

การป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโดยวิธีการเคลือบผิวด้วยการรมดำ
แบบร้อนรวมกับการใช้ไฮดราซีน และไอร์ออน (II) ซัลเฟต

CORROSION PROTECTION OF STEEL BY HOT BLACKENING WITH
HYDRAZINE AND IRON (II) SULFATE



นางสาวกิ่งสุดา มะหุณี
นางสาวณัฐพร ศิริบรรลือหาญ
นางสาวนภัสสร มะกอกน้อย

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

การป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโดยวิธีการเคลือบผิวด้วยการรมดำ
แบบร้อนร่วมกับการใช้ไฮดราซีน และไอร์ออน (II) ซัลเฟต

CORROSION PROTECTION OF STEEL BY HOT BLACKENING WITH
HYDRAZINE AND IRON (II) SULFATE



นางสาวกิงสุดา มะหุณี

นางสาวณัฐพร ศิริบรรลือหาญ

นางสาวนภัสสร มะกอกน้อย

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CORROSION PROTECTION OF STEEL BY HOT BLACKENING WITH
HYDRAZINE AND IRON (II) SULFATE



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN INDUSTRIAL CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโดยวิธีการเคลือบผิวด้วยการรมดำ
แบบร้อนร่วมกับการใช้ไฮดราซีน และไอร์ออน (II) ซัลเฟต
Corrosion Protection of Steel by Hot Blackening with
Hydrazine and Iron (II) Sulfate

ชื่อนักศึกษา นางสาวกิ่งสุดา มะหุณี รหัสนักศึกษา 54050130
นางสาวณัฐพร ศิริบรรลือหาญ รหัสนักศึกษา 54050171
นางสาวนภัสสร มะกอกน้อย รหัสนักศึกษา 54050186

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา เคมี
ปีการศึกษา 2557
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. สุธา สุทธิเรืองวงศ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมี
อุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.ปานไพลิน สีหาราช กรรมการ	
ผศ.ดร.สุธา สุทธิเรืองวงศ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโดยวิธีการเคลือบผิวด้วยการรมดำแบบร้อนร่วมกับการใช้ไฮดราซีน และไอร์ออน (II) ซัลเฟต
ชื่อนักศึกษา	นางสาวกิงสุดา มะหุณี รหัสนักศึกษา 54050130 นางสาวณัฐพร ศิริบรรลือหาญ รหัสนักศึกษา 54050171 นางสาวณภััสสร มะกอกน้อย รหัสนักศึกษา 54050186
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา	เคมี
ปีการศึกษา	2557
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.สุธา สุทธิเรืองวงศ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กกล้าชนิด S50C โดยวิธีการเคลือบผิวด้วยการรมดำแบบร้อนและใส่สารเติมแต่งที่ส่งผลต่อฟิล์มแมกนีไทด์ (Fe_3O_4) ที่ช่วยในการยับยั้งการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5% โดยมวลต่อปริมาตร โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 20 และ 30% โดยมวลต่อปริมาตร จากนั้นเติมสารเติมแต่ง 2 ชนิด คือ ไฮดราซีนไฮเดรต ($\text{N}_2\text{H}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ที่ความเข้มข้น 2 5 และ 10 เท่าของไฮดราซีนที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับออกซิเจนในน้ำกลั่น และ ไอร์ออน (II) ซัลเฟต ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) ที่ความเข้มข้น 3 และ 5 เท่าของงานวิจัยที่อ้างอิง จากนั้นนำไปวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดควบคู่ไปกับเทคนิคการวิเคราะห์แบบ EDS เพื่อตรวจหาความหนาของชั้นฟิล์มและหาค่าประกอบของธาตุ พบว่าเมื่อทำการรมดำเหล็กด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 30% กับไฮดราซีนไฮเดรตที่ความเข้มข้น 5 เท่า ชั้นออกไซด์ที่ได้มีความหนา 32.50 ไมโครเมตร และเมื่อทำการรมดำเหล็กด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 30% กับไฮดราซีนไฮเดรตที่ความเข้มข้น 5 เท่า แล้วเติมไอร์ออน (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 5 เท่า จะมีความหนามากที่สุด คือ 36.67 ไมโครเมตร จากนั้นเมื่อไปทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดินามิกโพลาริเซชันพบว่า ทำการรมดำเหล็กด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 30% กับไฮดราซีนไฮเดรตที่ความเข้มข้น 5 เท่า แล้วเติมไอร์ออน (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 5 เท่า จะให้ประสิทธิภาพในการยับยั้งการกัดกร่อนดีที่สุด นอกจากนี้พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) ของเหล็กกล้าที่ผ่านการรมดำมีค่าต่ำกว่าค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนที่วัดได้จากเหล็กกล้ารมดำเชิงการค้า

คำสำคัญ : เหล็กกล้าชนิด S50C แมกนีไทด์ การยับยั้งการกัดกร่อน การรมดำ

Title	Corrosion Protection of Steel by Hot Blackening with Hydrazine and Iron (II) Sulfate	
Students	Miss Kingsuda Mahunee	Student ID 54050130
	Miss Nattapron Siribanluehan	Student ID 54050171
	Miss Napatsorn Makoknoi	Student ID 54050186
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)	
Department	Chemistry	
Academic Year	2014	
Advisor	Asst.Prof.Dr. Sutha Sutthiruangwong	

Abstract

The corrosion protection of carbon steel S50C by hot blackening and additives that provided magnetite (Fe_3O_4) film were studied in 3.5% NaCl solution. The blackening solution were 10, 20, and 30% W/V NaOH. The additives were added to alkaline solution, i.e., hydrazine hydrate ($\text{N}_2\text{H}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) and iron (II) sulfate heptahydrate ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$). The concentration were equal to 2x 5x 10x times of the amount of hydrazine equivalent to dissolved oxygen and 3x and 5x FeSO_4 amount obtained from the reference literature. The Fe_3O_4 films thickness and composition were characterized using scanning electron microscope / energy dispersive x-ray spectrometer (SEM/EDS). The film prepared by 30% NaOH - 5x N_2H_4 and 30% NaOH - 5x N_2H_4 - 5x FeSO_4 had thickness of 32.50 μm and 36.67 μm respectively. The corrosion protection was studied using potentiodynamic polarization. It has been found that 30% NaOH- 5x N_2H_4 - 5x FeSO_4 showed the highest performance in corrosion protection because of the lowest corrosion current density (i_{corr}).

Keywords : carbon steel S50C, magnetite, corrosion protection, blackening

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากความเมตตาอนุเคราะห์ของหลายๆฝ่าย ทางคณะผู้จัดทำโครงการขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุธา สุทธิเรืองวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่คอยให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือในภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติมาโดยตลอด ทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จบรรลุผลไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด และ ผศ.ดร.ปานไพลิน สีหาราช คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษที่ได้ให้คำแนะนำ ชี้แนะ และตรวจสอบข้อมูลต่างๆ ทำให้โครงการพิเศษนี้มีความถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่อำนวยความสะดวกในด้านอุปกรณ์และสารเคมี

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือกลาง วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่อำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์สาร และให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์เป็นอย่างดี

นางสาวกิ่งสุตา มะหุณี
นางสาวณัฐพร ศิริบรรลือหาญ
นางสาวนภัสสร มะกอกน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ฎ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 วิธีการศึกษา	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การกัดกร่อน (Corrosion)	4
2.1.1 กลไกของการกัดกร่อน (Mechanism of corrosion)	4
2.1.2 ปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้เกิดการผุกร่อนของโลหะ	8
2.2 การป้องกันการกัดกร่อน (Corrosion protection)	10
2.2.1 การป้องกันแบบแคโทดิก (Cathodic protection)	10
2.2.1.1 โลหะกัดกร่อนหรือแอโนดป้องกันการกัดกร่อน (Sacrificial anodes)	11

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.1.2 ระบบป้องกันและระงับการเกิดสนิมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (ICCP)	12
2.2.2 การป้องกันแบบแอโนดิก (Anodic protection)	13
2.2.3 การปรับสภาพผิว (Surface treatment)	13
2.2.3.1 การเคลือบผิวด้วยสารอินทรีย์ (Organic coating)	13
2.2.3.2 การเคลือบผิวด้วยโลหะ (Metallic coating)	13
1. การชุบเคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อน (Hot dip galvanizing)	13
2. การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating)	15
3. การเคลือบผิวแบบพ่นโลหะ (Spraying)	16
2.2.3.3 การเคลือบผิวที่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่ผิวชิ้นงาน (Conversion coating)	16
1. การเคลือบผิวด้วยฟอสเฟต (Phosphate conversion coating)	16
2. การเคลือบผิวด้วยโครเมต (Chromate conversion coating)	17
3. การทำอะโนไดซ์ (Anodizing)	17
4. การรมดำ (Blackening)	18
2.3 ลักษณะและคุณสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอน	23
2.3.1 ชนิดของเหล็กกล้าคาร์บอน	23
2.3.2 เหล็กกล้าคาร์บอนชนิด S50C	24
2.4 การเตรียมผิวและการทำความสะอาดชิ้นงานสำหรับการรมดำ	25
2.4.1 การเตรียมผิวชิ้นงาน	26
2.4.1.1 การขัด	26
2.4.1.2 การยิงทรายหรือการพ่นทราย	27

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.2 ชั้นทำความสะอาดผิวชิ้นงาน	28
2.4.2.1 การล้างคราบไขมันด้วยตัวทำละลาย	28
2.4.2.2 การต้มล้างไขมันด้วยด่างร้อน	28
2.4.2.3 การล้างชิ้นงานด้วยไฟฟ้า	28
2.4.2.4 การล้างด้วยกรด	29
2.4.2.5 การล้างด้วยน้ำ	29
2.5 ชั้นขีโลมผิวด้วยน้ำมันและอบ	29
2.6 สารเติมแต่งที่ใช้ในการรมดำ (Additive)	29
2.6.1 คุณสมบัติของสารเติมแต่ง	30
2.6.2 ชนิดของสารเติมแต่ง	30
2.6.2.1 กำจัดออกซิเจนในสารละลาย (Oxygen scavengers)	30
2.6.2.2 เพิ่มปริมาณเหล็กในรูปสารละลาย	31
2.6.3 สารเติมแต่งที่ศึกษาในงานวิจัย	31
2.7 เทคนิคโพเทนชิโอดนามิกโพลาริเซชัน (Potentiodynamic polarization)	32
2.7.1 การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อน	32
2.7.2 การคำนวณพารามิเตอร์ (Calculation)	34
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	36
2.8.1 การเกิดฟิล์มเหล็กออกไซด์ (Magnetite, Fe_3O_4)	36
2.8.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กออกไซด์ (Magnetite, Fe_3O_4)	37
2.8.3 สารเติมแต่งที่มีส่วนช่วยในการปรับปรุงคุณภาพของฟิล์มเหล็กออกไซด์ (Magnetite, Fe_3O_4)	38

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8.3.1 สารเติมแต่งที่สามารถกำจัดออกซิเจนในระบบ	38
2.8.3.2 สารเติมแต่งที่สามารถเพิ่มปริมาณเหล็กในรูปสารละลาย	39
2.8.4 การป้องกันการกัดกร่อนของชั้นฟิล์มเหล็กออกไซด์ในสารละลาย ทดสอบการ กัดกร่อน	39
2.8.5 การป้องกันการกัดกร่อนของโลหะโดยการเคลือบผิวด้วยวิธีต่างๆ	40
2.8.6 สรุปรงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	40
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	42
3.2 อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	42
3.3 วิธีการทดลอง	43
3.3.1 การเตรียมตัวอย่าง	43
3.3.2 การเตรียมสารเคมีในการทดลอง	43
3.3.3 การเคลือบผิวด้วยการรมดำ	44
3.3.4 การทดสอบชิ้นงาน	44
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล	
4.1 ผลจากกล่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเหล็กชนิด S50C โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10, 20 และ 30% โดยมวลต่อปริมาตร	46
4.2 ผลจากกล่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเหล็กชนิด S50C โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตร และเติมสารเติมแต่ง 2 ชนิด	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1 ไฮดรารีนที่ความเข้มข้น 2, 5 และ 10 เท่าของไฮดรารีนที่ทำปฏิกิริยา พอดี้กับออกซิเจนในน้ำกลั่น	52
4.2.2 ไฮดรารีนที่ความเข้มข้น 5 เท่าของไฮดรารีนที่ทำปฏิกิริยาพอดี้กับ ออกซิเจนในน้ำกลั่นกับไฮร์ออน (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 3 และ 5 เท่าของงานวิจัยที่อ้างอิง	57
4.3 ผลการทดลองการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กกล้าชนิด S50C โดยการเคลือบ ผิวด้วยวิธีการรมดำ	61
4.3.1 ผลของไฮร์ออน (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0, 3 และ 5 เท่าของงานวิจัย	61
4.3.2 ผลของเหล็กกล้าที่ไม่ได้ถูกเคลือบผิวกับไฮร์ออน (II) ซัลเฟตที่ ความเข้มข้น 5 เท่าของงานวิจัย และเหล็กกล้าเชิงการค้า	63
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลงานวิจัย	65
5.2 ข้อเสนอแนะ	65
เอกสารอ้างอิง	66
ภาคผนวก ก รูปภาพประกอบการทดลอง	71
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของครึ่งเซลล์รีดอกซ์ (E°)	6
ตารางที่ 2.2 แสดงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกัดกร่อนของเหล็กกล้า	9
ตารางที่ 2.3 สมบัติทั่วไปของเหล็กกล้าชนิด S50C	25
ตารางที่ 2.4 สมบัติทางกายภาพของเหล็กกล้าชนิด S50C	25
ตารางที่ 2.5 แสดงค่าที่ใช้ในสมการของฟาราเดย์ (Faraday's equation)	36
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของธาตุออกซิเจน และเหล็กที่ได้จากเทคนิค EDS บริเวณฟิล์มชั้นนอก ฟิล์มชั้นใน และเนื้อเหล็กของชิ้นงานที่ได้จากการเคลือบผิว ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตร	50
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบของธาตุออกซิเจน และเหล็กที่ได้จากเทคนิค EDS บริเวณฟิล์มชั้นนอก ฟิล์มชั้นใน และเนื้อเหล็กของชิ้นงานที่ได้จากการเคลือบผิว ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตร กับไฮดรอกไซด์เข้มข้น 5 เท่าของไฮดรอกไซด์ที่ทำปฏิกิริยาพอดิกับออกซิเจน ในน้ำกลั่น	55
ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของธาตุออกซิเจน และเหล็กที่ได้จากเทคนิค EDS บริเวณฟิล์มชั้นนอก ฟิล์มชั้นใน และเนื้อเหล็กของชิ้นงานที่ได้จากการเคลือบผิว ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตร กับไฮดรอกไซด์เข้มข้น 5 เท่าของไฮดรอกไซด์ที่ทำปฏิกิริยาพอดิกับออกซิเจน ในน้ำกลั่น และไอออน (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 5 เท่าของงานวิจัยที่อ้างอิง	59
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า การกัดกร่อน (i_{corr})	62
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า การกัดกร่อน (i_{corr})	64

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงกลไกการกัดกร่อนจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า	7
รูปที่ 2.2 การเกิดสนิมของเหล็ก	8
รูปที่ 2.3 ชิ้นงานที่เคลือบด้วยอะลูมิเนียมแอโนด	11
รูปที่ 2.4 ชิ้นงานที่เคลือบด้วยแมกนีเซียมแอโนด	12
รูปที่ 2.5 รูปแสดงการจ่ายกระแสอิเล็กตรอนในระบบ ICCP	12
รูปที่ 2.6 ตัวอย่างชิ้นงานที่ชุบเคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อน	14
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างชิ้นงานที่ชุบโลหะด้วยไฟฟ้า	15
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยอะโนไดซ์	17
รูปที่ 2.9 ตัวอย่างกระบวนการรมดำแบบเย็น	20
รูปที่ 2.10 ตัวอย่างกระบวนการรมดำแบบร้อน	21
รูปที่ 2.11 แผนภูมิสมดุสภาพของเหล็กกล้าคาร์บอน	24
รูปที่ 2.12 ตัวอย่างชิ้นงานที่ทำการขัด	26
รูปที่ 2.13 ตัวอย่างชิ้นงานที่พ่นทราย	27
รูปที่ 2.14 การวัดกระแสไฟฟ้ากัดกร่อนและศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนโดยเครื่องโพเทนชิโอสแตท	33
รูปที่ 2.15 กราฟโพลาริเซชันแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน	34
รูปที่ 2.16 การหาค่า i_{corr} และค่า E_{corr} จากกราฟโพลาริเซชัน	35
รูปที่ 3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	45
รูปที่ 4.1 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ดังนี้ (a) เข้มข้น 10% โดยมวลต่อปริมาตร (b) เข้มข้น 20% โดยมวลต่อปริมาตร (c) เข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตร	46

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.2 ภาพตัดขวางของชิ้นงานที่ได้จากการเคลือบผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 10% โดยมวลต่อปริมาตร ที่กำลังขยาย 500 เท่า	47
รูปที่ 4.3 ภาพตัดขวางของชิ้นงานที่ได้จากการเคลือบผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 20% โดยมวลต่อปริมาตร ที่กำลังขยาย 500 เท่า	47
รูปที่ 4.4 ภาพตัดขวางของชิ้นงานที่ได้จากการเคลือบผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตร ที่กำลังขยาย 500 เท่า	47
รูปที่ 4.5 แสดงตำแหน่งที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS ที่บริเวณฟิล์มชั้นนอกของชิ้นงานที่ได้จากการเคลือบผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตร	48
รูปที่ 4.6 แสดงตำแหน่งที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS ที่บริเวณฟิล์มชั้นในของชิ้นงานที่ได้จากการเคลือบผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตร	49
รูปที่ 4.7 แสดงตำแหน่งที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS ที่บริเวณเนื้อเหล็กของชิ้นงานที่ได้จากการเคลือบผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตร	49
รูปที่ 4.8 ภาพตัดขวางของชิ้นงานที่ได้จากการเคลือบผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตรกับไฮดราซีนไฮเดรต เข้มข้น 2 เท่า (5.6 ไมโครลิตร) ที่กำลังขยาย 500 เท่า	52
รูปที่ 4.9 ภาพตัดขวางของชิ้นงานที่ได้จากการเคลือบผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตร กับไฮดราซีนไฮเดรต เข้มข้น 5 เท่า (13.9 ไมโครลิตร) ที่กำลังขยาย 500 เท่า	52
รูปที่ 4.10 ภาพตัดขวางของชิ้นงานที่ได้จากการเคลือบผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตร กับไฮดราซีนไฮเดรต เข้มข้น 10 เท่า (27.8 ไมโครลิตร) ที่กำลังขยาย 500 เท่า	53

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.11 แสดงตำแหน่งที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS ที่บริเวณฟิล์มชั้นนอกของชิ้นงานที่ได้จากการเคลือบผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตร กับไฮดราซีนไฮเดรต เข้มข้น 5 เท่า (13.9 ไมโครลิตร)	54
รูปที่ 4.12 แสดงตำแหน่งที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS ที่บริเวณฟิล์มชั้นในของชิ้นงานที่ได้จากการเคลือบผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตร กับไฮดราซีนไฮเดรต เข้มข้น 5 เท่า (13.9 ไมโครลิตร)	54
รูปที่ 4.13 แสดงตำแหน่งที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS ที่บริเวณเนื้อเหล็กของชิ้นงานที่ได้จากการเคลือบผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตร กับไฮดราซีนไฮเดรต เข้มข้น 5 เท่า (13.9 ไมโครลิตร)	55
รูปที่ 4.14 ภาพตัดขวางของชิ้นงานที่ได้จากการเคลือบผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตร กับไฮดราซีนไฮเดรต เข้มข้น 5 เท่า (13.9 ไมโครลิตร) และ ไอร์ออน (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 3 เท่าของงานวิจัยที่อ้างอิงที่กำลังขยาย 2000 เท่า	57
รูปที่ 4.15 ภาพตัดขวางของชิ้นงานที่ได้จากการเคลือบผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตร กับไฮดราซีนไฮเดรต เข้มข้น 5 เท่า (13.9 ไมโครลิตร) และ ไอร์ออน (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 5 เท่าของงานวิจัยที่อ้างอิงที่กำลังขยาย 2000 เท่า	57
รูปที่ 4.16 แสดงตำแหน่งที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS ที่บริเวณฟิล์มชั้นนอกของชิ้นงานที่ได้จากการเคลือบผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตร กับไฮดราซีนไฮเดรต เข้มข้น 5 เท่า (13.9 ไมโครลิตร) และ ไอร์ออน (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 5 เท่าของงานวิจัยที่อ้างอิง	58
รูปที่ 4.17 แสดงตำแหน่งที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS ที่บริเวณฟิล์มชั้นในของชิ้นงานที่ได้จากการเคลือบผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตร กับไฮดราซีนไฮเดรต เข้มข้น 5 เท่า (13.9 ไมโครลิตร) และ ไอร์ออน (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 5 เท่าของงานวิจัยที่อ้างอิง	58

สารบัญญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.18 แสดงตำแหน่งที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS ที่บริเวณเนื้อเหล็กของชิ้นงานที่ได้จากการเคลือบผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตร กับไฮดราซีนไฮเดรต เข้มข้น 5 เท่า (13.9 ไมโครลิตร) และ ไอร์ออน (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 5 เท่าของงานวิจัยที่อ้างอิง	59
รูปที่ 4.19 กราฟโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันของเหล็กกล้าที่ถูกเคลือบผิวด้วยการรมดำโดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตร กับไฮดราซีนไฮเดรต เข้มข้น 5 เท่า และ ไอร์ออน (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0, 3 และ 5 เท่าของงานวิจัยที่อ้างอิง ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5% โดยมวลต่อปริมาตร	61
รูปที่ 4.20 กราฟโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันของเหล็กกล้าที่ไม่ถูกเคลือบผิว และที่ถูกเคลือบผิวด้วยการรมดำโดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตรกับไฮดราซีนไฮเดรต เข้มข้น 5 เท่า และ ไอร์ออน (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 5 เท่าของงานวิจัยที่อ้างอิง เปรียบเทียบกับเหล็กกล้าเชิงการค้าในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5% โดยมวลต่อปริมาตร	63

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมในประเทศไทยได้มีการนำเหล็ก S50C มาใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเหล็ก S50C จัดเป็นกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางที่นิยมใช้ในงานพื้นฐาน ทั้งงานโครงสร้าง งานอุปกรณ์การเกษตร งานเครื่องจักรกล งานแม่พิมพ์และส่วนประกอบแม่พิมพ์ รวมทั้งชิ้นส่วนในรถยนต์ เนื่องจากเป็นเหล็กที่มีคุณสมบัติที่ดีในหลายด้าน ทั้งด้านความแข็งแรง ความเหนียวแกร่ง และมีราคาถูก [1] แต่มักเกิดปัญหาการกัดกร่อนของโลหะซึ่งการกัดกร่อนในโลหะเป็นปัญหาที่พบมากที่สุดในการบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกระบวนการผลิตที่เป็นกรดสูง ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ รวมถึงทรัพย์สิน ทั้งในทางตรงและทางอ้อม ด้วยเหตุนี้ทำให้มีการศึกษาและมิจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกัดกร่อนและวิธีการป้องกันการกัดกร่อน เช่น การป้องกันการกัดกร่อนแบบแคโทดิก (Cathodic protection) เป็นวิธีที่ทำให้โลหะมีสถานะเป็นแคโทดโดยใช้โลหะที่เสียอิเล็กตรอนได้ง่ายกว่าเหล็ก การป้องกันการกัดกร่อนแบบพาสซีเวชัน (Passivation protection) เป็นการป้องกันโดยทำให้ผิวของโลหะเฉื่อยต่อปฏิกิริยาโดยนำไปชุบด้วยตัวออกซิไดส์ การป้องกันการกัดกร่อนโดยการเคลือบผิว (Surface coating) ซึ่งเป็นการป้องกันไม่ให้เหล็กถูกกับออกซิเจนและความชื้น อาทิเช่น การเคลือบผิวโดยใช้โลหะ (Metallic coating) การเคลือบผิวโดยสารอินทรีย์ (Organic coating) การเคลือบผิวแบบคอนเวอร์ชัน (Conversion coating) เป็นต้น โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเคลือบผิวแบบการรมดำ (Blackening) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการเคลือบผิวแบบคอนเวอร์ชัน (Conversion coating)

การรมดำ เป็นกรรมวิธีทางเคมีชนิดหนึ่งที่ทำให้เกิดสีบนผิวของชิ้นงานโลหะ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้เกิดความสวยงาม ป้องกันการเกิดสนิมและเพื่อเพิ่มคุณค่าของชิ้นงาน ซึ่งคล้ายกันกับกรรมวิธีการชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า เพียงแต่การรมดำไม่ต้องใช้ไฟฟ้าใช้เพียงสารเคมีเท่านั้น และเทคนิคการทำงานง่ายกว่า ลงทุนน้อยกว่า แต่ก็ยังมีข้อเสีย เช่น ฟิล์มหลุดง่าย ป้องกันการกัดกร่อนได้ไม่ยาวนาน เราจึงได้ทำการศึกษาและปรับปรุงการป้องกันการกัดกร่อนโดยวิธีนี้ โดยการเพิ่มสารเติมแต่งเข้าไปเพื่อเพิ่มคุณสมบัติของฟิล์มที่ผิวของโลหะ ส่งผลทำให้ระยะเวลาการป้องกันการกัดกร่อนได้ยาวนานขึ้น ทำให้ลดต้นทุนการผลิต

การรมดำสามารถใช้กับโลหะได้หลายชนิด เช่น เหล็กกล้า ทองเหลือง ทองแดง สังกะสี อะลูมิเนียม รวมถึงสแตนเลส แต่เนื่องด้วยชิ้นงานเหล็กที่นำมารมดำส่วนมากเป็นอาวุธปืนหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในกิจการทางทหาร ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกกรรมวิธีการรมดำเหล็กอีกชื่อหนึ่งว่า การรมดำอาวุธปืน [2] และจากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการรมดำแบบร้อน พบว่ามิจงานวิจัยของ Zhu [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ทำการศึกษาคาร์บอนเสริมเติมแต่ง 2 ชนิด คือ ไฮดรอกซีไฮดรอกไซด์ และไฮดรอกไซด์ (II) ซัลเฟต โดยทำในสภาวะ Hydrothermal (ความดันสูงและอุณหภูมิสูง) ซึ่งใช้ความเข้มข้นต่ำ เมื่อเทียบกับในสภาวะ Non-hydrothermal (ความดันบรรยากาศ) ซึ่งชั้นฟิล์มที่ได้จะมีลักษณะบางกว่าชั้นฟิล์มจากการรมดำทั่วไป ดังนั้นเราจึงได้ทำการศึกษาว่าที่สภาวะ Non-hydrothermal จะสามารถทำการรมดำร่วมกับสารเติมแต่งทั้ง 2 ชนิดได้หรือไม่ และฟิล์มที่ได้จากการรมดำแบบนี้ จะมีประสิทธิภาพเทียบดีกว่าเหล็กกรรมดำเชิงการค้าหรือไม่

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลของสารเติมแต่งที่มีผลต่อความต้านทานการกัดกร่อนของฟิล์มเหล็กออกไซด์ (Fe_3O_4) ที่ได้จากการรมดำแบบร้อน ในสภาวะ Non-hydrothermal
2. เพื่อค้นหาสูตรรมดำซึ่งมีประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนที่ดีกว่ากรรมดำเชิงการค้า

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

จากการศึกษางานวิจัยของ Zhu [28] ซึ่งเป็นการรมดำเหล็กกล้าในสภาวะ Hydrothermal (ความดันสูงและอุณหภูมิสูง) โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารเติมแต่ง 2 ชนิดคือ ไฮดรอกซีน ($\text{N}_2\text{H}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) และไฮดรอกไซด์ (II) ซัลเฟต ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) จึงได้มีการศึกษาและทดลองรมดำเหล็กกล้าชนิด S50C ในสภาวะ Non-hydrothermal

1.4 วิธีการศึกษา

1. ค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการป้องกันการกัดกร่อนในโลหะชนิดต่างๆชนิดของเหล็กสมบัติของสารเติมแต่งกลไกการยับยั้งการกัดกร่อนบนพื้นผิวของเหล็ก
2. จัดหาอุปกรณ์และสารเคมีสำหรับการทดลอง
3. ทดลองโดยการเคลือบผิวด้วยกระบวนการรมดำในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ไม่ใส่สารเติมแต่งและใส่สารเติมแต่ง (สารเติมแต่งที่ใช้ คือไฮดรอกซีน ($\text{N}_2\text{H}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) และไฮดรอกไซด์ (II) ซัลเฟต ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$))
4. ตรวจสอบความหนาของชั้นฟิล์มเพื่อดูลักษณะพื้นผิว ความหนา และองค์ประกอบทางเคมีของชั้นฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดควบคู่ไปกับเทคนิคการวิเคราะห์แบบ EDS (scanning electron microscope/ energy dispersive x-ray spectrometer, SEM-EDS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ทดสอบการทนต่อการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5% โดยมวลต่อปริมาตร ของชิ้นงานด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดีนามิกโพลาริเซชัน (Potentiodynamic polarization)
6. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. สูตรที่ร่รรมดำจะสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้
2. สูตรที่ร่รรมดำสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ในระยะเวลาที่ยาวนานขึ้นเมื่อเทียบกับรรมดำเชิงการค้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เหล็กเป็นธาตุที่มีมากเป็นอันดับสามรองจากออกซิเจนและซิลิกอน เป็นโลหะที่นำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมด้านต่างๆ หลายชนิดซึ่งแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เพื่อนำไปใช้งานให้ตรงกับคุณสมบัติ และลักษณะของงานแต่ละประเภท

เหล็กเป็นโลหะที่นิยมนำมาใช้ประโยชน์มากมาย อาทิเช่น โครงสร้างของอาคาร ชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ไฮดรอลิก ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ชิ้นส่วนของเครื่องจักร รวมไปถึงเครื่องอำนวยความสะดวกเป็นต้น เนื่องจากเหล็กมีความแข็งแรงและราคาถูก จุดเดือดจุดหลอมเหลวสูง นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี ในทางกลับกันก็สามารถหลอมให้เป็นรูปร่างต่างๆได้ อย่างไรก็ตามข้อบกพร่องที่สำคัญที่สุด คือ การเกิดสนิม ซึ่งเกิดจากสาเหตุหลายประการ ตัวอย่างเช่น การที่อะตอมของโลหะที่ถูกออกซิไดซ์แล้วรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศเกิดเป็นออกไซด์ของโลหะนั้น เช่น สนิมเหล็ก (Fe_2O_3) สนิมทองแดง (CuO) หรือสนิมอลูมิเนียม (Al_2O_3)

2.1 การกัดกร่อน (Corrosion)

การกัดกร่อน หมายถึง การเสื่อมสภาพของวัสดุเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม โดยปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาเคมีหรือปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า อัตราการกัดกร่อนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความเข้มข้น ชนิดของตัวทำปฏิกิริยาและผลจากปฏิกิริยา

2.1.1 กลไกของการกัดกร่อน (Mechanism of corrosion) [3]

การกัดกร่อนสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ การกัดกร่อนจากปฏิกิริยาเคมีโดยตรงและการกัดกร่อนจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี

1. การกัดกร่อนจากปฏิกิริยาเคมีโดยตรง (Direct chemical corrosion)

การกัดกร่อนจากปฏิกิริยาเคมีโดยตรงเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นกับโลหะ ทำให้โลหะกัดกร่อน ซึ่งเกิดจากสภาพอากาศเป็นตัวการสำคัญ เช่น ความชื้นในอากาศมีมาก ทำให้โลหะเป็นสนิมเร็วขึ้น แก๊สออกซิเจนในอากาศเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดการกัดกร่อน โดยอาศัยปฏิกิริยาเคมีกับโลหะ การกัดกร่อนจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยเหล็กที่เผาไหม้แดงจะเกิดสนิมได้ง่ายกว่าเหล็กที่อยู่ในอากาศปกติ ซึ่งการกัดกร่อนจากปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นได้ดังนี้

- เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างโลหะกับออกซิเจนโดยมีน้ำและความชื้นเป็นตัวร่วมทำปฏิกิริยา เช่นการเกิดสนิมเหล็กในอากาศปกติที่มีความชื้นแสดงดังสมการ 2.1 และ 2.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างโลหะกับออกซิเจนโดยไม่มีควมชื้น เช่น เมื่ออบเหล็กให้ร้อนที่อุณหภูมิสูงในบรรยากาศที่มีออกซิเจนจะเกิดชั้นออกไซด์สีดำของ FeO เคลือบที่ผิว ด้านนอกดังปฏิกิริยาในสมการที่ 2.3



นอกจากนี้การเกิดออกซิเดชันนั้นไม่ได้เกิดจากผลของออกซิเจนเพียงอย่างเดียว อาจรวมถึงเกิดจากสารปนเปื้อน เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ซิลเฟอร์ไดออกไซด์ ออกไซด์ของไนโตรเจนและไอน้ำจะทำให้โลหะเกิดการเสื่อมสภาพเร็วมากขึ้นที่อุณหภูมิสูง

2. การกัดกร่อนจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (Electrochemical corrosion)

การกัดกร่อนจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเป็นการกัดกร่อนของโลหะเนื่องจากโลหะสองชนิดที่อยู่ในสารละลายเล็กโวลต์มีความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้า โดยการกัดกร่อนของโลหะเกือบทั้งหมดมีขั้นตอนการเกิดเป็นการถ่ายเทประจุไฟฟ้า (Electrochemical reaction) เมื่อโลหะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือถูกออกซิไดซ์ จะมีการกร่อนของโลหะนั้น ๆ เกิดขึ้น

โลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของครึ่งเซลล์รีดักชัน (E°) สูงที่สุดได้แก่ ทองคำดังนั้นทองคำจึงสามารถทนต่อการกัดกร่อนได้มากที่สุด ทองคำจึงเป็นโลหะมีค่า ส่วนแพลตินัม เงินและทองแดงที่มีค่า E° ครึ่งเซลล์รีดักชันเป็นบวกก็มีความสามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ดีรองลงมา ส่วนโลหะอื่น ๆ ก็จะเป็นโลหะที่ถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย คือมีโอกาสกัดกร่อนได้ง่ายกว่า ตารางค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของครึ่งเซลล์รีดักชันแสดงในตารางที่ 2.1

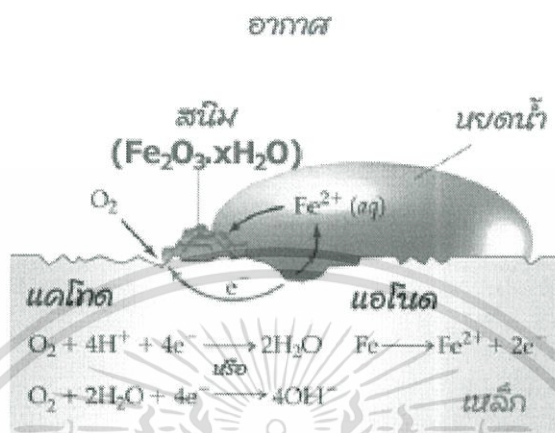
ตารางที่ 2.1 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของครึ่งเซลล์รีดักชัน (E°) [4]

	Reduction Half-Reaction	E° (V)		
Stronger oxidizing agent	$F_2(g) + 2 e^- \longrightarrow 2 F^-(aq)$	2.87	Weaker reducing agent	
	$H_2O_2(aq) + 2 H^+(aq) + 2 e^- \longrightarrow 2 H_2O(l)$	1.78		
	$MnO_4^-(aq) + 8 H^+(aq) + 5 e^- \longrightarrow Mn^{2+}(aq) + 4 H_2O(l)$	1.51		
	$Cl_2(g) + 2 e^- \longrightarrow 2 Cl^-(aq)$	1.36		
	$Cr_2O_7^{2-}(aq) + 14 H^+(aq) + 6 e^- \longrightarrow 2 Cr^{3+}(aq) + 7 H_2O(l)$	1.33		
	$O_2(g) + 4 H^+(aq) + 4 e^- \longrightarrow 2 H_2O(l)$	1.23		
	$Br_2(l) + 2 e^- \longrightarrow 2 Br^-(aq)$	1.09		
	$Ag^+(aq) + e^- \longrightarrow Ag(s)$	0.80		
	$Fe^{3+}(aq) + e^- \longrightarrow Fe^{2+}(aq)$	0.77		
	$O_2(g) + 2 H^+(aq) + 2 e^- \longrightarrow H_2O_2(aq)$	0.70		
	$I_2(s) + 2 e^- \longrightarrow 2 I^-(aq)$	0.54		
	$O_2(g) + 2 H_2O(l) + 4 e^- \longrightarrow 4 OH^-(aq)$	0.40		
	$Cu^{2+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Cu(s)$	0.34		
	$Sn^{4+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Sn^{2+}(aq)$	0.15		
	$2 H^+(aq) + 2 e^- \longrightarrow H_2(g)$			0
	Weaker oxidizing agent	$Pb^{2+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Pb(s)$		-0.13
$Ni^{2+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Ni(s)$		-0.26		
$Cd^{2+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Cd(s)$		-0.40		
$Fe^{2+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Fe(s)$		-0.45		
$Zn^{2+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Zn(s)$		-0.76		
$2 H_2O(l) + 2 e^- \longrightarrow H_2(g) + 2 OH^-(aq)$		-0.83		
$Al^{3+}(aq) + 3 e^- \longrightarrow Al(s)$		-1.66		
$Mg^{2+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Mg(s)$		-2.37		
$Na^+(aq) + e^- \longrightarrow Na(s)$		-2.71		
$Li^+(aq) + e^- \longrightarrow Li(s)$		-3.04		

ตัวอย่างการกัดกร่อนที่พบได้บ่อยและชัดเจนคือการเกิดสนิมเหล็กหรือการเกิดออกไซด์ของเหล็ก เหล็กเป็นสนิมได้ก็ต่อเมื่อมีก๊าซออกซิเจนและน้ำอยู่ด้วย การเกิดสนิมจะทำให้เหล็กมีความแข็งแรงลดลง และเกิดการผุกร่อน ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญก่อให้เกิดความเสียหายทั้งรอยแตก ร้าว คราบน้ำสนิม รวมไปถึงการพังทลายของโครงสร้าง ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานลดลง พร้อมทั้งสร้างความสูญเสียด้านงบประมาณ 1 ใน 7 ของปริมาณเหล็กที่ประเทศผลิตได้ บางครั้งอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สิน

ดังนั้น การป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อลดปัญหาที่เกิดขึ้น เพื่อให้ใช้งานเหล็กได้อย่างคุ้มค่า ลดความจำเป็นในการซ่อมบำรุง และมั่นใจ ในความปลอดภัย

ปฏิกิริยาการเกิดสนิมเหล็ก [5] ค่อนข้างซับซ้อนและมีลักษณะเฉพาะตัว เช่นการเกิดสนิมเหล็กเนื่องจากบริเวณผิวเหล็กที่สัมผัสน้ำจะมีการให้และรับอิเล็กตรอนโดยอะตอมของเหล็กจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือถูกออกซิไดส์เป็น Fe^{2+} ส่วนน้ำและออกซิเจนในอากาศจะรับอิเล็กตรอนหรือถูกรีดิวซ์เป็น OH ปฏิกิริยาการเกิดสนิมเหล็กในธรรมชาติเป็นดังนี้



รูปที่ 2.1 แสดงกลไกการกัดกร่อนจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า [5]

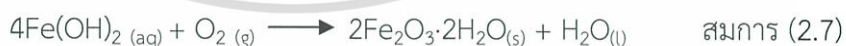
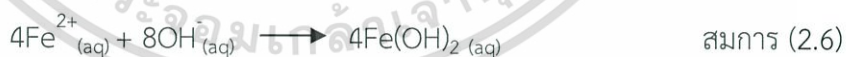
ปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวส่วนหนึ่งของเหล็กทำหน้าที่เป็นแอโนด ดังสมการ 2.4



ออกซิเจนถูกรีดิวซ์ที่ผิวอีกส่วนหนึ่งของเหล็กซึ่งทำหน้าที่เป็นแคโทด เมื่อมีน้ำอยู่ด้วย ดังสมการ 2.5

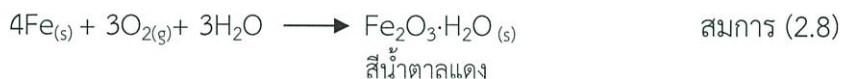


และมีปฏิกิริยาต่อเนื่องต่อไปคือ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปปฏิกิริยาการเกิดสนิมเหล็ก



เหล็กโดยทั่วไปมักเกิดสนิมได้ง่าย ถ้าตั้งทิ้งไว้ในอากาศ เนื่องจากในอากาศมีออกซิเจนและความชื้นทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจน และความชื้นในอากาศกับเนื้อเหล็ก ทำให้เกิดเป็นสนิมออกไซด์ของเหล็กเกิดขึ้น และเหล็กจะเกิดสนิมได้เร็วขึ้นในบางสภาวะ เช่น สภาพที่เป็นกรด ชายทะเลที่มีไอเกลือเข้มข้น ซึ่งการเกิดสนิมเหล็กโดยเริ่มแรกเหล็กจะเสียอิเล็กตรอนเกิดเป็นเหล็กไอออน (Fe^{2+}) จากนั้นออกซิเจนจะเข้ามารับอิเล็กตรอนแล้วทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นไฮดรอกไซด์ แล้วไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับเหล็กไอออนเกิดเป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์ (II) ไฮดรอกไซด์ จากนั้นสารประกอบไฮดรอกไซด์ (II) ไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นสนิมเหล็ก มีชื่อทางเคมีว่า ไฮเดรตเฟอริกออกไซด์ ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{XH}_2\text{O}$) ลักษณะเป็นคราบสีน้ำตาลแดง



รูปที่ 2.2 การเกิดสนิมของเหล็ก [5]

2.1.2 ปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้เกิดการผุกร่อนของโลหะ [6]

การที่โลหะถูกกัดทำลายหรือผุกร่อนไปโดยเร็ว นับว่าเป็นความเสียหายทางด้านเศรษฐกิจที่สำคัญอย่างหนึ่ง อัตราการผุกร่อนอาจขึ้นกับปัจจัยที่สำคัญ 2 ประการ คือ โลหะนั้นั้นกับสภาวะแวดล้อม อาจจำแนกได้ต่างๆกันคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของโลหะในตารางค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของครึ่งเซลล์รีดอกซ์ซึ่งแสดงในตารางที่ 2.1 โดยโลหะแต่ละชนิดจะมีความสามารถละลายลงในสารละลายได้มากน้อยต่างกัน โลหะที่มีค่า E° ต่ำจะมีความสามารถในการละลายลงไปได้มากกว่าโลหะที่มีค่า E° สูงกว่า
2. ขึ้นอยู่กับโลหะอีกชนิดหนึ่งที่สัมผัสอยู่ เช่น สังกะสีที่สัมผัสกับเหล็ก สังกะสีจะผุกร่อนขณะที่เหล็กจะไม่ถูกกัดกร่อน แต่ถ้าเหล็กมาสัมผัสกับดีบุก เนื้อเหล็กจะถูกกัดกร่อนไปในขณะที่ดีบุกไม่ถูกกัดกร่อน และถ้าโลหะที่มาสัมผัสกันนั้นมีค่า E° ต่างกันมาก การผุกร่อนนั้นก็จะมีรุนแรงมากขึ้น
3. ขึ้นกับโครงสร้างของเนื้อโลหะนั้น เช่น ถ้าเนื้อโลหะมีสิ่งเจือปนมากหรือเนื้อโลหะไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด โลหะนั้นจะผุกร่อนได้ง่าย
4. ขึ้นอยู่กับความเครียดภายในเนื้อโลหะ ถ้าเนื้อโลหะมีความเครียดภายในมาก โลหะนั้นก็จะผุกร่อนได้ง่ายเช่นกัน

เหล็กเมื่อทำปฏิกิริยากับความชื้นหรือออกซิเจนในอากาศ จะสามารถเกิดสารประกอบที่อยู่ในรูปเหล็กออกไซด์ได้หลายสูตรโมเลกุล โดยที่แต่ละสูตรโมเลกุลจะมีสีที่แตกต่างกันออกไป แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกัดกร่อนของเหล็กกล้า [7]

สูตรโมเลกุล	สี	สภาวะออกซิเดชัน
$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ หรือ $\text{Fe}(\text{OH})_3$	น้ำตาลแดง	Fe^{3+}
Fe_3O_4	ดำ	$\text{Fe}^{2+/3+}$
$\text{Fe}(\text{OH})_2$	น้ำเงิน/เขียว	Fe^{2+}
FeO	ดำ	Fe^{2+}

ดังนั้นอุปกรณ์และวัสดุส่วนใหญ่ที่ผลิตขึ้นจากเหล็กจึงต้องทำการป้องกัน หรือชะลอการผุกร่อนด้วยวิธีต่างๆ เช่นการยับยั้งไม่ให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างวัสดุโลหะกับสิ่งแวดล้อมที่นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงค่าที่สามารถวัดค่าได้ ตลอดจนทำให้ความสามารถในการทำงานของวัสดุดังกล่าวเสื่อมสภาพ

2.2 การป้องกันการกัดกร่อน (Corrosion Protection) [8]

โลหะและโลหะผสมบางชนิดอาจต้านทานการผุกร่อนในสภาวะแวดล้อมต่างๆ ได้ดีแต่อาจมีราคาแพงมาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้โลหะที่มีราคาพอสมควรและหาทางให้โลหะนั้นใช้งานได้ทนทาน การป้องกันการผุกร่อนของโลหะและโลหะผสมอาจทำได้หลายทางเช่น

1. ทาผิวหน้าของโลหะด้วยสี หรือน้ำมันเคลือบ หรือเคลือบด้วยพลาสติก หรือทาด้วยสารป้องกันการผุกร่อนชนิดต่างๆ ที่มีจำหน่าย
2. เคลือบ หรือเชื่อม หรือพันด้วยโลหะที่เสียอิเล็กตรอนได้ง่ายกว่า
3. ชุบ หรือเคลือบผิวหน้าของโลหะที่ต้องการป้องกันการผุกร่อนด้วยโลหะอื่น โลหะที่นิยมใช้เคลือบคือโลหะที่เกิดสารประกอบออกไซด์แล้วสารประกอบออกไซด์นี้สามารถเคลือบผิวหน้าของโลหะไว้ไม่ให้ผุกร่อนลุกลามต่อไป
4. ทำเป็นโลหะผสม โดยการนำโลหะตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปมาหลอมรวมกัน ทำให้ทนทานต่อการผุกร่อน
5. วิธีอะโนไดซ์ คือ การใช้กระแสไฟฟ้าทำให้ผิวหน้าของโลหะกลายเป็นโลหะออกไซด์ ซึ่งใช้กับโลหะที่มีสมบัติพิเศษ คือ เมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นออกไซด์ของโลหะแล้ว ออกไซด์ของโลหะนั้นจะเคลือบผิวของโลหะไม่ให้เกิดการผุกร่อนต่อไป
6. วิธีแคโทดิก เนื่องจากการผุกร่อนของโลหะ คือการที่โลหะเสียอิเล็กตรอน จึงเปรียบได้กับขั้วแอโนด ดังนั้นถ้าต้องการไม่ให้โลหะเกิดการผุกร่อน จะต้องทำให้โลหะนั้นมีสถานะเป็นแคโทด หรือคล้ายแคโทด
7. วิธีการมดำเป็นการป้องกันการผุกร่อนและเพิ่มความสวยงามแก่ชิ้นงานโลหะ โดยการทำให้ผิวของโลหะเปลี่ยนเป็นออกไซด์ของโลหะนั้น ซึ่งมีลักษณะเป็นฟิล์มสีดำเกาะติดแน่นบนผิวชิ้นงานโลหะ

2.2.1 การป้องกันแบบแคโทดิก (Cathodic protection) [9]

การป้องกันแบบแคโทดิก (Cathodic protection) เป็นวิธีป้องกันสนิมที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดวิธีหนึ่ง การป้องกันสนิมกระทำโดยการใช้กระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดภายนอกจ่ายให้กับโครงสร้างโลหะเพื่อป้องกันสนิม แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าสำหรับการป้องกันแบบแคโทดิก (Cathodic protection) มี 2 ประเภท ได้แก่ โลหะกันกร่อน (Sacrificial anodes) และระบบ Impressed current

2.2.1.1 โลหะกันกร่อนหรือแอโนดป้องกันการกัดกร่อน (Sacrificial anodes)

เป็นการป้องกันสนิมของโครงสร้างเหล็กแบบแคโทดิก (Cathodic protection) วิธีหนึ่ง ซึ่งใช้ค่าความต่างศักย์ของโลหะกันกร่อน (Sacrificial anodes) และโครงสร้างโลหะในการจ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อป้องกันสนิม ดังนั้นการใช้โลหะกันกร่อน (Sacrificial anodes) จึงมีข้อได้เปรียบการป้องกันแบบแคโทดิก (Cathodic protection) ที่ใช้ระบบ Impressed current คือ ไม่จำเป็นต้องมีระบบไฟฟ้า และ ไม่ต้องมีการบำรุงรักษาระหว่างการใช้งาน

1. อลูมิเนียมแอโนด (Aluminium anode) สำหรับการป้องกันสนิมของโครงสร้างเหล็กและโลหะประเภทต่างๆ เช่น เรือเดินสมุทร ท่าเทียบเรือ และแท่นขุดเจาะมีเนียมแอโนด (Aluminium anode) มีค่าความจุกระแสสูงที่สุดในกลุ่มของโลหะกันกร่อน (Sacrificial anode) ทำให้อลูมิเนียมแอโนด (Aluminium anode) มีความได้เปรียบในด้านน้ำหนักและราคาที่ถูกเมื่อเทียบกับการใช้งานสังกะสีแอโนด (Zinc anode) และแมกนีเซียมแอโนด (Magnesium anode) นอกจากนี้ลูมิเนียมแอโนด (Aluminium anode) ยังสามารถใช้งานได้เป็นอย่างดีทั้งในน้ำทะเลและน้ำกร่อย จึงมีความเหมาะสมกับเรือเดินสมุทรเป็นอย่างมากตัวอย่างชิ้นงานที่เคลือบด้วยอลูมิเนียมแอโนด แสดงดังรูปที่ 2.3

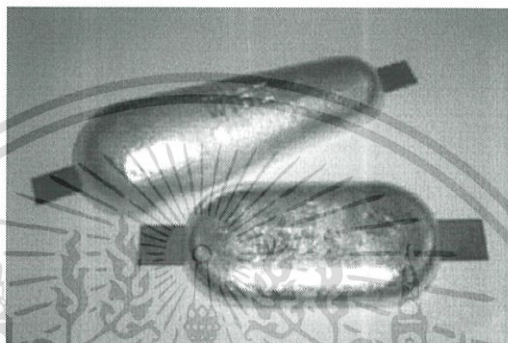


รูปที่ 2.3 ชิ้นงานที่เคลือบด้วยอลูมิเนียมแอโนด [9]

2. สังกะสีแอโนด (Zinc anode) เหมาะสำหรับการใช้งานเพื่อป้องกันสนิมของโครงสร้างที่ทำจากเหล็กหรืออลูมิเนียมที่ใช้งานในน้ำทะเล เช่น ตัวเรือสมอเรือและเครื่องควบแน่นกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทางด้านที่ใช้งานในน้ำทะเล และสังกะสีแอโนด (Zinc anode) ยังมีค่า ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของเซลล์กับเหล็กต่างกันน้อยที่สุดในกลุ่มของโลหะกันกร่อน (Sacrificial anode) สำหรับการป้องกันสนิมแบบแคโทดิก (Cathodic protection) จึงทำให้ไม่เกิดปัญหาการป้องกันที่มากเกินไป (Overprotection) ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้สีหลุดร่อน (Coating- disbondment) และความเสียหายจากไฮโดรเจน (Hydrogen damage) ของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (High strength steel)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

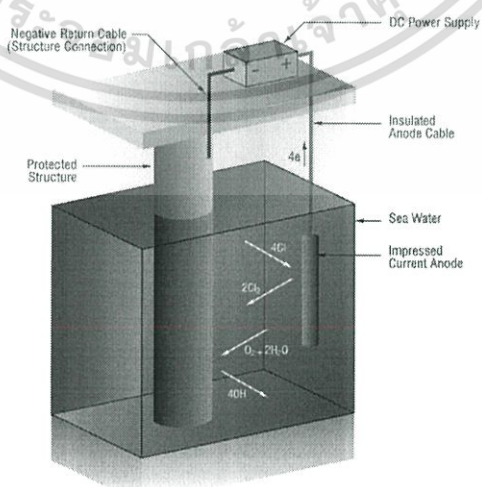
3. แมกนีเซียมแอโนด (Magnesium anode) เหมาะสำหรับใช้งานเพื่อป้องกันสนิมของโครงสร้างที่ทำจากเหล็กหรืออลูมิเนียม ที่ใช้งานในน้ำทะเล น้ำกร่อย เช่น ตัวเรือสมอเรือ และเครื่องควบแน่น กับ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ทางด้านที่ใช้งานในน้ำทะเลเป็นต้น แมกนีเซียมแอโนด (Magnesium anode) มี ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของเซลล์กับเหล็กต่างกัน มากกว่าสังกะสีแอโนด (Zinc Anode) จึงมีประสิทธิภาพในการป้องกันสนิมแบบแคโทดิก (Cathodic protection) ได้มากกว่า อีกทั้งแมกนีเซียมแอโนด (Magnesium anode) ไม่เกิดปัญหาการป้องกันที่มากเกินไป (Overprotection) เหมือนกับสังกะสีแอโนด (Zinc anode) ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้สีหลุดร่อน (Coating disbondment) และความเสียหายจากไฮโดรเจน (Hydrogen damage) ของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (High strength steel) ตัวอย่างชิ้นงานที่เคลือบด้วยแมกนีเซียมแอโนด แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ชิ้นงานที่เคลือบด้วยแมกนีเซียมแอโนด [9]

2.2.1.2 ระบบป้องกันและระงับการเกิดสนิมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (Impressed current cathodic protection, ICCP)

ระบบ ICCP คือจะจ่ายกระแสอิเล็กตรอน จากแหล่งภายนอกเพื่อยับยั้งการเสียอิเล็กตรอนของส่วนที่มีแนวโน้มเป็นขั้ว Anode ในเหล็กเสริม โดยหยุดขั้นตอนปฏิกิริยา $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$ และทำให้กระบวนการเกิดสนิมยุติลง รูปแสดงการจ่ายกระแสอิเล็กตรอนในระบบ ICCP แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 รูปแสดงการจ่ายกระแสอิเล็กตรอนในระบบ ICCP [47]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 การป้องกันแบบแอโนดิก (Anodic protection)

เป็นวิธีที่ได้พัฒนาขึ้นมาใหม่และเป็นวิธีที่ทำให้เกิดชั้นฟิล์ม Passive บนผิวของโลหะ หรือโลหะผสม สำหรับป้องกันการกัดกร่อนโดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า Potentiostat ตัวอย่างการปกป้องแบบแอโนด (Anodic protection) นี้ เช่น การทำให้ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมประเภท Austenitic เกิดชั้นฟิล์ม Passive ขึ้นโดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า Potentiostat ทำให้อัตราเร็วในการกัดกร่อนเกิดช้าลง ข้อดีของวิธีนี้คือ สามารถใช้ได้ทั้งในกรณีที่สภาวะแวดล้อมที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนน้อยจนถึงรุนแรงได้ และใช้กระแสไฟฟ้าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ส่วนข้อเสียของวิธีนี้คือ ต้องการใช้อุปกรณ์เครื่องมือที่มีความสลับซับซ้อน และมีค่าติดตั้งค่อนข้างสูง

2.2.3 การปรับสภาพผิว (Surface treatment)

การปรับสภาพผิวมี 3 วิธี ได้แก่

2.2.3.1 การเคลือบด้วยสารอินทรีย์ (Organic coating)

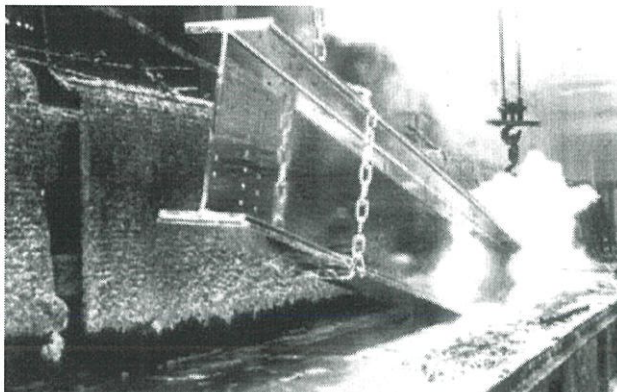
การเคลือบผิวด้วยสารอินทรีย์คือการเคลือบชั้นงาน ด้วยพอลิเมอร์นิยมใช้ในการป้องกันการกัดกร่อน (Corrosion protection) การป้องกันการสึกหรอ (Wear protection) ลดการเสียดสี (Reduced friction) รวมทั้งเป็นฉนวนทางไฟฟ้า (Electrical insulation) หรืองานที่ต้องการความสวยงามเป็นต้นเช่นสีไวนิล (Vinyl coating) และอีพ็อกซี (Epoxy coating) นอกจากนี้สภาพแวดล้อมที่เอื้อต่อการใช้งานของสารเคลือบผิวคือ สถานที่ที่มีความชื้นสูงใกล้ทะเล แต่ถ้าสภาพแวดล้อมที่มี pH ต่ำจะนิยมเคลือบด้วยสีไวนิล เป็นต้น

2.2.3.2 การเคลือบผิวด้วยโลหะ (Metallic coating) [10-11]

การเคลือบผิวด้วยโลหะกระทำได้หลายวิธีต่างๆ กัน คือ

1. การชุบเคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อน (Hot dip galvanizing)

เหล็กและเหล็กกล้าเกิดสนิมได้ง่ายหากเราวางทิ้งไว้ในอากาศปกติทั่วไป เนื่องจากเกิดการทำปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนและไอน้ำกับเนื้อเหล็ก โดยเฉพาะอย่างยิ่งคลอไรด์ (chloride) ซึ่งมีฤทธิ์กัดกร่อนเหล็กได้ดี เกิดเป็นสนิมออกไซด์ของเหล็กดังนั้นการเคลือบผิวเหล็กจึงเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการป้องกันการเกิดสนิม สังกะสีเป็นที่นิยมนำมาใช้เป็นสารเคลือบ เพราะในอนุกรมกัลวานิกสังกะสีเป็นโลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าเหล็กจึงเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ง่ายกว่าตัวอย่างชิ้นงานที่ชุบเคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อน แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างชิ้นงานที่ชุบเคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อน [11]

เหล็กที่ได้จากการชุบเคลือบสังกะสีเรียกว่า เหล็กกล้าชุบเคลือบสังกะสี (Galvanized steel) โดยปัจจุบันกระบวนการเคลือบสังกะสีได้ถูกนำมาใช้ในวงการอุตสาหกรรมเช่น อุตสาหกรรมชิ้นส่วนรถยนต์ อุตสาหกรรมก่อสร้าง หรืออุตสาหกรรมชิ้นส่วนอุปกรณ์ไฟฟ้า การชุบเคลือบสังกะสีมีด้วยกันหลายวิธี หนึ่งในนั้นคือการชุบเคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อน (Hot dip galvanizing) ซึ่งมีการใช้งานมากกว่า 200 ปีถูกนำออกเผยแพร่ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1742 โดยนักเคมีชาวฝรั่งเศส P.J.Malouin โดยขั้นตอนวิธีการชุบเคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อน มีดังนี้

- 1) การกำจัดสิ่งสกปรก (Soil and grease removal-caustic cleaning) โดยใช้สารละลายต่าง
- 2) การล้างด้วยน้ำ (Rinsing) ใช้น้ำสะอาดล้างชิ้นงานที่ผ่านการแช่สารละลายต่าง และสารละลายกรดเพื่อกำจัดสภาพต่างและกรดออกจากผิวชิ้นงาน
- 3) การกัดด้วยกรด (Pickling) ใช้สารละลายกรด เช่น กรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริก ทำความสะอาดผิวโลหะ เพื่อกำจัดฟิล์มออกไซด์และสิ่งปนเปื้อนผิวโลหะออกไป
- 4) การแช่น้ำยาประสาน (Fluxing) นำชิ้นงานเหล็กมาแช่ในน้ำยาประสาน (สารละลายซิงค์แอมโมเนียมคลอไรด์, Zinc ammonium chloride solution) เพื่อปรับความตึงผิวของเหล็กให้มีความเหมาะสมกับการเคลือบด้วยสังกะสีหลอมเหลว
- 5) การชุบเคลือบสังกะสี (Galvanizing) นำชิ้นงานที่จะชุบเคลือบผิวไปแช่ในอ่างสังกะสีหลอมเหลว (อุณหภูมิประมาณ 435 – 455 °C) เป็นระยะเวลาประมาณ 3-6 นาที
- 6) การตกแต่งสำเร็จ (Finishing) เหล็กที่ชุบเคลือบสังกะสีเสร็จแล้ว จะถูกนำมากำจัดเอาสังกะสีส่วนเกินออกโดยใช้วิธีการเขย่า (Vibrating) หรือการล้าง (Draining) หรือการหมุนเหวี่ยง (Centrifuging) จากนั้นลดอุณหภูมิชิ้นงานโดยนำไปเป่าลมเย็น หรือนำไปชุบของเหลว (Quenching)
- 7) การตรวจสอบ (Inspection) ชิ้นงานที่เคลือบสังกะสีแล้วจะถูกส่งมาตรวจสอบคุณสมบัติ ซึ่งคุณสมบัติสองอย่างที่ใช้พิจารณาคุณภาพของผิวเคลือบก็คือ ความหนา และลักษณะของผิวเคลือบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดสอบทางกายภาพหรือในห้องปฏิบัติการอาจนำมาใช้ในการหาค่าความหนาความสม่ำเสมอ การยึดเกาะ และลักษณะของผิวเคลือบ

ผลิตภัณฑ์เหล็กชุบเคลือบสังกะสี สามารถนำไปใช้งานได้ในอุตสาหกรรมหลาย ประเภท ไม่ว่าจะ เป็นอุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมก่อสร้าง และอุตสาหกรรมอื่น ๆ แต่มีข้อสังเกตอย่างหนึ่ง คือ ชิ้นงานที่เคลือบสังกะสีเป็นชั้นบาง จะไม่เหมาะสำหรับการใช้งานภายนอกอาคาร อย่างเช่น ชิ้นงานที่เคลือบสังกะสีด้วยวิธีเคลือบด้วยไฟฟ้า มีชั้นเคลือบหนาประมาณ 5-10 ไมครอน (ไมครอน = 10^{-6} m) ซึ่งไม่เหมาะกับงานภายนอกอาคาร ขณะที่ชิ้นงานเหล็กที่ชุบเคลือบสังกะสีแบบ จุ่มร้อน จะมีชั้นเคลือบสังกะสี หนาตั้งแต่ 65 - 300 ไมครอน ทำให้มีความทนทานต่อการกัดกร่อน จากสภาพแวดล้อม มากกว่าจึงเหมาะกับการใช้งาน ภายนอกอาคารมากกว่า

2. การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating)

การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating) เป็นวิธีการเคลือบผิวโลหะที่นิยมกันแพร่หลาย การเคลือบผิวด้วยวิธีนี้มีข้อได้เปรียบกว่าการเคลือบด้วยวิธี Hot-dipping หลายประการ คือ สามารถควบคุมความหนาบางของโลหะที่เคลือบได้ดีกว่า และผิวที่เคลือบมีความสม่ำเสมอและสามารถบดอง ได้ดีพอสมควรโดยไม่แตกร้าวอีกด้วย โลหะที่นำมาเคลือบได้แก่ ทองแดง นิกเกิล โครเมียม แคดเมียม ทองเงิน ดีบุก สังกะสี และอื่น ๆ ก่อนเคลือบผิวด้วยวิธีชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electro-plating) จะต้องมี การเตรียมผิวโลหะเช่นเดียวกับวิธี Hot-dipping การเตรียมผิวที่ไม่ถูกต้องจะทำให้โลหะที่เคลือบร้อน ลอกออกได้หรืออาจเกิดปูดเป็นรอยนูนขึ้นภายหลังเช่นกัน การเคลือบผิวโดยวิธีไฟฟ้าเคมีนี้ ชิ้นงานที่ จะนำโลหะอื่นมาเคลือบจะเป็นแคโทด (Cathode) ส่วนตัวโลหะที่จะเคลือบจะเป็นแอโนด (Anode) ซึ่งจะละลายลงไปในอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ซึ่งมีเกลือของโลหะนั้นๆละลายอยู่ในขณะที่โลหะ บางส่วนจะเคลือบผิวแคโทดดังนั้น ความเข้มข้นของโลหะในอิเล็กโทรไลต์จึงคงที่อยู่เสมอตัวอย่าง ชิ้นงานที่ชุบโลหะด้วยไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างชิ้นงานที่ชุบโลหะด้วยไฟฟ้า [47]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมการเคลือบผิวโลหะแบบนี้ให้ได้ผลดี คือโลหะที่เคลือบติดแน่นและสม่ำเสมอ จะต้อง ควบคุมโดยเข้มงวดทั้งความต่างศักย์ไฟฟ้าความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้า ณ ผิวแคโทดโดยมีหน่วยวัดเป็นแอมแปร์ต่อตารางเมตร สัดส่วนของพื้นที่แอโนดต่อพื้นที่แคโทด เวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว รวมทั้งองค์ประกอบและอุณหภูมิของอิเล็กโทรไลต์ความหนาของโลหะที่เคลือบโดยทั่วไป จะมีความหนา ดังนี้คือ

เคลือบนิกเกิล จะหนาประมาณ 0.00750 – 0.05000 มิลลิเมตร

เคลือบโครเมียม จะหนาประมาณ 0.00025 – 0.00125 มิลลิเมตร

เคลือบทองแดง จะหนาประมาณ 0.00750 – 0.02500 มิลลิเมตร

เคลือบแคดเมียม จะหนาประมาณ 0.00500 – 0.01250 มิลลิเมตร

เคลือบเงิน จะหนาประมาณ 0.00750 – 0.03000 มิลลิเมตร

3. การเคลือบผิวแบบการพ่นโลหะ (Spraying)

การเคลือบผิวแบบการพ่น (Spraying) เป็นการเคลือบผิวโลหะ โดยการพ่นโลหะเหลวให้เป็นละอองเคลือบวัตถุไว้ เครื่องพ่นโลหะเหลวจะมีลักษณะคล้ายปืน ภายในบรรจุโลหะที่จะนำไปเคลือบผิวไว้ในลักษณะที่เป็นแท่งลวด เมื่อต้องการเคลือบวัตถุใด ก็อาจหลอมโลหะดังกล่าวด้วยกระแสไฟฟ้า หรือด้วยแก๊ส ออกซิอะเซทีลีน (Oxyacetylene) จากนั้นจึงใช้อากาศอัดให้โลหะเหลวพ่นเป็นละอองออกมา ผิวโลหะที่เคลือบลักษณะนี้จะติดแน่นสู่การเคลือบด้วยวิธีอื่นไม่ได้ เนื่องจากระหว่างแนวที่โลหะทั้งสองชนิดสัมผัสกันจะไม่เกิดเป็นโลหะผสมของโลหะทั้งสองชนิดขึ้น โลหะที่จะนำมาเคลือบด้วยวิธีนี้ จะต้องเตรียมทำความสะอาดผิวเช่นกัน แต่ผิวของชิ้นงานพวกนี้ควรจะต้องขรุขระพอสมควร โลหะที่เป็นตัวเคลือบอาจมีได้หลายชนิดเช่น สังกะสีอลูมิเนียมดีบุกทองแดงตะกั่วทองเหลืองบรอนซ์เงิน รวมทั้ง เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) ก็สามารถนำมาเคลือบผิวด้วยวิธีนี้ได้ ความหนาโดยปกติของสังกะสีและอลูมิเนียมที่เคลือบจะประมาณ 0.1-0.3 มิลลิเมตร ข้อได้เปรียบของการเคลือบผิวโดยวิธีการพ่นโลหะคือ สามารถทำได้ง่ายในสถานที่ต่างๆ ดังนั้นจึงสามารถทำการเคลือบผิวชิ้นงานขนาดใหญ่ ณ สถานที่ที่ก่อสร้างชิ้นงานนั้นได้เลย

2.2.3.3 การเคลือบผิวที่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่ผิวหน้าชิ้นงาน (Conversion coating)

การเคลือบผิวแบบ Conversion โดยวิธีทางเคมีเป็นกาทำให้พื้นผิวโลหะเกิดชั้นป้องกัน (Protective coating) หรือเกิดชั้นผิวที่สวยงาม (Decorative coating) ตัวอย่างเช่น

1. การเคลือบผิวด้วยฟอสเฟต (Phosphate conversion coating)

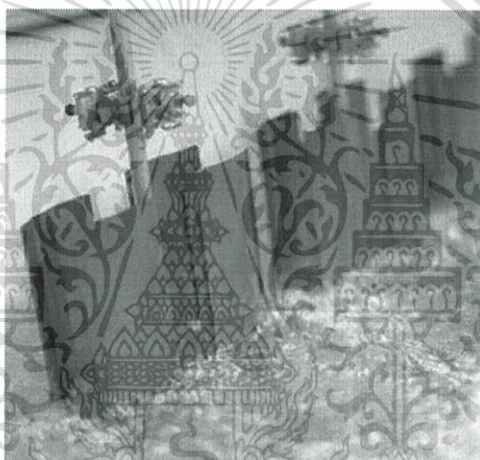
การเคลือบผิวโลหะด้วยฟอสเฟตสามารถทำได้โดยใช้โลหะจุ่มกับสารประกอบฟอสเฟต เช่น ซิงค์ฟอสเฟต ($ZnPO_4$) แมงกานีสฟอสเฟต ($MnPO_4$) และเฟอร์รัสฟอสเฟต ($FePO_4$) โดยความหนาของฟิล์มขึ้นอยู่กับลักษณะของงาน โดยปกติการเคลือบผิวด้วยฟอสเฟต โลหะที่นิยมคือเหล็กกล้า (steel) เพื่อเพิ่มการป้องกันการกัดกร่อน

2. การเคลือบผิวด้วยโครเมต (Chromate conversion coating)

การเคลือบผิวโลหะด้วยโครเมตใช้เพื่อสร้างชั้นป้องกันโลหะเช่น อลูมิเนียม สังกะสี แคดเมียม ทองแดง เงิน แมกนีเซียม โดยจุ่มกับสารละลายที่ประกอบด้วยสารประกอบเฮกซะวาเลนซ์โครเมียม (Hexavalent chromium) เนื่องจากสารประกอบเฮกซะวาเลนซ์โครเมียมเป็นอันตรายต่อสุขภาพ จึงมีการพัฒนาเป็นสารประกอบไตรวาเลนซ์โครเมียม (Trivalent chromium) ซึ่งช่วยลดอัตราการกัดกร่อนของโลหะ

3. การทำอะโนไดซ์ (Anodizing) [12]

โลหะบางชนิดเช่น อลูมิเนียม สังกะสี เมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจน เกิดเป็นออกไซด์ของโลหะ ซึ่งสลายตัวยากและเคลือบบนผิวโลหะนั้น ทำให้โลหะไม่ผุกร่อน การเกิดออกไซด์ของโลหะนี้เป็นไปอย่างไม่สม่ำเสมอ จึงใช้วิธีอะโนไดซ์ โดยอาศัยหลักการของอิเล็กโทรไลต์ การทำอะโนไดซ์ เป็นการใช้กระแสไฟฟ้าทำให้ผิวหน้าของโลหะกลายเป็นโลหะออกไซด์แล้วโลหะออกไซด์นั้นจะเคลือบผิวของโลหะทำให้ไม่เกิดการผุกร่อนอีกต่อไป ตัวอย่างชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยอะโนไดซ์ แสดงดังรูปที่ 2.8



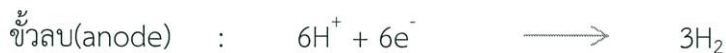
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยอะโนไดซ์ [12]

การอะโนไดซ์ (Anodizing) อลูมิเนียม คือ การทำผิวของอลูมิเนียมให้เป็นอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ในลักษณะเป็นฟิล์ม ซึ่งกรรมวิธีการทำคล้ายกับการชุบเคลือบด้วยผิวไฟฟ้า แตกต่างกันคือ การทำอะโนไดซ์ชิ้นงานจะต้องเป็นขั้วบวก แรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงกว่า และไม่มีโลหะชนิดอื่นไปเกาะที่ผิวอลูมิเนียม ส่วนการชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าชิ้นงานจะต้องเป็นขั้วลบ ใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ำ และจะมีโลหะชนิดหนึ่งไปเคลือบโลหะอีกชนิดหนึ่ง ออกไซด์ของอลูมิเนียมที่เกิดขึ้นจากการทำอะโนไดซ์จะมีลักษณะผิวด้านและมีรูพรุนขนาดเล็ก โดยรูพรุนนี้จะกักเก็บสีที่เราจะย้อมไว้ การย้อมสีอลูมิเนียมหลังจากการอะโนไดซ์ โดยทั่วไปมักใช้สีที่มาจากสารอินทรีย์ (Organic dyes) แต่สำหรับงานที่มีความต้องการสะท้อนแสงมากๆ สีที่ทำมาจากสารอนินทรีย์ (Inorganic dyes) จะให้ผลที่ดีกว่า การทำอะโนไดซ์ จะทำให้ผิวอลูมิเนียมทนการกัดกร่อนได้มากขึ้น และเป็นฉนวนไฟฟ้า

ผิวของอลูมิเนียมที่ผ่านการอะโนไดซ์แล้ว จะมีความสามารถในการนำความร้อนได้ลดลง และมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวต่ำกว่าอลูมิเนียมบริสุทธิ์ ด้วยเหตุนี้ผิวจะแตกร้าวในอุณหภูมิที่สูงกว่า $80^{\circ}C$ แต่จะไม่ลอกออก อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่เกิดขึ้นส่วนหนึ่งจะพอกพูนขึ้นที่ผิวและอีกส่วนจะกิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณลึกลงไปที่เนื้อผิวเดิม ในอัตราส่วนเท่าๆกัน เช่น การอะโนไดซ์ความหนา 2 ไมโครเมตร ดังนั้นชั้นงานจะมีความหนาเพิ่มขึ้นเพียง 1 ไมโครเมตรการอะโนไดซ์อลูมิเนียมปฏิกิริยาเคมีดังนี้



4. การรมดำ (Blackening of steel) [13-15]

กระบวนการรมดำถูกพัฒนามาตั้งแต่ก่อนคริสต์ศักราช 1900 แต่เริ่มเป็นที่นิยมภายหลังคริสต์ศักราช 1930 และยังคงเป็นที่นิยมจวบจนปัจจุบัน เนื่องจากความเจริญก้าวหน้าของกระบวนการทางเคมีในขณะนี้ทำให้อุตสาหกรรมการรมดำสามารถปรับปรุงแก้ไขในด้านเทคนิค การค้นคว้าวิจัย รวมไปถึงเทคโนโลยีที่ทันสมัยมากขึ้นส่งผลให้อุตสาหกรรมการรมดำเป็นหนึ่งในผู้เชี่ยวชาญในการเคลือบผิวด้วยสารเคมี (Chemical conversion coating)

กระบวนการรมดำสามารถนำไปใช้ได้กับเหล็ก (Ferrous) และโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก (Non-Ferrous) เช่น ทองเหลือง (Brass) โลหะผสมคอปเปอร์ (Copper alloy) ซึ่งการรมดำเป็นการเคลือบผิวโดยการเปลี่ยนเหล็กให้กลายเป็นสารประกอบของเหล็กออกไซด์สีดำ ติดแน่นอยู่บนโลหะซึ่งเรียกว่าแมกนีไทต์ (Fe_3O_4) ที่ช่วยในเรื่องการป้องกันการกัดกร่อนของชิ้นงาน ซึ่งในอดีตอุตสาหกรรมการรมดำยังไม่เป็นที่นิยม จึงมีผู้คิดค้นพัฒนาตลอดจนปัจจุบัน การรมดำเริ่มเป็นที่นิยมมากขึ้นเนื่องจากกระบวนการไม่ซับซ้อน ต้นทุนต่ำ ประหยัดเวลาในการผลิต อีกทั้งผิวชิ้นงานที่ผ่านการรมดำมีขนาดความหนาเท่าเดิม ข้อดีของกระบวนการรมดำคือการเคลือบผิวจะติดทั่วทั้งชิ้นงานและไม่ทำให้ขนาดของชิ้นงานเปลี่ยนไป โดยออกไซด์สีดำของโลหะเกิดจากการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างเหล็กที่บริเวณพื้นผิวกับตัวออกซิไดซ์และเกิดเป็นเหล็กออกไซด์ (Magnitite, Fe_3O_4) ซึ่งวิธีที่ในปัจจุบันได้รับความนิยมได้แก่ การรมดำแบบร้อนและการรมดำแบบเย็น

4.1 ทฤษฎีของกระบวนการรมดำ [15]

การเคลือบผิวแบบเปลี่ยนสภาพ (Conversion coating) เป็นวิธีการเคลือบผิวที่มีการเกิดบนผิวของโลหะจากปฏิกิริยาดังสมการที่ 2.9



โดยที่ M คือ โลหะที่ทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม

A คือ ไอออนของสิ่งแวดล้อมที่เป็นสื่อกลาง

อย่างไรก็ตาม ในความเป็นจริงกระบวนการเคลือบผิวด้วยการรมดำบนผิวของโลหะจะมีความซับซ้อนมากกว่าสมการที่ 2.9 และรวมไปถึงมีปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ปฏิกิริยาเคมี และมีปฏิกิริยาเคมีฟิสิกส์ซึ่งอาจเกิดเป็นปฏิกิริยาถัดมา โดยกลไกอย่างง่ายของการเกิดฟิล์มแมกนีไทต์ถูกนำเสนอโดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Samartsev ซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.10 โดยเหล็กเมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายเบสจะได้โซเดียมไฮโปเฟอร์ไรต์ (Na_2FeO_2) ที่สามารถละลายน้ำได้



ซึ่งเกลือโซเดียมไฮโปเฟอร์ไรต์ (Na_2FeO_2) จะเข้าทำปฏิกิริยากับตัวออกซิไดซ์ เช่น โซเดียมไนเตรด โซเดียมไนไตรด์ เพื่อที่จะเกิดเป็นโซเดียมเฟอร์ไรต์ ($\text{Na}_2\text{Fe}_2\text{O}_2$) ที่สามารถละลายน้ำได้ จากนั้นทำปฏิกิริยาต่อเป็นแมกนีไทต์อยู่บนพื้นผิวของโลหะ

4.2 ประโยชน์ของการเคลือบผิวด้วยการรมดำ

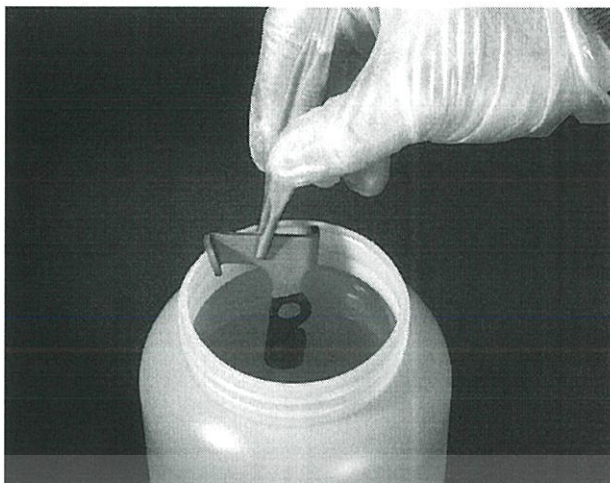
- โลหะที่ถูกเคลือบผิวด้วยการรมดำจะมีขนาดเท่าเดิมหรือเปลี่ยนไปเล็กน้อย
- โลหะที่ถูกเคลือบผิวด้วยการรมดำจะไม่ทำให้คุณสมบัติของโลหะเปลี่ยนไป
- การเคลือบผิวด้วยการรมดำมีราคาไม่แพง
- การเคลือบผิวด้วยการรมดำสามารถช่วยป้องกันรอยขีดข่วน
- เนื่องจากการเคลือบผิวด้วยการรมดำสีของโลหะจะมีสีดำทำให้นำไปประยุกต์ใช้งานด้านการตกแต่งได้หลากหลายมากยิ่งขึ้น

4.3 ประเภทของการรมดำ

1) การรมดำแบบเย็น (Cold Blackening) [15]

กระบวนการรมดำแบบเย็นเป็นการเปลี่ยนผิวของโลหะให้กลายเป็นสารเชิงซ้อนของคอปเปอร์ (Copper complex) ซึ่งสีของชิ้นงานเหล็กที่ผ่านการรมดำจะมีสีเทาเข้มโดยขนาดของชิ้นงานเหล็กไม่เปลี่ยนแปลง และมีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำมัน (Oil absorption) โดยการจุ่มในชิ้นงานในสารละลาย โดยทั่วไปสารละลายที่ใช้สำหรับการรมดำแบบเย็นคือสารละลายคอปเปอร์ฟอสเฟต โดย pH ประมาณ 2 ณ ที่อุณหภูมิห้อง 21-26 °C เป็นเวลา 40-60 วินาที ตัวอย่างกระบวนการรมดำแบบเย็น แสดงดังรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างกระบวนการรมดำแบบเย็น [15]

ซึ่งวิธีนี้มีความปลอดภัย และกระบวนการไม่ซับซ้อน ต้นทุนต่ำใช้เวลาไม่นานอย่างการรมดำแบบร้อน โดยขั้นตอนในการรมดำแบบเย็นที่ใช้ในปัจจุบันคือ อันดับแรกเป็นขั้นตอนเตรียมผิวเพื่อ ล้างคราบน้ำมันหรือโลหะปนเปื้อนอื่น (Contaminate) ของชิ้นงานที่ต้องการรมดำด้วยสารละลายเบส จากนั้นล้างน้ำก่อนจุ่มชิ้นงานในสารละลายคอปเปอร์ฟอสเฟตที่ถูกเจือจางแล้วลงร้อยละ 10 โดยปริมาตร หลังจากนั้นจะได้โลหะสีดำ (Magnetite, Fe_3O_4) สูดซับในส่วนน้ำมัน เพื่อเคลือบปกป้องรูพรุนเป็นอันเสร็จขั้นตอนใน

การรมดำแบบเย็น โดยโลหะที่สามารถรมดำแบบเย็น เช่น เหล็กกล้าที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนสูงๆ (Mild Steel) เหล็กหล่อ (Cast Iron) เหล็กหล่อเหนียว (Malleable Iron) ตลอดจนผงโลหะ (Powdered Metal) โดยชั้นป้องกันที่ได้ (Magnetite, Fe_3O_4) มีลักษณะที่บาง รูพรุนมากกว่าการรมดำแบบร้อน ความยึดติดระหว่าง ชิ้นงานกับชั้นป้องกันต่ำ ส่งผลทำให้ความต้านทานต่อการกัดกร่อน การขัดถูน้อย ซึ่งไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของโลหะ (Substance) จึงเหมาะกับงานเล็กๆ ใช้เวลาน้อย ลักษณะจำพวก ตกแต่งชิ้นงาน เพื่อความสวยงาม

ข้อดีของการรมดำแบบเย็น

- ไม่ต้องใช้ความร้อนดังนั้นจึงประหยัดพลังงาน
- การรมดำแบบเย็นใช้เวลาน้อยกว่า
- การรมดำแบบเย็นมีกรรมวิธีที่ไม่ซับซ้อน
- การรมดำแบบเย็นมีกระบวนการที่มีความปลอดภัย
- ปลอดภัยเนื่องจากสารละลายที่ใช้รมดำทำในสภาวะที่เป็นกรดน้อย
- ไม่จำเป็นต้องมีช่องระบายความร้อนในระหว่างกระบวนการ
- ขนาด (dimension) ของชิ้นงานเปลี่ยนเล็กน้อย
- สามารถผลิตได้จำนวนมากเนื่องจากใช้เวลาไม่นาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อเสียของการรมดำแบบเย็น

- ค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับงานเคลือบผิวทั่วไป
- สารเคมีที่ใช้มีราคาแพงและหายาก

2) การรมดำแบบร้อน (Hot Alkaline Blackening) [15]

กระบวนการรมดำแบบร้อนเป็นการเคลือบผิวชนิดหนึ่ง ซึ่งกระบวนการรมดำแบบร้อนนิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม โดยการรมดำแบบร้อนทำได้โดยจุ่มชิ้นงานเหล็กที่ต้องการรมดำลงในสารละลายรมดำ โดยกระบวนการรมดำแบบร้อนจะใช้สารเคมีหลากหลายชนิดผสมกัน ซึ่งสารเคมีที่นิยมเป็นสารผสมคือโซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไนเตรด โซเดียมไนไตรด์ ที่อุณหภูมิ 140-146 °C เป็นเวลา 40-60 นาที โดยสารละลายรมดำจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับเหล็กที่อยู่บนพื้นผิวของชิ้นงาน (Fe) ให้เป็นสารประกอบเหล็กออกไซด์ (Magnitite, Fe_3O_4) ทำให้ชิ้นงานมีสีดำเข้ม ช่วยในการยับยั้งการกัดกร่อน และขนาดของชิ้นงานเหล็กที่ผ่านการรมดำแล้วจะมีขนาดเท่าเดิม

กระบวนการรมดำแบบร้อนมีความอันตรายมาก เนื่องจากสารละลายที่ใช้ในการรมดำต้องทำที่จุดเดือด และใช้เวลานาน แต่ชิ้นงานที่ผ่านการรมดำจะมีสีดำสม่ำเสมอโดยการเคลือบผิวด้วยการรมดำจะไม่ทำให้ความแข็งของโลหะลดลงหรือมีผลกระทบกับรูปร่างลักษณะของโลหะ ซึ่งการเคลือบผิวด้วยการรมดำนี้สามารถทำได้ทั่วทั้งผิวโลหะและไม่ทำให้เปราะแตก หรือขีดออกได้ ตัวอย่างการรมดำแบบร้อน แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างกระบวนการรมดำแบบร้อน [48]

ข้อดีของการรมดำแบบร้อน

- สามารถเคลือบผิวโลหะได้หลายชนิด
- ค่าใช้จ่ายไม่สูงเท่ากับงานเคลือบผิวทั่วไป
- สารเคมีที่ใช้ในการรมดำมีราคาถูก
- สารเคมีที่ใช้ในการรมดำสามารถหาได้ง่ายกว่าการรมดำแบบเย็น
- ขนาด (dimension) ของชิ้นงานไม่เปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ไม่มีผลต่อความสามารถในการนำความร้อน
- เพิ่มความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อน
- ลดการสะท้อนแสง
- ทำให้ชิ้นงานมีคุณสมบัติป้องกันรอยขีดข่วน

ข้อเสียของการรมดำแบบร้อน

- การรมดำแบบร้อนมีกรรมวิธีค่อนข้างซับซ้อน ใช้เวลานาน
- การรมดำแบบร้อนมีกระบวนการที่อันตรายเนื่องจากใช้อุณหภูมิสูง

4.4 การประยุกต์ใช้งาน [13]

ชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยการรมดำสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายดังต่อไปนี้

- ชิ้นส่วนของเครื่องจักรกล (Machine-tool parts)
- ชิ้นส่วนเครื่องมือกล (Power-tool parts)
- มีดกลึง (Cutting tools)
- เครื่องจักรกล (Machine tools)
- อะไหล่รถยนต์ (Automotive parts)
- หัวเทียนรถยนต์ (Spark plugs)
- อาวุธปืน (Fire arms)
- เพลาของมอเตอร์ (Motor shafts)
- แหวนลูกสูบ (Piston rings)
- วาล์ว (Valves)
- เครื่องยึด (Fasteners)

4.5 ขั้นตอนในการรมดำ

สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

- (1) ขั้นตอนเตรียมผิวชิ้นงาน
- (2) ขั้นตอนทำความสะอาดผิวชิ้นงาน
- (3) ขั้นตอนรมดำ
- (4) ขั้นตอนโลมผิวด้วยน้ำมันและอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ลักษณะและคุณสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอน [16]

2.3.1 ชนิดของเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steels)

เหล็กกล้าคาร์บอน คือเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนเป็นธาตุผสมหลัก และมีปริมาณธาตุผสมอื่นๆ อยู่ในปริมาณน้อย ตามนิยามของ AISI (American Iron and Steel Institute) จำกัดปริมาณธาตุผสมไว้ ดังนี้ แมงกานีสไม่เกิน 1.65% ซิลิคอนไม่เกิน 0.60% ทองแดงไม่เกิน 0.60% และปริมาณของ ฟอสฟอรัสรวมกับกำมะถันไม่เกิน 0.05% สามารถแบ่งชนิดของเหล็กกล้าคาร์บอนตามเปอร์เซ็นต์ของ คาร์บอนที่อยู่ในเนื้อเหล็กดังนี้คือ

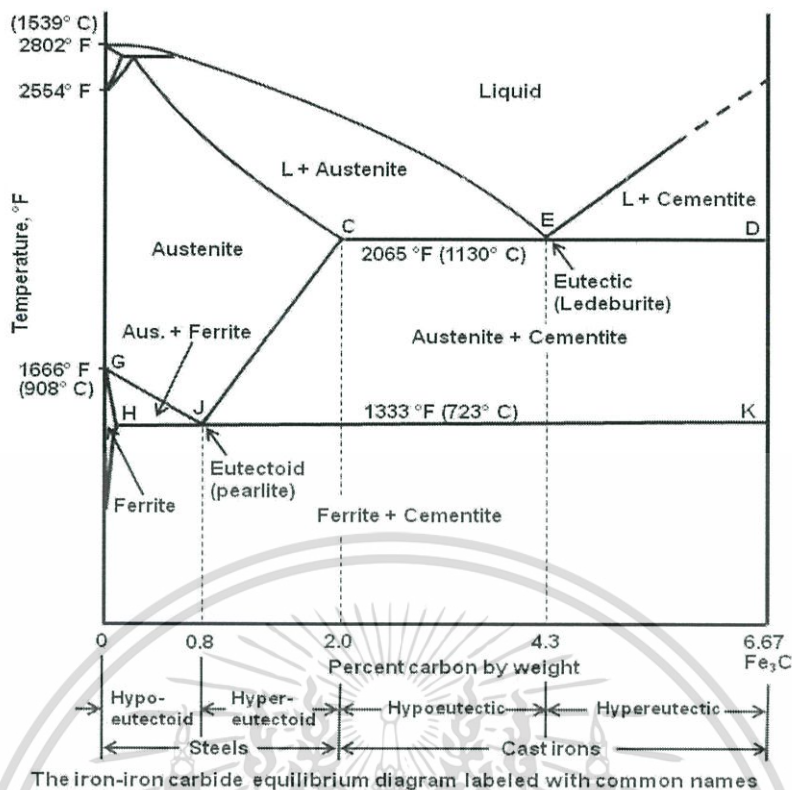
1. เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) มีปริมาณคาร์บอนต่ำกว่า 0.20%C นอกจากคาร์บอนแล้วยังมีธาตุอื่นอยู่ด้วย เช่น แมงกานีส ซิลิคอน ฟอสฟอรัส และกำมะถัน แต่มีปริมาณน้อยเนื่องจากหลงเหลือมาจากกระบวนการผลิต เหล็กประเภทนี้ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรม และในชีวิตประจำวันไม่ต่ำกว่า 90% เนื่องจากขึ้นรูปง่าย เชื่อมง่าย และราคาไม่แพง โดยเฉพาะเหล็กแผ่นมีการนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น ตัวถังรถยนต์ ชิ้นส่วนยานยนต์ต่างๆ กระจังรถจักรยาน สังกะสีมุงหลังคา เครื่องใช้ในครัวเรือน

2. เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium carbon steel) มีปริมาณคาร์บอนอยู่ระหว่าง 0.2 - 0.5%C มีความแข็งแรงและความเค้นแรงดึงมากกว่าเหล็กคาร์บอนต่ำ แต่จะมีความเหนียวน้อยกว่า สามารถนำไปชุบแข็งได้ เหมาะกับงานทำชิ้นส่วนเครื่องจักรกล รางรถไฟ เฟือง ก้านสูบ ท่อเหล็ก เป็นต้น

3. เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High carbon steel) มีปริมาณคาร์บอนมากกว่า 0.50%C ขึ้นไป มีความแข็งแรงและความเค้นแรงดึงสูง เมื่อชุบแข็งจะเปราะ เหมาะสำหรับงานที่ทนต่อการสึกหรอ ใช้ในการทำเครื่องมือ สปริงแหนบ ลูกปืน เป็นต้น

เหล็กกล้าคาร์บอนเป็นโลหะที่เหมาะสมกับงานทางด้านวิศวกรรม เพราะมีความแข็งแรง ความอ่อนตัวที่เปลี่ยนแปลงได้กว้างมากตามปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ในเหล็ก ในการศึกษาสมบัติและการควบคุมสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอน จะใช้แผนภูมิสมดุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนดังแสดงในรูป

2.11



รูปที่ 2.11 แผนภูมิสมดุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอน [16]

2.3.2 เหล็กกล้าคาร์บอน (0.5%C) [17]

เหล็กกล้าคาร์บอน 0.5%C (S50C) ซึ่งจัดอยู่ในประเภทเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางคือมีส่วนผสมของคาร์บอนระหว่าง 0.2 – 0.5% โดยน้ำหนัก เหล็กกลุ่มนี้ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแล้วจะเหมาะกับการใช้งานที่ต้องการความแข็งแรง และความแข็งมากกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เช่น เครื่องมือหรือชิ้นส่วนของเครื่องจักร นอต ค้อน ก้านเพลลา เกียร์ รางรถไฟ งานแม่พิมพ์และส่วนประกอบแม่พิมพ์ เช่น ทำกรอบแม่พิมพ์ งานอุปกรณ์การเกษตร เช่น จอบ เสียม คราด ชิ้นส่วนในรถยนต์ รวมทั้งใช้งานในส่วนโครงสร้างความแข็งแรง ความต้านทานการสึกกร่อนและความแกร่งประกอบกัน เนื่องจากเป็นเหล็กที่มีคุณสมบัติที่ดีในหลายด้าน ทั้งด้านความแข็งแรง ความเหนียวแกร่ง และมีราคาถูก แต่เหล็กประเภทนี้หากมีการผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแล้วจะมีความเหนียวและความแกร่งลดลง ซึ่งสมบัติต่างๆของเหล็กกล้าชนิด S50C โดยทั่วไปเป็นดังนี้

คุณลักษณะเด่น

- มีราคาถูกเมื่อเทียบกับเหล็กทำแม่พิมพ์เกรดอื่น
- สามารถขึ้นรูปได้ดีพอสมควร
- มีความแข็งแรงสูงกว่าเหล็กโครงสร้างทั่วไป
- มีความเหนียวแกร่ง (Toughness) ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สามารถชุบแข็งให้ได้ความแข็งสูงมาก แต่ให้ชั้นผิวแข็งตื้น
- สามารถชุบในเตาบรรยากาศ หรือ ชุบอินดักชันได้
- มีความสามารถในการตัดกลึงพอใช้

ตารางที่ 2.3 สมบัติทั่วไปของเหล็กกล้าชนิด S50C

ส่วนผสมทางเคมี (%wt.)	C	Mn	Si	P	S
		0.47-0.55	0.60-0.90	≤ 0.40	≤ 0.030
AISI	1050				
JIS	S50C				
DIN	1.1206 (Ck 50/C50E)				
สภาพจำหน่าย	อบปกติ ความแข็งไม่เกิน 235 HB				
สภาพหลังชุบ	ชุบแข็งด้วยน้ำ ความแข็ง 58-60 HRC				

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางกายภาพของเหล็กกล้าชนิด S50C

คุณสมบัติ	อุณหภูมิทดสอบ		
การนำความร้อน	20°C	350°C	700°C
Thermal Conductivity (W/m·K)	42.5	38.5	34.2
โมดูลัสของการยืดหยุ่นที่ 20°C			
Modulus of elasticity (10 ³ N/mm ²)	210		
ความจุความร้อนจำเพาะที่ 20°C			
Specific heat at 20°C (J/g·°C)	0.486		
ความหนาแน่น Density (g/ cm ³)	7.80		

2.4 การเตรียมผิวและการทำความสะอาดชิ้นงานสำหรับการรมดำ [18-19]

การเตรียมผิวเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อการเคลือบผิว ซึ่งถ้ามีการเตรียมผิวที่ไม่ดีหรือไม่ถูกต้องจะทำให้การเคลือบผิวไม่มีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 การเตรียมผิวชิ้นงาน

2.4.1.1 การขัด

ตัวอย่างชิ้นงานที่ทำการขัด แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างชิ้นงานที่ทำการขัด [18]

1. การขัดหยาบ (Polishing)

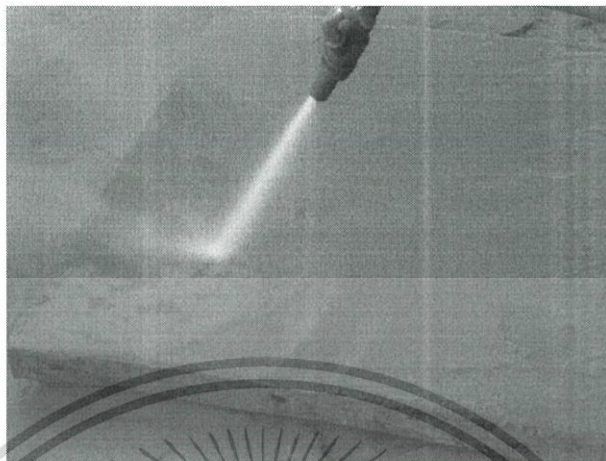
- 1) ล้อขัด ทำด้วยผ้ามีสลิ้น หรือหนัง ซึ่งจะสวมเข้ากับเครื่องขัดมอเตอร์
- 2) ผงขัด อาจเป็นวัสดุธรรมชาติ หรือสังเคราะห์ ขนาดละเอียดมาก มีความแข็งที่จะขัดแต่งผิวชิ้นงาน เช่น อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC)
- 3) กาว ใช้ยึดผงขัดกับล้อขัด ต้องเลือกที่มีจุดหลอมเหลวสูงมีความยืดหยุ่น มีความหนืดสูง

2. การขัดละเอียด (Buffing)

จะทำภายหลังการขัดหยาบ เพื่อให้ผิวชิ้นงานมีความเรียบ ความมันวาวเพิ่มขึ้น ล้อขัดเป็นผ้าฝ้ายเย็บตีเกลียว ผงขัดเป็นอะลูมินาหรือคาร์ไบด์ผสมกับกรดสเตียริกให้แข็งตัวแล้วทำเป็นแท่งยาขัด เมื่อใช้งานจะนำแท่งยาขัดไปถูกับล้อขัดที่กำลังหมุนให้ยาขัดเกาะที่ล้อก่อนจะนำชิ้นงานมาขัดละเอียด

2.4.1.2 การยิงทรายหรือการพ่นทราย (Sand blasting)

ตัวอย่างชิ้นงานที่พ่นทราย แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างชิ้นงานที่พ่นทราย [19]

การยิงทรายหรือการพ่นทราย (Sand blasting) เป็นกระบวนการขัดผิวชิ้นงานด้วยเครื่องพ่นทรายโดยมีแรงดัน จากปั๊มลมเป็นแรงขับเคลื่อนทรายให้ไปกระทบผิวของชิ้นงาน ทำให้ขัดผิวได้รวดเร็ว เข้าถึงทุกซอกทุกมุม ไม่เปลืองแรงขับ ดีกว่าการขัดด้วยมือ สามารถเลือกให้ผิวของชิ้นงานหยาบหรือละเอียดได้ตามความต้องการ โดยการเลือกขนาดของเม็ดทรายที่ใช้ สามารถใช้งานได้หลายรูปแบบ เช่น การลอกผิวชิ้นงาน ลอกสี ทรายสนิมลบรอย ลบคม โดยสามารถทำได้ตั้งแต่วัสดุขนาดเล็กจนกระทั่งชิ้นงานขนาดใหญ่ เช่น ชิ้นส่วนอะไหล่รถยนต์ รถมอเตอร์ไซด์ จักรยาน ชิ้นส่วนเครื่องจักรต่างๆ ซึ่งทรายที่ใช้พ่นจะมีหลายชนิด หลายขนาด โดยทรายเม็ดใหญ่จะให้ผิวที่หยาบ ส่วนทรายเม็ดเล็กจะให้ผิวที่เนียนละเอียด ความคมของทรายและความเร็วในการยิงทรายของทรายแต่ละชนิดจะไม่เท่ากัน จะเลือกใช้ทรายชนิดใดขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของงานและตามความต้องการจะให้พื้นผิวออกมาเป็นอย่างไร ยกตัวอย่างเช่น

1. ทรายซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide) สีดำ เป็นทรายที่มีความคมและแข็งมากที่สุด ทำงานได้รวดเร็วที่สุด ให้ผิวด้าน
2. ทรายอะลูมิเนียมออกไซด์สีขาว (White aluminium oxide) มีความคมน้อยกว่าทรายซิลิกอนคาร์ไบด์เล็กน้อย ทำงานรวดเร็ว ให้ผิวด้าน
3. ทรายบราวน์อะลูมิเนียมออกไซด์ (Brown aluminium oxide) สีน้ำตาล มีความคมน้อยกว่าทรายซิลิกอนคาร์ไบด์ ให้ผิวด้าน ราคาถูก
4. ทรายกลาสบีช (Glass bead) เป็นเม็ดแก้วขาวใส มีความคมและแข็งน้อย แต่ให้ผิวที่สวยงามกึ่งด้านกึ่งเงา และให้ผิวลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 ขั้นตอนการทำความสะอาดชิ้นงาน

2.4.2.1 การล้างคราบไขมันด้วยตัวทำละลาย

ชิ้นงานที่นำมาทำการชุบ มักมีสิ่งสกปรกจากขั้นตอนต่างๆในการทำงานติดอยู่ เช่น คราบน้ำมัน ผงละออง ผงขัด เศษผ้าขัด ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์จึงต้องใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ในการชะล้างสิ่งสกปรกเหล่านี้ คุณสมบัติที่สำคัญของตัวทำละลายอินทรีย์

1. ล้างสารพวกจาระบี หรือแวกซ์ได้อย่างดี
2. ไม่กัดผิวโลหะ
3. ติดไฟยาก ระเหยได้ง่าย ไม่เป็นพิษ
4. ราคาถูก

ตัวทำละลายที่นิยมใช้ คือ ไตรคลอโรเอเทน (C_2H_3Cl) มีความถ่วงจำเพาะ 1.47 และ จุดเดือด 85.5-87.5 องศาเซลเซียส

2.4.2.2 การต้มล้างไขมันด้วยด่างร้อน

สารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นด่าง สามารถละลายคราบน้ำมันหรือไขมันต่างได้ดี นิยมใช้โซดาไฟ และสารประกอบโซเดียม เช่น โซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมเมตาซิลิเกต ผิวของชิ้นงานอาจถูกกัดด้วยด่างได้ จึงต้องควบคุมความเป็นกรดด่างของน้ำยาต้มล้างไขมันให้เหมาะสมโดย ถ้าชิ้นงานเป็นเหล็ก pH 13 หรือมากกว่า ถ้าชิ้นงานเป็นทองแดง และโลหะผสมของทองแดง pH10-12 แต่ถ้าชิ้นงานเป็นอะลูมิเนียม ดีบุก สังกะสี pH 9-11

2.4.2.3 การล้างชิ้นงานโดยใช้ไฟฟ้า

เป็นกระบวนการที่ทำตามหลังการต้มล้างด้วยด่างร้อน เพื่อให้ชิ้นงานสะอาดยิ่งขึ้นจะคล้ายกับการชุบเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า แต่สารละลายจะเป็นชนิดเดียวกับที่ใช้ต้มล้างไขมันด้วยด่างร้อน ชิ้นงานอาจแขวนไว้ที่ขั้วบวกหรือขั้วลบตามความเหมาะสม เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าจะเกิดก๊าซไปช่วยขับไล่สิ่งสกปรก

1. แขนงชิ้นงานที่ขั้วลบจะเกิดก๊าซไฮโดรเจนที่ผิวที่จะผลักเอาสิ่งสกปรกออกไป เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) มีประจุบวกวิ่งมารับอิเล็กตรอน แต่มีข้อเสีย คือ ถ้าสารละลายเกิดสกปรกจากการละลายของโลหะต่างๆ เช่น ทองแดง สังกะสี ดีบุก ตะกั่ว โลหะเหล่านี้จะไปจับที่ผิวของวัสดุที่ทำการล้าง จะทำให้คุณภาพการชุบไม่ดี โลหะจะเกาะที่ผิวไม่แน่นและป้องกันการเกิดสนิมไม่ดี

2. แขนงชิ้นงานที่ขั้วบวกจะเกิดก๊าซออกซิเจนซึ่งจะไปช่วยออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่เกาะที่ผิวชิ้นงาน และหลุดออกไปได้ง่าย แต่อาจเกิดชิ้นงานของออกไซด์ขึ้นที่ชิ้นงาน ต้องระวังส่วนผสมของสารละลาย และค่า pH ที่เหมาะสม

2.4.2.4 การล้างด้วยกรด

ในบางครั้งชิ้นงานที่นำมาชุบเคลือบผิว ซึ่งผ่านขั้นตอนต่างๆของการตีขึ้นรูปหรือชุบแข็ง จะมีสิ่งสกปรกที่กำจัดออกได้ยาก จึงต้องล้างด้วยกรด มีวิธีดังนี้

1. ชิ้นงานเป็นเหล็กกล้าธรรมดา จะใช้กรดเกลือหรือกรดกำมะถัน 10% โดยปริมาตร กรดเกลือ อาจไปละลายโลหะด้วย ทำให้เกิดรอยต่างได้ง่าย แต่ปัญหานี้จะไม่เกิดในกรณีของกรดกำมะถัน แต่ต้องใช้อุณหภูมิ 40-60 องศาเซลเซียสในการล้าง

2. ชิ้นงานเป็นทองแดงหรือโลหะผสมของทองแดง จะใช้กรดกำมะถันหรือกรดไนตริก

2.4.2.5 การล้างด้วยน้ำ

การล้างด้วยน้ำเป็นขั้นตอนที่สำคัญมาก เพราะเป็นการล้างเอาสารเคมีที่ติดมาในขั้นตอนต่างๆออกไปก่อน ก่อนนำไปชุบในขั้นตอนต่อไป และยังเป็น การป้องกันการเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งจะทำให้ผิวชิ้นงานเกิดรอยย่นหรือบวมได้ [18]

2.5 ขั้นตอนการล้างด้วยน้ำมันและอบ

มีขั้นตอนดังนี้

1. นำชิ้นงานที่รมดำเรียบร้อยแล้ว ซิลิโคนหรือทาผิวชิ้นงานด้วยน้ำมันละหุ่ง (Linseed oil) หรือ น้ำมันมะกอก (Olive oil) ให้ผิวชุ่ม

2. นำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส นาน 20-30 นาที เพื่อให้ไขมันซึมเข้าไปในผิวของชิ้นงาน

3. นำชิ้นงานออกแล้ววางทิ้งไว้บนภาชนะที่สะอาด ปล่อยให้แห้งให้เย็น จะได้ชิ้นงานที่รมดำเสร็จเรียบร้อยแล้ว

หมายเหตุ อย่าอบชิ้นงานนานเกินไป เพราะจะทำให้คุณภาพของการรมดำไม่ดี [2]

2.6 สารเติมแต่งที่ใช้ในการรมดำ (Additive)

สารเติมแต่ง (Additive) คือ สารที่เติมลงไปในการละลายหลักเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติให้เหมาะสม และไม่มี การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่สำคัญของโลหะ (Substance)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1 คุณสมบัติของสารเติมแต่ง

- 1) ต้องเสถียร (Stable) ภายใต้สภาวะในการผลิตและการใช้งาน
- 2) ต้องไม่ก่อให้เกิดมลภาวะที่เป็นพิษ
- 3) ทำหน้าที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- 4) ราคาไม่แพง

2.6.2 ชนิดของสารเติมแต่งได้แก่

2.6.2.1 กำจัดออกซิเจนในสารละลาย (Oxygen scavengers)

สารกำจัดออกซิเจน	การนำไปใช้
N,N-Diethylhydroxylamine (DEHA)	ใช้ เป็นตัวยับยั้งในกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน, สารทำให้คงตัวสำหรับสารประกอบฟีนอล และกระบวนการบำบัดน้ำ [25, 27, 37]
Morpholine	ใช้ เป็นตัวกลางในกระบวนการผลิตยางและ ตัวทำละลายสำหรับสารออกแกนิกโมเลกุลใหญ่ [25, 38]
Hydrazine Hydrate	ใช้ เป็นตัวออกซิไดซ์ ในกระบวนการสังเคราะห์และ สารเพิ่มประสิทธิภาพในการสร้างชั้นป้องกันการกัดกร่อนของโลหะ [25-26, 39]
Cyclohexylamine	ใช้ เป็นตัวกลางในการสังเคราะห์สารออกแกนิก, สารยับยั้งการกัดกร่อน และตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตยาง [25, 40]
Carbohydrazide	ใช้ เป็นตัวกลางในกระบวนการสังเคราะห์สารออกแกนิก และสารเพิ่มประสิทธิภาพในการสร้างชั้นป้องกันการกัดกร่อนของโลหะ [25, 41]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

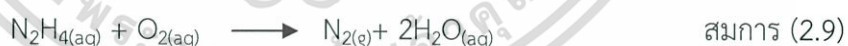
2.6.2.2 เพิ่มปริมาณเหล็กในรูปสารละลาย

สารเพิ่มปริมาณเหล็ก ในรูปสารละลาย	การนำไปใช้
Iron (II) sulfate heptahydrate	ใช้ ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางเคมี (Chemical process) และสารตั้งต้นในการสังเคราะห์เหล็กออกไซด์ [28, 42]
Iron (II) chloride	ใช้ ในการสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อนของเหล็ก และเป็นสารตั้งต้นในการผลิตโอโรอนออกไซด์ (FeO) [30, 43]
Iron (III) chloride	ใช้ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตเอทิลีนไดคลอไรด์ (Ethylene dichloride) ไวนิลคลอไรด์ (Vinyl-chloride) และกระบวนการบำบัดน้ำเสีย [30, 44]

2.6.3 สารเติมแต่งที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ได้แก่

- 1) ไฮดราซีนไฮเดรต (Hydrazine hydrate, $N_2H_4 \cdot H_2O$)
- 2) โอโรอน (II) ซัลเฟต (Iron (II) sulfate heptahydrate, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$)

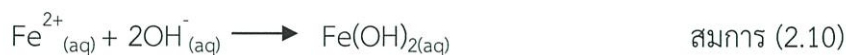
เนื่องจากการเกิดฟิล์ม (Magnetite, Fe_3O_4) บนเหล็กกล้า ในกระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธีรมดำแบบร้อน จำเป็นต้องกำจัดออกซิเจนในระบบ [20-22] เพื่อโอกาสในการเกิดฟิล์ม และเพิ่มปริมาณเหล็กในรูปสารละลาย (Fe^{2+}) เพื่อโอกาสในการเกิดชั้นฟิล์มที่มีความสม่ำเสมอและหนามากขึ้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือก ไฮดราซีนไฮเดรต ($N_2H_4 \cdot H_2O$) ใช้เป็นสารกำจัดออกซิเจน (Oxygen scavenger) เพราะสารมีความว่องไวในการจับออกซิเจน [25,26] ดังสมการที่ 2.9



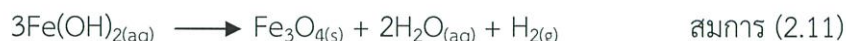
ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยา ไม่ส่งผลกระทบต่อเกิดฟิล์ม ทั้งนี้ยังสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อสารเคมีของคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

และเลือกโอโรอน (II) ซัลเฟต ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) เป็นสารเพิ่มปริมาณเหล็กในรูปสารละลาย (Fe^{2+}) [28,42] เพราะสารไม่ก่อให้เกิดมลภาวะที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และเป็นสารเคมีพื้นฐานในห้องปฏิบัติการเคมีสิ่งแวดล้อม ใช้ในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางเคมี (Chemical process) ลดค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อสารเคมีของคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยหลักการที่เลือกเติมปริมาณเหล็กในรูปสารละลาย (Fe^{2+}) เพื่อเพิ่มโอกาสในการรวมตัวกับไฮดรอกไซด์ (OH^-) เกิดเป็นสารประกอบโอโรอน (II) ไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_2$) มากขึ้น [20,21-22,29] ดังสมการ 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เมื่อสารประกอบนี้สูญเสียน้ำ กลายเป็นฟิล์มของเหล็กออกไซด์ (Magnetite, Fe_3O_4) บนเหล็กกล้า ที่มีความหนา และสม่ำเสมอเพิ่มขึ้น [21] ดังสมการ 2.11

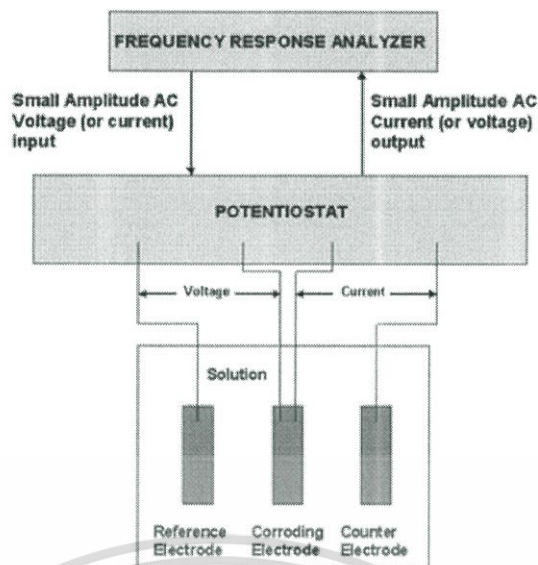


2.7 เทคนิคโพเทนชิโอดนามิกโพลาริเซชัน (Potentiodynamic polarization) [45-46]

เป็นเทคนิคที่ใช้ศึกษาวิเคราะห์พฤติกรรมการกัดกร่อนของชิ้นงานโลหะตัวอย่างในสภาพสิ่งแวดล้อมที่กำหนดโดยเฉพาะโลหะหรือโลหะผสมที่มีสมบัติสภาวะกัดกร่อน-สภาวะป้องกัน (Active-passive) หรือโลหะผสมที่มีฟิล์มป้องกัน (Passive film) โดยใช้เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบสามขั้วซึ่งประกอบด้วยชิ้นงานโลหะตัวอย่างเป็นขั้วทำงาน (Working electrode, WE) โดยอยู่ในสารละลาย อิเล็กโทรไลต์ที่มีสภาวะความเข้มข้น อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนในสารละลายตามกำหนด โดยที่ใช้ขั้วอ้างอิงมาตรฐาน (Reference electrode, RE) ทำการต่อให้ครบวงจรด้วยขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter electrode, CE) โดยขั้วไฟฟ้านี้จะถูกออกแบบให้กระแสที่เกิดขึ้นในวงจรไหลผ่านได้ โดยป้อนศักย์ไฟฟ้าไปทางบวกเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เพื่อเร่งการกัดกร่อน และติดตามกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปที่ค่าศักย์ไฟฟ้าต่างๆ ทำให้ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและค่า $\log I$ ($i = I/A$ หรือความหนาแน่นของกระแส) หรือกราฟโพลาริเซชัน (Polarization curve)

2.7.1 การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อน [45]

ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion potential, E_{corr}) คือ ศักย์ไฟฟ้าที่อัตราการรวมของปฏิกิริยาแอโนดทั้งหมดเท่ากับอัตราการรวมของปฏิกิริยาแคโทดิก โดยความหนาแน่นกระแสที่ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน เรียกว่า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion current density, i_{corr}) ซึ่งถือเป็นตัวบ่งชี้การกัดกร่อน การวัดศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขณะเกิดการกัดกร่อนสามารถทำได้โดยใช้เครื่องโพเทนชิโอสแตต (Potentiostat) ซึ่งมีลักษณะการวัดดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การวัดกระแสไฟฟ้ากักกร่อนและศักย์ไฟฟ้าการกักกร่อนโดยเครื่องโพเทนชิโอสแตต [45]

ขั้วไฟฟ้า ถือเป็นพื้นฐานในการทดสอบทางเคมีไฟฟ้าโดยจะทำหน้าที่นำไฟฟ้าต่อเชื่อมระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์และเป็นอุปกรณ์สำหรับการวัดสัญญาณทางไฟฟ้า สำหรับการวิเคราะห์การกักกร่อนของวัสดุจะต้องประกอบด้วยเซลล์ไฟฟ้าด้วยกัน 3 ขั้ว ดังนี้

1. ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode)

ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงทำจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่สามารถรักษาสภาพของศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ซึ่งใช้เป็นจุดอ้างอิงสำหรับวัดค่าศักย์ไฟฟ้า โดยขั้วไฟฟ้าอ้างอิงที่นิยมใช้ ได้แก่ ขั้วคาโลเมลอิ่มตัว (Saturated calomel electrode, SCE)

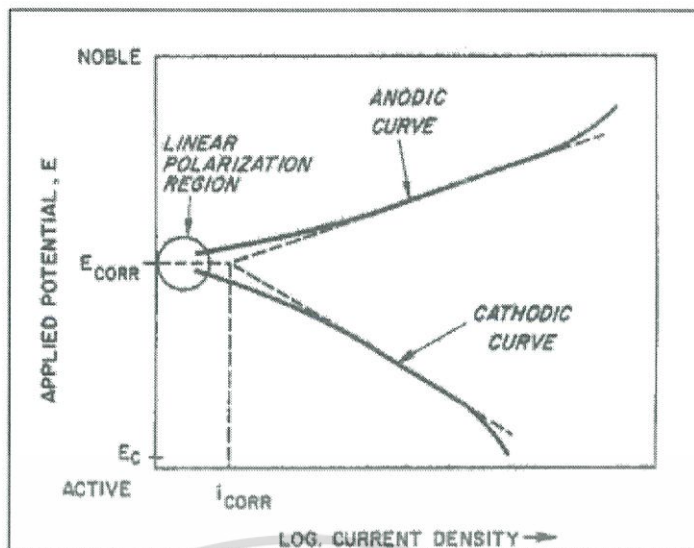
2. ขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter electrode)

ขั้วไฟฟ้าช่วยเป็นขั้วไฟฟ้าพิเศษใช้สำหรับทำหน้าที่เพื่อส่งผ่านอิเล็กตรอนหรือส่งผ่านกระแสไฟฟ้าไปยังขั้วไฟฟ้าทำงาน โดยไม่ต้องผ่านขั้วไฟฟ้าอ้างอิงของวงจร ซึ่งขั้วไฟฟ้าช่วยจะทำมาจากวัสดุที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยา เช่น แพลตินัม ทองคำ

3. ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode)

ขั้วไฟฟ้าทำงานคือโลหะตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ

ค่าศักย์ไฟฟ้าจะไดจากการวัดเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าอ้างอิงกับขั้วไฟฟ้าทำงาน ค่ากระแสไฟฟ้าจะไดจากการวัดเทียบระหว่างขั้วไฟฟ้าช่วยกับขั้วไฟฟ้าทำงานจากค่าศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ เมื่อมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าทั้งสองจะได้กราฟที่เรียกว่ากราฟโพลาริเซชัน (Polarization curve) แสดงดังรูปที่ 2.15

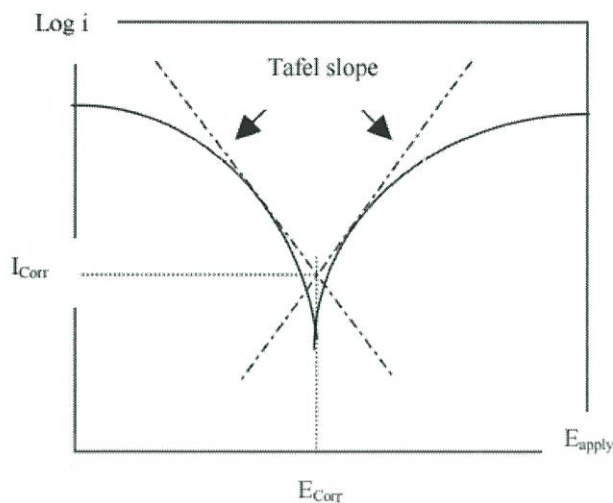


รูปที่ 2.15 กราฟโพลาริเซชันแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน [45]

จากรูปที่ 2.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าของปฏิกิริยาแอโนดิกและปฏิกิริยาแคโทดิกบนพื้นผิวของโลหะที่กำลังเกิดการกัดกร่อน เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วไฟฟ้าที่ผิว ความต่างศักย์ของขั้วทั้งสองจะเกิดการเปลี่ยนแปลงดังในเส้นกราฟแอโนดิก (Anodic curve) และเส้นกราฟแคโทดิก (Cathodic curve) ตามลำดับโดยที่ความต่างศักย์ของแอโนดจะเปลี่ยนค่าไปในทางบวก ส่วนความต่างศักย์ขององแคโทดจะเปลี่ยนค่าไปในทางลบ ในลักษณะเช่นนี้แสดงถึงการเกิดโพลาริเซชันของขั้วทั้งสอง สามารถหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนได้จากจุดตัดของเส้นความชันของเส้นกราฟแอโนดและเส้นกราฟแคโทด

2.7.2 การคำนวณพารามิเตอร์ (Calculation) [45-46]

จากกราฟโพลาริเซชันระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้กับกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น สามารถหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) และค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) โดยการลากเส้นสัมผัสเส้นกราฟ (Tafel slope) ด้านแอโนดิกและแคโทดิกที่จุดตัดของเส้นกราฟทั้งสองจะได้ค่าที่ต้องการแสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การหาค่า i_{corr} และค่า E_{corr} จากกราฟโพลาริเซชัน

ค่าอัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate) โดยประยุกต์ใช้กฎของฟาราเดย์และมาตรฐาน ASTM G102 [1]

$$CR = K_1 \frac{i_{corr}}{\rho} EW \quad (2.1)$$

$$Q = \sum \left(\frac{f_i n_i}{W_i} \right) \quad (2.2)$$

$$EW = \frac{1}{\sum \left(\frac{f_i n_i}{W_i} \right)} \quad (2.3)$$

โดยที่

$K_1 = 3.27 \times 10^{-3} \text{ mm g}/\mu\text{A}\cdot\text{cm}\cdot\text{yr}$ (จากตารางที่ 2.5)

ρ = ความหนาแน่น

W = มวลอะตอม

f = อัตราส่วนมวล

n = จำนวนสมมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 แสดงค่าที่ใช้ในสมการของฟาราเดย์ (Faraday's equation) [35]

A				
Penetration Rate Unit (CR)	I_{cor} Unit	ρ Unit	K_1	Units of K_1^A
mpy	$\mu A/cm^2$	g/cm^3	0.1288	mpy $g/\mu A$ cm
mm/yr ^B	A/m^{2B}	kg/m^{3B}	327.2	mm kg/A m y
mm/yr ^B	$\mu A/cm^2$	g/cm^3	3.27×10^{-3}	mm $g/\mu A$ cm y
B				
Mass Loss Rate Unit	I_{cor} Unit	K_2	Units of K_2^A	
g/m^2d^B	A/m^{2B}	0.8953	g/Ad	
mg/dm ² d (mdd)	$\mu A/cm^2$	0.0895	mg $cm^2/\mu A$ dm ² d	
mg/dm ² d (mdd)	A/m^{2B}	8.953×10^{-3}	mg m^2/A dm ² d	

^AEW is assumed to be dimensionless.

^BSI unit.

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1. การเกิดฟิล์มเหล็กออกไซด์ (Magnetite, $Fe_3O_4 \cdot nH_2O$)

จากการศึกษาลักษณะของการเกิดชั้นฟิล์มออกไซด์บนโลหะเหล็กกล้า AISI 4140 ในสภาวะเบส ของกระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธีรมดำแบบร้อน เพื่อป้องกันการกัดกร่อนในสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นกลาง โดยโลหะเหล็ก (Fe) จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ง่ายอิเล็กตรอนกลายเป็นไอออนของเหล็ก (Fe^{2+}) หลุดเข้าไปในสิ่งแวดล้อมที่ทำให้เกิดการกัดกร่อน และออกซิเจนในน้ำเกิดปฏิกิริยารีดักชัน รับอิเล็กตรอนกลายเป็นไอออนของไฮดรอกไซด์ (OH^-) หลุดเข้าไปในสิ่งแวดล้อม เกิดการรวมตัวทำให้เกิดสารประกอบไฮดรอกไซด์ (II) ไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_2$) ชั้นที่ผิวของเนื้อเหล็ก ซึ่งสารประกอบนี้สามารถเกิดออกซิเดชันได้อย่างรวดเร็ว ด้วยออกซิเจนที่มีอยู่ในระบบ ทำให้เกิดสารประกอบไฮดรอกไซด์ (III) ไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_3$) กระบวนการต่อไปเมื่อ สารประกอบนี้สูญเสียน้ำกลายเป็นสารประกอบตัวใหม่ คือ สนิมเหล็กสีแดง (Hematite, $Fe_2O_3 \cdot H_2O$) แต่ถ้าปริมาณออกซิเจนในระบบมีไม่เพียงพอต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบไฮดรอกไซด์ (II) ไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_2$) ชั้นที่ผิว จะหยุดในรูป สนิมเหล็กสีดำ (Magnetite, $Fe_3O_4 \cdot nH_2O$) [20]

จากการศึกษาการสังเคราะห์ฟิล์ม (Magnetite, Fe_3O_4) บนผงเหล็ก (Iron powder) พบว่าการเกิดฟิล์มจำเป็นต้องสังเคราะห์ในสภาวะที่ pH สูง โดยทำสังเคราะห์ฟิล์มในสารละลายเบสที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 5 และ 10 โมลาร์ เมื่อนำไปตรวจหาความเป็นผลึกด้วยเทคนิค X-Ray diffraction พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นดูจากพีคแหลมมากขึ้น (Sharp) และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการเกิดฟิล์ม (Intermedia reaction) บนพื้นผิวเหล็กคือ $Fe + 2H_2O \rightarrow Fe(OH)_2 + H_2$ ซึ่งสารประกอบไฮดรอกไซด์ (II) ไฮดรอกไซด์ สามารถเปลี่ยน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปเป็น Fe_3O_4 ได้จากกระบวนการสูญเสียไฮโดรเจนโดย Fe_3O_4 จะฟอร์มตัวบนเหล็กในลักษณะเป็นชั้นฟิล์ม [21]

จากการศึกษาพฤติกรรมของการสร้างชั้นฟิล์ม (Magnetite, Fe_3O_4) บนพื้นผิวของเหล็กกล้า (Carbon steel) พบว่า จากข้อสันนิษฐานที่ว่าฟิล์มเกิดจากปฏิกิริยา Schikorr จะเกิดที่อุณหภูมิมากกว่า 50°C โดยความหนาของชั้นฟิล์มจะขึ้นกับปริมาณการเกิดของไฮดรอกไซด์ (II) ซัลเฟต ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) แสดงดังสมการ $3\text{Fe}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{H}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ และสารประกอบไฮดรอกไซด์ (II) ซัลเฟตยังสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยเกิดเป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์ (III) ซัลเฟต เมื่อออกซิเจนในสารละลายเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยา [22]

2.8.2. ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดฟิล์มเหล็กออกไซด์ (Magnetite, Fe_3O_4)

จากการศึกษาอิทธิพลของปัจจัย ที่มีผลกระทบต่อ การเกิดชั้นฟิล์มเหล็กออกไซด์ (Magnetite, Fe_3O_4) บนโลหะเหล็กหล่อ ซึ่งทำได้โดยกระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธีรมดำแบบร้อน (Hot blackening) โดยทำในสภาวะเบส เบสที่ใช้คือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยใช้สารเติมแต่งคือโซเดียมไนไตรต์ (NaNO_2) และโซเดียมไนเตรต (NaNO_3) ทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์เหล็ก จากเหล็กในรูปของโลหะ (Fe) เป็น (Fe^{2+}) ในรูปของสารละลาย เพื่อปริมาณเหล็กในรูปสารละลาย (Fe^{2+}) เกิดการรวมตัว กับไฮดรอกไซด์ในรูปสารละลาย (OH^-) เป็นชั้นฟิล์มเหล็กออกไซด์ สีดำบนโลหะ โดยปัจจัยที่มีผลต่อความหนาของชั้นฟิล์ม คือ ระยะเวลาในการต้ม เมื่อเพิ่มระยะเวลานานขึ้น จาก 10 เป็น 20 และ 30 นาที ทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มเพิ่มขึ้นทีละ 0.4 ไมโครเมตร จาก 0.4 เป็น 0.8 และ 1.2 ไมโครเมตรตามลำดับ เนื่องด้วยระยะเวลามีผล ต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง เหล็กในรูปของสารละลาย (Fe^{2+}) กับเบส ถ้าระยะเวลาในกระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธีรมดำนานขึ้น ชั้นฟิล์มเหล็กออกไซด์บนโลหะที่ได้ จะมีความหนาเพิ่มขึ้น [23]

จากการศึกษาผลกระทบของสารเติมแต่ง (Additive) ต่อชั้นฟิล์ม (Magnetite, Fe_3O_4) บนพื้นผิวของโลหะที่เจือด้วยแมกนีเซียม (Magnesium alloy) ในความเข้มข้นต่างๆ พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารเติมแต่ง มีผลทำให้เกิดรอยแตกของชั้นฟิล์มป้องกัน (Micro crack) บนโลหะ โดยความเข้มข้นของสารเติมแต่งที่ดีที่สุด คือ 0.005 mol/L พบว่าลักษณะของชั้นฟิล์มป้องกันบน Magnesium alloy มีรอยแตกที่น้อยที่สุด (Micro crack) รวมทั้งความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีที่สุด เมื่อเทียบกับไม่มีการเติมสารเติมแต่ง [24]

2.8.3. สารเติมแต่งที่มีส่วนช่วยในการปรับปรุงคุณภาพของฟิล์มเหล็กออกไซด์ (Magnetite, Fe_3O_4)

2.8.3.1. สารเติมแต่งที่สามารถกำจัดออกซิเจนในระบบ (Oxygen scavengers)

จากการศึกษาอิทธิพลของสารเติมแต่ง (Additive) ที่สามารถทำหน้าที่ในการกำจัดออกซิเจนในสารละลาย (Oxygen scavenger) โดยโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ ใช้ในกระบวนการผสมน้ำส่งเข้าหม้อต้ม (Boiler) เพื่อลดอัตราการกัดกร่อนในท่อเหล็กเหล็กส่งน้ำ โดยในโรงงานอุตสาหกรรมนิยมใช้ไฮดราซีนไฮเดรต ($\text{N}_2\text{H}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) เนื่องจากไฮดราซีนไฮเดรต ($\text{N}_2\text{H}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา (Kinetics of reaction) และเมื่อสารนี้ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ แก๊สไนโตรเจนซึ่งสามารถระเหยได้ง่าย และง่ายต่อการกำจัด นอกจากนี้สารเติมแต่งที่สามารถทำหน้าที่แบบไฮดราซีนไฮเดรต คือ diethyl hydroxylamine morpholine cyclohexylamine และ carbonylhydrazide แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจแตกต่างกันขึ้นกับสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา [25]

จากการศึกษาสมบัติของสารเติมแต่งคือ ไฮดราซีนไฮเดรต ($\text{N}_2\text{H}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของฟิล์ม (Magnetite, Fe_3O_4) โดยไฮดราซีนไฮเดรตจะทำหน้าที่ กำจัดออกซิเจนในสารละลายเพิ่มโอกาสในการเกิดฟิล์มมากขึ้น เนื่องจากถ้าปริมาณออกซิเจนในสารละลายมีปริมาณมาก ทำให้ฟิล์มที่ได้บนโลหะคือ สนิมเหล็ก (Hematite, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) สีแดง ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการ เพราะก่อให้เกิดการกัดกร่อนของโลหะได้ นอกจากนี้สารเติมแต่งนี้ ยังสามารถเปลี่ยนจากสนิมเหล็กเป็นเหล็กออกไซด์ (Fe_3O_4) ในกรณีใส่ปริมาณมากเกินไป (Excess of scavenger) ต่อการจับออกซิเจน ในส่วนของปฏิกิริยาออกซิเจนกับไฮดราซีนไฮเดรต ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ แก๊สไนโตรเจนและน้ำ ข้อดีคือผลิตภัณฑ์ที่ได้ ไม่เจือปนในชั้นฟิล์ม เนื่องจากเป็นแก๊สไนโตรเจนสามารถระเหยไปในอากาศได้ ดังนั้นสารเติมแต่งนี้ จึงเป็นที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์สารจำพวก ที่ต้องการลดปริมาณออกซิเจน ในกระบวนการเกิด เช่น การสร้างชั้นฟิล์มเหล็กออกไซด์ (Fe_3O_4) และกระบวนการต่างๆที่ใช้ท่อเหล็กเป็นต้น [26]

จากการศึกษาสมบัติของสารเติมแต่งคือ ไดเอทิลไฮดรอกซิลามีน (Diethyl hydroxylamine, DEHA) ในการปรับปรุงคุณภาพของฟิล์ม (Magnetite, Fe_3O_4) ใช้ในการเพิ่มโอกาสเกิดฟิล์ม โดยสารนี้ทำหน้าที่ กำจัดออกซิเจนในสารละลาย (Oxygen scavenger) ซึ่งกลไกในการจับออกซิเจนคล้ายกับไฮดราซีนไฮเดรต แต่ผลิตภัณฑ์ตัวสุดท้ายที่ได้จากการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน คือ กรดแอสติก (Acetic acid, CH_3COOH) ข้อดีของการใช้ DEHA เป็นสารเติมแต่งคือ มีความปลอดภัยกว่าการใช้สารเติมแต่งชนิดอื่น [27]

2.8.3.2. สารเติมแต่งที่สามารถเพิ่มปริมาณเหล็กในรูปสารละลาย

จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของชั้นฟิล์มเหล็กออกไซด์ (Magnetite, Fe_3O_4) บนเหล็กกล้าด้วยเทคนิคการรมดำแบบร้อน (Hydrothermal blackening technology) ในสภาวะเบส โดยทำการปรับปรุงคุณภาพของชั้นฟิล์มบนพื้นผิวโลหะด้วยไอออน (II) ซัลเฟต ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) ทำหน้าที่เพิ่มปริมาณเหล็กในรูปสารละลาย (Fe^{2+}) เพื่อเพิ่มโอกาสในการรวมตัวกับไฮดรอกไซด์ (OH^-) จากสารละลายเบสมากขึ้น ทำให้ลักษณะชั้นฟิล์มมีความหนาที่เพิ่มขึ้นและสม่ำเสมอมากขึ้นกว่าเดิมที่ใช้สารละลายเบสอย่างเดียว โดยงานวิจัยทำการเปรียบเทียบฟิล์มของชั้นป้องกัน (Fe_3O_4) บนเหล็กกล้าโดยมีสารละลายผสมที่แตกต่างกัน ผลสรุปว่า ฟิล์มที่ดีที่สุดเกิดจาก สารละลายผสมระหว่าง ไอออนซัลเฟต ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และไฮดราซีนไฮเดรต ($\text{N}_2\text{H}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) มีความหนาขึ้น และมีอัตราการกัดกร่อนลดลง เมื่อเทียบกับโลหะเหล็กที่ไม่ถูกเคลือบผิว [28]

จากการศึกษาการสังเคราะห์เหล็กออกไซด์ (Magnetite, Fe_3O_4) ในสารละลายผสมระหว่าง ไอออน (II) คลอไรด์ (FeCl_2) และไอออน (III) คลอไรด์ (FeCl_3) โดยอัตราส่วน 1 : 2 โมล ทำให้สภาวะเบส ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลาย มีค่าประมาณ 9 โดยระหว่างการสังเคราะห์จำเป็นต้องกำจัดออกซิเจนในระบบก่อน เพื่อเพิ่มโอกาสในการเกิดเป็นเหล็กออกไซด์ (Magnetite, Fe_3O_4) โดยงานวิจัยนี้ใช้ไอออน (II) คลอไรด์ และไอออน (III) คลอไรด์ ทำหน้าที่เพิ่มปริมาณเหล็กไอออน (Fe^{2+}) ในการรวมตัวกับไฮดรอกไซด์ (OH^-) แทนที่ ไอออน (II) ซัลเฟต ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งกลไกการเกิดเหล็กออกไซด์เหมือนกัน และได้ผลิตภัณฑ์เหมือนกัน สามารถใช้ในการสังเคราะห์ชั้นฟิล์มบนเหล็กในการเคลือบผิวด้วยวิธีรมดำแบบร้อน (Hot black oxide process) [29]

2.8.4. การป้องกันการกัดกร่อนของชั้นฟิล์มเหล็กออกไซด์ (Magnetite, Fe_3O_4) ในสารละลายทดสอบการกัดกร่อน

จากการศึกษาพฤติกรรมการป้องกันการกัดกร่อนของฟิล์ม (Magnetite, Fe_3O_4) ที่เคลือบผิวบนเหล็กฟอยด์ (Fe foil) โดยสารละลายที่ใช้ทดสอบคือ โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride, NaCl) ซึ่งมีความเข้มข้น 3.5% โดยปริมาตร โดยมีการใช้ขั้วอิเล็กโทรดอ้างอิง (Reference electrode) คือ ขั้วคาโลเมลล์อิมิตัวอิเล็กโทรดกระแส (Counter electrode, CE) คือ แพลทินัมฟอยด์ และอิเล็กโทรดตัวอย่าง (Working electrode, WE) คือ ชิ้นงานตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ โดยในงานวิจัยนี้ทดสอบเหล็กฟอยด์ที่ไม่ถูกเคลือบผิว และเหล็กฟอยด์ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์ม พบว่า ชิ้นงานที่ไม่ถูกเคลือบผิวมีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนน้อยกว่าชิ้นงานที่ถูกเคลือบ และมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากกว่า ชิ้นงานที่ถูกเคลือบ แสดงให้เห็นว่า กระบวนการแอโนดิกถูกยับยั้งโดยฟิล์ม มีผลทำให้โลหะที่ถูกเคลือบเฉื่อย ต่อปฏิกิริยาการกัดกร่อนทำให้อัตราการกัดกร่อนลดลง [30]

จากการศึกษาผลของการป้องกันการกัดกร่อนของฟิล์ม (Magnetite, Fe_3O_4) ที่เคลือบผิวบนเหล็กกล้าประสมต่ำ (Low alloy steel) เป็นเหล็กกล้าผสมคาร์บอนไม่เกิน 1.7% และมีธาตุอื่น ๆ ผสม โดยสารละลายที่ใช้ทดสอบคือ โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride, NaCl) ความเข้มข้น 1 โมลาร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่า ชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีกว่า ชิ้นงานที่ไม่ถูกเคลือบผิว และสารละลายที่ใช้ทดสอบมีค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลาย (pH) เพิ่มขึ้นจาก 6.8 เป็น 7.8 เนื่องมาจากในสารละลายหลังจากการทดสอบ เกิดสารประกอบในรูปเชิงซ้อนของเหล็กไอออน (Fe^{2+}) กับคลอไรด์ไอออน (Cl^-) [31]

2.8.5. การป้องกันการกัดกร่อนของโลหะ โดยการเคลือบผิวด้วยวิธีต่างๆ

จากการศึกษาการวิเคราะห์การพิสูจน์เอกลักษณ์ของ (Vanadate conversion coating, VCC) บนพื้นผิวของโลหะเจือแมกนีเซียม (Magnesium alloy) โดยจุ่มในสารละลายวานาเดียม-ฟอสเฟต (vanadium phosphate) ซึ่งสารละลาย vanadium phosphate จะประกอบไปด้วย phosphoric acid (H_3PO_4) 3-5.5 g/L $NaVO_3$ zinc nitrate, ammonium hydrogen fluoride (NH_4HF_2) สารละลายแอมโมเนียและสารเติมแต่งโมลิบดีต (molybdate additive) ที่อุณหภูมิ $50^\circ C$ เป็นเวลา 10 นาทีพบว่า $NaVO_3$ ทำให้น้ำหนักของการเคลือบผิวที่มากขึ้นและป้องกันการกัดกร่อนบน Mg alloy ได้อย่างสมบูรณ์ [32]

จากการศึกษาที่มุ่งพัฒนา Conversion coating โดยใช้ Hexavalent chromium ที่มีความเป็นพิษสูง อันตรายต่อสุขภาพแต่มีข้อดีคือสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีที่สุด จึงมีการค้นคว้าหาการเคลือบผิวที่มีประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนซึ่งมีความใกล้เคียงกับเมื่อใช้ Chromium conversion coating และไม่เป็นพิษต่อการใช้งาน ซึ่งหนึ่งในนั้นคือ การเคลือบผิวด้วยสารละลายไดโครเมต (Dichromate) ซึ่งได้ชั้นฟิล์มเป็น Cr_2O_3 มีข้อดีคือสามารถทนความร้อนได้ดีกว่า ผลสรุปว่างานวิจัยนี้ได้นำสารละลายไดโครเมต (dichromate) มาผสมกับ Hexavalent chromium ซึ่งทำให้ฟิล์มสามารถป้องกันการกัดกร่อน และความร้อนได้ดี พร้อมทั้งยังลดความเป็นพิษต่อสุขภาพ [33]

จากการศึกษาการเคลือบผิวบนพื้นผิวโลหะโดยใช้สารละลายฟอสเฟต (Phosphate chemical conversion coating) เพื่อประยุกต์ใช้ในด้านทางการแพทย์ซึ่งสถานะ (Phase) ของฟอสเฟตที่ใช้สำหรับ phosphate conversion coating ได้แก่ Zinc phosphate tetrahydrate (hopeite), Dicalcium phosphate dehydrate (brushite), Zinc calcium phosphatedehydrate (schplzite) และ Hydroxyapatite (HA) ในงานวิจัยนี้โลหะที่ใช้ศึกษาได้แก่ แมกนีเซียม ไทเทเนียม เหล็กกล้าไร้สนิม และเหล็กบริสุทธิ์ ซึ่งโดยปกติจะใช้สารละลายฟอสเฟตเคลือบผิวเพื่อลดอัตราการกัดกร่อนของโลหะที่ใช้ในทางการแพทย์ [34]

2.8.6 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ การรมดำแบบร้อน พบว่ามีงานวิจัยที่น่าสนใจของ Zhu [28] ที่ทำการศึกษาการรมดำแบบร้อน ในสภาวะ Hydrothermal (ความดันสูงและอุณหภูมิสูง) โดยมีการปรับปรุงคุณภาพของชั้นฟิล์มบนเหล็กกล้า โดยเติมสารเติมแต่ง 2 ชนิด คือ ไฮโดรซัน-ไฮเดรต ทำหน้าที่กำจัดออกซิเจนในระบบ เพื่อเพิ่มโอกาสในการเกิดชั้นฟิล์มสีดำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Magnetite, Fe_3O_4) [25-27] และไอร์ออน (II) ซัลเฟต ทำหน้าที่เพิ่มปริมาณเหล็กไอออน (Fe^{2+}) เพื่อเพิ่มโอกาสในการเกิดชั้นฟิล์มที่มีความหนา และความสม่ำเสมอเพิ่มขึ้น [28-31] ซึ่งในกระบวนการรรมดำนี้ ใช้ความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ในการรรมดำต่ำ เมื่อเทียบกับในสภาวะ Non-hydrothermal (ที่ความดัน-บรรยากาศ) และชั้นฟิล์มที่ได้จะมีลักษณะที่บางกว่าชั้นฟิล์มจากการรรมดำแบบทั่วไป ดังนั้นจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ โดยทำการศึกษากระบวนการรรมดำแบบร้อนที่สภาวะ Non-hydrothermal สามารถเกิดชั้นฟิล์ม (Magnetite, Fe_3O_4) ได้หรือไม่ โดยในการทดลองมีการเพิ่มความเข้มข้นสารละลายในกระบวนการรรมดำ รวมทั้งปริมาณความเข้มข้นของสารเติมแต่ง ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพฟิล์ม จากนั้นทดสอบชั้นฟิล์มของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดควบคู่ไปกับเทคนิคการวิเคราะห์แบบ EDS (scanning electron microscope / energy dispersive x-ray spectrometer, SEM/EDS) เพื่อศึกษาความหนาของชั้นฟิล์มที่ได้จากกระบวนการรรมดำแบบร้อน และเทคนิคโพเทนชิโอดินามิกโพลาริเซชัน (Potentiodynamic polarization) เพื่อศึกษาอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานโดยทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 3.5 % โดยมวลต่อปริมาณ [30-31]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. โซเดียมไฮดรอกไซด์เกรดวิเคราะห์ (Sodium hydroxide, NaOH)
2. ไฮดราซีนไฮเดรต (Hydrazine hydrate, $N_2H_4 \cdot H_2O$)
3. ไอร์รอน (II) ซัลเฟต (Iron (II) sulfate heptahydrate, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$)
4. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)
5. น้ำกลั่น
6. อะซิโตน (Acetone)
7. น้ำยาทำความสะอาด

3.2 อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เหล็กกล้าชนิด S50C
2. เตาให้ความร้อนแบบหลุม (Heating mantle) ขนาด 500 มิลลิลิตร
3. เครื่องปั่นกวนสารละลายด้วยแรงแม่เหล็ก
4. เครื่องตัดชิ้นงานแบบอัตโนมัติ
5. เครื่องโพเทนชิโอสแตท (Potentiostat)
6. ชุดรีฟลักซ์
7. ปีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
8. ขวดปรับปริมาตร ขนาด 250 มิลลิลิตร
9. ขวดกั่นกลมขนาด 500 มิลลิลิตร
10. ไมโครปิเปต ขนาด 2-20 μL
11. คีมคีบ (Forceps)
12. กรวยกรอง
13. ซ้อนตักสาร
14. แท่งแก้วคนสาร
15. กระจาดชทรายน้ำ หมายเลข 80 100 400 600 800 1000 และ 2000
16. เครื่องชั่งสาร
17. เครื่องเป่าลมร้อน (Dryer)
18. กระจกนาฬิกา
19. ชุดทดสอบการกัดกร่อน
20. โลหะแพลตินัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

21. ชั่วโมงอิงชนิดคาโลเมลอิมตัว

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมตัวอย่าง

1. ชัดเหล็กด้วยกระดาษทรายน้ำ เพื่อกำจัดออกไซด์ที่เคลือบผิวเดิม และปรับผิวหน้าของเหล็กให้เรียบ โดยเริ่มขัดหยาบด้วยกระดาษทรายน้ำ หมายเลข 80 100 และ 400 ตามลำดับ จากนั้นขัดละเอียดด้วยกระดาษทรายน้ำ หมายเลข 600 800 และ 1000 ตามลำดับ เพื่อทำความสะอาดและปรับสภาพผิวให้สม่ำเสมอ โดยในระหว่างการขัดเหล็กด้วยกระดาษทรายจะใช้น้ำช่วยในการขัด เพื่อลดความร้อนและแรงเสียดทานที่เกิดจากการขัด

2. ล้างเหล็กที่ขัดเสร็จด้วยน้ำยาทำความสะอาด และน้ำปราศจากไอออน (Deionized-water) เพื่อกำจัดคราบไขมัน

3. เป่าเหล็กที่ผ่านการทำความสะอาดให้แห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อน (Dryer)

3.3.2 การเตรียมสารเคมีในการทดลอง

1. การเตรียมโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 20 และ 30% โดยมวลต่อปริมาตร

1) ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์จำนวน 25 50 และ 75 กรัม ตามลำดับ ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร

2) เติมน้ำกลั่น คนให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นเทสารละลายลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

2. การเตรียมโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตรกับไฮดราซีนเข้มข้น 2 5 และ 10 เท่าของไฮดราซีนที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับออกซิเจนในน้ำกลั่น

1) ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์จำนวน 75 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร

2) ปีเปตไฮดราซีนไฮเดรตปริมาตร 5.6 13.9 และ 27.8 μL และเติมลงในแต่ละขวดตามลำดับ จากนั้นเติมน้ำกลั่น คนให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน และเทสารละลายลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร ที่มีโซเดียมไฮดรอกไซด์ในแต่ละขวด แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การเตรียมโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตรกับไฮดราซีนเข้มข้น 5 เท่าของไฮดราซีนที่ทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ออกซิเจนในน้ำกลั่น และไอร์รอน (II) ซัลเฟตเข้มข้น 3 และ 5 เท่าของที่ใช้ในงานวิจัยของ Zhu [28]

1) ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์จำนวน 75 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร จากนั้น บีบไฮดราซีนไฮเดรต ปริมาตร 13.9 μL ใส่ในบีกเกอร์

2) ชั่งไอร์รอน (II) ซัลเฟตจำนวน 1.05 และ 1.75 กรัม ตามลำดับ ใส่ในบีกเกอร์ แล้วเติมน้ำกลั่นปริมาตร 50 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปคนให้เข้ากันด้วยเครื่องคนสารละลายด้วยแรงแม่เหล็กให้เข้ากัน

3) นำสารละลายทั้งสองเทเข้าด้วยกัน แล้วคนให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้น เทสารละลายลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

3.3.3 การเคลือบผิวด้วยการรมดำ

1. นำชิ้นเหล็กที่เตรียมผิวเรียบร้อยแล้ว ใส่ลงในขวดก้นกลมขนาด 500 มิลลิลิตร จากนั้นเทสารละลายที่ทำการปรับปริมาตรแล้วลงในขวดก้นกลม จากนั้นต่อชุดรีฟลักซ์

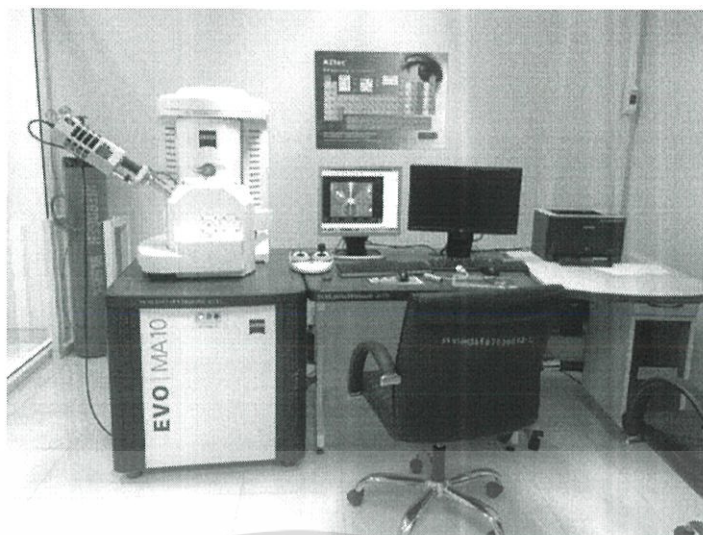
2. ให้ความร้อนด้วยเตาให้ความร้อนแบบหลุมที่จุดเดือดของสารละลาย เป็นเวลา 60 นาที

3. จากนั้นนำชิ้นงานเหล็กมาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนแล้วเป่าด้วยเครื่องเป่าลมร้อนให้แห้ง

3.3.4 การทดสอบชิ้นงาน

การเตรียมชิ้นงานก่อนนำไปทดสอบ โดยทำการตัดชิ้นงานด้วยเครื่องตัดชิ้นงานแบบอัตโนมัติ ให้ชิ้นงานมีขนาด กว้าง 0.4 เซนติเมตร ยาว 1.5 เซนติเมตร หนา 0.5 เซนติเมตร

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดควบคู่ไปกับเทคนิคการวิเคราะห์แบบ EDS (scanning electron microscope / energy dispersive x-ray spectrometer, SEM/EDS) เพื่อดูลักษณะ และวัดความหนาของชั้นฟิล์ม พร้อมทั้งวัดปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของชิ้นงานที่ทำการรมดำ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

2. การวัดอัตราการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชัน (Potentiodynamic polarization)

- 1) การเตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 3.5% โดยมวลต่อปริมาตร โซเดียมคลอไรด์ จำนวน 35 กรัม เติมน้ำกลั่นให้ปริมาตรครบ 1000 มิลลิลิตร
- 2) การวัดอัตราการกัดกร่อน
 - (1) นำสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 3.5% โดยมวลต่อปริมาตรมาใส่ภาชนะ ออกซิเจนออกด้วยก๊าซไนโตรเจน เป็นเวลา 30 นาที
 - (2) ล้างชุดทดสอบการกัดกร่อนด้วยน้ำปราศจากไอออน ทิ้งไว้ให้แห้ง
 - (3) เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์และเครื่องโพเทนชิโอสแตททักลิวาโนสแตท
 - (4) เปิดโปรแกรม NOVA 1.10 ควบคุม กรอกข้อมูลพื้นที่ผิวของชิ้นงานตัวอย่าง เลือกสภาวะทดสอบ ใช้อัตราเร็วในการปรับค่าศักย์ไฟฟ้า 2000 มิลลิโวลต์ต่อชั่วโมง ปรับค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วงตั้งแต่ -500 ถึง 1,000 มิลลิโวลต์ เทียบกับค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (Open circuit potential, OCP)
 - (5) จัดอุปกรณ์ชุดทดสอบการกัดกร่อน แล้วเติมสารละลายที่เตรียมไว้
 - (6) ใส่ชิ้นงานตัวอย่าง ชั่วอ้างอิง SCE และ ชั่วแพลทินัม ลงในชุดทดสอบการกัดกร่อน
 - (7) เริ่มปรับค่าศักย์ไฟฟ้าและวัดค่ากระแสไฟฟ้า จากนั้นทำการบันทึกข้อมูล
 - (8) หาค่า i_{corr} และ E_{corr} ตามเทคนิค ทาเฟิล (Tafel slope)
 - (9) เมื่อทำการวัดเสร็จสิ้น ทำการบันทึกข้อมูลลงในเครื่องคอมพิวเตอร์
 - (10) ทำการทดลองเช่นเดิม แต่เปลี่ยนชิ้นงานที่ทำทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กกล้าชนิด S50C โดยทำการเคลือบผิวโดยใช้สารละลายเบส คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และ สารเติมแต่งสองชนิด ได้แก่ ไฮดรอกซีไฮเดรต และ ไอร์รอน (II) ซัลเฟต และทำการทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสโตนามิกโพลาริเซชันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 3.5% โดยมวลต่อปริมาตร ด้วยอัตราเร็วในการตรวจวัด เท่ากับ 2000 มิลลิโวลต์ต่อชั่วโมง โดยขั้นตอนแรกเป็นการศึกษาอิทธิพลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากการทดลองโดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ คือ 10 20 และ 30% โดยมวลต่อปริมาตร เพื่อพิจารณาว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นใดจะมีคุณสมบัติของฟิล์มที่ดีที่สุด โดยในที่นี้จะใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายเบสหลัก ก่อนที่จะทำการเติมสารเติมแต่งเข้าไป

4.1 อิทธิพลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์

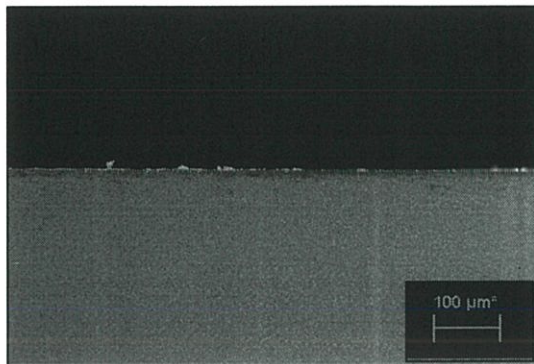
ชิ้นงานเหล็กที่ผ่านการเคลือบผิวโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 20 และ 30% โดยมวลต่อปริมาตร พบว่า ที่ผิวของชิ้นงานจะมีสีเข้มขึ้น



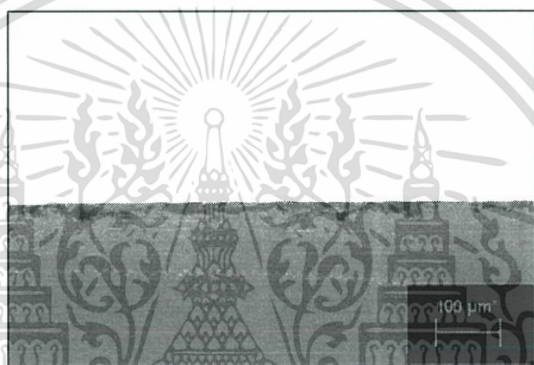
รูปที่ 4.1 ชิ้นงานที่ผ่านการรมดำโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ดังนี้ (a) เข้มข้น 10% โดยมวลต่อปริมาตร (b) เข้มข้น 20% โดยมวลต่อปริมาตร (c) เข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตร

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตร จะให้ผิวรมดำที่มีสีเข้มที่สุด จากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อดูความหนาของชั้นฟิล์ม

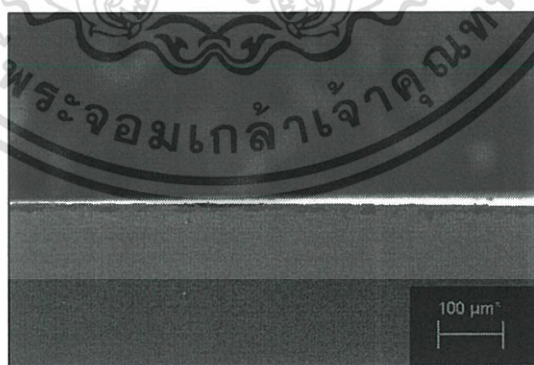
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ภาพตัดขวางของชิ้นงานที่ได้จากการรมดำด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 10% โดยมวลต่อปริมาตร โดยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ 4.3 ภาพตัดขวางของชิ้นงานที่ได้จากการรมดำด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 20% โดยมวลต่อปริมาตร โดยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า



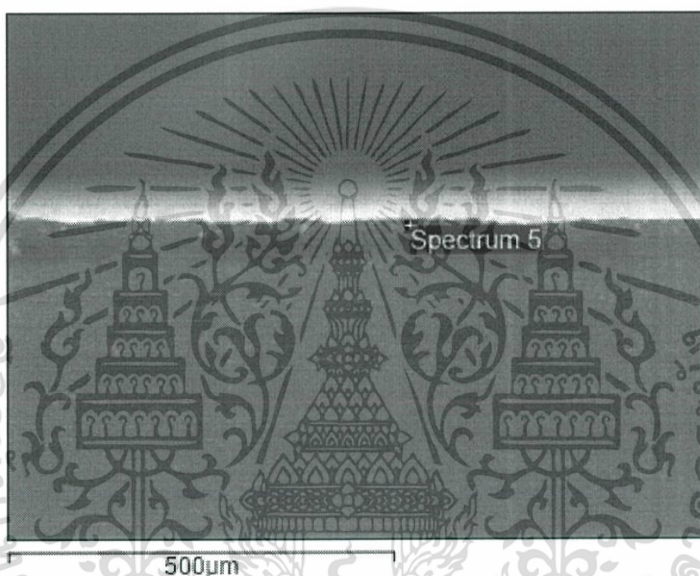
รูปที่ 4.4 ภาพตัดขวางของชิ้นงานที่ได้จากการรมดำด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตร โดยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพตัดขวางของชิ้นงานที่ได้จากการรมดำในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่างกัน จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มากขึ้น จะส่งผลทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มมากขึ้น โดยที่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 10% 20% และ 30% โดยมวลต่อปริมาตร จะให้ชั้นรมดำที่มีความหนาเฉลี่ย 14.0 18.0 และ 28.0 ไมโครเมตร ตามลำดับ

ดังนั้นพบว่าที่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตรจะให้ชั้นรมดำที่มีความหนามากที่สุด จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS เพื่อหาลักษณะประกอบของธาตุในชิ้นงาน การตรวจวัดแบ่งออกเป็น 3 บริเวณ คือ

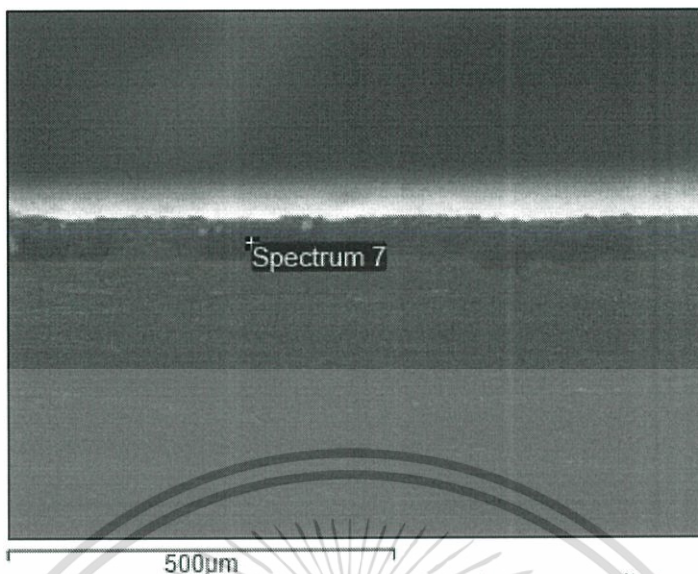
1. บริเวณฟิล์มชั้นนอก



รูปที่ 4.5 แสดงตำแหน่งที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS ที่บริเวณฟิล์มชั้นนอกโดยเทคนิค SEM

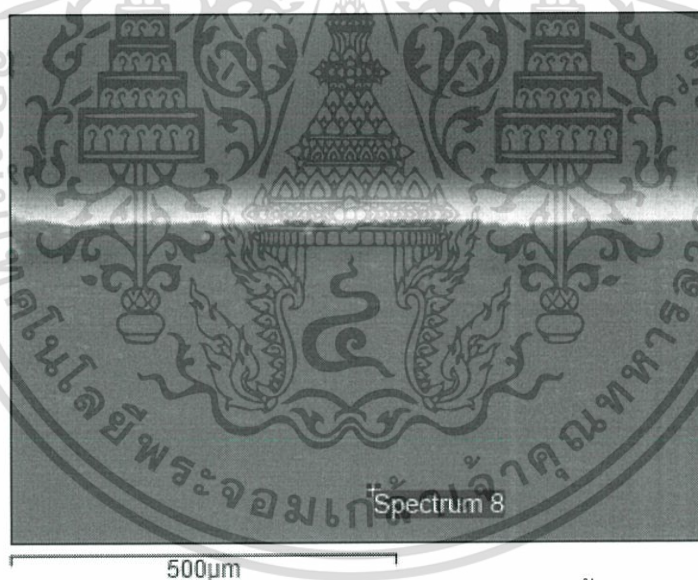
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. บริเวณฟิล์มชั้นใน



รูปที่ 4.6 แสดงตำแหน่งที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS ที่บริเวณฟิล์มชั้นในโดยเทคนิค SEM

3. บริเวณเนื้อเหล็ก



รูปที่ 4.7 แสดงตำแหน่งที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS ที่บริเวณเนื้อเหล็กกล้า โดยเทคนิค SEM

จากรูปที่ 4.5 4.6 และ 4.7 พบว่าทั้งบริเวณฟิล์มชั้นนอก ฟิล์มชั้นใน และบริเวณเนื้อเหล็กกล้า ที่ได้จากเทคนิค EDS มีองค์ประกอบของธาตุออกซิเจน และเหล็กดังตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของธาตุออกซิเจน และเหล็กที่ได้จากเทคนิค EDS บริเวณฟิล์มชั้นนอก ฟิล์มชั้นใน และเนื้อเหล็กของชิ้นงานที่ได้จากการเคลือบผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตร

Element	Fe (% weight)	O (% weight)	อัตราส่วนของ Fe:O (ที่ทำการปรับค่า)
ฟิล์มชั้นนอก	49.95	22.44	1 : 0.45
ฟิล์มชั้นใน	37.43	1.05	1 : 0.03
เนื้อเหล็ก	87.41	0.00	1 : 0.00

วิเคราะห์ข้อมูลจากตารางที่ 4.1 จะพบว่า บริเวณฟิล์มชั้นนอกมีปริมาณธาตุออกซิเจน เท่ากับร้อยละ 22.44 โดยน้ำหนัก บริเวณฟิล์มชั้นในมีปริมาณออกซิเจน เท่ากับร้อยละ 1.05 โดย น้ำหนัก และที่บริเวณเนื้อเหล็กมีปริมาณออกซิเจน เท่ากับร้อยละ 0.00 โดยน้ำหนัก จากนั้นทำการ ปรับค่า (Normalization) เพื่อหาอัตราส่วนของปริมาณเหล็กต่อปริมาณออกซิเจน (Fe : O) พบว่าที่ บริเวณฟิล์มชั้นนอก มีอัตราส่วนของ Fe : O เท่ากับ 1 : 0.45 ที่บริเวณฟิล์มชั้นใน มีอัตราส่วนของ Fe : O เท่ากับ 1 : 0.03 และที่บริเวณเนื้อเหล็กมีอัตราส่วนของ Fe : O เท่ากับ 1 : 0.00 จะเห็นว่ามี ปริมาณออกซิเจนลดลงที่บริเวณฟิล์มชั้นใน และมีปริมาณออกซิเจนมากที่สุดที่บริเวณฟิล์มชั้นนอก

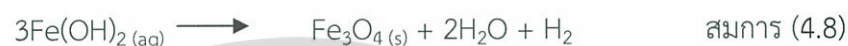
จากข้อมูลข้างต้นจะอธิบายได้ว่าบริเวณที่มีออกซิเจนมาก จะมีโอกาสเกิดเป็นสารประกอบใน รูปออกไซด์ของเหล็กได้มากขึ้น อธิบายได้ด้วยสมการดังนี้



จากสมการที่ 4.1 เมื่อเหล็ก 1 โมล ทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจน 1/2 โมล จะเกิดเป็น สารประกอบเหล็กออกไซด์ในรูป FeO เมื่อแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้นเป็น 2 โมล ดังสมการที่ 4.2 ทำ ปฏิกิริยากับเหล็ก 3 โมล จะเกิดเป็นสารประกอบเหล็กออกไซด์ในรูปแมกนีไทต์ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ แก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้นเป็น 3 โมล แล้วทำปฏิกิริยากับเหล็ก 4 โมล จะเกิดเป็นสารประกอบเหล็ก ออกไซด์ในรูปฮีมาไทต์ (Fe₂O₃) ซึ่งจะเห็นว่าฟิล์มที่เราต้องการจากการรมดำ คือ เป็นสารประกอบ เหล็กออกไซด์ในรูปแมกนีไทต์

กระบวนการเกิดฟิล์มสามารถอธิบายได้โดยขั้นตอนแรกจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน แล้วแตกตัวให้ OH⁻ ดังสมการที่ 4.4 และยังมี OH⁻ ที่มาจากการแตกตัวของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ เป็นสารละลายในการเคลือบผิวชิ้นงานเหล็กด้วยการรมดำ ซึ่งทำปฏิกิริยากับเหล็กไอออน (Fe²⁺) เกิด เป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์ (II) ไฮดรอกไซด์ (Fe(OH)₂) ดังสมการที่ 4.5 ซึ่งสารประกอบ Fe(OH)₂ นี้จะ เป็นฟิล์มที่มีความเสถียรซึ่งสามารถช่วยป้องกันการกัดกร่อนจากสารละลายได้ แต่สารประกอบ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fe(OH)_2 นี้ยังสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่มีอยู่ในสารละลายและน้ำเกิดเป็นสารประกอบ Fe(OH)_3 ดังสมการที่ 4.6



เนื่องจากสารประกอบไอร์ออน (III) ไฮดรอกไซด์ไม่มีความเสถียรเนื่องจากสามารถเกิดเป็นสารประกอบ Fe_2O_3 หรือสนิมเหล็กบนผิววัสดุได้ถ้ามีออกซิเจนพบมาก จึงทำการเติมสารเติมแต่ง คือ ไฮดรอกซีไฮเดรต เพื่อกำจัดออกซิเจนออกจากกระบวนการ

4.2 อิทธิพลของไฮดรอกซีไฮเดรต และไอร์ออน (II) ซัลเฟต

จากการศึกษาอิทธิพลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าที่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตร มีความหนาของชั้นฟิล์มมากที่สุด จึงทำการเติมสารเติมแต่งเพื่อทำให้ชั้นฟิล์มมีความเสถียรมากขึ้น (เกิดฟิล์มแมกนีไทต์ได้มากขึ้น) โดยทำการเติมไฮดรอกซีไฮเดรตในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 2.5 และ 10 เท่าของไฮดรอกซีไฮเดรตที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับออกซิเจนในน้ำกลั่น ได้ผลดังนี้

4.2.1 ไฮดรอกซีลีนที่ความเข้มข้น 2 5 และ 10 เท่าของไฮดรอกซีลีนที่ทำปฏิกิริยาพอลิกับ ออกซิเจนในน้ำกลั่น

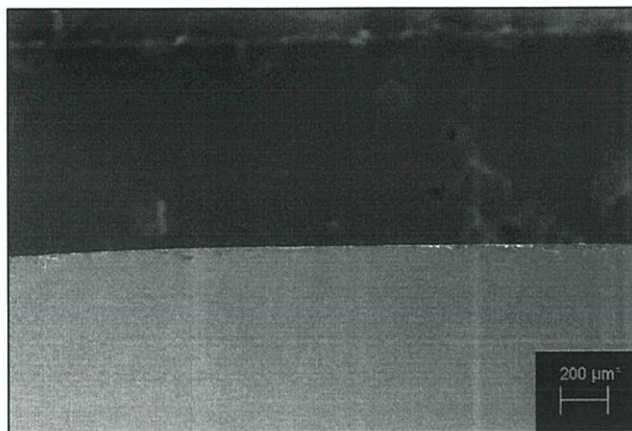


รูปที่ 4.8 ภาพตัดขวางของชิ้นงานที่ได้จากการรมดำด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตร กับไฮดรอกซีลีนไฮเดรต เข้มข้น 2 เท่า (5.6 ไมโครลิตร) โดยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ 4.9 ภาพตัดขวางของชิ้นงานที่ได้จากการรมดำด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตร กับไฮดรอกซีลีนไฮเดรต เข้มข้น 5 เท่า (13.9 ไมโครลิตร) โดยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



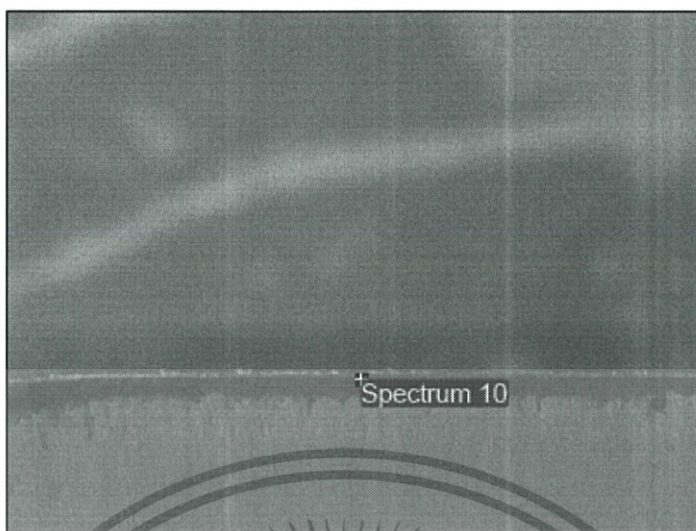
รูปที่ 4.10 ภาพตัดขวางของชั้นงานที่ได้จากการรมดำด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตร กับไฮดราซีนไฮเดรต เข้มข้น 10 เท่า (27.8 ไมโครลิตร) โดยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า

จากภาพตัดขวางของชั้นงานที่ได้จากการเคลือบผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตร กับไฮดราซีนไฮเดรต เข้มข้น 2.5 และ 10 เท่า จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮดราซีนไฮเดรตมากขึ้นจะส่งผลทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มเพิ่มขึ้นโดยที่ไฮดราซีนความเข้มข้น 2.5 และ 10 เท่า มีความหนาเฉลี่ย 17.5 32.5 และ 35.0 ไมโครเมตร ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อเพิ่มไฮดราซีนไฮเดรตเข้าไป ไฮดราซีนไฮเดรตจะเป็นตัวไปจับออกซิเจนทำให้ออกซิเจนในระบบลดลง ส่งผลทำให้เกิดสารประกอบออกไซด์ในรูปแบบแมกนีไทต์ (Fe_3O_4) มากขึ้น ทำให้ชั้นฟิล์มมีความหนาเพิ่มขึ้น [25-27]

ดังนั้นพบว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตรกับไฮดราซีนไฮเดรต เข้มข้น 5 และ 10 เท่าให้ค่าความหนาของชั้นฟิล์มจากการรมดำไม่ต่างกันมาก จึงเลือกใช้สูตรการรมดำ ที่มีไฮดราซีนไฮเดรตจำนวน 5 เท่า เพื่อการทดลองในลำดับถัดไป และนำชั้นงานที่รมดำได้จากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตรกับไฮดราซีนไฮเดรต เข้มข้น 5 เท่า ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS เพื่อหาองค์ประกอบของธาตุในชั้นงาน โดยทำการตรวจวัด 3 บริเวณคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บริเวณฟิล์มชั้นนอก



รูปที่ 4.11 แสดงตำแหน่งที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS ที่บริเวณฟิล์มชั้นนอกโดยเทคนิค SEM

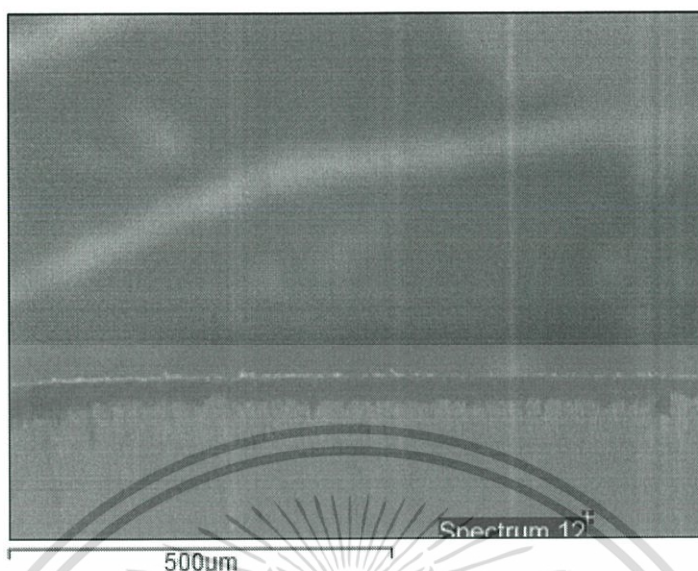
2. บริเวณฟิล์มชั้นใน



รูปที่ 4.12 แสดงตำแหน่งที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS ที่บริเวณฟิล์มชั้นในโดยเทคนิค SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. บริเวณเนื้อเหล็ก



รูปที่ 4.13 แสดงตำแหน่งที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS ที่บริเวณเนื้อเหล็กกล้าโดยเทคนิค SEM

จากรูปที่ 4.11 4.12 และ 4.13 พบว่าทั้งบริเวณฟิล์มชั้นนอก ฟิล์มชั้นใน และบริเวณเนื้อเหล็กกล้า ที่ได้จากเทคนิค EDS มีองค์ประกอบของธาตุออกซิเจน และเหล็กดังตารางที่ 4.2

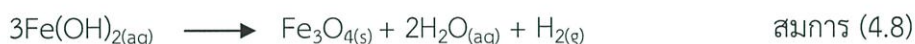
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบของธาตุออกซิเจน และเหล็กที่ได้จากเทคนิค EDS บริเวณฟิล์มชั้นนอก ฟิล์มชั้นใน และเนื้อเหล็กของชิ้นงานที่ได้จากการเคลือบผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตร กับไฮดรอกซีนไฮเดรต เข้มข้น 5 เท่าของไฮดรอกซีนที่ทำปฏิกิริยาพอลิกับออกซิเจนในน้ำกลั่น

Element	Fe (% weight)	O (% weight)	อัตราส่วนของ Fe : O (ที่ทำการปรับค่า)
ฟิล์มชั้นนอก	51.49	2.05	1 : 0.04
ฟิล์มชั้นใน	37.57	2.24	1 : 0.06
เนื้อเหล็ก	86.88	0.40	1 : 0.005

วิเคราะห์ข้อมูลจากตารางที่ 4.2 จะพบว่า ที่บริเวณฟิล์มชั้นนอกมีปริมาณธาตุออกซิเจน เท่ากับร้อยละ 2.05 โดยน้ำหนัก และบริเวณฟิล์มชั้นในมีปริมาณออกซิเจน เท่ากับร้อยละ 2.24 โดยน้ำหนัก และที่บริเวณเนื้อเหล็กมีปริมาณออกซิเจน เท่ากับร้อยละ 0.40 โดยน้ำหนัก จากนั้นทำการปรับค่า (Normalization) เพื่อหาอัตราส่วนของปริมาณเหล็กต่อปริมาณออกซิเจน (Fe : O) พบว่าที่บริเวณฟิล์มชั้นนอก มีอัตราส่วนของ Fe : O เท่ากับ 1 : 0.04 ที่บริเวณฟิล์มชั้นใน มีอัตราส่วนของ Fe : O เท่ากับ 1 : 0.06 ซึ่งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ และที่บริเวณเนื้อเหล็กมีอัตราส่วนของ Fe : O เท่ากับ 1 : 0.0005

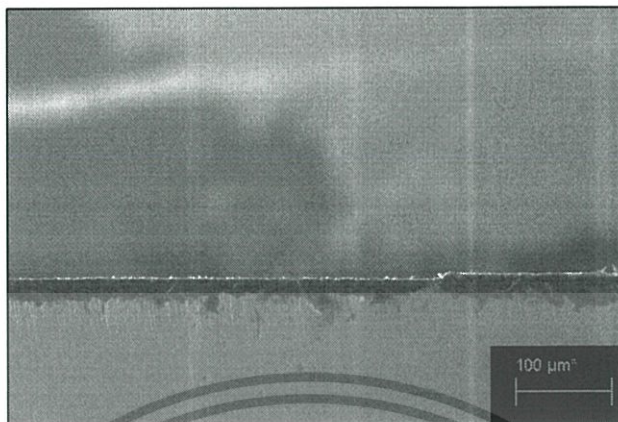
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกระบวนการการเกิดฟิล์มที่อธิบายข้างต้นเมื่อเติมสารเติมแต่งคือ ไฮดรอกซีไฮดรอกไซด์ ซึ่งทำหน้าที่กำจัดออกซิเจนในระบบ ซึ่งมีส่วนช่วยยับยั้งในปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบไฮดรอกไซด์ (III) ไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) ดังสมการที่ 4.7 ดังนั้นบริเวณชั้นฟิล์มที่เติมสารเติมแต่งจึงมีแต่สารประกอบ $\text{Fe}(\text{OH})_2$ และเมื่อสารประกอบนี้เกิดการสูญเสียน้ำเกิดเป็นเหล็กออกไซด์ (Magnetite, Fe_3O_4) ซึ่งเรียกว่า ปฏิกิริยา Schikorr ดังสมการที่ 4.8



จากการศึกษาอิทธิพลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ กับสารเติมแต่งชนิดที่หนึ่งคือ ไฮดรอกซีไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2, 5 และ 10 เท่าของไฮดรอกซีไฮดรอกไซด์ ที่ทำปฏิกิริยาพอกดีกับออกซิเจนในน้ำกลั่น พบว่าที่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตร กับไฮดรอกซีไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 5 เท่า และ 10 เท่า มีความหนาของชั้นฟิล์มที่หนามากที่สุดใกล้เคียงกัน จึงเลือกใช้ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตร กับไฮดรอกซีไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 5 เท่า เพื่อลดค่าใช้จ่ายสารเคมี แต่เนื่องด้วยชั้นฟิล์มที่ได้จากการรมดำในสารละลายนี้ ชั้นฟิล์มไม่สม่ำเสมอ ดังนั้น จึงทำการเติมสารเติมแต่งชนิดที่สอง เพื่อให้ชั้นฟิล์มมีความเสถียรมากขึ้น (เกิดฟิล์มแมกนีไทต์ได้มากขึ้น) โดยทำการเติมไฮดรอกไซด์ (II) ซัลเฟต ลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตร กับไฮดรอกซีไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 5 เท่าของไฮดรอกซีไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 3 และ 5 ของงานวิจัยที่อ้างอิง ได้ผลดังนี้

4.2.2 ไฮดรอกซีลที่ความเข้มข้น 5 เท่าของไฮดรอกซีลที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับออกซิเจนในน้ำ
กลั่นกับไอร์ออน (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 3 และ 5 เท่าของงานวิจัยที่อ้างอิง



รูปที่ 4.14 ภาพตัดขวางของชั้นงานที่ได้จากการรมดำด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
เข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตร กับไฮดรอกซีลไฮเดรตเข้มข้น 5 เท่า (13.9 ไมโครลิตร) และ
ไอร์ออน (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 3 เท่าของงานวิจัยที่อ้างอิง โดยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย
500 เท่า



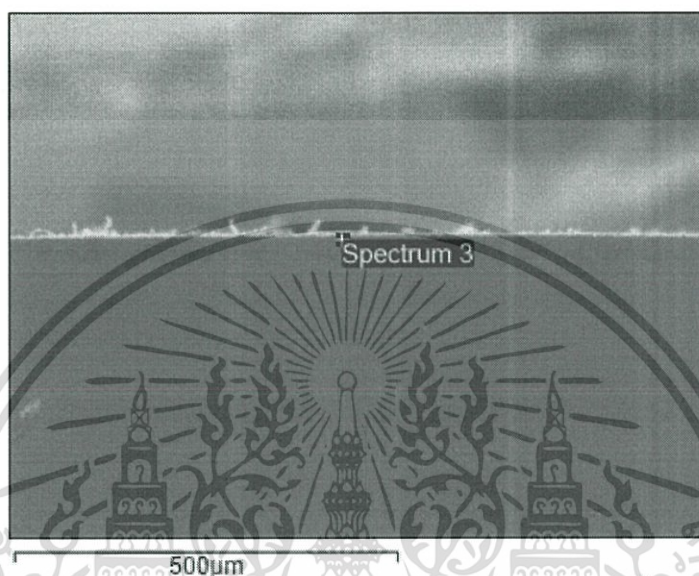
รูปที่ 4.15 ภาพตัดขวางของชั้นงานที่ได้จากการรมดำด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
เข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตร กับไฮดรอกซีลไฮเดรตเข้มข้น 5 เท่า (13.9 ไมโครลิตร) และ
ไอร์ออน (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 5 เท่าของงานวิจัยที่อ้างอิง โดยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย
500 เท่า

จากภาพตัดขวางของชั้นงานที่ได้จากการเคลือบผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
เข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตร กับไฮดรอกซีลไฮเดรตเข้มข้น 5 เท่า และไอร์ออน (II) ซัลเฟตที่ความ
เข้มข้น 3 และ 5 เท่าของงานวิจัยที่อ้างอิง โดยที่ไอร์ออน (II) ซัลเฟตเข้มข้น 3 และ 5 เท่า มีความ
หนาเฉลี่ย 35.3 และ 36.7 ไมโครเมตร ตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ
ไอร์ออน (II) ซัลเฟตเพิ่มขึ้น จะส่งผลต่อความหนาของชั้นฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

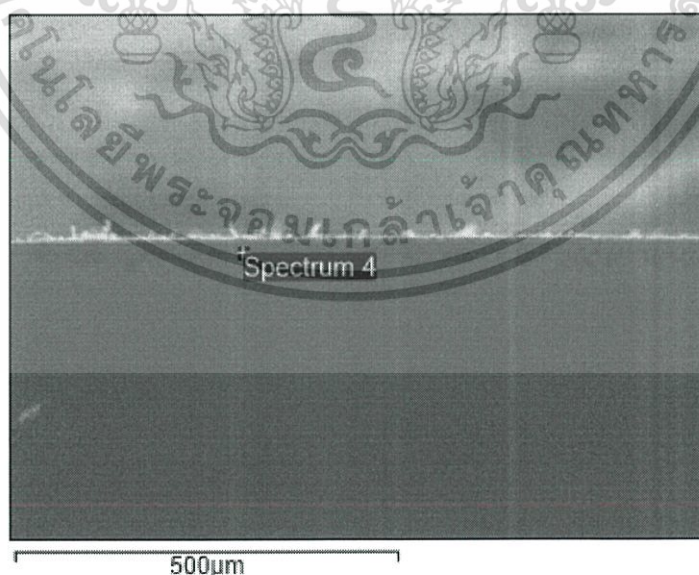
พบว่า เมื่อเติมไอร์ออน (II) ซัลเฟตจะส่งผลให้มีค่าความหนาของชั้นฟิล์มออกไซด์ที่ได้จากการรมดำที่ได้ไม่ต่างกันมาก ที่ความเข้มข้น 3 และ 5 เท่าของงานวิจัยที่อ้างอิง แต่ที่ความเข้มข้นของไอร์ออน (II) ซัลเฟต ให้ชั้นความหนาของชั้นฟิล์มที่หนาที่สุด จึงได้นำไปตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS เพื่อหาค่าประกอบของธาตุในชิ้นงาน โดยทำการตรวจวัด 3 บริเวณคือ

1.บริเวณฟิล์มชั้นนอก



รูปที่ 4.16 แสดงตำแหน่งที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS ที่บริเวณฟิล์มชั้นนอกโดยเทคนิค SEM

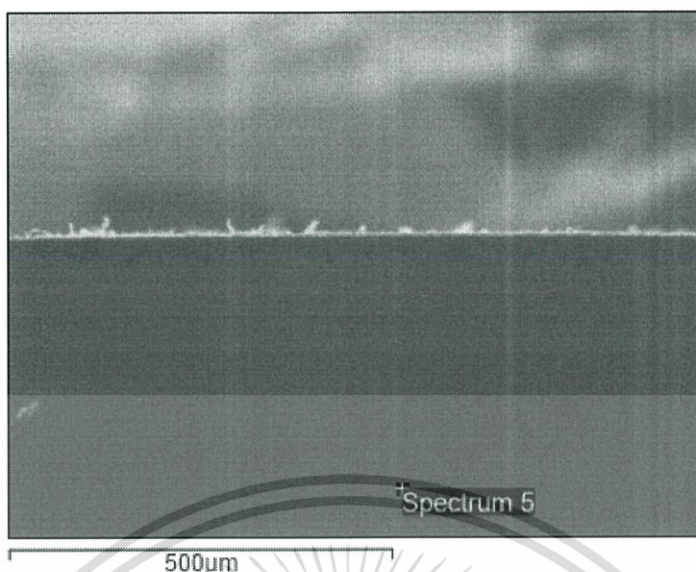
2.บริเวณฟิล์มชั้นใน



รูปที่ 4.17 แสดงตำแหน่งที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS ที่บริเวณฟิล์มชั้นในโดยเทคนิค SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. บริเวณเนื้อเหล็ก



รูปที่ 4.18 แสดงตำแหน่งที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค EDS ที่บริเวณเนื้อเหล็กกล้าโดยเทคนิค SEM

จากรูปที่ 4.16 4.17 และ 4.18 พบว่าทั้งบริเวณฟิล์มชั้นนอก ฟิล์มชั้นใน และบริเวณเนื้อเหล็กกล้า ที่ได้จากเทคนิค EDS มีองค์ประกอบของธาตุออกซิเจน และเหล็กดังตารางที่ 4.3

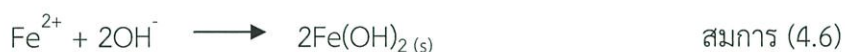
ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของธาตุออกซิเจน และเหล็กที่ได้จากเทคนิค EDS บริเวณฟิล์มชั้นนอก ฟิล์มชั้นใน และเนื้อเหล็กของชิ้นงานที่ได้จากการเคลือบผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตร กับไฮดรอกซีนไฮเดรต เข้มข้น 5 เท่าของไฮดรอกซีนที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับออกซิเจนในน้ำกลั่น และไอรอน (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 5 เท่าของงานวิจัยที่อ้างอิง

Element	Fe (% weight)	O (% weight)	อัตราส่วนของ Fe : O (ที่ทำการปรับค่า)
ฟิล์มชั้นนอก	74.84	0.83	1 : 0.01
ฟิล์มชั้นใน	47.19	1.62	1 : 0.03
เนื้อเหล็ก	78.00	0.46	1 : 0.005

วิเคราะห์ข้อมูลจากตารางที่ 4.3 จะพบว่า บริเวณฟิล์มชั้นนอกมีปริมาณธาตุออกซิเจน เท่ากับร้อยละ 0.83 โดยน้ำหนัก บริเวณฟิล์มชั้นในมีปริมาณออกซิเจน เท่ากับร้อยละ 1.62 โดยน้ำหนัก และที่บริเวณเนื้อเหล็กมีปริมาณออกซิเจน เท่ากับร้อยละ 0.46 โดยน้ำหนัก จากนั้นทำการปรับค่า (Normalization) เพื่อหาอัตราส่วนของปริมาณเหล็กต่อปริมาณออกซิเจน (Fe : O) พบว่าที่บริเวณฟิล์มชั้นนอก มีอัตราส่วนของ Fe : O เท่ากับ 1 : 0.01 ที่บริเวณฟิล์มชั้นใน มีอัตราส่วนของ Fe : O เท่ากับ 1 : 0.03 และที่บริเวณเนื้อเหล็กมีอัตราส่วนของ Fe : O เท่ากับ 1 : 0.0005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลข้างต้นจะอธิบายได้ว่า เมื่อเติมไฮดรอกไซด์ (II) ซัลเฟตเพิ่มขึ้นส่งผลให้มีเหล็กไอออนมากขึ้นในระบบ ทำให้โอกาสที่จะเกิดชั้นฟิล์มก็ยิ่งมากขึ้น เนื่องจากเมื่อเหล็กไอออนมากขึ้นก็จะสามารถทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ในสารละลายเบสได้มากขึ้นทำให้เกิดเป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์ (II) ไฮดรอกไซด์และไฮดรอกไซด์ (III) ไฮดรอกไซด์มากขึ้น ส่งผลทำให้ชั้นฟิล์มหนา และสม่ำเสมอมากขึ้นนั่นเอง ดังสมการ 4.6



สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตร กับไฮดรอกไซด์ไฮเดรต เข้มข้น 5 เท่า และไฮดรอกไซด์ (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 5 เท่าของงานวิจัยที่อ้างอิง ในการรรมด้าแบบร้อน เป็นสูตรที่เหมาะสมที่สุด ดังนั้นจึงทำการวัดอัตราการกัดกร่อนของชั้นฟิล์มของชิ้นงานในลำดับต่อไป

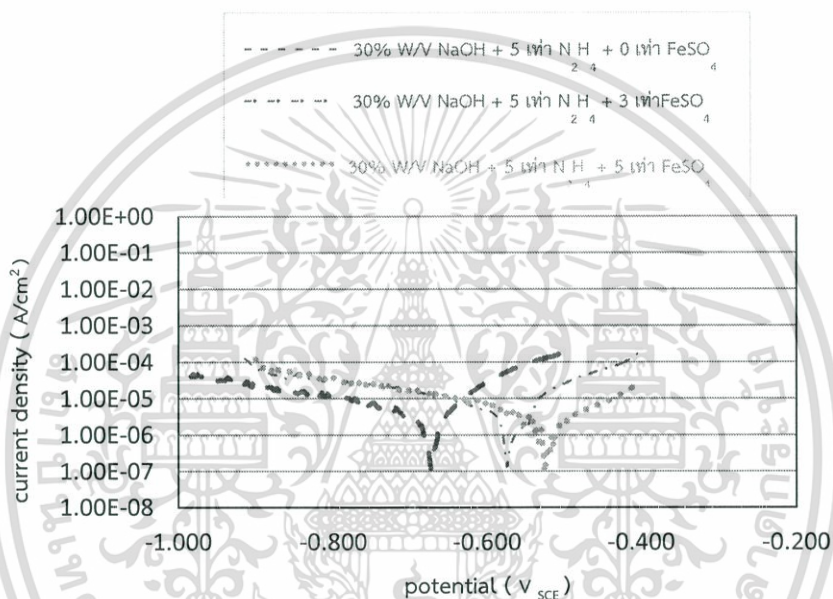


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการทดลองการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กกล้าชนิด S50C โดยการเคลือบผิวด้วยวิธีการธรรมดาแบบร้อน

จากการศึกษาอิทธิพลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาณ กับไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 5 เท่าของไฮดรอกไซด์ที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับออกซิเจนในน้ำกลั่น และไอร์ออน (II) ซัลเฟต ที่ความเข้มข้น 3 และ 5 เท่าของงานวิจัยที่อ้างอิง พบว่าความหนาของชั้นฟิล์มมีค่าใกล้เคียงกัน จึงทำการวัดอัตราการกัดกร่อนเพื่อตรวจสอบความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อน

4.3.1 ผลของไอร์ออน (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0 3 และ 5 เท่าของงานวิจัยที่อ้างอิง



รูปที่ 4.19 กราฟโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันของเหล็กกล้าที่ผ่านการธรรมดาโดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตรกับไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 5 เท่า และ ไอร์ออน (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0 3 และ 5 เท่าของงานวิจัยที่อ้างอิง ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5% โดยมวลต่อปริมาตร

จากรูปที่ 4.19 เป็นกราฟที่มาจากการใช้ไอร์ออน (II) ซัลเฟตเพื่อเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าชนิด S50C ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5% พบว่าจากกราฟสามารถหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของการกัดกร่อน (i_{corr}) และค่าอัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate) แสดงดังตารางที่ 4.4

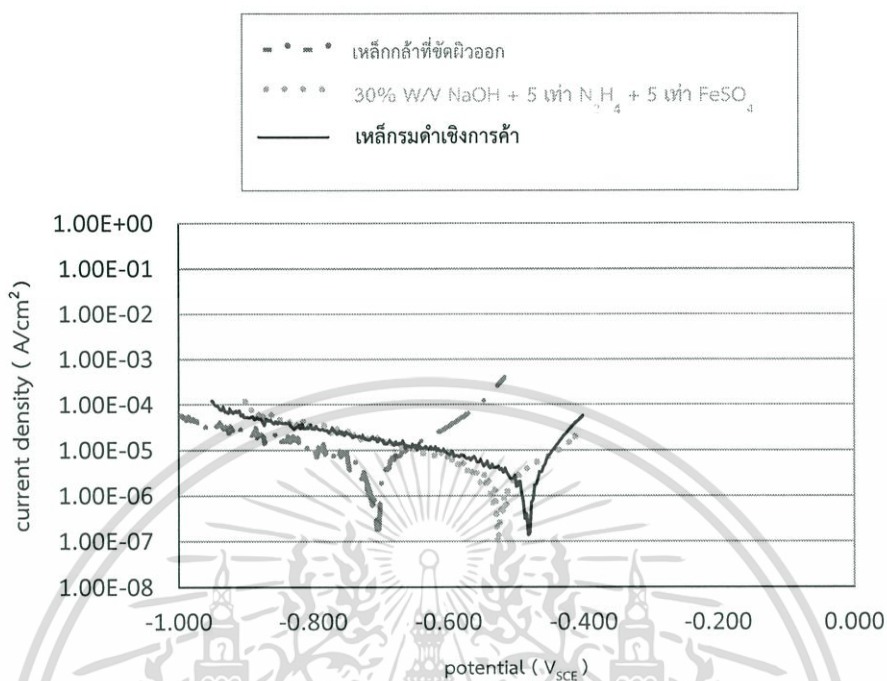
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr})

ชิ้นงาน	E_{corr} (V _{SCE})	i_{corr} (A/cm ²)	Corrosion rate (mm/year)
30% w/v NaOH + 5 เท่า N ₂ H ₄ + 0 เท่า FeSO ₄	-0.674	3.91×10^{-6}	4.40×10^{-2}
30% w/v NaOH + 5 เท่า N ₂ H ₄ + 3 เท่า FeSO ₄	-0.577	3.47×10^{-6}	4.00×10^{-2}
30% w/v NaOH + 5 เท่า N ₂ H ₄ + 5 เท่า FeSO ₄	-0.523	2.21×10^{-6}	2.50×10^{-2}

จากรูปที่ 4.19 และตารางที่ 4.4 พบว่าเมื่อเติมไฮดรอกไซด์ไอออน (II) ซัลเฟต เข้มข้น 0 3 และ 5 เท่า จะเห็นว่าค่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อน (E_{corr}) ซึ่งมีแนวโน้มใกล้เคียงกันคือ -0.674 -0.577 และ -0.523 V ตามลำดับ และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) มีแนวโน้มลดลงจาก 3.91×10^{-6} เป็น 3.47×10^{-6} และ 2.21×10^{-6} A/cm² ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อเติมไฮดรอกไซด์ไอออน (II) ซัลเฟตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดสารประกอบไฮดรอกไซด์ไอออน (II) ไฮดรอกไซด์ไอออนบนพื้นผิวเหล็กซึ่งมีความหนาและความสม่ำเสมอมากขึ้น [20,21-26] ทำให้เหล็กกล้า S50C ที่ถูกเคลือบผิวมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น [31] ทำให้สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีขึ้น

เมื่อพิจารณาการเติมไฮดรอกไซด์ไอออน (II) ซัลเฟต พบว่าค่าอัตราการกัดกร่อนมีแนวโน้มลดลงจาก 4.40×10^{-2} เป็น 4.00×10^{-2} และ 2.50×10^{-2} mm/year สำหรับการเพิ่มขึ้นของไฮดรอกไซด์ไอออน (II) ซัลเฟต 3 และ 5 เท่าตามลำดับ แสดงว่าความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน (II) ซัลเฟตเพิ่มขึ้น ทำให้ความต้านทานการกัดกร่อนเพิ่มมากขึ้นโดยไฮดรอกไซด์ไอออน (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 5 เท่าจะให้ค่าความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้า S50C มากที่สุดในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5% โดยมวลต่อปริมาตร

4.3.2 ผลของเหล็กกรรมดำที่ขัดผิวออกกับไอร์ออน (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 5 เท่าของงานวิจัย และเหล็กกรรมดำเชิงการค้า



รูปที่ 4.20 กราฟโพเทนซีโอไดนามิกโพลาริเซชันของเหล็กกรรมดำที่ขัดผิวออกและเหล็กที่ผ่านการรมดำโดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 30% โดยมีมวลต่อปริมาตรกับไฮดราซีนไฮเดรต เข้มข้น 5 เท่า และ ไอร์ออน (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 5 เท่าของงานวิจัยที่อ้างอิง เปรียบเทียบกับเหล็กกรรมดำเชิงการค้า ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5% โดยมีมวลต่อปริมาตร

จากรูปที่ 4.20 สามารถหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของการกัดกร่อน (i_{corr}) และค่าอัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate) แสดงดังตารางที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr})

ชิ้นงาน	E_{corr} (V _{SCE})	i_{corr} (A/cm ²)	Corrosion rate (mm/year)
เหล็กกล้าที่ขัดผิวออก	-0.711	4.45×10^{-6}	5.20×10^{-2}
5 เท่า FeSO ₄ + N ₂ H ₄ + NaOH	-0.523	2.21×10^{-6}	2.50×10^{-2}
เหล็กกล้าเชิงการค้า	-0.479	2.75×10^{-6}	3.20×10^{-2}

จากรูปที่ 4.21 และตารางที่ 4.5 โดยเปรียบเทียบเหล็กกล้าที่ขัดผิวออกกับการรมดำโดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตรกับไฮดราซีนไฮเดรต เข้มข้น 5 เท่า และ ไอร์รอน (II) ซัลเฟต ที่ความเข้มข้น 5 เท่าของงานวิจัยที่อ้างอิงและเหล็กกล้าเชิงการค้า ค่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อน (E_{corr}) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก -0.711 เป็น -0.523 และ -0.479 V ตามลำดับ และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) มีค่าต่างกันคือ 4.45×10^{-6} , 2.21×10^{-6} และ 2.75×10^{-6} A/cm² ตามลำดับจะเห็นว่าเหล็กกล้าที่ขัดผิวออกมีค่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อน (E_{corr}) น้อยกว่าเหล็กกล้าที่ผ่านการรมดำ และพบว่าเหล็กกล้าที่ขัดผิวออกมีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าของการกัดกร่อน (i_{corr}) มากกว่าเหล็กกล้าที่ผ่านการรมดำ จึงจะกล่าวได้ว่าเหล็กกล้าที่ผ่านการรมดำ จะมีความต้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่าเหล็กกล้าที่ขัดผิวออกและเมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กที่ผ่านการรมดำกับเหล็กกล้าเชิงการค้า จะพบว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กที่ผ่านการรมดำมีค่าน้อยกว่าเหล็กกล้าเชิงการค้าเล็กน้อย แสดงว่าเหล็กที่ผ่านการรมดำจะสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีกว่าเหล็กกล้าเชิงการค้า

เมื่อพิจารณาอัตราการกัดกร่อน พบว่ามีแนวโน้มลดลงจาก 5.20×10^{-2} เป็น 2.50×10^{-2} และ 3.20×10^{-2} mm/year ตามลำดับ พบว่าเหล็กที่ผ่านการรมดำโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตร กับไฮดราซีนไฮเดรตที่ความเข้มข้น 5 เท่าและไอร์รอน (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 5 เท่าของงานวิจัยที่อ้างอิงซึ่งเป็นสูตรที่ดีที่สุดที่มีอัตราการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5% โดยมวล ต่ำกว่าเหล็กที่ถูกเคลือบผิวเชิงการค้าเล็กน้อย

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการป้องกันการกัดกร่อนด้วยวิธีการเคลือบผิวด้วยการรมดำ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น สีที่ผิวของเหล็กที่ผ่านการรมดำจะเข้มขึ้น โดยที่ความเข้มข้น 10% โดยมวลต่อปริมาตรจะให้สีจางที่สุด และความเข้มข้น 30% โดยมวลต่อปริมาตรจะให้สีเข้มที่สุด

2. เมื่อนำเหล็กที่ทำการรมดำไปทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดินามิกโพลาริเซชัน พบว่าเหล็กกล้าที่ถูกเคลือบผิวด้วยการรมดำโดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มขึ้น 30% โดยมวลต่อปริมาตร กับไฮดรอกซีไฮเดรต เข้มขึ้น 5 เท่า และ ไรร์ออน (II) ซัลเฟต ที่ความเข้มข้น 5 เท่าของงานวิจัยที่อ้างอิง จะมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนได้ดีที่สุด

3. เหล็กที่ผ่านการรมดำด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มขึ้น 30% โดยมวลต่อปริมาตร กับไฮดรอกซีไฮเดรต เข้มขึ้น 5 เท่า และ ไรร์ออน (II) ซัลเฟต เข้มขึ้น 5 เท่าของงานวิจัยที่อ้างอิงจะได้ฟิล์มที่มีคุณสมบัติในการป้องกันการกัดกร่อนดีกว่าเหล็กรมดำเชิงการค้าเล็กน้อย

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรทดสอบด้วยเทคนิคอื่นเช่น เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray-diffractometer, XRD) เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกของชั้นรมดำและควรดูลักษณะความขรุขระของพื้นผิวที่ทำการรมดำ หรือวัดความต้านทานของชิ้นงานด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] บริษัท ไทย-เยอรมันสเปเชียลสตีลเซ็นเตอร์ จำกัด. “Carbon Steel S50C”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://www.thyssenkruppmaterials.co.th/dmdocuments/s50c.pdf>
- [2] พิชิต เลี่ยมพิพัฒน์. “รมดำ”. พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพฯ:บริษัทสารมวลชน,2526
- [3] “กลไกการกัดกร่อน”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://www.scimath.org>
- [4] อุบลวรรณ ใต้ทอง. “ศัลยกรรมไฟฟ้าเครื่องเซลล์มาตรฐาน”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก http://www.ebook.mtk.ubon2.net/main/forum_posts.asp?TID=1591&PN=12553
- [5] มหาวิทยาลัยมหิดล, “ปฏิกิริยาการเกิดสนิม”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/electrochemistry/web/electrochem04.html>
- [6] วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ. “ปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้เกิดการผุกร่อนของโลหะ”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://sc.sci.rmutp.ac.th/sctank/appchem/wcs-metal.pdf>
- [7] สุธา สุทธิเรืองวงศ์. เอกสารประกอบการสอนวิชาหัวข้อที่น่าสนใจในอุตสาหกรรมเคมี (การกัดกร่อน). ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2554
- [8] วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ. “การป้องกันการผุกร่อนของโลหะและโลหะผสม”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://sc.sci.rmutp.ac.th/sctank/appchem/wcs-metal.pdf>
- [9] “การป้องกันแบบแคโทดิก”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://www.thaimp.co.th/index.php/th/2014-10-27-17-14-28>
- [10] คณาจารย์และนิสิต ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. “การชุบเคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อน”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก http://www.mic.eng.ku.ac.th/materials-resources-detail.php?id_sub=28&id=104
- [11] วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ. “การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating)”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://sc.sci.rmutp.ac.th/sctank/appchem/wcs-metal.pdf>
- [12] “การทำอะโนไดซ์ (Anodizing)”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://www.tcmetal2549.com>
- [13] “การรมดำ”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://www.amperemetal.com/black2.html>
- [14] N.Arab, M.Rahimi Nezhad Soltani. A Study of Coating Process of Cast Iron Blackening. Islamic Azad University, Saveh Branch, Saveh Iran, 2009
- [15] “Blackfast - Hot and cold blacking case study”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก www.blackfast.com/applications/study1.pdf

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[16] จักรพล แจนโกนต์ และสัญชัย รุ่งกิติกานต์. “เหล็กกล้าคาร์บอน”.

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://app.enit.kku.ac.th/mis/administrator/doc_upload/20100303135714.pdf

[17] บริษัท ไทย-เยอรมันสเปเชียลตีลเซ็นเตอร์ จำกัด. “Carbon Steel S50C”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก www.thyssenkruppmaterials.co.th/dmdocuments/s50c.pdf

[18] “การเตรียมผิวชิ้นงานก่อนชุบ”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก

<http://bsrithai.geol.science.cmu.ac.th/pdf/218382/3-ElectroplatingPDF-/4-surface%20prep.pdf>

[19] “การยิงทรายหรือการพ่นทราย”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก

<http://www.xn--72c6a5ace4gk.net/>

[20] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรวิสา วงศ์ปัญญา และคณะ. รายงานการวิจัยความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้า AISI 4140 ที่เคลือบผิวด้วยไอทางกายภาพ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2555

[21] Baodong Mao และคณะ. Synthesis of magnetite octahedrons from iron powders through a mil hydrothermal method. Materials research bulletin 41, 2007. หน้า 2226-2231

[22] K. Daub และคณะ. Oxide growth and conversion on carbon steel as a function of temperature over 25 and 80 °C under ambient pressure. Electrochimica acta 56, 2011. หน้า 6661-6672

[23] N. Arab, M. Rahimi Nezhad Soltani. A Study of Coating Process of Cast Iron Blackening. Journal of Applied Chemical Research 9, 2009. หน้า 13-23

[24] Toshihide Takenaka และคณะ. Improvement of Corrosion Resistance of Magnesium Alloys by Surface Film with Rare Earth Element. Materials Transactions Vol. 49 No. 5, 2008. หน้า 1071-1076

[25] P.C. Mayan และคณะ. Decomposition of hydrazine in preserved boilers. Issued as technical report no. SWC CRDC-27, 1993

[26] Farshad Farahbod. Investigations to find appropriate range of pH and a new replacement for hydrazine to protect corrosion in steam-tanks of petrochemical industries. Engineering failure analysis 22, 2012. หน้า 38-49

[27] Michael A. Brenner. How steam system chemistry and control affect steam side coil corrosion. Wester dry kiln association, 2004

[28] Hongliang Zhu และคณะ. A new hydrothermal blackening technology for Fe₃O₄ coatings of carbon steel. Applied surface science 254, 2008. หน้า 5905-5909

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [29] A.K. Gupta, M. Gupta. Synthesis of magnetic iron oxide nanoparticles. Biomaterials 26, 2005. หน้า 3995-4021
- [30] Jie Chen และคณะ. Hydrothermal preparation of a protective Fe_3O_4 film on Fe foil. Corrosion science 50, 2008. หน้า 1982-1986
- [31] W. A. GHANEM และคณะ. The high temperature corrosion of a low alloy steel in aqueous sodium chloride. Corrosion science Vol.38 No.7, 1996. หน้า 1171-1186
- [32] Ximei Wang และคณะ. Effect of cerium additive on aluminum-based chemical conversion coating on AZ91D magnesium alloy. Applied surface science 280, 2013. หน้า 467-473
- [33] Se'bastien Pommiers และคณะ. Alternative conversion coatings to chromate for the protection of magnesium alloy. Corrosion science 84, 2014. หน้า 135-146
- [34] Se'bastien Pommiers-Belin และคณะ. Determination of the chemical mechanism of chromate conversion coating on magnesium alloys EV31A. Applied surface science 298, 2014. หน้า 199-207
- [35] ASTM international, Designation : G102-89, 2010. Standard practice for calculation of corrosion rates and related information from electrochemical measurements.
- [36] “การนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมของสารเติมแต่ง N,N-Diethylhydroxylamine”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://www.bomammonia.com/deha.htm>
- [37] “การนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมของสารเติมแต่ง Morpholine”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://en.wikipedia.org/wiki/Morpholine>
- [38] “การนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมของสารเติมแต่ง Hydrazine hydrate”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก http://www.chemicalbook.com/ProductChemicalPropertiesCB511046_1_EN.htm
- [39] “การนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมของสารเติมแต่ง Cyclohexylamine”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://en.wikipedia.org/wiki/Cyclohexylamine>
- [40] “การนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมของสารเติมแต่ง Carbohydrazide”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://www.thwater.net/09-Carbohydrazide.htm>
- [41] “การนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมของสารเติมแต่ง Iron (II) sulfate heptahydrate”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก http://en.wikipedia.org/wiki/Iron%28II%29_sulfate
- [42] “การนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมของสารเติมแต่ง Iron (II) chloride”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก [http://en.wikipedia.org/wiki/Iron\(II\)_chloride](http://en.wikipedia.org/wiki/Iron(II)_chloride)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[43] “การนำไปใช้ ในโรงงานอุตสาหกรรมของสารเติมแต่ง Iron (III) chloride”. [ออนไลน์].

เข้าถึงได้จาก [http://en.wikipedia.org/wiki/Iron\(III\)_chloride](http://en.wikipedia.org/wiki/Iron(III)_chloride)

[44] “ค่าความเป็นกรด-เบสในสารละลาย (pH) ที่มีโอกาสเกิดตะกอนสีขาวของไฮดรอกไซด์ (II) คลอไรด์”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก

<http://www.budmgt.com/tech/tech01/lime-property-in-water.html>

[45] พรวิสา วงศ์ปัญญา. “เทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชัน

(Potentiodynamic polarization)”. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2553 [ออนไลน์].

เข้าถึงได้จาก

<http://sutir.sut.ac.th:8080/sutir/bitstream/123456789/4039/1/Fulltext+SUT7-713-53-24-35.pdf>

[46] พรวิสา วงศ์ปัญญา. “การทดสอบการกัดกร่อนด้วยเครื่องโพเทนชิโอสเตท”. [ออนไลน์].

เข้าถึงได้จาก

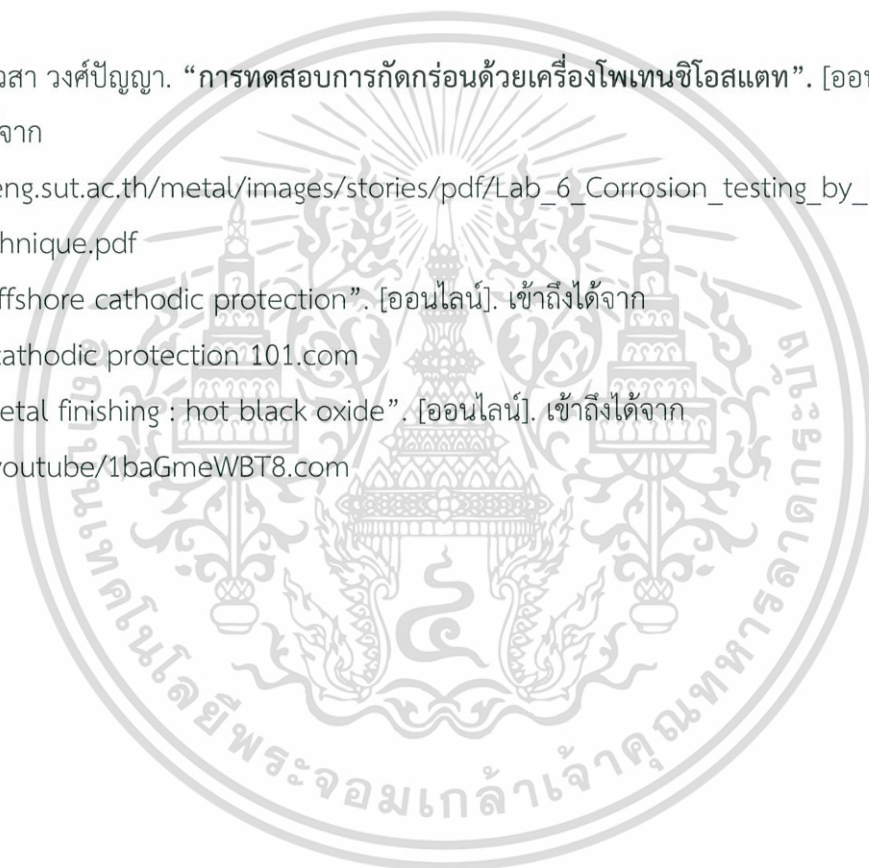
http://eng.sut.ac.th/metal/images/stories/pdf/Lab_6_Corrosion_testing_by_Potentiostatic_technique.pdf

[47] “Offshore cathodic protection”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก

<http://cathodicprotection101.com>

[48] “Metal finishing : hot black oxide”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก

<http://youtube/1baGmeWBT8.com>

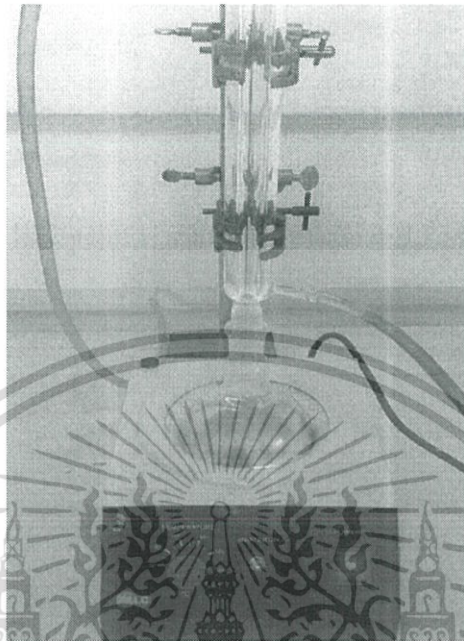


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

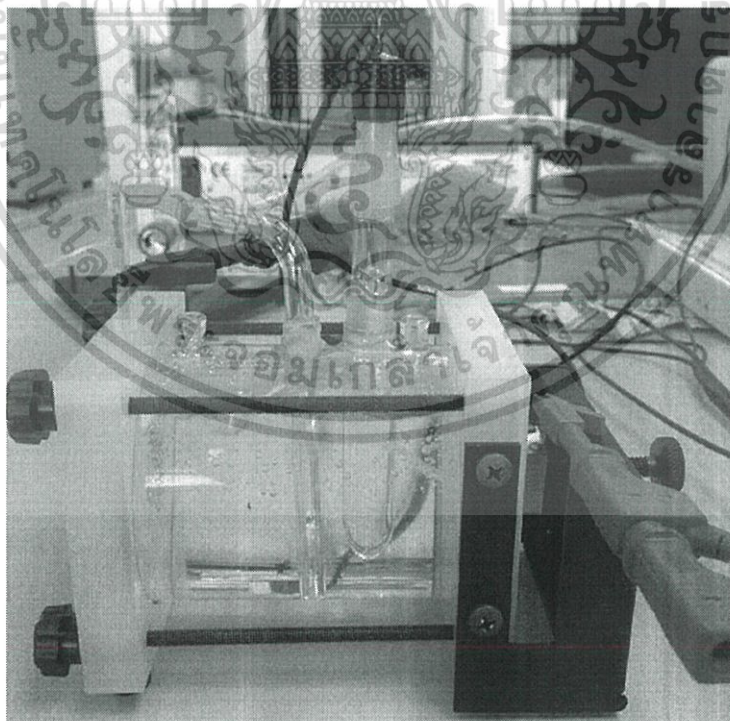


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก รูปภาพประกอบการทดลอง

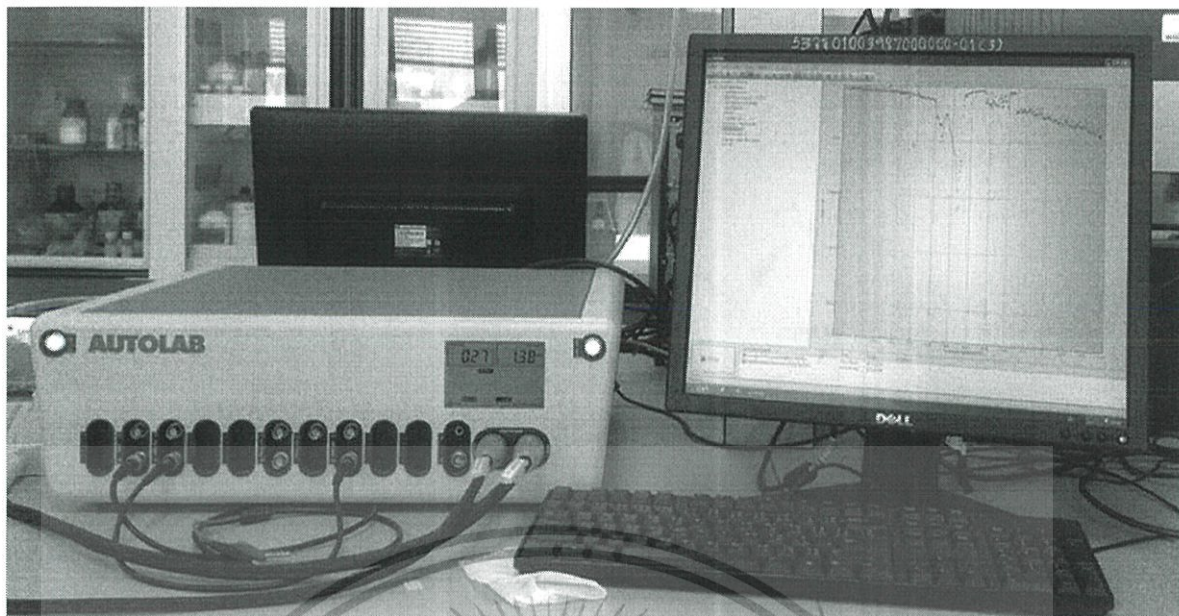


รูปที่ 1 การต้มชิ้นงาน ด้วยชุดรีฟลักซ์

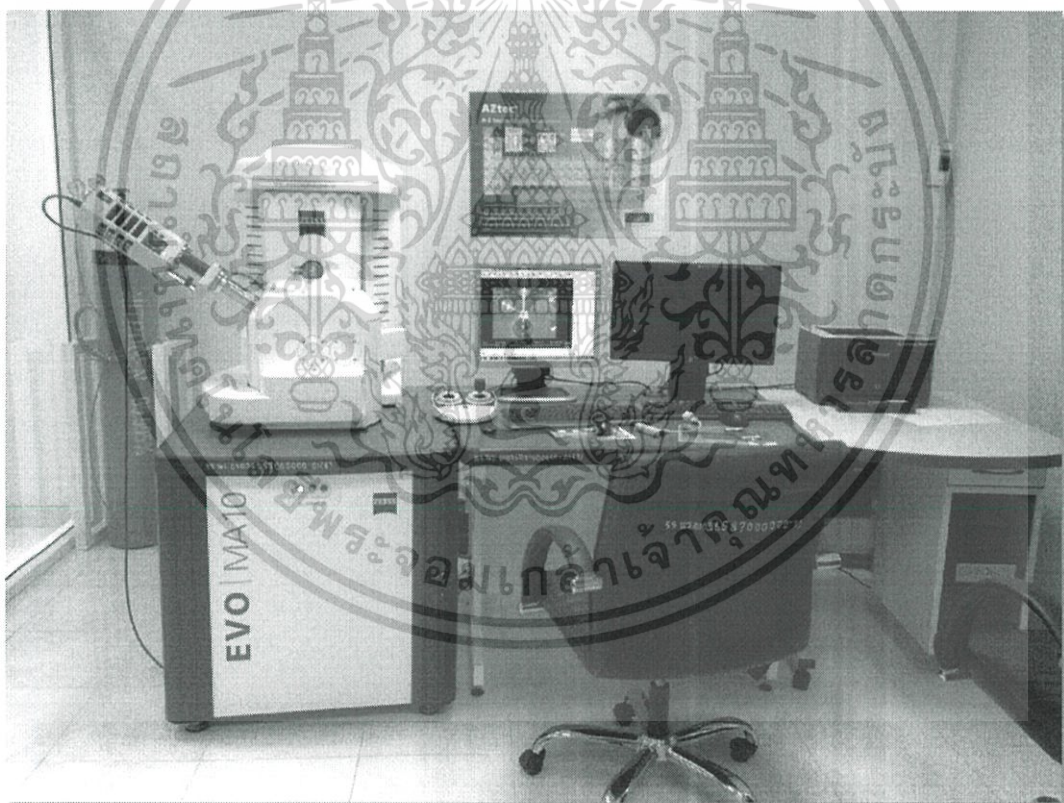


รูปที่ 2 การต่อขั้วตรวจวัดที่เซลล์ (Flat cell)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 เครื่องโพเทนชิโอสแตท



รูปที่ 4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(scanning electron microscopy, SEM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5 เครื่องวัดปริมาณออกซิเจนในน้ำ (Dissolved Oxygen Meter)



รูปที่ 6 เครื่องชั่งสาร 4 ตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข การคำนวณอัตราการกัดกร่อน

สามารถคำนวณอัตราการกัดกร่อน (CR) ได้จากสมการที่ 2.1 ตามมาตรฐาน ASTM G102 โดยกรณีที่เป็นโลหะผสมต้องหาค่าการเกิดออกซิเดชันต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนัก หรือค่าการสูญเสียอิเล็กตรอน (Q) ดังสมการที่ 2.2 เพื่อนำไปหาค่าน้ำหนักสมมูล (Equivalent weight, EW) ดังสมการที่ 2.3

$$CR = K_1 \frac{i_{corr}}{\rho} EW \quad (2.1)$$

$$Q = \sum \left(\frac{f_i n_i}{W_i} \right) \quad (2.2)$$

$$EW = \frac{1}{\sum \left(\frac{f_i n_i}{W_i} \right)} \quad (2.3)$$

โดยที่

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

ρ = ความหนาแน่น

W = มวลอะตอม

f = อัตราส่วนมวล

n = จำนวนสมมูล

จากสมการที่ 2.2 และ 2.3 สามารถนำมาแทนค่าหาอัตราการกัดกร่อนดังตัวอย่างของชิ้นงานเหล็กที่ไม่ได้มีการเคลือบผิวด้วยการรมดำซึ่งร้อยละของธาตุที่ผสมอยู่ในชิ้นงานเหล็กแสดงดังตารางที่ 2.2 สามารถแสดงการคำนวณดังต่อไปนี้

โดยที่	ร้อยละของเหล็ก	= 98.31
	ร้อยละของซิลเฟอร์	= 0.035
	ร้อยละของฟอสฟอรัส	= 0.03
	ร้อยละของซิลิคอน	= 0.4
	ร้อยละของแมงกานีส	= 0.75
	ร้อยละของคาร์บอน	= 0.475
	อัตราส่วนมวลของเหล็ก (f_{Fe})	= 0.98
	อัตราส่วนมวลของเหล็ก (f_S)	= 0.00035
	อัตราส่วนมวลของเหล็ก (f_P)	= 0.0030

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วนมวลของเหล็ก (f_{Si})	= 0.004
อัตราส่วนมวลของเหล็ก (f_{Mn})	= 0.0075
อัตราส่วนมวลของเหล็ก (f_C)	= 0.00475
จำนวนสมมูล ($n_{Fe}, n_S, n_P, n_{Si}, n_{Mn}, n_C$)	= 2
มวลอะตอมของเหล็ก (W_{Fe})	= 55.845 g/mol
มวลอะตอมของเหล็ก (W_S)	= 32.06 g/mol
มวลอะตอมของเหล็ก (W_P)	= 30.9737 g/mol
มวลอะตอมของเหล็ก (W_{Si})	= 28.085 g/mol
มวลอะตอมของเหล็ก (W_{Mn})	= 54.93805 g/mol
มวลอะตอมของเหล็ก (W_C)	= 12.0107 g/mol
ความหนาแน่นของเหล็กชนิด S50C	= 7.80 g/cm ³
ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของการกัดกร่อน (i_{corr})	= 4.45 × 10 ⁻⁶ A/cm ²

แทนค่า ดังนี้

- หาค่า Q

$$Q = \left(\frac{f_{Fe} n_{Fe}}{W_{Fe}} \right) + \left(\frac{f_S n_S}{W_S} \right) + \left(\frac{f_P n_P}{W_P} \right) + \left(\frac{f_{Si} n_{Si}}{W_{Si}} \right) + \left(\frac{f_{Mn} n_{Mn}}{W_{Mn}} \right) + \left(\frac{f_C n_C}{W_C} \right)$$

$$Q = \left(\frac{0.98 \times 2}{55.845} \right) + \left(\frac{0.0035 \times 2}{32.06} \right) + \left(\frac{0.003 \times 2}{30.97379} \right) + \left(\frac{0.004 \times 2}{28.085} \right) + \left(\frac{0.0075 \times 2}{54.93805} \right) + \left(\frac{0.00475 \times 2}{12.0107} \right)$$

$$Q = 0.03744 \frac{equi}{g}$$

- หาค่า EW

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

$$EW = \frac{1}{0.03744}$$

$$EW = 26.70 \frac{g}{equi}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำค่า Q และ EW ลงในสมการที่ 2.1 จะได้ค่าอัตราการกัดกร่อน ดังนี้

$$CR = \frac{(3.27 \times 10^{-3})(4.45 \times 10^{-6})(26.70)(1 \times 10^6)}{7.80}$$

$$CR = 0.04981 \frac{mm}{year}$$

ดังนั้นชิ้นงานเหล็กชนิด S50C ที่ไม่ได้เคลือบผิวด้วยการรมดำจะมีอัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 0.04981 มิลลิเมตรต่อปี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้