

อัตราการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กจากการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า

Corrosion Rate of Electroplated Co-Fe Alloys



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2555

อัตราการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก  
จากการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า

Corrosion Rate of Electroplated Co-Fe Alloys



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

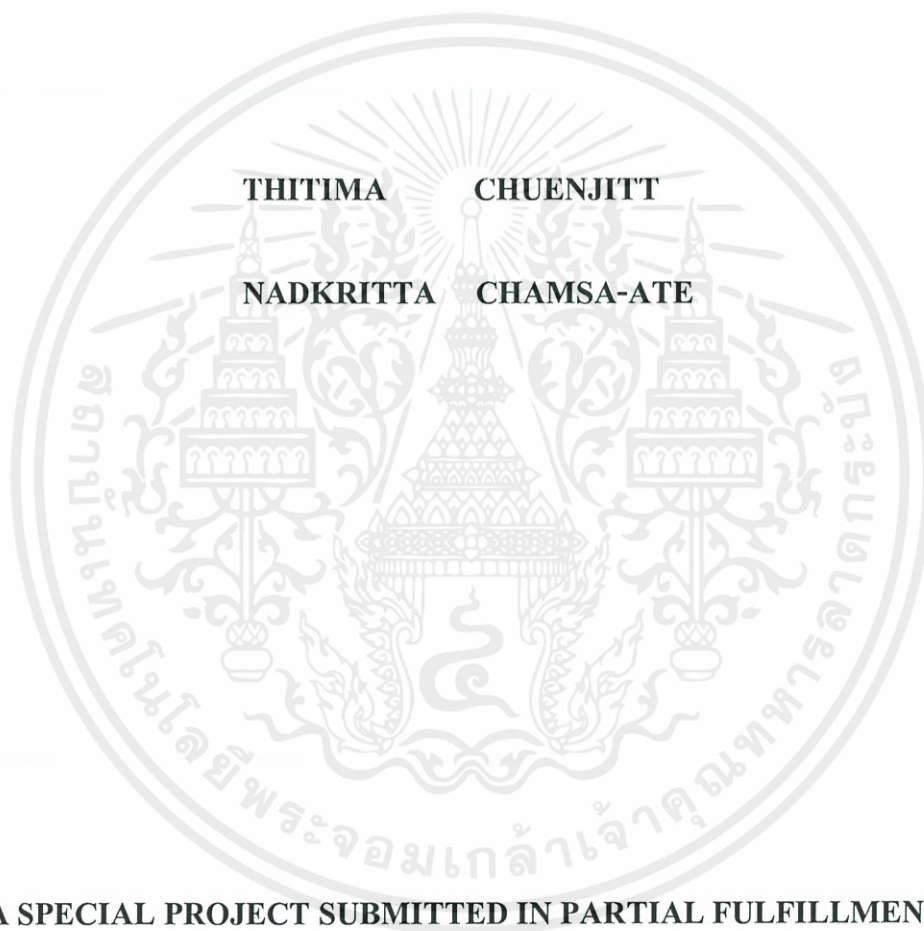
สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2555

# CORROSION RATE OF ELECTROPLATED Co-Fe ALLOYS



**THITIMA CHUENJITT**

**NADKRITTA CHAMSA-ATE**

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
IN INDUSTRIAL CHEMISTRY  
FACULTY OF SCIENCE**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**ACADEMIC YEAR 2555**  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ อัตราการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กจากการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า

Corrosion Rate of Electroplated Co-Fe Alloys

ชื่อนักศึกษา นางสาวจิตติมา ชื่นจิตต์  
นางสาวณัฐกฤตา แซ่มสอาด




ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม

ปีการศึกษา 2555

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สุธา สุทธิเรืองวงศ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2555

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ปทุมมา ศิริพันธ์โนน	
ดร.ปานไพลิน สีหาราช	
ผศ.ดร.สุธา สุทธิเรืองวงศ์	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังขอสงวนสิทธิ์ในการนำเอกสารฉบับนี้ไปใช้ซ้ำทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ อัตราการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กจากการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า

ชื่อนักศึกษา นางสาวจิตติมา ชื่นจิตต์  
นางสาวณัฐกฤตา แซ่มสอาด

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม

ปีการศึกษา 2555

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สุชา สุทธิเรืองวงศ์

### บทคัดย่อ

โลหะผสมโคบอลต์-เหล็กได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมต่างๆมากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics) เนื่องจากโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กมีสมบัติความเป็นแม่เหล็กที่ดี จึงนำไปผลิตเป็นหัวอ่านหัวเขียนฮาร์ดดิสก์ซึ่งทำให้ฮาร์ดดิสก์มีประสิทธิภาพที่ดีมากขึ้น แต่วัสดุที่เป็นโลหะนั้นก็มักจะพบปัญหาทางด้านการกัดกร่อน จึงเป็นที่มาของโครงการพิเศษนี้ ซึ่งสนใจพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.01 และ 0.001 N จากการเคลือบโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กลงบนผิวของทองแดงด้วยไฟฟ้าที่ pH เท่ากับ 2 ณ อุณหภูมิห้อง โดยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี (Cyclic voltammetry) และวัดอัตราการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนซิโอดีนามิกโพลาริเซชัน (Potentiodynamic polarization) พบว่าเมื่อปริมาณของเหล็กในโลหะผสมเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนจะเพิ่มมากขึ้น ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและค่าความต้านทานการถูกโพลาริเซชันมีค่าลดลง โดยความเข้มข้นของกรดที่มากขึ้นจะเป็นตัวสนับสนุนในการถูกโพลาริเซชันที่ง่ายมากขึ้นด้วย ดังนั้นปริมาณเหล็กในโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย โดยสามารถเขียนแผนภูมิอัตราการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กในสารละลายกรดซัลฟิวริก

ได้จากข้อมูลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ลิขสิทธิ์นี้ให้ด้วยเงื่อนไขข้อตกลงเบื้องต้น และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**คำสำคัญ :** การกัดกร่อน โลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก การเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า

<b>Title</b>	Corrosion Rate of Electroplated Co-Fe Alloys
<b>Students</b>	Thitima Chuenjitt Nadkriteria Chamsa-art
<b>Degree</b>	Bachelor of Science
<b>Major Program</b>	Industrial chemistry
<b>Academic Year</b>	2012
<b>Advisor</b>	Asst.Prof.Dr. Sutha Sutthiruangwong

### ABSTRACT

The Co-Fe alloys are used in many industries, especially in the electronic industries because of their good magnetic properties. They are applied to produce reader/writer for hard disk drives with better performance. The metal alloy materials often encounter corrosion problems. This work therefore aims to investigate the corrosion behavior of Co-Fe alloys. The testing solutions were sulfuric acid at 0.01 N and 0.001 N. The alloys were electrodeposited on Cu substrate at pH 2 and room temperature by cyclic voltammetry. The corrosion rates were determined by potentiodynamic polarization technique. The results showed that, when the amount of iron in the alloy was increased, the corrosion current density was also increased but the corrosion potential and the polarization resistance were decreased. The Co-Fe alloys can be easier polarized by increasing acid concentration. Once the amount of iron in Co-Fe alloys is increased, the corrosion rate will be increased. According to the results, the corrosion rate diagram of Co-Fe alloys in sulfuric acid solution was constructed.

**Keywords:** Corrosion, Co-Fe alloys, Electroplating

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความกรุณาอย่างยิ่งจาก ผศ.ดร.สุชา สุทธิเรืองวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่คอยให้คำปรึกษา ช่วยชี้แนะ รวมทั้งให้แง่คิดต่างๆ ในการจัดทำโครงการพิเศษ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสุดซึ้งในความเมตตาเสมอมา

ขอกราบขอบพระคุณผศ.ดร.ปยุตมา ศิริพันธ์ โนน และดร.ปานไพลิน สีหาราช ซึ่งเป็นคณะกรรมการสอบโครงการพิเศษที่ได้ให้คำแนะนำ ให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไข ทำให้โครงการพิเศษนี้มีความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ต่างๆ ให้แก่ผู้วิจัย ซึ่งช่วยให้ผู้วิจัยได้นำความรู้ต่างๆ เหล่านั้นมาประยุกต์ใช้ในการทำโครงการพิเศษได้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณนางสาวพิมพ์ภรณ์ มั่นพิริยะกุล พี่นักวิทยาศาสตร์ในหน่วยวิจัยเฉพาะทางด้านการคัดกรองที่คอยให้ความช่วยเหลือ แนะนำ และให้กำลังใจด้วยดีมาโดยตลอด รวมทั้งพี่นักวิทยาศาสตร์ภาควิชาเคมีที่คอยให้บริการ และให้ความช่วยเหลือในการยืมอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในโครงการพิเศษนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา และครอบครัวของผู้วิจัยที่ให้กำลังใจ คอยให้การสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง ทำให้โครงการพิเศษนี้เสร็จสิ้นอย่างสมบูรณ์ด้วยดี

ฐิติมา ชื่นจิตต์

ณัฐกฤตา แซ่มสอาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 การกักคร่อน	3
2.2 หลักการเกิดการกักคร่อนโดยปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า	4
2.3 รูปแบบการกักคร่อน	6
2.3.1 การกักคร่อนแบบสม่ำเสมอ	6
2.3.2 การกักคร่อนแบบกัลวานิก	7
2.3.3 การกักคร่อนแบบชอก	10
2.3.4 การกักคร่อนแบบหลุม	11
2.3.5 การกักคร่อนแบบกั๊ดเซาะ	15
2.3.6 การกักคร่อนบริเวณขอบเกรน	15
2.3.7 การแตกร้าวจากความเค้นและการกักคร่อน	16
2.3.8 การแตกร้าวจากการกักคร่อนร่วมกับความล้า	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.9 การเสียหายจากไฮโดรเจน	18
2.3.10 การกัดกร่อนแบบเฟรตติง	19
2.4 การเคลือบผิวด้วยโลหะ	21
2.4.1 การเคลือบผิวแบบจุ่มร้อน (Hot-Dipping)	21
2.4.2 การเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า (Electroplating)	22
2.4.3 การทำเคลดติง (Cladding)	24
2.4.4 การเคลือบโลหะแบบพ่น (Spraying)	24
2.5 ขั้นตอนการเคลือบผิวโลหะ	24
2.5.1 ขั้นตอนการเตรียมผิวชิ้นงาน	24
2.5.2 ขั้นตอนการเคลือบผิวโลหะ	26
2.5.3 ขั้นตอนการล้าง	26
2.5.4 ขั้นตอนการอบแห้ง	26
2.6 การทดสอบการกัดกร่อน	27
2.6.1 วัตถุประสงค์ของการทดสอบคุณภาพ ที่อาศัยการทดสอบการกัดกร่อน	27
2.6.2 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการเกิดการกัดกร่อน ในแต่ละช่วงของการทดสอบ	27
2.7 วิธีทดสอบการกัดกร่อน	28
2.7.1 Salt spray test	28
2.7.2 เทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชัน (Potentiodynamic polarization)	28
2.8 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวัดการกัดกร่อน	29
2.8.1 เซลล์ทดลอง	29

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8.2 ที่ใส่ขั้วไฟฟ้า (Electrode holder)	30
2.8.3 ขั้วไฟฟ้า (Electrodes)	30
2.9 โคบอลต์ (Cobalt, Co)	30
2.9.1 การค้นพบ	31
2.9.2 ลักษณะ	31
2.9.3 การใช้ประโยชน์	31
2.10 เหล็ก (Iron, Fe)	32
2.10.1 การค้นพบ	32
2.10.2 ลักษณะ	33
2.10.3 การใช้ประโยชน์	34
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	34
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย</b>	
3.1 อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	36
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	36
3.3 การเตรียมตัวอย่าง	37
3.4 การเตรียมสารละลาย	37
3.4.1 สารละลายที่ใช้ในการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า	37
3.4.2 สารละลายที่ใช้ในการทดสอบการกัดกร่อน	38
3.5 การเตรียมขั้วไฟฟ้า	38
3.5.1 ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode)	38
3.5.2 ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode)	38
3.5.3 ขั้วไฟฟ้าตรงข้าม (Counter electrode)	38
3.6 การเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า (Electroplating)	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คำปรึกษาเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.7 การทดสอบการกัดกร่อน (Corrosion test)	39
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล</b>	
4.1 การเคลื่อนผิวด้วยไฟฟ้า	41
4.2 ผลการทดสอบการกัดกร่อน	43
4.2.1 สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.01 N	43
4.2.2 สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.001 N	44
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย</b>	
5.1 สรุปผลการวิจัย	51
เอกสารอ้างอิง	52
ภาคผนวก	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างของปฏิกิริยาแอโนดิกและปฏิกิริยาแคโทดิก	5
ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงสัดส่วนเชิงมวลของ Co:Fe	37
ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบสัดส่วนเชิงมวลของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กในสารละลาย และสัดส่วนเชิงมวลของชั้นเคลือบของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กที่วัดได้จาก เทคนิค XRF ที่ใช้ทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.01 N	42
ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบสัดส่วนเชิงมวลของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กในสารละลาย และสัดส่วนเชิงมวลของชั้นเคลือบของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กที่วัดได้จาก เทคนิค XRF ที่ใช้ทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.01 N	42
ตารางที่ 4.3 สัมประสิทธิ์ทางการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก ในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.001 N	44
ตารางที่ 4.4 สัมประสิทธิ์ทางการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก ในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.001 N	45
ตารางที่ 4.5 อัตราการกัดกร่อนที่คำนวณได้ที่ชิ้นงานต่างๆ ในสารละลายกรดซัลฟิวริก	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ภาพวาดแสดงปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ผิวของเหล็ก	5
รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างการกัดกร่อนของสังกะสี กับกรดไฮโดรคลอริกที่ไม่มีอากาศเกี่ยวข้อง	6
รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนคู่อัถวานิกของสังกะสีและทองคำขาว	7
รูปที่ 2.4 อนุกรมกัถวานิกของโลหะบริสุทธิ์กับโลหะผสมในน้ำทะเล 25 °c	8
รูปที่ 2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดการกัดกร่อนแบบกัถวานิก	9
รูปที่ 2.6 ลักษณะทั่วไปของการเกิดการกัดกร่อนในซอก	10
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการกัดกร่อนแบบซอก	10
รูปที่ 2.8 แสดงกลไกการกัดกร่อนในซอก	11
รูปที่ 2.9 ตัวอย่างชิ้นงานที่ถูกกัดกร่อนแบบหลุม	12
รูปที่ 2.10 การกัดกร่อนแบบหลุมเนื่องจากปฏิกิริยาเร่งตัวเอง โดยโลหะ M กำลัถถูกกัดกร่อนในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ (NaCl)	12
รูปที่ 2.11 ภาพวาดแสดงการคำนวณหาปัจจัยการเกิดหลุม	13
รูปที่ 2.12 แสดงปัจจัยการเกิดหลุม	14
รูปที่ 2.13 ภาพวาดแสดงรูปแบบของหลุม	14
รูปที่ 2.14 ภาพวาดแสดงกลไกการกัดกร่อนแบบเซาะ	15
รูปที่ 2.15 ภาพวาดแสดงกลไกการกัดกร่อนตามขอบเกรน	16

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.16 ปัจจัยหลักสำคัญ 3 อย่างที่ทำให้กำการแตกร้าวจากความเค้นและการกัดกร่อน	17
รูปที่ 2.17 แสดงตัวอย่างชิ้นงานที่เกิดการแตกร้าวจากความเค้นและการกัดกร่อน	18
รูปที่ 2.18 การกัดกร่อนแบบเฟรดติงเนื่องจากการออกซิเดชันและสึกหรอ	20
รูปที่ 2.19 ภาพวาดแสดงการกัดกร่อนแบบเฟรดติงเนื่องจากการสึกหรอและออกซิเดชัน	20
รูปที่ 2.20 การเคลือบผิวแบบจุ่มร้อน	21
รูปที่ 2.21 การเคลือบชั้นด้วยเงินด้วยการเคลือบแบบไฟฟ้า	23
รูปที่ 2.22 แสดงตัวอย่างกราฟโพลาริเซชันแบบทั้งแคโทดิกและแอนโนดิก	28
รูปที่ 2.23 แสดงตัวอย่างกราฟโพลาริเซชันแบบแอนโนดิก	29
รูปที่ 2.24 ภาพวาดแสดงเซลล์ทดลองที่เหมาะสม	29
รูปที่ 2.25 ภาพวาดแสดงตัวอย่างที่ใส่ขั้วไฟฟ้า (Electrode holder)	30
รูปที่ 2.26 แผนภาพเฟสและ Allotropes	33
รูปที่ 4.1 ภาพตัดขวางของชิ้นงานที่ได้จากการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าจาก กล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 500X โดยเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า ที่มีอัตราส่วน Co:Fe เท่ากับ 69.8:30.2	41
รูปที่ 4.2 กราฟโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก ในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.01 N ณ อุณหภูมิห้อง	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.3 กราฟโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันของโลหะผสม โคบอลต์-เหล็ก ในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.001 N ณ อุณหภูมิห้อง	44
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและสัดส่วนเชิงมวลของ เหล็กในโลหะผสม โคบอลต์-เหล็ก ในสารละลายกรดซัลฟิวริก ณ อุณหภูมิห้อง	46
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน และสัดส่วนเชิงมวลของเหล็กในโลหะผสม โคบอลต์-เหล็ก ในสารละลายกรดซัลฟิวริก ณ อุณหภูมิห้อง	47
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานการถูกโพลาริซ์และสัดส่วนเชิงมวลของ เหล็กในโลหะผสม โคบอลต์-เหล็ก ในสารละลายกรดซัลฟิวริก ณ อุณหภูมิห้อง	48
รูปที่ 4.7 แผนภูมิอัตราการกัดกร่อนของโลหะผสม โคบอลต์-เหล็ก ในสารละลายกรดซัลฟิวริก ณ อุณหภูมิห้อง	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก (CoFe alloys) ได้รับความสนใจในอุตสาหกรรมงานอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics) เป็นอย่างมาก เนื่องจากโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและแม่เหล็กที่ดี ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์กระบวนการส่วนใหญ่อาจก่อให้เกิดปัญหาด้านการกัดกร่อนของชิ้นงานขึ้นได้ เช่น การสัมผัสกับสารเคมีในกระบวนการล้างชิ้นงาน ได้แก่ น้ำสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) สารอินทรีย์ เป็นต้น กระบวนการผลิต การยึดติดชิ้นงานด้วยสารเคมีที่มีฤทธิ์กัดกร่อน การขัดชิ้นงาน การขึ้นรูปด้วยความร้อน ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายต่อชิ้นงาน หากทำการลดความเสียหายทางด้านการกัดกร่อนลงได้ ถือเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา รวมถึงเพื่อแก้ปัญหาด้านการกัดกร่อนได้อีกด้วย จึงเป็นที่มาของงานวิจัยในครั้งนี้ เพื่อศึกษาอัตราการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก ที่สร้างโดยเทคนิคการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า (Electroplating) ซึ่งมีสัดส่วนเชิงมวลของ Co:Fe ที่หลากหลาย จะนำไปสู่ข้อมูลในการประเมินความอ่อนไหวต่อการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก และเพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนกับสัดส่วนเชิงมวลของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก เนื่องจากสาเหตุของการกัดกร่อนมีหลากหลาย ดังนั้นการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนจะช่วยให้ทราบถึงสาเหตุ ซึ่งส่งผลต่อการเลือกใช้การป้องกันการกัดกร่อนที่ถูกต้องเหมาะสมตรงตามสาเหตุ เป็นการยืดอายุการใช้งานของชิ้นงานและลดค่าใช้จ่ายในการป้องกันและแก้ไขปัญหการกัดกร่อนที่ดี

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก
- 1.2.2 เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนกับสัดส่วนเชิงมวลของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

ทำการสังเคราะห์โลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก โดยใช้เทคนิคการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า ที่อัตราส่วนระหว่าง Co:Fe ดังต่อไปนี้คือ 20 40 60 และ 80% ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี (Cyclic voltammetry) ด้วยเครื่องโพเทนชิโอสเตท (Potentiostat) จากนั้นทำการวัดอัตราการกัดกร่อนของตัวอย่างในแต่ละอัตราส่วนต่างๆ ในสารละลายกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) เข้มข้น 0.01 M และ 0.001 M โดยเทคนิคโพเทนชิโอดินามิกโพลาริเซชัน (Potentiodynamic polarization) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนเชิงมวลของ Co และ Fe กับอัตราการกัดกร่อน รวมทั้งศึกษาพฤติกรรมของการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบถึงพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสม โคบอลต์-เหล็ก
- 1.4.2 ทราบถึงอัตราการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก
- 1.4.3 ทราบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนกับสัดส่วนเชิงมวลของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 การกัดกร่อน

จากนิยามตามมาตรฐาน DIN EN ISO 8044 การกัดกร่อน (Corrosion) คือปฏิกิริยาระหว่างวัสดุโลหะกับสิ่งแวดล้อมซึ่งนำไปสู่การเสื่อมสภาพของวัสดุนั้น และยังผลให้ความสามารถในการทำหน้าที่ของวัสดุดังกล่าวเสียหายไป โดยส่วนใหญ่ปฏิกิริยาดังกล่าวจะเป็นปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า แต่ทั้งนี้สามารถเป็นปฏิกิริยาเคมี หรือปฏิกิริยาทางกายภาพของโลหะได้เช่นกัน [14] การกัดกร่อนเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) ของโลหะซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ให้อิเล็กตรอน โดยที่โลหะนั้นมีอิเล็กตรอนที่เคลื่อนย้ายได้ เมื่อโลหะเกิดการกัดกร่อนอิเล็กตรอนจะหลุดออกทำให้อะตอมโลหะเปลี่ยนเป็นไอออนโลหะประจุบวก เมื่อมีการให้และรับอิเล็กตรอนครบเซลล์เคมีไฟฟ้าที่เรียกว่าเซลล์การกัดกร่อน คือโลหะที่ให้อิเล็กตรอนเป็นขั้วแอโนด (Anode) อิเล็กตรอนเดินทางไปตามเนื้อโลหะ สิ่งแวดล้อมที่รับอิเล็กตรอนเป็นขั้วแคโทด (Cathode) และความชื้นหรือสารละลายที่ผิวโลหะเป็นอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ซึ่งทำให้ไอออนเดินทางได้ครบเซลล์

ดังนั้นการกัดกร่อนจึงสามารถเกิดขึ้นได้ทั่วไป อาจกล่าวได้ว่าโลหะเกือบทุกชนิดเกิดการกัดกร่อนได้เสมอ ต่างกันที่ความยากง่ายของการเกิดการกัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อนเร็วหรือช้า สาเหตุของการเกิดการกัดกร่อนจึงมาจากทั้งโลหะและสิ่งแวดล้อม [15]

ในทางวิศวกรรมการกัดกร่อนหมายถึงการทำปฏิกิริยาเคมี (Chemical reaction) หรือปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (Electrochemical reaction) ระหว่างผิวของวัสดุและสิ่งแวดล้อม โดยส่วนใหญ่วัสดุที่เกิดการกัดกร่อนแบบปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้ามักเป็นโลหะ เนื่องจากโลหะสามารถทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อมได้ดีและมีสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดี สำหรับวัสดุที่ไม่ใช่โลหะมักเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีเท่านั้น โดยทั่วไปอาจแบ่งประเภทของการกัดกร่อนได้เป็น 2 แบบหลักๆ [1] ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารการกัดกร่อนแบบชื้นับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม บริษัทฯ ขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏและขอสงวนสิทธิ์ในข้อมูลและข้อมูลอื่นที่ปรากฏในเอกสารฉบับนี้

การกัดกร่อนแบบชื้น (Wet corrosion) จะเกิดขึ้นได้เองต้องอาศัยความชื้น หรือสารละลายเป็นตัวกลางในการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า การกัดกร่อนประเภทนี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีเซลล์

เคมีไฟฟ้าที่ครบวงจร โดยทั่วไปเมื่อพูดถึงการกัดกร่อนของโลหะก็จะหมายถึงการกัดกร่อนแบบชื้นเท่านั้น

- การกัดกร่อนแบบแห้ง

การกัดกร่อนแบบแห้ง (Dry corrosion) เป็นการทำปฏิกิริยาเคมีโดยตรงระหว่างโลหะกับก๊าซ ทำให้ไม่จำเป็นต้องอาศัยความชื้นหรือสารละลายเป็นตัวกลาง อาจเรียกการกัดกร่อนแบบแห้งได้ว่าเป็นการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation)

## 2.2 หลักการเกิดการกัดกร่อนโดยปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า [2]

ปฏิกิริยาการกัดกร่อนของโลหะส่วนใหญ่จะเป็นปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า หรือปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reaction) โดยที่โลหะที่เกิดการกัดกร่อนจะเป็นแอโนด (Anode) และเกิดปฏิกิริยาแอโนดิก (Anodic reaction) หรือปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxydation) ดังสมการที่ 2.1



โดยที่ Me คืออะตอมของโลหะที่ให้อิเล็กตรอนออกมา n ตัว แล้วเปลี่ยนสภาพเป็นไอออนบวก

สำหรับปฏิกิริยาแคโทดิก (Cathodic reaction) หรือปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction) อาจเกิดได้หลายรูปแบบ ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม เช่น ในสภาพของเหลวที่ไม่มีออกซิเจน อย่างเช่นน้ำที่อยู่นิ่ง หรือกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เป็นต้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอาจทำให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซไฮโดรเจนซึ่งเราจะเรียกว่า ขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจน (Hydrogen electrode) ดังสมการที่ 2.2



สำหรับน้ำที่มีออกซิเจนละลายอยู่จะเรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่า ขั้วไฟฟ้าออกซิเจน (Oxygen electrode) แสดงดังสมการที่ 2.3

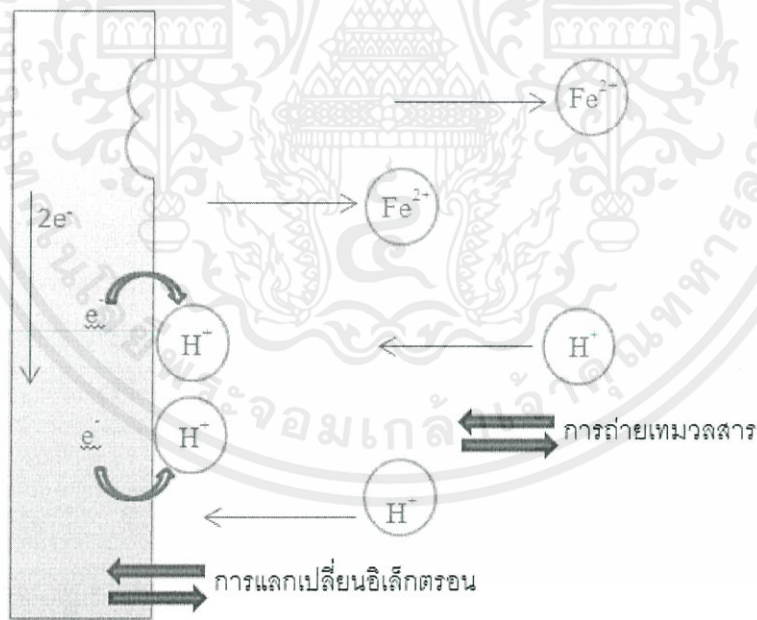


ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้ได้ไอออน  $\text{OH}^-$  เพิ่มขึ้นในสารละลายจากนั้น  $\text{OH}^-$  จะทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะ  $\text{Me}^{n+}$  เกิดเป็นผลผลิตของแข็งยกตัวอย่างเช่น  $\text{Fe}^{2+}$  ร่วมกับ  $\text{OH}^-$  เกิดเป็น  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  หรือสนิมเหล็ก ตารางที่ 2.1 แสดงตัวอย่างของปฏิกิริยาแอโนดิกและปฏิกิริยา

แคโทดิกบางชนิด ตัวอย่างของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ผิวของเหล็กและสภาพแวดล้อมที่มีซัลเฟอร์ไฮโดรเจนแสดงไว้ดังรูปที่ 2.1 และตัวอย่างของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ผิวของสังกะสีในกรดไฮโดรคลอริกแสดงไว้ดังรูปที่ 2.2

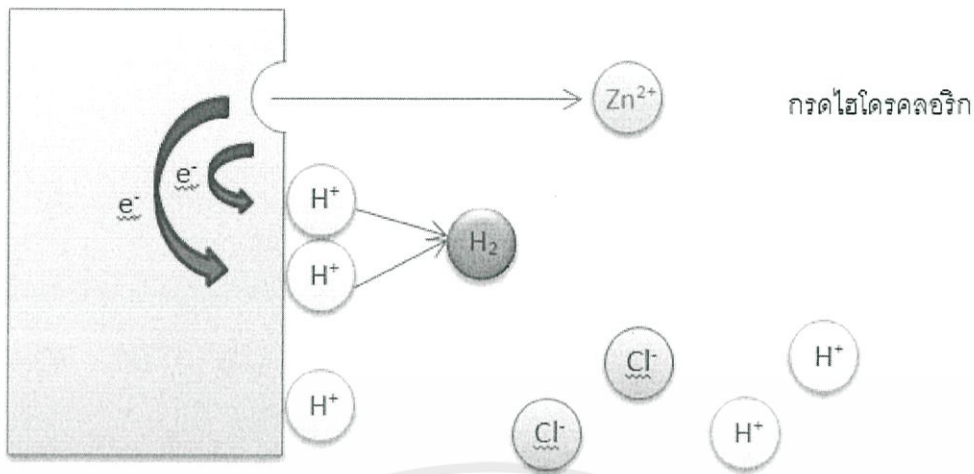
ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างของปฏิกิริยาแอโนดิกและปฏิกิริยาแคโทดิก [1]

ชนิดของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี	ตัวอย่าง
ปฏิกิริยาแอโนดิก	$\text{Fe} \longrightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ $\text{Zn} \longrightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^-$ $\text{Fe}^{2+} \longrightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{e}^-$
ปฏิกิริยาแคโทดิก	$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \longrightarrow 4\text{OH}^-$ $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$ $\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- \longrightarrow \text{Fe}^{2+}$



รูปที่ 2.1 ภาพวาดแสดงปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ผิวของเหล็ก [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างการกัดกร่อนของสังกะสีกับกรดไฮโดรคลอริกที่ไม่มีอากาศเกี่ยวข้อง [1]

ในการตรวจสอบและวิเคราะห์ความเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อนนิยมแยกประเภทของการกัดกร่อนจากลักษณะที่ผิวและรอยแตกที่เกิดจากการกัดกร่อน ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายรูปแบบดังนี้ การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ การกัดกร่อนแบบกัลวานิก การกัดกร่อนบริเวณซอก การกัดกร่อนแบบหลุม การกัดกร่อนแบบกัดเซาะ การกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน การแตกร้าวจากความเค้นและการกัดกร่อน การแตกร้าวจากการกัดกร่อนร่วมกับความล้า เป็นต้น

## 2.3 รูปแบบการกัดกร่อน

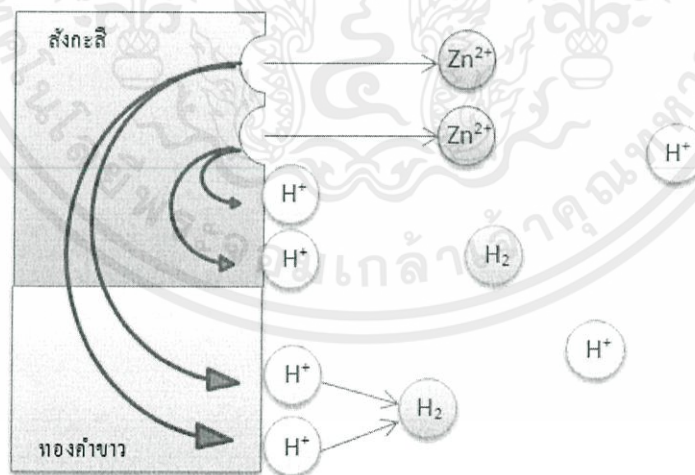
### 2.3.1 การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ [1]

การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform corrosion) หรืออาจเรียกว่าการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้า เป็นการกัดกร่อนที่พบเห็นได้ทั่วไป และมีผลกระทบอย่างมากในทางเศรษฐกิจของประเทศ การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอเป็นรูปแบบการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะกับสิ่งแวดล้อม โดยความไม่สม่ำเสมอของส่วนผสม ความแตกต่างของเฟสหรือขนาดในการขึ้นรูปเย็น ซึ่งทำให้พื้นที่ผิวของชิ้นงานสามารถทำหน้าที่เป็นได้ทั้งแคโทดหรือแอโนด และทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอน ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเท่าๆกันและมีความสม่ำเสมอตลอดทั่วทั้งผิวของโลหะ ซึ่งจะทำให้ผิวของชิ้นงานถูกกัดกร่อนเป็นพื้นที่กว้าง ความลึกของการกัดกร่อนจะมีขนาดไม่แตกต่างกัน โดยส่วนใหญ่สาเหตุมาจากการเปิดผิวของโลหะสัมผัสกับบรรยากาศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งบรรยากาศในโรงงานอุตสาหกรรมหรือริมทะเล ตัวอย่างการกัดกร่อนประเภทนี้ ได้แก่ การเกิดสนิมของเหล็กกล้าและการหมองของเครื่องเงิน ถึงแม้ว่าการกัด

กร่อนประเภทนี้จะทำให้เกิดการสูญเสียเนื้อโลหะมากที่สุด แต่ก็ไม่ได้สร้างปัญหาหรือทำให้เกิดความเสียหายที่รุนแรงมาก เนื่องจากสามารถทำนายอัตราการกัดกร่อนได้ทำให้ทราบถึงอายุการใช้งานของวัสดุอุปกรณ์ได้อย่างแม่นยำ สามารถประยุกต์ใช้กฎของฟาราเดย์ในการคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนในมิติต่างๆ ได้ เช่นมวลต่อพื้นที่ต่อเวลา ความลึกของการกัดกร่อนต่อเวลา [14] และยังสามารถออกแบบการป้องกันการกัดกร่อน การบำรุงรักษาตามช่วงระยะเวลาได้ [16]

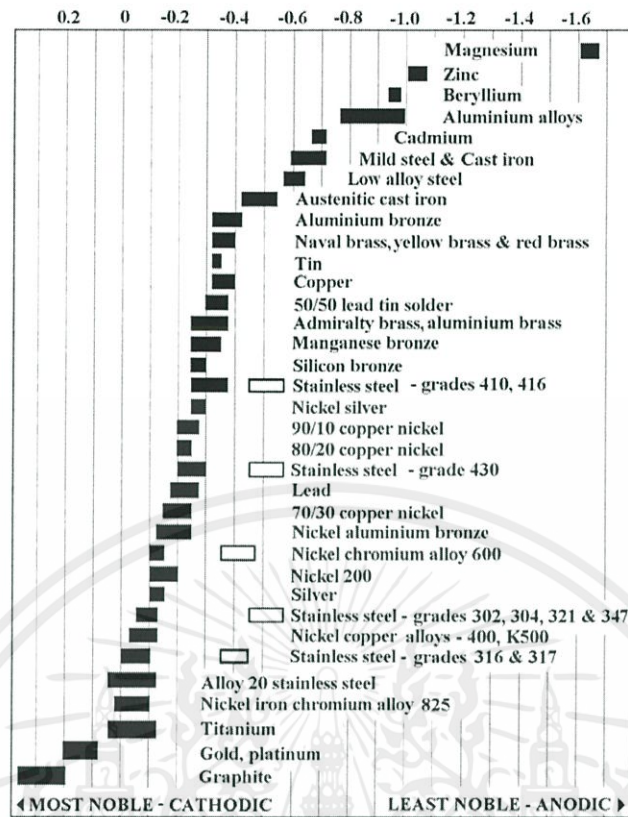
### 2.3.2 การกัดกร่อนแบบกัลวานิก [1]

การกัดกร่อนแบบกัลวานิกจะเกิดขึ้นเมื่อ โลหะ 2 ชนิดมีศักย์ไฟฟ้ารีดักชันต่างกันและอยู่ในสารละลายที่นำไฟฟ้าได้ โลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันต่ำกว่ามีแนวโน้มที่จะสูญเสียอิเล็กตรอนได้ง่ายกว่า [14] ส่วนโลหะเฉื่อย (Noble) กว่าซึ่งมีความต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่าจะทำหน้าที่เป็นแคโทด และการกัดกร่อนจะเกิดขึ้นที่โลหะที่เป็นแอโนด ศักย์ไฟฟ้าที่ต่างกันของโลหะ 2 ชนิด จะทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนเกิดขึ้น โดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากโลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำไปหาโลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าแสดงดังรูปที่ 2.3 โดยโลหะทั้งสองอาจเป็นโลหะชนิดเดียวกันแต่มีความแตกต่างทางองค์ประกอบเคมีในระดับจุลภาคก็ได้ ส่วนโลหะชนิดใดจะเป็นแคโทดหรือแอโนดสามารถพิจารณาได้จากตารางอนุกรมกัลวานิก (Galvanic series) ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบความไวของโลหะบริสุทธิ์กับโลหะผสมในน้ำทะเล



รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนคู่กัลวานิกของสังกะสีและทองคำขาว [1]

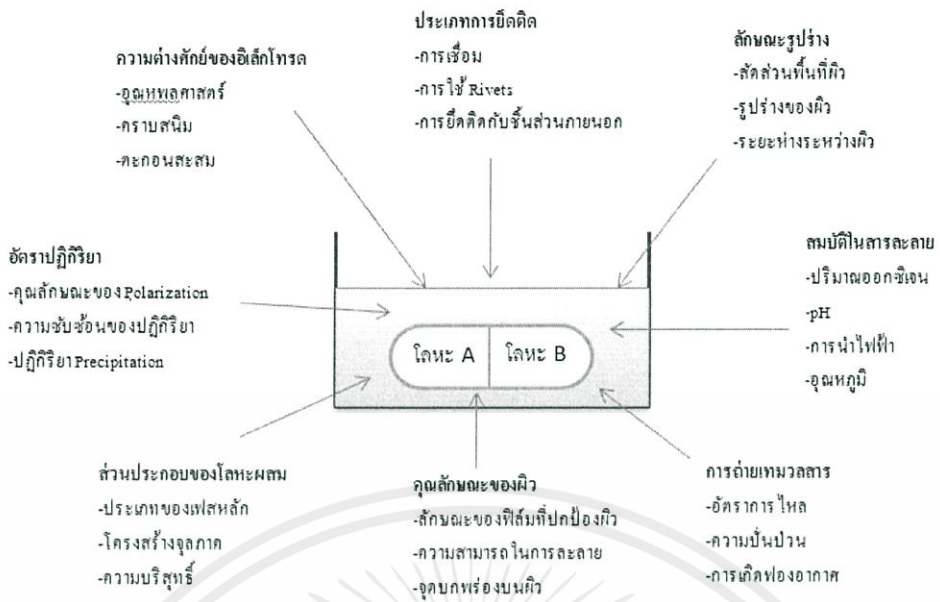
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 อนุกรมศักวานิกของโลหะบริสุทธิ์กับโลหะผสมในน้ำทะเลที่ 25 °c [18]

ความรุนแรงของการกัดกร่อนแบบกัลวานิกจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับหลากหลายปัจจัย เช่น สมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะที่นำมาเชื่อมต่อกัน ขนาดสัดส่วนพื้นที่ของแอโนดต่อแคโทด และอัตราการไหลของอิเล็กโทรไลต์ ระยะห่างจากรอยต่อ โดยจะรุนแรงที่สุดในบริเวณใกล้รอยต่อระหว่างโลหะทั้งสองและอัตราการกัดกร่อนจะลดลงเมื่อระยะห่างจากรอยต่อนั้นเพิ่มขึ้น [14] เป็นต้น ดังนั้นเมื่อนำโลหะที่มีความต้านทานการกัดกร่อนที่แตกต่างกันมากมาเชื่อมต่อกัน เช่น การนำท่อเหล็กมาเชื่อมต่อกับท่อทองเหลือง โดยเหล็กจะทำหน้าที่เป็นแอโนดและทองเหลืองจะทำหน้าที่เป็นแคโทดจะส่งผลให้เหล็กที่มีความต้านทานการกัดกร่อนต่ำกว่าเกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนให้แก่ทองเหลือง ทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบกัลวานิกในเหล็กซึ่งในรูปที่ 2.5 แสดงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการเกิดการกัดกร่อนแบบกัลวานิกในกรณีที่ขึ้นอยู่กับสมบัติความต้านทานการกัดกร่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดการกัดกร่อนแบบกัลวานิก [1]

ความรุนแรงของการกัดกร่อนแบบกัลวานิกที่ขึ้นอยู่กับขนาดสัดส่วนพื้นที่ผิวของแอโนดต่อแคโทด เนื่องจากอัตราของการกัดกร่อนจะสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวของโลหะทั้งสองโดยถ้าหากพื้นที่ผิวของแคโทดมากกว่าพื้นที่ผิวของแอโนดจะเกิดการกัดกร่อนขึ้นอย่างรวดเร็ว ในทางกลับกันหากพื้นที่ของแอโนดมากกว่าแคโทดความรุนแรงของการกัดกร่อนจะลดลง กล่าวคือเมื่อพื้นที่ผิวของแคโทดคงที่ แอโนดที่มีพื้นที่เล็กจะถูกกัดกร่อนได้รวดเร็วกว่าแอโนดที่มีพื้นที่ใหญ่ เนื่องจากอัตราเร็วการกัดกร่อนขึ้นอยู่กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ซึ่งเป็นค่ากระแสต่อพื้นที่ผิวที่ถูกกัดกร่อนที่ไม่ใช่ค่ากระแสเพียงอย่างเดียว ดังนั้นความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของแอโนดจะสูงเมื่อมีพื้นที่ผิวน้อยกว่าพื้นที่ผิวของแคโทด

2.3.2.1 วิธีการลดหรือป้องกันการกัดกร่อนแบบกัลวานิกมีหลายวิธีดังนี้ [17]

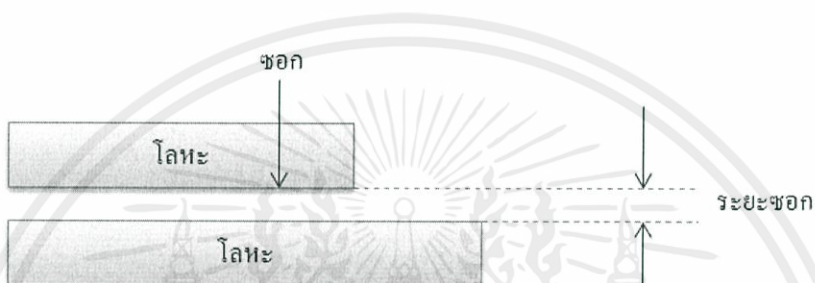
1. เลือกใช้วัสดุที่มีค่า Galvanic series ใกล้เคียงกันเท่าที่เป็นได้
2. หลีกเลี่ยงอัตราส่วนของพื้นที่แคโทดต่อแอโนด ปรับพื้นที่ทั้งสองให้ใกล้เคียงกัน
3. ใช้ฉนวนกัน ในบริเวณที่ใช้โลหะต่างชนิดกันมาสัมผัสกัน
4. ใช้สารเคลือบผิวอย่างระมัด คูลการเคลือบผิวให้อยู่ในสภาพดี
5. เติมสารยับยั้ง เพื่อลดความรุนแรงของการกัดกร่อน
6. ออกแบบให้สามารถเปลี่ยนชิ้นงานที่เป็นแอโนดได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

7. ติดตั้งวัสดุที่สามที่มีค่าความต่างศักย์น้อยกว่าโลหะทั้งสอง เพื่อให้เกิดการกัดกร่อนแทน

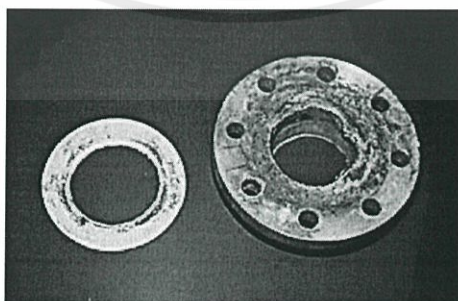
### 2.3.3 การกัดกร่อนแบบซอก [1]

การกัดกร่อนแบบซอก (Crevice corrosion) เป็นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นบริเวณซอกหรือบริเวณที่ไม่มีการไหลวนของสิ่งแวดล้อม เช่น บริเวณที่อยู่ใต้ตะกอนสะสม (Deposit) บริเวณที่อยู่ใต้สลักเกลียว ตะปู หรือตะเจ็บริยต่อของโลหะ เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ลักษณะทั่วไปของการเกิดการกัดกร่อนในซอก [1]

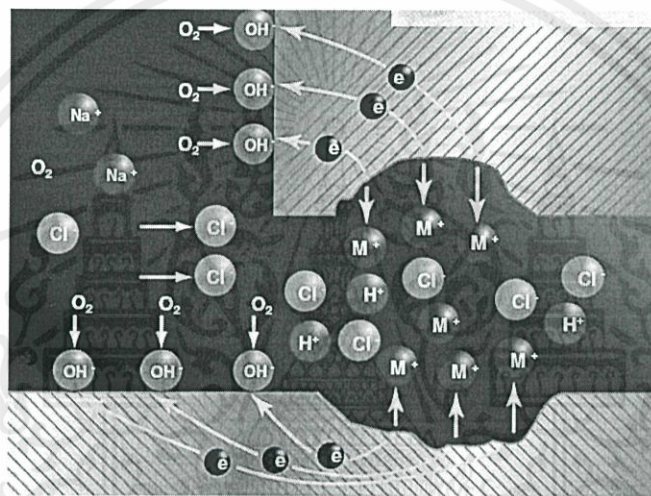
บริเวณซอกที่มีสารละลายอยู่นิ่งจะมีความเข้มข้นของออกซิเจนต่ำกว่าบริเวณโดยรอบทำให้เกิดความแตกต่างของเซลล์ความเข้มข้น (Concentration cell) ระหว่างภายในและภายนอก ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ในบริเวณซอกและมีค่า pH ต่ำกว่าบริเวณอื่นๆ จึงเกิดการกัดกร่อนขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป อาจมีการสะสมของเกลือโลหะ (Metalic salt) ขึ้นที่บริเวณดังกล่าวทำให้สภาพความเป็นกรดในบริเวณนั้นเพิ่มขึ้นอีก ซึ่งเป็นการกระตุ้นให้เกิดการกัดกร่อนที่มากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ค่า pH ด้านในซอกอาจจะลดลงได้ถึง 1 หรือ 0 ในขณะที่ค่า pH ด้านนอกคงที่ที่ 7 [14]



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการกัดกร่อนแบบซอก [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบุคลากรในหน่วยงานเพื่อการศึกษาค้นคว้าและเผยแพร่ความรู้เท่านั้น กรุณาอย่าได้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิใช้เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.8 แสดงการกัดกร่อนแบบชอกที่มีการขังของสารละลายเป็นระยะเวลานาน โดยไม่มีการหมุนเวียนถ่ายเททำให้เกิดความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายภายนอกและสารละลายที่อยู่ภายในชอก ทำให้เกิดการครบเซลล์การกัดกร่อนโดยโลหะที่อยู่ในชอกจะเปลี่ยนสภาพเป็นแอโนด ซึ่งออกซิเจนที่ใช้ทำปฏิกิริยาแคโทดิกในบริเวณที่เป็นชอกจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนหมด แต่ปฏิกิริยาแอโนดิกยังคงดำเนินต่อไป ดังนั้นเพื่อรักษาสมดุลของประจุเอาไว้อิออนคลอไรด์จะเคลื่อนตัวเข้ามาในชอกและทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้เกิดเป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์และกรดไฮโดรคลอริก ซึ่งกรดนี้จะกัดกร่อนเนื้อโลหะไปทีละน้อยทำให้รอยแตกเกิดการขยายตัวการกัดกร่อนประเภทนี้สามารถเกิดกับโลหะที่สัมผัสกับโลหะได้ด้วย เช่น Rubber gasket เป็นต้น [16] โดยอัตราการกัดกร่อนในช่องแคบจะสูงกว่าของเนื้อโลหะโดยรวม (Bulk)



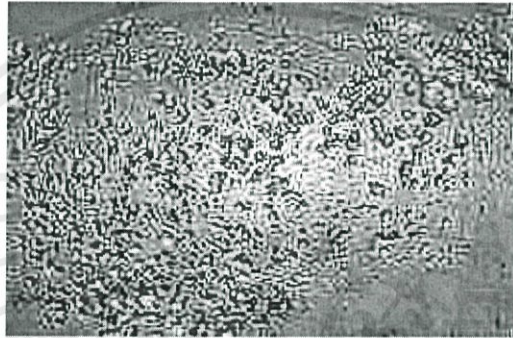
รูปที่ 2.8 แสดงกลไกการกัดกร่อนในชอก [1]

การกัดกร่อนแบบชอกอาจป้องกันได้ด้วยการใช้โลหะที่เหมาะสมที่มีสมบัติต้านการกัดกร่อนที่ดี การเคลือบผิวโลหะด้วยสารเคลือบที่เหมาะสม การใช้การเชื่อมแทนการต่อด้วยหมุดย้ำหรือสลักเกลียว การหมั่นตรวจสอบเอาเศษสิ่งสกปรกออกจากระบบ และการออกแบบที่เหมาะสมหลีกเลี่ยงบริเวณที่เป็นชอก หรือบริเวณที่อาจทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดการหยุดนิ่งได้

#### 2.3.4 การกัดกร่อนแบบหลุม [1]

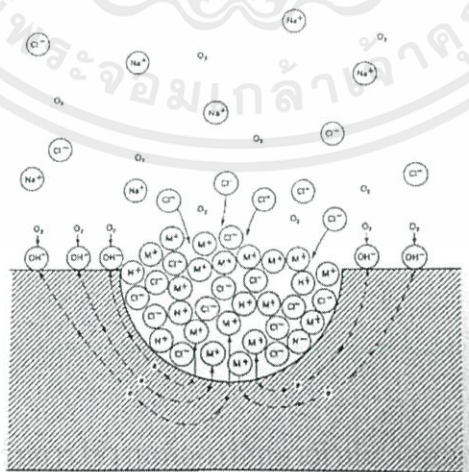
การกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting corrosion) เป็นการกัดกร่อนในบริเวณจำเพาะ (Localized corrosion) ซึ่งรุนแรงและอันตรายมากถึงแม้ว่าจะสูญเสียน้ำหนักโดยรวมน้อยมากก็ตาม การกัดกร่อนแบบหลุมก่อให้เกิดรูหรือหลุมที่ลึกแต่เล็กในโลหะในทิศทางที่แทบจะเป็นแนวตั้ง ซึ่งหลุมที่ไม่ว่าเกิดขึ้นมิได้หลายลักษณะ เช่น หลุมแบบปากกว้าง หลุมแบบรูเข็ม หลุมแบบปากแคบแต่ด้านในโพรงกลวง [14] โดยจะพบมากในชิ้นงานที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม เช่น ถังบรรจุหรือท่อลำเลียงสาร

หรือโลหะอื่นๆที่ไวต่อการเกิดการกัดกร่อนแบบหลุม เช่น อะลูมิเนียม ไทเทเนียม เป็นต้น ซึ่งมักเป็นโลหะที่มีชั้นป้องกัน (Passive layer) ช่วยป้องกันการกัดกร่อน โดยชั้นป้องกันจะทำให้มีแรงขับ (Driving force) ก่อให้เกิดกระแสการกัดกร่อนไหลไปในหลุมสูง ถ้าผิวภายนอกของไวก็จะขาดแรงขับต่อการเกิดการกัดกร่อนแบบหลุม [16] และเมื่อเกิดการกัดกร่อนแบบหลุมเกิดขึ้น หลุมจะมีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว โดยที่พื้นผิวบริเวณใกล้เคียงอาจไม่พบร่องรอยของการกัดกร่อน และอาจมีการปกคลุมหลุมด้วยผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการกัดกร่อน ทำให้การสังเกตการกัดกร่อนแบบหลุมทำได้ยาก ด้วยเหตุนี้จึงทำให้การกัดกร่อนประเภทนี้มีความอันตรายมาก เนื่องจากไม่สามารถสังเกตและทำนายอายุการใช้งานได้



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างชิ้นงานที่ถูกกัดกร่อนแบบหลุม [21]

การกัดกร่อนแบบหลุมเป็นการกัดกร่อนแบบปฏิกิริยาชนิดเร่งตัวเอง (Autocatalytic) กล่าวคือภายในหลุมเป็นแอโนดจะเกิดการขยายขนาดหลุมอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนจะเกิดขึ้นที่ผิวของโลหะที่อยู่ใกล้เคียง รูปที่ 2.10 แสดงกลไกการกัดกร่อนแบบหลุมเนื่องจากปฏิกิริยาชนิดเร่งตัวเอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... หากนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.10 การกัดกร่อนแบบหลุมเนื่องจากปฏิกิริยาเร่งตัวเอง โดยโลหะ M กำลังถูกกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) [1]

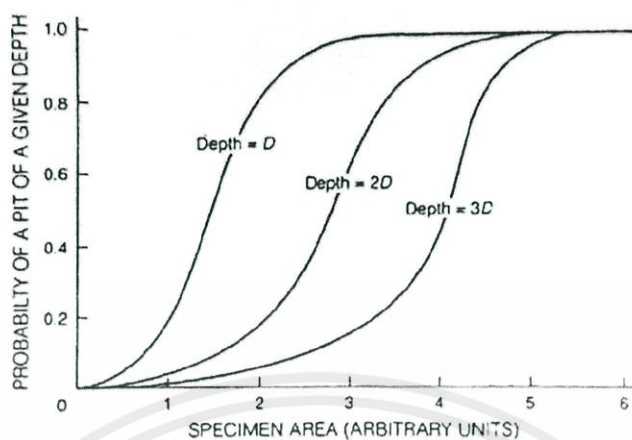
กลไกการกัดกร่อนแบบหลุมจะคล้ายคลึงกับกลไกการกัดกร่อนแบบซอก โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดภายในหลุมส่วนปฏิกิริยรีดักชันจะเกิดขึ้นที่ผิวของโลหะในบริเวณที่ใกล้เคียงกับหลุม และผลของแรงโน้มถ่วงของโลกจะทำให้หลุมเกิดการขยายหรือเคลื่อนที่ตามแนวตั้งลึกกลงไปในโลหะ ในขณะที่หลุมมีความลึกมากขึ้นนั้นสารละลายที่อยู่ก้นหลุมจะมีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น

ในการตรวจสอบการกัดกร่อนแบบหลุมสามารถหาขนาดของหลุมในเนื้อโลหะ (Metal penetration) ได้จากปัจจัยการเกิดหลุม (Pitting factor) ซึ่งหาได้จากสัดส่วนของระยะการกัดกร่อนจากผิวเดิมต่อขนาดความลึกของหลุม ( $p/d$ ) ดังรูปที่ 2.11 ถ้าปัจจัยการเกิดหลุมมีค่ามากขนาดการเจาะของหลุมในเนื้อโลหะก็จะมาก ในกรณีที่การเกิดหลุมมีค่าเท่ากับ 1 หมายความว่า เป็นการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ ความลึกของหลุมจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปเนื่องจากการกัดกร่อนถูกดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ความลึกของหลุมยังสามารถเพิ่มขึ้นได้เมื่อพื้นผิวของโลหะที่ถูกกัดกร่อนเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.12 ซึ่งหลุมที่เกิดขึ้นนั้นอาจเกิดได้หลากหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมของการกัดกร่อน แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.11 ภาพวาดแสดงการคำนวณหาปัจจัยการเกิดหลุม [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 แสดงปัจจัยการเกิดหลุม [1]

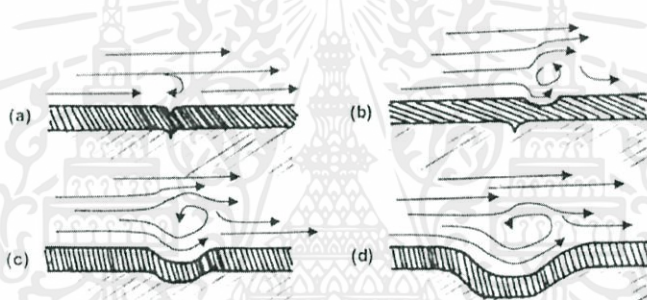


รูปที่ 2.13 ภาพวาดแสดงรูปแบบของหลุม [1]

การป้องกันการกัดกร่อนแบบหลุมสามารถทำได้หลากหลายวิธีแต่วิธีที่ดีที่สุดคือการเลือกใช้วัสดุที่มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบหลุมสูงในสภาพแวดล้อมเฉพาะ เช่น ในเหล็กกล้าไร้สนิมการเติมธาตุผสมบางตัวจะให้ความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุมเพิ่มขึ้น เช่น โครเมียม นิกเกิล โมลิบดีนัม และไนโตรเจน เป็นต้น

### 2.3.5 การกัดกร่อนแบบกัดเซาะ [1]

การกัดกร่อนแบบกัดเซาะ (Erosion corrosion) มีสาเหตุมาจากการเคลื่อนที่ของของเหลวผ่านผิวโลหะอย่างรวดเร็วเป็นผลให้เกิดการกัดเซาะที่ผิวของโลหะ เช่น การไหลของของเหลวในท่อส่งน้ำ ซึ่งจะทำให้เกิดการกัดกร่อนบริเวณผิวที่ถูกระทบ หรืออาจเกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างของเหลวกับโลหะ และแรงกระทำทางกลของของไหลที่กระทำต่อผิวโลหะ ซึ่งมีอัตราการกัดกร่อนที่สูงกว่าการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ เป็นผลมาจากการกัดเซาะของของเหลวที่มีอัตราเร็วสูงทำให้เกิดเป็นคลื่น ร่อง หลุม หรือแอ่งบนผิวของโลหะ โดยจะเกิดในทิศทางเดียวกับการเสียดสีหรือการกระทบ ในรูปที่ 2.14 แสดงการไหลของของเหลวผ่านผิวโลหะด้วยความเร็วสูงจะทำให้ชั้นป้องกันของผิวโลหะถูกทำลายหรือถูกชะล้างไปด้วย เป็นผลให้อัตราการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว มักพบในระบบท่อที่มีการออกแบบที่ไม่เหมาะสม เช่น ท่อที่มีมุมแคบหรือการหักมุมอย่างทันทีหรือท่อที่มีการลดขนาดอย่างรวดเร็ว รวมถึงแรงดันภายในของเหลวที่สูงเกินไปด้วย



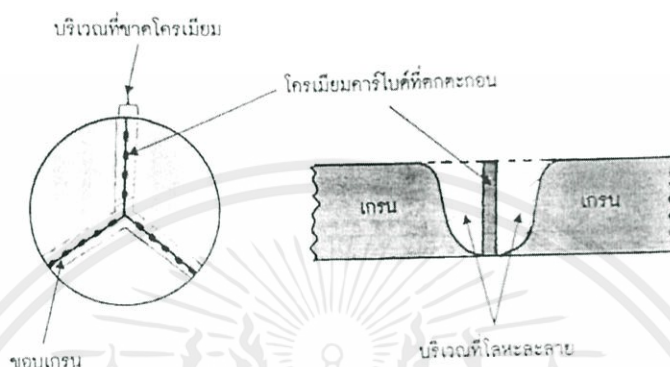
รูปที่ 2.14 ภาพวาดแสดงกลไกการกัดกร่อนแบบเซาะ [1]

โดยปกติอาจตรวจสอบการกัดกร่อนแบบเซาะจากร่องหรือคลื่นที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของโลหะที่เกิดจากการสูญเสียผิวโลหะ เนื่องจากการเสียดสีของอนุภาคของแข็งทำให้ออกซิเจนในของเหลวเข้าถึงเนื้อโลหะได้มากขึ้นและการเพิ่มอัตราเร็วของของเหลวจะทำให้อัตราการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น หากมีฟองก๊าซหรือของแข็งปะปนอยู่ในของเหลวการกัดกร่อนจะรุนแรงมากยิ่งขึ้น เช่น ท่อจุดเจาะน้ำมันกลางทะเล

### 2.3.6 การกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน [1]

การกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน (Intergranular corrosion) เกิดจากบริเวณขอบเกรนในโครงสร้างจุลภาคของโลหะมีแนวโน้มถูกกัดกร่อนได้มากกว่าเนื้อโลหะ อาจมีสาเหตุมาจากกระบวนการผลิตที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในรูปร่างของเกรน เช่น การขึ้นรูปทางกล การอบชุบ และการเชื่อม เป็นต้น โดยขอบเกรนของโลหะจะมีสภาพเป็นแอโนด และเกรนของโลหะจะมี

สภาพเป็นแคโทด การกัดกร่อนประเภทนี้จะเกิดขึ้นได้ง่ายหากขอบเกรนมีอนุภาคอื่นปนอยู่ด้วย การกัดกร่อนประเภทนี้จะเกิดขึ้นที่ขอบเกรนของโลหะผสมบางชนิดในสภาวะที่เหมาะสมเท่านั้น ส่งผลให้โครงสร้างเกรนของชิ้นงานถูกแยกออกจากกันหากบริเวณขอบเกรนมีอนุภาคอื่น ๆ มาตกตะกอนอยู่ หรือมีธาตุหนึ่งมากหรือน้อยเกินไป ขอบเกรนอาจจะถูกกัดกร่อนหรือทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้นอีก [17]



รูปที่ 12.15 ภาพวาดแสดงกลไกการกัดกร่อนตามขอบเกรน [1]

การกัดกร่อนแบบขอบเกรนสร้างปัญหาอย่างมากในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม มักเรียกว่า การเสื่อมสภาพของแนวเชื่อม (Weld decay) การป้องกันสามารถทำได้ ดังนี้

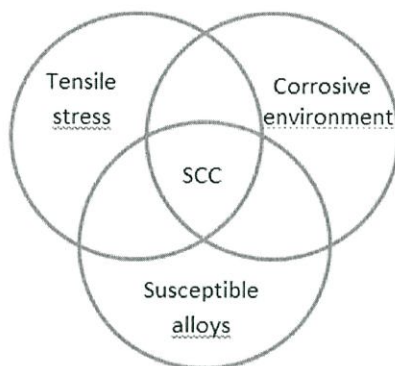
- ทำการอบเหล็กกล้าไร้สนิมที่อุณหภูมิสูงเพื่อละลายอนุภาคโครเมียมคาร์ไบด์ ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ )
- ใช้เหล็กกล้าไร้สนิมที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำกว่า 0.03 wt.% ลดการเกิดอนุภาคของคาร์ไบด์ เนื่องจากมีแนวโน้มในการรวมตัวกันระหว่างคาร์บอนกับโครเมียมต่ำ

นอกเหนือเหล็กกล้าไร้สนิมแล้วการกัดกร่อนตามขอบเกรนยังสามารถเกิดกับโลหะผสมชนิดอื่นได้เช่น โลหะผสมอะลูมิเนียม โลหะผสมนิกเกิล และโลหะผสมสังกะสี เป็นต้น

### 2.3.7 การแตกร้าวจากความเค้นและการกัดกร่อน [1]

การแตกร้าวจากความเค้นและการกัดกร่อน (Stress corrosion cracking, SCC) เกิดขึ้นเมื่อโลหะมีความเค้นดึงตกค้าง (Residual tensile stresses) หรือได้รับความเค้นภายนอก (Applied stresses) มีการสัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อน โดยจะต้องมีปัจจัยหลัก 3 ปัจจัย แสดงดังรูปที่ 2.16 ดังนี้

- อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อน
- โลหะผสมไวต่อการเกิดการแตกร้าวจากความเค้นและการกัดกร่อน
- มีความเค้นดึงตกค้างในชิ้นงานโลหะ



รูปที่ 2.16 ปัจจัยหลักสำคัญ 3 อย่างที่ทำให้เกิดการแตกร้าวจากความเค้นและการกัดกร่อน [1]

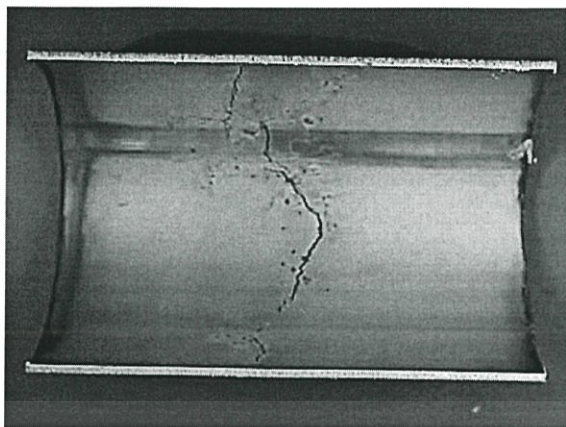
โลหะผสมบางชนิดมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนได้ดีในสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนแบบทั่วไป แต่อาจไม่สามารถต้านทานการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมที่มีความเค้นเกิดขึ้นร่วมกันได้ ทำให้เกิดรอยแตกขนาดเล็กที่มีลักษณะเป็นหลุมบนผิวของโลหะผสม และรอยแตกจะเกิดการขยายตัวในทิศทางตั้งฉากกับแนวแรงดึง ส่งผลให้เกิดความเสียหายและแตกหักได้ ซึ่งเป็นลักษณะการเสียหายของวัสดุเปราะ ถึงแม้ว่าโลหะผสมจะมีคุณสมบัติเหนียวก็ตาม หากขนาดความเค้นเพิ่มสูงขึ้น ก็จะทำให้อายุการใช้งานของโลหะผสมสั้นลงอาจเป็นผลมาจากการลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็วทำให้มีการหดตัวของโลหะที่ไม่เท่ากัน นอกจากนี้ก๊าซหรืออนุภาคของแข็งที่เกิดจากการกัดกร่อนและตกค้างอยู่ภายในเนื้อของโลหะผสม สามารถสร้างความเค้นตกค้างได้ เหล็กกล้าไร้สนิมส่วนใหญ่จะเกิดการแตกร้าวจากความเค้นและการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมที่มีไอออนของคลอไรด์ และทองแดงจะไม่ทนต่อการแตกร้าวจากความเค้นและการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

การแตกหักเสียหาย (Cracking) พบว่ามีทั้งแบบแตกไปตามขอบเกรน (Intergranular cracking) และแบบผ่ากลางเกรน (Transgranular cracking) [17]

ปัจจัยสำคัญอื่นที่มีผลต่อการแตกร้าวจากความเค้นและการกัดกร่อน ได้แก่ ความแข็งแรงของโลหะผสม ชาติผสมหลักในโลหะผสม และสภาพแวดล้อมที่เกิดการกัดกร่อน การเพิ่มความแข็งแรงของโลหะผสมจะเพิ่มโอกาสการแตกหักแบบกัดกร่อนร่วมกับความเค้น

วิธีการป้องกันการแตกร้าวจากความเค้นและการกัดกร่อน สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การลดขนาดความเค้นดึงตกค้าง หรือการเพิ่มพื้นที่ผิวที่รับความเค้นให้มากขึ้น การอบชุบทางความร้อนที่เหมาะสมเพื่อลดขนาดความเค้นตกค้างทางความร้อนในโลหะผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 แสดงตัวอย่างชิ้นงานที่เกิดการแตกร้าวจากความเค้นและการกัดกร่อน [19]

### 2.3.8 การแตกร้าวจากการกัดกร่อนร่วมกับความล้า [1]

การแตกร้าวจากการกัดกร่อนร่วมกับความล้า (Corrosion fatigue) เป็นความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่ชิ้นงานได้รับแรงกระทำทางกลแบบรอบรอบร่วมกับการกัดกร่อน ทำให้ความล้าเกิดขึ้นในชิ้นงาน ส่งผลให้ชั้นป้องกันของโลหะเกิดการแตกและหลุดออก จึงเกิดการกัดกร่อนขึ้นในเนื้อโลหะ ดังนั้นการที่ชิ้นงานได้รับความเค้นแบบรอบรอบในสภาพแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อนจะเป็นตัวเร่งทำให้ความเสียหายที่มีความรุนแรงมากยิ่งขึ้น โดยรอยแตกที่เกิดจากการแตกร้าวจากการกัดกร่อนร่วมกับความล้า จะทำให้โลหะมีผิวหยาบไม่สะท้อนแสง ซึ่งเป็นผลมาจากผลิตภัณฑ์ของการกัดกร่อน และมีปัจจัยสำคัญ 3 ปัจจัย ได้แก่ ปัจจัยทางกล ปัจจัยทางโลหะวิทยา และปัจจัยทางสภาพแวดล้อม

### 2.3.9 การเสียหายจากไฮโดรเจน [1]

การเสียหายจากไฮโดรเจน (Hydrogen damage) เกิดขึ้นเมื่อชิ้นงานอยู่ในสภาวะที่มีก๊าซไฮโดรเจนหรือสารประกอบของไฮโดรเจนอยู่เป็นผลให้โลหะมีความเหนียวและความแข็งแรงลดลง เนื่องจากการแทรกซึมของอะตอมไฮโดรเจนในเนื้อโลหะถึงแม้ว่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่มีอยู่ในผลึกจะมีอยู่เพียง 1 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ก็สามารถทำให้เกิดการแตกหักได้ เพราะอะตอมของไฮโดรเจนที่แทรกซึมอยู่ในเนื้อของโลหะเกิดการรวมตัวกันที่ช่องว่างขนาดเล็กในเนื้อโลหะกลายเป็นก๊าซไฮโดรเจน เกิดเป็นความดันเกิดขึ้น เมื่อความดันมากพอจะสามารถดันเนื้อโลหะให้แตกออกได้ การเสียหายในรูปแบบนี้ต้องใช้เวลาในการเคลื่อนที่ของอะตอมไฮโดรเจน และสามารถเกิดขึ้นได้ในโลหะทุกชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเสียหายจากไฮโดรเจนจำเป็นต้องมีแหล่งกำเนิดไฮโดรเจน และมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดอะตอมไฮโดรเจนได้ นอกจากนี้อะตอมของไฮโดรเจนจะต้องสามารถแพร่เข้าไปในเนื้อโลหะ

ได้ กระบวนการที่ทำให้เกิดไฮโดรเจนและแพร่เข้าไปในเนื้อโลหะได้ ได้แก่ การกัดล้างผิวเหล็กกล้าด้วยกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า และการใช้งานในบรรยากาศที่มีไฮโดรเจนที่อุณหภูมิสูง เช่น การเชื่อมและการอบชุบ นอกจากนี้การมีกำมะถัน (Sulfur) และสารหนู (Arsenic) อยู่ด้วยจะทำให้เกิดการเปราะได้เร็วขึ้น เนื่องจากสารเหล่านี้ต้านทานการเกิดโมเลกุลของไฮโดรเจน จึงช่วยเพิ่มระยะเวลาตกค้างของอะตอมไฮโดรเจนบนผิวโลหะ ซึ่งสารกำมะถันนั้นมักพบในน้ำมันปิโตรเลียม ก๊าซธรรมชาติ น้ำเกลือในบ่อน้ำมัน และของเหลวร้อนที่อยู่ใต้พื้นดิน

โลหะผสมที่มีโครงสร้างผลึกแบบ FCC เช่น เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ โลหะผสมทองแดง อะลูมิเนียม และนิกเกิล สามารถต้านทานการเสียหายเนื่องจากไฮโดรเจนได้ดีเพราะมีความเหนียวสูง อย่างไรก็ตามการขึ้นรูปเย็น หรือการเพิ่มความแข็งจากความเครียดของโลหะผสมก็จะทำให้เกิดการเสียหายเนื่องจากไฮโดรเจนได้มากขึ้น

เทคนิคบางประการถูกนำมาใช้ในการลดการเสียหายเนื่องจากไฮโดรเจน ได้แก่ การลดค่าความแข็งแรงของโลหะด้วยกรรมวิธีทางความร้อน การกำจัดแหล่งกำเนิดไฮโดรเจน การอบโลหะที่อุณหภูมิสูงเพื่อไล่ก๊าซไฮโดรเจนที่ละลายอยู่ในเนื้อโลหะ และการใช้โลหะอื่นที่มีความสามารถในการต้านทานการเสียหายจากไฮโดรเจน

### 2.3.10 การกัดกร่อนแบบเฟรตติง [1]

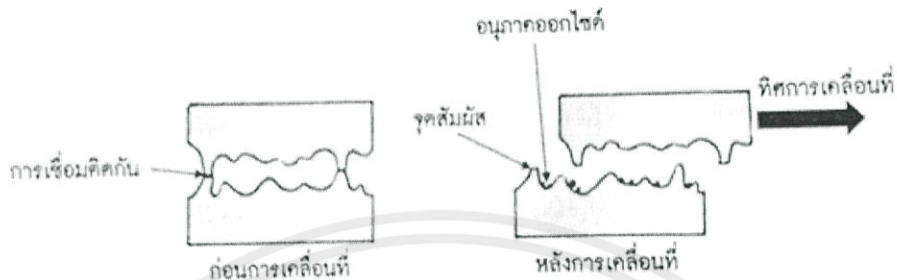
การกัดกร่อนแบบเฟรตติง (Fretting corrosion) เป็นความเสียหายที่เกิดจากการกัดกร่อนร่วมกับการสึกหรอแบบถูรูด (Fretting) คือการเคลื่อนที่กลับไปกลับมา หรือการสั่นทำให้ผิวหน้าของโลหะเกิดความเสียหาย และทำลายชั้นป้องกันของโลหะที่มีพฤติกรรมแบบแพสซีฟ ทำให้ความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะนั้นลดลง

ปัจจัยพื้นฐานของการการกัดกร่อนแบบเฟรตติง ได้แก่ [17]

- โลหะที่หันหน้าเข้าหากันนั้นเกิดแรงกระทำต่อกัน
- มีการสั่นสะเทือนบริเวณผิวหน้าสัมผัส โดยผิวด้านหนึ่งตีกระทบหรืออยู่กับผิวหน้าอีกด้านหนึ่ง
- เกิดการสั่นไถลระหว่างผิวหน้าของโลหะทั้งสอง เช่น ผิวด้านสัมผัสระหว่าง bearing กับเพลลา

กลไกการกัดกร่อนแบ่งออกเป็น 2 แบบ ได้แก่ แบบที่เกิดออกซิเดชันและสึกหรอ กับแบบที่เกิดการสึกหรอและออกซิเดชัน

แบบที่เกิดออกซิเดชันและสึกหรอกลไกความเสียหายเริ่มจากการเชื่อมติดกันของโลหะ ภายใต้อุณหภูมิแล้วเกิดการไถล และเกิดการแตกหักที่ผิวหน้าเป็นชิ้นส่วนขนาดเล็ก แล้วเกิดการออกซิไดซ์ทันทีเนื่องจากความร้อนที่เกิดจากการเสียดสี การไถลบนผิวเข้าไปซ้ำมาจะทำให้เกิดการกัดกร่อนที่มากขึ้น ส่งผลให้มีเศษที่เกิดออกซิไดซ์ตกค้างอยู่บนผิวของโลหะดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 การกัดกร่อนแบบเฟรตติงเนื่องจากการออกซิเดชันและสึกหรอ [1]

สำหรับแบบที่เกิดการสึกหรอและออกซิเดชัน ผิวออกไซด์ที่ป้องกันเนื้อโลหะจะเกิดการแตกหักและหลุดออกจากผิวโลหะ เนื่องจากความดันและการเคลื่อนที่แบบไถลเข้าไปมาเกิดเป็นชิ้นส่วนออกไซด์ต่างอยู่บนผิวโลหะโดยผิวโลหะจะเกิดการออกซิไดซ์ใหม่แล้วเกิดเป็นผิวออกไซด์ใหม่ ซึ่งจะเกิดเข้าไปมาแบบนี้จึงเป็นการสูญเสียเนื้อโลหะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ แสดงดังรูปที่ 2.19



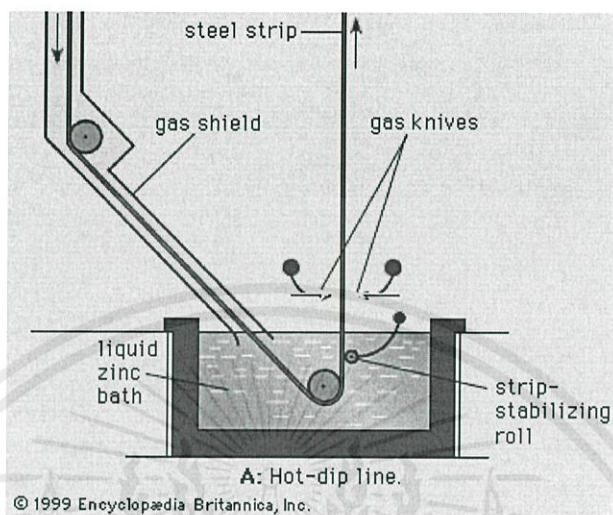
รูปที่ 2.19 ภาพวาดแสดงการกัดกร่อนแบบเฟรตติงเนื่องจากการสึกหรอและออกซิเดชัน [1]

ผลที่เกิดจากการกัดกร่อนแบบเฟรตติงได้แก่ [17]

- สูญเสียเนื้อโลหะบริเวณพื้นผิวสัมผัสกลายเป็นโลหะออกไซด์ หากเกิดกับเหล็กหรือเหล็กกล้า จะได้เป็นเหล็กออกไซด์ (Ferric oxide)
- ทำให้ความคงรูปเสียหายไป จากที่เคยเข้ากันได้ดีก็จะหลวม
- เมื่อการกัดกร่อนแบบเฟรตติงก่อให้เกิดการหลวมแล้วก็ยิ่งก่อให้เกิด Excessive strain ด้วยนำไปสู่การเกิดร่องซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของรอยร้าว และเป็น Fatigue fracture ในที่สุด

## 2.4 การเคลือบผิวด้วยโลหะ [23] อาจกระทำได้หลายวิธีต่าง ๆ กัน คือ

### 2.4.1 การเคลือบผิวแบบจุ่มร้อน (Hot-Dipping)



รูปที่ 2.20 การเคลือบผิวแบบจุ่มร้อน [30]

วิธีนี้มักใช้ในการทำแผ่นเหล็กเคลือบดีบุกและแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีเป็นส่วนใหญ่ แผ่นเหล็กเคลือบดีบุก (Tin) ส่วนใหญ่ที่ผลิตมักใช้ทำภาชนะบรรจุอาหารเนื่องจากไม่เป็นพิษ ด้านทานการกัดกร่อนได้ดีและยังบัดกรีได้ง่ายอีกด้วย การเคลือบผิวอาจทำได้โดยการนำแผ่นเหล็กที่มีความหนาประมาณ 0.25 mm มาทำความสะอาดผิวโดยกำจัดเหล็กออกไซด์ที่ติดอยู่ออกให้หมด โดยแช่ลงในสารละลายกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) หรือกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เจือจางวิธีการดังกล่าวนี้เรียกว่า Pickling การเตรียมผิวที่ไม่เหมาะสมจะทำให้โลหะที่เคลือบร้อนหลุดออกได้หรืออาจเกิดรอยปูดนูนขึ้นได้โลหะที่เคลือบ ดังนั้นจึงต้องระมัดระวังและควบคุมให้ถูกต้อง หลังจากนั้นจึงนำไปเคลือบผิวด้วยดีบุกโดยผ่านลงในถังดีบุกหลอมเหลวซึ่งตอนบนมีฟลักซ์ปกคลุมอยู่ ดีบุกจะติดผิวเหล็กโดยช่วงรอยต่อระหว่างเหล็กกับดีบุกจะเกิดเป็นโลหะผสมระหว่างเหล็กกับดีบุกขึ้น แผ่นเหล็กเคลือบดีบุกในปัจจุบันนี้มักผลิตโดยวิธีการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า เนื่องจากสามารถควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่า สำหรับการเคลือบผิวเหล็กด้วยสังกะสีก็เช่นเดียวกับการเคลือบเหล็กด้วยดีบุก คือในขั้นแรกจะต้องนำเหล็กมาทำความสะอาดผิวโดยการ pickling ก่อนต่อจากนั้นจึงนำมาล้างเกลือและออกไซด์ต่างๆ ที่ติดอยู่ออกเพื่อป้องกันผิวเหล็กไม่ให้ถูกออกซิไดซ์ได้อีกจึงนำมาจุ่มลงในฟลักซ์ซึ่งเป็นสารละลายที่ประกอบด้วยเกลือสังกะสีคลอไรด์และเกลือแอมโมเนียมคลอไรด์ หลังจากนั้นจึงนำไปอบด้วยอุณหภูมิต่ำ ฟลักซ์จะแห้งติดผิวเหล็กและทำหน้าที่ป้องกันผิว

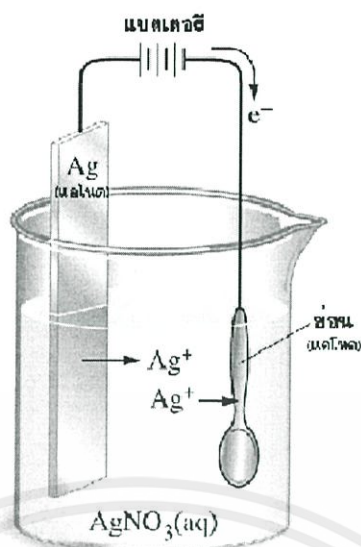
เหล็กไม่ให้ถูกออกซิไดซ์ได้ เมื่อนำแผ่นเหล็กนี้ไปเคลือบสังกะสีโดยจุ่มลงในถังที่บรรจุสังกะสีหลอมเหลว ฟลักซ์จะแยกตัวออกจากผิวเหล็ก ความหนาของสังกะสีที่เคลือบจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในถังสังกะสีหลอมเหลว และขึ้นกับอัตราเร็วที่แผ่นเหล็กเคลื่อนตัวผ่านสังกะสีที่หลอมเหลวโดยทั่วไป ควรมีค่าประมาณ  $0.3-0.6 \text{ kg/m}^2$  สำหรับแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีที่มีสังกะสีเคลือบบางและต้องการให้หักบิดงอได้พอสมควร มักจะผสมอลูมิเนียมประมาณ  $0.2\%$  ลงในสังกะสีหลอมเหลว วิธีการเคลือบผิวดังกล่าวนี้ยังอาจใช้ในการทำแผ่นเหล็กเคลือบอลูมิเนียมได้อีกด้วย โดยหลังจากที่ทำความสะอาดผิวเหล็กดีแล้วก็จะนำมาจุ่มลงในสารละลายที่มีเกลือของทองแดงละลายอยู่ ทองแดงจะจับติดผิวเหล็กเป็นแผ่นบางๆ หลังจากนั้นนำมาล้างด้วยสารละลายของแอลกอฮอล์หรือกลีเซอริน (Glycerine) แล้วจึงจุ่มลงในอลูมิเนียมเหลว หลังจากนั้นนำมารีด (Rolling) ผิวจะสวยงามขึ้น ผลิตภัณฑ์ชนิดนี้อาจใช้ทำภาชนะบรรจุอาหารแทนแผ่นเหล็กเคลือบดีบุกได้

#### 2.4.2 การเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า (Electroplating)

เป็นวิธีการเคลือบผิวโลหะที่นิยมกันแพร่หลาย การเคลือบผิวด้วยวิธีนี้มีข้อได้เปรียบกว่าการเคลือบผิวแบบจุ่มร้อนหลายประการ คือสามารถควบคุมความหนาของโลหะที่เคลือบได้ดีกว่าและผิวที่เคลือบสม่ำเสมอ ทั้งยังสามารถบิดและงอได้ดีพอสมควรโดยไม่แตกร้าว โลหะที่นำมาเคลือบก็อาจเป็น ทองแดง นิกเกิล โครเมียม แคนเดียม ทอง เงิน ดีบุก สังกะสี เป็นต้น ก่อนเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าจะต้องมีการเตรียมผิวโลหะเช่นเดียวกับการเคลือบผิวแบบจุ่มร้อน หากเตรียมผิวไม่ถูกต้องจะทำให้โลหะที่เคลือบร้อนออกได้หรืออาจเกิดปฏิกิริยาเป็นรอยรูดขึ้นภายหลังเช่นกัน การเคลือบผิวโดยวิธีเคมีไฟฟ้าขึ้นงานจะเป็นแคโทด ส่วนตัวโลหะที่ต้องการเคลือบจะเป็นแอโนด ซึ่งจะละลายลงไปในการละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยมีเกลือของโลหะนั้นๆละลายอยู่ในขณะที่โลหะบางส่วนจะเคลือบผิวแคโทด ในกรณีที่แอโนดเป็นตัวนำชนิดที่ไม่ว่องไว (Non-reactive) เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม ตะกั่ว หรือ แท่งคาร์บอน โลหะที่ไปเคลือบผิวแคโทดอาจอยู่ในลักษณะเกลือที่ละลายอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพียงอย่างเดียวก็ได้

ตัวอย่างการชุบซ้อนด้วยเงินหลักการของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าคือ ต้องให้โลหะชนิดหนึ่งมาเคลือบบนโลหะอีกชนิดหนึ่งที่อยู่เป็นแคโทดโดยจัดเซลล์ดังนี้ [26]

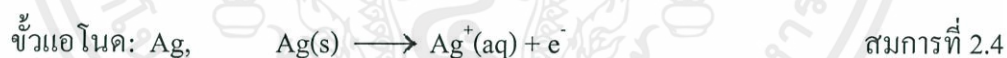
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 การเคลือบชิ้นด้วยเงินด้วยการเคลือบแบบไฟฟ้า [26]

- ขั้วแอโนด: โลหะที่ใช้ชุบ
- ขั้วแคโทด: โลหะที่ต้องการชุบ
- สารละลายอิเล็กโทรไลต์: โลหะไอออนของโลหะที่เป็นแอโนด
- ไฟฟ้า: กระแสตรง

จากรูปที่ 2.21 การชุบชิ้นโลหะด้วยเงิน ต้องใช้เงินเป็นแอโนด ชิ้นโลหะเป็นแคโทด และใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ( $\text{AgNO}_3$ ) เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์



การควบคุมการเคลือบผิวโลหะวิธีนี้ให้ได้ผลดี คือโลหะที่เคลือบติดแน่นและสม่ำเสมอ จะต้อง ควบคุมโดยเข้มงวดทั้งความต่างศักย์ไฟฟ้า ความเข้มของกระแสไฟฟ้า ณ ผิวแคโทดโดยมีหน่วยวัดเป็น  $\text{A/cm}^2$  สัดส่วนของพื้นที่แอโนดต่อพื้นที่แคโทด เวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว รวมทั้งองค์ประกอบและอุณหภูมิของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ความหนาของโลหะที่เคลือบเป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.3 การทำแคลตดิ่ง (Cladding)

การทำแคลตดิ่ง คือการเอาโลหะชนิดหนึ่งมาทาบบประกบทั้งด้านบนและด้านล่างของโลหะอีกชิ้นหนึ่ง แล้วจึงรีดแบบร้อน (Hot-rolling) จนได้ความหนาตามต้องการ ความหนาของโลหะที่ผิวจะหนาประมาณ 5–20% ของความหนาทั้งหมดโลหะที่ทำแคลตดิ่งส่วนใหญ่จะใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมเคมี เนื่องจากมีการกัดกร่อนของโลหะอย่างรุนแรง ตัวอย่างโลหะที่นำมาทำแคลตดิ่ง ได้แก่ Duralumin ซึ่งเป็นอลูมิเนียมผสม นำมาประกบผิวด้วยอลูมิเนียมบริสุทธิ์และเหล็กที่ประกบผิวด้วยนิกเกิล

### 2.4.4 การเคลือบโลหะแบบพ่น (Spraying)

เป็นการเคลือบผิวโลหะ โดยการพ่นโลหะเหลวให้เป็นละอองเคลือบวัตถุไว้ เครื่องพ่นโลหะเหลวจะมีลักษณะคล้ายปืน ภายในบรรจุโลหะที่จะนำไปเคลือบผิวไว้ในลักษณะที่เป็นแท่งหลอดหรือในรูปแบบอื่นๆ เมื่อทำการเคลือบวัตถุ ให้หลอมโลหะที่ต้องการเคลือบด้วยกระแสไฟฟ้า หรือก๊าซ Oxy-acetylene จากนั้นจึงใช้อากาศอัดให้โลหะเหลวพ่นเป็นละอองออกมา ผิวโลหะที่เคลือบลักษณะนี้จะติดแน่นได้ไม่ดี เนื่องจากแนวที่โลหะทั้งสองชนิดสัมผัสกันจะไม่เกิดเป็นโลหะผสมของโลหะทั้งสองชนิดขึ้น โดยโลหะที่นำมาเคลือบด้วยการเคลือบโลหะแบบพ่นจะต้องเตรียมทำความสะอาดผิวเช่นกัน แต่ผิวของชิ้นงานควรขรุขระพอสมควร โลหะที่เป็นตัวเคลือบอาจมีได้หลายชนิด เช่น สังกะสี อลูมิเนียม ดีบุก ทองแดง ตะกั่ว ทองเหลือง บรอนซ์ เงิน รวมทั้ง เหล็กกล้าไร้สนิม เป็นต้น ก็อาจนำมาเคลือบผิวโดยวิธีนี้ได้ ความหนาโดยปกติของสังกะสีและอลูมิเนียมที่เคลือบจะมีค่าประมาณ 0.1-0.3 mm ข้อได้เปรียบของการเคลือบโลหะแบบพ่นคือสามารถทำได้ง่ายในสถานที่ต่างๆ ดังนั้นจึงอาจทำการเคลือบผิวชิ้นงานใหญ่ๆ ณ สถานที่ที่สร้างชิ้นงานได้

## 2.5 ขั้นตอนการเคลือบผิวโลหะ

### 2.5.1 ขั้นตอนการเตรียมผิวชิ้นงาน

ขั้นตอนการเตรียมผิวชิ้นงานเป็นขั้นตอนการทำให้ผิวชิ้นงานเรียบ ไม่ขรุขระและทำความสะอาดผิวเพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอม เช่น ไขมัน น้ำมันหรือออกไซด์ต่างๆออกจากผิวหน้าของชิ้นงานที่นำมาเคลือบผิวก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการเคลือบผิว ขั้นตอนการเตรียมผิวชิ้นงานมีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.1.1 ขั้นตอนการขัดผิวชิ้นงาน

เป็นขั้นตอนแรกในการเตรียมผิวชิ้นงานก่อนนำไปล้างทำความสะอาดเพราะชิ้นงานก่อนที่จะนำมาทำการเคลือบผิวจะมีผิวหยาบขรุขระ มีรอยขีดข่วนหรือเป็นสนิม การขัดจนผิวหน้าเรียบจะทำให้คุณภาพชิ้นงานหลังการเคลือบผิวดีคือผิวชิ้นงานมีความเรียบสม่ำเสมอ และการเกาะติดของโลหะจะแน่นในขั้นตอนการขัดผิวชิ้นงานประกอบด้วยงานขัดหมุนด้วยไฟฟ้าหรือมอเตอร์ขัด ล้อขัด สายพานขัดและกระดาษทรายในการขัดผิวชิ้นงานนั้นจะเกิดฝุ่นละอองที่เกิดจากการขัดเป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีพัดลมสำหรับเป่าไล่ฝุ่นและพัดลมดูดอากาศขนาดใหญ่หรือเครื่องดูดฝุ่นเพื่อกักเก็บฝุ่นที่เกิดขึ้นจากการขัดนอกจากนี้ควรขัดผิวชิ้นงานในห้องที่มีแสงสว่างและการถ่ายเทของอากาศดีเพียงพอ [27] วิธีในการขัดจะแบ่งเป็น การขัดหยาบ การขัดละเอียด และการขัดเงา ซึ่งการขัดหยาบเป็นการขัดขั้นแรกโดยขัดเอารอยขีดขูดลึกๆ หรือบริเวณที่ไม่สม่ำเสมอออกซึ่งใช้ล้อที่เคลือบด้วยทรายหยาบ ส่วนการขัดละเอียดเป็นการขัดต่อจากการขัดหยาบ เมื่อขัดผิวชิ้นแรกเสร็จก็ทำการขัดผิวด้วยล้อทรายละเอียดขึ้น จนกระทั่งสังเกตเห็นผิวงานเรียบดีแล้วจึงขัดด้วยล้อผ้าหยาบและละเอียดตามลำดับ พร้อมกับใช้ยาขัดประกอบกับล้อผ้า จะเห็นว่าผิวงานเรียบไม่มีริ้วรอยและเป็นเงา แต่ก่อนจะขัดด้วยล้อผ้าควรขัดด้วยแปรงหางม้าก่อน ทำให้ผิวเรียบและเงาขึ้นและสุดท้ายการขัดเงา นับว่าเป็นการขัดชิ้นงานสุดท้าย ที่ต้องการให้งานมีความเงา โดยทั่วไปมักใช้ล้อผ้าหยาบร่วมกับยาขัดสีขาว

### 2.5.1.2 ขั้นตอนการล้างไขมัน

- **ขั้นตอนการล้างไขมันด้วยด่าง** เป็นการทำความสะอาดชิ้นงานโดยการจุ่มหรือสเปรย์ การล้างทำความสะอาดโดยวิธีจุ่มหรือสเปรย์ด้วยสารละลายทำความสะอาดที่เป็นเบสหรือสารเคมีอื่นๆ เช่น โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate) โซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต (Sodium tripolyphosphate) สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ (Anionic Surfactant) และสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ (Nonionic Surfactant) ที่อุณหภูมิ 80 °c เป็นเวลา 3-15 นาที ยกเว้นการใช้สเปรย์ด้วยสารลดแรงตึงผิวจะทำที่อุณหภูมิ 64-74 °c [27]
- **การกำจัดไขมันด้วยไอระเหย** การเอาน้ำมันหรือไขมันออกจากผิวงานที่จะทำการชุบ ด้วยการนำชิ้นงานไปจุ่มแช่ลงในไตรคลอโรเอททีลีน (Trichloroethylene) ซึ่งต้องบรรจุอยู่ในถังพิเศษ ซึ่งมีเครื่องทำความร้อนอยู่ได้ถึง และมีท่อขุดทำความเย็นอยู่บริเวณของปากถัง เวลาใช้งานไตรคลอโรเอททีลีนต้องให้ความร้อนซึ่งมีจุดเดือดที่ 86 °c เมื่อถึงจุดเดือดก็จะเป็นไอระเหยขึ้นมากระทบกับความเย็นเกิดการกลั่นตัวโดยท่อขุดทำความเย็นกลับสู่ในถังอีก เมื่อจุ่มชิ้นงานลงในไตรคลอ

โรเอทที่สิ้น ไอระเหยจะถูกลั่นตัวบนผิวงาน ทำการชำระล้างไขมันหรือน้ำมันลงสู่ถัง สำหรับชิ้นงานที่มียาขัดติดแน่นอยู่ ให้จุ่มลงในน้ำมันระเหยก่อน เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกจำนวนมากออก ต่อมาจึงนำชิ้นงานขึ้นอยู่กับไอระเหย เป็นการล้างทำความสะอาดชิ้นงานขั้นสุดท้าย [3]

- **ขั้นตอนการกำจัดสนิมด้วยกรด** เป็นขั้นตอนที่ทำต่อจากการทำความสะอาดด้วยเบส โดยขั้นตอนนี้จะเป็นการกำจัดสนิมหรือชั้นออกไซด์ออกจากผิวชิ้นงานส่วนใหญ่จะใช้กรดเกลือหรือกรดไฮโดรคลอริก ซึ่งมีความรุนแรงในการกำจัดสนิมสูง ความเข้มข้นของกรดที่ใช้จะแตกต่างกันตามประเภทและความสกปรกของชิ้นงาน โดยทั่วไปจะให้ความเข้มข้นของกรดเกลือหรือกรดไฮโดรคลอริก 5-15% [27]
- **ขั้นตอนการทำความสะอาดด้วยอ่างล้างความถี่สูง (Ultrasonic bath)** เป็นการทำความสะอาดด้วยคลื่นความถี่สูง เพื่อกำจัดสิ่งสกปรก ผุ่นละอองในขั้นสุดท้ายออกส่วนมากใช้กับชิ้นงานที่มีชิ้นส่วนเล็กๆ จากนั้นทำการอบให้แห้ง

#### 2.5.2 ขั้นตอนการเคลือบผิวโลหะ

ขั้นตอนการเคลือบผิวโลหะเป็นขั้นตอนเคลือบผิวชิ้นงานด้วยโลหะโดยการใช้ไฟฟ้าในการเคลือบผิวโลหะภายในบ่อเคลือบผิวจะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าสองขั้วคือแอโนด (ขั้วลบ) และแคโทด (ขั้วบวก) และสารเคมีต่างๆ

#### 2.5.3 ขั้นตอนการล้าง

ขั้นตอนการล้างเป็นขั้นตอนการล้างวัตถุดิบและสารเคมีที่ติดกับชิ้นงาน โดยใช้น้ำสะอาด โดยขั้นตอนการล้างมีอยู่ในทุกๆ ส่วนของขั้นตอนการเคลือบผิวดังต่อไปนี้

- การล้างหลังจากการขัด
- การล้างหลังจากการล้างไขมันด้วยด่าง
- การล้างหลังจากการกำจัดสนิมด้วยกรด

#### 2.5.4 ขั้นตอนการอบแห้ง

หลังจากผ่านขั้นตอนการเคลือบผิวโลหะและขั้นตอนการล้างแล้วจะนำชิ้นงานไปอบแห้ง หรือใช้การผึ่งแดดเพื่อให้ชิ้นงานแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 การทดสอบการกัดกร่อน [2]

ปฏิกิริยาการกัดกร่อนเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นช้า อาจเป็นเดือน เป็นปี หรือหลายปี แต่การทดสอบคุณภาพต้องการผลภายในเวลารวดเร็ว ดังนั้นหลักการทดสอบจึงต้องร่นระยะเวลาการเกิดการกัดกร่อนโดยตัดช่วงเวลาที่ไม่มีเกิดปฏิกิริยาออก หรือใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ผลเร็วขึ้น แต่ทั้งนี้ต้องไม่เปลี่ยนกลไกของปฏิกิริยา วิธีการทดสอบต้องเป็นไปเช่นเดียวกับการกัดกร่อนตามธรรมชาติแต่ใช้เวลาสั้นกว่า

### 2.6.1 วัตถุประสงค์ของการทดสอบคุณภาพที่อาศัยการทดสอบการกัดกร่อน มีดังนี้

#### 2.6.1.1 ควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ แบ่งออกเป็น

- การทดสอบประจำวัน
- การทดสอบเพื่อการยอมรับ
- การทดสอบเพื่อควบคุมผลิตภัณฑ์ให้มีคุณภาพสม่ำเสมอ

#### 2.6.1.2 ประมาณอายุใช้งานของอุปกรณ์จากผลการทดสอบในเวลาสั้น

#### 2.6.1.3 เปรียบเทียบสมบัติของวัสดุต่างๆ

#### 2.6.1.4 เปรียบเทียบความรุนแรงของสิ่งแวดล้อมแบบต่างๆ

#### 2.6.1.5 หาอัตราการกัดกร่อน

2.6.2 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการเกิดการกัดกร่อนในแต่ละช่วงของการทดสอบสรุปได้ดังนี้คือ

#### 2.6.2.1 ชั้นทดสอบ ได้แก่

- ลักษณะของชิ้นงานที่ทดสอบ
- ขนาดของชิ้นงานที่ทดสอบ
- อัตราส่วนของน้ำหนักต่อปริมาตร
- การออกแบบ
- การเตรียมผิวหน้าของชิ้นงานที่ทดสอบ (การทำความสะอาด และการล้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 (สนิม)  
 ไม่ว่าจะฉีดยาใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2.2 สิ่งแวดล้อมที่ทำให้เกิดการกัดกร่อน ซึ่งอาจเป็นตามธรรมชาติ การเปลี่ยนแปลงแบบธรรมชาติ หรือการเร่งปฏิกิริยา เช่น การเติม 2 mM ของกรดซัลฟิวริกและ 0.02 mM ของแอมโมเนียมซัลเฟต เพื่อเลียนแบบบรรยากาศโรงงานอุตสาหกรรม

2.6.2.3 ตัวแปรทางโลหะวิทยา ซึ่งเป็นผลที่เกิดจากเนื้อโลหะ เช่น ผลของโลหะเจือ รอยเชื่อม และการเปลี่ยนแปลงในเนื้อโลหะเนื่องจากกระบวนการทางความร้อน

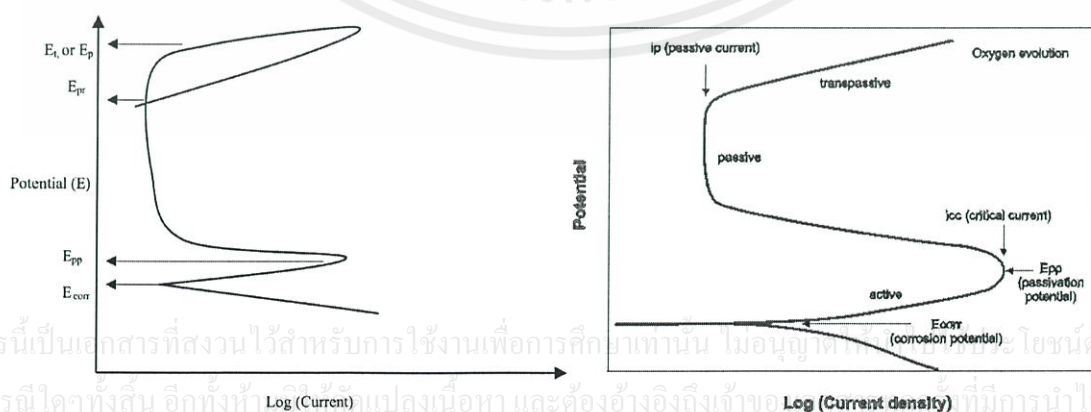
## 2.7 วิธีทดสอบการกัดกร่อน [2]

### 2.7.1 Salt spray test

ใช้ตู้ที่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นแล้วพ่นสารละลายในลักษณะที่เป็นละอองภายในตู้ เพื่อเป็นการเร่งปฏิกิริยา โดยสารละลายที่ใช้คือโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5% หรืออาจทำให้เป็นกรด โดยการปรับ pH ด้วยกรดแอซติก ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) ให้มี pH 3.5 อุณหภูมิ 20 – 35 °c ความชื้นสัมพัทธ์ 95% ใช้ระยะเวลาในการทดสอบ 2 – 3 วัน หากใช้อุณหภูมิ 50 °c สามารถลดเวลาลงเหลือ 18 ชั่วโมงขึ้นกับชิ้นงานที่ทดสอบ

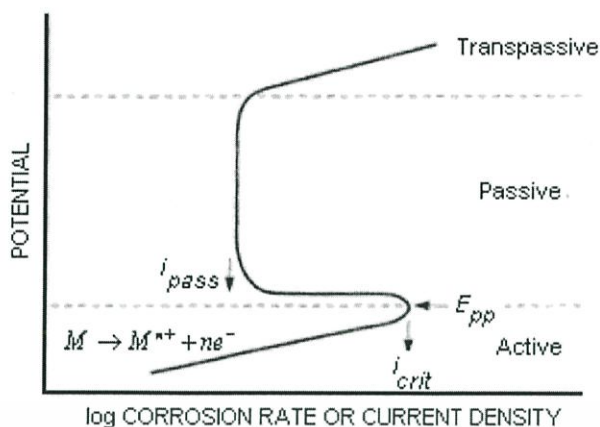
### 2.7.2 เทคนิคโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชัน (Potentiodynamic polarization)

เป็นวิธีการวัดการกัดกร่อน โดยให้ค่าศักย์ไฟฟ้าแก่ชิ้นงานเพื่อเร่งการกัดกร่อน แล้ววัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าต่างๆ โดยจะมีกระแสฟังก์เคโทดิก แสดงการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน และกระแสแอนโอดิกแสดงปฏิกิริยาออกซิเดชัน เกิดเป็นพฤติกรรมของการกัดกร่อน หรือกราฟโพลาริเซชัน (Polarization curve)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับเป็นเอกสารที่เผยแพร่สู่สาธารณะ โยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะฉีดยาทั้งสิ้น อีกทั้งทำให้เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของสิทธิ์ที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.22 แสดงตัวอย่างกราฟโพลาริเซชันแบบทั้งแคโทดิกและแอนโอดิก [22,24]

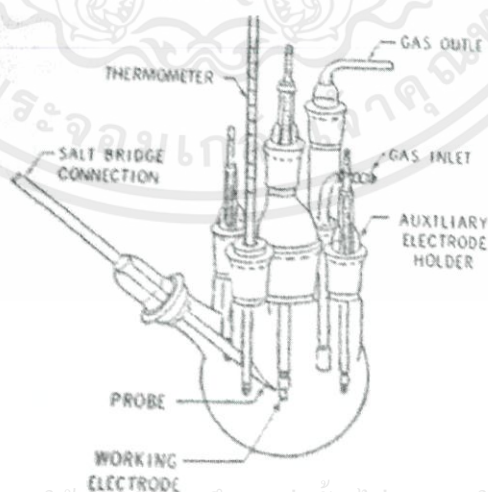


รูปที่ 2.23 แสดงตัวอย่างกราฟโพลาริเซชันแบบแอโนดิก [23]

## 2.8 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวัดการกัดกร่อน [12]

### 2.8.1 เซลล์ทดลอง

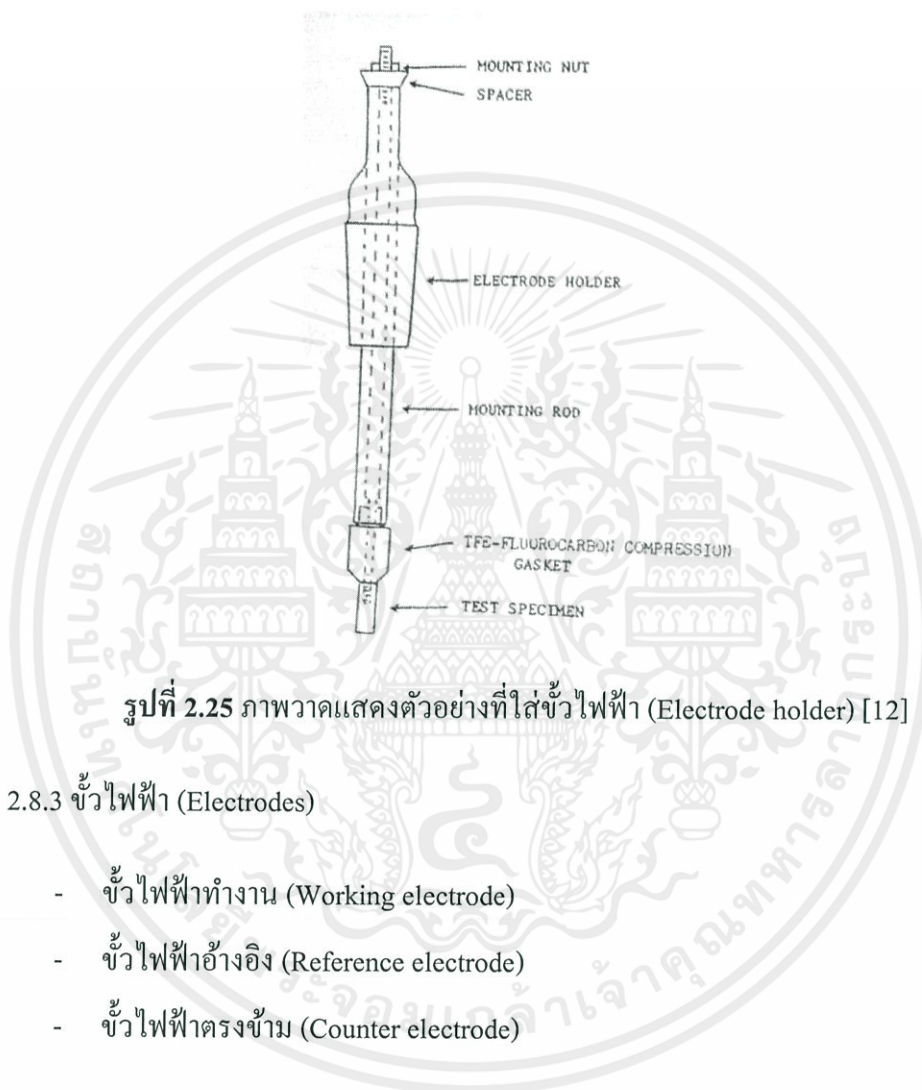
ใช้บรรจุนสารละลายที่ต้องการศึกษา คือขั้วไฟฟ้า (Electrode) ต่างๆ สะพานเกลือ (salt-bridge) ที่ต่อกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) ทางเข้าของก๊าซเฉื่อย (Inert gas) และเทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer) โดยเซลล์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นวัสดุที่ไม่เกิดการกัดกร่อน และทนทานต่อการทดสอบ รวมทั้งไม่รบกวนการทดสอบ เซลล์ที่เหมาะสมแสดงดังรูปที่ 2.24 ภาพวาดแสดงขวดกั้นกลมที่ถูกดัดแปลงให้มีหลายคอ เพื่อเป็นทางเข้าของขั้วต่างๆ ทางเข้าของก๊าซ และเทอร์โมมิเตอร์ โดยต้องจัดให้ปลายสะพานเกลือนั้นอยู่ใกล้กับขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้รูปที่ 2.24 ภาพวาดแสดงเซลล์ทดลองที่เหมาะสม [12] ภาครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.8.2 ที่ใส่ขั้วไฟฟ้า (Electrode holder)

ใช้บรรจุขั้วไฟฟ้าทำงาน โดยที่ใส่ขั้วนี้มีหลากหลายรูปแบบ แสดงดังรูปที่ 2.25 เป็นที่ใส่แบบยาว ห่อหุ้มเกือบทั้งขั้ว เพื่อป้องกันการเกิดรอยแตกของขั้วและสามารถรองรับความดันที่เกิดจากการทดสอบได้



รูปที่ 2.25 ภาพวาดแสดงตัวอย่างที่ใส่ขั้วไฟฟ้า (Electrode holder) [12]

## 2.8.3 ขั้วไฟฟ้า (Electrodes)

- ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode)
- ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode)
- ขั้วไฟฟ้าตรงข้าม (Counter electrode)

## 2.9 โคบอลต์ (Cobalt, Co) [4]

เลขอะตอม 27 เป็นธาตุในหมู่ VIII คาบที่ 4 ในตารางธาตุ จัดเป็นโลหะทรานซิชัน

น้ำหนักอะตอม 58.94 amu

จุดหลอมเหลว 1493 °C

จุดเดือด 3100 °C

ความหนาแน่น 8800 kg/m<sup>3</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลขออกซิเดชันสามัญ +2 +3

### 2.9.1 การค้นพบ [28]

การวิเคราะห์รูปปั้นที่ทำด้วยแก้วสีน้ำเงินและเครื่องปั้นดินเผาของสมัยอียิปต์โบราณและบาบิโลน (Babylonia) ก่อนคริสตศักราช 1450 ปี โดยวิธีสเปกโตรสโกปี พบว่าได้มีการใช้สีที่มีสารประกอบของโคบอลต์ เกือบหลายชนิดของโคบอลต์เป็นตัวให้สีน้ำเงินแก่ เซรามิกส์ (Ceramics) และเมื่อผสมกับสารประกอบของนิกเกิล โครเมียมหรือแมงกานีสให้สีน้ำเงินและสีเขียว

ในปี ค.ศ. 1735 Brandt เป็นคนแรกที่ค้นพบธาตุ Co และในปี ค.ศ. 1742 เขาสามารถสกัดธาตุโคบอลต์ในรูปของธาตุอิสระได้

ในปี ค.ศ. 1750 Bergman ได้ศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของธาตุที่ค้นพบได้ใหม่นี้ ชื่อของธาตุนี้ตรงกับคำเยอรมัน "Kobalt" ซึ่งมาจากคำกรีก "Cobalos" มีความหมายว่า "เหมือง" คำเยอรมัน "Kobalt" หมายถึงปีศาจแห่งเหมืองเป็นชื่อที่ใช้เรียกสินแร่บางชนิด โดยนักขุดเหมืองของเมือง Saxony เพราะสินแร่เหล่านี้ก่ออันตรายต่อมือและเท้าได้ ต่อมาพบว่าสินแร่เหล่านี้มีสารประกอบของโคบอลต์และสารหนูเป็นองค์ประกอบ

### 2.9.2 ลักษณะ [4]

โคบอลต์บริสุทธิ์มีการจัดเรียงตัวด้วยกัน 2 รูปแบบ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $417^{\circ}\text{C}$  โคบอลต์มีการจัดเรียงโครงสร้างแบบ HCP (Hexagonal close packed) และที่อุณหภูมิสูงกว่า  $417^{\circ}\text{C}$  มีการจัดเรียงโครงสร้างแบบ FCC (Face center cubic) ในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจาก FCC ไปเป็น HCP นั้นจะเกิดขึ้นได้ช้ามาก และไม่สามารถเกิดขึ้นได้เอง ซึ่งขึ้นอยู่กับกระบวนการเย็นตัวที่อุณหภูมิสูง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหล่อขึ้นมาเย็นตัวจากสภาวะหลอมละลาย หรืออาจทำให้เย็นตัวจากการขึ้นรูปร้อน (Annealing) จึงทำให้ได้โครงสร้างแบบ FCC ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ไม่เสถียรเกิดขึ้น ถ้าถูกทำให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้องจะถูกเหนี่ยวนำด้วยความเค้นเชิงกลในระหว่างการเย็นตัว ซึ่งเชื่อว่าเกี่ยวข้องกับ การรวมตัวของ Stacking fault จำนวนมาก ทำให้ได้โครงสร้างที่เสถียรมีลักษณะเป็นแบบ HCP โคบอลต์ที่มีลักษณะโครงสร้างที่ไม่เสถียรเป็นแบบ FCC นั้นจะพบตำหนิแบบ Twinning ในระหว่างการเย็นตัว

### 2.9.3 การใช้ประโยชน์

2.9.3.1 ผลิตภัณฑ์เหล็กถาวรและแม่เหล็กอ่อน เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็น Ferromagnetic จึงนิยมใช้กับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ [28]

2.9.3.2 ใช้ในทางพาณิชย์โดยส่วนใหญ่จะใช้เป็นประเภทที่มีความแข็งแรงแบบ การตกตะกอนของแข็ง โดยมีการเติมธาตุโลหะทนไฟต่างๆ ลงไป เช่น โมลิบดีนัม ทังสแตน และ

แทนทาลัม นอกจากนี้โลหะผสมโคบอลต์พวกที่ถูกผลิตขึ้นมาจากกรรมวิธีแบบหล่อ จะเพิ่มปริมาณคาร์บอนลงไปผสมเพื่อให้ได้สารประกอบประเภทคาร์ไบด์ซึ่งเฟสคาร์ไบด์นี้จะให้ความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง โดยเฉพาะชิ้นส่วนในเครื่องยนต์เครื่องบิน ทว่าไปแล้วการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของคาร์ไบด์จะเกิดขึ้นระหว่างการใช้งาน มากกว่าการทำให้เกิดขึ้นโดยกรรมวิธีอบชุบทางความร้อน ความแข็งแรงที่ได้จากคาร์ไบด์เหล่านี้เกิดขึ้นโดยการเพิ่มความต้านทานต่อการเลื่อนไหลของระนาบในผลึกและที่ขอบผลึกที่อุณหภูมิสูงประมาณ 800-900 °C [5]

2.9.3.3 การเติมธาตุโครเมียมผสมลงไปโลหะผสมโคบอลต์ที่ปริมาณ 20-30% จะช่วยป้องกันการช่วยป้องกันการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งบรรยากาศที่มีการเผาไหม้ของกำมะถัน เช่น ในเครื่องยนต์กังหันก๊าซของเครื่องบินหรือโรงไฟฟ้า การเติมธาตุโครเมียมผสมลงไปนี้จะทำให้เกิดการฟอร์มหรือก่อตัวของแผ่นฟิล์มบางๆ ของโครเมียมออกไซด์ ซึ่งช่วยป้องกันการเกิดออกซิเดชัน [5]

2.9.3.4 โคบอลต์ที่เหลือใช้ในรูปแบบของสารประกอบ เช่น เป็นตัวช่วยทำให้สีแห้งเร็วขึ้น ใช้เป็นตัวให้สีของสีทาบ้านและเวนิช [28]

2.9.3.5 เนื่องจาก Co เป็นธาตุที่พืชต้องการในปริมาณเล็กน้อย (Trace element) สารประกอบของ Co จึงใช้ผสมในปุ๋ยเคมี [28]

2.9.3.6  $^{60}\text{Co}$  ซึ่งเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีสังเคราะห์ใช้รักษามะเร็งและใช้ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกัมมันตรังสี [28]

## 2.10 เหล็ก (Iron, Fe) [4]

<u>เลขอะตอม</u>	26 เป็นธาตุในหมู่ VIII คาบที่ 4 ในตารางธาตุ จัดเป็นโลหะทรานซิชัน
<u>น้ำหนักอะตอม</u>	58.85 amu
<u>จุดหลอมเหลว</u>	1535 °C
<u>จุดเดือด</u>	2800 °C
<u>ความหนาแน่น</u>	7900 kg/m <sup>3</sup>
<u>เลขออกซิเดชันสามัญ</u>	+2 +3

### 2.10.1 การค้นพบ [28]

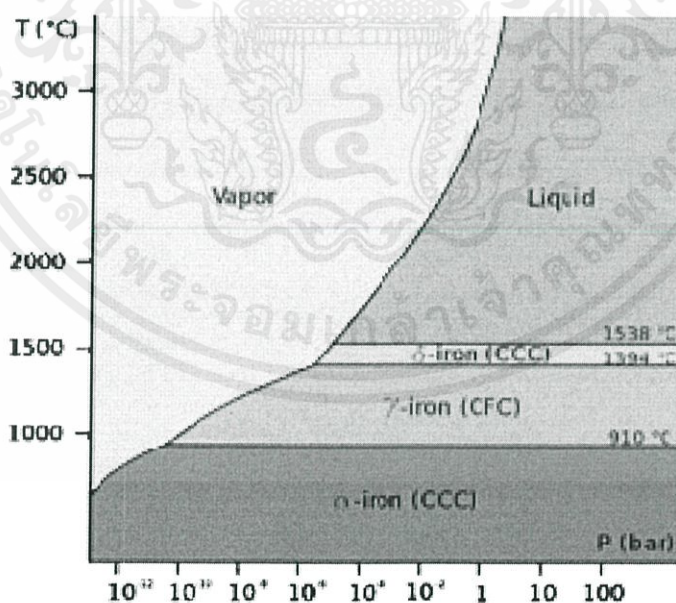
มนุษย์รู้จักเหล็กตั้งแต่ก่อนประวัติศาสตร์ มีหลักฐานยืนยันว่ามนุษย์เรารู้จักโลหะนี้ไม่น้อยกว่า 8,000 ปี อย่างไรก็ตาม 1,000 – 2,000 ปีก่อนคริสตกาลเหล็กจัดเป็นโลหะที่หายาก และในสมัยนั้นแหล่งสำคัญของเหล็กมาจากสะเก็ดดาว (Meteorites) ตั้งแต่ 1,000 – 2,000 ปีก่อนคริสต

ศักราชเป็นต้นมา มนุษย์เริ่มรู้จักวิธีถลุงเหล็กจากแร่เหล็ก และนำเหล็กมาใช้ประโยชน์ในทุกยุคทุกสมัย กระบวนการถลุงเหล็กที่ใช้กันมามี หลักการไม่แตกต่างไปจากที่ใช้กันในปัจจุบัน

### 2.10.2 ลักษณะ [29]

เหล็กมีเลขออกซิเดชันที่ค่อนข้างกว้าง -2 ถึง +6 แต่จะพบเลขออกซิเดชัน +2 และ +3 มากที่สุด มีพื้นผิวเงา การออกซิไดซ์เหล็กในอากาศปกติทำให้เหล็กเกิดออกไซด์หรือสนิม ซึ่งจะแตกต่างจากโลหะอื่น คือรูปแบบชั้นป้องกันเป็นเหล็กออกไซด์ไม่แน่นพอ โดยมีพื้นที่มากกว่าโลหะเหล็กและมีลักษณะคล้ายเกล็ด จึงเผยให้เห็นพื้นผิวที่ใหม่สำหรับการกัดกร่อนอยู่เสมอ

เหล็กบริสุทธิ์มีความนุ่ม (นุ่มกว่าอลูมิเนียม) ซึ่งไม่พบจากการถลุงเพราะจะมีสิ่งสกปรกปะปนอยู่ด้วยเสมอ เช่น คาร์บอน จึงทำให้เหล็กที่ได้มีความแข็งแรง สัดส่วนของคาร์บอนอยู่ระหว่าง 0.2% และ 2.1% โดยสมบัติเชิงกลของเหล็กและโลหะผสมของเหล็กเพิ่มขึ้นจากปริมาณคาร์บอนส่งผลให้สมบัติเชิงกลของเหล็กเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ การนำโลหะเหล็กมาใช้งานจึงต้องเพิ่มเติมกับปริมาณออกซิเจน ลดปริมาณคาร์บอนในสัดส่วนที่ถูกต้องเพื่อการใช้งานในภาคอุตสาหกรรมที่มีคุณสมบัติที่ต้องการ



รูปที่ 2.26 แผนภาพเฟสและ Allotropes [29]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.26 พบว่า

- เมื่อเหล็กหลอมเหลวเย็นลงถึงที่อุณหภูมิ 1538 °c ในอัญรูป  $\delta$  พบว่ามีโครงสร้างผลึกแบบ BCC (Body center cubic)
- ขณะที่มันเย็นตัวลงไปจนถึง 1394 °c โครงสร้างผลึกมีการเปลี่ยนแปลงกลายเป็นไบหน้าศูนย์กลางลูกบาศก์หรือ FCC (Face centered cubic) ที่พบ  $\gamma$  เหล็กหรือ austenite เกิดขึ้น
- ที่ 912 °c โครงสร้างผลึกจะกลายเป็น  $\alpha$ -เหล็กหรือเฟอร์ไรท์

เหล็กมีความสำคัญยิ่งเมื่อผสมกับโลหะอื่น ๆ มีหลายประเภทของเหล็กทั้งหมดที่มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันและความเข้าใจในคุณสมบัติของ Allotropes ของเหล็ก เป็นกุญแจสำคัญในการผลิตของเหล็กที่มีคุณภาพดี

### 2.10.3 การใช้ประโยชน์ [28]

เหล็กเป็นโลหะที่ใช้ประโยชน์และมีประโยชน์มากที่สุดในโลกชีวโลหะปัจจุบัน เหล็กเกือบทั้งหมดที่ผลิตได้ใช้ประโยชน์ในรูปของโลหะและโลหะเจือหรือเหล็กกล้า ใช้เป็นโครงสร้างในการก่อสร้าง อุตสาหกรรมยานยนต์ เครื่องจักร ฯลฯ

## 2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

N.M. Nik Rozlin, Akran M. Alfantazi [6] ทำการศึกษาขนาดเกรน และความแข็งแรงของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กในสารละลายกรดซัลฟิวริก ที่อุณหภูมิ 40 °c และที่ pH 2.5 พบว่าเมื่อปริมาณเหล็กเพิ่มขึ้น 6-25 wt% โลหะผสมโคบอลต์-เหล็กจะมีขนาดเกรนที่ลดลง และมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับโคบอลต์บริสุทธิ์ถึงสามเท่า รวมถึงโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของเหล็ก คือที่เหล็ก 11-17 wt% จะมีโครงสร้างผลึกแบบ FCC + BCC เมื่อเหล็กเพิ่มขึ้นเป็น 18-25 wt% จะแสดงโครงสร้างผลึกแบบ BCC

Keon Ha Kim, Seung Hwan Lee, Nguyen Dang Nam and Jung Gu Kim [7] ทำการศึกษาทดลองผลของการเติมโคบอลต์ ต่อสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนสำหรับ low alloy steel โดยเปรียบเทียบกันระหว่าง 0.05% Co steel และ 0.10% Co steel กับ blank steel ซึ่งปราศจากโคบอลต์ ในสารละลายกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) โดยมีค่า pH เท่ากับ 0.13 ที่อุณหภูมิห้อง ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกโพลาไรเซชัน พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณโคบอลต์เพิ่มขึ้น ค่ากระแสการกัดกร่อน และกระแสช่วงเพสซีฟจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณโคบอลต์

Hundal Jung and Akram Alfantazi [8] ทำการศึกษาคุณสมบัติด้านการกัดกร่อนของการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าของโคบอลต์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคของคลอไรด์ไอออน ทำการทดลองที่ pH 5 7 10 และ 13 โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) และกรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) ปรับค่า pH และใส่สารละลายโซเดียมคลอไรด์ ( $\text{NaCl}$ ) ความเข้มข้น 0.01 และ 0.1 M เพื่อศึกษาผลของคลอไรด์ไอออน ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดีนามิกโพลาไรเซชัน เปรียบเทียบผลการทดลองจากกราฟโพลาไรเซชัน โดยพบว่าค่า pH มีผลต่อลักษณะการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น โดยที่ค่า pH 5 และ 7 ไม่พบชั้นแพสซีฟเกิดขึ้น และเมื่อค่า pH เพิ่มสูงขึ้นค่ากระแสการกัดกร่อนมีค่าลดลงตามลำดับ

Allen Bai and Chi-Chang Hu [9] ทำการศึกษาอิทธิพลและสัญญาณวิทยาจากการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าของโลหะผสมนิกเกิล-โคบอลต์บนทองแดงที่ pH เท่ากับ 2 และ 3 ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรีเปรียบเทียบระหว่าง  $\text{Ni Ni}_6\text{Co}_4$  และ  $\text{Co}$  พบว่าเกิดกระแสแคโทดิกและแอโนดิกขึ้น โดยโคบอลต์บริสุทธิ์มีกระแสแอโนดิกมากที่สุด เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของโคบอลต์ที่นิกเกิลบริสุทธิ์พบชั้นแพสซีฟเกิดขึ้น จากภาพตัดขวางพบความหนาของชั้นเคลือบเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนรอบที่ทำการเคลือบผิว โดยมีความหนาเพิ่มมากขึ้นเมื่อจำนวนรอบในการเคลือบผิวมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือการเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้าในสารละลายที่ประกอบด้วยสัดส่วนเชิงมวลระหว่าง Co:Fe ที่แตกต่างกัน และการวัดอัตราการกัดกร่อนของโลหะที่เคลือบได้ในแต่ละสัดส่วน

#### 3.1 อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 โลหะทองแดง
- 3.1.2 เครื่องโพเทนชิโอสเตท (Potentiostat)
- 3.1.3 ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงชนิดคาโลเมลอิ่มตัว (Saturated calomel electrode, SCE)
- 3.1.4 โลหะแพลทินัม (Platinum electrode)
- 3.1.5 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope)
- 3.1.6 กระจกทรายหมายเลข 280 600 และ 1,200
- 3.1.7 เครื่องเป่าลมร้อน
- 3.1.8 อ่างล้างความถี่สูง (Ultrasonic bath) รุ่น Elma E 30 H
- 3.1.9 อุปกรณ์เครื่องแก้ว
- 3.1.10 เครื่องชั่งสาร
- 3.1.11 เครื่องวัดพีเอช (pH meter)

#### 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 โคบอลต์คลอไรด์เฮกซะไฮเดรต (Cobalt chloride hexahydrate,  $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) เกรดวิเคราะห์
- 3.2.2 ไอออน(II)คลอไรด์เตตระไฮเดรต (Iron(II)chloride tetrahydrate,  $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) เกรดวิเคราะห์
- 3.2.3 เอทานอล (Ethanol) เกรดวิเคราะห์
- 3.2.4 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, HCl) เกรดวิเคราะห์
- 3.2.5 น้ำปราศจากไอออน (Deionized water) มาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
- 3.2.6 ก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen gas) และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
- 3.2.7 กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) เกรดวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับของงานวิจัยที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

### 3.3 การเตรียมตัวอย่าง

3.3.1 ซัดโลหะทองแดงด้วยกระดาษทรายเพื่อขจัดคราบสิ่งสกปรก และกำจัดออกไซด์ที่เคลือบอยู่บริเวณผิวหน้าของทองแดง โดยในการซัดจะทำการซัดร่วมกับน้ำเพื่อลดความร้อนและแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น เริ่มซัดหยาบด้วยกระดาษทรายหมายเลข 280 ก่อน จากนั้นซัดต่อด้วยกระดาษทรายหมายเลข 600 และ 1,200 ตามลำดับเพื่อให้ผิวทองแดงมีความละเอียดมากขึ้น

3.3.2 ล้างโลหะทองแดงที่ซัดเสร็จเรียบร้อยแล้วด้วยน้ำยาทำความสะอาด และเอทานอลตามลำดับเพื่อล้างคราบสิ่งสกปรกจากการซัด

3.3.3 จากนั้นนำชิ้นโลหะแช่ในบีกเกอร์ที่มีเอทานอล ล้างต่อในอ่างล้างความถี่สูงเป็นเวลา 5 นาที

3.3.4 เป่าชิ้นโลหะให้แห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อน

### 3.4 การเตรียมสารละลาย

3.4.1 สารละลายที่ใช้ในการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงสัดส่วนเชิงมวลของ Co:Fe

Mass fraction		Weight (g/L)	
Co	Fe	CoCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	FeCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O
0.80	0.20	18.83	4.15
0.60	0.40	13.97	8.21
0.40	0.60	9.21	12.19
0.20	0.80	4.56	16.07

<b>หมายเหตุ</b>	FeCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	198.8	g/mol
	CoCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	237.9	g/mol
	Total concentration	0.1	M
	pH	2	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

3.4.1.1 ชั่งโคบอลต์คลอไรด์เฮกซะไฮเดรต และไอออน(II)คลอไรด์เตตระไฮเดรต ตามตารางที่ 3.1 (ทำครั้งละหนึ่งอัตราส่วน)

3.4.1.2 ละลายสารที่ชั่งได้ในน้ำปราศจากไอออน จากนั้นเทใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 ml

3.4.1.3 ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดวัดปริมาตร

3.4.1.4 ปรับ pH ด้วยกรดไฮโดรคลอริกจนกระทั่งมีค่า pH เท่ากับ 2 จะได้สารละลายผสมโคบอลต์-เหล็ก เพื่อใช้สำหรับการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า

3.4.2 สารละลายที่ใช้ในการทดสอบการกัดกร่อน

3.4.2.1 สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.01 N

- ปิเปตกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (98%) 0.3 ml ลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำปราศจากไอออน
- คนสารละลายให้เข้ากัน และเทลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 ml
- ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จนถึงขีดบอกริมาตร

3.4.2.2 สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.001 N

- ปิเปตกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (98%) 0.03 ml ลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำปราศจากไอออน
- คนสารละลายให้เข้ากัน และเทลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 ml
- ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดบอกริมาตร

### 3.5 การเตรียมขั้วไฟฟ้า

3.5.1 ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode)

- นำชิ้นงานโลหะทองแดงที่เตรียมไว้บรรจุลงในขั้วไฟฟ้าทำงาน

3.5.2 ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode)

- ตรวจสอบขั้วไฟฟ้าอ้างอิงชนิดคาโลเมอรัมอิ่มตัว (Saturated calomel electrode, SCE) โดยสังเกตระดับสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl)

3.5.3 ขั้วไฟฟ้าตรงข้าม (Counter electrode)

- ใช้แผ่นแพลทินัมเป็นขั้วไฟฟ้าตรงข้าม ทำการล้างและเผาโลหะแพลทินัมเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนออก แล้วทิ้งไว้ให้เย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 การเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า (Electroplating)

3.6.1 ทำการพ่นก๊าซไนโตรเจนลงในสารละลายที่เตรียมไว้เพื่อกำจัดก๊าซออกซิเจน เป็นเวลา 30 นาที

3.6.2 นำทองแดงที่ขัดผิวและทำความสะอาดแล้วมาบรรจุเป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน

3.6.3 เทสารละลายที่เตรียมไว้ตามหัวข้อ 3.4.1 ลงในเซลล์ไฟฟ้า

3.6.4 ทำการต่อขั้วไฟฟ้าเข้ากับเครื่องโพเทนชิโอสเตท (Potentiostat) โดยให้ปลายของสะพานเกลือซึ่งบรรจุขั้วไฟฟ้าอ้างอิงห่างจากขั้วไฟฟ้าทำงาน 2 mm

3.6.5 เริ่มทำการเคลือบผิวโดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี (Cyclic voltammetry) ตามตารางที่ 3.1 ที่อัตราส่วนละ 3 ชี้นงาน โดยวัดค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (Open circuit potential, OCP) เป็นเวลา 60 วินาที และใช้สภาวะในการเคลือบผิวดังต่อไปนี้

- Start potential	-0.750 V	เมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด
- Upper vertex potential	-0.500 V	เมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด
- Lower vertex potential	-1.000 V	เมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด
- Stop potential	-0.750 V	เมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด
- Scan rate	0.01 V/s	
- Time of plated	5 hr	

3.6.6 ยืนยันองค์ประกอบทางเคมีที่แน่นอนด้วย X-ray fluorescence spectrometry (XRF)

3.6.7 ศึกษาลักษณะชั้นเคลือบของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กบนทองแดงที่ได้ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์

### 3.7 การทดสอบการกัดกร่อน (Corrosion test)

3.7.1 พ่นก๊าซไนโตรเจนลงในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.01 N เพื่อกำจัดก๊าซออกซิเจน เป็นเวลา 30 นาที

3.7.2 นำตัวอย่างที่ได้จากการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนของ Co:Fe ในสารละลายเท่ากับ 80:20 บรรจุเป็นขั้วไฟฟ้าทำงานและต่อขั้วไฟฟ้าอื่นๆเข้ากับเครื่องโพเทนชิโอสเตท โดยให้ปลายของสะพานเกลือที่บรรจุขั้วไฟฟ้าอ้างอิงห่างจากขั้วไฟฟ้าทำงาน 2 mm

3.7.3 ทำการทดสอบโดยใช้เทคนิคโพเทนชิโอดนามิกโพลาริเซชัน (Potentiodynamic polarization) ด้วยอัตราการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 2,000 mV/hr วัดค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเป็นเวลา 60 วินาที และใช้สภาวะในการทดสอบการกัดกร่อนดังต่อไปนี้

- Start potential -0.500 V เมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด
- Stop potential 0.500 V เมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด
- Scan rate 2,000 mV/hr

3.7.4 เมื่อทำการวัดเสร็จสิ้นทำการบันทึกข้อมูล หลังจากนั้นทำการทดสอบการกัดกร่อนซ้ำ โดยเปลี่ยนเป็น ตัวอย่างที่ได้จากการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้ามีอัตราส่วนของ Co:Fe ในสารละลาย เท่ากับ 60:40 40:60 และ 20:80

3.7.5 หาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion current density,  $i_{corr}$ ) ค่าความต้านทานการถูกโพลาไรซ์ (Polarization resistance,  $R_p$ ) และค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion potential,  $E_{corr}$ ) โดยใช้เทคนิคการประมาณการนอกช่วงของทาเฟิล (Tafel extrapolation)

3.7.6 สร้างกราฟความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

- ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัด และปริมาณร้อยละของเหล็กที่แท้จริงของโลหะผสม โคบอลต์-เหล็กที่เคลือบผิวด้วยไฟฟ้า (จากผลการวิเคราะห์โดยเทคนิค XRF)
- ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน และปริมาณร้อยละของเหล็กที่แท้จริงของโลหะผสม โคบอลต์-เหล็กที่เคลือบผิวด้วยไฟฟ้า
- ค่าความต้านทานการถูกโพลาไรซ์ และปริมาณร้อยละของเหล็กที่แท้จริงของโลหะผสม โคบอลต์-เหล็กที่เคลือบผิวด้วยไฟฟ้า

3.7.7 คำนวณหาอัตราการกัดกร่อน จากสมการ  $CR = K_1 \frac{i_{corr}}{\rho}$  EW และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการกัดกร่อนกับปริมาณร้อยละของเหล็กที่แท้จริงของโลหะผสม โคบอลต์-เหล็กที่เคลือบผิวด้วยไฟฟ้า

3.7.8 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 3.7.1 โดยเปลี่ยนเป็นสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.001 N

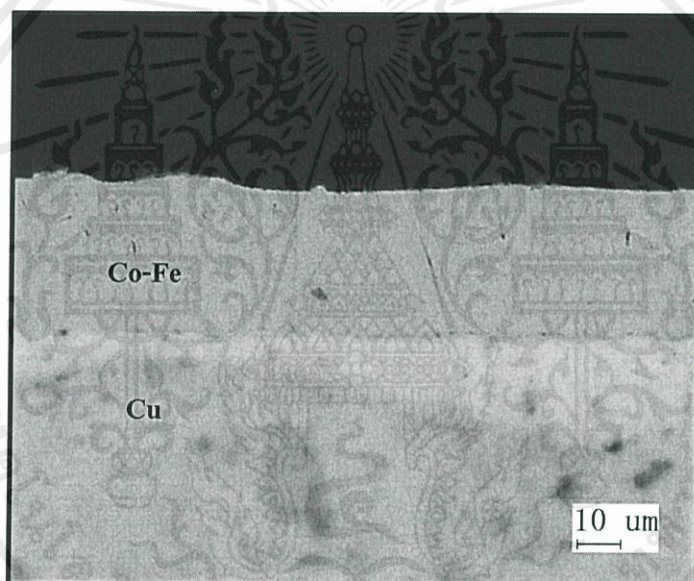
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

#### 4.1 การเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า

จากการเคลือบผิวทองแดงด้วยไฟฟ้าเมื่อนำชิ้นงานไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Optical microscope, OM) ดังรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าปรากฏชั้นเคลือบของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กเคลือบอยู่บนผิวของทองแดงมีความหนาประมาณ 23  $\mu\text{m}$  ชั้นของโลหะผสมเมื่อมองด้วยตาเปล่าจะมีสีเงินเป็นมันวาว



รูปที่ 4.1 ภาพตัดขวางของชิ้นงานที่ได้จากการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าจากกล้องจุลทรรศน์ที่ กำลังขยาย 500X โดยเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนของ Co:Fe เท่ากับ 69.8:30.2

จากการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าจะได้ปริมาณร้อยละของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กที่แท้จริง จากเทคนิค XRF ดังตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

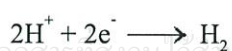
ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบสัดส่วนเชิงมวลของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กในสารละลาย และ สัดส่วนเชิงมวลของชั้นเคลือบของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กที่วัดได้จากเทคนิค XRF ที่ใช้ทดสอบ การกัดกร่อนในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.01 N

ชิ้นงาน	สัดส่วนเชิงมวลของ Co:Fe ในสารละลาย	สัดส่วนเชิงมวลของชั้นเคลือบ Co:Fe ที่วัดได้จากเทคนิค XRF
Co66.6Fe33.4	80:20	66.6:33.4
Co47.8Fe52.2	60:40	47.8:52.2
Co29.7Fe70.3	40:60	29.7:70.3
Co15.4Fe84.6	20:80	15.4:84.6

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบสัดส่วนเชิงมวลของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กในสารละลาย และ สัดส่วนเชิงมวลของชั้นเคลือบของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กที่วัดได้จากเทคนิค XRF ที่ใช้ทดสอบ การกัดกร่อนในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.001 N

ชิ้นงาน	สัดส่วนเชิงมวลของ Co:Fe ในสารละลาย	สัดส่วนเชิงมวลของชั้นเคลือบ Co:Fe ที่วัดได้จากเทคนิค XRF
Co68.5Fe31.5	80:20	68.5:31.5
Co51.9Fe48.1	60:40	51.9:48.1
Co30.6Fe69.4	40:60	30.6:69.4
Co15.4Fe84.6	20:80	15.4:84.6

จากตารางที่ 4.1 และ 4.2 แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนเชิงมวลของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กใน สารละลาย และสัดส่วนเชิงมวลของชั้นเคลือบของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กที่วัดได้จากเทคนิค XRF มีค่าแตกต่างกัน โดยสารละลายจะประกอบไปด้วยโปรตอน ( $H^+$ ) และไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) นอกจากไอออนของโลหะในสารละลายแล้วโปรตอนสามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้เช่นกัน กลายเป็นก๊าซไฮโดรเจน ดังสมการที่ 4.1



สมการที่ 4.1

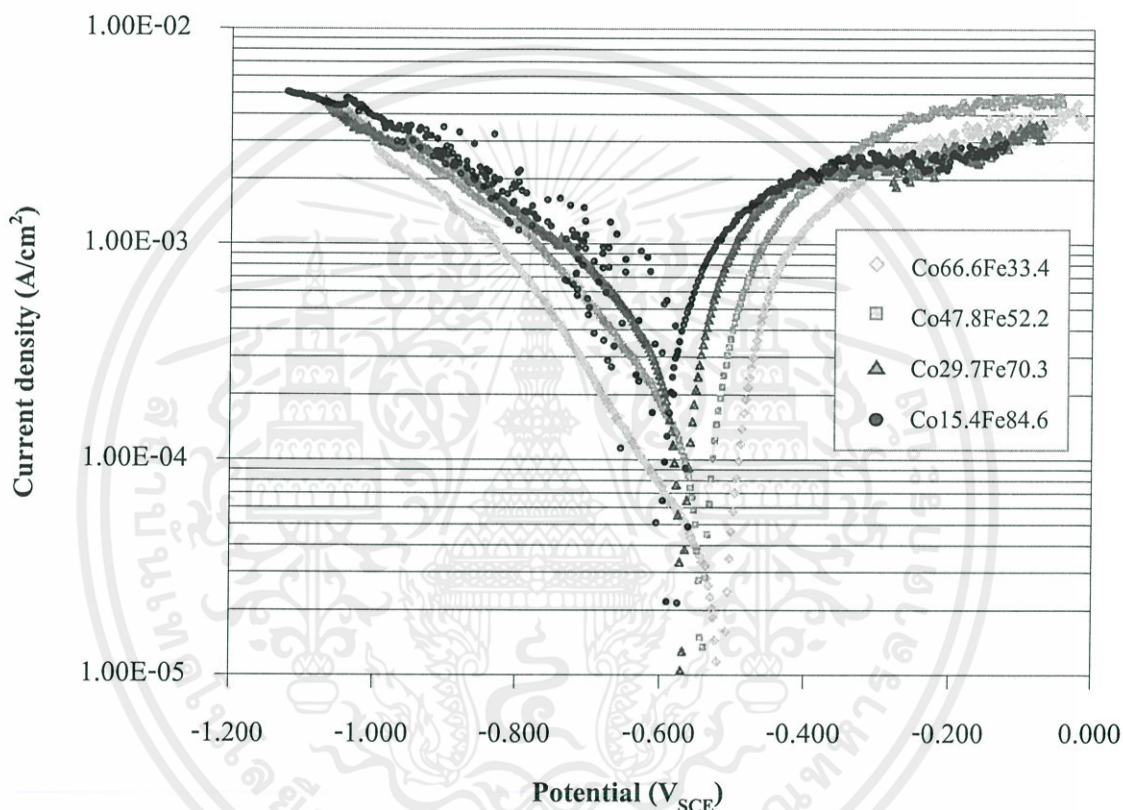
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

แม้ว่ากรณีใดๆ ที่เกิดขึ้นปฏิกิริยารีดักชันดังกล่าวนี้ ทำให้สารละลายมีค่า pH สูงขึ้นจากผลของความเข้มข้น ของไฮดรอกไซด์ไอออนที่เพิ่มขึ้น และการยึดติดบนผิวของทองแดงนั้นสามารถเกิดได้ในรูปของ

Metal monohydroxide ( $\text{Me}(\text{OH})^+$ ) ซึ่งความสามารถในการยึดติดของ  $\text{Fe}(\text{OH})^+$  มากกว่า  $\text{Co}(\text{OH})^+$  ดังนั้นจึงพบว่าสัดส่วนเชิงมวลของเหล็กในชั้นเคลือบของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กมีค่ามากกว่า สัดส่วนเชิงมวลของโคบอลต์ [10]

## 4.2 ผลการทดสอบการกัดกร่อน

### 4.2.1 สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.01 N



รูปที่ 4.2 กราฟโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.01 N ณ อุณหภูมิห้อง

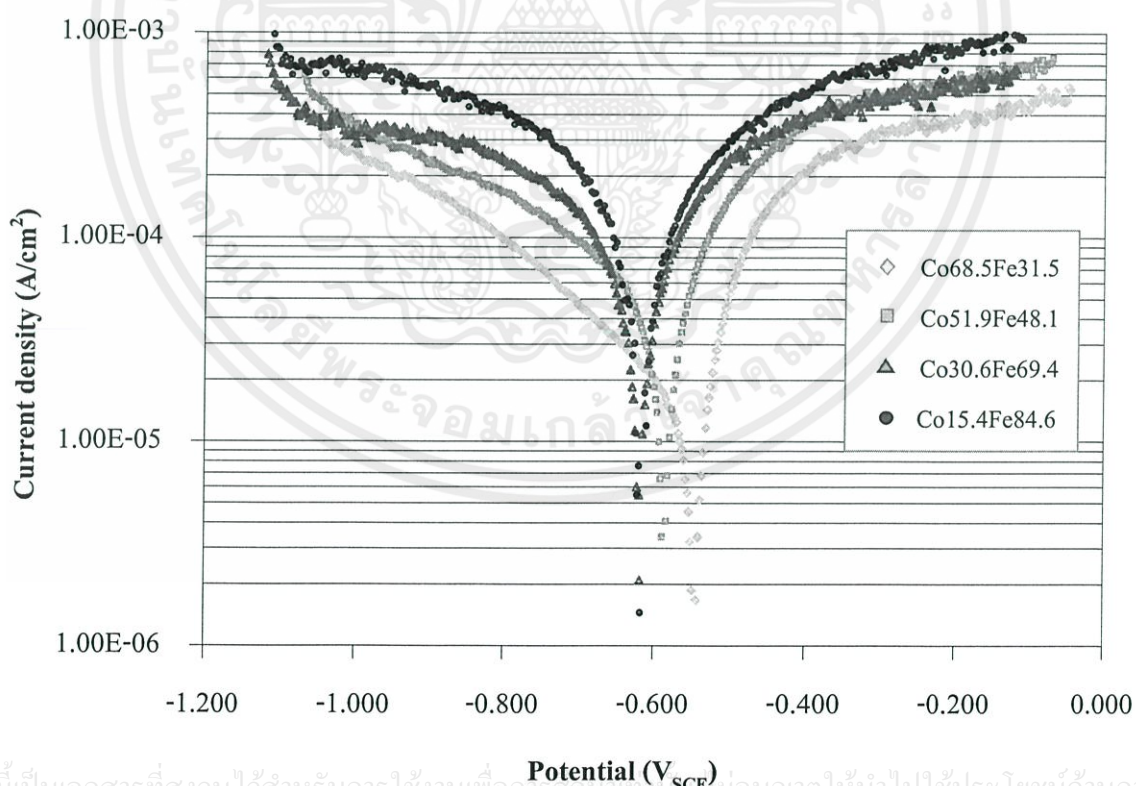
รูปที่ 4.2 แสดงกราฟโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.01 N ของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กที่สัดส่วนเชิงมวลต่างๆ พบว่าเมื่อปริมาณของเหล็กลดน้อยลง ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนจะเลื่อนไปทางด้านขวา เนื่องจากโคบอลต์มีค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานสูงกว่าเหล็ก ส่งผลให้โลหะผสมโคบอลต์-เหล็กเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้น้อยลงและมีการกัดกร่อนน้อยลง ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $i_{\text{corr}}$ ) ลด

น้อยลงด้วย นอกจากนี้ยังสามารถประมาณการนอกช่วงตามแบบของทาเฟิลได้ค่าสัมประสิทธิ์ทางการกัดกร่อนดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สัมประสิทธิ์ทางการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก ในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.01 N

ชิ้นงาน	$E_{\text{corr}}$ (V)	$i_{\text{corr}}$ (A/cm <sup>2</sup> )	Polarization resistance ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )
Co66.6Fe33.4	-0.515	$3.18 \times 10^{-5}$	636
Co47.8Fe52.2	-0.542	$1.10 \times 10^{-4}$	217
Co29.7Fe70.3	-0.571	$3.53 \times 10^{-4}$	119
Co15.4Fe84.6	-0.601	$4.32 \times 10^{-4}$	129

#### 4.2.2 สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.001 N



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าในนามอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.3 กราฟโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กในสารละลายกรด

ซัลฟิวริกเข้มข้น 0.001 N ณ อุณหภูมิห้อง

รูปที่ 4.3 พบว่าเมื่อปริมาณเหล็กลดน้อยลงค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนจะเพิ่มมากขึ้นแสดงให้เห็นว่าโลหะผสมมีความเหนียวมากขึ้น และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนจะลดลงในทำนองเดียวกันกับรูปที่ 4.2 แต่โดยรวมแล้วค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.001 N จะมีค่าน้อยกว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.01 N เนื่องจากในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.001 N มีโปรตอนน้อยกว่าสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.01 N ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันของโปรตอนดังสมการที่ 4.2 ได้น้อยกว่าด้วย เมื่อปฏิกิริยารีดักชันลดลงจะทำให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะผสมลดน้อยลงตามไปด้วยดังสมการที่ 4.3 จากรูปที่ 4.3 สามารถประมาณการนอกช่วงของทافلิตได้ค่าสัมประสิทธิ์ทางการกัดกร่อนดังตารางที่ 4.4

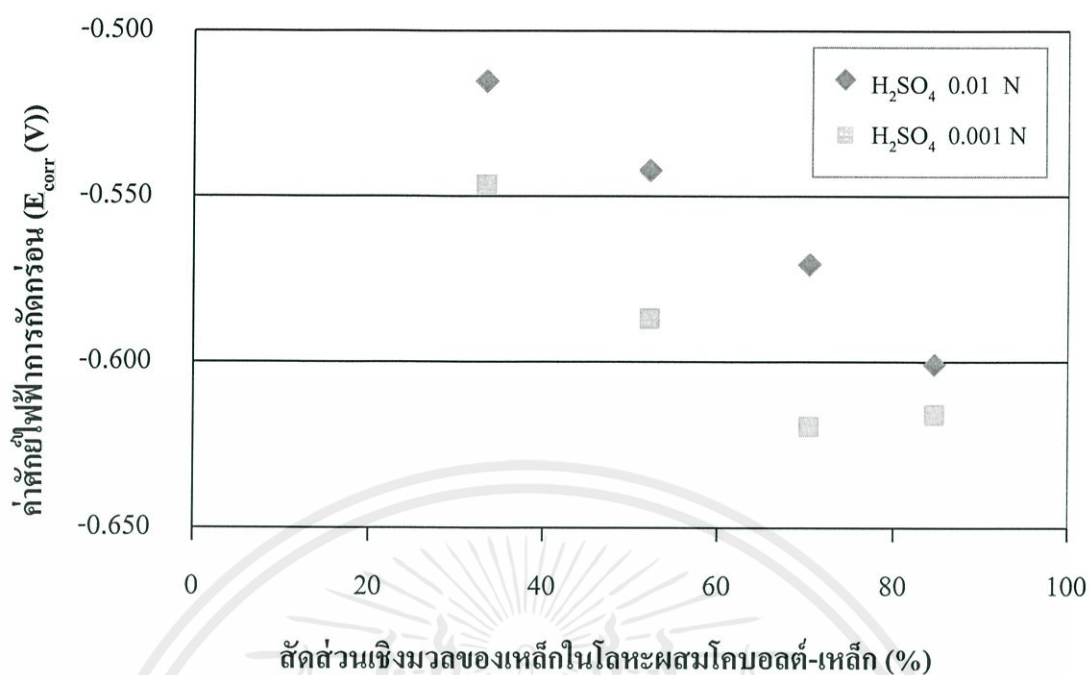


ตารางที่ 4.4 สัมประสิทธิ์ทางการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก ในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.001 N

ชิ้นงาน	$E_{\text{corr}}$ (V)	$i_{\text{corr}}$ (A/cm <sup>2</sup> )	Polarization resistance ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )
Co68.5Fe31.5	-0.546	$1.37 \times 10^{-5}$	1,942
Co51.9Fe48.1	-0.587	$4.52 \times 10^{-5}$	1,045
Co30.6Fe69.4	-0.619	$8.34 \times 10^{-5}$	725
Co15.4Fe84.6	-0.616	$2.15 \times 10^{-4}$	566

จากตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4 สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน และค่าความต้านทานการถูกโพลาไรซ์กับค่าร้อยละของเหล็กได้ดังรูปที่ 4.4 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ

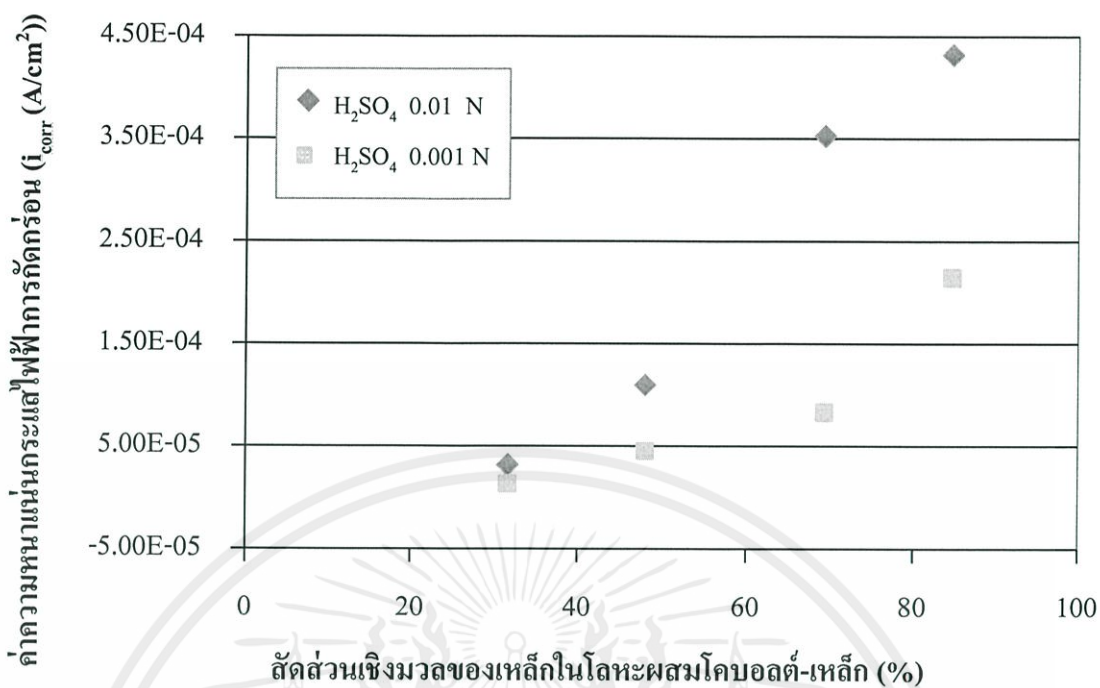
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและสัดส่วนเชิงมวลของเหล็กในโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก ในสารละลายกรดซัลฟิวริก ณ อุณหภูมิห้อง

รูปที่ 4.4 พบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริกเท่ากับ 0.01 N ปริมาณร้อยละของเหล็กเป็น 33.4 52.2 70.3 และ 84.6 พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนมีแนวโน้มลดลงจาก -0.515 เป็น -0.542 -0.571 และ -0.601 V ตามลำดับ และที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริกเท่ากับ 0.001 N ปริมาณร้อยละของเหล็กเป็น 31.5 48.1 69.4 และ 84.6 พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนมีแนวโน้มลดลงจาก -0.546 เป็น -0.587 -0.619 และ -0.616 V ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณร้อยละของเหล็กเพิ่มขึ้นค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนจะลดต่ำลง เนื่องจากเหล็กมีค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานต่ำกว่าโคบอลต์จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่ายกว่า ทำให้โดยรวมแล้วโลหะผสมมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนมากขึ้น

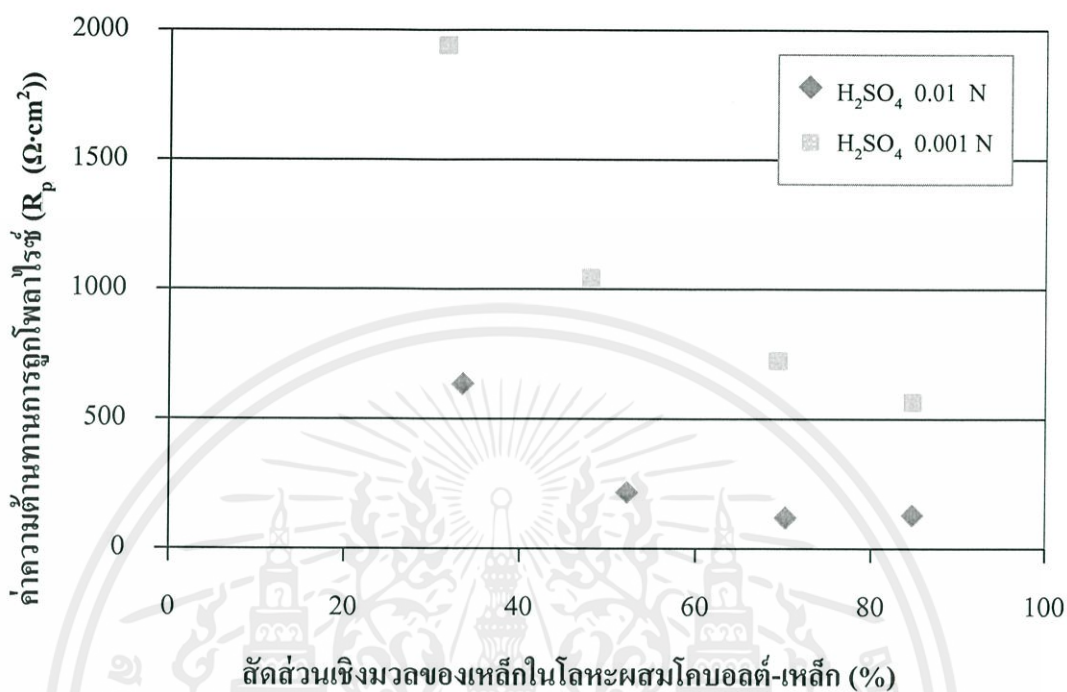
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและสัดส่วนเชิงมวลของเหล็กในโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก ในสารละลายกรดซัลฟิวริก ณ อุณหภูมิห้อง

รูปที่ 4.5 แสดงว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริกเท่ากับ 0.01 N ปริมาณร้อยละของเหล็กเป็น 33.4 52.2 70.3 และ 84.6 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่าเท่ากับ  $3.18 \times 10^{-5}$   $1.10 \times 10^{-4}$   $3.53 \times 10^{-4}$  และ  $4.32 \times 10^{-4}$  A/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ และที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริกเท่ากับ 0.001 N ปริมาณร้อยละของเหล็กเป็น 31.5 48.1 69.4 และ 84.6 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่าเท่ากับ  $1.37 \times 10^{-5}$   $4.52 \times 10^{-5}$   $8.34 \times 10^{-5}$  และ  $2.15 \times 10^{-4}$  A/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณร้อยละของเหล็กเพิ่มขึ้นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้นในสารละลายทั้ง 2 ความเข้มข้น เนื่องจากเหล็กมีความว่องไวต่อการเกิดการกัดกร่อนมากกว่าโคบอลต์ เมื่อปริมาณร้อยละของเหล็กเพิ่มขึ้นทำให้โลหะผสมเกิดการกัดกร่อนได้มากขึ้นตามไปด้วย โดยรวมแล้วค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนทั้งในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.01 N และ 0.001 N มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แต่ในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.01 N จะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนโดยรวมที่สูงกว่าสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.001 N สังเกตได้จากความชันของกราฟที่ไม่ว่ากันมากว่า แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนเชิงมวลของเหล็กในโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กในปริมาณ

เท่าๆกัน โลหะผสมที่อยู่ในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.01 N จะมีแนวโน้มถูกกัดกร่อนเพิ่มขึ้นมากกว่าโลหะผสมที่อยู่ในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.001 N



**รูปที่ 4.6** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานการถูกโพลาไรซ์และสัดส่วนเชิงมวลของเหล็กในโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก ในสารละลายกรดซัลฟิวริก ณ อุณหภูมิห้อง

รูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริกเท่ากับ 0.01 N ปริมาณร้อยละของเหล็กเป็น 33.4 52.2 70.3 และ 84.6 ค่าความต้านทานการถูกโพลาไรซ์มีค่าเท่ากับ 636 217 119 และ 129 Ω·cm<sup>2</sup> ตามลำดับ และที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริกเท่ากับ 0.001 N ปริมาณร้อยละของเหล็กเป็น 31.5 48.1 69.4 และ 84.6 ค่าความต้านทานการถูกโพลาไรซ์มีค่าเท่ากับ 1,942 1,045 725 และ 566 Ω·cm<sup>2</sup> ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณร้อยละของเหล็กเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานการถูกโพลาไรซ์จะลดลง โดยค่าความต้านทานการถูกโพลาไรซ์บ่งบอกถึงความอ่อนไหวของวัสดุต่อการถูกเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้า เมื่อปริมาณร้อยละของเหล็กเพิ่มขึ้นจะทำให้โลหะผสมมีความไวต่อการถูกเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นด้วย โดยรวมแล้วค่าความต้านทานการถูกโพลาไรซ์ในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.01 N มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าที่วัดได้ในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.001 N เนื่องจากความเข้มข้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับงานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่ควรเอาไปทำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของกรดเป็นตัวสนับสนุนให้วัสดุถูกโพลาไรซ์ได้ง่ายขึ้น ค่าความต้านทานการถูกโพลาไรซ์เป็นปัจจัยหนึ่งที่ต้องคำนึงถึง

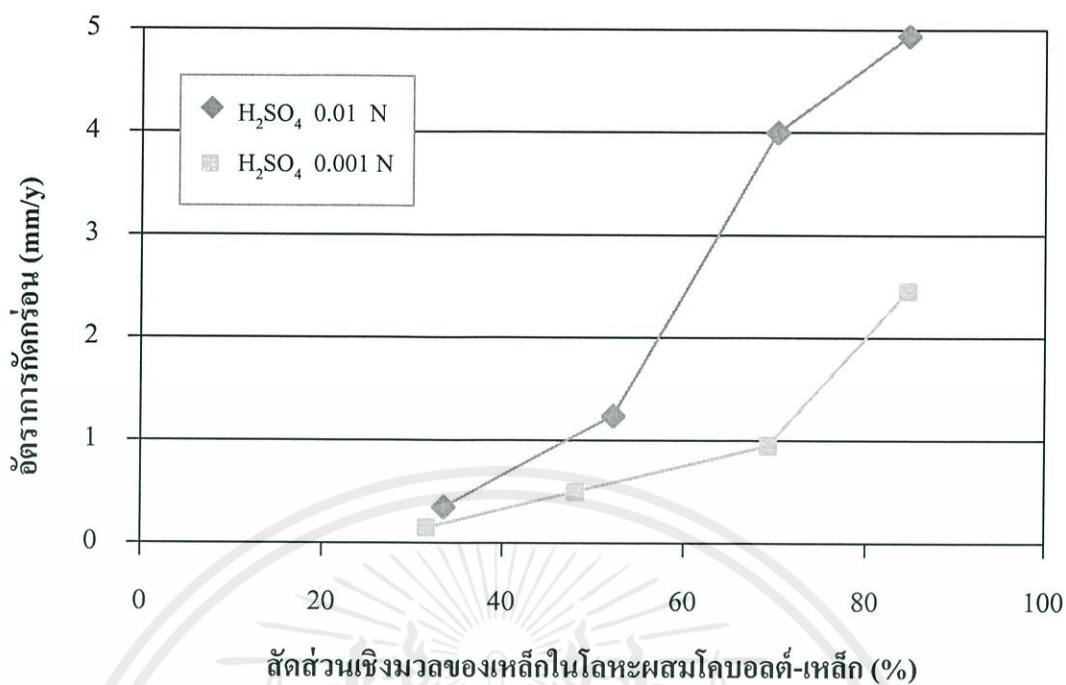
จากตารางที่ 4.3 และ 4.4 สามารถคำนวณหาค่าอัตราการกัดกร่อนได้ดังตารางที่ 4.5 โดยประยุกต์ใช้กฎของฟาราเดย์และมาตรฐาน ASTM G102 [13] (สามารถศึกษาตัวอย่างการคำนวณได้จากภาคผนวก) และสามารถเขียนแผนภูมิอัตราการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กในสารละลายกรดซัลฟิวริก ณ อุณหภูมิห้องได้ดังรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.5 อัตราการกัดกร่อนที่คำนวณได้จากชิ้นงานต่างๆ ในสารละลายกรดซัลฟิวริก

สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.01 N		สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.001 N	
ชิ้นงาน	อัตราการกัดกร่อน (mm/y)	ชิ้นงาน	อัตราการกัดกร่อน (mm/y)
Co66.6Fe33.4	0.35	Co68.5Fe31.5	0.15
Co47.8Fe52.2	1.24	Co51.9Fe48.1	0.50
Co29.7Fe70.3	4.00	Co30.6Fe69.4	0.95
Co15.4Fe84.6	4.94	Co15.4Fe84.6	2.46

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าอัตราการกัดกร่อนที่คำนวณได้ที่ชิ้นต่างๆ ในสารละลายกรดซัลฟิวริก ที่ความเข้มข้น 0.01 N ชิ้นงาน Co66.6Fe33.4 Co47.8Fe52.2 Co29.7Fe70.3 และ Co15.4Fe84.6 มีค่าอัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 0.35 1.24 4.00 และ 4.94 mm/y ตามลำดับ และในสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 0.001 N ชิ้นงาน Co68.5Fe31.5 Co51.9Fe48.1 Co30.6Fe69.4 และ Co15.4Fe84.6 มีค่าอัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 0.15 0.50 0.95 และ 2.46 mm/y ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณร้อยละของเหล็กเพิ่มมากขึ้นค่าอัตราการกัดกร่อนมีค่ามากขึ้น โดยผลการทดลองจากสารละลายกรดซัลฟิวริกทั้ง 2 ความเข้มข้นมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เช่น อุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ มีความต้องการเพิ่มปริมาณเหล็กในโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กเพื่อต้องการให้โลหะผสมมีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กที่ดีขึ้น และเป็นการเพิ่มความสามารถในการจุข้อมูล แต่ในทางกระบวนการผลิตควรคำนึงถึงการกัดกร่อนที่สามารถเกิดได้รุนแรงมากขึ้นด้วย ดังตารางที่ 4.5 ที่แสดงอย่างชัดเจนว่าเมื่อปริมาณร้อยละของเหล็กเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย [11]



รูปที่ 4.7 แผนภูมิอัตราการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กในสารละลายกรดซัลฟิวริก ณ อุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาอัตราการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กจากการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า ได้ข้อสรุปดังนี้

1. เมื่อปริมาณร้อยละของเหล็กในโลหะผสมมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้โลหะผสมมีความเหนียวลดน้อยลง ส่งผลให้มีความไวต่อการกัดกร่อนมากขึ้น และค่าความต้านทานต่อการถูกโพลาไรซ์จะมีค่าลดลงด้วย
2. แผนภูมิอัตราการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กในสารละลายกรดซัลฟิวริก ถูกสร้างขึ้นได้ด้วยข้อมูลจากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย. การวิเคราะห์ความเสียหายทางโลหการ. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554, หน้า 361-400.
- [2] กัญจนา ตระกูลกู. เทคโนโลยีการกัดกร่อน. กรุงเทพฯ : คราฟแมนเพรส, 2530, หน้า 92-97.
- [3] อนันต์ ทองมอญ. ชุบโลหะด้วยไฟฟ้า. กรุงเทพฯ : กองบริการอุตสาหกรรม.
- [4] Robert B. Ross. **Metallic materials specification handbook**. 4 th ed. London : Chapman & Hall, 1992.
- [5] Meetham, G.W. and Van de Voorde, M.H. **Materials for high temperature engineering applications**. springer, 2000.
- [6] Nik Rozlin, N.M. and Alfantazi, Akran M. **Nanocrystalline cobalt-iron alloy: Synthesis and characterization**. J. Material Science and Engineering A. 550(2012), 388-394.
- [7] Keon Ha Kim, Seung Hwan Lee, Nguyen Dang Nam and Jung Gu Kim. **Effect of cobalt on the corrosion resistance of low alloy steel in sulfuric acid solution**. J. Corrosion Science. (53)2011, 3576-3587.
- [8] Hundal Jung and Akram Alfantazi. **Corrosion properties of electrodeposited cobalt in sulfate solutions containing chloride ions**. J. Electrochimica Acta. 55(2010) ,865-869.
- [9] Allen Bai and Chi-Chang Hu. **Effect of electroplating variables on the composition and morphology of nickel-cobalt deposits plated through means of cyclic voltammetry**. J. Electrochimica Acta. (47)2002, 3447-3456.
- [10] Allen Bai, Chi-Chang Hua,, and Ten-Chin Wen. **Composition control of ternary Fe-Co-Ni deposits using cyclic voltammetry**. J. Electrochimica Acta. (48)2003, 2425-2434.

- [11] Penny Tsay, Chi-Chang Hu and Chun-Kuo Wang. **Compositional effect on the physical properties of iron-nickel deposits prepared by means of pulse-reverse electroplating.** J. Material Chemistry and Physics. 89(2005), 275-282.
- [12] ASTM International, Designation : G5 — 94. **Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements.**
- [13] ASTM International, Designation : G102-89. **Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements.**
- [14] [Online]. Available : การกัดกร่อน <http://www.kmitl.ac.th/~kssutha/>
- [15] [Online]. Available : การกัดกร่อน  
<http://www.mesutstudent.com/board/showthread.php?tid=367>
- [16] [Online]. Available : การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ  
<http://www.lpnpm.co.th/th/knowledge6.php>
- [17] [Online]. Available : การป้องกันการกัดกร่อนแบบกัลวานิก  
<http://www.rmutphysics.com/charud/specialnews/2/corrosion/corrosionthai6.htm>
- [18] [Online]. Available : อนุกรมกัลวานิก  
<http://siamkaewkumsai.blogspot.com/2010/10/graphitic-corrosion-graphitization.html>
- [19] [Online]. Available : ตัวอย่างการแตกหักแบบการกัดกร่อนร่วมกับความเค้น  
<http://midlandcorrosion.co.uk/>
- [20] [Online]. Available : ตัวอย่างการกัดกร่อนแบบซอก  
<http://siamkaewkumsai.blogspot.com/2010/06/crevice-corrosion.html>
- [21] [Online]. Available : ตัวอย่างการกัดกร่อนแบบหลุม  
[http://www.ndt.net/article/v07n07/ginzel\\_r/ginzel\\_r.htm](http://www.ndt.net/article/v07n07/ginzel_r/ginzel_r.htm)

เอกส [22] [Online]. Available : ตัวอย่างกราฟโพลีไครเซชันแบบทั้งแคโทดิกและแอโนดิกประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนี้ <http://events.nace.org/library/corrosion/AnodProtect/passivecurve.asp> รังที่มีการนำไปใช้

- [23] [Online]. Available : ตัวอย่างกราฟโพลาริเซชันแบบแอโนดิก  
<http://srizam-expro.blogspot.com/2011/03/how-to-explain-potentiodynamic.html>
- [24] [Online]. Available : ตัวอย่างกราฟโพลาริเซชันแบบทั้งแคโทดิกและแอโนดิก  
<http://www.emeraldinsight.com/journals.htm?articleid=1554448&show=html>
- [25] [Online]. Available : การเคลือบผิวด้วยโลหะ  
<http://www.demarctrading.com/index.asp?contentID=10000004&title=7.+%A1%D2%C3%E0%A4%C5%D7%CD%BA%BC%D4%C7%B4%E9%C7%C2%E2%C5%CB%D0&getarticle=21&keyword=&catid=1>
- [26] [Online]. Available : การชุบชั้นโลหะด้วยเงิน  
[http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/electrochemistry/web/metal\\_coating.htm](http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/electrochemistry/web/metal_coating.htm)
- [27] [Online]. Available : หลักปฏิบัติเพื่อป้องกันมลพิษ  
[http://oaep.diw.go.th/ctu/pdf/COP\\_Electroplating\\_th.pdf](http://oaep.diw.go.th/ctu/pdf/COP_Electroplating_th.pdf)
- [28] [Online]. Available : สารานุกรมธาตุ  
<http://web.ku.ac.th/schoolnet/snet5/topic2>
- [29] [Online]. Available : เหล็ก  
<http://translate.google.co.th/translate?hl=th&langpair=en|th&u=http://en.wikipedia.org/wiki/Iron>
- [30] [Online]. Available : การเคลือบผิวแบบจุ่มร้อน  
<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/272730/hot-dipping>
- [31] [Online]. Available : อิทธิพลที่มีผลต่อการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า  
[http://library.cmu.ac.th/digital\\_collection/theses/fulltext.php?id=349#](http://library.cmu.ac.th/digital_collection/theses/fulltext.php?id=349#)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การคำนวณอัตราการกัดกร่อน

จากค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนดังตารางที่ 4.3 และ 4.4 สามารถคำนวณหาอัตราการกัดกร่อน (CR) ได้จากสมการที่ 4.4 ตามมาตรฐาน ASTM G102 [21] โดยกรณีที่เป็นโลหะผสมต้องหาค่าการเกิดออกซิเดชันต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนัก หรือค่าการสูญเสียอิเล็กตรอน (Q) ดังสมการที่ 4.5 เพื่อนำไปหาค่าน้ำหนักสมมูล (Equivalent weight, EW) ดังสมการที่ 4.6

$$CR = K_1 \frac{i_{corr}}{\rho} EW \quad \text{สมการที่ 4.4}$$

$$Q = \sum \left( \frac{f_i n_i}{W_i} \right) \quad \text{สมการที่ 4.5}$$

$$EW = \frac{1}{\sum \left( \frac{f_i n_i}{W_i} \right)} \quad \text{สมการที่ 4.6}$$

โดยที่ W = มวลอะตอม

n = จำนวนสมมูล

f = อัตราส่วนมวล

$$K_1 = 3.27 \times 10^{-3} \text{ mm g}/\mu\text{A cm y}$$

จากสมการที่ 4.5 และ 4.6 สามารถนำมาแทนค่าหาอัตราการกัดกร่อนดังตัวอย่างต่อไปนี้

โดยที่	ร้อยละของเหล็ก	= 33.4
	อัตราส่วนมวลของเหล็ก ( $f_{Fe}$ )	= 0.33
	อัตราส่วนมวลของโคบอลต์ ( $f_{Co}$ )	= 0.67
	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i)	= $3.1810^{-5}$ A/cm <sup>2</sup>
	ค่าความหนาแน่นของเหล็ก ( $\rho_{Fe}$ )	= 7.9 g/cm <sup>3</sup>
	ค่าความหนาแน่นของโคบอลต์ ( $\rho_{Co}$ )	= 8.8 g/cm <sup>3</sup>
	จำนวนสมมูล ( $n_{Fe}, n_{Co}$ )	= 2
	มวลอะตอมของเหล็ก ( $W_{Fe}$ )	= 55.8 g/mol
	มวลอะตอมของโคบอลต์ ( $W_{Co}$ )	= 58.9 g/mol
	ความหนาแน่นของโลหะผสม ( $\rho_{CoFe}$ )	= ( $\rho_{Fe} \times f_{Fe}$ ) + ( $\rho_{Co} \times f_{Co}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คำปรึกษาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ความหนาแน่นของโลหะผสม } (\rho_{CoFe}) = (7.9 \times 0.33) + (8.8 \times 0.67)$$

$$\text{ความหนาแน่นของโลหะผสม } (\rho_{CoFe}) = 8.5 \text{ g/cm}^3$$

แทนค่า ดังนี้

- หาค่า Q

$$Q = \left( \frac{f_{Fe} n_{Fe}}{W_{Fe}} \right) + \left( \frac{f_{Co} n_{Co}}{W_{Co}} \right)$$

$$Q = \left( \frac{0.33 \times 2}{55.8} \right) + \left( \frac{0.67 \times 2}{58.9} \right)$$

$$Q = 0.034586 \frac{\text{equi}}{\text{g}}$$

- หาค่า EW

$$EW = \frac{1}{\sum \left( \frac{f_i n_i}{W_i} \right)} = \frac{1}{Q}$$

$$EW = \frac{1}{0.034586}$$

$$EW = 28.91 \frac{\text{g}}{\text{equi}}$$

นำค่า Q และ EW ลงในสมการที่ 4.4 จะได้ค่าอัตราการกัดกร่อนดังนี้

$$CR = \frac{(3.27 \times 10^{-3}) \times (3.18 \times 10^{-5}) \times (1 \times 10^6) \times 28.91}{8.4994}$$

$$CR = 0.35 \frac{\text{mm}}{\text{y}}$$

ดังนั้นที่ปริมาณร้อยละของเหล็กเท่ากับ 33.4 จากชิ้นงาน Co66.6Fe33.4 จะมีอัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 0.35 มิลลิเมตรต่อปี จากตัวอย่างการคำนวณด้านบนจะได้ค่าอัตราการกัดกร่อนแต่ละชิ้นงานดังตารางที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้