


การศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของ
โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-Cu-Sb
A STUDY ON CORROSION BEHAVIOR OF
Sn-Cu-Sb LEAD-FREE SOLDERS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมออกแบบการผลิตและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A STUDY ON CORROSION BEHAVIOR OF
Sn-Cu-Sb LEAD-FREE SOLDERS



MISS PIRADA PAERATANADILOK
MISS WARISSARA KHONGSOMRAN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN
PRODUCTION DESIGN AND MATERIALS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์

การศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของ
โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-Cu-Sb
A STUDY ON CORROSION BEHAVIOR OF
Sn-Cu-Sb LEAD-FREE SOLDERS


นักศึกษา

นางสาวพิรดา แพร่ตันดิลก รหัสประจำตัว 59010976
นางสาววิศรา คงสำราญ รหัสประจำตัว 59011198

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมออกแบบการผลิตและวัสดุ

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์


(ดร.พชรพล ตันขวิรุฬห์)


(รศ.ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์

การศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของ

โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-Cu-Sb

นักศึกษา

นางสาวพิรดา แพรัตนติก

นางสาววิศรา คงสำราญ

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมออกแบบการผลิตและวัสดุ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา

2562

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์

ดร.พชรพล ตัณฑวิรุฬห์

รศ.ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของธาตุพลวง (Sb) ที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-1.5Cu-xSb ที่มีส่วนผสมของพลวง (Sb) ที่ 0, 4, 6, 8 wt.% โดยการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคจะใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM), เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD), กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (EDX) สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (IMCs) และการทดสอบคุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วจะทดสอบด้วยวิธี Open-circuit Potential (OCP), Potentiodynamic Polarization และ Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) ซึ่งใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5% เป็นอิเล็กโทรไลต์ จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพบสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ในโลหะบัดกรีที่ไม่ได้เติมธาตุ Sb และพบสารประกอบเชิงโลหะ 2 ชนิดคือ Cu_6Sn_5 และ Sn_3Sb_2 เมื่อเติมธาตุ Sb ลงในโลหะบัดกรี โดยหลังจากการทดสอบการกัดกร่อนพบว่าพื้นผิวโดยส่วนมากของโลหะบัดกรีแต่ละชนิดเกิดขึ้นฟิล์มออกไซด์ของดีบุก คือ SnO_3 และจากผลทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิค Polarization พบว่า เมื่อเติมธาตุ Sb ปริมาณ 4 wt.% ลงในส่วนผสมของโลหะบัดกรี ส่งผลให้โลหะบัดกรีมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนได้ดีที่สุด แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเติมธาตุ Sb ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่ 6 wt.% และ 8 wt.% ส่งผลให้ความต้านทานการกัดกร่อนลดลง และเมื่อทดสอบคุณสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนด้วยเทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy พบว่า เมื่อเติมธาตุ Sb ที่ปริมาณ 6 wt.% ส่งผลให้ความต้านทานไฟฟ้า (R) ของโลหะบัดกรีมากที่สุด ซึ่งแสดงได้ว่ามีความต้านทานการกัดกร่อนมากกว่าโลหะบัดกรีที่มีธาตุ Sb ในปริมาณอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	A Study on Corrosion Behavior of Sn-Cu-Sb Lead-Free Solders
Student	Miss Pirada Paeratanadilok Miss Warissara Khongsomran
Degree	Bachelor of Engineering in Production Design and Materials Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year	2019
Thesis Advisor	Dr. Phacharaphon Tunthawiroon Assoc.Prof.Dr. Kannachai Kanlayasiri

ABSTRACT

The objective of this thesis is to study the influence of antimony (Sb) on microstructure and corrosion resistance of Sn-1.5Cu-xSb lead-free solders where x is the Sb content at 0, 4, 6, 8 wt.%. The microstructure and chemical composition of the solders and intermetallic compounds (IMCs) formed in the solder matrix were characterized by optical microscope (OM), X-ray diffractometer (XRD), Scanning electron microscope (SEM) equipped with Energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX). The corrosion behavior of the experimental solders was tested via electrochemical methods, including open-circuit potential (OCP), potentiodynamic polarization and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) in 3.5% NaCl solution. From the microstructure and XRD analysis, IMCs were found as Cu_6Sn_5 in the non-Sb solder whereas Cu_6Sn_5 and Sn_3Sb_2 were coexisted in the Sb-doped solders. After the corrosion tests, SnO_3 was incompletely formed on the surface of the experimental solders. In the non-Sb solder Cu_6Sn_5 was found without the covering of the oxide product whereas Sb-doped solder, Cu_6Sn_5 and Sn_3Sb_2 was found consistent with the initial microstructure analysis. According to the polarization technique, the best corrosion resistance, based on the corrosion rates, of the Sn-1.5-xSb solders was found in adding 4 wt.% of Sb. However, the corrosion resistance decreased when the concentrations of Sb are 6 and 8 wt.%. According to the EIS characterization, adding of 6 wt.% Sb in Sn-1.5Cu solders exhibited the highest electrical resistance (R), indicating the better resistance to corrosion compared to other experimental solders.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้นั้น เนื่องจากความช่วยเหลือต่างๆ จากคณาจารย์และบุคคลหลากหลายฝ่าย คณะผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณบุคคลทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จนเป็นฉบับที่ถูกต้องสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ดร.พชรพล ตันทวีรุฬห์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ รวมทั้งตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องของปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์

ขอขอบคุณ รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ที่สนับสนุนชิ้นงานทดสอบเพื่อใช้ในการทำวิจัย และให้คำแนะนำในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อสนับสนุนให้ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อสนับสนุนให้ใช้ Deionized Water (DI) เพื่อใช้ในการทดสอบชิ้นงาน

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อสนับสนุนให้ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) และเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานทดสอบ

ขอขอบคุณวิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อสนับสนุนให้ใช้เครื่องโพเทนชิโอสแตททีลวโนสแตท ในการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของชิ้นงานทดสอบ

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงผู้เกี่ยวข้องอื่นๆ ที่ผู้จัดทำไม่ได้เอ่ยนามที่คอยให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจระหว่างการทำวิจัย จนทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จโดยสมบูรณ์ หากมีข้อผิดพลาดประการใด คณะผู้จัดทำขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

นางสาวพิรดา แพร์ตันติก

นางสาววิศรา คงสำราญ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของปริญญาานิพนธ์.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 แผนการดำเนินการ.....	3
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 การบัดกรี.....	4
2.1.1 ประเภทของการบัดกรี.....	4
2.1.2 อุณหภูมิการใช้งานของโลหะบัดกรี.....	5
2.1.3 น้ำยาประสานหรือฟลักซ์.....	5
2.2 โลหะบัดกรี.....	10
2.3 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว.....	12
2.3.1 คุณสมบัติที่นำมาพิจารณาในการเลือกใช้โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว.....	14
2.3.2 ธาตุที่สามารถนำมาทดแทนสารตะกั่ว.....	15
2.3.3 แนวทางการเลือกธาตุที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน.....	15
2.4 คุณสมบัติของส่วนผสมโลหะบัดกรี.....	17
2.4.1 ดีบุก.....	17
2.4.2 ทองแดง.....	18
2.4.3 พลวง.....	20
2.5 แผนภูมิเฟสของโลหะบัดกรี.....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
2.5.1 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุก-ทองแดง	21
2.5.2 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุก-พลวง.....	22
2.5.3 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมทองแดง-พลวง	22
2.5.4 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุก-ทองแดง-พลวง	24
2.6 การกัดกร่อน	25
2.6.1 ประเภทของการกัดกร่อน.....	26
2.7 ศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐาน.....	30
2.7.1 ประโยชน์ศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐาน.....	32
2.8 การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้า.....	32
2.8.1 การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด.....	33
2.8.2 การวัดทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติกโพลาไรเซชัน	33
2.8.3 อิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า	36
2.9 การเตรียมชิ้นงานทางโลหะวิทยา	40
2.9.1 การตัดชิ้นงานเพื่อเตรียมตัวอย่าง	40
2.9.2 การฝังชิ้นงานในพลาสติก	41
2.9.3 การเตรียมผิวเชิงกล.....	42
2.10 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค.....	45
2.10.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....	45
2.10.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	46
2.10.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสี	47
2.10.4 หลักการของการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectrophotometry	48
2.11 น้ำปราศจากไอออน	49

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	51
3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	52
3.3 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ.....	52
3.3.1 การตัดชิ้นงาน	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
3.3.2 การหล่อเรซิน.....	53
3.3.3 การขัดเตรียมผิวชิ้นงานแบบหยาบ.....	54
3.3.4 การขัดเตรียมผิวชิ้นงานแบบละเอียด.....	55
3.3.5 การทำความสะอาดชิ้นงานทดสอบ.....	55
3.4 การตรวจสอบและวิเคราะห์ผลทางโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี.....	56
3.4.1 การตรวจสอบและวิเคราะห์ผลทางโครงสร้างจุลภาคเบื้องต้นของโลหะบัดกรีด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....	56
3.4.2 การตรวจสอบและวิเคราะห์ผลทางโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของโลหะบัดกรี.....	57
3.4.3 การตรวจสอบและวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโลหะบัดกรีด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	57
3.5 การตรวจสอบและวิเคราะห์ผลต้านทานการกัดกร่อนของโลหะบัดกรี.....	58
3.5.1 เตรียมสารละลายทดสอบ.....	58
3.5.2 การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดและการวัดทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชัน.....	59
3.5.3 การวัดอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า.....	60
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	
4.1 การวิเคราะห์ผลทางโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb ก่อนการกัดกร่อน.....	61
4.1.1 การวิเคราะห์ผลทางโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....	61
4.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ก่อนการกัดกร่อน.....	62
4.2 การวิเคราะห์พฤติกรรมการกัดกร่อนในโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb.....	63
4.2.1 การวิเคราะห์พฤติกรรมการกัดกร่อนในโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb ด้วยเทคนิคการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด.....	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
4.2.2 การวิเคราะห์พฤติกรรมการกัดกร่อนในโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb ด้วยเทคนิคการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดและเทคนิคโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชัน	65
4.2.3 การวิเคราะห์พฤติกรรมการกัดกร่อนในโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb ด้วยเทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy Measurements	67
4.3 การวิเคราะห์ผลทางโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb หลังการกัดกร่อน	69
4.3.1 การวิเคราะห์ผลทางโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb หลังการกัดกร่อนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	69
4.3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์หลังการกัดกร่อน	75
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงาน	
5.1 สรุปผลการทดลอง	76
5.2 ข้อจำกัดในการทำงานวิจัย	77
5.3 ข้อเสนอแนะ	77
เอกสารอ้างอิง	78
ภาคผนวก	ผ1
ภาคผนวก ก	ผ2
ภาคผนวก ข	ผ5
ภาคผนวก ค	ผ10
ภาคผนวก ง.....	ผ12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินการ.....	3
ตารางที่ 2.1 ชนิดของโลหะพื้นและน้ำยาประสานที่เหมาะสม.....	7
ตารางที่ 2.2 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำกว่า 180 °C.....	12
ตารางที่ 2.3 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 180 °C ถึง 200 °C.....	13
ตารางที่ 2.4 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 200 °C ถึง 230 °C.....	13
ตารางที่ 2.5 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวสูงกว่า 230 °C.....	13
ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบของโลหะบัดกรีชนิดต่างๆ ที่สามารถนำมาใช้ทดแทนตะกั่วบัดกรี.....	14
ตารางที่ 2.7 ธาตุที่สามารถนำมาทดแทนสารตะกั่ว.....	15
ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และฟิสิกส์ของดีบุก.....	17
ตารางที่ 2.9 คุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และฟิสิกส์ของทองแดง.....	18
ตารางที่ 2.10 คุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และฟิสิกส์ของพลวง.....	20
ตารางที่ 2.11 Temperature-Invariant Reactions in the Cu-Sb System.....	24
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมของโลหะบัดกรีแต่ละชนิดที่นำมาใช้ในการทดสอบ.....	52
ตารางที่ 4.1 สัมประสิทธิ์ทางเคมีไฟฟ้าของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb ใน สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 wt.%.....	67
ตารางที่ 4.2 ค่าความต้านทานของสารละลาย ค่าความต้านทานและค่าเก็บประจุในวงจร R(RC) ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 wt.%.....	69
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ธาตุโดยใช้ EDX ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb.....	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 การแผ่กระจายของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะพื้นของแผ่นทองแดงที่ให้อุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ	8
รูปที่ 2.2 การทำงานของฟลักซ์	9
รูปที่ 2.3 การเกิดการประสานกันระหว่างชิ้นงานโลหะโดยใช้การบัดกรี	11
รูปที่ 2.4 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมที่ประกอบด้วยตะกั่วและดีบุก.....	11
รูปที่ 2.5 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุก-ทองแดง (Sn-Cu)	21
รูปที่ 2.6 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุก-พลวง (Sn-Sb)	22
รูปที่ 2.7 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมทองแดง-พลวง (Cu-Sb)	23
รูปที่ 2.8 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุก-ทองแดง-พลวง (Sn-Cu-Sb)	24
รูปที่ 2.9 ตัวอย่างการกัดกร่อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของโลหะ	26
รูปที่ 2.10 ลักษณะการเกิดของการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ	26
รูปที่ 2.11 ลักษณะการเกิดของการกัดกร่อนเนื่องจากความต่างศักย์.....	27
รูปที่ 2.12 ลักษณะการเกิดของการกัดกร่อนแบบช่องแคบ.....	27
รูปที่ 2.13 ลักษณะการเกิดของการกัดกร่อนแบบเป็นหลุม.....	28
รูปที่ 2.14 ลักษณะการเกิดของการกัดกร่อนตามขอบเกรน.....	28
รูปที่ 2.15 ลักษณะการเกิดของการกัดกร่อนแบบกัดเซาะ	29
รูปที่ 2.16 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐานที่ 25°C ที่ 1 atm.....	31
รูปที่ 2.17 หลักการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าแบบเปิด (Open-circuit Potential Measurements, OCP)	33
รูปที่ 2.18 เซลล์ไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบการกัดกร่อน	34
รูปที่ 2.19 เส้นโค้งโพลาริเซชันสำหรับการกัดกร่อนที่เกิดฟิล์มพาสซีฟ (Passive Film) คลุมทั่วผิวหน้าโลหะ	35
รูปที่ 2.20 ลักษณะของ Nyquist Plot ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อิมพีแดนซ์จินตภาพ (Imaginary Impedance) และอิมพีแดนซ์ส่วนจริง (Real Impedance)	37
รูปที่ 2.21 ลักษณะของ Bode Plot ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ผลรวมของอิมพีแดนซ์และความถี่ (Frequency)	38
รูปที่ 2.22 วงจรไฟฟ้าที่ตัวต้านทาน (Resistor) และ ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ต่ออนุกรมกัน โดยได้มาจากการวิเคราะห์ Nyquist Plot และ Bode Plot.....	39
รูปที่ 2.23 วงจรไฟฟ้าที่ตัวต้านทาน (Resistor) และ ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ต่อขนานโดยได้มาจากการวิเคราะห์ Nyquist Plot และ Bode Plot.....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.24 วงจรไฟฟ้าที่ตัวต้านทาน (Resistor) และ ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ต่ออนุกรม และขนาดโดยได้มาจากการวิเคราะห์ Nyquist Plot และ Bode Plot.....	40
รูปที่ 2.25 ชั้นของผิวหน้าชิ้นงานที่ต้องทำการกำจัดโดยการขัดหยาบและขัดเงา	42
รูปที่ 2.26 ทิศทางการขัดที่เหมาะสม	43
รูปที่ 2.27 ตัวอย่างผิวงานขัดชิ้นงาน Aluminum Alloy ที่ผ่านการขัดด้วยกระดาษขัดเบอร์ต่างๆ.....	43
รูปที่ 2.28 ผ้าขัดโพลีเอสเตอร์ชนิดที่ใช้กับผงขัดเพชร.....	44
รูปที่ 2.29 สารขัดเงาอะลูมิเนียมออกไซด์และผงขัดเพชร.....	44
รูปที่ 2.30 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง	46
รูปที่ 2.31 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	46
รูปที่ 2.32 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึก	47
รูปที่ 3.1 ลักษณะเครื่องตัดแบบแรงโน้มถ่วงยี่ห้อ Struers รุ่น Minitom.....	52
รูปที่ 3.2 ลักษณะแม่แบบที่ใช้ในการหล่อเรซิน.....	53
รูปที่ 3.3 การหล่อเรซิน	53
รูปที่ 3.4 การขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทราย.....	54
รูปที่ 3.5 ลักษณะเครื่องขัดยี่ห้อ Struers รุ่น LaboPol-1	54
รูปที่ 3.6 ลักษณะเครื่องขัดผิวหน้าแบบละเอียด (Polishing Machine)	55
รูปที่ 3.7 ลักษณะเครื่องล้างอัลตราโซนิค (Ultrasonic Cleaner) ยี่ห้อ Elmasonic รุ่น E30H.....	56
รูปที่ 3.8 ลักษณะกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM) ยี่ห้อ OLYMPUS.....	56
รูปที่ 3.9 ลักษณะกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)	57
รูปที่ 3.10 ลักษณะเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD)	58
รูปที่ 3.11 โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)	58
รูปที่ 3.12 เซลล์ทดสอบการกัดกร่อนชนิดเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบ 3 ขั้ว (Three-Electrode Electrochemical Cell)	59
รูปที่ 3.13 เครื่องโพเทนชิโอสแตทกัลวานอสแตท (Potentiostat/Galvanostat) ยี่ห้อ Autolab รุ่น PGSTAT302N	59
รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb หลังการขัดผิวชิ้นงาน ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ที่กำลังขยาย 50 เท่า	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบสารด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) ก่อนการกัดกร่อน.....	62
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Potential กับเวลาที่รอให้เสถียรของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 98.5Sn-1.5Cu.....	63
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Potential กับเวลาที่รอให้เสถียร ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 94.5Sn-1.5Cu-4Sb.....	64
รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Potential กับเวลาที่รอให้เสถียร ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 92.5Sn-1.5Cu-6Sb.....	64
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Potential กับเวลาที่รอให้เสถียร ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 90.5Sn-1.5Cu-8Sb.....	65
รูปที่ 4.7 ภาพชิ้นงานผลิตภัณฑ์ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb หลังจากการทดสอบ Potentiodynamic Polarization.....	66
รูปที่ 4.8 กราฟ Potentiodynamic Polarization ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb.....	66
รูปที่ 4.9 กราฟ Nyquist Plot ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb.....	67
รูปที่ 4.10 กราฟ Bode Plot ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb.....	68
รูปที่ 4.11 วงจร R(RC) ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม.....	68
รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1000 เท่า และสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 98.5Sn-1.5Cu. 70	
รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1000 เท่า และสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 94.5Sn-1.5Cu-4Sb.....	71
รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1000 เท่า และสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 92.5Sn-1.5Cu-6Sb.....	72
รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1000 เท่า และสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 90.5Sn-1.5Cu-8Sb.....	73

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบสารด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)

หลังการกัดกร่อน 74



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-Cu-Sb ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดต่างๆ ของงานวิจัย ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา
2. วัตถุประสงค์การศึกษา
3. ขอบเขตของปริญญาานิพนธ์
4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ
5. แผนการดำเนินการ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และเครื่องใช้ไฟฟ้า รวมทั้งอุปกรณ์เครื่องมือต่างๆ มีการนำโลหะบัดกรีมาใช้เป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างรอยต่อของโลหะเข้าด้วยกัน ซึ่งโลหะบัดกรีที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ โลหะบัดกรีชนิดดีบุก-ตะกั่ว (Sn-Pb) [1] เนื่องจากมีคุณสมบัติในการบัดกรีที่ดี อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วงที่เหมาะสม มีสมบัติทางกายภาพ ทางกลและทางโลหะที่ดี และราคาถูก [2] อย่างไรก็ตามโลหะบัดกรีชนิดนี้เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมอย่างมาก เนื่องจากตะกั่วที่ใช้เป็นส่วนผสมของโลหะบัดกรีชนิดนี้ เป็นธาตุโลหะหนักที่มีพิษสามารถตกค้างปนเปื้อนลงในดิน และแหล่งน้ำธรรมชาติได้ ซึ่งเป็นที่อยู่อาศัยของสิ่งมีชีวิตต่างๆ [3] และสหภาพยุโรปได้ออกข้อบังคับ RoHS (The Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances) หรือมาตรฐานเพื่อสิ่งแวดล้อม ว่าด้วยเรื่องของการใช้สารที่เป็นอันตรายในอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อควบคุมการใช้สารมีพิษบางชนิดรวมทั้งตะกั่ว [4]

ในปัจจุบันจึงมีการหลีกเลี่ยงการใช้โลหะบัดกรีชนิดดีบุก-ตะกั่ว และมีการศึกษาค้นคว้าและพัฒนา โดยการนำโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วมาใช้ทดแทนโลหะบัดกรีชนิดดีบุก-ตะกั่ว โดยธาตุที่สามารถนำมาใช้ทดแทนตะกั่วหรือนำมาผสมกับดีบุกเพื่อใช้ทำโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วได้มีอยู่หลายชนิด ได้แก่ ทองคำ (Au), ทองแดง (Cu), บิสมัท (Bi), พลวง (Sb), แคดเมียม (Cd), อินเดียม (In), สังกะสี (Zn) และเงิน (Ag) ซึ่งจะนำมาผสมกันอยู่ในรูปแบบของโลหะผสม (Alloy) [2] ที่ประกอบไปด้วยธาตุ 2 ชนิด ได้แก่ Sn-Bi, Sn-Sb, Sn-Cu, Sn-Zn และ Sn-In เป็นต้น แต่เนื่องจากปัญหาทางด้านอุณหภูมิที่จุดยูเทคติกต่างจากโลหะบัดกรีชนิดดีบุก-ตะกั่วซึ่งอยู่ที่ 183°C หรือมีจุดหลอมเหลวสูงกว่าโลหะบัดกรีชนิดดีบุก-ตะกั่ว ต่อมาจึงได้พัฒนาโลหะบัดกรีที่ประกอบไปด้วยธาตุ 3 ชนิด ได้แก่ Sn-Bi-Ag,

Sn-Bi-Cu, Sn-Ag-Cu และ Sn-Ag-Sb [5-8] โดยโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่นิยมใช้กันมากคือ Sn-Ag-Cu เนื่องจากเป็นโลหะบัดกรีที่มีความแข็งแรงสูงและมีความสามารถในการบัดกรีที่ดี แต่โลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมของ Ag อาจทำให้เกิดการแตกร้าวของโลหะบัดกรีเมื่อได้รับความเค้นอย่างต่อเนื่อง [5,9] และผิวรอยบัดกรีขุ่นมัว อีกทั้งผลกระทบต่อราคาของ Ag ที่มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องซึ่งสวนทางกับราคาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีราคาถูกลงและมีการแข่งขันเรื่องราคาสูงทำให้มีความจำเป็นที่จะต้องหาวัสดุอื่นทดแทน [5,10] ซึ่งพลวงจัดเป็นตัวเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาทดแทนและปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วได้เนื่องจากถ้าเติมพลวงในปริมาณที่เหมาะสมจะสามารถเพิ่มคุณสมบัติต้านทานการคืบและต้านทานการล้าได้ อีกทั้งไม่เป็นสารที่มีพิษตามข้อบังคับ RoHS และราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับธาตุตัวอื่น [2]

จากที่กล่าวมาข้างต้นปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จึงจัดทำเพื่อศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิดดีบุก-ทองแดง-พลวง (Sn-Cu-Sb) ซึ่งอาจนำไปใช้พัฒนาเป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิดใหม่ได้ในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของ Sb ที่มีผลต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วในกลุ่ม Sn-Cu-Sb
2. เพื่อศึกษาโครงสร้างของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-Cu-Sb

1.3 ขอบเขตของปริญญาานิพนธ์

1. ศึกษาโดยใช้โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วในกลุ่ม Sn-Cu-Sb ซึ่งมีปริมาณของ Sb ตั้งแต่ 0-8% โดยน้ำหนัก ได้แก่ 98.5Sn-1.5Cu, 94.5Sn-1.5Cu-4Sb, 92.5Sn-1.5Cu-6Sb และ 90.5Sn-1.5Cu-8Sb
2. ทดสอบผลกระทบของธาตุจากการกัดกร่อน โดยวิธี Electrochemical ได้แก่ Open-circuit Potential Measurement (OCP), Potentiodynamic Polarization Measurement และ Electrochemical Impedance Spectroscopy Measurement (EIS)
3. ศึกษาพื้นผิวของชิ้นงานโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วในกลุ่ม Sn-Cu-Sb ก่อนและหลังการทดสอบการกัดกร่อนด้วย SEM Analysis, X-ray Diffractometer (XRD)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เรียนรู้วิธีการทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธี Electrochemical
2. ได้เรียนรู้อิทธิพลของธาตุ Sb ที่มีผลต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วในกลุ่ม Sn-Cu-Sb
3. ได้เรียนรู้ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วในกลุ่ม Sn-Cu-Sb ก่อนและหลังการทดสอบการกัดกร่อนด้วย SEM Analysis และ X-ray Diffractometer (XRD)

1.5 แผนการดำเนินการ

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินการ

รายการ	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1. ค้นหาหัวข้อที่สนใจในการทำ ปริญญานิพนธ์	←→							
2. ศึกษาเนื้อหา ข้อมูล อุปกรณ์ และ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 2.1 ศึกษาข้อมูลของโลหะบัดกรี ไร้สารตะกั่ว 2.2 ศึกษาการวิเคราะห์โครงสร้าง 2.3 ศึกษาวิธีการกัดกร่อน	←→							
3. เตรียมชิ้นงานโลหะบัดกรีไร้สาร ตะกั่ว Sn-Cu-Sb		←→						
4. ศึกษาโครงสร้างของโลหะบัดกรีไร้ สารตะกั่ว Sn-Cu-Sb ด้วย SEM Analysis ทั้งก่อนและหลังการกัด กร่อน			←→					
5. ศึกษาพฤติกรรมในการกัดกร่อน ของ Sn-Cu-Sb ทั้งก่อนและหลังการ กัดกร่อน				←→				
6. วิเคราะห์ผลการดำเนินงาน					←→			
7. สรุปผลการดำเนินงาน					←→			
8. จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์				←→				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการจัดทำปริญญาณิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้จัดทำได้ทำการศึกษาหาข้อมูลเกี่ยวกับทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆ ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงแนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การบัดกรี
2. โลหะบัดกรี
3. โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว
4. คุณสมบัติของส่วนผสมโลหะบัดกรี
5. แผนภูมิเฟสของโลหะบัดกรี
6. การกัดกร่อน
7. ศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐาน
8. การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้า
9. การเตรียมชิ้นงานทางโลหะวิทยา
10. การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค
11. น้ำปราศจากไอออน

2.1 การบัดกรี

การบัดกรี (Soldering) คือ กรรมวิธีการต่อโลหะตั้งแต่สองชิ้นหรือมากกว่าเข้าด้วยกัน โดยที่โลหะนั้นจะเป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ และใช้โลหะเติมที่เป็นโลหะที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ เช่น ตะกั่วหรือดีบุก เติมลงไปที่รอยต่อของชิ้นงาน โลหะเติมนี้จะหลอมละลายและแทรกตัวซึมเข้าไปในช่องว่างระหว่างรอยต่อของแผ่นโลหะที่นำมาบัดกรี โดยในระหว่างการบัดกรีนั้นโลหะบัดกรีที่หลอมละลายจะกระจายเข้าไปที่รอยต่อระหว่างแผ่นโลหะด้วยแรงดึงตามรูเล็กเป็นการประสานให้แผ่นโลหะทั้งสองชิ้นเกิดยึดติดกัน [11]

2.1.1 ประเภทของการบัดกรี

1. การบัดกรีแข็ง (Brazing) หรือการแล่นประสาน คือ กรรมวิธีการต่อโลหะตั้งแต่สองชิ้นขึ้นไปหรือมากกว่าเข้าด้วยกัน โดยโลหะนั้นจะเป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ การบัดกรีแข็งจำเป็นต้องมีโลหะเติมหรือตัวประสาน (Filler Metal) ซึ่งจะเป็นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า 450 องศาเซลเซียส แต่ต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะที่นำมาทำการบัดกรีแข็งและโลหะเติมนี้จะถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เติมลงไปที่ยรอยต่อของชิ้นงาน โดยหลักการ โลหะเติมนี้จะหลอมละลายและแทรกตัวซึมเข้าไปในช่องว่างระหว่างรอยต่อด้วยปฏิกิริยาคาปิลารี (Capillary Action) ปกติโลหะเติมจะเป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Non-Ferrous Metal) ซึ่งจะให้อรอยต่อที่มีความแข็งแรงเกือบเท่ารอยเชื่อม [12]

2. การบัดกรีอ่อน (Soldering) คือ กรรมวิธีการต่อโลหะตั้งแต่สองชิ้นหรือมากกว่าเข้าด้วยกัน โดยที่โลหะนั้นจะเป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ การบัดกรีอ่อนกระทำโดยให้ความร้อนแก่รอยต่อที่อุณหภูมิต่ำกว่า 450 องศาเซลเซียส และใช้โลหะเติมที่เป็นโลหะและมีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ เช่น ตะกั่วหรือดีบุกเติมลงไปที่ยรอยต่อของชิ้นงาน โลหะเติมนี้จะหลอมละลายและแทรกตัวซึมเข้าไปในช่องว่างระหว่างรอยต่อด้วยปฏิกิริยาคาปิลารี (Capillary Action) ลักษณะงานที่ใช้การต่อโลหะด้วยการบัดกรีอ่อนได้แก่ งานบัดกรีท่อทองแดงสำหรับงานแรงดันต่ำหรืองานที่มีอุณหภูมิการใช้งานไม่เกิน 200-300 °C หรืองานบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ติดกับแผงวงจรพิมพ์ [12]

โดยสามารถแบ่งประเภทของการบัดกรีอ่อนตาม AWS ดังต่อไปนี้ [2]

1. การบัดกรีในเตา (Furnace Soldering : FS)
2. การบัดกรีในเตาเหนี่ยวนำ (Induction Soldering : IS)
3. การบัดกรีด้วยอินฟราเรด (Infrared Soldering : IRS)
4. การบัดกรีแบบจุ่ม (Dip Soldering : DS)
5. การบัดกรีด้วยความต้านทาน (Resistance Soldering : RS)
6. การบัดกรีด้วยเปลวไฟ (Torch Soldering : TS)
7. การบัดกรีด้วยคลื่น (Wave Soldering : WS)
8. การบัดกรีด้วยหัวแร่ (Iron Soldering : INS)

2.1.2 อุณหภูมิการใช้งานของโลหะบัดกรี

อุณหภูมิการใช้งาน คือ อุณหภูมิที่โลหะบัดกรีจะเกิดการหลอมละลาย จากนั้นจึงไหลเข้าไปในช่องว่างระหว่างชิ้นงานและเกิดการประสานกันระหว่างชิ้นงานในช่องว่างระหว่างชิ้นงานและเกิดการประสานกันระหว่างชิ้นงาน โดยทั่วไปอุณหภูมิใช้งานของโลหะบัดกรีจะสูงกว่าอุณหภูมิหลอมละลายของโลหะบัดกรี ซึ่งถ้าหากอุณหภูมิของชิ้นงานในขณะนั้นต่ำกว่าอุณหภูมิใช้งานโลหะบัดกรีจะไม่ไหลถึงแม้โลหะบัดกรีจะหลอมละลายแล้วก็ตาม และถ้าหากให้ความร้อนชิ้นงานสูงกว่าอุณหภูมิใช้งาน ฟลักซ์จะไหม้ ก่อให้เกิดสิ่งสกปรกขึ้น ส่งผลทำให้การบัดกรีได้ผลไม่ดี ความแข็งแรงของรอยบัดกรีจะลดลงอย่างมาก โลหะบัดกรีที่แข็งแล้วจะเป็นรูพรุน ดังนั้นจำเป็นต้องรักษาอุณหภูมิใช้งานไว้เพื่อการบัดกรีที่สมบูรณ์โดยอุณหภูมิใช้งานที่ใช้สำหรับตะกั่วบัดกรี Sn-40Pb เท่ากับ 230 °C และโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.7Cu เท่ากับ 270 °C [12]

2.1.3 น้ำยาประสานหรือฟลักซ์

ในการบัดกรีให้ประสบความสำเร็จ ขึ้นอยู่กับความสามารถในการกระจายตัว (Spreading) ของโลหะบัดกรีและภาวะเปียก (Wetting) บนพื้นผิวโลหะพื้น อุปสรรคของการบัดกรี คือ เกิดชั้นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ฟิล์มและคราบสกปรกต่างๆ ปกคลุมอยู่บนพื้นผิวโลหะพื้น ซึ่งจะขัดขวางไม่ให้โลหะบัดกรีนั้นเกิดการกระจายตัวและเกิดภาวะเปียกในบริเวณที่จะทำการบัดกรี

ดังนั้นก่อนการบัดกรีต้องมีการทำความสะอาดพื้นผิวโลหะพื้นด้วยสารเคมี ที่เรียกว่า น้ำยาประสานหรือฟลักซ์ (Fluxes) มีหน้าที่ทำความสะอาดพื้นผิวโลหะบริเวณที่จะทำการบัดกรี โดยฟลักซ์จะทำปฏิกิริยาและกำจัดชั้นฟิล์มออกไซด์ (Oxide) และคราบสกปรกต่างๆ ให้หมดไปเหลือแต่ผิวหน้าโลหะพื้นที่แท้จริง และฟลักซ์มีหน้าที่ลดความตึงผิวของโลหะบัดกรีทำให้โลหะบัดกรีมีการไหลที่ดีกระจายตัวบนพื้นผิวโลหะได้ดีและช่วยเพิ่มสถานะเปียก อีกทั้งฟลักซ์ยังช่วยป้องกันพื้นผิวโลหะพื้นสัมผัสกับออกซิเจนจากอากาศ (Oxidation) เข้ามาปะปนบนพื้นผิวโลหะพื้นที่กำลังทำการบัดกรี เพราะปกติพื้นผิวโลหะพื้นจะมีชั้นฟิล์มออกไซด์อยู่แล้วแต่จะมีการเพิ่มมากขึ้นเมื่อพื้นผิวโลหะได้รับความร้อน ส่วนตกค้างของฟลักซ์หลังจากการบัดกรีต้องไม่กัดกร่อนรอยต่อหรือชิ้นงานโลหะรวมทั้งไม่นำไฟฟ้าและสามารถกำจัดออกไปได้โดยใช้สารละลายหรือตัวทำละลายเคมี

ฟลักซ์ที่ใช้ในกระบวนการบัดกรีมีหลายรูปแบบ ได้แก่ ของแข็ง (Solid) กึ่งของเหลว (Paste) และแบบของเหลว (Liquid) ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งฟลักซ์ที่ดีจะต้องหลอมละลายที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะบัดกรีและฟลักซ์ที่หลอมละลายแล้วต้องแผ่กระจายตัวบนผิวหน้าโลหะพื้นบริเวณที่จะทำการบัดกรีและทำความสะอาดผิวหน้าโลหะพื้นที่ก่อนที่โลหะบัดกรีจะหลอมละลายและแผ่เข้ามาแทนที่ฟลักซ์ [12]

น้ำยาประสานหรือฟลักซ์ แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทตามฤทธิ์การกัดกร่อน ได้แก่

1. น้ำยาประสานประเภทที่มีฤทธิ์กัดกร่อน (Corrosive Fluxes) หรือฟลักซ์อนินทรีย์ (Inorganic Fluxes) เช่น สังกะสีคลอไรด์ (Zinc Chloride) กรดเกลือ (Muriatic Acid) และเกลืออนินทรีย์ชนิดต่างๆ โดยปกติจะใช้ฟลักซ์จำพวกนี้เมื่อมีปัญหาจากการเกิดออกซิเดชันระหว่างโลหะบัดกรีกับอากาศ เนื่องจากฟลักซ์กลุ่มนี้สามารถปกป้องรอยเชื่อมได้ค่อนข้างดี

กรดเกลือหรือ Muriatic Acid เป็นกรดที่มีความเข้มข้นสูงและอันตรายมาก มีสีเหลือง ใช้เป็นน้ำยาประสานเมื่อบัดกรีเหล็กอาบสังกะสีจะเดือดและมีควัน ทำให้แผ่นเหล็กอาบสังกะสีจะมีรอยดำ กรดเกลือใช้ในการผลิตสังกะสีคลอไรด์ สำหรับทำความสะอาดก่อนการบัดกรี โดยเฉพาะเหล็กอาบสังกะสี (Galvanized Steel) ในงานแผ่นโลหะต่างๆ ไป กรดเกลือจะถูกเรียกว่า Raw acid

สังกะสีคลอไรด์ (Zinc Chloride) หรือ Cut Acid เป็นน้ำยาประสานที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น กัดกร่อนโลหะ และอันตรายมากเท่าๆ กรดเกลือ โดยทั่วไปใช้เป็นน้ำยาประสานในการบัดกรีสำหรับเหล็กอาบสังกะสี (Galvanized Steel) สังกะสี (Zinc) ทองเหลือง (Bass) ทองแดง (Copper) และตะกั่ว (Lead)

ตารางที่ 2.1 ชนิดของโลหะพื้นและน้ำยาประสานที่เหมาะสม

ชนิดของโลหะ	น้ำยาประสาน	ชื่อทางเคมีของน้ำยาประสาน
แผ่นสังกะสี (Zinc)	สังกะสีคลอไรด์ (Cut Acid)	Zinc Chloride
แผ่นเหล็กอาบสังกะสี (Galvanized Steel)	กรดเกลือ (Muriatic Acid)	Hydrochloride Acid
แผ่นดีบุก (Tin)	ยางสน (Rosin)	Colophony
แผ่นเหล็กอาบดีบุก (Tin plate)	สังกะสีคลอไรด์ (Cut Acid)	Zinc Chloride
แผ่นเหล็ก (Mild steel)	สังกะสีคลอไรด์ (Cut Acid)	Zinc Chloride
แผ่นเหล็กทองเหลือง	สังกะสีคลอไรด์ (Cut Acid)	Zinc Chloride
แผ่นทองแดง	ยางสน (Rosin)	Colophony
แผ่นตะกั่ว	ยางสน (Rosin)	Colophony
แผ่นอลูมิเนียม	น้ำยาประสานชนิดพิเศษ (Special Flux)	-

2. น้ำยาประสานประเภทที่ไม่มีฤทธิ์กัดกร่อน (Noncorrosive Fluxes) หรือฟลักซ์อินทรีย์ (Organic Fluxes) เช่น ไชสัตว์ (Tallow) ยางสน (Rosin) ยางไม้ (Natural Rosin) แอลกอฮอล์ กรดอินทรีย์ และเกลือของฮาโลเจน 7 (Halogen) โดยทั่วไปแล้วฟลักซ์ในกลุ่มนี้ใช้กับการบัดกรีอุปกรณ์ไฟฟ้าหรืออิเล็กทรอนิกส์

ยางสน เป็นน้ำยาประสานชนิดที่ไม่มีฤทธิ์กัดกร่อน เป็นผลิตภัณฑ์ธรรมชาติที่ได้จากการกลั่นน้ำมันสน ประกอบด้วยสารประกอบอินทรีย์ที่เรียกว่า Abietic Acid มีฤทธิ์เป็นกรดอ่อนๆ ที่ไม่ทำให้เกิดการกัดกร่อน เมื่อได้รับความร้อนจะเริ่มอ่อนตัวที่อุณหภูมิ 50-70 องศาเซลเซียส และหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส โดยยางสนสามารถทำความสะอาดออกไซด์ที่บริเวณผิวหน้าของพื้นผิวโลหะพื้นได้ เช่น ทองแดง ใช้ในการบัดกรีงานที่เล็กๆ โดยเฉพาะงานอุปกรณ์ไฟฟ้าและวิทยุ ยางสนอาจจะผลิตออกมาทั้งในรูปของก้อน ผง และผสมเบนซินเป็นยางเหนียว (Semi Solid)

ประเภทของน้ำยาประสานทางการค้าเชิงพาณิชย์ที่ใช้สำหรับการบัดกรีทั่วไป ได้แก่

1. R (Rosin)
2. RMA (Rosin Mildly Activated)
3. RA (Rosin Activated)
4. OA (Organic Acid)

5. IA (Inorganic Acid)
6. SA (Synthetically Activated)
7. WS (Water Soluble)

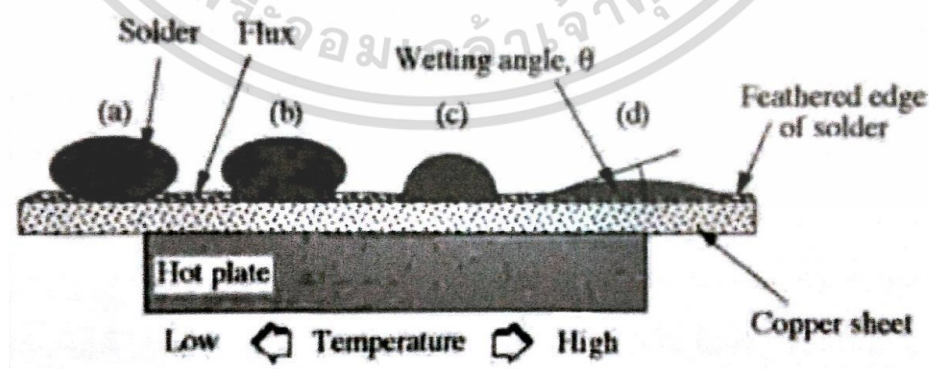
น้ำยาประสานประเภท R, RMA, และ RA จะประกอบไปด้วยยางสนเป็นส่วนประกอบหลัก โดยความแตกต่างระหว่างน้ำยาประสานประเภท R, RMA, และ RA คือระดับของ Chemical Activity ที่เพิ่มขึ้นจาก R ไปยัง RA และในน้ำยาประสานสมัยใหม่ส่วนใหญ่ยางสนคือสิ่งที่ได้จากการสังเคราะห์ทางเคมี โดยจะไม่มีผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติ

น้ำยาประสานประเภท OA คือ กรดอินทรีย์ (Organic Acid) จะมีระดับ Chemical Activity มากกว่า RA แต่ไม่เท่า IA

น้ำยาประสานประเภท IA คือ กรดอนินทรีย์ (Inorganic Acid) ส่วนใหญ่จะเป็นกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid) และมีระดับ Chemical Activity มากที่สุดเมื่อเทียบกับน้ำยาประสานทุกประเภท

น้ำยาประสานประเภท SA เป็นการสังเคราะห์จากสูตรทางเคมีของสารละลายคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (Chlorofluorocarbon) และเป็นการเพิ่มขึ้นของมลภาวะทางอากาศ โดยเฉพาะสาร CFCs น้ำยาประสานประเภท SA ก็จะถูกแทนที่ด้วยน้ำยาประสานประเภทใหม่ที่เรียกว่า Water Soluble (WS)

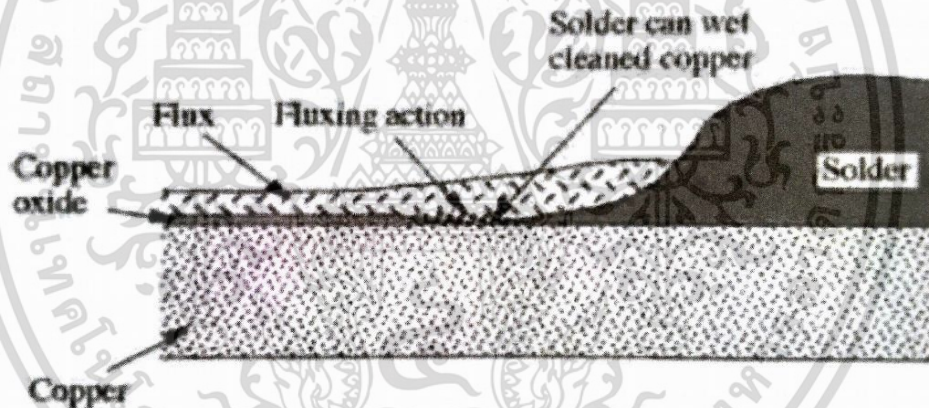
น้ำยาประสานประเภท WS จะประกอบไปด้วยฮาโลด์ ซึ่งใช้กันมาหลายสิบปี โดยเป็นน้ำยาประสานที่นิยมใช้ในการค้าเชิงพาณิชย์และมีการพัฒนาให้ใช้ได้อย่างกว้างขวาง คือใช้ได้ในทุกระดับของ Chemical Activity และถ้าใช้น้ำยาประสานประเภทนี้ในกระบวนการบัดกรี หลังบัดกรีเสร็จต้องมีการล้างทำความสะอาดเอาน้ำยาประสานที่ตกค้างบนบริเวณที่ทำการบัดกรีออก เพราะน้ำยาประสานที่ตกค้างอาจทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ อีกทั้งยังยากต่อการนำไปใช้ในกระบวนการบัดกรีแบบโฟลว์ด้วยการทำงานของฟลักซ์ [12]



รูปที่ 2.1 การแผ่กระจายของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะพื้นของแผ่นทองแดง
ที่ให้อุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ

จากรูปที่ 2.1 แสดงแผ่นทองแดงที่มีฟลักซ์เคลือบอยู่บนพื้นผิวและวางอยู่บนแผ่นความร้อน (Hot Plate) ที่กำลังเพิ่มอุณหภูมิของแผ่นทองแดงให้สูงขึ้นเหนืออุณหภูมิหลอมละลายของโลหะบัดกรี ในตอนแรกโลหะบัดกรีจะมีลักษณะเป็นทรงกลมวางอยู่บนแผ่นทองแดง (a) หลังจากนั้นแผ่นความร้อนจะให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจนแผ่นทองแดงมีอุณหภูมิถึงอุณหภูมิหลอมละลายของโลหะบัดกรี จะเห็นได้ว่าโลหะบัดกรีทรงกลมเริ่มหลอมละลาย (b) เริ่มไหล (c) และเกิดภาวะเปียกบนแผ่นทองแดง (d) [12]

จากรูปที่ 2.2 ขณะที่โลหะบัดกรีกำลังหลอมละลายและไหล ในบริเวณผิวหน้าแผ่นทองแดงนี้จะประกอบไปด้วยชั้นออกไซด์ของทองแดง ฟลักซ์ และโลหะบัดกรี โดยในระหว่างกระบวนการบัดกรีนี้มีขั้นตอนที่สำคัญ 2 อย่าง คือ บนแผ่นทองแดงที่ร้อนโลหะบัดกรีจะเริ่มหลอมละลาย และในขณะเดียวกัน ฟลักซ์เริ่มทำปฏิกิริยา ในระหว่างที่ฟลักซ์ทำปฏิกิริยากับแผ่นทองแดง ออกไซด์บนผิวหน้าของแผ่นทองแดงจะถูกกำจัดออก อย่างไรก็ตามพื้นผิวโลหะบัดกรีและการป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อาจเกิดขึ้นอีก อีกทั้งชนิดของฟลักซ์ที่ใช้โดยทั่วไปขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นของออกไซด์ของพื้นผิวที่จะบัดกรี ถ้าชั้นของออกไซด์บางจะใช้ฟลักซ์ที่รุนแรงน้อย (Low Activity) [13]



รูปที่ 2.2 การทำงานของฟลักซ์

บทบาทของน้ำยาประสานระหว่างการให้ความร้อน โดยเมื่อพื้นผิวของโลหะปราศจากสิ่งแปลกปลอมสนิมหรือเศษของมันแล้ว เราก็มยังไม่สามารถให้ความร้อนกับตัวโลหะหรือตัวโลหะผสมได้ในทันที เนื่องจากเราจะต้องป้องกันโลหะจากการก่อตัวของสนิมอีกครั้งในระหว่างการให้ความร้อน สารซึ่งใช้สำหรับป้องกันการก่อตัวของสนิมระหว่างการให้ความร้อน และช่วยให้พื้นผิวสะอาดตลอดขั้นตอนการบัดกรีนี้มีชื่อเรียกว่า น้ำยาประสานหรือฟลักซ์และเนื่องจากว่าน้ำยาประสานถูกนำมาใช้เพื่อขัดขวางการก่อตัวของสนิมในบริเวณพื้นผิวที่จะบัดกรีเราจึงต้องแน่ใจว่าในระหว่างการใช้งาน สารดังกล่าวถูกทาทั่วบริเวณที่ตัวโลหะผสมจะปกคลุมซึ่งหลายครั้งกรณีดังกล่าวเป็นสาเหตุที่ทำให้การบัดกรีล้มเหลวในการที่จะได้พื้นผิวโลหะที่สะอาดนั้นสามารถกระทำได้โดยสองวิธีคือทางกลไกและทางเคมี การทำความสะอาดทางกลไกสามารถกระทำได้ง่ายด้วยการใช้แปรงหรือฝอยลวดขจัดสิ่ง

แลกเปลี่ยนและสุมออกจากพื้นผิวเพื่อที่จะได้ไม่มีสิ่งกีดขวางเมื่อโลหะผสมแผ่มาปกคลุม ในระหว่าง การทำความสะอาดนี้ผิวของโลหะจะโดนขูดขีดเล็กน้อยเป็นผลให้เกิดรอยขนาดจิวซึ่งทำให้พื้นผิวของ โลหะขยายขึ้นกล่าวคือพื้นผิวขรุขระนี้ช่วยให้โลหะผสมเกาะยึดกับตัวโลหะมากขึ้นเนื่องจากปริมาณ พื้นที่ที่เพิ่มขึ้นทำความสะอาดทางเคมีหมายถึงการใช้ผลิตภัณฑ์เคมีซึ่งผสมกรดหรือผลิตภัณฑ์ที่ ออกฤทธิ์กับสนิมและขจัดมันออกจากพื้นผิวโลหะ [2]

2.2 โลหะบัดกรี

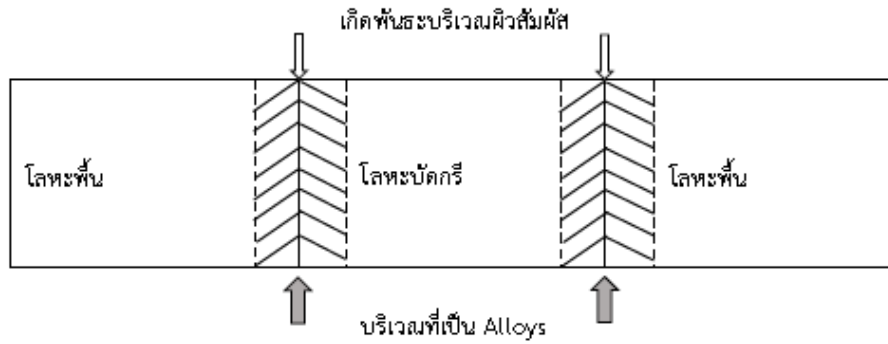
โลหะบัดกรี (Solder) คือ โลหะผสมที่มีจุดหลอมละลายต่ำ ใช้เป็นตัวเชื่อมประสานชิ้นงาน โลหะเข้าด้วยกันโดยทั่วไปอุณหภูมิในการหลอมละลายของตัวเชื่อมประสานนี้มักจะต่ำกว่าอุณหภูมิ หลอมละลายของชิ้นงานที่ต้องการเชื่อมต่อกันเสมอ และโลหะบัดกรีนี้ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสาน แทนที่ โดยโลหะบัดกรีที่ใช้กันแพร่หลายทั่วไป คือ โลหะผสมของตะกั่วและดีบุก (Sn-Pb) ซึ่งข้อดี คือ ราคาถูก มีคุณสมบัติในการบัดกรีที่ดี อุณหภูมิหลอมละลายต่ำ มีการกระจายตัวบนผิวโลหะต่างๆ ได้ดี และให้รอยต่อที่มีความแข็งแรง ทำให้ผู้คนมักเรียกโลหะบัดกรีว่า “ตะกั่วบัดกรี” โดยที่โลหะบัดกรี บางชนิดไม่มีส่วนประกอบของตะกั่วและดีบุกผสมอยู่

ในระหว่างการบัดกรีนั้นจะก่อให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างโลหะบัดกรีกับแผ่นโลหะชิ้นงาน (Base Metal) เกิดเป็นการเกาะติดทางโลหะระหว่างโลหะบัดกรีกับความหยาบบนผิวหน้าที่ไม่สม่ำเสมอของ แผ่นโลหะชิ้นงานพร้อมทั้งเกิดพันธะโลหะระหว่างโลหะบัดกรีกับแผ่นโลหะชิ้นงาน โดยปกติแล้วพันธะ โลหะที่เกิดขึ้นนั้นจะมีความแข็งแรงมากกว่าการเกาะติดทางกล นอกจากนี้ในส่วนที่เกิดปฏิกิริยาจะ พบการก่อตัวของสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic Compounds) ระหว่างโลหะบัดกรีกับแผ่น โลหะชิ้นงานด้วย ซึ่งลักษณะการเกิดการประสานกันระหว่างชิ้นงานโลหะโดยใช้การบัดกรี โดยบริเวณ การบัดกรีจะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ

1. บริเวณที่ ชิ้นงานโลหะทำปฏิกิริยากับโลหะบัดกรีเกิดเป็นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic Compounds)

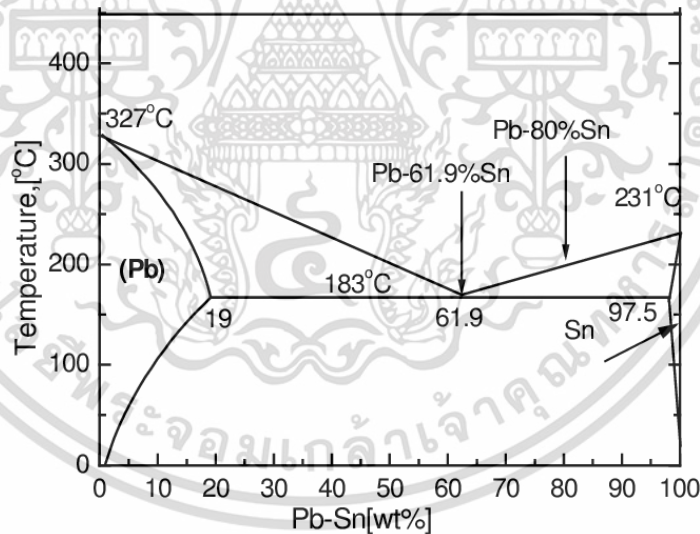
2. บริเวณที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยากับโลหะบัดกรี บริเวณนี้โครงสร้างจุลภาคจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงไปจากโลหะบัดกรีเดิมแต่บริเวณนี้มีพื้นที่ค่อนข้างน้อยในการวิจัยจึงใช้ชิ้นงานอีกชิ้นเพื่อ ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีเฉพาะในส่วนนี้เพื่อง่ายต่อการวิเคราะห์และมีบริเวณที่จะ ศึกษามากกว่าชิ้นงานที่ผ่านการบัดกรีแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 2.3 [14]

บริเวณทั้งสองส่วนนี้จะถูกแรงกระทำเหมือนกัน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องศึกษา โครงสร้างจุลภาคของทั้งสองบริเวณ เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างที่เกิดขึ้นซึ่งส่งผลต่อคุณสมบัติทางกล หลังจากนำไปใช้งาน [13]



รูปที่ 2.3 การเกิดการประสานกันระหว่างชิ้นงานโลหะโดยใช้การบัดกรี

เนื่องจากโลหะบัดกรีทำมาจากโลหะผสมระหว่างดีบุกและตะกั่ว (Sn-Pb) มีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ แต่ไม่เหมาะสมกับการใช้งานบางประเภท จึงทำให้มีการนำเอาโลหะชนิดอื่นเข้ามาผสมสมบัติทางกลและทางกายภาพของตะกั่ว โดยโลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมระหว่างดีบุกและตะกั่วในอัตราส่วนแตกต่างกันจะมีผลทำให้อุณหภูมิหลอมเหลว (Liquidus Temperature) มีความแตกต่างกัน แสดงในเฟสไดอะแกรม ดังแสดงในรูปที่ 2.4 [15]



รูปที่ 2.4 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมที่ประกอบด้วยตะกั่วและดีบุก

จากรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่า ดีบุกจะเริ่มหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 283 °C และกลายเป็นของเหลวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 327 °C ส่วนตะกั่วจะเริ่มหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 183 °C และกลายเป็นของเหลวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 232 °C หากใช้ดีบุกหรือตะกั่วเพียงอย่างใดอย่างหนึ่งในการบัดกรี จะไม่เหมาะสม เนื่องจากจุดหลอมเหลวสูงเกินไปแตเมื่อนำเอาดีบุกและตะกั่วมาผสมกันในอัตราส่วนที่เหมาะสม จะทำให้ได้ตะกั่วบัดกรีที่มีจุดหลอมเหลวและอุณหภูมิช่วงอ่อนตัวลดต่ำลง ถ้าใช้อัตราส่วน

ระหว่างดีบุก 61.9% โดยน้ำหนัก และตะกั่ว 38.1% โดยน้ำหนัก จะทำให้ส่วนผสมนี้ไม่มีบริเวณที่เป็นสถานะของผสม โดยจะเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นของเหลวที่อุณหภูมิ 183 °C ตั้งในเฟสไดอะแกรม แต่ส่วนผสมนี้ไม่นิยมใช้งานเนื่องจากจะทำให้เกิดความเปราะของรอยบัดกรีภายใต้สภาวะการใช้งาน

อัตราส่วนที่นิยมใช้กันมากที่สุดของตะกั่วบัดกรีที่ใช้ในงานทางอิเล็กทรอนิกส์ คือ ดีบุก 60% และตะกั่ว 40% โดยน้ำหนัก ซึ่งเรียกว่า ตะกั่วบัดกรีแบบ 60/40 และถูกจัดว่าเป็นตะกั่วแบบอ่อนโดยจะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 188 °C และมีช่วงการหลอมเหลวประมาณ 5 °C ซึ่งจะทำให้ได้ความแข็งแรงที่สุดและมีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าต่ำสุดด้วย สำหรับรอยต่อที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูงหรือต้องการความแข็งแรงทางกลมากๆ จำเป็นต้องใช้ตะกั่วบัดกรีแบบแข็ง ซึ่งจะประกอบด้วยอัตราส่วนผสมของดีบุก ต่อตะกั่ว 30/70 และมีช่วงหลอมเหลวประมาณ 255 ถึง 275 °C [13]

2.3 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-Free Solder) คือ โลหะบัดกรีที่ปราศจากการผสมของธาตุตะกั่ว (Pb) ซึ่งมีการศึกษาและพัฒนาเพื่อทดแทนการใช้โลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมของธาตุตะกั่ว โดยที่โลหะบัดกรีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คือ โลหะบัดกรีชนิดดีบุก-ตะกั่ว ที่มีความเป็นพิษเนื่องจากมีปริมาณตะกั่วผสมอยู่ในโลหะชนิดนี้เกินข้อกำหนด RoHS (Restriction of Hazardous Substances) มาตราฐานเพื่อสิ่งแวดล้อม ที่กำหนดไว้ว่า ปริมาณสารที่เป็นอันตรายในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งรวมถึงตะกั่วต้องไม่เกิน 0.1% โดยน้ำหนัก [11]

โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีการพัฒนาเพื่อทดแทนโลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมของตะกั่ว สามารถแบ่งได้ตามช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวได้ 4 กลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 2.2-2.5 [2,16]

ตารางที่ 2.2 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำกว่า 180 °C

โลหะผสม	ส่วนประกอบ (wt.%)	ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว (°C)
Sn-Bi	Sn-58Bi	138
Sn-In	Sn-52In	118
Sn-In	Sn-50In	118-125
Bi-In	Bi-33In	109

ตารางที่ 2.3 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 180 °C ถึง 200 °C

โลหะผสม	ส่วนประกอบ (wt.%)	ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว (°C)
Sn-Zn	Sn-9Zn	198
Sn-Zn-Bi	Sn-8Zn3-Bi	188-189
Sn-Bi-In	Sn-20Bi-10In	143-193

ตารางที่ 2.4 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 200 °C ถึง 230 °C

โลหะผสม	ส่วนประกอบ (wt.%)	ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว (°C)
Sn-Ag	Sn-3.5Ag	221
Sn-Ag	Sn-2Ag	221-226
Sn-Cu	Sn-0.7Cu	227
Sn-Ag-Bi	Sn-3.5Ag-3Bi	206-213
Sn-Ag-Bi	Sn-2Ag-7.5Bi	207-212
Sn-Ag-Cu	Sn-0.3Ag-0.7Cu	217
Sn-Ag-Cu-Sb	Sn-2Ag-0.8Cu-0.5Sb	216-222

ตารางที่ 2.5 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวสูงกว่า 230 °C

โลหะผสม	ส่วนประกอบ (wt.%)	ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว (°C)
Sn-Sb	Sn-5Sb	232-240
Sn-Au	Sn-80Au	280
Sn-Ag-Sb	Sn-25Ag-10Sb	233

ในปัจจุบันโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วได้มีการพัฒนาขึ้นเป็นจำนวนมาก บางชนิดถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ แล้วบางส่วนและมีอีกจำนวนมากที่อยู่ในระหว่างการวิจัย แต่ยังไม่มีการนำไปประยุกต์ใช้ ซึ่งตัวอย่างของโลหะบัดกรีเหล่านี้ ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบของโลหะบัดกรีชนิดต่างๆ ที่สามารถนำมาใช้ทดแทนตะกั่วบัดกรี

ชนิดโลหะผสม	จุดหลอมเหลว (°C)	ความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 25°C (ปอนด์ต่อลูกบาศก์นิ้ว)
42Sn-58Bi	138	0.316
77.2Sn-20In-2.8Ag	179-189	0.267
91Sn-9Zn	199	0.263
92.8Sn-3.4Ag-4.8Bi	208-215	0.272
90Sn-7.5Bi-0.5Cu	186-212	0.273
95.5Sn-4Ag-0.5Cu	217-218	0.269
95.5Sn-3.5Ag-1.5In	218	0.268
95.5Sn-3.5Ag-1.5Bi	216-220	0.269
96.5Sn-3.5Ag	221	0.368
99.3Sn-0.7Cu	227	0.264
95Sn-5Sb	232-240	0.263
96.2Sn-2.5Ag-0.8Cu-0.5Sb	213-219	0.267

2.3.1 คุณสมบัติเบื้องต้นที่นำมาพิจารณาในการเลือกใช้โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

ในการป้องกันอันตรายจากสารตะกั่วจึงมีการนำโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-Free Solder) มาใช้แทนโลหะบัดกรีชนิดดีบุก-ตะกั่ว ซึ่งคุณสมบัติที่นำมาพิจารณาในการเลือกใช้โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว มีดังต่อไปนี้ [16]

1. ราคาถูกและหาได้ง่าย
2. อุณหภูมิหลอมเหลวใกล้เคียงโลหะบัดกรีชนิดดีบุก-ตะกั่ว
3. มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าที่ดี
4. ไม่เป็นพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมตามข้อกำหนด RoHS มาตรฐานเพื่อสิ่งแวดล้อม
5. มีคุณสมบัติด้านกายภาพที่ดี
6. มีคุณสมบัติด้านทานการล้าที่ดี
7. มีคุณสมบัติด้านทานการกัดกร่อนที่ดีและอัตราการเกิดออกซิเดชันต่ำ
8. มีคุณสมบัติด้านการเปียกที่ดี

2.3.2 ธาตุที่สามารถนำมาทดแทนสารตะกั่ว

ธาตุที่สามารถนำมาทดแทนสารตะกั่วจะถูกพิจารณาจากคุณสมบัติเบื้องต้นที่นำมาพิจารณาในการเลือกใช้โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว ซึ่งตัวอย่างธาตุที่สามารถนำมาใช้ทดแทนสารตะกั่วได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.7 [16]

ตารางที่ 2.7 ธาตุที่สามารถนำมาทดแทนสารตะกั่ว

ชนิดโลหะ	ราคาโดยประมาณ (US) ต่อ น้ำหนักหนึ่ง ปอนด์	ความหนาแน่น ที่อุณหภูมิ 25°C ปอนด์ต่อ ลูกบาศก์นิ้ว	จำนวนที่สามารถผลิตได้ ต่อปี (ล้าน ปอนด์)	ความยากง่ายในการนำมาใช้งาน	ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน (V)
สังกะสี (Zn)	0.5	0.258	1560	หาง่าย	-0.14
ทองแดง (Cu)	0.65	0.324	4900	หาง่าย	+0.34
พลวง (Sb)	0.80	0.239	100	หาง่าย	-0.1
ดีบุก (Sn)	3.5	0.264	180	หาง่าย	-0.76
เงิน (Ag)	84.20	0.379	3.5	มีจำกัด	+0.8
บิสมัท (Bi)	3.40	0.354	9	มีจำกัด	+0.2
อินเดียม (In)	125.00	0.264	0.2	ขาดแคลน	-0.34

จากตารางที่ 2.7 จะพบว่าธาตุแต่ละตัวมีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไป โดยที่ธาตุที่หาได้ยาก ขาดแคลน และมีอยู่อย่างจำกัด เช่น อินเดียม บิสมัท และเงิน จะมีราคาที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับธาตุชนิดอื่น และเงินจะมีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานมากที่สุด และอินเดียมจะมีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานน้อยที่สุด แต่คุณสมบัติที่พิจารณาในข้างต้นยังไม่สามารถบอกได้ว่าธาตุชนิดไหนเหมาะสมในการนำมาใช้ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติหลายๆ ประการร่วมด้วยและความเหมาะสมในการเลือกนำมาใช้เป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

2.3.3 แนวทางการเลือกธาตุที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน

โดยทั่วไปโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วจะมีส่วนประกอบคือ ดีบุก (Sn) เป็นหลัก เนื่องจากดีบุกมีคุณสมบัติการเปียกและการแพร่กระจายตัวที่ดี ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของโลหะบัดกรี และธาตุที่สามารถนำมาทดแทนสารตะกั่วได้มีหลายชนิด ได้แก่ บิสมัท (Bi), แคดเมียม (Cd), อินเดียม (In), สังกะสี (Zn), ทองคำ (Au), ทองแดง (Cu), พลวง (Sb) และเงิน (Ag) เป็นต้น โดยคุณสมบัติของธาตุที่นำมาทดแทนสารตะกั่วได้ มีดังต่อไปนี้

1. สังกะสี (Zn) เป็นโลหะที่มีจุดเด่นด้านอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำและราคาถูก โดยโลหะบัดกรีชนิดดีบุก-สังกะสี มีจุดยูเทคติกอุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ที่ $199\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งใกล้เคียงกับโลหะบัดกรีชนิดดีบุก-ตะกั่ว จุดยูเทคติกอุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ที่ $183\text{ }^{\circ}\text{C}$ แต่โลหะบัดกรีกุ่มนี้มีข้อเสีย เช่น Zn สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ง่ายและเกิดเป็นสังกะสีออกไซด์มากเมื่อใช้งาน นอกจากนี้ Zn ยังไวต่อปฏิกิริยากับสารเคมีที่ผสมอยู่ในฟลักซ์ทำให้เกิดการกัดกร่อน

2. ทองแดง (Cu) เมื่อผสมดีบุกกับทองแดงที่อัตราส่วน $99.3\text{Sn}-0.7\text{Cu}$ จะทำให้โลหะบัดกรีมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดโครงสร้างยูเทคติกที่จุดหลอมเหลว $227\text{ }^{\circ}\text{C}$ และมีโครงสร้างจุลภาคที่ประกอบไปด้วยเฟสของ Cu_6Sn_5 ซึ่งมีลักษณะเป็นแท่งฝังอยู่ในเนื้อดีบุก แต่โลหะบัดกรีกุ่มนี้มีข้อเสีย คือ การมีธาตุเจือผสมอยู่ในปริมาณน้อยจึงอาจเกิดเส้นใยดีบุกขึ้นได้ จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรได้

3. พลวง (Sb) การเติมพลวงในปริมาณที่พอเหมาะจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติการต้านทานการคืบและการต้านทานความล้าของโลหะบัดกรีให้ดีขึ้น แต่พลวงจะทำให้คุณสมบัติการเปียกและการแพร่กระจายของโลหะบัดกรีลดลง

4. เงิน (Ag) เป็นโลหะที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะบัดกรี ทำให้สมบัติการแพร่ดีขึ้น มีจุดหลอมเหลวต่ำ แต่มีราคาสูง

5. บิสมัท (Bi) ที่อัตราส่วน $45\text{Sn}-58\text{Bi}$ เป็นโลหะบัดกรีที่มีจุดเด่นคือ มีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ต่ำมาก คือ $139\text{ }^{\circ}\text{C}$ แต่บิสมัทมีคุณสมบัติเปราะ และราคาสูง

6. อินเดียม (In) เป็นโลหะที่อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ ลดการเกิดออกซิเดชัน เพิ่มคุณสมบัติความเหนียว แต่มีราคาที่สูงมาก

7. แคดเมียม (Cd) เป็นโลหะที่มีคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนที่ดี แต่เป็นพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม

8. ทองคำ (Au) เป็นโลหะที่มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าสูง ต้านทานการกัดกร่อน แต่มีราคาสูงมาก

2.4 คุณสมบัติของส่วนผสมโลหะบัดกรี

โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-Cu-Sb จะมีส่วนประกอบพื้นฐาน คือ ดีบุก (Sn) และมีการเติมธาตุอื่นๆ คือ ทองแดง (Cu) และพลวง (Sb) เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการใช้งาน โดยคุณสมบัติของธาตุแต่ละตัวข้างต้น มีดังต่อไปนี้ [17-28]

2.4.1 ดีบุก

2.4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และฟิสิกส์ของดีบุก

ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และฟิสิกส์ของดีบุก

สัญลักษณ์ทางเคมี	Sn
สถานะ	ของแข็ง
โครงสร้างผลึก	สีเทา แบบ Tetragonal, สีเทา แบบ Cubic
เลขอะตอม	50
มวลอะตอม	118.69 g.mol ⁻¹
จุดเดือด	2,270 °C
จุดหลอมเหลว	231.9 °C
Vanderwaals radius	0.162 nm
Ionic radius	0.112 nm (+2) ; 0.070 nm (+4)
Electronegativity	1.8
ความหนาแน่น	5.77 g/cm ³ (α : 13 °C), 7.29 g/cm ³ (β : 18 °C)

2.4.1.2 คุณสมบัติทั่วไปของดีบุก

1. มีความต้านทานการกัดกร่อน และไม่เป็นสนิม
2. มีจุดหลอมเหลวต่ำ
3. ต้านทานการเสียดสี (Friction)
4. มีความอ่อนตัวสูง สามารถขึ้นรูปหรือตัดให้โค้งงอได้ง่าย
5. ไม่เป็นพิษต่อร่างกาย
6. เพิ่มความแข็งแรงเมื่อผสมกับโลหะอื่น
7. มีสีเทาเป็นเงามัน
8. มีค่าดัชนีความหักเหแสงสูง ทำให้แลดูแวววาว (Luster)
9. จับผิวโลหะต่างๆ ได้ดี จึงนิยมใช้เคลือบโลหะ
10. มีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อ และต้านจุลชีพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1.3 ความเป็นพิษของดีบุก

ดีบุกเป็นธาตุที่พบได้ตามธรรมชาติ แต่จะพบอยู่ในดินและอาหารต่างๆ ในปริมาณน้อย ดีบุกจะใช้ในการผลิตกระป๋อง ตะกั่วขัดสี เหล็ก ท่อทองแดง และไม่มีโทษร้ายแรงต่อร่างกายมนุษย์แต่สารอินทรีย์ของดีบุกจะมีโทษร้ายแรง เช่น Dimethyl Tin, Dialkyl Tin และ Triphenyl Tin เป็นต้น

2.4.2 ทองแดง

2.4.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และฟิสิกส์ของทองแดง

ตารางที่ 2.9 คุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และฟิสิกส์ของทองแดง

สัญลักษณ์ทางเคมี	Cu
สถานะ	ของแข็ง
โครงสร้างผลึก	Face-Centered Cubic
เลขอะตอม	29
มวลอะตอม	63.546 g.mol ⁻¹
จุดเดือด	2595 °C
จุดหลอมเหลว	1083 °C
Vanderwaals radius	0.128 nm
Ionic radius	0.096 nm (+1) ; 0.069 nm (+3)
Electronegativity	1.9
ความหนาแน่น	8.92 g/cm ³ (20 °C)

2.4.2.2 คุณสมบัติทั่วไปของทองแดง

1. มีการนำไฟฟ้าและการนำความร้อนสูง
2. มีความต้านทานการกัดกร่อนและการสึกกร่อน
3. มีความสามารถในการขึ้นรูปและความเหนียวสูง สามารถแปรรูปด้วยวิธีต่างๆ ได้ง่าย
4. ไม่เสี่ยงต่อการแตกหักเสียหาย
5. ความอ่อนสามารถปรับปรุงได้โดยทำการอบอ่อน
6. มีสีเฉพาะ และอาจเปลี่ยนสีได้โดยขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ
7. สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของทองแดงได้ โดยการเติมธาตุผสมต่างๆ เช่น สังกะสี นิกเกิล เบอริลเลียม ก็จะทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และมีความต้านทานความล้าสูง สามารถนำไปใช้งานได้กว้างขวางมากขึ้น

2.4.2.3 ความเป็นพิษของทองแดง

ปัจจุบันทองแดงมีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมหลายชนิดเช่น ใช้ผลิตลวด สายไฟ ท่อน้ำ นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารเคมีทางการเกษตร เป็นสารกำจัดศัตรูพืชและสัตว์รบกวนต่างๆ การทำสีย้อม เป็นต้น ส่งผลให้มีการแพร่กระจายของทองแดงสู่สิ่งแวดล้อมมากขึ้น ซึ่งอาจได้รับทองแดงจากการหายใจ การดื่มน้ำ การบริโภคอาหารในชีวิตประจำวัน โดยส่วนมากจะพบทั้งในรูปแบบของไอและเกลือของทองแดง เนื่องจากการหลอมโลหะทองแดง ทองเหลือง การเชื่อมและบัดกรีโลหะโดยใช้โลหะผสมของทองแดง

การเกิดพิษขึ้นอยู่กับปริมาณที่ได้รับเข้าไป ช่องทางที่ได้รับและสภาพร่างกายของแต่ละบุคคล ทองแดงถูกดูดซึมได้ดีในกระเพาะอาหารและลำไส้ส่วนบน โดยซึมผ่านเข้าผนังลำไส้ไปที่ตับ จากนั้นจะรวมตัวกับน้ำดี แล้วถูกหลั่งออกมาบริเวณลำไส้ ขับออกไปกับอุจจาระ หรืออาจถูกดูดกลับเข้าสู่ร่างกายได้ 30% โดยไปสะสมที่กระดูก กล้ามเนื้อ ตับ สมอง การสะสมจะมากที่สุดที่ตับและสมอง เมื่อได้รับทองแดงในปริมาณมากจะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อร่างกาย คือ เกิดการระคายเคืองและอักเสบที่ตา คลื่นไส้ อาเจียน เป็นไข้ (Metal Fume Fever) อาจทำให้ผิวหนังและผมเปลี่ยนสีได้ เกิดการอักเสบในช่องท้องและกล้ามเนื้อ ท้องเสีย การทำงานของหัวใจผิดปกติ ระบบหายใจ ระบบทางเดินอาหารและประสาทสัมผัสเสีย กดรระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายและอาจส่งผลให้เกิดความผิดปกติทางจิต ส่วนอาการเรื้อรังจากการได้รับติดต่อกันเป็นเวลานาน และตับทำหน้าที่บกพร่อง ไม่สามารถขับทองแดงออกจากร่างกายได้ตามปกติ จึงทำให้มีการสะสมอยู่ในร่างกายเป็นปริมาณมาก ส่งผลให้เกิดความผิดปกติของร่างกาย หรือกลุ่มอาการ Wilson Diseases คือ ร่างกายสั่นเทาอยู่ตลอดเวลา กล้ามเนื้อแข็งเกร็ง มีน้ำมูก น้ำลายไหล ควบคุมการพูดลำบาก อีกทั้งยังทำให้เนื้อเยื่อจมูกอักเสบและเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดโรคโลหิตจาง

2.4.3 พอลวง

2.4.3.1 คุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และฟิสิกส์ของพอลวง

ตารางที่ 2.10 คุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และฟิสิกส์ของพอลวง

สัญลักษณ์ทางเคมี	Sb
สถานะ	ของแข็ง
โครงสร้างผลึก	Rhombohedral
เลขอะตอม	51
มวลอะตอม	121.75 g.mol ⁻¹
จุดเดือด	1587 °C
จุดหลอมเหลว	631 °C
Vanderwaals radius	0.159 nm
Ionic radius	0.245 nm (-3); 0.062 nm (+5); 0.076 nm (+3)
Electronegativity	1.9
ความหนาแน่น	6.684 g/cm ³

2.4.3.2 คุณสมบัติทั่วไปของพอลวง

1. เมื่อผสมกับโลหะชนิดอื่น จะเพิ่มคุณสมบัติการต้านทานความคืบ (Creep) และการต้านทานความล้า (Fatigue)
2. ใช้เป็นกึ่งตัวนำ (Semiconductor) และอื่นๆ
3. ไม่เป็นพิษ ตามข้อกำหนด RoHS

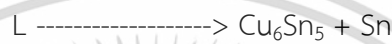
2.4.3.3 ความเป็นพิษของพอลวง

แร่พอลวงและโลหะพอลวงทุกชนิดเป็นพิษ ซึ่งมีผลกระทบต่อร่างกายมนุษย์เช่นเดียวกับสารหนู โดยจะกระตุ้นประสาททั้งภายในและภายนอกของร่างกาย ถ้าเข้าสู่ร่างกายเกินกว่า 0.5 มิลลิกรัม ต่อลูกบาศก์เมตร จะทำให้ปวดท้อง ท้องเดินและอาเจียน ตับจะถูกรบกวนการทำงาน ปวดกล้ามเนื้อ ปวดศีรษะ ระบบการหายใจล้มเหลว ระบบการไหลเวียนของโลหิตล้มเหลว ระบบประสาทผิดปกติ ถ้าสัมผัสผิวหนังอาจเป็นผื่นแพ้ ถ้าเข้าตาอาจอักเสบเป็นแผล เมื่อสูดดมไอระเหยจะเกิดอาการคลื่นไส้ อ่อนเพลีย เกิดอาการทำลายเม็ดเลือดแดง ตาและตัวเหลือง อีกทั้งอาจทำให้อันตรายถึงชีวิต

2.5 แผนภูมิเฟสของโลหะบัดกรี

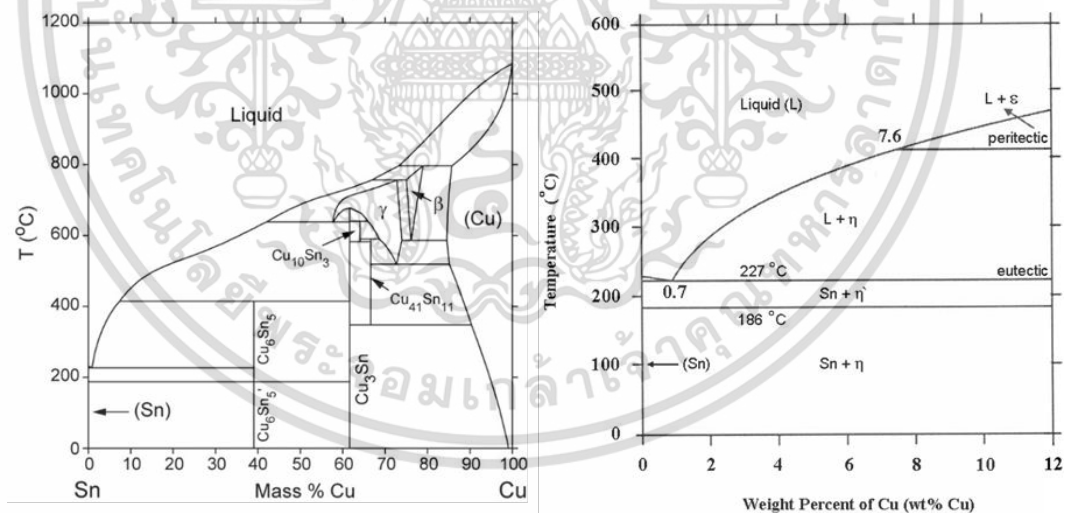
2.5.1 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุก-ทองแดง

ปฏิกิริยาที่สำคัญประการหนึ่งของโลหะผสมดีบุก-ทองแดง (Sn-Cu) คือ ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 226.8 °C ซึ่งเป็นปฏิกิริยายูเทคติก ดังแสดงในรูปที่ 2.5 [30-31] ปฏิกิริยายูเทคติก (Eutectic Reaction) คือปฏิกิริยาที่สารผสมละลายกันอย่างสมบูรณ์ในสภาพของเหลว เมื่อเย็นตัวลงแล้วสารผสมทั้งสองจะแยกออกจากกัน เนื่องจากไม่สามารถละลายเข้ากันในสภาพของแข็ง เกิดเป็นสารสองชนิดที่แตกต่างกัน โดยที่จุดยูเทคติกนี้ของเหลวจะเปลี่ยนไปเป็นเฟสของแข็ง 2 เฟส ได้แก่ สารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 กับเฟสของ Sn ซึ่งปฏิกิริยายูเทคติก เป็นไปตามสมการดังนี้ [29]



โดยปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะผสมดีบุก-ทองแดง แต่ละเฟสมีส่วนผสมดังนี้ คือ

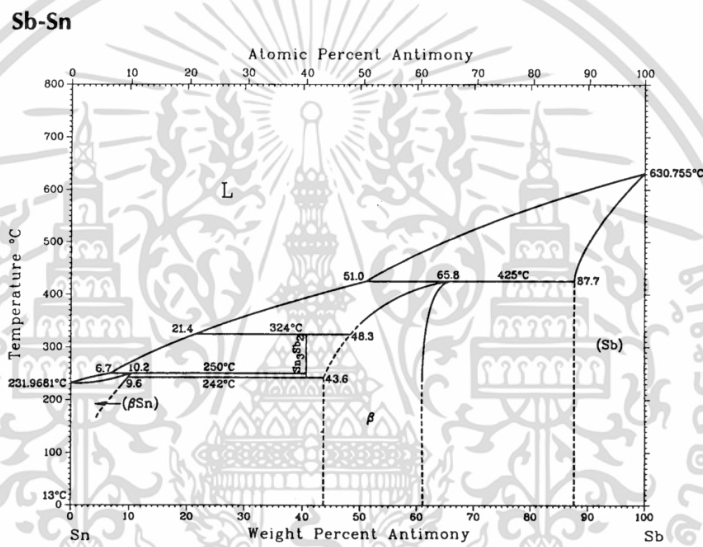
เฟส	Mass%Cu	Mass%Sn
Liquid	0.89	99.11
Cu_6Sn_5	39.07	60.93
Sn	0.11	99.89



รูปที่ 2.5 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุก-ทองแดง (Sn-Cu)

2.5.2 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมตีบุก-พลวง

จากแผนภูมิเฟสของโลหะผสมตีบุก-พลวง (Sn-Sb) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 [32] ในระบบนี้จะเกิดเฟสของสารประกอบเชิงโลหะ 4 เฟส ได้แก่ βSn , Sn_3Sb_2 , SnSb และ Sb ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 231.96°C เป็นปฏิกิริยาเพอริเทคติก (Peritectic Reaction) คือ การที่สารละลายที่มีสภาพของเหลวกับสารของแข็งเกิดปฏิกิริยารวมตัว เป็นสารของแข็งชนิดใหม่เพียงชนิดเดียวเมื่ออุณหภูมิลดลง โดยที่จุดเพอริเทคติกนี้ของเหลว (L) และสารประกอบเชิงโลหะ Cn_3Sb_2 จะเปลี่ยนไปเป็นเฟสของแข็ง ได้แก่ เฟสของ βSn ซึ่งปฏิกิริยาเพอริเทคติก เป็นไปตามสมการดังนี้ [29]

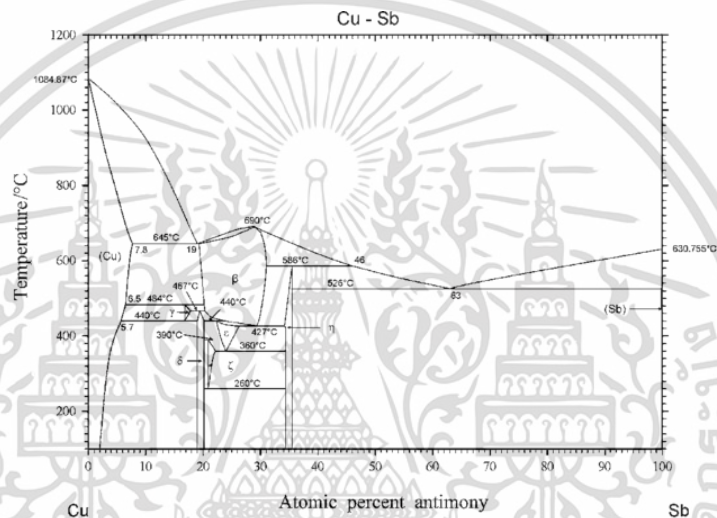


รูปที่ 2.6 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมตีบุก-พลวง (Sn-Sb)

2.5.3 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมทองแดง-พลวง

จากแผนภูมิเฟสของโลหะผสมทองแดง-พลวง (Cu-Sb) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 [33] ในระบบนี้จะเกิดเฟสของสารประกอบเชิงโลหะ 8 เฟส ได้แก่ Cu , Sb , Cu_2Sb , Cu_3Sb , Cu_4Sb , $\text{Cu}_8\text{Sb}_{15}$, $\text{Cu}_{75}\text{Sb}_{25}$ และ $\text{Cu}_{77}\text{Sb}_{23}$ และปฏิกิริยาที่เกิด ณ อุณหภูมิต่างๆ แสดงในตารางที่ 2.11 [34] ซึ่งแต่ละเฟสจะเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังต่อไปนี้ [29]

1. Cu -
2. Sb -
3. Cu₂Sb η
4. Cu₃Sb β
5. Cu₄Sb δ
6. Cu₈Sb₁₅ γ
7. Cu₇₅Sb₂₅ ε
8. Cu₇₇Sb₂₃ ζ



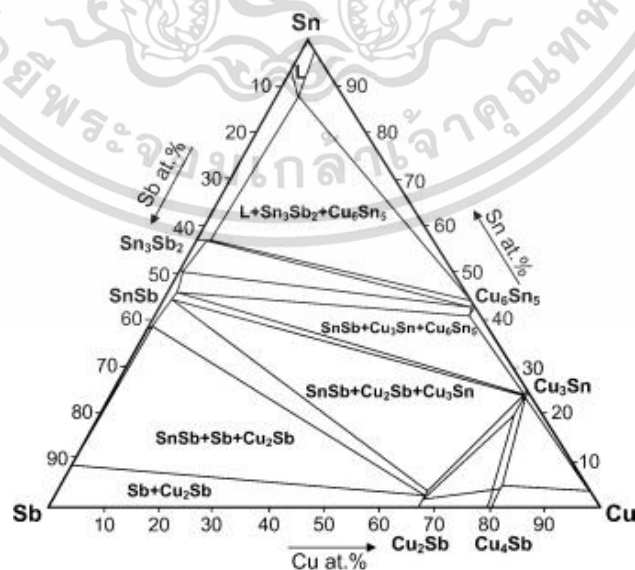
รูปที่ 2.7 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมทองแดง-พลวง (Cu-Sb)

ตารางที่ 2.11 Temperature-Invariant Reactions in the Cu-Sb System

ปฏิกิริยา	อุณหภูมิ (°C)	ชนิดของปฏิกิริยา
$L \rightarrow \beta$	683	Congruent melt
$L \rightarrow Cu+\beta$	645	Eutectic
$L+\beta \rightarrow \eta$	586	Peritectic
$L \rightarrow \eta+Sb$	526	Eutectic
$Cu+\beta \rightarrow \gamma$	488	Peritectoid
$\beta+\gamma \rightarrow \delta$	462	Peritectoid
$\beta+\delta \rightarrow \varepsilon$	445	Peritectoid
$\beta \rightarrow \varepsilon+\eta$	440	Eutectoid
$\gamma \rightarrow Cu+\delta$	400	Eutectoid
$\gamma+\varepsilon \rightarrow \zeta$	390	Peritectoid
$\varepsilon \rightarrow \zeta+\eta$	360	Eutectoid
$\zeta \rightarrow \delta+\eta$	260	Eutectoid

2.5.4 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมตีบุก-ทองแดง-พลวง

แผนภูมิเฟส 3 ธาตุ (Ternary Equilibrium Diagram) ของโลหะผสมตีบุก-ทองแดง-พลวง (Sn-Cu-Sb) จะเกิดเฟสและสารประกอบเชิงโลหะ ที่อุณหภูมิ 250 °C ดังแสดงในรูปที่ 2.8 [35] ใน การศึกษานี้ส่วนผสมทั้ง 3 เมื่อเกิดปฏิกิริยาจะมีโอกาสเกิดตามแผนภูมิเฟส ดังต่อไปนี้ [29]



รูปที่ 2.8 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมตีบุก-ทองแดง-พลวง (Sn-Cu-Sb)

2.6 การกัดกร่อน

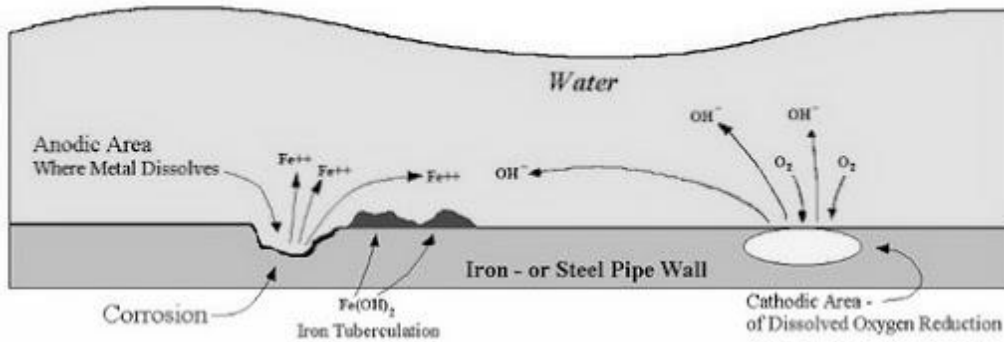
การกัดกร่อน (Corrosion) เป็นปฏิกิริยาระหว่างวัสดุโลหะกับสิ่งแวดล้อม [36] นำไปสู่การเสื่อมสภาพของวัสดุนั้นและยังส่งผลให้ความสามารถในการทำหน้าที่ของวัสดุดังกล่าวเสียไปด้วย [37] ซึ่งการกัดกร่อนเกิดขึ้นโดยปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี ดังนั้นอัตราเร็วในการกัดกร่อนของวัสดุจึงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์และปัจจัยอื่นๆ เช่น ความเค้นทางกลศาสตร์ (Mechanical Stress) แรงกดและการกัดเซาะ (Erosion) ซึ่งจะเป็นส่วนสนับสนุนต่อการเกิดการกัดกร่อนได้

การกัดกร่อนของวัสดุส่วนใหญ่มักจะเกิดขึ้นกับโลหะ [36] ที่มีการสัมผัสกับสารเคมีซึ่งโดยทั่วไปกลไกที่เกิดขึ้นจะเป็นกลไกทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Mechanism) เนื่องจากโลหะมีอิเล็กตรอนอิสระอยู่จึงสามารถทำให้โลหะเกิดเป็นขั้วไฟฟ้าทางเคมีขึ้นได้ โลหะส่วนใหญ่จะถูกกัดกร่อนในระดับหนึ่งเนื่องจากน้ำและสถานะบรรยากาศที่อยู่รอบๆ นอกจากนี้โลหะยังสามารถเกิดการกัดกร่อนขึ้นได้โดยตรงจากการสัมผัสกับสารละลายเคมีหรือแม้แต่โลหะที่อยู่ในสภาพของเหลว ทั้งนี้สามารถเป็นปฏิกิริยาเคมีหรือปฏิกิริยาทางกายภาพของโลหะได้เช่นกัน

ในอีกนัยหนึ่งเราอาจกล่าวได้ในเชิงโลหะวิทยาว่า การกัดกร่อนของโลหะเป็นการย้อนกลับสู่สภาพธรรมชาติที่แท้จริงของโลหะ กล่าวคือ ในธรรมชาติโดยส่วนใหญ่โลหะจะอยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ ซัลไฟด์ คาร์บอเนต หรือซิลิเกต ในสถานะที่โลหะอยู่ในรูปของสารประกอบเหล่านี้ เพราะสารประกอบของโลหะนี้จะมีพลังงานที่ต่ำกว่า (เสถียรกว่า) ดังนั้นโลหะจึงมักจะทำปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อเปลี่ยนรูปกลับไปเป็นสารประกอบ ตัวอย่างเช่น เหล็กออกไซด์ที่มีอยู่โดยทั่วไปในธรรมชาติมักจะถูกนำมาทำการรีดิวซ์ด้วยพลังงานความร้อนเพื่อเปลี่ยนรูปไปเป็นโลหะเหล็กซึ่งมีพลังงานที่สูงกว่า ดังนั้นโลหะเหล็กจึงมักไม่เสถียรและพยายามที่จะเปลี่ยนรูปกลับไปเป็นเหล็กออกไซด์โดยการกัดกร่อน (เกิดสนิม) เพื่อที่จะได้อยู่ในสถานะที่มีพลังงานที่ต่ำกว่า

วัสดุที่ไม่ใช่โลหะ (Nonmetallic Materials) เช่น เซรามิก และพอลิเมอร์ มักจะไม่ประสบปัญหาการกัดกร่อนเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีทางไฟฟ้า แต่มักจะเกิดความเสียหายโดยตรงเนื่องจากการสัมผัสกับสารเคมี ตัวอย่างเช่น วัสดุจำพวกเซรามิกทนไฟสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับเกลือที่หลอมละลาย (Molten Salts) ได้ที่อุณหภูมิสูงๆ ส่วนวัสดุจำพวกพอลิเมอร์บางประเภทสามารถดูดซึมน้ำได้ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้พอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงรูปร่างและสมบัติ หรืออาจจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ที่อุณหภูมิห้องเป็นสาเหตุทำให้พอลิเมอร์พวกนี้แข็งแรงแต่เปราะและไม่หลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อน [38]

The Corrosion Cell :



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างการกัดกร่อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของโลหะ

2.6.1 ประเภทของการกัดกร่อน

การกัดกร่อนสามารถแบ่งออกเป็นหลายประเภท โดยแบ่งตามกลไกของการกัดกร่อน ลักษณะทากายภาพ หรือตัวแปรที่ส่งผลต่อการกัดกร่อน โดยสามารถแบ่งออกเป็นได้ 8 ประเภท ดังนี้

2.6.1.1 การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ

การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform Corrosion) เกิดขึ้นเนื่องจากวัสดุสัมผัสกับสิ่งแวดล้อม โดยอัตราความสูญเสียพื้นผิวของวัสดุที่บริเวณที่สัมผัสปัจจัยให้เกิดการกัดกร่อนต่างๆ โดยเฉลี่ยจะใกล้เคียงกัน



รูปที่ 2.10 ลักษณะการเกิดของการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ

2.6.1.2 การกัดกร่อนเนื่องจากความต่างศักย์

การกัดกร่อนเนื่องจากความต่างศักย์ (Galvanic Corrosion) เกิดจากวัสดุโลหะที่เป็นตัวนำไฟฟ้าได้ 2 ชนิดที่ต่างกันหรือวัสดุชนิดเดียวกันแต่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างกันมาเชื่อมต่อกันจะเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นทำให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนระหว่างวัสดุทั้งสอง โดยโลหะที่ทำตัวเป็นขั้ว Anode จะเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนของวัสดุที่มีค่าความต่างศักย์ต่ำกว่าและจะถูกกัดกร่อนในที่สุด

ซึ่งการกัดกร่อนประเภทนี้อาจจะเกิดเฉพาะจุดหรืออาจเกิดเป็นพื้นที่กว้างได้ ขึ้นอยู่กับรูปแบบของการประกบของโลหะทั้ง 2 ชั้น ซึ่งลักษณะการเกิดของการกัดกร่อนตามขอบเกรน ดังแสดงในรูปที่ 2.11 [39]



รูปที่ 2.11 ลักษณะการเกิดของการกัดกร่อนเนื่องจากความต่างศักย์

2.6.1.3 การกัดกร่อนแบบช่องแคบ

การกัดกร่อนแบบช่องแคบ (Crevice Corrosion) เกิดจากวัสดุสัมผัสสารละลายบางชนิดที่สามารถแตกตัวเป็นประจุไฟฟ้าหรือเกิดจากบริเวณพื้นผิวที่การถ่ายเทของเหลวไม่ดี ส่งผลต่อการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันแตกต่างกัน มักเกิดขึ้นได้ตามรอยแยก รอยร้าว ตามซอกต่างๆ ของวัสดุ และภายใต้เกราะป้องกันผิวที่อยู่ในสารละลายหนึ่ง ซึ่งการกัดกร่อนประเภทนี้ส่วนใหญ่มักเกิดขึ้นกับโลหะผสม เช่น Stainless Steel, Titanium, Aluminum และ Copper Alloy



รูปที่ 2.12 ลักษณะการเกิดของการกัดกร่อนแบบช่องแคบ

2.6.1.4 การกัดกร่อนแบบเป็นหลุม

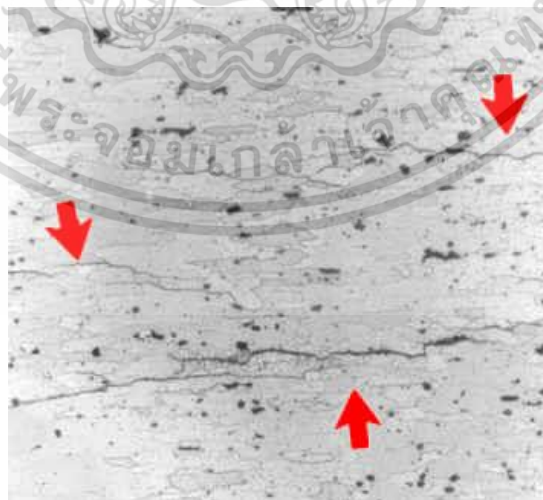
การกัดกร่อนแบบเป็นหลุม (Pitting Corrosion) ส่วนมากเกิดจากวัสดุอยู่สัมผัสสารละลายพวกคลอไรด์ เช่น น้ำทะเล เมื่อวัสดุถูกกัดกร่อน บริเวณกัดกร่อนจะเป็นรูหรือหลุม อาจถูกบดบังด้วยตัวกัดกร่อนเอง มักเกิดแบบเฉียบพลันตรวจพบได้ยาก มีขนาดเล็ก ส่วนใหญ่พบในวัสดุโลหะที่สามารถสร้างชั้นป้องกันได้ ซึ่งลักษณะการเกิดของการกัดกร่อนตามขอบเกรน ดังแสดงในรูปที่ 2.13 [40]



รูปที่ 2.13 ลักษณะการเกิดของการกัดกร่อนแบบเป็นหลุม

2.6.1.5 การกัดกร่อนตามขอบเกรน

การกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular Corrosion) มักเกิดกับเหล็กกล้าไร้สนิมในบริเวณที่มีการเชื่อมต่อ โดยเหล็กจะสูญเสียโครเมียมในรูปคาร์ไบด์เมื่อเกิดการสูญเสียจะขาดโครเมียมในการสร้างการป้องกันเนื้อเหล็ก ซึ่งลักษณะการเกิดของการกัดกร่อนตามขอบเกรน ดังแสดงในรูปที่ 2.14 [41]



รูปที่ 2.14 ลักษณะการเกิดของการกัดกร่อนตามขอบเกรน

2.6.1.6 การผุกร่อนแบบเลือก

การผุกร่อนแบบเลือก (Selective Leaching or Dealloying) เกิดวัตถุที่เป็นโลหะผสมที่ธาตุโลหะหนึ่งเสถียรกว่าธาตุหนึ่งเมื่อสัมผัสสภาพแวดล้อม เช่น การกัดกร่อนของทองเหลือง (Dezincification) โดยทองเหลืองจะสูญเสียสังกะสี เหลือแต่ทองแดงทำให้เป็นรูพรุน รูปทรงของวัตถุจะไม่เปลี่ยนแปลง แต่ความแข็งแรงจะลดลงสามารถลดการกัดกร่อนได้โดยเติมดีบุกลงไปประมาณร้อยละ 1 ในทองเหลือง

2.6.1.7 การกัดกร่อนแบบกัดเซาะ

การกัดกร่อนแบบกัดเซาะ (Erosion Corrosion) พบได้มากในเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ที่ต้องสัมผัสกับน้ำหรือของเหลวใดๆ ที่มีความเร็วในการไหลสูงๆ เช่น ใบพัดเรือ, ใบพัดของเครื่องสูบน้ำ, ข้อเสี้ยวของท่อ ฯลฯ การกัดกร่อนประเภทนี้เกิดจากสาเหตุ 2 ประการ ดังนี้

1. Electrochemical Corrosion

2. แรงกระแทกของของไหลหรือจากเศษผงอื่นๆ ในของไหล ซึ่งโลหะบางชนิดอาจจะสามารถสร้าง Oxide Film เพื่อปกป้องได้ดีแต่เมื่ออยู่ในสภาพน้ำไหลแรงหรือมีแรงกระแทกต่างๆ ก็จะทำให้ Oxide Film นั้น ถูกทำลายไปโลหะก็จะกัดกร่อนเร็วขึ้น



รูปที่ 2.15 ลักษณะการเกิดของการกัดกร่อนแบบกัดเซาะ

2.6.1.8 การกัดกร่อนโดยความเค้น

การกัดกร่อนโดยความเค้น (Stress Corrosion) เกิดจากความเค้นหรือแรงเค้นของสภาพแวดล้อม เช่น การตัด การดัด ความร้อนภายนอก การสั่นสะเทือน หรือความเค้นจากภายในของวัตถุที่อาจหลงเหลือจากการขึ้นรูป การเย็นตัวที่ไม่สม่ำเสมอ

2.7 ศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐาน

ค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐาน (Standard Reduction Potential) เขียนแทนด้วย E^0_{red} หรือ E^0 เป็นค่าที่แสดงความสามารถในการรับอิเล็กตรอนของครึ่งเซลล์ โดยเทียบกับขั้วไฮโดรเจนมาตรฐาน (SHE) การวัดค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของเซลล์ไฟฟ้า (E^0_{cell}) ใดๆ ทำได้โดยการนำ SHE ต่อกับครึ่งเซลล์ที่สนใจ

การเขียนทิศทางของปฏิกิริยาขั้วไฟฟ้าและเครื่องหมายของศักย์ไฟฟ้าในปัจจุบันนี้อาศัยหลักตามข้อเสนอแนะโดยสหพันธ์เคมีบริสุทธิ์และเคมีประยุกต์นานาชาติ (IUPAC) ดังนี้

1. เขียนครึ่งปฏิกิริยารีดอกซ์ให้อยู่ในรูปของปฏิกิริยารีดักชัน เช่น



2. เขียนเครื่องหมายของศักย์ไฟฟ้าเป็นบวก (+) เมื่อสารเป็นตัวออกซิไดซ์ที่ดีกว่า H^+ แต่ถ้า H^+ เป็นตัวออกซิไดซ์ที่ดีกว่าต้องเขียนเครื่องหมายของศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ (-)

3. ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน (E^0) เป็นศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อสารแต่ละตัวที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยามีค่า Activity เป็น 1 ถ้าสารที่เข้าทำปฏิกิริยาละลายอยู่ในตัวทำละลายใด ถือได้ว่า Activity มีค่าเท่ากับประมาณค่าความเข้มข้นของสารนั้นเป็น mol/L ถ้าสารตั้งต้นอยู่ในรูปของของแข็งหรือของเหลวบริสุทธิ์ ถือได้ว่าค่า Activity เป็น 1 เพราะความเข้มข้นของสารในภาวะที่บริสุทธิ์นั้นคงที่และไม่ขึ้นกับปริมาณ

ค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐาน (E^0) ดังแสดงในรูปที่ 2.16 [43] เป็นตัวเลขที่ได้จากปฏิกิริยาครึ่งเซลล์ ดังนั้นจึงเรียกศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานว่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐาน (Standard Half-Cell Potential) ซึ่งใช้สัญลักษณ์ E^0 เหมือนกัน

ในการพิจารณาดาราง E^0 นั้นจะเห็นได้ว่ายิ่ง E^0 มีค่าสูงขึ้น ความสามารถในการออกซิไดซ์ของระบบ (หมายถึงครึ่งปฏิกิริยารีดักชัน) มีมากขึ้น ดังนั้นตัวออกซิไดซ์ที่แรงที่สุดคือตัวที่อยู่ในรูปของตัวออกซิไดซ์ที่อยู่ส่วนบนสุดของตาราง (มีค่า E^0 สูงสุด) ในขณะที่ตัวรีดิวซ์ที่แรงที่สุดคือตัวที่อยู่ในรูปของตัวรีดิวซ์ที่อยู่ส่วนล่างสุดของตาราง (มีค่า E^0 ต่ำสุด) [42]

Half-Reaction	$E^\circ(\text{V})$
$\text{F}_2(\text{g}) + 2\text{e}^- \longrightarrow 2\text{F}^-(\text{aq})$	+2.87
$\text{O}_3(\text{g}) + 2\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{O}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}$	+2.07
$\text{Co}^{3+}(\text{aq}) + \text{e}^- \longrightarrow \text{Co}^{2+}(\text{aq})$	+1.82
$\text{H}_2\text{O}_2(\text{aq}) + 2\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	+1.77
$\text{PbO}_2(\text{s}) + 4\text{H}^+(\text{aq}) + \text{SO}_4^{2-}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{PbSO}_4(\text{s}) + 2\text{H}_2\text{O}$	+1.70
$\text{Ce}^{4+}(\text{aq}) + \text{e}^- \longrightarrow \text{Ce}^{3+}(\text{aq})$	+1.61
$\text{MnO}_4^-(\text{aq}) + 8\text{H}^+(\text{aq}) + 5\text{e}^- \longrightarrow \text{Mn}^{2+}(\text{aq}) + 4\text{H}_2\text{O}$	+1.51
$\text{Au}^{3+}(\text{aq}) + 3\text{e}^- \longrightarrow \text{Au}(\text{s})$	+1.50
$\text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{e}^- \longrightarrow 2\text{Cl}^-(\text{aq})$	+1.36
$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}(\text{aq}) + 14\text{H}^+(\text{aq}) + 6\text{e}^- \longrightarrow 2\text{Cr}^{3+}(\text{aq}) + 7\text{H}_2\text{O}$	+1.33
$\text{MnO}_2(\text{s}) + 4\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Mn}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{H}_2\text{O}$	+1.23
$\text{O}_2(\text{g}) + 4\text{H}^+(\text{aq}) + 4\text{e}^- \longrightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	+1.23
$\text{Br}_2(\text{l}) + 2\text{e}^- \longrightarrow 2\text{Br}^-(\text{aq})$	+1.07
$\text{NO}_3^-(\text{aq}) + 4\text{H}^+(\text{aq}) + 3\text{e}^- \longrightarrow \text{NO}(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}$	+0.96
$2\text{Hg}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Hg}_2^{2+}(\text{aq})$	+0.92
$\text{Hg}_2^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow 2\text{Hg}(\text{l})$	+0.85
$\text{Ag}^+(\text{aq}) + \text{e}^- \longrightarrow \text{Ag}(\text{s})$	+0.80
$\text{Fe}^{3+}(\text{aq}) + \text{e}^- \longrightarrow \text{Fe}^{2+}(\text{aq})$	+0.77
$\text{O}_2(\text{g}) + 2\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2\text{O}_2(\text{aq})$	+0.68
$\text{MnO}_4^-(\text{aq}) + 2\text{H}_2\text{O} + 3\text{e}^- \longrightarrow \text{MnO}_2(\text{s}) + 4\text{OH}^-(\text{aq})$	+0.59
$\text{I}_2(\text{s}) + 2\text{e}^- \longrightarrow 2\text{I}^-(\text{aq})$	+0.53
$\text{O}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \longrightarrow 4\text{OH}^-(\text{aq})$	+0.40
$\text{Cu}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Cu}(\text{s})$	+0.34
$\text{AgCl}(\text{s}) + \text{e}^- \longrightarrow \text{Ag}(\text{s}) + \text{Cl}^-(\text{aq})$	+0.22
$\text{SO}_4^{2-}(\text{aq}) + 4\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{SO}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}$	+0.20
$\text{Cu}^{2+}(\text{aq}) + \text{e}^- \longrightarrow \text{Cu}^+(\text{aq})$	+0.15
$\text{Sn}^{4+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Sn}^{2+}(\text{aq})$	+0.13
$2\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2(\text{g})$	0.00
$\text{Pb}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Pb}(\text{s})$	-0.13
$\text{Sn}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Sn}(\text{s})$	-0.14
$\text{Ni}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Ni}(\text{s})$	-0.25
$\text{Co}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Co}(\text{s})$	-0.28
$\text{PbSO}_4(\text{s}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Pb}(\text{s}) + \text{SO}_4^{2-}(\text{aq})$	-0.31
$\text{Cd}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Cd}(\text{s})$	-0.40
$\text{Fe}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Fe}(\text{s})$	-0.44
$\text{Cr}^{3+}(\text{aq}) + 3\text{e}^- \longrightarrow \text{Cr}(\text{s})$	-0.74
$\text{Zn}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Zn}(\text{s})$	-0.76
$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2(\text{g}) + 2\text{OH}^-(\text{aq})$	-0.83
$\text{Mn}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Mn}(\text{s})$	-1.18
$\text{Al}^{3+}(\text{aq}) + 3\text{e}^- \longrightarrow \text{Al}(\text{s})$	-1.66
$\text{Be}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Be}(\text{s})$	-1.85
$\text{Mg}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Mg}(\text{s})$	-2.37
$\text{Na}^+(\text{aq}) + \text{e}^- \longrightarrow \text{Na}(\text{s})$	-2.71
$\text{Ca}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Ca}(\text{s})$	-2.87
$\text{Sr}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Sr}(\text{s})$	-2.89
$\text{Ba}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Ba}(\text{s})$	-2.90
$\text{K}^+(\text{aq}) + \text{e}^- \longrightarrow \text{K}(\text{s})$	-2.93
$\text{Li}^+(\text{aq}) + \text{e}^- \longrightarrow \text{Li}(\text{s})$	-3.05

*For all half-reactions the concentration is 1 M for dissolved species and the pressure is 1 atm for gases. These are the standard-state values.

รูปที่ 2.16 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐานที่ 25°C ที่ 1 atm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.1 ประโยชน์ศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐาน

ศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานมีประโยชน์ในการใช้งานดังต่อไปนี้ [44]

1. ใช้เรียงลำดับการชิง e^- หรือตัวออกซิไดซ์
2. ใช้เรียงลำดับการให้ e^- หรือตัวรีดิวซ์
3. ใช้บอกให้ทราบถึงขั้วบวก ขั้วลบ แอโนด แคโทด ความต่างศักย์ แผนภาพ ปฏิกิริยาและอื่นๆ เมื่อนำครึ่งเซลล์มาต่อเข้าด้วยกัน
4. ใช้บอกให้ทราบว่าโลหะชนิดใดใช้ป้องกันการผุของ Fe ได้ (โดยเสีย e^- ง่ายกว่า Fe)
5. ใช้บอกให้ทราบว่าโลหะชนิดใดทำให้ Fe ผุเร็วขึ้น (โดยเสีย e^- ยากกว่า Fe)
6. ใช้ทำนายการเกิดปฏิกิริยาได้หรือไม่ได้ โดยการหาค่า E^0 ของเซลล์ ถ้า E^0 ของเซลล์เป็นบวกเกิดได้ ถ้า E^0 ของเซลล์เป็นลบเกิดไม่ได้ (หมายถึง เกิดตรงกันข้าม) แต่ไม่ได้บอกว่าเกิดขึ้นเร็วหรือช้า (อัตราเร็ว) หรือเกิดมากหรือน้อย

2.8 การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้า

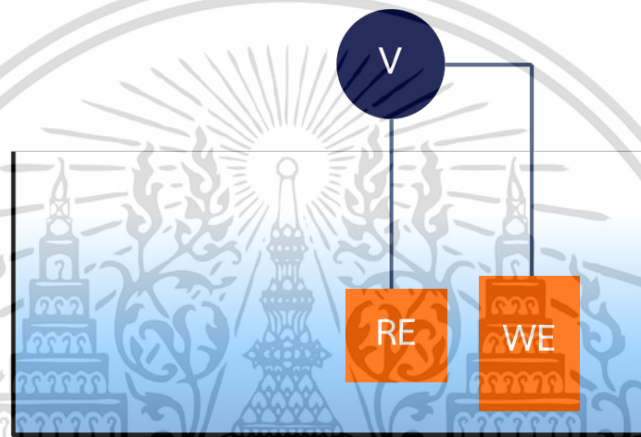
การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะโดยเทคนิคเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Technique) เป็นวิธีหนึ่งซึ่งช่วยประเมินอัตราการกัดกร่อนได้ดีและเร็ว และเป็นการจำลองการเกิดกระบวนการการกัดกร่อนของโลหะ โดยปกติแล้วการเกิดการกัดกร่อนเป็นปฏิกิริยาทางกายภาพของโลหะกับสภาพแวดล้อมรอบโลหะ ซึ่งเกิดจากการถ่ายเทประจุไฟฟ้าหรือแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนในสารละลายของน้ำ เรียกว่า ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Reaction) การเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของการกัดกร่อนเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันเมื่อน้ำหรือสารละลายที่สัมผัสกับโลหะหลักการของการทดสอบการกัดกร่อนโลหะโดยใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้าคือการป้อนศักย์ไฟฟ้าแรงการกัดกร่อนโดยใช้เครื่องมือและอยู่ในสถานะที่มีสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ทำหน้าที่เป็นทางเดินของไอออนและเป็นการเชื่อมต่อเซลล์เคมีไฟฟ้า (Electrochemical Cell) [45]

การประเมินอัตราการกัดกร่อนของโลหะ สามารถทำได้หลายวิธี เช่น

1. การทดสอบการกัดกร่อนโดยการฝังในบรรยากาศ
2. การทดสอบความทนของน้ำเกลือ
3. Open-circuit Potential Measurements (OCP)
4. Potentiodynamic Polarization Measurements
5. Electrochemical Impedance Spectroscopy Measurements (EIS)

2.8.1 การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด

การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (Open-circuit Potential Measurements, OCP) เป็นวิธีที่ช่วยให้สามารถกำหนดช่วงของค่าศักย์ไฟฟ้าในการทำการทดลองอื่นๆ ได้ และสามารถบอกจุดเปลี่ยนของปฏิกิริยาแคโทดิก (Cathodic) และปฏิกิริยาแอโนดิก (Anodic) โดยหลักการคือวัดค่าศักย์ไฟฟ้าจาก ขั้วทำงาน (Working Electrode หรือ Specimen Electrode) กับ ขั้วมาตรฐานอ้างอิง (Standard Reference Electrode) ในขณะที่ในระบบไม่มีการใส่ศักย์ไฟฟ้าหรือกระแสใดๆ จนกว่าจะเกิดการเสถียร [46] และแสดงเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าศักย์ไฟฟ้า (E) และเวลาดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 หลักการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าแบบเปิด (Open-circuit Potential Measurements, OCP)

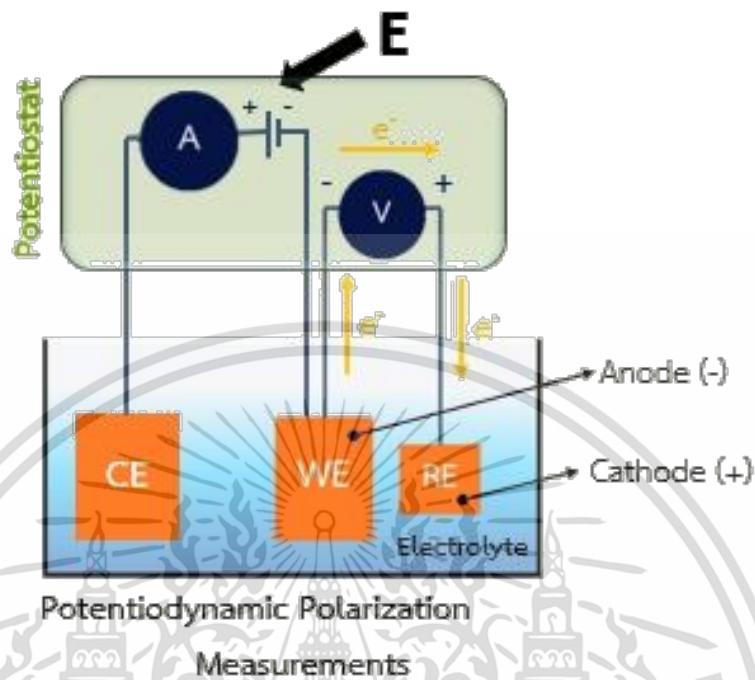
2.8.2 การวัดทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดนามิกโพลาริเซชัน

หลักการของวิธีการโพเทนชิโอดนามิกโพลาริเซชัน (Potentiodynamic Polarization Measurements) คือการใช้เครื่อง Potentiostat/Galvanostat ในการบ่อนศักย์ไฟฟ้าเพื่อเร่งปฏิกิริยาการกัดกร่อน ในสภาวะที่มีสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ทำหน้าที่เป็นทางเดินของไอออน โดยใช้ Three-Electrode Electrochemical Cell ทำให้เราสามารถคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนได้ โดยใช้เซลล์เคมีไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบการกัดกร่อนของโลหะประกอบไปด้วย

1. ขั้วทำงาน (Working Electrode หรือ Specimen Electrode) เป็นขั้วแอโนด ก็คือชิ้นตัวอย่างทดสอบ เป็นขั้วที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและให้อิเล็กตรอน
2. ขั้วมาตรฐานอ้างอิง (Standard Reference Electrode) เป็นขั้วแคโทด (Cathode) ที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันและรับอิเล็กตรอน เช่น SCE (Saturated Calomel Electrode) หรือ Ag/AgCl ที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่
3. ขั้วอิเล็กโทรดกระแส (Counter Electrode) มักจะใช้โลหะที่เสถียร เช่น แพลตินัม หรือ กราไฟต์ หรือ เหล็กกล้าไร้สนิม

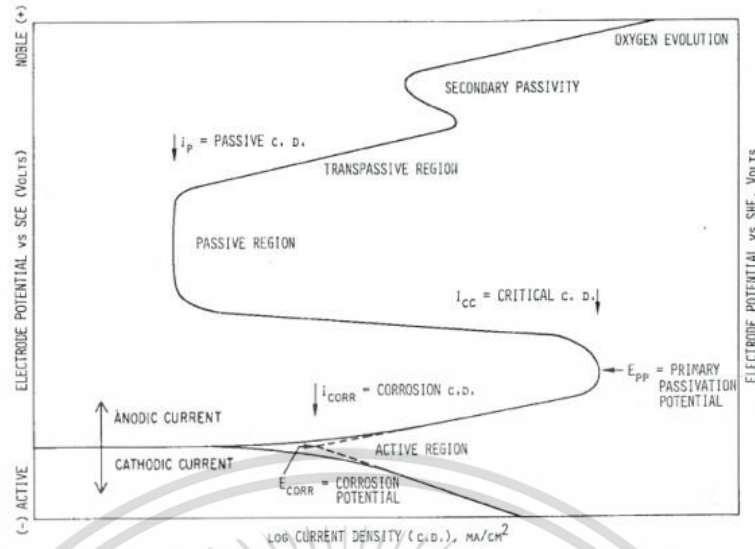
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ซึ่งเป็นทางเดินของไอออน



รูปที่ 2.18 เซลล์ไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบการกัดกร่อน

ค่าที่วัดได้จากการทดสอบ ได้เป็นเส้นโค้งโพลาริเซชัน (Polarization Curve) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้า เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าจนกระทั่งโลหะเริ่มเกิดการกัดกร่อนเรียกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion Potential, E_{corr}) ที่จุดนี้ก็จะได้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion Current Density, I_{corr}) ด้วย ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาอัตราการกัดกร่อน แสดงในสมการที่ (2.1) ในขณะเดียวกันถ้าโลหะที่มีฟิล์มพาสซีฟ (Passive Film) ที่ทนต่อการกัดกร่อน เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม ถ้าป้อนศักย์ไฟฟ้าต่อไปอีกโลหะนั้นสร้างฟิล์มพาสซีฟ (Passive Film) เพื่อป้องกันการกัดกร่อนทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่หรือลดลง ในขณะที่ป้อนศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจนถึงระดับหนึ่งที่ทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าเริ่มเพิ่มขึ้นอีกครั้ง แสดงว่าเกิดการแตกของฟิล์มพาสซีฟ (Passive Film) เป็นรูเข็ม (Pitting) นั่นคือค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting Potential, E_p) และค่ากระแสไฟฟ้าพาสซีฟ (Passive Current Density, I_p) ดังแสดงในรูปที่ 2.19 [47]



รูปที่ 2.19 เส้นโค้งโพลาริเซชันสำหรับการกัดกร่อน
ที่เกิดฟิล์มพาสซีฟ (Passive Film) กลุ่มตัวผิวหน้าโลหะ

2.8.2.1 อัตราการกัดกร่อน

$$\text{อัตราการกัดกร่อน (Corrosion Rate)} = (k \times I_{\text{corr}} \times EW) / (A \times D) \quad (2.1)$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่โดยจะมีค่า 0.13 เมื่ออัตราการกัดกร่อนมีหน่วยเป็นมิลต่อปี

(Mil per year, mpy)

I_{corr} คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)

EW คือ ค่ามวลสมมูลของชิ้นงาน ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)

A คือ พื้นที่ผิวของชิ้นงาน (cm^2)

D คือ ความหนาแน่นของชิ้นงาน (g/cm^3)

ผลการประเมินการกัดกร่อนของโลหะจากเส้นโค้งโพลาริเซชัน (Polarization Curve) ถ้าโลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) ต่ำ จะไวต่อการกัดกร่อนมากกว่าโลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) สูง และคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนของโลหะต่อปีได้จากค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) ดังนั้นการทดสอบการกัดกร่อนโลหะโดยเทคนิคเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Test) เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะได้ ใช้เวลาน้อย เพื่อช่วยให้การเลือกวัสดุให้เหมาะสมกับงานหรือสามารถหาวิธีป้องกันการกัดกร่อนได้ดี

2.8.3 อิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า

อิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้าหรือเรียกว่า อิเล็กโทรเคมีคอลอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปี (Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS) มีชื่อย่อเรียกว่าเทคนิค AC Impedance เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีประโยชน์อย่างมากในการวิเคราะห์ลักษณะของระบบเซลล์เคมีไฟฟ้า ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานด้านวัสดุศาสตร์ เช่น ในการศึกษาลักษณะการเคลือบแบบเตอรี หรือเซลล์เชื้อเพลิง รวมไปถึงการวิเคราะห์การแพร่ของไอออนผ่านเยื่อ และการศึกษารอยต่อของสารกึ่งตัวนำ

หลักการของ AC Impedance คือ การให้ทางกระแสไฟฟ้าสลับในรูปฟังก์ชันไซน์ (Sine Wave) โดยการควบคุมศักย์ไฟฟ้า ที่มีค่าแอมพลิจูดของศักย์ไฟฟ้า (Amplitude) ต่ำในระดับ 10 - 50 มิลลิโวลต์ และปรับเปลี่ยนความถี่ได้ในช่วงระหว่าง $10^{-3} - 10^5$ เฮิร์ต เมื่อกำหนดศักย์ไฟฟ้าคงที่ค่าหนึ่งแล้วเพิ่มศักย์ไฟฟ้าในรูปกระแสสลับป้อนให้แก่ระบบ แล้ววัดค่ากระแส จากค่ากระแสที่ได้สามารถนำไปวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบเซลล์เคมีไฟฟ้านั้นๆ ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์สามารถใช้บ่งบอกคุณลักษณะการตอบสนองของกระแสไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้า หรือสัญญาณอื่นๆ ทางไฟฟ้าของวัสดุที่สนใจได้ [48]

2.8.3.1 ส่วนประกอบของการทดลองอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า

โดยทั่วไปการทดลองอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้าจะประกอบด้วย

1. เครื่องวัดศักย์ไฟฟ้า (Potentiostat) หรือเครื่องวัดกระแส (Galvanostat)
2. เครื่องวิเคราะห์การตอบสนองค่าความถี่ (Frequency Response Analyzer, FRA)
3. เซลล์เคมีไฟฟ้า โดยเซลล์เคมีไฟฟ้า ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าพื้นฐานแบบ 3 ขั้ว คือ
 - 1) ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working Electrode, WE)
 - 2) ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode, RE)
 - 3) ขั้วไฟฟ้าช่วย หรือ ขั้วไฟฟ้าป้อนศักย์ไฟฟ้า (Counter Electrode, CE)

2.8.3.2 อิมพีแดนซ์

อิมพีแดนซ์ (Impedance) คือ ความต้านทานของไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating Current, AC) ซึ่งสามารถแสดงค่าอิมพีแดนซ์ได้โดยอาศัยกฎของโอห์ม (Ohm's Law) ตามสมการที่ (2.2)

$$E = IZ \quad (2.2)$$

เมื่อ E คือ ค่าศักย์ไฟฟ้า

I คือ กระแสไฟฟ้า

Z คือ อิมพีแดนซ์หรือความต้านทานในรูปของกระแสสลับ

ในรูปของกระแสลับขนาดอิมพีแดนซ์หาได้จากความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.3)

$$Z = \frac{E_0 \sin \omega t}{I_0 \sin (\omega t + \theta t)} \quad (2.3)$$

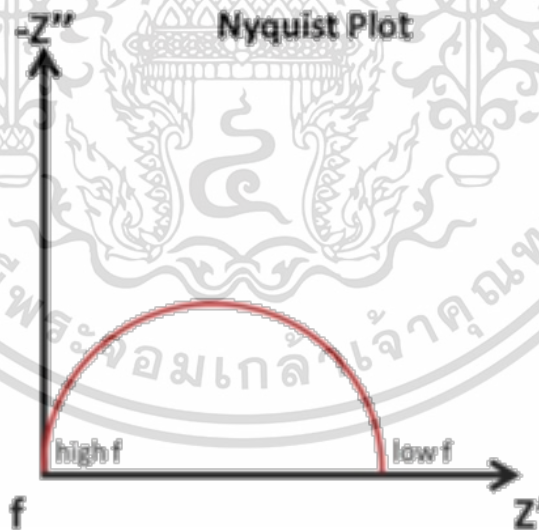
เมื่อ ω คือ ความถี่เชิงมุมต่อวินาที มีค่าเท่ากับ $2\pi f$ เมื่อ f คือ ความถี่ที่หน่วยเป็นเฮิร์ต (Hertz)

θ คือ ความต่างเฟสมีหน่วยเป็นเรเดียน (Radian)

โดยที่อิมพีแดนซ์จะใช้สำหรับบ่งบอกสมรรถนะของขั้วไฟฟ้า ซึ่งอิมพีแดนซ์มีลักษณะคล้ายความต้านทานทางเคมีไฟฟ้าต่างกันที่อิมพีแดนซ์จะไม่มีข้อจำกัดในเกี่ยวกับความถี่ในการใช้งาน เนื่องจากการวัดอิมพีแดนซ์โดยส่วนใหญ่จะวัดโดยการให้กระแสลับกับเซลล์ไฟฟ้าเคมี

2.8.3.3 ไนควิสต์พล็อต

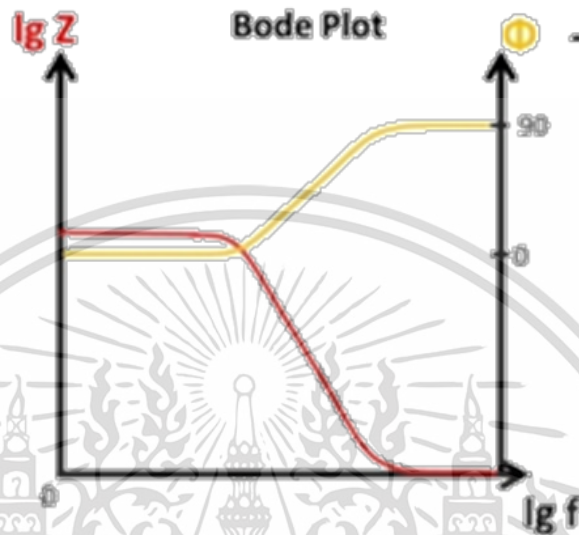
ขนาดอิมพีแดนซ์ประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ส่วนจริง (Real Impedance) และอิมพีแดนซ์ส่วนจินตภาพ (Imaginary Impedance) โดยอิมพีแดนซ์ส่วนจริง หมายถึง ค่าศักย์ไฟฟ้า (E) และกระแส (I) จะอยู่เฟสเดียวกับกระแส (In phase) ในทางตรงข้ามอิมพีแดนซ์จินตภาพค่าศักย์ไฟฟ้า (E) และกระแส (I) จะอยู่ต่างเฟสกับกระแส (Out of Phase) เมื่อนำค่าอิมพีแดนซ์ทั้งสองมาสร้างกราฟโดยให้ค่าอิมพีแดนซ์จินตภาพ (Imaginary Impedance) บนแกน Y และอิมพีแดนซ์จริง (Real-Impedance) บนแกน X จะได้กราฟที่มีลักษณะเฉพาะ เรียกว่าพล็อตว่า ไนควิสต์พล็อต (Nyquist Plot) ลักษณะแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.20 [49]



รูปที่ 2.20 ลักษณะของ Nyquist Plot ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อิมพีแดนซ์จินตภาพ (Imaginary Impedance) และอิมพีแดนซ์ส่วนจริง (Real Impedance)

2.8.3.4 โบทเพล็ท

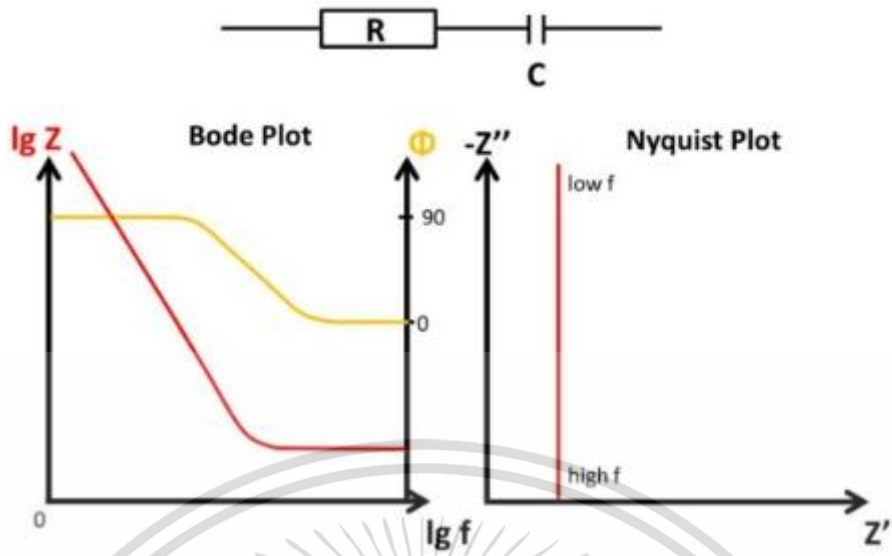
โบเตพล็ท (Bode Plot) คือกราฟลอการิทึมซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของผลรวมของอิมพีแดนซ์ ($|Z|=Z_0$) บนแกน Y และความถี่ (Frequency) ในแกน X เพื่อแสดงค่าของอิมพีแดนซ์ในระหว่างที่ความถี่เปลี่ยนแปลงไปในการทดลอง



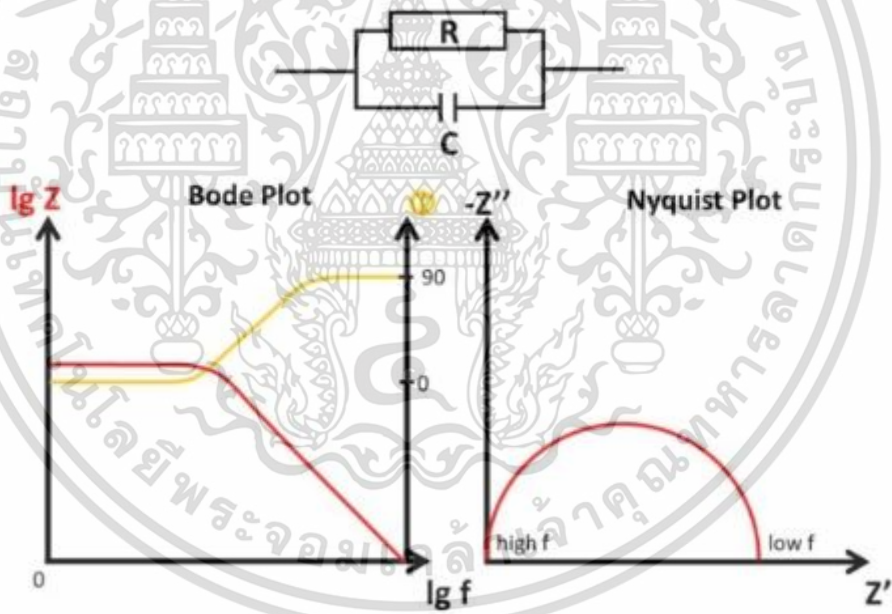
รูปที่ 2.21 ลักษณะของ Bode Plot ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ผลรวมของอิมพีแดนซ์และความถี่ (Frequency)

2.8.3.5 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์และวงจรสมมูล

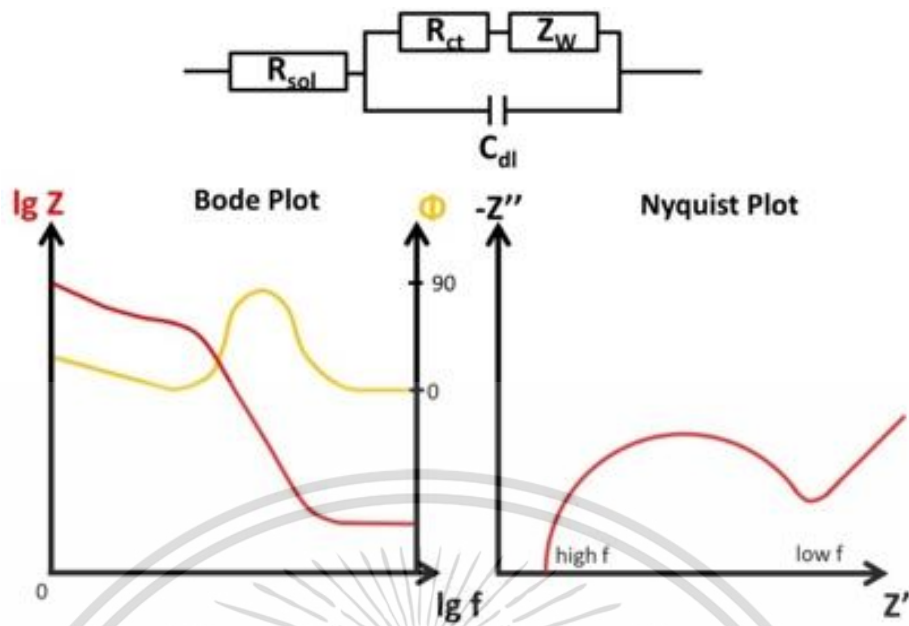
ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้มาสามารถแปลให้อยู่ในรูปที่สัมพันธ์กับวงจรไฟฟ้าที่เหมาะสม และเป็นข้อมูลคาดคะเนพฤติกรรมของวงจรไฟฟ้า เพราะฉะนั้นจึงสามารถใช้ลักษณะของกราฟ Nyquist Plot ในการเทียบหาวงจรไฟฟ้าลักษณะต่างๆ โดยเรียกว่า วงจรสมมูล (Equivalent Circuit) ซึ่งแสดงลักษณะ Nyquist Plot ที่สัมพันธ์กับแต่ละวงจรมีแสดงในรูปที่ 2.22 - 2.24 [49]



รูปที่ 2.22 วงจรไฟฟ้าที่ตัวต้านทาน (Resistor) และ ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ต่ออนุกรมกันโดย
ได้มาจากการวิเคราะห์ Nyquist Plot และ Bode Plot



รูปที่ 2.23 วงจรไฟฟ้าที่ตัวต้านทาน (Resistor) และ ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ต่อขนานโดยได้มา
จากการวิเคราะห์ Nyquist Plot และ Bode Plot



รูปที่ 2.24 วงจรไฟฟ้าที่ตัวต้านทาน (Resistor) และ ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ต่ออนุกรมและขนาด โดยได้มาจากการวิเคราะห์ Nyquist Plot และ Bode Plot

2.8.3.6 ตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุ (Capacitor) สามารถเป็นตัวบ่งชี้อัตราความต้านทานการกัดกร่อนของพื้นผิวโลหะ โดยตัวเก็บประจุเป็นส่วนโดยตรงต่อความไวต่อการกัดกร่อน [50]

ค่าความต้านทานของตัวเก็บประจุ (Capacitive Reactance) จะเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ของแหล่งจ่ายและขนาดของตัวเก็บประจุ ตามสมการที่ (2.4) ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์ X_c แทนความหมายของความต้านทานของตัวเก็บประจุ [51]

$$X_c = 1 / (2 \times \pi \times f \times C) \quad (2.4)$$

เมื่อ X_c คือ ค่า Capacitive Reactance มีหน่วยเป็น Ohms

f คือ ความถี่ของแหล่งจ่ายแรงดันไฟสลับ มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz)

C คือ ความจุของตัวเก็บประจุ มีหน่วยเป็นฟารัด (F)

π คือ ค่าคงที่มีค่าประมาณ 3.14

2.9 การเตรียมชิ้นงานทางโลหะวิทยา

การเตรียมชิ้นงานทางโลหะวิทยา (Metallurgical Specimen Preparation) จะมีวิธีดังต่อไปนี้

2.9.1 การตัดชิ้นงานเพื่อเตรียมตัวอย่าง

การตัดชิ้นงานเพื่อเตรียมตัวอย่าง (Sectioning) โดยเครื่องมือที่ใช้ คือ เครื่องตัดละเอียดที่ใช้ใบตัดกลมชนิดสารขัดถู (Abrasive Cut-Off Wheel) ซึ่งนิยมใช้กันทั่วไปสำหรับการตัดชิ้นงานเพื่อเอกซเรย์เป็นเอกซเรย์ที่สแกนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา การตัดด้วยเครื่องตัดชนิดนี้ใช้สำหรับตัดชิ้นงานให้ได้ขนาดและ
ระนาบที่ต้องการโดยที่โครงสร้างต้องเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด ทำได้โดยใช้น้ำหล่อเย็นในระหว่างการตัด
เพื่อทำหน้าที่ระบายความร้อนออกจากบริเวณชิ้นงานที่ถูกตัด ทั้งนี้จะต้องเลือกใบตัดให้เหมาะสมกับ
การใช้งาน เช่น การตัดเหล็กกล้าและเหล็กหล่อควรใช้ใบตัดกลมชนิดที่สารขัดถูเป็นอลูมิเนียมออกไซด์
(Al₂O₃) หรือเรียกว่าใบตัดอ่อน (Soft Wheels) ในขณะที่โลหะนอกกลุ่มเหล็ก เช่น โลหะผสม
อลูมิเนียม โลหะผสมทองแดง ควรใช้ในตัดชนิดที่สารขัดถูเป็นซิลิคอนคาร์ไบด์หรือเรียกว่าใบตัดแข็ง
(Hard Wheels) [52]

2.9.2 การฝังชิ้นงานในพลาสติก

การฝังชิ้นงานในพลาสติก (Mounting) จะทำหลังจากตัดชิ้นงานให้มีขนาดเล็กลงเหมาะสมที่จะ
ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคแล้ว ชิ้นงานที่ถูกตัดบางครั้งอาจจะสามารถทำการขัดด้วยกระดาษ
ทรายได้เลย เนื่องจากมีขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมกับการจับขัดด้วยมือหรือสามารถจับยึดด้วย
เครื่องขัดอัตโนมัติได้ อย่างไรก็ตามบางครั้งต้องฝังชิ้นงานลงในวัสดุจับยึด เช่น พลาสติก เพื่อให้ชิ้นงาน
มีขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมกับการขัด เช่น โลหะที่เป็นแผ่นบาง ลวดโลหะ ชิ้นงานที่มีรูปร่างไม่
สมมาตร นอกจากนี้การฝังชิ้นงานในพลาสติกจะช่วยรักษาสภาพขอบมุมผิวหน้าชิ้นงานไว้ได้อย่าง
สมบูรณ์ การฝังชิ้นงานในพลาสติกสามารถแบ่งได้ 2 วิธี ดังต่อไปนี้

2.9.2.1 การฝังชิ้นงานในพลาสติกโดยใช้ความร้อน-ความดัน

การฝังชิ้นงานในพลาสติกโดยใช้ความร้อน-ความดัน (Hot Mounting) โดยที่พลาสติกที่ใช้
สำหรับวิธีการ Hot Mounting มีอยู่ 2 กลุ่ม คือ Thermosetting Compound และ Thermoplastic
Compound

หลักการ คือ ให้ความร้อนเพื่อให้พลาสติกเกิดการหลอมเหลวภายในแบบหล่อรูปร่าง
ทรงกระบอกที่มีชิ้นงานวางอยู่และใช้ความดันสูง ทำให้พลาสติกหลอมเหลวเกิดการอัดตัวแน่น
พลาสติกหลอมเหลวจะมีความถ่วงจำเพาะสูงขึ้น จากนั้นลดอุณหภูมิลงเพื่อให้พลาสติกหลอมเกิดการ
แข็งตัวและยึดเกาะชิ้นงานไว้ เมื่อพลาสติกแข็งตัวและอุณหภูมิภายในทรงกระบอกลดลงแล้วจึงเอา
ชิ้นงานออกจากแบบการทำ Hot Mounting ซึ่งวิธีการนี้เหมาะสำหรับวัสดุที่ไม่เปลี่ยนโครงสร้างที่
อุณหภูมิ 150 °C [52]

2.9.2.2 การฝังชิ้นงานในอีพอกซี

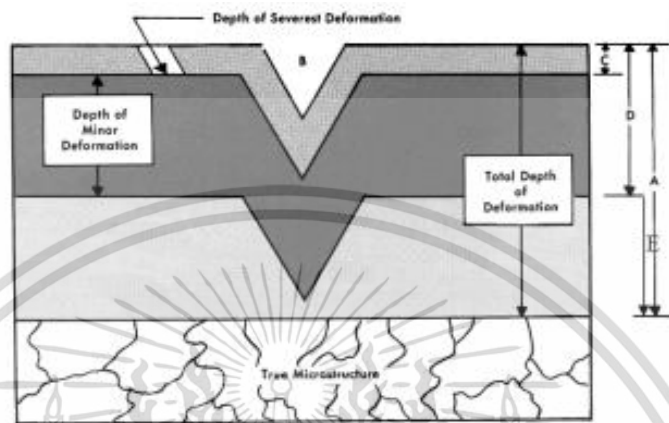
การฝังชิ้นงานในอีพอกซี (Cold Mounting) จะทำโดยการใช้เรซินผสมกับสารเร่งการแข็งตัว
เหลวในแบบหล่อให้ท่วมชิ้นงานที่วางอยู่ทิ้งไว้จนอีพอกซีแข็งตัวใช้เวลาประมาณ 16–24 ชั่วโมง แล้ว
จึงแกะออกจากแบบ ในขณะที่อีพอกซีเกิดการแข็งตัวจะคายความร้อนออกมาเล็กน้อย การทำ Cold
Mounting เหมาะกับชิ้นงานที่มีความอ่อนนุ่มๆ และชิ้นงานที่ไม่ทนต่อความร้อนและแรงดัน

การฝังชิ้นงานในอีพอกซีมีข้อเสีย คือ อีพอกซีใช้เวลาแข็งตัวค่อนข้างนาน ส่วนชนิดที่แข็งตัว
เร็วก็จะมีราคาสูง ส่วนข้อดี คือ สามารถรักษาสภาพความสมบูรณ์ของชิ้นงานไม่ว่าจะเป็น มุม ผิว
เคลือบ รูพรุนไว้ได้ [52]

2.9.3 การเตรียมผิวเชิงกล

2.9.3.1 การขัดระนาบ

การขัดระนาบ (Fine Grinding) เป็นการขจัดผิวชิ้นงานที่อาจจะเกิดการเปลี่ยนรูป (Deformation) จากการตัด อุณหภูมิและการขัดหยาบ ซึ่งเป็นการขัดเพื่อให้มีระนาบเรียบที่สุด

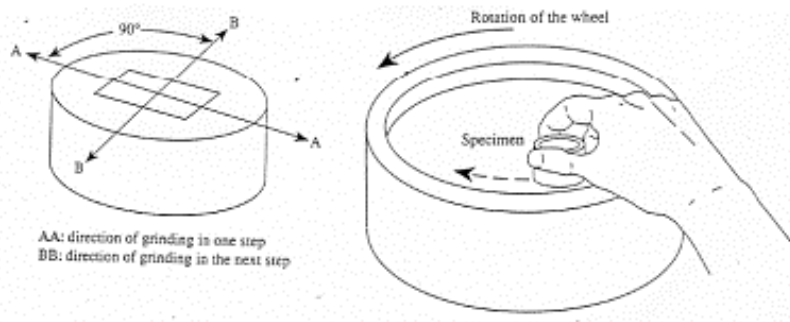


รูปที่ 2.25 ชั้นของผิวหน้าชิ้นงานที่ต้องทำการกำจัดโดยการขัดหยาบและขัดเงา

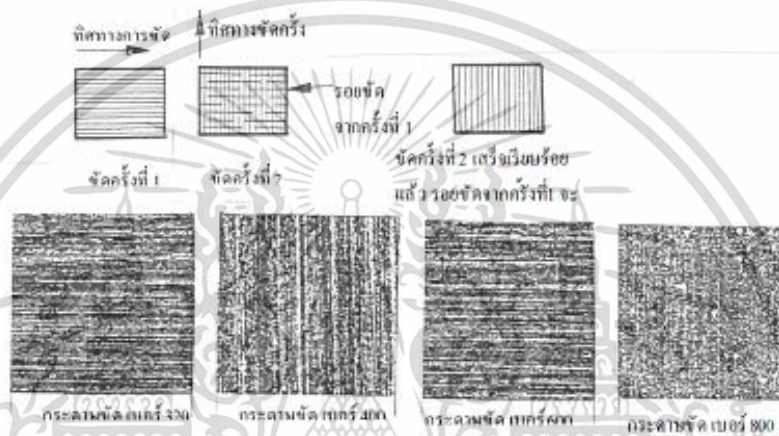
จากรูปที่ 2.25 ผิวหน้าที่ต้องกำจัดออกมีความลึกเท่ากับระยะ A (Total Depth of Deformation) B คือ รอยขีดที่เกิดจากการขัดละเอียดซึ่งจะมีระยะที่เกิดการเปลี่ยนรูป มีความลึกเท่ากับ C และ D คือ ความลึกของผิวที่เกิดการเสียรูปเล็กน้อย

วัสดุที่ใช้ขัดระนาบละเอียด คือ แผ่นกระดาษที่ด้านบนจะมีชั้นของสารขัดถู โดยมากจะนิยมใช้ซิลิโคนคาร์ไบด์ที่มีอยู่ 2 แบบ คือ แบบที่ฝังด้วยอนุภาคซิลิโคนคาร์ไบด์เรียกชื่อสามัญว่า กระดาษทราย และแบบที่ฝังอะลูมิเนียมออกไซด์ อนุภาคของสารขัดถูจะยึดกันโดยใช้ซีเมนต์ โดยกระบวนการผลิตจะทำให้สารขัดถูเรียงตัวตั้งฉากกับแผ่นกระดาษ ซึ่งแผ่นกระดาษสามารถทนน้ำและซีเมนต์ได้

การขัดต้องมีน้ำเป็นตัวหล่อลื่นบริเวณผิวหน้าชิ้นงานและกระดาษขัดตลอดเวลาที่ทำการขัด โดยการขัดต้องขัดให้เกิดรอยกระดาษทรายในทิศทางเดียวตลอดผิวงาน แล้วหมุนชิ้นงานไป 90° ขัดจนรอยเดิมหายไป ดังแสดงในรูปที่ 2.26 และ 2.27 การขัดจะขัดโดยเรียงลำดับเบอร์ของกระดาษขัด ตั้งแต่ขนาดเม็ดทรายหยาบไปหาขนาดเม็ดทรายละเอียด (Grit Number เรียงจากมากไปน้อย) เริ่มขัดตั้งแต่เบอร์ 120, 240, 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ ตามมาตรฐาน ANSI (American National Standards Institute) โดยก่อนที่จะเปลี่ยนกระดาษขัดต้องล้างผิวงานให้สะอาดเพื่อกำจัดผงขัดหยาบที่ติดมากับผิวทุกครั้ง [52]



รูปที่ 2.26 ทิศทางการขัดที่เหมาะสม

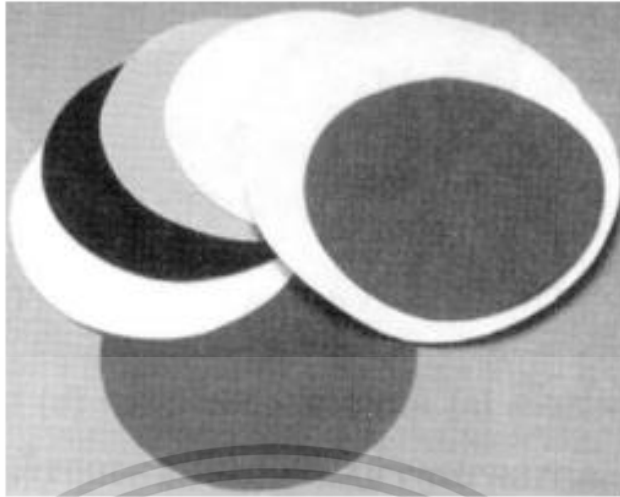


รูปที่ 2.27 ตัวอย่างผิวงานขัดชิ้นงาน Aluminum Alloy ที่ผ่านการขัดด้วยกระดาษขัดเบอร์ต่างๆ

2.9.3.2 การขัดละเอียดหรือการขัดเงาโลหะ

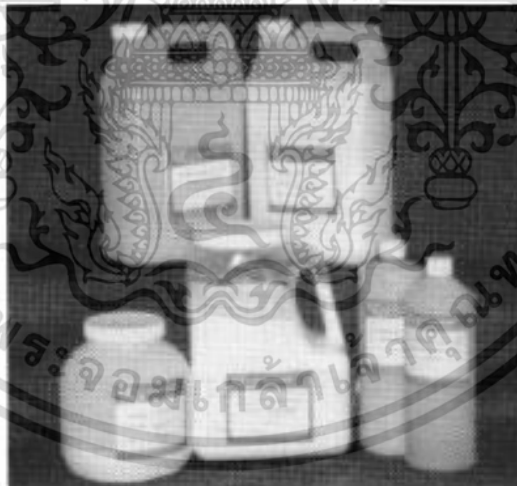
การขัดละเอียดหรือการขัดเงาโลหะจะมีหลักการและอุปกรณ์คล้ายคลึงกับการขัดหยาบ โดยใช้งานหมุดอัตโนมัติเพียงแต่ขนาดอนุภาคของสารขัดถูจะเล็กกว่า อุปกรณ์พื้นฐานในการขัดเงา คือ ผ้าขัดและสารขัดถูที่อยู่ในรูปแบบต่างๆ เช่น ครีม แขนวลอยในน้ำ แขนวลอยในน้ำมัน และแบบที่เป็นผ้าโพลีเอสเตอร์ที่ฝังอนุภาคสารขัดถูมาแล้ว ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ผ้าขัด โดยผ้าขัดชนิดที่ใช้กับการขัดเงาเป็นผ้าโพลีเอสเตอร์ลักษณะคล้ายผ้ากำมะหยี่ขนสั้นมีทั้งชนิดที่ติดกาวสำเร็จรูปด้านหลังและชนิดไม่ติดกาวเวลาใช้งานจะแถมด้วยผงขัดชนิดที่เป็นครีมหรือฉีดยึดด้วยผงขัดที่แขวนลอยในน้ำ แขนวลอยในน้ำมัน



รูปที่ 2.28 ผ้าขัดโพลีเอสเตอร์ชนิดที่ใช้กับผงขัดเพชร

2. สารขัดเงา มีทั้งที่เป็นผงขัดเพชร อะลูมินาความละเอียดตั้งแต่ 6 ไมโครเมตรไปจนถึง 0.25 ไมโครเมตร เวลาแถมผงขัดหรือฉีดผงขัดลงบนผ้าควรถัดเป็นจุดตามตำแหน่ง 3 6 9 12 นาฬิกา บนแนวเส้นรอบวงของการหมุนเดียวกัน ถ้าเป็นชนิดที่ขัดแห้ง คือ การขัดโดยไม่ต้องใช้น้ำมันหรือสารหล่อลื่น ส่วนการขัดเปียก คือ การใช้น้ำช่วยหล่อลื่นหรือใช้น้ำมัน [52]



รูปที่ 2.29 สารขัดเงาอะลูมิเนียมออกไซด์และผงขัดเพชร

2.10 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค

โครงสร้างจุลภาคของโลหะ คือ ลักษณะโครงสร้างหรือองค์ประกอบของเนื้อโลหะที่มีขนาดในระดับ 1 มิลลิเมตร หรือเล็กกว่าจำเป็นต้องใช้กล้องจุลทรรศน์ ในการตรวจสอบคุณลักษณะของโครงสร้างนั้นๆ โดยใช้กำลังขยายตั้งแต่ 25 เท่าขึ้นไป

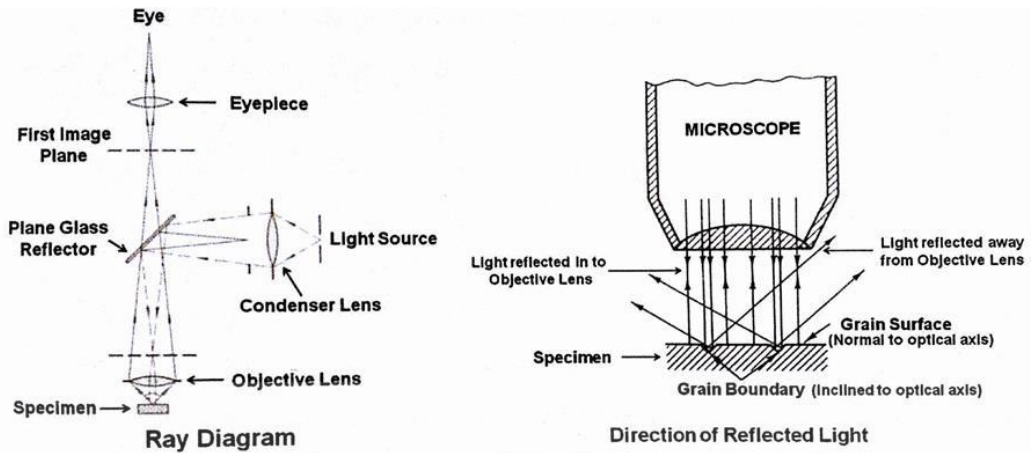
การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคเป็นการตรวจสอบโครงสร้างของโลหะที่ผ่านการเตรียมชิ้นงานด้วยการขัดกระดาษทราย ขัดละเอียดด้วยผ้าขัด และถ่ายภาพที่กำลังขยายสูงกว่า 25 ถึง 1,000 เท่า ทำให้เห็นถึงลักษณะชนิดของโครงสร้างภายในเนื้อโลหะ โดยมีวิธีการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคหลายรูปแบบ ดังต่อไปนี้ [53]

2.10.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง

กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM) เป็นกล้องที่ใช้ศึกษาโครงสร้างจุลภาค ซึ่งหลักการทำงานของกล้องประเภทนี้จะใช้แสงและระบบกำเนิดแสงเป็นพื้นฐานในการทำให้มองเห็นภาพ โดยแสงจะวิ่งผ่านระบบเลนส์ต่างๆและมีการส่งไปที่วัตถุก่อนที่แสงจะส่องผ่านเข้าสู่สายตาเรา ซึ่งแสงที่อยู่ภายในระบบที่สะท้อนกลับเข้าสู่สายตาเราจะทำให้เห็นเป็นภาพได้ [55]

กล้องประเภทนี้สามารถตรวจสอบโครงสร้างได้เฉพาะที่ผิวเท่านั้นโดยการสะท้อนแสงสำหรับวัตถุทึบแสง เช่น โลหะทุกประเภท เซรามิก และ โพลีเมอร์บางชนิดความดำของภาพแตกต่างกัน เกิดจากความสามารถในการสะท้อนแสงที่แตกต่างกันในบริเวณต่างๆ การตรวจแบบนี้เรียกว่า เมทัลโลกราฟี (Metallography) ชิ้นงานที่ผ่านการขัดเรียบจนสะท้อนแสงได้เหมือนกระจก หลังจากการขัดด้วยสารเคมีและนำมาตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงจะมองเห็นโครงสร้างจุลภาคที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเกรนมีทิศทางที่แตกต่างกัน จึงมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาต่างกัน แสงที่สะท้อนจากผิวของเกรนที่มีทิศทางการเรียงตัวของอะตอมที่แตกต่างกันหลังการกัดผิว โดยความเงาและเนื้อผิวที่เห็นในแต่ละเกรนขึ้นอยู่กับการสะท้อนแสงของเกรนนั้นๆ หลังจากการกัดผิวที่ขอบเกรนจะเกิดร่องขนาดเล็กขึ้น เนื่องจากอะตอมที่บริเวณขอบเกรนมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยามากกว่าบริเวณอื่นๆ จึงถูกกัดออกไปมากกว่าบริเวณอื่นภายในเกรน [54] ดังแสดงในรูปที่

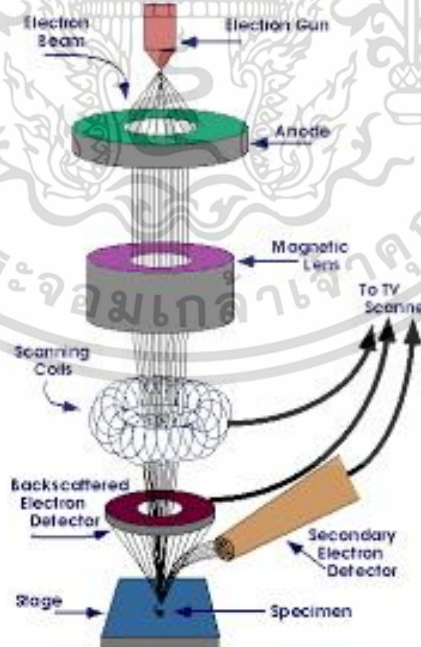
2.30



รูปที่ 2.30 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

2.10.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายประมาณ 10 นาโนเมตร [56] ซึ่งเป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ศึกษาพื้นฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวชิ้นงานทดสอบ เช่น พื้นทีหน้าตัดของโลหะ และวัสดุขนาดและรูปร่างของเกรนหรือตำแหน่งที่สนใจบนชิ้นงานทดสอบและแสดงให้เห็นลักษณะและการกระจายของเฟสในโครงสร้างจุลภาค การสร้างภาพตามโดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากผิวหน้าของตัวอย่าง ซึ่งภาพที่ได้จากกล้องนี้จะเป็นภาพ 3 มิติ [29] ดังแสดงในรูปที่ 2.31 [57]



รูปที่ 2.31 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

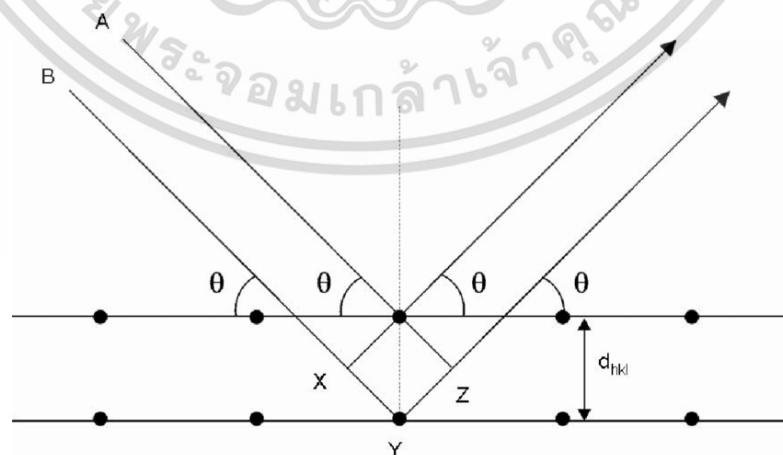
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เป็นอุปกรณ์ซึ่งยิงลำอิเล็กตรอนไปตกกระทบบนเป้าที่เป็นชิ้นงานตัวอย่าง จะมีการรวบรวมและแสดงสัญญาณอิเล็กตรอนิกส์ (Electron Signals) ซึ่งปล่อยออกมา โดยชิ้นงานที่ใช้ทำเป็นเป้าไม่จำเป็นต้องผ่านการขัดผิวแต่จะต้องนำไฟฟ้าได้ ถ้าวัสดุไม่นำไฟฟ้าจะต้องเคลือบผิวด้วยโลหะหรือวัสดุที่นำไฟฟ้า เช่น การเคลือบทองคำหรือคาร์บอน โดยปืนอิเล็กตรอนจะผลิตลำอิเล็กตรอน (Electron Beam) และควบคุมให้พุ่งมาตกกระทบบนจุดเล็กๆ บนเป้าตัวอย่าง โดย Scanning Coils จะปล่อยให้ลำอิเล็กตรอนแยกภาพพื้นผิวชิ้นงานตัวอย่าง และจะมีอุปกรณ์สำหรับตรวจจับสัญญาณ (Detector) ชนิดต่างๆ แล้วส่งไปประมวลผลเป็นภาพแสดงบนจอภาพต่อไปตัวอย่างสัญญาณที่เกิดขึ้นนั้น [29] ได้แก่

1. อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electrons, SE) สัญญาณอิเล็กตรอนชนิดนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะพื้นผิวตัวอย่าง เป็นสัญญาณที่ถูกนำมาใช้ในการสร้างภาพมากที่สุดซึ่งทำให้เกิดภาพสามารถขยายได้ถึง 500,000 เท่าภาพที่ได้จากสัญญาณชนิดนี้เรียกว่า ภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electrons, SE)

2. อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back Scattered Electrons, BE) สัญญาณชนิดนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนประกอบทางเคมีบนผิวของชิ้นงานตัวอย่างและแสดงให้เห็นลักษณะความสูงต่ำของพื้นผิว

2.10.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction, XRD) เป็นเทคนิคที่มีการใช้กันแพร่หลายในการวิเคราะห์วัสดุต่างๆ โดยสามารถใช้ในการวิเคราะห์ทดสอบชนิดปริมาณคุณภาพของสารประกอบแบบผลึกต่างๆ ในชิ้นงานได้ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของลำรังสีสะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบ ดังแสดงในรูปที่ 2.32 [59]



รูปที่ 2.32 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึก

จากรูปที่ 2.32 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้จากสมการของ Bragg's Law คือ

$$2dhkl \sin \theta = n\lambda \quad (2.5)$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

n คือ ลำดับการสะท้อน

$dhkl$ คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ

ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบและแร่สามารถแยกแยะประเภทและชนิดของวัสดุที่พบในธรรมชาติว่ามีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบใดหรือจำแนกได้ว่าวัสดุที่พบเห็นนั้นเป็นธาตุชนิดใด โดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดโดยองค์กร JCPDs (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิดมีรูปแบบโครงสร้างผลึกแตกต่างกันและระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบก็แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับขนาดและประจุของอะตอม สารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบ (XRD Pattern) เฉพาะตัวเปรียบเช่นเดียวกับลายนิ้วมือของคนที่แตกต่างกันจากหลักการทำงานของ XRD มีการนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์วัสดุที่มีสูตรโครงสร้างทางเคมีเหมือนกันแต่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน ลักษณะตัวอย่างที่เหมาะสมในการส่งเพื่อทดสอบ

เครื่อง XRD สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งในรูปแบบของแข็ง หรือตัวอย่างที่เป็น Powder ได้ ในกรณีที่ตัวอย่างเป็นของแข็ง ด้านที่ต้องการทดสอบผิวจะต้องเรียบ ส่วนในกรณีตัวอย่างที่เป็นผงจะต้องมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 325 mesh หรือ ประมาณ 40 micron (ผงละเอียดคล้ายผงแป้ง) จึงจะให้ผลการทดสอบที่ดี โดยปริมาณที่ต้องใช้ในการทดสอบต่อครั้ง จะอยู่ประมาณ 1-2 กรัม ในกรณีที่ ตัวอย่างเป็นก้อน ต้องมีขนาดกว้างยาว ไม่เกิน 10 cm ทั้งนี้ พื้นที่ที่จะทำการทดสอบ จะเป็นเพียงบริเวณเล็กๆ ประมาณ 10 mm เท่านั้น [58]

2.10.4 หลักการของการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectrophotometry

การวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectrophotometry (EDX) เป็นระบบที่นิยมใช้กันมากในกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) เนื่องจากสามารถวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของวัตถุ และใช้เวลาไม่นานในการวิเคราะห์โดยเทคนิค EDS มีหลักการวิเคราะห์ คือ เมื่อลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงเคลื่อนที่เข้าชนอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นในของอะตอม เช่น ชั้น K หรือ L แล้วเกิดการถ่ายโอนพลังงานให้แก่อิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนในชั้นที่ได้รับพลังงานดังกล่าวมีพลังงานสูงกว่าพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding Energy) ของชั้นโคจร อิเล็กตรอนจึงหลุดจากวงโคจรทำให้เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอนในชั้นโคจร หลังจากนั้นอะตอมที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นจะลดระดับพลังงานลงสู่สภาวะปกติในช่วงเวลาอันสั้น โดยอิเล็กตรอนของวงโคจรชั้นถัดออกไปจะลดระดับพลังงานลงมาให้เท่ากับพลังงานยึดเหนี่ยวของวงโคจรที่เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอน โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
48

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของรังสีเอกซ์แล้วอิเล็กตรอนจะเข้ามาแทนที่พลังงานส่วนเกิน
นี้มีพลังงานเท่ากับความแตกต่างของระดับพลังงานยึดเหนี่ยวเฉพาะชั้นโคจรของอิเล็กตรอน และ
เฉพาะของธาตุนั้นๆ สำหรับการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์แบบ EDX สามารถกระทำได้ 3 วิธีคือ

1. การวิเคราะห์ส่องกราดเฉพาะพื้นที่ (Area Scan Analysis) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า
เอกซ์เรย์แมปปิง (X-ray Mapping) ซึ่งจะเป็นการวิเคราะห์โดยใช้ลำอิเล็กตรอนส่องกราดบนพื้นผิว
ตัวอย่างเป็นพื้นที่เล็กๆ โดยความกว้างของพื้นที่ขึ้นกับกำลังขยายที่ใช้ ลักษณะการส่องกราดเป็นแนว
จากซ้ายไปขวา และจากบนลงล่าง ภาพที่ได้จากการวิเคราะห์จะแสดงลักษณะการกระจายของธาตุ
บนพื้นที่นั้นๆ

2. การวิเคราะห์ส่องกราดตามแนวเส้น (Line Scan Analysis) เป็นการวิเคราะห์โดยใช้การ
ส่องกราดลำอิเล็กตรอนตามแนวบนตัวอย่างตรงตำแหน่งที่สนใจ เพื่อวัดความเข้มของรังสีเอกซ์
เฉพาะตัว นิยมใช้ในกรณีที่ต้องการจะหาขอบเขตของรอยต่อหรือเฟสของโครงสร้าง

3. การวิเคราะห์เฉพาะจุด เป็นการวิเคราะห์ที่ให้ลำอิเล็กตรอนกระทบอยู่หนึ่งกับที่บนพื้นผิว
ตัวอย่าง ตรงจุดที่ต้องการวิเคราะห์เพื่อวัดค่าปริมาณรังสีเอกซ์เฉพาะตรงจุดที่ต้องการ รังสีเอกซ์
เฉพาะตัวที่เกิดจากตัวอย่างจะมีพลังงานตามสมการที่ (2.6) [60]

$$E = hU \quad (2.6)$$

เมื่อ E คือ พลังงานของรังสีเอกซ์

h คือ ค่าคงที่ของพลัง (Planck's Constant $\approx 6.626 \times 10^{-34}$ J·s)

U คือ ความถี่ของรังสีเอกซ์

2.11 น้ำปราศจากไอออน

น้ำปราศจากไอออน (Deionized Water) หรือที่เรียกกันโดยทั่วๆ ไปว่าน้ำดีไอ (DI) เป็นน้ำที่
ผ่านการกรองไอออน โดยใช้เรซินเป็นตัวกรองจึงทำให้น้ำที่ได้ไม่มีไอออนหลงเหลืออยู่ และเป็นน้ำที่มี
ความบริสุทธิ์สูงเพราะโมเลกุลที่เหลืออยู่จะมีเพียงโมเลกุลของน้ำ (H_2O) เท่านั้น ปัจจุบันวิธีการ
Deionization เป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในการทำน้ำบริสุทธิ์ และยังสามารถนำไปใช้ร่วมกับ
วิธีการทำให้น้ำบริสุทธิ์วิธีอื่นๆ เช่น RO (Reverse Osmosis) การกรอง การกลั่น และการใช้ตัวดูดซับ
คาร์บอน (Carbon Adsorption) ได้ แต่ถึงแม้วิธี Deionization จะเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง แต่มี
ข้อจำกัดเพราะไม่สามารถกรองเชื้อจุลินทรีย์ได้ นอกจากนี้จุลินทรีย์สามารถอาศัยอยู่บนเรซินซึ่งจะทำให้
เกิดการปนเปื้อนและสร้างความเป็นพิษในน้ำได้อีกด้วย ดังนั้นการจะทำให้น้ำบริสุทธิ์และปราศจาก
เชื้อด้วยจึงต้องใช้หลายๆ วิธีควบคู่กัน

กระบวนการผลิตน้ำ DI คือ การทำน้ำให้มีความบริสุทธิ์มากโดยผ่าน Ion Exchange เพื่อจับ
ทั้งไอออนบวกและลบออกจากน้ำ โดยใช้เรซิน (Resin) เป็นตัวกรอง [61] ซึ่งเรซินที่ใช้มีด้วยกัน 3
ชนิดดังต่อไปนี้ [62]

1. แคทไอออนเรซิน (Cation Resin) เป็นเรซินที่มีไอออนบวก (ประจุ+) เกาะอยู่บนพื้นผิวของเม็ด เรซิน เช่น H^+ ใช้ดักจับ ไอออน + ของสารละลายที่อยู่ในน้ำ
2. แอนไอออนเรซิน (Anion Resin) เป็นเรซินที่มีไอออนลบ (ประจุ-) เกาะอยู่บนพื้นผิวของเม็ดเรซิน เช่น OH^- ใช้ดักจับ ไอออน - ของสารละลายที่อยู่ในน้ำ
3. มิกซ์เบดเรซิน (Mixed Bed Resin) เป็น แคทไอออนเรซินผสมกับแอนไอออนเรซิน ใช้ดักจับทั้ง ไอออน + และ - ที่หลงเหลือจากการกรองผ่านขบวนการกรองประจุ + และ - ในขั้นตอน

โดยน้ำ DI จะไม่มีมาตรฐานแน่นอนขึ้นอยู่กับแต่ละบริษัทและอุตสาหกรรมที่จะนำไปใช้ ซึ่งส่วนใหญ่ น้ำ DI จะใช้ในการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หรืออุตสาหกรรมที่มีการใช้หม้อไอน้ำความดันสูง (High Pressure Boiler) หรืออุตสาหกรรมที่ต้องมีการใช้น้ำในกระบวนการผลิตที่มีความสะอาดสูงมาก นอกจากนี้ยังเป็นน้ำที่ใช้ในห้องปฏิบัติการทางการแพทย์ และห้องปฏิบัติการต่างๆ อย่างมากมาย ทั้งนี้ น้ำ DI ส่วนมากค่า Electric Conductivity (EC) หรือค่าความนำไฟฟ้าจะมีค่าต่ำมาก (ไม่เกิน 1 ไมโครซีเมนส์) [61]



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

ในการจัดทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-Cu-Sb ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนในการดำเนินงานเพื่อให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จบรรลุตามวัตถุประสงค์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ขั้นตอนการดำเนินงาน
2. วัสดุที่ใช้ในการทดลอง
3. การเตรียมชิ้นงานทดสอบ
4. การตรวจสอบและวิเคราะห์ผลทางโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี
5. การตรวจสอบและวิเคราะห์ผลด้านทานการกัดกร่อนของโลหะบัดกรี

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

สำหรับงานวิจัยเพื่อศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-Cu-Sb มีขั้นตอนการดำเนินงานตามลำดับ ดังต่อไปนี้

1. ศึกษาความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย
2. รวบรวมข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
3. วางแผนและออกแบบขั้นตอนในการทำการทดลอง
4. เตรียมชิ้นงานเพื่อการทดลอง
5. ทำการทดลองและวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี
6. ทำการทดลองและวิเคราะห์ผลการต้านทานการกัดกร่อนของโลหะบัดกรี
7. ทำการทดลองและวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีหลังจากการได้รับการกัดกร่อน
8. วิเคราะห์ผลการทดลอง
9. สรุปผลการทดลอง
10. จัดทำรูปเล่มและตรวจสอบความถูกต้อง

3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ใช้ในการทดลองจะประกอบไปด้วยส่วนผสมต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมของโลหะบัดกรีแต่ละชนิดที่นำมาใช้ในการทดสอบ

ชั้นงาน	ส่วนประกอบ (%)		
	Sn	Cu	Sb
1	98.5	1.5	0
2	94.5	1.5	4
3	92.5	1.5	6
4	90.5	1.5	8

3.3 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

3.3.1 การตัดชิ้นงาน

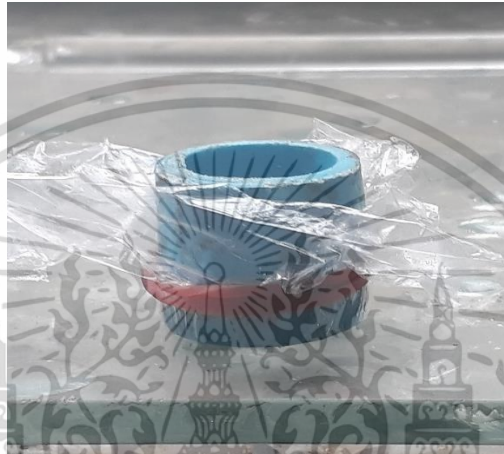
นำชิ้นงานทดสอบทั้ง 4 ชนิดมาตัดโดยใช้เครื่องตัดแบบแรงโน้มถ่วงยี่ห้อ Struers รุ่น Minitom ดังแสดงในรูปที่ 3.1 [63] โดยตัดให้ได้ขนาดมากกว่า 10 x 10 มิลลิเมตร จำนวนอย่างละ 7 ชิ้น เป็นจำนวนรวมทั้งหมด 28 ชิ้น



รูปที่ 3.1 ลักษณะเครื่องตัดแบบแรงโน้มถ่วงยี่ห้อ Struers รุ่น Minitom

3.3.2 การหล่อเรซิน

เมื่อต้องการนำชิ้นงานไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ชิ้นงานที่มีขนาดเล็กจนไม่สามารถจับชิ้นงานได้ระหว่างกระบวนการขัดมาทำการหล่อเรซิน (Mounting) โดยเริ่มจากนำแม่แบบที่ทำมาจากท่อ PVC ที่มีความสูงมากกว่าชิ้นงาน ทำการปรับพื้นแม่แบบให้เป็นระนาบ โดยการห่อฐานแม่แบบด้วยพลาสติกแรป จากนั้นทาวาสลินที่ผิวด้านในของท่อ PVC ให้ทั่วก่อนทำการหล่อเรซินเพื่อให้ง่ายต่อการนำชิ้นงานออกจากท่อ PVC และทำการนำชิ้นงานวางลงแม่แบบ



รูปที่ 3.2 ลักษณะแม่แบบที่ใช้ในการหล่อเรซิน

หลังจากนั้นทำการผสม Epoxy-แข็งใส A กับ ตัวเร่ง Epoxy-แข็งใส B ในอัตราส่วน 4:6 และผสมกันโดยคนไปในทิศทางเดียวกันเพื่อป้องกันการเกิดฟองอากาศ เมื่อผสมเรซินเรียบร้อยแล้ว จึงทำการเทเรซินลงไปและรอจนกว่าเรซินแข็งตัวก่อนแล้วจึงแกะชิ้นงานออกจากแม่แบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การหล่อเรซิน

3.3.3 การขัดเตรียมผิวชิ้นงานแบบหยาบ

การขัดเตรียมผิวชิ้นงานแบบหยาบ (Grinding) โดยจะนำชิ้นงานมาขัดด้วยกระดาษทรายโดยเรียงลำดับตั้งแต่ระดับความหยาบไปจนถึงละเอียดตั้งแต่เบอร์ 240, 1200, 4000 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ด้วยเครื่องขัดชิ้นงานยี่ห้อ Struers รุ่น LaboPol-1 ดังแสดงในรูปที่ 3.5 [64] ก่อนเริ่มขัดต้องทำการขัดลบเหลี่ยมที่แหลมคมเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนที่ส่งผลให้โลหะบางชนิดอาจเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคได้และเพื่อให้หน้าช่วยล้างเศษโลหะที่ไม่ต้องการออกไป ทิศทางการขัดต้องมีการเปลี่ยนแปลงโดยหมุนชิ้นงานในทิศทางตั้งฉาก (90°) ไปจากแนวเดิมเมื่อเปลี่ยนเบอร์กระดาษทรายเพื่อเป็นการลบรอยกระดาษทรายเบอร์เดิมให้หายไป และทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ ตามลำดับของเบอร์กระดาษทราย



รูปที่ 3.4 การขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทราย



รูปที่ 3.5 ลักษณะเครื่องขัดยี่ห้อ Struers รุ่น LaboPol-1

3.3.4 การขัดเตรียมผิวชิ้นงานแบบละเอียด

การขัดเตรียมผิวชิ้นงานแบบละเอียด (Polishing Machine) จะนำชิ้นงานที่ผ่านการขัดแบบหยาบมาขัดแบบละเอียดบนผ้าสักหลาดด้วยเครื่องขัดผิวหน้าแบบละเอียด (Polishing Machine) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 [29] ใช้ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที โดยขัดด้วยผงอะลูมินา (Aluminum Oxide) ด้วยความละเอียด 1 และ 0.3 ไมครอน ตามลำดับ การขัดควรใช้แรงกดน้อยเพื่อไม่ให้เกิดรอยบนพื้นผิวหน้าชิ้นงานจากเศษโลหะที่อยู่บนผ้าสักหลาด ทำการขัดผิวหน้าชิ้นงานทดสอบจนกว่าผิวหน้าจะมีความเงาและไม่มีรอย



รูปที่ 3.6 ลักษณะเครื่องขัดผิวหน้าแบบละเอียด (Polishing Machine)

3.3.5 การทำความสะอาดชิ้นงานทดสอบ

หลังจากชิ้นงานผ่านกระบวนการขัดเรียบร้อยแล้ว นำชิ้นงานล้างด้วยเครื่องล้างอัลตราโซนิก (Ultrasonic Cleaner) ยี่ห้อ Elma รุ่น E30H ดังแสดงในรูปที่ 3.7 เป็นเวลา 2 นาที เพื่อเป็นการชะล้างสิ่งสกปรกที่อาจติดอยู่บนผิวชิ้นงาน โดยอาศัยหลักการทำงานจากการส่งคลื่นเสียงความถี่สูงร่วมกับเอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl Alcohol) เพื่อให้เกิดแรงดันต่อผิวชิ้นงาน จึงช่วยให้สิ่งสกปรกหลุดออกจากผิวชิ้นงาน



รูปที่ 3.7 ลักษณะเครื่องล้างอัลตราโซนิก (Ultrasonic Cleaner) ยี่ห้อ Elma รุ่น E30H

3.4 การตรวจสอบและวิเคราะห์ผลทางโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี

3.4.1 การตรวจสอบและวิเคราะห์ผลทางโครงสร้างจุลภาคเบื้องต้นของโลหะบัดกรีด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

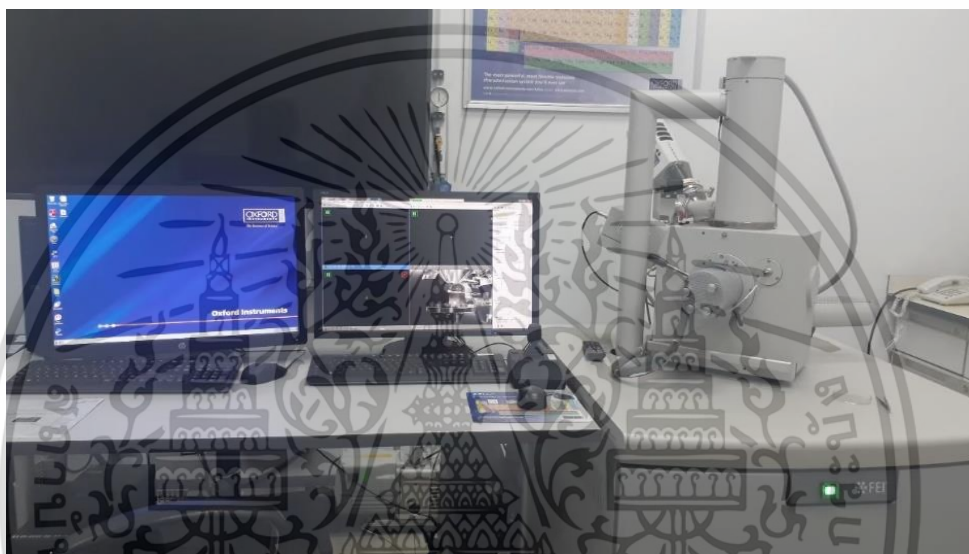
ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการขัดและทำความสะอาดเรียบร้อยแล้วจะถูกนำมาส่องที่กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM) ยี่ห้อ OLYMPUS ดังแสดงในรูปที่ 3.8 [65] เพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและลักษณะของผิวชิ้นงานว่ามีรอยตำหนิหรือไม่



รูปที่ 3.8 ลักษณะกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM)
ยี่ห้อ OLYMPUS

3.4.2 การตรวจสอบและวิเคราะห์ผลทางโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของโลหะบัดกรี

ชิ้นงานที่ผ่านการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและตรวจพบว่าไม่มีรอยตำหนิและชิ้นงานที่ได้รับการกัดกร่อนแล้วจะนำมาทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) ยี่ห้อ FEI รุ่น QUANTA 250 ดังแสดงในรูปที่ 3.9 และวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะด้วยวิธี Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDX)



รูปที่ 3.9 ลักษณะกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

3.4.3 การตรวจสอบและวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโลหะบัดกรีด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

เมื่อชิ้นงานที่ได้รับการกัดกร่อนแล้วจะนำมาทำการวิเคราะห์องค์ประกอบสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction, XRD) ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer ยี่ห้อ Bruker AXS รุ่น D8 Advance ดังแสดงในรูปที่ 3.10 [66]

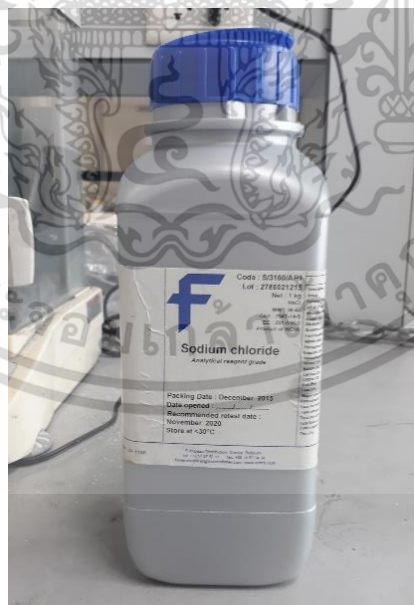


รูปที่ 3.10 ลักษณะเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD)

3.5 การตรวจสอบและวิเคราะห์ผลด้านทานการกัดกร่อนของโลหะบัดกรี

3.5.1 เตรียมสารละลายทดสอบ

เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โดยใช้โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ประมาณ 35 กรัม ต่อน้ำ 1 ลิตรเพื่อให้ได้สารละลายที่มีความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 3.5% ของน้ำหนักน้ำ ซึ่งเทียบเท่ากับความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ในน้ำทะเล



รูปที่ 3.11 โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

3.5.2 การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดและการวัดทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิก-โพลาริเซชัน

1. นำชิ้นงานติดตั้งกับเซลล์ทดสอบการกักกร่อนชนิดเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบ 3 ขั้ว Three-Electrode Electrochemical Cell ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ซึ่งประกอบด้วย ขั้วชิ้นงาน (Working Electrode) คือชิ้นงานที่ต้องการทดสอบ ขั้วตรงข้าม (Counter Electrode) คือแผ่นแพลทินัมผิวเรียบขนาด 1.5 cm x 5 cm x 0.1 cm และ ขั้วอ้างอิง (Reference Electrode) คือขั้วไฟฟ้าชนิดคาโลเมลอิ่มตัว (Saturated Calomel Electrode) โดยค่าศักย์ไฟฟ้าของระบบที่แสดงผลออกมาจะอ้างอิงกับขั้วไฟฟ้านี้ และนำมาต่อเข้ากับเครื่องโพเทนชิโอสแตททกัลวานอสแตท (Potentiostat/Galvanostat) ยี่ห้อ Autolab รุ่น PGSTAT302N ซึ่งควบคุมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ NOVA เวอร์ชัน 1.11 ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.12 เซลล์ทดสอบการกักกร่อนชนิดเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบ 3 ขั้ว (Three-Electrode Electrochemical Cell)



รูปที่ 3.13 เครื่องโพเทนชิโอสแตททกัลวานอสแตท (Potentiostat/Galvanostat) ยี่ห้อ Autolab รุ่น PGSTAT302N

2. เติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.6 โมลาร์ หรือ 3.5% ต่อน้ำหนักน้ำ ลงในเซลล์ทดสอบการกัดกร่อน โดยเทให้พองท่วมหน้าขี้นงาน

3. ตั้งค่าโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยใช้ Scan Rate คือ 0.0033 V/s ช่วงศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบมีค่าตั้งแต่ -1.2 V ถึง +1 V และตั้งค่าเวลาที่ทำการทดสอบ OCP คือ 5 นาที

4. เปิดเครื่องโพเทนชิโอสแตทกัลวานอสแตท (Potentiostat/Galvanostat) เพื่อเริ่มการทดสอบ โดย 5 นาทีแรกจะบันทึกการเปลี่ยนแปลงของค่าศักย์ไฟฟ้าต่อเวลา เพื่อบันทึกค่า OCP และหลังจากนั้นบันทึกการเปลี่ยนแปลงระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้า โดยแสดงผลเป็น Polarization Curve

5. ทำการทดสอบซ้ำแบบเดียวกันอีก 2 ครั้ง

3.5.3 การวัดอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า

1. นำขี้นงานติดตั้งกับเซลล์ทดสอบการกัดกร่อนชนิดเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบ 3 ขั้ว Three-Electrode Electrochemical Cell และนำมาต่อเข้ากับเครื่องโพเทนชิโอสแตทกัลวานอสแตท (Potentiostat/Galvanostat) ซึ่งควบคุมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เหมือนการวัดทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดนามิกโพลาริเซชัน (Potentiodynamic Polarization Measurements)

2. เติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.6 โมลาร์ หรือ 3.5% ต่อน้ำหนักน้ำ ลงในเซลล์ทดสอบการกัดกร่อน โดยเทให้พองท่วมหน้าขี้นงาน

3. ตั้งค่าโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยใช้ค่าแอมพลิจูด (Amplitude) เท่ากับ 10 mV และ ช่วงความถี่ที่ใช้ในการทดสอบมีค่าตั้งแต่ 100 kHz ถึง 0.01 Hz

4. เปิดเครื่องโพเทนชิโอสแตทกัลวานอสแตท (Potentiostat/Galvanostat) เพื่อเริ่มการทดสอบ และเริ่มบันทึกการเปลี่ยนแปลงระหว่างความถี่และค่ากระแสไฟฟ้า โดยแสดงผลเป็น Nyquist Plot และ Bode Plot

5. ทำการทดสอบซ้ำแบบเดียวกันอีก 2 ครั้ง

บทที่ 4

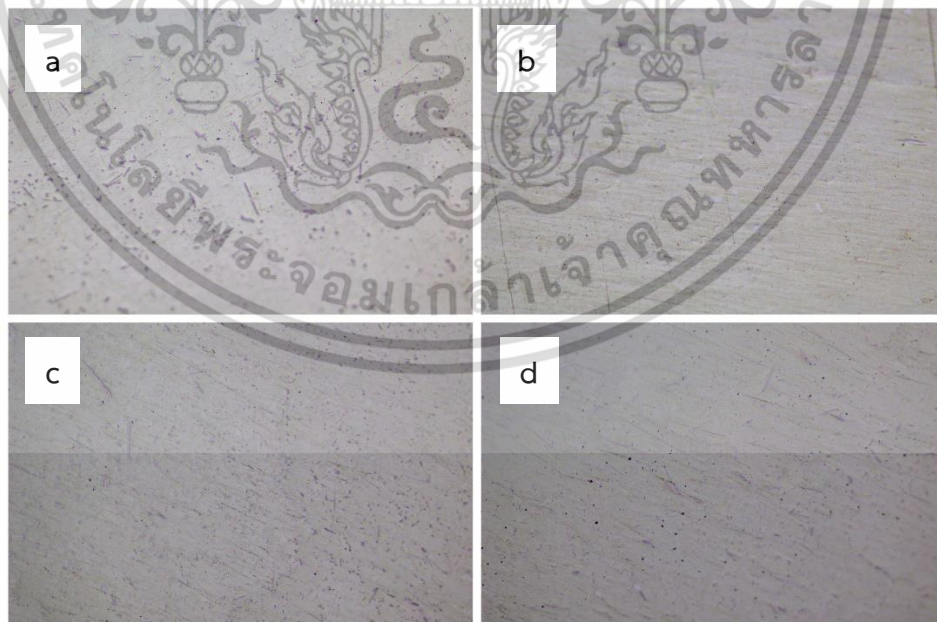
ผลการดำเนินงาน

ในการจัดทำปฏิญญาพันธบัตรฉบับนี้ คณะผู้จัดทำได้ทำการทดสอบชิ้นงานเพื่อศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนตามที่ได้วางแผนไว้ ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองจากวิธีการต่างๆ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การวิเคราะห์ผลทางโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb ก่อนการกัดกร่อน
2. การวิเคราะห์พฤติกรรมการกัดกร่อนในโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb
3. การวิเคราะห์ผลทางโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb หลังการกัดกร่อน

4.1 การวิเคราะห์ผลทางโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb ก่อนการกัดกร่อน

4.1.1 การวิเคราะห์ผลทางโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง



รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb หลังการขัดผิวชิ้นงาน ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ที่กำลังขยาย 50 เท่า

(a) 98.5Sn-1.5Cu, (b) 94.5Sn-1.5Cu-4Sb, (c) 92.5Sn-1.5Cu-6Sb, (d) 90.5Sn-1.5Cu-8Sb

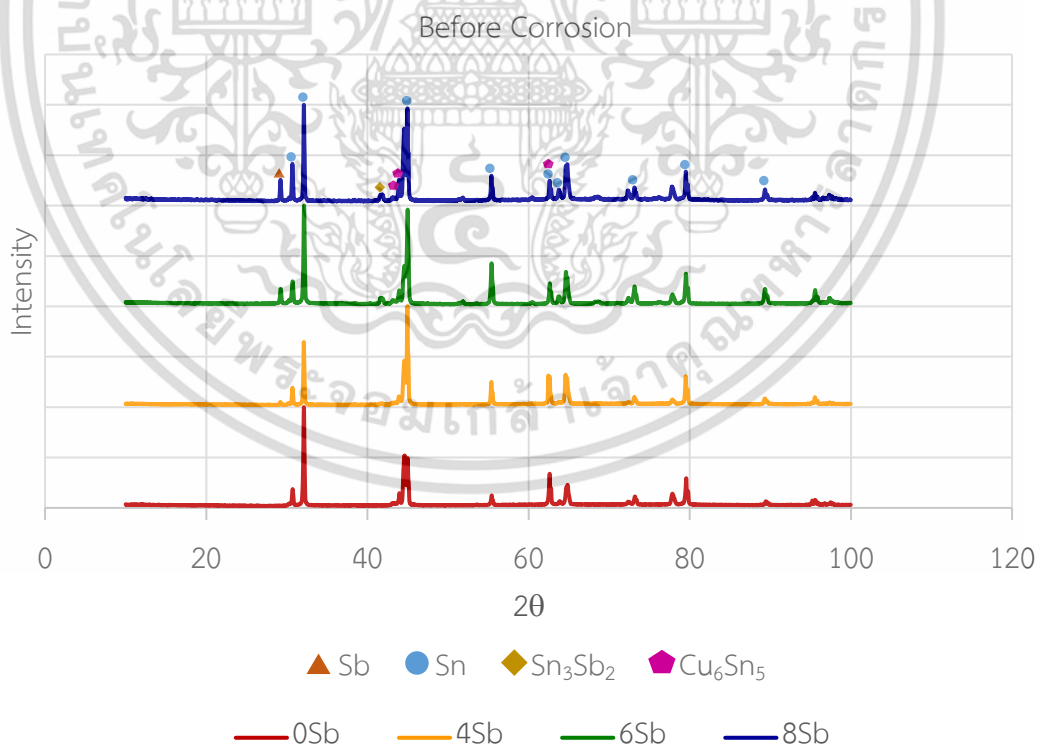
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb ทั้ง 4 ชนิด โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง จะพบว่า ลักษณะของโครงสร้างมีความคล้ายคลึงกัน โดยบริเวณที่ทำการตรวจสอบจะพบจุดสีขาวหรือจุดสว่าง และพบกลุ่มก้อนสีขาวที่มีลักษณะเป็นรูปร่างกระจายอยู่ทั่วบริเวณพื้นผิว ซึ่งในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงยังมีความละเอียดไม่เพียงพอที่จะสามารถระบุได้แน่ชัดว่าเป็นสารประกอบชนิดใด ดังนั้นจึงต้องตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) และวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยวิธี Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDX) อีกทั้งต้องวิเคราะห์องค์ประกอบสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction, XRD) ต่อไป

4.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ก่อนการกัดกร่อน

จากการทดสอบการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb โดยวิเคราะห์องค์ประกอบสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ก่อนการกัดกร่อน ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ได้ผลการวิเคราะห์พบว่าทั้ง 4 ชิ้นงานมีส่วนผสมตรงตามที่ต้องการทดสอบ โดยในชิ้นงานที่ไม่มีธาตุ Sb พบสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 และในชิ้นงานที่มีส่วนผสมของธาตุ Sb พบสารประกอบเชิงโลหะ 2 ชนิดคือ Cu_6Sn_5 และ Sn_3Sb_2

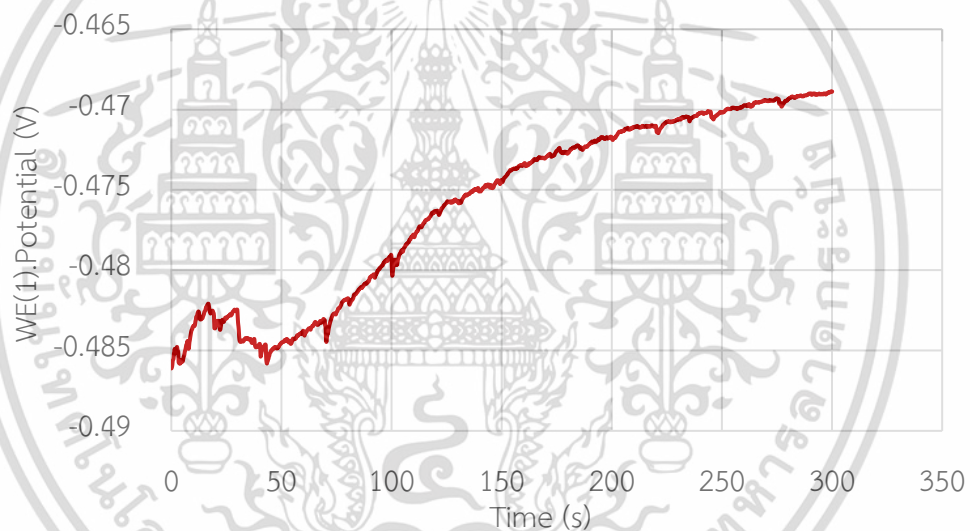


รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบสารด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) ก่อนการกัดกร่อน

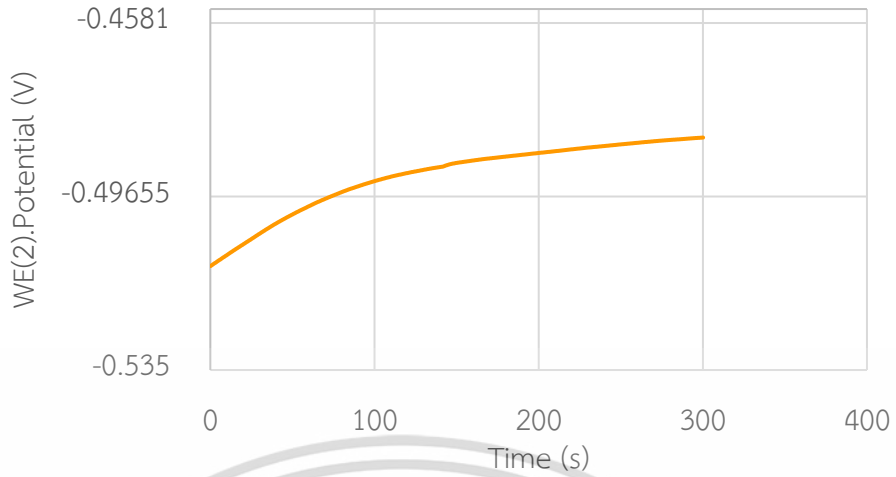
4.2 การวิเคราะห์พฤติกรรมการกัดกร่อนในโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb

4.2.1 การวิเคราะห์พฤติกรรมการกัดกร่อนในโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb ด้วยเทคนิคการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรมืด

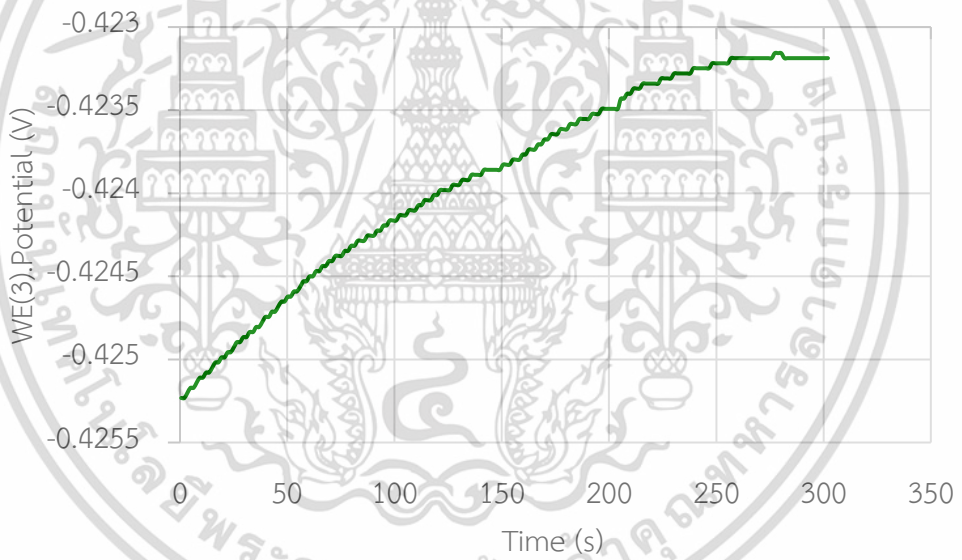
จากผลการทดสอบการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb โดยเทคนิคการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรมืด (Open-circuit Potential Measurements, OCP) ดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยมีการเติมธาตุ Sb ที่แตกต่างกัน พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรมืด (Open-circuit Potential, E_{ocp}) ของโลหะบัดกรีที่ไม่ได้เติมธาตุ Sb มีค่าเท่ากับ $-0.46893 V_{SCE}$ และเมื่อเติมธาตุ Sb ลงในโลหะบัดกรีที่สัดส่วน 94.5Sn-1.5Cu-4Sb พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรมืดมีค่าเท่ากับ $-0.46729 V_{SCE}$ ซึ่งมีค่ามากขึ้น เมื่อเติมธาตุ Sb ลงในโลหะบัดกรีที่สัดส่วน 92.5Sn-1.5Cu-6Sb พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรมืดมีค่าเท่ากับ $-0.42319 V_{SCE}$ และเมื่อเติมธาตุ Sb ที่สัดส่วน 90.5Sn-1.5Cu-8Sb พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรมืดมีค่า $-0.42319 V_{SCE}$ ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ Sb ที่ 6 wt.%



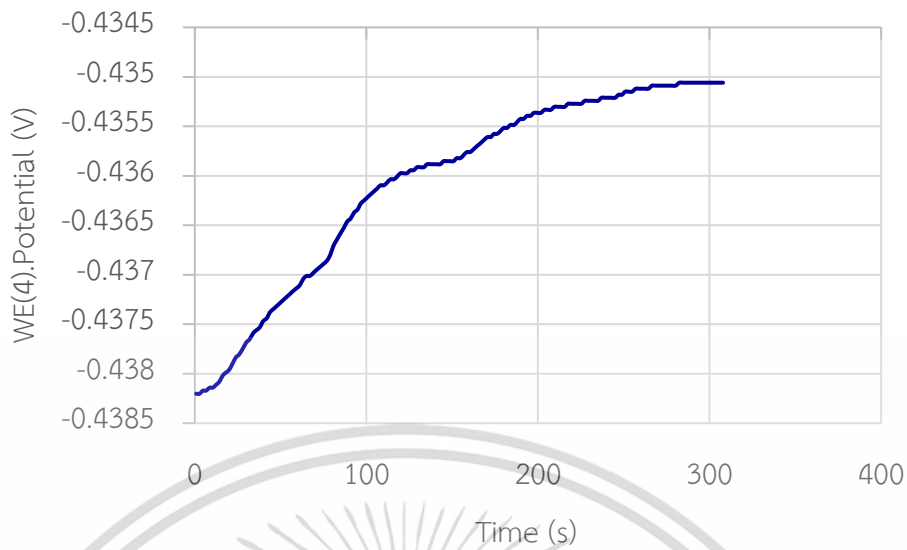
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Potential กับเวลาที่รอให้เสถียรของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 98.5Sn-1.5Cu



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Potential กับเวลาที่รอให้เสถียร ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 94.5Sn-1.5Cu-4Sb



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Potential กับเวลาที่รอให้เสถียร ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 92.5Sn-1.5Cu-6Sb

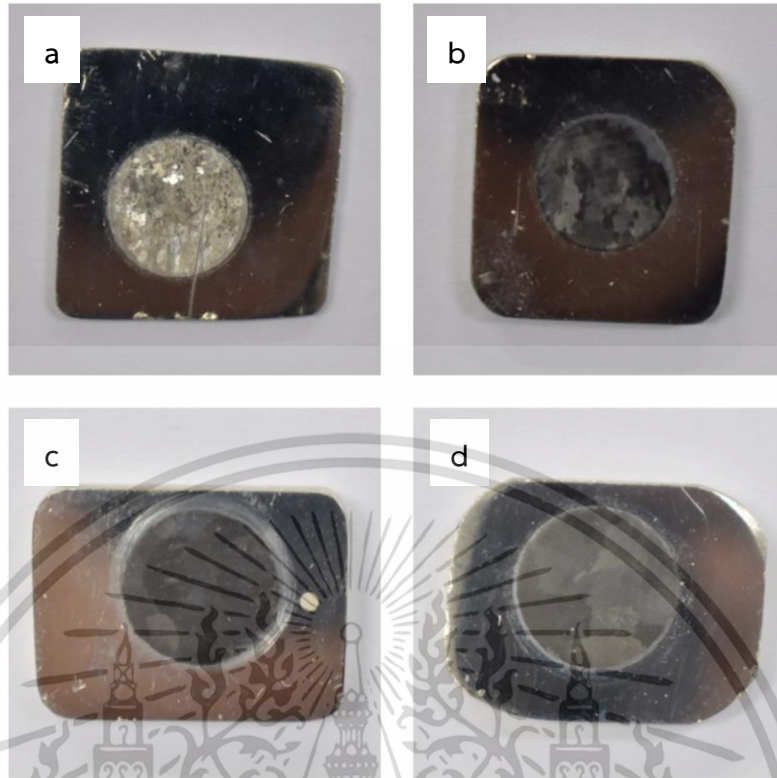


รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Potential กับเวลาที่รอให้เสถียรของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว 90.5Sn-1.5Cu-8Sb

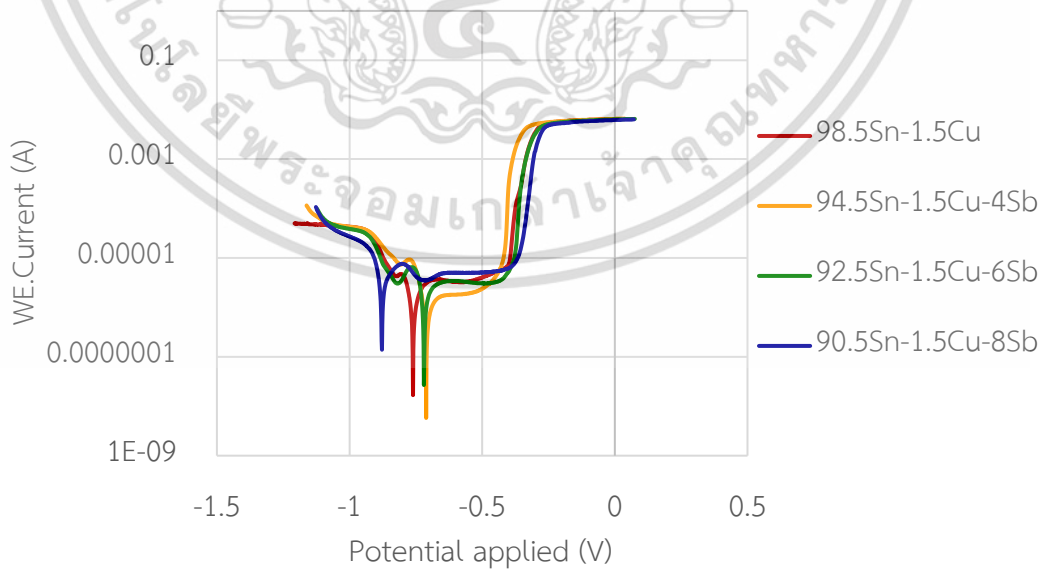
4.2.2 การวิเคราะห์พฤติกรรมการกัดกร่อนในโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb ด้วยเทคนิคการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดและเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชัน

จากผลทดสอบการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb โดยเทคนิค Potentiodynamic Polarization ดังแสดงในรูปที่ 4.7-4.8 โดยมีการเติมธาตุ Sb ที่แตกต่างกัน พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion Potential, E_{corr}) ของโลหะบัดกรีที่ไม่ได้เติมธาตุ Sb มีค่าเท่ากับ $-0.7588 V_{SCE}$ และเมื่อเติมธาตุ Sb ลงในโลหะบัดกรีที่สัดส่วน 94.5Sn-1.5Cu-4Sb พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่าเท่ากับ $-0.7048 V_{SCE}$ ซึ่งมีค่าไปทางบวกมากขึ้น เมื่อเติมธาตุ Sb ลงในโลหะบัดกรีที่สัดส่วน 92.5Sn-1.5Cu-6Sb พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่าเท่ากับ $-0.7132 V_{SCE}$ ซึ่งมีค่าไปทางลบเมื่อเปรียบเทียบกับ Sb ที่ 4 wt.% และเมื่อเติมธาตุ Sb ลงในโลหะบัดกรีที่สัดส่วน 90.5Sn-1.5Cu-8Sb พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่าต่ำที่สุดซึ่งเท่ากับ $-0.8780 V_{SCE}$ ซึ่งต่ำกว่าค่าที่ได้จากโลหะบัดกรีที่ไม่ได้เติมธาตุ Sb ถึง $0.1192 V_{SCE}$ การลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเป็นผลมาจากความสามารถในการออกซิไดซ์ของสารละลายที่ต่ำลง

นอกจากนี้อัตราการกัดกร่อน (Corrosion Rate) มีค่าต่ำลงเมื่อเติมธาตุ Sb ที่ 4 wt.% แต่เมื่อเพิ่มปริมาณธาตุ Sb กลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยในกรณีของโลหะบัดกรีที่ไม่ได้เติมธาตุ Sb พบว่า อัตราการกัดกร่อนมีค่าเท่ากับ 0.0162 mm/year และเมื่อเพิ่มปริมาณธาตุ Sb เป็น 4 wt.%, 6 wt.% และ 8 wt.% พบว่าอัตราการกัดกร่อน มีค่าเท่ากับ 0.0083 mm/year, 0.0166 mm/year และ 0.0340 mm/year ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 ภาพชิ้นงานผลิตภัณฑ์ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb
 หลังจากการทดสอบ Potentiodynamic Polarization
 (a) 98.5Sn-1.5Cu, (b) 94.5Sn-1.5Cu-4Sb, (c) 92.5Sn-1.5Cu-6Sb, (d) 90.5Sn-1.5Cu-8Sb



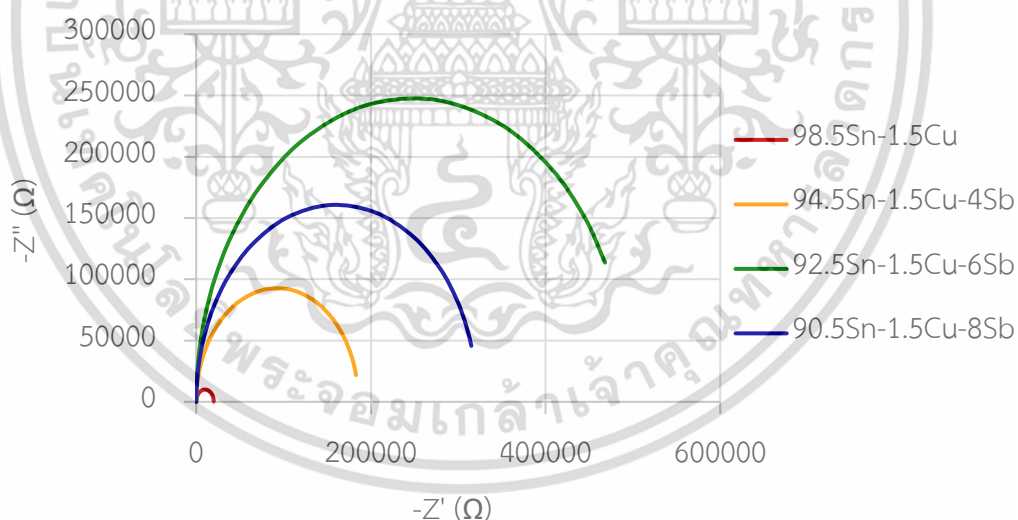
รูปที่ 4.8 กราฟ Potentiodynamic Polarization ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb

ตารางที่ 4.1 สัมประสิทธิ์ทางเคมีไฟฟ้าของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 wt.%

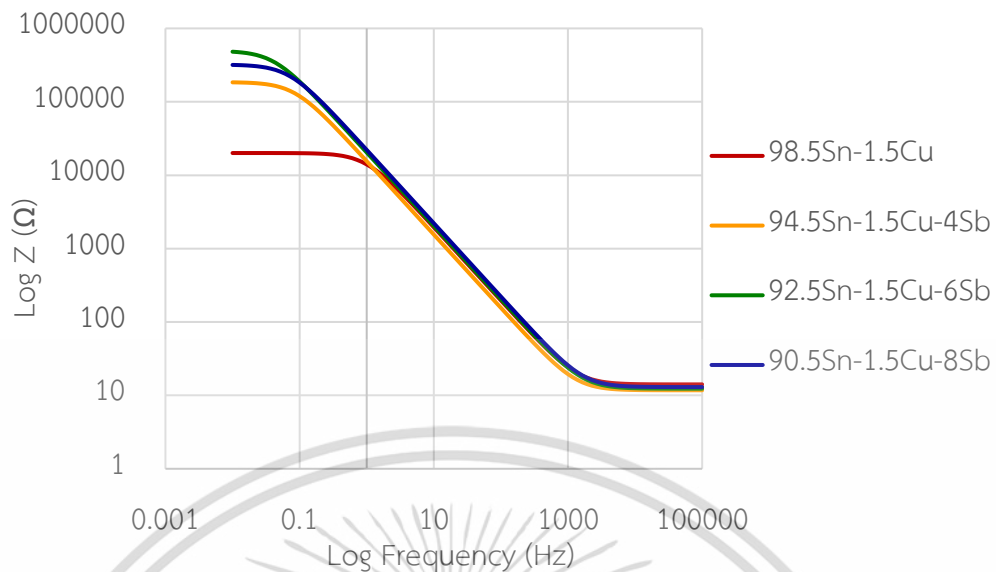
Alloy	E_{corr} (V)	I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Corrosion Rate (mm/year)
98.5Sn-1.5Cu	-0.7588	1.3985	0.0162
94.5Sn-1.5Cu-4Sb	-0.7048	0.7149	0.0083
92.5Sn-1.5Cu-6Sb	-0.7132	1.4330	0.0166
90.5Sn-1.5Cu-8Sb	-0.8780	2.9281	0.0340

4.2.3 การวิเคราะห์พฤติกรรมการกัดกร่อนในโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb ด้วยเทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy Measurements

จากผลทดสอบการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb โดยเทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy Measurements (EIS) ดังแสดงผลในรูปที่ 4.9 และ 4.10 โดยมีการเติมธาตุ Sb ที่แตกต่างกัน พบว่าในกรณีโลหะบัดกรีที่ไม่ได้เติมธาตุ Sb และเมื่อเติมธาตุ Sb เป็น 4 wt.%, 8 wt.% และ 6 wt.% ความต้านทานจริงและความต้านทานเสมือนของโลหะบัดกรีเพิ่มขึ้นตามลำดับ

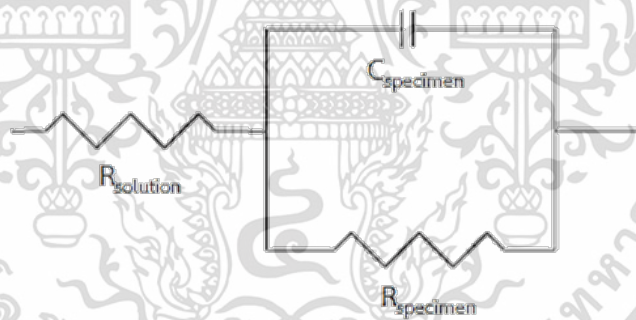


รูปที่ 4.9 กราฟ Nyquist Plot ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb



รูปที่ 4.10 กราฟ Bode Plot ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.9 และ 4.10 สามารถวิเคราะห์ห้วงจรของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 วงจร R(RC) ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม

นอกจากนี้ค่าความต้านทานและค่าตัวเก็บประจุในวงจร R(RC) ในกรณีของโลหะบัดกรีที่ไม่ได้เติมธาตุ Sb พบว่าความต้านทานของโลหะบัดกรีมีค่าเท่ากับ 20 kΩ และเมื่อเพิ่มปริมาณธาตุ Sb เป็น 4 wt.%, 6 wt.%, 8 wt.% พบว่าความต้านทานของโลหะบัดกรีมีค่าเท่ากับ 186 kΩ, 496 kΩ และ 332 kΩ ตามลำดับ และค่าตัวเก็บประจุของโลหะบัดกรีในกรณีของโลหะบัดกรีที่ไม่ได้เติมธาตุ Sb พบว่าค่าตัวเก็บประจุของโลหะบัดกรีมีค่าเท่ากับ 8.11 μF และเมื่อเพิ่มปริมาณธาตุ Sb เป็น 4 wt.%, 6 wt.%, 8 wt.% พบว่าค่าตัวเก็บประจุของโลหะบัดกรีมีค่าเท่ากับ 10.20 μF, 7.80 μF และ 7.18 μF ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ค่าความต้านทานของสารละลาย ค่าความต้านทานและค่าเก็บประจุในวงจร R(RC) ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 wt.%

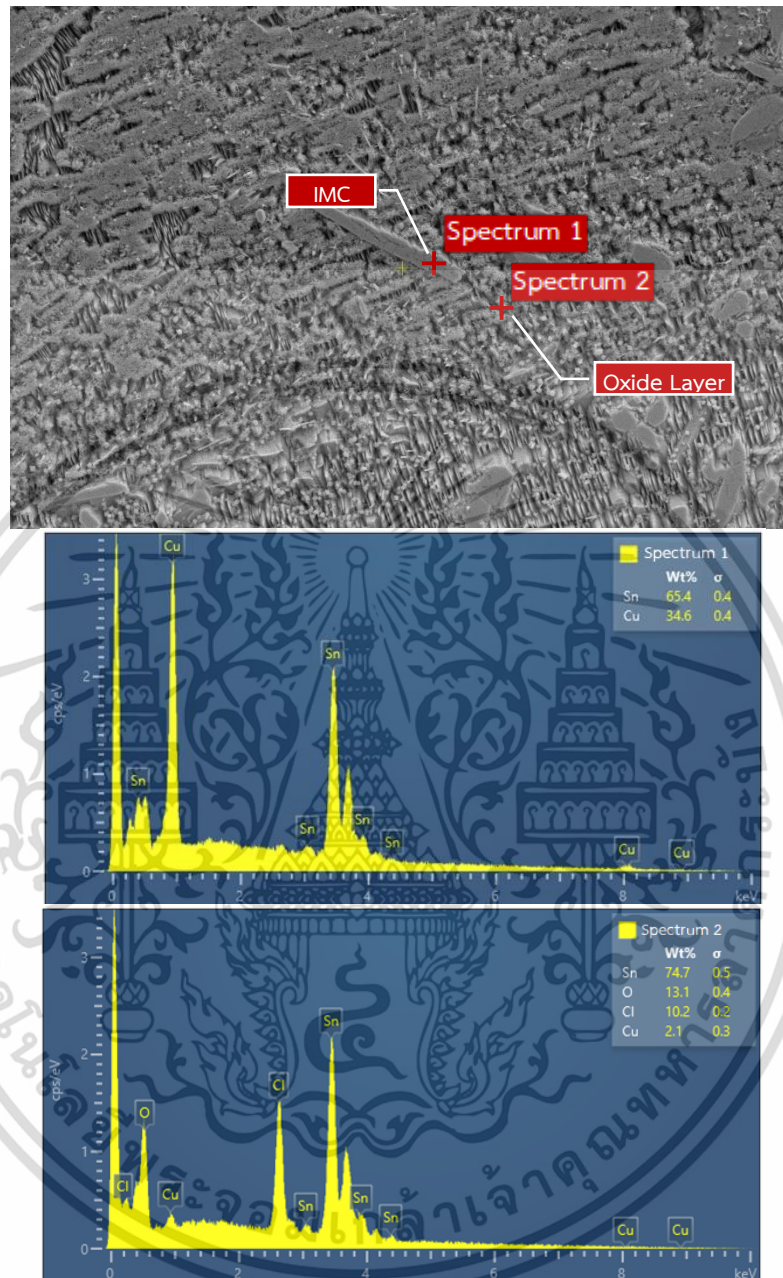
Alloy	R _{Solution} (Ω)	R _{specimen} (kΩ)	C _{specimen} (μF)
98.5Sn-1.5Cu	14.1	20.1	8.11
94.5Sn-1.5Cu-4Sb	11.7	186	10.20
92.5Sn-1.5Cu-6Sb	12.3	496	7.80
90.5Sn-1.5Cu-8Sb	13.0	332	7.18

4.3 การวิเคราะห์ผลทางโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb หลังการกัดกร่อน

4.3.1 การวิเคราะห์ผลทางโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb หลังการกัดกร่อนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากเทคนิค Potentiodynamic Polarization โดยตรวจสอบผลทางโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแต่ละชนิดที่ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) และวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยวิธี Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDX) ซึ่งจะได้ผลการทดสอบดังต่อไปนี้

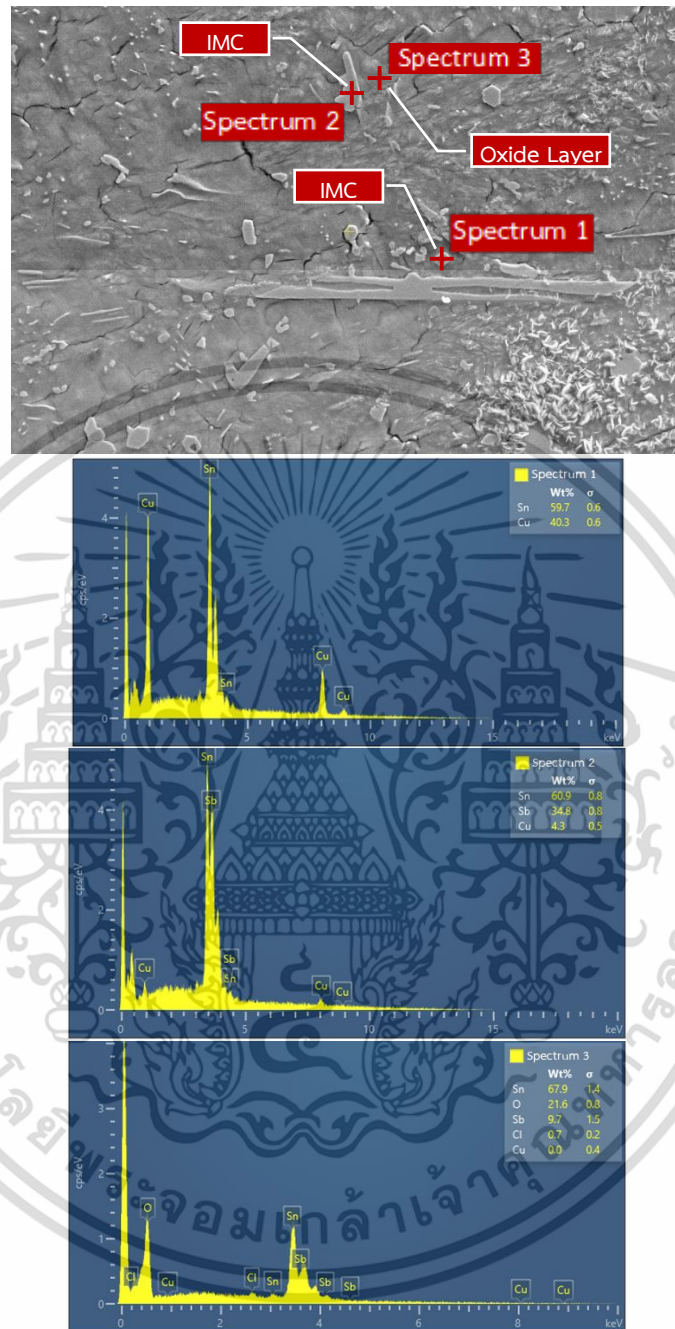
1. โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 98.5Sn-1.5Cu



รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1000 เท่า และสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 98.5Sn-1.5Cu

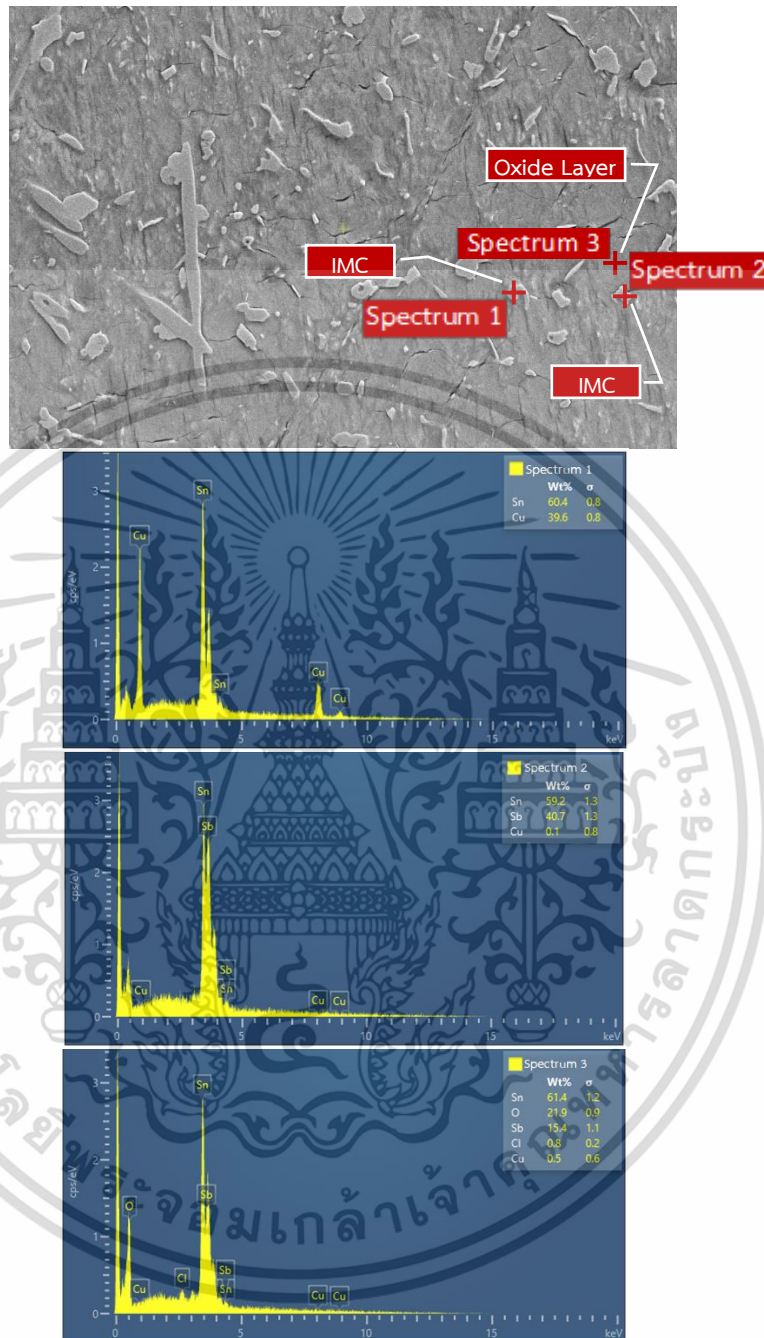
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 94.5Sn-1.5Cu-4Sb



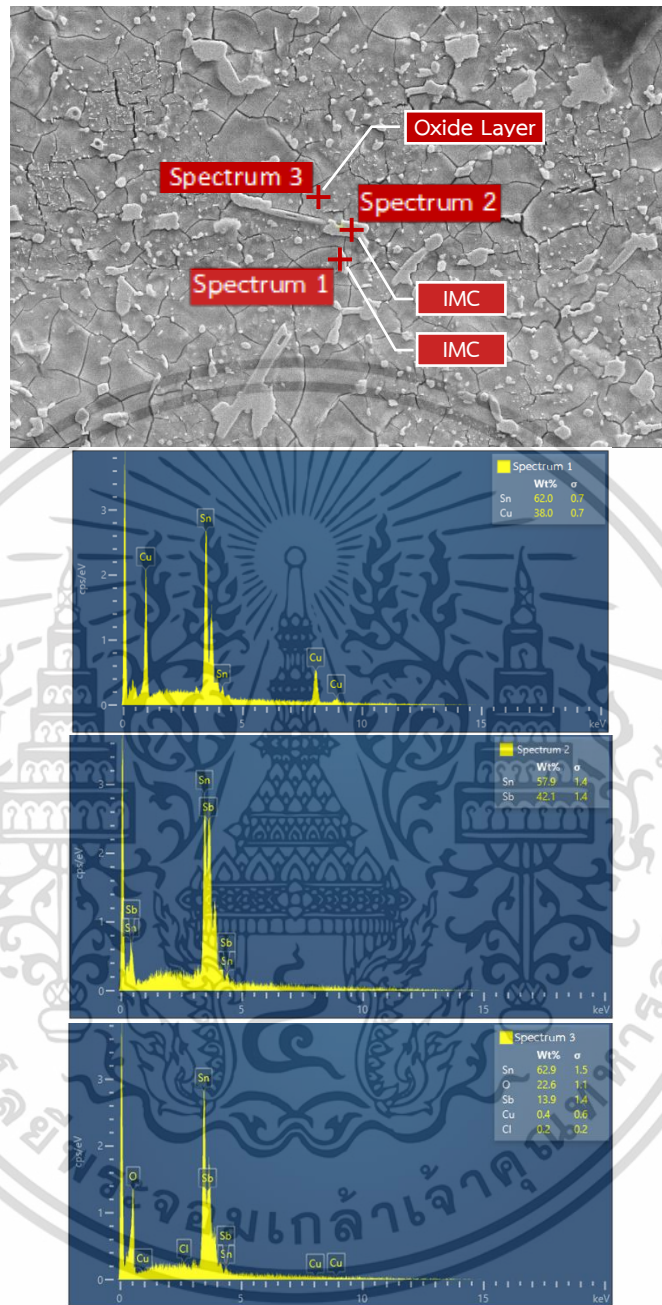
รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1000 เท่า และสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 94.5Sn-1.5Cu-4Sb

3. โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 92.5Sn-1.5Cu-6Sb



รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1000 เท่า และสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 92.5Sn-1.5Cu-6Sb

4. โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 90.5Sn-1.5Cu-8Sb



รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1000 เท่า และสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 90.5Sn-1.5Cu-8Sb

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วทั้ง 4 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 4.12 - 4.15 พบว่าลักษณะโครงสร้างจุลภาคหลังการกัดกร่อนมีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยบริเวณที่ตรวจสอบจะพบกลุ่มก้อนสีขาวซึ่งเป็นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic Compounds, IMCs) กระจายอยู่ทั่วพื้นผิว และเมื่อเติมธาตุพลวง (Sb) ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดสารประกอบเชิงโลหะเพิ่มมากขึ้น

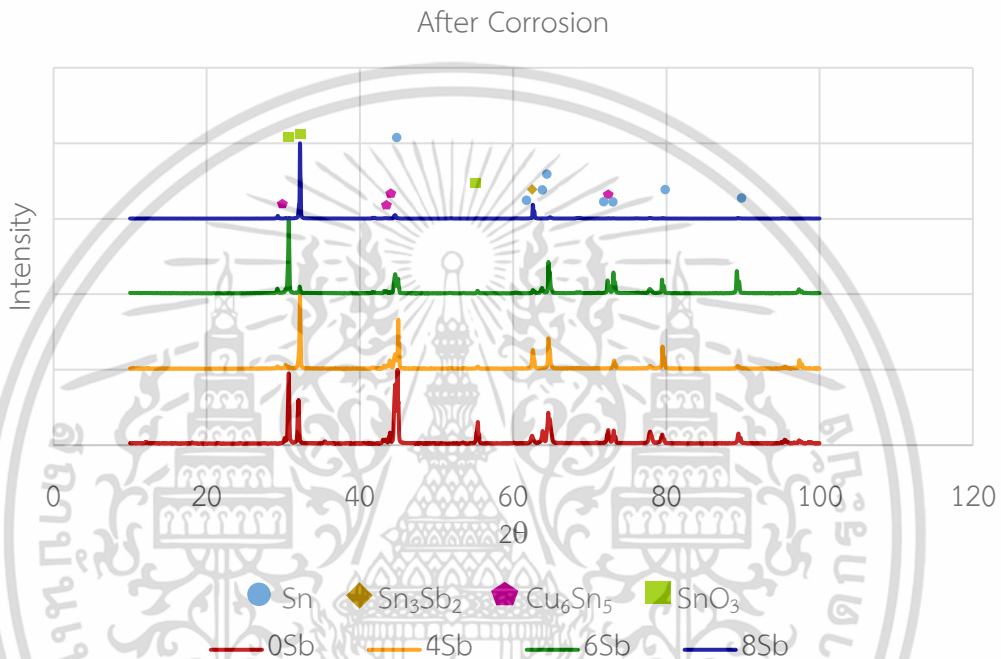
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิค EDX ดังแสดงในตารางที่ 4.3 โดยมีการเติมธาตุ Sb ที่แตกต่างกัน พบว่าพื้นผิวโดยส่วนมากของโลหะบัดกรีแต่ละชนิดเกิดขึ้นฟิล์มออกไซด์ของดีบุก และพบสารประกอบเชิงโลหะกระจายตัวอยู่บนชั้นฟิล์ม โดยในโลหะบัดกรีที่ไม่ได้เติมธาตุ Sb บริเวณพื้นผิวพบ SnO_3 และพบสารประกอบเชิงโลหะ คือ Cu_6Sn_5 เมื่อเติมธาตุ Sb ที่ปริมาณ 4 wt.%, 6 wt.% และ 8 wt.% พบว่าที่บริเวณพื้นผิวชั้นฟิล์มออกไซด์ของดีบุก คือ SnO_3 และพบสารประกอบเชิงโลหะ 2 ชนิด ได้แก่ Cu_6Sn_5 และ Sn_3Sb_2

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ธาตุโดยใช้ EDX ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb

Alloys	Oxide Layer		IMCs 1		IMCs 2	
	Sn (at%)	O (at%)	Sn (at%)	Cu (at%)	Sn (at%)	Sb (at%)
98.5Sn-1.5Cu	35.63	46.25	50.24	49.76	-	-
94.5Sn-1.5Cu-4Sb	28.27	66.80	44.21	55.79	59.19	32.93
92.5Sn-1.5Cu-6Sb	25.28	67.04	44.97	55.03	59.79	40.05
90.5Sn-1.5Cu-8Sb	25.64	68.20	46.61	53.39	58.56	41.44

4.3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ หลังการกัดกร่อน

จากการทดสอบการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb โดยวิเคราะห์องค์ประกอบสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) หลังการกัดกร่อน ดังแสดงในรูปที่ 4.16 พบว่าชิ้นงานทดสอบทั้ง 4 ส่วนผสมมีผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนคือ SnO₃ ชิ้นงานที่ไม่ได้เติมธาตุ Sb พบสารประกอบเชิงโลหะ คือ Cu₆Sn₅ และชิ้นงานที่มีส่วนผสมของธาตุ Sb พบสารประกอบเชิงโลหะ 2 ชนิดคือ Cu₆Sn₅ และ Sn₃Sb₂



รูปที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบสารด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) หลังการกัดกร่อน

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงาน

ในการจัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ จัดทำเพื่อศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-Cu-Sb โดยทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธี Electrochemical ได้แก่ Open-circuit Potential Measurement (OCP), Potentiodynamic Polarization Measurement และ Electrochemical Impedance Spectroscopy Measurement (EIS) และวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิค SEM Analysis, เทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectrophotometry (EDX) และเทคนิค X-ray Diffractometer (XRD) โดยได้รวบรวมข้อมูลนำมาวิเคราะห์ สามารถสรุปผลการศึกษา ข้อจำกัดในการทำงานวิจัย และข้อเสนอแนะระหว่างการดำเนินงานได้ดังต่อไปนี้

1. สรุปผลการทดลอง
2. ข้อจำกัดในการทำงานวิจัย
3. ข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการตรวจสอบและวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-1.5Cu-xSb ทั้ง 4 ชนิด ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เปรียบเทียบทั้งก่อนและหลังทำการกัดกร่อนพบว่าในเนื้อโลหะบัดกรีเมื่อไม่ได้เติมธาตุ Sb มีสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic Compounds) กระจายอยู่ทั่วเนื้อโลหะ และเมื่อเติมธาตุ Sb พบว่า สารประกอบเชิงโลหะมีปริมาณเพิ่มขึ้น

จากการทดสอบการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb โดยเทคนิค Open-circuit Potential Measurements และ Potentiodynamic Polarization พบว่าเมื่อเติมปริมาณธาตุ Sb ลงในส่วนผสมของโลหะบัดกรี ส่งผลให้โลหะบัดกรีมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนได้ดีขึ้น เนื่องจากอัตราการกัดกร่อนลดลง แต่เมื่อเติมธาตุ Sb ที่ 6 wt.% ขึ้นไป ส่งผลให้โลหะบัดกรีมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนลดลง

จากการทดสอบการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb โดยเทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy Measurements (EIS) พบว่า เมื่อเติมธาตุ Sb ลงในส่วนผสมของโลหะบัดกรี ส่งผลให้ความต้านทานของโลหะบัดกรีเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเติม ธาตุ Sb ที่ 8 wt.% ความต้านทานของโลหะบัดกรีลดลง และพบว่า เมื่อเติมปริมาณธาตุ Sb ส่งผลให้ความเก็บประจุของโลหะบัดกรีมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเติมธาตุ Sb ในปริมาณที่มากขึ้น ความเก็บประจุของโลหะ

บัดกรีมีค่าลดลง ซึ่งหมายความว่าในการเติมธาตุ Sb ส่งผลให้เกิดความต้านทานการกัดกร่อนในระยะยาวดีขึ้น เนื่องจากเมื่อค่าความเก็บประจุลดลงส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานของโลหะบัดกรีเพิ่มขึ้น

จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแต่ละชนิดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM), วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยวิธี Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDX) และวิเคราะห์องค์ประกอบสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ก่อน-หลังการทดสอบการกัดกร่อน พบว่าลักษณะโครงสร้างจุลภาคหลังการกัดกร่อนมีลักษณะคล้ายคลึงกัน พื้นผิวโดยส่วนมากของโลหะบัดกรีแต่ละชนิดเกิดขึ้นฟิล์มออกไซด์ของดีบุก โดยในโลหะบัดกรีที่ไม่ได้เติมธาตุ Sb พบสารประกอบเชิงโลหะชนิดเดียวคือ Cu_6Sn_5 และเมื่อเติมธาตุ Sb ที่ปริมาณ 4 wt.%, 6 wt.% และ 8 wt.% พบสารประกอบเชิงโลหะ 2 ชนิด ได้แก่ Cu_6Sn_5 และ Sn_3Sb_2

5.2 ข้อจำกัดในการทำงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดในการทำงานต่างๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ในการทำการทดสอบการกัดกร่อน ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิระหว่างการทดสอบ
2. ไม่มีการสอบเทียบเครื่องมือวัดก่อนการทดสอบการกัดกร่อน ส่งผลให้ค่าที่ได้อาจเกิดคลาดเคลื่อนได้
3. ระยะเวลาในการทำวิจัยน้อยกว่าที่วางแผน เนื่องจากได้รับผลกระทบจากสถานการณ์ COVID-19

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพอื่นๆ และโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแต่ละชนิดเพิ่มเติม
2. ควรมีการศึกษาธาตุอื่นๆ ที่สามารถนำมาเพิ่มในโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วได้ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติอื่นเพิ่มเติมและพัฒนาเป็นโลหะบัดกรีชนิดใหม่
3. ระหว่างกระบวนการทดสอบการกัดกร่อนควรควบคุมปัจจัยอื่นๆ รวมด้วย เช่น อุณหภูมิของสารละลายที่ใช้ในการทดสอบ ฯลฯ
4. ควรมีระยะเวลาในการทดสอบชิ้นงานมากกว่าที่ควร เนื่องจากช่วงเวลาที่ทำการทดสอบได้รับผลกระทบจากสถานการณ์ COVID-19 ทำให้ไม่สามารถทำการทดสอบได้เพิ่มเติม

[12] จิตวัต เทียมเมือง และภูเบศ เลิศพรเจริญ. (2558). การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของ โลหะบัดกรีตีบุก-ทองแดง-พลวง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพมหานคร: 5 หน้า

[13] กัลยรัตน์ ธารงวินิจฉัย. (2555). การศึกษาอิทธิพลของธาตุเจือจุ่มต่อโครงสร้างจุลภาคและ ปฏิกริยารอยต่อของโลหะบัดกรี Sn-0.6Cu-0.05Ni-0.005Ge. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพมหานคร: 2 หน้า

[14] กรรณชัย กัลยาศิริ. (2551). กรรมวิธีการผลิต. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[15] The Pb-Sn phase diagram. (2547). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.researchgate.net/figure/The-Pb-Sn-phase-diagram_fig1_291162603 [สืบค้นเมื่อ 30 กันยายน 2562]

[16] สมนึก วัฒนศรีสกุล, การทดสอบวัสดุ, 2549. กรุงเทพฯ : กรีนเวิลด์ มีเดีย

[17] แหล่งตีบุกและประโยชน์ตีบุก. (ม.ป.ป.). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.siamchemi.com/%E0%B8%94%E0%B8%B5%E0%B8%9A%E0%B8%B8%E0%B8%81/> [สืบค้นเมื่อ 27 ตุลาคม 2562]

[18] Tin-Sn. (ม.ป.ป.). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.lenntech.com/periodic/elements/sn.htm> [สืบค้นเมื่อ 27 ตุลาคม 2562]

[19] มลพิษโลหะหนัก. (ม.ป.ป.). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://il.mahidol.ac.th/e-media/ecology/chapter2/chapter2_airpolution11.htm [สืบค้นเมื่อ 18 มกราคม 2563]

[20] ประโยชน์และพิษทองแดง. (ม.ป.ป.). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.siamchemi.com/%E0%B8%97%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B9%81%E0%B8%94%E0%B8%87/> [สืบค้นเมื่อ 18 มกราคม 2563]

[21] Copper-Cu. (ม.ป.ป.). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.lenntech.com/periodic/elements/cu.htm> [สืบค้นเมื่อ 27 ตุลาคม 2562]

[22] คุณสมบัติทองแดง. (ม.ป.ป.). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CopperProperties&LN=TH> [สืบค้นเมื่อ 27 ตุลาคม 2562]

[23] ความเป็นพิษของทองแดง. (ม.ป.ป.). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://webdb.dmsc.moph.go.th/ifc_toxic/a_tx_1_001c.asp?info_id=296 [สืบค้นเมื่อ 18 มกราคม 2563]

[24] พลวง. (2562). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%9E%E0%B8%A5%E0%B8%A7%E0%B8%87> [สืบค้นเมื่อ 27 ตุลาคม 2562]

- [25] Antimony–Sb. (ม.ป.ป.). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
<https://www.lenntech.com/periodic/elements/sb.htm> [สืบค้นเมื่อ 27 ตุลาคม 2562]
- [26] Antimony. (ม.ป.ป.). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
<https://web.ku.ac.th/schoolnet/snet5/topic2/Sb.html> [สืบค้นเมื่อ 27 ตุลาคม 2562]
- [27] มนต์รี ทองอ่อน. (2543). การวิเคราะห์หาปริมาณพลวงโดยวิธี Iodometry. หน้า 6
- [28] โทษของแร่พลวง. (ม.ป.ป.). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
<http://cpairat.tripod.com/Stibnite.htm> [สืบค้นเมื่อ 18 มกราคม 2563]
- [29] นฎาประไพ พิษย์รัตน์. (2561). การศึกษาโครงสร้างจุลภาคและความแข็งของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-Cu-Sb. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพมหานคร: 8 หน้า
- [30] The Cu-Sn phase diagram. (ม.ป.ป.). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
<https://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/figure-1-shows-phase-diagram-bronze-alloy-copper-tin--using-phase-diagram-describe-solidif-q38298657> [สืบค้นเมื่อ 30 ตุลาคม 2562]
- [31] The Sn-Cu phase diagram. (2560). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
https://www.researchgate.net/figure/The-Sn-rich-corner-of-the-Sn-Cu-phase-diagram_fig3_312057010 [สืบค้นเมื่อ 30 ตุลาคม 2562]
- [32] Sn-Sb phase diagram. (2543). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
https://www.researchgate.net/figure/Sn-Sb-phase-diagram-25_fig12_226788231 [สืบค้นเมื่อ 30 ตุลาคม 2562]
- [33] The Cu–Sb phase diagram. (2555). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
https://www.researchgate.net/figure/New-version-of-the-Cu-Sb-phase-diagram_fig4_257450381 [สืบค้นเมื่อ 30 ตุลาคม 2562]
- [34] Fürtauer and Flandorfer, A new experimental phase diagram investigation of Cu–Sb, *Monatsh Chem*, 2012, 143: 1275-1287.
- [35] Phase equilibria of Sn–Sb–Cu system. (2555). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0254058411010042> [สืบค้นเมื่อ 30 ตุลาคม 2562]
- [36] Corrosion. (ม.ป.ป.). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
http://ie.eng.cmu.ac.th/IE2014/elearnings/2014_08/17/%E0%B8%9A%E0%B8%97%E0%B8%97%E0%B8%B5%E0%B9%88%20%20Corrosion.pdf [สืบค้นเมื่อ 27 มีนาคม 2563]

- [37] การกัดกร่อนและการป้องกัน. (2560). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.scimath.org/lesson-chemistry/item/7182-2017-06-05-14-44-28> [สืบค้นเมื่อ 27 มีนาคม 2563]
- [38] แม้น อมรสิทธิ์ และสมชัย อัครทิวา. (2547). วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพฯ : ท้อป.
- [39] Galvanic Corrosion. (2560). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://facilityexecutive.com/2017/06/galvanic-corrosion-what-to-do-about-it/> [สืบค้นเมื่อ 27 มีนาคม 2563]
- [40] Pitting Corrosion. (2561). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.nuflowmidwest.com/2-types-of-corrosion-that-occur-in-industrial-piping-systems/> [สืบค้นเมื่อ 27 มีนาคม 2563]
- [41] Intergranular Corrosion. (ม.ป.ป.). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://corrosion-doctors.org/Forms-intergranular/intergranular.htm> [สืบค้นเมื่อ 27 มีนาคม 2563]
- [42] ศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐาน. (ม.ป.ป.). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.mwit.ac.th/~webmaster/mssql/data/chem/t2040103/EC-electrochem-text.pdf> [สืบค้นเมื่อ 25 พฤศจิกายน 2562]
- [43] Standard Reduction Potentials table. (ม.ป.ป.). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.conejousd.org/Portals/49/Departments/Science/ponce/H%20Chem/Stand%20Reduction%20Potentials.pdf?ver=2019-04-18-232913-410> [สืบค้นเมื่อ 25 พฤศจิกายน 2562]
- [44] ประโยชน์ของค่า E^0 . (ม.ป.ป.). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://web.ku.ac.th/schoolnet/snet5/topic9/benefef0.html> [สืบค้นเมื่อ 25 พฤศจิกายน 2562]
- [45] พฤติกรรมการกัดกร่อนโลหะ. (2560). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.tistr.or.th/tistrblog/?tag=พฤติกรรมการกัดกร่อนโลหะ> [สืบค้นเมื่อ 30 ตุลาคม 2562]
- [46] Open-circuit Potential. (2560). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.corrosionpedia.com/definition/834/open-circuit-potential-ocp> [สืบค้นเมื่อ 30 ตุลาคม 2562]
- [47] การประเมินผลพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะจากเส้นโค้งโพลาริเซชัน. (2560). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.tistr.or.th/tistrblog/?p=2701> [สืบค้นเมื่อ 30 ตุลาคม 2562]

[48] วรพรรณ พรหมศิลา. (2556). อิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า. ใน: การศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้าของตัวตรวจวัดพอลิอะนิลีนสำหรับวัดการนำไฟฟ้าแบบไม่สัมผัส. วรพรรณ พรหมศิลา, กรุงเทพมหานคร. 5-7

[49] Bode and Nyquist Plot. (2562). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.palmsenscorrosion.com/knowledgebase/bode-and-nyquist-plot/> [สืบค้นเมื่อ 30 ตุลาคม 2562]

[50] Capacitor. (2561). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.corrosionpedia.com/definition/6458/capacitor> [สืบค้นเมื่อ 27 มีนาคม 2563]

[51] สูตรการหาค่า X_C . (ม.ป.ป.). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.hs8jyx.com/html/xc_xl.html [สืบค้นเมื่อ 27 มีนาคม 2563]

[52] อรจิรา เตียวณิษฐ์. การเตรียมชิ้นงานสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหวิทยา. สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[53] การศึกษาโครงสร้างจุลภาค (Microstructure). (2555). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.gotoknow.org/posts/334989> [สืบค้นเมื่อ 20 มีนาคม 2563]

[54] สุกัญญา อุณารัตน์. (2559). ผลกระทบของธาตุเงินต่อโครงสร้างจุลภาคและความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-xAg. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพมหานคร: 10 หน้า

[55] กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง. (2555). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.mic.eng.ku.ac.th/facilities-detail.php?id_sub=42&id=139 [สืบค้นเมื่อ 25 พฤศจิกายน 2562]

[56] กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนสแกน (SEM). (ม.ป.ป.). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html> [สืบค้นเมื่อ 25 พฤศจิกายน 2562]

[57] กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนสแกน (SEM). (2554). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://metallurgyfordummies.com/th/characterization-of-materials.html> [สืบค้นเมื่อ 25 พฤศจิกายน 2562]

[58] เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึก (X-ray Diffractometer, XRD). (ม.ป.ป.). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://science.kmutt.ac.th/sic/index.php/physics/16-x-ray-Diffraction> [สืบค้นเมื่อ 25 พฤศจิกายน 2562]

[59] Hunter, Stuart Michael (2008) A structural and reactivity study of lithium molybdenum nitride

[60] ยุทธนา ทิพย์ทิพากร, “การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของวัสดุ”, 2013. คณะ

วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสวนดุสิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

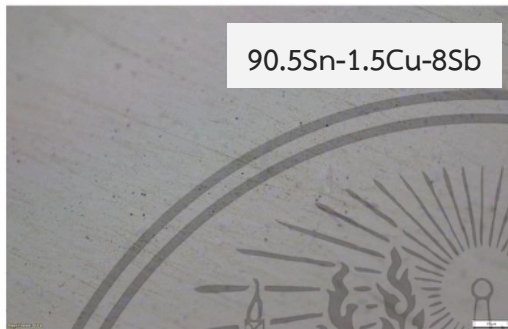
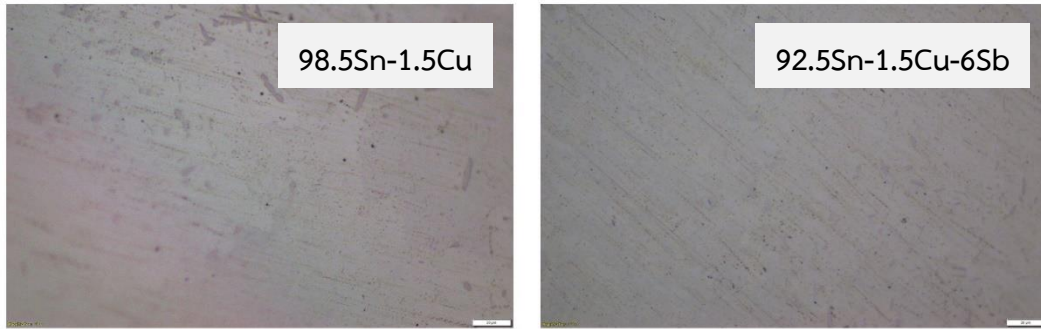
- [61] น้ำ DI. (ม.ป.ป.). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.ninety-ninero.com/content/DI.pdf> [สืบค้นเมื่อ 13 มีนาคม 2563]
- [62] การผลิตน้ำ DI. (2557). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.duan-daw.com/article/12/%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%9C%E0%B8%A5%E0%B8%B4%E0%B8%95%E0%B8%99%E0%B9%89%E0%B8%B3-di-deionized-water> [สืบค้นเมื่อ 13 มีนาคม 2563]
- [63] MINITOM. (ม.ป.ป.). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.struers.com/en/Products/Cutting/Cutting-equipment/Minitom#minitom-benefits> [สืบค้นเมื่อ 24 กุมภาพันธ์ 2563]
- [64] LabolPol-1. (ม.ป.ป.). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.ung.si/en/research/materials-research-laboratory/equipment/> [สืบค้นเมื่อ 24 กุมภาพันธ์ 2563]
- [65] Biological Microscope. (ม.ป.ป.). [ออนไลน์]. 2017. แหล่งที่มา: <http://www.microscopesociety.com/upright-microscopes/biological-microscope-cx33/> [สืบค้นเมื่อ 24 กุมภาพันธ์ 2563]
- [66] X-Ray Diffractometer. (2561). [ออนไลน์]. 2018. แหล่งที่มา: <http://sciins.science.kmitl.ac.th/instrumentDetail/4--xd-x-ray-diffractometer-> [สืบค้นเมื่อ 24 กุมภาพันธ์ 2563]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผก 1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 20 เท่า



รูปที่ ผก 2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 100 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผก 3 แสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 90.5Sn-1.5Cu-8Sb จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 200 เท่า



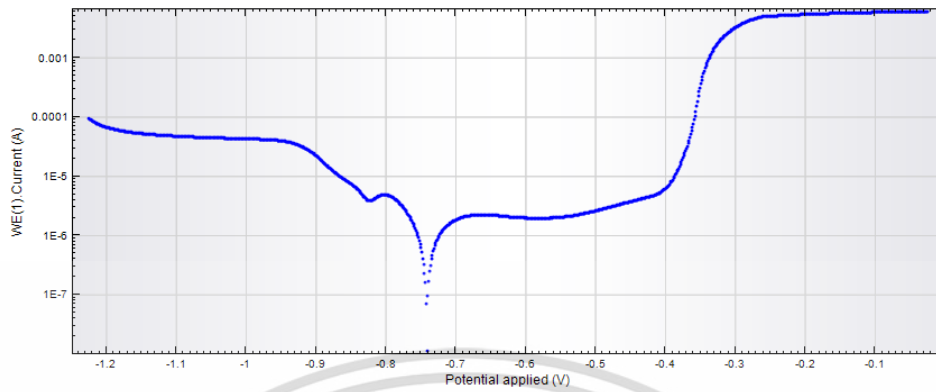


ภาคผนวก ข

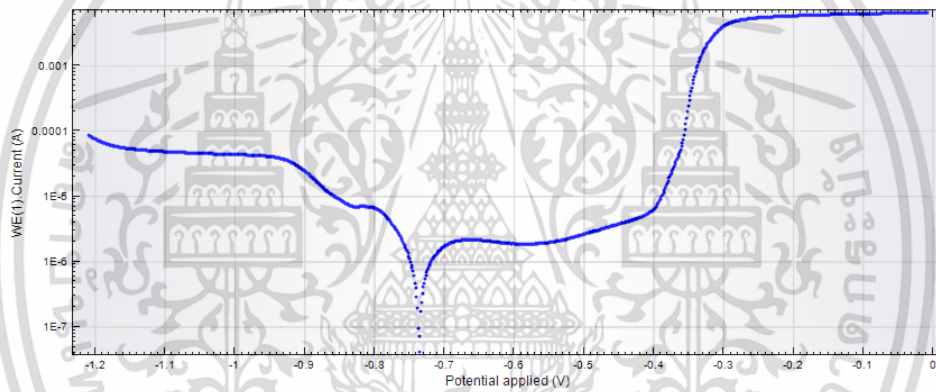
ผลทดสอบการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb
โดยเทคนิค Potentiodynamic Polarization

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ผลทดสอบของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 98.5Sn-1.5Cu

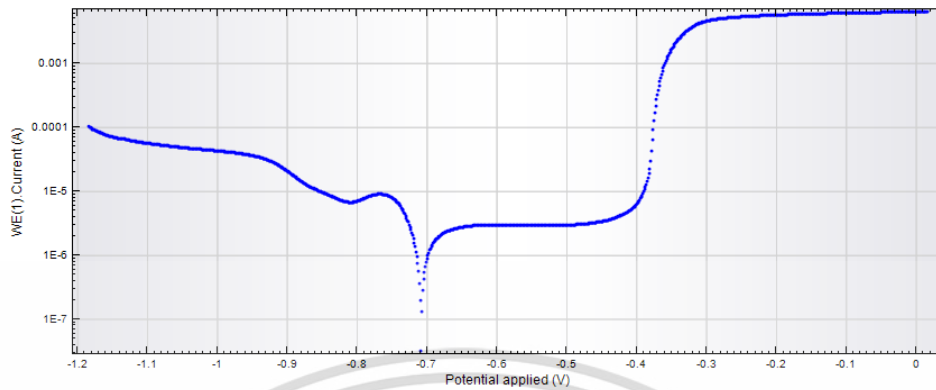


รูปที่ ผข 1 กราฟ Potentiodynamic Polarization ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 98.5Sn-1.5Cu

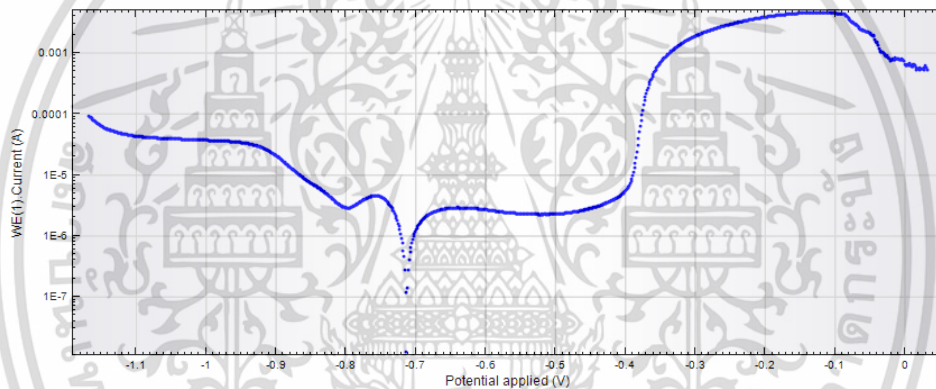


รูปที่ ผข 2 กราฟ Potentiodynamic Polarization ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 98.5Sn-1.5Cu

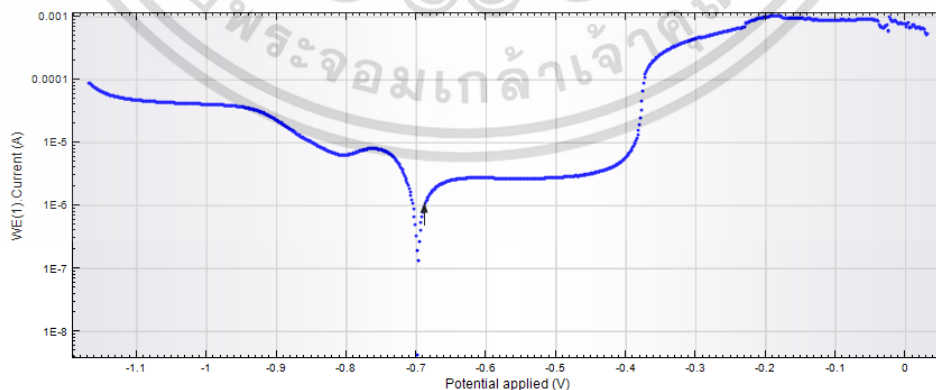
2. ผลทดสอบของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 94.5Sn-1.5Cu-4Sb



รูปที่ ๓ ภาพ Potentiodynamic Polarization
ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 94.5Sn-1.5Cu-4Sb

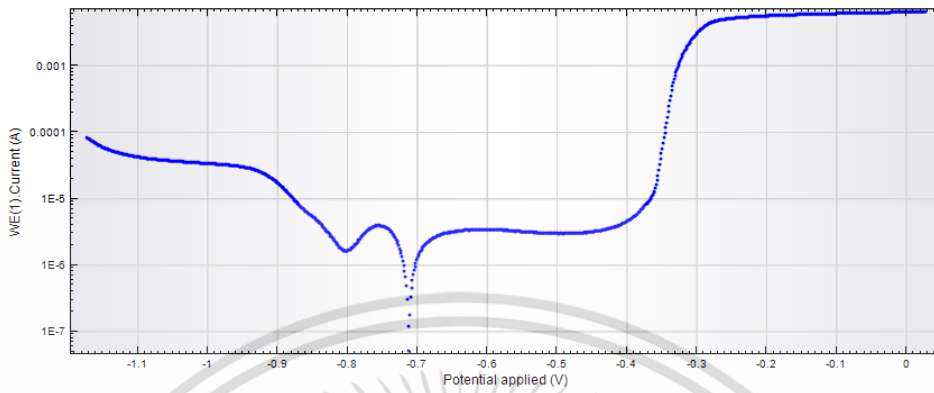


รูปที่ ๔ ภาพ Potentiodynamic Polarization
ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 94.5Sn-1.5Cu-4Sb

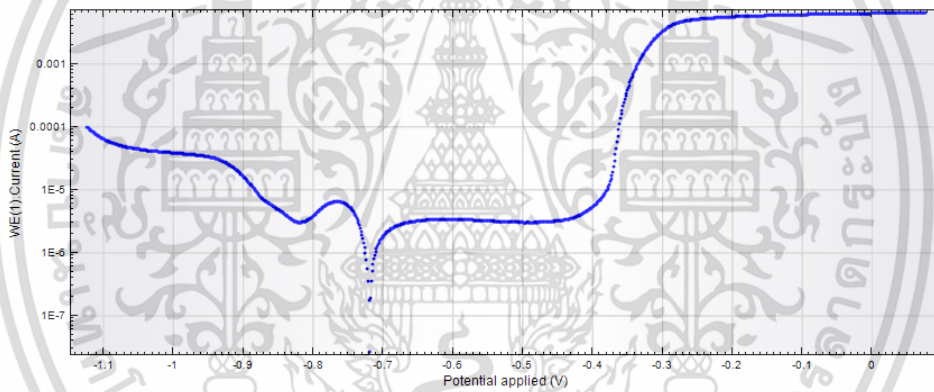


รูปที่ ๕ ภาพ Potentiodynamic Polarization
ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 94.5Sn-1.5Cu-4Sb

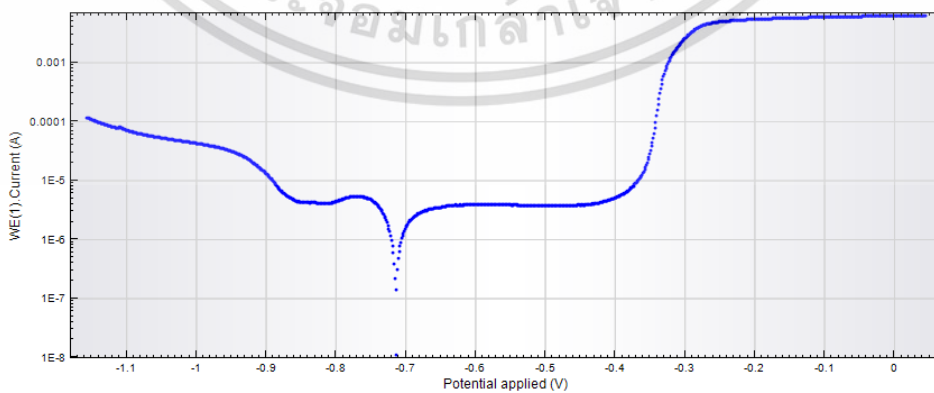
3. ผลทดสอบของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 92.5Sn-1.5Cu-6Sb



รูปที่ ผข 6 กราฟ Potentiodynamic Polarization
ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 92.5Sn-1.5Cu-6Sb



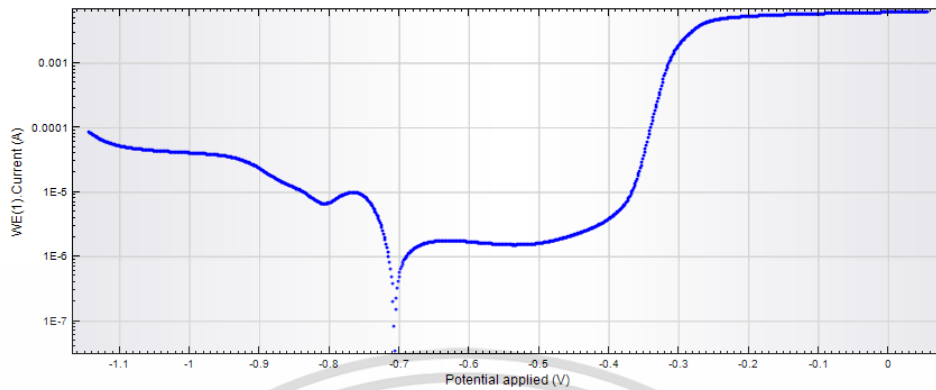
รูปที่ ผข 7 กราฟ Potentiodynamic Polarization
ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 92.5Sn-1.5Cu-6Sb



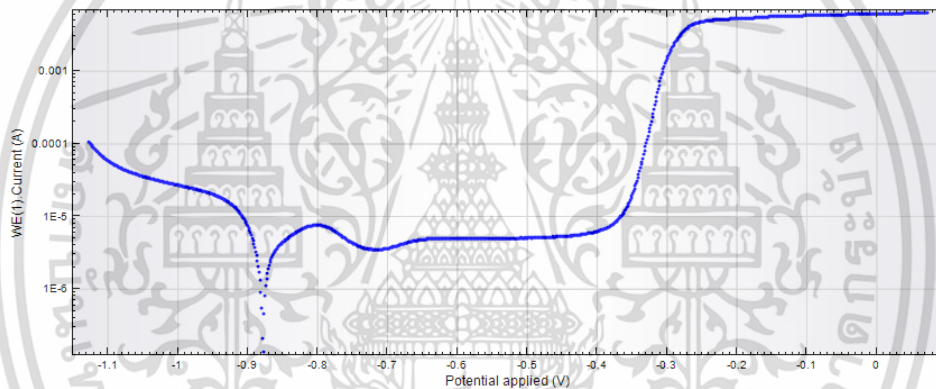
รูปที่ ผข 8 กราฟ Potentiodynamic Polarization
ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 92.5Sn-1.5Cu-6Sb

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

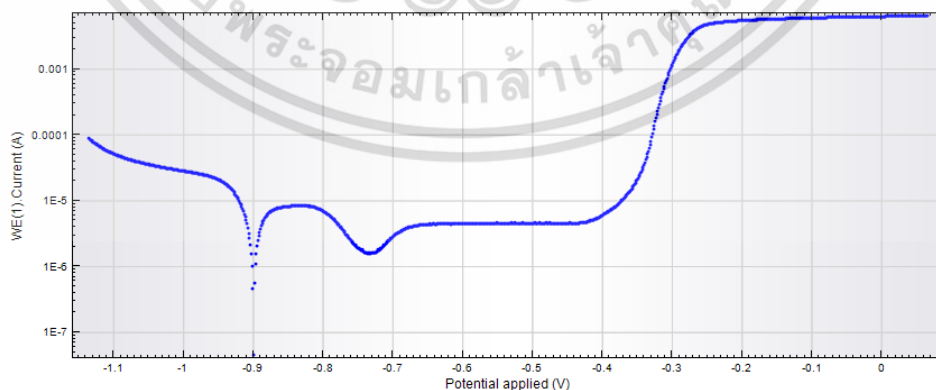
4. ผลทดสอบของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 90.5Sn-1.5Cu-8Sb



รูปที่ 9 กราฟ Potentiodynamic Polarization ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 90.5Sn-1.5Cu-8Sb



รูปที่ 10 กราฟ Potentiodynamic Polarization ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 90.5Sn-1.5Cu-8Sb

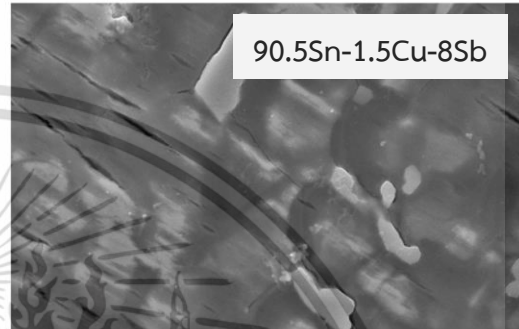
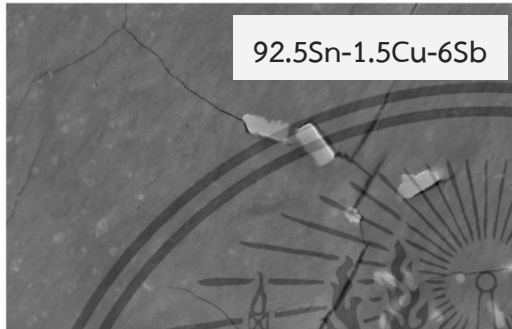
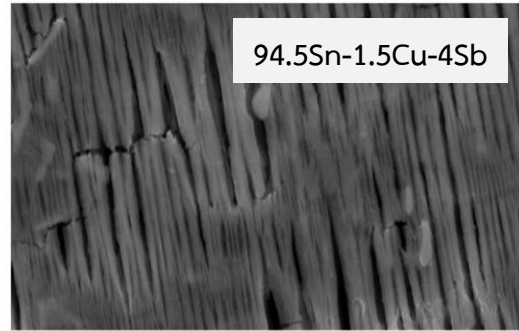
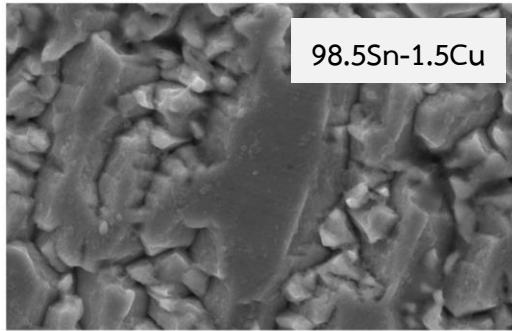


รูปที่ 11 กราฟ Potentiodynamic Polarization ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 90.5Sn-1.5Cu-8Sb

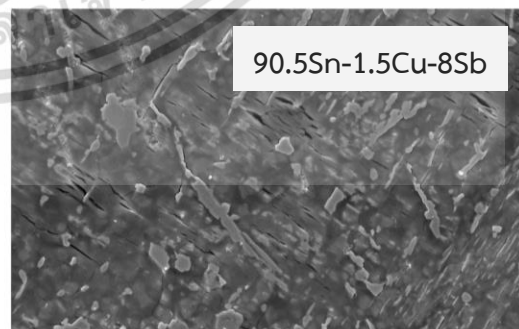
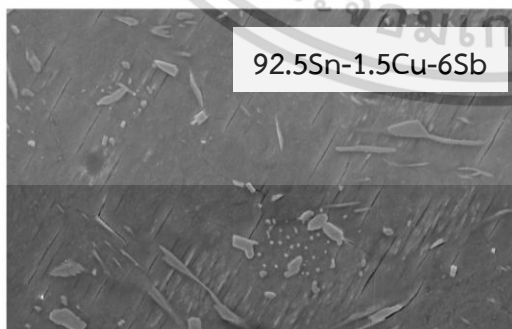
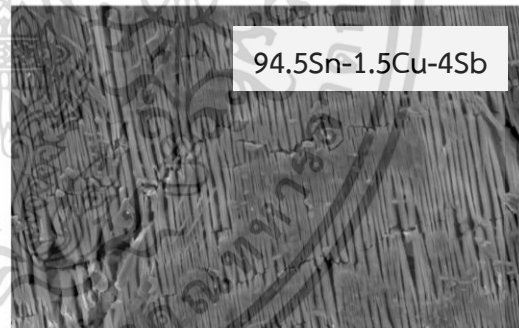
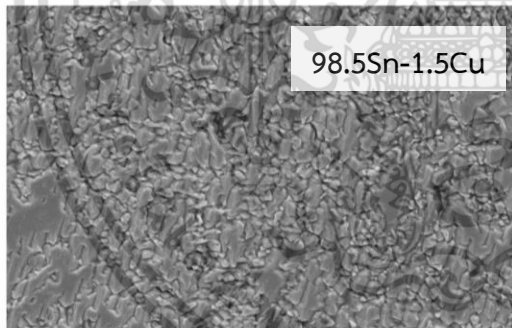


ภาคผนวก ค

โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb หลังจากการทดสอบ Potentiodynamic Polarization ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 5 และ 30 เท่า



รูปที่ ผศ 1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb หลังจากการทดสอบ Potentiodynamic Polarization ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 5 เท่า



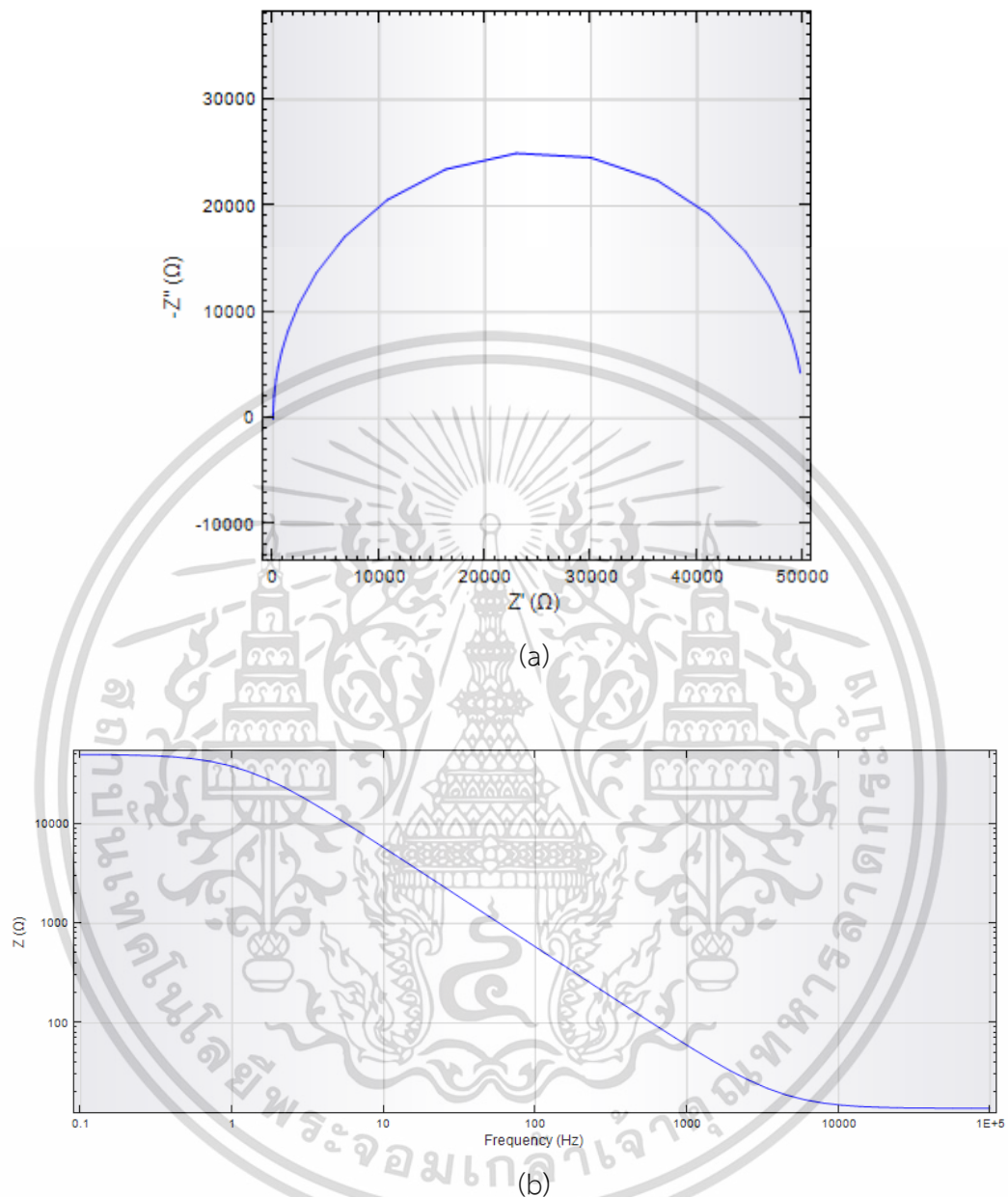
รูปที่ ผศ 2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb หลังจากการทดสอบ Potentiodynamic Polarization ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 30 เท่า



ภาคผนวก ง

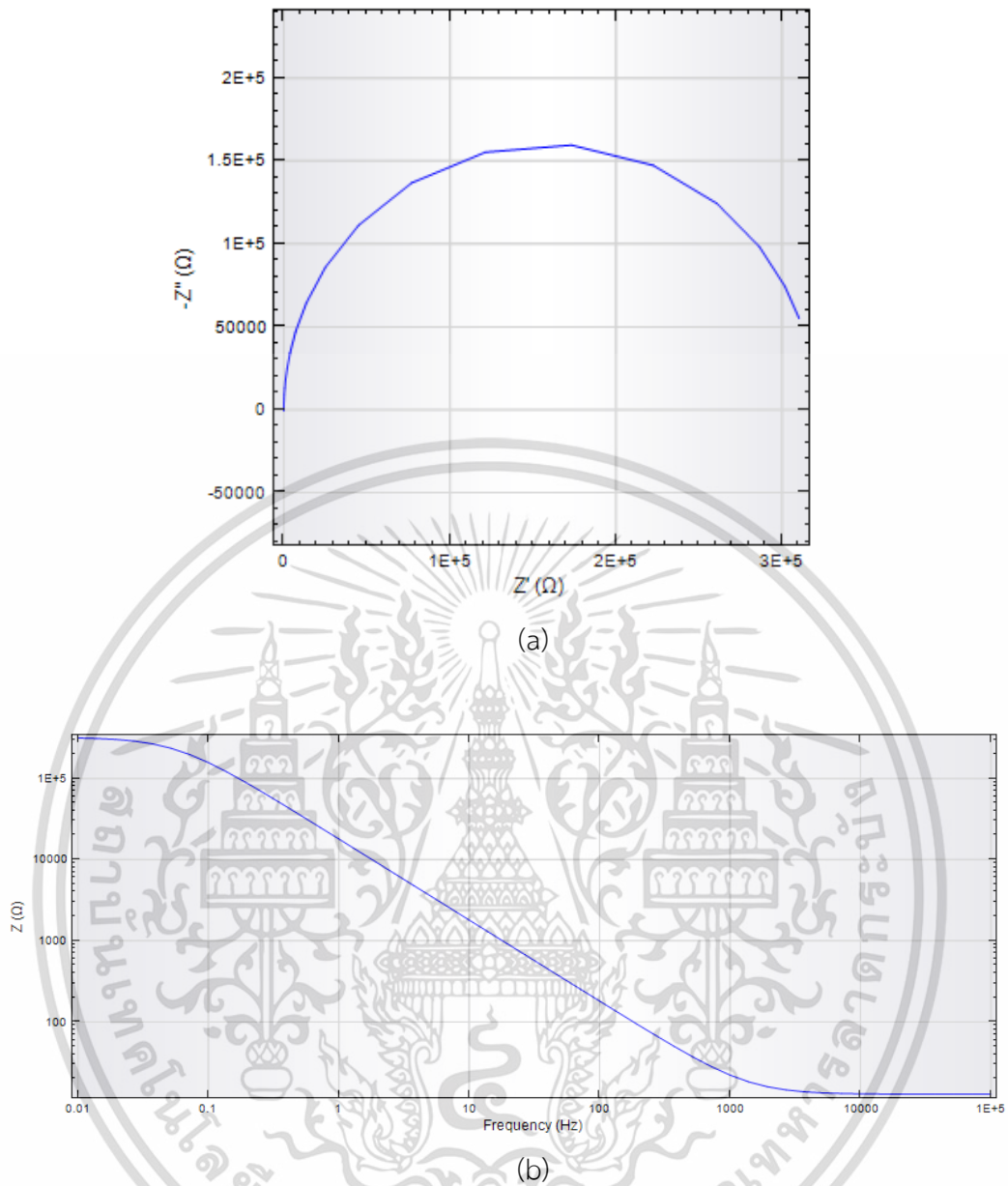
ผลทดสอบการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-1.5Cu-xSb
โดยเทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy Measurements (EIS)

1. ผลทดสอบของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิดชนิด 98.5Sn-1.5Cu



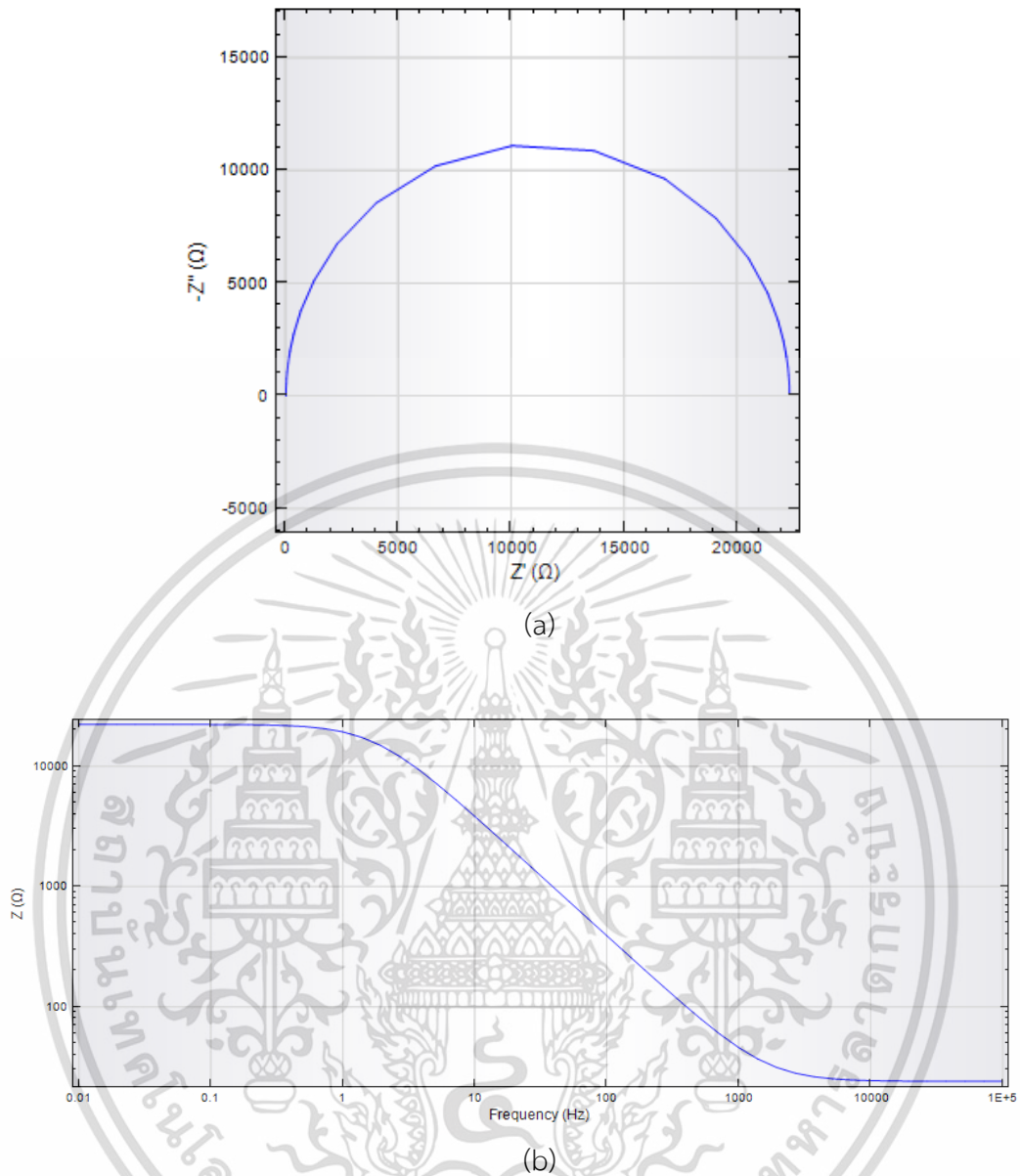
รูปที่ ผง 1 ผลทดสอบการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 98.5Sn-1.5Cu โดยเทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy Measurements (EIS)

(a) กราฟ Nyquist Plot และ (b) กราฟ Bode Plot



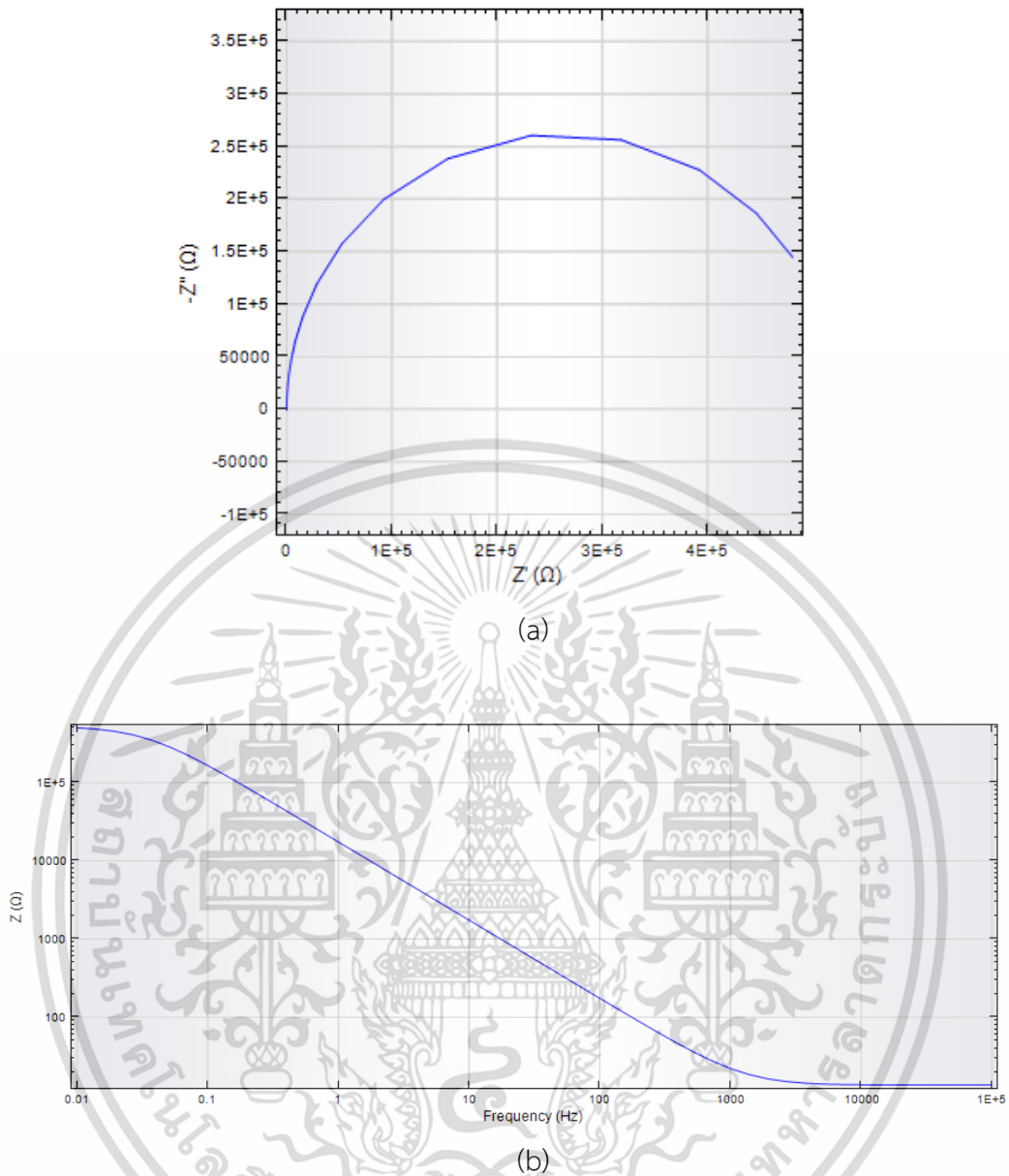
รูปที่ ผง 2 ผลทดสอบการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 98.5Sn-1.5Cu โดยเทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy Measurements (EIS)

(a) กราฟ Nyquist Plot และ (b) กราฟ Bode Plot



รูปที่ ผง 3 ผลทดสอบการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 98.5Sn-1.5Cu โดยเทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy Measurements (EIS)

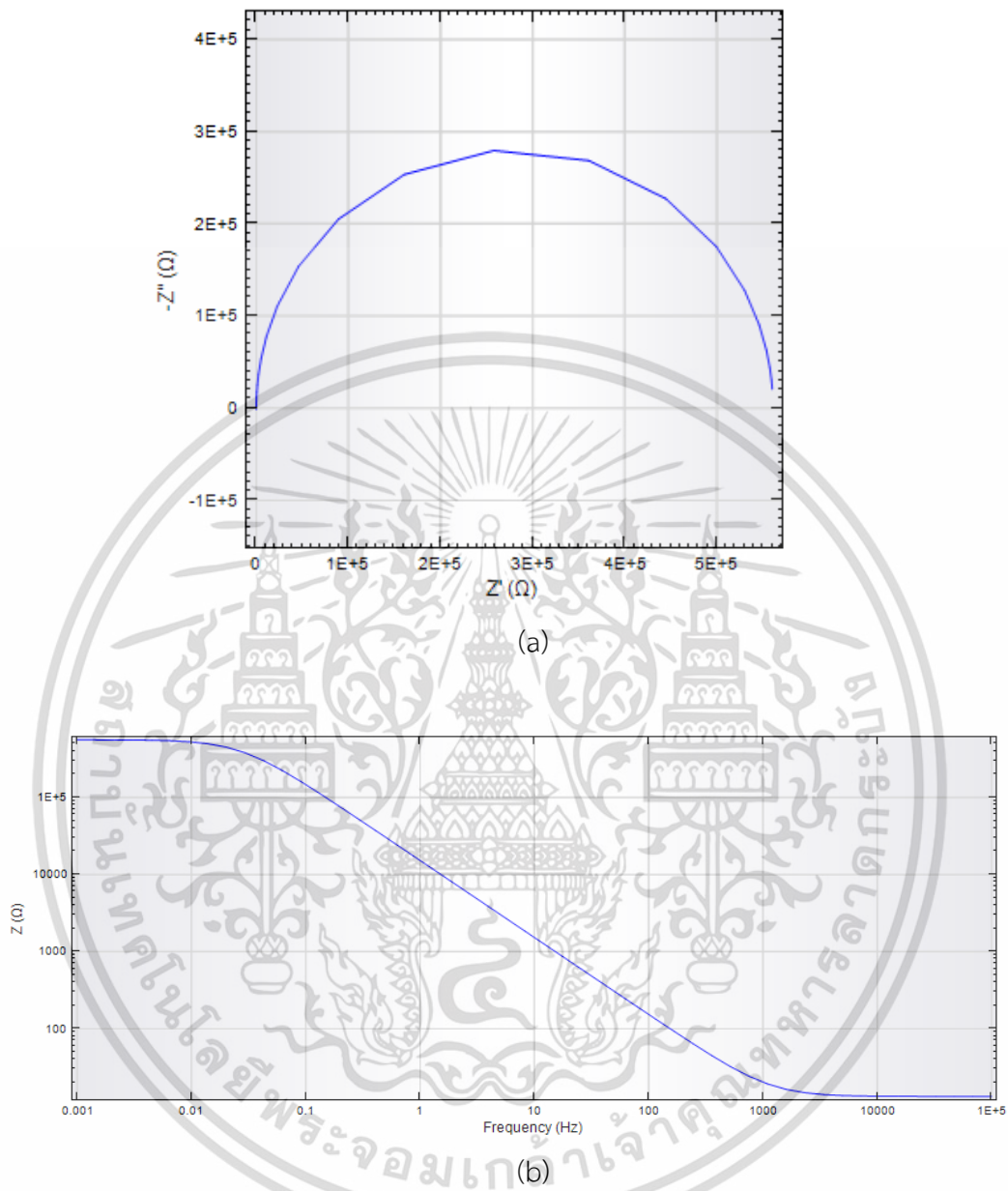
(a) กราฟ Nyquist Plot และ (b) กราฟ Bode Plot



รูปที่ ผง 4 ผลทดสอบการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 98.5Sn-1.5Cu โดยเทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy Measurements (EIS)

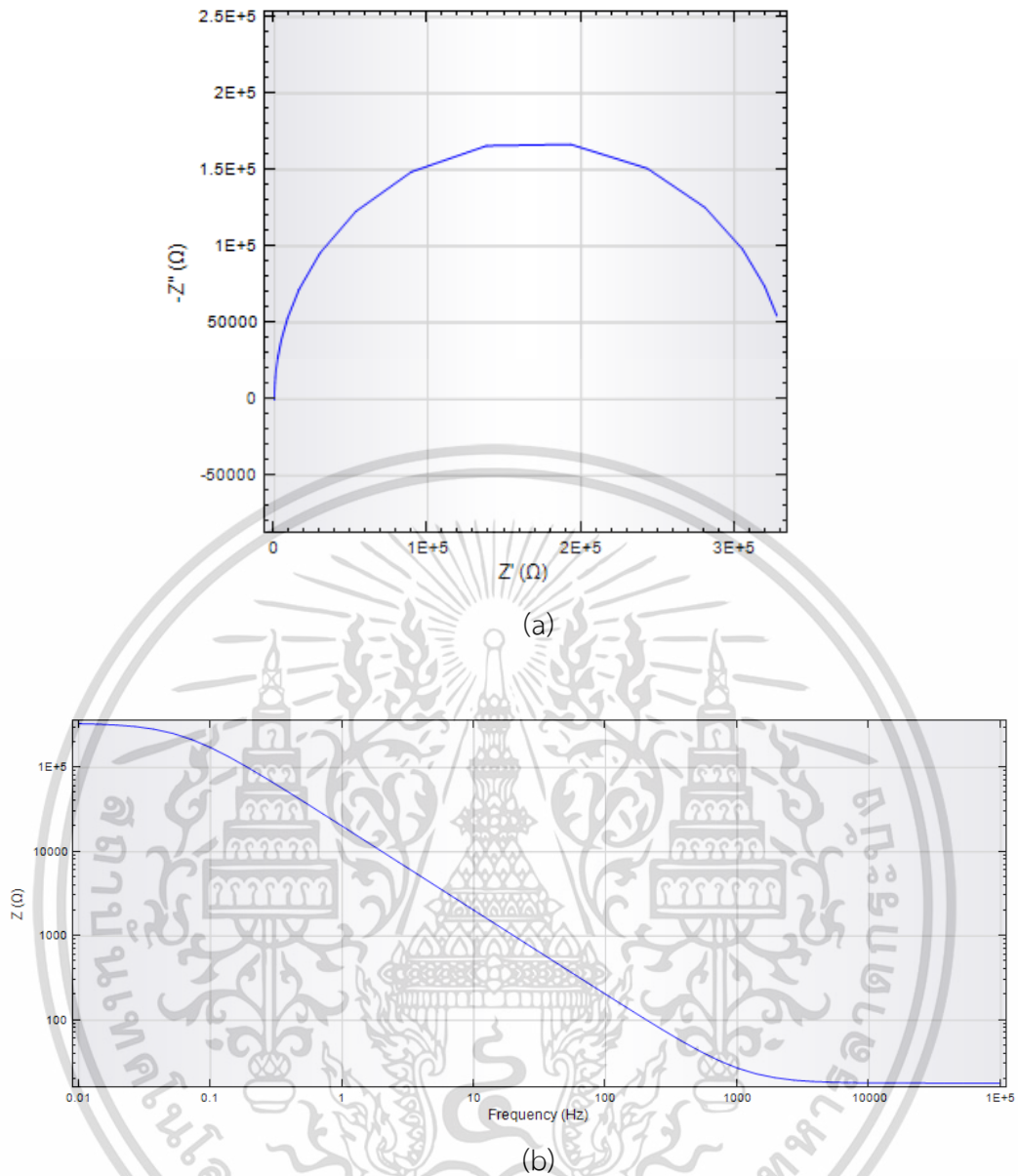
(a) กราฟ Nyquist Plot และ (b) กราฟ Bode Plot

2. ผลทดสอบของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 94.5Sn-1.5Cu-4Sb



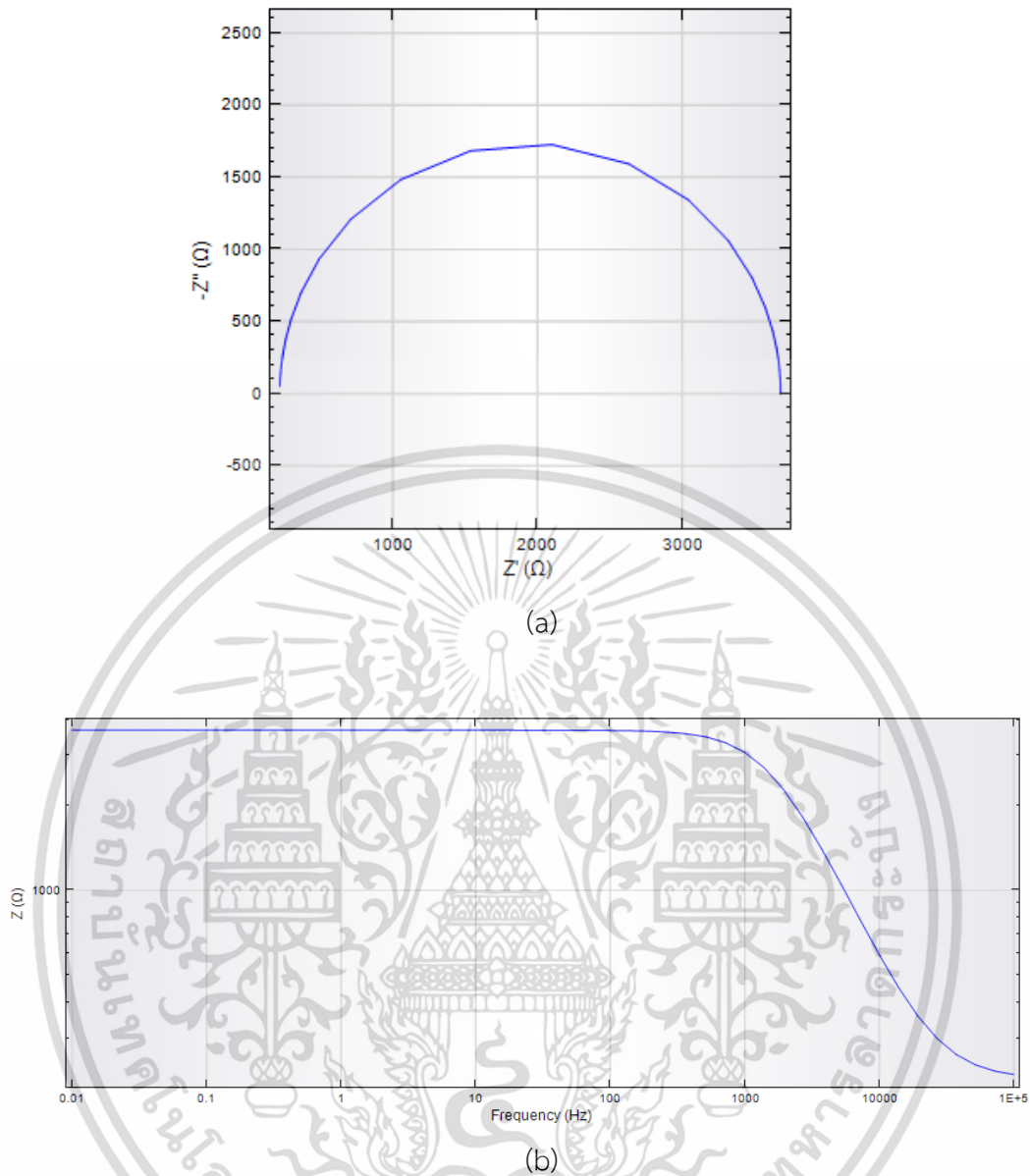
รูปที่ ผง 5 ผลทดสอบการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 94.5Sn-1.5Cu-4Sb โดยเทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy Measurements (EIS)

(a) กราฟ Nyquist Plot และ (b) กราฟ Bode Plot



รูปที่ 6 ผลทดสอบการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 94.5Sn-1.5Cu-4Sb โดยเทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy Measurements (EIS)

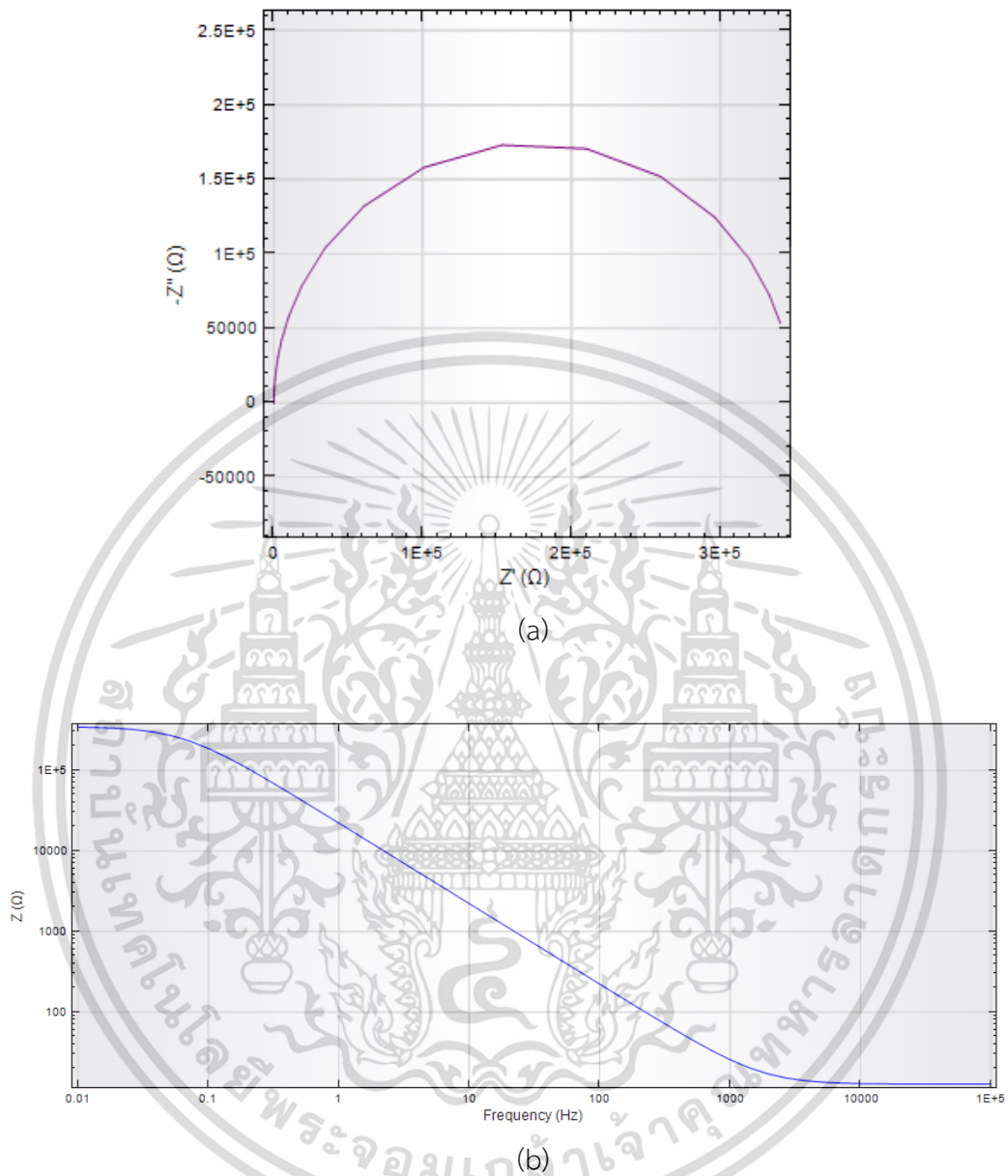
(a) กราฟ Nyquist Plot และ (b) กราฟ Bode Plot



รูปที่ ผง 7 ผลทดสอบการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 94.5Sn-1.5Cu-4Sb โดยเทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy Measurements (EIS)

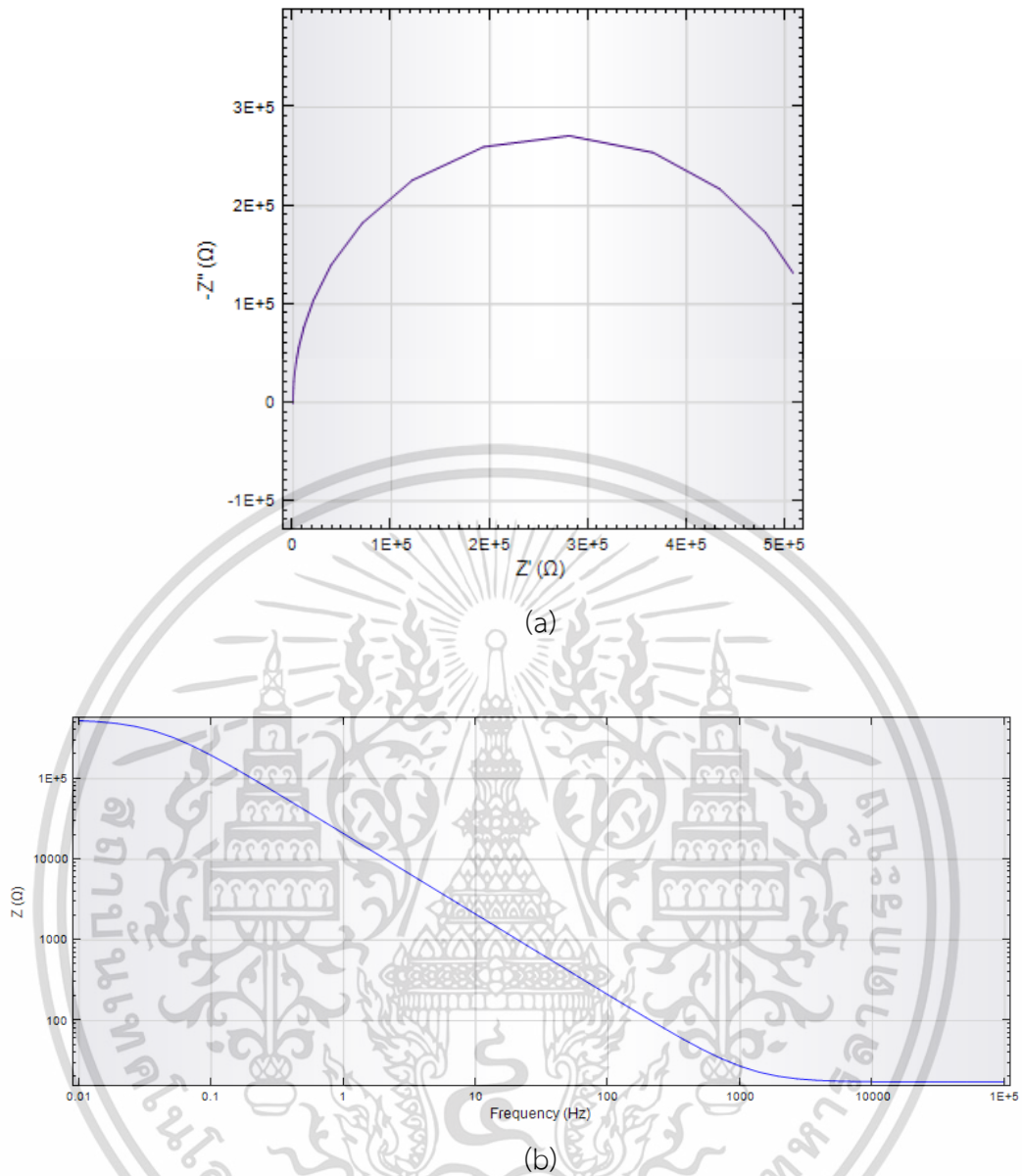
(a) กราฟ Nyquist Plot และ (b) กราฟ Bode Plot

3. ผลทดสอบของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 92.5Sn-1.5Cu-6Sb



รูปที่ 8 ผลทดสอบการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 92.5Sn-1.5Cu-6Sb โดยเทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy Measurements (EIS)

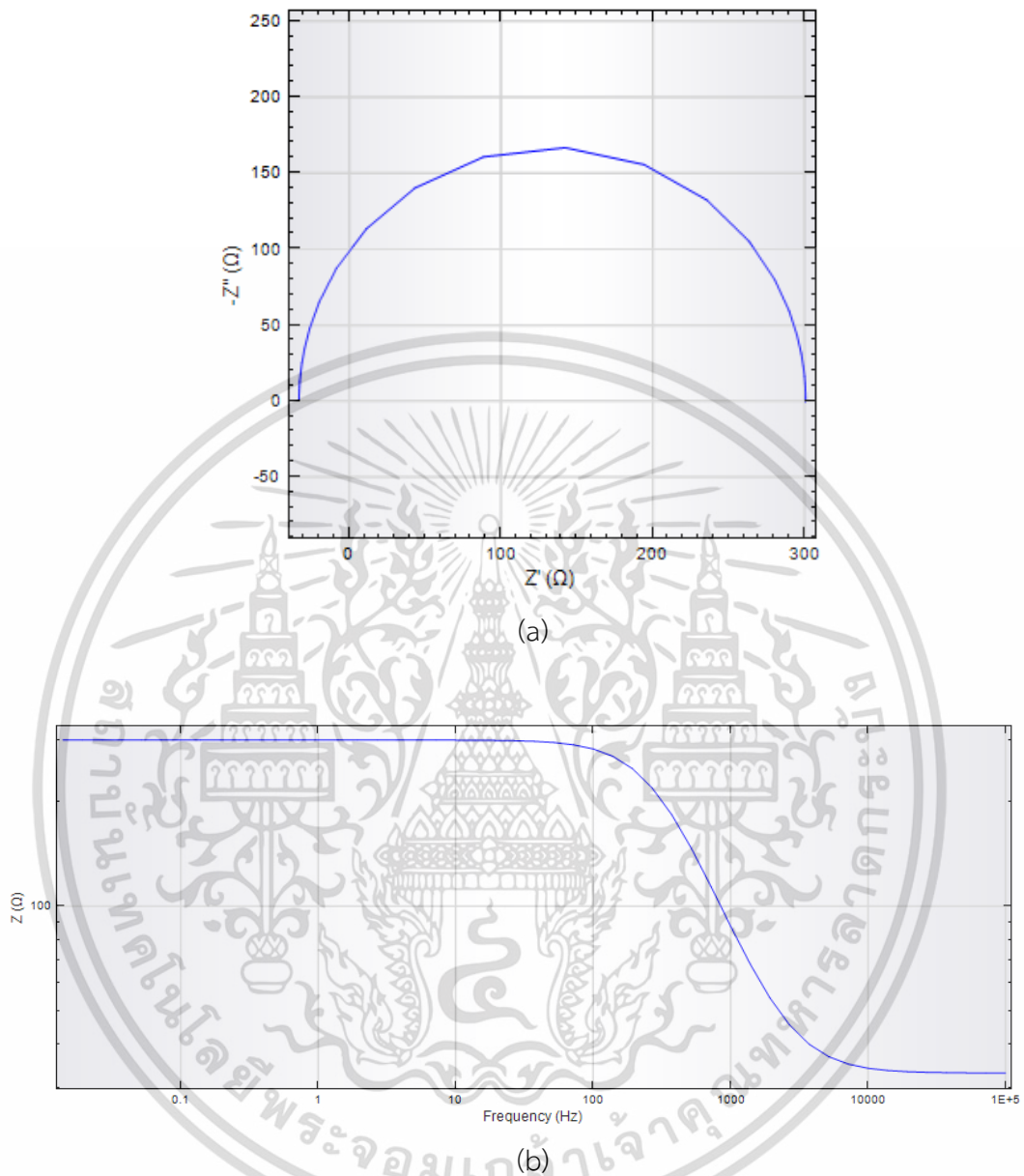
(a) กราฟ Nyquist Plot และ (b) กราฟ Bode Plot



รูปที่ ผง 9 ผลทดสอบการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 92.5Sn-1.5Cu-6Sb โดยเทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy Measurements (EIS)

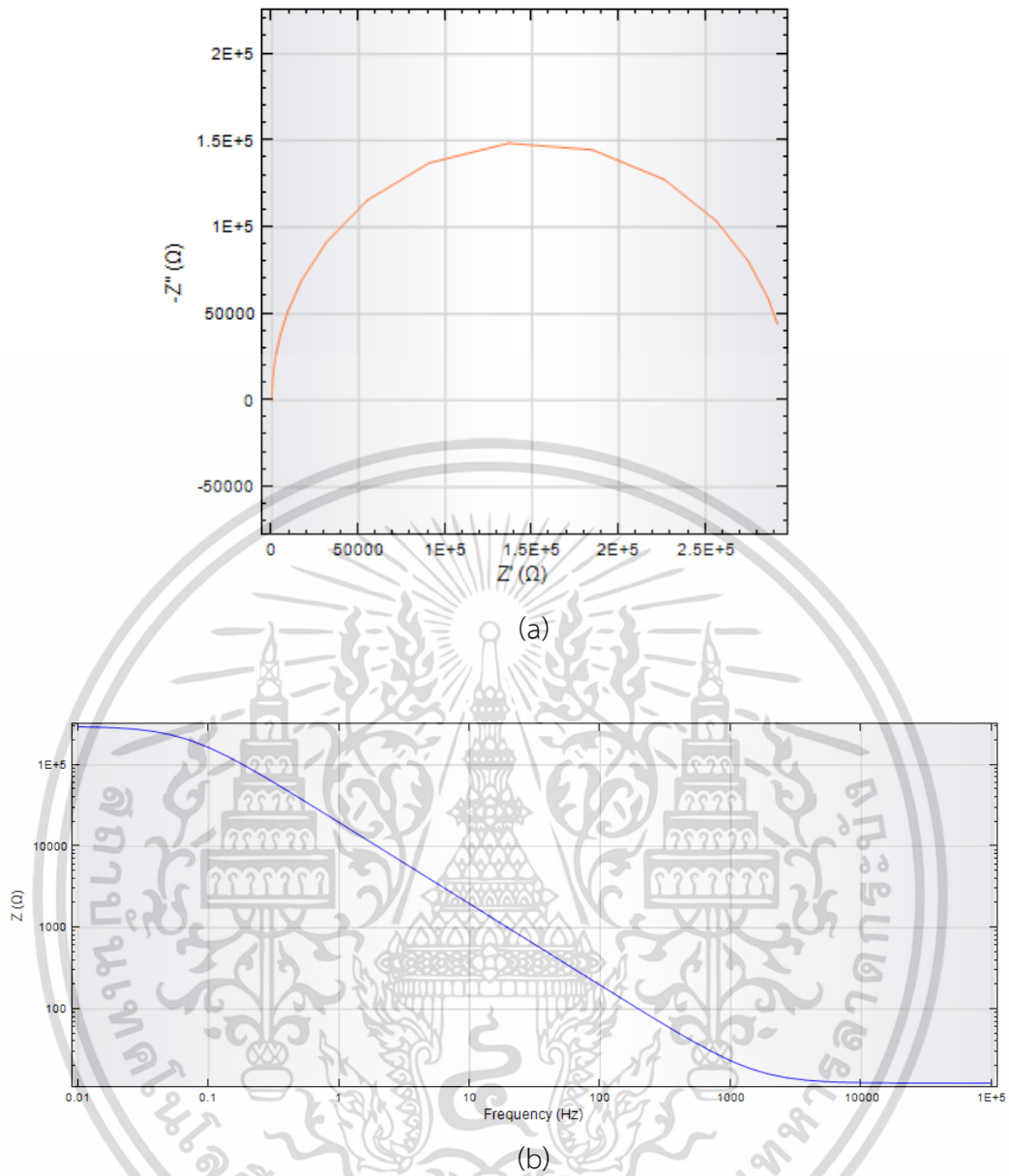
(a) กราฟ Nyquist Plot และ (b) กราฟ Bode Plot

4. ผลทดสอบของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 90.5Sn-1.5Cu-8Sb



รูปที่ 10 ผลทดสอบการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 90.5Sn-1.5Cu-8Sb โดยเทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy Measurements (EIS)

(a) กราฟ Nyquist Plot และ (b) กราฟ Bode Plot



รูปที่ 11 ผลทดสอบการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 90.5Sn-1.5Cu-8Sb โดยเทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy Measurements (EIS)

(a) กราฟ Nyquist Plot และ (b) กราฟ Bode Plot