนออกมาได้ การวัดค่าหาประจุไฟฟ้าที่วิ่งผ่านพื้นที่หน้าตัดที่พิจารณาต่อหนึ่งหน่วยเวลาหนึ่งๆ ก็คือ การวัดค่ากระแสไฟฟ้า โดยกระแสไฟฟ้าที่วัดได้สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$m = \frac{Ita}{nF} \quad (2.5)$$

โดยที่

m = มวล, g

I = กระแสไฟฟ้า, A

T = เวลา, s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

a = มวลอะตอม, g/mol

n = จำนวนสมมูล, n

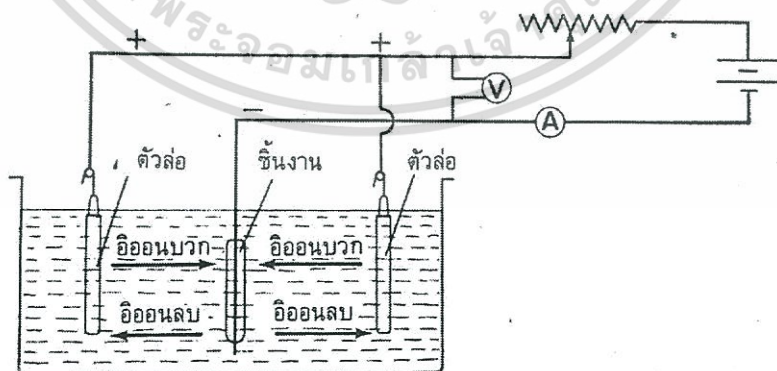
F = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,500 คูลอมป์/จำนวนสมมูล), C/n

สมการที่ 2.5 คือ กฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่วัดได้จากการทดลองกับมวลที่ถูกกัดกร่อนต่อเวลา โดยจากการทดลองเราสามารถหากระแสการกัดกร่อนได้ จากกระแสดังกล่าวเราสามารถใช้อัตราของฟาราเดย์ในการแปลงค่ากระแสในหน่วย A ไปเป็นอัตราการกัดกร่อนในหน่วยมวลต่อเวลา และจากอัตราการกัดกร่อนดังกล่าว เราสามารถแปลงไปเป็นอัตราการกัดกร่อนในหน่วยอื่น ๆ เช่น ความหนาของชั้นงานที่ลดลงในหนึ่งปี

2.2 การเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า [9]

2.2.1 หลักการเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า

การเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating) หมายถึง การนำเอาชิ้นงานหรือวัสดุที่สามารถนำไฟฟ้าได้มาเคลือบผิวด้วยโลหะโดยอาศัยไฟฟ้ากระแสตรงเข้าช่วย ซึ่งมีหลักการง่าย ๆ คือนำชิ้นงานที่จะทำการเคลือบต่อเข้ากับขั้วลบของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนโลหะที่จะไปเคลือบผิวบนชิ้นงานจะต่อเข้ากับขั้วบวก (แต่ขั้วบวกไม่จำเป็นจะต้องเป็นโลหะชนิดเดียวกันกับโลหะที่นำไปเคลือบบนชิ้นงานเสมอ) เรียกว่า ตัวล่อ นำชิ้นงานและตัวล่อจุ่มลงไปในน้ำยาชุบ แล้วปรับปริมาณทางไฟฟ้าคือแรงเคลื่อนและกระแสไฟฟ้าให้เหมาะสม ทำให้ไอออนของโลหะที่จะเคลือบบนชิ้นงานวิ่งไปยังขั้วลบที่เป็นชิ้นงาน แล้วรับอิเล็กตรอนที่ผิวของชิ้นงานกลายเป็นโลหะเคลือบติดอยู่บนผิวของชิ้นงาน ส่วนขั้วบวกถ้าเป็นโลหะชนิดเดียวกับโลหะที่นำไปเคลือบที่ผิวของชิ้นงาน จะละลายลงสู่น้ำยาชุบในรูปของไอออนบวก จากหลักการข้างต้นสามารถจะเขียนเป็นแผนภาพได้ดังนี้



รูปที่ 2.2 หลักการเคลือบอย่างง่าย [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาจากรูปจะเห็นได้ว่า น้ำยาเคลือบต้องนำไฟฟ้าได้ จึงจะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลได้ครบวงจร ดังนั้น ในน้ำยาเคลือบต้องมีสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบของน้ำยาเคลือบชนิดที่แตกตัวเป็นไอออนบวก และไอออนลบได้ดีเมื่อละลายน้ำ ซึ่งไอออนเหล่านี้จะเป็นตัวนำไฟฟ้าให้ไหลครบวงจร คือ ไอออนบวกจะนำกระแสไฟฟ้าบวกไปยังขั้วลบหรือเคลื่อนที่ไปยังขั้วลบเพื่อรับอิเล็กตรอนจากขั้วลบ ส่วนไอออนลบจะวิ่งไปยังขั้วบวกเพื่อจ่ายอิเล็กตรอนให้กับขั้วบวก ปรากฏการณ์เช่นนี้จะเกิดขึ้นตลอดเวลาในขณะที่ทำการเคลือบผิวโลหะ ดังนั้น โดยทั่วไปแล้ว น้ำยาเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้าจะประกอบด้วยสารเคมีที่สำคัญ ๆ ดังนี้

- สารที่เป็นตัวกำเนิดโลหะ น้ำยาเคลือบแต่ละชนิดจะมีตัวกำเนิดโลหะไม่เหมือนกัน ขึ้นอยู่ว่าต้องการเคลือบผิวด้วยโลหะชนิดใด เช่น ถ้าต้องการเคลือบผิวโลหะด้วยทองแดง ก็จะต้องมีเกลือของโลหะทองแดงเป็นตัวกำเนิดโลหะ คือ คอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) ละลายอยู่ในน้ำยาเคลือบ หรือถ้าต้องการชุบเคลือบผิวโลหะด้วยนิกเกิล ก็จะต้องมีนิกเกิลซัลเฟต (NiSO_4) หรือนิกเกิลคลอไรด์ (NiCl_2) ละลายอยู่ในน้ำยาเคลือบ สารที่เป็นตัวกำเนิดโลหะเหล่านี้เป็นสารหลักที่สำคัญที่สุดในเรื่องของการเคลือบ เพราะว่าสารเหล่านี้จะแตกตัวเป็นไอออนบวก และไอออนลบเมื่ออยู่ในน้ำยาเคลือบ โดยไอออนบวก คือ Cu^{2+} หรือ Ni^{2+} เป็นตัวเคลื่อนที่ไปเคลือบเกาะอยู่บนชิ้นงานที่เป็นโลหะทองแดงหรือนิกเกิล

- สารที่ช่วยเพิ่มการนำไฟฟ้า แม้ว่าสารที่เป็นตัวกำเนิดโลหะจะแตกตัวและนำไฟฟ้าได้ แต่ก็ยังนำได้ไม่มากนัก จะต้องมีสารที่ช่วยเพิ่มการนำไฟฟ้าใส่ลงไป ในน้ำยาเคลือบด้วยสารพวกนี้ ส่วนใหญ่จะเป็นกรดแก่ หรือเบสแก่ชนิดต่าง ๆ ซึ่งจะช่วยให้อัตราเร็วของการเกาะเคลือบผิวดีขึ้น

- สารควบคุมระดับพีเอช (Buffer) น้ำยาเคลือบผิวโลหะแต่ละชนิดจะอยู่ในสภาพการใช้งานได้ดีหรือไม่ต้องมีค่าพีเอช (pH) อยู่ในช่วงที่เหมาะสมตามแต่ละชนิดของน้ำยาเคลือบ ดังนั้น ถ้าไม่ต้องการให้พีเอชของน้ำยาเคลือบเปลี่ยนแปลงมากเกินไป ก็ควรต้องใส่สารควบคุมระดับค่าพีเอชลงไป ตัวอย่างของสารควบคุมค่าพีเอชของน้ำยาชุบ เช่น โซเดียมคาร์บอเนตในน้ำยาเคลือบทองแดงแบบต่างหรือกรดบอริกในน้ำยาเคลือบนิกเกิล เป็นต้น

- น้ำยาเงา (Brightener) ในการเคลือบส่วนมากจะต้องการความเงาของชิ้นงานผลิตภัณฑ์ที่นำมาเคลือบ ดังนั้น จึงต้องทำการเติมน้ำยาเงาลงไปในน้ำยาเคลือบ เพื่อให้ผิวของชิ้นงานที่ได้มีลักษณะแวววาว และเงาสวยงาม

- สารรักษาระดับการเคลือบผิวให้สม่ำเสมอ (Leveller) ส่วนมากจะเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่จะไม่มีซัลเฟอร์รวมอยู่ และสารที่เป็นที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่ คูมาริน (Coumarin) ซึ่งจะช่วยให้ผิวของชิ้นงานที่เคลือบมีความเป็นรูหรือหลุมให้น้อยลง

- สารเพิ่มความชื้น (Wetting agent) เป็นสารซึ่งมีความสำคัญมากในการเคลือบโลหะให้เงา เพราะสารเพิ่มความชื้นจะไปลดแรงตึงผิวของสารละลายให้ลดลง จะทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่เกิดรอยต่าง การใช้สารเพิ่มความชื้นจำเป็นต้องใช้ในอัตราส่วนที่เหมาะสม เพราะถ้าใช้ไม่เหมาะสมแล้วจะทำให้ความเงาสูญเสียไป หรือทำให้การรักษาระดับการเคลือบผิวไม่ดี

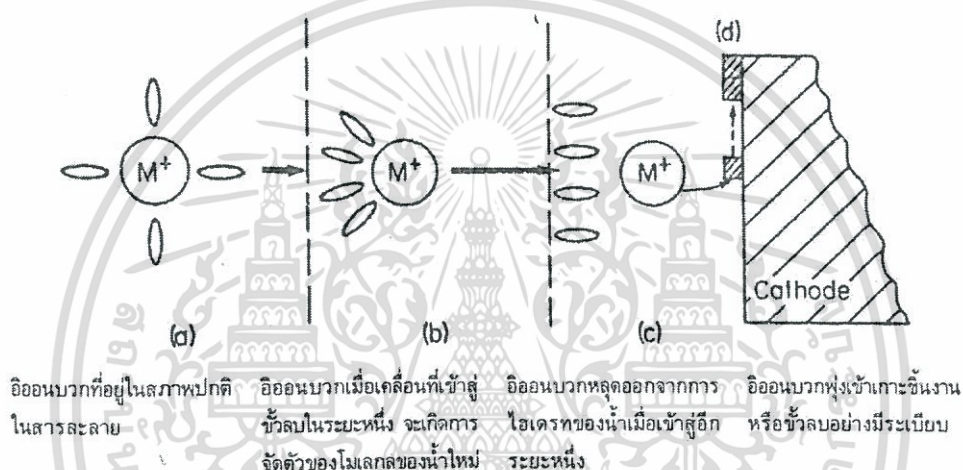
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 ลักษณะการเข้าเกาะเคลือบผิวที่ขั้วลบ

ลักษณะการเข้าเกาะเคลือบผิวของไอออนบวก (M^+) ที่ไปเข้าเกาะเคลือบผิวที่ขั้วลบ ซึ่งเป็นไอออนของโลหะจะแบ่งพิจารณาได้เป็น 2 กรณี คือ

2.2.2.1 น้ำยาเคลือบที่เป็นเกลือแบบธรรมดา

น้ำยาเคลือบที่เป็นเกลือแบบธรรมดา ไอออนบวกจะรวมอยู่กับโมเลกุลของน้ำซึ่งเป็นตัวทำละลายที่เรียกว่าเกิดการไฮเดรต (Hydrate) โดยไอออนบวกที่ถูกไฮเดรตหรือถูกห่อหุ้มด้วยโมเลกุลของน้ำยังคงแสดงจำนวนประจุเท่าเดิม เช่น Cu^{2+} เมื่อถูกไฮเดรตจะกลายเป็น $Cu(H_2O)_4^{2+}$ ซึ่งเมื่อไอออนบวกในรูปของไฮเดรตเคลื่อนที่เข้าหาขั้วลบเพื่อจะทำการเคลือบผิวที่ขั้วลบ จะเกิดตามลำดับขั้นตอนดังรูปข้างล่างนี้



รูปที่ 2.3 ลักษณะการเข้าเกาะเคลือบผิวที่ขั้วลบของไอออนบวก (M^+) ที่เป็นเกลือแบบธรรมดา [9]

2.2.2.2 น้ำยาเคลือบที่เป็นเกลือเชิงซ้อน

น้ำยาเคลือบจำนวนมากที่ไอออนของโลหะที่จะไปเคลือบบนผิวของชิ้นงานอยู่ในรูปของเกลือเชิงซ้อน เช่น เกลือเชิงซ้อนไซยาไนด์ของทองแดง เงิน สังกะสี แคดเมียม ทอง เกลือเชิงซ้อนไฟโรฟอสเฟตของทองแดง เกลือเชิงซ้อนฟลูออโบเรตของตะกั่ว ทองแดง ดีบุก นิกเกิล เป็นต้น ลักษณะการเข้าเกาะที่ขั้วลบของไอออนเชิงซ้อนค่อนข้างจะสลับซับซ้อน แต่พอจะสรุปได้ว่า ไอออนของโลหะเมื่อเคลื่อนที่เข้าหาขั้วลบได้ระยะหนึ่งจะเปลี่ยนจากสภาพที่เป็นไอออนเชิงซ้อนไปเป็นไอออนอิสระแล้วจึงถูกไฮเดรตด้วยโมเลกุลของน้ำ จากนั้นก็จะมีกลไกการเคลื่อนที่เข้าหาขั้วลบเหมือนกับน้ำยาเคลือบที่เป็นเกลือแบบธรรมดาตามข้อ ก.

2.2.3 ประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าที่ขั้วลบและขั้วบวก

ประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าที่ขั้วลบและขั้วบวกบางที่เรียกสั้นๆ ว่า ประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้า หรือบางที่เรียกว่า ประสิทธิภาพของขั้วลบหรือประสิทธิภาพของขั้วบวก ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าที่ขั้วลบและที่ขั้วบวกนี้ส่วนใหญ่จะมีค่าแตกต่างกัน โดยประสิทธิภาพนี้อาจจะนิยามได้ 2 ลักษณะ คือ ประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้านั้นมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในการเคลือบผิวจริง ๆ ต่อปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ผ่านลงไปทั้งหมดนำไปคูณด้วยหนึ่งร้อย หรือจะนิยามว่า ประสิทธิภาพของขั้วบวก คือ ปริมาณของโลหะขั้วบวกที่ได้ละลายจริง ต่อปริมาณของโลหะขั้วบวกที่ควรละลายซึ่งเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์คูณด้วยหนึ่งร้อย หรือจะนิยามว่า ประสิทธิภาพของขั้วลบ คือ ปริมาณของสารที่มาเกาะเคลือบผิวที่ขั้วลบต่อปริมาณที่ควรละลายขั้วลบที่เป็นไปตามกฎของฟาราเดย์คูณด้วยหนึ่งร้อย

โดยปกติแล้วประสิทธิภาพจะไม่ถึงหนึ่งร้อยเปอร์เซ็นต์ทั้งที่ขั้วบวก และขั้วลบ ทั้งนี้เพราะกระแสไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปยังน้ำยาชุบไม่ได้นำไปใช้ในการละลายขั้วบวก หรือทำให้ไอออนบวกของโลหะไปเกาะที่ขั้วลบเพียงอย่างเดียว แต่ยังถูกใช้ในการไปทำให้เกิดกลไกอื่นอีกด้วย เช่น ไปแยกสลายโมเลกุลของน้ำไปทำให้เกิดก๊าซขึ้นที่ขั้วบวกหรือขั้วลบ หรือถูกเปลี่ยนไปเป็นความร้อนเกิดขึ้นในสารละลาย เป็นต้น การหาประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าที่ขั้วลบ ตัวอย่างเช่น สำหรับการเคลือบผิวโครเมียม หากใช้กระแสไฟฟ้าที่ผ่านลงไปในการละลายทั้งหมดคือ 2 ฟาราเดย์ ถ้าเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ควรมีโลหะไปเกาะที่ขั้วลบเท่ากับ 17.334 กรัม แต่จากผลการทดลองพบว่ามีโลหะไปเกาะโครเมียมจริง ๆ ทั้งหมด 4.292 กรัม ดังนั้น ประสิทธิภาพที่ขั้วลบจะมีค่า $(4.292/17.334) \times 100$ เท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์ หรือสำหรับการหาประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าที่ขั้วบวกก็สามารถทำได้เช่นเดียวกัน เช่น การเคลือบผิวโลหะอย่างหนึ่งพบว่า เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าลงไปในสารละลาย 0.5 ฟาราเดย์ โลหะที่เป็นขั้วบวกละลายไป 80 กรัม แต่ถ้าคำนวณตามกฎของฟาราเดย์แล้วจะต้องละลายไป 100 กรัม ดังนั้นประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าที่ขั้วบวกมีค่าเท่ากับ $(80/100) \times 100 = 80$ เปอร์เซ็นต์ เป็นต้น

ในการเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพดีที่สุุดนั้น ประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าที่ขั้วบวกและขั้วลบควรจะมีค่า 100 เปอร์เซ็นต์ทั้งสองขั้ว ซึ่งจะเป็นลักษณะว่า ประสิทธิภาพที่ขั้วบวกและที่ขั้วลบจะต้องเท่ากัน เพราะทั้งสองกรณีนี้คือการรักษาปริมาณไอออนที่เป็นแหล่งกำเนิดของโลหะคงที่ และเท่าเดิมเสมอ เนื่องจากปริมาณโลหะที่ไปเคลือบผิวที่ขั้วลบต้องเท่ากับปริมาณโลหะที่ละลายจากขั้วบวกลงไปสู่สารละลาย แต่ถ้าประสิทธิภาพของขั้วบวก และขั้วลบไม่เท่ากัน จะทำให้ปริมาณของไอออนที่เป็นแหล่งกำเนิดโลหะนั้นมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ซึ่งทำให้น้ำยาเคลือบเสื่อมสภาพเร็ว แต่ยังมีวิธีแก้ปัญหาเหล่านี้ได้ ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของขั้วบวก และขั้วลบมีค่าใกล้เคียงกันหรือเท่า ๆ กัน

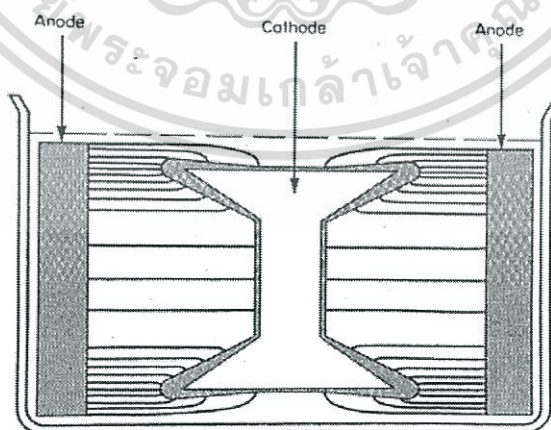
2.2.4 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า

ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า คือ ปริมาณของกระแสไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ซึ่งปกติแล้วจะแสดงในหน่วยของแอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร (A/dm^2) หรือแอมแปร์ต่อตารางฟุต (A/ft^2) และถ้าไม่ระบุว่าเป็นความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ขั้วบวกหรือลบ ก็มักจะหมายถึงความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ขั้วลบ ในน้ำยาเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้าแต่ละชนิด จะกำหนดการทำงานเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไว้ชัดเจนว่าต้องเคลือบที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเท่าใด ดังนั้น ก่อนทำการเคลือบผิวจึงต้องคำนวณพื้นที่ผิวของชิ้นงานหรือที่ขั้วลบก่อน แล้วนำค่าพื้นที่นี้ไปคำนวณหากระแสไฟฟ้าว่าต้องใช้เท่าใดจึงจะทำให้ได้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าตามที่กำหนด เช่น ในการเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้าชนิดหนึ่ง จะต้องทำการเคลือบที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 8 A/dm^2 และปรากฏว่าพื้นที่ผิวหน้าของชิ้นงานที่จะทำการเคลือบทั้งหมดเท่ากับ 5 ตารางเดซิเมตร ดังนั้น ในการเคลือบนี้จะต้องใช้กระแสไฟฟ้าเท่ากับ $8 \times 5 = 40$ แอมแปร์ จึงจะอยู่ในสภาวะการเคลือบที่ดี โดยปกติแล้ว ถ้าการเคลือบชนิดเดียวกันมีสภาวะการทำงานของกรรการเคลือบบางอย่างแตกต่างกันก็อาจจะใช้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าแตกต่างกันไป เช่น อุณหภูมิสูงและมีการกวนน้ำยาอย่างแรงก็จะชอบที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสูงกว่าปกติได้ ซึ่งจะทำให้มีอัตราเร็วของการเคลือบผิวเร็วขึ้น แต่ทางปฏิบัติทั่ว ๆ ไปแล้ว การเคลือบที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่ำจะเคลือบผิวได้เป็นระเบียบและสวยงามกว่า แต่ก็เสียเวลาในการเคลือบมากขึ้น

2.2.5 การกระจายของกระแสไฟฟ้า

เนื่องจากชิ้นงานที่จะทำการเคลือบมีรูปร่างแตกต่างกันออกไป เช่น แบน กลม กลวง โค้งแหลม จะพบว่าจุดต่าง ๆ บนชิ้นงานจะห่างจากขั้วลบไม่เท่ากัน จุดใดที่อยู่ใกล้ขั้วลบ กระแสไฟฟ้านั้นจะเดินทางได้สะดวก ทำให้มีลักษณะการกระจายของกระแสไฟฟ้าบริเวณจุดที่อยู่ใกล้มากกว่าจุดที่อยู่ไกล และถ้าหากบริเวณใดที่มีลักษณะเป็นมุมแหลม จะมีการกระจายของกระแสไฟฟ้าในบริเวณนั้นค่อนข้างแน่นมากขึ้น เนื่องจากลักษณะการกระจายของกระแสไฟฟ้า คือ การเคลื่อนที่ของไอออนโลหะที่ไปเกาะยังขั้วลบ ดังนั้น บริเวณของขั้วลบที่อยู่ใกล้ขั้วบวกหรือบริเวณที่มีลักษณะเป็นมุมแหลมจะทำให้มีลักษณะการเกาะเคลือบผิวของโลหะที่บริเวณนั้นมากกว่าบริเวณอื่น ๆ จึงทำให้ผิวที่เคลือบนั้นหนากว่าที่อื่นด้วย ซึ่งอาจจะแสดงลักษณะการกระจายของกระแสไฟฟ้าและความหนาที่เคลือบบนชิ้นงานได้ดังรูปด้านล่างนี้



รูปที่ 2.4 ลักษณะการกระจายของกระแสไฟฟ้าและความหนาที่เคลือบในบริเวณต่าง ๆ ของชิ้นงาน

[9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปจะเห็นว่า บริเวณของชิ้นงานส่วนที่เป็นมุมแหลมหรืออยู่ใกล้ขั้วบวกจะมีการกระจายของกระแสไฟฟ้าหนาแน่นมากที่สุดและมีการเกาะเคลือบผิวหนาที่สุด ซึ่งถ้าต้องการให้การเคลือบออกมาในลักษณะเช่นนี้ ก็จะต้องการแก้ไขอะไร และถ้าต้องการให้มีลักษณะของการเคลือบผิวที่มีความหนาแน่นเท่า ๆ กัน ตลอดชิ้นงาน สามารถแก้ไขได้โดยการหาแผ่นวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำยาเคลือบมากั้นกลางระหว่างขั้วบวกกับขั้วลบตรงบริเวณที่อยู่ใกล้กันเพื่อลดความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าให้เหลือเท่า ๆ กันทุกบริเวณของขั้วลบ วัสดุที่ใช้ควรเป็นวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้า เช่น พอลิเอทิลีน พอลิไวนิลคลอไรด์ หรือพอลิพรพิลีน เป็นต้น แต่ถ้าการเกาะเคลือบผิวที่ขั้วลบไม่ทั่วหรือไม่สม่ำเสมอเป็นผลมาจากสาเหตุที่น้ำยามีกำลังการเกาะเคลือบผิวไม่ดีก็จะต้องแก้ไขโดยวิธีออกแบบขั้วบวกให้เหมาะสมเข้าช่วย คือ ออกแบบให้มีการกระจายของกระแสไฟฟ้าที่ขั้วลบให้เท่ากัน และทั่วถึงในส่วนที่ต้องการให้มีการเกาะเคลือบผิว สำหรับกำลังการเคลือบผิว หมายถึง ความสามารถในการกระจายของไอออนบวกหรือไอออนของโลหะไปเคลือบผิวบนชิ้นงานได้ทั่วถึงมากหรือน้อย ถ้า น้ำยามีกำลังการเคลือบผิวไม่ดี จะสังเกตได้จากการเคลือบชิ้นงานที่มีลักษณะกลวงหรือโค้งงอ จะพบว่าส่วนที่อยู่ลึกๆ ลงไปจะไม่เกิดการเคลือบผิว

2.3 กรดซัลฟิวริก [10]

กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid) เรียกทั่วไปว่ากรดกำมะถัน โดยไฮโดรเจนซัลเฟตมีสูตรเป็น H_2SO_4 เป็นสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นกรดแก่ ไม่มีสี มีกลิ่นฉุน ละลายในน้ำได้ นิยมใช้มากในภาคอุตสาหกรรมเหมืองแร่ อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมฟอกย้อม และกระบวนการบำบัดและปรับปรุงน้ำเสีย รวมไปถึงนำมาใช้ในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากกรดซัลฟิวริกจัดเป็นกรดแก่จึงมีฤทธิ์ในการกัดกร่อนโลหะต่าง ๆ ได้ดี และเมื่อการสัมผัสเกิดจากกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นจะทำให้เกิดออกไซด์ของกำมะถัน และไฮโดรเจนซึ่งพร้อมจะลุกไหม้หรือระเบิดได้หากมีความร้อน และประกายไฟ โดยมีสมบัติเฉพาะตัวดังนี้

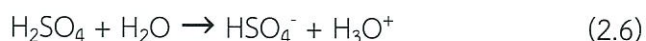
- 1) มวลโมเลกุล : 98.08 กรัม/โมล
- 2) สถานะ : ของเหลว
- 3) สี : ไม่มี
- 4) กลิ่น : ไม่มี
- 5) จุดเดือด : 276 องศาเซลเซียส
- 6) จุดหลอมเหลว : -1 องศาเซลเซียส
- 7) ความถ่วงจำเพาะ : 1.84 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
- 8) ความหนืด : 26.9 มิลลิเมตรปรอท
- 9) ความหนาแน่นไอ : 3.4
- 10) ความเป็นกรด : 1 ที่ 1 เปอร์เซนต์ โดยน้ำหนัก
- 11) จุดวาบไฟ : ไม่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

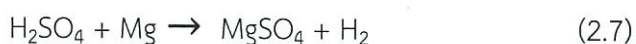
12) ความสามารถในการละลาย : ละลายน้ำได้

13) สารที่เข้ากันไม่ได้ : ต่างแก่ น้ำ สารอินทรีย์ โลหะต่างๆ

กรดซัลฟิวริกเมื่อละลายน้ำจะทำให้สารละลายมีสภาพเป็นกรด ดังสมการ



กรดซัลฟิวริกเมื่อสัมผัสกับโลหะจะทำให้เกิดก๊าซ และเกลือของโลหะชนิดนั้น เช่น



กรดซัลฟิวริกเมื่อสัมผัสกับธาตุโลหะจะทำให้เกิดออกไซด์ของธาตุนั้น เช่น



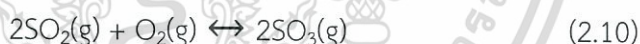
2.3.1 กระบวนการผลิต

2.3.1.1 Contact process

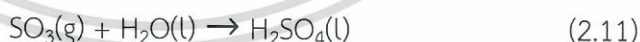
ขั้นแรก เผาซัลเฟอร์ (S) เพื่อผลิตซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2)



จากนั้นออกไซด์ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) เป็น ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) โดยใช้ ออกซิเจน (O_2)



จากนั้นละลายซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) โดยตรงด้วยน้ำ (H_2O) เพื่อผลิตกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)

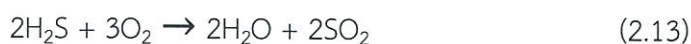


2.3.1.2 Wet sulfuric acid process

ขั้นแรกเผาซัลเฟอร์ (S) เพื่อผลิตซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2)

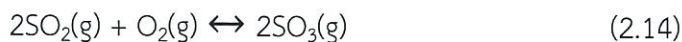


หรือเผาไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) เพื่อผลิตซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นออกซิไดซ์ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) เป็น ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) โดยใช้ ออกซิเจน (O_2)



จากนั้นให้ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ทำปฏิกิริยา Hydration เพื่อผลิตกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)



จากนั้นให้กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ควบแน่นเป็นของเหลวที่ 97-98% H_2SO_4



2.4 นิกเกิลและโลหะผสมนิกเกิล [11]

2.4.1 นิกเกิล

นิกเกิล (Nickel) เป็นโลหะที่มีความต้านทานต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งก็คือ ความต้านทานต่อการกัดกร่อนสูง เป็นโลหะที่มีสีขาว มีความเหนียว และอ่อนตัวค่อนข้างสูงสามารถขึ้นรูปเย็นได้ค่อนข้างง่าย นอกจากนี้นิกเกิลยังสามารถละลายเข้ากับโลหะอื่นได้ง่าย และให้สารละลายของแข็งที่มีความเหนียว ประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ นิกเกิลจะใช้สำหรับอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กกล้าไร้สนิม และเหล็กกล้าผสม ส่วนที่เหลือจะใช้สำหรับทำโลหะผสมนิกเกิลต่าง ๆ ที่ใช้ใน งานพิเศษที่ต้องการความต้านทานต่อการกัดกร่อนสูง ๆ และใช้เคลือบผิวเหล็ก (Electroplating) โดยอาศัยคุณสมบัติเทียบเท่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ที่เหนียวกว่าตรงที่สามารถรักษาความเหนียวได้ดี ในช่วงอุณหภูมิต่ำ คุณสมบัติตัวนำไฟฟ้าของนิกเกิลจะสูงไม่เท่าทองแดงและอลูมิเนียม แต่ก็สูงพอที่จะใช้ได้ในบางกรณีที่ขั้วสายหรือเทอร์มินอลในงานอิเล็กทรอนิกส์ ในบรรยากาศใช้งานถ้ามีก๊าซของกำมะถันอยู่ด้วยจะมีส่วนทำให้นิกเกิลขาดความต้านทานที่ดี และบางทีอาจจะเปราะแตกง่าย ส่วนใหญ่ไม่นิยมนิกเกิลในสภาพโลหะบริสุทธิ์ เพราะนิกเกิลมีราคาสูงเมื่อเทียบกับโลหะชนิดอื่น ๆ จะใช้ในลักษณะโลหะผสม และเฉพาะกรณีที่มีความจำเป็นเพื่ออาศัยคุณสมบัติพิเศษของนิกเกิลเท่านั้น

2.4.1.1 สมบัติทางฟิสิกส์

- 1) น้ำหนักอะตอม : 58.69
- 2) โครงสร้างระบบผลึก : face center cubic ($a=3.516$ อังสตรอม)
- 3) ความหนาแน่น (25 องศาเซลเซียส) : 8.89 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
- 4) อุณหภูมิหลอมเหลว : 1435 – 1445 องศาเซลเซียส
- 5) จุดเดือดกลายเป็นไอ : 2730 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) ความร้อนจำเพาะ (27 - 100 องศาเซลเซียส) : 0.130 แคลอรีต่อกรัมองศาเซลเซียส

7) ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย : 73.8 แคลอรีต่อกรัม

8) สัมประสิทธิ์การขยาย (27 - 100 องศาเซลเซียส) : 13×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส

9) ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (20 องศาเซลเซียส) : 9.5 ไมโครโอมเซนติเมตร

10) สัมประสิทธิ์ตัวนำความร้อน (27 - 100 องศาเซลเซียส) : 0.145 แคลอรีเซนติเมตรต่อตารางเซนติเมตรองศาเซลเซียส

2.4.1.2 สมบัติเชิงกล

1) ความแข็งแรงหรือความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) : 47 กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร

2) พิกัดความยืดหยุ่น (Elastic limit) : 15 กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร

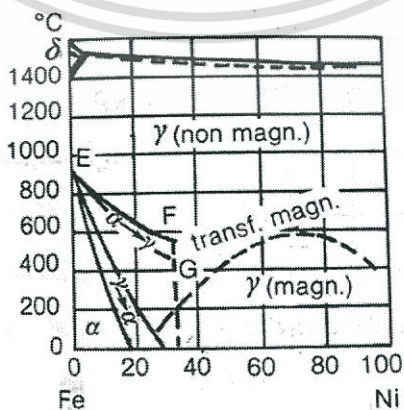
3) อัตราการยืดตัว (Percent elongation) : 40 เปอร์เซ็นต์

4) ความแข็ง (Hardness) : 110 HB

5) โมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) : 21000 กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร

2.4.2 โลหะผสมนิกเกิล-เหล็ก

นิกเกิลกับเหล็กสามารถละลายได้ดีในในสภาวะหลอมละลายและในสภาวะของแข็งซึ่งจะให้สารละลายของแข็ง โดยมีระบบผลึกเป็น FCC หรืออาจจะเรียกสารละลายของแข็งนี้เป็นออสเทนไนต์ (γ) โดยมีอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติแม่เหล็กแปรไปตามปริมาณนิกเกิลโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กทุกส่วนผสมที่อุณหภูมิปกติแม่เหล็กจะคูตติต ส่วนใหญ่แผนภูมิสมดุลงานที่นำมาศึกษา ลักษณะโครงสร้างของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็ก จะเป็นแผนภูมิสมดุลงานของเหล็ก-นิกเกิล ดังภาพที่ 2.5 เพราะทางด้านนิกเกิลปริมาณมากจะไม่มีรายละเอียดอะไรนอกจากเส้นการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติแม่เหล็ก



รูปที่ 2.5 แผนภูมิสมดุลงานเหล็ก-นิกเกิล [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางด้านเหล็กปริมาณมากจะมีเส้นการเปลี่ยนแปลงจาก $\alpha \leftrightarrow \gamma$ และอาณาเขตของ $\alpha + \gamma$ ซึ่งในเอกสารอ้างอิงจากหลายๆ แหล่งจะกล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงจาก $\gamma \rightarrow \alpha$ และจาก $\alpha \rightarrow \gamma$ จะเกิดได้ไม่สมบูรณ์ ถ้าอัตราการเย็นตัวไม่อยู่ในสภาวะสมดุล อาจจะมีปรากฏโครงสร้างมาร์เทนไซต์ของนิเกิล หมายถึงโครงสร้างที่ γ เปลี่ยนไปเป็น α ได้ไม่สมบูรณ์ซึ่งจะมีผลทางด้านคุณสมบัติเชิงกลของโลหะผสม

โลหะผสมนิเกิล-เหล็กที่มีส่วนผสมของนิเกิลตั้งแต่ 20 ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ จะมีที่ใช้ในงานวิศวกรรมมาก โดยมีโลหะผสมให้คุณสมบัติพิเศษทางด้าน การขยายตัว (Thermal expansion) คุณสมบัติแม่เหล็ก และคุณสมบัติยืดตัวเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง (Thermoelastic) ดังตัวอย่างเช่น

Permalloys เป็นโลหะผสมที่มีนิเกิลอยู่ในช่วง 60-90 เปอร์เซ็นต์ โดยมีเหล็กผสมไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์ มีคุณสมบัติยอมให้ฟลักซ์แม่เหล็กผ่านได้สูง (High magnetic permeability) และเมื่อถูกขาร์จด้วยอำนาจแม่เหล็กจะมีฮิสเทอรีซิสที่แคบมากจึงเหมาะสำหรับใช้ในงานด้านอุปกรณ์การสื่อสารแกนของทรานสฟอร์มเมอร์

Invar เป็นโลหะผสมที่มีนิเกิลประมาณ 36 เปอร์เซ็นต์ เป็นโลหะผสมที่มีอัตราการขยายตัวน้อยมากในช่วงอุณหภูมิไม่เกิน 100 องศาเซลเซียส จึงมีความเหมาะสมในการทำเครื่องมือวัดความยาวและมาตรฐานของเครื่องมือต่าง ๆ ส่วนประกอบของนาฬิกา (Pendulum rod) และส่วนประกอบของ Bimetallic ที่ใช้ควบคุมอุณหภูมิของเตาเผา (Invar มาจากคำว่า Invariable)

ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของ โลหะผสมนิเกิลและเหล็ก จาก 20-100 องศาเซลเซียสมีค่าน้อยกว่า 1.3×10^{-6} องศาเซลเซียส อุณหภูมิคูรี คือ 230 องศาเซลเซียส และความหนาแน่น 8.1 กิโลกรัมต่อลิตร

2.5 ชนิดของสภาวะแม่เหล็ก [12]

สนามแม่เหล็กจะเกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน กล่าวคือ เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านเส้นลวดตัวนำ สนามแม่เหล็กจะเกิดขึ้นรอบ ๆ ลวดตัวนำ และในทำนองเดียวกันสภาวะแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในวัสดุก็เกิดขึ้นเนื่องมาจากการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอนเอง และการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนรอบ nuclei สภาวะแม่เหล็กแบ่งออกได้เป็นลักษณะดังนี้

2.5.1 Diamagnetism

การที่สนามแม่เหล็กจากภายนอกมากระทำต่ออะตอมของวัสดุจะทำให้อิเล็กตรอนที่หมุนรอบนิวเคลียสของอะตอมเกิดสภาวะเสถียรสมดุล ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กเล็ก ๆ ขึ้นภายในอะตอม โดยเป็นสมบัติของแม่เหล็กที่อ่อนแอที่สุด ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปแบบที่ไม่ถาวร (Nonpermanent) หรือถาวร (Permanent) ขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะต้านกับสนามแม่เหล็กจากภายนอก ซึ่งผลจากการกระทำดังกล่าวทำให้เกิดผลของแม่เหล็กในทางลบซึ่งจะเรียกว่าไดอะแมกเนติก (Diamagnetism) ผลของสภาวะแม่เหล็กแบบไดอะแมกเนติกนี้ จะทำให้ค่าความไวแม่เหล็กเป็นลบเล็กน้อย หรือทำให้อิเล็กตรอนที่หมุนรอบนิวเคลียสของอะตอมเกิดการเสถียรสมดุลเล็กน้อย ซึ่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นผลทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กเล็ก ๆ ขึ้นในอะตอม ซึ่งค่าของโมเมนต์แม่เหล็ก (Magnetic moment) มีค่าน้อยมาก และอยู่ในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับสนามแม่เหล็กภายนอก สภาวะแม่เหล็กแบบไดอะแมกเนติกสามารถเกิดได้กับวัสดุทุกชนิด แต่จะถูกหักล้างด้วยผลสภาวะแม่เหล็กเชิงบวก อย่างไรก็ตาม พฤติกรรมสภาวะแม่เหล็กแบบไดอะแมกเนติก นั้นไม่มีความสำคัญต่องานทางด้านวิศวกรรมเท่าใดนัก

2.5.2 Paramagnetism

วัสดุที่สามารถแสดงค่าความไวแม่เหล็กในเชิงบวกเล็กน้อยเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก จะถูกเรียกว่าพาราแมกเนติก (paramagnetism) และสภาวะแม่เหล็กแบบพาราแมกเนติกของวัสดุจะหายไปเมื่อวัสดุนั้นถูกนำออกจากสนามแม่เหล็ก

วัสดุที่มีสภาวะแม่เหล็กแบบพาราแมกเนติกเกิดจากการเรียงตัวของโมเมนต์ขั้วคู่แม่เหล็กของอะตอมหรือโมเลกุลของวัสดุเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก และมักมีค่าความไวแม่เหล็ก (Magnetic susceptibility) อยู่ในช่วง 10^{-6} ถึง 10^{-2} โดยทิศทางของการเรียงตัวของโมเมนต์ขั้วคู่แม่เหล็กนี้สามารถทำให้เกิดความไม่เป็นระเบียบที่มากขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้สภาวะแม่เหล็กแบบพาราแมกเนติกนี้ลดลง

อะตอมของธาตุแทรนซิชัน และธาตุโลหะหายากบางชนิดมีอิเล็กตรอนที่ไม่มีคู่ภายในบรรจุอยู่ที่พลังงานชั้นใน ด้วยเหตุผลนี้ ทำให้ธาตุเหล่านี้ก่อให้เกิดผลของแม่เหล็กแบบพาราแมกเนติกอย่างแรง และในบางครั้งอาจจะแสดงสภาวะแม่เหล็กได้แข็งแรงเช่นเดียวกับวัสดุจำพวกเฟอร์โรแมกเนติก และเฟอร์ริแมกเนติก

2.5.3 Ferromagnetism

ดังที่ได้กล่าวข้างต้นถึงสภาวะแม่เหล็กแบบไดอะแมกเนติก และพาราแมกเนติกจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นได้เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกถูกใส่เข้าไป และจะยังคงสภาพสภาวะแม่เหล็กนั้นได้ตราบเท่าที่สนามแม่เหล็กนั้นยังคงอยู่ แต่ยังมีสภาพสภาวะแม่เหล็กอีกชนิดหนึ่งซึ่งถูกเรียกว่าเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetism) เป็นสภาพสภาวะแม่เหล็กที่สามารถทำให้คงอยู่ได้แม้จะไม่อยู่ในสนามแม่เหล็ก หรือทำให้หมดสภาพไปได้โดยต้องการ และมีค่าความไวแม่เหล็กสูงถึง 10^6 สภาวะแม่เหล็กแบบนี้จึงมีความสำคัญต่องานทางด้านวิศวกรรม วัสดุที่สามารถแสดงสภาวะแม่เหล็กแบบนี้ได้ และมีความสำคัญในงานอุตสาหกรรม ได้แก่ เหล็ก (Fe) โคบอลต์ (Co) และนิกเกิล (Ni) นอกจากนี้ยังมีธาตุกาโดลิเนียมซึ่งเป็นธาตุโลหะหายากที่สามารถแสดงสมบัติสภาวะแม่เหล็กแบบเฟอร์โรแมกเนติกได้

สมบัติสภาวะแม่เหล็กแบบเฟอร์โรแมกเนติกของธาตุแทรนซิชันจำพวก Fe Co และ Ni สามารถเกิดขึ้นได้เนื่องมาจากอิเล็กตรอนที่ไม่มีคู่ซึ่งอยู่ที่ระดับพลังงานชั้นในเกิดการหมุนรอบตัวเอง และจัดเรียงตัวในโครงสร้างผลึกส่วนอิเล็กตรอนที่อยู่เป็นคู่ และหมุนสวนทางกันในระดับพลังงานชั้นในซึ่งจะไม่ให้ผลของโมเมนต์ขั้วคู่แม่เหล็ก

นอกจากนี้อิเล็กตรอนที่อยู่ทีวงนอกสุดของอะตอมจะไม่แสดงผลของโมเมนต์ขั้วคู่แม่เหล็ก เพราะว่าอิเล็กตรอนนั้นเกิดพันธะทางเคมีกับอิเล็กตรอนวงนอกสุดของอะตอมอื่น ดังนั้นจึงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาจสามารถสรุปได้ว่าอิเล็กตรอนที่ไม่มีคู่ซึ่งอยู่ในระดับพลังงานชั้นในของอะตอมนั้นจะมีบทบาทที่สำคัญต่อการแสดงสถานะแม่เหล็กแบบเฟอร์โรแมกเนติก เช่น Fe Co และ Ni ซึ่งมีอิเล็กตรอนที่ไม่มีคู่อยู่ที่ชั้นระดับพลังงาน 3d จำนวน 4 3 และ 2 ตามลำดับ จึงทำให้ Fe Co และ Ni สามารถแสดงสมบัติสถานะแม่เหล็กแบบเฟอร์โรแมกเนติกได้

วัสดุเซรามิกบางชนิดจะประกอบด้วยไอออนต่างชนิดกันซึ่งมีโมเมนต์แม่เหล็กแตกต่างกัน เมื่อโมเมนต์แม่เหล็กนั้นมีการจัดเรียงตัวในทิศทางที่ตรงกันข้าม และไม่หักล้างกันหมดแต่จะยังคงมีโมเมนต์แม่เหล็กเหลือในทิศทางหนึ่ง จึงทำให้วัสดุเหล่านี้สามารถแสดงสมบัติสถานะแม่เหล็กได้ วัสดุเหล่านี้จะถูกเรียกว่าเฟอร์ไรต์ (Ferrites) ซึ่งมีด้วยกันหลายชนิด เช่น แมกนีไทต์ เหล็กออกไซด์ (Fe_3O_4) วัสดุเฟอร์ไรต์มีความสามารถในการนำไฟฟ้าต่ำจึงมักถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์อย่างมาก

2.5.4 Antiferromagnetism

เป็นสถานะแม่เหล็กอีกชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นกับวัสดุบางชนิด กล่าวคือ Magnetic dipoles ของอะตอมของวัสดุที่มีสมบัติเช่นนี้ เรียงตัวในทิศทางที่ตรงกันข้ามกันเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กซึ่งแมงกานีส ออกไซด์ (Manganese Oxide, MnO) เป็นหนึ่งในวัสดุเซรามิกที่แสดงสมบัติเช่นนี้

2.5.5 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติแม่เหล็ก

ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติแม่เหล็ก (The influence of temperature on magnetic behavior) คือ อุณหภูมิมีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติทางแม่เหล็ก ตัวอย่างเช่น การเพิ่มอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของอะตอมที่อุณหภูมิสูงกว่า 0 เคลวิน

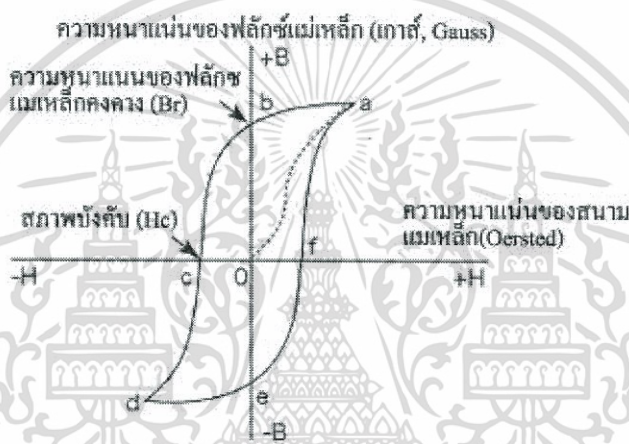
พลังงานความร้อนจะเป็นสาเหตุทำให้วัสดุจำพวกเฟอร์โรแมกเนติกมีการจัดเรียงตัวใหม่ เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยถ้าอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี ($Curie, T_c$) มีผลทำให้สถานะแม่เหล็กหมดสภาพไปอย่างสิ้นเชิง และจะเปลี่ยนสภาพกลายเป็นสถานะแม่เหล็กแบบพาราแมกเนติกแทน แต่เมื่อถูกนำมาทำให้เย็นตัวลงต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี ตัว magnetic domains จะเกิดการเรียงตัวใหม่ และกลับมาเป็นสถานะแม่เหล็กอีกครั้ง

2.6 เส้นโค้งฮิสเทอรีซิสของแม่เหล็ก [13]

เส้นโค้งฮิสเทอรีซิสของแม่เหล็ก (Magnetic hysteresis curve) คือ เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กกับความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก B ในสสารที่มีการทำให้มีสถานะเป็นแม่เหล็กในสนามแม่เหล็กดังกล่าว ตลอดจนการทำให้มีสถานะเป็นแม่เหล็ก J

2.6.1 สภาพบังคับหรือแรงบังคับ

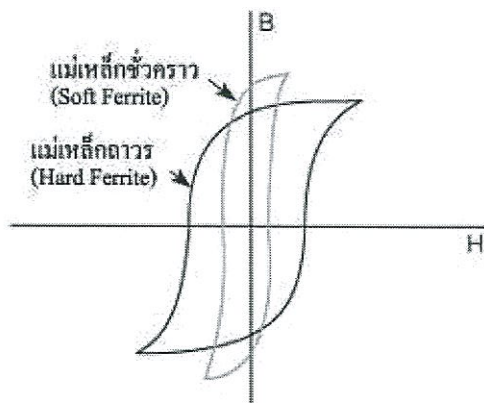
ถ้าเพิ่มความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กในทิศทางตรงข้ามโดยกลับด้านกระแสไฟ ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กจะค่อยๆ ลดลงจากจุด b เป็น 0 ที่จุด c เราเรียกความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กนี้ว่าเป็นสภาพบังคับ (Coercivity) หรือแรงบังคับ (Coercive Force) (H_c) นอกจากนี้ถ้าเพิ่มความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กกลับกัน ทำให้แม่เหล็กมีสถานะเป็นแม่เหล็กในทิศทางที่กลับกันอยู่ในสภาพอิ่มตัวที่จุด d จากการค่อยๆ เปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กในลักษณะเช่นนี้ ทำให้ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กในแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงไปตามรอบที่กำหนด คือ $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow e \rightarrow f \rightarrow a$ เราเรียกเส้นโค้งนี้ว่าเส้นโค้งฮิสเทอรีซิสของแม่เหล็ก (Hysteresis Loop)



รูปที่ 2.6 เส้นโค้งฮิสเทอรีซิสของแม่เหล็ก [13]

2.6.2 ความแตกต่างของสมบัติเฉพาะของเส้นโค้งฮิสเทอรีซิสแม่เหล็กชั่วคราวและแม่เหล็กถาวร

แม่เหล็กถาวร (Hard ferrite) มีสภาพบังคับที่มากกว่าแม่เหล็กชั่วคราว (Soft ferrite) ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับใช้เป็นแม่เหล็ก ในทางตรงกันข้ามแม่เหล็กชั่วคราว (Soft ferrite) มักจะใช้ในการป้องกันเสียงรบกวนเป็นหลักหรือใช้เป็นหัวแม่เหล็ก



รูปที่ 2.7 เส้นโค้งฮิสเทอริซิสของแม่เหล็กชั่วคราวและแม่เหล็กถาวร [13]

2.7 ทองแดง [14-15]

ทองแดง (Copper) มีสัญลักษณ์ธาตุคือ Cu มีเลขอะตอมเท่ากับ 29 จัดเป็นโลหะที่อ่อนและสามารถยืดหยุ่นได้ถ้าให้ความร้อน มีความแข็งแรงที่อยู่ในเกณฑ์ต่ำ แม้จะมีความเหนียวสูงก็ตาม พื้นผิวสัมผัสของทองแดงบริสุทธิ์มีสีแดงส้ม ใช้เป็นตัวนำไฟฟ้า ตัวนำความร้อน วัสดุในการก่อสร้าง หรือแม้กระทั่งเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) สำหรับการวัดอุณหภูมิ

ทองแดงเป็นธาตุที่พบเป็นปริมาณน้อยบนพื้นผิวโลก แต่เป็นธาตุหนึ่งในไม่กี่ธาตุที่พบในสภาพบริสุทธิ์โดยธรรมชาติ หรือที่เรียกว่าสภาพโลหะ (Metallic state, Native copper)

2.7.1 สมบัติเชิงฟิสิกส์ของทองแดง

- 1) น้ำหนักอะตอม : 63.546
- 2) ระบบผลึก : FCC
- 3) จุดหลอมเหลว : 1084.62 องศาเซลเซียส
- 4) จุดเดือด : 2562 องศาเซลเซียส
- 5) ความหนาแน่นที่อุณหภูมิห้อง : 8.96 กรัมต่อตารางเซนติเมตร

2.7.2 สมบัติเชิงกลของทองแดง

- 1) Young's modulus : $110-128 \times 10^9$ ปาสคาล
- 2) Shear modulus : 48×10^9 ปาสคาล
- 3) Brinell hardness : $235-878 \times 10^6$ ปาสคาล

ประโยชน์ของทองแดงนั้นสามารถนำมาใช้ทำลวดส่งกระแสไฟฟ้า และอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิด เนื่องจากทองแดงเป็นโลหะที่นำไฟฟ้าได้ดีเป็นอันดับสองรองจากเงิน แต่ราคาถูกกว่าเงินมาก การที่ทองแดงนำไฟฟ้าได้ดี สามารถช่วยลดพลังงานความร้อนที่สูญเสียไปขณะที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านทองแดงที่ใช้ส่วนใหญ่จะใช้ทองแดงบริสุทธิ์ แต่ในตัวทองแดงบริสุทธิ์นั้นมีความแข็งแรงที่อยู่ในเกณฑ์ต่ำ แต่มีความเหนียวสูง การใช้งานของทองแดงจึงมีขอบเขตที่จำกัด จึงมีการปรับปรุงทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อเพิ่มคุณสมบัติด้านเชิงกล ในอุตสาหกรรมนิยมใช้วิธีการทำสารละลายของแข็ง (Solid-Solution Formation) คือการเจืออัลลอยบางชนิดลงไปเช่น ทองเหลือง (ทองแดงผสมกับสังกะสี) สำริด (ทองแดงผสมกับดีบุก) เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในด้านของความแข็ง ในด้านการกัดกร่อนโลหะผสมทองแดงจะป้องกันการกัดกร่อนจากน้ำ และไอน้ำได้ โลหะผสมทองแดงสามารถป้องกันการกัดกร่อนในสภาพอากาศของชนบท, ในทะเล และโรงงานอุตสาหกรรมได้ ทองแดงสามารถป้องกันน้ำเกลือ ดินแร่ธาตุที่ไม่เกิดการออกซิเดชัน กรดอินทรีย์ และการกัดกร่อน แต่แอมโมเนีย ฮาโลเจน ซัลไฟด์ สารละลายที่มีแอมโมเนียไอออน และกรดออกซิไดซ์ จะทำลายทองแดงได้ เช่นเดียวกับโลหะผสมทองแดงที่ป้องกันการดออินทรีย์ได้เพียงเล็กน้อย โดยความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนของโลหะผสมทองแดงจะมาจากการสร้างแผ่นฟิล์มบนพื้นผิวของวัสดุ และฟิล์มนี้จะทำหน้าที่ป้องกันการกัดกร่อนโลหะ

2.8 การสูญเสียของสังกะสีในชั้นโลหะผสม [16]

การสูญเสียของสังกะสีในชั้นโลหะผสม (Dezincification) เป็นรูปแบบหนึ่งของการกัดกร่อนซึ่งเกิดโดยการละลายของธาตุบางตัวจากโลหะผสม เป็นผลจากการกระทำซึ่งสิ่งแวดล้อมทำให้โลหะที่ว่องไวที่สุดออกจากโลหะผสม เหลือไว้แต่โครงสร้างพรุนซึ่งเต็มไปด้วยโลหะที่เสถียรที่สุด วัสดุที่เหลือจึงสูญเสียความแข็งแรงทางกายภาพ และความแข็งแรงเชิงกลไปมาก โดยการกัดกร่อนแบบนี้มักมีชื่อตามธาตุที่ละลายออกมา โดย dezincification จะเป็นการกัดกร่อนโดยมีธาตุสังกะสี (Zn) ละลายออกมา

โลหะผสมประกอบด้วยโลหะตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป จากที่กล่าวมาว่าโลหะจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าเฉพาะตัว ดังนั้นโลหะที่เป็นส่วนผสมที่มีศักย์ต่ำกว่า จะถูกกัดกร่อนไป ตัวอย่างที่พบมากคือทองเหลือง (ประกอบด้วยทองแดง และสังกะสี) สูญเสียสังกะสีไปทำให้โครงสร้างของทองเหลืองที่เหลืออยู่จะเป็นทองแดงโดยส่วนมากและพรุน มีความแข็งแรงที่ต่ำลง การสูญเสียสังกะสีอาจสังเกตได้จากจุดเดิมที่เคยมีสีเหลือง เมื่อสูญเสียสังกะสีไป ทำให้มีสีแดงขึ้นซึ่งเป็นสีของทองแดง ทองเหลืองที่มีปริมาณสังกะสีผสมอยู่มากจะเกิดการสูญเสียสังกะสีได้ง่าย

กลไกการสูญเสียสังกะสีแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนคือ

1. ทองเหลือง (ทองแดง และสังกะสี) ถูกกัดกร่อนหรือละลายลงไปในสารละลาย
2. สังกะสียังคงอยู่ในสารละลาย
3. ทองแดงกลับไปเป็นโลหะอีกครั้งโดยติดกับชิ้นงานเดิม

2.9 การตรวจสอบและพิสูจน์เอกลักษณ์ชิ้นงาน

2.9.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [17]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้อิเล็กตรอนเป็นแหล่งกำเนิดแสง เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะสัณฐานของวัสดุในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมาก และเนื่องจากข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่มีความยาวคลื่นแสงขนาดใหญ่กว่าลักษณะสัณฐานบางชนิดที่ต้องการศึกษา และกำลังความสามารถในการแยกชัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดาที่มีค่าต่ำ ใช้วัตถุเล็กสุดประมาณ 0.2 ไมโครเมตร และให้กำลังขยายสูงสุดไม่เกิน 3,000 เท่า ซึ่งไม่สามารถตรวจสอบรายละเอียดของวัตถุที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ได้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง มีความสามารถในการแยกชัดดี เนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้น เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของวัสดุ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีกำลังขยายมากกว่า 3,000 เท่า ได้จนถึงกำลังขยายที่มากกว่า 100,000 เท่า และสามารถบอกรายละเอียดของภาพซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวอย่างได้ตั้งแต่ขนาด 3 นาโนเมตรไปจนถึง 100 นาโนเมตร นอกจากนี้ยังสามารถใช้งานร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์อื่น เช่น เครื่องเอกซเรย์สเปกโทรสโคปแบบกระจายพลังงาน (EDX) และ เครื่องเอกซเรย์สเปกโทรสโคปแบบกระจายความยาวคลื่น (WDS) ซึ่งเป็นข้อมูลทางเคมี จึงส่งผลให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกลายเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีต้นกำเนิดแสง (Light source) โดยใช้ อิเล็กตรอนแทนแสง โดยอิเล็กตรอนจะถูกสร้างจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงจากปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) แก่ขดลวดทังสเตน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากขดลวด จากนั้นอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ซึ่งมีเป็นสภาพสุญญากาศ ด้วยความต่างศักย์เร่ง (Accelerating voltage) ในช่วง 0 ถึง 30 กิโลโวลต์ (อาจสูงถึง 50 กิโลโวลต์) ถูกควบคุมทิศทางภายใต้สนามแม่เหล็กจากเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens) จำนวน 2 ชุด หรือมากกว่า โดยอาศัยหลักการการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก ทำให้ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้ามากระทบกับชิ้นงาน ซึ่งปริมาณของอิเล็กตรอนถูกควบคุมโดยแอฟเพอเจอร์ (Aperture) ซึ่งมีขนาดต่างกัน ๆ กันตามลักษณะการใช้งาน และเข้าเกิดอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนต่อชิ้นงานหลายแบบ เนื่องจากลำอิเล็กตรอนที่วิ่งมากระทบชิ้นงานมีพลังงานสูง ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากชิ้นงาน

เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรกเรียกว่า เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญที่สุดต่อการควบคุมทัศนศาสตร์อิเล็กตรอน (Electron optics) เพราะเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบอิเล็กตรอนที่วิ่งลงมาจากแหล่งกำเนิดให้เป็นลำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ส่วนเลนส์วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์ชุดสุดท้าย ทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอน (Electron beam) ให้ไปตกกระทบบนผิวของตัวอย่างโดยมีสแกนคอยล์ (Scan coil) ทำหน้าที่กราดลำอิเล็กตรอนให้ไปตกกระทบบนผิวของตัวอย่างภายในกรอบพื้นที่สี่เหลี่ยมเล็ก ๆ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวอย่างที่ถูกยิงด้วยลำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนนี้จะเกิดสัญญาณต่าง ๆ ขึ้นในเวลาเดียวกัน โดยเครื่องมือชนิดนี้จะมีอุปกรณ์สำหรับตรวจจับสัญญาณ (Detector) ชนิดต่าง ๆ แล้วส่งไปประมวลผลเป็นรูปภาพแสดงบนจอต่อไป

ตัวอย่างสัญญาณที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งได้เป็น อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron, SE) และอิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (Back scattered electron, BSE)

อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron, SE) เป็นสัญญาณที่ถูกนำมาใช้สร้างเป็นรูปภาพมากที่สุด ซึ่งเป็นอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากแถบนำกระแส (Conduction band) หรือแถบพลังงานเวเลนซ์ (Valance band) ซึ่งแค่เพียงพลังงานต่ำ ๆ ก็สามารถทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวชิ้นงานได้ง่าย บางครั้งเรียกว่าอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งมีช่วงพลังงานตั้งแต่ 10 ถึง 50 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) อิเล็กตรอนชนิดนี้ใช้สำหรับการสร้างรูปภาพที่อยู่บริเวณผิวของชิ้นงาน ภาพที่ได้จากสัญญาณชนิดนี้ เรียกว่า ภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron image, SEI) โดยจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง

อิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (Back scattered electron, BSE) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนประกอบทางเคมีบนผิวของตัวอย่าง และ แสดงให้เห็นลักษณะความสูงต่ำของพื้นผิว ซึ่งเป็นอิเล็กตรอนที่เกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron) รั้งชนกับชิ้นงาน โดยสูญเสียพลังงานให้กับอะตอมที่อยู่ในชิ้นงานเพียงบางส่วน แล้วเกิดการกระเจิงกลับออกมา ซึ่งพลังงานของอิเล็กตรอนชนิดนี้มีค่าตั้งแต่ค่าพลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิไปจนถึงค่าระดับพลังงานอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ค่าพลังงานต่าง ๆ ที่กระเจิงกลับมานั้นขึ้นกับมวลอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบภายในชิ้นงาน ดังนั้นอิเล็กตรอนชนิดนี้จึงสามารถใช้สร้างรูปภาพที่แสดงถึงความแตกต่างของธาตุได้โดยแสดงในรูปของความเข้ม และความสว่างของภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณ ซึ่งเหมาะสำหรับการใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในชิ้นงาน

รังสีเอกซ์ (X-ray) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีลักษณะความยาวของคลื่นสั้นแต่มีความถี่สูง เกิดจากอิเล็กตรอนพลังงานสูงวิ่งชนบริเวณชิ้นงาน ทำให้อิเล็กตรอนในระดับชั้นพลังงานต่าง ๆ เช่น ระดับชั้นพลังงาน K L หรือ M ได้รับความเร่งจนสามารถทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากชั้นพลังงานเดิม แล้วอิเล็กตรอนจากชั้นพลังงานถัดไปเข้ามาแทนที่ ซึ่งทำให้มีการคายพลังงานของรังสีเอกซ์ออกมา โดยสามารถนำลักษณะสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ที่คายออกมา ไปใช้วิเคราะห์เพื่อหาองค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ได้ในเชิงคุณภาพ และเชิงปริมาณ โดยค่าพลังงานที่คายออกมาจะขึ้นอยู่กับเลขอะตอมของธาตุนั้น ๆ โดยสามารถใช้ห้วงรังสีเอกซ์เพื่อนำมาวิเคราะห์ข้อมูลประกอบกับการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

นอกเหนือจากสัญญาณเหล่านี้แล้ว ยังมีสัญญาณอีกหลายชนิดที่เกิดขึ้น เช่น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) และโอเจอิเล็กตรอน (Auger electron) เป็นต้น ซึ่งสัญญาณแต่ละชนิดจะให้ข้อมูลของตัวอย่างแตกต่างกันไป

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Wang และคณะ [4] ได้ศึกษาการกัดกร่อนแบบหลุมในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นของสารละลายกรด-เบส (pH) และปริมาณของคลอไรด์ที่แตกต่างกัน ด้วยเทคนิคโพเทนซิโอดนามิก-โพลาริเซชัน EIS และการวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าพฤติกรรมของการกัดกร่อนแบบหลุมในสารละลายโซเดียมคลอไรด์มีพฤติกรรมที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับสารละลายที่เป็นกลาง และสารละลายกรด โดยภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงให้เห็นว่า pH และปริมาณคลอไรด์ในสารละลายส่วนใหญ่ มีอิทธิพลต่อสัณฐานวิทยาอย่างมาก และยังกล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่าง pH และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ โดยค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น (Open circuit potential, OCP) มีค่าเป็นลบมากขึ้น และค่ากระแสผั่งแอโนดิกที่มากขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของคลอไรด์ในสารละลาย หรือเพิ่มความเป็นกรดในสารละลาย (ที่ pH เท่ากับ 4) แสดงให้เห็นว่ามีอัตราการกัดกร่อนที่สูงขึ้น

สุธา สุทธิเรืองวงศ์ [5] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ประยุกต์ใช้โลหะผสมที่มีความเป็นแม่เหล็ก เช่น โลหะผสมนิกเกิล-เหล็ก (Ni-Fe) เพื่อลดอัตราการกัดกร่อนที่สามารถเกิดขึ้นได้ในกระบวนการผลิต และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของฮาร์ดไดรฟ์ จึงมีผู้ศึกษาเกี่ยวกับโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กเพื่อหาอัตราการกัดกร่อน เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการวางแผนกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งทำให้สามารถลดการกัดกร่อนที่อาจเกิดขึ้นได้ งานวิจัยนี้ผลิตโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กที่สัดส่วนเชิงมวลต่าง ๆ และเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าลงบนทองแดง จากนั้นนำโลหะผสมที่เคลือบผิวได้มาหาอัตราการกัดกร่อนในน้ำปราศจากไอออนและกรดไฮโดรคลอริก pH เท่ากับ 2 และ 5 นอกจากนี้สารละลายถูกทำให้อิ่มตัวด้วยอากาศ โดยออกซิเจนสามารถเข้าร่วมในปฏิกิริยาการกัดกร่อนได้ด้วย ซึ่งวิธีวัดการกัดกร่อนในงานวิจัยนี้คล้ายคลึงกับการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นจริงกับฮาร์ดไดรฟ์ในกระบวนการผลิต ซึ่งอยู่ในสถานะที่มีออกซิเจน พบว่าอัตราการกัดกร่อนของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มสัดส่วนเชิงมวลของเหล็ก

Chansena และ Sutthiruangwong [6] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก (Co-Fe) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญสำหรับหัวอ่าน และเขียนในฮาร์ดดิสก์ พื้นผิวของโลหะผสมต้องสัมผัสกับสภาพแวดล้อมทั้งในช่วงก๊าซและในช่วงของเหลวระหว่างกระบวนการผลิต การศึกษาพฤติกรรมของการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก (Co-Fe) สามารถให้ข้อมูลพื้นฐานที่เป็นประโยชน์สำหรับการวางแผนการผลิตของหัวอ่าน และเขียนโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อการกัดกร่อนกลายเป็นปัญหาหลัก การศึกษาการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก (Co-Fe) จากการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าผ่านกัลวานโอดนามิกโพลาไรเซชัน (Galvanodynamic polarization) โดยใช้เทคนิคโพเทนซิโอดนามิก-โพลาริเซชัน (Potentiodynamic polarization) ส่วนประกอบของ โลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก (Co-Fe) ถูกวัดด้วยเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ สเปกโทรเมทรี (X-ray fluorescence spectrometry) รูปแบบจาก X-ray diffractometer พบว่าโครงสร้างผลึกของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก (Co-Fe) ที่ได้จากการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้ามีลักษณะโครงสร้างเป็นลูกบาศก์แบบกลางตัว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Body-centered cubic, BCC) การศึกษาอัตราการกัดกร่อนในน้ำปราศจากไอออน และสารละลาย ที่เป็นกรดที่มีค่า pH เท่ากับ 3 4 และ 5 พบว่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก (Co-Fe) ในสารละลายกรดมีค่าสูงกว่าในน้ำปราศจากไอออน และความหนาแน่นของกระแส (Current densities) ของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก (Co-Fe) ในแต่ละค่าความเข้มข้น แปรผันตรงกับ ปริมาณของเหล็ก นั่นคือ ทั้งในสารละลายกรด และน้ำปราศจากไอออน อัตราการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก (Co-Fe) เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเหล็กเพิ่มขึ้น และค่า pH ลดลง ความหนาแน่นของกระแสการกัดกร่อน (i_{cor}) ของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก (Co-Fe) เพิ่มขึ้น

Kim และคณะ [18] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของสภาพการชุบโลหะผสม Ni-Fe ที่แช่ใน อ่างอัล-ตราโซนิก ส่วนประกอบของโลหะผสม Ni-Fe ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไอออนเหล็กมากกว่า ไอออนนิกเกิล หน้าที่และค่าพีเอชไม่ได้แสดงผลกระทบต่อองค์ประกอบของโลหะผสม Ni-Fe อย่างไร ก็ตามส่วนประกอบของโลหะผสมมีค่าสูงจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของกระแส เมื่ออุณหภูมิของ อ่างอัล-ตราโซนิก สูงกว่า 45 องศาเซลเซียส ส่วนประกอบของนิกเกิลเพิ่มขึ้นเนื่องจากความหนาแน่น ของนิกเกิลในกระแสที่เพิ่มขึ้น ความเข้มข้นที่เหมาะสมของอ่างอัลตราโซนิก และความเข้มข้นในการ ทำงานของโลหะผสม Ni-Fe ที่ได้รับ

Jinlong และคณะ [19] ได้ทำการศึกษาการต้านทานการกัดกร่อนของนิกเกิลบริสุทธิ์ และ โลหะผสม นิกเกิล-เหล็ก (Ni-Fe) ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าในสารละลายบัฟเฟอร์บอเรต การ ทดสอบทางเคมีไฟฟ้าพบว่าโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กมีความต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่านิกเกิลบริสุทธิ์ การวิเคราะห์ด้วยวิธีของ Mott-Schottky พบว่าเหล็กออกไซด์ทำให้เกิดลักษณะของสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ชนิด n-type เมื่อเทียบกับนิกเกิลบริสุทธิ์ โลหะผสมนิกเกิล-เหล็ก (Ni-Fe) ที่มี ขนาดเกรนละเอียดจะช่วยให้การสร้างแผ่นฟิล์มให้หนามากขึ้น ซึ่งช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กในสารละลายบัฟเฟอร์บอเรตได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นผลมาจาก ขอบของ nanocrystalline ในโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กที่ช่วยเพิ่มการแพร่ของนิกเกิลและเหล็ก นอกจากนี้การวิเคราะห์ XPS ยังแสดงให้เห็นว่าไฮดรอกไซด์ที่มากขึ้นควรส่งผลต่อการสูญเสียความ ต้านทานการกัดกร่อนของนิกเกิลบริสุทธิ์

Liang และคณะ [20] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหรียญทองเหลืองใน สารละลาย sweat solution โดยตรวจสอบด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี และวิธีการวิเคราะห์พื้นผิว ได้แก่ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และ Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDX) ทำให้เห็นว่าไอออนคลอไรด์ในสารละลาย sweat solution ช่วยเร่งการ ละลายของเนื้อทองเหลืองซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการกัดกร่อนแบบหลุม และการสูญเสียของทองแดง ในชั้นโลหะผสม ในขณะที่กรดแลคติก แอมโมเนีย และน้ำกระตุ้นปฏิกิริยาที่ซับซ้อน ผลิตภัณฑ์จากการ กัดกร่อนที่เกิดบนพื้นผิวส่วนใหญ่ประกอบด้วยคอปเปอร์คลอไรด์ cuprous oxide และสารประกอบ เชนจ์ซ้อนของยูเรียที่ประกอบด้วยทองแดงและแลคเตทไอออนปริมาณน้อย จลนศาสตร์ของการเกิด การกัดกร่อนแบบหลุมถูกควบคุมโดยการละลายของเกลือที่เคลือบอยู่บนพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Tavoosi และคณะ [21] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าด้วยผลึก Fe-Ni-Cr โดยกระบวนการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าดำเนินการโดยใช้ความหนาแน่นของกระแสที่อยู่ในช่วง 10-40 A/dm² และเพื่อให้ได้โครงสร้างทางจุลภาคที่ต้องการ ทำการเคลือบและอบในอุณหภูมิ 250 °C ในเวลาที่ต่างกัน ตัวอย่างที่เตรียมขึ้นนั้นทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วย XRD และ FE-SEM และทดสอบพฤติกรรมการกัดกร่อนหลังจากการเคลือบด้วยผลึก Fe-Ni-Cr ด้วยสารละลาย NaCl 3.5% ผ่าน Potentiostat Analysis พบว่าสามารถต้านทานการกัดกร่อนที่ศักย์ไฟฟ้า 375-635 mV และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ 0.15-5.2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$

Bhandari และคณะ [22] กล่าวว่า การกัดกร่อนเป็นสาเหตุหลักของการเสื่อมสภาพของโครงสร้างทางทะเล และนอกชายฝั่ง ซึ่งส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของอุปกรณ์กระบวนการต่าง ๆ ภายในท่อ และอาจทำให้เกิดความล้มเหลวของโครงสร้าง การรั่วซึมส่งผลกระทบต่อการสูญเสียผลิตภัณฑ์มวลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม และการสูญเสียชีวิต การกัดกร่อนแบบหลุมถือได้ว่าเป็นรูปแบบหนึ่งที่เป็นอันตรายที่สุดสำหรับการกัดกร่อนของโครงสร้างทางทะเล และนอกชายฝั่ง การกัดกร่อนแบบหลุมคือการสลายตัวของโลหะที่เกิดจากการสลายตัวของชั้นฟิล์มป้องกันบนพื้นผิวโลหะ อย่างไรก็ตาม ความล้มเหลวของโครงสร้างเนื่องจากลักษณะหลุมยังคงไม่เป็นที่เข้าใจ การวัดความลึกของหลุมที่แม่นยำด้วยเทคนิคการประเมินความแม่นยำ การวิเคราะห์ความเสี่ยงจากการรุกราน และความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมที่เป็นสาเหตุของความล้มเหลวในการทำให้เกิดหลุมเป็นปัจจัยที่ต้องทำความเข้าใจเพิ่มเติม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่ประเด็นเหล่านี้ ทบทวนและวิเคราะห์กลไกการกัดกร่อนแบบหลุม และตรวจสอบปัจจัยที่เป็นไปได้ทั้งหมดซึ่งอาจทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบหลุมได้ นอกจากนี้ยังมีการทบทวนและวิเคราะห์เทคนิคต่าง ๆ ที่นักวิทยาศาสตร์ และนักวิจัยใช้ในการระบุและจำลองการกัดกร่อนแบบหลุมด้วย

Wall และ Wadsö [23] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการกัดกร่อนของโครงสร้างเหล็กในสภาพแวดล้อมทางทะเลเป็นซึ่งเป็นปัญหาสำคัญ การเสื่อมสภาพของโครงสร้างชนิดนี้มีค่าใช้จ่ายและยากที่จะคาดการณ์ทั้งในการออกแบบโครงสร้างใหม่ ๆ และการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของโครงสร้างที่มี จุดมุ่งหมายของการตรวจสอบนี้คือเพื่อหาค่าอัตราการกัดกร่อนของกองเหล็กที่ชายฝั่งตะวันตกของประเทศสวีเดน โดยอัตราการกัดกร่อนดังกล่าว (มม./ปี) สามารถใช้ได้ทั้งในการออกแบบโครงสร้างใหม่ ๆ โดยการตัดขนาดความหนาของเหล็ก และประเมินความสามารถในการแบกของโครงสร้างเสาเข็มที่มีอยู่ การสำรวจก่อนหน้านี้เกี่ยวกับอัตราการกัดกร่อนตามแนวชายฝั่งตะวันออกของประเทศสวีเดนโดยมีค่าความเค็มประมาณ 0.2% ถึง 0.8% ในปัจจุบันเป็นแนวทางสำหรับอัตราการกัดกร่อนของโครงสร้างเหล็กทั้งหมดในระบบการเดินเรือของสวีเดนแม้ว่าความเค็มบนชายฝั่งตะวันตกอาจเป็นไปได้ สูงถึง 3.0% ท่าเรือเหล็กที่ตั้งอยู่ในท่าเรือ Halmstad บนชายฝั่งตะวันตกของประเทศสวีเดนซึ่งได้รับการตรวจสอบโดยการวัดด้วยคลื่นความถี่สูง และมีการตรวจสอบโครงสร้างท่าเรือสามแห่งที่มีความยาวรวมประมาณ 700 เมตร พบว่าไม่มีท่าเทียบเรือที่ได้รับการตรวจสอบใดที่ได้รับหรือมีการป้องกันการกัดกร่อนแบบแคโทดิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ma และคณะ [24] ประสบความสำเร็จในการเคลือบโคบอลต์ (Co) ลงบนนิกเกิล (Ni) กระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) ของทั้งนิกเกิลที่ถูกเคลือบโดยการแช่ใน 1 ชั่วโมง และนิกเกิลที่ไม่ได้ถูกเคลือบ ถูกทดสอบโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 3.5 % โดยมวล และการเคลือบด้วยวิธีการจุ่มในระยะเวลาที่เพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนลดลง เมื่อระยะเวลาในการเคลือบผิวเพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลงเมื่อนิกเกิลถูกเคลือบ โดยการเคลือบแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน เนื่องจากการสร้างชั้น Al_2O_3 บนพื้นผิว

Zou และ Chin [25] ได้ศึกษาเกี่ยวกับกลไกการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 – 19 N เพื่อระบุผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการกัดกร่อน พบว่าเหล็กละลายเป็นไอออนของ $HFeO_2^-$ และกลไกการกัดกร่อนขึ้นอยู่กับสลายตัวของน้ำกลายเป็นไฮโดรเจนในด้านของขั้วแคโทด และการละลายของไอออน $HFeO_2^-$ ในด้านของขั้วแอโนด ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีอิทธิพลอย่างมากต่อเหล็กกล้า โดยค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนได้เลื่อนไปทางลบมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย ค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนเพิ่มมากขึ้นจาก $1.23 \times 10^{-5} A/cm^2$ ที่ 1 N ไปเป็น $9.65 \times 10^{-5} A/cm^2$ ที่ 14 N และที่ความเข้มข้นที่มากกว่านี้ค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนลดลงเนื่องด้วยเหมือนเป็นการลดความสามารถในการทำปฏิกิริยาของน้ำ

Yang และคณะ [26] ได้ศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของ Mg-8Li-3Zn-Al ถูกศึกษาในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5% น้ำหนักที่หายไปถูกวัดโดยอัตราการกัดกร่อน ผลของไฟฟ้าเคมีระบุว่าความต้านทานการกัดกร่อนของ Mg-8Li-3Zn-Al ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5% แยกว่าในน้ำกลั่น คลอไรด์ไอออนเป็นตัวนำและก่อให้เกิดการกัดกร่อน ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นในสารละลายเกลือแสดงให้เห็นได้ชัดว่ามีค่าเป็นลบมากกว่าน้ำกลั่น สามารถบ่งบอกได้ว่ามีความต้านทานการกัดกร่อนที่แย่เนื่องจากมีค่าศักย์ไฟฟ้าสมดุลที่ต่ำกว่า และทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย

Da-hai และคณะ [27] ได้ศึกษากระบวนการการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ถูกเคลือบด้วยดีบุกในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ถูกศึกษาโดย EIS และสัณฐานวิทยาโดย SEM SPM WRD และ XPS ผลพบว่าดีบุกมีความต้านทานการกัดกร่อน ค่า R_c คงที่ในขณะที่มีการแลกเปลี่ยนประจุ และ R_{ct} ลดลงเป็นสองเท่า สามารถบ่งบอกได้ว่าชั้นเคลือบของดีบุกนั้นไม่โดนกัดกร่อนในขณะที่พื้นผิวของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำถูกกัดกร่อน การกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่เคลือบด้วยดีบุกในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.5 M พบว่าเกิดการละลายของเหล็กลงไป ในสารละลายเนื่องจากมีข้อบกพร่องในชั้นเคลือบของดีบุก และมีการกัดกร่อนอย่างรุนแรงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเกลือ จาก 0.01 M ไปเป็น 0.5 M

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

- 1) นิกเกิลคลอไรด์ เฮกซะไฮเดรต ($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) จาก Carlo Erba Co.,Ltd เกรดวิเคราะห์
- 2) ไอรอนคลอไรด์ เตตระไฮเดรต ($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) จาก Acros Organics Co.,Ltd เกรดวิเคราะห์
- 3) เอทิลแอลกอฮอล์ ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) จาก Carlo Erba Co.,Ltd เกรดวิเคราะห์
- 4) กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (conc. HCl) จาก Fisher Chemical Co.,Ltd เกรดวิเคราะห์
- 5) ก๊าซไนโตรเจน 99.5% จากบริษัท ยูไนเต็ด อินดัสเตรียลแก๊ส จำกัด เกรดการค้า
- 6) แท่งทองแดงบริสุทธิ์ 99.9% ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร จากบริษัท พรพูนอนันต์ จำกัด เกรดการค้า
- 7) น้ำกลั่น
- 8) ลวดทองแดง
- 9) โซเดียมไฮดรอกไซด์ แอนไฮไดรรัส (NaOH anhydrous) จาก Carlo Erba Co.,Ltd เกรดวิเคราะห์
- 10) กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (conc. H_2SO_4) จาก Carlo Erba Co.,Ltd เกรดวิเคราะห์
- 11) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) จาก Fisher Chemical Co.,Ltd เกรดวิเคราะห์

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) กรงฟาราเดย์
- 2) ท่อขนาดเล็กของล็กกิน (Luggin capillary)
- 3) แหวนรองวงกลมชนิดเทฟลอน
- 4) เซลล์เคมีไฟฟ้าชนิด 3 ขั้ว
 - 4.1) โลหะทองแดงเป็นขั้วทำงาน (Working electrode)
 - 4.2) แผ่นโลหะแพลทินัมเป็นขั้วตรงข้าม (Counter electrode)
 - 4.3) ขั้วไฟฟ้าอิ่มตัวคาโลเมล (Saturated Calomel) เป็นขั้วอ้างอิง (Reference electrode)
- 5) ปีกเกอร์ขนาด 25 50 150 250 600 และ 1000 มิลลิลิตร
- 6) ขวดวัดปริมาตร 1000 มิลลิลิตร
- 7) กรวยแก้ว
- 8) ซ้อนตักสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 9) คีมคีบ (Forceps)
- 10) ขาตั้ง (Stand)
- 11) แคลมป์จับ (Clamp)
- 12) ที่ยึดแคลมป์จับกับขาตั้ง (Clamp holder)
- 13) แท่งแก้วคนสาร
- 14) กระจกบอทวง
- 15) กระจกบอคน้ำกลั่น
- 16) หลอดหยด
- 17) กระดาษทรายหมายเลข 280 600 1200 และ 2000
- 18) ไตรลัมร้อน
- 19) เครื่องกวน และแท่งแม่เหล็ก
- 20) เครื่องวัดความเป็นกรด-เบส (pH meter)
- 21) เครื่องชั่งน้ำหนักไฟฟ้าแบบ 4 ตำแหน่ง
- 22) ตู้ดูดควัน
- 23) อ่างล้างความถี่สูง 44kHz
- 24) เครื่องโพเทนชิโอสแตท-กัลวานอสแตท รุ่น PGSTAT12 จาก Metrohm Autolab Co.,Ltd
- 25) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) รุ่น ZEISS EVO 10 จาก Zeiss Co.,Ltd

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมสารละลายสำหรับการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า

เตรียมสารละลายเพื่อการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า (Electrodeposition) ซึ่งประกอบด้วย $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ โดยให้มีความเข้มข้นโดยรวมของไอออนโลหะมีค่าเท่ากับ 0.1 M โดย

- 1) ชั่ง $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ มา 9.51 กรัม นำมาละลายด้วยน้ำกลั่นแล้วเทลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร
- 2) ชั่ง $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ มา 11.93 กรัม นำมาละลายด้วยน้ำกลั่นแล้วเทลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร ซึ่งเป็นขวดเดียวกันข้อที่ 1)
- 3) ปรับปริมาตรสารละลายผสมให้เป็น 1000 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปเทลงในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร แล้วใส่แท่งแม่เหล็กลงไป
- 4) นำไปปั่นกวนบนเครื่องปั่นกวน พร้อมทั้งปรับ pH ให้เท่ากับ 2 โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกสัดส่วน 1:1 กับน้ำกลั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การเตรียมผิวชิ้นงานของโลหะ

- 1) นำแท่งทองแดงบริสุทธิ์ 99.9% ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ไปตัดให้มีความหนาเท่ากับ 3 มิลลิเมตร
- 2) นำชิ้นงานที่ได้ไปขัดด้วยกระดาษทรายขัดโลหะหมายเลข 280 600 1200 และ 2000 ตามลำดับ โดยขัดร่วมกับน้ำ แล้วล้างด้วยน้ำกลั่น
- 3) นำชิ้นงานใส่บีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตรไปล้างในอ่างล้างความถี่สูงด้วยเอทิลแอลกอฮอล์เป็นเวลา 5 นาที
- 4) นำชิ้นงานไปเป่าด้วยลมร้อน เพื่อเตรียมสำหรับขั้นตอนการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าต่อไป

3.3.3 การเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า

- 1) นำสารละลายที่เตรียมได้จากหัวข้อ 3.3.1 มาพ่นด้วยก๊าซไนโตรเจนเพื่อกำจัดออกซิเจนที่ละลายอยู่ในสารละลายเป็นเวลา 30 นาที ก่อนที่จะนำมาบรรจุลงในเซลล์เคมีไฟฟ้าชนิด 3 ขั้ว ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การบรรจุเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิด 3 ขั้ว

- 2) นำเซลล์เคมีไฟฟ้าชนิด 3 ขั้วมาเชื่อมต่อกับเครื่องโพเทนชิโอสแตต-กัลวานอสแตต และเริ่มทำการเคลือบผิวด้วยเทคนิคการให้กระแสไฟฟ้าแบบวนรอบ (Cyclic galvanodynamic) ที่ช่วงกระแสไฟฟ้า -1 mA ถึง 0 mA ที่อัตราเร็วในการปรับค่ากระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.1 mA/s เป็นจำนวน 150 รอบ
- 3) เมื่อทำการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าเสร็จแล้วให้นำชิ้นงานมาล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วนำไปเป่าด้วยลมร้อนให้แห้ง ได้ชิ้นงานดังรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ชิ้นงานที่ได้จากการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า

3.3.4 การศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนในสารละลายกรดและเบส

- 1) เตรียมสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น pH เท่ากับ 5.0 และ 6.0 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น pH เท่ากับ 8.0 และ 9.0 และน้ำกลั่น
- 2) นำชิ้นงานที่ได้จากหัวข้อ 3.3.3 มาบรรจุลงในเซลล์ไฟฟ้าชนิด 3 ขั้ว โดยชิ้นงานเป็นขั้วทำงาน ขั้วไฟฟ้าอิ่มตัวคาลอเมล (Saturated calomel) เป็นขั้วอ้างอิง แผ่นแพลทินัมเป็นขั้วตรงข้าม และใช้สารละลายเป็นกรดซัลฟิวริก
- 3) นำเซลล์ไฟฟ้าชนิด 3 ขั้ว มาต่อกับเครื่องโพเทนชิโอสแตต-กัลป์วาโนสแตต โดยปรับค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นเท่ากับ -500 mV และเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้าไปจนถึง 1000 mV ที่อัตราเร็วในการปรับค่าศักย์ไฟฟ้าที่ 11988 mV/hour
- 4) เริ่มวัดค่ากระแสไฟฟ้า เป็นเวลา 7 นาที 30 วินาที เมื่อวัดเสร็จแล้วทำการบันทึกข้อมูล
- 5) ทำการทดลองซ้ำกับสารละลายที่เตรียมไว้ในข้อ 1)

3.3.5 การศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์

- 1) เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1% 1% 2% และ 3% โดยน้ำหนัก และน้ำกลั่น
- 2) นำชิ้นงานที่ได้จากหัวข้อ 3.3.3 มาบรรจุลงในเซลล์ไฟฟ้าชนิด 3 ขั้ว โดยชิ้นงานเป็นขั้วทำงาน ขั้วไฟฟ้าอิ่มตัวคาลอเมล (Saturated calomel) เป็นขั้วอ้างอิง แผ่นแพลทินัมเป็นขั้วตรงข้าม และใช้สารละลายเป็นกรดซัลฟิวริก
- 3) นำเซลล์ไฟฟ้าชนิด 3 ขั้ว มาต่อกับเครื่องโพเทนชิโอสแตต-กัลป์วาโนสแตต โดยปรับค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นเท่ากับ -500 mV และเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้าไปจนถึง 1000 mV ที่อัตราเร็วในการปรับค่าศักย์ไฟฟ้าที่ 25704 mV/hour
- 4) เริ่มวัดค่ากระแสไฟฟ้า เป็นเวลา 3 นาที 30 วินาที เมื่อวัดเสร็จแล้วทำการบันทึกข้อมูล
- 5) ทำการทดลองซ้ำกับสารละลายที่เตรียมไว้ในข้อ 1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.6 การศึกษาพฤติกรรมการสูญเสียของเหล็กในชั้นโลหะผสมนิกเกิล-เหล็ก โดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชัน

- 1) เตรียมสารละลายกรดซัลฟูริกความเข้มข้น pH เท่ากับ 5.0
- 2) นำชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าจากขั้นตอน 3.3.3 เรียบร้อยแล้วไปบรรจุลงเซลล์ไฟฟ้าชนิด 3 ขั้ว
- 3) นำเซลล์ไฟฟ้าชนิด 3 ขั้วมาต่อกับเครื่องโพเทนชิโอสแตต-กัลวานอสแตต โดยใช้ช่วงศักย์ไฟฟ้าที่คำนวณได้จากการทดลองในข้อ 2)
- 4) ทำการปล่อยออกซิเจนที่ละลายอยู่ในสารละลายด้วยการพ่นก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 30 นาที
- 5) ให้ศักย์ไฟฟ้า +200 mV จาก Open circuit potential (OCP) เป็นเวลา 3 นาที
- 6) นำชิ้นงานที่ทำการทดลองเสร็จไปวิเคราะห์พื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และวิเคราะห์หาปริมาณนิกเกิล-เหล็กในชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ติดตั้งร่วมกับเครื่องเอกซเรย์สเปกโทรสโกปีแบบกระจายพลังงาน (SEM-EDX)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็ก และศึกษาพฤติกรรมการสูญเสียของเหล็กในชั้นโลหะผสมจากการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า โดยการนำเสนอผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัยของงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ตอน คือ ตอนที่ 1 ศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กในสารละลายกรด เบส และโซเดียมคลอไรด์ สำหรับสารละลายกรดที่ใช้ คือ สารละลายกรดซัลฟิวริกที่ pH เท่ากับ 5 และ 6 สารละลายเบสที่ใช้ คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ pH เท่ากับ 8 และ 9 และสำหรับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ใช้ที่ความเข้มข้น 0.1% 1% 2% และ 3% โดยน้ำหนัก และตอนที่ 2 เป็นการศึกษาพฤติกรรมการสูญเสียของเหล็กในชั้นโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กในสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ pH เท่ากับ 5 และทำการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดติดตั้งร่วมกับเครื่องเอกซเรย์สเปกโทรสโคปแบบกระจายพลังงาน (SEM-EDX)

4.1 ผลกระทบของความเข้มข้นสารละลายโลหะผสมต่อการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า

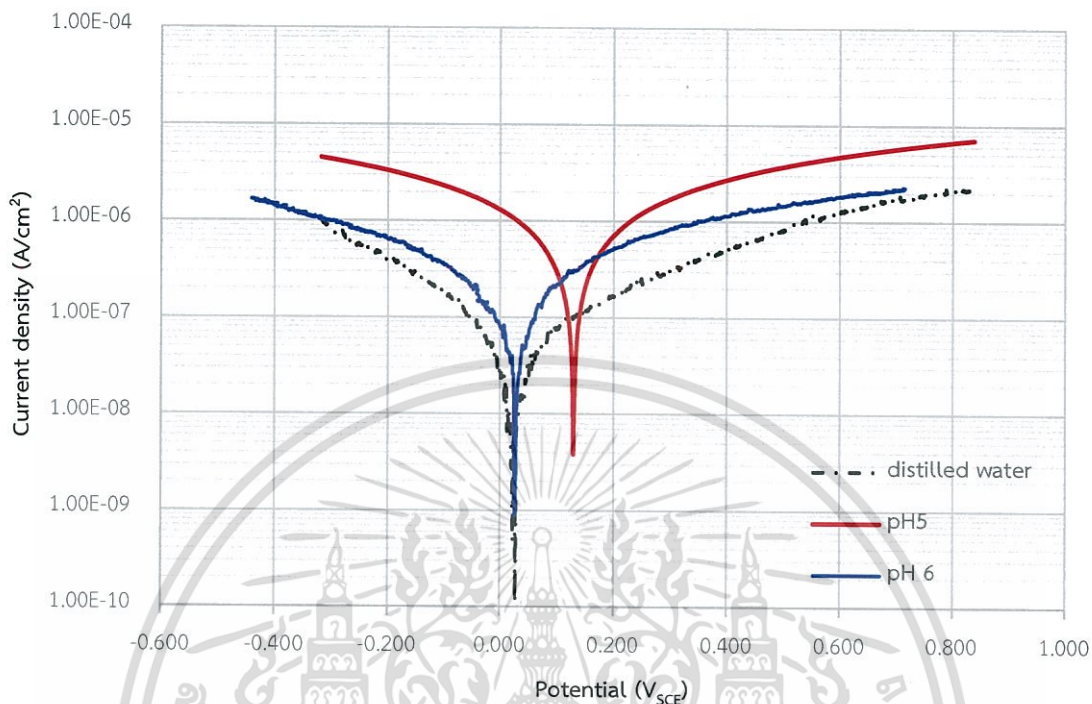
จากขั้นตอนการเตรียมสารละลายโลหะผสมจาก $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ เพื่อให้ได้สัดส่วนของนิกเกิลและเหล็กเท่ากับ 40:60 พบว่าหลังจากทำการผสมสารตั้งต้น (Precursor) สำหรับสารละลายโลหะผสมทั้งสองจะได้ค่า pH ประมาณ 3.0 ถึง 3.5 เนื่องจากทั้ง NiCl_2 และ FeCl_2 เป็นสารประกอบเกลือของกรดแก่ จากนั้นมีการปรับค่า pH ของสารละลายโลหะผสมให้มีค่าเท่ากับ 2 ในทุกการทดลอง เมื่อทำเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าปรากฏว่าได้สัดส่วนของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กเท่ากับ 75:25 โดยยืนยันได้จากผลการทดลองด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดติดตั้งร่วมกับเครื่องเอกซเรย์สเปกโทรสโคปแบบกระจายพลังงาน ซึ่งเป็นผลมาจากขั้นตอนการเตรียมสารละลายโลหะผสม ได้มีการตกตะกอนของสารประกอบเหล็ก จึงอาจทำให้ปริมาณเหล็กที่อยู่ในสารละลายโลหะผสมมีไม่เพียงพอ สัดส่วนนิกเกิล-เหล็กที่ได้จึงน้อยลงจากที่ต้องการ

ในการปรับค่า pH ของสารละลายโลหะผสมควรปรับให้มีค่าอยู่ในช่วงที่มีความเป็นกรดที่เหมาะสม และไม่ควรรออยู่ในช่วงที่เป็นเบส เนื่องจากไฮดรอกไซด์ไอออนจะเข้าทำปฏิกิริยากับโลหะที่อยู่ในสารตั้งต้นเป็นสารประกอบของไฮดรอกไซด์ตกตะกอนลงมา ทำให้ไม่ได้สารละลายของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กที่ต้องการ แต่ถ้าความเข้มข้นของสารละลายโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กมีความเป็นกรดที่มากเกินไป อาจทำให้เกิดการทำลายผิวของชิ้นงานได้ ดังนั้นการเตรียมสารละลายโลหะผสมสำหรับการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าจึงต้องมีช่วง pH ที่เหมาะสม รวมไปถึงปริมาณสัดส่วนของสารตั้งต้นที่เหมาะสมด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็ก

4.2.1 พฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กในสารละลายกรด



รูปที่ 4.1 กราฟโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กในน้ำกลั่น และ สารละลายกรดซัลฟิวริกที่ pH เท่ากับ 5 และ 6

จากรูปที่ 4.1 แสดงกราฟโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กในน้ำกลั่น และสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ pH เท่ากับ 5 และ 6 ด้านแอนโนดของกราฟสำหรับโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กที่ทำการวัดแสดงให้เห็นถึงการละลายของโลหะลงสู่สารละลายจากปฏิกิริยารีดักชันของโปรตอน (H^+) ในสารละลายกรด ซึ่งโปรตอนเป็นตัวออกซิไดซ์โลหะดังสมการที่ 4.1



เมื่อความเป็นกรดเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้โปรตอนในสารละลายไปออกซิไดซ์โลหะเป็น Me^{2+} ได้มากขึ้น หรือเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้มากขึ้น ซึ่งก็คือการละลายของโลหะลงสู่สารละลายที่มากขึ้น ทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) เพิ่มมากขึ้น ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) ของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กในสารละลายกรดซัลฟิวริกเลื่อนไปทางด้านแอนโนดิก เมื่อเพิ่มความเป็นกรดของสารละลายกรดซัลฟิวริก แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการออกซิไดซ์ของโปรตอนในสารละลายที่เพิ่มมากขึ้น และไม่พบว่าโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กมีพฤติกรรมเชิงป้องกัน (Passivation behavior)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสังเกตจากกราฟโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันทางด้านแอโนดที่มีการเพิ่มขึ้นของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current density) อย่างต่อเนื่อง ซึ่งถ้าหากมีพฤติกรรมเชิงป้องกันค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าทางด้านแอโนดจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มขึ้นไปถึงจุดหนึ่ง

ตารางที่ 4.1 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กในน้ำกลั่นและสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ pH เท่ากับ 5 และ 6

ความเข้มข้น	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr} , A/cm ²)	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr} , V _{SCE})
pH 5	8.12×10^{-7}	+0.132
pH 6	3.84×10^{-7}	+0.051
น้ำกลั่น	6.23×10^{-8}	+0.034

การใช้วิธีการประมาณการนอกช่วงของทาเฟิล (Tafel extrapolation) เป็นวิธีที่การใช้คำนวณหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน และค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน จากกราฟโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชัน ซึ่งคำนวณได้ดังตารางที่ 4.1 เห็นได้ว่าเมื่อค่าความเป็นกรดเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยในสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ pH เท่ากับ 5 มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนมากกว่าเมื่อเทียบกับสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ pH เท่ากับ 6 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กสำหรับสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ pH เท่ากับ 5 และ 6 พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง +0.051 V และ +0.132 V



(ก) pH เท่ากับ 5

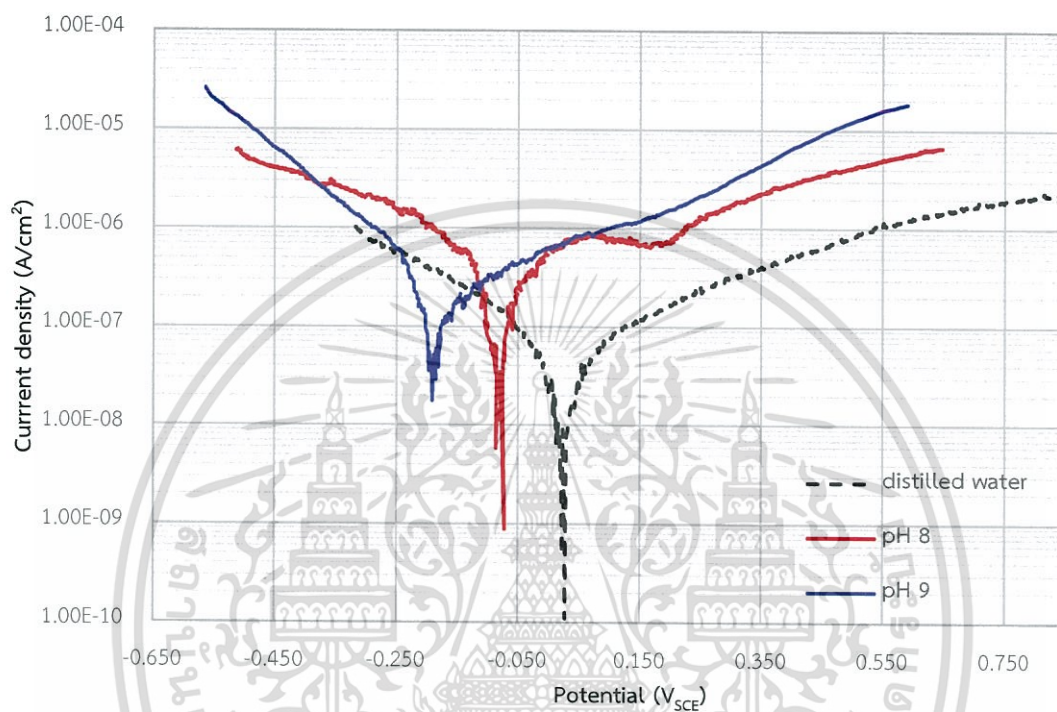
(ข) pH เท่ากับ 6

รูปที่ 4.2 โลหะผสมนิกเกิล-เหล็กที่เคลือบบนผิวโลหะทองแดงหลังจากทำการทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ pH ต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 แสดงลักษณะของพื้นผิวโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กหลังจากทำการทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ pH เท่ากับ 5 และ 6 ด้วยเทคนิคโพเทนซิโอดนามิกโพลาริเซชัน ไม่สามารถสังเกตลักษณะของพื้นผิวที่โดนกัดกร่อนได้อย่างชัดเจน ซึ่งอาจจำเป็นต้องใช้ทัศนูปกรณ์เพื่อวิเคราะห์หาลักษณะพื้นผิวเพิ่มเติม

4.2.2 พฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กในสารละลายเบส



รูปที่ 4.3 กราฟโพเทนซิโอดนามิกโพลาริเซชันของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กในน้ำกลั่น และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ pH เท่ากับ 8 และ 9

จากรูปที่ 4.3 แสดงกราฟโพเทนซิโอดนามิกโพลาริเซชันของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กในน้ำกลั่น และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ pH เท่ากับ 8 และ 9 ซึ่งแสดงผลกระทบของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อโลหะผสมนิกเกิล-เหล็ก และจากวิธีการประมาณการนอกช่วงของทาลเฟิล (Tafel extrapolation) ทำให้คำนวณหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) และค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) ได้ดังตารางที่ 4.2 เห็นได้ชัดว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มความเป็นเบสของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ นอกจากนี้ยังส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเลื่อนไปทางด้านแคโทดิก

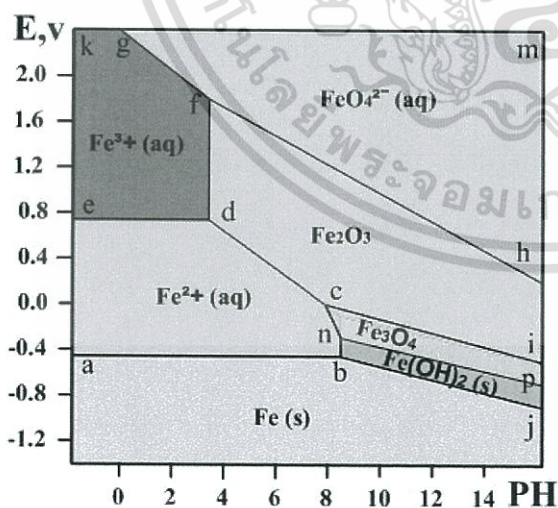
กราฟโพเทนซิโอดนามิกโพลาริเซชันของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ pH เท่ากับ 8 และ 9 มีลักษณะไม่เรียบ หรือมีลักษณะของสัญญาณรบกวน (Noise) เมื่อเทียบกับกราฟโพเทนซิโอดนามิกโพลาริเซชันของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กในสารละลาย

กรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ทั้งนี้เนื่องมาจากการพยายามเกิดขึ้นป้องกันของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็ก ลักษณะของกราฟจึงมีการลดลงของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า แต่ไม่สามารถเกิดพฤติกรรมเชิงป้องกันได้ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจึงมีค่าเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้กราฟมีลักษณะไม่เรียบ

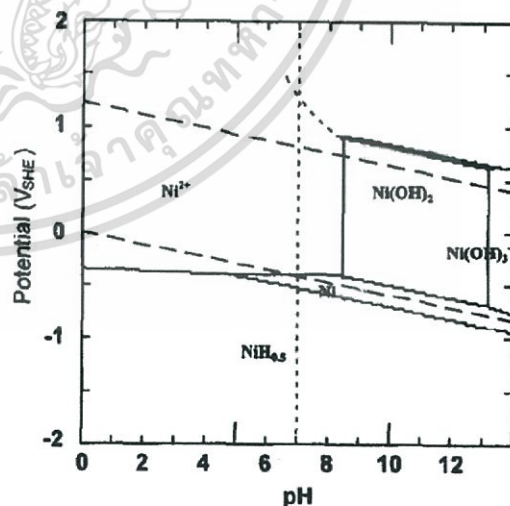
ตารางที่ 4.2 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กในน้ำกลั่น และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ pH เท่ากับ 8 และ 9

ความเข้มข้น	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr} , A/cm ²)	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr} , V _{SCE})
pH 8	3.76×10^{-7}	-0.078
pH 9	3.53×10^{-7}	-0.187
น้ำกลั่น	6.23×10^{-8}	+0.034

จากตารางที่ 4.2 การเพิ่มความเป็นเบสของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเลื่อนไปทางด้านแคโทดเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กสำหรับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทั้ง pH เท่ากับ 8 และ 9 พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง -0.078 V และ -0.187 V



รูปที่ 4.4 แผนภาพพัวเบของเหล็ก [29]



รูปที่ 4.5 แผนภาพพัวเบของนิกเกิล [30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

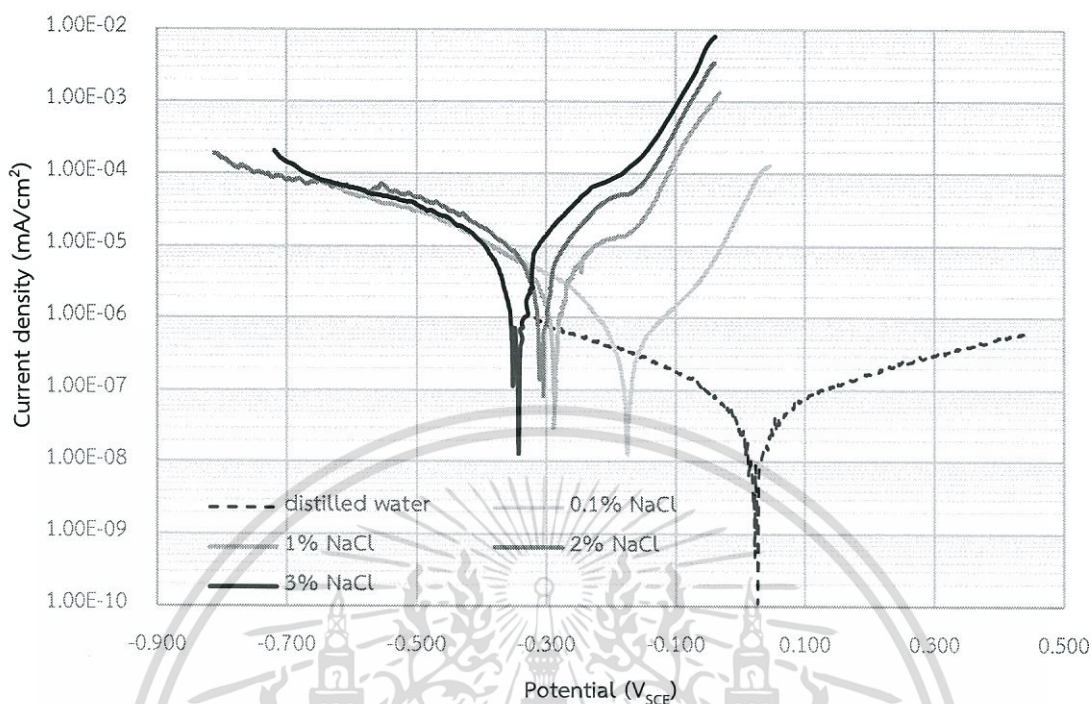
จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 แสดงแผนภาพพัวเบ (Pourbaix diagram) ของเหล็ก และ นิกเกิลตามลำดับ ในสภาวะของสารละลายที่มีค่า pH เท่ากับ 8 มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเท่ากับ -0.397 V เมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้ามาตรฐานไฮโดรเจน เห็นได้ชัดว่าเหล็ก และนิกเกิลถูกออกซิไดซ์ด้วย ออกซิเจนเป็น Fe^{2+} และ Ni^{2+} ตามลำดับ เนื่องจากในสภาวะนี้เหล็ก และนิกเกิลมีความเสถียรอยู่ใน รูปของ Fe^{2+} และ Ni^{2+} และเมื่อเพิ่มความเป็นเบสหรือที่ pH เท่ากับ 9 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่า เท่ากับ -0.423 V เมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้ามาตรฐานไฮโดรเจน เห็นได้ว่าค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนมี ค่าลดลงเมื่อเทียบกับ pH เท่ากับ 8 เนื่องจากในสภาวะที่ pH เท่ากับ 9 เหล็กและนิกเกิลมีความ เสถียรอยู่ในรูปของ $\text{Fe}(\text{OH})_2$ และ $\text{Ni}(\text{OH})_2$ ซึ่งเกิดเป็นชั้นป้องกันที่พื้นผิวของโลหะ ทำให้ ความสามารถในการออกซิไดซ์ของออกซิเจนลดลงหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือออกซิเจนออกซิไดซ์โลหะ ได้ยากขึ้น



รูปที่ 4.6 โลหะผสมนิกเกิล-เหล็กที่เคลือบบนผิวโลหะทองแดงหลังจากทำการทดสอบการกัดกร่อน ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ pH ต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.6 แสดงลักษณะของพื้นผิวโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กหลังจากทำการทดสอบ การกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ pH เท่ากับ 8 และ 9 ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสไตนา- มิกโพลาริเซชัน ไม่สามารถสังเกตลักษณะของพื้นผิวที่โดนกัดกร่อนได้อย่างชัดเจน ซึ่งอาจจำเป็นต้อง ใช้ทัศนูปกรณ์เพิ่มเติม เพื่อวิเคราะห์หาลักษณะพื้นผิวเช่นเดียวกับพื้นผิวของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็ก หลังจากทำการทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายกรดซัลฟิวริก

4.2.3 พฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กในสารละลายโซเดียมคลอไรด์



รูปที่ 4.7 กราฟโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กในน้ำกลั่นและสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1% 1% 2% และ 3% โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.7 แสดงกราฟโพเทนชิโอไดนามิกของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เมื่อนำไปหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) และค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) ดังตารางที่ 4.3 พบว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ และเห็นได้ชัดว่าค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ รวมไปถึงค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กในสารละลายโซเดียมคลอไรด์มีค่าเป็นลบมากกว่าน้ำกลั่น ซึ่งสามารถบ่งชี้ได้ว่ามีความต้านทานการกัดกร่อนที่แย่ในสภาวะที่เกิดการกัดกร่อน เนื่องจากมีค่าศักย์ไฟฟ้าสมดุลที่ต่ำกว่า จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่ายขึ้น และไม่พบว่าโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กมีพฤติกรรมเชิงป้องกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yang และคณะ [26] และ Srinivasan และคณะ [28]

นอกจากนี้ยังสามารถบ่งบอกได้ถึงพฤติกรรมการกัดกร่อนที่รุนแรงอย่างมากในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ซึ่งสังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นของค่ากระแสไฟฟ้าทางด้านแอโนดิกของกราฟโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชัน เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Da-hai และคณะ [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน และค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กในน้ำกลั่นและสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1% 1% 2% และ 3% โดยน้ำหนัก

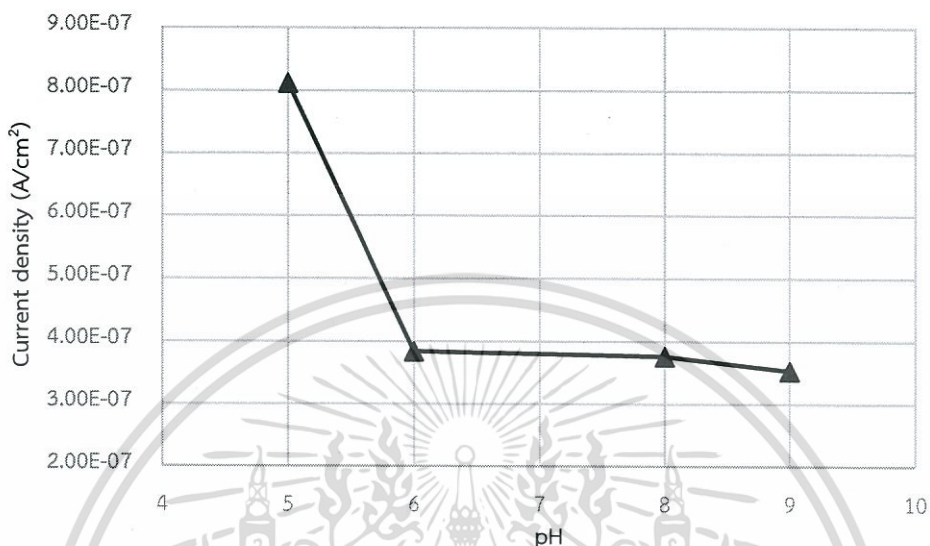
ความเข้มข้น	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr} , A/cm ²)	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr} , V _{SCE})
0.1% NaCl	5.58×10^{-7}	-0.186
1% NaCl	4.57×10^{-6}	-0.287
2% NaCl	9.40×10^{-6}	-0.313
3% NaCl	1.54×10^{-5}	-0.341
น้ำกลั่น	6.23×10^{-8}	+0.034

จากตารางที่ 4.3 พบว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ กล่าวคือมีปริมาณของคลอไรด์ไอออนเพิ่มมากขึ้น และมีค่าสูงสุดในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3% โดยน้ำหนัก จึงสรุปได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์คือการเพิ่มปริมาณคลอไรด์ไอออน ส่งผลให้สารละลายมีความสามารถในการนำไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งการนำไฟฟ้าสนับสนุนปฏิกิริยาทั้งทางด้านแคโทดิก และแอโนดิก ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าของทั้งสองด้านมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อกระแสไฟฟ้าของทั้งสองด้านมีค่าเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้มีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่มากขึ้น ส่งผลให้โลหะละลายลงสู่สารละลายเป็นโลหะไอออนผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันได้มากขึ้น จึงมีอัตราการกัด-กร่อนที่เพิ่มขึ้น

ลักษณะของพื้นผิวโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กหลังจากทำการทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.1% 1% 2% และ 3% โดยน้ำหนักพบว่า โลหะผสมนิกเกิล-เหล็กถูกกัดกร่อนมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์

4.3 การศึกษาความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนกับ สารละลายกรด เบส และโซเดียมคลอไรด์

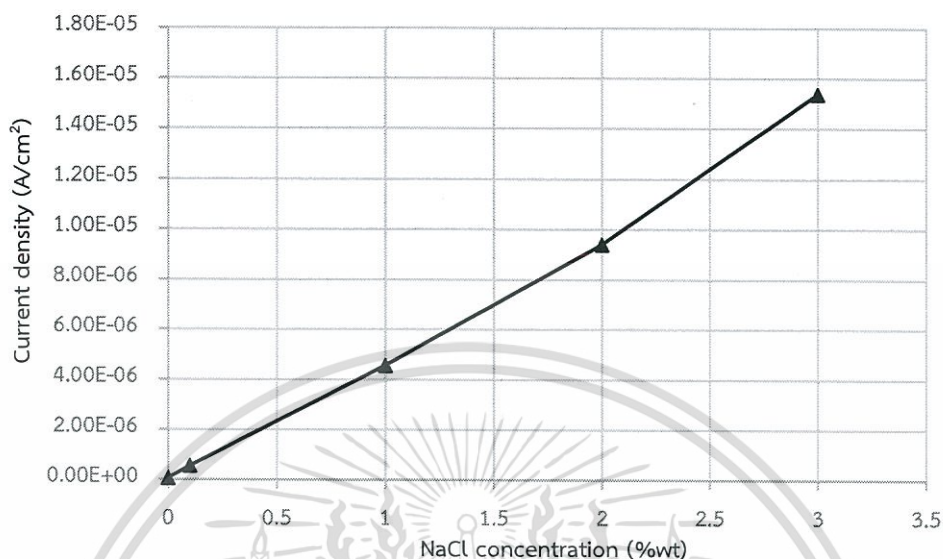
4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและ pH



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและ pH

จากรูปที่ 4.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน และความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ pH เท่ากับ 5 และ 6 และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ pH เท่ากับ 8 และ 9 ทำให้เห็นได้ชัดว่าที่มีค่า pH ต่ำ เกิดการกัดกร่อนของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กได้มากกว่าที่มีค่า pH สูง สังเกตได้จาก ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กในสารกรดซัลฟิวริกที่ pH เท่ากับ 5 มีค่าสูงมากอย่างเห็นได้ชัด

4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์

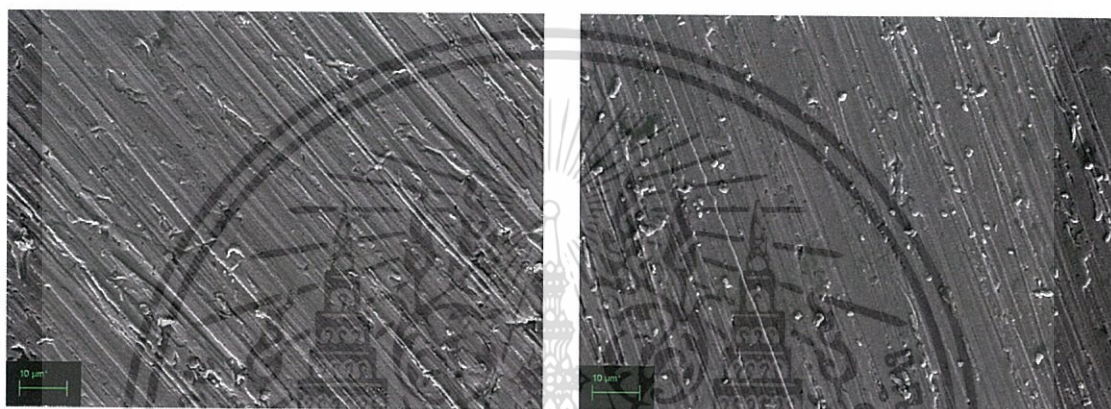


รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์

จากรูปที่ 4.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน และสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3% โดยน้ำหนัก มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนสูงที่สุด และพบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์มีลักษณะเป็นเส้นตรง (Linear equation) โดยตามหลักจลนศาสตร์เคมีสามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า $-r_A = kc_A$ หรือที่เรียกว่า สมการปฏิกิริยาเคมีอันดับหนึ่ง (First-order reaction) [34]

4.4 การศึกษาพฤติกรรมการสูญเสียของเหล็กในชั้นโลหะผสม

การศึกษาพฤติกรรมการสูญเสียของเหล็กในชั้นโลหะผสมนิกเกิล-เหล็ก (Deironification) จากการทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ pH เท่ากับ 5 โดยนำชิ้นงานไปศึกษาลักษณะพื้นผิว และวิเคราะห์หาปริมาณธาตุนิกเกิล และเหล็กโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ติดตั้งร่วมกับเครื่องเอกซเรย์สเปกโทรสโคปแบบกระจายพลังงาน (SEM-EDX) ทั้งก่อน และหลังทำการทดสอบการกัดกร่อน ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชันที่ค่าศักย์ไฟฟ้า +200 mV จากค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น (Open Circuit Potential, OCP) เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของนิกเกิล และเหล็กในโลหะผสม และลักษณะพื้นผิวของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กที่กำลังขยาย 1000 เท่า



(ก) ก่อนการทดสอบการกัดกร่อน

(ข) หลังการทดสอบการกัดกร่อน

รูปที่ 4.10 ลักษณะพื้นผิวของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็ก

จากรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของพื้นผิวโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กก่อนและหลังการทดสอบการกัดกร่อนซึ่งมีลักษณะขรุขระ ไม่เรียบ เนื่องจากการกัดกร่อนในขั้นตอนการเตรียมผิวชิ้นงานของโลหะ และผิวของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กหลังจากการทดสอบการกัดกร่อน (ข) มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยจากก่อนการทดสอบการกัดกร่อน (ก) โดยมีลักษณะขรุขระเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากการกัดกร่อน

เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์สเปกโทรสโคปแบบกระจายพลังงานเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณนิกเกิล และเหล็กในโลหะผสมนิกเกิล-เหล็ก ดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าปริมาณนิกเกิล และเหล็กในโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย โดยนิกเกิลมีปริมาณลดลงจาก 75.53% เหลือเพียง 73.64% และส่งผลให้ปริมาณเหล็กเพิ่มขึ้นจาก 24.47% เป็น 26.36% คิดเป็นความแตกต่างเพียง 1.89% เท่านั้น ซึ่งเครื่องเอกซเรย์สเปกโทรสโคปแบบกระจายพลังงานมีความแม่นยำในการวิเคราะห์ $\pm 2\%$ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าความแตกต่างเพียง 1.89% นี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนโดยมวลอย่างมีนัยสำคัญ [35]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 อัตราส่วนโดยมวลของนิกเกิล และเหล็กในโลหะผสมนิกเกิล-เหล็ก

ก่อน-หลัง	Ni	Fe
ก่อนทดสอบการกัดกร่อน	75.53	24.47
หลังทดสอบการกัดกร่อน	73.64	26.36



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนในสารละลายกรด เบส และโซเดียมคลอไรด์ของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กจากการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชัน และศึกษาพฤติกรรมการสูญเสียเหล็กในชั้นโลหะผสมนิกเกิล-เหล็ก (Deironification) ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชัน สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. การศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็ก ในสารละลายกรดซัลฟิวริกที่มีค่า pH เท่ากับ 5 และ 6 พบว่าเมื่อเพิ่มความเป็นกรดของสารละลายกรดซัลฟิวริกส่งผลให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) เพิ่มขึ้น และค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) เลื่อนไปทางด้านแคโทดิก

2. การศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็ก ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีค่า pH เท่ากับ 8 และ 9 พบว่าเมื่อเพิ่มความเป็นเบสของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ส่งผลให้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนลดลง และค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเลื่อนไปทางด้านแคโทดิก

3. จากการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็ก ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.1% 1% 2% และ 3% โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่าเพิ่มขึ้น และค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเลื่อนไปทางด้านแคโทดิก

4. จากการศึกษาพฤติกรรมการสูญเสียเหล็กในชั้นโลหะผสมของนิกเกิล-เหล็ก ในสารละลายกรดซัลฟิวริกที่มีค่า pH เท่ากับ 5 พบว่าไม่เกิดพฤติกรรมดังกล่าว เนื่องจากสัดส่วนโดยมวลของนิกเกิล และเหล็กในโลหะผสมมีการเปลี่ยนน้อยมากเมื่อเทียบชิ้นงานก่อนการทดสอบการกัดกร่อน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เพิ่มปริมาณของ $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายโลหะผสมเพื่อเพิ่มสัดส่วนเชิงมวลของเหล็กในโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กหลังจากการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า
2. ทำการศึกษาพฤติกรรมการสูญเสียเหล็กในชั้นโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กเพิ่มเติมในสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ pH เท่ากับ 4
3. ทำการศึกษาพฤติกรรมการสูญเสียเหล็กในชั้นโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กเพิ่มเติมในสัดส่วนของนิกเกิล และเหล็กในปริมาณที่แตกต่างจากในโครงการพิเศษนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สุธา สุทธิเรืองวงศ์. 2547. การกัดกร่อน. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.corrosionchemist.com/>.
- [2] คลังความรู้สู่ความเป็นเลิศ. 2560. การกัดกร่อนและการป้องกัน. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.scimath.org/lesson-chemistry/item/7182-2017-06-05-14-44-28>.
- [3] V. Torabinejad, M. Aliofkhaezai, S. Assareh, M.H. Allahyarzadeh and A.S. Rouhaghdam. 2016. "Electrodeposition of Ni-Fe alloys, composites, and nano coatings – A review." *Journal of Alloys and Compounds*. 691 : 841-859.
- [4] Y. Wang, G. Cheng, W. Wu, Q. Qiao, Y. Li and X. Li. 2015. "Effect of pH and chloride on the micro-mechanism of of pitting corrosion for high strength pipeline steel in aerated NaCl solutions." *Applied Surface Science*. 349 : 746-756.
- [5] สุธา สุทธิเรืองวงศ์. 2559. "อัตราการกัดกร่อนของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กจากการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าในน้ำปราศจากไอออนและสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่มีการเติมอากาศ." *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*. 21(2) : 176-187.
- [6] A. Chansena and S. Sutthiruangwong. 2017. "Corrosion behavior of electrodeposited Co-Fe alloys in aerated solutions." *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 429 : 251-256.
- [7] M.G. Fontana. 1988. *Corrosion Engineering*. 3rd ed. New York : McGraw-Hill.
- [8] สมฤกษ์ จันทรอัมพร. 2554. หลักการพื้นฐานของการกัดกร่อน. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [9] สาโรช พันธุ์แพ และอภิชาติ ชรรณวิทย์กุล. 2526. การชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : ห้างหุ้นส่วนจำกัด โรงพิมพ์ชวนพิมพ์.
- [10] ศูนย์รวมเคมีภัณฑ์ทุกชนิด. 2560. กรดซัลฟิวริก. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.worldchemical.co.th/th/product-detail-113-กรดซัลฟิวริก.html>.
- [11] มนัส สติรจินดา. 2538. โลหะนอกกลุ่มเหล็ก. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม. 2561. ชนิดของสภาวะแม่เหล็ก. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://elec.chandra.ac.th/courses/ELEC2101/termwork/magnetic/timesaving2.html>.
- [13] SIMOTEC. 2561. เส้นโค้งฮิสเตอร์เรซิสของแม่เหล็ก. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.simotecthailand.co.th/knowledge9.html>
- [14] Wikipedia. 2018. Copper. [Online]. Available : <https://en.wikipedia.org/wiki/Copper>.
- [15] Total materia. 2561. คุณสมบัติทองแดง. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CopperProperties&LN=TH>.
- [16] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะ และวัสดุแห่งชาติ. 2561. การสูญเสียส่วนผสมบางตัว. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www2.mtec.or.th/th/research/famd/lcenter/selective.html>.
- [17] มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง. 2561. Scanning Electron Microscope : SEM. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://web2.mfu.ac.th/center/stic/micro-analysis-instrument-menu/item/96-scanning-electron-microscop.html>.
- [18] J.H. Kim, T.H. Yim and J.H. Lee. 2013. “Effects of bath and operating conditions on the composition of Ni-Fe alloy electroplating for solar cell substrate.” *Current Applied Physics*. 13 : S108-S110.
- [19] L. Jinlong, M. Yang, K. Suzuki, H. Miura and Y. Zhang. 2017. “Comparison of resistance of electrodeposited pure Ni and nanocrystalline Ni-Fe alloy in borate buffer solution.” *Materials Chemistry and Physics*. 202 : 15-21.
- [20] C.H. Liang, S.S. Wang, N.B. Huang and P. Wang. 2015. “Corrosion behavior of brass coinage in synthetic sweat solution.” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 25 : 654-660.
- [21] M. Tavoosi and A. Barahimi. 2017. “Corrosion behavior of amorphous-nanocrystalline Fe-Ni-Cr electrodeposited coatings.” *Surfaces and Interfaces*. 8 : 103-111.
- [22] J. Bhandari, F. Khan, R. Abbassi, V. Garaniya and R. Ojeda. 2015. “Modelling of pitting corrosion in marine and offshore steel structures – A technical review.” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 37 : 39-62.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [23] H. Wall and L. Wadsö. 2013. “Corrosion rate measurements in steel sheet pile walls in a marine environment.” *Marine Structures*. 33: 21-32.
- [24] C. Ma, C. Zhou and J. Sun. 2018. “Electrochemical corrosion behavior of the cobalt modified aluminide coating in 3.5 wt% NaCl solutions.” *Progress in Natural Science: Materials International*. 28 : 85-89.
- [25] J.Y. Zou and D.T. Chin. 1987. “Mechanism of Steel in Concentrated NaOH Solutions.” *Electrochimica Acta*. 32(12) : 1751-1756.
- [26] L. Yang, Q. Jiang, M. Zheng, B.H. and Y. Li. 2016. “Corrosion behavior of Mg-8Li-3Zn-Al alloy in neutral 3.5% NaCl solution.” *Journal of Magnesium and Alloys*. 4 : 22-26.
- [27] X. Da-hai, S. Shi-zhe, W. Ji-hui, J. Yu-zuan and H. Zhe-wen. 2012. “Corrosion behavior of tinplate in NaCl solution.” *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*. 22 : 717-724.
- [28] A. Srinivasan, C. Blawert, Y. Huang, C.L. Mendis, K.U. Kainer and N. Hort. 2014. “Corrosion behavior of Mg-Gd-Zn based alloys in aqueous NaCl solution.” *Journal of Magnesium and Alloys*. 2 : 245-256.
- [29] Substance & Technologies. 2018. **Pourbaix diagrams**. [Online]. เข้าถึงได้จาก : http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=pourbaix_diagrams.
- [30] B. Beverskog and I. Puigdomenech. 1997. “Revised Pourbaix Diagrams for Nickel at 25-300 °C.” *Corrosion Science*. 39(5) : 969-980.
- [31] E.H. Han, J. Wang and J. Wang. 2016. “Influence of Conductivity on Corrosion Behavior of 304 Stainless Steel in High Temperature Aqueous Environment.” *Journal of Materials Science & Technology*. 32 : 333-340.
- [32] วัชรชาติ สารระคำ, ภัสส์ชนกภร จีงจริยานนท์ และอภิสรรา เกตุพงษ์ชัย. 2557. “การยับยั้งการกัดกร่อนของโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 และเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในสารละลายกรดโดยโซเดียมโอดีเคซิลซัลเฟต.” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม, ภาควิชาเคมี, คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [33] D.A. Jones. 1996. **Corrosion and Prevention of Corrosion**. 2nd ed. New Jersey : Prentice-Hall.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [34] O. Levenspiel. 1999. **Chemical Reaction Engineering**. 3rd ed. New York : John Wiley and Sons.
- [35] Australian Microscopy and Microanalysis Research Facility. 2014. **Accuracy, Precision and Detection Limits**. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.ammrf.org.au/myscope/analysis/eds/accuracy/>.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

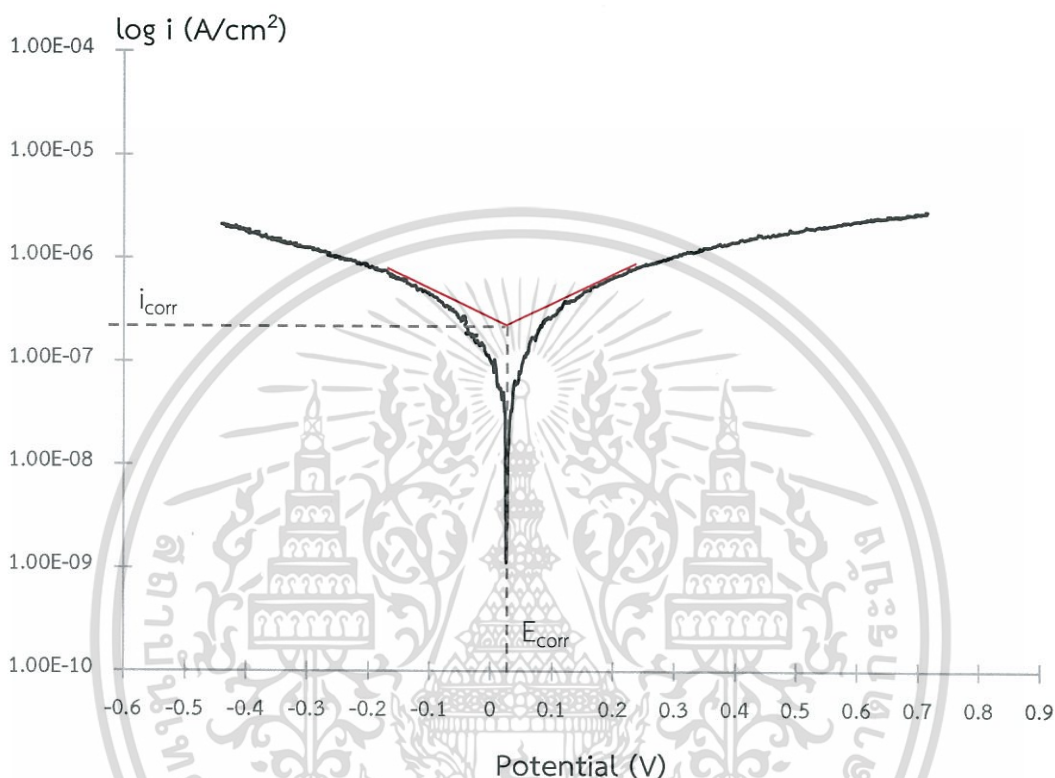


ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ขั้นตอนการคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr})



รูปที่ ก.1 การหาความชันของทาเฟิล

การคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) สามารถคำนวณได้จากวิธีประมาณการนอกช่วงของทาเฟิล (Tafel extrapolation) ความชันของทาเฟิลด้านแคโทดคือเส้นตรงสีแดงที่มีความชันเป็นลบหรือเส้นด้านซ้าย ส่วนความชันของทาเฟิลด้านแอโนดคือเส้นตรงที่มีความชันเป็นบวกหรือเส้นด้านขวา เมื่อลากทาเฟิลของทั้งด้านแคโทดและแอโนด จะเกิดจุดตัดกันที่จุดวกกลับของกราฟโพลาริเซชัน โดยเมื่อลากเส้นทาเฟิลทั้งด้านแคโทดและแอโนด จะได้สมการเส้นตรงเพื่อมาคำนวณ i_{corr} และ E_{corr} ได้ดังสมการ โดยจะยกตัวอย่างการคำนวณจากกราฟโพลาริเซชันของ pH 6

$$y = -1.63783x - 6.50018 \quad (\text{สมการเส้นตรงของทาเฟิลด้านแคโทด}) \quad \text{----- (ก.1)}$$

$$y = 1.37633x - 6.48678 \quad (\text{สมการเส้นตรงของทาเฟิลด้านแอโนด}) \quad \text{----- (ก.2)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแกน x คือ Potential (V) สามารถคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน E_{corr} ได้จากค่า x ที่อยู่ในสมการ สังเกตว่าสมการทั้งสองสมการมีค่า y เท่ากัน ดังนั้นจึงนำสมการที่ ก.1 เท่ากับสมการที่ ก.2 ได้เป็นสมการที่ ก.3

$$-1.63783x - 6.50018 = 1.37633x - 6.48678 \quad \text{----- (ก.3)}$$

แก้สมการที่ ก.3 หาค่า x ได้เท่ากับ 0.051 จากนั้นนำค่า x แทนลงในสมการที่ ก.1 หรือสมการที่ ก.2 เพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) ได้จากค่า y ดังสมการที่ ก.4

$$y = -1.63783 (0.051) - 6.50018 \quad \text{----- (ก.4)}$$

แก้สมการที่ ก.4 จะได้ค่า y เท่ากับ -6.416 จะเห็นว่าค่าที่ได้ไม่ตรงกับภาพ เนื่องด้วยแกน y เป็นการพล็อตกราฟโพลาร์ไรเซชันในโปรแกรมไมโครซอฟต์เอกเซล เป็นการพล็อตแบบมาตราส่วนลอการิทึม ค่า y ที่ได้ต้องนำมาถอดลอการิทึมดังสมการที่ ก.5 และ ก.6

$$\log I = -6.416 \quad \text{----- (ก.5)}$$

$$I = 3.84 \times 10^{-7} \text{ A} \quad \text{----- (ก.6)}$$

จากสมการที่ ก.6 จะได้ค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) เท่ากับ $3.84 \times 10^{-7} \text{ A}$ สามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) ได้ โดยนำค่าจากสมการที่ ก.6 มาหารกับพื้นที่ผิวที่โดนกัดกร่อน คำนวณได้จากพื้นที่ผิววงกลมของชิ้นงานที่สัมผัสกับสารละลายซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 cm^2 ดังสมการที่ ก.7

$$i_{corr} = \frac{3.84 \times 10^{-7} \text{ A}}{1 \text{ cm}^2} = 3.84 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \quad \text{----- (ก.7)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

การคำนวณปริมาณกรดซัลฟิวริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์สำหรับใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็ก

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

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

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

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

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

$$C_{2H^+} = 36 \frac{\text{mol}}{\text{L}}$$

คำนวณหาปริมาตรสำหรับใช้ปรับ pH เท่ากับ 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 เท่ากับ 1 ปริมาตรของสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 2.78 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตรียมสารละลาย pH เท่ากับ 5 จากสารละลาย pH เท่ากับ 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 เท่ากับ 6 จาก สารละลาย pH เท่ากับ 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 เท่ากับ 5 จากสารละลาย pH เท่ากับ 1 โดยปิเปตสารละลาย pH เท่ากับ 1 มา 0.1 มิลลิลิตร และเตรียมสารละลาย pH เท่ากับ 6 จากสารละลาย pH เท่ากับ 5 โดยปิเปตสารละลาย pH เท่ากับ 5 มา 10 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร

2) คำนวณหาปริมาณที่ต้องใช้สำหรับปรับ pH ของโซเดียมไฮดรอกไซด์

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

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

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

เตรียมสารละลาย pH เท่ากับ 8 จากสารละลาย pH เท่ากับ 12

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

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

เตรียมสารละลาย pH เท่ากับ 8 จากสารละลาย pH เท่ากับ 12

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

ภาคผนวก ค.

การคำนวณปริมาณโซเดียมคลอไรด์สำหรับใช้ในการทดสอบพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็ก

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

% คือ ร้อยละโดยมวล

d คือ ความหนาแน่นของสารละลาย

1. โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1% โดยมวล

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

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

2. โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1% โดยมวล

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

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

3. โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2% โดยมวล

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

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

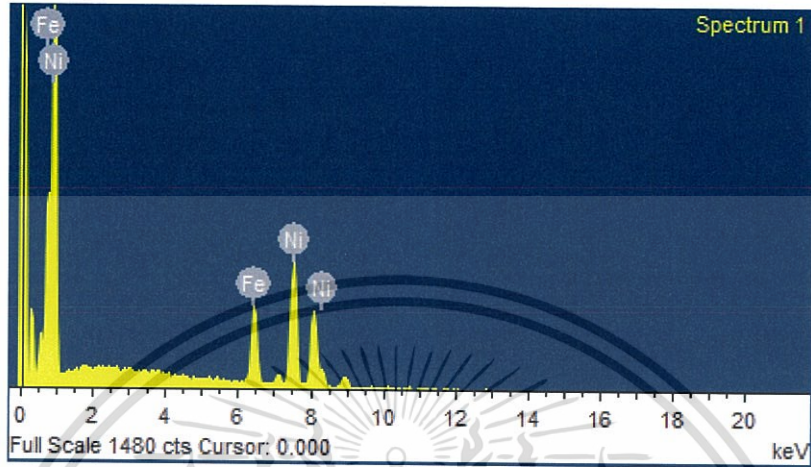
4. โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3% โดยมวล

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

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

ภาคผนวก ง.

ผลการวิเคราะห์หาปริมาณนิกเกิลและเหล็กก่อนการทดสอบการกัดกร่อน



รูปที่ ง.1 สเปกตรัมของนิกเกิลและเหล็กก่อนการทดสอบการกัดกร่อน

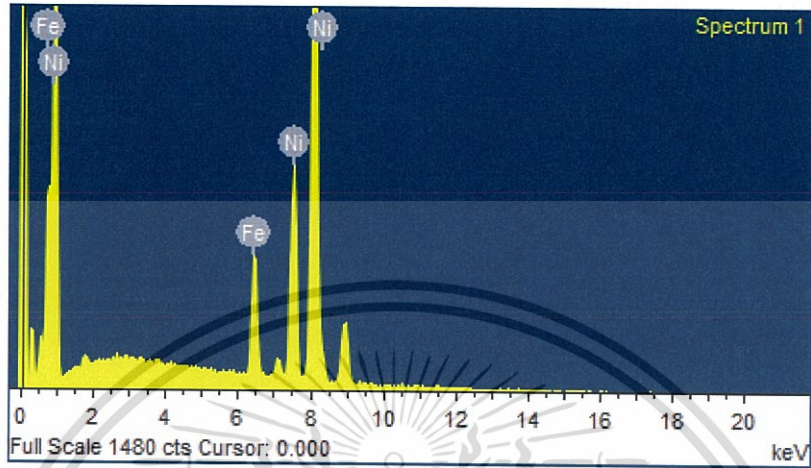
ตารางที่ ง.1 ปริมาณนิกเกิลและเหล็กในโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กก่อนการทดสอบการกัดกร่อน

Element	Weight%	Atomic%
Fe K	24.47	25.54
Ni K	75.53	74.46
Totals	100.00	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ.

ผลการวิเคราะห์หาปริมาณนิกเกิลและเหล็กหลังการทดสอบการกัดกร่อน



รูปที่ จ.1 สเปกตรัมของนิกเกิลและเหล็กหลังการทดสอบการกัดกร่อน

ตารางที่ จ.1 ปริมาณนิกเกิลและเหล็กในโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กหลังการทดสอบการกัดกร่อน

Element	Weight%	Atomic%
Fe K	26.36	25.54
Ni K	73.64	74.46
Totals	100.00	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



งานทะเบียนคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ

วันที่ 15 เดือน กรกฎาคม พ.ศ 2561

ข้าพเจ้า นางสาวชวันรัตน์ ศิริรัตนสุวรรณ รหัสประจำตัว 57050398

นายธนกาญจน์ สุทธิโรจน์ รหัสประจำตัว 57050419

นายธีรตนย์ วิมลศิลป์ รหัสประจำตัว 57050426

นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี

ขอรับรองว่าโครงการพิเศษ เรื่อง

ชื่อภาษาไทย พฤติกรรมการกัดกร่อนในสารละลายกรด เบส และโซเดียมคลอไรด์ของโลหะผสม
นิกเกิล-เหล็กจากการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า

ชื่อภาษาอังกฤษ Corrosion Behavior of Electrodeposited Nickel-Iron Alloys in Acidic, Basic
and Sodium Chloride Solutions

ปีการศึกษา 2560

เป็นผลงานวิจัยที่ได้คัดลอกหรือละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นและได้ผ่านการตรวจสอบความ
ซ้ำซ้อนเรียบร้อยแล้ว และได้แนบเอกสารการตรวจสอบการลอกเลียนงานวรรณกรรมที่ตรวจสอบจาก
เล่มโครงการพิเศษฉบับสมบูรณ์แล้ว

โปรแกรมอักขราวิสุทธิ 5.08 %

ลงชื่อ ชวันรัตน์ ศิริรัตนสุวรรณ

ลงชื่อ ธนกาญจน์ สุทธิโรจน์

ลงชื่อ ธีรตนย์ วิมลศิลป์

(นางสาวชวันรัตน์ ศิริรัตนสุวรรณ)

(นายธนกาญจน์ สุทธิโรจน์)

(นายธีรตนย์ วิมลศิลป์)

นักศึกษา

นักศึกษา

นักศึกษา

ข้าพเจ้า ผศ.ดร.สุธา สุทธิเรืองวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษได้ตรวจสอบโครงการพิเศษของ
นักศึกษาข้างต้นแล้ว ขอรับรองว่าเป็นผลงานวิจัยของนักศึกษาจริงและมีเนื้อหาสมบูรณ์ จึงลงชื่อไว้
เป็นหลักฐาน

ลงชื่อ.....

(ผศ.ดร.สุธา สุทธิเรืองวงศ์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้