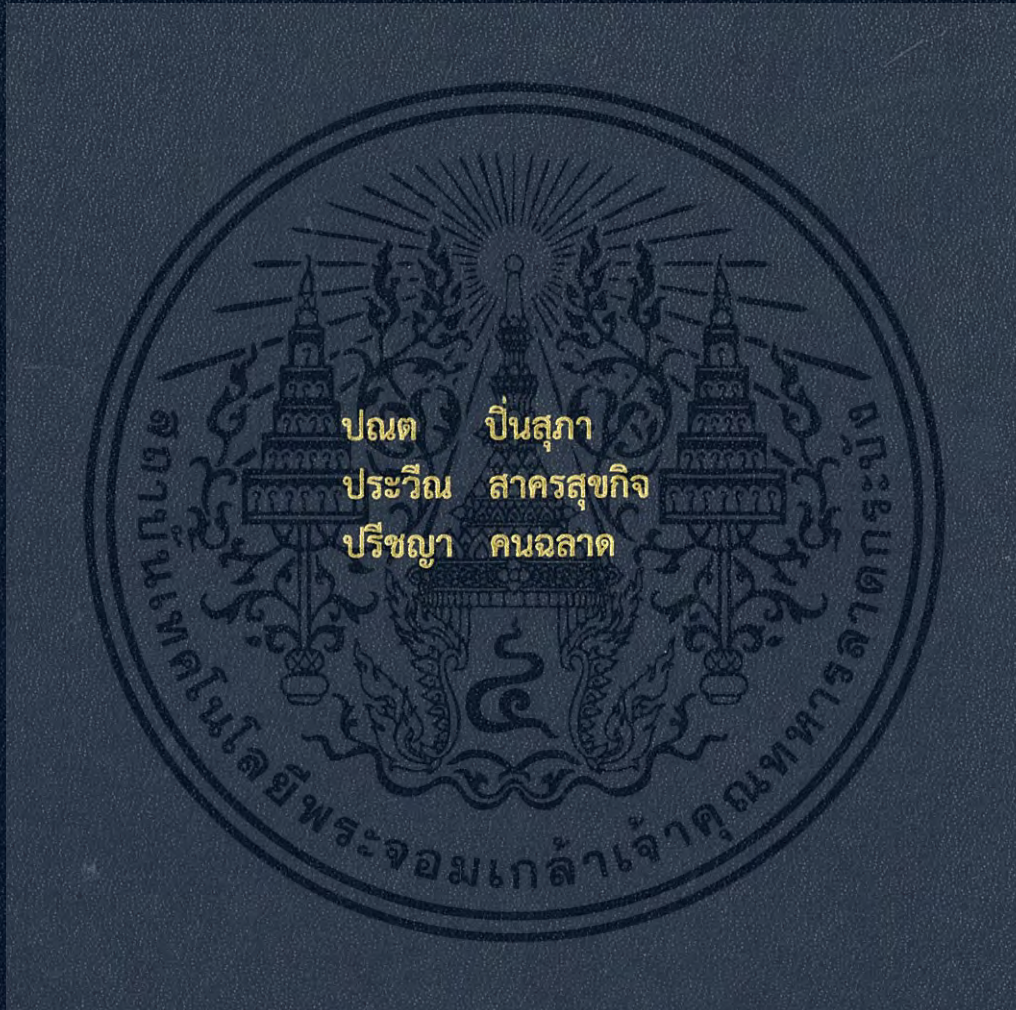


พฤติกรรมการกัดกร่อนของนิกเกิล-ซัลเฟอร์ที่ได้จากการเคลือบผิวโดย
ปราศจากการใช้ไฟฟ้า

CORROSION BEHAVIOR OF NICKEL-SULFUR PLATING FROM
ELECTROLESS PLATING



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

พฤติกรรมการกัดกร่อนของนิกเกิล-ซัลเฟอร์ที่ได้จากการเคลือบผิว
โดยปราศจากการใช้ไฟฟ้า

CORROSION BEHAVIOR OF NICKEL-SULFUR PLATING
FROM ELECTROLESS PLATING



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประจำปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CORROSION BEHAVIOR OF NICKEL-SULFUR PLATING FROM ELECTROLESS PLATING



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

พฤติกรรมการกัดกร่อนของนิกเกิล-ซัลเฟอร์ที่ได้จากการเคลือบผิว
โดยปราศจากการใช้ไฟฟ้า

Corrosion behavior of nickel-sulfur from electroless
plating

ชื่อนักศึกษา

นายปณต ปิ่นสุภา รหัสนักศึกษา 57050450
นายประวีณ สาครสุขกิจ รหัสนักศึกษา 57050451
นางสาวปรีชญา คนฉลาด รหัสนักศึกษา 57050452

ปริญญา

วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา

เคมี

ปีการศึกษา

2560

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. สุชา สุทธิเรืองวงศ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมี-
อุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2560

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. ภัทราวุธ มนต์วิเศษ ประธานกรรมการ	
ดร. อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล กรรมการ	
ผศ.ดร. สุชา สุทธิเรืองวงศ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	พฤติกรรมการณ์กัดกร่อนของนิกเกิล-ซัลเฟอร์ที่ได้จากการเคลือบผิวโดยปราศจากการใช้ไฟฟ้า		
ชื่อนักศึกษา	นายปณต	ปิ่นสุภา	รหัสนักศึกษา 57050450
	นายประวิณ	สาครสุขกิจ	รหัสนักศึกษา 57050451
	นางสาวปรีชญา	คนฉลาด	รหัสนักศึกษา 57050452
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)		
ภาควิชา	เคมี		
คณะ	วิทยาศาสตร์		
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)		
ปีการศึกษา	2560		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. สุธา สุทธิเรืองวงศ์		

บทคัดย่อ

ชั้นฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟอร์และนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียมสามารถเคลือบลงบนพื้นผิวของโลหะทองแดงได้ด้วยเทคนิคการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้นิกเกิลซัลเฟตเฮกซะไฮเดรตเป็นแหล่งของนิกเกิล โซเดียมไทโอซัลเฟตเพนตะไฮเดรตเป็นแหล่งของซัลเฟอร์ และโครเมียมซัลเฟตเป็นแหล่งของโครเมียม จากการพิสูจน์เอกลักษณ์บนพื้นผิวที่ผ่านการเคลือบผิวแล้วด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่าโครงสร้างของชั้นฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟอร์ส่วนใหญ่เป็นออสติเนียน โดยตรวจพบโครงสร้างของ Ni_3S_2 ที่ 21.5° 31.3° และ 37.5° และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ติดตั้งร่วมกับเครื่องเอกซเรย์สเปคโตร-สโคปแบบกระจายพลังงาน (SEM-EDX) พบนิกเกิลร้อยละ 58.27 โดยน้ำหนัก พบซัลเฟอร์ร้อยละ 41.73 โดยน้ำหนักและที่เวลาเพิ่มขึ้นปริมาณของโครเมียมไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก พฤติกรรมการณ์กัดกร่อนของนิกเกิล-ซัลเฟอร์และนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียมตรวจวัดด้วยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตท/กัลวานอสแตท โดยใช้ขั้วไฟฟ้าชนิดคาโบลเมออลุ่มตัวเป็นขั้วอ้างอิง แผ่นโลหะแพลตินัมบริสุทธิ์เป็นขั้วตรงข้ามและชิ้นงานทองแดงเป็นขั้วทำงาน จากผลการทดลองพบว่านิกเกิล-ซัลเฟอร์ที่ pH 9 ให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) สูงที่สุด และไม่เหมาะสมต่อการใช้งานในสภาวะที่มีความเค็มเนื่องจากมี i_{corr} ที่สูง การเจือโครเมียมลงไปทำให้ i_{corr} เพิ่มขึ้นเนื่องจากศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์รีดักชันของโครเมียมมีค่าต่ำกว่านิกเกิลทำให้เกิดการกัดกร่อนมากกว่า

คำสำคัญ : การเคลือบผิวโดยปราศจากการใช้ไฟฟ้า ฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟอร์ ฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียม โพลาริเซชัน โพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Corrosion behavior of nickel-sulfur from electroless plating		
Students	Mr. Panot Pinsupa	Student ID 57050450	
	Mr. Praween Sakornsukkit	Student ID 57050451	
	Miss Preechaya Khonchalad	Student ID 57050452	
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)		
Department	Chemistry		
Faculty	Science		
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
Academic Year	2017		
Advisor	Asst. Prof. Dr. Sutha Sutthiruangwong		

Abstract

Nickel-sulfur film and nickel-sulfur with chromium film can be on the surface of copper by electroless plating at room temperature using nickel sulphate hexahydrate for nickel, sodium thiosulphate pentahydrate for sulfur and chromium sulphate for chromium. Characterization by XRD shows the structure of nickel-sulfur film is almost amorphous. The peaks of Ni_3S_2 appear at 21.5° , 31.3° and 37.5° . The amount of Ni and S was found to be 58.27 and 41.73% respectively. Polarization of nickel-sulfur film and nickel-sulfur with chromium by potentiostat galvanostat was done by using standard calomel electrode for reference electrode, platinum sheet for counter electrode and copper for working electrode. Nickel-sulfur film gave highest corrosion current density (i_{corr}) at pH 9 and in sodium chloride solutions it gave high i_{corr} . Addition of chromium led to high i_{corr} because standard potential of half cell reaction (E_0) of chromium was lower than nickel.

Keywords : Electroless plating, nickel-sulfur film, nickel-sulfur with chromium film, polarization, potentiodynamic polarization.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องมาจากการได้รับความอนุเคราะห์และความร่วมมือจากบุคคลและหน่วยงานต่าง ๆ ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. สุธา สุทธิเรืองวงศ์ ที่ได้มอบหมายงานนี้ให้แก่กลุ่มของข้าพเจ้า และให้เกียรติเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ เป็นผู้ให้ความรู้สอนทักษะต่าง ๆ ในการทำงานจึงขอขอบคุณเป็นอย่างสูง ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ภัทราวุธ มนต์วิเศษ และ ดร. อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล ที่เป็นคณะกรรมการในการสอบและตรวจทานแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้การสนับสนุน ทั้งทางด้านทุนวิจัย สารเคมี อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ อีกทั้งยังอำนวยความสะดวกตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี และเจ้าหน้าที่ห้องธุรการ ภาควิชาเคมี ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวก ในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จไปด้วยดี

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

ปณต ปิ่นสุภา
ประวีณ สาครสุขกิจ
ปรีชญา คนฉลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
สัญลักษณ์.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 ขั้นตอนของกสนวิจัยและวิธีการดำเนินงาน.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การกััดกร่อน.....	4
2.2 การเคลือบผิวโลหะ.....	5
2.3 วัตถุประสงค์ของการเคลือบผิวโลหะโดยปราศจากการใช้ไฟฟ้า.....	8
2.4 คุณสมบัติของการเคลือบผิวโลหะด้วยนิกเกิลโดยการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้า.....	9
2.5 การเตรียมพื้นผิวสำหรับการเคลือบผิวโลหะด้วยนิกเกิลโดยการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้า.....	11
2.6 เทคนิคโพเทนชิโอดนามิกโพลาริเซชัน.....	16
2.7 หลักการของเครื่องมือ.....	20
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	27
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	27
3.2 สารเคมี.....	27
3.3 วิธีการทดลอง.....	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	34
4.1 กลไกการเกิดชั้นฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟอร์ และนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียมที่เกิดบนพื้นผิวของทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิว.....	34
4.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของพื้นผิวโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์ และนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียมโดยเทคนิคการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้า.....	35
4.3 พฤติกรรมการกัดกร่อนของพื้นผิวโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์ และนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียมโดยเทคนิคการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้า โดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชัน.....	41
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	47
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	47
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	47
เอกสารอ้างอิง.....	48
ภาคผนวก.....	50
ภาคผนวก ก ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุบนพื้นผิว.....	51
คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ.....	56

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ผลการทดลองโพเทนซิโอดีนามิกโพลาริเซชันของโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วย นิกเกิล-ซัลเฟอร์ในสารละลายที่ค่า pH ต่าง ๆ	42
4.2 ผลการทดลองโพเทนซิโอดีนามิกโพลาริเซชันของโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วย นิกเกิล-ซัลเฟอร์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	44
4.3 ผลการทดลองโพเทนซิโอดีนามิกโพลาริเซชันของโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วย นิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียมเทียบกับชั้นฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟอร์ในสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ค่า pH เท่ากับ 5	46



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ผลของอุณหภูมิของสารละลายซิงค์เคตต่อน้ำหนักของชั้นฟิล์มสังกะสีบนพื้นผิวอลูมิเนียม	15
2.2 น้ำหนักของชั้นสังกะสีที่เกิดขึ้นจากกระบวนการการแช่แอลคาไลน์ซิงค์เทียบกับโลหะผสม อลูมิเนียมชนิดต่าง ๆ	15
2.3 เครื่องโพเทนชิโอสแตท พร้อมอุปกรณ์ และเซลล์การกัดกร่อน	17
2.4 หลักการทำงานของเครื่องโพเทนชิโอสแตท	18
2.5 ตัวอย่างเส้นโพลาริเซชันที่ได้จากการทดลองของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์ที่ค่า pH ต่าง ๆ	18
2.6 ส่วนต่าง ๆ ที่สำคัญของเส้นโค้งโพลาริเซชัน	19
2.7 หลักการของ Bragg's law ในการคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	21
2.8 แผนภาพแสดงระดับชั้นพลังงานต่าง ๆ ของอิเล็กตรอนในอะตอม ซึ่งจะสังเกตเห็นชั้น K, L และ M	22
2.9 แผนภาพแสดงการเกิดสัญญาณที่เกี่ยวข้องกับรังสีเอกซ์ ในแบบต่าง ๆ เช่น Auger electron, continuum X-ray และ characteristic X-ray	23
3.1 เครื่องเอกซ์เรย์ดีฟแฟรคโทรมิเตอร์	29
3.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและเอนเนอจีดีสเพอซีฟเอกซ์เรย์สเปกโตรสโคปี	30
3.3 เครื่องโพเทนชิโอสแตท/กัลวานอสแตท พร้อมอุปกรณ์ และเซลล์การกัดกร่อน	30
3.4 กรงฟาราเดย์	31
4.1 กราฟเอกซ์อาร์ดี (XRD) แสดงความเป็นผลึกบนพื้นผิวของโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วย นิกเกิล-ซัลเฟอร์ A) แสดงข้อมูลกราฟ XRD ทั้งหมด B) แสดงการขยายข้อมูลกราฟ XRD บางส่วน	36
4.2 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะบนพื้นผิวของโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์ A) ที่กำลังขยาย 1000X B) ที่กำลังขยาย 5000X	37
4.3 กราฟแสดงผล EDX ของตัวอย่างทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์	37
4.4 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะบนพื้นผิวของโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์ เจือโครเมียมร้อยละ 5 ของนิกเกิลที่กำลังขยาย 1000X ที่เวลาในการเคลือบผิว A) 15 นาที B) 30 นาที C) 45 นาที และ D) 60 นาที	38
4.5 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะบนพื้นผิวของโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์ เจือโครเมียมร้อยละ 5 ของนิกเกิลที่กำลังขยาย 5000X ที่เวลาในการเคลือบผิว A) 15 นาที B) 30 นาที C) 45 นาที และ D) 60 นาที	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 4.6 กราฟแสดงผล EDX ของตัวอย่างทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียม ร้อยละ 5 ของนิกเกิลที่เวลาเคลือบผิว A) 15 นาที B) 30 นาที C) 45 นาที และ D) 60 นาที 40
- 4.7 กราฟโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันของโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์ โดยผ่านเทคนิคการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้า ในสารละลายกรดซัลฟิวริก สารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ค่า pH เท่ากับ 5 6 8 9 และ น้ำกลั่น 41
- 4.8 กราฟโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันของโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์ โดยผ่านเทคนิคการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้า ในน้ำกลั่นและในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.1 0.5 1 1.5 2 และ 3% 43
- 4.9 กราฟโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันของโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์ เจือโครเมียมโดยผ่านเทคนิคการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้า ในสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ ค่า pH เท่ากับ 5 เทียบกับชั้นฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟอร์ 45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
i_{corr}	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน
E_{corr}	ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน
pH	ค่าแสดงความเป็นกรด-เบส
XRD	เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์
SEM-EDX	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ติดตั้งร่วมกับเครื่องเอกซเรย์สเปกโตร-สโคปแบบกระจายพลังงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยถือเป็นเมืองเกษตรกรรมกึ่งอุตสาหกรรม ในปัจจุบันนี้อุตสาหกรรมเข้ามามีบทบาทสำคัญอย่างมากอีกทั้งมีการลงทุนที่มากขึ้น ทำให้เกิดการขยายตัวของเศรษฐกิจอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดการสร้างโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งเป็นฐานการผลิตเพิ่มมากขึ้น และการทำงานอย่างต่อเนื่องของเครื่องจักรการผลิตส่งผลให้เครื่องจักรได้รับการดูแลรักษาน้อยลง มีสิ่งตกค้างในเครื่องจักรมากขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุหลักในการเกิดการกัดกร่อนของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรม รวมไปถึงท่อโลหะที่ใช้ในการลำเลียงวัตถุดิบหรือวัสดุอุปกรณ์เข้าสู่กระบวนการการผลิต หากปล่อยให้เครื่องจักรเกิดการกัดกร่อนจะทำให้เกิดผลกระทบตามมาอีกมากมาย ไม่ว่าจะเป็นในด้านของคุณภาพ ความสะอาด ความปลอดภัย การส่งมอบที่ล่าช้า เนื่องจากเครื่องจักรไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและเต็มกำลังการผลิต หรือเครื่องจักรไม่สามารถปฏิบัติหน้าที่ต่อไปได้ตามเวลาที่กำหนด ตลอดจนไม่สามารถใช้งานได้ตามอายุการใช้งานที่ควรจะเป็น ปัญหาเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อองค์กร ไม่ว่าจะเป็นด้านกระบวนการการผลิต คุณภาพของสินค้า ตลอดจนการขนส่ง และอาจทำให้ลูกค้าเกิดความไม่พอใจ

การป้องกันการกัดกร่อนของโลหะจึงมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในโรงงานอุตสาหกรรม ทั้งนี้เพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อไปยังกระบวนการการผลิตที่อาจนำไปสู่การสูญเสียมากมาย โดยการป้องกันการกัดกร่อนนั้นมีหลากหลายวิธี ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ผู้ทำการศึกษาสนใจศึกษาเกี่ยวกับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยเทคนิคการเคลือบผิวโดยปราศจากการใช้ไฟฟ้าซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย และประหยัดเวลา โดยมุ่งเน้นการศึกษาเทคนิค และพฤติกรรมของการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น รวมถึงศึกษาความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนของโลหะที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยเทคนิคการเคลือบผิวโดยปราศจากการใช้ไฟฟ้า

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาเทคนิคการเคลือบโลหะทองแดงด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์ และนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียมโดยเทคนิคการเคลือบโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้า
- 2) เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการกัดกร่อนของโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์ และนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียมโดยเทคนิคการเคลือบโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1) ศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์ และนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียมโดยเทคนิคการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้าด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชัน โดยตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่

- ค่า pH ของสารละลายที่ใช้สำหรับการทดสอบการกัดกร่อนของโลหะที่ผ่านการเคลือบผิว

- ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ใช้สำหรับการทดสอบการกัดกร่อนของโลหะที่ผ่านการเคลือบผิว

2) วิเคราะห์คุณลักษณะของโลหะที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยวิธีการเคลือบผิวโลหะโดยปราศจากการใช้ไฟฟ้า ด้วยวิธีการต่าง ๆ ได้แก่

- วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของพื้นผิวโลหะที่ผ่านการเคลือบผิว ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)

- วิเคราะห์สัณฐานวิทยาของพื้นผิวโลหะที่ผ่านการเคลือบผิว กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ติดตั้งร่วมกับเครื่องเอกซเรย์สเปกโตร-สโคปแบบกระจายพลังงาน (Scanning electron microscopy with energy dispersive X-ray spectrometry, SEM-EDX)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) เรียนรู้เทคนิคการเคลือบผิวโลหะทองแดงด้วยวิธีการเคลือบผิวโลหะด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์ และนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียมโดยปราศจากการใช้ไฟฟ้า

2) เรียนรู้พฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์ และนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียมโดยเทคนิคการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้า

1.5 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	เดือน									
	ต.ค	พ.ย	ธ.ค	ม.ค	ก.พ	มี.ค	เม.ย	พ.ค	มิ.ย	
1.ศึกษาหาข้อมูล ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง										
2.ออกแบบวิธีการทดลอง										
3.ทำวิจัยบทที่ 1,2 และ3										
4.ทำการทดลองการเคลือบผิวโดยปราศจากการใช้ไฟฟ้า										
5.ตรวจสอบลักษณะทางเคมีและทางกายภาพของชิ้นงาน										
6.วิเคราะห์ผลการทดลอง										
7.สรุป และรายงานผล										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การกัดกร่อน (Corrosion) [1]

จากนิยามมาตรฐาน DIN EN ISO 8044 (เดิม DIN 50900) การกัดกร่อน คือปฏิกิริยาระหว่างวัสดุโลหะกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งนำไปสู่การเสื่อมสภาพของวัสดุนั้น และยังส่งผลให้ความสามารถในการทำหน้าที่ของวัสดุดังกล่าวเสียไป โดยส่วนใหญ่ปฏิกิริยาดังกล่าวจะเป็นปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า แต่ทั้งนี้ยังสามารถเป็นปฏิกิริยาเคมี หรือปฏิกิริยาทางกายภาพของโลหะได้เช่นกัน

2.1.1 กลไกการกัดกร่อน (Mechanism of Corrosion)

กลไกการกัดกร่อนสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทคือ

2.1.1.1 เกิดการผุกร่อนด้วยปฏิกิริยาเคมีโดยตรง (Direct Chemical Corrosion) จะเกิดปฏิกิริยาเคมีโดยตรงระหว่างผิวของโลหะและก๊าซ เช่น ออกซิเจน (O_2) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) เป็นต้น

2.1.1.2 เกิดการผุกร่อนด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Corrosion) จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างผิวของโลหะและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เช่น ความชื้นบนผิวของโลหะสำหรับการกัดกร่อนในชั้นบรรยากาศ หรือคอนกรีตเปียกสำหรับการกัดกร่อนแท่งเหล็กเสริมแรงในสะพาน

2.1.2 ประเภทของการกัดกร่อน (Classifications of Corrosion)

การกัดกร่อนบนพื้นผิวของโลหะสามารถจำแนกได้หลายลักษณะดังนี้

2.1.2.1 การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform Corrosion) เป็นลักษณะการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นตลอดพื้นผิวของโลหะอย่างสม่ำเสมอ อาจเกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีหรือปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี สามารถวัดค่าได้ และทำนายการเกิดการกัดกร่อนล่วงหน้าได้

2.1.2.2 การกัดกร่อนในบริเวณจำเพาะ (Localized Corrosion) เป็นลักษณะของการกัดกร่อนที่เกิดเฉพาะบริเวณใดบริเวณหนึ่งของผิวโลหะ ในบางกรณีอาจไม่สามารถสังเกตเห็นการกัดกร่อนได้ด้วยตาเปล่า ตัวอย่างเช่น

2.1.2.2.1 การกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic Corrosion) เป็นลักษณะการกัดกร่อนที่เกิดจากโลหะสองชนิดที่มีศักย์ไฟฟ้ารีดักชันแตกต่างกัน เมื่อโลหะทั้งสองชนิดสัมผัสกันและอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โลหะที่มีศักย์ไฟฟ้ารีดักชันต่ำกว่าจะมีแนวโน้มสูญเสียอิเล็กตรอนได้ง่ายกว่า และการกัดกร่อนจะเกิดขึ้นอย่างรุนแรงที่บริเวณผิวสัมผัสของโลหะทั้งสอง

2.1.2.2.2 การสูญเสียส่วนเจือ (Dealloying) เป็นลักษณะการกัดกร่อนของ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โลหะผสมประกอบด้วยโลหะตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปซึ่งเป็นโลหะที่มีศักย์ไฟฟ้ารีดักชันต่างกัน เมื่ออยู่ในสารละลายโลหะที่มีศักย์ไฟฟ้ารีดักชันต่ำกว่าจะถูกกัดกร่อนแต่จะยังคงอยู่ในสารละลาย ทำให้เหลือโลหะส่วนที่มีศักย์ไฟฟ้ารีดักชันสูงกว่า และสูญเสียความแข็งแรงไป

2.1.2.2.3 การแตกร้าวเนื่องจากไฮโดรเจน (Hydrogen Damage) เป็นลักษณะการกัดกร่อนที่เกิดจากอะตอมไฮโดรเจนแพร่เข้าสู่เนื้อโลหะ ซึ่งจะลดความเหนียวและความแข็งแรงของโลหะลง เมื่ออะตอมของไฮโดรเจนเกิดการรวมตัวกันในเนื้อโลหะจะเกิดก๊าซไฮโดรเจนที่มีแรงดันสูงจะสามารถสร้างรอยแตกหรือรอยระเบิดออกได้ในที่สุด

2.1.2.2.4 การกัดกร่อนจากการถูครูด (Fretting Corrosion) เป็นลักษณะการกัดกร่อนที่เกิดจากการสัมผัสกันของผิวโลหะโดยมีแรงกระทำและมีการเคลื่อนที่ในสภาพแวดล้อมที่เอื้อต่อการกัดกร่อน ซึ่งทำให้เกิดการสึกหรอมากกว่าปกติ

2.2 การเคลือบผิวโลหะ (Plating) [2]

การเคลือบผิวโลหะสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีคือ การเคลือบผิวโลหะโดยการใช้ไฟฟ้า (Electroplating) ซึ่งเป็นการเคลือบผิวของโลหะโดยการอาศัยแหล่งกระแสไฟฟ้าจากภายนอก และการเคลือบผิวโลหะโดยปราศจากการใช้ไฟฟ้า (Electroless plating) เป็นการเคลือบผิวโลหะที่ไม่อาศัยแหล่งกระแสไฟฟ้าจากภายนอก อาศัยเพียงสารละลายที่มีสารตั้งต้นที่ต้องการเคลือบผิวของโลหะ ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายกว่าการเคลือบผิวโลหะโดยการใช้ไฟฟ้าเนื่องจากไม่ต้องอาศัยแหล่งกระแสไฟฟ้าจากภายนอก และใช้เวลาในการเคลือบผิวโลหะน้อยกว่าการเคลือบโลหะโดยการใช้ไฟฟ้า

2.2.1 การเคลือบโลหะโดยปราศจากการใช้ไฟฟ้า (Electroless plating)

โดยวิธีการนี้สามารถเรียกได้หลายชื่ออาทิ เช่น Auto-catalytic plating, Chemical plating, Immersion plating ซึ่งกระบวนการเคลือบผิวโลหะนี้เกิดขึ้นเนื่องมาจากผลของปฏิกิริยารีดักชันของโลหะไอออนในสารละลาย ซึ่งเมื่อเราแช่โลหะลงในสารละลาย ไอออนของสารละลายนั้นจะไปเกาะทั่วบริเวณผิวของโลหะเกิดเป็นชั้นฟิล์มบาง ๆ ขึ้นมา กระบวนการที่เกิดขึ้นมานี้เราจะเรียกว่า การเคลือบผิวโลหะโดยปราศจากการใช้ไฟฟ้า (Electroless plating) โดยจะมีขั้นตอนทั้งหมด 3 ขั้นตอนได้แก่

2.2.1.1 การเตรียมผิวของโลหะที่ต้องการเคลือบ

โลหะที่ต้องการเคลือบผิวนั้นจะต้องผ่านกระบวนการที่ทำให้เกิดความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเคมี และไม่มีสิ่งปนเปื้อนบนผิวโลหะที่ต้องการเคลือบ

2.2.1.2 การเตรียมผิวของโลหะที่ต้องการเคลือบให้มีลักษณะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

คือการทำให้โลหะที่ต้องการเคลือบผิวนั้นสามารถนำไฟฟ้าได้โดยไปจุ่มในสารละลาย เช่น นำโลหะที่ต้องการเคลือบผิวไปจุ่มในสารละลายพาลาเดียมคลอไรด์ หลังจากนั้นจะทำการรีดิวซ์ไอออนของโลหะให้กลายเป็นอะตอมด้วยการจุ่มสารละลายโซเดียมไฮโปฟอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.3 การเคลือบผิวโลหะโดยปราศจากการใช้ไฟฟ้า

โดยขั้นตอนนี้เราจะนำโลหะที่ต้องการเคลือบผิวที่ผ่านขั้นตอนทั้ง 2 ขั้นตอนข้างต้น มาจุ่มในสารละลายที่เราต้องการจะเคลือบ ซึ่งในสารละลายนั้นจะประกอบไปด้วยไอออนของโลหะที่ต้องการจะเคลือบ ไอออนเหล่านั้นจะถูกรีดิวซ์ให้กลายเป็นอะตอมแล้วมาเกาะบริเวณผิวของโลหะที่ต้องการเคลือบผิว เกิดเป็นชั้นฟิล์มบาง ๆ บนโลหะนั้นขึ้นมา ซึ่งในสารละลายที่เราต้องการนำมาเคลือบนั้นจะต้องประกอบไปด้วยองค์ประกอบ 7 องค์ประกอบคือ

1. ตัวกำเนิดโลหะ โดยในสารละลายนั้นจะต้องมีไอออนของโลหะที่เราต้องการจะเคลือบ เช่น ถ้าเราต้องการไอออนของ Cu^{2+} ตัวกำเนิดโลหะก็คือตัว CuSO_4 , $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ เป็นต้น
2. สารที่ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อน (Complexing agents) โดยสารนี้นั้นมีหน้าที่ในการป้องกันการเกิดตะกอนของเกลือโลหะ ซึ่งจะสามารถทำให้ไอออนของเรานั้นถูกรีดิวซ์ด้วยตัวรีดิวซ์ได้ดียิ่งขึ้น และยังสามารถทำให้สารละลายของเรานั้นเสื่อมสภาพได้ช้าลงด้วย เช่น อีดีทีเอ กลีเซอริน แอมโมเนีย เป็นต้น
3. ตัวรีดิวซ์ (Reducing Agent) เป็นสารที่จะมาลดเลขออกซิเดชันของไอออนโลหะให้กลายเป็นอะตอมของโลหะ และอะตอมโลหะนั้นจะไปเคลือบอยู่ที่ผิวของโลหะที่ต้องการเคลือบผิว ตัวรีดิวซ์ที่ใช้กันโดยส่วนใหญ่ได้แก่ โซเดียมไฮโปฟอสไฟต์ โซเดียมโบโรไฮไดรด์ เป็นต้น
4. สารรักษาสภาพของสารละลาย (Stabilizer) เป็นสารที่สามารถทำให้สารละลายนั้นเสื่อมสภาพได้ช้าลง เช่น ไทโอยูเรีย กรดแอลคานอลามีนอะซิติก คาร์บอนเนต เป็นต้น
5. บัฟเฟอร์ (Buffer) เป็นสารที่ใช้ในการรักษาค่า pH ไม่ให้เปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด เช่น โซเดียมคาร์บอนเนต โกลซีน กรดมาโลนิก เป็นต้น
6. สารช่วยเพิ่มอัตราการเกาะตัวของโลหะ (Exaltant) เป็นสารที่ช่วยให้การยึดติดของโลหะบนโลหะที่ต้องการเคลือบผิวดีขึ้น โดยสารนี้จะเป็สารประกอบจำพวกเชิงซ้อนได้แก่ เกลือแลคเตต เกลืออะซิเตต เกลือฟลูออไรด์ เกลือไฮดรอกซีอะซิเตต เป็นต้น
7. สารเพิ่มความชื้น (Wetting Agent) เป็นสารที่ทำให้แรงตึงผิวของสารละลายลดลง ซึ่งช่วยทำให้สารละลายนั้นสามารถสัมผัสกับผิวของโลหะที่ต้องการเคลือบผิวได้ดีขึ้น และยังสามารถกำจัดฟองก๊าซของก๊าซไฮโดรเจนที่จะเกิดขึ้นระหว่างการเคลือบได้อีกด้วย ตัวอย่างเช่น เกลือของกรดซัลโฟนิก เป็นต้น

ซึ่งกระบวนการเคลือบผิวโลหะโดยปราศจากการใช้ไฟฟ้านั้นสามารถใช้กับโลหะได้หลายชนิด เช่น สังกะสี เงิน ทองแดง ทอง พลาตียม ดีบุก แพททินัม เป็นต้น

2.2.2 ปัจจัยที่ต้องควบคุม (Controlling Factor)

ตัวแปรสำคัญสำหรับการเคลือบผิวโลหะโดยปราศจากการใช้ไฟฟ้า (Electroless plating) ได้แก่

1. อุณหภูมิ (Temperature) อัตราการเคลือบผิวของโลหะจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เพราะเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้อัตราการสลายตัวของสารละลายกลายเป็นไอออนได้มากขึ้น และยังทำให้ชั้นฟิล์มเกิดได้ง่ายขึ้น
2. พื้นผิวต่อปริมาตร (Volume Area) การเคลือบผิวโลหะจะเกิดได้ดีขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมากขึ้น เพราะจะทำให้มีพื้นที่การเกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยามากขึ้นด้วย

2.2.3 ข้อควรระวัง (Precaution)

1. การรักษาความเข้มข้นของสารละลายนั้นเป็นสิ่งสำคัญ ควรกำหนดความเข้มข้นของสารละลายเหล่านี้
 - ความเข้มข้นของโลหะ
 - ปริมาณของตัวรีดิวซ์
 - สารรักษาสภาพของสารละลาย
2. การรักษาระดับของ pH ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญ เพราะจะทำให้การเคลือบผิวของโลหะเกิดได้ดียิ่งขึ้น
3. ควรทำในอ่างที่ผลิตจากวัสดุที่นำมาเกาะได้ยาก เช่น โพลีเอทิลีน เพราะจะช่วยลดการเคลือบที่ผนังของอ่าง

2.2.4 ข้อดีของการเคลือบผิวโลหะโดยปราศจากการใช้ไฟฟ้า

1. ไม่ต้องใช้ไฟฟ้า
2. ใช้เคลือบโลหะลงบนผิวที่ไม่นำไฟฟ้าได้
3. สร้างชั้นที่มีหมู่ฟังก์ชันเฉพาะขึ้นมาได้
4. ได้ผิวโลหะที่เหมือนกันทั่วทั้งชิ้นส่วน แม้ว่าตัวชิ้นส่วนจะมีรูปร่างซับซ้อน
5. อุปกรณ์ที่ใช้ในการเคลือบผิวโลหะโดยปราศจากการใช้ไฟฟ้านั้น หาได้ง่าย

2.2.5 ข้อเสียของการเคลือบผิวโลหะโดยปราศจากการใช้ไฟฟ้า

1. ราคาสูงกว่าการเคลือบโลหะโดยการไฟฟ้า (Electroplating) เพราะตัวรีดิวซ์ที่ใช้มีราคาสูงกว่า

2. ได้ความเข้มข้นของชั้นโลหะน้อยกว่าอันเนื่องมาจากอัตราการเคลือบผิวนั้นถูกควบคุมด้วยความเข้มข้นของไอออนในสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 วัตถุประสงค์ของการเคลือบผิวโลหะโดยปราศจากการใช้ไฟฟ้า (Purpose of Electroless plating) [3]

การเคลือบผิวโลหะโดยปราศจากการใช้ไฟฟ้า (Electroless plating) มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อน เพิ่มความแข็งของผิววัสดุ เคลือบผิวแล้วมีความหนาแน่นสม่ำเสมอทั่วชิ้นงาน และวัตถุประสงค์หลักคือรักษาสภาพพื้นผิวของวัสดุให้เหมือนเดิมไม่เปลี่ยนแปลง

การเคลือบผิวโลหะด้วยนิกเกิลโดยการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้า (Electroless Nickel Plating) คือการเคลือบนิกเกิลอัลลอยด์ลงบนพื้นผิวของโลหะที่เราต้องการเคลือบด้วยสารละลายทางเคมี โดยไม่มีขั้วไฟฟ้า หรือประจุไฟฟ้าจากภายนอก กระบวนการนี้สามารถเคลือบพื้นผิวโลหะที่เข้าถึงได้ยากได้ เช่น พื้นผิวที่มีหลุมเล็กหรือหลุมลึก และพื้นผิวที่มีรูปร่างซับซ้อน ความหนาของการเคลือบผิวโลหะโดยปราศจากการใช้ไฟฟ้าสำหรับการใช้งานด้านวิศวกรรมโดยเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.0003 ถึง 0.0008 นิ้ว (0.0076 ถึง 0.0203 มิลลิเมตร) และความแข็งโดยเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 48 ถึง 52 HRC (Rockwell C. Hardness) เมื่อทำการเคลือบผิวด้วยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 750 องศาฟาเรนไฮต์ (400 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ความแข็งจะเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 58 ถึง 64 HRC

2.3.1 การเคลือบผิวโลหะด้วยนิกเกิลโดยการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้าสำหรับการต้านทานการกัดกร่อน (Electroless nickel plating For Corrosion Resistance)

การเคลือบผิวด้วยนิกเกิลโดยการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้าถูกใช้ในการต้านทานการกัดกร่อนที่เกิดจากสิ่งแวดล้อม เช่น น้ำเค็ม สารที่มีความเป็นกรด เป็นต้น ในการเคลือบส่วนนี้ไม่ควรมีความแข็งหลังจากทำการเคลือบผิวเพราะความแข็งมีผลโดยตรงทำให้ความต้านทานการกัดกร่อนลดลง

2.3.2 การเคลือบผิวโลหะด้วยนิกเกิลโดยการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้าสำหรับการเคลือบในพื้นที่ที่เข้าถึงได้ยาก (Electroless nickel plating For Wear Resistance in Hard-to-Reach Areas)

การเคลือบผิวด้วยนิกเกิลโดยการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้าสามารถเคลือบพื้นผิวที่เข้าถึงได้ยาก หรือไม่มีความเป็นไปได้ในการเข้าถึงเมื่อเคลือบพื้นผิวด้วยการเคลือบพื้นผิวด้วยโครเมียมโดยใช้ขั้วไฟฟ้า เช่น หลุมขนาดเล็ก หรือหลุมลึก

2.4 คุณสมบัติของการเคลือบผิวโลหะด้วยนิกเกิลโดยการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้า (Properties of Electroless Nickel Plating)

การเคลือบผิวโลหะด้วยนิกเกิลโดยการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้ามีคุณสมบัติที่หลากหลาย เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิว สิ่งที่สำคัญที่สุดคือการเลือกสถานะการเคลือบให้เหมาะสมกับการใช้งาน

2.4.1 การเปลี่ยนแปลงความแข็ง (Variation in Hardness)

2.4.1.1 หลังจากทำการเคลือบปกติ (As Plated) ความแข็งเพิ่มขึ้นจาก 48 เป็น 52 HRC

2.4.1.2 หลังจากการเคลือบโดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 750 องศาฟาเรนไฮต์ (400 องศาเซลเซียส) (Heat Treated for One Hour at 750 F (400 C)) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ความแข็งเพิ่มขึ้นจาก 58 เป็น 64 HRC

2.4.2 การต้านทานการกัดกร่อนและโครงสร้างพื้นผิว (Corrosion Resistance and Surface Structure)

2.4.2.1 หลังจากทำการเคลือบปกติ (As Plated) โครงสร้างพื้นผิวจะเรียบเนียนเป็นออสถุฐาน (ไม่เป็นผลึก) ไม่มีรูพรุน สม่ำเสมอ และมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีเยี่ยม

2.4.2.2 หลังจากการเคลือบโดยใช้ความร้อน (Upon Heat Treatment) พื้นผิวจะกลายเป็นโครงสร้างผลึกที่มีรูพรุนสูง และมีรอยแตกเล็ก ๆ เนื่องจากการเกิดการหดตัวของพื้นผิวการเคลือบ การต้านทานการกัดกร่อนจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

2.4.3 ความหนาในการเคลือบที่สม่ำเสมอ และอัตราการสะสม (Uniformity of Plating Thickness and Deposition Rate)

ความหนาที่สม่ำเสมอเกิดขึ้นเยอะที่สุดบนพื้นผิว รวมถึงพื้นที่ขนาดเล็กและพื้นที่ที่ซับซ้อน การสะสมบนพื้นผิวควบคุมได้โดยค่าพื้นผิวในส่วนของ การเคลือบ เพราะค่าพื้นผิวจะสม่ำเสมอกันทั่วทั้งพื้นผิว การสะสมบนพื้นผิวจะเกิดขึ้นเหมือนกันในทุก ๆ จุดบนพื้นผิว

2.4.4 การยึดเกาะของการเคลือบและวัสดุที่นำมาเคลือบ (Adhesion of Plating and Material Being Plating)

การยึดเกาะของการเคลือบผิวโลหะด้วยนิกเกิลโดยการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้าบนโลหะจะขึ้นกับความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาของตัวโลหะกับสารละลายที่ใช้ในการเคลือบเพื่อให้เกิดเป็นพันธะที่แข็งแรง

2.4.5 ขนาดของส่วนเคลือบทั้งก่อนและหลังเคลือบ (Dimension of Parts before and after Plating)

ขนาดของส่วนเคลือบควรเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเคลือบ โดยทั่วไปส่วนเคลือบจะมีขนาด 0.0005 นิ้ว (0.0127 มิลลิเมตร) และเมื่อผ่านการเคลือบจะมีขนาดอยู่ระหว่าง 0.0005 ถึง 0.0008 นิ้ว (0.0127 ถึง 0.0203 มิลลิเมตร) ซึ่งเป็นขนาดที่เล็กที่สุดที่สามารถทำการขัด หรือตะไบได้

2.4.6 พื้นผิวก่อนและหลังทำการเคลือบ (Surface Finish before and after Plating)

2.4.6.1 การเคลือบที่มีความหนาระหว่าง 0.0001 ถึง 0.0006 นิ้ว (0.0025 ถึง 0.0152 มิลลิเมตร) (Plating Thickness from 0.0001 to 0.0006 in (from 0.0025 to 0.0152 mm))

เกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยบนพื้นผิวระหว่างการเคลือบ เมื่อทำการเคลือบความหนาจะเพิ่มจาก 0.0001 เป็น 0.0006 นิ้ว (0.0025 เป็น 0.0152 มิลลิเมตร) ดังนั้นพื้นผิวก่อนทำการเคลือบจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับพื้นผิวหลังทำการเคลือบ

2.4.7 การเตรียมพื้นผิว และการทำให้แอคทีฟก่อนเคลือบ (Surface Cleaning and Activation Prior to Plating)

พื้นผิวต้องผ่านการเตรียมผิว ผ่านการทำความสะอาดเพื่อให้เกิดการยึดเกาะที่ดีของการเคลือบผิวโลหะด้วยนิกเกิลโดยการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้ากับพื้นผิวของโลหะที่ทำการเคลือบ การที่ไม่ได้เตรียมผิวเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนทุกชนิดบนพื้นผิวจะมีผลทำให้ความแข็งแรงของพันธะที่จะเกิดขึ้นระหว่างการเคลือบลดลง และเป็นต้นเหตุทำให้เกิดการแตกเป็นแผ่น หรือการพุพองของการเคลือบที่ใช้ความร้อนเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อน หากพื้นผิวสะอาดพร้อมสำหรับการเคลือบจะต้องทำให้แอคทีฟโดยการ pre-plating treatment designed เพื่อทำให้พื้นผิวของโลหะที่ต้องการเคลือบมีปฏิกิริยาตอบสนองต่อสารละลายที่ใช้ในการเคลือบ (Plating solution)

2.4.8 การควบคุมคุณภาพของกระบวนการการเคลือบผิวโลหะด้วยนิกเกิลโดยการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้า (Quality Control of Electroless Nickel Plating Process)

การเคลือบผิวโลหะด้วยนิกเกิลโดยการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้ามีหลายตัวแปรที่จำเป็นต่อการควบคุม ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงมากกว่าการเคลือบผิว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยโครเมียมโดยการชุบไฟฟ้าที่มีตัวแปรน้อยตัวที่ต้องการการควบคุมอย่างเคร่งครัด การควบคุมคุณภาพส่งผลต่อผลลัพธ์ที่ได้เมื่อใช้กระบวนการเคลือบผิวโลหะด้วยนิกเกิลโดยการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการชุบไฟฟ้า

2.4.8.1 ผลของสิ่งปนเปื้อน (Effects of Contamination)

การปนเปื้อนอาจเกิดขึ้นได้ระหว่างการเคลือบหากมีการปนเปื้อนในอ่างเคลือบอยู่ก่อนหน้า โดยสิ่งปนเปื้อนเหล่านั้นอาจเกิดการสะสมร่วม (co-deposition) กับนิกเกิลได้ ซึ่งจะมีผลทำให้ความสามารถในการเกาะติดของนิกเกิลที่ต้องการเคลือบลดลง และเพิ่มความเครียดภายในซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการแตก หรือการพองได้

2.4.8.2 การควบคุมสภาวะของอ่างเคลือบ (Control of Plating Bath Conditions)

การเคลือบผิวโลหะด้วยนิกเกิลโดยการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการชุบไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่ต้องการการควบคุมอุณหภูมิ ปริมาณของนิกเกิล ระดับ pH และการกรองที่ถูกต้อง แม่นยำ แต่ข้อเสียอย่างหนึ่งของการเคลือบผิวโลหะด้วยนิกเกิลโดยการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการชุบไฟฟ้าคือ the batch สามารถทำให้เกิดการหลุดออกของอนุภาคเล็ก ๆ หรืออนุภาคละเอียด การกรองอย่างต่อเนื่องจะสามารถป้องกันการหลุดออกได้

2.5 การเตรียมพื้นผิวสำหรับการเคลือบผิวโลหะด้วยนิกเกิลโดยการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการชุบไฟฟ้า (Surface Preparation for Electroless Nickel Plating) [4]

การเคลือบผิวโลหะด้วยนิกเกิลโดยการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการชุบไฟฟ้าของพื้นผิว (substrates) ที่เป็นโลหะและไม่เป็นโลหะมีองค์ประกอบและคุณสมบัติที่แตกต่างกันมาก ด้วยเหตุนี้จึงเป็นไปได้เลยที่จะเลือกขั้นตอนการเตรียมพื้นผิวด้วยขั้นตอนเดียว ดังนั้นจึงมีการเตรียมพื้นผิวที่แตกต่างกันตามชนิดของพื้นผิวที่จะทำการเคลือบ สามารถแบ่งชนิดของพื้นผิวออกได้เป็นพื้นผิวที่เป็นโลหะและพื้นผิวที่ไม่เป็นโลหะ โดยส่วนใหญ่การเคลือบผิวโลหะด้วยนิกเกิลโดยการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการชุบไฟฟ้าจะใช้สำหรับการเคลือบบนพื้นผิวที่เป็นโลหะ

เอกลักษณ์ที่สำคัญของการเคลือบบนผิวโลหะคือความแข็งแรงของพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวที่เป็นโลหะและสารละลายที่ใช้ในการเคลือบ (coating) ค่าความสามารถในการยึดติดจะสูงขึ้นได้โดยการเตรียมพื้นผิว-กำจัดสิ่งปนเปื้อนออกจากพื้นผิวโลหะ (ดิน โคลน ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการกัดกร่อน ออกไซด์ สิ่งสกปรก และอื่น ๆ) และกำจัดกลไกที่บิดเบี้ยวบนชั้นพื้นผิว-เพื่อทำความสะอาดโครงสร้างพื้นผิวที่สมบูรณ์

การกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่ได้ผลโดยทั่วไปใช้สารละลายทำความสะอาดอัลตราโซนิก การเลือกใช้สารละลายขึ้นอยู่กับธรรมชาติของสิ่งปนเปื้อนและชนิดของพื้นผิวที่ต้องการเคลือบ

การกำจัดพื้นผิวที่เกิดออกซิเดชัน และโลหะที่ไม่ต้องการที่ได้ผลโดยทั่วไปคือการทำปฏิกิริยาทางเคมี การแช่ในสารละลายกรด และวัสดุอัลตราโซนิกกำจัดออกซิเจน คล้าย ๆ กับการใช้ในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลือบโดยปราศจากการใช้ไฟฟ้า และยังมีผลต่อการเคลือบผิวโลหะด้วยนิกเกิลโดยการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้า

การเคลือบผิวโดยปราศจากการใช้ไฟฟ้าแตกต่างจากเทคนิคการเคลือบผิวโลหะอื่น ๆ (Electroplating, Vacuum Metallizing, Hot dip Galvanizing) บนพื้นผิวเริ่มต้นโดย the autocatalytic chemical reduction process บางโลหะ เช่นนิกเกิลเป็นตัวเร่งเมื่อจุ่มลงในสารละลายสำหรับการเคลือบผิวโดยปราศจากการใช้ไฟฟ้า ขณะที่เหล็กกล้าและอลูมิเนียมกลายเป็นตัวเร่งโดยการสร้างพันธะของนิกเกิลในอ่างการเคลือบผิวโลหะด้วยนิกเกิลโดยการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้า โลหะอื่น ๆ เช่นทองแดงเป็นแพสซีฟ (passive) และต้องการกระบวนการที่ทำให้แอคทีฟในการเริ่มกระบวนการเคลือบผิวโลหะด้วยนิกเกิลโดยการเคลือบผิวโลหะโดยปราศจากการใช้ไฟฟ้า ข้อควรระวังคือต้องสังเกตธรรมชาติการแอคทีฟของพื้นผิวที่สามารถกลายเป็นแพสซีฟ เมื่อปนเปื้อนโดยสิ่งสกปรกตกค้างหรือชั้นออกไซด์ ด้วยเหตุผลนี้การเตรียมพื้นผิวสำหรับการเคลือบผิวโลหะด้วยนิกเกิลโดยการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้าจึงมีความจำเป็นต่อการได้รับการดูแลและการควบคุมตลอดทั้งกระบวนการในระดับที่สูงที่สุด

เหตุผลอื่นที่จำเป็นจะต้องระมัดระวังการเลือกกระบวนการเตรียมผิวอย่างมากคือ ผลกระทบของรูพรุนของโลหะ สิ่งสกปรกตกค้างจากการสารละลายทำความสะอาดหรือ สารละลายกำจัดออกซิเจนสามารถเพิ่มรูพรุนของการเคลือบผิวโลหะด้วยนิกเกิลโดยการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้าได้ จุดที่เกิดแพสซีฟจะไม่เกิดการเคลือบผิวโลหะด้วยนิกเกิลโดยการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้า ที่ความหนาน้อยกว่า 5 ไมโครเมตร การเคลือบผิวโลหะด้วยนิกเกิลโดยการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้า จะมีรูพรุนมากกว่าที่เคลือบผิวโลหะด้วยนิกเกิลโดยการเคลือบผิวโลหะที่ใช้ไฟฟ้าที่ความหนาเท่ากัน ระหว่างทำการเคลือบการเกาะติดของนิกเกิลจะเริ่มสะสมอยู่บนพื้นผิวและเต็มไปด้วยนิกเกิลที่ใช้เคลือบผิวโลหะ การเคลือบในระยะเวลาสั้น ๆ จะทำให้พื้นผิวไม่ถูกเคลือบอย่างทั่วถึงเป็นสาเหตุทำให้เกิดรูพรุนในการเคลือบผิวโลหะโดยการเคลือบโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้า

2.5.1 เหล็กและโลหะผสมเหล็ก (Iron and Ferrous Alloys)

เหล็กและโลหะผสมเหล็กถูกนำมาใช้เป็นพื้นผิวสำหรับการเคลือบบ้อยที่สุด เช่นโลหะผสมเหล็กในอัตราต่ำ (low alloy steels) เหล็กกล้าคาร์บอน (carbon steels) เหล็กหล่อ (cast iron) และเหล็กกล้าผสมเหล็กในอัตราสูง (high alloy steels) หลักการของการเตรียมผิวเหล็กขึ้นอยู่กับขั้นตอนในการกำจัดดิน กำจัดออกซิเจน และความแอคทีฟของพื้นผิว โดยแต่ละขั้นตอนจะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะผสม การทำความสะอาดเหล็กกล้าและเหล็กหล่อทำได้โดยการใช้เทคนิคทั่วไป เช่น สารละลายทำความสะอาดแอลคาไลน์ สารละลายทำความสะอาด หรือทำความสะอาดด้วยไฟฟ้า เช่นเดียวกับกระบวนการการเคลือบผิวโลหะด้วยการใช้ไฟฟ้า หรือขั้นตอนอื่น ๆ ในบางกรณีพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาจเต็มไปด้วยสิ่งสกปรกที่ยึดเกาะแน่นหนา กลไกสำหรับการกำจัดเช่นการเป่าทราย ปั่นกวาดอาจเป็นสิ่งจำเป็น

การแช่ในสารละลายทำความสะอาดแอลคาไลน์เป็นวิธีโดยทั่วไปที่ใช้งานบ่อย วัสดุที่ประกอบด้วยสารประกอบแอลคาไลน์โซเดียม เช่น ไฮดรอกไซด์ คาร์บอเนต ซิลิเกต ฟอสเฟต และสารลดแรงตึงผิวอินทรีย์ การเลือกกระบวนการทำความสะอาดขึ้นอยู่กับธรรมชาติของพื้นผิวที่ปนเปื้อนและธรรมชาติของพื้นผิว การเติมสารบางอย่างจะสามารถช่วยให้การทำความสะอาดมีประสิทธิภาพมากขึ้น ในบางกรณีอาจมีการใช้ตัวทำละลาย หรือตัวทำละลายไขมันก่อนที่จะเริ่มขั้นตอนการทำความสะอาดแอลคาไลน์

เหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมระดับต่ำ กำจัดออกซิเจนโดยใช้การแช่ในสารละลายกรด หรือสารละลายกำจัดออกซิเจนแอลคาไลน์ สารละลายกรดที่แช่โดยทั่วไปใช้กรดไฮโดรคลอริก หรือกรดซัลฟิวริก บนเหล็กกล้าคาร์บอนกรดไฮโดรคลอริกใช้ความเข้มข้นประมาณ 10 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่กรดซัลฟิวริกก็ถูกใช้ในความเข้มข้นประมาณ 2 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ การแช่ในกรดซัลฟิวริกถูกแนะนำให้ใช้สำหรับเหล็กกล้าตะกั่ว แต่เป็นวิธีที่ควรหลีกเลี่ยงเนื่องจากอาจจะมีผลต่อการยับยั้งการเริ่มต้นสำหรับการเคลือบผิวโลหะโดยการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้า

ขั้นตอนที่จำเป็นต่อการเริ่มต้นการเคลือบผิวและการยึดเกาะพื้นผิวโดยหลักจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของพื้นผิว ในกรณีของเหล็กกล้าอ่อนและเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่านการเตรียมผิวและกำจัดออกซิเจนมาเป็นอย่างดีจะเกิดการยึดเกาะที่ดี ในกรณีของเหล็กหล่อและเหล็กกล้าผสมอัตราสูงจำเป็นต้องมีเทคนิคพิเศษเพื่อให้เกิดการยึดเกาะที่ดีและการเคลือบผิวที่ครอบคลุม

เหล็กหล่อโดยทั่วไปจะมีรูพรุนและอาจต้องการสารละลายแอลคาไลน์พิเศษ และขั้นตอนการทำความสะอาดด้วยกรดเพื่อทำความสะอาดรูพรุนและหลีกเลี่ยงการหลุดออกของสนิมผ่านการเคลือบ โดยนิกเกิล เหล็กหล่อควรแช่ในสารละลายที่มีความเป็นกรดต่ำเท่านั้น เพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียแกรไฟต์ (graphite) ที่เกิดจากการหลอมรวมถึงกับการลดการยึดติดของกรด

เหล็กกล้าผสมอัตราสูงเช่นเหล็กกล้าไร้สนิมซีรีส์ 300 และ 400 ต้องการเทคนิคพิเศษเพื่อให้พื้นผิวมีความแอคทีฟสำหรับการเริ่มต้นการเคลือบที่เร็วขึ้นและเกิดการสร้างพันธะที่ดี โดยทั่วไปกรดไฮโดรคลอริกจะใช้ความเข้มข้นที่ค่อนข้างสูงสำหรับการทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมมีความแอคทีฟ สารกำจัดออกซิเจนแอลคาไลน์ถูกใช้งานพร้อมกับกระแสย้อนกลับแบบชั่วคราวสำหรับการเตรียมพื้นผิว เมื่อใช้การกำจัดออกซิเจนชนิดนี้กับเหล็กกล้าผสมอัตราสูงควรใช้กับส่วนที่เป็นแคโทดิก เพื่อหลีกเลี่ยงการสร้างชั้นออกไซด์ภายใต้สภาวะแอโนดิก

2.5.2 อะลูมิเนียม และโลหะผสมอะลูมิเนียม (Aluminum and Aluminum Alloys)

การเคลือบผิวโลหะด้วยนิกเกิลโดยการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้าให้ความแข็งแรง การต้านทานต่อการกัดกร่อน การต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อการบัดกรีและการกัดกร่อนแก่พื้นผิวที่เป็นอะลูมิเนียม การเตรียมผิวของอะลูมิเนียมและโลหะผสมอะลูมิเนียมค่อนข้างจำเพาะเพราะตั้งแต่ที่อะลูมิเนียมสัมผัสกับอากาศพื้นผิวก็ปกคลุมไปด้วยออกไซด์ที่เกิดขึ้น จึงต้องกำจัดออกไซด์ก่อนถึงจะสามารถนำมาเคลือบผิวได้ นอกจากนี้ส่วนที่ถูกลำออกซิเจนออกจะต้องถูกป้องกันเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดออกไซด์ซ้ำของพื้นผิวอะลูมิเนียมมีความแฉกที่พบบ่อย

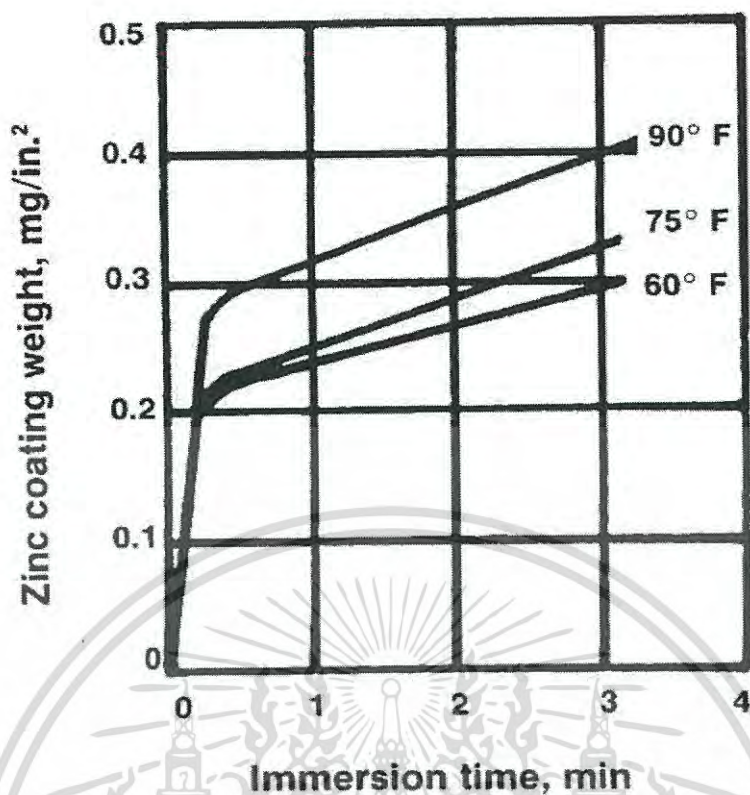
เอกลักษณ์อื่น ๆ ของอะลูมิเนียมคือปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับสารละลายเคลือบผิวโลหะด้วยนิเกิลโดยการเคลือบที่ปราศจากไฟฟ้า นิเกิลเคลือบชั้นเกาะติดบนอะลูมิเนียมได้ดี การเกาะติดของนิเกิลและปฏิกิริยาทางเคมีของพื้นผิวอะลูมิเนียมจะเกิดขึ้นทำให้เกิดการยึดติดที่ดีของการเคลือบผิวโลหะด้วยนิเกิลโดยการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้า เพื่อป้องกันพื้นผิวของอะลูมิเนียมระหว่างกระบวนการจิ้งแซ่ในสารละลายสังกะสี (ซิงค์แคต zincates) สังกะสีป้องกันไม่ให้อะลูมิเนียมเกิดออกซิเดชันซ้ำซ้อนจากการสัมผัสอากาศและการละลายซ้ำในสารละลายสำหรับการเคลือบผิวโลหะด้วยนิเกิลโดยการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้า ทำให้พื้นผิวของอะลูมิเนียมปราศจากออกไซด์จนกระทั่งนิเกิลเริ่มเกาะติดบนพื้นผิวของอะลูมิเนียม โดยทั่วไปจะเตรียมผิวอะลูมิเนียมโดยใช้สารละลายทำความสะอาดแอลคาไลน์ กรด หรือต่าง สารกำจัดออกซิเจน และซิงค์แคต การทำความสะอาดพื้นผิวด้วยสารละลายทำความสะอาดแอลคาไลน์อ่อน ๆ จะไม่มีผลกระทบหรือมีผลกระทบน้อยมาก ๆ ต่อพื้นผิวของอะลูมิเนียมในขณะการกำจัดสิ่งสกปรกอินทรีย์ สารละลายทำความสะอาดแอลคาไลน์ที่แรง ๆ จะมีผลกระทบต่อพื้นผิวของอะลูมิเนียมทันที ซึ่งจะขัดขวางการยึดเกาะของนิเกิลจากการเคลือบผิวโลหะด้วยนิเกิลโดยการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้า

กลไกพื้นฐานของซิงค์แคตโดยการแทนที่สังกะสีจากสารละลายแอลคาไลน์ซิงค์แคตด้วยอะลูมิเนียม

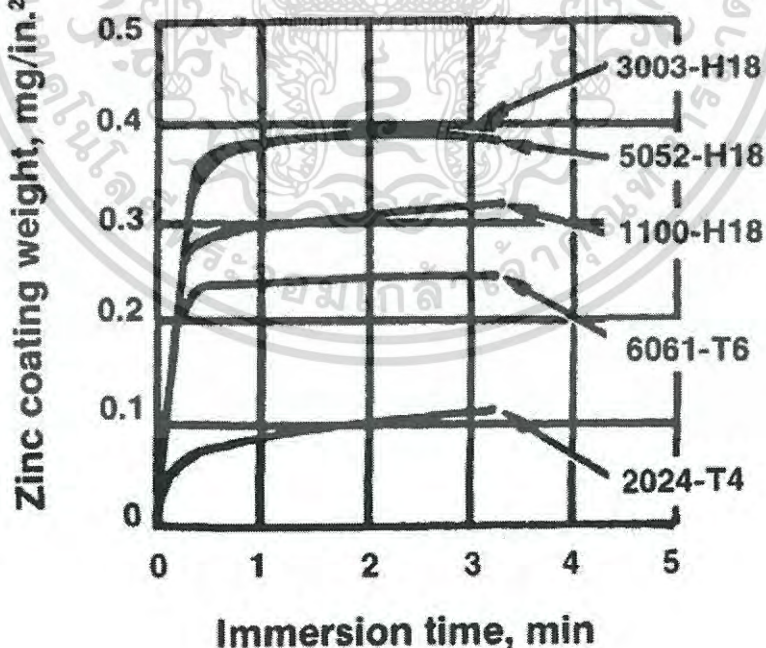


อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารละลายซิงค์แคต และชนิดของโลหะผสมอะลูมิเนียม ซึ่งส่งผลถึงโครงสร้าง ความสม่ำเสมอ ความหนาของชั้นฟิล์มสังกะสี ความสามารถในการเกาะติด และความสามารถในการป้องกันของการเคลือบผิวโลหะด้วยนิเกิลโดยการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้า ดังนั้นอ่างซิงค์แคตจะต้องได้รับการควบคุมทั้งองค์ประกอบ อุณหภูมิ และเวลาในการแช่ กระบวนการการแช่ซิงค์แคตจะได้ผลดีกับโลหะผสมอะลูมิเนียมชนิดหนึ่ง และอาจจะไม่มีผลเกิดขึ้นถ้าพื้นผิวของโลหะผสมเปลี่ยนแปลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ผลของอุณหภูมิของสารละลายซิงค์เคตต่อน้ำหนักของชั้นฟิล์มสังกะสีบนพื้นผิวอลูมิเนียม



รูปที่ 2.2 น้ำหนักของชั้นสังกะสีที่เกิดขึ้นจากกระบวนการการแช่แอลคาไลน์ซิงค์เทียบกับโลหะผสมอลูมิเนียมชนิดต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนสำคัญอีกอย่างหนึ่งของกระบวนการซิงค์เคต คือกลไกการเริ่มต้นของการเคลือบผิวโดยปราศจากการใช้ไฟฟ้าบนพื้นผิวอะลูมิเนียม กลุ่มของสังกะสีที่ใช้ในการชุบจะละลายในสารละลายสำหรับการเคลือบผิวโลหะด้วยนิกเกิลโดยการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้าที่มีความเป็นกรด อะลูมิเนียมจะปกคลุมไปด้วยนิกเกิล กระบวนการนี้คือการเริ่มต้นเป็นตัวเร่งอัตโนมัติ (autocatalytic) จนกระทั่งไม่เกิดการละลายอีกและจะพบสังกะสีอยู่ภายใต้ชั้นของนิกเกิล

2.5.3 ทองแดงและโลหะผสมทองแดง (Copper and Copper Alloys)

ทองแดงเป็นหนึ่งในโลหะที่ไม่เกิดการเร่งปฏิกิริยาในสารละลายสำหรับการเคลือบผิวด้วยนิกเกิลโดยการเคลือบผิวที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้า ทองแดงเป็นตัวเร่งได้ในอ่างอะมีโนโบรอน และอ่างโบโรไฮไดรด์-รีตีวซ์

ขั้นตอนต่อไปนี้ทำให้ทองแดงและโลหะผสมทองแดงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

1. เริ่มต้นโดยการกระตุ้นโดยให้ไฟฟ้าเคมีสัมผัสกับโลหะ (เหล็กกล้าหรืออะลูมิเนียม) หรือกระตุ้นด้วยไฟฟ้าในนิกเกิลคลอไรด์เจือจาง หรือในอ่างเคลือบผิวด้วยนิกเกิลโดยปราศจากการใช้ไฟฟ้า
2. เตรียมพื้นผิวด้วยตัวรีตีวซ์ที่แรง เช่นไดเมทิลอะมีโน โบรอน
3. ทำให้พื้นผิวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการชุบในสารละลายพาลาเดียมคลอไรด์ (ไม่แนะนำ)

2.5.4 แมกนีเซียม (Magnesium)

การเคลือบผิวด้วยนิกเกิลโดยการเคลือบผิวที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้าเป็นการป้องกันที่ดีบนแมกนีเซียม แต่การเคลือบบนแมกนีเซียมนั้นไม่ใช่เรื่องง่าย เนื่องจากแมกนีเซียมเป็นโลหะที่มีความว่องไวสูง สารละลายทำความสะอาดและกำจัดออกซิเจนทั่วไปไม่เพียงพอต่อการเตรียมผิวของแมกนีเซียม วิธีการเตรียมผิวที่เหมาะสมคือซิงค์เคต หรือชุบฟลูออไรด์ก่อนหลังจากนั้นทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์ และแช่ด้วยสารละลายกรดโครมิก กระบวนการที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางคือชุบฟลูออไรด์ก่อน และใช้สารละลายพิเศษสำหรับการเคลือบด้วยนิกเกิลโดยการเคลือบที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้าที่ประกอบด้วยฟลูออไรด์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการยึดเกาะให้ดีขึ้น

2.6 เทคนิคโพเทนชิโอดนามิกโพลาริเซชัน (Potentiodynamic polarization technique) [5]

เทคนิคโพเทนชิโอดนามิกโพลาริเซชันเป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมกัดกร่อนของตัวอย่างโลหะภายใต้สภาพแวดล้อมที่กำหนด โดยเฉพาะโลหะที่มีคุณสมบัติในการสร้างชั้นฟิล์มป้องกันโดยจะใช้ชิ้นงานของตัวอย่างโลหะเป็นขั้วทำงานซึ่งจะอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีสถานะของความเข้มข้น อุณหภูมิ หรือปริมาณออกซิเจนในสารละลายตามกำหนดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงมาตรฐานจะทำการต่อให้ครบวงจร จากนั้นทำการป้อนศักย์ไฟฟ้าเพื่อช่วยเร่งปฏิกิริยาการกัดกร่อน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ่านไปยังชั่วตรงข้ามโดยทำการป้อนศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นที่มีค่าต่ำจากศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนไปทางบวกเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ตรวจวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปตามค่าศักย์ไฟฟ้าต่าง ๆ ซึ่งกระแสจะลดลงเมื่อตัวอย่างโลหะสร้างชั้นฟิล์มป้องกัน และจะเพิ่มขึ้นทันทีในภายหลังเมื่อชั้นฟิล์มป้องกันถูกทำลายโดยสารละลายอิเล็กโทรไลต์

ในงานวิจัยครั้งนี้จะมุ่งเน้นที่การทดสอบด้วยหลักการทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งจะทดสอบด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตทโดยผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบคือ เส้นโค้งโพลาริเซชัน ค่าสำคัญที่ได้จากเส้นโค้งโพลาริเซชัน คือค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน จากนั้นนำค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนไปคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนต่อไป



รูปที่ 2.3 เครื่องโพเทนชิโอสแตท พร้อมอุปกรณ์ และเซลล์การกัดกร่อน

หลักการทำงานของเครื่องโพเทนชิโอสแตทประยุกต์มาจากสมการของเนินส์ โดยวัดค่าแรงขับเคลื่อนไฟฟ้า (Electromotive force, emf) หรือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมี โดยต่อเข้ากับแหล่งจ่ายศักย์ไฟฟ้า คือ เครื่องโพเทนชิโอสแตท (Potentiostat)

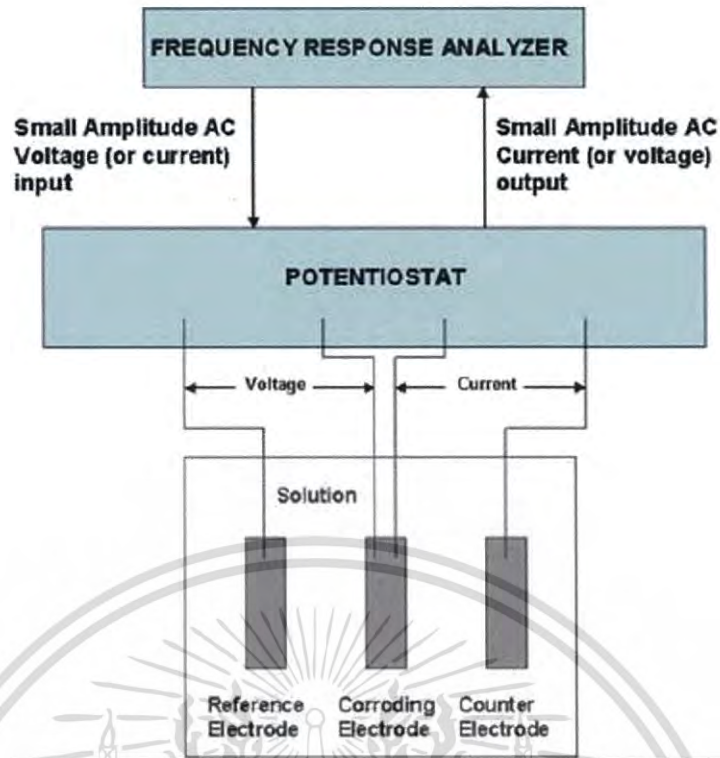
ขั้วไฟฟ้า (Electrode) ที่ใช้มี 3 ส่วนดังนี้

1. Reference electrode เป็นขั้วอ้างอิงเมื่อวัดเทียบกับ Working electrode จะได้ศักย์ไฟฟ้าของโลหะนั้น สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ใช้ขั้วอ้างอิงเป็นขั้วไฟฟ้าชนิดคาโลเมลอิ่มตัว (Saturated Calomel Electrode, SCE)

2. Counter electrode เป็นขั้วอ้างอิงเมื่อวัดเทียบกับ Working electrode จะได้กระแสไฟฟ้าของโลหะนั้น สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ใช้เป็นแผ่นโลหะแพลทินัมผิวเรียบขนาดกว้าง 1.5 เซนติเมตร ยาว 5.0 เซนติเมตรและหนา 0.1 เซนติเมตร

3. Working electrode เป็นโลหะที่ต้องการทดสอบ สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ใช้เป็นแท่งโลหะทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตรและหนา 3 มิลลิเมตร

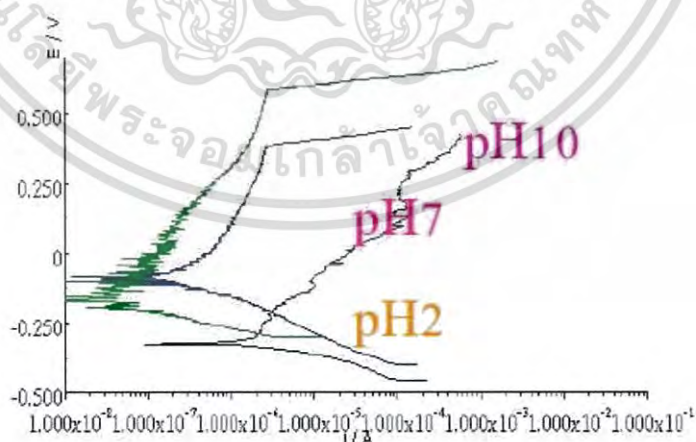
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 หลักการทำงานของเครื่องโพเทนชิโอสแตท

ค่าที่วัดได้จากเครื่องโพเทนชิโอสแตทคือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current density ในหน่วยแอมป์) และศักย์ไฟฟ้า (ในช่วงที่สนใจทดสอบมีหน่วยเป็นโวลต์)

เมื่อนำค่าทั้งสอง มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์จะได้ Polarization curve ดังแสดงในรูปที่ 2.5

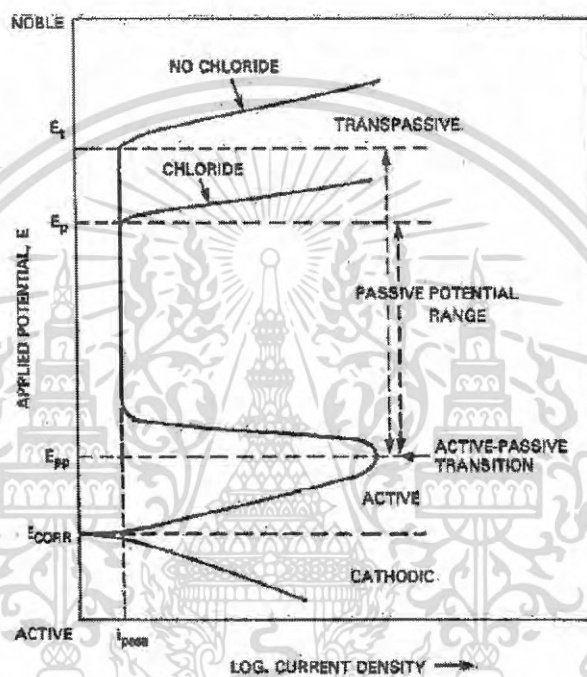


รูปที่ 2.5 ตัวอย่างเส้นโพลาริเซชันที่ได้จากการทดลองของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ค่า pH ต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากเส้นโค้งโพลาริเซชัน สามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วงที่สำคัญ คือ:

- 1) ช่วงที่โลหะเกิดความว่องไวต่อการกัดกร่อน (Active region) ตัวแปรสำคัญที่วัดได้ในช่วงนี้คือ ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน
- 2) ช่วงที่โลหะไม่ว่องไวต่อการกัดกร่อน (Passive region) ตัวแปรสำคัญที่วัดได้ในช่วงนี้คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าการเกิดพาสซีฟฟิล์ม
- 3) ช่วงที่โลหะเกิดการละลายสูญเสียเนื้อโลหะอีกครั้ง เนื่องจากการแตกออกของพาสซีฟฟิล์ม (Transpassive region)



รูปที่ 2.6 ส่วนต่าง ๆ ที่สำคัญของเส้นโค้งโพลาริเซชัน

จากค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนนำมาคำนวณหาค่าอัตราการกัดกร่อนได้จากสมการ

$$R_{mpy} = [0.13 * i_{corr} * e] / p$$

เมื่อ

- R_{mpy} คือ อัตราการเกิดการกัดกร่อน (ไมล์ต่อปี)
- i_{corr} คือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร)
- e คือ น้ำหนักกรัมสมมูลของโลหะ ในที่นี้มีค่า 27.92
- p คือ ความหนาแน่นของโลหะ ในที่นี้มีค่า 7.87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 หลักการของเครื่องมือ

เครื่องมือที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์คุณลักษณะของโลหะที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยวิธีการเคลือบผิวโลหะโดยปราศจากการใช้ไฟฟ้า

2.7.1 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ (X-ray Diffractometer, XRD) [6]

X-ray diffractometer (XRD) เป็นเครื่องมือ ที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุโดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้อีกด้วย ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิดจะมีขนาดของ Unit Cell ที่ไม่เท่ากัน ทำให้รูปแบบของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ที่ออกมาไม่เท่ากัน ทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่าง ๆ กับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ ซึ่งจะทำให้ เราทราบว่าในตัวอย่างนั้น ๆ มีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ของ XRD จะสามารถหองค์ประกอบของตัวอย่างได้แล้วนั้น ยังสามารถคำนวณหาขนาดอนุภาคของแต่ละ Unit cell, ความเครียดของตัวอย่าง , ค่าความเป็นผลึกของตัวอย่างได้อีกด้วย นอกจากนี้ยังสามารถทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มบาง และ คำนวณค่าความหนาของชั้นฟิล์มบางได้อีกด้วย

การนำเทคนิค X-ray diffraction มาใช้ในการวิเคราะห์ในส่วนที่เป็นผลึกจะใช้ลำแสง ของ monochromatic x-ray ตกกระทบกับผิวของผลึกที่มุมตกกระทบที่เหมาะสม รังสีเอกซ์ บางส่วนจะเกิดการเลี้ยวเบน (diffract) รังสีบางส่วนจะกระจัดกระจายและผ่านทะลุลงไปยังผิวชั้นที่ สองของผลึกที่ต่ำลงไป จะเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์อีกครั้งและรังสีเอกซ์บางส่วนก็จะทะลุลง ไปยังผิวผลึกชั้นที่สาม จะเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เช่นนี้ไปเรื่อย ๆ ซึ่งสามารถอธิบายและ เขียนเป็นสมการ (ดังรูปที่ 2.7) ตามกฎของ เซอร์ ดับบลิว เอช แบรกก์ นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ ที่อาศัยหลักการทางฟิสิกส์ โดยการเลี้ยวเบนโดยใช้รังสีเอกซ์ XRD เพื่ออธิบายโครงสร้างของผลึก เมื่อตกกระทบเข้ากับรังสีเอกซ์ด้วยมุมตกกระทบที่แตกต่างกัน โดยระยะห่างและความยาวคลื่นเปลี่ยนแปลงไป

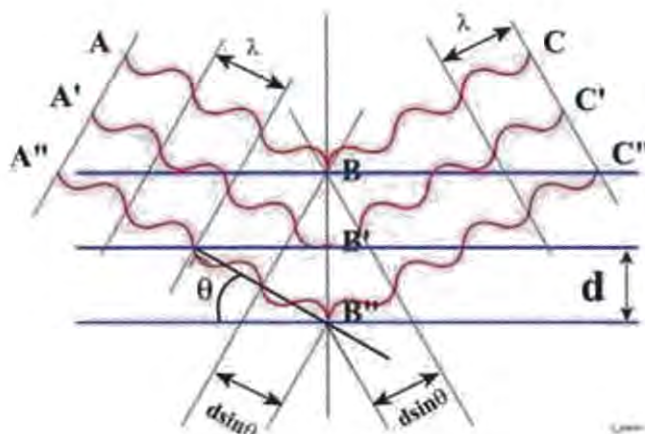
สมการ Bragg's law

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

เมื่อ

- λ คือความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์
- θ คือมุมตกกระทบระหว่างรังสีเอกซ์กับระนาบในผลึก
- d คือระยะห่างระหว่างระนาบในผลึก
- n คือลำดับการเลี้ยวเบนโดยเป็นเลขจำนวนเต็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 หลักการของ Bragg's law ในการคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

2.7.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและแอนเนอจิดิสเพอซีฟเอกซ์เรย์สเปกโตรสโคปี (Scanning electron microscopy with energy dispersive X-ray spectrometry, SEM-EDX)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นเครื่องมือที่ใช้อิเล็กตรอนในการสร้างภาพขยาย โดยอิเล็กตรอนถูกสร้างจาก Electron Gun โดยใช้ศักย์ไฟฟ้าในช่วง 2 ถึง 25 กิโลโวลต์ จากนั้นบีบลำอิเล็กตรอนให้แคบลงด้วย Condensor Lens จนมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กและเล็งให้ตกลงบนพื้นผิวของตัวอย่างด้วย Objective Lens จากนั้น Scan Coil จะควบคุมให้เกิดการกวาดของอิเล็กตรอนโดยเริ่มกวาดจากซ้ายไปขวา เมื่อเสร็จสิ้น Scan Coil จะเลื่อนลงไปอีกชั้นแล้วเริ่มกวาดจนครบเฟรม

ผิวชิ้นงานตัวอย่างที่ลำอิเล็กตรอนตกกระทบใส่จะเกิดสัญญาณขึ้นหลายรูปแบบ ถ้าผิวชิ้นงานตัวอย่างเรียบก็จะให้สัญญาณที่ดี ซึ่งสามารถรับสัญญาณได้ด้วย Detector ที่เหมาะสมกับชนิดของสัญญาณเพื่อนำมาสร้างเป็นภาพ โดยปกติสัญญาณที่ได้จะต่ำจึงต้องขยายสัญญาณให้มีความเข้มที่สูงขึ้นด้วย Amplifier เพื่อให้สัญญาณมีความแรงพอที่จะแสดงออกมาเป็นภาพ [7]

สัญญาณที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับผิวชิ้นงานจะมีหลายแบบ ได้แก่ secondary electron (SE), back-scattered electron (BE), characteristic X-ray (X-ray), รวมทั้ง Auger electron และ cathodoluminescence (visible light) และ Bremsstrahlung ซึ่งสัญญาณต่าง ๆ เหล่านี้จะเกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน อย่างไรก็ตาม สัญญาณที่มีประโยชน์ในการนำไปใช้ในการศึกษาโครงสร้างของวัสดุ คือ SE, BE และ characteristic X-ray [8]

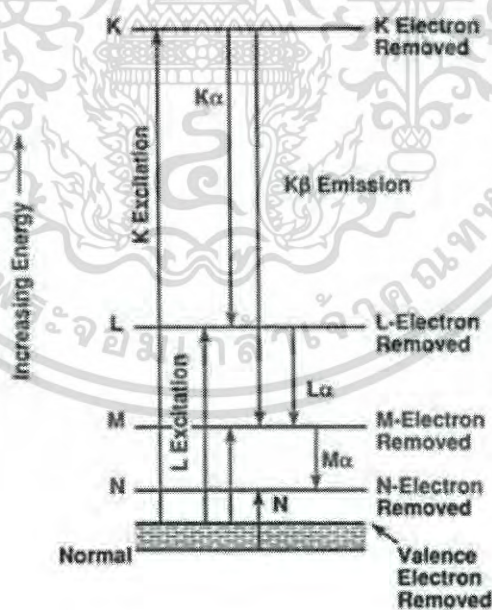
1. back-scattered electron คืออิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิด (primary electron beam) ที่ทะลุทะลวงเข้าไปได้ผิวชิ้นงานและเกิดอันตรกิริยากับอะตอมในชิ้นงานในแบบ elastic scattering

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลายๆ ครั้ง พร้อมทั้งเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางการวิ่ง จนกระทั่งอิเล็กตรอนดังกล่าวหลุดออกจากผิวชิ้นงาน ดังนั้น back-scattered electron จึงมีพลังงานสูงในระดับที่ใกล้เคียงกับพลังงานของ primary electron จากแหล่งกำเนิด

2. secondary electron เกิดจากการชนกันระหว่าง primary electron กับอะตอมสารตัวอย่างในแบบ inelastic scattering ส่งผลให้อิเล็กตรอนของอะตอมที่บริเวณผิวชิ้นงานสารตัวอย่างหลุดออกมา อย่างไรก็ตาม อิเล็กตรอนดังกล่าวจะมีพลังงานต่ำมาก (ระดับ eV) เมื่อเทียบกับ primary electron หรือ back scattered electron ดังนั้นลักษณะการเคลื่อนที่ของ secondary electron จึงมีลักษณะเป็นเส้นโค้งและถูกเหนี่ยวนำให้เปลี่ยนทิศทางได้ง่าย

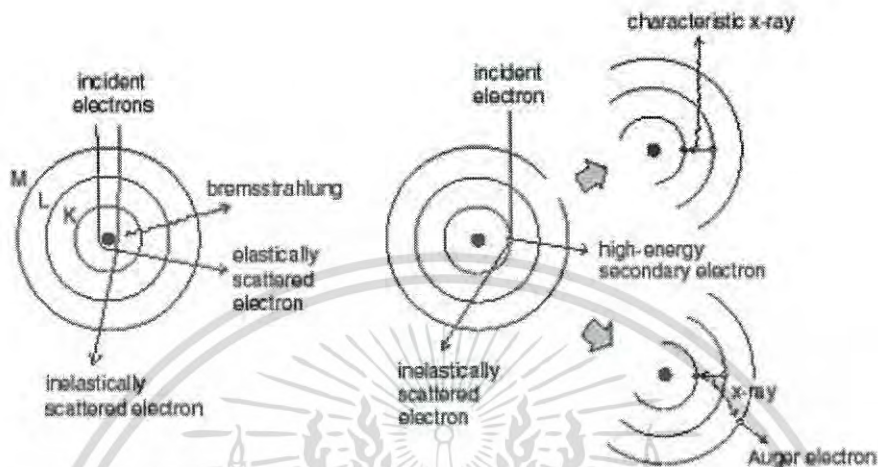
3. characteristic X-ray อิเล็กตรอนที่วิ่งเข้ามาชนกับสารตัวอย่างอาจจะไปกระแทกให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรชั้นในของอะตอมของสารตัวอย่างหลุดออกมา ส่งผลให้อะตอมดังกล่าวถูกกระตุ้นให้ขึ้นไปอยู่ในสถานะเร้าหรือสถานะที่ถูกกระตุ้น (excited state) ซึ่งเป็นสถานะที่ไม่เสถียร หลังจากนั้นอะตอมดังกล่าวจะกลับคืนสู่สถานะปกติ (ground state) โดยการที่อิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรชั้นถัดออกไปด้านนอกเลื่อนระดับ ลงมาแทนที่ช่องว่างดังกล่าว พร้อมกับมีการคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ (X-ray)



รูปที่ 2.8 แผนภาพแสดงระดับชั้นพลังงานต่าง ๆ ของอิเล็กตรอนในอะตอม ซึ่งจะสังเกตเห็นชั้น K, L และ M

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. Auger electron คืออิเล็กตรอนที่หลุดเนื่องจากรังสีเอกซ์เรย์ที่คายออกมานั้นวิ่งไปกระทบหรือชนให้ อิเล็กตรอนในวงชั้นนอกถุดออกไป ซึ่งในกรณีนี้จะเรียกอิเล็กตรอนดังกล่าวที่หลุดออกมาว่า Auger electron



รูปที่ 2.9 แผนภาพแสดงการเกิดสัญญาณที่เกี่ยวข้องกับรังสีเอกซ์ ในแบบต่าง ๆ เช่น Auger electron, continuum X-ray และ characteristic X-ray

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Zhang และคณะ ได้ศึกษาการเคลือบผิวโลหะทองแดงโดยเทคนิคการเคลือบผิวด้วยการแช่ในสารละลายแบบขั้นตอนเดียวที่ประกอบไปด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอ์เพื่อป้องกันการกัดกร่อน โดยใช้ นิกเกิลซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต (Nickel Sulfate Hexahydrate) เป็นแหล่งของนิกเกิล และโซเดียมไทโอซัลเฟตเพนตะไฮเดรต (Sodium Thiosulfate Pentahydrate) เป็นแหล่งของซัลเฟอ์ พบว่าค่า OCP (Open Circuit Potential) ของทองแดงมีค่าต่ำกว่าของนิกเกิลในสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตเพนตะไฮเดรต ซึ่งทำให้นิกเกิลเกิดการสะสมบนทองแดงเพราะการแตกตัวของโซเดียมไทโอซัลเฟตซัลเฟอ์จะเกิดการสะสมร่วม (co-deposited) กับนิกเกิลทำให้การเคลือบผิวโลหะด้วยนิกเกิลซัลเฟอ์เกิดขึ้น ซึ่งการเคลือบผิวโลหะด้วยนิกเกิลซัลเฟอ์มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่ดี ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์บนพื้นผิวพบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่บนพื้นผิวเป็นพวกโลหะนิกเกิลและนิกเกิล (II) ซัลเฟอ์ (Ni_3S_2) และผลของกระแสความหนาแน่นการกัดกร่อนของทองแดงลดลงในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก [9]

Sahoo และคณะ ได้ศึกษาการเคลือบผิวด้วยนิกเกิลโดยเทคนิคการเคลือบผิวที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้า พบว่าเทคนิคการเคลือบผิวโดยปราศจากการใช้ไฟฟ้ามีความแตกต่างจากการเทคนิคการเคลือบผิวโดยการใช้ไฟฟ้าคือการไม่ต้องการชั้นไฟฟ้าใด ๆ มาใช้ในการดำเนินการ ข้อดีของเทคนิค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเคลือบผิวโดยปราศจากการใช้ไฟฟ้าคือการเคลือบผิวที่สม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน และยังสามารถเคลือบบนพื้นผิวของวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้าได้ คุณสมบัติของการเคลือบผิวด้วยนิกเกิลโดยเทคนิคการเคลือบผิวที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้าเช่น มีความแข็งสูง มีความต้านทานต่อการสึกหรอและความต้านทานต่อการกัดกร่อนได้เป็นอย่างดี ด้วยเหตุนี้การเคลือบผิวด้วยนิกเกิลโดยเทคนิคการเคลือบผิวที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้าจึงมีการประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ อย่างกว้างขวางเช่น งานอุตสาหกรรมด้านการบินและอวกาศ ด้านยานยนต์ ด้านไฟฟ้า และด้านเคมีภัณฑ์ นอกจากนี้ยังมีการพัฒนารูปแบบของการเคลือบผิวด้วยนิกเกิลในหลากหลายรูปแบบเช่น นิกเกิล-ทังสเตน-ฟอสฟอรัส (Ni-W-P) นิกเกิล-คอปเปอร์-ฟอสฟอรัส (Ni-Cu-P) นิกเกิล-ฟอสฟอรัส-ซิลิกอนคาร์ไบด์ (Ni-P-SiC) นิกเกิล-ฟอสฟอรัส-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ni-P-TiO₂) และอื่น ๆ [10]

Tian และคณะ ได้ศึกษาการเตรียมฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟต (Ni-S) บนพื้นผิวของทองแดงผ่านปฏิกิริยาการแทนที่เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าขั้วลบในสารละลายไทโอยูเรียเข้มข้น ในสภาพแวดล้อมที่มีค่า pH ต่ำ ๆ จะส่งผลให้การสร้างชั้นฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟตได้อย่างสม่ำเสมอ ปริมาณของซัลเฟตในฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟตจะเพิ่มขึ้นโดยการเพิ่มขึ้นของเวลาในการสะสมบนพื้นผิวและการเพิ่ม pH ในสารละลาย การมีซัลเฟตในฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟตพบว่ามีคุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ส่วนสำคัญอื่น ๆ คือการวัดเส้นโค้งของกระแสที่และเส้นโค้งของ anodic polarization แสดงให้เห็นว่าฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟตที่มีปริมาณซัลเฟตสูงมีแนวโน้มจะเป็นพาสซีฟ (Passivated) มีอิทธิพลในเชิงลบต่อการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เส้นโค้ง polarization ค่า electrochemical impedance spectroscopy และ open circuit potential (OCP) ที่วัดได้ถูกนำมาใช้ตรวจสอบความเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟตสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันไฮโปฟอสไฟต์ และการเคลือบผิวด้วยนิกเกิลโดยเทคนิคการเคลือบผิวที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้า (Electroless Nickel plating, EN) สามารถปรับปรุงสมบัติการเร่งปฏิกิริยาของฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟตสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันไฮโปฟอสไฟต์และการเคลือบผิวด้วยนิกเกิลโดยเทคนิคการเคลือบผิวที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้า เปรียบเทียบกับฟิล์มพาลาเดียม ฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟตมีสมบัติการเร่งปฏิกิริยาที่คล้ายคลึงกัน และการเคลือบผิวโดยปราศจากการใช้ไฟฟ้าชั้นนิกเกิล-ฟอสเฟตเกิดขึ้นในระหว่างการทำ EN [11]

Somasundaram และคณะ ได้ศึกษาการเคลือบผิวของโลหะผสมสังกะสีและนิกเกิลโดยใช้ทองแดงเป็นพื้นผิวรองรับผ่านเทคนิคการเคลือบผิวโดยใช้ขั้วไฟฟ้าจากการปรับแต่งอ่างเคลือบฟิชล็อก (Fishlock bath) ที่ประกอบไปด้วยนิกเกิลซัลเฟต นิกเกิลแอมโมเนียมซัลเฟต ซิงค์ซัลเฟต และแอมโมเนียมไทโอไซยาเนต นิกเกิลให้ความหนาที่ประมาณ 4 ถึง 5 ไมโครเมตรจากการใช้อ่างเคลือบวัตส์ (Watts bath) เพื่อเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน และการยึดเกาะแก่การเคลือบนิกเกิล ตัวแปรของกระบวนการจะถูกพัฒนาให้เหมาะสมต่อพื้นที่ที่มีการปล่อยรังสีสูง ๆ ของการเคลือบนิกเกิลเพื่อป้องกันรังสีความร้อน ที่ความหนา 5 ถึง 6 ไมโครเมตรการเคลือบของโลหะผสมสังกะสีและนิกเกิลจะเกิดขึ้นพร้อมกระบวนการที่เหมาะสมแสดงการปล่อยรังสีที่ 0.83 และการดูดซับรังสีที่ 0.92 อัตราส่วนสังกะสีต่อนิกเกิลที่ปล่อยรังสีสูงอยู่ในช่วงระหว่าง 2.3 ถึง 2.4 [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

He และคณะ นักเกิล-ซัลเฟอร์ถูกเคลือบบนนิเกิลโพลด้วยวิธีการเคลือบผิวโดยการใช้ไฟฟ้า สันฐานวิทยาของแต่ละชั้นของการเคลือบนิเกิล-ซัลเฟอร์ถูกตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) การกระจายตัวและปริมาณของซัลเฟอร์ในการเคลือบนิเกิล-ซัลเฟอร์ถูกวัดด้วยเครื่องเอนเนอจีดีสเพอซีฟเอกซ์เรย์สเปกโตรสโคปี (EDX) องค์ประกอบของการเคลือบนิเกิล-ซัลเฟอร์ชั้นแรกถูกตรวจวัดด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ (XRD) ผลของการตรวจวัดการกระจายตัวของซัลเฟอร์ในแต่ละชั้นของนิเกิลโพลไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ขนาดของอนุภาคไม่เหมือนกัน โครงสร้างอสังฐานของการเคลือบนิเกิล-ซัลเฟอร์ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและปริมาณซัลเฟอร์ในการเคลือบ เมื่อปริมาณของซัลเฟอร์ในการเคลือบเปลี่ยนจาก 18 เปอร์เซ็นต์เป็น 18.62 เปอร์เซ็นต์ ศักย์ปฏิกิริยาไฮโดรเจนจะลดลง มีการดูดซับอะตอมของไฮโดรเจนจำนวนมากในโครงสร้างอสังฐานของการเคลือบนิเกิล-ซัลเฟอร์ในกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) เพื่อปรับปรุงสมบัติอิเล็กโทรแคตาไลติก (Electrocatalytic) ของปฏิกิริยาไฮโดรเจน โครงสร้างอสังฐานของการเคลือบนิเกิล-ซัลเฟอร์จะเริ่มละลายที่ความต่างศักย์ -0.6 โวลต์ และเริ่มเป็นชั้นพาสซีฟ (Passivated) ที่ความต่างศักย์ -0.47 โวลต์ ศักย์ปฏิกิริยาไฮโดรเจนของการเคลือบโดยการใช้ไฟฟ้าบนนิเกิลโพลจะมีค่าต่ำที่สุด พลังงานกระตุ้นมีค่าเป็น 46.8 กิโลจูลต่อโมล ที่ 0.1 โวลต์ เกินศักย์ปฏิกิริยาไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียสศักย์ไฟฟ้าในเซลล์กระตุ้นจะเป็น 1.7 โวลต์ที่ 0.2 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และเป็น 1.96 โวลต์ที่ 0.4 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร [13]

Yagi และคณะ ได้ศึกษาการเคลือบผิวด้วยนิเกิลโดยเทคนิคการเคลือบผิวที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้าบนทองแดงที่มีความกว้างน้อยกว่า 200 นาโนเมตรที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสโดยใช้สารละลายสำหรับเคลือบผิวที่มีไทเทเนียมไอออน (Ti (III) ions) เป็นตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) สารละลายที่ใช้ประกอบไปด้วยนิเกิลซัลเฟตความเข้มข้น 0.04 โมลาร์ (0.04 M NiSO_4) ไททานเนียมไตรคลอไรด์ความเข้มข้น 0.08 โมลาร์ (0.08 M TiCl_3) กรดซิตริกความเข้มข้น 0.24 โมลาร์ (0.24 M citric acid (เกลือโซเดียม, Na_3 Cit) และกรดไนไตรโลตริอะซิติกความเข้มข้น 0.04 โมลาร์ (0.04 M nitrilotriacetic acid (เกลือโซเดียม, Na_3 NTA) เมื่อทำการเคลือบผิวชั้นของนิเกิลจะมีความต่อเนื่องและสม่ำเสมอหนาประมาณ 10 นาโนเมตรพบเฉพาะบริเวณที่เป็นทองแดงเท่านั้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระหว่างทำการเคลือบผิวอธิบายได้จากหลักการทางกลศาสตร์ (Thermodynamic standpoint) อัตราการเคลือบผิวที่ดีได้รับอิทธิพลจากความต่างศักย์การแช่และค่า pH ของสารละลาย ปฏิกิริยารีดักชันของน้ำในสารละลายและปฏิกิริยาข้างเคียงส่งผลให้ค่า pH ต่ำลงและการเคลือบเกิดช้าลง ระบบที่ใช้ Ni^{2+} -citrate และ Ni^{2+} -nitrilotriacetate สามารถคำนวณการกระจายของสารประกอบเชิงซ้อนนิเกิล (II) ไอออนในสารละลายโดยการปรับค่าความเข้มข้นของ Na_3 NTA วิเคราะห์ที่องค์ประกอบเป็นนิเกิลซัลเฟตความเข้มข้น 0.04 โมลาร์ Na_3 Cit ความเข้มข้น 0.24 โมลาร์ Na_3 NTA ความเข้มข้น 0.12 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของ Na_3 NTA มีผลต่อความเสถียรของสารละลายที่ใช้ในการเคลือบและอัตราการเคลือบ [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Cao และคณะ ได้ศึกษาการปรับแต่งของนิกเกิล-ซัลเฟตสารประกอบตัวกลางสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรเจนในสารละลายแอลคาไลน์โดยการเคลือบผิวโดยการใช้ไฟฟ้าจากอ่างวัตส์ (watts bath) ที่มีโซเดียมไทโอซัลเฟตเป็นแหล่งของซัลเฟอร์ และกรดซัลโฟซาลิไซลิก (Sulfosalicylic acid) เป็นสารเติมแต่ง การวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ (XRD) แสดงให้เห็นว่าฟิล์มของนิกเกิล-ซัลเฟตมีคุณลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่ดีประกอบด้วยโครงสร้างในเฟสสารประกอบตัวกลางและโครงสร้างในเฟสอสัณฐาน ฟิล์มสารประกอบตัวกลางที่เกิดขึ้นมีสมบัติในการเร่งปฏิกิริยาที่สูงสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรเจนในสารละลายแอลคาไลน์เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟตที่ประกอบไปด้วยโครงสร้างเฟสอสัณฐาน [15]

He และคณะ นิกเกิล-ซัลเฟอร์ถูกเคลือบบนนิกเกิลโพลีเมอร์ด้วยวิธีการเคลือบผิวโดยการใช้ไฟฟ้าและปรับปรุงอ่างวัตส์ (Watts bath) ที่ประกอบไปด้วยไทโอยูเรีย กรดซิทริก และจำนวนเล็กน้อยของแซคคาริน สัณฐานวิทยาของชั้นเคลือบนิกเกิล-ซัลเฟอร์ถูกตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) การกระจายตัวและปริมาณของซัลเฟอร์ในการเคลือบนิกเกิล-ซัลเฟอร์ถูกวัดด้วยเครื่องเอเนอจีดีสเพอซีฟเอกซ์เรย์สเปกโตรสโคปี (EDX) องค์ประกอบของการเคลือบนิกเกิล-ซัลเฟอร์ชั้นแรกถูกตรวจวัดด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ (XRD) ความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนรวมถึงการเคลือบนิกเกิล-ซัลเฟอร์บนโพลีเมอร์ก็ถูกตรวจวัดเช่นกัน ผลของการตรวจวัดการกระจายตัวของปริมาณซัลเฟอร์ในชั้นต่าง ๆ มีการไล่ระดับและไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ขนาดของอนุภาคในแต่ละชั้นไม่เหมือนกัน ผลของ XRD แสดงโครงสร้างของการเคลือบนิกเกิล-ซัลเฟอร์เป็นอสัณฐาน โดยการเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าโครงสร้างจะค่อย ๆ เป็นอสัณฐานมากขึ้น ส่วนโครงสร้างผลึกจะค่อย ๆ ลดลง ในช่วงปริมาณของซัลเฟอร์จาก 18 เปอร์เซ็นต์ถึง 18.8 เปอร์เซ็นต์สมบัติทางไฟฟ้าเคมีของการเคลือบนิกเกิล-ซัลเฟตจะสูงที่สุด ปฏิกิริยาไฮโดรเจนของโครงสร้างอสัณฐานการเคลือบนิกเกิล-ซัลเฟตบนนิกเกิลโพลีเมอร์จะมีค่าสูงกว่าบนพื้นผิวนิกเกิลสุทธิ [16]

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. บีกเกอร์ขนาด 50 250 600 และ 1000 มิลลิลิตร
2. กระจกบอทวงขนาด 100 มิลลิลิตร
3. ขวดปรับปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร
4. หลอดหยด
5. แท่งแก้วคนสาร
6. ข้อนตักสาร
7. คีมคีบ (Forceps)
8. กระจกบอทน้ำกลั่น
9. ตู้อุคควัน
10. ไตรลัมร้อน
11. ขาตั้ง (Stand)
12. แคลมป์จับ
13. ตัวยึดแคลมป์กับขาตั้ง
14. หนั่งยาง
15. เครื่องชั่งน้ำหนักไฟฟ้า 2 ตำแหน่ง
16. เครื่องล้างความถี่สูง 44 kHz
17. กระจกทรายเบอร์ 280 600 1000 และ 2000
18. ชุดทดลองเซลล์ชีวไฟฟ้า
19. กรงฟาราเดย์
20. เครื่องโพเทนชิโอสแตท/กัลวานอสแตท รุ่น PGSSTAT12
21. ตลับสำหรับใส่ชิ้นงาน

3.2 สารเคมี

1. นิกเกิลซัลเฟต เฮกซะไฮเดรต ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) บริษัท carlo erba จำกัด เกรตวิเคราะห์
2. โซเดียมไทโอซัลเฟต เพนตะไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) บริษัท carlo erba จำกัด เกรตวิเคราะห์
3. โครเมียมซัลเฟต ($\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$) บริษัท carlo erba จำกัด เกรตวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. น้ำกลั่น

5. กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) 96 เปอร์เซ็นต์ บริษัท carlo erba จำกัด เกรดวิเคราะห

6. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) บริษัท carlo erba จำกัด เกรดวิเคราะห

7. โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) บริษัท carlo erba จำกัด เกรดวิเคราะห

8. เอทิลแอลกอฮอล์ (CH_3CH_2OH or C_2H_5OH) บริษัท carlo erba จำกัด เกรดวิเคราะห

9. ก๊าซไนโตรเจน 99.5 เปอร์เซ็นต์ บริษัท ยูไนเต็ด อินดัสเตรียลแก๊ส จำกัด เกรดการค้ำ

10. กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (conc. HCl) บริษัท ฟิชเชอร์ เคมีคอล จำกัด เกรดวิเคราะห

11. แห้งทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร หนา 3 มิลลิเมตร

99.9 เปอร์เซ็นต์ บริษัท พรพูนอนันต์ จำกัด

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมผิวชิ้นงาน

ใช้โลหะทองแดงบริสุทธิ์ 99.9 เปอร์เซ็นต์ มีลักษณะเป็นทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร หนา 3 มิลลิเมตร โดยมีขั้นตอนการเตรียมผิวดังต่อไปนี้

1. นำชิ้นงานขัดผิวด้วยกระดาษทรายเบอร์ 280 600 1200 และ 2000 ตามลำดับจนผิวหน้าของแห้งทองแดงที่ใช้เป็นซับสเตรตเรียบเนียน และให้มีรอยขีดเป็นไปในทางเดียว
2. ล้างชิ้นงานที่ขัดแล้วด้วยสารลดแรงตึงผิว และน้ำกลั่น
3. ล้างชิ้นงานโดยใช้เครื่อง Sonicator bath ด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเป่าชิ้นงานให้แห้งด้วยลมร้อนจากไดร์
4. เก็บชิ้นงานที่แห้งสนิทในตลับมีฝาปิด

3.3.2 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายสำหรับเคลือบผิวโลหะทองแดง

สารละลายใช้ในการเคลือบผิวโลหะทองแดงมีขั้นตอนการเตรียมดังต่อไปนี้

3.3.2.1 สารละลายนิกเกิล-ซัลเฟอร์

1. ชั่งนิกเกิลซัลเฟต เฮกซะไฮเดรต 5 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร
2. ชั่งโซเดียมไทโอซัลเฟต เพนตะไฮเดรต 16 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร
3. ผสมสารละลายทั้งสองข้างต้นเข้าด้วยกัน

3.3.2.2 สารละลายนิกเกิล-ซัลเฟอร์ โดยเติมสารละลายโครเมียมซัลเฟต

1. ชั่งนิกเกิลซัลเฟต เฮกซะไฮเดรต 5 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร
2. ชั่งโซเดียมไทโอซัลเฟต เพนตะไฮเดรต 16 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร
3. ชั่งโครเมียมซัลเฟต 0.44 กรัม
4. ผสมสารละลายทั้งสามข้างต้นเข้าด้วยกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 ขั้นตอนการเคลือบผิวโลหะทองแดงด้วยเทคนิคการเคลือบผิวโดยปราศจากการไฟฟ้า

การเคลือบผิวโลหะทองแดงขั้นตอนการเตรียมดังต่อไปนี้

3.3.3.1 การเคลือบผิวโลหะทองแดง ด้วยสารละลายนิกเกิล-ซัลเฟอร์

1. นำชิ้นงานที่แห้งสนิทออกจากถ้ำด้วยคีมคีบ มัดคีมคีบด้วยหนังยาง
2. ใช้แคลมป์และขาตั้งเป็นตัวช่วยจับคีมคีบขณะทำการชุบ
3. แช่โลหะทองแดงลงในสารละลายผสมที่เตรียมได้ เป็นเวลา 30 นาที
4. นำโลหะทองแดงออกจากสารละลาย ล้างด้วยน้ำกลั่น
5. เป่าให้แห้งด้วยลมร้อน จากนั้นเก็บชิ้นงานที่แห้งสนิทในถ้ำมีฝาปิด

3.3.3.2 การเคลือบผิวโลหะทองแดง ด้วยสารละลายนิกเกิล-ซัลเฟอร์ โดยเติมสารละลายโครเมียมซัลเฟต

1. นำชิ้นงานที่แห้งสนิทออกจากถ้ำด้วยคีมคีบ มัดคีมคีบด้วยหนังยาง
2. ใช้แคลมป์และขาตั้งเป็นตัวช่วยจับคีมคีบขณะทำการชุบ
3. แช่โลหะทองแดงลงในสารละลายผสมที่เตรียมได้ เป็นเวลา 30 นาที
4. นำโลหะทองแดงออกจากสารละลาย ล้างด้วยน้ำกลั่น
5. เป่าให้แห้งด้วยลมร้อน จากนั้นเก็บชิ้นงานที่แห้งสนิทในถ้ำมีฝาปิด

3.3.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์บนพื้นผิวของโลหะทองแดง

นำโลหะทองแดงที่ได้หลังจากการเคลือบผิวมาตรวจวัดเอกลักษณ์โดยเทคนิคการพิสูจน์เอกลักษณ์ต่าง ๆ ดังนี้

3.3.4.1 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของพื้นผิวโลหะที่ผ่านการเคลือบผิว ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)



รูปที่ 3.1 เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4.2 วิเคราะห์สัณฐานวิทยาของพื้นผิวโลหะที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ติดตั้งร่วมกับเครื่องเอกซเรย์สเปกโตรสโคปแบบกระจายพลังงาน (Scanning electron microscopy with energy dispersive X-ray spectrometry, SEM-EDX)



รูปที่ 3.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ติดตั้งร่วมกับเครื่องเอกซเรย์สเปกโตรสโคปแบบกระจายพลังงาน (Scanning electron microscopy with energy dispersive X-ray spectrometry, SEM-EDX)

3.3.5 ศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนโดยตรวจวัดด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตท นำโลหะทองแดงที่ได้หลังจากการเคลือบผิวมาตรวจวัดพฤติกรรมการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนซิโอสแตทนามิกโพลาริเซชันที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 3.3 เครื่องโพเทนชิโอสแตท/กัลวานอสแตท พร้อมอุปกรณ์ และเซลล์การกัดกร่อน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 กรงฟาราเดย์

3.3.5.1 ตรวจวัดพฤติกรรมกรรมการกัดกร่อนของชั้นฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟอร์ด้วยเทคนิค-โพเทนชิโอดีนามิกโพลาริเซชันที่อุณหภูมิห้องในน้ำกลั่น สารละลายกรดซัลฟิวริก และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ค่า pH ต่าง ๆ

โดยมีขั้นตอนการตรวจวัดดังนี้

1. เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์และเครื่องโพเทนชิโอสแตท/กัลวานอสแตท
2. เลือกโปรแกรมควบคุม กรอกข้อมูลพื้นที่ผิวของชิ้นงานตัวอย่าง
3. เลือกสภาวะสำหรับการทดสอบ ใช้อัตราเร็วในการสแกนที่ 6000 มิลลิโวลต์ต่อ ชั่วโมง ปรับค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วงตั้งแต่ -500 ถึง 1000 มิลลิโวลต์ เทียบกับค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (Open Circuit Potential, OCP)
4. ชัดชุดทดลองการทดสอบการกัดกร่อนด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในอัตราส่วน 1:1 จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่น ทั้งไว้ให้แห้ง หรืออาจทำให้แห้งได้ด้วยลมร้อนจากไดร์
5. เทน้ำกลั่นลงขวด 5 คอ จากนั้นไล่ออกซิเจนด้วยก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 30 นาที
6. ประกอบชิ้นงานตัวอย่างเข้ากับชุดทดลอง ชิ้นให้ตั้งมือ
7. ต่อขั้วไฟฟ้าจากเครื่องโพเทนชิโอสแตท/กัลวานอสแตทเข้ากับชุดทดลองการทดสอบการกัดกร่อน โดยต่อขั้วอ้างอิงเป็นขั้วไฟฟ้าชนิดคาโลเมลอิมมัว ขั้วตรงข้ามเป็นแผ่นโลหะแพลทินัม ขั้วทำงานเป็นโลหะที่ใช้ในการทดสอบการกัดกร่อน และต่อสายดินเข้ากับกรงฟาราเดย์ โดยไล่ออกซิเจนด้วยก๊าซไนโตรเจนตลอดเวลาการทดสอบ
8. กดปุ่มเริ่มทำการทดสอบ เมื่อตรวจวัดเสร็จจึงทำการบันทึกข้อมูล
9. หาค่า i_{corr} และ E_{corr} โดยการประมาณการการนอกช่วงตามแบบทาเฟิล (Tafel extrapolation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. ทำการทดสอบซ้ำโดยเปลี่ยนชิ้นงานตัวอย่างและสารละลายเป็นสารละลายกรดซัลฟิวริกที่มีค่า pH เท่ากับ 5 และ 6 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีค่า pH เท่ากับ 8 และ 9

3.3.5.2 ตรวจวัดพฤติกรรมการกัดกร่อนของชั้นฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟอร์ด้วยเทคนิคโพเทนซิโอดินามิกโพลาริเซชันที่อุณหภูมิห้องในน้ำกลั่น และสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

โดยมีขั้นตอนการตรวจวัดดังนี้

1. เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์และเครื่องโพเทนซิโอสแตท/กัลวานอสแตท
2. เลือกโปรแกรมควบคุม กรอกข้อมูลพื้นที่ผิวของชิ้นงานตัวอย่าง
3. เลือกสภาวะสำหรับการทดสอบ ใช้อัตราเร็วในการสแกนที่ 30000 มิลลิโวลต์ต่อชั่วโมง ปรับค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วงตั้งแต่ -500 ถึง 1000 มิลลิโวลต์ เทียบกับค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (Open Circuit Potential, OCP)
4. ขัดชุดทดลองการทดสอบการกัดกร่อนด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในอัตราส่วน 1:1 จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่น ทิ้งไว้ให้แห้ง หรืออาจทำให้แห้งได้ด้วยลมร้อนจากไดร์
5. เหน้้ำกลั่นลงขวด 5 คอ จากนั้นไล่ออกซิเจนด้วยก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 30 นาที
6. ประกอบชิ้นงานตัวอย่างเข้ากับชุดทดลอง ชั้นให้ตั้งมือ
7. ต่อขั้วไฟฟ้าจากเครื่องโพเทนซิโอสแตท/กัลวานอสแตทเข้ากับชุดทดลองการทดสอบการกัดกร่อน โดยต่อขั้วอ้างอิงเป็นขั้วไฟฟ้าชนิดคาโลเมลล์อิ่มตัว ขั้วตรงข้ามเป็นแผ่นโลหะแพลทินัม ขั้วทำงานเป็นโลหะที่ใช้ในการทดสอบการกัดกร่อน และต่อสายดินเข้ากับกรงฟาราเดย์ โดยไล่ออกซิเจนด้วยก๊าซไนโตรเจนตลอดเวลาการทดสอบ
8. กดปุ่มเริ่มทำการทดสอบ เมื่อตรวจวัดเสร็จจึงทำการบันทึกข้อมูล
9. หาค่า i_{corr} และ E_{corr} โดยการประมาณการการนอกช่วงตามแบบทาเฟิล (Tafel extrapolation)
10. ทำการทดสอบซ้ำโดยเปลี่ยนชิ้นงานตัวอย่างและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็นร้อยละ 0.1 0.5 1 1.5 2 และ 3

3.3.5.3 ตรวจวัดพฤติกรรมการกัดกร่อนของชั้นฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียมด้วยเทคนิคโพเทนซิโอดินามิกโพลาริเซชันที่อุณหภูมิห้องในสารละลายกรดซัลฟิวริก pH 5

โดยมีขั้นตอนการตรวจวัดดังนี้

1. เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์และเครื่องโพเทนซิโอสแตท/กัลวานอสแตท
2. เลือกโปรแกรมควบคุม กรอกข้อมูลพื้นที่ผิวของชิ้นงานตัวอย่าง
3. เลือกสภาวะสำหรับการทดสอบ ใช้อัตราเร็วในการสแกนที่ 6000 มิลลิโวลต์ต่อชั่วโมง ปรับค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วงตั้งแต่ -500 ถึง 1000 มิลลิโวลต์ เทียบกับค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (Open Circuit Potential, OCP)
4. ขัดชุดทดลองการทดสอบการกัดกร่อนด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วน 1:1 จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่น ทิ้งไว้ให้แห้ง หรืออาจทำให้แห้งได้ด้วยลมร้อนจากไดร์

5. เทสารละลายกรดซัลฟิวริก pH 5 ลงขวด 5 คอ จากนั้นไล่ออกซิเจนด้วยก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 30 นาที

6. ประกอบชิ้นงานตัวอย่างเข้ากับชุดทดลอง ชั้นให้ตั้งมือ

7. ต่อขั้วไฟฟ้าจากเครื่องโพเทนชิโอสแตท/กัลวานอสแตทเข้ากับชุดทดลองการทดสอบการกัดกร่อน โดยต่อขั้วอ้างอิงเป็นขั้วไฟฟ้าชนิดคาโลเมลอิ่มตัว ขั้วตรงข้ามเป็นแผ่นโลหะแพลทินัม ขั้วทำงานเป็นโลหะที่ใช้ในการทดสอบการกัดกร่อน และต่อสายดินเข้ากับกรงฟาราเดย์ โดยไล่ออกซิเจนด้วยก๊าซไนโตรเจนตลอดเวลาการทดสอบ

8. กดปุ่มเริ่มทำการทดสอบ เมื่อตรวจวัดเสร็จจึงทำการบันทึกข้อมูล

9. หาค่า i_{corr} และ E_{corr} โดยการประมาณการการนอกช่วงตามแบบทาเฟิล (Tafel extrapolation)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

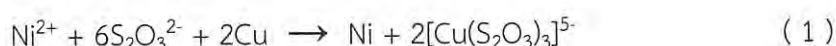
งานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการเคลือบผิวโลหะทองแดงด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์ และนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียมโดยเทคนิคการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้า ซึ่งแหล่งของนิกเกิลได้มาจากนิกเกิลซัลเฟต เฮกซะไฮเดรต ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) แหล่งของซัลเฟอร์ได้มาจากโซเดียมไทโอซัลเฟต เพนตะไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) และแหล่งของโครเมียมได้มาจากโครเมียมซัลเฟต ($\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$) โดยผลของการวิจัยจะกล่าวถึงการพิสูจน์เอกลักษณ์ของพื้นผิวโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์ และนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียมโดยเทคนิคการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้า ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ติดตั้งร่วมกับเครื่องเอกซเรย์สเปกโตรสโคป แบบกระจายพลังงาน (Scanning electron microscopy with energy dispersive X-ray spectrometry, SEM-EDX) และพฤติกรรมการกัดกร่อนของพื้นผิวโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์ และนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียมด้วยเทคนิคการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้า โดยเทคนิคโพเทนชิโอดนามิกโพลาริเซชัน (Potentiodynamic polarization) ด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตท/กัลวานอสแตทที่อัตราเร็วในการตรวจวัด 6000 มิลลิโวลต์ต่อชั่วโมง ในน้ำกลั่น ในสารละลายกรดซัลฟิวริกที่มีค่า pH ที่ 5 และ 6 ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีค่า pH ที่ 8 และ 9 และที่อัตราเร็วในการตรวจวัด 30000 มิลลิโวลต์ต่อชั่วโมงในน้ำกลั่น และในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 0.5 1 1.5 2 และ 3

4.1 กลไกการเกิดขึ้นฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟอร์ และนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียมที่เกิดบนพื้นผิวของทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิว

กลไกการเกิดขึ้นฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟอร์ และนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียมที่เกิดบนพื้นผิวของทองแดงมีดังนี้

4.1.1 สำหรับการเคลือบผิวของทองแดงด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์ [9]

กลไกการเกิดปฏิกิริยาการเกาะติดของนิกเกิลบนพื้นผิวของทองแดง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไทโอซัลเฟตบนพื้นผิวของทองแดง



กลไกการเกิดซัลเฟอร์บนพื้นผิวของทองแดง



กลไกการเกิดชั้นฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟอร์บนพื้นผิวของทองแดง



4.1.2 สำหรับการเคลือบผิวของทองแดงด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียม

กลไกการเกิดปฏิกิริยาการเกาะติดของโครเมียมบนพื้นผิวของทองแดง

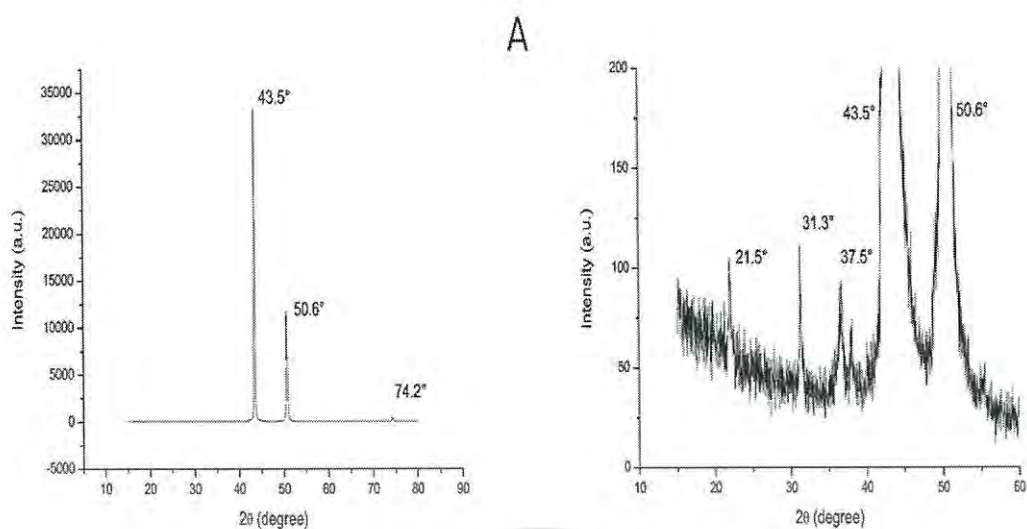


4.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของพื้นผิวโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์ และนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียมโดยเทคนิคการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้า

นำชิ้นงานที่ได้หลังจากทำการเคลือบผิวโลหะทองแดงด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์ และนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียมด้วยเทคนิคการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้าไปพิสูจน์เอกลักษณ์บนพื้นผิวของโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยเทคนิคต่าง ๆ ดังนี้

4.2.1 เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)

นำชิ้นงานที่ได้หลังจากทำการเคลือบผิวโลหะทองแดงด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์ตรวจวัดด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์



รูปที่ 4.1 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) แสดงความเป็นผลึกบนพื้นผิวของโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์ A) แสดงข้อมูลกราฟ XRD ทั้งหมด B) แสดงการขยายข้อมูลกราฟ XRD บางส่วน

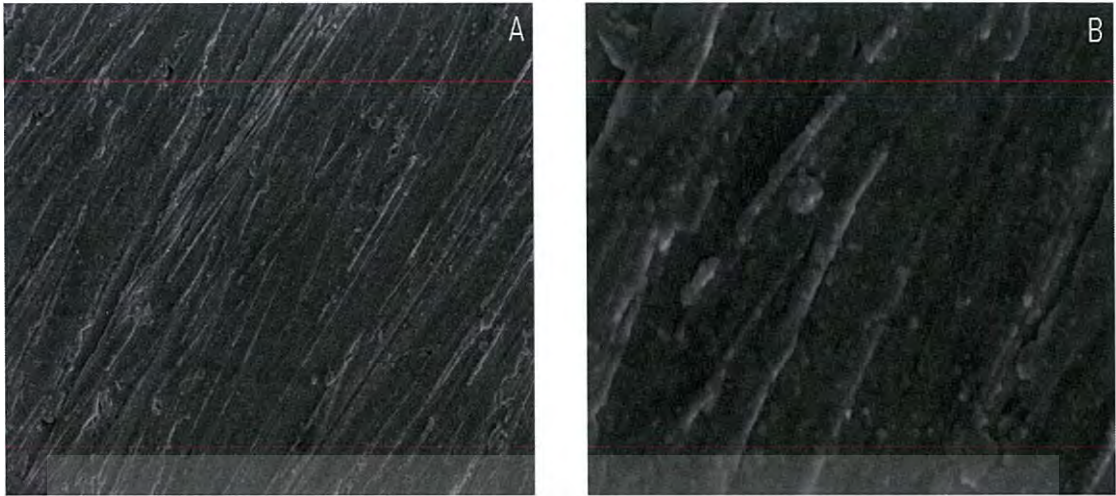
รูปที่ 4.1 แสดงผลของการพิสูจน์เอกลักษณ์บนพื้นผิวของทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ภาพ A) พบว่าพีคที่ขึ้นให้เห็นส่วนใหญ่เป็นพีคที่แสดงถึงผลึกของโลหะทองแดงซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจน ต่างจากผลึกของชั้นฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟอร์ที่เคลือบอยู่บนโลหะทองแดงที่เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ไม่อาจตรวจวัดได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชั้นฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟอร์มีความเป็นผลึกอยู่น้อยมาก ภาพ B) แสดงพีคที่ 21.5° 31.3° และ 37.5° ตามลำดับ ซึ่งเป็นพีคที่แสดงถึงผลึกของสารประกอบ Ni_3S_2 ซึ่งเป็นพีคที่มีความเข้มต่ำมากอาจเกิดจากชั้นฟิล์มของนิกเกิล-ซัลเฟอร์ที่เคลือบอยู่บนทองแดงนั้นมีความหนาเพียงเล็กน้อยทำให้พีคที่ปรากฏไม่เด่นชัดเหมือนชั้นทองแดง [9]

4.2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ติดตั้งร่วมกับเครื่องเอกซเรย์สเปกโตรสโคปแบบกระจายพลังงาน (Scanning electron microscopy with energy dispersive X-ray spectrometry, SEM-EDX)

นำชิ้นงานที่ได้หลังจากทำการเคลือบผิวโลหะทองแดงด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์ และนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียมร้อยละ 5 ของนิกเกิลตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ติดตั้งร่วมกับเครื่องเอกซเรย์สเปกโตรสโคปแบบกระจายพลังงานได้ผลดังต่อไปนี้

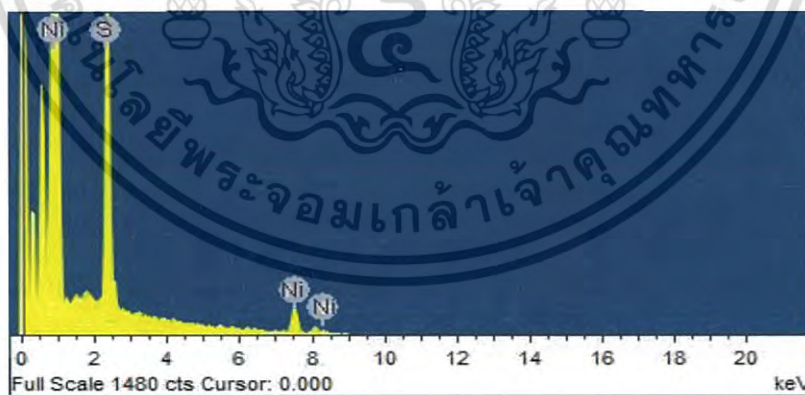
4.2.2.1 ผลจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ติดตั้งร่วมกับเครื่องเอกซเรย์สเปกโตรสโคปแบบกระจายพลังงานสำหรับตัวอย่างทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะบนพื้นผิวของโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์ A) ที่กำลังขยาย 1000X B) ที่กำลังขยาย 5000X

รูปที่ 4.2 แสดงถึงลักษณะบนพื้นผิวของทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์ที่สองกำลังขยายคือ A) ที่กำลังขยาย 1000X B) ที่กำลังขยาย 5000X โดยภาพ A) จะเห็นว่าบนพื้นผิวของทองแดงมีลักษณะเป็นเส้น ๆ อาจเกิดจากรอยขีดของทองแดงที่เป็นชั้นสเตรทเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนบนผิวของทองแดงก่อนนำไปเคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์ ภาพ B) พบว่ามีอนุภาคขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วไปบนพื้นผิวซึ่งคาดว่าจะเป็อนุภาคของนิกเกิล และอนุภาคของซัลเฟอร์ที่อยู่ในสารละลายสำหรับใช้เคลือบผิวทองแดงด้วยเทคนิคการเคลือบผิวที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้า

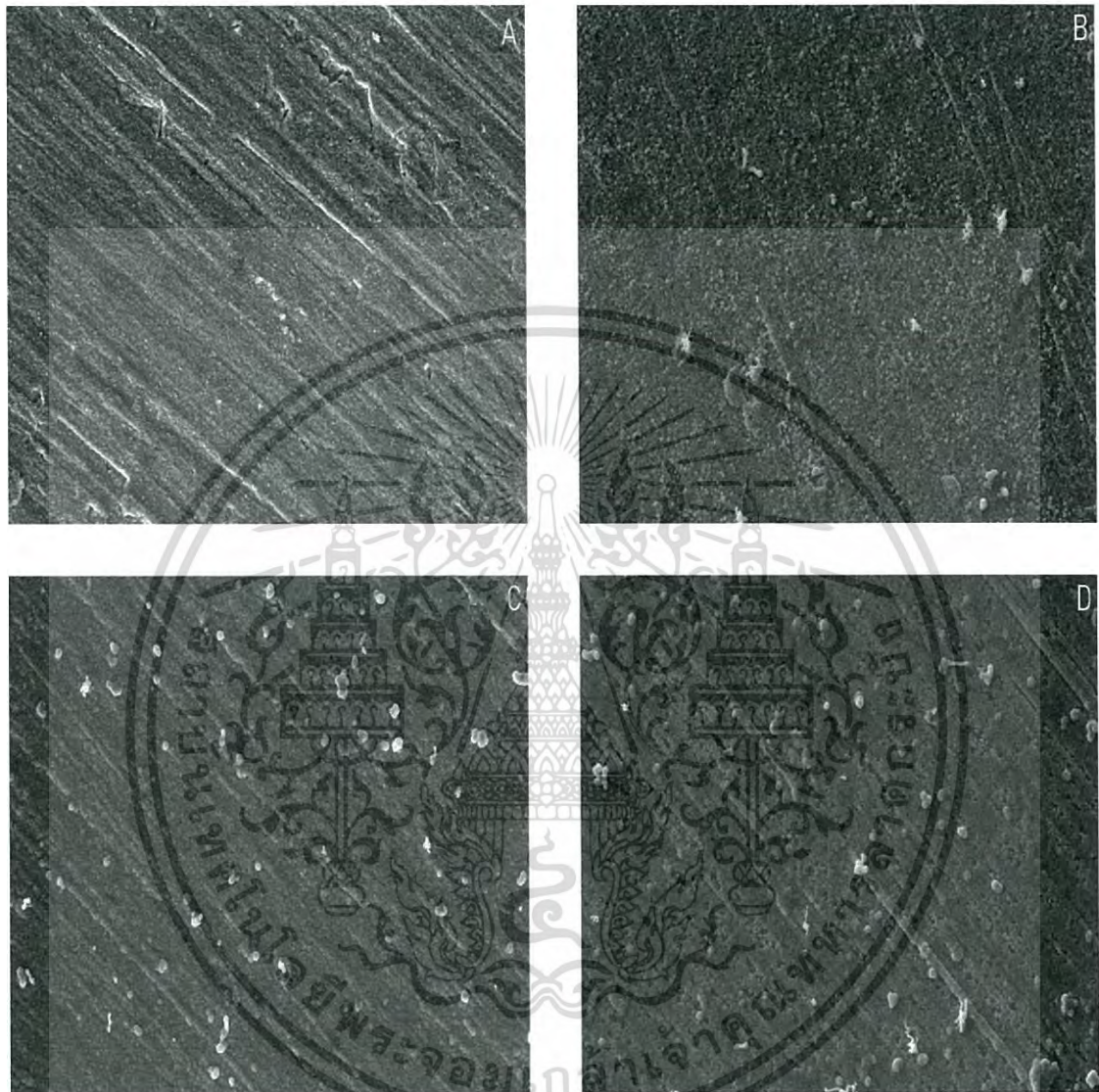


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผล EDX ของตัวอย่างทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์

จากรูปที่ 4.3 ผลของ EDX ตรวจพบว่ามีนิกเกิลและซัลเฟอร์อยู่บนพื้นผิวของทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยเทคนิคการเคลือบผิวโดยปราศจากการใช้ไฟฟ้า โดยผลของการตรวจวัดพบนิกเกิลที่ปริมาณร้อยละ 58.27 โดยน้ำหนัก และพบซัลเฟอร์ที่ปริมาณร้อยละ 41.73 โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ติดตั้งร่วมกับเครื่องเอกซเรย์สเปกโตรสโคปแบบกระจายพลังงานสำหรับตัวอย่างทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียมร้อยละ 5 ของนิกเกิล

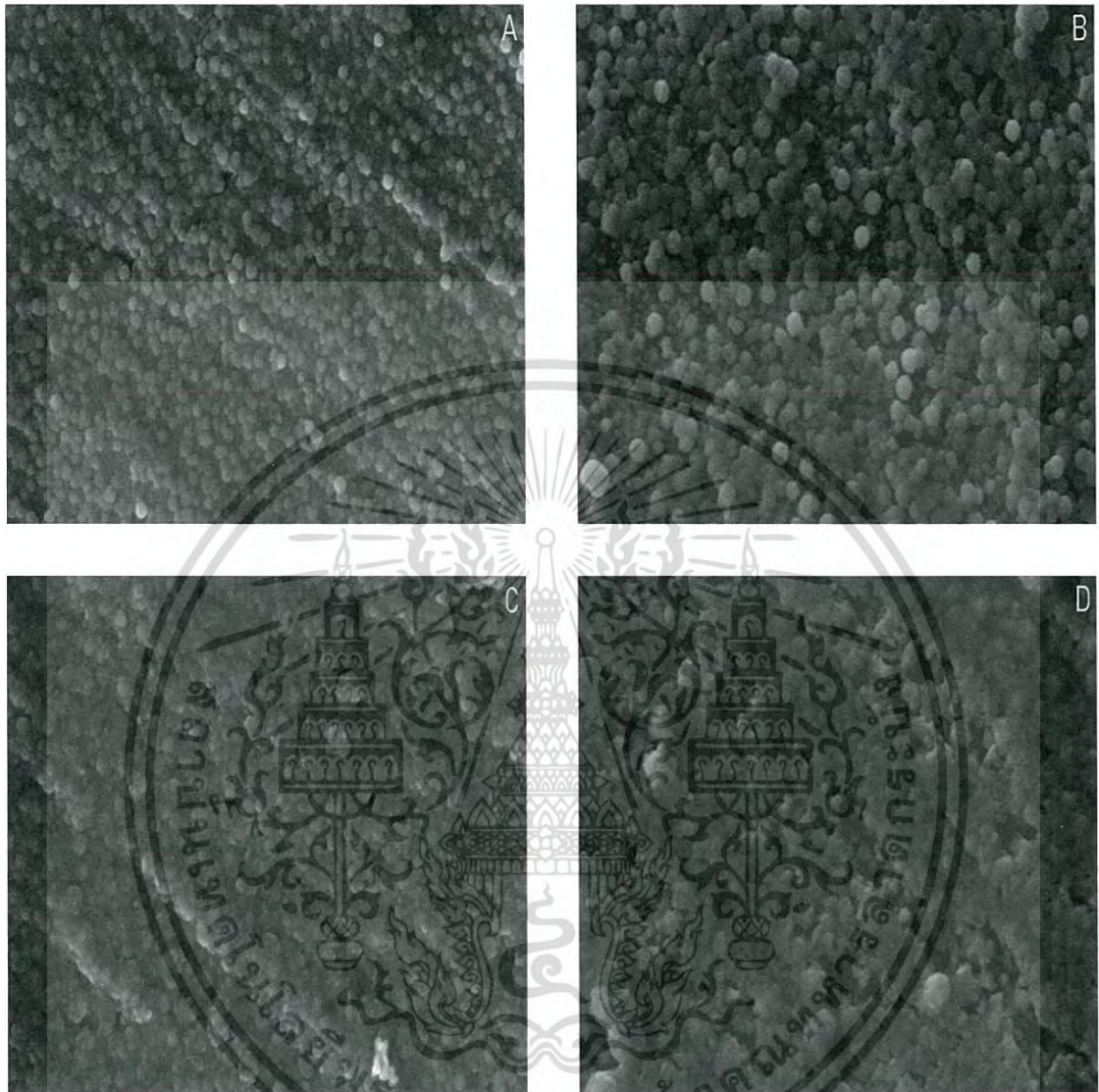


รูปที่ 4.4 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะบนพื้นผิวของโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียมร้อยละ 5 ของนิกเกิลที่กำลังขยาย 1000X ที่เวลาในการเคลือบผิว A) 15 นาที B) 30 นาที C) 45 นาที และ D) 60 นาที

จากรูปที่ 4.4 แสดงถึงลักษณะบนพื้นผิวของทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียมร้อยละ 5 ของนิกเกิลที่กำลังขยาย 1000X ที่เวลาแตกต่างกันพบว่า มีลักษณะของพื้นผิวที่คล้ายคลึงกันคือมีลักษณะเป็นเส้น ๆ คาดว่าจะเกิดจากรอยขีดเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนก่อนนำไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

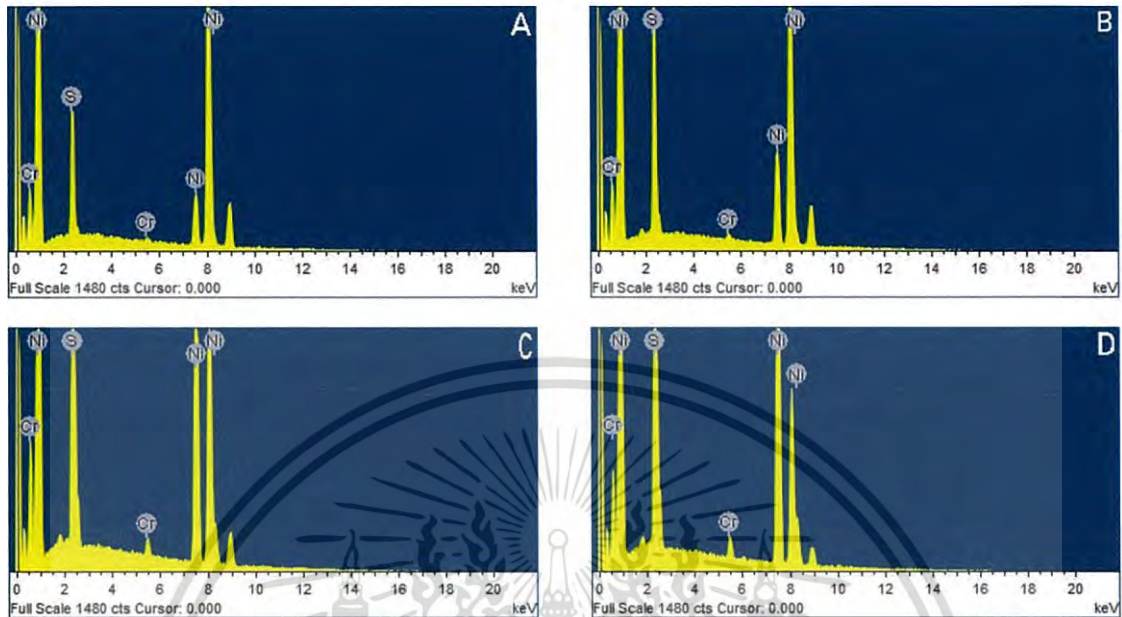
เคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียมร้อยละ 5 ของนิกเกิล และยังพบอนุภาคขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วไปบนพื้นผิว



รูปที่ 4.5 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะบนพื้นผิวของโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียมร้อยละ 5 ของนิกเกิลที่กำลังขยาย 5000X ที่เวลาในการเคลือบผิว A) 15 นาที B) 30 นาที C) 45 นาที และ D) 60 นาที

จากรูปที่ 4.5 แสดงถึงลักษณะบนพื้นผิวของทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียมร้อยละ 5 ของนิกเกิลที่กำลังขยาย 5000X ที่เวลาแตกต่างกันพบว่า มีลักษณะของพื้นผิวที่คล้ายคลึงกันคือมีลักษณะเป็นเม็ด ๆ ของอนุภาคที่เคลือบบนพื้นผิวโดย A) พบว่ามีอนุภาคกระจาย

อยู่ทั่วไป B) พบว่ามีอนุภาคกระจายอยู่ทั่วไปแยกอนุภาคชัดเจน C) ยังมีการกระจายตัวทั่วไปแต่อนุภาคเริ่มรวมตัวกัน D) อนุภาครวมตัวกันไม่เห็นเป็นเม็ด ๆ ชัดเจน



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผล EDX ของตัวอย่างทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียมร้อยละ 5 ของนิกเกิลที่เวลาเคลือบผิว A) 15 นาที B) 30 นาที C) 45 นาที และ D) 60 นาที

จากรูปที่ 4.6 ผลของ EDX ตรวจสอบว่ามีนิกเกิล ซัลเฟอร์และโครเมียมอยู่บนพื้นผิวของทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยเทคนิคการเคลือบผิวโดยปราศจากการใช้ไฟฟ้า โดยผลของการตรวจวัดพบว่าที่เวลา A) 15 นาทีพบนิกเกิลที่ปริมาณร้อยละ 64.53 โดยน้ำหนัก พบซัลเฟอร์ที่ปริมาณร้อยละ 32.98 โดยน้ำหนัก และพบโครเมียมที่ปริมาณร้อยละ 2.50 โดยน้ำหนัก ที่เวลา B) 30 นาทีพบนิกเกิลที่ปริมาณร้อยละ 62.33 โดยน้ำหนัก พบซัลเฟอร์ที่ปริมาณร้อยละ 35.59 โดยน้ำหนัก และพบโครเมียมที่ปริมาณร้อยละ 2.08 โดยน้ำหนัก ที่เวลา C) 45 นาทีพบนิกเกิลที่ปริมาณร้อยละ 65.10 โดยน้ำหนัก พบซัลเฟอร์ที่ปริมาณร้อยละ 33.06 โดยน้ำหนัก และพบโครเมียมที่ปริมาณร้อยละ 1.85 โดยน้ำหนัก และที่เวลา D) 60 นาทีพบนิกเกิลที่ปริมาณร้อยละ 65.40 โดยน้ำหนัก พบซัลเฟอร์ที่ปริมาณร้อยละ 32.62 โดยน้ำหนัก และพบโครเมียมที่ปริมาณร้อยละ 1.99 โดยน้ำหนัก

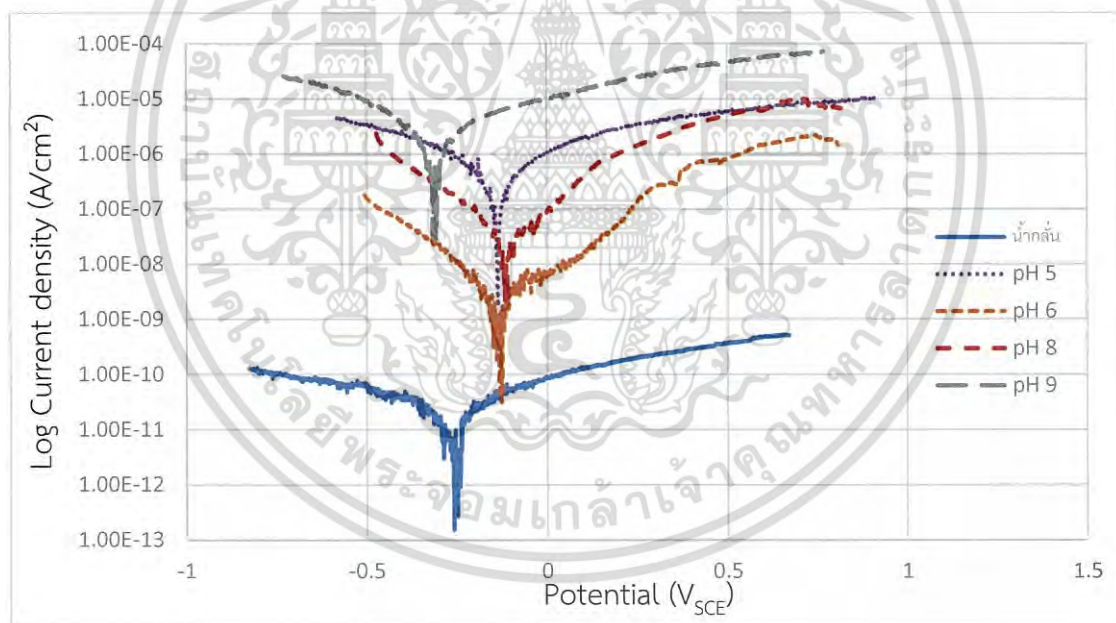
จากข้อมูลข้างต้นพบว่านิกเกิล ซัลเฟอร์ และโครเมียมที่มีบนพื้นผิวของทองแดงมีปริมาณใกล้เคียงกันแม้ว่าจะใช้เวลาในการเคลือบต่างกัน

4.3 พฤติกรรมการกัดกร่อนของพื้นผิวโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์ และนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียมโดยเทคนิคการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้า โดยเทคนิคโพเทนซิโอดนามิกโพลาริเซชัน (Potentiodynamic polarization)

นำชิ้นงานที่ได้หลังจากทำการเคลือบผิวโลหะทองแดงด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์ และนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียมร้อยละ 5 ของนิกเกิลด้วยเทคนิคการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้าไปทำการวัดพฤติกรรมการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนซิโอดนามิกโพลาริเซชันด้วยเครื่องโพเทนซิโอสแตท/กัลวานอสแตทในน้ำกลั่น สารละลายกรดซัลฟิวริก สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ค่า pH ต่าง ๆ และสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

4.3.1 พฤติกรรมการกัดกร่อนของพื้นผิวโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวในน้ำกลั่น สารละลายกรดซัลฟิวริก และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ค่า pH ต่าง ๆ

พฤติกรรมการกัดกร่อนของพื้นผิวโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวในน้ำกลั่น สารละลายกรดซัลฟิวริก และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ค่า pH เท่ากับ 5 6 8 และ 9



รูปที่ 4.7 กราฟโพเทนซิโอดนามิกโพลาริเซชันของโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์โดยผ่านเทคนิคการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้า ในสารละลายกรดซัลฟิวริก สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ค่า pH เท่ากับ 5 6 8 9 และ น้ำกลั่น

รูปที่ 4.7 เป็นกราฟแสดงโพเทนซิโอดนามิกโพลาริเซชันของโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์โดยผ่านเทคนิคการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้า ในสารละลายกรดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซัลฟิวริก สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ค่า pH เท่ากับ 5 6 8 9 และน้ำกลั่น ซึ่งสามารถหาค่า ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนได้ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองโพเทนซีโอไดนามิกโพลาริเซชันของโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิว ด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์ในสารละลายที่ค่า pH ต่าง ๆ

pH ของสารละลาย	E_{corr} (V _{SCE})	i_{corr} (A/cm ²)
น้ำกลั่น	-0.260	2.77×10^{-11}
5	-0.137	5.85×10^{-7}
6	-0.125	3.44×10^{-9}
8	-0.111	3.35×10^{-8}
9	-0.306	2.97×10^{-6}

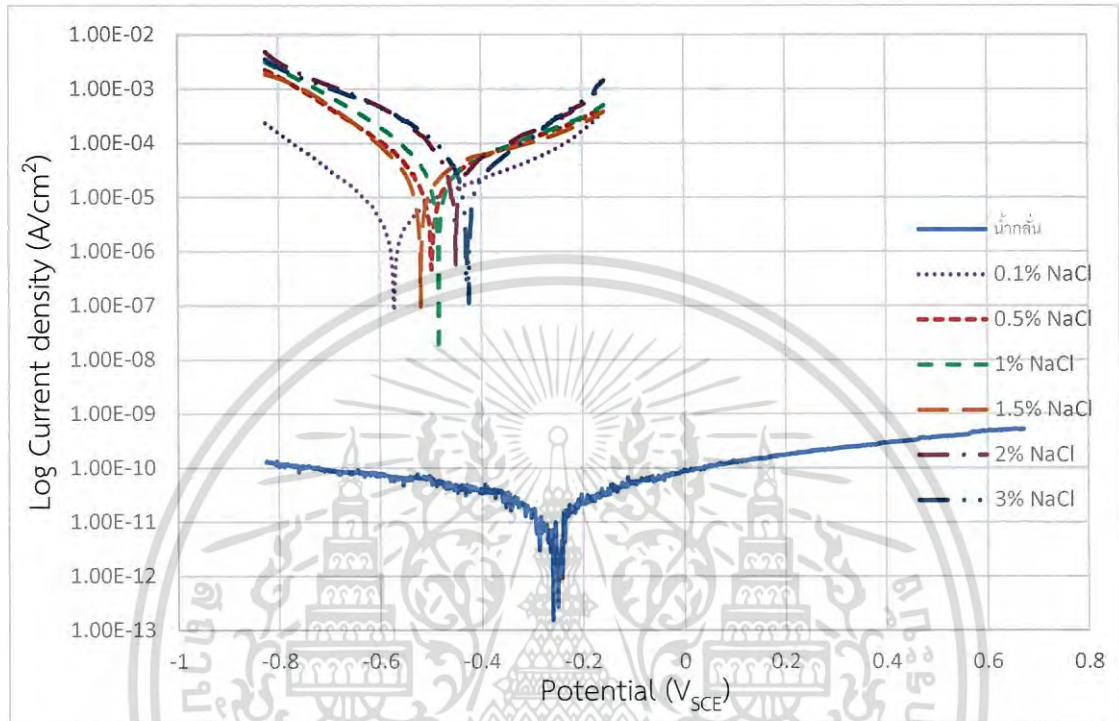
จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 4.1 พบว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) และศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) ของโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์โดยในน้ำกลั่นมีค่า i_{corr} เท่ากับ 2.77×10^{-11} A/cm² ซึ่งแตกต่างจากในสารละลายที่ pH ต่าง ๆ อย่างเห็นได้ชัด ในสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ค่า pH เท่ากับ 5 และ 6 มีค่า i_{corr} ที่ค่อนข้างแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดโดยที่ค่า pH เท่ากับ 5 มีค่า i_{corr} ที่ 5.85×10^{-7} A/cm² ซึ่งเกิดการกัดกร่อนสูงกว่าที่ค่า pH เท่ากับ 6 ที่มีค่า i_{corr} ที่ 3.44×10^{-9} A/cm² แต่ทั้งสองค่า pH มีค่า E_{corr} ที่ใกล้เคียงกัน ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ค่า pH เท่ากับ 8 และ 9 มีค่า i_{corr} ค่อนข้างแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเช่นเดียวกับในสารละลายกรดซัลฟิวริกโดยที่ค่า pH เท่ากับ 9 มีค่า i_{corr} ที่ 2.97×10^{-6} A/cm² ซึ่งเกิดการกัดกร่อนสูงกว่าที่ค่า pH เท่ากับ 8 ที่มีค่า i_{corr} ที่ 3.35×10^{-8} A/cm² และทั้งสองค่า pH มีค่า E_{corr} ที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด

จากข้อมูลทั้งหมดพบว่าสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ pH 5 โลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยชั้นฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟอร์ถูกกัดกร่อนมากกว่าที่ pH 6 ซึ่งสารละลายที่มีค่าความเป็นกรดสูงทำให้เกิดการกัดกร่อนสูงเนื่องจากกรดซัลฟิวริกเป็นตัวออกซิไดซ์ที่ดีทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยกรดเข้าไปรับอิเล็กตรอนจากโลหะนิกเกิลทำให้เกิดเป็นนิกเกิลไอออนหลุดออกมาส่งผลให้ i_{corr} สูงขึ้นสำหรับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ pH 9 โลหะทองแดงถูกกัดกร่อนมากกว่าที่ pH 8 เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้าทำปฏิกิริยากับชั้นฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟอร์เกิดเป็นนิกเกิลไฮดรอกไซด์หลุดออกมาส่งผลให้ i_{corr} สูงขึ้นเกิดการกัดกร่อนมากขึ้น [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 พฤติกรรมการกัดกร่อนของพื้นผิวโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

พฤติกรรมการกัดกร่อนของพื้นผิวโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.1 0.5 1 1.5 2 3% และในน้ำกลั่น



รูปที่ 4.8 กราฟโพเทนเชียลไดนามิกโพลาริเซชันของโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์โดยผ่านเทคนิคการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้า ในน้ำกลั่นและในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.1 0.5 1 1.5 2 และ 3%

รูปที่ 4.8 เป็นกราฟแสดงโพเทนเชียลไดนามิกโพลาริเซชันของโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์โดยผ่านเทคนิคการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้า ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.1 0.5 1 1.5 2 3% และในน้ำกลั่น ซึ่งสามารถหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนได้ดังแสดงในตารางที่ 4.2

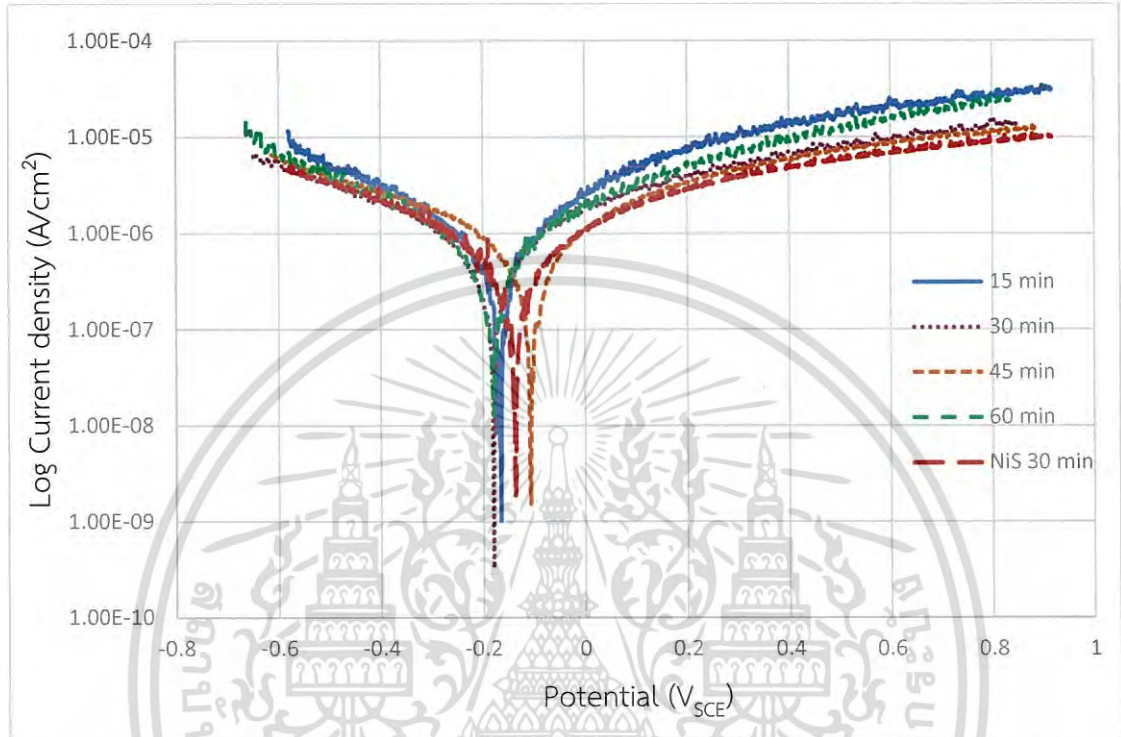
ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองโพเทนชิโอดนามิกโพลาริเซชันของโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ความเข้มข้นของสารละลาย	E_{corr} (V_{SCE})	i_{corr} (A/cm^2)
น้ำกลั่น	-0.260	2.77×10^{-11}
0.1%	-0.384	4.19×10^{-6}
0.5%	-0.412	2.25×10^{-5}
1%	-0.421	3.04×10^{-5}
1.5%	-0.451	3.41×10^{-5}
2%	-0.403	1.31×10^{-4}
3%	-0.384	8.42×10^{-5}

จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 4.2 พบว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) และศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) ของโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.1 0.5 1 1.5 2 3% และน้ำกลั่นมีการกระจายตัวน้อยมากเส้นกราฟที่ได้ค่อนข้างซ้อนทับกันมากทำให้ค่า i_{corr} ที่ได้ค่อนข้างใกล้เคียงกันด้วย โดยจากตารางพบว่าค่า i_{corr} มีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ พบว่าที่สารละลายความเข้มข้นเท่ากับ 2% มีค่า i_{corr} สูงที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ $1.31 \times 10^{-4} A/\text{cm}^2$ และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างน้ำกลั่นกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1% จะเห็นได้ว่า i_{corr} มีค่าสูงขึ้นถึง 100000 เท่า เนื่องจากการกัดกร่อนเป็นปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีการที่เติมโซเดียมคลอไรด์นั้นเป็นการเพิ่มไอออนให้กับระบบทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนได้มากขึ้นส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนมากขึ้น แต่การเพิ่มความเข้มข้นทำให้ i_{corr} เพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญเนื่องจากในระบบมีไอออนมากพอที่จะทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนอยู่แล้วค่า i_{corr} จึงมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก

4.3.3 พฤติกรรมการกัดกร่อนของพื้นผิวโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวในสารละลายกรดซัลฟิวริกที่มีค่า pH เท่ากับ 5

พฤติกรรมการกัดกร่อนของพื้นผิวโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวในสารละลายกรดซัลฟิวริกที่มีค่าความเข้มข้นเท่ากับ 5



รูปที่ 4.9 กราฟโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันของโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียมโดยผ่านเทคนิคการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้า ในสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ค่า pH เท่ากับ 5 เทียบกับชั้นฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟอร์

รูปที่ 4.9 เป็นกราฟแสดงโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันของโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียมโดยผ่านเทคนิคการเคลือบผิวโลหะที่ปราศจากการใช้ไฟฟ้า ในสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ค่า pH เท่ากับ 5 เทียบกับชั้นฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟอร์ ซึ่งสามารถหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนได้ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชันของโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียมเทียบกับชั้นฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟอร์ในสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ค่า pH เท่ากับ 5

ชั้นฟิล์ม	E_{corr} (V _{SCE})	i_{corr} (A/cm ²)
NiS-5%Cr 15 min	-0.165	8.13×10^{-7}
NiS-5%Cr 30 min	-0.179	7.57×10^{-7}
NiS-5%Cr 45 min	-0.106	7.03×10^{-7}
NiS-5%Cr 60 min	-0.180	7.40×10^{-7}
NiS 30 min	-0.137	5.85×10^{-7}

จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 4.3 พบว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) และศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) ของโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียมร้อยละ 5 ของนิกเกิลในสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ค่า pH เท่ากับ 5 มีการกระจายตัวน้อยมากเส้นกราฟที่ได้ค่อนข้างซ้อนทับกันมากทำให้ค่า i_{corr} ที่ได้ค่อนข้างใกล้เคียงกันด้วยเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียมและชั้นฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟอร์ที่เวลา 30 นาที พบว่าชั้นฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟอร์มีค่า i_{corr} ต่ำกว่าชั้นฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียมร้อยละ 5 ของนิกเกิล เนื่องจากนิกเกิลมีค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์รีดักชัน (E_0) เท่ากับ $-0.250 \text{ V}_{\text{SHE}}$ และโครเมียมมีค่า E_0 เท่ากับ $-0.740 \text{ V}_{\text{SHE}}$ ซึ่งต่ำกว่าของนิกเกิลทำให้เสียอิเล็กตรอนได้ง่ายกว่าเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันง่ายกว่าส่งผลให้มีค่า i_{corr} สูงกว่า

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาผลของการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์ และนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียมในสารละลายกรดซัลฟิวริก สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ น้ำกลั่นที่ค่า pH ต่าง ๆ และในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ และการพิสูจน์เอกลักษณ์บนพื้นผิวของโลหะทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวสามารถนำมาสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

- 1) ชั้นฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟอร์ที่เคลือบอยู่บนพื้นผิวของโลหะทองแดงมีโครงสร้างเป็นผลึกแต่น้อยมากจึงปรากฏพีคที่มีความเข้มข้นต่ำ สูตรทางเคมีของชั้นฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟอร์ที่พบคาดว่าจะ เป็น Ni_3S_2 โดยพบว่ามีพีคขึ้นที่ 21.5° 31.3° และ 37.5°
- 2) บนชั้นฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟอร์พบว่า มีนิกเกิลนิกเกิล 58.27 %/w และพบซัลเฟอร์ 41.73 %/w บนชั้นฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียม 5% ของนิกเกิลพบว่าเวลาการเคลือบเพิ่มขึ้นปริมาณของโครเมียมไม่เปลี่ยนแปลงมากนักโดยมีปริมาณโครเมียมอยู่ที่ 2%
- 3) การเคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ซัลเฟอร์ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นในสารละลายกรดซัลฟิวริกที่มีค่า pH เท่ากับ 5 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีค่า pH เท่ากับ 9
- 4) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นสูงขึ้นจะให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น
- 5) ชั้นฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟอร์ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนที่ต่ำกว่าชั้นฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียมร้อยละ 5 ของนิกเกิลที่เวลาการเคลือบเดียวกันเนื่องจากค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์รีดักชันของโครเมียมมีค่าต่ำกว่าของนิกเกิลจึงเกิดการกัดกร่อนมากกว่า

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรนำไปศึกษาในหลากหลายเทคนิคการพิสูจน์เอกลักษณ์เพื่อให้ทราบถึงลักษณะโครงสร้างที่อยู่บนพื้นผิวของทองแดง เช่น กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope, AFM) เพื่อหาความหนาของชั้นฟิล์ม
- 2) ควรนำไปแช่ในสารละลายกรดไนตริก หรือกรดซัลฟิวริกที่เป็นตัวออกซิไดซ์ที่ดีเพื่อกระตุ้นการเกิดชั้นออกไซด์ของชั้นฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียม
- 3) เมื่อเคลือบผิวเสร็จแล้วควรพักทิ้งไว้ประมาณ 1-2 สัปดาห์เพื่อปล่อยการเกิดชั้นออกไซด์ของชั้นฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียมกับออกซิเจนในอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Sutha S. 2014. **Corrosion**. [Online]. Available : <http://www.corrosionchemist.com>
- [2] ชลธิชา วโรกร ชัชชนก วัฒนวิษ ชุตติพงศ์ แซ่ซ้อ. 2553. **การปรับสภาพพื้นผิวด้วยพลาสมาที่กระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟเพื่อเคลือบผิวพอลิเมอร์ด้วยโลหะ**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [3] Bal Seal Engineering, INC. 2015. **Electroless nickel plating: A general description of electroless nickel plating**. California, USA.
- [4] Juann Hajdu. 1990. **Chapter 7 Surface Preparation For Electroless Nickel Plating**.
- [5] พรวิศา วงศ์ปัญญา. 2555. **Corrosion testing by Potentiostat Analyzer**.
- [6] สุภิญญา มากุล. 2557. **การวิเคราะห์ดินด้วยวิธี X-ray diffraction (XRD) เพื่อประยุกต์ใช้ทางนิติวิทยาศาสตร์**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [7] วิวัฒน์ ชินวร. 2547. **การวิเคราะห์เจม่าป็นด้วยเทคนิค SEM/EDX**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีศึกษา บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [8] จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. **เอกสารประกอบการสอน วิชา MTT656 Polymer Characterization and Analysis**. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [9] Xingkai, Z. Kaixiong, G. Fuguo, W. Yan, Z. Junyan. Z. 2018. **One-step immersion plating method to deposit anticorrosion nickel-sulfur coating on copper**. Journal of Surface and Coatings Technology. 333 : 163-167.
- [10] Praasanta, S. and Suman Kalyan, D. 2011. **Tribology of electroless nickel coating – A review**. Journal of Materials & Design. 32 : 1760-1775.
- [11] Dong, T. Ning, L. Ning, X. Fang ,F.W. Shi, Y.Y. Qing, L. Wei, G. and Gang, W. 2013. **Replacement Deposition of Ni-S Films on Cu Their Catalytic Activity for Electroless Nickel Plating**. Journal of The Electrochemical Society. 160 : 95-101.
- [12] Soniya, S. Anju, M.P. A, Rajendra. A.K, Sharma. 2015. **High emittance black nickel coating on copper substrate for space applications**. Journal of Alloys and Compounds. 643 : 263-269.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] Hanwei, H. Hongjiang, L. Fang, L. and Kechao, Z. 2006. **Structures and electrochemical properties of amorphous nickel Sulphur coatings electrodeposited on the nickel foam substrate as hydrogen evolution reaction cathodes.** Journal of Surface and Coatings Technology. 201 : 958-964
- [14] Shunsuke, Y. Kuniaki, M. Susumu, T. Tetsuji, H. and Yasuhiro, A. 2005. **Electroless Nickel Plating onto Minute Patterns of Copper Using Ti (IV)/Ti (III) Redox Couple.** Journal of The Electrochemical Society. 152 : 588-592.
- [15] Yinliang, C. Jingjun, L. Feng, W. Jing, J. Jianjun, W. Shiyong, Q. Lianghu, Z. 2010. **Electrodeposited Ni-S intermetallic compound film electrodes for hydrogen evolution reaction in alkaline solutions.** Journal of Materials Letters. 64 : 261-263.
- [16] Hanwei, H. Hongjiang, L. Fang, L. and Kechao, Z. 2005. **Distribution of sulphur and electrochemical properties of nickel sulphur coatings electrodeposited on the nickel foam as hydrogen evolution reaction cathodes.** Journal of Materials Letters. 59 : 3968-3972.
- [17] ChemicalAid 2011. [Online]. Available : [https://en.intl.chemicalaid.com/tools/equationbalancer.php?equation=NiS%20%2B%20NaOH%20%3D%20Na2S%20%2B%20Ni\(OH\)2](https://en.intl.chemicalaid.com/tools/equationbalancer.php?equation=NiS%20%2B%20NaOH%20%3D%20Na2S%20%2B%20Ni(OH)2)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุบนพื้นผิว

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบสำหรับชั้นฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟอร์

Spectrum processing :

Peaks possibly omitted : 0.268, 0.521 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 2

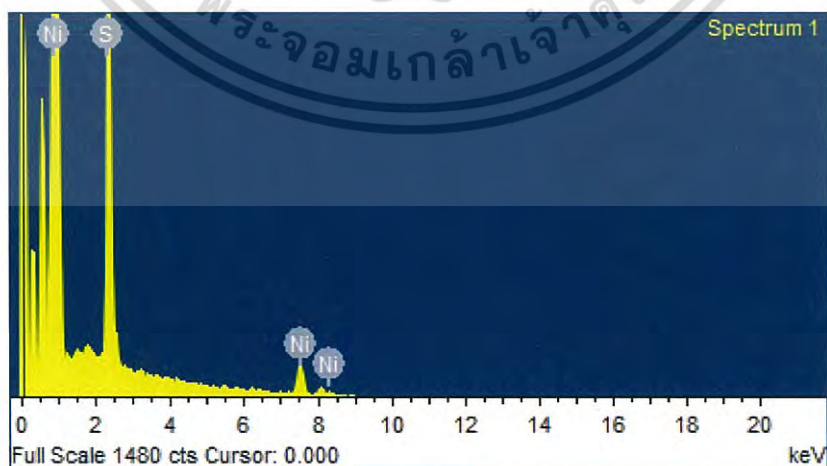
Standard :

S FeS2 1-Jun-1999 12:00 AM

Ni Ni 1-Jun-1999 12:00 AM

ตารางที่ ก1 ปริมาณนิกเกิลและซัลเฟอร์บนชั้นฟิล์ม

Element	Weight%	Atomic%
S K	41.73	56.73
Ni L	58.27	43.27
Totals	100.00	



รูปที่ ก1 EDX ของชั้นฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบสำหรับชั้นฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียมที่เวลาการเคลือบ 15 นาที

Spectrum processing :

Peaks possibly omitted : 0.270, 8.900 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 2

Standard :

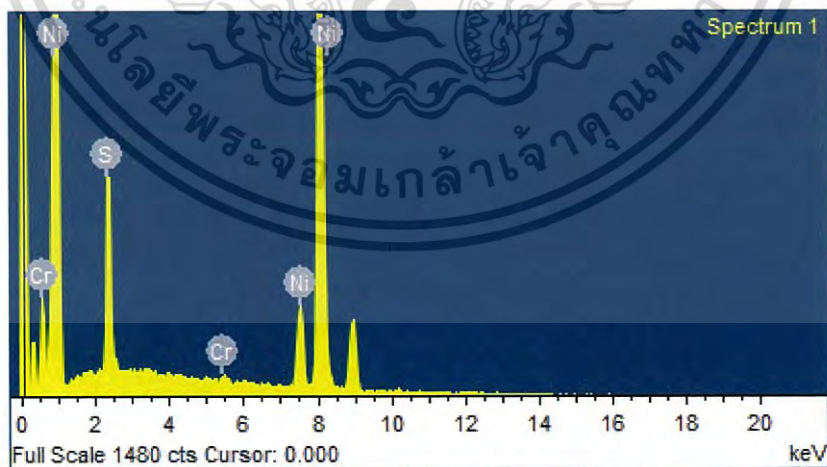
S FeS2 1-Jun-1999 12:00 AM

Cr Cr 1-Jun-1999 12:00 AM

Ni Ni 1-Jun-1999 12:00 AM

ตารางที่ ก2 ปริมาณนิกเกิล ซัลเฟอร์และโครเมียมบนชั้นฟิล์ม

Element	Weight%	Atomic%
S K	32.98	47.27
Cr K	2.50	2.21
Ni K	64.53	50.52
Totals	100.00	



รูปที่ ก2 EDX ของชั้นฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบสำหรับชั้นฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียมที่เวลาการเคลือบ 30 นาที

Spectrum processing :

Peaks possibly omitted : 0.266, 8.899 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 2

Standard :

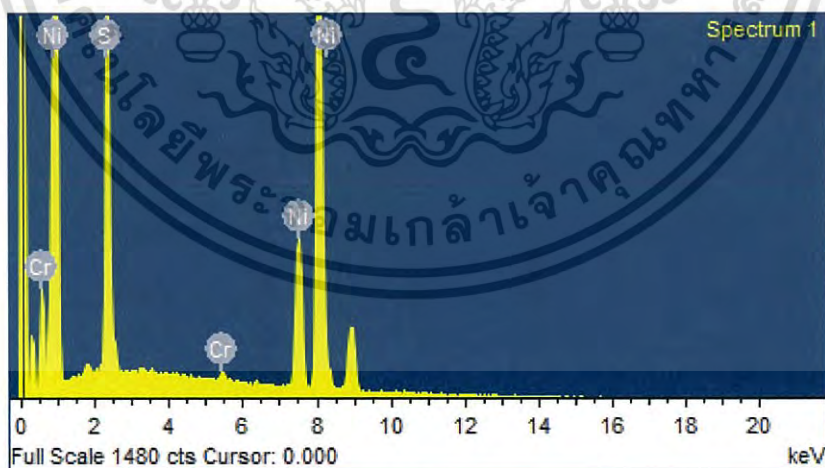
S FeS2 1-Jun-1999 12:00 AM

Cr Cr 1-Jun-1999 12:00 AM

Ni Ni 1-Jun-1999 12:00 AM

ตารางที่ ก3 ปริมาณนิกเกิล ซัลเฟอร์และโครเมียมบนชั้นฟิล์ม

Element	Weight%	Atomic%
S K	35.59	50.19
Cr K	2.08	1.81
Ni K	62.33	48.00
Totals	100.00	



รูปที่ ก3 EDX ของชั้นฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบสำหรับชั้นฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียมที่เวลาการเคลือบ 45 นาที

Spectrum processing :

Peaks possibly omitted : 0.265, 1.747, 8.900 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 2

Standard :

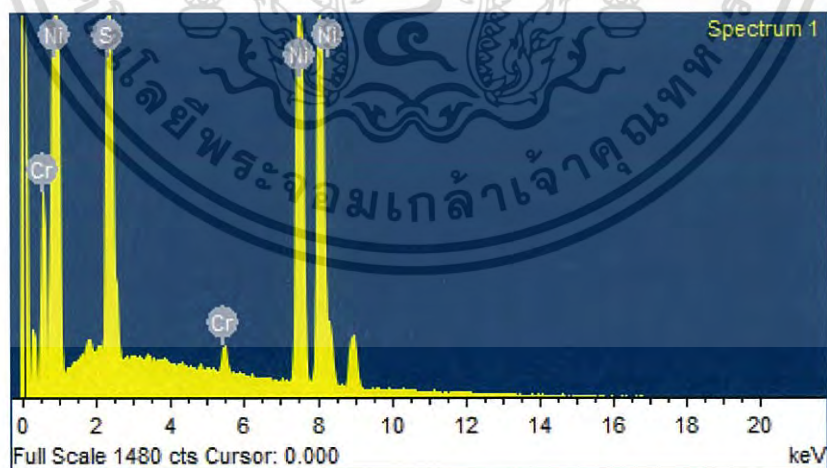
S FeS2 1-Jun-1999 12:00 AM

Cr Cr 1-Jun-1999 12:00 AM

Ni Ni 1-Jun-1999 12:00 AM

ตารางที่ ก4 ปริมาณนิกเกิล ซัลเฟอร์และโครเมียมบนชั้นฟิล์ม

Element	Weight%	Atomic%
S K	33.06	47.40
Cr K	1.85	1.63
Ni K	65.10	50.97
Totals	100.00	



รูปที่ ก4 EDX ของชั้นฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบสำหรับชั้นฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟอร์เจือโครเมียมที่เวลาการเคลือบ 60 นาที

Spectrum processing :

Peaks possibly omitted : 0.266, 1.740, 8.896, 9.990 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 2

Standard :

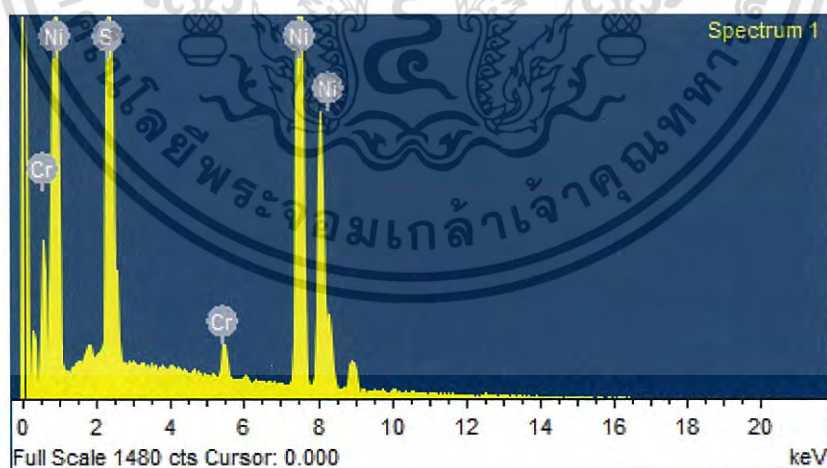
S FeS2 1-Jun-1999 12:00 AM

Cr Cr 1-Jun-1999 12:00 AM

Ni Ni 1-Jun-1999 12:00 AM

ตารางที่ ก5 ปริมาณนิกเกิล ซัลเฟอร์และโครเมียมบนชั้นฟิล์ม

Element	Weight%	Atomic%
S K	32.62	46.89
Cr K	1.99	1.76
Ni K	65.40	51.35
Totals	100.00	



รูปที่ ก5 EDX ของชั้นฟิล์มนิกเกิล-ซัลเฟอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



งานทะเบียนคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา

วันที่.....13.....เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2561

ข้าพเจ้า นายปณต	ปิ่นสุภา	รหัสประจำตัว 57050450
นายประวีณ	สาครสุขกิจ	รหัสประจำตัว 57050451
นางสาวปรีชญา	คนฉลาด	รหัสประจำตัว 57050452

นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี ขอรับรองว่าโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา เรื่อง

ชื่อภาษาไทย พฤติกรรมการกัดกร่อนของนิกเกิล-ซัลเฟอร์ที่ได้จากการเคลือบผิวโดยปราศจากการใช้ไฟฟ้า

ชื่อภาษาอังกฤษ Corrosion behavior of nickel-sulfur from electroless plating
ปีการศึกษา 2560

เป็นผลงานวิจัยที่ได้คัดลอกหรือละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นและได้ผ่านการตรวจสอบความซ้ำซ้อนเรียบร้อยแล้ว และได้แนบเอกสารการตรวจสอบการลอกเลียนงานวรรณกรรมที่ตรวจสอบจากเล่มโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์แล้ว
โปรแกรมอักขราวิสุทธิ์..... 0.27% หรือโปรแกรม Turnitin.....%.

ลงชื่อ.....*ปณต ปิ่นสุภา*..... ลงชื่อ.....*ประวีณ สาครสุขกิจ*..... ลงชื่อ.....*ปรีชญา คนฉลาด*.....
(นายปณต ปิ่นสุภา) (นายประวีณ สาครสุขกิจ) (นางสาวปรีชญา คนฉลาด)
นักศึกษา นักศึกษา นักศึกษา

ข้าพเจ้า ผศ.ดร. สุชา สุทธิเรืองวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา ได้ตรวจสอบโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษาของนักศึกษาข้างต้น แล้ว ขอรับรองว่าเป็นผลงานวิจัยของนักศึกษาจริงและมีเนื้อหาสมบูรณ์ จึงลงชื่อไว้เป็นหลักฐาน

ลงชื่อ.....*สุชา สุทธิเรืองวงศ์*.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุชา สุทธิเรืองวงศ์)
อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้