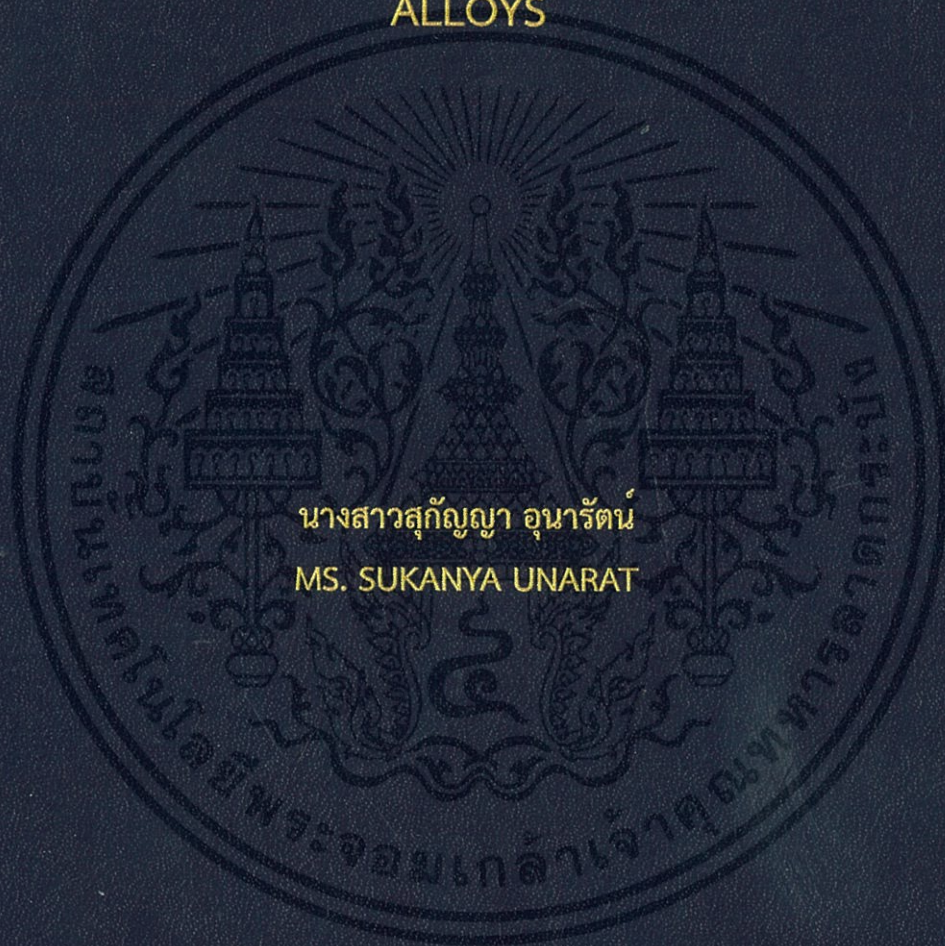


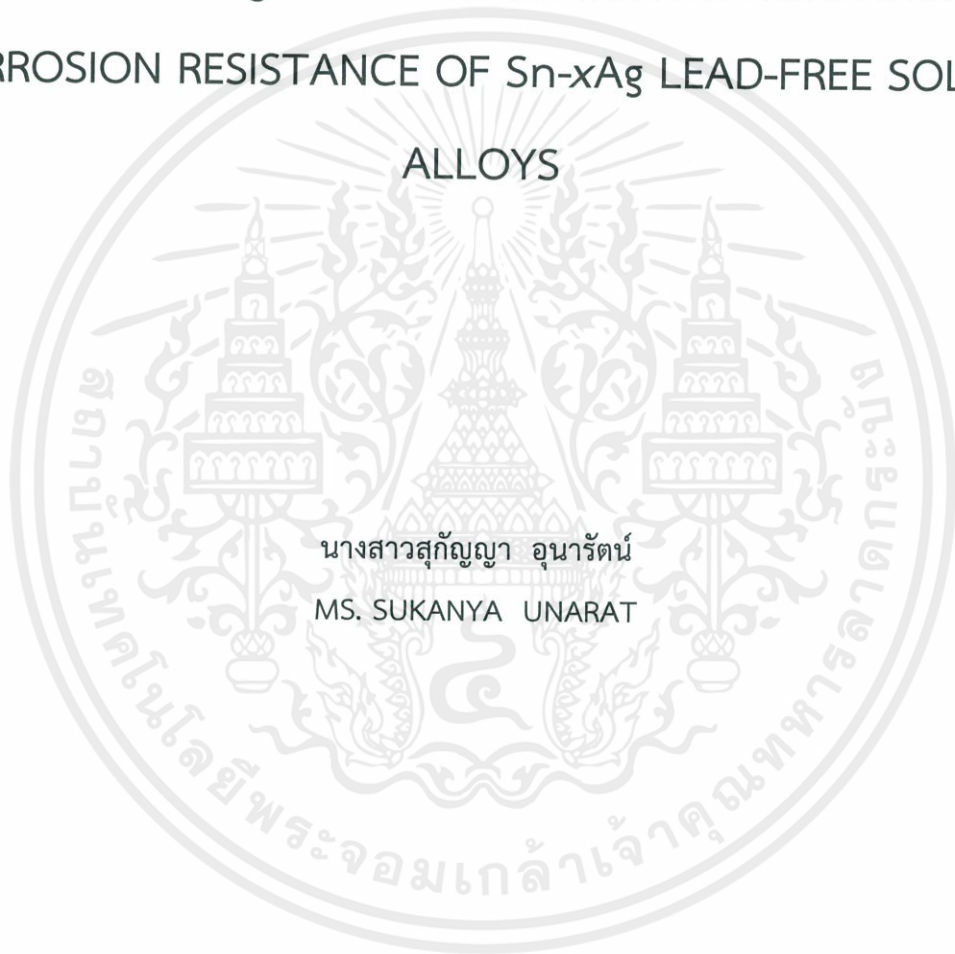
ผลกระทบของธาตุเงินต่อโครงสร้างจุลภาคและความต้านทาน  
การกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-xAg  
INFLUENCE OF Ag CONTENT ON MICROSTRUCTURE AND  
CORROSION RESISTANCE OF Sn-xAg LEAD-FREE SOLDER  
ALLOYS



นางสาวสุกัญญา อุนารัตน์  
MS. SUKANYA UNARAT

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

ผลกระทบของธาตุเงินต่อโครงสร้างจุลภาคและความต้านทาน  
การกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-xAg  
INFLUENCE OF Ag CONTENT ON MICROSTRUCTURE AND  
CORROSION RESISTANCE OF Sn-xAg LEAD-FREE SOLDER  
ALLOYS



นางสาวสุกัญญา อุนารัตน์  
MS. SUKANYA UNARAT

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INFLUENCE OF Ag CONTENT ON MICROSTRUCTURE AND  
CORROSION RESISTANCE OF Sn-xAg LEAD-FREE SOLDER  
ALLOYS



MS. SUKANYA UNARAT

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์

ผลกระทบของธาตุเงินต่อโครงสร้างจุลภาคและความต้านทาน  
การกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-xAg  
INFLUENCE OF Ag CONTENT ON MICROSTRUCTURE AND  
CORROSION RESISTANCE OF Sn-xAg LEAD-FREE SOLDER  
ALLOYS


นักศึกษา

นางสาวสุกัญญา อุนารัตน์ รหัสประจำตัว 56011329

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์

  
(รศ.ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ)

  
(ดร. พชรพล ตันทวิรุฬห์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	ผลกระทบของธาตุเงินต่อโครงสร้างจุลภาคและความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-xAg
นักศึกษา	นางสาวสุกัญญา อุณารัตน์
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ ดร.พชรพล ตัณฑวิรุฬห์

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของธาตุเงิน (Ag) ที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-xAg ( $x=0,3,3.5,4$  และ  $5$  wt%) ซึ่งผลิตโดยบริษัท Ultracore จำกัดมหาชน ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและการกัดกร่อน และใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (EDX) สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (IMCs) ในขณะที่คุณสมบัติการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีถูกทดสอบด้วยวิธี Potentiodynamic โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น  $3.5\%$  และสารละลายซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้น  $1\%$  เป็นอิเล็กโทรไลต์ จากการสำรวจโครงสร้างจุลภาคแสดงให้เห็นว่า โลหะบัดกรี Sn-xAg ที่มีส่วนประกอบของธาตุเงิน (Ag) ระหว่าง  $3.5$  ถึง  $5$  wt% มีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดสารประกอบเชิงโลหะ  $Ag_3Sn$  มีขนาดใหญ่ขึ้น การทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และสารละลายซัลฟิวริก พบว่าความต้านทานการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของธาตุเงิน (Ag) อย่างไรก็ตามเมื่อโครงสร้างของ  $Ag_3Sn$  ใหญ่ขึ้นจะส่งผลให้ความแข็งแรงของรอยต่อจากการบัดกรีลดลง หลังการทดสอบภายใต้เงื่อนไขการบัดกรีที่อุณหภูมิ  $260$  C เป็นเวลา  $30$  วินาที พบว่าค่าเฉลี่ยตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะผสมทั้ง  $5$  ชนิด มีค่าใกล้เคียงกัน และพบโครงสร้างของชั้นสารประกอบ  $Cu_6Sn_5$  เกิดขึ้นระหว่างโลหะบัดกรีกับทองแดง โดยความหนาของ  $Cu_6Sn_5$  เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณธาตุเงิน (Ag) คือไม่มีธาตุเงิน (Ag) มีความหนามากที่สุด และเมื่อเติมธาตุเงินเป็น  $3$  wt% ความหนาจะลดลงแล้วค่อยๆเพิ่มขึ้นตามเปอร์เซ็นต์ธาตุเงิน (Ag) ที่เพิ่มเข้าไป

Thesis Title	Influence of Ag Content on Microstructure and Corrosion Resistance of Sn-xAg Lead-free Solder Alloys
Student	Ms. Sukanya Unarat
Degree	Bachelor of Engineering in Industrial Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year	2016
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Kannachai Kanlayasiri Dr. Phacharaphon Tunthawiroon

### ABSTRACT

The microstructure and corrosion resistance of lead-free solder alloys containing different Ag content were investigated. A series of as-cast solders Sn-xAg (x = 0, 3, 3.5, 4 and 5 wt %) supplied by Ultracore Co., Ltd. (Thailand) was prepared from high purity metallic elements of Sn and Ag. The microstructure and chemical composition of alloy matrix and intermetallic compounds (IMCs) were characterized using a SEM equipped with EDX. The corrosion property of solders was tested via the polarization technique. A 3.5% NaCl and 1% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution were used as an electrolyte for each polarization test. The observed microstructure revealed that IMCs were found as Ag<sub>3</sub>Sn surrounded by β-Sn phase. The fraction of Ag<sub>3</sub>Sn IMCs was increased with increasing the initial concentration of Ag in an alloy. The Sn-xAg alloy with the higher Ag content (3.5–5 wt %) tended to cause the formation of larger Ag<sub>3</sub>Sn IMCs. The corrosion tests in NaCl and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solutions indicated that the resistance to corrosion is enhanced proportionally to the amount of Ag in alloy. However, the formation of high Ag<sub>3</sub>Sn fraction would diminish the strength of solder joint due to its brittle nature. In addition, wetting property and interface reaction with substrates (Cu) were also investigated. The average spread factor of five alloys was not affected by Ag content. The formation of the thin scalloped Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> structure was clearly visible at the interface layer between solder and Cu substrate. The plate-like Ag<sub>3</sub>Sn phase was observed in the solder matrix after soldering.

๗

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือและคำแนะนำจากอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ และดร.พชรพล ตันตวิรุฬห์ ที่ให้โอกาสข้าพเจ้าในการศึกษาปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ คอยช่วยเหลือชี้แนะแนวทางในการแก้ไขปัญหาข้อบกพร่องต่างๆ ที่เกิดขึ้นขณะดำเนินงาน ตลอดจนให้ความรู้ ความเอาใจใส่ในทุกๆ ด้านแก่ผู้จัดทำปริญญาานิพนธ์ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้เอื้อเฟื้อเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำงานวิจัย ตลอดจนอำนวยความสะดวก ให้แก่ผู้จัดทำจนสามารถทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

ขอขอบคุณนายกำธร สุขพิมาย ที่คอยให้คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือ และชี้แนะแนวทางในการ ปฏิบัติระหว่างดำเนินงาน ตลอดจนอำนวยความสะดวกให้แก่ผู้จัดทำปริญญาานิพนธ์จนสำเร็จ

ขอขอบคุณ บริษัท โคเอกซ์กรุ๊ปคอร์ปอเรชั่น เป็นอย่างสูงที่ให้การสนับสนุนในด้านเครื่องมือในการ ทำงานวิจัยและความรู้เกี่ยวกับการใช้เครื่องมือ

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมไปถึงผู้เกี่ยวข้องอื่นๆ ที่คอยเป็นกำลังใจที่ดี เสมอมา ให้ความช่วยเหลือ จนทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ หากมีสิ่งผิดพลาดประการใดคณะผู้จัดทำ ขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้

นางสาวสุกัญญา อุนารัตน์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง .....	ญ
สารบัญรูป.....	ฉ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา .....	2
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์ .....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	2
<b>บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 การบัดกรี (Soldering).....	3
2.1.1 โลหะพื้น (Base Metal) .....	5
2.1.2 โลหะบัดกรี (Solder).....	5
2.1.3 น้ำยาประสานหรือฟลักซ์ (Fluxes).....	8
2.1.4 วิธีการบัดกรี .....	12
2.2 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-free Solders).....	14
2.2.1 คุณลักษณะเบื้องต้นในการพิจารณาเลือกใช้โลหะบัดกรีแบบไร้สารตะกั่ว .....	15
2.2.2 โลหะทดแทนสารตะกั่ว.....	16
2.2.3 แนวทางการเลือกธาตุที่เป็นส่วนผสมที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิต .....	19
2.2.3.1 ธาตุเจือที่ใช้ผสมกับดีบุกเพื่อผลิตเป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว .....	19
2.2.3.2 สมบัติของธาตุเจือชนิดต่างๆ.....	19

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 เฟสไดอะแกรมสำหรับโลหะบัดกรี .....	22
2.3.1 เฟสไดอะแกรมของดีบุก-ทองแดง.....	22
2.3.2 เฟสไดอะแกรมของดีบุก-พลวง .....	23
2.3.3 เฟสไดอะแกรมของทองแดง-พลวง .....	24
2.3.4 เฟสไดอะแกรมของดีบุก-เงิน .....	25
2.4 ความสามารถในการกระจายตัว (Wettability).....	25
2.4.1 วิธีทดสอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรี (Spread Test Method).....	26
2.4.1.1 วิธีวัดค่าตัวประกอบกระจายตัว (Spread Factor, $S_f$ ) .....	27
2.4.1.2 ค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread Ratio, $S_r$ ).....	27
2.4.2 การทดสอบค่ามุมสัมผัสหลังการบัดกรี (Contact Angle Method).....	28
2.4.3 Wetting Balance Method.....	32
2.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure Observation).....	34
2.5.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM) .....	34
2.5.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM).....	35
2.5.3 การวิเคราะห์ Energy Dispersive X-Ray (EDX).....	38
2.5.4 การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Driffraction).....	40
2.6 การกัดกร่อน (Corrosion).....	41
2.7 การกัดกร่อนของโลหะเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า .....	43
2.7.1 ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน .....	43
2.8 อัตราการกัดกร่อน (จลนพลศาสตร์) .....	43
2.8.1 อัตราเร็วของการกัดกร่อนอย่างสม่ำเสมอหรือการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating) ...	44
ในสารละลาย .....	44
2.8.2 ปฏิกิริยาการกัดกร่อนและโพลาริเซชัน.....	45

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.9 ประเภทของการกัดกร่อน.....	49
2.9.1 การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform Corrosion).....	49
2.9.2 การกัดกร่อนเนื่องจากเกลวานิกหรือโลหะ 2 ชนิด (Galvanic Corrosion) .....	49
2.9.3 การกัดกร่อนแบบช่องแคบ (Crevice Corrosion) .....	49
2.9.4 การกัดกร่อนแบบเป็นหลุม (Pitting Corrosion).....	50
2.9.5 การกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน (Intergranular Corrosion) .....	50
2.9.6 การผุกร่อนแบบเลือก (Selective Leaching or Dealloying).....	50
2.9.7 การกัดกร่อนแบบกัดเซาะ (Erosion Corrosion).....	50
2.9.8 การกัดกร่อนเนื่องจากความเค้น (Stress Corrosion).....	50
2.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) .....	51
2.10.1 จุดเด่นของการวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	51
2.10.2 ข้อตกลงเบื้องต้น .....	51
2.10.3 หลักการวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	52
2.10.4 วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	53
2.10.4.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว.....	53
2.10.4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง .....	54
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน</b>	
3.1 การวางแผนการดำเนินงาน .....	55
3.2 การวิเคราะห์ผลทางโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี .....	56
3.2.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ .....	56
3.2.2 การหล่อเรซิน (Mounting).....	57
3.2.3 การขัดเตรียมผิวชิ้นงานทดสอบแบบหยาบ.....	58
3.2.4 การขัดผิวชิ้นงานทดสอบแบบละเอียด.....	60

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.5 การกัดผิวหน้าชิ้นงาน .....	61
3.2.6 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเบื้องต้นและองค์ประกอบทางเคมี.....	62
3.3 วิเคราะห์ผลการต้านทานการกัดกร่อนของโลหะบัดกรี .....	62
3.3.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ .....	62
3.3.1.1 การตัดชิ้นงานทดสอบ .....	62
3.3.1.2 การขัดเตรียมผิวชิ้นงานทดสอบ.....	63
3.3.1.3 การทำความสะอาดชิ้นงานทดสอบ .....	64
3.3.2 การเตรียมสารละลายทดสอบ.....	65
3.3.3 การวัดทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดนามิกโพลาริเซชัน (Potentiodynamic Polarization) .....	66
3.4 วิเคราะห์ความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีหลังจากการบัดกรี.....	67
3.4.1 การเตรียมชิ้นงาน .....	67
3.4.2 การเตรียมแผ่นทองแดง.....	70
3.4.3 วิธีการทดสอบหาค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะพื้น .....	71
3.5 วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีหลังจากการบัดกรี.....	73
3.5.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบโครงสร้างทางจุลภาค .....	73
3.5.2 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะและองค์ประกอบทางเคมี.....	74
3.5.3 การวัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ.....	75
3.5.4 การใช้โปรแกรม Minitab ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียว .....	76

## บทที่ 4 ผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของโลหะบัดกรี .....	78
4.2 การวิเคราะห์ผลความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะบัดกรี Sn-xAg ด้วยเทคนิค โพเทนชิโอดนามิกโพลาริเซชัน.....	83

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1 อัตราการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-xAg ที่มีต่อโซเดียมคลอไรด์ (NaCl).....	83
4.2.2 อัตราการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-xAg ที่มีต่อซัลฟิวริก (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ).....	85
4.2.3 วิเคราะห์ผลผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนของโลหะบัดกรี Sn-xAg .....	87
4.2.3.1 โครงสร้างผลผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนของโลหะบัดกรี Sn-xAg .....	87
4.2.3.2 การวิเคราะห์ผลผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนบนพื้นผิวของโลหะบัดกรี Sn-xAg ด้วยเทคนิคเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) .....	88
4.3 การวิเคราะห์ความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรี Sn-xAg หลังจากการบัดกรี .....	89
4.3.1 การวิเคราะห์หาอัตราการแผ่กระจายของโลหะบัดกรี Sn-xAg .....	89
4.3.2 การใช้โปรแกรม Minitab ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียว .....	91
4.4 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn-xAg หลังจากการบัดกรี.....	92
4.4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ .....	93
4.4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ .....	95
<b>บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงาน</b>	
5.1 สรุปผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว.....	102
5.2 ความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะบัดกรี Sn-xAg ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก โพลาริเซชัน.....	102
5.3 สรุปผลการวิเคราะห์ความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรี.....	103
5.4 โครงสร้างจุลภาคหลังจากการบัดกรี.....	103
5.5 ข้อจำกัดในการทำงานวิจัย.....	103
5.6 ข้อเสนอแนะ.....	104
5.7 ประโยชน์ที่ได้รับ .....	104
<b>เอกสารอ้างอิง.....</b>	<b>105</b>

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก.....	108
ภาคผนวก ก. โครงสร้างจุลภาคและความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ .....	109



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ชนิดของโลหะพื้นต่อความยากง่ายในการบัดกรี.....	5
ตารางที่ 2.2 ชนิดของโลหะพื้นและน้ำยาประสานที่เหมาะสม .....	9
ตารางที่ 2.3 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำกว่า 180 องศาเซลเซียส.....	16
ตารางที่ 2.4 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 180 ถึง 200 องศาเซลเซียส.....	17
ตารางที่ 2.5 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 200 ถึง 230 องศาเซลเซียส.....	17
ตารางที่ 2.6 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวสูงกว่า 230 องศาเซลเซียส.....	18
ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบของโลหะบัดกรีชนิดต่างๆที่สามารถนำมาใช้แทนตะกั่วบัดกรี .....	18
ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติบางประการระหว่าง Sn-Ag กับ Sn-Pb.....	22
ตารางที่ 2.9 ลำดับเวลาในการดำเนินการทดสอบ.....	29
ตารางที่ 2.10 สูตรความแปรปรวนทางเดียว .....	53
ตารางที่ 2.11 สูตรสูตรความแปรปรวนทางเดียว .....	53
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมของโลหะบัดกรีที่ใช้ในการทดลอง.....	56
ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์ธาตุโดยใช้ EDX .....	82
ตารางที่ 4.2 สัมประสิทธิ์ทางเคมีไฟฟ้าของโลหะบัดกรี Sn-xAg ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.6 โมลาร์.....	84
ตารางที่ 4.3 สัมประสิทธิ์ทางเคมีไฟฟ้าของโลหะบัดกรี Sn-xAg ในสารละลายซิลฟิวริกเข้มข้น 1 โมลาร์.....	86
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าพื้นที่ เส้นผ่านศูนย์กลาง ความสูงของการแผ่กระจายและค่าอัตราการแผ่กระจาย ของโลหะบัดกรีแต่ละส่วนผสม .....	90
ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยอัตราการแผ่กระจายของโลหะบัดกรี Sn-xAg.....	90
ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียว .....	92
ตารางที่ 4.7 ความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ .....	94

ญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ตัวอย่างของรอยต่อที่ใช้ทางกล.....	4
รูปที่ 2.2 การเกิดการประสานกันระหว่างชิ้นงานโลหะโดยใช้การบัดกรี.....	6
รูปที่ 2.3 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมที่ประกอบด้วยตะกั่วและดีบุก.....	7
รูปที่ 2.4 การแผ่กระจายของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะพื้นของแผ่นทองแดงที่ให้อุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ.....	11
รูปที่ 2.5 การทำงานของฟลักซ์ .....	12
รูปที่ 2.6 การบัดกรีแบบใช้มือ .....	12
รูปที่ 2.7 การบัดกรีแบบคลื่น .....	13
รูปที่ 2.8 การบัดกรีแบบโพล์วี .....	14
รูปที่ 2.9 เฟสไดอะแกรมของดีบุก-ทองแดง .....	23
รูปที่ 2.10 เฟสไดอะแกรมของดีบุก-พลวง.....	24
รูปที่ 2.11 เฟสไดอะแกรมของทองแดง-พลวง.....	24
รูปที่ 2.12 เฟสไดอะแกรมของดีบุก-เงิน .....	25
รูปที่ 2.13 ความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรี .....	27
รูปที่ 2.14 Contact Angle Method.....	28
รูปที่ 2.15 ลำดับขั้นตอนในช่วงเวลาทดสอบ.....	29
รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ของมุมสัมผัสที่มีต่อโลหะบัดกรี พื้นผิวโลหะและบรรยากาศโดยรอบ.....	30
รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ของมุมสัมผัสที่มุมใดๆ กับการกระจายตัวของโลหะบัดกรี .....	30
รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างรัศมี ความสูง และมุมสัมผัสของโลหะบัดกรี.....	31
รูปที่ 2.19 Wetting Balance Method .....	32
รูปที่ 2.20 Wetting Curve ที่ได้จากเครื่องทดสอบ .....	33
รูปที่ 2.21 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....	35
รูปที่ 2.22 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	37
รูปที่ 2.23 การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับตัวอย่างที่ระดับชั้นความลึกต่างๆ.....	37

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.24 การเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่ระดับพลังงานของชั้นวงโคจรต่างๆ.....	38
รูปที่ 2.25 การกระตุ้นให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวโดยใช้อิเล็กตรอน.....	39
รูปที่ 2.26 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในผลึก.....	40
รูปที่ 2.27 เหล็กกล้าเปลี่ยนรูปกลับไปเป็นเหล็กออกไซด์โดยเกิดการกัดกร่อน (เกิดสนิม).....	42
รูปที่ 2.28 ปฏิกริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน.....	43
รูปที่ 2.29 เซลล์เคมีไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบการกัดกร่อน.....	46
รูปที่ 2.30 เส้นโค้งโพลาริเซชันสำหรับการกัดกร่อน แบบหัวผิวหน้าของโลหะ.....	47
รูปที่ 2.31 เส้นโค้งโพลาริเซชันสำหรับการกัดกร่อนที่เกิดฟิล์มพาสซีฟ (Passive Film) คลุมหัวผิวหน้า.....	47
รูปที่ 3.1 โลหะบัดกรีแบบแท่งจากบริษัท Ultracore.....	56
รูปที่ 3.2 เครื่องตัดแบบแรงโน้มถ่วงยี่ห้อ Struers รุ่น Minitom.....	57
รูปที่ 3.3 แม่แบบที่ใช้ในการหล่อเรซิน.....	57
รูปที่ 3.4 ชิ้นงานหลังจากเรซินแข็งตัว.....	58
รูปที่ 3.5 ชิ้นงานทดสอบ.....	59
รูปที่ 3.6 เครื่องขัดยี่ห้อ Struers รุ่น LaboPol-1.....	59
รูปที่ 3.7 ทิศทางการหมุนปรับชิ้นงานในกระบวนการขัดเมื่อเปลี่ยนกระดาษทราย.....	59
รูปที่ 3.8 เครื่องขัดผิวหน้าแบบละเอียด (Polishing Machine).....	60
รูปที่ 3.9 อะลูมินาชนิดครีมขนาด 1 ไมครอน และ 0.3 ไมครอน.....	60
รูปที่ 3.10 เครื่องกัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยไอออน (Ion milling) บริษัท Hitachi.....	61
รูปที่ 3.11 ลักษณะการยิง Ion Beam แบบ Flate Milling.....	61
รูปที่ 3.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ Hitachi รุ่น SU3500.....	62
รูปที่ 3.13 ชิ้นงานทดสอบ.....	63
รูปที่ 3.14 ชิ้นงานทดสอบหลังผ่านการขัดแบบละเอียด.....	64
รูปที่ 3.15 เครื่องล้างทำความสะอาดด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ยี่ห้อ Elmasonic.....	64

## ฎ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.16 โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) .....	65
รูปที่ 3.17 กรดซัลฟิวริก (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) ความเข้มข้น 95 เปอร์เซ็นต์.....	65
รูปที่ 3.18 เครื่องโพเทนชิโอสแตทท์กลาวโนสแตทท์.....	66
รูปที่ 3.19 เซลล์ทดสอบการกัดกร่อน.....	67
รูปที่ 3.20 เบ้าหลอมกราไฟต์ .....	68
รูปที่ 3.21 แม่พิมพ์โลหะที่ใช้ในการหล่อ .....	68
รูปที่ 3.22 ชิ้นงานที่ได้จากการหล่อด้วยแม่พิมพ์โลหะ.....	69
รูปที่ 3.23 เครื่องชั่งน้ำหนักยี่ห้อ Sartorius รุ่น BSA2245-CW.....	69
รูปที่ 3.24 แผ่นทองแดงบริสุทธิ์ 99.99 % ขนาด 30 x 30 x 0.35 มิลลิเมตร .....	70
รูปที่ 3.25 แฉ่แผ่นทองแดงทิ้งไว้ใน Ethyl Alcohol.....	70
รูปที่ 3.26 ตู้อบลมร้อน Memmert รุ่น UF30 .....	71
รูปที่ 3.27 ฟลักซ์ชนิด AMR-3125.....	71
รูปที่ 3.28 ชิ้นงานทดสอบที่วางอยู่บนแผ่นทองแดง .....	72
รูปที่ 3.29 เทาริโพลีรี่ห้อ LPKF รุ่น ProtoFlow E .....	72
รูปที่ 3.30 เส้นใยในการบัดกรี .....	73
รูปที่ 3.31 ชิ้นงานทดสอบหลังการบัดกรี.....	74
รูปที่ 3.32 ชิ้นงานระหว่างรอเรซินแข็งตัว .....	74
รูปที่ 3.33 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ยี่ห้อ Hitachi รุ่น SU3500.....	75
รูปที่ 3.34 การหาพื้นที่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ .....	76
รูปที่ 3.35 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียวโดยใช้โปรแกรม Minitab .....	77
รูปที่ 4.1 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด 100Sn.....	79
รูปที่ 4.2 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีหลังจากเติมธาตุเงิน (Ag).....	80

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.3 (ต่อ) ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีหลังจากเติมธาตุเงิน (Ag).....	81
รูปที่ 4.4 กราฟโพเทนทีโอไดนามิกโพลาริเซชันของ Sn-xAg ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์.....	84
รูปที่ 4.5 กราฟโพเทนทีโอไดนามิกโพลาริเซชันของ Sn-xAg ในสารละลายซัลฟิวริก .....	86
รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนที่ได้จากการทดสอบโพเทนทีโอไดนามิกส์.....	87
รูปที่ 4.7 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนที่ได้จากการทดสอบโพเทนทีโอไดนามิกส์ .....	88
รูปที่ 4.8 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนบนพื้นผิวของโลหะบัดกรีในสารละลายโซเดียมคลอไรด์.....	88
รูปที่ 4.9 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนบนพื้นผิวของโลหะบัดกรีในสารละลายซัลฟิวริก .....	89
รูปที่ 4.10 ลักษณะการแผ่กระจายของโลหะบัดกรี Sn-xAg บนแผ่นทองแดง.....	91
รูปที่ 4.11 อัตราการแผ่กระจายของโลหะบัดกรี.....	92
รูปที่ 4.12 ลักษณะรอยต่อของโลหะบัดกรี Sn-xAg หลังบัดกรี.....	93
รูปที่ 4.13 ความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ.....	95
รูปที่ 4.14 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค Mapping และการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วย EDX ของโลหะบัดกรีชนิด 100Sn.....	96
รูปที่ 4.15 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping และการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วย EDX ของโลหะบัดกรีชนิด 97Sn-3Ag.....	97
รูปที่ 4.16 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping และการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วย EDX ของโลหะบัดกรีชนิด 96.5Sn-3.5Ag.....	98
รูปที่ 4.17 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping และการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วย EDX ของโลหะบัดกรีชนิด 96Sn-4Ag.....	99
รูปที่ 4.18 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping และการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วย EDX ของโลหะบัดกรีชนิด 95Sn-5Ag.....	100
รูปที่ 4.19 แบบจำลองการเกิดสารประกอบเชิงโลหะและชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรี.....	101

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดขยะอิเล็กทรอนิกส์ขึ้นในปริมาณมหาศาลส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นอันตรายต่อร่างกาย เช่น ระบบประสาท ระบบทางเดินอาหาร ระบบหายใจ เป็นต้น ดังนั้นประเทศต่างๆจึงหันมาให้ความสนใจต่อปัญหาที่เกิดขึ้น ซึ่งเห็นได้จากกลุ่มประเทศสหภาพยุโรปได้ออกระเบียบ RoHS : The Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment ที่มุ่งเน้นการจำกัดการใช้สารอันตรายบางประเภทในผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งสารที่ถูกจำกัดการใช้ ได้แก่ ตะกั่ว (Pb) พรอท (Hg) แคดเมียม (Cd) โครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ (Cr-VI) โพลีโบรมิเนท-ไบฟีนิล (PBB) และโพลีโบรมิเนท-ไดฟีนิล-อีเทอร์ (PBDE) [1] ดังนั้นในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์จึงได้มีการปรับใช้โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-free solder) แทนการใช้โลหะบัดกรีแบบเดิมที่มีส่วนผสมของสารตะกั่ว

โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่จะสามารถนำมาทดแทน Sn-Pb ได้ดีมีหลายชนิดทั้งที่เป็นสารประกอบระหว่างโลหะสองชนิด อันได้แก่ Sn-Ag, Sn-Cu, Sn-Zn, Sn-Bi และ Sn-In หรือเป็นสารประกอบระหว่างโลหะสามชนิด อันได้แก่ Sn-Ag-Cu, Sn-Ag-Bi, Sn-Zn-Bi เป็นต้น ซึ่งโลหะบัดกรีแต่ละชนิดก็จะมีลักษณะเด่นแตกต่างกัน [2] โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิดหนึ่งที่นิยมใช้กันในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คือ Sn-Ag เนื่องจากเป็นโลหะบัดกรีที่มีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น มีคุณสมบัติทางกลที่ดี ไม่มีการถือครองสิทธิบัตร และให้รอยบัดกรีที่สวยงาม อย่างไรก็ตามคุณสมบัติบางประการของโลหะบัดกรีชนิดนี้ยังไม่มีข้อมูลที่แพร่หลาย เช่น ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของธาตุเงิน (Ag) ที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-xAg โดยทำการทดลองเฉพาะโลหะบัดกรีที่มีความเข้มข้นของธาตุเงิน (Ag) เท่ากับ 0, 3, 3.5, 4 และ 5 (wt%) จากนั้นทำการศึกษาความสามารถในการกระจายตัวและปฏิกิริยารอยต่อที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะบัดกรีเหล่านี้กับแผ่นทองแดงที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 วินาที

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของธาตุเงิน (Ag) ที่มีผลกระทบท่อโครงสร้างจุลภาคก่อนและหลังบัดกรีกับแผ่นทองแดง (Cu)
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของธาตุเงิน (Ag) ที่มีผลกระทบท่อการต้านทานการกัดกร่อน
3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของธาตุเงิน (Ag) ที่มีผลกระทบท่อความสามารถในการกระจายตัว (Wettability) ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-xAg

## 1.3 ขอบเขตของปริญญาณิพนธ์

1. ทำการทดลองเฉพาะโลหะบัดกรีชนิด Sn-xAg ที่มีความเข้มข้นของธาตุเงิน (Ag) เท่ากับ 0, 3, 3.5, 4 และ 5 (wt%)
2. ทำการทดลองความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนของ Sn-xAg ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และสารละลายซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ )

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงผลกระทบท่อของธาตุเงินที่เติมลงไปต่อโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว
2. ทราบถึงผลกระทบท่อของธาตุเงินที่เติมลงไปต่อความสามารถต้านทานการกัดกร่อน
3. สามารถนำผลการศึกษาไปพัฒนาส่วนผสมชนิดใหม่ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

## บทที่ 2

### แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การบัดกรี (Soldering) [3]

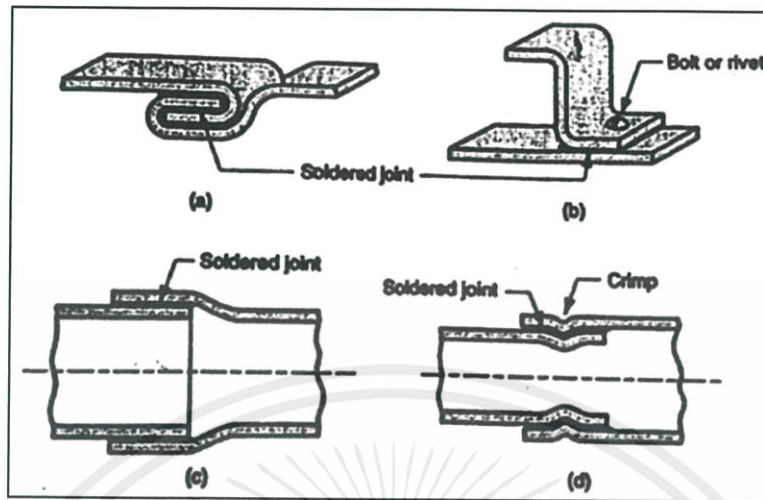
การบัดกรี หมายถึง กรรมวิธีในการยึดหรือต่อ (Joining) โลหะสองชิ้นเข้าด้วยกัน โดยแผ่นโลหะที่นำมาต่อจะไม่หลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกันเหมือนการเชื่อม (Welding) แต่การบัดกรีจะนำเอาโลหะผสมที่เรียกว่า โลหะบัดกรี (Solder) ซึ่งมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าแผ่นโลหะที่นำมาบัดกรี โดยในระหว่างการบัดกรีนั้นโลหะบัดกรีที่หลอมละลายจะกระจายเข้าไปที่รอยต่อระหว่างแผ่นโลหะด้วยแรงดึงตามรูเล็กเป็นการประสานให้แผ่นโลหะทั้งสองชิ้นเกิดยึดติดกัน

การบัดกรีโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. การบัดกรีแข็ง (Brazing) หรือ การประสาน คือ กรรมวิธีการต่อโลหะตั้งแต่สองชิ้นขึ้นไปหรือมากกว่าเข้าด้วยกัน โดยโลหะนั้นจะเป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ การบัดกรีแข็งจำเป็นต้องมีโลหะเติม หรือตัวประสาน (Filler Metal) ซึ่งจะเป็นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า 450 องศาเซลเซียส แต่ต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะที่นำมาทำการบัดกรีแข็งและโลหะเติมนี้จะถูกเติมลงไปที่ยรอยต่อของชิ้นงาน โดยหลักการ โลหะเติมนี้จะหลอมละลายและแทรกตัวซึมเข้าไปในช่องว่างระหว่างรอยต่อด้วยปฏิกิริยาคาปิลารี (Capillary Action) ปกติโลหะเติมจะเป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Non-ferrous Metal) ซึ่งจะให้รอยต่อที่มีความแข็งแรงเกือบเท่ารอยเชื่อม

2. การบัดกร้อ่อน (Soldering) คือ กรรมวิธีการต่อโลหะตั้งแต่สองชิ้นหรือมากกว่าเข้าด้วยกัน โดยที่โลหะนั้นจะเป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ การบัดกร้อ่อนกระทำโดยให้ความร้อนแก่รอยต่อที่อุณหภูมิต่ำกว่า 450 องศาเซลเซียส และใช้โลหะเติมที่เป็นโลหะและมีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ เช่น ตะกั่วหรือดีบุกเติมลงไปที่ยรอยต่อของชิ้นงาน โลหะเติมนี้จะหลอมละลายและแทรกตัวซึมเข้าไปในช่องว่างระหว่างรอยต่อด้วยปฏิกิริยาคาปิลารีซึ่งใช้สำหรับการบัดกรีโลหะแผ่นโดยทั่วไป

ในการบัดกรีแผ่นโลหะ นอกจากจะใช้รอยต่อแบบต่อชนและต่อเกยในลักษณะเดียวกับการประสานแล้ว การบัดกรียังใช้รอยต่อแบบอื่นๆอีกในการประสานชิ้นงานดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างของรอยต่อที่ใช้ทางกล [2]

ข้อดีของการประสานชิ้นงานด้วยการบัดกรี ได้แก่ ใช้พลังงานต่ำเมื่อเทียบกับการเชื่อมหลอมหรือการแล่นประสานและสามารถใช้แหล่งพลังงานความร้อนได้หลากหลาย ซึ่งรอยบัดกรีที่นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดีสามารถให้รอยต่อที่อากาศหรือของเหลวไม่สามารถผ่านไปได้ อีกทั้งรอยต่อจากการบัดกรีสามารถที่จะซ่อมแซมหรือเปลี่ยนแปลงได้ง่าย ในทางกลับกัน การบัดกรีให้รอยต่อที่มีความแข็งแรงต่ำและมีความแข็งแรงน้อยลงเมื่ออุณหภูมิใช้งานของชิ้นงานนั้นๆ สูงขึ้น

ในการบัดกรีนั้นจะต้องอาศัยตัวช่วยประสานหรือน้ำยาประสาน (Flux) เพื่อทำหน้าที่รักษาโลหะบัดกรีและชิ้นงานให้สะอาดในขณะที่บัดกรี

การบัดกรีที่จะทำให้รอยต่อมีคุณภาพดีนั้น ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ 3 ประการ คือ

1. ธรรมชาติของผิวโลหะชิ้นงาน (Base Metal) ซึ่งครอบคลุมถึงชนิดของโลหะชิ้นงาน และสภาพผิวของผิวหน้าโลหะด้วย

2. ชนิดของโลหะบัดกรีที่ใช้ (Solder)

3. ชนิดของน้ำยาประสานหรือฟลักซ์ (Flux)

องค์ประกอบทั้ง 3 ประการนี้จะแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิที่ใช้ในการบัดกรี จึงอาจกล่าวได้ว่า องค์ประกอบทั้ง 3 นี้สัมพันธ์กันด้วยความร้อนที่ใช้ในการบัดกรี

### 2.1.1 โลหะพื้น (Base Metal)

โลหะพื้นที่ถูกบัดกรีส่วนใหญ่จะเป็นเหล็กและทองแดง ในส่วนของอะลูมิเนียมก็มีความสำคัญเช่นกัน เพราะน้ำหนักเบาแต่จะบัดกรียากกว่าเหล็ก ทองแดง และโลหะผสมของเหล็กกับทองแดง จากตารางที่ 2.1 แสดงถึงชนิดของโลหะพื้นต่อความยากง่ายในการบัดกรี แต่กระนั้นจะต้องคำนึงถึงน้ำยาประสานที่เหมาะสมด้วยว่าเป็นชนิดที่ว่องไวหรือไม่ ซึ่งจะมีผลต่อการบัดกรีโดยตรง

ตารางที่ 2.1 ชนิดของโลหะพื้นต่อความยากง่ายในการบัดกรี

โลหะพื้นหรือโลหะชิ้นงาน	การบัดกรี
เงิน ดีบุก แพลลาเดียม โรเดียม ทองแดง บรอนซ์ ทองเหลือง ตะกั่ว นิกเกิลผสมเงิน	ดีเยี่ยม
เบอร์ิลเลียมผสมทองแดง	ดี
เหล็ก สังกะสี นิกเกิล	พอใช้
อะลูมิเนียม อะลูมิเนียมผสมบรอนซ์ เหล็กผสมโครเมียม	ยาก
เหล็กหล่อ โครเมียม ไททาเนียม แทนทาลัม แมกนีเซียม	เคลือบด้วยโลหะ บัดกรีก่อน

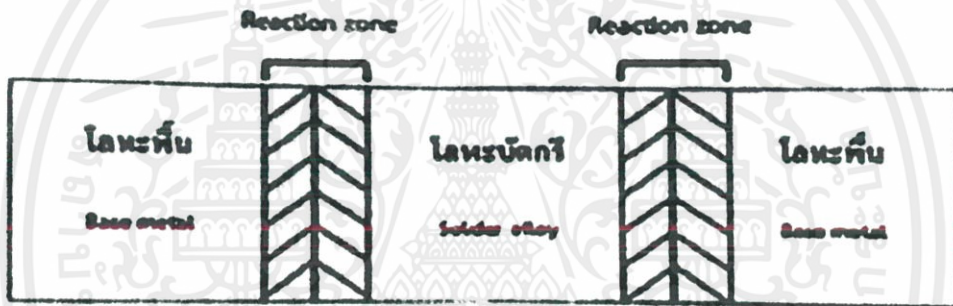
โลหะที่เป็นดีบุก แคดเมียม และทองแดง จะง่ายต่อการเชื่อมประสานของโลหะบัดกรี โดยไม่ต้องทำความสะอาดก่อน และใช้ฟลักซ์ที่ไม่ว่องไวได้ ถ้าเป็นเงินจะเกิดฟิล์มของซัลไฟด์บนผิว ซึ่งเป็นตัวลดประสิทธิภาพการบัดกรีทันที ตะกั่วจะเกิดออกไซด์ที่ผิวเมื่ออยู่ในสภาพขึ้น และอาจต้องทำความสะอาดก่อนการบัดกรี ทองแดง ทองเหลือง บรอนซ์และเหล็ก จะเกิดออกไซด์ได้ในบางบริเวณซึ่งต้องทำความสะอาดหรือล้างด้วยกรดอ่อน ความจำเป็นในการทำความสะอาดจะขึ้นอยู่กับขอบเขตของผิวโลหะที่เกิดออกซิเดชัน และความไวของน้ำยาประสาน

### 2.1.2 โลหะบัดกรี (Solder)

โลหะบัดกรี คือ โลหะผสมที่มีจุดหลอมเหลวต่ำใช้เป็นตัวเชื่อมประสานชิ้นงานโลหะเข้าด้วยกัน โดยทั่วไปอุณหภูมิในการหลอมละลายของตัวเชื่อมประสานควรต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมละลายของชิ้นงานเสมอ โดยโลหะบัดกรีที่ใช้กันแพร่หลายทั่วไป คือ โลหะผสมของตะกั่วและดีบุก (Sn-Pb) ซึ่งมีข้อดี คือ

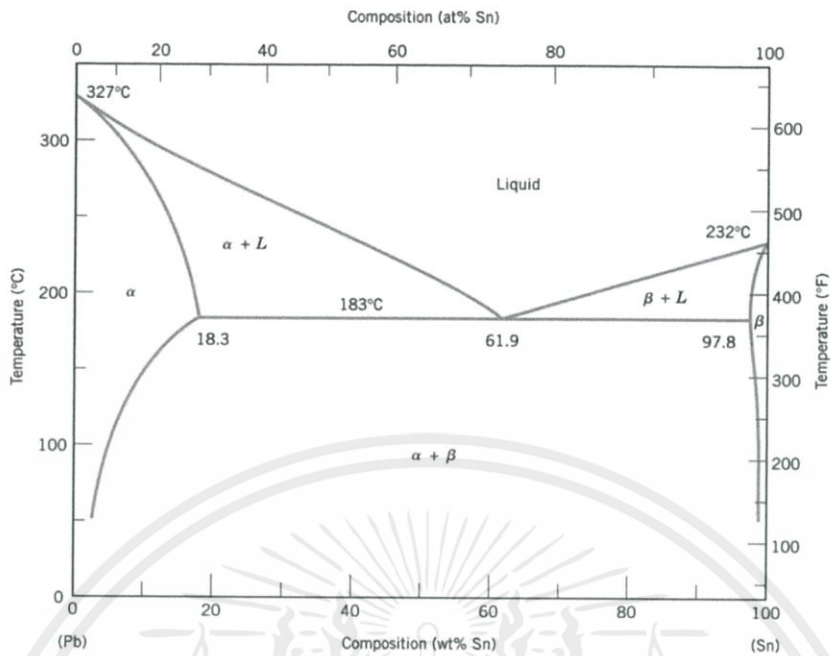
ราคาถูก มีสมบัติการบัดกรีที่ดี อุณหภูมิหลอมละลายต่ำ มีการกระจายตัวบนผิวโลหะต่างๆได้ดี และมีรอยต่อที่มีความแข็งแรง แต่ยังคงมีความเป็นพิษเนื่องจากมีปริมาณตะกั่วผสมอยู่ในปริมาณที่สูง (37-50% โดยน้ำหนัก)

ในระหว่างการบัดกรีนั้นจะก่อให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างโลหะบัดกรีกับแผ่นโลหะชิ้นงาน (Base metal) เกิดเป็นการเกาะติดทางกลระหว่างโลหะบัดกรีกับความหยาบบนผิวหน้าที่ไม่สม่ำเสมอของแผ่นโลหะชิ้นงานพร้อมทั้งเกิดพันธะโลหะระหว่างโลหะบัดกรีกับแผ่นโลหะชิ้นงาน โดยปกติแล้วพันธะโลหะที่เกิดขึ้นนั้นจะมีความแข็งแรงมากกว่าการเกาะติดทางกล นอกจากนี้ในส่วนที่เกิดปฏิกิริยาจะพบการก่อตัวของสารประกอบเชิงโลหะ ( Intermetallic compounds) ระหว่างโลหะบัดกรีกับแผ่นโลหะชิ้นงานด้วย ลักษณะการเกิดการประสานกันระหว่างชิ้นงานโลหะโดยใช้การบัดกรีแสดงไว้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การเกิดการประสานกันระหว่างชิ้นงานโลหะโดยใช้การบัดกรี [2]

เนื่องจากโลหะบัดกรีที่ทำมาจากโลหะผสม (Alloys) ของดีบุกและตะกั่ว (Sn-Pb) มีคุณสมบัติที่ดีหลายประการแต่อาจไม่เหมาะกับการใช้งานบางประเภท จึงทำให้มีการนำเอาโลหะชนิดอื่นเข้ามาผสมในอัตราส่วนที่ต่างกันอย่างเช่น แอนติโมนี (Antimony) เงิน (Silver) แคดเมียม (Cadmium) อินเดียม (Indium) และบิสมัท (Bismuth) เพื่อช่วยให้การควบคุมคุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางกลของตะกั่วบัดกรี เช่น ช่วงของอุณหภูมิการหลอมเหลว ความแข็งและความต้านทานการกัดกร่อน ซึ่งส่วนผสมจะถูกออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้งานโดยโลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมระหว่างดีบุกและตะกั่วในอัตราส่วนต่างกัน จะมีผลทำให้อุณหภูมิหลอมเหลว (Liquidus Temperature) มีความแตกต่างกันดังเฟสไดอะแกรมของ Sn-Pb ที่แสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมที่ประกอบด้วยตะกั่วและดีบุก [3]

จากเฟสไดอะแกรมดีบุกบริสุทธิ์จะเริ่มหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 232 องศาเซลเซียส ส่วนตะกั่วนั้น จะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 327 องศาเซลเซียส หากใช้ตะกั่วเพียงอย่างเดียวอย่างหนึ่งในการบัดกรีจะไม่เหมาะสมเนื่องจากจุดหลอมเหลวสูงเกินไป แต่เมื่อนำตะกั่วและดีบุกมาผสมกันในอัตราส่วนที่พอเหมาะ จะได้โลหะบัดกรีที่มีจุดหลอมเหลวและช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลวที่ต่ำลง เช่นถ้าใช้อัตราส่วนระหว่าง ดีบุก 61.9% และตะกั่ว 38.1% โดยน้ำหนัก ที่ส่วนผสมนี้โลหะผสมจะเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็น ของเหลวทันทีที่อุณหภูมิ 183 องศาเซลเซียส ดังแสดงในเฟสไดอะแกรม แต่ส่วนผสมนี้ไม่นิยมในการใช้งานเนื่องจากทำให้เกิดความเปราะของรอยบัดกรีภายใต้สภาวะการใช้งาน

อัตราส่วนที่นิยมใช้กันมากที่สุดของตะกั่วบัดกรีที่ใช้งานในอิเล็กทรอนิกส์ คือ ดีบุก 60% และ ตะกั่ว 40% โดยน้ำหนัก ซึ่งเรียกว่าตะกั่วแบบ 60/40 และถูกจัดว่าเป็นตะกั่วแบบอ่อน โดยจะหลอมเหลว ที่อุณหภูมิประมาณ 188 องศาเซลเซียส และมีช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลวสูงขึ้นไปประมาณ 5 องศา เซลเซียส ซึ่งจะทำให้ได้ความแข็งแรงที่ดีที่สุดและมีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าต่ำที่สุดด้วย สำหรับรอยต่อ ที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูงหรือต้องการความแข็งแรงทางกลมากๆจำเป็นต้องใช้ตะกั่วบัดกรีแบบแข็ง ซึ่ง ประกอบไปด้วยอัตราส่วนผสมของดีบุกและตะกั่ว 30/70 และมีช่วงหลอมเหลวประมาณ 255-275 องศา เซลเซียส

### 2.1.3 น้ำยาประสานหรือฟลักซ์ (Fluxes)

ในการบัดกรีการประสานจะประสบความสำเร็จหรือไม่ขึ้นอยู่กับความสามารถในการกระจายตัว (Spreading) ของโลหะบัดกรีและภาวะเปียก (Wetting) บนพื้นผิวโลหะพื้น อุปสรรคใหญ่ของการบัดกรี คือ ชั้นฟิล์มและคราบสกปรกต่างๆที่ปกคลุมอยู่บนพื้นผิวโลหะพื้น ซึ่งจะขัดขวางไม่ให้โลหะบัดกรีนั้นเกิดการกระจายตัวและเกิดภาวะเปียกในบริเวณที่จะทำการบัดกรี

ดังนั้นก่อนการบัดกรีทุกครั้งต้องทำความสะอาดพื้นผิวโลหะพื้นด้วยสารเคมี ที่เรียกว่า น้ำยาประสานหรือฟลักซ์ (Fluxes) ซึ่งฟลักซ์มีหน้าที่ทำความสะอาดพื้นผิวโลหะบริเวณที่จะทำการบัดกรี โดยฟลักซ์จะทำปฏิกิริยาและกำจัดชั้นฟิล์มออกไซด์ (Oxide) และคราบสกปรกต่างๆ ให้หมดไปเหลือแต่ผิวหน้าโลหะพื้นแท้ที่แท้จริง และฟลักซ์มีหน้าที่ลดความตึงผิวของโลหะบัดกรีทำให้โลหะบัดกรีมีการไหลที่ดีกระจายตัวบนพื้นผิวโลหะได้ดี และช่วยเพิ่มสภาวะเปียก อีกทั้งฟลักซ์ยังช่วยป้องกันพื้นผิวโลหะพื้นสัมผัสกับออกซิเจนจากอากาศ (Oxidation) เข้ามาปะปนบนพื้นผิวโลหะพื้นที่กำลังทำการบัดกรีเพราะปกติพื้นที่หน้าผิวโลหะพื้นจะมีชั้นฟิล์มออกไซด์อยู่แล้วแต่จะมีการเพิ่มมากขึ้นเมื่อพื้นผิวโลหะได้รับความร้อน ส่วนตกค้างของฟลักซ์หลังจากการบัดกรีต้องไม่กัดกร่อนรอยต่อหรือชิ้นงานโลหะ รวมทั้งไม่นำไฟฟ้าและสามารถกำจัดออกไปได้โดยใช้สารละลายหรือตัวทำละลายเคมี

ฟลักซ์ที่ใช้ในกระบวนการบัดกรีมีหลายรูปแบบ ได้แก่ ของแข็ง (Solid) กึ่งของเหลว (Paste) และแบบของเหลว (Liquid) ดังตารางที่ 2.2 ซึ่งฟลักซ์ที่ดีจะต้องหลอมละลายที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะบัดกรี และฟลักซ์ที่หลอมละลายแล้วต้องแผ่กระจายตัวบนผิวหน้าโลหะพื้นบริเวณที่จะทำการบัดกรีและทำความสะอาดผิวหน้าโลหะพื้นก่อนที่โลหะบัดกรีจะหลอมละลายและแผ่เข้ามาแทนที่ฟลักซ์

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) ในงานแผ่นโลหะต่างๆไป กรดเกลือจะถูกเรียกว่า Raw acid

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

ตารางที่ 2.2 ชนิดของโลหะพื้นและน้ำยาประสานที่เหมาะสม

ชนิดของโลหะ	น้ำยาประสาน	ชื่อทางเคมีของน้ำยาประสาน
แผ่นสังกะสี (Zinc)	สังกะสีคลอไรด์ (Cut Acid)	Zinc Chloride
แผ่นเหล็กอบสังกะสี (Galvanized Steel)	กรดเกลือ (Muriatic Acid)	Hydrochloride Acid
แผ่นดีบุก (Tin)	ยางสน (Rosin)	Colophony
แผ่นเหล็กอบดีบุก (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 ไชสตัว (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)

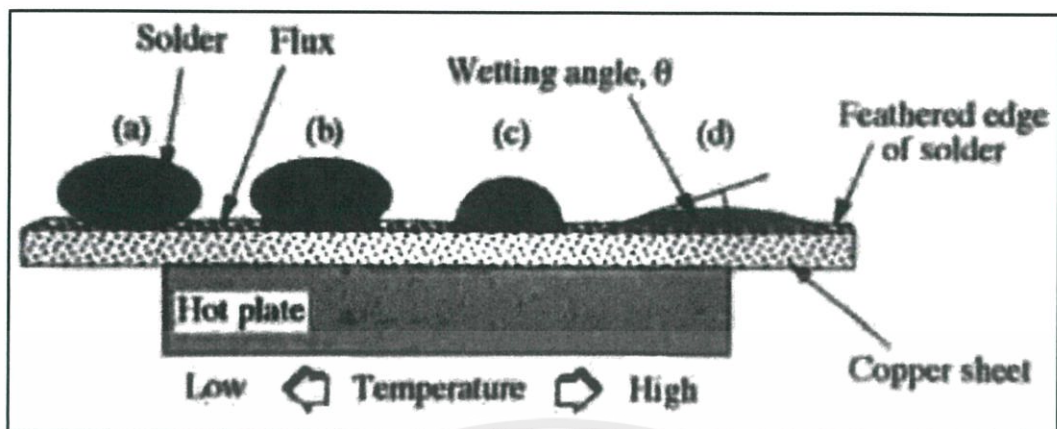
น้ำยาประสานประเภท R, RMA, และ RA จะประกอบไปด้วยยางสนเป็นส่วนประกอบหลัก โดยความแตกต่างระหว่างน้ำยาประสานประเภท R, RMA, และ RA คือระดับของ Chemical Activity ที่เพิ่มขึ้นจาก R ไปยัง RA และในน้ำยาประสานสมัยใหม่ส่วนใหญ่ยางสนคือสิ่งที่ได้จากการสังเคราะห์ทางเคมี โดยจะไม่มีผลลึทธิจากธรรมชาติ

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)

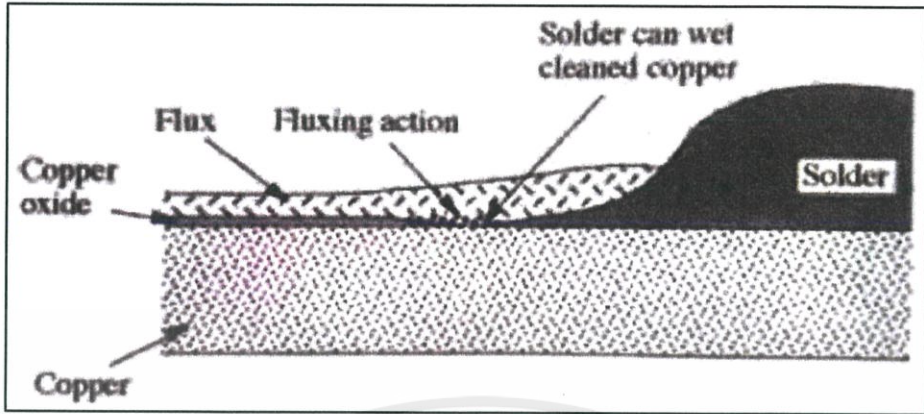
น้ำยาประสานประเภท WS จะประกอบไปด้วยฮาไลด์ ซึ่งใช้กันมาหลายสิบปี โดยเป็นน้ำยาประสานที่นิยมใช้ในการค้าเชิงพาณิชย์และมีการพัฒนาให้ใช้ได้อย่างกว้างขวาง คือใช้ได้ในทุกระดับของ Chemical Activity และถ้าใช้น้ำยาประสานประเภทนี้ในกระบวนการบัดกรี หลังบัดกรีเสร็จต้องมีการล้างทำความสะอาดเอาน้ำยาประสานที่ตกค้างบนบริเวณที่ทำการบัดกรีออก เพราะน้ำยาประสานที่ตกค้างอาจทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ อีกทั้งยังยากต่อการนำไปใช้ในกระบวนการบัดกรีแบบโพล์ด้วยการทำงานของฟลักซ์



รูปที่ 2.4 การแผ่กระจายของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะพื้นของแผ่นทองแดงที่ให้อุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ [3]

รูปที่ 2.4 แสดงแผ่นทองแดงที่มีฟลักซ์เคลือบอยู่บนพื้นผิวและวางอยู่บนแผ่นความร้อน (Hot Plate) ที่กำลังเพิ่มอุณหภูมิของแผ่นทองแดงให้สูงขึ้นเหนืออุณหภูมิหลอมละลายของโลหะบัดกรี ในตอนแรกโลหะบัดกรีจะมีลักษณะเป็นทรงกลมวางอยู่บนแผ่นทองแดง (a) หลังจากนั้นแผ่นความร้อนจะให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจนแผ่นทองแดงมีอุณหภูมิถึงอุณหภูมิหลอมละลายของโลหะบัดกรี จะเห็นได้ว่าโลหะบัดกรีทรงกลมเริ่มหลอมละลาย (b) เริ่มไหล (c) และเกิดภาวะเปียกบนแผ่นทองแดง (d)

จากรูปที่ 2.5 ขณะที่โลหะบัดกรีกำลังหลอมละลายและไหล ในบริเวณผิวหน้าแผ่นทองแดงนี้จะประกอบไปด้วยชั้นออกไซด์ของทองแดง ฟลักซ์ และโลหะบัดกรี โดยในระหว่างกระบวนการบัดกรีนี้ มีขั้นตอนที่สำคัญ 2 อย่าง คือ บนแผ่นทองแดงที่ร้อนโลหะบัดกรีจะเริ่มหลอมละลาย และในขณะเดียวกัน ฟลักซ์เริ่มทำปฏิกิริยา ในระหว่างที่ฟลักซ์ทำปฏิกิริยากับแผ่นทองแดง ออกไซด์บนผิวหน้าของแผ่นทองแดงจะถูกกำจัดออก อย่างไรก็ตามพื้นผิวโลหะบัดกรีและการป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อาจจะเกิดขึ้นอีกอีกทั้งชนิดของฟลักซ์ที่ใช้โดยทั่วไปขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นของออกไซด์ของพื้นผิวที่จะบัดกรี ถ้าชั้นของออกไซด์บางจะใช้ฟลักซ์ที่รุนแรงน้อย (Low Activity) [5]

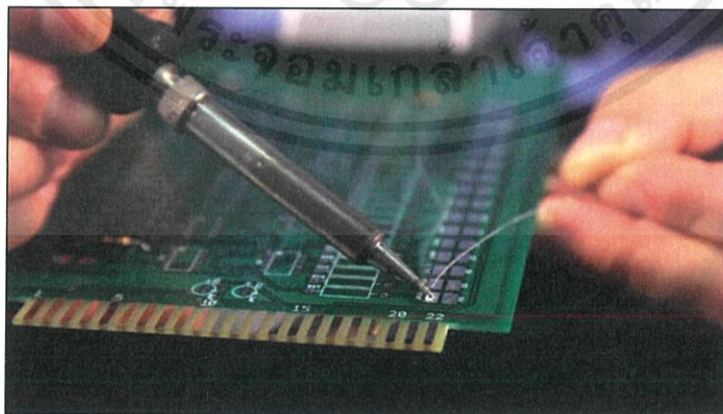


รูปที่ 2.5 การทำงานของฟลักซ์ [3]

#### 2.1.4 วิธีการบัดกรี

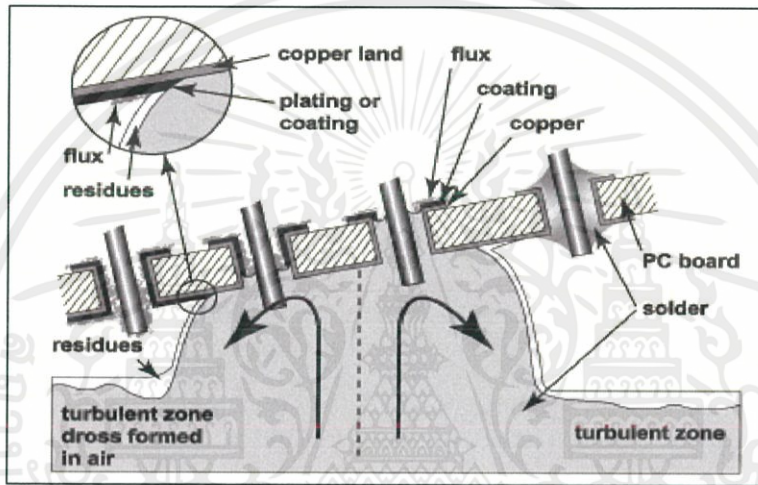
การบัดกรีส่วนใหญ่จะมีวิธีการคล้ายกับวิธีการเล่นประสานหรือการบัดกรีแข็ง (Brazing) เช่น การบัดกรีในเตา (Furnace Solder, FS) การบัดกรีด้วยความต้านทาน (Resistance Soldering, RS) การบัดกรีด้วยอินฟราเรด (Infrared Soldering, IRS) และการบัดกรีแบบจุ่ม (Dip Soldering, DS) เป็นต้น แต่จะมีบางวิธีที่สามารถทำได้เฉพาะการบัดกรีเท่านั้น คือ ไม่สามารถทำการเล่นประสานได้ ได้แก่ การบัดกรีแบบใช้มือ การบัดกรีแบบคลื่น และการบัดกรีแบบรีโฟลว์ เป็นต้น โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การบัดกรีแบบใช้มือ (Hand Soldering) เป็นการบัดกรีด้วยตนเองโดยใช้หัวแร้งและลวดบัดกรี ส่วนใหญ่การบัดกรีแบบนี้จะบัดกรีชิ้นงานที่เป็นข้อต่อขนาดเล็กหรือแผ่นวงจรพิมพ์ที่ไม่ซับซ้อน ดังรูปที่ 2.6



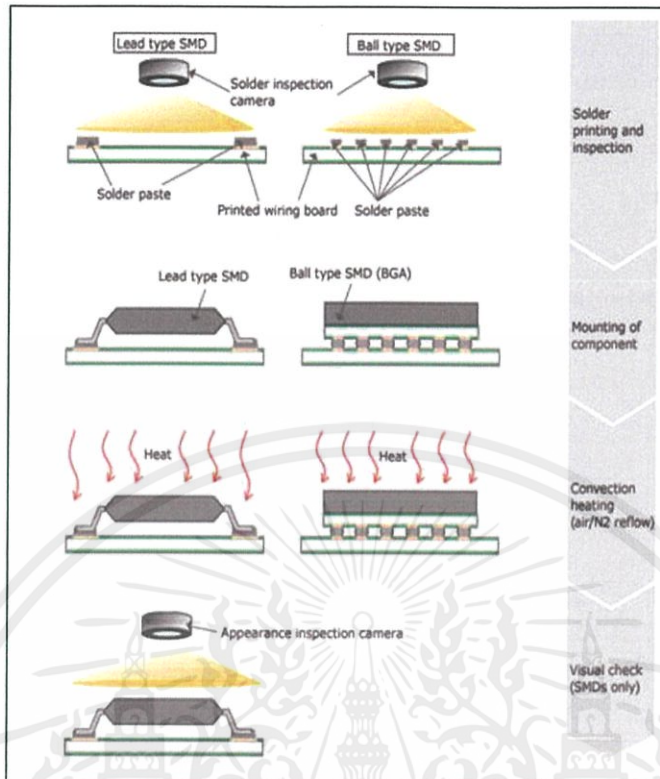
รูปที่ 2.6 การบัดกรีแบบใช้มือ [3]

2. การบัดกรีแบบคลื่น (Wave Soldering) เป็นการบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ลงบนแผ่นวงจรพิมพ์หรือแผ่นปริ้น (Printed Circuit Board, PCB) โดยแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ติดอยู่จะเคลื่อนที่ด้วยสายพานลำเลียงไปยังสถานีฟลักซ์ก่อน เพื่อทำการพ่นฟลักซ์บนแผ่นวงจรพิมพ์ หลังจากนั้นแผ่นวงจรพิมพ์จะเคลื่อนที่ไปบนอ่างของโลหะบัดกรีหลอมเหลว ซึ่งอ่างบัดกรีจะมีปั๊มจุ่มเพื่อสร้างคลื่นของโลหะบัดกรีหลอมเหลว โลหะบัดกรีหลอมเหลวดังกล่าวจะถูกดูดและพ่นไปยังด้านล่างของแผ่นวงจรพิมพ์เพื่อให้โลหะบัดกรีเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ากับวงจรดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การบัดกรีแบบคลื่น [3]

3. การบัดกรีแบบโพลว์ (Reflow Soldering) เป็นการบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดติดตั้งบนพื้นผิว (Surface Mount Components) กับแผ่นวงจรพิมพ์ ในกระบวนการนี้จะใช้โลหะบัดกรีที่อยู่ในรูปของครีม (Paste) โดยโลหะบัดกรีจะผสมอยู่กับฟลักซ์และตัวยึด (Binder) ซึ่งจะถูกสกรีนลงบนตำแหน่งที่ต้องการบัดกรีบนแผ่นวงจรพิมพ์แล้ววางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ลงบนโลหะบัดกรี หลังจากนั้นแผ่นวงจรพิมพ์จะถูกให้ความร้อนจนกระทั่งโลหะบัดกรีหลอมละลายและเชื่อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ากับวงจร เมื่ออุณหภูมิลดลงโลหะบัดกรีก็จะกลายเป็นของแข็งที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดังรูป 2.8



รูปที่ 2.8 การบัดกรีแบบโพลว์ [3]

## 2.2 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-free Solders)

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์มีการใช้โลหะบัดกรี (Solder) เป็นโลหะเติม (Filler Metal) ในการเชื่อมต่อชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆเข้ากับแผงวงจร (Printed Circuit Board) ด้วยวิธีการบัดกรี (Soldering) ซึ่งโลหะบัดกรีดั้งเดิมที่มีการใช้อยู่ทั่วไปจะมีส่วนผสมของตะกั่วและดีบุก (Sn-Pb) โดยตะกั่วถือเป็นสารอันตรายที่ส่งผลต่อสภาพแวดล้อมและร่างกายมนุษย์ จึงทำให้คณะกรรมการการยุโรปหรืออีซี (EC-European Commission) ซึ่งเป็นหน่วยงานที่กำหนดนโยบายและการบริหารงานร่วมของประเทศในเครือสหภาพยุโรปหรืออียู (EU-European Union) ได้ออกข้อบังคับใช้ตั้งแต่วันที่ 1 กรกฎาคม ค.ศ.2006 กำหนดให้ตะกั่วเป็นสารต้องห้ามตามระเบียบ RoHS (Restriction on Hazardous Substances) และ WEEE (Waste from Electrical and Electronic Equipment) จึงทำให้อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตและมีการพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-free Solder) ขึ้นมาทดแทนโลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมของตะกั่ว โดยโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่พัฒนาขึ้นมาขึ้นนั้นต้องมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าหรือเทียบเท่ากับโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิม ตัวอย่างของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว เช่น

กลุ่มโลหะผสมของดีบุกและทองแดง กลุ่มโลหะผสมของดีบุก ทองแดง และเงิน และกลุ่มโลหะผสมของดีบุกและสังกะสี เป็นต้น จะเห็นได้ว่าโลหะหลักที่ยังใช้เป็นส่วนประกอบของโลหะบัดกรียังคงเป็นดีบุกอยู่ ทั้งนี้เนื่องมาจากดีบุกเป็นโลหะที่สามารถหาได้ง่าย มีคุณสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสม เช่น จุดหลอมเหลวต่ำ นำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดี และโลหะผสมของดีบุกยังมีคุณสมบัติในการเป็นโลหะประสานที่ดี ซึ่งการวิจัยและพัฒนาโลหะบัดกรีชนิดใหม่นี้ยังคงต้องการการศึกษาในเรื่องของคุณสมบัติต่างๆของโลหะบัดกรีเหล่านี้ก็เป็นอันมากจึงนำไปใช้งานได้อย่างเหมาะสมและปลอดภัย

### 2.2.1 คุณลักษณะเบื้องต้นในการพิจารณาเลือกใช้โลหะบัดกรีแบบไร้สารตะกั่ว

1. อุณหภูมิหลอมเหลวใกล้เคียงกับโลหะบัดกรีดั้งเดิม โดยทั่วไปอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะบัดกรีแบบไร้สารตะกั่วจะสูงกว่าตะกั่วบัดกรีชนิด 63Sn/37Pb การที่โลหะบัดกรีมีอุณหภูมิหลอมเหลวสูงเวลาทำการบัดกรีอาจทำให้ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์เสียหายหรืออาจทำให้แผ่นวงจรพิมพ์เกิดการเปลี่ยนสีหรือบิดงอเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงเกินไป
2. มีสมบัติด้าน Wettability และ Solderability ที่ดี
3. มีคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ความแข็งแรง ความแข็ง ความทนทานและความสวยงามของรอยบัดกรีต้องไม่ด้อยไปกว่าโลหะบัดกรีชนิด 63Sn/37Pb
4. โลหะบัดกรีต้องสามารถถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และสามารถนำไฟฟ้าได้ดี โดยไม่ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของวงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์ลดลง
5. มีสมบัติต้านทานการล้าที่ดี
6. มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันต่ำ
7. สามารถใช้กับระบบพลาซมาเคลือบที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบัน
8. ต้องไม่เป็นพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมตามข้อบังคับของ RoHs และ WEEE
9. ต้องมีราคาถูก และหาได้ง่าย เพราะราคาของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว โดยทั่วไปจะสูงกว่าโลหะบัดกรี 63Sn/37Pb ซึ่งหมายถึงต้นทุนการผลิตโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วจะมีแนวโน้มสูงขึ้น ซึ่งตรงกันข้าม ราคาของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันที่มีแนวโน้มที่จะต่ำลงเรื่อยๆ
10. ต้องใช้ได้กับเครื่องหลอมโลหะบัดกรีที่มีอยู่โดยไม่ต้องดัดแปลงมากหรือต้องซื้อระบบใหม่ ผู้ผลิตอาจยอมรับการดัดแปลงเล็กน้อย เช่น เพิ่มระบบจ่ายแก๊สไนโตรเจน ( $N_2$ ) ในเครื่องบัดกรีแบบคลื่นหรือเครื่องบัดกรีแบบรีโฟลว์ เพื่อปรับปรุงคุณภาพของรอยบัดกรี เนื่องจากต้นทุนของการติดตั้งระบบจ่ายแก๊สไนโตรเจนโดยทั่วไปจะไม่สูงมากนัก

11. โลหะบัดกรีควรมีจุดหลอมเหลวคงที่ เนื่องจากในการผลิตสินค้าจำนวนมากๆ (Mass volume) ต้องมีการควบคุมความผันแปรต่างๆในกระบวนการผลิตเพื่อไม่ให้ ปริมาณของเสียในการผลิต มากเกินไป ในการผลิตโลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมของโลหะหลายๆชนิด จะควบคุมส่วนผสมให้คงที่ได้ยาก จึง ทำให้โลหะบัดกรีเหล่านี้มีจุดหลอมเหลวที่มีลักษณะเป็นช่วงอุณหภูมิไม่คงที่ ดังนั้นการเลือกใช้โลหะบัดกรี ประเภทนี้อาจทำให้ประสบปัญหาในกระบวนการผลิต

12. ผู้ผลิตแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดติดตั้งบนพื้นผิว (Surface Mounted Device, SMD) หลายรายยังไม่สามารถเลิกใช้สารตะกั่วในเวลาอันสั้น ทำให้ขั้วของอุปกรณ์ SMD หรือลายวงจรบนแผ่นพิมพ์บางชนิดยังมีสารตะกั่วเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึง ความสามารถในการเชื่อมประสานกันระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วกับสารตะกั่ว ที่อยู่บนขั้วของอุปกรณ์ SMD และแผ่นวงจรพิมพ์ด้วย ซึ่งถ้าไม่สามารถเชื่อมประสานกันได้ดีก็อาจทำให้จุดบัดกรีนั้นไม่แข็งแรง เพียงพอต่อการนำไปใช้งานหรือมีผลกับการใช้งานของผลิตภัณฑ์ในระยะยาว (Reliability)

### 2.2.2 โลหะทดแทนสารตะกั่ว [4]

การพิจารณาโลหะที่นำมาทดแทนสารตะกั่ว และนำมาผสมกับดีบุกมีหลายชนิดด้วยกัน เช่น เงิน อินเดียม สังกะสี พลวง ทองแดง และบิสมัท สาเหตุที่โลหะดังกล่าวถูกนำมาพิจารณา เนื่องจากเมื่อนำ โลหะเหล่านี้มาผสมกับดีบุกแล้ว จุดหลอมเหลวที่ได้ของโลหะบัดกรีมีแนวโน้มลดลง มีคุณสมบัติทางไฟฟ้า และทางกายภาพที่ดีพอเป็นที่ยอมรับได้

โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีการพัฒนา เพื่อทดแทนโลหะบัดกรีชนิดผสมตะกั่ว สามารถจัดแบ่ง กลุ่มตามช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวออกเป็น 4 กลุ่ม ดังนี้

1. กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำกว่า 180 องศาเซลเซียส ได้แก่ โลหะผสมระบบ Sn-Bi, Sn-In และ Bi-In ตัวอย่างแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำกว่า 180 องศาเซลเซียส

ระบบโลหะผสม	องค์ประกอบ (wt%)	ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)
Sn-Bi	Sn-58Bi	138
Sn-In	Sn-52In	118
Sn-In	Sn-50In	118-125
Bi-In	Bi-33In	109

2. กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 180 ถึง 200 องศาเซลเซียส ตัวอย่างแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 180 ถึง 200 องศาเซลเซียส

ระบบโลหะผสม	องค์ประกอบ (wt%)	ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)
Sn-Zn	Sn-9Zn	198.5
Sn-Zn-Bi	Sn-8Zn-3Bi	188-189
Sn-Bi-In	Sn-20Bi-10In	143-193

3. กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 200 ถึง 230 องศาเซลเซียส ตัวอย่างแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 200 ถึง 230 องศาเซลเซียส

ระบบโลหะผสม	องค์ประกอบ (wt%)	ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)
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-7Bi	207-212
Sn-Ag-Cu	Sn-3.8Ag-0.7Cu	217
Sn-Ag-Cu-Sb	Sn-2Ag-0.8Cu-0.5Sb	216-222

4. กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวสูงกว่า 230 องศาเซลเซียส ตัวอย่างแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวสูงกว่า 230 องศาเซลเซียส

ระบบโลหะผสม	องค์ประกอบ (wt%)	ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)
Sn-Sb	Sn-5Sb	232-240
Sn-Au	Sn-80Au	280
Sn-Ag-Sb	Sn-25Ag-10Sb	233

ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบของโลหะบัดกรีชนิดต่างๆที่สามารถนำมาใช้แทนตะกั่วบัดกรี

อัตราส่วน	จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	ความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (ปอนด์ต่อลูกบาศก์นิ้ว)
63Sn-37Pb	183	0.318
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
93.5Sn-3.5Ag-1.5Bi	216-220	0.269
96.5Sn-3.5Ag	221	0.368
99.3Sn-0.7Cu	227	0.264
95Sn-5Sn	232-240	0.263
96.2Sn-2.5Ag-0.8Cu-0.5Sb	213-219	0.267

ปัจจุบันชนิดของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วได้มีการพัฒนาขึ้นเป็นจำนวนมาก บางชนิดถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆบ้างแล้ว และยังมีอีกจำนวนมากที่กำลังอยู่ในระหว่างการวิจัยเท่านั้น แต่ยังไม่มีการนำไปประยุกต์ใช้ ซึ่งตัวอย่างของโลหะบัดกรีเหล่านี้แสดงในตารางที่ 2.7

## 2.2.3 แนวทางการเลือกธาตุที่เป็นส่วนผสมที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิต

### 2.2.3.1 ธาตุเจือที่ใช้ผสมกับดีบุกเพื่อผลิตเป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

โลหะบัดกรีทั่วไปจะมีส่วนผสมของโลหะดีบุกเป็นหลัก เนื่องจากดีบุกมีคุณสมบัติการแพร่กระจายตัวเวลาบัดกรีได้ดี ส่วนธาตุเจือที่นำมาผสมกับดีบุกทำเป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วมีหลายชนิดด้วยกัน ธาตุโลหะเจือที่สำคัญๆ ได้แก่ เงิน (Ag) อินเดียม (In) บิสมัท (Bi) พลวง (Sb) ทองแดง (Cu) และสังกะสี (Zn) เป็นต้น

### 2.2.3.2 สมบัติของธาตุเจือชนิดต่างๆ

1. เงิน (Ag) เป็นโลหะที่ใช้เป็นส่วนผสมในบัดกรี มีราคาสูง โลหะเงินช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะบัดกรี ทำให้สมบัติการแพร่กระจายดีขึ้นและมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำลง

2. อินเดียม (In) เป็นโลหะที่มีราคาค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับธาตุเจือชนิดอื่นๆ โลหะบัดกรีที่มีอินเดียมผสมจะมีราคาแพง แต่มีข้อดีคือ อุดมภูมิหลอมเหลวต่ำ ตัวอย่างเช่น อินเดียมที่เติมลงในโลหะบัดกรีชนิด Sn-Zn สามารถช่วยลดอุณหภูมิหลอมเหลวลง ระยะห่างระหว่างเส้นของแข็งและของเหลวกว้างขึ้น จึงเป็นข้อดีสำหรับการใช้งานกับอุปกรณ์ที่ทนความร้อนได้ต่ำ และยังสามารถลดการเกิดออกซิเดชันและเพิ่มคุณสมบัติความเหนียวให้ดีขึ้น

3. บิสมัท (Bi) โลหะดีบุกผสมบิสมัทที่อัตราส่วน 42Sn-58Bi มีโครงสร้างแบบยูเทคติก โลหะบัดกรีในกลุ่มนี้มีจุดเด่นคือ มีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ต่ำมากคือ 139 องศาเซลเซียส จึงเป็นข้อดีคือ ใช้งานกับอุปกรณ์ที่ไม่สามารถทนความร้อนในการบัดกรีสูงได้ ลักษณะโครงสร้างของโลหะบัดกรีชนิดนี้จะมีลักษณะเป็นแผ่นแบบ Lamellar มีความสามารถในการเชื่อมประสานที่ดีมากแต่มีข้อเสียคือบิสมัทมีราคาสูง

4. พลวง (Sn) การเติมพลวงในปริมาณที่พอเหมาะจะช่วยเพิ่มสมบัติการต้านทานคืบและการต้านทานการล้าของของโลหะบัดกรีให้ดีขึ้น แต่พลวงมีข้อเสียคือ ทำให้สมบัติการเปียกและการแพร่กระจายของโลหะบัดกรีน้อยลง

5. ทองแดง (Cu) เมื่อผสมดีบุกกับทองแดงในอัตราส่วน 99.3Sn-0.7Cu จะทำให้เกิดโครงสร้างยูเทคติก มีจุดหลอมเหลวที่ 227 องศาเซลเซียส โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟส  $Cu_6Sn_5$  ลักษณะเป็นแท่งฝังอยู่ในเนื้อดีบุก ทองแดงจะทำให้โลหะบัดกรีมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ข้อเสียของโลหะบัดกรีในกลุ่ม Sn-Cu คือการมีธาตุเจือผสมอยู่น้อยจึงอาจเกิดเส้นใยดีบุก (Tin Whiskers) ขึ้นได้ ซึ่งปัญหาเหล่านี้นำไปสู่การก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก

6. สังกะสี (Zn) เป็นโลหะที่มีจุดเด่นด้านอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำและราคาถูก โลหะบัดกรีชนิด ดีบุก-สังกะสีที่จุดยูเทคติก (Sn-Zn) มีอุณหภูมิจุดหลอมเหลวที่ 199 องศาเซลเซียส ซึ่งใกล้เคียงกับโลหะ บัดกรีชนิด Sn-Pb ที่จุดยูเทคติก (183 องศาเซลเซียส) โลหะผสม Sn-9wt.%Zn ประกอบด้วยเฟส 2 เฟส คือ Sn Matrix และ Hexagonal Zn ซึ่งรวมตัวกับดีบุกในลักษณะเป็นแผ่นบางสลับกันระหว่างเฟส Sn Rich กับ Zn Rich ซึ่งทั้งดีบุกและสังกะสีต่างสามารถทำปฏิกิริยากับโลหะพื้นที่เป็นทองแดงได้ โลหะบัดกรี ในกลุ่ม Sn-Zn มีข้อจำกัดบางประการ เช่น Zn สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ง่าย เกิดเป็นสังกะสี ออกไซด์ (Dross) มาก เมื่อใช้งานในกระบวนการบัดกรีแบบ Wave Soldering นอกจากนี้แล้ว Zn ยังไว ต่อปฏิกิริยากับสารเคมีที่ผสมอยู่ในฟลักซ์ที่ใช้กับโลหะบัดกรีในกลุ่ม Sn-58Bi ทำให้เกิดการกัดกร่อน

สาเหตุที่โลหะดังกล่าวถูกนำมาพิจารณาก็เพราะว่า เมื่อนำโลหะเหล่านี้มาผสมกับดีบุกแล้ว โดยรวมจะทำให้จุดหลอมเหลวมีแนวโน้มที่ต่ำลง มีสมบัติทางไฟฟ้าและกายภาพที่ดีพอเป็นที่ยอมรับได้ แต่ เนื่องจากโลหะที่นำมาทดแทนเป็นโลหะที่หายาก และมีอยู่อย่างจำกัด จึงนำมาใช้เป็นส่วนผสมในปริมาณ น้อย

โลหะบัดกรีที่ส่วนผสมของโลหะ 4-5 ชนิด บรรดาผู้ผลิตต่างๆ พยายามที่จะทำการทดลองหา ส่วนผสมระหว่างโลหะหลายๆชนิด เพื่อให้ได้ส่วนผสมที่ดีที่สุด แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าส่วนผสมเหล่านี้จะให้ จุดหลอมเหลวที่มีค่าช่วง ซึ่งทำให้การควบคุมกระบวนการผลิตทำได้ลำบาก และการผสมโลหะหลายๆชนิด เข้าด้วยกันให้มีอัตราส่วนที่คงที่แน่นอนในแต่ละครั้งก็ทำได้ยากกว่าการผสมโลหะเพียงแค่ 2-3 ชนิด การที่ ส่วนผสมเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยก็อาจทำให้คุณสมบัติโดยรวมเปลี่ยนไปมาก ด้วยเหตุผลนี้ทำให้ โลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมของโลหะ 4-5 ชนิด ยังไม่เป็นที่นิยมในปัจจุบัน แต่ก็มีบางบริษัทในประเทศญี่ปุ่นที่ มีการใช้โลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมของโลหะ 5 ชนิด

นอกจากนี้ความเหมาะสมในการนำโลหะบัดกรีมาใช้งานยังขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตที่มีการใช้ อยู่ เช่น ถ้ากรณีเป็นโลหะบัดกรีแบบแท่ง (Solder Bar) หรือโลหะบัดกรีแบบเส้น (Solder Wire) สำหรับ ใช้กับเครื่อง Wave Soldering หรือการบัดกรีด้วยมือตามลำดับ จะมีหลักเกณฑ์ในการพิจารณาดังนี้

1. อุณหภูมิของบ่อตะกั่ว (Solder Pot) ไม่ควรเกิน 260 องศาเซลเซียส
2. ปริมาณงานเสียต่ำ
3. ราคาต่ำ
4. มีขี้ตะกั่ว (Dross) น้อย

การพิจารณาเลือกโลหะบัดกรีสำหรับการบัดกรีด้วยมือมีหลักเกณฑ์คล้ายๆกับการบัดกรีแบบ คลื่น คือ ในเรื่องราคาและจุดหลอมเหลวที่ไม่สูงเกินไป ทำให้ไม่ต้องปรับอุณหภูมิของหัวแร้งให้สูงตามไป ด้วย ในกรณีของตะกั่วแบบครีม (Solder Paste) ที่ใช้กับเครื่องบัดกรีแบบรีโฟลว์ เรื่องของราคาไม่ใช่

ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติบางประการระหว่าง Sn-Ag กับ Sn-Pb

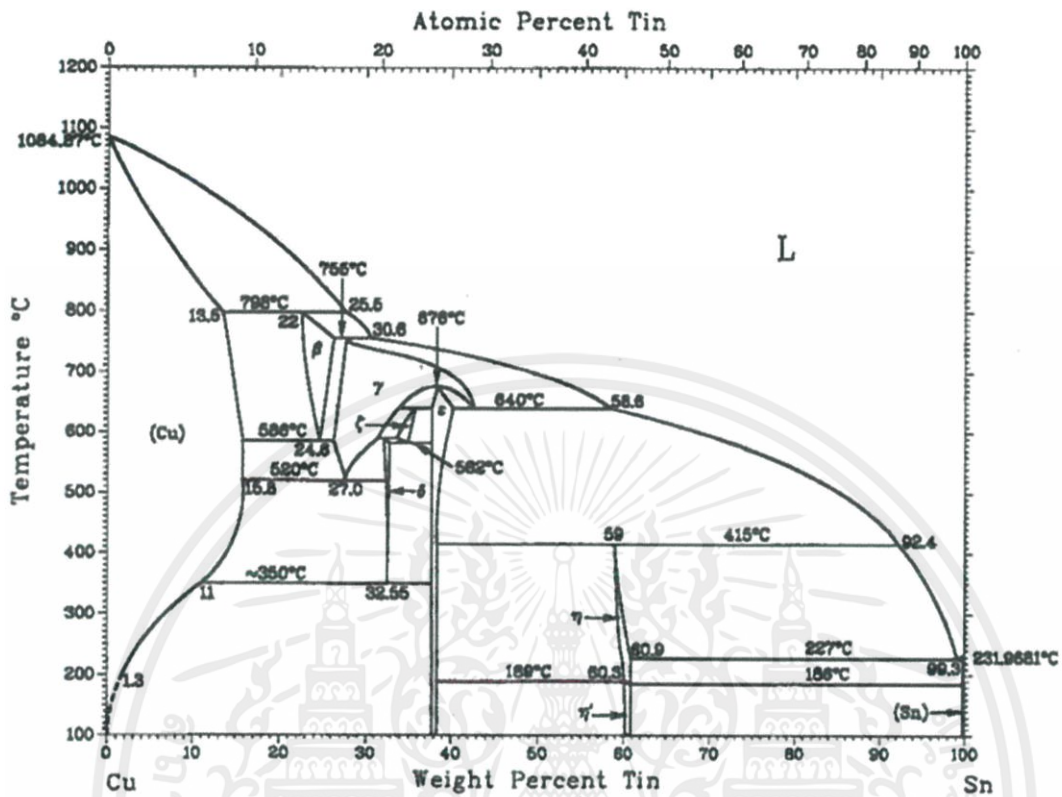
ส่วนผสม	จุดหลอมเหลว (°C)	ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวด้านความร้อน (Coefficient of thermal expansion) (ppm/ °C)	สภาพการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) (%IACS)	สภาพการต้านทานไฟฟ้า (Electrical resistivity) (μΩ/cm)	ความตึงผิว (Surface tension) (N/m)	สภาพการนำความร้อน (Thermal conductivity) (W/[mK])
63Sn-37Pb	183	8400	21.4@25 °C	11.5	14.99	0.49	57.9@32.6 °C
96.5Sn-3.5Ag	221	7290	22@20 °C	14	12.31	0.48	55.3@23.9 °C

### 2.3 เฟสไดอะแกรมสำหรับโลหะบัดกรี

เฟสไดอะแกรม (Phase Diagram) มีความสำคัญในการออกแบบ และควบคุมกระบวนการทางความร้อน (Heat Treatment) ซึ่งเฟสไดอะแกรมจะแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างผลึกกับคุณสมบัติเชิงกลต่างๆ จุดหลอมเหลว โดยจะแปรตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ความดัน และส่วนผสม ซึ่งในหัวข้อนี้จะแสดงตัวอย่างของเฟสไดอะแกรมสำหรับโลหะบัดกรีที่สำคัญๆ คือ เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก-ทองแดง เฟสไดอะแกรมของดีบุก-พลวง เฟสไดอะแกรมของทองแดง-พลวง และเฟสไดอะแกรมของดีบุก-เงิน

#### 2.3.1 เฟสไดอะแกรมของดีบุก-ทองแดง

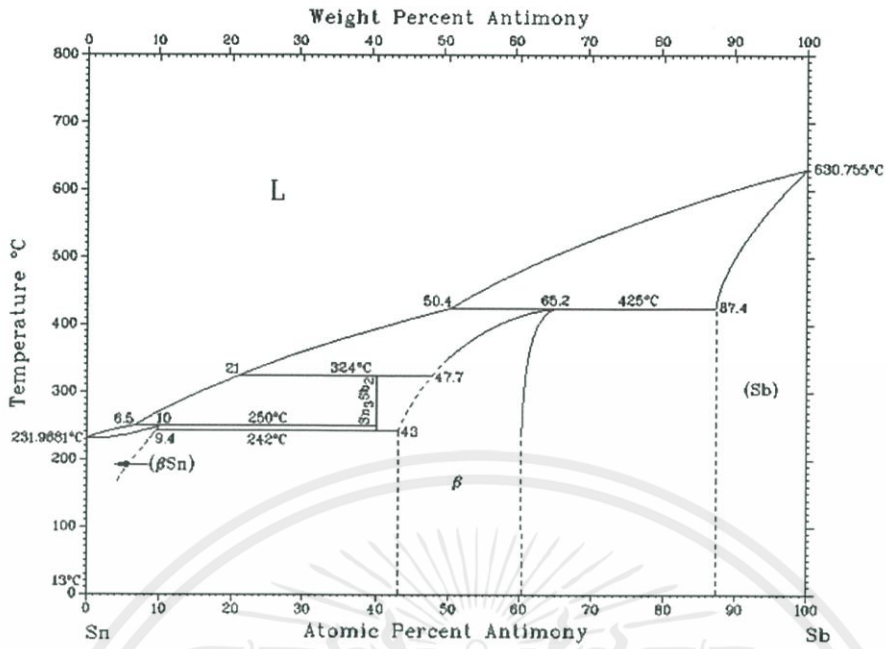
ปฏิกิริยาที่สำคัญประการหนึ่งของดีบุก-ทองแดง คือปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 226.8 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นปฏิกิริยายูเทกติก ที่จุดนี้ของเหลวจะเปลี่ยนไปเป็นของแข็ง Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> และ Sn ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 เฟสไดอะแกรมของดีบุก-ทองแดง [6]

### 2.3.2 เฟสไดอะแกรมของดีบุก-พลวง

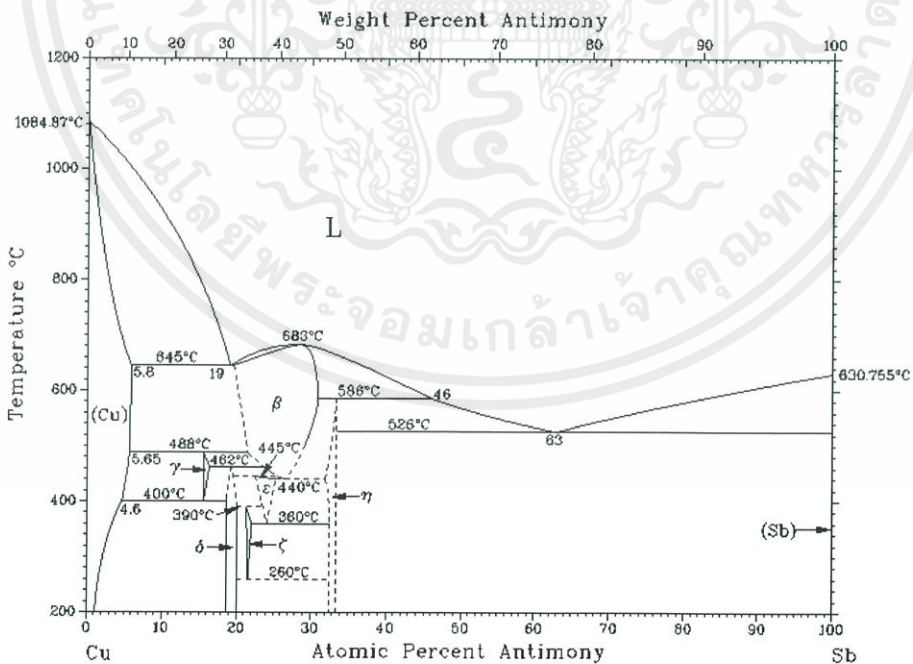
ปฏิกิริยาที่สำคัญของดีบุก-พลวง คือปฏิกิริยาเพอริเทคติกที่อุณหภูมิ 425 องศาเซลเซียส เกิดการรวมตัวของเฟสของเหลวกับพลวงที่อยู่ในสถานะของแข็งได้เป็นเฟส  $\beta$ -SnSb นอกจากนี้ ที่อุณหภูมิ 324 องศาเซลเซียส ยังมีการรวมตัวของเฟสของเหลวกับ  $\beta$ -SnSb ได้เป็นเฟส  $\text{Sn}_3\text{Sb}_2$  และที่อุณหภูมิ 243 องศาเซลเซียส มีการรวมตัวของเฟสของเหลวกับ  $\text{Sn}_3\text{Sb}_2$  จนเกิดเป็นเฟส Sn ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 เฟสไดอะแกรมของดีบุก-พลวง [6]

### 2.3.3 เฟสไดอะแกรมของทองแดง-พลวง

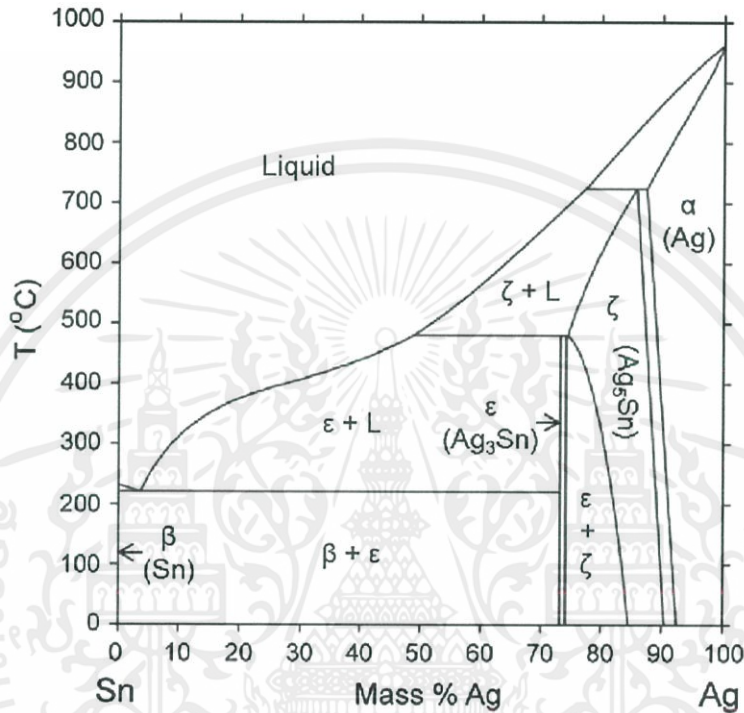
ปฏิกิริยาที่สำคัญของทองแดง-พลวง คือปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 526 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นปฏิกิริยา ยูเทกติก ทำให้ของเหลวเปลี่ยนไปเป็นของแข็ง  $Cu_2Sb$  และ Sb ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 เฟสไดอะแกรมของทองแดง-พลวง [6]

### 2.3.4 เฟสไดอะแกรมของดีบุก-เงิน

ปฏิกิริยาที่สำคัญของดีบุก-เงิน คือ ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 221 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นปฏิกิริยายูเทกติก ที่จุดนี้ของเหลวจะเปลี่ยนไปเป็นของแข็ง 2 เฟส คือ  $Ag_3Sn$  และ Sn ซึ่งลักษณะโครงสร้างหลังจากผ่านปฏิกิริยายูเทกติก จะมีลักษณะการเรียงตัวสลับกันแบบ Lamella แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 เฟสไดอะแกรมของดีบุก-เงิน [6]

### 2.4 ความสามารถในการกระจายตัว (Wettability)

ความสามารถในการกระจายตัว คือ ค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะพื้น โดยถ้าค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีนั้นมีค่าสูง แสดงว่าโลหะบัดกรีชนิดนั้นมีการกระจายตัว (Wetting) ที่ดี มีการไหล (Fluidly) ที่ดี และมีแรงยึดติด (Adhesive) บนพื้นผิวโลหะพื้นที่ดี ผลที่ได้คือ เกิดการเชื่อมประสานและรอยบัดกรีที่ติดบนพื้นผิวโลหะพื้น

ค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะนั้นสามารถบ่งบอกความสามารถ ในการบัดกรีได้ ดังนั้นสิ่งที่จำเป็นเวลาจะทำการบัดกรีต้องคำนึงถึงโลหะบัดกรีที่มีค่าความสามารถในการกระจายตัว (Wettability) บนพื้นผิวโลหะสูง ซึ่งค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีนั้นสามารถหาได้ 3 วิธี ได้แก่

1. Spread Test Method อ้างอิงมาตรฐาน JIS Z 3198-3: 2003 (JWES), Test Methods for Lead-free Solders – Part 3: Methods for Spread Test

2. Contact Angle Method อ้างอิงมาตรฐาน JIS Z 31984-4:2003 (JWES), Test Methods for Lead-free Solder – Part 4: Methods for Solderability Test by A Wetting Balance Method and A Contact Angle Method

3. Wetting Balance Method อ้างอิงมาตรฐาน JIS Z 31984-4:2003 (JWES), Test Methods for Lead-free Solder – Part 4: Methods for Solderability Test by A Wetting Balance Method and A Contact Angle Method

#### 2.4.1 วิธีทดสอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรี (Spread Test Method) [7]

ตามมาตรฐานของ JIS Z 3198-3: 2003 (JWES) ว่าด้วยเรื่อง Test Methods for Lead-free Solders – Part 3: Methods for Spread Test

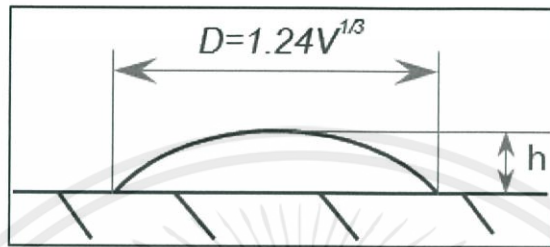
Spread Test Method คือ วิธีการทดสอบหาค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะพื้น โดยมีวิธีการทดสอบดังนี้

1. หยดน้ำยาประสาน 0.02 มิลลิลิตร ที่จุดศูนย์กลางของแผ่นทองแดงและวางโลหะบัดกรีทดสอบที่จุดศูนย์กลางบนแผ่นทองแดง
2. ให้ความร้อน 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 2 นาที เพื่อให้ฟลักซ์ระเหยออกไป
3. ตั้งค่าอุณหภูมิอ่างบัดกรีที่ 300 องศาเซลเซียส  $\pm$  3 องศาเซลเซียส
4. นำชิ้นงานทดสอบสัมผัสกับโลหะบัดกรีหลอมเหลวลงในอ่างบัดกรี และกำจัดชั้นฟิล์มออกไซด์บนผิว หน้าโลหะบัดกรีที่หลอมด้วย Scrubber
5. ทิ้งชิ้นงานทดสอบไว้ในอ่างบัดกรีเป็นเวลา 30 วินาที จนโลหะบัดกรีที่ใช้ทดสอบหลอมละลายบนแผ่นทองแดง
6. เลื่อนชิ้นงานขึ้น จากนั้นปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
7. ล้างน้ำยาประสานออกโดยใช้สารละลายที่เหมาะสม

การหาค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนผิวโลหะโดย Spread Test Method สามารถหาได้ดังนี้

#### 2.4.1.1 วิธีวัดค่าตัวประกอบกระจายตัว (Spread Factor, $S_f$ ) [8]

หลังจากทำการทดสอบโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดงแล้ว แล้วปล่อยให้โลหะบัดกรีเย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง ทำการวัดค่าความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรีที่แข็งตัวแล้ว ด้วยไมโครมิเตอร์ดังรูปที่ 2.13 และนำค่าที่ได้มาหาค่าตัวประกอบกระจายตัว (Spread Factor,  $S_f$ ) ดังสมการที่ 2.1



รูปที่ 2.13 ความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรี [8]

$$S_f = \frac{D - h}{D} \times 100 \quad (2.1)$$

เมื่อ  $h$  คือ ความสูงของโลหะบัดกรีที่แผ่กระจาย

$D$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรีที่ถูกทดสอบ เมื่อ  $D = 1.24V^{1/3}$

$V$  คือ ปริมาตรของโลหะบัดกรีที่ใช้ทดสอบ

#### 2.4.1.2 ค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread Ratio, $S_r$ )

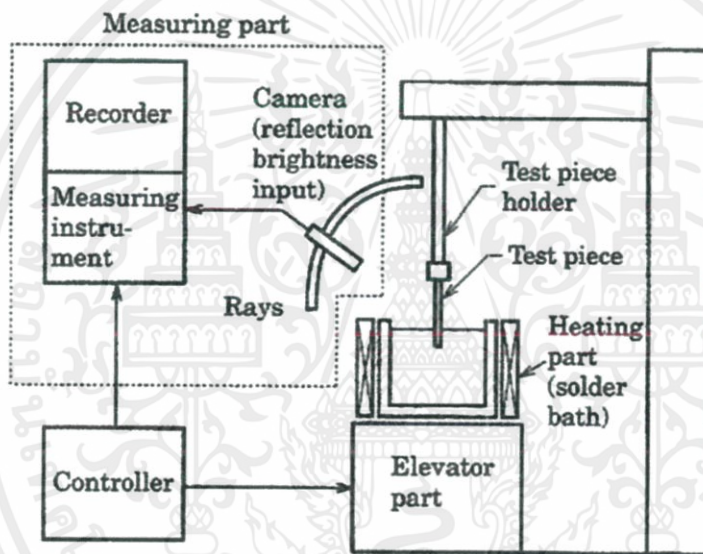
นอกจากนี้ค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรียังสามารถคำนวณเป็นค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread Ratio,  $S_r$ ) ได้ดังสมการที่ 2.2

$$S_r = \frac{\text{Plan are of spread on the substate surface}}{\text{Plan area of the original pellet}} \quad (2.2)$$

## 2.4.2 การทดสอบค่ามุมสัมผัสหลังการบัดกรี (Contact Angle Method) [9]

ตามมาตรฐาน JIS Z 3198-4 :2003 (JWES), Test Methods for Lead-free Solders – Part 4 : Methods for Solderability Test by A Wetting Balance Method and A Contact Angle Method กล่าวว่

Contact Angle เป็นวิธีการทดสอบในการวัดค่ามุมสัมผัสที่บริเวณปลายขอบของโลหะบัดกรีเมื่อผ่านกระบวนการทดสอบ วิธีการนี้จะทำการวัดมุมสัมผัสของโลหะบัดกรีที่แผ่กระจายบนชิ้นงานทดสอบ จากจุดของแผ่นชิ้นงานทดสอบที่ทำการจุ่มและดึงขึ้นจากอ่างโลหะบัดกรีและบันทึกผลที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 2.14 ซึ่งการทดสอบนั้นมีขั้นตอนต่างๆ แสดงตามตารางที่ 2.9 และรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.14 Contact Angle Method [9]

### ขั้นตอนการทดสอบ

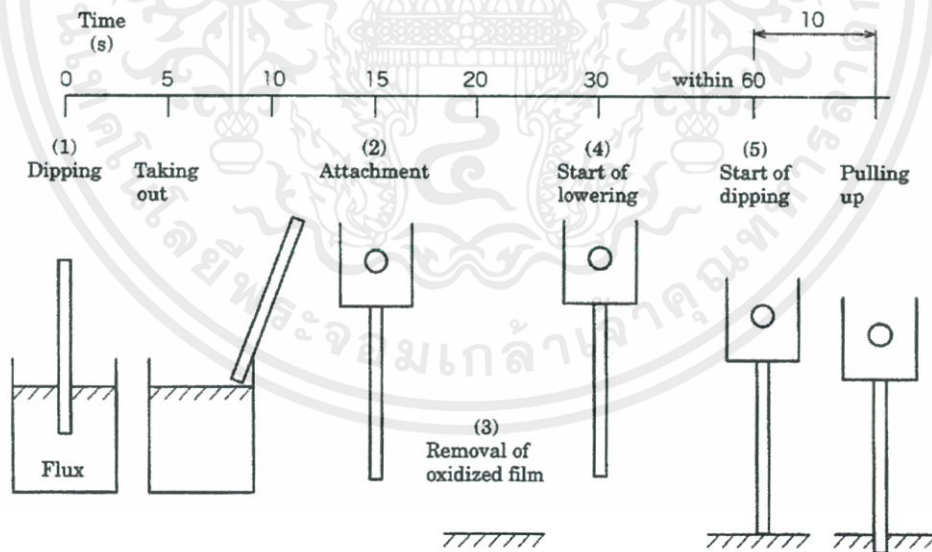
1. หลอมโลหะบัดกรีในอ่างบัดกรี (Solder Tank) ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส  $\pm$  3 องศาเซลเซียส
2. ใส่ฟลักซ์ที่ใช้ในการทดลองตามมาตรฐานลงในจานทดลอง (Petri Dish)
3. จุ่มชิ้นงานทดสอบลงในฟลักซ์ ลึกลงไป 4-5 มิลลิเมตรจากขอบ เป็นเวลา 5 วินาที แล้วยกขึ้นเพื่อกำจัดออกไซด์ที่ผิวหน้า
4. ให้นำชิ้นงานทดสอบที่ทำการจุ่มฟลักซ์แล้ว จุ่มลงในอ่างบัดกรีอย่างช้าๆ ลึกลงไป 2 มิลลิเมตร ทิ้งไว้ประมาณ 10 วินาที และเริ่มให้เครื่องบันทึกผลทำงาน จากนั้นบันทึกผลค่ามุมสัมผัส (Contact Angle) ที่

เปลี่ยนแปลงไป ณ เวลาหนึ่งๆ ของโลหะบัดกรีบนแผ่นขึ้นทดสอบที่เกิดการยึดประสานกันที่ผิวหน้าของชิ้นงานในระหว่างการจุ่ม เมื่อเวลาเปลี่ยนไป

ตารางที่ 2.9 ลำดับเวลาในการดำเนินการทดสอบ

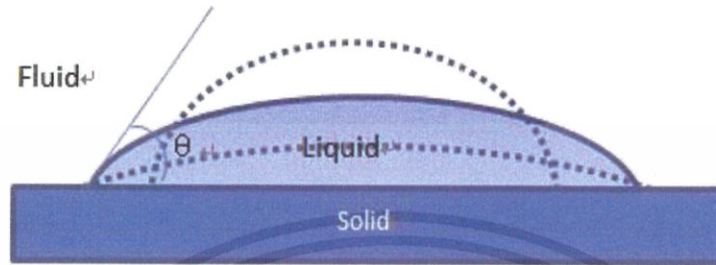
Unit : s

Operation Item	Time	Continuing Time
(1) Dipping into flux	0	5
(2) Attachment of a test piece to a holder	15	-
(3) Removal of the oxidized film from a solder bath surface	20	-
(4) Start of lowering of the test piece	30	-
(5) Dipping into the solder bath	60 or under	10



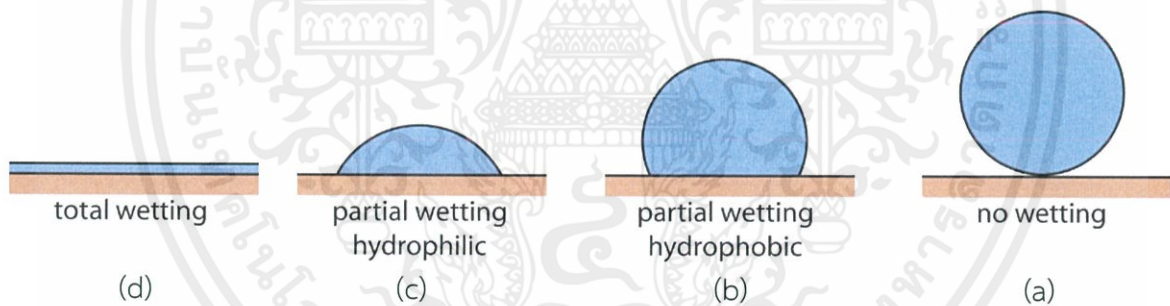
รูปที่ 2.15 ลำดับขั้นตอนในช่วงเวลาทดสอบ [9]

โลหะพื้นและรูปร่างของโลหะบัดกรีหลอมเหลว ซึ่งมุมสัมผัสที่ได้นั้นเกิดจากการที่ของเหลวมีอาณาเขตติดต่อกัน 3 เฟส ได้แก่ ของแข็ง (Solid, S) ของเหลว (Liquid, L) และก๊าซ (Gas, G)



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ของมุมสัมผัสที่มีต่อโลหะบัดกรี พื้นผิวโลหะและบรรยากาศโดยรอบ [10]

จากรูปที่ 2.16 มุมที่เกิดจากระนาบของแข็งและของเหลว ( $\theta$ ) เรียกว่า Wetting Angle หรือ Contact Angle โดยมุมนี้ขึ้นอยู่กับ การกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะแผ่น



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ของมุมสัมผัสที่มุมใดๆ กับการกระจายตัวของโลหะบัดกรี [10]

จากรูปที่ 2.17 จะแสดงให้เห็นถึงค่า  $\theta$  หรือ Contact Angle ที่มุมใดๆ โดยที่รูป (a) มี Contact Angle เท่ากับ 180 องศา คือยังไม่มี การกระจายตัวของโลหะบัดกรี (Non-Wetted) จึงยังไม่เกิดการประสานของพื้นผิวโลหะพื้น รูปที่ 2.17 (b) มี Contact Angle ระหว่าง 0 ถึง 90 องศา คือ เนื่องจากมีบางส่วนของโลหะบัดกรีเริ่มหลอมละลาย รูปที่ 2.17 (c) มี Contact Angle ระหว่าง 90 ถึง 180 องศา คือโลหะบัดกรีเริ่มมีการหลอมละลายบนพื้นผิวโลหะแล้วกลับคืนไปเป็นของแข็งอีกครั้ง (Dewetting) เนื่องจากอุณหภูมิในการหลอมละลายต่ำลง จึงไม่เกิดการประสานกันบนพื้นผิวโลหะพื้น รูปที่ 2.17 (d) มี Contact Angle เท่ากับ 0 องศา คือมีการกระจายตัวของโลหะบัดกรีแบบสมบูรณ์ (Total Wetting) จน

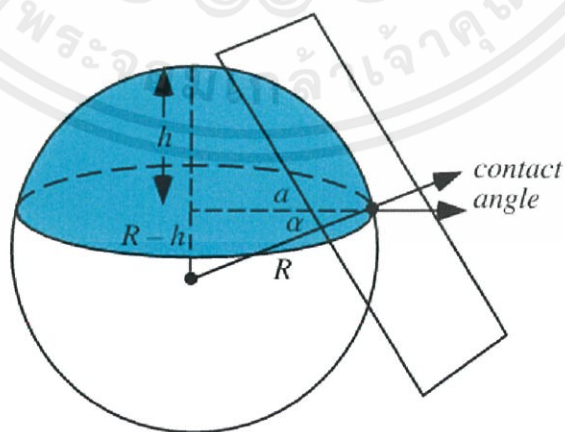
คือโลหะบัดกรีเริ่มมีการหลอมละลายบนพื้นผิวโลหะแล้วกลับคืนไปเป็นของแข็งอีกครั้ง (Dewetting) เนื่องจากอุณหภูมิต่ำลง จึงไม่เกิดการประสานกันบนพื้นผิวโลหะพื้น รูปที่ 2.17 (d) มี Contact Angle เท่ากับ 0 องศา คือมีการกระจายตัวของโลหะบัดกรีแบบสมบูรณ์ (Total wetting) จนเกิดเป็นชั้นฟิล์มขึ้นบนผิวของพื้นผิวโลหะพื้น อาจกล่าวได้ว่า Contact Angle จะแปรผกผันกับค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรี

ในกระบวนการบัดกรีมีจุดประสงค์คือ บัดกรีให้มี Contact Angle เท่ากับ 0 องศา ซึ่งเป็นได้แค่ในอุดมคติเท่านั้น ในความเป็นจริงในกระบวนการบัดกรีขอแค่การบัดกรีที่มี Contact Angle น้อยกว่า 75 องศา ก็ถือว่าเป็นบัดกรีที่ดีแล้ว ทั้งนี้ Contact Angle จะขึ้นอยู่กับแรงตึงผิวของโลหะบัดกรีด้วย ถ้าแรงตึงผิวของโลหะบัดกรีมีค่าต่ำลง จะยิ่งทำให้ Contact Angle มีค่าน้อยลงด้วย

ค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะพื้น สามารถ หาได้จากค่า Contact Angle โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างรัศมี และความสูงของโลหะบัดกรี ดังรูปที่ 2.18 จากนั้นจะนำมาคำนวณหาค่ามุมสัมผัสด้วยสมการ 2.3

$$\sin \theta = \frac{2}{\left(\frac{a}{h} + \frac{h}{a}\right)} \quad (2.3)$$

- เมื่อ
- θ คือ มุมสัมผัส
  - a คือ รัศมีของโลหะบัดกรี
  - h คือ ความสูงของโลหะบัดกรี

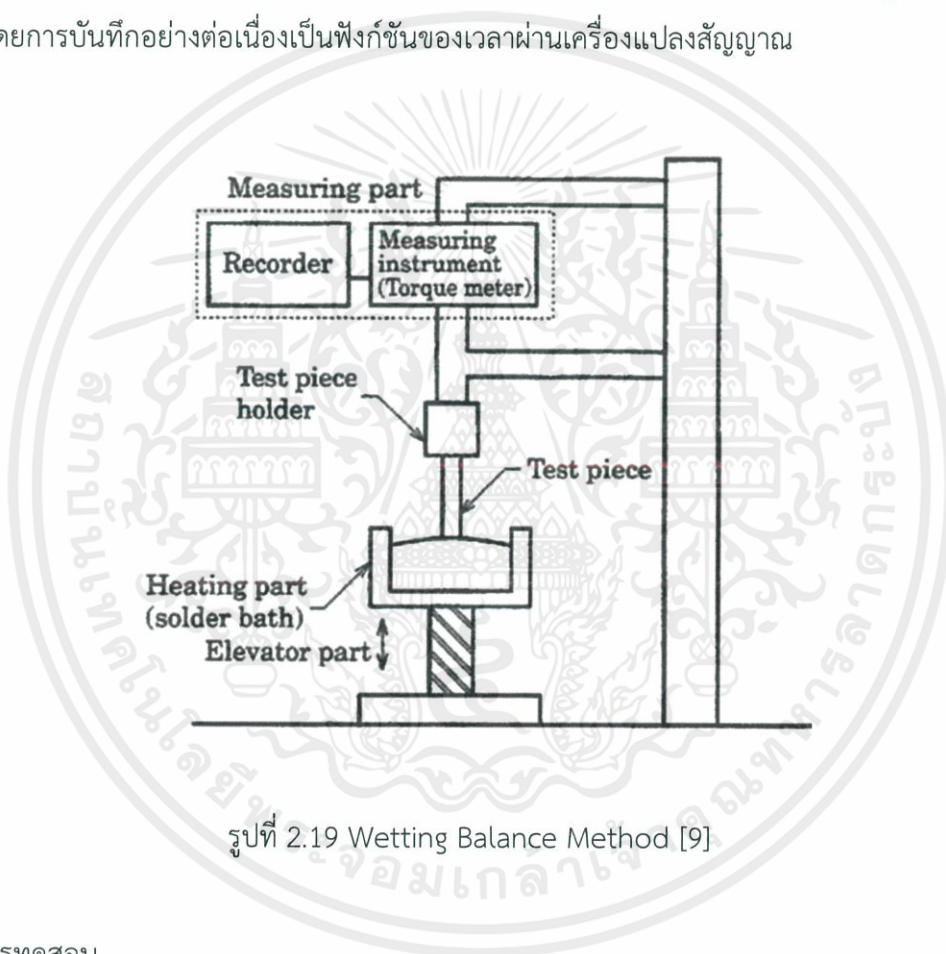


รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างรัศมี ความสูง และมุมสัมผัสของโลหะบัดกรี [10]

### 2.4.3 Wetting Balance Method [9]

ตามมาตรฐาน JIS Z 3198-4 : 2003 (JWES), Test Methods for Lead-free Solders – Part 4 : Methods for Solderability Test by A Wetting Balance Method and A Contact Angle Method กล่าวว่

Wetting Balance เป็นวิธีการทดสอบสำหรับวัดค่าเวลาและแรงในภาวะการฉีก (Wetting) ของโลหะบัดกรีระหว่างทำการทดสอบ วิธีการนี้เป็นวิธีการตรวจสอบแรงที่กระทำลงบนแผ่นชิ้นงานทดสอบ จากจุดของแผ่นชิ้นงานทดสอบที่ทำการจุ่มและดึงขึ้นจากอ่างโลหะบัดกรี ดังรูปที่ 2.19 และแสดงผลโดยการบันทึกอย่างต่อเนื่องเป็นฟังก์ชันของเวลาผ่านเครื่องแปลงสัญญาณ



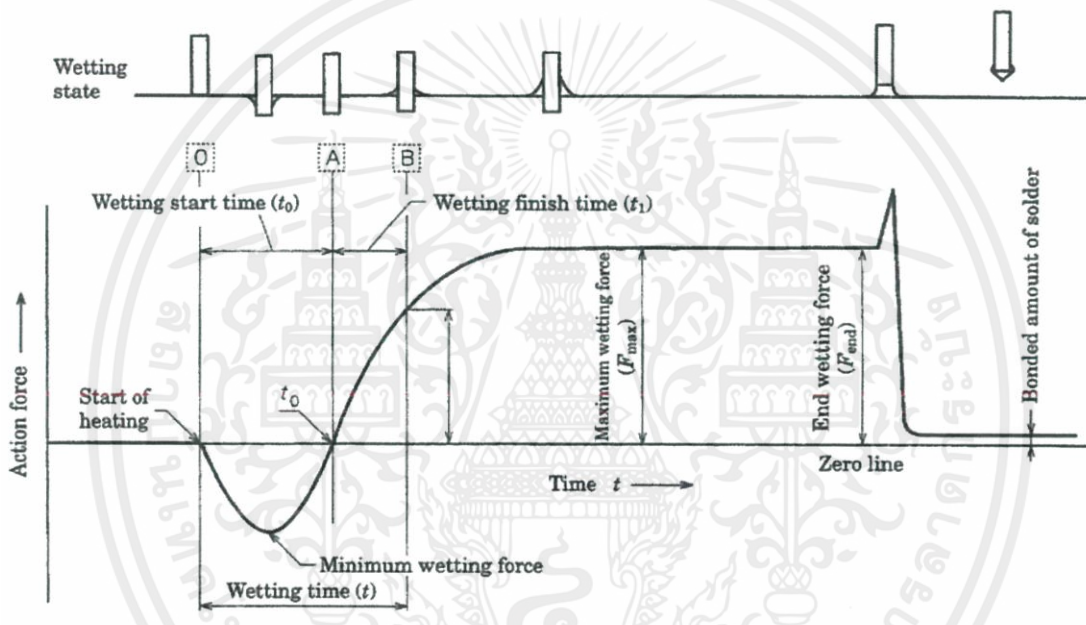
รูปที่ 2.19 Wetting Balance Method [9]

ขั้นตอนการทดสอบ

1. หลอมโลหะบัดกรีในอ่างบัดกรี (Solder Tank) ที่อุณหภูมิ  $300 \pm 3$  องศาเซลเซียส
2. ใส่ฟลักซ์ที่ใช้ในการทดลองตามมาตรฐานลงในจานทดลอง (Petri Dish)
3. จุ่มชิ้นงานทดสอบลงในฟลักซ์ ลึกลงไป 4-5 มิลลิเมตรจากขอบ เป็นเวลา 5 วินาที และยกขึ้นเพื่อกำจัดออกไซด์ที่ผิวหน้า

4. ให้ชิ้นงานทดสอบที่ทำการจุ่มฟลักซ์แล้ว จุ่มลงในอ่างบัดกรีอย่างช้าๆ ลึกลงไป 2 มิลลิเมตร ทิ้งไว้ประมาณ 10 วินาที และบันทึกผลการทดลองลงบนแผนภูมิการเปลี่ยนแปลงของโพลต์ในช่วงเวลาต่างๆ จากจุดที่ชิ้นงานทดสอบเกิดการยึดประสานกันที่ผิวชิ้นงานทดสอบในระหว่างการจุ่ม

Wetting Curve คือ วิธีการทดสอบหาค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะพื้น โดยจะนำชิ้นงานโลหะที่ชุบด้วยฟลักซ์ แล้วมาจุ่มลงในโลหะบัดกรีหลอมเหลวที่อยู่ในอ่างบัดกรี ด้วยความเร็วและระยะเวลาความลึกในการจุ่มตามที่กำหนด แล้วนำค่าที่ได้จากการทดสอบมาสร้าง Wetting Curve ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 Wetting Curve ที่ได้จากเครื่องทดสอบ [9]

จากรูปที่ 2.20 สามารถอธิบายได้ว่า ในช่วงแรกที่ชิ้นงานทดสอบเริ่มสัมผัสกับโลหะบัดกรีหลอมเหลวเมื่อจุ่มลงในโลหะบัดกรีนั้นค่าแรงที่ได้จะเป็นลบ เนื่องจากต้องมีแรงพยายามอย่างมากเพื่อเอาชนะแรงลอยตัวที่บริเวณผิวของโลหะบัดกรีหลอมเหลว จากนั้นแรงที่ได้จะเป็นค่าบวก และเมื่อชิ้นงานเริ่มสัมผัสกับโลหะบัดกรีจะกระทั่งมีมุมสัมผัสเป็น 90 องศา ช่วงที่แรงอยู่ในสภาวะสมดุลคือ Wetting Time ( $T_0$ ) และมีแรงที่กระทำสูงสุดต่อหน่วยพื้นที่ระหว่างผิวของโลหะทดสอบกับโลหะบัดกรีหลอมเหลวคือ Wetting Force ( $F_{max}$ )

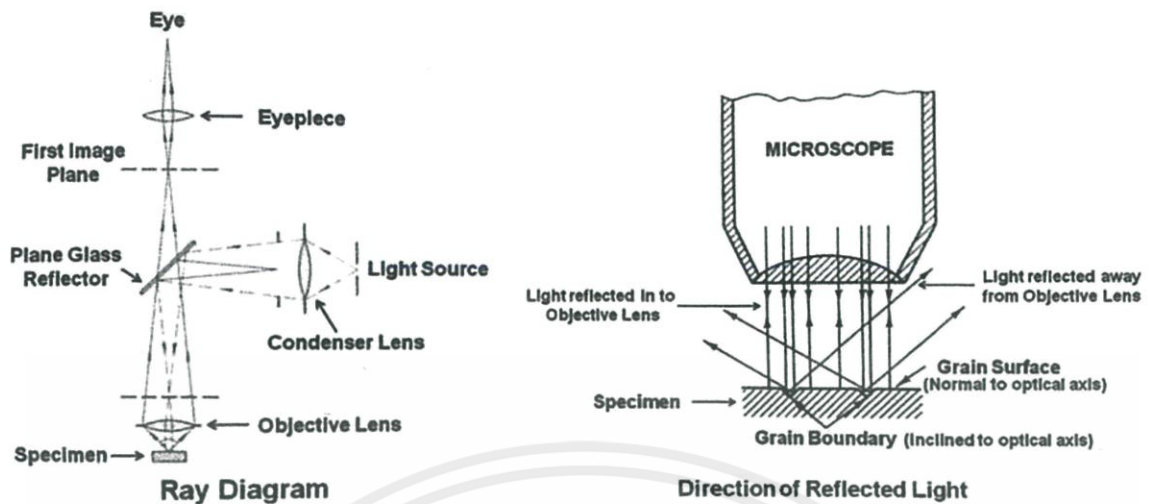
## 2.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure Observation)

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะ จะช่วยให้เราสามารถอธิบายคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของโลหะได้ การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะจะมีประสิทธิภาพและคุณภาพที่ดีขึ้นอยู่กับ การเตรียมชิ้นงานทดสอบเป็นสำคัญ กล่าวคือ ชิ้นงานทดสอบจะต้องผ่านการปรับระดับของผิวหน้า และขัดผิวให้เรียบร้อยไม่มีรอยขีดข่วน มีลักษณะเป็นมันวาว ถ้าขั้นตอนการเตรียมงานไม่ดี ก็ไม่สามารถวิเคราะห์หรือมองภาพจากกล้องจุลทรรศน์ได้ชัดเจน

ภายหลังจากที่ชิ้นงานผ่านการขัดมันมาแล้ว เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์จะมองเห็นเป็นภาพพื้นเรียบสว่างตลอดผิวงาน ไม่สามารถมองเห็นโครงสร้างจุลภาคได้ จึงต้องนำชิ้นงานทดสอบไปทำการกัดด้วยสารเคมี เพื่อให้ผิวชิ้นงานเกิดลักษณะที่แตกต่างกัน เนื่องจากชิ้นงานประกอบด้วยเฟสหลายเฟสและหลายชนิด เฟสใดที่มีความต้านทานสูงกรดสามารถกัดได้น้อย และเฟสใดที่มีความต้านทานต่ำ กรดสามารถกัดได้ลึกกว่า ทำให้ผิวชิ้นงานเปลี่ยนเป็นขรุขระ เมื่อนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่ส่องลงไปบนผิวหน้าที่ขรุขระสะท้อนแสงกลับมาคนละทิศทาง ทำให้บริเวณที่แสงสะท้อนกลับมาน้อยเห็นเป็นสีดำ ส่วนบริเวณที่แสงสะท้อนกลับมาได้มากก็จะเห็นเป็นสีขาว

### 2.5.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM)

กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงเป็นกล้องที่ใช้ศึกษาโครงสร้างจุลภาค โดยใช้แสงและระบบกำเนิดแสงเป็นพื้นฐาน กล้องประเภทนี้สามารถตรวจสอบโครงสร้างได้เฉพาะที่ผิวเท่านั้นโดยการสะท้อนแสงสำหรับวัตถุทึบแสง เช่น โลหะทุกประเภท เซรามิก และ โพลีเมอร์บางชนิด ความดำของภาพแตกต่างกันเกิดจากความสามารถในการสะท้อนแสงที่ต่างกันบริเวณต่างๆ การตรวจแบบนี้เรียกว่า เมทัลโลกราฟี (Metallography) ชิ้นงานที่ผ่านการขัดเรียบจนสะท้อนแสงได้เหมือนกระจก หลังการกัดด้วยสารเคมีและนำมาตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงจะมองเห็นโครงสร้างจุลภาค ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเกรนมีทิศทางที่ต่างกัน จึงมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาต่างกัน แสงที่สะท้อนจากผิวของเกรนที่มีทิศทางการเรียงตัวของอะตอมที่ต่างกันหลังการกัดผิว โดยความเงาและเนื้อผิวที่เห็นในแต่ละเกรนขึ้นอยู่กับ การสะท้อนแสงของเกรนนั้นๆ หลังการกัดผิวที่ขอบเกรนจะเกิดร่องขนาดเล็กขึ้น เนื่องจากอะตอมที่บริเวณขอบเกรนมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยามากกว่าบริเวณอื่นๆ จึงถูกกัดออกไปมากกว่าบริเวณอื่นภายในเกรน ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง [12]

### 2.5.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) สัญญาณภาพที่ได้เกิดจากการใช้ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Detector, SE Detector) มาจับสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดขึ้น หรือใช้ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscatter Electron, BSE) มาจับสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับที่เกิดขึ้น ดังนั้นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบนี้จะสามารถประกอบกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ได้ทั้งแบบ Energy Dispersive X-Ray (EDX) และ Wavelength Dispersive X-Ray (WDX) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ธาตุโดยอาศัยหลักการแยกรังสีตามระดับพลังงาน

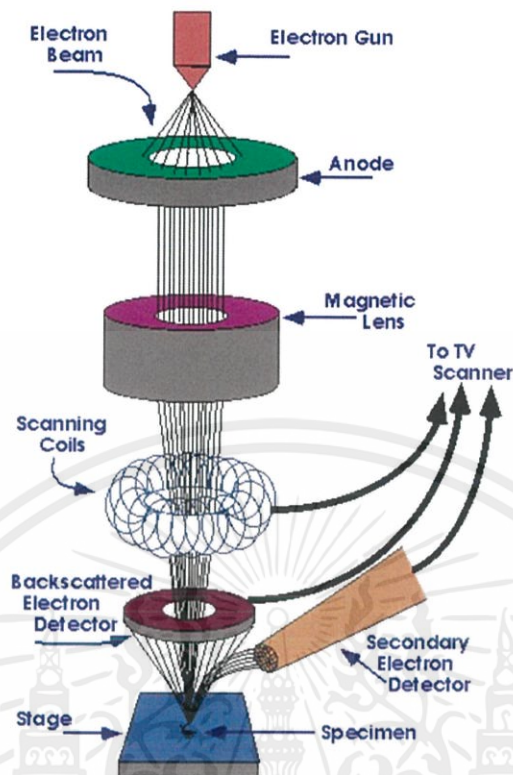
หลักการเกิดภาพของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด คือ อิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary Electron) จากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron Gun) จะถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าสูงที่สามารถปรับค่าได้ (1000-3000 อิเล็กตรอนโวลต์หรือมากกว่า) จากนั้นจึงถูกดูดลงสู่แผ่นเบี่ยงล่างโดยแผ่นแอโนด (Anode Plate) ภายใต้อัตราความดันสุญญากาศ  $10^{-5}$  ถึง  $10^{-7}$  ทอร์ และมีจุดคอนเดนเซอร์เลนส์ที่ปรับลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดเล็กลงเพื่อเป็นการเพิ่มความเข้มของลำอิเล็กตรอน จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะวิ่งสู่เบี่ยงล่างผ่านเลนส์วัตถุ ซึ่งมีหน้าที่ในการปรับลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้มีจุดโฟกัสบนผิวตัวอย่างพอดี และลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบบนผิววัตถุหรือตัวอย่างจะมีขนาดในช่วง 5 ถึง 200 นาโนเมตร โดยมีชุดขดลวดควบคุมการส่องกราด (Scan Coil) ของลำอิเล็กตรอนทำหน้าที่ควบคุมทิศทางเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนบนผิวตัวอย่างดังรูปที่ 2.22 และเกิดการถ่ายโอนพลังงานที่ขึ้นความลึกจากผิวที่ระดับต่างๆทำให้เกิดการปลดปล่อยสัญญาณอิเล็กตรอนชนิดต่างๆออกมาดังรูปที่ 2.23 ซึ่งใช้ประโยชน์ในการศึกษา

ลักษณะผิวของตัวอย่างและวิเคราะห์ธาตุที่มีในชิ้นงานตัวอย่างได้ตามลักษณะสัญญาณภาพที่ได้จากลักษณะสัญญาณอิเล็กตรอนชนิดต่างๆ ที่เกิด คือ

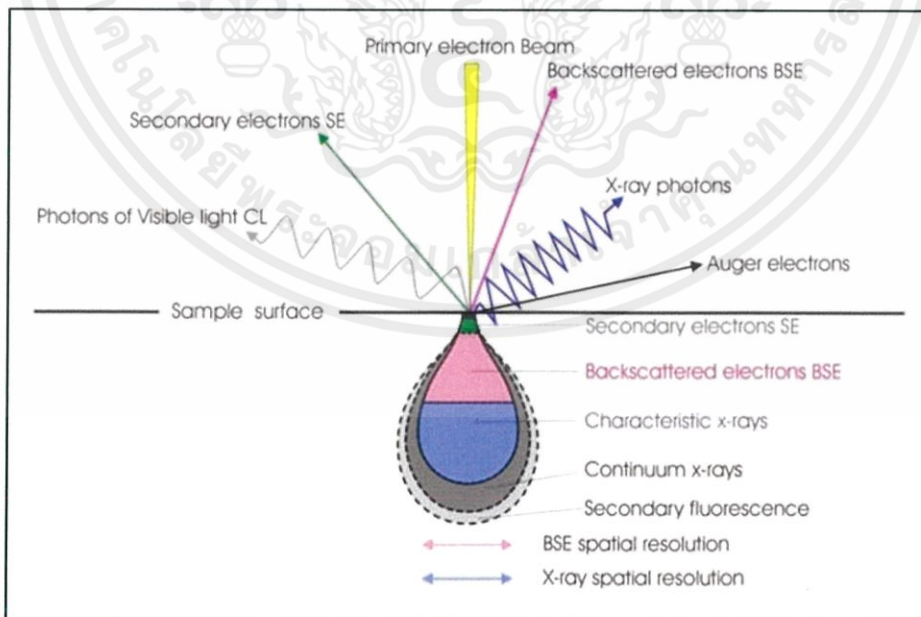
1. สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Secondary Electron Image, Sei) หรือเป็นกลุ่มพลังงานต่ำ 3-5 อิเล็กตรอนโวลต์ เกิดที่พื้นผิวระดับลึกไม่เกิน 10 นาโนเมตร โดยเกิดกับธาตุที่มีแรงยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนที่ผิวต่ำ

2. สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscatter Electron Image, Bei) หรือกลุ่มอิเล็กตรอนที่สูญเสียพลังงานให้กับอะตอมในชิ้นงานเพียงบางส่วน และการกระเจิงกลับออกมามีพลังงานสูงกว่าอิเล็กตรอนทุติยภูมิ เกิดที่ผิวระดับลึกกว่า 10 นาโนเมตร โดยเกิดได้กับธาตุที่มีเลขอะตอมสูง

3. สัญญาณภาพจากรังสีเอกซ์ (X-Ray Image, Xri) ชนิดที่เป็นรังสีเอกซ์เฉพาะตัวเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดจากอิเล็กตรอนในระดับชั้นโคจรต่างๆ (K, L, M,...) ถูกกระตุ้นหรือได้รับพลังงานมากพอจนหลุดออกมาจากวงโคจรทำให้อะตอมต้องรักษาสสมดุลของโครงสร้างรวมภายในโดยการดึงอิเล็กตรอนจากวงโคจรชั้นถัดไปเข้ามาแทนที่และต้องลดระดับพลังงานภายใน เนื่องจากอิเล็กตรอนที่ถูกดึงมามีพลังงานสูงกว่าโดยการปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปแบบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อให้ตัวเองมีพลังงานเท่ากับชั้นวงโคจรที่เข้าไปแทนที่ ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้มีความยาวคลื่นเฉพาะในแต่ละธาตุ จึงสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ธาตุตามระดับพลังงานของตัวอย่างได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ



รูปที่ 2.22 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [12]

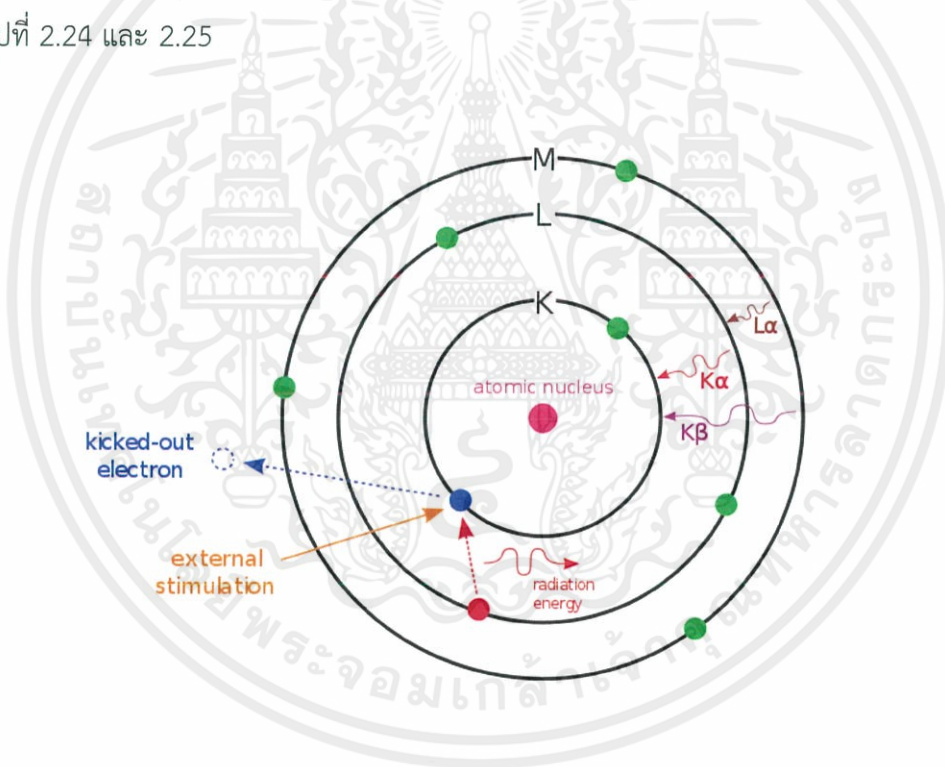


รูปที่ 2.23 การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับตัวอย่างที่ระดับชั้นความลึกต่างๆ [12]

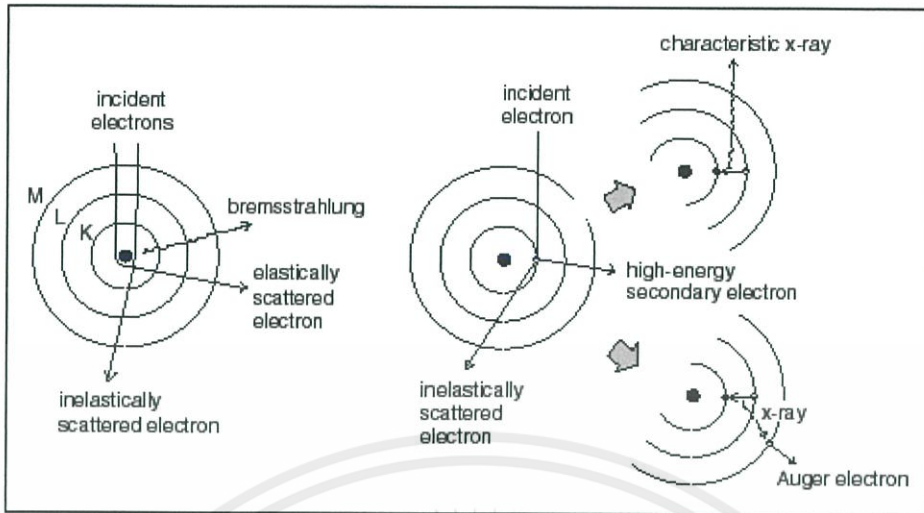
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.3 การวิเคราะห์ Energy Dispersive X-Ray (EDX)

ในระบบวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์สำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จะใช้ระบบการวิเคราะห์แบบ Energy Dispersive X-Ray (EDX) โดยระบบ EDX มีหลักการวิเคราะห์คือ เมื่อนำลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงเคลื่อนที่เข้าชนอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นในของอะตอม เช่น ชั้น K หรือ L แล้วเกิดการถ่ายโอนพลังงานให้แก่อิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนในชั้นที่ได้รับพลังงานดังกล่าวมีพลังงานสูงขึ้นเกินพลังงานยึดเหนี่ยวของชั้นวงโคจร อิเล็กตรอนจึงหลุดออกจากวงโคจรและทำให้เกิดที่ว่างในชั้นวงโคจรนั้น จากนั้นอะตอมที่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้นจะลดระดับพลังงานลงมาให้เท่ากับพลังงานยึดเหนี่ยวของวงโคจรที่เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอน ด้วยการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินในรูปแบบรังสีเอกซ์แล้วอิเล็กตรอนจะเข้ามาแทนที่ พลังงานส่วนเกินนี้จะมีพลังงานเท่ากับความต่างของพลังงานยึดเหนี่ยวเฉพาะชั้นโคจรของอิเล็กตรอนเฉพาะของธาตุนั้นๆ จึงเป็นพลังงานเฉพาะค่า เราเรียกรังสีเอกซ์ชนิดนี้ว่า รังสีเอกซ์เฉพาะตัว แสดงดังรูปที่ 2.24 และ 2.25



รูปที่ 2.24 การเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่ระดับพลังงานของชั้นวงโคจรต่างๆ [13]



รูปที่ 2.25 การกระตุ้นให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวโดยใช้อิเล็กตรอน [13]

ในระบบการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์แบบ EDX หัววัดรังสีที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ หัววัดรังสีแบบ Si (Li) ซึ่งเหมาะกับการวัดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่มีพลังงานในช่วง 1-30 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (Kev) หรือหัววัดเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง (High Purity Germanium, Hpge) ซึ่งสามารถวัดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวได้ในช่วง 3-200 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ แม้ว่าหัววัด Hpge จะสามารถวัดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวได้ในช่วงกว้างกว่า แต่ในการวิเคราะห์ธาตุเบา หัววัดชนิด Si (Li) ก็ยังมีความจำเป็นอยู่มาก หัววัดรังสีเอกซ์ทั้งสองแบบจะเปลี่ยนพลังงานของรังสีให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าในรูปแบบศักย์ไฟฟ้า โดยขนาดของสัญญาณไฟฟ้าที่ออกจากหัววัด จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบบนหัววัด จากนั้นวงจรขยายแบบช่องเดี่ยวหรือหลายช่องจะเก็บสัญญาณไฟฟ้าจากหัววัดในหน่วยความจำที่อยู่ภายในเครื่องและแสดงผลวิเคราะห์บนจอภาพในรูปแบบของสเปกตรัมพร้อมทั้งผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณและคุณภาพ โดยโปรแกรมสำเร็จรูปที่มีอยู่ซึ่งมีความซับซ้อนแตกต่างกันไปในแต่ละกลุ่มผู้ผลิต

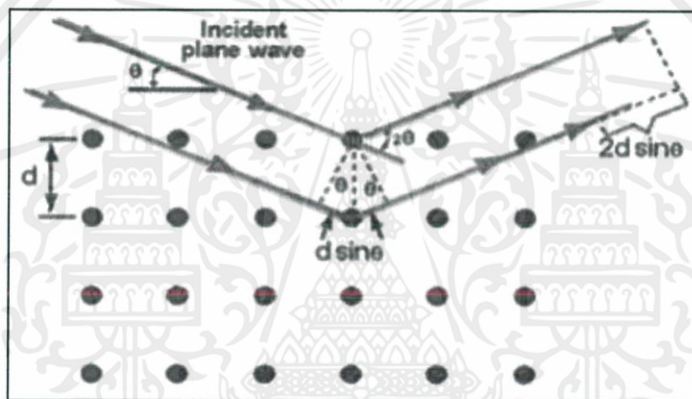
การประยุกต์ใช้งานของ SEM-EDX

1. ใช้ประเมินคุณลักษณะเฉพาะ (Characteristic Evaluation) สามารถดูได้จากขนาดของเกรน (Grain Size) ความขรุขระของผิว (Surface Roughness) ความพรุน (Porosity) การกระจายตัวของอนุภาค (Particle Distribution) และความเป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุ (Material Homogeneity)
2. การวิเคราะห์จุดบกพร่อง (Failure Defect) สามารถดูได้จากการปนเปื้อนเฉพาะบริเวณ (Contamination Location) การประเมินกลไกการเกิดความเสียหาย (Mechanical Damage Assessment) บริเวณที่เกิดการแตกหักในระดับจุลโครงสร้าง (Micro-Crack Location)

3. การควบคุมคุณภาพ (Quality Control Screening) สามารถดูได้จากการเปรียบเทียบตัวอย่างที่ดีและไม่ดี การกำหนดความหนาของชั้นฟิล์มและชั้นเคลือบ เป็นต้น

#### 2.5.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction) [14]

การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) เป็นเทคนิคที่มีการใช้กันแพร่หลายในการวิเคราะห์วัสดุต่างๆ โดยสามารถใช้ในการวิเคราะห์ทดสอบชนิดปริมาณคุณภาพของสารประกอบแบบผลึกต่างๆในชิ้นงานได้ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของลำรังสีสะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบแสดงดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในผลึก [14]

จากรูปที่ 2.26 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้จากสมการของ Bragg's Law คือ

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (2.4)$$

โดยที่  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

$n$  คือ ลำดับการสะท้อน

$d$  คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ

ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบและแร่สามารถแยกแยะประเภทและชนิดของวัสดุที่พบในธรรมชาติว่ามีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบใดหรือจำแนกได้ว่าวัสดุที่พบเห็นนั้นเป็นธาตุชนิดใด โดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการ

ตรวจวัดโดยองค์กร JCPDs (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิดมีรูปแบบโครงสร้างผลึกแตกต่างกันและระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบก็แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับขนาดและประจุของอะตอมสารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบ (XRD Pattern) เฉพาะตัวเปรียบเช่นเดียวกับลายนิ้วมือของคนที่แตกต่างกันจากการทำงานของ 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 ในกรณีที่ตัวอย่างเป็นก้อน ต้องมีขนาดกว้างยาว ไม่เกิน 10 cm ทั้งนี้ พื้นที่ที่จะทำการทดสอบ จะเป็นเพียงบริเวณเล็กๆ ประมาณ 10 mm เท่านั้น

## 2.6 การกัดกร่อน (Corrosion) [15]

การกัดกร่อน (Corrosion) หมายถึง การเสถียรภาพของวัสดุหรือการที่วัสดุถูกทำลายเนื่องจากวัสดุสัมผัสกับสารเคมีหรืออยู่ในสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม เนื่องจากการกัดกร่อนเกิดขึ้นโดยปฏิกิริยาทางไฟฟ้า-เคมี ดังนั้นอัตราเร็วในการกัดกร่อนของวัสดุจึงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆ อาทิ ความเค้นทางกลศาสตร์ (Mechanical Stress) และการกัดกร่อน (Erosion) มีส่วนเกี่ยวข้องกับการกัดกร่อนของวัสดุด้วยเช่นกัน

การกัดกร่อนของวัสดุส่วนใหญ่มักจะเกิดขึ้นกับโลหะที่มีการสัมผัสกับสารเคมีซึ่งโดยทั่วไปกลไกที่เกิดขึ้นจะเป็นกลไกทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Mechanism) เนื่องจากโลหะมีอิเล็กตรอนอิสระอยู่จึงสามารถทำให้โลหะเกิดเป็นขั้วไฟฟ้าทางเคมีขึ้นได้ โลหะส่วนใหญ่จะถูกกัดกร่อนในระดับหนึ่งเนื่องจากน้ำและสภาวะบรรยากาศที่อยู่รอบๆ นอกจากนี้โลหะยังสามารถเกิดการกัดกร่อนขึ้นได้โดยตรงจากการสัมผัสกับสารละลายเคมีหรือแม้แต่โลหะที่อยู่ในสภาพของเหลว

ในอีกนัยหนึ่งเราอาจกล่าวได้ในเชิงโลหะวิทยาว่า การกัดกร่อนของโลหะเป็นการย้อนกลับสู่สภาพธรรมชาติที่แท้จริงของโลหะ กล่าวคือ ในธรรมชาติโดยส่วนใหญ่โลหะจะอยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ ซัลไฟด์ คาร์บอเนต หรือซิลิเกต ในสภาวะที่โลหะอยู่ในรูปของสารประกอบเหล่านี้ เพราะสารประกอบของโลหะนี้จะมีพลังงานที่ต่ำกว่า (เสถียรกว่า) ดังนั้นโลหะจึงมักจะทำปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อเปลี่ยนรูปกลับไปเป็นสารประกอบ ตัวอย่างเช่น เหล็กออกไซด์ที่มีอยู่โดยทั่วไปในธรรมชาติมักจะถูกนำมา

ทำการรีดิวซ์ด้วยพลังงานความร้อนเพื่อเปลี่ยนรูปไปเป็นโลหะเหล็กซึ่งมีพลังงานที่สูงกว่า ดังนั้นโลหะเหล็กจึงมักไม่เสถียรและพยายามที่จะเปลี่ยนรูปกลับไปเป็นเหล็กออกไซด์โดยเกิดการกัดกร่อน (เกิดสนิม) เพื่อที่จะได้อยู่ในสถานะที่มีพลังงานที่ต่ำกว่า แสดงดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 เหล็กกล้าเปลี่ยนรูปกลับไปเป็นเหล็กออกไซด์โดยเกิดการกัดกร่อน (เกิดสนิม) เพื่อที่จะได้อยู่ใน (a) แร่เหล็ก (เหล็กออกไซด์), (b) การกัดกร่อนของเหล็กกล้า [15]

วัสดุที่ไม่ใช่โลหะ (Nonmetallic Materials) เช่น เซรามิก และพอลิเมอร์ มักจะไม่ประสบปัญหาการกัดกร่อนเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีทางไฟฟ้า แต่มักจะเกิดความเสียหายโดยตรงเนื่องจากการสัมผัสกับสารเคมี ตัวอย่างเช่น วัสดุจำพวกเซรามิกทนไฟสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับเกลือที่หลอมละลาย (Molten Salts) ได้ที่อุณหภูมิสูงๆ ส่วนวัสดุจำพวกพอลิเมอร์บางประเภทสามารถดูดซึมน้ำได้ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้พอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงรูปร่างและสมบัติ หรืออาจจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ที่อุณหภูมิห้องเป็นสาเหตุทำให้พอลิเมอร์พวกนี้แข็งแรงแต่เปราะและไม่หลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อน

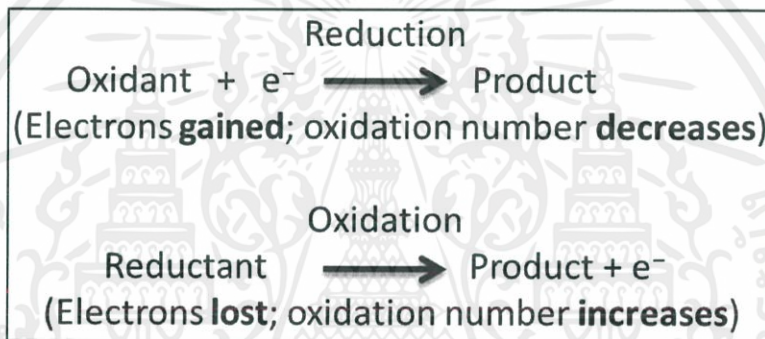
การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับวัสดุจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งที่วิศวกรต้องเกี่ยวข้องและให้ความสนใจ เพราะการถูกกัดกร่อนอาจจะก่อให้เกิดความเสียหายอย่างใหญ่หลวงในเชิงเศรษฐศาสตร์ ดังนั้นจึงไม่ต้องประหลาดใจเลยว่าวิศวกรที่ทำงานในอุตสาหกรรมต้องให้ความสนใจเกี่ยวกับการควบคุมและป้องกันการเกิดการกัดกร่อนของวัสดุ

## 2.7 การกัดกร่อนของโลหะเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า

### 2.7.1 ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) หมายถึงปฏิกิริยาที่โมเลกุลหรืออะตอมมีการสูญเสียอิเล็กตรอนจากวงโคจรให้กับโมเลกุลที่ทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน (Reduction) จะเกิดคู่กัน สารที่ทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน เรียกว่า ตัวรีดิวซ์ (Reducing Agent) และเรียกสารที่ทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนนี้ว่า ตัวออกซิไดส์ (Oxidizing Agent) โดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน มักจะเกี่ยวข้องกับออกซิเจน

ปฏิกิริยารีดักชัน คือปฏิกิริยาที่โลหะหรือโลหะถูกรีดิวซ์ (มีการรับอิเล็กตรอน) แสดงดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน

### 2.8 อัตราการกัดกร่อน (จลนพลศาสตร์)

จากที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น การศึกษาการกัดกร่อนของโลหะมักจะพูดเน้นเฉพาะการกัดกร่อนในสถานะสมดุล และแนวโน้มของโลหะต่อการกัดกร่อนซึ่งเกี่ยวข้องกับศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้าของโลหะชนิดนั้นๆ เท่านั้น แต่โดยแท้จริงแล้วการกัดกร่อนอาจไม่ได้อยู่ในสถานะสมดุล และค่าศักย์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ก็ไม่ได้บอกถึงอัตราเร็วของการเกิดการกัดกร่อน ความรู้ทางด้านจลนพลศาสตร์ของการกัดกร่อนนั้นจะมีความสลับซับซ้อนมาก และไม่สามารถเข้าใจได้อย่างสมบูรณ์ จากในหัวข้อนี้เราจะได้กล่าวถึงความรู้พื้นฐานบางประการที่เกี่ยวกับจลนพลศาสตร์ของการเกิดการกัดกร่อน

## 2.8.1 อัตราเร็วของการกัดกร่อนอย่างสม่ำเสมอหรือการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating)

### ในสารละลาย

ปริมาณของโลหะที่ถูกกัดกร่อนอย่างสม่ำเสมอจากขั้วแอโนด หรือปริมาณการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าบนขั้วแคโทดในสารละลายในช่วงเวลาหนึ่งนั้นสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการของ Faraday ของเคมีทั่วไป ดังนี้คือ

$$\omega = \frac{ItM}{nF} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $\omega$  = น้ำหนักของโลหะ (g) ที่ถูกกัดกร่อนหรือที่ถูกชุบด้วยไฟฟ้าในสารละลายในช่วงเวลา  $t$  (s)

$I$  = ปริมาณกระแสไฟฟ้า (A)

$M$  = มวลอะตอมของโลหะ (g/mol)

$n$  = จำนวนของอิเล็กตรอน/อะตอม ที่เกิดขึ้นหรือใช้ไปในกระบวนการ

$F$  = ค่าคงที่ของ Faraday = 96,500 C/mol หรือ 96,500 A\*s/mol

บางครั้งการกัดกร่อนของโลหะอาจแสดงในเทอมของความหนาแน่นของกระแส  $i$  ซึ่งมีหน่วยเป็น  $A/cm^2$  โดยการแทนค่า  $I$  ในสมการ (2.5) ด้วย  $iA$  จะได้สมการที่ 2.6

$$\omega = \frac{iAtM}{nF} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $i$  = ความหนาแน่นของกระแส ( $A/cm^2$ ) และ  $A$  = พื้นที่ ( $cm^2$ )

ในการศึกษาการกัดกร่อน เรามีวิธีการวัดการกัดกร่อนของผิวโลหะที่สัมผัสกับสภาวะแวดล้อมที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนขึ้นได้หลายวิธีด้วยกัน วิธีหนึ่งที่มีกนิยมถูกใช้ในการวัดคือ การวัดปริมาณน้ำหนักของตัวอย่างที่สูญหายไปในช่วงเวลาหนึ่งหลังจากที่ได้สัมผัสกับสภาวะแวดล้อมที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนนั้น และแสดงอัตราเร็วของการกัดกร่อนในเทอมของน้ำหนักที่สูญหายต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของผิวสัมผัสต่อหนึ่งหน่วยเวลา ตัวอย่างเช่น การกัดกร่อนอย่างสม่ำเสมอของพื้นผิว มักจะแสดงในหน่วยของน้ำหนักที่สูญหายในหน่วยของมิลลิกรัมต่อตารางเดซิเมตรต่อวัน (mdd) นอกจากนี้ยังมีวิธีอื่นอีกที่นิยมใช้คือ อัตราเร็วในการ

กัดกร่อน แสดงในเทอมของความลึกของวัสดุที่สูญหายต่อหนึ่งหน่วยเวลา เช่น มิลลิเมตรต่อปี (mm/yr) หรือ mils ต่อปี (mils/yr) ในที่นี้ 1 mil เท่ากับ 0.001 in สำหรับการกัดกร่อนอย่างสม่ำเสมอที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าในสารละลายนั้น อาจแสดงในเทอมของความหนาแน่นของกระแส

## 2.8.2 ปฏิกิริยาการกัดกร่อนและโพลาริเซชัน [16]

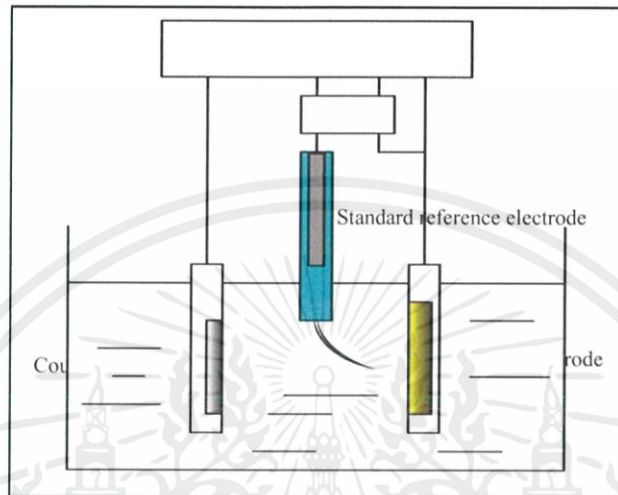
การกัดกร่อน (Corrosion) ของโลหะสามารถเกิดขึ้นได้ตลอดเพราะเป็นพฤติกรรมธรรมชาติของโลหะ เมื่อเกิดขึ้นแล้วย่อมทำให้เกิดความเสียหายได้ทั้งในด้านทรัพย์สิน เศรษฐกิจ ถ้าเราสามารถประเมินความเสียหายจากการกัดกร่อนของโลหะได้ก่อนก็จะช่วยยับยั้งความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในอนาคต การประเมินอัตราการกัดกร่อนของโลหะ สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การทดสอบการกัดกร่อนโดยการฝังในบรรยากาศ การทดสอบความทนละอองน้ำเกลือ การใช้คู่มือการกัดกร่อน การทดสอบด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้าโดยประเมินผลการกัดกร่อนจากเส้นโค้งโพลาริเซชัน (Polarization Curve) ที่ช่วยลดปัญหาที่จะเกิดขึ้นได้

การทดสอบการกัดกร่อนของโลหะโดยเทคนิคเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Technique) เป็นวิธีหนึ่งซึ่งช่วยประเมินอัตราการกัดกร่อนได้ดีและเร็ว และเป็นการจำลองการเกิดกระบวนการกัดกร่อนของโลหะ โดยปกติแล้วการเกิดการกัดกร่อนเป็นปฏิกิริยาทางกายภาพของโลหะกับสภาพแวดล้อมรอบๆ โลหะ ซึ่งเกิดจากการถ่ายเทประจุไฟฟ้าหรือแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนในสารละลายของน้ำ เรียกว่า ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Reaction) การเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของการกัดกร่อนเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน เมื่อน้ำหรือสารละลายที่สัมผัสกับโลหะ หลักการของการทดสอบการกัดกร่อนโลหะโดยใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า คือการป้อนศักย์ไฟฟ้าเร่งการกัดกร่อน โดยใช้เครื่อง Potentiostat/Galvanostat ในสถานะที่มีสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ทำหน้าที่เป็นทางเดินของไอออน และเป็นการเชื่อมต่อเซลล์เคมีไฟฟ้า (Electrochemical Cell) ดังแสดงในรูปที่ 2.29 ทำให้เราสามารถคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนได้

เซลล์เคมีไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบการกัดกร่อนของโลหะประกอบไปด้วย

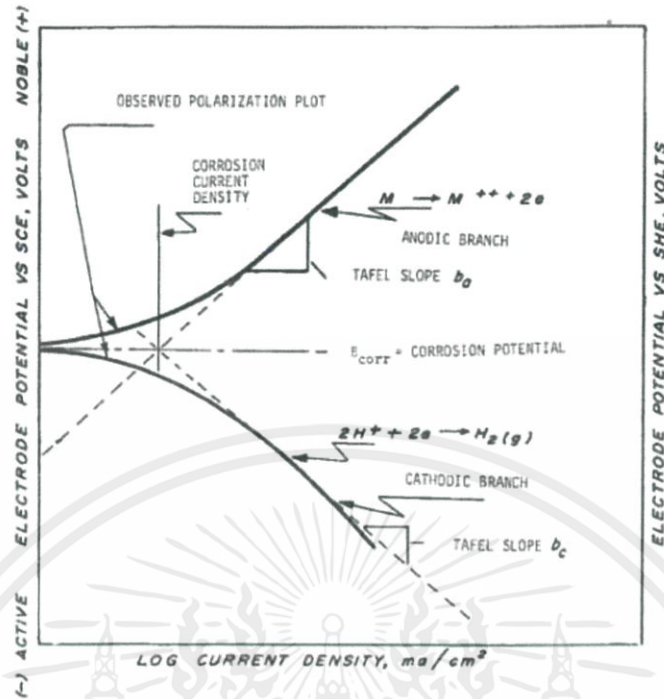
1. ขั้วทำงาน (Working Electrode หรือ Specimen Electrode) เป็นขั้วแอโนด ก็คือชิ้นตัวอย่างทดสอบ เป็นขั้วที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและให้อิเล็กตรอน
2. ขั้วมาตรฐานอ้างอิง (Standard Reference Electrode) เป็นขั้วแคโทด (Cathode) ที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันและรับอิเล็กตรอน เช่น SCE (Saturated Calomel Electrode) หรือ Ag/AgCl ที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่

3. ขั้วอิเล็กโทรดกระแส (Counter Electrode) มักจะใช้โลหะที่เสถียร เช่น แพลตินัม หรือ กราไฟต์ หรือ เหล็กกล้าไร้สนิม
4. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ซึ่งเป็นทางเดินของไอออน

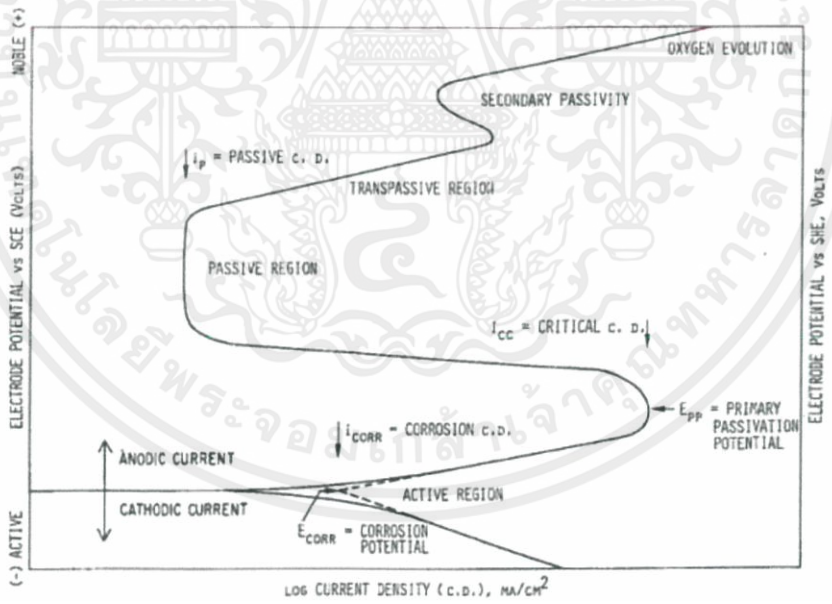


รูปที่ 2.29 เซลล์เคมีไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบการกัดกร่อน [16]

ค่าที่วัดได้จากการทดสอบ ได้เป็นเส้นโค้งโพลาริเซชัน (Polarization Curve) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้า เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าจนกระทั่งโลหะเริ่มเกิดการกัดกร่อนเราเรียกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion Potential,  $E_{corr}$ ) ที่จุดนี้ก็จะได้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion Current Density,  $I_{corr}$ ) ด้วย ซึ่งนำไปคำนวณหาอัตราการกัดกร่อน แสดงดังรูปที่ 2.30 ในขณะที่เดียวกันถ้าโลหะที่มีฟิล์มพาสซีฟ (Passive Film) ที่ทนต่อการกัดกร่อน เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม ถ้าป้อนศักย์ไฟฟ้าต่อไปอีกโลหะนั้นสร้างฟิล์มพาสซีฟ (Passive Film) เพื่อป้องกันการกัดกร่อนทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่หรือลดลง ในขณะที่ป้อนศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจนถึงระดับหนึ่งที่ทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าเริ่มเพิ่มขึ้นอีกครั้ง แสดงว่าเกิดการแตกของฟิล์มพาสซีฟ (Passive Film) เป็นรูเข็ม (Pitting) นั่นคือค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting Potential,  $E_p$ ) และค่ากระแสไฟฟ้าพาสซีฟ (Passive Current Density,  $I_p$ ) แสดงดังรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.30 เส้นโค้งโพลาริเซชันสำหรับการกัดกร่อน แบบทั่วไปของโลหะ [16]



รูปที่ 2.31 เส้นโค้งโพลาริเซชันสำหรับการกัดกร่อนที่เกิดฟิล์มพาสซีฟ (Passive Film) คลุมทั่วผิวหน้า [16]

ลักษณะของเส้นโค้งโพลาริเซชัน (Polarization Curve) แสดงพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะ มีรายละเอียดดังนี้

1. ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion Potential,  $E_{corr}$ ) เป็นค่าศักย์ไฟฟ้าที่โลหะเริ่มเกิดการกัดกร่อน ซึ่งถ้าโลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนต่ำจะไวต่อการกัดกร่อนมากกว่าโลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนสูง

2. ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion Current Density,  $I_{corr}$ ) เป็นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่จุดเกิด  $E_{corr}$  โดยค่า  $I_{corr}$  แสดงถึงการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้า (Uniform Corrosion) และสามารถนำมาคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้าต่อปีของตัวอย่างทดสอบได้ จากสมการที่ 2.7

$$\text{อัตราการกัดกร่อน (Corrosion Rate)} = \frac{k \times I_{corr} \times EW}{A \times D} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $k$  คือ ค่าคงที่ของการคำนวณเปลี่ยนหน่วยต่างๆ เช่น มีค่า 13 ถ้าอัตราการกัดกร่อนมีหน่วยมิลต่อปี (mpy) หรือมีค่า 0.00327 ถ้าหน่วยมิลลิเมตรต่อปี (mm/y)

$I_{corr}$  คือ ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion Current Density) หน่วยเป็นไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

EW คือ ค่ามวลสมมูล (Equivalent Weight) ของโลหะตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบ ถ้าโลหะผสมต้องคำนวณตามสัดส่วน

A คือ พื้นที่ผิวของโลหะตัวอย่าง หน่วยเป็นตารางเซนติเมตร ( $\text{cm}^2$ )

D คือ ความหนาแน่นของโลหะตัวอย่างหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

3. ค่าศักย์ไฟฟ้าขณะที่เกิดฟิล์มที่ผิว (Primary Passivation Potential,  $E_{pp}$ ) เป็นค่าศักย์ไฟฟ้าที่โลหะเกิดฟิล์มพาสซีฟ (Passive Film) ครอบคลุมทั่วผิวหน้าโลหะ ซึ่งมีผลให้เกิดการกัดกร่อนน้อยลง

4. ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting Potential,  $E_p$ ) เป็นค่าศักย์ไฟฟ้าที่โลหะเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting) ซึ่งพบในโลหะที่สามารถสร้างฟิล์มพาสซีฟ (Passive Film) ที่ทนต่อการกัดกร่อน เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม

ผลการประเมินการกัดกร่อนของโลหะจากเส้นโค้งโพลาริเซชัน (Polarization Curve) ถ้าโลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) ต่ำ จะไวต่อการกัดกร่อนมากกว่าโลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน

( $E_{corr}$ ) สูง และคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนของโลหะต่อปีได้จากค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $I_{corr}$ ) ดังนั้นการทดสอบการกัดกร่อนโลหะโดยเทคนิคเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Test) เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะได้ ใช้เวลาน้อย เพื่อช่วยให้การเลือกวัสดุให้เหมาะสมกับงานหรือสามารถหาวิธีป้องกันการกัดกร่อนได้ดี

## 2.9 ประเภทของการกัดกร่อน [17]

ประเภทของการกัดกร่อนสามารถแบ่งตามสภาพของการกัดกร่อนของโลหะที่ปรากฏให้เห็น สภาพการกัดกร่อนหลายสภาพที่สามารถระบุได้ชัดเจนว่าเป็นประเภทใด แต่ก็มีหลายครั้งที่มักจะเกิดในลักษณะผสมผสานกันประเภทของการกัดกร่อนมีดังนี้คือ

### 2.9.1 การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform or General Attack Corrosion)

การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform Corrosion) เป็นรูปแบบการกัดกร่อนที่ธรรมดาที่สุด การผุกร่อนเกิดขึ้นทั่วๆ ทั้งผิวโลหะที่สัมผัสกับสารละลาย เนื้อโลหะจะบางลงทุกขณะ จนกระทั่งไม่สามารถใช้งานได้อีกต่อไป การผุกร่อนรูปแบบนี้ถึงแม้จะทำความเสียหายมาก แต่ในแง่วิศวกรรมแล้วถือว่าไม่เป็นปัญหา เพราะการผุกร่อนจะเป็นไปด้วยอัตราที่คงที่ เราสามารถประมาณอายุการใช้งานของโลหะได้โดยการตรวจสอบง่าย (ด้วยสายตา) นอกจากนั้นยังสามารถควบคุมได้ง่ายอีกด้วย

### 2.9.2 การกัดกร่อนเนื่องจากเกลวานิกหรือโลหะ 2 ชนิด (Galvanic or Two – Metal Corrosion)

การกัดกร่อนแบบนี้เกิดจากการสัมผัสหรือเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าของโลหะตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปที่มีศักย์ไฟฟ้ารีดักชันต่างกันและอยู่ในสารละลายที่นำไฟฟ้าได้ โลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันต่ำกว่ามีแนวโน้มที่จะสูญเสียอิเล็กตรอนได้ง่ายกว่า และเกิดการกัดกร่อนกับโลหะนั้นอย่างรุนแรงที่บริเวณรอยต่อของการสัมผัส นอกจากนี้ในบางกรณี แม้ว่าจะมีโลหะเพียงชนิดเดียวแต่ถ้าปลายทั้งสองด้านของโลหะนั้นอยู่ในสถานะที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์ต่างกัน ก็สามารถเอื้อให้เกิดการกัดกร่อนแบบกัลวานิกได้

### 2.9.3 การกัดกร่อนแบบช่องแคบ (Crevice Corrosion)

การกัดกร่อนแบบช่องแคบ คือ การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในพื้นที่อับบนผิวโลหะที่สัมผัสโดยตรงกับสารกัดกร่อน การกัดกร่อนประเภทนี้เกี่ยวข้องกับปริมาณของสารละลายที่ค้างอยู่ตามพื้นที่ที่เป็นหลุม หรือพื้นที่ที่เป็นซอก บริเวณแคบๆที่มีสารละลายเข้าไปขังอยู่ได้เป็นเวลานานโดยไม่มีการถ่ายเท ทำให้ความเข้มข้นของออกซิเจน ในน้ำหรือสารละลายภายในซอกไม่เท่ากับภายนอก ทำให้เกิดการครบ เซลล์การกัดกร่อนชนิดเซลล์ความเข้มข้น โดยบริเวณในซอกจะเกิดเป็นขั้วแอโนดคือเกิดการสูญเสียเนื้อโลหะ

#### 2.9.4 การกัดกร่อนแบบเป็นหลุม (Pitting Corrosion)

ส่วนมากเกิดจากวัสดุสัมผัสสารละลายพวกคลอไรด์ เช่น น้ำทะเล เมื่อวัสดุถูกกัดกร่อน บริเวณกัดกร่อนจะเป็นรูหรือหลุมขึ้นในวัสดุ รูปแบบของการกัดกร่อนในลักษณะนี้ เป็นอันตรายต่อโครงสร้างทางวิศวกรรมอย่างมากเมื่อการกัดกร่อนนั้นก่อให้เกิดรูทะลุเนื้อโลหะขึ้น แต่ก็มีบ่อยครั้งที่หลุมที่เกิดขึ้นจะถูกตรวจเช็คได้ยากเนื่องจากหลุมเล็กๆ เหล่านี้มักจะถูกปกคลุมด้วยผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการกัดกร่อนนั้น นอกจากนี้จำนวนและความลึกของหลุมมักจะแตกต่างกัน ทำให้ยากที่จะประเมินความเสียหายได้

#### 2.9.5 การกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน (Intergranular Corrosion)

โดยปกติการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน (Grain Boundary) จะเกิดได้ดีกว่าที่โลหะพื้นเล็กน้อย แต่ในบางสภาวะ การกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนจะไวมาก เช่น ปัญหาที่พบบ่อยของการกัดกร่อนแบบนี้ในเหล็กกล้าไร้สนิม คือ บริเวณรอยเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมที่เกิดการสูญเสียโครเมียมในรูปของคาร์ไบด์ ( $Cr_{23}C_6$ ) ทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบนี้ในบริเวณใกล้แนวเชื่อมเนื่องจากขาดโครเมียมสำหรับการสร้างฟิล์มโครเมียมออกไซด์ที่แน่นและป้องกันเนื้อเหล็ก

#### 2.9.6 การผุกร่อนแบบเลือก (Selective Leaching or Dealloying)

การผุกร่อนแบบนี้จะเกิดขึ้นกับโลหะทองเหลือง โดยเฉพาะทองเหลืองที่นำไปใช้งานในน้ำเค็ม ทำให้สังกะสีในทองเหลืองจะถูกละลายไปเหลือแต่ทองแดง ดังนั้นทองเหลืองจะมีลักษณะพรุน เพราะอะตอมของสังกะสีหลุดออกมา ชิ้นงานจึงมีความแข็งแรงลดลง จะสังเกตได้ง่ายเพราะชิ้นงานที่เกิดการผุกร่อนแบบนี้จะมีสีคล้ายทองแดง

#### 2.9.7 การกัดกร่อนแบบกัดเซาะ (Erosion Corrosion)

การผุกร่อนแบบนี้พบได้มากในเครื่องจักร หรืออุปกรณ์ที่ต้องสัมผัสกับน้ำ หรือของเหลวใดๆ ที่มีความเร็วในการไหลสูงๆ เช่น ใบพัดเรือ, ใบพัดของเครื่องสูบน้ำ, ข้อเสี้ยวของท่อ ฯลฯ การผุกร่อนแบบนี้เกิดจากสาเหตุ 2 ประการคือ 1. Electrochemical Corrosion 2. แรงกระแทกของของไหลหรือจากเศษผงอื่นๆ ในของไหล ซึ่งโลหะบางชนิดอาจจะสามารถสร้าง Oxide Film เพื่อปกป้องได้ดี แต่เมื่ออยู่ในสภาพน้ำไหลแรง หรือมีแรงกระแทกต่างๆ ก็จะทำให้ Oxide Film นั้นถูกทำลายไป โลหะก็จะผุกร่อนเร็วขึ้น

#### 2.9.8 การกัดกร่อนเนื่องจากความเค้น (Stress Corrosion)

การกัดกร่อนชนิดนี้จะเกิดกับโลหะที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีสารกัดกร่อน และมีความเค้นกระทำกับโลหะ ความเค้นนี้อาจเป็นความเค้นตึง หรือความเค้นภายนอกที่มากระทำ

เสียหายแบบนี้ ผิวโลหะอาจไม่ถูกกัดกร่อน หรือไม่เปลี่ยนแปลงเลย แต่ในเนื้อโลหะจะมีรอยร้าว เล็กๆ อยู่มากมาย ลักษณะของการกัดกร่อนที่มีความเค้นเข้ามา เกี่ยวข้อง จะมีลักษณะรอยร้าวเป็น กิ่งก้าน โดยที่รอยร้าวนี้อาจเกิดตามขอบเกรนหรือผ่าเกรนก็ได้

## 2.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

เป็นวิธีการทดสอบสมมติฐานทางสถิติเพื่อทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย (Mean) ของ ประชากรที่มีตั้งแต่ 3 กลุ่มขึ้นไป

### 2.10.1 จุดเด่นของการวิเคราะห์ความแปรปรวน

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) เป็นวิธีการทางสถิติที่ใช้ ทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ย (Mean) ของกลุ่มตัวอย่างตั้งแต่ 2 กลุ่มขึ้นไป อันเกิดจากการ กระทำที่ต่างกัน

จุดเด่นของการวิเคราะห์ความแปรปรวน

1. ใช้ในการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยจากกลุ่มตัวอย่างมากกว่า 2 กลุ่มขึ้นไป
2. ใช้วิเคราะห์ข้อมูลสำหรับการวิจัยที่ออกแบบซับซ้อนหรือมีตัวแปรอิสระมากกว่า 1 ตัวได้
3. สามารถทดสอบได้ว่าตัวแปรอิสระสองตัวหรือมากกว่ามีปฏิสัมพันธ์ (Interaction) กันหรือไม่

### 2.10.2 ข้อตกลงเบื้องต้น

เนื่องจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนใช้ F เป็นสถิติทดสอบโดยที่ F เป็นอัตราส่วนระหว่าง ความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (Mean Square Between) กับความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Mean Square Within) การวิเคราะห์ความแปรปรวนจึงมีข้อตกลงเบื้องต้นเกี่ยวกับลักษณะข้อมูลที่จะนำมาวิเคราะห์ดังนี้

1. กลุ่มตัวอย่างได้มาโดยสุ่มจากประชากร (Random Sampling) และหากกลุ่มตัวอย่างเลือกมาโดยการ สุ่มจากประชากรที่มีการกระจายตัวเป็นโค้งปกติในการคำนวณค่า F ความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (Mean square between) และความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Mean Square Within) จะเป็นอิสระจากกัน
2. ข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์จะต้องได้จากประชากรที่มีความแปรปรวนเท่ากันทุกกลุ่ม (Variance Homogeneity)  $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 \dots = \sigma_k^2 = \sigma^2$
3. ความเป็นปกติ (Normality) ตัวอย่างแต่ละกลุ่มจะส่งมาจากประชากรที่มีการแจกแจงปกติ หาก จำเป็นต้องแปลงข้อมูล (Transformation) ให้มีการแจกแจงแบบโค้งปกติก่อนหรือเพิ่มตัวอย่างให้มีขนาด มากขึ้น และใช้กลุ่มตัวอย่างที่มีขนาดเท่าๆกันในแต่ละกลุ่มจะหลีกเลี่ยงการละเมิดข้อตกลงนี้ได้
4. ข้อมูลของตัวแปรตามที่จะนำมาวิเคราะห์ต้องอยู่ในมาตราอันตรภาคหรืออัตราส่วน โดยตัวแปรอิสระเป็น ตัวแปรประเภททวิภาค

### 2.10.3 หลักการวิเคราะห์ความแปรปรวน

ความแปรปรวนของข้อมูลหรือคะแนนหรือค่าการวัดนั้นพิจารณาจากแหล่งที่มา แบ่งได้เป็น 3 แหล่งคือ

1. ความแปรปรวนรวม (Total Group Variance หรือ Mean Square Total,  $MS_T$ ) เป็นความแปรปรวนอันเกิดจากคะแนนแต่ละตัวเบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยของกลุ่มรวม
2. ความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (Between-Treatment Variance หรือ Mean Square Between Group,  $MS_B$ ) เป็นความแปรปรวนของค่าตัวแปรตามระหว่างตัวแปรต้นแต่ละกลุ่ม ซึ่งความแปรปรวนที่เกิดขึ้นนี้อาจเนื่องมาจากอิทธิพลของตัวแปรต้น หรืออาจเกิดจากอิทธิพลของตัวแปรต้นเกิดขึ้นอย่างสุ่ม (Chance) ที่เนื่องมาจากความแตกต่างระหว่างตัวอย่างหรือเกิดจากความคลาดเคลื่อนในการทดลอง เช่น ใช้การวัดที่แตกต่างกัน
3. ความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Within Treatment Variance หรือ Mean Square Within Group,  $MS_W$ ) เป็นความแปรปรวนอันเกิดจากคะแนนแต่ละตัวในแต่ละกลุ่มเบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่ม ซึ่งความแปรปรวนชนิดนี้ คือความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน

การวิเคราะห์ความแปรปรวน เป็นการนำความแปรปรวนของตัวแปรหรือปรากฏการณ์มาแบ่งเป็นส่วนๆ ตามความต้องการของผู้วิจัย แล้วนำความแปรปรวนแต่ละส่วนมาเปรียบเทียบการตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย กล่าวคือ การวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นการเปรียบเทียบความแปรปรวนอันเกิดจากความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่ม ซึ่งเป็นผลของตัวแปรอิสระกับความแปรปรวนภายในกลุ่ม หรือความคลาดเคลื่อนว่าตัวใดมีค่ามากกว่ากัน ในการทดสอบสมมติฐานจึงใช้อัตราส่วนของความแปรปรวนอันเกิดจากความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่ม (Between-Group Variance) กับความแปรปรวนภายในกลุ่ม อันเกิดจากความคลาดเคลื่อน (Within-Group หรือ Error Variance) เป็นหลักในการตัดสินใจ และเรียกอัตราส่วนนี้ว่า F-Ratio แสดงดังสมการที่ 2.8

$$F = \frac{MSB}{MSW} \quad (2.8)$$

ซึ่ง  $MSB$  = ความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม

$MSW$  = ความแปรปรวนภายในกลุ่ม

## 2.10.4 วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน

### 2.10.4.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว

การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว หรือ One-Way ANOVA เป็นวิธีการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นตัวเดียวกับตัวแปรตามเพียงตัวเดียว โดยที่ตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นอาจมีลักษณะเป็นตัวแปรเชิงคุณภาพ (Qualitative Variable) ที่จำแนกออกเป็นระดับหรือประเภทต่างๆ เช่น เก่ง-ปานกลาง-อ่อน ดีมาก-ดี-พอใช้-แย่มาก เป็นต้น ส่วนตัวแปรตามอาจมีลักษณะเป็นตัวแปรเชิงปริมาณ (Quantitative Variable) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นว่าจะส่งผลอย่างไรกับตัวแปรตาม ตามสมมติฐานการวิจัยที่กำหนดไว้

#### 1. สูตรและตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว

ตารางที่ 2.10 สูตรความแปรปรวนทางเดียว

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F-statistic
Between Group (Treatment)	$SSB = \sum_{i=1}^k \frac{T_i^2}{n_i} - \frac{T^2}{n}$	k-1	$MSB = \frac{SSB}{k-1}$	$F = \frac{MSB}{MSW}$
Within Groups (Error)	$SSW = SST - SSA$	n-k	$MSW = \frac{SSW}{n-k}$	
Total	$SST = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} X_{ij}^2 - \frac{T^2}{n}$	n-1		

โดย  $SST = SSB + SSW$

จากตารางที่ 2.10 สามารถเขียนโดยสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 2.11 สรุปสูตรความแปรปรวนทางเดียว

Source of Variance	df	Sum Square	Mean Square (MS)	F-ratio
Between Groups	k-1	SSB	MSB	$F = \frac{MSB}{MSW}$
Within Groups	n-k	SSW	MSW	
Total	n-1	SST		

## 2. ขั้นตอนการทดสอบสมมติฐานมีดังนี้

### 1. ตั้งสมมติฐาน

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$$

$H_1$  : มีอย่างน้อยหนึ่งคู่ที่ไม่เท่ากัน

### 2. กำหนดระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ )

3. กำหนดตัวสถิติทดสอบและคำนวณค่า (ตัวสถิติทดสอบคือ  $f$  และสร้างตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน)

### 4. ดูบริเวณการทดสอบ

5. ถ้าค่า  $f$  ที่คำนวณน้อยกว่าค่าที่เปิดจากตาราง หมายถึงค่าที่คำนวณได้จากตัวอย่างตกบริเวณยอมรับ  $H_0$  ตัดสินใจยอมรับ  $H_0$  สรุปว่าไม่มีเหตุผลเพียงพอที่ปฏิเสธสมมติฐาน  $H_0$  หากค่า  $f$  ที่คำนวณได้มากกว่าค่าในตารางหมายถึง ค่าที่คำนวณได้จากตัวอย่างตกบริเวณปฏิเสธ  $H_0$  ตัดสินใจปฏิเสธ  $H_0$  และสรุปผลว่ามีค่าเฉลี่ยอย่างน้อยหนึ่งคู่ที่ไม่เท่ากัน

### 2.10.4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง

การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทางหรือ Two-Way ANOVA เป็นวิธีการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นซึ่งเป็นสิ่งทดลองจำนวน 2 ตัวกับตัวแปรตามเพียงตัวเดียว โดยที่ตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นอาจมีลักษณะเชิงคุณภาพที่จำแนกออกเป็นระดับหรือประเภทต่างๆ ส่วนตัวแปรตามมีลักษณะเชิงปริมาณ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นว่าจะส่งผลอย่างไรกับตัวแปรตาม ตามสมมติฐานการวิจัยที่กำหนดไว้โดยที่การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง นอกจากจะสามารถศึกษาผลของตัวแปรทั้งสองตัวไปพร้อมๆ กันแล้ว ยังสามารถศึกษาผลร่วม (Interaction) ระหว่างตัวแปรทั้งสองตัวด้วยว่าตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นตัวหนึ่งนอกจากจะส่งผลต่อตัวแปรตามแล้ว ยังส่งผลใดๆต่อตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นอีกตัวแปรหนึ่งหรือไม่

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงาน

ในการจัดทำปฏิญานิพนธ์เรื่องการศึกษาการศึกษาอิทธิพลของ Ag ในโลหะบัดกรีสารตะกั่ว Sn-xAg ที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและความต้านทานการกัดกร่อน โดยมีตัวแปรที่สำคัญในการวิจัยครั้งนี้คือ เฟอร์เซ็นต์ของธาตุเงินที่เติมเข้าไปในโลหะบัดกรีพื้นฐาน หลังจากเพิ่มเฟอร์เซ็นต์ธาตุเงินแล้ว จะทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด และการต้านทานการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-xAg ที่มีต่อโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) ด้วยวิธี Potentiostat Analyzer หลังจากนั้นจะทำการศึกษาปฏิกิริยารอยต่อหลังจากการบัดกรี โดยจะทำการวัดความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดงด้วยวิธี Spread Test แล้วทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีและองค์ประกอบทางเคมีที่ได้หลังจากการบัดกรีโลหะบัดกรีแต่ละชนิดกับแผ่นทองแดงบริสุทธิ์

#### 3.1 การวางแผนการดำเนินงาน

สำหรับงานวิจัยเพื่อการศึกษาอิทธิพลของธาตุเงิน (Ag) ในโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-xAg ที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค และความต้านทานการกัดกร่อน มีขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยดังนี้

1. ศึกษาความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ
2. รวบรวมข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
3. วางแผนและออกแบบขั้นตอนในการทำการทดลอง
4. ทำการทดลองและวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี
5. ทำการทดลองและวิเคราะห์ผลการต้านทานการกัดกร่อนของโลหะบัดกรี
6. ทำการทดลองและวิเคราะห์ความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีหลังจากการบัดกรี
7. ทำการทดลองและวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีหลังจากการบัดกรี
8. วิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้
9. สรุปผลการทดลอง
10. จัดทำรูปเล่มและตรวจสอบความถูกต้อง

### 3.2 การวิเคราะห์ผลทางโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี

#### 3.2.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

เตรียมโลหะบัดกรีที่ประกอบไปด้วยส่วนผสมต่างๆจากบริษัท Ultracore จำกัด (มหาชน) ตามที่กำหนดไว้เพื่อใช้เป็นชิ้นงานทดสอบในการทำการทดลองดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมของโลหะบัดกรีที่ใช้ในการทดลอง

No.	Composition (wt%)	
	Sn	Ag
1	100	0
2	97	3
3	96.5	3.5
4	96	4
5	95	5

การเตรียมชิ้นงานทดสอบในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี จะเริ่มจากการนำโลหะบัดกรีดังรูปที่ 3.1 มาตัดด้วยเครื่องตัดแบบแรงโน้มถ่วงยี่ห้อ Struers รุ่น Minitom รูปที่ 3.2 โดยตัดในลักษณะตัดขวาง (Cross-Sectional) บริเวณส่วนกลางของโลหะบัดกรี ส่วนผสมละ 5 ชิ้น เป็นจำนวนทั้งหมด 25 ชิ้น



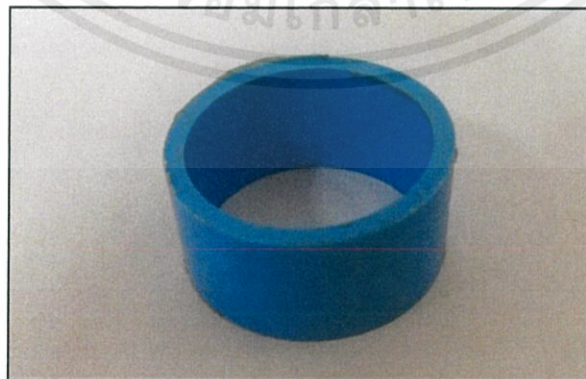
รูปที่ 3.1 โลหะบัดกรีแบบแท่งจากบริษัท Ultracore



รูปที่ 3.2 เครื่องตัดแบบแรงโน้มถ่วงยี่ห้อ Struers รุ่น Minitom

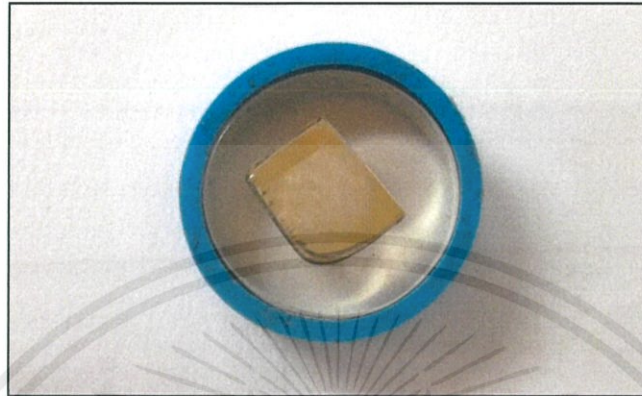
### 3.2.2 การหล่อเรซิน (Mounting)

จะกระทำต่อเมื่อตัวอย่างชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค มีขนาดเล็กจนไม่สามารถที่จะจับถือได้สะดวกในระหว่างกระบวนการขัดหยาบ ขัดละเอียด และขัดเงา เริ่มจากนำชิ้นงานทดสอบที่ตัดแล้วมาทำการหล่อเรซิน โดยแม่แบบที่ใช้ในการหล่อเรซินจะเป็นท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.20 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3.3 และตัดแบ่งท่อให้มีความสูงมากกว่าชิ้นงาน ทำการปรับผิวของท่อ PVC และพื้นระนาบที่วางแม่แบบนำเอาวาสลินมาทาผิวด้านในของท่อ PVC ก่อนทำการหล่อเรซินเพื่อให้ง่ายต่อการแกะชิ้นงานออกจากท่อ PVC



รูปที่ 3.3 แม่แบบที่ใช้ในการหล่อเรซิน

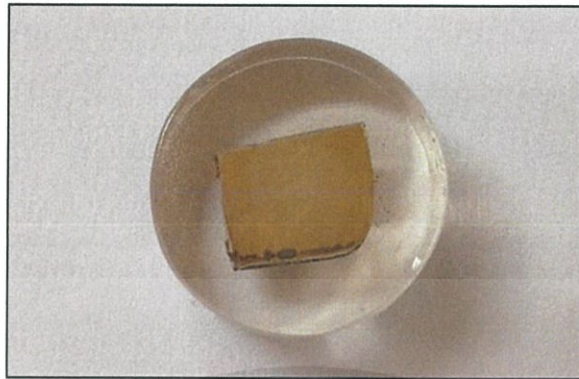
จากนั้นนำชิ้นงานวางลงบนแม่แบบแล้วเทเรซินที่ผสมเรียบร้อยแล้วลงไปรอจนเรซินแข็งตัวก่อน แล้วจึงแกะชิ้นงานออกจากแม่แบบแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ชิ้นงานหลังจากเรซินแข็งตัว

### 3.2.3 การขัดเตรียมผิวชิ้นงานทดสอบแบบหยาบ

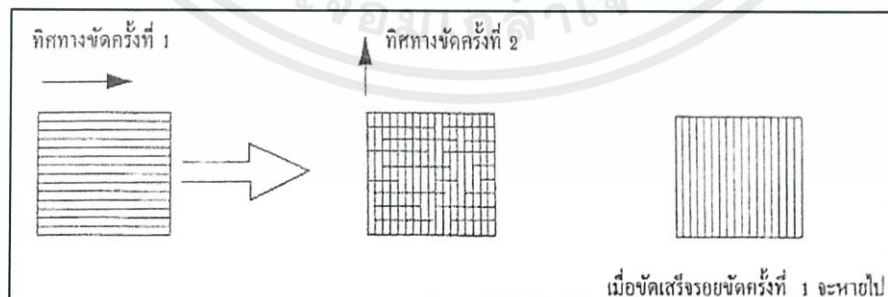
การนำชิ้นงานทดสอบดังรูปที่ 3.5 ขัดด้วยกระดาษทราย (SiC) โดยเรียงลำดับตั้งแต่ระดับความหยาบไปจนถึงละเอียด เบอร์ 400, 600, 1000, 2000, และ 4000 ตามลำดับ ด้วยเครื่องขัดยี่ห้อ Struers รุ่น LaboPol-1 ดังรูปที่ 3.6 ก่อนที่จะเริ่มขัดจะต้องทำการขัดลบมุม หรือเหลี่ยมที่แหลมคมของชิ้นงานให้หมดเสียก่อน มิฉะนั้นจะทำให้กระดาษทรายขาดได้ ในระหว่างกระบวนการขัดจะต้องมีน้ำไหลผ่านบนกระดาษขัดตลอดเวลาทั้งนี้ เพื่อให้ น้ำช่วยชะล้างพัสดุพาเอาเศษโลหะที่ไม่ต้องการออกไป และยังช่วยหล่อเย็นไม่ให้เกิดความร้อนบนผิวหน้าชิ้นงาน ซึ่งในโลหะบางชนิดความร้อนที่เกิดขึ้นนี้อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างได้อีกด้วย และทิศทางการขัดจะต้องมีการเปลี่ยนโดยการหมุนตัวอย่างชิ้นงานไป 90 องศาจากแนวเดิมดังแสดงในรูปที่ 3.7 เสมอเมื่อมีการเปลี่ยนเบอร์กระดาษทรายทั้งนี้เพื่อเป็นการลบรอยกระดาษทรายเบอร์เดิม ขัดชิ้นงานจนกระทั่งรอยขีดขัดต่างๆ หายไป



รูปที่ 3.5 ชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 3.6 เครื่องขัดยี่ห้อ Struers รุ่น LaboPol-1



รูปที่ 3.7 ทิศทางการหมุนปรับขึ้นงานในกระบวนการขัดเมื่อเปลี่ยนกระดาษทราย

### 3.2.4 การขัดผิวชิ้นงานทดสอบแบบละเอียด

นำชิ้นงานทดสอบไปขัดผิวละเอียดบนผ้าสักหลาดด้วยเครื่องขัดผิวหน้าแบบละเอียด (Polishing Machine) โดยใช้ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยใช้อะลูมินาชนิดครีม ซึ่งอะลูมินาที่ใช้ขัดนั้นมีความละเอียด 1 ไมครอนและ 0.3 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ในการขัดจะใช้แรงกดเบาๆ เพื่อไม่ให้เกิดรอยบนผิวหน้าของชิ้นงานทดสอบจากเศษโลหะที่ฝังบนผ้าสักหลาด ตลอดเวลาที่ทำกรขัดนั้นจะต้องทำการหล่อลื่นตลอดเวลาโดยใช้น้ำ เพื่อลดความร้อนที่เกิดขึ้นขณะทำการขัดและระบายเศษโลหะที่เกิดขึ้น ทำการขัดผิวหน้าชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการขัดผิวแบบหยาบ จนผิวหน้ามีความเงาและไม่มีรอยที่เกิดจากการขัดผิวหยาบ



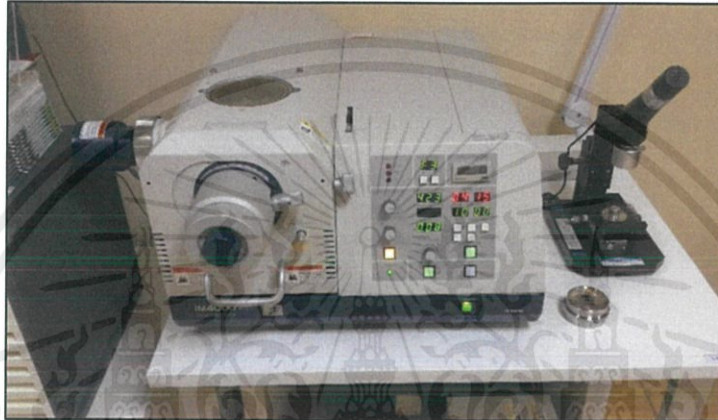
รูปที่ 3.8 เครื่องขัดผิวหน้าแบบละเอียด (Polishing Machine)



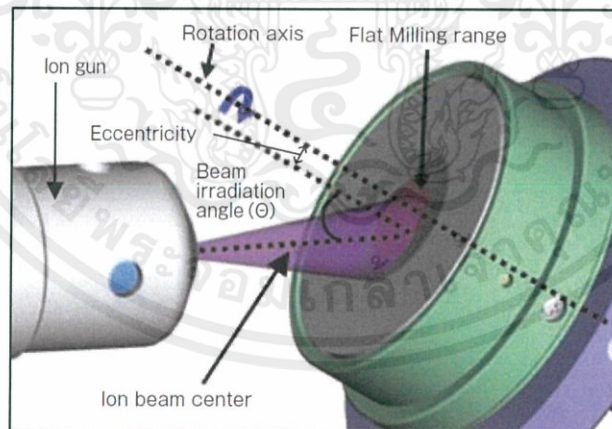
รูปที่ 3.9 อะลูมินาชนิดครีมขนาด 1 ไมครอน และ 0.3 ไมครอน

### 3.2.5 การกัดผิวหน้าชิ้นงาน

ผิวหน้าชิ้นงานเมื่อผ่านการขัดเงาแล้วยังไม่สามารถตรวจสอบวิเคราะห์โครงสร้าง หรือเฟสที่อยู่ภายในได้ทั้งนี้เพราะพื้นผิวหน้าชิ้นงานนั้นค่อนข้างเรียบเสมอกันเมื่อนำไปส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ก็จะสะท้อนแสงกลับหมดเพราะไม่มีความขรุขระต่างกันของโครงสร้าง ดังนั้นจึงต้องนำชิ้นงานทดสอบไปเข้าเครื่องกัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยไอออน (Ion Milling System) รุ่น IM4000Plus แสดงดังรูปที่ 3.10 ทำการยิงลำแสงไอออน (Ion Beam) ตรงกลางชิ้นงาน ซึ่งลักษณะการยิง Ion Beam แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.10 เครื่องกัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยไอออน (Ion Milling) บริษัท Hitachi



รูปที่ 3.11 ลักษณะการยิง Ion Beam แบบ Flate Milling

### 3.2.6 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเบื้องต้นและองค์ประกอบทางเคมี

ในการศึกษาชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นและองค์ประกอบทางเคมี จะทำการศึกษาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ยี่ห้อ Hitachi รุ่น SU3500 ดังแสดงในรูปที่ 3.12 และใช้ Energy Dispersive X-Ray (EDX) เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ



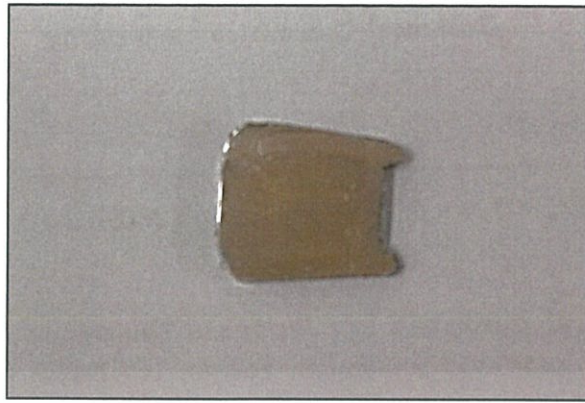
รูปที่ 3.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ Hitachi รุ่น SU3500

### 3.3 วิเคราะห์ผลการต้านทานการกัดกร่อนของโลหะบัดกรี

#### 3.3.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

##### 3.3.1.1 การตัดชิ้นงานทดสอบ

การเตรียมชิ้นงานทดสอบในการศึกษาการต้านทานการกัดกร่อนของโลหะบัดกรี จะเริ่มจากการนำโลหะบัดกรี มาตัดด้วยเครื่องตัดแบบแรงโน้มถ่วงยี่ห้อ Struers รุ่น Minitom โดยตัดในลักษณะตัดขวาง (Cross-Sectional) บริเวณส่วนกลางของโลหะบัดกรี แสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ชิ้นงานทดสอบ

### 3.3.1.2 การขัดเตรียมผิวชิ้นงานทดสอบ

การนำชิ้นงานทดสอบขัดด้วยกระดาษทรายโดยใช้ความละเอียดตั้งแต่เบอร์ 400, 600, 1000, 2000, และ 4000 ตามลำดับ ด้วยเครื่องขัดมือ Struers รุ่น LaboPol-1 ดังรูปที่ 3.6 โดยที่ในขณะที่ขัดนั้นต้องใช้น้ำหล่อให้เปียกอยู่ตลอดเวลา เพื่อเป็นการระบายความร้อนและระบายเศษของชิ้นงานที่ถูกขัดออกมาไม่ให้ค้างอยู่บนกระดาษทรายเพราะจะทำให้ชิ้นงานเป็นรอยได้ ซึ่งการขัดนั้นจะต้องขัดในทิศทางเดียวกันตลอดผิว และเมื่อเปลี่ยนกระดาษทรายเบอร์ใหม่จะต้องหมุนชิ้นงานไป 90 องศาจากทิศทางเดิมที่ใช้ขัด แล้วขัดจนรอยเดิมหายไป และภายหลังจากขัดชิ้นงานทดสอบด้วยกระดาษทรายจนครบทุกเบอร์แล้วให้นำชิ้นงานทดสอบไปขัดผิวละเอียดบนสีกหลาดด้วยเครื่องขัดผิวแบบละเอียด (Polishing machine) โดยใช้ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ด้วยอะลูมินาชนิดครีมขนาด 1.0 ไมครอน และ 0.3 ไมครอน ขัดชิ้นงานทดสอบโดยใช้แรงกดเบาๆ เพื่อไม่ให้เกิดรอยบนผิวหน้าของชิ้นงานทดสอบ อันเนื่องมาจากเศษโลหะที่ฝังตัวบนผ้าสีกหลาด ตลอดเวลาที่ทำกรขัดนั้นต้องทำการหล่อส่นโดยใช้น้ำเพื่อลดความร้อนที่เกิดขึ้น ซึ่งจะขัดจนกว่าผิวหน้าของชิ้นงานทดสอบมีความเงาและไม่มีรอยที่เกิดจากการขัดผิวหยาบแสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ชิ้นงานทดสอบหลังผ่านการขัดแบบละเอียด

### 3.3.1.3 การทำความสะอาดชิ้นงานทดสอบ

นำชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการขัดผิวแบบละเอียด มาล้างทำความสะอาดพื้นผิวด้วยเครื่องล้างทำความสะอาดด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ยี่ห้อ ELMA รุ่น E30H ดังรูปที่ 3.15 โดยตั้งอุณหภูมิที่ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นล้างชิ้นงานด้วย Ethyl Alcohol ปลอ่ยชิ้นงานให้แห้งในอากาศก่อนจะนำไปทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดนามิกโพลาริเซชัน (Potentiodynamic Polarization)



รูปที่ 3.15 เครื่องล้างทำความสะอาดด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ยี่ห้อ Elmasonic

### 3.3.2 การเตรียมสารละลายทดสอบ

เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) แสดงดังรูปที่ 3.16 โดยใช้โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 35.064 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตรซึ่งมีเข้มข้นเทียบเท่ากับความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ในน้ำทะเล (ความเข้มข้น 0.6 โมลาร์) และเตรียมสารละลายกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) โดยใช้กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 95 เปอร์เซ็นต์จากบริษัท Fisher Chemical แสดงดังรูปที่ 3.17 ปริมาตร 56 มิลลิลิตรต่อน้ำ 1 ลิตร ซึ่งกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) มีความเข้มข้นเทียบเท่ากับความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) ในแบตเตอรี่ (ความเข้มข้น 4.5 โมลาร์)



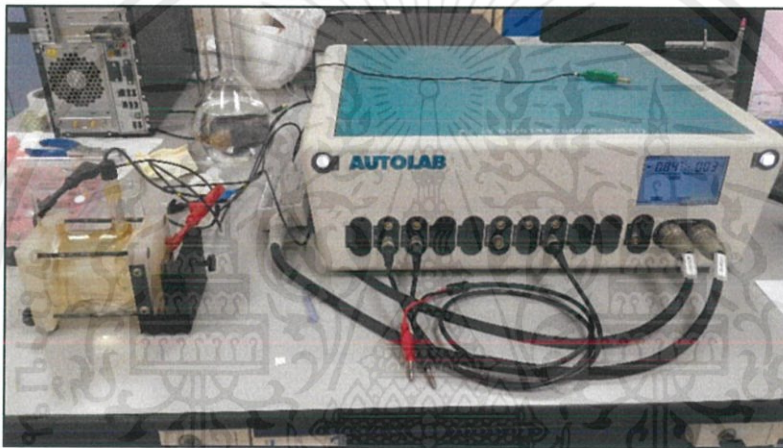
รูปที่ 3.16 โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)



รูปที่ 3.17 กรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) ความเข้มข้น 95 เปอร์เซ็นต์

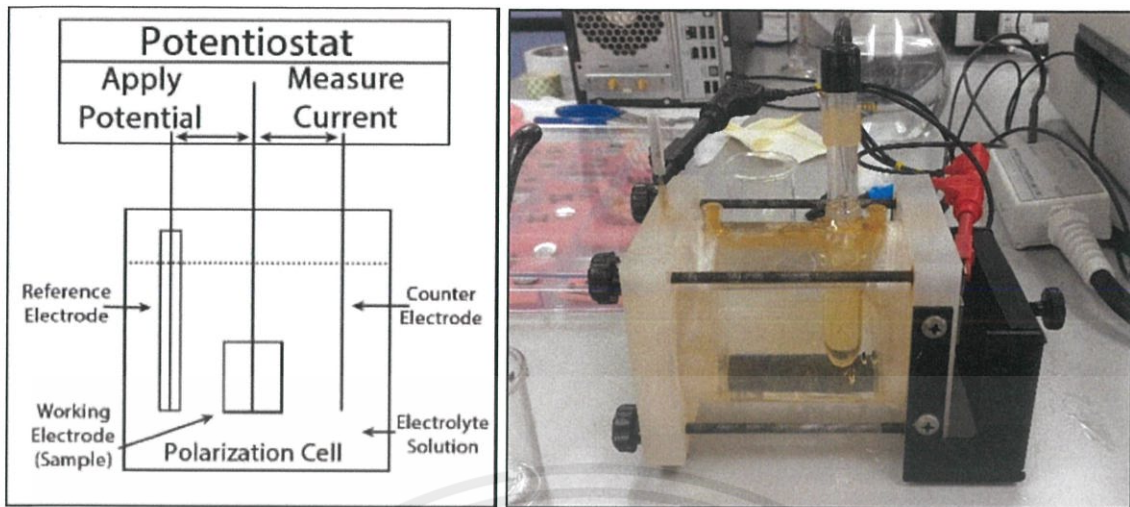
### 3.3.3 การวัดทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิคโพเทนซิโอดนามิกโพลาริเซชัน (Potentiodynamic polarization)

1. เครื่องโพเทนซิโอสแตทกัลวานอสแตท (Potentiostat/Galvanostat) ยี่ห้อ Autolab รุ่น PGSTAT302N ซึ่งควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ถูกนำมาต่อเข้ากับเซลล์ทดสอบการกัดกร่อนชนิด 3 ขั้วดังแสดงในรูปที่ 3.18 ประกอบไปด้วย ขั้วตรงข้าม (Counter Electrode) ซึ่งเป็นแผ่นแพลทินัมผิวเรียบขนาด 1.5 ซม. × 5.0 ซม. × 0.1 ซม. ขั้วอ้างอิง (Reference Electrode) จะเป็นขั้วไฟฟ้าชนิดคาโลเมลอิ่มตัว (Saturated Calomel Electrode) ดังนั้นค่าศักย์ไฟฟ้าทั้งหมดที่รายงานจะอ้างอิงกับขั้วไฟฟ้าชนิดคาโลเมลอิ่มตัว และขั้วทำงาน (Working Electrode) คือชิ้นงานทดสอบที่ทำความสะอาดแล้ว



รูปที่ 3.18 เครื่องโพเทนซิโอสแตทกัลวานอสแตท

2. ติดตั้งชิ้นงานที่ทำการขัดผิวละเอียดแล้วเข้ากับเซลล์ทดสอบ และทำการเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เข้มข้น 0.6 โมลาร์ (0.6M-NaCl) และสารละลายกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) เข้มข้น 1 โมลาร์ (1M- $H_2SO_4$ ) ที่ละชนิด ลงในเซลล์ทดสอบการกัดกร่อน ซึ่งขั้วตรงข้ามและขั้วทำงานจะจุ่มอยู่ในสารละลาย ส่วนขั้วอ้างอิงจะถูกเชื่อมต่อเข้าสู่เซลล์ทดสอบการกัดกร่อนด้วยสะพานเกลือที่ทำจากผงอะการ์ (Agar) 0.1 เปอร์เซ็นต์ และโซเดียมซัลเฟต 0.002 เปอร์เซ็นต์ ในน้ำกลั่น โดยสะพานเกลือนี้จะถูกบรรจุลงในเครื่องแก้วที่มีปลายด้านหนึ่งเป็นท่อขนาดเล็กของลักกิน (Luggin Capillary) ซึ่งเข้าหาชิ้นงานทดสอบ โดยมีระยะห่าง 2 มิลลิเมตร อีกด้านหนึ่งเป็นกระเปาะบรรจุโพแทสเซียมคลอไรด์อิ่มตัวเพื่อใช้ใส่ขั้วอ้างอิง แสดงดังรูปที่ 3.19 โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 20-25 องศาเซลเซียส [18]



รูปที่ 3.19 เซลล์ทดสอบการกัดกร่อน

3. ทำการตั้งค่าโปรแกรมจากคอมพิวเตอร์ โดยใช้ Scan Rate เป็น 0.0033 V/s ช่วงศักย์ไฟฟ้าที่ทดสอบตั้งแต่ -1.2 ถึง +1.3 ใช้เวลาทดสอบทั้งสิ้น 30 วินาทีต่อ 1 ชิ้นงาน และเริ่มบันทึกการเปลี่ยนแปลงระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าจาก Polarization Curve พร้อมทั้งวิเคราะห์หาอัตราการกัดกร่อน ตามลำดับ

4. ทำการทดสอบซ้ำแบบเดียวกัน 2 ครั้ง ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และสารละลายกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลอง

### 3.4 วิเคราะห์ความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีหลังการบัดกรี

#### 3.4.1 การเตรียมชิ้นงาน

ในการเตรียมชิ้นงานเพื่อใช้ในการทดสอบเริ่มต้นด้วยการหล่อโลหะบัดกรีแต่ละชนิด โดยใช้เข้าหลอมกราไฟต์ แสดงดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 เ้าหลอมกราไฟต์

เมื่อโลหะบัดกรีหลอมเหลวแล้วทำการเทโลหะบัดกรีลงในแม่พิมพ์โลหะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 มิลลิเมตร หนา 1.6 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 แม่พิมพ์โลหะที่ใช้ในการหล่อ

ชิ้นงานโลหะบัดกรีที่ได้จากการหล่อจะมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก ตามขนาดของแม่พิมพ์ แสดงดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 ชิ้นงานที่ได้จากการหล่อด้วยแม่พิมพ์โลหะ

รอให้ชิ้นงานเย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้องแล้วจึงทำการแกะโลหะบัดกรีออกจากแม่พิมพ์ แล้วทำการปรับขนาดของโลหะบัดกรีที่ได้จากการหล่อด้วยแม่พิมพ์ โดยการชั่งน้ำหนักให้มีน้ำหนักเท่ากันด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักยี่ห้อ Sartorius รุ่น BSA2245-CW แสดงดังรูปที่ 3.23 จำนวน 5 ชิ้น เพื่อนำไปทดสอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีต่อไป



รูปที่ 3.23 เครื่องชั่งน้ำหนักยี่ห้อ Sartorius รุ่น BSA2245-CW

### 3.4.2 การเตรียมแผ่นทองแดง

เตรียมแผ่นทองแดงบริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์ ขนาด  $30 \times 30 \times 0.35$  มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.24 เพื่อใช้เป็นโลหะบัดกรีฐาน จากนั้นนำแผ่นทองแดงมาล้างด้วย Ethyl Alcohol แซ่ทิ้งไว้ประมาณ 2 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 3.25

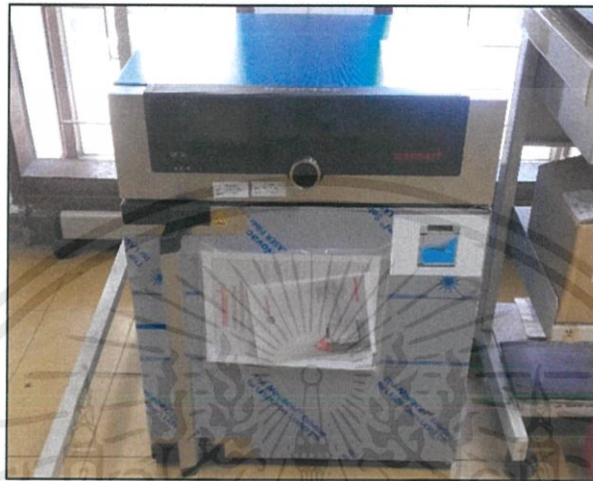


รูปที่ 3.24 แผ่นทองแดงบริสุทธิ์ 99.99 % ขนาด  $30 \times 30 \times 0.35$  มิลลิเมตร



รูปที่ 3.25 แซ่แผ่นทองแดงทิ้งไว้ใน Ethyl Alcohol

นำแผ่นทองแดงขึ้นมาเป่าลมด้วยเครื่องเป่าลมให้แห้ง และอบด้วยตู้อบลมร้อน ยี่ห้อ Memmert รุ่น UF30 แสดงดังรูปที่ 3.26 ด้วยอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที เพื่อไล่ความชื้นออกจากแผ่นทองแดงให้หมดก่อนนำไปใช้ทดสอบ



รูปที่ 3.26 ตู้อบลมร้อน Memmert รุ่น UF30

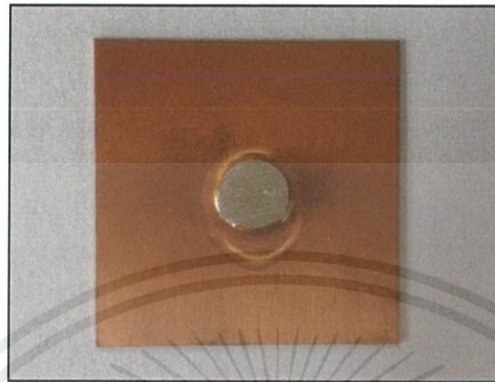
### 3.4.3 วิธีการทดสอบหาค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะพื้น

หยดฟลักซ์จากบริษัท Ultracore ชนิด AMR-3125 แสดงดังรูปที่ 3.27 ซึ่งมีสถานะเป็นของเหลว ประมาณ 0.02 มิลลิเมตร ลงบนแผ่นทองแดงขนาด 30 x 30 x 0.35 มิลลิเมตร ที่ได้ทำการเตรียมไว้



รูปที่ 3.27 ฟลักซ์ชนิด AMR-3125

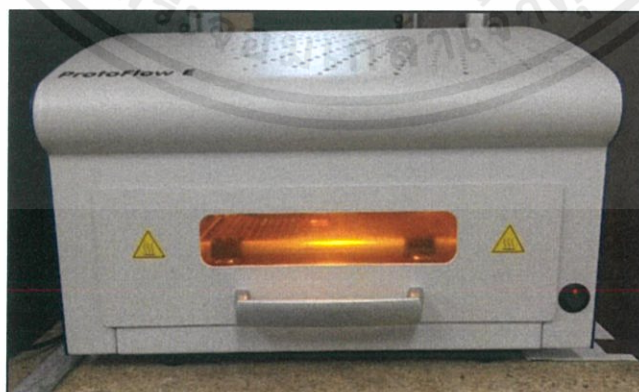
จากนั้นนำโลหะบัดกรีที่ได้จากการหล่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 มิลลิเมตร หนา 1.6 มิลลิเมตร มาวางบนแผ่นทองแดง แสดงดังรูปที่ 3.28



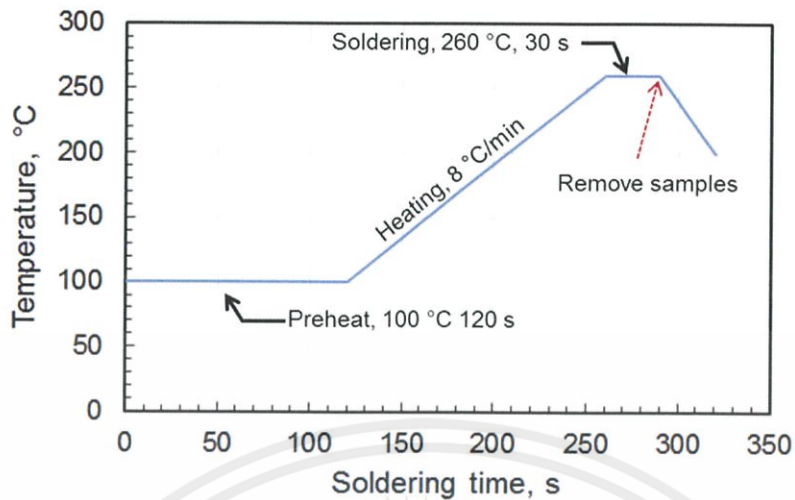
รูปที่ 3.28 ชิ้นงานทดสอบที่วางอยู่บนแผ่นทองแดง

ทำการบัดกรีด้วยวิธีรีโฟลว์โดยใช้เตารีดโฟลว์ยี่ห้อ LPKF รุ่น ProtoFlow E แสดงดังรูปที่ 3.29 และทดสอบการบัดกรีภายใต้เงื่อนไขดังต่อไปนี้

1. ขั้นตอนการ Preheat เป็นการอุ่นชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 120 วินาที ก่อนการบัดกรี
2. กระบวนการเพิ่มความร้อนให้แก่ชิ้นงานทดสอบจนถึงอุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะบัดกรี 40 องศาเซลเซียส
3. หลังจากการบัดกรีชิ้นงานที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียสเสร็จแล้ว จะทำการแช่ชิ้นงานทดสอบไว้เป็นระยะเวลา 30 วินาที ก่อนนำชิ้นงานออกจากเตารีดโฟลว์ แสดงดังรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.29 เตารีดโฟลว์ยี่ห้อ LPKF รุ่น ProtoFlow E



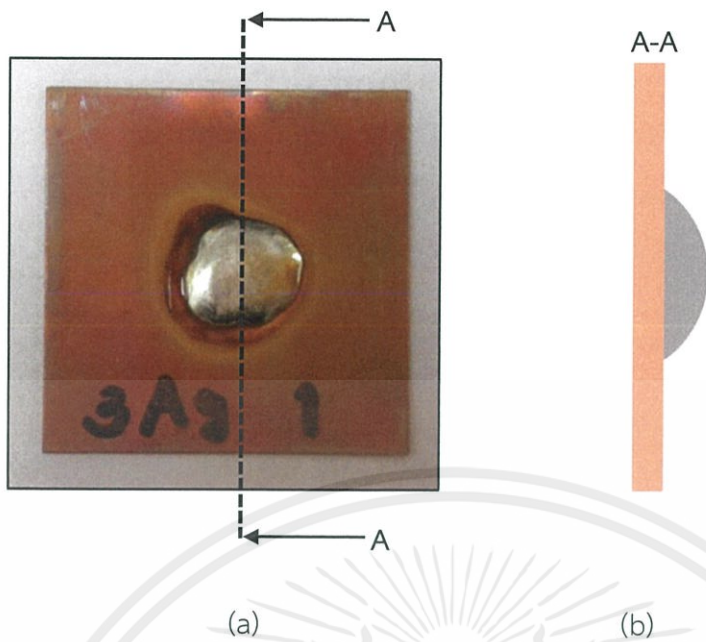
รูปที่ 3.30 เสร็จสิ้นในการบัดกรี

จากนั้นยกชิ้นงานออกจากเตาไฟและปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นล้างฟลักซ์ออกด้วย Ethyl Alcohol และนำไมโครมิเตอร์มาวัดความสูงของโลหะบัดกรีที่จุดสูงสุดของชิ้นงานโดยต้องหักความสูงของแผ่นทองแดงออกไป และนำมาคำนวณหาค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread Factor,  $S_p$ ) ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2

### 3.5 วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีหลังจากการบัดกรี

#### 3.5.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบโครงสร้างทางจุลภาค

นำเอาชิ้นงานทดสอบที่ทำการบัดกรีเสร็จเรียบร้อยแล้วดังรูปที่ 3.31 (a) มาตัดด้วยเครื่องตัดแบบแรงโน้มถ่วงยี่ห้อ Struers รุ่น Minitom รูปที่ 3.31 (b) โดยตัดในทิศตั้งฉากกับผิวของแผ่นทองแดงบริเวณส่วนกลางของโลหะบัดกรี หลังจากตัดชิ้นงานเสร็จแล้วให้นำชิ้นงานไปทำความสะอาดก่อนแล้วจึงนำไปหล่อเรซินให้ได้ตามรูปที่ 3.32 จากนั้นทำการเตรียมผิวชิ้นงานทดสอบ ตามขั้นตอนในหัวข้อ 3.2.2 – 3.2.4



รูปที่ 3.31 ชิ้นงานทดสอบหลังการบัดกรี



รูปที่ 3.32 ชิ้นงานระหว่างรอเรซินแข็งตัว

### 3.5.2 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชั้นสารประกอบเชิงโลหะและองค์ประกอบทางเคมี

ในการศึกษาชั้นสารประกอบเชิงโลหะและองค์ประกอบทางเคมีของเฟสที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีแต่ละชนิด จะทำการศึกษาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ยี่ห้อ Hitachi รุ่น SU3500 แสดงดังรูปที่ 3.33 ด้วยวิธี Back Scatter Electron เพื่อตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของชิ้นงาน หลังจากนั้นจะทำการตรวจสอบปริมาณธาตุที่พบบนพื้นผิวชิ้นงานทดสอบด้วยวิธี Energy-Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDX) จะได้ผลเป็นปริมาณธาตุที่ผิวชิ้นงานใน

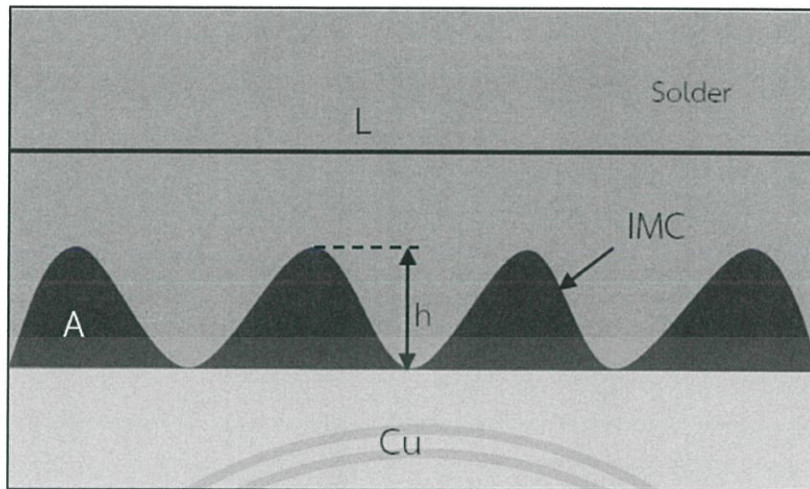
แต่ละสเปกตรัม ซึ่งจะแสดงผลเฉพาะธาตุที่ค้นพบและรายงานผลเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักหรือโดยจำนวนอะตอม



รูปที่ 3.33 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ยี่ห้อ Hitachi รุ่น SU3500

### 3.5.3 การวัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

การวัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะบัดกรีกับแผ่นทองแดงบริสุทธิ์ ทำได้โดยใช้รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยายเท่ากันในทุกๆ ชั้นงานทั้งหมด 5 ชั้น นำมาหาพื้นที่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะโดยใช้โปรแกรม ImageJ ดังรูปที่ 3.34



รูปที่ 3.34 การหาพื้นที่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

ความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะสามารถคำนวณได้จากการแบ่งพื้นที่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นโดยคำนวณได้จากสมการที่ 3.1

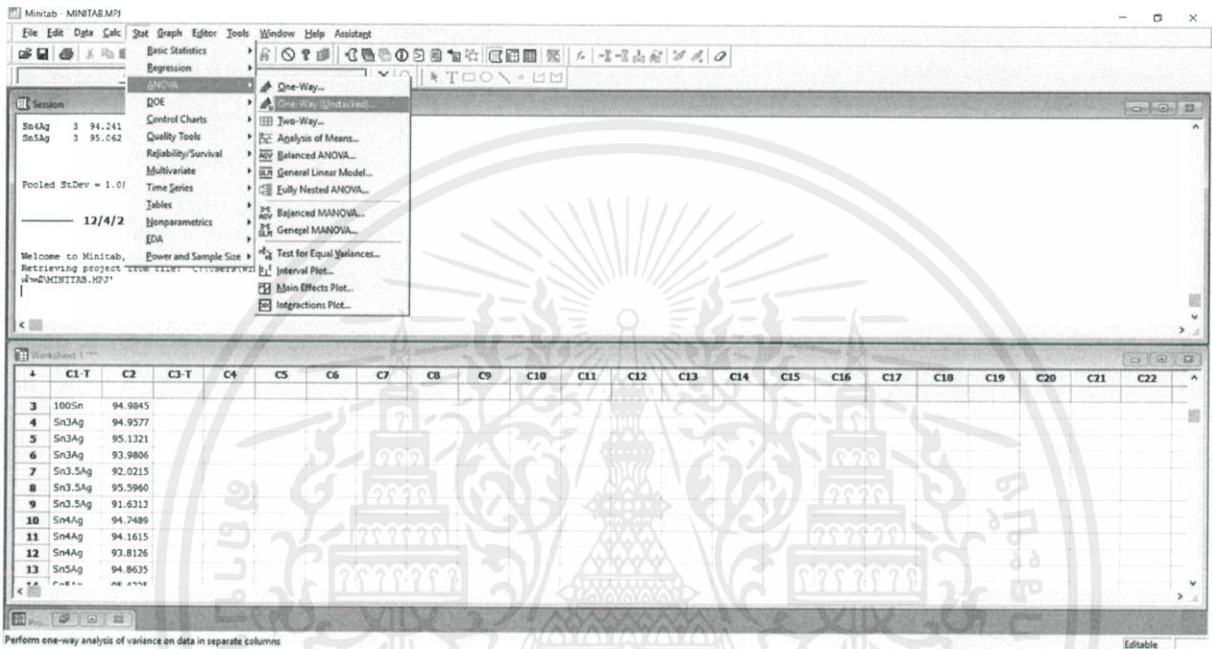
$$h = \frac{A}{L} \quad (3.1)$$

- เมื่อ
- h คือ ความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (ไมโครเมตร)
  - A คือ พื้นที่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (ตารางไมโครเมตร)
  - L คือ ความยาวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (ไมโครเมตร)

#### 3.5.4 การใช้โปรแกรม Minitab ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียว

หลังจากวัดอัตราการแผ่กระจายและความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะซ้ำทั้ง 3 ครั้งแล้ว จากนั้นจะทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียว (Completely Randomized Single Factor ANOVA) โดยการใช้โปรแกรม Minitab ดังแสดงในรูปที่ 3.35 ช่วยในการวิเคราะห์ว่าการเติมธาตุเงินที่ปริมาณแตกต่างกันมีผลต่อความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหรือไม่ ซึ่งผลการวิเคราะห์จะแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ

1. ถ้าผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่าไม่มีความแตกต่างกันระหว่างค่าเฉลี่ยของกลุ่มก็ไม่ต้องทดสอบต่อไป แสดงว่าไม่มีค่าเฉลี่ยคู่ใดที่แตกต่างกัน
2. ถ้าผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่ามีความแตกต่างกันระหว่างค่าเฉลี่ยของกลุ่มก็จะต้องทดสอบความแตกต่างต่อไปให้ดูว่าค่าเฉลี่ยคู่ใดบ้างที่แตกต่างกัน



รูปที่ 3.35 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียวโดยใช้โปรแกรม Minitab

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

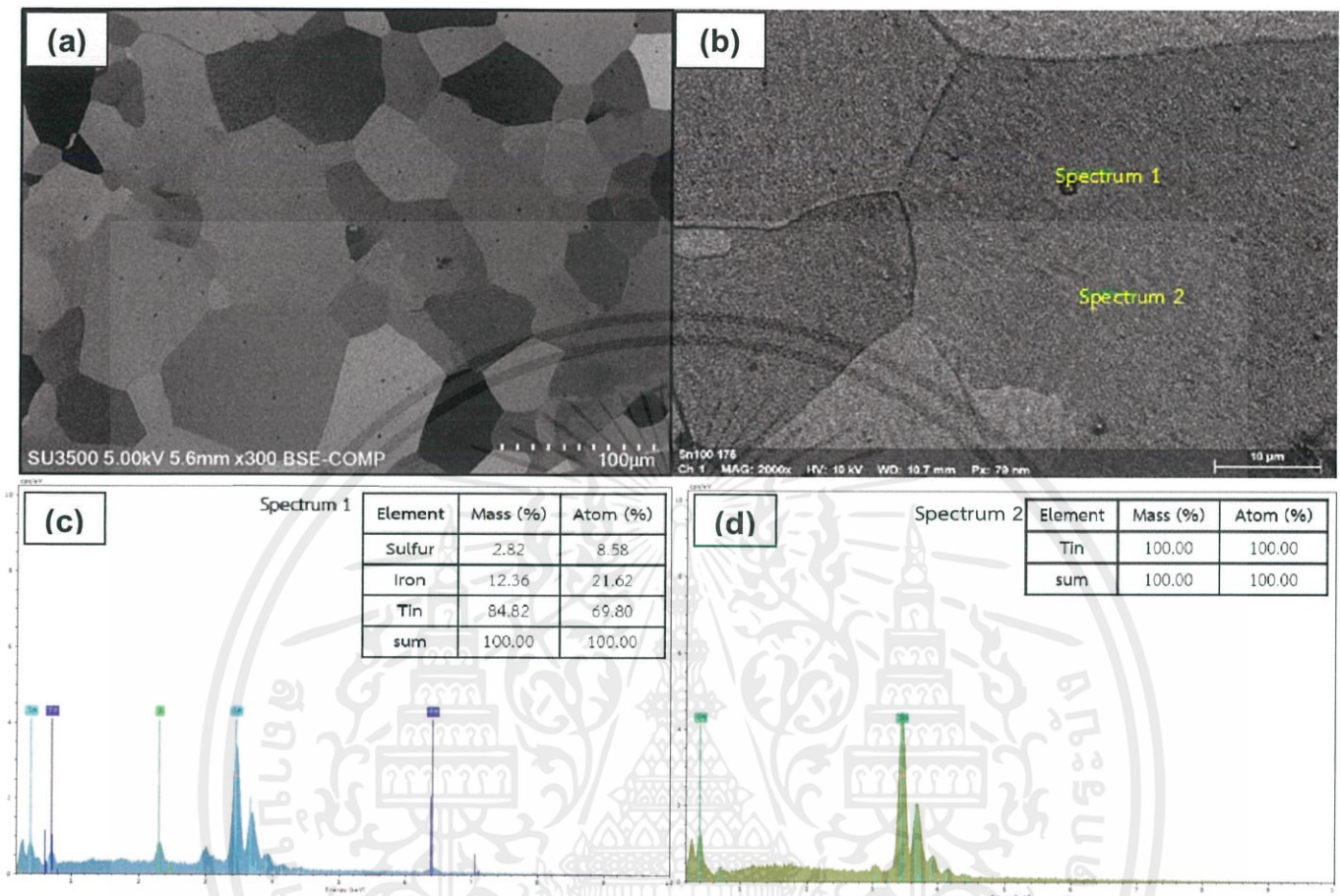
จากการศึกษาอิทธิพลของธาตุเงิน (Ag) ในโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-xAg ที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค และทดสอบความสามารถการต้านทานการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีด้วยวิธีเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า (Potentiostat Analyzer) และทดสอบหาค่าความสามารถในการกระจายตัวบนผิวโลหะพื้นทองแดงด้วยวิธี Spread Test แล้วทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีหลังการบัดกรีเพื่อวิเคราะห์ธาตุและความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ได้ผลการทดสอบดังนี้

#### 4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของโลหะบัดกรี

จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีแต่ละส่วนผสมที่ได้กำหนดไว้เบื้องต้นด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) และการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณด้วย EDX ในรูปแบบ Backscatter ซึ่งได้ผลการทดสอบดังนี้

##### 4.1.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด 100Sn

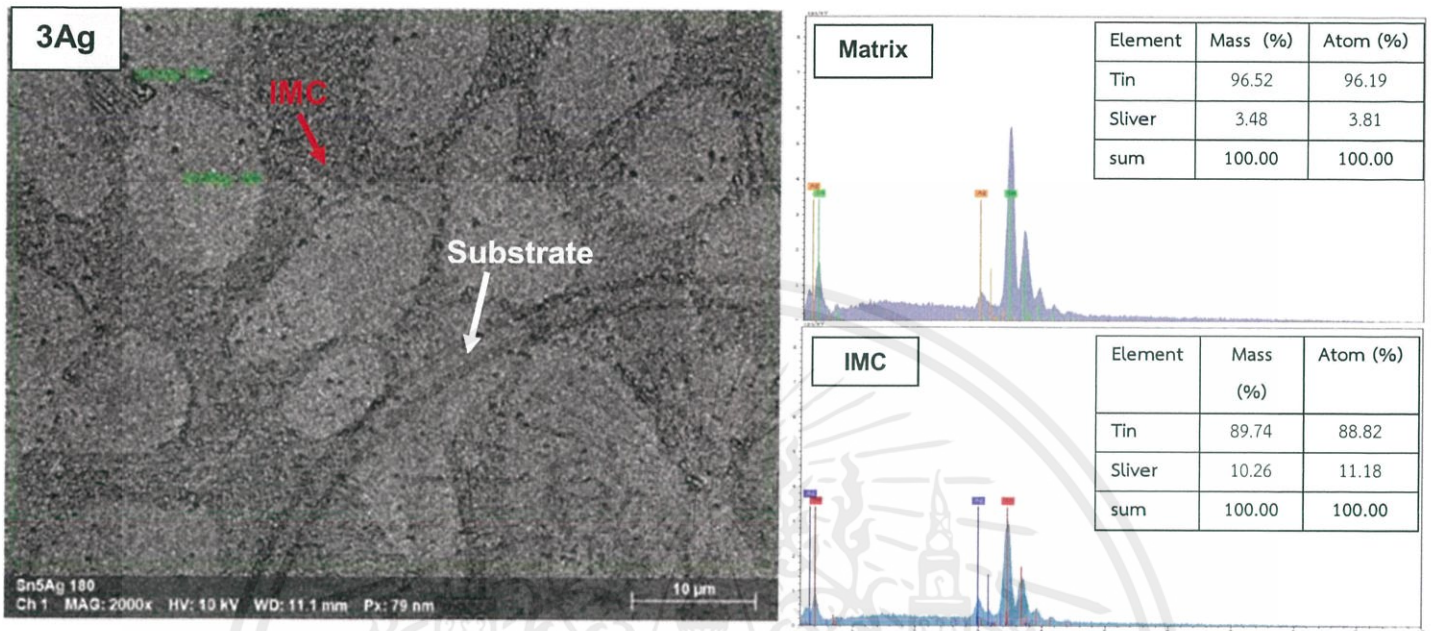
จากภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด 100Sn ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (a) จะพบว่าผลึกหรือ Grains มีรูปแบบการจัดเรียงตัวไม่แน่นอน (Random Orientation) และพบว่าพื้นผิวหลักของชิ้นงานประกอบไปด้วยโครงสร้างพื้นฐานเป็นเฟส  $\beta$ -Sn ซึ่งพื้นผิวบางส่วนประกอบไปด้วยสารมลทิน (Impurity) สารมลทินเหล่านี้จะมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าเนื้อโลหะดีบุก ในขณะที่โลหะแข็งตัวลักษณะ Dendrite อดอมของโลหะดีบุกจะเริ่มจับตัวก่อน เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวสูงกว่า เมื่อจับตัวใหญ่ขึ้นก็จะไล่พวกสารมลทินซึ่งยังเหลืออยู่ให้หนีออกไปบริเวณผลึกแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.1 (b)



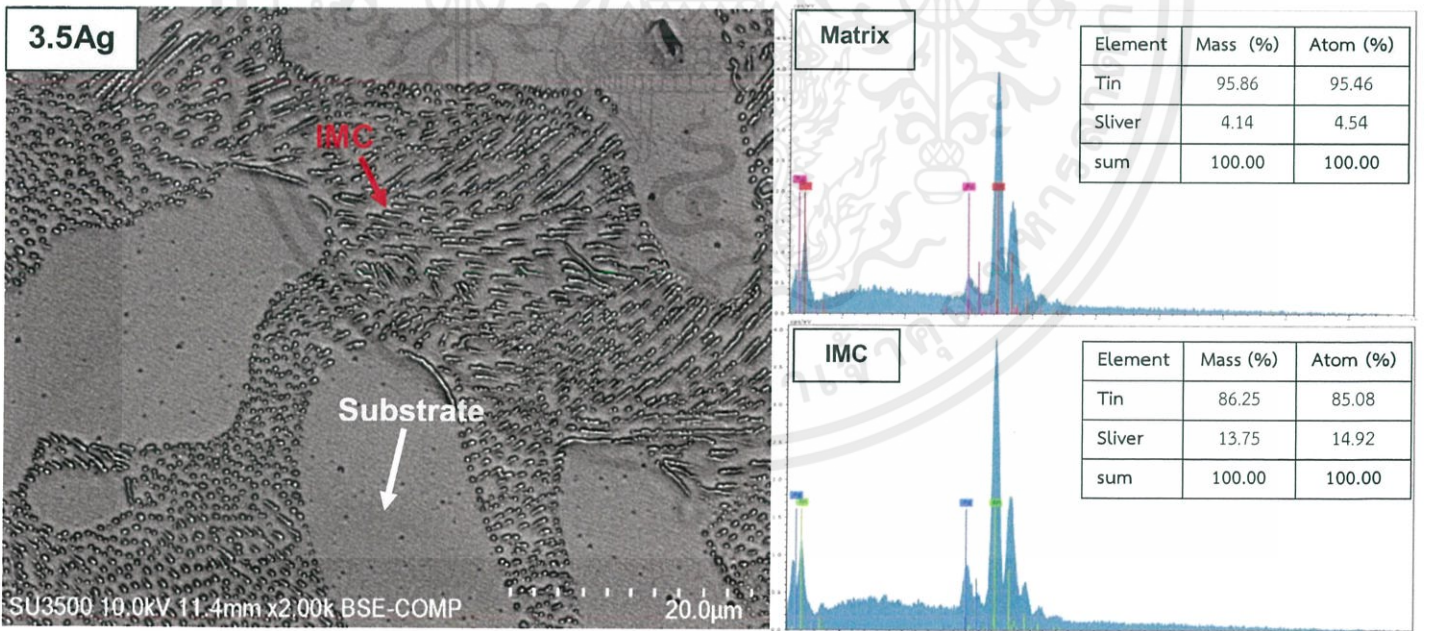
รูปที่ 4.1 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด 100Sn (a) รูปแบบการจัดเรียงตัวของผลึกที่กำลังขยาย 300 เท่า, (b) การแยกตัวของสารมลทินออกจากผลึกโลหะ, (c) ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 1 และ(d) ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 2

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วย EDX โดยทำการยิงสเปกตรัมตำแหน่งที่ 1 แสดงดังรูปที่ 4.1 (c) พบว่าตำแหน่งที่ 1 คือสารมลทิน (Impurity) ประกอบไปด้วยซัลเฟอร์และเหล็ก ซึ่งเกิดจากการหล่อ และตำแหน่งที่ 2 คือเฟส  $\beta$ -Sn ซึ่งประกอบไปด้วยดีบุกปริมาณ 100 wt% แสดงดังรูปที่ 4.1 (d)

#### 4.1.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีหลังเติมธาตุเงิน (Ag)



(a)

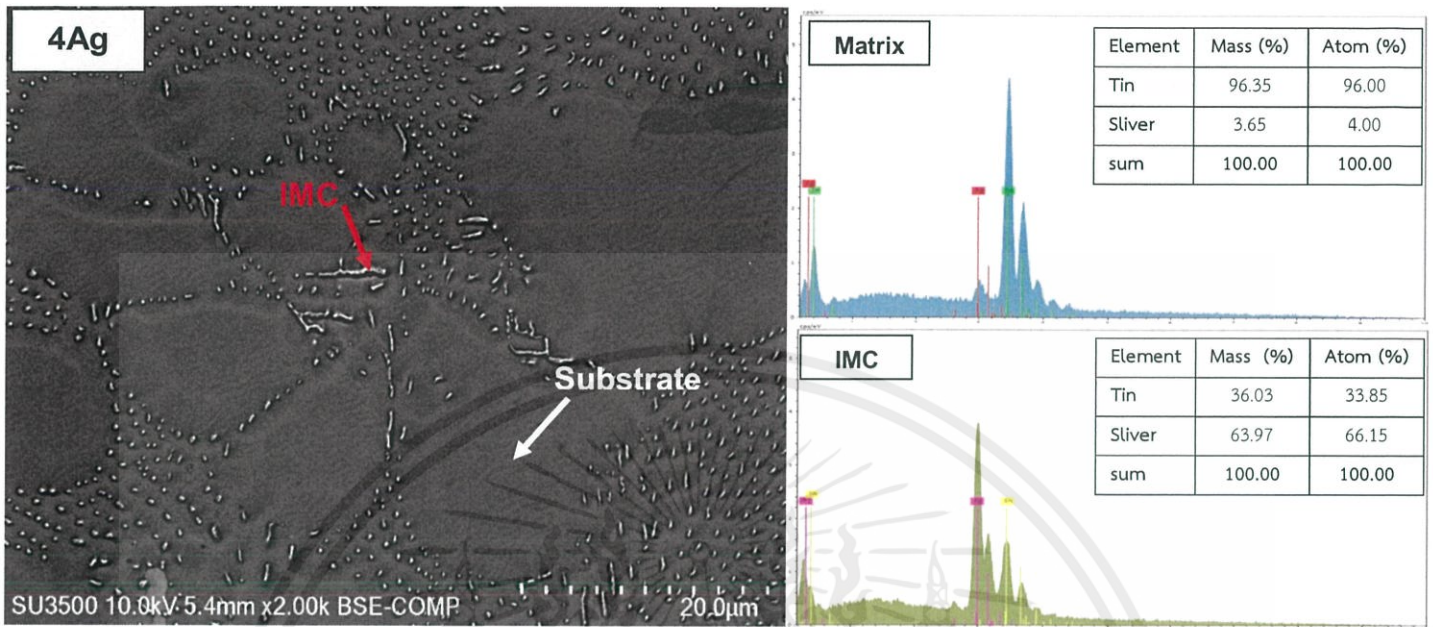


(b)

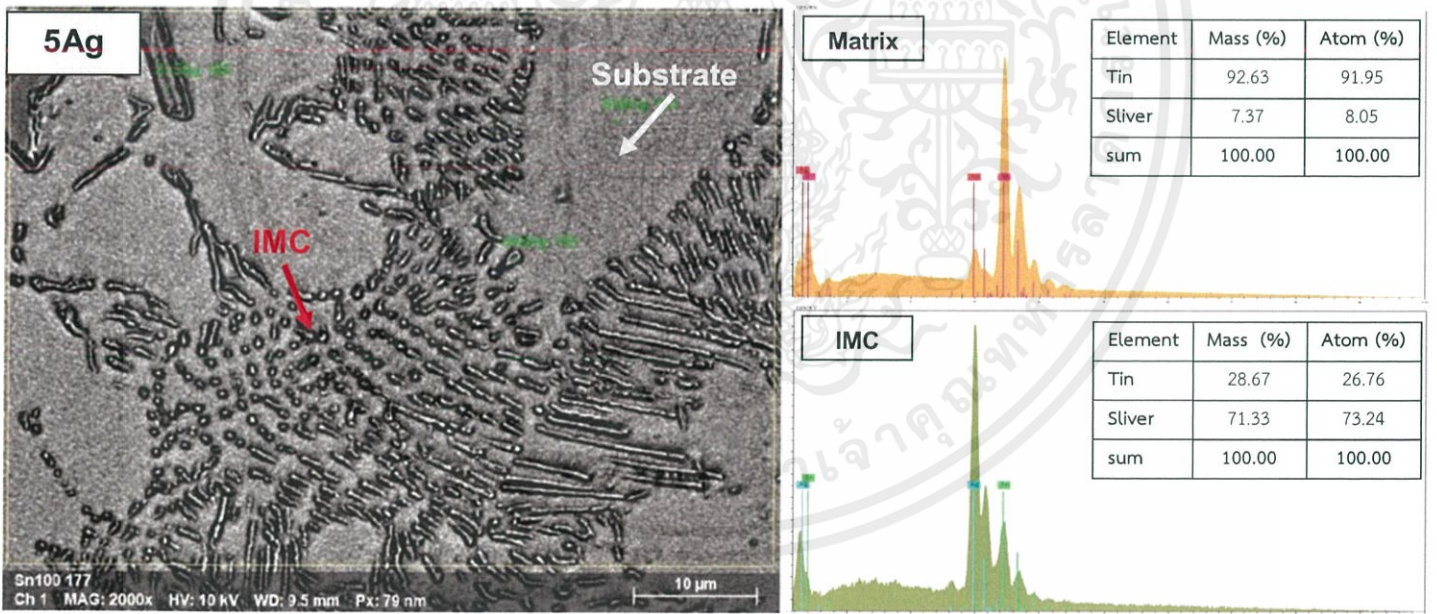
รูปที่ 4.2 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีหลังจากเติมธาตุเงิน (Ag) (a) 97Sn-3Ag,

(b) 96.5Sn-3.5Ag, (c) 96Sn-4Ag และ (d) 95Sn-5Ag

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c)



(d)

รูปที่ 4.3 (ต่อ)ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีหลังจากเติมธาตุเงิน (Ag) (a) 97Sn-3Ag, (b) 96.5Sn-3.5Ag, (c) 96Sn-4Ag และ (d) 95Sn-5Ag

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างจุลภาคแสดงดังรูปที่ 4.2-4.3 พบว่าเมื่อเติมธาตุเงิน (Ag) ในปริมาณที่มากขึ้นทำให้เกิดโครงสร้าง Lamella ที่เยอะขึ้น โดยอ้างอิงจากเฟสไดแกรมของดีบุกและเงิน จะเห็นได้ว่าส่วนผสม 97Sn-3Ag จะอยู่ทางด้านปฏิกิริยาไฮโปยูเทคติก (Hypoeutectic) ของเฟสไดอะแกรม เมื่อโลหะผสมลดอุณหภูมิลง ผลึกของ  $\beta$ -Sn จะเริ่มก่อตัวขึ้นก่อนเป็นนิวเคลียสเม็ดเล็กๆ และเติบโตขึ้นก่อน หลังจากนั้นเมื่ออุณหภูมิลดต่ำกว่าจุดยูเทคติก ของเหลวทั้งหมดก็จะเริ่มเกิดเป็นของแข็งยูเทคติกขึ้น ซึ่งมีลักษณะเป็น Lamella และที่เป็นจุดปฏิกิริยายูเทคติก (Eutectic) ซึ่งก็คือส่วนผสม 96.5Sn-3.5Ag ของเหลวทั้งหมดจะเปลี่ยนเป็นของแข็งที่ประกอบด้วย  $Ag_3Sn$  และ  $\beta$ -Sn มีลักษณะโครงสร้างแบบ Lamella 100 เปอร์เซ็นต์ แต่ในกรณีของส่วนผสมนี้ ไม่เกิดเป็นโครงสร้างแบบ Lamella 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นผลเนื่องจากอัตราการเย็นตัวของการหล่อ ทำให้โครงสร้างแบบ Lamella เกิดได้ไม่เต็ม 100 เปอร์เซ็นต์ ถัดมาเป็นปฏิกิริยาไฮเปอร์ยูเทคติก (Hypereutectic) ซึ่งมีการเติมปริมาณธาตุเงินมากกว่า 3.5 wt% เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง ของเหลวจะเริ่มเกิดเป็น Primary  $Ag_3Sn$  ก่อน แล้วจึงเกิดเป็นโครงสร้างแบบ Lamella ดังนั้น โครงสร้างทางจุลภาคที่เราได้กรณีที่มีการเติมธาตุเงินเข้าไป 4 และ 5 wt% มีโอกาสที่สารประกอบเชิงโลหะจะมีขนาดใหญ่และเยอะขึ้น

จากผลการวิเคราะห์ห้องประกอบของธาตุด้วย EDX แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าในเฟส Matrix มีปริมาณดีบุก (Sn) ลดลง และปริมาณเงิน (Ag) ที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ สามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มปริมาณธาตุเงิน (Ag) เข้าไปมากทำให้เกิดสารประกอบเชิงโลหะในสัดส่วนที่มากขึ้น ซึ่งสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นนี้คือ  $Ag_3Sn$

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์ธาตุโดยใช้ EDX

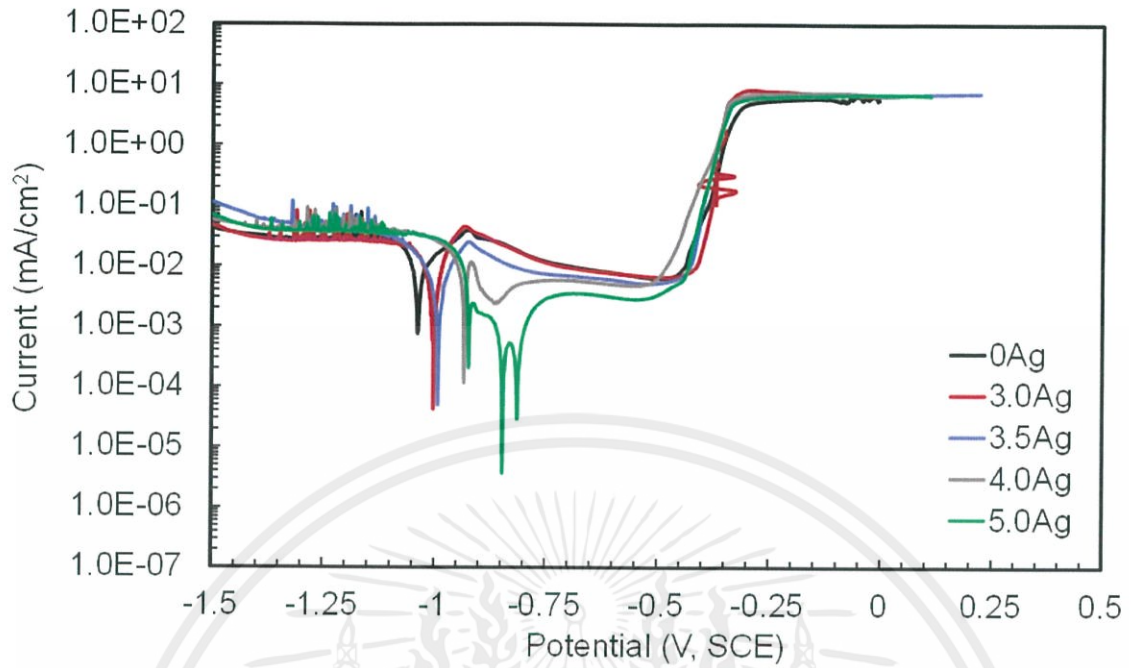
Alloy	Matrix		IMCs	
	Sn (wt%)	Ag (wt%)	Sn (wt%)	Ag (wt%)
0Ag	100	0	0	0
3.0Ag	96.52	3.48	89.74	10.26
3.5Ag	95.86	4.14	86.25	13.75
4.0Ag	96.35	3.65	36.78	63.97
5.0Ag	92.63	7.37	28.67	71.33

## 4.2 การวิเคราะห์ผลความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะบัดกรี Sn-xAg ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชัน

### 4.2.1 อัตราการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-xAg ที่มีต่อโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

จากผลการทดสอบการกัดกร่อนของโลหะบัดกรี Sn-xAg โดยวิธีโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชัน ดังแสดงในรูปที่ 4.4 โดยมีการเติมธาตุเงินที่แตกต่างกัน ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion Potential,  $E_{corr}$ ) จากการทดลองที่ไม่เติมธาตุเงินมีค่าเท่ากับ  $-1.005 V_{SCE}$  และเมื่อเติมธาตุเงินลงในโลหะบัดกรีที่สัดส่วน 97Sn-3Ag พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนจะเลื่อนไปทางบวกมากขึ้นเป็น  $-0.996 V_{SCE}$  เมื่อเติมธาตุเงินเป็น 3.5wt% ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนยังคงเลื่อนไปทางบวกมากขึ้น  $-0.971 V_{SCE}$  และเมื่อเติมธาตุเงินเป็น 4wt% ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนยังคงมากกว่าค่าที่ได้จากโลหะบัดกรีที่ปราศจากธาตุเงินและยังคงเลื่อนไปทางบวกมากขึ้นเป็น  $-0.934 V_{SCE}$  เมื่อเพิ่มปริมาณธาตุเงินไปจนถึง 5wt% พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่าสูงสุดเท่ากับ  $-0.805 V_{SCE}$  ซึ่งสูงกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนจากโลหะบัดกรีที่ปราศจากธาตุเงินถึง  $0.199 V_{SCE}$  การเพิ่มขึ้นของค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนนี้เป็นผลมาจากความสามารถในการออกซิไดซ์ (Oxidizing Power) ของสารละลายที่เพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามกรณีนี้อัตราเร็วในการเกิดการกัดกร่อนจะมีค่าลดลงได้ แม้ว่าความสามารถในการออกซิไดซ์ของสารละลายจะเพิ่มมากขึ้นก็ตาม จากข้อมูลของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน ซึ่งเป็นตัวแทนโดยตรงของอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนดังแสดงในตารางที่ 4.2 เห็นได้ว่าเมื่อเติมธาตุเงินลงในโลหะบัดกรี จะพบว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน (Corrosion Current Density,  $i_{corr}$ ) ซึ่งสามารถหาได้จากวิธีการประมาณค่านอกช่วงของทาเฟิล (Tafel Extrapolation) มีค่าลดลงจาก  $14.788 \mu A/cm^2$  เป็น  $14.230 \mu A/cm^2$  และเมื่อเพิ่มปริมาณธาตุเงินไปจนถึง 5 wt% ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อนจะมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ  $0.874 \mu A/cm^2$

นอกจากนี้ยังพบว่า การเติมธาตุเงิน (Ag) ในปริมาณที่มากพอ สามารถสร้างชั้นฟิล์มมาปกป้องผิวโลหะได้อีกด้วยโดยสังเกตเห็นช่วง Passive Film ปรากฏขึ้นทางฝั่งแอโนดิกของกราฟโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชัน



รูปที่ 4.4 กราฟโพเทนทีโอไดนามิกโพลาริเซชันของ Sn-xAg ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์

ตารางที่ 4.2 สัมประสิทธิ์ทางเคมีไฟฟ้าของโลหะบัดกรี Sn-xAg ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.6 โมลาร์

Alloy	$E_{corr}$ (V)	$I_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Passive region	Corrosion rate (mmpy)
100Sn	-1.005	14.788	✓	0.393
97Sn-3Ag	-0.996	14.230	✓	0.384
96.5Sn-3.5Ag	-0.971	9.298	✓	0.251
96Sn-4Ag	-0.934	6.835	✓	0.185
95Sn-5Ag	-0.805	0.875	✓	0.024

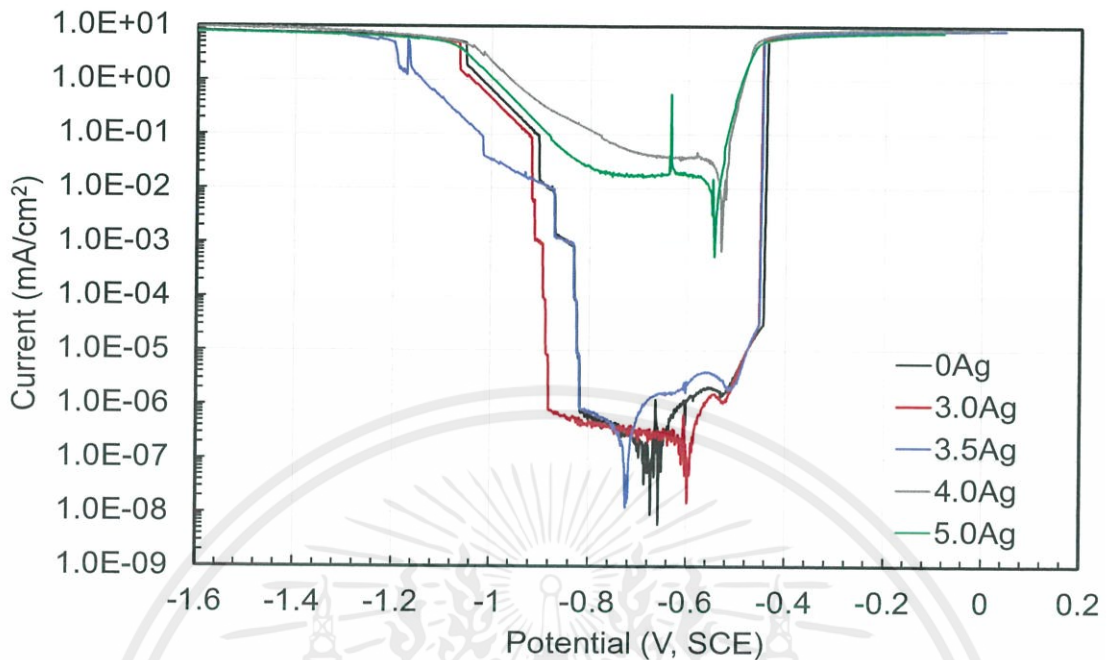
นอกจากนี้อัตราการกัดกร่อน (Corrosion Rate) ยังมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มปริมาณธาตุเงินมากขึ้นแสดงดังตารางที่ 4.2 ในกรณีของโลหะบัดกรีที่ไม่มีการเติมธาตุเงินอัตราการกัดกร่อนมีค่าเท่ากับ 0.393 mmpy เมื่อเพิ่มปริมาณธาตุเงินเป็น 3wt% , 3.5wt% , 4wt% , และ 5wt% พบว่าอัตราการกัดกร่อน มีค่าเป็น 0.384 mmpy, 0.251 mmpy, 0.185 mmpy และ 0.024 mmpy ตามลำดับ

จากโครงสร้างจุลภาคในหัวข้อ 4.1.2 จะพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณธาตุเงินเข้าไปทำให้ปริมาณสารประกอบเชิงโลหะ  $Ag_3Sn$  เพิ่มมากขึ้นและขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งสารประกอบเชิงโลหะ  $Ag_3Sn$  มีความต้านทานการเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่าดีบุก (Sn) ดังนั้นโลหะบัดกรีจะต้านทานการกัดกร่อนได้ดียิ่งขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณธาตุเงิน (Ag)

#### 4.2.2 อัตราการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-xAg ที่มีต่อซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ )

สำหรับการทดสอบในสารละลายซัลฟิวริกดังแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน (Corrosion Potential,  $E_{corr}$ ) จากการทดสอบที่ไม่เติมธาตุเงินมีค่าเท่ากับ  $-0.684 V_{SCE}$  และเมื่อเพิ่มธาตุเงินลงไปโลหะบัดกรีที่ 3wt% พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนจะเลื่อนไปทางบวกมากขึ้นเป็น  $0.618 V_{SCE}$  และเมื่อเพิ่มธาตุเงินมากขึ้นเป็น 3.5wt% ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากโลหะบัดกรีที่ปราศจากธาตุเงิน และพบว่าค่าที่ได้ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการเติมธาตุเงิน 3wt% มีค่าเท่ากับ  $-0.760 V_{SCE}$  และเมื่อเพิ่มปริมาณธาตุเงินเป็น 4wt% ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่ามากขึ้นและยังคงมากกว่าค่าที่ได้จากโลหะบัดกรีทุกๆส่วนผสม เมื่อเพิ่มปริมาณธาตุเงินไปจนถึง 5wt% พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนมีค่าลดต่ำลง แต่ยังคงมากกว่าค่าที่ได้จากโลหะบัดกรีที่ปราศจากธาตุเงินมีค่าเท่ากับ  $-0.542 V_{SCE}$  จากข้อมูลของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน ซึ่งเป็นตัวแทนโดยตรงของอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนดังแสดงในตารางที่ 4.3 เห็นได้ว่าเมื่อเติมธาตุเงินลงในโลหะบัดกรี จะพบว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน (Corrosion Current Density,  $I_{corr}$ ) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก  $0.00019 \mu A/cm^2$  เป็น  $0.00026 \mu A/cm^2$  และเมื่อเพิ่มปริมาณธาตุเงินไปจนถึง 4wt% ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อนจะมีค่ามากที่สุดเท่ากับ  $30.617 \mu A/cm^2$  และเมื่อเพิ่มปริมาณธาตุเงินเป็น 5wt% ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อนจะมีค่าลดลงแต่ยังคงมากกว่าส่วนผสมที่ปราศจากธาตุเงิน 3wt% และ 3.5wt%

นอกจากนี้ยังพบการสร้างชั้นฟิล์มเกิดขึ้น โดยสังเกตเห็นช่วง Passive Film ปรากฏขึ้นทางฝั่งแอโนดของกราฟโพเทนทิโอดินามิกโพลาริเซชัน ในโลหะบัดกรีที่ปราศจากธาตุเงินและเมื่อเพิ่มธาตุเงิน (Ag) เป็น 3wt% และ 3.5wt% เท่านั้น จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าการสร้าง Passive Film เพื่อปกป้องผิวของโลหะบัดกรีในสารละลายซัลฟิวริกมีความแตกต่างจาก Passive Film ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์อย่างมาก เนื่องจากโลหะบัดกรีมีคุณสมบัติในการเกิด Passive Film ได้ก็จริงแต่ในการเกิด Passive Film ในเกลือกับกรดจะแตกต่างกัน เพราะสารละลายซัลฟิวริกมีความเป็นกรดมาก มีฤทธิ์ในการกัดกร่อนโลหะชนิดต่างๆได้สูง ทำให้ Passive Film เกิดได้แต่ไม่เสถียร กราฟช่วงกว้างของการเกิด Passive Film ก็จะมีน้อยกว่า



รูปที่ 4.5 กราฟโพเทนทีโอไดนามิกโพลาริเซชันของ Sn-xAg ในสารละลายซัลฟิวริก

ตารางที่ 4.3 สัมประสิทธิ์ทางเคมีไฟฟ้าของโลหะบัดกรี Sn-xAg ในสารละลายซัลฟิวริกเข้มข้น 1 โมลาร์

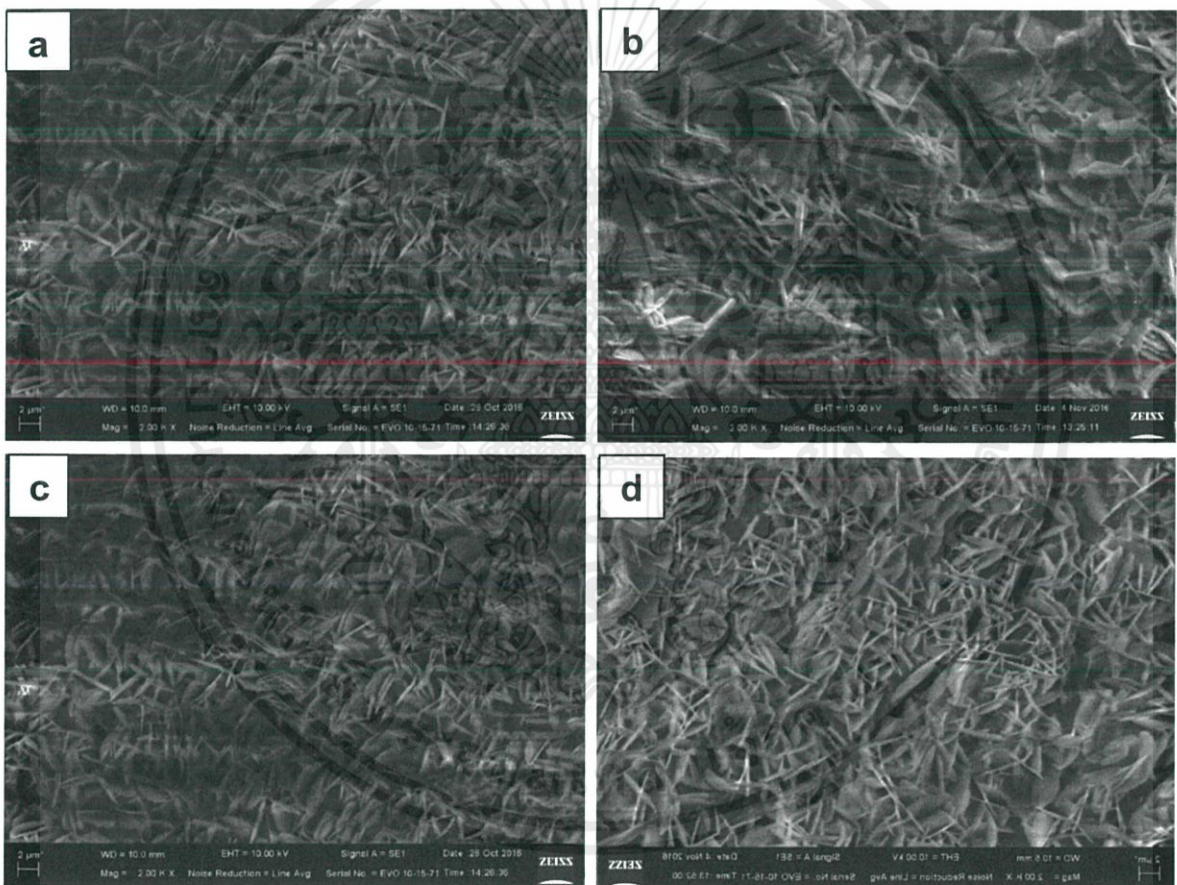
Alloy	$E_{corr}(V)$	$i_{corr}(\mu A/cm^2)$	Passive region	Corrosion rate (mmpy)
100Sn	-0.684	0.00019	✓	$5.14 \times 10^{-9}$
97Sn-3Ag	-0.618	0.00026	✓	$7.03 \times 10^{-9}$
96.5Sn-3.5Ag	-0.760	0.00049	✓	$1.32 \times 10^{-8}$
96Sn-4Ag	-0.530	30.617	-	$8.30 \times 10^{-4}$
95Sn-5Ag	-0.542	14.247	-	$3.90 \times 10^{-4}$

จากตารางที่ 4.3 อัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate) ในกรณีของโลหะบัดกรีที่ไม่มีการเติมธาตุเงินมีค่าเท่ากับ  $5.14 \times 10^{-9}$  mmpy เมื่อเพิ่มปริมาณธาตุเงินเป็น 3wt% , 3.5wt%, 4wt%, และ 5wt% พบว่าอัตราการกัดกร่อน มีค่าเป็น  $7.03 \times 10^{-9}$  mmpy,  $1.32 \times 10^{-8}$  mmpy,  $8.30 \times 10^{-4}$  mmpy และ  $3.90 \times 10^{-4}$  mmpy ตามลำดับ

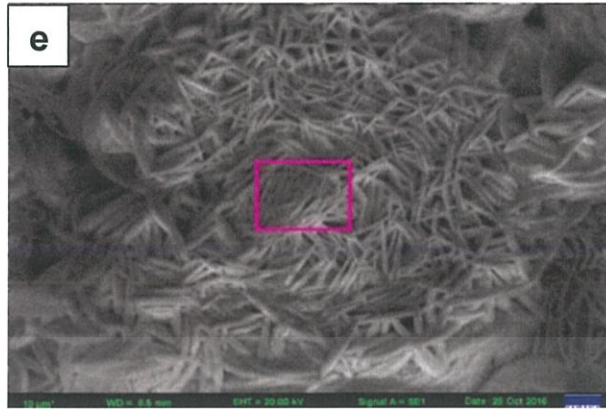
### 4.2.3 วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนของโลหะบัดกรี Sn-xAg

#### 4.2.3.1 โครงสร้างผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนของโลหะบัดกรี Sn-xAg

จากเทคนิคโพเทนทิโอสไตนาไมกส์พบว่าเกิดผลิตภัณฑ์การกัดกร่อน (Corrosion product) ของโลหะบัดกรี 100Sn, 97Sn-3Ag, 96.5Sn-3.5Ag, 96Sn-4Ag และ 95Sn-5Ag ขึ้นซึ่งทำให้อัตราการกัดกร่อนลดลง และทั้ง 5 ส่วนผสมมีโครงสร้างจุลภาคผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนที่คล้ายคลึงกัน โดยโครงสร้างจุลภาคมีรูปร่างเหมือนเกล็ดเลือดและมีการกระจายตัวอย่างอิสระบนพื้นผิวมีทิศทางที่แตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 4.6-4.7 [19]



รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนที่ได้จากการทดสอบโพเทนทิโอสไตนาไมกส์ (a)100Sn, (b) 97Sn-3Ag, (c) 96.5Sn-3.5Ag, (d) 96Sn-4Ag และ (e) 95Sn-5Ag

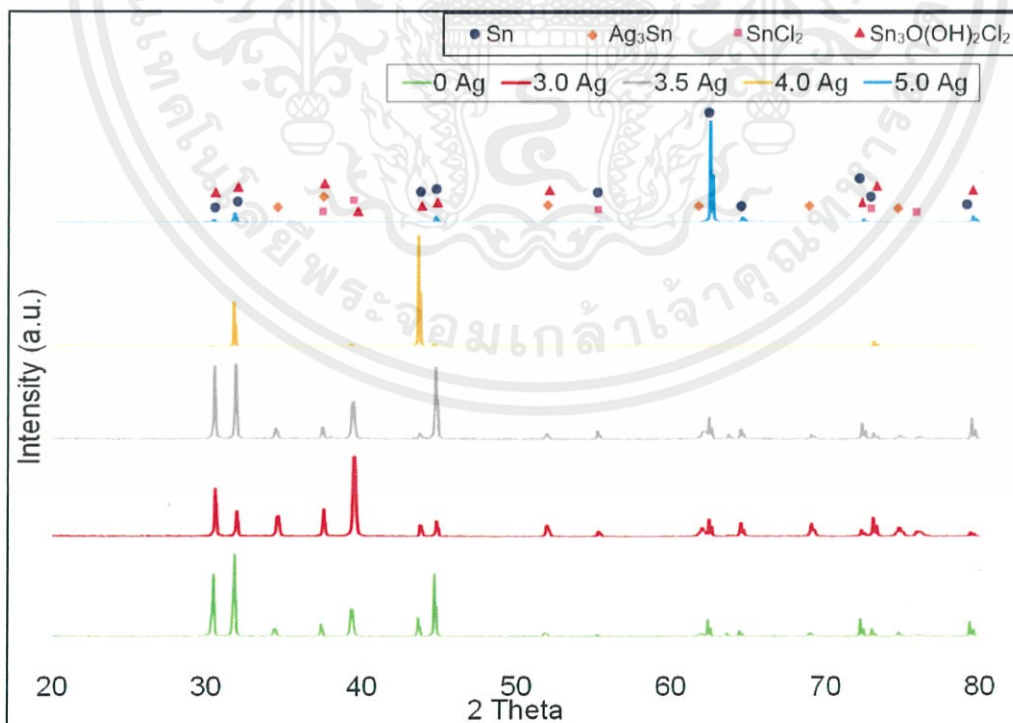


รูปที่ 4.7 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคผลิตภัณฑ์การกักตร่อนที่ได้จากการทดสอบโพเทนทิโอดนามิกส์ (a)100Sn, (b) 97Sn-3Ag, (c) 96.5Sn-3.5Ag, (d) 96Sn-4Ag และ (e) 95Sn-5Ag

#### 4.2.3.2 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์การกักตร่อนบนพื้นผิวของโลหะบัดกรี Sn-xAg ด้วยเทคนิคเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD)

1. ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์การกักตร่อนของโลหะบัดกรี Sn-xAg ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์

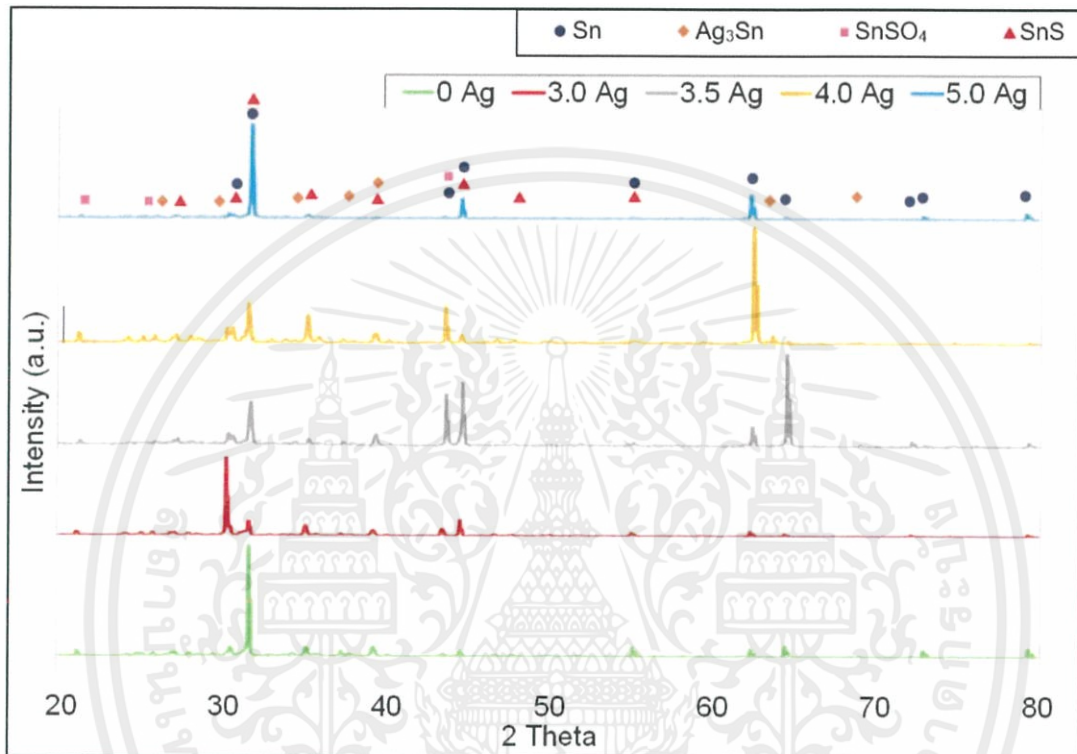
รูปที่ 4.8 แสดงการตรวจวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์การกักตร่อนบนพื้นผิวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-xAg ที่มีปริมาณเงินแตกต่างกัน ผลจากการวิเคราะห์พบว่าทั้ง 5 ส่วนผสมมีผลิตภัณฑ์การกักตร่อนตัวเดียวกัน คือ  $\text{Sn}_3\text{O}(\text{OH})_2\text{Cl}_2$  และ  $\text{SnCl}_2$



รูปที่ 4.8 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์การกักตร่อนบนพื้นผิวของโลหะบัดกรีในสารละลายโซเดียมคลอไรด์

## 2. ผลการวิเคราะห์ฟิล์มของโลหะบัดกรี Sn-xAg ในสารละลายซัลฟิวริก

จากรูปที่ 4.9 แสดงการตรวจวิเคราะห์ผลึกภัณฑ์การกัดกร่อนบนพื้นผิวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-xAg ที่มีปริมาณเงินแตกต่างกัน ผลจากการวิเคราะห์พบว่าทั้ง 5 ส่วนผสมมีผลึกภัณฑ์การกัดกร่อนตัวเดียวกัน คือ SnSO<sub>4</sub> และ SnS ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 การวิเคราะห์ผลึกภัณฑ์การกัดกร่อนบนพื้นผิวของโลหะบัดกรีในสารละลายซัลฟิวริก

### 4.3 การวิเคราะห์ความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรี Sn-xAg หลังการบัดกรี

#### 4.3.1 การวิเคราะห์หาอัตราการแพร่กระจายของโลหะบัดกรี Sn-xAg

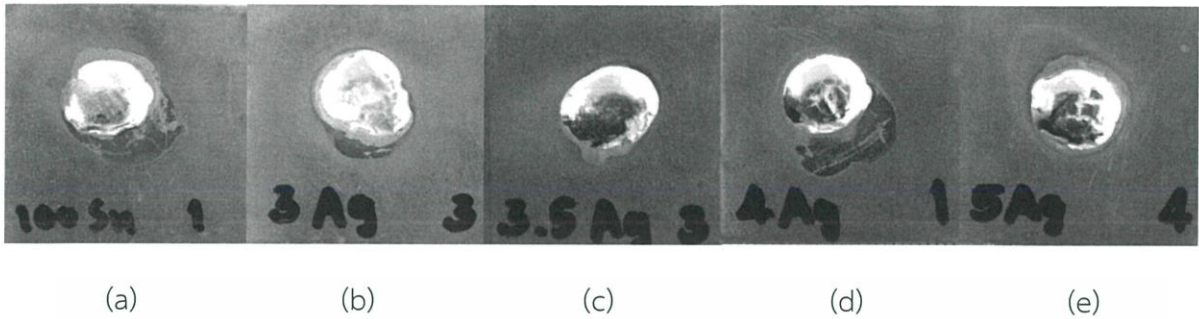
จากการทดลองวัดค่าอัตราการแพร่กระจายจากการเติมธาตุเงิน (Ag) ลงในโลหะบัดกรีพื้นฐานปริมาณ 3 wt%, 3.5wt%, 4wt%, และ 5wt% โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งแสดงผลดังตารางที่ 4.4 เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยได้ผลดังตารางที่ 4.5 โดยตัวอย่างลักษณะการแพร่กระจายตามรูปที่ 4.8 และลักษณะของผิวชิ้นงานเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่าลักษณะการแพร่กระจายของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดงมีลักษณะเป็นวงกลมโดยจะสามารถสังเกตได้ว่าผิวของโลหะบัดกรีมีส่วนผสมของธาตุเงิน (Ag) มีผิวที่ขุ่นมัวเนื่องจากเกิดสารประกอบของดีบุกและเงินมีผิวที่หยาบ และการเติมธาตุเงินทำให้ความเหนียวลดลงซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการรอยแตกเมื่อได้รับความล้าเนื่องจากอุณหภูมิเป็นระยะเวลาาน

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าพื้นที่ เส้นผ่านศูนย์กลาง ความสูงของการแผ่กระจายและค่าอัตราการแผ่กระจายของโลหะบัดกรีแต่ละส่วนผสม

Alloys	Label	Area	D (mm)	H (mm)	Spread rate (%)
100Sn	1	76.235	24.257	1.245	94.867
100Sn	2	68.851	21.907	1.350	93.838
100Sn	3	76.136	24.225	1.215	94.985
97Sn-3Ag	1	76.666	24.394	1.230	94.958
97Sn-3Ag	2	76.830	24.446	1.190	95.132
97Sn-3Ag	3	71.009	22.594	1.360	93.981
96.5Sn-3.5Ag	1	70.117	22.310	1.780	92.022
96.5Sn-3.5Ag	2	84.922	27.021	1.190	95.596
96.5Sn-3.5Ag	3	64.970	20.672	1.730	91.631
96Sn-4Ag	1	73.617	23.424	1.230	94.749
96Sn-4Ag	2	72.617	23.105	1.349	94.162
96Sn-4Ag	3	74.820	23.806	1.473	93.812
95Sn-5Ag	1	76.116	24.219	1.244	94.863
95Sn-5Ag	2	81.213	25.841	1.180	95.434
95Sn-5Ag	3	77.193	24.561	1.255	94.890

ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยอัตราการแผ่กระจายของโลหะบัดกรี Sn-xAg

Label	Alloys	Spread rate (%)	SD
1	100Sn	94.563	0.631
2	97Sn-3Ag	94.690	0.621
3	96.5Sn-3.5Ag	93.083	2.185
4	96Sn-4Ag	94.241	0.473
5	95Sn-5Ag	95.063	0.322



รูปที่ 4.10 ลักษณะการแผ่กระจายของโลหะบัดกรี Sn-xAg บนแผ่นทองแดง (a) 100Sn, (b) 97Sn-3Ag, (c) 96.5Sn-3.5Ag, (d) 96Sn-4Ag และ (e) 95Sn-5Ag

#### 4.3.2 การใช้โปรแกรม Minitab ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียว

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียว (One-Way ANOVA) จะใช้ทดสอบสมมติฐานที่ว่าค่าเฉลี่ยของอัตราการแผ่กระจายของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดงทั้ง 5 ส่วนผสมนั้นมีความแตกต่างกันหรือไม่ ที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  นั่นคือที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ Confidence level 95.0 โดยสามารถตั้งสมมติฐานได้ดังนี้

**สมมติฐานทางการวิจัย**

- $H_0$  : ค่าเฉลี่ยของอัตราการแผ่กระจายของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดงทั้ง 5 ส่วนผสมนั้นไม่แตกต่างกัน
- $H_1$  : ค่าเฉลี่ยของอัตราการแผ่กระจายของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดงทั้ง 5 ส่วนผสมนั้นมีความแตกต่างกันอย่างน้อยคู่หนึ่ง

**สมมติฐานทางสถิติ**

$$H_0 : \mu_{100Sn} = \mu_{97Sn-3Ag} = \mu_{96.5Sn-3.5Ag} = \mu_{96Sn-4Ag} = \mu_{95Sn-5Ag}$$

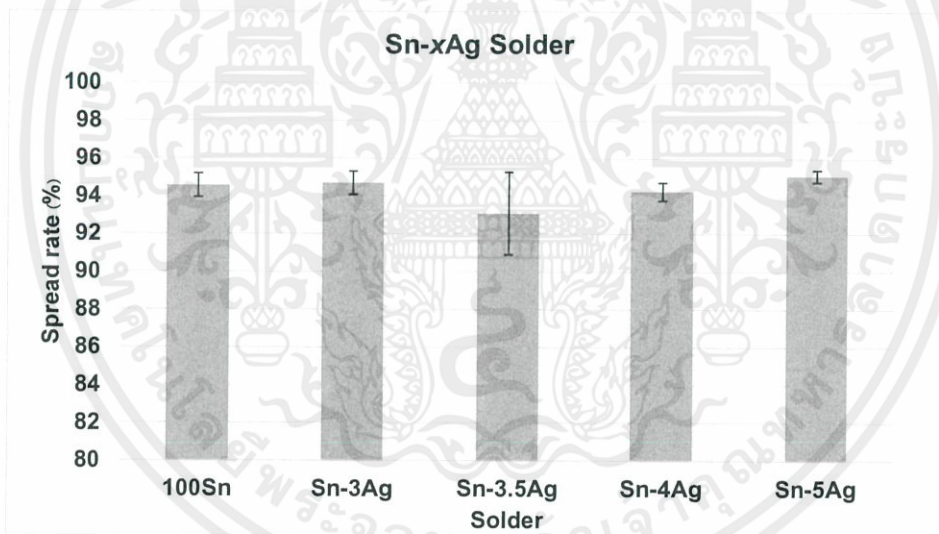
$$H_1 : \mu_i \neq \mu_j \text{ อย่างน้อย 1 คู่ ; } i \neq j$$

ซึ่งผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากตารางที่ 4.6 พบว่า ค่า P-Value เท่ากับ 0.183 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐาน  $H_0$  นั่นคือค่าเฉลี่ยของอัตราการแผ่กระจายของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดงทั้ง 5 ส่วนผสมนั้นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 หรือที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียว

Source	DF	SS	MS	F	P
Treatment	4	8.450	2.110	1.920	0.183
Error	10	10.990	1.100		
Total	14	19.440			

เมื่อนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟแสดงดังรูปที่ 4.23 เพื่อเปรียบเทียบค่าอัตราการแผ่กระจายของโลหะบัดกรี 100Sn, 97Sn-3Ag, 96.5Sn-3.5Ag, 96Sn-4Ag และ 95Sn-5Ag เมื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียว (One-Way ANOVA) พบว่าโลหะบัดกรีทั้ง 5 ส่วนผสม มีค่าเฉลี่ยอัตราการแผ่กระจายบนแผ่นทองแดงที่ไม่แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญที่  $\alpha = 0.05$

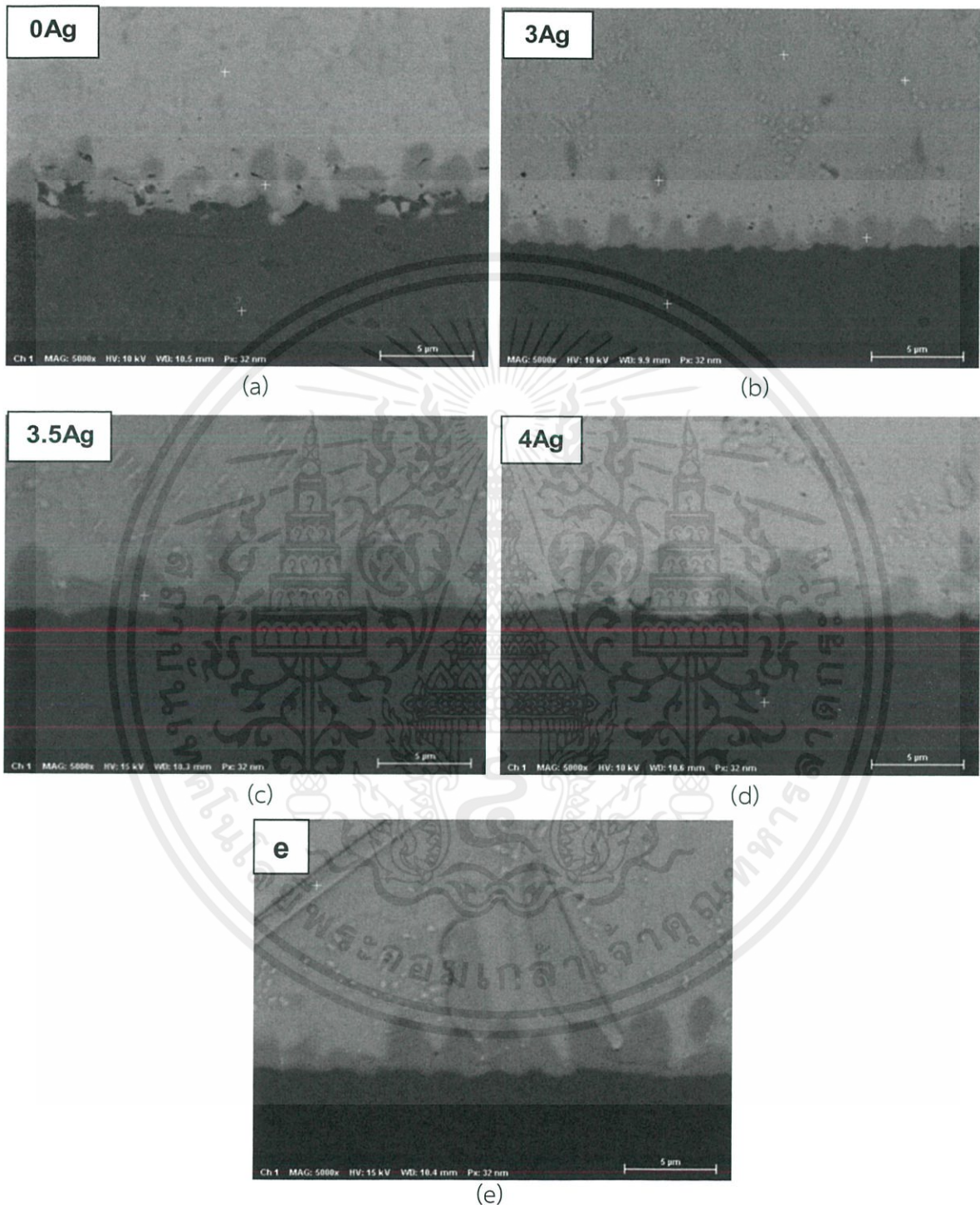


รูปที่ 4.11 อัตราการแผ่กระจายของโลหะบัดกรี

#### 4.4 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn-xAg หลังจากการบัดกรี

โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมหรือโลหะบัดกรีที่มีดีบุกเป็นส่วนประกอบพื้นฐาน เมื่อนำมาบัดกรีกับทองแดงจะเกิดการแพร่ของอะตอมทองแดงจากโลหะพื้นไปสู่โลหะบัดกรี เช่นเดียวกับการแพร่ของดีบุกที่มีการแพร่จากโลหะบัดกรีไปสู่โลหะพื้น และเกิดเป็นชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรีและโลหะพื้นทองแดง

#### 4.4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ



รูปที่ 4.12 ลักษณะรอยต่อของโลหะบัดกรี Sn-xAg หลังบัดกรี (a)100Sn, (b) 97Sn-3Ag, (c) 96.5Sn-3.5Ag, (d) 96Sn-4Ag และ (e) 95Sn-5Ag

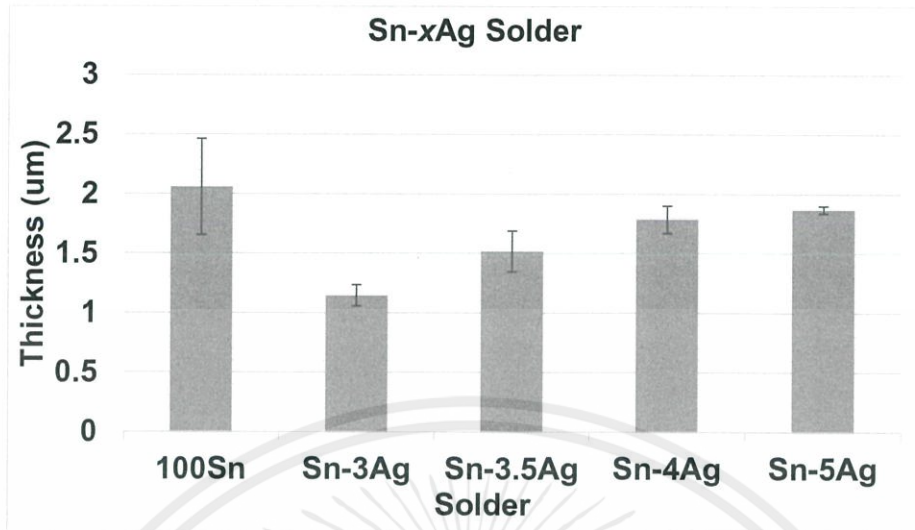
จากรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณธาตุเงิน (Ag) ทำให้โครงสร้างจุลภาคมีลักษณะที่แตกต่างกันทั้ง 5 ส่วนผสม เมื่อเติมธาตุเงิน (Ag) เข้าไปทำให้มีการเกิดสารประกอบเชิงโลหะขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณธาตุเงินไปถึง 5wt% จะเกิดสารประกอบเชิงโลหะที่เยอะและมีขนาดใหญ่ขึ้น จากนั้นทำการวิเคราะห์ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะด้วยโปรแกรม ImageJ นำค่าที่วัดได้จากโปรแกรมมาคำนวณในสมการ

$$h = \frac{A}{L} \quad (4.1)$$

จะได้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะดังตารางที่ 4.7 ซึ่งทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง โดยพบว่าความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นทองแดงกับโลหะบัดกรี 100Sn คือ 2.058 ไมโครเมตร และเมื่อทำการเติมธาตุเงินเข้าไปนั้น ทำให้ความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีค่าอยู่ระหว่าง 1.146 – 1.868 ไมโครเมตร ซึ่งชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นนี้บ่งบอกให้เห็นว่าธาตุเงิน (Ag) ส่งผลต่อความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างรอยต่อของโลหะบัดกรี Sn-xAg กับแผ่นทองแดงหลังจากการบัดกรี

ตารางที่ 4.7 ความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

Alloys	Thickness of Intermetallic compound ( $\mu\text{m}$ )				
	Replicate 1	Replicate 2	Replicate 3	Average	SD
100Sn	2.191	2.472	1.511	2.058	0.403
97Sn – 3Ag	1.255	1.143	1.040	1.146	0.088
96.5Sn – 3.5Ag	1.500	1.738	1.316	1.518	0.173
96Sn – 4Ag	1.669	1.745	1.942	1.785	0.115
95Sn – 5Ag	1.837	1.857	1.911	1.868	0.031

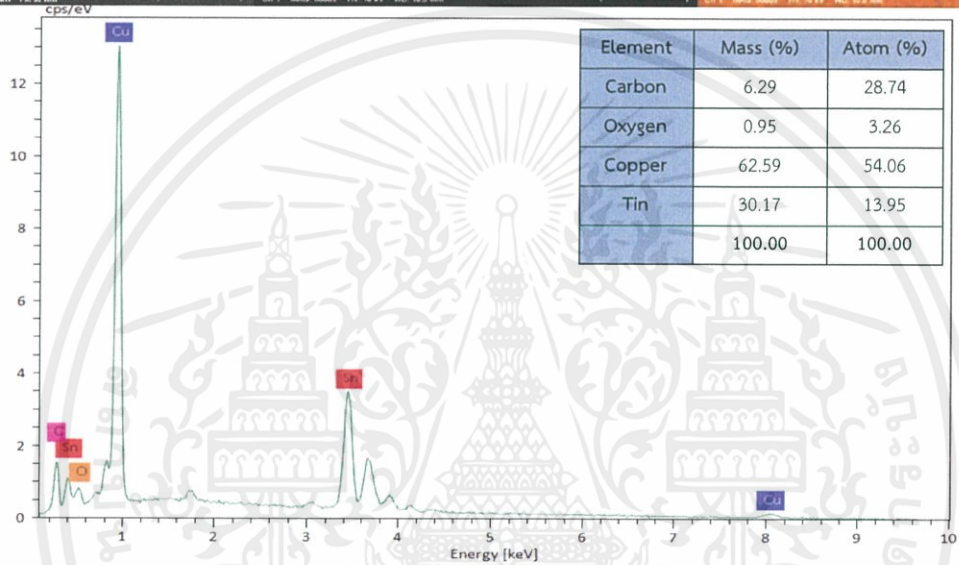
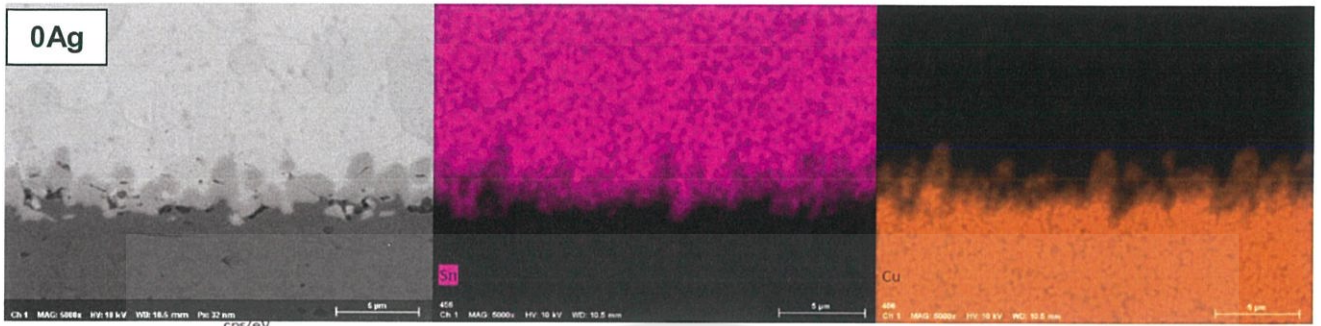


รูปที่ 4.13 ความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

จากรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าความหนาของชั้นสารประกอบที่ไม่มีการเติมธาตุเงิน (Ag) มีความหนามากที่สุด และเกิดเป็นชั้นสารประกอบเชิงโลหะ  $Cu_6Sn_5$  แต่เมื่อเติมธาตุเงิน (Ag) ลงในโลหะบัดกรี ทำให้เกิดสารประกอบเชิงโลหะ  $Ag_3Sn$  ถึงแม้ว่า  $Ag_3Sn$  จะมีค่าพลังงาน Gibbs Free Energy คือ  $-5.24$  kJ/mol ซึ่งเป็นลบน้อยกว่า  $Cu_6Sn_5$  คือ  $-6.20$  kJ/mol [20] แต่สารประกอบเชิงโลหะ  $Ag_3Sn$  ก็สามารถเกิดขึ้นได้ เนื่องจากขณะบัดกรีเงิน (Ag) มีสถานะเป็นของเหลวสามารถเกิดการแพร่ได้ดี จึงสามารถเกิดปฏิกิริยากับดีบุก Sn เช่นกัน ทำให้ทองแดง (Cu) ที่มีสถานะเป็นของแข็ง และเกิดการแพร่ได้ช้ากว่า เกิดเป็นสารประกอบเชิงโลหะ  $Cu_6Sn_5$  ลดลงอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อเติมธาตุเงิน (Ag) มากขึ้น ส่งผลให้ทองแดงละลาย (Dissolute) ออกมาได้มากขึ้น [21] ทำให้มีอะตอมของทองแดงที่สามารถทำปฏิกิริยากับดีบุกได้มากขึ้นทำให้เกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะ  $Cu_6Sn_5$  ที่มีความหนาเพิ่มมากขึ้น

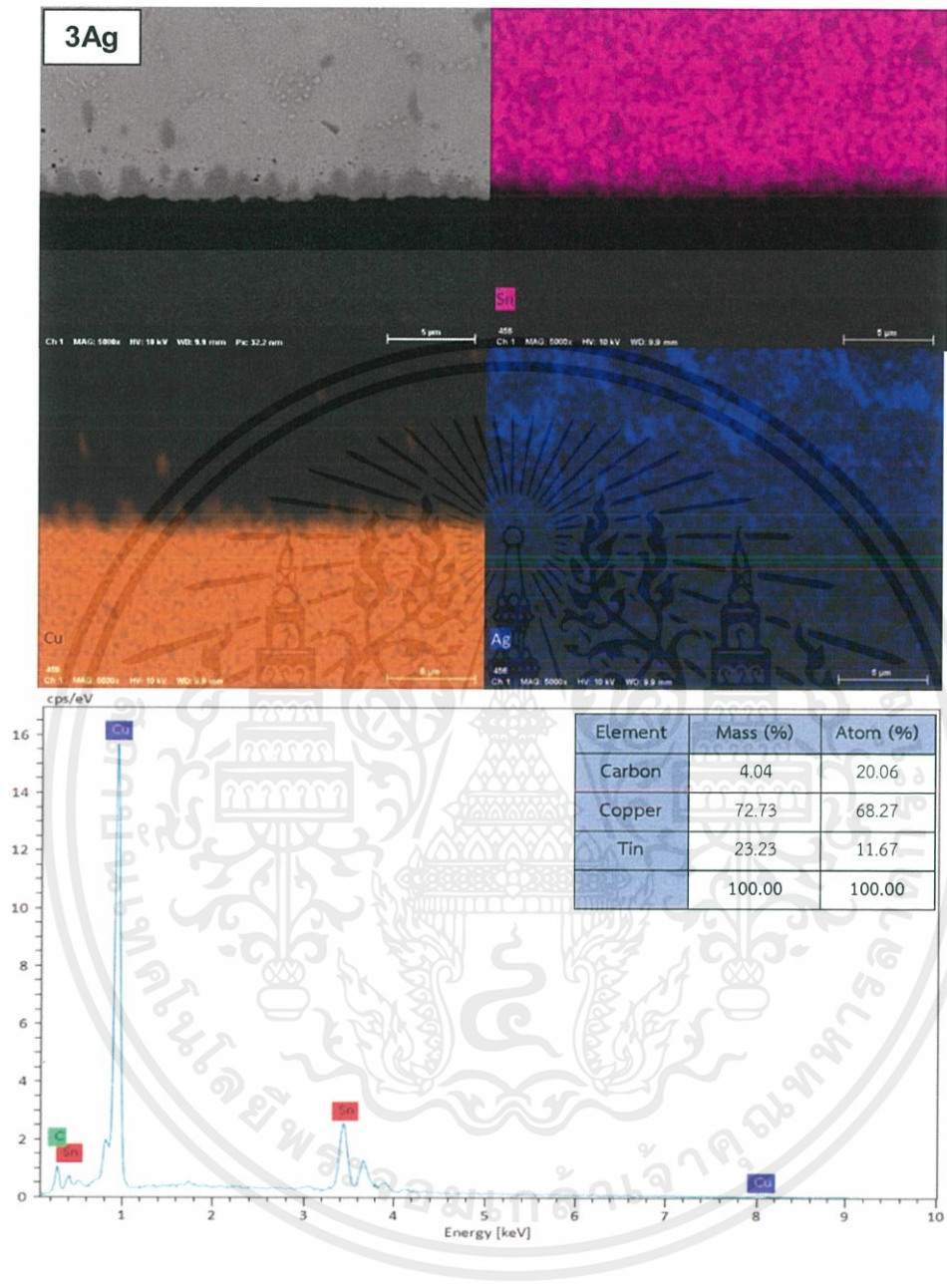
#### 4.4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของโลหะบัดกรีในแต่ละส่วนผสมที่ได้กำหนดไว้เบื้องต้นด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) และการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping และฟังก์ชัน EDX ในการตรวจสอบส่วนผสมของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.14-4.18



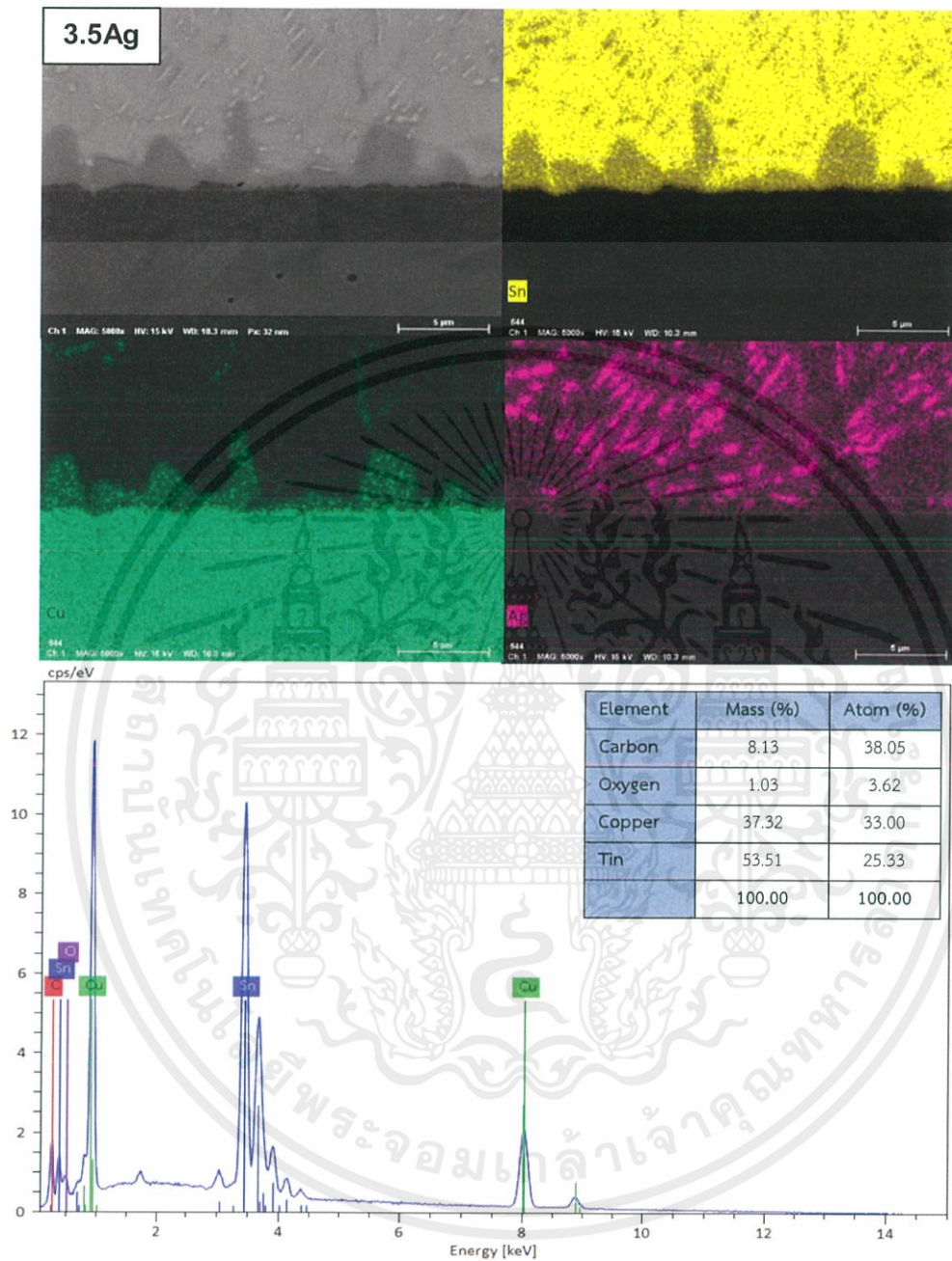
รูปที่ 4.14 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping และการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วย EDX ของโลหะบัดกรีชนิด 100Sn

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อ 96 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



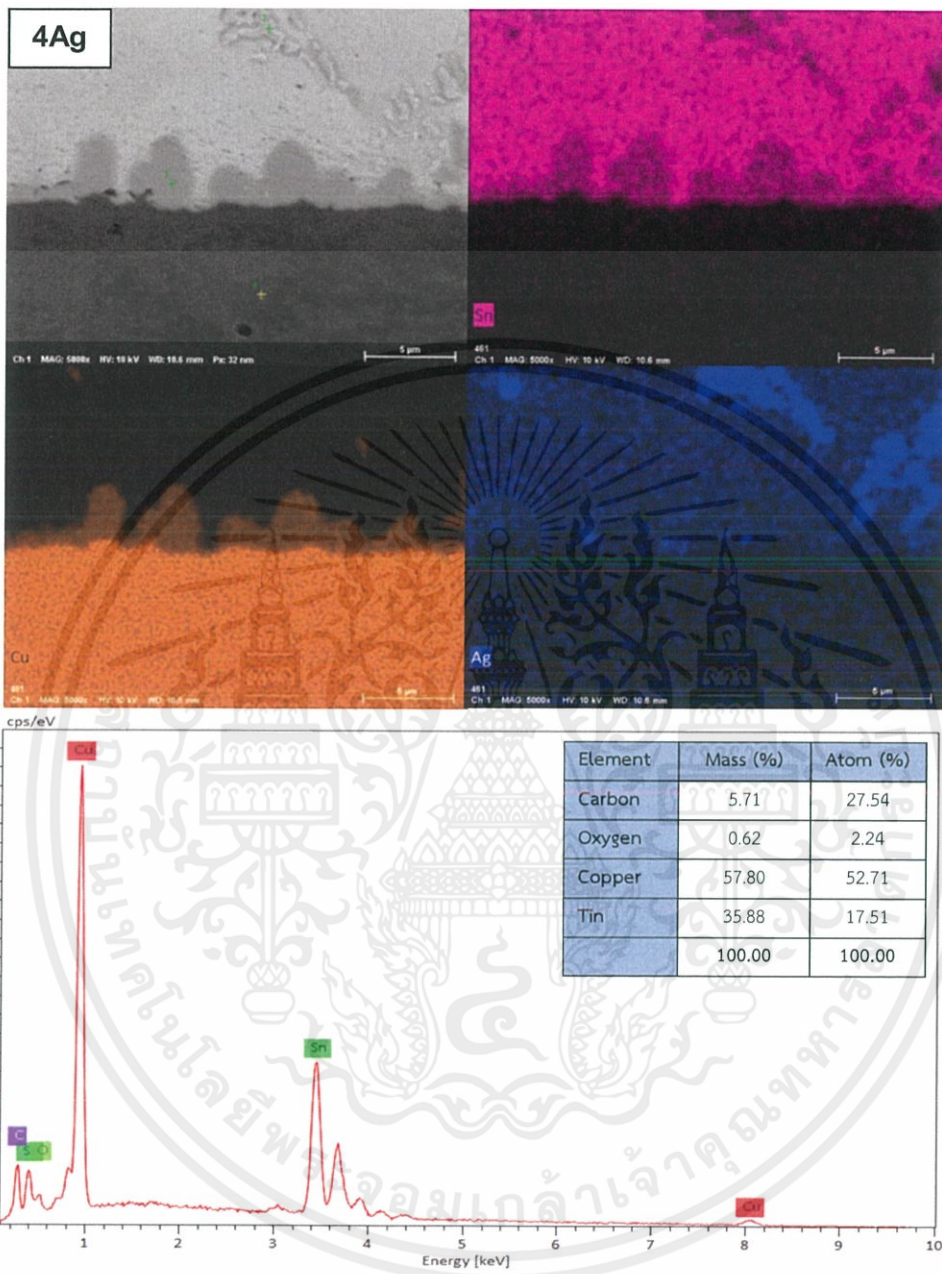
รูปที่ 4.15 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping และการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วย EDX ของโลหะบัดกรีชนิด 97Sn-3Ag

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อ 97ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

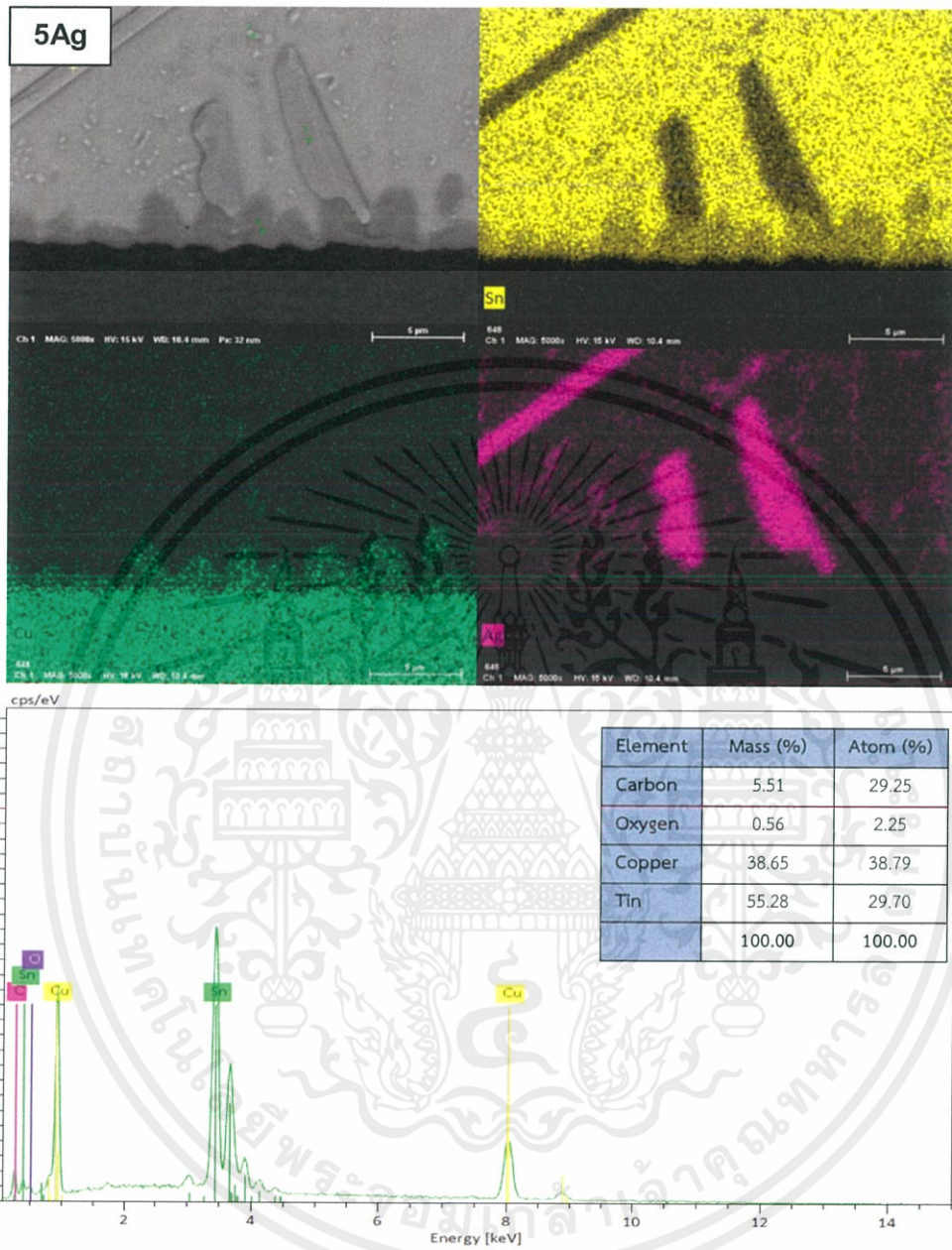


รูปที่ 4.16 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping และการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วย EDX ของโลหะบัดกรีชนิด 96.5Sn-3.5Ag

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อ 98 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

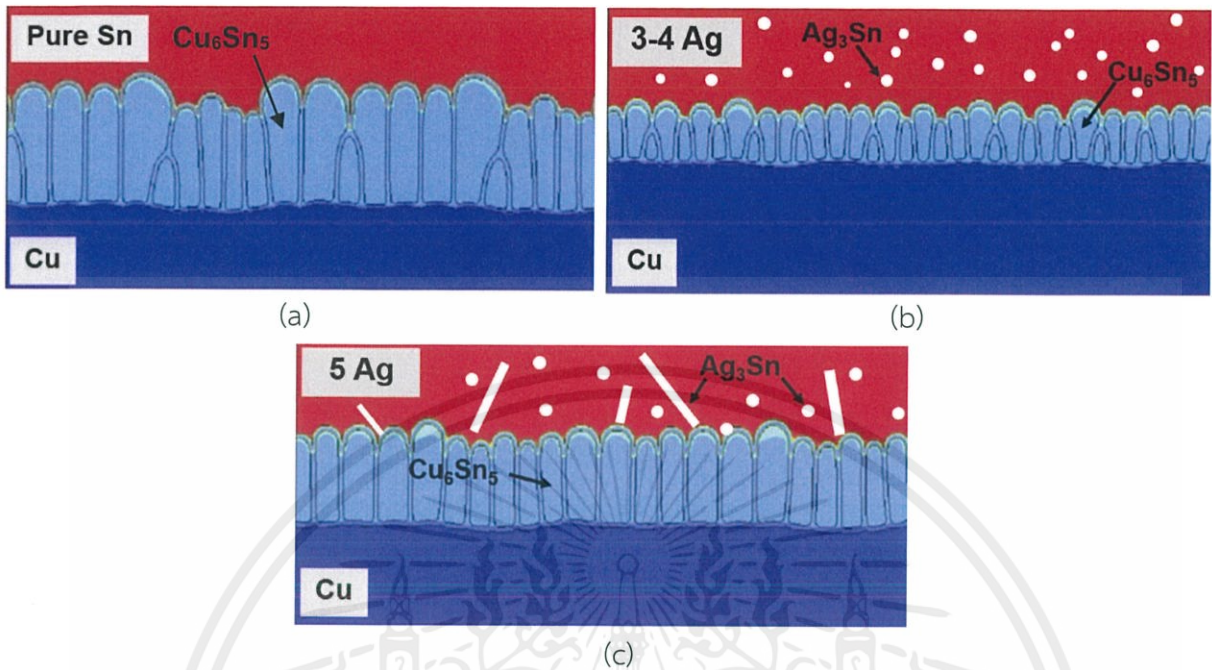


รูปที่ 4.17 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping และการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วย EDX ของโลหะบัดกรีชนิด 96Sn-4Ag



รูปที่ 4.18 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping และการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วย EDX ของโลหะบัดกรีชนิด 95Sn-5Ag

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อ 100 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 แบบจำลองการเกิดสารประกอบเชิงโลหะและชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรีระหว่างโลหะบัดกรีและโลหะพื้น (a) 100Sn, (b) 3Ag - 4Ag และ (c) 5Ag

จากวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping และการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วย EDX ในส่วนผสมที่ไม่มีการเติมธาตุเงินพบว่า มีการเกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรีและโลหะพื้น คือ  $Cu_6Sn_5$  เพียงชนิดเดียวแสดงดังรูปที่ 4.19 (a) และเมื่อทำการเติมธาตุเงิน (Ag) เป็น 3-4 wt% เข้าไปในโลหะบัดกรี ทำให้เกิดสารประกอบเชิงโลหะ  $Ag_3Sn$  กระจายตัวอยู่ห่างจากชั้นสารประกอบเชิงโลหะ  $Cu_6Sn_5$  แสดงดังรูปที่ 4.19 (b) และเมื่อเติมธาตุเงิน (Ag) เป็น 5wt% ทำให้เกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะ  $Cu_6Sn_5$  และมีการเกิดสารประกอบเชิงโลหะ Primary  $Ag_3Sn$  และ  $Ag_3Sn$  ที่มีลักษณะคล้ายเข็มและเม็ดกลมๆกระจายตัวอยู่ในทิศทางที่แตกต่างกันอยู่นอกชั้นสารประกอบเชิงโลหะ แสดงดังรูปที่ 4.19 (c)

## บทที่ 5

### สรุปผลการดำเนินงาน

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของของ Ag ในโลหะบัดกรีสารตะกั่ว Sn-xAg ที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและความต้านทานการกัดกร่อน โดยมีตัวแปรที่สำคัญในการวิจัยครั้งนี้คือ เฟอร์เซ็นต์ของธาตุเงินที่เติมเข้าไปในโลหะบัดกรีพื้นฐาน ผลจากการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างจุลภาค พบว่าพื้นผิวโดยส่วนมากของโลหะบัดกรีแต่ละชนิดประกอบด้วยเฟส  $\beta$ -Sn เป็นโครงสร้างพื้นฐาน และเมื่อทำการเติมธาตุเงิน (Ag) ทำให้เกิดโครงสร้างของสารประกอบเชิงโลหะกระจายตัวอยู่ในโครงสร้าง  $\beta$ -Sn เมื่อพิจารณาจากสัดส่วนของสารประกอบที่ได้นั้น จะพบสัดส่วนเฟอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ Ag มีค่ามากกว่า Sn สามารถสรุปได้ว่าการเติมธาตุเงิน (Ag) ส่งผลต่อขนาดและการกระจายตัวของสารประกอบเชิงโลหะ ที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณเงิน (Ag) ซึ่งจากการวิเคราะห์ธาตุพบว่าสารประกอบเชิงโลหะมีสูตรทางเคมีคือ  $Ag_3Sn$

#### 5.2 ความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะบัดกรี Sn-xAg ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดินามิกโพลาริเซชัน

##### 1. ผลการวิเคราะห์อัตราการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีต่อสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

สำหรับอัตราการกัดกร่อน เมื่อเพิ่มปริมาณธาตุเงิน (Ag) ลงในส่วนผสมของโลหะบัดกรี จะส่งผลให้โลหะบัดกรีมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนได้ดีขึ้น เนื่องจากค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) ของโลหะบัดกรีมีแนวโน้มปรับเพิ่มขึ้นซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่ผิวโลหะมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนได้ดีขึ้น ในขณะที่ค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $I_{corr}$ ) ก็มีแนวโน้มลดลงเช่นกัน และยังสามารถสังเกตเห็นช่วงสั้นๆของ Passive Film ที่เกิดขึ้นทางฝั่งแอโนดิกของกราฟ Polarization ซึ่งแสดงว่าโลหะบัดกรีจะเกิดการกัดกร่อนได้ยากขึ้น และผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนที่เกิดขึ้น คือ  $Sn_3O(OH)_2Cl_2$  และ  $SnCl_2$  ซึ่งโครงสร้างจุลภาคมีรูปร่างเหมือนเกล็ดเลือดและมีการกระจายตัวอย่างอิสระ

## 2. ผลการวิเคราะห์อัตราการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีต่อสารละลายซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ )

จากผลการทดลองทำให้ทราบว่า เมื่อเพิ่มธาตุเงิน (Ag) ปริมาณ 3 Wt% ลงในส่วนผสมของโลหะบัดกรี ส่งผลให้โลหะบัดกรีมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนได้ดีที่สุด และยังสามารถสังเกตเห็นช่วงสั้นๆ ของ Passive Film ที่เกิดขึ้นทางฝั่งแอโนดิกของกราฟ Polarization ในส่วนผสม 100Sn, 96.5Sn-3.5Ag และ 97Sn-3Ag ซึ่งแสดงว่าโลหะบัดกรีจะเกิดการกัดกร่อนได้ยากขึ้น และผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนที่เกิดขึ้น คือ  $SnSO_4$  และ SnS

### 5.3 สรุปผลการวิเคราะห์ความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรี

#### 1. ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการกระจายตัวด้วยวิธี Spread test method

จากการวิเคราะห์ค่าอัตราการการกระจายตัวของโลหะบัดกรีทั้งหมด 5 ส่วนผสม พบว่า มีค่าเฉลี่ยอัตราการแผ่กระจายตัวบนแผ่นทองแดงที่ไม่แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญที่  $\alpha = 0.05$  สามารถสรุปได้ว่า การเติมธาตุเงิน (Ag) ไม่ส่งผลต่อการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดง

#### 5.4 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรี

จากการทดสอบภายใต้เงื่อนไขการบัดกรีที่อุณหภูมิ 260 °C เป็นเวลา 30 วินาที พบโครงสร้างของชั้นสารประกอบ  $Cu_6Sn_5$  เกิดขึ้นระหว่างโลหะบัดกรีกับแผ่นทองแดง โดยความหนาของ  $Cu_6Sn_5$  เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณธาตุเงิน (Ag) คือไม่มีธาตุเงิน (Ag) มีความหนามากที่สุด และเมื่อเติมธาตุเงิน ความหนาจะลดลงอย่างมาก และเมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์ธาตุเงิน (Ag) ส่งผลให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ  $Cu_6Sn_5$  เพิ่มขึ้นตามลำดับ

#### 5.5 ข้อจำกัดในการทำงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดในการทำงานต่างๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. เนื่องจากเครื่องโพเทนชิโอสแตทกัลวานอสแตท (Potentiostat/Galvanostat) ไม่มีการสอบเทียบเครื่องมือวัด (Calibration) อาจจะทำให้ผลการทดสอบการกัดกร่อนมีความคลาดเคลื่อนได้ จึงต้องมีการทดลองหลายรอบ

2. ในการทดสอบอัตราการกัดกร่อน ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิของสารละลายที่ใช้ในการทดสอบ

## 5.6 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีแต่ละชนิดและปฏิกิริยารอยต่อที่เกิดขึ้น โดยวิธีการบ่มด้วยความร้อนในระดับอุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกชนิดโลหะบัดกรีที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานจริง

2. ควรมีการศึกษาความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีโดยวิธี Immersion Test ในสารละลายที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันและมีการควบคุมอุณหภูมิของสารละลายที่ใช้ในการทดสอบ

## 5.7 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ทราบถึงอิทธิพลของธาตุเงิน ต่อโครงสร้างจุลภาคโลหะบัดกรีก่อนและหลังบัดกรี และความต้านทานการกัดกร่อน

2. ได้เรียนรู้การใช้โปรแกรมมากขึ้น เช่นการใช้ Minitab ในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ และโปรแกรม ImageJ ในการวิเคราะห์การกระจายตัวและความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ



## เอกสารอ้างอิง

- [1] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. สารต้องห้ามตามระเบียบ RoHs. [ออนไลน์]. 2549. แหล่งที่มา: [http://www.thairohs.org/index.php?option=com\\_content&task=view&id=65&Itemid=84](http://www.thairohs.org/index.php?option=com_content&task=view&id=65&Itemid=84)
- [2] รศ.ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ, 2551. กรรมวิธีการผลิต. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [3] จิตวัต เทียมเมือง และภูเบศ เลิศพรเจริญ, 2558. การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของโลหะบัดกรีดีบุก- ทองแดง-พลวง. ปรินูญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [4] Zhao, Y. Cheng, CO. Cao, Z. Y. and Zhao J., 2012. Interaction of Liquid Tin and Zinc with AISI 304 Stainless Steel after Passivation in Air and Nitric Acid. Materials Characterization 77: 1-9.
- [5] กัลยรัตน์ ชำรงวินิจฉัย, 2554. การศึกษาอิทธิพลของธาตุเจือคั่วต่อโครงสร้างจุลภาคและปฏิกิริยารอยต่อของโลหะบัดกรี Sn-0.6Cu-0.05Ni-0.005Ge. ปรินูญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [6] Himikatus.ru. Phase diagram. [ออนไลน์] (1996). แหล่งที่มา: <http://www.himikatus.ru/art/phase-diagr1/sb-sn.php>
- [7] Japanese Standard Association, 2003. Test Methods for Lead-Free Solders- Part 3 : Methods for Spread Test.
- [8] กำจร สุขพิมาย, กัลยา ผ่าโผน และกรรณชัย กัลยาศิริ, 2556. การศึกษาอิทธิพลของอินเดียมต่อการกระจายตัวและการเกิดสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn บนแผ่นทองแดง. การประชุมวิชาการรายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี พ.ศ.2556.

- [9] Japanese Standard Association, 2003. Test Methods for Lead-Free Solders – Part 4: Methods for Solderability Test by A Wetting Balance Method and A Contact Angle Method.
- [10] USA KINO. Measurement of contact angle and interface tension-method and Ways. [ออนไลน์]. 2014. แหล่งที่มา: <http://www.surface-tension.org/article/63.html>
- [11] The University of Glasgow. ISAAC: Imaging spectroscopy and Analsis Centre. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.gla.ac.uk/schools/ges/research/researchfacilities/isaac/services/scanningelectronmicroscopy/>
- [12] Purdue University. Scanning Electron Microscope. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <https://www.purdue.edu/epps/rem/rs/sem.htm>
- [13] Goldstein, J., Newbury, D.E., Joy, D.C., Lyman, C.E., Echlin, P., Lifshin, E., Sawyer, L., and Michael, J.R., 3rd Edition, 2003. Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis.
- [14] ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์เพื่อมาตรฐานและอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึก : X-ray Diffractometer (XRD). [ออนไลน์] 2013 แหล่งที่มา: <http://science.kmutt.ac.th/sic/index.php/physics/16-x-ray-diffraction>
- [15] แม้น อมรสิทธิ์ และสมชัย อัครทิวา, 2547. วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพฯ : ท้อป.
- [16] รุจิภรณ์ นาคขุนทด. การประเมินผลพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะจากเส้นโค้งโพลาไรเซชัน (Polarization Curve). [ออนไลน์] 2017. แหล่งที่มา: <http://www.tistr.or.th/tistrblog/?tag=เส้นโค้งโพลาไรเซชัน>
- [17] สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.). ลักษณะของการกัดกร่อน. [ออนไลน์] 2014. แหล่งที่มา: <http://www.scimath.org/socialnetwork/groups/viewbulletin/2423ลักษณะของการกัดกร่อน?groupid=404>
- [18] พรวิสา วงศ์ปัญญา. Corrosion Testing by Potentiostat Analyzer. [ออนไลน์]. 2012. แหล่งที่มา: [http://eng.sut.ac.th/metal/images/stories/pdf/Lab\\_6\\_Corrosion\\_testing\\_by\\_Potentiostatic\\_technique.pdf](http://eng.sut.ac.th/metal/images/stories/pdf/Lab_6_Corrosion_testing_by_Potentiostatic_technique.pdf)
- [19] Dezhi Li, Paul P. Conway, and Changqing Liu, 2008. Corrosion Characterization of Tin-Lead and Lead-Free Solders In 3.5 Wt.% NaCl Solution. Corrosion Science 50 :995-1004.

- [20] Tao-Chih Chang, Min-Hsiung Hon and Moo-Chin Wang, 2004. Thermal Characteristics and Intermetallic Compounds Formed at Sn-9Zn-0.5Ag/Cu Interface. Materials Transactions 45:606-613.
- [21] Ranjit Pangher, Tom Lawlor, (n.d.) Effect of Sliver in Common Lead-Free Alloys. Cookson Electronics Asembly Materials.





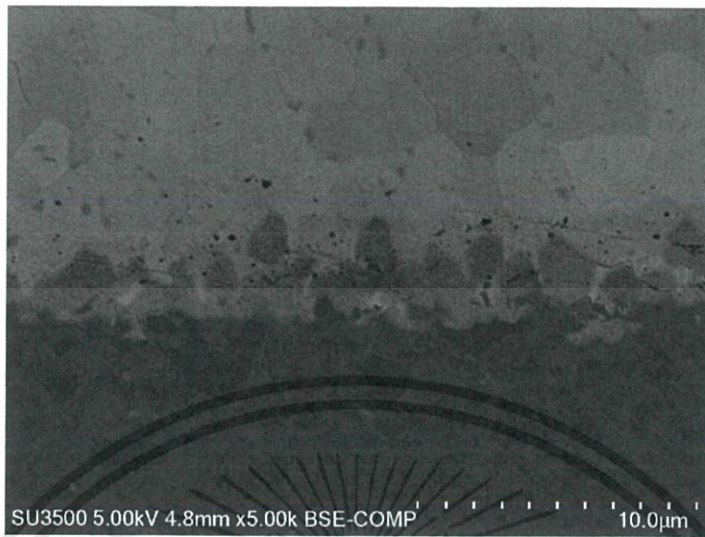
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อ 108 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.  
โครงสร้างจุลภาคและความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อ 109 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

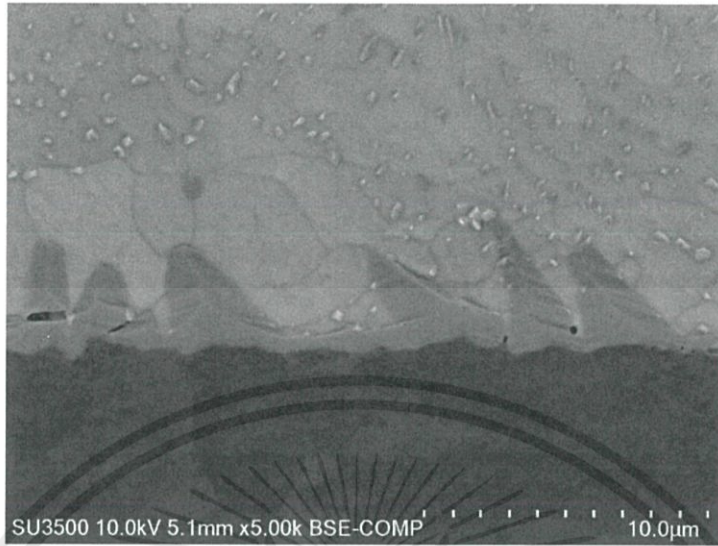


รูปที่ ก.1 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะชนิด 100Sn

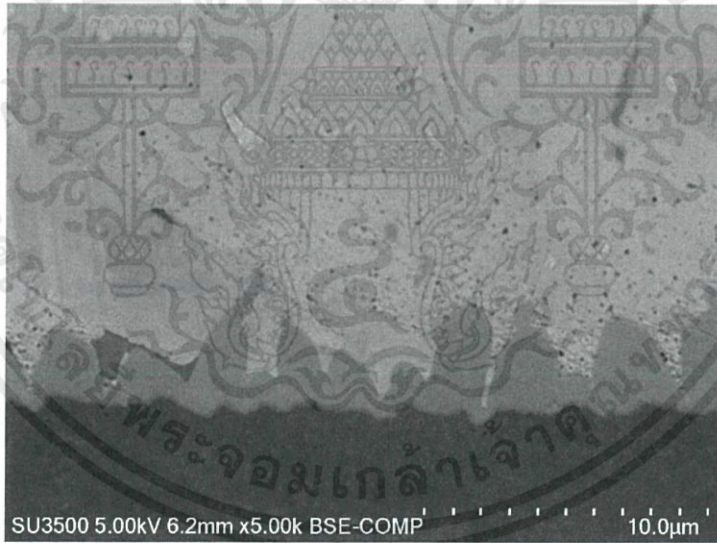


รูปที่ ก.2 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะชนิด 97Sn-3Ag

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อ 110 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

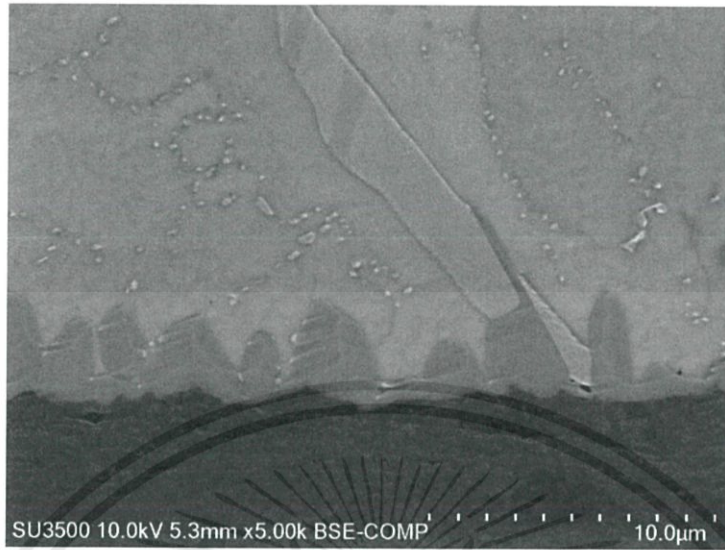


รูปที่ ก.3 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะชนิด 96.5Sn-3.5Ag



รูปที่ ก.4 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะชนิด 96Sn-4Ag

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อ111ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.5 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะชนิด 95Sn-5Ag

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้