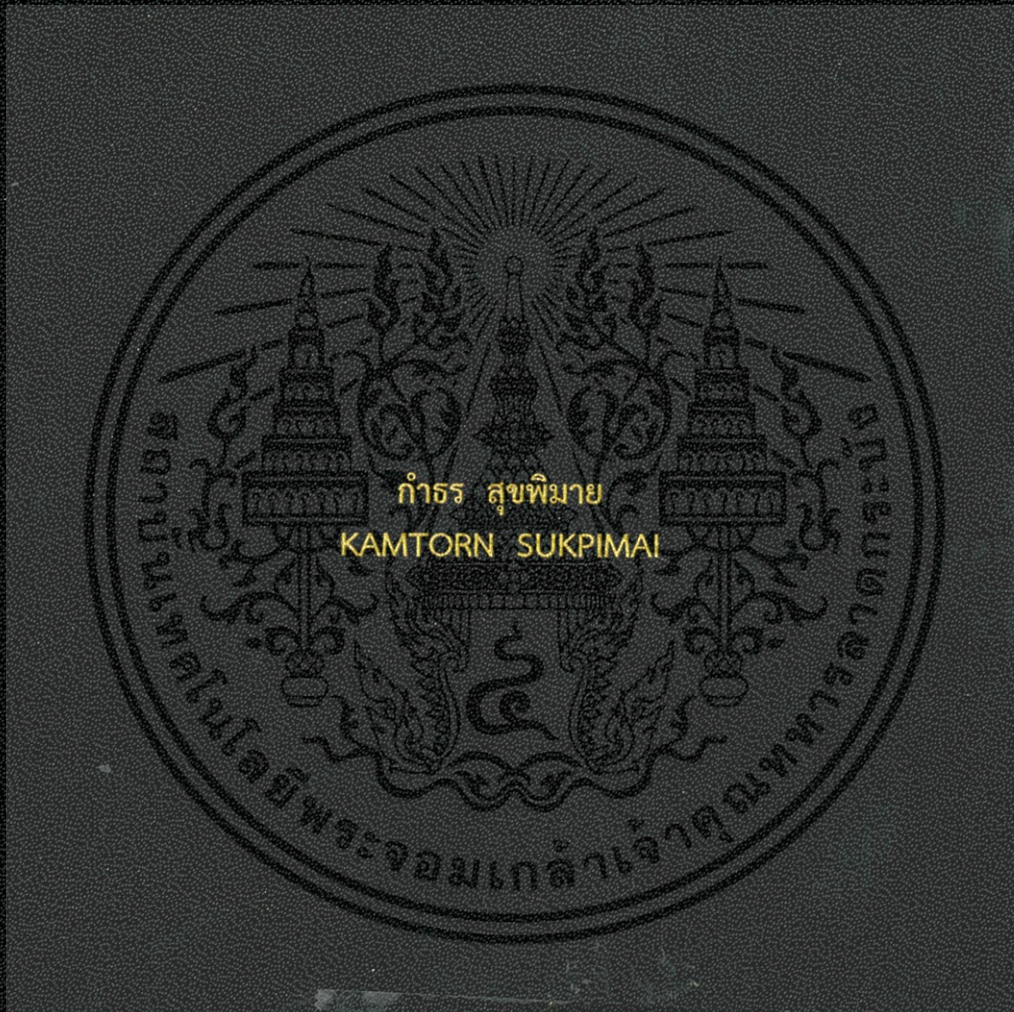


การศึกษาอิทธิพลของอินเดียมและการบ่มด้วยความร้อนที่มีต่อชั้น
สารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn
บนแผ่นรองทองแดง

A STUDY ON INFLUENCE OF INDIUM AND THERMAL AGING ON
INTERMETALLIC COMPOUND FORMATION BETWEEN Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn
LEAD FREE SOLDER AND COPPER SUBSTRATE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2557
KMITL-2014-EN-M-217-214

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาอิทธิพลของอินเดียมและการบ่มด้วยความร้อนที่มีต่อชั้น
สารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn
บนแผ่นรองทองแดง

A STUDY ON INFLUENCE OF INDIUM AND THERMAL AGING ON
INTERMETALLIC COMPOUND FORMATION BETWEEN Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn
LEAD FREE SOLDER AND COPPER SUBSTRATE



กำธร สุขพิมาย
KAMTORN SUKPIMAI

จพ.
ก 6731
2557

b.122 23630

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... **139545**
วัน.เดือน.ปี..... 10 11 2558

b.....
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2557

KMITL-2014-EN-M-217-214

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A STUDY ON INFLUENCE OF INDIUM AND THERMAL AGING ON
INTERMETALLIC COMPOUND FORMATION BETWEEN Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn
LEAD FREE SOLDER AND COPPER SUBSTRATE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2014

KMITL-2014-EN-M-217-214

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2014

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาอิทธิพลของอินเดียมและการบ่มด้วยความร้อนที่มีต่อชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn บนแผ่นรองทองแดง

Thesis Title A Study on Influence of Indium and Thermal Aging on Intermetallic Compound Formation between Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn Lead Free Solder and Copper Substrate

นักศึกษา นายกำธร สุขพิมาย

รหัสประจำตัว 55613401

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2014-EN-M-217-214

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.วิภู	ศรีสืบสาย	
ดร.จิตรภรณ์	วงศางาม	
รศ.สมนึก	วัฒนศรีกุล	
ดร.เจษฎา	ชัยโฉม	
รศ.ดร.กรรณชัย	กัลยาศิริ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 8 ธันวาคม พ.ศ. 2557 เวลา 10.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ห้อง E12-301

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ฉบับตี คณะวิศวกรรมศาสตร์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วันที่ 8 ธันวาคม พ.ศ. 2557

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาอิทธิพลของอินเดียมและการบ่มด้วยความร้อนที่มีต่อชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn บนแผ่นรองทองแดง
นักศึกษ	นายกำธร สุขพิมาย
รหัสประจำตัว	55613401
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
พ.ศ.	2557
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาอิทธิพลของอินเดียมที่มีต่อการกระจายตัว และการเกิดสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn กับแผ่นทองแดง รวมทั้งอิทธิพลของการบ่มด้วยความร้อนที่มีต่อชั้นสารประกอบเชิงโลหะ โดยบ่มชิ้นงานที่อุณหภูมิ 100, 135 และ 170 °C ใช้เวลาบ่ม 1, 10, 100 และ 1000 ชั่วโมง ปริมาณธาตุอินเดียมที่เติม คือ 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 wt% ทดสอบการกระจายตัวที่อุณหภูมิ 260°C เป็นเวลา 30 วินาที พบว่าการกระจายตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น คือ ค่าตัวประกอบการกระจายตัวมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 75.71% เป็น 79.43% อัตราส่วนการกระจายตัวก็เพิ่มขึ้นจาก 2.54 เป็น 2.65 และมุมสัมผัสของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดงมีค่าลดลงจาก 26.56° เป็น 20.45° เมื่อปริมาณ In เพิ่มขึ้น 0-3wt% ดังนั้น In จึงเป็นตัวช่วยเพิ่มความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดง และสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นพบเพียงเฟส Cu_6Sn_5 ในทุกกรณี หลังการบ่มพบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 มีความหนาเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและเวลาการบ่ม โดย In ที่เติมเข้าไปไม่มีผลต่อความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ และพบชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่สอง คือ Cu_3Sn เกิดขึ้นที่อุณหภูมิการบ่ม 135 และ 170 °C ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn ลดลงเมื่อปริมาณอินเดียมเพิ่มขึ้น เนื่องจากอินเดียมไปยับยั้งการแพร่ของ Sn ผ่านขอบเกรนของ Cu_3Sn นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณอินเดียมไม่ได้ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ และพบว่าพลังงานกระตุ้นการเติบโตของสารประกอบเชิงโลหะรวมมีค่าอยู่ในช่วง 77.12 ถึง 112.47 kJ/mol ของชั้น Cu_6Sn_5 มีค่าอยู่ในช่วง 52.73 ถึง 99.67 kJ/mol และของชั้น Cu_3Sn มีค่าอยู่ในช่วง 34.82 ถึง 90.15 kJ/mol โดยพลังงานกระตุ้นการเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะแต่ละชนิดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณอินเดียมเพิ่มขึ้น

Thesis title	A Study on Influence of Indium and Thermal Aging on Intermetallic Compound Formation between Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn Lead Free Solder and Copper Substrate
Student	Mr. Kamtorn Sukpimai
Student ID.	55613401
Degree	Master of Engineering
Program	Industrial Engineering
Year	2014
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Kannachai Kanlayasiri

ABSTRACT

This thesis was aimed to investigate the influence of indium on intermetallic compounds formed at the interface between Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn lead-free solder and copper substrate. Effect of indium on wettability of Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn lead-free solder on copper substrate was studied during the soldering stage. Formation of intermetallic compounds at the interface due to the soldering process was then examined, and lastly, growth of the intermetallic compounds due to thermal aging was studied. In this research, indium of 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 and 3.0 wt% was added into Sn-0.3Ag-0.7Cu lead-free solder. The wettability was investigated in terms of spread factor, spread ratio, and contact angle. Spread test was performed at a temperature of 260 °C for 30 s. Thermal aging was done at 100, 135, and 170 °C with aging time of 1, 10, 100, and 1,000 hours. It was found that indium improves wettability of Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn. The wettability was increased as the concentration of indium was increased. After the soldering stage, only Cu_6Sn_5 intermetallic compound was found at the interface for all concentration of indium, and the concentration of indium did not affect to thickness of the intermetallic layers. After thermal aging at 100 °C, Cu_6Sn_5 layer was increased in thickness with the aging time and no new phase was found. However, for thermal aging at 135 and 170 °C, Cu_3Sn was found between Cu_6Sn_5 layer and copper substrate. Results showed that indium suppresses the growth of Cu_3Sn layer. The higher the indium content, the thinner the Cu_3Sn layer because indium inhibited the diffusion of Sn atoms through grain boundaries of Cu_3Sn . It was also found that indium concentration do not affect to

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

the diffusion coefficients, but increases the activation energy of each intermetallic phase. The activation energy of $\text{Cu}_6\text{Sn}_5+\text{Cu}_3\text{Sn}$, Cu_6Sn_5 , and Cu_3Sn was 77.12-112.47 kJ/mol, 52.73-99.67 kJ/mol, and 34.82-90.15 kJ/mol, respectively.



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ ที่ให้ความช่วยเหลือ คำชี้แนะในการวิจัย การแก้ปัญหา ตลอดจนความรู้และประสบการณ์ที่ดี รวมถึงความเอาใจใส่สอบถามความก้าวหน้าอย่างสม่ำเสมอ

ขอขอบคุณ บริษัทอุลตราคอร์ จำกัด (ULTRACORE CO., LTD) ที่ให้การสนับสนุนด้านสถานที่ เครื่องมือ และค่าปรึกษาในการทดสอบ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและคณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษาและสนับสนุนทุนการศึกษาแก่ข้าพเจ้า ทำให้ข้าพเจ้ามีโอกาสด้านการศึกษาที่สูงขึ้น

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

ขอขอบคุณพี่ เพื่อน น้อง และญาติๆ ที่คอยเป็นกำลังใจที่ดีและช่วยเหลือข้าพเจ้าตลอดมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

กำธร สุขพิมาย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	IV
สารบัญ	V
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 สมมติฐานการศึกษา	2
1.4 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา	3
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1.1 ความสามารถในการเปียก	4
2.1.2 ปฏิกริยาผิวสัมผัสและโครงสร้างจุลภาค	5
2.1.3 การบ่มด้วยความร้อน	6
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	7
2.2.1 การบัดกรี	7
2.2.2 โลหะพื่น	8
2.2.3 โลหะบัดกรี	9
2.2.4 น้ำยาประสานหรือฟลักซ์	10
2.2.5 วิธีการบัดกรี	11
2.2.6 ข้อควรพิจารณาเบื้องต้นในการเลือกใช้โลหะบัดกรีแบบไร้สารตะกั่ว	12
2.2.6.1 โลหะทดแทนสารตะกั่ว	13
2.2.6.2 ข้อควรพิจารณาบางประการในกระบวนการผลิต	17
2.2.7 การแพร่	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.7.1 การแพร่ในสภาวะคงตัว	19
2.2.7.2 การแพร่ในสภาวะไม่คงตัว.....	21
2.2.7.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการแพร่	23
2.2.8 เฟสไดอะแกรมของโลหะบัดกรี	23
2.2.8.1 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก – เงิน	23
2.2.8.2 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก – ทองแดง	24
2.2.8.3 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมเงิน – ทองแดง	25
2.2.8.4 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก – เงิน – ทองแดง	26
2.2.9 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	28
2.2.9.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....	28
2.2.9.2 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด	29
2.2.9.3 การวิเคราะห์ Energy dispersive X-ray.....	30
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	36
3.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ	36
3.2 ขั้นตอนการทดสอบ	37
3.3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค	41
3.3.1 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเบื้องต้นโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง....	41
3.3.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมี	43
3.3.3 วิธีการวัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ	43
บทที่ 4 วิเคราะห์ผลการทดลอง	45
4.1 ความสามารถในการเปียก.....	45
4.1.1 การกระจายตัว.....	45
4.1.2 มุมสัมผัส.....	47
4.2 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะ	49
4.3 ค่าคงที่และสัมประสิทธิ์การแพร่.....	61
4.4 พลังงานกระตุ้นการเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	72
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	72
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	73
เอกสารอ้างอิง.....	74
ภาคผนวก.....	77
ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์.....	78
ภาคผนวก ข. สัมประสิทธิ์การแพร่และพลังงานกระตุ้น.....	88
ภาคผนวก ค. ปริมาณธาตุผสมในโลหะบัดกรี.....	113
ภาคผนวก ง. การวัดพื้นที่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ.....	121
ภาคผนวก จ. การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วย SEM.....	123
ประวัติผู้เขียน.....	170

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ชนิดของโลหะต่อความยากง่ายในการบัดกรี.....	8
2.2 คุณสมบัติบางประการของโลหะทดแทนตะกั่ว.....	14
2.3 ส่วนผสมต่างๆที่สามารถนำมาทดแทนโลหะบัดกรีชนิดที่มีสารตะกั่ว	14
2.4 คุณสมบัติบางประการระหว่าง Sn/Ag กับ Sn/Sb	17
2.5 ค่าของเออร์เรอร์ฟังก์ชัน.....	22
4.1 ค่าเฉลี่ยค่าตัวประกอบและอัตราส่วนการกระจายตัว.....	45
4.2 มุมสัมผัสของโลหะบัดกรี	47
4.3 ความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ	53
4.4 ความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5	57
4.5 ความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn	59
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวมกับ $t^{1/2}$ ที่อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน	62
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 กับ $t^{1/2}$ ที่อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน	63
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn กับ $t^{1/2}$ ที่อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน	64
4.9 สัมประสิทธิ์การแพร่ (D) ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่าง Sn-0.3Ag-0.7Cu กับทองแดง .	65
4.10 สัมประสิทธิ์การแพร่ของชั้น $Cu_6Sn_5 + Cu_3Sn$ ในโลหะบัดกรีตระกูล SAC ที่อุณหภูมิการบ่ม 170 °C.....	66
4.11 สัมประสิทธิ์การแพร่ (D) ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม.....	67
4.12 สัมประสิทธิ์การแพร่ (D) ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5	67
4.13 สัมประสิทธิ์การแพร่ (D) ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn	67
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง Ln D กับ 1/T ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu กับทองแดง.....	68
4.15 สัมประสิทธิ์การแพร่ ค่าคงที่การแพร่ และพลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ระหว่างโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu กับทองแดง	70
4.16 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ $Cu_6Sn_5+Cu_3Sn$, Cu_6Sn_5 และ Cu_3Sn	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การเกิดการเชื่อมประสานของโลหะบัดกรี	9
2.2 การบัดกรีแบบคลื่น	11
2.3 การบัดกรีแบบรีโฟลว์	12
2.4 กลไกการแพร่โดยอาศัยช่องว่าง	19
2.5 กลไกการแพร่แบบแทรกที่	19
2.6 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแบบเส้นตรง	20
2.7 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก – เงิน	24
2.8 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสม ดีบุก – ทองแดง	25
2.9 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมเงิน – ทองแดง	26
2.10 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก – เงิน – ทองแดง	27
2.11 ส่วนผสมยูเทคติกของโลหะผสมดีบุก – เงิน – ทองแดง	28
2.12 แผนภาพแสดงการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง	29
2.13 แผนภาพแสดงการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด	30
2.14 แบบจำลองอะตอมของโบร์	31
2.15 ตำแหน่งปฏิกิริยาที่แตกต่างของการเกิดรังสีเอ็กซ์	33
2.16 ปริมาณสัมประสิทธิ์การดูดซับรังสีเอ็กซ์ของ Ni และ Al ขณะเป็น ฟังก์ชันของพลังงานรังสีเอ็กซ์	33
2.17 ลักษณะพื้นผิวที่มีผลต่อระยะรังสีเอ็กซ์	34
2.18 ผลของการวิเคราะห์ EDX ใน SEM	34
3.1 ชิ้นงานตัวอย่าง	36
3.2 อ่างดีบุกหลอมเหลว	36
3.3 ลักษณะชิ้นงานก่อนและหลังทดสอบการแผ่กระจาย	37
3.4 ฟลักซ์บัดกรี	37
3.5 การทดสอบการกระจายตัว	38
3.6 ความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรี	38
3.7 มุมสัมผัสบนแผ่นทองแดง	39
3.8 ลักษณะการแผ่กระจายของชิ้นงานทดสอบ	39
3.9 เตาอบแบบท่อ	40
3.10 เครื่องบันทึกข้อมูล	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11 เครื่องตัดแบบแรงโน้มถ่วง.....	41
3.12 เครื่องขัดชิ้นงานละเอียด	42
3.13 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....	42
3.14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนและ Energy dispersive X-ray	43
3.15 การวัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ.....	43
4.1 ค่าตัวประกอบการกระจายตัว	46
4.2 อัตราส่วนการกระจายตัว.....	46
4.3 การวัดมุมสัมผัสด้วยโปรแกรม Image-pro Express.....	47
4.4 มุมสัมผัสของโลหะบัดกรีเทียบกับค่าการคำนวณกับค่าการวัด.....	48
4.5 ชิ้นงานหลังการทดสอบการกระจายตัว.....	48
4.6 ตัวอย่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะจากการใช้ SEM ของชิ้นงานทดสอบ.....	49
4.7 ตำแหน่งสเปกตรัมการวิเคราะห์ EDX.....	50
4.8 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของชั้น Cu_6Sn_5	51
4.9 ตำแหน่งสเปกตรัมการวิเคราะห์ EDX.....	51
4.10 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของชั้น Cu_3Sn	52
4.11 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของชั้น Cu_6Sn_5	52
4.12 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรี.....	54
4.13 วิเคราะห์ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะด้วย ANOVA ที่ $\alpha = 0.05$	54
4.14 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100 °C.....	55
4.15 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบ่มที่อุณหภูมิ 135 °C.....	55
4.16 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบ่มที่อุณหภูมิ 170 °C.....	56
4.17 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ที่อุณหภูมิ 100 °C.....	58
4.18 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ที่อุณหภูมิ 135 °C.....	58
4.19 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ที่อุณหภูมิ 170 °C.....	59
4.20 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn ที่อุณหภูมิ 135 °C.....	60
4.21 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn ที่อุณหภูมิ 170 °C.....	61
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวมกับรากที่สองของเวลาการบ่ม.....	62
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 กับรากที่สองของเวลาการบ่ม.....	63
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่ม.....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.25 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม	69
4.26 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5	69
4.27 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn	69



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ กระบวนการบัดกรีและโลหะบัดกรีมีความสำคัญมากในการประกอบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์เข้ากับแผ่นวงจร เนื่องจากชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็กและทนความร้อนได้ต่ำ จำเป็นต้องใช้วิธีการบัดกรีแทนการจับยึดแบบอื่น การบัดกรีจึงได้รับความนิยมมากในงานที่เกี่ยวข้องกับอิเล็กทรอนิกส์ โลหะบัดกรีที่ใช้ในช่วงแรกมีส่วนผสมของตะกั่ว แต่เนื่องจากตะกั่วเป็นอันตรายต่อร่างกายมนุษย์ จึงได้มีข้อบังคับเกี่ยวกับการใช้สารอันตรายในผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ หรือ Restriction on Hazardous Substance (RoHS) ที่กำหนดโดยคณะกรรมการยุโรปหรืออีซี (EC-European Commission) โดยมีผลบังคับใช้ตั้งแต่วันที่ 1 กรกฎาคม 2006 ระบุให้มีการลดปริมาณการใช้สารตะกั่วในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์เพื่อป้องกันปัญหาสิ่งแวดล้อม โดยให้ใช้สารโลหะประกอบอื่นทดแทน [1] ทำให้มีการจำกัดการใช้สารตะกั่วในโลหะบัดกรี และมีแนวโน้มที่จะยกเลิกการใช้สารตะกั่ว ซึ่งในหลายประเทศมีการจำกัดการใช้สารตะกั่วแล้ว เช่น สหรัฐอเมริกา สหภาพยุโรป และญี่ปุ่น ถึงแม้ว่าปริมาณตะกั่วที่ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์จะมีไม่มากนักเมื่อเทียบกับอุตสาหกรรมประเภทอื่น แต่ถ้าพิจารณาการเติบโตอย่างรวดเร็วของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบัน การเลิกใช้สารตะกั่วก็เป็นสิ่งที่ไม่ควรมองข้าม เพื่อทดแทนการใช้สารตะกั่วจึงได้มีการหาวัสดุอื่นที่มีความสามารถใกล้เคียงหรือดีกว่าตะกั่ว มาปรับปรุงคุณสมบัติในการบัดกรีให้ดีขึ้น และยังคงใช้ตะกั่วเป็นธาตุหลักในส่วนผสมโลหะบัดกรี ที่ผ่านมามีการพัฒนาโลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมของธาตุต่างๆ เช่น Sn-Bi-Ag, Sn-Bi-Cu, Sn-Ag-Cu และ Sn-Ag-Sb [2-4] ซึ่งส่วนผสมที่นิยมใช้กันมาก คือ Sn-Ag-Cu (SAC) เนื่องจากมีความแข็งแรงสูงและมีความสามารถในการบัดกรีที่ดีสำหรับการบัดกรีแบบคลื่น (Wave Soldering) แต่โลหะบัดกรีตระกูล SAC มีจุดหลอมเหลวที่สูง (217 °C) ซึ่งสูงกว่าโลหะบัดกรีชนิดที่ใช้อยู่เดิม คือ Sn-Pb eutectic ที่มีจุดหลอมเหลวประมาณ 183 °C [5] จุดหลอมเหลวที่สูงของโลหะบัดกรีกลุ่ม SAC จะทำให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และแผ่นวงจรได้ ดังนั้นจึงได้มีการเติมธาตุชนิดที่สี่เข้าไปเพื่อลดจุดหลอมเหลวและปรับปรุงคุณสมบัติของรอยต่อ เช่น คุณสมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาคและความสามารถในการเชื่อมประสาน ธาตุชนิดที่สี่ดังกล่าวได้แก่ พลวง (Sb) บิสมัท (Bi) หรืออินเดียม (In) ซึ่งการเติมธาตุแต่ละชนิดจะให้คุณสมบัติของโลหะบัดกรีที่แตกต่างกัน เช่น In ช่วยลดจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรี SAC [8] ซึ่งงานวิจัยในอดีตได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการเติมธาตุอินเดียมเข้าไปในโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆ [6-20] แต่ยังไม่พบว่ามีการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการบัดกรีของโลหะบัดกรี SAC ที่เติมอินเดียม เช่น ความสามารถในการเปียก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของโลหะบัดกรีบนแผ่นรอง (Substrate) โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี หรือการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรีเนื่องจากการใช้งาน

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาอิทธิพลของธาตุอินเดียม (In) ที่มีต่อความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn บนแผ่นทองแดง โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อหลังการบัดกรี และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อหลังการบ่มด้วยความร้อน

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของธาตุอินเดียม (In) ที่มีต่อความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn บนแผ่นทองแดง
2. เพื่อศึกษาชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn กับแผ่นทองแดงหลังการบัดกรี
3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของการบ่มด้วยความร้อนที่มีผลต่อชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn กับแผ่นทองแดง

1.3 สมมติฐานการศึกษา

จากการศึกษาค้นคว้าข้อมูลในอดีตและงานวิจัยต่างๆ สามารถตั้งสมมติฐานเพื่อกำหนดขอบเขตของการศึกษาได้ดังนี้

1. ปริมาณของ In มีผลต่อความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดง
2. ปริมาณของ In มีผลต่อความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรีกับแผ่นทองแดง
3. อินเดียม (In) มีผลต่อการเจริญเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (IMC) หลังการบ่มด้วยความร้อน

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาอิทธิพลของธาตุอินเดียม (In) ต่อความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn บนแผ่นทองแดง ตามมาตรฐานการทดสอบการกระจายตัว JIS Z 3198-3 [24]
2. ศึกษาเฉพาะปริมาณอินเดียม (In) ที่ 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 %wt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ศึกษาเฉพาะการบัดกรีโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn กับแผ่นทองแดง บริสุทธิ์ 99.99%

4. ศึกษาเฉพาะอิทธิพลของการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100, 135 และ 170 °C โดยใช้เวลาในการบ่ม 1, 10, 100 และ 1,000 ชั่วโมง ตามลำดับ

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว เช่น คุณสมบัติและโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด ข้อดีและข้อเสียเมื่อเทียบกับโลหะบัดกรีแบบเดิม
2. ศึกษาวิธีการและขั้นตอนการบัดกรีตามมาตรฐานเพื่อใช้ออกแบบการทดลองที่เหมาะสม
3. เตรียมชิ้นงานและอุปกรณ์ต่างๆตามที่ได้ออกแบบ
4. ทำการทดลอง โดยการหลอมโลหะบัดกรีที่มีการเติมธาตุอินเดียม (In) ในปริมาณที่ต่างกันบนแผ่นทองแดง เพื่อศึกษาความสามารถในการเปียก โครงสร้างจุลภาคและสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี
5. ทำการทดลอง โดยการบ่มด้วยความร้อนและเวลาที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อ
6. วิเคราะห์ผลการทดลอง ด้านความสามารถในการเปียก สารประกอบเชิงโลหะและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค
7. สรุปผลการทดลองพร้อมข้อเสนอแนะที่ได้จากการทดลอง

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วเพื่อทดแทนตะกั่วบัดกรีที่ใช้ในปัจจุบัน โลหะบัดกรีหลายชนิดถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้ใกล้เคียงกับตะกั่วบัดกรี ซึ่งการศึกษาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วในอดีตมีการศึกษาคุณสมบัติในหลายๆด้าน เช่น ความสามารถในการเปียก (Wettability) ปฏิกิริยาผิวสัมผัส (Interfacial reaction) โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) และการบ่มด้วยความร้อน (Thermal aging) ซึ่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถแบ่งได้ดังนี้

2.1.1 ความสามารถในการเปียก (Wettability)

ในงานวิจัยของ รชต คงขยาสุขวัฒน์ และคณะ [6] ได้ศึกษาความสามารถในการเปียก ในรูปของการกระจายตัวของโลหะบัดกรี โดยได้ศึกษาการปรับปรุงความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรี Sn-0.6Cu-0.05Ni-Ge บนแผ่นทองแดง โดยการเติมธาตุ Ag Bi In และ Sb ในสัดส่วน 0.05 wt% และ 0.1 wt% โดยวัดการกระจายตัวด้วยวิธีทดสอบการแผ่กระจาย (Spread test) พบว่าการกระจายตัวมีแนวโน้มดีที่สุดที่การเติม 0.1 wt% In โดยทำให้โลหะบัดกรี Sn-Cu-Ni-Ge มีอัตราการกระจายตัวเพิ่มขึ้นจาก 74.40% เป็น 75.18% โดยการกระจายตัวที่สูงขึ้นทำให้ความสามารถในการบัดกรีดีขึ้น

ในงานวิจัยของ Fallahi และคณะ [7] ได้ศึกษาผลกระทบของการเติม Fe และ In ในโลหะบัดกรีสี่ชนิดคือ Sn-3.6Ag-0.9Cu, Sn-3.6Ag-0.9Cu-0.2Fe, Sn-3.6Ag-0.9Cu-0.6Fe และ Sn-3.6Ag-0.9Cu-1.7In-0.3Ce บนแผ่นพื้นทองแดงแบบธรรมดาและแบบเคลือบ Ni-P ขนาด 1.5x1.5x0.5 มิลลิเมตร ใช้น้ำยาประสานชนิด ZnCl₂ โดยการจุ่ม ที่อุณหภูมิ 250°C เวลา 30 วินาที ที่ความเร็ว 5 mm/s ลึก 5 มิลลิเมตร วัดการกระจายตัวด้วย Wetting balance และการแผ่กระจาย (Spread test) พบว่าการเติมอินเดียมช่วยลดมุมสัมผัสจาก 29.6° เหลือ 18° โดยมุมสัมผัสที่ลดลงทำให้ความสามารถในการบัดกรีดีขึ้น

ในงานวิจัยของ Kanlayasiri และคณะ [8] ได้ศึกษาอิทธิพลของการเติมอินเดียม (In) ที่มีต่ออุณหภูมิ Solidus และ Liquidus ความสามารถในการเปียก ความแข็งแรงดึงและความแข็งจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn ปริมาณอินเดียม 0-3 wt% อัตราการให้ความร้อน 5 °C/s ใช้แผ่นทองแดงบริสุทธิ์ขนาด 1.0x4.0x0.04 cm ที่อุณหภูมิ 250°C ความเร็วในการจุ่ม 5 mm/s ความลึก 5 mm เวลา 20 วินาที วัดความสามารถในการเปียกด้วย Wetting balance พบว่า

อินเดียมช่วยปรับปรุงความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีให้ดีขึ้น โดยทำให้มุมสัมผัส (Contact angle) ลดลง

ในงานวิจัยของ Moser และคณะ [9] ได้ศึกษาแรงตึงผิวของโลหะบัดกรี Sn-3.13Ag-0.74Cu เมื่อเติมอินเดียม (In) ปริมาณ 2, 3, 4, 15, 30, 50 และ 75% ที่ช่วงอุณหภูมิ 431-1209 K วัดความสามารถในการเปียกด้วย Wetting balance การปรับปรุงความสามารถในการเปียกที่มีการเติมอินเดียมต่างกัน พบว่าที่ช่วงอุณหภูมิ 523-593 K เวลา 1800 วินาที มุมสัมผัสของโลหะบัดกรีกับแผ่นทองแดงลดลงเมื่อปริมาณ In เพิ่มขึ้น โดยมุมสัมผัสที่ลดลงช่วยให้ความสามารถในการบัดกรีดีขึ้น

ในงานวิจัยของ Sebo และคณะ [10] ได้ศึกษาอิทธิพลของอินเดียม (In) ในโลหะบัดกรีชนิด Sn-3.13Ag-0.74Cu โดยเติมในปริมาณ 4, 15, 30, 50 และ 75%In แล้ววัดความสามารถในการเปียกด้วย Wetting balance ที่อุณหภูมิ 523 K ใช้เวลา 1800 วินาที พบว่าเมื่ออินเดียมเพิ่มขึ้นจะทำให้แรงตึงระหว่างโลหะบัดกรีกับแผ่นทองแดงเพิ่มขึ้น ทำให้มุมสัมผัสลดลง

2.1.2 ปฏิกริยาผิวสัมผัสและโครงสร้างจุลภาค (Interfacial reaction and Microstructure)

ในงานวิจัยของ นีวัฒน์ มุแกม และ กรรณชัย กัลยาศิริ [11] ได้ศึกษาวิวัฒนาการและการเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะพื้นทองแดงกับโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu โดยการบัดกรีแบบจุ่มที่อุณหภูมิ 250, 270 และ 290°C ใช้เวลาบัดกรี 5, 10, 15 และ 20 วินาที พบว่าที่อุณหภูมิบัดกรี 250°C ที่เวลา 5 และ 10 วินาที ชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวทองแดงกับโลหะบัดกรีเป็น Cu_3Sn ส่วนที่เวลา 15 และ 20 วินาที เกิดเป็นชั้น Cu_6Sn_5 ซึ่งแตกต่างกันเนื่องจากการใช้เวลาในการบัดกรีที่แตกต่างกัน ส่วนอุณหภูมิ 270 และ 290°C เกิดชั้น Cu_6Sn_5 เหมือนกันทุกกรณี โดยความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาการบัดกรี

ในงานวิจัยของ Sharif และ Chan [12] ได้ศึกษาผลของอินเดียมที่มีต่อการละลายของโลหะพื้นทองแดงที่ร่อง BGA (Ball-Grid-Array) เมื่อหลอมโลหะบัดกรี Sn-9In-3.5Ag-0.5Cu, Sn-3.5Ag-0.5Cu และ Sn-0.7Cu บนแผ่นทองแดง โดยแผ่นทองแดงหนา 13 μm และเส้นผ่านศูนย์กลาง 650 μm วัดการละลายของทองแดงจากความหนาที่เปลี่ยนไปจากเวลา 5, 10 และ 20 นาที ที่อุณหภูมิ 230, 240, 250 และ 260 °C พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้น คือ เฟส $Cu_6(Sn, In)_5$ นอกจากนี้ยังพบเฟส $Ag_3(In, Sn)$ แทรกอยู่ในเฟส Sn-rich

ในงานวิจัยของ Lin และคณะ [13] ได้ศึกษาปฏิกริยาผิวสัมผัสของรอยต่อบัดกรีระหว่างโลหะบัดกรี Sn-20In-2.8Ag กับแผ่นทองแดง ด้วยวิธีการเชื่อมในเตาสุญญากาศแบบท่อ ที่อุณหภูมิ 100, 150 และ 250°C โดยที่อุณหภูมิ 250°C ใช้เวลา 15-480 นาที ที่อุณหภูมิ 100 และ 150°C ใช้เวลา 120-1440 ชั่วโมง พบว่าที่อุณหภูมิ 250°C เกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะขึ้นสองชั้น คือเฟส η -

Cu_6Sn_5 และ $\varepsilon\text{-Cu}_3\text{Sn}$ โดย In ที่อยู่ใกล้ผิวสัมผัสจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามการก่อตัวของเฟส $\eta\text{-Cu}_6\text{Sn}_5$ ที่อุณหภูมิ 100 และ 150°C เกิดขึ้นสารประกอบเชิงโลหะเฉพาะเฟส $\eta\text{-Cu}_6\text{Sn}_5$ ในทุกกรณี

ในงานวิจัยของ Lejoste และคณะ [14] ได้ศึกษาปฏิกิริยาของรอยต่อบัดกรีระหว่างโลหะบัดกรี Sn-3.0Ag-0.4Cu-7.0In กับแผ่นรองทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100, 125, 150 และ 180°C โดยใช้เวลาบ่ม 1506 ชั่วโมง พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในรอยต่อ คือ $\text{Cu}_6(\text{Sn}, \text{In})_5$ (η -phase) และ $\text{Cu}_3(\text{Sn}, \text{In})$ (ε -phase) โดยชั้น $\text{Cu}_6(\text{Sn}, \text{In})_5$ ติดกับโลหะบัดกรี ส่วนชั้น $\text{Cu}_3(\text{Sn}, \text{In})$ ติดกับทองแดง ซึ่งการพบ In ในชั้นสารประกอบเชิงโลหะจะส่งผลอย่างมากต่อจลนศาสตร์การเติบโต รวมทั้งค่าพลังงานกระตุ้นการเติบโตของชั้น $\text{Cu}_3(\text{Sn}, \text{In})$

ในงานวิจัยของ Hodulova และคณะ [15] ได้ศึกษากลไกการเกิดขึ้นสารประกอบเชิงโลหะในรอยต่อระหว่างโลหะบัดกรี Sn-1.5Ag-0.7Cu-9.5In กับแผ่นรองทองแดง โดยการบัดกรีที่อุณหภูมิ 250°C ใช้เวลา 5 วินาที และบ่มที่อุณหภูมิ $130\text{-}170^\circ\text{C}$ ใช้เวลา 2-16 วัน พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในรอยต่อบัดกรี คือ Cu_3Sn และ Cu_6Sn_5 ซึ่ง Cu_6Sn_5 เกิดขึ้นระหว่างการบัดกรี ส่วน Cu_3Sn เกิดขึ้นระหว่างการบ่ม โดย In ช่วยลดอัตราการเติบโตของ Cu_3Sn โดยยับยั้งการแพร่ของ Sn ผ่านขอบเกรน ยิ่งกว่านั้น In ยังทำให้เกิดเฟสใหม่ คือ $\text{Cu}_6(\text{Sn}, \text{In})_5$ แทนเฟส Cu_6Sn_5

2.1.3 การบ่มด้วยความร้อน (Thermal aging)

ในงานวิจัยของ กรรรมชัย กัลยาศิริ [16] ได้ศึกษาอิทธิพลของการบ่มด้วยความร้อนที่มีต่อความแข็งแรงจลภาคและโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn ที่ปริมาณอินเดียม (In) 0.0 1.0 2.0 และ 3.0% บ่มที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 1, 10, 100 และ 1000 ชั่วโมง พบว่าระยะเวลาการบ่มที่นานขึ้น จะทำให้ขนาดเกรนของเฟส Sn-rich เพิ่มขึ้นและเกิดการสลายตัวของสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 มากขึ้น สองสาเหตุนี้ทำให้ความแข็งแรงจลภาคของโลหะบัดกรีลดลงตามระยะเวลาในการบ่ม

ในงานวิจัยของ Kim และ Jung [17] ได้ศึกษาเกี่ยวกับจลนศาสตร์การเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะบัดกรี In-48Sn กับโลหะพื้นทองแดง โดยบ่มชิ้นงานที่อุณหภูมิ 70, 80, 90 และ 100°C เป็นเวลา 60 วัน พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นมีสองเฟส คือ $\text{Cu}(\text{In}, \text{Sn})_2$ (ติดกับโลหะบัดกรี) และ $\text{Cu}_6(\text{In}, \text{Sn})_5$ (ติดกับทองแดง) ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะแปรผันแบบเส้นตรงกับ $t^{1/2}$ เมื่อ t คือ เวลาการเกิดปฏิกิริยา

ในงานวิจัยของ Sebo และคณะ [18] ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของความร้อนที่มีต่อรอยต่อของโลหะบัดกรี Sn-3.5Ag-xIn กับทองแดง โดยการเพิ่มปริมาณของอินเดียมที่ 0, 6.5 และ 9% แล้วต่อในรูปแบบ Cu-solder-Cu ภายในเตาที่อุณหภูมิ 280°C เป็นเวลา 1800 วินาที หลังจากเย็นตัวให้ความร้อนในช่วงเวลาจากอุณหภูมิห้องถึง 150°C จำนวน 1000 รอบ และในช่วงเวลาจากอุณหภูมิห้องถึง 180°C จำนวน 500 รอบ พบว่าเมื่ออินเดียมเพิ่มขึ้นและจำนวนรอบเพิ่มขึ้นทำให้ชั้น

สารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 มีความหนาแน่นมากขึ้น เนื่องจากอินเดียมจะเป็นตัวช่วยให้เกิดการเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ง่ายขึ้น

ในงานวิจัยของ Lee และคณะ [19] ได้ศึกษาโลหะบัดกรี In-Ag ที่มีอุณหภูมิจุดยูเทคติกต่ำ สำหรับการเชื่อมเวเฟอร์บรรจุภัณฑ์สุญญากาศ MEMS โดยใช้การบัดกรีที่อุณหภูมิต่ำและไม่ใช้ฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 180°C เป็นเวลา 40 นาที และอบอ่อนที่อุณหภูมิ $120\text{-}130^\circ\text{C}$ นาน 24 ชั่วโมง พบว่าเกิดสารประกอบเชิงโลหะขึ้น คือ AgIn_2 และหลังจากบ่มที่อุณหภูมิ 70°C นาน 80 ชั่วโมง ได้สารประกอบเชิงโลหะใหม่ คือ Ag_2In และ Ag_9In_4

ในงานวิจัยของ Hodulova และคณะ [15] ได้ศึกษาผลของการเติมธาตุ Bi และ In ต่อการเกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะของรอยต่อโลหะบัดกรี Sn-3.7Ag-0.7Cu, Sn-1.0Ag-0.5Cu-1.0Bi และ Sn-1.5Ag-0.7Cu-9.5In กับโลหะพื้นทองแดง โดยการหลอมบนแผ่นทองแดงที่อุณหภูมิ 250°C เวลา 5 วินาที บ่มที่อุณหภูมิ $130\text{-}170^\circ\text{C}$ เวลา 2-16 วัน ในเตาอบแบบพาความร้อน พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในรอยต่อบัดกรี คือ Cu_3Sn และ Cu_6Sn_5 ซึ่ง Cu_6Sn_5 เกิดขึ้นระหว่างการบัดกรี ส่วน Cu_3Sn เกิดขึ้นระหว่างการบ่ม โดย In ช่วยลดอัตราการเติบโตของ Cu_3Sn ยิ่งกว่านั้น In ยังทำให้เกิดเฟสใหม่ คือ $\text{Cu}_6(\text{Sn}, \text{In})_5$ แทนเฟส Cu_6Sn_5 ซึ่งความร้อนและเวลาจะทำให้ $\text{Cu}_6(\text{Sn}, \text{In})_5$ มีความหนาเพิ่มขึ้น และเมื่อ $\text{Cu}_6(\text{Sn}, \text{In})_5$ หนาขึ้นจะทำให้รอยต่อบัดกรีเสื่อมสภาพก่อนเวลาอันควร

ในงานวิจัยของ Chen และคณะ [20] ได้ศึกษาวิวัฒนาการโครงสร้างจุลภาคของสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-3.5Ag-x ($x=0, 0.75\text{Zn}, 1.5\text{In}$) ที่ต่อกับทองแดง และกลไกการเติบโตระหว่างการหลอมเหลวที่สังเกตและวิเคราะห์ได้จากโครงสร้างจุลภาคและเฟส โดยการหลอมโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดงบริสุทธิ์ 99.99% ในเตาสุญญากาศที่อุณหภูมิ $550 - 600\text{ K}$ ประมาณ 1 นาที และขึ้นงานที่อุณหภูมิ 583 K ใช้เวลาบ่ม 8, 24 และ 40 นาที และให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง พบว่าการเพิ่ม In ใน Sn-Ag จะทำให้เกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะ $\text{Cu}_6(\text{Sn}_x\text{In}_{1-x})_5$ ระหว่างโลหะบัดกรี Sn-3.5Ag-1.5In ที่ต่อกับทองแดง มีความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะเพิ่มขึ้นตามเวลาในการบ่ม

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 การบัดกรี (Soldering)

การบัดกรี หมายถึง กรรมวิธีการยึดหรือต่อ (Joining) แผ่นโลหะชิ้นงานสองชิ้นเข้าด้วยกันโดยโลหะที่นำมาต่อจะไม่หลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกันเหมือนการเชื่อม (Welding) แต่การบัดกรีจะใช้วิธีนำเอาโลหะผสมที่เรียกว่า โลหะบัดกรีหรือตะกั่วบัดกรี (Solder) ซึ่งมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าโลหะชิ้นงานที่นำมาบัดกรี เป็นตัวประสานชิ้นงานให้ติดกัน การบัดกรีต้องอาศัยตัวช่วยประสานหรือฟลักซ์ (Flux) เพื่อทำความสะอาดผิวหน้าตรงส่วนที่จะบัดกรีก่อน และต้องอาศัยความร้อนที่ใช้หลอมละลายโลหะบัดกรี พร้อมทั้งให้ความร้อนแก่ชิ้นงานจากหัวแร้งบัดกรี (Soldering iron)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การบัดกรีโดยทั่วไปแบ่งเป็นชนิดใหญ่ๆได้ 2 ชนิด ได้แก่

1. การบัดกรีแข็ง (Brazing) เป็นการบัดกรีที่ต้องใช้ความร้อนหลอมตัวประสาน หรือโลหะบัดกรีซึ่งมีจุดหลอมละลายเกินกว่า 426.67°C แต่ต่ำกว่าจุดหลอมละลายของชิ้นงาน โดยปกติตัวประสานจะเป็นโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก (Non-ferrous metal) และการบัดกรีชนิดนี้จะให้ความร้อนแก่ชิ้นงานจนร้อนแดง (แต่ไม่ละลาย) รวมทั้งการบัดกรีเงิน (Silver soldering) และการแล่นประสานด้วย ซึ่งมีรอยต่อที่แข็งแรงเกือบเท่ากับรอยเชื่อม

2. การบัดกรีอ่อน (Soft soldering) เป็นการบัดกรีชนิดที่ต้องใช้ความร้อนหลอมละลายโลหะหรือตะกั่วบัดกรีต่ำกว่า 426.67°C ใช้สำหรับบัดกรีโลหะแผ่นโดยทั่วไป ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้จะทำการทดลองในกระบวนการบัดกรีอ่อน

การบัดกรีที่ดีอนจะทำให้ได้รอยต่อที่มีคุณภาพนั้นขึ้นอยู่กับ 3 องค์ประกอบด้วยกันคือ

1. ธรรมชาติของผิวโลหะ (Base metal) ซึ่งครอบคลุมถึงชนิดของโลหะและสภาพผิวของผิวหน้าด้วย

2. ชนิดของโลหะบัดกรีที่ใช้ (Soldering metal)

3. ตัวประสานหรือฟลักซ์ (Soldering flux)

องค์ประกอบทั้ง 3 นี้จะแปรเปลี่ยนไปด้วยอุณหภูมิที่ใช้ในการบัดกรี จึงอาจกล่าวได้ว่าองค์ประกอบทั้ง 3 นี้สัมพันธ์กันอยู่ด้วยความร้อนที่ใช้ในการบัดกรี

2.2.2 โลหะพื้น (Base metal)

โลหะพื้นส่วนใหญ่จะเป็นเหล็กและทองแดง ส่วนอลูมิเนียมก็มีส่วนสำคัญเพราะมีน้ำหนักเบา แต่จะบัดกรียากกว่าเหล็ก ทองแดง และอัลลอยของเหล็กกับทองแดง ดังแสดงในตารางที่ 2.1 แสดงถึงชนิดของโลหะต่อความยากง่ายในการบัดกรี แต่จะต้องคำนึงถึงฟลักซ์ที่เหมาะสมด้วยว่าเป็นชนิดว่องไวหรือไม่ ซึ่งจะมีผลต่อการบัดกรี

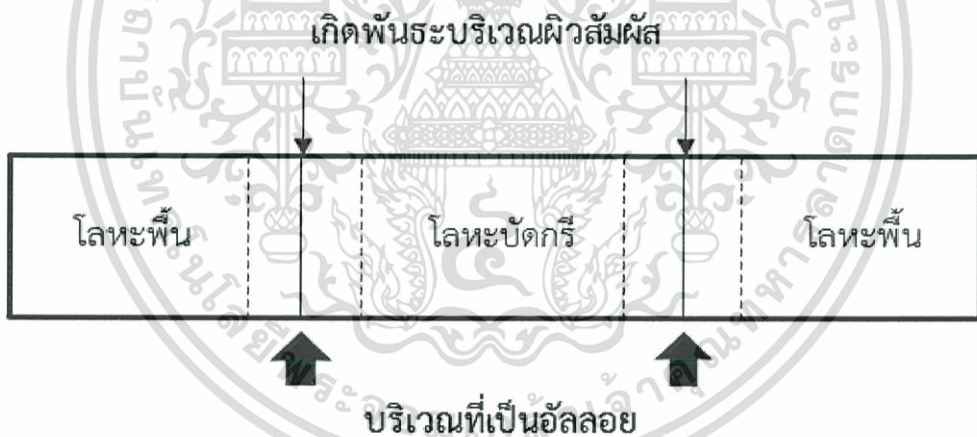
ตารางที่ 2.1 ชนิดของโลหะต่อความยากง่ายในการบัดกรี [5]

โลหะพื้นหรือโลหะชิ้นงาน	การบัดกรี
เงิน ดีบุก แคดเมียม แพลเลเดียม โรเดียม	ดีเยี่ยม
บรอนซ์ ทองเหลือง ตะกั่ว นิกเกิลผสมเงิน	ดีเยี่ยม
เบริลเลียมผสมทองแดง	ดี
เหล็ก สังกะสี นิกเกิล	พอใช้
อลูมิเนียม อลูมิเนียมผสมบรอนซ์ เหล็กผสมโครเมียม	ยาก
เหล็กหล่อ โครเมียม ไททานเนียม แทนทาลัม แมกนีเซียม	เคลือบด้วยโลหะบัดกรีก่อน

โลหะบัดกรีที่เป็นดีบุก แคดเมียม และทองแดงจะง่ายต่อการเชื่อมประสานของโลหะบัดกรี โดยไม่ต้องทำความสะอาดก่อนและใช้ฟลักซ์ที่ไม่ว่องไวได้ ถ้าเป็นเงินจะเกิดฟิล์มของอัลไพต์บนผิว ซึ่งเป็นตัวลดประสิทธิภาพการบัดกรีทันที ตะกั่วจะเกิดออกไซด์ที่ผิวเมื่ออยู่ในสภาพขึ้น และอาจต้องทำความสะอาดก่อนบัดกรี ทองแดง ทองเหลือง บรอนซ์ และเหล็กจะเกิดออกไซด์บางบริเวณ ซึ่งต้องทำความสะอาดหรือล้างด้วยกรดอ่อน ความจำเป็นในการทำความสะอาด จะขึ้นอยู่กับขอบเขตของผิวโลหะที่เกิดออกซิเดชันและความว่องไวของฟลักซ์

2.2.3 โลหะบัดกรี (Solder)

จุดบัดกรีจะเกิดขึ้นจากการใช้โลหะบัดกรีเป็นตัวกลางในการอุดให้แน่น และเชื่อมยึดระหว่างโลหะที่ต้องการเชื่อมให้ติดกัน การบัดกรีจะก่อให้เกิดการเชื่อมโยงกันทางด้านกลศาสตร์ของโลหะบัดกรีกับความหยาบบนผิวหน้าที่ไม่สม่ำเสมอของโลหะพื้นผิว อุณหภูมิของการบัดกรีที่เหมาะสม ซึ่งจะทำให้โลหะบัดกรีหลอมเป็นของเหลวไม่เกิน 427°C สำหรับโลหะบัดกรีชนิดแข็ง (Hard solder) จะไม่เกิน 315°C และควรต่ำกว่าจุดหลอมตัวของโลหะที่จะบัดกรี พันธะระหว่างโลหะบัดกรีกับโลหะพื้นจะมีมากกว่าแรงเกาะติดทางกลซึ่งก็คือ พันธะโลหะทั้งสองแรงจะส่งผลให้เกิดความแข็งแรงของการเกาะติด ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การเกิดการเชื่อมประสานของโลหะบัดกรี [16]

ตะกั่วบัดกรีเป็นโลหะผสมระหว่างดีบุกและตะกั่วในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน และอาจมีโลหะอื่นๆ ผสม เช่น แอนติโมนี เงิน แคดเมียม อินเดียม และบิสมีท ซึ่งช่วยควบคุมสมบัติทางกลและทางฟิสิกส์ของตะกั่วบัดกรี เช่น ความแข็ง ความต้านทานการกัดกร่อน และช่วงของอุณหภูมิการหลอมเหลว ซึ่งจะถูกออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยดีบุกจะเริ่มหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 327°C และอ่อนตัวหลอมเหลวลงมาถึงอุณหภูมิ 283°C ส่วนตะกั่วจะเริ่มหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 232°C และอ่อนตัวหลอมเหลวลงมาถึงอุณหภูมิ 183°C หากใช้ดีบุกหรือตะกั่วเพียงอย่างเดียวหนึ่งในการบัดกรีจะไม่เหมาะสม เนื่องจากจุดหลอมเหลวสูงเกินไปและในขณะที่โลหะบัดกรีอยู่ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานะอ่อนตัวหลอมเหลว หากมีการเคลื่อนไหวที่รอยต่อจะทำให้ได้รอยต่อที่ไม่ดี และราคาของดีบุกก็แพงกว่าตะกั่วถึง 20 เท่า เมื่อนำดีบุกและตะกั่วมาผสมกันในอัตราส่วนที่พอเหมาะ จะทำให้ได้ตะกั่วบัดกรีที่มีจุดหลอมเหลวและอุณหภูมิช่วงอ่อนตัวลดต่ำลง อัตราส่วนระหว่างดีบุก 63 เปอร์เซ็นต์ และตะกั่ว 37 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ส่วนผสมนี้ไม่มีบริเวณที่เป็นสถานะอ่อนตัวหลอมเหลว โดยจะเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นของเหลวที่อุณหภูมิแน่นอน คือ 183 °C ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่พึงปรารถนาเนื่องจากทำให้เกิดความเปราะภายใต้สภาวะการใช้งาน

อัตราส่วนที่นิยมใช้กันมากที่สุดของตะกั่วบัดกรีที่ใช้ในงานทางอิเล็กทรอนิกส์ คือ ดีบุก 60 เปอร์เซ็นต์ และตะกั่ว 40 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเรียกกันว่า ตะกั่วบัดกรีแบบ 60/40 ถูกจัดว่าเป็นตะกั่วแบบอ่อน โดยจะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 188 °C และมีช่วงที่เป็นสถานะอ่อนตัวหลอมเหลวประมาณ 5 °C ซึ่งจะช่วยให้ได้ความแข็งแรงดีที่สุด และมีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าต่ำสุดด้วย สำหรับรอยต่อซึ่งจำเป็นต้องทนต่ออุณหภูมิสูงหรือต้องการความแข็งแรงทางกลมากๆ จำเป็นต้องใช้ตะกั่วบัดกรีแบบแข็ง ซึ่งประกอบไปด้วยอัตราส่วนของดีบุกต่อตะกั่ว 30/70 และมีช่วงหลอมเหลวที่ 255 ถึง 275 °C

2.2.4 น้ำยาประสานหรือฟลักซ์ (Fluxes)

คำว่า ฟลักซ์ มาจากภาษาละตินมีความหมายว่า Flow ในโลหะบัดกรี ฟลักซ์ยังมีหน้าที่อื่น ๆ นอกเหนือจากการช่วยให้โลหะบัดกรีไหล เป็นที่เชื่อกันว่าฟลักซ์จะไม่เกิดพันธะ แต่เหมือนจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี การบัดกรีโดยไม่มีฟลักซ์ซึ่งใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมก็อาจทำได้ แต่ถ้ามีฟลักซ์จะทำให้การบัดกรีสะดวกขึ้น โดยฟลักซ์ทำหน้าที่หลักๆ ดังนี้ คือ เป็นตัวทำให้ผิวหน้าโลหะพื้นไม่ให้มีสิ่งสกปรกพวกออกไซด์ และทำให้ชิ้นงานสะอาด อีกทั้งทำให้โลหะบัดกรีแผ่ขยายไปเป็นผลให้เกาะติดได้ง่าย

ฟลักซ์สามารถแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 2 ประเภท คือ

1. ฟลักซ์อินทรีย์ (Organic fluxes) จัดเป็นฟลักซ์ประเภทที่ไม่มีการกัดกร่อน (Noncorrosive fluxes) ได้แก่ ยางไม้ (Natural rosin) ไขสัตว์ ยางสน แอลกอฮอล์ กรดอินทรีย์และเกลือของธาตุหมู่ 7 โดยทั่วไปฟลักซ์กลุ่มนี้ใช้กับการบัดกรีอุปกรณ์ไฟฟ้าหรืออิเล็กทรอนิกส์

2. ฟลักซ์อนินทรีย์ (Inorganic fluxes) เป็นฟลักซ์ประเภทที่มีการกัดกร่อน (Corrosive fluxes) ได้แก่ กรดและเกลืออนินทรีย์ชนิดต่างๆ โดยปกติจะใช้ฟลักซ์จำพวกนี้เมื่อมีปัญหาการเกิดออกซิเดชันระหว่างโลหะบัดกรีกับอากาศ เนื่องจากฟลักซ์กลุ่มนี้สามารถปกป้องรอยเชื่อมได้ค่อนข้างดี หลังจากการบัดกรีฟลักซ์ที่หลงเหลืออยู่จะถูกกำจัดออกไปโดยใช้สารละลายหรือตัวทำละลายเคมี

กรดเกลือ (Muriatic acid) ในงานโลหะแผ่นจะเรียกว่า Raw acid เป็นกรดที่มีความเข้มข้นและอันตรายมาก โดยมีลักษณะเป็นสีเหลือง ใช้เป็นฟลักซ์เมื่อเวลาบัดกรีเหล็กอบสังกะสี จะเดือดและมีควันแผ่นเหล็กอบสังกะสีจะมีรอยดำ Muriatic acid ใช้ในการผลิต Zinc chloride สำหรับทำความสะอาดโลหะก่อนบัดกรี โดยเฉพาะเหล็กอบสังกะสี (Galvanized steel)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

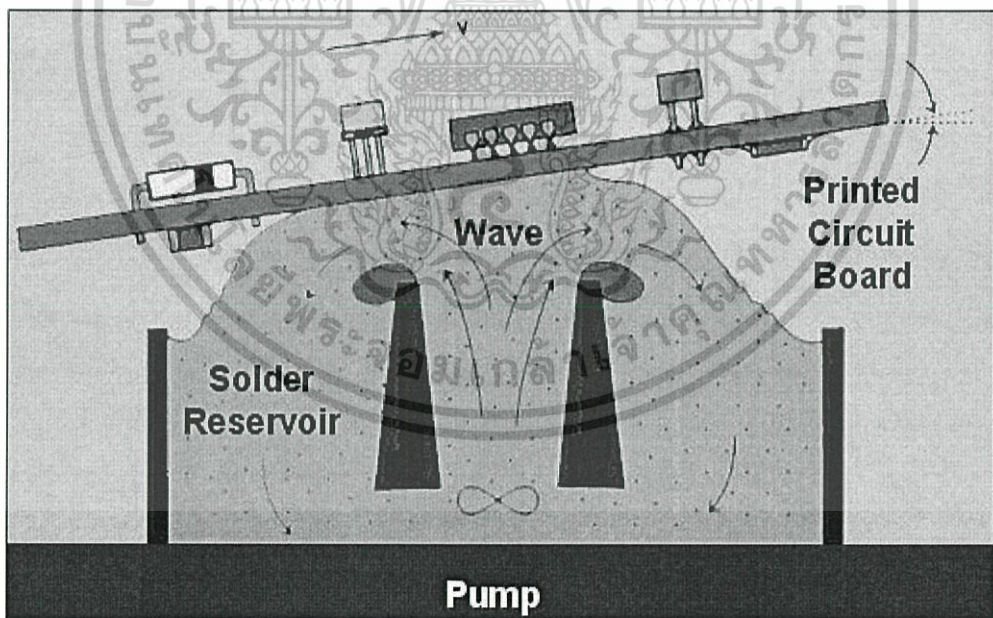
สังกะสีคลอไรด์ (Zinc chloride) หรือบางครั้งเรียกว่า Cut acid, Cured acid หรือ Killed acid ใช้เป็นฟลักซ์ในการบัดกรีเหล็กอาบสังกะสี (Galvanized steel) สังกะสี ทองเหลือง ทองแดง และตะกั่ว เป็นฟลักซ์ที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น กัดกร่อนโลหะและอันตรายมากเท่าๆกรดเกลือ ฉะนั้นในการทำฟลักซ์ชนิดนี้จะต้องทำด้วยความระมัดระวัง

การทำสังกะสีคลอไรด์ สามารถทำได้โดยการตัดแผ่นสังกะสีเป็นชิ้นเล็กๆ ใส่ลงไปในถ้วยที่บรรจุกรดเกลือ จะเกิดปฏิกิริยาโดยกรดเกลือจะละลายสังกะสีและไล่ก๊าซไฮโดรเจนระเหยขึ้นมา น้ำกรดที่เหลือจะเป็นสังกะสีคลอไรด์ ดังสมการ $2\text{HCl} + \text{Zn} \rightarrow \text{ZnCl}_2 + \text{H}_2$

2.2.5 วิธีการบัดกรี (Soldering methods)

สำหรับในกระบวนการบัดกรีนอกจากการบัดกรีด้วยมือ (Hand soldering) แล้วในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ยังมีวิธีการดังต่อไปนี้

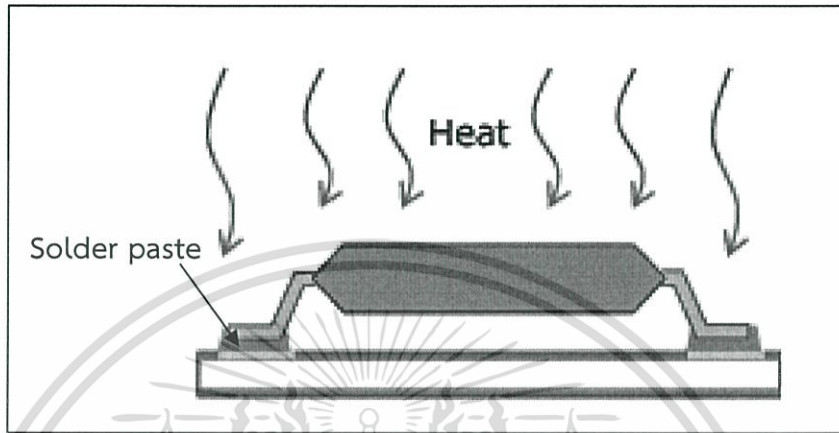
1. การบัดกรีแบบคลื่น (Wave soldering) เป็นการบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ลงบนแผ่นวงจรรวม(Printed circuit board: PCB) โดยที่ PCB ที่มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ติดอยู่เคลื่อนที่ผ่านไปบนอ่างของโลหะบัดกรีหลอมเหลว และของเหลวดังกล่าวจะถูกทำให้เป็นคลื่นและส่วนที่เป็นคลื่นจะสัมผัสกับด้านล่างของแผ่น PCB เพื่อให้โลหะบัดกรีเชื่อมต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ากับวงจร ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การบัดกรีแบบคลื่น

2. การบัดกรีแบบรีโฟลว์ (Reflow soldering) โดยทั่วไปจะใช้ในการเชื่อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เรียกว่า Surface mount components กับ PCB ในกระบวนการนี้จะใช้โลหะบัดกรีที่อยู่ในรูปของครีม (Paste) โดยโลหะบัดกรีจะผสมอยู่กับฟลักซ์และตัวยึด (Binder) ซึ่งจะถูกเอกสารเป็นเอกสารที่สกรวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สกรีนลงบนตำแหน่งที่ต้องการบน PCB แล้ววางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ลงบนโลหะบัดกรี หลังจากนั้น PCB จะถูกให้ความร้อนจนกระทั่งโลหะบัดกรีเกิดการหลอมละลายแล้วเชื่อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ากับวงจร ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เมื่ออุณหภูมิลดลงโลหะบัดกรีก็นแข็งตัวกลายเป็นของแข็งที่สามารถนำไฟฟ้าได้



รูปที่ 2.3 การบัดกรีแบบรีโฟลว์

2.2.6 ข้อควรพิจารณาเบื้องต้นในการเลือกใช้โลหะบัดกรีแบบไร้สารตะกั่ว

ตะกั่วบัดกรีที่เป็นส่วนผสมระหว่างดีบุกและตะกั่ว (Tin-lead) โดยส่วนผสมที่นิยมใช้งานคือ 63Sn/37Pb มีข้อดีหลายประการ เช่น ราคาถูก จุดบัดกรีมีความแข็งแรง ความเงางาม และนำไฟฟ้าได้ดี เป็นต้น ดังนั้นการที่จะนำโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วมาใช้งานแทนตะกั่วบัดกรีชนิด 63Sn/37Pb นั้น มีข้อพิจารณาเบื้องต้นดังนี้

1. ราคาของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วโดยทั่วไปจะสูงกว่าตะกั่วบัดกรี 63Sn/37Pb อย่างน้อย 35% ขึ้นไป เนื่องจากโลหะที่นำมาแทนตะกั่วจะเป็นโลหะที่หาได้ยาก และมีอยู่อย่างจำกัด เช่น บิสมัท (Bi) อินเดียม (In) หรือเงิน (Ag) เป็นต้น จะส่งผลให้ต้นทุนสินค้าสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าเป็นการใช้โลหะบัดกรีแบบแท่ง (Solder bar) สำหรับเครื่อง Wave soldering หรือโลหะบัดกรีแบบเส้น (Solder wire) สำหรับการบัดกรีด้วยมือ จะมีปริมาณการใช้สูงกว่าตะกั่วเหลวซึ่งโดยทั่วไปปริมาณโลหะบัดกรีแบบแท่งหรือแบบเส้นที่ใช้จะเป็นส่วนประกอบหลักของต้นทุนการผลิต

2. จุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว โดยทั่วไปจะสูงกว่าตะกั่วบัดกรี การที่โลหะบัดกรีมีจุดหลอมเหลวสูงก็หมายถึงเราต้องปรับตั้งอุณหภูมิของเครื่องหลอมตะกั่วให้สูงขึ้นด้วย ซึ่งอาจทำให้ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์เสียหายได้ หรืออาจทำให้แผงวงจรเกิดการเปลี่ยนสีหรือเสียรูปเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงเกินไป

3. ความสามารถในการนำไฟฟ้าต้องดีพอที่จะไม่ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ลดลง

4. ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต้องดีพอ

5. ต้องมีความเป็นพิษต่อสภาพแวดล้อมและร่างกายต่ำ ซึ่งเป็นจุดประสงค์หลักของการใช้โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-free solder)

6. ต้องใช้ได้ดีกับเครื่องหลอมตะกั่วที่มีอยู่ โดยไม่ต้องดัดแปลงมากหรือต้องซื้อระบบใหม่ อาจยอมรับการดัดแปลงโดยเล็กน้อย เช่น เพิ่มระบบจ่ายก๊าซไนโตรเจน (N_2) ในเครื่อง Wave soldering หรือเครื่อง Reflow soldering เพื่อปรับปรุงคุณภาพของโลหะบัดกรี เนื่องจากต้นทุนของการติดตั้งระบบก๊าซไนโตรเจนโดยทั่วไปจะไม่สูงมากนัก

7. คุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ความแข็งแรง ความทนทานของจุดบัดกรีต้องไม่ด้อยไปกว่าตะกั่วบัดกรีชนิด 63Sn/37Pb

8. ควรมียุทธศาสตร์ที่ เนื่องจากในการผลิตสินค้าปริมาณมาก (Mass volume) จะต้องมีการควบคุมความผันแปรต่างๆในกระบวนการผลิต เพื่อไม่ให้ปริมาณของเสียในการผลิตมีมากเกินไป เป็นที่น่าสังเกตว่าโลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมของโลหะตั้งแต่ 4 ชนิดขึ้นไปจะมีจุดหลอมเหลวที่มีลักษณะเป็นช่วงอุณหภูมิไม่คงที่ที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง ดังนั้นการเลือกใช้โลหะบัดกรีประเภทนี้จะทำให้ประสบปัญหาในกระบวนการผลิตได้

9. ความสวยงามของจุดบัดกรี (Solder joint cosmetics) ควรจะใกล้เคียงกับตะกั่วบัดกรีชนิด 63Sn/37Pb

10. โลหะที่จะนำมาทดแทนสารตะกั่วจะต้องหาได้ง่าย ผู้ผลิตสามารถผลิตออกมาแข่งขันกันได้อย่างกว้างขวาง ซึ่งจะส่งผลให้ราคาลดลงในอนาคต

11. ถึงแม้โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วกำลังเป็นที่นิยมดังที่กล่าวมาข้างต้น แต่ก็ต้องยอมรับว่าผู้ผลิตแผ่นวงจรพิมพ์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดติดตั้งบนพื้นผิว SMD หลายรายยังคงไม่สามารถเลิกใช้โลหะบัดกรีที่มีสารตะกั่วได้ในเวลาอันสั้น ดังนั้นข้อของอุปกรณ์ SMD หรือลายวงจบบนแผ่นวงจรพิมพ์ก็ยังคงมีสารตะกั่วเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงความสามารถในการเชื่อมประสานกันระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วกับสารตะกั่วที่อยู่บนขั้วอุปกรณ์ SMD และแผ่นวงจรพิมพ์ด้วย ซึ่งถ้าไม่สามารถเชื่อมประสานกันได้ดีก็อาจทำให้จุดบัดกรีนั้นไม่แข็งแรงเพียงพอต่อการนำไปใช้งาน หรือมีผลกับการใช้งานของผลิตภัณฑ์ในระยะยาว

2.2.6.1 โลหะทดแทนสารตะกั่ว

โลหะบัดกรีโดยทั่วไปจะเป็นส่วนผสมระหว่างโลหะตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป เช่น ดีบุก-ตะกั่ว (Tin-lead) เป็นต้น ถึงแม้จะมีความพยายามในการเลิกใช้สารตะกั่วโดยใช้โลหะชนิดอื่นมาทดแทน แต่ยังคงใช้ดีบุก (Tin) เป็นธาตุหลักในส่วนผสมของโลหะบัดกรี เนื่องจากดีบุกมีราคาถูก หาได้ง่าย มีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดี นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานที่ดี นอกจากนี้ดีบุกยังเป็นส่วนผสมหลักของตะกั่วบัดกรีที่หลายคนคุ้นเคย คือ 63Sn/37Pb

โลหะที่มีการพัฒนาและนำมาทดแทนสารตะกั่ว โดยนำมาผสมกับดีบุกมีหลายชนิดด้วยกัน เช่น เงิน (silver: Ag) อินเดียม (Indium: In) สังกะสี (Zinc: Zn) พลวง (Antimony: Sb) ทองแดง (Copper: Cu) บิสมัท (Bismuth: Bi) เป็นต้น ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติบางประการของโลหะทดแทนตะกั่ว

โลหะ	ราคา โดยประมาณ (US\$) ต่อปอนด์	ความหนาแน่นที่ อุณหภูมิ 25 °C (ปอนด์ต่อลูกบาศก์นิ้ว)	จำนวนที่สามารถ ผลิตได้ต่อปี (ล้าน ปอนด์)	ความยากง่ายใน การนำมาใช้งาน
สังกะสี (Zn)	0.50	0.258	1560	หาง่าย
พลวง (Sb)	0.80	0.239	100	หาง่าย
ดีบุก (Sn)	3.50	0.264	180	หาง่าย
เงิน (Ag)	84.20	0.379	3.5	มีจำกัด
บิสมัท (Bi)	3.40	0.354	9	มีจำกัด
อินเดียม (In)	125.00	0.264	0.2	ขาดแคลน
ตะกั่ว (Pb)	0.45	0.41	170	หาง่าย
ทองแดง (Cu)	0.65	0.324	4900	หาง่าย

สาเหตุที่โลหะดังกล่าวถูกนำมาพิจารณาก็เพราะว่าเมื่อนำโลหะเหล่านี้มาผสมกับดีบุกแล้วจุดหลอมเหลวมีแนวโน้มต่ำลง คุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกายภาพที่ดีพอเป็นที่ยอมรับได้นอกจากนี้ยังได้แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติบางประการของโลหะเหล่านี้ เช่น ราคาต่อน้ำหนักหนึ่งปอนด์ ความหนาแน่น จำนวนที่สามารถผลิตได้ต่อปี และความยากง่ายในการนำมาใช้งาน

นอกจากโลหะชนิดต่างๆที่กล่าวมาแล้ว บรรดาผู้ผลิตหลายรายก็ได้มีการเสนอส่วนผสมแบบต่างๆออกมามากมายถึง 75 ชนิดในปัจจุบัน แต่สรุปมาให้พิจารณาเพียง 12 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ส่วนผสมต่างๆที่สามารถนำมาทดแทนโลหะบัดกรีชนิดที่มีสารตะกั่ว

ส่วนผสม	จุดหลอมเหลว (°C)	ราคา (US\$) ต่อปอนด์	ราคา (US\$) ต่อลูกบาศก์ นิ้ว	ความหนาแน่น ที่อุณหภูมิ 25 °C (ปอนด์ต่อ ลูกบาศก์นิ้ว)
63Sn/37Pb	183	2.37	0.75	0.318
42Sn/58Bi	139	3.44	1.09	0.316
77.2Sn/20In/2.8Ag	179-189	30.06	8.02	0.267

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 (ต่อ) ส่วนผสมต่างๆที่สามารถนำมาทดแทนโลหะบัดกรีชนิดที่มีสารตะกั่ว

ส่วนผสม	จุดหลอมเหลว (°C)	ราคา (US\$) ต่อปอนด์	ราคา (US\$) ต่อลูกบาศก์ นิ้ว	ความหนาแน่น ที่อุณหภูมิ 25 °C (ปอนด์ต่อ ลูกบาศก์นิ้ว)
91Sn/9Zn	199	2.32	0.85	0.263
91.8Sn/3.4Ag/4.8Bi	208-215	6.24	1.70	0.272
90sn/7.5Bi/2.0Ag/0.5Cu	186-212	5.09	1.39	0.273
96.2Sn/2.5Ag/0.8Cu/0.5Sb	213-219	5.84	1.46	0.267
95.5Sn/4.0Ag/0.5Cu	217-218	6.55	1.76	0.269
95Sn/3.5Ag/1.5In	218	8.15	2.18	0.268
93.5Sn/3.5Ag/3.0Bi	216-220	5.92	1.59	0.269
96.5Sn/3.5Ag	221	6.32	2.33	0.368
99.3Sn/0.7Cu	227	3.48	0.92	0.264
95Sn/5.0Sb	232-240	3.37	0.88	0.263

หมายเหตุ:

- สังเกตว่าส่วนผสมของโลหะบัดกรีทุกชนิดในตารางจะมีดีบุกเป็นส่วนประกอบหลัก
- ราคาต่อหนึ่งลูกบาศก์นิ้วเป็นราคาที่นิยมใช้ในการเปรียบเทียบราคาของตะกั่วเหลว
มีข้อมูลเกี่ยวกับส่วนผสมบางชนิดในตารางที่ 2.3 ที่สามารถใช้เป็นแนวทางในการ
เลือกส่วนผสมที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิต โดยพิจารณาจากข้อดีข้อเสียต่างๆดังนี้

อินเดียม (Indium) เป็นธาตุที่สามารถทำให้จุดหลอมเหลวของส่วนผสมลดลงได้ดีเมื่อนำมาผสมกับดีบุก มีคุณสมบัติทางกายภาพและความสามารถในการเชื่อมประสานที่ดี แต่อินเดียมเป็นธาตุที่มีจำนวนจำกัด และเริ่มขาดแคลนในปัจจุบัน

สังกะสี (Zinc) เป็นธาตุที่มีราคาถูก (ใกล้เคียงกับตะกั่ว) หามาใช้งานได้ง่าย แต่ข้อเสียก็คือสังกะสีทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้เร็ว เกิดเป็นสังกะสีออกไซด์ ซึ่งออกไซด์นี้จะไปลดความสามารถในการเชื่อมประสาน และทำให้เกิดขี้ตะกั่ว (Dross) ปริมาณมากในเครื่อง Wave soldering ถึงแม้ว่าอาจใช้ก๊าซไนโตรเจนมาช่วยลดปัญหาเรื่องออกไซด์ได้ แต่สังกะสีก็ยังไม่เป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ซึ่งยังต้องมีการทดลองใช้งานกันอีกต่อไป

บิสมัท (Bismuth) เป็นธาตุที่สามารถทำให้จุดหลอมเหลวของส่วนผสม (Alloy) ลดลงได้ดีเหมือนอินเดียม และยังมีคุณสมบัติทางกายภาพ ความสามารถในการเชื่อมประสานที่ดีมาก แต่ข้อเสียก็คือจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีที่มีบิสมัทเป็นส่วนผสมจะต่ำเกินไป โดยเฉพาะถ้าบิสมัทมี

การปนเปื้อนกับตะกั่วที่อยู่บนแผ่นวงจรพิมพ์หรือขั้วอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะเกิดเป็นส่วนผสมของ Sn/Pb/Bi ซึ่งจุดหลอมเหลวต่ำถึง 96°C จึงทำให้ไม่เหมาะกับการใช้งาน อาจมีผลให้จุดบัดกรีไม่แข็งแรง เกิดมีรอยแตกง่ายได้ง่าย นอกจากนี้ราคาของบิสมาท์ในปัจจุบันก็ยังคงสูง

โลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมของโลหะ 4-5 ชนิด บรรดาผู้ผลิตต่างพยายามที่จะทำการทดลองหาส่วนผสมระหว่างโลหะหลายๆชนิด เพื่อให้ได้ส่วนผสมที่ดีที่สุด แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าส่วนผสมเหล่านี้จะให้จุดหลอมเหลวที่มีค่าเป็นช่วง ซึ่งทำให้การควบคุมกระบวนการผลิตทำได้ลำบาก และการผสมโลหะหลายๆชนิดเข้าด้วยกันให้มีอัตราส่วนที่แน่นอนในแต่ละครั้งก็ทำได้ยากกว่าการผสมโลหะเพียงแค่ 2-3 ชนิด การที่ส่วนผสมเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยก็อาจทำให้คุณสมบัติโดยรวมเปลี่ยนแปลงไปมาก ด้วยเหตุนี้จึงทำให้โลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมของโลหะ 4-5 ชนิด ยังไม่เป็นที่นิยมในปัจจุบัน แต่ก็มีบางบริษัทในญี่ปุ่นที่มีการใช้โลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมของโลหะ 5 ชนิด

นอกจากนี้ความเหมาะสมในการนำโลหะบัดกรีมาใช้งาน ยังขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตที่มีการใช้อยู่ เช่น ถ้ากรณีเป็นโลหะบัดกรีแบบแท่ง (Solder bar) หรือโลหะบัดกรีแบบเส้น (Solder wire) สำหรับใช้กับเครื่อง Wave soldering หรือการบัดกรีด้วยมือ ตามลำดับ จะมีเกณฑ์หลักในการพิจารณาดังนี้

1. อุณหภูมิของบ่อตะกั่ว (Solder pot) ไม่ควรเกิน 260°C
2. ปริมาณงานเสียต่ำ
3. ราคาต่ำ
4. มีขี้ตะกั่วน้อย

การพิจารณาเลือกโลหะบัดกรีสำหรับการบัดกรีด้วยมือมีเกณฑ์คล้ายๆกับการบัดกรีแบบคลื่น คือ ในเรื่องราคาและจุดหลอมเหลวที่ไม่สูงเกินไป ทำให้ไม่ต้องปรับอุณหภูมิของหัวแร้งให้สูงตามไปด้วย ในกรณีของตะกั่วแบบครีม (Solder paste) ที่ใช้กับเครื่องบัดกรีแบบรีโฟลว์ เรื่องของราคาไม่ใช่เกณฑ์สำคัญในการพิจารณา เนื่องจากราคาของตะกั่วเหลวจะเป็นอัตราส่วนที่น้อยเมื่อเทียบกับต้นทุนการผลิตรวม ดังนั้นการพิจารณาจะเน้นจุดหลอมเหลวที่ต่ำเป็นสำคัญ ซึ่งในที่นี้ก็จะมี 95.5Sn-4.0Ag-0.5Cu (จุดหลอมเหลว = 217-218°C) และ 96.5Sn-3.5Ag (จุดหลอมเหลว = 221°C) เป็นทางเลือก

เป็นเรื่องยากที่จะสรุปว่าส่วนผสมใดมีความเหมาะสมมากกว่า ถึงแม้ 95.5Sn-4.0Ag-0.5Cu จะมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำกว่า แต่ 96.5Sn-3.5Ag ก็มีความได้เปรียบในด้านที่เป็นส่วนผสมของโลหะเพียงแค่สองชนิด ซึ่งสามารถควบคุมความแน่นอนของส่วนผสมได้ดีกว่า บริษัทอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ชั้นนำต่างก็มีการศึกษาส่วนผสมทั้งสองชนิดพอๆกัน

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติบางประการระหว่าง Sn/Ag กับ Sn/Sb

ส่วนผสม	จุดหลอมเหลว (°C)	ความหนาแน่น (kg/m ³)	สัมประสิทธิ์การขยายตัวด้านความร้อน (Coefficient of thermal expansion) (ppm/°C)	สภาพการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) (%IACS)	ความต้านทานไฟฟ้า (Electrical resistivity) (μΩ/cm)	ความตึงผิว (Surface tension) (N/m)	การนำความร้อน (Thermal conductivity) (W/[mK])
63Sn/37Pb	183	8400	21@25°C	11.5	14.99	0.49	57.9@32.6°C
96.5Sn/3.5Ag	221	7290	22@20°C	14	12.31	0.48	55.3@23.9°C

ส่วนผสม 96.5Sn/3.5Ag ได้มีการนำมาใช้งานจริงแล้ว ในขณะที่ส่วนผสม Sn/4.0Ag/0.5Cu ยังอยู่ในระหว่างการทดสอบจากหลายบริษัทในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งผลการทดลองที่ออกมาก็เป็นที่ยอมรับเมื่อเทียบกับตะกั่วบัดกรีชนิด 63Sn/37Pb ทั้งในด้านคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า ความแข็งแรง ความสวยงามของจุดบัดกรี และความสะดวกในการใช้งาน ตารางที่ 2.4 แสดงผลเปรียบเทียบของคุณสมบัติบางประการระหว่างส่วนผสม 63Sn/37Pb กับ 96.5Sn/3.5Ag ซึ่งมีค่าคุณสมบัติต่างๆที่ใกล้เคียงกันมาก

2.2.6.2 ข้อควรพิจารณาบางประการในกระบวนการผลิต

ในการใช้งานจริงนอกจากต้องทำการเลือกใช้โลหะผสม หรือโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วให้เหมาะสมกับกระบวนการผลิต แล้วยังต้องมีการพิจารณาการปรับปรุงเปลี่ยนแปลงสิ่งต่างๆ ในกระบวนการผลิตอีกหลายประการ เช่น การปรับตั้งเครื่องจักรต่างๆให้เหมาะสมกับชนิดของโลหะบัดกรีที่เลือกใช้ โดยทั่วไปโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วจะมีจุดหลอมเหลวที่สูงกว่าตะกั่วบัดกรีชนิด 63Sn/37Pb ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่บนแผงวงจรได้ ดังนั้นจึงควรเพิ่มความระมัดระวังในเรื่องนี้เป็นพิเศษ

การพัฒนาและฝึกอบรมพนักงานถึงวิธีการบัดกรีด้วยมือ และวิธีการซ่อมของเสียก็เป็นสิ่งสำคัญ การบัดกรีด้วยมือโดยใช้โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว โดยทั่วไปจะต้องใช้อุณหภูมิของหัวแร้งที่สูงขึ้น ระยะเวลาในการจี้หัวแร้งนานขึ้น เพื่อให้โลหะบัดกรีมีเวลานานพอที่จะไหลไปเชื่อมกับขั้วของอุปกรณ์ ดังนั้นควรจัดให้มีการฝึกอบรมให้แก่พนักงานที่เกี่ยวข้อง ถึงวิธีการบัดกรีที่ถูกต้อง บางโรงงานอาจมีการใช้โลหะบัดกรีหลายชนิด ทั้งแบบมีและไม่มีสารตะกั่วเป็นส่วนประกอบ ก็จำเป็นที่จะต้องมีการแจ้งให้พนักงานที่ทำการซ่อมของเสียได้ทราบชนิดของโลหะบัดกรีที่จะนำมาใช้

(Tracking system) มาตรฐานและเงื่อนไขในการตรวจสอบคุณภาพ ก็ควรจะมีการทบทวนกันใหม่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และข้อมูลใดๆของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

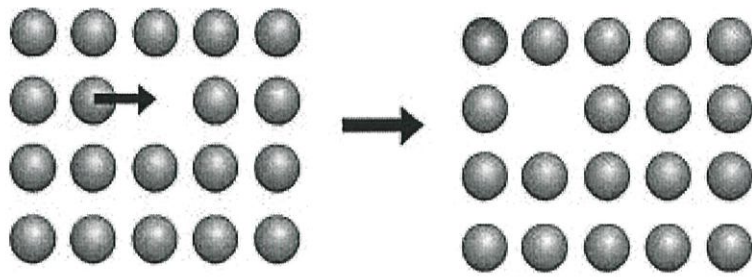
คือต้องมีการพัฒนาความรู้ความเข้าใจในมาตรฐานคุณภาพใหม่ให้แก่พนักงานทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งผู้บริหารและลูกค้า

การเปลี่ยนมาใช้โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์จำเป็นต้องมีการวางแผน และทบทวนสิ่งต่างๆทั้งในส่วนของต้นทุน กระบวนการผลิต และระบบควบคุมคุณภาพอย่างรอบคอบโดยวิศวกรผู้รับผิดชอบ เพื่อให้การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีความราบรื่นมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ และควรเริ่มต้นจากผลิตภัณฑ์ที่ไม่สลับซับซ้อนและมีวงจรชีวิตสั้นเป็นอันดับแรก

2.2.7 การแพร่ (Diffusion)

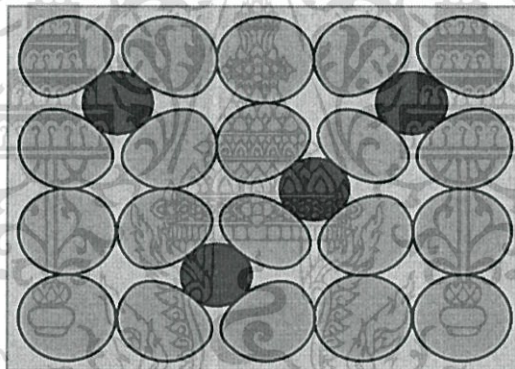
การแพร่ คือ การขนถ่ายมวลจากเฟสของเหลว ก๊าซ หรือของแข็งอื่นมายังเฟสของแข็งเฉพาะอีกเฟสหนึ่ง แต่ในระดับอะตอมการแพร่เป็นการเคลื่อนที่ของอะตอมจากตำแหน่งแลตทิซหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง ตัวอย่างปรากฏการณ์ของการแพร่ เช่น คู่ควบการแพร่ (Diffusion couple) จากการเชื่อมโลหะสองชนิดให้ติดกัน โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะเป็นระยะเวลาหนึ่ง โดยอะตอมของโลหะชนิดที่หนึ่งแพร่เข้าไปในโลหะชนิดที่สอง เช่นเดียวกับการแพร่ของโลหะชนิดที่สองที่เข้าไปในโลหะชนิดที่หนึ่ง และระหว่างรอยต่อมีโลหะทั้งสองชนิดผสมกัน โดยกระบวนการนี้เรียกว่า การแพร่ของอะตอมต่างชนิด (Inter diffusion) หรือการแพร่ของอะตอมแปลกปลอม (Impurity diffusion) ที่มีความเข้มข้นของธาตุทั้งสอง ณ ตำแหน่งต่างๆเปลี่ยนแปลงตามเวลา สำหรับการแพร่ในโลหะบริสุทธิ์อะตอมที่เคลื่อนย้ายตำแหน่งจะเป็นชนิดเดียวกันเรียกว่า การแพร่ในตัวเอง (Self diffusion) ซึ่งไม่สามารถสังเกตหรือตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมทางเคมีได้ โดยกลไกการแพร่ในโลหะแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ

1. การแพร่โดยอาศัยช่องว่าง (Vacancy diffusion) เป็นกลไกการเปลี่ยนตำแหน่งของอะตอมจากตำแหน่งแลตทิซปกติไปยังตำแหน่งแลตทิซข้างๆที่ยังว่างอยู่ หรือเป็นช่องว่าง ดังแสดงในรูปที่ 2.4 กระบวนการนี้จำเป็นต้องมีช่องว่างในวัสดุ และการแพร่โดยอาศัยช่องว่าง จะเกิดได้มากน้อยเพียงใดก็ขึ้นอยู่กับปริมาณของตำหนิชนิดนี้นั่นเอง ทั้งนี้สำหรับโลหะแล้วที่อุณหภูมิสูง จะมีความหนาแน่นของช่องว่างในระดับที่สูงพอสมควร เนื่องจากอะตอมที่กำลังแพร่และช่องว่างที่ต้องแลกเปลี่ยนตำแหน่งกัน ดังนั้นการแพร่ของอะตอมในทิศทางหนึ่งจึงหมายถึงการเคลื่อนที่ช่องว่างในทิศทางตรงกันข้ามด้วย ทั้งการแพร่ในตัวเองและการแพร่ของอะตอมต่างชนิดสามารถเกิดได้ด้วยกลไกนี้



รูปที่ 2.4 กลไกการแพร่โดยอาศัยช่องว่าง

2. การแพร่แบบแทรกที่ (Interstitial diffusion) เป็นกลไกการเคลื่อนที่ของอะตอมจากตำแหน่งแทรกที่ (Interstitial diffusion) ไปยังตำแหน่งข้างเคียงที่ยังว่างอยู่ กลไกนี้จะพบในการแพร่ของอะตอมต่างชนิดของธาตุมลทิน เช่น ไฮโดรเจน คาร์บอน ไนโตรเจน และออกซิเจน ซึ่งมีอะตอมขนาดเล็กพอที่จะแทรกเข้าไปในตำแหน่งระหว่างอะตอม (Interstitial position) ได้ ส่วนอะตอมหลักและอะตอมมลทินที่ละลายแบบแทนที่นั้นมีโอกาสอยู่ในตำแหน่งระหว่างอะตอมน้อยมาก ดังนั้นตามปกติจึงไม่แพร่ด้วยกลไกนี้ และปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การแพร่แบบแทรกที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กลไกการแพร่แบบแทรกที่

2.2.7.1 การแพร่ในสถานะคงตัว (Steady-state diffusion)

การแพร่เป็นกระบวนการที่ต้องใช้เวลา กล่าวคือ ในเชิงมหภาค (Macro) แล้วปริมาณของธาตุที่จะถูกขนส่ง (ขนย้าย) ภายในอีกธาตุหนึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลา โดยมากแล้วเราจำเป็นต้องทราบว่าการแพร่เกิดได้เร็วเท่าไร อัตราการขนถ่ายมวลเป็นเท่าไร อัตราเร็วนี้มักถูกแสดงด้วยค่าฟลักซ์การแพร่ (Diffusion flux: J) ซึ่งมีนิยามคือ มวล (หรือจำนวนอะตอม) M ที่แพร่ผ่านวัสดุของแข็งต่อพื้นที่หน้าตัดในทิศทางตั้งฉากต่อหน่วยเวลา หรือ

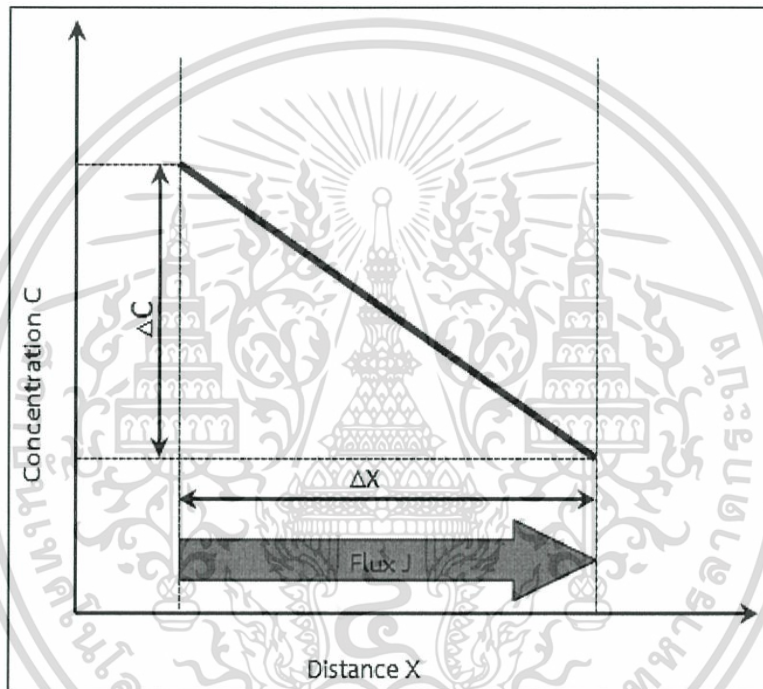
$$J = \frac{M}{At} \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ A คือ พื้นที่ที่มีการแพร่ผ่าน t คือ เวลาที่ใช้ในการแพร่ในรูปแบบเชิงอนุพันธ์ จะเขียนสมการ (2.1) ได้เป็น

$$J = \frac{1}{A} \frac{dM}{dt} \quad (2.2)$$

ในกรณีที่ฟลักซ์การแพร่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาจะเกิดสภาวะคงตัวขึ้น ตัวอย่างหนึ่งของการแพร่ในสภาวะคงตัว ได้แก่ การแพร่ระออมของก๊าซผ่านแผ่นโลหะโดยที่ความเข้มข้น (หรือความดัน) ของก๊าซที่กำลังแพร่ถูกรักษาไว้ให้คงที่ ณ ผิวของแผ่นโลหะทั้งสองด้าน



รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแบบเส้นตรง

เมื่อพล็อตค่าความเข้มข้น (C) เทียบกับตำแหน่งหรือระยะทางภายในของแข็ง (x) จะได้เส้นโค้งที่เรียกว่า รูปแบบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นหรือโพรไฟล์ของความเข้มข้น (Concentration profile) ค่าความชันของเส้นโค้งนี้ ณ จุดหนึ่งๆ เรียกว่า อัตราผลต่างความเข้มข้นหรือเกรเดียนต์ของความเข้มข้น (Concentration gradient)

$$\text{Concentration gradient} = \frac{dC}{dx} \quad (2.3)$$

ในกรณีโพรไฟล์ของความเข้มข้นเป็นเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.6 สามารถเขียนได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Concentration gradient} = \frac{\Delta C}{\Delta x} = \frac{C_A - C_B}{x_A - x_B} \quad (2.4)$$

คณิตศาสตร์ของการแพร่ในสภาวะคงตัวในทิศทางเดียว (x) มีความสัมพันธ์ คือ ฟลักซ์การแพร่แปรผันตรงกับเกรเดียนต์ของความเข้มข้น ดังสมการ

$$J = -D \frac{dC}{dx} \quad (2.5)$$

ค่าคงที่ของการแพร่ผันตรง (D) เรียกว่า สัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ซึ่งมีหน่วยเป็น ตารางเมตรต่อวินาที เครื่องหมายลบในสมการระบุทิศทางของการแพร่ คือ การแพร่จะแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำนั่นเอง สมการ (2.5) บางครั้งเรียกว่า กฎข้อที่หนึ่งของฟิค (Fick's first law)

2.2.7.2 การแพร่ในสภาวะไม่คงตัว (Non-steady-state diffusion)

สภาพการแพร่ที่เกิดขึ้นจริงมักเป็นแบบไม่คงตัว นั่นคือ ฟลักซ์การแพร่และอัตราผลต่างความเข้มข้น ณ จุดหนึ่งในของแข็งมีค่าแปรผันไปตามเวลา และมีการสะสมหรือลดลงของสารที่กำลังแพร่ ณ จุดนั้นเกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขของสภาวะคงตัว สมการ (2.5) ไม่เหมาะสม จึงใช้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (2.6)$$

ซึ่งรู้จักกันในนาม กฎข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้น (ซึ่งต้องตรวจสอบเป็นกรณีๆ ไป ในการแพร่แต่ละสถานการณ์) สมการที่ (2.6) จะถูกทำให้ง่ายขึ้นและเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2.7)$$

ผลเฉลยของสมการนี้ (ความเข้มข้นที่เป็นฟังก์ชันของตำแหน่งและเวลา) จะถูกหาได้ก็ต่อเมื่อมีการระบุเงื่อนไขขอบเขตทางกายภาพที่เหมาะสม ผลเฉลยในกรณีสำคัญที่พบในทางปฏิบัติกรณีหนึ่ง ได้แก่ กรณีที่เรียกว่า ของแข็งแบบเซมิอินฟินิต (Semi-infinite solid) ซึ่งความเข้มข้นที่ผิวของแข็งถูกรักษาไว้ให้คงที่ตลอดเวลา โดยส่วนมากแล้ว แหล่งกำเนิดของอะตอมที่จะแพร่ในของแข็งดังกล่าวมักมาจากเฟสของก๊าซ ซึ่งมีค่าความดันย่อยถูกรักษาไว้ให้คงที่ ณ ผิวของแข็งนั่นเอง นอกจากนี้ยังมีสมมติฐานอื่นอีก ได้แก่

1. ก่อนเกิดการแพร่ สารที่จะแพร่ในของแข็งนั้นมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ

ตลอดขึ้นของแข็ง ด้วยความเข้มข้น C_0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ค่าของ x (ตัวแปรบอกตำแหน่ง) เป็นศูนย์ที่ผิวของแข็ง และเพิ่มค่าขึ้นตามระยะลึกเข้าไปในของแข็ง

3. เวลาเป็นศูนย์ ณ เวลาที่เริ่มมีการแพร่เกิดขึ้น
เงื่อนไขขอบเขตดังกล่าว เขียนได้เป็น

$$\text{ณ. } t = 0, \quad C = C_0 \quad \text{ณ ตำแหน่ง } 0 \leq x \leq \infty$$

$$\text{เมื่อ } t > 0, \quad C = C_s \quad (\text{ความเข้มข้นที่ผิวคงที่}) \quad \text{ณ } x = 0$$

$$C = C_0 \quad \text{ณ } x = \infty$$

เมื่อแทนค่าเงื่อนไขขอบเขตเหล่านี้ลงในสมการ (2.7) จะได้ผลเฉลย คือ

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (2.8)$$

โดยค่า C_x หมายถึง ความเข้มข้นที่ความลึกได้ผิว x ณ เวลา t สำหรับนิยามของเกาเซียนเออร์เรอร์ฟังก์ชัน (Gaussian error function) คือ

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\pi} \int_0^z e^{-y^2} dy \quad (2.9)$$

เมื่อ

$$z = \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \quad (2.10)$$

เกาเซียนเออร์เรอร์ฟังก์ชันหาได้จากการเปิดตารางค่าเออร์เรอร์ฟังก์ชันเทียบกับค่า $x/2\sqrt{Dt}$

ตารางที่ 2.5 ค่าของเออร์เรอร์ฟังก์ชัน

Z	erf(z)	Z	erf(z)	Z	erf(z)
0.00	0.0000	0.55	0.5633	1.30	0.9340
0.03	0.0282	0.60	0.6039	1.40	0.9523
0.05	0.0564	0.65	0.6420	1.50	0.9661
0.10	0.1125	0.70	0.6778	1.60	0.9763
0.15	0.1680	0.75	0.7112	1.70	0.9838
0.20	0.2227	0.80	0.7421	1.80	0.9891
0.25	0.2763	0.85	0.7707	1.90	0.9928
0.30	0.3286	0.90	0.7970	2.00	0.9953
0.35	0.3794	0.95	0.8209	2.20	0.9981
0.40	0.4284	1.00	0.8427	2.40	0.9993

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปตีพิมพ์เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 (ต่อ) ค่าของเออร์เรอร์ฟังก์ชัน

Z	erf(z)	Z	erf(z)	Z	erf(z)
0.45	0.4755	1.10	0.8802	2.60	0.9998
0.50	0.5205	1.20	0.9103	2.80	0.9999

2.2.7.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการแพร่

สารที่แพร่ (Diffusion species) ขนาดของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ จะเป็นดัชนีชี้วัดความเร็วที่อะตอมนั้นๆจะแพร่ไปได้ ทั้งกรณีการแพร่ในตัวเองและการแพร่ระหว่างอะตอมต่างชนิดในระบบโลหะบางระบบ ชนิดของสาร (อะตอม) ที่แพร่เองและตัวโลหะแม่ (โครงสร้างหลัก Host metal) ล้วนมีผลต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ ยกตัวอย่างเช่น การแพร่ในตัวเองและการแพร่ของคาร์บอน (อะตอมต่างชนิด) ในเหล็กแอลฟาที่ 500°C มีความแตกต่างกันมาก ค่า D ของการแพร่ของคาร์บอนมีค่าสูงกว่ามาก ความแตกต่างที่บ่งบอกถึงอัตราเร็วในการแพร่โดยอาศัยช่องว่าง และการแพร่แบบแทรกที่ ดังได้อภิปรายไว้ในข้างต้นแล้ว การแพร่ในตัวเองต้องอาศัยช่องว่าง ขณะที่การแพร่ของคาร์บอนในเหล็กเป็นการแพร่แบบแทรกที่

อุณหภูมิ (Temperature) เนื่องจากการแพร่ในระดับอะตอมเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของอะตอม อุณหภูมิจึงมีผลรุนแรงที่สุดต่อสัมประสิทธิ์และอัตราเร็วของการแพร่ ผลของอุณหภูมิต่อสัมประสิทธิ์การแพร่มักเขียนในรูปของสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation)

2.2.8 เฟสไดอะแกรมของโลหะบัดกรี

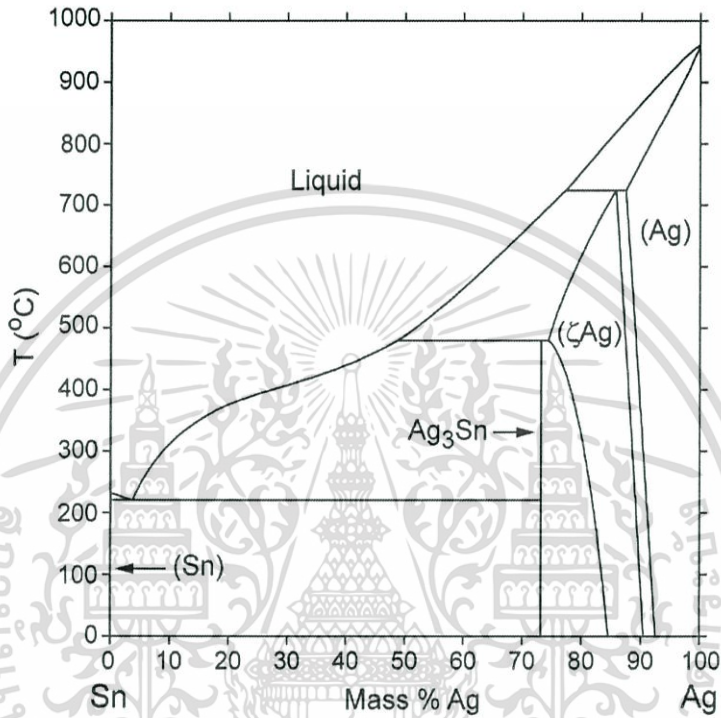
2.2.8.1 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก – เงิน (Sn-Ag)

ปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะผสมดีบุก – เงิน จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 220.3 °C ที่อุณหภูมินี้จะถูกเรียกว่า อุณหภูมิยูเทคติก (Eutectic temperature) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งอุณหภูมิยูเทคติกเป็นอุณหภูมิต่ำที่สุดที่เฟสของเหลวจะยังคงมีอยู่ในระบบ และสถานะที่จุดยูเทคติกนี้เฟสของเหลวจะเปลี่ยนสภาพเป็นเฟสของแข็ง 2 เฟส ในปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะผสมดีบุกและเงิน ซึ่งจะเกิดเฟสของสารประกอบเชิงโลหะ Ag_3Sn และเฟสของ Sn-rich ซึ่งสมการของปฏิกิริยาเคมีดังนี้



โดยในปฏิกิริยาอุทกติกของโลหะผสม ดีบุก - เงิน แต่ละเฟสจะมีส่วนผสมดังนี้

เฟส	Mass %Ag	Mass %Sn
Liquid	3.58	96.42
Ag ₃ Sn	73.17	26.83
Sn	0.07	99.93



รูปที่ 2.7 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก - เงิน [26]

2.2.8.2 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก - ทองแดง (Sn - Cu)

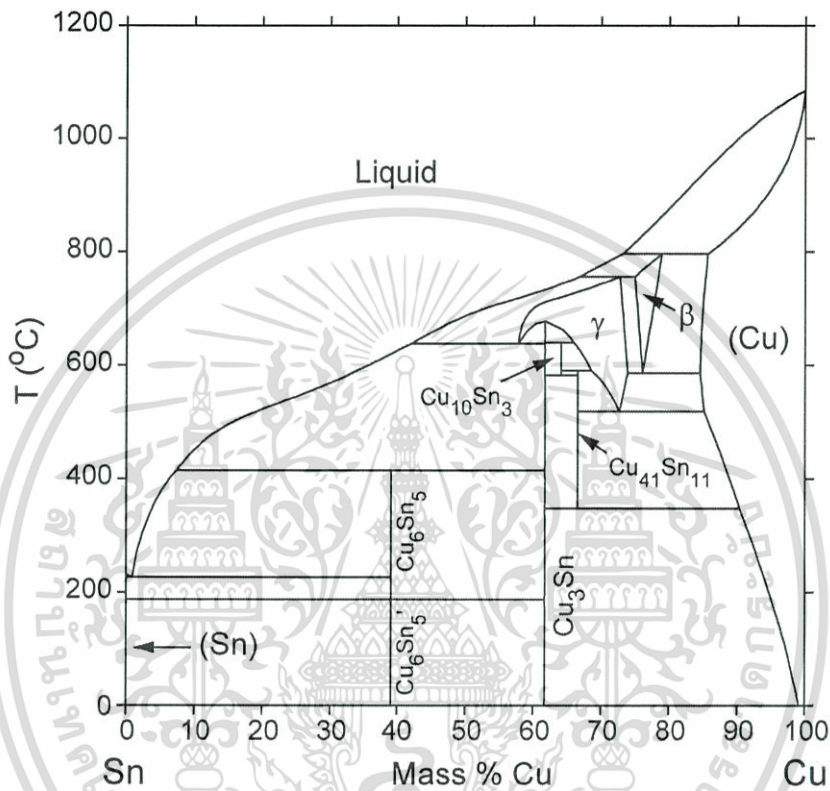
ปฏิกิริยาที่สำคัญประการหนึ่งของโลหะผสมดีบุก - ทองแดง ก็คือปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 226.8°C ซึ่งเป็นปฏิกิริยาอุทกติก ดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยที่จุดอุทกติกนี้ของเหลวจะเปลี่ยนไปเป็นเฟสของแข็ง 2 เฟส ได้แก่ สารประกอบเชิงโลหะ Cu₆Sn₅ กับเฟส Sn-rich โดยสมการของปฏิกิริยาอุทกติกมีดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในปฏิกิริยาอุทกคติของโลหะผสมดีบุก – ทองแดง แต่ละเฟสจะมีส่วนผสมดังนี้

เฟส	Mass %Cu	Mass %Sn
Liquid	0.89	99.11
Cu_6Sn_5	39.07	60.93
Sn	0.01	99.99



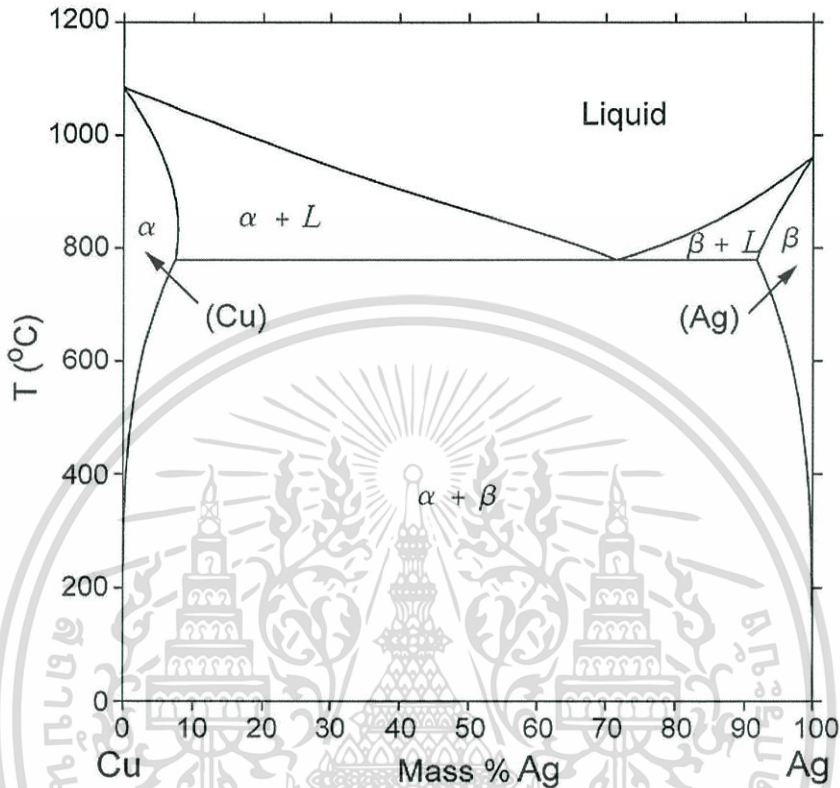
รูปที่ 2.8 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสม ดีบุก – ทองแดง [26]

2.2.8.3 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมเงิน – ทองแดง (Ag – Cu)

โลหะผสมทั้งสองนี้จะไม่สามารถเกิดการละลายในสภาวะของแข็งสมบูรณ์ แม้ว่าโลหะทั้งสองจะมีโครงสร้างผลึกแบบเดียวกัน (FCC) โดยที่โครงสร้างผลึกของเงินสามารถรองรับอะตอมของทองแดงได้ในปริมาณที่น้อย อีกนัยหนึ่งก็คือ มีอะตอมเงินปริมาณน้อยที่ถูกแทนที่ด้วยอะตอมทองแดง และในขณะเดียวกันความสามารถในการละลายก็จะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ สารละลายของแข็งที่มีเงินอยู่มาก (Ag – rich) และสารละลายของแข็งที่มีทองแดงอยู่มาก (Cu- rich) สารละลายของแข็งทั้งสองดังกล่าวถูกจัดว่าเป็นสารละลายของแข็งชนิดละลายได้บางส่วน (Partial solid solution) โดยกำหนดสัญลักษณ์เป็นอัลฟา (α) และเบตา (β) อยู่ด้วยกัน และในบริเวณระหว่างเส้นของแข็งสมบูรณ์ (สารละลายของแข็งทั้งสองเฟส) นี้กับเส้นของเหลวสมบูรณ์จะมีส่วนประกอบของของเหลวอัลฟาและของเหลวเบตา และสิ่งสำคัญอีกสิ่งหนึ่งของเฟสไดอะแกรมระหว่างเงินกับทองแดง ก็คือ ณ จุดที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดการบรรจบกันของเส้นของเหลวสมบูรณกับเส้นของแข็งสมบูรณ ที่ส่วนผสมทองแดง 28.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และที่อุณหภูมิเท่ากับ 780°C โลหะผสมที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งนี้เรียกว่า ยูเทคติก ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมเงิน - ทองแดง [26]

2.2.8.4 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก - เงิน - ทองแดง (Sn - Ag - Cu)

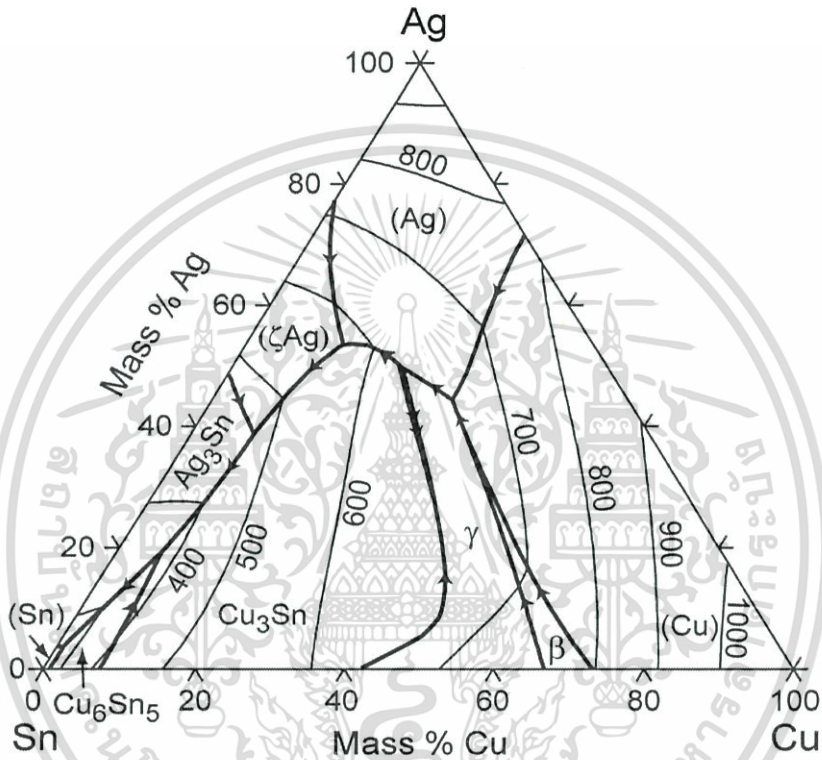
จากเฟสไดอะแกรม 3 ชาติ (Ternary equilibrium diagram) ของโลหะผสมดีบุก - เงิน - ทองแดง ในการศึกษาส่วนผสมที่นำมาทำการศึกษา จะเป็นส่วนผสมที่ใกล้เคียงกับส่วนผสมยูเทคติกของโลหะผสม 3 ชาติ ซึ่งเฟสไดอะแกรมโลหะผสมดีบุก - เงิน - ทองแดง ดังแสดงในรูปที่ 2.10 โดยปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะผสมดีบุก - เงิน - ทองแดง นี้จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 217°C โดยเฟสของเหลวจะเปลี่ยนเป็นเฟสของแข็ง 3 เฟส คือสารประกอบเชิงโลหะ Ag_3Sn , Cu_6Sn_5 และเฟส Sn-rich ซึ่งสมการของปฏิกิริยายูเทคติก มีดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะผสมดีบุก – เงิน – ทองแดง จะมีส่วนผสมดังนี้

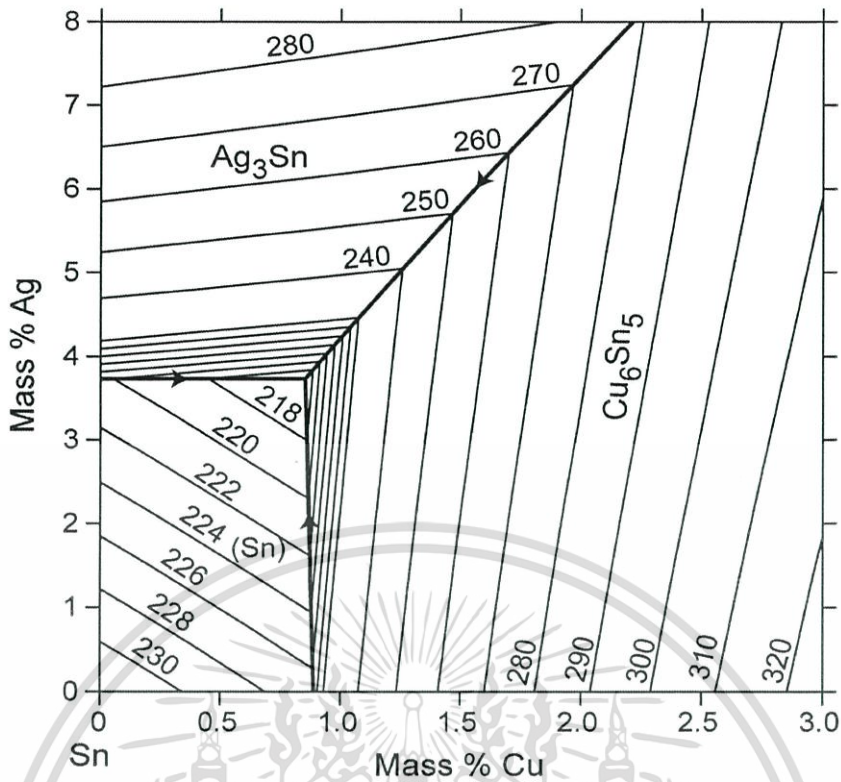
เฟส	Mass %Ag	Mass %Cu	Mass %Sn
Liquid	3.73	0.85	95.42
Ag_3Sn	73.17	0	26.83
Cu_6Sn_5	0	39.07	60.93
Sn	0.07	0	99.93



รูปที่ 2.10 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก – เงิน – ทองแดง

และจากรูปที่ 2.11 ได้แสดงส่วนขยายอัตราส่วนผสมยูเทคติกของโลหะผสมดีบุก – เงิน – ทองแดง ซึ่งอัตราส่วนผสมที่จุดยูเทคติกโดยประมาณ คือ 95.44wt%Sn-3.7wt%Ag-0.86wt%Cu ที่อุณหภูมิ 217°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 ส่วนผสมยูเทคติกของโลหะผสมดีบุก - เงิน - ทองแดง

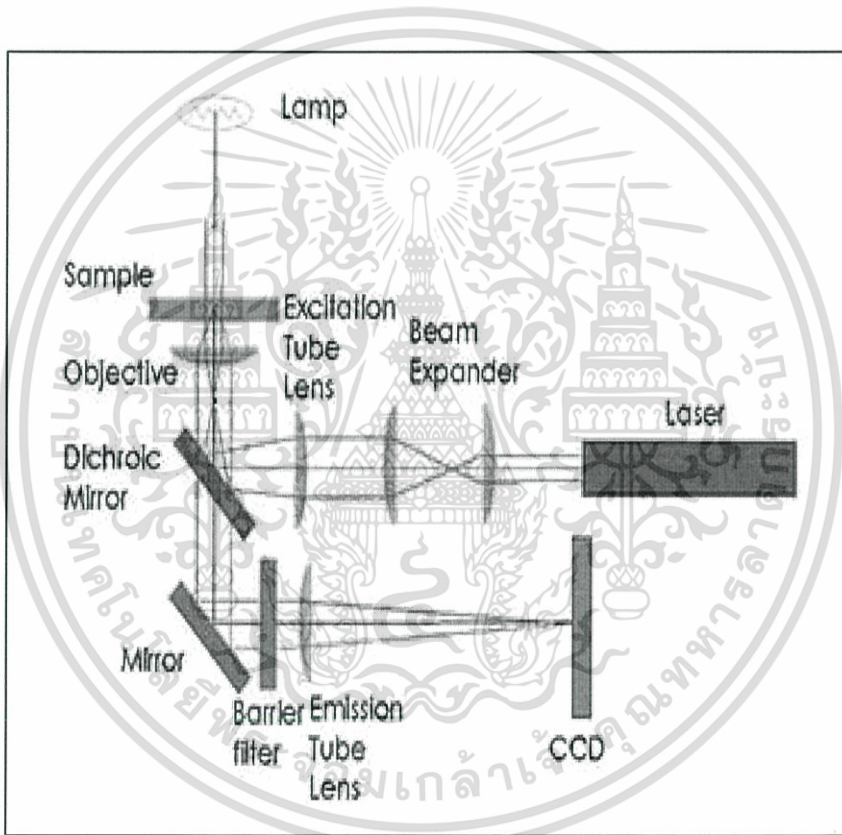
2.2.9 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

สำหรับโครงสร้างบางอย่างมีขนาดใหญ่ในระดับมหภาค (Macroscopic) จึงสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า แต่วัสดุจำนวนมากมีขนาดเกรนในระดับจุลภาค คือ มีขนาดระดับไมโครเมตร หรือเรียกอีกอย่างว่า ระดับไมครอน ซึ่งไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า การศึกษารายละเอียดของวัสดุเหล่านั้น จึงจำเป็นต้องใช้กล้องจุลทรรศน์ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการศึกษาและวิเคราะห์วัสดุ รวมทั้งองค์ประกอบและตำหนิที่มีผลต่อวัสดุ เพื่อให้เข้าใจถึงความเกี่ยวข้องระหว่างโครงสร้างและคุณสมบัติ ทำให้สามารถทำนายคุณสมบัติของวัสดุได้จากโครงสร้างจุลภาค อย่างไรก็ตามก่อนการตรวจสอบในระดับจุลภาคต้องมีการเตรียมพื้นผิวของตัวอย่างทดสอบ ซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญและต้องทำอย่างระมัดระวังมากในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค โดยการขัดกระดาษทรายและผงขัดที่มีขนาดเล็กมาก หลังจากนั้นกัดผิว (Etching) ด้วยสารเคมีที่เหมาะสมจึงสามารถมองเห็นโครงสร้างจุลภาคได้

2.2.9.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope, OM)

กล้องจุลทรรศน์แบบแสงเป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาค โดยใช้แสงและระบบกำเนิดแสงเป็นพื้นฐาน กล้องประเภทนี้สามารถตรวจสอบโครงสร้างได้เฉพาะที่พื้นผิวเท่านั้นโดยการสะท้อนแสง สำหรับวัสดุทึบแสง เช่น โลหะทุกประเภท เซรามิก และพอลิเมอร์บางชนิด ความดำของภาพแตกต่างกันเกิดจากความสามารถในการสะท้อนแสงที่แตกต่างกันในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณต่างๆ การตรวจสอบแบบนี้เรียกว่า เมทัลโลกราฟี (Metallography) ชิ้นงานที่ผ่านการขัดจนเรียบให้สะท้อนแสงได้เหมือนกระจก หลังจากกัดด้วยสารเคมีแล้วนำมาตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ซึ่งการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงจะแสดงในรูปที่ 2.12 จะมองเห็นโครงสร้างจุลภาค ที่เป็นเช่นนี้เพราะเกรนมีทิศทางการเรียงตัวของอะตอมที่แตกต่างกัน จึงมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาต่างกัน แสงที่สะท้อนออกมาจากผิวของเกรนที่มีทิศทางการเรียงตัวของอะตอมที่แตกต่างกันหลังผ่านการกัดผิวด้วยความเงาและเนื้อผิวที่เห็นในแต่ละเกรนจะขึ้นอยู่กับการสะท้อนแสงของเกรนนั้นๆ หลังการกัดผิวที่ขอบเกรนเกิดร่องเล็กขึ้น เนื่องจากอะตอมที่บริเวณขอบเกรนมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยามากกว่าบริเวณอื่นๆ จึงถูกกัดออกไปมากกว่าบริเวณอื่นภายในเกรน โดยร่องขนาดเล็กนี้สามารถมองเห็นได้เนื่องจากการสะท้อนแสงที่แตกต่างจากบริเวณพื้นเกรน



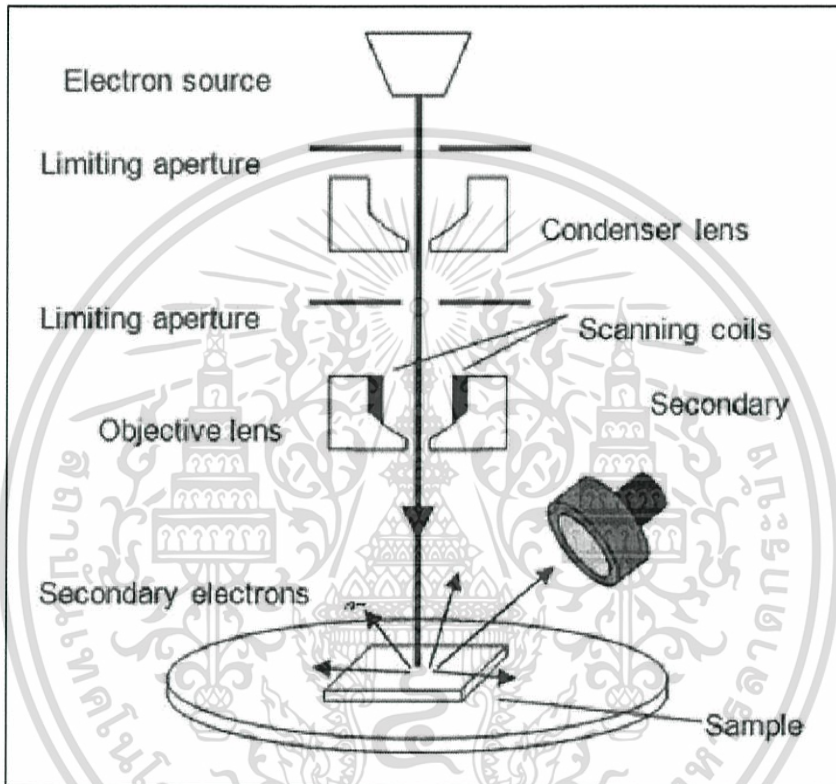
รูปที่ 2.12 แผนภาพแสดงการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

2.2.9.2 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) เป็นอุปกรณ์ซึ่งยิงลำอิเล็กตรอนไปตกกระทบบนเป้าหมายซึ่งเป็นชิ้นงานตัวอย่าง จะรวบรวมและแสดงสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic signals) ที่ปล่อยออกมา โดยชิ้นงานที่ใช้ทำเป็นเป้าไม่จำเป็นต้องผ่านการขัดผิว แต่จะต้องสามารถนำไฟฟ้าได้ ถ้าวัสดุไม่นำไฟฟ้าจะต้องเคลือบผิวด้วยโลหะหรือวัสดุที่นำไฟฟ้า เช่น การเคลือบทองคำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือคาร์บอน รูปที่ 2.13 แสดงรายละเอียดและหลักการทำงาน โดยปืนอิเล็กตรอนจะผลิตลำอิเล็กตรอน (Electron beam) และควบคุมให้พุ่งมาตกกระทบบจุดเล็กๆบนเป่าตัวอย่าง โดย Scanning coils จะปล่อยให้ลำอิเล็กตรอนแยกภาพบนพื้นผิวชิ้นงานตัวอย่าง ลำอิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับด้วยมุมเล็กๆ (Low-angle back-scattered electrons) จะทำอันตรกริยากับส่วนที่นูนของพื้นผิว และทำให้เกิดลำอิเล็กตรอนกระเจิงกลับที่สอง (Secondary back-scattered electrons) เพื่อสร้างสัญญาณของอิเล็กตรอนซึ่งทำให้เกิดภาพ สามารถขยายได้ถึง 500,000 เท่า



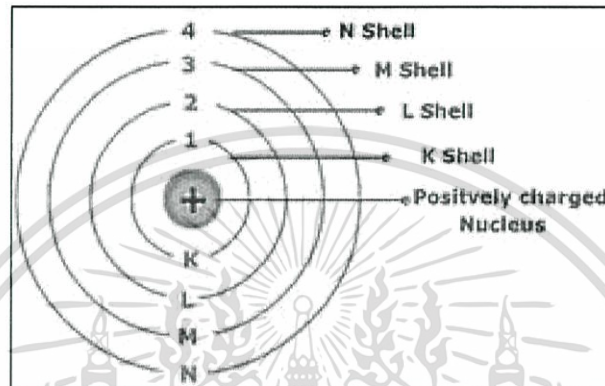
รูปที่ 2.13 แผนภาพแสดงการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

2.2.9.3 การวิเคราะห์ Energy dispersive X-ray, EDX

การวิเคราะห์ EDX ใน SEM เป็นเครื่องมือวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ โดยใช้หลักการยิงรังสีเอ็กซ์ (X-ray) ไปยังเป่าชิ้นงานตัวอย่างและวัดระดับการกระจายของพลังงาน (Energy dispersive) ที่สะท้อนออกมาในรูปรังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence) จะทำให้ทราบว่าตัวอย่างมีธาตุอะไรอยู่บ้าง ในปริมาณเท่าไร ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งบรรยากาศปกติ สุญญากาศ และก๊าซฮีเลียม เพื่อความหลากหลายในการประยุกต์ใช้งาน สำหรับรังสีเอ็กซ์ คือ โฟตอน (photon) ที่มีพลังงานมากกว่ารังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) แต่น้อยกว่ารังสีแกมมา (Gamma rays) รังสีเอ็กซ์มีพลังงานต่ำสุดที่ประมาณ 10 eV และสูงสุดประมาณ 100 keV ซึ่งการมีอยู่ของอิเล็กตรอนในอะตอมในสภาวะการยึดเหนี่ยว โดยแบบจำลองอะตอมของโบร์และจากกลศาสตร์ควอนตัมมีสมมติฐานว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนมีวงโคจรและตำแหน่งที่แน่นอนอยู่รอบนิวเคลียส จากหลักการควอนตัมพลังงานของอิเล็กตรอนมีค่าเฉพาะ คือ อิเล็กตรอนสามารถมีพลังงานในบางค่าเท่านั้น และระดับพลังงานของอิเล็กตรอนสามารถเปลี่ยนแปลงไปสู่ระดับชั้นพลังงานที่ประกอบด้วยระดับชั้นพลังงานย่อย (sub shell) โดยเลขควอนตัมจะบ่งบอกระดับชั้นพลังงานหลัก (Shell) ถูกแสดงด้วยเลขควอนตัมหลัก (Principal quantum number) n เป็นเลขจำนวนเต็มเริ่มจากหนึ่ง หรือบางครั้งแสดงด้วยอักษร K, L, M แทนเลข 1, 2 และ 3 ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แบบจำลองอะตอมของโบร์

แบบจำลองอะตอมของโบร์จะเกิดรังสีเอ็กซ์ปล่อยออกมาโดยอะตอมหลังเกิดไอออนเมื่อปล่อยรังสีเอ็กซ์จากแหล่งพลังงานมากระทบเป้าตัวอย่างและจะเกิดการดูดซับรังสีเอ็กซ์ของตัวอย่าง ที่ถูกกำหนดโดยปริมาณของสัมประสิทธิ์การดูดซับ (Absorption coefficient) (cm^2/g) โดย μ/p ซึ่งเป็นไปตามกฎของเบียร์ (Beer's law)

$$I = I_0 e^{-\left(\frac{\mu}{\rho} \rho x\right)} \quad (2.14)$$

เมื่อ I คือ ความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่มากระทบตัวอย่าง I_0 คือ ความเข้มเริ่มต้นของรังสีเอ็กซ์ ρ คือ ความหนาแน่นของตัวอย่าง และ x คือ ความหนาของวัสดุที่รังสีเอ็กซ์ผ่าน โดยปริมาณสัมประสิทธิ์การดูดซับจะเป็นฟังก์ชันของพลังงานที่เกี่ยวข้องกับรังสีเอ็กซ์ และคุณลักษณะเฉพาะทางเคมีของวัสดุ สำหรับอัตราการสูญเสียพลังงานของลำแสง (Beam) กับความลึกจะแสดงโดยสมการของ Bethe's

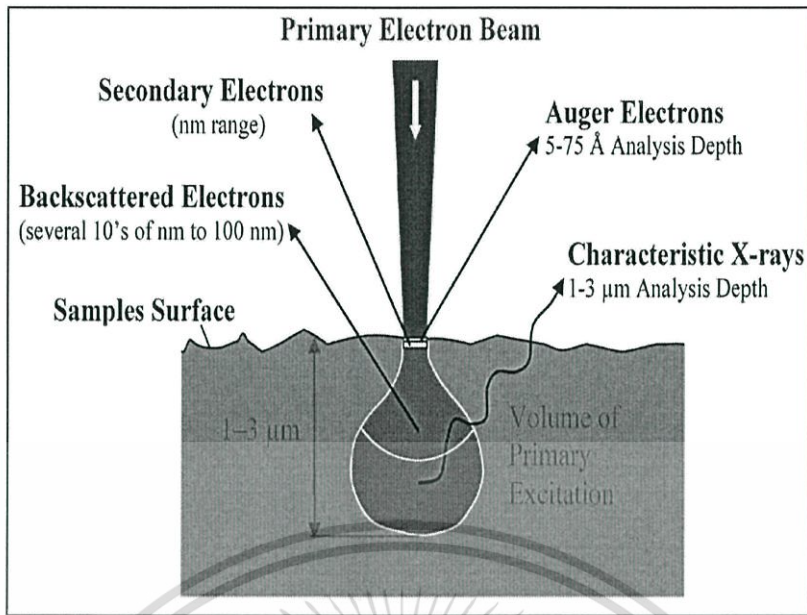
$$\frac{dE}{dx} = -7.85 \left(\frac{Z\rho}{AE_m} \right) \ln \left(\frac{1.66E}{J} \right) \quad (2.15)$$

เมื่อ E คือ พลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอน Z คือ จำนวนอะตอมเฉลี่ย A คือน้ำหนักของอะตอม และ J คือ จำนวนไอออนเฉลี่ยของธาตุในตัวอย่าง

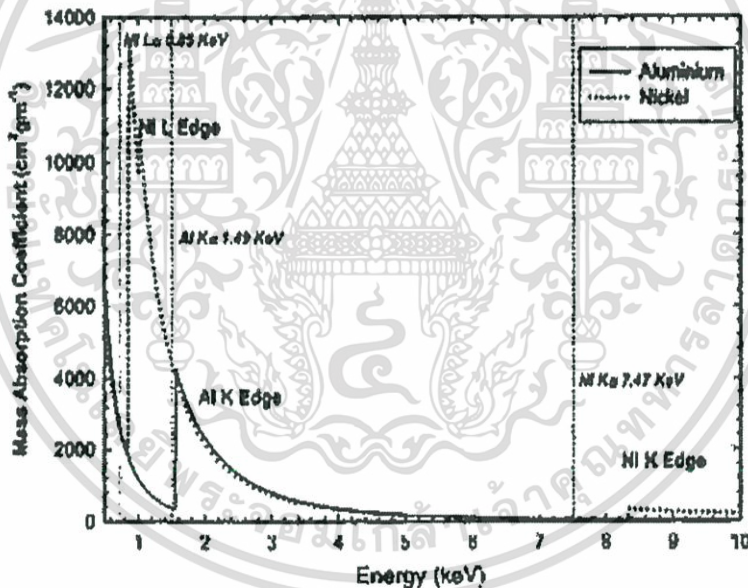
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ต้องมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ซึ่งเป็นจุดที่ลำอิเล็กตรอนมาตกกระทบไปถึงการตรวจจับและรวบรวมจากสเปกตรัม (Spectrums) สำหรับจำนวนอะตอมที่มีความแตกต่างกัน ตัวอย่างการวิเคราะห์โลหะผสม Ni-Al โดย Ni K α line พลังงานจะอยู่ประมาณ 7.48 keV และ L line ประมาณที่ 0.85 keV ถึงแม้ว่า Al K line มีพลังงานประมาณ 1.49 keV การเลือกพลังงานอิเล็กตรอนสำหรับการวิเคราะห์มีความเข้มข้นประมาณ 20 keV เมื่อลำอิเล็กตรอนแทรกซึมไปยังพื้นผิวของตัวอย่าง แรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการกระตุ้นรังสีเอ็กซ์ของ Ni K แต่สำหรับการกระตุ้น Al K หรือรังสีเอ็กซ์ของ Ni L ขณะที่การกระจายของอิเล็กตรอนผ่านตัวอย่างและพลังงานถูกลดลง กระบวนการรังสีเอ็กซ์ของ Ni K จะลดลงกับความลึก อย่างไรก็ตามกระบวนการรังสีเอ็กซ์ของ Al K และ Ni L เพิ่มขึ้นเพราะพลังงานลำแสงเข้าใกล้พลังงานที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการของรังสีเอ็กซ์นั้นๆ ในที่สุดกระบวนการรังสีเอ็กซ์ของ Ni K จะสิ้นสุดทันทีที่พลังงานของลำแสง เพิ่มขึ้นประมาณ 8 keV แต่กระบวนการรังสีเอ็กซ์ของ Al K และ Ni L จะยังคงเพิ่มขึ้นสำหรับบางส่วนของที่ลึกมาก กระบวนการจะยังคงมีรังสีเอ็กซ์ที่สูงสุดของกระบวนการและค่อนข้างจะลดลงอย่างรวดเร็วถึงศูนย์

สำหรับตัวอย่างถ้าความต่างศักย์ลำแสงเป็น 10 keV รังสีเอ็กซ์ของ Ni K เกิดขึ้นเล็กน้อย และกระบวนการของ Al K และรังสีเอ็กซ์ของ Ni L จะน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของความลึก เพราะพลังงานสูงอิเล็กตรอนสูญเสียพลังงานช้ามากกว่าพลังงานต่ำ เช่น ช่วงของ 10 keV อิเล็กตรอนที่น้อยกว่าครึ่งหนึ่งของช่วง 20 keV ในการอธิบายนี้จึงมีการยอมรับถึงการเสียพลังงานอย่างราบเรียบของลำอิเล็กตรอน (เป็นที่ยอมรับถึงสมการ Bethe's สำหรับตัวอย่าง) อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าสมการของ Bethe's อาจจะทำนายพลังงานของอิเล็กตรอนอย่างแม่นยำ บางครั้งก็ไม่สามารถประมาณพลังงานที่กระจายของอิเล็กตรอนที่ผ่านเข้าไปสัมพันธ์กับระยะห่าง โดยปราศจากการสูญเสียพลังงานจริงและอื่นๆที่อยู่อย่างกระจัดกระจายกลับไปสู่พื้นผิวการเพิ่มความเข้มข้นของอิเล็กตรอน แต่การเพิ่มขึ้นของพลังงานที่กระจายของอิเล็กตรอน บางส่วนของอิเล็กตรอนสามารถกระตุ้นรังสีเอ็กซ์ของ Ni K ในการตรวจจับรังสีเอ็กซ์เพื่อเกิดเป็นสเปกตรัม ดังแสดงในรูปที่ 2.15 แสดงการดูดซับรังสีเอ็กซ์ของตัวอย่าง และรูปที่ 2.16 แสดงสัมประสิทธิ์การดูดซับสำหรับ Ni และ Al ขณะเป็นฟังก์ชันของพลังงานรังสีเอ็กซ์บนช่วงเส้นตรงกับพลังงานของ Ni K, Al และ Al line ที่แสดงรายละเอียดตัวแปรจากสมการของ Heinrich's สำหรับการสะท้อนกลับของ NiAl เป็นสาเหตุให้การตรวจจับรังสีเอ็กซ์ทำมุม 40 องศากับระนาบ พิจารณาผลของรังสีเอ็กซ์ของ Al K α เกิดที่ 1 μm ใต้พื้นผิวและเริ่มเคลื่อนที่ไปสู่การตรวจจับเมื่อเปลี่ยนไปเป็น 1.6 μm



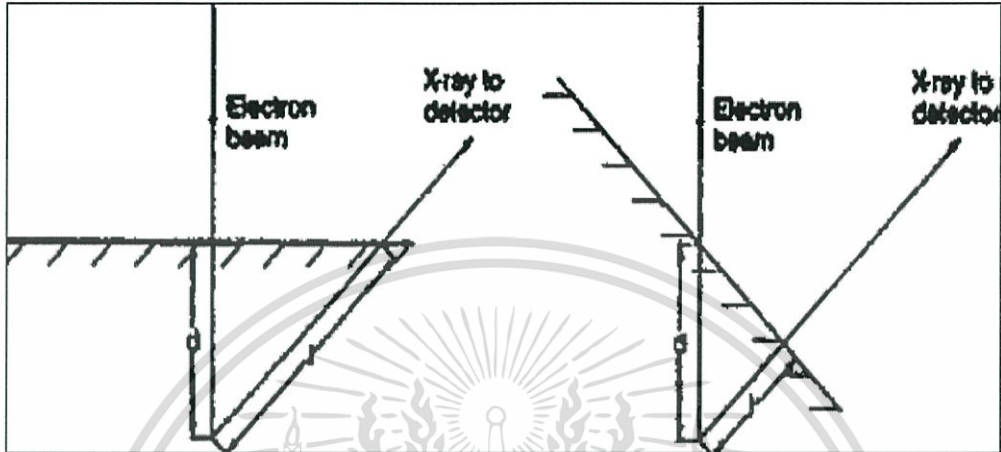
รูปที่ 2.15 ตำแหน่งปฏิกิริยาที่แตกต่างของการเกิดรังสีเอ็กซ์



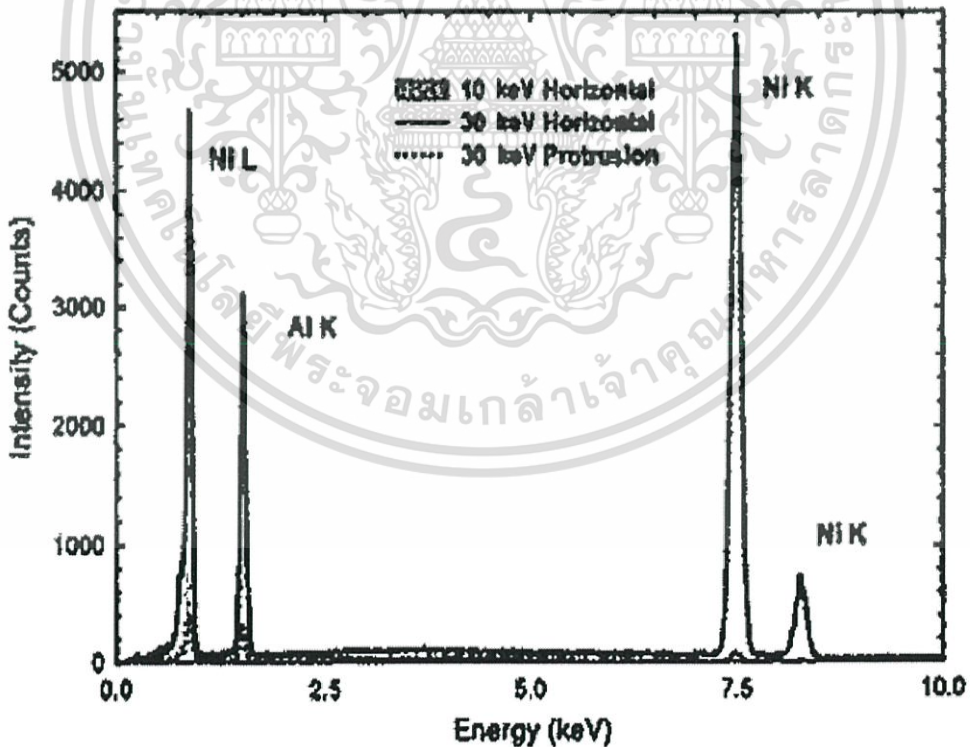
รูปที่ 2.16 ปริมาณสัมประสิทธิ์การดูดซับรังสีเอ็กซ์ของ Ni และ Al ขณะเป็นฟังก์ชันของพลังงานรังสีเอ็กซ์

ปริมาณสัมประสิทธิ์การดูดซับโดยตัวแปรจากสมการของ Heinrich's สามารถคำนวณรังสีเอ็กซ์ได้ประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์ของการมาถึงที่พื้นผิว ดังนั้นที่เกิดขึ้นจากการตรวจจับความแตกต่างต่างกับรังสีเอ็กซ์ของ Ni K α ที่เกิดขึ้นที่ความลึกเท่ากันมีความน่าจะเป็นของการตรวจจับ 94 เปอร์เซ็นต์ เช่นเดียวกับรังสีเอ็กซ์ของ Ni L ที่ 0.85 keV ที่ความลึกเท่ากันมีความน่าจะเป็นของการตรวจจับ 17 เปอร์เซ็นต์ สำหรับบางจุดมีผลกระทบของการดูดซับ เช่น พื้นผิวตัวอย่างที่มีลักษณะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอียงเพราะระยะความยาวของรังสีเอ็กซ์จะขึ้นอยู่กับความเอียงของพื้นผิว ดังแสดงในรูปที่ 2.17 สำหรับรูปที่ 2.18 แสดงตัวอย่างผลกระทบที่รุนแรงของ Ni-49.3 at.%Al จากรูปได้รับสเปกตรัมที่พลังงาน (Beam) 30 keV จากพื้นผิวที่มีลักษณะราบเรียบกับการได้รับสเปกตรัมจากส่วนที่ยื่นออกมาจากพื้นผิว



รูปที่ 2.17 ลักษณะพื้นผิวที่มีผลต่อระยะรังสีเอ็กซ์



รูปที่ 2.18 ผลของการวิเคราะห์ EDX ใน SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่เป็นพื้นราบที่ 10 keV สิ่งสำคัญของการไม่สะท้อนกลับของรังสีเอ็กซ์ในอะตอมของวัสดุ คือ การเกิดช่องว่างในโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดรังสีเอ็กซ์จากอะตอม ซึ่งต้องการช่วงเวลา โดยความเข้มข้นของบางเส้นในสเปกตรัมของรังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์สามารถปรับให้ชัดเจนได้ โดยทั่วไปฟลูออเรสเซนซ์จะมีความเข้มข้นลดลงจากความแตกต่างระหว่างพลังงานของรังสีเอ็กซ์และพลังงานการเกิดไอออน (ionization energy) ของช่องว่าง ก่อให้เกิดรังสีเอ็กซ์ที่เคลื่อนไปสู่การตรวจจับ สามารถเกิดเป็นฟลูออเรสเซนซ์ในช่วงเวลานั้น และรังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์ที่ปล่อยออกมาจะถูกตรวจจับและนำไปวิเคราะห์ผลจากการสะท้อนกลับจากตัวอย่าง

จากตัวอย่างแสดงให้เห็นรังสีเอ็กซ์ของ Ni K ในปริมาณมากนั้นจะเป็นทิศทางการเคลื่อนที่สู่พื้นผิวตัวอย่างที่สะท้อนกลับ อย่างไรก็ตามรังสีเอ็กซ์ของ Ni K ที่ผ่านไปสู่ตัวอย่างก่อให้เกิดไอออนของ Al L หรือ Ni L และบางครั้งรังสีเอ็กซ์เกิดโดยบังเอิญ (ผลที่ตามมาของรังสีเอ็กซ์ของ Ni K มีความกว้างตามระยะห่าง) เพราะฉะนั้นมีผลทำให้ Ni L หรือ Al สูง ในกรณีของรังสีเอ็กซ์ของ Al ถึงแม้จะมีความแตกต่าง จึงเป็นการดูดซับโดยเปรียบเทียบความเข้มข้นโดย Ni มีระยะที่สั้นเนื่องจากเปรียบเทียบกับความลึกที่เกิดขึ้นในตัวอย่าง รังสีเอ็กซ์มีทุกทิศทางและมีทั่วทั้งตัวอย่าง ทำให้เกิดรังสีนำไปสู่การอธิบายในกระบวนการสเปกตรัม



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

การเตรียมชิ้นงานจะใช้แผ่นทองแดงบริสุทธิ์ 99.99% ขนาด 30x30x0.35 มิลลิเมตร เป็นโลหะพื้นในการบัดกรี ซึ่งมีความหยาบผิว R_a 0.06 ไมโครเมตร และโลหะบัดกรีจะทำการหลอมในแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิมให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.50 มิลลิเมตร หนา 1.60 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน JIS Z 3198-3 [24] ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ใช้อ่างดีบุกเหลว Solder bath ในการให้ความร้อนซึ่งเป็นอ่างชนิดที่ควบคุมอุณหภูมิได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยลักษณะการหลอมละลายของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดงจะคล้ายกับตัวอย่างในรูปที่ 3.3 ที่แสดงก่อนและหลังการทดลอง และฟลักซ์ที่ใช้ในการเชื่อมประสาน คือ AMR N-3125 ซึ่งมีฤทธิ์กัดกร่อนปานกลาง ดังแสดงในรูปที่ 3.4

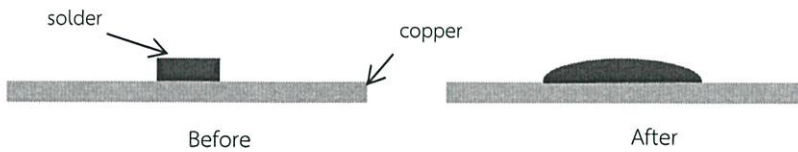


รูปที่ 3.1 ชิ้นงานตัวอย่าง

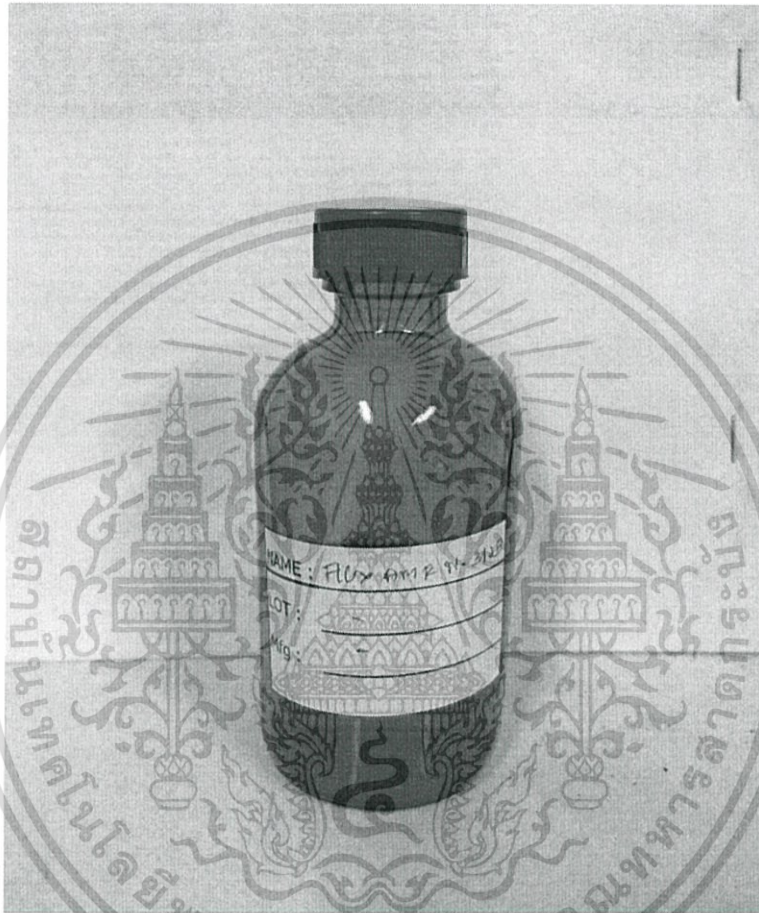


รูปที่ 3.2 อ่างดีบุกหลอมเหลว (Solder bath)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ลักษณะชิ้นงานก่อนและหลังทดสอบการกระจายตัว

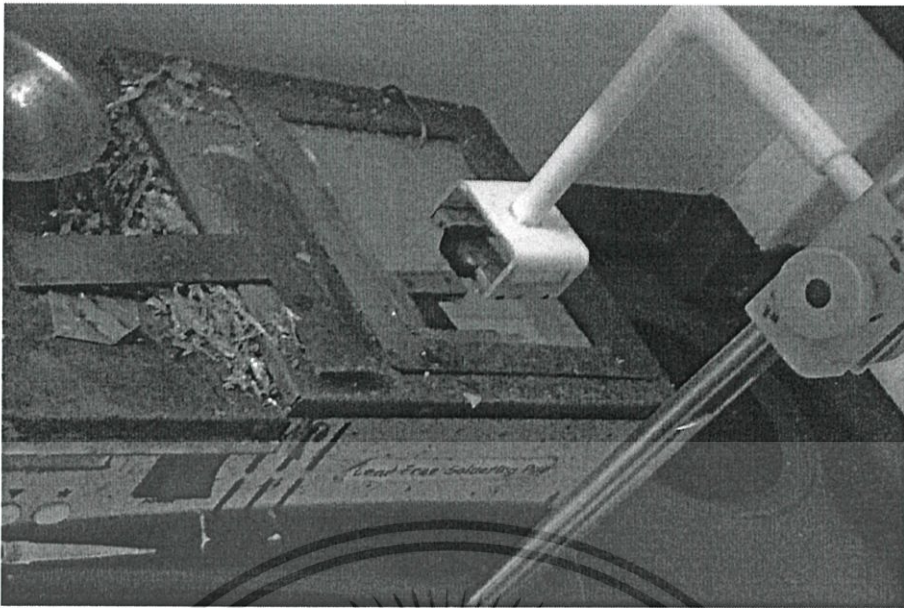


รูปที่ 3.4 ฟลักซ์บัดกรี

3.2 ขั้นตอนการทดลอง

วางชิ้นงานโลหะบัดกรีลงบนแผ่นทองแดงแล้วใส่ฟลักซ์ชนิด AMR N-3125 ปริมาณ 0.3 มิลลิลิตร ลงบนแผ่นทองแดง และวางแผ่นทองแดงบนฐานรอง ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยให้อุณหภูมิในอ่างดีบุกหลอมเหลว 260°C ใช้เวลาหลอมโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดง 30 วินาที [24] นับจากโลหะบัดกรีเริ่มหลอมเหลว จากนั้นยกชิ้นงานออกและปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง แล้วล้างฟลักซ์ออกด้วยโพรพานอล (Propanol)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 การทดสอบการกระจายตัว

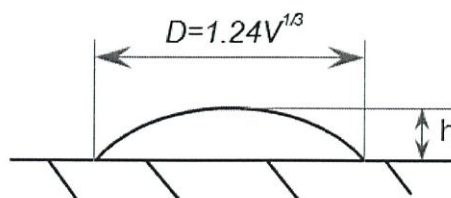
ในการวัดการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดง ใช้วิธีการวัดค่าความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรีที่แข็งตัว โดยใช้ไมโครมิเตอร์และโปรแกรม Image-pro Express แล้วนำมาคำนวณตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor: S_f) ดังสมการที่ 3.1

$$S_f = \frac{D-h}{D} \times 100 \quad (3.1)$$

เมื่อ h คือ ความสูงของโลหะบัดกรีที่แผ่กระจาย และ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางโลหะบัดกรีที่ถูกทดสอบ เมื่อ

$$D = 1.24V^{1/3} \quad (3.2)$$

โดย V คือปริมาตรของโลหะบัดกรีที่ใช้ทดสอบ และรูปที่ 3.6 แสดงรูปร่าง ความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดง



รูปที่ 3.6 ความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางโลหะบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณหาอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio: S_r) ได้จากสมการที่ 3.3

$$S_r = \frac{\text{Plan area of spread on the substrate surface}}{\text{Plan area of the original pellet}} \quad (3.3)$$

ความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดงยังสามารถวัดได้โดยใช้ค่ามุมสัมผัส (Contact angle) ดังแสดงในสมการที่ 3.4 และในรูปที่ 3.7 แสดงตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการคำนวณหาค่ามุมสัมผัส

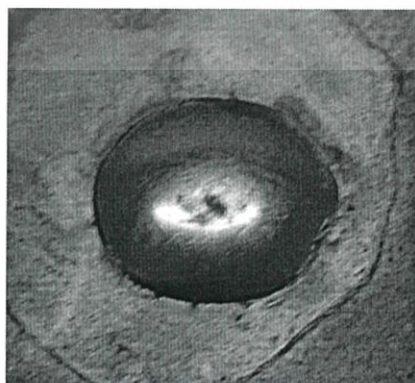
$$\sin \theta = \frac{2}{(A/h + h/A)} \quad (3.4)$$

เมื่อ θ คือ มุมสัมผัส A คือ รัศมีของโลหะบัดกรี และ h คือ ความสูงของโลหะบัดกรี



รูปที่ 3.7 มุมสัมผัสบนแผ่นทองแดง

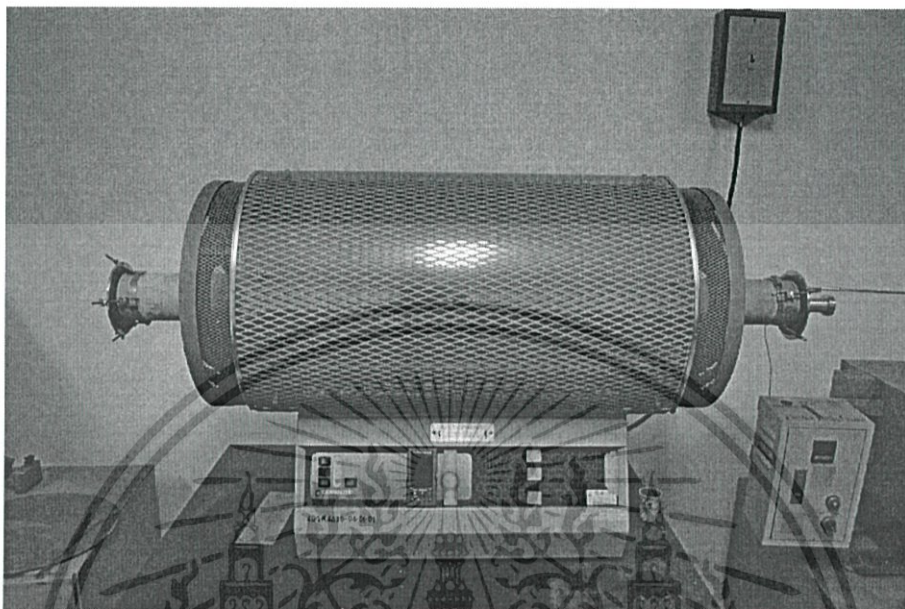
ในการวัดค่าการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดง จะใช้ซอฟต์แวร์โปรแกรม Image-pro Express ช่วยในการวัดและคำนวณหาพื้นที่การกระจายตัวของโลหะบัดกรีหลังการหลอมบนแผ่นทองแดง ซึ่งลักษณะชิ้นงานหลังการทดสอบ แสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ลักษณะการแผ่กระจายของชิ้นงานทดสอบ

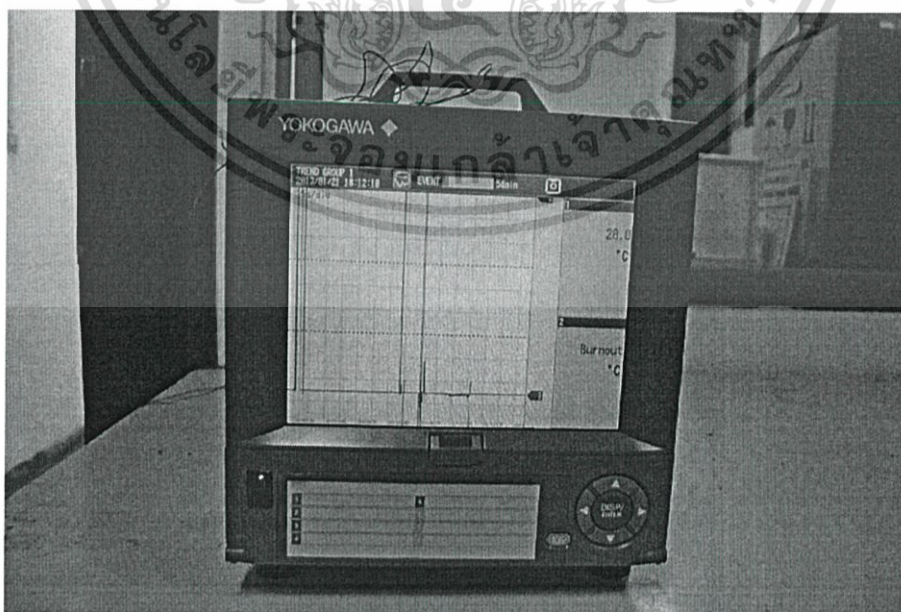
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นนำชิ้นงานทดสอบไปบ่มในเตาแบบท่อ (Tube furnace) ยี่ห้อ CARBOLITE รุ่น STF 15/450 ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ที่อุณหภูมิ 100, 135 และ 170°C ตามลำดับ โดยใช้เวลาบ่ม 1, 10, 100 และ 1,000 ชั่วโมง หลังการบ่มปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ



รูปที่ 3.9 เตาอบแบบท่อ

สำหรับการตรวจสอบอุณหภูมิตลอดระยะเวลาการบ่ม จะใช้เครื่องเก็บข้อมูลยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น DAQ STATION DX 100 ในการบันทึกข้อมูลตลอดระยะเวลาการบ่ม ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 เครื่องบันทึกข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

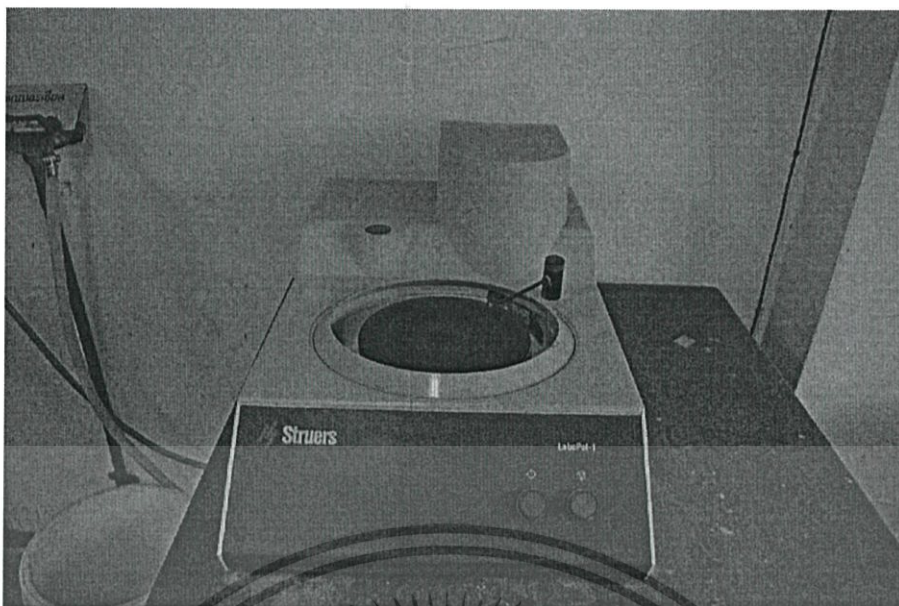
3.3.1 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเบื้องต้นโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง

ในเบื้องต้นต้องทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน เพื่อตรวจสอบเกี่ยวกับลักษณะโครงสร้าง การกระจายตัว รวมถึงลักษณะและขนาดของเกรน เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคมีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติทางกลของรอยต่อบัดกรี โดยนำชิ้นงานที่เย็นตัวหลังจากการทดสอบมาทำการตัดด้วยเครื่องตัดแบบแรงโน้มถ่วงยี่ห้อ Struers รุ่น Minitom ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ตัดชิ้นงานบริเวณเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรีที่หลอมบนแผ่นทองแดง



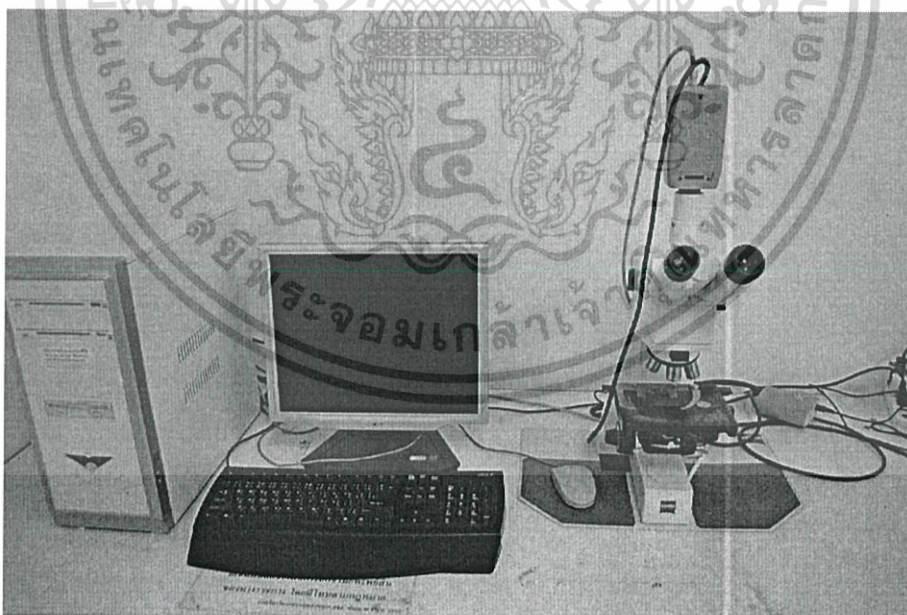
รูปที่ 3.11 เครื่องตัดแบบแรงโน้มถ่วง

นำชิ้นงานไปขึ้นรูปตัวเรือนด้วยการหล่อเรซินและขัดผิวหน้าด้วยกระดาษทรายที่มีความละเอียดตั้งแต่เบอร์ 600, 800, 1,000, 1,200 และ 4,000 ตามลำดับ แล้วจึงขัดบนผ้าสักหลาดด้วยผงอะลูมินา (Al_2O_3) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 และ 0.3 ไมโครเมตร โดยใช้เครื่องขัดยี่ห้อ Struers รุ่น LaboPol-1 ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 เครื่องขัดชิ้นงานโลหะ

หลังจากขัดผิวหน้าชิ้นงานเรียบร้อยแล้วนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคในเบื้องต้นด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง Optical microscope ยี่ห้อ Zeiss รุ่น Axiolab ซึ่งมีกำลังขยายสูงสุดอยู่ที่ 500 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 3.13

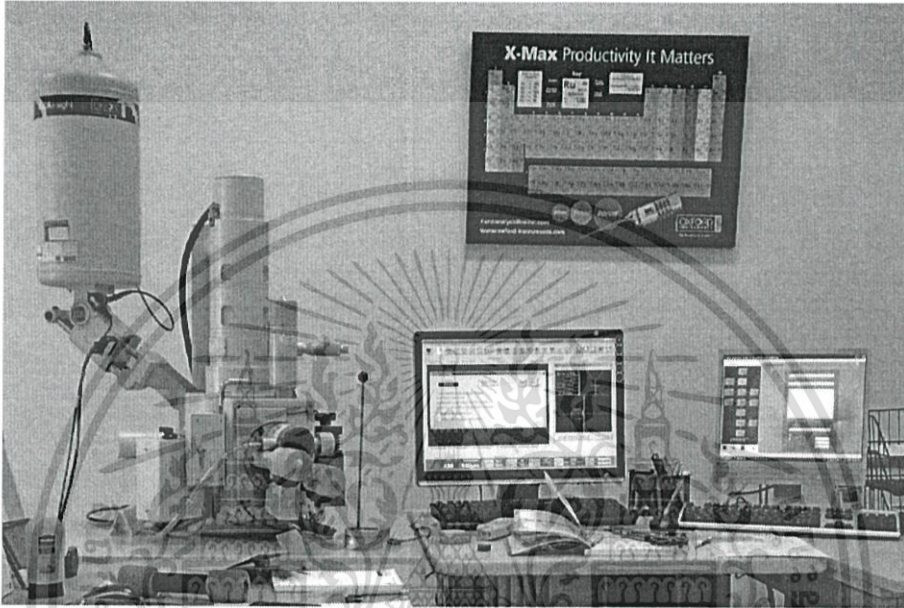


รูปที่ 3.13 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมี

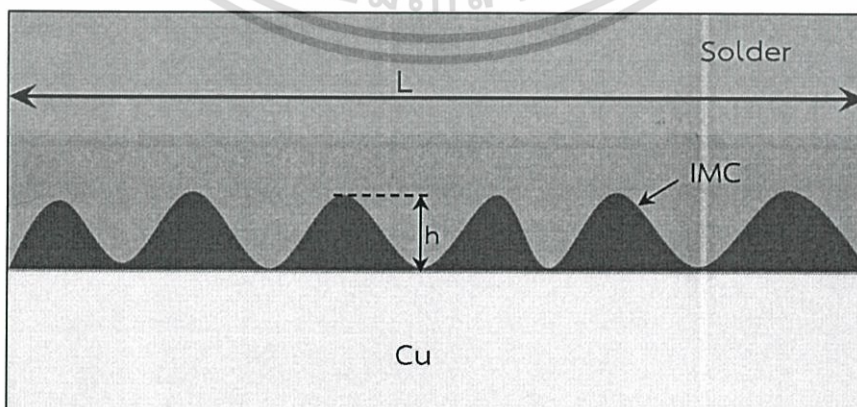
ในการศึกษาชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นและองค์ประกอบทางเคมี จะแยกศึกษาทั้งก่อนและหลังการบ่มโดยใช้ Scanning electron microscope (SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM6380LV ดังแสดงในรูปที่ 3.14 และใช้ Energy dispersive X-ray (EDX) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM6380LV ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ



รูปที่ 3.14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนและ Energy dispersive X-ray (EDX)

3.3.3 วิธีการวัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

การวัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นบนรอยต่อบัดกรี จากการทำ SEM ของแต่ละตัวอย่างซึ่งโปรแกรมที่ใช้ในการวัด คือ Image-Pro Express ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.15 [11]



รูปที่ 3.15 การวัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะคำนวณจากพื้นที่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในแต่ละชั้นหารด้วยความยาวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ซึ่งจะคำนวณจากสมการ 3.5

$$h = \frac{A}{L} \quad (3.5)$$

เมื่อ h คือ ความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (μm) A คือ พื้นที่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (μm^2) และ L คือ ความยาวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (μm) สำหรับการวัดความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจะทำการแยกวัดแต่ละชั้นที่เกิดขึ้นในกรณีที่เกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะมากกว่าสองชั้นที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะบัดกรีกับแผ่นทองแดง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

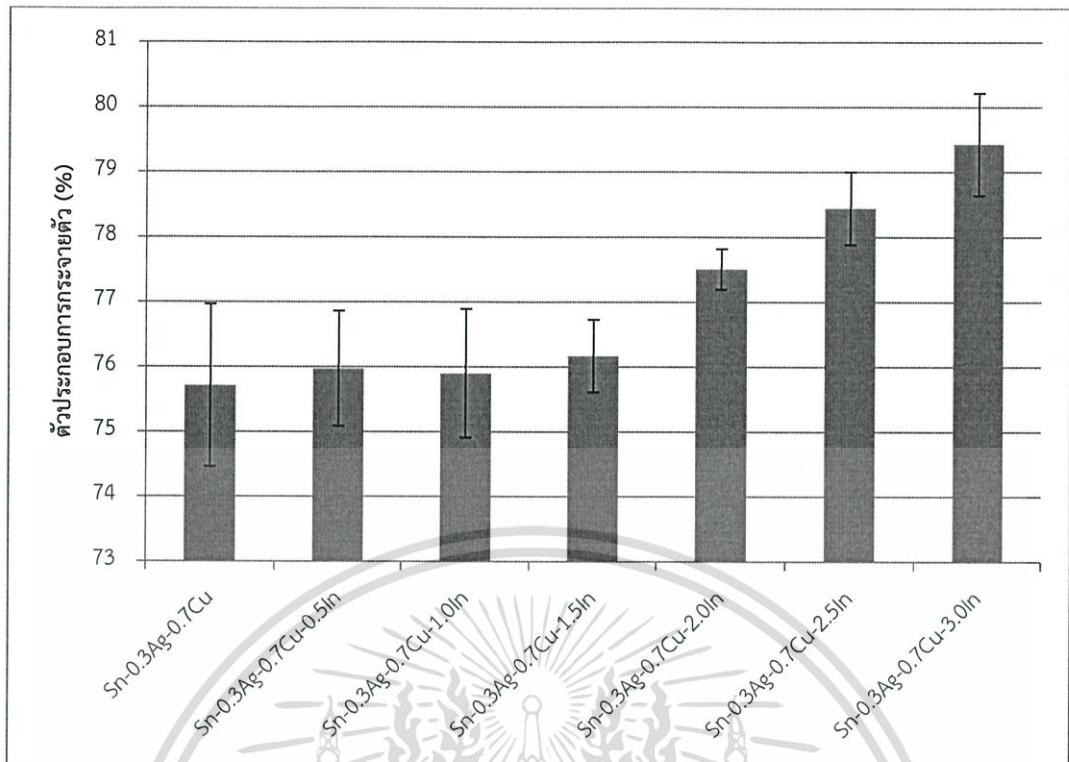
4.1 ความสามารถในการเปียก (Wettability)

4.1.1 การกระจายตัว (Spread)

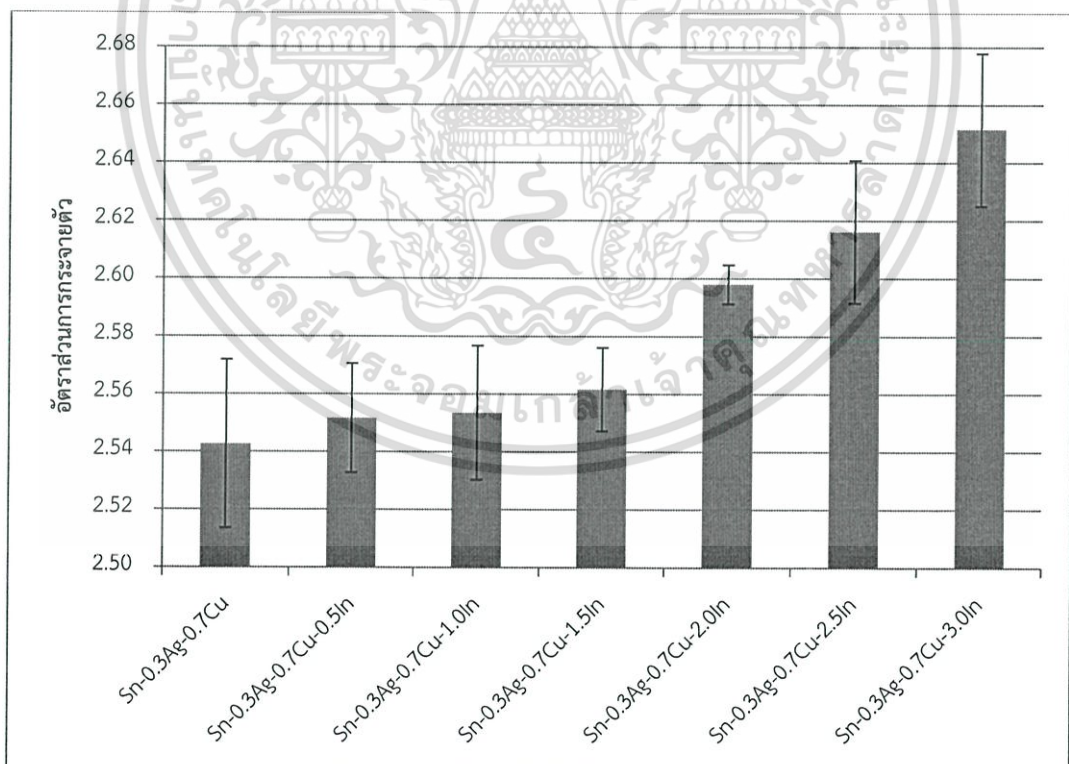
จากการทดสอบการกระจายตัว (Spread test) ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn บนแผ่นทองแดง ผลค่าตัวประกอบการกระจายตัวและอัตราส่วนการกระจายตัวสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 3.1 และ 3.3 ได้ผลการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นว่าความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณ In เพิ่มขึ้น เนื่องจาก In สามารถลดแรงตึงผิวของโลหะบัดกรีได้ [5, 7] นั่นคือ In สามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดง เมื่อเทียบกับโลหะบัดกรีพื้นฐานที่มีค่าตัวประกอบการกระจายตัว 75.71 % และอัตราส่วนการกระจายตัว 2.54 แต่เมื่อมีการเติมธาตุ In จะมีค่าตัวประกอบการกระจายตัวและอัตราส่วนการกระจายตัวที่เพิ่มขึ้น รูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงแนวโน้มของค่าตัวประกอบและอัตราส่วนการกระจายตัวของโลหะบัดกรี

ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยค่าตัวประกอบและอัตราส่วนการกระจายตัว

โลหะบัดกรี	S_f (%)	S_r
Sn-0.3Ag-0.7Cu	75.71	2.54
Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In	75.97	2.55
Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In	75.90	2.55
Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In	76.17	2.56
Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In	77.51	2.60
Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In	78.44	2.62
Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In	79.43	2.65



รูปที่ 4.1 ค่าตัวประกอบกระจายตัว (S_f)

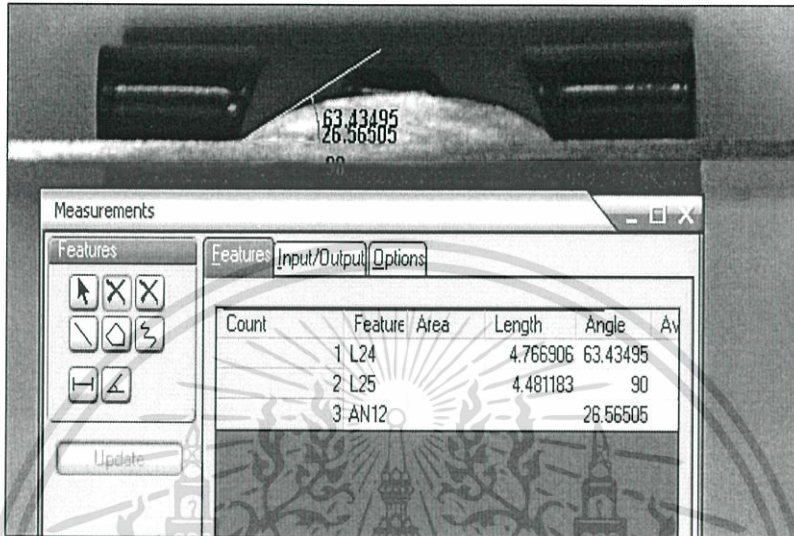


รูปที่ 4.2 อัตราส่วนการกระจายตัว (S)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 มุมสัมผัส (Contact angle)

ความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดงยังสามารถวัดได้โดยใช้ค่ามุมสัมผัส (Contact angle) ดังแสดงในรูปที่ 4.3 แสดงการวัดค่ามุมสัมผัสจากชิ้นงานทดสอบ โดยใช้โปรแกรมช่วยในการวัด คือ Image-pro Express



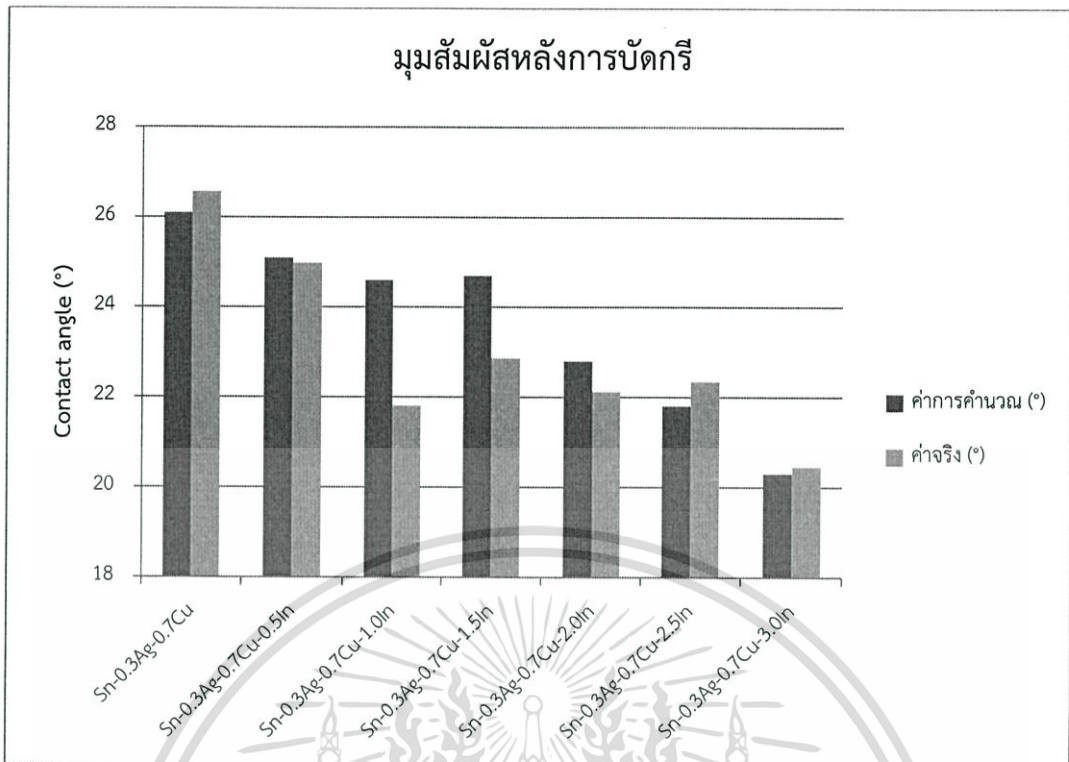
รูปที่ 4.3 การวัดมุมสัมผัสด้วยโปรแกรม Image-pro Express

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.4 พบว่าค่ามุมสัมผัสมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ In ซึ่งเป็นผลที่สอดคล้องกับค่า S_f และ S_r และจากการเปรียบเทียบค่ามุมสัมผัสที่คำนวณได้จากสมการที่ 3.4 กับค่าที่วัดได้จริงจากชิ้นงานทดสอบ พบว่าค่าทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน จากการทดลองนี้ยังพบว่าลักษณะของผิวโลหะบัดกรีที่มีการเติม In จะมีสีขุ่นเมื่อเทียบกับโลหะบัดกรีพื้นฐาน Sn-0.3Ag-0.7Cu โดยความขุ่นจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ In ที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.5

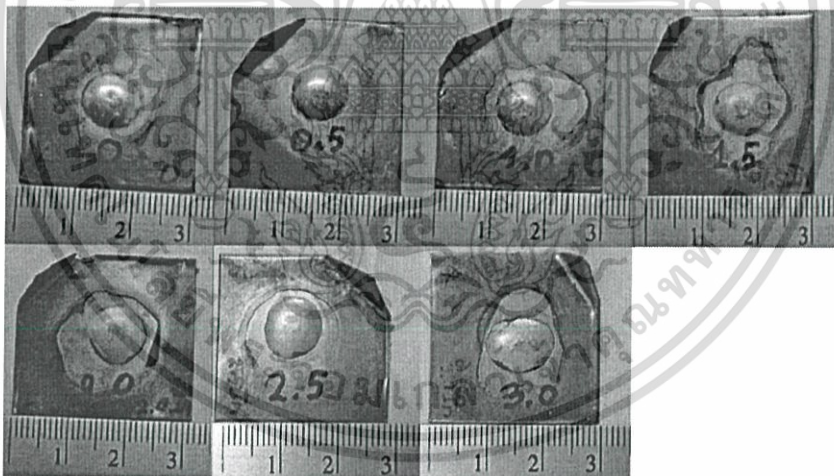
ตารางที่ 4.2 มุมสัมผัสของโลหะบัดกรี

โลหะบัดกรี	ค่าการคำนวณ (°)	ค่าจริง (°)
Sn-0.3Ag-0.7Cu	26.1	26.56
Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In	25.1	24.99
Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In	24.6	21.81
Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In	24.7	22.86
Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In	22.8	22.12
Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In	21.8	22.34
Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In	20.3	20.45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 มุมสัมผัสของโลหะบัดกรีเทียบกับค่าการคำนวณกับค่าจริง



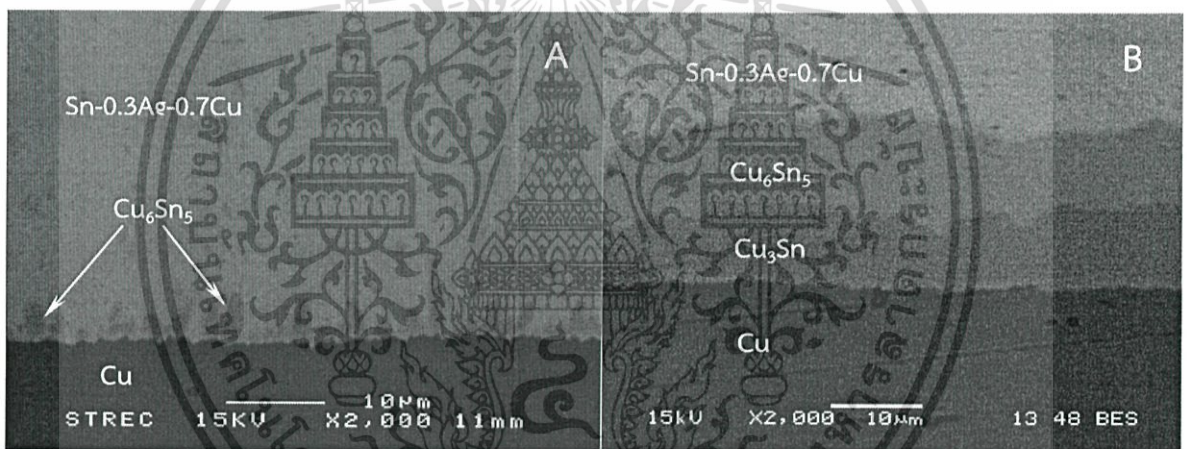
รูปที่ 4.5 ชิ้นงานหลังการทดสอบการกระจายตัว

ดังนั้นความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn บนแผ่นทองแดงดีขึ้นเมื่อปริมาณ In เพิ่มขึ้น เนื่องจาก In ที่เติมเข้าไปทำให้โลหะบัดกรีมีจุดหลอมเหลวลดลงและช่วยลดค่าแรงตึงผิวลงได้ [5] เมื่อทดลองที่อุณหภูมิเดียวกัน (260°C) โลหะบัดกรีที่มีปริมาณ In มากกว่าก็จะมีสามารถในการไหลที่สูงกว่า ด้วยสาเหตุนี้จึงทำให้โลหะบัดกรีกระจายตัวดีขึ้น มุมสัมผัสลดลงตามปริมาณ In ที่เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compounds: IMC)

จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้ SEM และ EDX ที่รอยบัดกรี พบว่าเกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn กับแผ่นรองทองแดงชั้น ซึ่งขนาดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นมีความหนาในระดับไมโครเมตรจึงไม่สามารถมองเห็นได้ชัดเจนด้วยตาเปล่า โดยรูปโครงสร้างจุลภาคจากการใช้ SEM ที่กำลังขยาย 2,000 เท่าสำหรับทุกระดับความเข้มข้นของ In เพื่อช่วยให้สามารถมองเห็นได้ชัดเจนและใช้ซอฟต์แวร์ Image-pro Express ช่วยในการวัดขนาดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ รูปที่ 4.6 A แสดงชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นหลังการบัดกรีที่ตรวจสอบด้วย EDX พบ Cu_6Sn_5 เพียงเฟสเดียว และหลังจากการบ่มด้วยความร้อนเกิดเฟสที่สองขึ้นระหว่างเฟส Cu_6Sn_5 กับทองแดง คือ Cu_3Sn ดังแสดงในรูปที่ 4.6 B ซึ่งความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อมีการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.6 ตัวอย่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะจากการใช้ SEM ของชิ้นงานทดสอบ

สำหรับการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะด้วย EDX ซึ่งจะใช้เปอร์เซ็นต์อะตอมในการแสดงส่วนผสมของเฟส ในกรณีที่เกิดสารประกอบเชิงโลหะชั้นเดียวตำแหน่งที่ตรวจสอบปริมาณธาตุแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่ามีปริมาณ Cu 58.57 atomic% และ Sn 41.43 atomic% ผลของปริมาณธาตุแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งเป็นเฟสของสารประกอบเชิงโลหะ คือ Cu_6Sn_5 สำหรับกรณีที่เกิดสารประกอบเชิงโลหะสองชั้นตำแหน่งที่ตรวจสอบจะแสดงในรูปที่ 4.9 ที่สเปกตรัมที่ 1 มีปริมาณของ Cu 76.32 atomic% และ Sn 23.68 atomic% ดังแสดงในรูปที่ 4.10 เป็นเฟสของสารประกอบเชิงโลหะ คือ Cu_3Sn เกิดขึ้นระหว่างทองแดงกับ Cu_6Sn_5 (Cu_6Sn_5 | Cu_3Sn | Cu) เช่นเดียวกับสเปกตรัมที่ 2 ที่มีปริมาณ Cu 57.64 atomic% และ Sn 42.36 atomic% ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ซึ่งเป็นเฟสของสารประกอบเชิงโลหะ คือ Cu_6Sn_5 ที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะบัดกรีกับโลหะ

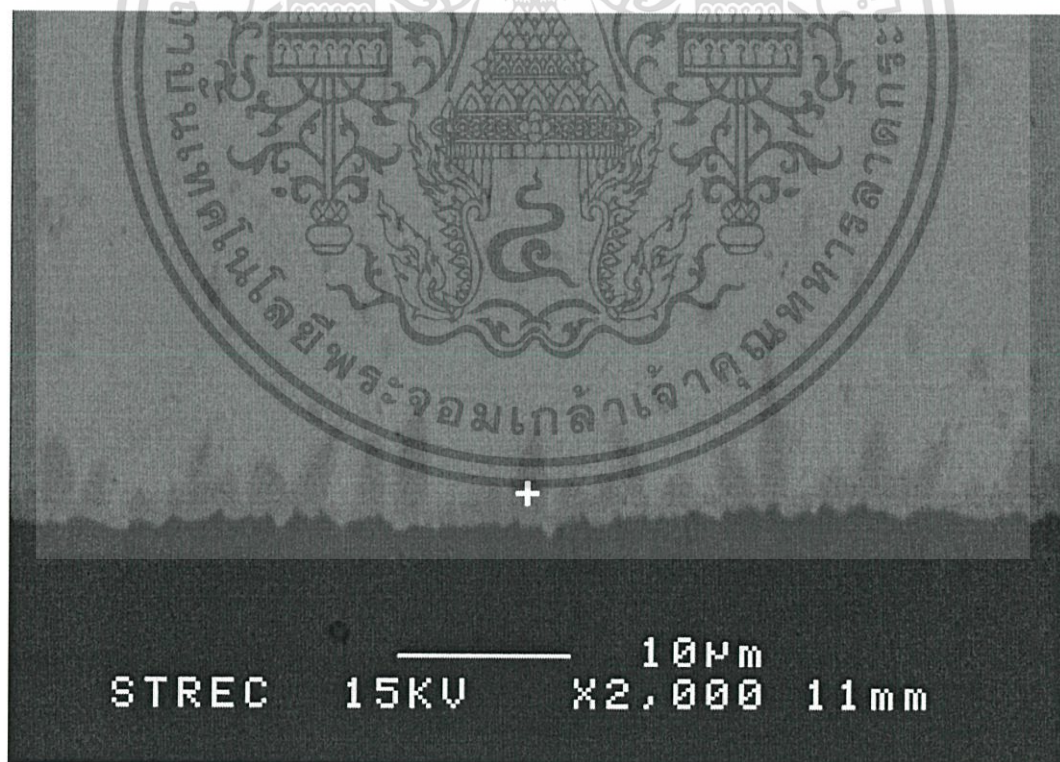
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นทองแดง (Solder | Cu_6Sn_5 | Cu) โดยเฟส Cu_6Sn_5 เกิดจากส่วนผสมของทองแดงและดีบุกที่มีอัตราส่วน 6:5 ซึ่งสามารถดูได้จากเฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก-ทองแดงในรูปที่ 2.8

โดยชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 เกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างทองแดง 6 อะตอมและดีบุก 5 อะตอมรวมตัวกัน ดังแสดงในสมการที่ 4.1 และชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง Cu_6Sn_5 กับทองแดง 9 อะตอม ดังแสดงในสมการที่ 4.2

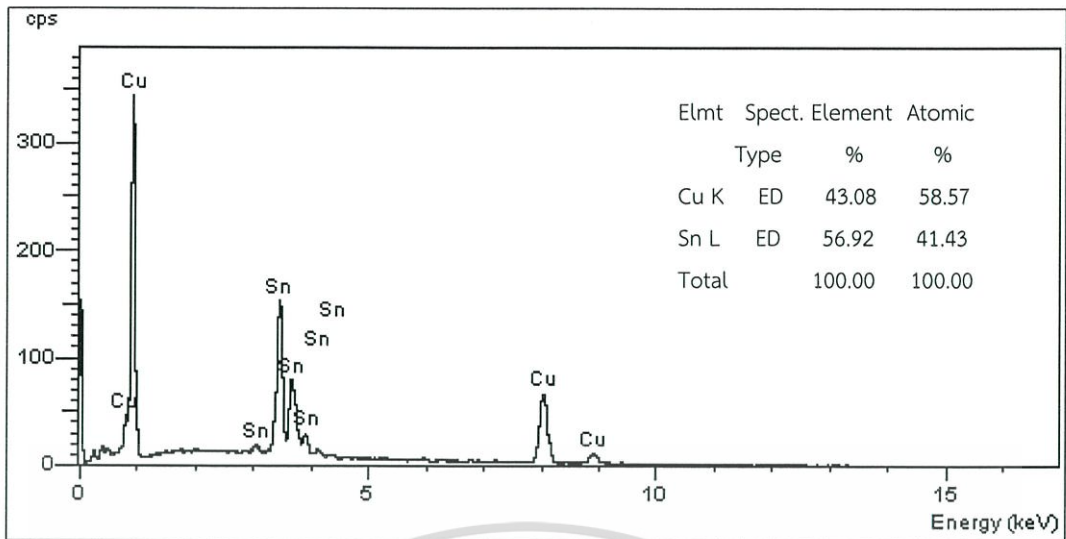


การเพิ่มขึ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn จะเกิดจากการสลายตัวของ Cu_6Sn_5 ทำให้เกิด 2 โมเลกุลของ Cu_3Sn และอีก 3 อะตอมดีบุก ดังสมการที่ 4.3

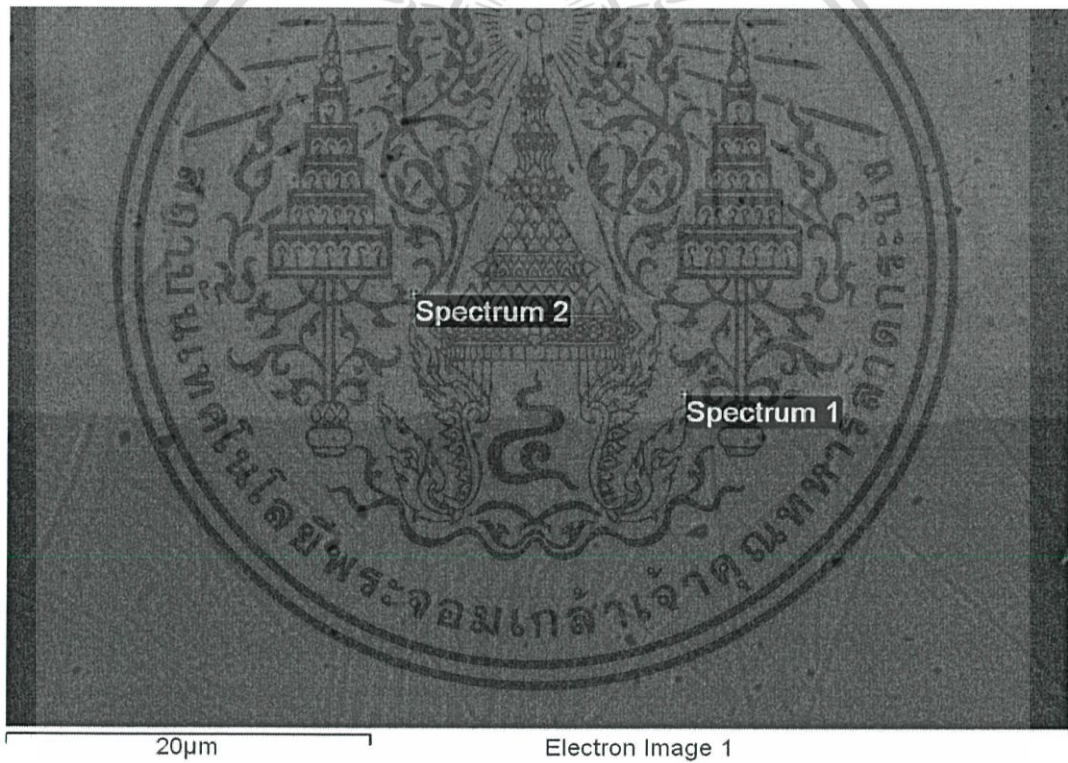


รูปที่ 4.7 ตำแหน่งสเปกตรัมการวิเคราะห์ EDX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

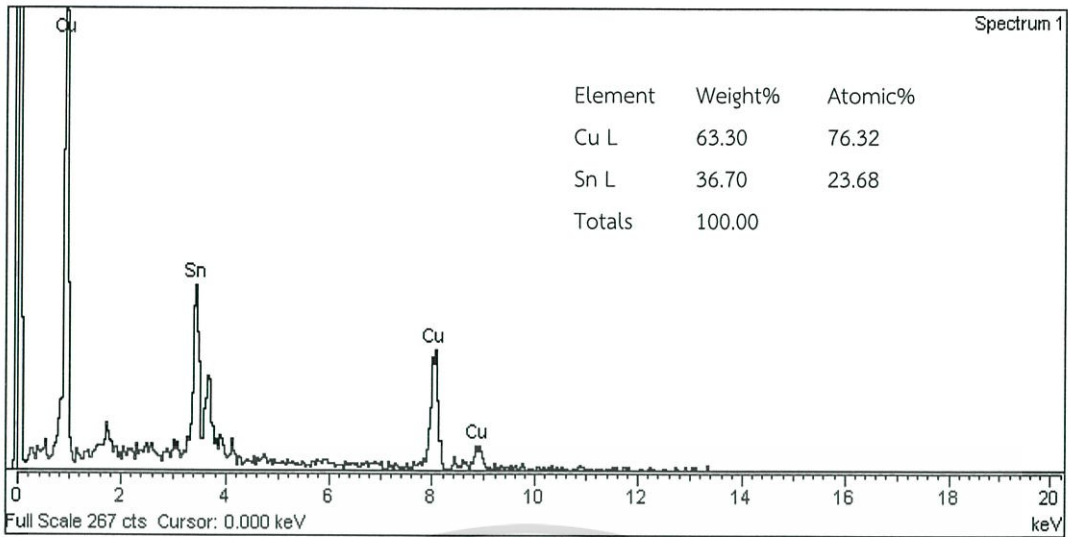


รูปที่ 4.8 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของชั้น Cu_6Sn_5

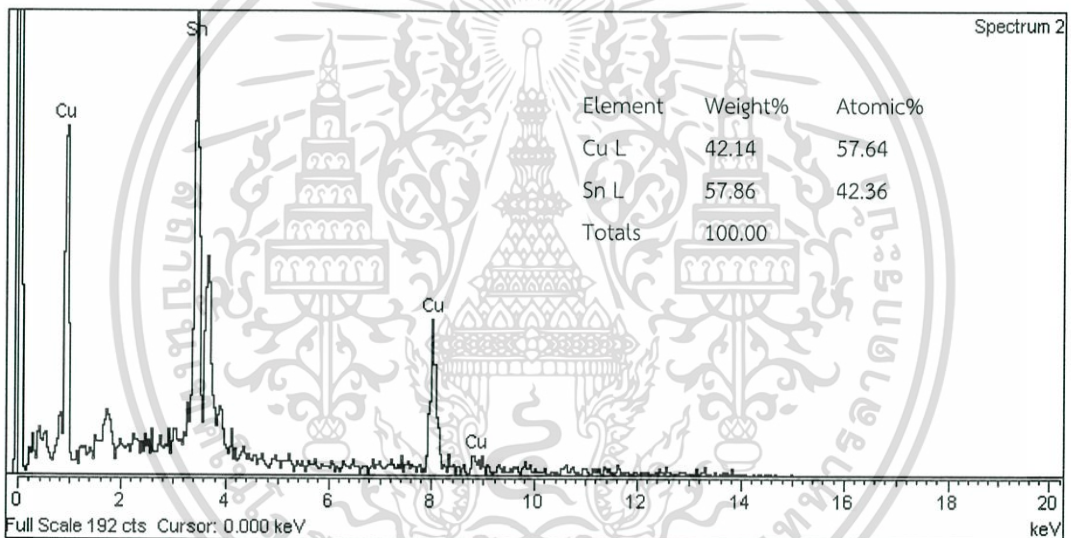


รูปที่ 4.9 ตำแหน่งสเปกตรัมการวิเคราะห์ EDX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของชั้น Cu_3Sn



รูปที่ 4.11 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของชั้น Cu_6Sn_5

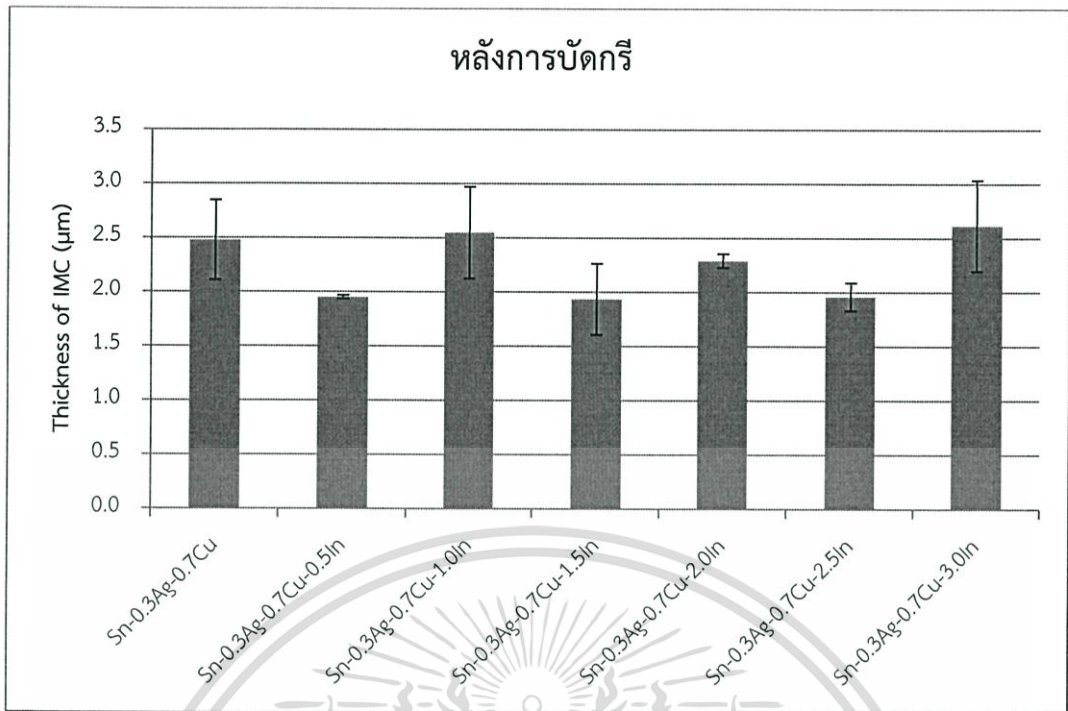
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ $Cu_6Sn_5+Cu_3Sn$ (μm)						
อุณหภูมิ °C	โลหะบัดกรี	เวลา (hr)				
		0	1	10	100	1000
100	Sn-0.3Ag-0.7Cu	2.261	2.092	2.650	4.906	3.536
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In	1.943	2.137	4.075	3.910	5.080
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In	2.284	2.184	4.325	4.589	4.812
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In	1.733	2.074	5.834	5.000	5.344
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In	2.265	2.418	2.499	2.499	3.249
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In	1.882	2.178	4.664	4.247	3.594
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In	2.348	2.802	4.605	4.857	3.704
135	Sn-0.3Ag-0.7Cu	2.901	2.072	7.447	4.961	16.385
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In	1.969	4.031	4.405	4.169	11.595
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In	3.033	4.022	4.689	5.163	9.492
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In	2.314	3.661	5.274	4.027	13.491
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In	2.244	2.046	4.144	3.505	6.861
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In	2.110	2.007	3.405	3.070	11.000
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In	3.105	2.002	4.064	3.732	7.302
170	Sn-0.3Ag-0.7Cu	2.267	3.540	7.589	9.138	17.365
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In	1.941	4.201	8.430	12.865	17.351
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In	2.323	6.762	8.925	9.935	17.986
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In	1.760	8.344	7.864	9.510	17.956
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In	2.363	3.855	8.400	9.120	15.058
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In	1.888	5.892	7.802	7.110	13.710
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In	2.401	4.658	8.065	13.068	17.451

จากการวิเคราะห์ด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณอินเดียมกับความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรี ดังแสดงในรูปที่ 4.12 เมื่อนำข้อมูลมาเปรียบเทียบในทางสถิติด้วย ANOVA พบว่าค่า P-value มีค่ามากกว่า 0.05 ที่ความเชื่อมั่น 95% ซึ่งสรุปได้ว่าปริมาณ In ไม่มีผลต่อความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 4.13

หลังจากการบ่มที่อุณหภูมิ 100, 135 และ 170 °C โดยใช้เวลาบ่ม 1, 10, 100 และ 1000 ชั่วโมง ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะแสดงในรูปที่ 4.14-4.16 พบว่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและเวลาในการบ่ม



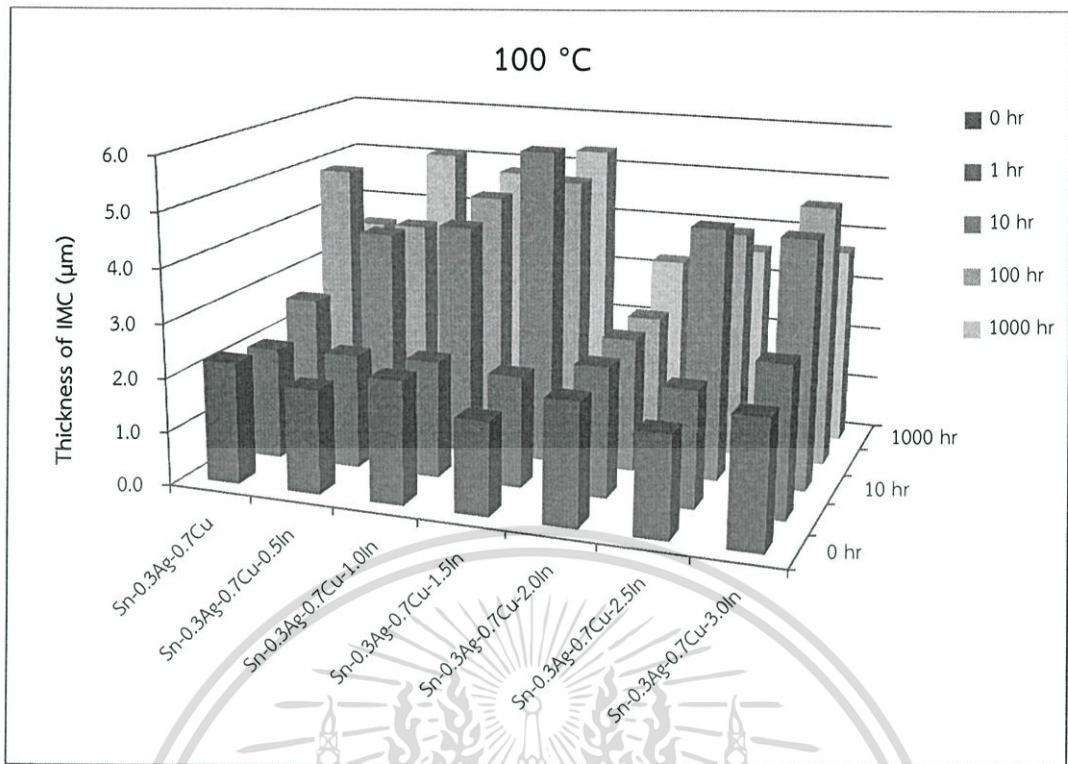
รูปที่ 4.12 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรี

One-way ANOVA: IMC versus In

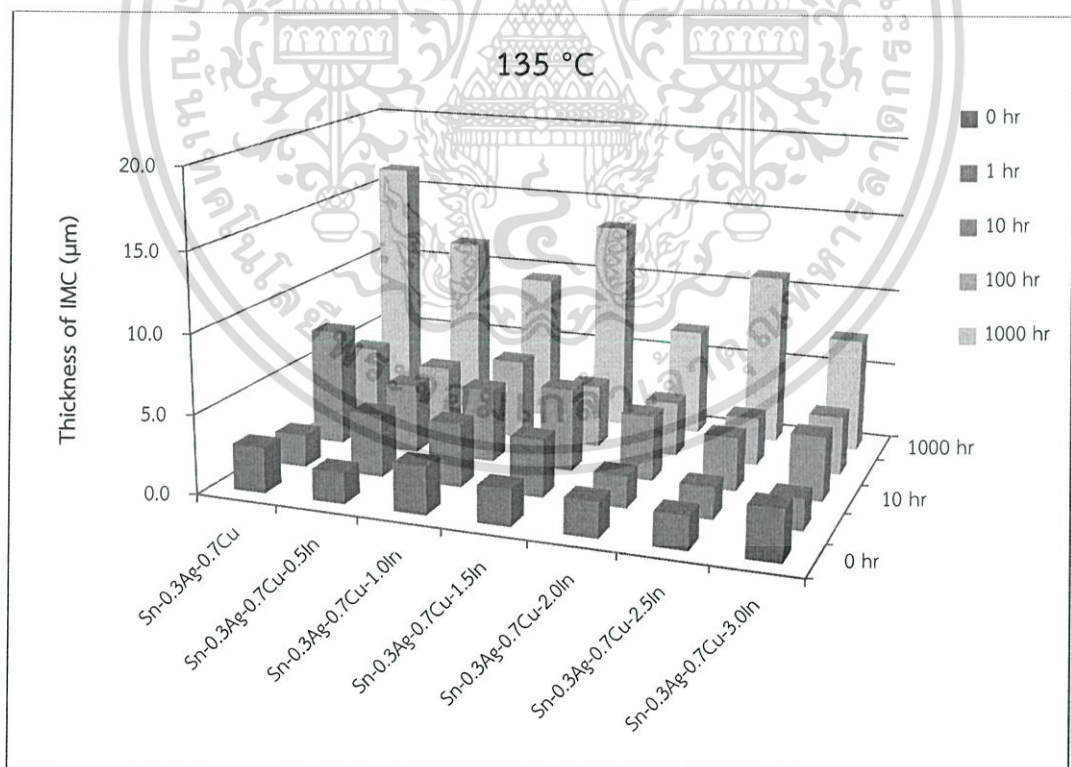
Source	DF	SS	MS	F	P
In	6	3.802	0.634	1.78	0.176
Error	14	4.995	0.357		
Total	20	8.796			

รูปที่ 4.13 วิเคราะห์ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะด้วย ANOVA ที่ $\alpha = 0.05$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

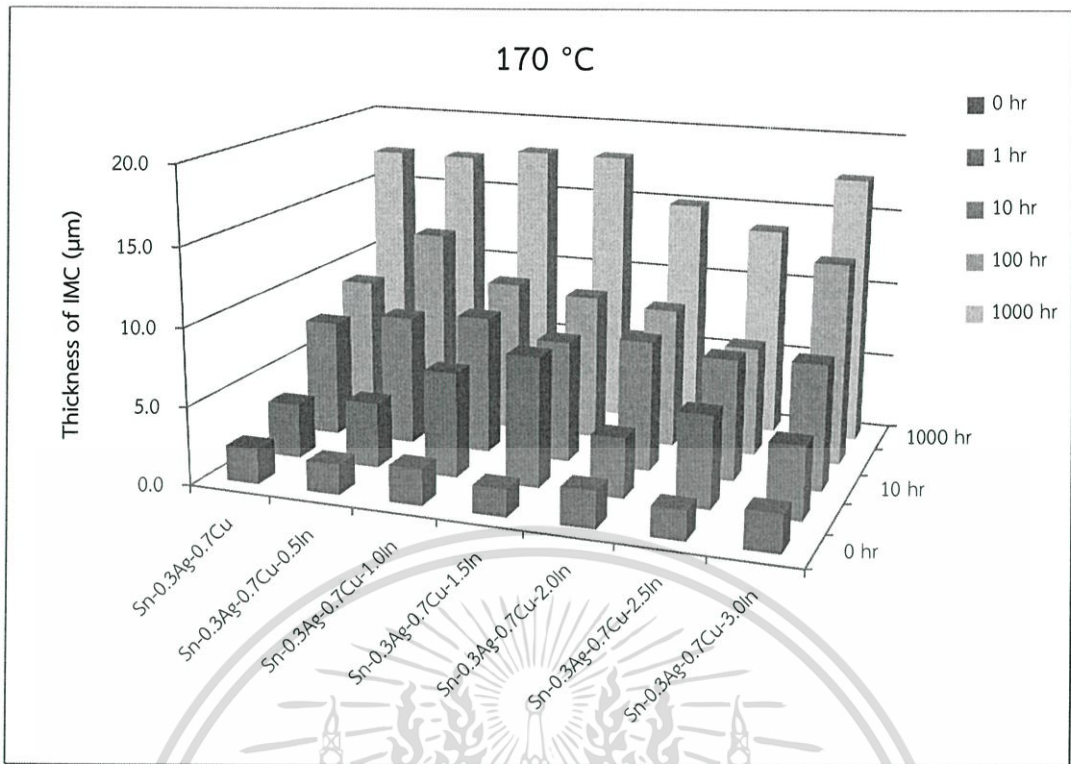


รูปที่ 4.14 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100 °C



รูปที่ 4.15 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบ่มที่อุณหภูมิ 135 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



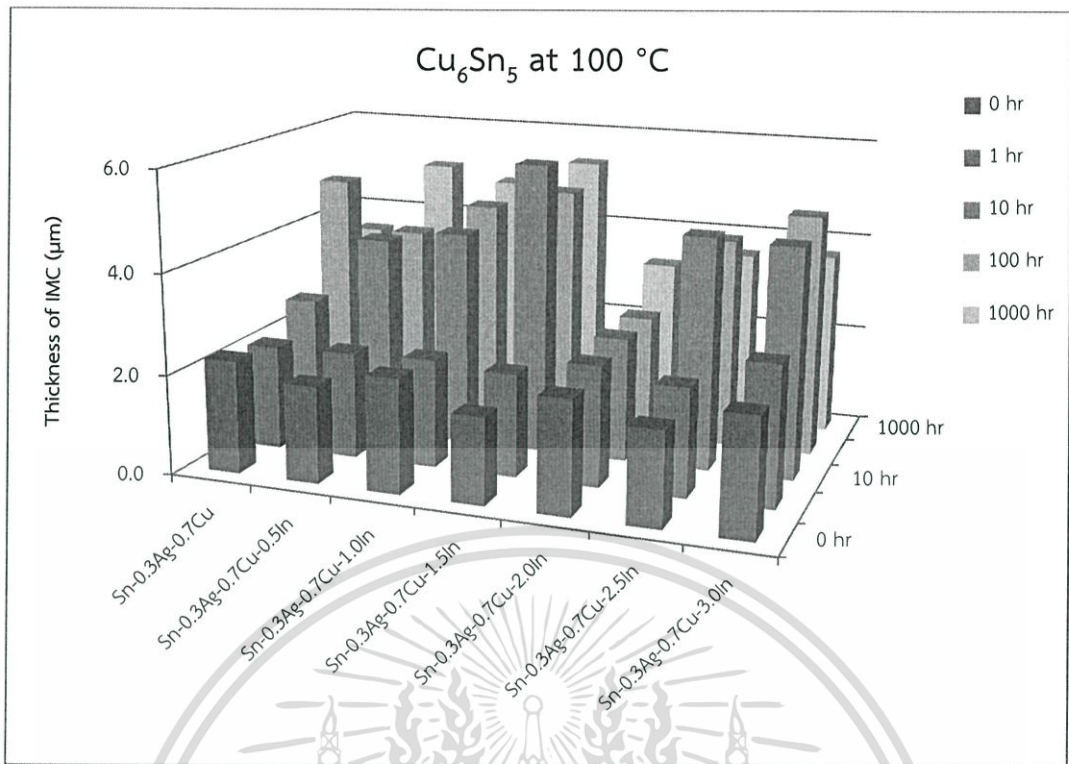
รูปที่ 4.16 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบ่มที่อุณหภูมิ 170 °C

จากการตรวจสอบด้วย SEM และ EDX พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นชั้นแรกหลังการบัดกรี คือ Cu_6Sn_5 ซึ่งความหนาของชั้น Cu_6Sn_5 แสดงในตารางที่ 4.4 เช่นเดียวกับความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม คือ ความหนาของชั้น Cu_6Sn_5 เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาบ่มเพิ่มขึ้น แต่จะลดลงเมื่อเกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะชั้นที่สองขึ้น นั่นคือ Cu_3Sn สังเกตได้ชัดเจนที่สุดคือ ที่อุณหภูมิ 170°C เวลาบ่ม 1000 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.17-4.19 ซึ่งแนวโน้มของความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะก็ยังคงมีความคงที่เมื่อปริมาณของ In เพิ่มขึ้น ดังนั้นปริมาณ In จึงไม่มีผลต่อความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5

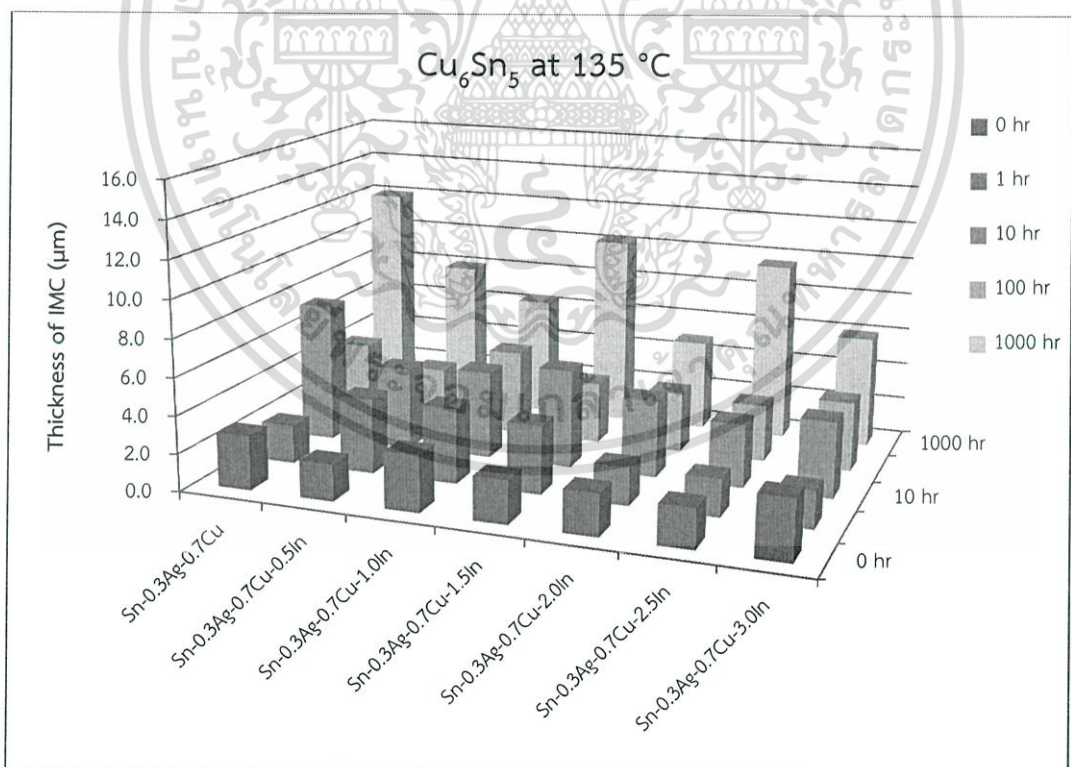
ตารางที่ 4.4 ความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5

ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 (μm)						
อุณหภูมิ °C	โลหะบัดกรี	เวลา (hr)				
		0	1	10	100	1000
100	Sn-0.3Ag-0.7Cu	2.261	2.092	2.650	4.906	3.536
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In	1.943	2.137	4.075	3.910	5.080
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In	2.284	2.184	4.325	4.589	4.812
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In	1.733	2.074	5.834	5.000	5.344
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In	2.265	2.418	2.499	2.499	3.249
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In	1.882	2.178	4.664	4.247	3.594
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In	2.348	2.802	4.605	4.857	3.704
135	Sn-0.3Ag-0.7Cu	2.901	2.072	7.447	4.127	12.025
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In	1.969	4.031	4.405	3.148	8.037
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In	3.033	4.022	4.689	4.599	6.422
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In	2.314	3.661	5.274	3.325	10.269
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In	2.244	2.046	4.144	3.267	4.884
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In	2.110	2.007	3.405	3.070	9.613
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In	3.105	2.002	4.064	3.732	6.003
170	Sn-0.3Ag-0.7Cu	2.267	2.676	5.730	6.268	9.210
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In	1.941	3.599	6.883	9.674	10.964
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In	2.323	6.190	7.574	7.276	12.288
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In	1.760	7.756	6.520	7.856	13.082
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In	2.363	2.703	7.364	7.463	10.702
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In	1.888	5.123	6.732	5.469	9.852
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In	2.401	4.658	7.228	11.102	13.001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

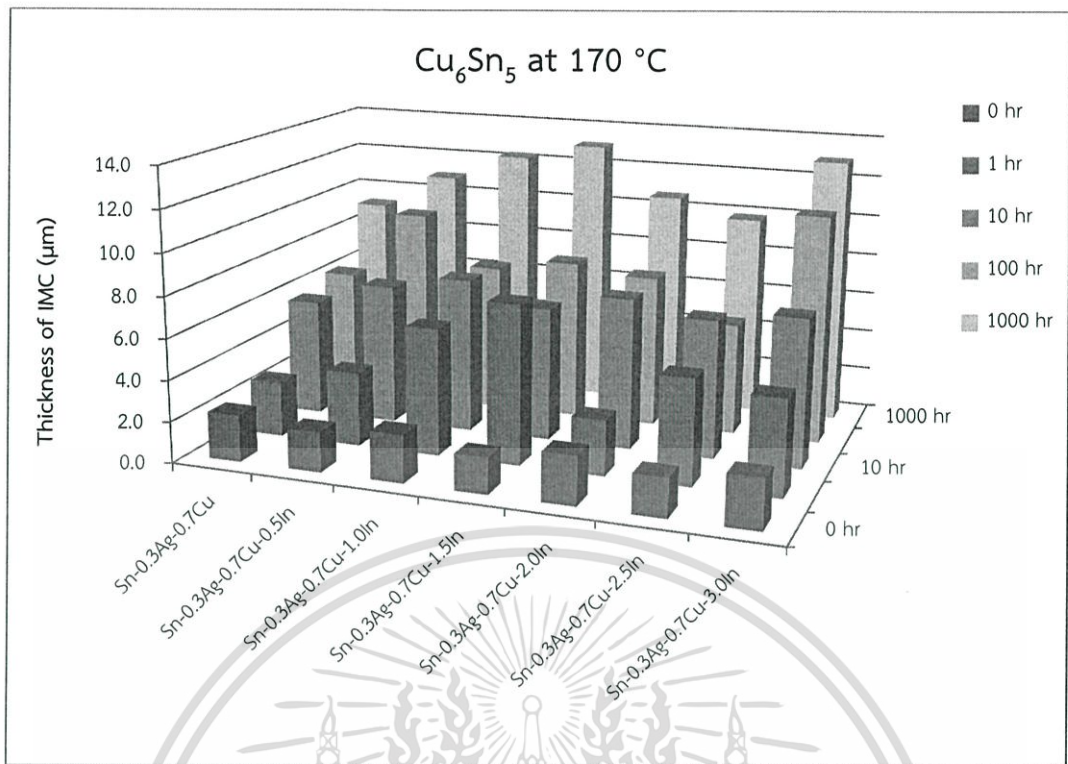


รูปที่ 4.17 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ที่อุณหภูมิการบ่ม 100 °C



รูปที่ 4.18 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ที่อุณหภูมิการบ่ม 135 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu₆Sn₅ ที่อุณหภูมิการบ่ม 170 °C

สำหรับชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นใหม่หลังการบ่ม คือ Cu₃Sn ซึ่งความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu₃Sn แสดงในตารางที่ 4.5 โดยชั้น Cu₃Sn เริ่มเกิดขึ้นที่อุณหภูมิการบ่ม 135 °C เวลาบ่ม 100 ชั่วโมง ชั้น Cu₃Sn ที่เกิดมีความหนาน้อยมากในช่วงแรก และเมื่อเวลาบ่มเพิ่มขึ้น ความหนาเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิการบ่ม 170 °C พบชั้น Cu₃Sn ตั้งแต่เริ่มบ่มชั่วโมงแรก

ตารางที่ 4.5 ความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu₃Sn

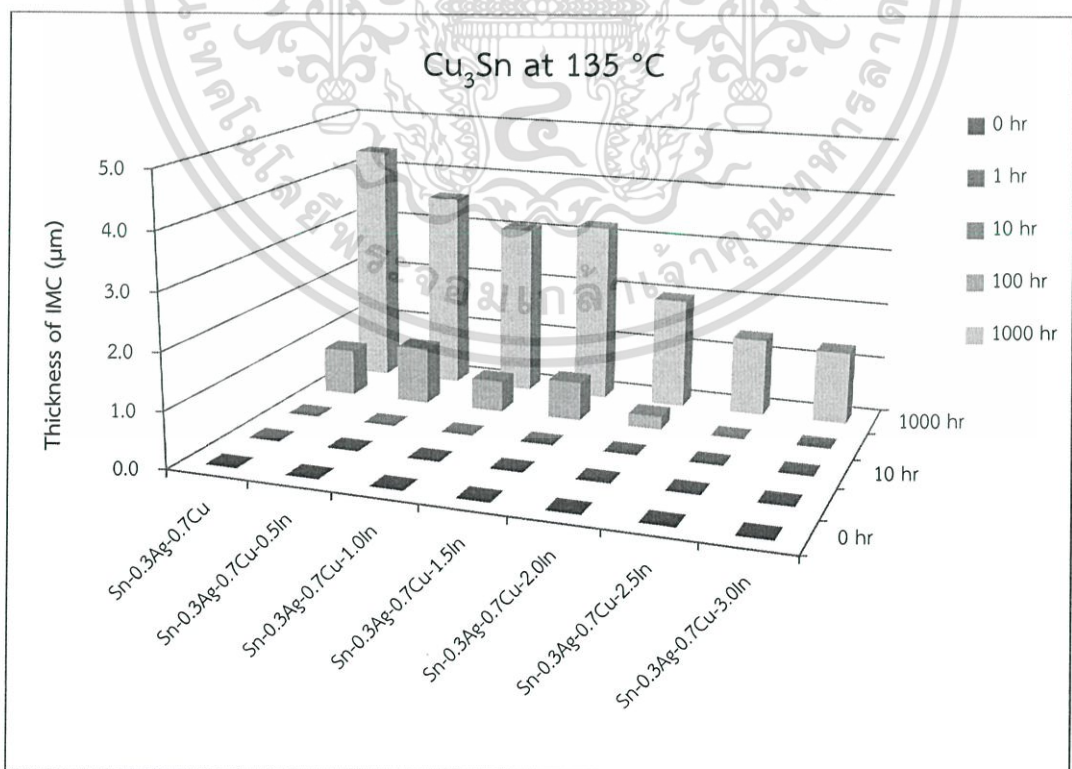
ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu ₃ Sn (μm)						
อุณหภูมิ °C	โลหะบัดกรี	เวลา (hr)				
		0	1	10	100	1000
135	Sn-0.3Ag-0.7Cu	-	-	-	0.834	4.360
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In	-	-	-	1.021	3.558
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In	-	-	-	0.565	3.070
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In	-	-	-	0.702	3.222
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In	-	-	-	0.238	1.977
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In	-	-	-	-	1.387
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In	-	-	-	-	1.299

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

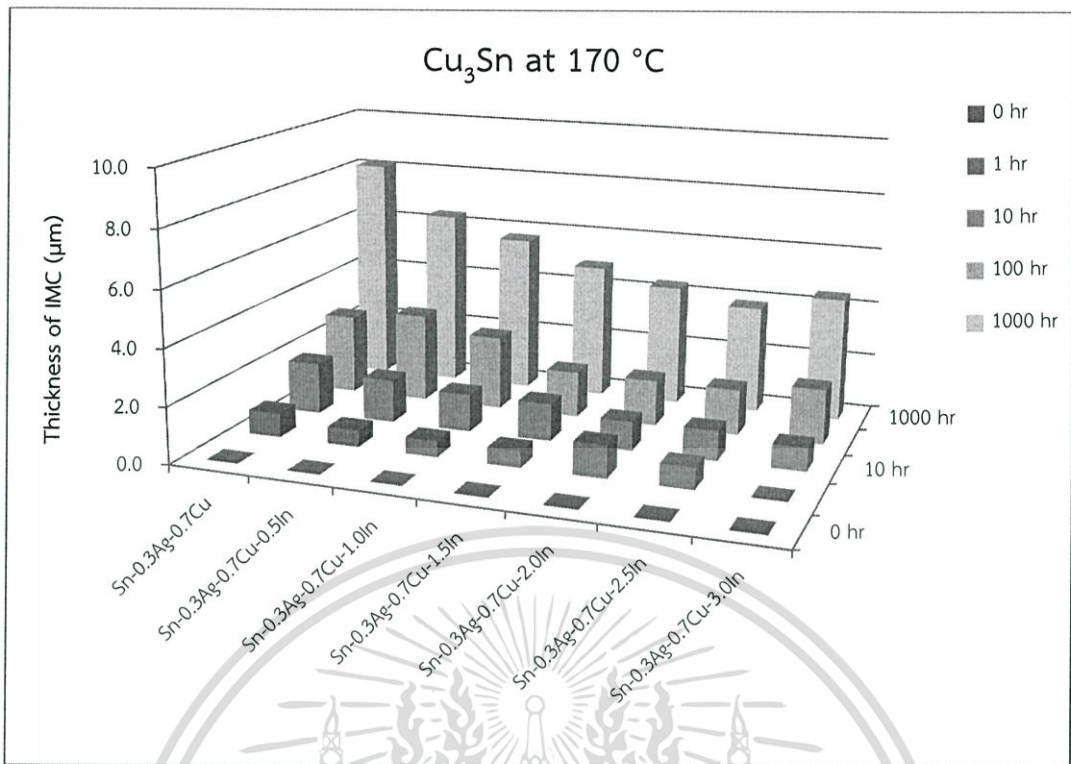
ตารางที่ 4.5 (ต่อ) ความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn

ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn (μm)						
อุณหภูมิ $^{\circ}\text{C}$	โลหะบัดกรี	เวลา (hr)				
		0	1	10	100	1000
170	Sn-0.3Ag-0.7Cu	-	0.863	1.859	2.871	8.155
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In	-	0.602	1.547	3.192	6.386
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In	-	0.572	1.351	2.659	5.698
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In	-	0.588	1.344	1.655	4.874
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In	-	1.151	1.036	1.657	4.356
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In	-	0.769	1.070	1.641	3.858
	Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In	-	-	0.837	1.965	4.450

โดยความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn ที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิและเวลาในการบ่มมากขึ้น แต่ในเชิงปริมาณ In ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ In เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.20 และ 4.21 ดังนั้นอุณหภูมิและเวลาในการบ่มทำให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn เพิ่มขึ้น แต่ In ทำให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn ลดลงเมื่อปริมาณ In เพิ่มขึ้น เนื่องจาก In ช่วยลดอัตราการเติบโตของ Cu_3Sn โดยยับยั้งการแพร่ของ Sn ผ่านขอบเกรนของ Cu_3Sn [15]



รูปที่ 4.20 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn ที่อุณหภูมิการบ่ม 135 $^{\circ}\text{C}$
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือนำไปใช้
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu₃Sn ที่อุณหภูมิการบ่ม 170 °C

4.3 ค่าคงที่และสัมประสิทธิ์การแพร่

ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการบ่มด้วยความร้อน โดยทั่วไปเป็นกระบวนการที่ถูกควบคุมด้วยการแพร่ในสถานะของแข็ง ซึ่งความหนาของชั้นคู่ควบคุมการแพร่ที่เป็นฟังก์ชันของเวลาสามารถกำหนดโดยสมการ

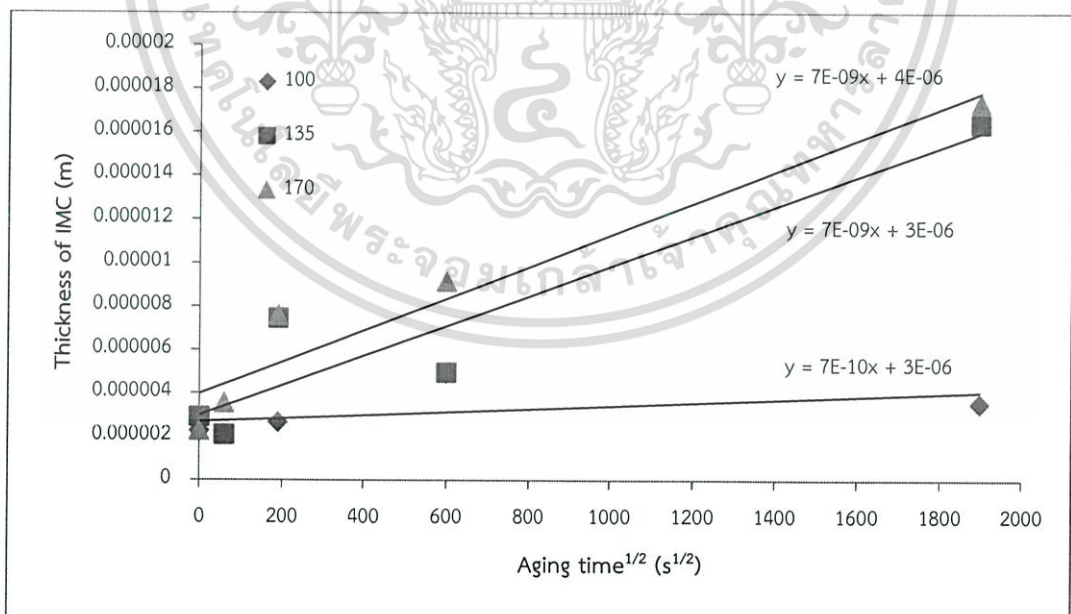
$$Y = Y_0 + \sqrt{Dt} \quad (4.4)$$

เมื่อ Y คือ ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เวลา t , Y_0 คือ ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรี และ D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)

กลไกการเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะสามารถกำหนดได้จากความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่อุณหภูมิการบ่ม 100, 135 และ 170 °C ดังแสดงในตารางที่ 4.6-4.8 มาพล็อตกับรากที่สองของเวลาในการบ่ม, $t^{1/2}$ ซึ่งสามารถแสดงในรูปที่ 4.22-4.24 โดยความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะเพิ่มขึ้นและมีอัตราการเติบโตเร็วสำหรับการบ่มที่อุณหภูมิสูง (170°C) ซึ่ง $t^{1/2}$ ยังแสดงให้เห็นการเพิ่มขึ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะเป็นกระบวนการที่ถูกควบคุมด้วยการแพร่

ตารางที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวมกับ $t^{1/2}$ ที่อุณหภูมิ และเวลาที่แตกต่างกันของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu กับทองแดง

Temperature		Aging time		$t^{1/2}$		IMC Total	
°C	K	hr	s	hr	s	μm	m
100	373	0	0	0.00	0.00	2.26	2.26×10^{-6}
		1	3,600	1.00	60.00	2.09	2.09×10^{-6}
		10	36,000	3.16	189.74	2.65	2.65×10^{-6}
		100	360,000	10.00	600.00	4.91	4.91×10^{-6}
		1,000	3,600,000	31.62	1897.37	3.54	3.54×10^{-6}
135	408	0	0	0.00	0.00	2.90	2.90×10^{-6}
		1	3,600	1.00	60.00	2.07	2.07×10^{-6}
		10	36,000	3.16	189.74	7.45	7.45×10^{-6}
		100	360,000	10.00	600.00	4.96	4.96×10^{-6}
		1,000	3,600,000	31.62	1897.37	16.38	1.64×10^{-5}
170	443	0	0	0.00	0.00	2.27	2.27×10^{-6}
		1	3,600	1.00	60.00	3.54	3.54×10^{-6}
		10	36,000	3.16	189.74	7.59	7.59×10^{-6}
		100	360,000	10.00	600.00	9.14	9.14×10^{-6}
		1,000	3,600,000	31.62	1897.37	17.36	1.74×10^{-5}

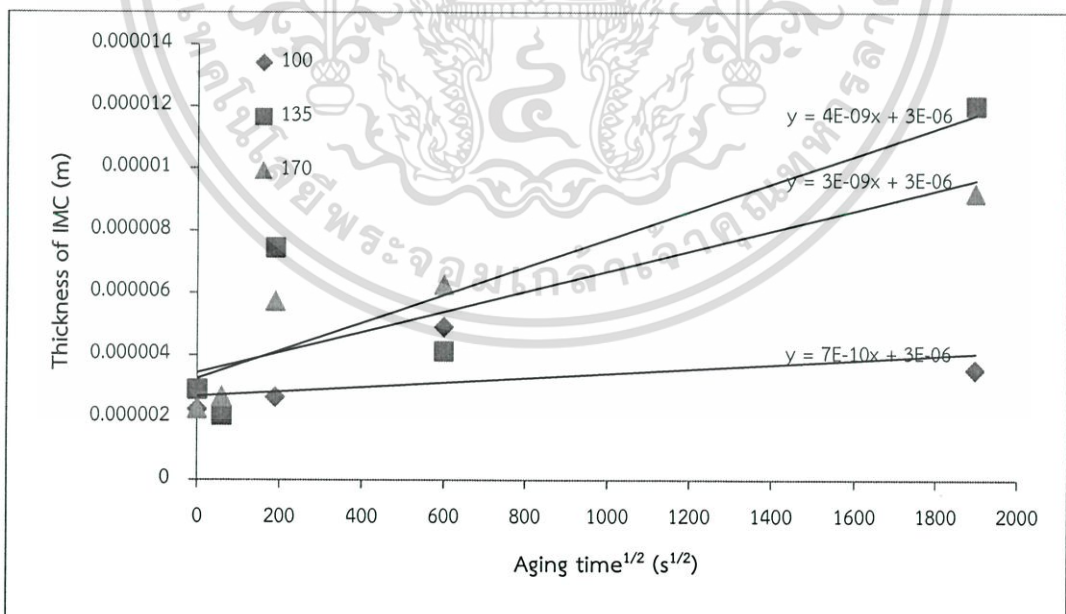


รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวมกับรากที่สองของเวลาการบ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 กับ $t^{1/2}$ ที่ อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกันของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu กับทองแดง

Temperature		Aging time		$t^{1/2}$		IMC of Cu_6Sn_5	
$^{\circ}\text{C}$	K	hr	s	hr	s	μm	m
100	373	0	0	0.00	0.00	2.26	2.26×10^{-6}
		1	3,600	1.00	60.00	2.09	2.09×10^{-6}
		10	36,000	3.16	189.74	2.65	2.65×10^{-6}
		100	360,000	10.00	600.00	4.91	4.91×10^{-6}
		1,000	3,600,000	31.62	1897.37	3.54	3.54×10^{-6}
135	408	0	0	0.00	0.00	2.90	2.90×10^{-6}
		1	3,600	1.00	60.00	2.07	2.07×10^{-6}
		10	36,000	3.16	189.74	7.45	7.45×10^{-6}
		100	360,000	10.00	600.00	4.13	4.13×10^{-6}
		1,000	3,600,000	31.62	1897.37	12.02	1.20×10^{-5}
170	443	0	0	0.00	0.00	2.27	2.27×10^{-6}
		1	3,600	1.00	60.00	2.68	2.68×10^{-6}
		10	36,000	3.16	189.74	5.73	5.73×10^{-6}
		100	360,000	10.00	600.00	6.27	6.27×10^{-6}
		1,000	3,600,000	31.62	1897.37	9.21	9.21×10^{-6}

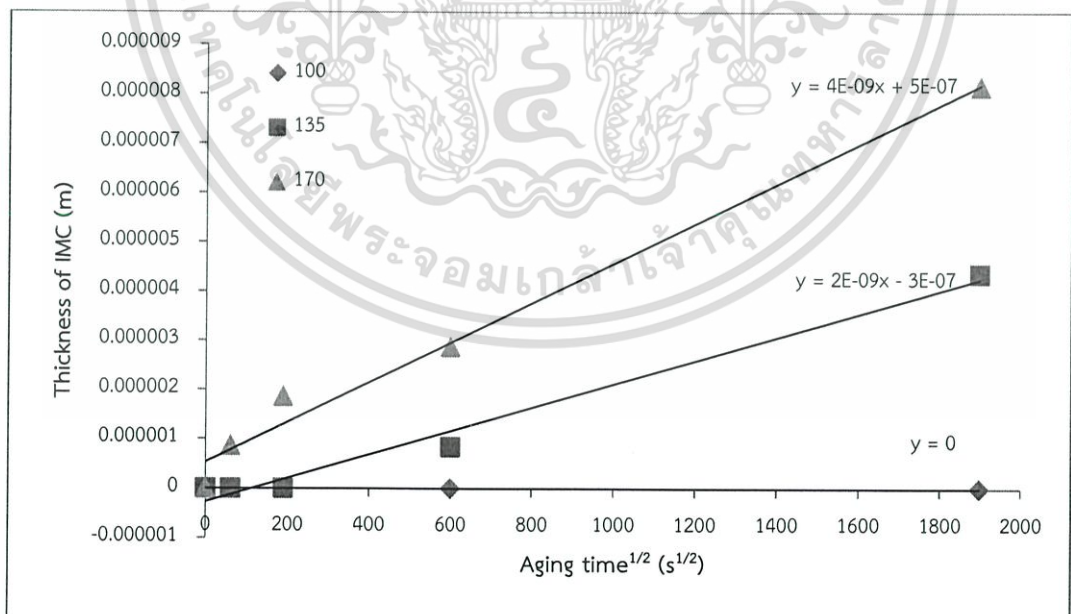


รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 กับรากที่สองของเวลาการบ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn กับ $t^{1/2}$ ที่ อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกันของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu กับทองแดง

Temperature		Aging time		$t^{1/2}$		IMC of Cu_3Sn	
$^{\circ}\text{C}$	K	hr	s	hr	s	μm	m
100	373	0	0	0.00	0.00	-	-
		1	3,600	1.00	60.00	-	-
		10	36,000	3.16	189.74	-	-
		100	360,000	10.00	600.00	-	-
		1,000	3,600,000	31.62	1897.37	-	-
135	408	0	0	0.00	0.00	-	-
		1	3,600	1.00	60.00	-	-
		10	36,000	3.16	189.74	-	-
		100	360,000	10.00	600.00	0.83	8.34×10^{-7}
		1,000	3,600,000	31.62	1897.37	4.36	4.36×10^{-6}
170	443	0	0	0.00	0.00	-	-
		1	3,600	1.00	60.00	0.86	8.63×10^{-7}
		10	36,000	3.16	189.74	1.86	1.86×10^{-6}
		100	360,000	10.00	600.00	2.87	2.87×10^{-6}
		1,000	3,600,000	31.62	1897.37	8.15	8.15×10^{-6}



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับสัมประสิทธิ์การแพร่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ $\text{Cu}_6\text{Sn}_5+\text{Cu}_3\text{Sn}$, Cu_6Sn_5 และ Cu_3Sn สามารถคำนวณจากการวิเคราะห์การถดถอยแบบเส้นตรง $y = a + bx$ เมื่อความชัน (Slope) = b จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะกับ $t^{1/2}$ สามารถคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ได้จากความชัน ดังแสดงในตารางที่ 4.9 แสดงการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu กับแผ่นทองแดง โดยสัมประสิทธิ์การแพร่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่อุณหภูมิการบ่ม 100 °C มีค่าน้อยกว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่อุณหภูมิการบ่ม 135 และ 170 °C ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ใกล้เคียงกัน สำหรับสัมประสิทธิ์การแพร่ของชั้น Cu_3Sn ที่อุณหภูมิ 100 °C ไม่สามารถคำนวณได้เนื่องจากชั้น Cu_3Sn ไม่เกิดขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมที่มีการเติม In สัมประสิทธิ์การแพร่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม ($\text{Cu}_6\text{Sn}_5+\text{Cu}_3\text{Sn}$) มีค่าใกล้เคียงกัน โดยปริมาณ In ที่เพิ่มขึ้นไม่ได้ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.10 สำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn จะแสดงไว้ในภาคผนวก ข

ตารางที่ 4.9 สัมประสิทธิ์การแพร่ (D) ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่าง Sn-0.3Ag0.7Cu กับทองแดง

Solder	Temperature (°C)/(K)	Intermetallic phase	Slope	D (m ² /s)
Sn-0.3Ag-0.7Cu	100/373	$\text{Cu}_6\text{Sn}_5+\text{Cu}_3\text{Sn}$	7.0×10^{-10}	4.9×10^{-19}
		Cu_6Sn_5	7.0×10^{-10}	4.9×10^{-19}
		Cu_3Sn	-	-
	135/408	$\text{Cu}_6\text{Sn}_5+\text{Cu}_3\text{Sn}$	7.0×10^{-9}	4.9×10^{-17}
		Cu_6Sn_5	4.0×10^{-9}	1.6×10^{-17}
		Cu_3Sn	2.0×10^{-9}	4.0×10^{-18}
	170/443	$\text{Cu}_6\text{Sn}_5+\text{Cu}_3\text{Sn}$	7.0×10^{-9}	4.9×10^{-17}
		Cu_6Sn_5	3.0×10^{-9}	9.0×10^{-18}
		Cu_3Sn	4.0×10^{-9}	1.6×10^{-17}

ตารางที่ 4.10 สัมประสิทธิ์การแพร่ของชั้น $\text{Cu}_6\text{Sn}_5 + \text{Cu}_3\text{Sn}$ ในโลหะบัดกรีตระกูล SAC ที่อุณหภูมิการบ่ม 170°C

$\text{Cu}_6\text{Sn}_5 + \text{Cu}_3\text{Sn}$		
โลหะบัดกรี	สัมประสิทธิ์การแพร่ D (m^2/s)	Refs
Sn-0.3Ag-0.7Cu	4.9×10^{-17}	This work
Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In	4.9×10^{-17}	
Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In	4.9×10^{-17}	
Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In	4.9×10^{-17}	
Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In	3.6×10^{-17}	
Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In	2.5×10^{-17}	
Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In	4.9×10^{-17}	
Sn-0.3Ag-0.7Cu	6.4×10^{-17}	[21]
Sn-1.0Ag-0.5Cu	5.5×10^{-15}	[27]
Sn-3.0Ag-0.5Cu	5.9×10^{-15}	[27]
Sn-4.0Ag-0.5Cu	6.3×10^{-15}	[27]

จากการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่เกิดขึ้นในชั้นสารประกอบเชิงโลหะ $\text{Cu}_6\text{Sn}_5 + \text{Cu}_3\text{Sn}$, Cu_6Sn_5 และ Cu_3Sn ที่อุณหภูมิการบ่ม 100, 135 และ 170°C สามารถอธิบายได้ว่า สัมประสิทธิ์การแพร่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ $\text{Cu}_6\text{Sn}_5 + \text{Cu}_3\text{Sn}$ มีค่าใกล้เคียงกันเช่นเดียวกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ที่มีความใกล้เคียงกันเมื่อความเข้มข้นของ In เพิ่มขึ้น แต่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะมากขึ้นตามอุณหภูมิการบ่มที่เพิ่มขึ้น และสัมประสิทธิ์การแพร่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn ก็มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ใกล้เคียงกันเมื่อความเข้มข้นของ In เพิ่มขึ้น และมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มากขึ้นตามอุณหภูมิการบ่มที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.11-4.13 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่มีแนวโน้มลดลงและสังเกตได้อย่างชัดเจน คือ ชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn ซึ่งมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของ In เพิ่มขึ้น แต่ที่อุณหภูมิการบ่ม 100°C ไม่สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ได้เนื่องจากชั้น Cu_3Sn ไม่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิการบ่มนี้

ตารางที่ 4.11 สัมประสิทธิ์การแพร่ (D) ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม

Cu ₆ Sn ₅ +Cu ₃ Sn			
โลหะบัดกรี	สัมประสิทธิ์การแพร่ D (m ² /s)		
	100 °C	135 °C	170 °C
Sn-0.3Ag-0.7Cu	0.49×10 ⁻¹⁸	49.0×10 ⁻¹⁸	49.0×10 ⁻¹⁸
Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In	1.00×10 ⁻¹⁸	16.0×10 ⁻¹⁸	49.0×10 ⁻¹⁸
Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In	1.00×10 ⁻¹⁸	9.00×10 ⁻¹⁸	49.0×10 ⁻¹⁸
Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In	1.00×10 ⁻¹⁸	25.0×10 ⁻¹⁸	49.0×10 ⁻¹⁸
Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In	0.25×10 ⁻¹⁸	4.00×10 ⁻¹⁸	36.0×10 ⁻¹⁸
Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In	0.25×10 ⁻¹⁸	25.0×10 ⁻¹⁸	25.0×10 ⁻¹⁸
Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In	0.16×10 ⁻¹⁸	4.00×10 ⁻¹⁸	49.0×10 ⁻¹⁸

ตารางที่ 4.12 สัมประสิทธิ์การแพร่ (D) ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu₆Sn₅

Cu ₆ Sn ₅			
โลหะบัดกรี	สัมประสิทธิ์การแพร่ D (m ² /s)		
	100 °C	135 °C	170 °C
Sn-0.3Ag-0.7Cu	0.49×10 ⁻¹⁸	16.0×10 ⁻¹⁸	9.00×10 ⁻¹⁸
Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In	1.00×10 ⁻¹⁸	9.00×10 ⁻¹⁸	16.0×10 ⁻¹⁸
Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In	1.00×10 ⁻¹⁸	1.00×10 ⁻¹⁸	16.0×10 ⁻¹⁸
Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In	1.00×10 ⁻¹⁸	16.0×10 ⁻¹⁸	16.0×10 ⁻¹⁸
Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In	0.25×10 ⁻¹⁸	1.00×10 ⁻¹⁸	16.0×10 ⁻¹⁸
Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In	0.25×10 ⁻¹⁸	16.0×10 ⁻¹⁸	9.00×10 ⁻¹⁸
Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In	0.16×10 ⁻¹⁸	4.00×10 ⁻¹⁸	25.0×10 ⁻¹⁸

ตารางที่ 4.13 สัมประสิทธิ์การแพร่ (D) ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu₃Sn

Cu ₃ Sn			
โลหะบัดกรี	สัมประสิทธิ์การแพร่ D (m ² /s)		
	100 °C	135 °C	170 °C
Sn-0.3Ag-0.7Cu	-	4.00×10 ⁻¹⁸	16.0×10 ⁻¹⁸
Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In	-	4.00×10 ⁻¹⁸	9.00×10 ⁻¹⁸
Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In	-	4.00×10 ⁻¹⁸	9.00×10 ⁻¹⁸
Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In	-	4.00×10 ⁻¹⁸	4.00×10 ⁻¹⁸
Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In	-	1.00×10 ⁻¹⁸	4.00×10 ⁻¹⁸
Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In	-	0.64×10 ⁻¹⁸	4.00×10 ⁻¹⁸
Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In	-	0.49×10 ⁻¹⁸	4.00×10 ⁻¹⁸

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 พลังงานกระตุ้นการเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

ขณะที่กลไกการเพิ่มความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิจะกำหนดด้วยสมการอาร์เรเนียส

$$D = D_0 e^{-Q/RT} \quad (4.5)$$

เมื่อ D_0 คือ ค่าคงที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) Q คือ พลังงานกระตุ้นของการแพร่ (J/mol , cal/mol หรือ eV/atom) R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 J/mol-K หรือ 1.987 cal/mol-K) และ T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) เมื่อใส่ลอการิทึมธรรมชาติกับสมการ (4.5) จะได้

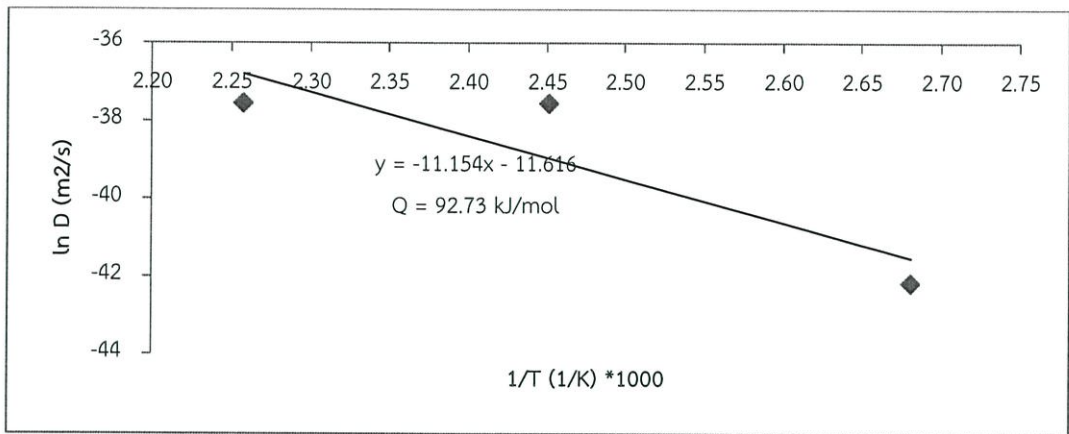
$$\ln D = \ln D_0 - \frac{Q}{R} \left(\frac{1}{T} \right) \quad (4.6)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของสัมประสิทธิ์การแพร่ $\ln D$ กับส่วนกลับของอุณหภูมิสัมบูรณ์ $1/T$ จากสมการที่ 4.6 และข้อมูลในตารางที่ 4.14 พลังงานกระตุ้นสามารถกำหนดจากความชันของเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 4.25-4.27

ตารางที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln D$ กับ $1/T$ ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu กับทองแดง

Solder	Temperature (°C)/(K)	Intermetallic phase	$\ln D$	$1/T$ (1/K)*1000
Sn-0.3Ag0.7Cu	100/373	Cu ₆ Sn ₅ +Cu ₃ Sn	-42.16	2.68
		Cu ₆ Sn ₅	-42.16	2.68
		Cu ₃ Sn	-	2.68
	135/408	Cu ₆ Sn ₅ +Cu ₃ Sn	-37.55	2.45
		Cu ₆ Sn ₅	-38.67	2.45
		Cu ₃ Sn	-40.06	2.45
	170/443	Cu ₆ Sn ₅ +Cu ₃ Sn	-37.55	2.26
		Cu ₆ Sn ₅	-39.25	2.26
		Cu ₃ Sn	-38.67	2.26

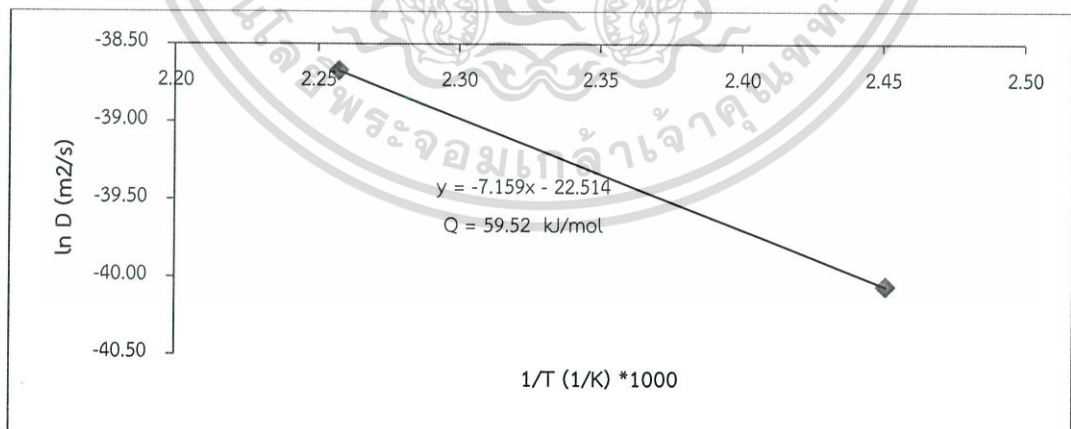
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม ($Cu_6Sn_5+Cu_3Sn$)



รูปที่ 4.26 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5



รูปที่ 4.27 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ $\text{Cu}_6\text{Sn}_5+\text{Cu}_3\text{Sn}$, Cu_6Sn_5 และ Cu_3Sn เท่ากับ 92.73, 59.25 และ 59.52 kJ/mol ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.15 สัมประสิทธิ์การแพร่ที่แตกต่างกันจะเป็นดัชนีชี้บอกถึงอัตราเร็วของอะตอมนั้นๆ จะแพร่ไปได้ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะแปรผันตามอุณหภูมิ ทั้งการแพร่โดยอาศัยช่องว่าง และการแพร่แบบแทรกที่ล้วนมีผลต่อสัมประสิทธิ์การแพร่

ตารางที่ 4.15 สัมประสิทธิ์การแพร่ ค่าคงที่การแพร่ และพลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu กับทองแดง

Solder	Intermetallic phase	Temperature (°C)/(K)	D (m ² /s)	D ₀ (m ² /s)	Q (kJ/mol)
Sn-0.3Ag-0.7Cu	$\text{Cu}_6\text{Sn}_5+\text{Cu}_3\text{Sn}$	100/373	4.9×10^{-19}	1.5×10^{-7}	92.73
		135/408	4.9×10^{-17}		
		170/443	4.9×10^{-17}		
	Cu_6Sn_5	100/373	4.9×10^{-19}	7.78×10^{-12}	59.25
		135/408	1.6×10^{-17}		
		170/443	9.0×10^{-18}		
	Cu_3Sn	100/373	-	1.74×10^{-13}	59.52
		135/408	4.0×10^{-18}		
		170/443	1.6×10^{-17}		

โดยทั่วไปพลังงานกระตุ้นอาจถูกมองว่าเป็นพลังงานที่จำเป็นในการทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอะตอม หากค่าพลังงานกระตุ้นนี้สูงจะทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำ ซึ่งจะมีผลทำให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีการเติบโตช้า พลังงานกระตุ้นในชั้นสารประกอบเชิงโลหะ $\text{Cu}_6\text{Sn}_5+\text{Cu}_3\text{Sn}$, Cu_6Sn_5 และ Cu_3Sn ที่ได้ตามปริมาณของ In ดังแสดงในตารางที่ 4.16 ค่าพลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 มีค่าน้อยนั้นหมายความว่าชั้น Cu_6Sn_5 เกิดขึ้นได้ง่ายกว่าเมื่อเทียบกับชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม โดยพลังงานกระตุ้นจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณ In นั้นแสดงว่า In ทำให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะเติบโตได้ยาก และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ พบว่าค่าพลังงานกระตุ้นที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีลักษณะคล้ายกัน คือ ชั้น Cu_6Sn_5 จะมีพลังงานกระตุ้นน้อยกว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม ส่วนค่าที่แตกต่างกันอาจเนื่องมาจากปัจจัยหลายอย่าง เช่น วิธีการทดลอง วิธีการวัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ และปัจจัยอื่นๆ ที่ควบคุมไม่ได้ สำหรับการหาค่าพลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ $\text{Cu}_6\text{Sn}_5+\text{Cu}_3\text{Sn}$, Cu_6Sn_5 และ Cu_3Sn ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn จะแสดงไว้ในภาคผนวก ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.16 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ $\text{Cu}_6\text{Sn}_5+\text{Cu}_3\text{Sn}$, Cu_6Sn_5 และ Cu_3Sn

โลหะบัดกรี	พลังงานกระตุ้น Q (kJ/mol)			
	$\text{Cu}_6\text{Sn}_5+\text{Cu}_3\text{Sn}$	Cu_6Sn_5	Cu_3Sn	Refs
Sn-0.3Ag-0.7Cu	92.73	59.26	59.52	This work
Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In	77.12	55.19	34.82	
Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In	76.47	52.73	34.82	
Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In	77.62	55.83	0.00	
Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In	97.62	80.64	59.52	
Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In	92.73	72.81	78.68	
Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In	112.47	99.67	90.15	
Sn-0.3Ag-0.7Cu	80.56	51.59	119.04	[21]
Sn-3.8Ag-0.7Cu	-	-	119.80	[25]
Sn-3.5Ag	75.16	58.59	-	[28]
Sn-5Bi	107.10	98.35	90.50	[29]
Sn-3.0Ag-0.5Cu	79.90	41.30	-	[30]

ดังนั้นจากพลังงานกระตุ้นที่เพิ่มขึ้นนี้สามารถบอกได้ว่าปริมาณ In เพิ่มขึ้นทำให้การเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะช้าลง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาอิทธิพลของธาตุอินเดียม (In) ต่อการกระจายตัวและการเกิดสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu บนแผ่นทองแดง หลังการทดสอบการกระจายตัวและการบ่มด้วยอุณหภูมิและเวลา สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การกระจายตัวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติม In มากขึ้น เช่น ค่าตัวประกอบการกระจายตัวและอัตราส่วนการกระจายตัวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากการเติม In โดยมุมสัมผัสของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดงมีค่าลดลง ดังนั้น In จึงเป็นตัวช่วยเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรี

2. จากการตรวจสอบชั้นสารประกอบเชิงโลหะด้วย SEM ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu ทุกความเข้มข้นของ In (0-3 wt%) พบว่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงว่า In ไม่มีผลต่อความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn กับแผ่นทองแดงหลังจากการบัดกรี

3. จากการตรวจสอบชั้นสารประกอบเชิงโลหะด้วย SEM ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu ทุกความเข้มข้นของ In (0-3 wt%) กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100, 135 และ 170 °C ด้วยเวลา 1, 10, 100, 1000 ชั่วโมง พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นมีความหนาเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการบ่ม

4. จากการตรวจสอบปริมาณธาตุในชั้นสารประกอบเชิงโลหะด้วย SEM และ EDX ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu ทุกความเข้มข้นของ In (0-3 wt%) กับแผ่นทองแดง พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้น คือ Cu_6Sn_5 ในทุกกรณี หลังการบ่มด้วยความร้อนอุณหภูมิ 100, 135 และ 170 °C ด้วยเวลา 1, 10, 100, 1000 ชั่วโมง พบว่าเกิดสารประกอบเชิงโลหะชั้นที่สอง คือ Cu_3Sn ชั้นที่อุณหภูมิ 135 °C เวลา 100 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 170 °C เวลา 1 ชั่วโมง

5. สำหรับชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn ของทุกระดับการเติม In (0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 wt%) พบว่าความหนาเฉลี่ยลดลงตามปริมาณ In ที่เพิ่มขึ้นหลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100, 135 และ 170 °C ด้วยเวลา 1, 10, 100, 1000 ชั่วโมง ดังนั้น In มีผลทำให้ความหนาของ Cu_3Sn ลดลงเมื่อปริมาณ In เพิ่มขึ้น

6. ความเข้มข้นของ In ไม่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ โดยสัมประสิทธิ์การแพร่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการบ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. พลังงานกระตุ้นการเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ In ในโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu เพิ่มขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรศึกษาเพิ่มเติมด้านคุณสมบัติการนำไฟฟ้า การเติมธาตุที่ช่วยให้โลหะบัดกรีมีความเงางาม การล้าตัว และการคืบ รวมไปถึงการเติมอินเดียมในปริมาณที่สูงขึ้นเนื่องจากปัจจัยเหล่านี้จะช่วยเพิ่มความเชื่อมั่นในการเลือกใช้โลหะบัดกรี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Bradley E., Handwerker C.A., Bath J., Parker R.D. and Gedney R.W. **Lead-Free Electronics iNEMI Projects Lead to Successful Manufacturing**. Chapter 10, United State of America. IEEE Press. 2007.
- [2] Abtew, M., Selvaduray, G. "Lead-free Solders in Microelectronics." **Materials Science and Engineering R**, Vol.27, 2000. Pp. 95-141
- [3] Kaihwa, C., Vincent, K., Jennie S.H. "Comparative Wetting Ability of Lead-Free Alloys." **Singapore Asahi Chemical & Solder Ind. Pte. Cleve land**. 2003.
- [4] Mahmudi R., and Mahin-Shirazi S. "Effect of Sb Addition on The Tensile Deformation Behavior of Lead-Free Sn-3.5Ag Solder Alloy." **Materials and Design**, 32, 2011. Pp. 5027-5032
- [5] ฉวีวรรณ ลิมสุวรรณ. "การศึกษาอิทธิพลของอินเดียมต่อคุณสมบัติและโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551.
- [6] รชต คงขยาสุขวัฒน์, กัลยา ผาโผน, กรรณชัย กัลยาศิริ. "การศึกษาอิทธิพลของธาตุ In, Bi, Sb และ Ag ต่อสมบัติทางกายภาพของโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.6Cu-0.05Ni-Ge." **การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม**, ตุลาคม 2555.
- [7] Fallahi H., Nurulakmal M.S., Arezodar A.F. and Abdullah J. "Effect of Iron and Indium on IMC Formation and Mechanical Properties of Lead-Free Solder. Materials." **Science and Engineering A**, 553, 2012. Pp. 22-31
- [8] Kanlayasiri K., Mongkolwongrojn M. and Ariga T. "Influence of Indium Addition on Characteristics of Sn-0.3Ag-0.7Cu Solder Alloy." **Journal of Alloys and Compounds**, 485, 2009. Pp. 225-230
- [9] Moser Z., Sebo P., Gasior W., Svec P. and Pstrus J. "Effect of Indium on Wettability of Sn-Ag-Cu Solders. Experiment vs. Modeling Part I." **CALPHAD: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry**, 33, 2009. Pp 63-68
- [10] Sebo P., Moser Z., Svec P., Janickovic D., Dobrocka E., Gasior W. and Pstrus J. "Effect of Indium on The Microstructure of The Interface between Sn3.13Ag0.74CuIn Solder and Cu Substrate." **Journal of Alloys and Compounds**, 480, 2009. Pp. 409-415

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [11] นิวัฒน์ มุแก้ม, กรรณชัย กัลยาศิริ. “วิวัฒนาการของชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu และโลหะพื้นทองแดง.” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, ปีที่ 7, พฤษภาคม 2552. หน้า 445-449
- [12] Sharif A., Chan Y.C. “Effect of Indium Addition in Sn-Rich Solder on Dissolution of Cu Metallization.” *Journal of Alloys and Compounds*, 390, 2005. Pp. 67-73
- [13] Lin S.-K., Hsu Ch.-W., Chen S.-W. and Hsu Ch.-M. “Interfacial Reactions in Sn-20In-2.8Ag/Cu Couples.” *Materials Chemistry and Physics*, 142, 2013. Pp. 268-275
- [14] Lejuste Ch., Hodaj F. and Petit L. “Solid State Interaction between a Sn-Ag-Cu-In Solder Alloy and Cu Substrate.” *Intermetallics*, 36, 2013. Pp. 102-108
- [15] Hodulova E., Palcut M., Lechovic E., Simekova B. and Ulrich K. “Kinetics of Intermetallic Phase Formation at The Interface of Sn-Ag-Cu-X (X=Bi, In) Solder with Cu Substrate.” *Journal of Alloys and Compounds*, 509, 2011. Pp. 7052-7059
- [16] กรรณชัย กัลยาศิริ. “อิทธิพลของการบ่มด้วยความร้อนที่มีต่อความแข็งแรงจุลภาคและโครงสร้างจุลภาค ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn.” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, ปีที่ 8, เมษายน 2553. หน้า 485-490
- [17] Kim D.-G., Jung S.-B. “Interfacial Reaction and Growth Kinetics for Intermetallic Compound Layer between In-48Sn Solder and Bar Cu Substrate.” *Journal of Alloys and Compounds*, 386, 2005. Pp. 151-156
- [18] Sebo P., Svec P., Janickovic D. and Stefanik P. “Influence of Thermal Cycling on Shear Strength of Cu-Sn-3.5Ag-xIn-Cu Joint with Various Content of Indium.” *Journal of Alloys and Compounds*, 463, 2008. Pp. 168-172
- [19] Lee Ch., Yu A., Yan L., Wang H., He J.H., Zhang Q.X. and Lau J.H. “Characterization of Intermediate In/Ag Layers of Low Temperature Fluxes Solder Based Wafer Bonding for MEMS Packaging.” *Sensors and Actuators A Physical*, 154, 2009. Pp. 85-91
- [20] Chen J., Shen J., Lai S., Min D. and Wang X. “Microstructural Evolution of Intermetallic Compound in Sn-3.5Ag-X (X=0, 0.75Ni, 1.0Zn and 1.5In)/Cu Solder Joints during Liquid Aging.” *Journal of Alloys and Compounds*, 489, 2010. Pp. 631-637

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [21] Mookam, N., Kanlayasiri, K. "Evolution of Intermetallic Compounds between Sn-0.3Ag-0.7Cu Low-Silver Lead-Free Solder and Cu Substrate during Thermal Aging." *Journal of Materials Science and Technology*, 28(1), 2012. Pp. 53-59
- [22] Noor E.E.M., Sharif N.M., Kuan Yew Ch., Ariga T., Badri Ismail A. and Hussain Z. "Wettability and Strength of In-Bi-Sn Lead-Free Solder Alloy on Copper Substrate." *Journal of Alloys and Compounds*, 507, 2010. Pp. 290-296
- [23] Chang T.-Ch., Wang J.-W., Wang M.-Ch. and Hon M-H. "Solderability of Sn-9Zn-0.5Ag-1In Lead-Free Solder on Cu Substrate Part 1. Thermal Properties, Microstructure, Corrosion and Oxidation Resistance." *Journal of Alloys and Compounds*, 422, 2006. Pp. 239-243
- [24] Test Methods for Lead-Free Solder. "Methods for Spread Test, JIS Z 3198-3." *Japanese Standard Association*, Part 3, 2003.
- [25] Peng W., Monlevade E., and Marques M.E. "Effect of Thermal Aging on The Interfacial Structure of SnAgCu Solder Joints on Cu." *Microelectronics Reliability*, 47, 2007. Pp. 2161-2168
- [26] Massalski T.B. *Binary Alloy Phase Diagrams*. 2nd ED. Vol.3. United State of America. ASM International 2001.
- [27] Lee J.-H., Yu A.-M., Kim J.-H., Kim M.-S. and Kang N. "Reaction Properties and Interfacial Intermetallic for Sn-xAg-Cu Solder as a Function of Ag Content." *Metals and Materials International*, 14, 2008. Pp. 649-654
- [28] Yu D.-G., Wu C.-M.-L., Law C.-M.-T., Wang L. and Lai J.-K.-L. "Intermetallic Compounds Growth between Sn-3.5Ag Lead-Free Solder and Copper Substrate by Dipping Method." *Journal of Alloys and Compounds*, 392, 2005. Pp. 192-199
- [29] Yoon J.-W., Jung S.-B. "Investigation of Interfacial Reaction between Sn-5Bi Solder and Cu Substrate." *Jpurnal of Alloys and Compounds*, 359, 2003. Pp. 202-208
- [30] Yoon J.-W., Noh B.-I., Lee Y.-H., Lee H.-S. and Jung S.-B. "Effects of Isothermal Aging and Temperature-Humidity Treatment of Substrate on Joint Reliability of Sn-3.0Ag-0.5Cu/OSP-Finished Cu CSP Solder Joint." *Microelectronics Reliability*, 48, 2008. Pp. 1864-1874

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



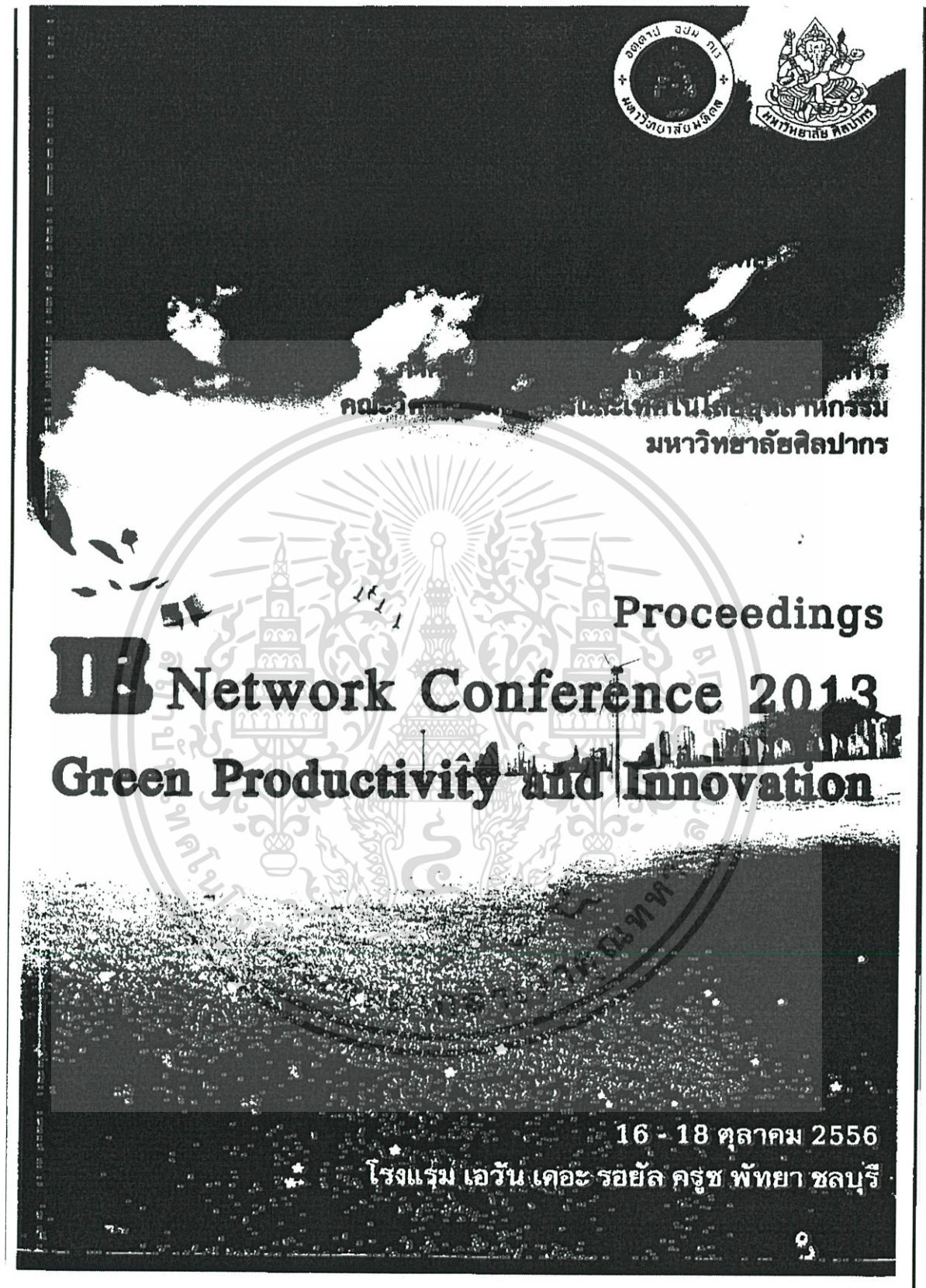
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาอิทธิพลของอินเดียมต่อการกระจายตัวและการเกิดสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn บนแผ่นทองแดง
A Study on Influence of Indium on Wettability and Intermetallic Compound Formation between Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn Lead Free Solder and Copper Substrate

กำธร สุขพิมาย¹ กัลยา ผาโหม² กรรณชัย กัลยาศิริ³
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
กรุงเทพมหานคร 10520
บริษัท อุลตราคอร์ จำกัด 1417 หมู่ 4 ซ.ศรีบุญเรือง 1 ต.เทพารักษ์ ต.เทพารักษ์ อ.เมืองสมุทรปราการ 10270
E-mail: kskamtor@kmitl.ac.th

Kamtom Sukpimai¹ Kanlaya Phaphon² Kannachai Kanlayasin³
^{1,2}Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520
²ULTRACORE CO., LTD. 1417 Moo 4, Soi Sriboonnuang1, Teparak Rd., Tambol Teparak,
Amphur Muang, Samutprakam, 10270
E-mail: kskamtor@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษา อิทธิพลของอินเดียมที่มีต่อการกระจายตัวและการเกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn กับแผ่นทองแดง โดยทำการเติมธาตุอินเดียม ปริมาณ 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 wt% การกระจายตัวของโลหะบัดกรีทดสอบโดยวิธี Spread test ที่อุณหภูมิ 260 °C เป็นเวลา 30 วินาที พบว่าค่าตัวประกอบ การกระจายตัว และค่าอัตราส่วนการกระจายตัวมีค่าเพิ่มขึ้นและพบว่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดงมีค่าลดลง เมื่อปริมาณของอินเดียมเพิ่มขึ้น โดย อินเดียมที่เติมเข้าไปไม่มีผลต่อความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะบัดกรี กับแผ่นทองแดง และพบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นที่ทุกส่วนผสม คือ Cu₆Sn₅
คำหลัก โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว การกระจายตัว สารประกอบเชิงโลหะ การบัดกรี

การประชุมวิชาการย้ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2556
16-18 ตุลาคม 2556 พัทยา ชลบุรี

การศึกษาอิทธิพลของอินเดียมต่อการกระจายตัวและการเกิดสารประกอบเชิง
โลหะของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn บนแผ่นทองแดง
A Study on Influence of Indium on Wettability and Intermetallic Compound
Formation between Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn Lead Free Solder and Copper
Substrate

กำธร สุขพิมาย¹ กัลยา ฝ่าโชน² กรรณชัย กัลยาศิริ³
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
กรุงเทพมหานคร 10520
บริษัท อุลตร้าคอร์ จำกัด 1417 หมู่ 4 ซ.ศรีบุญเรือง 1 ถ.เทพารักษ์ ต.เทพารักษ์ อ.เมืองสมุทรปราการ 10270
E-mail: kskamtor@kmitl.ac.th

Kamtorn Sukplimai¹ Kanlaya Phaphon² Kannachai Kanlayasiri³
^{1,3}Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520
²ULTRACORE CO., LTD. 1417 Moo 4, Soi Sriboonruang1, Teparak Rd., Tambol Teparak,
Amphur Muang, Samutprakam, 10270
E-mail: kskamtor@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของอินเดียมที่มีต่อการกระจายตัวและการเกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn กับแผ่นทองแดง โดยทำการเติมธาตุอินเดียมปริมาณ 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 wt% การกระจายตัวของโลหะบัดกรีทดสอบโดยวิธี Spread test ที่อุณหภูมิ 260 °C เป็นเวลา 30 วินาที พบว่าค่าตัวประกอบการกระจายตัวและค่าอัตราส่วนการกระจายตัวมีค่าเพิ่มขึ้นและพบว่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดงมีค่าลดลง เมื่อปริมาณของอินเดียมเพิ่มขึ้น โดยอินเดียมที่เติมเข้าไปไม่มีผลต่อความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะบัดกรีกับแผ่นทองแดง และพบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นนี้ทุกส่วนผสม คือ Cu₆Sn₅
คำหลัก โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว การกระจายตัว สารประกอบเชิงโลหะ การบัดกรี

Abstract

This research was studied on influence of indium on wettability and intermetallic compound formation between Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn lead-free solder and copper substrate. Indium was added into the basic solder at 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 and 3.0 wt%, and wettability of solders on the substrate was measured using spreading test at 260 °C for 30 seconds. It was found that spread factor, and spread ratio increase with the increase of indium, and contact angle decreases with the increase of indium. The addition of indium had no effect on thickness of intermetallic compound layer at the interface. In addition, intermetallic compound founded at the interface was Cu₆Sn₅ in all cases.

Keywords: Lead-free solder, Wettability, Intermetallic compound, Soldering

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

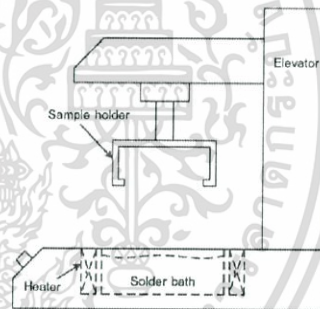
ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ การบัดกรีมีความสำคัญมากในการประกอบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์เข้ากับแผงวงจร เนื่องจากชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็กและทนความร้อนได้ต่ำ จำเป็นต้องใช้วิธีการบัดกรีแทนการเชื่อมประสานแบบอื่น การบัดกรีจึงได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในงานที่เกี่ยวข้องกับอิเล็กทรอนิกส์ โลหะบัดกรีที่ใช้ในอดีตมีส่วนผสมของตะกั่ว แต่เนื่องจากตะกั่วเป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม จึงได้มีการออกข้อบังคับเกี่ยวกับการห้ามใช้สารอันตรายในผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ หรือ Restriction on Hazardous Substance (RoHS) ที่กำหนดโดยคณะกรรมาธิการยุโรป หรืออีซี (EC-European Commission) [1] ทำให้มีการห้ามใช้สารตะกั่วในโลหะบัดกรี ซึ่งในหลายประเทศมีการห้ามใช้สารตะกั่วแล้ว เช่น สหรัฐอเมริกา สหภาพยุโรป และญี่ปุ่น เพื่อทดแทนการใช้สารตะกั่วจึงได้มีการหาวัสดุอื่นที่มีความสามารถใกล้เคียงหรือดีกว่าตะกั่ว ใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติในการบัดกรีให้ดีขึ้น โดยยังคงใช้ดีบุกเป็นธาตุหลักในโลหะบัดกรี และได้มีการพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีส่วนผสมของธาตุต่างๆขึ้นมาเช่น Sn-Cu, Sn-Ag, Sn-Zn, Sn-Bi, Sn-Sb, Sn-Bi-Ag, Sn-Bi-Cu, Sn-Ag-Cu และ Sn-Ag-Sb [1-3] ซึ่งส่วนผสมที่นิยมใช้กันมากคือ Sn-Ag-Cu (SAC) เพราะมีความแข็งแรงสูงและมีความสามารถในการบัดกรีที่ดีสำหรับการบัดกรีแบบคลื่น (Wave soldering) โดยโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-3.0Ag-0.5Cu เป็นที่นิยมใช้กันมากที่สุด แต่โลหะบัดกรีชนิดนี้มีราคาค่อนข้างสูงเนื่องจากมีเงิน (Ag) ผสมอยู่ถึง 3% โดยน้ำหนักและมีจุดหลอมเหลวที่สูง (216-221 °C) สำหรับโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu เป็นโลหะบัดกรีอีกชนิดหนึ่งในกลุ่ม SAC ที่มีจุดหลอมเหลวใกล้เคียงกันที่ 217 °C [4] แต่มีราคาถูกกว่ามากเนื่องจากมีเงินผสมน้อยลง แต่ Sn-0.3Ag-0.7Cu ก็ยังมีจุดหลอมเหลวสูงกว่าโลหะบัดกรีชนิดเดิม คือ Sn-Pb eutectic ที่มีจุดหลอมเหลวที่ 183 °C [5] จากงานวิจัยของ Kanlayasiri และคณะพบว่า การเติมธาตุอินเดียมจะช่วยลดจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu ลงได้ [6]

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาค่าอิทธิพลของธาตุอินเดียม (In) ที่มีต่อความสามารถในการกระจายตัว (Wettability) ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn บนแผ่นรองทองแดง (Copper substrate) รวมทั้งศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อหลังจากการบัดกรีเข้ากับแผ่นรองทองแดง

2. การทดลอง

2.1 วัสดุและวิธีการทดลอง

ชิ้นงานทดสอบจะใช้แผ่นทองแดงบริสุทธิ์ 99.99% ขนาด 30 x 30 x 0.35 มิลลิเมตร เป็นแผ่นรองในการบัดกรี โดยใช้โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn และจะทำการหล่อโลหะบัดกรีเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 มิลลิเมตร หนา 1.6 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน JIS Z 3198-3 [7] ใช้ฟลักซ์ชนิด AMR N-3126 ซึ่งเครื่องที่ใช้ในการทดสอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีมีลักษณะดังรูปที่ 1 โดยวางชิ้นงานโลหะบัดกรีบนแผ่นรองทองแดงที่ติดตั้งบน Sample holder



รูปที่ 1 โครงสร้างเครื่องทดสอบการกระจายตัว [7]

การทดสอบการกระจายตัวทำที่อุณหภูมิ 260°C และใช้เวลาหลอมโลหะบัดกรีบนแผ่นรองทองแดง 30 วินาที นับจากโลหะบัดกรีเริ่มหลอมเหลว [7] จากนั้นยกชิ้นงานขึ้นและปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง แล้วล้างฟลักซ์ออกด้วยโพพรานอล โดยทำการทดลองซ้ำตัวอย่างละ 5 ชิ้น จากนั้นวัดค่าความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรีที่แข็งตัว แล้วใช้ไมโครมิเตอร์และโปรแกรม Image-

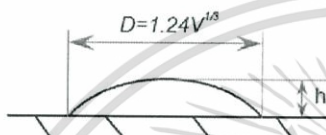
pro Express แล้วนำมาคำนวณตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor: S_r) ดังสมการที่ 1

$$S_r = \frac{D-h}{D} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ h คือ ความสูงของโลหะบัดกรีที่แผ่กระจาย และ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางโลหะบัดกรีที่ถูกทดสอบเมื่อ

$$D = 1.24V^{1/3} \quad (2)$$

โดย V คือปริมาตรของโลหะบัดกรีที่ใช้ทดสอบ และรูปที่ 2 แสดงรูปร่างของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดง



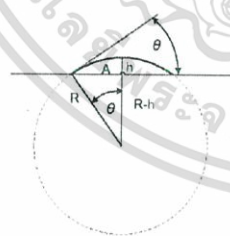
รูปที่ 2 ความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางโลหะบัดกรี

นอกจากนี้การกระจายตัวของโลหะบัดกรีที่สามารถคำนวณเป็นค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio: S_r) ได้จากสมการที่ 3

$$S_r = \frac{\text{Plan area of spread on the substrate surface}}{\text{Plan area of the original pellet}} \quad (3)$$

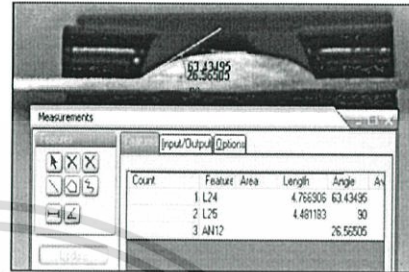
และความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดงยังสามารถวัดได้โดยใช้ค่ามุมสัมผัส (Contact angle) ดังแสดงในสมการที่ 4 และในรูปที่ 3 แสดงตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการคำนวณหาตามมุมสัมผัส

$$\sin \theta = \frac{2}{(A/h + h/A)} \quad (4)$$



รูปที่ 3 มุมสัมผัสบนแผ่นทองแดง

เมื่อ θ คือ มุมสัมผัส A คือ รัศมีของโลหะบัดกรี และ h คือ ความสูงของโลหะบัดกรี รูปที่ 4 แสดงการวัดค่ามุมสัมผัสจากชิ้นงานทดสอบ โดยใช้โปรแกรม Image-pro Express ในการวัด



รูปที่ 4 การวัดมุมสัมผัสด้วยโปรแกรม Image-pro Express

2.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

นำชิ้นงานที่เป็นตัวหลังจากการทดลองมาตัดด้วยเครื่องตัดแบบแรงโน้มถ่วง ตัดชิ้นงานบริเวณเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรีที่หลอมบนแผ่นทองแดง แล้วนำชิ้นงานไปหล่อเรซินและขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400, 800, 1,200 และ 4,000 จากนั้นขัดด้วยผงอะลูมินา (Al_2O_3) ขนาด 1.0 ไมโครเมตร จากนั้นนำไปตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope) และในการศึกษาชิ้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นและองค์ประกอบทางเคมีจะใช้ Scanning electron microscope (SEM) และ Energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX)

3. ผลการทดลอง

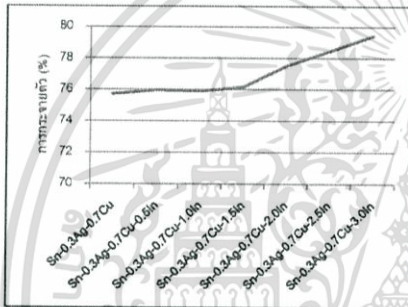
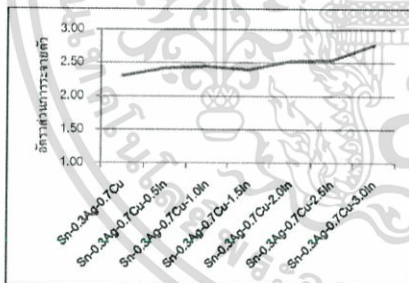
3.1 ความสามารถในการกระจายตัว

จากการทดลองหาความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn บนแผ่นทองแดง ผลค่าตัวประกอบการกระจายตัวและอัตราส่วนการกระจายตัวแสดงในตารางที่ 1 จะเห็นว่าการกระจายตัวของโลหะบัดกรีมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณ In เพิ่มขึ้น เนื่องจาก In สามารถลดแรงตึงผิวของโลหะบัดกรีได้ [6] นั่นคือ In สามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการเชื่อมประสานของโลหะบัดกรีกับแผ่นทองแดง เมื่อเทียบกับโลหะบัดกรีพื้นฐานที่มี

ค่าตัวประกอบการกระจายตัว 75.71 % และอัตราการกระจายตัว 2.30 แต่เมื่อมีการเติมธาตุ In จะมีค่าตัวประกอบการกระจายตัวและอัตราการกระจายตัวที่เพิ่มขึ้น รูปที่ 5 และ 6 แสดงค่าตัวประกอบและอัตราการกระจายตัวของโลหะบัดกรี

ตารางที่ 1 ค่าตัวประกอบและอัตราการกระจายตัว

โลหะบัดกรี	S_r (%)	S_r
Sn-0.3Ag-0.7Cu	75.71	2.30
Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In	75.97	2.42
Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In	75.90	2.45
Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In	76.17	2.40
Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In	77.51	2.53
Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In	78.44	2.54
Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In	79.43	2.77

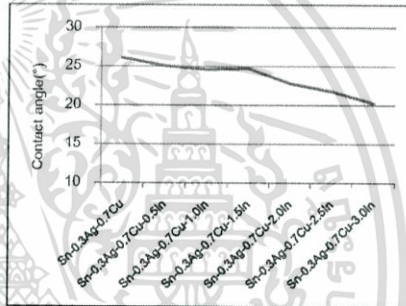
รูปที่ 5 ค่าตัวประกอบการกระจายตัว (S_r)รูปที่ 6 อัตราการกระจายตัว (S_r)

จากตารางที่ 2 และรูปที่ 7 พบว่าค่ามุมสัมผัสมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ In ซึ่งเป็นผลที่สอดคล้องกับค่า S_r และ S_r และจากการเปรียบเทียบค่ามุมสัมผัสที่คำนวณได้

จากสมการที่ 4 กับค่าที่วัดได้จึงจากขึ้นงานทดสอบพบว่าค่าทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันดังแสดงในตารางที่ 2 และจากการทดลองนี้ยังพบว่าลักษณะของผิวโลหะบัดกรีที่มีการเติม In จะมีสีนูนเมื่อเทียบกับโลหะบัดกรีพื้นฐาน Sn-0.3Ag-0.7Cu โดยความนูนจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ In ที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2 มุมสัมผัสของโลหะบัดกรี

โลหะบัดกรี	ค่าการคำนวณ ($^{\circ}$)	ค่าจริง ($^{\circ}$)
Sn-0.3Ag-0.7Cu	26.1	26.56
Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In	25.1	24.99
Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In	24.6	21.81
Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In	24.7	26.06
Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In	22.8	22.12
Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In	21.8	22.34
Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In	20.3	20.45



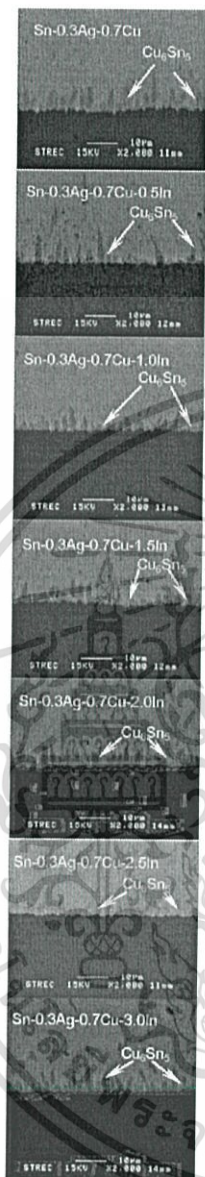
รูปที่ 7 มุมสัมผัสของโลหะบัดกรี

3.2 โครงสร้างจุลภาค

จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้ SEM และ EDX ที่รอยบัดกรีพบว่าเกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn กับแผ่นรองทองแดงขึ้น โดยรูปโครงสร้างจุลภาคจากการใช้ SEM กำลังขยาย 2,000 เท่าสำหรับทุกระดับของการเติม In แสดงในรูปที่ 8

การประชุมวิชาการถ่ายทอดนวัตกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2556

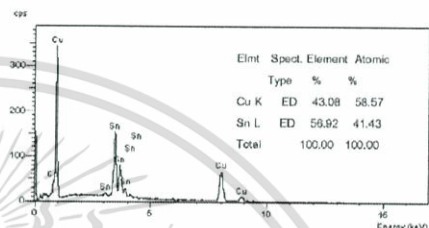
16-18 ตุลาคม 2556 พัทยา ชลบุรี



รูปที่ 8 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรีกับแผ่นทองแดง

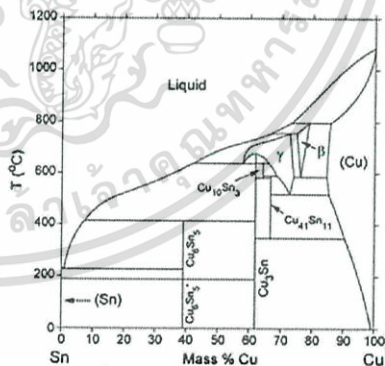
จากการวิเคราะห์ด้วย EDX พบองค์ประกอบของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นตรงรอยต่อระหว่างโลหะ

บัดกรีกับแผ่นทองแดง คือ สารประกอบเชิงโลหะ Cu₆Sn₅ ดังแสดงในรูปที่ 9 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu₆Sn₅ ที่เกิดขึ้นมีความหนาประมาณ 2.1 µm โดยไม่พบความแตกต่างของความหนาย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นใกล้เคียงกันนี้บ่งบอกให้เห็นว่า In ไม่มีผลต่อความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างรอยต่อของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn กับแผ่นทองแดงหลังจากการบัดกรี



รูปที่ 9 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของชั้น Cu₆Sn₅

รูปที่ 10 แสดงแผนภูมิเฟสของดีบุกกับทองแดงสำหรับการเกิดสารประกอบเชิงโลหะบนรอยต่อของโลหะบัดกรีกับแผ่นทองแดง ในการทดลองนี้พบเฉพาะ Cu₆Sn₅ โดยไม่พบสารประกอบเชิงโลหะชนิดอื่น ซึ่งสมการที่ 5 แสดงสมการทางเคมีของการเกิดสารประกอบเชิงโลหะ Cu₆Sn₅ โดยพบว่า การเกิด Cu₆Sn₅ นี้สอดคล้องกับผลการวิจัยอื่นๆ ในการบัดกรีโลหะบัดกรีกลุ่ม SAC กับแผ่นทองแดง [8-13]



รูปที่ 10 แผนภูมิเฟสของดีบุก-ทองแดง [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. สรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของธาตุอินเดียมที่มีต่อการกระจายตัวและชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn บนแผ่นรองทองแดง ซึ่งพบว่าค่าตัวประกอบการกระจายตัวและอัตราส่วนการกระจายตัวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากการเติม In โดยมุมสัมผัสของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดงมีค่าลดลง ดังนั้น In จึงเป็นตัวช่วยเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรี

การเติมธาตุ In ลงในโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu จะไม่ส่งผลต่อความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะบัดกรีกับแผ่นทองแดง โดยให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงว่า In ไม่มีผลกับความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn กับแผ่นทองแดงหลังจากการบัดกรีและสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นที่รอยต่อคือ Cu_6Sn_5 ในทุกกรณี

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท อุตสาหกรรม จำกัด สำหรับคำแนะนำสนับสนุนเครื่องมือ และอุปกรณ์ในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Bradley, E., Handwerker, C.A., Bath, J., Parker, R.D. and Gedney R.W. 2007. Lead-Free Electronics INEMI Projects Lead to Successful Manufacturing, IEEE Press, United State of America.
- [2] Abtew, M., Selvaduray, G. 2000. Lead-free Solders in Microelectronics, Materials Science and Engineering R, Vol.27, pp: 95-141.
- [3] Mahmudi, R. and Mahin-Shirazi, S. 2011. Effect of Sb Addition on the Tensile Deformation Behavior of Lead-Free Sn-3.5Ag Solder Alloy. Materials and Design, 32: 5027-5032.
- [4] Noor, E.E.M., Sharif, N.M., Yew, C.K., Ariga, T., Ismail, A.B. and Hussain, Z. 2010. Wettability and Strength of In-Bi-Sn Lead-Free Solder Alloy on Copper Substrate. Journal of Alloys and Compounds, 507: 290-296.
- [5] Moser, Z., Sebo, P., Gasior, W., Svec, P. and Pstrus, J. 2009. Effect of Indium on Wettability of Sn-Ag-Cu Solders. Experiment vs. Modeling Part I, CALPHAD: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry, 33: 63-68.
- [6] Kanlayasiri, K., Mongkolwongroj, M. and Ariga, T. 2009. Influence of Indium Addition on Characteristics of Sn-0.3Ag-0.7Cu Solder Alloy. Journal of Alloys and Compounds, 485: 225-230.
- [7] Test Methods for Lead-Free Solder – Part 3. 2003. Methods for Spread Test, JIS Z 3198-3. Japanese Standard Association.
- [8] Sharif A. and Chan, Y.C. 2005. Effect of Indium Addition in Sn-rich Solder on Dissolution of Cu Metallization. Journal of Alloys and Compounds, 390: 67-73.
- [9] Fallahli, H., Nurulakmal, M.S., Arezodar, A.F. and Abdullah, J. 2012. Effect of Iron and Indium on IMC Formation and Mechanical Properties of Lead-Free Solder. Materials Science and Engineering A, 553: 22-31.
- [10] Sebo, P., Moser, Z., Svec, P., Janickovic, D., Dobrocka, E., Gasior, W. and Pstrus, J. 2009. Effect of Indium on the Microstructure of the Interface between Sn3.13Ag0.74CuIn Solder and Cu Substrate. Journal of Alloys and Compounds, 480: 409-415.
- [11] Chen, J., Shen, J., Lai, S., Min, D. and Wang, X. 2010. Microstructural Evolution of Intermetallic Compound in Sn-3.5Ag-X (X=0, 0.75Ni, 1.0Zn and 1.5In)Cu Solder Joints during Liquid Aging. Journal of Alloys and Compounds, 489: 631-637.
- [12] Peng, W., Monlevade, E., and Marques, M.E. 2007. Effect of Thermal Aging on the Interfacial

Structure of SnAgCu Solder Joints on Cu.
Microelectronics Reliability, 47: 2161-2168.

- [13] Mookam, N. and Kanlayasiri, K. 2012. Evolution of Intermetallic Compounds between Sn-0.3Ag-0.7Cu Low-Silver Lead-Free Solder and Cu Substrate during Thermal Aging. Journal of Materials Science and Technology, 28(1): 53-59.
- [14] Massalski, T.B. 2001. Binary Alloy Phase Diagrams. 2nded, ASM International, Vol.3, United State of America.



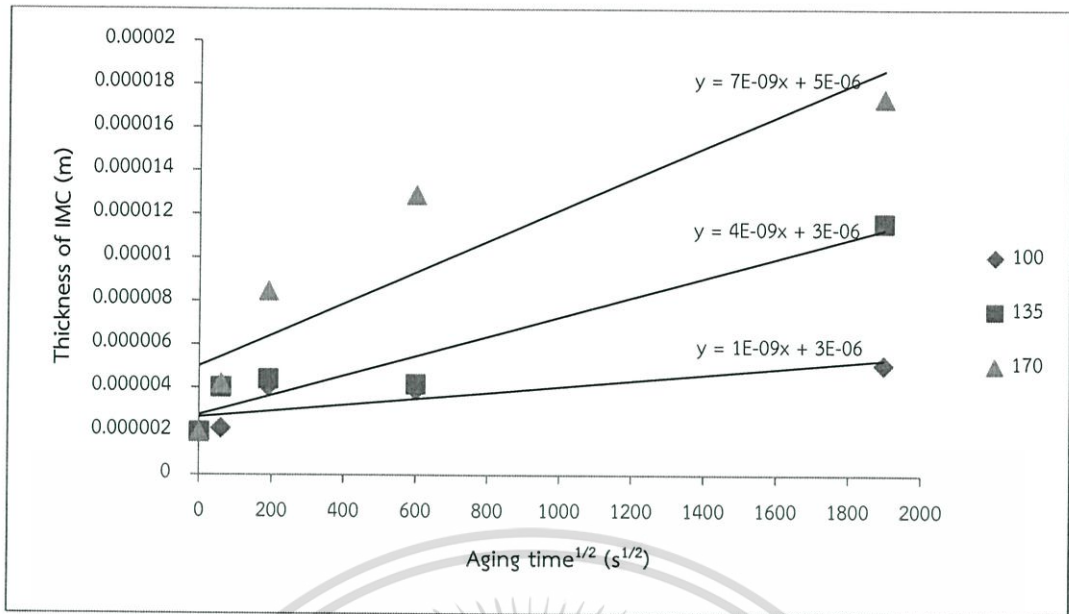
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



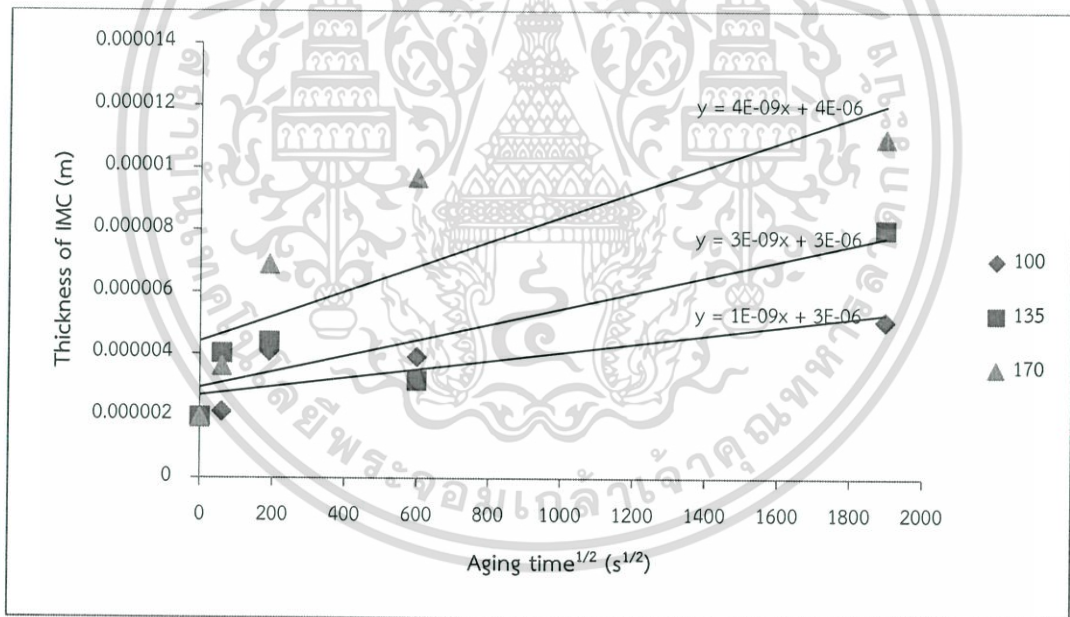
ภาคผนวก ข.

สัมประสิทธิ์การแพร่และพลังงานกระตุ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

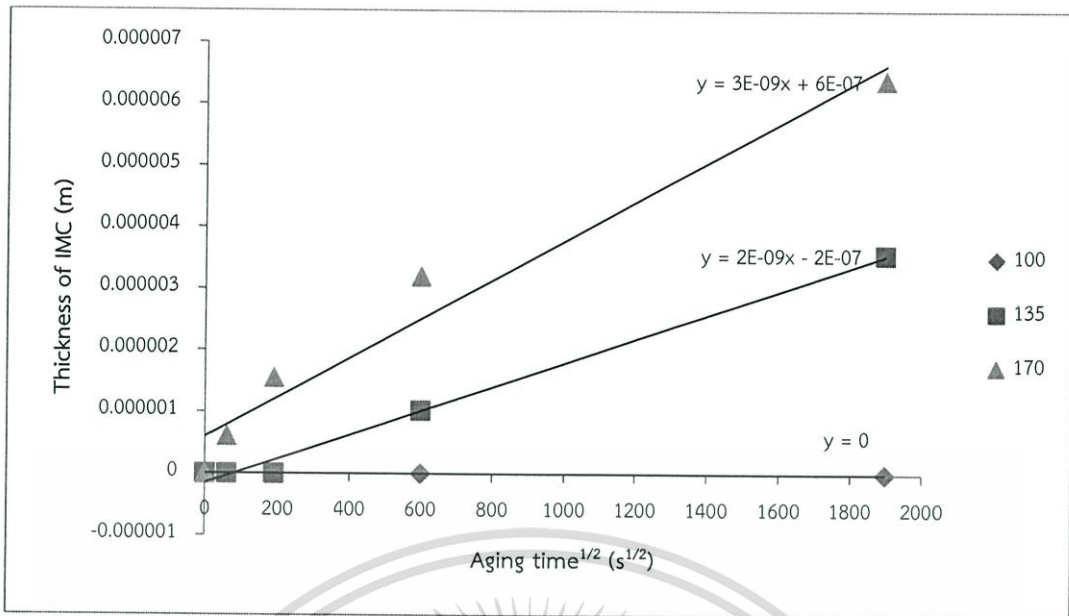


รูปที่ ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ $\text{Cu}_6\text{Sn}_5 + \text{Cu}_3\text{Sn}$ กับรากที่สองของเวลาการบ่ม ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In กับทองแดง



รูปที่ ข.2 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 กับรากที่สองของเวลาการบ่ม ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In กับทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

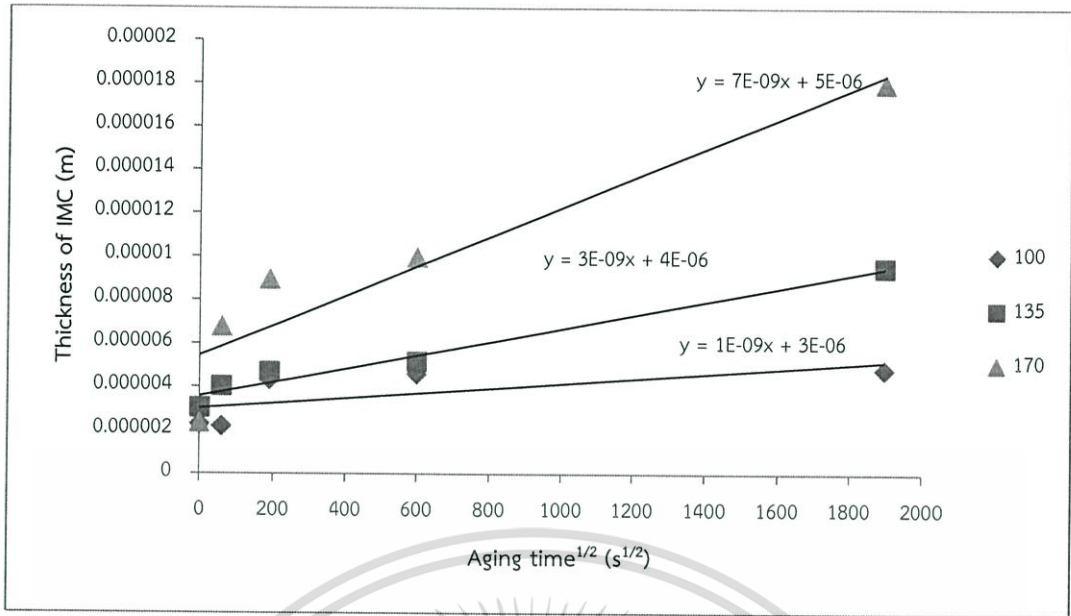


รูปที่ ข.3 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการป่มของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In กับทองแดง

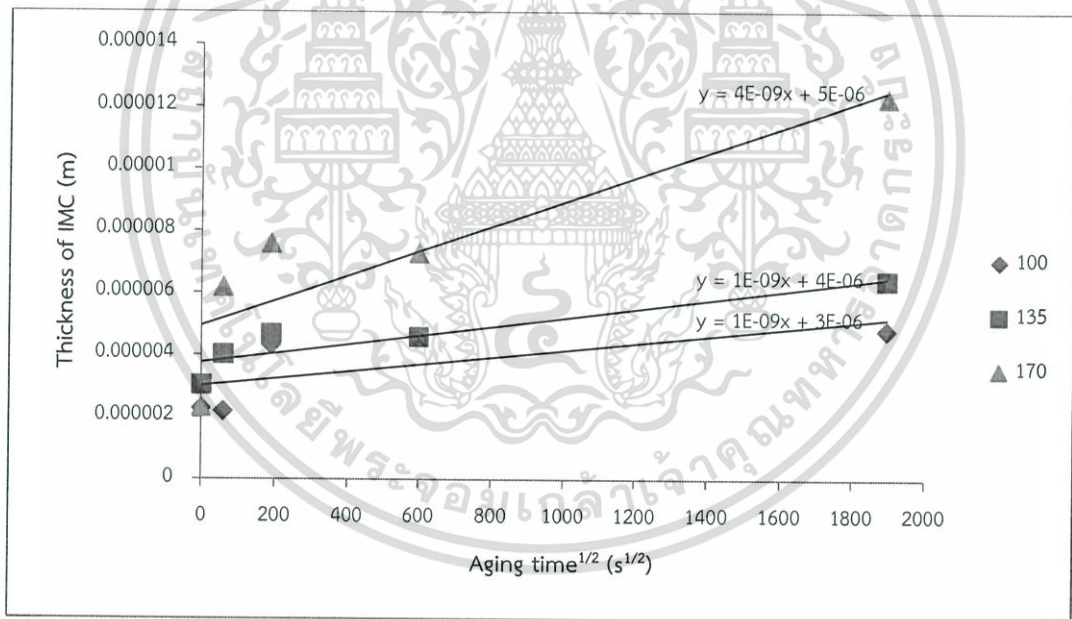
ตารางที่ ข.1 สัมประสิทธิ์การแพร่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่าง Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In กับแผ่นทองแดง

Solder	Temperature (°C)/(K)	Intermetallic phase	Slope	D (m ² /s)
Sn-0.3Ag0.7Cu-0.5In	100/373	$Cu_6Sn_5+Cu_3Sn$	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-18}
		Cu_6Sn_5	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-18}
		Cu_3Sn	-	-
	135/408	$Cu_6Sn_5+Cu_3Sn$	4.0×10^{-9}	1.6×10^{-17}
		Cu_6Sn_5	3.0×10^{-9}	9.0×10^{-18}
		Cu_3Sn	2.0×10^{-9}	4.0×10^{-18}
	170/443	$Cu_6Sn_5+Cu_3Sn$	7.0×10^{-9}	4.9×10^{-17}
		Cu_6Sn_5	4.0×10^{-9}	1.6×10^{-17}
		Cu_3Sn	3.0×10^{-9}	9.0×10^{-18}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

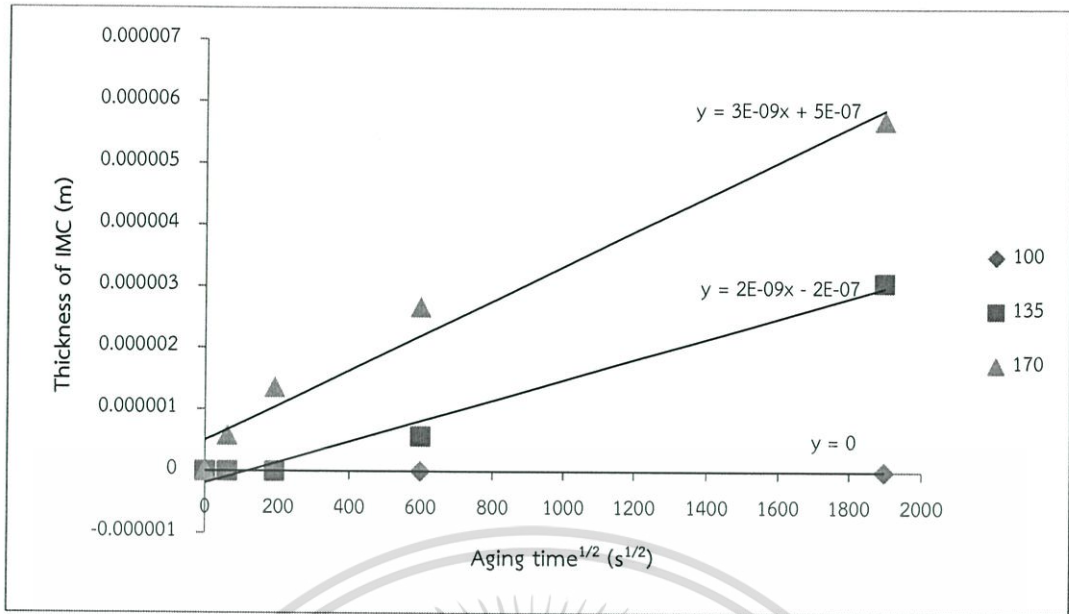


รูปที่ ข.4 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ $\text{Cu}_6\text{Sn}_5 + \text{Cu}_3\text{Sn}$ กับรากที่สองของเวลาการป้อน ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In กับทองแดง



รูปที่ ข.5 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 กับรากที่สองของเวลาการป้อน ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In กับทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

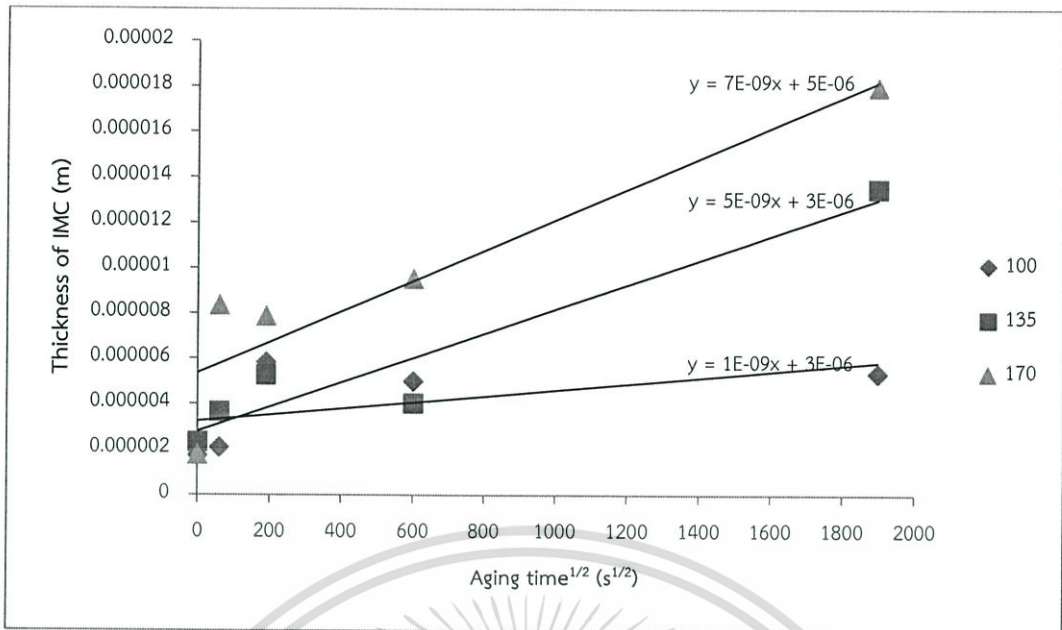


รูปที่ ข.6 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In กับทองแดง

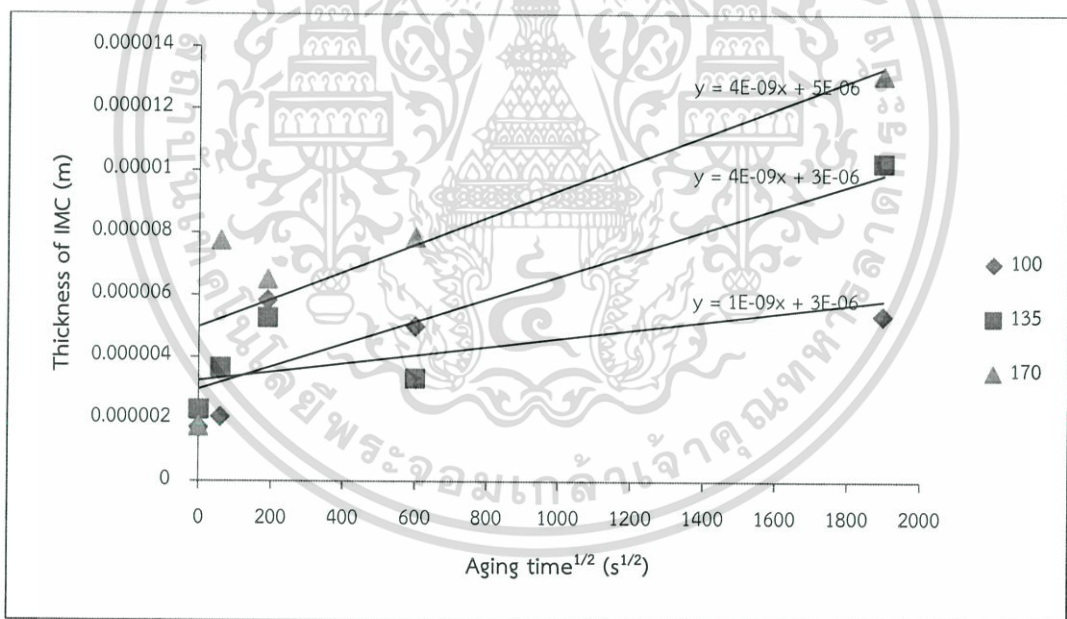
ตารางที่ ข.2 สัมประสิทธิ์การแพร่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่าง Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In กับแผ่นทองแดง

Solder	Temperature (°C)/(K)	Intermetallic phase	Slope	D
			(m ² /s)	(m ² /s)
Sn-0.3Ag0.7Cu-1.0In	100/373	$\text{Cu}_6\text{Sn}_5 + \text{Cu}_3\text{Sn}$	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-18}
		Cu_6Sn_5	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-18}
		Cu_3Sn	-	-
	135/408	$\text{Cu}_6\text{Sn}_5 + \text{Cu}_3\text{Sn}$	3.0×10^{-9}	9.0×10^{-18}
		Cu_6Sn_5	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-18}
		Cu_3Sn	2.0×10^{-9}	4.0×10^{-18}
	170/443	$\text{Cu}_6\text{Sn}_5 + \text{Cu}_3\text{Sn}$	6.8×10^{-9}	4.9×10^{-17}
		Cu_6Sn_5	4.0×10^{-9}	1.6×10^{-17}
		Cu_3Sn	3.0×10^{-9}	9.0×10^{-18}

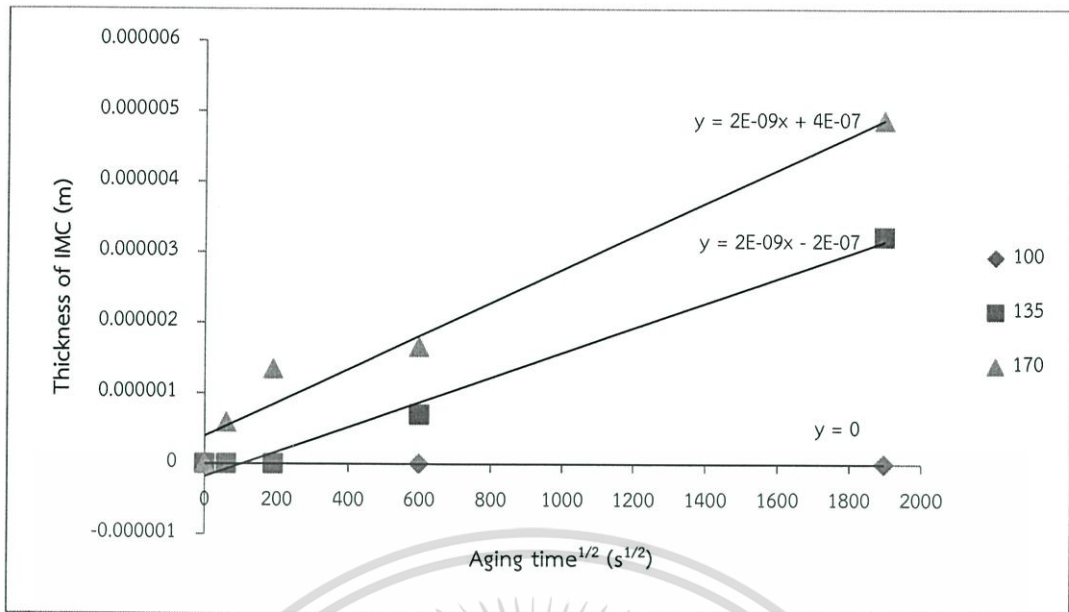
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.7 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ $\text{Cu}_6\text{Sn}_5 + \text{Cu}_3\text{Sn}$ กับรากที่สองของเวลาการบ่ม ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In กับทองแดง



รูปที่ ข.8 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 กับรากที่สองของเวลาการบ่ม ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In กับทองแดง

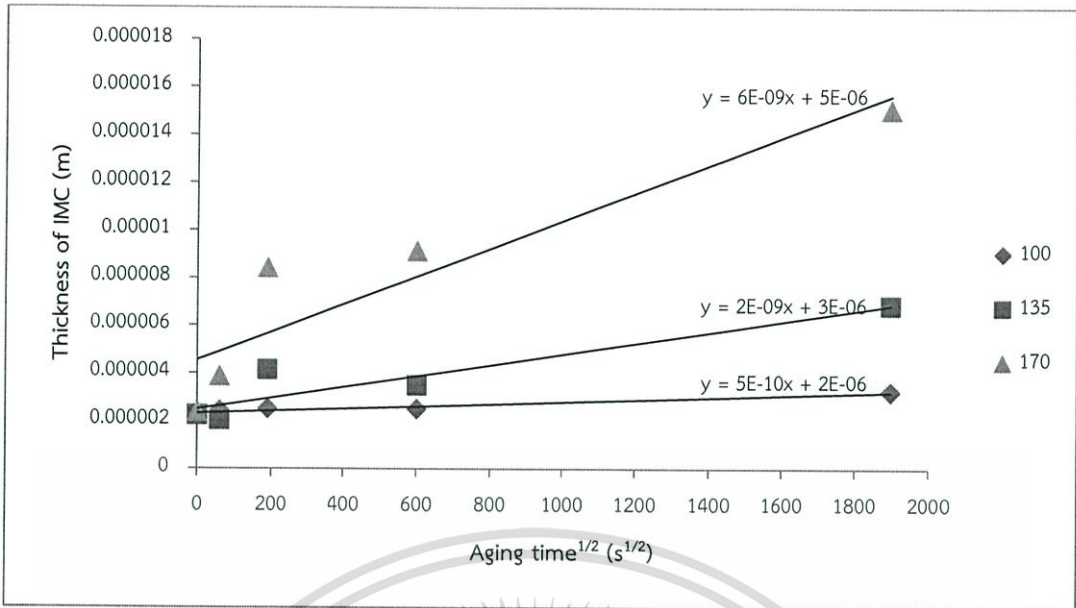


รูปที่ ข.9 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In กับทองแดง

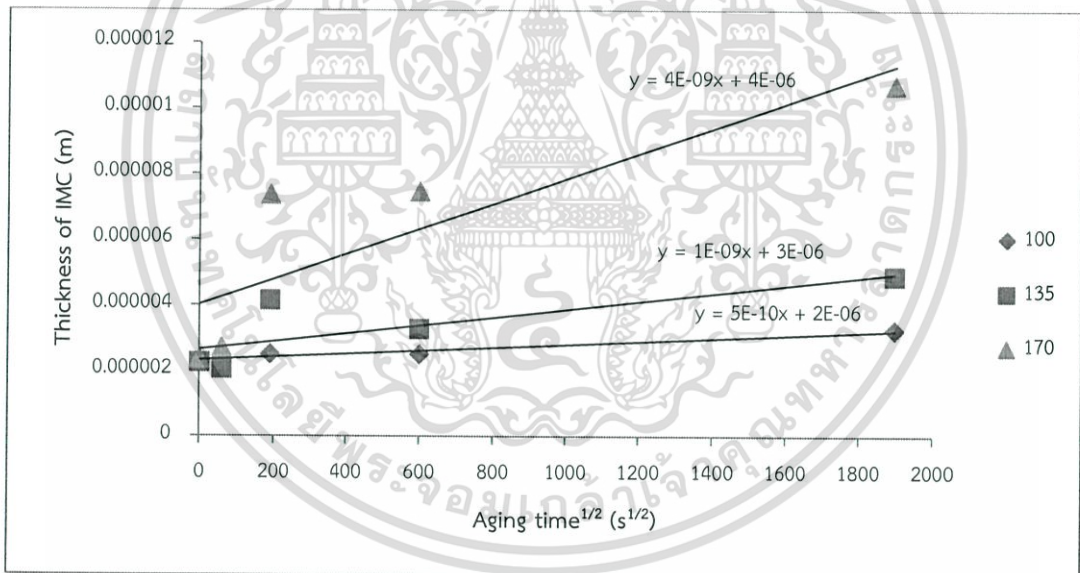
ตารางที่ ข.3 สัมประสิทธิ์การแพร่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่าง Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In กับแผ่นทองแดง

Solder	Temperature (°C)/(K)	Intermetallic phase	Slope	D (m ² /s)
Sn-0.3Ag0.7Cu-1.5In	100/373	$\text{Cu}_6\text{Sn}_5 + \text{Cu}_3\text{Sn}$	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-18}
		Cu_6Sn_5	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-18}
		Cu_3Sn	-	-
	135/408	$\text{Cu}_6\text{Sn}_5 + \text{Cu}_3\text{Sn}$	5.0×10^{-9}	2.5×10^{-17}
		Cu_6Sn_5	4.0×10^{-9}	1.6×10^{-17}
		Cu_3Sn	2.0×10^{-9}	4.0×10^{-18}
	170/443	$\text{Cu}_6\text{Sn}_5 + \text{Cu}_3\text{Sn}$	7.0×10^{-9}	4.9×10^{-17}
		Cu_6Sn_5	4.0×10^{-9}	1.6×10^{-17}
		Cu_3Sn	2.0×10^{-9}	4.0×10^{-18}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

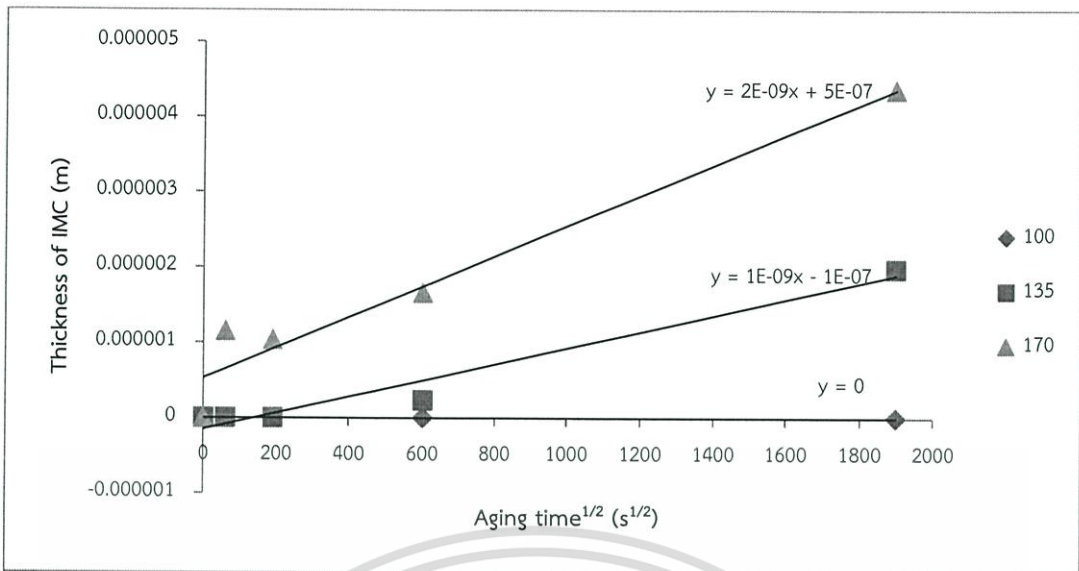


รูปที่ ข.10 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ $\text{Cu}_6\text{Sn}_5 + \text{Cu}_3\text{Sn}$ กับรากที่สองของเวลาการบ่ม ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In กับทองแดง



รูปที่ ข.11 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 กับรากที่สองของเวลาการบ่ม ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In กับทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

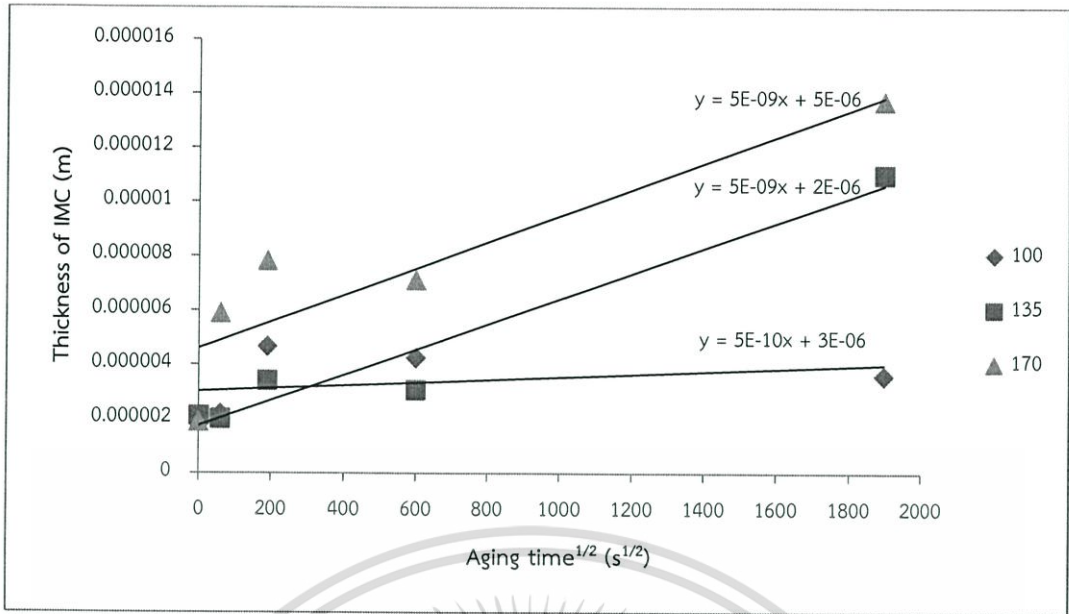


รูปที่ ข.12 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In กับทองแดง

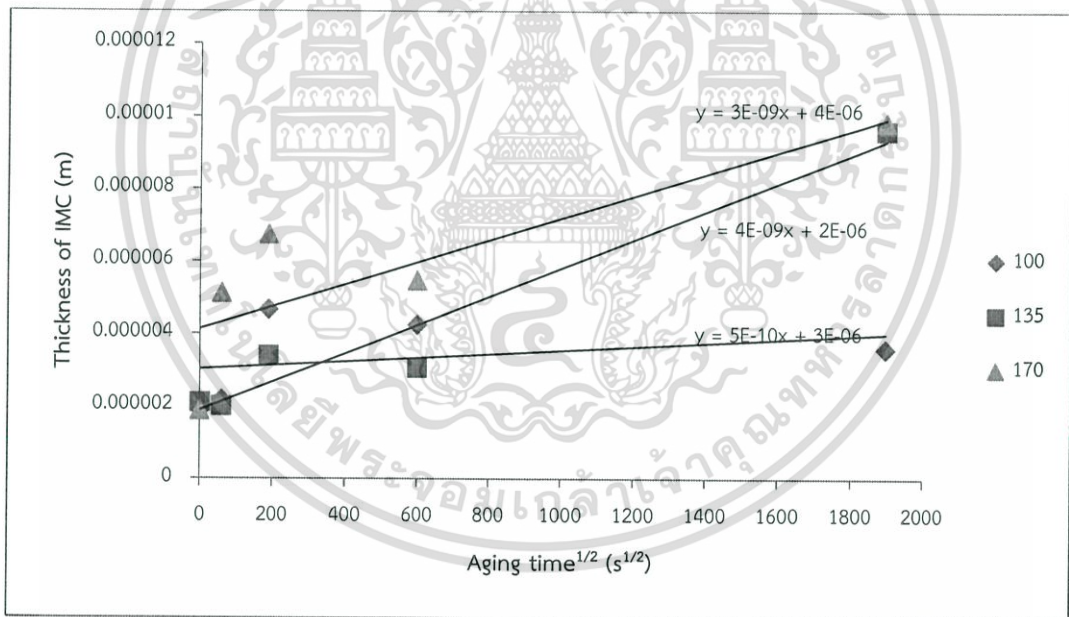
ตารางที่ ข.4 สัมประสิทธิ์การแพร่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่าง Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In กับแผ่นทองแดง

Solder	Temperature	Intermetallic	Slope	D
	(°C)/(K)	phase		
Sn-0.3Ag0.7Cu-2.0In	100/373	$\text{Cu}_6\text{Sn}_5 + \text{Cu}_3\text{Sn}$	5.0×10^{-10}	2.5×10^{-19}
		Cu_6Sn_5	5.0×10^{-10}	2.5×10^{-19}
		Cu_3Sn	-	-
	135/408	$\text{Cu}_6\text{Sn}_5 + \text{Cu}_3\text{Sn}$	2.0×10^{-9}	4.0×10^{-18}
		Cu_6Sn_5	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-18}
		Cu_3Sn	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-18}
	170/443	$\text{Cu}_6\text{Sn}_5 + \text{Cu}_3\text{Sn}$	6.0×10^{-9}	3.6×10^{-17}
		Cu_6Sn_5	4.0×10^{-9}	1.6×10^{-17}
		Cu_3Sn	2.0×10^{-9}	4.0×10^{-18}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

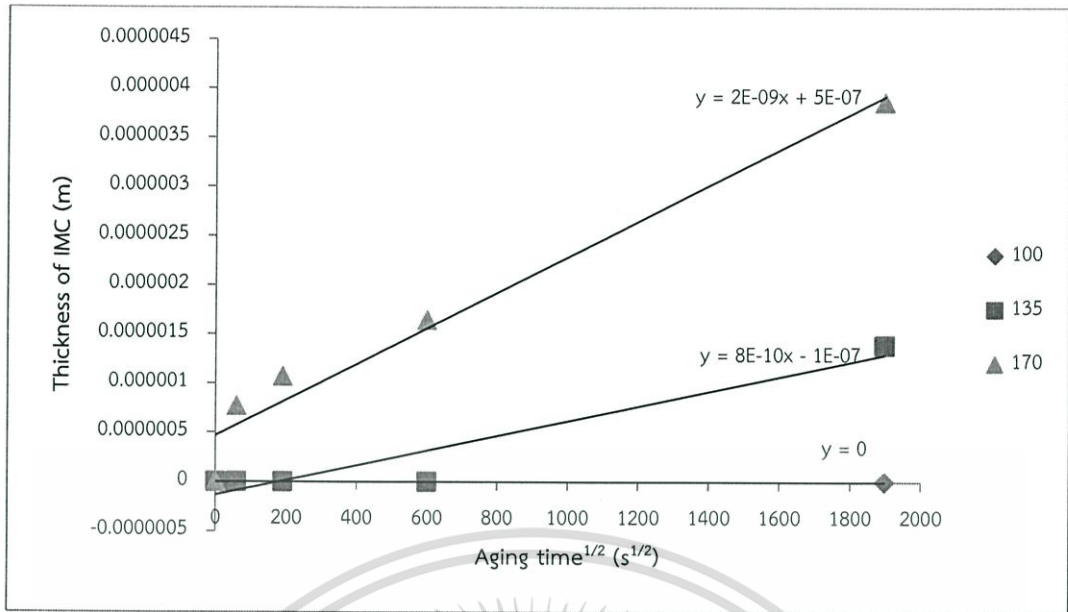


รูปที่ ข.13 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ $\text{Cu}_6\text{Sn}_5 + \text{Cu}_3\text{Sn}$ กับรากที่สองของเวลาการบ่ม ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In กับทองแดง



รูปที่ ข.14 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 กับรากที่สองของเวลาการบ่ม ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In กับทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

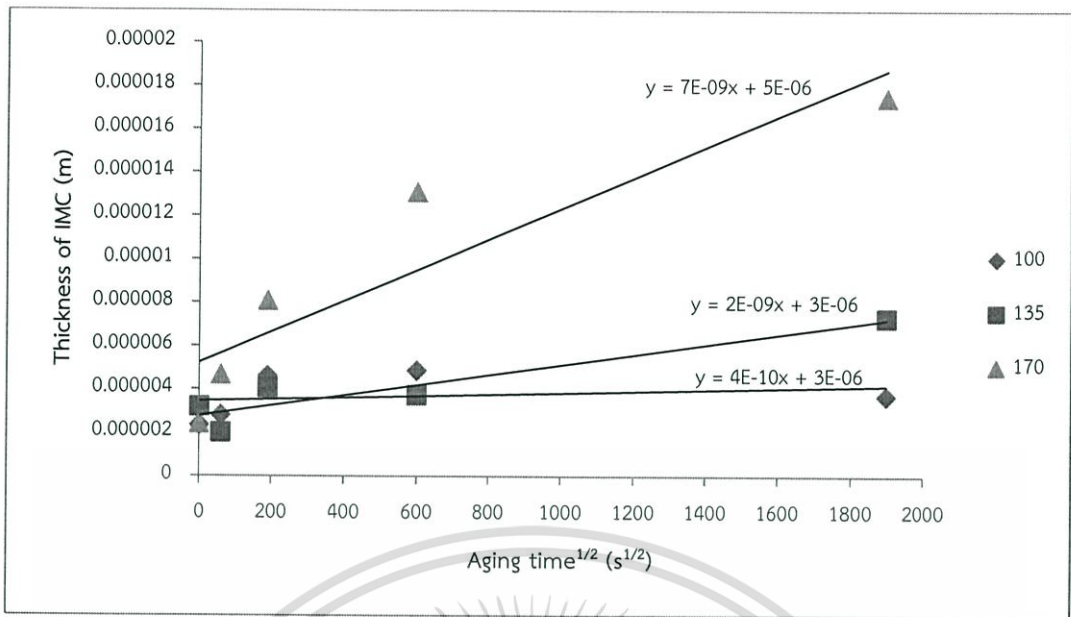


รูปที่ ข.15 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In กับทองแดง

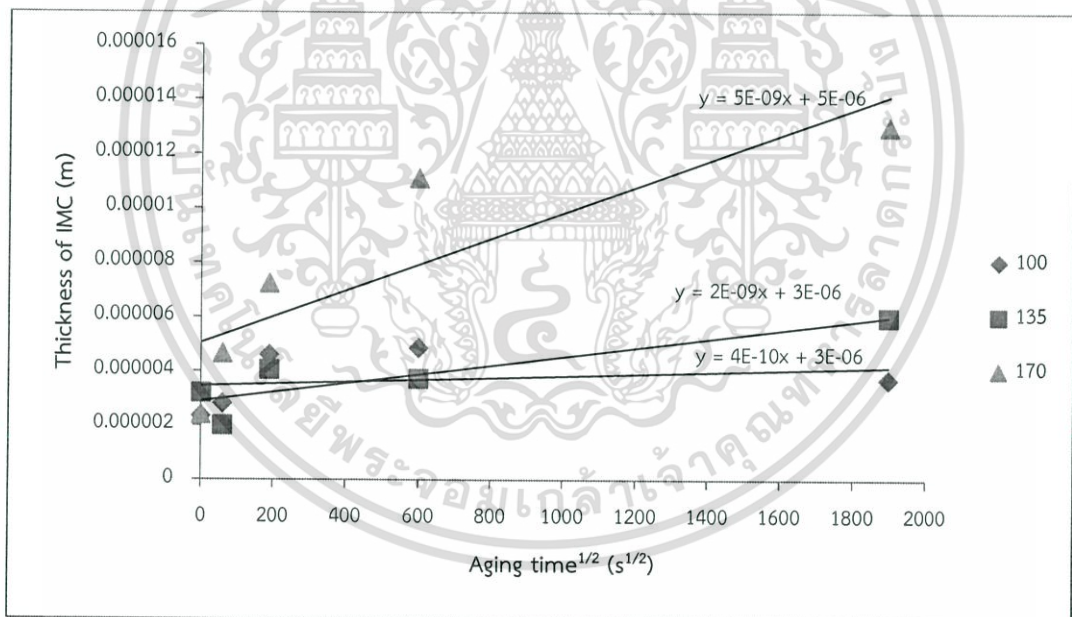
ตารางที่ ข.5 สัมประสิทธิ์การแพร่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่าง Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In กับแผ่นทองแดง

Solder	Temperature (°C)/(K)	Intermetallic phase	Slope	D (m^2/s)
Sn-0.3Ag0.7Cu-2.5In	100/373	$\text{Cu}_6\text{Sn}_5 + \text{Cu}_3\text{Sn}$	5.0×10^{-10}	2.5×10^{-19}
		Cu_6Sn_5	5.0×10^{-10}	2.5×10^{-19}
		Cu_3Sn	-	-
	135/408	$\text{Cu}_6\text{Sn}_5 + \text{Cu}_3\text{Sn}$	5.0×10^{-9}	2.5×10^{-17}
		Cu_6Sn_5	4.0×10^{-9}	1.6×10^{-17}
		Cu_3Sn	8.0×10^{-10}	6.4×10^{-19}
	170/443	$\text{Cu}_6\text{Sn}_5 + \text{Cu}_3\text{Sn}$	5.0×10^{-9}	2.5×10^{-17}
		Cu_6Sn_5	3.0×10^{-9}	9.0×10^{-18}
		Cu_3Sn	2.0×10^{-9}	4.0×10^{-18}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

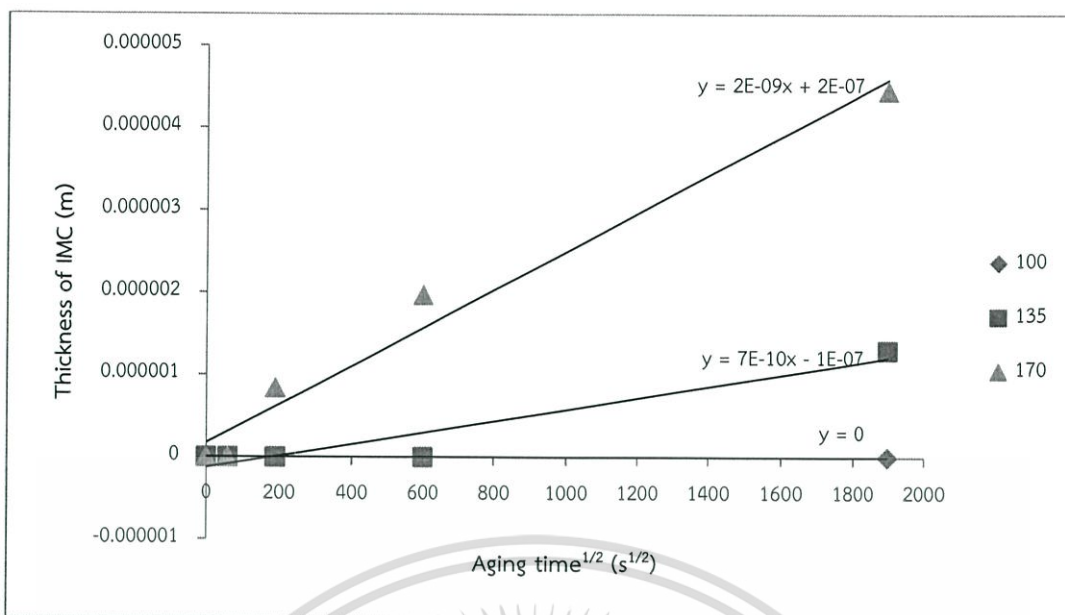


รูปที่ ข.16 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ $\text{Cu}_6\text{Sn}_5+\text{Cu}_3\text{Sn}$ กับรากที่สองของเวลาการบ่ม ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In กับทองแดง



รูปที่ ข.17 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 กับรากที่สองของเวลาการบ่ม ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In กับทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.18 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In กับทองแดง

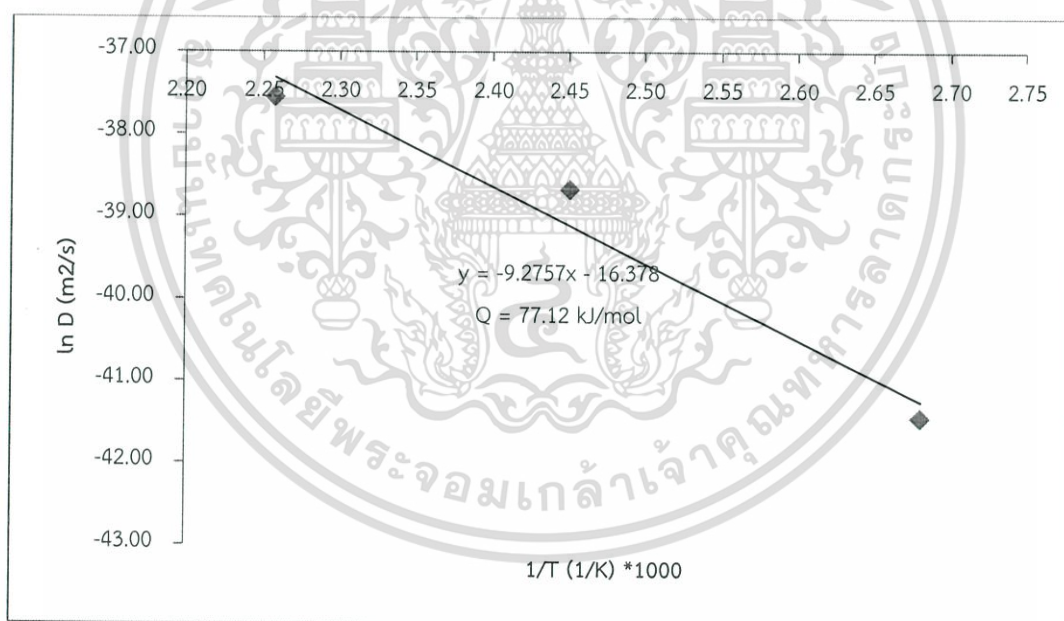
ตารางที่ ข.6 สัมประสิทธิ์การแพร่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่าง Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In กับแผ่นทองแดง

Solder	Temperature (°C)/(K)	Intermetallic phase	Slope	D (m ² /s)
Sn-0.3Ag0.7Cu-3.0In	100/373	$\text{Cu}_6\text{Sn}_5 + \text{Cu}_3\text{Sn}$	4.0×10^{-10}	1.6×10^{-19}
		Cu_6Sn_5	4.0×10^{-10}	1.6×10^{-19}
		Cu_3Sn	-	-
	135/408	$\text{Cu}_6\text{Sn}_5 + \text{Cu}_3\text{Sn}$	2.0×10^{-9}	4.0×10^{-18}
		Cu_6Sn_5	2.0×10^{-9}	4.0×10^{-18}
		Cu_3Sn	7.0×10^{-10}	4.9×10^{-19}
	170/443	$\text{Cu}_6\text{Sn}_5 + \text{Cu}_3\text{Sn}$	7.0×10^{-9}	4.9×10^{-17}
		Cu_6Sn_5	5.0×10^{-9}	2.5×10^{-17}
		Cu_3Sn	2.0×10^{-9}	4.0×10^{-18}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

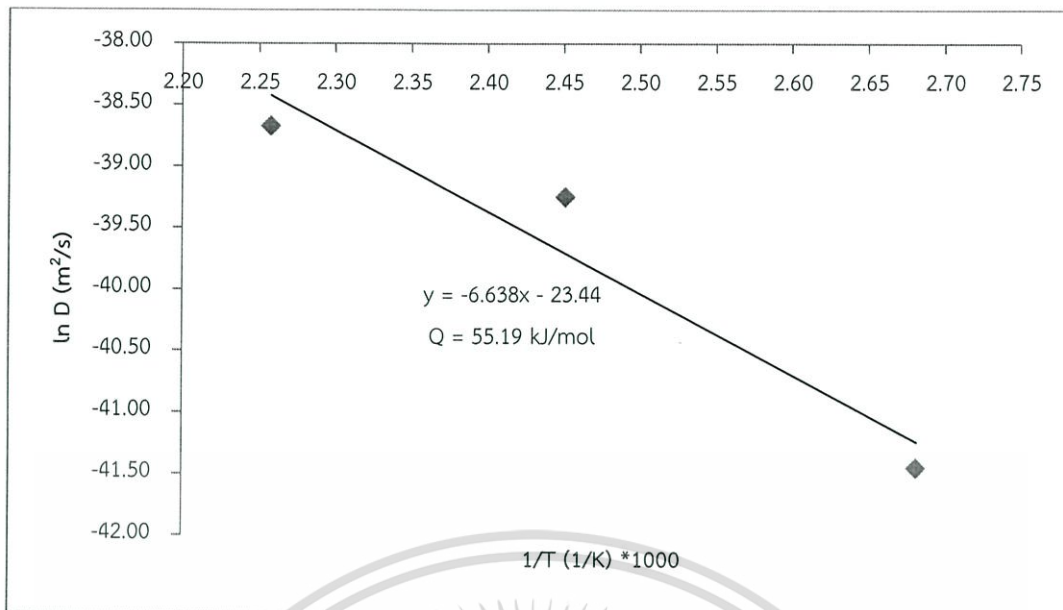
ตารางที่ ข.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln D$ กับ $1/T$ ของ Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In กับแผ่นทองแดง

Solder	Temperature (°C)/(K)	Intermetallic phase	$\ln D$	$1/T$ (1/K)*1000
Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In	100/373	Cu ₆ Sn ₅ +Cu ₃ Sn	-41.45	2.68
		Cu ₆ Sn ₅	-41.45	2.68
		Cu ₃ Sn	0.00	2.68
	135/408	Cu ₆ Sn ₅ +Cu ₃ Sn	-38.67	2.45
		Cu ₆ Sn ₅	-39.25	2.45
		Cu ₃ Sn	-40.06	2.45
	170/443	Cu ₆ Sn ₅ +Cu ₃ Sn	-37.55	2.26
		Cu ₆ Sn ₅	-38.67	2.26
		Cu ₃ Sn	-39.25	2.26

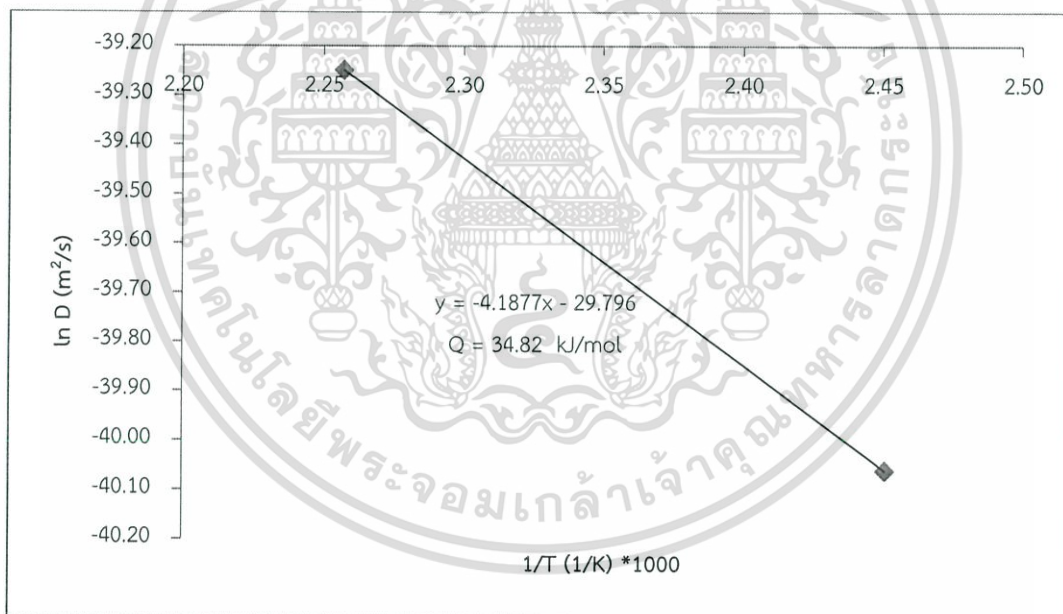


รูปที่ ข.19 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu₆Sn₅+Cu₃Sn ระหว่าง Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In กับแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.20 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ระหว่าง $\text{Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In}$ กับแผ่นทองแดง

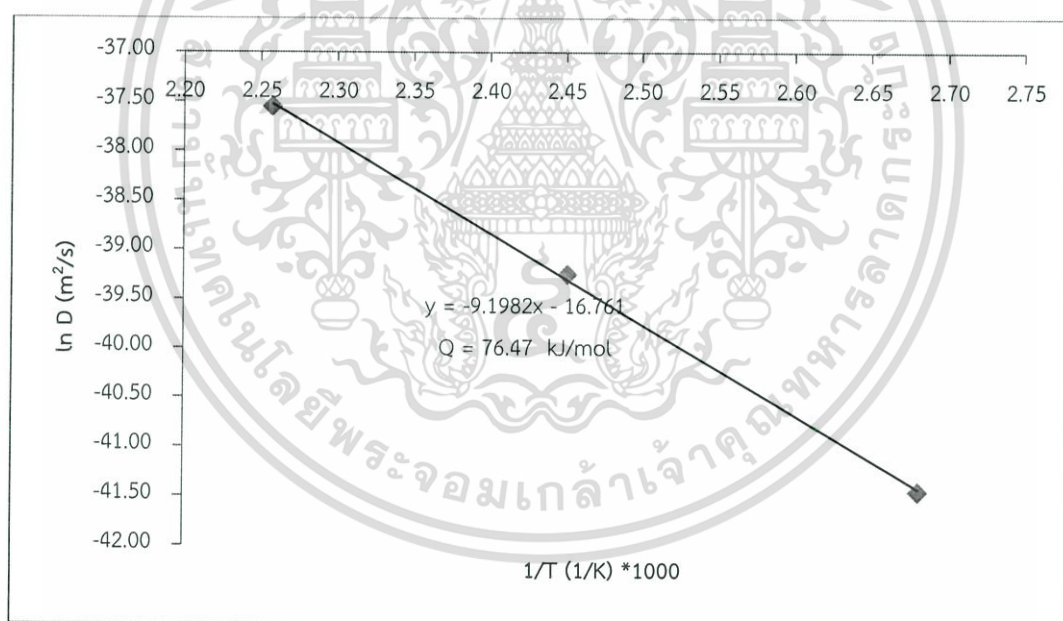


รูปที่ ข.21 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn ระหว่าง $\text{Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In}$ กับแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

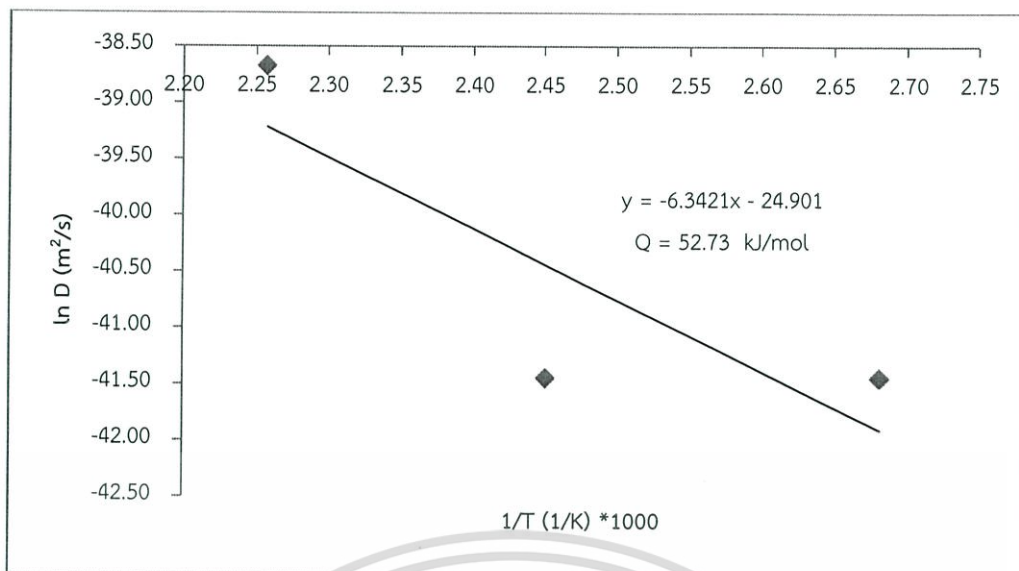
ตารางที่ ข.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln D$ กับ $1/T$ ของ Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In กับแผ่นทองแดง

Solder	Temperature (°C)/(K)	Intermetallic phase	$\ln D$	$1/T$ (1/K)*1000
Sn-0.3Ag0.7Cu-1.0In	100/373	Cu ₆ Sn ₅ +Cu ₃ Sn	-41.45	2.68
		Cu ₆ Sn ₅	-41.45	2.68
		Cu ₃ Sn	-	2.68
	135/408	Cu ₆ Sn ₅ +Cu ₃ Sn	-39.25	2.45
		Cu ₆ Sn ₅	-41.45	2.45
		Cu ₃ Sn	-40.06	2.45
	170/443	Cu ₆ Sn ₅ +Cu ₃ Sn	-9.98	2.26
		Cu ₆ Sn ₅	-38.67	2.26
		Cu ₃ Sn	-39.25	2.26

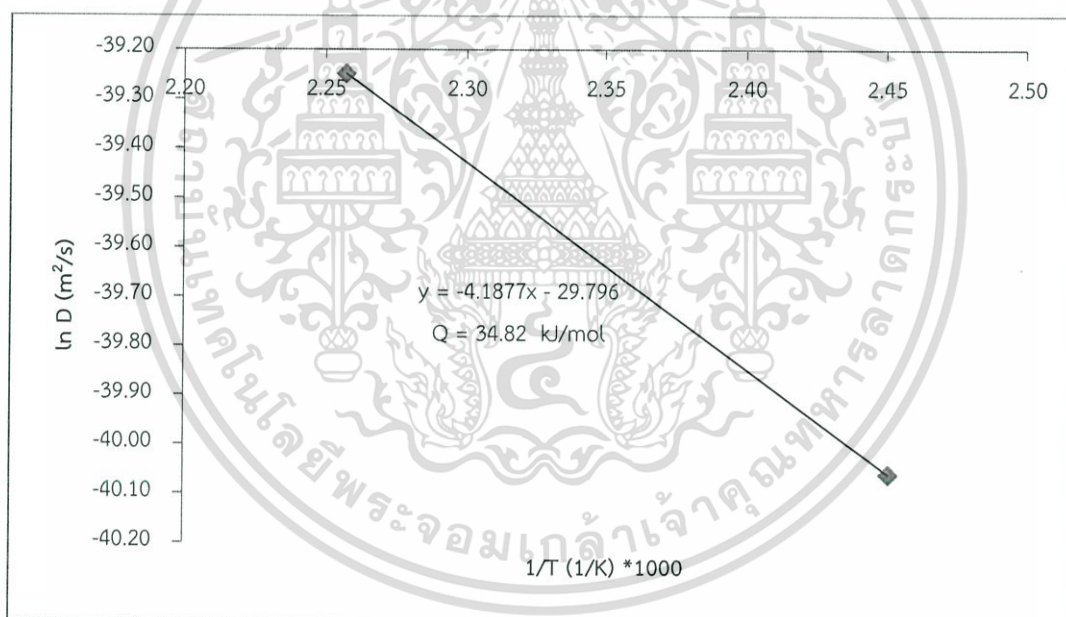


รูปที่ ข.22 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu₆Sn₅+Cu₃Sn ระหว่าง Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In กับแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.23 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ระหว่าง $\text{Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In}$ กับแผ่นทองแดง

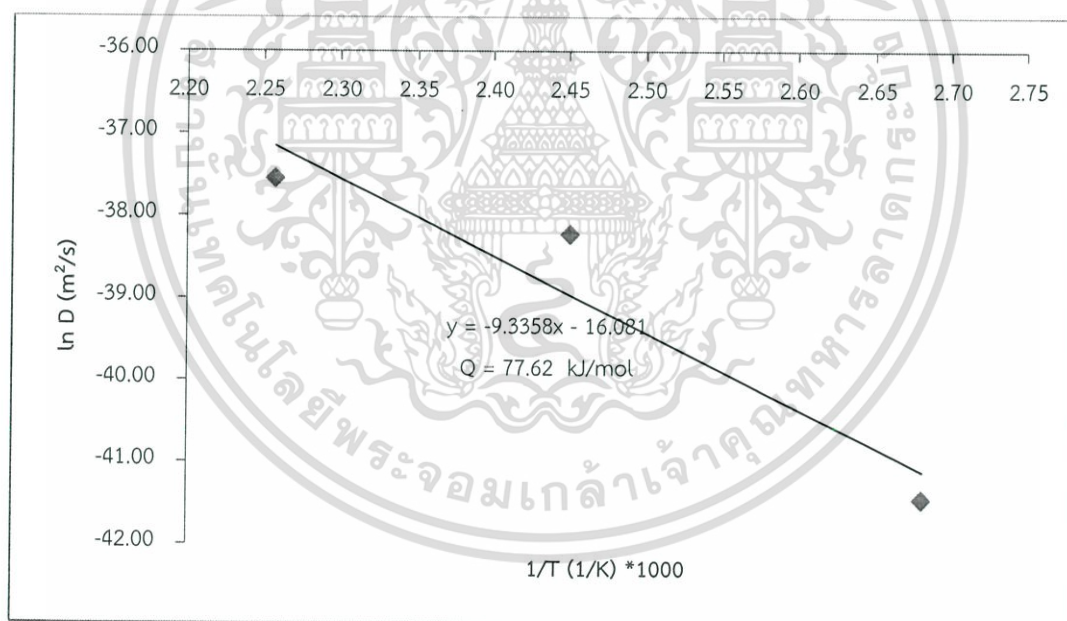


รูปที่ ข.24 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn ระหว่าง $\text{Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In}$ กับแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

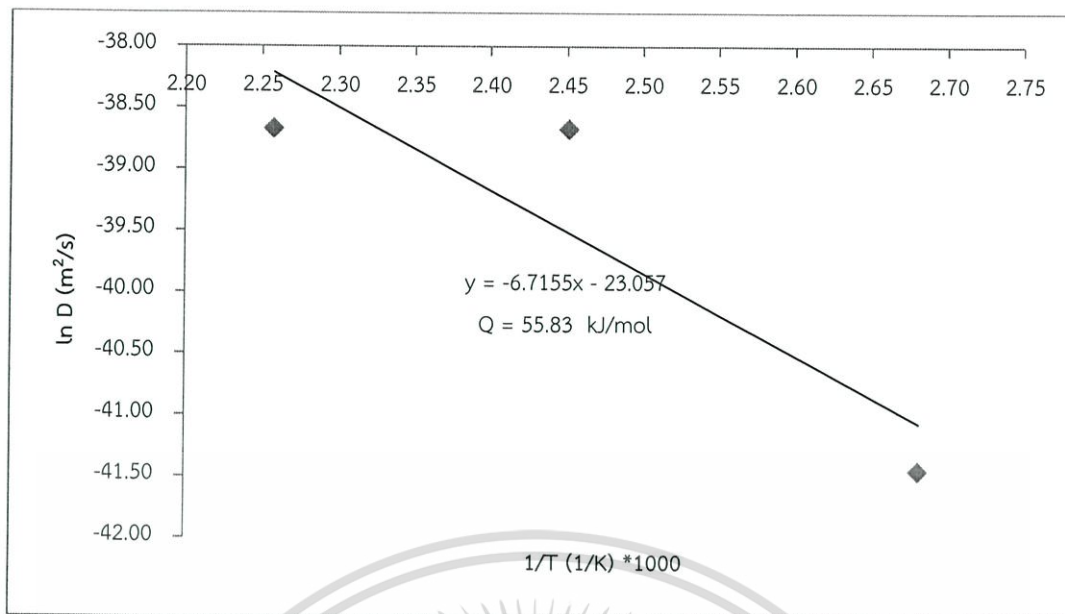
ตารางที่ ข.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln D$ กับ $1/T$ ของ Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In กับแผ่นทองแดง

Solder	Temperature (°C)/(K)	Intermetallic phase	$\ln D$	$1/T$ (1/K)*1000
Sn-0.3Ag0.7Cu-1.5In	100/373	Cu ₆ Sn ₅ +Cu ₃ Sn	-41.45	2.68
		Cu ₆ Sn ₅	-41.45	2.68
		Cu ₃ Sn	-	2.68
	135/408	Cu ₆ Sn ₅ +Cu ₃ Sn	-38.23	2.45
		Cu ₆ Sn ₅	-38.67	2.45
		Cu ₃ Sn	-40.06	2.45
	170/443	Cu ₆ Sn ₅ +Cu ₃ Sn	-37.55	2.26
		Cu ₆ Sn ₅	-38.67	2.26
		Cu ₃ Sn	-40.06	2.26



รูปที่ ข.25 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu₆Sn₅+Cu₃Sn ระหว่าง Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In กับแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.26 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ระหว่าง $\text{Sn}-0.3\text{Ag}-0.7\text{Cu}-1.5\text{In}$ กับแผ่นทองแดง

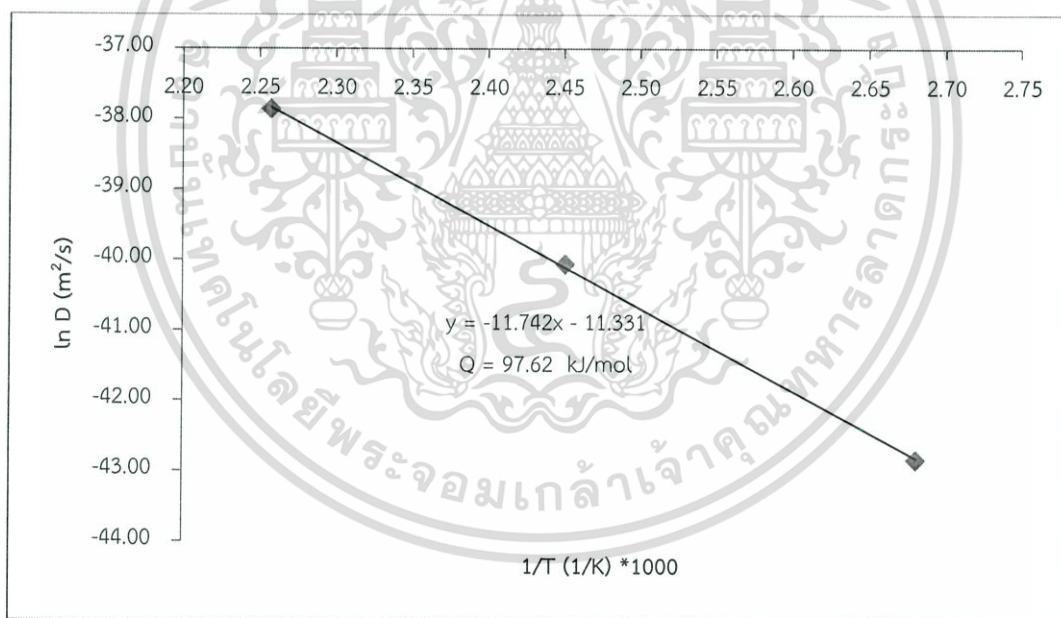


รูปที่ ข.27 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn ระหว่าง $\text{Sn}-0.3\text{Ag}-0.7\text{Cu}-1.5\text{In}$ กับแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

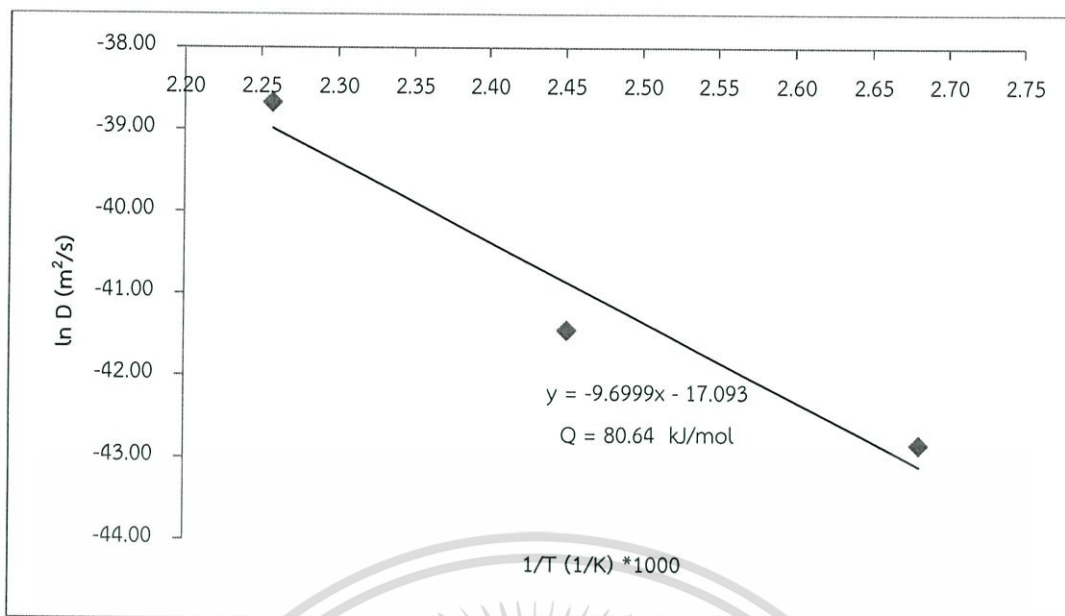
ตารางที่ ข.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln D$ กับ $1/T$ ของ Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In กับแผ่นทองแดง

Solder	Temperature (°C)/(K)	Intermetallic phase	$\ln D$	$1/T$ (1/K)*1000
Sn-0.3Ag0.7Cu-2.0In	100/373	Cu ₆ Sn ₅ +Cu ₃ Sn	-42.83	2.68
		Cu ₆ Sn ₅	-42.83	2.68
		Cu ₃ Sn	-	2.68
	135/408	Cu ₆ Sn ₅ +Cu ₃ Sn	-40.06	2.45
		Cu ₆ Sn ₅	-41.45	2.45
		Cu ₃ Sn	-41.45	2.45
	170/443	Cu ₆ Sn ₅ +Cu ₃ Sn	-37.86	2.26
		Cu ₆ Sn ₅	-38.67	2.26
		Cu ₃ Sn	-40.06	2.26

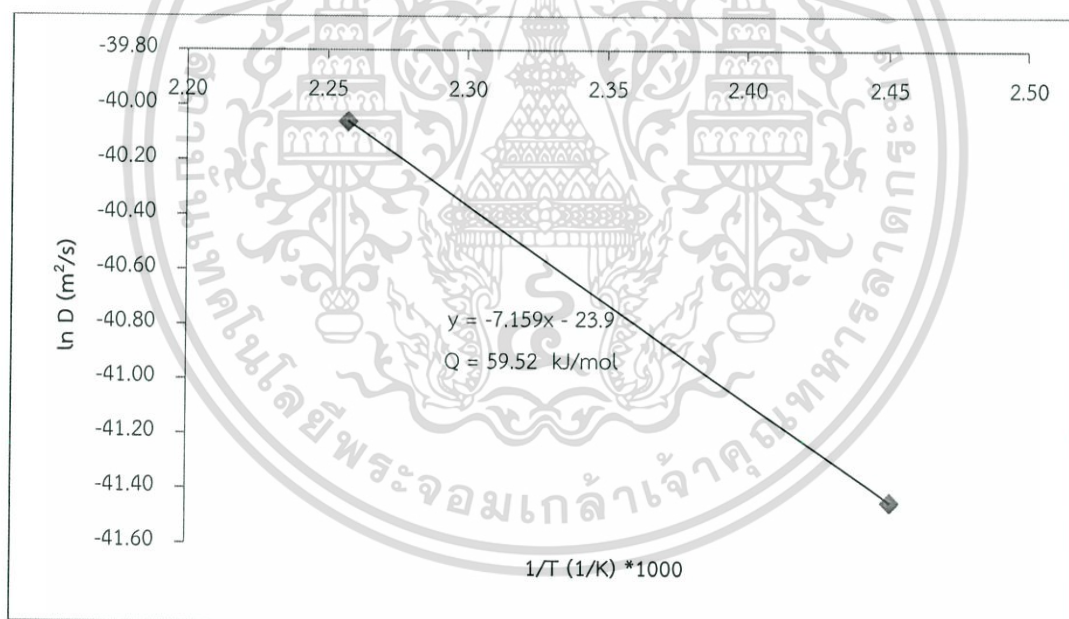


รูปที่ ข.28 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu₆Sn₅+Cu₃Sn ระหว่าง Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In กับแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.29 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ระหว่าง $\text{Sn}-0.3\text{Ag}-0.7\text{Cu}-2.0\text{In}$ กับแผ่นทองแดง

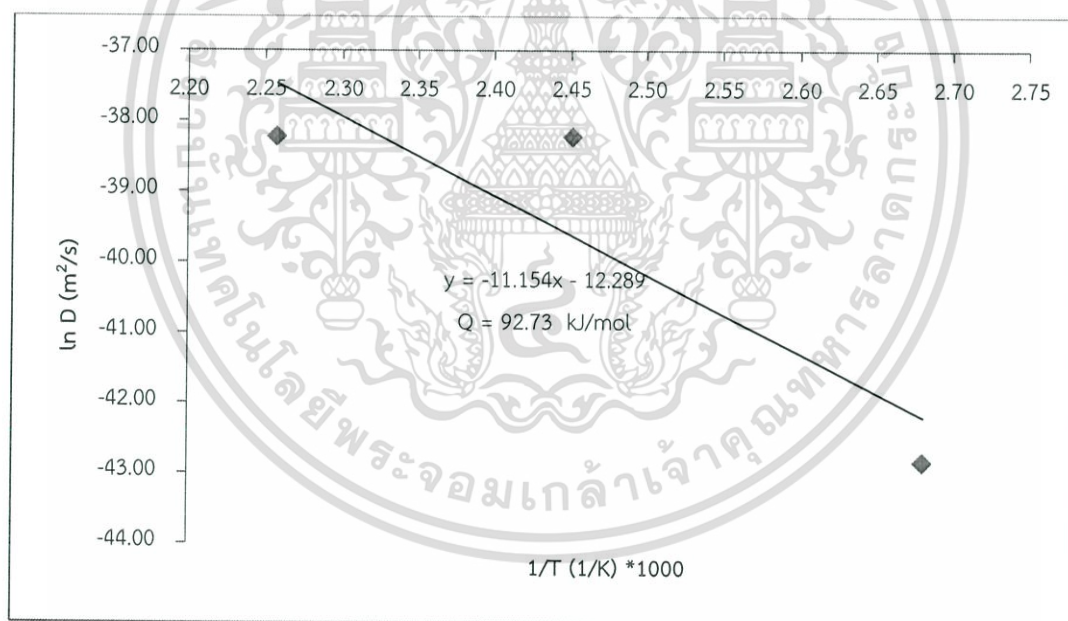


รูปที่ ข.30 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn ระหว่าง $\text{Sn}-0.3\text{Ag}-0.7\text{Cu}-2.0\text{In}$ กับแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

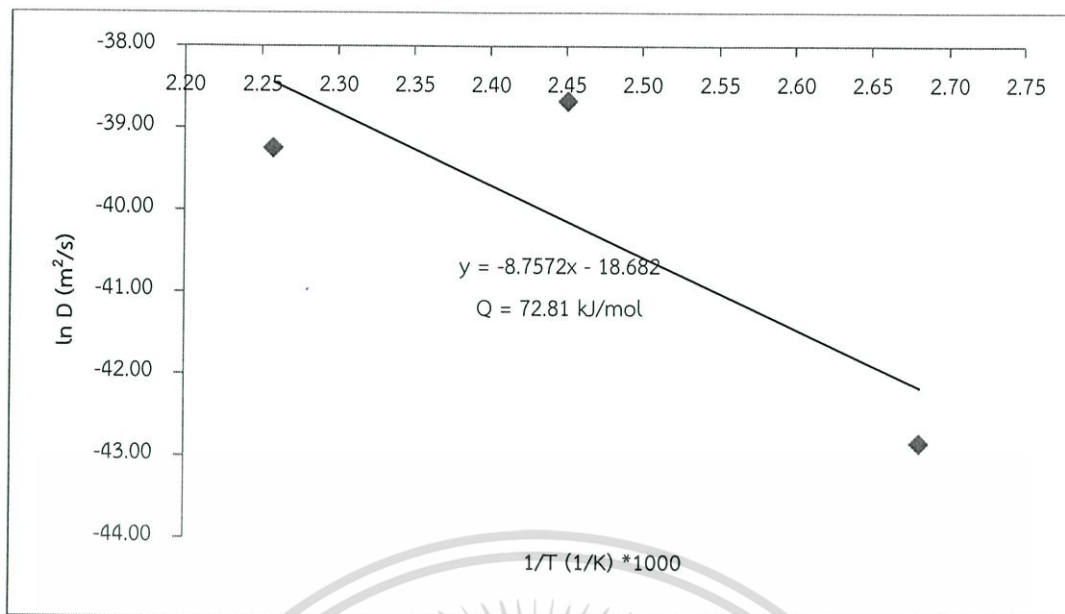
ตารางที่ ข.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln D$ กับ $1/T$ ของ Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In กับแผ่นทองแดง

Solder	Temperature (°C)/(K)	Intermetallic phase	$\ln D$	$1/T$ (1/K)*1000
Sn-0.3Ag0.7Cu-2.5In	100/373	Cu ₆ Sn ₅ +Cu ₃ Sn	-42.83	2.68
		Cu ₆ Sn ₅	-42.83	2.68
		Cu ₃ Sn	-	2.68
	135/408	Cu ₆ Sn ₅ +Cu ₃ Sn	-38.23	2.45
		Cu ₆ Sn ₅	-38.67	2.45
		Cu ₃ Sn	-41.89	2.45
	170/443	Cu ₆ Sn ₅ +Cu ₃ Sn	-38.23	2.26
		Cu ₆ Sn ₅	-39.25	2.26
		Cu ₃ Sn	-40.06	2.26

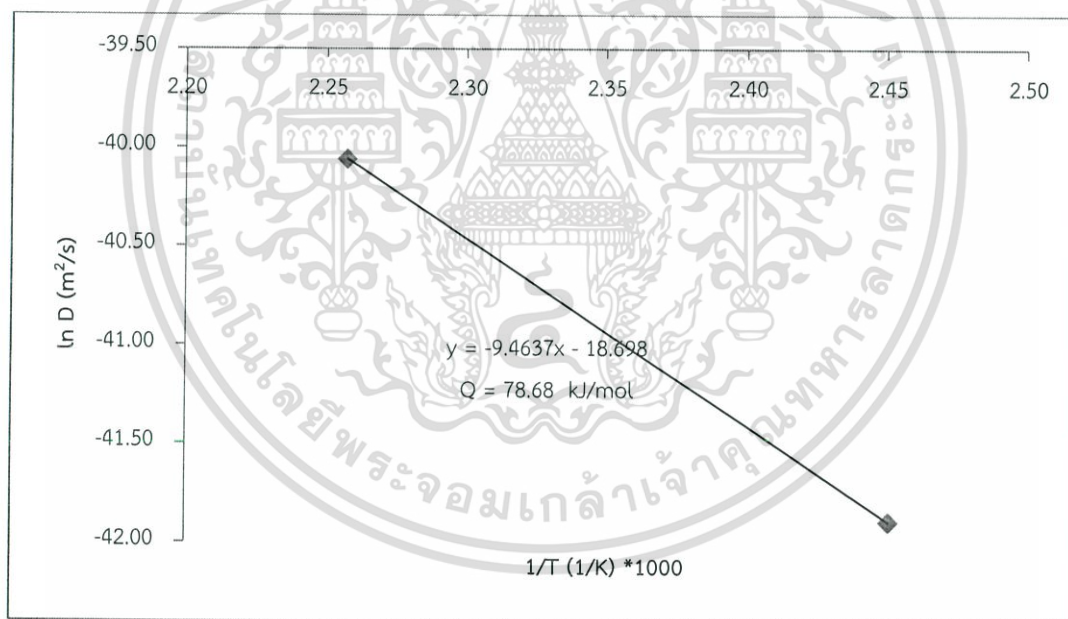


รูปที่ ข.31 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu₆Sn₅+Cu₃Sn ระหว่าง Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In กับแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.32 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ระหว่าง Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In กับแผ่นทองแดง

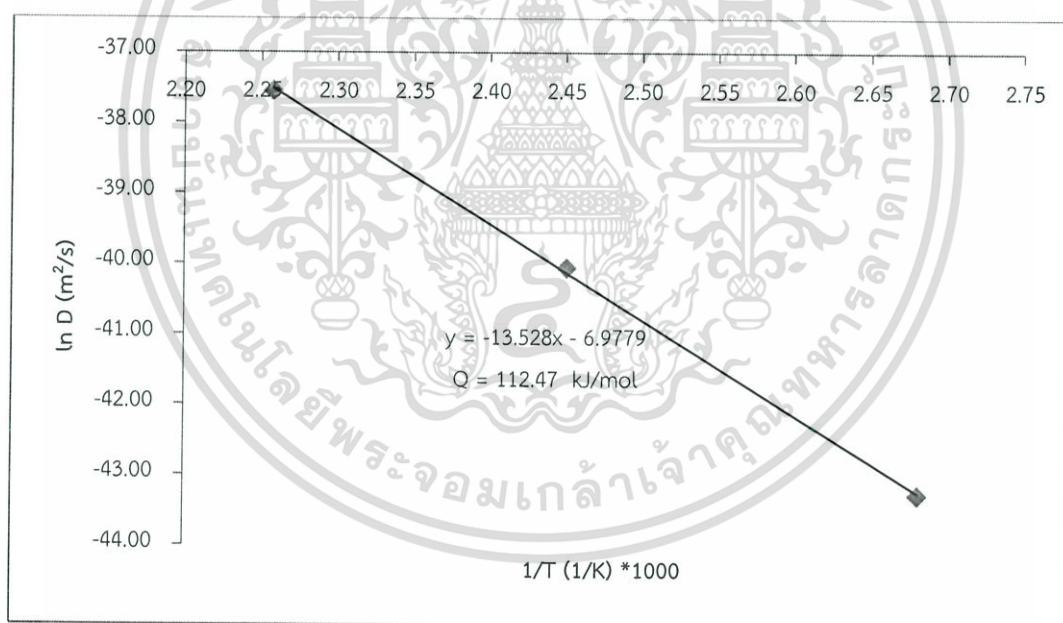


รูปที่ ข.33 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn ระหว่าง Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In กับแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

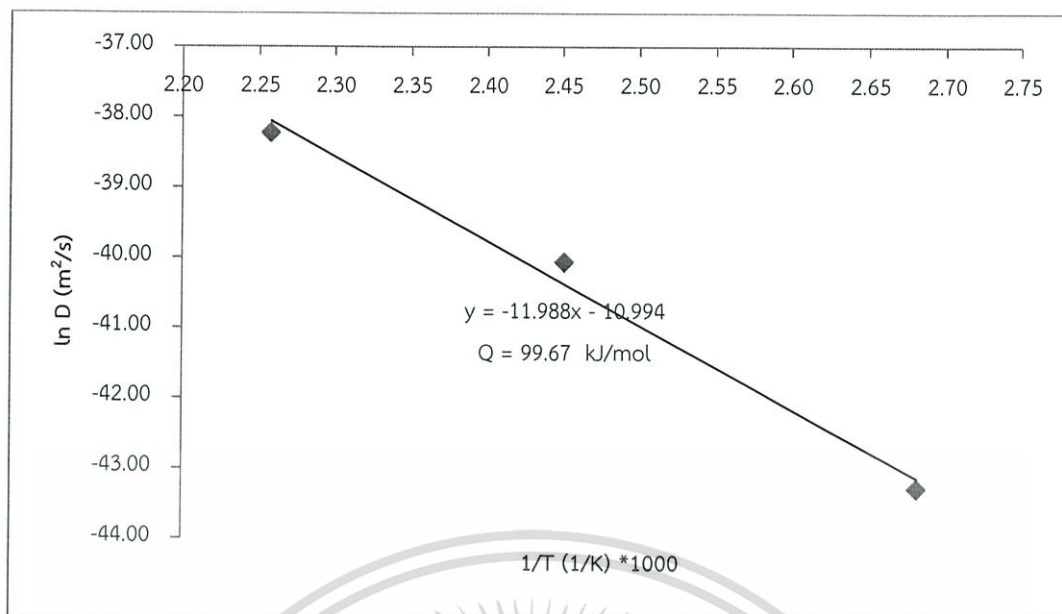
ตารางที่ ข.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln D$ กับ $1/T$ ของ Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In กับแผ่นทองแดง

Solder	Temperature (°C)/(K)	Intermetallic phase	$\ln D$	$1/T$ (1/K)*1000
Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In	100/373	Cu ₆ Sn ₅ +Cu ₃ Sn	-43.28	2.68
		Cu ₆ Sn ₅	-43.28	2.68
		Cu ₃ Sn	-	2.68
	135/408	Cu ₆ Sn ₅ +Cu ₃ Sn	-40.06	2.45
		Cu ₆ Sn ₅	-40.06	2.45
		Cu ₃ Sn	-42.16	2.45
	170/443	Cu ₆ Sn ₅ +Cu ₃ Sn	-37.55	2.26
		Cu ₆ Sn ₅	-38.23	2.26
		Cu ₃ Sn	-40.06	2.26

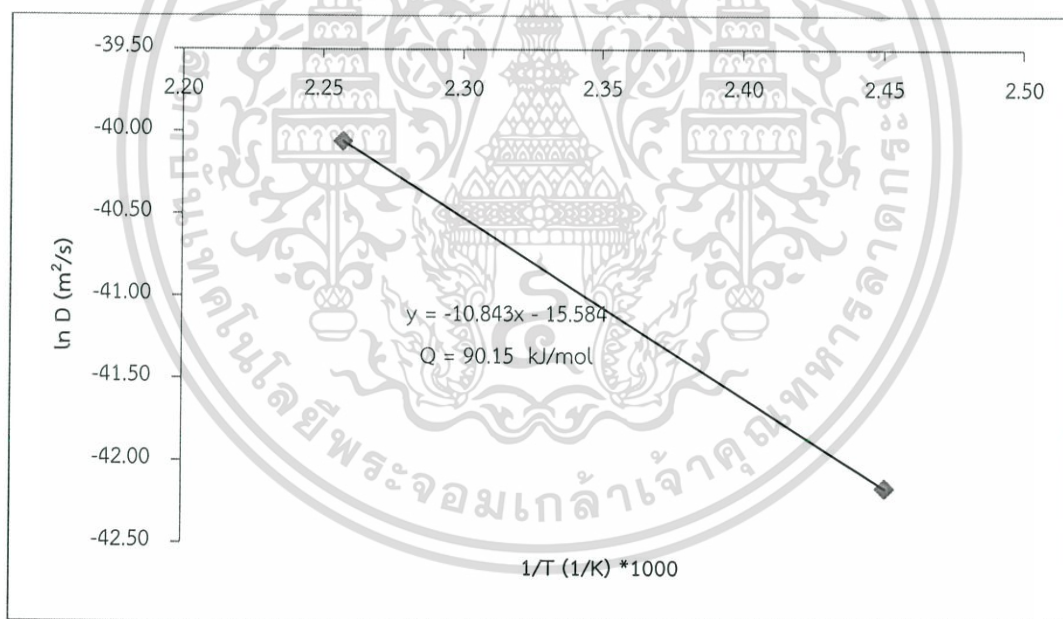


รูปที่ ข.34 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu₆Sn₅+Cu₃Sn ระหว่าง Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In กับแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.35 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ระหว่าง $\text{Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In}$ กับแผ่นทองแดง



รูปที่ ข.36 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn ระหว่าง $\text{Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In}$ กับแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GA2000SE

List of Analyses

Date: 15/9/2013 Time: 12:04:21
 Date: 15/9/2013 Time: 14:24:34

Sample No: 99/0.3/0.7 Sn/Ag/Cu Program: Sn-03 Sn-A

Element	Value	Unit
Sn	98.9	%
Pb	0.0197	%
Cu	0.0212	%
Ag	0.0070	%
Bi	0.0197	%
Sb	<0.0007	%
As	<0.0010	%
Au	0.00010	%
Fe	0.00070	%
Ni	<0.0001	%
Co	0.00020	%
Zn	0.00070	%
Ge	1.7781	%
P	<0.0001	%

รูปที่ ค.1 ส่วนผสมของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EDAX ZOOMSE

List of Analyses

Date: 15/9/2013
Time: 12:06:05
Program: Sn:03 Sn-A

Date: 15/9/2013
Time: 14:24:43

SampleNo: 98.5/0.3/0.7/0.5 in

Element	Value	Element	Value	Element	Value	Element	Value
S	<0.0002	Pb	0.0198	Zn	0.00060	Ni	<0.0001
Co	<0.0002	Bi	0.0186	Cu	0.695	Ag	0.328
Cr	<0.0002	Au	0.00010	P	<0.0001	Ge	319703
Fe	0.00070	As	<0.0010	Bg	98.4		
Al	0.00070	Sb	<0.0010	Sn	98.4		
In	0.536	Se	<0.0010				

รูปที่ ค.2 ส่วนผสมของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LIAZ000SE

Date: 15/9/2013
Time: 12:07:52

Date: 15/9/2013
Time: 14:24:55

List of Analyses

Program Sn-03 Sn-A

SampleNo 98/0.3/0.7/1.0 In

Value	S %	Sb %	As %	Au %	Bi %	Pb %	Cu %	Zn %	Ag %	Ni %	Co %
<0.0002	<0.0010	<0.0010	<0.0010	0.00010	0.0175	0.0275	0.683	0.00060	0.319	<0.0001	0.00020
Value	Cd %	Fe %	Al %	In %	Sn %	Bg %	P %	Ge %			
<0.0000	0.00310	0.00070	0.921	98.0	98.0	98.0	<0.0001	578323			

รูปที่ ค.3 ส่วนผสมของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DIA2000SE

List of Analyses

Date: 15/9/2013
Time: 14:25:06

Date: 15/9/2013
Time: 14:08:58
Program: Sn-03 Sn-A

SampleNo: 97.5/0.3/0.7/1.5 In

S	%	<0.0002	Sb	%	<0.0010	As	%	<0.0010	Au	%	0.00010	Bi	%	0.0180	Pb	%	0.0196	Cu	%	0.687	Zn	%	0.00070	Ag	%	0.319	Ni	%	<0.0001	Co	%	0.00020
Cd	%	<0.0000	Fe	%	0.00270	Al	%	0.00070	In	%	1.51	Sn	%	97.4	Bg	%	97.4	P	%	<0.0001	Ge	%	1066000									

รูปที่ ค.4 ส่วนผสมของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DIA2000SE

List of Analyses

Date: 15/9/2013
Time: 14:25:15

Date: 15/9/2013
Time: 14:12:42
Program Sn-03 Sn-A

Sample No 9710.3/0.7/2.0 In

Element	Value	Element	Value
S %	<0.0002	Ag %	0.311
Sb %	<0.0010	Zn %	0.00060
As %	<0.0010	Cu %	0.674
Au %	0.00010	Pb %	0.0194
Bi %	0.0173	Sn %	97.0
Fe %	0.00070	Bg %	97.0
Cd %	<0.0000	Ge %	<0.0001
Co %	<0.0001	1518000	
Ni %	<0.0001		

รูปที่ ค.5 ส่วนผสมของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DIA2000SE

List of Analyses

Date: 15/9/2013
Time: 14:25:23

Date: 15/9/2013
Time: 14:17:54
Program: Sn-03-Sn-A

Sample No: 96.5/0.3/0.7/2.5 In

Value	S %	As %	Sb %	Au %	Bi %	Pb %	Cu %	Zn %	Ag %	Ni %	Co %
<0.0002	0.00810	<0.0010	0.00020	0.00020	0.0205	0.0166	0.634	0.00070	0.317	0.00020	0.00020
Value	Cd %	Fe %	Al %	In %	Sn %	Bg %	P %	Ge %			
<0.0000	0.00450	0.00070	2.58	96.4	96.4	<0.0001	2083000				

รูปที่ ค.6 ส่วนผสมของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DIA 2000SE

List of Analyses

Date: 15/9/2013 Date: 15/9/2013
 Time: 14:23:41 Time: 14:25:32

Sample No 96-0.3/0.7/3.0 In Program / Sn-03 Sn-A

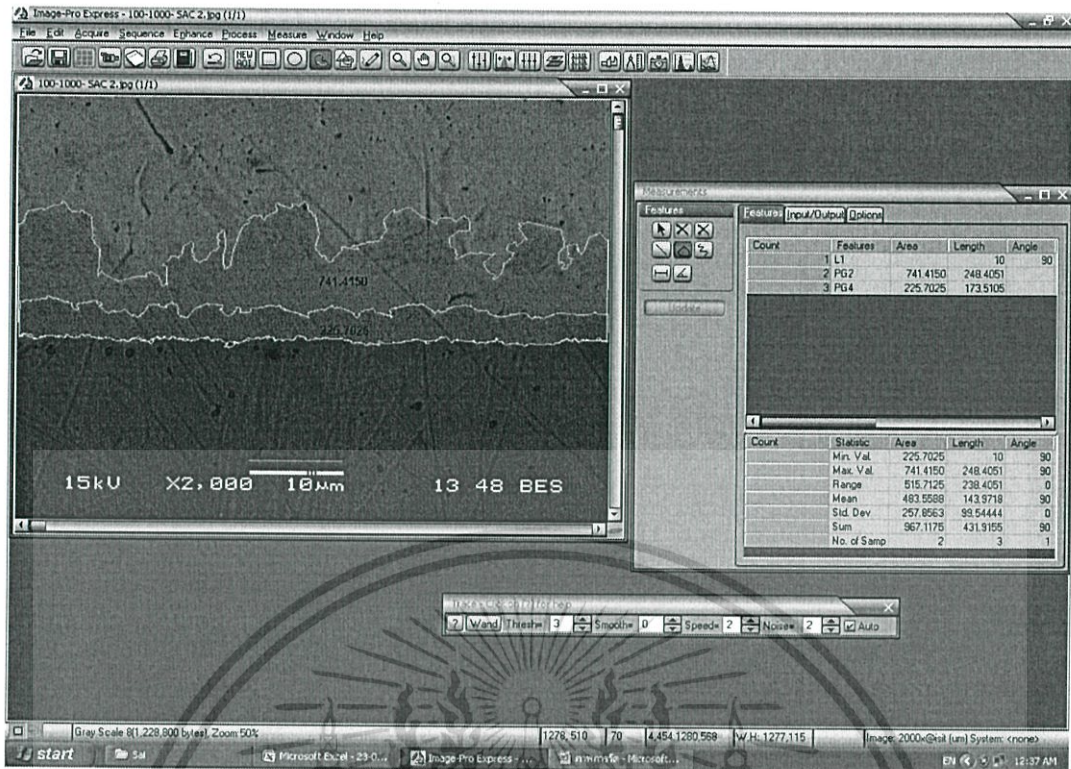
Element	Value	Element	Value
S	<0.0002	Ag	0.369
Sb	0.00650	Zn	0.00080
As	<0.0010	Cu	0.746
Au	0.00020	Pb	0.326
Bi	0.0207	Bi	0.0207
Sn	95.5	Sn	95.5
In	2.98	In	2.98
Fe	0.00350	Fe	0.00350
Al	0.00070	Al	0.00070
Cd	<0.0000	Cd	<0.0000
P	<0.0001	P	<0.0001
Bg	95.5	Bg	95.5
Ge	2.320000	Ge	2.320000
Ni	0.00030	Ni	0.00030
Co	0.00030	Co	0.00030

รูปที่ ค.7 ส่วนผสมของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In

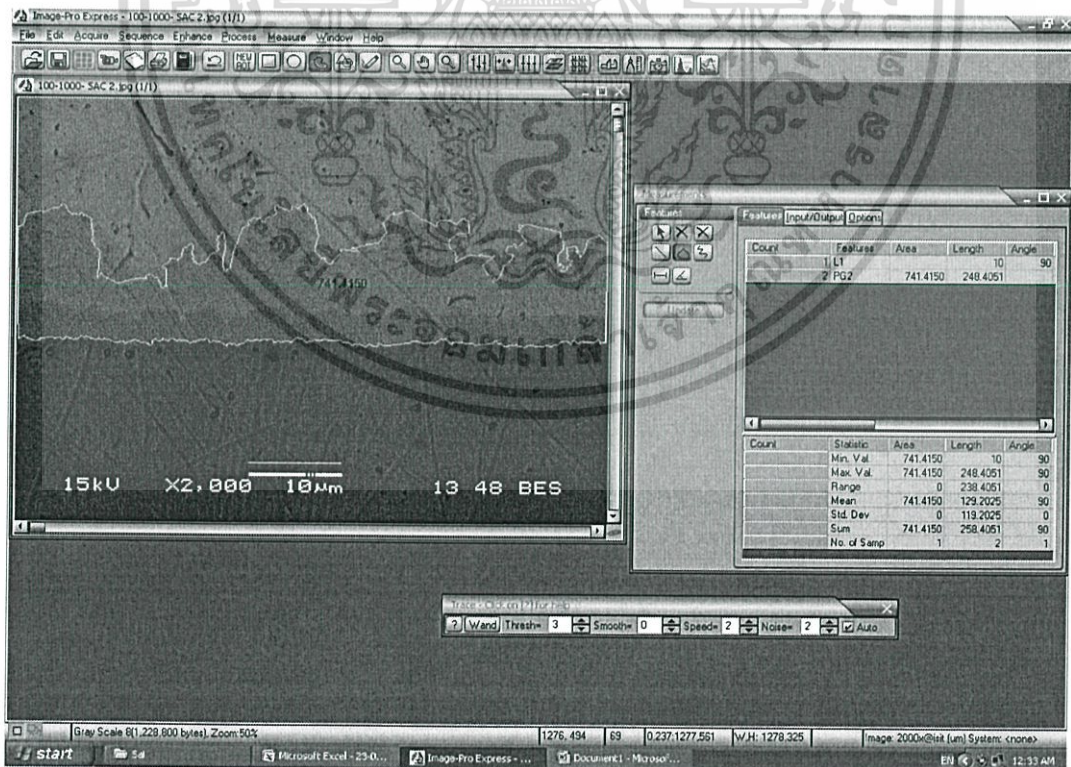
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง.1 การวัดขนาดพื้นที่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 และ Cu_3Sn ด้วยโปรแกรม Image-pro Express

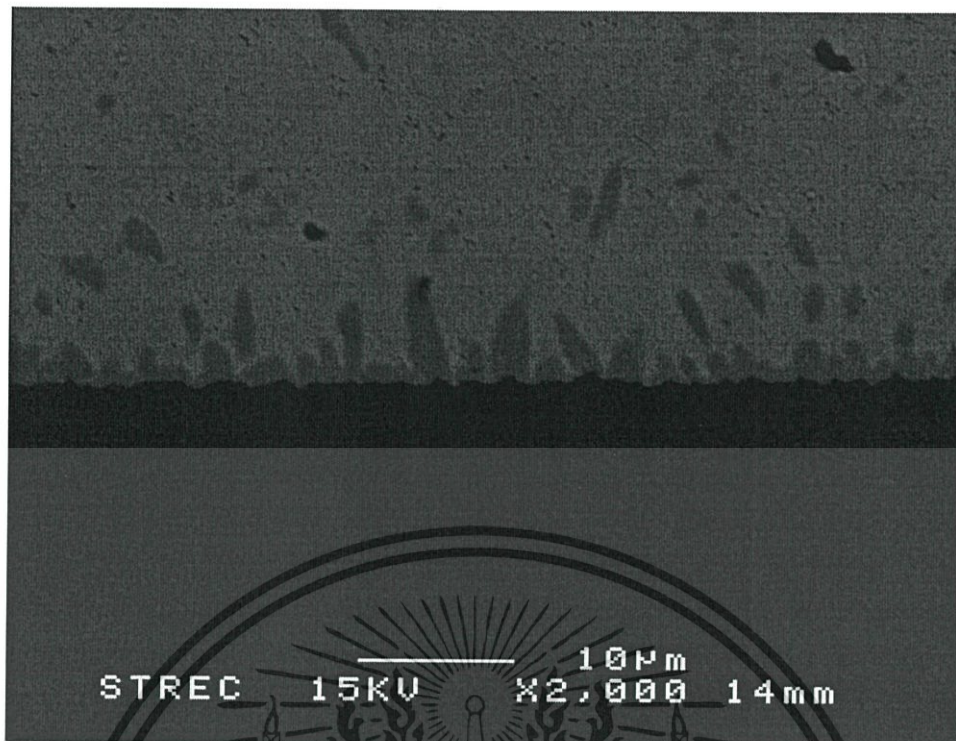


รูปที่ ง.2 การวัดขนาดพื้นที่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวมด้วยโปรแกรม Image-pro Express

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

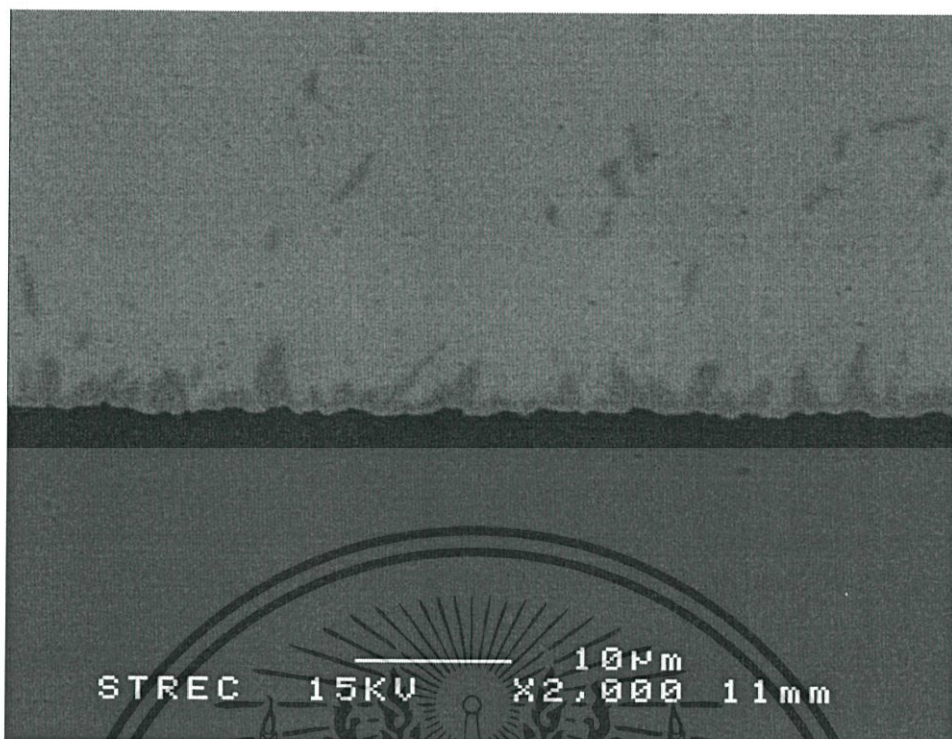


รูปที่ จ.1 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu กับแผ่นทองแดง หลังการบัดกรี



รูปที่ จ.2 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In กับแผ่นทองแดงหลังการบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

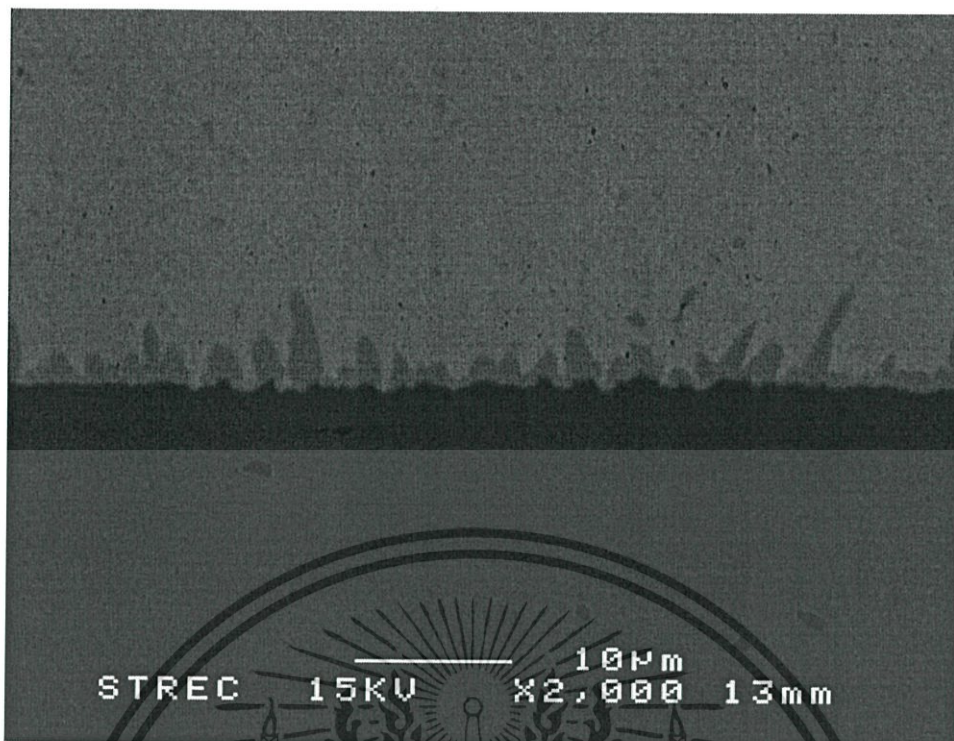


รูปที่ จ.3 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In กับแผ่นทองแดงหลังการบัดกรี

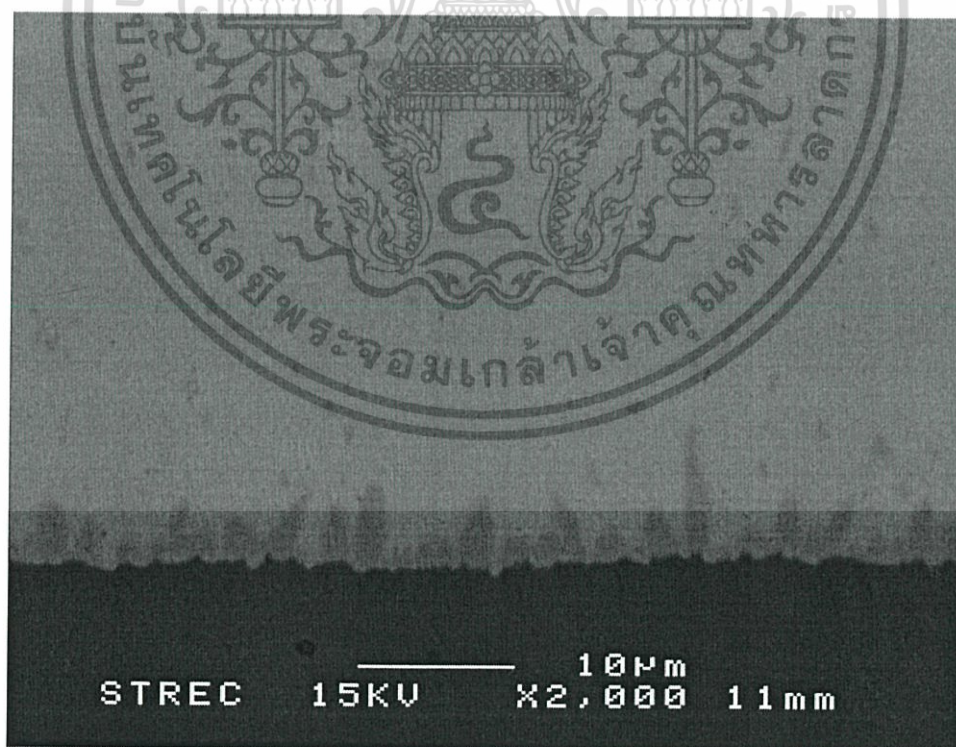


รูปที่ จ.4 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In กับแผ่นทองแดงหลังการบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

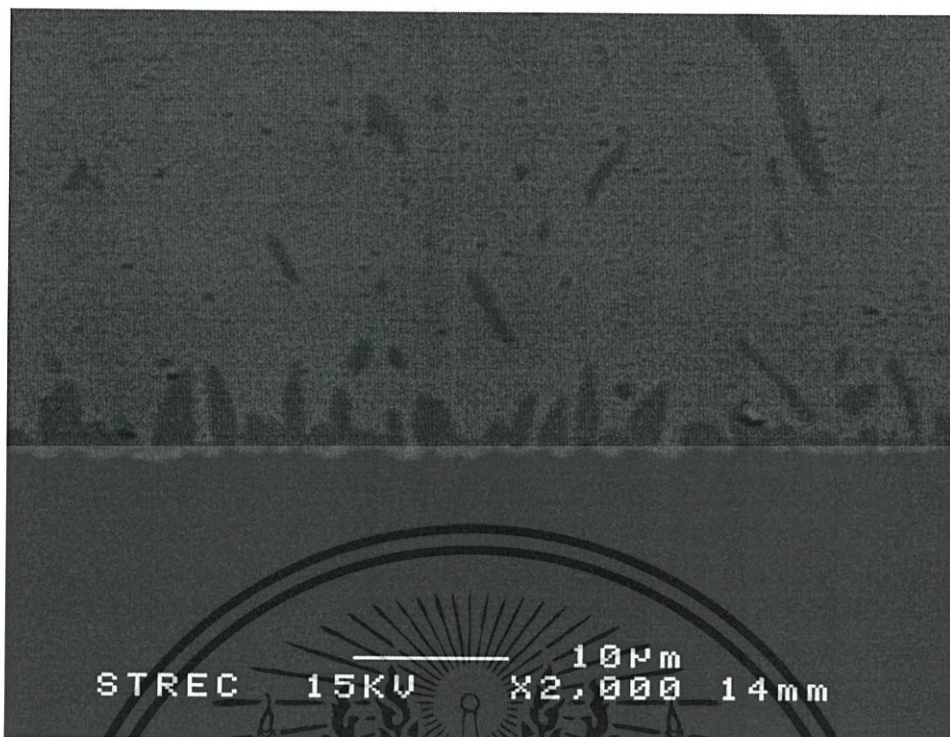


รูปที่ จ.5 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In กับแผ่นทองแดงหลังการบัดกรี

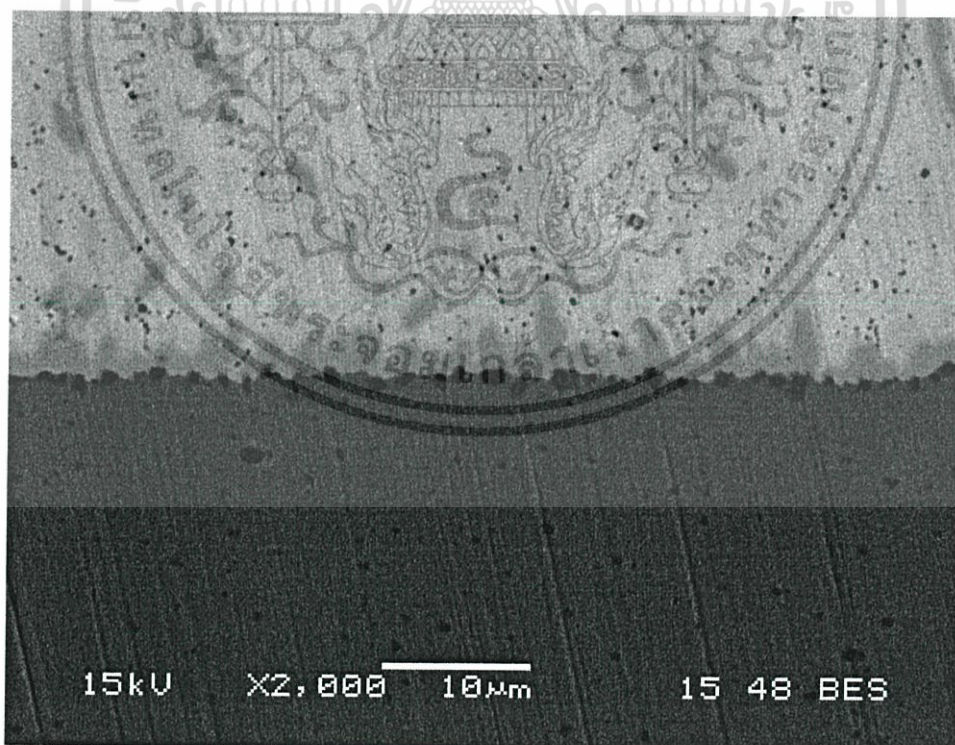


รูปที่ จ.6 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In กับแผ่นทองแดงหลังการบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

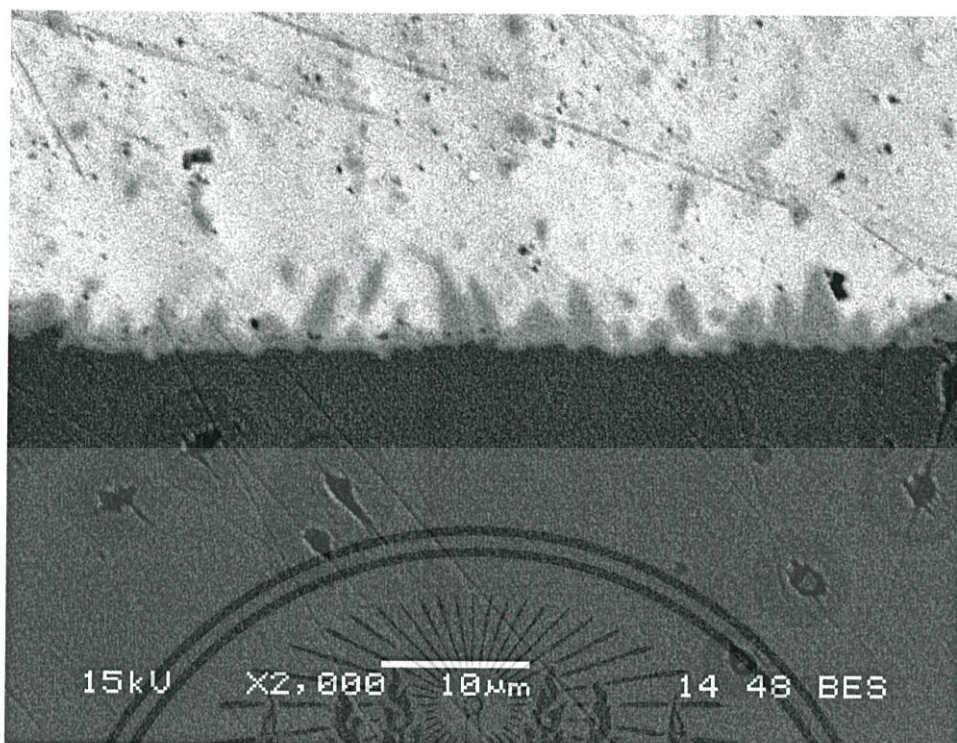


รูปที่ จ.7 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In กับแผ่นทองแดงหลังการบัดกรี

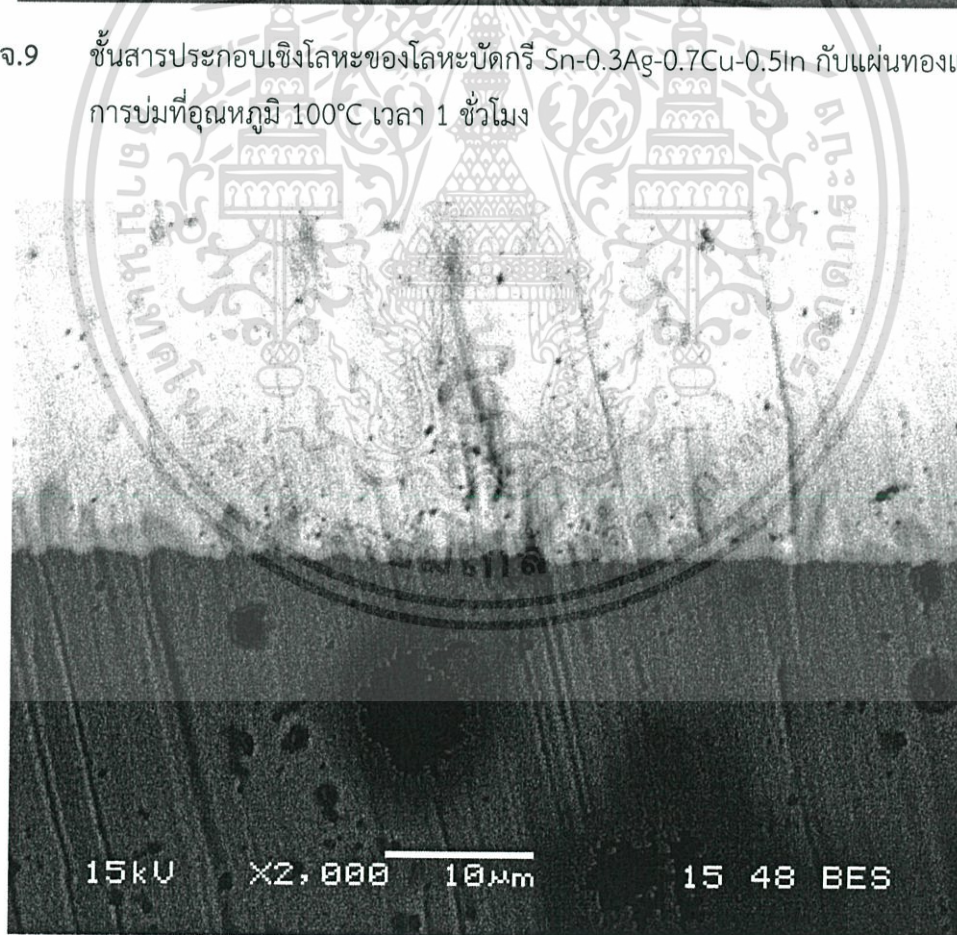


รูปที่ จ.8 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

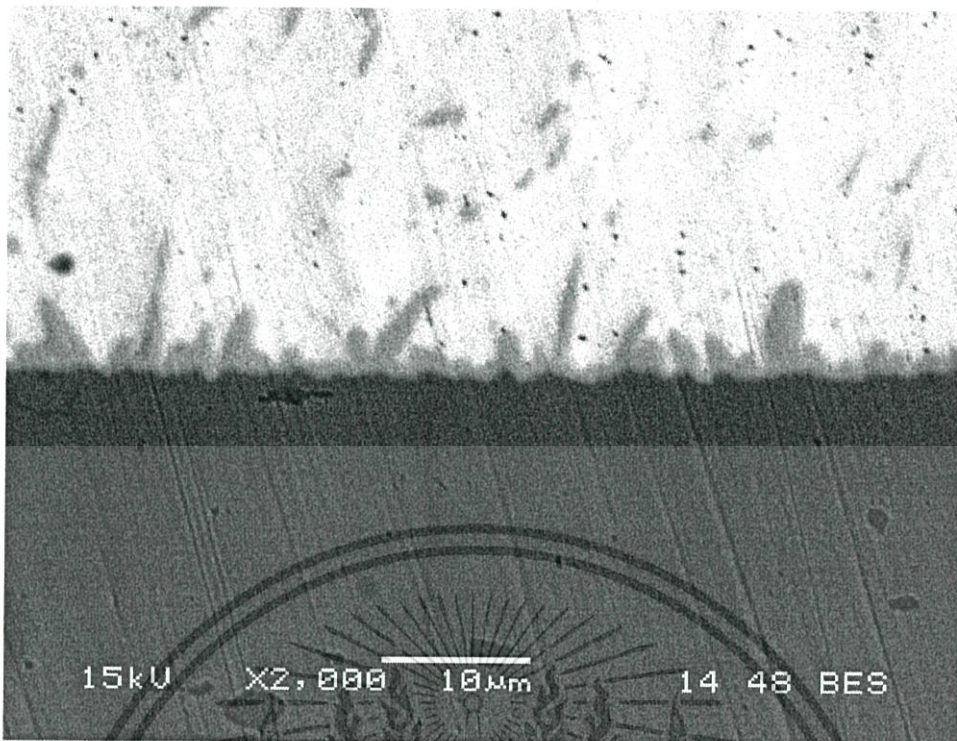


รูปที่ จ.9 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 1 ชั่วโมง

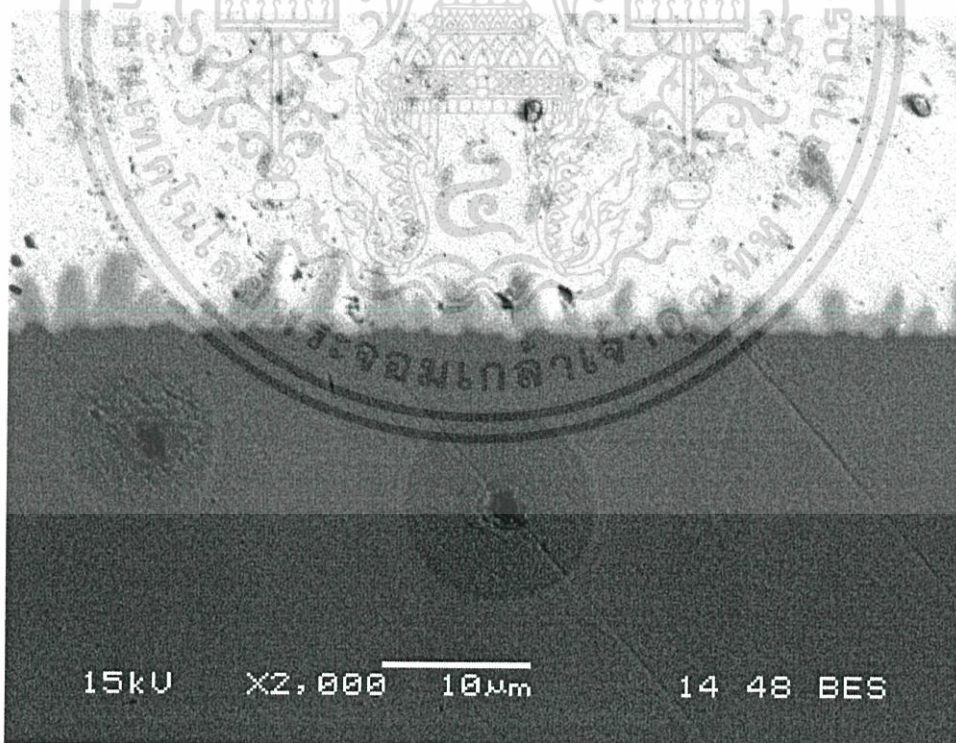


รูปที่ จ.10 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

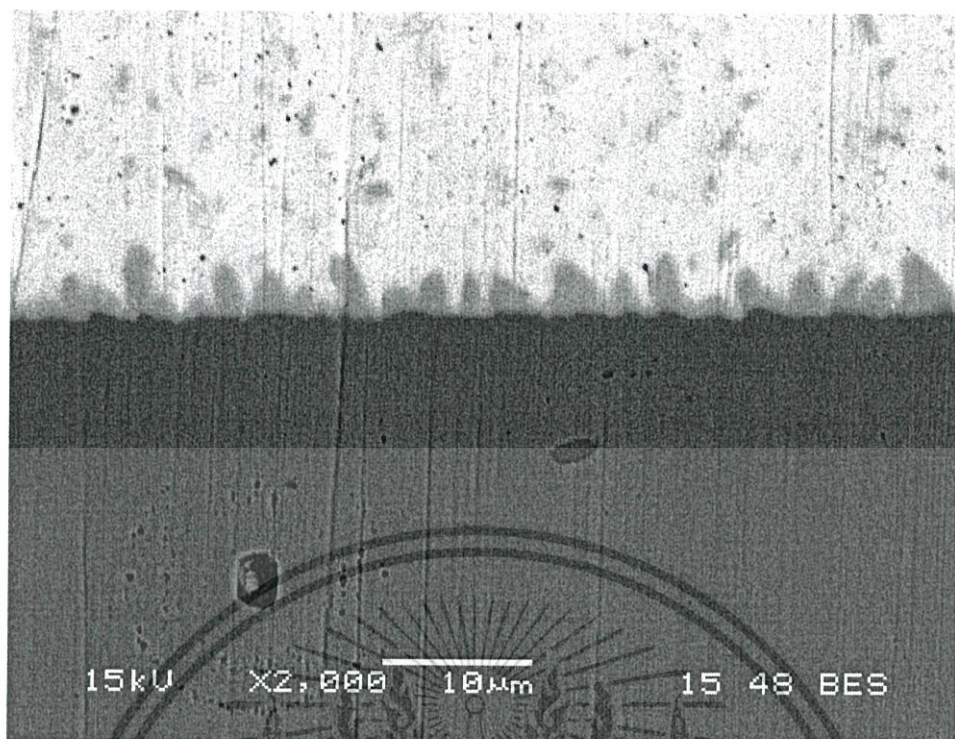


รูปที่ จ.11 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 1 ชั่วโมง

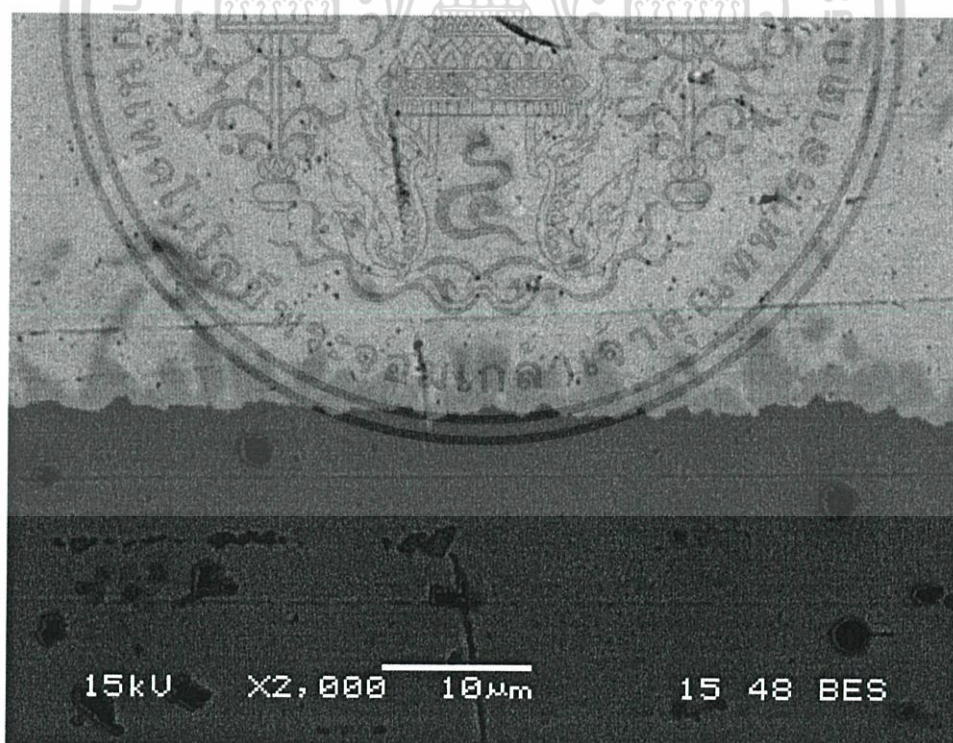


รูปที่ จ.12 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

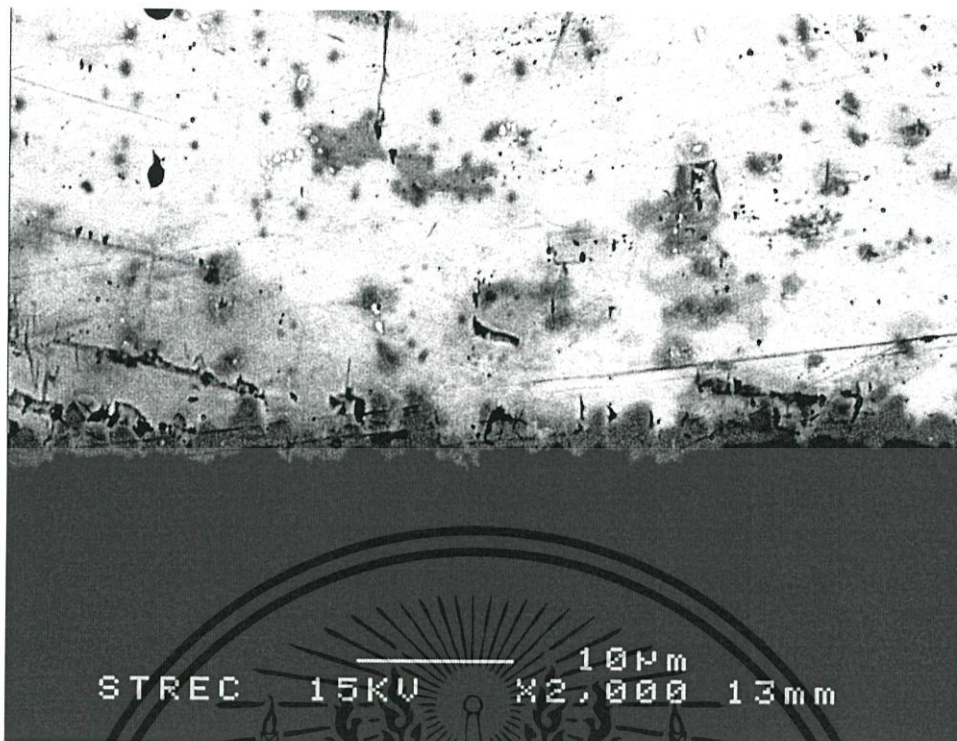


รูปที่ จ.13 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 1 ชั่วโมง

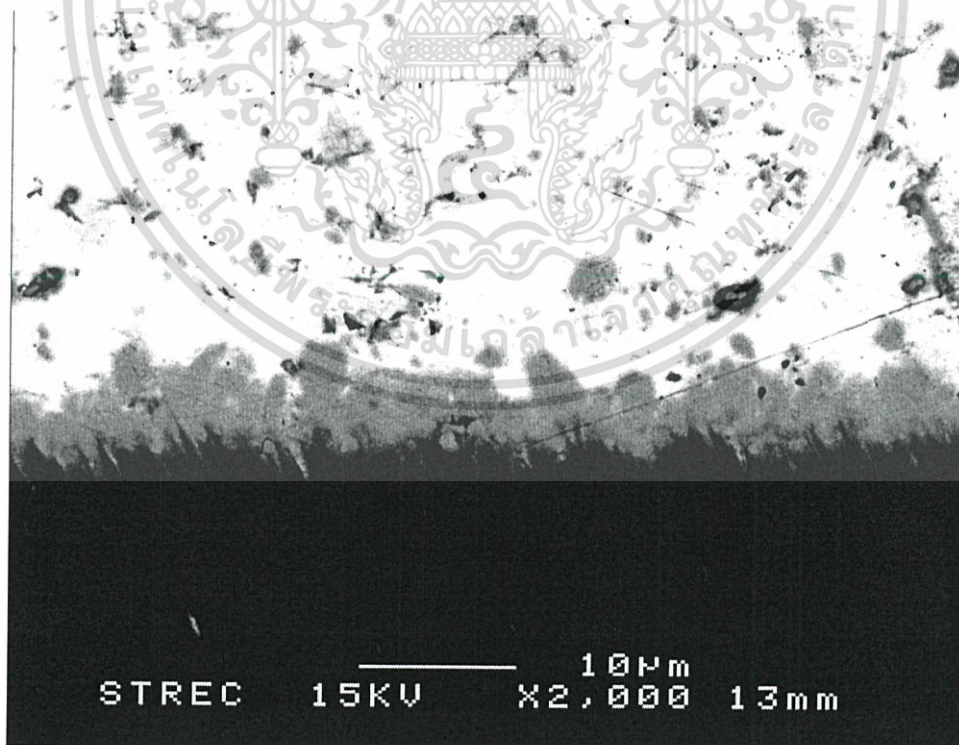


รูปที่ จ.14 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

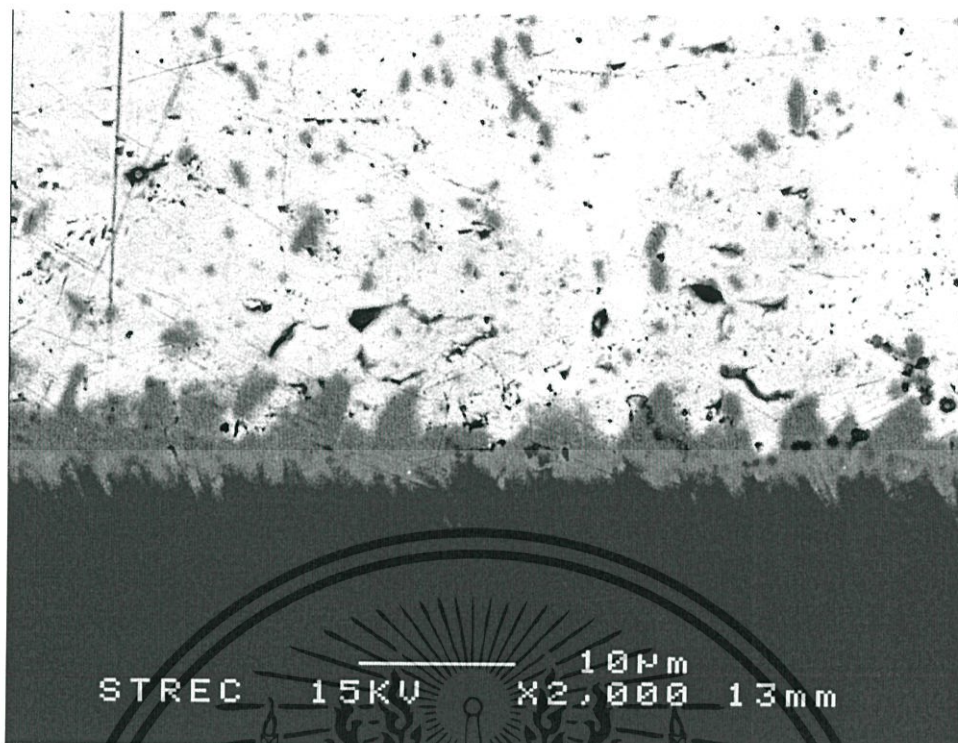


รูปที่ จ.15 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 135°C เวลา 1 ชั่วโมง

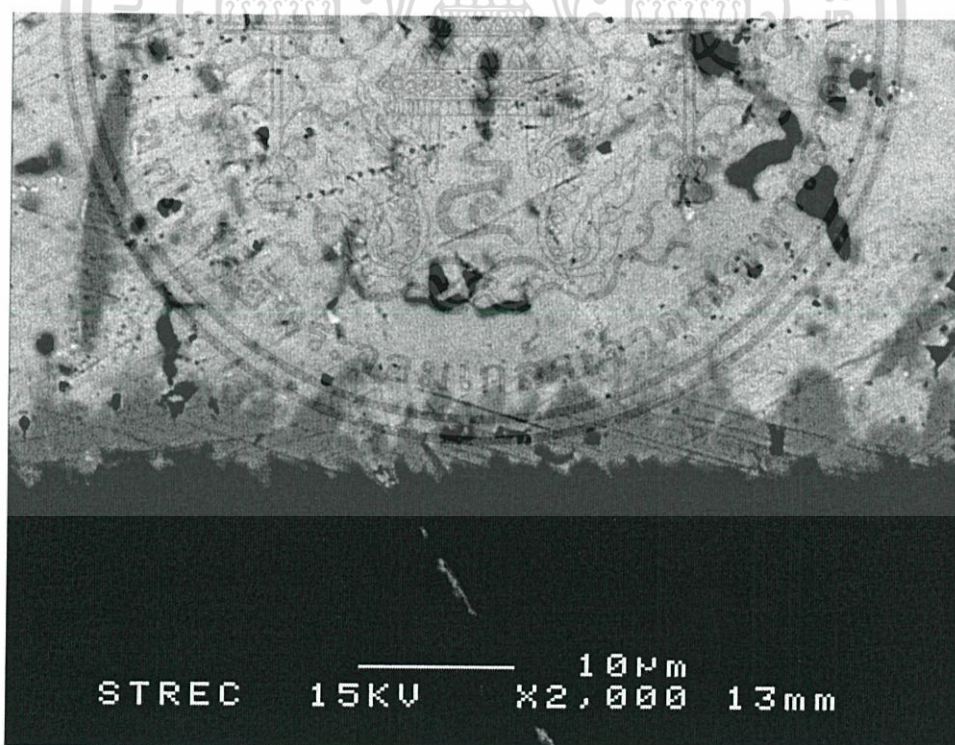


รูปที่ จ.16 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 135°C เวลา 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

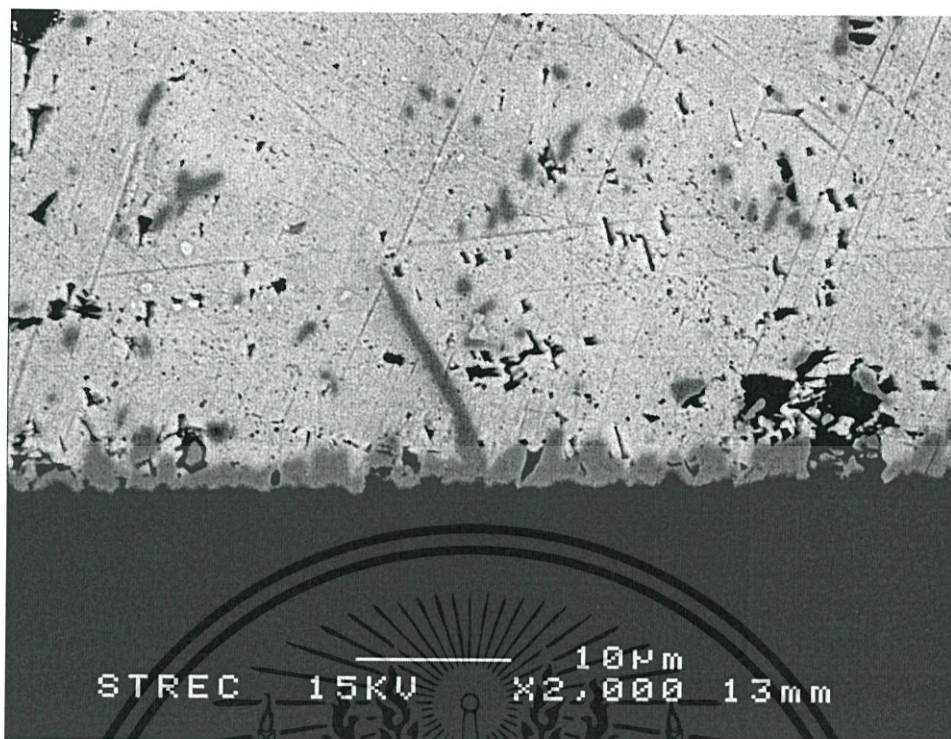


รูปที่ จ.17 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 135°C เวลา 1 ชั่วโมง

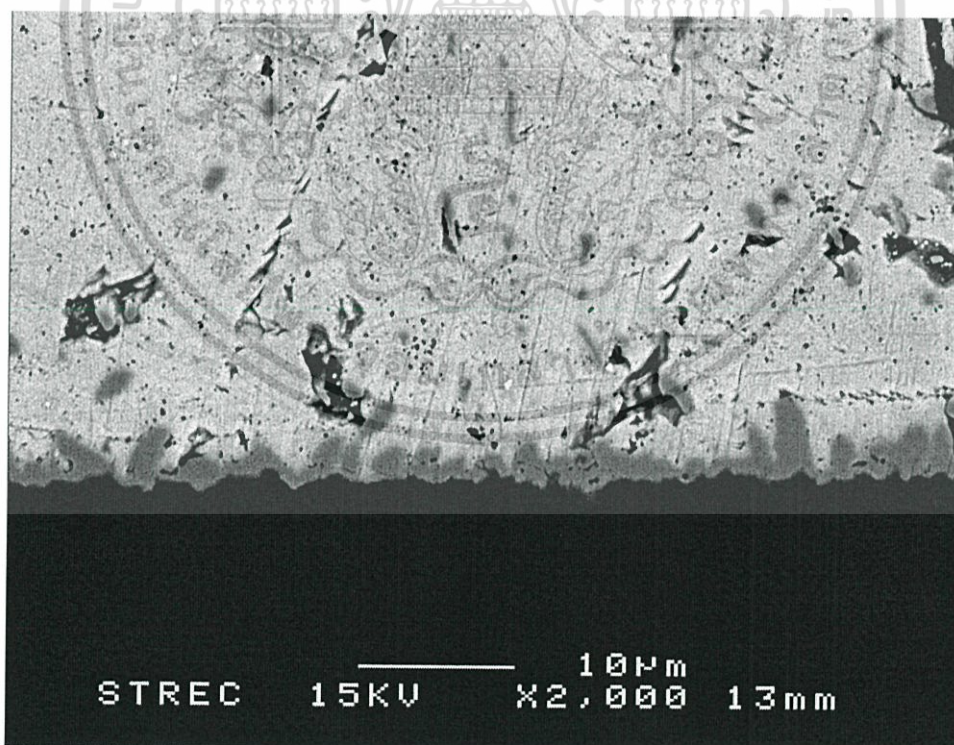


รูปที่ จ.18 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 135°C เวลา 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

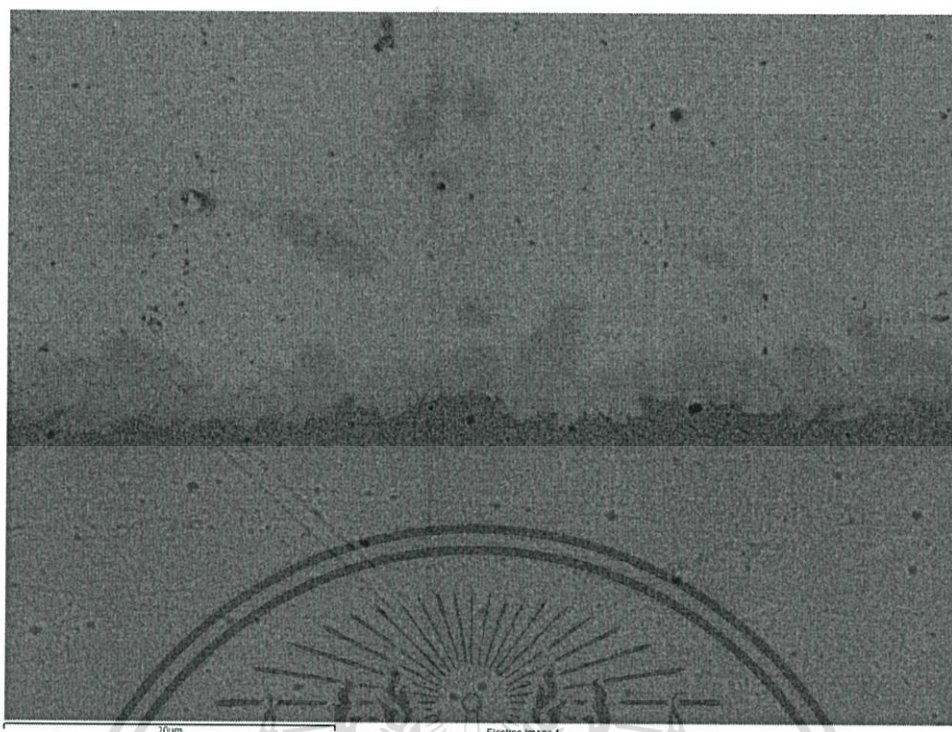


รูปที่ จ.19 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 135°C เวลา 1 ชั่วโมง

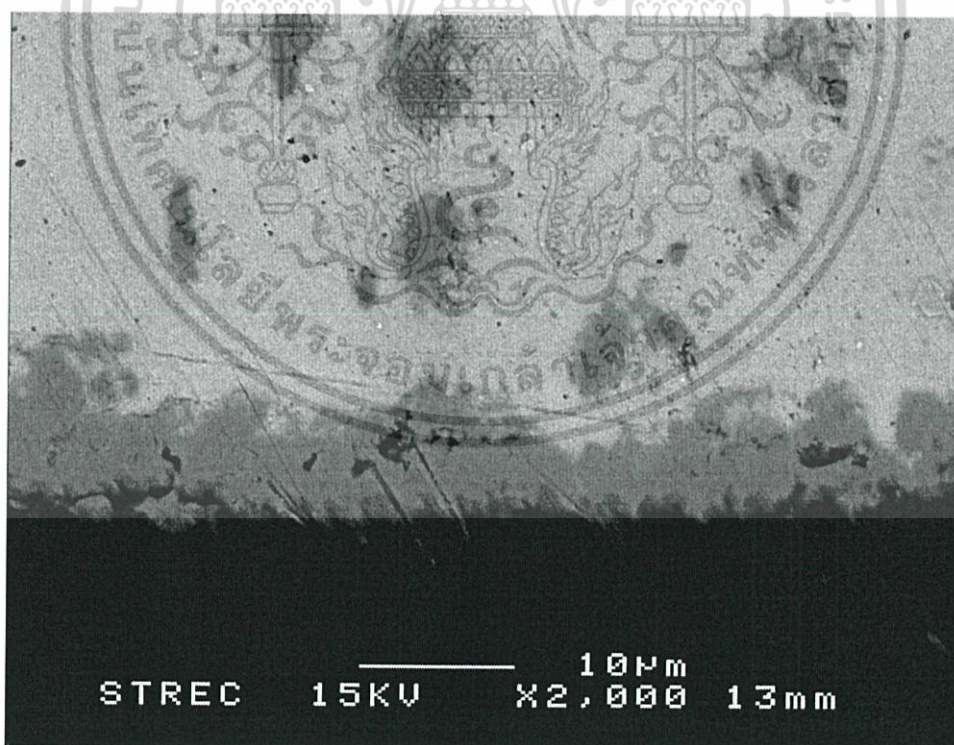


รูปที่ จ.20 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 135°C เวลา 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

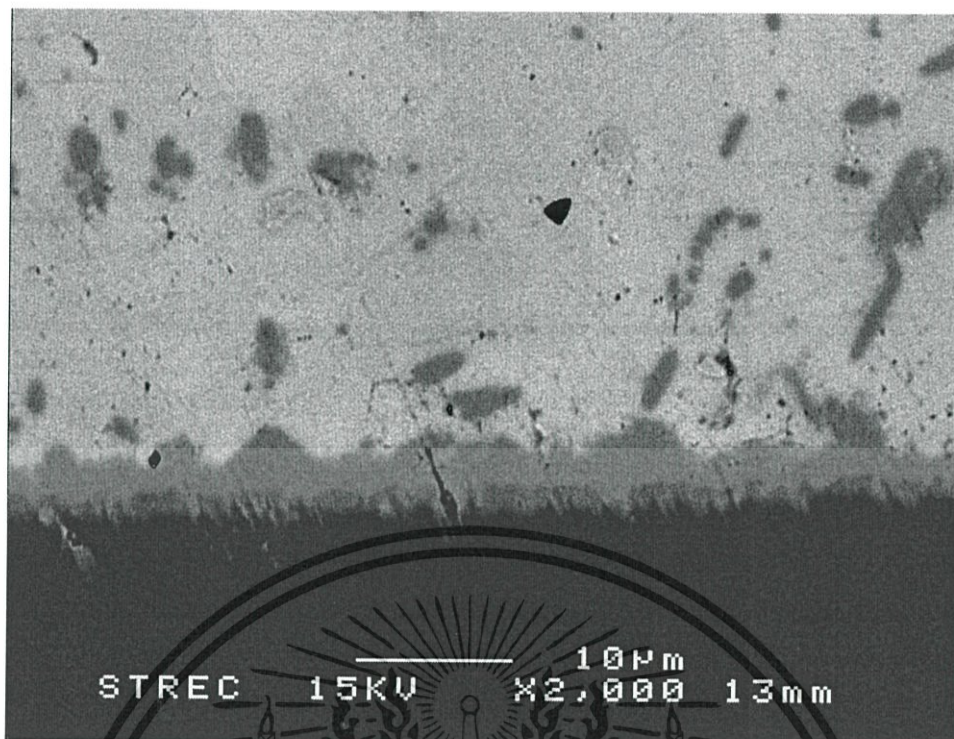


รูปที่ จ.21 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 135°C เวลา 1 ชั่วโมง

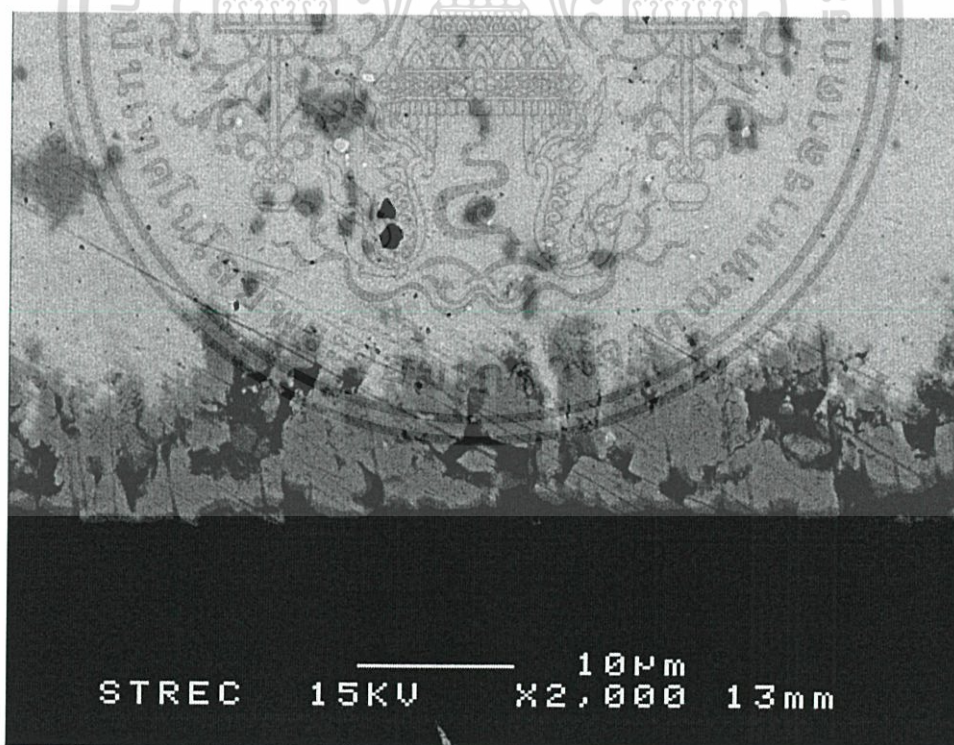


รูปที่ จ.22 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 170°C เวลา 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

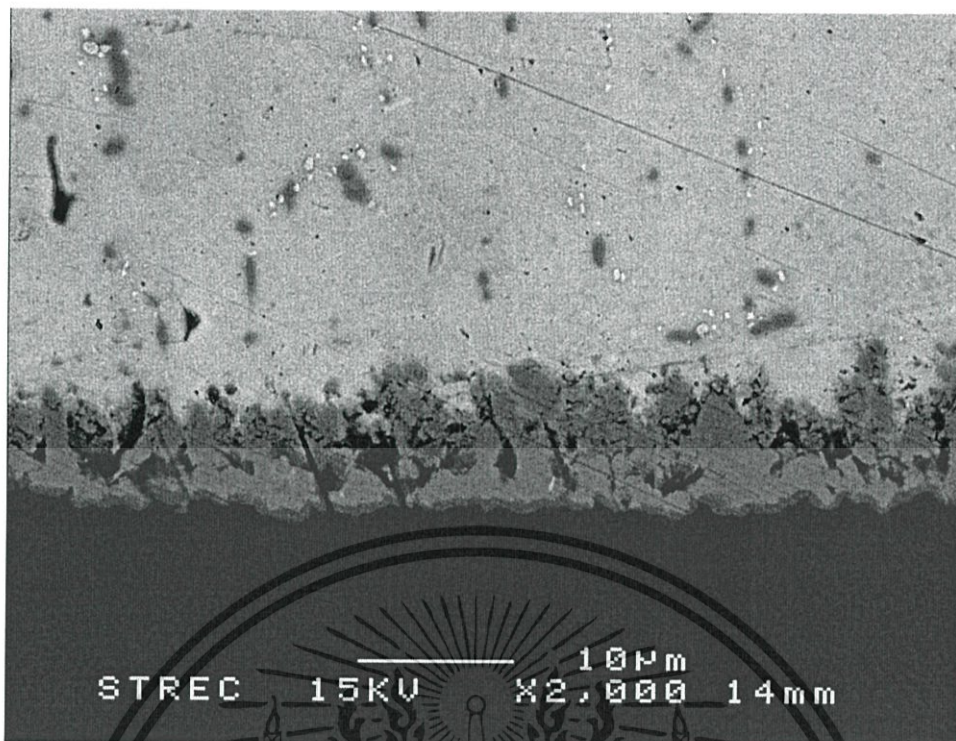


รูปที่ จ.23 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 170°C เวลา 1 ชั่วโมง

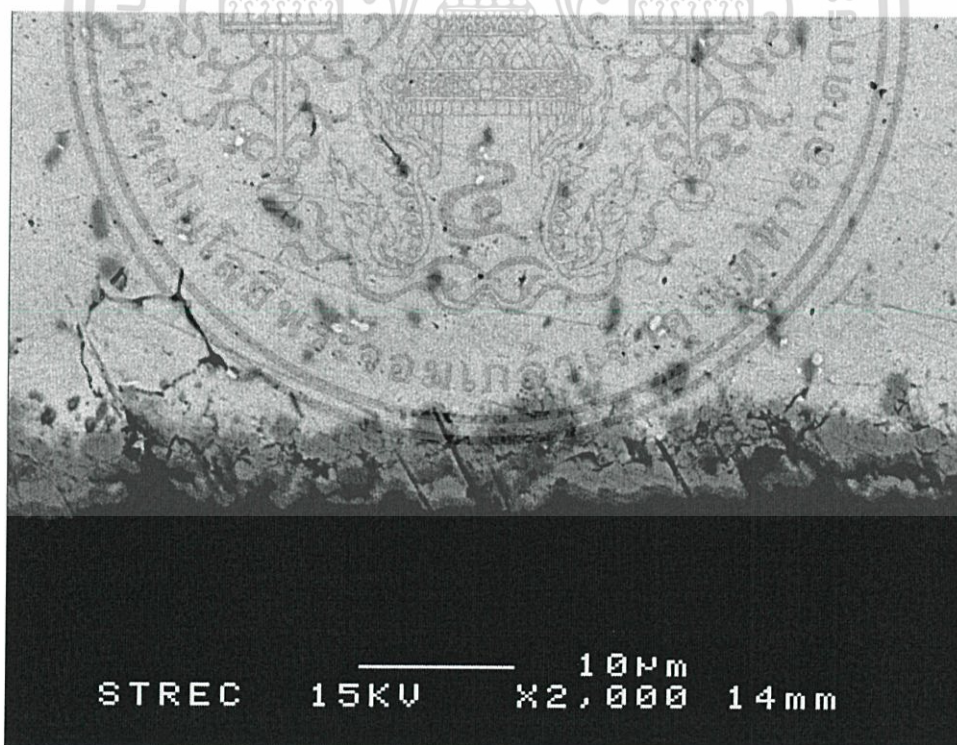


รูปที่ จ.24 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 170°C เวลา 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

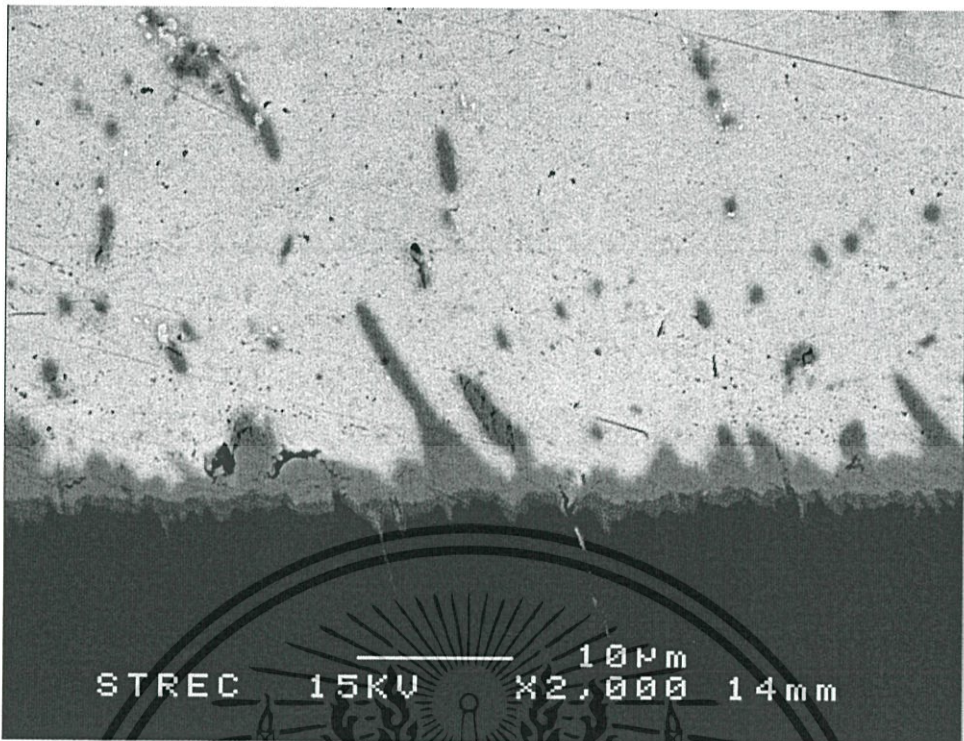


รูปที่ จ.25 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 170°C เวลา 1 ชั่วโมง

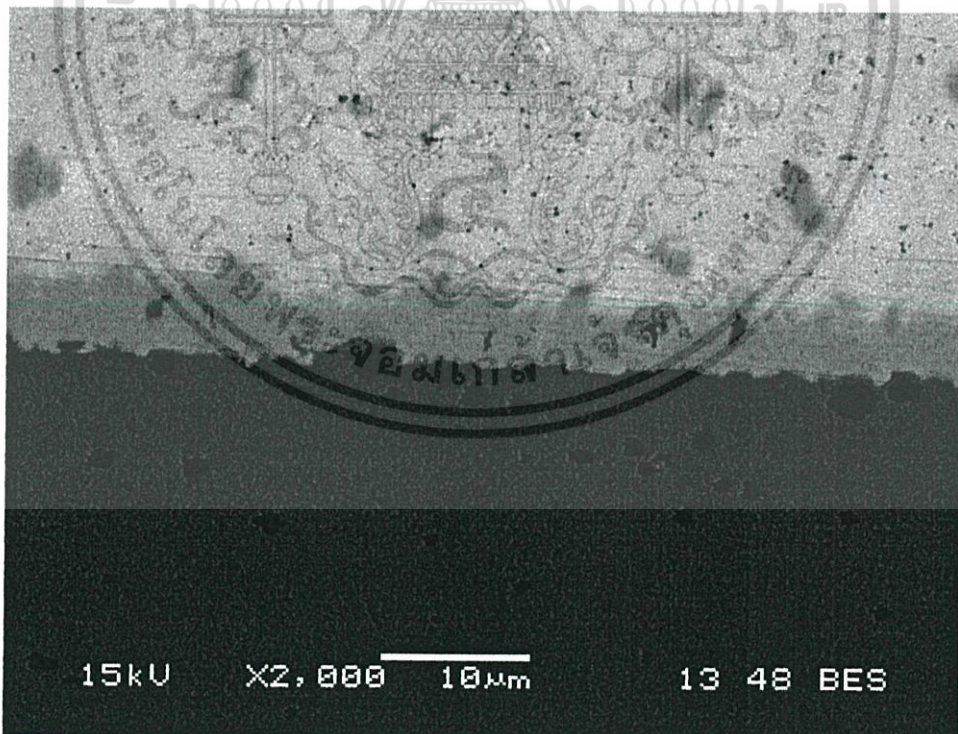


รูปที่ จ.26 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 170°C เวลา 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

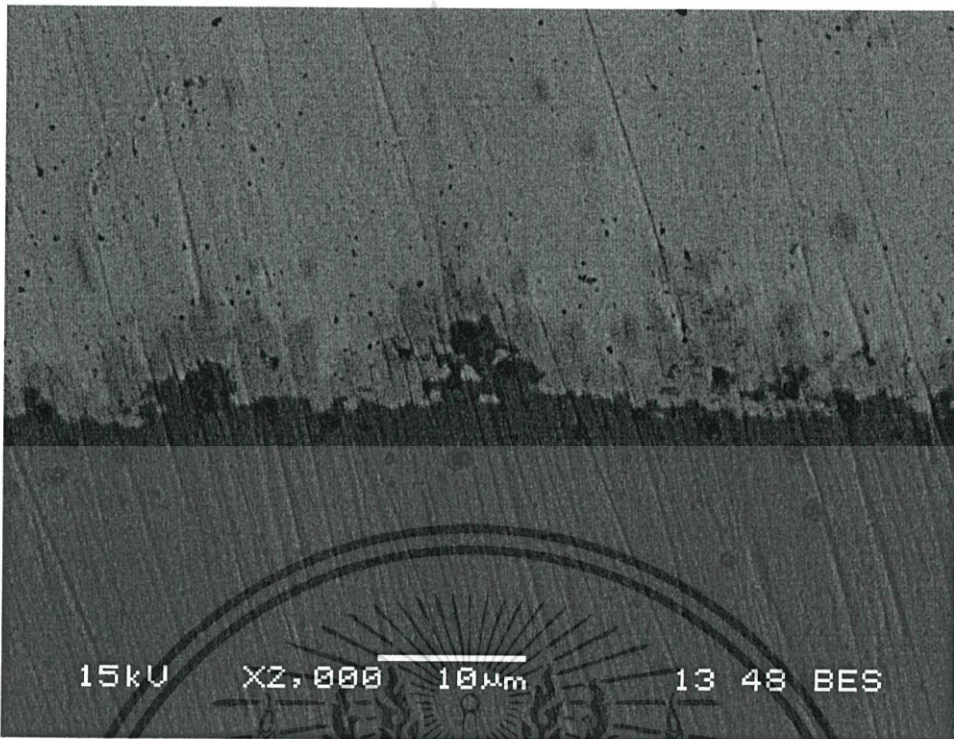


รูปที่ จ.27 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 170°C เวลา 1 ชั่วโมง

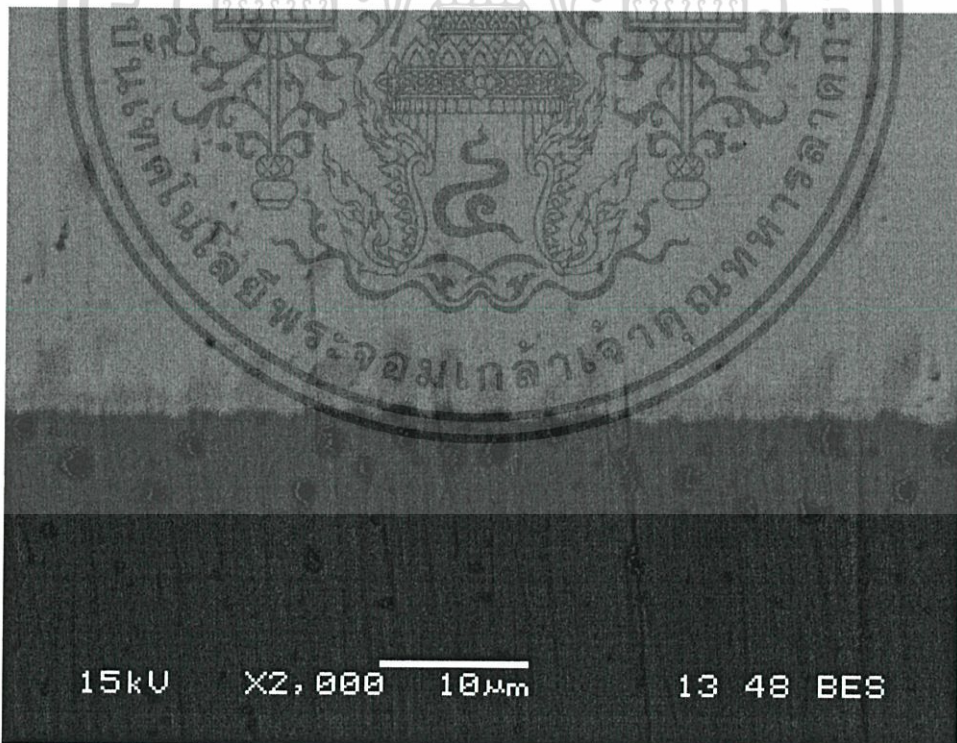


รูปที่ จ.28 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 170°C เวลา 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

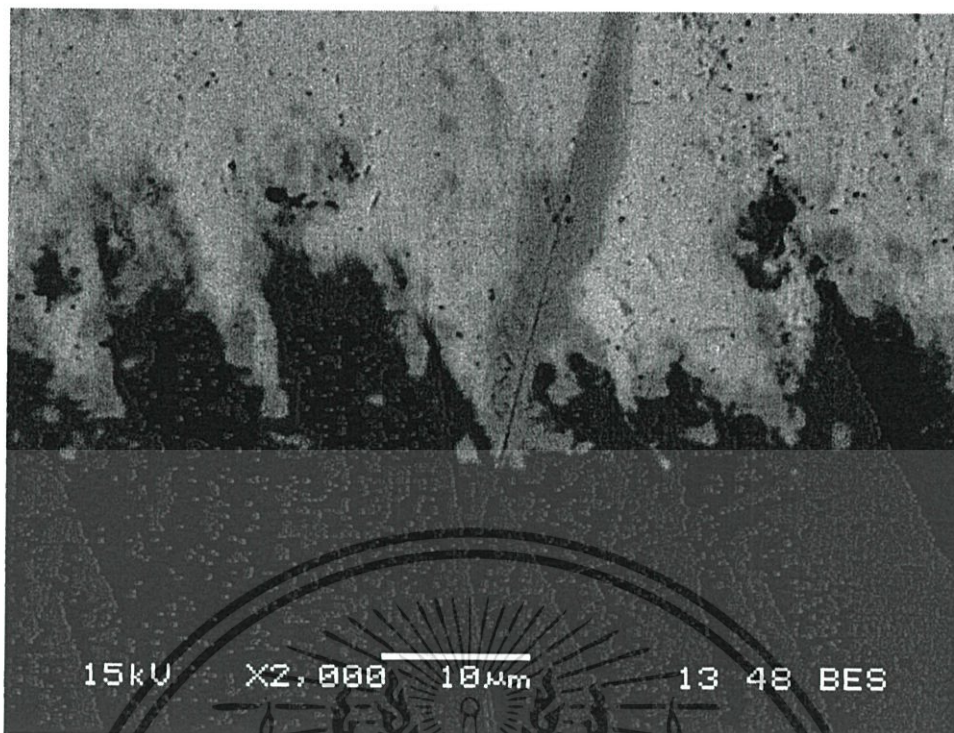


รูปที่ จ.29 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 10 ชั่วโมง

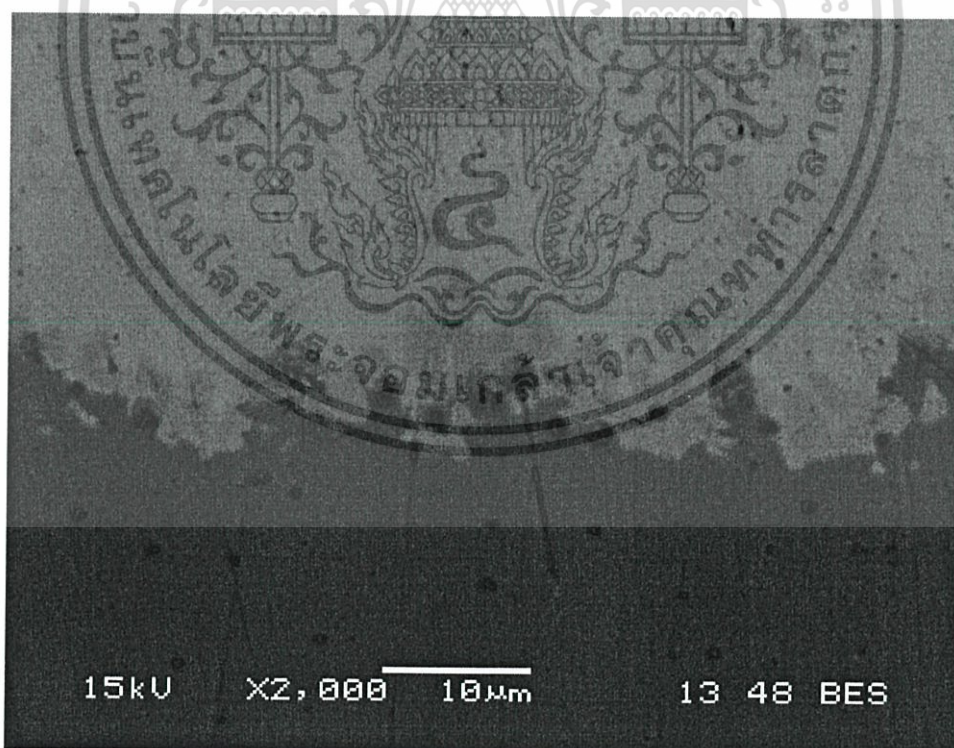


รูปที่ จ.30 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

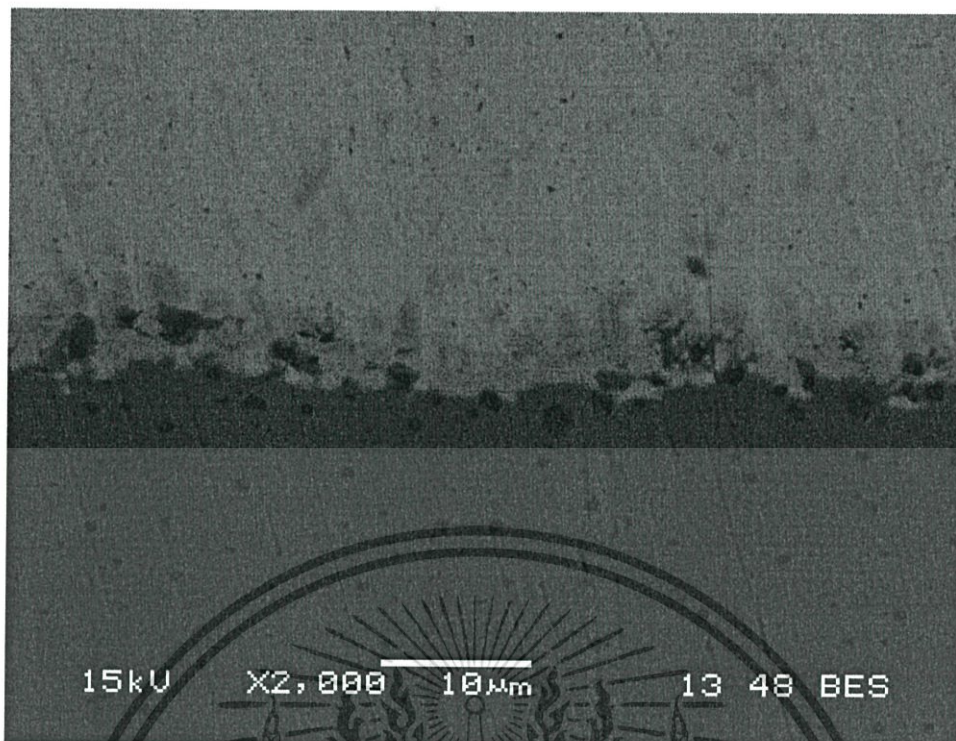


รูปที่ จ.31 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 10 ชั่วโมง

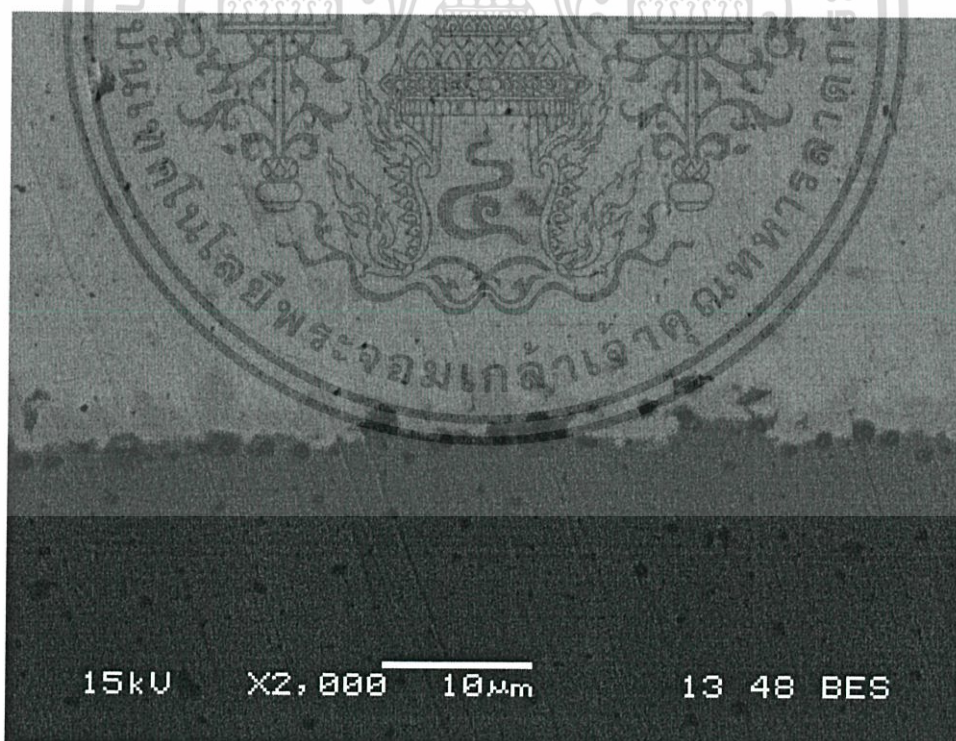


รูปที่ จ.32 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

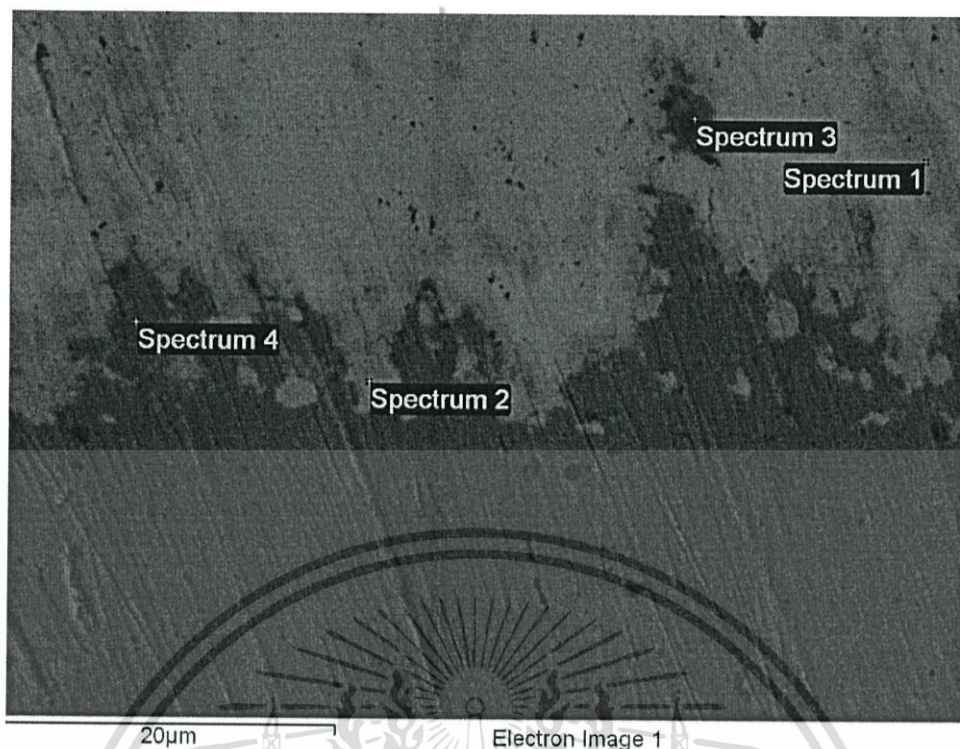


รูปที่ จ.33 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 10 ชั่วโมง

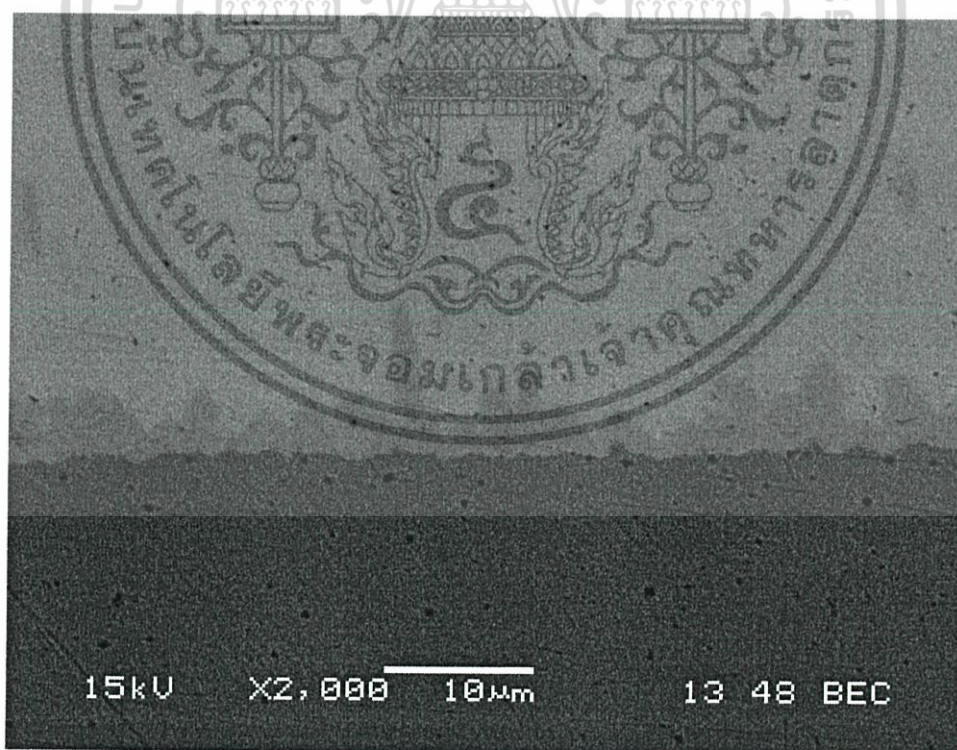


รูปที่ จ.34 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

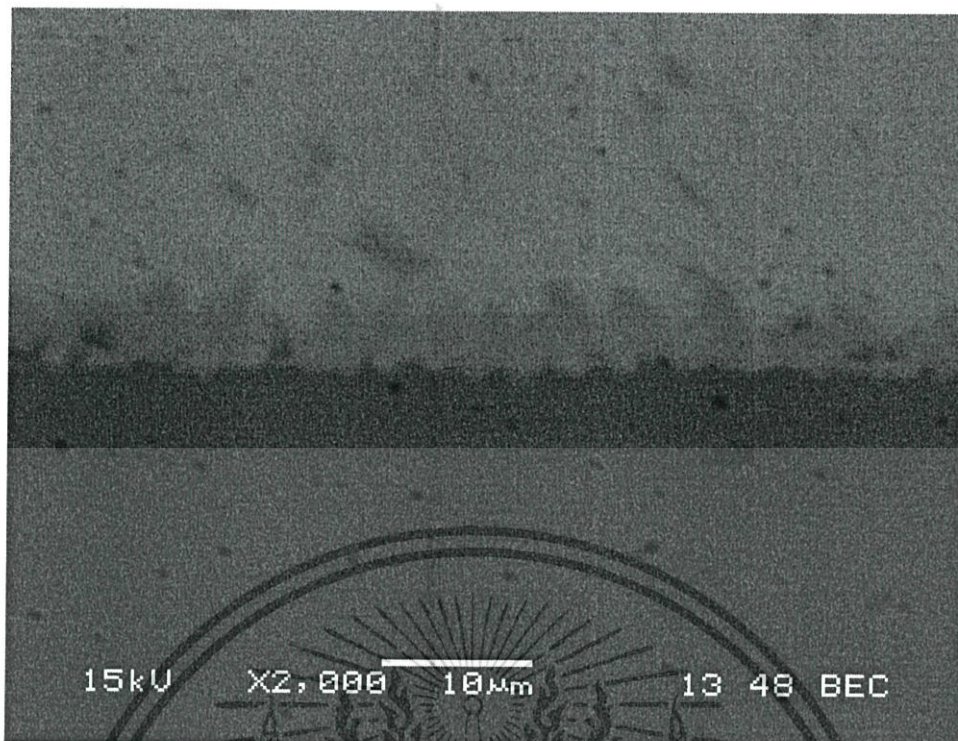


รูปที่ จ.35 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 10 ชั่วโมง

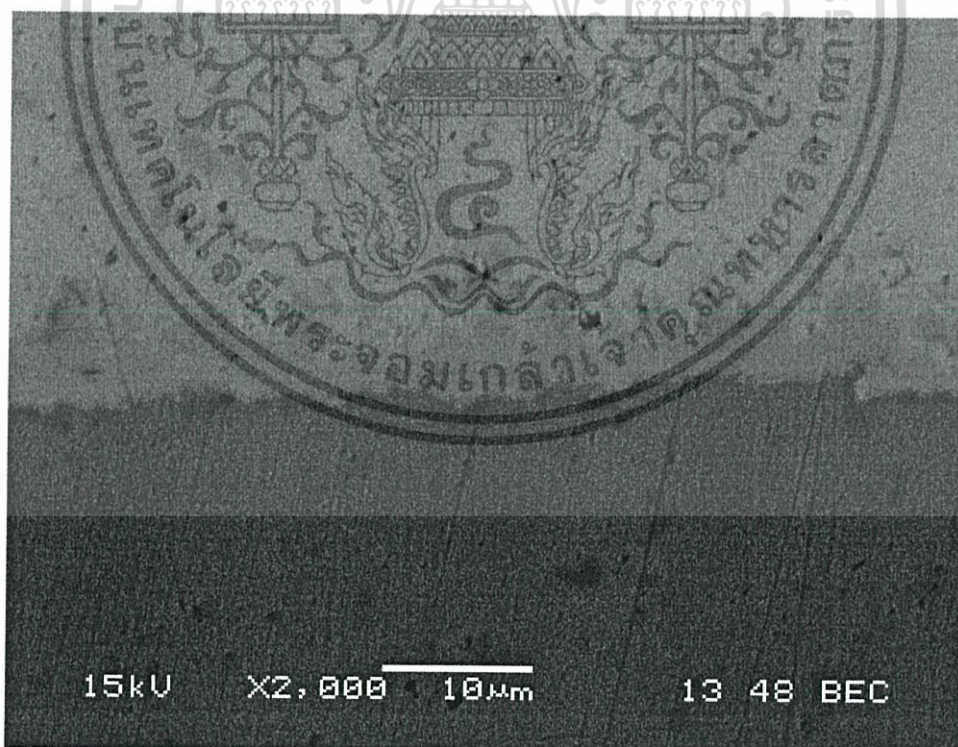


รูปที่ จ.36 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 135°C เวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

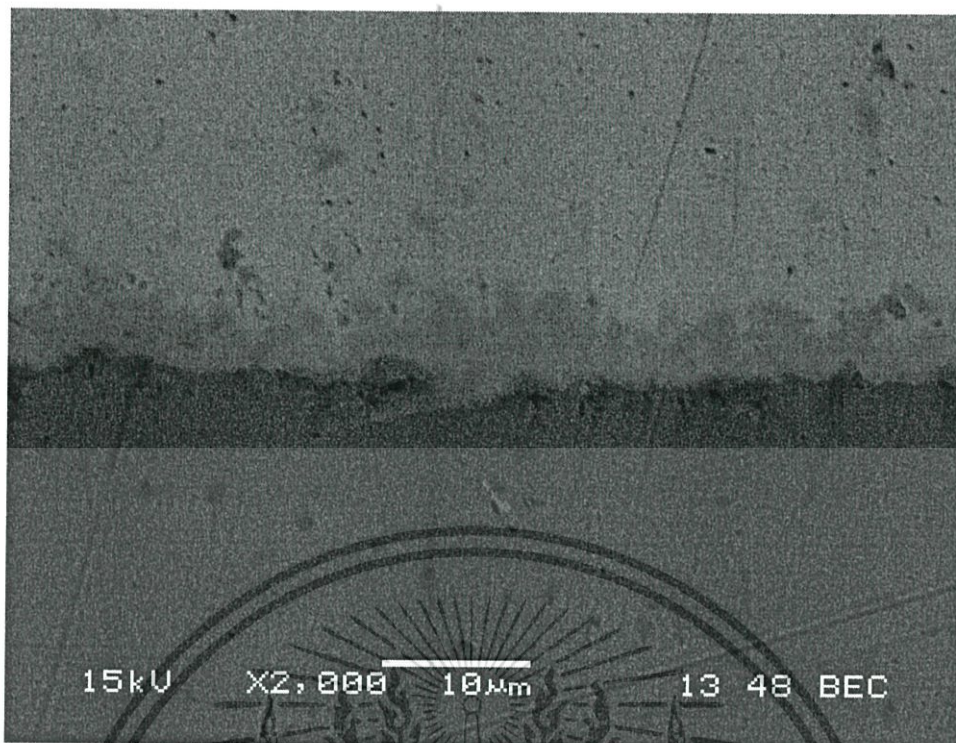


รูปที่ จ.37 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 135°C เวลา 10 ชั่วโมง

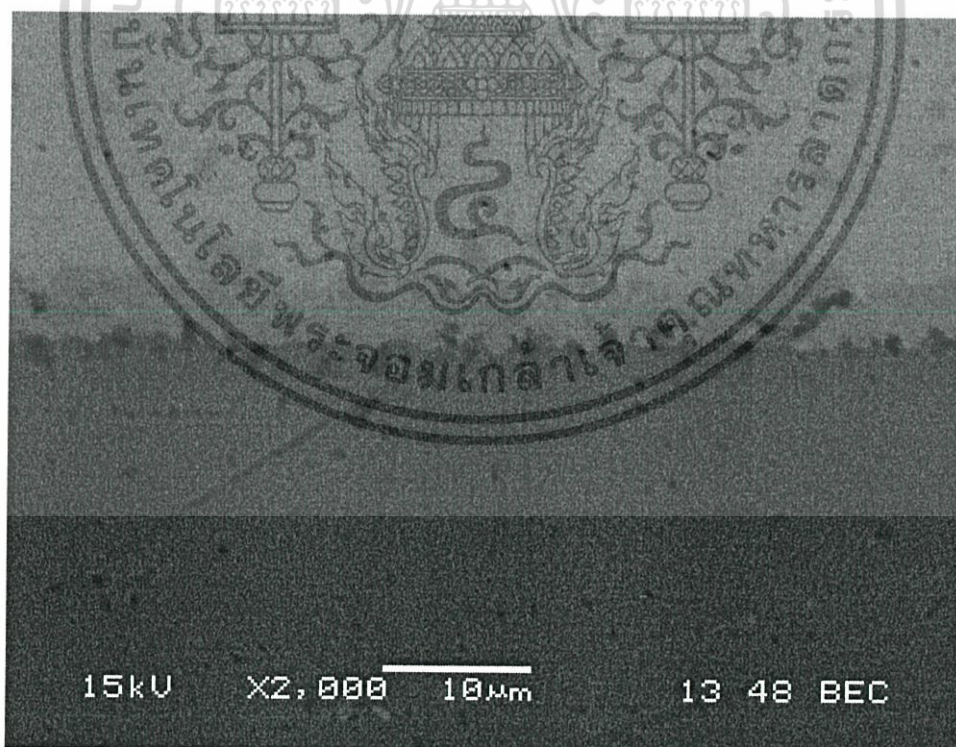


รูปที่ จ.38 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 135°C เวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

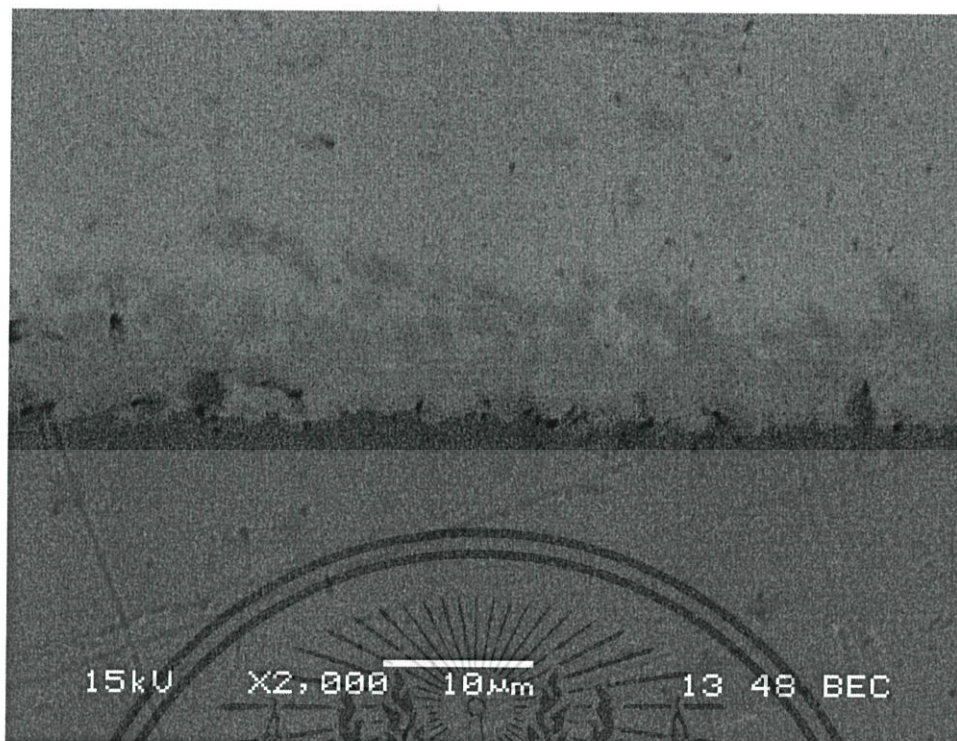


รูปที่ จ.39 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 135°C เวลา 10 ชั่วโมง

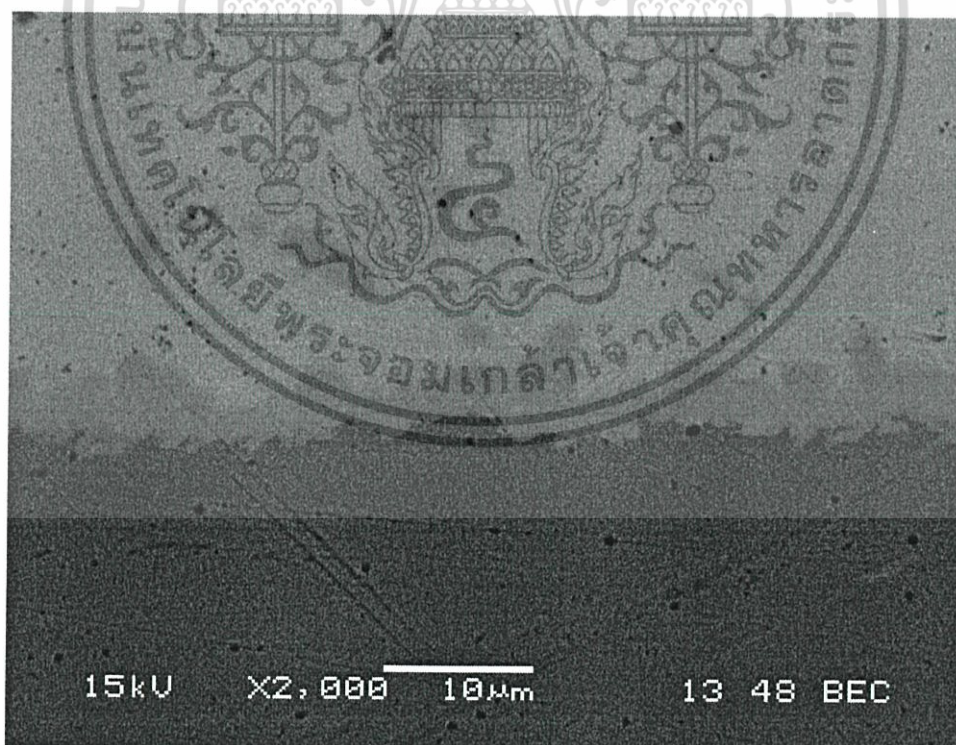


รูปที่ จ.40 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 135°C เวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

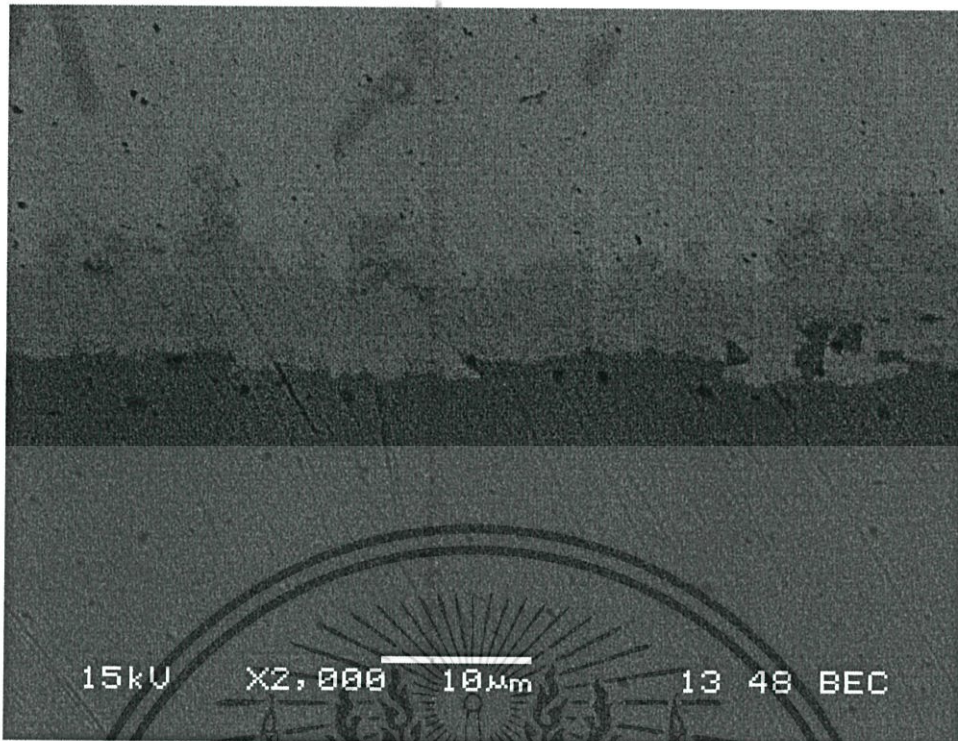


รูปที่ จ.41 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 135°C เวลา 10 ชั่วโมง

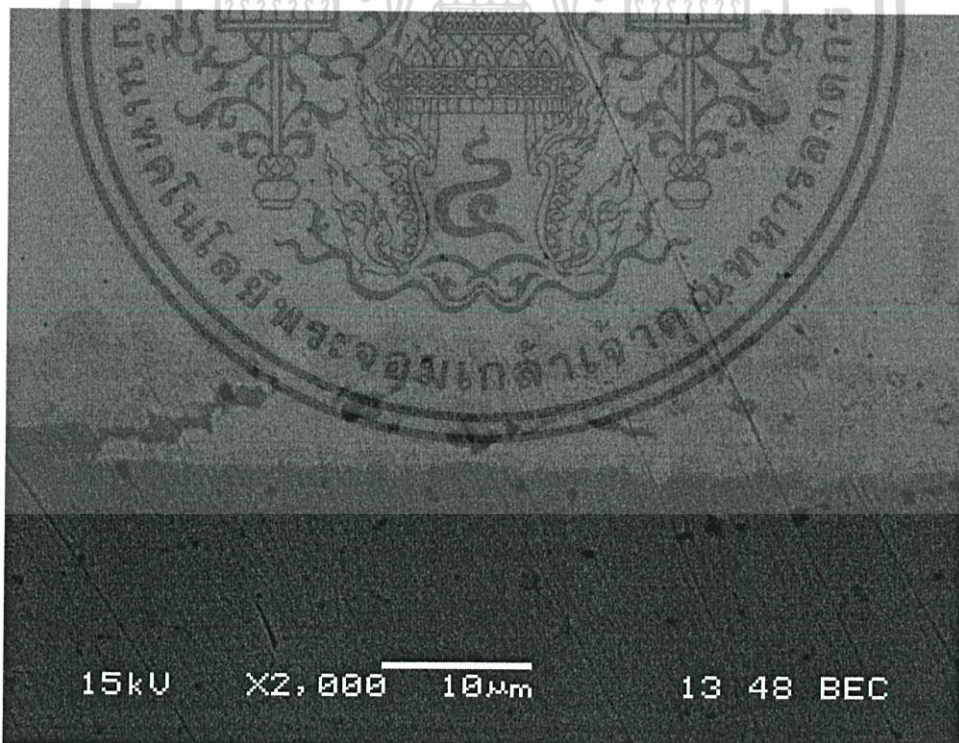


รูปที่ จ.42 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 135°C เวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

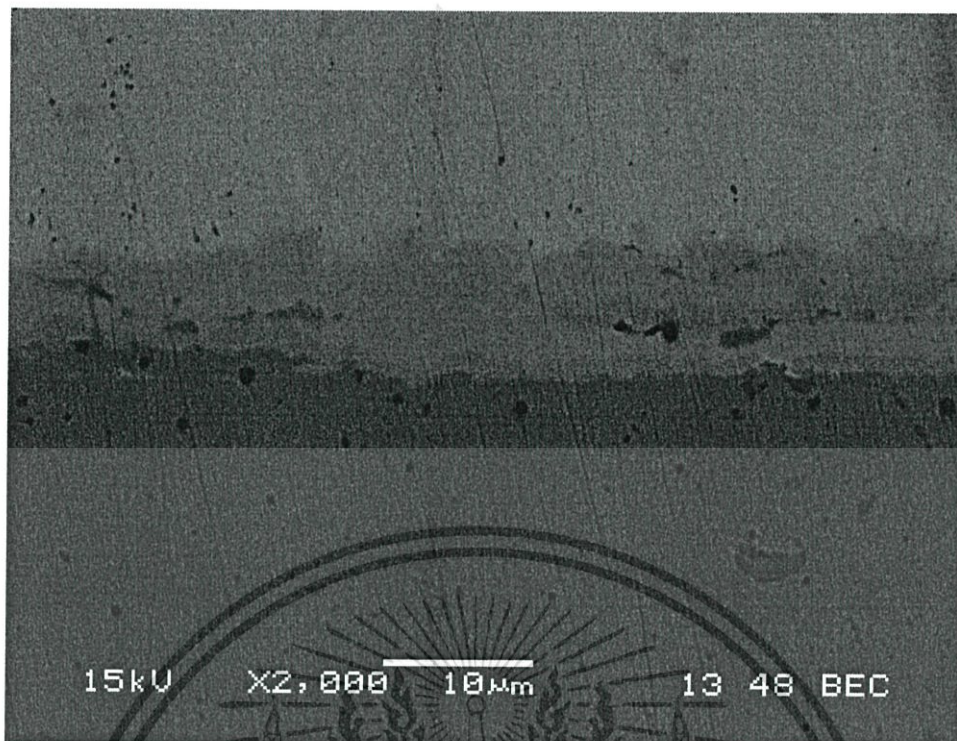


รูปที่ จ.43 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 170°C เวลา 10 ชั่วโมง

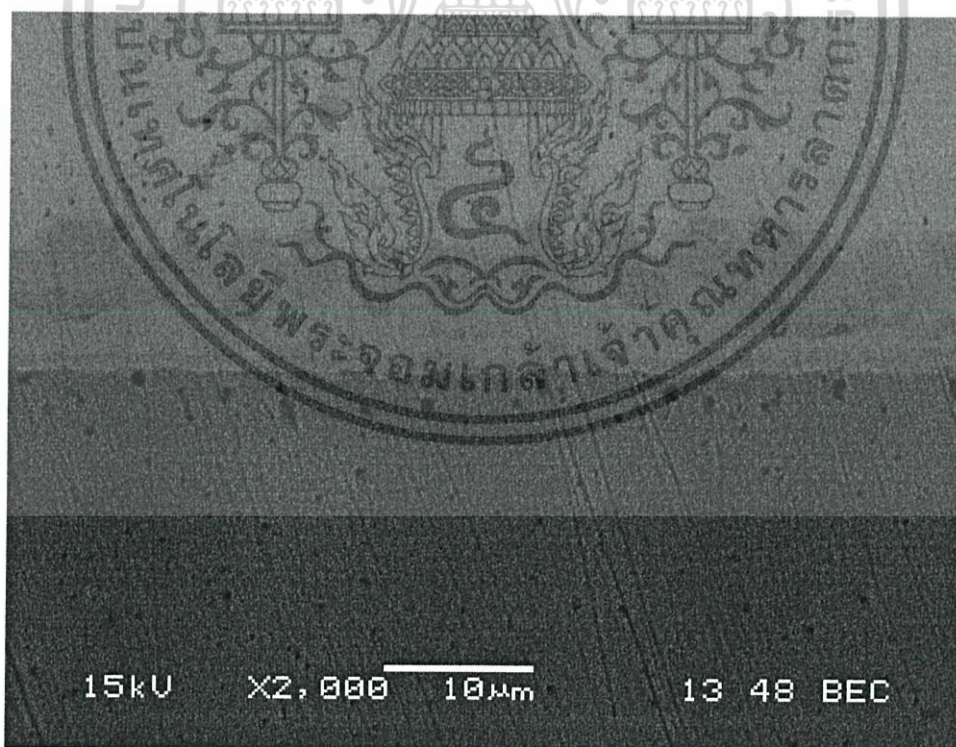


รูปที่ จ.44 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 170°C เวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

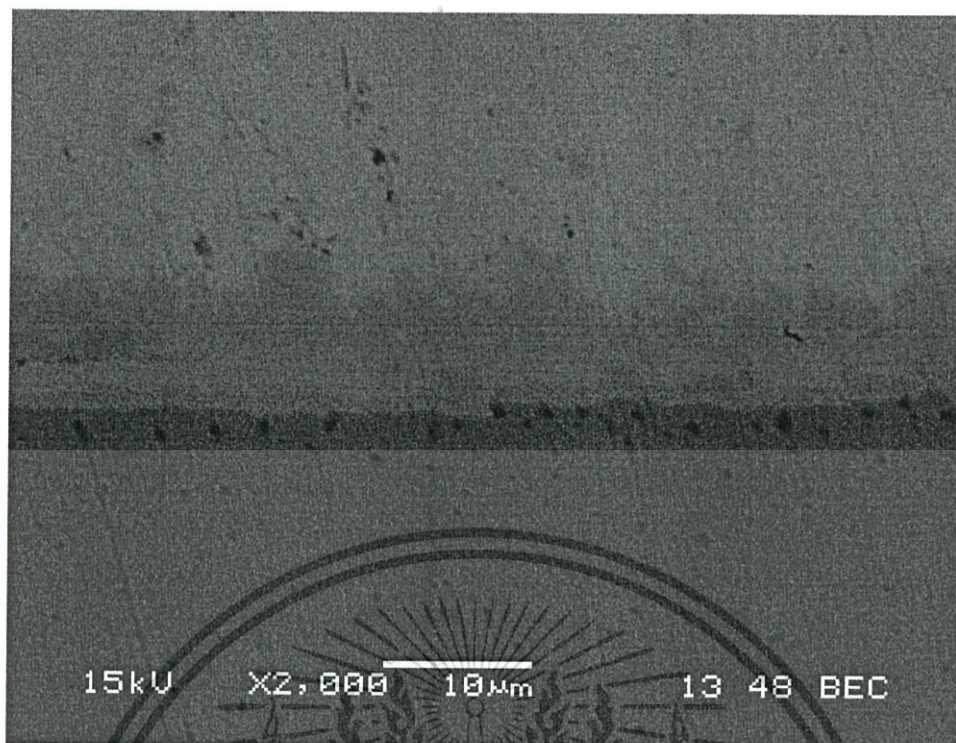


รูปที่ จ.45 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 170°C เวลา 10 ชั่วโมง

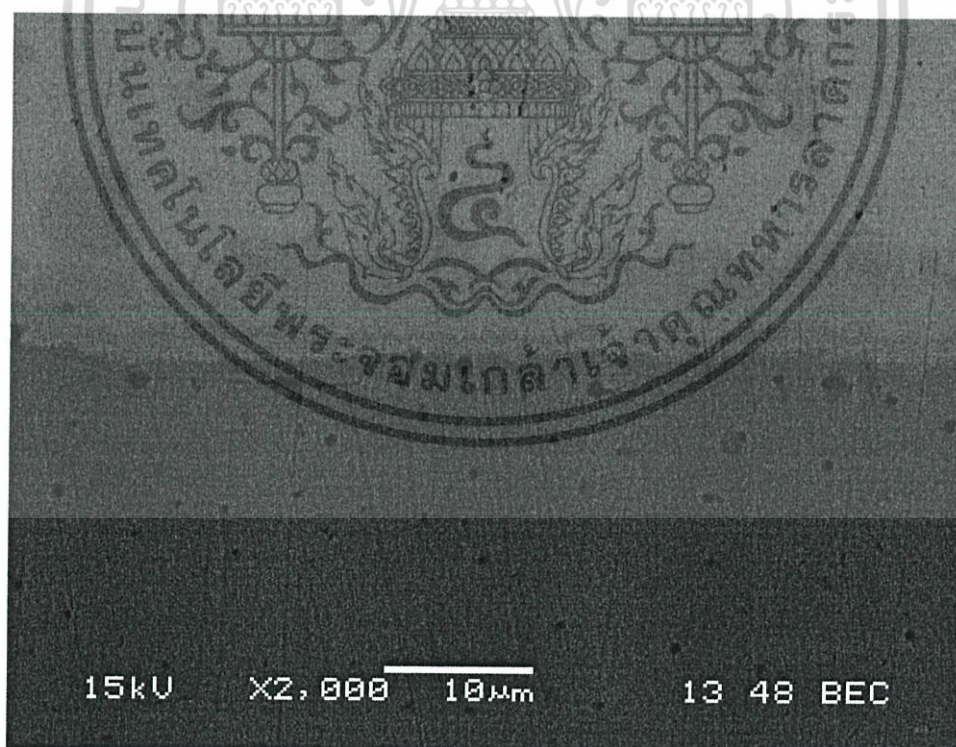


รูปที่ จ.46 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 170°C เวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

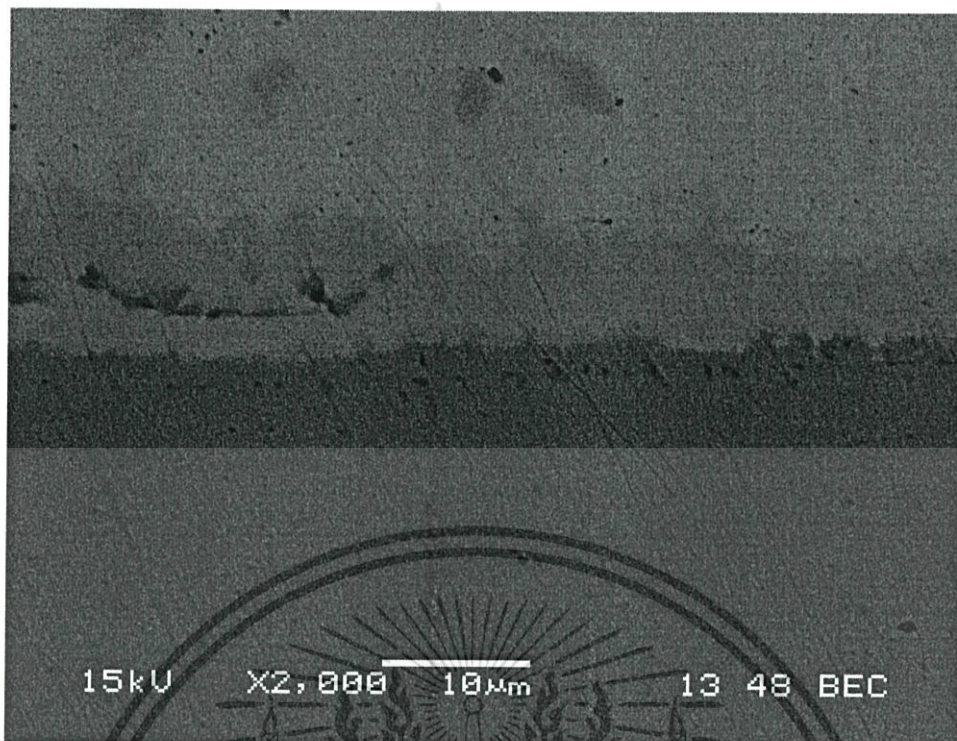


รูปที่ จ.47 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 170°C เวลา 10 ชั่วโมง

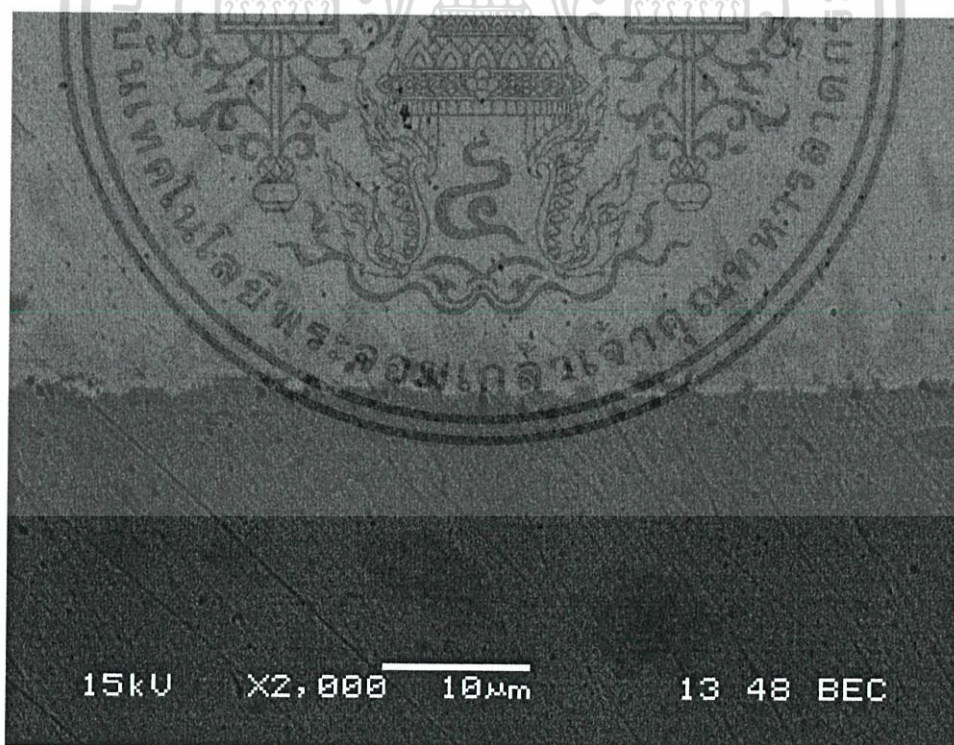


รูปที่ จ.48 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 170°C เวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

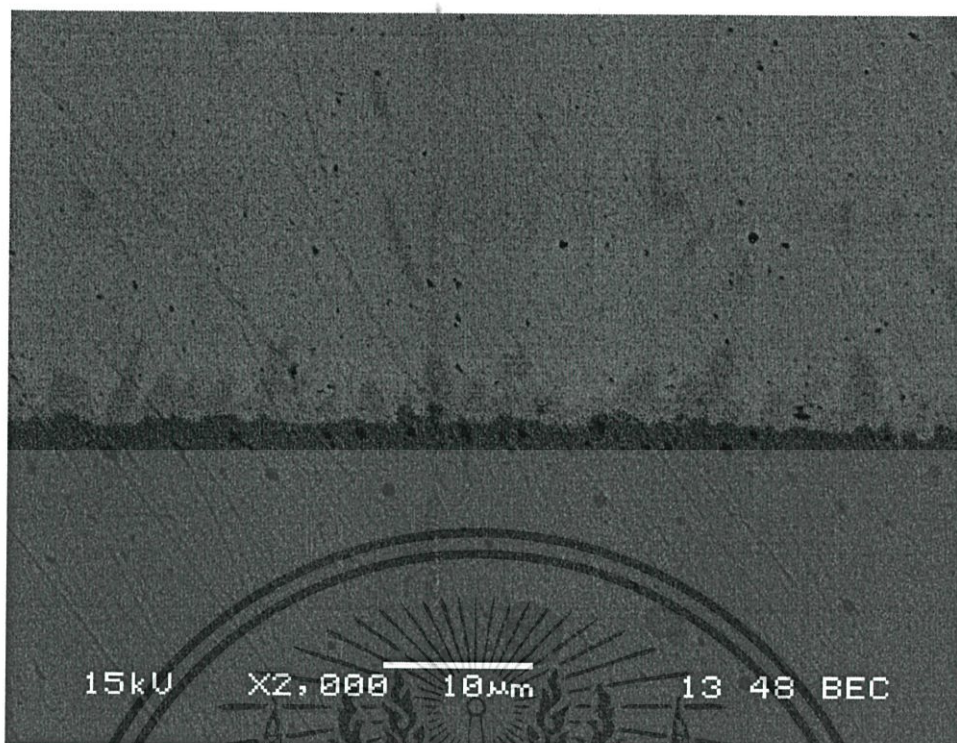


รูปที่ จ.49 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 170°C เวลา 10 ชั่วโมง

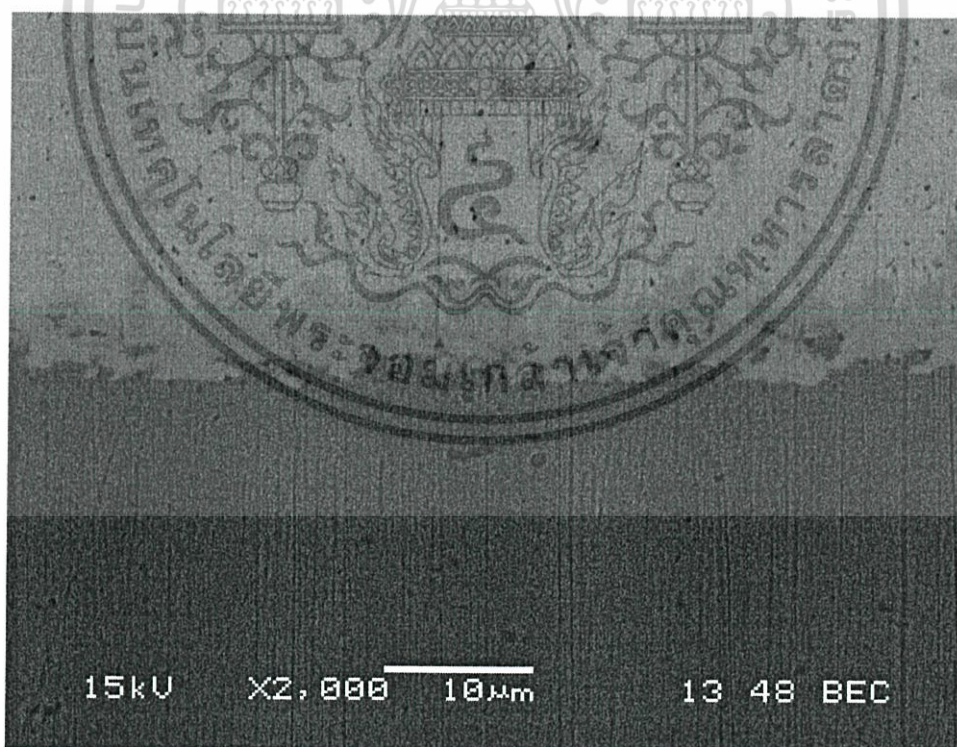


รูปที่ จ.50 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

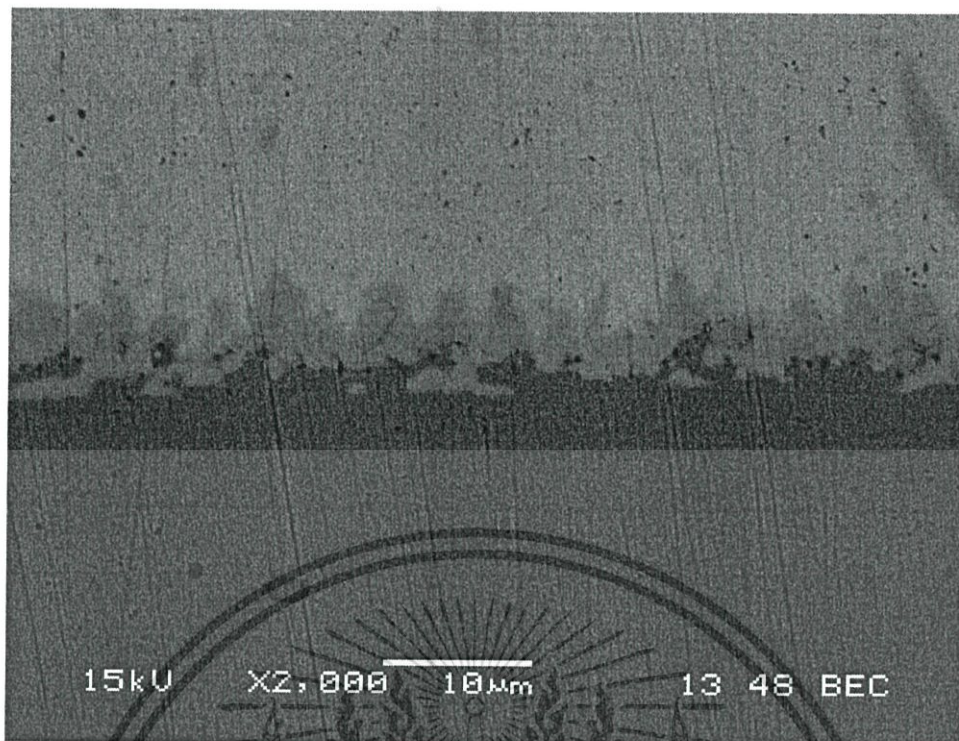


รูปที่ จ.51 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 100 ชั่วโมง

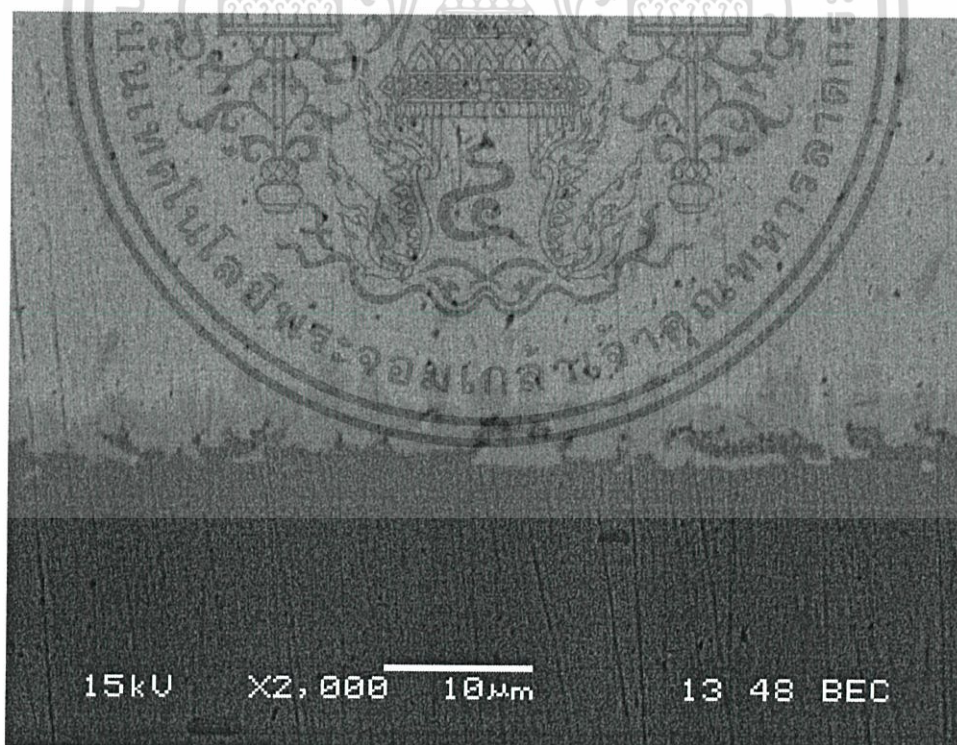


รูปที่ จ.52 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

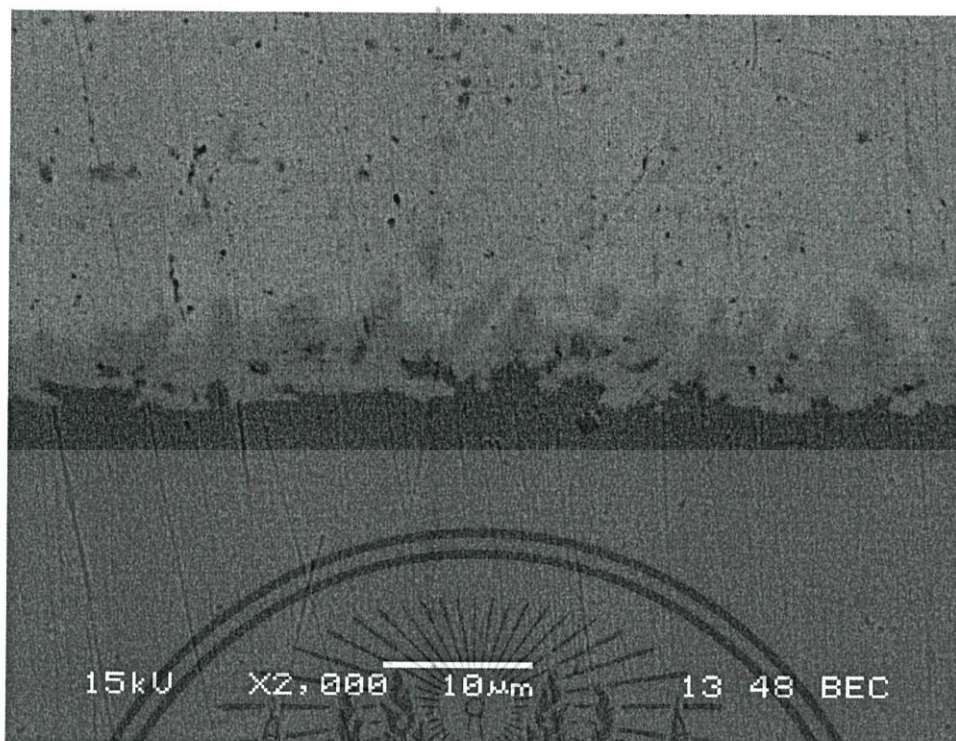


รูปที่ จ.53 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 100 ชั่วโมง

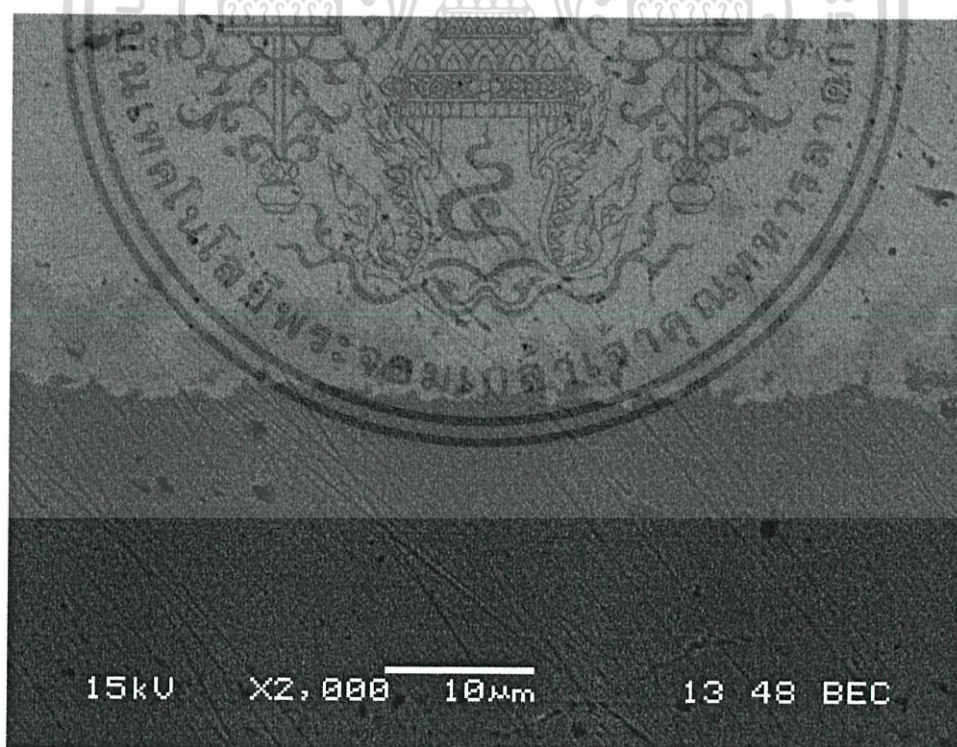


รูปที่ จ.54 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

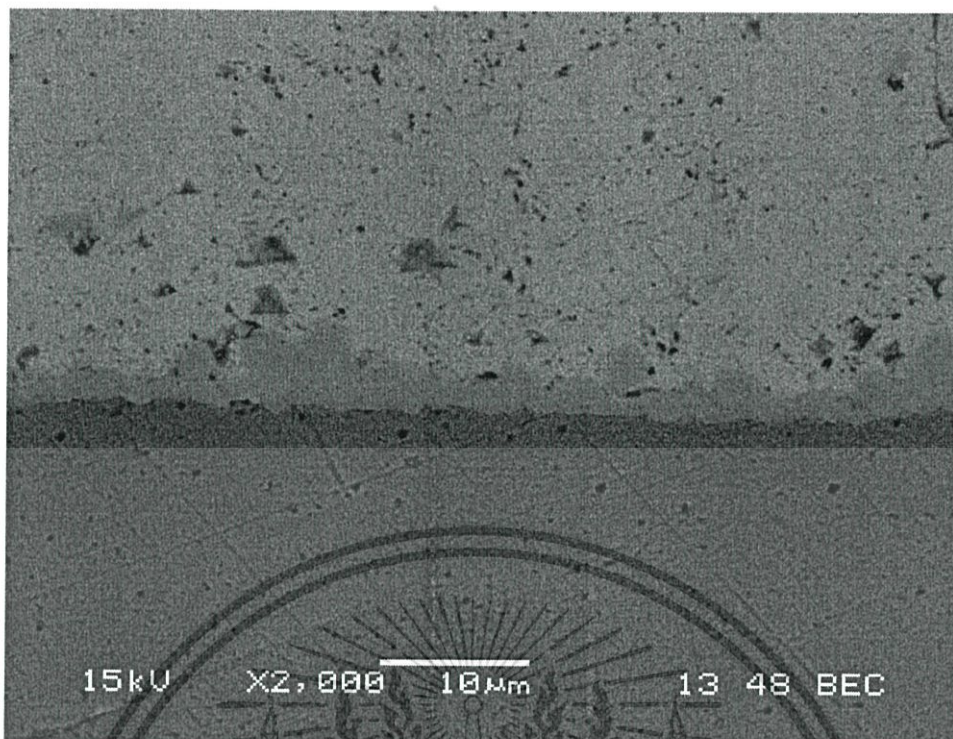


รูปที่ จ.55 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 100 ชั่วโมง

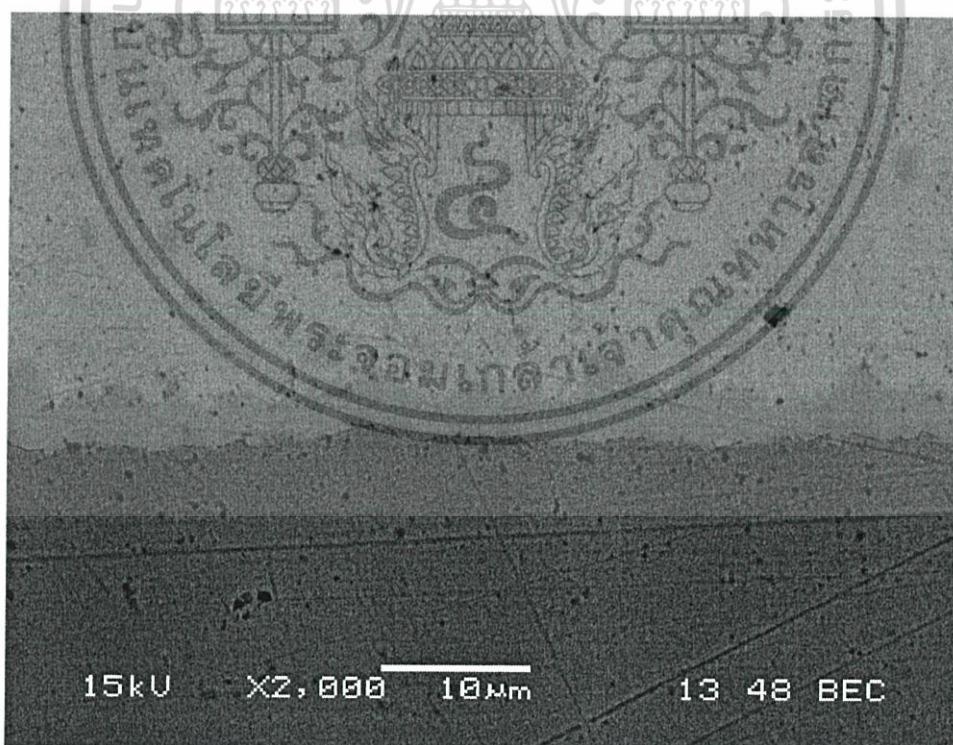


รูปที่ จ.56 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

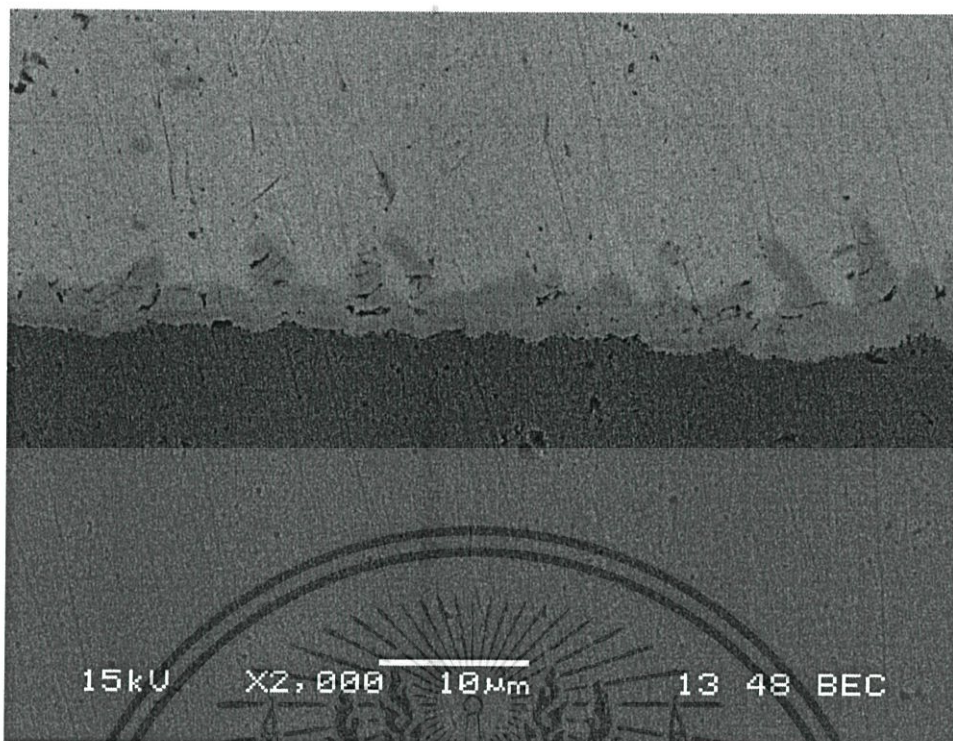


รูปที่ จ.57 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 135°C เวลา 100 ชั่วโมง

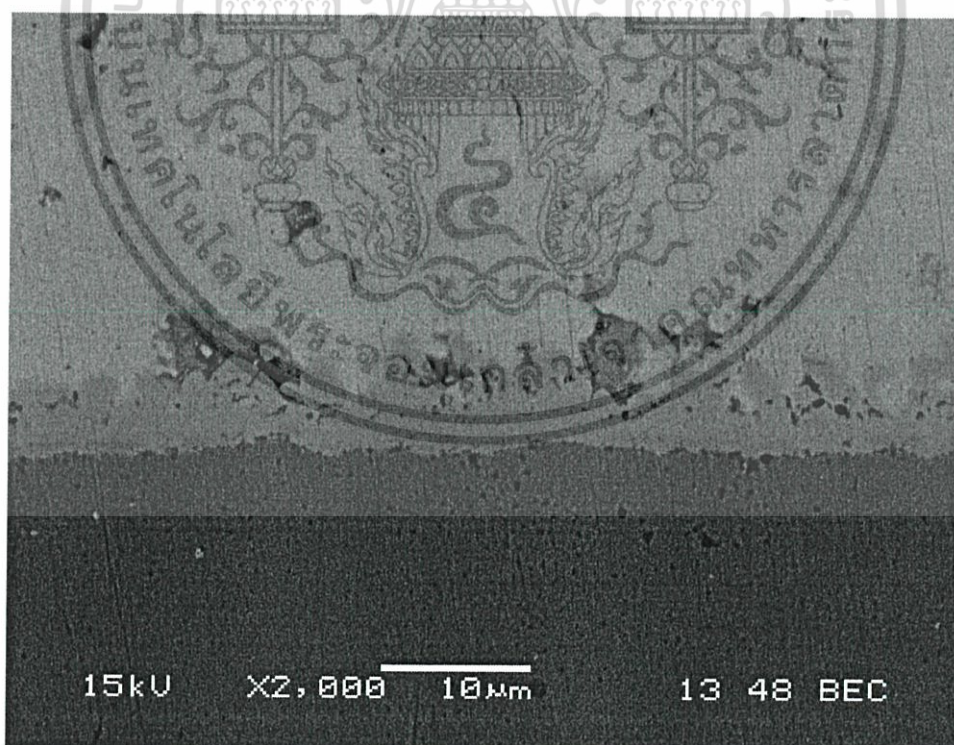


รูปที่ จ.58 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 135°C เวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

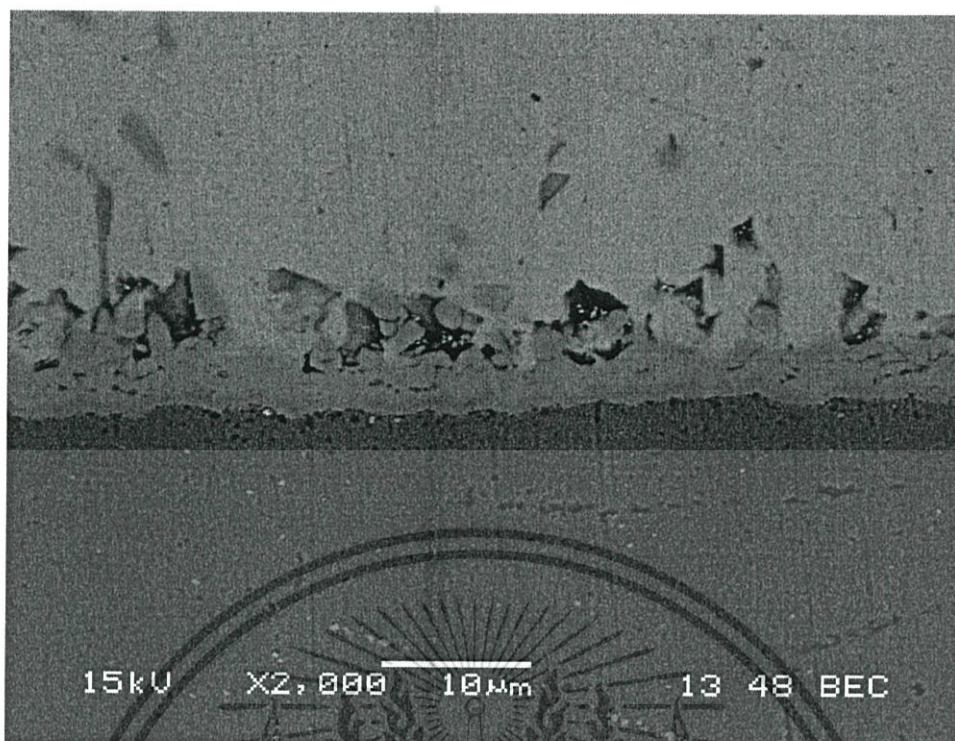


รูปที่ จ.59 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 135°C เวลา 100 ชั่วโมง

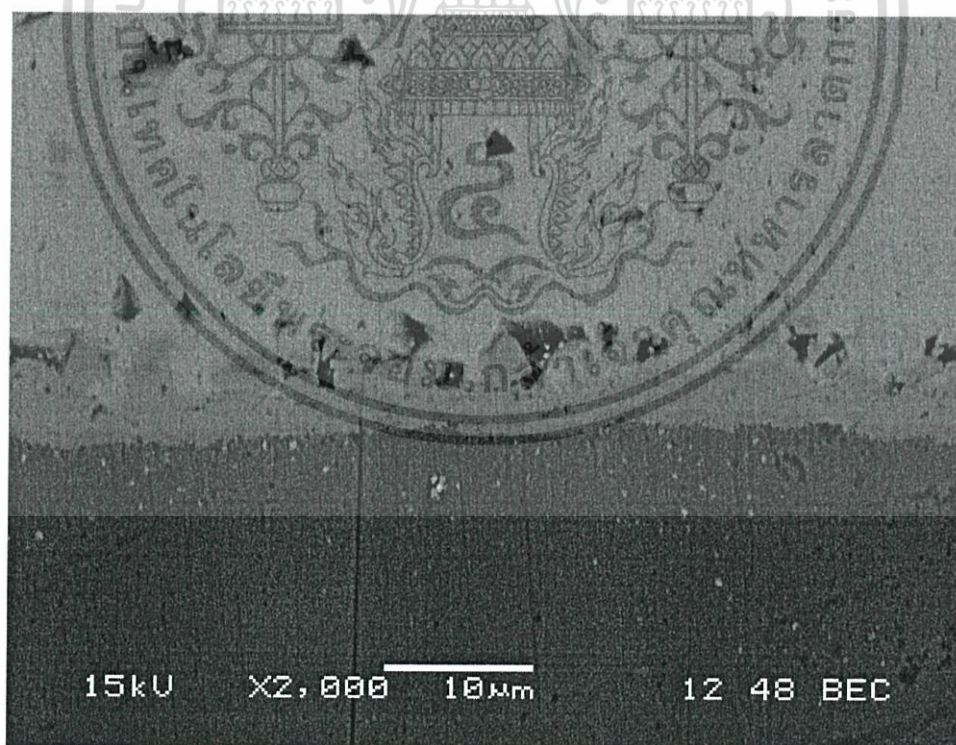


รูปที่ จ.60 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 135°C เวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

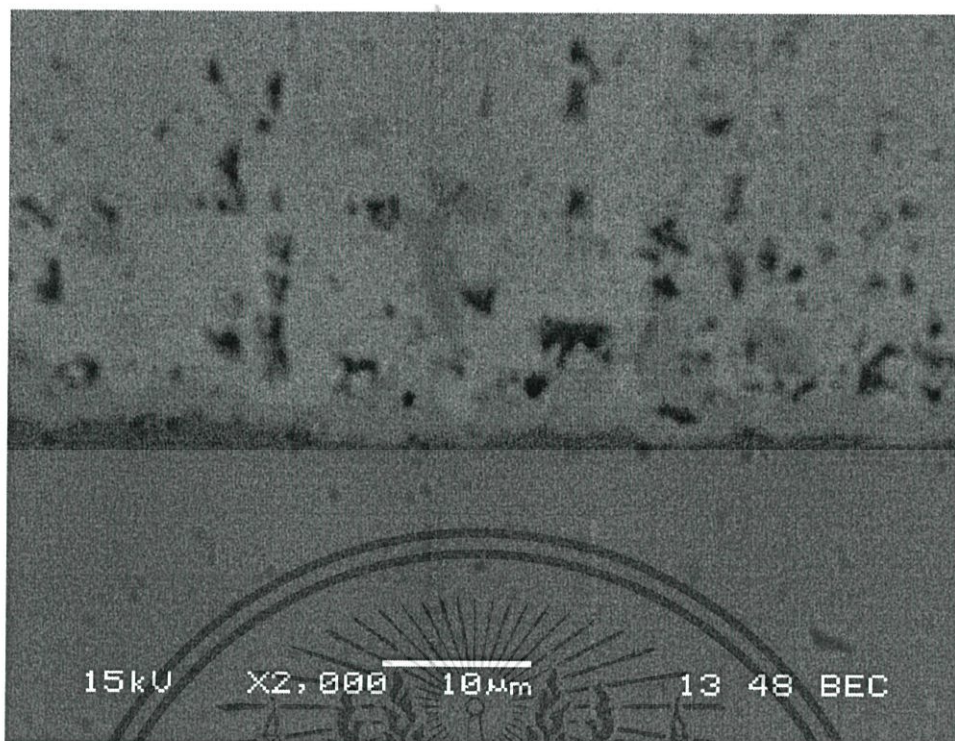


รูปที่ จ.61 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 135°C เวลา 100 ชั่วโมง

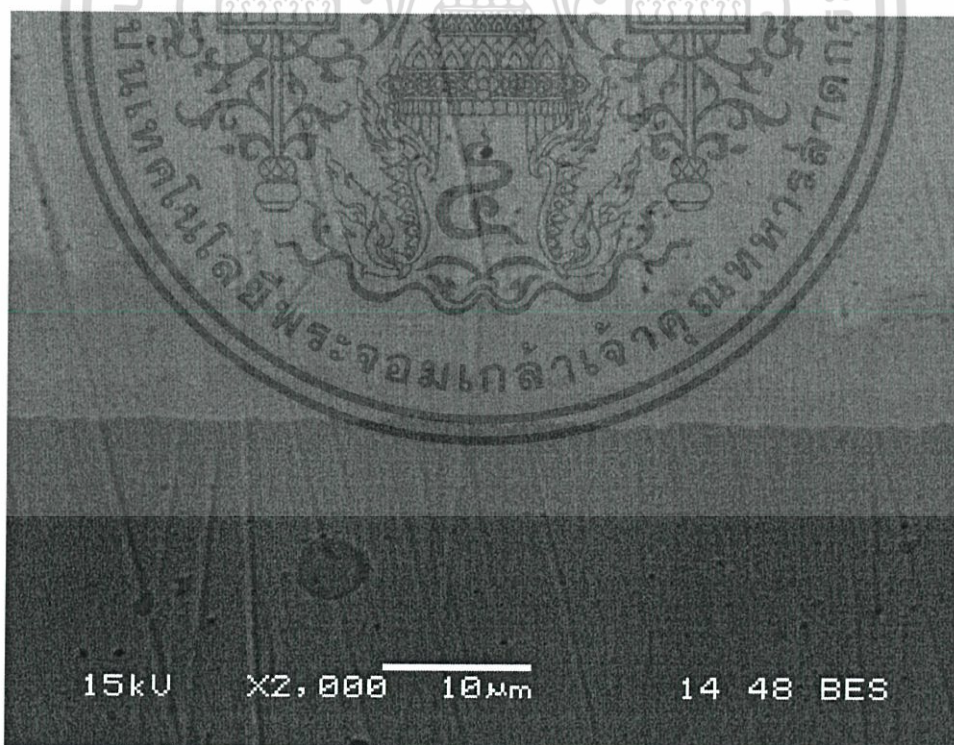


รูปที่ จ.62 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 135°C เวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

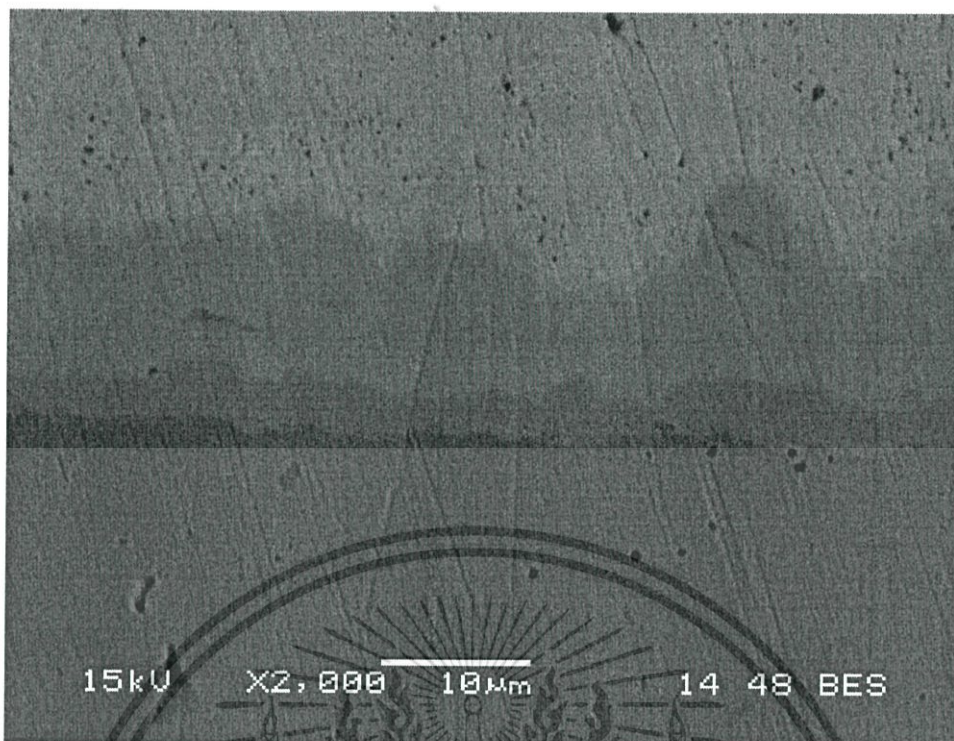


รูปที่ จ.63 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 135°C เวลา 100 ชั่วโมง

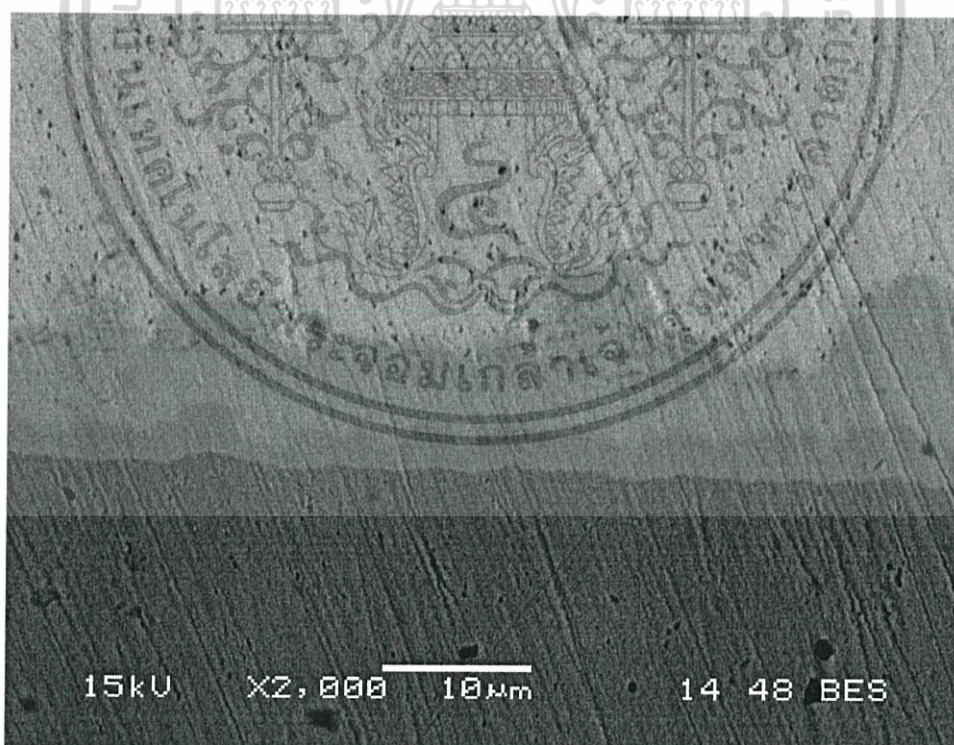


รูปที่ จ.64 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 170°C เวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

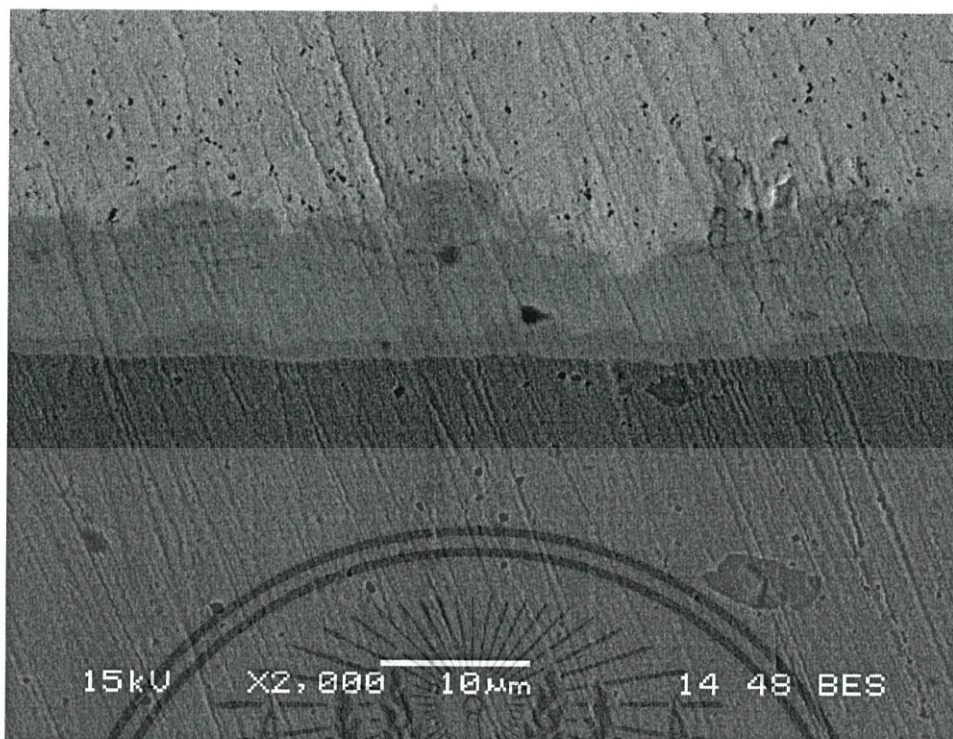


รูปที่ จ.65 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 170°C เวลา 100 ชั่วโมง

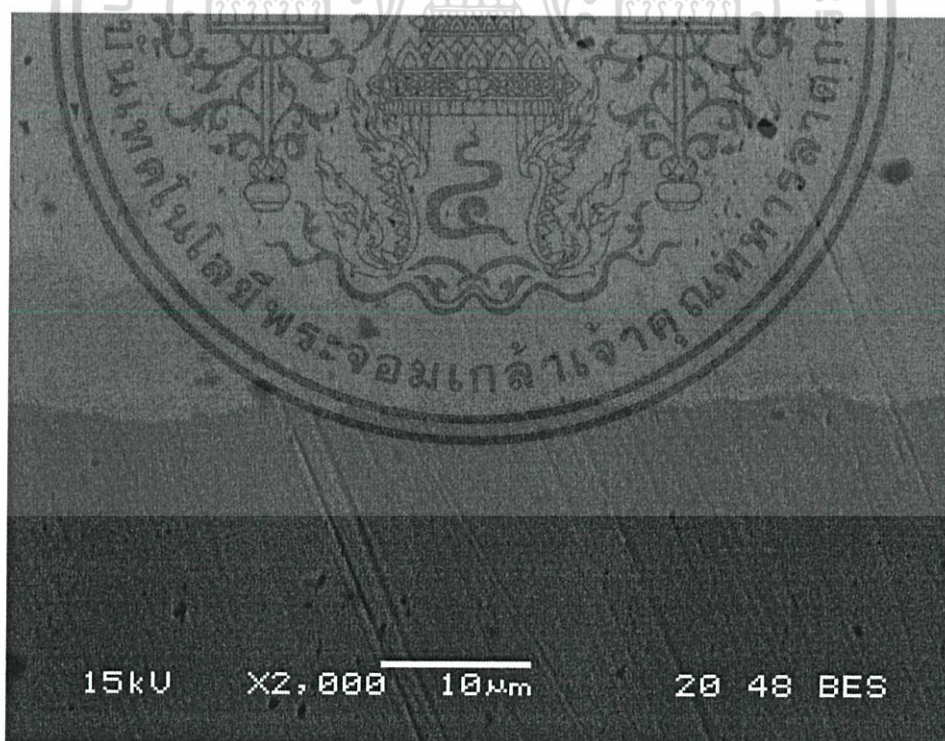


รูปที่ จ.66 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 170°C เวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

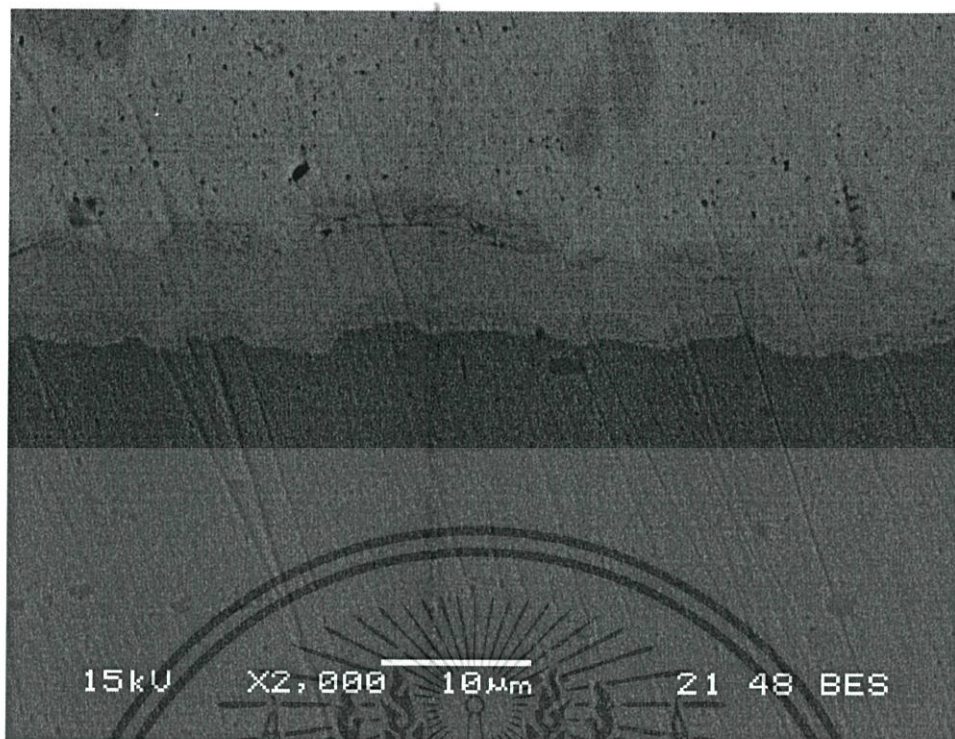


รูปที่ จ.67 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 170°C เวลา 100 ชั่วโมง

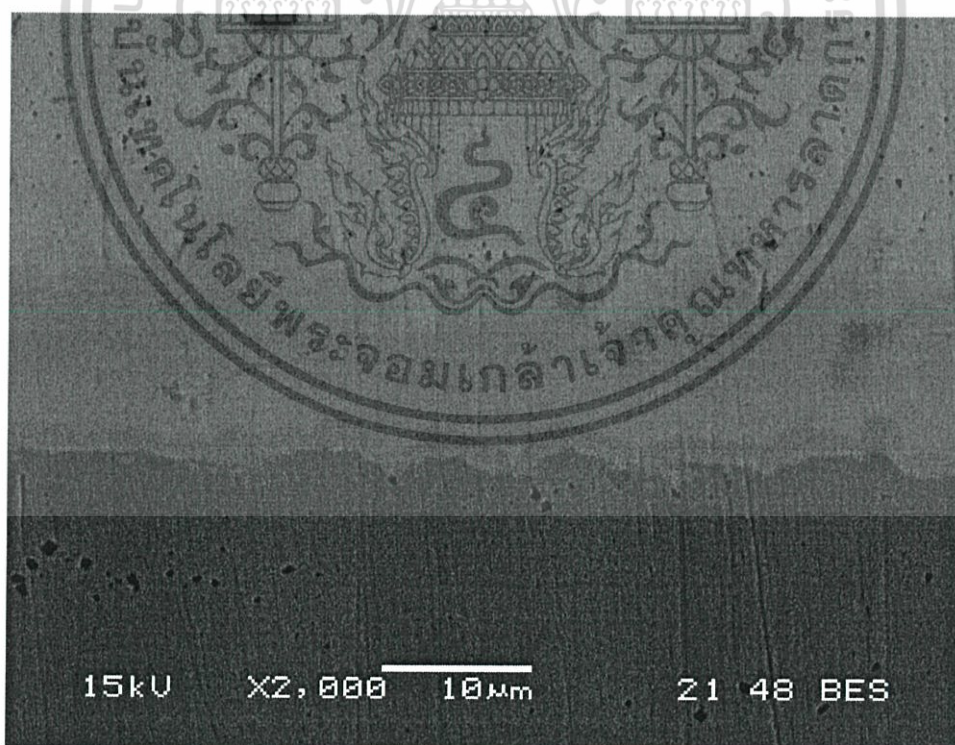


รูปที่ จ.68 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 170°C เวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

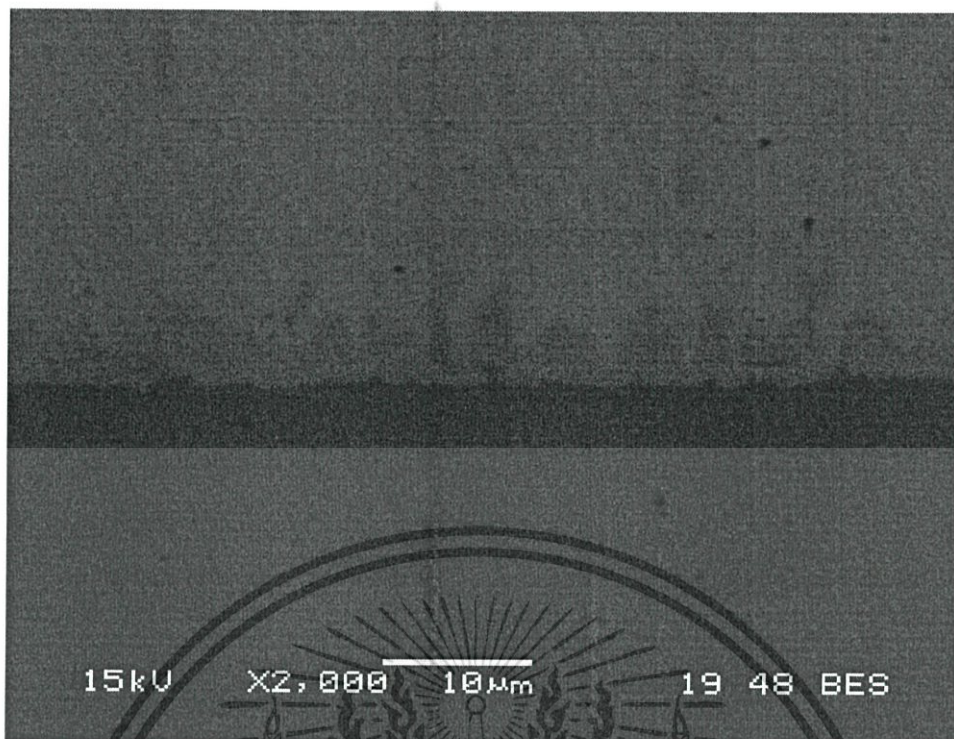


รูปที่ จ.69 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 170°C เวลา 100 ชั่วโมง

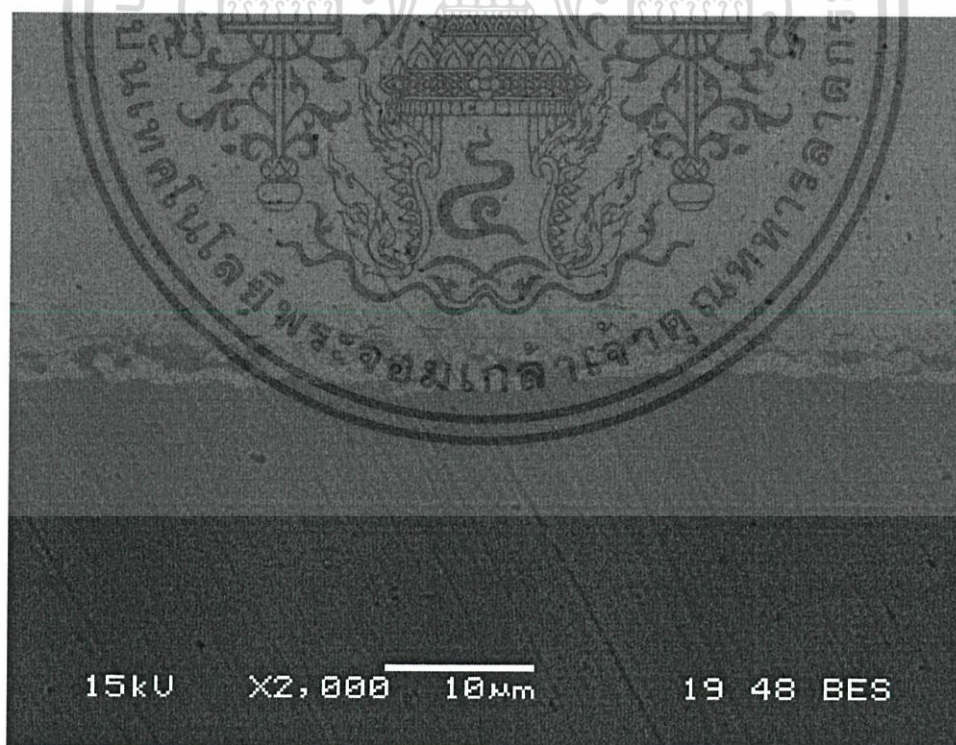


รูปที่ จ.70 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 170°C เวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

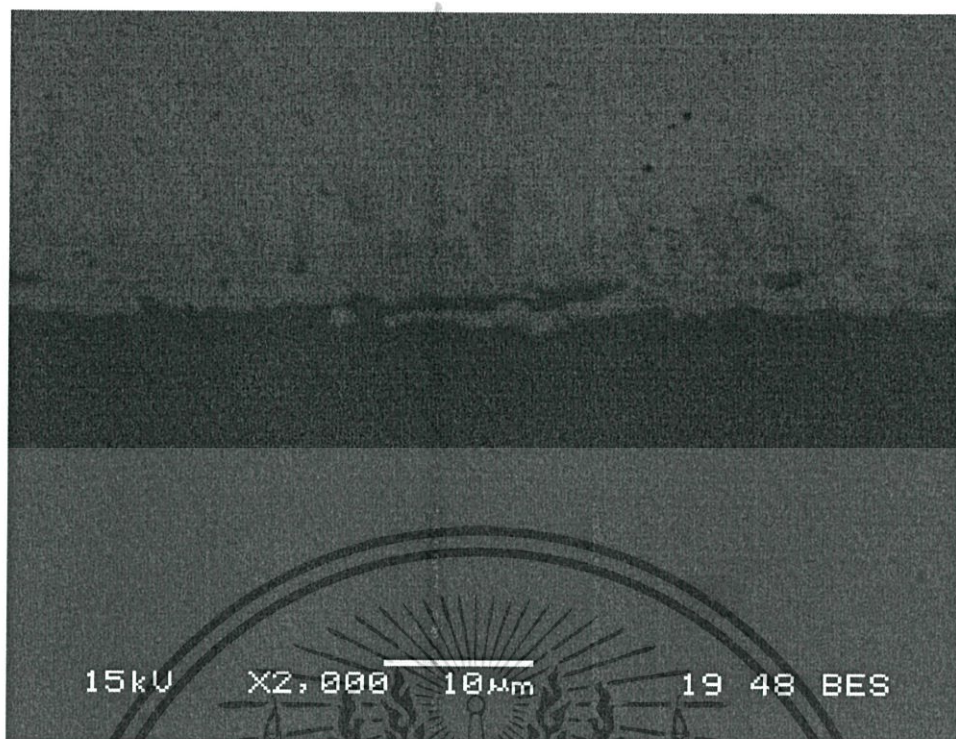


รูปที่ จ.71 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 1000 ชั่วโมง

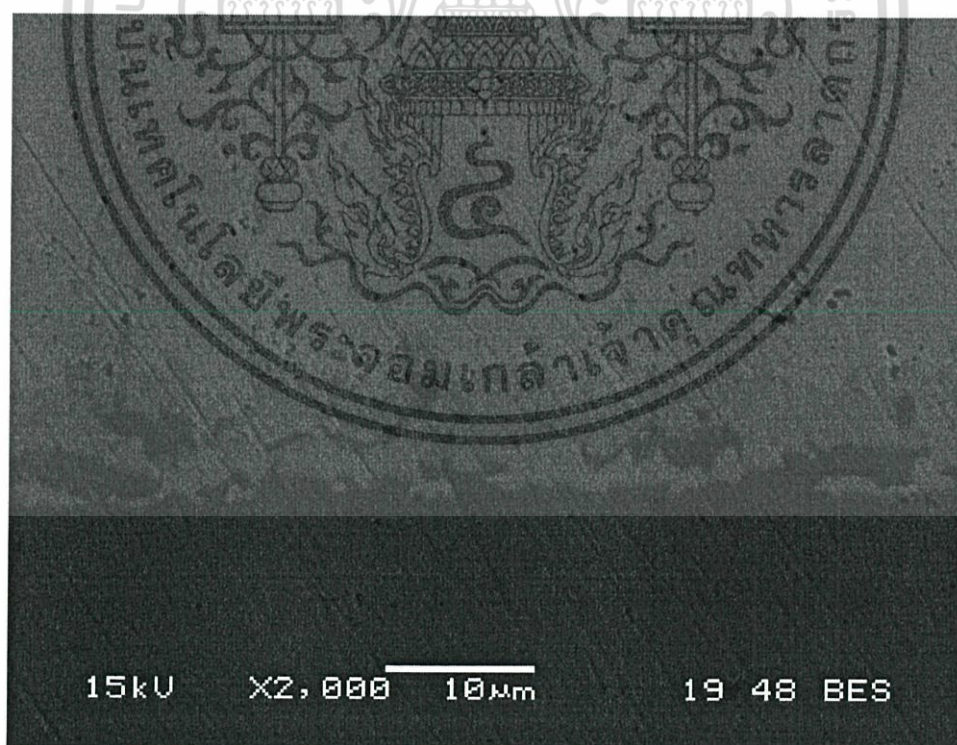


รูปที่ จ.72 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

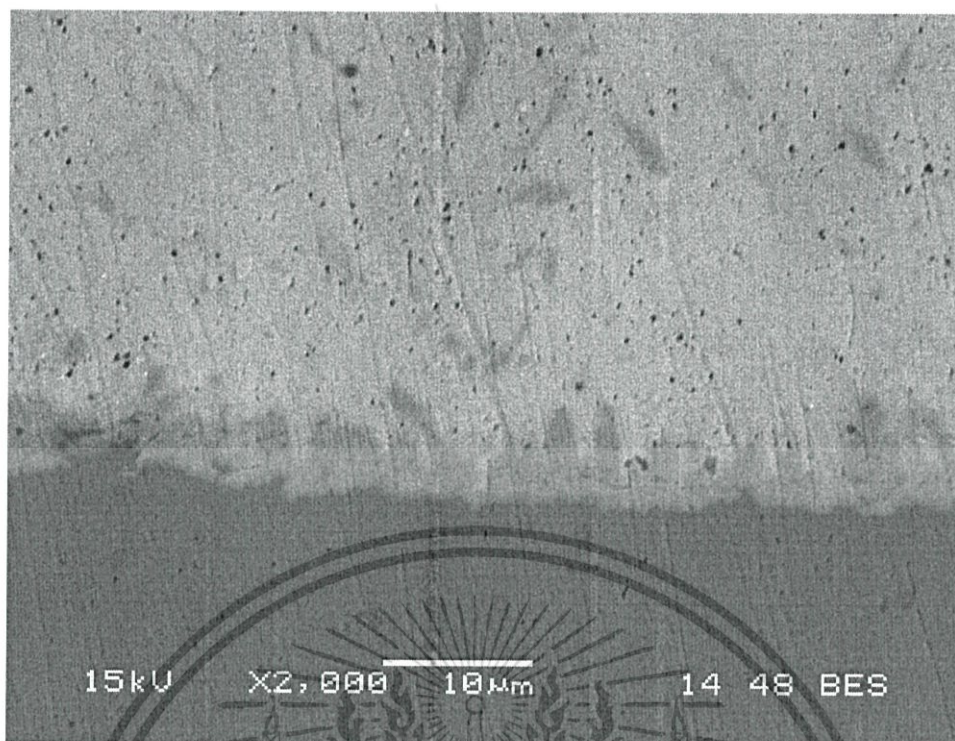


รูปที่ จ.73 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 1000 ชั่วโมง

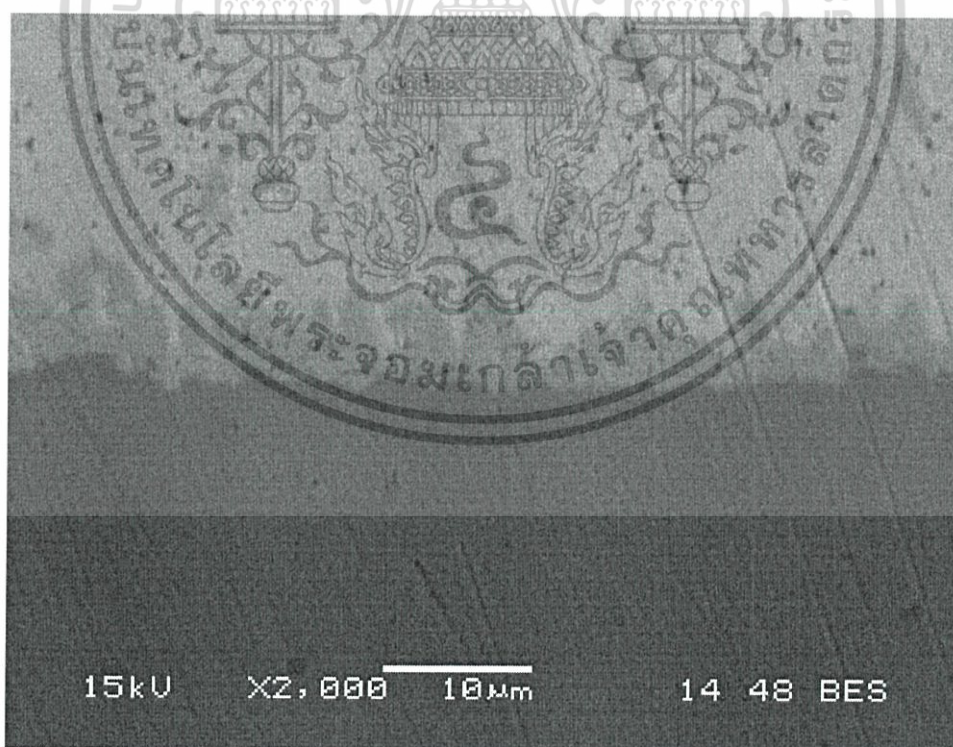


รูปที่ จ.74 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

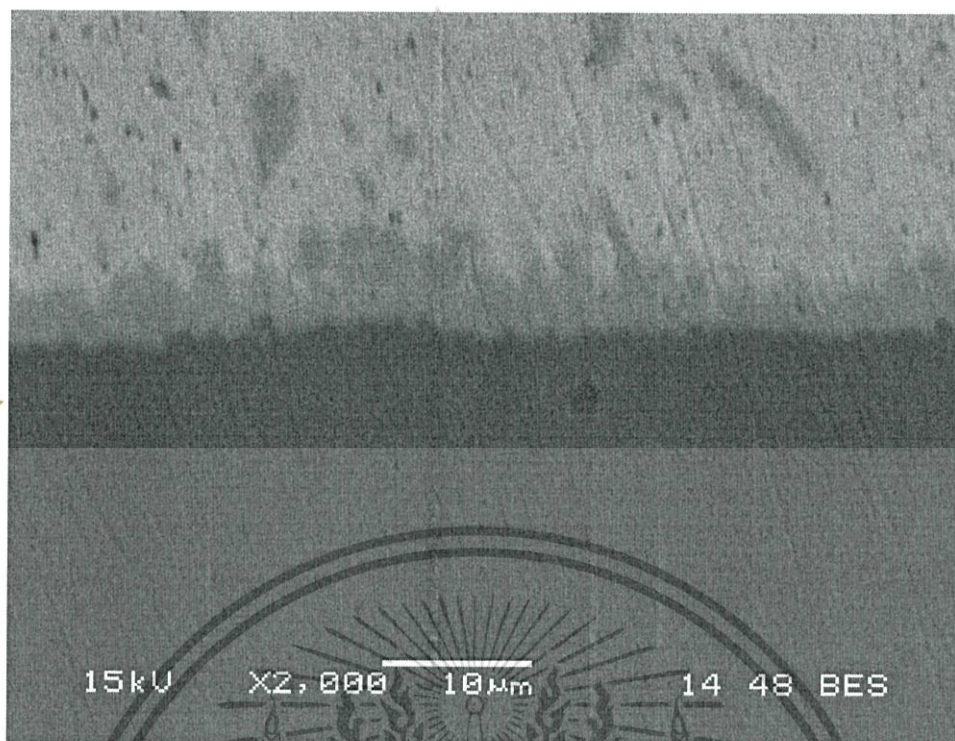


รูปที่ จ.75 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 1000 ชั่วโมง

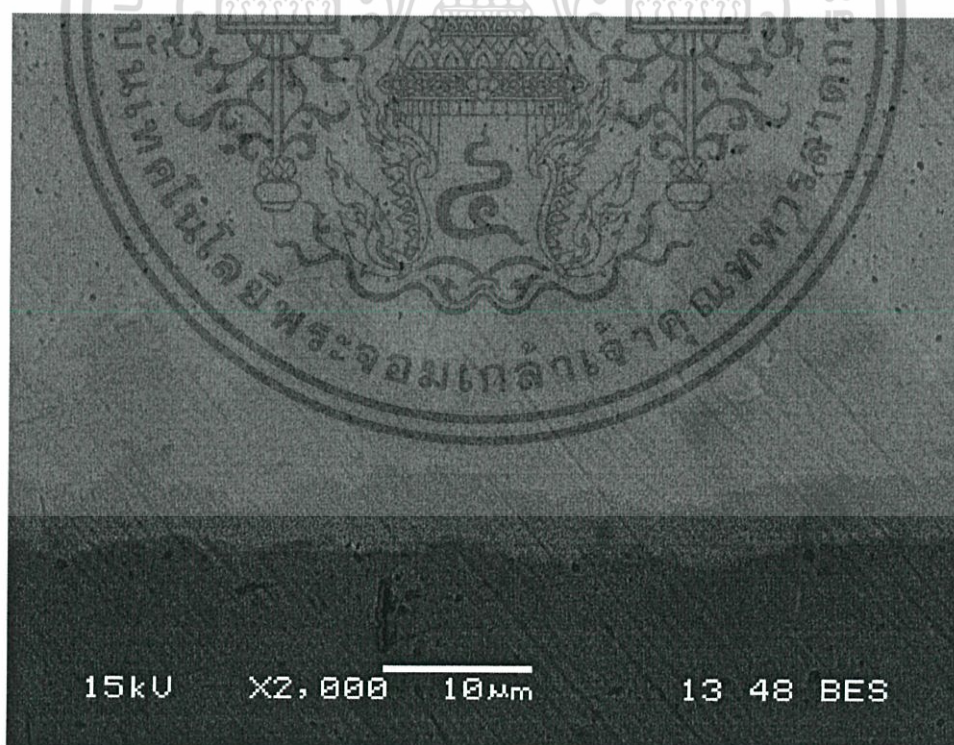


รูปที่ จ.76 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

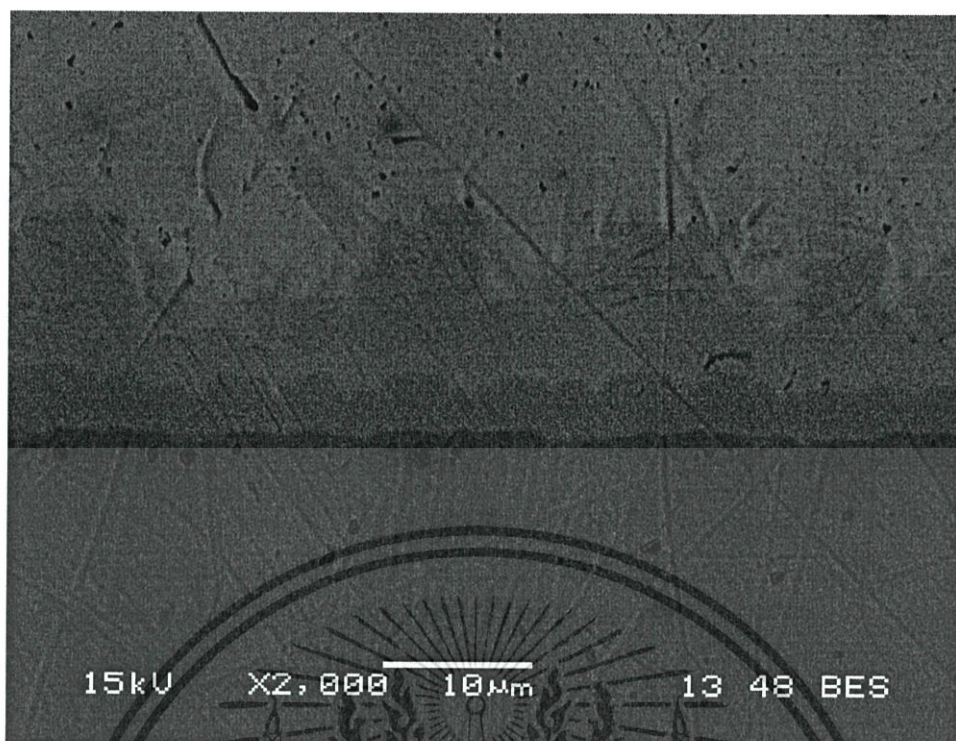


รูปที่ จ.77 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 1000 ชั่วโมง

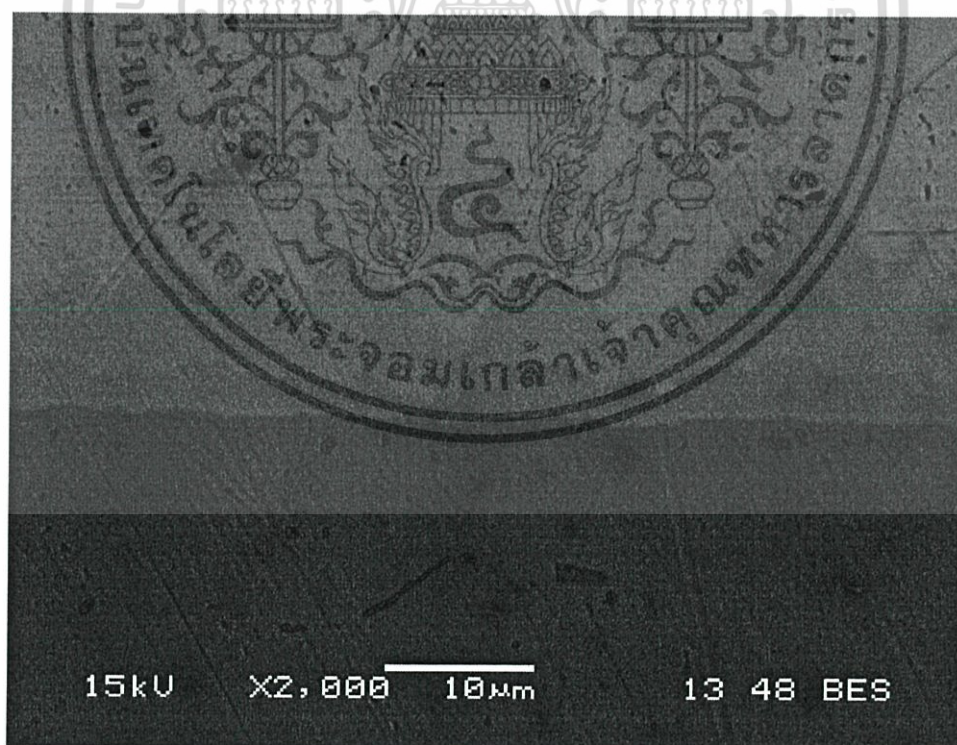


รูปที่ จ.78 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 135°C เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

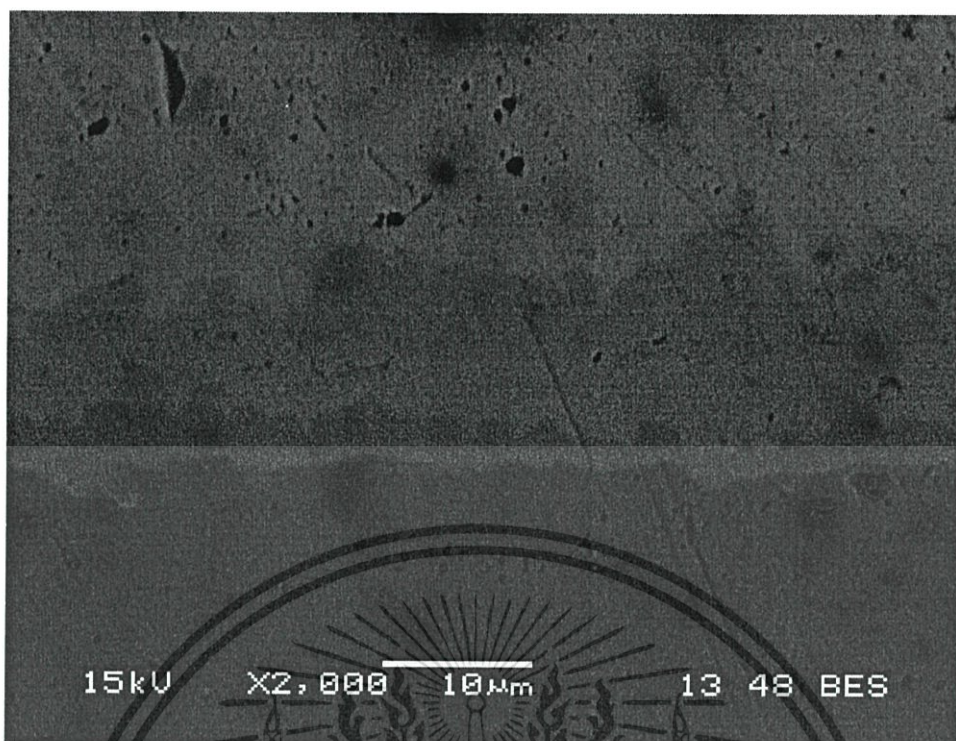


รูปที่ จ.79 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 135°C เวลา 1000 ชั่วโมง

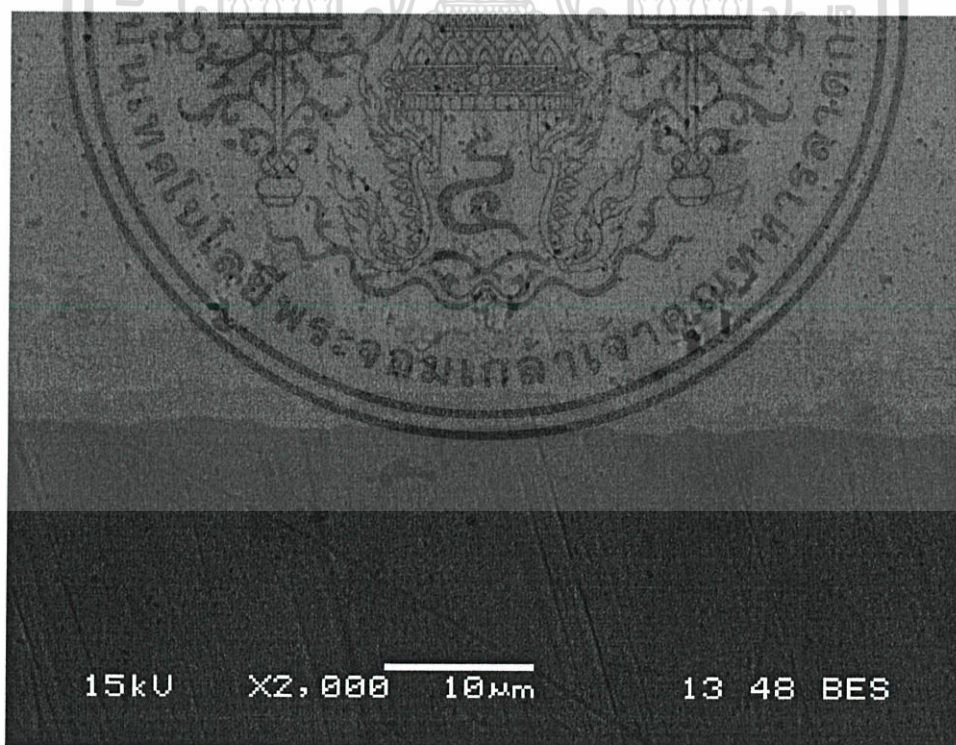


รูปที่ จ.80 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 135°C เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

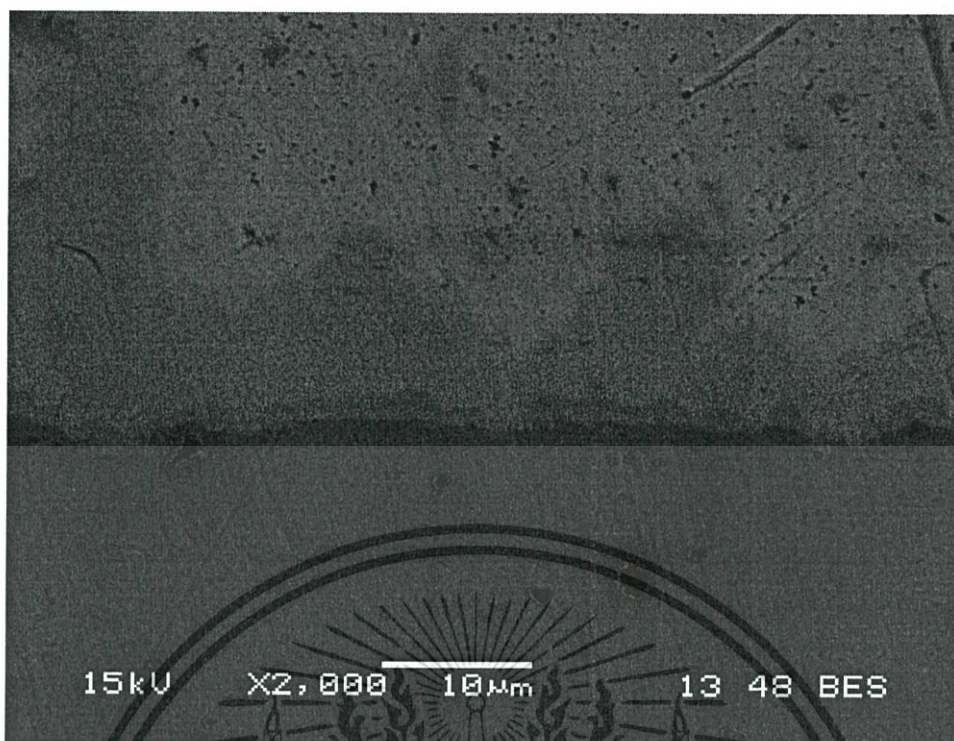


รูปที่ จ.81 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 135°C เวลา 1000 ชั่วโมง

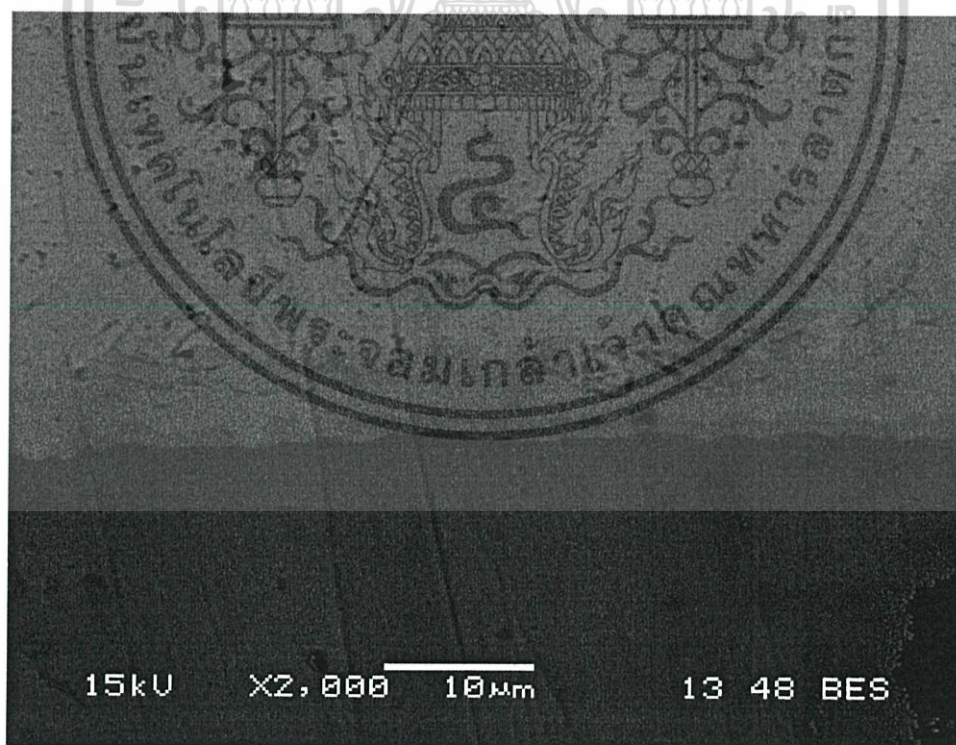


รูปที่ จ.82 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 135°C เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

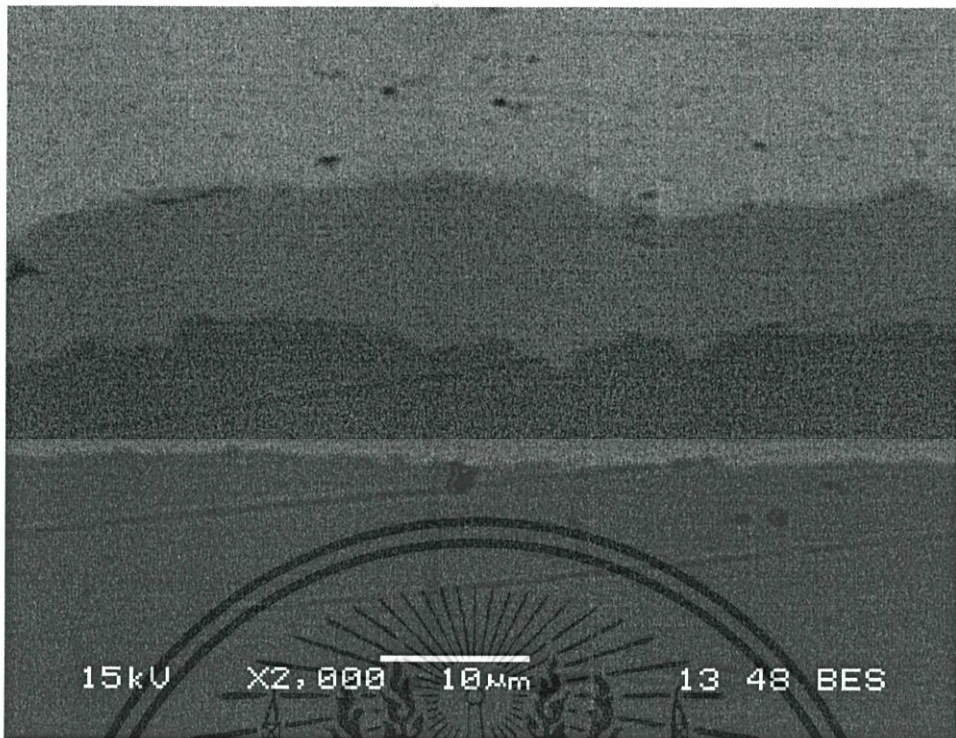


รูปที่ จ.83 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 135°C เวลา 1000 ชั่วโมง

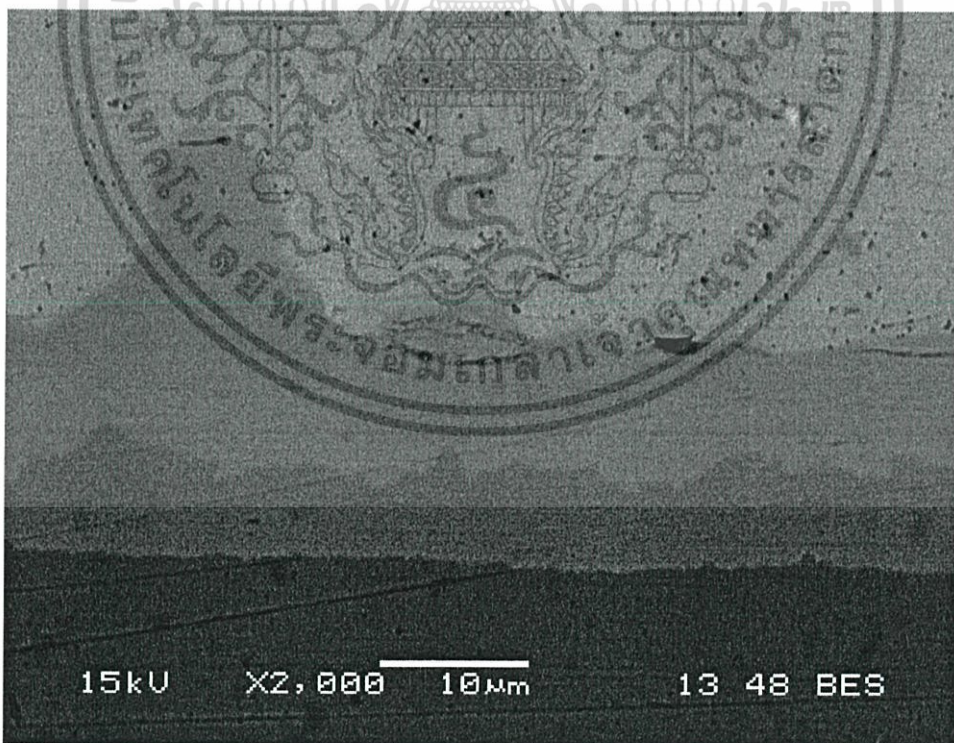


รูปที่ จ.84 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 135°C เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

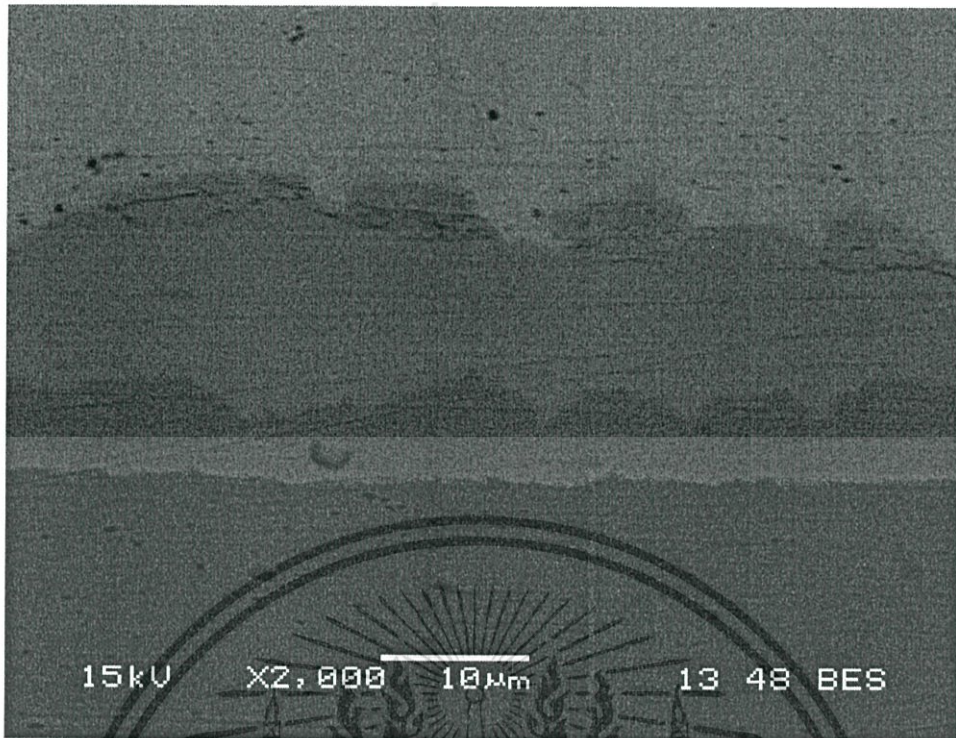


รูปที่ จ.85 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 170°C เวลา 1000 ชั่วโมง

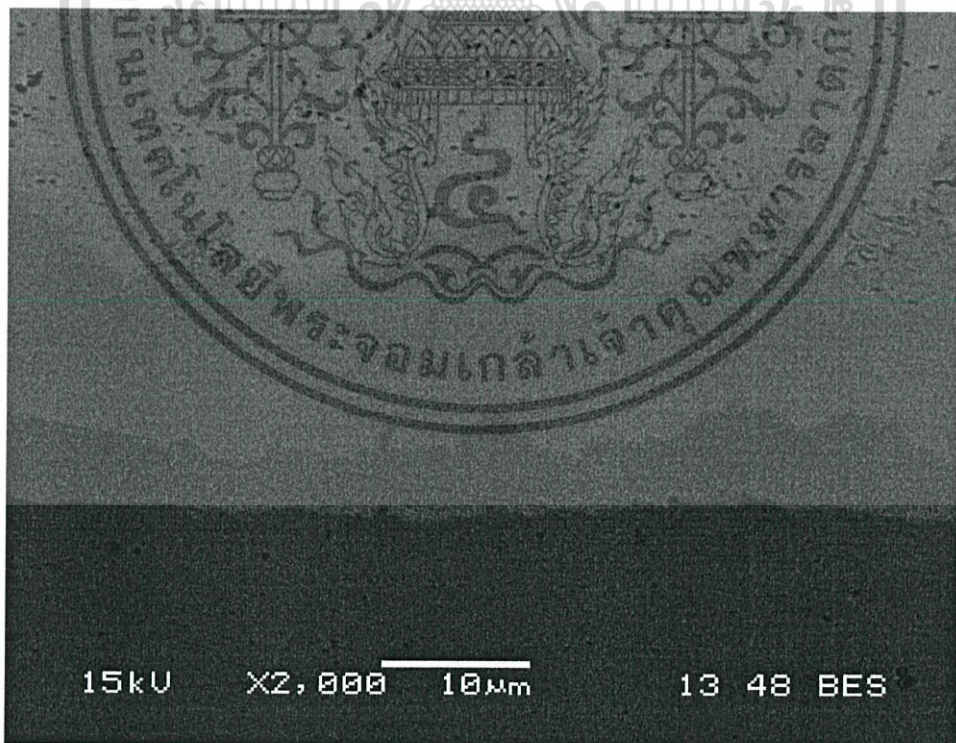


รูปที่ จ.86 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 170°C เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

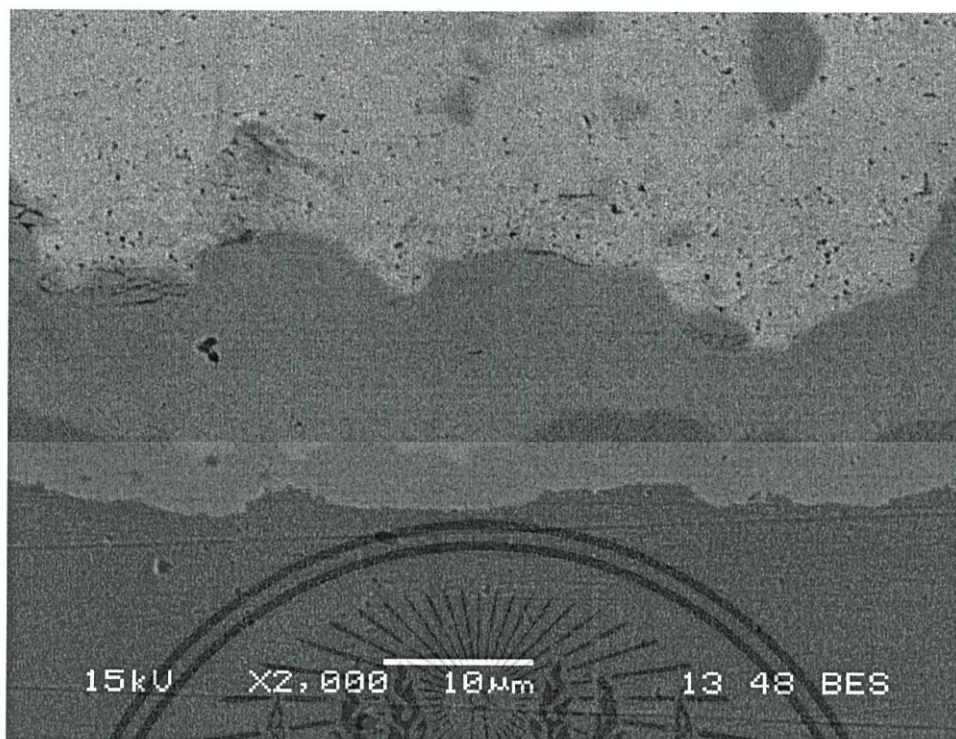


รูปที่ จ.87 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 170°C เวลา 1000 ชั่วโมง

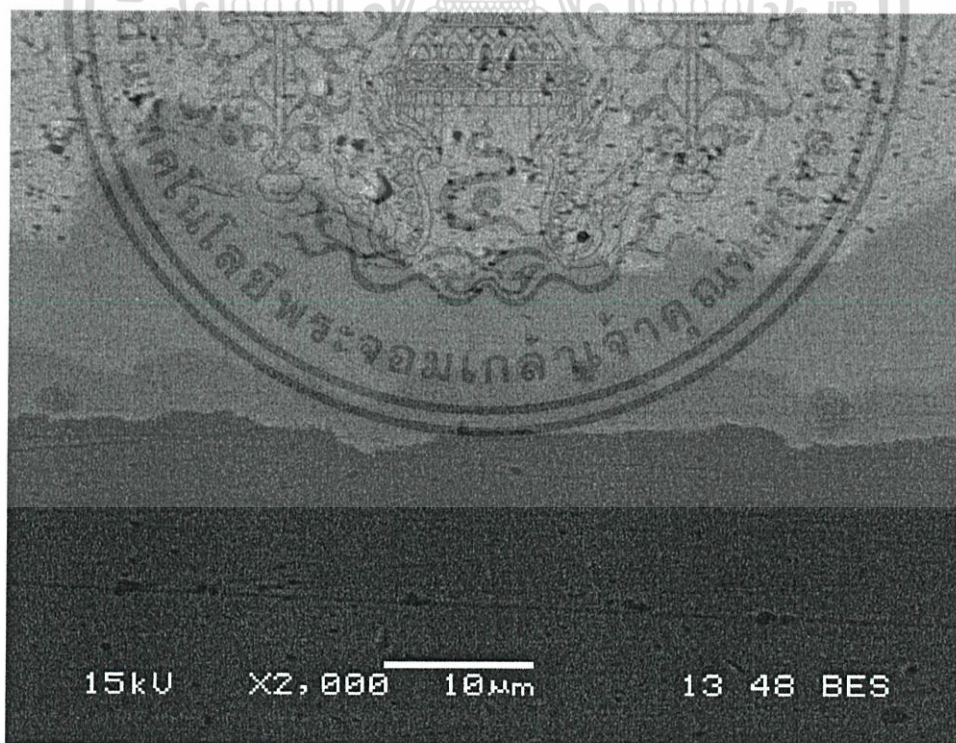


รูปที่ จ.88 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 170°C เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

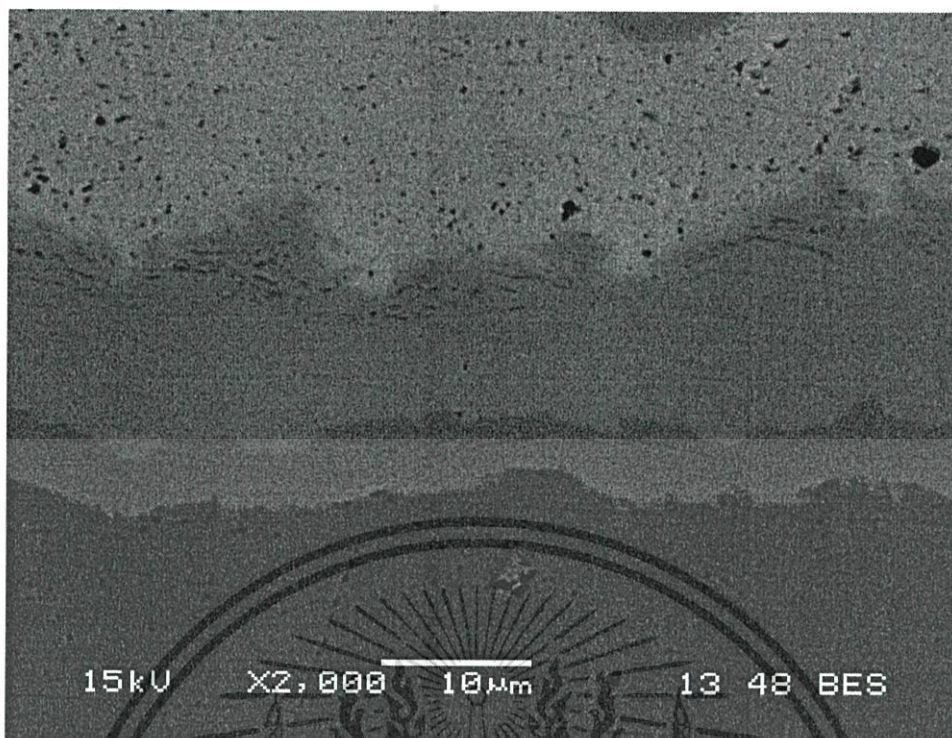


รูปที่ จ.89 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 170°C เวลา 1000 ชั่วโมง



รูปที่ จ.90 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 170°C เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ.91 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 170°C เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นายกำธร สุขพิมาย
วัน เดือน ปีเกิด	26 มกราคม 2531 ที่นครราชสีมา
ที่อยู่	39 หมู่ 3 ตำบลหันห้วยทราย อำเภอประทาย นครราชสีมา 30180
ประวัติการศึกษา	2553 อดุสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรม การออกแบบแม่พิมพ์ (เกียรตินิยมอันดับ 1) มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล
ประสบการณ์การทำงาน	2554 - ปัจจุบัน ตำแหน่งเจ้าหน้าที่วิจัย สังกัดส่วนสนับสนุน วิชาการ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานทางวิชาการ	กำธร สุขพิมาย กัลยา ผ่าโผน กรรณชัย กัลยาศิริ. 2556 “การศึกษาอิทธิพลของอินเดียมต่อการกระจายตัวและการเกิด สารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn บนแผ่นทองแดง” การประชุมวิชาการช่างงาน วิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2556 มหาวิทยาลัยมหิดล และมหาวิทยาลัยศิลปากร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้