

การศึกษาผลของ Ni, Ag และ In ต่อปฏิกิริยารอยต่อระหว่าง
โลหะบัดกรี Sn-58Bi-Ni-X กับแผ่นทองแดง
AN INVESTIGATION ON EFFECT OF Ni, Ag AND In ON
INTERFACIAL REACTION BETWEEN Sn-58Bi-Ni-X SOLDER
AND Cu SUBSTRATE

นางสาวธัญพร ทองมณี

MS.THANYAPORN THONGMANEE

นางสาวสุวรรณา คุณากรกุล

MS.SUWANNA KUNAKONKUN

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

การศึกษาผลของ Ni, Ag และ In ต่อปฏิกิริยารอยต่อระหว่าง
โลหะบัดกรี Sn-58Bi-Ni-X กับแผ่นทองแดง
AN INVESTIGATION ON EFFECT OF Ni, Ag AND In ON
INTERFACIAL REACTION BETWEEN Sn-58Bi-Ni-X SOLDER
AND Cu SUBSTRATE

นางสาวธันยพร ทองมณี
MS.THANYAPORN THONGMANEE
นางสาวสุวรรณา คุณากรกุล
MS.SUWANNA KUNAKONKUN

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

AN INVESTIGATION ON EFFECT OF Ni, Ag AND In ON
INTERFACIAL REACTION BETWEEN Sn-58Bi-Ni-X SOLDER
AND Cu SUBSTRATE

MS.THANYAPORN THONGMANEE

MS.SUWANNA KUNAKONKUN

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 2014

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์

การศึกษาผลของ Ni, Ag และ In ต่อปฏิกิริยารอยต่อระหว่างโลหะ
บัดกรี Sn-58Bi-Ni-X กับแผ่นทองแดง
AN INVESTIGATION ON EFFECT OF Ni, Ag AND In ON
INTERFACIAL REACTION BETWEEN Sn-58Bi-Ni-X SOLDER AND
Cu SUBSTRATE

นักศึกษา

นางสาวธัญพร ทองมณี รหัสประจำตัว 54010616
นางสาวสุวรรณา คุณากรกุล รหัสประจำตัว 54011436

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์



(รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ)

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การศึกษาผลของ Ni, Ag และ In ต่อปฏิริยารอยต่อระหว่างโลหะบัดกรี Sn-58Bi-Ni-X กับแผ่นทองแดง
นักศึกษา	นางสาวธันยพร ทองมณี นางสาวสุวรรณา คุณากรกุล
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา	2557
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการออกแบบและสร้างชุดแม่พิมพ์ขึ้นสำหรับผลิตชิ้นงานทดสอบโลหะบัดกรีเพื่อศึกษาผลของ Ni, Ag และ In ต่อปฏิริยารอยต่อระหว่างโลหะบัดกรี Sn-58Bi-Ni-X กับแผ่นทองแดง เมื่อ X คือ Ag หรือ In และ ศึกษาผลทางโครงสร้างจุลภาคกับองค์ประกอบทางเคมีของโลหะบัดกรีแต่ละชนิดหลังการบัดกรี ซึ่งโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วพื้นฐานที่ใช้ คือ Sn58Bi แต่โลหะบัดกรีชนิดนี้มีสมบัติทางกลและความสามารถในการเปียกที่ต่ำ จึงมีการเติมธาตุ Ni, Ag และ In โดยเติมธาตุ Ni ปริมาณ 0.05, 0.1, 0.5 และ 1.0 wt% เติมธาตุ Ag ปริมาณ 0.05 และ 0.1 wt% และเติมธาตุ In ปริมาณ 0.05 และ 0.1 wt% จากนั้นทำการหล่อชิ้นงานตัวอย่างทั้งหมด 21 ชนิดด้วยแม่พิมพ์ที่สร้างขึ้น แล้วนำชิ้นงานตัวอย่างมาบัดกรีบนแผ่นทองแดงที่อุณหภูมิ 179 °C เป็นเวลา 30 วินาที ด้วยวิธี Reflow Process และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ จากนั้นนำชิ้นงานไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ร่วมกับ เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer, EDX) พบว่าการเติมธาตุ Ni ในปริมาณ 0.05, 0.1, 0.5 และ 1.0 wt% ไปในโลหะบัดกรีพื้นฐาน Sn-58Bi ส่งผลให้ค่าตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับโลหะบัดกรีพื้นฐาน และการเติมธาตุ In และ Ag ในปริมาณ 0.05 และ 0.1wt% ไปในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-Ni ส่งผลให้ค่าตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีมีแนวโน้มทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของธาตุที่เติม และพบว่าการเติมธาตุเจือเหล่านี้มีผลให้ค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะเพิ่มมากขึ้นจากโลหะบัดกรีพื้นฐาน

Thesis Title	An Investigation on Effect of Ni, Ag and In on Interfacial Reaction between Sn-58Bi-Ni-X Solder and Cu Substrate
Student	Ms.Thanyaporn Thongmanee Ms.Suwanna Kunakonkun
Degree	Bachelor of Engineering in Industrial Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year	2014
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Kannachai Kanlayasiri

ABSTRACT

This project aims to first design and create the mold for fabricating lead-free solder specimens and second investigate the alloy effect of Ni, Ag and In. The effects considered in this study are interfacial reaction between the solder alloy and Cu substrate; and microstructure and chemical composition of the alloy after a soldering process. The compositions of the solder alloys are Sn-58Bi, Sn-58Bi-Ni and Sn-58Bi-Ni-X, where the composition of Ni is 0.05, 0.1, 0.5 to 1.0 wt%. The element X is either Ag or In where the compositions of either elements are 0.05 and 0.1 wt%. Furthermore, all specimens were soldered at 179 °C using the reflow process method and subsequently analyzed by an optical microscope (OM) and a scanning electron microscope. The result from Sn-58Bi-Ni alloy showed that the spread rate increased with Ni composition. By comparing Sn-58Bi-Ni and Sn-58Bi-Ni-X alloys, it was found that the spread rate depended on concentration of In and Ag. Finally, increasing concentration of Ni, Ag, and In led to increased thickness of intermetallic compound layers.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 การบัดกรี.....	3
2.1.1 โลหะพื้น.....	4
2.1.2 โลหะบัดกรี.....	5
2.1.3 น้ำยาประสานหรือฟลักซ์.....	7
2.2.3.1 การทำงานของฟลักซ์.....	10
2.1.4 วิธีการบัดกรี.....	11
2.2 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว.....	13
2.2.1 คุณสมบัติเบื้องต้นในการพิจารณาเลือกใช้โลหะบัดกรีแบบไร้สารตะกั่ว.....	14
2.2.2 โลหะทดแทนสารตะกั่ว.....	15
2.2.3 แนวทางในการเลือกธาตุที่เป็นส่วนผสมที่เหมาะสมกับขบวนการผลิต.....	18
2.2.3.1 ธาตุเจือที่ใช้ผสมกับดีบุกเพื่อผลิตเป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว.....	18
2.2.3.2 สมบัติของธาตุเจือชนิดต่างๆ.....	18
2.3 โลหะบัดกรี Sn-58Bi.....	19

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.1	คุณสมบัติทางฟิสิกส์.....	20
2.3.2	คุณสมบัติทางกล.....	20
2.4	วัสดุที่ใช้ในการสร้างแม่พิมพ์.....	21
2.4.1	คุณสมบัติทั่วไปและคุณสมบัติทางกายภาพของเหล็กกล้าไร้สนิม.....	21
2.4.2	คุณสมบัติเชิงกล.....	21
2.4.3	ความต้านทานการกัดกร่อน.....	22
2.4.4	เหล็กกล้าไร้สนิม.....	22
2.5	ความสามารถในการกระจายตัว.....	23
2.5.1	Spread test method.....	24
2.5.1.1	ค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor).....	24
2.5.1.2	ค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio).....	25
2.5.2	Contact angle method.....	25
2.5.3	Wetting balance method.....	29
2.5.4	ความสัมพันธ์ของ Spread factor, Spread ratio และ Contact angle ...	31
2.5.4.1	ความสัมพันธ์ของ Spread ratio และ Contact angle.....	31
2.5.4.2	ความสัมพันธ์ของ Spread factor และ Contact angle.....	32
2.5.4.3	ความสัมพันธ์ของ Contact angle.....	32
2.6	แผนภูมิเฟสของโลหะบัดกรี.....	32
2.6.1	แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุก-ทองแดง (Sn-Cu).....	32
2.6.2	แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุก-นิกเกิล (Sn-Ni).....	33
2.6.3	แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุก-ทองแดง-นิกเกิล (Sn-Cu-Ni).....	34
2.7	การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	35
2.7.1	กล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....	35
2.7.2	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	36
2.7.3	การวิเคราะห์ Energy dispersive x-ray (EDX).....	39
บทที่ 3	วิธีดำเนินการ.....	41
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	41

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2 การศึกษาวัสดุที่ใช้ในการสร้างแม่พิมพ์	42
3.2.1 วัสดุที่เลือกใช้สร้างแม่พิมพ์.....	42
3.2.2 วัสดุที่เลือกใช้ทำสลักของแม่พิมพ์.....	43
3.3 การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์โลหะ.....	43
3.3.1 การออกแบบแม่พิมพ์โลหะ.....	43
3.3.1.1 แม่พิมพ์ส่วนบน.....	43
3.3.1.2 แม่พิมพ์ส่วนล่าง.....	44
3.3.1.3 แม่พิมพ์ส่วนกลาง.....	45
3.3.1.4 สลัก.....	45
3.3.2 การสร้างแม่พิมพ์โลหะ.....	46
3.3.2.1 การสร้างแม่พิมพ์ส่วนบน.....	46
3.3.2.2 การสร้างแม่พิมพ์ส่วนล่าง.....	48
3.3.2.3 การสร้างแม่พิมพ์ส่วนกลาง.....	48
3.3.2.4 การสร้างสลัก.....	48
3.4 การวิเคราะห์ความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีหลังการบัดกรี.....	50
3.4.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ.....	50
3.4.2 การเตรียมแผ่นทองแดง.....	52
3.4.3 วิธีการทดสอบหาค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรี.....	53
3.5 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรี.....	54
3.5.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ.....	54
3.5.1.1 การตัดชิ้นงานทดสอบ.....	54
3.5.1.2 การหล่อเรซิน.....	56
3.5.1.3 การขัดผิวชิ้นงานทดสอบ.....	56
3.5.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมี.....	56
3.5.3 วิธีการวัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ.....	57
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	59
4.1 ชุดแม่พิมพ์สำหรับผลิตชิ้นงานทดสอบ.....	59

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ชิ้นงานทดสอบ	62
4.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของโลหะบัดกรี	63
4.3.1 กลุ่มที่ 1 (เติมธาตุ Ni ลงไปในโลหะพื้นปริมาณ 0.05, 0.1, 0.5 และ 1wt%)	63
4.3.2 กลุ่มที่ 2 (เติมธาตุ Ni ลงไปในโลหะพื้นปริมาณ 0.05, 0.1, 0.5 และ 1 wt%, เติมธาตุ In ลงไปปริมาณ 0.05, 0.1 wt%)	74
4.3.3 กลุ่มที่ 3 (เติมธาตุ Ni ลงไปในโลหะพื้นปริมาณ 0.05, 0.1, 0.5 และ 1 wt%, เติมธาตุ Ag ลงไปปริมาณ 0.05, 0.1 wt%)	91
4.4 ค่าตัวประกอบการกระจายตัวและความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ	108
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงาน	114
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน	114
5.2 ข้อเสนอแนะแนวทางการศึกษาในอนาคต	114
เอกสารอ้างอิง	115

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ชนิดของโลหะต่อความยากง่ายในการบัดกรี	5
ตารางที่ 2.2 โลหะที่ทำการบัดกรีและน้ำยาประสานที่ใช้.....	8
ตารางที่ 2.3 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำกว่า 180 องศาเซลเซียส.....	16
ตารางที่ 2.4 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 180 ถึง 200 องศาเซลเซียส	16
ตารางที่ 2.5 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 200 ถึง 230 องศาเซลเซียส	16
ตารางที่ 2.6 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวมากกว่า 230 องศาเซลเซียส.....	17
ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบของโลหะบัดกรีชนิดต่างๆที่สามารถนำมาใช้ทดแทนตะกั่วบัดกรี	17
ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติทางฟิสิกส์.....	20
ตารางที่ 2.9 ลำดับเวลาในการดำเนินการทดสอบ	27
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมของตัวอย่างที่ใช้ทำการทดสอบ.....	50
ตารางที่ 4.1 น้ำหนักและน้ำหนักเฉลี่ยของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด	62
ตารางที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi	64
ตารางที่ 4.3 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.05Ni	66
ตารางที่ 4.4 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi- 0.1Ni	68
ตารางที่ 4.5 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi- 0.5Ni	70
ตารางที่ 4.6 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-1.0Ni	72
ตารางที่ 4.7 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.05Ni-0.05In.....	75
ตารางที่ 4.8 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.05Ni-0.1In.....	77
ตารางที่ 4.9 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.1Ni-0.05In.....	79

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.10 เปอร์เซนต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.1Ni-0.1In	81
ตารางที่ 4.11 เปอร์เซนต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.5Ni-0.05In	83
ตารางที่ 4.12 เปอร์เซนต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.5Ni-0.1In	85
ตารางที่ 4.13. เปอร์เซนต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-1.0Ni-0.05In	87
ตารางที่ 4.14 เปอร์เซนต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-1.0Ni-0.1In	89
ตารางที่ 4.15 เปอร์เซนต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.05Ni-0.05Ag.....	92
ตารางที่ 4.16 เปอร์เซนต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.1Ni-0.05In	94
ตารางที่ 4.17 เปอร์เซนต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.1Ni-0.05Ag.....	96
ตารางที่ 4.18 เปอร์เซนต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.1Ni-0.1Ag	98
ตารางที่ 4.19 เปอร์เซนต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.5Ni-0.05Ag.....	100
ตารางที่ 4.20 เปอร์เซนต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.5Ni-0.1Ag	102
ตารางที่ 4.21 เปอร์เซนต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-1.0Ni-0.05Ag.....	104
ตารางที่ 4.22 เปอร์เซนต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-1.0Ni-0.1Ag.....	106
ตารางที่ 4.23 เปอร์เซนต์ค่าตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรี และความหนาของชั้นสาร ประกอบเชิงโลหะแต่ละชนิด.....	108

สารบัญรูปรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ตัวอย่างของรอยต่อที่ใช้ทางกล.....	4
รูปที่ 2.2 การเกิดการประสานกันระหว่างชิ้นงานโลหะโดยใช้การบัดกรี	6
รูปที่ 2.3 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมที่ประกอบด้วยตะกั่วและดีบุก.....	6
รูปที่ 2.4 การแผ่กระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะพื้นของแผ่นทองแดง ที่ให้อุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ.....	10
รูปที่ 2.5 การทำงานของฟลักซ์	11
รูปที่ 2.6 การบัดกรีแบบใช้มือ	11
รูปที่ 2.7 การบัดกรีแบบคลื่น	12
รูปที่ 2.8 การบัดกรีแบบรีโฟลว์.....	13
รูปที่ 2.9 เฟสไดอะแกรมระหว่างดีบุกและบิสมัท	19
รูปที่ 2.10 ความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรี	25
รูปที่ 2.11 Contact angle method	26
รูปที่ 2.12 ลำดับขั้นตอนในช่วงทำการทดสอบ	27
รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ของมุมที่มีต่อโลหะบัดกรีพื้นผิวโลหะและบรรยากาศโดยรอบเมื่อ Liquid คือ โลหะบัดกรีหลอมเหลว Solid คือ พื้นผิวพื้นโลหะ Gas คือ บรรยากาศ โดยรอบ.....	28
รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ของมุมสัมผัสที่มุมใดๆ กับการกระจายตัวของโลหะบัดกรี	28
รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างรัศมี ความสูง และมุมสัมผัสของโลหะบัดกรี.....	29
รูปที่ 2.16 Wetting balance method.....	30
รูปที่ 2.17 Wetting curve ที่ได้จากเครื่องทดสอบ.....	31
รูปที่ 2.18 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุก - ทองแดง (Sn-Cu).....	33
รูปที่ 2.19 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุก - นิกเกิล (Sn-Ni).....	34
รูปที่ 2.20 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุก - ทองแดง - นิกเกิล (Sn-Cu-Ni).....	34
รูปที่ 2.21 ลักษณะการตกกระทบและแสงสะท้อนของแสงบนผิวชิ้นงานถูกกัดด้วยสารละลาย	35
รูปที่ 2.22 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง	36
รูปที่ 2.23 การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมตัวอย่าง ที่ระดับชั้นความลึกต่างๆ.....	38
รูปที่ 2.24 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	38

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.25 การเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่ระดับพลังงานของชั้นวงโคจรต่างๆ.....	39
รูปที่ 2.26 การกระตุ้นให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวโดยใช้ลำอิเล็กตรอน.....	40
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	41
รูปที่ 3.2 แบบแม่พิมพ์ส่วนบน.....	44
รูปที่ 3.3 แบบแม่พิมพ์ส่วนล่าง.....	44
รูปที่ 3.4 แบบแม่พิมพ์ส่วนกลาง.....	45
รูปที่ 3.5 แบบสลักสำหรับยึดแม่พิมพ์.....	46
รูปที่ 3.6 เครื่องเลื่อย.....	47
รูปที่ 3.7 เครื่องกัด.....	47
รูปที่ 3.8 เครื่องเจาะ.....	47
รูปที่ 3.9 เครื่องกลึง.....	49
รูปที่ 3.10 ตัวอย่างชิ้นงานหลังจากการหล่อ.....	51
รูปที่ 3.11 เบ้าหลอมกราไฟต์.....	51
รูปที่ 3.12 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการหล่อ.....	51
รูปที่ 3.13 เครื่องชั่งน้ำหนักยี่ห้อ Sartorius รุ่น BSA224S-CW.....	52
รูปที่ 3.14 แผ่นทองแดงบริสุทธิ์ 99.99% ขนาด 30x30x0.35 มิลลิเมตร.....	52
รูปที่ 3.15 IPA ที่ใช้ในการล้างแผ่นทองแดงขั้นตอนสุดท้าย.....	53
รูปที่ 3.16 SPEEDY FLUX NH-100VK-1.....	53
รูปที่ 3.17 แผ่นทองแดงที่มีการหยดฟลักซ์และโลหะบัดกรีสำหรับการทดสอบ.....	53
รูปที่ 3.18 ชิ้นงานก่อนทำการบัดกรี.....	54
รูปที่ 3.19 ชิ้นงานหลังทำการบัดกรี.....	54
รูปที่ 3.20 ชิ้นงานทดสอบ.....	55
รูปที่ 3.21 เครื่องตัดแบบแรงโน้มถ่วงยี่ห้อ STRUERS รุ่น MINITOM.....	55
รูปที่ 3.22 ลักษณะชิ้นงานทดสอบหลังทำการตัด.....	55
รูปที่ 3.23 เครื่องขัดยี่ห้อ Struers LaboPol-1.....	56
รูปที่ 3.24 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	57
รูปที่ 3.25 ตัวอย่างการวัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ.....	58
รูปที่ 4.1 แม่พิมพ์โลหะสำหรับการหล่อชิ้นงานทดสอบ.....	59

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.2 แม่พิมพ์ส่วนบน.....	59
รูปที่ 4.3 แม่พิมพ์ส่วนล่าง.....	60
รูปที่ 4.4 แม่พิมพ์ส่วนกลาง.....	60
รูปที่ 4.5 สลัก.....	61
รูปที่ 4.6 นี้อตขนาดเบอร์ M6.....	61
รูปที่ 4.7 ลักษณะรอยต่อจากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของชิ้นงานทดสอบกลุ่มที่ 1.....	63
รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi.....	64
รูปที่ 4.9 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 1.....	64
รูปที่ 4.10 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 2.....	65
รูปที่ 4.11 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 3.....	65
รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.05Ni.....	66
รูปที่ 4.13 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 1.....	66
รูปที่ 4.14 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 2.....	67
รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.1Ni.....	67
รูปที่ 4.16 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 1.....	68
รูปที่ 4.17 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 2.....	68
รูปที่ 4.18 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 3.....	69
รูปที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.5Ni.....	69
รูปที่ 4.20 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 1.....	70
รูปที่ 4.21 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 2.....	70
รูปที่ 4.22 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 3.....	71
รูปที่ 4.23 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-1.0Ni.....	71
รูปที่ 4.24 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 1.....	72
รูปที่ 4.25 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 2.....	72
รูปที่ 4.26 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 3.....	73

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.27 ลักษณะรอยต่อจากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราดของชิ้นงานทดสอบกลุ่มที่ 2.....	74
รูปที่ 4.28 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.05Ni-0.05In.....	75
รูปที่ 4.29 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 1	76
รูปที่ 4.30 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 2	76
รูปที่ 4.31 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 3	76
รูปที่ 4.32 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.05Ni-0.1In.....	77
รูปที่ 4.33 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 1	78
รูปที่ 4.34 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.1Ni-0.05In.....	78
รูปที่ 4.35 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 1	79
รูปที่ 4.36 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 2	79
รูปที่ 4.37 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 3	80
รูปที่ 4.38 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.1Ni-0.1In.....	80
รูปที่ 4.39 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 1	81
รูปที่ 4.40 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 2	81
รูปที่ 4.41 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 3	82
รูปที่ 4.42 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.5Ni-0.05In.....	82
รูปที่ 4.43 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 1	83
รูปที่ 4.44 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 2	83
รูปที่ 4.45 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 3	84
รูปที่ 4.46 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.5Ni-0.1In.....	84
รูปที่ 4.47 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 1	85
รูปที่ 4.48 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 2	85
รูปที่ 4.49 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 3	86
รูปที่ 4.50 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-1.0Ni-0.05In.....	86
รูปที่ 4.51 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 1	87
รูปที่ 4.52 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 2	87
รูปที่ 4.53 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 3	88

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.54 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-1.0Ni-0.1In	88
รูปที่ 4.55 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 1	89
รูปที่ 4.56 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 2	89
รูปที่ 4.57 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 3	90
รูปที่ 4.58 ลักษณะรอยต่อจากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราดของชิ้นงานทดสอบกลุ่มที่ 3	91
รูปที่ 4.59 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.05Ni-0.05Ag.....	92
รูปที่ 4.60 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 1	93
รูปที่ 4.61 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 2	93
รูปที่ 4.62 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 3	93
รูปที่ 4.63 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.05Ni-0.1Ag.....	94
รูปที่ 4.64 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 1	95
รูปที่ 4.65 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 2	95
รูปที่ 4.66 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.1Ni-0.05Ag.....	96
รูปที่ 4.67 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 1	96
รูปที่ 4.68 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 2	97
รูปที่ 4.69 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.1Ni-0.1Ag	97
รูปที่ 4.70 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 1	98
รูปที่ 4.71 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 2	98
รูปที่ 4.72 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 3	99
รูปที่ 4.73 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.5Ni-0.05Ag.....	99
รูปที่ 4.74 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 1	100
รูปที่ 4.75 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 2	100
รูปที่ 4.76 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 3	101
รูปที่ 4.77 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.5Ni-0.1Ag.....	101
รูปที่ 4.78 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 1	102
รูปที่ 4.79 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 2	102
รูปที่ 4.80 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 3	103

สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.81 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-1.0Ni-0.05Ag.....	103
รูปที่ 4.82 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 1	104
รูปที่ 4.83 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 2	104
รูปที่ 4.84 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 3	105
รูปที่ 4.85 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-1.0Ni-0.1Ag	105
รูปที่ 4.86 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 1	106
รูปที่ 4.87 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 2	106
รูปที่ 4.88 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 3	107
รูปที่ 4.89 ค่าตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีพื้น Sn58Bi และโลหะบัดกรี ที่เติม Ni ปริมาณต่างๆ.....	108
รูปที่ 4.90 ค่าตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีที่ไม่เติม In และเติม In ปริมาณต่างๆ...	109
รูปที่ 4.91 ค่าตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีที่ไม่เติม Ag และเติม Ag ปริมาณต่างๆ.	110
รูปที่ 4.92 ค่าตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรี.....	110
รูปที่ 4.93 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่ไม่เติม In และเติม In ปริมาณต่างๆ.....	112
รูปที่ 4.94 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่ไม่เติม Ag และเติม Ag ปริมาณต่างๆ.....	113
รูปที่ 4.95 ความหนาของชั้นสารประกอบหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด.....	114

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การศึกษาผลของ Ni, Ag และ In ต่อปฏิกิริยารอยต่อระหว่างโลหะบัดกรี Sn-58Bi-Ni-X กับแผ่นทองแดง
นักศึกษา	นางสาวธัญพร ทองมณี
ปริญญา	นางสาวสุวรรณา คุณากรกุล
ปีการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการออกแบบและสร้างชุดแม่พิมพ์ขึ้นสำหรับผลิตชิ้นงานทดสอบโลหะบัดกรีเพื่อศึกษาผลของ Ni, Ag และ In ต่อปฏิกิริยารอยต่อระหว่างโลหะบัดกรี Sn-58Bi-Ni-X กับแผ่นทองแดง เมื่อ X คือ Ag หรือ In และ ศึกษาผลทางโครงสร้างจุลภาคกับองค์ประกอบทางเคมีของโลหะบัดกรีแต่ละชนิดหลังการบัดกรี ซึ่งโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วพื้นฐานที่ใช้ คือ Sn58Bi แต่โลหะบัดกรีชนิดนี้มีสมบัติทางกลและความสามารถในการเปียกที่ดี จึงมีการเติมธาตุ Ni, Ag และ In โดยเติมธาตุ Ni ปริมาณ 0.05, 0.1, 0.5 และ 1.0 wt% เติมธาตุ Ag ปริมาณ 0.05 และ 0.1 wt% และเติมธาตุ In ปริมาณ 0.05 และ 0.1 wt% จากนั้นทำการหล่อชิ้นงานตัวอย่างทั้งหมด 21 ชนิดด้วยแม่พิมพ์ที่สร้างขึ้น แล้วนำชิ้นงานตัวอย่างมาบัดกรีบนแผ่นทองแดงที่อุณหภูมิ 179 °C เป็นเวลา 30 วินาที ด้วยวิธี Reflow Process และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ จากนั้นนำชิ้นงานไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ร่วมกับ เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer, EDX) พบว่าการเติมธาตุ Ni ในปริมาณ 0.05, 0.1, 0.5 และ 1.0 wt% ไปในโลหะบัดกรีพื้นฐาน Sn-58Bi ส่งผลให้ค่าตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับโลหะบัดกรีพื้นฐาน และการเติมธาตุ In และ Ag ในปริมาณ 0.05 และ 0.1wt% ไปในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-Ni ส่งผลให้ค่าตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีมีแนวโน้มทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของธาตุที่เติม และพบว่าการเติมธาตุเจือเหล่านี้มีผลให้ค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะเพิ่มมากขึ้นจากโลหะบัดกรีพื้นฐาน

Thesis Title	An Investigation on Effect of Ni, Ag and In on Interfacial Reaction between Sn-58Bi-Ni-X Solder and Cu Substrate
Student	Ms.Thanyaporn Thongmanee Ms.Suwanna Kunakonkun
Degree	Bachelor of Engineering in Industrial Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year	2014
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Kannachai Kanlayasiri

ABSTRACT

The purpose of this research is to design and create mold for specimen work producing to investigate on the effect of Ni, Ag and In on interfacial reaction between Sn-58Bi-Ni-X solder and Cu substrate and study microstructure and chemical composition of solder after soldering. The basic solder is Sn58Bi. But, Sn58Bi has inferior mechanical properties and low wettability. So, it needs to add Ni for 0–1 wt% to the basic solder. After we added Ni, we also add Ag to Sn-58Bi-Ni solder with the concentration of 0.05 and 1.0 wt%. Moreover, we add In to Sn-58Bi-Ni solder with the same concentration of Ag. Then we cast all 21 specimen works by the mold that we created and, solder them on Cu substrate at 179°C by reflow process method. After this process, all specimen works were investigated by Optical microscope (OM), Scanning electron microscope (SEM) and Energy dispersive x-ray spectrometer (EDX). The result is adding 0.05, 0.1, 0.5 and 1.0 wt% of Ni can increase the spread rate of Sn-58Bi-Ni solder. Adding 0.05 and 0.1 wt% of Ag and In to Sn-58Bi-Ni can make the higher and lower spread rate of Sn-58Bi-Ni-X solder which is depend on type and concentration of element. Furthermore, adding these elements is the cause of thicker intermetallic compound layer.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหา ข้อบกพร่องต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงาน ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ผู้จัดทำ ปริญญาานิพนธ์ รวมถึงการดูแลเอาใจใส่สอบถามถึงความก้าวหน้าอย่างสม่ำเสมอ

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกๆท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับผู้จัดทำปริญญาานิพนธ์

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือในการทำงานวิจัย ตลอดจนอำนวยความสะดวกให้แก่ผู้จัดทำปริญญาานิพนธ์จนสามารถทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

ขอขอบพระคุณ บริษัทอุลตร้าคอร์ จำกัด (ULTRACORE CO., LTD) ที่ให้การสนับสนุนในด้านวัสดุ ที่ใช้ในการทดสอบ และเอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือในการทำงานวิจัย ตลอดจนให้ความรู้เกี่ยวกับโลหะ บัดกรีแก่ผู้จัดทำปริญญาานิพนธ์

ขอขอบคุณนายกำธร สุขพิมาย ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และชี้แนะแนวทางในการ ปฏิบัติระหว่างการดำเนินงาน ตลอดจนอำนวยความสะดวกให้แก่ผู้จัดทำปริญญาานิพนธ์จนปริญญาานิพนธ์ ฉบับนี้สำเร็จ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เปิดโอกาสให้ได้รับการ ศึกษาเล่าเรียน ตลอดจนให้การสนับสนุนในทุกๆเรื่องและให้กำลังใจข้าพเจ้าเสมอมา จนทำให้ผู้จัดทำ ปริญญาานิพนธ์สามารถทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

นางสาวฉันทพร ทองมณี

นางสาวสุวรรณา คุณากรกุล

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน ประเทศไทยผลิตและส่งออกสินค้าอิเล็กทรอนิกส์เป็นจำนวนมาก แต่เนื่องจากปัญหาเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัยในสุขภาพของมนุษย์ จึงมีข้อจำกัดเกี่ยวกับการใช้สารอันตรายหรือ Restriction on Hazardous Substances (RoHS) [1] ที่กำหนดโดยคณะกรรมการยุโรปหรืออีซี (EC-European Commission) ซึ่งเป็นหน่วยงานที่กำหนดนโยบายและการบริหารงานร่วมของประเทศในเครือสหภาพยุโรปหรืออียู (EU-European Union) ระบุให้มีการลดปริมาณการใช้สารตะกั่วในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์เพื่อป้องกันปัญหาสิ่งแวดล้อม ทำให้อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์จำเป็นต้องปรับตัวโดยใช้โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-Free Solder) ที่มีศักยภาพเทียบเท่าโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิม

ปริณูณานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาผลของ Ni, Ag และ In ต่อปฏิกริยารอยต่อระหว่างโลหะบัดกรี Sn-58Bi-Ni-X กับแผ่น โดยโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วพื้นฐานที่ใช้ คือ Sn58Bi แต่โลหะบัดกรีชนิดนี้มีสมบัติทางกลและความสามารถในการเปียกที่ต่ำ จึงทำการศึกษาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn58Bi-Ni-X เมื่อ X คือ Ag หรือ In เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ดีขึ้น โดยเติมธาตุ Ni ปริมาณ 0.05, 0.1, 0.5 และ 1.0 wt% เติมธาตุ Ag ปริมาณ 0.05 และ 0.1 wt% และเติมธาตุ In ปริมาณ 0.05 และ 0.1 wt% โดยศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและความหนาของชั้นสารประกอบที่เกิดขึ้นหลังการบัดกรีด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ร่วมกับ Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDX)

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อสร้างชุดแม่พิมพ์สำหรับผลิตชิ้นงานทดสอบ ตามมาตรฐานการทดสอบของ JES Z 3198-3 : 2003 (JWES)
2. เพื่อศึกษาผลกระทบของ Ni, Ag และ In ต่อปฏิกริยารอยต่อระหว่างโลหะบัดกรี Sn-58Bi-Ni-X กับแผ่นทองแดง
3. เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-Ni-X

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

1. ใช้ Sn-58Bi เป็นโลหะบัดกรีพื้นฐานโดยใช้ Ni ที่ความเข้มข้น 0-1 wt% และใช้ Ag, In ที่ความเข้มข้น 0.05 หรือ 0.1 wt% เป็นธาตุเจือ
2. ใช้แผ่นรองที่ทำจากทองแดงที่มีความบริสุทธิ์ 99.99%

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับองค์ความรู้เกี่ยวกับการพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิดใหม่
2. เป็นการเพิ่มทางเลือกให้กับอุตสาหกรรมโลหะบัดกรี

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

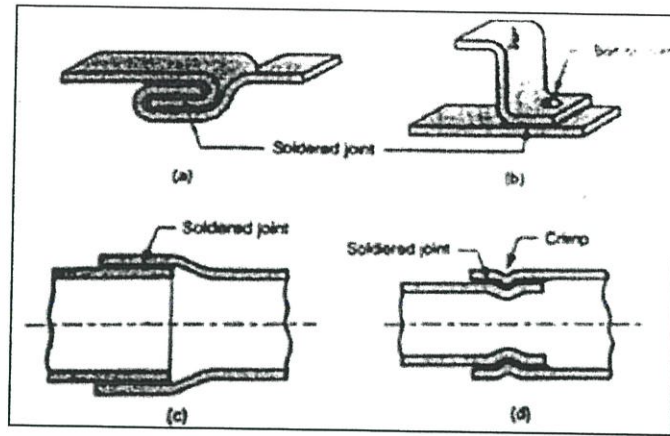
2.1 การบัดกรี (Soldering)

การบัดกรี หมายถึง กรรมวิธีในการยึดหรือต่อ (Joining) แผ่นโลหะสองชิ้นเข้าด้วยกัน โดยแผ่นโลหะที่นำมาต่อจะไม่หลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกันเหมือนการเชื่อม (Welding) แต่การบัดกรีจะนำเอาโลหะผสมที่เรียกว่า โลหะบัดกรี (Solder) ซึ่งมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าแผ่นโลหะที่นำมาบัดกรี โดยในระหว่างการบัดกรีนั้นโลหะบัดกรีที่หลอมละลายจะกระจายเข้าไปที่รอยต่อระหว่างแผ่นโลหะด้วยแรงดึงตามรูเล็กเป็นการประสานให้แผ่นโลหะทั้งสองชิ้นเกิดการยึดติดกัน

การบัดกรีโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. การบัดกรีแข็ง (Brazing) หรือ การแล่นประสาน คือ กรรมวิธีการต่อโลหะตั้งแต่สองชิ้นหรือมากกว่าเข้าด้วยกัน โดยโลหะนั้นจะเป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ โลหะเติมนี้เป็นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า 450 องศาเซลเซียส แต่ต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะที่นำมาทำการบัดกรีแข็ง และเติมลงไปที่ยูรอยต่อของชิ้นงาน โดยโลหะเติมนี้จะหลอมละลายและแทรกตัวซึมเข้าไปในช่องว่างระหว่างรอยต่อด้วยปฏิกิริยาคาปิลลารี (Capillary Action) ปกติตัวประสาน จะเป็นพวกโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก (Non-ferrous metal) ซึ่งจะให้รอยต่อที่มีความแข็งแรงเกือบเท่ารอยเชื่อม
2. การบัดกร้อ่อน (Soft Soldering) คือ กรรมวิธีการต่อโลหะตั้งแต่สองชิ้นหรือมากกว่าเข้าด้วยกัน โดยที่โลหะนั้นจะเป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ให้ความร้อนแก่รอยต่อที่อุณหภูมิต่ำกว่า 450 องศาเซลเซียสใช้โลหะเติมที่เป็นโลหะที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ เช่น ตะกั่วหรือดีบุกเติมลงไปที่ยูรอยต่อของชิ้นงาน โลหะเติมนี้จะหลอมละลายและแทรกตัวซึมเข้าไปในช่องว่างระหว่างรอยต่อด้วยปฏิกิริยาคาปิลลารี ซึ่งใช้สำหรับการบัดกรีโลหะแผ่นโดยทั่วไป

ในการบัดกรีแผ่นโลหะ นอกจากจะใช้รอยต่อแบบต่อชนและต่อเกยในลักษณะเดียวกับการแล่นประสานแล้ว การบัดกรียังใช้รอยต่อแบบอื่นๆอีกในการประสานชิ้นงานดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างของรอยต่อที่ใช้ทางกล

ข้อดีของการบัดกรี ได้แก่ ใช้พลังงานต่ำเมื่อเทียบกับการเชื่อมหลอมหรือการแล่นประสานและสามารถใช้แหล่งพลังงานความร้อนได้หลากหลาย ซึ่งรอยบัดกรีที่นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดีสามารถให้รอยต่อที่อากาศหรือของเหลวไม่สามารถผ่านไปได้ และรอยต่อจากการบัดกรีสามารถที่จะซ่อมแซมหรือเปลี่ยนแปลงได้ง่าย ส่วนข้อเสียของการบัดกรี ได้แก่ รอยต่อที่มีความแข็งแรงต่ำและมีความแข็งแรงน้อยลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

ในการบัดกรีนั้นต้องอาศัยตัวช่วยประสานหรือน้ำยาประสาน (Flux) เพื่อทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นโลหะชิ้นงานบริเวณที่จะทำการบัดกรีก่อนการบัดกรี และต้องอาศัยความร้อนที่ใช้หลอมละลายโลหะบัดกรี พร้อมทั้งให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน

การบัดกรีที่จะทำให้รอยต่อมีคุณภาพดีนั้น ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ 3 ประการ คือ

1. ธรรมชาติของผิวโลหะชิ้นงาน (Base Metal) ซึ่งครอบคลุมถึงชนิดของโลหะชิ้นงาน และสภาพผิวของผิวหน้าโลหะด้วย
2. ชนิดของโลหะบัดกรีที่ใช้ (Solder)
3. ชนิดของน้ำยาประสานหรือฟลักซ์ (Flux)

องค์ประกอบทั้ง 3 ประการนี้จะแปรเปลี่ยนไปด้วยอุณหภูมิที่ใช้ในการบัดกรี จึงอาจกล่าวได้ว่าองค์ประกอบทั้ง 3 นี้สัมพันธ์กันด้วยความร้อนที่ใช้ในการบัดกรี

2.1.1 โลหะพื้น (Base Metal)

โลหะพื้นที่ถูกบัดกรีส่วนใหญ่จะเป็นเหล็กและทองแดง ส่วนอลูมิเนียมก็นิยมเพราะมีน้ำหนักเบา แต่จะบัดกรียากกว่าเหล็ก ทองแดง และโลหะผสมของเหล็กกับทองแดง จากตารางที่ 2.1 จะแสดงถึงชนิดของโลหะต่อความยากง่ายในการบัดกรี แต่จะต้องคำนึงถึงฟลักซ์ที่เหมาะสมด้วยว่าเป็นชนิดอวองไวหรือไม่ซึ่งมีผลต่อการบัดกรี

ตารางที่ 2.1 ชนิดของโลหะและความยากง่ายในการบัดกรี

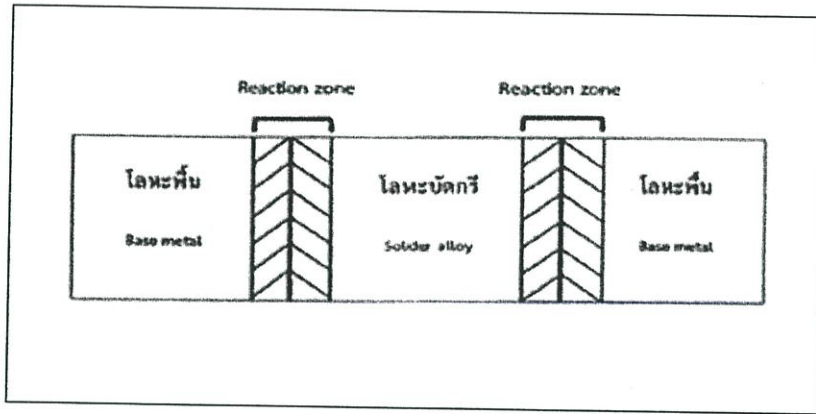
โลหะพื้นหรือโลหะชิ้นงาน	ความยากง่ายในการบัดกรี
เงินดีบุก แคดเมียม แพลลาเดียม โรเดียม ทองแดง บรอนซ์ ทองเหลือง ตะกั่ว นิกเกิลผสมเงิน	ดีเยี่ยม
เบอริลเลียมผสมทองแดง	ดี
เหล็กสังกะสี นิกเกิล	พอใช้
อลูมิเนียมอลูมิเนียมผสมบรอนซ์ เหล็กผสมโครเมียม	ยาก
เหล็กหล่อโครเมียม ไททานเนียม แทนทาลัม แมกนีเซียม	เคลือบโลหะบัดกรีก่อน

โลหะที่เป็นดีบุก แคดเมียม และ ทองแดง จะง่ายต่อการเชื่อมประสานของโลหะบัดกรี โดยไม่ต้องทำความสะอาดก่อน และใช้ฟลักซ์ที่ไม่ว่องไวได้ ถ้าเป็นเงินจะเกิดฟิล์มของซัลไฟด์บนผิว ซึ่งเป็นตัวลดประสิทธิภาพการบัดกรีทันที ตะกั่วจะเกิดออกไซด์ที่ผิวเมื่ออยู่ในสภาพชื้น และอาจต้องทำความสะอาดก่อนการบัดกรี ทองแดง ทองเหลือง บรอนซ์ และ เหล็ก จะเกิดออกไซด์บางบริเวณ ซึ่งต้องทำความสะอาดหรือล้างด้วยกรดอ่อน ความจำเป็นในการทำความสะอาดจะขึ้นอยู่กับขอบเขตของผิวโลหะที่เกิดออกซิเดชัน และความไวของฟลักซ์ [2]

2.1.2 โลหะบัดกรี (Solder)

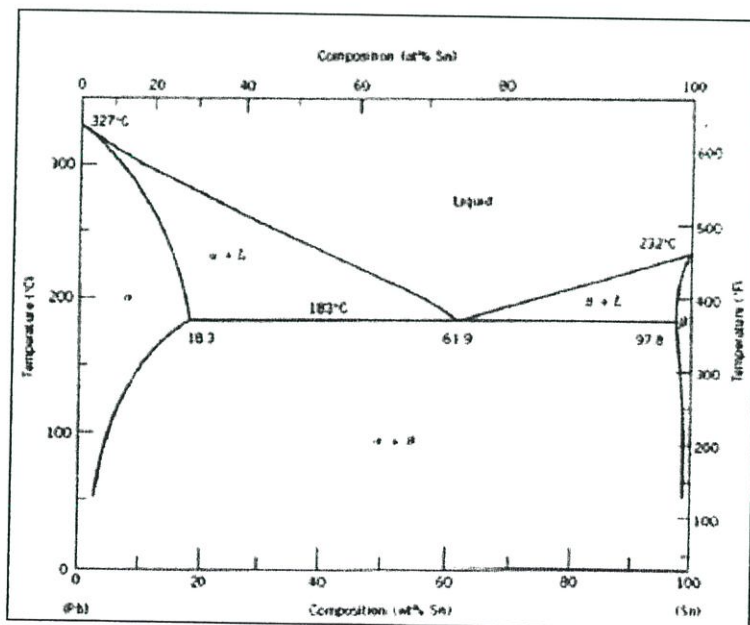
โลหะบัดกรี คือ โลหะผสมที่มีจุดหลอมละลายต่ำใช้เป็นตัวเชื่อมประสานชิ้นงานโลหะเข้าด้วยกัน โดยทั่วไปอุณหภูมิในการหลอมละลายของตัวเชื่อมประสานควรต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมละลายของชิ้นงานเสมอ และโลหะบัดกรีนี้นี้จะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานเท่านั้นแต่ไม่ทำปฏิกิริยากับโลหะที่ถูกเชื่อม โดยโลหะบัดกรีที่ใช้กันแพร่หลายทั่วไป คือ โลหะผสมของตะกั่วและดีบุก (Sn-Pb) ซึ่งมีข้อดี คือ ราคาถูก มีสมบัติการบัดกรีที่ดี อุณหภูมิหลอมละลายต่ำ มีการกระจายตัวบนผิวโลหะต่างๆได้ดี และให้รอยต่อที่มีความแข็งแรง แต่ยังคงมีความเป็นพิษเนื่องจากมีปริมาณตะกั่วผสมอยู่ในปริมาณสูง [3]

ซึ่งในระหว่างการบัดกรีนั้นจะก่อให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างโลหะบัดกรีกับแผ่นโลหะชิ้นงาน (Base Metal) เกิดเป็นการเกาะติดทางกลระหว่างโลหะบัดกรีกับความหยาบบนผิวหน้าที่ไม่สม่ำเสมอของแผ่นโลหะชิ้นงานพร้อมทั้งเกิดพันธะโลหะระหว่างโลหะบัดกรีกับแผ่นโลหะชิ้นงาน โดยปกติแล้วพันธะโลหะที่เกิดขึ้นนั้นจะมีความแข็งแรงมากกว่าการเกาะติดทางกล นอกจากนี้ในส่วนที่เกิดปฏิกิริยาจะพบการเกิดสารประกอบเชิงโลหะหรือสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิก (Intermetallic Compounds) ระหว่างโลหะบัดกรีกับแผ่นโลหะชิ้นงานด้วย ลักษณะการเกิดการประสานกันระหว่างชิ้นงานโลหะโดยใช้การบัดกรีแสดงไว้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การเกิดการประสานกันระหว่างชิ้นงานโลหะโดยใช้การบัดกรี

เนื่องจากโลหะบัดกรีทำมาจากโลหะผสม (Alloys) ของดีบุกและตะกั่ว (Sn-Pb) มีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ แต่อาจไม่เหมาะกับการใช้งานบางประเภท จึงทำให้มีการนำเอาโลหะชนิดอื่นเข้ามาผสมในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน เช่น แอนติโมนี (Antimony) เงิน (Silver) แคดเมียม (Cadmium) อินเดียม (Indium) และ บิสมัท (Bismuth) เพื่อช่วยในการควบคุมคุณสมบัติทางฟิสิกส์ และทางกลของตะกั่วโลหะบัดกรี เช่น ช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลว ความแข็งและความต้านทานการกัดกร่อน ซึ่งส่วนผสมจะถูกออกแบบให้เหมาะกับการใช้งานโดยโลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมระหว่างดีบุกและตะกั่วในอัตราส่วนต่างกันจะมีผลให้อุณหภูมิวิกฤต (Liquidus Temperature) มีความแตกต่างกันดังแสดงในเฟสไดอะแกรมดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมที่ประกอบด้วยตะกั่วและดีบุก

ดีบุกจะเริ่มหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 283 องศาเซลเซียส และกลายเป็นของเหลวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 327 องศาเซลเซียส ส่วนตะกั่วนั้นจะเริ่มหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 183 องศาเซลเซียส และกลายเป็นของเหลวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 232 องศาเซลเซียส หากใช้ดีบุกหรือตะกั่วเพียงอย่างเดียวอย่างใดอย่างหนึ่งในการบัดกรีจะไม่เหมาะสมเนื่องจากจุดหลอมเหลวสูงเกินไป แต่เมื่อนำดีบุกและตะกั่วมาผสมกันในอัตราส่วนที่พอเหมาะ จะทำให้ได้ตะกั่วบัดกรีที่มีจุดหลอมเหลวและช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลวที่ลดต่ำลง ถ้าใช้อัตราส่วนระหว่างดีบุก 61.9 % และ ตะกั่ว 38.1% โดยน้ำหนัก จะทำให้ส่วนผสมนี้ไม่มีบริเวณที่เป็นสถานะของผสม โดยจะเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นของเหลวทันทีที่อุณหภูมิ 183 องศาเซลเซียส ดังในเฟสไดอะแกรม แต่ส่วนผสมนี้ไม่นิยมในการใช้งานเนื่องจากทำให้เกิดความเปราะของรอยต่อบัดกรีภายใต้สภาวะการใช้งาน

อัตราส่วนที่นิยมใช้กันมากที่สุดของตะกั่วบัดกรีที่ใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์คือ ดีบุก 60 % และ ตะกั่ว 40 % โดยน้ำหนัก ซึ่งเรียกว่าตะกั่วแบบ 60/40 และถูกจัดว่าเป็นตะกั่วแบบอ่อน โดยจะหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 188 องศาเซลเซียส และมีช่วงการหลอมเหลวประมาณ 5 องศาเซลเซียส ซึ่งจะทำให้ความแข็งแรงดีที่สุด และมีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าต่ำที่สุดด้วย สำหรับรอยต่อที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูงหรือต้องการความแข็งแรงทางกลมากๆ จำเป็นต้องใช้ตะกั่วบัดกรีแบบแข็ง ซึ่งจะประกอบด้วยอัตราส่วนผสมของดีบุกและตะกั่ว 30/70 และมีช่วงหลอมเหลวประมาณ 255-275 องศาเซลเซียส [4]

2.1.3 น้ำยาประสานหรือฟลักซ์ (Fluxes)

ในการบัดกรีจะประสบความสำเร็จหรือไม่ขึ้นขึ้นอยู่กับความสามารถในการกระจายตัว (Spreading) ของโลหะบัดกรี และภาวะเปียก (Wetting) บนพื้นผิวโลหะพื้น อุปสรรคใหญ่ของการบัดกรีคือ ชั้นฟิล์มและคราบสกปรกต่างๆที่ปกคลุมอยู่บนพื้นผิวโลหะพื้น ซึ่งจะขัดขวางไม่ให้โลหะบัดกรีนั้นเกิดการกระจายตัวและเกิดภาวะเปียกในบริเวณที่จะทำการบัดกรี

ดังนั้นก่อนการบัดกรีทุกครั้งต้องทำความสะอาดพื้นผิวโลหะด้วยสารเคมี ที่เรียกว่า น้ำยาประสานหรือฟลักซ์ (Fluxes) ซึ่งฟลักซ์มีหน้าที่ทำความสะอาดพื้นผิวโลหะพื้นบริเวณที่จะทำการบัดกรี โดยฟลักซ์จะทำปฏิกิริยาและกำจัดชั้นฟิล์มออกไซด์ (Oxide) กับคราบสกปรกต่างๆให้หมดไปเหลือแต่ผิวหน้าโลหะพื้นที่แท้จริง และฟลักซ์มีหน้าที่ลดความตึงผิวของโลหะบัดกรีทำให้โลหะบัดกรีมีการไหลที่ดี กระจายตัวบนพื้นผิวโลหะพื้นได้ดี และช่วยเพิ่มภาวะเปียก อีกทั้งฟลักซ์ยังช่วยป้องกันพื้นผิวโลหะพื้นสัมผัสออกซิเจนจากอากาศ (Oxidation) เข้ามาปะปนบนพื้นผิวโลหะพื้นที่กำลังทำการบัดกรีเพราะปกติที่ผิวหน้าพื้นผิวโลหะพื้นจะมีชั้นฟิล์มออกไซด์อยู่แล้ว แต่จะมีเพิ่มมากขึ้นเมื่อพื้นผิวโลหะพื้นได้รับความร้อน ส่วนตกค้างของฟลักซ์หลังจากการบัดกรีต้องไม่กัดกร่อนรอยต่อหรือชิ้นงานโลหะ รวมทั้งไม่นำไฟฟ้าและสามารถกำจัดออกไปได้โดยใช้สารละลายหรือตัวทำละลายเคมี

ฟลักซ์ที่ใช้ในกระบวนการบัดกรีมีหลายรูปแบบ ได้แก่ ของแข็ง (Solid) กึ่งของแข็งของเหลว (Paste) และ แบบของเหลว (Liquid) ซึ่งฟลักซ์ที่ดีจะต้องหลอมละลายที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิ

หลอมเหลวของโลหะบัดกรี และฟลักซ์ที่หลอมละลายแล้วต้องแผ่กระจายตัวบนผิวหน้าโลหะพื้นบริเวณที่จะทำการบัดกรีและทำความสะอาดผิวหน้าโลหะพื้นก่อนที่โลหะบัดกรีจะหลอมละลายและแผ่เข้ามาแทนที่ฟลักซ์

น้ำยาประสานหรือฟลักซ์ แบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามฤทธิ์การกัดกร่อน ได้แก่

1. น้ำยาประสานประเภทที่มีฤทธิ์การกัดกร่อน (Corrosive Fluxes) หรือ ฟลักซ์อนินทรีย์ (Inorganic Fluxes) เช่น สังกะสีคลอไรด์ (Zinc Chloride) กรดเกลือ (Muriatic Acid) และ เกลืออนินทรีย์ชนิดต่างๆ โดยปกติจะใช้ฟลักซ์จำพวกนี้เมื่อมีปัญหาจากการเกิดออกซิเดชันระหว่างโลหะบัดกรีกับอากาศ เนื่องจากฟลักซ์กลุ่มนี้สามารถปกป้องรอยเชื่อมได้ค่อนข้างดี

กรดเกลือหรือ Muriatic Acid เป็นกรดที่เข้มข้นและมีอันตรายมาก มีสีเหลือง ใช้เป็นน้ำยาประสานเมื่อถึงเวลาบัดกรีเหล็กอบสังกะสีจะเดือดและมีควัน แผ่นเหล็กอบสังกะสีจะมีรอยดำ กรดเกลือใช้ในการผลิตสังกะสีโครไรด์สำหรับทำความสะอาดก่อนการบัดกรี โดยเฉพาะเหล็กอบสังกะสี (Galvanized Steel) ในงานแผ่นโลหะทั่วไป กรดเกลือจะถูกเรียกว่า “Raw Acid”

สังกะสีคลอไรด์ (Galvanized Chloride) หรือ Cut Acid เป็นน้ำยาประสานที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น กัดกร่อนโลหะ และอันตรายมากเท่ากับกรดเกลือ ใช้เป็นน้ำยาประสานในการบัดกรีเหล็กอบสังกะสี (Galvanized Steel) สังกะสี (Zinc) ทองเหลือง (Brass) ทองแดง (Copper) และ ตะกั่ว (Lead)

การทำสังกะสีคลอไรด์ทำได้โดยการตัดแผ่นเหล็กสังกะสีเป็นชิ้นเล็กๆใส่ลงไปในถ้วยที่บรรจุกรดเกลือ กรดเกลือจะละลายสังกะสี ไล่ก๊าซไฮโดรเจนระเหยขึ้นมา และน้ำกรดที่เหลือก็จะเป็สังกะสีคลอไรด์ ดังสมการที่ 2.1



ตารางที่ 2.2 โลหะที่ทำการบัดกรีและน้ำยาประสานที่ใช้

ชนิดของโลหะ	น้ำยาประสาน	ชื่อทางเคมีของน้ำยาประสาน
แผ่นสังกะสี (Zinc)	สังกะสีคลอไรด์ (Cut acid)	Zinc chloride
แผ่นเหล็กอบสังกะสี (Galvanized steel)	กรดเกลือ (Muriatic acid)	Hydrochloric 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. น้ำยาประสานประเภทที่ไม่มีฤทธิ์การกัดกร่อน (Noncorrosive Fluxes) หรือ ฟลักซ์อินทรีย์ (Organic Fluxes) เช่น ไชส์ตว์ (Tallow) ยางสน (Rosin) ยางไม้ (Natural Rosin) แอลกอฮอล์ กรดอินทรีย์ และ

เกลือของฮาโลเจน 7 (Halogen) โดยทั่วไปแล้วฟลักซ์ในกลุ่มนี้ใช้กับการบัดกรีอุปกรณ์ไฟฟ้าหรืออิเล็กทรอนิกส์

ยางสน เป็นน้ำยาประสานชนิดไม่มีฤทธิ์การกัดกร่อน เป็นผลิตภัณฑ์ธรรมชาติที่ได้จากการกลั่นน้ำมันสน ประกอบด้วยสารประกอบอินทรีย์ที่เรียกว่า Abietic Acid มีฤทธิ์เป็นกรดอ่อนๆ ที่ไม่ทำให้เกิดการกัดกร่อน เมื่อได้รับความร้อนและเริ่มอ่อนตัวที่อุณหภูมิ 50-70 องศาเซลเซียส และหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส โดยยางสนสามารถทำความสะอาดออกไซด์ที่บริเวณของพื้นผิวโลหะพื้นได้ เช่น ทองแดง ใช้ในการบัดกรีงานที่เล็กๆ โดยเฉพาะงานในอุปกรณ์ไฟฟ้า วิทยุ และยางสนอาจจะผลิตออกมาทั้งในรูปของก้อน ผง และ ผสมเบนซินเป็นยางเหนียว (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 จะประกอบด้วยยางสนเป็นส่วนผสมหลัก โดยความแตกต่างระหว่างน้ำยาประสานประเภท R, RMA และ RA คือ ระดับของ Chemical Activity ที่เพิ่มขึ้นจาก R ไปยัง RA และในน้ำยาประสานสมัยใหม่ส่วนใหญ่ยางสน คือ สิ่งที่ได้จากการสังเคราะห์ทางเคมี โดยจะไม่มีผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติ

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

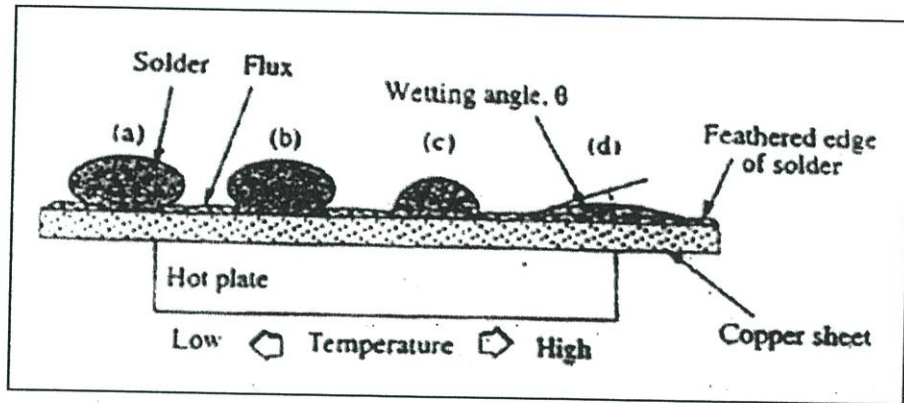
น้ำยาประสานประเภท IA คือ กรดอนินทรีย์ (Inorganic Acid) ส่วนใหญ่จะเป็นกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid) และ มีระดับ Chemical Activity มากที่สุดในน้ำยาประสานทุกประเภท

น้ำยาประสานประเภท SA เป็นการสังเคราะห์จากสูตรทางเคมีของสารละลายของสารคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (Chlorofluorocarbon) อีกทั้งความกังวลของการเพิ่มขึ้นของมลภาวะทางอากาศ โดยเฉพาะสาร CFCs น้ำยาประสานประเภท SA ก็จะถูกแทนที่ด้วยน้ำยาประสานประเภทใหม่ที่เรียกว่า Water Soluble (WS)

น้ำยาประสานประเภท WS จะประกอบด้วยฮาไลด์ ซึ่งใช้กันมาหลายสิบปีแล้ว โดยเป็นน้ำยาประสานที่นิยมใช้ในการค้าเชิงพาณิชย์ และมีการพัฒนาให้ใช้ได้ในทุกๆระดับของ Chemical Activity และถ้าใช้น้ำยาประสานประเภทนี้ในกระบวนการบัดกรี หลังบัดกรีเสร็จจะต้องมีการล้างทำความสะอาดเอาน้ำยา

ประสานที่ตักค้ำบนบริเวณที่ทำการบัดกรีออก เพราะน้ำยาประสานที่ตักค้ำอาจทำให้เกิดการกัดกร่อนได้อีกทั้งยากต่อการนำไปใช้ในกระบวนการบัดกรีแบบรีโฟลว์ด้วย

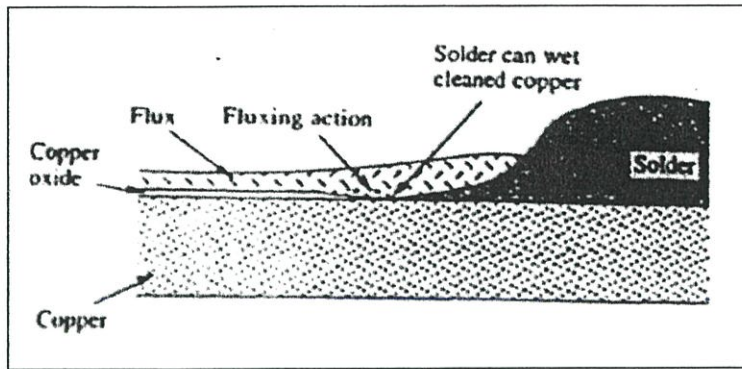
2.2.3.1 การทำงานของฟลักซ์



รูปที่ 2.4 การแผ่กระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะพื้นของแผ่นทองแดงที่ให้อุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ

จากรูปที่ 2.4 ได้แสดงแผ่นทองแดงที่มีฟลักซ์เคลือบอยู่บนพื้นผิว และวางอยู่บนแผ่นความร้อน (Hot Plate) ที่กำลังเพิ่มอุณหภูมิของแผ่นทองแดงให้สูงขึ้นเหนืออุณหภูมิหลอมละลายของแผ่นโลหะบัดกรี ในตอนแรกโลหะบัดกรีจะมีลักษณะเป็นทรงกลมวางอยู่บนแผ่นทองแดง หลังจากนั้นแผ่นความร้อนจะให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจนแผ่นทองแดงมีอุณหภูมิสูงถึงอุณหภูมิหลอมละลายของโลหะบัดกรี จะเห็นได้ว่าโลหะบัดกรีทรงกลมเริ่มหลอมละลาย เริ่มไหล และเกิดภาวะเปียกบนแผ่นทองแดง

จากรูปที่ 2.5 บริเวณที่โลหะบัดกรีกำลังหลอมละลายและไหลบนผิวหน้าแผ่นทองแดงจะเห็นชั้นออกไซด์ของทองแดง ฟลักซ์ โลหะบัดกรี และ ออกไซด์ของโลหะบัดกรี โดยเกิดกระบวนการที่สำคัญ 2 อย่าง คือ บนแผ่นทองแดงที่ร้อนโลหะบัดกรีเริ่มหลอมละลาย และฟลักซ์เริ่มทำปฏิกิริยา คือ เริ่มกำจัดออกไซด์บนพื้นผิวหน้าของทองแดง พื้นผิวโลหะบัดกรี และป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อาจเกิดขึ้นอีก อีกทั้งชนิดฟลักซ์ที่ใช้โดยทั่วไปขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นของออกไซด์ของพื้นผิวที่จะบัดกรี ถ้าชั้นออกไซด์บางจะใช้ฟลักซ์ที่รุนแรงน้อย (Low Activity) [5]

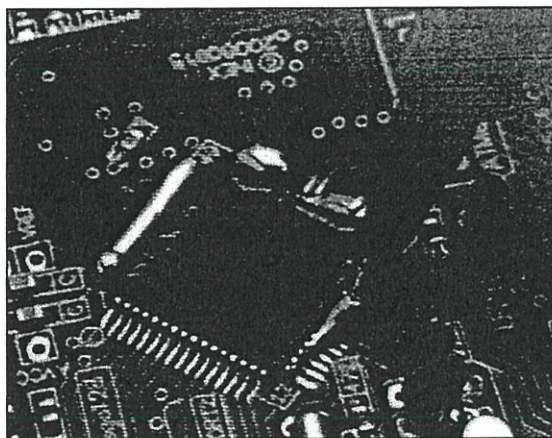


รูปที่ 2.5 การทำงานของฟลักซ์

2.1.4 วิธีการบัดกรี

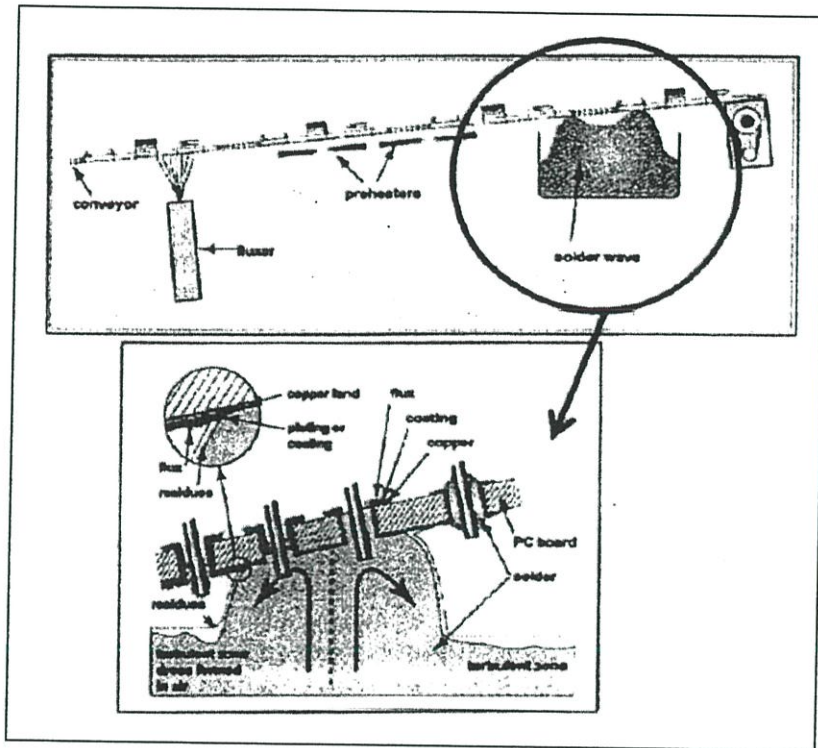
การบัดกรีเป็นที่นิยมอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมการผลิตวงจรไฟฟ้า และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงอุตสาหกรรมเครื่องประดับด้วย การบัดกรีส่วนใหญ่จะมีวิธีการคล้ายกับวิธีการเล่นประสานหรือการบัดกรีแข็ง (Brazing) เช่น การบัดกรีในเตา (Furnace Soldering : FS) การบัดกรีด้วยความต้านทาน (Resistance Soldering : RS) การบัดกรีด้วยอินฟราเรด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

1. การบัดกรีแบบใช้มือ (Hand Soldering) เป็นการบัดกรีด้วยตนเองโดยใช้หัวแร้งและลวดบัดกรี ส่วนใหญ่การบัดกรีแบบนี้จะบัดกรีชิ้นงานที่เป็นข้อต่อขนาดเล็กหรือเป็นแผ่นวงจรพิมพ์ที่ไม่ซับซ้อนมากนัก



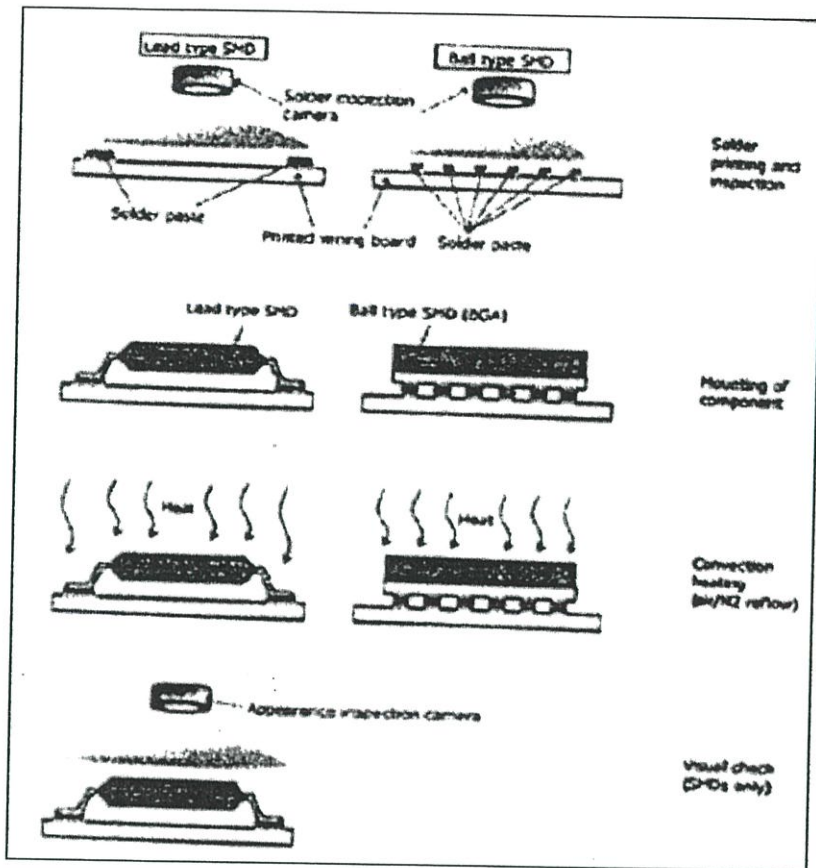
รูปที่ 2.6 การบัดกรีแบบใช้มือ

2. การบัดกรีแบบคลื่น (Wave Soldering) เป็นการบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ หรือ แผ่น PCB (Printed Circuit Board) โดยแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ติดอยู่จะเคลื่อนที่ด้วยสายพานลำเลียงไปยังสถานีฟลักซ์ก่อน เพื่อทำการพ่นฟลักซ์บนแผ่นวงจรพิมพ์ หลังจากนั้นแผ่นวงจรพิมพ์จะเคลื่อนที่ไปบนอ่างของโลหะบัดกรีหลอมเหลว ซึ่งอ่างบัดกรีจะมีบีบจุ่มเพื่อสร้างคลื่นของโลหะบัดกรีหลอมเหลว โลหะบัดกรีหลอมเหลวดังกล่าวจะถูกดูด และพ่นไปยังด้านล่างของแผ่นวงจรพิมพ์เพื่อให้โลหะบัดกรีเชื่อมต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ากับวงจรดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การบัดกรีแบบคลื่น

3. การบัดกรีแบบรีโฟลว์ (Reflow Soldering) เป็นการบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดติดตั้งบนพื้นผิว (Surface Mount Components) กับแผ่นวงจรพิมพ์ ในกระบวนการนี้จะใช้โลหะบัดกรีที่อยู่ในรูปของครีม (Paste) โดยโลหะบัดกรีจะผสมอยู่กับฟลักซ์ และตัวยึด (Binder) ซึ่งจะถูกสกรีนลงบนตำแหน่งที่ต้องการบัดกรีบนแผ่นวงจรพิมพ์แล้ววางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ลงบนโลหะบัดกรี หลังจากนั้นแผ่นวงจรพิมพ์จะถูกให้ความร้อนจนกระทั่งโลหะบัดกรีหลอมละลาย และเชื่อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ากับวงจร เมื่ออุณหภูมิลดลงโลหะบัดกรีก็จะกลายเป็นของแข็งที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การบัดกรีแบบรีโฟลว์

2.2 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-Free Solder)

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์มีการใช้โลหะบัดกรีเป็นโลหะเติม (Filler Metal) ในการเชื่อมต่อชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆเข้ากับแผงวงจร (Printed Circuit Board) ด้วยวิธีการบัดกรี ซึ่งโลหะบัดกรีดั้งเดิมที่มีการใช้อยู่ทั่วไปจะมีส่วนผสมของตะกั่วและดีบุก (Sn-Pb) ซึ่งตะกั่วที่นั่นถือเป็นสารอันตรายที่ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมและร่างกายมนุษย์ จึงทำให้คณะกรรมการยุโรปหรืออีซี (EC- European Commission) ซึ่งเป็นหน่วยงานที่กำหนดนโยบาย และการบริหารงานร่วมของประเทศในเครือสหภาพยุโรปหรืออียู (EU- European Union) ได้ออกข้อบังคับใช้ตั้งแต่วันที่ 1 กรกฎาคม ค.ศ. 2006 กำหนดให้สารตะกั่วเป็นสารต้องห้ามตามระเบียบ RoHs (Restriction on Hazardous Substances) และ WEEE (Waste from Electrical and Electronic Equipment) จึงทำให้อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า และอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์มีความจำเป็นที่ต้องทำการปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิต และมีการพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-Free solder) ขึ้นมาทดแทนโลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมของตะกั่วและดีบุก โดยโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่พัฒนาขึ้นมาต้องมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าหรือหรือเทียบเท่ากับโลหะบัดกรีแบบเดิม ตัวอย่างของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว เช่น กลุ่มโลหะผสมของดีบุกและทองแดง กลุ่มโลหะผสมของดีบุก ทองแดง เงิน และ กลุ่มโลหะผสมของดีบุก และ สังกะสี

เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากดีบุกเป็นโลหะที่สามารถหาได้ง่าย มีคุณสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสม เช่น จุดหลอมเหลวต่ำ นำความร้อนและนำไฟฟ้าได้ดี และโลหะผสมของดีบุกยังมีคุณสมบัติในการเป็นโลหะประสานได้ดี ซึ่งการวิจัยและการพัฒนาโลหะบัดกรีชนิดใหม่นี้ยังต้องการการศึกษาในเรื่องของคุณสมบัติต่างๆของโลหะบัดกรีเหล่านี้ก็เป็นอันมากจึงจะนำไปใช้งานได้อย่างเหมาะสมและปลอดภัย

ในปัจจุบันโลหะบัดกรีที่สามารถนำมาใช้แทนตะกั่วบัดกรีได้หลายชนิด ได้แก่ สารประกอบระหว่างโลหะ 2 ชนิด เช่น Sn-Ag, Sn-Cu, Sn-Zn, Sn-Bi, และ Sn-In หรือเป็นสารประกอบระหว่างโลหะ 3 ชนิด เช่น Sn-Ag-Cu, Sn-Ag-Bi และ Sn-Zn-Bi ซึ่งโลหะบัดกรีแต่ละชนิดมีลักษณะเด่นแตกต่างกันไป เช่น Sn-Zn มีจุดหลอมเหลวที่ต่ำใกล้เคียงกับ Sn-Pb รวมถึงมีราคาค่อนข้างถูก และมีข้อเสีย คือ เกิดออกซิเดชันได้ง่าย โลหะบัดกรีที่นิยมกันใช้ค่อนข้างมากในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์คือโลหะบัดกรีในกลุ่ม Sn-Ag-Cu ซึ่งเป็นโลหะบัดกรีที่มีราคาค่อนข้างสูงเนื่องจากมี Ag เป็นส่วนผสม แต่มีข้อดีทางด้านคุณสมบัติทางกล รวมถึงความสามารถในการบัดกรีที่โดดเด่นกว่าโลหะบัดกรีชนิดอื่น จึงได้มีการใช้งานและปรับปรุงส่วนผสมของ Sn-Ag-Cu เพื่อให้ได้ส่วนผสมที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานมากที่สุด เช่น Sn-3.8Ag-0.7Cu, Sn-3.9Ag-0.6Cu หรือ Sn-4Ag-0.5Cu หรืออาจมีการเติมธาตุบางชนิดเพิ่มเข้าไปเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านจุดหลอมเหลวรวมทั้งคุณสมบัติทางกล ธาตุที่นิยมเติมเข้าไปเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะบัดกรีมีหลายธาตุด้วยกัน เช่น Bi, Sb, Ge, In, Ni, Co และ Mg ซึ่งแต่ละธาตุเมื่อเติมเข้าไปจะทำให้โลหะบัดกรีมีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไป อย่างไรก็ตามปัญหาที่สำคัญอีกประการหนึ่งของโลหะบัดกรีในกลุ่ม Sn-Ag-Cu คือจุดหลอมเหลวที่สูง ซึ่งสูงกว่าโลหะบัดกรีชนิด ยูเทกติก Sn-Pb ที่มีจุดหลอมเหลวเพียง 183 องศาเซลเซียส ดังนั้นเมื่อนำไปใช้งานสามารถก่อให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์รวมถึงแผ่นวงจรพิมพ์ได้ [6]

2.2.1 คุณสมบัติเบื้องต้นในการพิจารณาเลือกใช้โลหะบัดกรีแบบไร้สารตะกั่ว

1. อุณหภูมิหลอมเหลวใกล้เคียงกับโลหะบัดกรีดั้งเดิม โดยทั่วไปอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะบัดกรีแบบไร้สารตะกั่วจะสูงกว่าตะกั่วบัดกรีชนิด 63Sn/37Pb การที่โลหะบัดกรีมีอุณหภูมิหลอมเหลวสูง เวลาทำการบัดกรีอาจทำให้ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์เสียหายได้หรืออาจทำให้แผ่นวงจรพิมพ์เกิดการเปลี่ยนสีหรือบิดงอเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงเกินไป
2. มีสมบัติด้าน Wettability และ Solderability ที่ดี
3. มีคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ความแข็งแรง ความแข็ง ความทนทานและความสวยงามของรอยบัดกรี ต้องไม่ด้อยไปกว่าตะกั่วบัดกรีชนิด 63Sn/37Pb
4. โลหะบัดกรีต้องสามารถถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และสามารถนำไฟฟ้าได้ดี โดยไม่ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของวงจรรีอิเล็กทรอนิกส์ลดลง
5. มีสมบัติต้านทานการล้าที่ดี
6. มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันต่ำ

7. สามารถใช้กับระบบฟลักซ์เหลวที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบัน
8. ต้องไม่เป็นพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมตามข้อบังคับของ RoHS และ WEEE
9. ต้องมีราคาถูก หาได้ง่ายเพราะราคาของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว โดยทั่วไปจะสูงกว่าโลหะบัดกรี 63Sn/37Pb ส่งผลให้ต้นทุนสูงขึ้น แต่ราคาของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันมีแนวโน้มที่จะต่ำลงเรื่อยๆ
10. ต้องใช้ได้กับเครื่องหลอมโลหะบัดกรีที่มีอยู่โดยไม่ต้องดัดแปลงมากหรือต้องซื้อระบบใหม่ ผู้ผลิตอาจยอมรับการดัดแปลงเล็กน้อย เช่น เพิ่มระบบจ่ายแก๊สไนโตรเจน (N₂) ในเครื่องบัดกรีแบบคลื่น หรือเครื่องบัดกรีแบบรีโฟลว์ เพื่อปรับปรุงคุณภาพของรอยบัดกรี เนื่องจากต้นทุนของการติดตั้งระบบจ่ายแก๊สไนโตรเจนโดยทั่วไปจะไม่สูงนัก
11. โลหะบัดกรีควรมีจุดหลอมเหลวคงที่ เนื่องจากการผลิตสินค้าปริมาณมากๆ (Mass Volume) ต้องมีการควบคุมการผันแปรต่างๆ ในกระบวนการผลิตเพื่อไม่ให้ปริมาณของเสียในการผลิตมากเกินไป ในการผลิตโลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมของโลหะหลายๆชนิดจะควบคุมส่วนผสมให้คงที่ได้ยาก จึงทำให้โลหะบัดกรีเหล่านี้มีจุดหลอมเหลวที่มีลักษณะเป็นช่วงอุณหภูมิไม่คงที่ ดังนั้นการเลือกใช้โลหะบัดกรีประเภทนี้อาจทำให้ประสบปัญหาในกระบวนการผลิตได้
12. ผู้ผลิตแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดติดตั้งบนพื้นผิว (Surface Mounted Devices : SMD) หลายรายยังไม่สามารถเลิกใช้สารตะกั่วในเวลาอันสั้น ทำให้ข้อของอุปกรณ์ SMD หรือลายวงจรบนแผ่นวงจรพิมพ์บางชนิดก็ยังมีสารตะกั่วเป็นสารประกอบที่สำคัญ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงความสามารถในการเชื่อมประสานกันระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วกับสารตะกั่วที่อยู่บนขั้วของอุปกรณ์ SMD และแผ่นวงจรพิมพ์ด้วยซึ่งถ้าไม่สามารถเชื่อมประสานกันได้ดีก็อาจทำให้จุดบัดกรีนั้นไม่แข็งแรงเพียงพอต่อการนำไปใช้งานหรือมีผลต่อการใช้ผลิตภัณฑ์ในระยะยาว (Reliability)

2.2.2 โลหะทดแทนสารตะกั่ว

การพิจารณาโลหะที่นำมาทดแทนสารตะกั่ว และนำมาผสมกับดีบุกมีหลายชนิดด้วยกัน เช่น เงิน อินเดียม สังกะสี พลวง ทองแดง และ บิสมัท สาเหตุที่โลหะดังกล่าวถูกนำมาพิจารณา เนื่องจากเมื่อนำโลหะเหล่านี้มาผสมกับดีบุกแล้ว จุดหลอมเหลวที่ได้ของโลหะบัดกรีมีแนวโน้มลดลง และมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกายภาพที่ดีพอเป็นที่ยอมรับได้

โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีการพัฒนา เพื่อทดแทนโลหะบัดกรีชนิดผสมตะกั่ว สามารถจัดแบ่งกลุ่มตามช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวออกเป็น 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

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

ตารางที่ 2.5 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 200 ถึง 230 องศาเซลเซียส

ระบบโลหะผสม	องค์ประกอบ (wt%)	ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)
Sn-Ag	Sn-3.5Ag	221
Sn-Ag	Sn-2Ag	221-226
Sn-Cu	Sn-0.7Cu	227
Sn-Ag-Bi	Sn-3.5Ag-3Bi	206-213
Sn-Ag-Bi	Sn-2Ag-7.5Bi	207-212
Sn-Ag-Cu	Sn-3.8Ag-0.7Cu	217
Sn-Ag-Cu-Sb	Sn-2Ag-0.8Cu-0.5Sb	216-222

4. กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวมากกว่า 230 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 2.6 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวมากกว่า 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 องค์ประกอบของโลหะบัดกรีชนิดต่างๆที่สามารถนำมาใช้ทดแทนตะกั่วบัดกรี

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-5Sb	232-240	0.263
96.2Sn-2.5Ag-0.8Cu-0.5Sb	213-219	0.267

โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วได้มีการพัฒนาขึ้นเป็นจำนวนมาก บางชนิดถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆบ้างแล้ว และมีอีกจำนวนมากที่มีเพียงการศึกษาวิจัยเท่านั้น แต่ยังไม่มีการนำไปประยุกต์ใช้

2.2.3 แนวทางในการเลือกธาตุที่เป็นส่วนผสมที่เหมาะสมกับขบวนการผลิต

2.2.3.1 ธาตุเจือที่ใช้ผสมกับดีบุกเพื่อผลิตเป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

โลหะบัดกรีทั่วไปจะมีส่วนผสมของโลหะดีบุกเป็นหลัก เนื่องจากดีบุกมีสมบัติ Wettability และการแผ่กระจายเวลาบัดกรีได้ดี ส่วนธาตุเจือที่นำมาผสมกับดีบุกทำเป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วมีหลายชนิดด้วยกัน ธาตุโลหะเจือที่สำคัญ ได้แก่ เงิน (Ag) อินเดียม (In) บิสมัท (Bi) พลวง (Sb) ทองแดง (Cu) และสังกะสี (Zn) เป็นต้น

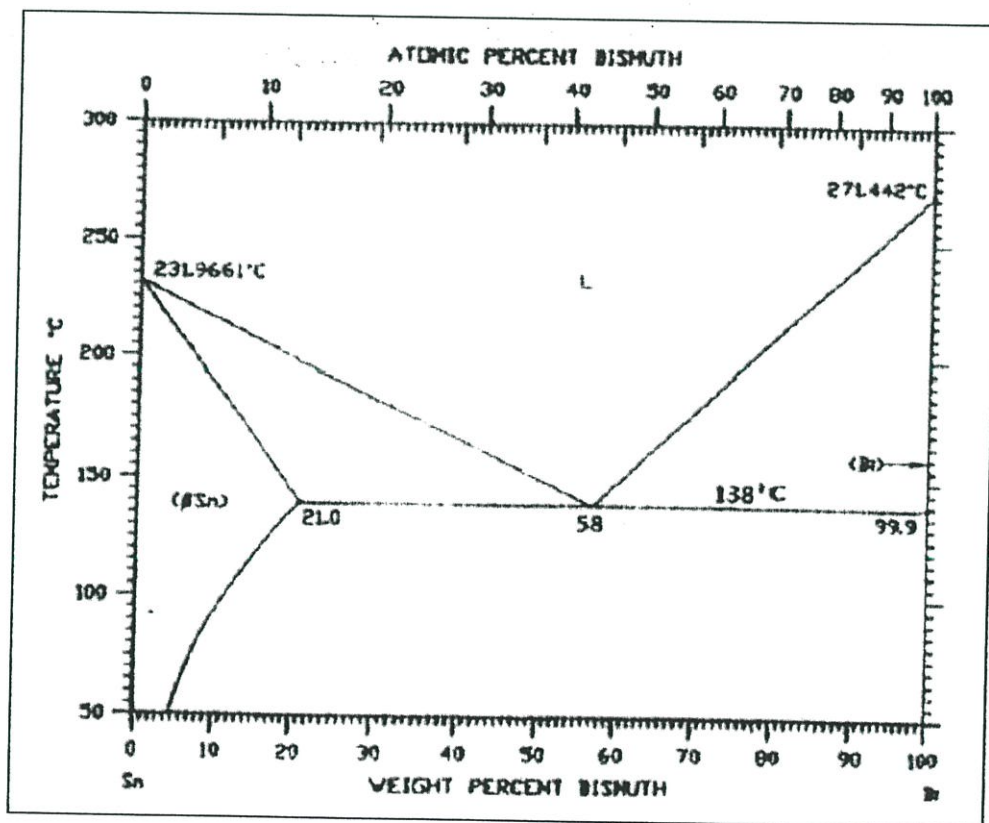
2.2.3.2 สมบัติของธาตุเจือชนิดต่างๆ

1. เงิน (Ag) เป็นโลหะที่ใช้เป็นส่วนผสมในโลหะบัดกรี มีราคาสูง โลหะเงินช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะบัดกรี ทำให้สมบัติการแผ่กระจายดีขึ้น และมีจุดหลอมเหลวต่ำลง [7] อินเดียม (In) เป็นโลหะที่มีราคาค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับธาตุเจือชนิดอื่น โลหะบัดกรีที่มีอินเดียมผสมอยู่จะมีราคาแพง แต่มีข้อดี คือ อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ จึงเป็นข้อดีสำหรับการใช้งานกับอุปกรณ์ที่ทนความร้อนได้ต่ำ และอินเดียมยังมีความสามารถในการลดการเกิดออกซิเดชันและเพิ่มสมบัติความเหนียว (Ductility) ให้ดีขึ้น
3. บิสมัท (Bi) โลหะดีบุกผสมบิสมัทที่อัตราส่วน 42Sn-58Bi มีโครงสร้างยูเทคติก โลหะบัดกรีในกลุ่มนี้มีจุดเด่น คือ มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำมาก คือ 138 องศาเซลเซียส จึงเป็นข้อดี คือ สามารถใช้งานกับอุปกรณ์ที่ไม่สามารถทนความร้อนในการบัดกรีสูงๆได้ ลักษณะโครงสร้างของโลหะบัดกรีชนิดนี้จะมีลักษณะเป็นแผ่นแบบ Lamella มีความสามารถในการเชื่อมประสาน (Solderability or Wetting) ที่ดีมาก แต่มีข้อเสีย คือ บิสมัทมีราคาสูง
4. พลวง (Sb) การเติมพลวงในปริมาณที่พอเหมาะจะช่วยเพิ่มสมบัติการต้านการคืบ และการต้านความล้าของโลหะบัดกรีให้ดีขึ้น แต่พลวงมีข้อเสีย คือ ทำให้สมบัติ Wettability และการแผ่กระจายของโลหะบัดกรีด้อยลง
5. ทองแดง (Cu) เมื่อผสมดีบุกกับทองแดงในอัตราส่วน 99.3Sn-0.7Cu จะทำให้เกิดโครงสร้างยูเทคติก มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 227 องศาเซลเซียส โครงสร้างจุลภาคประกอบไปด้วยเฟส Cu_6Sn_5 ลักษณะเป็นแท่งฝอยอยู่ในเนื้อดีบุก ทองแดงจะทำให้โลหะบัดกรีมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ข้อเสียของโลหะบัดกรีในกลุ่ม Sn-Cu คือ การที่มีธาตุเจือผสมอยู่น้อยจึงอาจเกิดเส้นใยดีบุก (Tin Whisker) ขึ้นได้ ซึ่งเป็นปัญหาทำให้เกิดกระแสไฟลัดวงจร
6. สังกะสี (Zn) เป็นโลหะที่มีจุดเด่นด้านอุณหภูมิการหลอมเหลวต่ำและราคาถูก โลหะบัดกรีชนิดดีบุก-สังกะสีที่จุดยูเทคติก (Sn-9 wt.% Zn) มีอุณหภูมิจุดหลอมเหลวที่ 199 องศาเซลเซียส ซึ่งใกล้เคียงกับโลหะบัดกรีชนิดดีบุก-ตะกั่วที่จุดยูเทคติก (183 องศาเซลเซียส) Sn-9 wt.% Zn ประกอบด้วยเฟส 2 เฟส คือ Sn matrix และ Hexagonal Zn ซึ่งรวมตัวกับดีบุกอยู่ในลักษณะเป็นแผ่นบางสลับกันระหว่างเฟส Sn rich และ Zn rich ซึ่งทั้งดีบุกและสังกะสีต่างก็สามารถทำปฏิกิริยากับโลหะพื้นที่เป็นทองแดงได้ โลหะบัดกรีในกลุ่ม Sn-Zn นี้มีข้อด้อยบางประการ เช่น Zn สามารถเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ง่าย เกิดเป็น

สังกะสีออกไซด์ (Dross) มาก เมื่อใช้ในกระบวนการการบัดกรีแบบ Wave Soldering นอกจากนี้แล้ว Zn ยังไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับสารเคมีที่ผสมอยู่ในฟลักซ์ที่ใช้กับโลหะบัดกรีในกลุ่ม Sn-58Bi ทำให้เกิดการกัดกร่อน

2.3 โลหะบัดกรี Sn-58Bi

โลหะผสม Sn-58Bi คือ โลหะผสมระหว่างดีบุกและบิสมัทที่มีอัตราส่วนคือ 42%Sn-58%Bi ซึ่งมีโครงสร้างแบบยูเทคติก เป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีคุณสมบัติดีกว่าหรือเทียบเท่ากับโลหะผสม Sn-Pb โดยจุดเด่นของโลหะบัดกรีกลุ่มนี้ คือ มีอุณหภูมิหลอมเหลว 138 องศาเซลเซียส ราคาต่ำ มีความสามารถในการเชื่อมประสานที่ดี และไม่ทำร้ายสิ่งแวดล้อม การที่โลหะบัดกรีนี้มีจุดหลอมเหลวที่ต่ำมาก จึงเหมาะสำหรับการบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่สามารถบัดกรีที่อุณหภูมิสูงๆได้ รวมไปถึงชิ้นส่วนที่มีพื้นผิวไวต่ออุณหภูมิ โดยลักษณะโครงสร้างของโลหะผสม Sn-58Bi แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 เฟสไดอะแกรมระหว่างดีบุกและบิสมัท

จากเฟสไดอะแกรมระหว่างดีบุกและบิสมัท บริเวณที่อยู่ปลายด้านซ้ายและด้านขวาของเฟสไดอะแกรม คือ บริเวณ Terminal Solid Solution ซึ่งมีความสามารถในการละลายที่จำกัด กล่าวคือ เฟส β เป็นโลหะผสมที่มีดีบุกเป็นตัวทำละลาย และมีบิสมัทเป็นตัวถูกละลาย โดยบิสมัทสามารถละลายได้มาก

ที่สุด 21.0% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 138 องศาเซลเซียส ส่วนเฟสที่อยู่ปลายด้านขวาของเฟสไดอะแกรม จะเป็นโลหะผสมที่มีบิสบัทเป็นตัวทำละลาย และมีดีบุกเป็นตัวถูกละลาย โดยดีบุกสามารถละลายได้มากที่สุด 0.1% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 231.97 องศาเซลเซียส ส่วนบิสบัทนั้นเริ่มหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 271.44 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง โลหะผสมนี้จะแข็งตัวที่อุณหภูมิคงที่ 138 องศาเซลเซียส ซึ่งเรียกอุณหภูมินี้ว่า อุณหภูมิยูเทคติก (Eutectic Temperature) เกิดเป็นโลหะผสมที่มีโครงสร้างแบบยูเทคติก

2.3.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ (Physical Properties of Solder Alloy)

ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ (Physical Properties of Solder Alloy) [8]

Alloy composition	42%Sn-58%Bi
Liquidus	138 °C
Solidus	138 °C
Ultimate Tensile Strength	8766 psi (60.4 MPa)
Yield Strength (0.2% offset)	7119 psi (49.1 MPa)
Elastic Modulus	1720 ksi (11.9 GPa)
Total Elongation	46%
Uniform Elongation	3%
Strength Coefficient	8766 psi (60.4 MPa)
Density	8.56 g/ml ³
Hardening Exponent	0.029

2.3.2 คุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties)

โลหะบัดกรี 42Sn-58Bi จะมีความแข็งแรงแต่เปราะมากกว่าโลหะบัดกรี 63Sn-37Pb ที่อุณหภูมิห้อง และจะมีความแข็งแรงลดลงจนหลอมละลายที่อุณหภูมิลดลง เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลของ Sn-58Bi กับ 63Sn-Pb จะพบว่าโลหะผสม Sn-58Bi มีคุณสมบัติดังนี้

1. มีค่า Yield และ ความแข็งแรงสูงที่อุณหภูมิห้อง แต่ความแข็งแรงจะลดลงที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส
2. อายุการใช้งานเนื่องจากการล้าจากความร้อน อยู่ในช่วงอุณหภูมิคงที่คือ 20 องศาเซลเซียส ถึง 70 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะเมื่ออยู่ภายใต้ความเครียดแบบคงรูปมากๆ (Plastic Strain)

3. จะมีความเปราะเมื่ออยู่ในลักษณะเป็นก้อนหรือผลึก แต่จะมีสมบัติแบบ Superplastic เมื่ออยู่ในลักษณะแท่งลวด

นอกจากนี้หากมีการเติมธาตุอื่นเข้าไปจะทำให้โลหะบัดกรีมีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไป เช่น การเติม Ag หรือ Au ในปริมาณเล็กน้อย จะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติความเหนียว และอายุการใช้งานเนื่องจากการล้าจากความร้อน (Thermal Fatigue Life) ของโลหะผสมเพิ่มสูงขึ้น และในระหว่างกระบวนการบัดกรี หากมีการสลายตัวของวัสดุที่ใช้เป็นโลหะพื้นหรือมีธาตุอื่นเจือปนเข้าไปในโลหะบัดกรี จะส่งผลทำให้คุณสมบัติในการหลอมละลายเปลี่ยนไป รวมถึงคุณสมบัติทางกลที่เปลี่ยนไปของรอยต่อที่เกิดจากการบัดกรีด้วย

2.4 วัสดุที่ใช้ในการสร้างแม่พิมพ์

2.4.1 คุณสมบัติทั่วไปและคุณสมบัติทางกายภาพของเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel)

ค่าความหนาแน่นสูงของเหล็กกล้าไร้สนิมจะแตกต่างจากวัสดุอื่น ๆ อย่างเห็นได้ชัดในส่วนของคุณสมบัติเกี่ยวกับความสามารถทนความร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิม มีข้อสังเกต 3 ประการ คือ

1. การที่มีจุดหลอมเหลวสูง ทำให้มีอัตราการคืบดี เมื่อเทียบกับเซรามิกที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1000 องศาเซลเซียส
2. การที่มีค่านำความร้อนระดับปานกลาง ทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมเหมาะที่จะใช้งานที่ต้องทนความร้อน (ตู้คอนเทนเนอร์) หรือต้องการคุณสมบัตินำความร้อนได้ดี (เครื่องถ่ายเอกสาร)
3. การที่มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวระดับปานกลาง จึงสามารถใช้ความยาวมากๆ ได้โดยใช้ตัวเชื่อมน้อย

2.4.2 คุณสมบัติเชิงกล

โดยทั่วไปเหล็กกล้าไร้สนิมมีส่วนผสมของเหล็กประมาณ 70-80% ทำให้มีคุณสมบัติของเหล็กที่สำคัญ 2 ประการ คือ ความแข็งและความแกร่ง เมื่อนำคุณสมบัติเชิงกลเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดอื่น จะเห็นได้ว่าพลาสติก ซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางมีความแข็งแรง และโมดูลัสความยืดหยุ่นต่ำ ส่วนเซรามิกมีความแข็งแรงและความเหนียวสูง แต่มีความแกร่งหรือความสามารถรับแรงกระแทกโดยไม่แตกหักต่ำ

เหล็กกล้าไร้สนิมให้ค่ากลางของทั้งความแกร่ง ความแข็ง และ ความเหนียว เนื่องจากมีส่วนผสมของธาตุเหล็กอยู่มาก และจะมีเพิ่มขึ้นอีกในชนิดออสเทนิติก ค่าความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ของเหล็กกล้าไร้สนิม ไม่ว่าจะชนิดที่อ่อนตัวง่าย ซึ่งสามารถทำให้ขึ้นรูปเย็นได้ดี เช่น การขึ้นรูปลึก (Deep Drawing) จนถึงชนิดความแข็งแรงสูงสุด ซึ่งได้จากการขึ้นรูปเย็นหรือทำให้เย็นตัวโดยเร็ว (Quenching) หรือ ชนิดชุบแข็งแบบตกผลึก (Precipitation Hardening) ซึ่งเหมาะใช้ทำสปริง [9]

2.4.3 ความต้านทานการกัดกร่อน

โลหะทุกชนิดจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ เกิดเป็นชั้นฟิล์มออกไซด์บนผิวโลหะ โดยออกไซด์ที่เกิดบนผิวโลหะทั่วไป จะทำปฏิกิริยาออกซิไดซ์ และทำให้เกิดสภาพพื้นผิวผุกร่อน ที่เราเรียกว่าเป็นสนิม แต่เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นเหล็กที่มีคาร์บอนต่ำ (น้อยกว่า 2%) ของน้ำหนัก หรือเป็นโลหะผสม (Alloy) มีส่วนผสมของโครเมียมอย่างน้อย 10.5% หรือโลหะอื่นแตกต่างกันออกไปตามชนิดของคุณสมบัติเชิงกล ทำให้เหล็กกล้ามีความต้านทานการเกิดสนิมได้ โดยโครเมียมที่เป็นส่วนผสมหลักของเหล็กกล้าไร้สนิมจะทำให้เกิดการสร้างแผ่นฟิล์มโครเมียมออกไซด์ (Chromium Oxide Film : CrO_2 ที่เรียกว่า Passive Film) ที่มองไม่เห็นเกาะติดอยู่ที่ผิวหน้า ทำให้เหล็กกล้ามีความต้านทานการกัดกร่อน ถ้าฟิล์มที่ผิวหน้านั้นถูกทำลาย ไม่ว่าจะจากแรงกลหรือสารเคมีใดๆ ออกซิเจนที่มีอยู่ในอากาศจะเข้าทำปฏิกิริยากับโครเมียมและสร้างฟิล์มโครเมียมออกไซด์ทดแทนชั้นใหม่ด้วยตัวมันเอง

นอกจากนี้ ยังขึ้นอยู่กับสภาพการกัดกร่อน ได้แก่ ความรุนแรงของปฏิกิริยาออกซิไดซ์ ความเป็นกรด ปริมาณสารละลายคลอไรด์ และ อุณหภูมิ โดยทั่วไปแล้วการเพิ่มปริมาณโครเมียม (Cr) จะช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม การเติมนิกเกิล (Ni) จะช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนทั่วไปให้ทนสภาวะการกัดกร่อนรุนแรงได้ ส่วนโมลิบดีนัมจะช่วยเพิ่มความกัดกร่อนเฉพาะที่ เช่น การกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting Corrosion)

ในทางปฏิบัติ เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดเฟอร์ริติก มีการใช้งานจำกัดในสภาพการกัดกร่อนปานกลาง และในสภาพขบขท ทั้งในชนิดเฟอร์ริติก และ ออสเทนิติก สามารถใช้ทำอุปกรณ์เครื่องใช้ในครัวเรือนได้ แต่เนื่องจากชนิดออสเทนิติกสามารถทนการกัดกร่อนได้ดี และทำความสะอาดง่าย จึงนิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม นอกจากนี้ชนิดออสเทนิติกยังทนการกัดกร่อนจากสารเคมีหลายประเภท ได้แก่ กรดอัลคาลายด์ เป็นต้น ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเคมี และกระบวนการผลิตต่างๆ

2.4.4 เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel)

แบ่งออกเป็น 5 กลุ่ม ดังนี้

1. กลุ่มเฟอร์ริติก (Ferritic Stainless Steel) จุลโครงสร้างแบบเฟอร์ไรต์ แม่เหล็กดูดติด มีส่วนผสมของคาร์บอนต่ำ และมีโครเมียมเป็นส่วนผสมหลัก คือประมาณ 10.5-29% มักนำไปใช้ทำถังน้ำต่างๆ (Tank) ทำผนัง เครื่องใช้ภายในบ้าน ทำเครื่องครัว ทำเฟอร์นิเจอร์ ฯลฯ ส่วนผสมทางเคมี Cr 10.5-29% C \leq 0.1% (คาร์บอนน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.1%) Ni 0% เกรดที่พบ AISI 430, 430Ti, 439, 409 (เรียกเป็นซีรี่ส์)
2. กลุ่มมาร์เทนซิติก (Martensitic Stainless Steel) จุลโครงสร้างแบบมาร์เทนไซด์ แม่เหล็กดูดติด โดยทั่วไปจะมีโครเมียมผสมอยู่ 10.5-17% และมีส่วนผสมของคาร์บอนในระดับปานกลาง มักนำไปใช้ทำส้อม มีด ใบมีดโกน เครื่องมือแพทย์ และเครื่องมือวิศวกรอื่นๆ ซึ่งต้องการคุณสมบัติเด่นในด้าน ความต้านทานการสึกกร่อน และความแข็งแรงทนทานส่วนผสมทางเคมี Cr 10.5-17% C $>$ 0.1% (คาร์บอน

มากกว่า 0.1%) Ni 0% (ไม่มีนิกเกิลผสมอยู่) มีค่า Yield Strength และค่า Ultimate Tensile Strength สูงมากในสภาพที่ผ่านกระบวนการอบชุบ แต่จะมีค่า Elongation ต่ำ เกรดที่พบ AISI 410, 420 (เรียกเป็น ซีรีย์)

3. กลุ่มออสเตนิติก (Austenitic Stainless Steel) จุลโครงสร้างแบบออสเตนไนต์ แม่เหล็กดูดไม่ติด นอกจากส่วนผสมของโครเมียม 16-18% แล้วยังมีนิกเกิลผสมอยู่ 8-13% ที่ช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนอีกด้วย ชนิดออสเตนิติกเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางมากที่สุดในบรรดาสแตนเลสด้วยกัน ส่วนออสเตนิติกที่มีโครเมียมผสมอยู่สูง 20-25% และ นิกเกิล 1-20% จะสามารถทนการเกิดออกซิไดซ์ได้ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งใช้ในส่วนประกอบของเตาหลอม ท่อนำความร้อน และแผ่นกันความร้อนในเครื่องยนต์ จะเรียกว่า เหล็กกล้าไร้สนิม ชนิดทนความร้อน (Heat Resisting Steel) ส่วนผสมทางเคมี Cr 16-18% C \leq 0.08% (คาร์บอนน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.08%) Ni 8-13% (แม่เหล็กจึงดูดไม่ติด) เกรดที่พบ AISI 304, 316, 304L, 316L (** L = เน้นการเชื่อม)

4. กลุ่มดูเพล็กซ์ (Duplex) แม่เหล็กดูดติด มีโครงสร้างผสมระหว่างเฟอร์ไรต์และออสเตนไนต์ มีโครเมียมผสมอยู่ประมาณ 20-25% และนิกเกิล 4-7% เหล็กชนิดนี้มีค่า Yield Strength และ ค่า Elongation สูง จึงเรียกได้ว่า เหล็กชนิดนี้มีทั้งความแข็งแรงและความเหนียว (Ductility) ที่สูงเป็นเลิศ มักถูกนำไปใช้งานที่มีคลอรีนสูง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting Corrosion) และช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนที่เป็นรอยร้าวอันเนื่องมาจากแรงกดดัน (Stress Corrosion Cracking Resistance) ทำฐานชุดเจาะน้ำมัน ฯลฯ ส่วนผสมทางเคมี Cr 20-25% C = 0% (ไม่มีส่วนผสมของคาร์บอน) Ni 4-7%

5. กลุ่มพรีซิพิตีเซชันฮาร์เดนนิ่ง (Precipitation Hardening Steel) กลุ่มนี้เกิดการตกผลึกโดยวิธีทางความร้อน เป็นเหล็กกล้าชุบแข็งแบบตกผลึก มีโครเมียมผสมอยู่ 17% และ มีนิกเกิล 4% ทองแดง และ ไนโอเบียมผสมอยู่ด้วย มีความต้านทานการกัดกร่อนเทียบเคียงกับตระกูลออสเตนิติกมีความแข็งแรงมากกว่าตระกูลมาร์เทนซิดิก เกรด 17-4H เนื่องจากเหล็กชนิดนี้สามารถชุบแข็งได้ในคราวเดียว จึงเหมาะสำหรับทำแกนปั๊ม หัววาล์ว และส่วนประกอบของยานอวกาศ [10]

2.5 ความสามารถในการกระจายตัว (Wettability)

ความสามารถในการกระจายตัว คือ ค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะพื้น โดยถ้าค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีนั้นมีค่าสูง แสดงว่า โลหะบัดกรีชนิดนั้นมีการกระจายตัว (Wetting) ที่ดี มีการไหล (Fluidly) ที่ดี และมีแรงยึดติด (Adhesive) บนพื้นผิวโลหะพื้นที่ต่ำ ผลที่ได้ คือ เกิดการเชื่อมประสาน และรอยบัดกรีที่ติดบนพื้นผิวโลหะพื้น [11]

ถ้าค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะพื้นนั้นสามารถบ่งบอกความสามารถในการบัดกรีได้ ดังนั้น สิ่งที่เป็นเวลาจะทำการบัดกรีต้องคำนึงถึงโลหะบัดกรีที่มีค่าความสามารถในการกระจายตัว (Wettability) บนพื้นผิวโลหะพื้นที่สูง ซึ่งค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีนั้นสามารถหาได้ 3 วิธี ได้แก่

1. Spread test method อ้างอิงมาตรฐานของ JIS Z 3198-3 : 2003 (JWES), Test method for lead free solder – Part 3 : Method for spread test
2. Contact angle method อ้างอิงมาตรฐานของ JIS Z 3198-4 : 2003 (JWES), Test method for lead free solder – Part 4 : Method for solderability test by wetting balance method and a contact angle method
3. Wetting balance method อ้างอิงมาตรฐานของ JIS Z 3198-4 : 2003 (JWES), Test method for lead free solder – Part 4 : Method for solderability test by wetting balance method and a contact angle method

2.5.1 Spread test method

ตามมาตรฐาน JIS Z 3198-3 : 2003 (JWES), Test method for lead free solder – Part 3 : Method for spread test

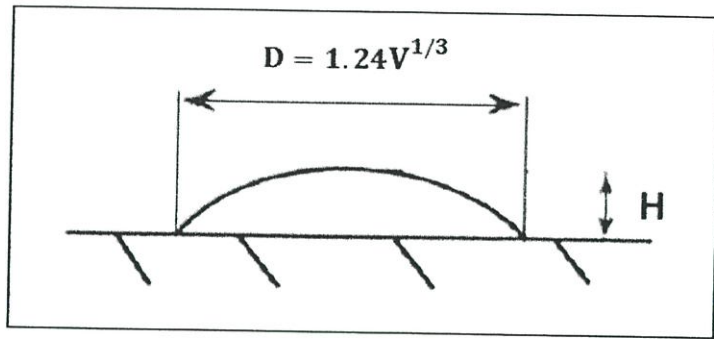
Spread test method คือ วิธีการทดสอบหาค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะพื้น โดยวิธีทดสอบดังนี้

1. หยดน้ำยาประสาน 0.02 มิลลิลิตร ที่จุดศูนย์กลางของแผ่นทองแดงและวางโลหะบัดกรีทดสอบที่จุดศูนย์กลางแผ่นทองแดง
2. ให้ความร้อน 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 2 นาที เพื่อให้ฟลักซ์ระเหยออกไป
3. ตั้งค่าอุณหภูมิอ่างบัดกรีที่ 250 องศาเซลเซียส ± 3 องศาเซลเซียส
4. นำชิ้นงานทดสอบสัมผัสกับโลหะบัดกรีหลอมเหลวในอ่างบัดกรี และกำจัดชั้นฟิล์มออกไซด์บนผิวหน้าโลหะบัดกรี หลอมเหลวด้วย Scrubber
5. หลังจากชิ้นงานสัมผัสกับโลหะบัดกรีหลอมเหลวในอ่างบัดกรีเป็นระยะเวลา 30 นาทีให้โลหะบัดกรีที่ใช้ทดสอบหลอมละลายบนแผ่นทองแดง
6. เลื่อนชิ้นงานขึ้น จากนั้นปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
7. ล้างน้ำยาประสานออกโดยใช้สารละลายที่เหมาะสม

การหาค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะพื้นโดย Spread test method สามารถหาได้ดังนี้

2.5.1.1 ค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor : S_f)

หลังจากทำการทดสอบโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดงแล้ว ปล่อยให้โลหะบัดกรีเย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง ทำการวัดค่าความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรีที่แข็งตัวแล้วด้วยไมโครมิเตอร์ และนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread Factor : S_f) ดังแสดงในสมการ 2.2



รูปที่ 2.10 ความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรี

$$S_f = \frac{D-H}{D} \times 100 \quad (2.2)$$

เมื่อ H คือ ความสูงของโลหะบัดกรีที่แผ่กระจาย
D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรีที่ถูกทดสอบ เมื่อ $D = 1.24 V^{1/3}$
โดย V คือ ปริมาตรของโลหะบัดกรีที่ใช้ทดสอบ

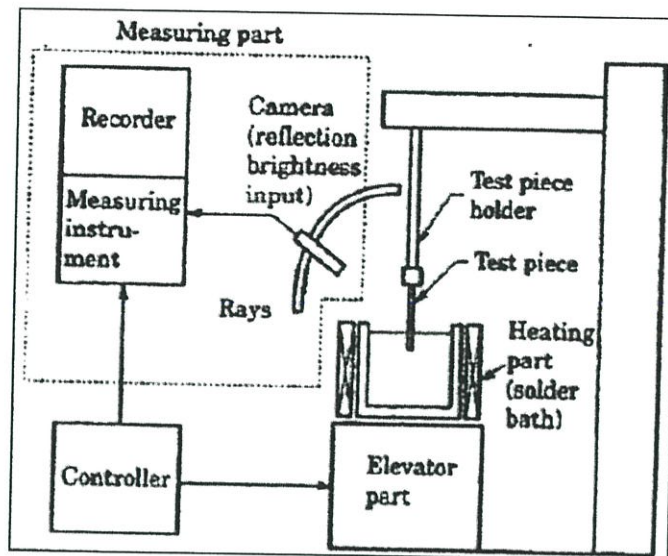
2.5.1.2 ค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio : S_r)

นอกจากนี้ค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรียังสามารถคำนวณเป็นค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio : S_r) ได้ดังสมการ 2.3 [12]

$$S_r = \frac{\text{plan area of spread on the substrate surface}}{\text{plan area of the original pellet}} \quad (2.3)$$

2.5.2 Contact angle method

ตามมาตรฐาน JIS Z 3198-4 : 2003 (JWES), Test methods for lead-free solder – Part 4 : Methods for solderability test by a wetting balance method and contact angle method (Japanese Standards Association, 2003) กล่าวว่า Contact angle เป็นวิธีการทดสอบในการวัดค่ามุมสัมผัสที่บริเวณปลายขอบของโลหะบัดกรีเมื่อผ่านกระบวนการทดสอบ วิธีการนี้จะทำการวัดมุมสัมผัสของโลหะบัดกรีที่แผ่กระจายบนแผ่นชิ้นงานทดสอบ จากจุดของแผ่นชิ้นงานทดสอบที่ทำการจุ่มและดึงขึ้นจากอ่างโลหะบัดกรีและบันทึกผลที่เกิดขึ้น



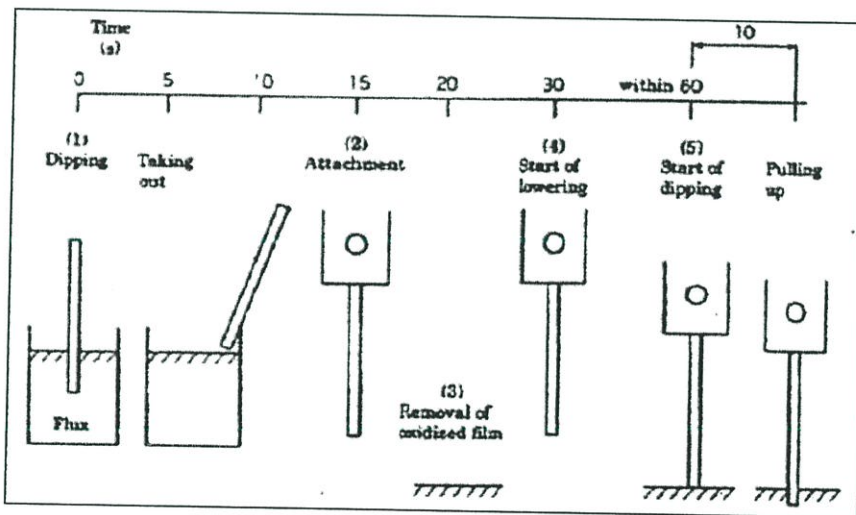
รูปที่ 2.11 contact angle method

ขั้นตอนการทดสอบ

1. หลอมโลหะบัดกรีในอ่างบัดกรี (Solder Tank) ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส \pm 3 องศาเซลเซียส
2. ใส่ฟลักซ์ที่ใช้ในการทดสอบตามมาตรฐานลงในจานทดลอง (Petri dish)
3. จุ่มชิ้นงานทดสอบลงในฟลักซ์ ลึกลงไป 4-5 มิลลิเมตร จากขอบเป็นเวลา 5 วินาที แล้วยกขึ้นเพื่อกำจัดออกไซด์ที่ผิวหน้า
- 4.ให้นำชิ้นงานทดสอบที่ทำการจุ่มฟลักซ์ แล้วจุ่มลงในอ่างบัดกรีอย่างช้าๆ ลึกลงไป 2 มิลลิเมตร ทิ้งไว้ประมาณ 10 วินาที และเริ่มให้เครื่องบันทึกผลทำงาน จากนั้นบันทึกผลค่ามุมสัมผัส (Contact Angle) ที่เปลี่ยนแปลงไป ณ เวลาหนึ่งๆ ของโลหะบัดกรีบนแผ่นชิ้นทดสอบที่เกิดการยึดประสานกันที่ผิวหน้าของชิ้นงานในระหว่างการจุ่ม เมื่อเวลาเปลี่ยนไป

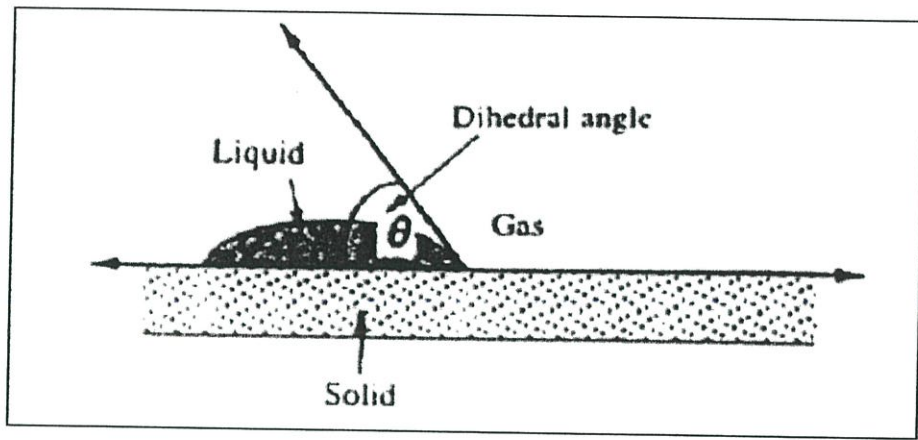
ตารางที่ 2.9 ลำดับเวลาในการดำเนินการทดสอบ

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 solder bath	60 or under	10



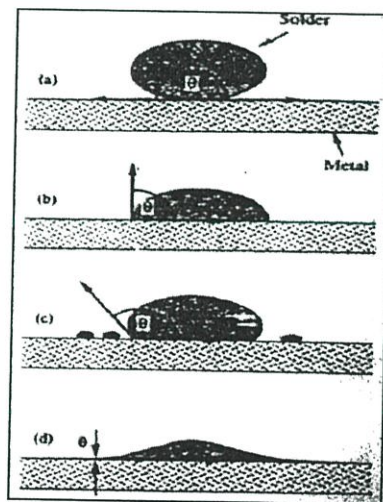
รูปที่ 2.12 ลำดับขั้นตอนในช่วงทำการทดสอบ

Contact angle method คือ วิธีการทดสอบหาค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะ บัดกรีบนพื้นผิวโลหะพื้น โดยวัดจากค่ามุมสัมผัส (Contact Angle : θ) โดยมุมสัมผัสเป็นการวัดมุมประสานระหว่างของแข็ง และของเหลวในเชิงปริมาณ ค่ามุมสัมผัสที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของพื้นผิวโลหะ และรูปร่างของโลหะบัดกรีหลอมเหลว ซึ่งมุมสัมผัสที่ได้นั้นจะเกิดจากการที่ของเหลวมีอาณาเขตติดต่อกัน 3 เฟส ได้แก่ ของแข็ง (Solid : S) ของเหลว (Liquid : L) และก๊าซ (Gas : G)



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ของมุมที่มีต่อโลหะบัดกรี พื้นผิวโลหะและบรรยากาศโดยรอบเมื่อ Liquid คือ โลหะบัดกรีหลอมเหลว Solid คือ พื้นผิวพื้นโลหะ Gas คือ บรรยากาศโดยรอบ

จากรูปที่ 2.13 มุมที่เกิดจากระนาบของแข็งและของเหลว (θ) เรียกว่า Wetting angle หรือ Contact angle โดยมุมนี้จะขึ้นอยู่กับ การกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะแผ่น



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ของมุมสัมผัสที่มุมใดๆ กับการกระจายตัวของโลหะบัดกรี

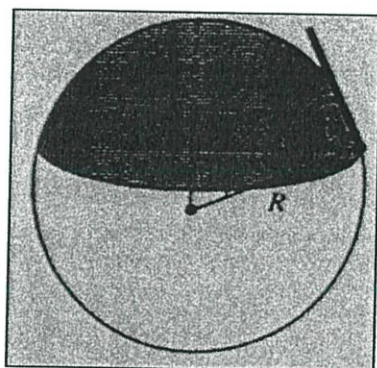
จากรูปที่ 2.14 จะแสดงให้เห็นถึงค่า θ หรือ Contact angle ที่มุมใดๆ โดยที่ รูปที่ 2.14 (a) มี Contact angle เท่ากับ 180 องศา คือ ยังไม่มีการกระจายตัวของโลหะบัดกรี (Non-Wetted) จึงยังไม่เกิดการประสานของพื้นผิวโลหะพื้น รูปที่ 2.14 (b) มี Contact angle ระหว่าง 0 องศา ถึง 90 องศา เนื่องจากมีบางส่วน of โลหะบัดกรีเริ่มหลอมละลาย รูปที่ 2.14 (c) มี Contact angle ระหว่าง 90 องศา ถึง 180 องศา คือ โลหะบัดกรีเริ่มมีการหลอมละลายบนพื้นผิวโลหะ แล้วกลับคืนไปเป็นของแข็งอีกครั้ง (Dewetting) เนื่องจากอุณหภูมิในการหลอมละลายต่ำลง จึงไม่เกิดการประสานกันบนพื้นผิวโลหะพื้น รูป

ที่ 2.14 (d) มี Contact angle เท่ากับ 0 องศา คือ มีการกระจายตัวของโลหะบัดกรีแบบสมบูรณ์ (Total Wetting) จนเกิดเป็นชั้นฟิล์มขึ้นบนผิวของผิวโลหะพื้น อาจกล่าวได้ว่า Contact angle จะแปรผกผันกับค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรี

ในกระบวนการบัดกรีมีจุดประสงค์คือ บัดกรีให้มี Contact angle เท่ากับ 0 องศา ซึ่งเป็นได้แคในอุดมคติเท่านั้น ในความเป็นจริงในกระบวนการบัดกรี ขอแค่การบัดกรีที่มี Contact angle น้อยกว่า 75 องศา ก็ถือว่าเป็นการบัดกรีที่ดีแล้ว ทั้งนี้ Contact angle จะขึ้นอยู่กับแรงตึงผิวของโลหะบัดกรีด้วย ถ้าแรงตึงผิวของโลหะบัดกรีมีค่าต่ำลง จะยิ่งทำให้ Contact angle มีค่าน้อยลงด้วย ค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะพื้นสามารถหาได้จากค่า Contact angle ได้ดังสมการ 2.4

$$\sin \theta = \frac{2}{\left(\frac{A}{h} + \frac{h}{A}\right)} \quad (2.4)$$

θ คือ มุมสัมผัส, A คือ รัศมีของโลหะบัดกรี, h คือ ความสูงของโลหะบัดกรี

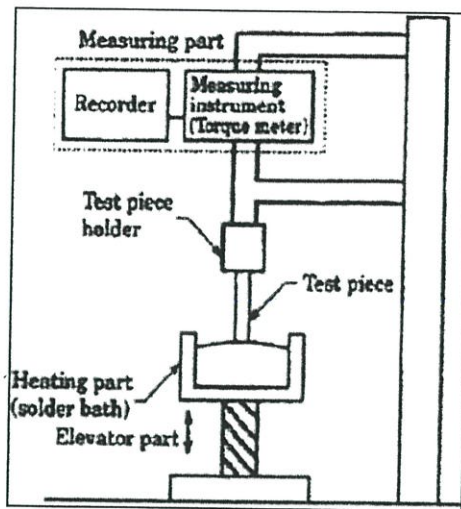


รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างรัศมี ความสูง และมุมสัมผัสของโลหะบัดกรี

2.5.3 Wetting balance method

ตามมาตรฐาน JIS Z 3198-4 : 2003 (JWES), Test methods for lead-free solder – Part 4 : Methods for solderability test by a wetting balance method and contact angle method [13]

Wetting balance เป็นวิธีการทดสอบสำหรับวัดค่าเวลาและแรงในภาวะการเปียก (Wetting) ของโลหะบัดกรีขณะทำการทดสอบ วิธีการนี้เป็นวิธีการตรวจสอบแรงที่กระทำบนแผ่นชิ้นงานทดสอบ จากจุดของแผ่นชิ้นงานทดสอบที่ทำการจุ่ม และดึงขึ้นจากอ่างโลหะบัดกรีและแสดงผลโดยการบันทึกอย่างต่อเนื่องเป็นฟังก์ชันของเวลาผ่านเครื่องแปลงสัญญาณ

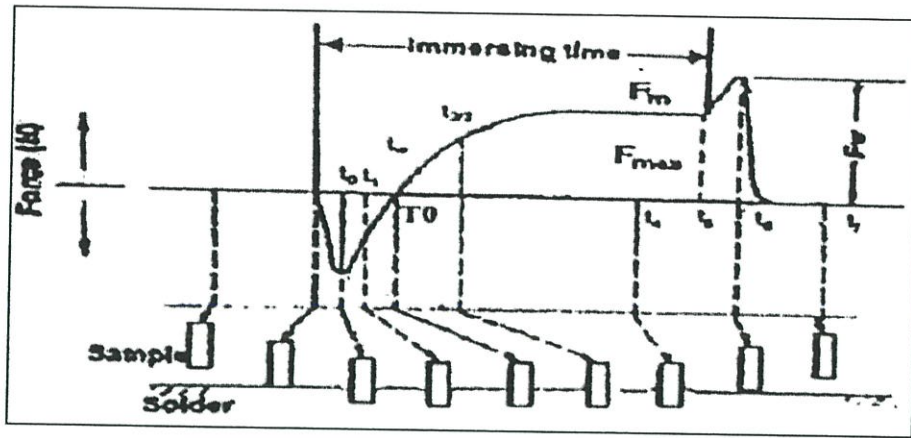


รูปที่ 2.16 Wetting balance method

ขั้นตอนการทดสอบ

1. หลอมโลหะบัดกรีในอ่างบัดกรี (Solder Tank) ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ± 3 องศาเซลเซียส
2. ใส่ฟลักซ์ที่ใช้ในการทดสอบตามมาตรฐานลงในจานทดลอง (Petri Dish)
3. จุ่มชิ้นงานทดสอบลงในฟลักซ์ ลึกลงไป 4-5 มิลลิเมตร จากขอบเป็นเวลา 5 วินาที แล้วยกขึ้น เพื่อกำจัดออกไซด์ที่ผิวหน้า
- 4.ให้นำชิ้นงานทดสอบที่ทำการจุ่มฟลักซ์แล้ว จุ่มลงในอ่างบัดกรีอย่างช้าๆ ลึกลงไป 2 มิลลิเมตร ทิ้งไว้ประมาณ 10 วินาที และบันทึกผลลงบนแผนภูมิการเปลี่ยนแปลงของโพลดในช่วงเวลาต่างๆ จากจุดที่ชิ้นทดสอบเกิดการยึดประสานกันที่ผิวของชิ้นงานทดสอบในระหว่างการจุ่ม

Wetting balance method คือ วิธีการทดสอบหาค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นโลหะพื้น โดยจะนำชิ้นงานโลหะที่ชุบด้วยฟลักซ์ แล้วมาจุ่มลงในโลหะบัดกรีหลอมเหลวที่อยู่ในอ่างบัดกรี ด้วยความเร็วและระยะความลึกในการจุ่มตามที่กำหนด แล้วนำค่าที่ได้จากการทดสอบมาสร้าง Wetting curve ได้ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 Wetting curve ที่ได้จากเครื่องทดสอบ

จากกราฟอธิบายได้ว่า ในช่วงแรกที่ชิ้นงานทดสอบเริ่มสัมผัสกับโลหะบัดกรีหลอมเหลวเมื่อจุ่มลงในโลหะบัดกรีนั้น ค่าแรงที่ได้จะเป็นค่าลบ เนื่องจากต้องมีแรงพยายามอย่างมากเพื่อเอาชนะแรงลอยตัวที่บริเวณผิวของโลหะบัดกรีหลอมเหลวได้ จากนั้นแรงที่ได้จะเป็นค่าบวก และเมื่อชิ้นงานเริ่มสัมผัสกับโลหะบัดกรีจนกระทั่งมีมุมสัมผัสเป็น 90 องศา คือ แรงอยู่ในภาวะสมดุล เวลานั้น คือ Wetting time (TO) นอกจากนี้แรงที่กระทำสูงสุดต่อหน่วยพื้นที่ระหว่างผิวของโลหะทดสอบกับโลหะบัดกรีหลอมเหลว คือ ค่า Wetting force (Fmax) และเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาในการจุ่ม จะต้องมีแรงในการดึงชิ้นงานออก คือ Withdrawal force (Fw)

2.5.4 ความสัมพันธ์ของ Spread factor, Spread ratio และ Contact angle

2.5.4.1 ความสัมพันธ์ของ Spread ratio และ Contact angle [14]

$$\text{จาก Spread ratio : } S_r = \frac{\text{Plan area of spread on the substrate surface}}{\text{Plan area of the original pellet}}$$

เมื่อ A และ a มีความสัมพันธ์ในเรื่องการอนุรักษ์ของปริมาตรของโลหะบัดกรีหลอมละลาย

$$\text{เมื่อ } V = \frac{3}{4} \pi a^3 = \frac{1}{6} \pi h(h^2 + 3A^2)$$

$$\text{ดังนั้น } a = \frac{1}{2} [h(h^2 + 3A^2)]^{\frac{1}{3}}$$

$$\text{และ } S_r = \frac{4a^2}{[h(h^2 + 3A^2)]^{\frac{2}{3}}}$$

จากรูปที่ 2.18 เมื่อ $A = R \sin \theta$, $h = R(1 - \cos \theta)$

จะได้ว่า
$$S_r = \frac{4\left(\frac{a^2}{h^2}\right)^{\frac{2}{3}}}{\left(1+3\frac{A^2}{h^2}\right)^{\frac{2}{3}}} = \frac{4 \cot^2 \frac{\theta}{2}}{\left(1+3\cot^2 \frac{\theta}{2}\right)^{\frac{2}{3}}} \quad (2.5)$$

เมื่อ $0^\circ < \theta < 180^\circ$

2.5.4.2 ความสัมพันธ์ของ Spread factor และ Contact angle

จากสมการ (2.1) Spread factor :

$$\begin{aligned} S_f &= \frac{D-H}{H} \\ &= \frac{(h^3+3A^2h)^{\frac{1}{3}}-h}{(h^3+3A^2h)^{\frac{1}{3}}} \\ &= 1 - \frac{1}{\left(1+3\frac{A^2}{h^2}\right)^{\frac{1}{3}}} \\ &= 1 - \frac{1}{\left(1+3\cot^2 \frac{\theta}{2}\right)^{\frac{1}{3}}} \end{aligned} \quad (2.6)$$

เมื่อ $0^\circ < \theta < 180^\circ$

2.5.4.3 ความสัมพันธ์ของ Contact angle และ มิติของโลหะบัดกรีหลอมละลาย

จาก
$$R^2 = A^2 + (R-h)^2 \quad (2.7)$$

จากทฤษฎีพีทาโกรัส จัดเรียงใหม่ได้เป็น
$$R = \frac{A^2+(R-h)^2}{2h}$$

จะได้ว่า
$$\sin \theta = \frac{2}{\left(\frac{A}{h}\right)+\left(\frac{h}{A}\right)} \quad (2.8)$$

2.6 แผนภูมิเฟสของโลหะบัดกรี

2.6.1 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุก-ทองแดง (Sn-Cu)

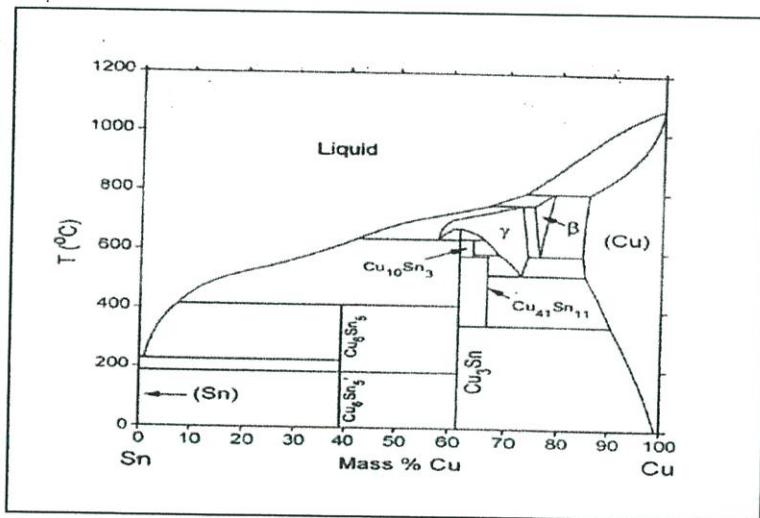
ปฏิกิริยาที่สำคัญประการหนึ่งของโลหะผสมดีบุก-ทองแดง คือปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 226.8°C ซึ่งเป็นปฏิกิริยายูเทกติก ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ปฏิกิริยายูเทกติก (Eutectic reaction) คือ ปฏิกิริยาที่ผสมที่ละลายกันอย่างสมบูรณ์ในสภาพของเหลว เมื่อเย็นตัวลงแล้วสารผสมทั้งสองแยกตัวออกจากกัน เนื่องจาก

ไม่สามารถละลายเข้ากันได้ ในสภาพของแข็งเกิดเป็นสารสองชนิดซึ่งต่างกัน โดยที่จุดยูเทกติกนี้ ของเหลว จะเปลี่ยนไปเป็นเฟสของแข็ง 2 เฟส ซึ่งปฏิกิริยายูเทกติก คือ



โดยปฏิกิริยายูเทกติกของโลหะผสมดีบุก-ทองแดง แต่ละเฟสจะมีส่วนผสมดังนี้ คือ

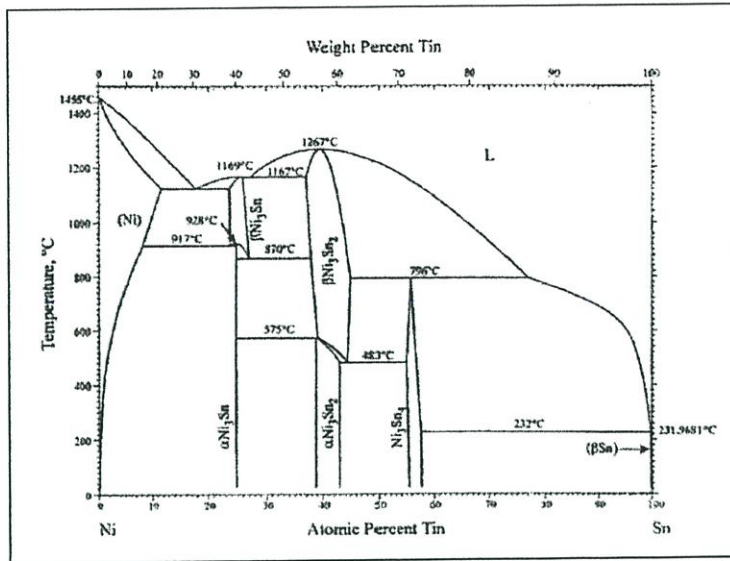
เฟส	Mass% Cu	Mass% Sn
Liquid	0.89	99.11
Cu_6Sn_5	39.07	60.95
Sn	0.11	99.99



รูปที่ 2.18 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุก - ทองแดง (Sn-Cu)

2.6.2 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุก-นิกเกิล (Sn-Ni)

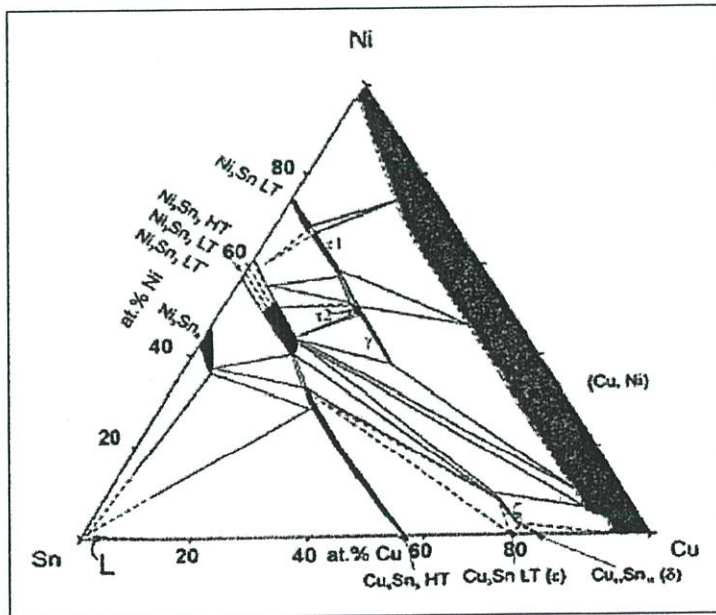
จากแผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุก-นิกเกิล ดังรูปที่ 2.19 ในระบบนี้จะเกิดเฟสของสารประกอบเชิงโลหะ 5 เฟส ได้แก่ Ni_3Sn , Ni_3Sn_2 โดยจะเกิดเฟสทั้งอุณหภูมิสูง และอุณหภูมิต่ำ ซึ่งจะกำหนดสัญลักษณ์เป็นอัลฟา (α) และ เบตา (β) และเฟส Ni_3Sn_4 โดยปฏิกิริยาเพอริเทกติก (Peritectic Reaction) ที่เกิดขึ้นนั้นเฟสของเหลวและเฟสของสารประกอบเชิงโลหะ Ni_3Sn_4 จะเปลี่ยนไปเป็นเฟสของแข็ง 2 เฟสที่อุณหภูมิสูง ได้แก่ สารประกอบเชิงโลหะ Ni_3Sn และ Ni_3Sn_2 ในปฏิกิริยายูเทกติกที่มีดีบุกอยู่มาก (Tin-Rich) จะเกิดที่อุณหภูมิ 231.2°C ซึ่งมีส่วนผสมของดีบุก 99.8% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 2.19 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุก - นิกเกิล (Sn-Ni)

2.6.3 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุก-ทองแดง-นิกเกิล (Sn-Cu-Ni)

จากแผนภูมิเฟส 3 ธาตุ (Ternary Equilibrium Diagram) ของโลหะผสมดีบุก-ทองแดง-นิกเกิล ดังแสดงในรูปที่ 2.20 ในการศึกษานี้ส่วนผสมที่นำมาทำการศึกษามีโอกาสเกิดปฏิกิริยาจะมีโอกาสเกิดตามแผนภูมิเฟส ซึ่งสมการของปฏิกิริยาที่เปลี่ยนแปลงไปมีดังนี้ $L + Ni_3Sn_4 \leftrightarrow Cu_6Sn_5 + (Sn)$ โดยจะเกิดในบริเวณที่มีดีบุกอยู่มาก (Tin-Rich)

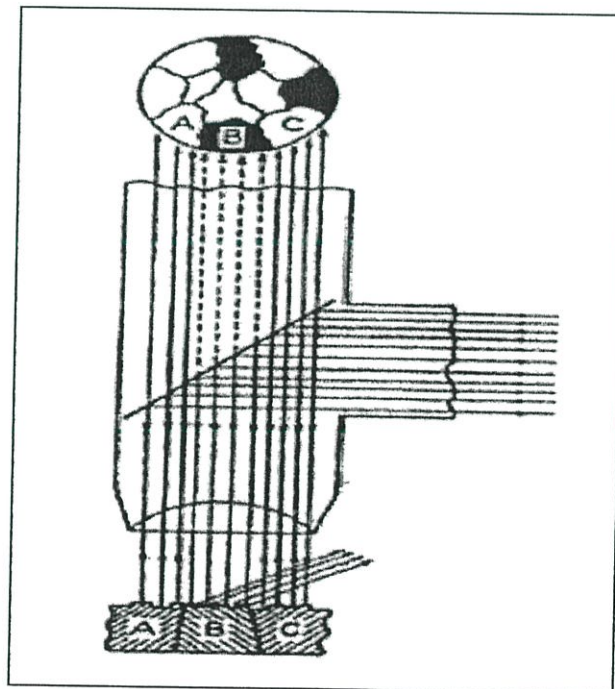


รูปที่ 2.20 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุก - ทองแดง - นิกเกิล (Sn-Cu-Ni)

2.7 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะ จะช่วยให้เราสามารถอธิบายคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของโลหะได้ การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะจะมีประสิทธิภาพ และคุณภาพขึ้นอยู่กับการเตรียมชิ้นงานทดสอบเป็นสำคัญ กล่าวคือ ชิ้นงานทดสอบจะต้องผ่านการปรับระดับของผิวหน้า และขัดผิวให้เรียบไม่มีรอยขีดข่วน มีลักษณะเป็นมัน ถ้าขั้นตอนการเตรียมงานไม่ดี ก็ไม่สามารถวิเคราะห์หรือมองภาพจากกล้องจุลทรรศน์ได้ชัดเจน

ภายหลังจากที่ชิ้นงานผ่านการขัดมันมาแล้ว เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์จะมองเห็นภาพเป็นพื้นเรียบสว่างตลอดผิวงาน ไม่สามารถมองเห็นโครงสร้างจุลภาคได้ จึงต้องนำชิ้นงานทดสอบไปทำการกัดด้วยสารเคมี เพื่อให้ผิวงานเกิดลักษณะที่แตกต่างกัน เนื่องจากชิ้นงานประกอบด้วยเฟสหลายเฟสและหลายชนิด เฟสใดที่มีความต้านทานสูงกรดสามารถกัดได้น้อย และเฟสใดที่มีความต้านทานต่ำกรดสามารถกัดได้ลึกกว่า ทำให้ผิวชิ้นงานเปลี่ยนเป็นขรุขระ เมื่อนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่ส่องลงไปบนผิวหน้าที่ขรุขระสะท้อนแสงกลับมาคนละทิศทาง ทำให้บริเวณที่แสงสะท้อนกลับมาน้อยเห็นเป็นสีดำ ส่วนบริเวณที่แสงสะท้อนกลับมาได้มากก็จะเห็นเป็นสีขาว กรณีกัดกรดด้วยระบบชาวดำดังแสดงดังรูปที่ 2.21

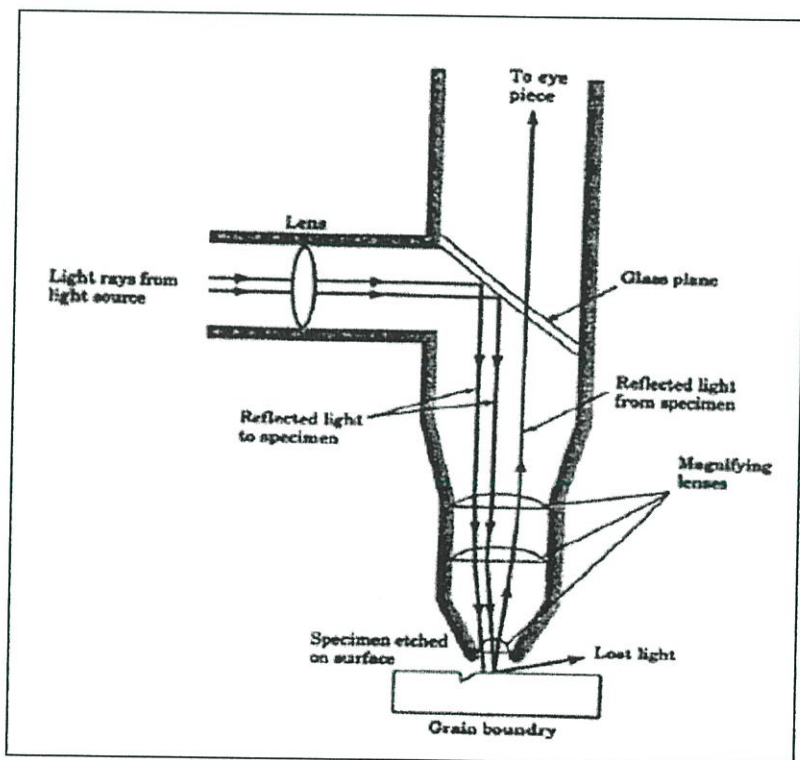


รูปที่ 2.21 ลักษณะการตกกระทบและแสงสะท้อนของแสงบนผิวชิ้นงานถูกกัดด้วยสารละลาย

2.7.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM)

กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงเป็นกล้องที่ใช้ศึกษาโครงสร้างจุลภาค โดยใช้แสงและระบบกำเนิดแสงเป็นพื้นฐาน กล้องประเภทนี้สามารถตรวจสอบโครงสร้างได้เฉพาะที่ผิวเท่านั้นโดยการสะท้อนแสง สำหรับ

วัตถุที่บ่งแสง เช่น โลหะทุกประเภท เซรามิก และ โพลีเมอร์บางชนิด ความดำของภาพแตกต่างกันเกิดจากความสามารถในการสะท้อนแสงที่แตกต่างกันในบริเวณต่างๆ การตรวจสอบแบบนี้เรียกว่า เมทัลโลกราฟี (Metallography) ชิ้นงานที่ผ่านการขัดจะเรียบจนสะท้อนแสงได้เหมือนกระจกหลังจากการกัดด้วยสารเคมี และนำมาตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงจะมองเห็นโครงสร้างจุลภาค ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเกรนมีทิศทางที่แตกต่างกัน จึงมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาต่างกัน แสงที่สะท้อนออกจากผิวของเกรนที่มีทิศทางการเรียงตัวของอะตอมที่แตกต่างกันหลังการกัดผิว โดยความเงาและเนื้อผิวที่เห็นในแต่ละเกรนขึ้นอยู่กับ การสะท้อนแสงของเกรนนั้นๆ หลังจากการขัดผิวที่ขอบเกรนจะเกิดร่องขนาดเล็กขึ้น เนื่องจากอะตอมที่บริเวณขอบเกรนมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยามากกว่าบริเวณอื่นๆ จึงถูกกัดออกไปมากกว่าบริเวณอื่นภายในเกรน ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

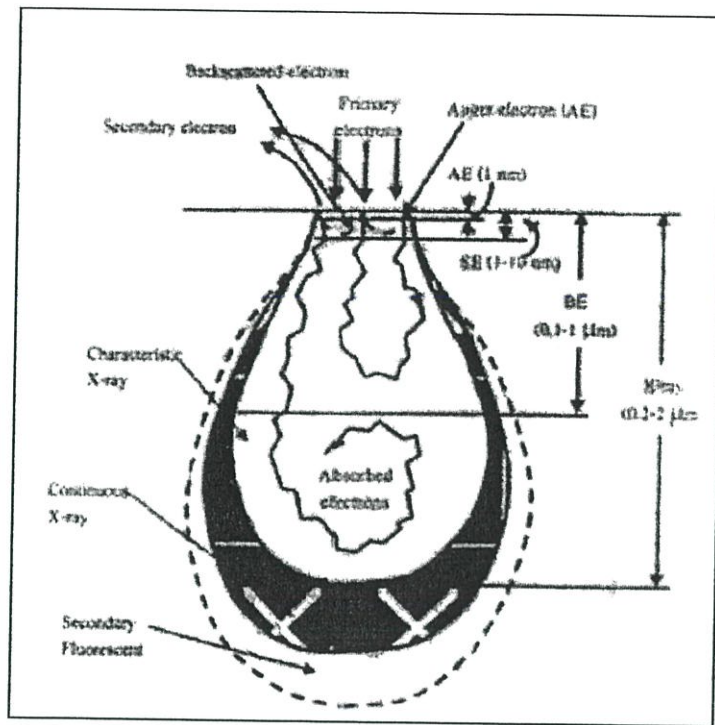
2.7.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) สัญญาณภาพที่ได้เกิดจากการใช้ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Detector, SE Detector) มาจับสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดขึ้น หรือใช้ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscatter Electron, BSE) มาจับสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับที่เกิดขึ้น ดังนั้นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบนี้จะสามารถประกอบกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ

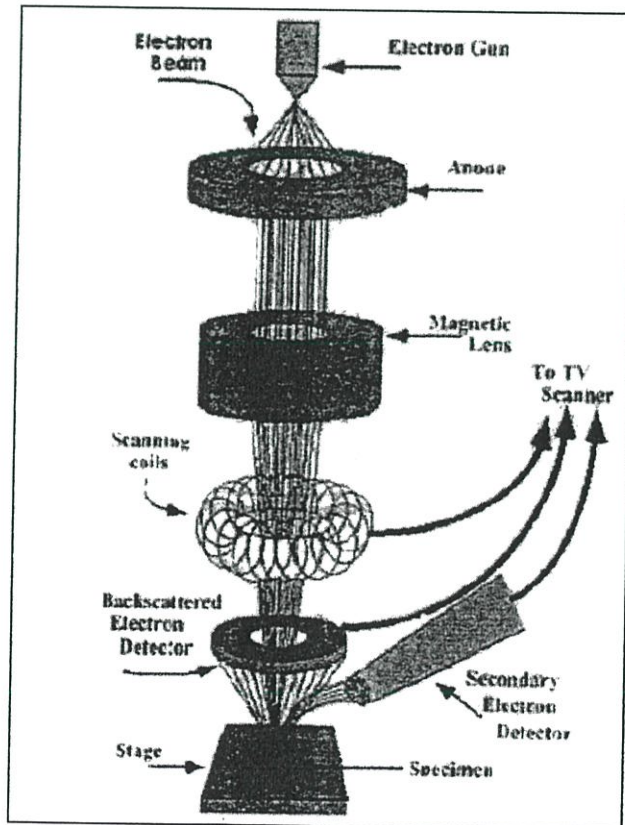
ด้วยรังสีเอกซ์ได้ทั้งแบบ Energy Dispersive X-ray (EDX) และ Wavelength Dispersive X-ray (WDX) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ธาตุโดยอาศัยหลักการแยกรังสีตามพลังงาน

หลักการเกิดภาพของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด คือ อิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary Electron) จากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron Gun) จะถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าสูงที่สามารถปรับค่าได้ (1000-3000 อิเล็กตรอนโวลต์หรือมากกว่า) จากนั้นจึงถูกดูดลงสู่แผ่นเบี่ยงล่างโดยแผ่นแอโนด (Anode Plate) ภายใต้ความดันสุญญากาศ 10^{-5} ถึง 10^{-7} ทอร์ และมีจุดคอนเด็นเซอร์เลนส์ที่ปรับลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดเล็กลงเพื่อเป็นการเพิ่มความเข้มของลำอิเล็กตรอน จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะวิ่งลงสู่เบี่ยงล่างผ่านเลนส์วัตถุ ซึ่งทำหน้าที่ในการปรับลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้มีจุดโฟกัสบนผิวตัวอย่างพอดี และลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบบนผิววัตถุหรือตัวอย่างจะมีขนาดในช่วง 5 ถึง 200 นาโนเมตร โดยมีชุดขดลวดควบคุมการส่องกราด (Scan Coil) ของลำอิเล็กตรอนทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนบนผิวตัวอย่าง และเกิดการถ่ายโอนพลังงานที่ชั้นความลึกจากผิวที่ระดับต่างๆทำให้เกิดการปลดปล่อยสัญญาณอิเล็กตรอนชนิดต่างๆออกมาดังรูปที่ 2.23 ซึ่งใช้ประโยชน์ในการศึกษาลักษณะผิวของตัวอย่างและวิเคราะห์ธาตุที่มีในชิ้นงานตัวอย่างได้ตามลักษณะสัญญาณภาพที่ได้จากลักษณะสัญญาณอิเล็กตรอนชนิดต่างๆที่เกิด คือ

1. สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Image, SEI) หรือเป็นกลุ่มพลังงานต่ำ 3-5 อิเล็กตรอนโวลต์ เกิดที่พื้นผิวระดับลึกไม่เกิน 10 นาโนเมตร โดยเกิดกับธาตุที่มีแรงยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนที่ผิวต่ำ
2. สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscatter Electron Image, BEI) หรือกลุ่มอิเล็กตรอนที่สูญเสียพลังงานให้กับอะตอมในชิ้นงานเพียงบางส่วน และการกระเจิงกลับออกมามีพลังงานสูงกว่าอิเล็กตรอนทุติยภูมิ เกิดที่ผิวระดับลึกกว่า 10 นาโนเมตร โดยเกิดได้ดีกับธาตุที่มีเลขอะตอมสูง
3. สัญญาณภาพจากรังสีเอกซ์ (X-ray Image, XRI) ชนิดที่เป็นรังสีเอกซ์เฉพาะตัวเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดจากอิเล็กตรอนในระดับชั้นโคจรต่างๆ (K,L,M,...) ถูกกระตุ้นหรือได้รับพลังงานมากพอจนหลุดออกมาจากวงโคจรทำให้อะตอมต้องรักษาสมดุลของโครงสร้างรวมภายในโดยการดึงอิเล็กตรอนจากวงโคจรชั้นถัดไปเข้ามาแทนที่และต้องลดระดับพลังงานภายใน เนื่องจากอิเล็กตรอนที่ถูกดึงมาแทนมีพลังงานสูงกว่าโดยการปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อให้ตัวเองมีพลังงานเท่ากับชั้นวงโคจรที่เข้าไปแทนที่ ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้มีความยาวคลื่นเฉพาะในแต่ละธาตุ จึงสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ธาตุตามระดับพลังงานของตัวอย่างได้ทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณ



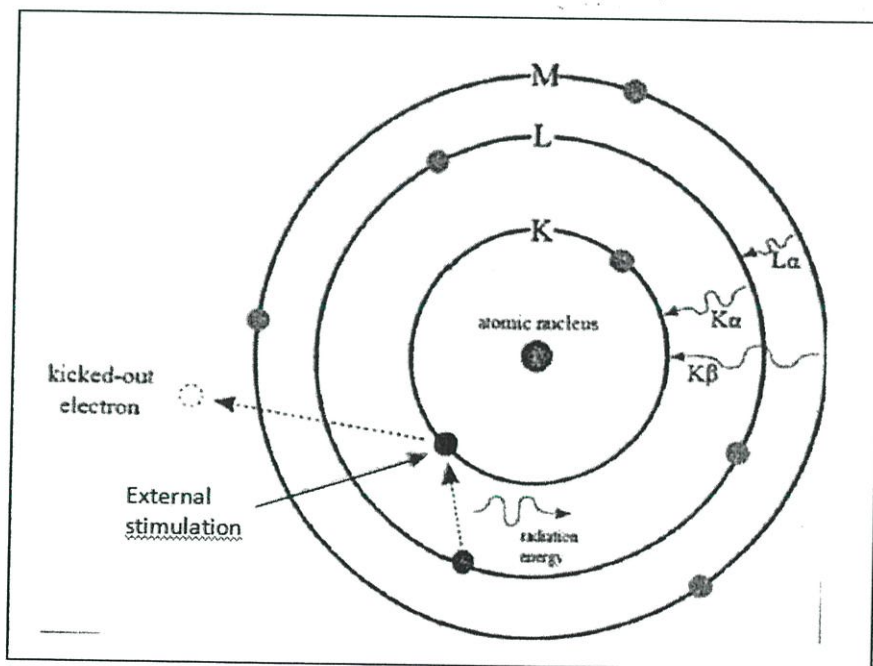
รูปที่ 2.23 การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับตัวอย่างที่ระดับชั้นความลึกต่างๆ



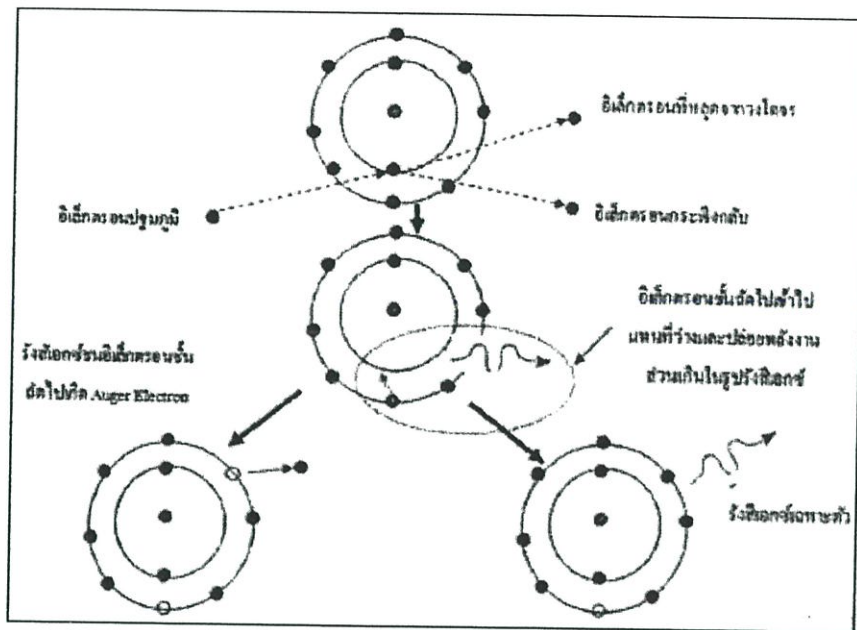
รูปที่ 2.24 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

2.7.3 การวิเคราะห์ Energy Dispersive X-ray (EDX)

ในระบบวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์สำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จะใช้ระบบการวิเคราะห์แบบ Energy Dispersive X-ray (EDX) โดยระบบ EDX มีหลักการการวิเคราะห์คือเมื่อลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงเคลื่อนที่เข้าชนอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นในของอะตอม เช่น ชั้น K หรือ L แล้วเกิดการถ่ายโอนพลังงานให้แก่อิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนในชั้นที่ได้รับพลังงานดังกล่าวมีพลังงานสูงขึ้นเกินพลังงานยึดเหนี่ยวของชั้นวงโคจร อิเล็กตรอนจึงหลุดออกจากวงโคจรและทำให้เกิดที่ว่างในชั้นวงโคจรนั้น จากนั้นอะตอมที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นจะลดระดับพลังงานลงมาให้เท่ากับพลังงานยึดเหนี่ยวของวงโคจรที่เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอน ด้วยการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินในรูปของรังสีเอกซ์ แล้วอิเล็กตรอนจะเข้ามาแทนที่ พลังงานส่วนเกินนี้จะมีพลังงานเท่ากับความต่างของพลังงานยึดเหนี่ยวเฉพาะชั้นโคจรของอิเล็กตรอนเฉพาะของธาตุนั้นๆ จึงเป็นพลังงานเฉพาะค่า เราเรียกรังสีเอกซ์ชนิดนี้ว่า รังสีเอกซ์เฉพาะตัว ดังรูปที่ 2.25 และ 2.26



รูปที่ 2.25 การเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่ระดับพลังงานของชั้นวงโคจรต่างๆ



รูปที่ 2.26 การกระตุ้นให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวโดยใช้ลำอิเล็กตรอน

ในระบบการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์แบบ EDX หัววัดรังสีที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ หัววัดรังสีแบบ Si (Li) ซึ่งเหมาะกับการวัดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่มีพลังงานในช่วง 1-30 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV) หรือหัววัดเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง (High Purity Germanium, HPGe) ซึ่งสามารถวัดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวได้ในช่วง 3-200 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ แม้ว่าหัววัด HPGe จะสามารถวัดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวได้ในช่วงกว้างกว่า แต่ในการวิเคราะห์ธาตุเบาหัววัดชนิด Si (Li) ก็ยังมีความจำเป็นอยู่มาก หัววัดรังสีเอกซ์ทั้งสองแบบจะเปลี่ยนพลังงานของรังสีให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าในรูปของศักย์ไฟฟ้า โดยขนาดของสัญญาณไฟฟ้าที่ทางออกของหัววัด จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบบนหัววัด จากนั้นวงจรขยายแบบช่องเดียวหรือหลายช่องจะเก็บสัญญาณไฟฟ้าจากหัววัดในหน่วยความจำที่อยู่ภายในเครื่อง และแสดงผลวิเคราะห์บนจอภาพในรูปของสเปกตรัมพร้อมทั้งผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณ และคุณภาพ โดยโปรแกรมสำเร็จรูปที่มีอยู่ซึ่งมีความซับซ้อนแตกต่างกันไปในแต่ละกลุ่มผู้ผลิต

การประยุกต์ใช้งานของ SEM-EDX

1. ใช้ประเมินคุณลักษณะเฉพาะ (Characteristic Evaluation) สามารถดูได้จากขนาดของเกรน (Grain Size) ความขรุขระของผิว (Surface Roughness) ความพรุน (Porosity) การกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle Size Distribution) และความเป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุ (Material Homogeneity)
2. การวิเคราะห์จุดบกพร่อง (Failure Analysis) สามารถดูได้จากการปนเปื้อนเฉพาะบริเวณ (Contamination Location) การประเมินกลไกการเกิดความเสียหาย (Mechanical Damage Assessment) บริเวณที่เกิดการแตกหักในระดับจุลโครงสร้าง (Micro-Crack Location)
3. การควบคุมคุณภาพ (Quality Control Screening) สามารถดูได้จากการเปรียบเทียบตัวอย่างที่ดี และไม่ดี การกำหนดความหนาของชั้นฟิล์มและชั้นเคลือบ เป็นต้น

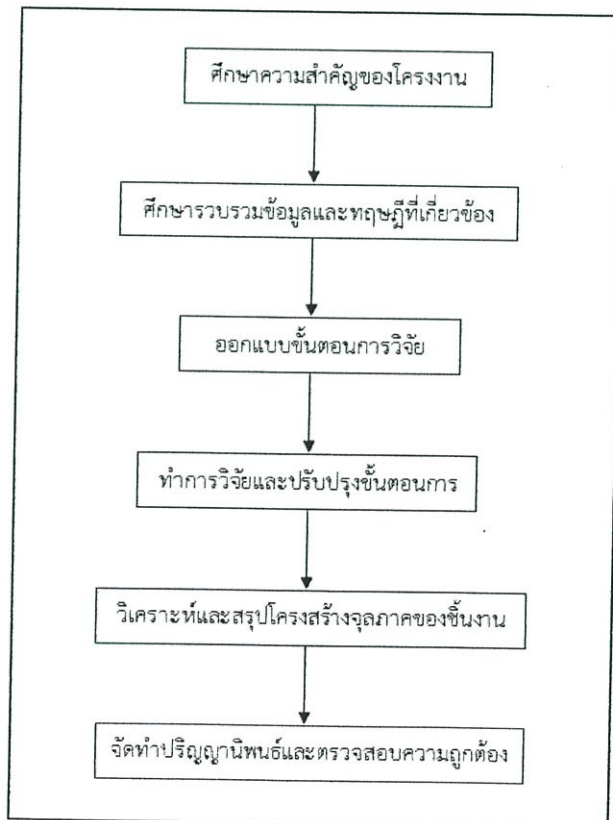
บทที่ 3

วิธีการดำเนินการ

ในการจัดทำปฏิญานิพนธ์เรื่องการศึกษาผลของ Ni, Ag และ In ต่อปฏิกิริยาระหว่าง Sn-58Bi-Ni-X กับแผ่นทองแดง ได้ทำการสร้างแม่พิมพ์สำหรับหล่อชิ้นงานทดสอบโลหะบัดกรี โดยมีตัวแปรที่สำคัญในการวิจัยครั้งนี้ คือ ความเข้มข้นของธาตุ Ni, Ag และ In โดยใช้ธาตุ Ni ที่ความเข้มข้น 0-1 wt% และ ใช้ Ag และ In ที่ความเข้มข้น 0.05 หรือ 0.1 wt% เป็นธาตุเจือหลังจากเติมธาตุผสมตามปริมาณที่กำหนดแล้วก็จะทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีและองค์ประกอบทางเคมีที่ได้หลังจากการบัดกรีโลหะบัดกรีแต่ละชนิดกับแผ่นทองแดงบริสุทธิ์

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

สำหรับงานวิจัยเพื่อการศึกษาผลกระทบบของ Ni, Ag และ In ต่อปฏิกิริยาระหว่าง Sn-Bi-Ni-X กับแผ่นทองแดงในครั้งนี้ มีขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยดังนี้



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.2 การศึกษาวัสดุที่ใช้ในการสร้างแม่พิมพ์

หลังจากทำการออกแบบแม่พิมพ์ด้วยโปรแกรม Solid Work ที่ใช้ในการผลิตชิ้นงานทดสอบ ต่อมาจะเป็นการเลือกวัสดุ พร้อมทั้งศึกษาคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการสร้างแม่พิมพ์

วัสดุหลักที่ใช้ในการสร้างแม่พิมพ์คือโลหะ ซึ่งหลักการเลือกโลหะที่ใช้ในการสร้างนั้นจะคำนึงถึง เรื่องคุณสมบัติของวัสดุ เช่น คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติเชิงกล การต้านการสึกหรอ ความแข็ง การต้านทานการเกิดสนิม ราคา เป็นต้น และสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึง คือ โครงสร้างอะตอมและองค์ประกอบ (Steel Structure) ของโลหะที่นำมาใช้ เนื่องจากโลหะที่ใช้สร้างแม่พิมพ์บางชนิด หากได้รับการถ่ายเท ความร้อนจากชิ้นงานอาจส่งผลให้เกรนของโลหะที่ใช้สร้างแม่พิมพ์เปลี่ยนคุณสมบัติได้ และอาจทำให้ผิว โลหะของแม่พิมพ์ในส่วนที่ขัดเงาไว้อย่างดีแบบ Mirror finished เกิดเป็นรูพรุน หรือเนื้อเกรนของเหล็ก แม่พิมพ์ส่วนที่ขัดมันไว้ผุดขึ้นมาจากผิวหรือบ่าแม่พิมพ์ ส่งผลให้ผิวชิ้นงานทดสอบที่ต้องการมีตำหนิ ดังนั้น การศึกษาคุณสมบัติของโลหะที่จะใช้สร้างแม่พิมพ์จึงเป็นสิ่งที่จะต้องคำนึงอย่างยิ่ง โดยเหล็กที่จะเลือกใช้ในการ สร้างแม่พิมพ์จะอยู่ในกลุ่มของเหล็กกล้า ซึ่งจะเลือกใช้เป็นเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel)

3.2.1 วัสดุที่เลือกใช้สร้างแม่พิมพ์

วัสดุที่ใช้เลือกสร้างแม่พิมพ์ คือ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 หรือ Stainless Steel AISI 304 ตาม มาตรฐานของอเมริกา เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดออสเทนนิคที่พบเห็น และใช้ แพร่หลายที่สุดในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมอาหาร เครื่องดื่ม อุปกรณ์ในกระบวนการทางเคมี อุปกรณ์เครื่องครัว เตาหลอม เครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร เครื่องใช้ในบ้าน เครื่องล้างจาน อ่างล้างจาน ภาชนะ หุ่นยนต์ เครื่องมือในโรงพยาบาล และ เวชภัณฑ์

เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 มีส่วนผสมของโครเมียมประมาณ 18% และนิกเกิลประมาณ 8% (ใส่ นิกเกิลเพื่อปรับอุณหภูมิยูเทคตอยด์ให้ต่ำลง ทำให้เกรนละเอียด เพิ่มความแข็ง และความแข็งแรงโดยไม่ทำ ให้ความเหนียวลดลง ปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านทนต่อแรงกระแทกที่อุณหภูมิต่ำ และปรับปรุงคุณสมบัติ ด้านทนการผุกร่อนให้ดีขึ้น) หรือเรียกกันว่า เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิค 18/8 สามารถทนความร้อนได้ ไม่เกิน 900 องศาเซลเซียส ซึ่งเหมาะกับการนำมาสร้างแม่พิมพ์ผลิตชิ้นงานทดสอบ เนื่องจากชิ้นงาน ทดสอบมีอุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ 138 องศาเซลเซียส

คุณสมบัติทนความร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิค สิ่งแรกที่พิจารณาคือ ความคงทนต่อการ อ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อน ประการที่สองจะพิจารณาถึงคุณสมบัติในด้านการต้านทานการเกิดออกซิเดชัน ที่อุณหภูมิสูง โดยเฉพาะในกรณีที่เกิดปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจน ปกติ O_2 จะสามารถแทรกเข้าไปทำปฏิกิริยา ออกซิเดชันให้สลายไปได้ผิวของเหล็กโดยการแทรกซึมลงไปตามเกรน (Intercrystalline) ยิ่งเหล็กที่มี อุณหภูมิสูงมีเกรนโต การแทรกซึมของ O_2 จะยิ่งเพิ่มมากขึ้น ในการป้องกันหรือลดการเกิดออกซิเดชัน อาจช่วยได้ด้วยการผสมโลหะประเภทแคลเซียมและซีเรียมในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิค จะช่วยป้องกัน

การขยายตัวของเกรนที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้ยังมีแก๊สไนโตรเจนที่มีบทบาทในการลดคุณสมบัติด้านทาน การเกิดออกซิเดชันโดยแก๊สไนโตรเจนที่มากับแก๊สจากการเผาไหม้ สามารถแทรกซึมเข้าไปในเนื้อเหล็ก และร่วมกับโครเมียมเป็นไนไตรด์ของโครเมียม ทำให้ปริมาณโครเมียมในออสเตไนต์ลดลงซึ่งจะไปลด คุณสมบัติด้านทานการเกิดออกซิเดชันของเหล็ก แต่ในกรณีนี้ฟิล์มออกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน จะมีส่วนช่วยป้องกันแก๊สไนโตรเจนแทรกซึมได้มาก

3.2.2 วัสดุที่เลือกใช้ทำสลักของแม่พิมพ์

สลักที่ใช้ยึดตัวแม่พิมพ์จะใช้เป็นเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 ตามมาตรฐานญี่ปุ่นจัดอยู่ในกลุ่ม JIS G3101 ตรงกับมาตรฐาน DIN 1.0028 และ UST 34-2 ส่วนผสม คือ C < 0.15%, Mn 0.2-0.5%, P < 0.05%, S < 0.05% ซึ่งจัดเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางหรือเรียกว่าเหล็กละมุน (Mild steel)

โดยส่วนผสมของเหล็กกล้าคาร์บอนจะมีส่วนผสมใกล้เคียงกับเหล็ก SS41 ใน JIS G3101 มีความ แข็งประมาณ 116-152 HB เหล็ก SS400 มีการใช้อย่างแพร่หลายในการประกอบหรือขึ้นรูปเป็น ผลิตภัณฑ์เหล็ก ได้แก่ ชิ้นส่วนเครื่องจักรกล งานท่อเหล็กต่างๆ รวมถึงการผลิตชิ้นส่วนเกี่ยวกับรถบรรทุก มีความต้านแรงดึง 400-510 N/mm²

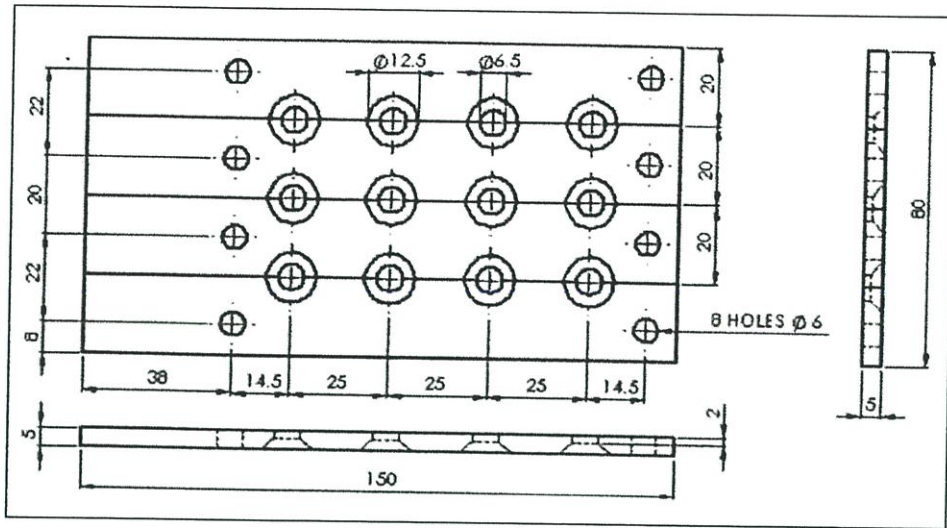
3.3 การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์โลหะ

3.3.1 การออกแบบแม่พิมพ์โลหะ

การออกแบบแม่พิมพ์โลหะสำหรับการหล่อชิ้นงานทดสอบนั้น อ้างอิงจากขนาดของชิ้นงาน ทดสอบ ตามมาตรฐานการทดสอบของ JES Z 3198-3 : 2003 (JWES) โดยกำหนดให้รูปร่างของชิ้นงาน ทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 มิลลิเมตร และหนา 1.6 มิลลิเมตร โดยแม่พิมพ์ที่ออกแบบนั้น ประกอบด้วย 4 ส่วน คือ แม่พิมพ์ส่วนบน แม่พิมพ์ส่วนล่าง แม่พิมพ์ส่วนกลาง และสลัก

3.3.1.1 แม่พิมพ์ส่วนบน

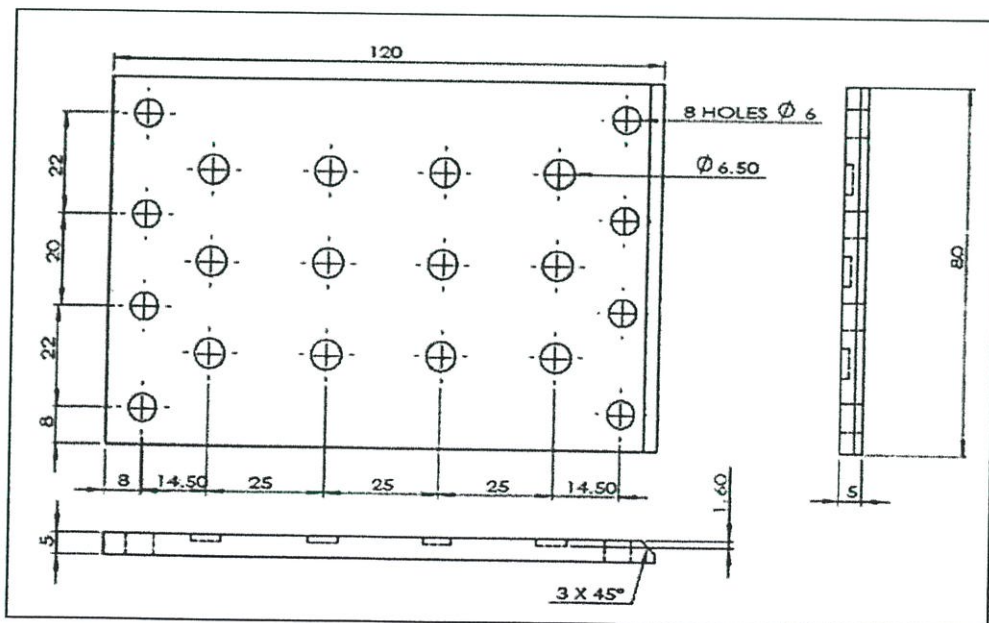
ออกแบบให้มีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ประกอบกัน 4 ส่วน โดยแต่ละส่วนมีความ ยาว 150 มิลลิเมตร ความกว้าง 20 มิลลิเมตร และมีความหนา 5 มิลลิเมตร โดยบริเวณผิวหน้าจะทำการ สร้างรูเท ลักษณะทรงกรวยเพื่อเป็นทางเดินของเหลวลึกลงไป 3 มิลลิเมตร จากนั้นสร้างรูตรงต่อจากรูเท ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 มิลลิเมตร จำนวน 12 รู และสร้างรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ลึกลงตามความหนาของแม่พิมพ์ จำนวน 8 รู สำหรับใส่สลักเพื่อยึดแม่พิมพ์ส่วนบน ส่วนกลางและแม่พิมพ์ ส่วนล่างเข้าด้วยกัน ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แบบแม่พิมพ์ส่วนบน

3.3.1.2 แม่พิมพ์ส่วนล่าง

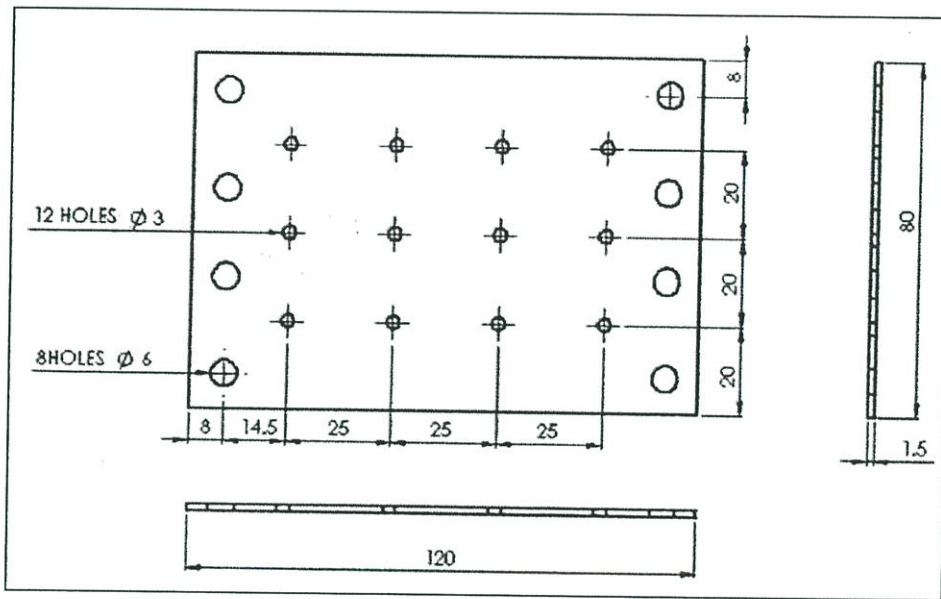
ออกแบบให้มีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาดความยาว 120 มิลลิเมตร ความกว้าง 80 มิลลิเมตร และมีความหนา 5 มิลลิเมตร โดยบริเวณผิวหน้าจะทำการสร้างรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 มิลลิเมตร ลึกลงไป 1.6 มิลลิเมตร จำนวน 12 รู สำหรับการหล่อชิ้นงานทดสอบ และสร้างรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ลึกตามความหนาของแม่พิมพ์ จำนวน 8 รู สำหรับใส่สลักเพื่อยึดแม่พิมพ์ส่วนบน ส่วนกลางและแม่พิมพ์ส่วนล่างเข้าด้วยกัน ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แบบแม่พิมพ์ส่วนล่าง

3.3.1.3 แม่พิมพ์ส่วนกลาง

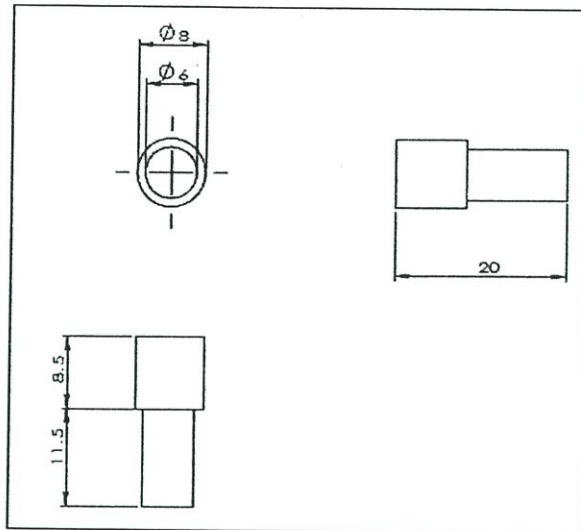
ออกแบบให้มีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาดความยาว 120 มิลลิเมตร ความกว้าง 80 มิลลิเมตร และมีความหนา 1.5 มิลลิเมตร โดยบริเวณผิวหน้าจะทำการสร้างมีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาดความยาว 120 มิลลิเมตร ความกว้าง 80 มิลลิเมตร และมีความหนา 1.5 มิลลิเมตร และสร้างรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ลึก 1.5 มิลลิเมตร จำนวน 8 รู สำหรับใส่สลักเพื่อยึดแม่พิมพ์ส่วนบน ส่วนกลางและแม่พิมพ์ส่วนล่างเข้าด้วยกัน ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แบบแม่พิมพ์ส่วนกลาง

3.3.1.4 สลัก

ออกแบบให้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกมีความยาวรวม 20 มิลลิเมตร ประกอบด้วยส่วนหัวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ความยาว 10 มิลลิเมตร และส่วนปลายมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ความยาว 10 มิลลิเมตร จำนวน 4 ตัว โดยสลักจะเป็นตัวยึดแม่พิมพ์ส่วนบน ส่วนกลางและแม่พิมพ์ส่วนล่างเข้าด้วยกัน โดยมีการเพิ่มน็อตยึดที่บริเวณมุม 4 ตัว เพื่อให้แม่พิมพ์แต่ละส่วนมีความแนบสนิทมากขึ้น ดังรูปที่ 3.5



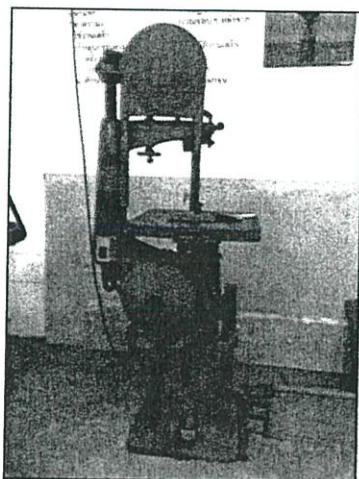
รูปที่ 3.5 แบบสลักสำหรับยึดแม่พิมพ์

3.3.2. การสร้างแม่พิมพ์โลหะ

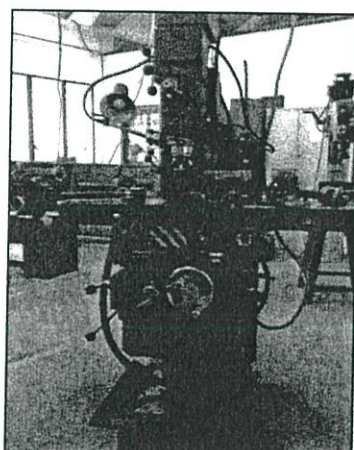
ทำการสร้างแม่พิมพ์ตามแบบที่กำหนด โดยวัสดุที่นำมาสร้างแม่พิมพ์ส่วนบน ส่วนกลาง และส่วนล่าง นั้นเป็นสแตนเลสเกรด 304 ชนิดออสเทนนิติก (Austenitic) และวัสดุที่ใช้ในการสร้างสลักเป็นเหล็กเพลลาขาว SS400 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร ซึ่งต้องนำมาผ่านขั้นตอนในการสร้างแม่พิมพ์ ดังนี้

3.3.2.1 การสร้างแม่พิมพ์ส่วนบน

1. ตัดสแตนเลสที่มีความหนา 6 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องเลื่อยโลหะ ดังรูปที่ 3.6 ให้มีขนาด ความยาว 155 มิลลิเมตร ความกว้าง 25 มิลลิเมตร จำนวน 4 ชิ้น
2. กัดขอบด้านข้างทั้ง 4 ด้านด้วยเครื่องกัด ดังรูปที่ 3.7 ให้ได้ขนาดความยาว 150 มิลลิเมตร ความกว้าง 20 มิลลิเมตร กัดด้านหน้าให้ได้ความหนา 5 มิลลิเมตร
3. เจาะรูสลักจำนวน 2 รู ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร บนแผ่นสแตนเลสแต่ละชิ้น ด้วยเครื่องเจาะ ดังรูปที่ 3.8
4. ทำการปาดรูเทสำหรับทางเดินน้ำโลหะบริเวณปากรูที่เจาะไว้ โดยตำแหน่งที่ทำการเจาะรูต่างๆเป็นไปตามที่ กำหนดไว้ในแบบแม่พิมพ์
5. นำชิ้นงานที่ได้มาทำการลบมุมคม ด้วยตะไบและกระดาษทราย



รูปที่ 3.6 เครื่องเลื่อย (Sawing Machine)



รูปที่ 3.7 เครื่องกัด (Milling Machine)



รูปที่ 3.8 เครื่องเจาะ (Drilling Machine)

3.3.2.2 การสร้างแม่พิมพ์ส่วนล่าง

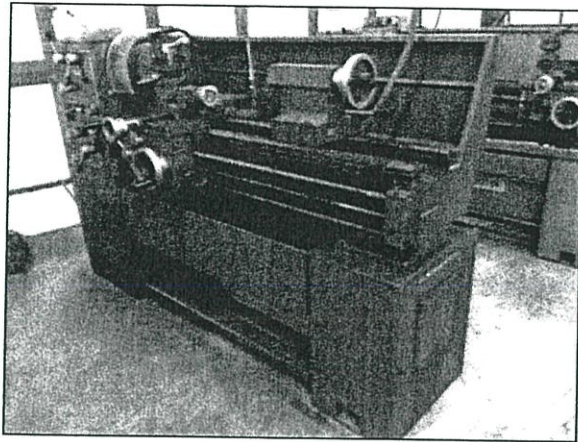
1. ตัดสแตนเลสที่มีความหนา 6 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องเลื่อยให้มีขนาดความยาว 125 มิลลิเมตร ความกว้าง 85 มิลลิเมตร
2. กัดขอบด้านข้างทั้ง 4 ด้านด้วยเครื่องกัดให้ได้ขนาดความยาว 120 มิลลิเมตร ความกว้าง 80 มิลลิเมตร และกัดด้านหน้าให้ได้ความหนา 5 มิลลิเมตร
3. เจาะรูสลักจำนวน 8 รู ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ลึก 5 มิลลิเมตร บนแผ่นสแตนเลสแต่ละชั้น ด้วยเครื่องเจาะ
4. เจาะรูหล่อชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 มิลลิเมตร ลึก 1.6 มิลลิเมตร จำนวน 12 รู ด้วยดอกกัด Slot drill ของเครื่องกัด
5. นำชิ้นงานที่ได้มาทำการลบมุมคม ด้วยตะไบและกระดาษทราย

3.3.2.3 การสร้างแม่พิมพ์ส่วนกลาง

1. ตัดแผ่นสแตนเลสที่มีความหนา 1.5 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องเลื่อยให้มีขนาดความยาว 120 มิลลิเมตร ความกว้าง 80 มิลลิเมตร
2. เจาะรูสลักจำนวน 8 รู ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ลึก 1.5 มิลลิเมตร และ รูหล่อชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ลึก 1.5 มิลลิเมตร จำนวน 12 รู บนแผ่นสแตนเลสแต่ละชั้น ด้วยเครื่องเจาะ
3. นำชิ้นงานที่ได้มาทำการลบมุมคม ด้วยตะไบและกระดาษทราย

3.3.2.4 การสร้างสลัก

1. ตัดเหล็กเพลลาขาว SS400 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร ยาว 40 มิลลิเมตร จำนวน 4 ชิ้น ด้วยเลื่อยตัดโลหะ
2. กิ่งผิวด้วยเครื่องกิ่ง ดังรูปที่ 3.9 ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ยาว 10 มิลลิเมตร และทำการกิ่งต่อด้านปลายของชิ้นงานให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ยาว 10 มิลลิเมตร
3. ใช้เนื้อขนาด เบอร์ M6 ในการยึด



รูปที่ 3.9 เครื่องกลึง (Turning Machine)

3.4 การวิเคราะห์ความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีหลังการบัดกรี

3.4.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

โลหะบัดกรีที่ทำการเติมธาตุผสมตามปริมาณที่กำหนดเพื่อใช้เป็นชิ้นงานทดสอบในการทำการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

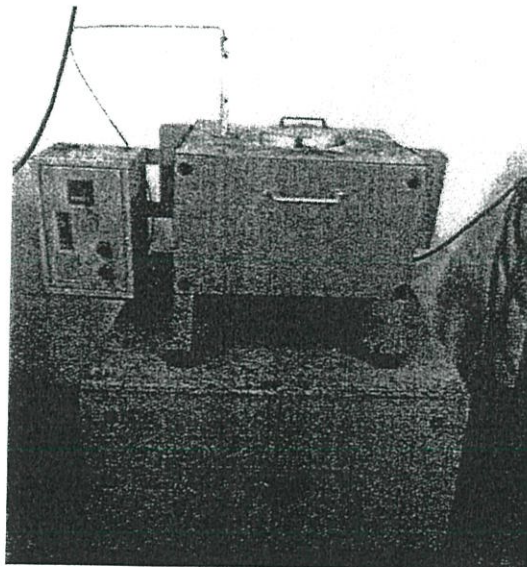
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมของตัวอย่างที่ใช้ทำการทดสอบ

โลหะบัดกรี	ส่วนประกอบ (wt%)				
	Sn	Bi	Ni	In	Ag
Sn58Bi	42.00	58.00	0.00	0.00	0.00
Sn58Bi-0.01Ni	41.95	58.00	0.05	0.00	0.00
Sn58Bi-0.1Ni	41.90	58.00	0.10	0.00	0.00
Sn58Bi-0.5Ni	41.50	58.00	0.50	0.00	0.00
Sn58Bi-1.0Ni	41.00	58.00	1.00	0.00	0.00
Sn58Bi-0.05Ni-0.05In	41.90	58.00	0.05	0.05	0.00
Sn58Bi-0.05Ni-0.10In	41.85	58.00	0.05	0.10	0.00
Sn58Bi-0.05Ni-0.05Ag	41.90	58.00	0.05	0.00	0.05
Sn58Bi-0.05Ni-0.10Ag	41.85	58.00	0.05	0.00	0.10
Sn58Bi-0.1Ni-0.05In	41.85	58.00	0.01	0.05	0.00
Sn58Bi-0.1Ni-0.1In	41.80	58.00	0.01	0.10	0.00
Sn58Bi-0.1Ni-0.05Ag	41.85	58.00	0.01	0.00	0.05
Sn58Bi-0.1Ni-0.1Ag	41.80	58.00	0.01	0.00	0.10
Sn58Bi-0.5Ni-0.05In	41.45	58.00	0.10	0.05	0.00
Sn58Bi-0.5Ni-0.1In	41.40	58.00	0.10	0.10	0.00
Sn58Bi-0.5Ni-0.05Ag	41.45	58.00	0.10	0.00	0.05
Sn58Bi-0.5Ni-0.1Ag	41.40	58.00	0.10	0.00	0.10
Sn58Bi-1.0Ni-0.05In	41.85	58.00	1.00	0.05	0.00
Sn58Bi-1.0Ni-0.1In	41.80	58.00	1.00	0.10	0.00
Sn58Bi-1.0Ni-0.05Ag	41.85	58.00	1.00	0.00	0.05
Sn58Bi-1.0Ni-0.1Ag	41.80	58.00	1.00	0.00	0.10

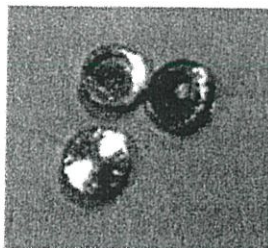
การเตรียมชิ้นงานเพื่อใช้ทดสอบ เริ่มต้นด้วยการหล่อโลหะบัดกรีเป็นรูปทรงกระบอก ขนาด 18.3×160 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.10 ซึ่งโลหะบัดกรีแต่ละชนิดจะทำการหลอมในเบ้าหลอมกราไฟต์ ดังรูปที่ 3.11 แล้วเทลงแม่พิมพ์โลหะที่สร้างขึ้น ซึ่งชิ้นงานโลหะบัดกรีที่ได้จากการหล่อมมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 มิลลิเมตร หนา 1.6 มิลลิเมตร ตามมาตรฐานการทดสอบของ JES Z 3198-3 : 2003 (JWES) ดังรูปที่ 3.12 หลังจากชิ้นงานเย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้องแล้วจึงทำการชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักยี่ห้อ Sartorius รุ่น BSA224S-CW ดังรูปที่ 3.13 เพื่อให้ได้ชิ้นงานทดสอบที่มีน้ำหนักตามที่ต้องการสำหรับการทำการทดสอบต่อไป



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างชิ้นงานหลังจากการหล่อ



รูปที่ 3.11 เบ้าหลอมกราไฟต์



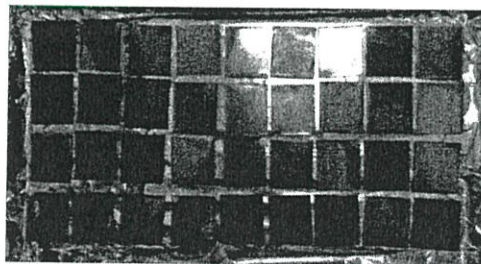
รูปที่ 3.12 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการหล่อ



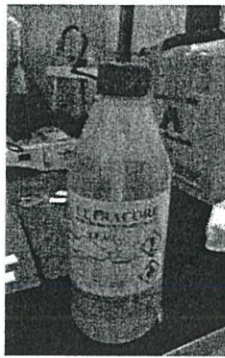
รูปที่ 3.13 เครื่องชั่งน้ำหนักยี่ห้อ Sartorius รุ่น BSA2245-CW

3.4.2 การเตรียมแผ่นทองแดง

เตรียมแผ่นทองแดงบริสุทธิ์ 99.99% ขนาด 30x30x0.35 มิลลิเมตรดังรูปที่ 3.14 เป็นโลหะบัดกรีพื้นฐาน จากนั้นนำแผ่นทองแดงมาล้างด้วย IPA และจุ่มลงในสารละลาย H_2SO_4 ที่อุณหภูมิ 65 ± 5 °C เป็นเวลา 1 นาที และนำมาล้างสารละลาย $(NH_4)_2S_2O_8$ เป็นเวลา 1 นาที ล้างด้วยน้ำประปาเปิดไหลผ่าน 5 วินาที และจุ่มในสารละลาย H_2SO_4 ที่อุณหภูมิ 25 ± 2 °C เป็นเวลา 1 นาที ล้างด้วยน้ำประปาเปิดไหลผ่าน และนำมาล้างด้วย DI Water สุดท้ายล้างด้วย IPA ดังรูปที่ 3.15 ตามมาตรฐาน JIS Z3284



รูปที่ 3.14 แผ่นทองแดงบริสุทธิ์ 99.99% ขนาด 30x30x0.35 มิลลิเมตร



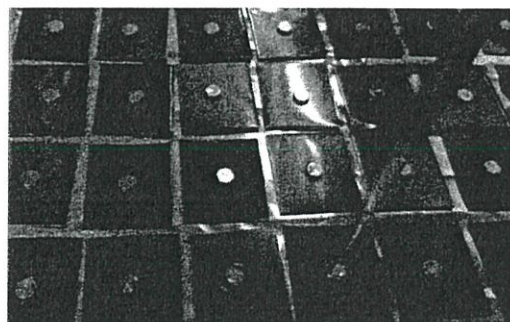
รูปที่ 3.15 IPA ที่ใช้ในการล้างแผ่นทองแดงชั้นตอนสุดท้าย

3.4.3 วิธีการทดสอบหาค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะพื้น

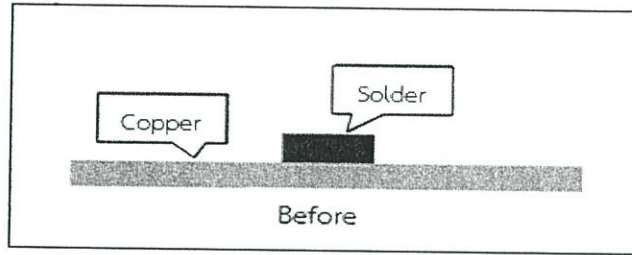
นำชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการหล่อวางบนแผ่นรองทองแดงขนาด 30x30x0.35 มิลลิเมตร ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 100°C และใส่ฟลักซ์ชนิด NH-100VK-1 ดังรูปที่ 3.16 ซึ่งมีสถานะเป็นของเหลว ปริมาณ 0.02 มิลลิลิตร จะได้ชิ้นงานที่พร้อมทดสอบดังรูปที่ 3.17 จากนั้นปรับตั้งค่าอุณหภูมิตู้อบที่ใช้ในการบัดกรีที่ 179°C ± 2°C ซึ่งใช้เวลาหลอมโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดง 30 วินาที นับเมื่อโลหะบัดกรีเริ่มหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 179 °C ตามมาตรฐาน JIS Z 3198-3:2003 จากนั้นยกชิ้นงานออกและปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง แล้วล้างฟลักซ์ออกด้วยเอทานอล ลักษณะชิ้นงานก่อนและหลังการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.18 และ 3.19 สำหรับการวัดค่าความสามารถในการเปียกนั้น นำไมโครมิเตอร์วัดความสูงของโลหะบัดกรีที่จุดสูงสุด



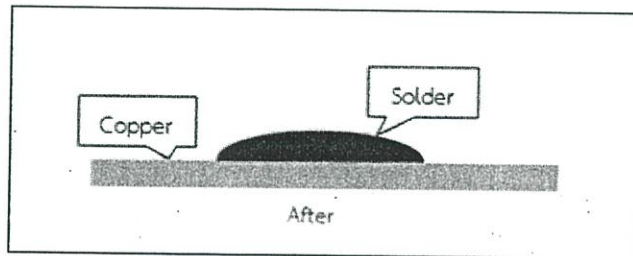
รูปที่ 3.16 SPEEDY FLUX NH-100VK-1



รูปที่ 3.17 แผ่นทองแดงที่มีการหยดฟลักซ์และโลหะบัดกรีสำหรับการทดสอบ



รูปที่ 3.18 ชิ้นงานก่อนทำการบัดกรี



รูปที่ 3.19 ชิ้นงานหลังทำการบัดกรี

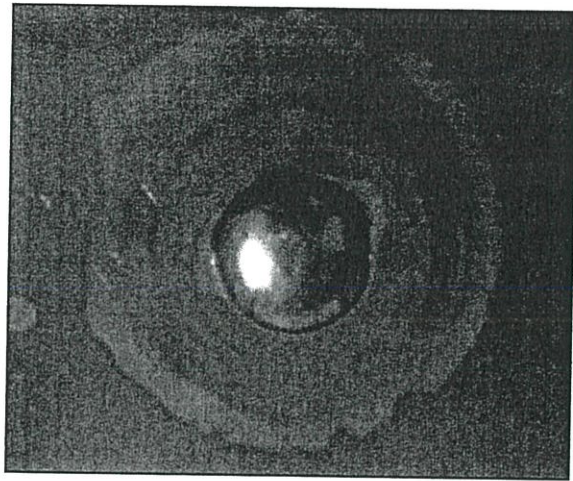
จากนั้นนำชิ้นงานหลังการทดสอบหาค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะพื้น มาคำนวณหาค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread Factor : S_f) ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2

3.5 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรี

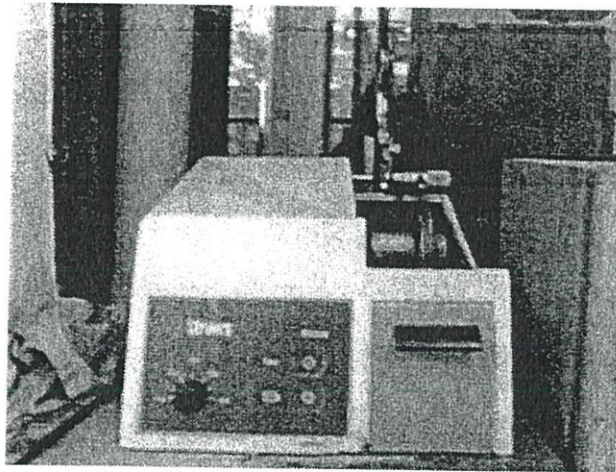
3.5.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

3.5.1.1 การตัดชิ้นงานทดสอบ

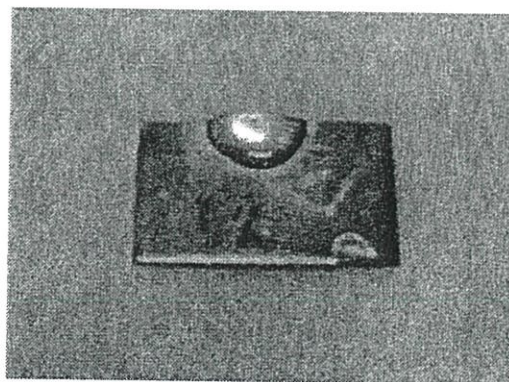
นำชิ้นงานทดสอบดังรูปที่ 3.20 ตัดในทิศที่ตั้งฉากกับผิวของแผ่นทองแดงบริเวณส่วนกลางของโลหะบัดกรีด้วยเครื่องตัดแบบแรงโน้มถ่วงยี่ห้อ STRUERS รุ่น MINITOM ดังรูปที่ 3.21 แล้วตัดออกมาด้วยเครื่องตัดแผ่นโลหะให้มีขนาดของหน้าตัดกว้าง 1.5 เซนติเมตร และยาว 2.0 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.22 จำนวน 21 ชิ้น จากนั้นนำไปทำความสะอาดแล้วทำการหล่อเรซิน



รูปที่ 3.20 ชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 3.21 เครื่องตัดแบบแรงโน้มถ่วงยี่ห้อ STRUERS รุ่น MINITOM



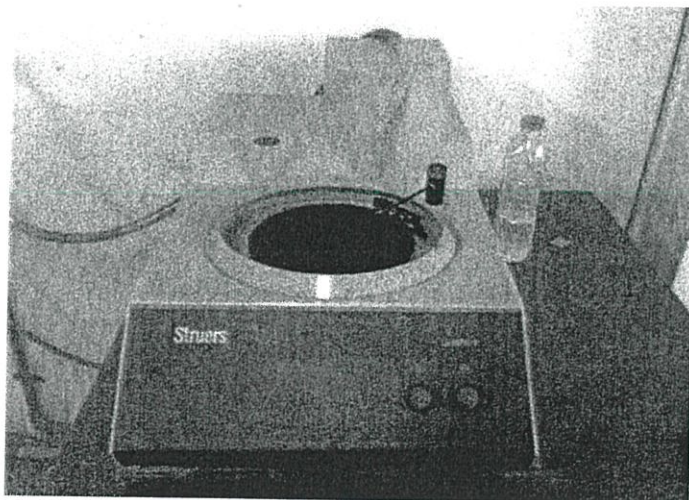
รูปที่ 3.22 ลักษณะชิ้นงานทดสอบหลังทำการตัด

3.5.1.2 การหล่อเรซิน

นำชิ้นงานมาทำการหล่อเรซินเพื่อให้จับชิ้นงานได้สะดวกในการขัดระนาบ โดยแม่แบบที่ใช้ในการหล่อเรซินจะเป็นท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.60 เซนติเมตร และตัดแบ่งท่อให้มีความสูงมากกว่าชิ้นงาน ทำการปรับผิวของท่อ PVC และพื้นระนาบที่วางแม่แบบ จากนั้นนำชิ้นงานวางในแม่แบบแล้วเทเรซินที่ผสมเรียบร้อยแล้วลงไป รอจนเรซินแข็งตัวก่อนแล้วจึงแกะชิ้นงานออกจากแม่แบบ

3.5.1.3 การขัดผิวชิ้นงานทดสอบ

นำชิ้นงานที่หล่อเรซินแล้วไปขัดด้วยกระดาษทรายที่ความละเอียดตั้งแต่เบอร์ 400, 1000, 2000 และ 4000 ตามลำดับ โดยใช้เครื่องขัดยี่ห้อ Struers LaboPol-1 ดังรูปที่ 3.23 ขณะขัดต้องใช้น้ำหล่อให้เปียกตลอดเวลาเพื่อเป็นการระบายความร้อนและระบายเศษของชิ้นงานที่ถูกขัดออกมา โดยจะขัดในทิศทางเดียวกันตลอดผิว เมื่อเปลี่ยนกระดาษทรายเบอร์ใหม่จะหมุนชิ้นงานไป 90 องศา แล้วจึงขัดจนรอยเดิมหายไป จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบไปขัดผิวละเอียดบนผ้าสักหลาดด้วยเครื่องขัดผิว โดยใช้ผงอะลูมินา ขนาด 1.0 ไมครอน ผสมกับน้ำแล้วขัดโดยใช้แรงกดเบาๆ เพื่อไม่ให้เกิดรอยบนผิวหน้าของชิ้นงานทดสอบจากเศษโลหะที่ฝังตัวบนผ้าสักหลาด ตลอดเวลาที่ทำการขัดนั้นต้องทำการหล่อสลับโดยใช้น้ำ เพื่อลดความร้อนที่เกิดขึ้นขณะทำการขัด ทำการขัดผิวหน้าชิ้นงานทดสอบจนผิวหน้ามีความเงาและไม่มียอยที่เกิดจากการขัดผิวหยาบ



รูปที่ 3.23 เครื่องขัดยี่ห้อ Struers LaboPol-1

3.5.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมี

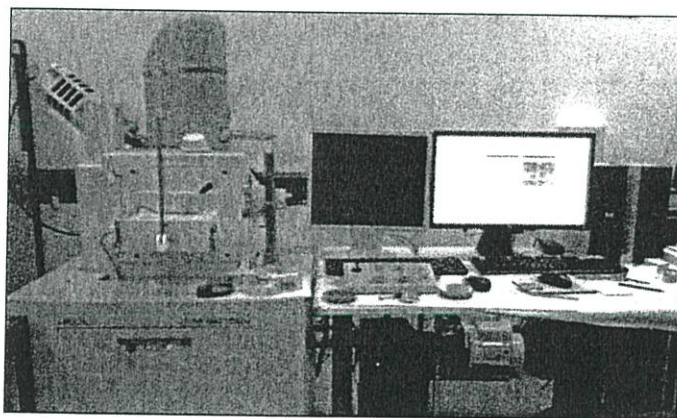
การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะและองค์ประกอบทางเคมี แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ

1. การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเบื้องต้นด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM)

เมื่อทำการเตรียมชิ้นงานเรียบร้อยแล้ว จะนำไปตรวจดูโครงสร้างด้วยโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM) ยี่ห้อ ZEISS รุ่น AXIOLAB เพื่อดูลักษณะโดยรวมของผิวชิ้นงานว่ามีรอยตำหนิหรือไม่

2. การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

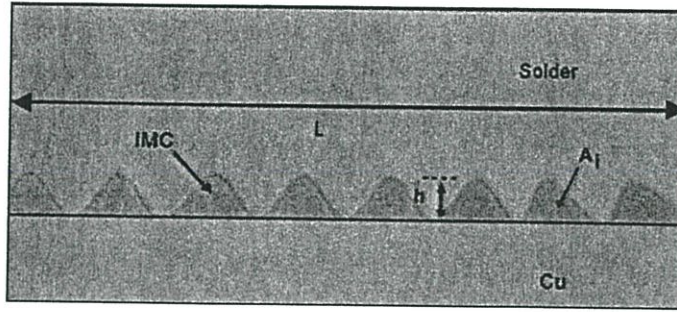
ในการศึกษาชิ้นสารประกอบเชิงโลหะและองค์ประกอบทางเคมีของเฟสที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีแต่ละชนิด จะทำการศึกษาโดยใช้ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6380 LV ดังแสดงในรูปที่ 3.24 ด้วยวิธี Back Scatter Electron เพื่อตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของชิ้นงาน หลังจากนั้นจะทำการตรวจสอบปริมาณธาตุที่พบบนพื้นผิวชิ้นงานตัวอย่างด้วยวิธี Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX) จะได้ผลเป็นปริมาณธาตุที่ผิวชิ้นงานในแต่ละสเปกตรัม ซึ่งจะแสดงผลเฉพาะธาตุที่ค้นพบและรายงานผลเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักหรือโดยจำนวนอะตอม



รูปที่ 3.24 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.5.3 วิธีการวัดความหนาของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะ

การวัดความหนาของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะบัดกรีกับแผ่นทองแดงบริสุทธิ์ ทำได้โดยใช้รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยายเท่ากันในทุกๆ ชิ้นงานทั้งหมด 21 ชิ้น โดยใช้โปรแกรม Image-Pro Express ดังแสดงตัวอย่างการวัดในรูปที่ 3.25 เพื่อหาพื้นที่ของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะ



รูปที่ 3.25 ตัวอย่างการวัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

โดยความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นคำนวณจากการแบ่งพื้นที่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้น ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3.1

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

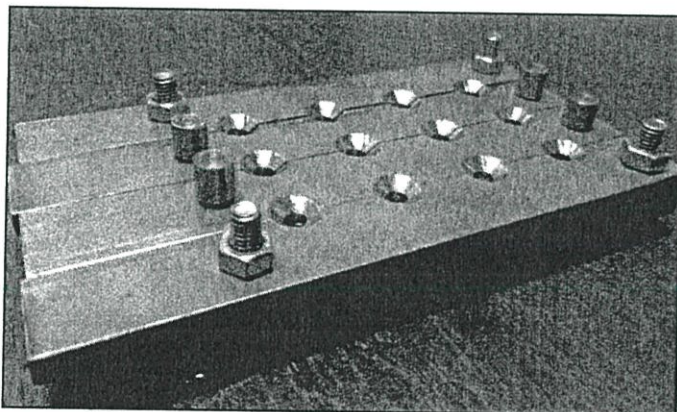
- ซึ่ง
- h = ความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (μm)
 - A = พื้นที่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (μm^2)
 - L = ความยาวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (μm)

บทที่ 4

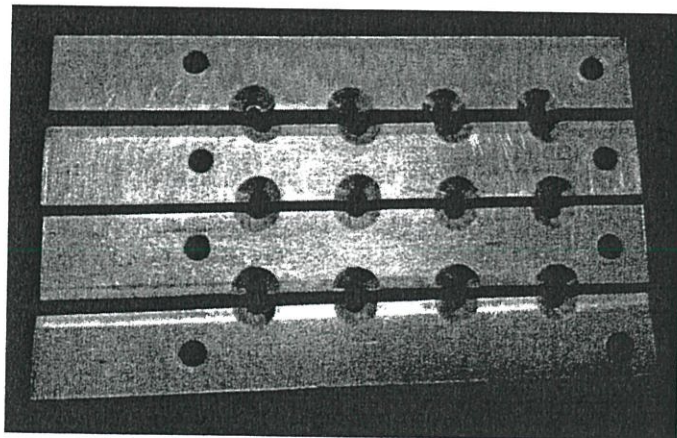
ผลการทดลอง

4.1 ชุดแม่พิมพ์สำหรับผลิตชิ้นงานทดสอบ

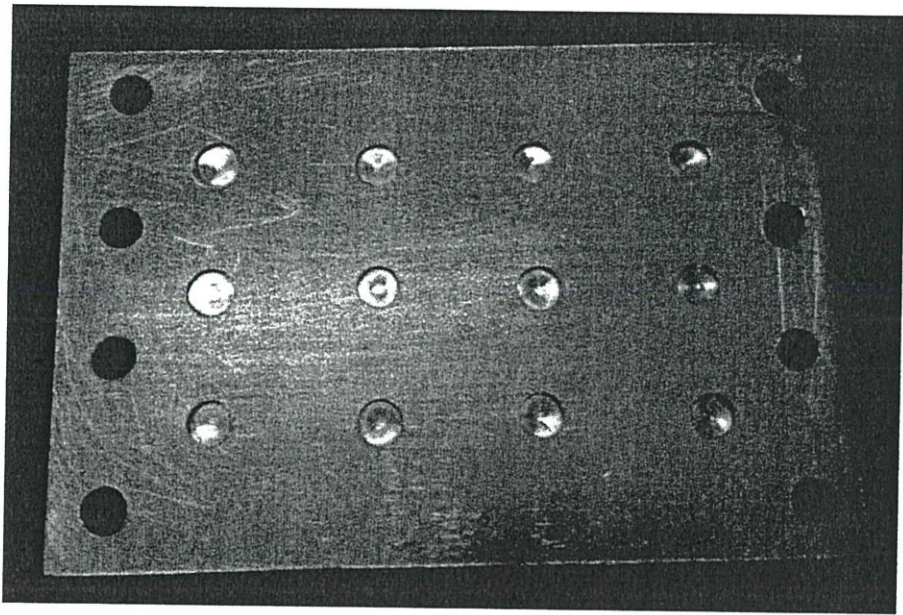
จากการศึกษาและแก้ไข้ปัญหาของชุดแม่พิมพ์เดิม ทำให้ชุดแม่พิมพ์ที่สร้างขึ้นใหม่ ดังรูปที่ 4.1 มีประสิทธิภาพในการหล่อชิ้นงานทดสอบมากขึ้น เมื่อเทียบกับแม่พิมพ์เดิม ซึ่งชิ้นงานทดสอบที่ได้มีขนาดตามที่กำหนด และไม่พบปัญหาชิ้นงานทดสอบติดกับแม่พิมพ์ โดยแม่พิมพ์ประกอบไปด้วย แม่พิมพ์ส่วนบน ดังรูปที่ 4.2 แม่พิมพ์ส่วนล่าง ดังรูปที่ 4.3 แม่พิมพ์ส่วนกลาง ดังรูปที่ 4.4 สลัก และ น็อตที่ใช้ยึดแม่พิมพ์ ดังรูปที่ 4.5 และ 4.6



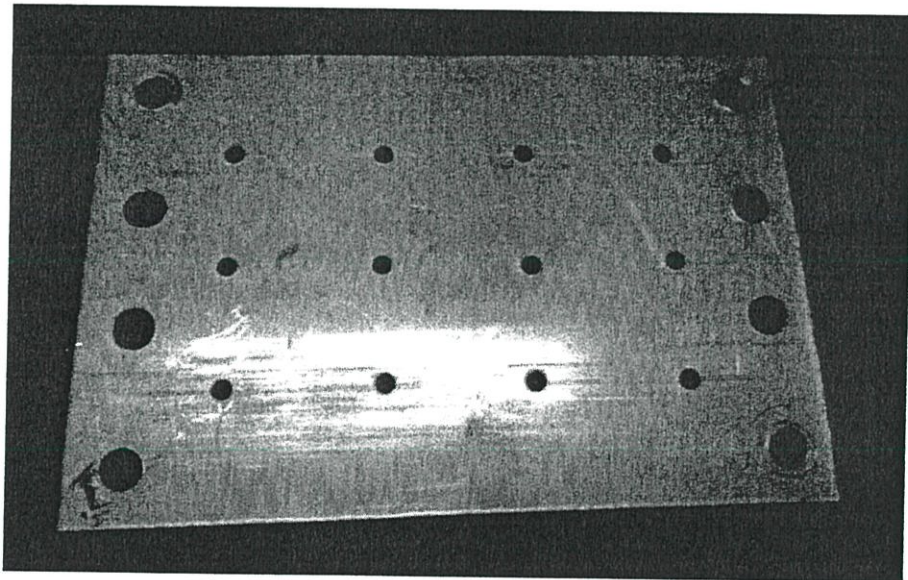
รูปที่ 4.1 แม่พิมพ์โลหะสำหรับการหล่อชิ้นงานทดสอบ



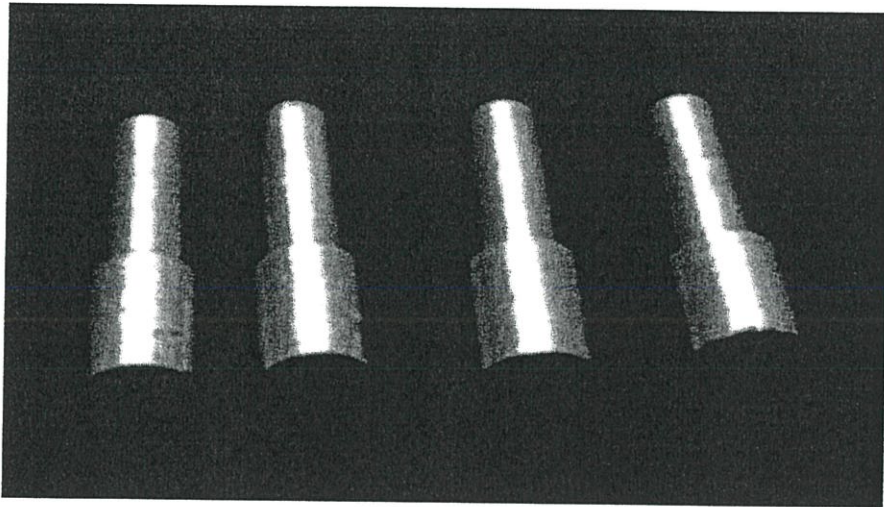
รูปที่ 4.2 แม่พิมพ์ส่วนบน



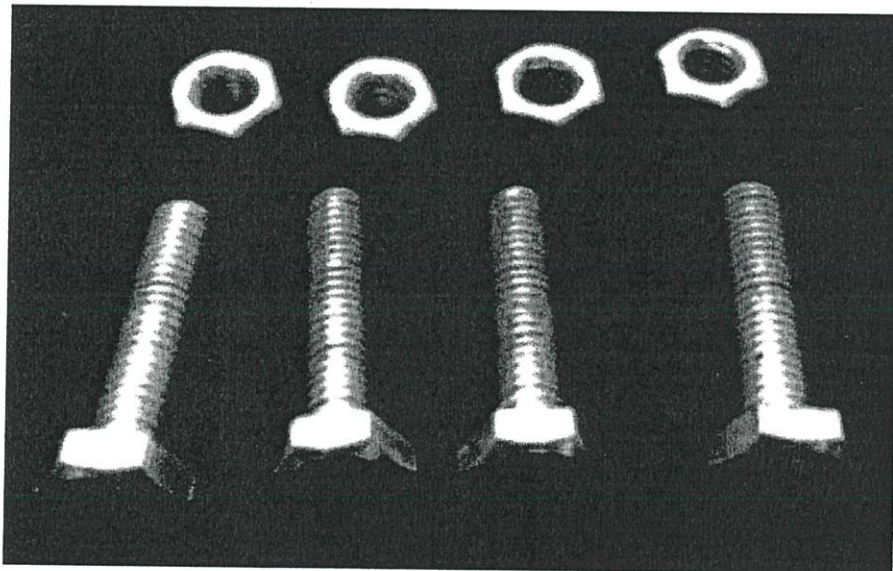
รูปที่ 4.3 แม่พิมพ์ส่วนล่าง



รูปที่ 4.4 แม่พิมพ์ส่วนกลาง



รูปที่ 4.5 สลัก



รูปที่ 4.6 น็อตขนาดเบอร์ M6

4.2 ชิ้นงานทดสอบ

จากการหล่อโลหะบัดกรีด้วยแม่พิมพ์โลหะที่สร้างขึ้น ได้ชิ้นงานทดสอบที่มีน้ำหนักตามที่ต้องการ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 น้ำหนักและน้ำหนักเฉลี่ยของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด

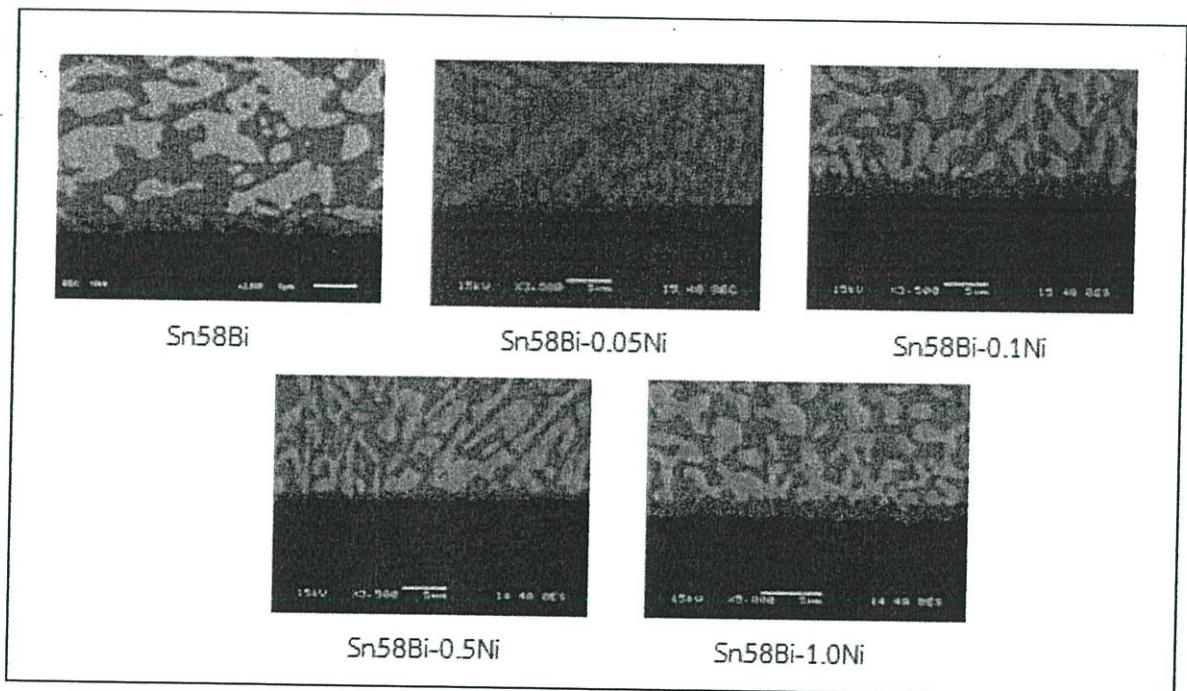
ชนิดของโลหะบัดกรี	น้ำหนัก (กรัม)						น้ำหนักเฉลี่ย (กรัม)	Stdev
Sn58Bi	0.4325	0.4305	0.4332	0.4348	0.4322	0.4326	0.4326	0.001398
Sn58Bi-0.05Ni	0.4324	0.4325	0.4313	0.4327	0.4303	0.434	0.4322	0.001268
Sn58Bi-0.1Ni	0.4328	0.432	0.4304	0.4336	0.4321	0.4343	0.4325	0.001368
Sn58Bi-0.5Ni	0.4316	0.43	0.4315	0.4318	0.4332	0.4326	0.4317	0.001093
Sn58Bi-1.0Ni	0.4307	0.4301	0.43	0.4327	0.4329	0.4305	0.4311	0.001305
Sn58Bi-0.05Ni-0.05In	0.4321	0.4333	0.4311	0.432	0.4323	0.432	0.4321	0.000706
Sn58Bi-0.05Ni-0.1In	0.4318	0.4326	0.4305	0.4305	0.4311	0.4317	0.4313	0.000824
Sn58Bi-0.1Ni-0.05In	0.4322	0.4323	0.4311	0.4334	0.4334	0.4315	0.4323	0.000927
Sn58Bi-0.1Ni-0.1In	0.4311	0.4323	0.4333	0.4318	0.4318	0.4334	0.4322	0.000911
Sn58Bi-0.5Ni-0.05In	0.43	0.433	0.4338	0.432	0.4324	0.43	0.4318	0.001568
Sn58Bi-0.5Ni-0.1In	0.433	0.4329	0.4314	0.43	0.4332	0.4302	0.4317	0.001454
Sn58Bi-1.0Ni-0.05In	0.4302	0.4312	0.4335	0.433	0.4314	0.43	0.4315	0.001434
Sn58Bi-1.0Ni-0.1In	0.4311	0.4337	0.4323	0.4327	0.4314	0.4305	0.4319	0.001173
Sn58Bi-0.05Ni-0.05Ag	0.4334	0.4317	0.4301	0.4329	0.4324	0.4329	0.4322	0.001193
Sn58Bi-0.05Ni-0.1Ag	0.4325	0.4333	0.43	0.4328	0.4309	0.4337	0.4322	0.001445
Sn58Bi-0.1Ni-0.05Ag	0.43	0.4327	0.4323	0.4308	0.4312	0.4314	0.4314	0.000986
Sn58Bi-0.1Ni-0.1Ag	0.4325	0.4338	0.4327	0.431	0.4304	0.4319	0.432	0.001228
Sn58Bi-0.5Ni-0.05Ag	0.4327	0.4333	0.4304	0.4322	0.4331	0.4321	0.4323	0.001045
Sn58Bi-0.5Ni-0.1Ag	0.4308	0.4311	0.4314	0.4308	0.4324	0.4324	0.4314	0.000744
Sn58Bi-1.0Ni-0.05Ag	0.4302	0.4321	0.4313	0.4308	0.4322	0.431	0.4312	0.000774
Sn58Bi-1.0Ni-0.1Ag	0.4322	0.4308	0.432	0.4318	0.43	0.4319	0.4314	0.000862
รวม							0.4319	0.001129

4.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของโลหะบัดกรี

โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมหรือโลหะบัดกรีที่มีดีบุกเป็นส่วนประกอบพื้นฐานเมื่อนำมาบัดกรีกับทองแดงจะเกิดการแพร่ของอะตอมทองแดงจากโลหะพื้นไปสู่โลหะบัดกรี เช่นเดียวกับการแพร่ของดีบุกที่มีการแพร่จากโลหะบัดกรีไปสู่โลหะพื้น และเกิดเป็นชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรีและโลหะพื้นทองแดง เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างอะตอมทองแดงและดีบุกระหว่างการบัดกรีซึ่งจะเกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่มีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกัน

จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีแต่ละชนิดจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้ EDX ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

4.3.1 กลุ่มที่ 1 (เติมธาตุ Ni ลงไปในโลหะพื้นปริมาณ 0.05, 0.1, 0.5 และ 1wt%)



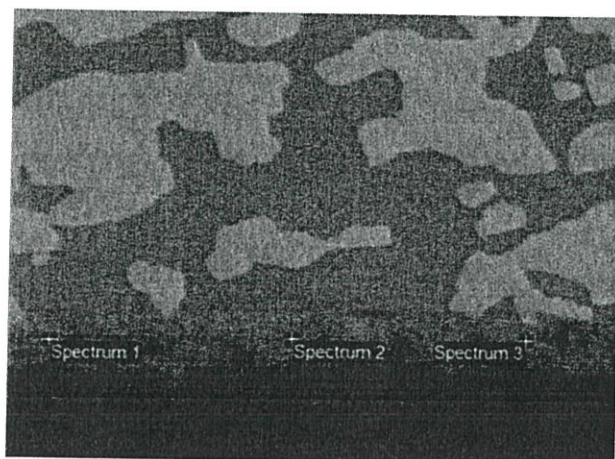
รูปที่ 4.7 ลักษณะรอยต่อจากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานทดสอบกลุ่มที่ 1

1. โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn58Bi

จากภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นเห็นขอบเขตได้ค่อนข้างชัดเจน ความหนาเท่ากับ 1.131 ไมโครเมตร และลักษณะโดยทั่วไปเป็นชั้นที่ความหนาค่อนข้างสม่ำเสมอ ขอบของชั้นมีลักษณะสูง-ต่ำแตกต่างกันบ้างเล็กน้อยดังแสดงในรูปที่

4.8

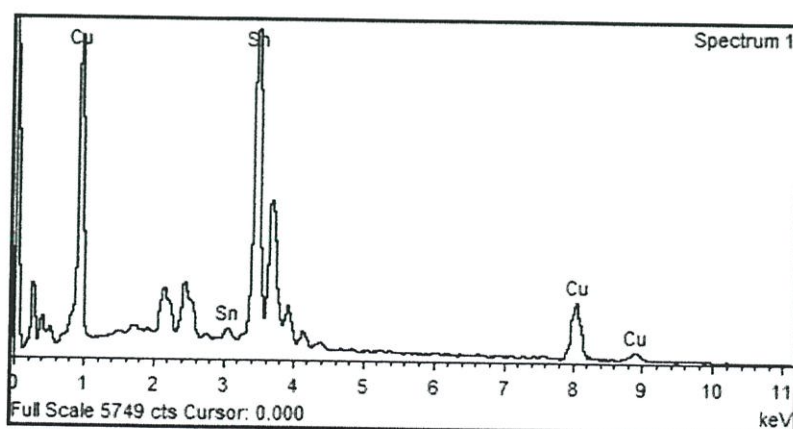
ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้ EDX เพื่อระบุองค์ประกอบทางเคมีสำหรับชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ในรูปที่ 4.8 แสดงผลของเปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นโดยพบธาตุ Cu ในช่วง 57.26-67.21% และธาตุ Sn ในช่วง 32.79-42.74% ดังตารางที่ 4.2 และ รูปที่ 4.9, 4.10 และ 4.11



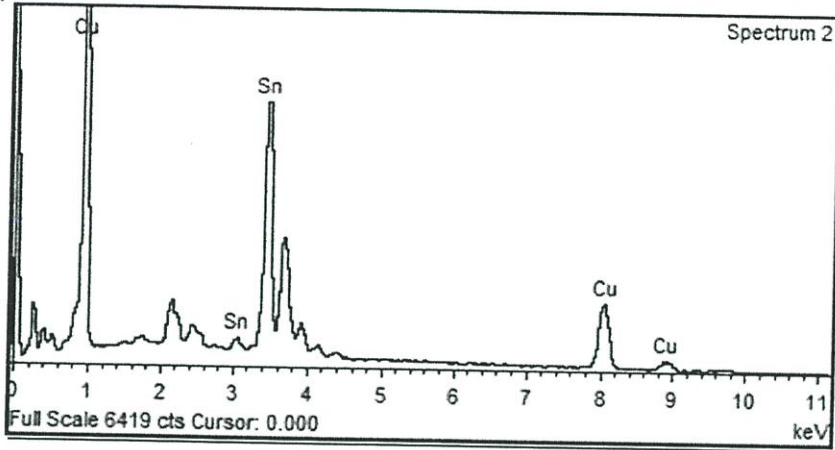
รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi

ตารางที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi

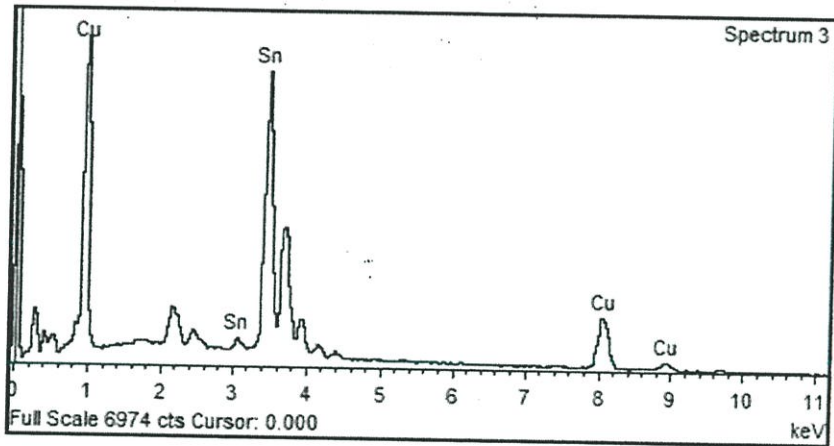
Element	Atomic%		
	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
Cu	57.26	67.21	60.1
Sn	42.74	32.79	39.9



รูปที่ 4.9 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 4.10 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 2

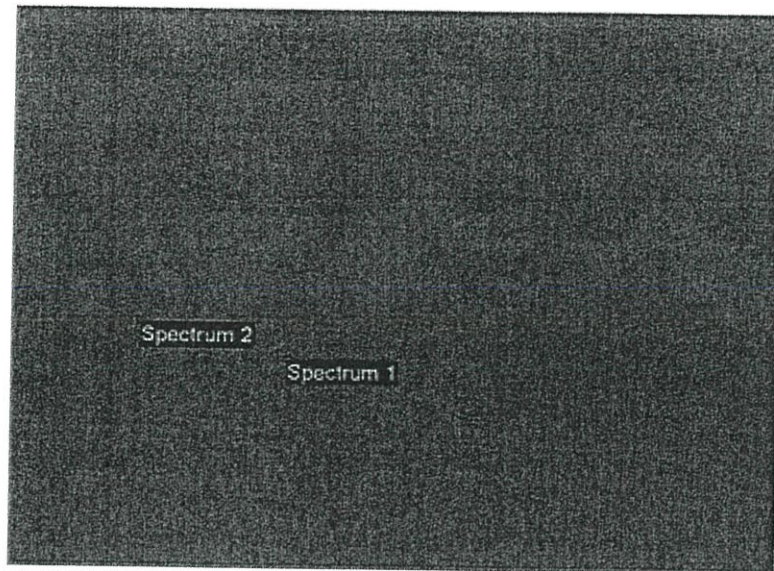


รูปที่ 4.11 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 3

2. โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn58Bi-0.05Ni

จากภาพถ่ายลักษณะโครงสร้าง จุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.05Ni พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นเห็นขอบเขตได้ไม่ค่อยชัดเจน ความหนาเท่ากับ 1.209 ไมโครเมตรและลักษณะโดยทั่วไปเป็นชั้นที่ความหนาไม่ค่อยสม่ำเสมอ ขอบของชั้นมีลักษณะสูง-ต่ำแตกต่างกัน ดังแสดงในรูป 4.12

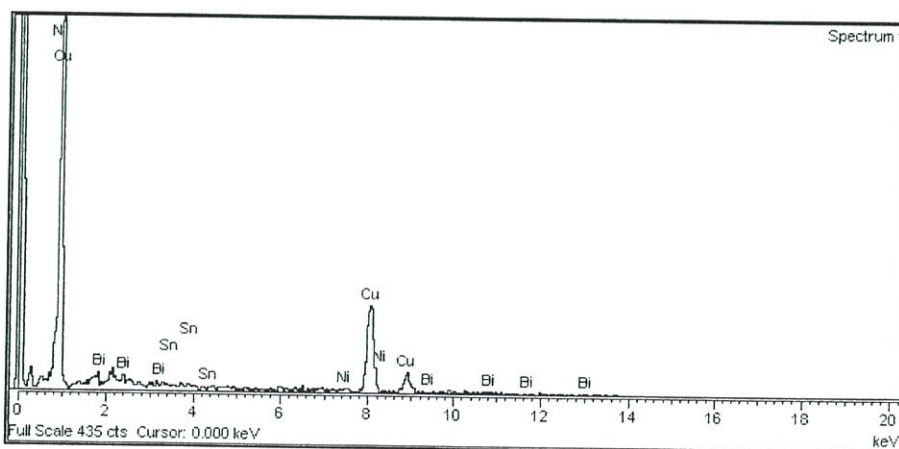
ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้ EDX เพื่อระบุองค์ประกอบทางเคมีสำหรับชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ในรูปที่ 4.12 แสดงผลของเปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นโดยพบธาตุ Cu ในช่วง 50.51-98.47% ธาตุ Sn 46.29% และธาตุ Bi ในช่วง 1.53-3.2% ดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.13 และ 4.14



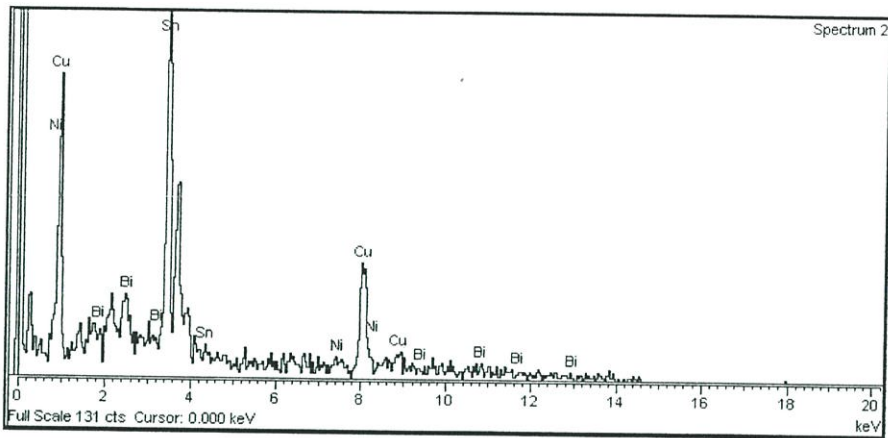
รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.05Ni

ตารางที่ 4.3 เปอร์เซนต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.05Ni

Element	Atomic%	
	Spectrum 1	Spectrum 2
Cu	98.47	50.51
Sn	-	46.29
Bi	1.53	3.2



รูปที่ 4.13 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 1

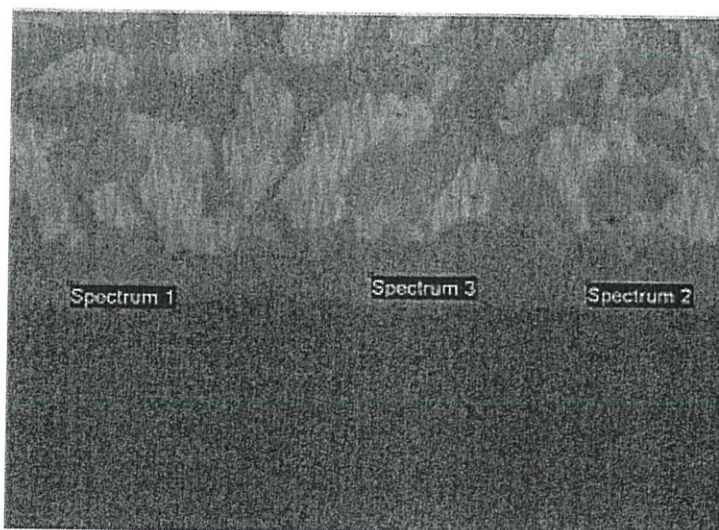


รูปที่ 4.14 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 2

3. โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn58Bi-0.1Ni

จากภาพถ่ายลักษณะโครงสร้าง จุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.1Ni พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นเห็นขอบเขตได้ชัดเจน ความหนาเท่ากับ 2.119 ไมโครเมตร และลักษณะโดยทั่วไปเป็นชั้นที่ความหนาค่อนข้างสม่ำเสมอ ขอบของชั้นมีลักษณะสูง-ต่ำแตกต่างกันเล็กน้อย ดังแสดงในรูป 4.15

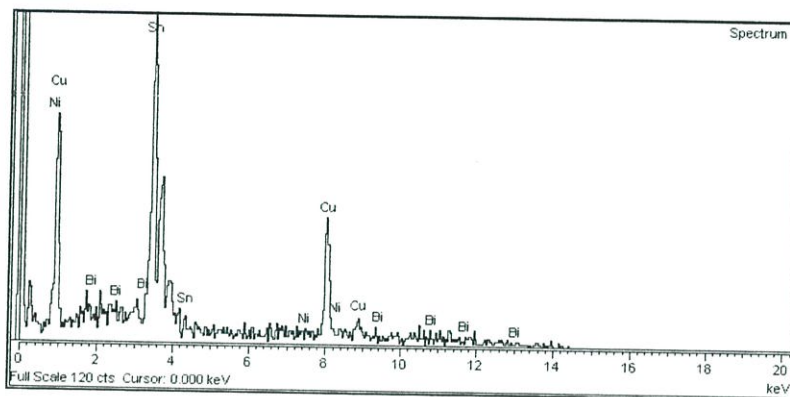
ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้ EDX เพื่อระบุองค์ประกอบทางเคมีสำหรับชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ในรูปที่ 4.15 แสดงผลของเปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นโดยพบธาตุ Ni ในช่วง 3.58-5.73% ธาตุ Cu ในช่วง 48.05-50.5% ธาตุ Sn ในช่วง 44.63-49.5% และธาตุ Bi 2.95% ดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.16, 4.17 และ 4.18



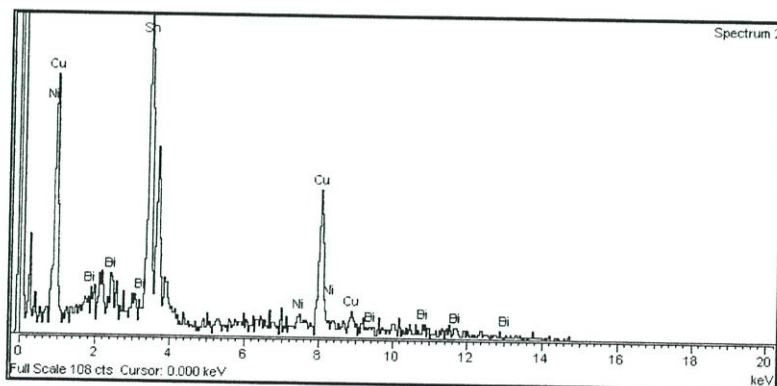
รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.1Ni

ตารางที่ 4.4 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.1Ni

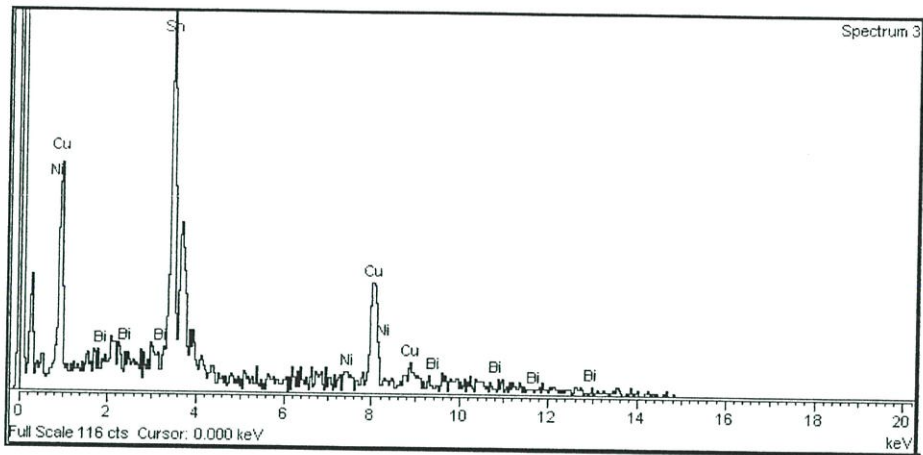
Element	Atomic%		
	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
Ni	-	3.58	5.73
Cu	50.5	48.84	48.05
Sn	49.5	44.63	46.22
Bi	-	2.95	-



รูปที่ 4.16 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 4.17 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 2

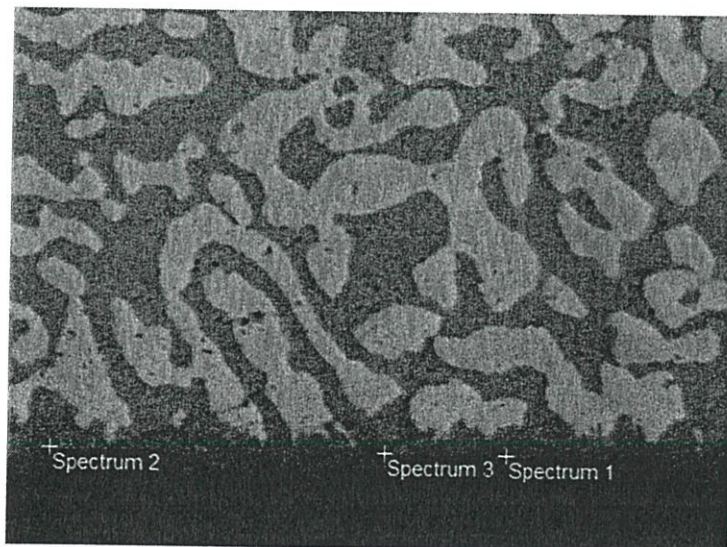


รูปที่ 4.18 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 3

4. โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn58Bi-0.5Ni

จากภาพถ่ายลักษณะโครงสร้าง จุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.5Ni พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นเห็นขอบเขตได้ชัดเจน ความหนาเท่ากับ 0.828 ไมโครเมตรและลักษณะโดยทั่วไปเป็นชั้นที่ความหนาไม่ค่อยสม่ำเสมอ ขอบของชั้นมีลักษณะสูง-ต่ำแตกต่างกัน ดังแสดงในรูป 4.19

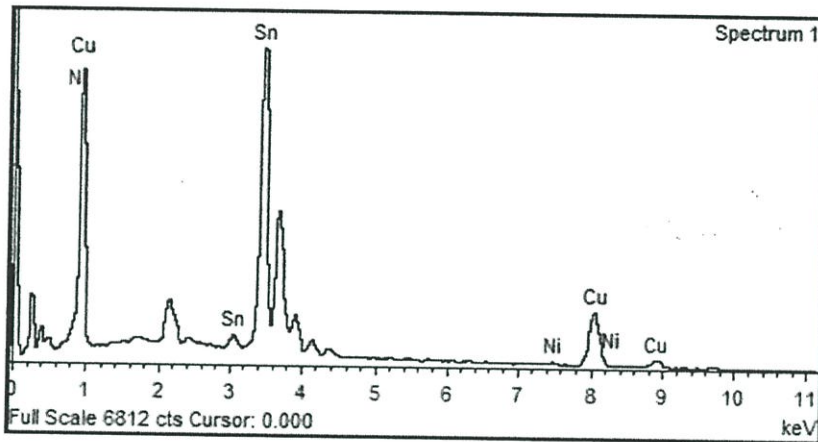
ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้ EDX เพื่อระบุองค์ประกอบทางเคมีสำหรับชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ในรูปที่ 4.19 แสดงผลของเปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นโดยพบธาตุ Ni ในช่วง 1.35-2.11% ธาตุ Cu ในช่วง 47.89-55.75% และธาตุ Sn ในช่วง 42.91-50.02% ดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.20, 4.21 และ 4.22



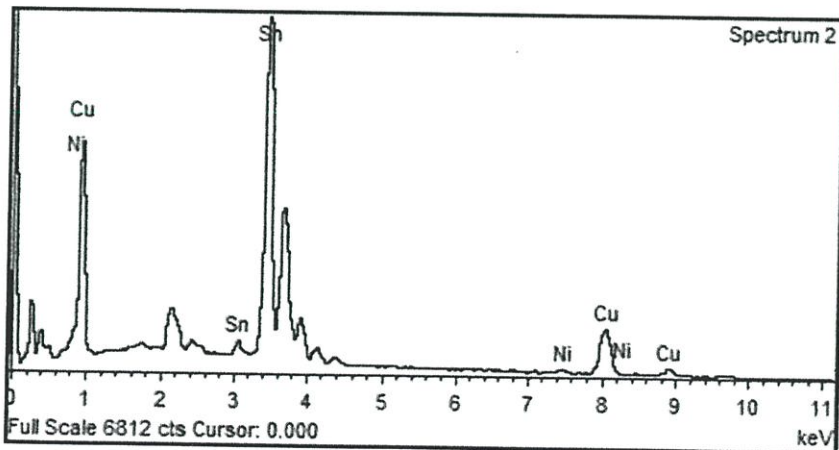
รูปที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.5Ni

ตาราง 4.5 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.5Ni

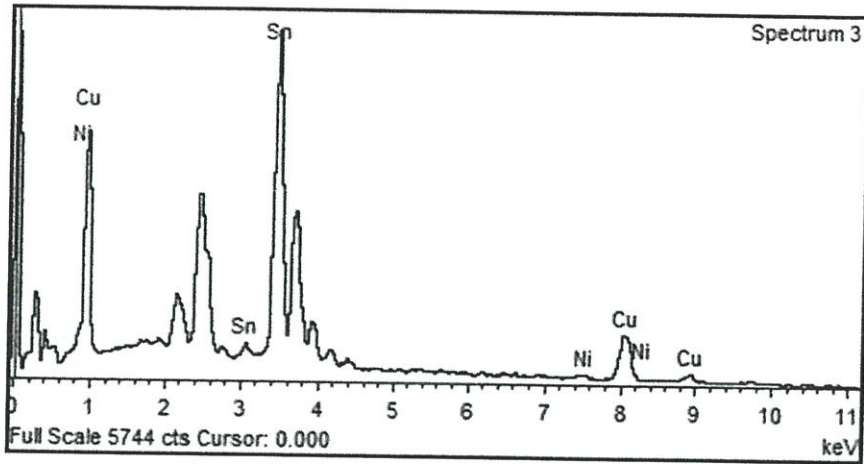
Element	Atomic%		
	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
Ni	1.35	2.09	2.11
Cu	55.75	47.89	49.34
Sn	42.91	50.02	48.55



รูปที่ 4.20 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 4.21 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 2

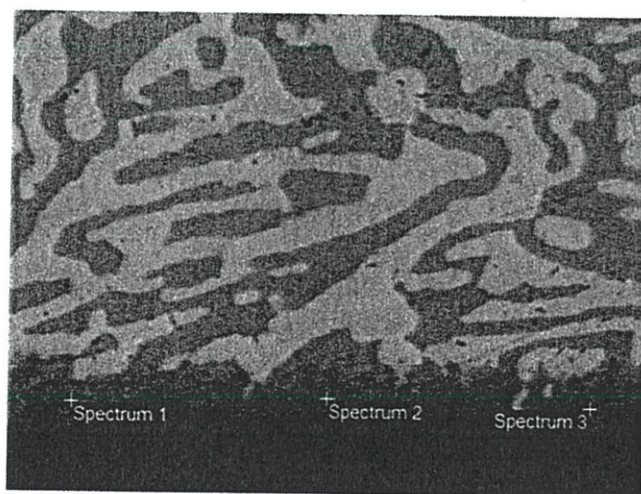


รูปที่ 4.22 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 3

5. โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn58Bi-1.0Ni

จากภาพถ่ายลักษณะโครงสร้าง จุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-1.0Ni พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นเห็นขอบเขตได้ชัดเจน ความหนาเท่ากับ 1.619 ไมโครเมตรและลักษณะโดยทั่วไปเป็นชั้นที่ความหนาค่อนข้างสม่ำเสมอ ขอบของชั้นมีลักษณะสูง-ต่ำแตกต่างกัน ดังแสดงในรูป 4.23

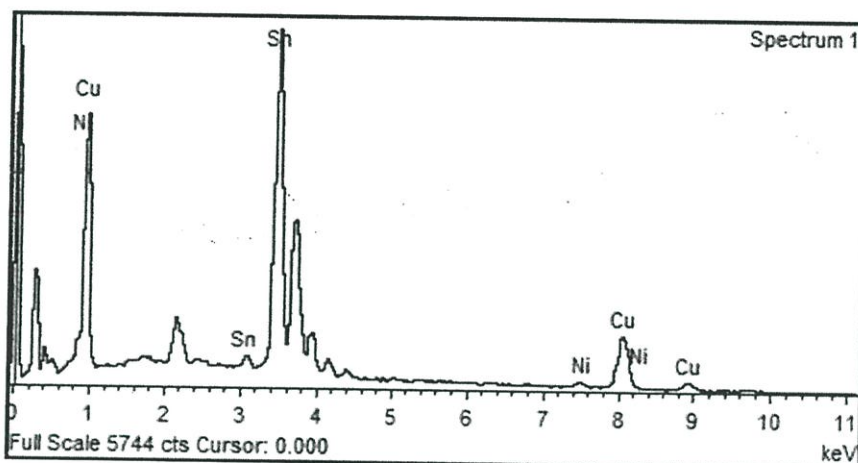
ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้ EDX เพื่อระบุองค์ประกอบทางเคมีสำหรับชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ในรูปที่ 4.23 แสดงผลของเปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นโดยพบธาตุ Ni ในช่วง 1.79-2.57% ธาตุ Cu ในช่วง 37.82-55.28% และธาตุ Sn ในช่วง 42.77-60.39% ดังตารางที่ 4.6 และ 4.24, 4.25 และ 4.26



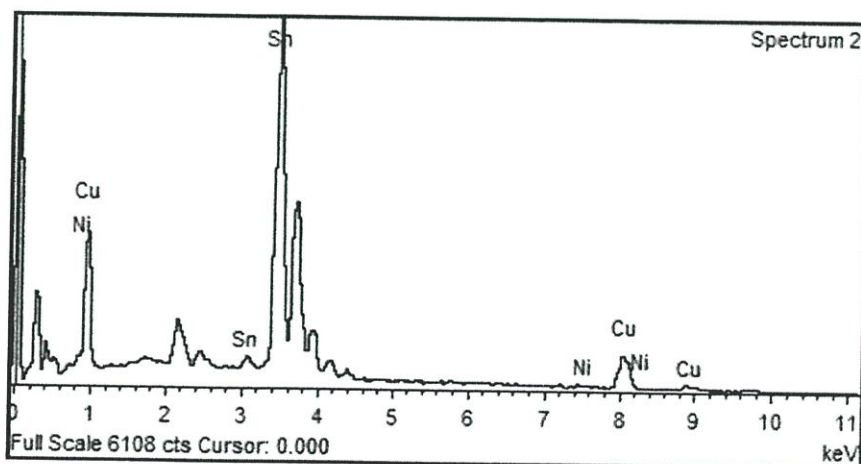
รูปที่ 4.23 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-1.0Ni

ตารางที่ 4.6 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-1.0Ni

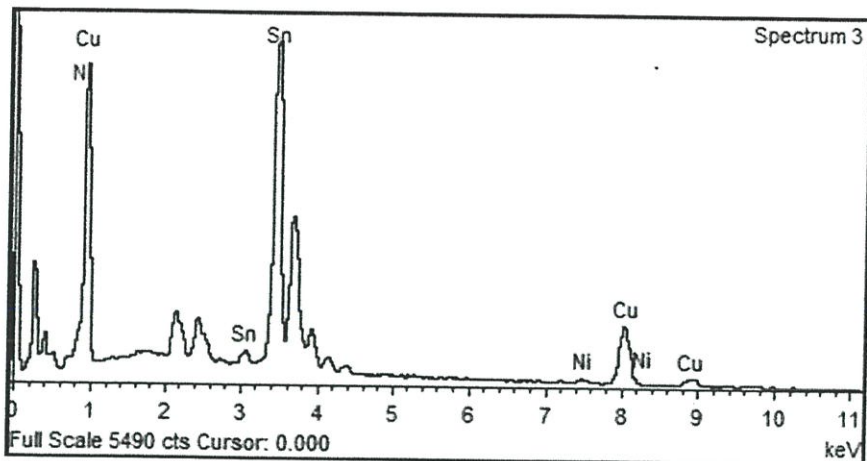
Element	Atomic%		
	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
Ni	2.57	1.79	1.95
Cu	51.13	37.82	55.28
Sn	46.3	60.39	42.77



4.24 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 1



4.25 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 2

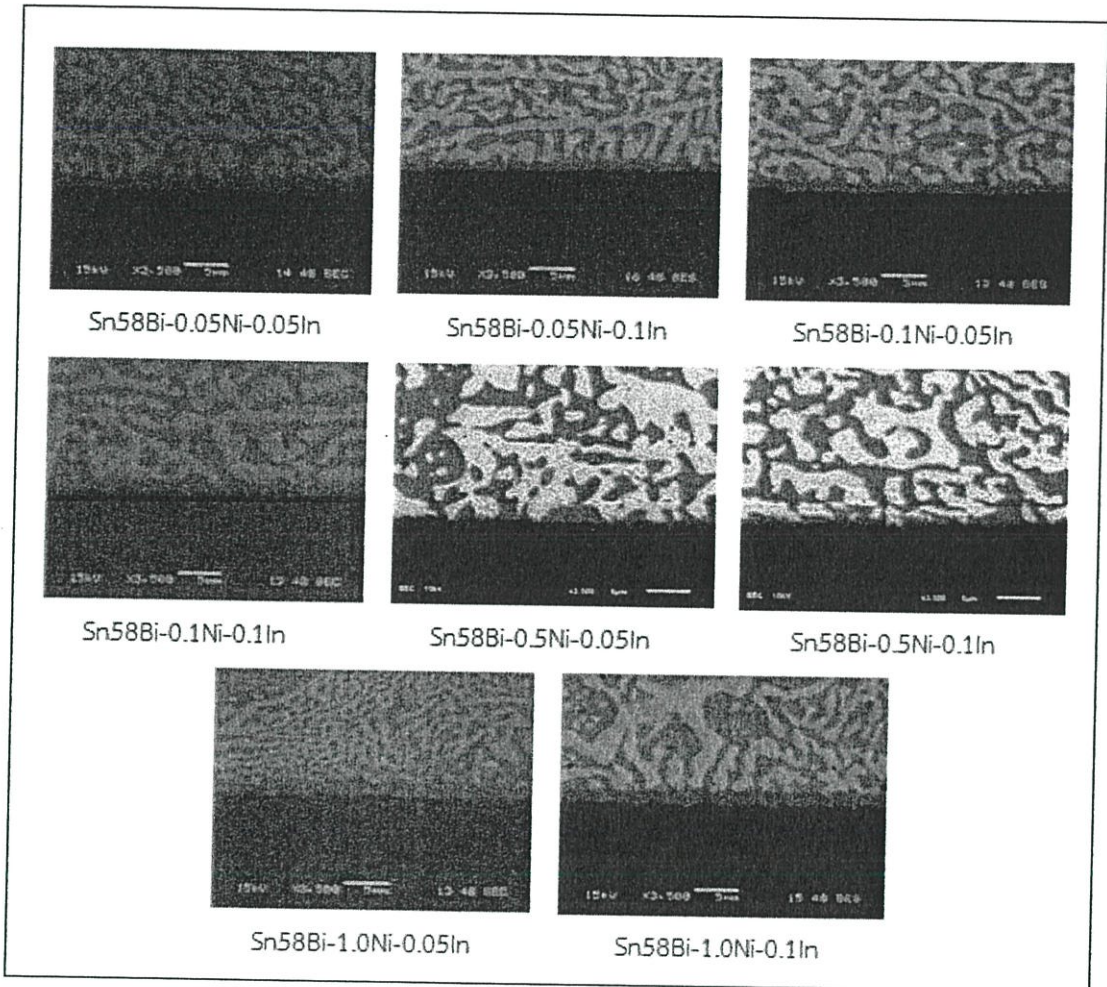


4.26 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 3

สรุปผลจากข้อมูลกลุ่มที่ 1

ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบที่นำมาตรวจสอบลักษณะรอยต่อด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ได้ถูกวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของธาตุที่พบในชั้นรอยต่อด้วย EDX ที่ต่ออยู่กับกล้อง SEM โดยทำการตรวจสอบด้วย EDX ที่บริเวณของบนและล่างของชั้นรอยต่อ พบว่าชนิดของธาตุที่พบในชั้นรอยต่อประกอบด้วย Sn, Cu, Bi, Ni ชั้นความหนาของชั้นสารประกอบของชิ้นงานตัวอย่างทั้ง 5 ชนิดอยู่ในช่วง 0.828 - 2.119 ไมโครเมตร โดยเมื่อเติม Ni เข้าไปในโลหะบัดกรีพื้นฐานแล้วมีแนวโน้มทำให้ความหนาของชั้นสารประกอบเพิ่มขึ้นจากเดิม

4.3.2. กลุ่มที่ 2 (เติมธาตุ Ni ลงไปในโลหะพื้นปริมาณ 0.05, 0.1, 0.5 และ 1 wt%, เติมธาตุ In ลงไป ปริมาณ 0.05, 0.1 wt%)

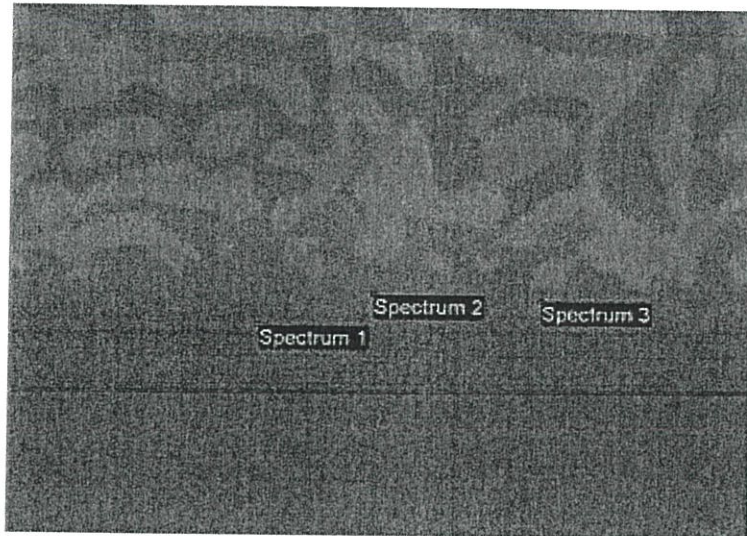


รูปที่ 4.27 ลักษณะรอยต่อจากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงาน ทดสอบกลุ่มที่ 2

1. โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn58Bi-0.05Ni-0.05In

จากภาพถ่ายลักษณะโครงสร้าง จุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.05Ni-0.05In พบว่าชั้น สารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นเห็นขอบเขตได้ชัดเจน ความหนาเท่ากับ 1.784 ไมโครเมตร และลักษณะ โดยทั่วไปเป็นชั้นที่ความหนาไม่ค่อยสม่ำเสมอ ขอบของชั้นมีลักษณะสูง-ต่ำแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดดัง แสดงในรูป 4.28

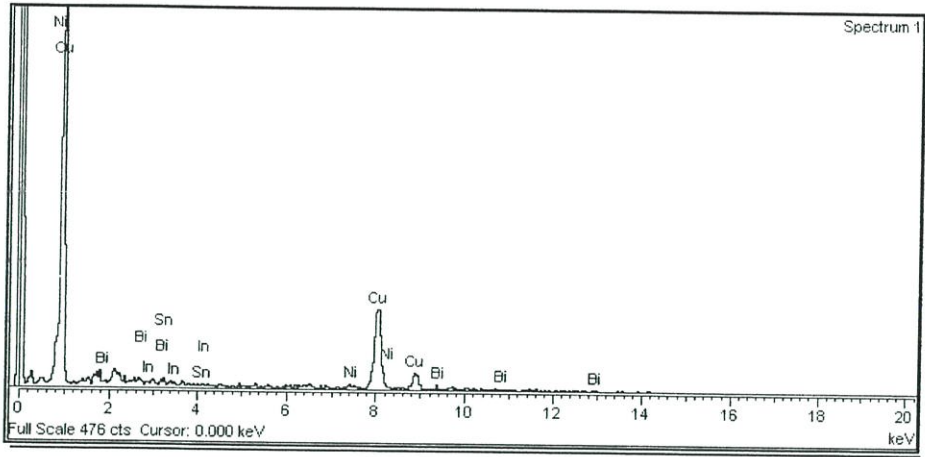
ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้ EDX เพื่อระบุองค์ประกอบทางเคมีสำหรับชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ในรูปที่ 4.28 แสดงผลของเปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นโดยพบธาตุ Cu ในช่วง 46.27-98.46% ธาตุ Sn ในช่วง 1.54-51.31% และธาตุ Bi ในช่วง 1.22-2.41% ดังตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.29, 4.30 และ 4.31



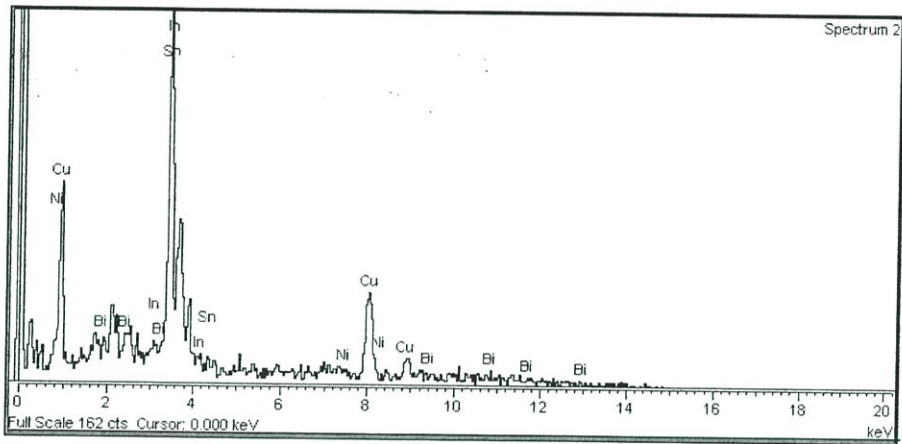
รูปที่ 4.28 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.05Ni-0.05In

ตารางที่ 4.7 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.05Ni-0.05In

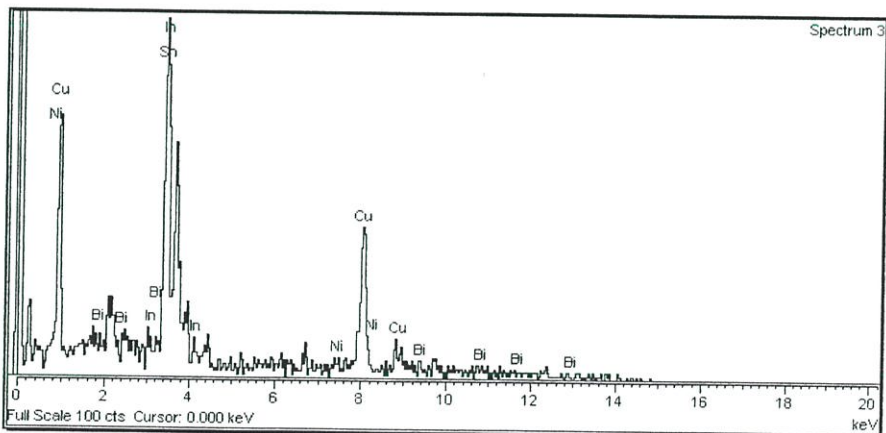
Element	Atomic%		
	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
Cu	98.46	46.27	50.52
Sn	1.54	51.31	48.27
Bi	-	2.41	1.22



รูปที่ 4.29 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 4.30 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 2

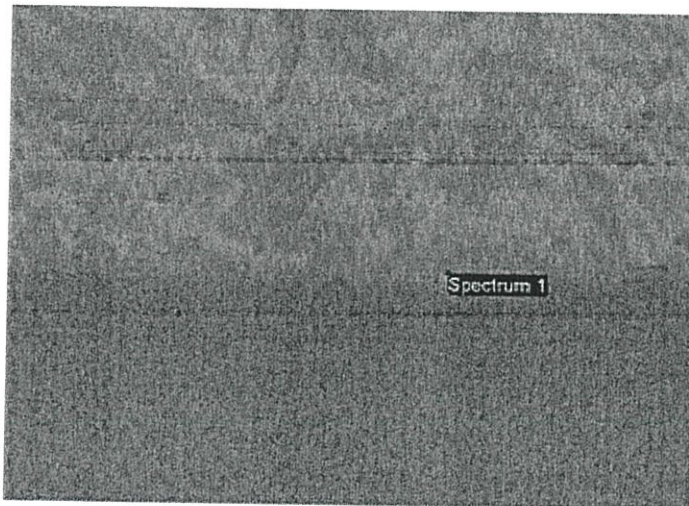


รูปที่ 4.31 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 3

2. โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn58Bi-0.05Ni-0.1In

จากภาพถ่ายลักษณะโครงสร้าง จุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.05Ni-0.1In พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นเห็นขอบเขตได้ค่อนข้างชัดเจน ความหนาเท่ากับ 0.769 ไมโครเมตรและลักษณะโดยทั่วไปเป็นชั้นที่ความหนาไม่ค่อยสม่ำเสมอ ขอบของชั้นมีลักษณะสูง-ต่ำแตกต่างกัน ดังแสดงในรูป 4.32

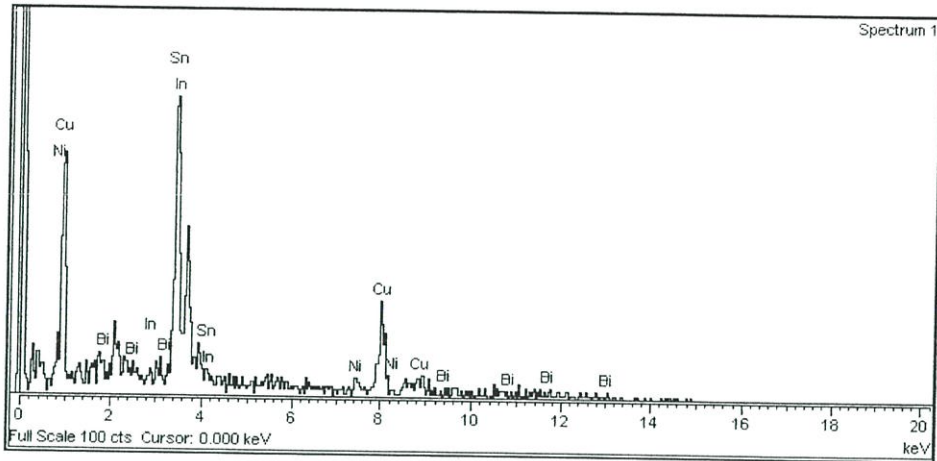
ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้ EDX เพื่อระบุองค์ประกอบทางเคมีสำหรับชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ในรูปที่ 4.32 แสดงผลของเปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นโดยพบธาตุ Ni 6.57% ธาตุ Cu 53.07% และธาตุ Sn 40.36% ดังตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.32 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.05Ni-0.1In

ตารางที่ 4.8 เปอร์เซนต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.05Ni-0.1In

Element	Atomic%
	Spectrum 1
Ni	6.57
Cu	53.07
Sn	40.36

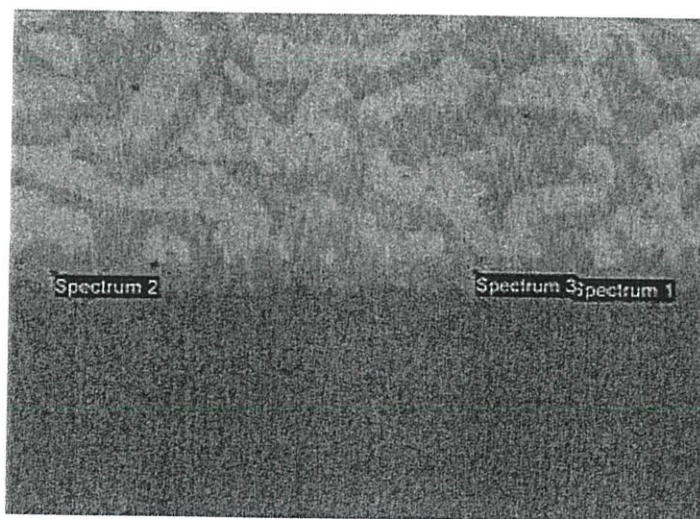


รูปที่ 4.33 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 1

3. โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn58Bi-0.1Ni-0.05In

จากภาพถ่ายลักษณะโครงสร้าง จุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.1Ni-0.05In พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นเห็นขอบเขตได้ชัดเจน ความหนาเท่ากับ 1.113 ไมโครเมตร และลักษณะโดยทั่วไปเป็นชั้นที่มีความหนาไม่สม่ำเสมอ ขอบของชั้นมีลักษณะสูง-ต่ำแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูป 4.34

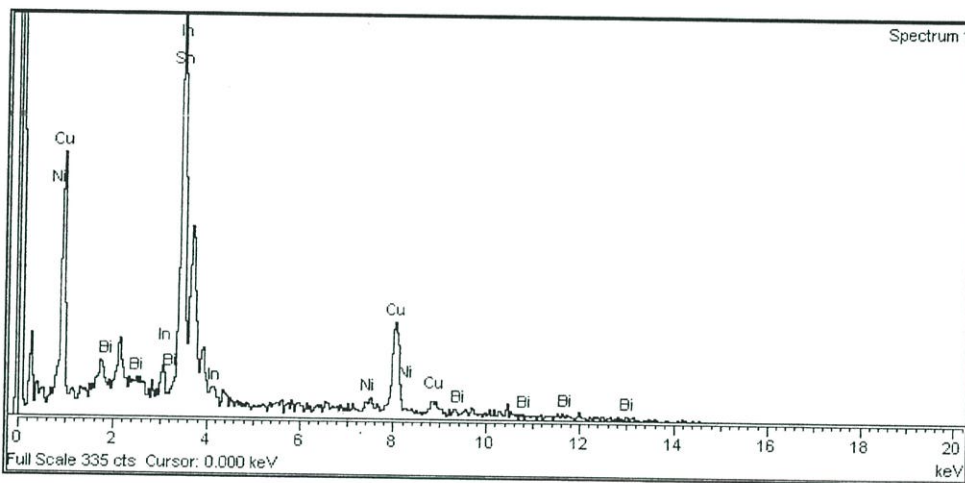
ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้ EDX เพื่อระบุองค์ประกอบทางเคมีสำหรับชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ในรูปที่ 4.34 แสดงผลของเปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นโดยพบธาตุ Ni 5.07% ธาตุ Cu ในช่วง 49.09-58.18% และธาตุ Sn ในช่วง 41.82-45.84% ดังตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.35, 4.36 และ 4.37



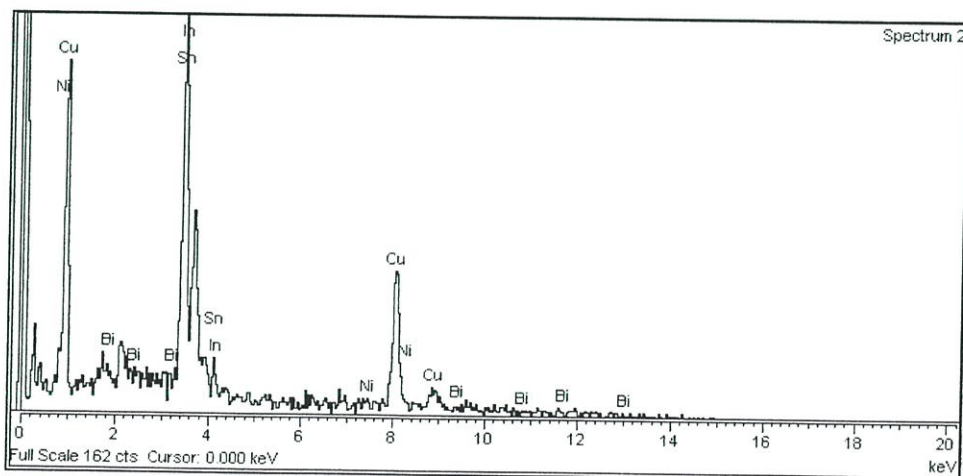
รูปที่ 4.34 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.1Ni-0.05In

ตารางที่ 4.9 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.1Ni-0.05In

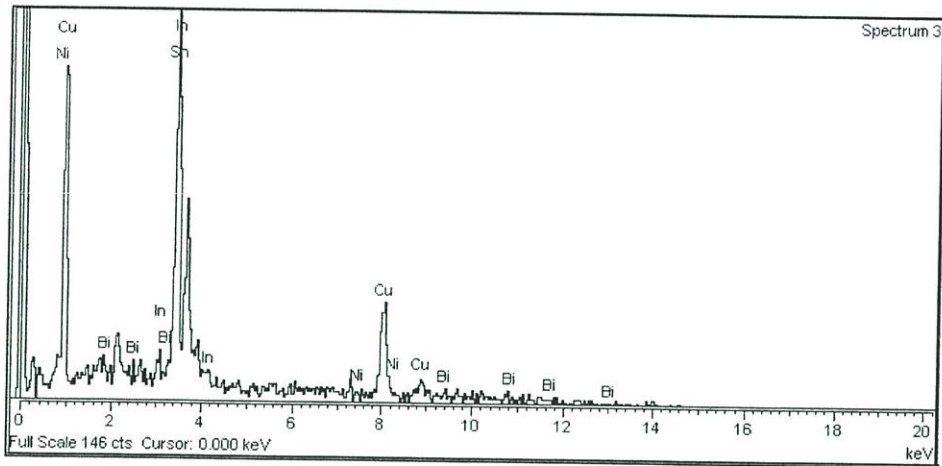
Element	Atomic%		
	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
Ni	5.07	-	-
Cu	49.09	58.18	57.93
Sn	45.84	41.82	42.07



รูปที่ 4.35 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 4.36 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 2

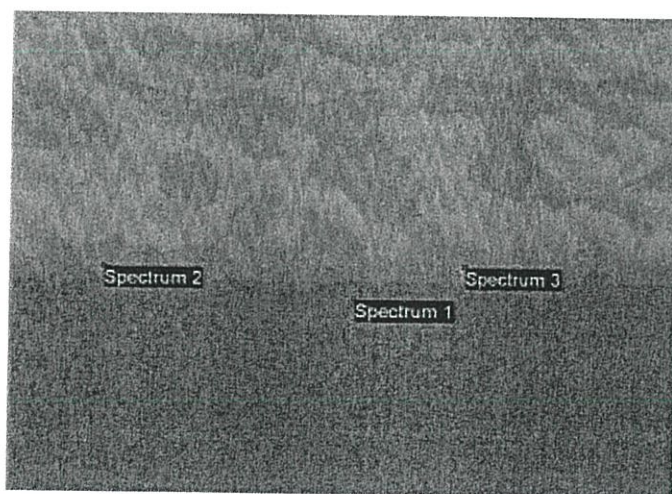


รูปที่ 4.37 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 3

4. โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn58Bi-0.1Ni-0.1In

จากภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.1Ni-0.1In พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นเห็นขอบเขตได้ชัดเจน ความหนาเท่ากับ 1.091 ไมโครเมตรและลักษณะโดยทั่วไปเป็นชั้นที่ความหนาไม่สม่ำเสมอ ขอบของชั้นมีลักษณะสูง-ต่ำแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูป 4.38

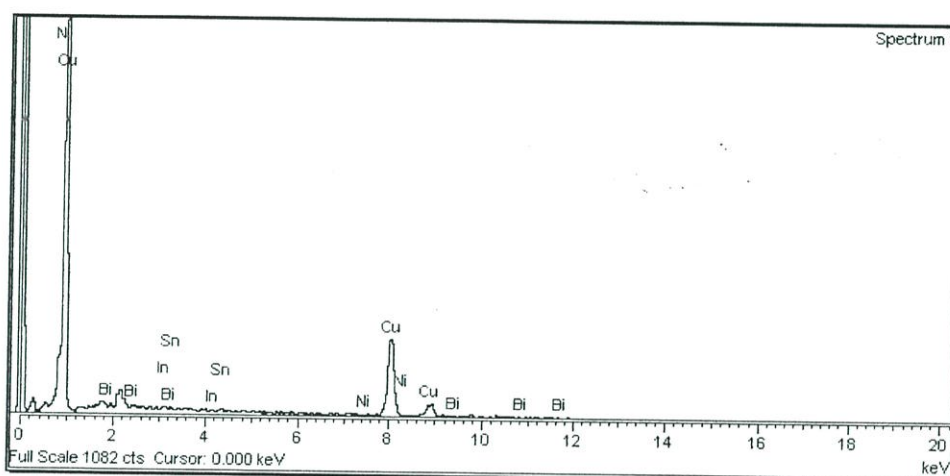
ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้ EDX เพื่อระบุองค์ประกอบทางเคมีสำหรับชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ในรูปที่ 4.38 แสดงผลของเปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นโดยพบธาตุ Cu ในช่วง 50.83-99.42% ธาตุ Sn ในช่วง 38.36-47.39% และธาตุ Bi ในช่วง 0.58-1.78% ดังตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.39, 4.40 และ 4.41



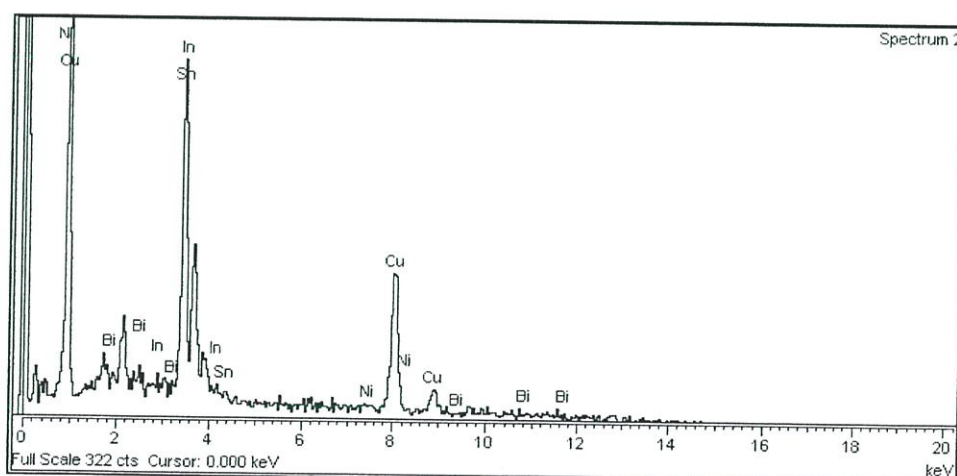
รูปที่ 4.38 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.1Ni-0.1In

ตารางที่ 4.10 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.1Ni-0.1In

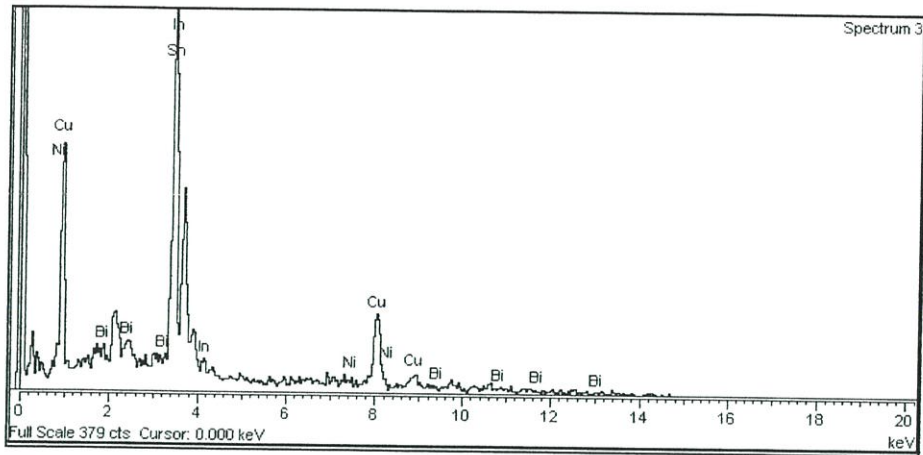
Element	Atomic%		
	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
Cu	99.42	60.64	50.83
Sn	-	38.36	47.39
Bi	0.58	1	1.78



รูปที่ 4.39 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 4.40 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 2

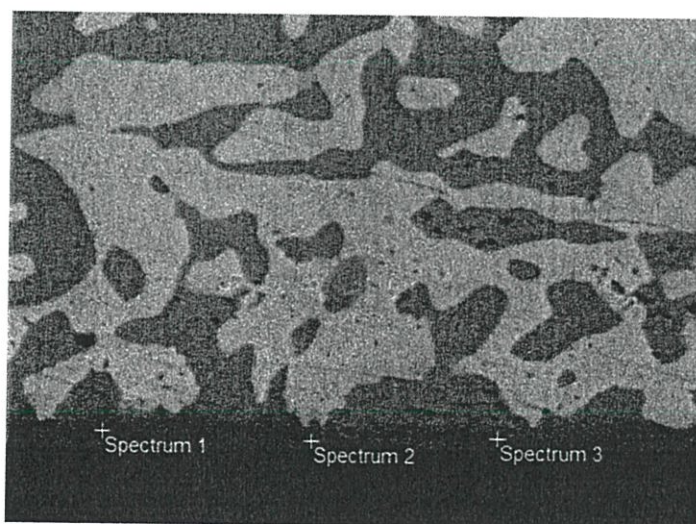


รูปที่ 4.41 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 3

5. โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn58Bi-0.5Ni-0.05In

จากภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.5Ni-0.05In พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นเห็นขอบเขตได้ชัดเจน ความหนาเท่ากับ 2.01 ไมโครเมตร ชั้นสารประกอบมีลักษณะกระจาย และลักษณะโดยทั่วไปเป็นชั้นที่ความหนาไม่ค่อยสม่ำเสมอ ขอบของชั้นมีลักษณะสูง-ต่ำแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูป 4.42

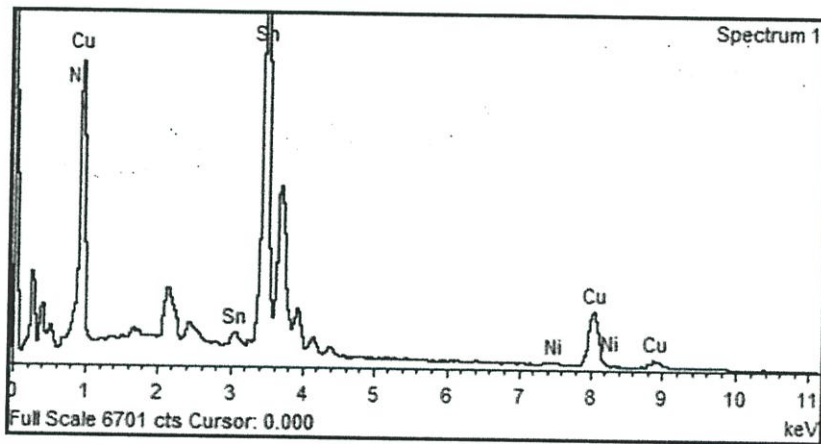
ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้ EDX เพื่อระบุองค์ประกอบทางเคมีสำหรับชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ในรูปที่ 4.42 แสดงผลของเปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นโดยพบธาตุ Ni ในช่วง 0.93-1.36% ธาตุ Cu ในช่วง 51.23-52.42% และธาตุ Sn ในช่วง 46.45-47.42% ดังตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.43, 4.44 และ 4.45



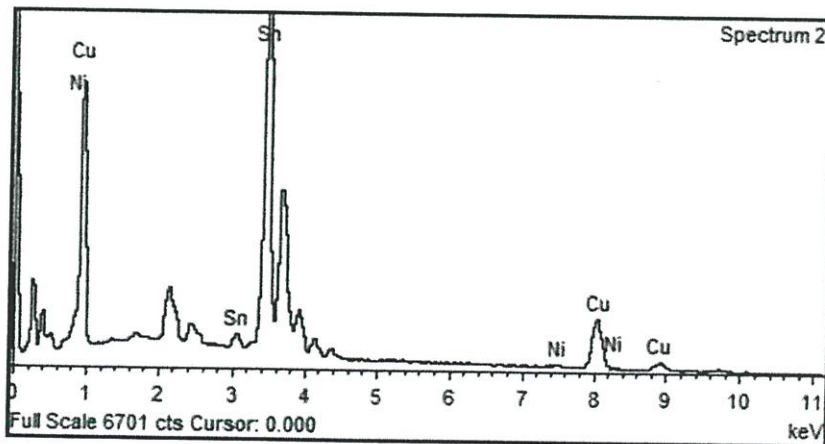
รูปที่ 4.42 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.5Ni-0.05In

ตารางที่ 4.11 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.5Ni-0.05In

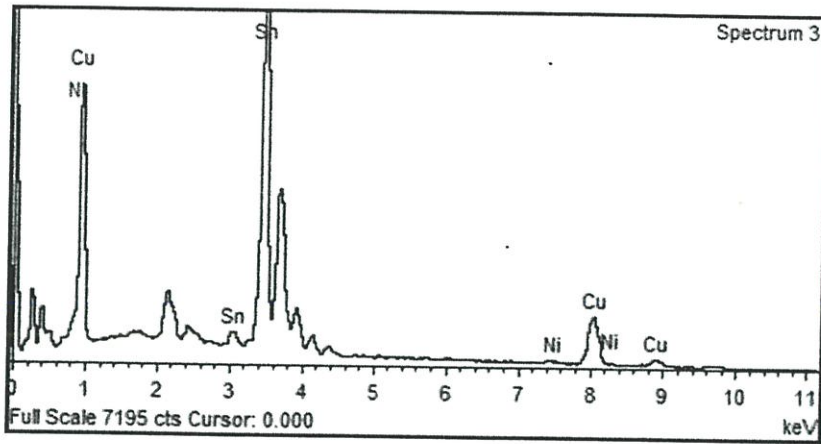
Element	Atomic%		
	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
Ni	1.13	0.93	1.36
Cu	52.42	51.65	51.23
Sn	46.45	47.42	47.41



รูปที่ 4.43 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 4.44 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 2

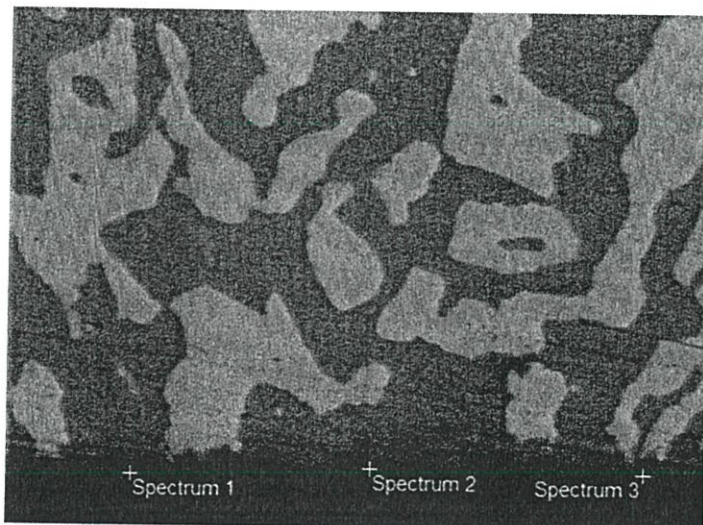


รูปที่ 4.45 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 3

6. โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn58Bi-0.5Ni-0.1In

จากภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.5Ni-0.1In พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นเห็นขอบเขตได้ชัดเจน ความหนาเท่ากับ 1.06 ไมโครเมตร และลักษณะโดยทั่วไปเป็นชั้นที่ความหนาไม่ค่อยสม่ำเสมอ ขอบของชั้นมีลักษณะสูง-ต่ำแตกต่างกัน ดังแสดงในรูป 4.46

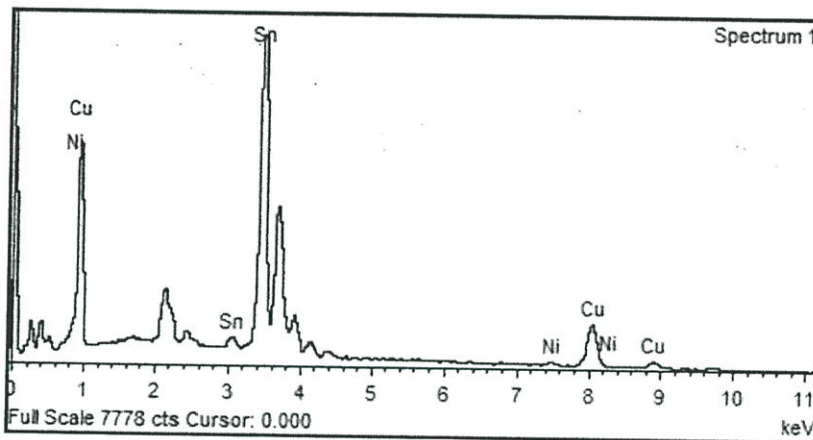
ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้ EDX เพื่อระบุองค์ประกอบทางเคมีสำหรับชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ในรูปที่ 4.46 แสดงผลของเปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นโดยพบธาตุ Ni ในช่วง 1.28-1.81% ธาตุ Cu ในช่วง 28.49-48.81% และธาตุ Sn ในช่วง 49.37-70.22% ดังตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.47, 4.48 และ 4.49



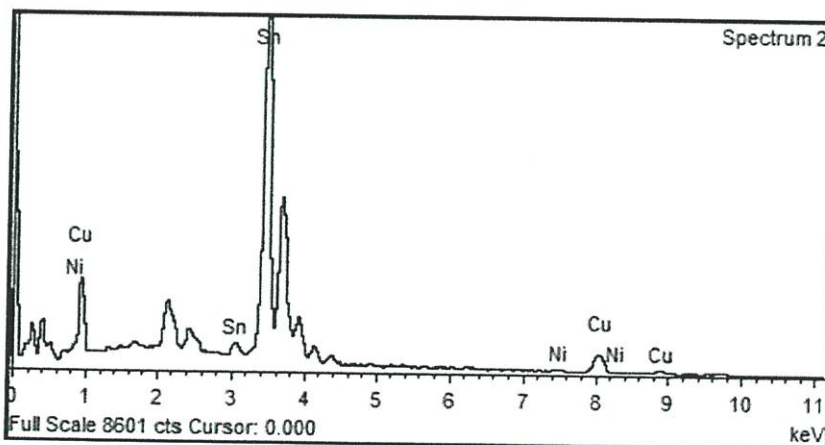
รูปที่ 4.46 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.5Ni-0.1In

ตารางที่ 4.12 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.5Ni-0.1In

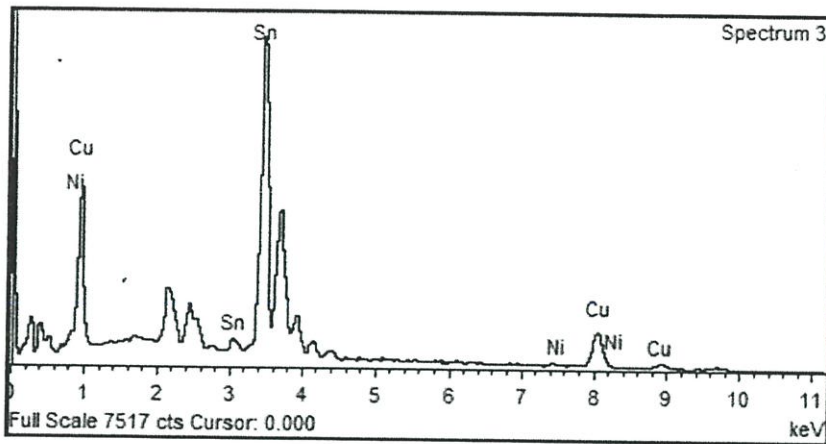
Element	Atomic%		
	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
Ni	1.81	1.28	1.45
Cu	48.81	28.49	43.91
Sn	49.37	70.22	54.63



รูปที่ 4.47 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 4.48 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 2

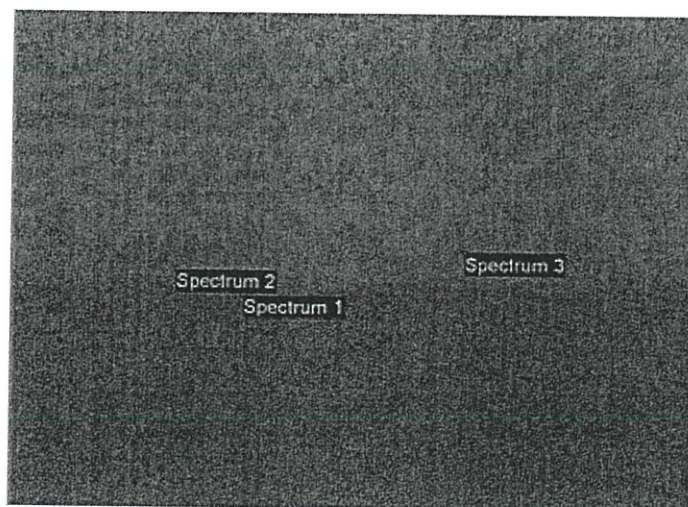


รูปที่ 4.49 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 3

7. โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn58Bi-1.0Ni-0.05In

จากภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-1.0Ni-0.05In พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นเห็นขอบเขตได้ชัดเจน ความหนาเท่ากับ 1.543 ไมโครเมตร และลักษณะโดยทั่วไปเป็นชั้นที่ความหนาไม่ค่อยสม่ำเสมอ ขอบของชั้นมีลักษณะสูง-ต่ำแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูป 4.50

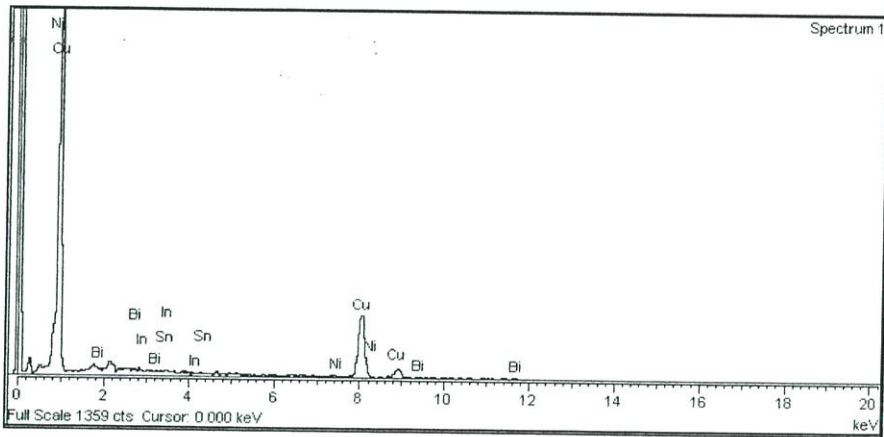
ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้ EDX เพื่อระบุองค์ประกอบทางเคมีสำหรับชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ในรูปที่ 4.50 แสดงผลของเปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นโดยพบธาตุ Ni 6.99% ธาตุ Cu ในช่วง 32.04-98.82% ธาตุ Sn ในช่วง 0.57-49.02% และธาตุ Bi ในช่วง 0.62-16.26% ดังตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.51, 4.52 และ 4.53



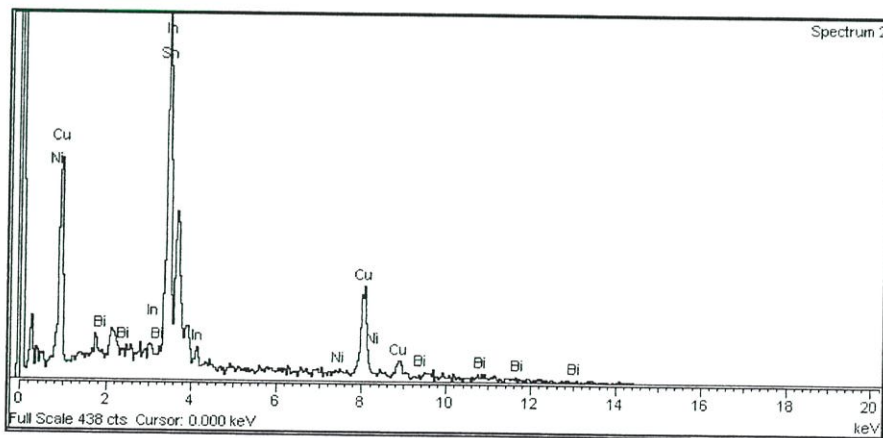
รูปที่ 4.50 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-1.0Ni-0.05In

ตารางที่ 4.13 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-1.0Ni-0.05In

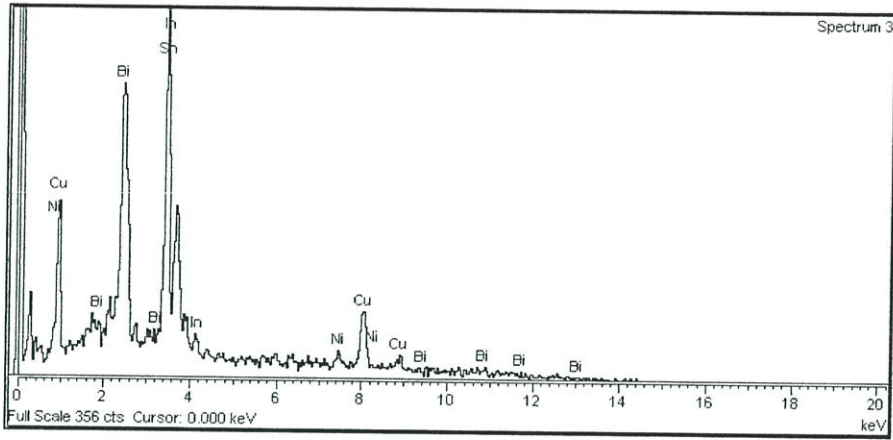
Element	Atomic%		
	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
Ni	-	-	6.99
Cu	98.82	50.19	32.04
Sn	0.57	49.02	44.7
Bi	0.62	0.78	16.26



รูปที่ 4.51 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 4.52 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 2

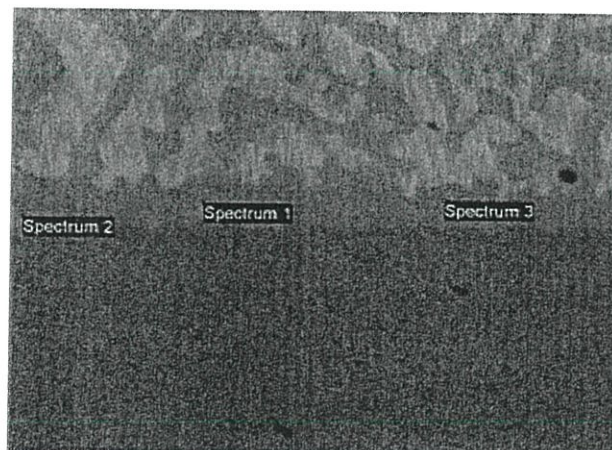


รูปที่ 4.53 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 3

8. โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn58Bi-1.0Ni-0.1In

จากภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-1.0Ni-0.1In พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นเห็นขอบเขตได้ชัดเจน ความหนาเท่ากับ 1.66 ไมโครเมตร และลักษณะโดยทั่วไปเป็นชั้นที่ความหนาไม่ค่อยสม่ำเสมอ ขอบของชั้นมีลักษณะสูง-ต่ำแตกต่างกันเล็กน้อย ดังแสดงในรูป 4.54

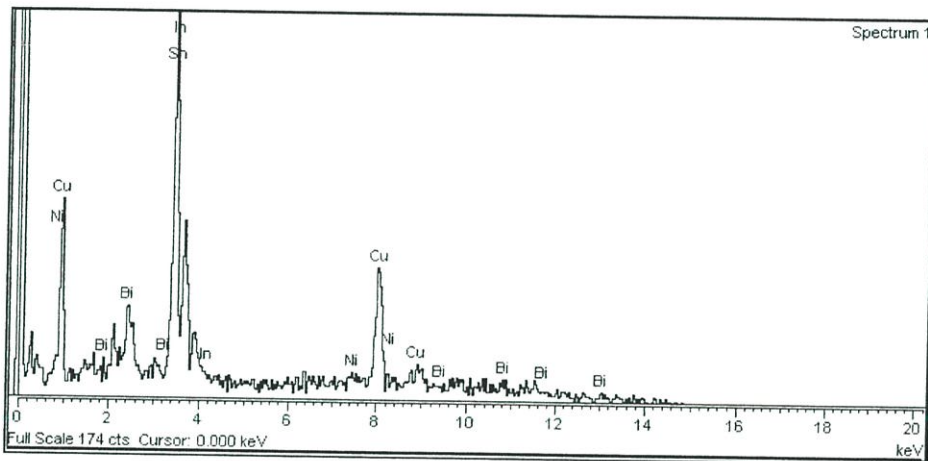
ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้ EDX เพื่อระบุองค์ประกอบทางเคมีสำหรับชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ในรูปที่ 4.54 แสดงผลของเปอร์เซ็นต์ต่อมวลของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นโดยพบธาตุ Ni ในช่วง 4.49-5.4% ธาตุ Cu ในช่วง 44.77-48.87% ธาตุ Sn ในช่วง 44.07-48.11% และธาตุ Bi ในช่วง 1.66-4.3% ดังตารางที่ 4.14 และรูปที่ 4.55, 4.56 และ 4.57



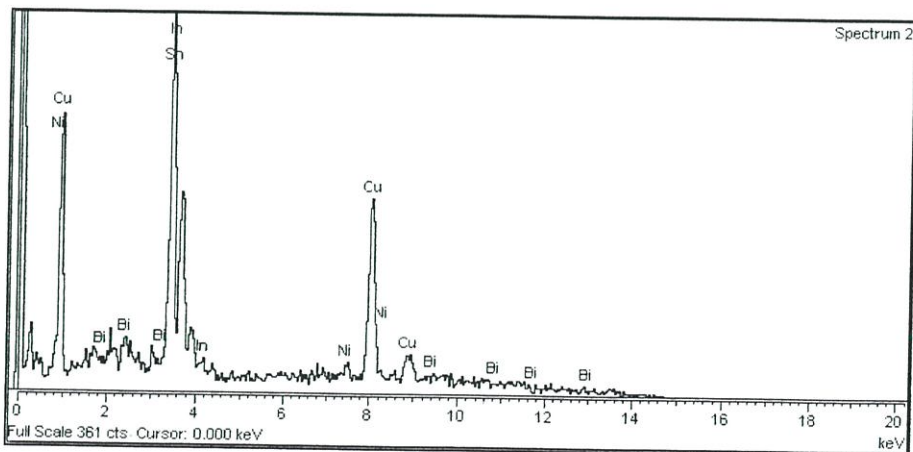
รูปที่ 4.54 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-1.0Ni-0.1In

ตารางที่ 4.14 เปอร์เซนต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-1.0Ni-0.1In

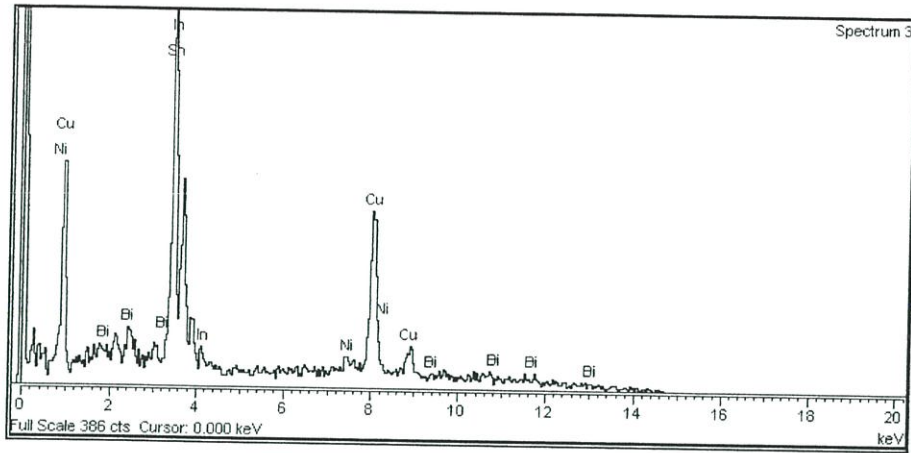
Element	Atomic%		
	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
Ni	5.09	5.4	4.49
Cu	44.77	48.87	45.51
Sn	45.84	44.07	48.11
Bi	4.3	1.66	1.89



รูปที่ 4.55 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 4.56 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 2

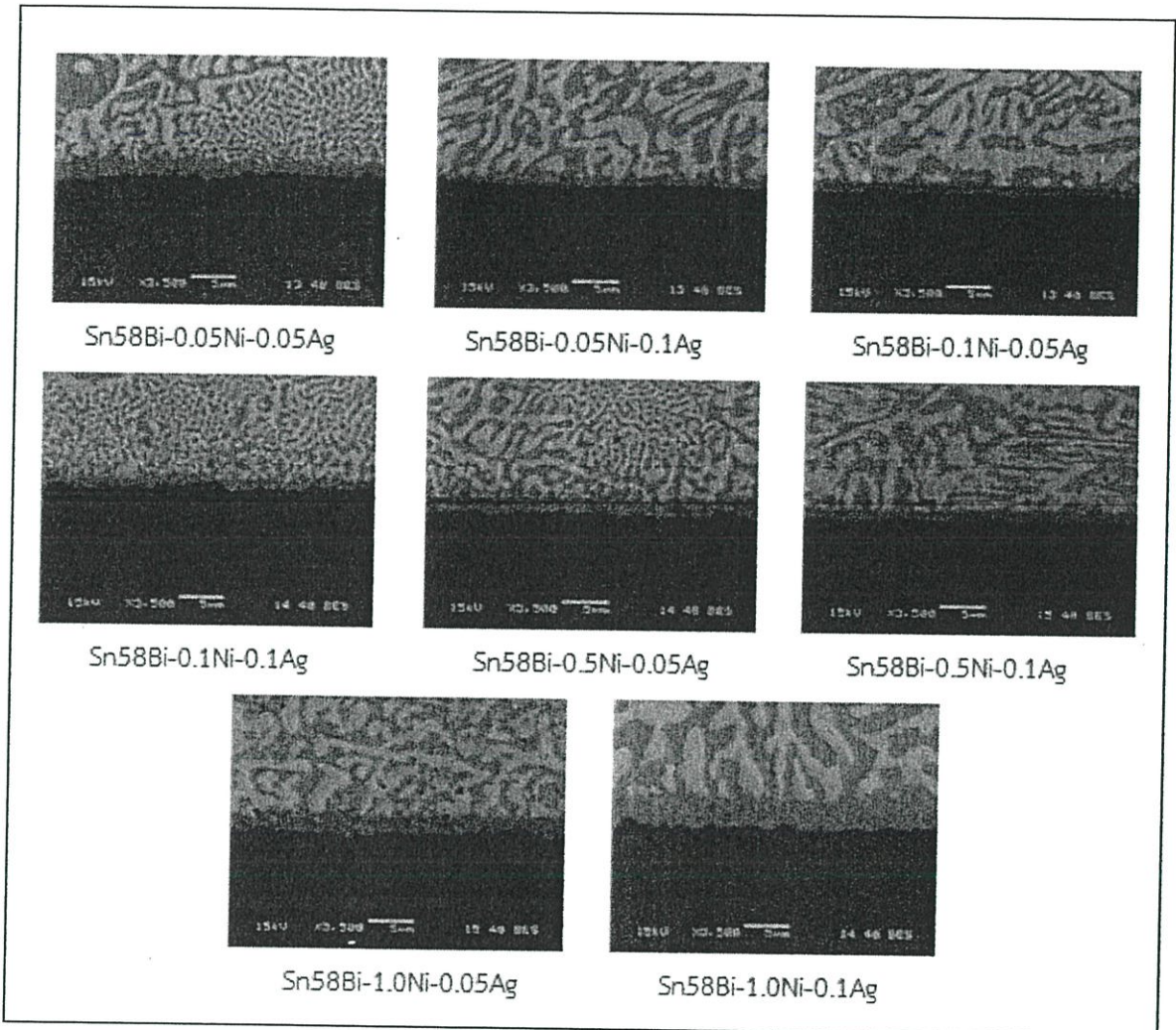


รูปที่ 4.57 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 3

สรุปผลจากข้อมูลกลุ่มที่ 2

ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบที่นำมาตรวจสอบลักษณะรอยต่อด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จะถูกวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของธาตุที่พบในชั้นรอยต่อด้วย EDX ที่ต่ออยู่กับกล้อง SEM โดยทำการตรวจสอบด้วย EDX ที่บริเวณของบนและล่างของชั้นรอยต่อ พบว่าชนิดของธาตุที่พบในชั้นรอยต่อประกอบด้วย Sn, Cu, Bi, Ni ชั้นความหนาของชั้นสารประกอบของชิ้นงานตัวอย่างทั้ง 8 ชนิดอยู่ในช่วง 0.769- 2.01 ไมโครเมตรโดยเมื่อเติม In เข้าไปในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-Ni แล้วมีแนวโน้มทำให้ชั้นสารประกอบมีความหนาเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับโลหะบัดกรีพื้นฐาน

4.3.3. กลุ่มที่ 3 (เติมธาตุ Ni ลงไปในโลหะพื้นปริมาณ 0.05, 0.1, 0.5 และ 1 wt%, เติมธาตุ Ag ลงไปปริมาณ 0.05, 0.1 wt%)

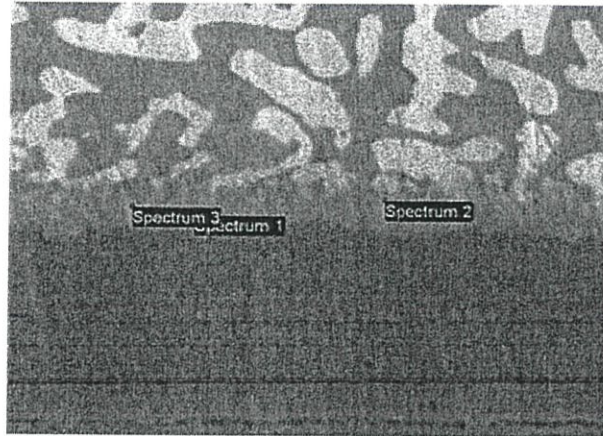


รูปที่ 4.58 ลักษณะรอยต่อจากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานทดสอบกลุ่มที่ 3

1. โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn58Bi-0.05Ni-0.05Ag

จากภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.05Ni-0.05Ag พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นเห็นขอบเขตได้ชัดเจน ความหนาเท่ากับ 1.535 ไมโครเมตรและลักษณะโดยทั่วไปเป็นชั้นที่ความหนาไม่ค่อยสม่ำเสมอ ขอบของชั้นมีลักษณะสูง-ต่ำแตกต่างกันเล็กน้อย ดังแสดงในรูป 4.59

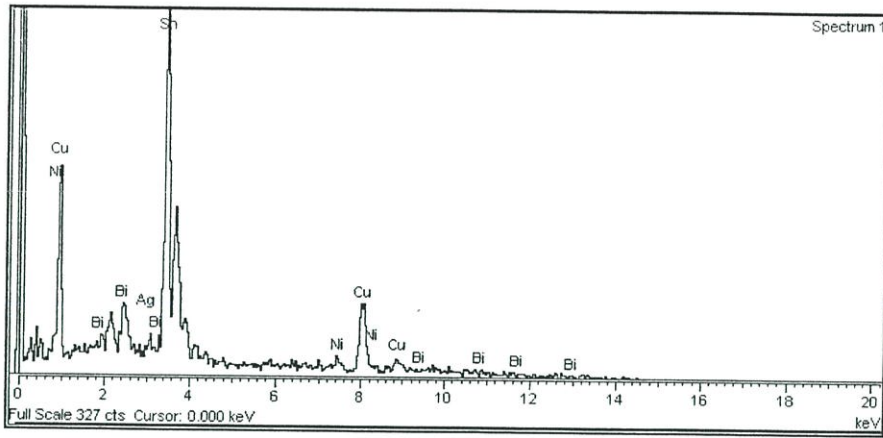
ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้ EDX เพื่อระบุองค์ประกอบทางเคมีสำหรับชิ้นสารประกอบเชิงโลหะ ในรูปที่ 4.59 แสดงผลของเปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นโดยพบธาตุ Ni ในช่วง 4.18-4.45% ธาตุ Cu ในช่วง 44.54-58.93% ธาตุ Sn ในช่วง 41.07-47.74% และธาตุ Bi ในช่วง 1.7-3.27% ดังตารางที่ 4.15 และรูปที่ 4.60, 4.61 และ 4.62



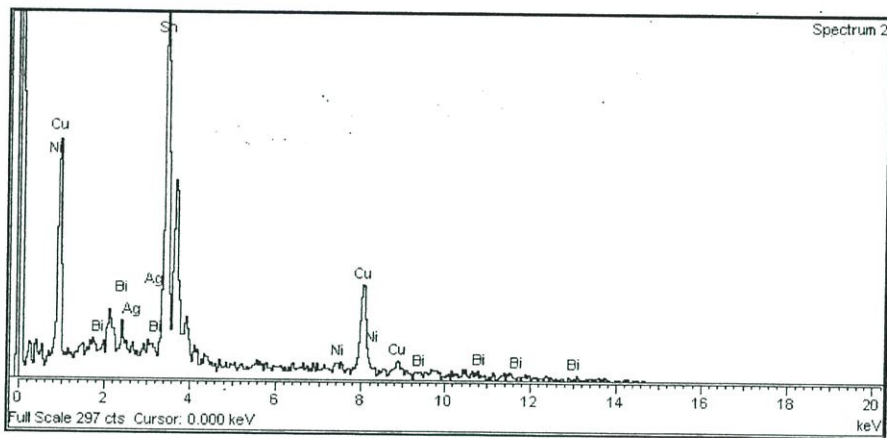
รูปที่ 4.59 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.05Ni-0.05Ag

ตารางที่ 4.15 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.05Ni-0.05Ag

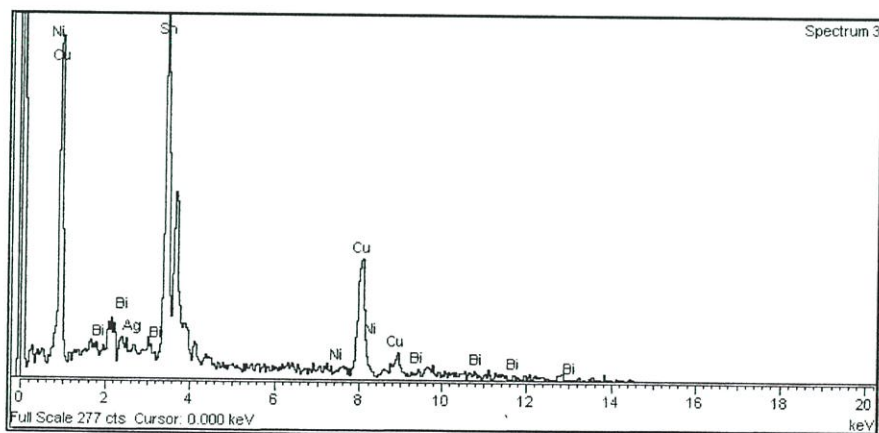
Element	Atomic%		
	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
Ni	4.45	4.18	-
Cu	44.54	47.48	58.93
Sn	47.74	46.64	41.07
Bi	3.27	1.7	-



รูปที่ 4.60 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 4.61 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 2

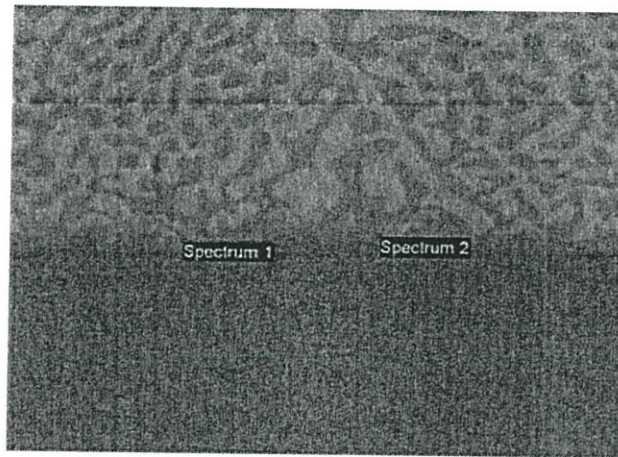


รูปที่ 4.62 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 3

2. โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn58Bi-0.05Ni-0.1Ag

จากภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.05Ni-0.1Ag พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นเห็นขอบเขตได้ชัดเจน ความหนาเท่ากับ 0.975 ไมโครเมตรและลักษณะโดยทั่วไปเป็นชั้นที่ความหนาไม่ค่อยสม่ำเสมอ ขอบของชั้นมีลักษณะสูง-ต่ำแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูป 4.63

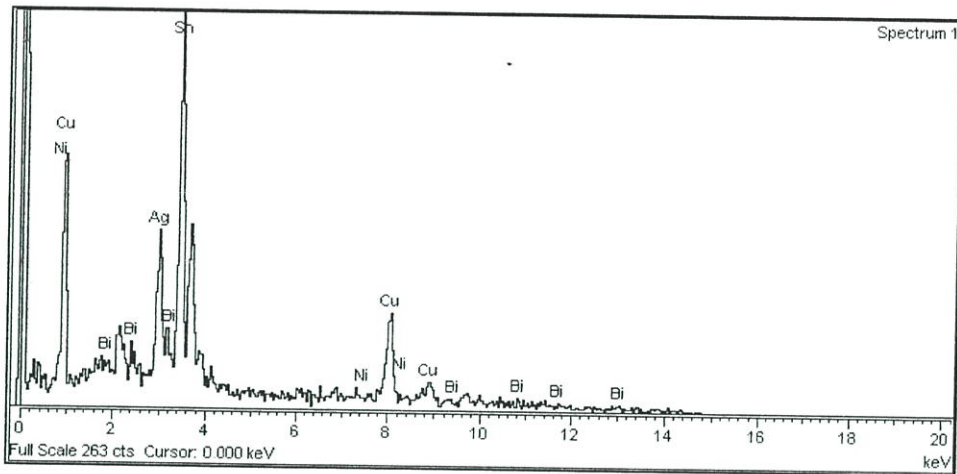
ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้ EDX เพื่อระบุองค์ประกอบทางเคมีสำหรับชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ในรูปที่ 4.63 แสดงผลของเปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นโดยพบธาตุ Ag ในช่วง 3.06-12.6% ธาตุ Cu ในช่วง 45.13-51.19% ธาตุ Sn ในช่วง 40.15-42.26% และธาตุ Bi ในช่วง 2.12-3.49% ดังตารางที่ 4.16 และรูปที่ 4.64 และ 4.65



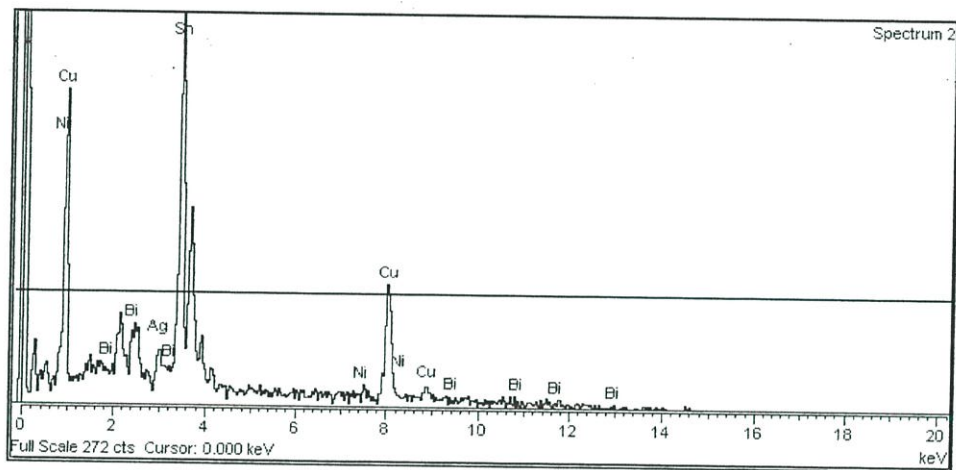
รูปที่ 4.63 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.05Ni-0.1Ag

ตารางที่ 4.16 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.05Ni-0.1Ag

Element	Atomic%	
	Spectrum 1	Spectrum 2
Ag	12.6	3.06
Cu	45.13	51.19
Sn	40.15	42.26
Bi	2.12	3.49



รูปที่ 4.64 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 1

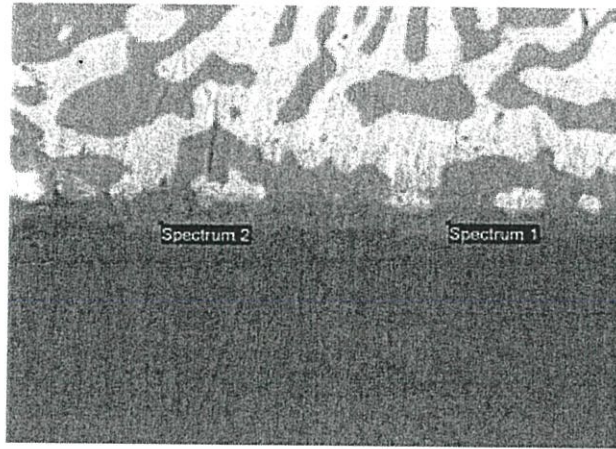


รูปที่ 4.65 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 2

3. โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn58Bi-0.1Ni-0.05Ag

จากภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.1Ni-0.05Ag พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นเห็นขอบเขตได้ชัดเจน ความหนาเท่ากับ 1.1 ไมโครเมตร และลักษณะโดยทั่วไปเป็นชั้นที่ความหนาไม่ค่อยสม่ำเสมอ ขอบของชั้นมีลักษณะสูง-ต่ำแตกต่างกันเล็กน้อย ดังแสดงในรูป 4.66

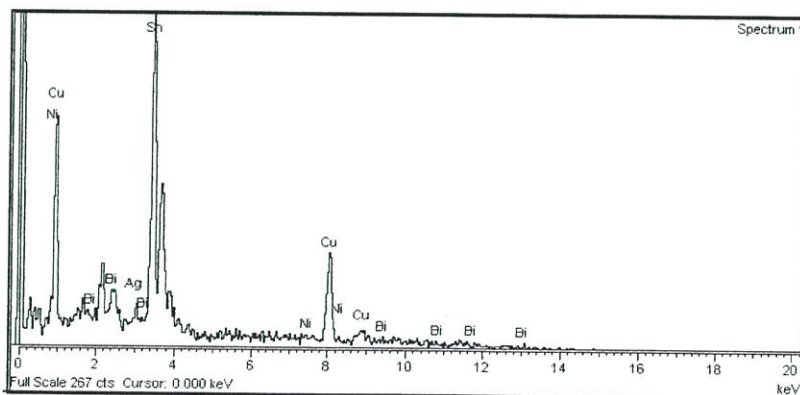
ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้ EDX เพื่อระบุองค์ประกอบทางเคมีสำหรับชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ในรูปที่ 4.66 แสดงผลของเปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นโดยพบธาตุ Ni 3.44% ธาตุ Cu ในช่วง 49.53-50.48% ธาตุ Sn ในช่วง 44.99-47.12% และธาตุ Bi ในช่วง 2.03-2.4% ดังตารางที่ 4.17 และรูปที่ 4.67 และ 4.68



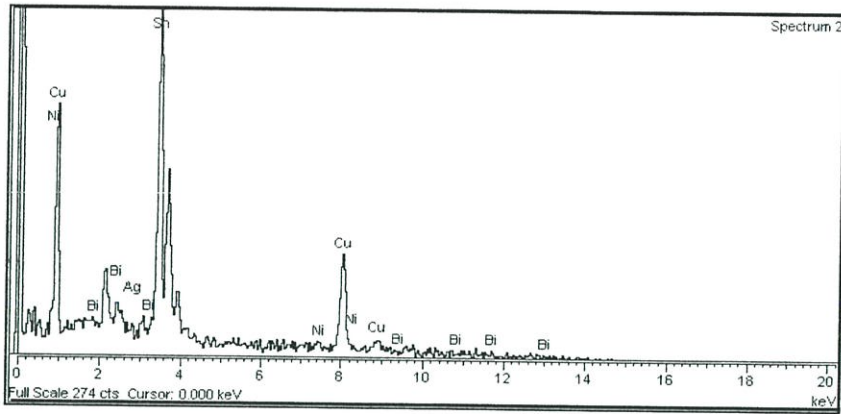
รูปที่ 4.66 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.1Ni-0.05Ag

ตารางที่ 4.17 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.1Ni-0.05Ag

Element	Atomic%	
	Spectrum 1	Spectrum 2
Ni	-	3.44
Cu	50.48	49.53
Sn	47.12	44.99
Bi	2.4	2.03



รูปที่ 4.67 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 1

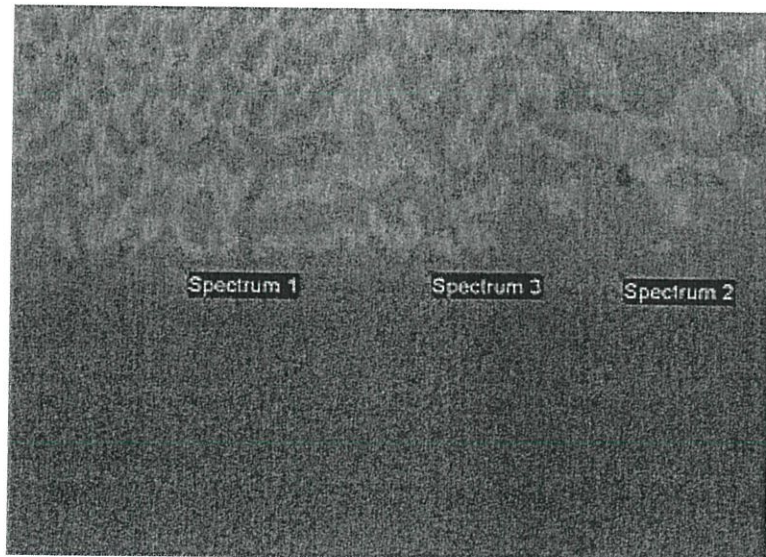


รูปที่ 4.68 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 2

4. โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn58Bi-0.1Ni-0.1Ag

จากภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.1Ni-0.1Ag พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นเห็นขอบเขตได้ชัดเจน มีความหนาเท่ากับ 1.11 ไมโครเมตร และลักษณะโดยทั่วไปเป็นชั้นที่ความหนาไม่ค่อนสม่ำเสมอ ขอบของชั้นมีลักษณะสูง-ต่ำแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูป 4.69

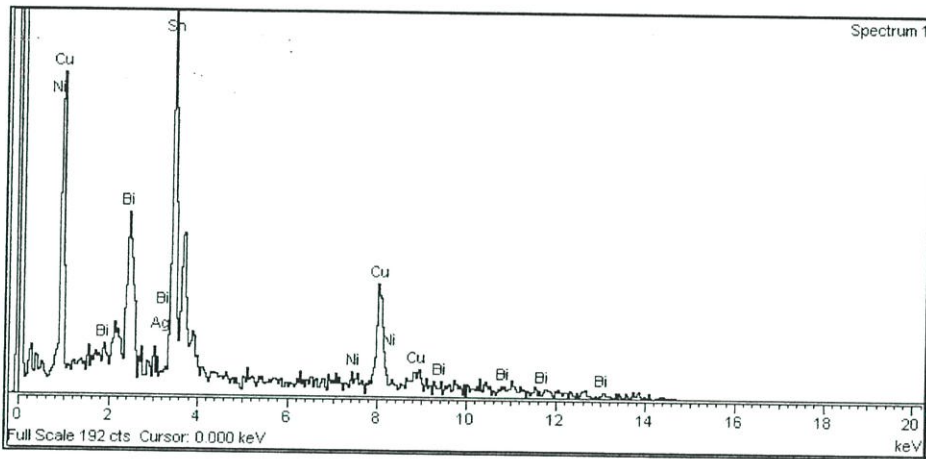
ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้ EDX เพื่อระบุองค์ประกอบทางเคมีสำหรับชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ในรูปที่ 4.69 แสดงผลของเปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นโดยพบธาตุ Ni ในช่วง 3.75-3.97% ธาตุ Cu ในช่วง 48.94-60.74% ธาตุ Sn ในช่วง 35.29-43.04% และธาตุ Bi 8.39% ดังตารางที่ 4.18 และรูปที่ 4.70, 4.71 และ 4.72



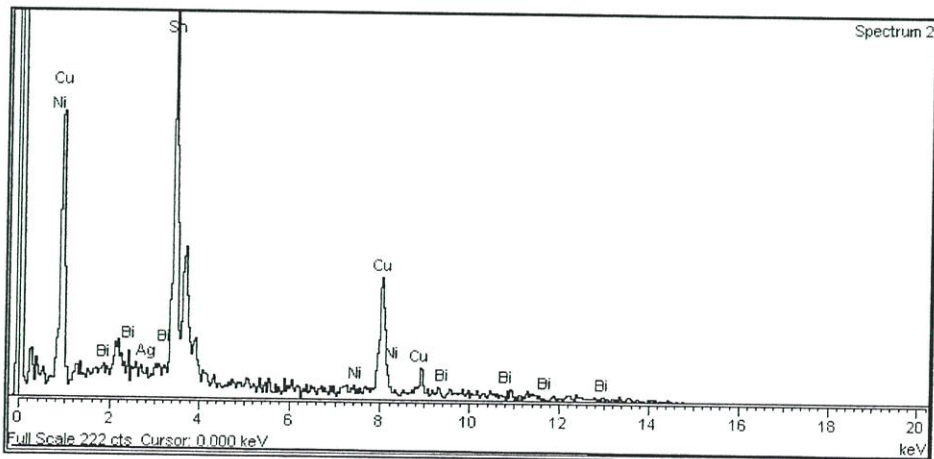
รูปที่ 4.69 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.1Ni-0.1Ag

ตารางที่ 4.18 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.1Ni-0.1Ag

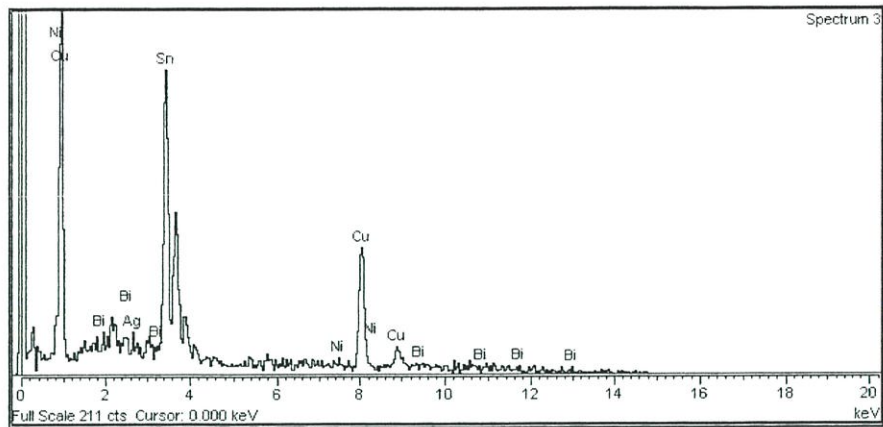
Element	Atomic%		
	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
Ni	3.75	-	3.97
Cu	48.94	56.96	60.74
Sn	38.93	43.04	35.29
Bi	8.39	-	-



รูปที่ 4.70 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 4.71 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 2

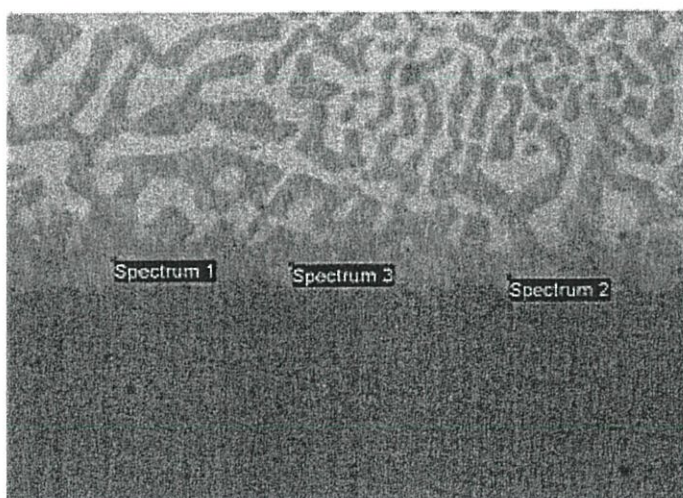


รูปที่ 4.72 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 3

5. โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn58Bi-0.5Ni-0.05Ag

จากภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.5Ni-0.05Ag พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นเห็นขอบเขตได้ชัดเจน ความหนาเท่ากับ 1.833 ไมโครเมตรและลักษณะโดยทั่วไปเป็นชั้นที่ความหนาไม่ค่อยสม่ำเสมอ ขอบของชั้นมีลักษณะสูง-ต่ำแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูป 4.73

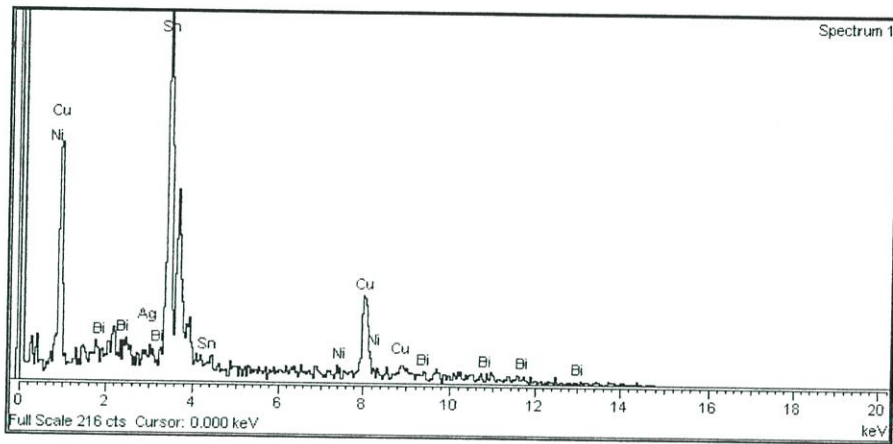
ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้ EDX เพื่อระบุองค์ประกอบทางเคมีสำหรับชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ในรูปที่ 4.73 แสดงผลของเปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นโดยพบธาตุ Ni 2.9% ธาตุ Cu ในช่วง 50.18-56.7% ธาตุ Sn ในช่วง 42.87-48.79% และธาตุ Bi ในช่วง 1.03-2.5% ดังตารางที่ 4.19 และรูปที่ 4.74, 4.45 และ 4.76



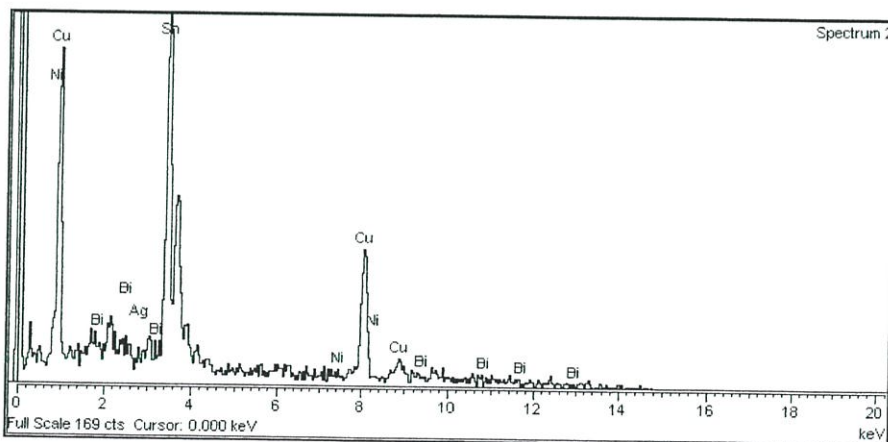
รูปที่ 4.73 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.5Ni-0.05Ag

ตารางที่ 4.19 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.5Ni-0.05Ag

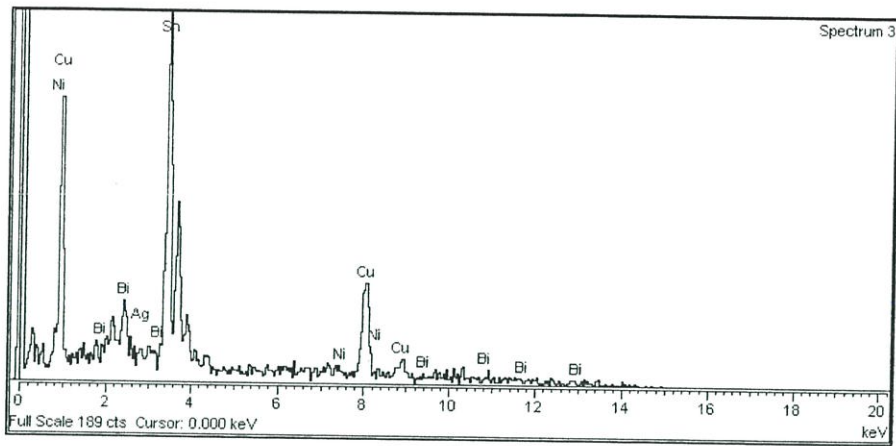
Element	Atomic%		
	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
Ni	-	-	2.9
Cu	50.18	56.7	51.72
Sn	48.79	43.3	42.87
Bi	1.03	-	2.5



รูปที่ 4.74 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 4.75 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 2

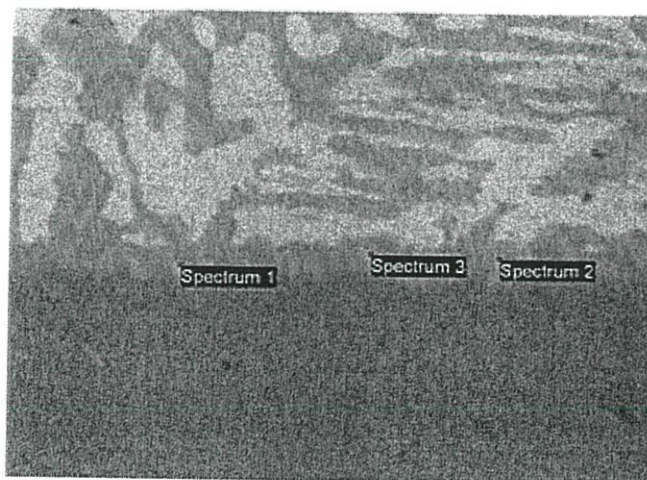


รูปที่ 4.76 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 3

6. โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn58Bi-0.5Ni-0.1Ag

จากภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.5Ni-0.1Ag พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นเห็นขอบเขตได้ชัดเจน ความหนาเท่ากับ 1.334 ไมโครเมตรและลักษณะโดยทั่วไปเป็นชั้นที่ความหนาไม่ค่อยสม่ำเสมอ ขอบของชั้นมีลักษณะสูง-ต่ำแตกต่างกันเล็กน้อย ดังแสดงในรูป 4.77

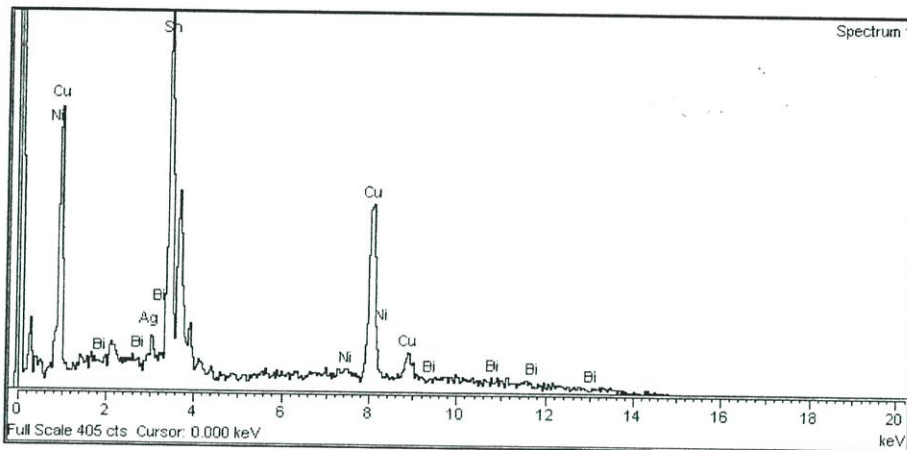
ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้ EDX เพื่อระบุองค์ประกอบทางเคมีสำหรับชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ในรูปที่ 4.77 แสดงผลของเปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นโดยพบธาตุ Ni 4.72% ธาตุ Cu ในช่วง 49.33-61.53% ธาตุ Sn ในช่วง 38.47-45.51% และธาตุ Bi 1.42% ดังตารางที่ 4.20 และรูปที่ 4.78, 4.79 แลพ 4.80



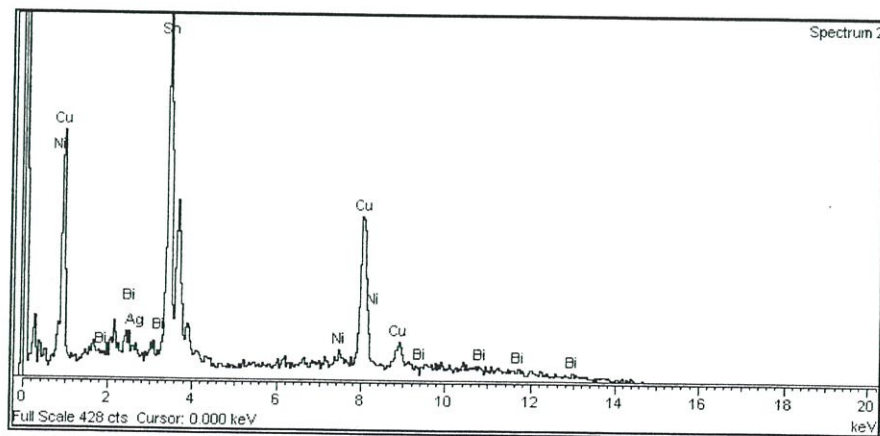
รูปที่ 4.77 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.5Ni-0.1Ag

ตารางที่ 4.20 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-0.5Ni-0.1Ag

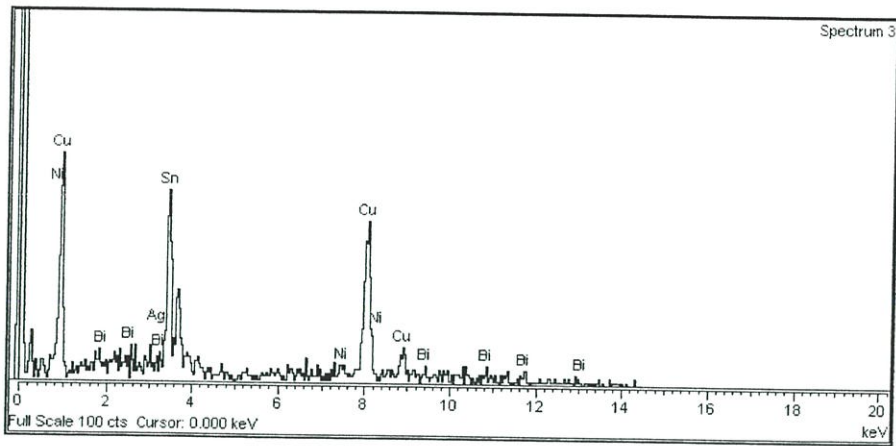
Element	Atomic%		
	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
Ni	-	4.72	-
Cu	54.49	49.33	61.53
Sn	45.51	44.53	38.47
Bi	-	1.42	-



รูปที่ 4.78 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 4.79 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 2

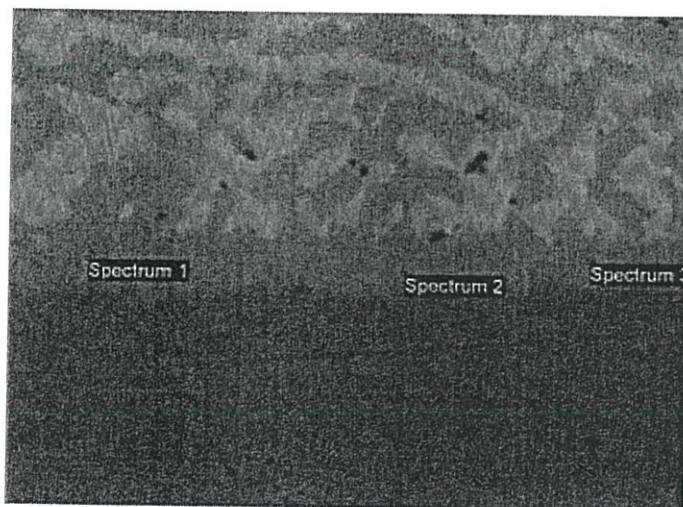


รูปที่ 4.80 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 3

7. โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn58Bi-1.0Ni-0.05Ag

จากภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-1.0Ni-0.05Ag พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นเห็นขอบเขตได้ชัดเจน ความหนาเท่ากับ 2.129 ไมโครเมตร และลักษณะโดยทั่วไปเป็นชั้นที่ความหนาไม่ค่อยสม่ำเสมอ ขอบของชั้นมีลักษณะสูง-ต่ำแตกต่างกันเล็กน้อย ดังแสดงในรูป 4.81

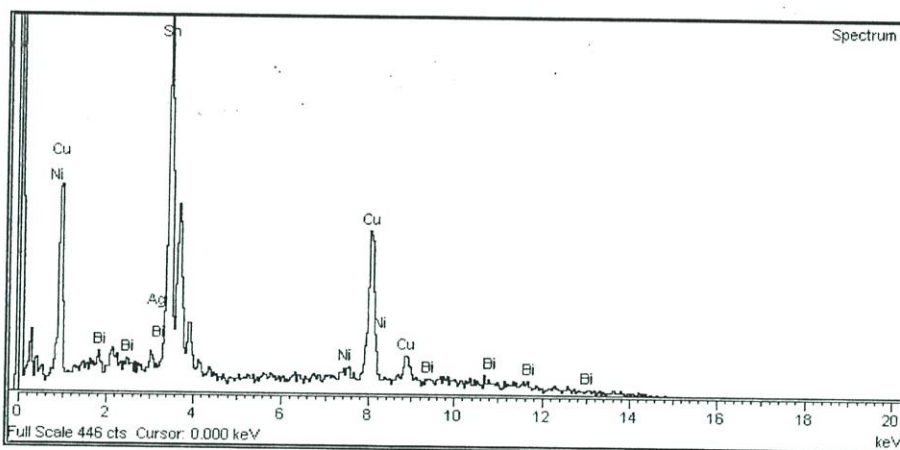
ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้ EDX เพื่อระบุองค์ประกอบทางเคมีสำหรับชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ในรูปที่ 4.81 แสดงผลของเปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นโดยพบธาตุ Ni ในช่วง 4.62-5.02% ธาตุ Cu ในช่วง 46.15-51.84% ธาตุ Sn ในช่วง 42.54-51.84% และธาตุ Bi 0.6% ดังตารางที่ 4.21 และรูปที่ 4.82, 4.83 และ 4.84



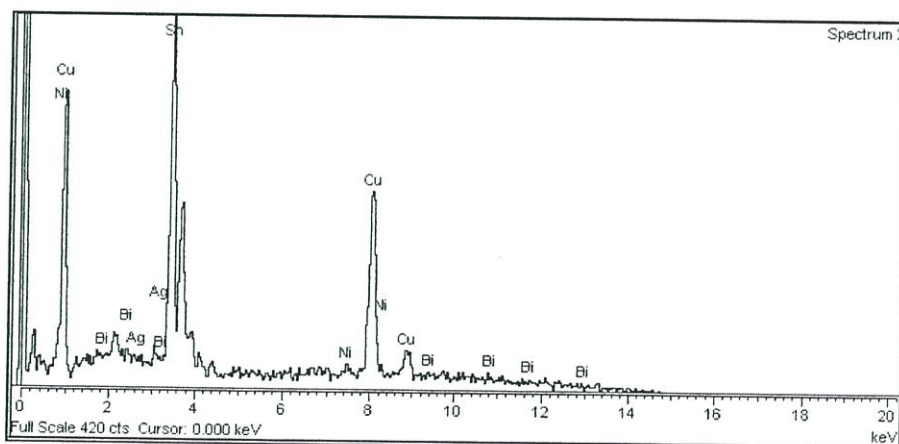
รูปที่ 4.81 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-1.0Ni-0.05Ag

ตารางที่ 4.21 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-1.0Ni-0.05Ag

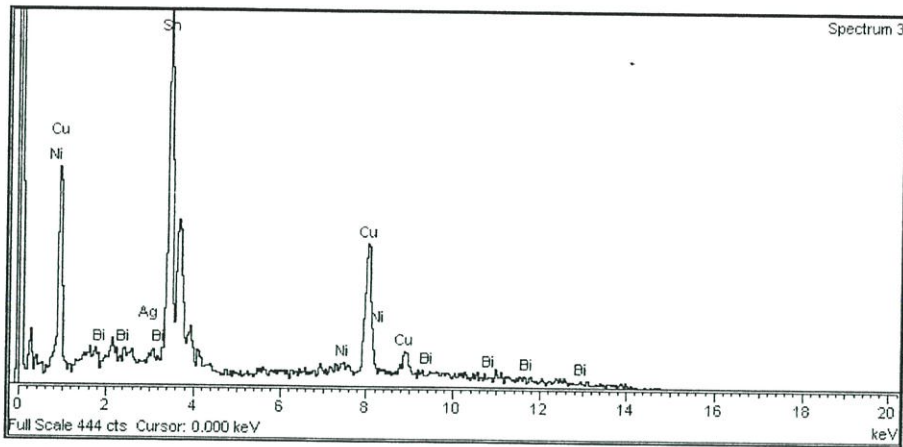
Element	Atomic%		
	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
Ni	4.62	5.02	-
Cu	46.15	51.84	47.46
Sn	49.23	42.54	51.84
Bi	-	0.6	-



รูปที่ 4.82 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 4.83 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 2

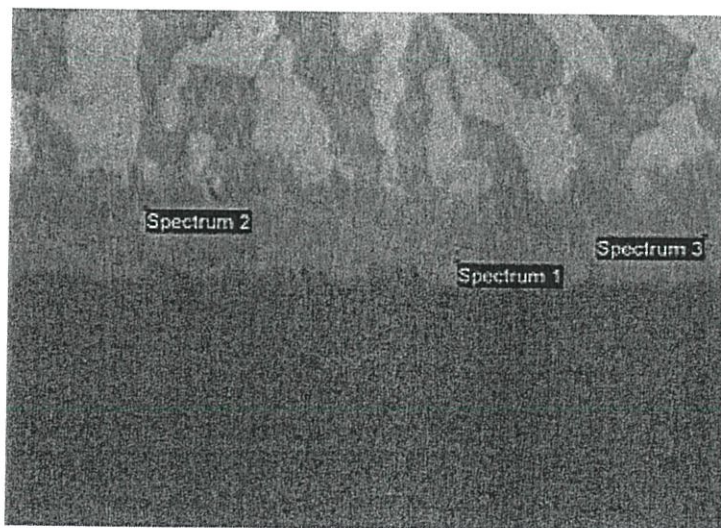


รูปที่ 4.84 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 3

8. โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn58Bi-1.0Ni-0.1Ag

จากภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-1.0Ni-0.1Ag พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นเห็นขอบเขตได้ชัดเจน ความหนาเท่ากับ 3.366 ไมโครเมตร และลักษณะโดยทั่วไปเป็นชั้นที่ความหนาไม่ค่อยสม่ำเสมอ ขอบของชั้นมีลักษณะสูง-ต่ำแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูป 4.85

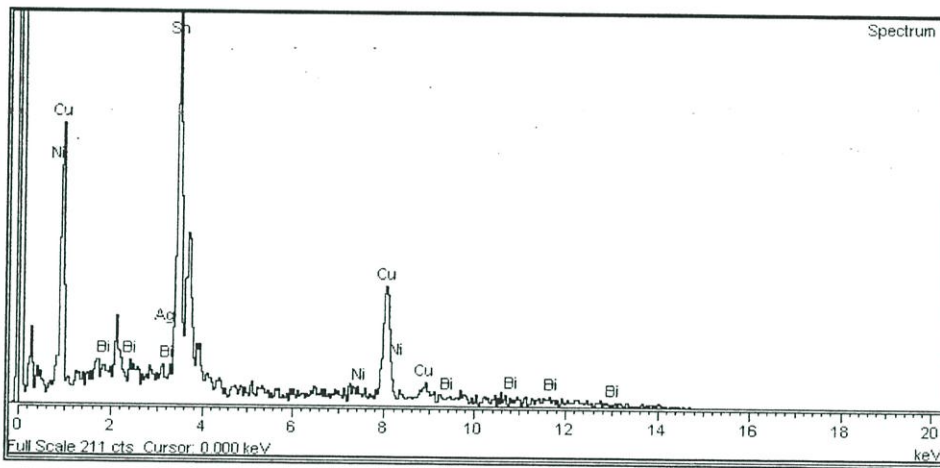
ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้ EDX เพื่อระบุองค์ประกอบทางเคมีสำหรับชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ในรูปที่ 4.85 แสดงผลของเปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นโดยพบธาตุ Cu ในช่วง 40.94-53.68% ธาตุ Sn ในช่วง 45.05-53.35% และธาตุ Bi ในช่วง 0.92-5.71% ดังตารางที่ 4.22 และรูปที่ 4.86, 4.87 และ 4.88



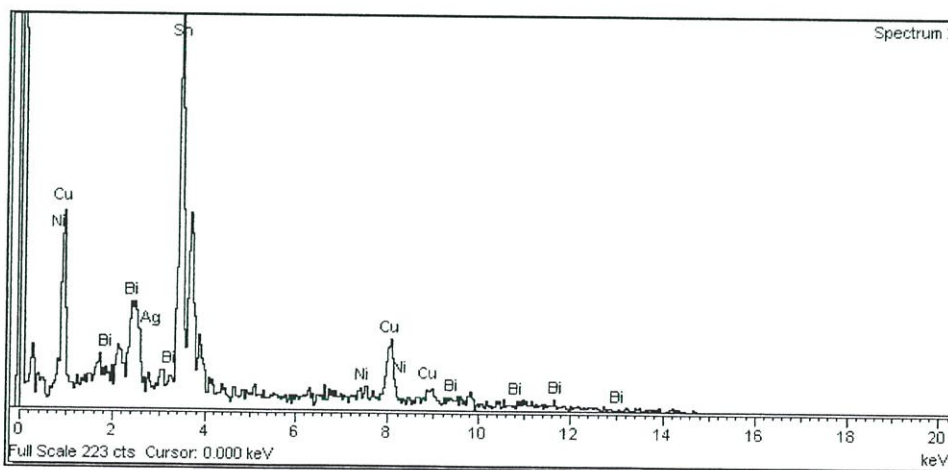
รูปที่ 4.85 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-1.0Ni-0.1Ag

ตารางที่ 4.22 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด Sn58Bi-1.0Ni-0.1Ag

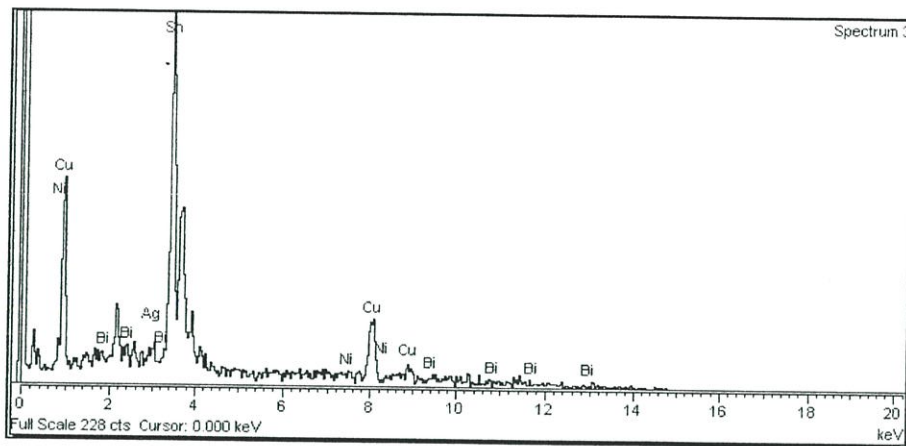
Element	Atomic%		
	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
Cu	53.68	40.94	47.78
Sn	45.05	53.35	51.29
Bi	1.26	5.71	0.92



รูปที่ 4.86 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 4.87 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 2



รูปที่ 4.88 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของ IMC ที่ตำแหน่งที่ 3

สรุปผลจากข้อมูลกลุ่มที่ 3

ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบที่นำมาตรวจสอบลักษณะรอยต่อด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จะถูกวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของธาตุที่พบในชั้นรอยต่อด้วย EDX ที่ต่ออยู่กับกล้อง SEM โดยทำการตรวจสอบด้วย EDX ที่บริเวณของบนและล่างของชั้นรอยต่อ พบว่าชนิดของธาตุที่พบในชั้นรอยต่อประกอบด้วย Sn, Cu, Bi, Ni, Ag ชั้นความหนาของชั้นสารประกอบของชิ้นงานตัวอย่างทั้ง 8 ชนิดอยู่ในช่วง 0.975- 3.366 ไมโครเมตรโดยเมื่อเติม Ag เข้าไปในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-Ni แล้วมีแนวโน้มทำให้ชั้นสารประกอบมีความหนาเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับโลหะบัดกรีพื้นฐาน

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการเติมธาตุ Ni, In และ Ag เข้าไปในโลหะบัดกรีพื้นฐานทำให้ความหนาของชั้นสารประกอบเพิ่มมากขึ้น ซึ่งหมายความว่าเมื่อเติมธาตุเหล่านี้เข้าไปทำให้โลหะบัดกรีทำปฏิกิริยากับแผ่นทองแดงได้ดีขึ้น

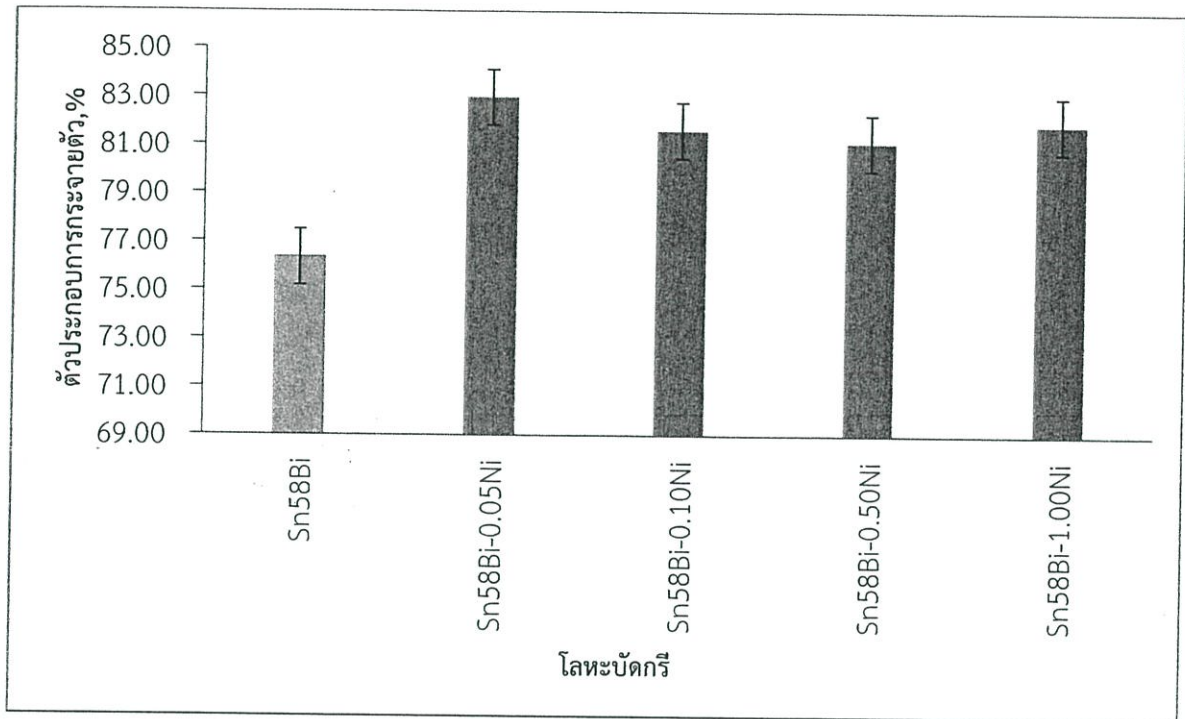
4.4 ค่าตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีและความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

จากการทดสอบหาค่าตัวประกอบการกระจายตัว และการวัดค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ โดยใช้โปรแกรม Image-Pro Express ได้ผลดังตารางที่ 4.23

ตารางที่ 4.23 เปอร์เซนต์ค่าตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรี และความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะแต่ละชนิด

ชนิดของโลหะบัดกรี	ค่าตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรี (%)			ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (mm)
Sn58Bi	78.25	75.09	75.64	1.13
Sn58Bi-0.05Ni	84.59	84.85	79.41	1.21
Sn58Bi-0.1Ni	76.16	79.59	84.67	2.12
Sn58Bi-0.5Ni	84.18	80.41	74.95	0.83
Sn58Bi-1.0Ni	75.66	83.26	83.24	1.62
Sn58Bi-0.05Ni-0.05In	84.01	82.59	79.96	1.78
Sn58Bi-0.05Ni-0.1In	80.95	80.29	71.21	0.77
Sn58Bi-0.1Ni-0.05In	75.73	81.36	80.59	1.11
Sn58Bi-0.1Ni-0.1In	83.18	82.76	80.83	1.09
Sn58Bi-0.5Ni-0.05In	66.35	82.00	83.23	2.01
Sn58Bi-0.5Ni-0.1In	83.31	83.20	78.45	1.06
Sn58Bi-1.0Ni-0.05In	79.15	84.44	70.80	1.54
Sn58Bi-1.0Ni-0.1In	74.61	73.09	58.71	1.66
Sn58Bi-0.05Ni-0.05Ag	83.99	80.75	80.64	1.54
Sn58Bi-0.05Ni-0.1Ag	80.30	77.10	79.72	0.98
Sn58Bi-0.1Ni-0.05Ag	83.68	86.52	80.28	1.10
Sn58Bi-0.1Ni-0.1Ag	77.32	79.31	79.92	1.11
Sn58Bi-0.5Ni-0.05Ag	84.55	84.19	82.01	1.83
Sn58Bi-0.5Ni-0.1Ag	81.29	72.47	82.48	1.33
Sn58Bi-1.0Ni-0.05Ag	85.04	84.04	77.64	2.13
Sn58Bi-1.0Ni-0.1Ag	76.93	86.77	85.41	3.37

จากรูปที่ 4.89 แสดงให้เห็นว่าการเติมธาตุ Ni ในปริมาณ 0.05, 0.1, 0.5 และ 1.0 wt% ไปในโลหะบัดกรีพื้นฐาน Sn-58Bi ส่งผลให้ค่าตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีมีค่าที่มากขึ้นเมื่อเทียบกับโลหะบัดกรีพื้นฐาน เนื่องจากอิทธิพลของธาตุ Ni ที่ส่งผลต่อโลหะบัดกรีพื้นฐาน Sn-58Bi



รูปที่ 4.89 ค่าตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีพื้นฐาน Sn58Bi และโลหะบัดกรีที่เติม Ni ปริมาณต่างๆ

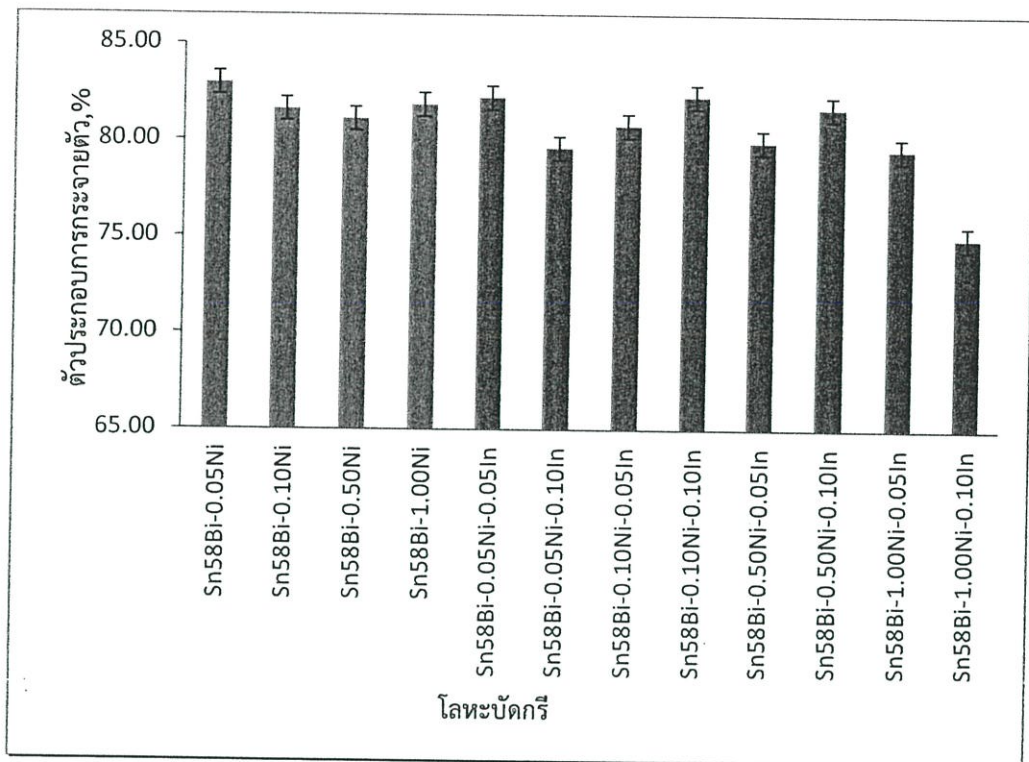
จากรูปที่ 4.91 แสดงกราฟค่าตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีที่ไม่เติม In และเติม In ปริมาณต่างๆ ในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-Ni โดยแบ่งตามปริมาณ Ni เป็น 4 กลุ่มคือ 0.05Ni, 0.1Ni, 0.5Ni และ 1.0Ni wt% จากการวิเคราะห์โดยเปรียบเทียบที่ละกลุ่ม พบว่า

การเติม In ใน Sn-58Bi-0.05Ni ในปริมาณ 0.05 และ 0.10 wt% ทำให้ค่าตัวประกอบการกระจายตัวมีแนวโน้มลดลง

การเติม In ใน Sn-58Bi-0.10Ni ในปริมาณ 0.05 และ 0.10 wt% ทำให้ค่าตัวประกอบการกระจายตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

การเติม In ใน Sn-58Bi-0.50Ni ในปริมาณ 0.05 และ 0.10 wt% ทำให้ค่าตัวประกอบการกระจายตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

การเติม In ใน Sn-58Bi-1.00Ni ในปริมาณ 0.05 และ 0.10 wt% ทำให้ค่าตัวประกอบการกระจายตัวมีแนวโน้มลดลง



รูปที่ 4.90 ค่าตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีที่ไม่เติม In และเติม In ปริมาณต่างๆ

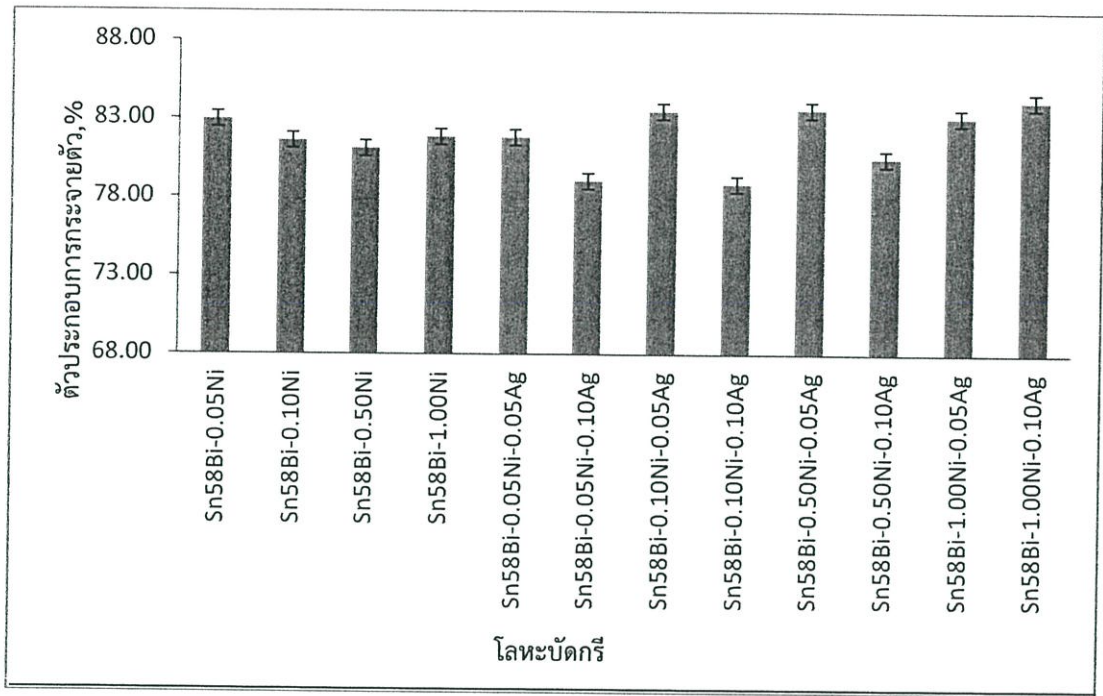
จากรูปที่ 4.91 แสดงกราฟค่าตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีที่ไม่เติม Ag และเติม Ag ปริมาณต่างๆ ในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-Ni โดยแบ่งตามปริมาณ Ni เป็น 4 กลุ่มคือ 0.05Ni, 0.1Ni, 0.5Ni และ 1.0Ni wt% จากการวิเคราะห์โดยเปรียบเทียบที่ละกลุ่ม พบว่า

การเติม Ag ใน Sn-58Bi-0.05Ni ในปริมาณ 0.05 และ 0.10 wt% ทำให้ค่าตัวประกอบการกระจายตัวมีแนวโน้มลดลง

การเติม Ag ใน Sn-58Bi-0.10Ni ในปริมาณ 0.05 wt% ทำให้ค่าตัวประกอบการกระจายตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และในปริมาณ 0.10 wt% ทำให้ค่าตัวประกอบการกระจายตัวมีแนวโน้มลดลง

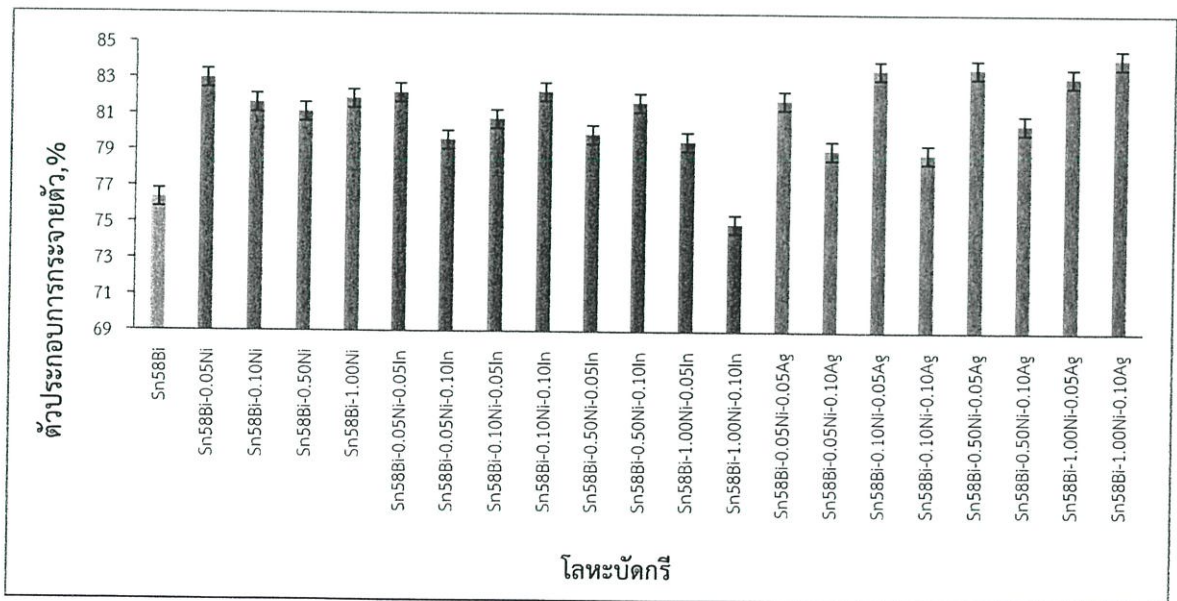
การเติม Ag ใน Sn-58Bi-0.50Ni ในปริมาณ 0.05 wt% ทำให้ค่าตัวประกอบการกระจายตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และในปริมาณ 0.10 wt% ทำให้ค่าตัวประกอบการกระจายตัวมีแนวโน้มลดลง

การเติม Ag ใน Sn-58Bi-1.00Ni ในปริมาณ 0.05 และ 0.10 wt% ทำให้ค่าตัวประกอบการกระจายตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.91 ค่าตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีที่ไม่เติม Ag และเติม Ag ปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 4.92 แสดงกราฟค่าตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีทุกสูตร สามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่าการเติมธาตุเงินในแต่ละสูตรทำให้ค่าตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีมีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อเทียบกับโลหะบัดกรีพื้นฐาน Sn58Bi



รูปที่ 4.92 ค่าตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรี

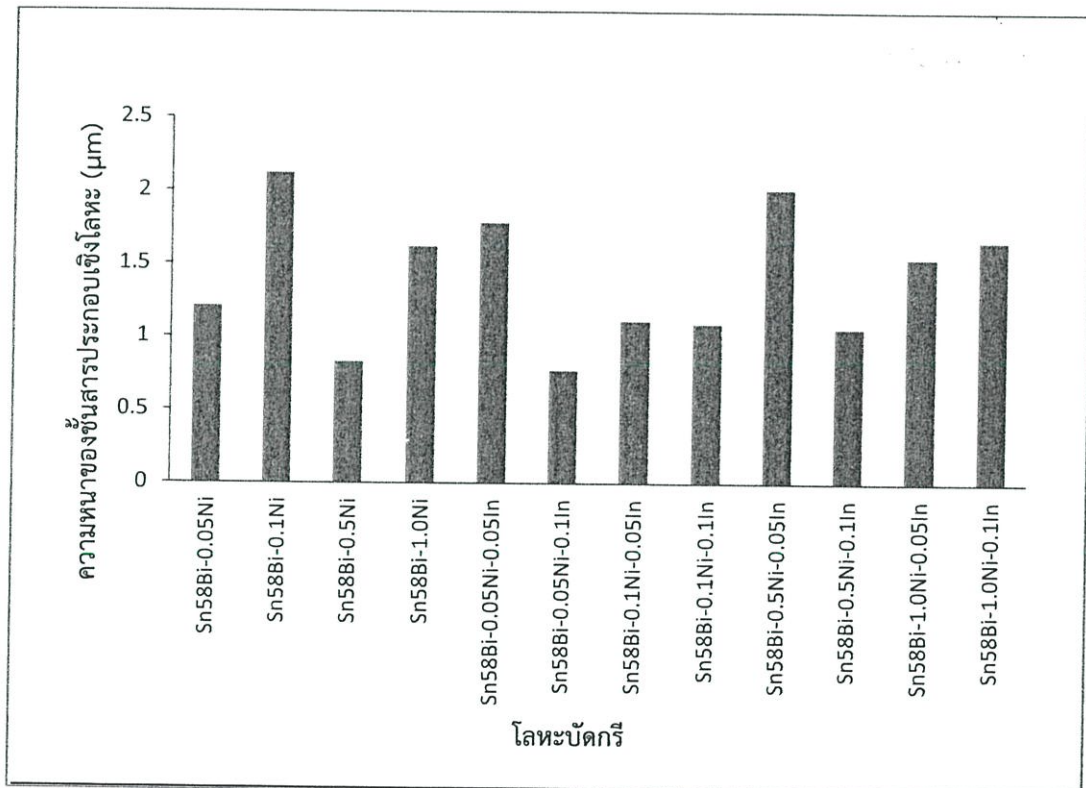
จากรูปที่ 4.93 แสดงกราฟความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีที่ไม่เติม In และเติม In ปริมาณต่างๆ ในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-Ni โดยแบ่งตามปริมาณ Ni เป็น 4 กลุ่มคือ 0.05Ni, 0.1Ni, 0.5Ni และ 1.0Ni wt% จากการวิเคราะห์โดยเปรียบเทียบที่ละกลุ่ม พบว่า

การเติม In ใน Sn-58Bi-0.05Ni ในปริมาณ 0.05 wt% ทำให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และ 0.10 wt% ทำให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีแนวโน้มลดลง

การเติม In ใน Sn-58Bi-0.10Ni ในปริมาณ 0.05 และ 0.10 wt% ทำให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีแนวโน้มลดลง

การเติม In ใน Sn-58Bi-0.50Ni ในปริมาณ 0.05 และ 0.10 wt% ทำให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีแนวโน้มลดลง

การเติม In ใน Sn-58Bi-1.00Ni ในปริมาณ 0.05 wt% ทำให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีแนวโน้มลดลง และ 0.10 wt% ทำให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.93 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่ไม่เติม In และเติม In ปริมาณต่างๆ

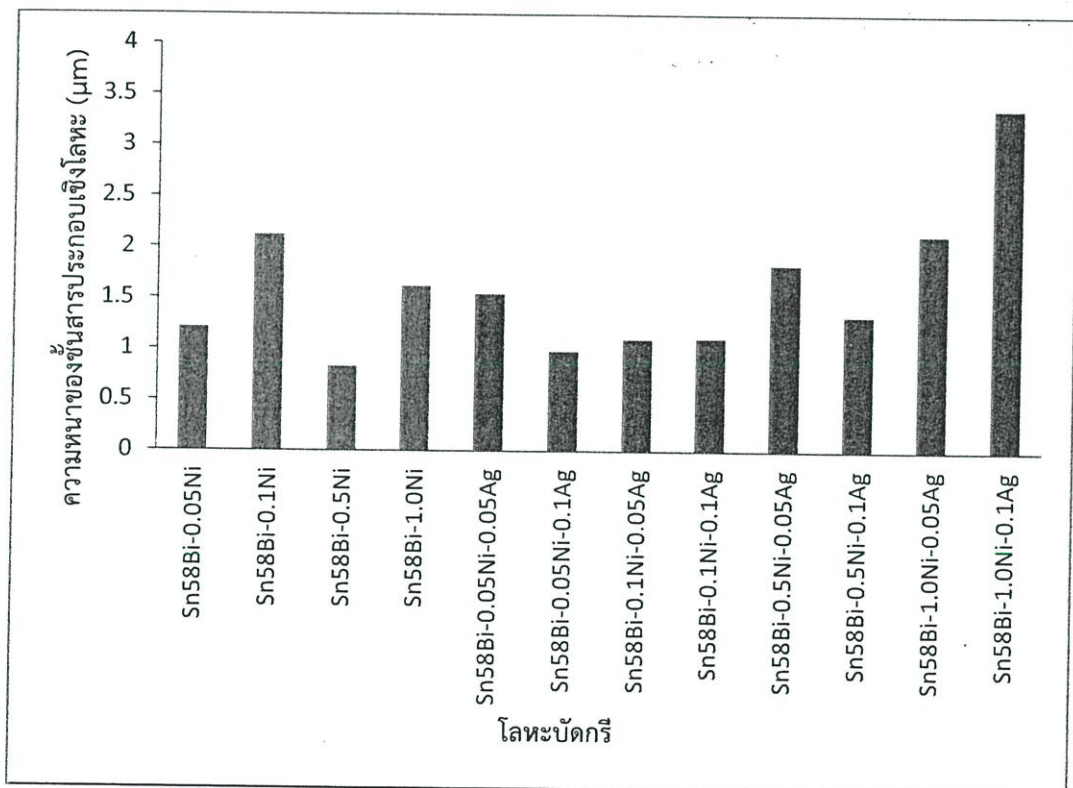
จากรูปที่ 4.94 แสดงกราฟความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีที่ไม่เติม Ag และเติม Ag ปริมาณต่างๆ ในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-Ni โดยแบ่งตามปริมาณ Ni เป็น 4 กลุ่มคือ 0.05Ni, 0.1Ni, 0.5Ni และ 1.0Ni wt% จากการวิเคราะห์โดยเปรียบเทียบที่ละกลุ่ม พบว่า

การเติม Ag ใน Sn-58Bi-0.05Ni ในปริมาณ 0.05 ทำให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และ 0.10 wt% ทำให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีแนวโน้มลดลง

การเติม Ag ใน Sn-58Bi-0.10Ni ในปริมาณ 0.05 และ 0.10 wt% ทำให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีแนวโน้มลดลง

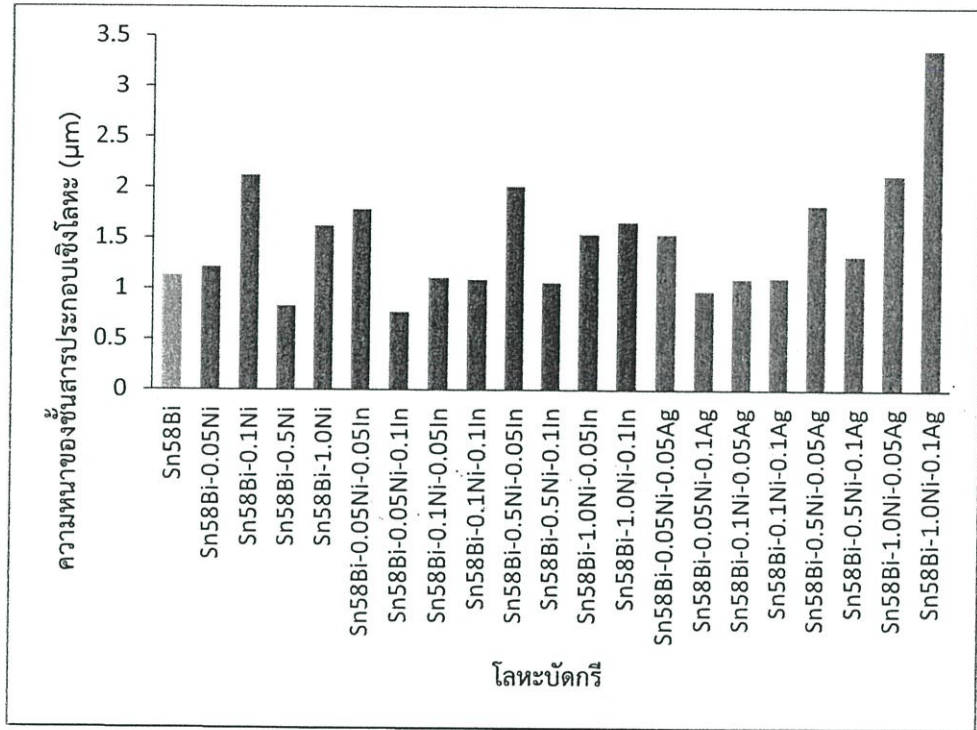
การเติม Ag ใน Sn-58Bi-0.50Ni ในปริมาณ 0.05 และ 0.10 wt% ทำให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

การเติม Ag ใน Sn-58Bi-1.00Ni ในปริมาณ 0.05 และ 0.10 wt% ทำให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.94 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่ไม่เติม Ag และเติม Ag ปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 4.95 แสดงกราฟค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ สามารถสรุปได้ว่าการเติมธาตุเจือส่งผลให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรีมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับโลหะบัดกรีพื้นฐาน Sn-58Bi



รูปที่ 4.95 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงาน

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

จากการศึกษาผลกระทบบของ Ni, Ag และ In ต่อปฏิกิริยารอยต่อระหว่างโลหะบัดกรี Sn-58Bi-Ni-X กับแผ่นทองแดง สามารถสรุปได้ว่า

1. จากการวิเคราะห์ค่าตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรี พบว่าการเติมธาตุ Ni ในปริมาณ 0.05, 0.1, 0.5 และ 1.0 wt% ไปในโลหะบัดกรีพื้นฐาน Sn-58Bi ส่งผลให้ค่าตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับโลหะบัดกรีพื้นฐาน และการเติมธาตุ In และ Ag ในปริมาณ 0.05 และ 0.1 wt% ไปในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-Ni ส่งผลให้ค่าตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีมีแนวโน้มทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง

2. จากการศึกษาคross-section จุลภาคของโลหะบัดกรีที่เติมธาตุเจือ Ni, Ag และ In พบว่าการเติมธาตุเจือเหล่านี้ เข้าไปในโลหะบัดกรีพื้นฐานทำให้ความหนาของชั้นสารประกอบมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น โดยความหนาอยู่ในช่วง 0.77 – 3.37 ไมโครเมตร

3. จากการตรวจสอบด้วย EDX ที่บริเวณของบนและล่างของชั้นรอยต่อของโลหะบัดกรีกลุ่มที่ 1 (เติมธาตุ Ni ลงไปในโลหะพื้นฐานปริมาณ 0.05, 0.1, 0.5 และ 1 wt%) และ กลุ่มที่ 2 (เติมธาตุ Ni ลงไปในโลหะพื้นฐานปริมาณ 0.05, 0.1, 0.5 และ 1 wt%, เติมธาตุ In ลงไปปริมาณ 0.05, 0.1 wt%) พบว่าชนิดของธาตุที่พบในชั้นรอยต่อประกอบด้วย Sn, Cu, Bi, Ni และ กลุ่มที่ 3 (เติมธาตุ Ni ลงไปในโลหะพื้นฐานปริมาณ 0.05, 0.1, 0.5 และ 1 wt%, เติมธาตุ Ag ลงไปปริมาณ 0.05, 0.1 wt%) พบว่าชนิดของธาตุที่พบในชั้นรอยต่อประกอบด้วย Sn, Cu, Bi, Ni และ Ag

5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการศึกษาในอนาคต

ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลจากการเติมธาตุเจือ Ni, Ag และ In ว่ามีผลอย่างไรต่อคุณสมบัติของโลหะบัดกรี โดยการบ่มความร้อนเป็นเวลานาน เพื่อให้เห็นผลที่ชัดเจนยิ่งขึ้นและศึกษาวิวัฒนาการการเจริญเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรีและโลหะพื้นทองแดง โดยชั้นสารประกอบที่เกิดขึ้นนั้นมีผลต่อความน่าเชื่อถือของรอยต่อ

เอกสารอ้างอิง

- นิวัฒน์มุแกม, 2554. ผลกระทบของสภาวะการเย็นตัวต่อโครงสร้างจุลภาค โครงสร้างผลึกและชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.7Cu และ Sn-0.3Ag-0.7Cu กับโลหะพื้นทองแดง. การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2554
- กัลยรัตน์ อารงวินิจฉัยและภรณ์ชัย กัลยาศิริ, 2555. การศึกษาอิทธิพลของธาตุเจือจุ่มต่อโครงสร้างจุลภาคและปฏิกิริยารอยต่อ ของโลหะบัดกรี Sn-0.6Cu-0.05Ni-0.005Ge.ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ประพิศ ประคุณหังสิตและวาสนา คงสุข, 2544. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ 2549 ฉบับที่ 155 มกราคม 2544
- ภรณ์ชัย กัลยาศิริ, 2551. กรรมวิธีการผลิต พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- Mike Judd and Keith Brindley, second edition, 1999. Soldering in Electronics Assembly
- ฉวีวรรณ ลิ้มสุวรรณและภรณ์ชัย กัลยาศิริ, 2551. การเปลี่ยนแปลงความแข็งของโลหะบัดกรีในกลุ่ม Sn-Ag-Cu เนื่องจากสภาพแวดล้อมในการใช้งาน.ภาควิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ปริญญา เลิศวิริยะศักดิ์และวรรษวัลย์ ลีอนาม, 2555. การศึกษากาเกิดขนมั่วโลหะบัดกรีในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์
- Siewert et al., 2002. Properties of Lead-Free Solders Release 4.0. Database for Solder Properties with Emphasis on New Lead-Free Solder, National Institute of Standards and Technology& Colorado School of Mines
- มนัส สถิรจินดา, 2529. เหล็กกล้า STEEL. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์
- ความรู้เกี่ยวกับ (StainlessSteel) [ออนไลน์.], 1 กันยายน 2557. แหล่งที่มา http://www.navy.mi.th/ncd/main/knowledge/store_knowledge/p121109102714.pdf
- Ing.Th.Herzog, 2007. Lecture: Electronic Packaging and Interconnection Technology Solderability and Soldering related Issues, Federal University of Santa Catarina

- กำธร สุขพิมาย, กัลยา ผ่าโผนและกรรณชัย กัลยาศิริ, 2556. การศึกษาอิทธิพลของอินเดียมต่อการกระจายตัวและการเกิดสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn บนแผ่นทองแดง.การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2556
- Japanese Standards Association, 2003. Test methods for lead-free solders – Part 4 : Methods for spread test by a wetting balance method and a contact angle method. JIS Z 3198-4
- Giles Humpston and David M. Jacobson, 2004.Principles of Soldering
- บทที่ 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ [ออนไลน์.], 15 มีนาคม 2558. แหล่งที่มา www.hosting.cmru.ac.th/phitsinee/admin/blog/file/240811114435.pdf
- บทที่ 17 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance : ANOVA) [ออนไลน์.], 15 มีนาคม 2558. แหล่งที่มา www.eng.kmutnb.ac.th/Engineering/.../บทที่%2017%20ANOVA.doc