ผลกระทบของ Ni, Ag และ In ต่อความสามารถในการเปียกและชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรี Sn-Bi-Ni-Ag หรือ Sn-Bi-Ni-In กับแผ่นทองแดง

EFFECTS OF Ni, Ag, AND In ON WETTABILITY AND INTERMETALLIC COMPOUND BETWEEN Sn-Bi-Ni-Ag OR Sn-Bi-Ni-In SOLDERS AND Cu SUBSTRATE

ปรัชญ์ เจียรสถาวงศ์
PRACH JHEANSATHAWONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-217-006

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ผลกระทบของ Ni, Ag และ In ต่อความสามารถในการเปียกและชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรี Sn-Bi-Ni-Ag หรือ Sn-Bi-Ni-In กับแผ่นทองแดง

EFFECTS OF Ni, Ag, AND In ON WETTABILITY AND INTERMETALLIC COMPOUND BETWEEN Sn-Bi-Ni-Ag OR Sn-Bi-Ni-In SOLDERS AND Cu SUBSTRATE

T148678

ปรัชญ์ เจียรสถาวงศ์
PRACH JHEANSATHAWONG

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 148678
วัน.เดือน.ปี 14 พ.ย. 2560

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-217-006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECTS OF Ni, Ag, AND In ON WETTABILITY AND INTERMETALLIC COMPOUND BETWEEN Sn-Bi-Ni-Ag OR Sn-Bi-Ni-In SOLDERS AND Cu SUBSTRATE

PRACH JHEANSATHAWONG

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
2017

KMITL-2017-EN-M-217-006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2017
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลกระทบของ Ni, Ag และ In ต่อความสามารถในการเปียกและชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรี Sn-Bi-Ni-Ag หรือ Sn-Bi-Ni-In กับแผ่นทองแดง

Thesis Title Effects of Ni, Ag, and In on Wettability and Intermetallic Compound between Sn-Bi-Ni-Ag or Sn-Bi-Ni-In Solders and Cu Substrate

นักศึกษา นายปรัชญ์ เจียรสถาวงศ์

รหัสประจำตัว 57601312

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-217-006

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.กอบบุญ	หล่อทองคำ	
ดร.จิตราภรณ์	วงศางาม	
ดร.นิรันดร์	พิสุทธอานนท์	
ผศ.ดร.วิภู	ศรีสืบสาย	
รศ.ดร.กรรณชัย	กัลยาศิริ	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 8 ธันวาคม พ.ศ. 2559 เวลา 09.00-11.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 5

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 8 ธันวาคม พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของ Ni, Ag และ In ต่อความสามารถในการเปียกและชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรี Sn-Bi-Ni-Ag หรือ Sn-Bi-Ni-In กับแผ่นทองแดง
นักศึกษา	นายปรัชญ์ เจียรสถาวงศ์
รหัสประจำตัว	57601312
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาผลกระทบของนิกเกิล (Ni) เงิน (Ag) และอินเดียม (In) ต่อความสามารถในการเปียกและชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-Bi-Ni-X (X คือ Ag หรือ In) กับแผ่นทองแดง และแผ่นทองแดงปนเปื้อนตะกั่ว ซึ่งปริมาณธาตุนิกเกิลที่เติม คือ 0, 0.05, 0.1, 0.5 และ 1.0 wt.% ปริมาณธาตุเงินและอินเดียมที่เติม คือ 0.05 และ 0.1 wt.% โดยใช้การบัดกรีด้วยวิธีรีโฟลว์ที่อุณหภูมิ 179 $^{\circ}$C เป็นเวลา 30 วินาที นับจากโลหะบัดกรีเริ่มหลอมละลาย และปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในอากาศ จากการวัดค่าความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด พบว่าการกระจายตัวของโลหะบัดกรีมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นหลังการเติมธาตุ Ni ส่วนการเติมธาตุ Ag และ In ส่งผลให้การกระจายตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จากนั้นชิ้นงานจะถูกบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 75, 100 และ 125 $^{\circ}$C เป็นเวลา 10, 100 และ 1000 ชั่วโมง โดยพบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นหลังการบัดกรี คือ Cu_6Sn_5 รวมถึง $(Cu,Ni)_6Sn_5$ (ในกรณีที่โลหะบัดกรีมีส่วนผสมของ Ni) และภายหลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 $^{\circ}$C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมงพบชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn ระหว่างชั้น Cu_6Sn_5 กับแผ่นทองแดง เช่นเดียวกับการบ่มที่อุณหภูมิ 125 $^{\circ}$C เป็นเวลา 100 และ 1000 ชั่วโมง โดยการเติมธาตุเจือต่างๆลงไปนั้นไม่ส่งผลต่อความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรีอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับโลหะบัดกรีพื้นฐาน Sn58Bi แต่ภายหลังการบ่มด้วยความร้อนพบว่า ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 และ Cu_3Sn ของโลหะบัดกรีที่มีการเติม Ni มีความหนาน้อยกว่าของโลหะบัดกรีพื้นฐาน ในขณะที่การเติม Ag และ In ไม่ส่งผลให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะแตกต่างจากของโลหะบัดกรีพื้นฐาน โดยพลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn จะมากกว่าของชั้น Cu_6Sn_5 ในโลหะบัดกรีทุกสูตร จากการตรวจสอบโลหะบัดกรีหลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 125 $^{\circ}$C เป็นระยะเวลา 1000 ชั่วโมง พบ Kirkendall voids ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn และแผ่นทองแดง นอกจากนี้เมื่อมีการปนเปื้อนตะกั่วในการบัดกรีจะพบว่า มีสารประกอบเชิงโลหะจุดหลอมเหลวต่ำ $Sn_{16}Pb_{32}Bi_{52}$ เกิดขึ้นในรอยบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis title	Effects of Ni, Ag, and In on wettability and intermetallic compound between Sn-Bi-Ni-Ag or Sn-Bi-Ni-In solders and Cu substrate
Student	Mr. Prach Jheansathawong
Student ID.	57601312
Degree	Master of Engineering
Program	Industrial Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Kannachai Kanlayasiri

ABSTRACT

This study investigated effects of nickel (Ni), silver (Ag) and indium (In) on the wettability and intermetallic compounds between Sn-Bi-Ni-X (X is Ag or In) lead-free solder and copper and lead-contaminated copper substrates. The concentration of Ni employed in this study was 0.05, 0.1, 0.5, and 1.0 wt% while Ag or In was used at 0.05 and 0.1 wt%. Reflow soldering was performed on the specimen at 179 °C for melting time of 30 seconds before cooling down in ambient temperature. It was found that Ni clearly increases the wettability of the solder while the addition of Ag and In slightly improves the wettability. The specimen was then thermally aged at a temperature of 75, 100 and 125 °C for 10, 100 and 1000 hours. Either Cu_6Sn_5 or $(Cu, Ni)_6Sn_5$ intermetallic phase was found at the interface (depending on composition of the solder). With the thermal aging condition of 100 °C at 1000 hours, Cu_3Sn intermetallic compound was appeared at the interface between the Cu_6Sn_5 layer and copper substrate. Cu_3Sn was also found in cases of thermal aging at 125 °C for 100 and 1000 hours. The introduction of the alloying elements did not affect the thickness of intermetallic layer after soldering, however after thermal aging Ni-bearing solder provided a thinner intermetallic layer compared to that of the base solder Sn58Bi, but the addition of Ag or In did not affect the thickness of intermetallic layer. The activation energy of combined Cu_6Sn_5 + Cu_3Sn layers was found to be higher than that of the single Cu_6Sn_5 layer in all cases. Kirkendall voids were also found between the Cu_3Sn layer and copper substrate after thermal aging at 125 °C for 1000 hours. In addition, the low melting point $Sn_{16}Pb_{32}Bi_{52}$ intermetallic phase was found in the solder joint when lead was contaminated in the soldering process.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ ที่ให้ความช่วยเหลือ คำชี้แนะในการวิจัยและการแก้ปัญหา ตลอดจนความรู้และประสบการณ์ที่ดีตลอดมา

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

ขอขอบคุณคณะอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณคณะอาจารย์สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหการ คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล ที่ให้การสนับสนุนด้านสถานที่ เครื่องมือ และคำปรึกษาในการทดสอบ

ขอขอบพระคุณบิดามารดาที่ให้โอกาสในการศึกษาและเป็นผู้คอยสนับสนุนเสมอมา

ขอขอบคุณพี่ เพื่อน น้อง ที่คอยเป็นกำลังใจที่ดีและช่วยเหลือข้าพเจ้าตลอดมา

หวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์นี้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อสังคมส่วนรวมได้

ปรัชญ์ เจียรสถาวงศ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II
กิตติกรรมประกาศ III
สารบัญ IV
สารบัญตาราง VII
สารบัญรูป VIII

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 อิทธิพลของธาตุ Bi 4
2.1.2 อิทธิพลของธาตุ Ni 5
2.1.3 อิทธิพลของธาตุ Ag 6
2.1.4 อิทธิพลของธาตุ In 7
2.1.5 อิทธิพลของธาตุ Pb 8
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 10
2.2.1 การบัดกรี 10
2.2.2 โลหะบัดกรี 10
2.2.3 โลหะพื้น 11
2.2.4 น้ำยาประสานหรือฟลักซ์ 12
2.2.5 วิธีการบัดกรี 12
2.2.6 ข้อควรพิจารณาเบื้องต้นในการเลือกใช้โลหะบัดกรีแบบไร้สารตะกั่ว 13
2.2.7 โลหะทดแทนสารตะกั่ว 15
2.2.8 การแพร่ 18
2.2.8.1 การแพร่ในสภาวะคงตัว 19
2.2.8.2 การแพร่ในสภาวะไม่คงตัว 20
2.2.8.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการแพร่ 22
2.2.9 เฟสไดอะแกรมของโลหะบัดกรี 23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.9.1 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก – ทองแดง 23
2.2.9.2 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก – เงิน 24
2.2.9.3 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมเงิน – ทองแดง 25
2.2.9.4 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก – บิสมัท 26
2.2.9.5 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก – นิกเกิล 27
2.2.9.6 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมบิสมัท – อินเดียม 28
2.2.9.7 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมนิกเกิล – อินเดียม 29
2.2.9.8 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก - บิสมัท – ตะกั่ว 30
2.2.10 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค 30
2.2.10.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง 30
2.2.10.2 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด 31
2.2.10.3 การวิเคราะห์ Energy dispersive X-ray spectroscopy 32

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 34
3.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ 35
3.2 ขั้นตอนการทดลอง 36
3.2.1 การบัดกรี 36
3.2.2 การบ่มด้วยความร้อน 39
3.2.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค 40

บทที่ 4 ผลการทดลอง 42
4.1 ความสามารถในการเปียก 42
4.2 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะ 43
4.3 ค่าคงที่และสัมประสิทธิ์การเติบโต 79
4.4 พลังงานกระตุ้นการเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ 89
4.5 ผลกระทบจากการปนเปื้อนของตะกั่ว 97
4.6 การวิเคราะห์การหลุดออกจากกันของชิ้นงาน 98
4.7 ผลการคัดเลือกโลหะบัดกรี 101

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 102
5.1 สรุปผลการทดลอง 102
5.2 ข้อเสนอแนะ 103

เอกสารอ้างอิง 104

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก 110

ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ 111

ภาคผนวก ข. สัมประสิทธิ์การเติบโตและพลังงานกระตุ้น 118

ภาคผนวก ค. ค่าตัวประกอบการกระจายตัว 189

ภาคผนวก ง. ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ 191

ภาคผนวก จ. การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วย SEM 200

ภาคผนวก ฉ. การตรวจสอบปริมาณธาตุด้วยวิธี Energy-dispersive X-ray spectroscopy 309

ภาคผนวก ช. การทดสอบทางสถิติ 369

ภาคผนวก ซ. Energy-dispersive X-ray spectroscopy calibration 374

ประวัติผู้เขียน 376

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 อิทธิพลของธาตุ Bi, Ni, Ag, In, และ Pb ต่อคุณสมบัติของโลหะบัดกรี 9
2.2 ชนิดของโลหะต่อความยากง่ายในการบัดกรี 12
2.3 คุณสมบัติบางประการของโลหะทดแทนตะกั่ว 15
2.4 ส่วนผสมต่างๆที่สามารถนำมาทดแทนโลหะบัดกรีชนิดที่มีสารตะกั่ว 16
2.5 ค่าของเออร์เรอร์ฟังก์ชัน 22
3.1 ส่วนผสมของตัวอย่างที่ใช้ทำการทดสอบ 34
4.1 ค่าเฉลี่ยตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด 42
4.2 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn ที่อุณหภูมิบ่ม 75 °C 54
4.3 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn ที่อุณหภูมิบ่ม 100 °C 56
4.4 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn ที่อุณหภูมิบ่ม 125 °C 58
4.5 ความหนาของชั้นสารประกอบรวมของโลหะบัดกรีสูตรต่างๆ 63
4.6 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ที่อุณหภูมิบ่ม 75 °C 64
4.7 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ที่อุณหภูมิบ่ม 100 °C 66
4.8 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ที่อุณหภูมิบ่ม 125 °C 68
4.9 ความหนาของชั้นสารประกอบ Cu_3Sn ของโลหะบัดกรีสูตรต่างๆ 69
4.10 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn ที่อุณหภูมิบ่ม 100 °C 70
4.11 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn ที่อุณหภูมิบ่ม 125 °C 72
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวมกับ $t^{1/2}$ ที่อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกันของโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับทองแดง 80
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 กับ $t^{1/2}$ ที่อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกันของโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับทองแดง 81
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn กับ $t^{1/2}$ ที่อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกันของโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับทองแดง 82
4.15 สัมประสิทธิ์การเติบโต (K) ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Sn-58Bi กับทองแดง 83
4.16 สัมประสิทธิ์การเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรีชนิดต่างๆ 85
4.17 สัมประสิทธิ์การเติบโต (K) ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม 86
4.18 สัมประสิทธิ์การเติบโต (K) ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 87
4.19 สัมประสิทธิ์การเติบโต (K) ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn 88
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln D กับ 1/T ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับทองแดง 90
4.21 สัมประสิทธิ์การเติบโต ค่าคงที่การเติบโต และพลังงานกระตุ้นระหว่างโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับทองแดง 91
4.22 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn และ Cu_6Sn_5 92
4.23 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรีสูตรต่างๆ 96
4.24 อันดับของโลหะบัดกรี 101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 ลักษณะการเชื่อมประสานของโลหะบัดกรีกับชิ้นงาน 11
2.2 การบัดกรีแบบคลื่น 13
2.3 การบัดกรีแบบรีโฟลว์ 13
2.4 กลไกการแพร่โดยอาศัยช่องว่าง 18
2.5 กลไกการแพร่แบบแทรกที่ 18
2.6 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแบบเส้นตรง 19
2.7 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก – ทองแดง 23
2.8 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก – เงิน 24
2.9 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมเงิน – ทองแดง 25
2.10 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก – บิสมัท 26
2.11 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก – นิเกิล 27
2.12 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมบิสมัท – อินเดียม 28
2.13 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมนิเกิล – อินเดียม 29
2.14 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก - บิสมัท – ตะกั่ว 30
2.15 แผนภาพแสดงการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง 31
2.16 แผนภาพแสดงการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด 32
2.17 แบบจำลองอะตอมของโบร์ 33
3.1 แบบหล่อแท่งโลหะบัดกรีเหล็กกล้าไร้สนิม 34
3.2 แท่งโลหะบัดกรี 34
3.3 แบบหล่อเม็ดโลหะบัดกรีเหล็กกล้าไร้สนิม 35
3.4 เม็ดโลหะบัดกรี 36
3.5 ชิ้นงานจำลองการปนเปื้อนของตะกั่ว 36
3.6 ฟลักซ์ชนิด NH-100VK-1 37
3.7 ชิ้นงานหลังจากการบัดกรี 37
3.8 ความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรี 37
3.9 การวัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ 38
3.10 อ่างน้ำมันบ่มความร้อน 39
3.11 เครื่องบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ 39
3.12 เครื่องตัดแรงโน้มถ่วงยี่ห้อ Struers รุ่น Minitom 40
3.13 เครื่องขัดยี่ห้อ Struers LaboPol-1 40
3.14 ชิ้นงานหลังการขัดผิวหน้า 41
3.15 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดยี่ห้อ JEOL JSM-6380 LV 41
4.1 ค่าตัวประกอบการกระจายตัว 43
4.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn-58Bi หลังการบัดกรี 44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.3 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 5000 เท่า ของโลหะบัดกรี Sn-58Bi หลังการบ่มที่อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน 44
4.4 ตำแหน่งที่ตรวจสอบปริมาณธาตุของโลหะบัดกรี Sn-58Bi หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง 45
4.5 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของชั้น Cu_6Sn_5 45
4.6 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของชั้น Cu_3Sn 46
4.7 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni หลังการบัดกรี 47
4.8 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 5000 เท่า ของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni หลังการบ่มที่อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน 47
4.9 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In หลังการบัดกรี 48
4.10 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 5000 เท่า ของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In หลังการบ่มที่อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน 48
4.11 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag หลังการบัดกรี 49
4.12 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 5000 เท่า ของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag หลังการบ่มที่อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน 49
4.13 กลไกการเกิดชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5 50
4.14 กลไกการแพร่ระหว่างโลหะบัดกรีและแผ่นทองแดง 51
4.15 ตำแหน่งที่ตรวจสอบปริมาณธาตุของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni 52
4.16 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของชั้น $(Cu,Ni)_6Sn_5$ ของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni 52
4.17 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด 53
4.18 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่อุณหภูมิการบ่ม 75 °C 55
4.19 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่อุณหภูมิการบ่ม 100 °C 57
4.20 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่อุณหภูมิการบ่ม 125 °C 59
4.21 โครงสร้างจุลภาคในพื้นที่โลหะบัดกรีที่มีปริมาณ Ni ต่างกันหลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125 °C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง 61
4.22 ตำแหน่งที่ตรวจสอบปริมาณธาตุของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125 °C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง 62
4.23 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของสารประกอบ Ni_3Sn_4 62
4.24 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ที่อุณหภูมิการบ่ม 75 °C 65
4.25 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ที่อุณหภูมิการบ่ม 100 °C 67
4.26 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ที่อุณหภูมิการบ่ม 125 °C 69
4.27 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn ที่อุณหภูมิการบ่ม 100 °C 71
4.28 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn ที่อุณหภูมิการบ่ม 125 °C 73
4.29 ตำแหน่งที่ตรวจสอบปริมาณธาตุของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag 74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.30 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของบริเวณที่เป็นธาตุ Bi 74
4.31 ลักษณะของ Kirkendall voids ในโลหะบัดกรีที่มีปริมาณ Ni ต่างกัน..... 75
4.32 ลักษณะของ Kirkendall voids ในโลหะบัดกรีที่มีปริมาณ Ni และ In ต่างกัน 76
4.33 ลักษณะของ Kirkendall voids ในโลหะบัดกรีที่มีปริมาณ Ni และ Ag ต่างกัน 77
4.34 พื้นผิวรอยต่อของชิ้นงานโลหะบัดกรี Sn-58Bi ที่กำลังขยาย a) 1000 เท่า b) 5000 เท่า c) 10000 เท่า 78
4.35 ลักษณะรอยแตกแบบเปราะของแผ่นทองแดงของโลหะบัดกรี Sn-58Bi 78
4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวมกับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi..... 80
4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi..... 81
4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi..... 82
4.39 เปรียบเทียบสมการสัมประสิทธิ์การเติบโตของชั้นสารประกอบกับสมการเส้นตรง..... 83
4.40 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม (Cu_6Sn_5+ Cu_3Sn), Cu_6Sn_5, และ Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi ที่อุณหภูมิบ่ม 125 °C... 84
4.41 เปรียบเทียบสมการอาร์เรเนียสกับสมการเส้นตรง 89
4.42 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม (Cu_6Sn_5+Cu_3Sn) ของโลหะบัดกรี Sn-58Bi 90
4.43 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ของโลหะบัดกรี Sn-58Bi..... 90
4.44 เปรียบเทียบพลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม (Cu_6Sn_5+Cu_3Sn) กับชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5 ของโลหะบัดกรี Sn-58Bi..... 93
4.45 เปรียบเทียบพลังงานกระตุ้นและความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวมกับชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi 93
4.46 ค่าพลังงานกระตุ้นในงานวิจัยของ Yoon และคณะ..... 94
4.47 ค่าพลังงานกระตุ้นในงานวิจัยของ Kim และ Jung..... 94
4.48 บริเวณการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของโลหะบัดกรี Sn-58Bi ปนเปื้อนตะกั่วบริสุทธิ์กับแผ่นทองแดง 97
4.49 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของโลหะบัดกรี Sn-58Bi ปนเปื้อนตะกั่วบริสุทธิ์กับแผ่นทองแดง97
4.50 พื้นผิวรอยต่อของชิ้นงานโลหะบัดกรี Sn-58Bi ที่กำลังขยาย a) 1000 เท่า b) 5000 เท่า c) 10000 เท่า..... 98
4.51 บริเวณที่วิเคราะห์ปริมาณธาตุที่พื้นผิวของโลหะบัดกรี Sn-58Bi..... 99
4.52 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่พื้นผิวของโลหะบัดกรี Sn-58Bi..... 99
4.53 พื้นผิวแผ่นทองแดงของชิ้นงานที่หลุดออกจากโลหะบัดกรี Sn-58Bi 100
4.54 บริเวณที่วิเคราะห์ปริมาณธาตุที่พื้นผิวของแผ่นทองแดงของโลหะบัดกรี Sn-58Bi..... 100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.55 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่พื้นผิวของแผ่นทองแดงของโลหะบัดกรี Sn-58Bi 100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยมีการผลิตและส่งออกสินค้าอิเล็กทรอนิกส์มาเป็นเวลานาน จากรายงานประจำปี 2557 ของศูนย์วิจัยกสิกรไทยพบว่ามีมูลค่าการส่งออกไม่ต่ำกว่า 1 ล้านล้านบาท [1] แต่ในหลายประเทศมีข้อกำหนดในการควบคุมปริมาณการใช้สารพิษในผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น Restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment หรือที่รู้จักในชื่อ RoHs ซึ่งเป็นระเบียบของสหภาพยุโรป โดยห้ามนำเข้าผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ประกอบด้วย ตะกั่ว (Pb) ปรอท (Hg) แคดเมียม (Cd) โครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ (Cr-VI) โพลิโบรมิเนท-ไบฟีนิล (PBB) และโพลิโบรมิเนท-ไดฟีนิล-อีเทอร์ (PBDE) [2] ด้วยเหตุนี้จึงทำให้อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่มีกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการบัดกรี ต้องเปลี่ยนมาใช้โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแทนโลหะบัดกรีดั้งเดิมที่ผสมสารตะกั่ว

โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วหลายชนิดได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อที่จะใช้แทนตะกั่วบัดกรีแบบเดิม เช่น Sn-Ag-Cu, Sn-Ag, Sn-Cu, Sn-Zn, และ Sn-Bi [3-5] โดยโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือ Sn-Ag-Cu (โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Sn-3.0Ag-0.5Cu หรือ SAC305) เนื่องจากมีคุณสมบัตินำไฟฟ้าได้ดีและมีความแข็งแรงที่รอยเชื่อมสูง อย่างไรก็ตามโลหะบัดกรีสูตร SAC305 นั้นมีช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวที่สูงถึง 217-221 °C ในขณะที่ตะกั่วบัดกรีแบบดั้งเดิม (Sn-Pb eutectic) มีจุดหลอมเหลวเพียง 183 °C [3,4,6] โดยช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวที่สูงนี้เป็นปัญหาหลักที่กระทบต่อกระบวนการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพราะอุณหภูมิการบัดกรีที่สูงจะสร้างความเสียหายต่อชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์และแผ่นวงจรขณะบัดกรี นอกจากนี้ปริมาณของเงิน (Ag) ที่มากใน SAC305 ทำให้โลหะบัดกรีชนิดนี้มีราคาสูงอีกด้วย [4,7]

ดังนั้นการใช้งานโลหะบัดกรีที่มีจุดหลอมเหลวต่ำจะแก้ปัญหาอุณหภูมิการบัดกรีที่สูงได้ ซึ่งการใช้อุณหภูมิต่ำในการบัดกรีมีผลทำให้ลด Thermal shock และลดอุณหภูมิในกระบวนการ Step soldering ซึ่งเป็นกระบวนการบัดกรีที่ใช้อุณหภูมิบัดกรีที่น้อยลงในแต่ละครั้ง เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายแก่ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่สามารถทนอุณหภูมิบัดกรีที่สูงได้ [8-10] โดย Sn-58Bi เป็นโลหะบัดกรีที่มีจุดหลอมเหลวเพียง 139 °C ซึ่งต่ำกว่าตะกั่วบัดกรีแบบดั้งเดิมอย่างมากและยังมีราคาที่ไม่สูงอีกด้วย แต่ข้อเสียของโลหะบัดกรี Sn-58Bi คือสภาพการเปียกและค่าความเหนียวค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับตะกั่วบัดกรีแบบดั้งเดิม ซึ่งมีสาเหตุจากโครงสร้างจุลภาคที่หยาบ [3,4] อีกทั้งรอยเชื่อมระหว่างโลหะบัดกรีและแผ่นทองแดงจะมีลักษณะเปราะเนื่องจากการแยกตัวของบิสมัท (Bi) ที่ผิวสัมผัสระหว่างชั้นสารประกอบ Cu_3Sn กับแผ่นทองแดงในขณะที่บ่มด้วยความร้อน [8,9] นอกจากนั้นหากมีการปนเปื้อนของตะกั่ว อะตอมของ ดีบุก (Sn), ตะกั่ว (Pb), และบิสมัท (Bi) จะรวมกันและกลายเป็นสารประกอบ $Sn_{16}Pb_{32}Bi_{52}$ ที่มีจุดหลอมเหลวเพียง 95.3 °C [10]

การผสมธาตุโลหะอื่นๆเข้าไปในโลหะบัดกรี เช่น Ag, Ga, In, Ni, Au, Zn, และ Fe จะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติได้หลายประการ (แม้ว่าอาจเปลี่ยนคุณสมบัติบางประการของโลหะบัดกรีไปด้วย) [11-16] เช่น การเติมนิกเกิล (Ni) จะช่วยปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี SAC และยับยั้งการเกิดสารประกอบเชิงโลหะขณะบัดกรี [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาผลกระทบของ Ni, Ag, และ In ต่อความสามารถในการเปียกและชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-Bi-Ni-X (X คือ Ag หรือ In) กับแผ่นทองแดงหลังการบัดกรีและการบ่มด้วยความร้อน โดยใช้ Sn-58Bi เป็นส่วนผสมพื้นฐาน นอกจากนี้ยังศึกษาความสามารถในการเปียก ผลกระทบจากการปนเปื้อนของตะกั่ว และสาเหตุของการหลุดออกจากกันของชิ้นงาน โดยผลการวิจัยจะทำให้ทราบถึงโครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวสัมผัสหลังจากการบัดกรีและหลังจากบ่มด้วยความร้อน พลังงานกระตุ้นของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด ความสามารถในการเปียก ผลกระทบจากการปนเปื้อนของตะกั่ว และสาเหตุของการหลุดออกจากกันของชิ้นงาน นอกจากนั้นพฤติกรรมเบื้องต้นของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-Bi-Ni-X จะถูกศึกษาและอาจนำไปใช้ในการผลิตโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิดใหม่ต่อไป

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-58Bi-Ni-X (X คือ Ag หรือ In)
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ Ni, Ag และ In ที่มีผลต่อชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-58Bi-Ni-X
3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของการบ่มด้วยความร้อนที่มีผลต่อชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-58Bi-Ni-X กับแผ่นทองแดง
4. เพื่อศึกษาผลกระทบจากการปนเปื้อนของตะกั่วที่มีผลต่อชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-58Bi-Ni-X

1.3 สมมติฐานการศึกษา

จากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยต่างๆ สามารถตั้งสมมติฐานของการศึกษาได้ดังนี้

1. การเติมธาตุนิกเกิล (Ni) ในปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยยับยั้งการขยายตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะและช่วยปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคให้ละเอียดยิ่งขึ้น
2. การเติมธาตุเงิน (Ag) จะช่วยเพิ่มความสามารถในการเปียกและช่วยปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรี
3. การเติมธาตุอินเดียม (In) ทำให้เกิดการยับยั้งการสลายตัวของแผ่นทองแดง ยับยั้งการขยายตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ และยังช่วยเพิ่มความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรี

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1. โลหะบัดกรีพื้นฐานที่ใช้ในการศึกษาคือโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-58Bi
2. ปริมาณนิกเกิล (Ni) ที่ทำการศึกษาคือ 0.0, 0.05, 0.1, 0.5, และ 1.0 wt%, ปริมาณเงิน (Ag) ที่ทำการศึกษาคือ 0.0, 0.05, และ 0.1 wt%, ปริมาณอินเดียม (In) ที่ทำการศึกษาคือ 0.0, 0.05, และ 0.1 wt%
3. ศึกษาเฉพาะการบัดกรีโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-58Bi-Ni-X กับแผ่นทองแดงบริสุทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ศึกษาเฉพาะอิทธิพลเนื่องจากการบ่มด้วยความร้อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-58Bi-Ni-X กับแผ่นทองแดงบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 75, 100 และ 125 °C โดยใช้เวลาในการบ่ม 10, 100 และ 1,000 ชั่วโมง

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว เช่น อิทธิพลของโลหะผสมต่อความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ข้อดีและข้อเสียเมื่อเทียบกับโลหะบัดกรีแบบเดิม
2. ศึกษาวิธีการเตรียมชิ้นงานและการบัดกรีตามมาตรฐานเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำและลดข้อผิดพลาดในการทำงาน
3. เตรียมชิ้นงานและอุปกรณ์ต่างๆตามที่ได้วางแผนไว้
4. ทำการทดลองโดยการบัดกรีโลหะบัดกรีที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ Ni, Ag, และ In ในปริมาณที่ต่างกันบนแผ่นทองแดง เพื่อศึกษาอิทธิพลของโลหะผสมต่อคุณสมบัติของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ
5. ทำการทดลองโดยการบ่มโลหะบัดกรีกับแผ่นทองแดงด้วยความร้อนและเวลาที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ
6. วิเคราะห์ผลการทดลองในด้านความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ และอิทธิพลเนื่องจากการปนเปื้อนของตะกั่ว
7. สรุปผลการทดลองพร้อมข้อเสนอแนะที่ได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 อิทธิพลของธาตุ Bi

งานวิจัยของ Rizvi และคณะ [18] ได้ศึกษาผลกระทบจากการเติม 1 wt.% Bi ต่อรูปแบบของสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรี Sn–2.8Ag–0.5Cu กับแผ่นทองแดงระหว่างการบัดกรีและการบ่มด้วยความร้อน โดยใช้แผ่นทองแดงบริสุทธิ์ขนาด 10x2x0.22 mm^3 จากนั้นนำไปจุ่มฟลักซ์ (ความตึงผิว = 370 mN/mm) และนำไปจุ่มในโลหะบัดกรีหลอมเหลวทันที โดยจุ่มลึก 3 mm เป็นเวลา 10 วินาที ที่อุณหภูมิ 255 °C จากนั้นชิ้นงานจะถูกบ่มด้วยความร้อนที่ 150 °C ± 1 °C เป็นเวลา 2, 6, 10 และ 14 วัน ผลการทดลองพบชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 หลังจากการบัดกรีและเริ่มพบชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn หลังจากบ่มด้วยความร้อนเป็นเวลา 14 วัน โดยความหนาของชั้นสารประกอบจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มด้วยความร้อน และโลหะบัดกรีที่เติม 1 wt.% Bi จะมีความหนาน้อยกว่าโลหะบัดกรีที่ไม่ได้เติมธาตุ Bi ในทุกระยะเวลาการบ่มด้วยความร้อน โดยความหนาของชั้นสารประกอบนั้นเพิ่มขึ้นเนื่องจากการแพร่ของแผ่นทองแดงและโลหะบัดกรีที่เติมธาตุ Bi มีอัตราการสลายตัวของแผ่นทองแดงที่น้อยกว่าโลหะบัดกรีที่ไม่ได้เติม Bi ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการเติม Bi ทำให้เกิดการสลายตัวของแผ่นทองแดงน้อยลงซึ่งเป็นการยับยั้งการเกิดชั้นสารประกอบ

งานวิจัยของ Guo-yuan และ Xun-qing [19] ได้ศึกษาอิทธิพลของ Bi ต่อการขยายตัวของสารประกอบเชิงโลหะในโละบัดกรี SAC โดยโลหะบัดกรีที่ใช้คือ Sn-3.5Ag- 0.7Cu-xBi (x = 0.0, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 และ 5.0) และเคลือบโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดงหนา 0.5 mm และบัดกรีด้วยวิธี Infared reflow process ที่อุณหภูมิ 250 °C เป็นเวลา 60 วินาที หลังจากนั้นนำไปบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 120, 150, 190 °C เป็นเวลา 0, 200, 400, 600, 800, และ 1000 ชั่วโมง โดยการเติม Bi ที่ปริมาณ 1% จะช่วยลดขนาดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 และ Cu_3Sn ได้ดีที่สุด เนื่องจากโลหะบัดกรีที่เติม Bi ที่ปริมาณ 1% นั้นมีค่า Activation energy สูงที่สุด

งานวิจัยของ Hu และคณะ [20] ได้ศึกษาสารประกอบเชิงโลหะในรอยเชื่อมของโลหะบัดกรี Sn0.7Cu, Sn0.7Cu0.7Bi และ Sn0.7Cu1.3Bi กับแผ่นทองแดงขนาด 10x10x2 mm^3 ที่อุณหภูมิบัดกรีต่างๆและใช้อุณหภูมิในการบ่มด้วยความร้อนที่ 150 °C เป็นเวลา 1,3,5,7 และ 9 วัน ผลปรากฏว่าพบชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5 และ Cu_3Sn ที่รอยเชื่อม โดยโลหะบัดกรีสูตร Sn0.7Cu1.3Bi มีความหนาชั้นสารประกอบที่หนากว่าสูตร Sn0.7Cu และ Sn0.7Cu0.7Bi ซึ่งความหนาของชั้นสารประกอบนั้นจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณ Bi โดย Bi ทำให้การเกิดปฏิกิริยาผิวสัมผัสระหว่าง Sn และ Cu นั้นเร็วขึ้น

งานวิจัยของรชต คงชยาสุขวัฒน์ และคณะ [21] ได้ศึกษาอิทธิพลของธาตุ Bi ต่ออัตราการแผ่กระจายของโลหะบัดกรี Sn-0.6Cu-0.05Ni-Ge โดยได้ทำการเติมธาตุ Ag, Sb, In และ Bi ปริมาณ 0.05 wt% และ 0.1 wt% ลงในโลหะบัดกรีพื้นฐาน Sn-0.6Cu-0.05Ni-Ge ที่มีค่าเฉลี่ยอัตราการแผ่กระจายอยู่ที่ 74.40% ภายหลังการเติมธาตุ Bi ปริมาณ 0.05 wt% และ 0.1 wt% พบว่าโลหะบัดกรีมีอัตราการแผ่กระจายที่ดีขึ้นเป็น 74.86% และ 75.10% ตามลำดับ และการเติมธาตุ Ag, Sb, In

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ Bi สองชนิดร่วมกันอย่างละ 0.05 wt.% ลงในโลหะบัดกรีพื้นฐานพบว่าค่าเฉลี่ยอัตราการแผ่กระจายมีค่าเพิ่มขึ้นทั้งหมด

2.1.2 อิทธิพลของธาตุ Ni

งานวิจัยของ Mokhtari และ Nishikawa [13] ได้ศึกษาผลกระทบของ Ni ต่อโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อโลหะบัดกรี Sn-58Bi โดยเติม Ni ที่ 0, 0.5, และ 1 wt.% ใช้แผ่นทองแดงทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm หนา 5 mm และใช้ Solder paste ผสม Flux (88:12) ทรงกระบอกหนา 200 μm จากนั้นใช้แผ่นทองแดงทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm หนา 2 μm วางด้านบนและบัดกรีด้วยวิธี Reflow หลังจากนั้นชิ้นงานจะถูกบ่มด้วยความร้อนในอ่างน้ำมันที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 168, 504, และ 1008 ชั่วโมงตามลำดับและถูกทำให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง พบว่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มด้วยความร้อน โดยชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่พบคือ Cu_6Sn_5, $Cu_6(Sn, In)_5$, และ $(Cu, Ni)_6Sn_5$ ซึ่งการเติม Ni ที่ปริมาณ 0.5 wt.% จะช่วยยับยั้งการขยายตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะได้ดีที่สุด

งานวิจัยของ Yoon และคณะ [22] ได้ศึกษาการขยายตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรีสูตร Sn–0.6Cu–0.05Ni และแผ่นทองแดง FR-4 PCB ขนาด 15 mm^2 หนา 1.5 mm โดยใช้ลวดทองแดงเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.1 mm สอดที่ Through-hole เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 mm จากนั้นนำไปบัดกรีโดยการจุ่ม PCB ลงในอ่างโลหะบัดกรีอุณหภูมิ 255 °C เป็นเวลา 5 วินาที จากนั้นชิ้นงานจะถูกบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 80, 100, 120 และ 150 °C เป็นเวลา 0 ถึง 60 วัน โดยผลจากการสังเกตด้วย Electron probe micro analyzer (EPMA) และ Line profiles ของรอยเชื่อม Sn–Cu–Ni/Cu หลังการบ่มความร้อนที่ 150 °C เป็นเวลา 60 วัน พบชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5 และ Cu_3Sn โดยชั้น Cu_6Sn_5 จะมีส่วนผสมของ Ni เล็กน้อย แต่พื้นที่ระหว่างชั้น Cu_6Sn_5 และ Cu_3Sn จะมีปริมาณของ Ni ที่สูงมาก ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า Ni ได้แพร่จากโลหะบัดกรีเข้าสู่ชั้นสารประกอบเชิงโลหะ โดยค่า Activation energy ของชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn และ Cu_6Sn_5 เท่ากับ 76.17 kJ/mol และ 66.35 kJ/mol ตามลำดับ

งานวิจัยของ Laurila และคณะ [15] ได้ศึกษาผลกระทบของ Ag, Fe, Au และ Ni ต่อการขยายตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-Cu กับแผ่นทองแดงขนาด 20x20 mm ที่เคลือบ RMA ฟลักซ์และจุ่มลงในโลหะบัดกรีหลอมเหลวที่ 260 °C เป็นเวลา 40 วินาที จากนั้นชิ้นงานจะถูกอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลาต่างๆจนถึง 2560 ชั่วโมง จากผลลัพธ์พบชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 และ Cu_3Sn โดยธาตุผสมแต่ละชนิดนั้นยับยั้งการขยายตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะได้ไม่เท่ากัน โดยจำแนกอิทธิพลของธาตุผสมที่เติมลงไปได้เป็น 2 ประเภท อย่างแรกคือไม่ละลายในชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (ธาตุ Ag และ Fe) อย่างที่สองคือละลายในชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (ธาตุ Au และ Ni) ซึ่งทำให้ยับยั้งการเกิดชั้นสารประกอบได้มากกว่า (โดยเฉพาะ Ni)

งานวิจัยของ Chen และคณะ [16] ได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Sn-3.5Ag-X (X = 0, 0.75Ni, 1.0Zn และ 1.5In) ระหว่างบ่มด้วยความร้อน โดยแผ่นทองแดงที่ใช้มีขนาด 15x7x6 มิลลิเมตร โดยทำการบัดกรีที่อุณหภูมิ 277-327 °C เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นนำไปบ่มความร้อนที่ 310 °C เป็นเวลา 8, 24, และ 40 นาที แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ เมื่อตรวจสอบรอยต่อของโลหะบัดกรี Sn-3.5Ag-0.75Ni หลังการบัดกรีพบชั้นสารประกอบ Ni_3Sn_4 ระหว่างโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัดกรีและชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5 แต่ภายหลังการบ่มด้วยความร้อนจะพบเพียงแค่ชั้นสารประกอบ $(Cu,Ni)_6Sn_5$ โดย Ni จะช่วยยับยั้งการแพร่ของอะตอม Cu ด้วยเหตุนี้ความหนาของชั้นสารประกอบของ Sn-Ag-Ni/Cu จึงน้อยกว่า Sn-Ag/Cu หลังการบ่มความร้อนที่ 40 นาที

งานวิจัยของรชต คงชยาสุขวัฒน์ และคณะ [21] ได้ศึกษาอิทธิพลของธาตุ Ni ต่ออัตราการแผ่กระจายของโลหะบัดกรี Sn-0.6Cu-0.05Ni-Ge ที่มีค่าเฉลี่ยอัตราการแผ่กระจายอยู่ที่ 74.40% ซึ่งมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าอัตราการแผ่กระจายของโลหะบัดกรี Sn-0.7Cu ที่มีค่าเฉลี่ยอัตราการแผ่กระจาย 73.75% ดังนั้นการเติม Ni เพียง 0.05wt% และ Ge ปริมาณ 0.005wt% มีผลทำให้อัตราการแผ่กระจายเพิ่มขึ้น

2.1.3 อิทธิพลของธาตุ Ag

งานวิจัยของ Chang และคณะ [14] ได้ศึกษาผลกระทบจากการบ่มด้วยความร้อนต่อสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn–9Zn–xAg (x = 0, 0.5, 1.5, 2.5 และ 3.5 wt.%) กับแผ่นทองแดงขนาด 70mm x 25mm x 2mm ทำการบัดกรีด้วยวิธีการจุ่มลงในโลหะบัดกรีหลอมเหลวที่ 350 °C เป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นทำการอบที่อุณหภูมิ 150 และ 180 °C เป็นเวลา 100, 250, 400, 750 และ 1000 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่าเกิดชั้นสารประกอบ Cu_5Zn_8, Cu_6Sn_5, Cu_3Sn และ Ag_3Sn ในรอยเชื่อม Sn–9Zn–xAg/Cu หลังการบ่มด้วยความร้อนที่ 150 °C เป็นเวลา 750 ชั่วโมง ซึ่งชั้นสารประกอบจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อระยะเวลาบ่มด้วยความร้อนนานขึ้น โดยการเติม Ag ปริมาณ 3.5 wt.% ลงในโลหะบัดกรีจะยับยั้งการขยายตัวของ Cu_6Sn_5 ได้ดีที่สุดเนื่องจาก Ag จะละลายเข้าไปในชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5 ระหว่างการบัดกรีได้มากที่สุด นอกจากนี้ยังไม่พบ Kirkendall voids ที่รอยเชื่อม Cu/Sn–9Zn–xAg หลังการบ่มความร้อนที่ 150 °C เป็นเวลา 750 ชั่วโมง โดยมาจากการที่ Ag เข้าไปแทนที่ Kirkendall voids และทำปฏิกิริยากับ Sn กลายเป็น Ag_3Sn ซึ่งจะช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของรอยเชื่อมหลังการบ่มเป็นระยะเวลานาน

งานวิจัยของ Yu และคณะ [23] ได้ศึกษาการขยายตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-3.5Ag กับแผ่นทองแดงหนา 0.1 มิลลิเมตร กว้าง 10 มิลลิเมตร โดยการบัดกรีจะใช้วิธีการจุ่มแผ่นทองแดงลงในโลหะบัดกรีหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 250 °C เป็นเวลา 10, 30, 60, และ 90 วินาที โดยชิ้นงานที่บัดกรีเป็นเวลา 30 วินาทีบางส่วน จะถูกนำมาบ่มด้วยความร้อนด้วยอุณหภูมิ 70, 125, และ 170 °C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ในอากาศ หลังการบัดกรีพบชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5 และสารประกอบ Ag_3Sn โดยความหนาของชั้นสารประกอบจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบัดกรี และหลังจากการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 125 °C พบชั้นสารประกอบ Cu_3Sn ระหว่างชั้น Cu_6Sn_5 และแผ่นทองแดง และหลังจากการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 170 °C พบสารประกอบ Ag_3Sn ฝังตัวอยู่ในชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5 โดยค่าพลังงานการกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 + Cu_3Sn เท่ากับ 75.16 kJ/mol และค่าพลังงานการกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 เท่ากับ 58.59 kJ/mol ซึ่งมีค่าน้อยกว่าการบัดกรีโดยวิธี Reflow ที่มีค่าพลังงานการกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ที่ 111 kJ/mol

งานวิจัยของรชต คงชยาสุขวัฒน์ และคณะ [21] ได้ศึกษาอิทธิพลของธาตุ Ag ต่ออัตราการแผ่กระจายของโลหะบัดกรี Sn-0.6Cu-0.05Ni-Ge โดยได้ทำการเติมธาตุ Ag, Sb, In และ Bi ปริมาณ 0.05 wt% และ 0.1 wt% ลงในโลหะบัดกรีพื้นฐาน Sn-0.6Cu-0.05Ni-Ge ที่มีค่าเฉลี่ยอัตราการแผ่กระจายอยู่ที่ 74.40% ภายหลังการเติมธาตุ Ag ปริมาณ 0.05 wt% และ 0.1 wt% พบว่าโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัดกรีมีอัตราการแผ่กระจายที่ดีขึ้นเป็น 74.83% และ 75.19% ตามลำดับ และการเติมธาตุ Ag, Sb, In และ Bi สองชนิดร่วมกันอย่างละ 0.05 wt.% ลงในโลหะบัดกรีพื้นฐานพบว่าค่าเฉลี่ยอัตราการแผ่กระจายมีค่าเพิ่มขึ้นทั้งหมด โดยเฉพาะการเติมธาตุ Ag ร่วมกับ In ทำให้ค่าอัตราการแผ่กระจายเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน

งานวิจัยของ Tsai และ Hwang [24] ได้ศึกษาพฤติกรรมการแข็งตัวของโลหะบัดกรี Sn-9Zn-xAg (x = 0, 0.5, 1.5, 2.5, 3.5 wt.%) โดยใช้เครื่อง Differential scanning calorimetry (DSC) ในการวัดอุณหภูมิลิควิดัสและโซลิดัส โดยชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองมีน้ำหนัก 10 มิลลิกรัม อัตราการให้ความร้อนเป็น 1 °C/min โดยให้ความร้อนจากอุณหภูมิ 25 °C ถึง 300 °C ผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิลิควิดัสมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ Ag ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิโซลิดัสมีค่าค่อนข้างที่จะคงที่ โดยอุณหภูมิลิควิดัสที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ Ag นั้นมีค่าตั้งแต่ 202.9 °C ถึง 213.5 °C ตามลำดับในขณะให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน และมีค่าตั้งแต่ 199.3 °C ถึง 213.2 °C ตามลำดับขณะที่ชิ้นงานคายความร้อน

งานวิจัยของ Luo และคณะ [25] ได้ศึกษาคุณสมบัติแรงดึงของ Ag ต่อโลหะบัดกรี Sn-Ag-Zn โดยเติม Ag ที่ปริมาณ 1, 1.5, 2, และ 3 wt.% และเติม Zn ที่ปริมาณ 1, 1.5, 2, 2.5, 3, และ 4 wt.% โดยหล่อชิ้นงานที่อุณหภูมิ 300 °C เป็นรูปทรงตามมาตรฐาน ISO6892 โดยใช้อัตราการดึงที่ 2 mm/min ซึ่งจะทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งและหาค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์ ผลการทดลองพบว่าค่าความแข็งแรงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ Ag เพิ่มขึ้น โดยที่ปริมาณ Zn เท่ากับ 1 wt.% นั้น ค่าความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณ Ag นั้นมีค่าตั้งแต่ 41.8 MPa ถึง 47.5 MPa ตามลำดับ และค่าความแข็งแรงยังคงมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ Ag ที่เพิ่มขึ้นในชิ้นงานที่มีปริมาณ Zn ที่เท่ากัน

2.1.4 อิทธิพลของธาตุ In

ในงานวิจัยของ Sharif และ Chan [12] ได้ศึกษาผลกระทบของ In ต่อการสลายตัวของ Cu โดยโลหะบัดกรีที่ใช้คือ Sn–9%In–3.5%Ag–0.5%Cu, Sn–3.5%Ag–0.5%Cu และ Sn–0.7%Cu การทดลองใช้แผ่นทองแดงแบบ BGA (Ball Grid Array) หนา 13 μm เส้นผ่านศูนย์กลาง 650 μm ถูกล้อมรอบโดย Solder mask บัดกรีด้วยวิธี Reflow กับโลหะบัดกรีทรงกลม (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.76 mm) โดยใช้อุณหภูมิบัดกรี 230, 240 ,250 และ 260 °C เป็นเวลา 1, 5, 10 และ 20 นาที ตามลำดับ ชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นคือ Cu_6Sn_5, $Cu_6(In, Sn)_5$, Cu_3Sn, Ag_3Sn, และ $Ag_3(In, Sn)$ ซึ่งพบว่าโลหะบัดกรีที่ผสม In จะยับยั้งการสลายตัวของแผ่นทองแดงได้มากกว่าและการเติม In นั้นจะปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของ Ag_3Sn จากทรงเรียวแบนเป็น $Ag_3(In, Sn)$ ทรงกลม

งานวิจัยของ Mokhtari และ Nishikawa [13] ได้ศึกษาผลกระทบของ In ต่อโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อโลหะบัดกรี Sn-58Bi โดยเติม In ที่ 0, 0.5, และ 1 wt.% ใช้แผ่นทองแดงทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm หนา 5 mm และใช้ Solder paste ผสม Flux (88:12) ทรงกระบอกหนา 200 μm จากนั้นใช้แผ่นทองแดงทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm หนา 2 μm วางด้านบนและบัดกรีด้วยวิธี Reflow หลังจากนั้นชิ้นงานจะถูกบ่มด้วยความร้อนในอ่างน้ำมันที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 168, 504, และ 1008 ชั่วโมงตามลำดับและถูกทำให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง พบว่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มด้วยความร้อน โดยชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่พบคือ Cu_6Sn_5, $Cu_6(Sn, In)_5$, และ $(Cu, Ni)_6Sn_5$ ซึ่งการเติม In ที่ปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.5 wt.% จะช่วยยับยั้งการขยายตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะได้ดีที่สุดและ In ยังช่วยปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของ Bi อีกด้วย

งานวิจัยของ Wu และคณะ [26] ได้ศึกษาชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี SnAgBiIn บนแผ่นทองแดงขนาด 10x10 mm^2 โดยใช้โลหะบัดกรีสูตร 84Sn–3Ag–3Bi–10In และ 89Sn–3Ag–3Bi–5In บัดกรีด้วยวิธี Reflow ที่ 252 °C เป็นเวลา 10 และ 40 นาที พบว่าความหนาของชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5 ของสูตร 84Sn–3Ag–3Bi–10In หนากว่าสูตร 89Sn–3Ag–3Bi–5In และมีค่า Activation energy เท่ากับ 48.3 kJ/mol และ 55.1 kJ/mol ตามลำดับและไม่พบการแทนที่ของ In ใน Sn ที่ชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5

งานวิจัยของกำธร สุขพิมาย และคณะ [27] ได้ศึกษาอิทธิพลของอินเดียมต่อการกระจายตัวและการเกิดสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn (x = 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 wt%) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 มิลลิเมตร หนา 1.6 มิลลิเมตร บนแผ่นทองแดงขนาด 30 x 30 x 0.35 มิลลิเมตร โดยการทดสอบการกระจายตัวใช้วิธี Spread test ที่อุณหภูมิ 260 °C เป็นเวลา 30 วินาที โดยการกระจายตัวของโลหะบัดกรีมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณ In เพิ่มขึ้น จากการวิเคราะห์ด้วย EDS พบชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ที่มีความหนาประมาณ 2.1 μm โดยไม่พบความแตกต่างของความหนาอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นใกล้เคียงกันนี้บ่งบอกให้เห็นว่า In ไม่มีผลต่อความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างรอยต่อของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn กับแผ่นทองแดงหลังจากการบัดกรี

งานวิจัยของรชต คงชยาสุขวัฒน์ และคณะ [21] ได้ศึกษาอิทธิพลของธาตุ In ต่ออัตราการแผ่กระจายของโลหะบัดกรี Sn-0.6Cu-0.05Ni-Ge โดยได้ทำการเติมธาตุ Ag, Sb, In และ Bi ปริมาณ 0.05 wt% และ 0.1 wt% ลงในโลหะบัดกรีพื้นฐาน Sn-0.6Cu-0.05Ni-Ge ที่มีค่าเฉลี่ยอัตราการแผ่กระจายอยู่ที่ 74.40% ภายหลังการเติมธาตุ In ปริมาณ 0.05 wt% และ 0.1 wt% พบว่าโลหะบัดกรีมีอัตราการแผ่กระจายที่ดีขึ้นเป็น 74.94% และ 75.18% ตามลำดับ และการเติมธาตุ Ag, Sb, In และ Bi สองชนิดร่วมกันอย่างละ 0.05 wt.% ลงในโลหะบัดกรีพื้นฐานพบว่าค่าเฉลี่ยอัตราการแผ่กระจายมีค่าเพิ่มขึ้นทั้งหมด โดยเฉพาะการเติมธาตุ Ag ร่วมกับ In ทำให้ค่าอัตราการแผ่กระจายเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน

2.1.5 อิทธิพลของธาตุ Pb

งานวิจัยของ Zhu และคณะ [28] ได้ศึกษาผลกระทบของตะกั่วต่อโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อมโลหะบัดกรี SnAg/Cu และ SnSb/Cu บนชิพตัวเก็บประจุ 1206 โดยทำการผสม Sn63Pb37 ลงใน Sn96.5Ag3.5 และ Sn95Sb5 เป็นปริมาณ 0, 5, 10, 15 และ 20 wt.% ตามลำดับ โดยจะใช้โลหะบัดกรีหนา 200 μm บนแผ่นทองแดง (PCB) และบัดกรีโดยใช้วิธี Standard infra-red reflow พบว่าปริมาณการปนเปื้อนของตะกั่วไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงรอยต่อที่อุณหภูมิห้อง แต่จะส่งผลเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูง โดยโลหะบัดกรีที่ไม่ปนเปื้อนตะกั่วจะมีความแข็งแรงเฉือนสูงกว่าที่โลหะบัดกรีที่ปนเปื้อนตะกั่วประมาณ 15%

งานวิจัยของ Moon และคณะ [10] ได้ศึกษาผลกระทบของตะกั่วต่อพฤติกรรมการแข็งตัวในโลหะบัดกรี Sn- x Bi (x=5, 10, และ58 wt.%) โดยพบว่าการปนเปื้อนของตะกั่วเพียง 1% จะขยายช่วงอุณหภูมิการแข็งตัวเนื่องจากเกิดรูปแบบของสารประกอบ $Sn_{16}Pb_{32}Bi_{52}$ ที่มีจุดหลอมเหลวเพียง 95 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยของ Xianzhang Zeng [29] ได้ศึกษาการปนเปื้อนของตะกั่วบนโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วโดยการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิก โลหะบัดกรีที่นำมาวิเคราะห์คือ Sn-Ag, Sn-Ag-Cu, และ Sn-Bi ซึ่งจะพิจารณาจากการเย็นตัวของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด โลหะบัดกรี Sn-1.6Ag (Sn-Ag ยูเทคติก) มีอุณหภูมิยูเทคติก 221 °C แต่เมื่อเกิดการปนเปื้อนของตะกั่วตั้งแต่ 4 wt.% ขึ้นไปจะทำให้อุณหภูมิยูเทคติกของโลหะบัดกรีลดลงเหลือ 176 °C ส่วนโลหะบัดกรี Sn-Ag-Cu นั้น การวิเคราะห์ด้วยแผนภูมิเฟสจะซับซ้อนมากเนื่องจากมีองค์ประกอบของธาตุถึง 4 ชนิด จึงศึกษาเพียงเส้นลิควิดัส, เส้นโซลิดัส, และอุณหภูมิยูเทคติกของโลหะบัดกรี Sn-Ag-Cu (95.5Sn–3.8Ag–0.7Cu wt.%) ที่ถูกปนเปื้อนโดยโลหะบัดกรี Sn-Pb ยูเทคติกแทน โดยโลหะบัดกรี 95.5Sn–3.8Ag–0.7Cu นั้นมีอุณหภูมิยูเทคติกที่ 216 °C แต่เมื่อถูกปนเปื้อนโดยโลหะบัดกรี Sn-Pb ยูเทคติกปริมาณ 10 wt.% ขึ้นไปอุณหภูมิยูเทคติกจะลดลงเหลือ 176 °C สำหรับโลหะบัดกรี Sn-58Bi (Sn-Bi ยูเทคติก) นั้น เมื่อเกิดการปนเปื้อนของตะกั่วเพียงเล็กน้อย จะทำให้อุณหภูมิยูเทคติกลดลงเหลือเพียง 99 °C

งานวิจัยของ Wang และคณะ [30] ได้ศึกษาคุณสมบัติแรงดึงของโลหะบัดกรี Sn-3.0Ag-0.5Cu ที่ผสม Sn-37Pb ปริมาณ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 50, 75, และ 100 wt.% ตามลำดับ โดยทำการหลอมโลหะบัดกรีรวมกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยหล่อชิ้นงานเป็นทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ผลจากการทดสอบ Tensile พบว่าโลหะบัดกรี Sn-3.0Ag-0.5Cu มีค่าความเค้นจุดครากและความเค้นสูงสุดเป็น 38.9 และ 41.6 MPa ตามลำดับ ส่วนโลหะบัดกรี Sn-37Pb มีค่าความเค้นจุดครากและความเค้นสูงสุดเป็น 33 และ 39.6 MPa ตามลำดับ แต่ภายหลังการผสมกันของโลหะบัดกรีทั้งสองชนิดค่าความเค้นจุดครากและความเค้นสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ Sn-37Pb ที่เพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดเมื่อปริมาณ Sn-37Pb มีค่า 50 wt.% โดยมีค่าความเค้นจุดครากและความเค้นสูงสุดเป็น 52.3 และ 59.4 MPa ตามลำดับ

โดยอิทธิพลของธาตุ Bi, Ni, Ag, In, และ Pb ต่อคุณสมบัติของโลหะบัดกรี สรุปได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 อิทธิพลของธาตุ Bi, Ni, Ag, In, และ Pb ต่อคุณสมบัติของโลหะบัดกรี

ธาตุผสม	ผลกระทบ
Bi	ลดความหนาชั้นสารประกอบ
Ni	ลดความหนาชั้นสารประกอบ เพิ่มอัตราการกระจายตัว
Ag	ลดความหนาชั้นสารประกอบ เพิ่มอัตราการกระจายตัว
In	ลดความหนาชั้นสารประกอบ เพิ่มอัตราการกระจายตัว
Pb	เกิดสารประกอบ $Sn_{16}Pb_{32}Bi_{52}$ ลดความแข็งแรงของรอยต่อที่อุณหภูมิสูง

จากที่ได้กล่าวข้างต้นการเติมธาตุโลหะผสมเช่น Ni, Ag และ In ลงในโลหะบัดกรีส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของโลหะบัดกรีหลายประการและนำไปสู่การปรับปรุงโลหะบัดกรีและรอยเชื่อมการบัดกรี แม้ว่าโลหะบัดกรีหลายชนิดได้ถูกศึกษาไปแล้ว แต่ไม่มีชนิดใดเลยที่มีความสัมพันธ์กับ Sn-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Bi-Ni-X โดย X คือ Ag หรือ In ดังนั้นการพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-Bi-Ni-X จึงเป็นสิ่งที่ควรค่าอย่างยิ่ง นอกเหนือจากนี้การปนเปื้อนของตะกั่วเพียงเล็กน้อยสามารถส่งผลต่อคุณสมบัติต่างๆของรอยเชื่อมได้มาก ดังนั้นการศึกษาอิทธิพลเนื่องจากการปนเปื้อนของตะกั่วจึงเป็นสิ่งที่ไม่สามารถละเลยได้

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 การบัดกรี (Soldering)

การบัดกรีเป็นวิธีการประสานวัสดุชนิดหนึ่ง โดยใช้โลหะเติมที่มีจุดหลอมเหลวไม่เกิน 450 °C และมักจะเรียกโลหะเติมสำหรับการบัดกรีว่า โลหะบัดกรี (Solder) ในระหว่างการบัดกรีโลหะบัดกรีที่ถูกหลอมละลายจะกระจายเข้าไปที่รอยต่อระหว่างชิ้นงานด้วยแรงดึงตามรูเล็ก สำหรับข้อดีของการบัดกรีมีหลายประการ เช่น ใช้พลังงานต่ำเมื่อเทียบกับการเชื่อมหลอมหรือการแล่นประสาน และสามารถใช้พลังงานความร้อนได้หลากหลาย รอยบัดกรีที่ได้สามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดีและไม่ยอมให้อากาศหรือของเหลวผ่านรอยต่อ นอกจากนี้รอยต่อจากการบัดกรีสามารถที่จะซ่อมแซมหรือเปลี่ยนแปลงได้ง่าย สำหรับข้อเสียของการบัดกรีได้แก่ รอยต่อที่มีความแข็งแรงต่ำและมีความแข็งแรงน้อยลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

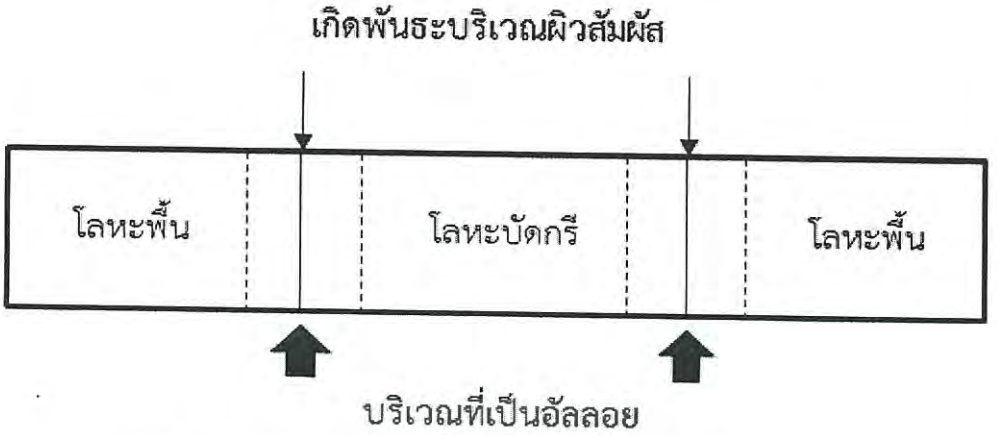
2.2.2 โลหะบัดกรี (Solder)

ในอดีตโลหะบัดกรีที่ใช้ส่วนใหญ่มักจะทำมาจากโลหะผสม (Alloys) ของดีบุกและตะกั่ว เนื่องจากธาตุทั้งสองชนิดมีจุดหลอมเหลวต่ำและมีราคาถูก และโลหะบัดกรีที่ได้จากการผสมดีบุกและตะกั่วมีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางทั้งในงานทางกลและทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น กระจายตัวบนผิวโลหะต่างๆได้ดี ให้รอยต่อที่มีความแข็งแรงและนำไฟฟ้าได้ดี อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันต่ำ และให้รอยบัดกรีที่มีความสวยงาม โลหะบัดกรีเหล่านี้มีส่วนผสมระหว่างดีบุกและตะกั่วในอัตราส่วนต่างๆกันไป ทำให้แต่ละอัตราส่วนมีอุณหภูมิลิควิดัสที่แตกต่างกันไป

อย่างไรก็ตามเนื่องจากความเป็นพิษของตะกั่วทำให้เกิดการพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-free solders) ขึ้นมาเพื่อใช้งานทดแทนโลหะบัดกรีแบบเดิม ตัวอย่างของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว เช่น กลุ่มโลหะผสมของดีบุก ทองแดง และเงิน และกลุ่มโลหะผสมของดีบุกและบิสมัท เป็นต้น

รอยบัดกรีจะเกิดขึ้นจากการใช้โลหะบัดกรีเป็นตัวกลางในการประสานโลหะที่ต้องการเชื่อมให้ติดกัน การบัดกรีจะก่อให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างชิ้นงานโลหะ (Base metal) และโลหะบัดกรี โดยจะเกิดการเกาะติดกันทางกลของโลหะบัดกรีกับความหยาบบนผิวหน้าของชิ้นงาน พร้อมทั้งเกิดพันธะโลหะระหว่างโลหะบัดกรีกับชิ้นงาน โดยปกติแล้วพันธะโลหะที่เกิดขึ้นจะมีความแข็งแรงมากกว่าการเกาะติดทางกล นอกจากนี้ในส่วนที่เกิดปฏิกิริยาจะพบการเกิดสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compounds) ของโลหะบัดกรีกับชิ้นงานด้วย ลักษณะการเกิดการประสานกันระหว่างชิ้นงานโลหะโดยใช้การบัดกรีแสดงดังรูปที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ลักษณะการเชื่อมประสานของโลหะบัดกรีกับชิ้นงาน [31]

ตะกั่วบัดกรีเป็นโลหะผสมระหว่างดีบุกและตะกั่วในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน โดยอาจมีโลหะอื่นๆ ผสม เช่น แอนติโมนี เงิน แคดเมียม อินเดียม และบิสมัท ที่ช่วยควบคุมสมบัติทางกลและทางฟิสิกส์ของตะกั่วบัดกรี เช่น ความแข็ง ความต้านทานการกัดกร่อน และช่วงของอุณหภูมิการหลอมเหลว ซึ่งจะถูกออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยดีบุกจะเริ่มหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 183 °C และกลายเป็นของเหลวอย่างสมบูรณ์ที่ 232 °C ส่วนตะกั่วนั้นจะเริ่มหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 183 °C และกลายเป็นของเหลวอย่างสมบูรณ์ที่ 327 °C หากใช้ดีบุกหรือตะกั่วเพียงอย่างใดอย่างหนึ่งในการบัดกรีจะไม่เหมาะสม เนื่องจากจุดหลอมเหลวที่สูงเกินไป แต่เมื่อนำดีบุกและตะกั่วมาผสมกันในอัตราส่วนที่พอเหมาะ จะทำให้ได้ตะกั่วบัดกรีที่มีจุดหลอมเหลวและช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวที่ต่ำลง ซึ่งอัตราส่วนระหว่างดีบุก 63 เปอร์เซ็นต์ และตะกั่ว 37 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักนั้น ทำให้ส่วนผสมนี้ไม่มีบริเวณที่เป็นสภาวะอ่อนตัวหลอมเหลว โดยจะเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นของเหลวทันทีที่อุณหภูมิ คือ 183 °C ซึ่งไม่นิยมในการใช้งานจริงเนื่องจากทำให้เกิดความเปราะภายใต้สภาวะการใช้งาน

อัตราส่วนที่นิยมใช้กันมากที่สุดของตะกั่วบัดกรีที่ใช้ในงานทางอิเล็กทรอนิกส์ คือ ดีบุก 60 เปอร์เซ็นต์ และตะกั่ว 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งเรียกว่าตะกั่วบัดกรีแบบ 60/40 ถูกจัดว่าเป็นตะกั่วแบบอ่อน โดยจะหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 188 °C และมีช่วงหลอมเหลวประมาณ 5 °C ซึ่งจะทำให้ได้ความแข็งแรงดีที่สุดและมีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าต่ำสุดด้วย สำหรับรอยต่อซึ่งจำเป็นต้องทนต่ออุณหภูมิสูงหรือต้องการความแข็งแรงทางกลมากๆ จำเป็นต้องใช้ตะกั่วบัดกรีแบบแข็ง ซึ่งประกอบไปด้วยอัตราส่วนของดีบุกต่อตะกั่ว 30/70 และมีช่วงหลอมเหลวที่ 255 ถึง 275 °C

2.2.3 โลหะพื้น (Base metal)

โลหะพื้นส่วนใหญ่จะเป็นเหล็กและทองแดง ส่วนอลูมิเนียมก็มีส่วนสำคัญเพราะมีน้ำหนักเบาแต่มีข้อเสียคือบัดกรียากกว่าเหล็กและทองแดง ดังแสดงในตารางที่ 2.2 แสดงถึงชนิดของโลหะต่อความยากง่ายในการบัดกรี แต่จะต้องคำนึงถึงชนิดของฟลักซ์ที่เหมาะสมด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ชนิดของโลหะต่อความยากง่ายในการบัดกรี [32]

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 ไททาเนียม แทนทาลัม แมกนีเซียม	เคลือบด้วยโลหะบัดกรีก่อน

โลหะบัดกรีที่เป็นดีบุก, แคดเมียม, และทองแดงจะง่ายต่อการเชื่อมประสานของโลหะบัดกรีโดยไม่ต้องทำความสะอาดก่อน ในส่วนของตะกั่วจะเกิดออกไซด์ที่ผิวเมื่ออยู่ในสภาพชื้น และอาจต้องทำความสะอาดก่อนบัดกรี และในส่วนของทองแดง, ทองเหลือง, บรอนซ์, และเหล็กจะเกิดอออกไซด์บางบริเวณ ซึ่งต้องทำความสะอาดหรือล้างด้วยกรดอ่อน ความจำเป็นในการทำความสะอาด จะขึ้นอยู่กับขอบเขตของผิวโลหะที่เกิดออกซิเดชันและความว่องไวของฟลักซ์

2.2.4 น้ำยาประสานหรือฟลักซ์ (Fluxes)

ฟลักซ์ที่ใช้ในการบัดกรีจะต้องเป็นสารเคมีที่สามารถหลอมเหลวที่อุณหภูมิบัดกรีและมีหน้าที่หลายประการ เช่น กำจัดออกไซด์และคราบสกปรกออกจากผิวหน้าของชิ้นงานที่จะทำการบัดกรี พร้อมทั้งทำหน้าที่ป้องกันการเกิดออกซิเดชันระหว่างการให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน นอกจากนี้ฟลักซ์ยังทำให้โลหะบัดกรีกระจายตัวได้ดีบนผิวชิ้นงานและยอมให้โลหะบัดกรีเข้ามาแทนที่ได้ โดยส่วนตกค้างของฟลักซ์หลังการบัดกรีจะต้องไม่กัดกร่อนรอยต่อของชิ้นงานรวมทั้งไม่นำไฟฟ้าด้วย ฟลักซ์สามารถแบ่งเป็นสองกลุ่มด้วยกันคือ

1. ฟลักซ์อินทรีย์ (Organic fluxes) ได้แก่ ยางไม้ (Natural rosin) แอลกอฮอล์ กรดอินทรีย์และเกลือของธาตุหมู่ 7 โดยทั่วไปแล้วฟลักซ์ในกลุ่มนี้ใช้กับการบัดกรีอุปกรณ์ไฟฟ้าหรืออิเล็กทรอนิกส์

2. ฟลักซ์อนินทรีย์ (Inorganic fluxes) ได้แก่ กรดและเกลืออนินทรีย์ชนิดต่างๆ โดยปกติจะใช้ฟลักซ์ชนิดนี้เมื่อมีปัญหาจากการเกิดออกซิเดชัน เนื่องจากฟลักซ์ชนิดนี้สามารถปกป้องรอยเชื่อมได้ค่อนข้างดี

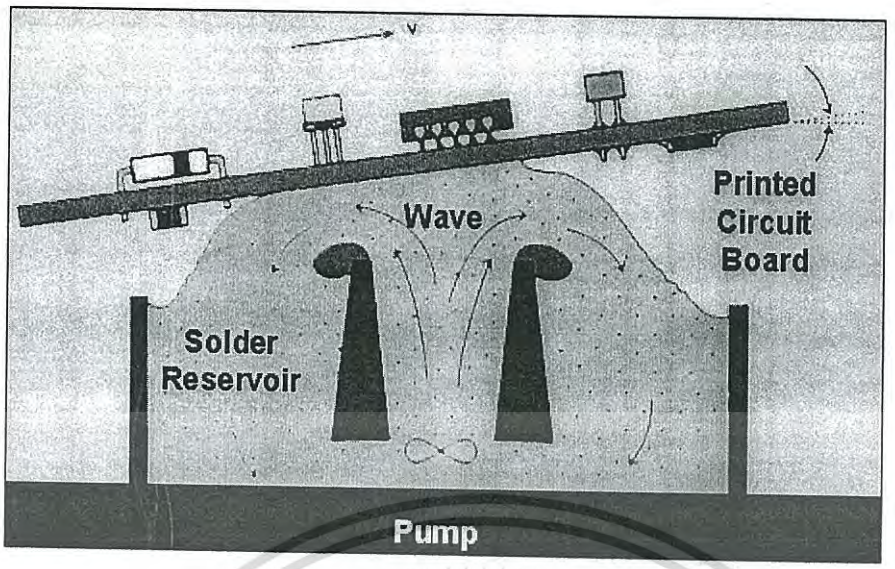
โดยหลังจากการบัดกรี ฟลักซ์ที่หลงเหลืออยู่จะถูกกำจัดออกไปโดยใช้สารละลายหรือตัวทำละลายเคมี

2.2.5 วิธีการบัดกรี (Soldering methods)

โดยทั่วไปแล้วนอกเหนือจากการบัดกรีด้วยมือ (Hand soldering) ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ยังมีวิธีการดังต่อไปนี้

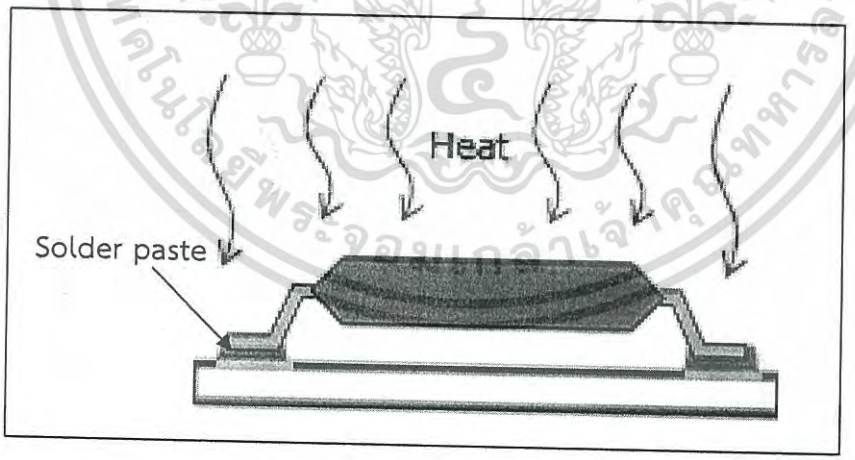
1. การบัดกรีแบบคลื่น (Wave soldering) เป็นการบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ลงบนแผ่นวงจรรวม (Printed circuit board : PCB) โดย PCB ที่มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ติดอยู่จะเคลื่อนที่ผ่านไปบนอ่างของโลหะบัดกรีหลอมเหลวที่ถูกพ่นเป็นคลื่นสัมผัสกับด้านล่างของแผ่น PCB เพื่อให้โลหะบัดกรีเชื่อมต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ากับวงจรดังแสดงในรูปที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 การบัดกรีแบบคลื่น [33]

2. การบัดกรีแบบรีโฟลว์ (Reflow soldering) โดยทั่วไปจะใช้ในการบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดติดตั้งบนพื้นผิวที่เรียกว่า Surface mount components กับ PCB ในกระบวนการนี้จะใช้โลหะบัดกรีที่อยู่ในรูปของครีม (Paste) โดยโลหะบัดกรีจะผสมอยู่กับฟลักซ์และตัวยึด (Binder) ซึ่งจะถูกสกรีนลงบนตำแหน่งที่ต้องการบน PCB แล้วจึงวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ลงบนโลหะบัดกรี หลังจากนั้น PCB จะถูกให้ความร้อนจนกระทั่งโลหะบัดกรีเกิดการหลอมละลายและเชื่อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ากับวงจรดังแสดงในรูปที่ 2.3 เมื่ออุณหภูมิลดลงโลหะบัดกรีก็จะกลายเป็นของแข็งที่สามารถนำไฟฟ้าได้



รูปที่ 2.3 การบัดกรีแบบรีโฟลว์ [34]

2.2.6 ข้อควรพิจารณาเบื้องต้นในการเลือกใช้โลหะบัดกรีแบบไร้สารตะกั่ว

สำหรับโลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมระหว่างดีบุกและตะกั่ว (Tin-lead) นั้น จะมีส่วนผสมที่นิยมใช้งานคือ 63Sn/37Pb ซึ่งมีข้อดีหลายประการ เช่น ราคาถูก จุดบัดกรีมีความแข็งแรง ความเงางาม และนำไฟฟ้าได้ดี เป็นต้น ดังนั้นการที่จะนำโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วมาใช้งานแทนตะกั่วบัดกรีชนิด 63Sn/37Pb นั้น มีข้อควรพิจารณาเบื้องต้นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ราคาของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วโดยทั่วไปจะสูงกว่าตะกั่วบัดกรี 63Sn/37Pb อย่างน้อย 35% ขึ้นไป เนื่องจากโลหะที่นำมาแทนตะกั่วจะเป็นโลหะที่หาได้ยาก และมีอยู่อย่างจำกัด เช่น บิสมัท (Bi) อินเดียม (In) หรือเงิน (Ag) เป็นต้น ซึ่งส่งผลให้ต้นทุนสินค้าสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าเป็นการใช้โลหะบัดกรีแบบแท่ง (Solder bar) สำหรับเครื่องบัดกรีแบบคลื่นหรือโลหะบัดกรีแบบเส้น (Solder wire) สำหรับการบัดกรีด้วยมือ จะมีปริมาณการใช้โลหะบัดกรีสูงกว่าโลหะบัดกรีแบบครีม (Solder paste) ซึ่งโดยทั่วไปปริมาณโลหะบัดกรีแบบแท่งหรือแบบเส้นที่ใช้จะเป็นส่วนประกอบหลักของต้นทุนการผลิต

2. จุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว โดยทั่วไปจะสูงกว่าตะกั่วบัดกรี การที่โลหะบัดกรีมีจุดหลอมเหลวสูงก็หมายถึงเราต้องปรับตั้งอุณหภูมิของเครื่องหลอมตะกั่วให้สูงขึ้นด้วย ซึ่งอาจทำให้ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์เสียหายได้ หรืออาจทำให้แผงวงจรเกิดการเปลี่ยนสีหรือเสียรูปเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงเกินไป

3. ความสามารถในการนำไฟฟ้าต้องดีพอที่จะไม่ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ลดลง

4. สามารถถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ดี

5. ต้องมีความเป็นพิษต่อสภาพแวดล้อมและร่างกายต่ำ ซึ่งเป็นจุดประสงค์หลักของการใช้โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-free solder)

6. ต้องใช้ได้ดีกับเครื่องหลอมตะกั่วที่มีอยู่ โดยไม่ต้องดัดแปลงมากหรือต้องซื้อระบบใหม่ อาจยอมรับการดัดแปลงเล็กน้อย เช่น เพิ่มระบบจ่ายก๊าซไนโตรเจน (N_2) ในเครื่องบัดกรีแบบคลื่นหรือเครื่องบัดกรีแบบ Reflow เพื่อปรับปรุงคุณภาพของรอยบัดกรี เนื่องจากต้นทุนของการติดตั้งระบบก๊าซไนโตรเจนโดยทั่วไปจะไม่สูงมากนัก

7. คุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ความแข็งแรง ความทนทานของรอยบัดกรีต้องไม่ด้อยไปกว่าตะกั่วบัดกรีชนิด 63Sn/37Pb

8. ควรมีจุดหลอมเหลวคงที่ เนื่องจากในการผลิตสินค้าปริมาณมาก (Mass volume) จะต้องมีการควบคุมความผันแปรต่างๆในกระบวนการผลิต เพื่อไม่ให้ปริมาณของเสียในการผลิตมีมากเกินไป โดยการผสมโลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมของโลหะตั้งแต่ 4 ชนิดขึ้นไปจะควบคุมส่วนผสมให้คงที่ได้ยาก ส่งผลให้มีจุดหลอมเหลวที่มีลักษณะเป็นช่วงอุณหภูมิไม่คงที่ ดังนั้นการเลือกใช้โลหะบัดกรีประเภทนี้จะทำให้ประสบปัญหาในกระบวนการผลิตได้

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

10. โลหะที่จะนำมาทดแทนสารตะกั่วจะต้องหาได้ง่าย ผู้ผลิตสามารถผลิตออกมาแข่งขันกันได้อย่างกว้างขวาง ซึ่งจะส่งผลให้ราคาลดลงในอนาคต

11. ผู้ผลิตแผ่นวงจรพิมพ์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดติดตั้งบนพื้นผิว (Surface mounted devices : SMD) หลายรายยังคงไม่สามารถเลิกสารตะกั่วได้ในเวลาอันสั้น ทำให้ขั้วของอุปกรณ์ SMD หรือลายวงจรบนแผ่นวงจรพิมพ์บางชนิดยังคงมีสารตะกั่วเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงความสามารถในการเชื่อมประสานกันระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วกับสารตะกั่วที่อยู่บนขั้วอุปกรณ์ SMD และแผ่นวงจรพิมพ์ด้วย ซึ่งถ้าไม่สามารถเชื่อมประสานกันได้ดีก็อาจทำให้จุดบัดกรีนั้นไม่แข็งแรงเพียงพอต่อการนำไปใช้งานหรือมีผลกับการใช้งานของผลิตภัณฑ์ในระยะยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.7 โลหะทดแทนสารตะกั่ว

โลหะบัดกรีโดยทั่วไปจะมีส่วนผสมระหว่างโลหะตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปโดยมีดีบุกเป็นส่วนผสมหลัก เนื่องจากดีบุกมีราคาถูกและมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ นอกจากนี้ดีบุกยังเป็นส่วนผสมหลักของตะกั่วบัดกรีที่นิยมใช้ คือ 63Sn/37Pb

โลหะที่มีการพัฒนาและนำมาทดแทนสารตะกั่ว โดยนำมาผสมกับดีบุกมีหลายชนิด เช่น เงิน (silver: Ag), อินเดียม (Indium: In), สังกะสี (Zinc: Zn), พลวง (Antimony: Sb), ทองแดง (Copper: Cu), บิสมัท (Bismuth: Bi) เป็นต้น ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติบางประการของโลหะทดแทนตะกั่ว [32]

โลหะ	ราคา โดยประมาณ (US$) ต่อปอนด์	ความหนาแน่นที่ อุณหภูมิ 25 °C (ปอนด์ต่อลูกบาศก์นิ้ว)	จำนวนที่สามารถ ผลิตได้ต่อปี (ล้านปอนด์)	ความยากง่ายใน การหามาใช้งาน
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

สาเหตุที่โลหะดังกล่าวถูกนำมาพิจารณาเนื่องจากเมื่อนำโลหะเหล่านี้มาผสมกับดีบุกแล้ว จุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีมีแนวโน้มลดลง และมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกายภาพที่ดีพอเป็นที่ยอมรับได้ นอกจากนี้ตารางที่ 2.3 ยังได้แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติบางประการของโลหะเหล่านี้ เช่น ราคาต่อน้ำหนักหนึ่งปอนด์, ความหนาแน่น, จำนวนที่สามารถผลิตได้ต่อปี, และความยากง่ายในการหามาใช้งาน

นอกจากโลหะชนิดต่างๆที่กล่าวมาแล้ว ผู้ผลิตหลายรายก็ได้มีการเสนอส่วนผสมแบบต่างๆออกมามากมายในปัจจุบัน แต่พิจารณาสรุปเพียง 12 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 ส่วนผสมต่างๆที่สามารถนำมาทดแทนโลหะบัดกรีชนิดที่มีสารตะกั่ว [32]

ส่วนผสม	จุดหลอมเหลว (°C)	ราคา (US$) ต่อปอนด์	ราคา (US$) ต่อลูกบาศก์นิ้ว	ความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 25 °C (ปอนด์ต่อลูกบาศก์นิ้ว)
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
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:

- ส่วนผสมของโลหะบัดกรีทุกชนิดในตารางจะมีดีบุกเป็นส่วนประกอบหลัก
- ราคาต่อหนึ่งลูกบาศก์นิ้วเป็นราคาที่นิยมใช้ในการเปรียบเทียบราคาของตะกั่วเหลว

โดยส่วนผสมบางชนิดในตารางที่ 2.4 สามารถพิจารณาจากข้อดีข้อเสียต่างๆ จากข้อมูลดังต่อไปนี้

อินเดียม (Indium) เป็นธาตุที่สามารถทำให้จุดหลอมเหลวของส่วนผสมลดลงได้ดี เมื่อนำมาผสมกับดีบุก มีคุณสมบัติทางกายภาพและความสามารถในการเชื่อมประสานที่ดี แต่อินเดียมเป็นธาตุที่มีจำนวนจำกัดและเริ่มขาดแคลนในปัจจุบัน

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

บิสมัท (Bismuth) เป็นธาตุที่สามารถทำให้จุดหลอมเหลวของส่วนผสม (Alloy) ลดลงได้ดีเหมือนอินเดียม และยังมีคุณสมบัติทางกายภาพ ความสามารถในการเชื่อมประสานที่ดีมาก แต่ข้อเสียก็คือจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีที่มีบิสมัทเป็นส่วนผสมจะต่ำเกินไป โดยเฉพาะถ้าบิสมัทมีการปนเปื้อนกับตะกั่วที่อยู่บนแผ่นวงจรพิมพ์หรือขั้วอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะเกิดเป็นส่วนผสมของ Sn/Pb/Bi ซึ่งจุดหลอมเหลวต่ำถึง 96°C จึงทำให้ไม่เหมาะกับการใช้งาน อาจมีผลให้จุดบัดกรีไม่แข็งแรง เกิดมีรอยแตกร้าวได้ง่าย นอกจากนี้ราคาของบิสมัทในปัจจุบันยังคงมีราคาสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

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

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

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

การพิจารณาเลือกโลหะบัดกรีสำหรับการบัดกรีด้วยมือมีเกณฑ์คล้ายๆกับการบัดกรีแบบคลื่น คือ ในเรื่องราคาและจุดหลอมเหลวที่ไม่สูงเกินไป ทำให้ไม่ต้องปรับอุณหภูมิของหัวแร้งให้สูงตามไปด้วย ในกรณีของตะกั่วแบบครีม (Solder paste) ที่ใช้กับเครื่องบัดกรีแบบ Reflow เรื่องของราคาไม่ใช่เกณฑ์สำคัญในการพิจารณา เนื่องจากราคาของตะกั่วเหลวจะเป็นอัตราส่วนที่น้อยเมื่อเทียบกับต้นทุนการผลิตรวม ดังนั้นการพิจารณาจะเน้นจุดหลอมเหลวที่ต่ำเป็นสำคัญ

นอกจากนี้ยังมีข้อควรพิจารณาในกระบวนการผลิตนั่นคือการพิจารณาการปรับปรุงสิ่งต่างๆ ในกระบวนการผลิตหลายประการ เช่น การปรับตั้งเครื่องจักรต่างๆให้เหมาะสมกับชนิดของโลหะบัดกรีที่เลือกใช้ โดยทั่วไปโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วจะมีจุดหลอมเหลวที่สูงกว่าตะกั่วบัดกรีชนิด 63Sn/37Pb ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่บนแผงวงจรได้ ดังนั้นจึงควรเพิ่มความระมัดระวังในเรื่องของอุณหภูมิบัดกรีเป็นพิเศษ

การพัฒนาและฝึกอบรมพนักงานถึงวิธีการบัดกรีด้วยมือ และวิธีการซ่อมของเสียก็เป็นสิ่งสำคัญ การบัดกรีด้วยมือโดยใช้โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว โดยทั่วไปจะต้องใช้อุณหภูมิของหัวแร้งที่สูงขึ้น ระยะเวลาในการจี้หัวแร้งนานขึ้น เพื่อให้โลหะบัดกรีมีเวลานานพอที่จะไหลไปเชื่อมกับขั้วของอุปกรณ์ ดังนั้นควรจัดให้มีการฝึกอบรมให้แก่พนักงานที่เกี่ยวข้อง ถึงวิธีการบัดกรีที่ถูกต้อง บางโรงงานอาจมีการใช้โลหะบัดกรีหลายชนิด ทั้งแบบมีและไม่มีสารตะกั่วเป็นส่วนประกอบ ก็จำเป็นที่จะต้องมีระบบแจ้งให้พนักงานที่ทำการซ่อมของเสียได้ทราบชนิดของโลหะบัดกรีที่จะนำมาใช้ (Tracking system) มาตรฐานและเงื่อนไขในการตรวจสอบคุณภาพ ก็ควรจะมีการทบทวนใหม่ คือต้องมีการพัฒนาความรู้ความเข้าใจในมาตรฐานคุณภาพใหม่ให้แก่พนักงานทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งผู้บริหารและลูกค้า

การเปลี่ยนมาใช้โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์จำเป็นที่จะต้องมีการวางแผน และทบทวนสิ่งต่างๆทั้งในส่วนของต้นทุน กระบวนการผลิต และระบบควบคุมคุณภาพอย่างรอบคอบโดยวิศวกรผู้รับผิดชอบ เพื่อให้การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีความราบรื่นมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

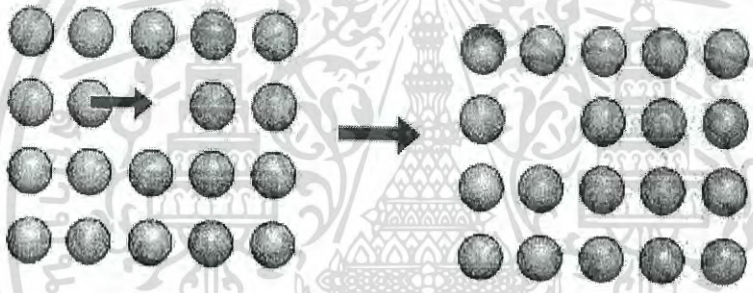
148678

ที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ และควรเริ่มต้นจากผลิตภัณฑ์ที่ไม่สลับซับซ้อนและมีวงจรชีวิตสั้นเป็นอันดับแรก

2.2.8 การแพร่ (Diffusion)

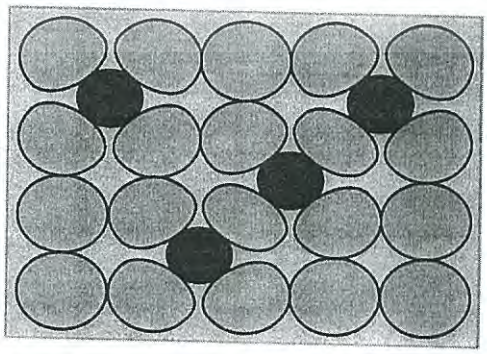
ในระดับอะตอมการแพร่เป็นการเคลื่อนที่ของอะตอมจากตำแหน่งแลตทิซหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง โดยการแพร่ในโลหะบริสุทธิ์อะตอมที่เคลื่อนย้ายตำแหน่งจะเป็นชนิดเดียวกันเรียกว่าการแพร่ในตัวเอง (Self-diffusion) ซึ่งไม่สามารถสังเกตหรือตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมทางเคมีได้ โดยกลไกการแพร่ในโลหะแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ

1. การแพร่โดยอาศัยช่องว่าง (Vacancy diffusion) เป็นกลไกการเปลี่ยนตำแหน่งของอะตอมจากตำแหน่งแลตทิซเดิมไปยังตำแหน่งแลตทิซข้างๆที่เป็นช่องว่างดังแสดงในรูปที่ 2.4 กระบวนการนี้จำเป็นต้องมีช่องว่างในวัสดุ โดยการแพร่โดยอาศัยช่องว่างจะเกิดได้มากน้อยเพียงใดนั้น ขึ้นอยู่กับปริมาณตำหนิในวัสดุ ทั้งนี้โลหะที่มีอุณหภูมิสูงจะมีความหนาแน่นของช่องว่างในระดับที่สูงพอสมควร เนื่องจากต้องมีอะตอมที่กำลังแพร่และช่องว่างที่ต้องแลกเปลี่ยนตำแหน่งกัน ดังนั้นการแพร่ของอะตอมในทิศหนึ่งจึงหมายถึงการเคลื่อนที่ช่องว่างในทิศทางตรงกันข้ามด้วย โดยการแพร่ในตัวเองและการแพร่ของอะตอมต่างชนิดสามารถเกิดได้ด้วยกลไกเดียวกันนี้



รูปที่ 2.4 กลไกการแพร่โดยอาศัยช่องว่าง [35]

2. การแพร่แบบแทรกที่ (Interstitial diffusion) เป็นกลไกการเคลื่อนที่ของอะตอมจากตำแหน่งแทรกที่ (Interstitial diffusion) ไปยังตำแหน่งข้างเคียงที่ยังว่างอยู่ กลไกนี้จะพบในการแพร่ของอะตอมต่างชนิดของธาตุมลทิน เช่น ไฮโดรเจน คาร์บอน ไนโตรเจน และออกซิเจน ซึ่งมีอะตอมขนาดเล็กพอที่จะแทรกเข้าไปในตำแหน่งระหว่างอะตอม (Interstitial position) ได้ โดยเรียกปรากฏการณ์นี้เรียกว่าการแพร่แบบแทรกที่ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กลไกการแพร่แบบแทรกที่ [36]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.8.1 การแพร่ในสภาวะคงตัว

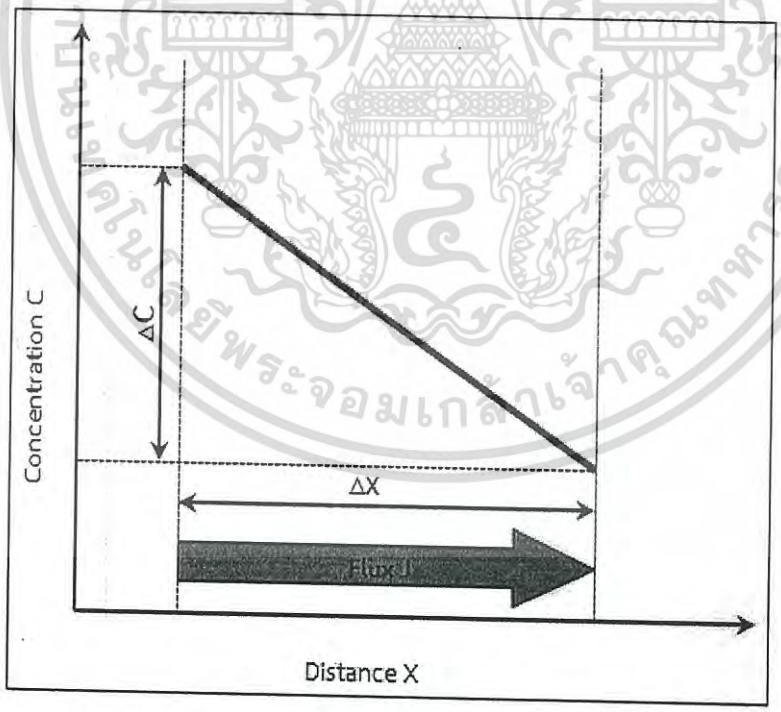
การแพร่เป็นกระบวนการที่ต้องใช้เวลา กล่าวคือ ในเชิงมหภาค (Macro) แล้วปริมาณของธาตุที่จะถูกขนส่ง (ขนย้าย) ภายในอีกธาตุหนึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลา โดยมากแล้วเราจำเป็นต้องทราบว่าการแพร่เกิดได้เร็วเท่าไร อัตราการขนถ่ายมวลเป็นเท่าไร อัตราเร็วนี้มักถูกแสดงด้วยค่าฟลักซ์การแพร่ (Diffusion flux: J) ซึ่งมีนิยามคือ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

$$J = \frac{M}{At} \tag{2.1}$$

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

$$J = \frac{1}{A}\frac{dM}{dt} \tag{2.2}$$

ในกรณีที่ฟลักซ์การแพร่ไม่เปลี่ยนไปตามเวลาจะเกิดสภาวะคงตัวขึ้น ตัวอย่างหนึ่งของการแพร่ในสภาวะคงตัว ได้แก่ การแพร่อะตอมของก๊าซผ่านแผ่นโลหะโดยที่ความเข้มข้น (หรือความดัน) ของก๊าซที่กำลังแพร่ถูกรักษาไว้ให้คงที่ ณ ผิวของแผ่นโลหะทั้งสองด้าน



รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแบบเส้นตรง [37]

เมื่อพล็อตค่าความเข้มข้น (C) เทียบกับตำแหน่งหรือระยะทางภายในของแข็ง (x) จะได้เส้นโค้งที่เรียกว่า รูปแบบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นหรือโปรไฟล์ของความเข้มข้น (Concentration

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

profile) ค่าความชันของเส้นโค้งนี้ ณ จุดหนึ่งๆ เรียกว่า อัตราผลต่างความเข้มข้นหรือเกรเดียนต์ของความเข้มข้น (Concentration gradient)

$$\text{Concentration gradient} = \frac{dC}{dx} \tag{2.3}$$

ในกรณีโปรไฟล์ของความเข้มข้นเป็นเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.6 สามารถเขียนได้เป็น

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

คณิตศาสตร์ของการแพร่ในสภาวะคงตัวในทิศทางเดียว (x) มีความสัมพันธ์ คือ ฟลักซ์การแพร่แปรผันตรงกับเกรเดียนต์ของความเข้มข้น ดังสมการ

$$J = -D\frac{dC}{dx} \tag{2.5}$$

ค่าคงที่ของการแปรผันตรง (D) เรียกว่า สัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ซึ่งมีหน่วยเป็นตารางเมตรต่อวินาที เครื่องหมายลบในสมการระบุทิศทางของการแพร่ คือ การแพร่จะแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำนั่นเอง สมการที่ 2.5 นั้นเรียกว่ากฎข้อที่หนึ่งของฟิก (Fick's first law)

2.2.8.2 การแพร่ในสภาวะไม่คงตัว (Non-steady-state diffusion)

สภาพการแพร่ที่เกิดขึ้นจริงมักเป็นแบบไม่คงตัว นั่นคือ ฟลักซ์การแพร่และอัตราผลต่างความเข้มข้น ณ จุดหนึ่งๆในของแข็งมีค่าแปรผันไปตามเวลา และมีการสะสมหรือลดลงของสารที่กำลังแพร่ ณ จุดนั้นเกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขของสภาวะคงตัว สมการที่ 2.5 ไม่เหมาะสม จึงใช้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย

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

ซึ่งรู้จักกันในนาม กฎข้อที่สองของฟิก (Fick's second law) ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้น (ซึ่งต้องตรวจสอบเป็นกรณี ในการแพร่ของแต่ละสถานการณ์) สมการที่ 2.6 จะถูกทำให้ง่ายขึ้นและเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \tag{2.7}$$

ผลเฉลยของสมการนี้ (ความเข้มข้นที่เป็นฟังก์ชันของตำแหน่งและเวลา) จะถูกหาได้ก็ต่อเมื่อมีการระบุเงื่อนไขขอบเขตทางกายภาพที่เหมาะสม ผลเฉลยในกรณีสำคัญที่พบในทางปฏิบัติกรณีหนึ่ง ได้แก่ กรณีที่เรียกว่า ของแข็งแบบเซมิอินฟินิต (Semi-infinite solid) ซึ่งความเข้มข้นที่ผิวของแข็งถูกรักษาไว้ให้คงที่ตลอดเวลา โดยส่วนมากแล้ว แหล่งกำเนิดของอะตอมที่จะแพร่ในของแข็งดังกล่าวมักมาจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฟสของก๊าซ ซึ่งมีค่าความดันย่อยถูกรักษาไว้ให้คงที่ ณ ผิวของแข็งนั่นเอง นอกจากนี้ยังมีสมมติฐานอื่นอีก ได้แก่

1. ก่อนเกิดการแพร่ สารที่จะแพร่ในของแข็งนั้นมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอตลอดชิ้นของแข็ง ด้วยความเข้มข้น C_0

2. ค่าของ x (ตัวแปรบอกตำแหน่ง) เป็นศูนย์ที่ผิวของแข็ง และเพิ่มค่าขึ้นตามระยะลึกเข้าไปในของแข็ง

3. เวลาเป็นศูนย์ ณ เวลาที่เริ่มมีการแพร่เกิดขึ้น

เงื่อนไขขอบเขตดังกล่าว เขียนได้เป็น

ณ. $t = 0$, $C = C_0$ ณ ตำแหน่ง $0 \leq x \leq \infty$

เมื่อ $t > 0$, $C = C_s$ (ความเข้มข้นที่ผิวคงที่) ณ $x = 0$

$C = C_0$ ณ $x = \infty$

เมื่อแทนค่าเงื่อนไขขอบเขตเหล่านี้ลงในสมการที่ 2.7 จะได้ผลคือ

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

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

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

เมื่อ

$$z = \frac{x}{2}\sqrt{Dt} \tag{2.10}$$

เกาเซียนเออร์เรอร์ฟังก์ชันหาได้จากการเปิดตารางค่าเออร์เรอร์ฟังก์ชันเทียบกับค่า $x/2\sqrt{Dt}$ ดังแสดงในตารางที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 ค่าของเออร์เรอร์ฟังก์ชัน [38]

Z	erf(z)	Z	erf(z)	Z	erf(z)
0.00	0.0000	0.55	0.5633	1.30	0.9340
0.025	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
0.45	0.4755	1.10	0.8802	2.60	0.9998
0.50	0.5205	1.20	0.9103	2.80	0.9999

2.2.8.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการแพร่

สารที่แพร่ (Diffusion species) ขนาดของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ จะเป็นดัชนีชี้วัดความเร็วที่อะตอมนั้นๆจะแพร่ไปได้ ทั้งกรณีการแพร่ในตัวเองและการแพร่ระหว่างอะตอมต่างชนิดในระบบโลหะบางระบบ ชนิดของสาร (อะตอม) ที่แพร่เองและตัวโลหะแม่ล้วนมีผลต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ ยกตัวอย่างเช่น การแพร่ในตัวเองและการแพร่ของคาร์บอน (อะตอมต่างชนิด) ในเหล็กแอลฟาที่ 500°C มีความแตกต่างกันมาก โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนมีค่าสูงกว่ามาก เนื่องมาจากเป็นการแพร่แบบแทรกที่

อุณหภูมิ (Temperature) เนื่องจากการแพร่ในระดับอะตอมเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของอะตอม อุณหภูมิจึงมีผลรุนแรงที่สุดต่อสัมประสิทธิ์และอัตราเร็วของการแพร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.9 เฟสไดอะแกรมของโลหะบัดกรี

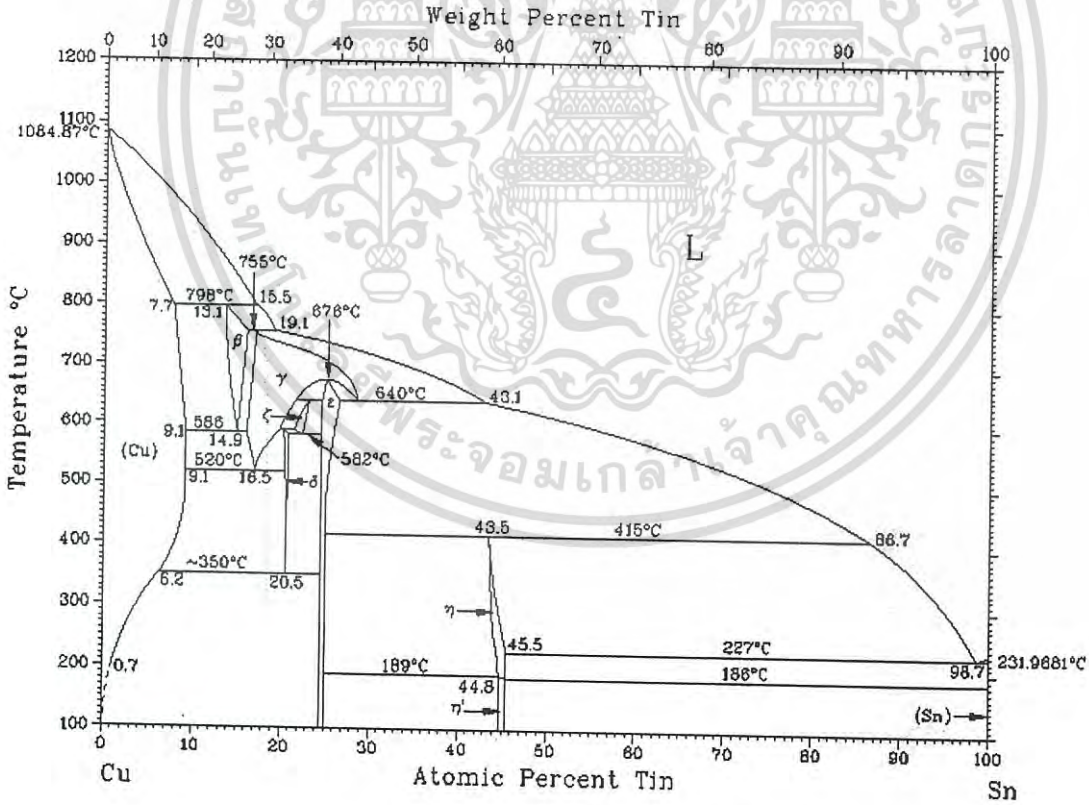
2.2.9.1 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก – ทองแดง (Sn – Cu)

หนึ่งในปฏิกิริยาที่สำคัญของโลหะผสมดีบุก – ทองแดง ก็คือปฏิกิริยายูเทคติกที่อุณหภูมิ 226.8°C ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยจุดยูเทคติกนี้ของเหลวจะเปลี่ยนไปเป็นเฟสของแข็ง 2 เฟสคือสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 กับเฟส Sn-rich โดยมีสมการของปฏิกิริยายูเทคติกดังนี้

$$L \longrightarrow Cu_6Sn_5 + Sn \qquad (2.12)$$

โดยในปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะผสมดีบุก – ทองแดง แต่ละเฟสจะมีส่วนผสมดังนี้

เฟส	atom%Cu	atom%Sn
Liquid	0.3	98.7
Cu_6Sn_5	54.55	45.45
Sn	0.01	99.99



รูปที่ 2.7 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก – ทองแดง [39]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

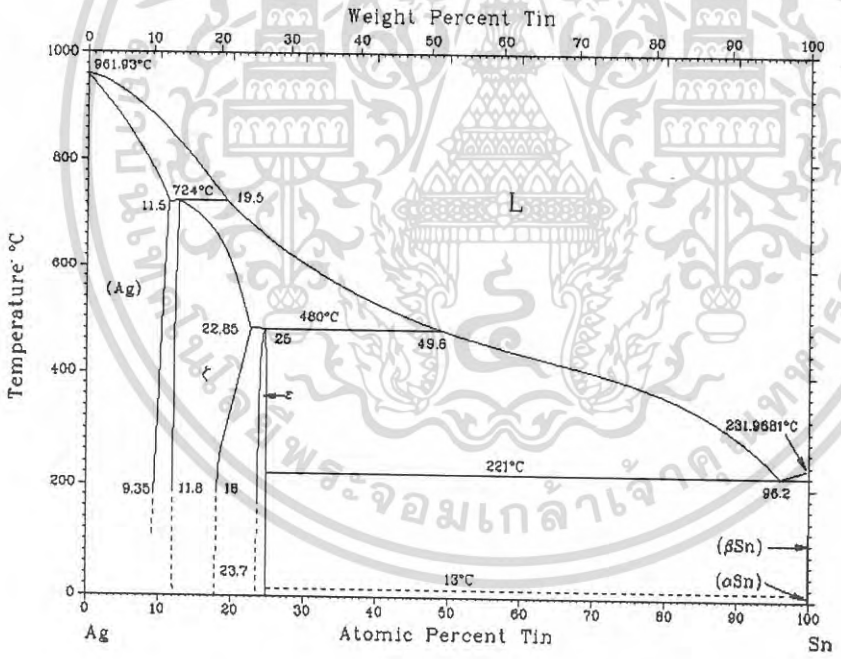
2.2.9.2 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก – เงิน (Sn-Ag)

ปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะผสมดีบุก – เงิน จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 220.3 °C ซึ่งเรียกว่าอุณหภูมิยูเทคติก (Eutectic temperature) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยอุณหภูมิยูเทคติกเป็นอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่โลหะยังคงสถานะเป็นของเหลว ซึ่งสภาวะที่จุดยูเทคติกจะทำให้เฟสของเหลวเปลี่ยนสภาพเป็นเฟสของแข็ง 2 เฟส โดยปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะผสมดีบุกและเงินจะเกิดเฟสของสารประกอบเชิงโลหะ Ag_3Sn และเฟส Sn-rich ซึ่งมีสมการของปฏิกิริยายูเทคติกดังนี้

$$L \longrightarrow Ag_3Sn + Sn \qquad (2.11)$$

โดยในปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะผสม ดีบุก – เงิน แต่ละเฟสจะมีส่วนผสมดังนี้

เฟส	atom%Ag	atom%Sn
Liquid	3.8	96.2
Ag_3Sn	75	25
Sn	0.07	99.93

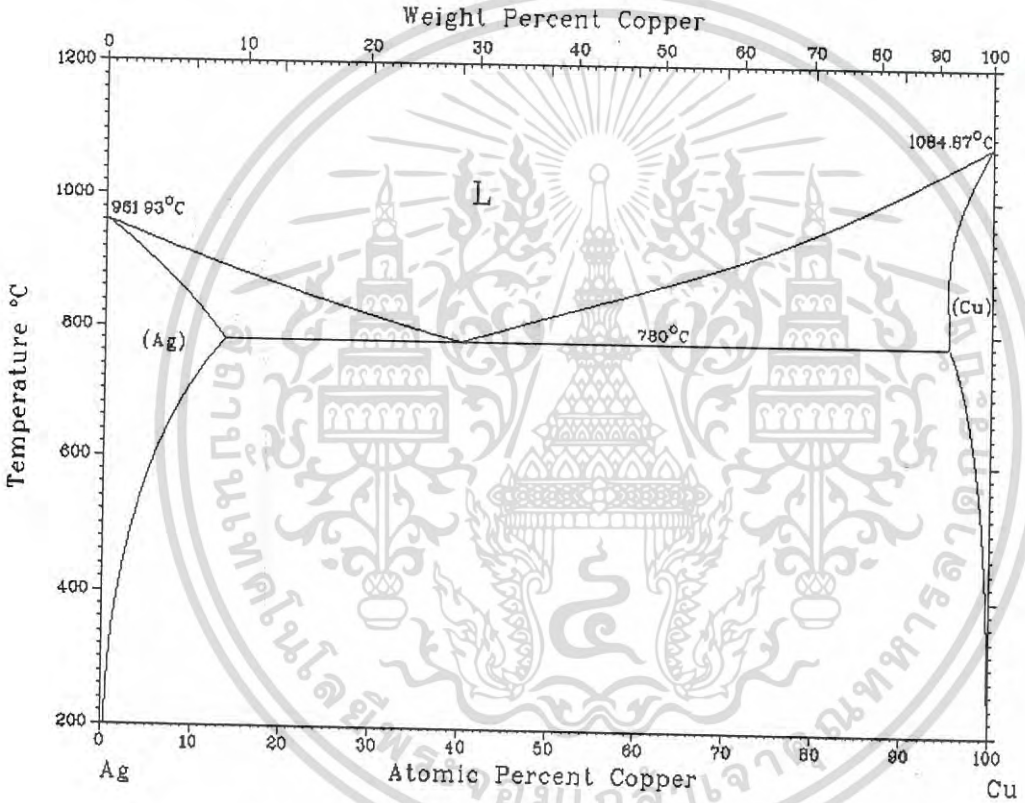


รูปที่ 2.8 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก – เงิน [40]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.9.3 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมเงิน – ทองแดง (Ag – Cu)

โลหะผสมทั้งสองนี้จะไม่สามารถเกิดการละลายในสภาวะของแข็งสมบูรณ์ แม้ว่าโลหะทั้งสองจะมีโครงสร้างผลึกแบบเดียวกัน (FCC) โดยที่โครงสร้างผลึกของโลหะทั้งสองชนิดสามารถรองรับอะตอมของโลหะอีกชนิดได้ในปริมาณที่น้อย ซึ่งความสามารถในการละลายจะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ ดังนั้นจึงมีสารละลายของแข็งสองชนิดคือ สารละลายของแข็งที่มีเงินอยู่มาก (Ag – rich) และสารละลายของแข็งที่มีทองแดงอยู่มาก (Cu- rich) ซึ่งสารละลายของแข็งทั้งสองชนิดถูกจัดว่าเป็นสารละลายของแข็งชนิดละลายได้บางส่วน (Partial solid solution) โดยกำหนดสัญลักษณ์เป็นอัลฟา (α) และเบตา (β) จุดสำคัญของเฟสไดอะแกรมระหว่างเงินกับทองแดงคือจุดยูเทคติกที่อุณหภูมิ 780 °C และมีส่วนผสมของเงิน 71.9% โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมเงิน – ทองแดง [39]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

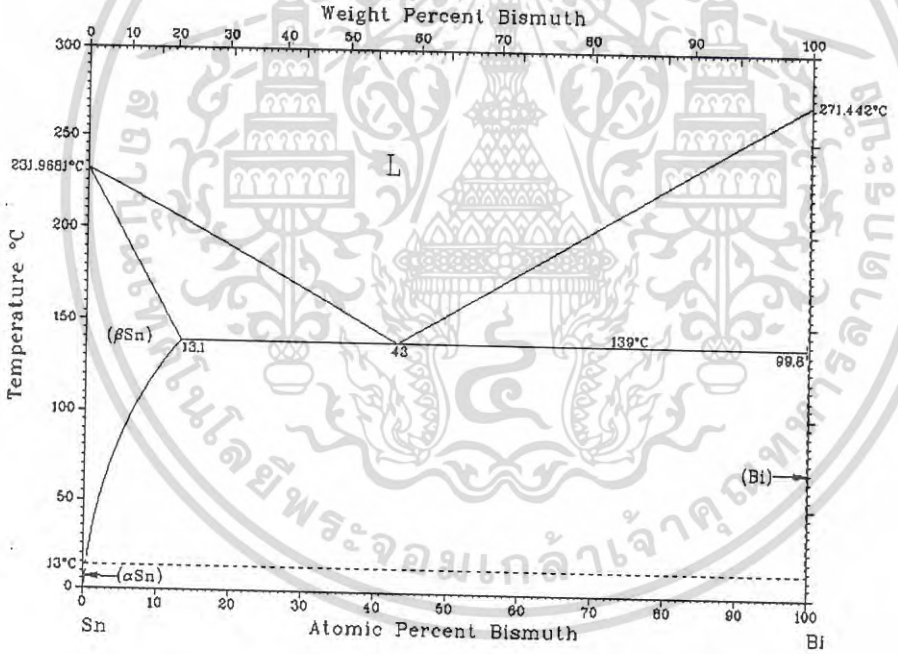
2.2.9.4 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก – บิสมัท (Sn – Bi)

โลหะผสมทั้งสองนี้จะไม่สามารถเกิดการละลายในสภาวะของแข็งสมบูรณ์ โดยความสามารถในการละลายของ Bi ใน Sn นั้นมีน้อยมาก จุดสำคัญของเฟสไดอะแกรมระหว่างดีบุกกับบิสมัทคือจุดยูเทคติกที่อุณหภูมิ 139 °C และมีส่วนผสมของบิสมัท 43% โดยอะตอม ดังแสดงในรูปที่ 2.10

$$L \longrightarrow Bi + Sn \tag{2.13}$$

โดยในปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะผสมดีบุก – บิสมัท แต่ละเฟสจะมีส่วนผสมดังนี้

เฟส	atom%Bi	atom%Sn
Liquid	43	57
Bi	99.8	0.2
Sn	13.1	86.9



รูปที่ 2.10 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก – บิสมัท [40]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

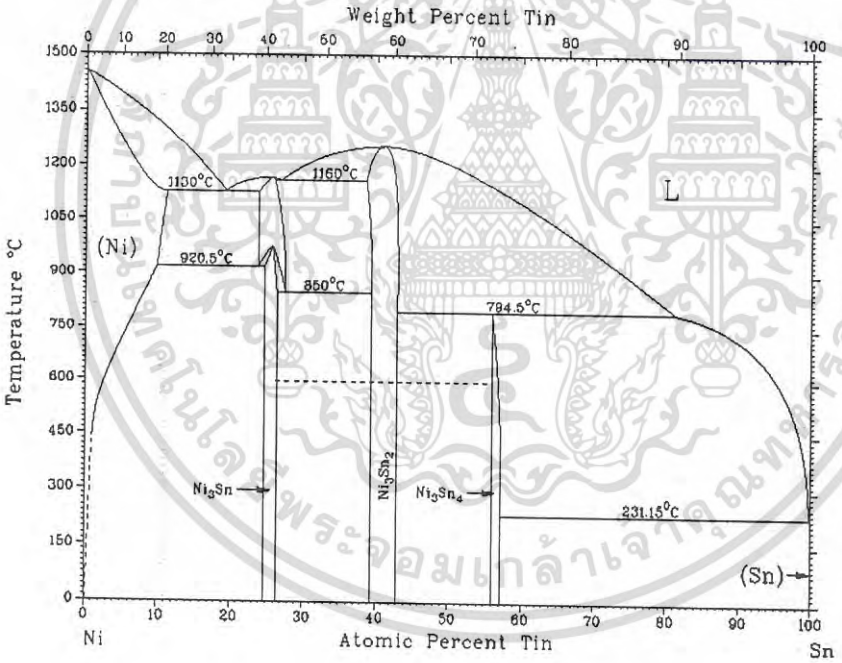
2.2.9.5 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก – นิเกิล (Sn – Ni)

ปฏิกิริยาที่สำคัญของโลหะผสมดีบุก – นิเกิล คือปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 231.15 °C ซึ่งเป็นปฏิกิริยายูเทคติก ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ที่จุดยูเทคติกนี้ของเหลวจะเปลี่ยนไปเป็นของแข็ง 2 เฟส ได้แก่ สารประกอบเชิงโลหะ Ni_3Sn_4 กับเฟส Sn โดยสมการของปฏิกิริยายูเทคติกคือ

$$L \longrightarrow Ni_3Sn_4 + Sn \qquad (2.14)$$

โดยในปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะผสมดีบุก - นิเกิล แต่ละเฟสจะมีส่วนผสมดังนี้

เฟส	atom%Ni	Atom%Sn
Liquid	0.33	99.67
Sn	0.11	99.99
Ni_3Sn_4	42.86	57.14



รูปที่ 2.11 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก – นิเกิล [40]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

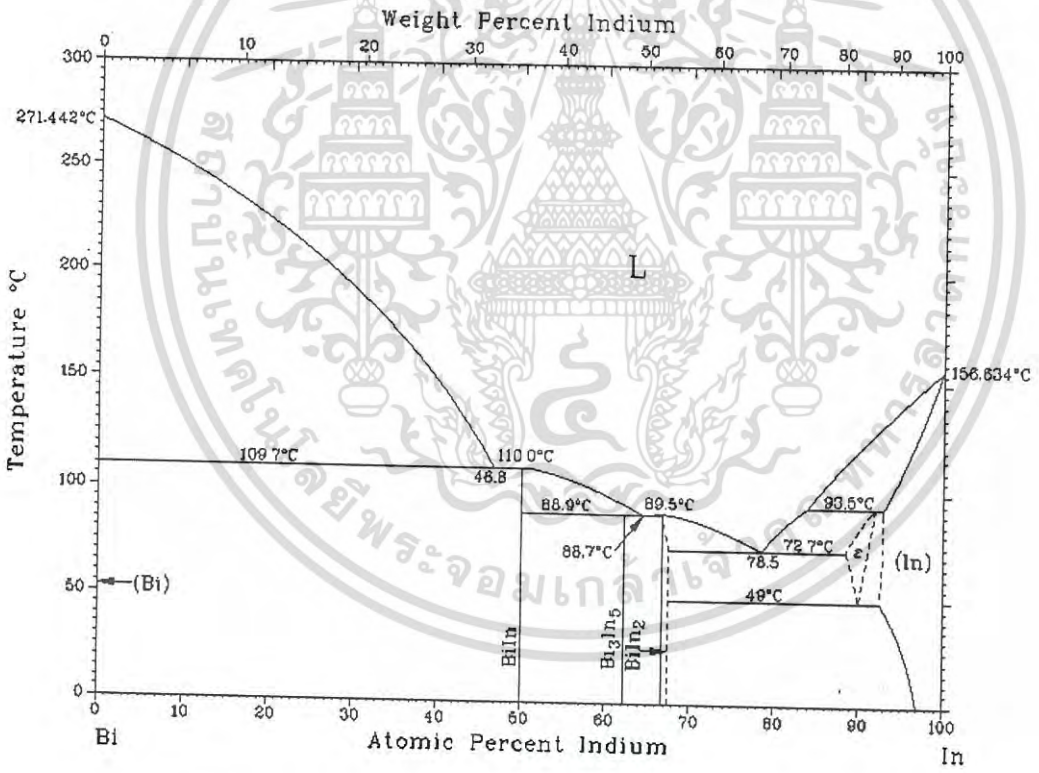
2.2.9.6 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมบิสมัท – อินเดียม (Bi – In)

ปฏิกิริยาที่สำคัญของโลหะผสมบิสมัท – อินเดียม คือปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 110 °C ซึ่งเป็นปฏิกิริยายูเทคติก ดังแสดงในรูปที่ 2.12 โดยที่จุดยูเทคติกนี้ของเหลวจะเปลี่ยนไปเป็นเฟสของแข็ง 2 เฟส ได้แก่ สารประกอบเชิงโลหะ BiIn กับเฟส Bi โดยสมการของปฏิกิริยายูเทคติกคือ

$$L \longrightarrow Bi + BiIn \qquad (2.15)$$

โดยในปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะผสมบิสมัท – อินเดียม แต่ละเฟสจะมีส่วนผสมดังนี้

เฟส	atom%In	atom%Bi
Liquid	46.8	53.2
Bi	0	100
BiIn	50	50



รูปที่ 2.12 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมบิสมัท – อินเดียม [40]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

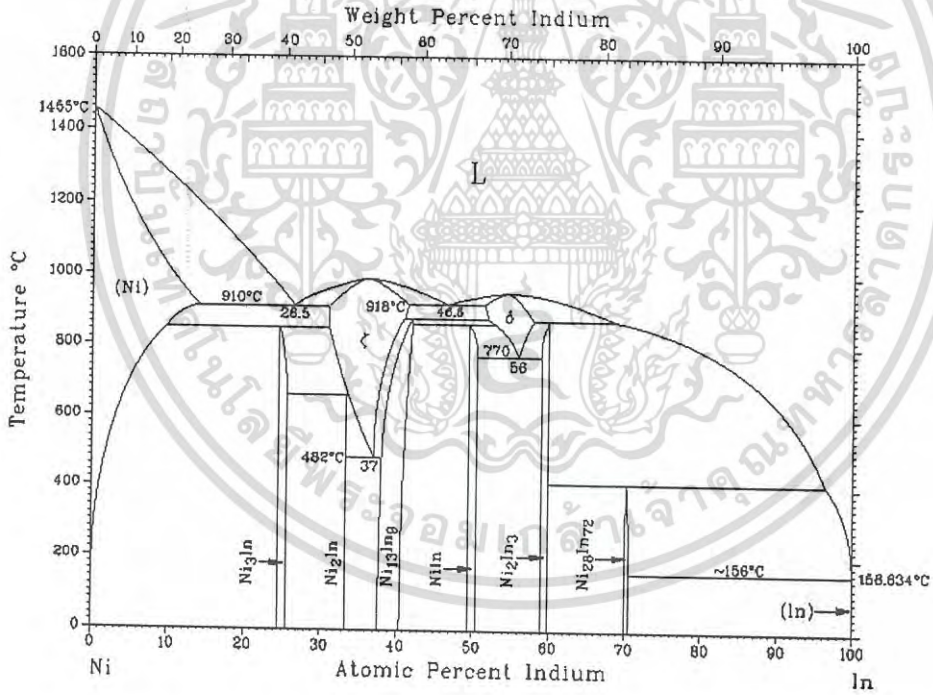
2.2.9.7 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมนิเกิล – อินเดียม (Ni-In)

ปฏิกิริยาที่สำคัญของโลหะผสมนิกิล – อินเดียม คือปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 156 °C ซึ่งเป็นปฏิกิริยายูเทคติก ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ที่จุดยูเทคติกนี้ของเหลวจะเปลี่ยนไปเป็นของแข็ง 2 เฟส ได้แก่ สารประกอบเชิงโลหะ $Ni_{28}In_{72}$ กับเฟส In โดยสมการของปฏิกิริยายูเทคติกคือ

$$L \longrightarrow Ni_{28}In_{72} + In \qquad (2.16)$$

โดยในปฏิกิริยายูเทคติคของโลหะผสมนิเกิล – อินเดียมแต่ละเฟสจะมีส่วนผสมดังนี้

เฟส	atom%Ni	atom%In
Liquid	0.04	99.96
In	0.01	99.99
$Ni_{28}In_{72}$	28	72



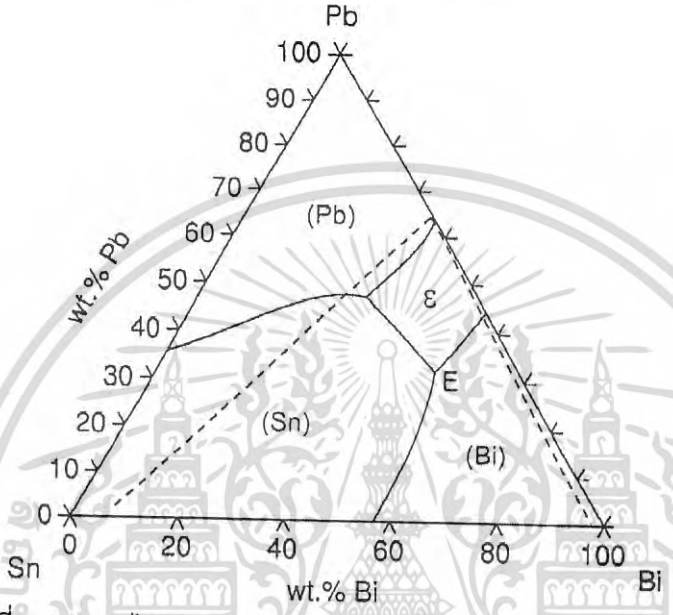
รูปที่ 2.13 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมนิเกิล – อินเดียม [40]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.9.8 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก - บิสมัท – ตะกั่ว (Sn-Bi-Pb)

ปฏิกิริยาที่สำคัญของโลหะผสมดีบุก - บิสมัท – ตะกั่ว คือปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 99 °C ซึ่งเป็นปฏิกิริยายูเทคติก (จุด E) ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ที่จุดยูเทคติกนี้จะเกิดเฟส Sn-Bi-Pb โดยจะมีส่วนผสมดังนี้

เฟส	Mass%Sn	Mass%Bi	Mass%Pb
Sn-Bi-Pb	15.6	52.2	32.2



รูปที่ 2.14 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก - บิสมัท – ตะกั่ว [29]

2.2.10 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

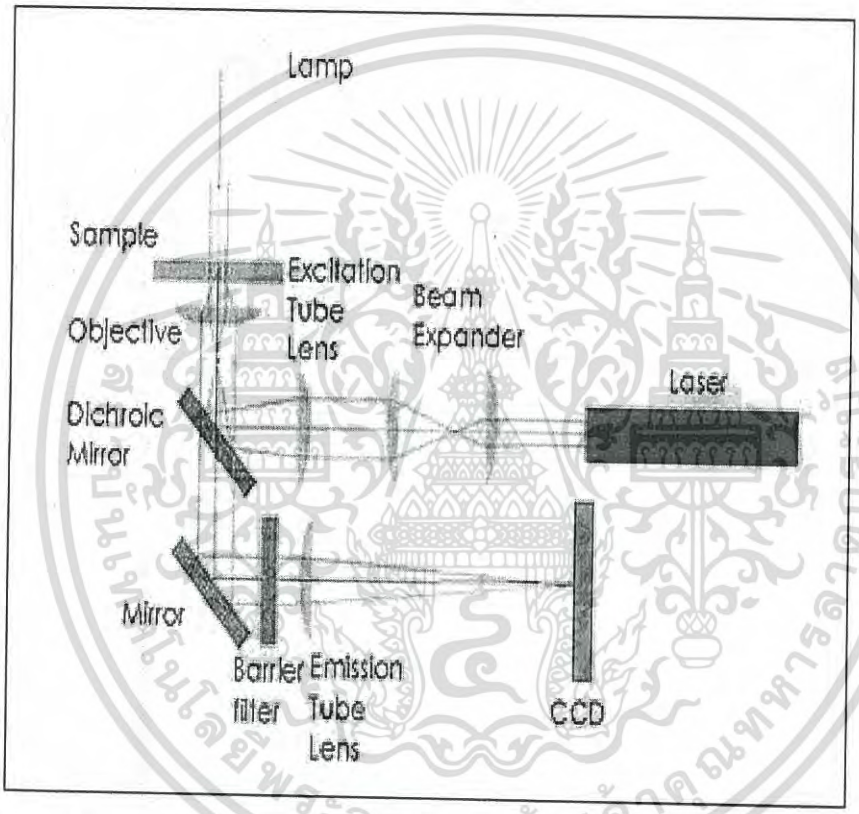
วัสดุบางชนิดมีโครงสร้างขนาดใหญ่ในระดับมหภาค (Macroscopic) จึงสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า แต่วัสดุจำนวนมากมีขนาดเกรนในระดับจุลภาคหรือมีขนาดระดับไมโครเมตร (ระดับไมครอน) ซึ่งไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ดังนั้นการศึกษารายละเอียดระดับไมครอนของวัสดุเหล่านั้น จึงจำเป็นต้องใช้กล้องจุลทรรศน์ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการศึกษาและวิเคราะห์วัสดุ รวมทั้งศึกษาองค์ประกอบและตำหนิที่มีผลต่อวัสดุ เพื่อให้เข้าถึงความเกี่ยวข้องระหว่างโครงสร้างและคุณสมบัติ ทำให้สามารถทำนายคุณสมบัติของวัสดุได้จากโครงสร้างจุลภาค อย่างไรก็ตามก่อนการตรวจสอบในระดับจุลภาคต้องมีการเตรียมพื้นผิวของตัวอย่างทดสอบซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญและต้องทำอย่างระมัดระวัง การเตรียมพื้นผิวของตัวอย่างทดสอบทำได้โดยการขัดกระดาษทรายและผงขัดที่มีขนาดเล็กมาก หลังจากนั้นอาจมีการกัดผิว (Etching) ด้วยสารเคมีที่เหมาะสมเพื่อทำให้มองเห็นโครงสร้างจุลภาคได้

2.2.10.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope, OM)

กล้องจุลทรรศน์แบบแสงเป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาค โดยใช้แสงและระบบกำเนิดแสงเป็นพื้นฐาน กล้องประเภทนี้สามารถตรวจสอบโครงสร้างได้เฉพาะที่พื้นผิวเท่านั้นโดยการสะท้อนแสง สำหรับวัสดุทึบแสง เช่น โลหะทุกประเภท, เซรามิก, และพอลิเมอร์บางชนิด ความดำของภาพที่แตกต่างกันจะเกิดจากความสามารถในการสะท้อนแสงที่แตกต่างกันใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณต่างๆ การตรวจสอบแบบนี้เรียกว่า เมทัลโลกราฟี (Metallography) ชิ้นงานที่ผ่านการขัดจนเรียบให้สะท้อนแสงได้เหมือนกระจก หลังจากกัดด้วยสารเคมีแล้วนำมาตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ซึ่งการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงจะแสดงในรูปที่ 2.15 จะมองเห็นโครงสร้างจุลภาค ที่เป็นเช่นนี้เพราะเกรนมีทิศทางที่แตกต่างกัน จึงมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาต่างกัน แสงที่สะท้อนออกมาจากผิวของเกรนที่มีทิศทางการเรียงตัวของอะตอมที่แตกต่างกันหลังผ่านการกัดผิว โดยความเงาและเนื้อผิวที่เห็นในแต่ละเกรนจะขึ้นอยู่กับการสะท้อนแสงของเกรนนั้นๆ หลังการกัดผิวที่ขอบเกรนจะเกิดร่องเล็กขึ้น เนื่องจากอะตอมที่บริเวณขอบเกรนมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยามากกว่าบริเวณอื่นๆ จึงถูกกัดออกไปมากกว่าบริเวณอื่นภายในเกรน โดยร่องขนาดเล็กนี้สามารถมองเห็นได้เนื่องจากการสะท้อนแสงที่แตกต่างจากบริเวณพื้นเกรน



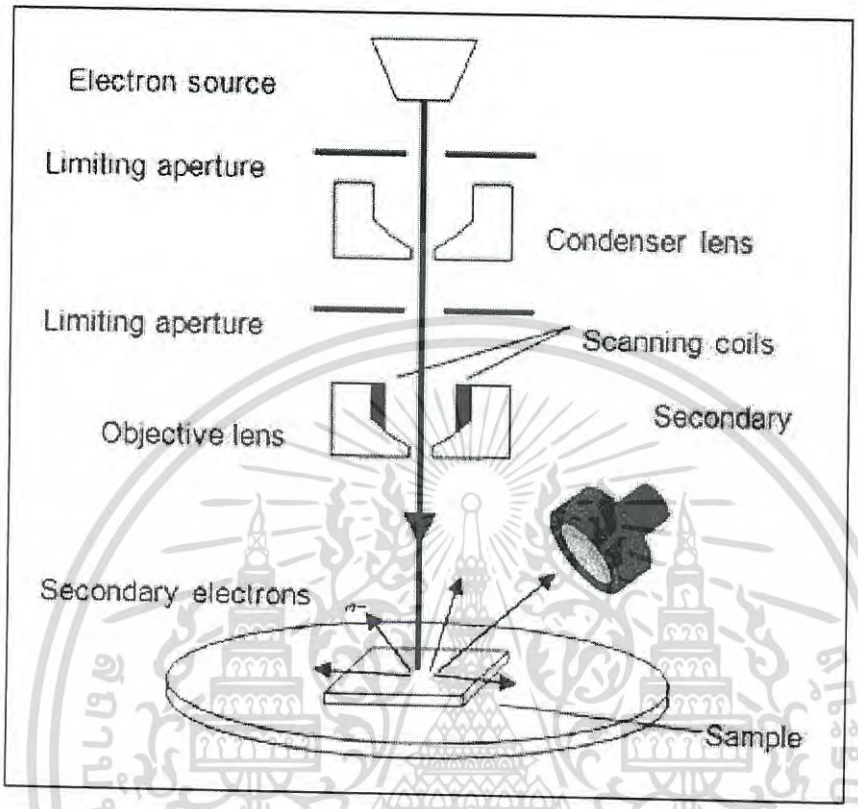
รูปที่ 2.15 แผนภาพแสดงการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง [41]

2.2.10.2 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) เป็นอุปกรณ์ซึ่งยิงลำอิเล็กตรอนไปตกกระทบบนเป้าหมายซึ่งเป็นชิ้นงานตัวอย่าง จะรวบรวมและแสดงสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic signals) ที่ปล่อยออกมา โดยชิ้นงานที่ใช้ทำเป็นเป้าไม่จำเป็นต้องผ่านการขัดผิว แต่จะต้องสามารถนำไฟฟ้าได้ ถ้าวัสดุไม่นำไฟฟ้าจะต้องเคลือบผิวด้วยโลหะหรือวัสดุที่นำไฟฟ้า เช่น การเคลือบทองคำหรือคาร์บอน รูปที่ 2.16 แสดงรายละเอียดและหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด โดยปืนอิเล็กตรอนจะผลิตลำอิเล็กตรอน (Electron beam) และควบคุมให้พุ่งมาตกกระทบจุดเล็กๆ บนเป้าตัวอย่าง โดย Scanning coils จะปล่อยให้ลำอิเล็กตรอนแยกภาพบนพื้นผิวชิ้นงานตัวอย่าง ลำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับด้วยมุมเล็กๆ (Low-angle back-scatted electrons) จะทำอันตรกริยากับส่วนที่นูนของพื้นผิว และทำให้เกิดลำอิเล็กตรอนกระเจิงกลับที่สอง (Secondary back-scattered electrons) เพื่อสร้างสัญญาณของอิเล็กตรอนซึ่งทำให้เกิดภาพ โดยสามารถขยายได้ถึง 500,000 เท่า

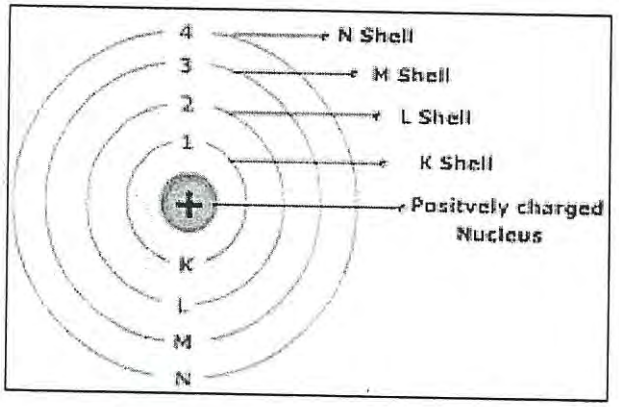


รูปที่ 2.16 แผนภาพแสดงการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด [42]

2.2.10.3 การวิเคราะห์ Energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS)

การวิเคราะห์ EDS ใน SEM เป็นเครื่องมือวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ โดยใช้หลักการยิงรังสีเอ็กซ์ (X-ray) ไปยังเป้าชิ้นงานตัวอย่างและวัดระดับการกระจายของพลังงาน (Energy dispersive) ที่สะท้อนออกมาในรูปรังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนต์ (X-ray fluorescence) ซึ่งจะทำให้ทราบว่าบริเวณที่สนใจมีธาตุใด ในปริมาณเท่าไร ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งบรรยากาศปกติ, สุญญากาศ, และก๊าซฮีเลียม เพื่อความหลากหลายในการประยุกต์ใช้งาน สำหรับรังสีเอ็กซ์ คือ โฟตอน (photon) ที่มีพลังงานมากกว่ารังสีอัลตราไวโอเลต (UV) แต่น้อยกว่ารังสีแกมมา (Gamma rays) รังสีเอ็กซ์มีพลังงานต่ำสุดที่ประมาณ 10 eV และสูงสุดประมาณ 100 keV โดยแบบจำลองอะตอมของโบร์และจากกลศาสตร์ควอนตัมมีสมมติฐานว่า อิเล็กตรอนมีวงโคจรและตำแหน่งที่แน่นอนอยู่รอบนิวเคลียส ดังนั้นควอนตัมพลังงานของอิเล็กตรอนจะมีค่าเฉพาะ กล่าวคืออิเล็กตรอนสามารถมีพลังงานในบางค่าเท่านั้น และระดับพลังงานของอิเล็กตรอนสามารถเปลี่ยนแปลงไปสู่ระดับชั้นพลังงานที่ประกอบด้วยระดับชั้นพลังงานย่อย (Sub shell) โดยเลขควอนตัมจะบ่งบอกระดับชั้นพลังงานหลัก (Shell) เป็นเลขจำนวนเต็มเริ่มจากหนึ่ง หรือบางครั้งแสดงด้วยอักษร K, L, M แทนเลข 1, 2 และ 3 ดังแสดงในรูปที่ 2.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 แบบจำลองอะตอมของโบร์ [43]

แบบจำลองอะตอมของโบร์จะมีรังสีเอ็กซ์ปล่อยออกมาโดยอะตอมหลังจากเกิดไอออน เมื่อปล่อยรังสีเอ็กซ์จากแหล่งพลังงานมากระทบเป้าตัวอย่างและจะเกิดการดูดซับรังสีเอ็กซ์ของตัวอย่าง ที่ถูกกำหนดโดยปริมาณของสัมประสิทธิ์การดูดซับ ซึ่งเป็นไปตามกฎของเบียร์ (Beer's law)

$$I = I_0 e^{-(\frac{\mu}{\rho}\rho x)} \tag{2.17}$$

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

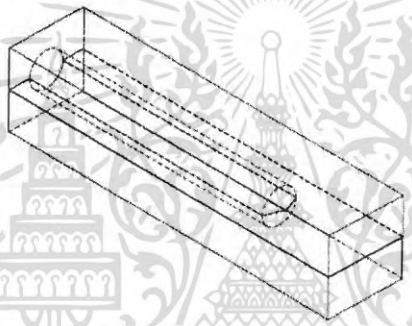
$$\frac{dE}{dx} = -7.85\left(\frac{Z\rho}{AE_m}\right)\ln\left(\frac{1.66E}{J}\right) \tag{2.18}$$

เมื่อ E คือ พลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอน Z คือ จำนวนอะตอมเฉลี่ย A คือน้ำหนักของอะตอม และ J คือ จำนวนไอออนเฉลี่ยของธาตุในตัวอย่าง โดยตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ต้องมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ซึ่งเป็นจุดที่ลำอิเล็กตรอนมาตกกระทบไปจนถึงการตรวจจับและรวบรวมจากสเปกตรัม (Spectrums) สำหรับจำนวนอะตอมที่มีความแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

โลหะบัดกรีแต่ละชนิดได้จากการหลอมธาตุ Sn, Bi, Ni, In และ Ag ในเบ้ากราไฟต์ จากนั้นเทลงแบบหล่อเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ดังรูปที่ 3.1 เพื่อให้ได้โลหะบัดกรีเป็นรูปทรงกระบอกขนาด 18.3×160 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.2 จากนั้นทำการวิเคราะห์ส่วนผสมด้วยเครื่อง Spark-OES (Optical emission spectroscopy) โดยการทดลองนี้จะใช้โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-58Bi เป็นโลหะบัดกรีพื้นและผสม Ni ปริมาณ 0, 0.05, 0.1, 0.5, และ 1% โดยน้ำหนัก ส่วน Ag และ In จะถูกผสมด้วยปริมาณเพียง 0.05 หรือ 0.1% โดยน้ำหนักเนื่องมาจากธาตุทั้งสองชนิดมีราคาสูง โดยส่วนผสมของโลหะบัดกรีแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 3.1 ในส่วนของแผ่นทองแดงที่ใช้ในการทดลองจะเป็นทองแดงบริสุทธิ์ 99.99% ชนิด OFHC (Oxygen-free high conductivity) ที่มีความหนา 0.35 มิลลิเมตร และมีความหยาบผิว (R_a) 0.06 μm



รูปที่ 3.1 แบบหล่อแท่งโลหะบัดกรีเหล็กกล้าไร้สนิม [44]

รูปที่ 3.2 แท่งโลหะบัดกรี [44]

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมของตัวอย่างที่ใช้ทำการทดสอบ

โลหะบัดกรี	ส่วนประกอบ (wt%)				
	Sn	Bi	Ni	In	Ag
Sn-58Bi	42.00	58.00	0.00	0.00	0.00
Sn-58Bi-0.05Ni	41.95	58.00	0.05	0.00	0.00
Sn-58Bi-0.1Ni	41.90	58.00	0.10	0.00	0.00
Sn-58Bi-0.5Ni	41.50	58.00	0.50	0.00	0.00
Sn-58Bi-1.0Ni	41.00	58.00	1.00	0.00	0.00
Sn-58Bi-0.05Ni-0.05In	41.90	58.00	0.05	0.05	0.00
Sn-58Bi-0.05Ni-0.1In	41.85	58.00	0.05	0.10	0.00
Sn-58Bi-0.05Ni-0.05Ag	41.90	58.00	0.05	0.00	0.05

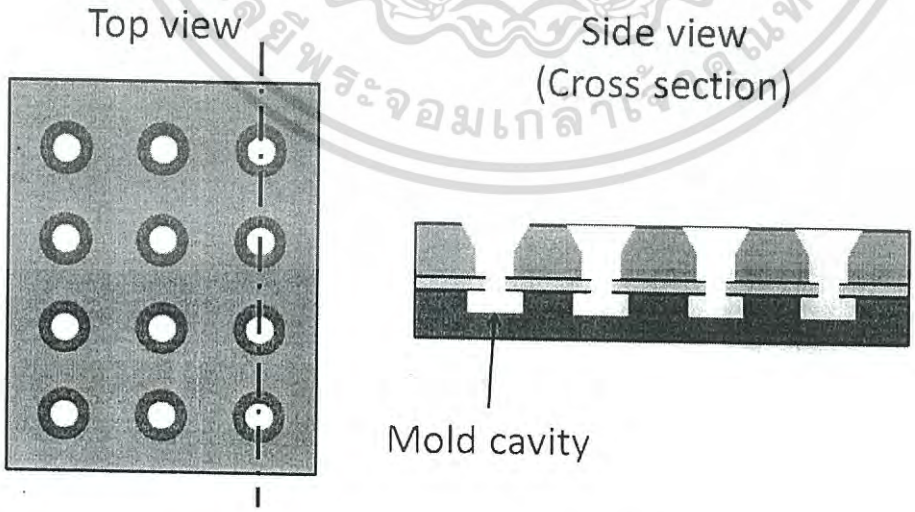
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1(ต่อ) ส่วนผสมของตัวอย่างที่ใช้ทำการทดสอบ

โลหะบัดกรี	ส่วนประกอบ (wt%)				
	Sn	Bi	Ni	In	Ag
Sn-58Bi-0.05Ni-0.1Ag	41.85	58.00	0.05	0.00	0.10
Sn-58Bi-0.1Ni-0.05In	41.85	58.00	0.10	0.05	0.00
Sn-58Bi-0.1Ni-0.1In	41.80	58.00	0.10	0.10	0.00
Sn-58Bi-0.1Ni-0.05Ag	41.85	58.00	0.10	0.00	0.05
Sn-58Bi-0.1Ni-0.1Ag	41.80	58.00	0.10	0.00	0.10
Sn-58Bi-0.5Ni-0.05In	41.45	58.00	0.50	0.05	0.00
Sn-58Bi-0.5Ni-0.1In	41.40	58.00	0.50	0.10	0.00
Sn-58Bi-0.5Ni-0.05Ag	41.45	58.00	0.50	0.00	0.05
Sn-58Bi-0.5Ni-0.1Ag	41.40	58.00	0.50	0.00	0.10
Sn-58Bi-1.0Ni-0.05In	40.95	58.00	1.00	0.05	0.00
Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In	40.90	58.00	1.00	0.10	0.00
Sn-58Bi-1.0Ni-0.05Ag	40.95	58.00	1.00	0.00	0.05
Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag	40.90	58.00	1.00	0.00	0.10

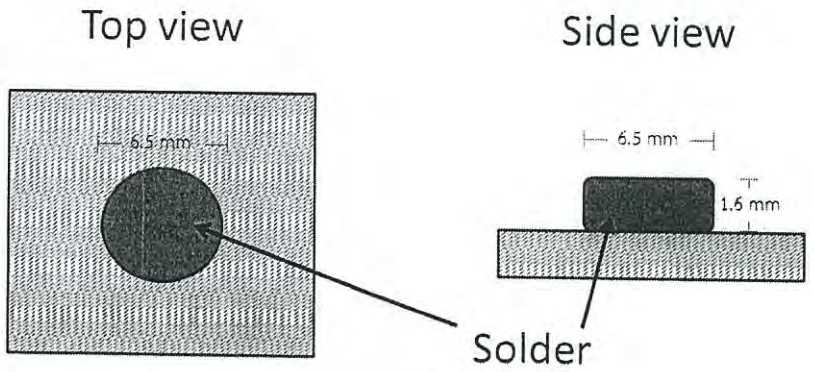
3.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

เริ่มจากการหล่อแท่งโลหะบัดกรีเป็นทรงกระบอกโดยทำการหลอมในเบ้าแกรไฟต์ แล้วเทลงแบบหล่อเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ดังรูปที่ 3.3 โดยชิ้นงานที่ได้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 มิลลิเมตร หนา 1.6 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน JIS Z 3198-3 จากนั้นนำไปขัดด้วยกระดาษทรายเพื่อให้มีน้ำหนัก 0.4300 กรัม ดังรูปที่ 3.4



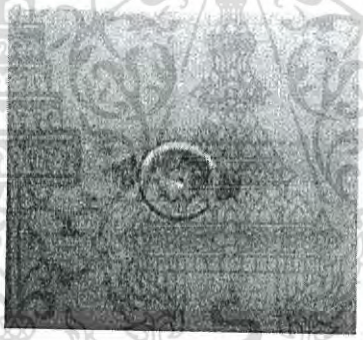
รูปที่ 3.3 แบบหล่อเม็ดโลหะบัดกรีเหล็กกล้าไร้สนิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 เม็ดโลหะบัดกรี

โดยแผ่นทองแดงบริสุทธิ์ที่ใช้มีขนาด 30x30x0.35 มิลลิเมตร ทำความสะอาดด้วยสารละลายไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ ตามมาตรฐาน JIS Z 3284 ในส่วนของการจำลองการปนเปื้อนของตะกั่วนั้น ใช้วิธีวางตะกั่วบริสุทธิ์น้ำหนัก 0.0200 กรัม จำนวน 2 ชิ้น ไว้ข้างโลหะบัดกรีดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ชิ้นงานจำลองการปนเปื้อนของตะกั่ว

3.2 ขั้นตอนการทดลอง

3.2.1 การบัดกรี

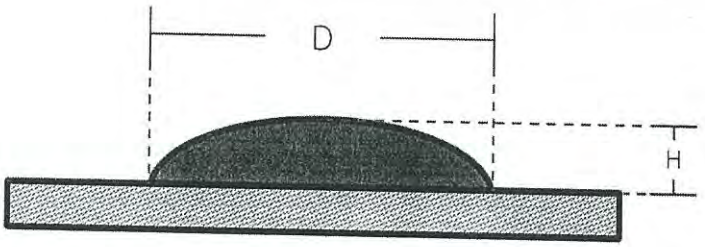
นำโลหะบัดกรีวางบนแผ่นทองแดงที่เตรียมไว้ทำการหยดฟลักซ์อินทรีย์ ประเภท RMA ชนิด NH-100VK-1 ดังรูปที่ 3.6 ปริมาณ 0.02 มิลลิลิตร และนำไปบัดกรีด้วยวิธี Reflow ที่อุณหภูมิ 179 °C เป็นเวลา 30 วินาทีนับจากโลหะบัดกรีเริ่มหลอมละลาย จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวในอากาศและล้างฟลักซ์ออกด้วยเอทานอล โดยชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 3.7 สำหรับการศึกษาผลกระทบจากการปนเปื้อนของตะกั่วนั้น จะจำลองการทดลองเป็น 2 กรณีคือ นำโลหะบัดกรีวางบนแผ่นทองแดงชุบตะกั่วและนำโลหะบัดกรีวางชิดกับตะกั่วบริสุทธิ์น้ำหนัก 0.02 กรัม บนแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.6 ฟลักซ์ชนิด NH-100VK-1 [44]

รูปที่ 3.7 ชิ้นงานหลังจากการบัดกรี

การวัดค่าความสามารถในการเปียกนั้นสามารถวัดได้จากค่าตัวประกอบการกระจายตัว อัตราส่วนการกระจายตัว และมุมสัมผัส ซึ่งทั้งสามวิธีนี้เป็นวิธีที่มีตัวแปรในการคำนวณและให้แนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน [51] ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงใช้ค่าตัวประกอบการกระจายตัวในการวัดค่าความสามารถในการเปียกเพียงวิธีเดียว การหาค่าตัวประกอบการกระจายตัวทำได้โดยการใช้ไมโครมิเตอร์วัดความสูงของโลหะบัดกรีที่จุดสูงสุด จากนั้นนำชิ้นงานมาคำนวณหาตัวประกอบการกระจายตัว ดังสมการที่ 3.1 โดยที่ S_f คือ ตัวประกอบการกระจายตัว H คือ ความสูงของโลหะบัดกรีที่แผ่กระจายและ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรีที่ถูกทดสอบซึ่งได้จากการวัดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานที่สัมผัสกับทองแดงดังสมการที่ 3.2 และรูปที่ 3.8



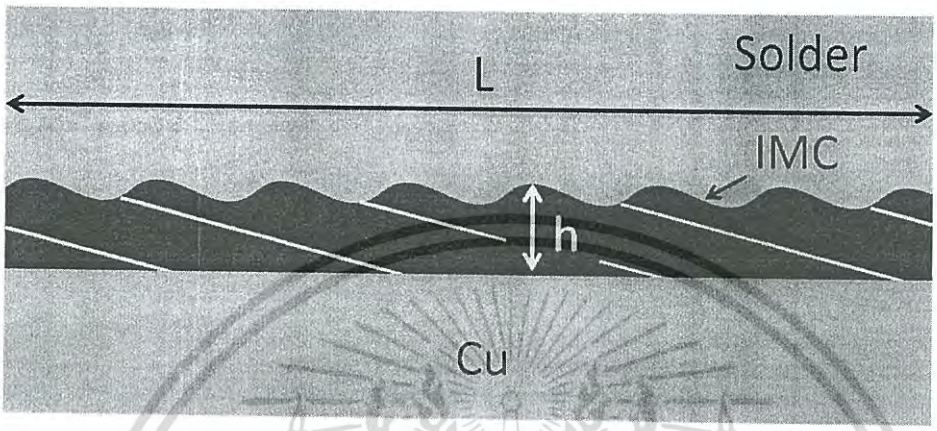
รูปที่ 3.8 ความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรี

$$S_f = \frac{D-H}{H} \times 100 \qquad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D = \sqrt{\frac{4 \times \text{พื้นที่หน้าตัด}}{\pi}} \quad (3.2)$$

การวัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะใช้โปรแกรม Image-Pro Express โดยความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจะถูกคำนวณจากสมการที่ 3.3 ซึ่งตัวแปรต่างๆ แสดงดังตัวอย่างในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การวัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

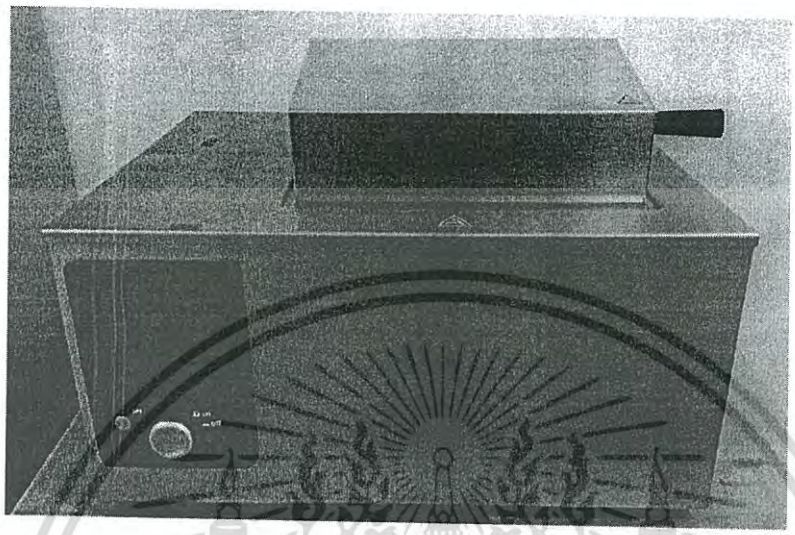
$$h = \frac{A}{L} \quad (3.3)$$

เมื่อ h คือความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ A คือพื้นที่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (พื้นที่แรเงาในรูปที่ 3.9) และ L คือความยาวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ในกรณีที่ชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีมากกว่า 1 ชั้น จะทำการวัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะแยกกัน

3.2.2 การบ่มด้วยความร้อน

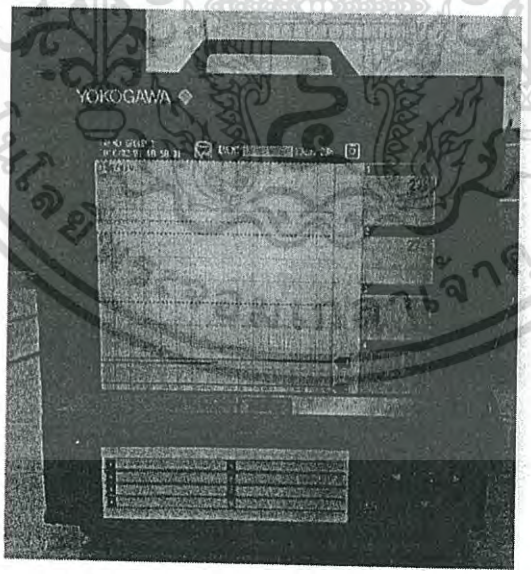
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากการบัดกรีนำชิ้นงานที่ไม่มีการปนเปื้อนของตะกั่วมาบ่มด้วยความร้อนในอ่างน้ำมัน (Oil bath) ยี่ห้อ Memmert รุ่น One 7 - 45 ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ที่อุณหภูมิ 75, 100, และ 125 °C ตามลำดับ เป็นเวลา 10, 100, และ 1000 ชั่วโมง ในแต่ละอุณหภูมิการบ่มด้วยความร้อน เมื่อครบกำหนดนำชิ้นงานออกจากอ่างน้ำมันและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ



รูปที่ 3.10 อ่างน้ำมันบ่มความร้อน

ตลอดระยะเวลาในการบ่มจะใช้เครื่องบันทึกข้อมูลอุณหภูมิยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น DAQ STATION DX 100 ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 เครื่องบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

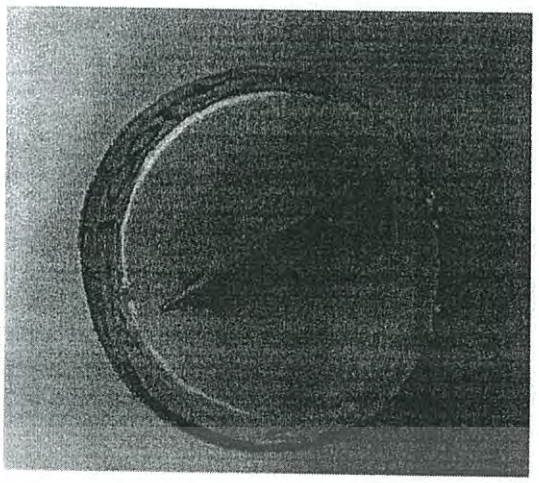
3.2.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

เพื่อที่จะตรวจสอบรอยบัดกรี ชิ้นงานจะถูกนำมาทำภาคตัดขวางด้วยเครื่องตัดแรงโน้มถ่วงยี่ห้อ Struers รุ่น Minitom ดังรูปที่ 3.12 และหล่อด้วย Epoxy จากนั้นทำการขัดผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400, 600, 1000, 2000, และ 4000 จากนั้นขัดบนผ้าสักหลาดด้วยผงอะลูมินาขนาด 0.3 μm โดยใช้เครื่องขัดยี่ห้อ Struers LaboPol-1 ดังรูปที่ 3.13 ชิ้นงานที่ผ่านการขัดผิวหน้าแล้วจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.14 จากนั้นนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope หรือ SEM) ยี่ห้อ JEOL JSM-6380 LV ดังรูปที่ 3.15 เพื่อตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของชิ้นงาน หลังจากนั้นจะทำการตรวจสอบปริมาณธาตุที่พบบนพื้นผิวชิ้นงานตัวอย่างด้วยวิธี Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) ซึ่งผลที่ได้จะแสดงธาตุที่ค้นพบในบริเวณที่สนใจ โดยผลกระทบของ Ni, Ag, และ In บนปฏิกิริยาพื้นผิวระหว่างโลหะบัดกรีกับแผ่นทองแดงและโลหะบัดกรีบนเปื้อนตะกั่วกับแผ่นทองแดงจะถูกศึกษา

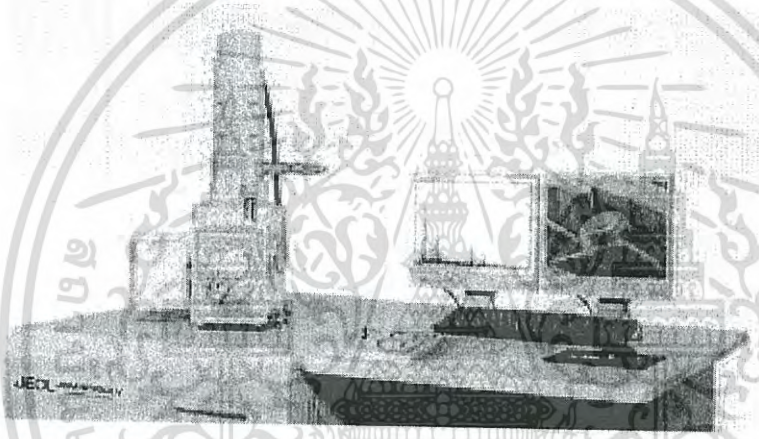
รูปที่ 3.12 เครื่องตัดแรงโน้มถ่วงยี่ห้อ Struers รุ่น Minitom [46]

รูป 3.13 เครื่องขัดยี่ห้อ Struers LaboPol-1 [47]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3.14 ชิ้นงานหลังการขัดผิวหน้า



รูปที่ 3.15 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดยี่ห้อ JEOL JSM-6380 LV [48]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลอง

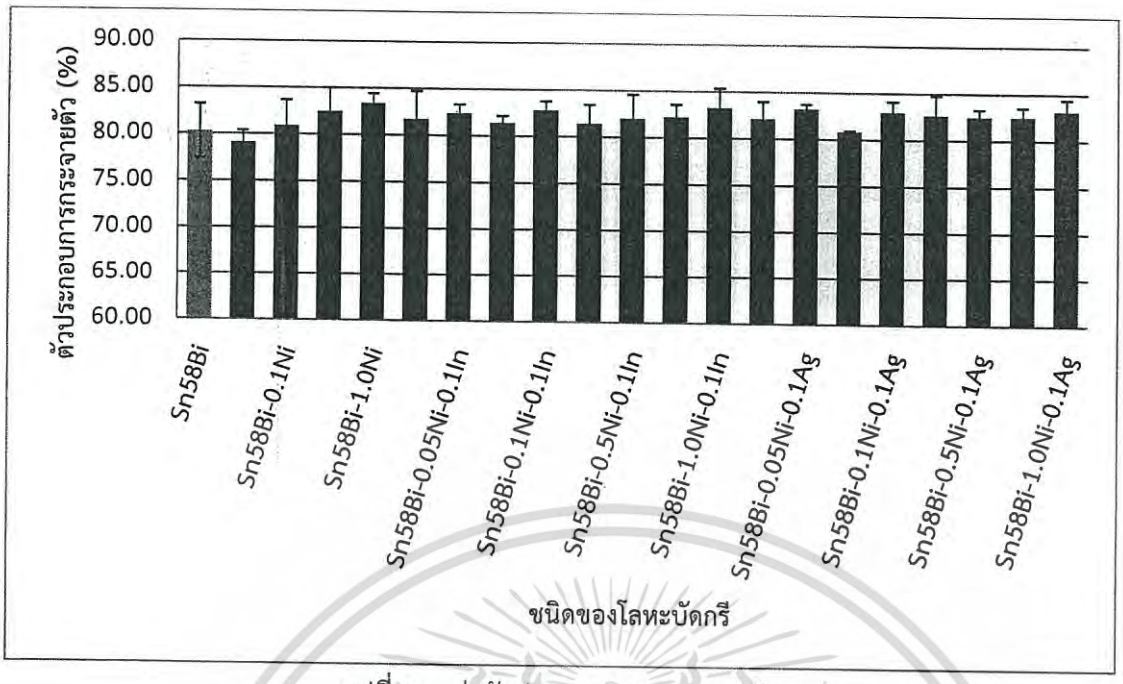
4.1 ความสามารถในการเปียก (Wettability)

จากการคำนวณค่าตัวประกอบการกระจายตัวจากสมการที่ 3.1 ได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 4.1 และค่าตัวประกอบการกระจายตัวแสดงดังรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด

โลหะบัดกรี	ตัวประกอบการกระจายตัว (%)				ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (%)
	ชิ้นที่ 1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่ 3	เฉลี่ย	
Sn-58Bi	81.67	82.93	76.21	80.27	2.92
Sn-58Bi-0.05Ni	78.45	80.91	77.84	79.07	1.33
Sn-58Bi-0.1Ni	77.07	82.95	82.77	80.93	2.73
Sn-58Bi-0.5Ni	84.85	83.59	78.90	82.45	2.56
Sn-58Bi-1.0Ni	81.97	83.38	84.65	83.33	1.09
Sn-58Bi-0.05Ni-0.05In	77.39	83.57	84.08	81.68	3.04
Sn-58Bi-0.05Ni-0.1In	81.18	83.55	82.37	82.37	0.97
Sn-58Bi-0.1Ni-0.05In	82.41	81.18	80.60	81.40	0.75
Sn-58Bi-0.1Ni-0.1In	83.48	83.50	81.33	82.77	1.02
Sn-58Bi-0.5Ni-0.05In	78.63	83.26	82.40	81.43	2.01
Sn-58Bi-0.5Ni-0.1In	83.52	78.36	84.12	82.00	2.58
Sn-58Bi-1.0Ni-0.05In	83.84	82.26	80.49	82.20	1.37
Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In	83.91	85.41	80.43	83.25	2.09
Sn-58Bi-0.05Ni-0.05Ag	84.24	82.41	79.78	82.14	1.83
Sn-58Bi-0.05Ni-0.1Ag	83.19	83.85	82.62	83.22	0.50
Sn-58Bi-0.1Ni-0.05Ag	80.95	80.71	80.87	80.84	0.10
Sn-58Bi-0.1Ni-0.1Ag	84.61	82.14	82.11	82.95	1.17
Sn-58Bi-0.5Ni-0.05Ag	84.84	83.33	79.80	82.66	2.11
Sn-58Bi-0.5Ni-0.1Ag	83.57	81.67	82.34	82.53	0.79
Sn-58Bi-1.0Ni-0.05Ag	83.98	81.82	81.76	82.52	1.03
Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag	83.66	84.40	81.40	83.15	1.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 ค่าตัวประกอบการกระจายตัว

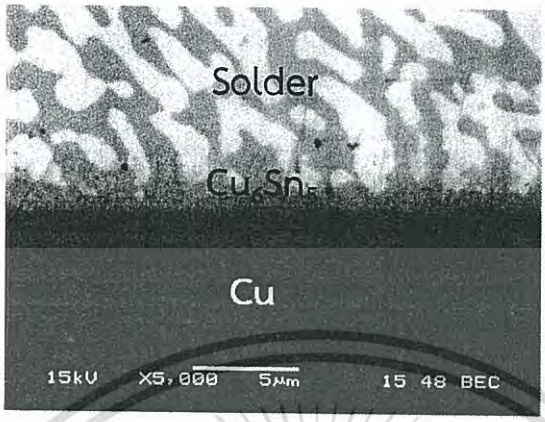
จากรูปที่ 4.1 พบว่าการเติม Ni จะช่วยทำให้โลหะบัดกรีมีค่าตัวประกอบการกระจายตัวสูงขึ้น เนื่องจากการเติมธาตุ Ni จะลดอุณหภูมิโซลิดัสและลิควิดัส และลดแรงตึงผิวของโลหะบัดกรีหลอมเหลว [49] ส่วนการเติม In และ Ag จะส่งผลให้ค่าตัวประกอบการกระจายตัวสูงขึ้นเล็กน้อย โดยค่าตัวประกอบการกระจายตัวหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีสูตรที่เติม In และ Ag ปริมาณ 0.05 wt.% นั้น จะน้อยกว่าโลหะบัดกรีสูตรที่เติม In และ Ag ปริมาณ 0.1 wt.% เล็กน้อย โดยโลหะบัดกรีกลุ่มที่เติม In ปริมาณเพิ่มขึ้นจาก 0.05 wt% เป็น 0.1 wt% จะมีค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระจายตัวที่เพิ่มขึ้นจาก 81.68% เป็น 82.60% ตามลำดับ และโลหะบัดกรีกลุ่มที่เติม Ag ปริมาณเพิ่มขึ้นจาก 0.05 wt% เป็น 0.1 wt% จะมีค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระจายตัวที่เพิ่มขึ้นจาก 82.04% เป็น 82.96% ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของรชต คงชยาสุขวัฒน์ และคณะ [21] ที่ศึกษาอิทธิพลของธาตุ Ag ปริมาณ 0.05 wt% และ 0.1 wt% ในโลหะบัดกรีพื้นฐาน Sn-0.6Cu-0.05Ni-Ge โดยพบว่าโลหะบัดกรีมีอัตราการแผ่กระจายที่ดีขึ้นเป็น 74.83% และ 75.19% ตามลำดับ เนื่องจาก Ag ที่เติมเข้าไปจะลดแรงตึงผิวของโลหะบัดกรีหลอมเหลว และงานวิจัยของกำธร สุขพิมาย และคณะ [27] ที่ศึกษาอิทธิพลของธาตุ In ในโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn (x = 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 wt%) โดยพบว่าการกระจายตัวของโลหะบัดกรีมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณ In เพิ่มขึ้น เนื่องจาก In ที่เติมเข้าไปจะลดแรงตึงผิวของโลหะบัดกรีหลอมเหลว

4.2 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compounds: IMC)

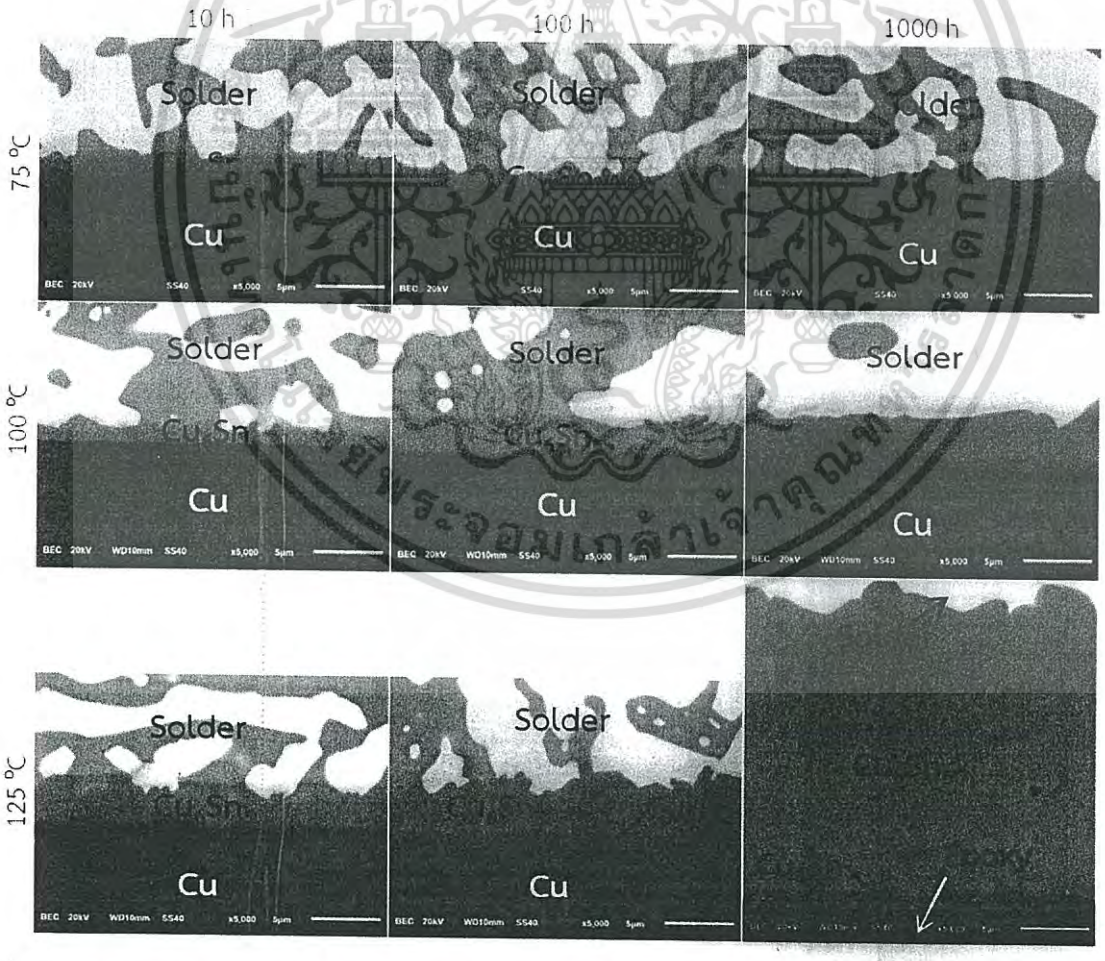
จากการตรวจสอบด้วย SEM และ EDS ที่รอยต่อของโลหะบัดกรีโดยใช้กำลังขยาย 5000 เท่า พบชั้นสารประกอบเชิงโลหะเกิดขึ้นระหว่างโลหะบัดกรีกับแผ่นรองทองแดง รูปที่ 4.2 แสดงชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นหลังจากการบัดกรีของโลหะบัดกรี Sn-58Bi ซึ่งเฟสที่พบคือ Cu_6Sn_5 แต่เมื่อชิ้นงานถูกบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นระยะเวลา 1000 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 125 °C เป็นระยะเวลา 100 และ 1000 ชั่วโมง จะทำให้เกิดเฟสที่สองระหว่างเฟส Cu_6Sn_5 กับแผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทองแดง นั่นคือเฟส Cu_3Sn ดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยเงื่อนไขในการเกิดชั้นสารประกอบ Cu_3Sn นี้ จะเป็นเช่นเดียวกันในโลหะบัดกรีทุกสูตร



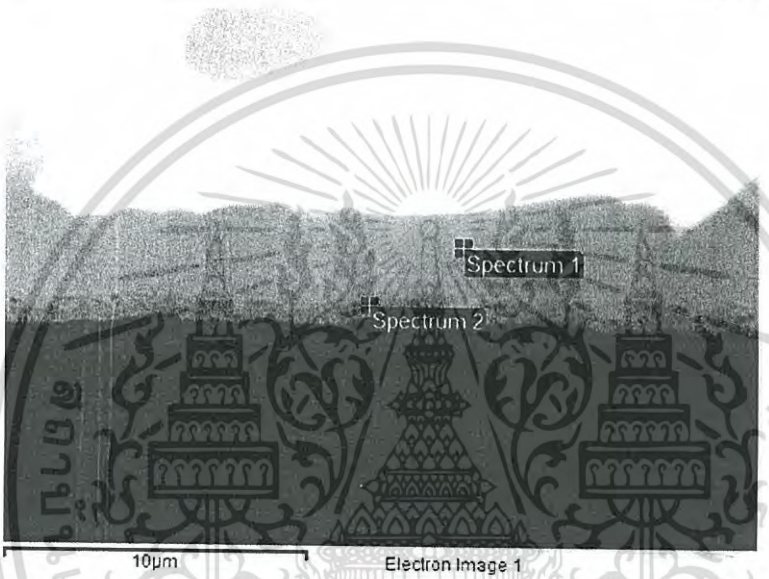
รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn-58Bi หลังการบัดกรี



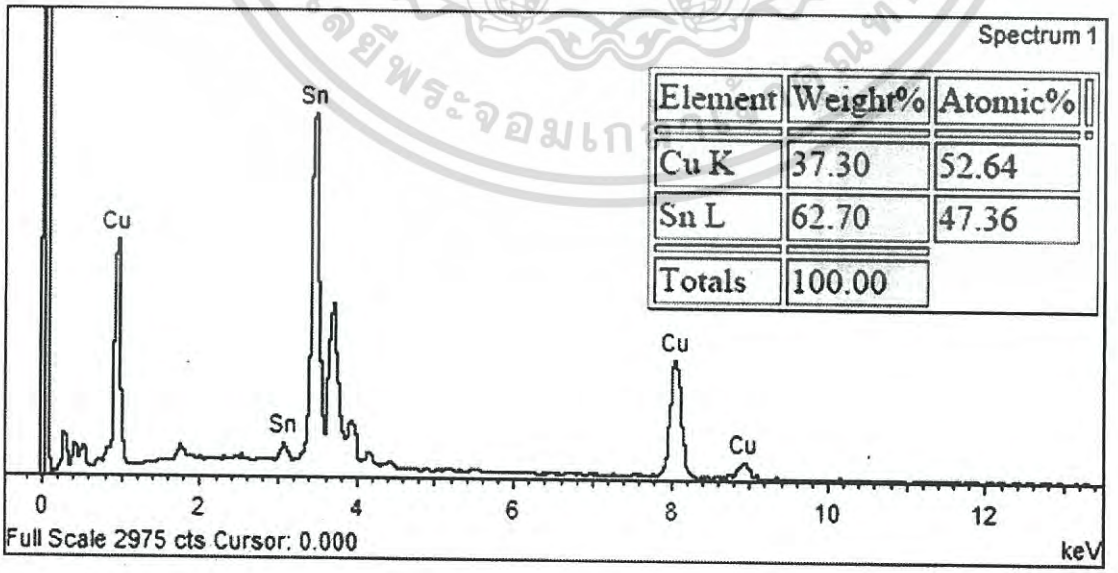
รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 5000 เท่า ของโลหะบัดกรี Sn-58Bi หลังการบ่มที่อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะด้วย EDS นั้น ผลลัพธ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์อะตอม ซึ่งเป็นข้อบ่งชี้ถึงส่วนผสมของเฟสและนำไปสู่การระบุชื่อเฟสที่ตรวจสอบ โดยโลหะบัดกรีทุกสูตรในวิทยานิพนธ์นี้ ในกรณีที่เกิดชั้นสารประกอบเพียงชั้นเดียว ชั้นสารประกอบนั้นจะเป็นเฟส Cu_6Sn_5 หรือ $(Cu,Ni)_6Sn_5$ (ในกรณีที่โลหะบัดกรีมีส่วนผสมของ Ni) และกรณีที่เกิดชั้นสารประกอบ 2 ชั้น ชั้นสารประกอบนั้นจะเป็นเฟส Cu_6Sn_5 (Spectrum 1) หรือ $(Cu,Ni)_6Sn_5$ (ในกรณีที่โลหะบัดกรีมีส่วนผสมของ Ni) และ Cu_3Sn (Spectrum 2) โดยตำแหน่งที่ตรวจสอบปริมาณธาตุของโลหะบัดกรี Sn-58Bi หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.4 และผลของการวิเคราะห์ปริมาณธาตุแสดงดังรูปที่ 4.5 และ 4.6

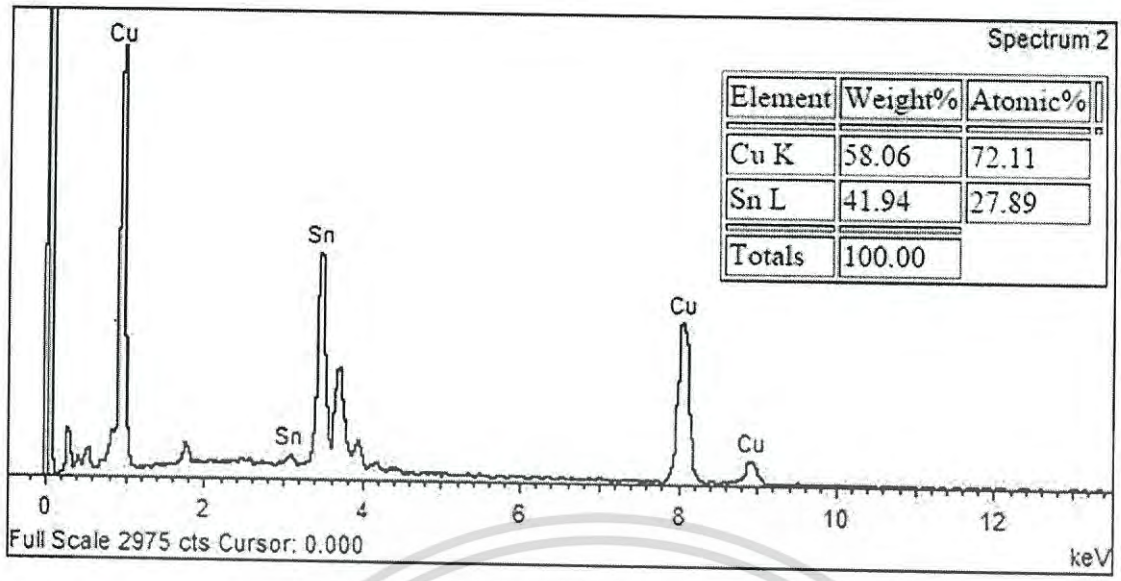


รูปที่ 4.4 ตำแหน่งที่ตรวจสอบปริมาณธาตุของโลหะบัดกรี Sn-58Bi หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง



รูปที่ 4.5 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของชั้น Cu_6Sn_5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

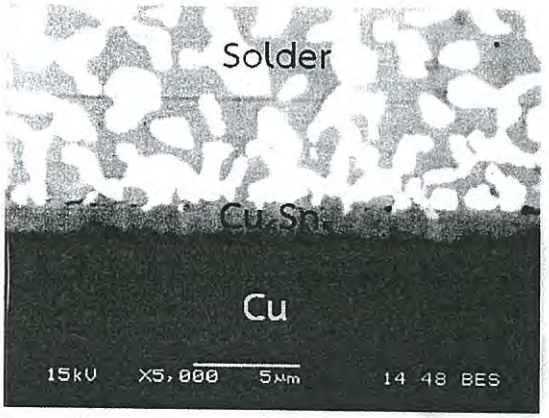


รูปที่ 4.6 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของชั้น Cu_3Sn

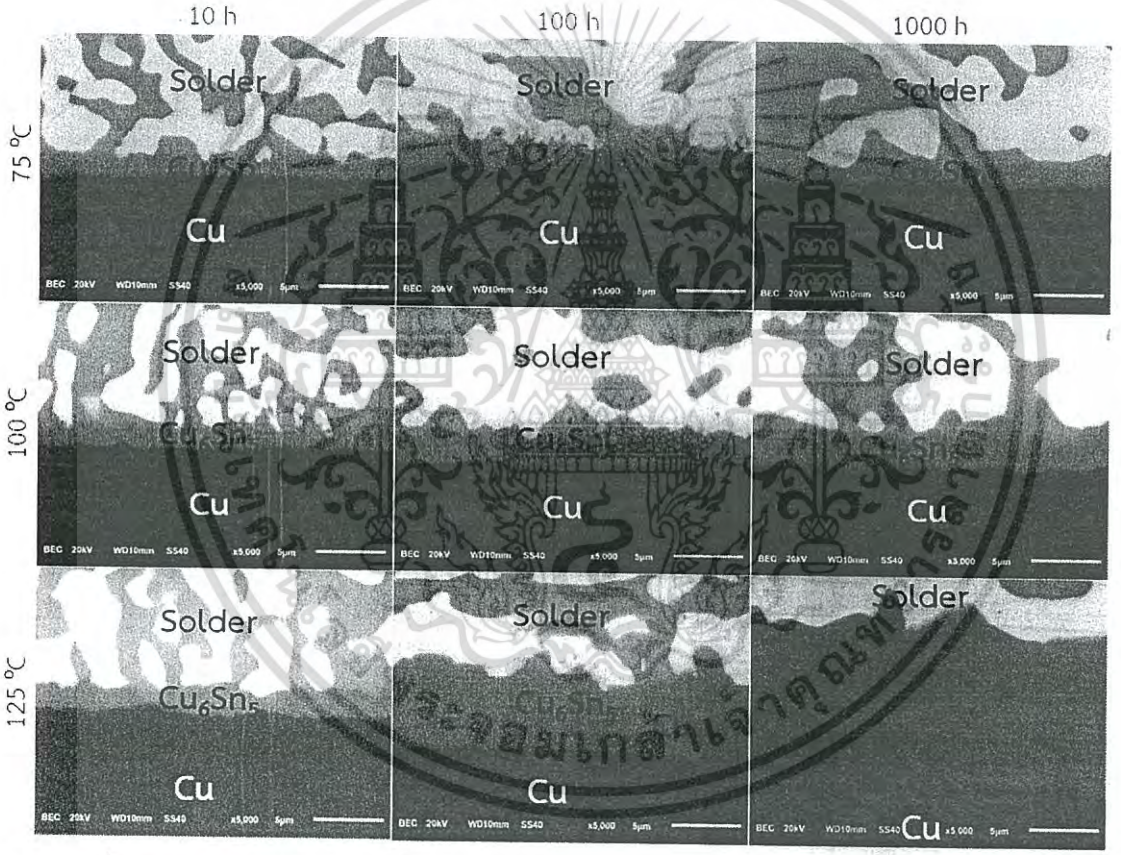
โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni ที่กำลังขยาย 5000 เท่า หลังการบัดกรีและหลังการบ่มที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ โดยชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นคือ Cu_6Sn_5 และ Cu_3Sn และโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In และ Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag ที่กำลังขยาย 5000 เท่า หลังการบัดกรีและหลังการบ่มที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.9-4.12 ตามลำดับ โดยชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นคือ Cu_6Sn_5 และ Cu_3Sn เช่นเดียวกัน ในส่วนของชั้นสารประกอบ Cu_3Sn จะมีขนาดเล็กมากจนสังเกตเห็นได้ยากในโลหะบัดกรีทุกสูตรยกเว้นโลหะบัดกรีพื้น Sn-58Bi ซึ่งแสดงให้เห็นว่าธาตุผสมที่เติมเข้าไปสามารถยับยั้งการเกิดชั้นสารประกอบ Cu_3Sn ได้

โดยอิทธิพลจากการบ่มด้วยความร้อนจะทำให้ชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีความหนามากขึ้นตามอุณหภูมิและระยะเวลาการบ่มที่มากขึ้น นอกจากนี้การบ่มด้วยความร้อนยังทำให้เฟสต่างๆในพื้นที่ของโลหะบัดกรีนั้นมีลักษณะหยาบมากขึ้นและทำให้ชั้นสารประกอบมีลักษณะเป็นระนาบมากขึ้น ในโลหะบัดกรีทุกสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

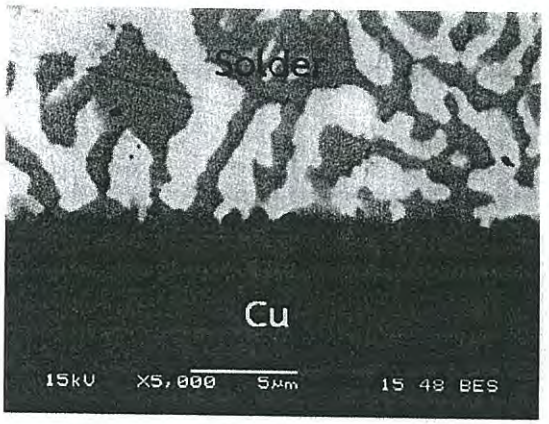


รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni หลังการบัดกรี

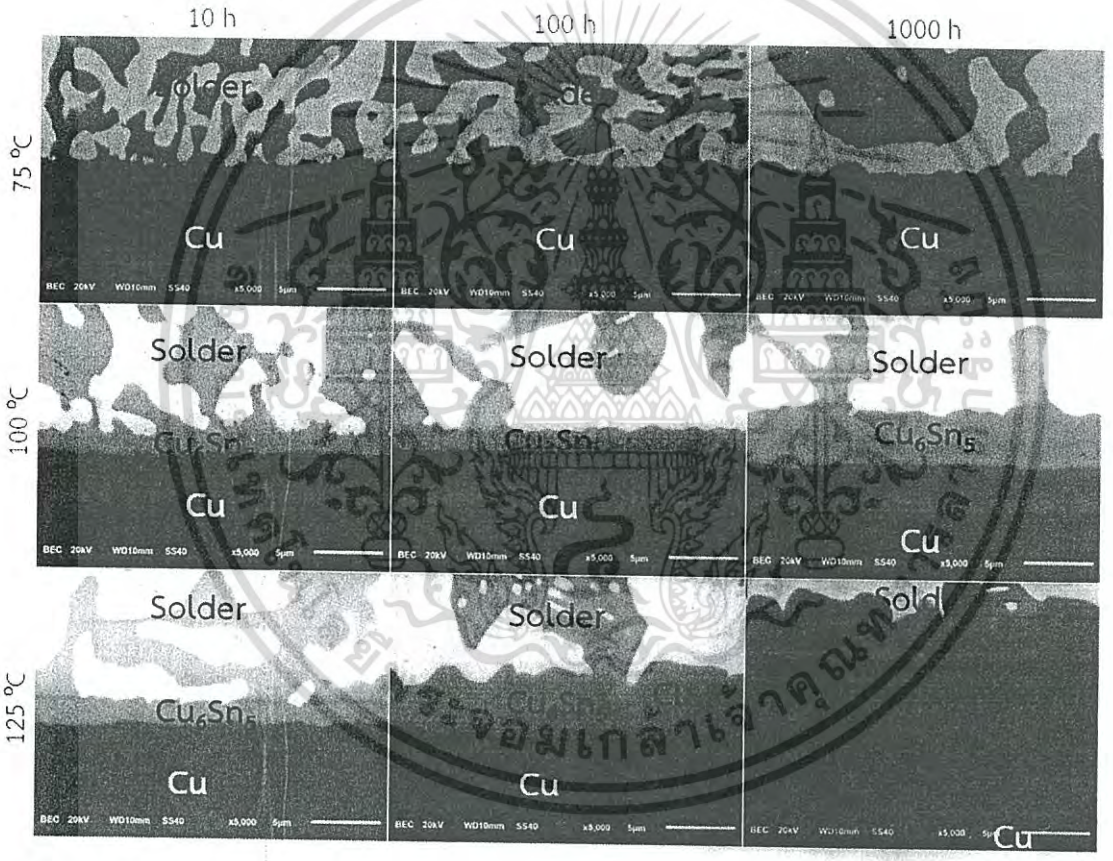


รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 5000 เท่า ของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni หลังการบ่มที่อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

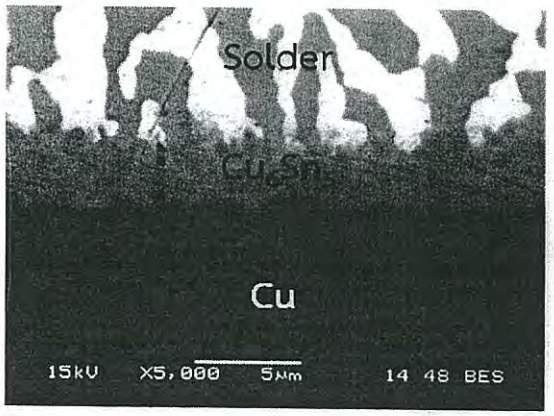


รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In หลังการบัดกรี

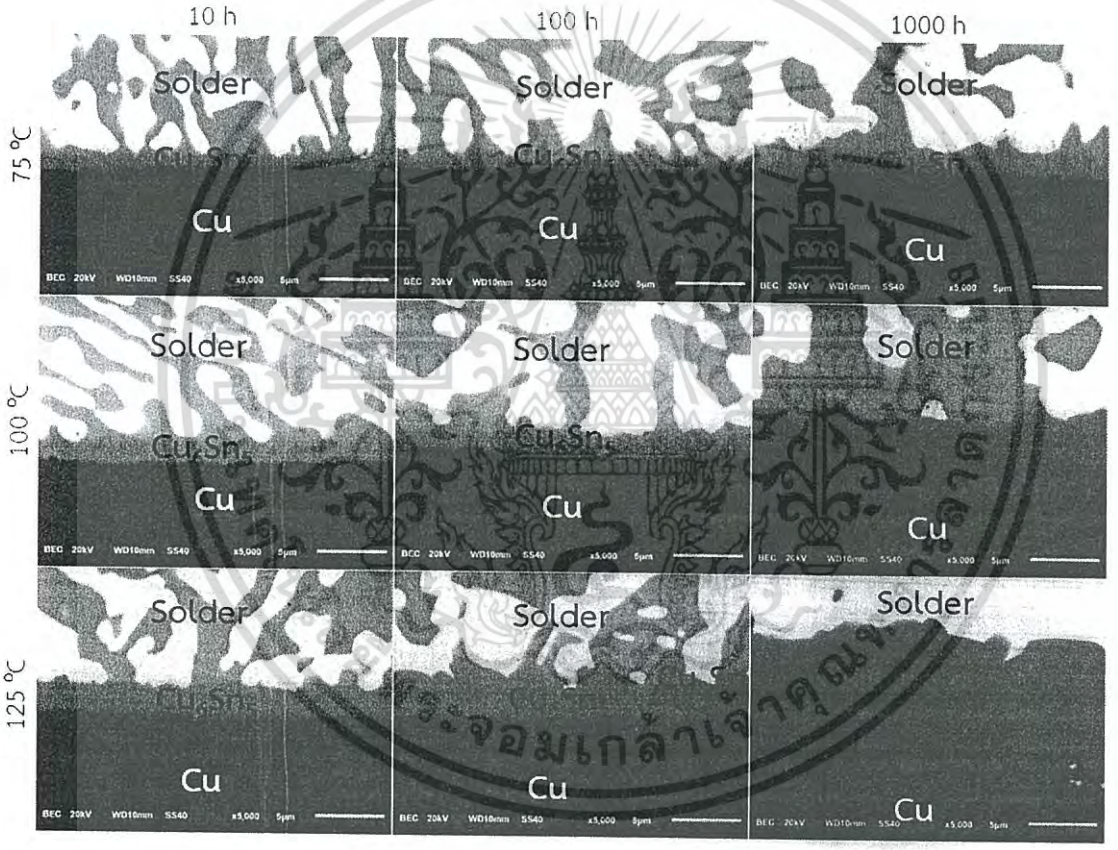


รูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 5000 เท่า ของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In หลังการบ่มที่อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



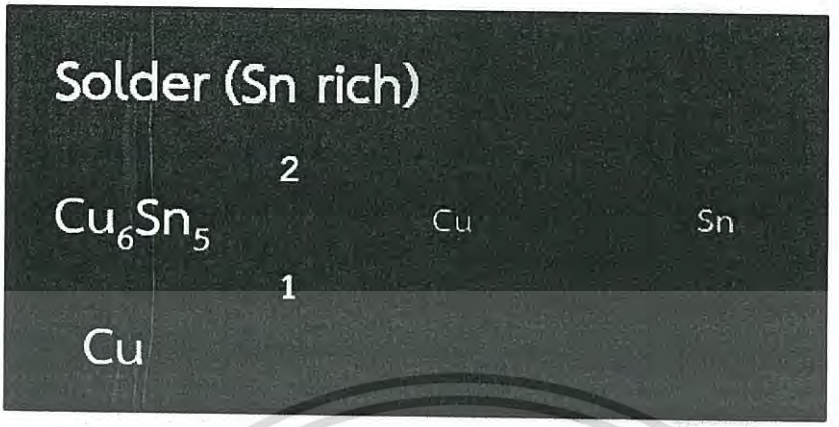
รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag หลังการบัดกรี



รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 5000 เท่า ของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag หลังการบ่มที่อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการพิจารณาเฟสไดอะแกรมและค่า Gibb's free energy (G) ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ พบว่าเฟสที่เกิดขึ้นจะเป็นชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5 โดยได้พิจารณาจากรูปที่ 4.13 [50]



รูปที่ 4.13 กลไกการเกิดชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5

การพิจารณาว่าชั้นสารประกอบใดจะเกิดขึ้นก่อนนั้น จะพิจารณาจากคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ ที่เรียกว่า Gibb's free energy (ΔG) ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 4.1

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \tag{4.1}$$

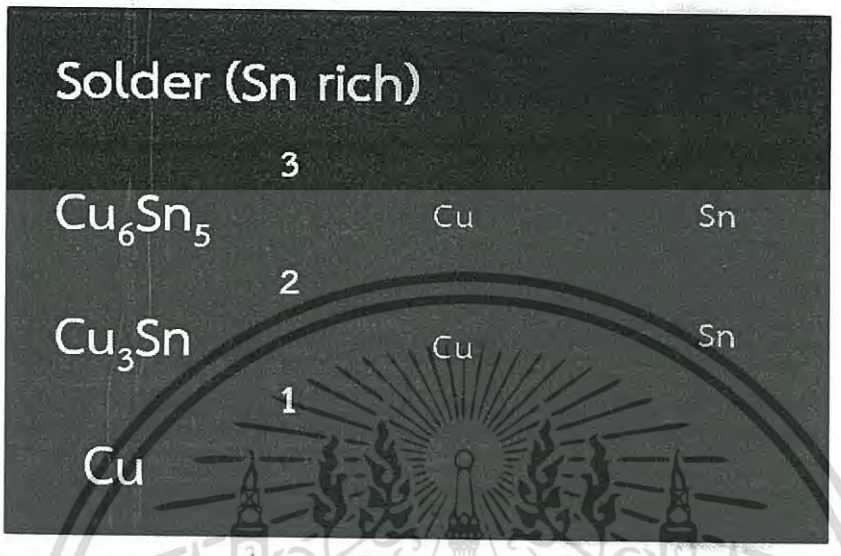
โดย ΔG คือ การเปลี่ยนแปลง Gibb's free energy, ΔH คือ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี, ΔS คือ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี ของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ และ T คือ อุณหภูมิของระบบ โดยผลิตภัณฑ์คือชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5 หรือ Cu_3Sn ที่เกิดจากสารตั้งต้นระหว่าง Cu และ Sn ตามสมการที่ 4.2 และ 4.5 โดยปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 179 °C ซึ่งปฏิกิริยาที่มีค่า ΔG ที่น้อย จะมีโอกาสเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าปฏิกิริยาที่มีค่า ΔG ที่มากกว่า จากงานวิจัยของ Laurila และคณะ [15] พบว่าค่า ΔG ของชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5 มีค่าประมาณ -18.21 kJ/mol และค่า ΔG ของชั้นสารประกอบ Cu_3Sn มีค่าประมาณ -9.87 kJ/mol จะเห็นได้ว่าปฏิกิริยาของชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5 มีค่า ΔG ที่น้อยกว่า Cu_3Sn ส่งผลให้อะตอมของ Cu และ Sn จะทำปฏิกิริยาเกิดเป็นชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5 ขึ้นมาก่อน จากนั้นชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5 นี้ จะขยายตัวเนื่องจากการแพร่ของอะตอม Sn และ Cu ผ่านชั้นสารประกอบและมีความหนามากขึ้น โดยพิจารณาจากผิวสัมผัสที่ 1 และ 2 ในรูปที่ 4.13 ดังนี้

ผิวสัมผัสที่ 1 : อะตอมของ Sn แพร่ผ่านชั้นสารประกอบเชิงโลหะมาทำปฏิกิริยากับแผ่นทองแดงเกิดเป็นชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ดังแสดงในสมการที่ 4.5

ผิวสัมผัสที่ 2 : อะตอมของ Cu แพร่ผ่านชั้นสารประกอบเชิงโลหะมาทำปฏิกิริยากับโลหะบัดกรีเกิดเป็นชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ดังแสดงในสมการที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5 บริเวณผิวสัมผัสที่ 1 ในรูปที่ 4.13 พบว่าปริมาณอะตอมของ Cu จะมากกว่าปริมาณอะตอมของ Sn เนื่องจากเป็นบริเวณที่ติดกับแผ่นทองแดง ดังนั้นจึงเกิดชั้นสารประกอบ Cu_3Sn ดังรูปที่ 4.14 และสมการที่ 4.2 นอกจากนี้การทำปฏิกิริยาระหว่างชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5 กับแผ่นทองแดงทำให้เกิดชั้นสารประกอบ Cu_3Sn เช่นกัน ดังสมการที่ 4.3



รูปที่ 4.14 กลไกการแพร่ระหว่างโลหะบัดกรีและแผ่นทองแดง

จากนั้นชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5 และ Cu_3Sn จะขยายตัวจากการแพร่ของอะตอม Sn และ Cu โดยพิจารณาจากผิวสัมผัสที่ 1, 2 และ 3 ในรูปที่ 4.14 ดังนี้

ผิวสัมผัสที่ 1 : อะตอมของ Sn แพร่ผ่านชั้นสารประกอบเชิงโลหะมาทำปฏิกิริยากับแผ่นทองแดงเกิดเป็นชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn ดังแสดงในสมการที่ 4.2

ผิวสัมผัสที่ 2 : อะตอมของ Cu ได้แพร่ผ่านชั้น Cu_3Sn ไปทำปฏิกิริยากับชั้น Cu_6Sn_5 เกิดเป็นชั้นสารประกอบ Cu_3Sn ดังแสดงในสมการที่ 4.3

ผิวสัมผัสที่ 2 : อะตอมของ Sn ได้แพร่ผ่านชั้น Cu_6Sn_5 ไปทำปฏิกิริยากับชั้น Cu_3Sn เกิดเป็นชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5 ดังแสดงในสมการที่ 4.4

ผิวสัมผัสที่ 3 : อะตอมของ Cu แพร่ผ่านชั้นสารประกอบเชิงโลหะมาทำปฏิกิริยากับโลหะบัดกรีเกิดเป็นชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ดังแสดงในสมการที่ 4.5

$$Sn + 3Cu \rightarrow Cu_3Sn \tag{4.2}$$

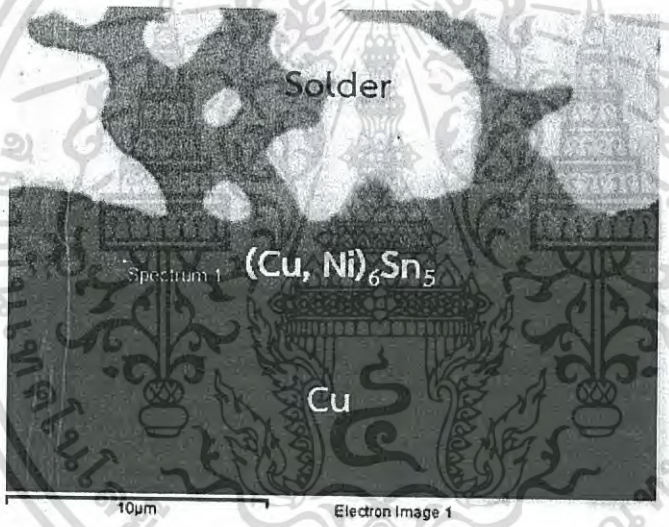
$$9Cu + Cu_6Sn_5 \rightarrow 5Cu_3Sn \tag{4.3}$$

$$3Sn + 2Cu_3Sn \rightarrow Cu_6Sn_5 \tag{4.4}$$

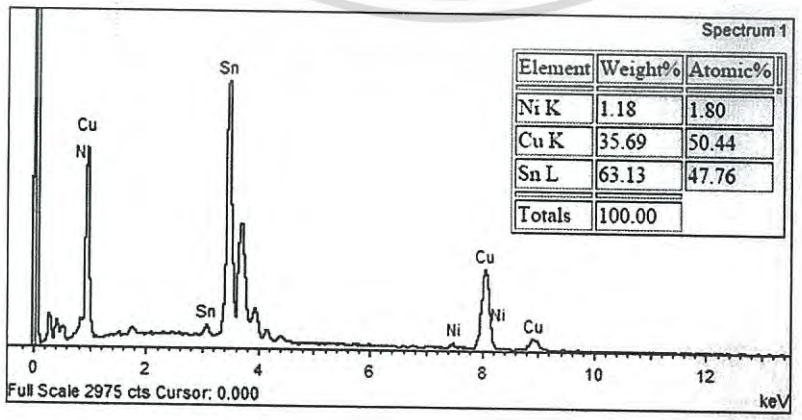
$$6Cu + 5Sn \rightarrow Cu_6Sn_5 \tag{4.5}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการตรวจสอบชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ของโลหะบัดกรีทุกชนิดที่มีส่วนผสมของ Ni ดังแสดงในรูปที่ 4.15 จะพบธาตุ Ni เล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.16 ซึ่งอยู่ในรูปของชั้นสารประกอบ $(Cu,Ni)_6Sn_5$ เนื่องมาจากขนาดอะตอมและค่าอิเล็กโตรเนกาทิวิตีของ Ni คือ 125 pm และ 1.91 Pauling scale ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับ Cu ที่มีขนาดอะตอมและมีค่าอิเล็กโตรเนกาทิวิตีคือ 128 pm และ 1.90 Pauling scale ตามลำดับ นอกจากนี้ Ni และ Cu ยังมีโครงสร้างผลึกชนิดเดียวกันจึงทำให้เกิดการแทนที่ของอะตอม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yoon และ Lee [22] อย่างไรก็ตามไม่พบ In และ Ag ในชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีทุกชนิด เนื่องจาก Ag ไม่มีคุณสมบัติในการแทนที่ของอะตอม Cu หรือ Sn ส่วน In มีขนาดอะตอมและค่าอิเล็กโตรเนกาทิวิตีคือ 155 pm และ 1.78 Pauling scale ตามลำดับ ซึ่งแม้จะใกล้เคียงกับ Sn ที่มีขนาดอะตอมและค่าอิเล็กโตรเนกาทิวิตีคือ 145 pm และ 1.96 Pauling scale ตามลำดับ แต่จากการตรวจสอบไม่พบการแทนที่ของอะตอมในวิทยานิพนธ์นี้ อย่างไรก็ตามงานวิจัยของ Sharif และ Chan [12] พบการแทนที่ของอะตอม In ในชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5 เมื่อมีปริมาณ In ในโลหะบัดกรีจำนวนมาก (9 wt.%)



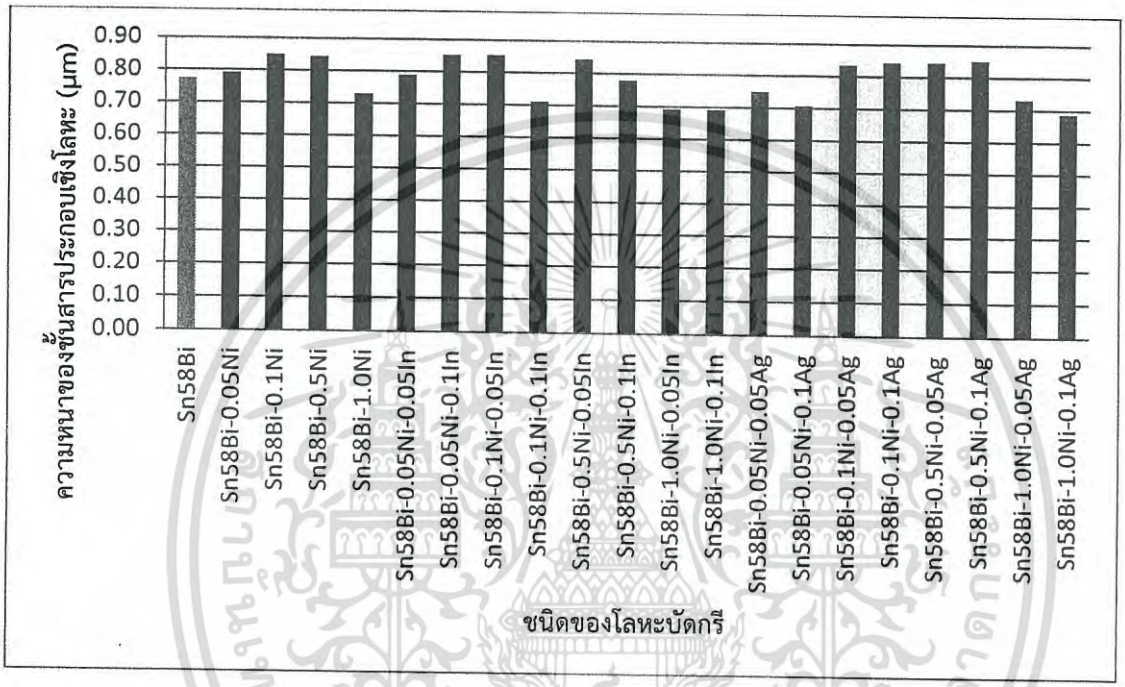
รูปที่ 4.15 ตำแหน่งที่ตรวจสอบปริมาณธาตุของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni



รูปที่ 4.16 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของชั้น $(Cu,Ni)_6Sn_5$ ของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรีแสดงดังรูปที่ 4.17 โดยจะพบเพียงชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 พบว่าการเติมธาตุผสม Ni, In และ Ag ไม่ส่งผลต่อความหนาของชั้นสารประกอบ โดยงานวิจัยของ Mokhtari และ Nishikawa [13] ได้ศึกษาผลกระทบของ Ni และ In ต่อโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับแผ่นทองแดง พบว่าความหนาของชั้นสารประกอบหลังการบัดกรีนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ในวิทยานิพนธ์นี้ โดยอิทธิพลของธาตุผสมต่อความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจะเห็นผลได้ชัดเมื่อผ่านการบ่มด้วยความร้อนเป็นระยะเวลานาน



รูปที่ 4.17 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด

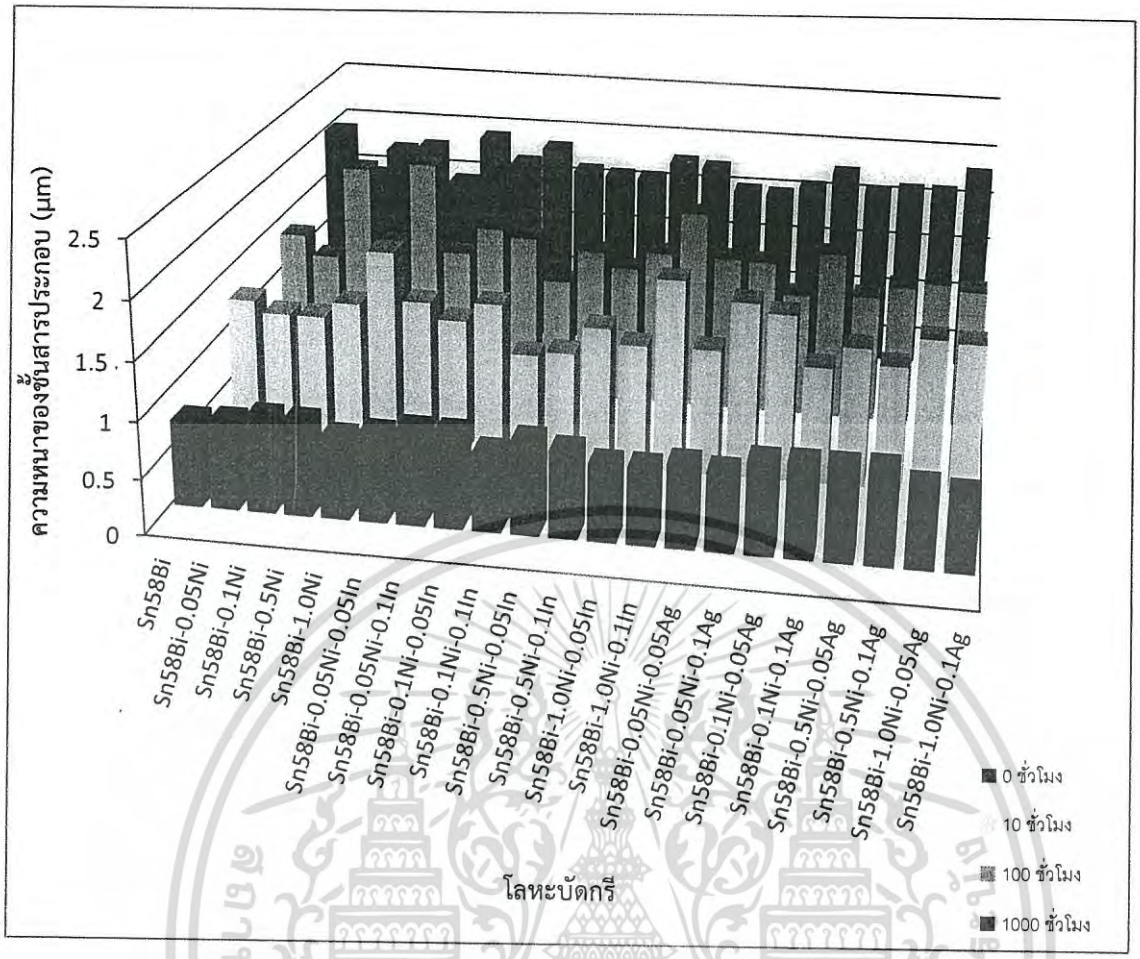
ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม (Cu_6Sn_5+Cu_3Sn) หลังจากการบัดกรีและบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 75, 100 และ 125 °C โดยใช้เวลาบ่ม 10, 100 และ 1000 ชั่วโมง แสดงดังตารางที่ 4.2-4.4 และรูปที่ 4.18-4.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn ที่อุณหภูมิบ่ม 75 °C

ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn (μm)					
อุณหภูมิ °C	โลหะบัดกรี	เวลา (hr)			
		0	10	100	1000
75	Sn58Bi	0.77	1.26	1.37	2.01
	Sn58Bi-0.05Ni	0.79	1.16	1.18	1.56
	Sn58Bi-0.1Ni	0.85	1.16	2.08	1.84
	Sn58Bi-0.5Ni	0.84	1.30	1.36	1.89
	Sn58Bi-1.0Ni	0.73	1.79	2.16	1.54
	Sn58Bi-0.05Ni-0.05In	0.79	1.36	1.30	2.02
	Sn58Bi-0.05Ni-0.1In	0.85	1.22	1.56	1.78
	Sn58Bi-0.1Ni-0.05In	0.85	1.39	1.49	1.95
	Sn58Bi-0.1Ni-0.1In	0.71	0.96	1.09	1.73
	Sn58Bi-0.5Ni-0.05In	0.84	1.00	1.40	1.70
	Sn58Bi-0.5Ni-0.1In	0.78	1.25	1.26	1.69
	Sn58Bi-1.0Ni-0.05In	0.69	1.12	1.43	1.88
	Sn58Bi-1.0Ni-0.1In	0.69	1.72	1.84	1.84
	Sn58Bi-0.05Ni-0.05Ag	0.75	1.13	1.42	1.62
	Sn58Bi-0.05Ni-0.1Ag	0.71	1.57	1.41	1.60
	Sn58Bi-0.1Ni-0.05Ag	0.83	1.49	1.12	1.69
	Sn58Bi-0.1Ni-0.1Ag	0.84	1.05	1.53	1.86
	Sn58Bi-0.5Ni-0.05Ag	0.84	1.25	1.15	1.68
	Sn58Bi-0.5Ni-0.1Ag	0.85	1.11	1.26	1.72
	Sn58Bi-1.0Ni-0.05Ag	0.73	1.37	1.31	1.72
	Sn58Bi-1.0Ni-0.1Ag	0.69	1.35	1.26	1.92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



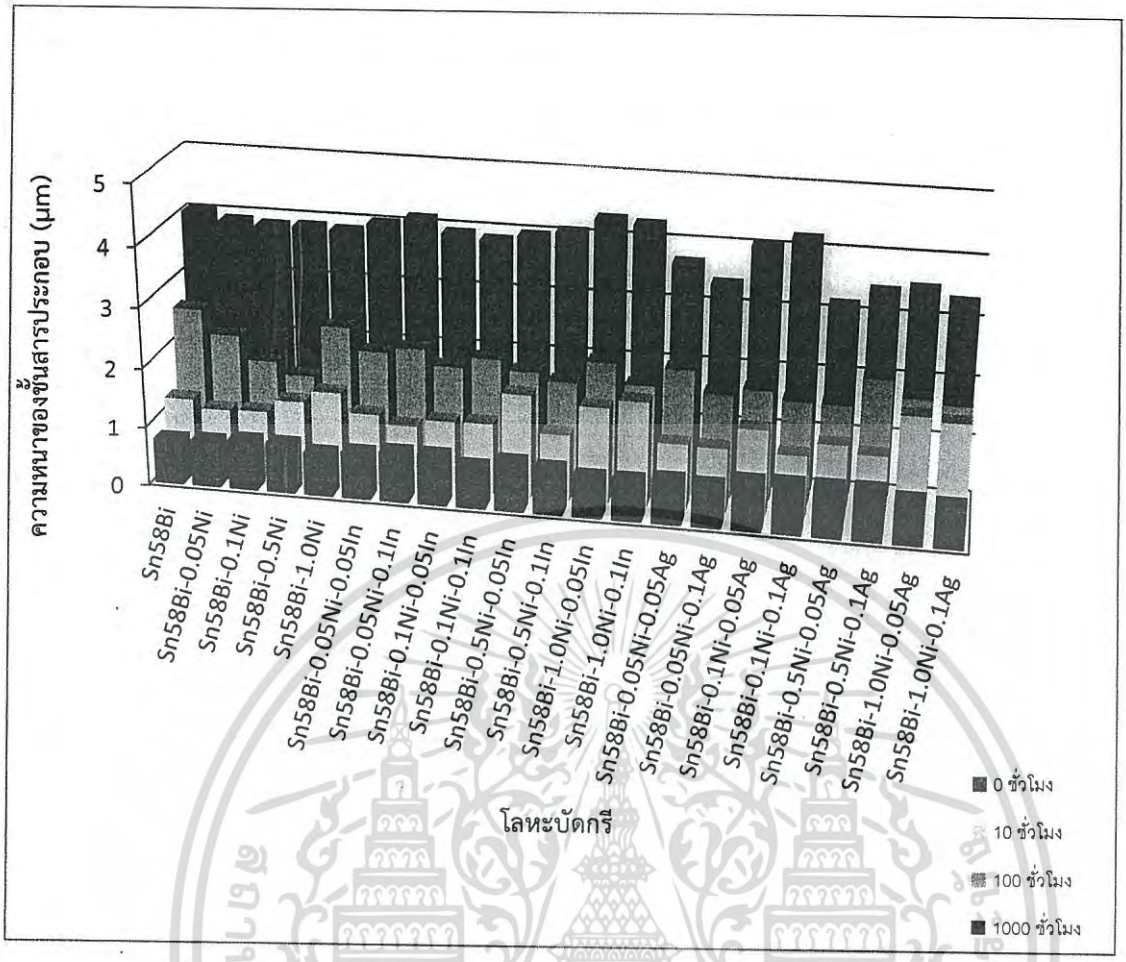
รูปที่ 4.18 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่อุณหภูมิการบ่ม 75 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn ที่อุณหภูมิบ่ม 100 °C

ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn (μm)					
อุณหภูมิ °C	โลหะบัดกรี	เวลา (hr)			
		0	10	100	1000
100	Sn58Bi	0.77	1.25	2.57	4.02
	Sn58Bi-0.05Ni	0.79	1.11	2.17	3.90
	Sn58Bi-0.1Ni	0.85	1.13	1.77	3.86
	Sn58Bi-0.5Ni	0.84	1.35	1.57	3.88
	Sn58Bi-1.0Ni	0.73	1.55	2.44	3.85
	Sn58Bi-0.05Ni-0.05In	0.79	1.23	2.07	4.00
	Sn58Bi-0.05Ni-0.1In	0.85	1.08	2.17	4.12
	Sn58Bi-0.1Ni-0.05In	0.85	1.21	1.91	3.92
	Sn58Bi-0.1Ni-0.1In	0.71	1.22	2.09	3.85
	Sn58Bi-0.5Ni-0.05In	0.84	1.76	1.92	3.96
	Sn58Bi-0.5Ni-0.1In	0.78	1.13	1.79	4.06
	Sn58Bi-1.0Ni-0.05In	0.69	1.64	2.17	4.31
	Sn58Bi-1.0Ni-0.1In	0.69	1.79	1.83	4.26
	Sn58Bi-0.05Ni-0.05Ag	0.75	1.12	2.14	3.68
	Sn58Bi-0.05Ni-0.1Ag	0.71	1.10	1.78	3.37
	Sn58Bi-0.1Ni-0.05Ag	0.83	1.47	1.89	4.04
	Sn58Bi-0.1Ni-0.1Ag	0.84	1.08	1.75	4.19
	Sn58Bi-0.5Ni-0.05Ag	0.84	1.31	1.74	3.15
	Sn58Bi-0.5Ni-0.1Ag	0.85	1.18	2.22	3.42
	Sn58Bi-1.0Ni-0.05Ag	0.73	1.89	1.94	3.50
	Sn58Bi-1.0Ni-0.1Ag	0.69	1.82	1.87	3.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



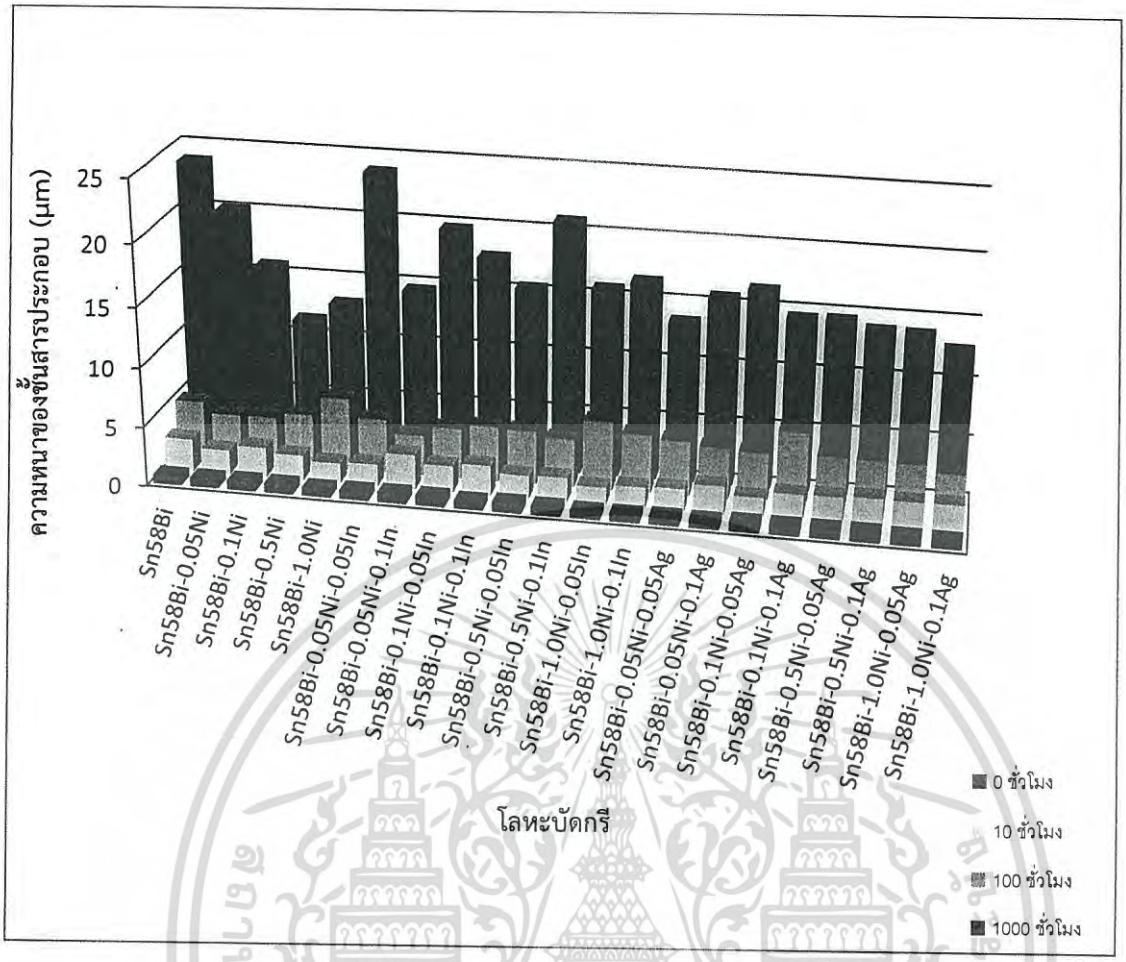
รูปที่ 4.19 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่อุณหภูมิการบ่ม 100 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn ที่อุณหภูมิบ่ม 125 °C

ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn (μm)					
อุณหภูมิ °C	โลหะบัดกรี	เวลา (hr)			
		0	10	100	1000
125	Sn58Bi	0.77	2.77	4.85	23.71
	Sn58Bi-0.05Ni	0.79	2.06	3.94	20.04
	Sn58Bi-0.1Ni	0.85	2.55	3.99	15.71
	Sn58Bi-0.5Ni	0.84	2.14	4.46	11.43
	Sn58Bi-1.0Ni	0.73	1.74	6.10	12.99
	Sn58Bi-0.05Ni-0.05In	0.79	1.90	4.55	23.76
	Sn58Bi-0.05Ni-0.1In	0.85	2.97	3.42	14.50
	Sn58Bi-0.1Ni-0.05In	0.85	2.29	4.27	19.68
	Sn58Bi-0.1Ni-0.1In	0.71	2.59	4.67	17.64
	Sn58Bi-0.5Ni-0.05In	0.84	2.01	4.60	15.34
	Sn58Bi-0.5Ni-0.1In	0.78	2.09	4.14	20.86
	Sn58Bi-1.0Ni-0.05In	0.69	1.52	5.91	15.71
	Sn58Bi-1.0Ni-0.1In	0.69	1.80	5.01	16.52
	Sn58Bi-0.05Ni-0.05Ag	0.75	1.92	4.73	13.45
	Sn58Bi-0.05Ni-0.1Ag	0.71	2.45	4.41	15.64
	Sn58Bi-0.1Ni-0.05Ag	0.83	1.74	4.23	16.48
	Sn58Bi-0.1Ni-0.1Ag	0.84	2.28	6.23	14.40
	Sn58Bi-0.5Ni-0.05Ag	0.84	2.33	4.40	14.49
	Sn58Bi-0.5Ni-0.1Ag	0.85	2.48	4.36	13.88
	Sn58Bi-1.0Ni-0.05Ag	0.73	2.42	4.31	13.79
	Sn58Bi-1.0Ni-0.1Ag	0.69	2.45	3.75	12.72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่อุณหภูมิการบ่ม 125 °C

หลังจากที่ได้ทำการวัดค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในแต่ละอุณหภูมิ (75, 100, 125 °C) และเวลาบ่ม (0, 10, 100, 1000 ชั่วโมง) แล้ว จึงทำการทดสอบความถูกต้องของข้อมูลความหนาของชั้นสารประกอบที่วัดได้ โดยเลือกกลุ่มตัวอย่างเป็นโลหะบัดกรี Sn-58Bi ที่ผ่านการบ่มด้วยความร้อนที่ 125 °C เป็นเวลา 100 ชั่วโมง มาทำการทำซ้ำ 5 ครั้ง เพื่อเปรียบเทียบค่าความหนาของชั้นสารประกอบระหว่างชิ้นงานที่ทำการวัด 1 ครั้ง ในวิทยานิพนธ์นี้กับค่าเฉลี่ยของความหนาชั้นสารประกอบจากกลุ่มตัวอย่าง 5 ชิ้นงานว่ามีค่าแตกต่างกันหรือไม่ ด้วยวิธี one sample t-test โดยกำหนดสมมติฐานให้

H_0 : ค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจากการวัด 1 ครั้ง เท่ากับ ค่าเฉลี่ยความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจากกลุ่มตัวอย่าง 5 ชิ้น

H_1 : ค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจากการวัด 1 ครั้ง ไม่เท่ากับ ค่าเฉลี่ยความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจากกลุ่มตัวอย่าง 5 ชิ้น

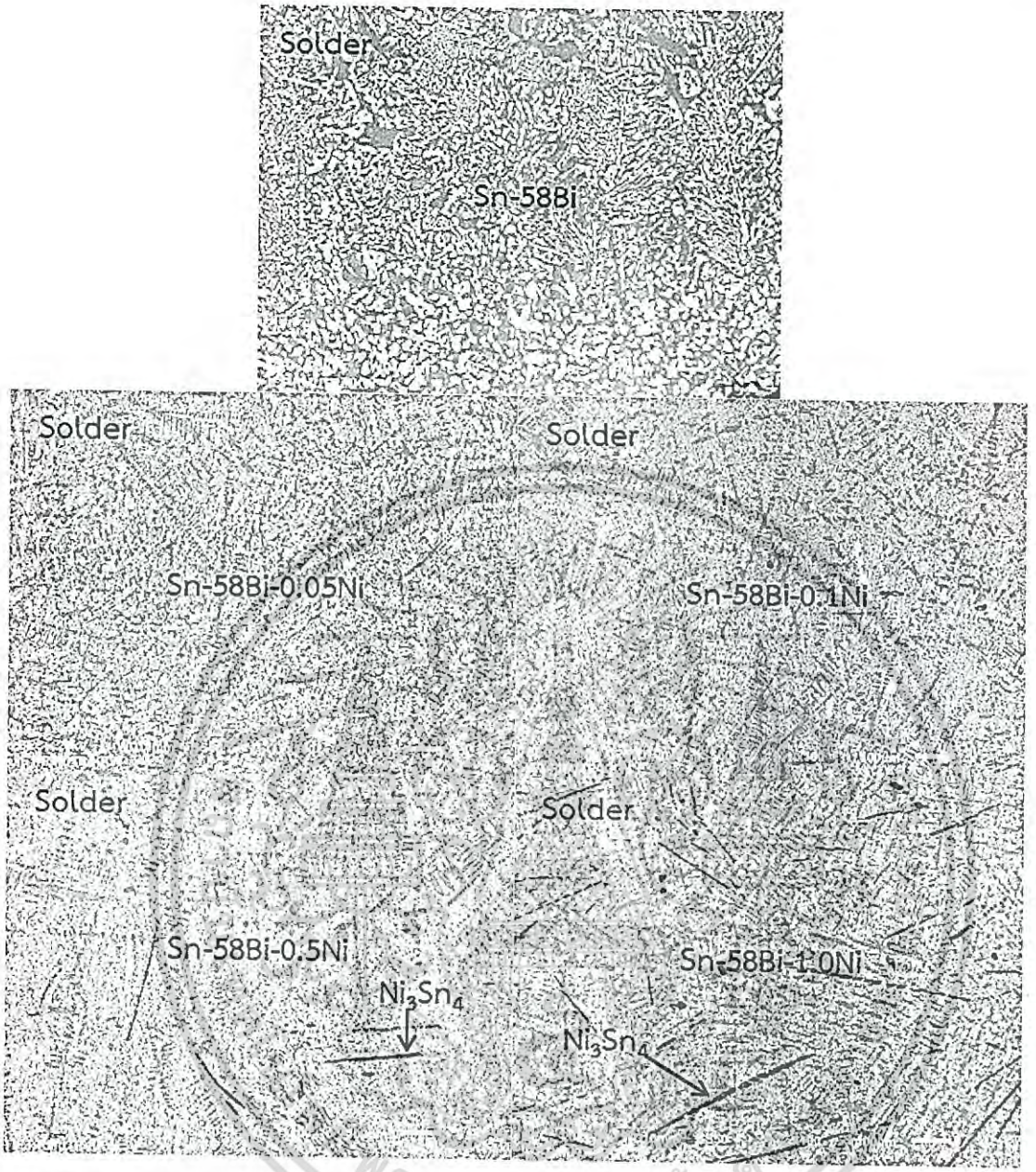
โดยผลการทดสอบพบว่าค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจากการวัด 1 ครั้ง ไม่ต่างจากค่าเฉลี่ยความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจากกลุ่มตัวอย่าง 5 ชิ้น ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยผลการทดสอบทางสถิติแสดงในภาคผนวก ช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.18-4.20 จะเห็นได้ว่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาบ่มเพิ่มขึ้น โดยอิทธิพลของธาตุผสมจะเห็นได้ชัดเจนเมื่อชิ้นงานถูกบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 125 °C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง จากรูปที่ 4.20 จะเห็นได้ว่าการเติม Ni จะช่วยลดขนาดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn ได้ เนื่องจากค่าพลังงานกระตุ้นที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่าง Sn กับ Ni นั้น น้อยกว่าค่าพลังงานกระตุ้นที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่าง Sn กับ Cu โดยงานวิจัยของ Yoon และคณะ [51] ทำการบ่มชิ้นงานโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับแผ่นทองแดง และชิ้นงานโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับแผ่นทองแดงชุบนิกเกิล (ความหนา 5-7 μm) โดยบ่มชิ้นงานที่อุณหภูมิ 70, 90, 100, และ 120 °C เป็นเวลา 1-60 วัน ผลการทดสอบพบว่าค่าพลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5 และ Ni_3Sn_4 คือ 129.7 และ 81.6 kJ/mol ตามลำดับ ดังนั้น Sn จึงมีแนวโน้มทำปฏิกิริยากับ Ni เพื่อเกิดเป็นสารประกอบ Ni_3Sn_4 มากกว่าการทำปฏิกิริยากับ Cu เพื่อเกิดเป็นชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5

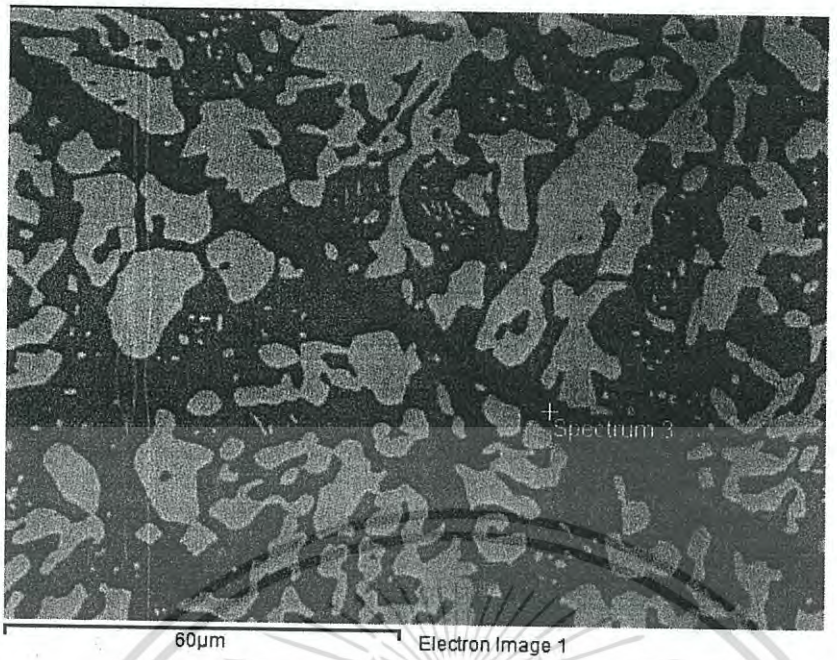
โดยวิทยานิพนธ์นี้พบสารประกอบ Ni_3Sn_4 ในพื้นที่ของโลหะบัดกรีดังแสดงในรูปที่ 4.21 ที่แสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีที่มีปริมาณ Ni ต่างกันที่กำลังขยาย 100 เท่า ซึ่งสารประกอบ Ni_3Sn_4 จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณ Ni ในโลหะบัดกรี และเป็นสาเหตุในการลดขนาดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn โดยบริเวณที่ตรวจสอบปริมาณธาตุแสดงดังรูปที่ 4.22 และผลของการวิเคราะห์ปริมาณธาตุแสดงดังรูปที่ 4.23 อย่างไรก็ตามไม่พบสารประกอบ Ni_3Sn_4 ในพื้นที่โลหะบัดกรีสูตร Sn-58Bi-0.05Ni และ Sn-58Bi-0.1Ni เนื่องจากปริมาณ Ni ที่ผสมลงไปมีปริมาณน้อยมาก ซึ่งส่งผลให้การตรวจสอบปริมาณธาตุพบสารประกอบ Ni_3Sn_4 นั้นทำได้ยาก ส่วนการเติม In และ Ag ไม่ส่งผลต่อขนาดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ เนื่องมาจากปริมาณ In และ Ag ที่ผสมลงไปมีปริมาณน้อยมาก โดยความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Sn-58Bi เทียบกับโลหะบัดกรีสูตรต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

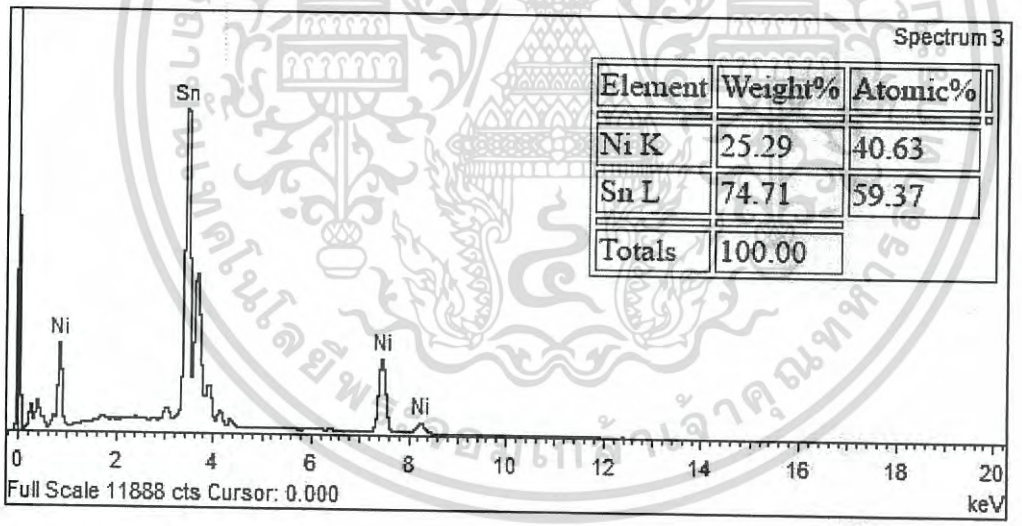


รูปที่ 4.21 โครงสร้างจุลภาคในพื้นที่โลหะบัดกรีที่มีปริมาณ Ni ต่างกันหลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125 °C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 ตำแหน่งที่ตรวจสอบปริมาณธาตุของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125 °C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง



รูปที่ 4.23 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของสารประกอบ Ni_3Sn_4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ความหนาของชั้นสารประกอบรวมของโลหะบัดกรีสูตรต่างๆ

โลหะบัดกรี	ความหนาของชั้นสารประกอบ (μm)	อุณหภูมิบ่ม(°C)/ระยะเวลาบ่ม (hr)	จุดหลอมเหลว (°C)	Refs
Sn-58Bi	0.77	หลังการบัดกรี	139	This work
	1.26	75/10		
	1.37	75/100		
	2.01	75/1000		
	4.02	100/1000		
	23.71	125/1000		
Sn-58Bi	0.75	หลังการบัดกรี	139	[13]
	1.20	80/168		
	1.50	80/504		
	1.90	80/1008		
Sn-0.3Ag-0.7Cu	2.48	หลังการบัดกรี	217	[45]
	3.54	100/1000		
	16.39	135/1000		
	17.37	170/1000		

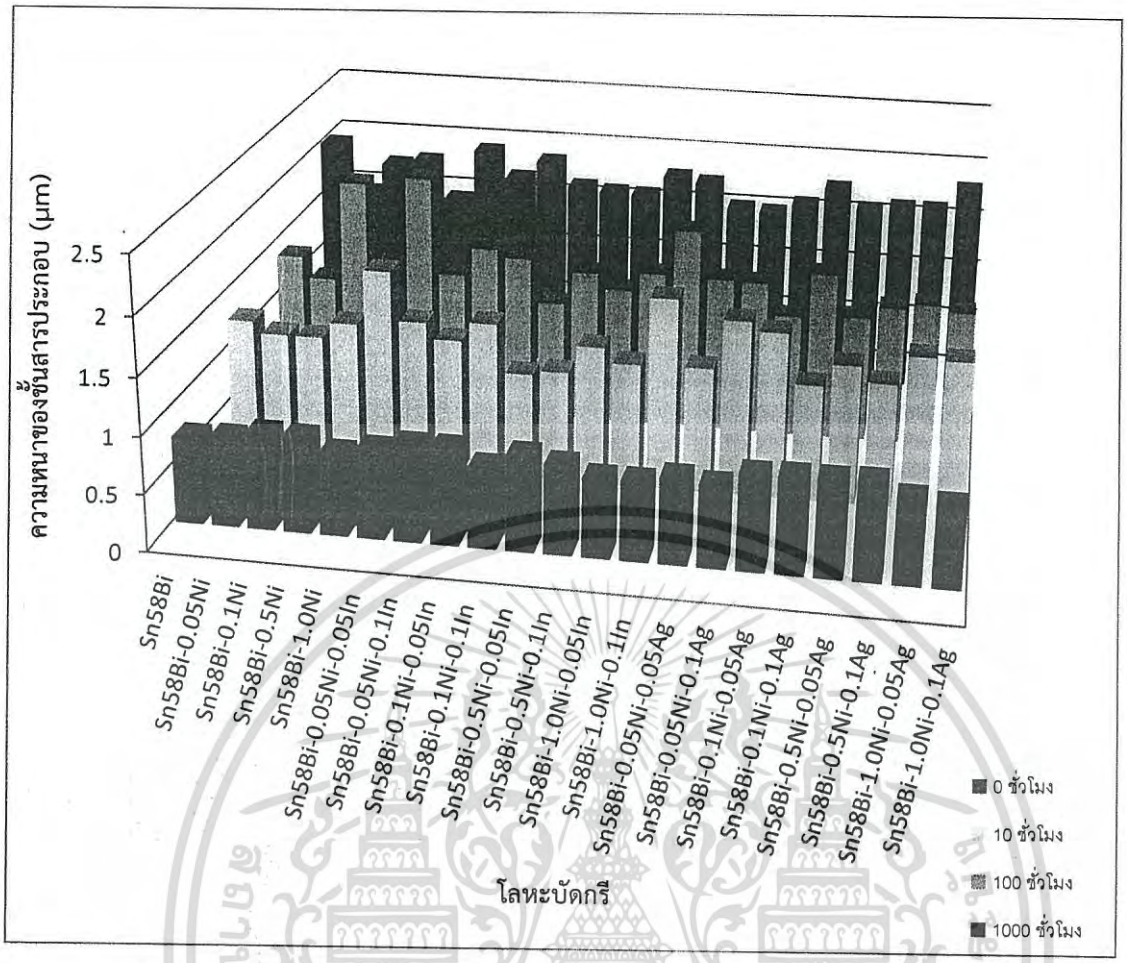
โดยชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นหลังการบัดกรีและหลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75 °C จะมีเพียง Cu_6Sn_5 ซึ่งความหนาของชั้น Cu_6Sn_5 แสดงในตารางที่ 4.6-4.8 และรูปที่ 4.24-4.26 โดยความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาบ่มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม ซึ่งความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 นั้น มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับแนวโน้มของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม ดังนั้นการเติมธาตุ Ni, In, และ Ag จึงมีผลต่อความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ในแนวโน้มเดียวกันกับชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ที่อุณหภูมิบ่ม 75 °C

ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 (μm)					
อุณหภูมิ °C	โลหะบัดกรี	เวลา (hr)			
		0	10	100	1000
75	Sn58Bi	0.77	1.26	1.37	2.01
	Sn58Bi-0.05Ni	0.79	1.16	1.18	1.56
	Sn58Bi-0.1Ni	0.85	1.16	2.08	1.84
	Sn58Bi-0.5Ni	0.84	1.30	1.36	1.89
	Sn58Bi-1.0Ni	0.73	1.79	2.16	1.54
	Sn58Bi-0.05Ni-0.05In	0.79	1.36	1.30	2.02
	Sn58Bi-0.05Ni-0.1In	0.85	1.22	1.56	1.78
	Sn58Bi-0.1Ni-0.05In	0.85	1.39	1.49	1.95
	Sn58Bi-0.1Ni-0.1In	0.71	0.96	1.09	1.73
	Sn58Bi-0.5Ni-0.05In	0.84	1.00	1.40	1.70
	Sn58Bi-0.5Ni-0.1In	0.78	1.25	1.26	1.69
	Sn58Bi-1.0Ni-0.05In	0.69	1.12	1.43	1.88
	Sn58Bi-1.0Ni-0.1In	0.69	1.72	1.84	1.84
	Sn58Bi-0.05Ni-0.05Ag	0.75	1.13	1.42	1.62
	Sn58Bi-0.05Ni-0.1Ag	0.71	1.57	1.41	1.60
	Sn58Bi-0.1Ni-0.05Ag	0.83	1.49	1.12	1.69
	Sn58Bi-0.1Ni-0.1Ag	0.84	1.05	1.53	1.86
	Sn58Bi-0.5Ni-0.05Ag	0.84	1.25	1.15	1.68
	Sn58Bi-0.5Ni-0.1Ag	0.85	1.11	1.26	1.72
	Sn58Bi-1.0Ni-0.05Ag	0.73	1.37	1.31	1.72
	Sn58Bi-1.0Ni-0.1Ag	0.69	1.35	1.26	1.92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



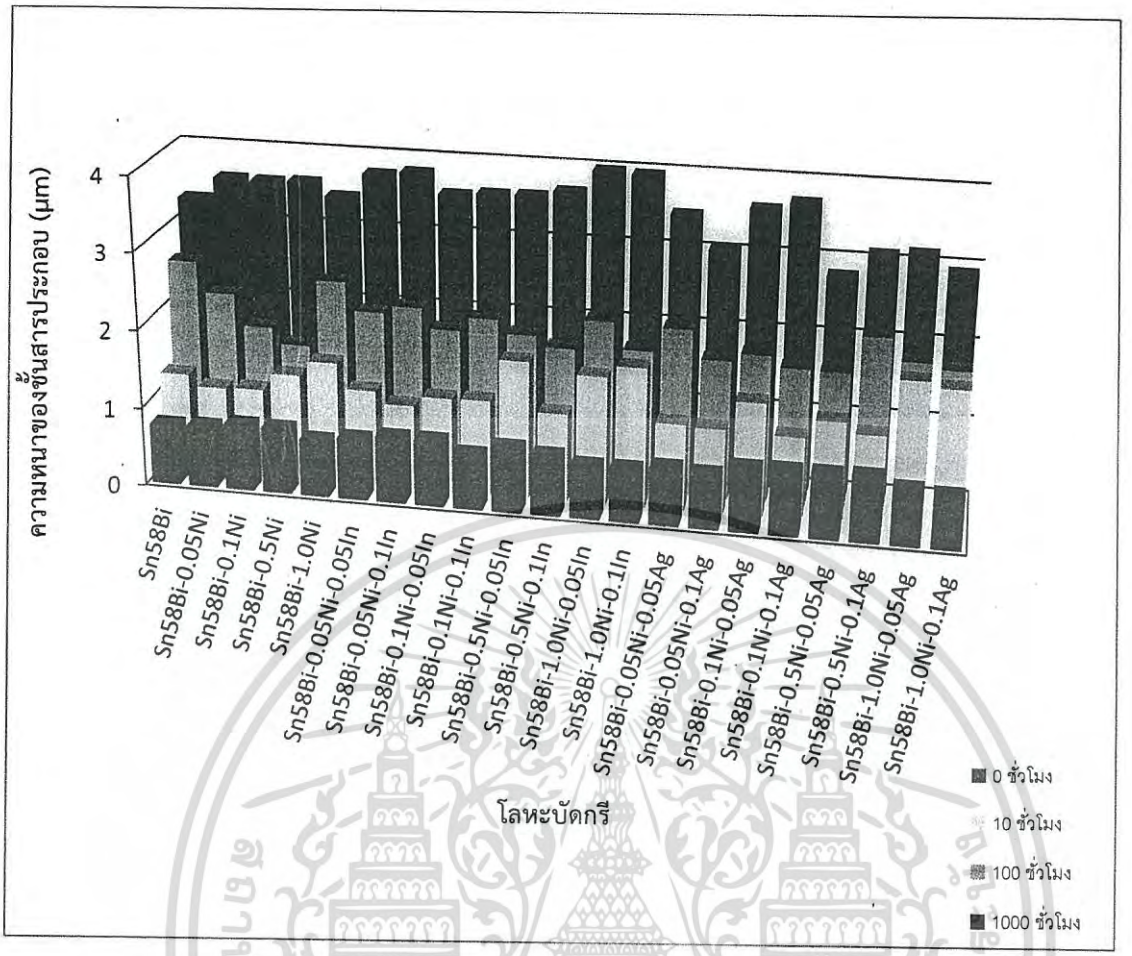
รูปที่ 4.24 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ที่อุณหภูมิการบ่ม 75 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ที่อุณหภูมิบ่ม 100 °C

ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 (μm)					
อุณหภูมิ °C	โลหะบัดกรี	เวลา (hr)			
		0	10	100	1000
100	Sn58Bi	0.77	1.25	2.57	3.28
	Sn58Bi-0.05Ni	0.79	1.11	2.17	3.58
	Sn58Bi-0.1Ni	0.85	1.13	1.77	3.57
	Sn58Bi-0.5Ni	0.84	1.35	1.57	3.59
	Sn58Bi-1.0Ni	0.73	1.55	2.44	3.42
	Sn58Bi-0.05Ni-0.05In	0.79	1.23	2.07	3.75
	Sn58Bi-0.05Ni-0.1In	0.85	1.08	2.17	3.80
	Sn58Bi-0.1Ni-0.05In	0.85	1.21	1.91	3.54
	Sn58Bi-0.1Ni-0.1In	0.71	1.22	2.09	3.58
	Sn58Bi-0.5Ni-0.05In	0.84	1.76	1.92	3.59
	Sn58Bi-0.5Ni-0.1In	0.78	1.13	1.79	3.67
	Sn58Bi-1.0Ni-0.05In	0.69	1.64	2.17	3.97
	Sn58Bi-1.0Ni-0.1In	0.69	1.79	1.83	3.95
	Sn58Bi-0.05Ni-0.05Ag	0.75	1.12	2.14	3.46
	Sn58Bi-0.05Ni-0.1Ag	0.71	1.10	1.78	3.02
	Sn58Bi-0.1Ni-0.05Ag	0.83	1.47	1.89	3.60
	Sn58Bi-0.1Ni-0.1Ag	0.84	1.08	1.75	3.71
	Sn58Bi-0.5Ni-0.05Ag	0.84	1.31	1.74	2.78
	Sn58Bi-0.5Ni-0.1Ag	0.85	1.18	2.22	3.09
	Sn58Bi-1.0Ni-0.05Ag	0.73	1.89	1.94	3.13
	Sn58Bi-1.0Ni-0.1Ag	0.69	1.82	1.87	2.91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



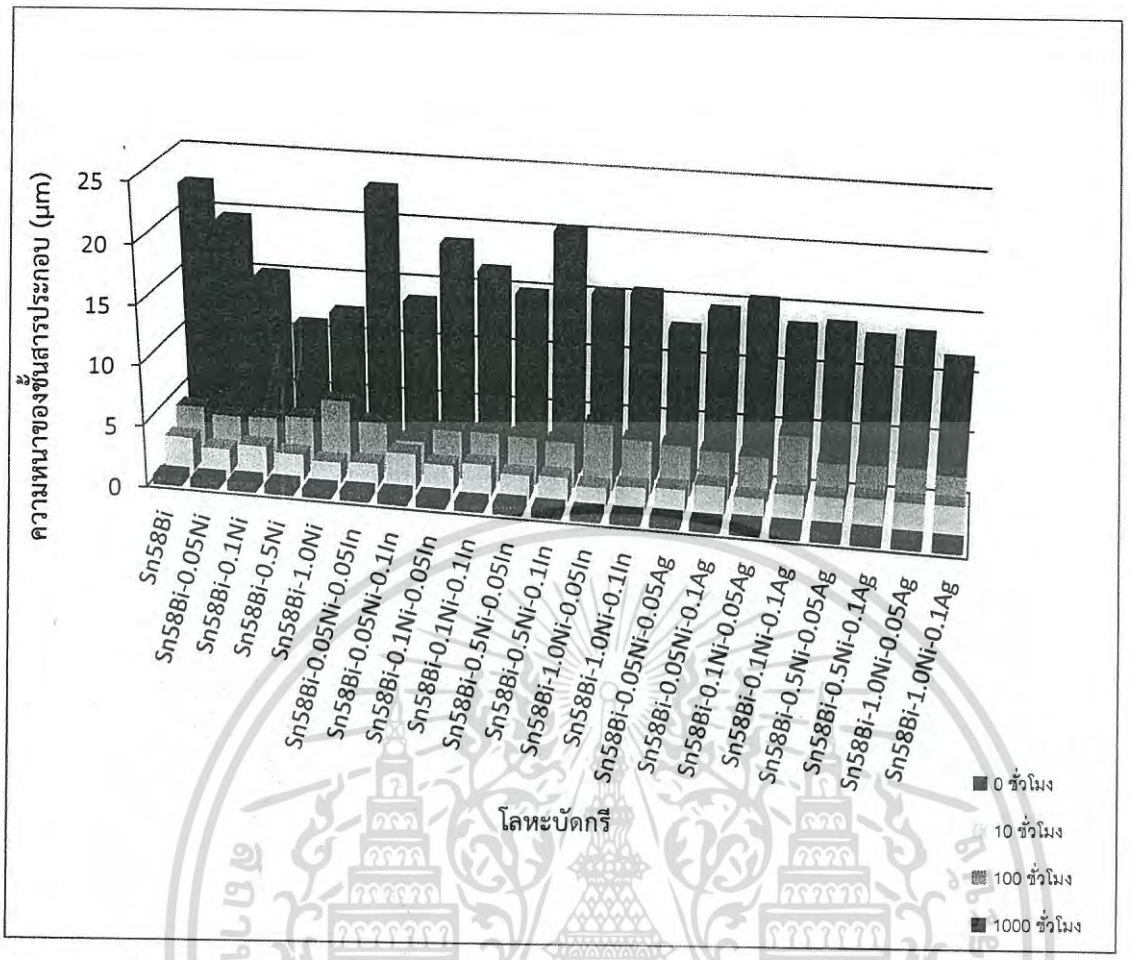
รูปที่ 4.25 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ที่อุณหภูมิการบ่ม 100 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ที่อุณหภูมิบ่ม 125 °C

ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 (μm)					
อุณหภูมิ °C	โลหะบัดกรี	เวลา (hr)			
		0	10	100	1000
125	Sn58Bi	0.77	2.77	4.19	22.18
	Sn58Bi-0.05Ni	0.79	2.06	3.65	19.45
	Sn58Bi-0.1Ni	0.85	2.55	3.73	14.90
	Sn58Bi-0.5Ni	0.84	2.14	4.02	10.81
	Sn58Bi-1.0Ni	0.73	1.74	5.67	12.07
	Sn58Bi-0.05Ni-0.05In	0.79	1.90	4.05	22.70
	Sn58Bi-0.05Ni-0.1In	0.85	2.97	2.77	13.42
	Sn58Bi-0.1Ni-0.05In	0.85	2.29	3.90	18.55
	Sn58Bi-0.1Ni-0.1In	0.71	2.59	3.98	16.49
	Sn58Bi-0.5Ni-0.05In	0.84	2.01	3.87	14.71
	Sn58Bi-0.5Ni-0.1In	0.78	2.09	3.72	20.18
	Sn58Bi-1.0Ni-0.05In	0.69	1.52	5.41	15.16
	Sn58Bi-1.0Ni-0.1In	0.69	1.80	4.38	15.43
	Sn58Bi-0.05Ni-0.05Ag	0.75	1.92	4.18	12.66
	Sn58Bi-0.05Ni-0.1Ag	0.71	2.45	3.94	14.34
	Sn58Bi-0.1Ni-0.05Ag	0.83	1.74	3.78	15.37
	Sn58Bi-0.1Ni-0.1Ag	0.84	2.28	5.75	13.40
	Sn58Bi-0.5Ni-0.05Ag	0.84	2.33	3.78	13.76
	Sn58Bi-0.5Ni-0.1Ag	0.85	2.48	3.90	12.91
	Sn58Bi-1.0Ni-0.05Ag	0.73	2.42	3.92	13.41
	Sn58Bi-1.0Ni-0.1Ag	0.69	2.45	3.53	11.52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ที่อุณหภูมิการบ่ม 125 °C

ชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn จะเกิดขึ้นหลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C และ 125 °C ซึ่งความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn แสดงในตารางที่ 4.10 และ 4.11 และรูปที่ 4.27 และ 4.28 โดยชั้นสารประกอบ Cu_3Sn จะเริ่มเกิดขึ้นที่อุณหภูมิการบ่ม 100 °C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ซึ่งมีความหนาของชั้นสารประกอบน้อยมาก ดังแสดงในตารางที่ 4.9 โดยจะมีความหนาของชั้นสารประกอบเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่อุณหภูมิการบ่ม 125 °C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.9 ความหนาของชั้นสารประกอบ Cu_3Sn ของโลหะบัดกรีสูตรต่างๆ

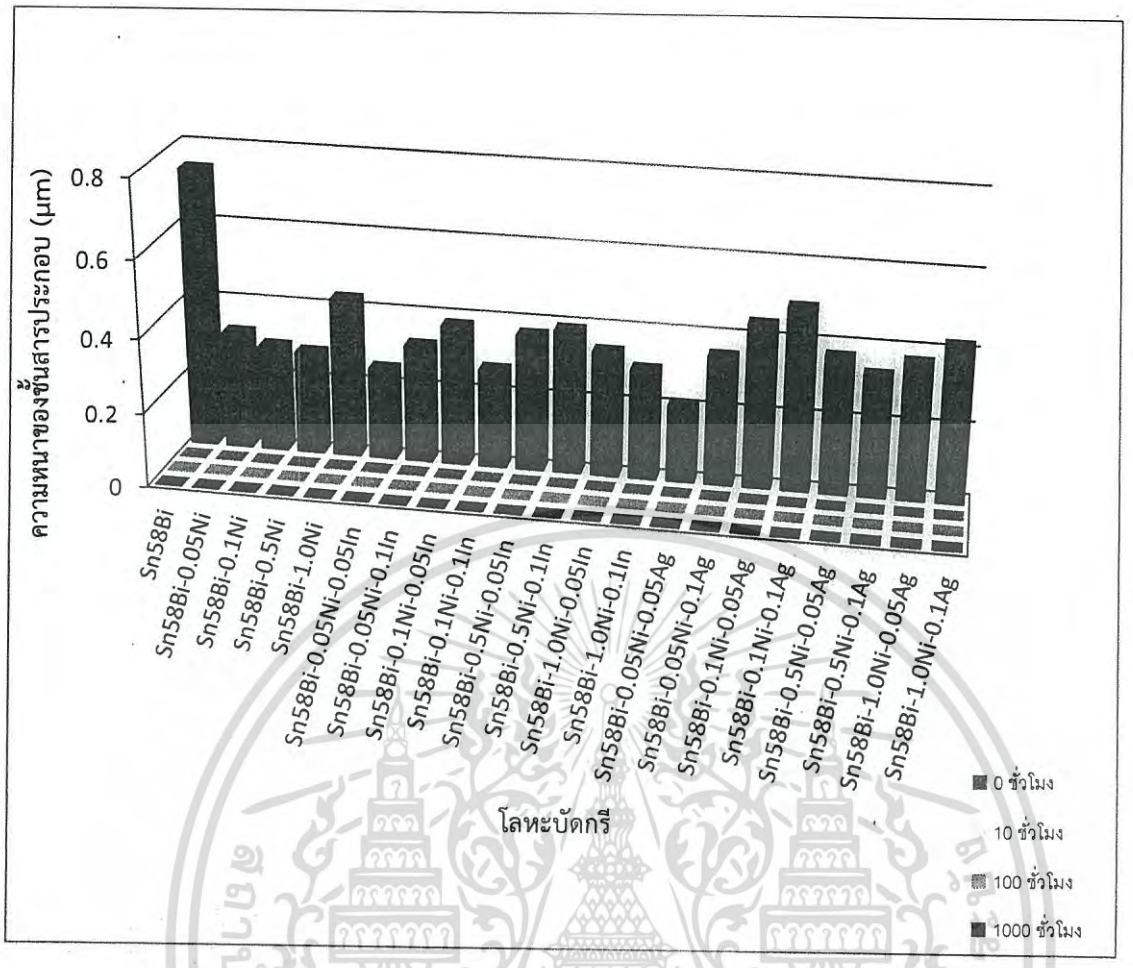
โลหะบัดกรี	ความหนาของชั้นสารประกอบ (μm)	อุณหภูมิบ่ม(°C)/ระยะเวลาบ่ม (hr)	จุดหลอมเหลว (°C)	Refs
Sn-58Bi	0.74	100/1000	139	This work
	1.53	125/1000		
Sn-58Bi	0	80/1008	139	[13]
Sn-0.3Ag-0.7Cu	4.36	135/1000	217	[45]
Sn-0.3Ag-0.7Cu	8.16	170/1000		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn ที่อุณหภูมิบ่ม 100 °C

ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn (μm)					
อุณหภูมิ °C	โลหะบัดกรี	เวลา (hr)			
		0	10	100	1000
100	Sn58Bi	-	-	-	0.74
	Sn58Bi-0.05Ni	-	-	-	0.32
	Sn58Bi-0.1Ni	-	-	-	0.29
	Sn58Bi-0.5Ni	-	-	-	0.28
	Sn58Bi-1.0Ni	-	-	-	0.43
	Sn58Bi-0.05Ni-0.05In	-	-	-	0.25
	Sn58Bi-0.05Ni-0.1In	-	-	-	0.32
	Sn58Bi-0.1Ni-0.05In	-	-	-	0.38
	Sn58Bi-0.1Ni-0.1In	-	-	-	0.27
	Sn58Bi-0.5Ni-0.05In	-	-	-	0.37
	Sn58Bi-0.5Ni-0.1In	-	-	-	0.39
	Sn58Bi-1.0Ni-0.05In	-	-	-	0.34
	Sn58Bi-1.0Ni-0.1In	-	-	-	0.30
	Sn58Bi-0.05Ni-0.05Ag	-	-	-	0.21
	Sn58Bi-0.05Ni-0.1Ag	-	-	-	0.35
	Sn58Bi-0.1Ni-0.05Ag	-	-	-	0.44
	Sn58Bi-0.1Ni-0.1Ag	-	-	-	0.49
	Sn58Bi-0.5Ni-0.05Ag	-	-	-	0.37
	Sn58Bi-0.5Ni-0.1Ag	-	-	-	0.33
	Sn58Bi-1.0Ni-0.05Ag	-	-	-	0.37
	Sn58Bi-1.0Ni-0.1Ag	-	-	-	0.42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



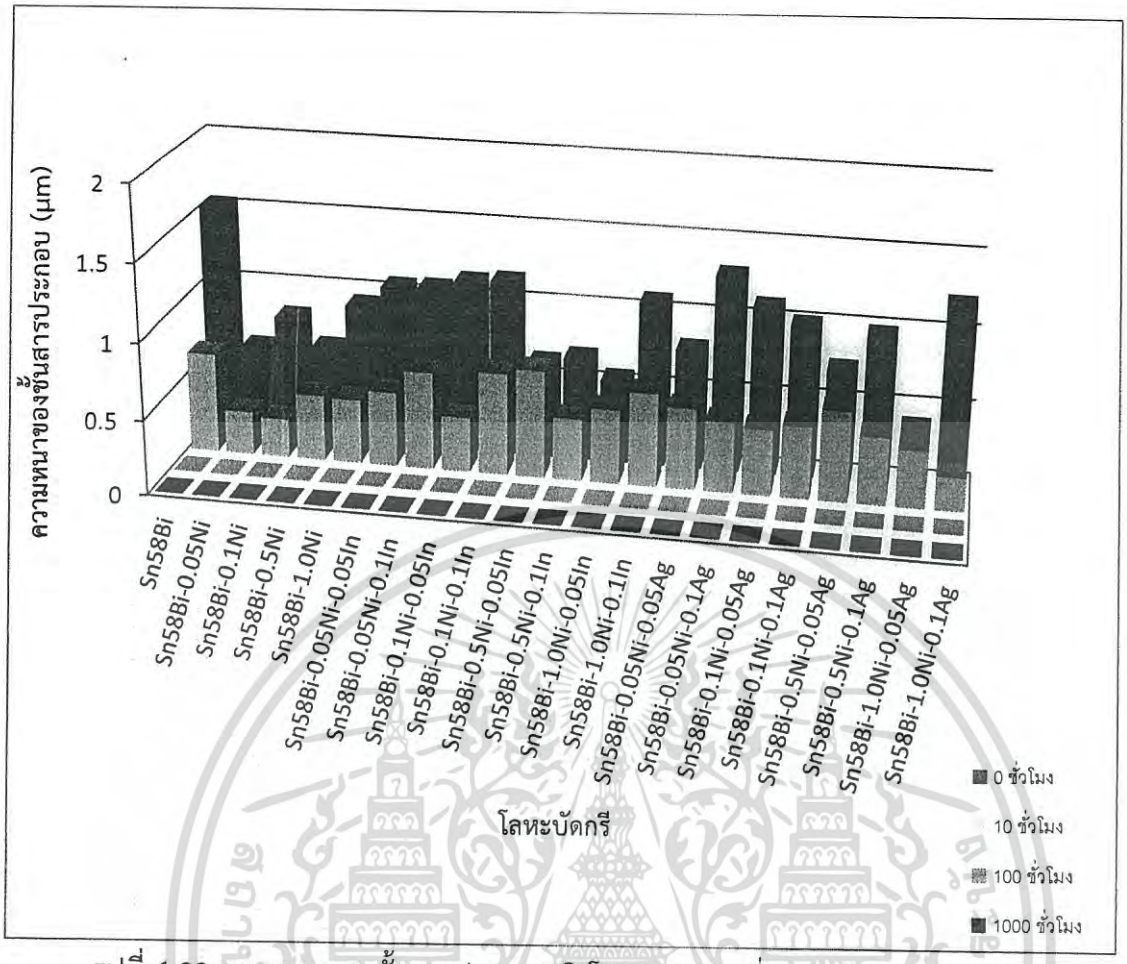
รูปที่ 4.27 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn ที่อุณหภูมิการบ่ม 100 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn ที่อุณหภูมิบ่ม 125 °C

ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn (μm)					
อุณหภูมิ °C	โลหะบัดกรี	เวลา (hr)			
		0	10	100	1000
125	Sn58Bi	-	-	0.66	1.53
	Sn58Bi-0.05Ni	-	-	0.29	0.59
	Sn58Bi-0.1Ni	-	-	0.26	0.81
	Sn58Bi-0.5Ni	-	-	0.44	0.62
	Sn58Bi-1.0Ni	-	-	0.43	0.92
	Sn58Bi-0.05Ni-0.05In	-	-	0.50	1.06
	Sn58Bi-0.05Ni-0.1In	-	-	0.65	1.07
	Sn58Bi-0.1Ni-0.05In	-	-	0.37	1.13
	Sn58Bi-0.1Ni-0.1In	-	-	0.68	1.15
	Sn58Bi-0.5Ni-0.05In	-	-	0.72	0.63
	Sn58Bi-0.5Ni-0.1In	-	-	0.42	0.68
	Sn58Bi-1.0Ni-0.05In	-	-	0.50	0.55
	Sn58Bi-1.0Ni-0.1In	-	-	0.63	1.08
	Sn58Bi-0.05Ni-0.05Ag	-	-	0.55	0.79
	Sn58Bi-0.05Ni-0.1Ag	-	-	0.48	1.29
	Sn58Bi-0.1Ni-0.05Ag	-	-	0.45	1.10
	Sn58Bi-0.1Ni-0.1Ag	-	-	0.49	1.00
	Sn58Bi-0.5Ni-0.05Ag	-	-	0.61	0.73
	Sn58Bi-0.5Ni-0.1Ag	-	-	0.46	0.97
	Sn58Bi-1.0Ni-0.05Ag	-	-	0.39	0.38
	Sn58Bi-1.0Ni-0.1Ag	-	-	0.23	1.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



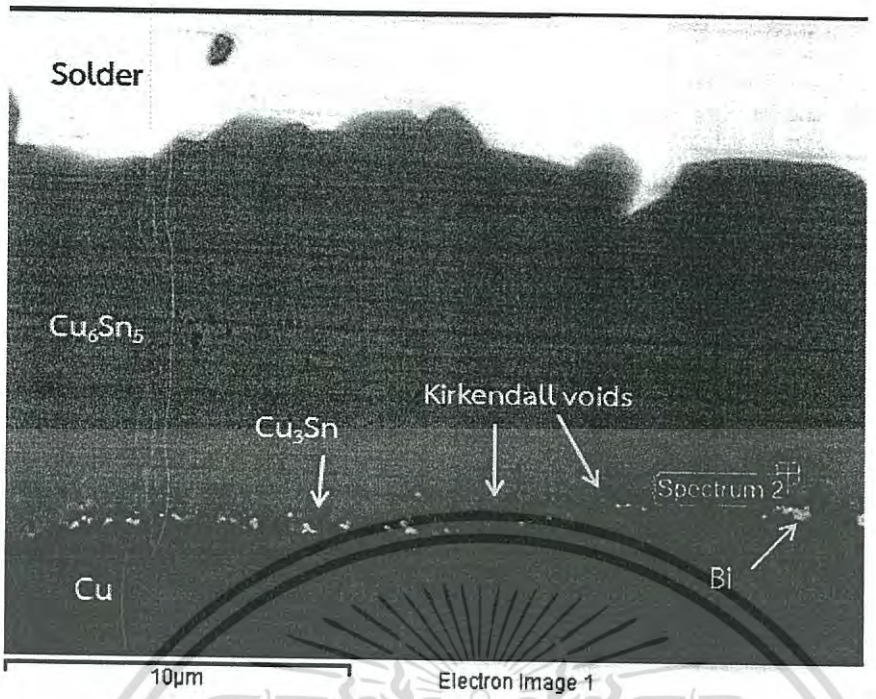
รูปที่ 4.28 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn ที่อุณหภูมิการบ่ม 125 °C

จากรูปที่ 4.27 และ 4.28 พบว่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn ลดลงเมื่อเติมธาตุผสม Ni ซึ่งอิทธิพลของการเติมธาตุผสม Ni, In, และ Ag ต่อความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn มีแนวโน้มเดียวกันกับชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวมดังที่กล่าวไว้แล้วในข้างต้น

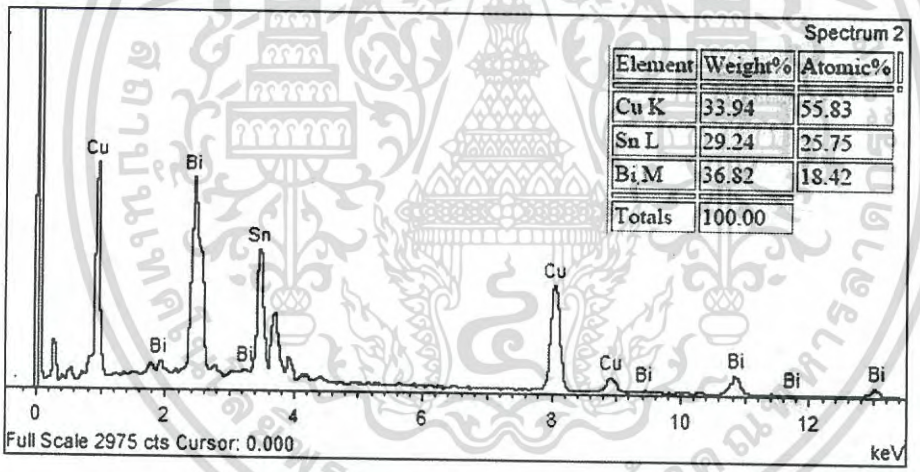
นอกเหนือจากนี้ชิ้นงานที่ผ่านการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 125 °C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง จะพบช่องว่าง (Kirkendall voids) ระหว่างชั้นสารประกอบ Cu_3Sn และทองแดง โดย Kirkendall voids นั้นเกิดจากอัตราการแพร่ที่ไม่เท่ากันของธาตุ Cu และ Sn โดย Cu จะมีอัตราการแพร่ที่เร็วกว่า Sn จึงทำให้เกิด Kirkendall voids ในบริเวณที่อะตอมของ Cu ได้แพร่ออกไป โดย Kirkendall voids นั้น หากมีจำนวนมากจะทำให้เกิดการหลุดออกจากกันของชิ้นงานและส่งผลต่อความน่าเชื่อถือของรอยต่อ นอกเหนือจากนี้ยังพบการก่อตัวของ Bi ที่แพร่จากโลหะบัดกรีมายังช่องว่างดังกล่าวอีกด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang และคณะ Hu และคณะ และ Kang และคณะ [52-54]

โดยตำแหน่งของชั้นสารประกอบต่างๆและบริเวณที่ตรวจสอบปริมาณธาตุที่กำลังขยาย 5000 เท่าของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag แสดงดังรูปที่ 4.29 และผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุแสดงดังรูปที่ 4.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



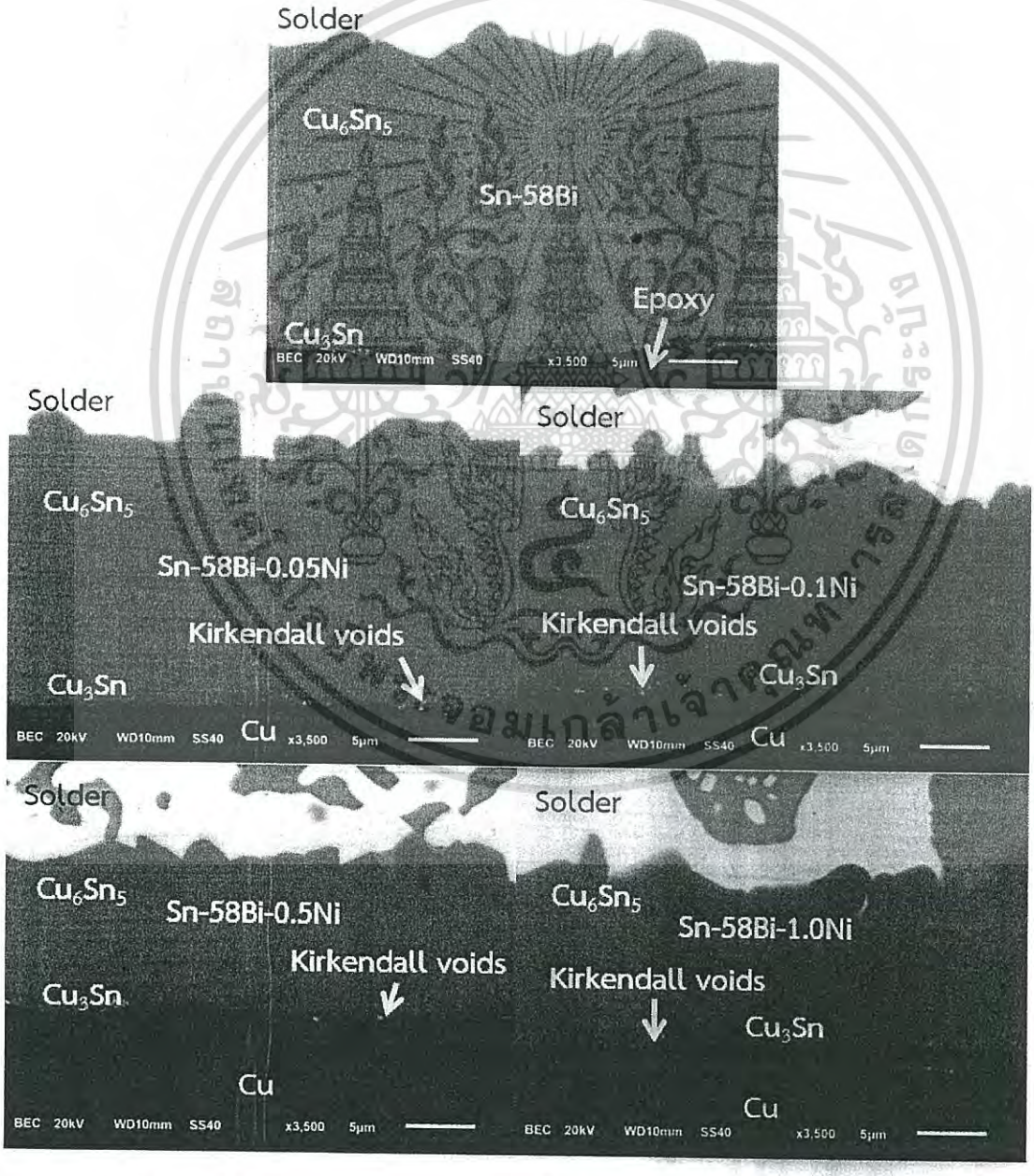
รูปที่ 4.29 ตำแหน่งที่ตรวจสอบปริมาณธาตุของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag



รูปที่ 4.30 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของบริเวณที่เป็นธาตุ Bi

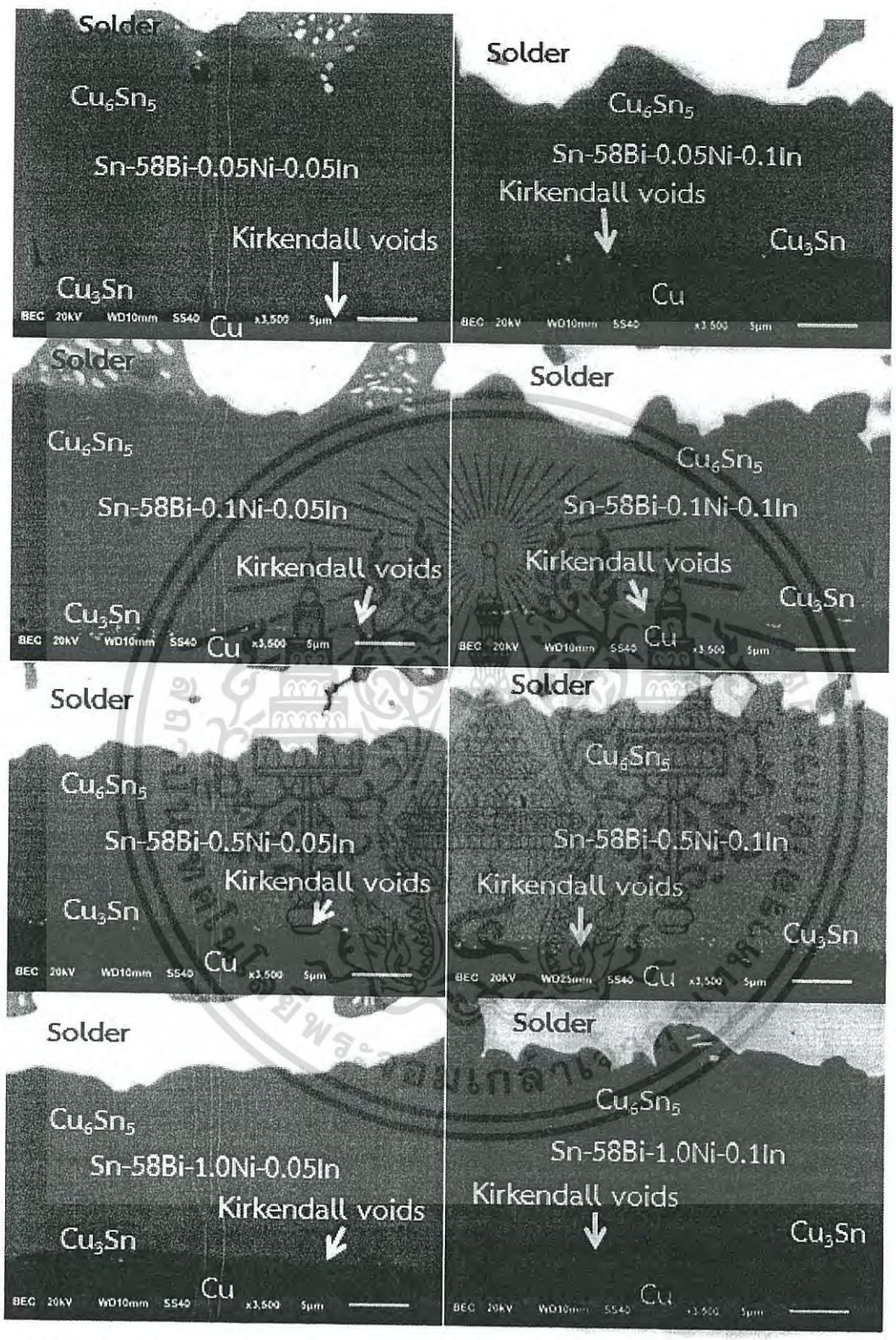
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.31-4.33 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของ Kirkendall voids ของโลหะบัดกรีทุกสูตรที่กำลังขยาย 3500 เท่า โดยทั่วไปแล้ว Kirkendall voids นั้นจะก่อตัวในชั้นสารประกอบ Cu_3Sn และมีทิศทางการขยายตัวไปยังพื้นที่ระหว่างชั้นสารประกอบ Cu_3Sn กับแผ่นทองแดง โดยลักษณะของ Kirkendall voids ที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีทุกสูตรนั้นคล้ายคลึงกัน ยกเว้นโลหะบัดกรีพื้น Sn-58Bi ที่ไม่สามารถตรวจสอบ Kirkendall voids ระหว่างชั้นสารประกอบ Cu_3Sn กับแผ่นทองแดงได้โดยตรง เนื่องจากโลหะบัดกรีหลุดออกจากแผ่นทองแดงระหว่างการตัดชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.31 โดยพื้นที่สีดำบริเวณด้านล่างนั้นเป็นส่วนของ Epoxy ไม่ใช่แผ่นทองแดง ดังนั้นจึงทำการตรวจสอบพื้นผิวรอยต่อของชิ้นงานโลหะบัดกรีที่หลุดออกมาและพื้นผิวของแผ่นทองแดง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.34 และ 4.35 จากการตรวจสอบพบ Kirkendall voids จำนวนมากบนพื้นผิวรอยต่อของชิ้นงานโลหะบัดกรี



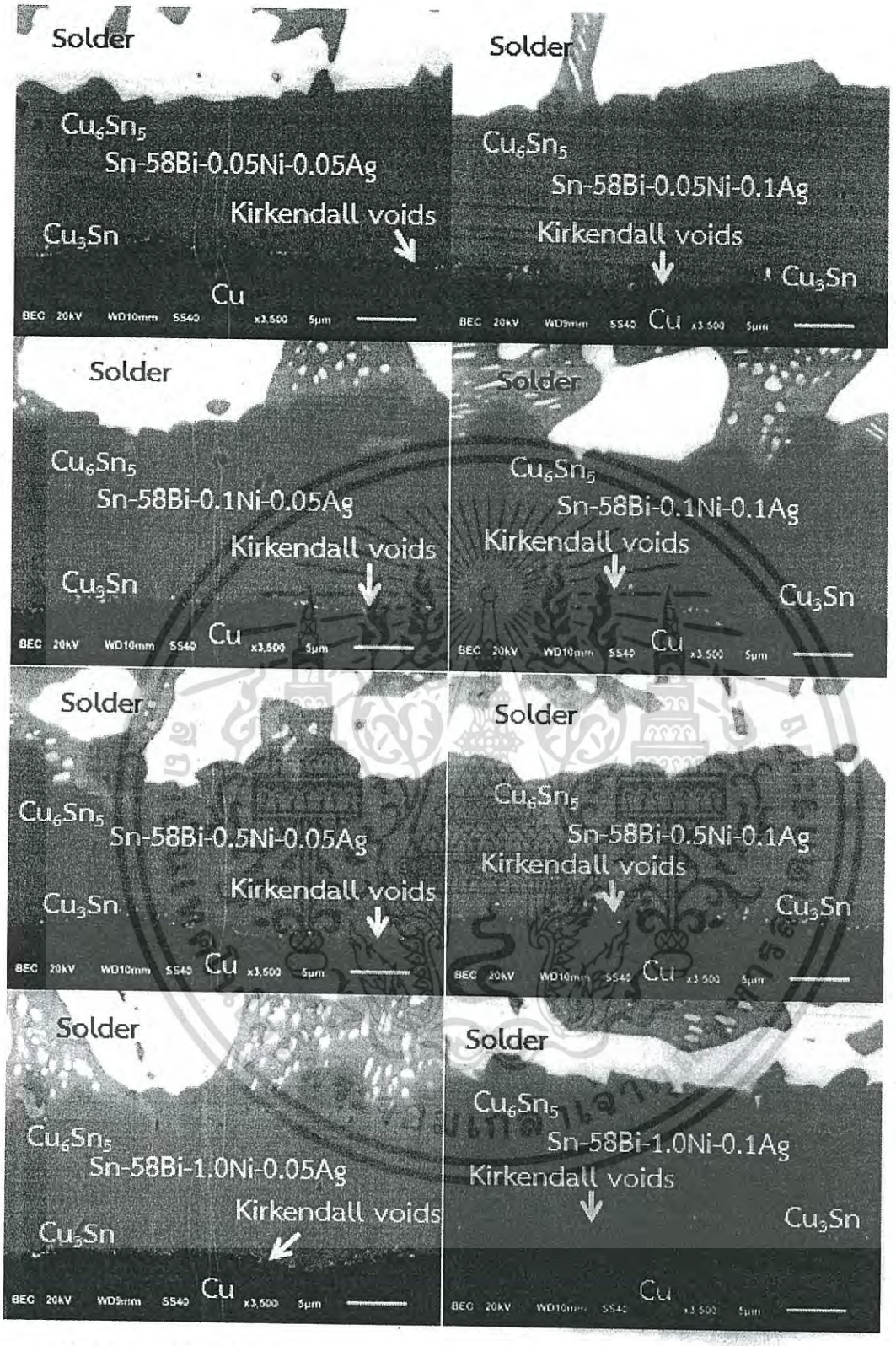
รูปที่ 4.31 ลักษณะของ Kirkendall voids ในโลหะบัดกรีที่มีปริมาณ Ni ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



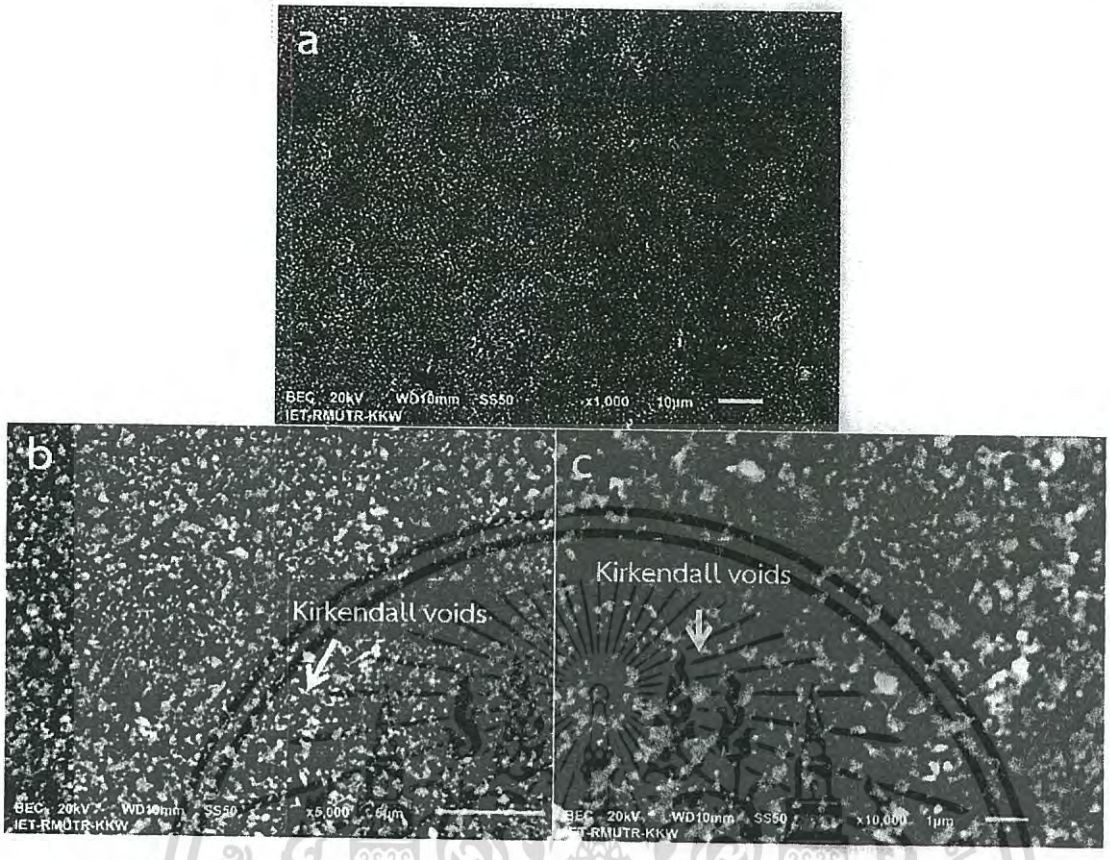
รูปที่ 4.32 ลักษณะของ Kirkendall voids ในโลหะบัดกรีที่มีปริมาณ Ni และ In ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

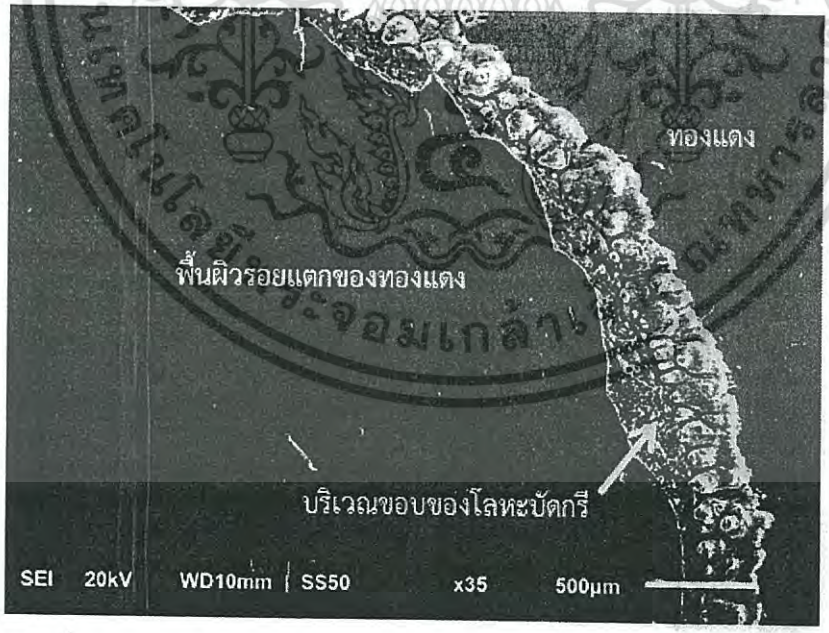


รูปที่ 4.33 ลักษณะของ Kirkendall voids ในโลหะบัดกรีที่มีปริมาณ Ni และ Ag ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.34 พื้นผิวรอยต่อของชิ้นงานโลหะบัดกรี Sn-58Bi ที่กำลังขยาย a) 1000 เท่า b) 5000 เท่า c) 10000 เท่า



รูปที่ 4.35 ลักษณะพื้นผิวของแผ่นทองแดงที่หลุดออกจากโลหะบัดกรี Sn-58Bi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 สัมประสิทธิ์การเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการบ่มด้วยความร้อนนั้นโดยทั่วไปเป็นกระบวนการที่ถูกควบคุมด้วยการแพร่ในสภาวะของแข็ง ซึ่งความหนาของชั้นคู่ควบการแพร่ที่เป็นฟังก์ชันของเวลาสามารถกำหนดโดยสมการที่ 4.6 ซึ่งมีสมมุติฐานว่าเกิดการแพร่แบบ Quasi-steady state และ Local equilibrium [55]

$$Y = Y_0 + \sqrt{K\,t} \tag{4.6}$$

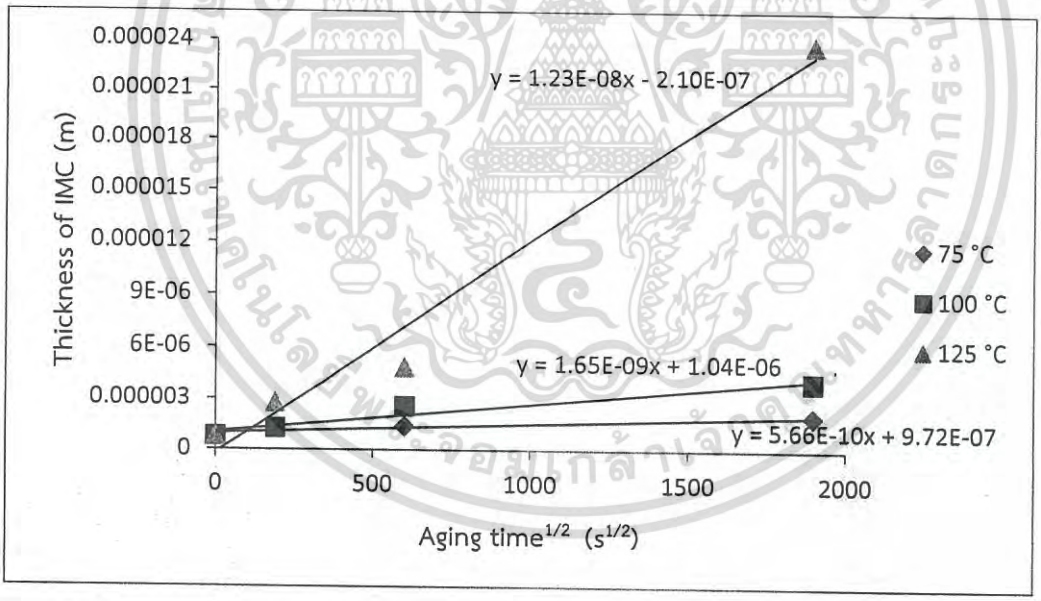
เมื่อ Y คือ ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เวลา t, Y_0 คือ ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรี และ K คือ สัมประสิทธิ์การเติบโตของชั้นสารประกอบ (m^2s^{-1})

กลไกการเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะสามารถกำหนดได้จากความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่อุณหภูมิการบ่ม 75, 100 และ 125 °C ดังแสดงในตารางที่ 4.12-4.14 มาพล็อตกับรากที่สองของเวลาในการบ่ม ($t^{1/2}$) โดยใช้โลหะบัดกรีสูตร Sn-58Bi เป็นตัวอย่างในการคำนวณ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้แสดงในรูปที่ 4.36-4.38 โดยความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีอัตราการเติบโตที่เร็วสำหรับการบ่มที่อุณหภูมิสูง (125 °C) และรากที่สองของเวลาในการบ่มยังแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะเป็นกระบวนการที่ถูกควบคุมโดยการแพร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวมกับ $t^{1/2}$ ที่อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกันของโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับทองแดง

Temperature		Aging time		$t^{1/2}$		Total IMC	
°C	K	hr	s	hr	s	μm	m
75	348	0	0	0.00	0.00	0.77	0.77×10^{-6}
		10	36,000	3.16	189.74	1.26	1.26×10^{-6}
		100	360,000	10.00	600.00	1.37	1.37×10^{-6}
		1,000	3,600,000	31.62	1897.37	2.01	2.01×10^{-6}
100	373	0	0	0.00	0.00	0.77	0.77×10^{-6}
		10	36,000	3.16	189.74	1.25	1.25×10^{-6}
		100	360,000	10.00	600.00	2.57	2.57×10^{-6}
		1,000	3,600,000	31.62	1897.37	4.02	4.02×10^{-6}
125	398	0	0	0.00	0.00	0.77	0.77×10^{-6}
		10	36,000	3.16	189.74	2.77	2.77×10^{-6}
		100	360,000	10.00	600.00	4.85	4.85×10^{-6}
		1,000	3,600,000	31.62	1897.37	23.71	23.71×10^{-6}

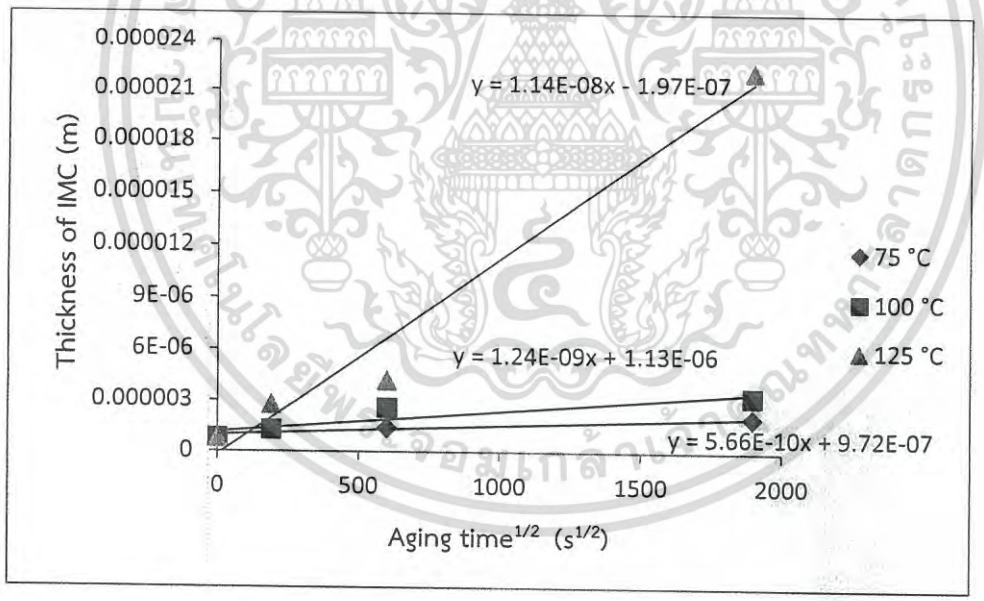


รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวมกับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 กับ $t^{1/2}$ ที่อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกันของโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับทองแดง

Temperature		Aging time		$t^{1/2}$		Total IMC	
°C	K	hr	s	hr	s	μm	m
75	348	0	0	0.00	0.00	0.77	0.77×10^{-6}
		10	36,000	3.16	189.74	1.26	1.26×10^{-6}
		100	360,000	10.00	600.00	1.37	1.37×10^{-6}
		1,000	3,600,000	31.62	1897.37	2.01	2.01×10^{-6}
100	373	0	0	0.00	0.00	0.77	0.77×10^{-6}
		10	36,000	3.16	189.74	1.25	1.25×10^{-6}
		100	360,000	10.00	600.00	2.57	2.57×10^{-6}
		1,000	3,600,000	31.62	1897.37	3.28	3.28×10^{-6}
125	398	0	0	0.00	0.00	0.77	0.77×10^{-6}
		10	36,000	3.16	189.74	2.77	2.77×10^{-6}
		100	360,000	10.00	600.00	4.19	4.19×10^{-6}
		1,000	3,600,000	31.62	1897.37	22.18	22.18×10^{-6}

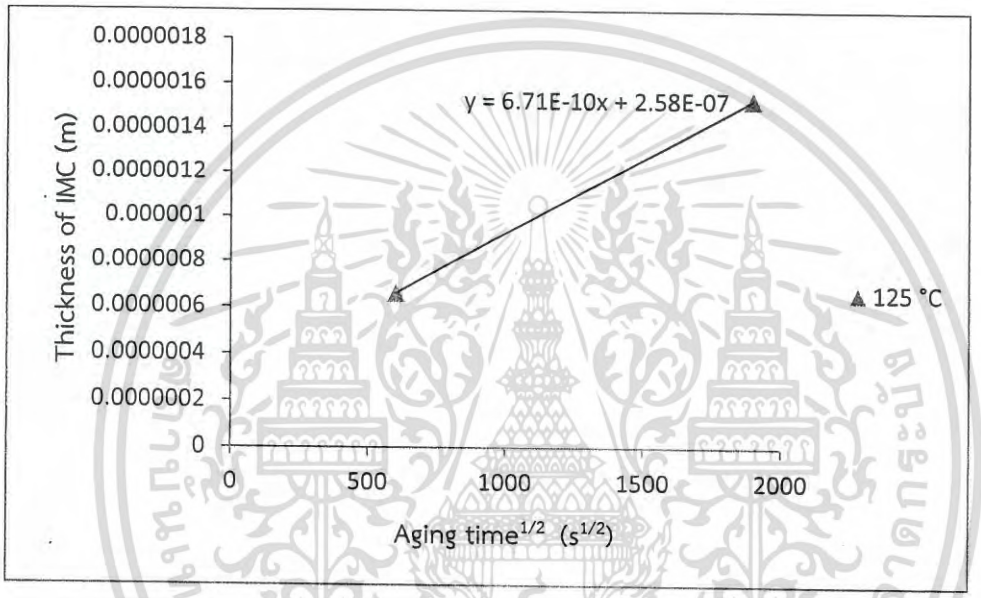


รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn กับ $t^{1/2}$ ที่อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกันของโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับทองแดง

Temperature		Aging time		$t^{1/2}$		Total IMC	
°C	K	hr	s	hr	s	μm	m
125	398	0	0	0.00	0.00	-	-
		10	36,000	3.16	189.74	-	-
		100	360,000	10.00	600.00	0.66	0.66×10^{-6}
		1,000	3,600,000	31.62	1897.37	1.53	1.53×10^{-6}



รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์การเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn, Cu_6Sn_5 และ Cu_3Sn สามารถคำนวณได้จากความชันในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะกับ $t^{1/2}$ โดยใช้วิธีวิเคราะห์การถดถอยแบบเส้นตรง y = a + bx เมื่อ b คือความชัน (Slope) ซึ่งความชันที่คำนวณได้จะมีค่าเท่ากับรากที่สองของสัมประสิทธิ์การเติบโตของชั้นสารประกอบ โดยค่าความชันที่สูง เป็นผลมาจากอัตราการเติบโตของชั้นสารประกอบที่สูง และส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์การเติบโตของชั้นสารประกอบที่สูงเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.39 และตารางที่ 4.15

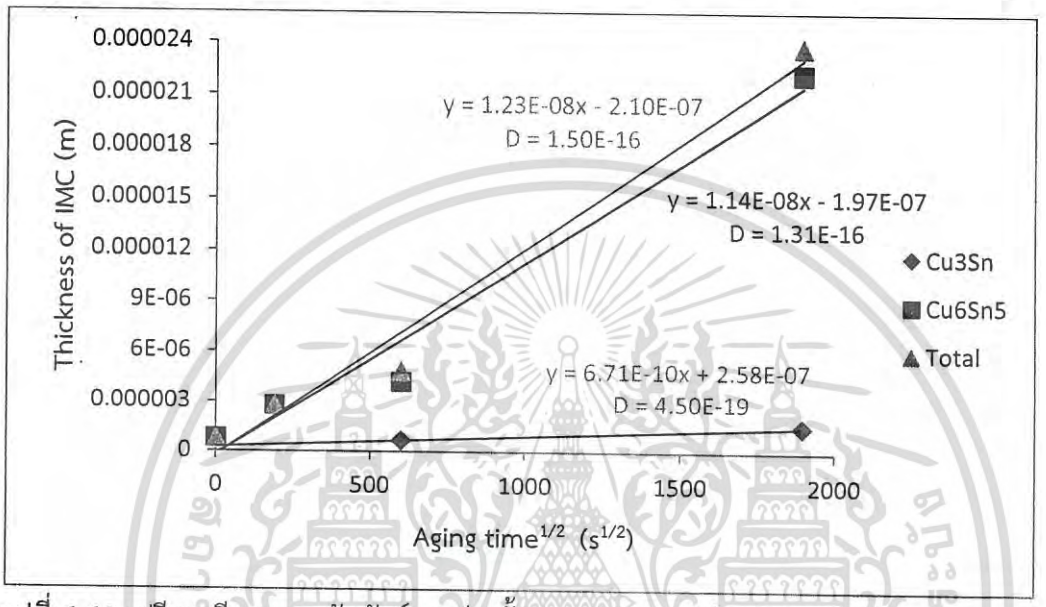
รูปที่ 4.39 เปรียบเทียบสมการสัมประสิทธิ์การเติบโตของชั้นสารประกอบกับสมการเส้นตรง

ตารางที่ 4.15 สัมประสิทธิ์การเติบโตของชั้นสารประกอบ (K) ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Sn-58Bi กับทองแดง

Intermetallic phase	Temperature (°C)/(K)	Slope = $K^{1/2}$	K (m^2/s)
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	75/348	5.66×10^{-10}	3.21×10^{-19}
	100/373	1.65×10^{-9}	2.73×10^{-18}
	125/398	1.23×10^{-8}	1.50×10^{-16}
Cu_6Sn_5	75/348	5.66×10^{-10}	3.21×10^{-19}
	100/373	1.24×10^{-9}	1.54×10^{-18}
	125/398	1.14×10^{-8}	1.31×10^{-16}
Cu_3Sn	75/348	-	-
	100/373	-	-
	125/398	6.71×10^{-10}	4.50×10^{-19}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยโลหะบัดกรีทุกสูตรในวิทยานิพนธ์นี้มีค่าสัมประสิทธิ์การเติบโตของชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn สูงกว่าชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5 และ Cu_3Sn ตามลำดับ เนื่องจากความชันในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะกับ $t^{1/2}$ ของชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn สูงกว่าชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5 และ Cu_3Sn ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yoon และคณะ [22] Yu และคณะ [23] Yoon และ Jung [56] และ Kim และ Jung [57] โดยตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 4.40 เป็นโลหะบัดกรีสูตร Sn-58Bi ที่อุณหภูมิบ่ม 125 °C



รูปที่ 4.40 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม (Cu_6Sn_5+ Cu_3Sn), Cu_6Sn_5, และ Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi ที่อุณหภูมิบ่ม 125 °C

นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิการบ่มสูงขึ้นตามลำดับ อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์การเติบโตของชั้นสารประกอบ Cu_3Sn ที่อุณหภูมิ 75 °C และ 100 °C ไม่สามารถคำนวณได้เนื่องจากไม่มีชั้นสารประกอบ Cu_3Sn เกิดขึ้น ทำให้มีข้อมูลไม่เพียงพอต่อการคำนวณ

สัมประสิทธิ์การเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นแสดงในตารางที่ 4.16 และสัมประสิทธิ์การเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะทุกชนิดในวิทยานิพนธ์นี้แสดงในตารางที่ 4.17-4.19 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การเติบโตของชั้นสารประกอบจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงอัตราเร็วของอะตอมที่จะแพร่ไปได้ โดยค่าสัมประสิทธิ์การเติบโตของชั้นสารประกอบจะแปรผันตามอุณหภูมิ สำหรับการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-Ni-X (X = In, Ag) แสดงไว้ในภาคผนวก ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.16 สัมประสิทธิ์การเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรีชนิดต่างๆ

โลหะบัดกรี	ชั้นสารประกอบเชิงโลหะ	อุณหภูมิการบ่ม (°C)	สัมประสิทธิ์การเติบโตของชั้นสารประกอบ K (m^2/s)	Refs
	$Cu_6Sn_5 + Cu_3Sn$			
Sn-58Bi			1.50×10^{-16}	
Sn-58Bi-0.05Ni			1.08×10^{-16}	
Sn-58Bi-0.1Ni			6.14×10^{-17}	
Sn-58Bi-0.5Ni			3.05×10^{-17}	
Sn-58Bi-1.0Ni			4.17×10^{-17}	
Sn-58Bi-0.05Ni-0.05In			1.56×10^{-16}	
Sn-58Bi-0.05Ni-0.1In			5.02×10^{-17}	
Sn-58Bi-0.1Ni-0.05In			1.02×10^{-16}	
Sn-58Bi-0.1Ni-0.1In			7.97×10^{-17}	
Sn-58Bi-0.5Ni-0.05In			5.98×10^{-17}	
Sn-58Bi-0.5Ni-0.1In	$Cu_6Sn_5+Cu_3Sn$	125	1.17×10^{-16}	This work
Sn-58Bi-1.0Ni-0.05In			6.48×10^{-17}	
Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In			7.17×10^{-17}	
Sn-58Bi-0.05Ni-0.05Ag			4.51×10^{-17}	
Sn-58Bi-0.05Ni-0.1Ag			6.16×10^{-17}	
Sn-58Bi-0.1Ni-0.05Ag			7.13×10^{-17}	
Sn-58Bi-0.1Ni-0.1Ag			5.03×10^{-17}	
Sn-58Bi-0.5Ni-0.05Ag			5.17×10^{-17}	
Sn-58Bi-0.5Ni-0.1Ag			4.65×10^{-17}	
Sn-58Bi-1.0Ni-0.05Ag			4.65×10^{-17}	
Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag			3.90×10^{-17}	
Sn-3.5Ag-0.7Cu-1Bi	$Cu_6Sn_5+Cu_3Sn$	120	1.815×10^{-19}	[19]
Sn-3.5Ag-0.7Cu-2Bi	$Cu_6Sn_5+Cu_3Sn$	120	9.801×10^{-19}	[19]
Sn-3.5Ag-0.7Cu-3Bi	$Cu_6Sn_5+Cu_3Sn$	120	1.904×10^{-18}	[19]
Sn-3.5Ag-0.7Cu-4Bi	$Cu_6Sn_5+Cu_3Sn$	120	2.074×10^{-18}	[19]
Sn-3.5Ag-0.7Cu-5Bi	$Cu_6Sn_5+Cu_3Sn$	120	1.277×10^{-18}	[19]
Sn-0.6Cu-0.05Ni	$Cu_6Sn_5+Cu_3Sn$	120	4.67×10^{-18}	[22]
Sn-8Zn-3Bi	$Cu_6Sn_5+Cu_5Zn_8$	125	4.49×10^{-17}	[58]
Sn-8Zn-3Bi	$Cu_6Sn_5+Cu_5Zn_8$	120	1.53×10^{-17}	[59]
Sn-5Bi	$Cu_6Sn_5+Cu_3Sn$	120	4.77×10^{-19}	[56]
Sn-58Bi	Cu_6Sn_5	120	3.75×10^{-17}	[51]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.17 สัมประสิทธิ์การเติบโตของชั้นสารประกอบ (K) ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม Cu_6Sn_5+Cu_3Sn

โลหะบัดกรี	สัมประสิทธิ์การเติบโตของชั้นสารประกอบ K (m^2/s)		
	75 °C	100 °C	125 °C
Sn-58Bi	3.21×10^{-19}	2.73×10^{-18}	1.50×10^{-16}
Sn-58Bi-0.05Ni	1.13×10^{-19}	2.64×10^{-18}	1.08×10^{-16}
Sn-58Bi-0.1Ni	1.98×10^{-19}	2.53×10^{-18}	6.14×10^{-17}
Sn-58Bi-0.5Ni	2.20×10^{-19}	2.45×10^{-18}	3.05×10^{-17}
Sn-58Bi-1.0Ni	2.99×10^{-20}	2.28×10^{-18}	4.17×10^{-17}
Sn-58Bi-0.05Ni-0.05In	2.98×10^{-19}	2.75×10^{-18}	1.56×10^{-16}
Sn-58Bi-0.05Ni-0.1In	1.73×10^{-19}	3.01×10^{-18}	5.02×10^{-17}
Sn-58Bi-0.1Ni-0.05In	2.26×10^{-19}	2.57×10^{-18}	1.02×10^{-16}
Sn-58Bi-0.1Ni-0.1In	2.53×10^{-19}	2.56×10^{-18}	7.97×10^{-17}
Sn-58Bi-0.5Ni-0.05In	1.83×10^{-19}	2.27×10^{-18}	5.98×10^{-17}
Sn-58Bi-0.5Ni-0.1In	1.52×10^{-19}	2.97×10^{-18}	1.17×10^{-16}
Sn-58Bi-1.0Ni-0.05In	2.99×10^{-19}	3.12×10^{-18}	6.48×10^{-17}
Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In	1.44×10^{-19}	2.95×10^{-18}	7.17×10^{-17}
Sn-58Bi-0.05Ni-0.05Ag	1.45×10^{-19}	2.29×10^{-18}	4.51×10^{-17}
Sn-58Bi-0.05Ni-0.1Ag	8.16×10^{-20}	1.87×10^{-18}	6.16×10^{-17}
Sn-58Bi-0.1Ni-0.05Ag	1.07×10^{-19}	2.62×10^{-18}	7.13×10^{-17}
Sn-58Bi-0.1Ni-0.1Ag	2.52×10^{-19}	3.21×10^{-18}	5.03×10^{-17}
Sn-58Bi-0.5Ni-0.05Ag	1.37×10^{-19}	1.34×10^{-18}	5.17×10^{-17}
Sn-58Bi-0.5Ni-0.1Ag	1.73×10^{-19}	1.74×10^{-18}	4.65×10^{-17}
Sn-58Bi-1.0Ni-0.05Ag	1.55×10^{-19}	1.57×10^{-18}	4.65×10^{-17}
Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag	2.75×10^{-19}	1.40×10^{-18}	3.90×10^{-17}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.18 สัมประสิทธิ์การเติบโตของชั้นสารประกอบ (K) ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5

โลหะบัดกรี	Cu_6Sn_5 สัมประสิทธิ์การเติบโตของชั้นสารประกอบ K (m^2/s)		
	75 °C	100 °C	125 °C
Sn-58Bi	3.21×10^{-19}	1.54×10^{-18}	1.31×10^{-16}
Sn-58Bi-0.05Ni	1.13×10^{-19}	2.09×10^{-18}	1.01×10^{-16}
Sn-58Bi-0.1Ni	1.98×10^{-19}	2.04×10^{-18}	5.46×10^{-17}
Sn-58Bi-0.5Ni	2.20×10^{-19}	1.97×10^{-18}	2.69×10^{-17}
Sn-58Bi-1.0Ni	2.99×10^{-20}	1.61×10^{-18}	3.55×10^{-17}
Sn-58Bi-0.05Ni-0.05In	2.98×10^{-19}	2.30×10^{-18}	1.42×10^{-16}
Sn-58Bi-0.05Ni-0.1In	1.73×10^{-19}	2.42×10^{-18}	4.23×10^{-17}
Sn-58Bi-0.1Ni-0.05In	2.26×10^{-19}	1.93×10^{-18}	9.00×10^{-17}
Sn-58Bi-0.1Ni-0.1In	2.53×10^{-19}	2.10×10^{-18}	6.90×10^{-17}
Sn-58Bi-0.5Ni-0.05In	1.83×10^{-19}	1.69×10^{-18}	5.48×10^{-17}
Sn-58Bi-0.5Ni-0.1In	1.52×10^{-19}	2.27×10^{-18}	1.10×10^{-16}
Sn-58Bi-1.0Ni-0.05In	2.99×10^{-19}	2.49×10^{-18}	6.02×10^{-17}
Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In	1.44×10^{-19}	2.38×10^{-18}	6.21×10^{-17}
Sn-58Bi-0.05Ni-0.05Ag	1.45×10^{-19}	1.93×10^{-18}	3.96×10^{-17}
Sn-58Bi-0.05Ni-0.1Ag	8.16×10^{-20}	1.37×10^{-18}	5.09×10^{-17}
Sn-58Bi-0.1Ni-0.05Ag	1.07×10^{-19}	1.89×10^{-18}	6.14×10^{-17}
Sn-58Bi-0.1Ni-0.1Ag	2.52×10^{-19}	2.32×10^{-18}	4.29×10^{-17}
Sn-58Bi-0.5Ni-0.05Ag	1.37×10^{-19}	9.07×10^{-19}	4.63×10^{-17}
Sn-58Bi-0.5Ni-0.1Ag	1.73×10^{-19}	1.29×10^{-18}	3.95×10^{-17}
Sn-58Bi-1.0Ni-0.05Ag	1.55×10^{-19}	1.10×10^{-18}	4.38×10^{-17}
Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag	2.75×10^{-19}	9.11×10^{-19}	3.11×10^{-17}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.19 สัมประสิทธิ์การเติบโตของชั้นสารประกอบ (K) ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn

โลหะบัดกรี	Cu_3Sn		
	สัมประสิทธิ์การเติบโตของชั้นสารประกอบ K (m^2/s)		
	75 °C	100 °C	125 °C
Sn-58Bi	-	-	4.50×10^{-19}
Sn-58Bi-0.05Ni	-	-	5.35×10^{-20}
Sn-58Bi-0.1Ni	-	-	1.80×10^{-19}
Sn-58Bi-0.5Ni	-	-	1.92×10^{-20}
Sn-58Bi-1.0Ni	-	-	1.43×10^{-19}
Sn-58Bi-0.05Ni-0.05In	-	-	1.86×10^{-19}
Sn-58Bi-0.05Ni-0.1In	-	-	1.05×10^{-19}
Sn-58Bi-0.1Ni-0.05In	-	-	3.43×10^{-19}
Sn-58Bi-0.1Ni-0.1In	-	-	1.31×10^{-19}
Sn-58Bi-0.5Ni-0.05In	-	-	4.81×10^{-21}
Sn-58Bi-0.5Ni-0.1In	-	-	4.02×10^{-20}
Sn-58Bi-1.0Ni-0.05In	-	-	1.49×10^{-21}
Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In	-	-	1.20×10^{-19}
Sn-58Bi-0.05Ni-0.05Ag	-	-	3.42×10^{-20}
Sn-58Bi-0.05Ni-0.1Ag	-	-	3.90×10^{-19}
Sn-58Bi-0.1Ni-0.05Ag	-	-	2.51×10^{-19}
Sn-58Bi-0.1Ni-0.1Ag	-	-	1.55×10^{-19}
Sn-58Bi-0.5Ni-0.05Ag	-	-	8.56×10^{-21}
Sn-58Bi-0.5Ni-0.1Ag	-	-	1.55×10^{-19}
Sn-58Bi-1.0Ni-0.05Ag	-	-	5.94×10^{-23}
Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag	-	-	5.59×10^{-19}

เนื่องจากชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn นั้น เกิดขึ้นภายหลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง และอุณหภูมิ 125 °C เป็นเวลา 100 และ 1000 ชั่วโมง จึงทำให้สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การเติบโตของชั้นสารประกอบได้เฉพาะที่อุณหภูมิ 125 °C โดยความชันของกราฟตัวแทนเกิดขึ้นจากข้อมูลเพียง 2 จุดเท่านั้น จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การเติบโตของชั้นสารประกอบที่คำนวณได้มีลักษณะไม่เป็นแนวโน้มที่ชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 พลังงานกระตุ้นการเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

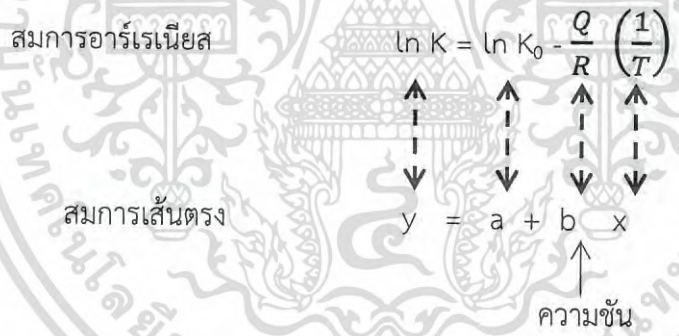
กลไกการเพิ่มความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะนั้นเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับอุณหภูมิ ดังนั้นสามารถกำหนดความสัมพันธ์ด้วยสมการอาร์เรเนียสได้

$$K = K_0\, e^{-Q/RT} \tag{4.7}$$

เมื่อ K_0 คือ ค่าคงที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ ($m^2 s^{-1}$) Q คือ พลังงานกระตุ้นของการแพร่ (J/mol, cal/mol หรือ eV/atom) R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (8.314 J/mol-K หรือ 1.987 cal/mol-K) และ T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) เมื่อใส่ลอการิทึมธรรมชาติกับสมการที่ 4.7 จะได้

$$\ln K = \ln K_0 - \frac{Q}{R}\left(\frac{1}{T}\right) \tag{4.8}$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของสัมประสิทธิ์การเติบโตของชั้นสารประกอบ (ln K) กับส่วนกลับของอุณหภูมิสัมบูรณ์ (1/T) จากสมการที่ 4.8 ทำให้พลังงานกระตุ้นสามารถกำหนดได้จากความชันของสมการเส้นตรง y = a + bx เมื่อ b คือความชันของสมการ ดังแสดงในรูปที่ 4.41 จะเห็นได้ว่าความชันจะเท่ากับ $-\frac{Q}{R}$ และเนื่องจากค่า R เป็นค่าคงที่ ดังนั้นค่าพลังงานกระตุ้นจะแปรผันตรงกับความชัน



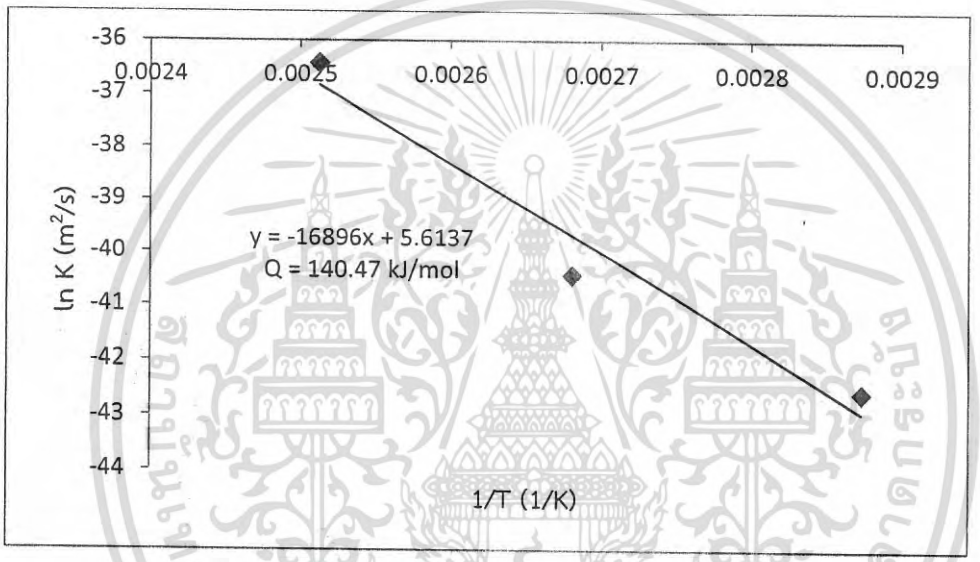
รูปที่ 4.41 เปรียบเทียบสมการอาร์เรเนียสกับสมการเส้นตรง

โดยตัวอย่างในการคำนวณใช้โลหะบัดกรีสูตร Sn-58Bi ดังแสดงในรูปที่ 4.42 และ 4.43 จะเห็นได้ว่าความชันจะมีค่าติดลบทั้งหมด โดยข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่าง ln K กับ 1/T ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับทองแดงแสดงในตารางที่ 4.20

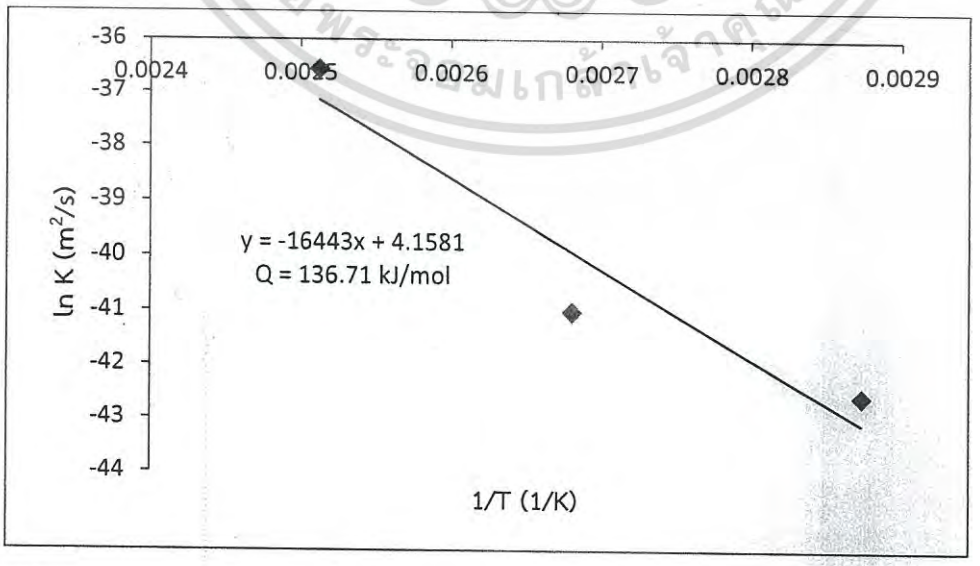
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln K กับ 1/T ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับทองแดง

Intermetallic phase	Temperature (°C)/(K)	1/T (1/K)	ln K
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	75/348	2.87×10^{-3}	-42.58
	100/373	2.68×10^{-3}	-40.44
	125/398	2.51×10^{-3}	-36.43
Cu_6Sn_5	75/348	2.87×10^{-3}	-42.58
	100/373	2.68×10^{-3}	-41.02
	125/398	2.51×10^{-3}	-36.57



รูปที่ 4.42 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม (Cu_6Sn_5+Cu_3Sn) ของโลหะบัดกรี Sn-58Bi



รูปที่ 4.43 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ของโลหะบัดกรี Sn-58Bi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยพลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn และ Cu_6Sn_5 เท่ากับ 140.47 และ 136.71 kJ/mol ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.21 และจากตารางที่ 4.22 ซึ่งแสดงพลังงานกระตุ้นในชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn และ Cu_6Sn_5 ของโลหะบัดกรี จะเห็นได้ว่าค่าพลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn จะมากกว่า Cu_6Sn_5 ในโลหะบัดกรีทุกสูตร ซึ่งมีสาเหตุมาจากความชันในกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ln K และ 1/T ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn มากกว่า Cu_6Sn_5 ในโลหะบัดกรีทุกสูตร

ตารางที่ 4.21 สัมประสิทธิ์การเติบโตของชั้นสารประกอบ ค่าคงที่การเติบโต และพลังงานกระตุ้นระหว่างโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับทองแดง

Intermetallic phase	Temperature (°C)/(K)	K (m^2/s)	K_0 (m^2/s)	Q (kJ/mol)
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	75/348	3.21×10^{-19}	274.16	140.47
	100/373	2.73×10^{-18}		
	125/398	1.50×10^{-16}		
Cu_6Sn_5	75/348	3.21×10^{-19}	63.95	136.71
	100/373	1.54×10^{-18}		
	125/398	1.31×10^{-16}		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

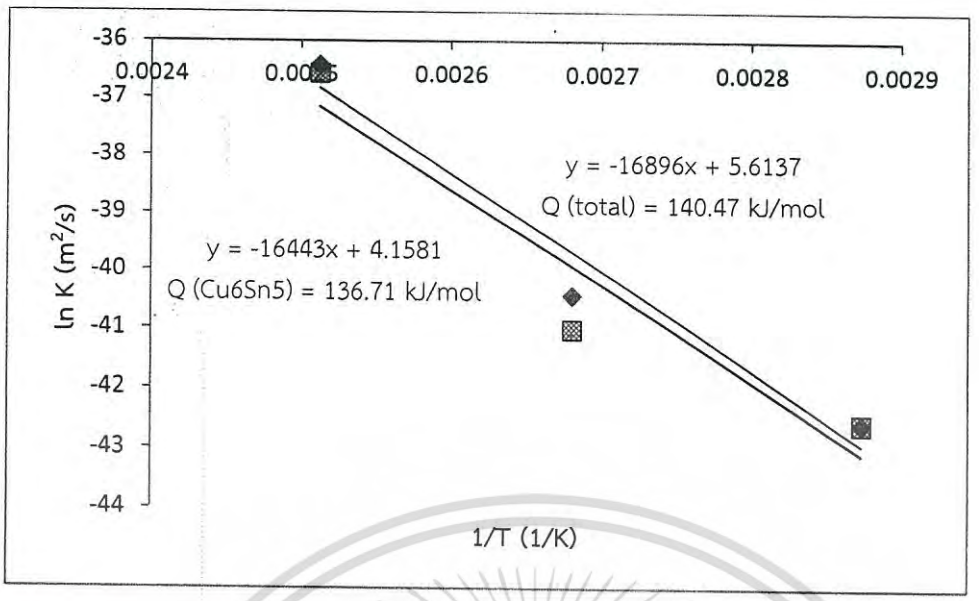
ตารางที่ 4.22 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn และ Cu_6Sn_5

โลหะบัดกรี	พลังงานกระตุ้น Q (kJ/mol)		
	Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	Cu_6Sn_5	Refs
Sn-58Bi	140.47	136.71	This work
Sn-58Bi-0.05Ni	157.44	155.79	
Sn-58Bi-0.1Ni	131.56	128.72	
Sn-58Bi-0.5Ni	113.32	110.30	
Sn-58Bi-1.0Ni	167.21	163.23	
Sn-58Bi-0.05Ni-0.05In	143.00	140.69	
Sn-58Bi-0.05Ni-0.1In	130.46	126.38	
Sn-58Bi-0.1Ni-0.05In	139.92	136.78	
Sn-58Bi-0.1Ni-0.1In	131.69	128.25	
Sn-58Bi-0.5Ni-0.05In	132.76	130.50	
Sn-58Bi-0.5Ni-0.1In	152.54	150.72	
Sn-58Bi-1.0Ni-0.05In	123.33	121.43	
Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In	142.79	139.33	
Sn-58Bi-0.05Ni-0.05Ag	131.84	128.74	
Sn-58Bi-0.05Ni-0.1Ag	152.18	147.59	
Sn-58Bi-0.1Ni-0.05Ag	149.56	145.88	
Sn-58Bi-0.1Ni-0.1Ag	121.71	117.79	
Sn-58Bi-0.5Ni-0.05Ag	135.82	132.92	
Sn-58Bi-0.5Ni-0.1Ag	128.10	124.17	
Sn-58Bi-1.0Ni-0.05Ag	130.56	128.86	
Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag	113.06	107.56	

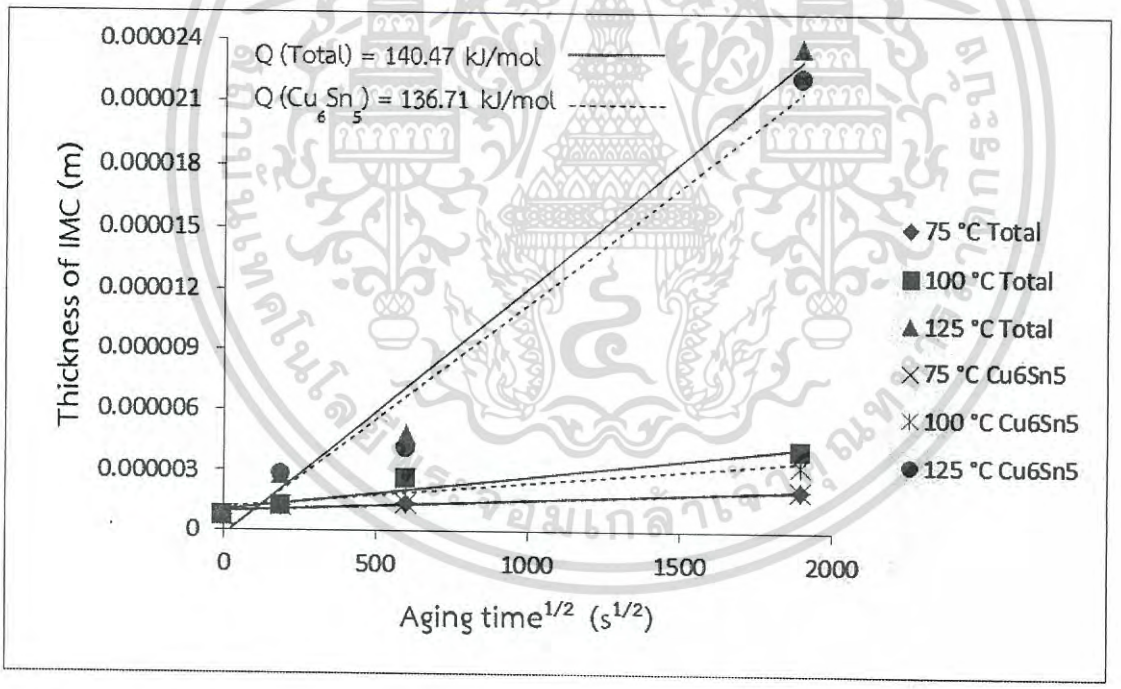
รูปที่ 4.44 แสดงการเปรียบเทียบพลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn กับชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5 ของโลหะบัดกรี Sn-58Bi ซึ่งเป็นข้อมูลจากตารางที่ 4.21 จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การเติบโตของชั้นสารประกอบที่อุณหภูมิ 75 °C ของชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn นั้นเท่ากับชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5 เนื่องจากอุณหภูมิบ่มที่ 75 °C มีชั้นสารประกอบเกิดขึ้นเพียงชั้นเดียวคือ Cu_6Sn_5 แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการบ่มขึ้นเป็น 100 °C และ 125 °C จะทำให้เกิดชั้นสารประกอบ Cu_3Sn ขึ้น ทำให้ค่าพลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn จะมากกว่าชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5 เสมอ เนื่องจากชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn มีขนาดของชั้นสารประกอบที่ใหญ่กว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.45 จะเห็นได้ว่าค่าพลังงานกระตุ้นซึ่งคำนวณมาจากความหนาของชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn และชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5 นั้น มีค่าใกล้เคียงกัน แต่เนื่องจากความหนาของชั้นสารประกอบแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันจากการทดสอบทางสถิติ ดังนั้นจึงถือว่าค่าพลังงานกระตุ้นนี้มีความแตกต่างกันเช่นกัน

โดยค่าพลังงานกระตุ้นที่คำนวณได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yoon และคณะ [22] Yu และคณะ [23] และ Yoon และ Jung [56] ที่มีค่าพลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn มากกว่าชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5 เนื่องจากทั้งสามงานวิจัยนี้ต่างก็มีค่าสัมประสิทธิ์การเติบโตของชั้นสารประกอบรวมเท่ากับชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5 ที่อุณหภูมิการบ่มที่ต่ำที่สุดของแต่ละงานวิจัย ดังแสดงในรูปที่ 4.46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

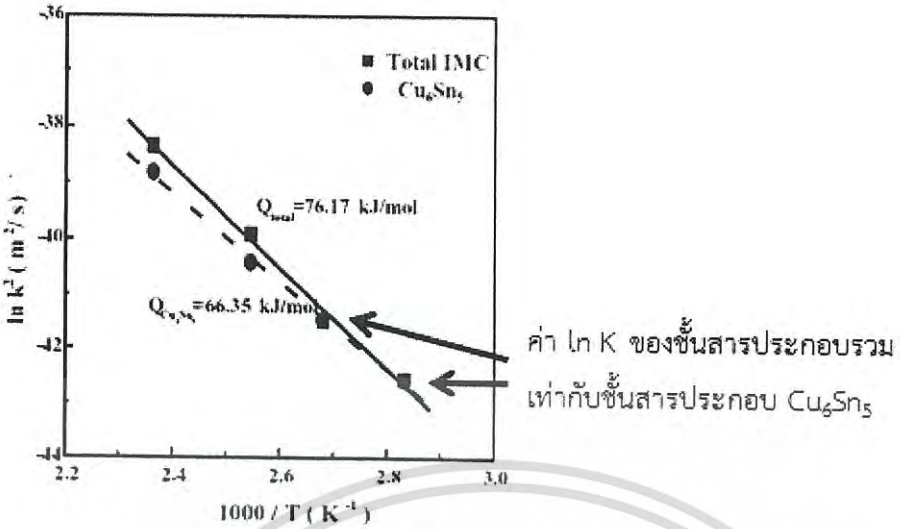


รูปที่ 4.44 เปรียบเทียบพลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม (Cu_6Sn_5+Cu_3Sn) กับชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5 ของโลหะบัดกรี Sn-58Bi



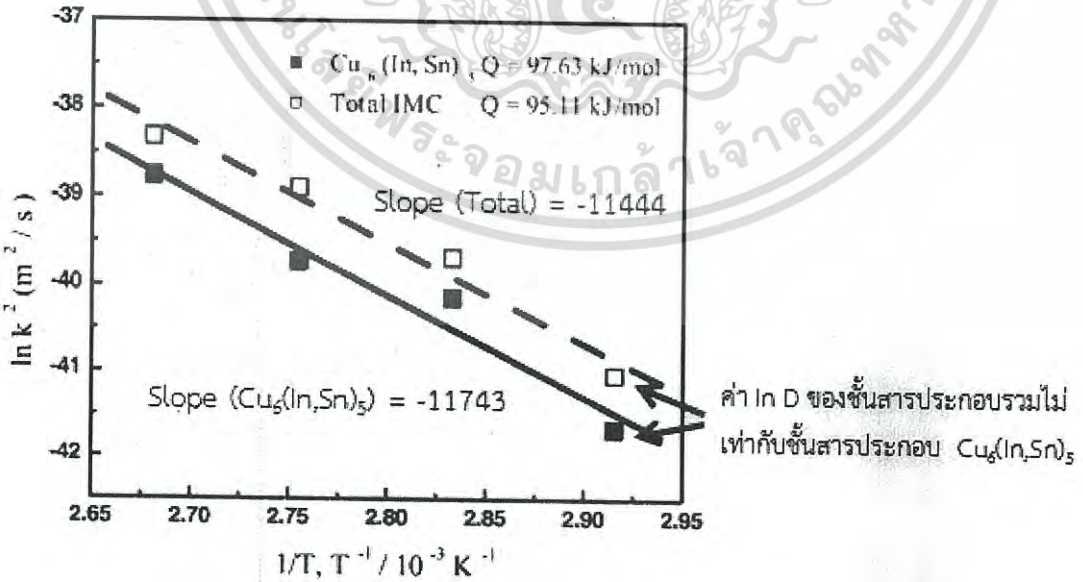
รูปที่ 4.45 เปรียบเทียบพลังงานกระตุ้นและความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวมกับชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.46 ค่าพลังงานกระตุ้นในงานวิจัยของ Yoon และคณะ [22]

อย่างไรก็ตามงานวิจัยของ Kim และ Jung [57] มีค่าพลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบ $Cu_6(In,Sn)_5$ มากกว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม เนื่องจากความชันในกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ln K และ 1/T ของชั้นสารประกอบ $Cu_6(In,Sn)_5$ มากกว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม ดังแสดงในรูปที่ 4.47 โดยจะสังเกตได้ว่าค่า ln K ที่บ่มที่อุณหภูมิต่ำของชั้นสารประกอบรวมไม่เท่ากับชั้นสารประกอบ $Cu_6(In,Sn)_5$ โดยเป็นผลมาจากการที่งานวิจัยของ Kim และ Jung มีชั้นสารประกอบเชิงโลหะ 2 ชั้นตั้งแต่การบ่มที่อุณหภูมิต่ำ จึงเป็นผลให้ความหนาของชั้นสารประกอบรวมไม่เท่ากับชั้นสารประกอบ $Cu_6(In,Sn)_5$ ตั้งแต่การบ่มที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ไม่สอดคล้องกับวิทยานิพนธ์นี้



รูปที่ 4.47 ค่าพลังงานกระตุ้นในงานวิจัยของ Kim และ Jung [57]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปกติแล้วชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่มีค่าพลังงานกระตุ้นที่มากมักจะมีขนาดเล็กกว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่มีค่าพลังงานกระตุ้นที่น้อยกว่า ซึ่งไม่สอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ อาจเนื่องมาจากการแพร่ของชิ้นงานในวิทยานิพนธ์นี้ไม่ได้เป็นแบบ quasi-steady state และ local equilibrium [55] ตามที่สมมุติฐานไว้ในสมการที่ 4.6

พลังงานกระตุ้นในชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ แสดงในตารางที่ 4.23 โดยพบว่าค่าพลังงานกระตุ้นที่เกิดขึ้นมีค่าแตกต่างกัน อาจเนื่องมาจากปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่ต่างกันเนื่องมาจากชนิดของโลหะบัดกรีหรือวิธีการวัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่ต่างกัน อุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มด้วยความร้อนที่ต่างกัน และปัจจัยอื่นๆที่ควบคุมไม่ได้ แต่เมื่อเทียบค่าพลังงานกระตุ้นกับงานวิจัยของ Yoon และคณะ [51] ที่มีชนิดของโลหะบัดกรี อุณหภูมิการบ่มและระยะเวลาบ่มที่ใกล้เคียงกัน พบว่าค่าพลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5 มีค่าเท่ากับ 127.9 kJ/mol ซึ่งใกล้เคียงกับวิทยานิพนธ์นี้ สำหรับการคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn และ Cu_6Sn_5 ของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-Ni-X (X = In, Ag) แสดงไว้ในภาคผนวก ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

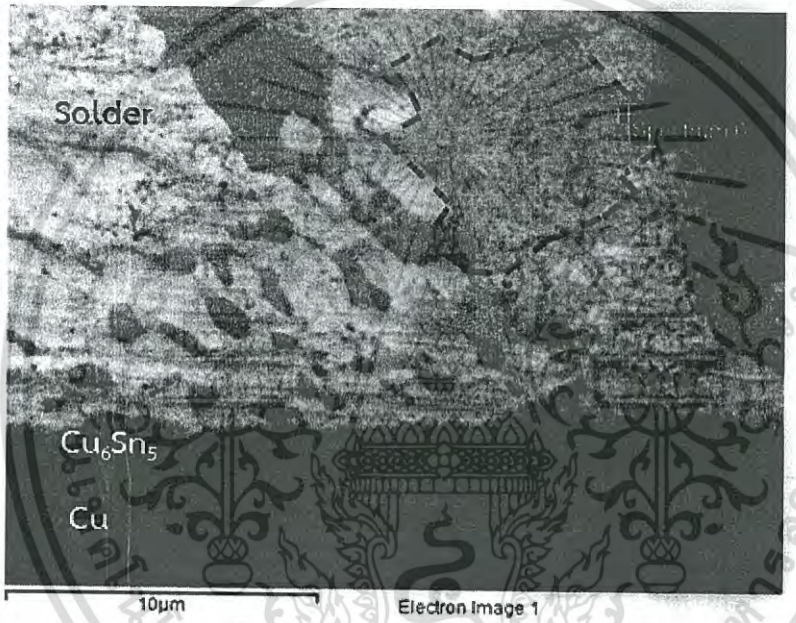
ตารางที่ 4.23 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรีสูตรต่างๆ

โลหะบัดกรี	พลังงานกระตุ้น Q (kJ/mol)	ชั้นสารประกอบเชิงโลหะ	อุณหภูมิบ่ม (°C) / ระยะเวลาบ่ม (hr)	Refs
Sn-58Bi	140.47			
Sn-58Bi-0.05Ni	157.44			
Sn-58Bi-0.1Ni	131.56			
Sn-58Bi-0.5Ni	113.32			
Sn-58Bi-1.0Ni	167.21			
Sn-58Bi-0.05Ni-0.05In	143.00			
Sn-58Bi-0.05Ni-0.1In	130.46			
Sn-58Bi-0.1Ni-0.05In	139.92			
Sn-58Bi-0.1Ni-0.1In	131.69			
Sn-58Bi-0.5Ni-0.05In	132.76			
Sn-58Bi-0.5Ni-0.1In	152.54	Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	75-125/0-1000	This work
Sn-58Bi-1.0Ni-0.05In	123.33			
Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In	142.79			
Sn-58Bi-0.05Ni-0.05Ag	131.84			
Sn-58Bi-0.05Ni-0.1Ag	152.18			
Sn-58Bi-0.1Ni-0.05Ag	149.56			
Sn-58Bi-0.1Ni-0.1Ag	121.71			
Sn-58Bi-0.5Ni-0.05Ag	135.82			
Sn-58Bi-0.5Ni-0.1Ag	128.10			
Sn-58Bi-1.0Ni-0.05Ag	130.56			
Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag	113.06			
Sn-3.5Ag-0.7Cu-1Bi	117.87	Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	120-190/0-1000	[19]
Sn-0.6Cu-0.05Ni	76.17	Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	80-150/0-1440	[22]
Sn-8Zn-3Bi	55.36	Cu_5Zn_8	50-150/0-700	[58]
Sn-8Zn-3Bi	61.19	Cu_5Zn_8	70-120/0-2400	[59]
Sn-5Bi	107.1	Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	70-200/0-720	[56]
Sn-58Bi	127.9	Cu_6Sn_5	70-120/0-1440	[51]
Sn-58Bi	55.0	Cu_6Sn_5	55-120/0-9600	[60]

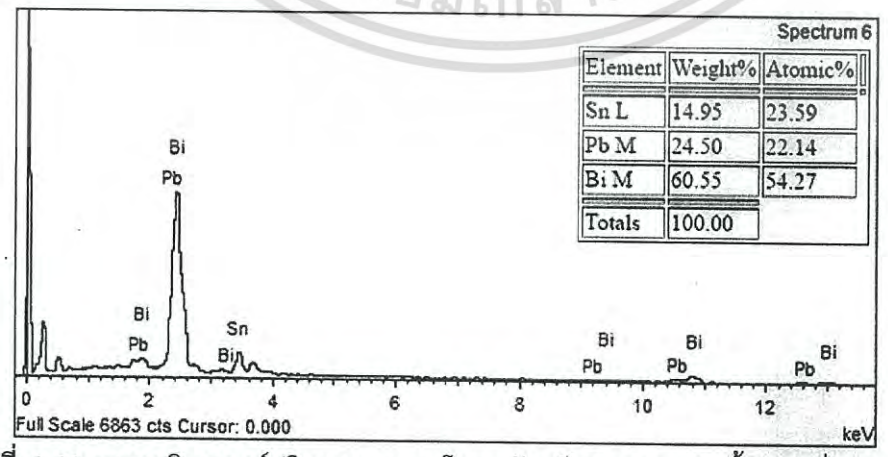
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ผลกระทบจากการปนเปื้อนของตะกั่ว

เนื่องจากชิ้นส่วนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บางชนิดมีส่วนผสมของตะกั่ว ดังนั้นการศึกษาการปนเปื้อนของตะกั่วจึงเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากการปนเปื้อนของตะกั่วในโลหะบัดกรี Sn-58Bi นั้นจะทำให้เกิดสารประกอบ 15.6Sn-52.2Bi-32.2Pb wt.% ที่มีจุดหลอมเหลวเพียง 99 °C [29] ซึ่งลดความน่าเชื่อถือของรอยต่อ โดยวิทยานิพนธ์นี้ศึกษาการปนเปื้อนของตะกั่วกับโลหะบัดกรี 4 ชนิด คือ Sn-58Bi, Sn-58Bi-1.0Ni, Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In, และ Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag รูปที่ 4.48 แสดงรอยต่อของโลหะบัดกรี Sn-58Bi ปนเปื้อนตะกั่วบริสุทธิ์กับแผ่นทองแดงที่กำลังขยาย 5000 เท่า และบริเวณที่ทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ โดยสามารถสังเกตเห็นเฟสของสารประกอบ Sn-Bi-Pb ได้ โดยผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.49



รูปที่ 4.48 บริเวณการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของโลหะบัดกรี Sn-58Bi ปนเปื้อนตะกั่วบริสุทธิ์กับแผ่นทองแดง



รูปที่ 4.49 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของโลหะบัดกรี Sn-58Bi ปนเปื้อนตะกั่วบริสุทธิ์กับแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

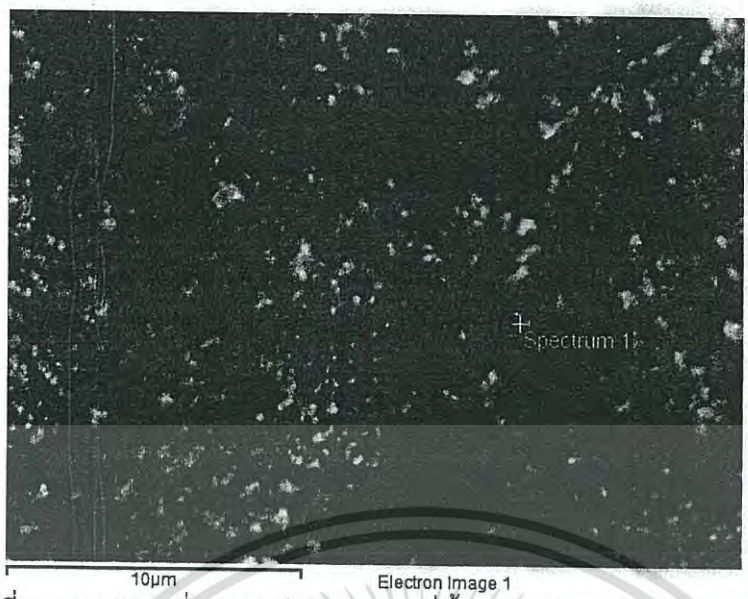
จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าการปนเปื้อนของตะกั่วแม้เพียงเล็กน้อย สามารถทำให้เกิดเฟสของสารประกอบ $Sn_{16}Pb_{32}Bi_{52}$ ที่มีจุดหลอมเหลวเพียง 99 °C ซึ่งลดความน่าเชื่อถือของรอยต่อเนื่องจากมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำทำให้เฟสดังกล่าวสามารถหลอมเหลวเมื่อใช้งานในอุณหภูมิที่สูงกว่า 99 °C

4.6 การวิเคราะห์การหลุดออกจากกันของชิ้นงาน

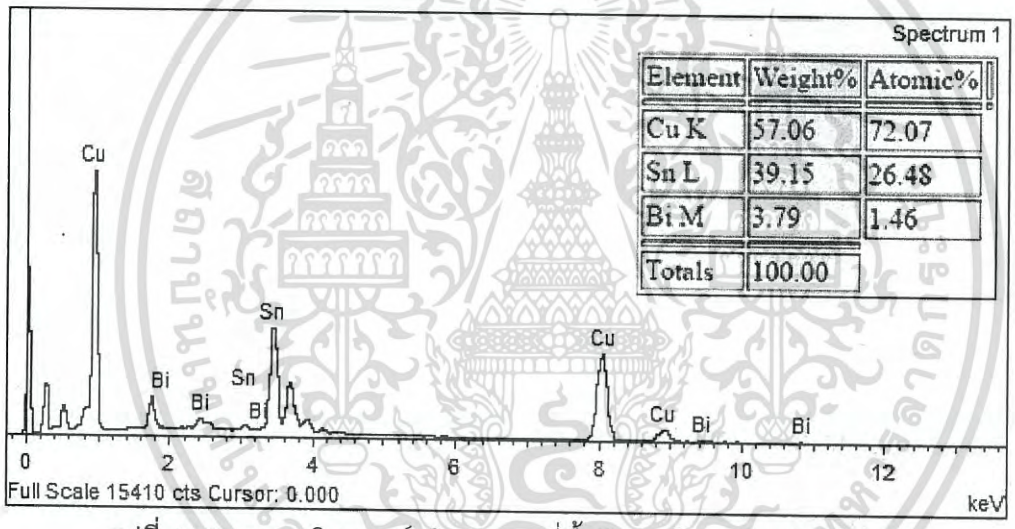
ภายหลังจากการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 125 °C เป็นระยะเวลา 1000 ชั่วโมง ของโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับแผ่นทองแดง พบว่าชิ้นงานมีความแข็งแรงที่รอยต่อต่ำกว่าโลหะบัดกรีสูตรอื่น เนื่องจากเมื่อนำชิ้นงานมาทำภาคตัดขวางด้วยเครื่องตัดแรงโน้มถ่วง พบว่าโลหะบัดกรีหลุดออกจากแผ่นทองแดง โดยได้นำโลหะบัดกรีและแผ่นทองแดงที่หลุดออกจากกันนั้น ไปวิเคราะห์ด้วยการตรวจสอบปริมาณธาตุที่พื้นผิวของทั้งโลหะบัดกรีและแผ่นทองแดง ดังแสดงในรูปที่ 4.50 โดยพบ Kirkendall voids จำนวนมากบนพื้นผิวรอยต่อของชิ้นงานโลหะบัดกรี รูปที่ 4.51 แสดงบริเวณที่วิเคราะห์ปริมาณธาตุที่พื้นผิวของโลหะบัดกรีที่กำลังขยาย 3500 เท่า และผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุแสดงดังรูปที่ 4.52 พบว่าพื้นผิวที่ทำการวิเคราะห์นั้นเป็นชั้นสารประกอบ Cu_3Sn

รูปที่ 4.50 พื้นผิวรอยต่อของชิ้นงานโลหะบัดกรี Sn-58Bi ที่กำลังขยาย a) 1000 เท่า b) 5000 เท่า c) 10000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.51 บริเวณที่วิเคราะห์ปริมาณธาตุที่พื้นผิวของโลหะบัดกรี Sn-58Bi

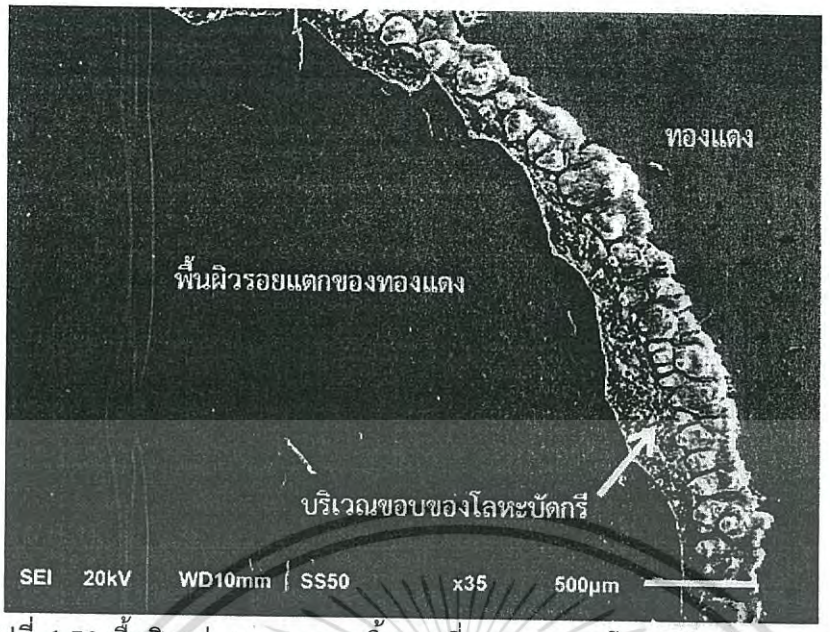


รูปที่ 4.52 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่พื้นผิวของโลหะบัดกรี Sn-58Bi

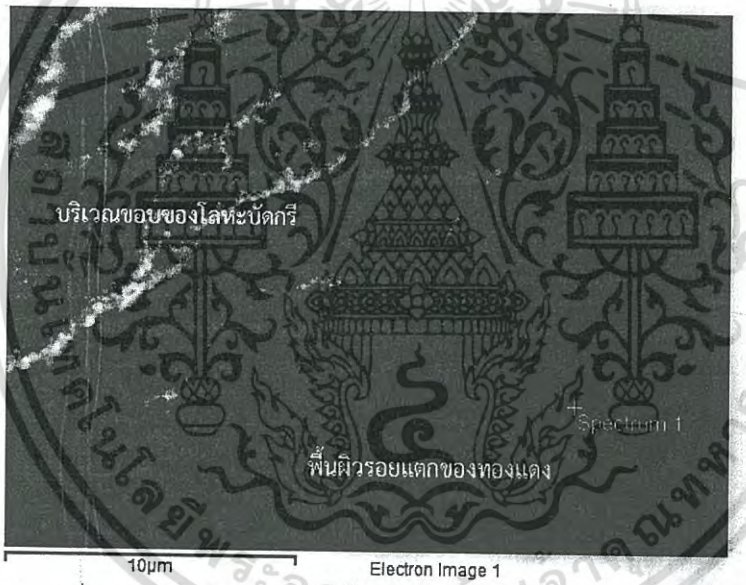
รูปที่ 4.53 แสดงพื้นผิวของแผ่นทองแดงที่กำลังขยาย 35 เท่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็นการแตกแบบเปราะ และรูปที่ 4.54 แสดงพื้นผิวของแผ่นทองแดงและบริเวณที่วิเคราะห์ปริมาณธาตุที่กำลังขยาย 5000 เท่า โดยผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.55 พบว่าบริเวณที่ทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ คือ ทองแดง

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการหลุดออกจากกันของชิ้นงานเกิดขึ้นจาก Kirkendall voids ร่วมกับความเปราะของเฟส Cu_3Sn โดยโลหะบัดกรี Sn-58Bi นั้น มีความหนาของชั้นสารประกอบ Cu_3Sn มากที่สุดเทียบกับโลหะบัดกรีสูตรอื่นๆในวิทยานิพนธ์นี้

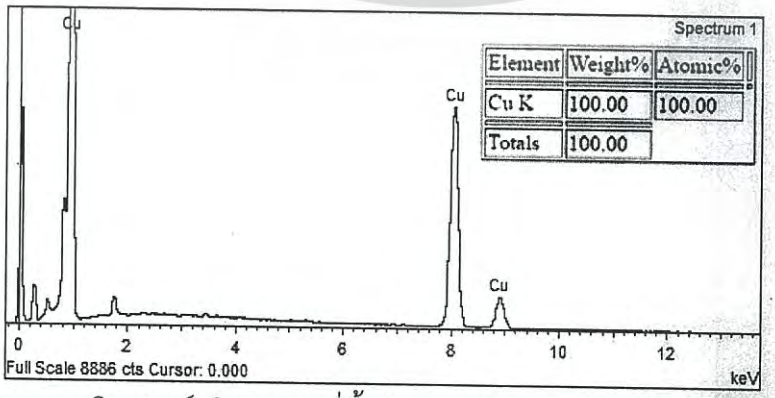
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.53 พื้นผิวแผ่นทองแดงของชิ้นงานที่หลุดออกจากโลหะบัดกรี Sn-58Bi



รูปที่ 4.54 บริเวณที่วิเคราะห์ปริมาณธาตุที่พื้นผิวของแผ่นทองแดงของโลหะบัดกรี Sn-58Bi



รูปที่ 4.55 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่พื้นผิวของแผ่นทองแดงของโลหะบัดกรี Sn-58Bi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 ผลการเลือกโลหะบัดกรี

การเลือกโลหะบัดกรีที่ดีที่สุดในวิทยานิพนธ์นี้ จะพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ความสามารถในการเปียกและความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (ภายหลังการบ่มด้วยความร้อนที่ 125 °C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง) โดยจะให้ความสำคัญของความสามารถในการเปียกและความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะเท่าๆกัน และไม่คำนึงถึงค่าสัมประสิทธิ์การเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ พลังงานกระตุ้น และผลกระทบจากการปนเปื้อนของตะกั่ว เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะและพลังงานกระตุ้นนั้น เป็นผลการคำนวณมาจากความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ และใช้โลหะบัดกรีเพียงบางชนิดในการทดลองผลกระทบจากการปนเปื้อนของตะกั่ว โดยผลการเลือกโลหะบัดกรีแสดงดังตารางที่ 4.24

ตารางที่ 4.24 อันดับของโลหะบัดกรี

ชนิดของโลหะบัดกรี	ค่าตัวประกอบการกระจายตัว	ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (125 °C, 1000 ชั่วโมง)	อันดับ
Sn58Bi-1.0Ni	83.33	12.99	1
Sn58Bi-1.0Ni-0.1Ag	83.15	12.72	2
Sn58Bi-0.5Ni	82.45	11.43	3
Sn58Bi-0.1Ni-0.1Ag	82.95	14.40	4
Sn58Bi-1.0Ni-0.05Ag	82.52	13.79	5
Sn58Bi-0.5Ni-0.1Ag	82.53	13.88	6
Sn58Bi-0.05Ni-0.1Ag	83.22	15.64	7
Sn58Bi-0.5Ni-0.05Ag	82.66	14.49	8
Sn58Bi-0.05Ni-0.05Ag	82.14	13.45	9
Sn58Bi-1.0Ni-0.1In	83.25	16.52	10
Sn58Bi-0.05Ni-0.1In	82.37	14.50	11
Sn58Bi-0.1Ni-0.1In	82.77	17.64	12
Sn58Bi-1.0Ni-0.05In	82.20	15.71	13
Sn58Bi-0.5Ni-0.05In	81.43	15.34	14
Sn58Bi-0.1Ni	80.93	15.71	15
Sn58Bi-0.1Ni-0.05Ag	80.84	16.48	16
Sn58Bi-0.5Ni-0.1In	82.00	20.86	17
Sn58Bi-0.1Ni-0.05In	81.40	19.68	18
Sn58Bi-0.05Ni-0.05In	81.68	23.76	19
Sn58Bi-0.05Ni	79.07	20.04	20
Sn58Bi	80.27	23.71	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลกระทบของ Ni, Ag และ In ต่อความสามารถในการเปียกและชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรี Sn-Bi-Ni-Ag หรือ Sn-Bi-Ni-In กับแผ่นทองแดง หลังการทดสอบการกระจายตัวและตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ค่าตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-58Bi-Ni-X มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นหลังการเติมธาตุ Ni ส่วนการเติม In และ Ag จะส่งผลให้ค่าตัวประกอบการกระจายตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

2. จากการตรวจสอบชั้นสารประกอบเชิงโลหะด้วย SEM ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-58Bi-Ni-X กับแผ่นทองแดงหลังการบัดกรี พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีความหนาที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงว่าธาตุผสมไม่ส่งผลต่อความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-58Bi-Ni-X กับแผ่นทองแดงหลังการบัดกรี

3. จากการตรวจสอบชั้นสารประกอบเชิงโลหะด้วย SEM ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-58Bi-Ni-X กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 75, 100 และ 125 °C เป็นเวลา 10, 100, 1000 ชั่วโมง พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีความหนาเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการบ่ม นอกจากนี้ยังพบว่าเฟสของธาตุต่างๆในโลหะบัดกรีมีลักษณะที่หยาบมากขึ้น

4. จากการตรวจสอบปริมาณธาตุในชั้นสารประกอบเชิงโลหะด้วย SEM และ EDS ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-58Bi-Ni-X กับแผ่นทองแดง พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้น คือ Cu_6Sn_5 รวมถึง $(Cu,Ni)_6Sn_5$ (ในกรณีที่โลหะบัดกรีมีส่วนผสมของ Ni) หลังการบัดกรีและหลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 75, 100 และ 125 °C เป็นเวลา 10, 100, 1000 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังพบสารประกอบเชิงโลหะชั้นที่สอง คือ Cu_3Sn หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 125 °C เป็นเวลา 100 และ 1000 ชั่วโมง

5. ภายหลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 125 °C เวลา 1000 ชั่วโมง ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 และ Cu_3Sn มีขนาดเล็กลงเมื่อโลหะบัดกรีมีการเติมธาตุผสม Ni ส่วนการเติม In และ Ag ไม่ส่งผลต่อขนาดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

6. ภายหลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 125 °C เวลา 1000 ชั่วโมง พบ Kirkendall voids ระหว่างชั้นสารประกอบ Cu_3Sn กับแผ่นทองแดง

7. ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn จะสูงกว่าชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5 และ Cu_3Sn ตามลำดับ ในโลหะบัดกรีทุกสูตร

8. พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn จะสูงกว่าชั้นสารประกอบ Cu_6Sn_5 ในโลหะบัดกรีทุกสูตร

9. จากการตรวจสอบปริมาณธาตุบริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วกับแผ่นทองแดงชุบตะกั่ว ไม่พบการปนเปื้อนของตะกั่วในชั้นสารประกอบเชิงโลหะและในพื้นที่โลหะบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. จากการตรวจสอบปริมาณธาตุบริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรีปนเปื้อนตะกั่วบริสุทธิ์กับแผ่นทองแดง พบสารประกอบ $Sn_{16}Pb_{32}Bi_{52}$ ในพื้นที่ของโลหะบัดกรี

11. จากการตรวจสอบรอยแตกระหว่างโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับแผ่นทองแดง พบ Kirkendall voids จำนวนมากและเกิดรอยแตกขึ้นระหว่างชั้นสารประกอบ Cu_3Sn กับแผ่นทองแดง

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรศึกษาเพิ่มเติมในการเติมธาตุที่ช่วยให้โลหะบัดกรีมีความเหนียวที่มากขึ้น เนื่องมาจากโลหะบัดกรี Sn-58Bi นั้นมีลักษณะเปราะ รวมไปถึงการเติมธาตุผสมในปริมาณที่สูงขึ้น เพื่อจะได้เห็นแนวโน้มที่ชัดเจนในแง่ของอิทธิพลของธาตุผสมต่อความหนาของชั้นสารประกอบ เนื่องจากปัจจัยเหล่านี้จะช่วยเพิ่มความเชื่อมั่นในการเลือกใช้โลหะบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] SME Thailand Club. **"ส่งออกอิเล็กทรอนิกส์ไทยปี'58... ยังไปต่อได้"** [online]. เข้าถึงได้จาก : http://www.smethailandclub.com/knowledges-view.php?id=578. 2015.

[2] MTEC. **"สาระสำคัญของระเบียบ WEEE & RoHS"** [online]. เข้าถึงได้จาก : http://www.thairohs.org/index.php?option=com_ content&task= view&temid=98. 2007.

[3] Abtew, M., Selvaduray, G. "Lead-free solders in microelectronics" **Materials Science and Engineering R.**, vol.27, 2000. Pp. 95-141.

[4] Chew, K.H., Pang, J.H.L. "Impact of drop-in lead free solders on microelectronics packaging" **Electronics Packaging Technology Conference.**, 2005. Pp. 451-454.

[5] Zeng, G., Xue, S., Zhang, L., Gao, L. "Recent advances on Sn-Cu solders with alloying elements: review" **Journal of Materials Science: Materials in Electronics.**, vol.22, 2011. Pp. 565-578.

[6] Amagai, M., Toyoda, Y., Ohnishi, T., Akita, S. "High drop test reliability: Lead-free solders" **Electronic Components and Technology Conference.**, 2004. Pp. 1304-1309.

[7] Kim, K.S., Suganuma, K. "Development of new Sn-Ag-Cu lead-free solders containing fourth elements" **Third International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing.**, 2003. Pp. 414-415.

[8] Zhang, Q.K., Zou, H.F., Zhang, Z.F. "Improving tensile and fatigue properties of Sn-58Bi/Cu solder joints through alloying substrate" **Journal of Materials Research.**, vol.25, 2010. Pp. 303-314.

[9] Shiue, Y.Y., Chuang, T.H. "Effect of La addition on the interfacial intermetallics and bonding strengths of Sn-58Bi solder joints with Au/Ni/Cu pads" **Journal of alloys and Compounds.**, vol.491, 2010. Pp. 610-617.

[10] Moon, K.W., Boettinger, W.J., Kattner, U.R., Handwerker, C.A., Lee, D.J. "The effect of Pb contamination on the solidification behavior of Sn-Bi solders" **Journal of Electronic Material.**, vol.30, 2001. Pp. 45-52.

[11] Lin, S.K., Nguyen, T.L., Wu, S.C., Wang, Y.H. "Effective suppression of interfacial intermetallic compound growth between Sn–58 wt.% Bi solders and Cu substrates by minor Ga addition" **Journal of Alloys and Compounds.** 586, 2014. Pp. 319-327.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[12] Sharif, A., Chan, Y.C. "Effect of indium addition in Sn-rich solder on the dissolution of Cu metallization" **Journal of Alloys and Compounds.**, vol.390, 2005. Pp. 67-73.

[13] Mokhtari, O., Nishikawa, H. "Effects of In and Ni Addition on Microstructure of Sn-58Bi Solder Joint" **Journal of ELECTRONIC MATERIALS.**, vol.43, 2014. Pp. 4158-4170.

[14] Chang, T.C., Wang, M.C., Hon, M.H. "Effect of aging on the growth of intermetallic compounds at the interface of Sn–9Zn–xAg/Cu substrates" **Journal of Crystal Growth.**, vol.250, 2003. Pp. 236–243.

[15] Laurila, T., Hurtig, J., Vuorinen, V., Kivilahti, J.K. "Effect of Ag, Fe, Au and Ni on the growth kinetics of Sn–Cu intermetallic compound layers" **Microelectronics Reliability.**, vol.49, 2009. Pp. 242–247.

[16] Chen, J., Shen, J. Lai, S., Min, D. Wang, X. "Microstructural evolution of intermetallic compounds 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.

[17] Dong, W., Shi, Y., Lei, Y., Xia, Z., Guo, F. "Effect of small amounts of Ni/P/Ce element additions on the microstructure and properties of Sn3.0Ag0.5Cu solder" **Journal of Materials Science: Materials in Electronics.**, vol.20, 2009. Pp. 1008-1017.

[18] Rizvi, M.J., Chan, Y.C., Bailey, C., Islam, M.N. "Effect of adding 1 wt% Bi into the Sn–2.8Ag–0.5Cu solder alloy on the intermetallic formations with Cu-substrate during soldering and isothermal aging" **Journal of Alloys and Compounds.**, vol.407, 2006. Pp. 208-214.

[19] Guo-yuan, L., Xun-qing, S. "Effects of bismuth on growth of intermetallic compounds in Sn-Ag-Cu Pb-free solder joints" **Transactions of Nonferrous Metals Society of China.**, vol.16, 2006. Pp. 739-743.

[20] Hu, X., Li, Y. Min, Z. "Interfacial reaction and IMC growth between Bi-containing Sn0.7Cu solders and Cu substrate during soldering and aging" **Journal of Alloys and Compounds.**, vol.582, 2014. Pp. 341-347

[21] รชต คงชยาสุขวัฒน์, กัลยา ผ่าโผน, กรรณชัย กัลยาศิริ. "การศึกษาอิทธิพลของธาตุ In, Bi, Sb และ Ag ต่อสมบัติทางกายภาพของโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.6Cu-0.05Ni-Ge" การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ, ตุลาคม 2555.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[22] Yoon, J.W., Lee, Y.H., Gon Kim, D.G. "Intermetallic compound layer growth at the interface between Sn–Cu–Ni solder and Cu substrate" **Journal of Alloys and Compounds.**, vol.381, 2004. Pp. 151-157.

[23] Yu, D.Q., Wu, C.M.L., Law, C.M.T., Wang, L., Lai, J.K.L. "Intermetallic compounds growth between Sn–3.5Ag lead-free solder and Cu substrate by dipping method" **Journal of Alloys and Compounds.** 392, 2005. Pp. 192-199.

[24] Tsai, Y.L., Hwang, W.S. "Solidification behavior of Sn–9Zn–xAg lead-free solder alloys" **Materials Science and Engineering A.** 413-414, 2005. Pp. 312-316.

[25] Luo, T., Chen, Z., Hu, A., Li, M. "Study on melt properties, microstructure, tensile properties of low Ag content Sn–Ag–Zn Lead-free solders" **Materials Science and Engineering A.** 556, 2012. Pp. 885-890.

[26] Wu, A.T., Chen, M.H., Huang, C.H. "Formation of intermetallic compounds in SnAgBiIn solder systems on Cu substrates" **Journal of Alloys and Compounds.**, vol.476, 2009. Pp. 436–440.

[27] กำธร สุขพิมาย, กัลยา ผ่าโผน, กรรณชัย กัลยาศิริ. "การศึกษาอิทธิพลของอินเดียมต่อการกระจายตัวและการเกิดสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn บนแผ่นทองแดง." การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ, ตุลาคม 2556.

[28] Zhu, Q., Sheng, M., Luo, L. "The effect of Pb contamination on the microstructure and mechanical properties of SnAg/Cu and SnSb/Cu solder joints in SMT" **Soldering & Surface Mount Technology.** vol.12, 2000. Pp. 19-24.

[29] Zeng, X. "Thermodynamic analysis of influence of Pb contamination on Pb-free solder joints reliability" **Journal of Alloys and Compounds.** 348, 2003. Pp. 184-188.

[30] Wang, F., O'Keefe, M., Brinkmeyer, B. "Microstructural evolution and tensile properties of Sn–Ag–Cu mixed with Sn–Pb solder alloys" **Journal of Alloys and Compounds.** 477, 2009. Pp. 267-273.

[31] กรรณชัย กัลยาศิริ. "อิทธิพลของการบ่มด้วยความร้อนที่มีต่อความแข็งจุลภาคและโครงสร้างจุลภาค ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn" **การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.** ปีที่ 8, เมษายน 2553. หน้า 485-490.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[32] ฉวีวรรณ ลิ้มสุวรรณ์. "การศึกษาอิทธิพลของอินเดียมต่อคุณสมบัติและโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551.

[33] A Random Lab Assistant. "PCB Assembly 101." [online]. Available : https://hax.co/2012/10/17/pcb-assembly-101/. 2012.

[34] Renesas. "Single-sided Soldering." [online]. Available : http://sg.renesas.com/products/package/manual/1/1_1/1_1_8/index.jsp. 2016.

[35] University of Cambridge. "Diffusion mechanisms." [online]. Available : http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/diffusion/diffusion_mechanism.php. 2016.

[36] STUDYBLUE. "interstitial." [online]. Available : https://www.studyblue.com/notes/note/n/chapter-4/deck/38009. 2016.

[37] นิวัฒน์ มูเก็ม. "การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu กับแผ่นรองทองแดงเนื่องจากการบ่มด้วยความร้อน" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553.

[38] Chegg. "Question." [online]. Available : http://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/nitrogen-gaseous-phase-diffused-pure-iron-675-c-surface-concentration-maintained-02-wt-n-c-q8472671. 2016.

[39] Massalski T.B. **Binary Alloy Phase Diagrams**. 2nd ED. Vol.3. United State of America. ASM International 2001.

[40] Himikatus. "**Himikatusru.**" [online]. Available : http://www.himikatus.ru/art/phase-diagr1/diagrams.php. 2015.

[41] OpenWetWare. "Roadmap and Milestones." [online]. Available : http://openwetware.org/wiki/20.309/Labs/Fluorescence_Optical_Microscope. 2016.

[42] WARWICK. "Scanning Electron Microscopy (SEM)." [online]. Available : https://www2.warwick.ac.uk/fac/sci/physics/current/postgraduate/regs/mpags/ex5/techniques/structural/sem3/. 2016.

[43] Orion. "Niels Henrik David Bohr." [online]. Available : https://2011modelsa.wikispaces.com/Group2. 2016.

[44] กมลวิภา พึ่งเจียก. "การศึกษาอิทธิพลของธาตุ Ni, Ag และ In ต่อสมบัติทางกายภาพของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn58Bi-Ni-X" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2557.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[45] กำธร สุขพิมาย. "การศึกษาอิทธิพลของอินเดียมและการบ่มด้วยความร้อนที่มีต่อชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn บนแผ่นรองทองแดง" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2557.

[46] Struers. "Minitom precision cut-off machine." [online]. Available : http://www.struers.com/default.asp?doc_id=262. 2016.

[47] Intecinstruments. "LaboPol-5." [online]. Available : http://www.intecinstruments.com/display/dsp_struers_19.htm. 2016.

[48] Evisa. "Instrument Database:JEOL - JSM-6380LV." [online]. Available : http://www.speciation.net/Database/Instruments/JEOL/JSM6380LV-;i21. 2016.

[49] Kanlayasiri, K., Ariga, T. "Physical properties of Sn58Bi–xNi lead-free solder and its interfacial reaction with copper substrate" **Materials and Design.** 86, 2015. Pp. 371-378.

[50] Singh, Y., Pradhan, S. "Kinetics of Nb_3Sn, Cu_6Sn_5 and Cu_3Sn layer growth" **Journal of Materials Science & Surface Engineering.** Vol.1(2), 2014. Pp. 52-57.

[51] Yoon, J.W., Lee, C.B., Jung, S.B. "Interfacial Reactions Between Sn-58 mass%Bi Eutectic Solder and (Cu, Electroless Ni-P/Cu) Substrate" **Materials Transactions.** vol.43, no.8, 2002. Pp. 1821-1826.

[52] Zhang, Q.K., Zou, H.F., Zhang, Z.F. "Improving tensile and fatigue properties of Sn–58Bi/Cu solder joints through alloying substrate" **Journal of Materials Research.** vol.25, no.2, 2010. Pp. 303-314

[53] Hu, X., Li, Y., Li, K., Min, Z. "Effect of Bi Segregation on the Asymmetrical Growth of Cu-Sn Intermetallic Compounds in Cu/Sn-58Bi/Cu Sandwich Solder Joints During Isothermal Aging" **Journal of Electronic Materials.** vol.42, no.12, 2013. Pp. 3567-3572.

[54] Kang, T.Y., Xiu, Y.Y., Liu, C.Z., Hui, L., Wang, J.J., Tong, W.P. "Bismuth segregation enhances intermetallic compound growth in SnBi/Cu microelectronic interconnect" **Journal of Alloys and Compounds.** 509, 2011. Pp. 1785-1789.

[55] Evans, J.W. "A Guide to Lead-free Solders: Physical Metallurgy and Reliability" **Springer.** Pp. 112.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[56] Yoon, J.W., Jung, S.B. "Investigation of interfacial reactions between Sn–5Bi solder and Cu substrate" **Journal of Alloys and Compounds.** 359, 2003. Pp. 202-208.

[57] Kim, D.G., Jung, S.B. "Interfacial reactions and growth kinetics for intermetallic compound layer between In-48Sn solder and bare Cu substrate" **Journal of Alloys and Compounds.** 386, 2005. Pp. 151-156.

[58] Mayappan, R., Ahmad, Z.A. "Effect of Bi addition on the activation energy for the growth of Cu_5Zn_8 intermetallic in the Sn–Zn lead-free solder" **Intermetallics.** 18, 2010. Pp. 730-735.

[59] Kim, D.G., Jang, H.S., Jung, S.B. "Solid state intermetallic compound layer growth between Sn–8Zn–3Bi solder and bare copper substrate" **Journal of Materials Science: Materials in electronics.** 16, 2005. Pp. 523-528.

[60] Vianco, P.T., Kilgo, A.C., Grant, R. "Intermetallic Compound Layer Growth By Solid State Reactions Between 58Bi-42Sn Solder and Copper" **Journal of Electronic Materials.** vol.24, no.10, 1995. Pp. 1493-1505.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Proceedings of IE Network Conference

เอกสารรวมบทความการประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ

IE NETWORK CONFERENCE 2015

6-7 August 2015 The Emerald Hotel Bangkok

Academics-Industrial Research Collaborations in order to be Excellence in ASEAN

การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี 2558

ASEAN Economic Community

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยศิลปากร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี พ.ศ. 2558
6-7 สิงหาคม 2558 กรุงเทพฯ

ผลกระทบของ Ni, Ag และ In ต่อปฏิกิริยารอยต่อระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-Bi กับแผ่นทองแดง

Effect of Ni, Ag, and In on interfacial reaction between Sn-Bi-Ni-X solder and Cu substrate

ปรัชญ์ เจียรสถาวงศ์* กัลยา ผ่าโผน กำธร สุขพิมาย กรรณชัย กัลยาศิริ
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
บริษัท อุลตราคอร์ จำกัด 1417 หมู่ 4 ซ.ศรีบุญเรือง 1 ถ.เทพารักษ์ ต.เทพารักษ์ อ.เมือง จ.สมุทรปราการ 10270
E-mail: prach.jhean@gmail.com*

Prach Jheansathawong*, Kanlaya Phaphon , Kamtom Sukpimai, Kannachai Kanlayasiri
Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok, 10520
ULTRACORE CO., LTD. 1417 Moo 4, Soi Sriboonruang1, Teparak Rd., TambolTeparak, AmphurMuang, Samutprakarn, 10270
E-mail: prach.jhean@gmail.com*

บทคัดย่อ

จากข้อบังคับที่ห้ามใช้ตะกั่วในผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ทำให้อุตสาหกรรมด้านอิเล็กทรอนิกส์หันมาพัฒนาการใช้โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแทนตะกั่วบัดกรีแบบเดิม ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ศึกษาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-58Bi เนื่องจากข้อดีหลายประการโดยเฉพาะจุดหลอมเหลวที่ต่ำ โดยจะศึกษาผลกระทบของนิเกิล, เงิน, และอินเดียมต่อปฏิกิริยารอยต่อระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-Bi-Ni-X (X คือ Ag หรือ In) กับแผ่นทองแดงและแผ่นทองแดงชุบตะกั่ว ซึ่งปริมาณธาตุนิเกิลที่เติมคือ 0, 0.05, 0.1, 0.5 และ 1.0 wt.% ตามลำดับ ปริมาณธาตุเงินและอินเดียมที่เติมคือ 0.05 และ 0.1 wt.% จากนั้นบัดกรีชิ้นงานด้วยวิธี reflow process และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ โดยชิ้นงานจะถูกนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (EDX) พบว่าชั้นสารประกอบที่เกิดขึ้นคือ Cu_6Sn_5 โดยธาตุผสมที่เติมเข้าไปไม่ส่งผลต่อการเกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ยกเว้นโลหะบัดกรี Sn58Bi-1.0Ni-0.1Ag ที่มีความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมากขึ้น

คำหลัก โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว, สารประกอบเชิงโลหะ, ปฏิกิริยารอยต่อ

Abstract

Recently, many counties have issued environmental regulations to control the use of certain toxic substances such as lead in electronic products. Therefore, the electronics industry must adapt to use lead-free solders instead of the traditional SnPb solders. In this research Sn-58Bi lead-free solder was investigated because of many advantages especially its melting point. Effect of Ni, Ag, and In on interfacial reaction between Sn-Bi-Ni-X solder (X = Ag or In) and Cu substrate was examined. Whereas 0, 0.05, 0.1, 0.5 and 1.0 wt.% Ni and 0.05 and 0.1 wt.% Ag or In were added. The lead-free solders were

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

soldered with Cu substrate by reflow process and cooled down to room temperature. The solder/Cu interfaces were investigated by SEM and EDX. The Cu_6Sn_5 intermetallic compound was found at solder/Cu interfaces. Results showed that the alloying elements do not affect solder/Cu interface except Sn58Bi-1.0Ni-0.1Ag solder.

Keywords: lead-free solder, intermetallic compound, interfacial reaction

1. บทนำ

จากข้อกำหนดในการควบคุมปริมาณการใช้สารพิษในผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น RoHs ทำให้อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ต้องเปลี่ยนมาใช้โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแทนโลหะบัดกรีดั้งเดิมที่ผสมสารตะกั่ว โดยโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วถูกพัฒนาขึ้นเพื่อทดแทนตะกั่วบัดกรีแบบเดิม โดยสูตรที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือ Sn-Ag-Cu (โดยเฉพาะอย่างยิ่ง SAC305) ที่มีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ อย่างไรก็ตามโลหะบัดกรีสูตร SAC305 นั้นมีช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวที่สูงถึง 217-221 °C [1] ซึ่งอาจสร้างความเสียหายต่อชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์และแผ่นวงจรขณะบัดกรี ดังนั้นการใช้งานโลหะบัดกรีที่มีจุดหลอมเหลวต่ำจะแก้ปัญหาอุณหภูมิการบัดกรีที่สูงได้ โดย Sn-58Bi เป็นโลหะบัดกรีจุดหลอมเหลวเพียง 139 °C แต่ข้อเสียของโลหะบัดกรี Sn-58Bi คือสภาพการเปียกที่ค่อนข้างต่ำ [2] ดังนั้นการผสมธาตุโลหะอื่นๆ เช่น Ni, Ag, และ In เข้าไปในโลหะบัดกรีจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติได้หลายประการ โดยธาตุผสมเหล่านี้จะช่วยปรับปรุงโครงสร้างจุลภาค, ลดจุดหลอมเหลว, และยับยั้งการเกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

โดยงานวิจัยนี้จะศึกษาผลกระทบของ Ni, Ag, และ In ต่อปฏิกิริยารอยต่อระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-Bi-Ni-X (X คือ Ag หรือ In) กับแผ่นทองแดง โดยจะใช้ Sn-58Bi เป็นส่วนผสมพื้นฐาน

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ทำการหล่อโลหะบัดกรีเป็นทรงกระบอกและปล่อยให้โลหะบัดกรีเย็นตัวในอากาศ โดยการทดลองนี้ใช้โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-58Bi เป็นโลหะบัดกรีพื้นและผสม Ni ปริมาณ 0.05, 0.1, 0.5, และ 1% โดยน้ำหนัก ส่วน Ag และ In จะถูกผสมด้วยปริมาณเพียง 0.05 หรือ 0.1% โดยน้ำหนักเนื่องมาจากธาตุทั้งสองชนิดมีราคาสูง แผ่นทองแดงบริสุทธิ์ที่ใช้มีขนาด 30x30x0.35 mm^3 ทำความสะอาดด้วย IPA ตามมาตรฐาน JIS Z 3284

2.2 วิธีการทดสอบ

นำโลหะบัดกรีวางบนแผ่นทองแดงที่เตรียมไว้ จากนั้นหยดฟลักซ์ชนิด NH-100VK-1 ปริมาณ 0.02 ml บัดกรีด้วยวิธี reflow ที่อุณหภูมิ 179 °C เป็นเวลา 30 วินาที นับจากโลหะบัดกรีเริ่มหลอมละลาย จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวในอากาศและล้างฟลักซ์ออกด้วยเอทานอล ในส่วนของความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะนั้นหาได้จากการใช้ซอฟท์แวร์ Image-pro Express

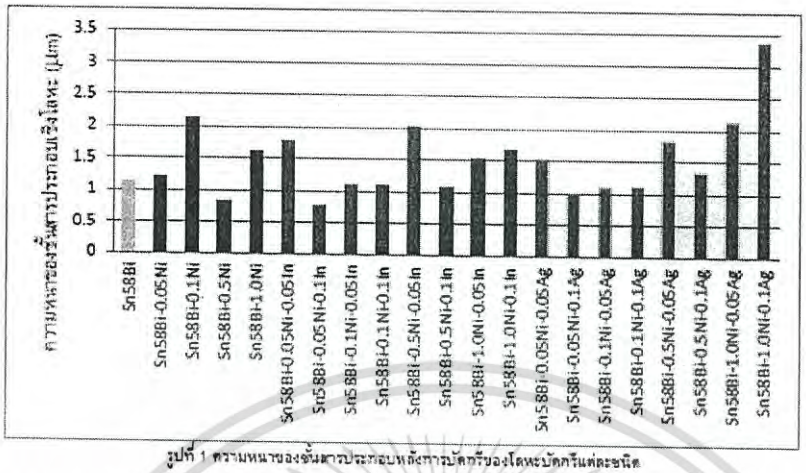
ในการศึกษารอยเชื่อมของโลหะบัดกรี ชิ้นงานที่ผ่านการบัดกรีแล้วจะถูกนำมาตัดขวางด้วยเครื่องตัดแรงโน้มถ่วงยี่ห้อ Struers รุ่น Minitom และหล่อด้วย epoxy จากนั้นทำการขัดผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400, 1000, 2000, และ 4000 จากนั้นขัดบนผ้าลักหลาดด้วยผงอะลูมินาขนาด 1 μm โดยใช้เครื่องขัดยี่ห้อ Struers LaboPol-1 จากนั้นนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope หรือ SEM) ยี่ห้อ JEOL JSM-6380 LV เพื่อตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของชิ้นงาน หลังจากนั้นทำการตรวจสอบปริมาณธาตุที่พบบนพื้นผิวชิ้นงานด้วยวิธี Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX) ซึ่งผลที่ได้จะแสดงธาตุที่พบในบริเวณที่สนใจ

3. ผลการวิจัย

3.1 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

รูปที่ 1 แสดงกราฟความหนาชั้นสารประกอบหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด พบว่าการเติม Ni, In และ Ag ไม่ส่งผลต่อความหนาของชั้นสารประกอบยกเว้นโลหะบัดกรี Sn58Bi-1.0Ni-0.1Ag โดยงานวิจัยของ Mokhtari และ Nishikawa [3] ได้ศึกษาผลกระทบของ Ni และ In ต่อโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมโลหะบัดกรี Sn58Bi พบว่าความหนาของชั้นสารประกอบหลังการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 ความหนาของชั้นสารประกอบหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด

บัดกรีนั้นมีค่าไม่ต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ในงานวิจัยนี้ โดยอิทธิพลของธาตุผสมต่อความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจะเห็นผลได้ชัดเมื่อผ่านการบ่มความร้อนเป็นระยะเวลานาน [3]

รูปที่ 2 (a-f) แสดงชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi, Sn-58Bi-1.0Ni, Sn-58Bi-1.0Ni-0.05In, Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In, Sn-58Bi-1.0Ni-0.05Ag และ Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน (ยกเว้น Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag)

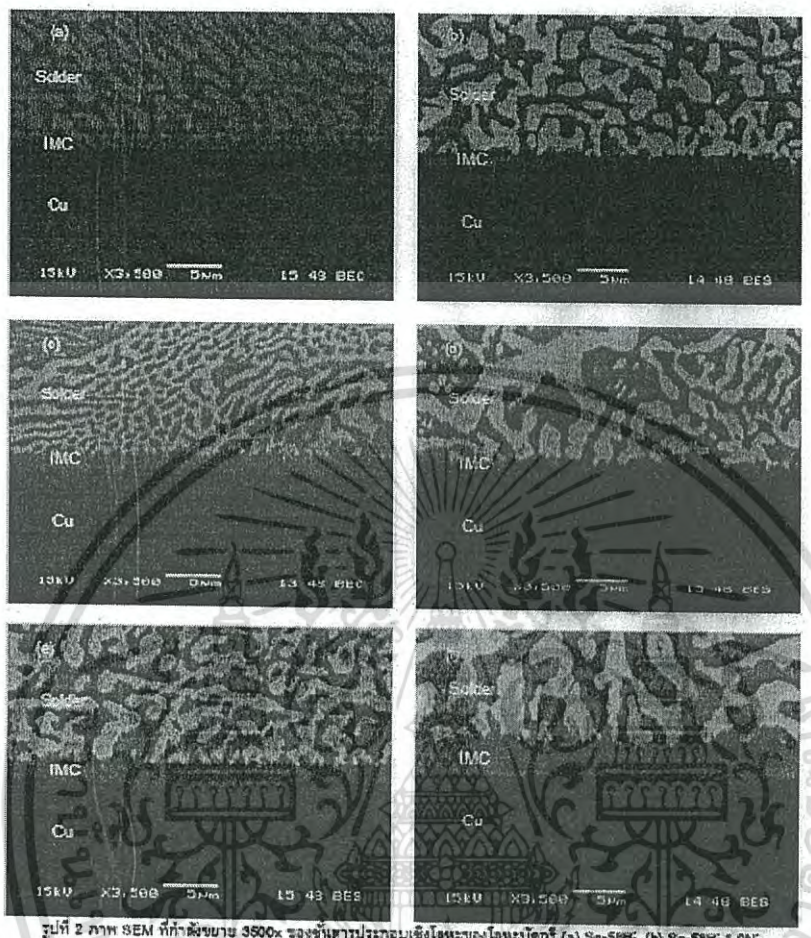
3.2 โครงสร้างจุลภาคของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

จากการตรวจสอบด้วย SEM และ EDX ที่รอยเชื่อมของโลหะบัดกรีโดยใช้กำลังขยาย 5000 เท่า โดยรูปที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In และรูปที่ 4 แสดงสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In พบชั้นสารประกอบเชิงโลหะเป็นเฟส Cu_6Sn_5 (รวมถึง $(Cu,Ni)_6Sn_5$) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yoon และ Lee [4] และผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.1Ag ดังรูปที่ 5 โดยสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX แสดงดังรูปที่ 6 พบเฟสของสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 (รวมถึง $(Cu,Ni)_6Sn_5$) อย่างไรก็ตามไม่พบ In และ Ag ในชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีทุกชนิด เนื่องจากปริมาณ In และ Ag ในโลหะบัดกรีมีปริมาณเพียง 0.1% และระยะเวลาในการบัดกรีที่สั้นเพียง 30 วินาที ทำให้การแทนที่ของอะตอมในชั้นสารประกอบเกิดขึ้นอย่างไม่ทั่วถึง โดยงานวิจัยของ Sharif และ Chan [5] พบปริมาณ In ในชั้นสารประกอบเพียง 2.8% จากปริมาณ 9%In ในโลหะบัดกรี Sn–9%In–3.5%Ag–0.5%Cu หลังการบัดกรี 5 นาที

4. สรุป

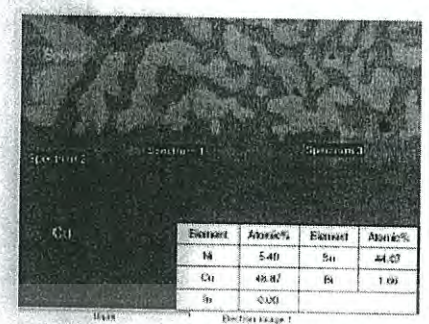
งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของ Ni, Ag และ In ต่อปฏิกิริยารอยต่อระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-Bi กับแผ่นทองแดง จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าการเติม Ni, In และ Ag ไม่ส่งผลต่อความหนาของชั้นสารประกอบหลังการบัดกรี (ยกเว้น Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag) และผลจากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชั้นสารประกอบเชิงโลหะพบว่าเฟสที่เกิดขึ้นคือสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 (รวมถึง $(Cu,Ni)_6Sn_5$) และไม่พบธาตุ In และ Ag ในชั้นสารประกอบเชิงโลหะเนื่องจากระยะเวลาการบัดกรีที่สั้นและปริมาณธาตุที่ผสมลงไปมีปริมาณน้อยมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

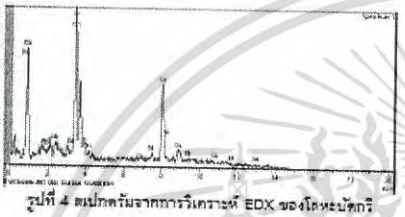


รูปที่ 2 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 3500x ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี (a) Sn-58Bi, (b) Sn-58Bi-1.0Ni, (c) Sn-58Bi-1.0Ni-0.05In, (d) Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In, (e) Sn-58Bi-1.0Ni-0.05Ag, (f) Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag

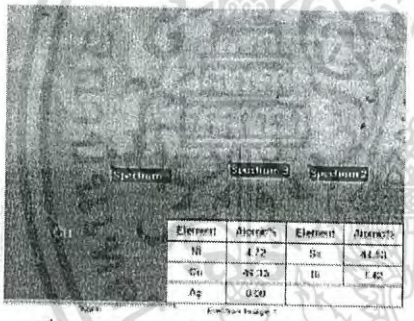
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



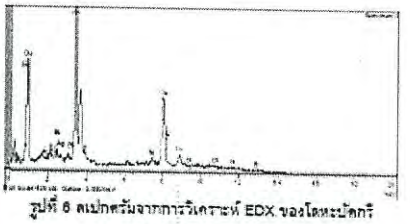
รูปที่ 3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In (Spectrum 2)



รูปที่ 4 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In



รูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.1Ag (Spectrum 2)



รูปที่ 6 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.1Ag

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท อุลตราดอร์ จำกัด สำหรับคำแนะนำและสนับสนุนอุปกรณ์ในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Abtew, M., Selvaduray, G. Lead-free solders in microelectronics. Materials Science and Engineering R. 2000; 27: 95-141.

[2] Chew, K.H., Pang, J.H.L. Impact of drop-in lead free solders on microelectronics packaging. Electronics Packaging Technology Conference. 2005; 451-454.

[3] Mokhtari, O., Nishikawa, H. Effects of In and Ni Addition on Microstructure of Sn-58Bi Solder Joint. Journal of Electronic Materials. 2014; 43: 4158-4170.

[4] Yoon, J.W., Lee, Y.H., Intermetallic compound layer growth at the interface between Sn–Cu–Ni solder and Cu substrate. Journal of Alloys and Compounds. 2004; 381: 151-157.

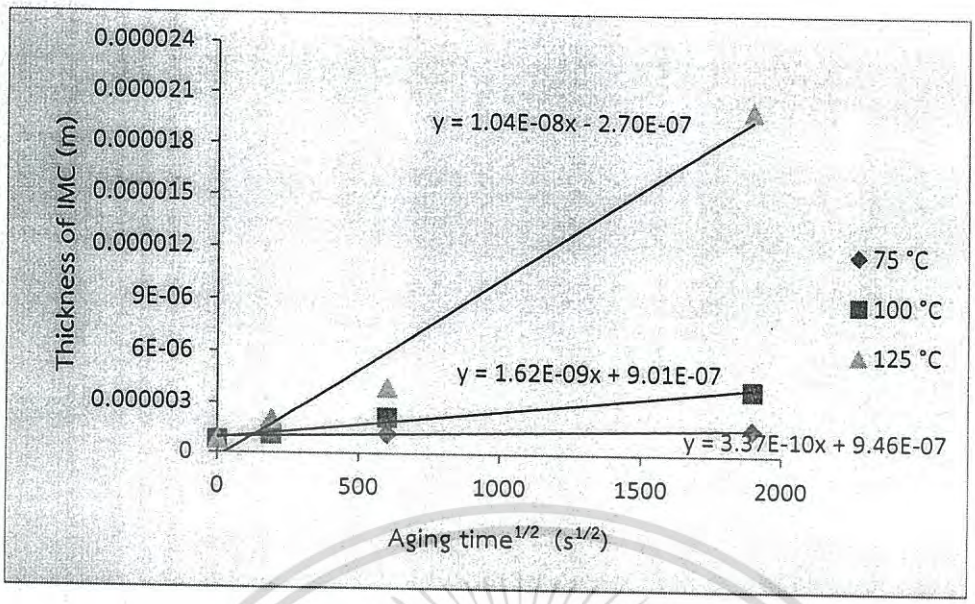
[5] Sharif, A., Chan, Y.C., Effect of indium addition in Sn-rich solder on the dissolution of Cu metallization. Journal of Alloys and Compounds. 2005; 390: 67-73.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

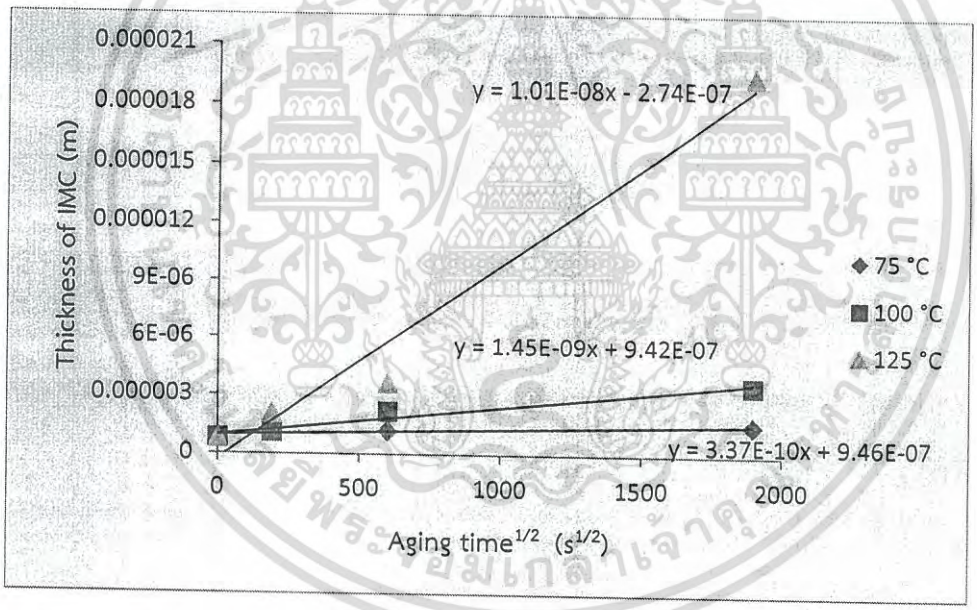
ภาคผนวก ข.

สัมประสิทธิ์การเติบโตและพลังงานกระตุ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

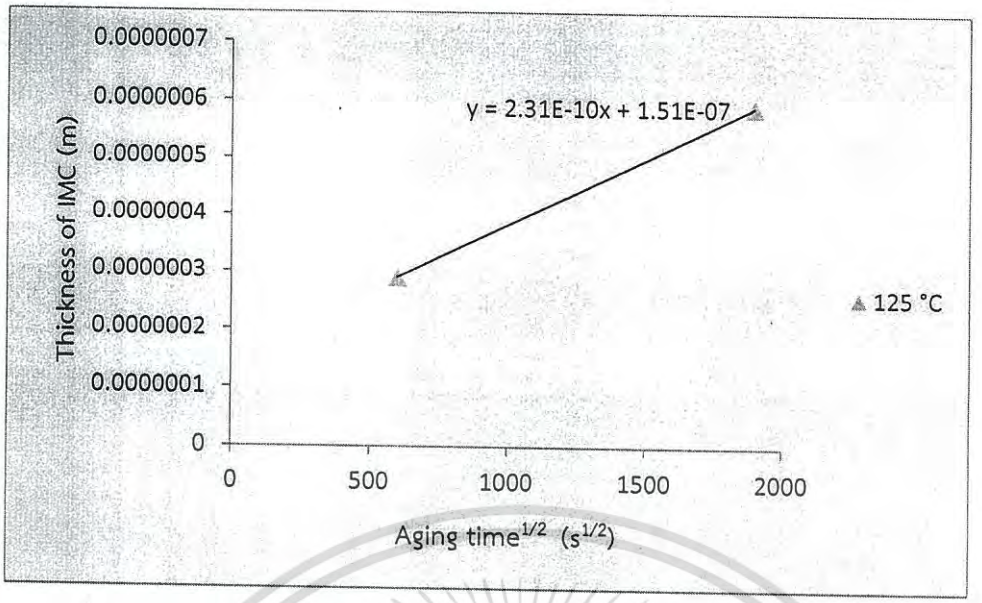


รูปที่ ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni กับทองแดง



รูปที่ ข.2 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni กับทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

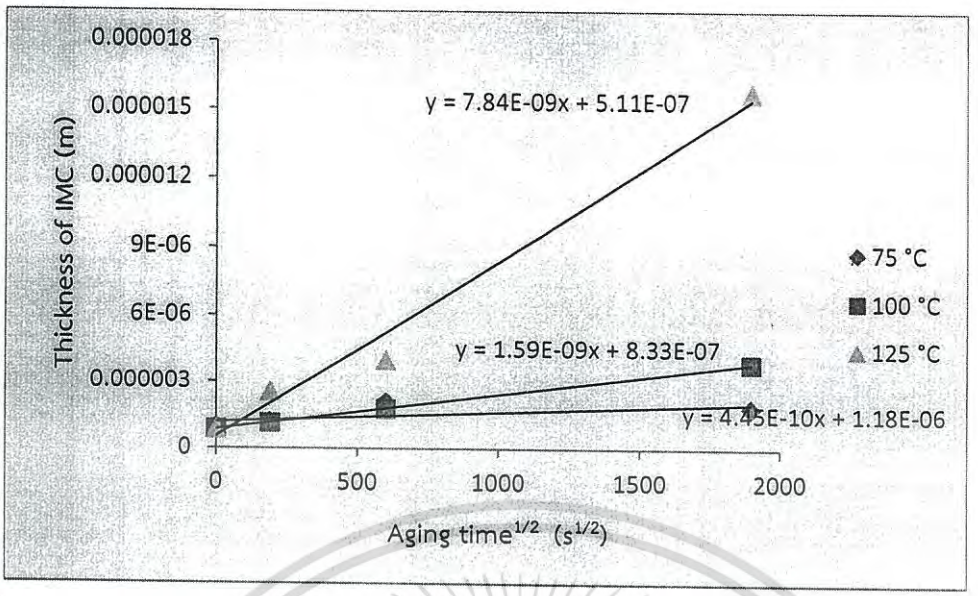


รูปที่ ข.3 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni กับทองแดง

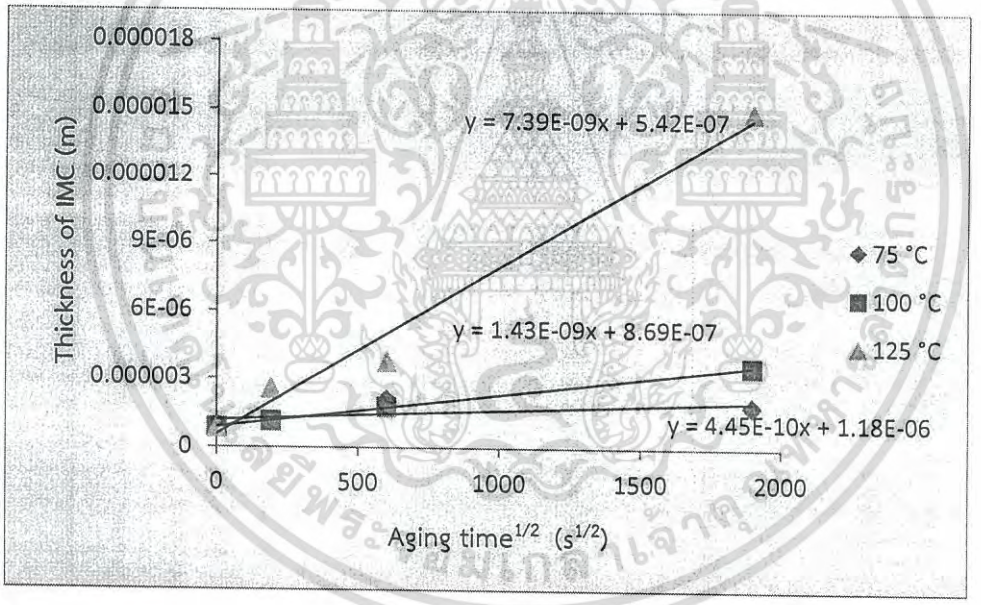
ตารางที่ ข.1 สัมประสิทธิ์การเติบโต (K) ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Sn-58Bi-0.05Ni กับทองแดง

Intermetallic phase	Temperature (°C)/(K)	Slope = $K^{1/2}$	K (m^2/s)
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	75/348	3.37×10^{-10}	1.13×10^{-19}
	100/373	1.62×10^{-9}	2.63×10^{-18}
	125/398	1.04×10^{-8}	1.08×10^{-16}
Cu_6Sn_5	75/348	3.37×10^{-10}	1.13×10^{-19}
	100/373	1.45×10^{-9}	2.09×10^{-18}
	125/398	1.01×10^{-8}	1.01×10^{-16}
Cu_3Sn	75/348	-	-
	100/373	-	-
	125/398	2.31×10^{-10}	5.35×10^{-20}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

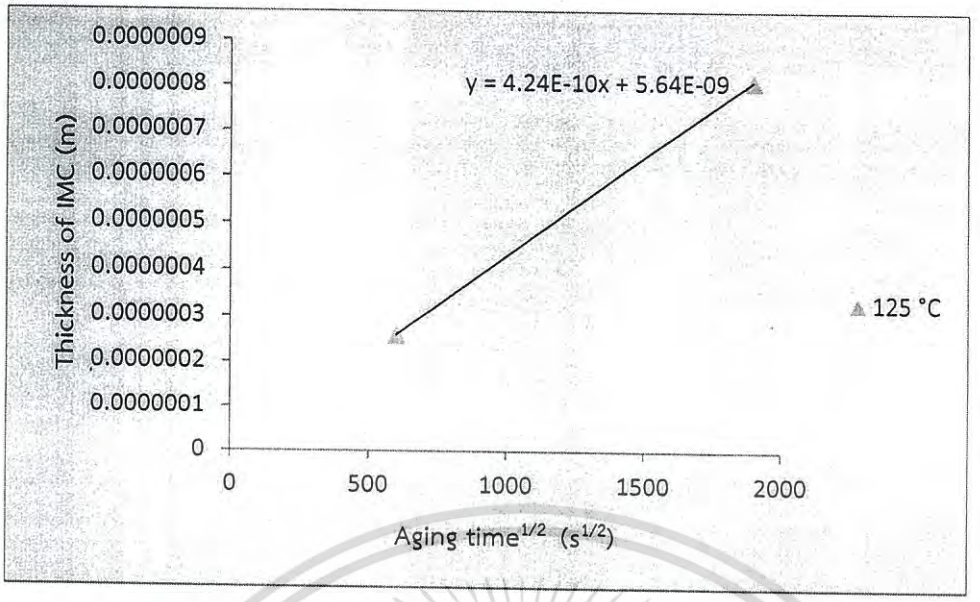


รูปที่ ข.4 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni กับทองแดง



รูปที่ ข.5 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni กับทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

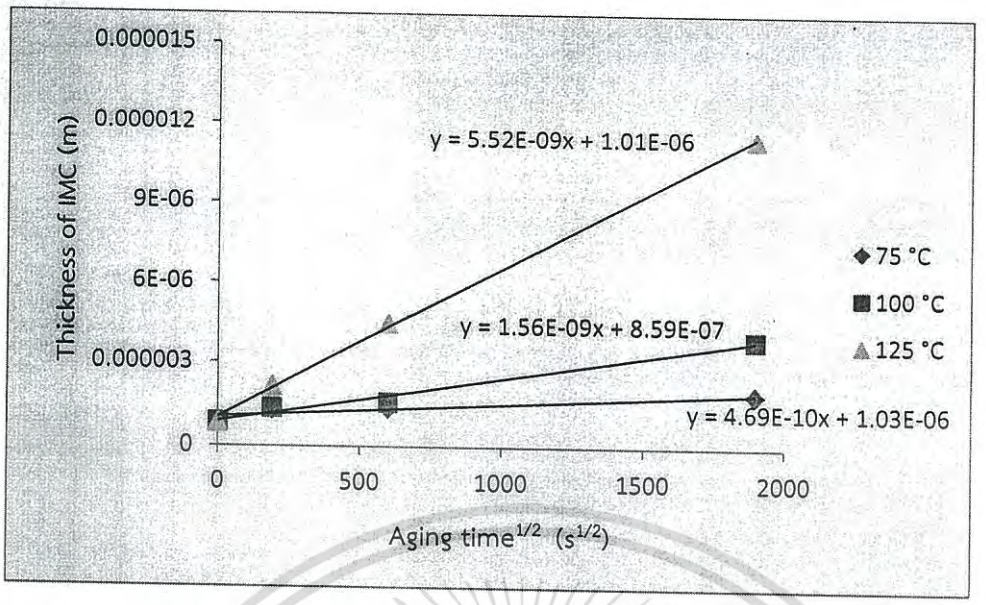


รูปที่ ข.6 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni กับทองแดง

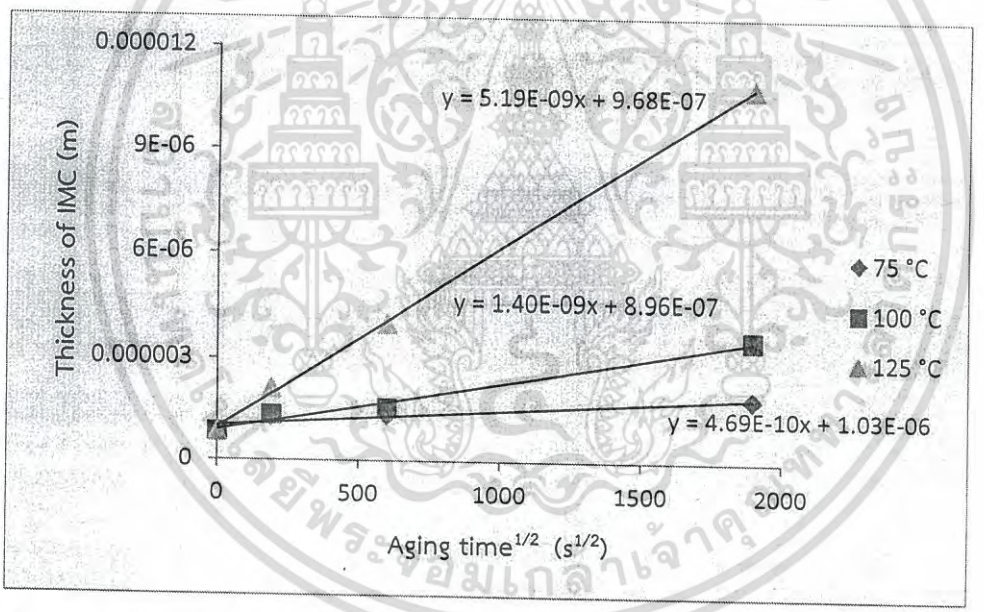
ตารางที่ ข.2 สัมประสิทธิ์การเติบโต (K) ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Sn-58Bi-0.1Ni กับทองแดง

Intermetallic phase	Temperature (°C)/(K)	Slope = $K^{1/2}$	K (m^2/s)
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	75/348	4.45×10^{-10}	1.98×10^{-19}
	100/373	1.59×10^{-9}	2.53×10^{-18}
	125/398	7.84×10^{-9}	6.14×10^{-17}
Cu_6Sn_5	75/348	4.45×10^{-10}	1.98×10^{-19}
	100/373	1.43×10^{-9}	2.04×10^{-18}
	125/398	7.39×10^{-9}	5.46×10^{-17}
Cu_3Sn	75/348	-	-
	100/373	-	-
	125/398	4.24×10^{-10}	1.80×10^{-19}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

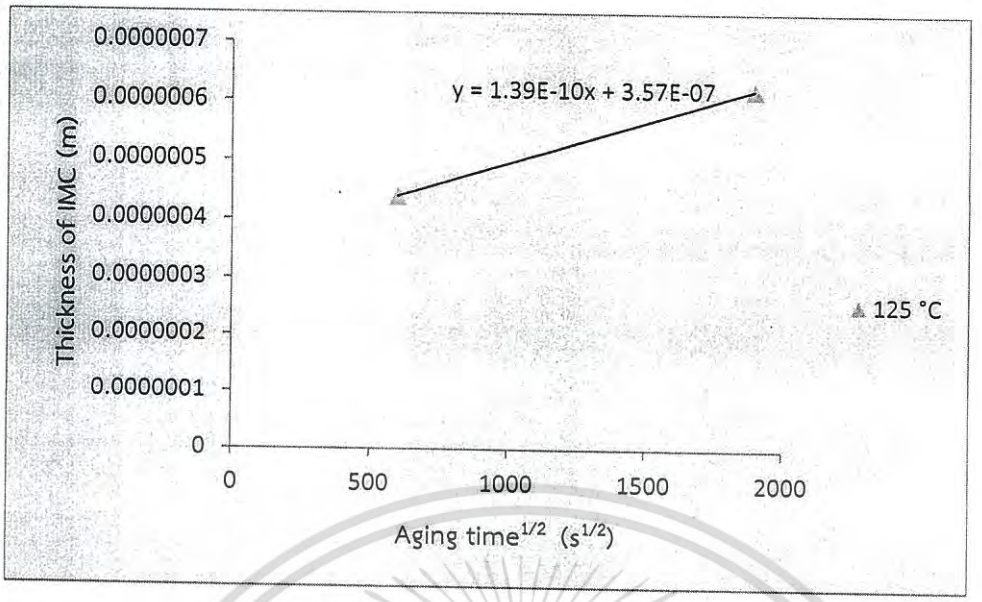


รูปที่ ข.7 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni กับทองแดง



รูปที่ ข.8 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni กับทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

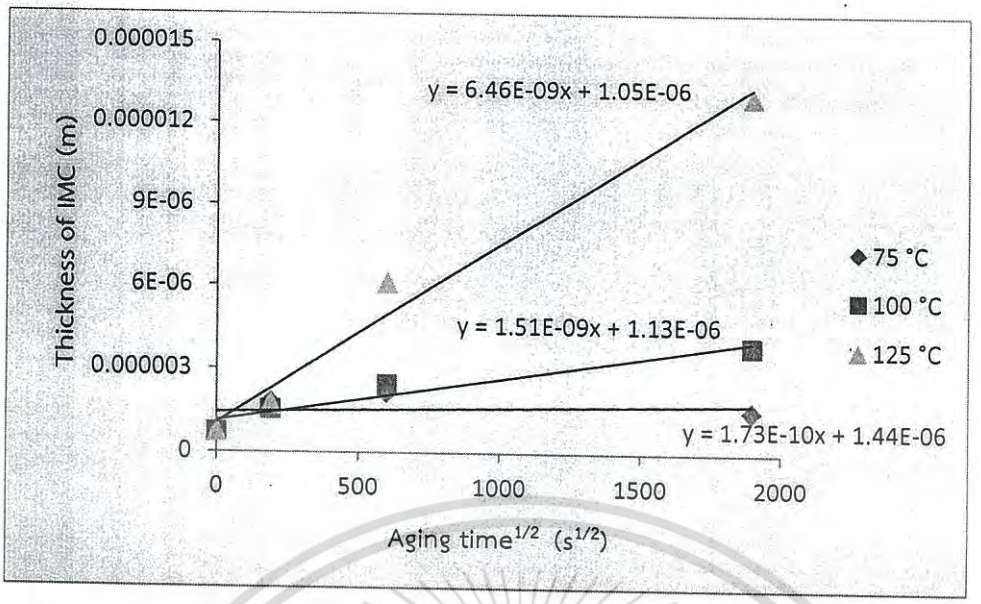


รูปที่ ข.9 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni กับทองแดง

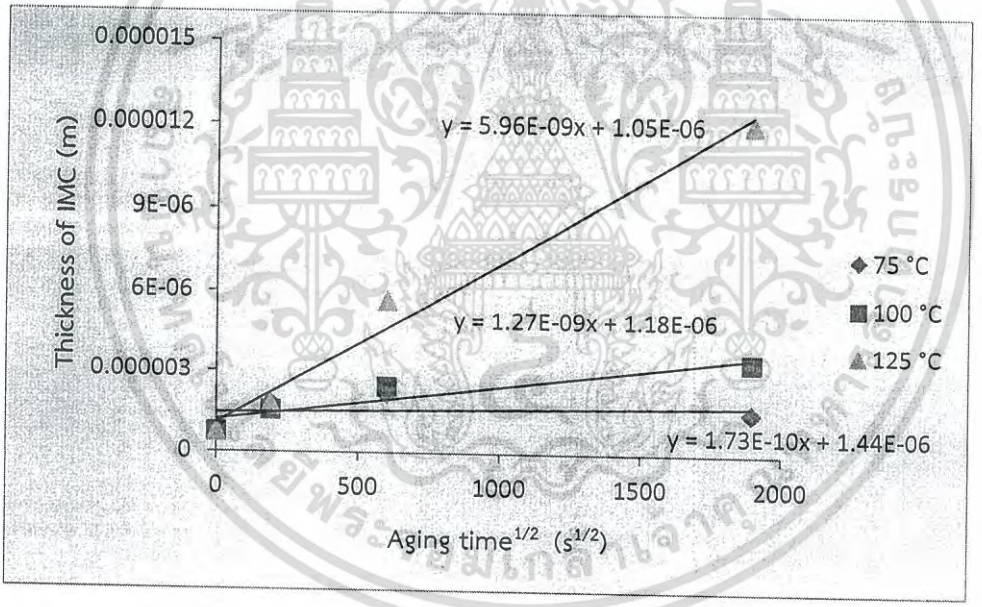
ตารางที่ ข.3 สัมประสิทธิ์การเติบโต (K) ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Sn-58Bi-0.5Ni กับทองแดง

Intermetallic phase	Temperature (°C)/(K)	Slope = $K^{1/2}$	K (m^2/s)
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	75/348	4.69×10^{-10}	2.20×10^{-19}
	100/373	1.56×10^{-9}	2.45×10^{-18}
	125/398	5.52×10^{-9}	3.05×10^{-17}
Cu_6Sn_5	75/348	4.69×10^{-10}	2.20×10^{-19}
	100/373	1.40×10^{-9}	1.97×10^{-18}
	125/398	5.19×10^{-9}	2.69×10^{-17}
Cu_3Sn	75/348	-	-
	100/373	-	-
	125/398	1.39×10^{-10}	1.92×10^{-20}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

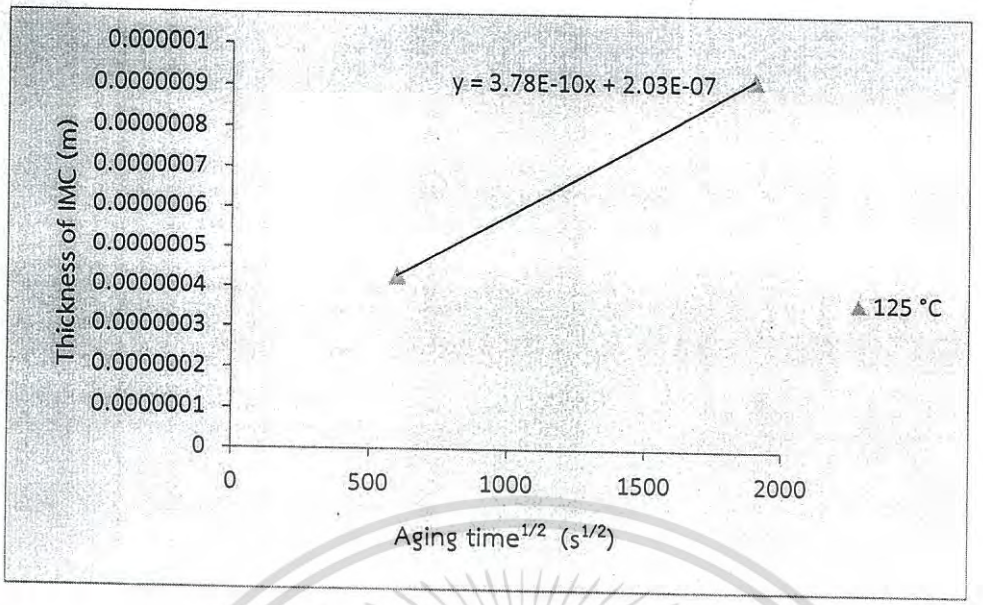


รูปที่ ข.10 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni กับทองแดง



รูปที่ ข.11 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni กับทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

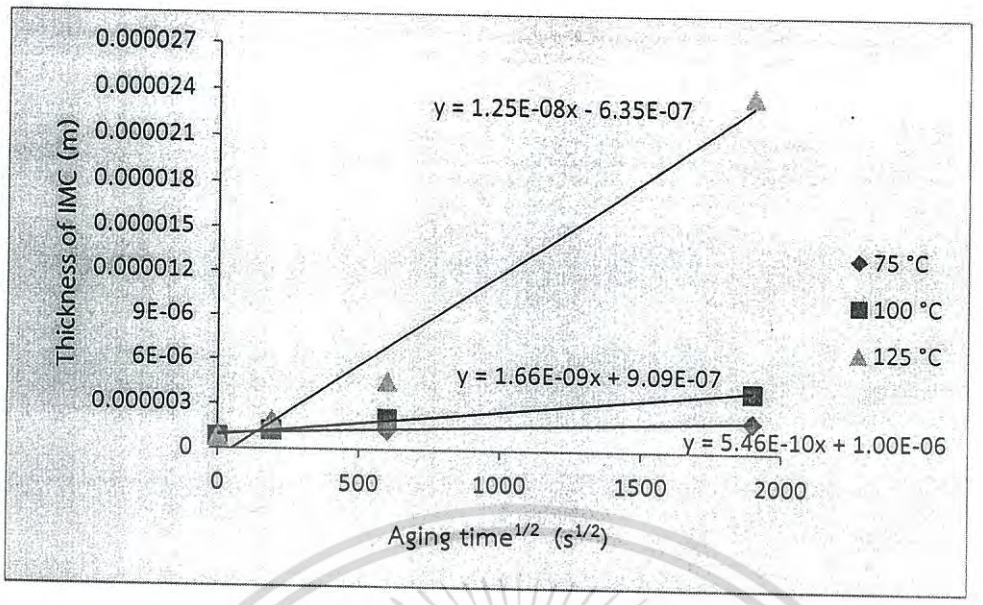


รูปที่ ข.12 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni กับทองแดง

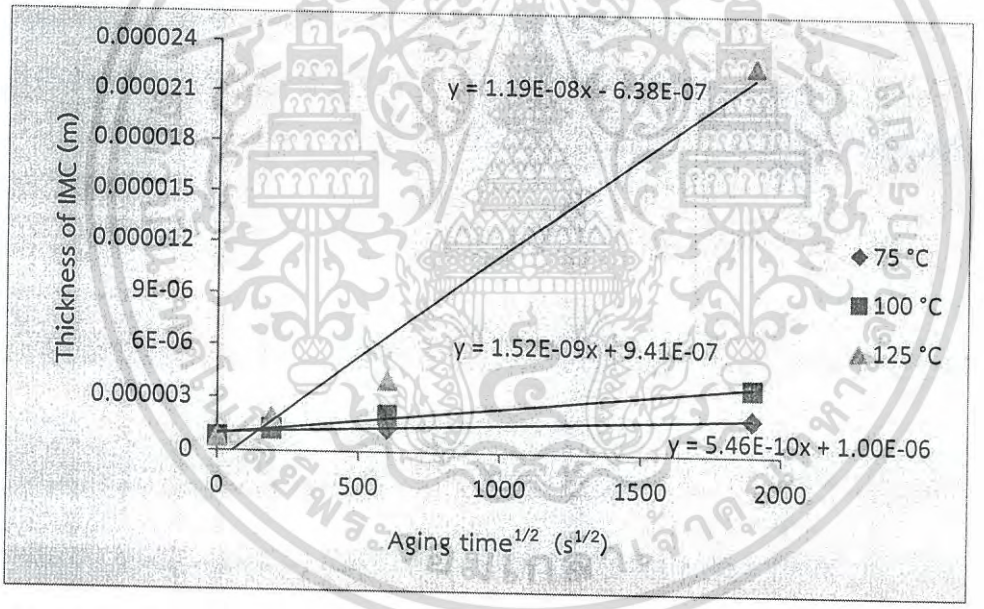
ตารางที่ ข.4 สัมประสิทธิ์การเติบโต (K) ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Sn-58Bi-1.0Ni กับทองแดง

Intermetallic phase	Temperature (°C)/(K)	Slope = $K^{1/2}$	K (m^2/s)
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	75/348	1.73×10^{-10}	2.99×10^{-20}
	100/373	1.51×10^{-9}	2.28×10^{-18}
	125/398	6.46×10^{-9}	4.17×10^{-17}
Cu_6Sn_5	75/348	1.73×10^{-10}	2.99×10^{-20}
	100/373	1.27×10^{-9}	1.61×10^{-18}
	125/398	5.96×10^{-9}	3.55×10^{-17}
Cu_3Sn	75/348	-	-
	100/373	-	-
	125/398	3.78×10^{-10}	1.43×10^{-19}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

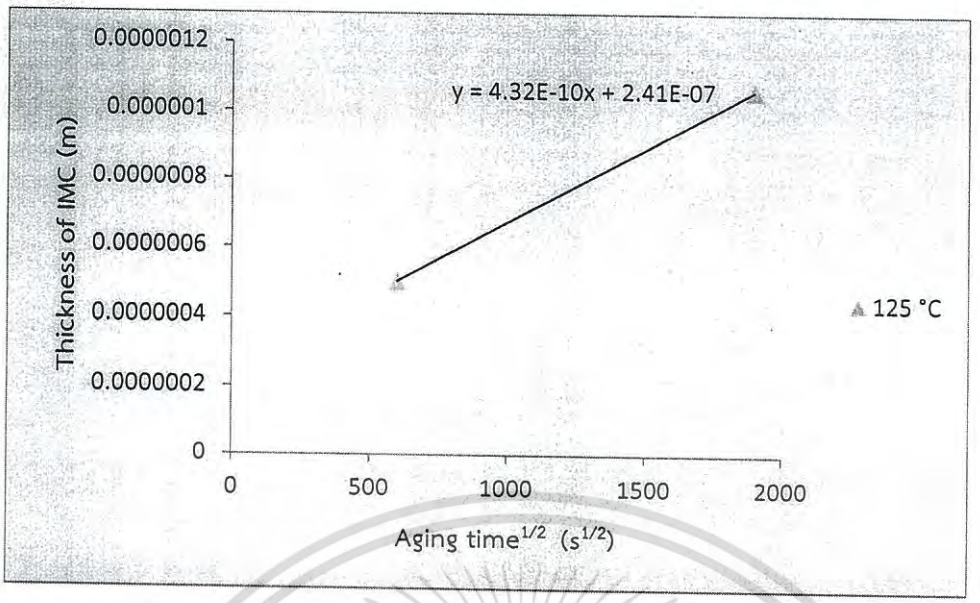


รูปที่ ข.13 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.05In กับทองแดง



รูปที่ ข.14 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.05In กับทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

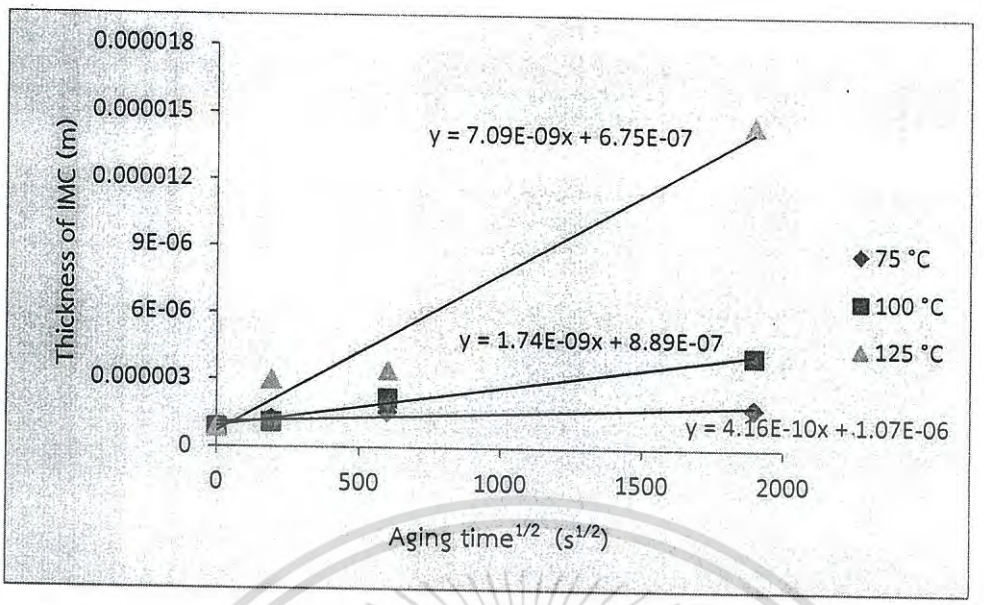


รูปที่ ข.15 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.05In กับทองแดง

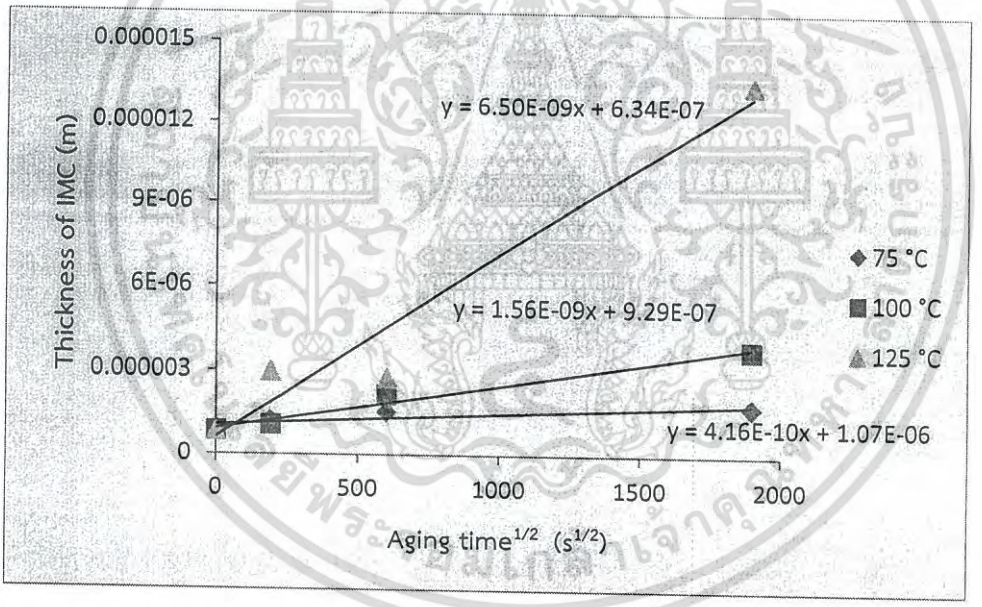
ตารางที่ ข.5 สัมประสิทธิ์การเติบโต (K) ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Sn-58Bi-0.05Ni-0.05In กับทองแดง

Intermetallic phase	Temperature (°C)/(K)	Slope = $K^{1/2}$	K (m^2/s)
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	75/348	5.46×10^{-10}	2.98×10^{-19}
	100/373	1.66×10^{-9}	2.75×10^{-18}
	125/398	1.25×10^{-8}	1.56×10^{-16}
Cu_6Sn_5	75/348	5.46×10^{-10}	2.98×10^{-19}
	100/373	1.52×10^{-9}	2.30×10^{-18}
	125/398	1.19×10^{-8}	1.42×10^{-16}
Cu_3Sn	75/348	-	-
	100/373	-	-
	125/398	4.32×10^{-10}	1.86×10^{-19}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

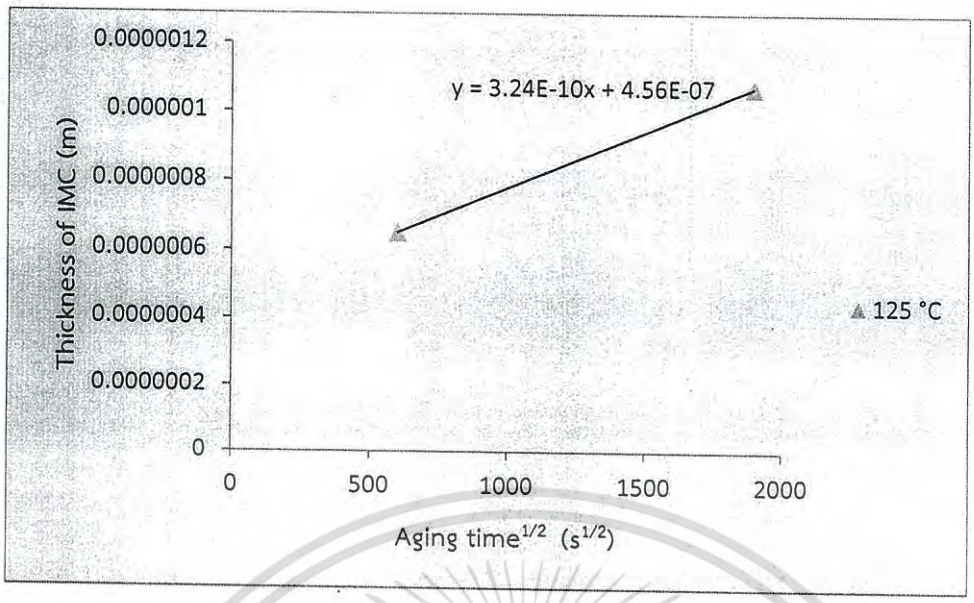


รูปที่ ข.16 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.1In กับทองแดง



รูปที่ ข.17 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.1In กับทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

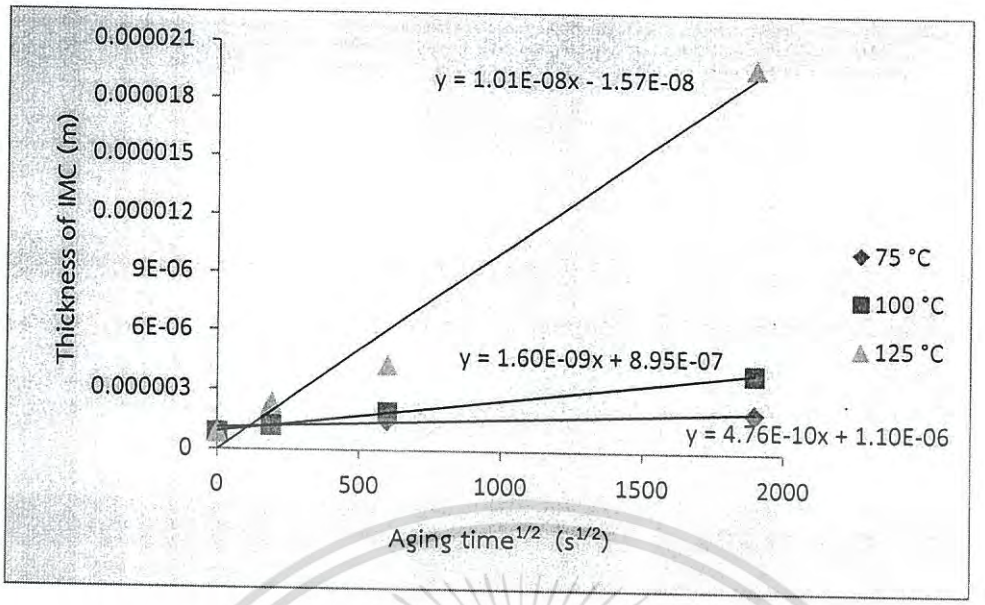


รูปที่ ข.18 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.1In กับทองแดง

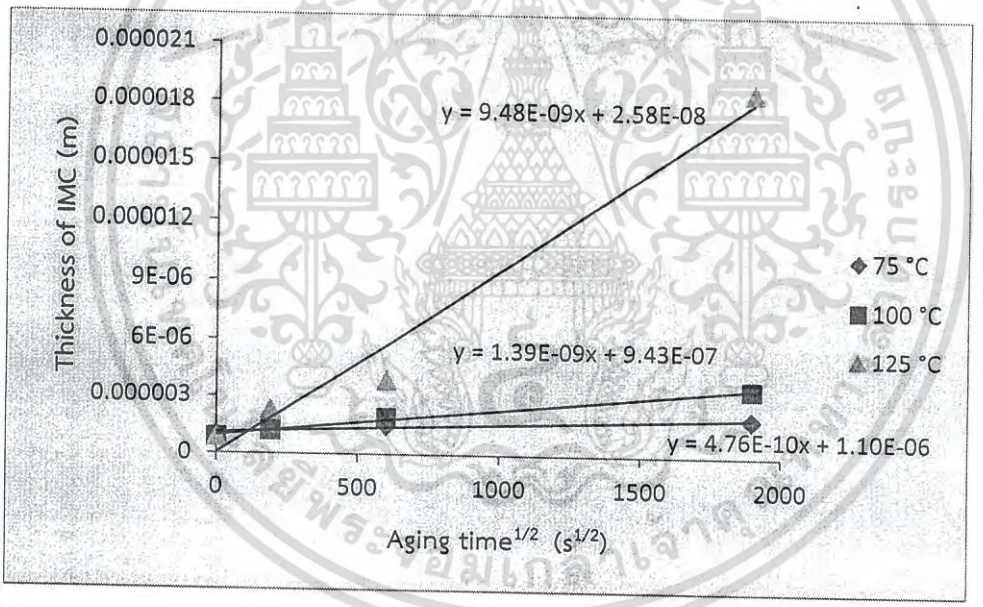
ตารางที่ ข.6 สัมประสิทธิ์การเติบโต (K) ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Sn-58Bi-0.05Ni-0.1In กับทองแดง

Intermetallic phase	Temperature (°C)/(K)	Slope = $K^{1/2}$	K (m^2/s)
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	75/348	4.16×10^{-10}	1.73×10^{-19}
	100/373	1.74×10^{-9}	3.01×10^{-18}
	125/398	7.09×10^{-9}	5.02×10^{-17}
Cu_6Sn_5	75/348	4.16×10^{-10}	1.73×10^{-19}
	100/373	1.56×10^{-9}	2.42×10^{-18}
	125/398	6.50×10^{-9}	4.23×10^{-17}
Cu_3Sn	75/348	-	-
	100/373	-	-
	125/398	3.24×10^{-10}	1.05×10^{-19}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

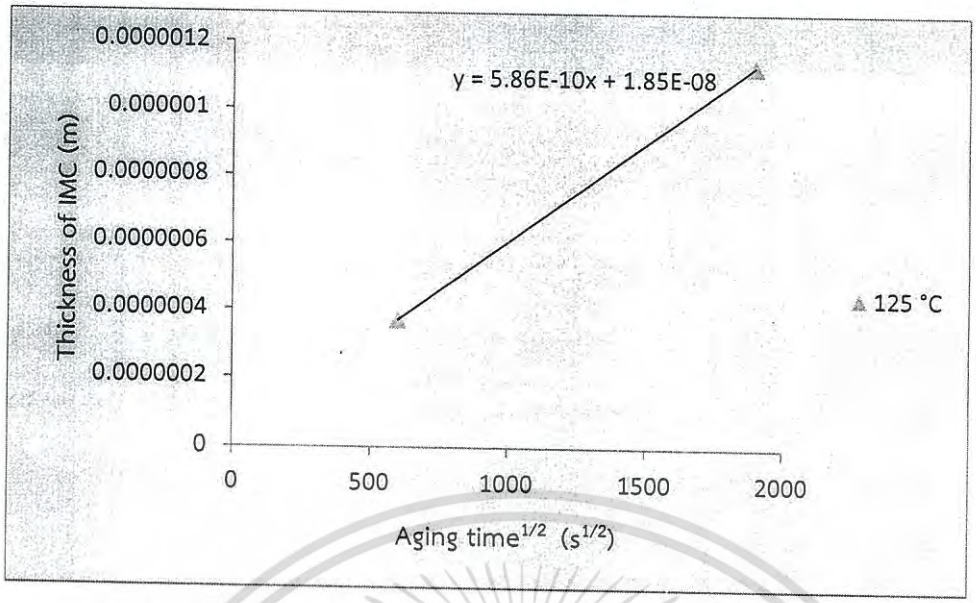


รูปที่ ข.19 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.05In กับทองแดง



รูปที่ ข.20 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.05In กับทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

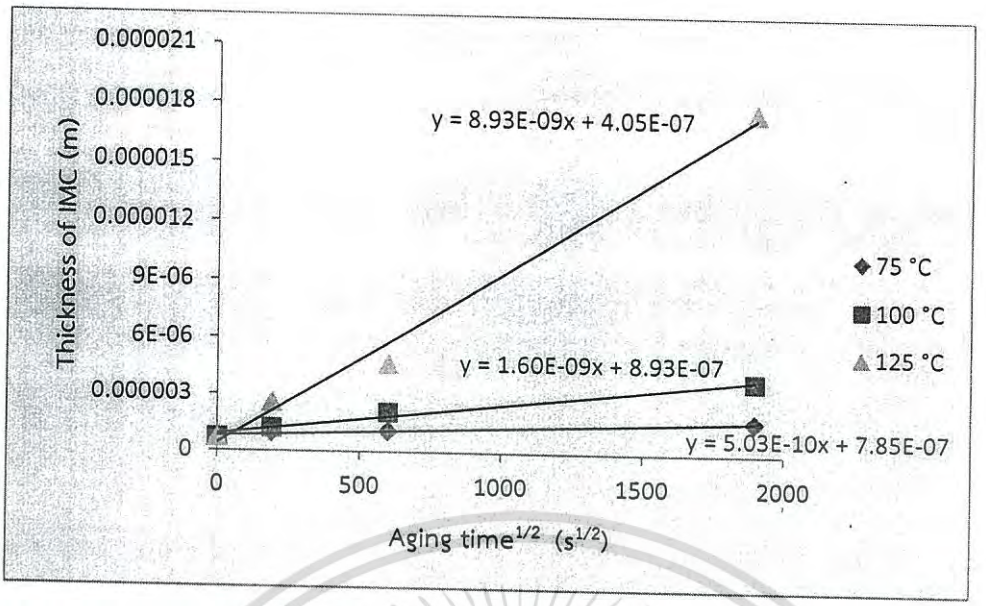


รูปที่ ข.21 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.05In กับทองแดง

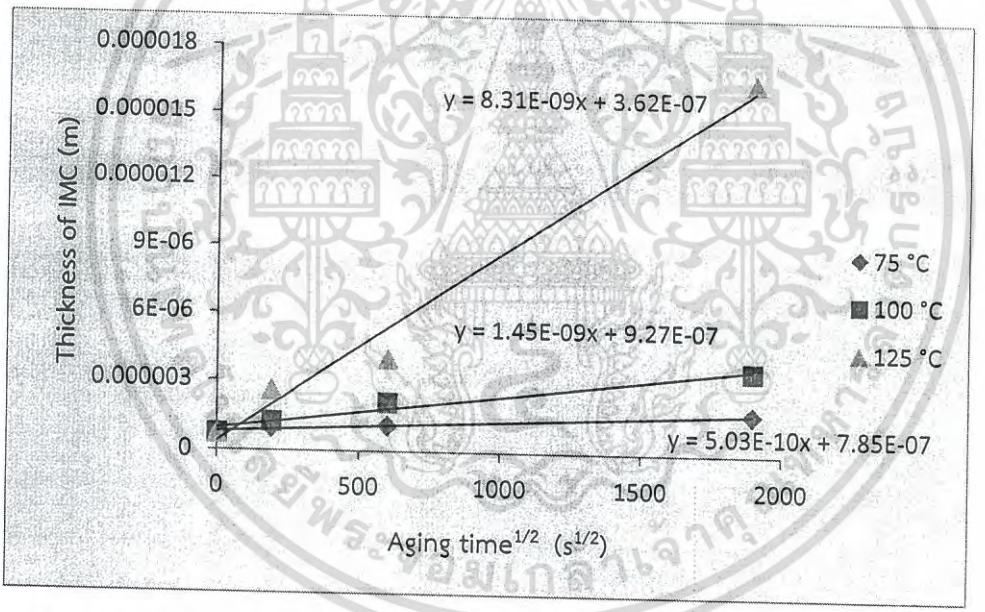
ตารางที่ ข.7 สัมประสิทธิ์การเติบโต (K) ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Sn-58Bi-0.1Ni-0.05In กับทองแดง

Intermetallic phase	Temperature (°C)/(K)	Slope = $K^{1/2}$	K (m^2/s)
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	75/348	4.76×10^{-10}	2.26×10^{-19}
	100/373	1.60×10^{-9}	2.57×10^{-18}
	125/398	1.01×10^{-8}	1.02×10^{-16}
Cu_6Sn_5	75/348	4.76×10^{-10}	2.26×10^{-19}
	100/373	1.39×10^{-9}	1.93×10^{-18}
	125/398	9.48×10^{-9}	9.00×10^{-17}
Cu_3Sn	75/348	-	-
	100/373	-	-
	125/398	5.86×10^{-10}	3.43×10^{-19}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

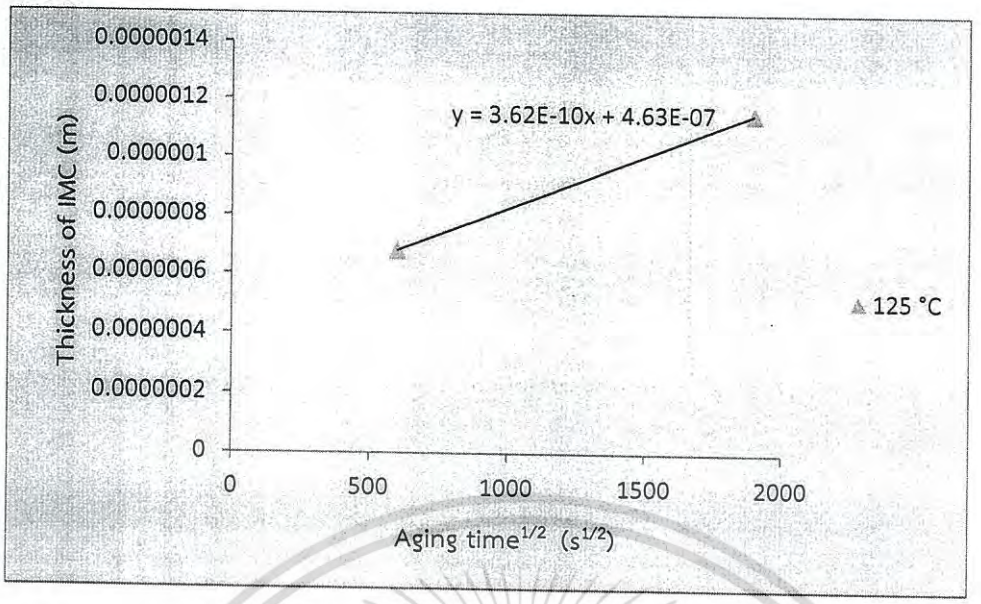


รูปที่ ข.22 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.1In กับทองแดง



รูปที่ ข.23 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.1In กับทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

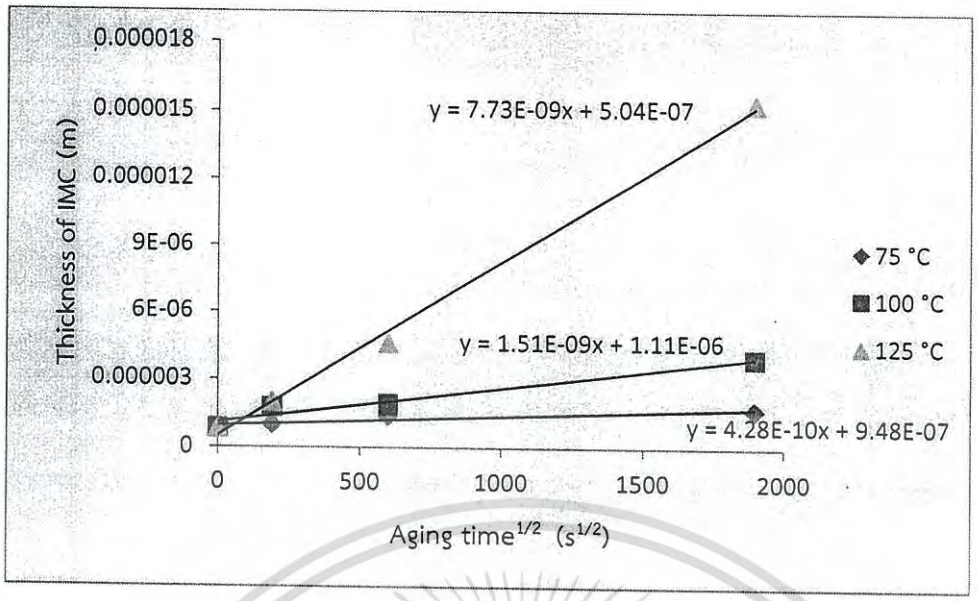


รูปที่ ข.24 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.1In กับทองแดง

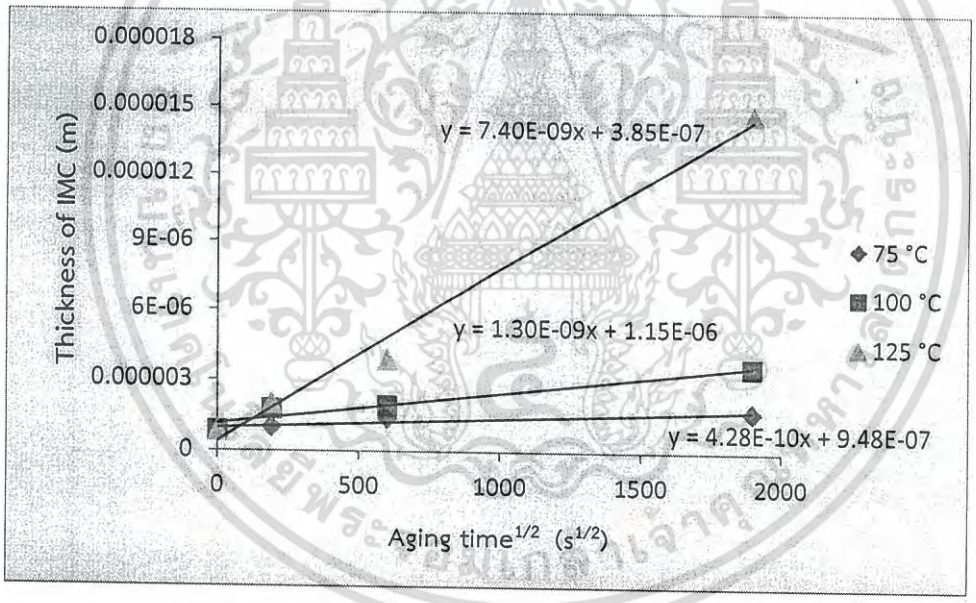
ตารางที่ ข.8 สัมประสิทธิ์การเติบโต (K) ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Sn-58Bi-0.1Ni-0.1In กับทองแดง

Intermetallic phase	Temperature (°C)/(K)	Slope = $K^{1/2}$	K (m^2/s)
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	75/348	5.03×10^{-10}	2.53×10^{-19}
	100/373	1.60×10^{-9}	2.56×10^{-18}
	125/398	8.93×10^{-9}	7.97×10^{-17}
Cu_6Sn_5	75/348	5.03×10^{-10}	2.53×10^{-19}
	100/373	1.45×10^{-9}	2.10×10^{-18}
	125/398	8.31×10^{-9}	6.90×10^{-17}
Cu_3Sn	75/348	-	-
	100/373	-	-
	125/398	3.62×10^{-10}	1.31×10^{-19}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

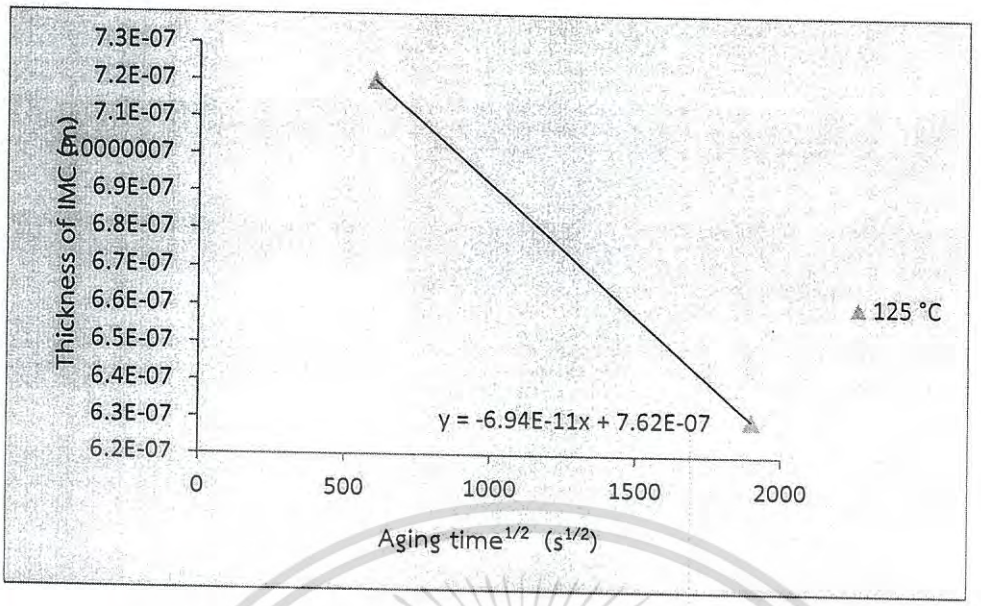


รูปที่ ข.25 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.05In กับทองแดง



รูปที่ ข.26 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.05In กับทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

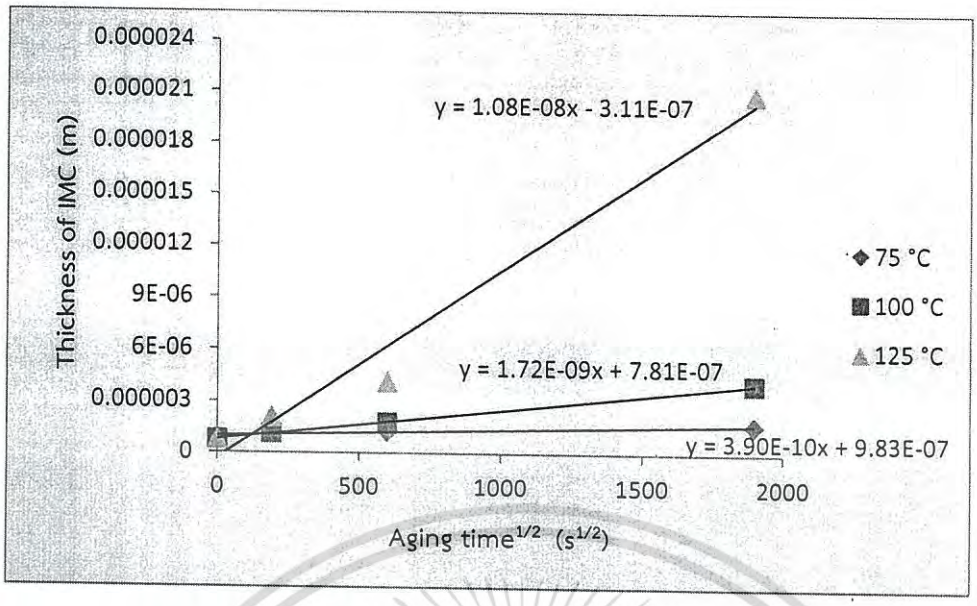


รูปที่ ข.27 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.05In กับทองแดง

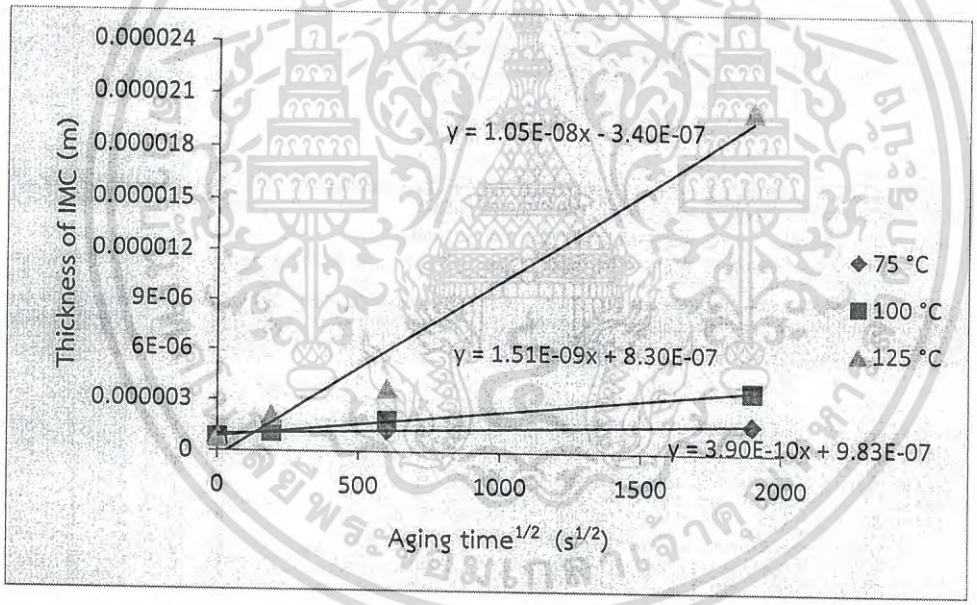
ตารางที่ ข.9 สัมประสิทธิ์การเติบโต (K) ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Sn-58Bi-0.5Ni-0.05In กับทองแดง

Intermetallic phase	Temperature (°C)/(K)	Slope = $K^{1/2}$	K (m^2/s)
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	75/348	4.27×10^{-10}	1.83×10^{-19}
	100/373	1.51×10^{-9}	2.27×10^{-18}
	125/398	7.73×10^{-9}	5.98×10^{-17}
Cu_6Sn_5	75/348	4.27×10^{-10}	1.83×10^{-19}
	100/373	1.30×10^{-9}	1.69×10^{-18}
	125/398	7.40×10^{-9}	5.48×10^{-17}
Cu_3Sn	75/348	-	-
	100/373	-	-
	125/398	-6.94×10^{-11}	4.81×10^{-21}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

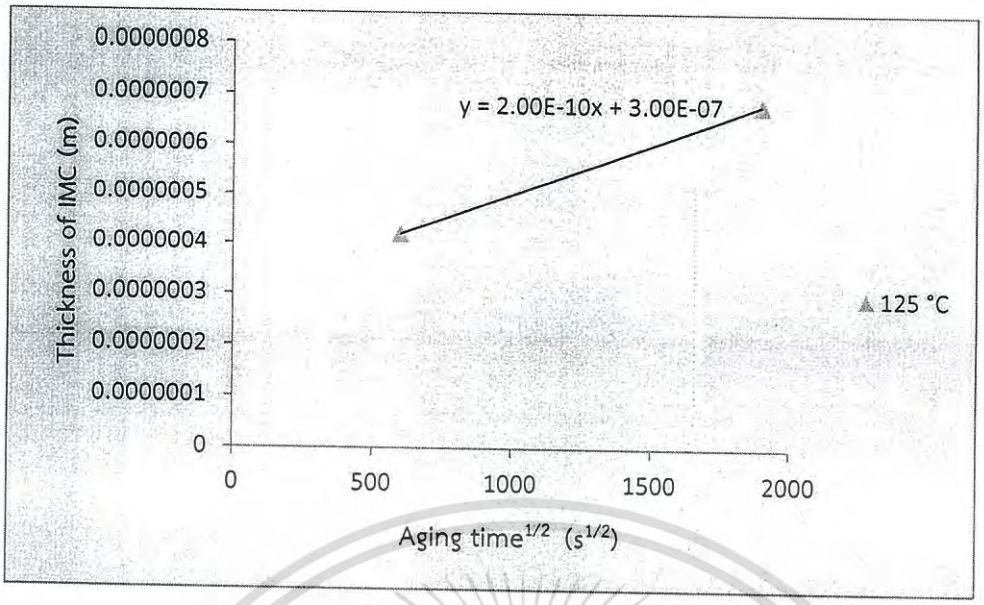


รูปที่ ข.28 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.1In กับทองแดง



รูปที่ ข.29 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.1In กับทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

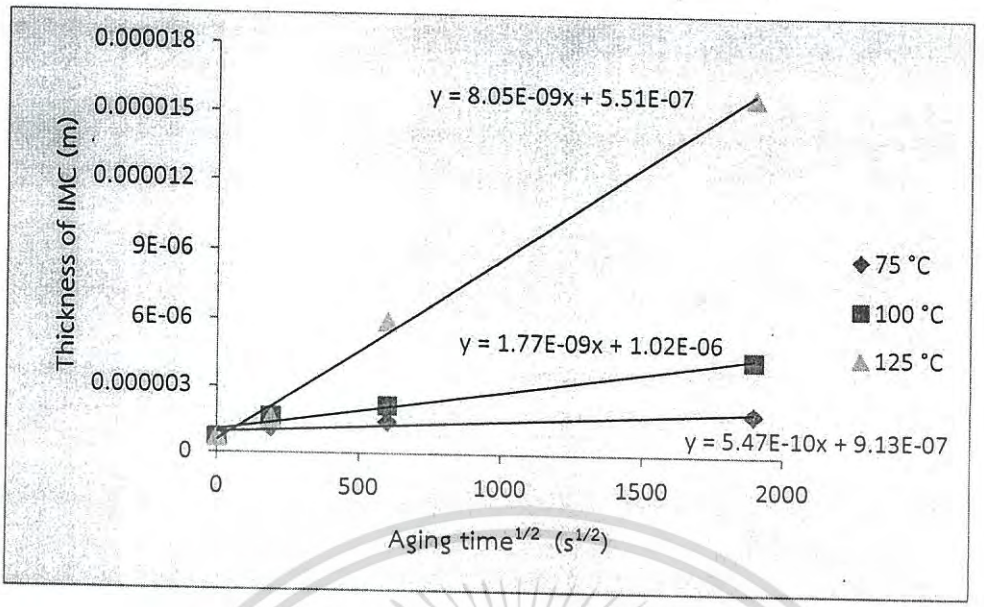


รูปที่ ข.30 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.1In กับทองแดง

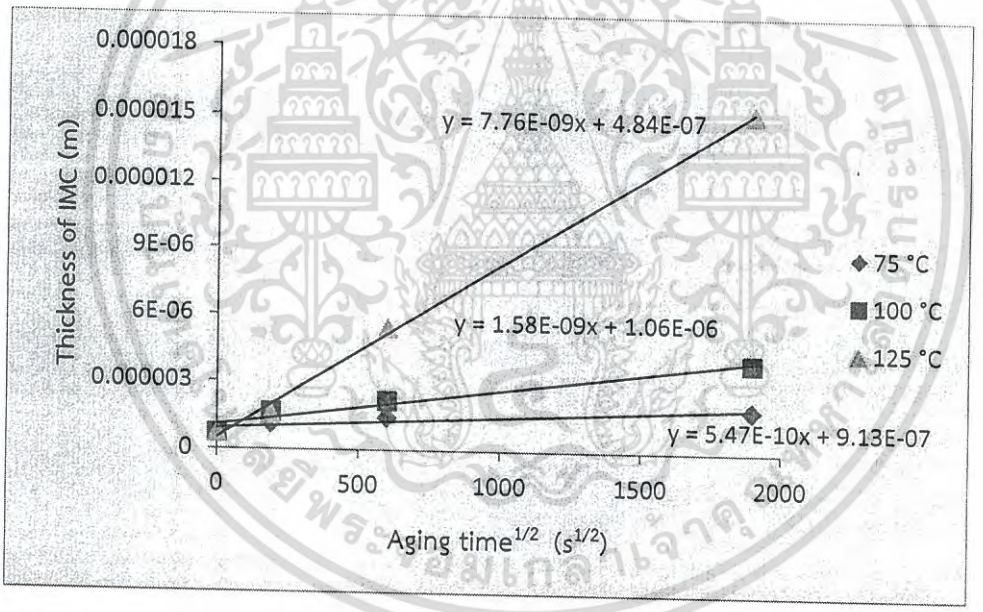
ตารางที่ ข.10 สัมประสิทธิ์การเติบโต (K) ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Sn-58Bi-0.5Ni-0.1In กับทองแดง

Intermetallic phase	Temperature (°C)/(K)	Slope = $K^{1/2}$	K (m^2/s)
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	75/348	3.90×10^{-10}	1.52×10^{-19}
	100/373	1.72×10^{-9}	2.97×10^{-18}
	125/398	1.08×10^{-8}	1.17×10^{-16}
Cu_6Sn_5	75/348	3.90×10^{-10}	1.52×10^{-19}
	100/373	1.51×10^{-9}	2.27×10^{-18}
	125/398	1.05×10^{-8}	1.10×10^{-16}
Cu_3Sn	75/348	-	-
	100/373	-	-
	125/398	2.00×10^{-10}	4.02×10^{-20}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

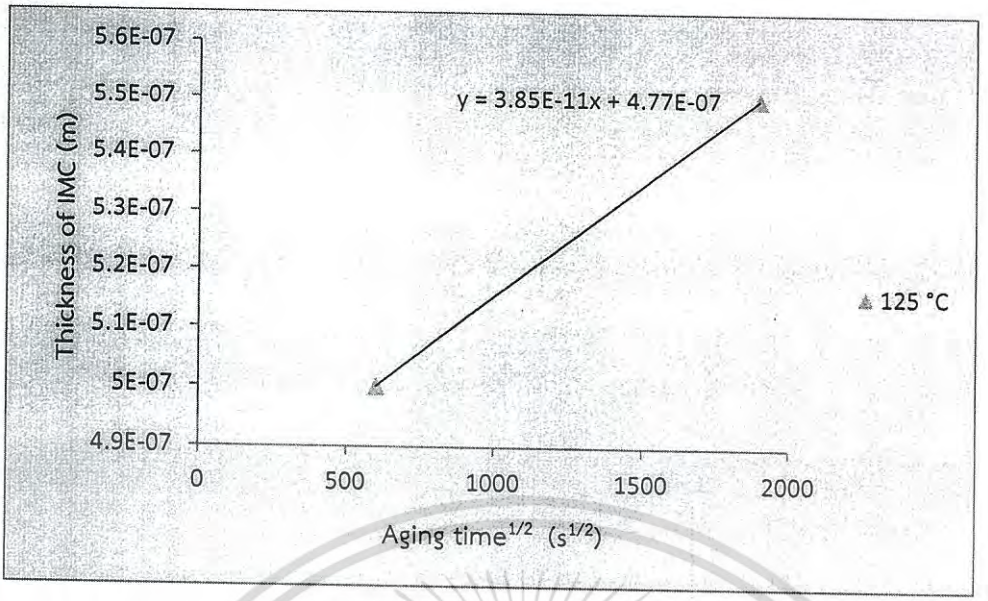


รูปที่ ข.31 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.05In กับทองแดง



รูปที่ ข.32 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.05In กับทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

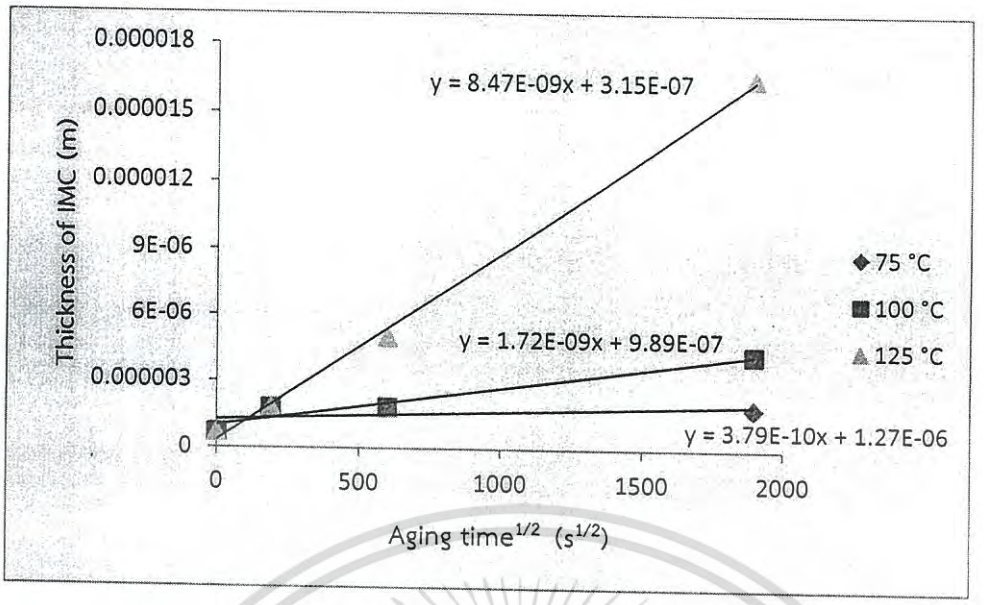


รูปที่ ข.33 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.05In กับทองแดง

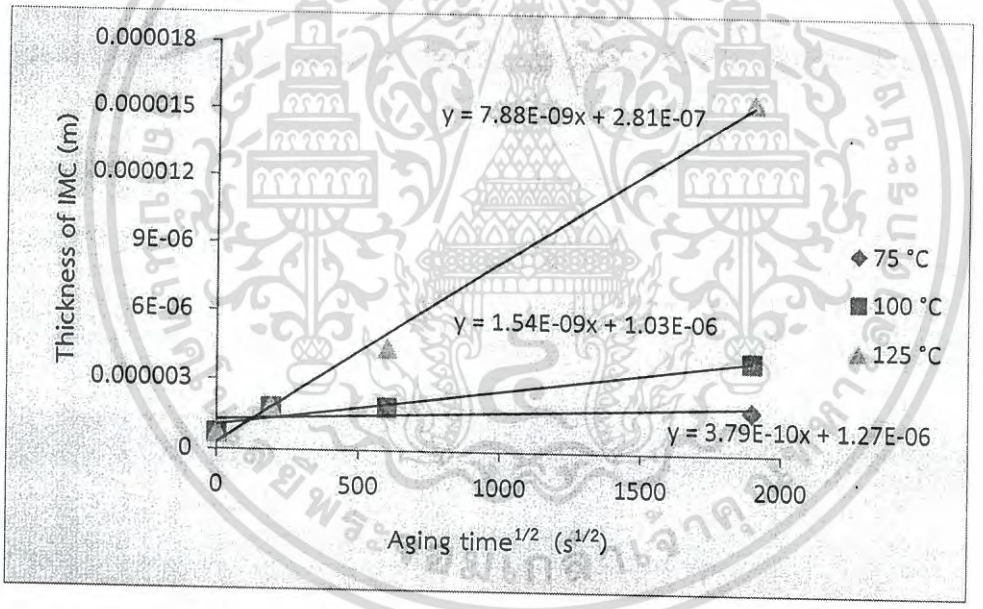
ตารางที่ ข.11 สัมประสิทธิ์การเติบโต (K) ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Sn-58Bi-1.0Ni-0.05In กับทองแดง

Intermetallic phase	Temperature (°C)/(K)	Slope = $K^{1/2}$	K (m^2/s)
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	75/348	5.47×10^{-10}	2.99×10^{-19}
	100/373	1.77×10^{-9}	3.12×10^{-18}
	125/398	8.05×10^{-9}	6.48×10^{-17}
Cu_6Sn_5	75/348	5.47×10^{-10}	2.99×10^{-19}
	100/373	1.58×10^{-9}	2.49×10^{-18}
	125/398	7.76×10^{-9}	6.02×10^{-17}
Cu_3Sn	75/348	-	-
	100/373	-	-
	125/398	3.85×10^{-11}	1.49×10^{-21}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

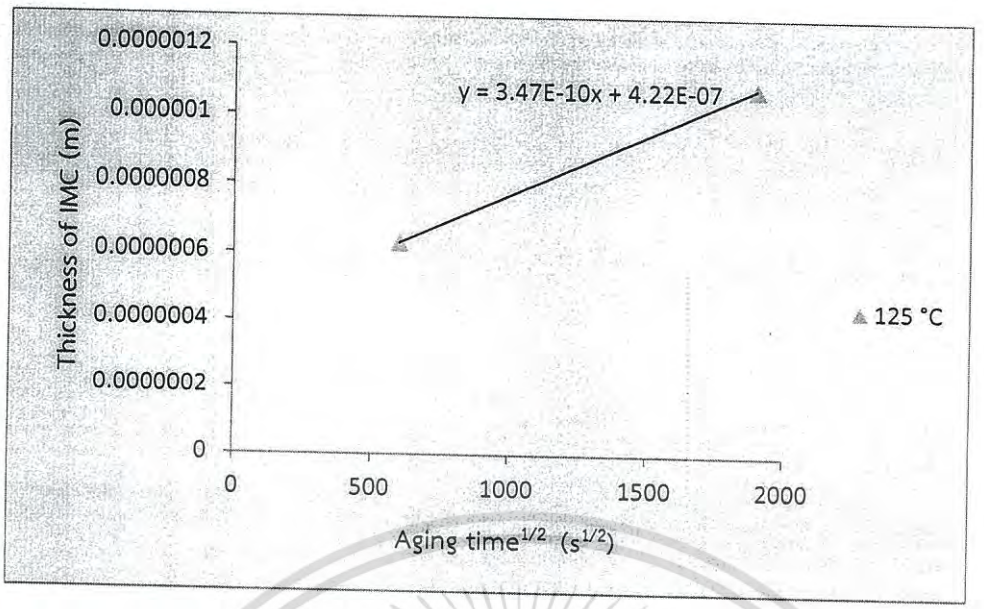


รูปที่ ข.34 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In กับทองแดง



รูปที่ ข.35 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In กับทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

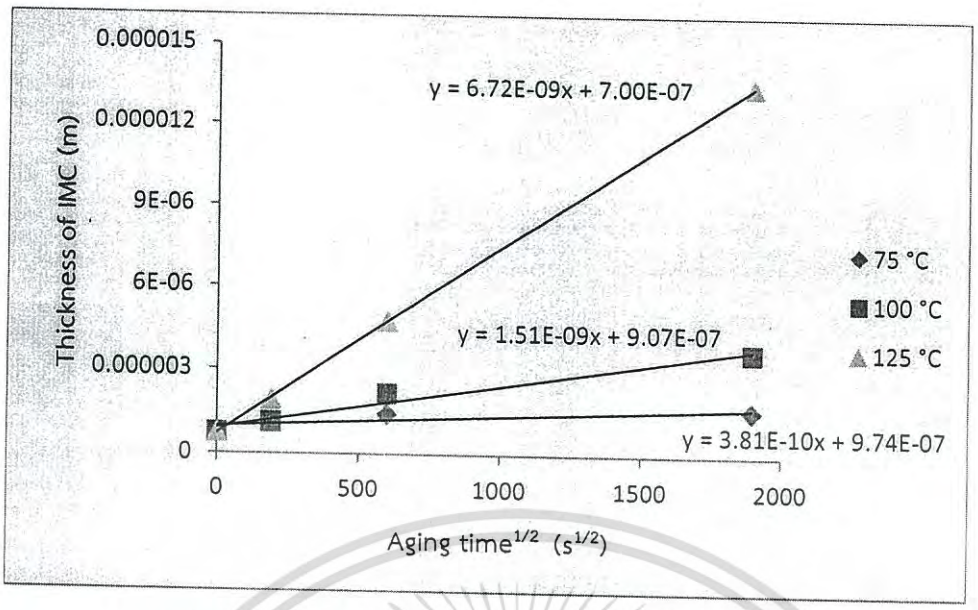


รูปที่ ข.36 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In กับทองแดง

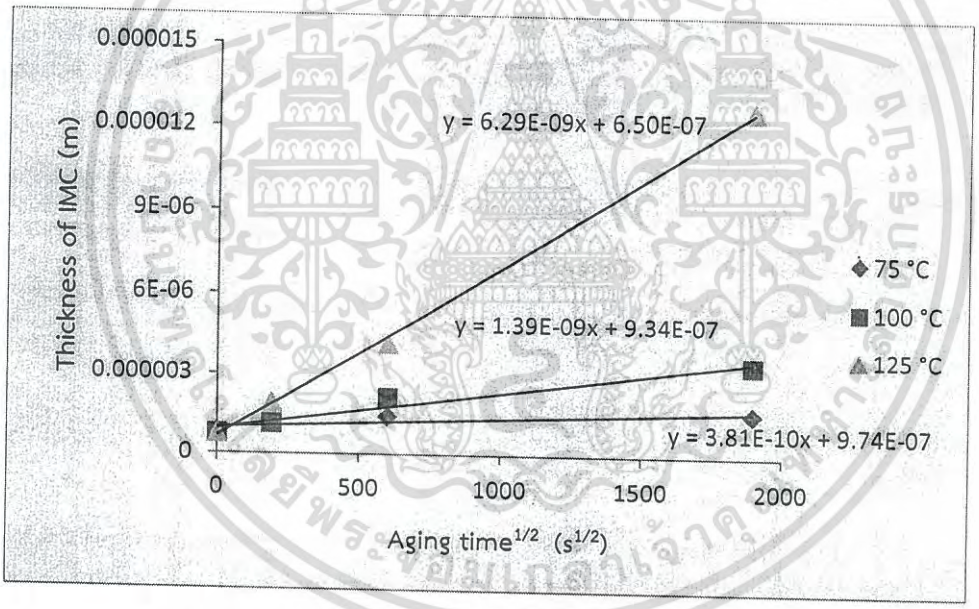
ตารางที่ ข.12 สัมประสิทธิ์การเติบโต (K) ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In กับทองแดง

Intermetallic phase	Temperature (°C)/(K)	Slope = $K^{1/2}$	K (m^2/s)
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	75/348	3.79×10^{-10}	1.44×10^{-19}
	100/373	1.72×10^{-9}	2.95×10^{-18}
	125/398	8.47×10^{-9}	7.17×10^{-17}
Cu_6Sn_5	75/348	3.79×10^{-10}	1.44×10^{-19}
	100/373	1.54×10^{-9}	2.38×10^{-18}
	125/398	7.88×10^{-9}	6.21×10^{-17}
Cu_3Sn	75/348	-	-
	100/373	-	-
	125/398	2.47×10^{-10}	1.20×10^{-19}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

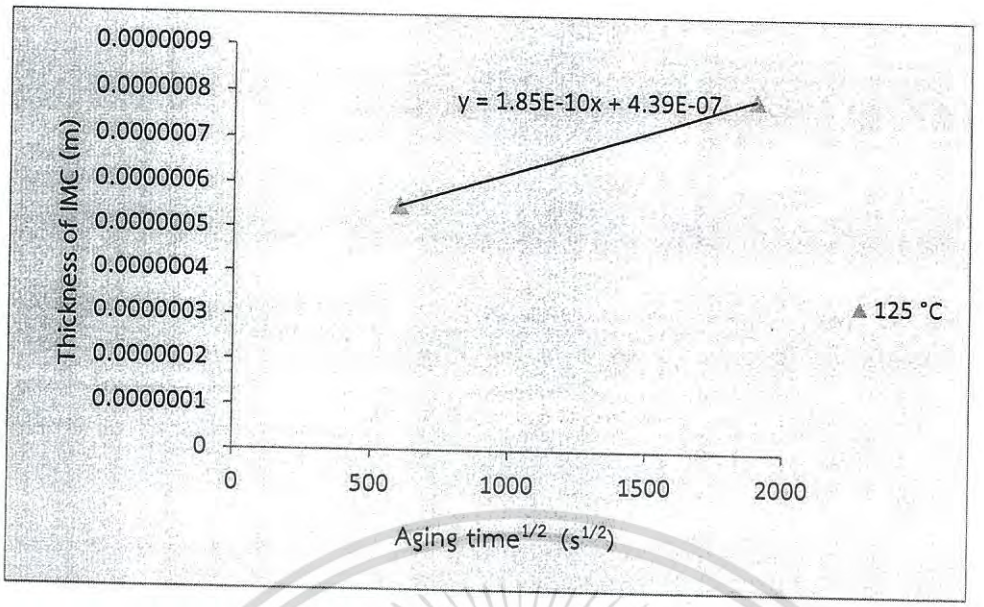


รูปที่ ข.37 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.05Ag กับทองแดง



รูปที่ ข.38 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.05Ag กับทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

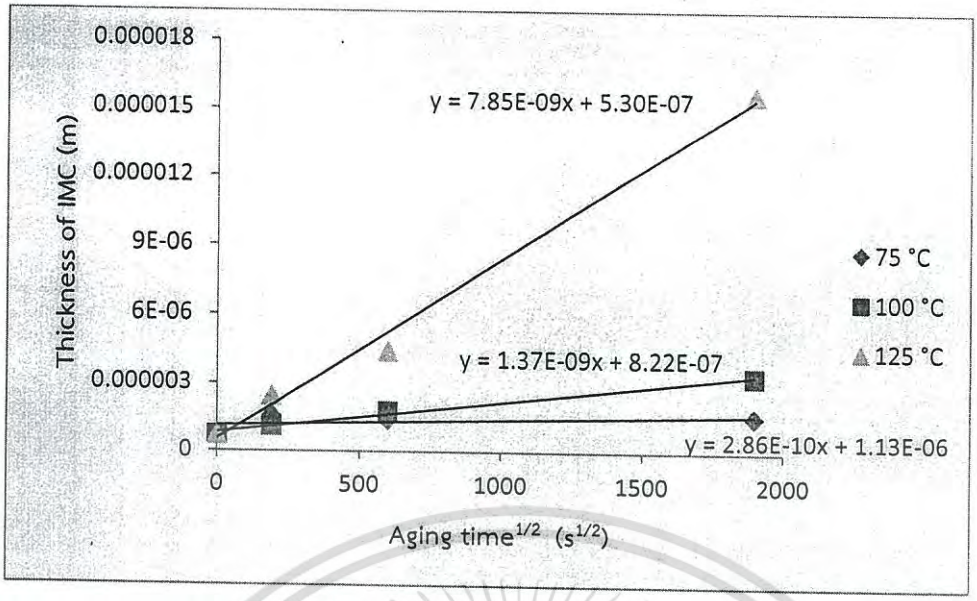


รูปที่ ข.39 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.05Ag กับทองแดง

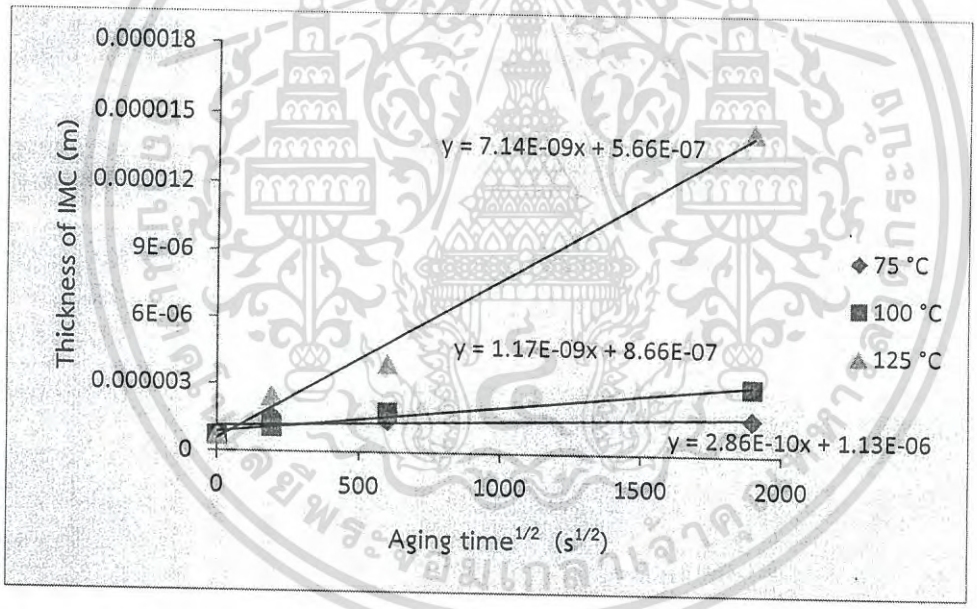
ตารางที่ ข.13 สัมประสิทธิ์การเติบโต (K) ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Sn-58Bi-0.05Ni-0.05Ag กับทองแดง

Intermetallic phase	Temperature (°C)/(K)	Slope = $K^{1/2}$	K (m^2/s)
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	75/348	3.81×10^{-10}	1.45×10^{-19}
	100/373	1.51×10^{-9}	2.29×10^{-18}
	125/398	6.72×10^{-9}	4.51×10^{-17}
Cu_6Sn_5	75/348	3.81×10^{-10}	1.45×10^{-19}
	100/373	1.39×10^{-9}	1.93×10^{-18}
	125/398	6.29×10^{-9}	3.96×10^{-17}
Cu_3Sn	75/348	-	-
	100/373	-	-
	125/398	1.85×10^{-10}	3.42×10^{-20}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

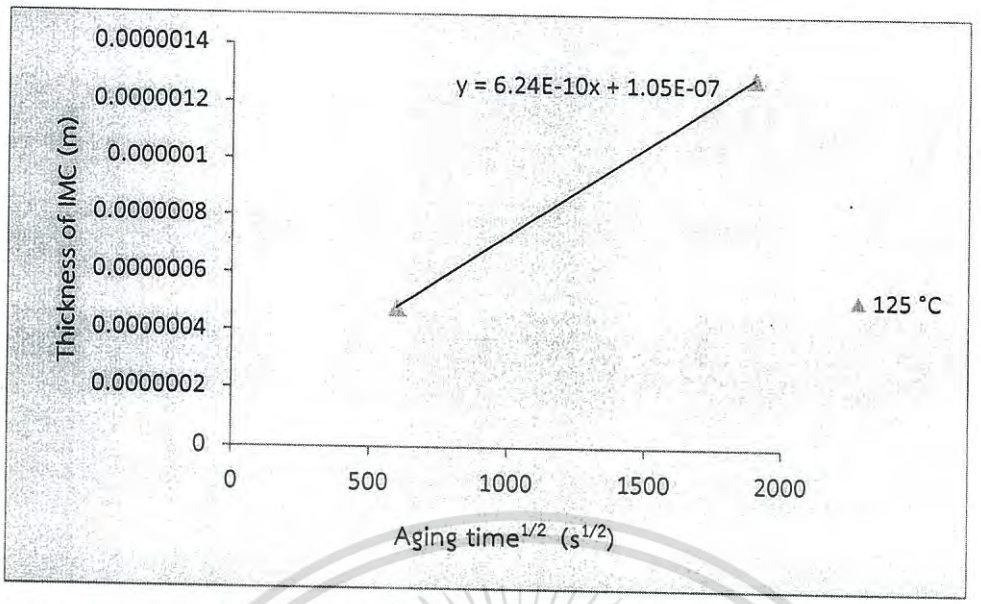


รูปที่ ข.40 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.1Ag กับทองแดง



รูปที่ ข.41 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.1Ag กับทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

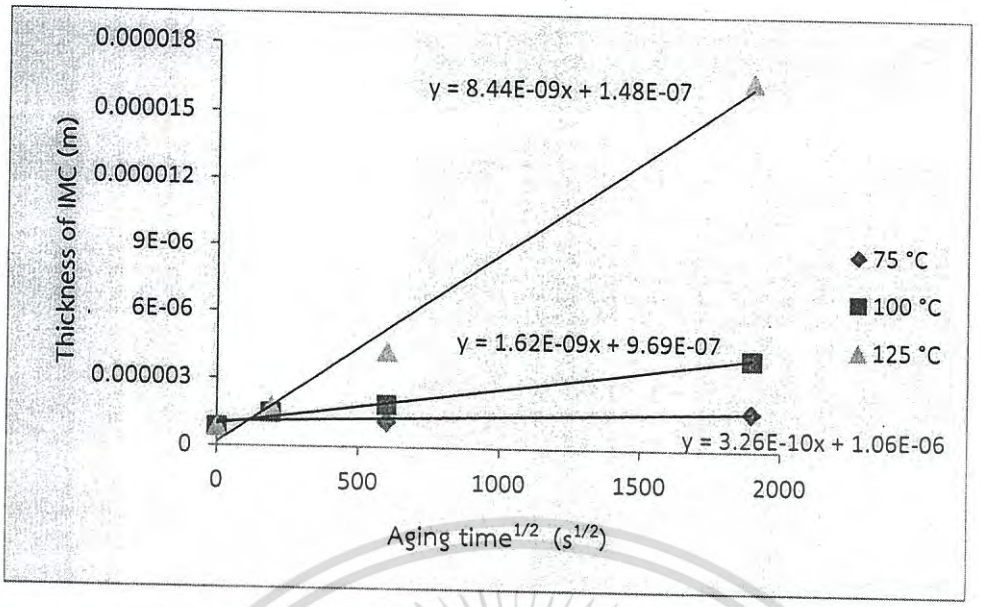


รูปที่ ข.42 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.1Ag กับทองแดง

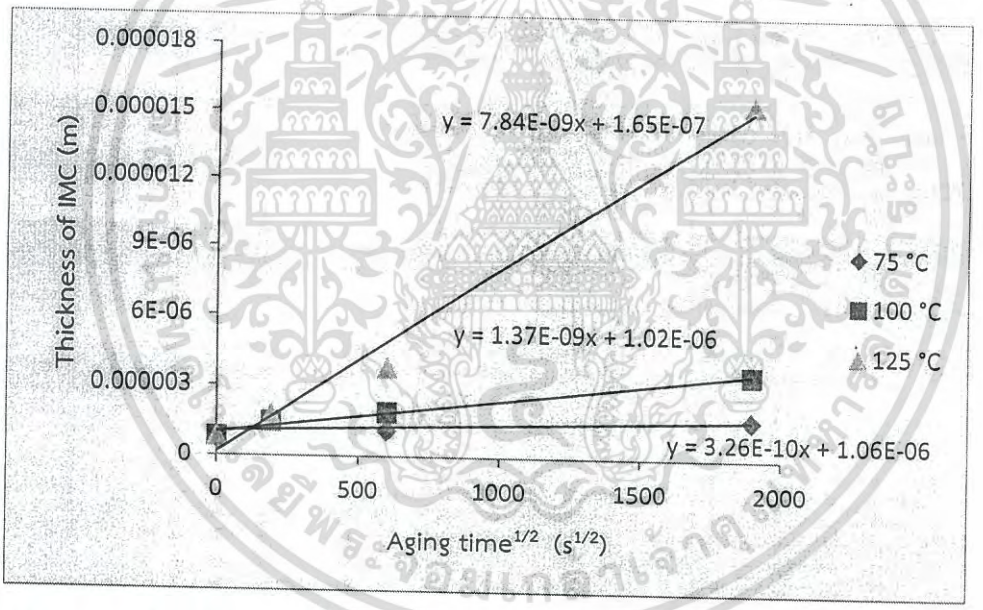
ตารางที่ ข.14 สัมประสิทธิ์การเติบโต (K) ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Sn-58Bi-0.05Ni-0.1Ag กับทองแดง

Intermetallic phase	Temperature (°C)/(K)	Slope = $K^{1/2}$	K (m^2/s)
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	75/348	2.86×10^{-10}	8.16×10^{-20}
	100/373	1.37×10^{-9}	1.87×10^{-18}
	125/398	7.85×10^{-9}	6.16×10^{-17}
Cu_6Sn_5	75/348	2.86×10^{-10}	8.16×10^{-20}
	100/373	1.17×10^{-9}	1.37×10^{-18}
	125/398	7.14×10^{-9}	5.09×10^{-17}
Cu_3Sn	75/348	-	-
	100/373	-	-
	125/398	6.24×10^{-10}	3.90×10^{-19}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

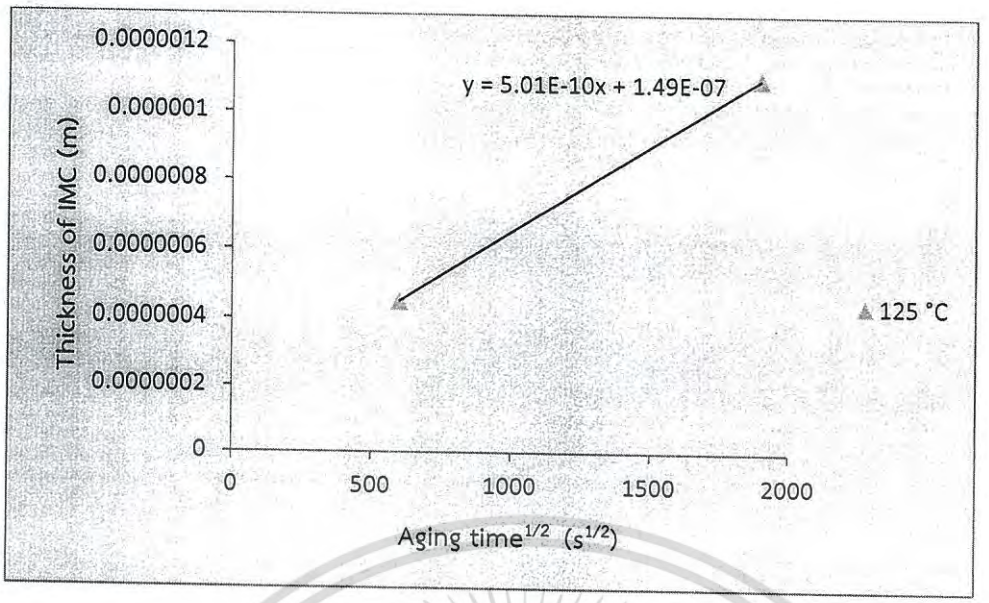


รูปที่ ข.43 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.05Ag กับทองแดง



รูปที่ ข.44 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.05Ag กับทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

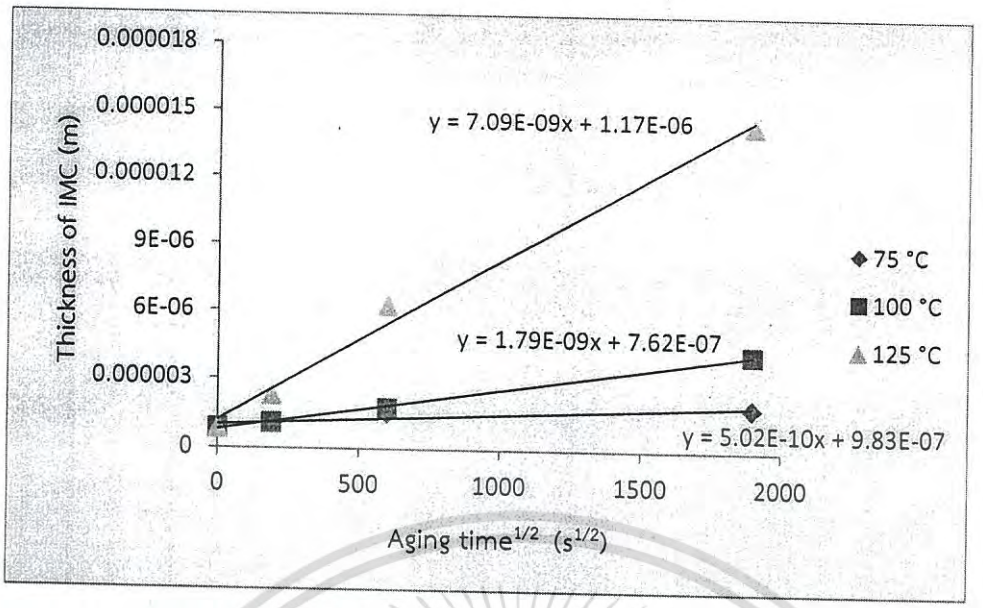


รูปที่ ข.45 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.05Ag กับทองแดง

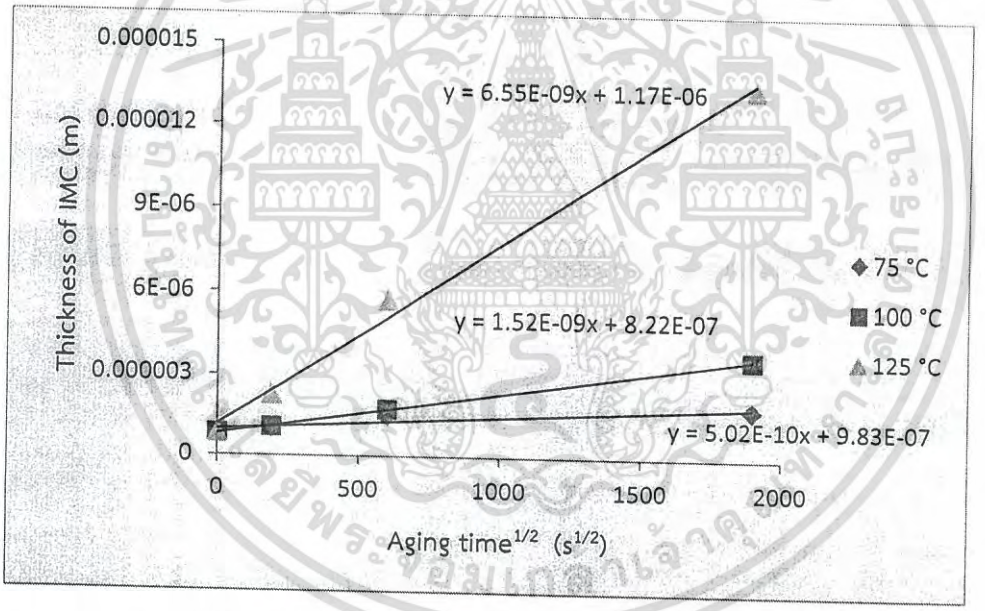
ตารางที่ ข.15 สัมประสิทธิ์การเติบโต (K) ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Sn-58Bi-0.1Ni-0.05Ag กับทองแดง

Intermetallic phase	Temperature (°C)/(K)	Slope = $K^{1/2}$	K (m^2/s)
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	75/348	3.26×10^{-10}	1.07×10^{-19}
	100/373	1.62×10^{-9}	2.62×10^{-18}
	125/398	8.44×10^{-9}	7.13×10^{-17}
Cu_6Sn_5	75/348	3.26×10^{-10}	1.07×10^{-19}
	100/373	1.37×10^{-9}	1.89×10^{-18}
	125/398	7.84×10^{-9}	6.14×10^{-17}
Cu_3Sn	75/348	-	-
	100/373	-	-
	125/398	5.01×10^{-10}	2.51×10^{-19}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

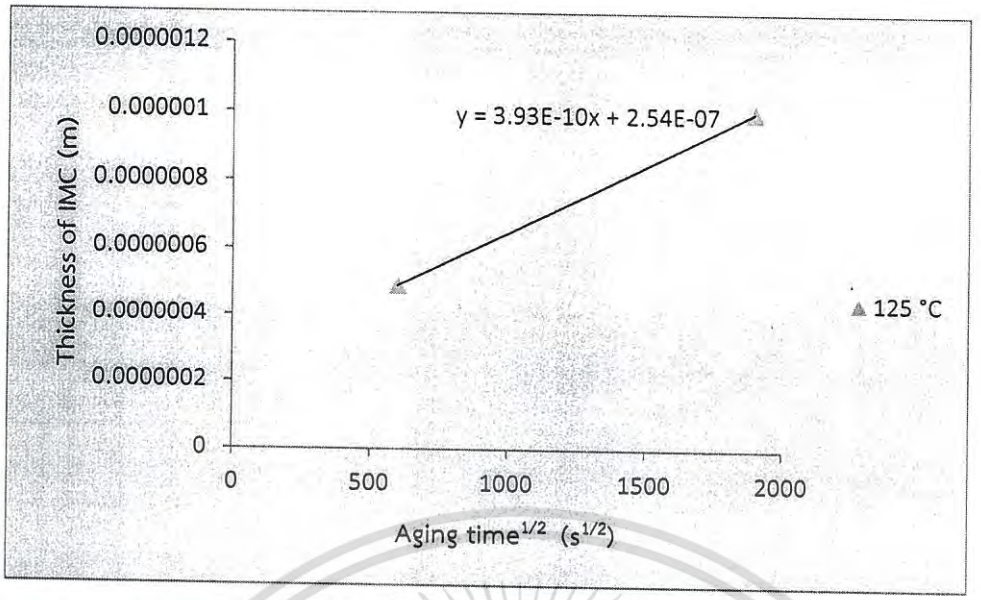


รูปที่ ข.46 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.1Ag กับทองแดง



รูปที่ ข.47 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.1Ag กับทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

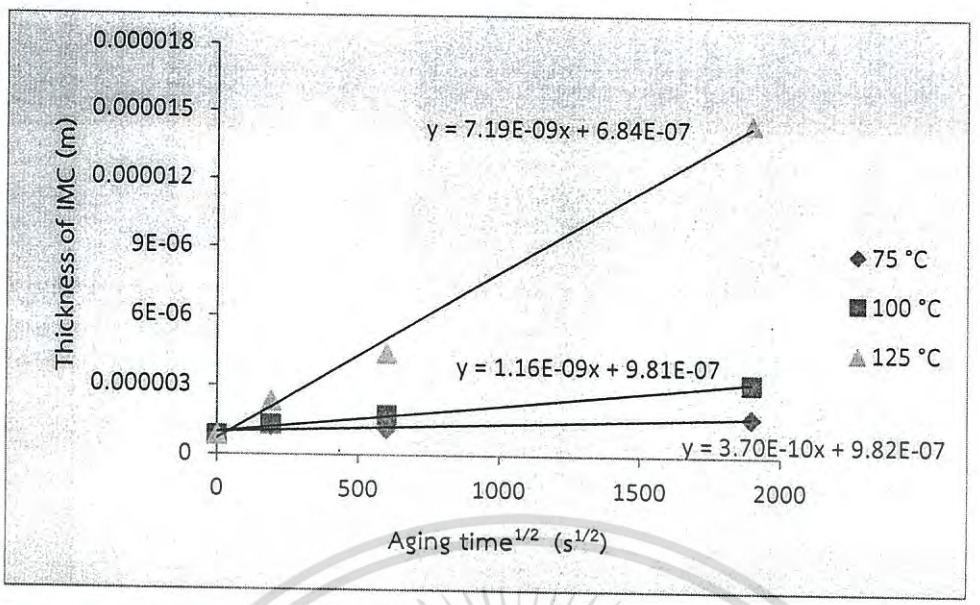


รูปที่ ข.48 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.1Ag กับทองแดง

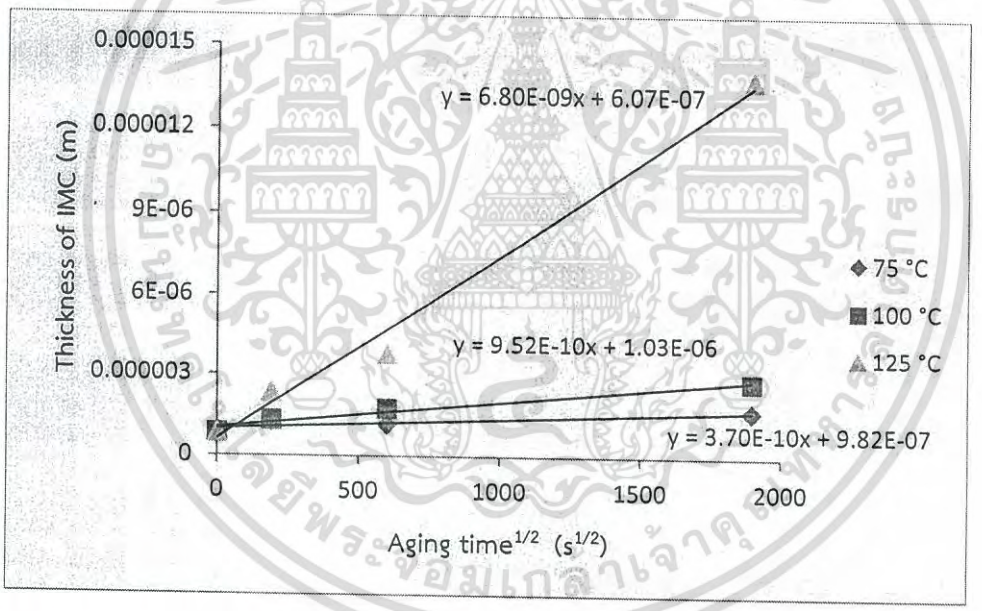
ตารางที่ ข.16 สัมประสิทธิ์การเติบโต (K) ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Sn-58Bi-0.1Ni-0.1Ag กับทองแดง

Intermetallic phase	Temperature (°C)/(K)	Slope = $K^{1/2}$	K (m^2/s)
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	75/348	5.02×10^{-10}	2.52×10^{-19}
	100/373	1.79×10^{-9}	3.21×10^{-18}
	125/398	7.09×10^{-9}	5.03×10^{-17}
Cu_6Sn_5	75/348	5.02×10^{-10}	2.52×10^{-19}
	100/373	1.52×10^{-9}	2.32×10^{-18}
	125/398	6.55×10^{-9}	4.29×10^{-17}
Cu_3Sn	75/348	-	-
	100/373	-	-
	125/398	3.93×10^{-10}	1.55×10^{-19}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

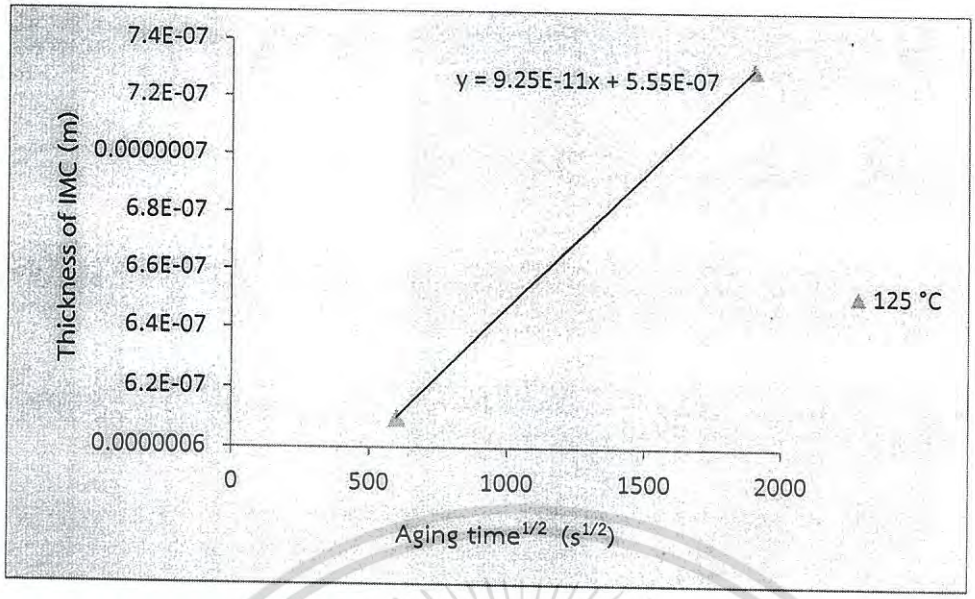


รูปที่ ข.49 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.05Ag กับทองแดง



รูปที่ ข.50 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.05Ag กับทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

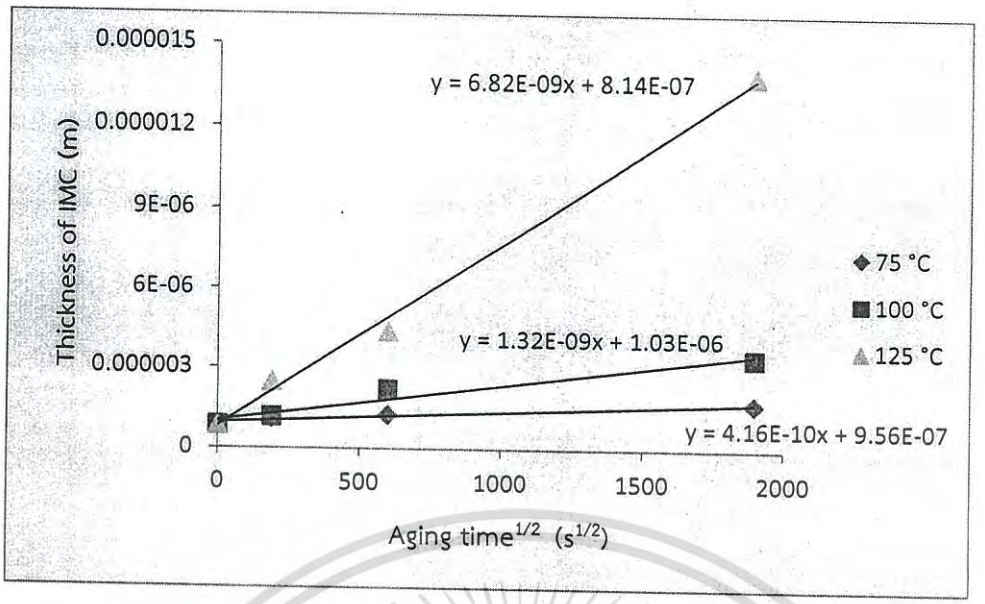


รูปที่ ข.51 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.05Ag กับทองแดง

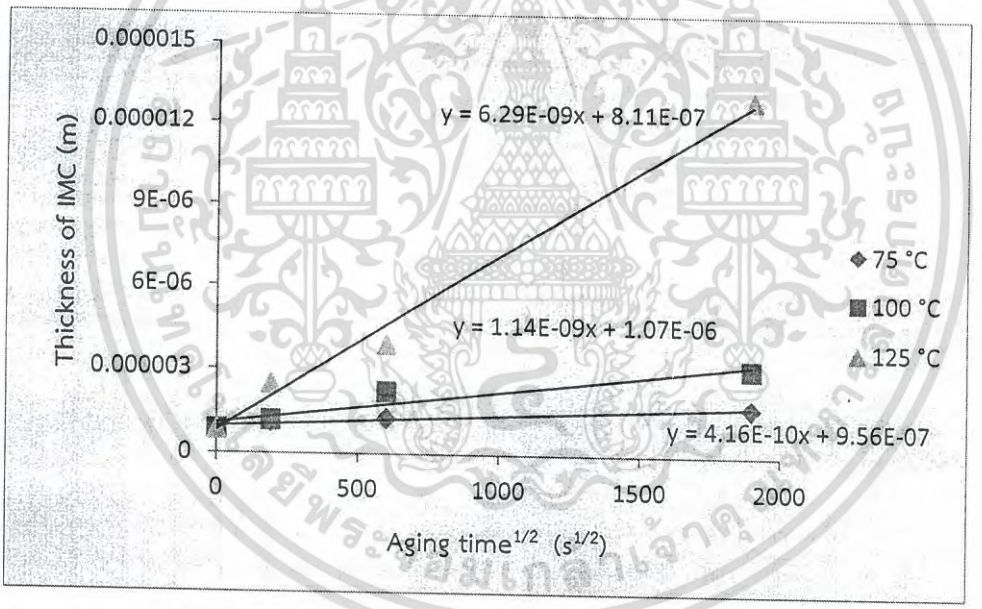
ตารางที่ ข.17 สัมประสิทธิ์การเติบโต (K) ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Sn-58Bi-0.5Ni-0.05Ag กับทองแดง

Intermetallic phase	Temperature (°C)/(K)	Slope = $K^{1/2}$	K (m^2/s)
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	75/348	3.70×10^{-10}	1.37×10^{-19}
	100/373	1.16×10^{-9}	1.34×10^{-18}
	125/398	7.19×10^{-9}	5.17×10^{-17}
Cu_6Sn_5	75/348	3.70×10^{-10}	1.37×10^{-19}
	100/373	9.52×10^{-10}	9.07×10^{-19}
	125/398	6.80×10^{-9}	4.63×10^{-17}
Cu_3Sn	75/348	-	-
	100/373	-	-
	125/398	9.25×10^{-11}	8.56×10^{-21}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

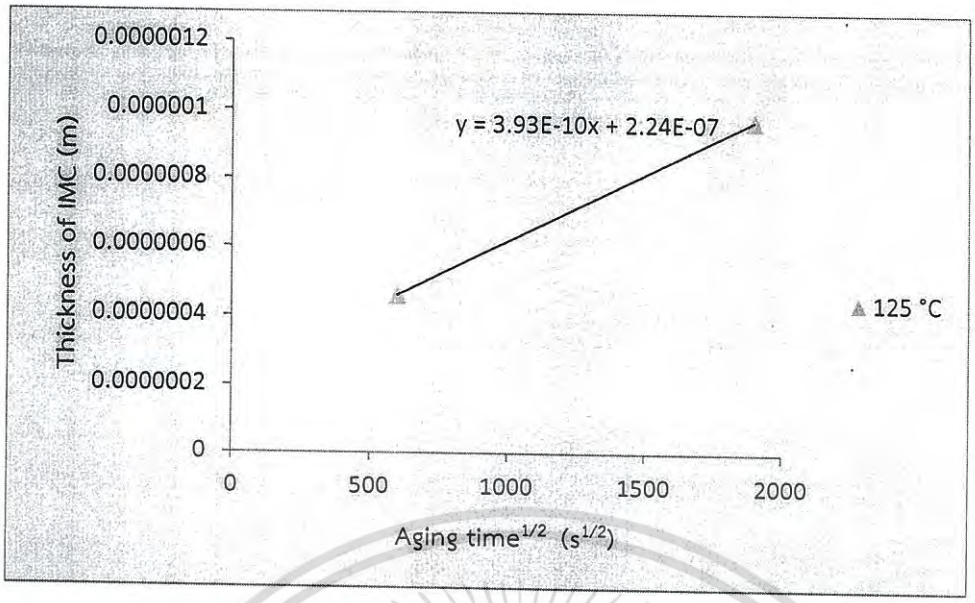


รูปที่ ข.52 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.1Ag กับทองแดง



รูปที่ ข.53 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.1Ag กับทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

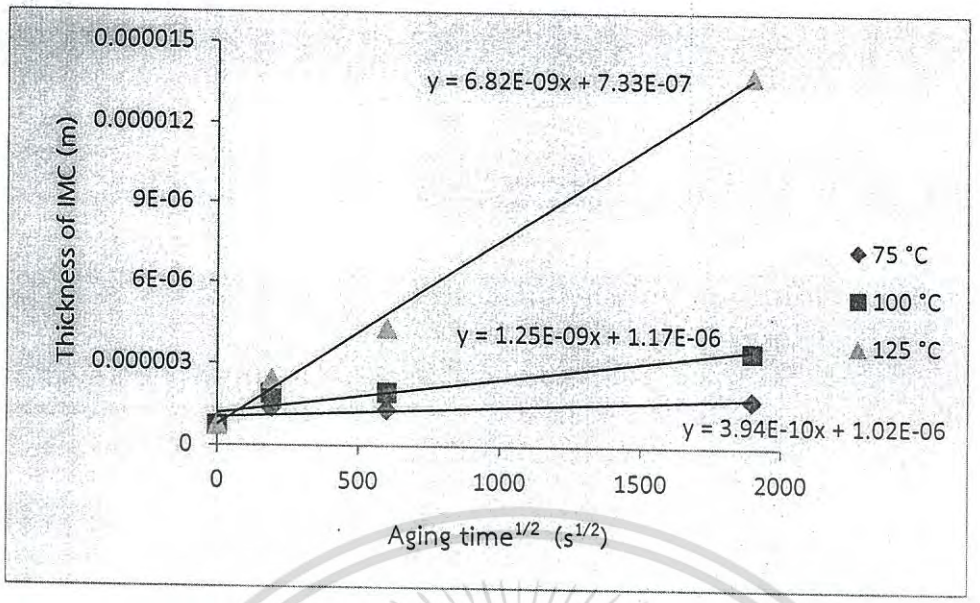


รูปที่ ข.54 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.1Ag กับทองแดง

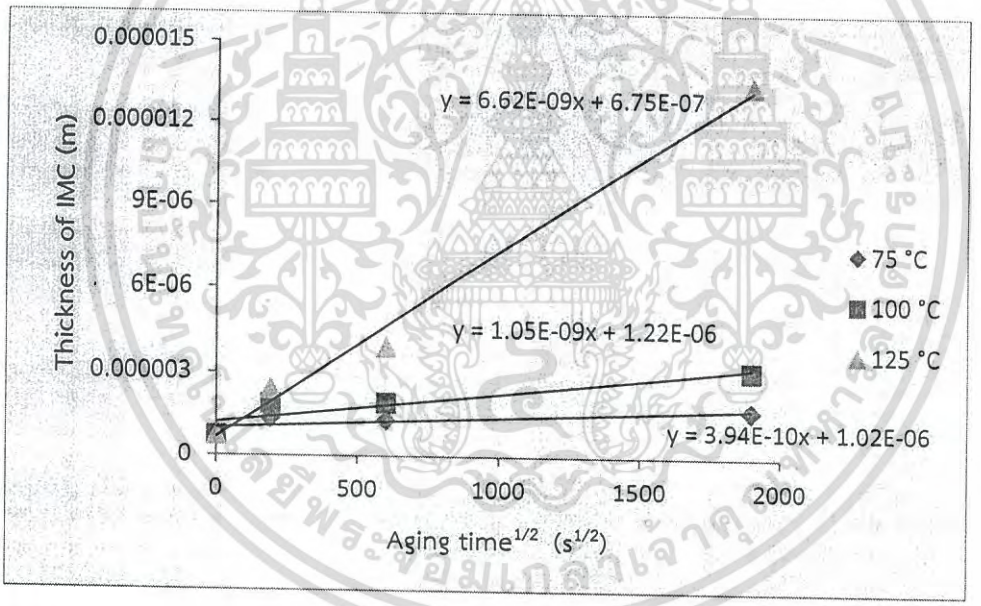
ตารางที่ ข.18 สัมประสิทธิ์การเติบโต (K) ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Sn-58Bi-0.5Ni-0.1Ag กับทองแดง

Intermetallic phase	Temperature (°C)/(K)	Slope = $K^{1/2}$	K (m^2/s)
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	75/348	4.16×10^{-10}	1.73×10^{-19}
	100/373	1.32×10^{-9}	1.74×10^{-18}
	125/398	6.82×10^{-9}	4.65×10^{-17}
Cu_6Sn_5	75/348	4.16×10^{-10}	1.73×10^{-19}
	100/373	1.14×10^{-9}	1.29×10^{-18}
	125/398	6.29×10^{-9}	3.95×10^{-17}
Cu_3Sn	75/348	-	-
	100/373	-	-
	125/398	3.93×10^{-10}	1.55×10^{-19}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

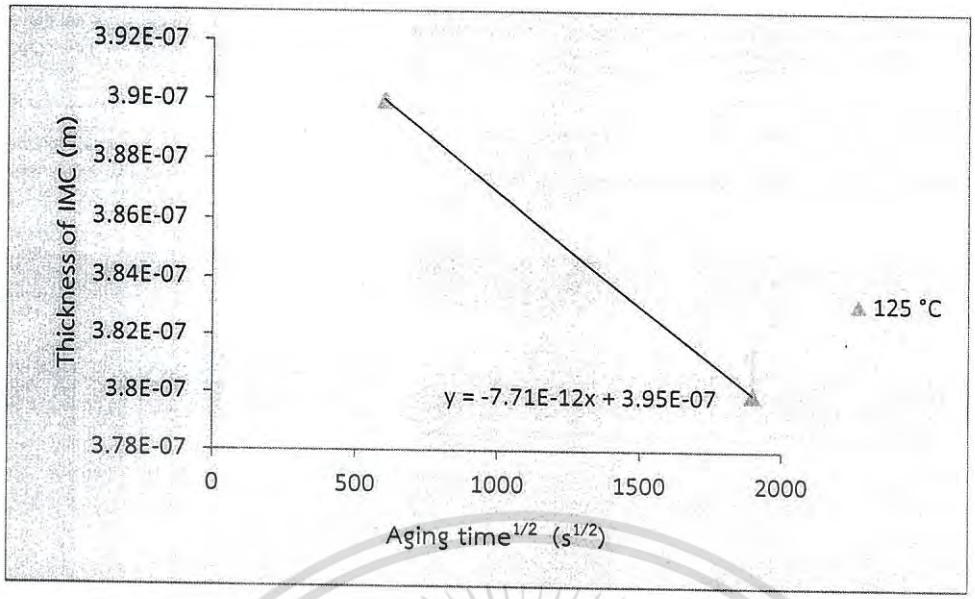


รูปที่ ข.55 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.05Ag กับทองแดง



รูปที่ ข.56 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.05Ag กับทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

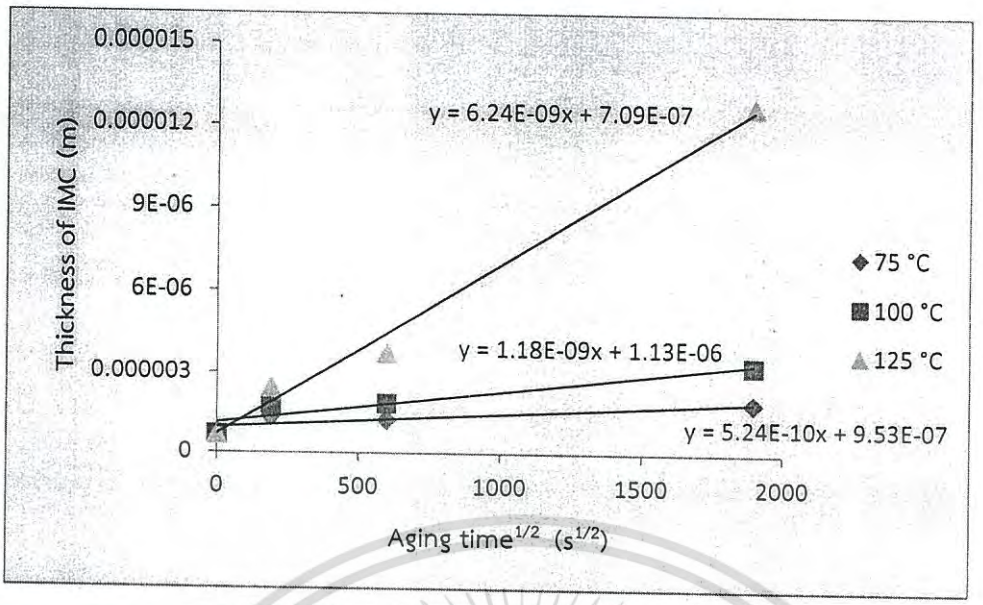


รูปที่ ข.57 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.05Ag กับทองแดง

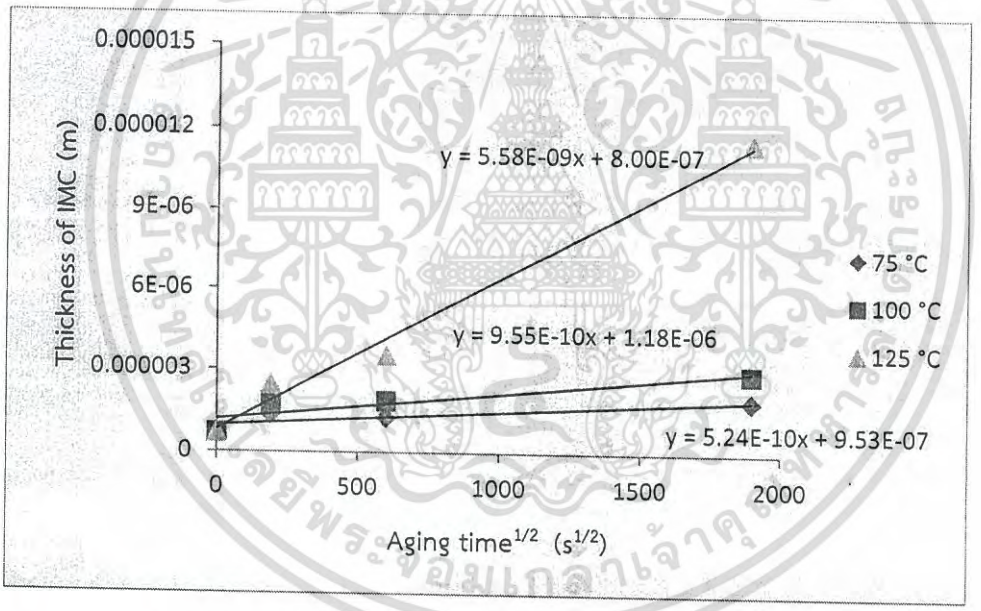
ตารางที่ ข.19 สัมประสิทธิ์การเติบโต (K) ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Sn-58Bi-1.0Ni-0.05Ag กับทองแดง

Intermetallic phase	Temperature (°C)/(K)	Slope = $K^{1/2}$	K (m^2/s)
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	75/348	3.94×10^{-10}	1.55×10^{-19}
	100/373	1.25×10^{-9}	1.57×10^{-18}
	125/398	6.82×10^{-9}	4.65×10^{-17}
Cu_6Sn_5	75/348	3.94×10^{-10}	1.55×10^{-19}
	100/373	1.05×10^{-9}	1.10×10^{-18}
	125/398	6.62×10^{-9}	4.38×10^{-17}
Cu_3Sn	75/348	-	-
	100/373	-	-
	125/398	-7.71×10^{-12}	5.94×10^{-23}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

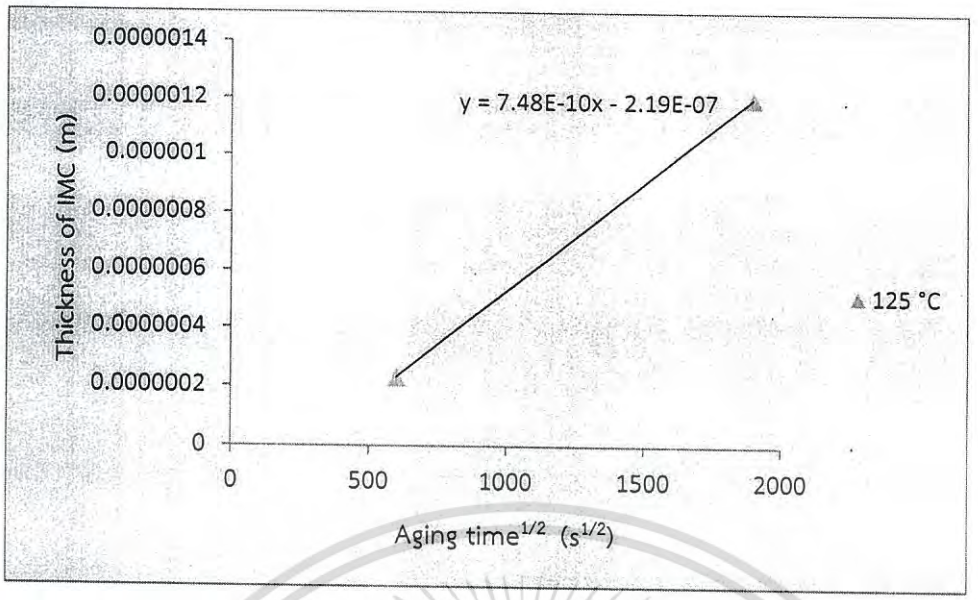


รูปที่ ข.58 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag กับทองแดง



รูปที่ ข.59 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag กับทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.60 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn กับรากที่สองของเวลาการบ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag กับทองแดง

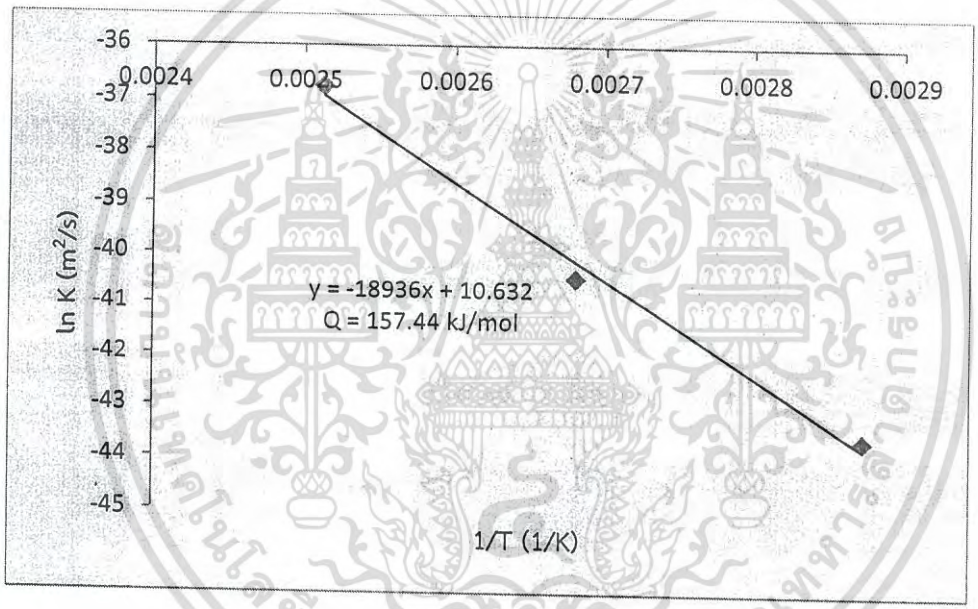
ตารางที่ ข.20 สัมประสิทธิ์การเติบโต (K) ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag กับทองแดง

Intermetallic phase	Temperature (°C)/(K)	Slope = $K^{1/2}$	K (m^2/s)
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	75/348	5.24×10^{-10}	2.75×10^{-19}
	100/373	1.18×10^{-9}	1.40×10^{-18}
	125/398	6.24×10^{-9}	3.90×10^{-17}
Cu_6Sn_5	75/348	5.24×10^{-10}	2.75×10^{-19}
	100/373	9.55×10^{-10}	9.11×10^{-19}
	125/398	5.58×10^{-9}	3.11×10^{-17}
Cu_3Sn	75/348	-	-
	100/373	-	-
	125/398	7.48×10^{-10}	5.60×10^{-19}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

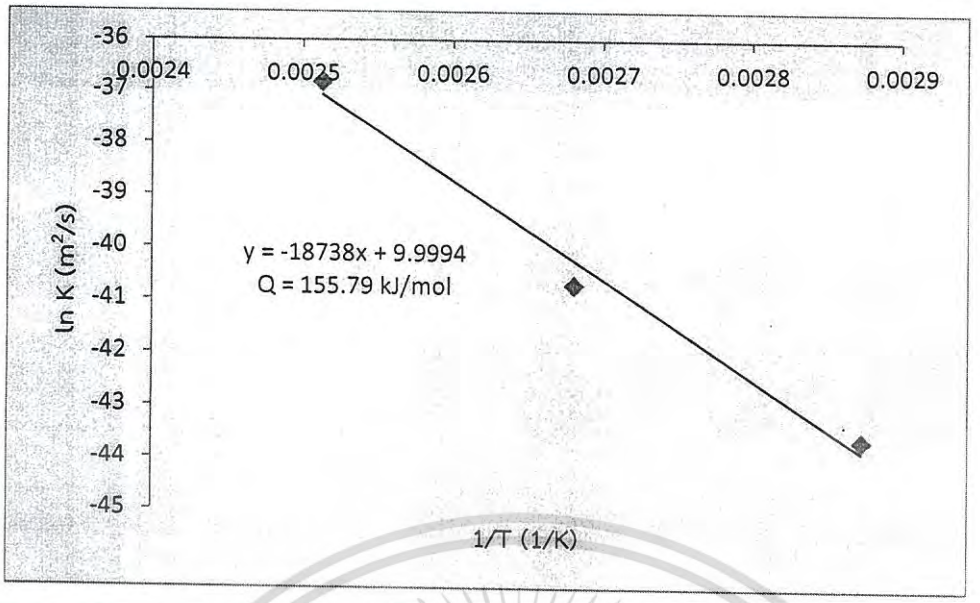
ตารางที่ ข.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln K กับ 1/T ของ Sn-58Bi-0.05Ni กับแผ่นทองแดง

Intermetallic phase	ln K	Temperature (°C)/(K)	1/T (1/K)
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-43.62	75/348	2.87×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-43.62		
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-40.48	100/373	2.68×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-40.71		
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-36.77	125/398	2.51×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-36.83		



รูปที่ ข.61 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn ระหว่าง Sn-58Bi-0.05Ni กับแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

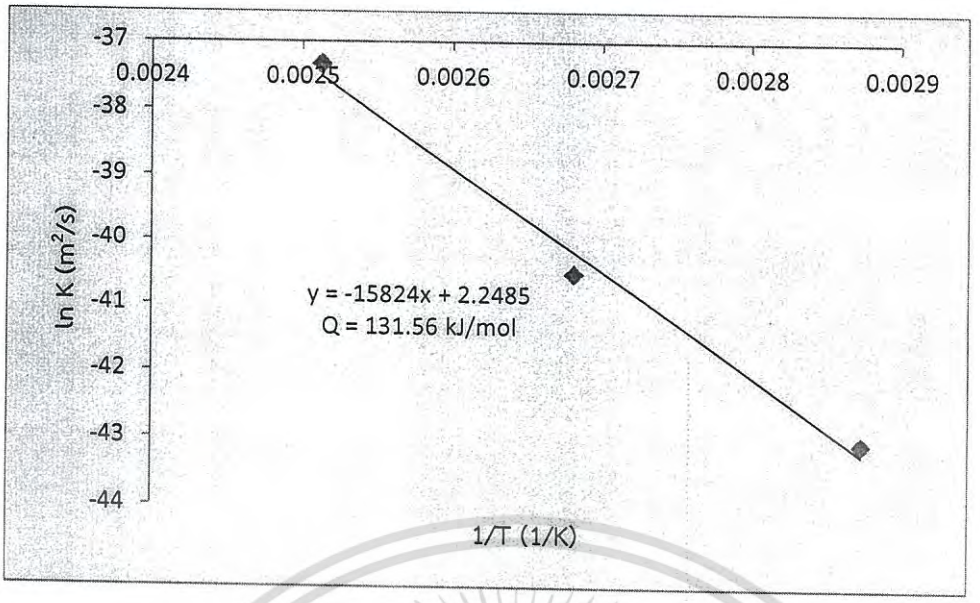


รูปที่ ข.62 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ระหว่าง Sn-58Bi-0.05Ni กับแผ่นทองแดง

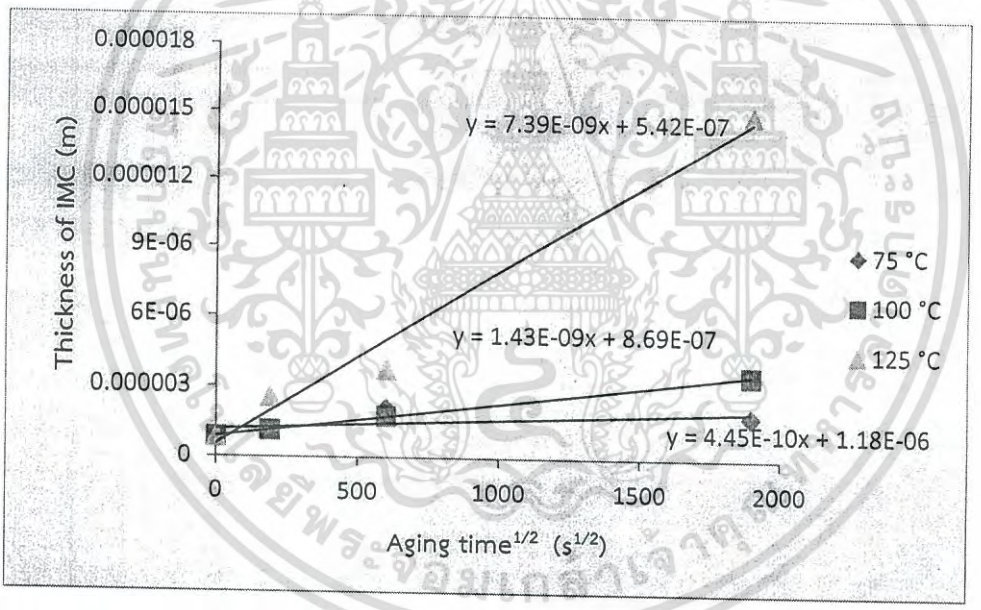
ตารางที่ ข.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln K กับ 1/T ของ Sn-58Bi-0.1Ni กับแผ่นทองแดง

Intermetallic phase	ln K	Temperature (°C)/(K)	1/T (1/K)
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-43.06	75/348	2.87×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-43.06		
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-40.52	100/373	2.68×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-40.73		
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-37.33	125/398	2.51×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-37.45		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.63 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn ระหว่าง Sn-58Bi-0.1Ni กับแผ่นทองแดง

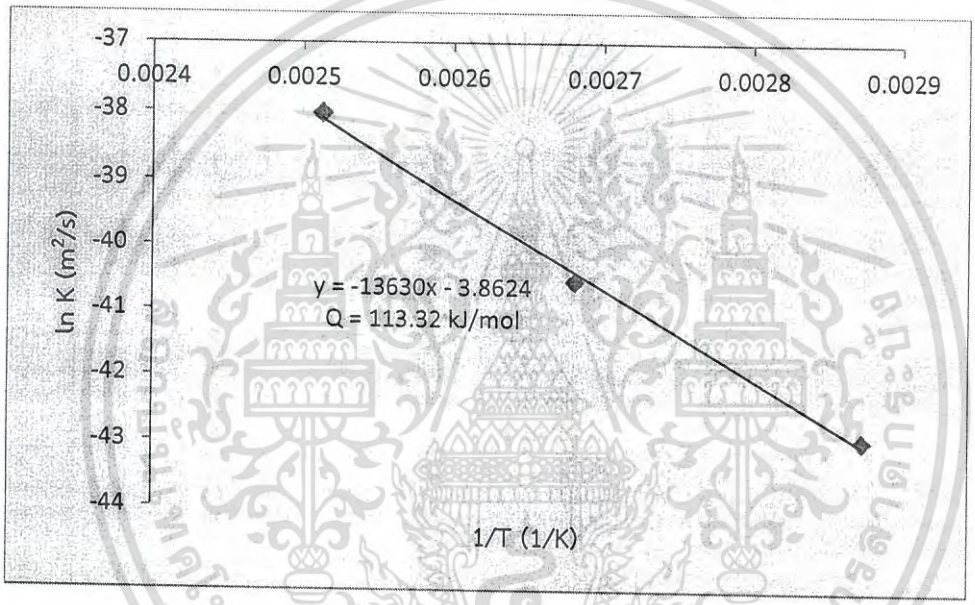


รูปที่ ข.64 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ระหว่าง Sn-58Bi-0.1Ni กับแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

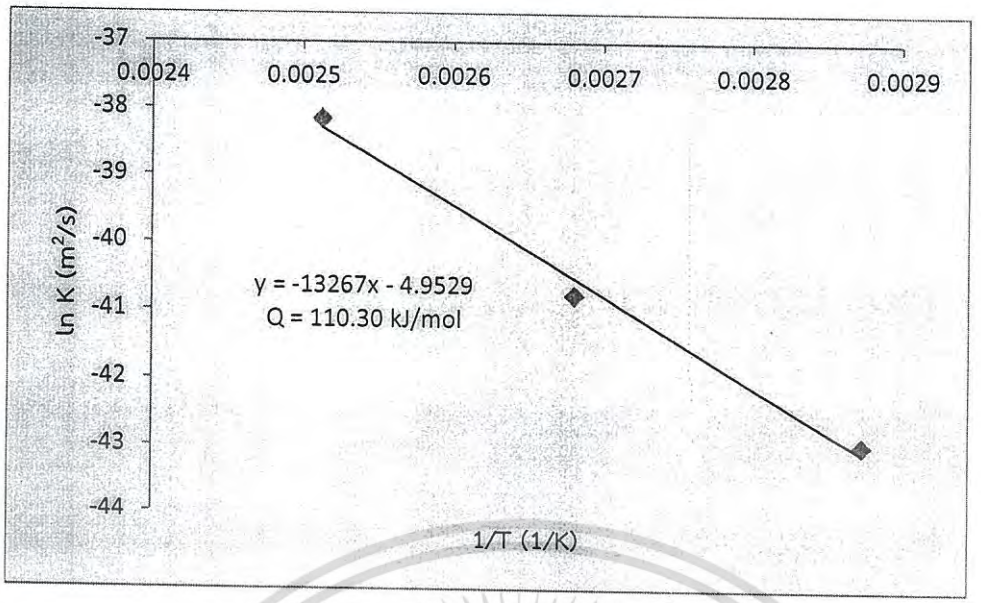
ตารางที่ ข.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln K กับ 1/T ของ Sn-58Bi-0.5Ni กับแผ่นทองแดง

Intermetallic phase	ln K	Temperature (°C)/(K)	1/T (1/K)
$Cu_6Sn_5+Cu_3Sn$	-42.96	75/348	2.87×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-42.96		
$Cu_6Sn_5+Cu_3Sn$	-40.55	100/373	2.68×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-40.78		
$Cu_6Sn_5+Cu_3Sn$	-38.03	125/398	2.51×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-38.15		



รูปที่ ข.65 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ $Cu_6Sn_5+Cu_3Sn$ ระหว่าง Sn-58Bi-0.5Ni กับแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

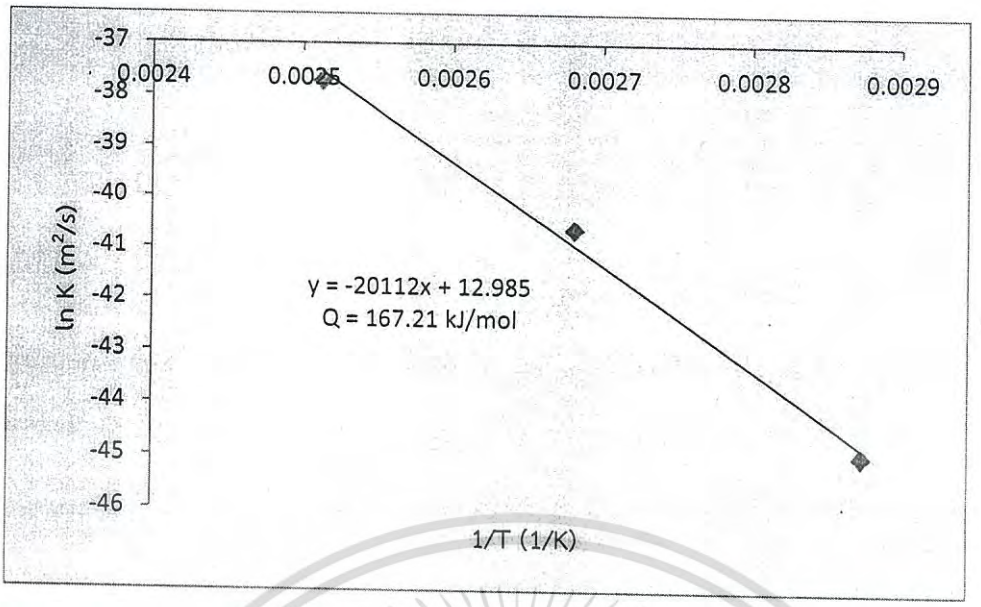


รูปที่ ข.66 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ระหว่าง Sn-58Bi-0.5Ni กับแผ่นทองแดง

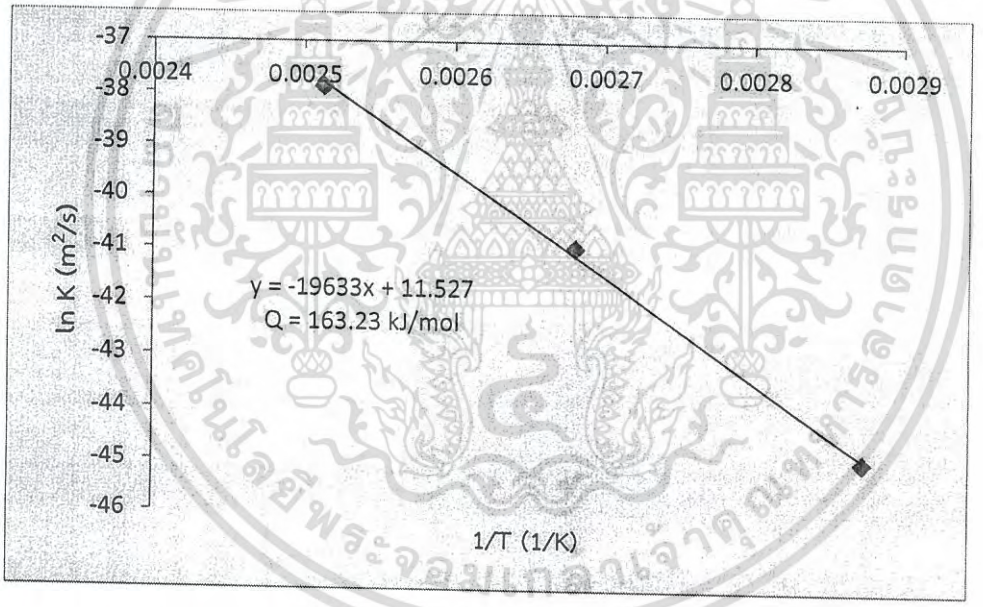
ตารางที่ ข.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln K กับ 1/T ของ Sn-58Bi-1.0Ni กับแผ่นทองแดง

Intermetallic phase	ln K	Temperature (°C)/(K)	1/T (1/K)
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-44.95	75/348	2.87×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-44.95		
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-40.62	100/373	2.68×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-40.97		
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-37.72	125/398	2.51×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-37.88		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.67 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn ระหว่าง Sn-58Bi-1.0Ni กับแผ่นทองแดง

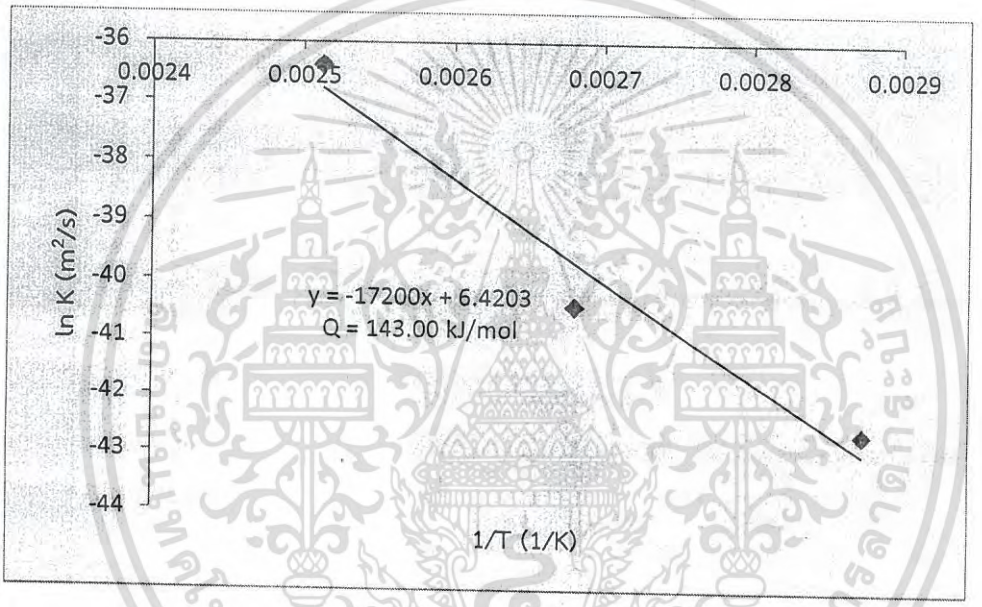


รูปที่ ข.68 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ระหว่าง Sn-58Bi-1.0Ni กับแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

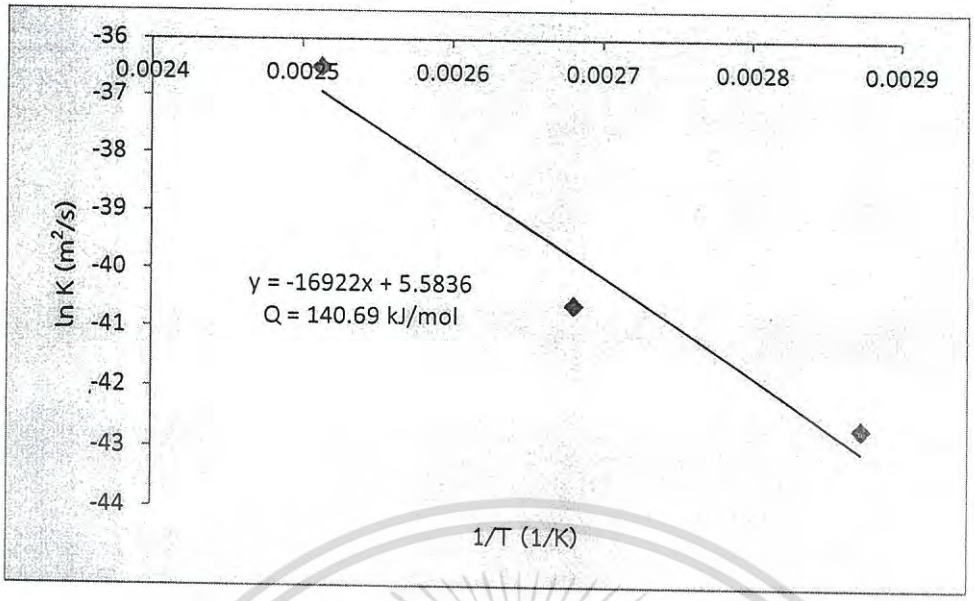
ตารางที่ ข.25 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln K กับ 1/T ของ Sn-58Bi-0.05Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง

Intermetallic phase	ln K	Temperature (°C)/(K)	1/T (1/K)
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-42.66	75/348	2.87×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-42.66		
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-40.44	100/373	2.68×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-40.61		
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-36.40	125/398	2.51×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-36.49		



รูปที่ ข.69 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn ระหว่าง Sn-58Bi-0.05Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

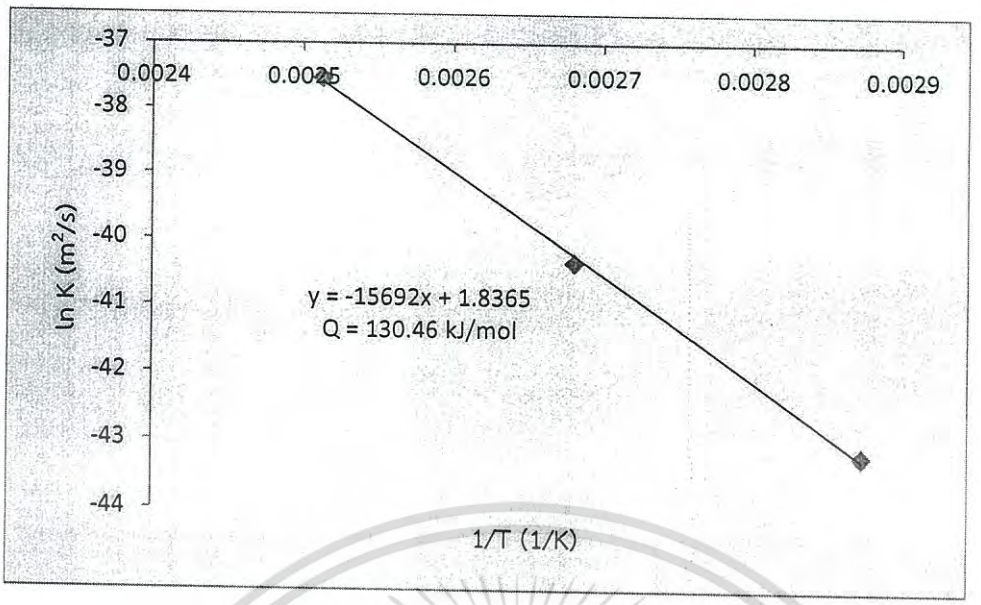


รูปที่ ข.70 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ระหว่าง Sn-58Bi-0.05Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง

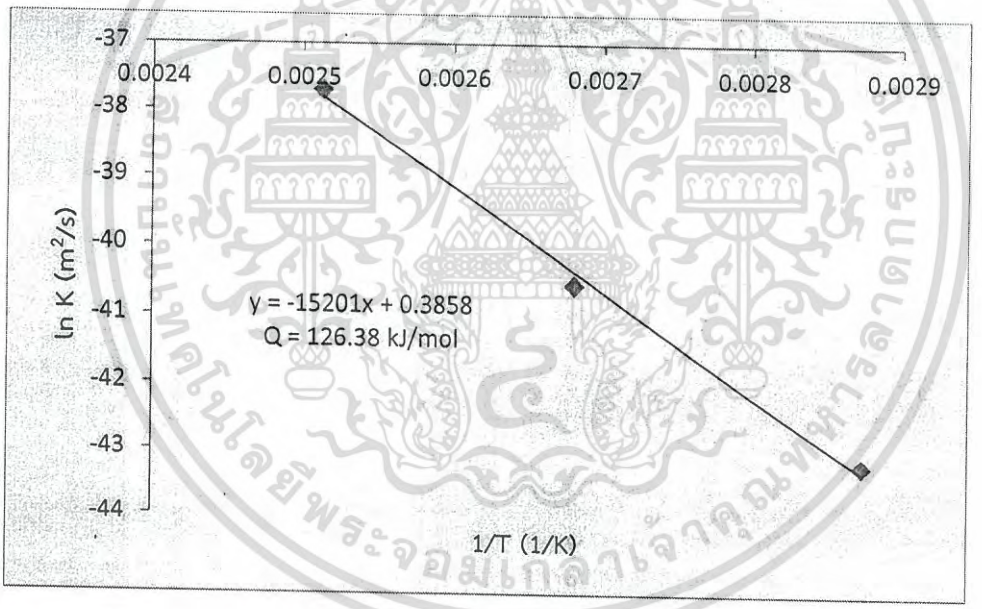
ตารางที่ ข.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln K กับ 1/T ของ Sn-58Bi-0.05Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง

Intermetallic phase	ln K	Temperature (°C)/(K)	1/T (1/K)
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-43.20	75/348	2.87×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-43.20		
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-40.34	100/373	2.68×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-40.56		
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-37.53	125/398	2.51×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-37.70		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.71 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn ระหว่าง Sn-58Bi-0.05Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง

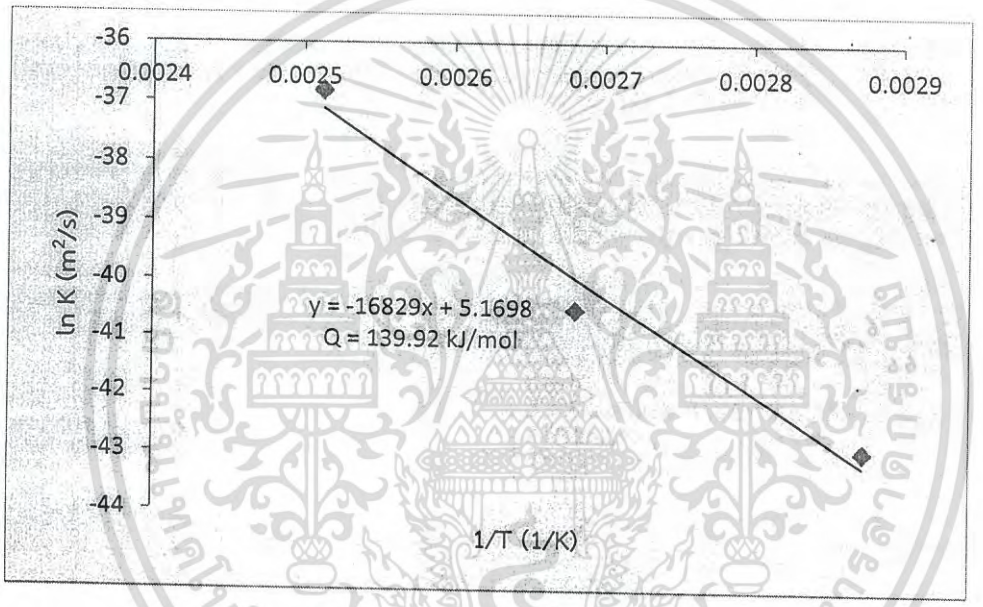


รูปที่ ข.72 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ระหว่าง Sn-58Bi-0.05Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

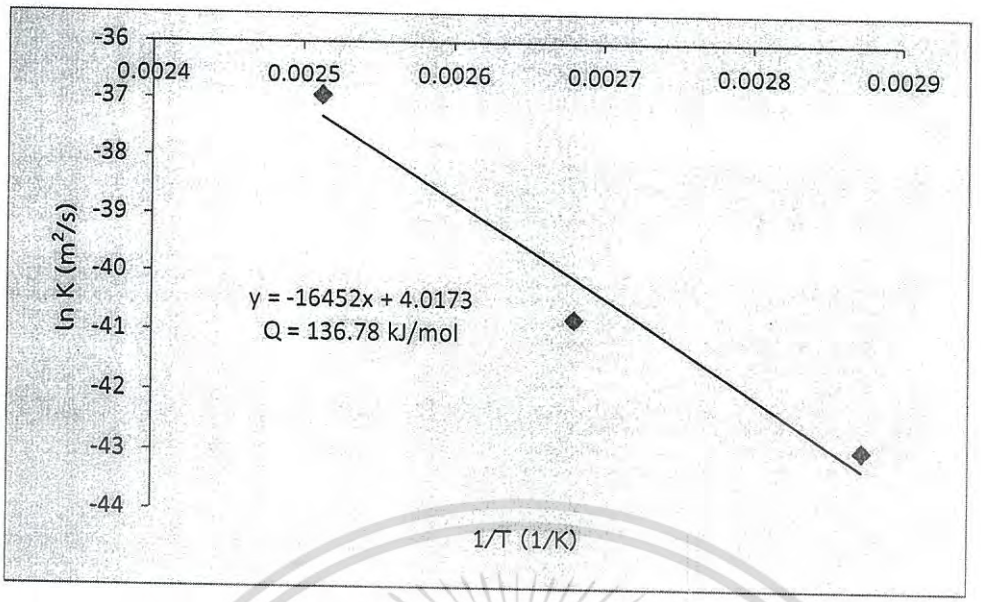
ตารางที่ ข.27 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln K กับ 1/T ของ Sn-58Bi-0.1Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง

Intermetallic phase	ln K	Temperature (°C)/(K)	1/T (1/K)
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-42.93	75/348	2.87×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-42.93		
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-40.50	100/373	2.68×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-40.79		
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-36.82	125/398	2.51×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-36.95		



รูปที่ ข.73 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn ระหว่าง Sn-58Bi-0.1Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

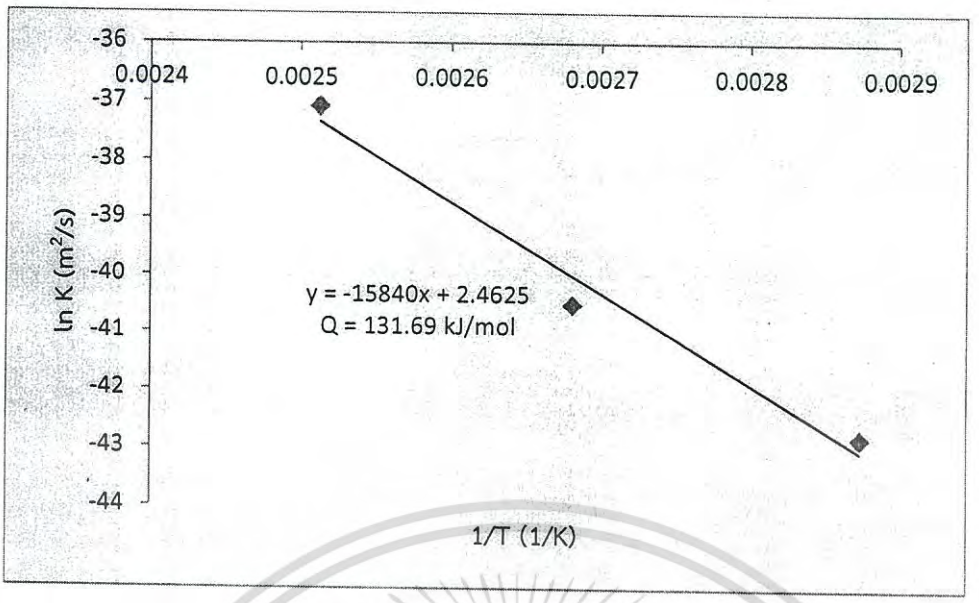


รูปที่ ข.74 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ระหว่าง Sn-58Bi-0.1Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง

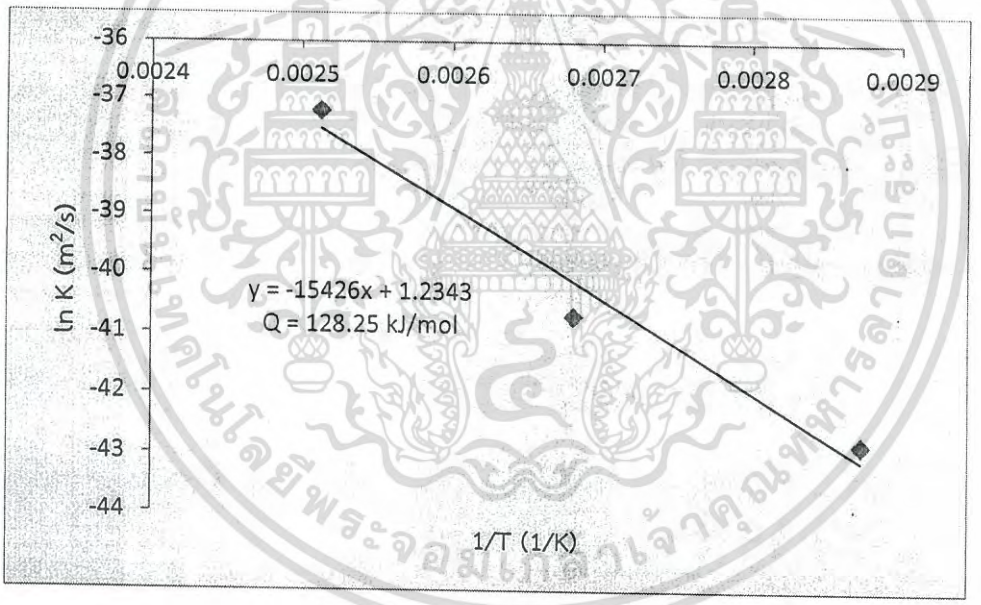
ตารางที่ ข.28 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln K กับ 1/T ของ Sn-58Bi-0.1Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง

Intermetallic phase	ln K	Temperature (°C)/(K)	1/T (1/K)
$Cu_6Sn_5+Cu_3Sn$	-42.82	75/348	2.87×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-42.82		
$Cu_6Sn_5+Cu_3Sn$	-40.51	100/373	2.68×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-40.71		
$Cu_6Sn_5+Cu_3Sn$	-37.07	125/398	2.51×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-37.21		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.75 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn ระหว่าง Sn-58Bi-0.1Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง

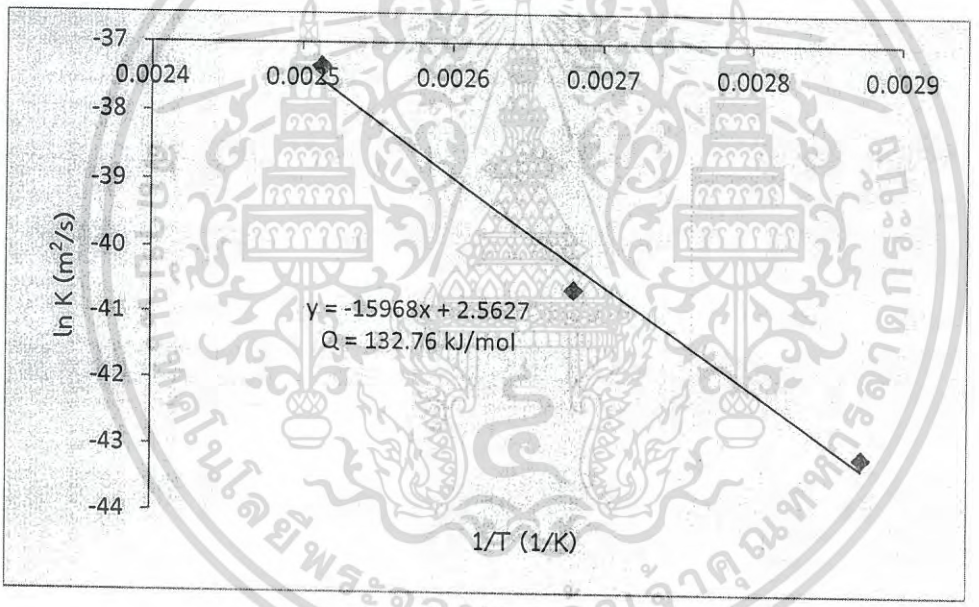


รูปที่ ข.76 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ระหว่าง Sn-58Bi-0.1Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

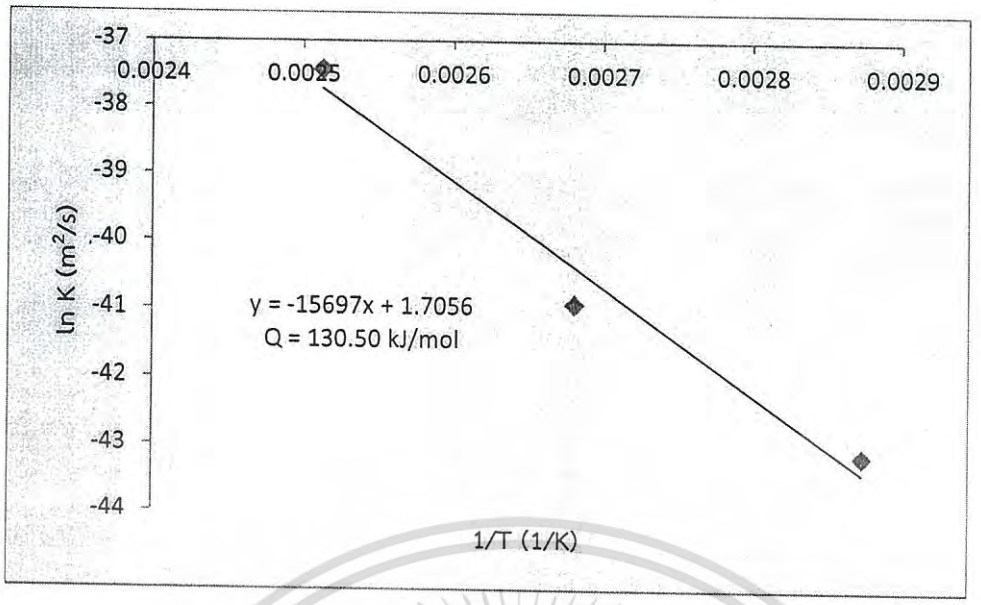
ตารางที่ ข.29 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln K กับ 1/T ของ Sn-58Bi-0.5Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง

Intermetallic phase	ln K	Temperature (°C)/(K)	1/T (1/K)
$Cu_6Sn_5+Cu_3Sn$	-43.15	75/348	2.87×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-43.15		
$Cu_6Sn_5+Cu_3Sn$	-40.63	100/373	2.68×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-40.92		
$Cu_6Sn_5+Cu_3Sn$	-37.36	125/398	2.51×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-37.44		



รูปที่ ข.77 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ $Cu_6Sn_5+Cu_3Sn$ ระหว่าง Sn-58Bi-0.5Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

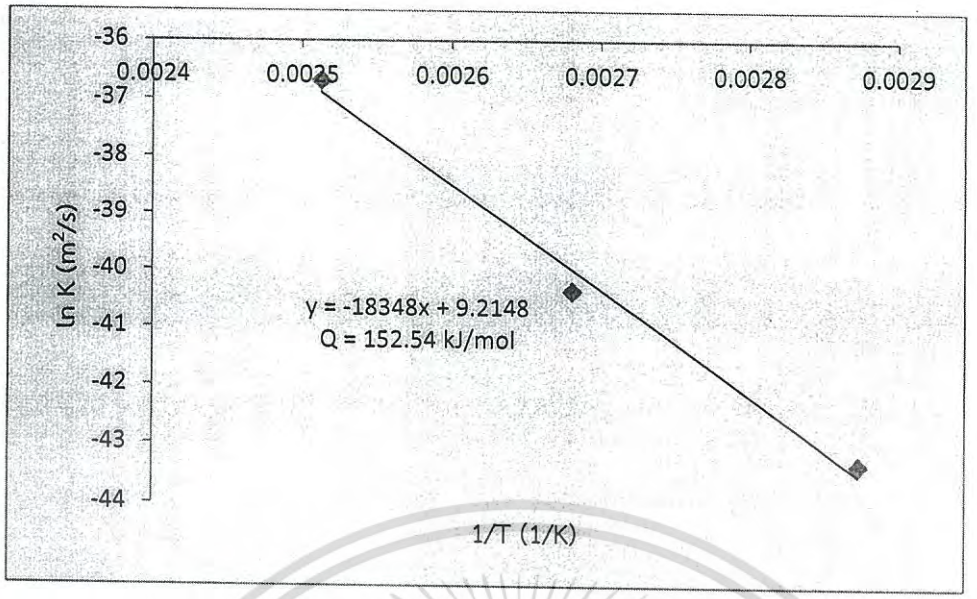


รูปที่ ข.78 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ระหว่าง Sn-58Bi-0.5Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง

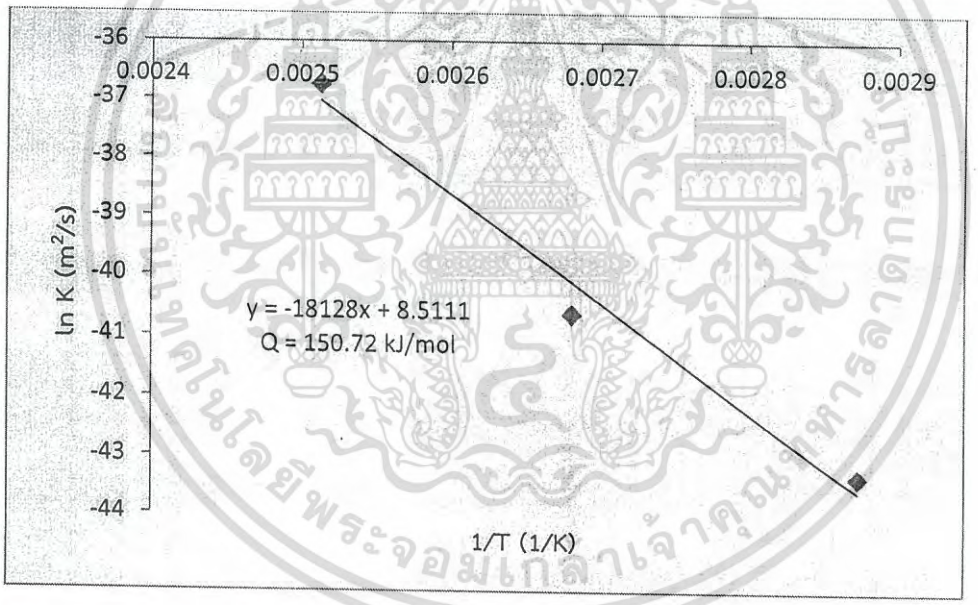
ตารางที่ ข.30 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln K กับ 1/T ของ Sn-58Bi-0.5Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง

Intermetallic phase	ln K	Temperature (°C)/(K)	1/T (1/K)
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-43.33	75/348	2.87×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-43.33		
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-40.36	100/373	2.68×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-40.63		
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-36.68	125/398	2.51×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-36.75		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.79 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn ระหว่าง Sn-58Bi-0.5Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง

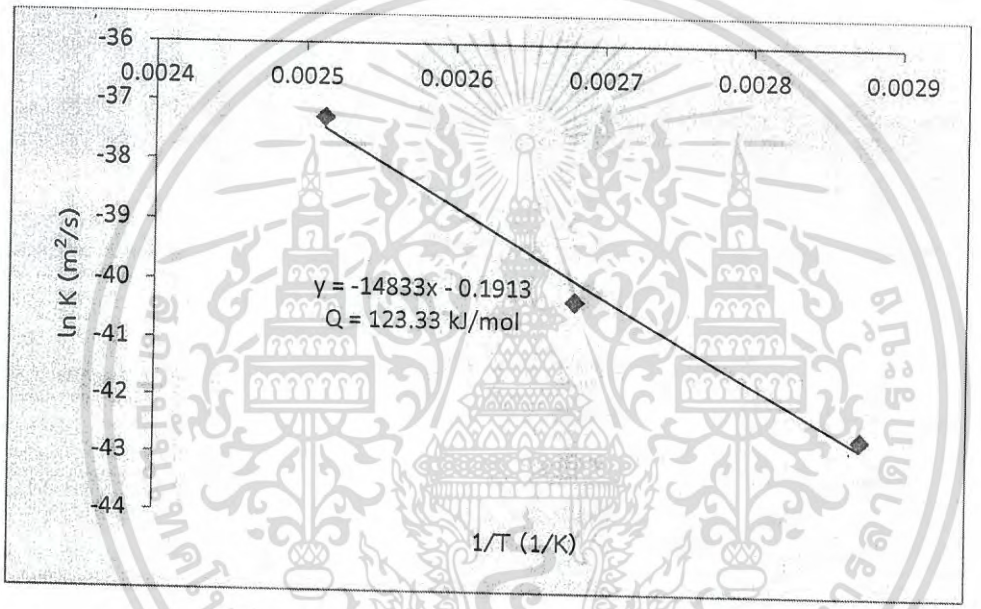


รูปที่ ข.80 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ระหว่าง Sn-58Bi-0.5Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

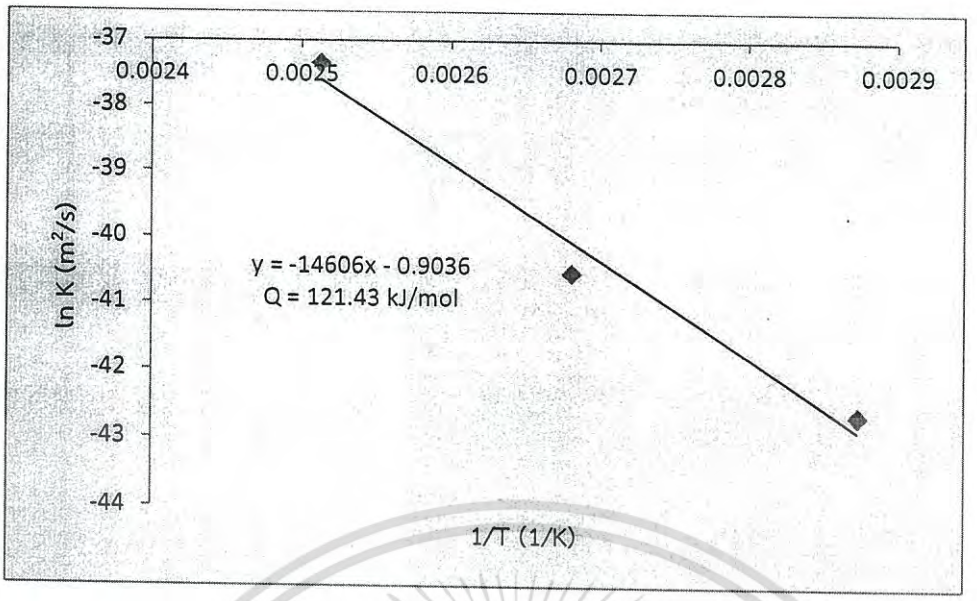
ตารางที่ ข.31 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln K กับ 1/T ของ Sn-58Bi-1.0Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง

Intermetallic phase	ln K	Temperature (°C)/(K)	1/T (1/K)
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-42.65	75/348	2.87×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-42.65		
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-40.31	100/373	2.68×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-40.54		
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-37.27	125/398	2.51×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-37.35		



รูปที่ ข.81 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn ระหว่าง Sn-58Bi-1.0Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

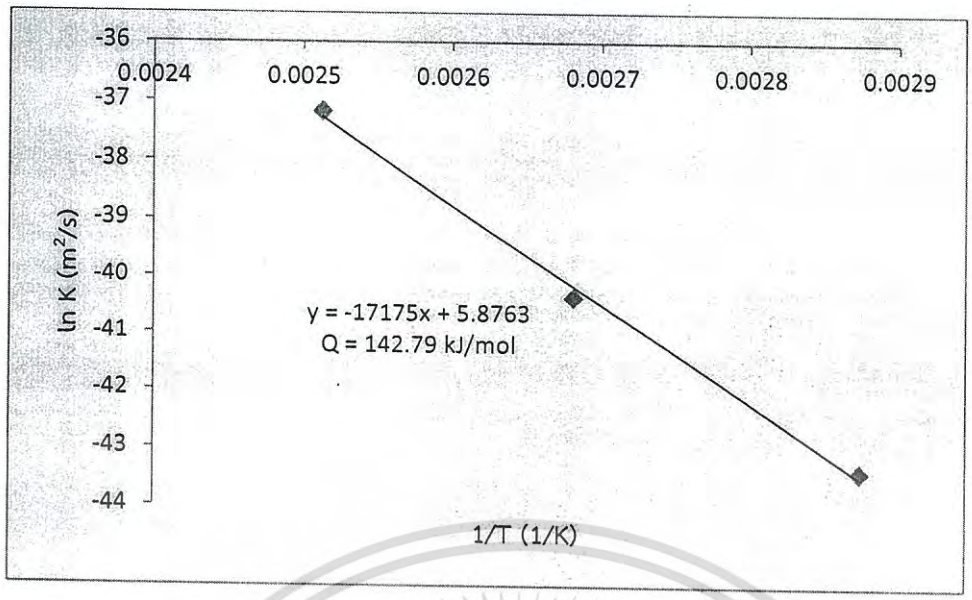


รูปที่ ข.82 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ระหว่าง Sn-58Bi-1.0Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง

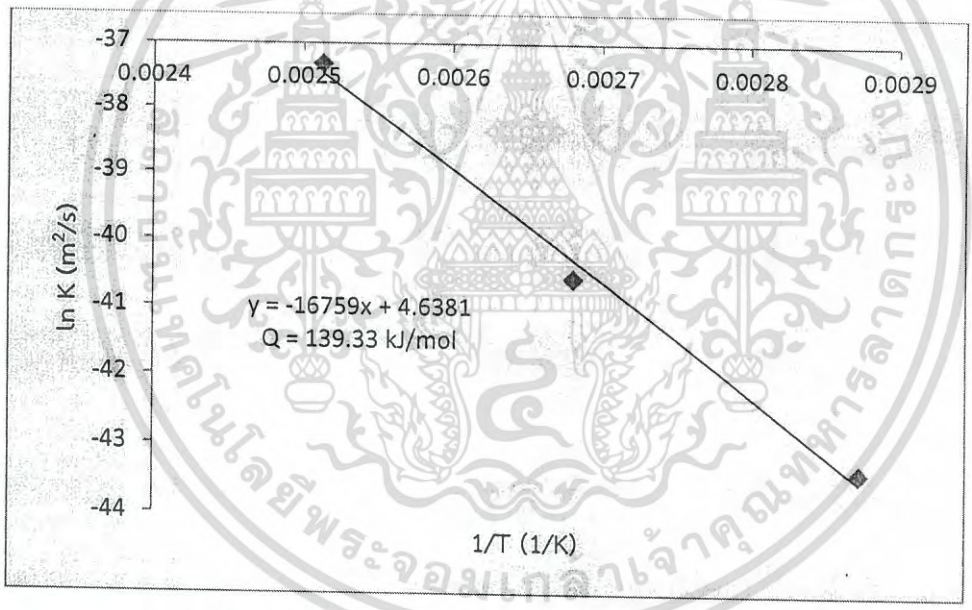
ตารางที่ ข.32 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln K กับ 1/T ของ Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง

Intermetallic phase	ln K	Temperature (°C)/(K)	1/T (1/K)
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-43.39	75/348	2.87×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-43.39		
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-40.36	100/373	2.68×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-40.58		
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-37.17	125/398	2.51×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-37.32		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.83 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn ระหว่าง Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง

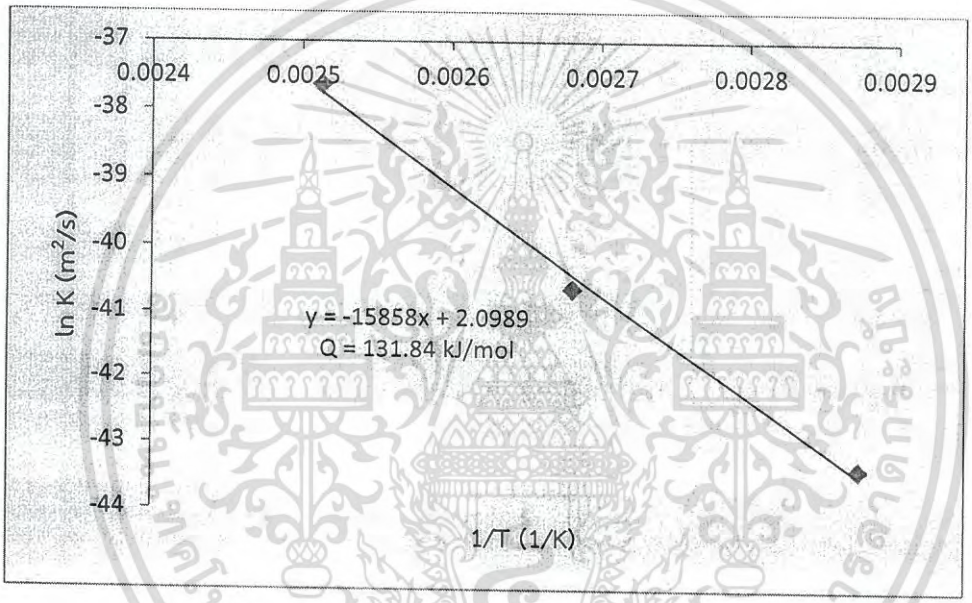


รูปที่ ข.84 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ระหว่าง Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

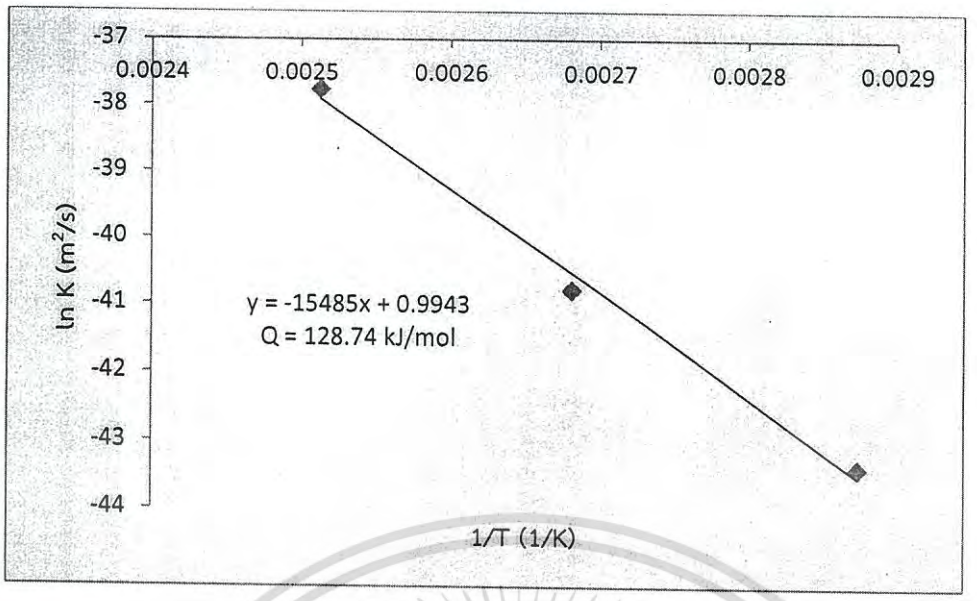
ตารางที่ ข.33 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln K กับ 1/T ของ Sn-58Bi-0.05Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง

Intermetallic phase	ln K	Temperature (°C)/(K)	1/T (1/K)
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-43.38	75/348	2.87×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-43.38		
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-40.62	100/373	2.68×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-40.79		
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-37.64	125/398	2.51×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-37.77		



รูปที่ ข.85 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn ระหว่าง Sn-58Bi-0.05Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

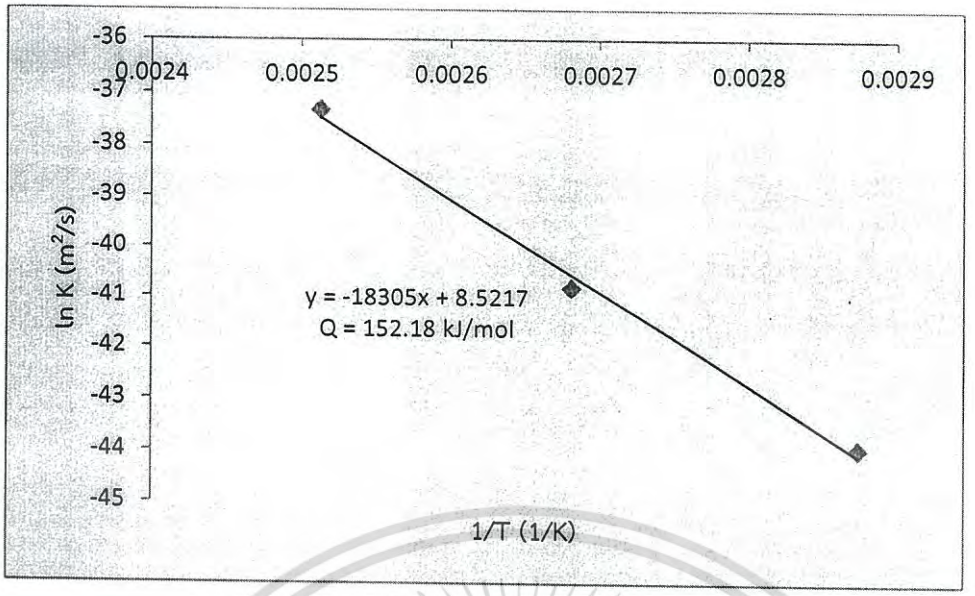


รูปที่ ข.86 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ระหว่าง Sn-58Bi-0.05Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง

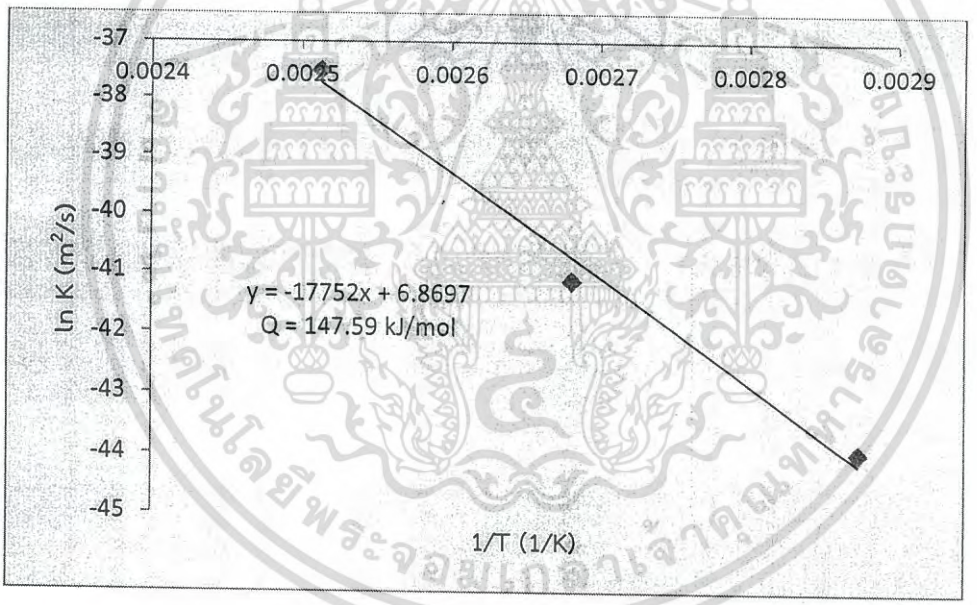
ตารางที่ ข.34 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln K กับ 1/T ของ Sn-58Bi-0.05Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง

Intermetallic phase	ln K	Temperature (°C)/(K)	1/T (1/K)
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-43.95	75/348	2.87×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-43.95		
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-40.82	100/373	2.68×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-41.13		
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-37.33	125/398	2.51×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-37.52		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.87 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn ระหว่าง Sn-58Bi-0.05Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง

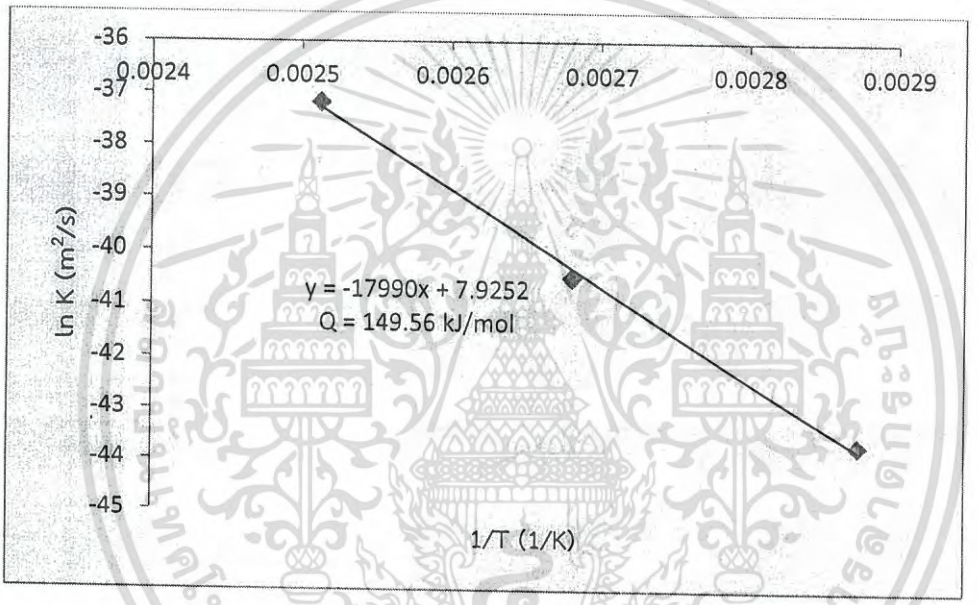


รูปที่ ข.88 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ระหว่าง Sn-58Bi-0.05Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

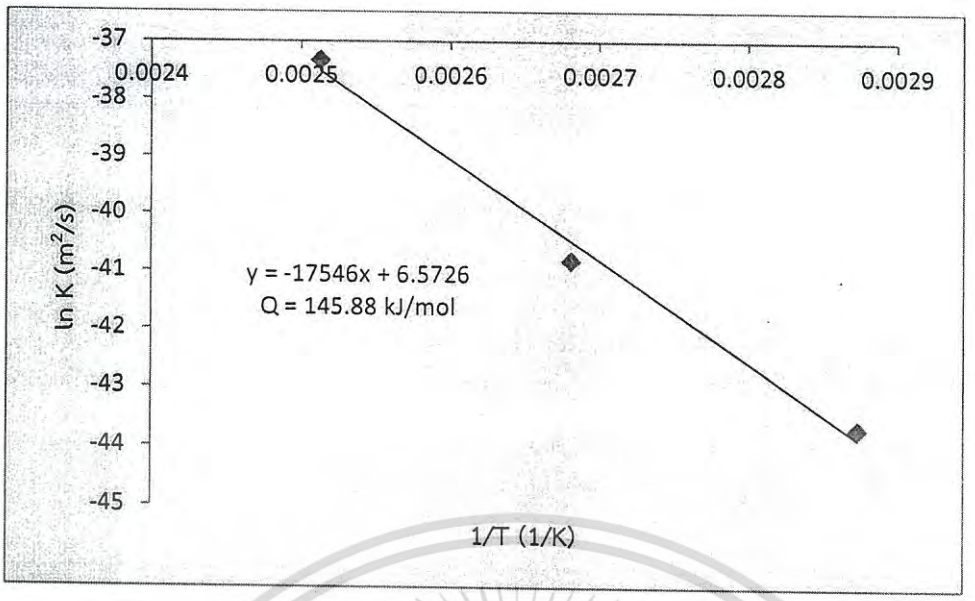
ตารางที่ ข.35 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln K กับ 1/T ของ Sn-58Bi-0.1Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง

Intermetallic phase	ln K	Temperature (°C)/(K)	1/T (1/K)
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-43.69	75/348	2.87×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-43.69		
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-40.48	100/373	2.68×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-40.81		
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-37.18	125/398	2.51×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-37.33		



รูปที่ ข.89 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn ระหว่าง Sn-58Bi-0.1Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

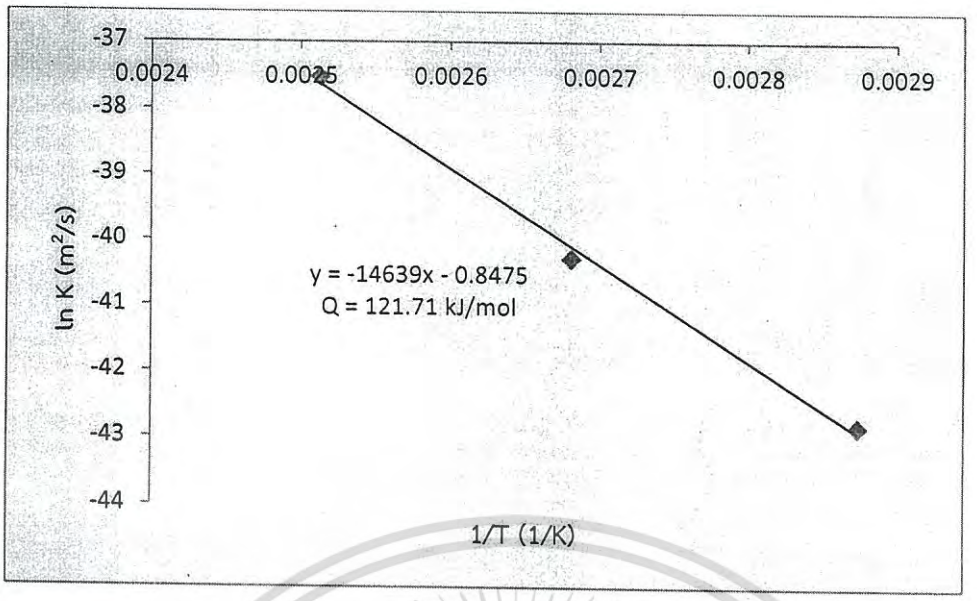


รูปที่ ข.90 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ระหว่าง Sn-58Bi-0.1Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง

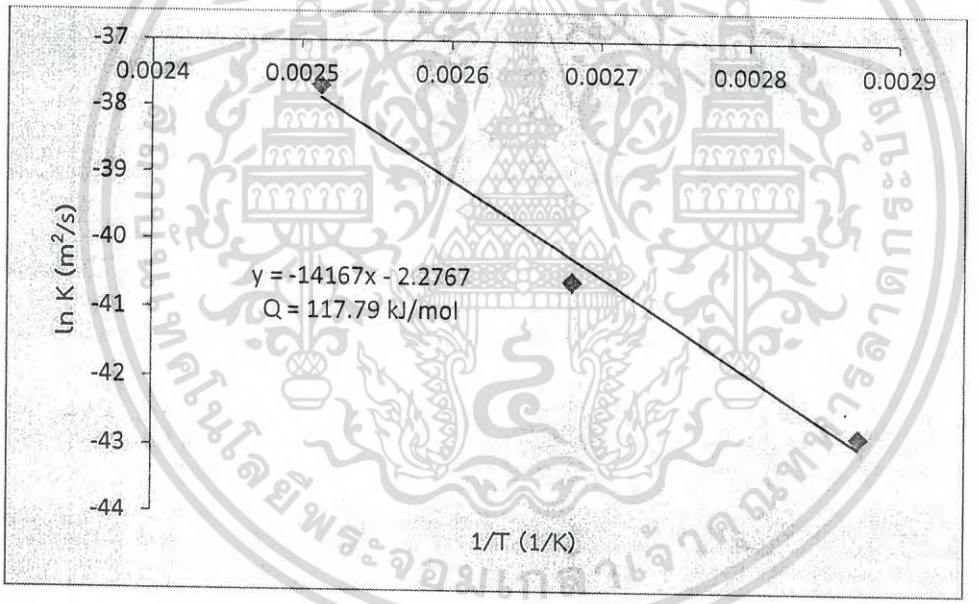
ตารางที่ ข.36 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln K กับ 1/T ของ Sn-58Bi-0.1Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง

Intermetallic phase	ln K	Temperature (°C)/(K)	1/T (1/K)
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-42.83	75/348	2.87×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-42.83		
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-40.28	100/373	2.68×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-40.61		
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-37.53	125/398	2.51×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-37.69		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.91 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn ระหว่าง Sn-58Bi-0.1Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง

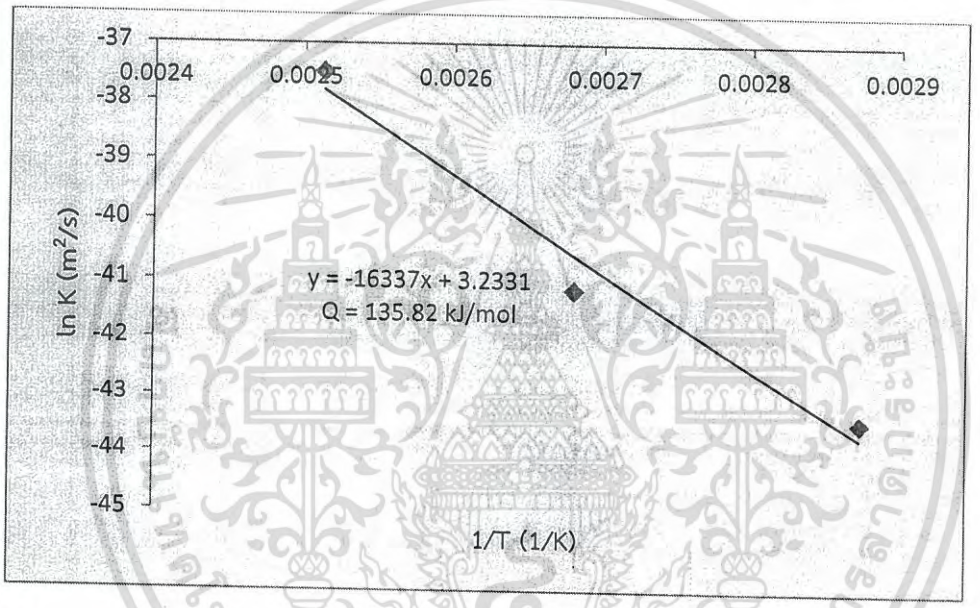


รูปที่ ข.92 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ระหว่าง Sn-58Bi-0.1Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

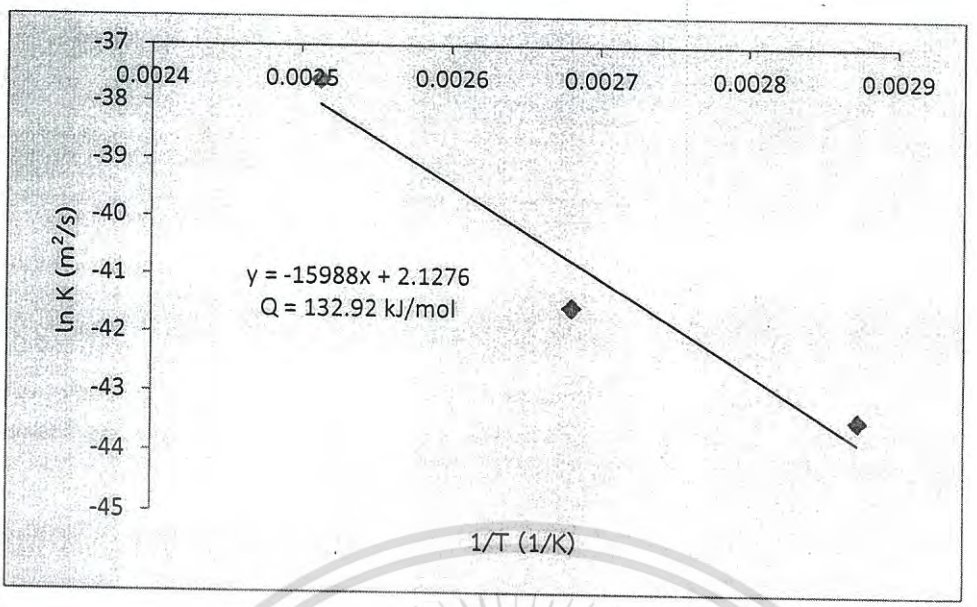
ตารางที่ ข.37 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln K กับ 1/T ของ Sn-58Bi-0.5Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง

Intermetallic phase	ln K	Temperature (°C)/(K)	1/T (1/K)
$Cu_6Sn_5+Cu_3Sn$	-43.44	75/348	2.87×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-43.44		
$Cu_6Sn_5+Cu_3Sn$	-41.15	100/373	2.68×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-41.54		
$Cu_6Sn_5+Cu_3Sn$	-37.50	125/398	2.51×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-37.61		



รูปที่ ข.93 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ $Cu_6Sn_5+Cu_3Sn$ ระหว่าง Sn-58Bi-0.5Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

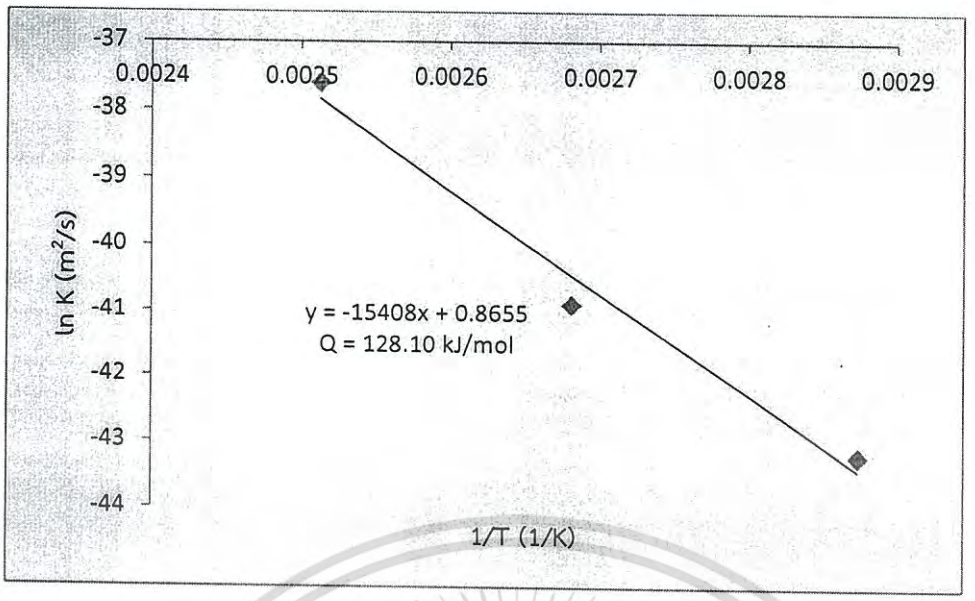


รูปที่ ข.94 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ระหว่าง Sn-58Bi-0.5Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง

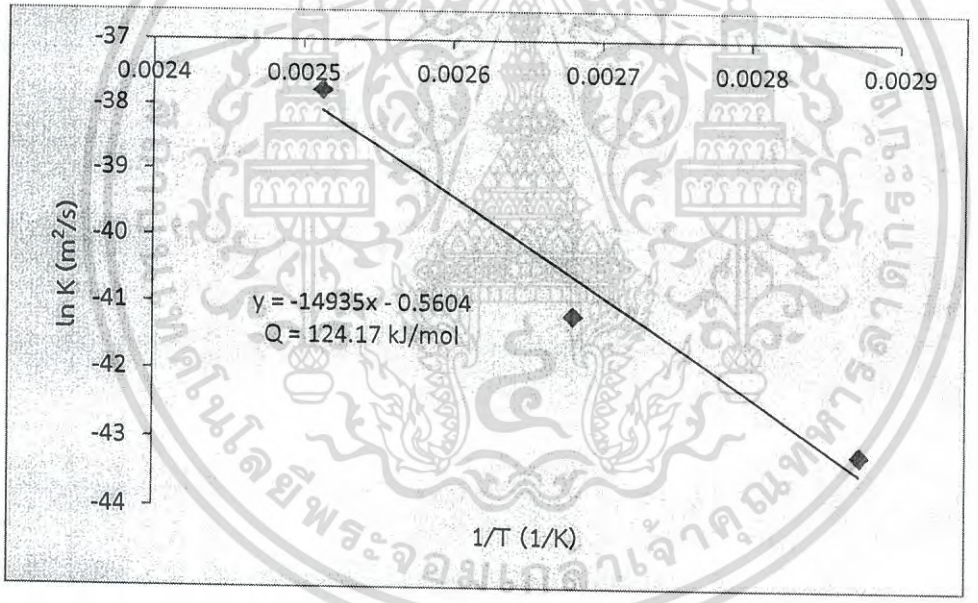
ตารางที่ ข.38 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln K กับ 1/T ของ Sn-58Bi-0.5Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง

Intermetallic phase	ln K	Temperature (°C)/(K)	1/T (1/K)
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-43.20	75/348	2.87×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-43.20		
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-40.89	100/373	2.68×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-41.19		
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-37.61	125/398	2.51×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-37.77		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.95 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn ระหว่าง Sn-58Bi-0.5Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง

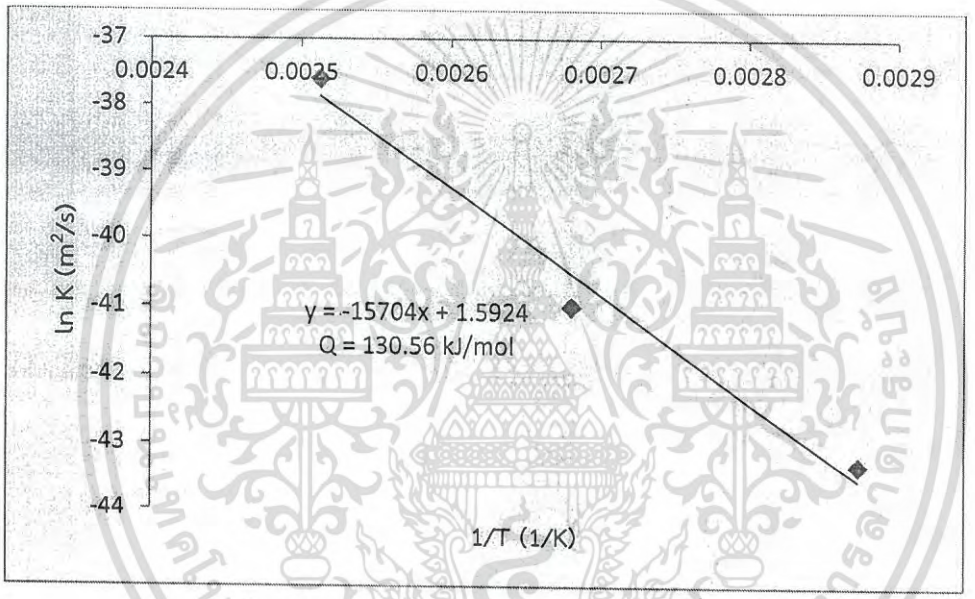


รูปที่ ข.96 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ระหว่าง Sn-58Bi-0.5Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

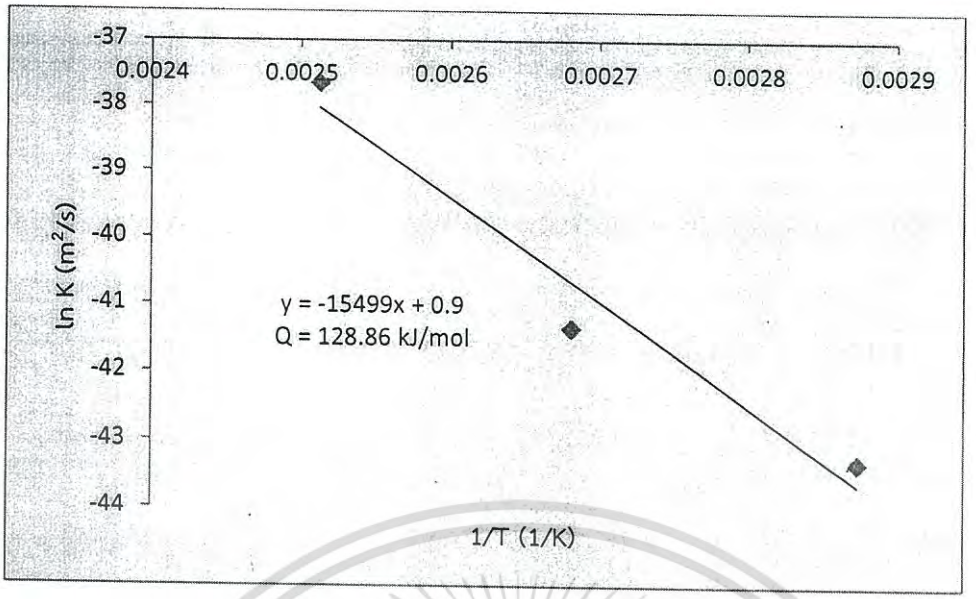
ตารางที่ ข.39 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln K กับ 1/T ของ Sn-58Bi-1.0Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง

Intermetallic phase	ln K	Temperature (°C)/(K)	1/T (1/K)
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-43.31	75/348	2.87×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-43.31		
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-40.99	100/373	2.68×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-41.35		
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-37.61	125/398	2.51×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-37.67		



รูปที่ ข.97 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn ระหว่าง Sn-58Bi-1.0Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

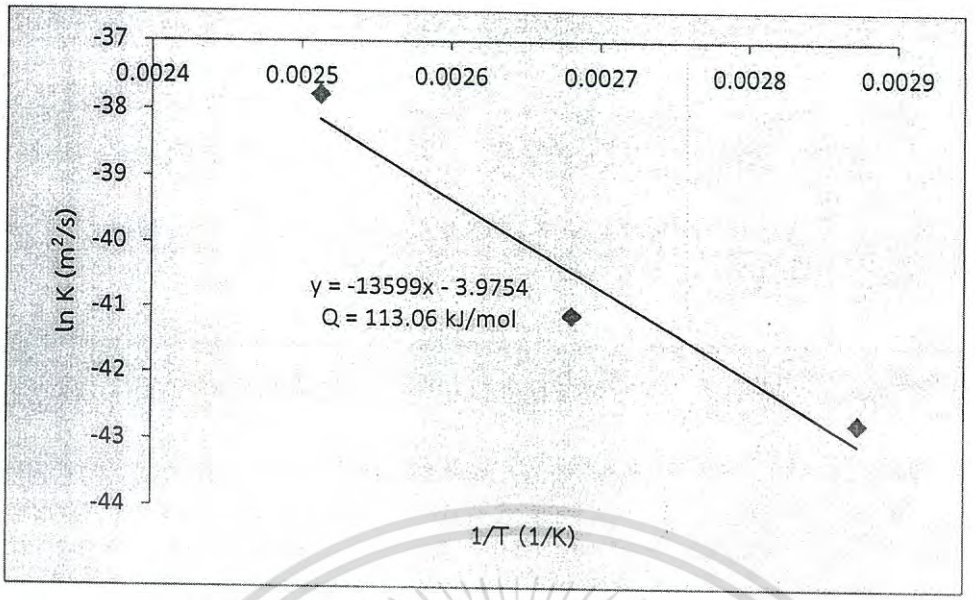


รูปที่ ข.98 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ระหว่าง Sn-58Bi-1.0Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง

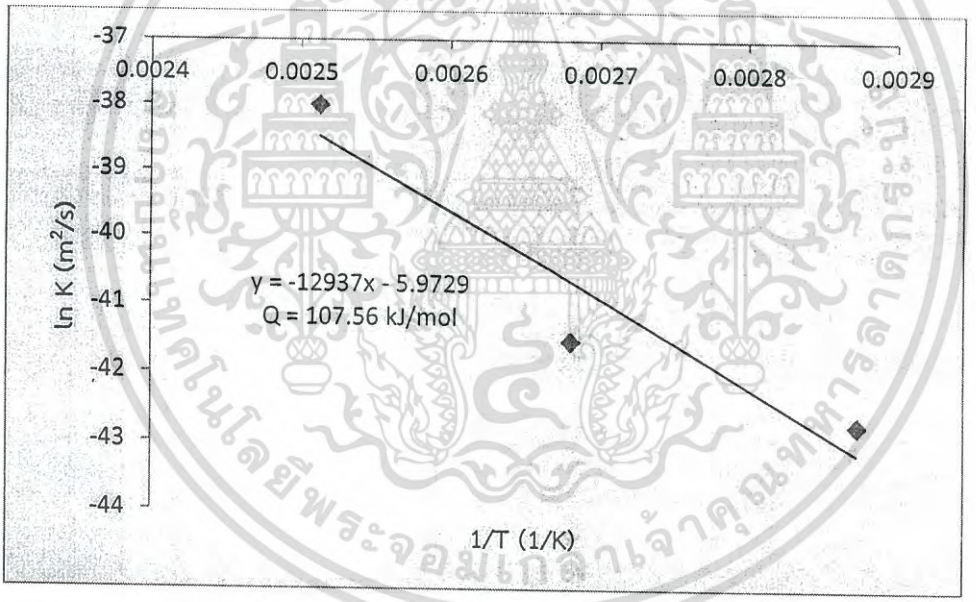
ตารางที่ ข.40 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln K กับ 1/T ของ Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง

Intermetallic phase	ln K	Temperature (°C)/(K)	1/T (1/K)
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-42.74	75/348	2.87×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-42.74		
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-41.11	100/373	2.68×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-41.54		
Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	-37.78	125/398	2.51×10^{-3}
Cu_6Sn_5	-38.01		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.99 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn ระหว่าง Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง



รูปที่ ข.100 พลังงานกระตุ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ระหว่าง Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

ค่าตัวประกอบการกระจายตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 ค่าตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด

ชนิดของโลหะบัดกรี	ค่าตัวประกอบการกระจายตัว (%)		
	โลหะบัดกรีชิ้นที่ 1	โลหะบัดกรีชิ้นที่ 2	โลหะบัดกรีชิ้นที่ 3
Sn58Bi	81.67	82.93	76.21
Sn-58Bi-0.05Ni	78.45	80.91	77.84
Sn-58Bi-0.1Ni	77.07	82.95	82.77
Sn-58Bi-0.5Ni	84.85	83.59	78.90
Sn-58Bi-1.0Ni	81.97	83.38	84.65
Sn-58Bi-0.05Ni-0.05In	77.39	83.57	84.08
Sn-58Bi-0.05Ni-0.1In	81.18	83.55	82.37
Sn-58Bi-0.1Ni-0.05In	82.41	81.18	80.60
Sn-58Bi-0.1Ni-0.1In	83.48	83.50	81.33
Sn-58Bi-0.5Ni-0.05In	78.63	83.26	82.40
Sn-58Bi-0.5Ni-0.1In	83.52	78.36	84.12
Sn-58Bi-1.0Ni-0.05In	83.84	82.26	80.49
Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In	83.91	85.41	80.43
Sn-58Bi-0.05Ni-0.05Ag	79.78	84.24	82.41
Sn-58Bi-0.05Ni-0.1Ag	83.19	83.85	82.62
Sn-58Bi-0.1Ni-0.05Ag	80.95	80.71	80.87
Sn-58Bi-0.1Ni-0.1Ag	84.61	82.14	82.11
Sn-58Bi-0.5Ni-0.05Ag	79.80	84.84	83.33
Sn-58Bi-0.5Ni-0.1Ag	83.57	81.67	82.34
Sn-58Bi-1.0Ni-0.05Ag	83.98	81.82	81.76
Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag	83.66	84.40	81.40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.

ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.1 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn ที่อุณหภูมิบ่ม 75 °C

ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn (μm)					
อุณหภูมิ °C	โลหะบัดกรี	เวลา (hr)			
		0	10	100	1000
75	Sn58Bi	0.77	1.26	1.37	2.01
	Sn58Bi-0.05Ni	0.79	1.16	1.18	1.56
	Sn58Bi-0.1Ni	0.85	1.16	2.08	1.84
	Sn58Bi-0.5Ni	0.84	1.30	1.36	1.89
	Sn58Bi-1.0Ni	0.73	1.79	2.16	1.54
	Sn58Bi-0.05Ni-0.05In	0.79	1.36	1.30	2.02
	Sn58Bi-0.05Ni-0.1In	0.85	1.22	1.56	1.78
	Sn58Bi-0.1Ni-0.05In	0.85	1.39	1.49	1.95
	Sn58Bi-0.1Ni-0.1In	0.71	0.96	1.09	1.73
	Sn58Bi-0.5Ni-0.05In	0.84	1.00	1.40	1.70
	Sn58Bi-0.5Ni-0.1In	0.78	1.25	1.26	1.69
	Sn58Bi-1.0Ni-0.05In	0.69	1.12	1.43	1.88
	Sn58Bi-1.0Ni-0.1In	0.69	1.72	1.84	1.84
	Sn58Bi-0.05Ni-0.05Ag	0.75	1.13	1.42	1.62
	Sn58Bi-0.05Ni-0.1Ag	0.71	1.57	1.41	1.60
	Sn58Bi-0.1Ni-0.05Ag	0.83	1.49	1.12	1.69
	Sn58Bi-0.1Ni-0.1Ag	0.84	1.05	1.53	1.86
	Sn58Bi-0.5Ni-0.05Ag	0.84	1.25	1.15	1.68
	Sn58Bi-0.5Ni-0.1Ag	0.85	1.11	1.26	1.72
	Sn58Bi-1.0Ni-0.05Ag	0.73	1.37	1.31	1.72
	Sn58Bi-1.0Ni-0.1Ag	0.69	1.35	1.26	1.92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.2 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn ที่อุณหภูมิบ่ม 100 °C

ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn (μm)					
อุณหภูมิ °C	โลหะบัดกรี	เวลา (hr)			
		0	10	100	1000
100	Sn58Bi	0.77	1.25	2.57	4.02
	Sn58Bi-0.05Ni	0.79	1.11	2.17	3.90
	Sn58Bi-0.1Ni	0.85	1.13	1.77	3.86
	Sn58Bi-0.5Ni	0.84	1.35	1.57	3.88
	Sn58Bi-1.0Ni	0.73	1.55	2.44	3.85
	Sn58Bi-0.05Ni-0.05In	0.79	1.23	2.07	4.00
	Sn58Bi-0.05Ni-0.1In	0.85	1.08	2.17	4.12
	Sn58Bi-0.1Ni-0.05In	0.85	1.21	1.91	3.92
	Sn58Bi-0.1Ni-0.1In	0.71	1.22	2.09	3.85
	Sn58Bi-0.5Ni-0.05In	0.84	1.76	1.92	3.96
	Sn58Bi-0.5Ni-0.1In	0.78	1.13	1.79	4.06
	Sn58Bi-1.0Ni-0.05In	0.69	1.64	2.17	4.31
	Sn58Bi-1.0Ni-0.1In	0.69	1.79	1.83	4.26
	Sn58Bi-0.05Ni-0.05Ag	0.75	1.12	2.14	3.68
	Sn58Bi-0.05Ni-0.1Ag	0.71	1.10	1.78	3.37
	Sn58Bi-0.1Ni-0.05Ag	0.83	1.47	1.89	4.04
	Sn58Bi-0.1Ni-0.1Ag	0.84	1.08	1.75	4.19
	Sn58Bi-0.5Ni-0.05Ag	0.84	1.31	1.74	3.15
	Sn58Bi-0.5Ni-0.1Ag	0.85	1.18	2.22	3.42
	Sn58Bi-1.0Ni-0.05Ag	0.73	1.89	1.94	3.50
	Sn58Bi-1.0Ni-0.1Ag	0.69	1.82	1.87	3.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.3 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn ที่อุณหภูมิบ่ม 125 °C

ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5+Cu_3Sn (μm)					
อุณหภูมิ °C	โลหะบัดกรี	เวลา (hr)			
		0	10	100	1000
125	Sn58Bi	0.77	2.77	4.85	23.71
	Sn58Bi-0.05Ni	0.79	2.06	3.94	20.04
	Sn58Bi-0.1Ni	0.85	2.55	3.99	15.71
	Sn58Bi-0.5Ni	0.84	2.14	4.46	11.43
	Sn58Bi-1.0Ni	0.73	1.74	6.10	12.99
	Sn58Bi-0.05Ni-0.05In	0.79	1.90	4.55	23.76
	Sn58Bi-0.05Ni-0.1In	0.85	2.97	3.42	14.50
	Sn58Bi-0.1Ni-0.05In	0.85	2.29	4.27	19.68
	Sn58Bi-0.1Ni-0.1In	0.71	2.59	4.67	17.64
	Sn58Bi-0.5Ni-0.05In	0.84	2.01	4.60	15.34
	Sn58Bi-0.5Ni-0.1In	0.78	2.09	4.14	20.86
	Sn58Bi-1.0Ni-0.05In	0.69	1.52	5.91	15.71
	Sn58Bi-1.0Ni-0.1In	0.69	1.80	5.01	16.52
	Sn58Bi-0.05Ni-0.05Ag	0.75	1.92	4.73	13.45
	Sn58Bi-0.05Ni-0.1Ag	0.71	2.45	4.41	15.64
	Sn58Bi-0.1Ni-0.05Ag	0.83	1.74	4.23	16.48
	Sn58Bi-0.1Ni-0.1Ag	0.84	2.28	6.23	14.40
	Sn58Bi-0.5Ni-0.05Ag	0.84	2.33	4.40	14.49
	Sn58Bi-0.5Ni-0.1Ag	0.85	2.48	4.36	13.88
	Sn58Bi-1.0Ni-0.05Ag	0.73	2.42	4.31	13.79
	Sn58Bi-1.0Ni-0.1Ag	0.69	2.45	3.75	12.72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.4 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ที่อุณหภูมิบ่ม 75 °C

ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 (μm)					
อุณหภูมิ °C	โลหะบัดกรี	เวลา (hr)			
		0	10	100	1000
75	Sn58Bi	0.77	1.26	1.37	2.01
	Sn58Bi-0.05Ni	0.79	1.16	1.18	1.56
	Sn58Bi-0.1Ni	0.85	1.16	2.08	1.84
	Sn58Bi-0.5Ni	0.84	1.30	1.36	1.89
	Sn58Bi-1.0Ni	0.73	1.79	2.16	1.54
	Sn58Bi-0.05Ni-0.05In	0.79	1.36	1.30	2.02
	Sn58Bi-0.05Ni-0.1In	0.85	1.22	1.56	1.78
	Sn58Bi-0.1Ni-0.05In	0.85	1.39	1.49	1.95
	Sn58Bi-0.1Ni-0.1In	0.71	0.96	1.09	1.73
	Sn58Bi-0.5Ni-0.05In	0.84	1.00	1.40	1.70
	Sn58Bi-0.5Ni-0.1In	0.78	1.25	1.26	1.69
	Sn58Bi-1.0Ni-0.05In	0.69	1.12	1.43	1.88
	Sn58Bi-1.0Ni-0.1In	0.69	1.72	1.84	1.84
	Sn58Bi-0.05Ni-0.05Ag	0.75	1.13	1.42	1.62
	Sn58Bi-0.05Ni-0.1Ag	0.71	1.57	1.41	1.60
	Sn58Bi-0.1Ni-0.05Ag	0.83	1.49	1.12	1.69
	Sn58Bi-0.1Ni-0.1Ag	0.84	1.05	1.53	1.86
	Sn58Bi-0.5Ni-0.05Ag	0.84	1.25	1.15	1.68
	Sn58Bi-0.5Ni-0.1Ag	0.85	1.11	1.26	1.72
	Sn58Bi-1.0Ni-0.05Ag	0.73	1.37	1.31	1.72
	Sn58Bi-1.0Ni-0.1Ag	0.69	1.35	1.26	1.92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.5 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ที่อุณหภูมิบ่ม 100 °C

ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 (μm)					
อุณหภูมิ °C	โลหะบัดกรี	เวลา (hr)			
		0	10	100	1000
100	Sn58Bi	0.77	1.25	2.57	3.28
	Sn58Bi-0.05Ni	0.79	1.11	2.17	3.58
	Sn58Bi-0.1Ni	0.85	1.13	1.77	3.57
	Sn58Bi-0.5Ni	0.84	1.35	1.57	3.59
	Sn58Bi-1.0Ni	0.73	1.55	2.44	3.42
	Sn58Bi-0.05Ni-0.05In	0.79	1.23	2.07	3.75
	Sn58Bi-0.05Ni-0.1In	0.85	1.08	2.17	3.80
	Sn58Bi-0.1Ni-0.05In	0.85	1.21	1.91	3.54
	Sn58Bi-0.1Ni-0.1In	0.71	1.22	2.09	3.58
	Sn58Bi-0.5Ni-0.05In	0.84	1.76	1.92	3.59
	Sn58Bi-0.5Ni-0.1In	0.78	1.13	1.79	3.67
	Sn58Bi-1.0Ni-0.05In	0.69	1.64	2.17	3.97
	Sn58Bi-1.0Ni-0.1In	0.69	1.79	1.83	3.95
	Sn58Bi-0.05Ni-0.05Ag	0.75	1.12	2.14	3.46
	Sn58Bi-0.05Ni-0.1Ag	0.71	1.10	1.78	3.02
	Sn58Bi-0.1Ni-0.05Ag	0.83	1.47	1.89	3.60
	Sn58Bi-0.1Ni-0.1Ag	0.84	1.08	1.75	3.71
	Sn58Bi-0.5Ni-0.05Ag	0.84	1.31	1.74	2.78
	Sn58Bi-0.5Ni-0.1Ag	0.85	1.18	2.22	3.09
	Sn58Bi-1.0Ni-0.05Ag	0.73	1.89	1.94	3.13
	Sn58Bi-1.0Ni-0.1Ag	0.69	1.82	1.87	2.91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.6 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ที่อุณหภูมิบ่ม 125 °C

ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 (μm)					
อุณหภูมิ °C	โลหะบัดกรี	เวลา (hr)			
		0	10	100	1000
125	Sn58Bi	0.77	2.77	4.19	22.18
	Sn58Bi-0.05Ni	0.79	2.06	3.65	19.45
	Sn58Bi-0.1Ni	0.85	2.55	3.73	14.90
	Sn58Bi-0.5Ni	0.84	2.14	4.02	10.81
	Sn58Bi-1.0Ni	0.73	1.74	5.67	12.07
	Sn58Bi-0.05Ni-0.05In	0.79	1.90	4.05	22.70
	Sn58Bi-0.05Ni-0.1In	0.85	2.97	2.77	13.42
	Sn58Bi-0.1Ni-0.05In	0.85	2.29	3.90	18.55
	Sn58Bi-0.1Ni-0.1In	0.71	2.59	3.98	16.49
	Sn58Bi-0.5Ni-0.05In	0.84	2.01	3.87	14.71
	Sn58Bi-0.5Ni-0.1In	0.78	2.09	3.72	20.18
	Sn58Bi-1.0Ni-0.05In	0.69	1.52	5.41	15.16
	Sn58Bi-1.0Ni-0.1In	0.69	1.80	4.38	15.43
	Sn58Bi-0.05Ni-0.05Ag	0.75	1.92	4.18	12.66
	Sn58Bi-0.05Ni-0.1Ag	0.71	2.45	3.94	14.34
	Sn58Bi-0.1Ni-0.05Ag	0.83	1.74	3.78	15.37
	Sn58Bi-0.1Ni-0.1Ag	0.84	2.28	5.75	13.40
	Sn58Bi-0.5Ni-0.05Ag	0.84	2.33	3.78	13.76
	Sn58Bi-0.5Ni-0.1Ag	0.85	2.48	3.90	12.91
	Sn58Bi-1.0Ni-0.05Ag	0.73	2.42	3.92	13.41
	Sn58Bi-1.0Ni-0.1Ag	0.69	2.45	3.53	11.52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.7 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn ที่อุณหภูมิบ่ม 100 °C

ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn (μm)					
อุณหภูมิ °C	โลหะบัดกรี	เวลา (hr)			
		0	10	100	1000
100	Sn58Bi	-	-	-	0.74
	Sn58Bi-0.05Ni	-	-	-	0.32
	Sn58Bi-0.1Ni	-	-	-	0.29
	Sn58Bi-0.5Ni	-	-	-	0.28
	Sn58Bi-1.0Ni	-	-	-	0.43
	Sn58Bi-0.05Ni-0.05In	-	-	-	0.25
	Sn58Bi-0.05Ni-0.1In	-	-	-	0.32
	Sn58Bi-0.1Ni-0.05In	-	-	-	0.38
	Sn58Bi-0.1Ni-0.1In	-	-	-	0.27
	Sn58Bi-0.5Ni-0.05In	-	-	-	0.37
	Sn58Bi-0.5Ni-0.1In	-	-	-	0.39
	Sn58Bi-1.0Ni-0.05In	-	-	-	0.34
	Sn58Bi-1.0Ni-0.1In	-	-	-	0.30
	Sn58Bi-0.05Ni-0.05Ag	-	-	-	0.21
	Sn58Bi-0.05Ni-0.1Ag	-	-	-	0.35
	Sn58Bi-0.1Ni-0.05Ag	-	-	-	0.44
	Sn58Bi-0.1Ni-0.1Ag	-	-	-	0.49
	Sn58Bi-0.5Ni-0.05Ag	-	-	-	0.37
	Sn58Bi-0.5Ni-0.1Ag	-	-	-	0.33
	Sn58Bi-1.0Ni-0.05Ag	-	-	-	0.37
	Sn58Bi-1.0Ni-0.1Ag	-	-	-	0.42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.8 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn ที่อุณหภูมิบ่ม 125 °C

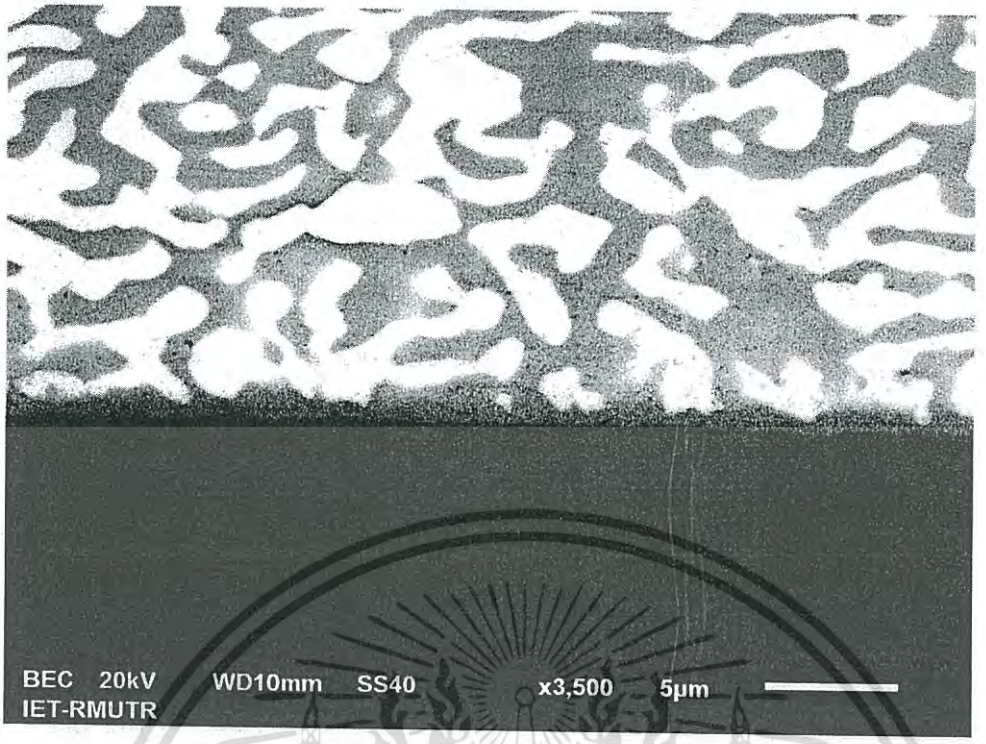
ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn (μm)					
อุณหภูมิ °C	โลหะบัดกรี	เวลา (hr)			
		0	10	100	1000
125	Sn58Bi	-	-	0.66	1.53
	Sn58Bi-0.05Ni	-	-	0.29	0.59
	Sn58Bi-0.1Ni	-	-	0.26	0.81
	Sn58Bi-0.5Ni	-	-	0.44	0.62
	Sn58Bi-1.0Ni	-	-	0.43	0.92
	Sn58Bi-0.05Ni-0.05In	-	-	0.50	1.06
	Sn58Bi-0.05Ni-0.1In	-	-	0.65	1.07
	Sn58Bi-0.1Ni-0.05In	-	-	0.37	1.13
	Sn58Bi-0.1Ni-0.1In	-	-	0.68	1.15
	Sn58Bi-0.5Ni-0.05In	-	-	0.72	0.63
	Sn58Bi-0.5Ni-0.1In	-	-	0.42	0.68
	Sn58Bi-1.0Ni-0.05In	-	-	0.50	0.55
	Sn58Bi-1.0Ni-0.1In	-	-	0.63	1.08
	Sn58Bi-0.05Ni-0.05Ag	-	-	0.55	0.79
	Sn58Bi-0.05Ni-0.1Ag	-	-	0.48	1.29
	Sn58Bi-0.1Ni-0.05Ag	-	-	0.45	1.10
	Sn58Bi-0.1Ni-0.1Ag	-	-	0.49	1.00
	Sn58Bi-0.5Ni-0.05Ag	-	-	0.61	0.73
	Sn58Bi-0.5Ni-0.1Ag	-	-	0.46	0.97
	Sn58Bi-1.0Ni-0.05Ag	-	-	0.39	0.38
	Sn58Bi-1.0Ni-0.1Ag	-	-	0.23	1.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

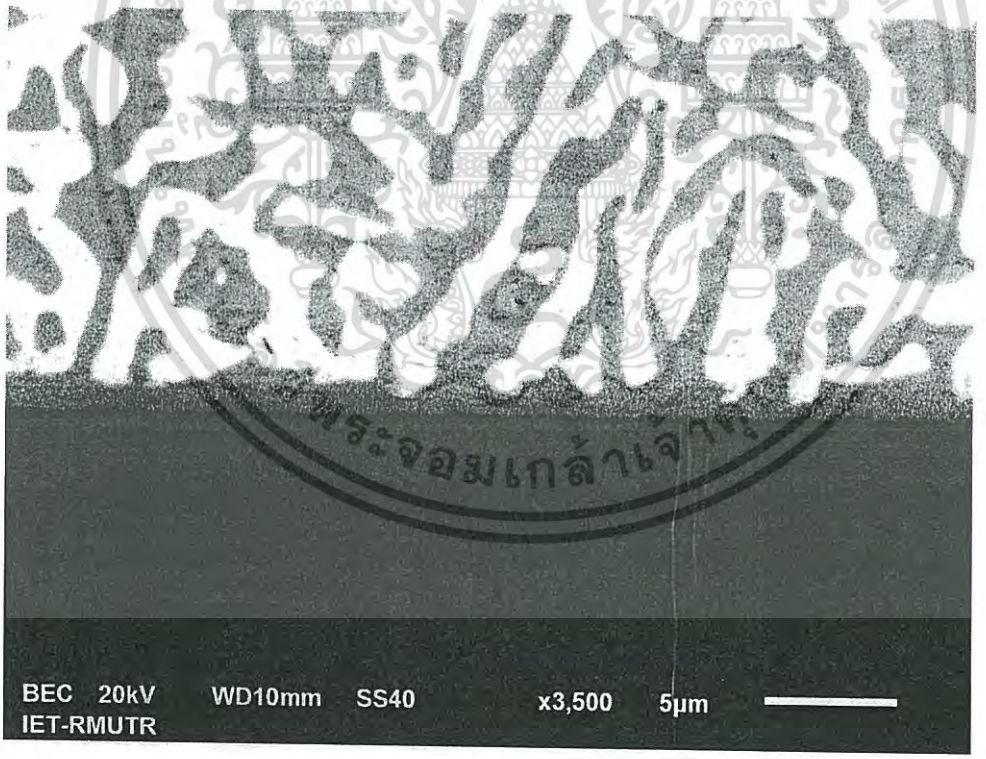
ภาคผนวก จ

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วย SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

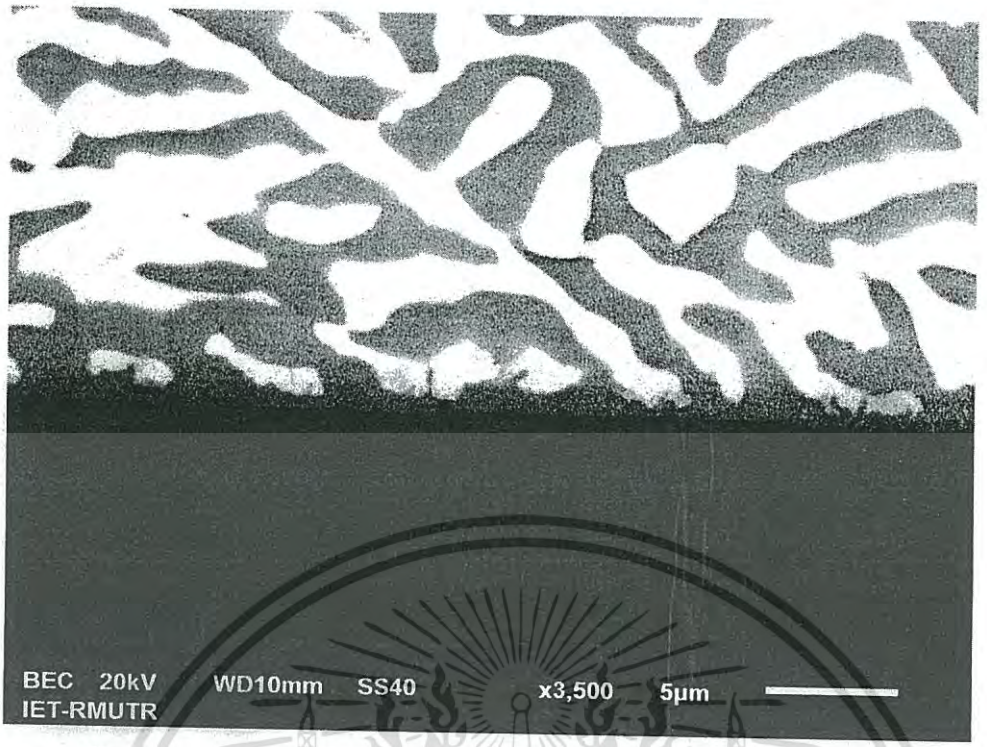


รูปที่ จ.1 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับแผ่นทองแดง หลังการบัดกรี

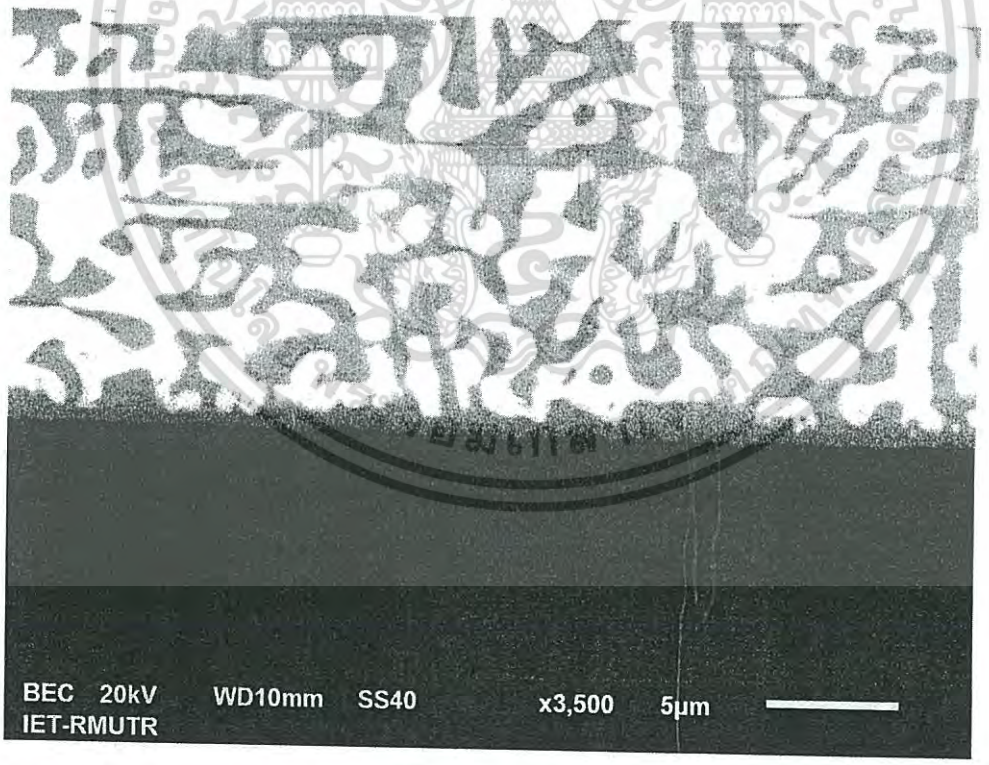


รูปที่ จ.2 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

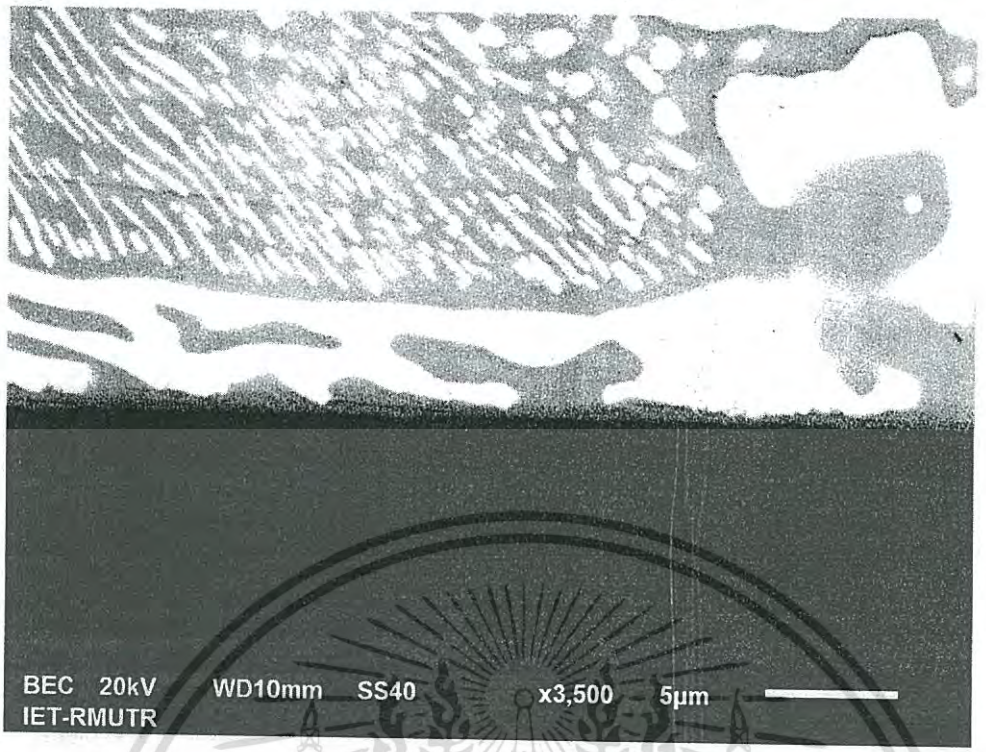


รูปที่ จ.3 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบัดกรี

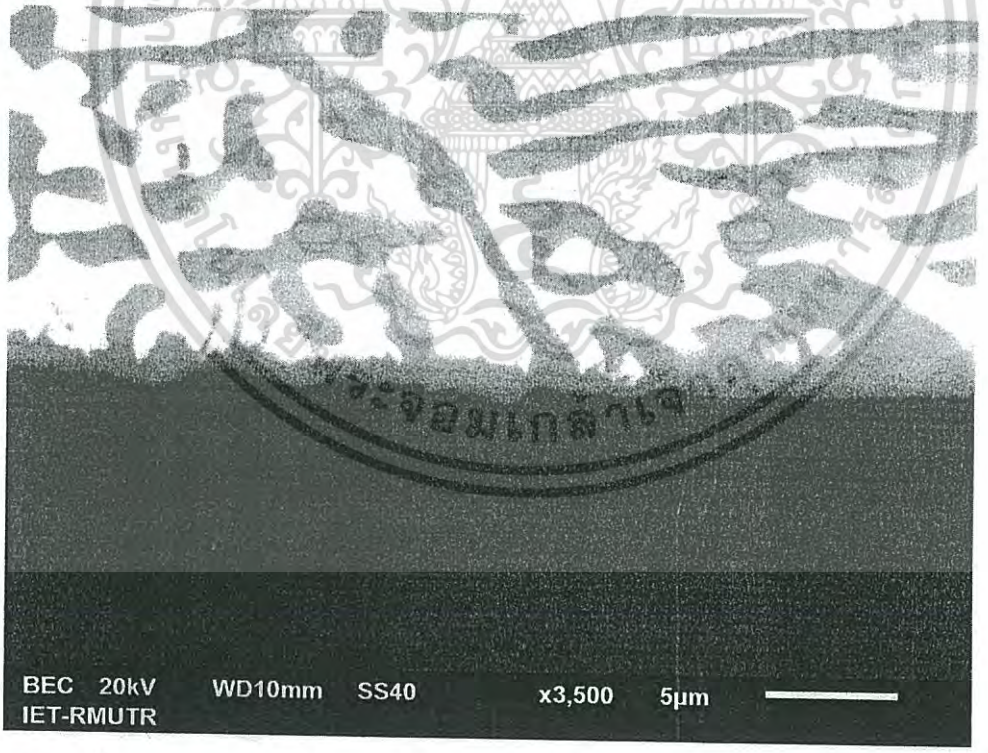


รูปที่ จ.4 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

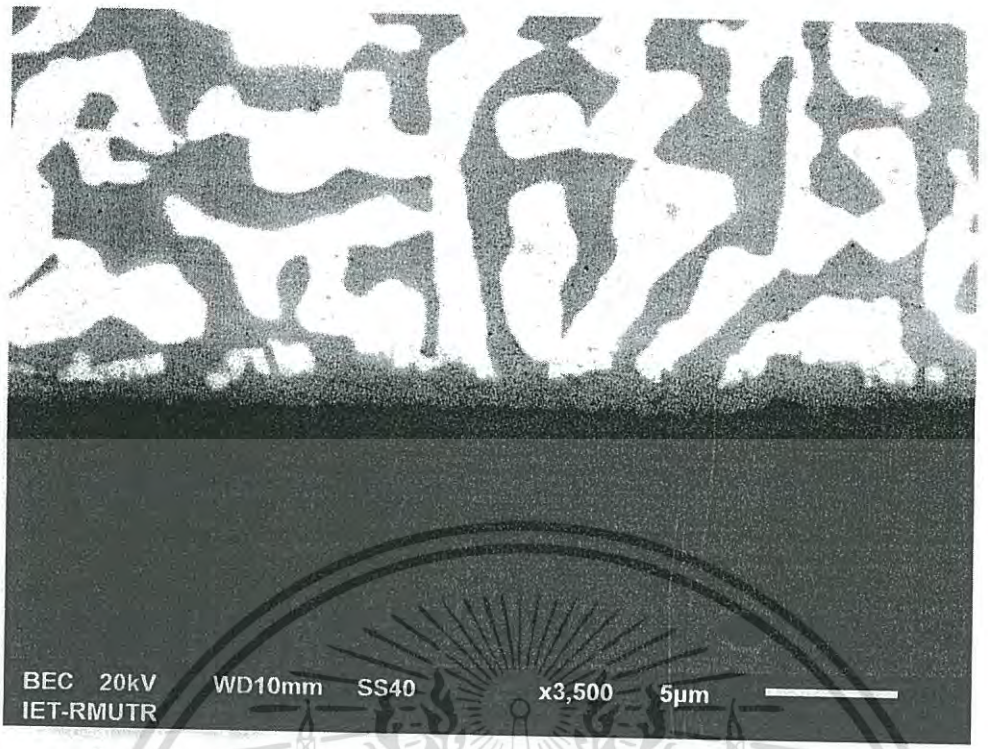


รูปที่ จ.5 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบัดกรี

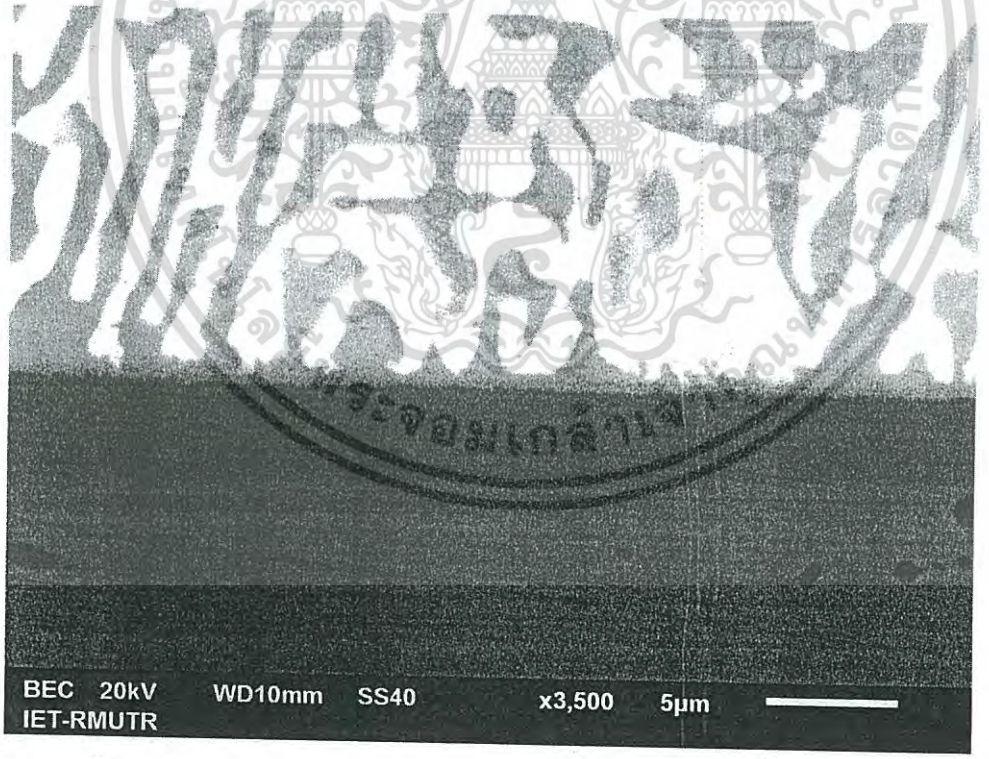


รูปที่ จ.6 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง หลังการบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

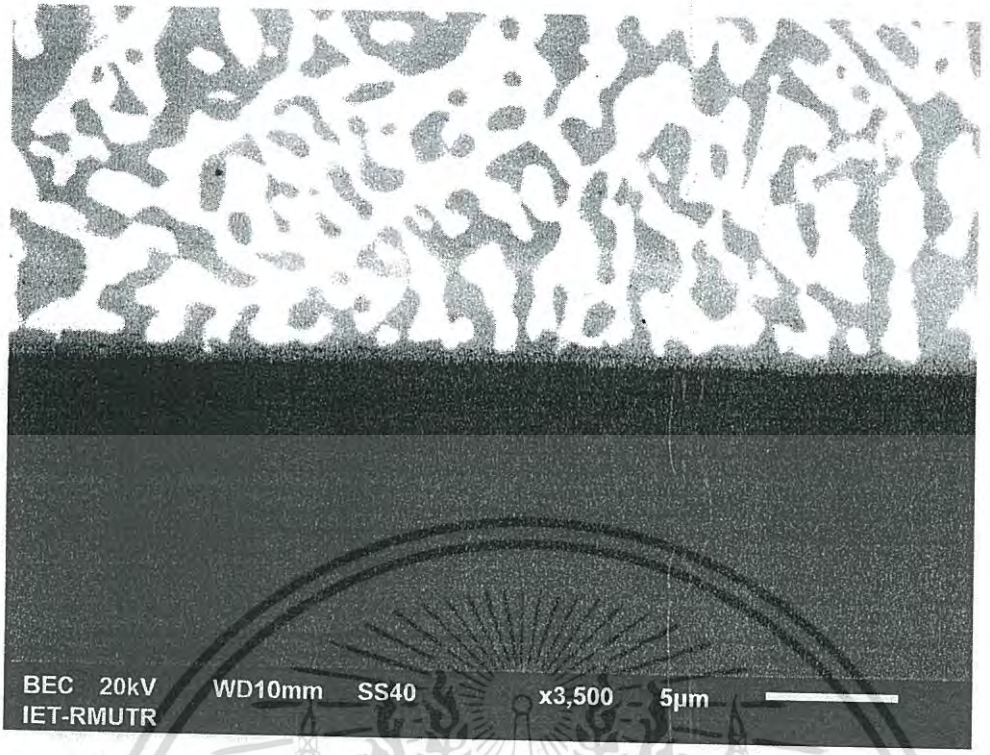


รูปที่ จ.7 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบัดกรี

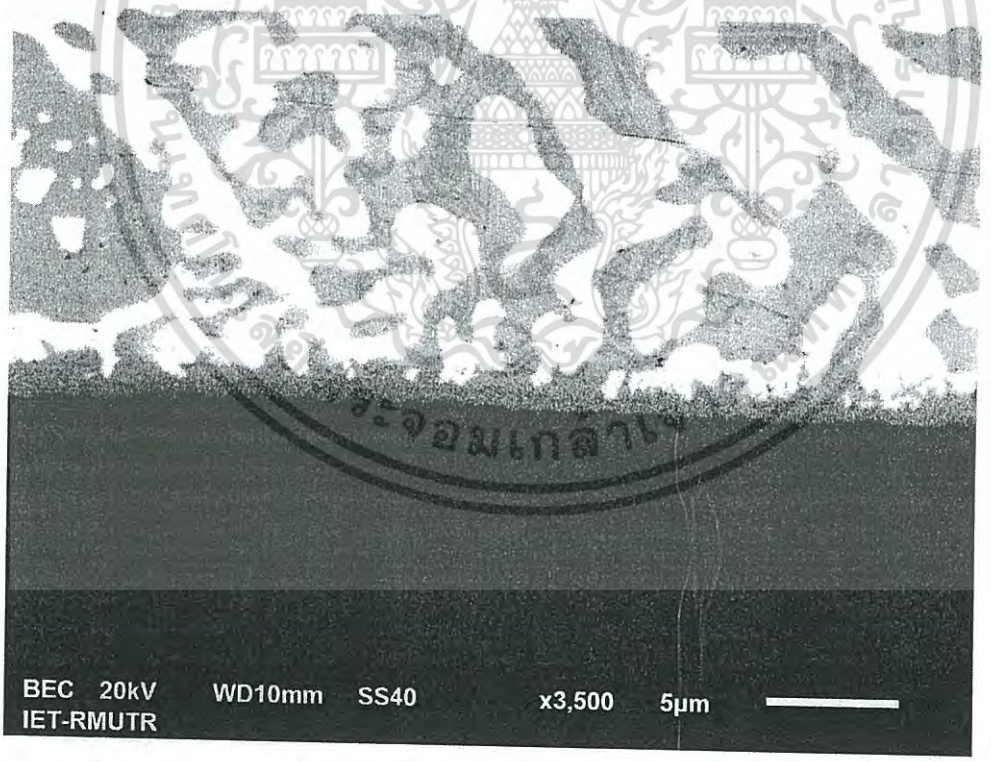


รูปที่ จ.8 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง หลังการบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

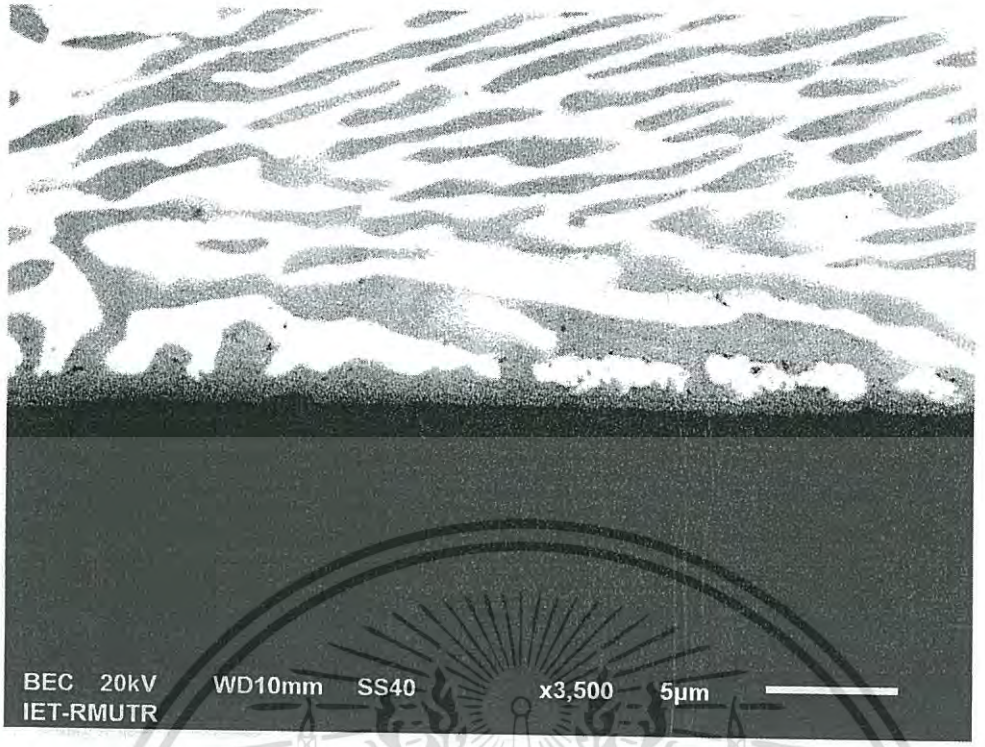


รูปที่ จ.9 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบัดกรี

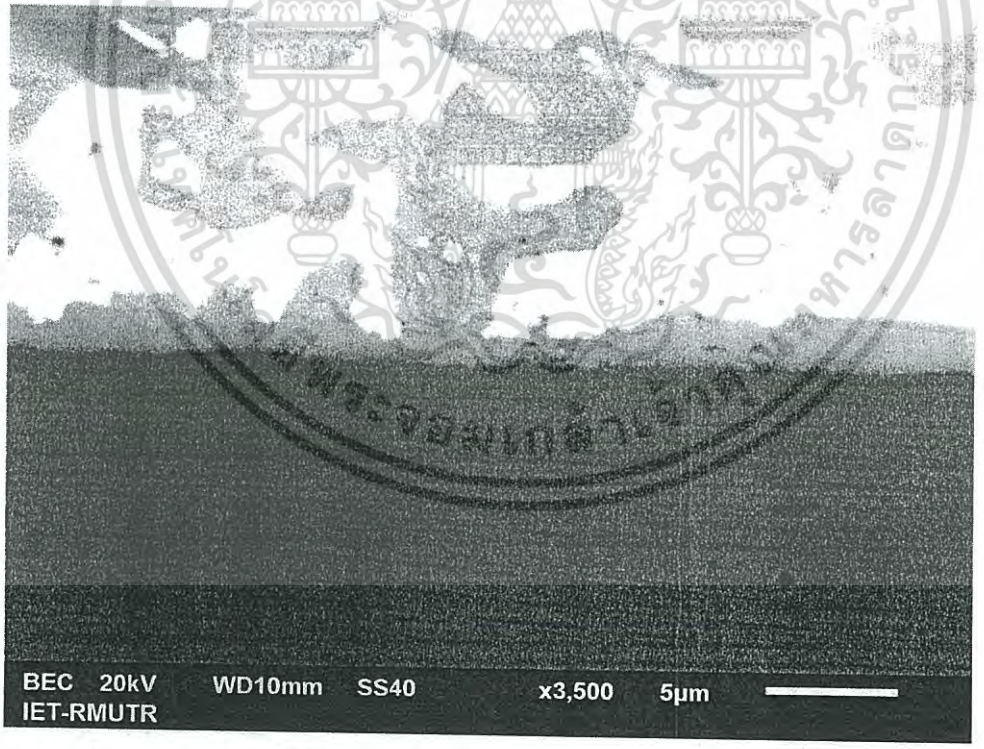


รูปที่ จ.10 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง หลังการบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

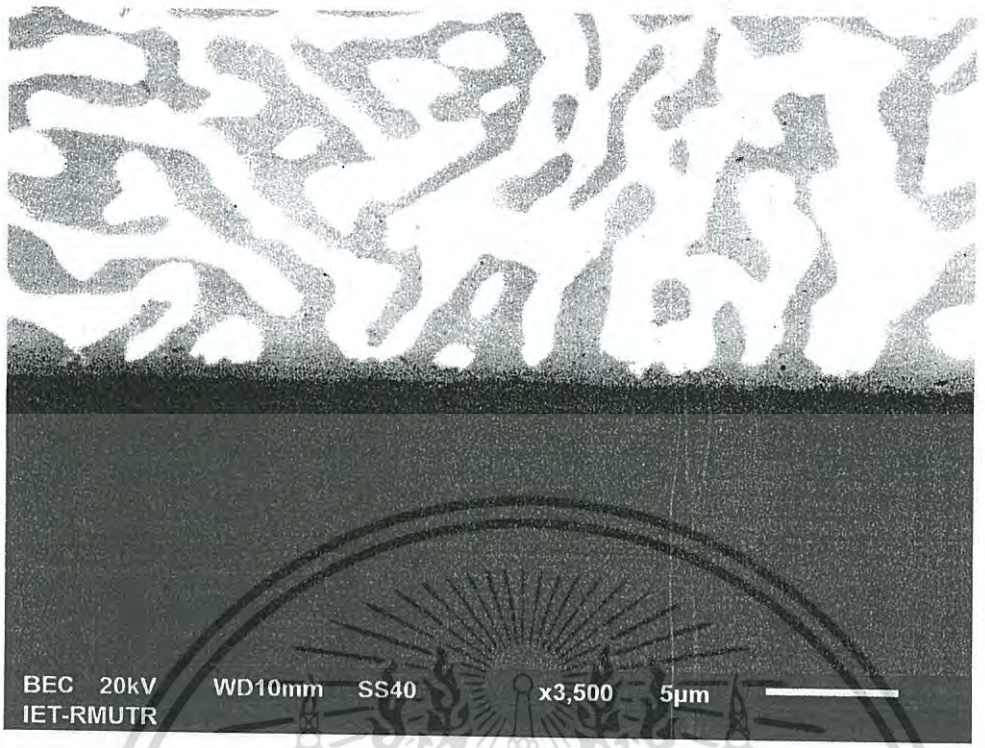


รูปที่ จ.11 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบัดกรี

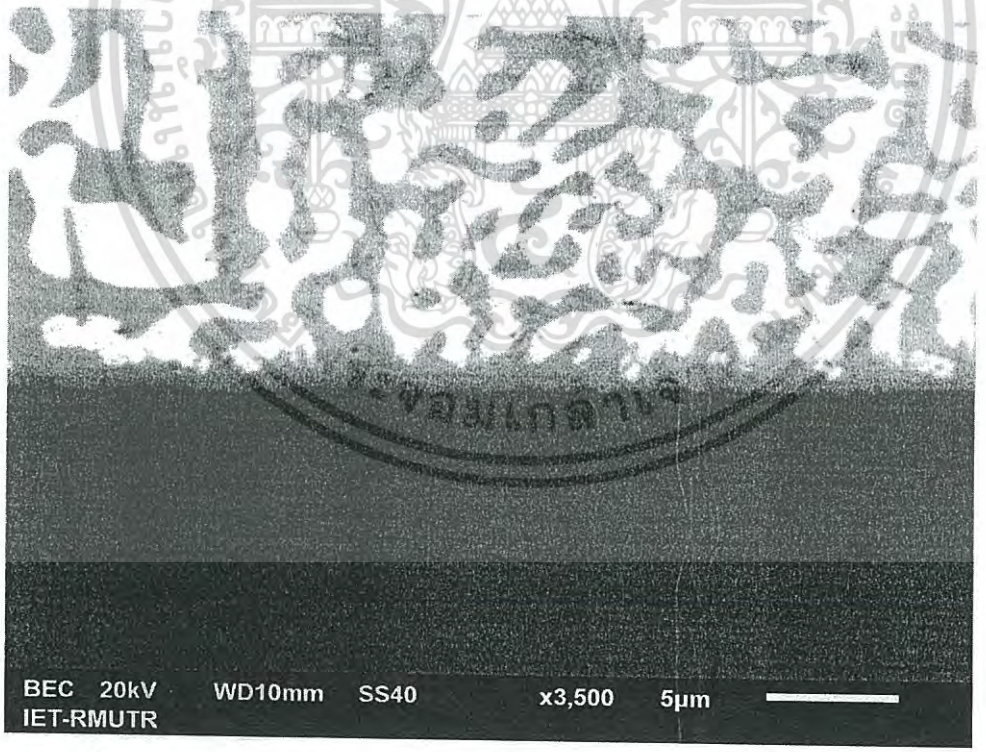


รูปที่ จ.12 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง หลังการบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

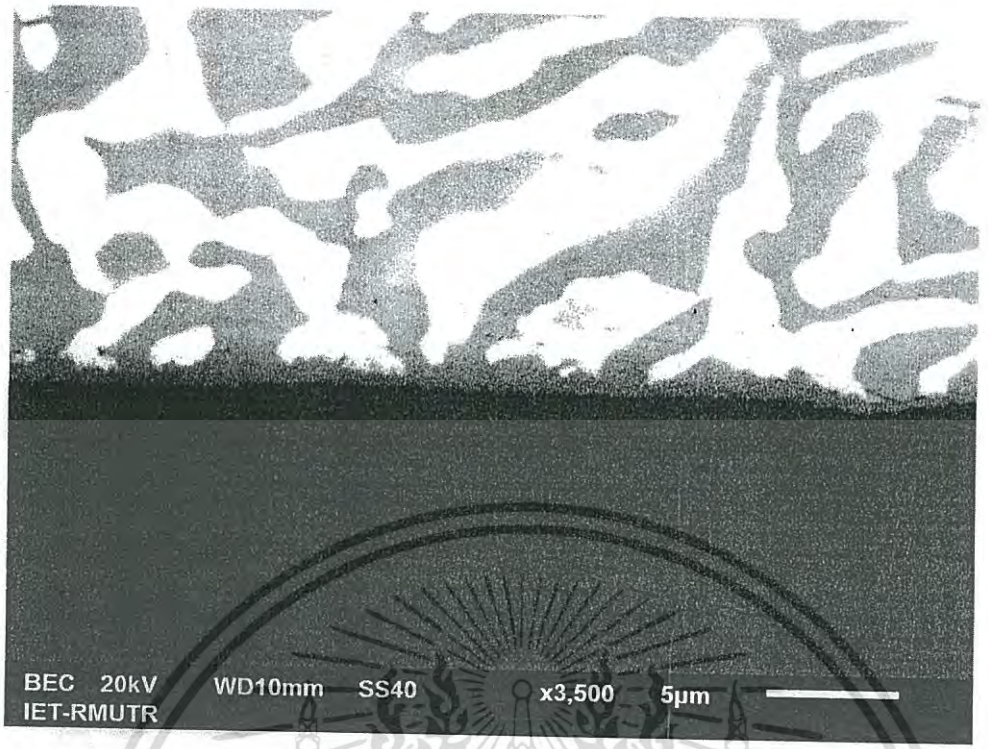


รูปที่ จ.13 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบัดกรี

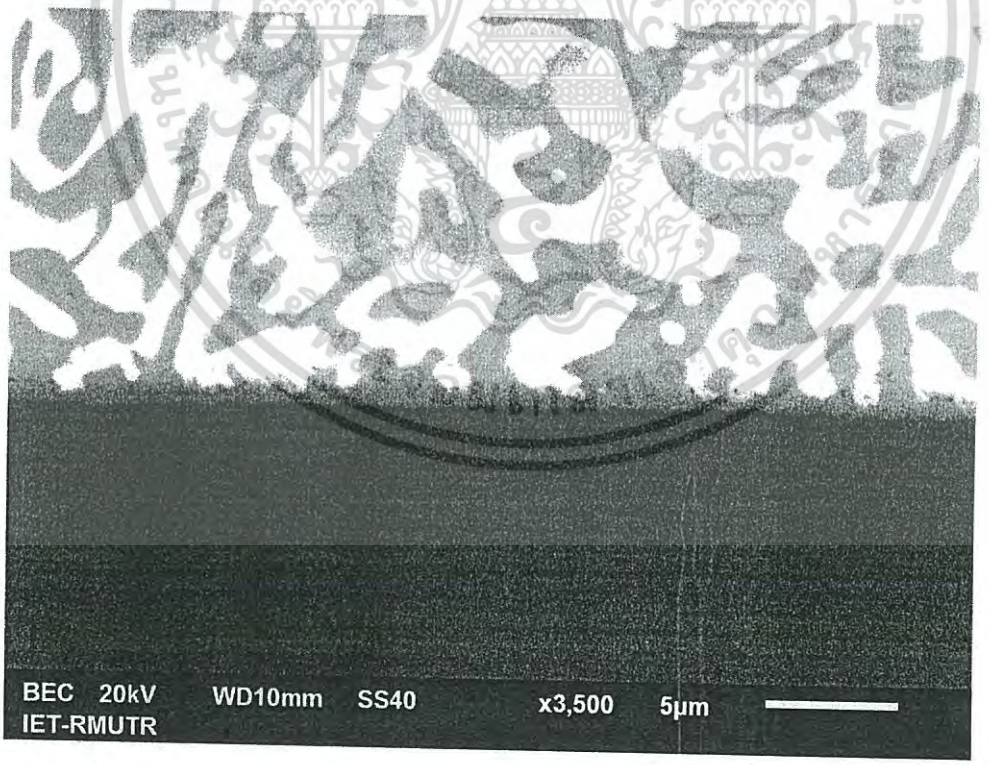


รูปที่ จ.14 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

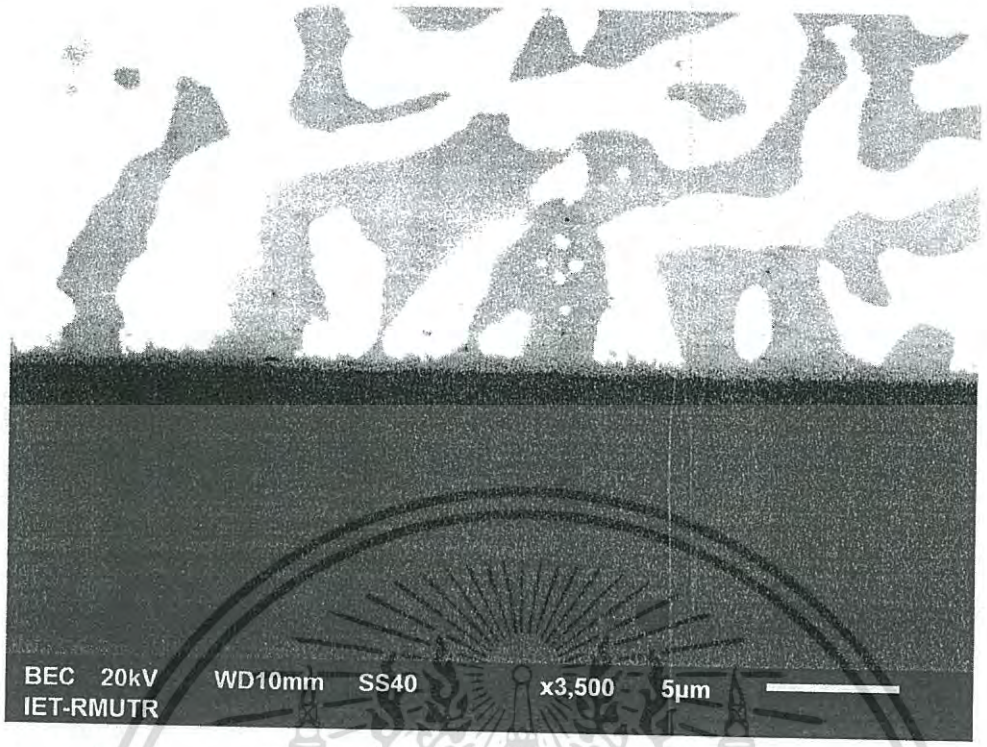


รูปที่ จ.15 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบัดกรี

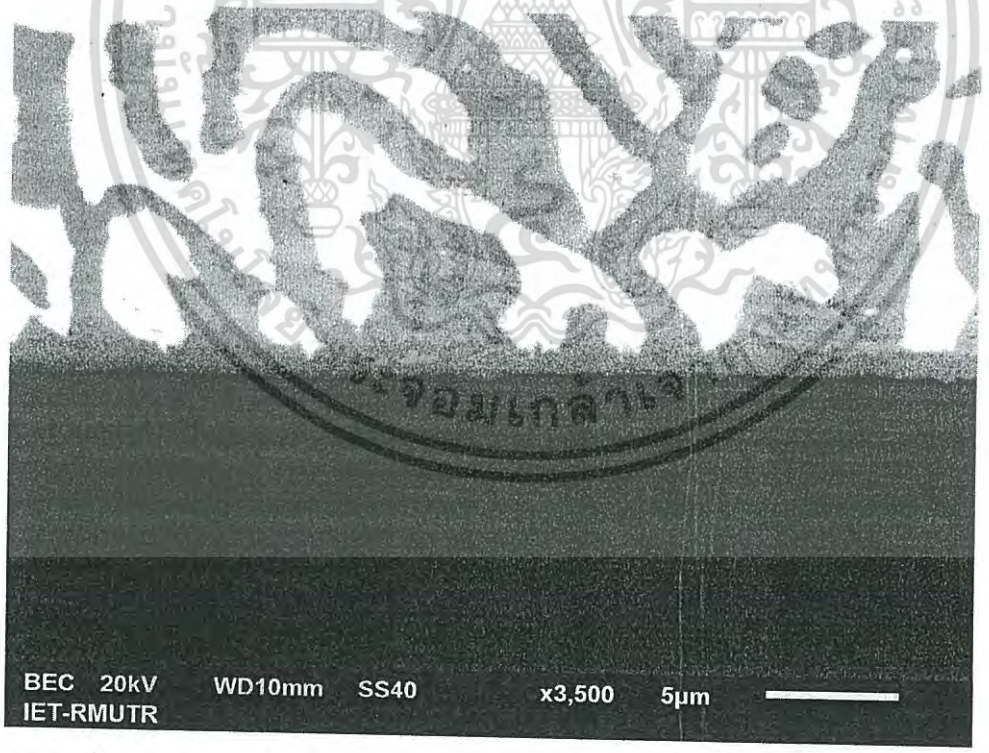


รูปที่ จ.16 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

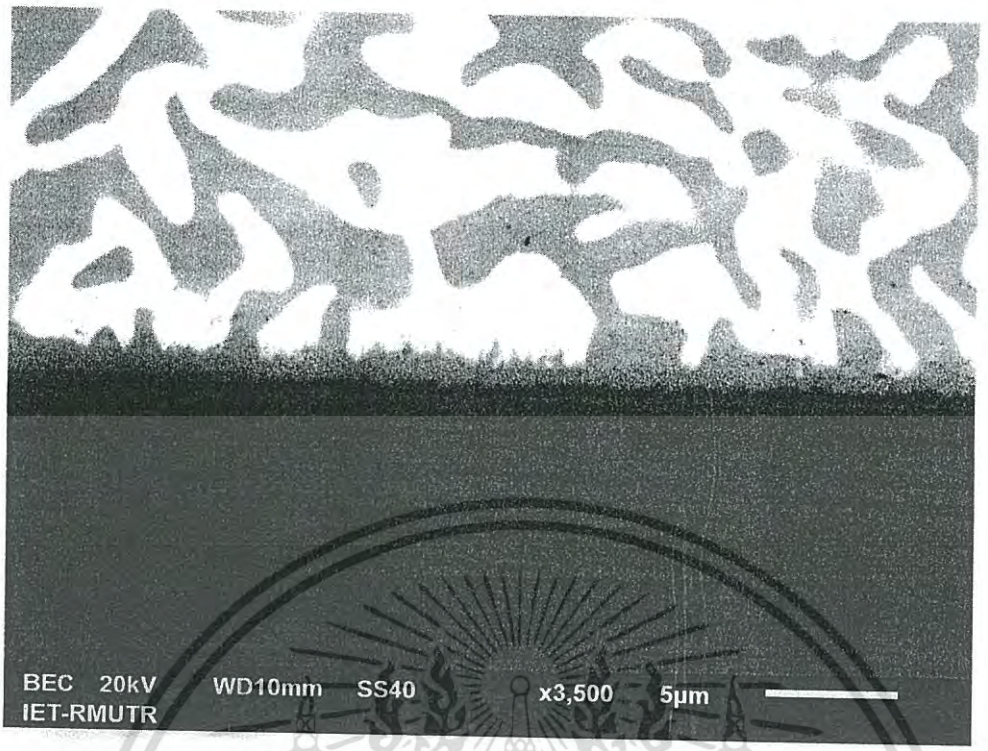


รูปที่ จ.17 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบัดกรี

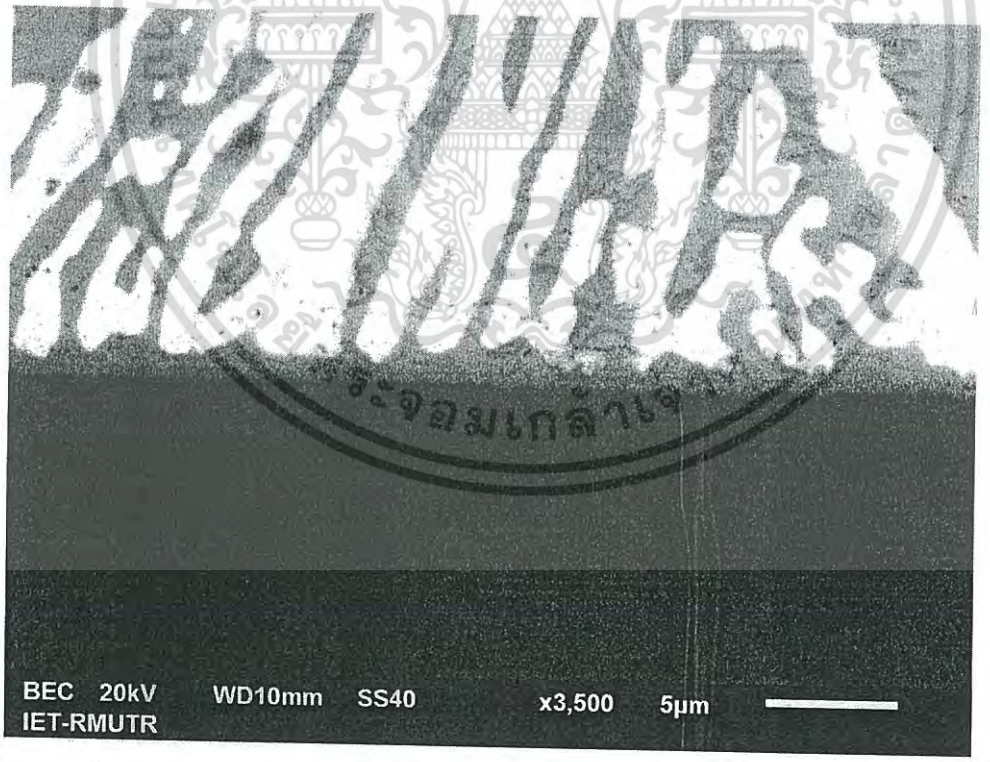


รูปที่ จ.18 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

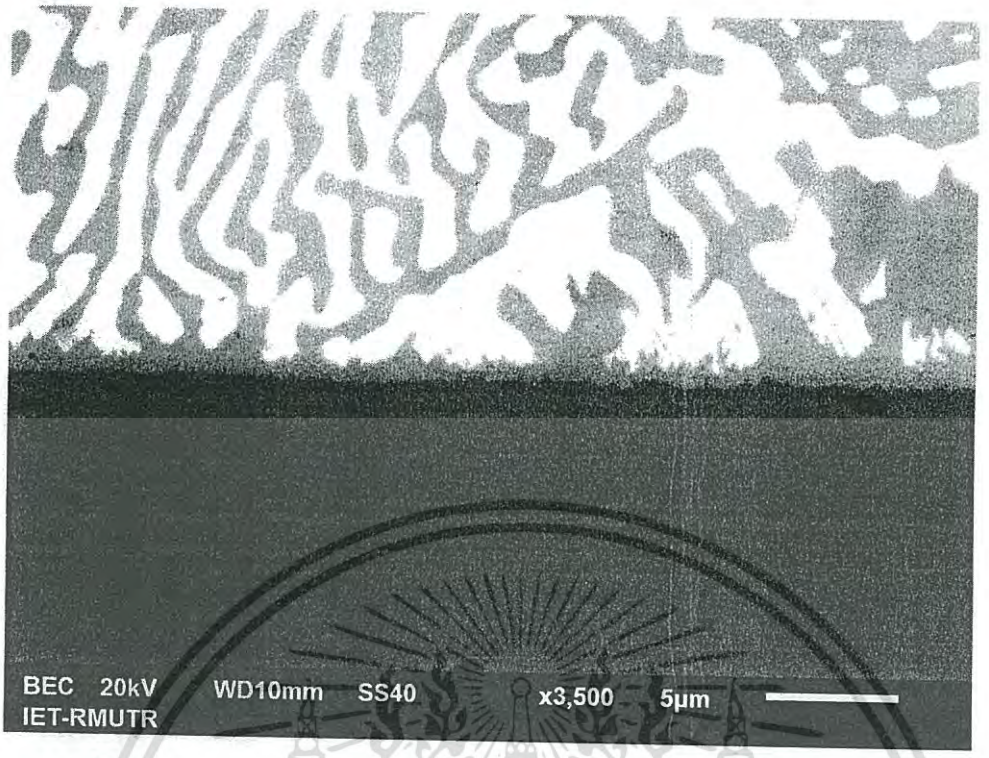


รูปที่ จ.19 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบัดกรี

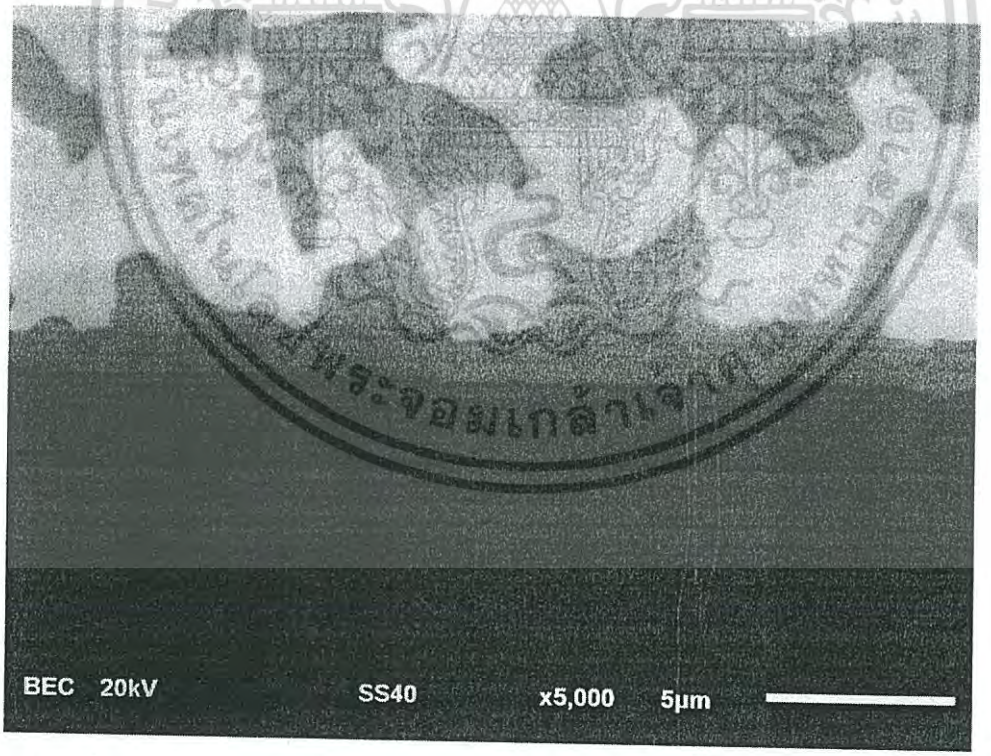


รูปที่ จ.20 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

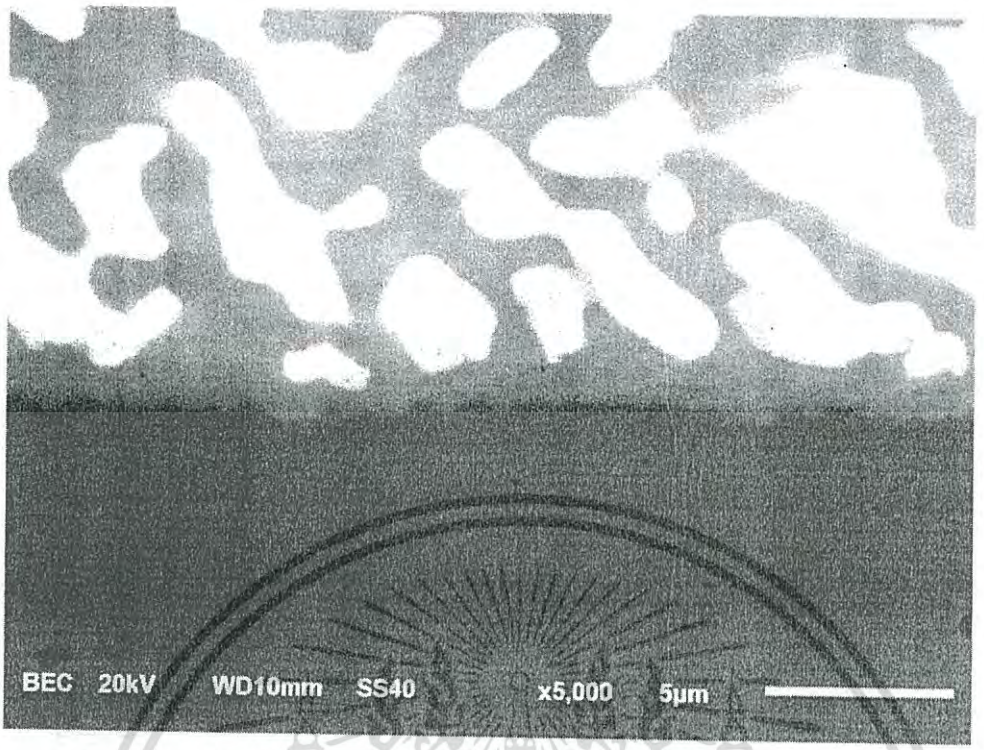


รูปที่ จ.21 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบัดกรี

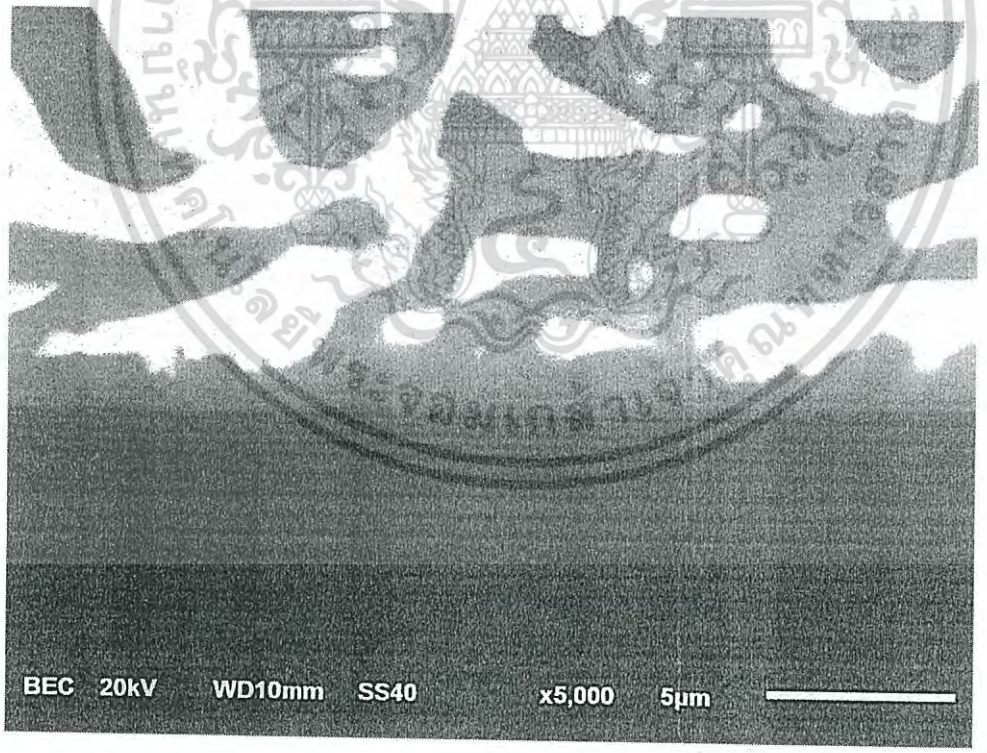


รูปที่ จ.22 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

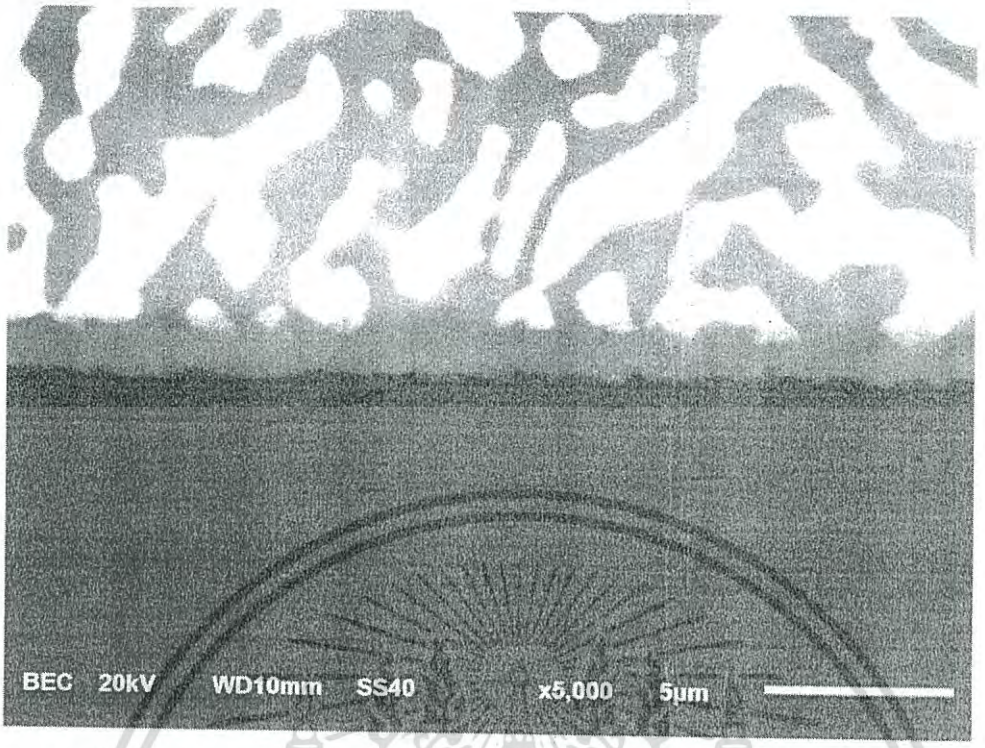


รูปที่ จ.23 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่ม ที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 10 ชั่วโมง

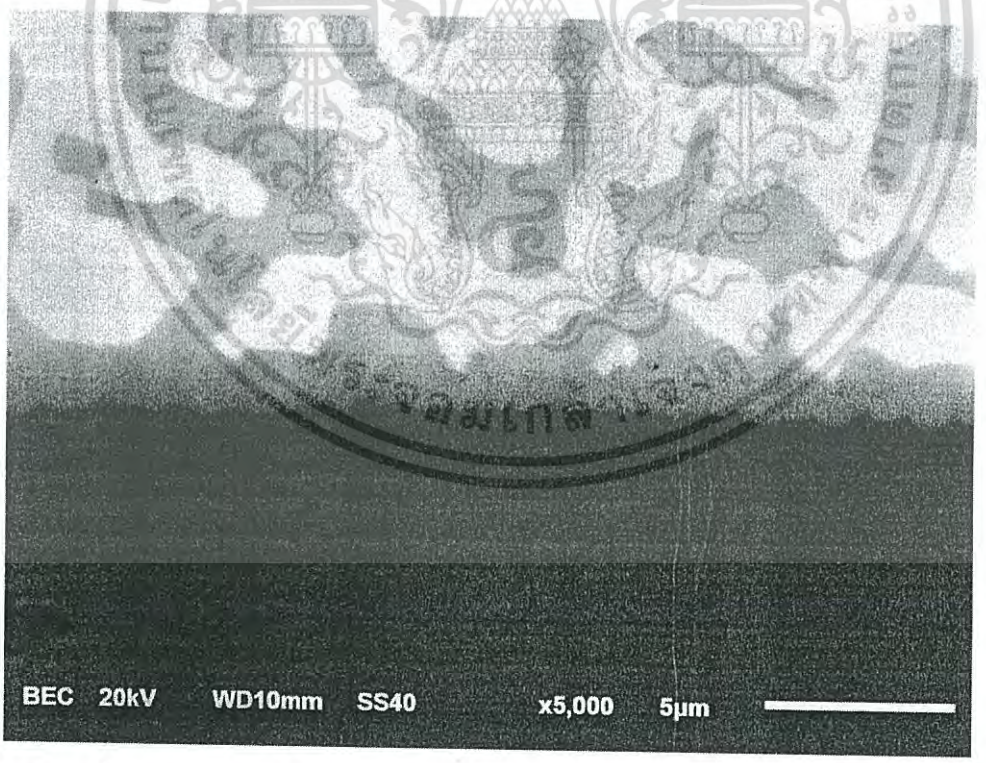


รูปที่ จ.24 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่ม ที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

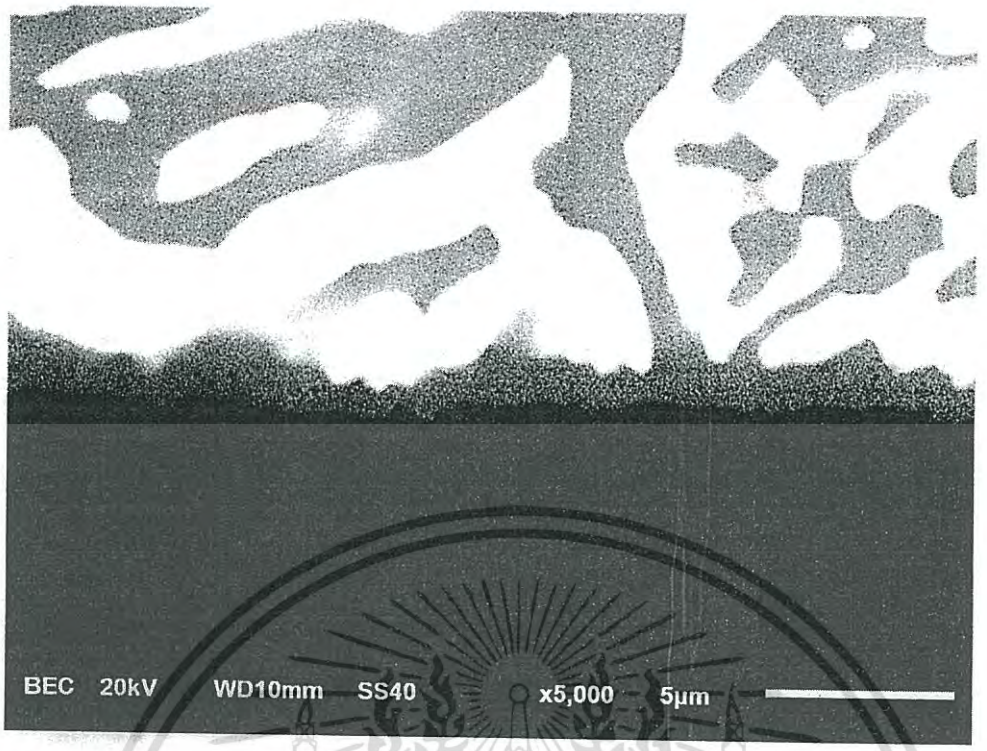


รูปที่ จ.25 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่ม ที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 10 ชั่วโมง

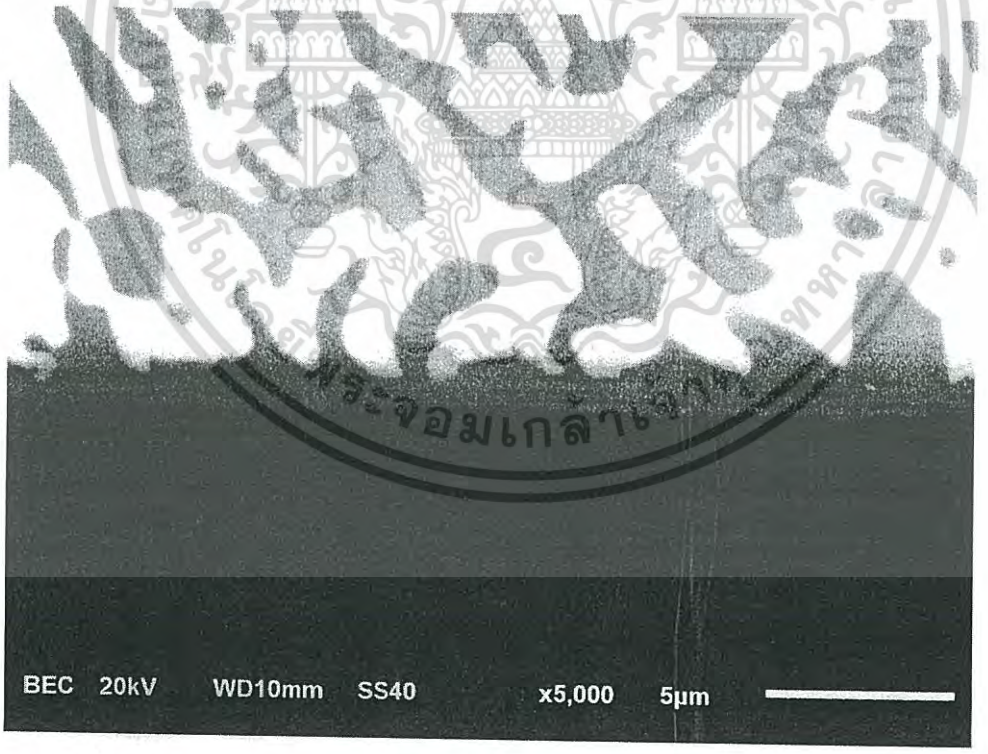


รูปที่ จ.26 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่ม ที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

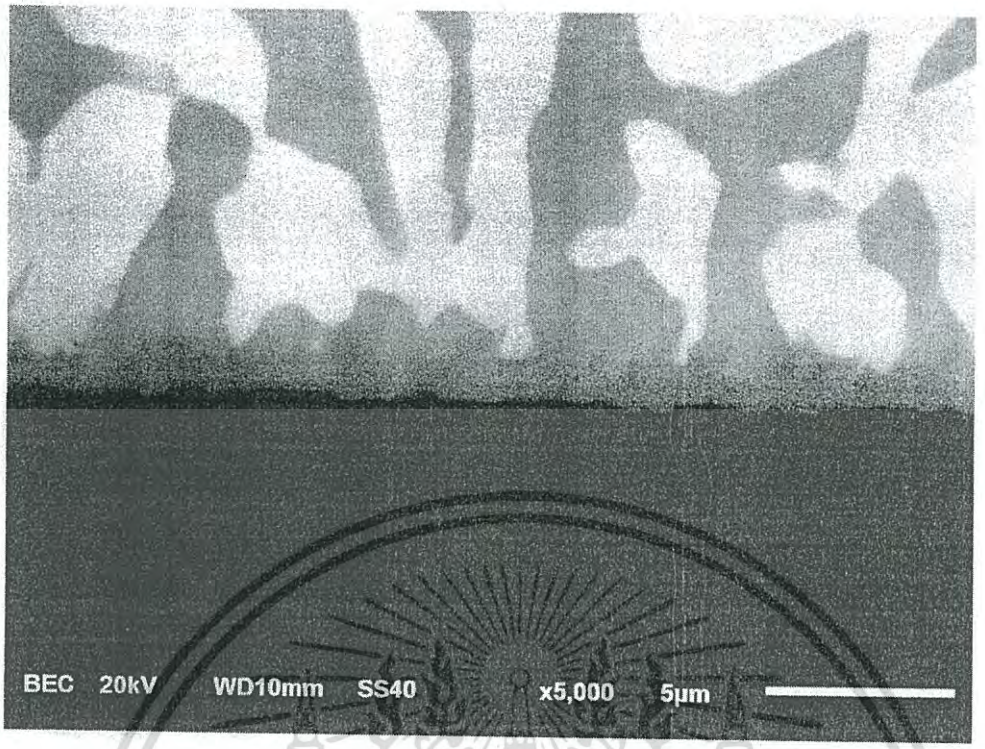


รูปที่ จ.27 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 10 ชั่วโมง

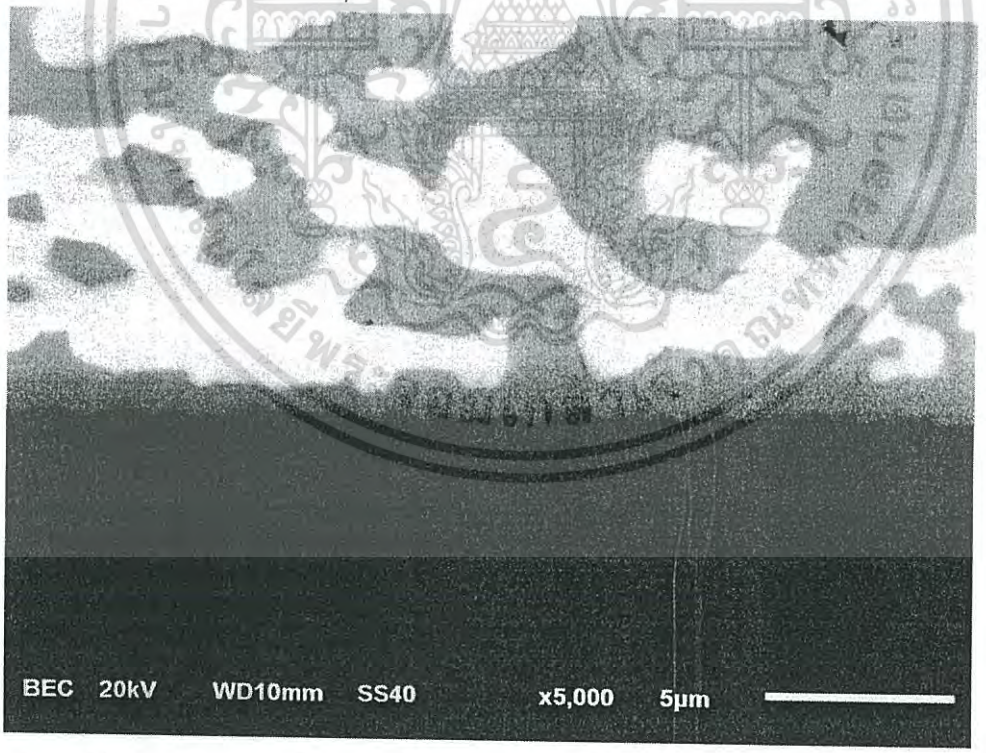


รูปที่ จ.28 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

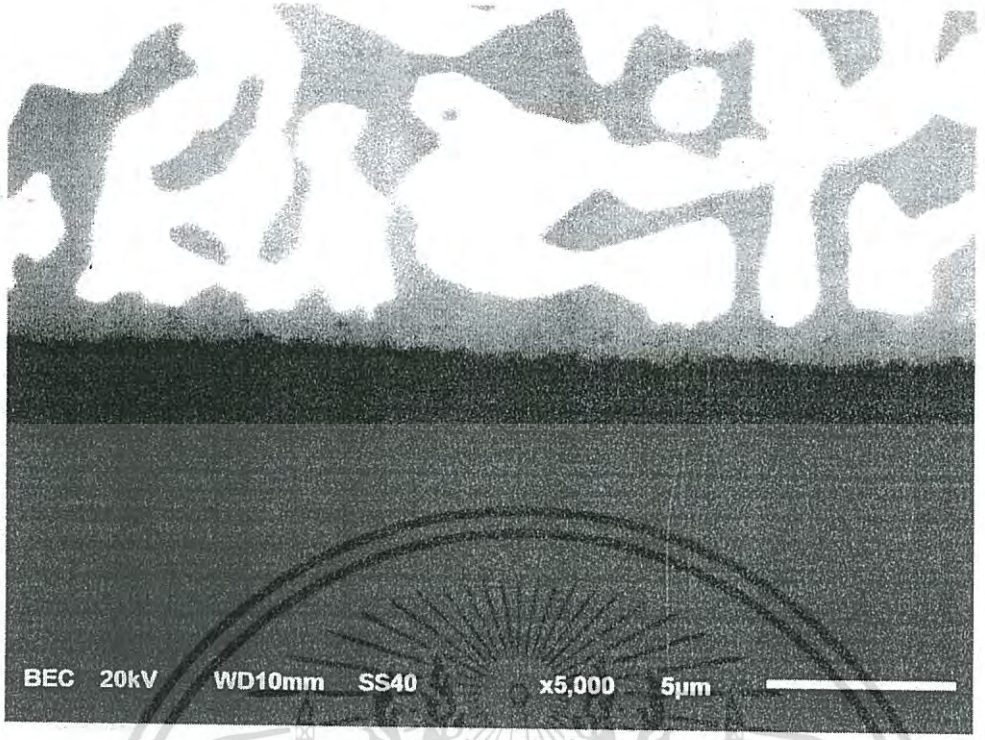


รูปที่ จ.29 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 10 ชั่วโมง

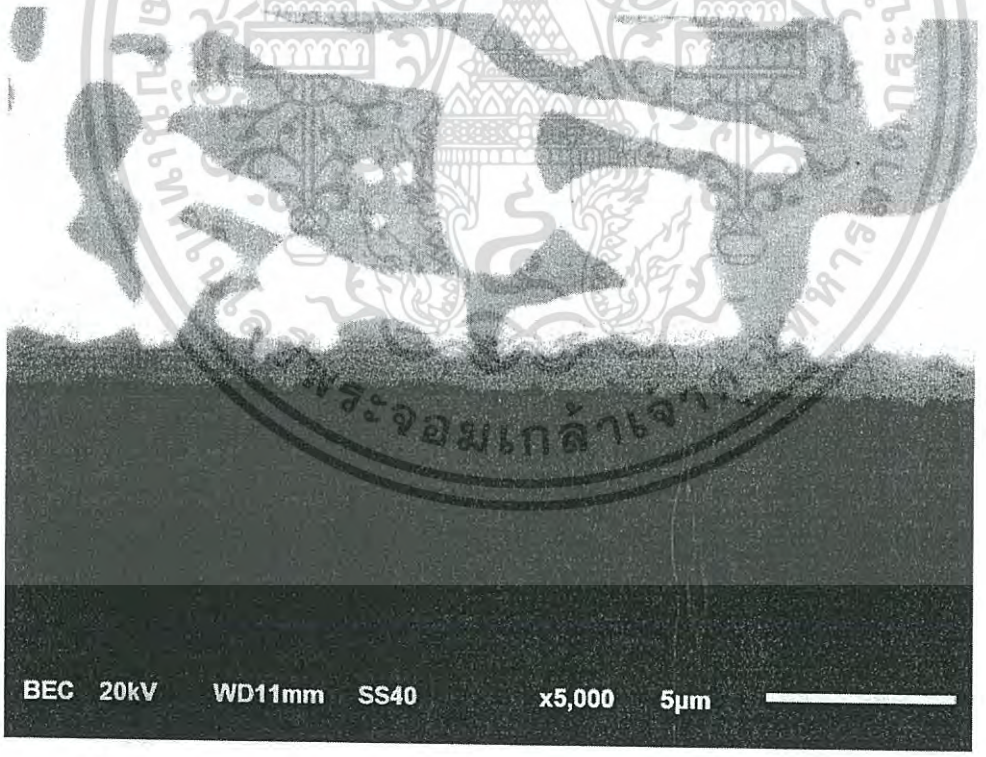


รูปที่ จ.30 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

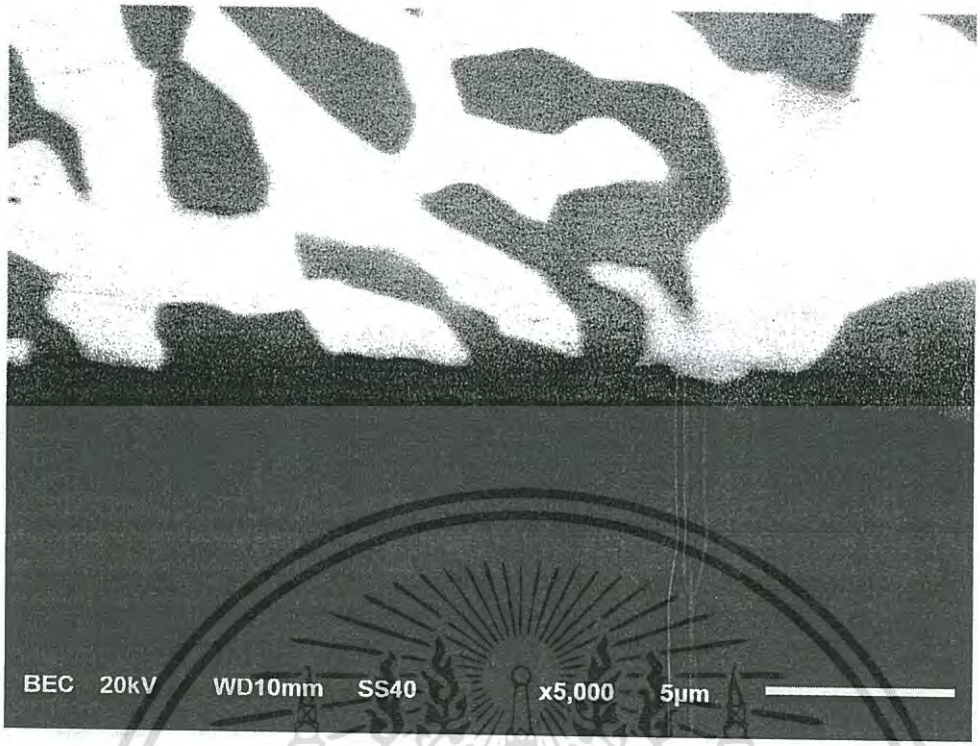


รูปที่ จ.31 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 10 ชั่วโมง

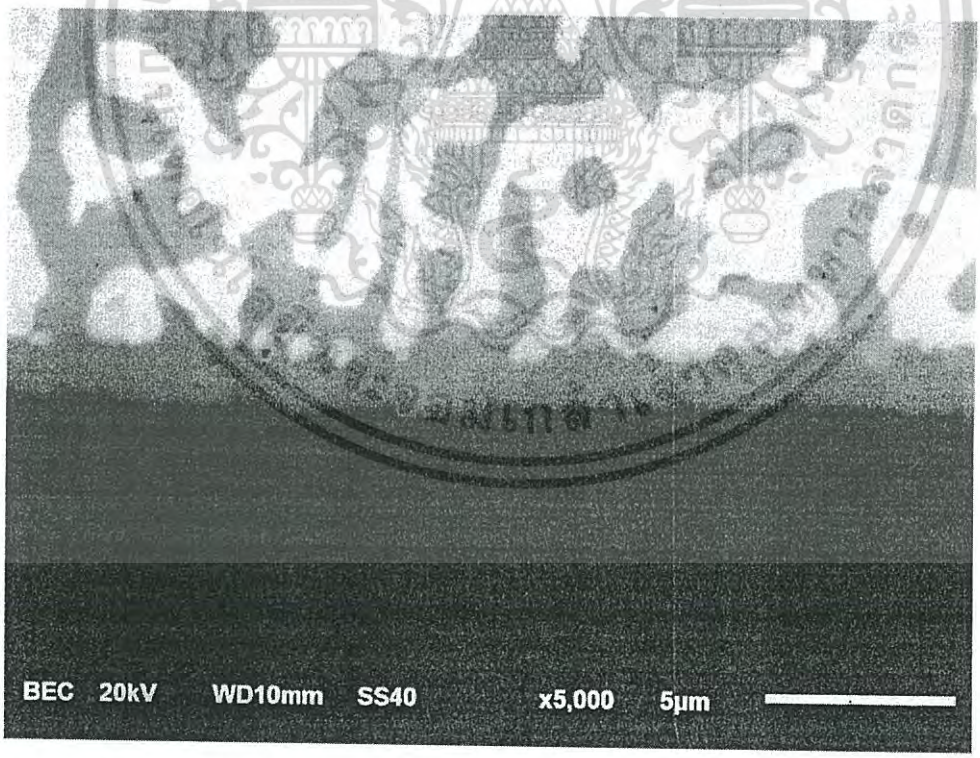


รูปที่ จ.32 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

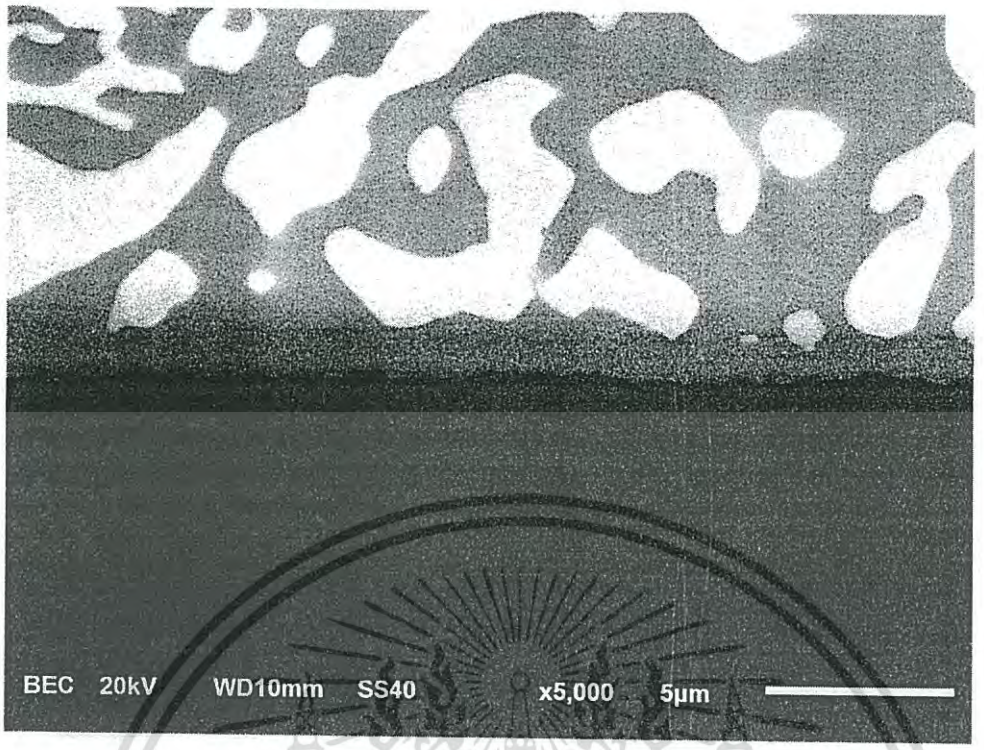


รูปที่ จ.33 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 10 ชั่วโมง

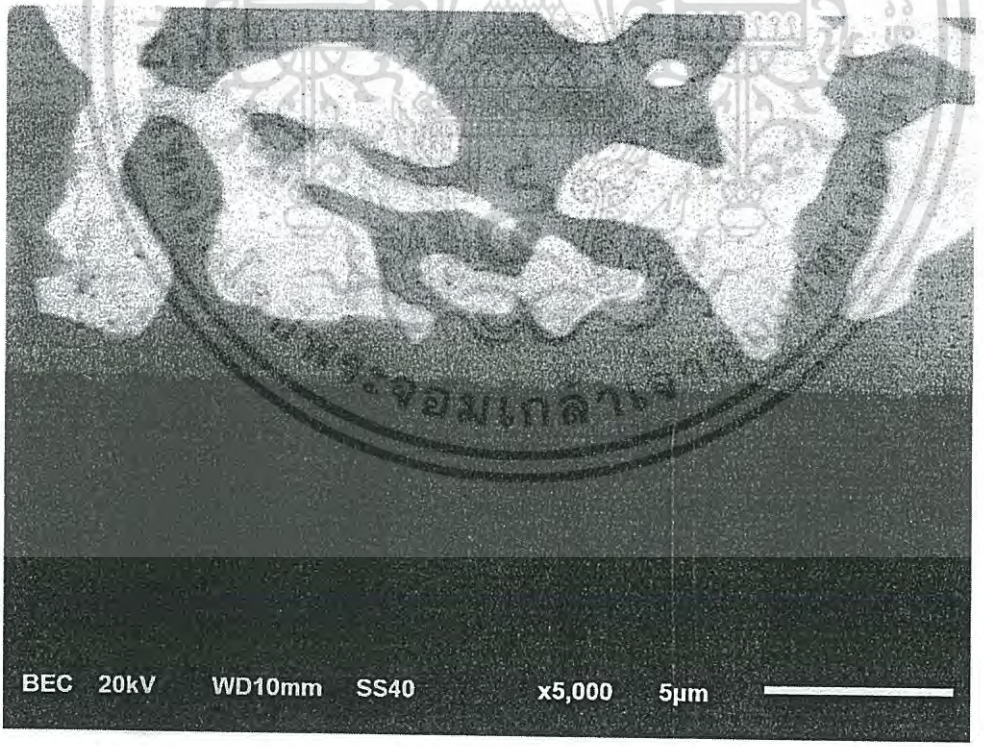


รูปที่ จ.34 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

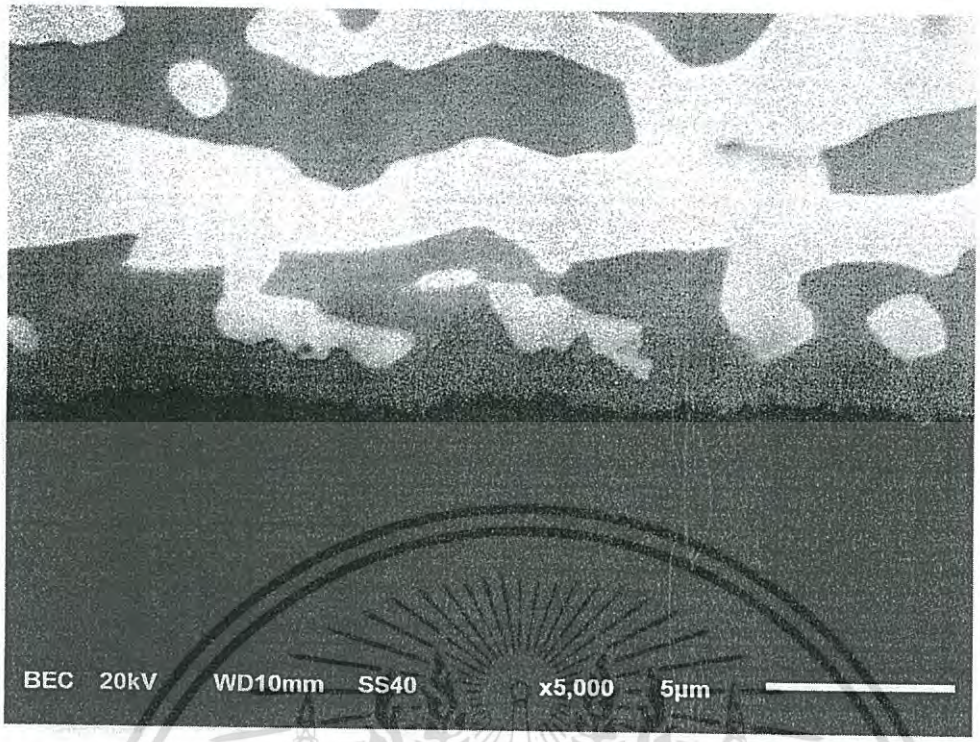


รูปที่ จ.35 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 10 ชั่วโมง

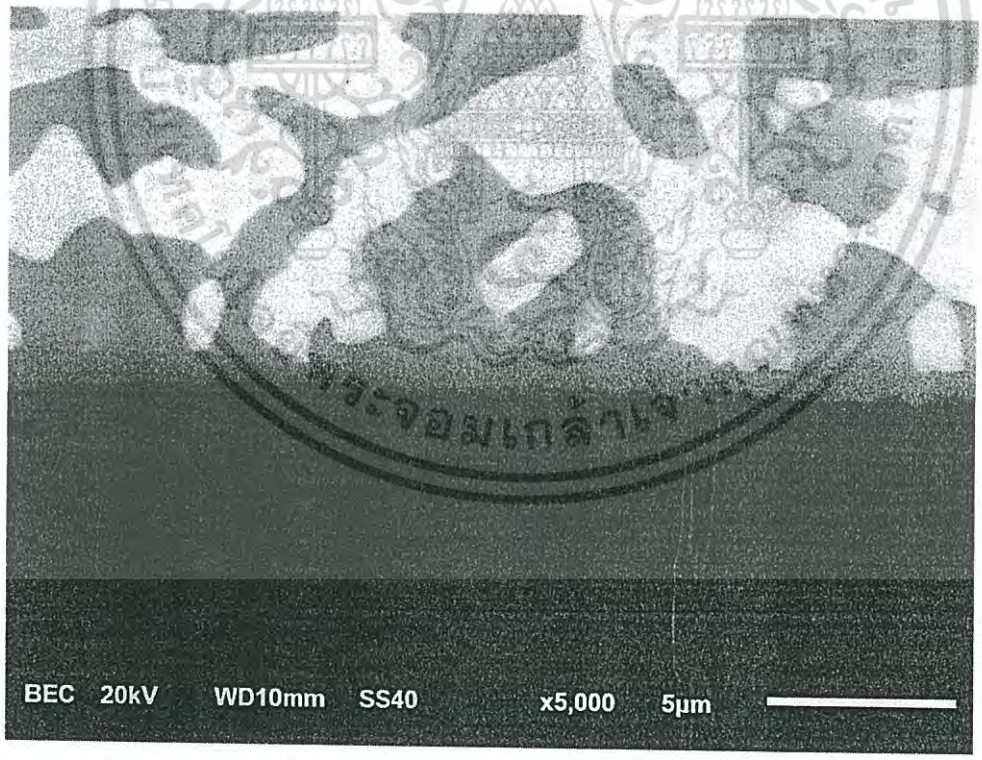


รูปที่ จ.36 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

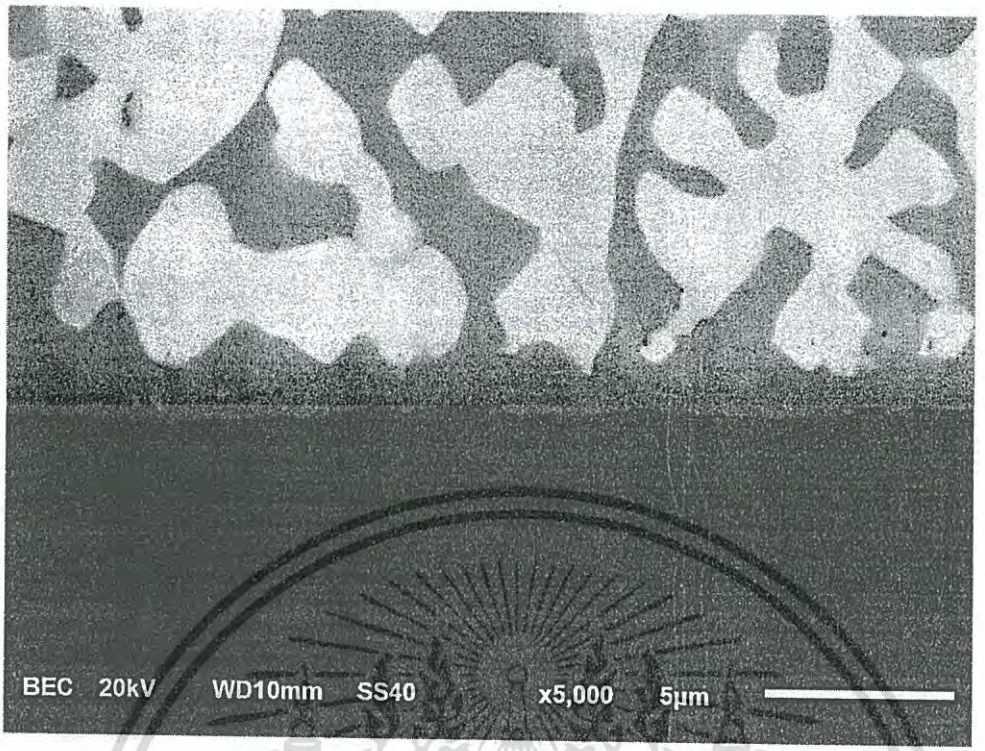


รูปที่ จ.37 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 10 ชั่วโมง

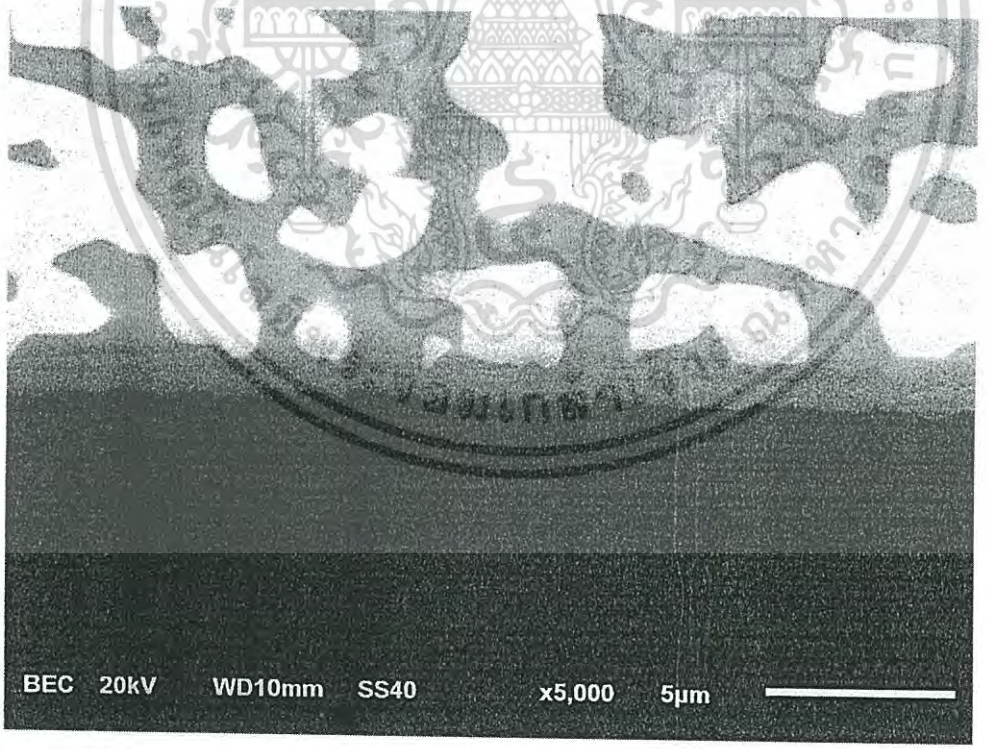


รูปที่ จ.38 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

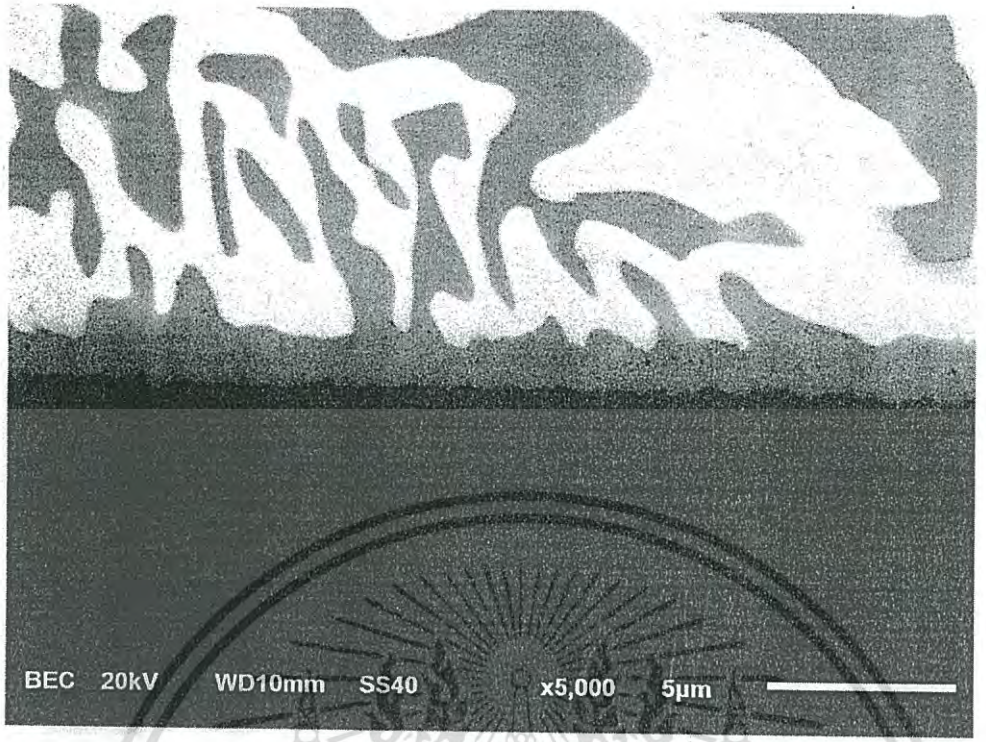


รูปที่ จ.39 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 10 ชั่วโมง

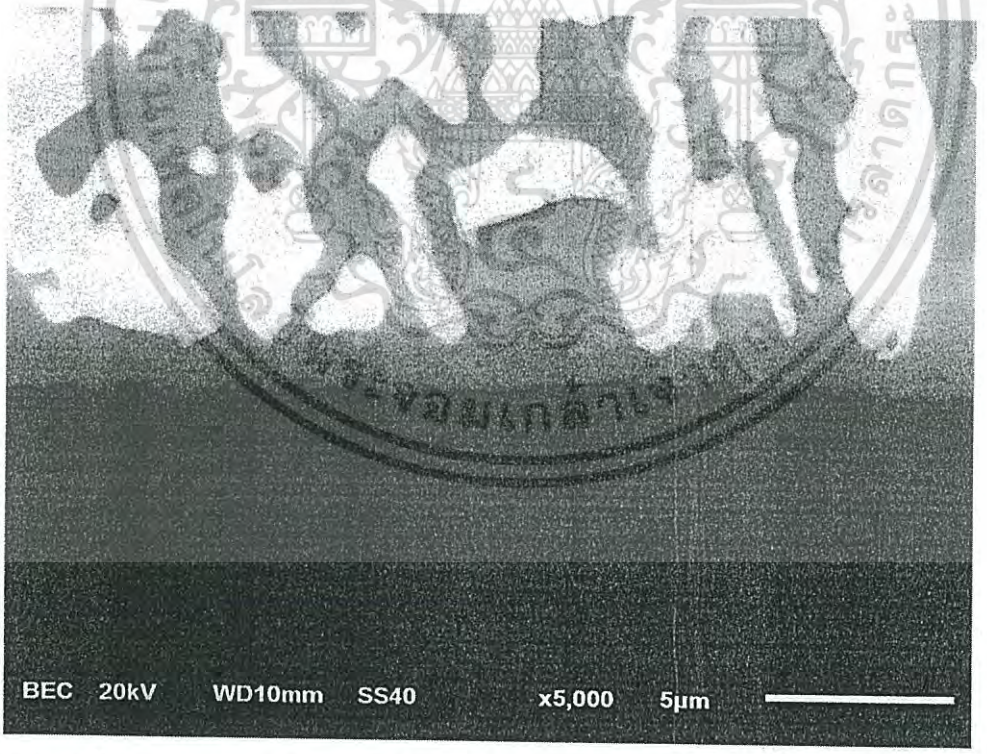


รูปที่ จ.40 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

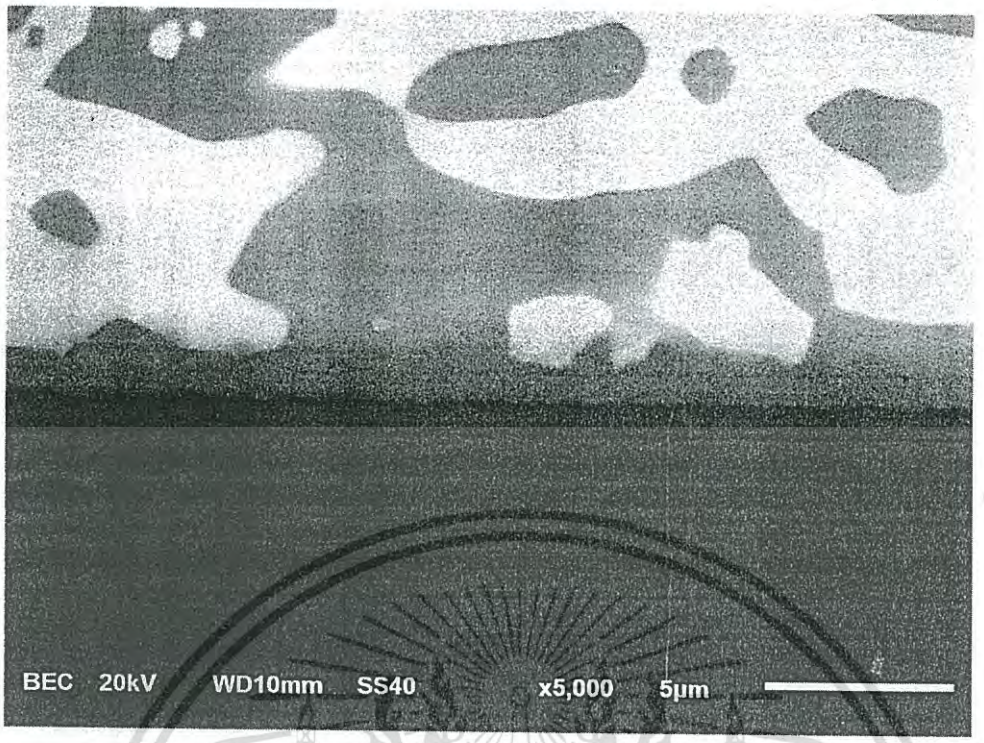


รูปที่ จ.41 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 10 ชั่วโมง

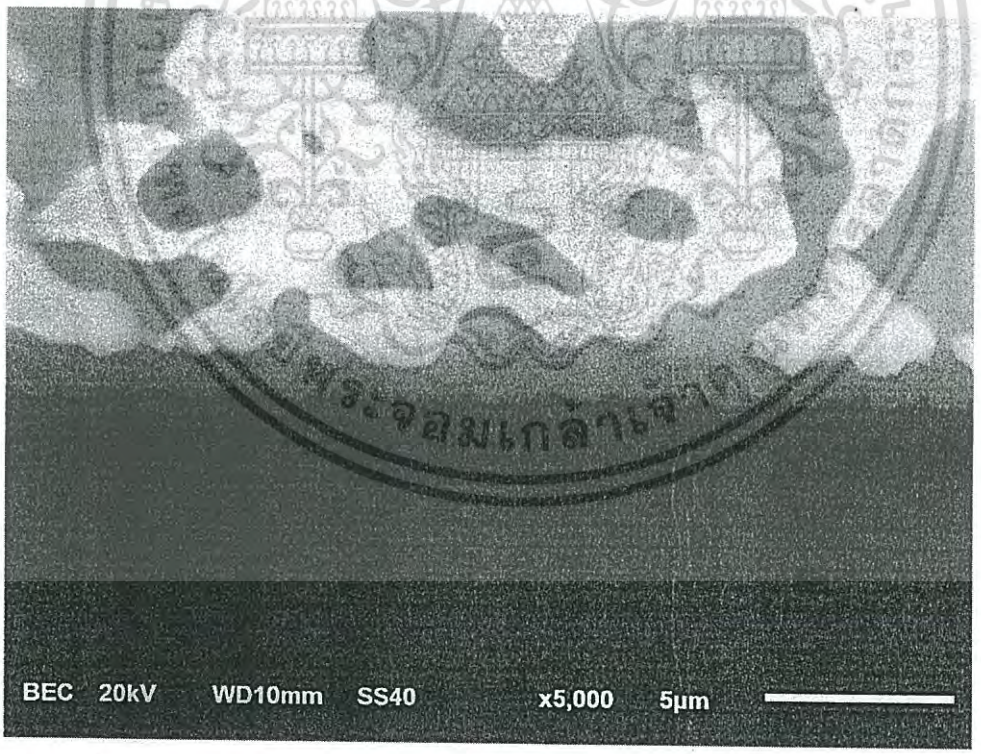


รูปที่ จ.42 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

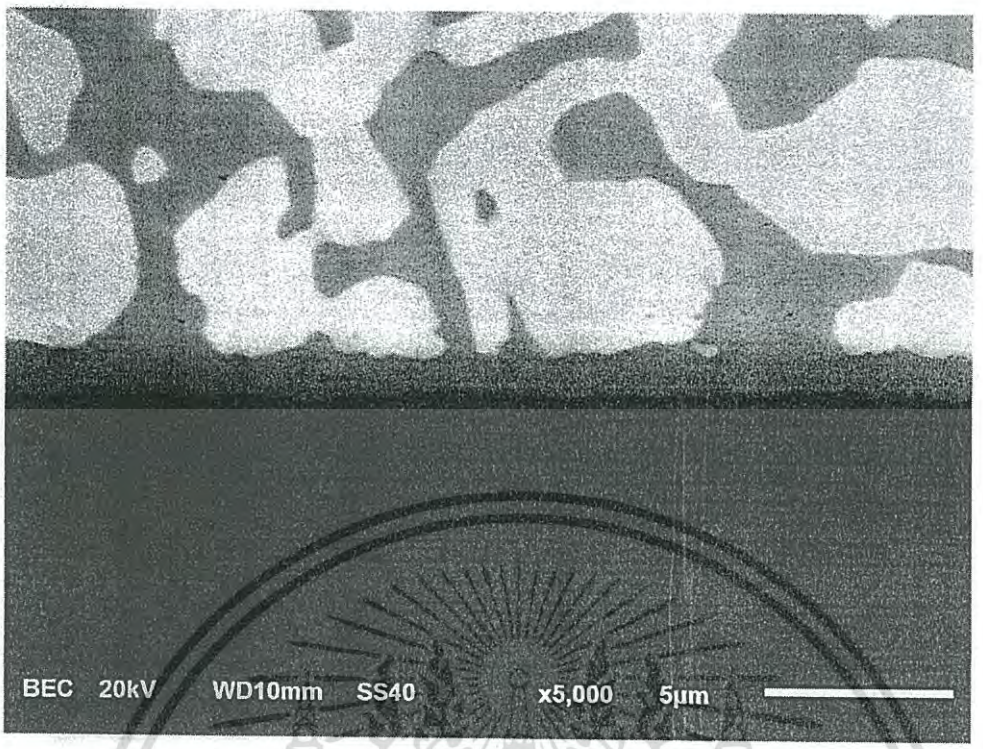


รูปที่ จ.43 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 10 ชั่วโมง

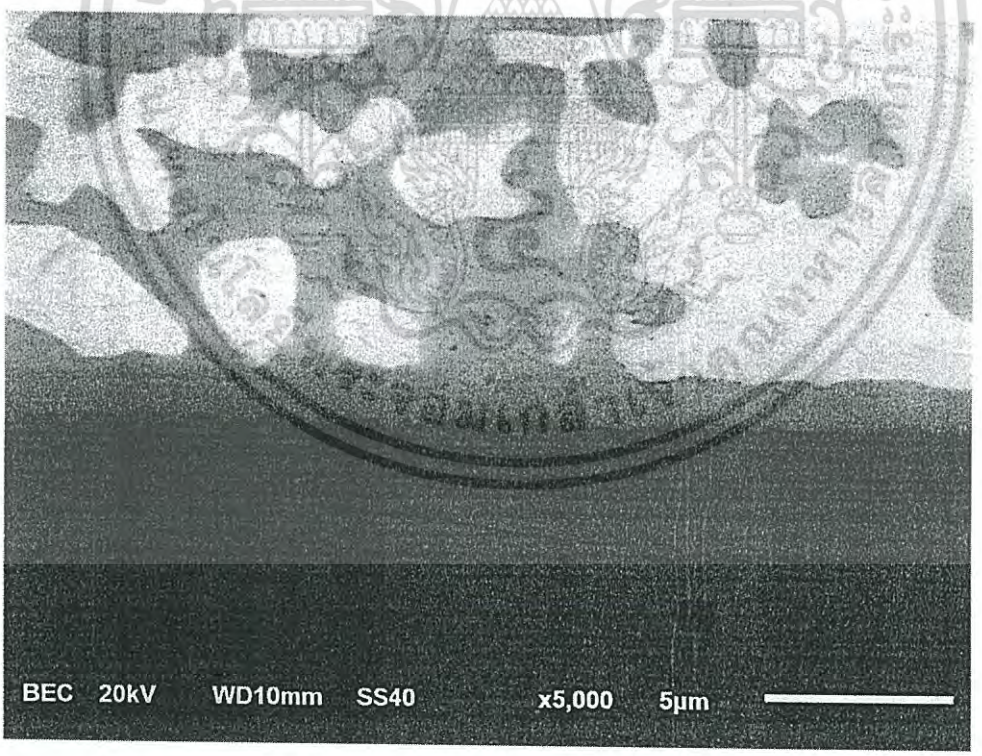


รูปที่ จ.44 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

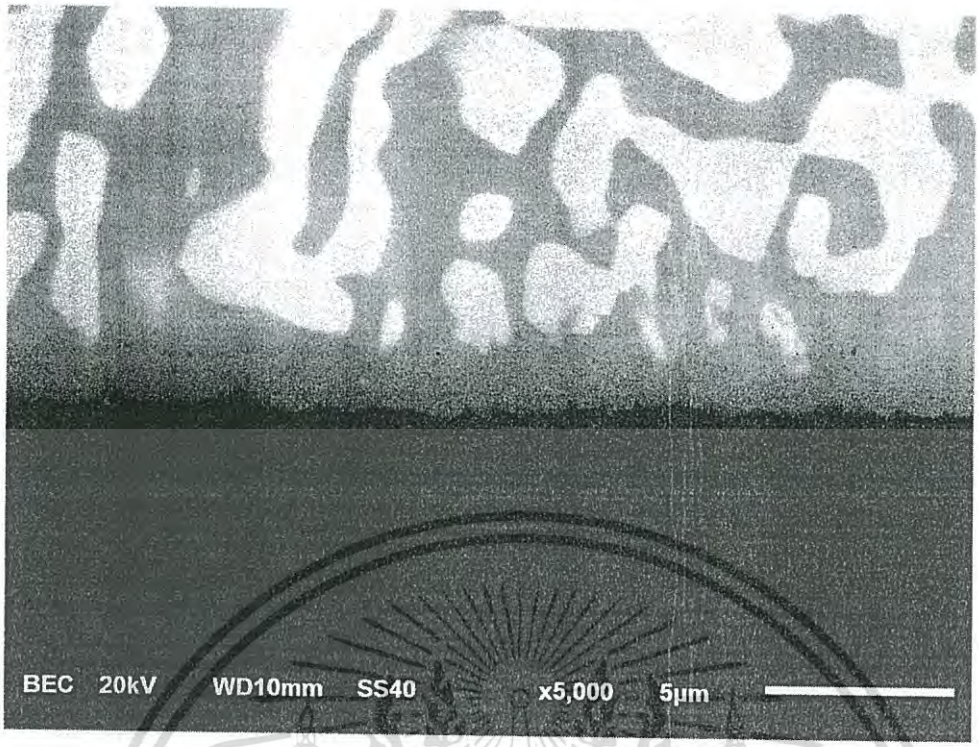


รูปที่ จ.45 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 10 ชั่วโมง

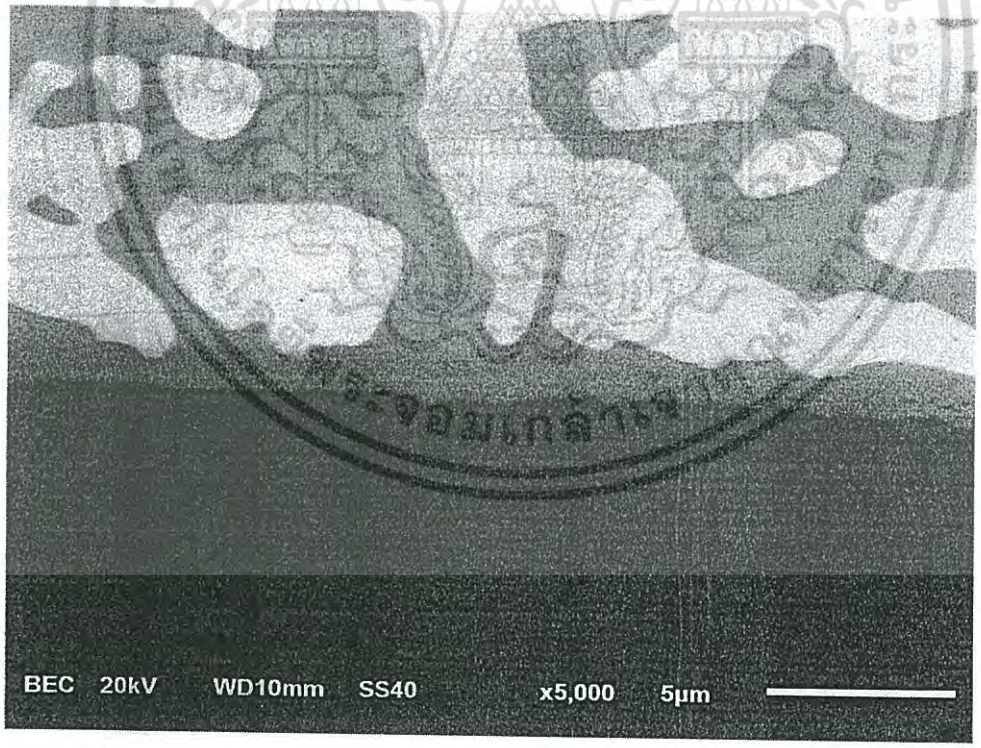


รูปที่ จ.46 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

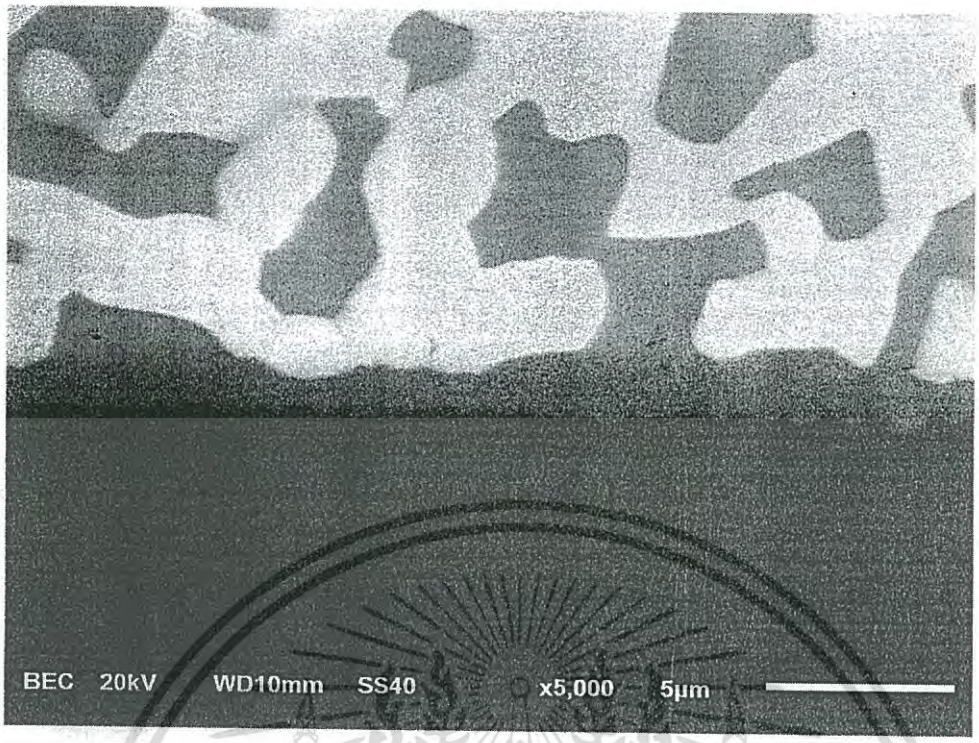


รูปที่ จ.47 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 10 ชั่วโมง

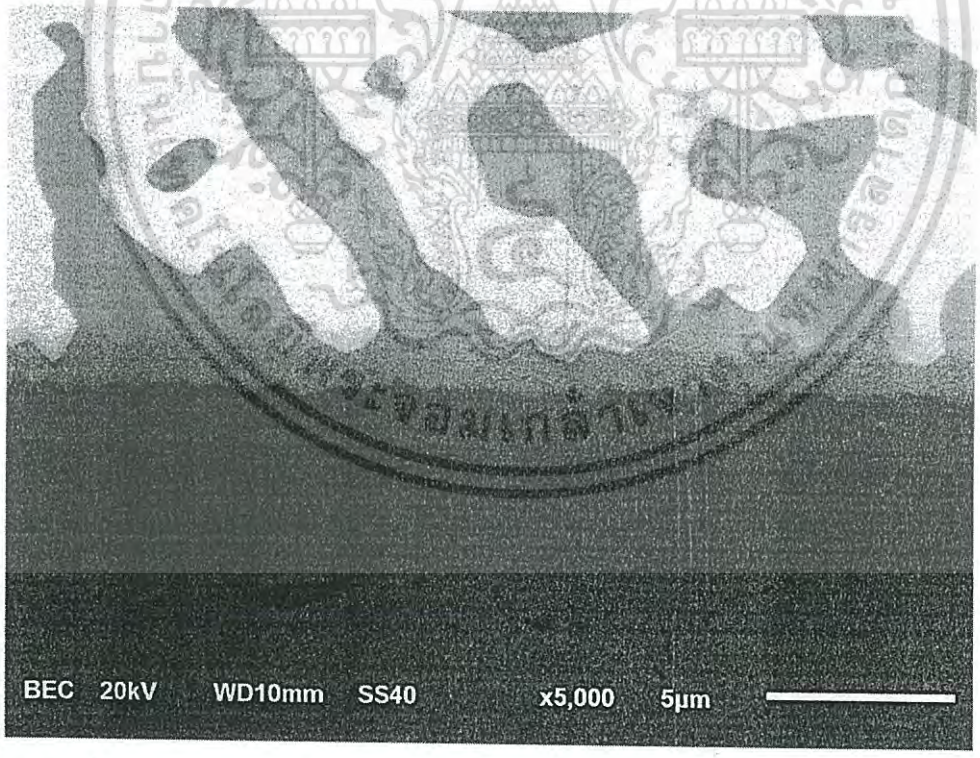


รูปที่ จ.48 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

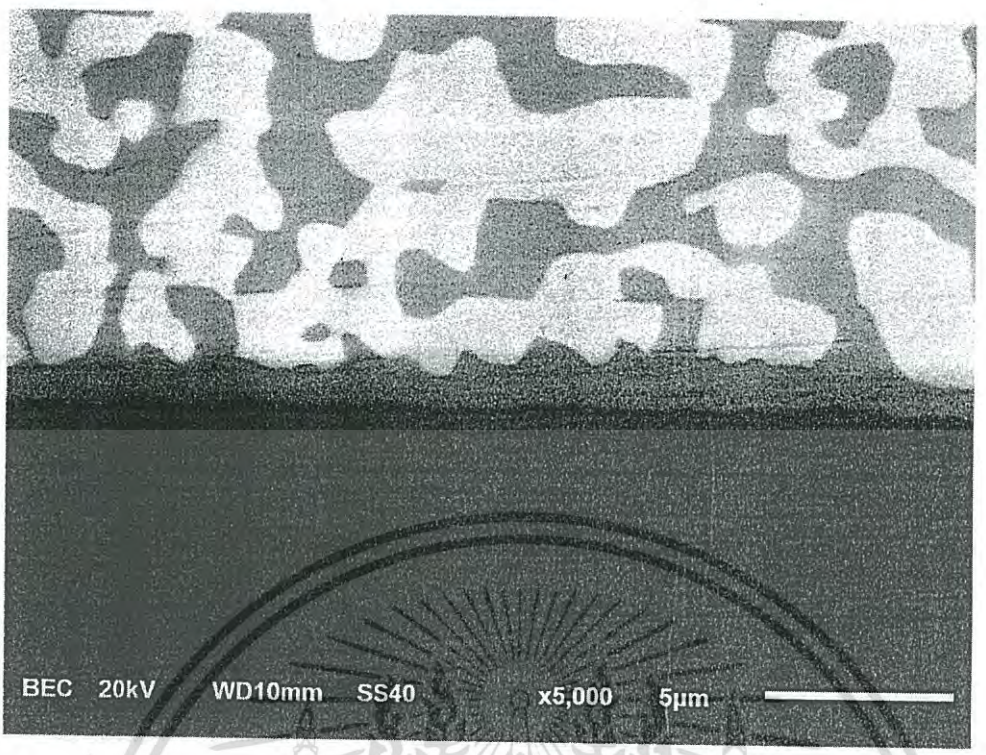


รูปที่ จ.49 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 10 ชั่วโมง

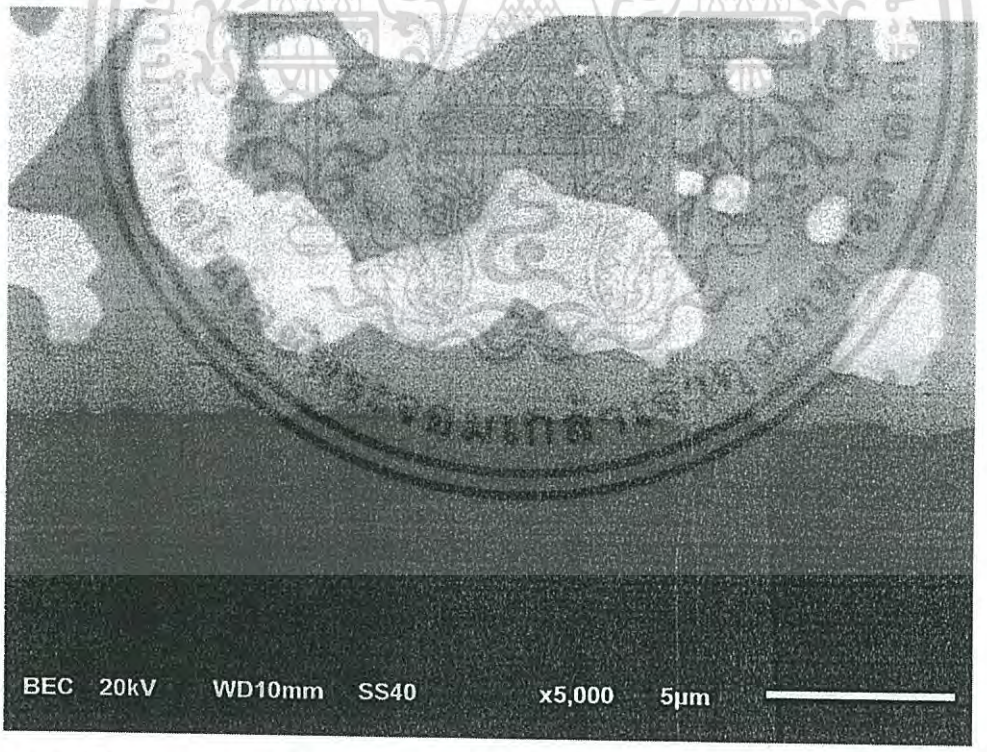


รูปที่ จ.50 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

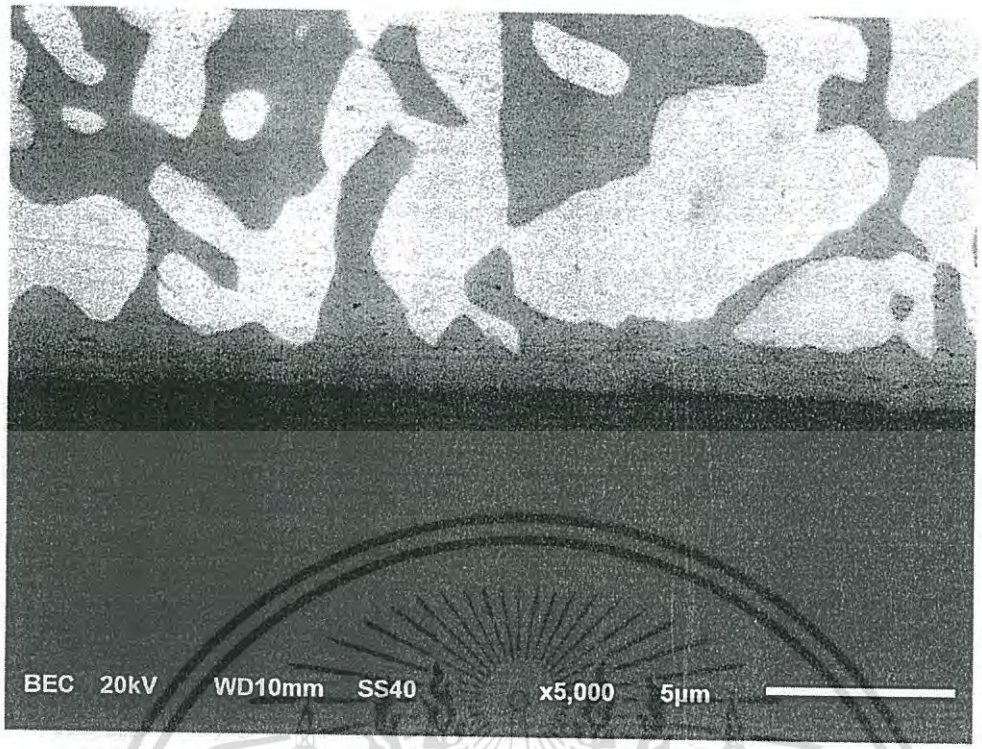


รูปที่ จ.51 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 10 ชั่วโมง

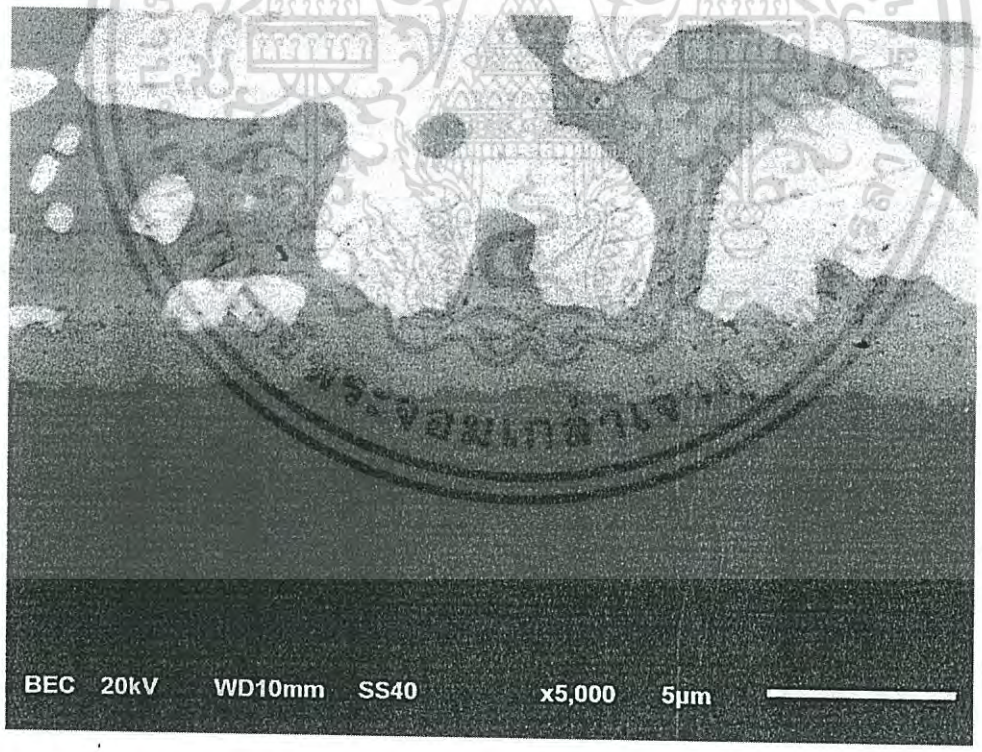


รูปที่ จ.52 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

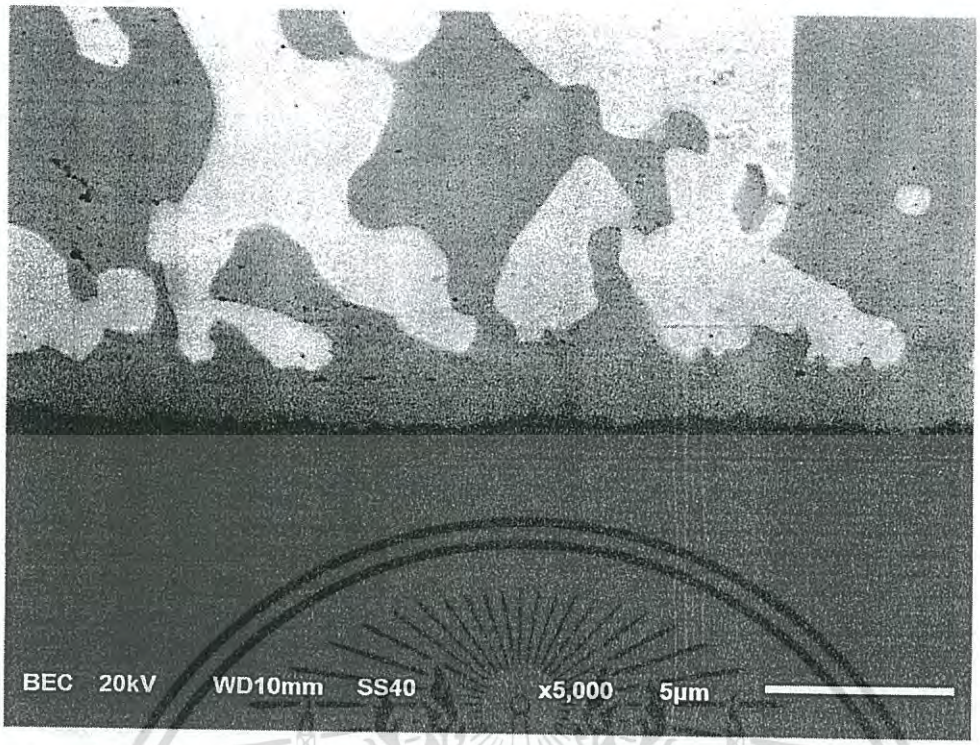


รูปที่ จ.53 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 10 ชั่วโมง

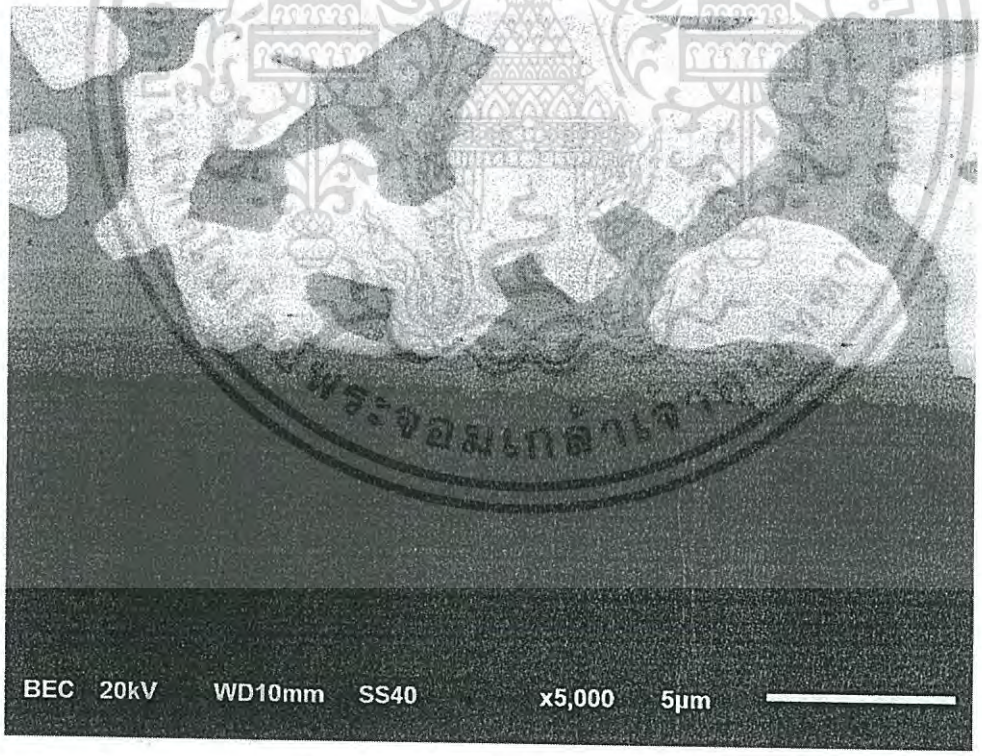


รูปที่ จ.54 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

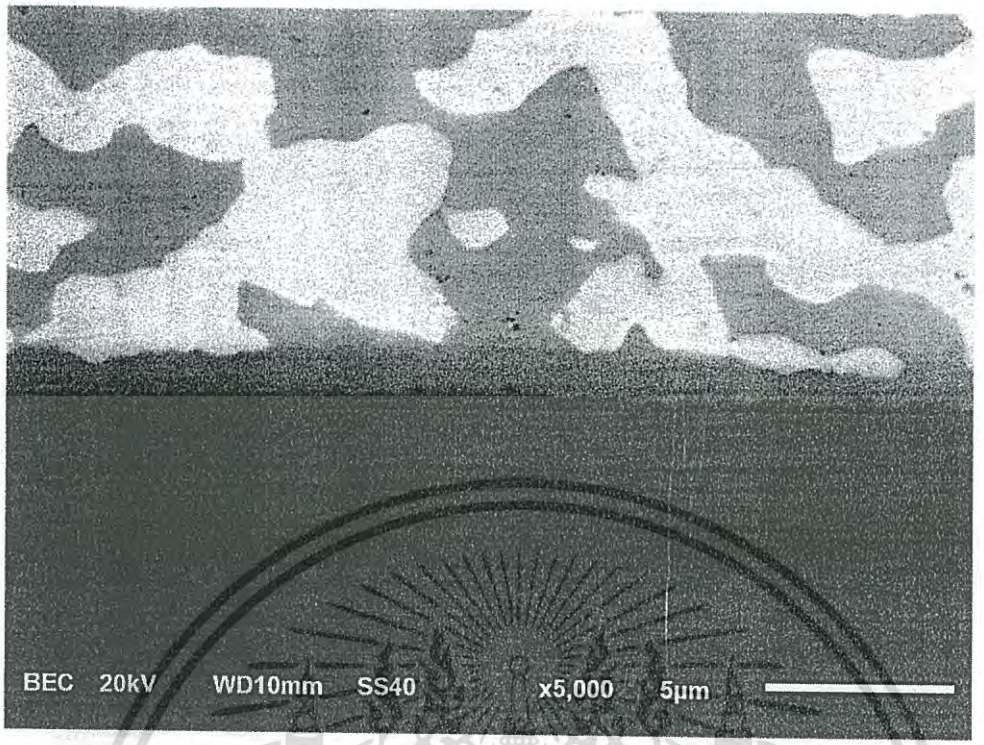


รูปที่ จ.55 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 10 ชั่วโมง

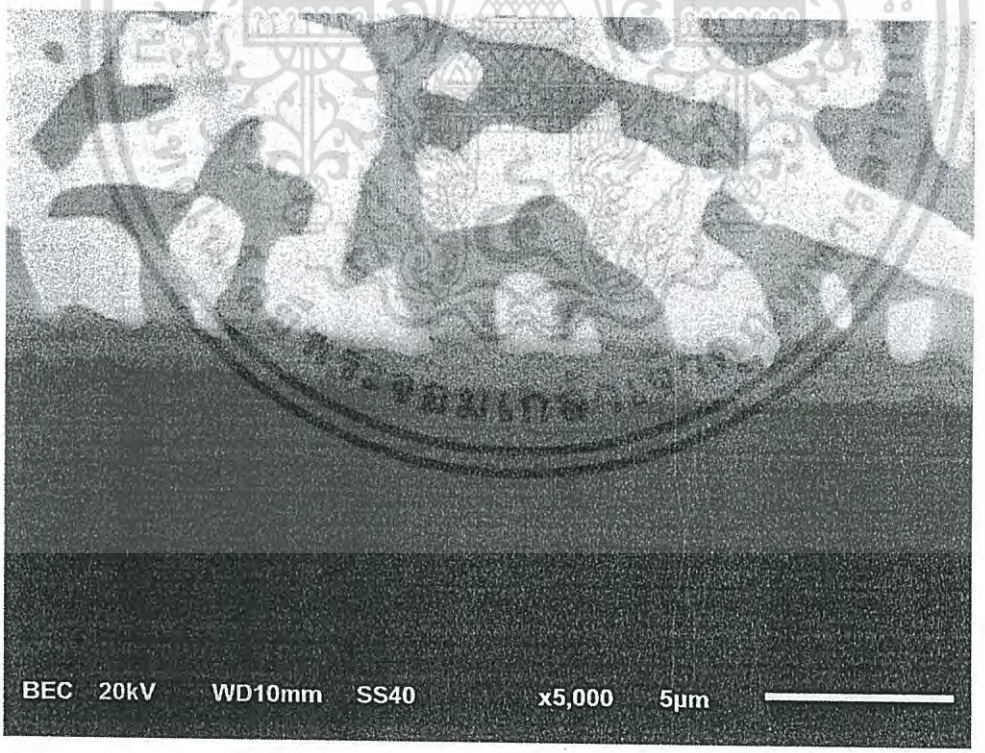


รูปที่ จ.56 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

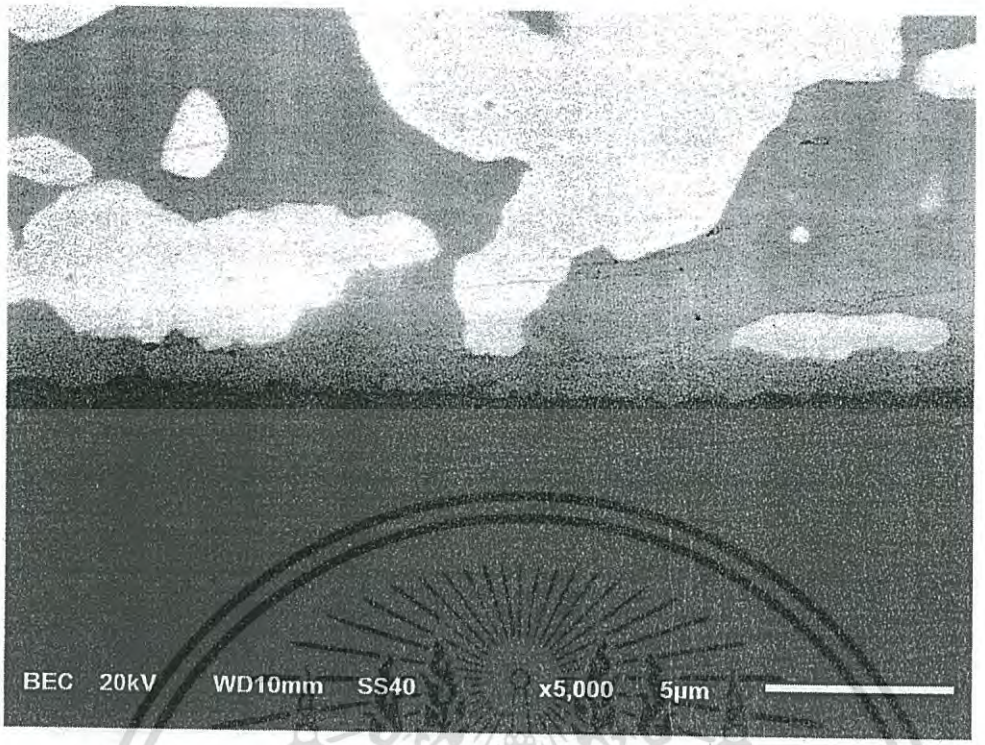


รูปที่ จ.57 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 10 ชั่วโมง

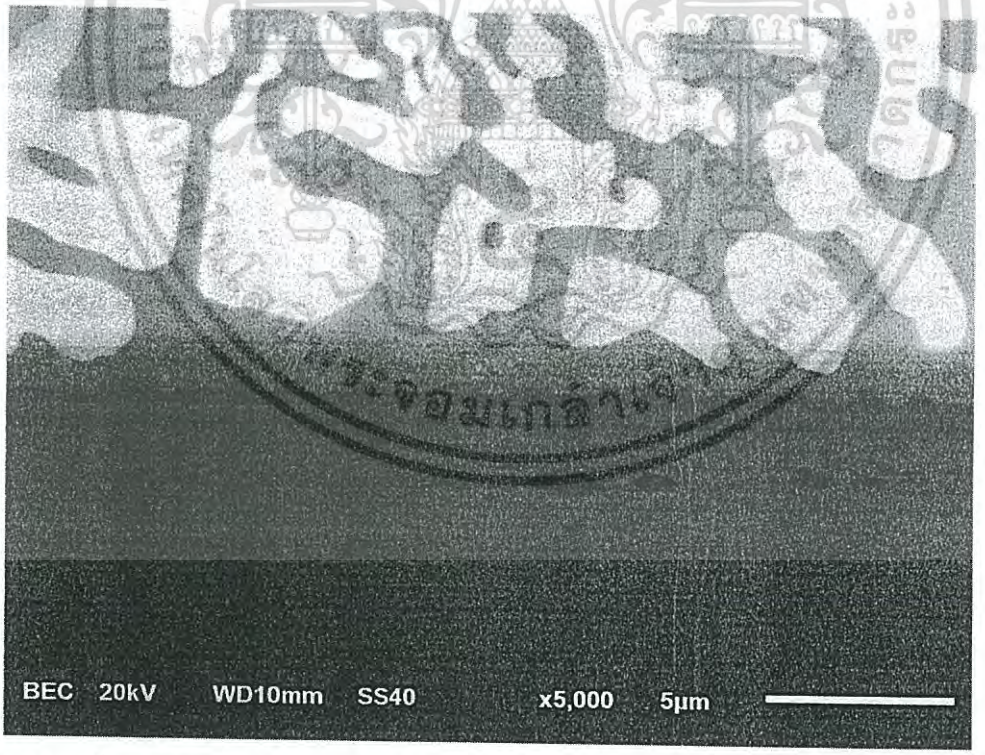


รูปที่ จ.58 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

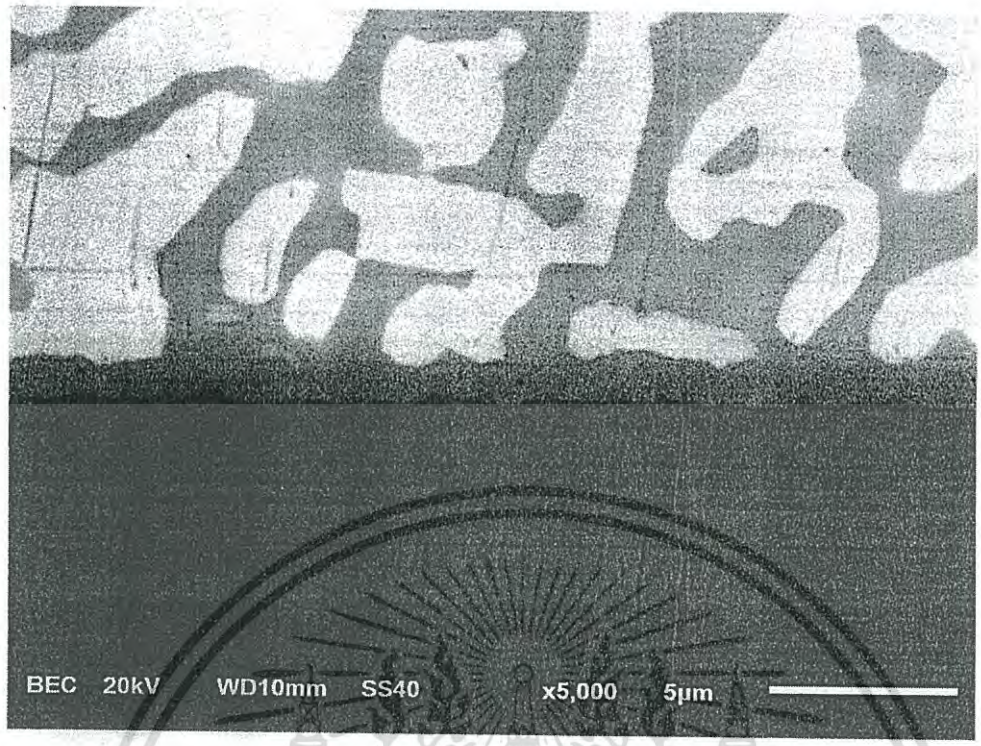


รูปที่ จ.59 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 10 ชั่วโมง

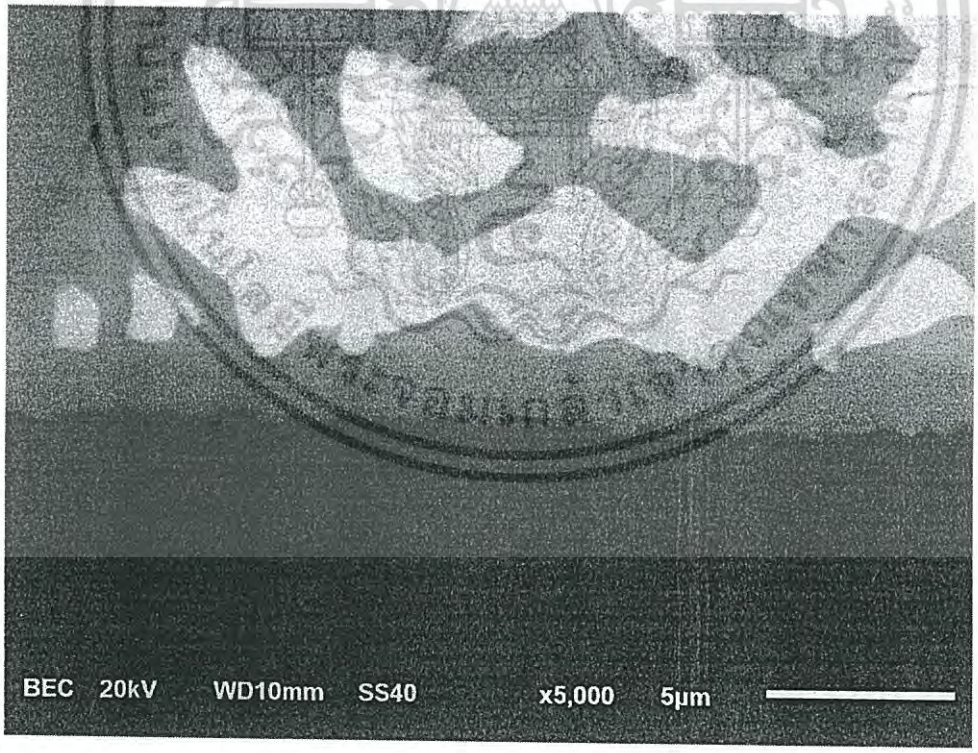


รูปที่ จ.60 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

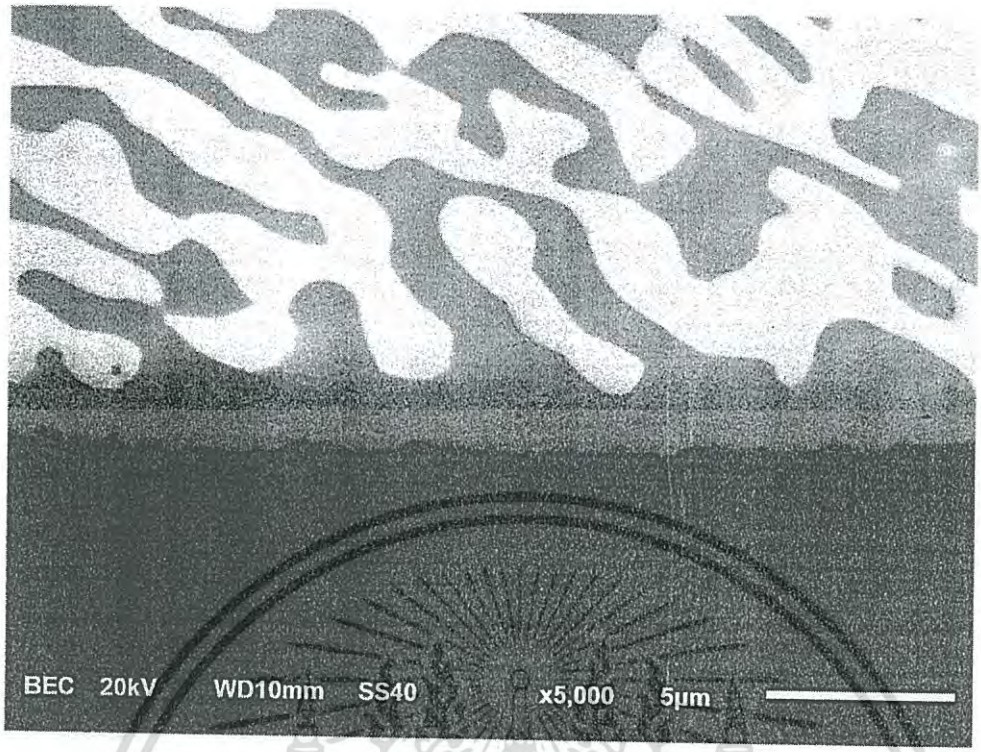


รูปที่ จ.61 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 10 ชั่วโมง

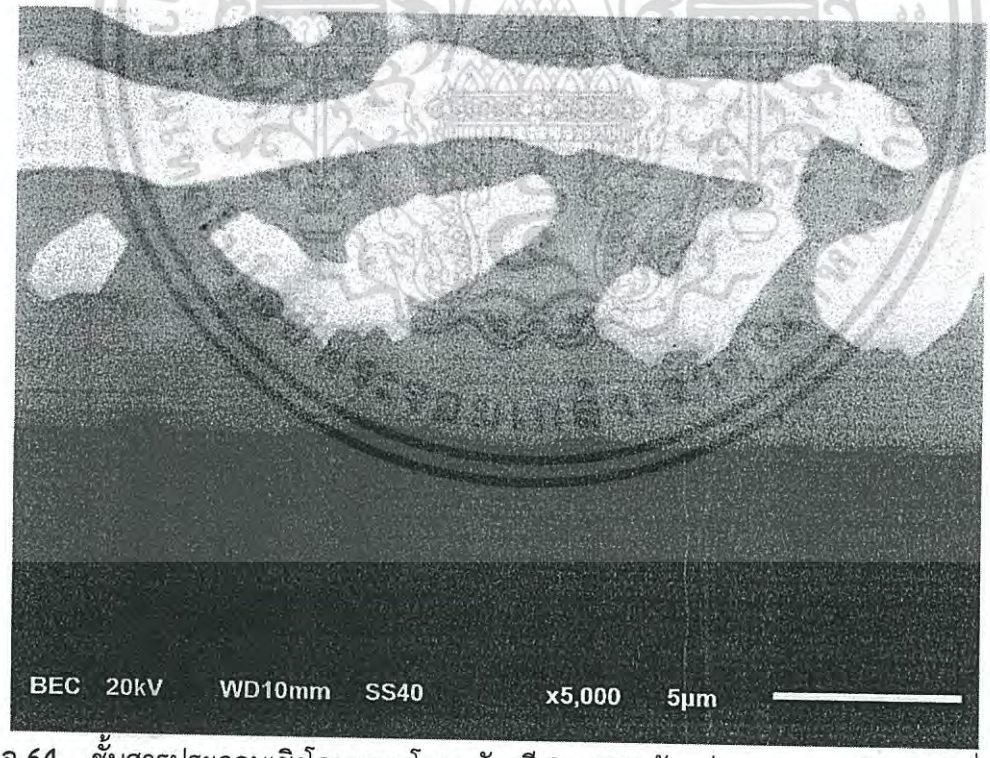


รูปที่ จ.62 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

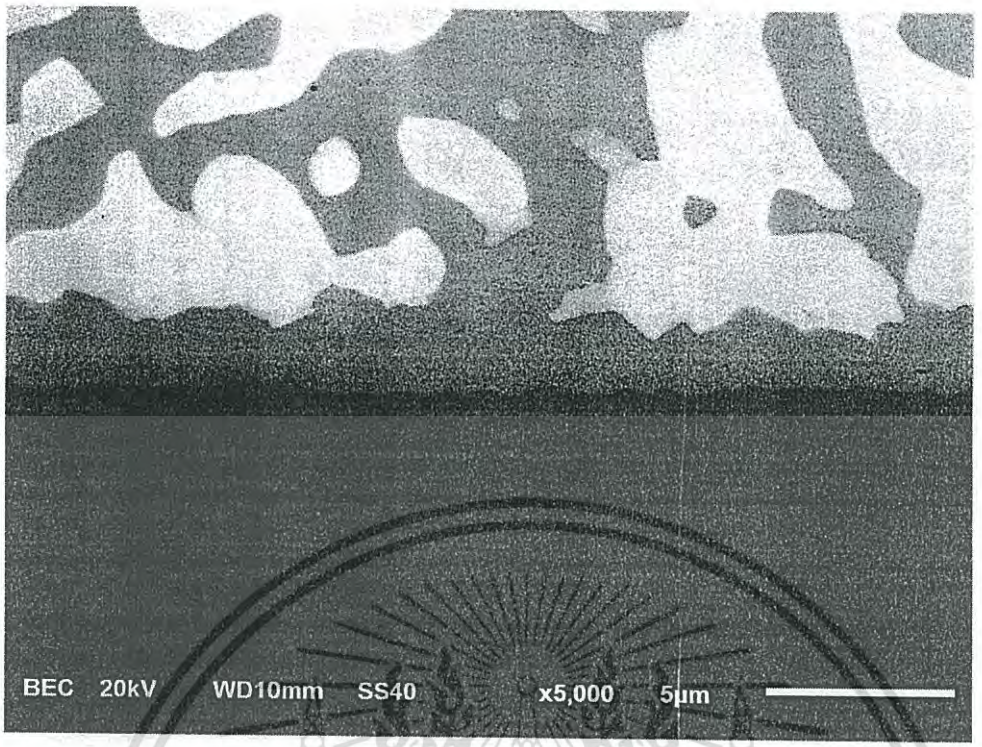


รูปที่ จ.63 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 10 ชั่วโมง

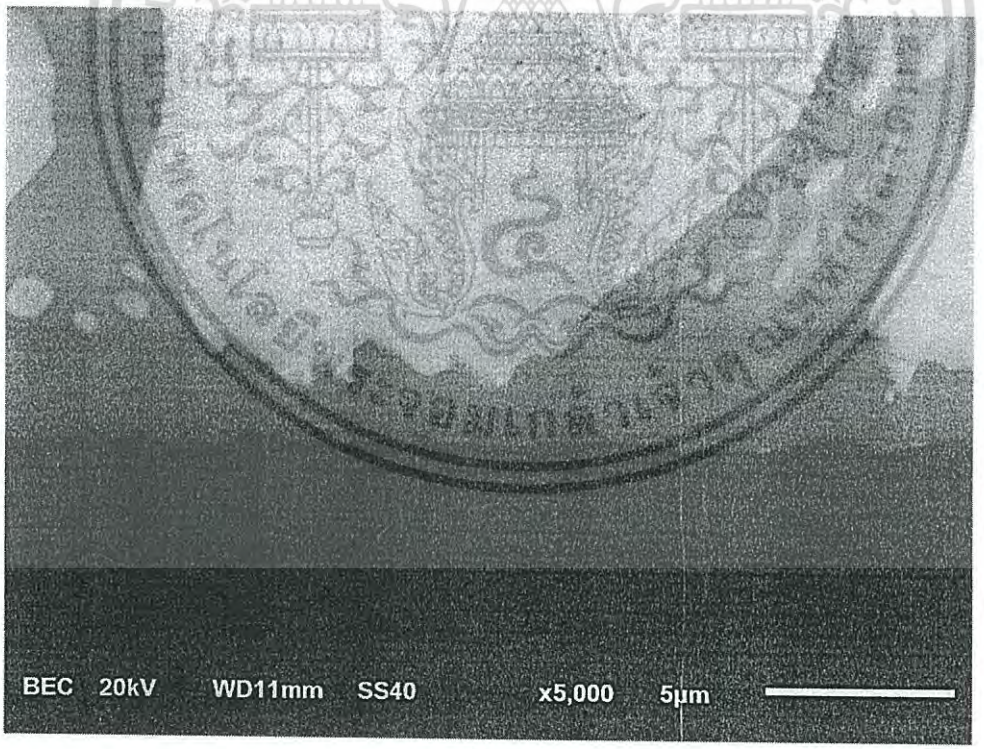


รูปที่ จ.64 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

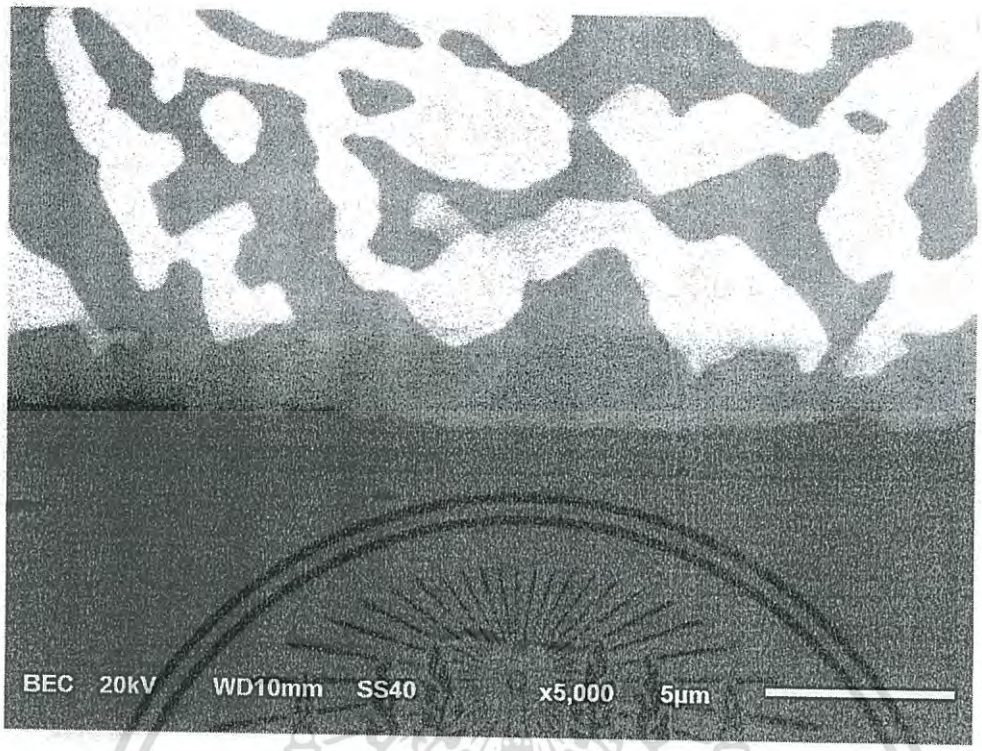


รูปที่ จ.65 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่ม ที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 10 ชั่วโมง

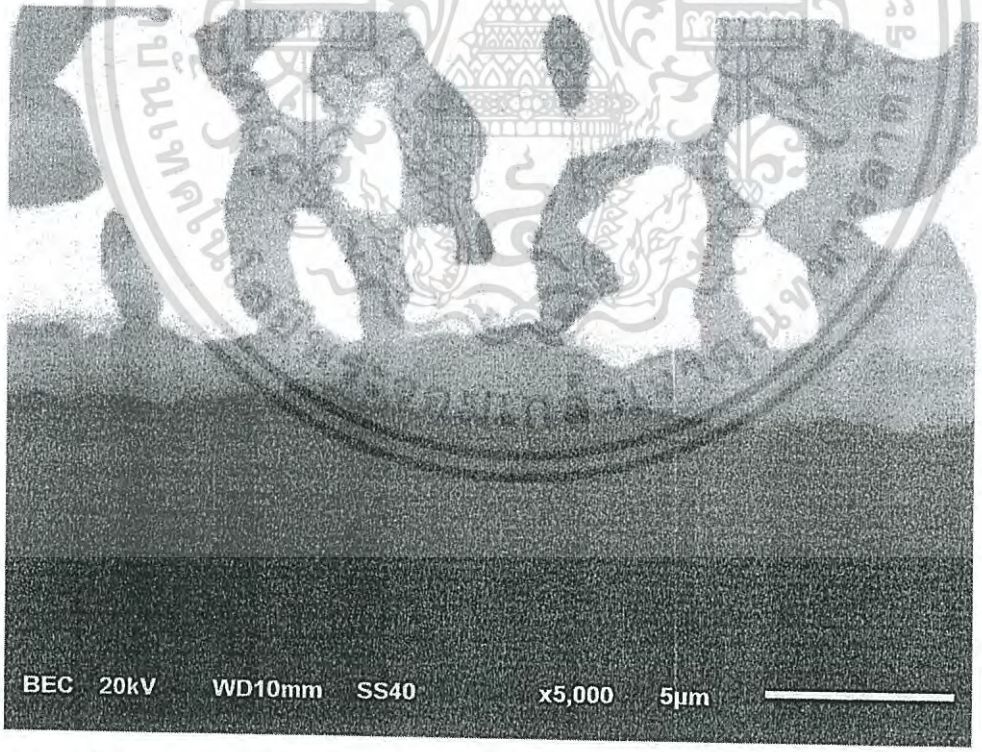


รูปที่ จ.66 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่ม ที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

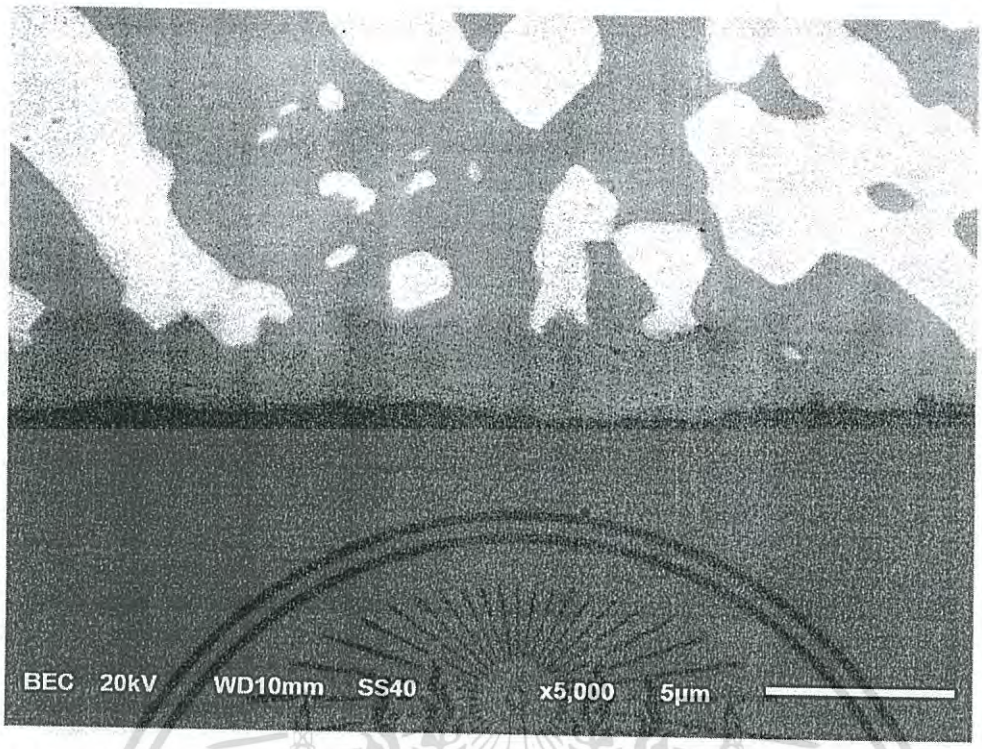


รูปที่ จ.67 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 10 ชั่วโมง

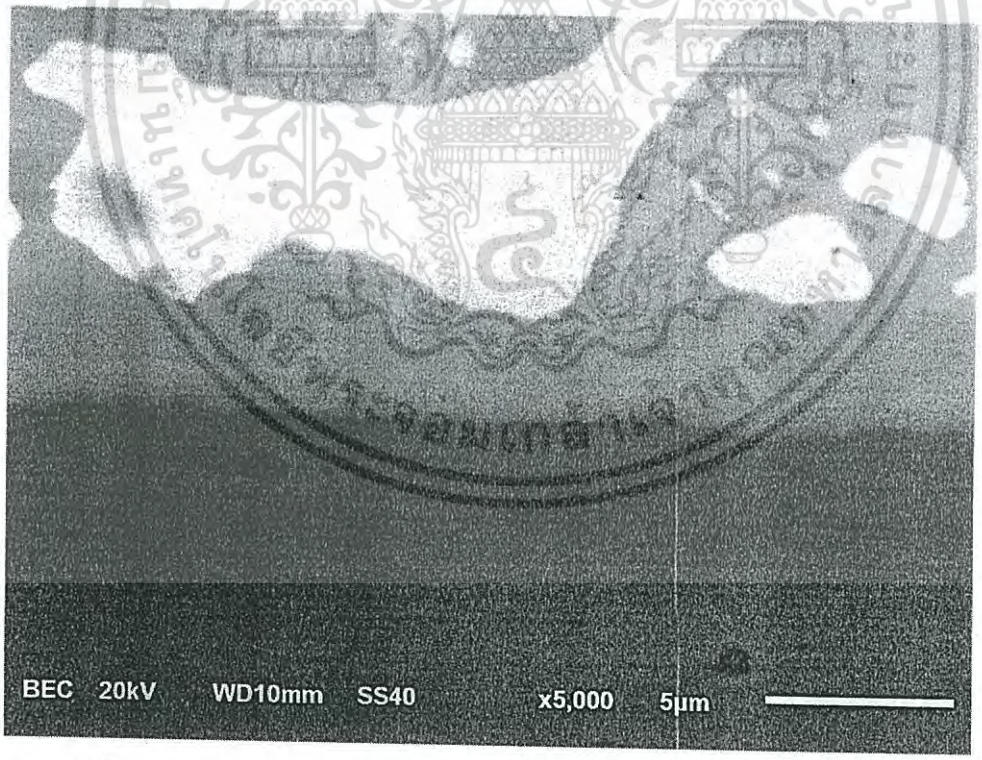


รูปที่ จ.68 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

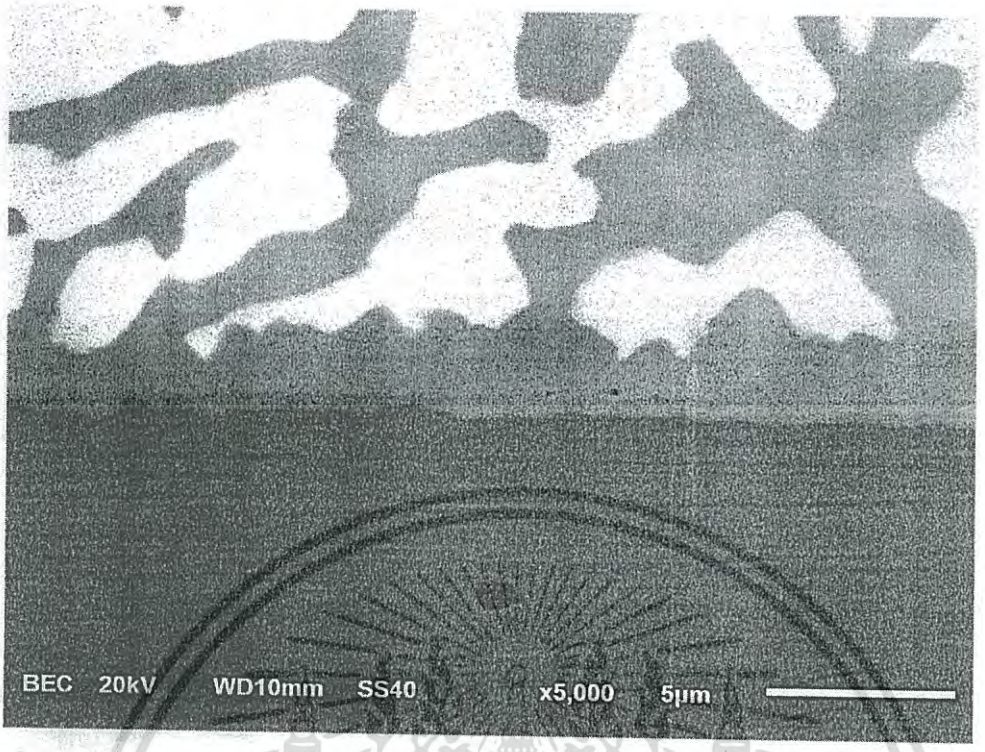


รูปที่ จ.69 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 10 ชั่วโมง

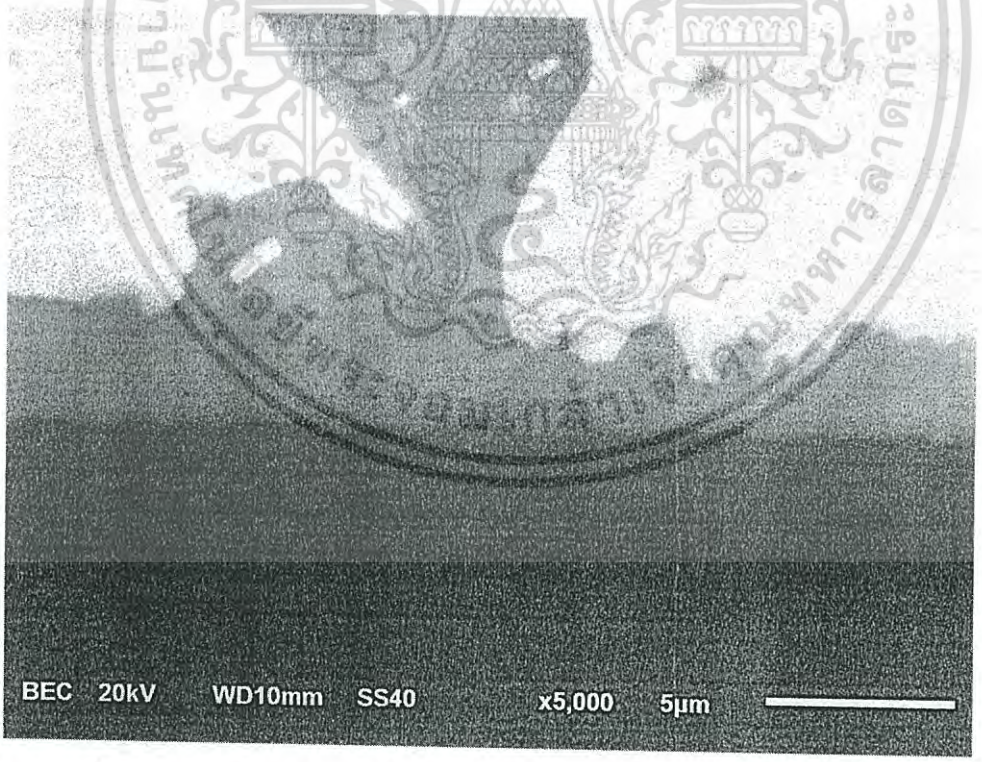


รูปที่ จ.70 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

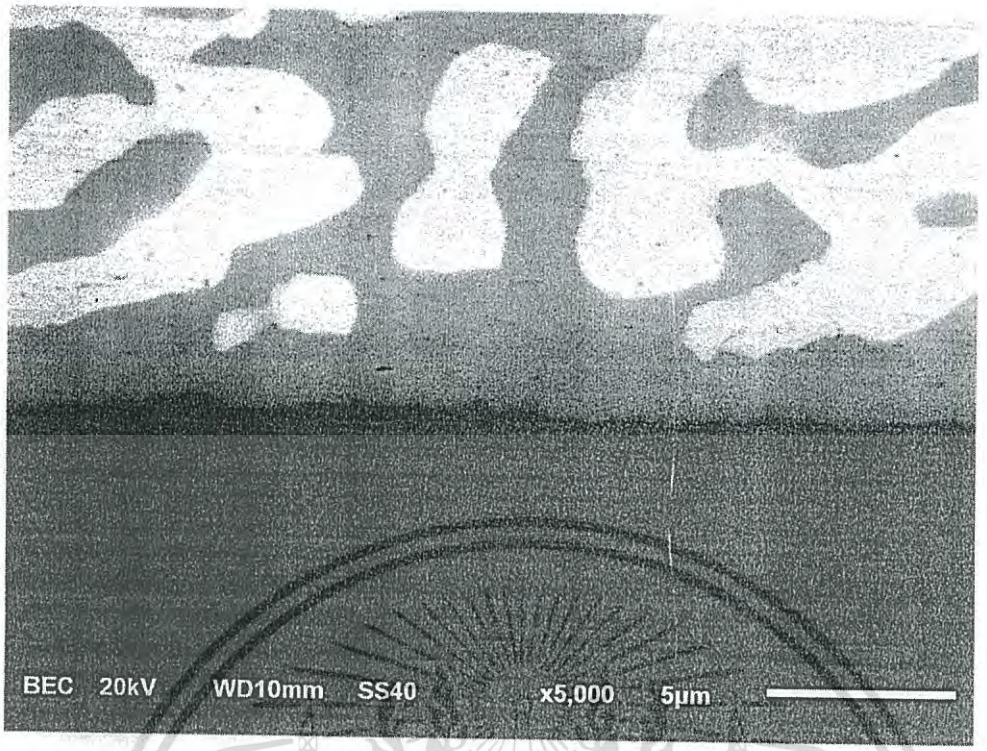


รูปที่ จ.71 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 10 ชั่วโมง



รูปที่ จ.72 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 10 ชั่วโมง

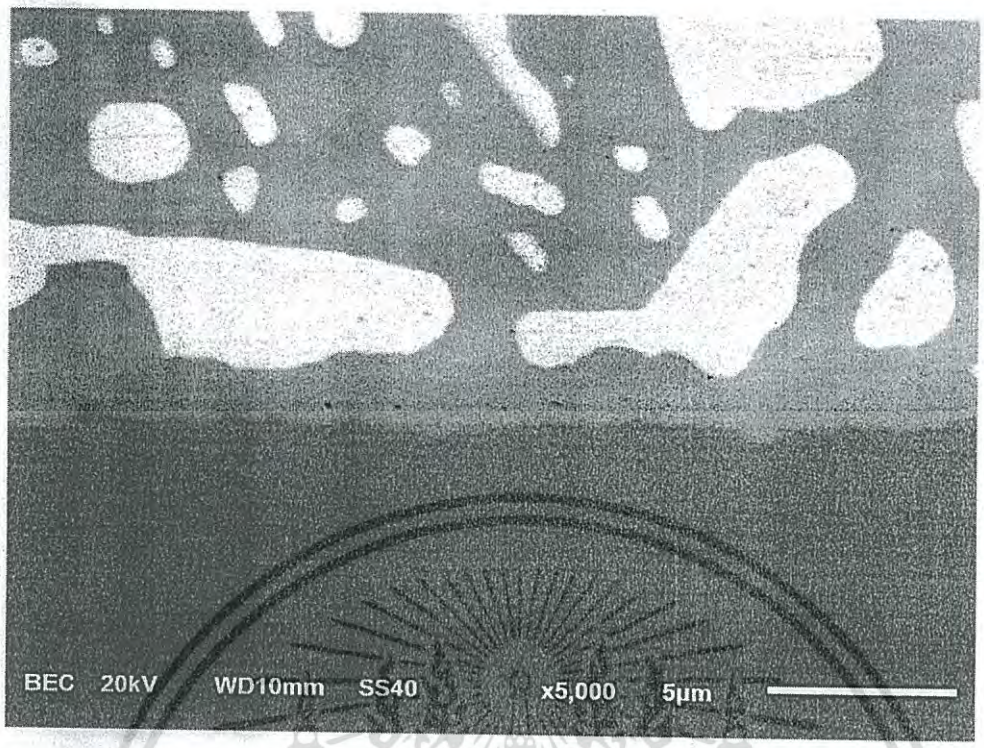
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



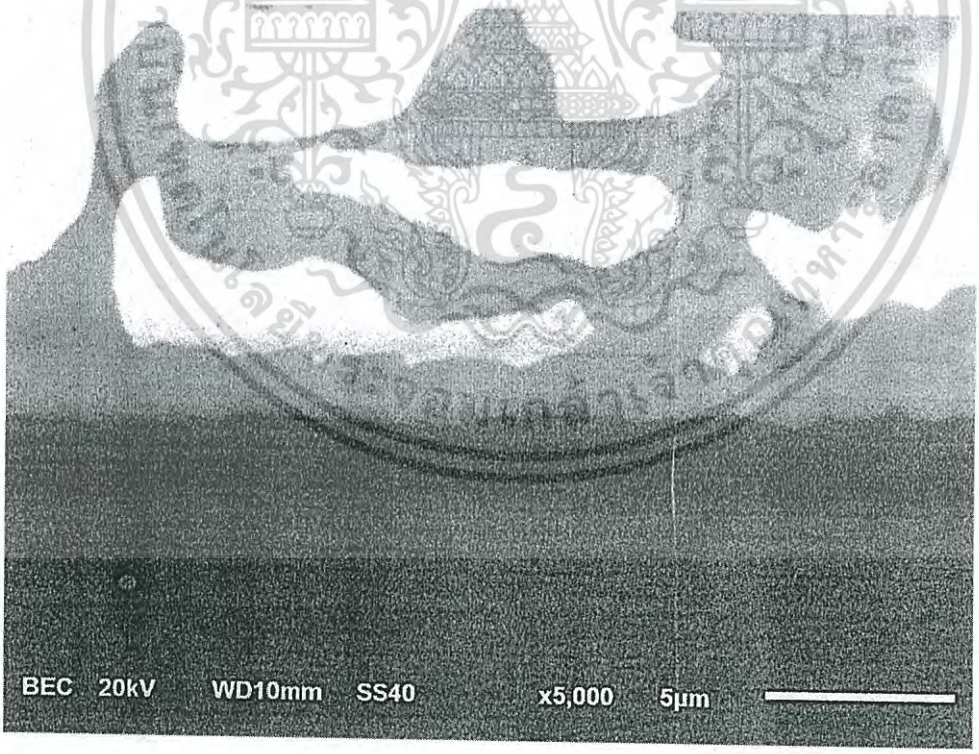
รูปที่ จ.73 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 10 ชั่วโมง

รูปที่ จ.74 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

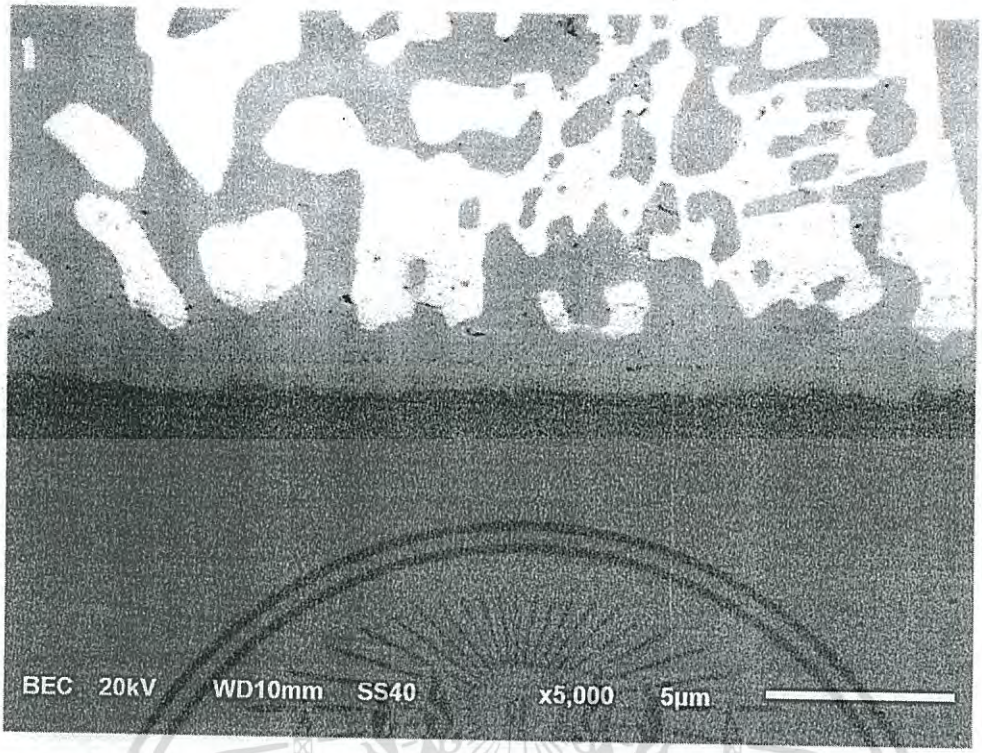


รูปที่ จ.75 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 10 ชั่วโมง

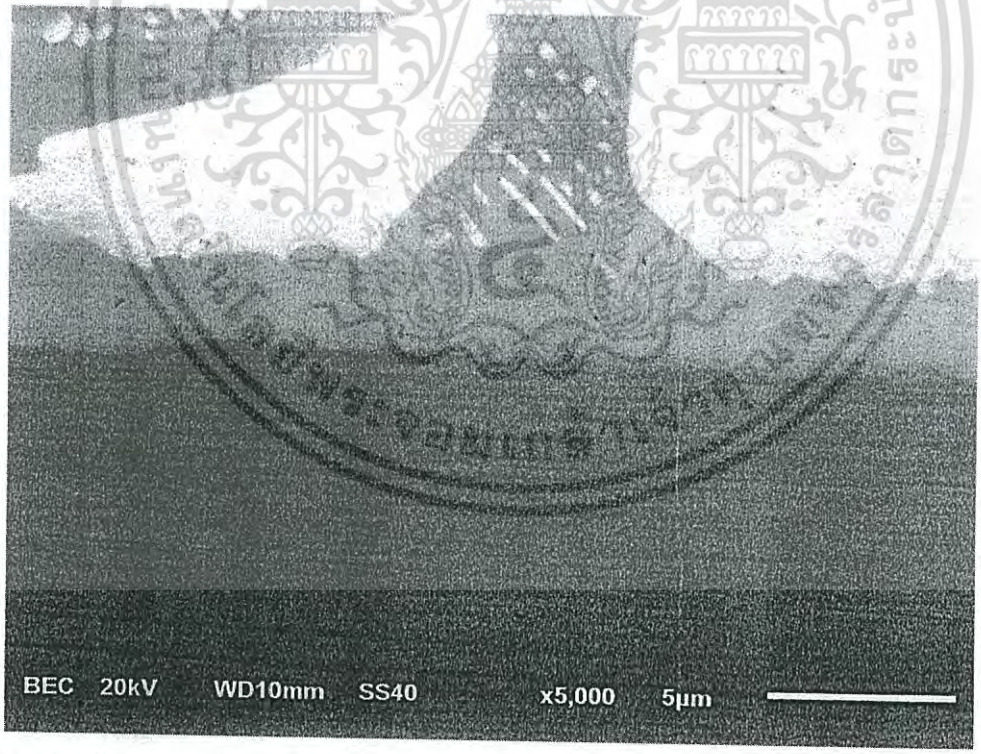


รูปที่ จ.76 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

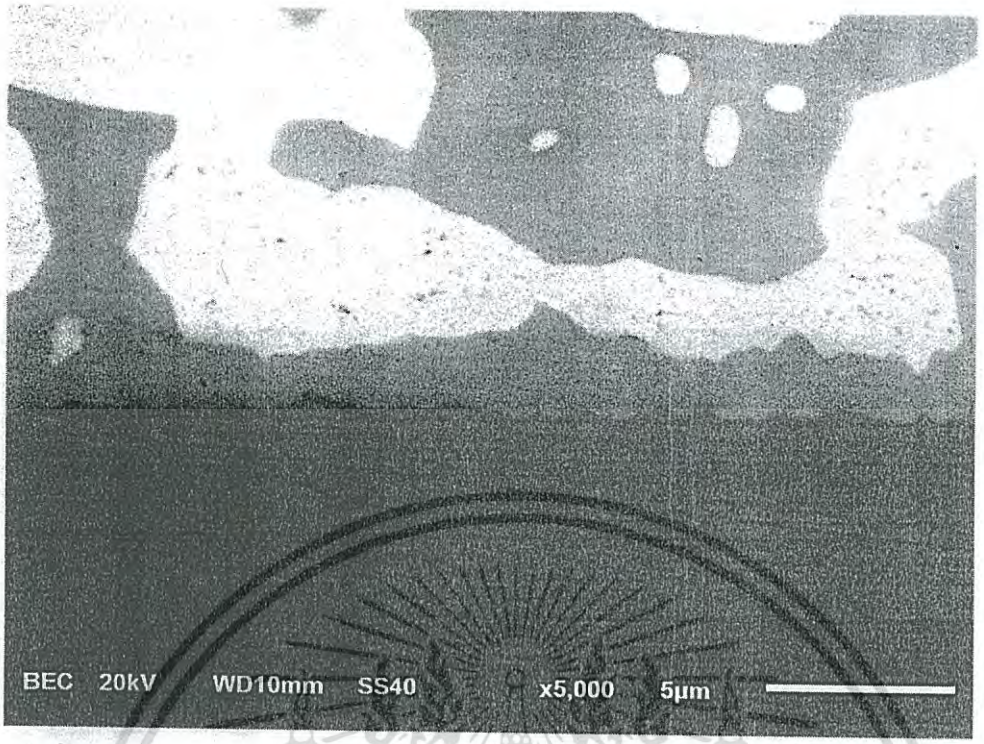


รูปที่ จ.77 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 10 ชั่วโมง

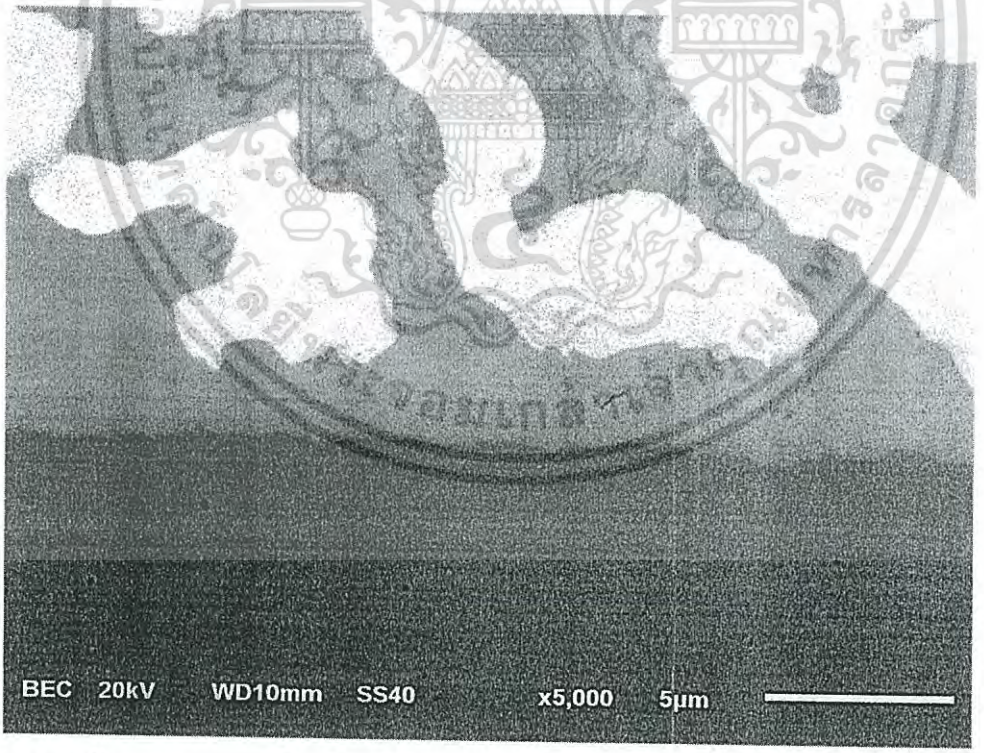


รูปที่ จ.78 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



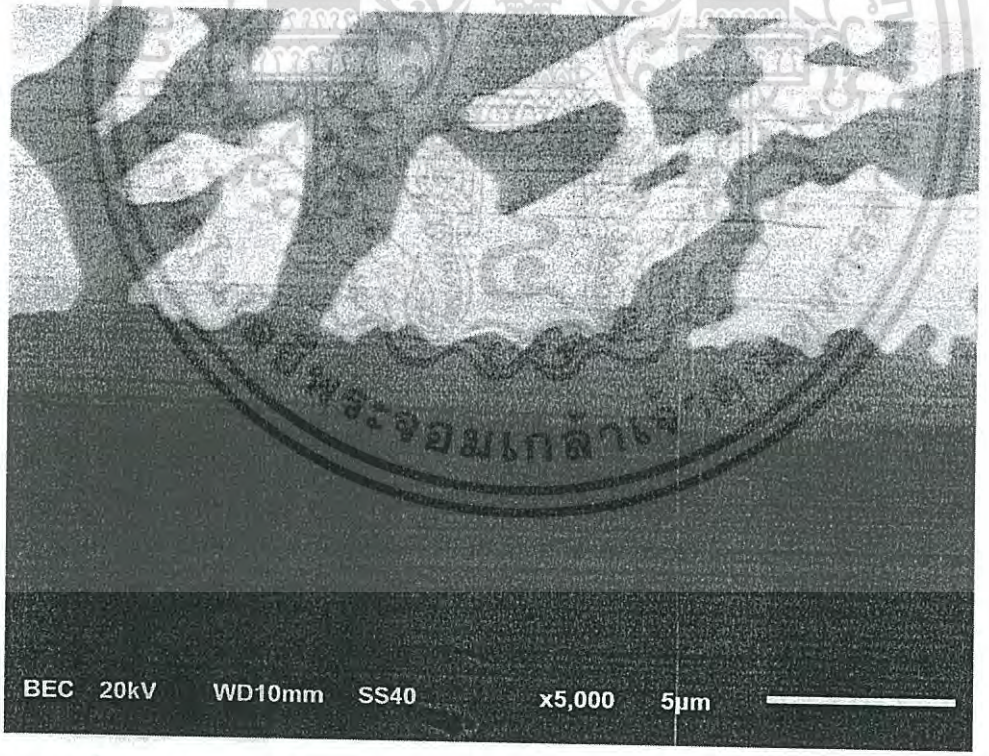
รูปที่ จ.79 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 10 ชั่วโมง



รูปที่ จ.80 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 10 ชั่วโมง

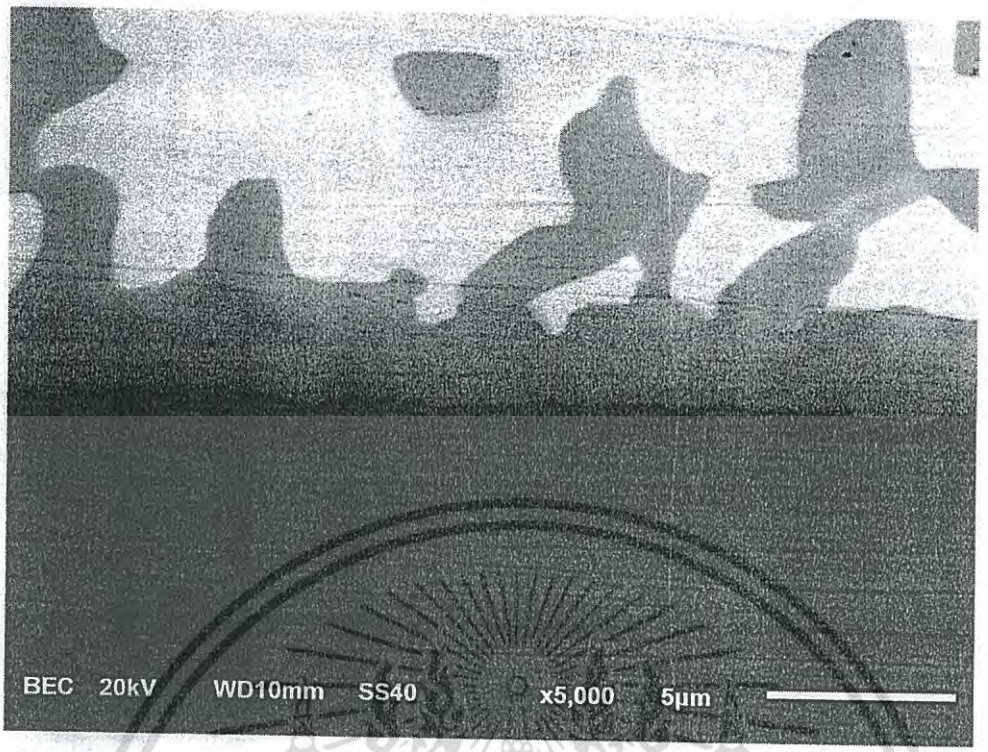
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ จ.81 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 10 ชั่วโมง

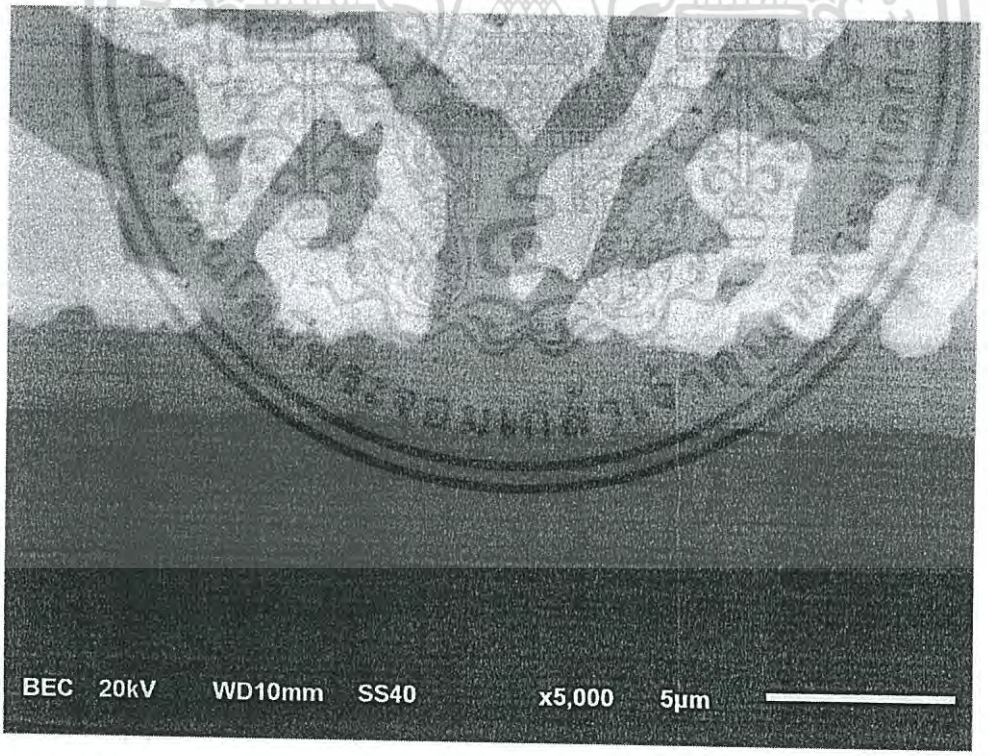


รูปที่ จ.82 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

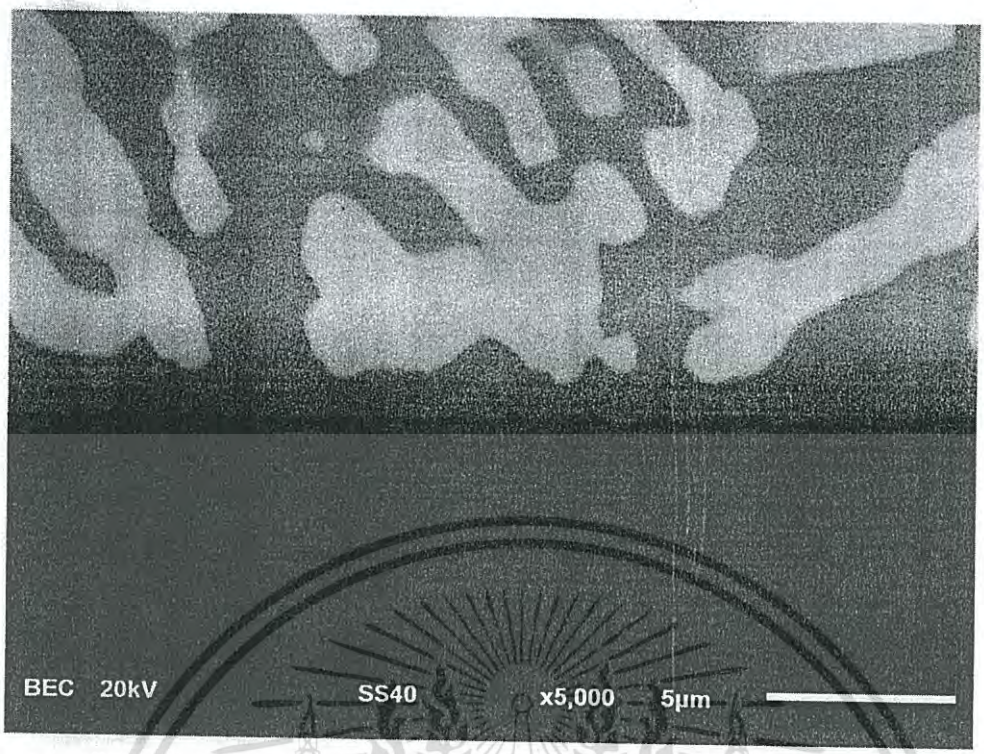


รูปที่ จ.83 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 10 ชั่วโมง

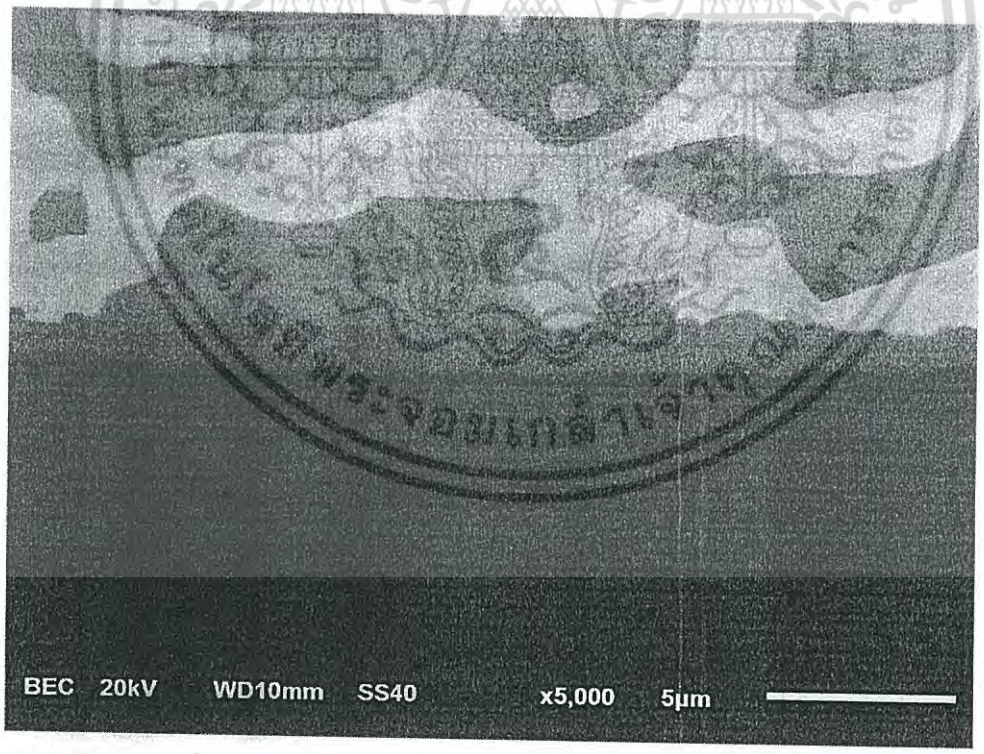


รูปที่ จ.84 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

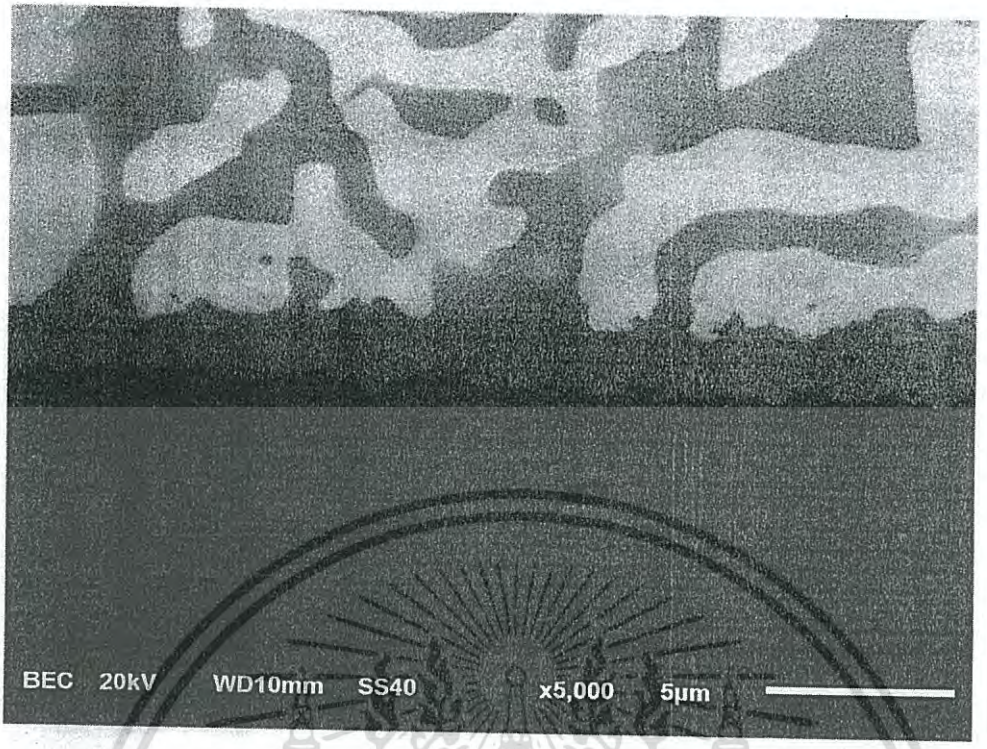


รูปที่ จ.85 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 100 ชั่วโมง

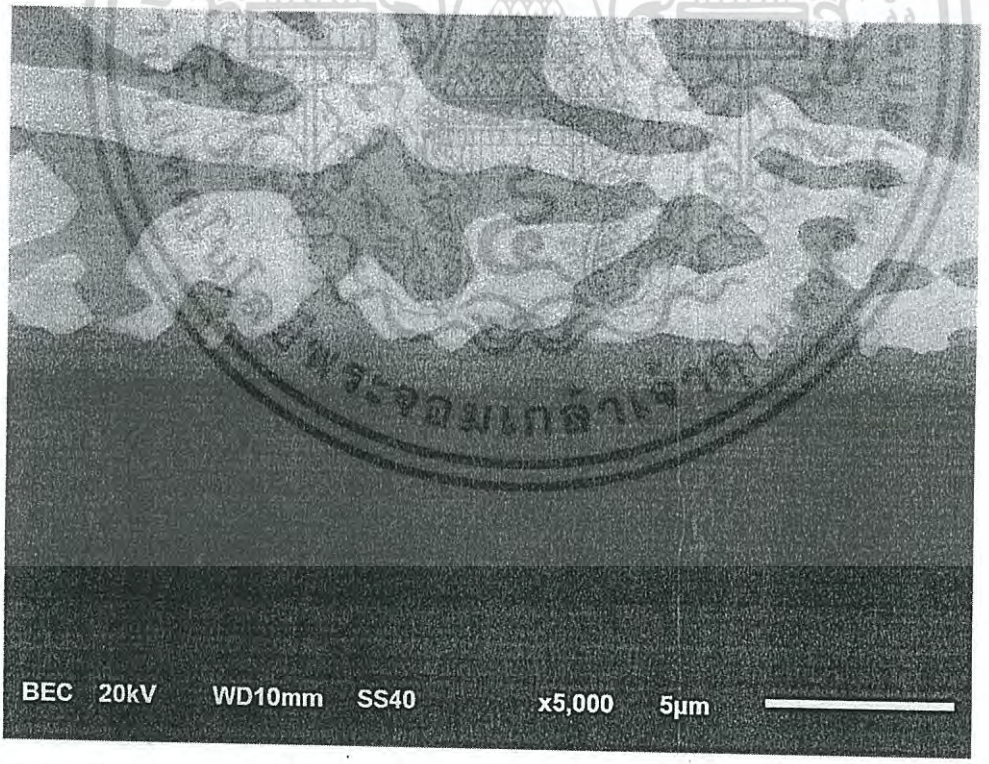


รูปที่ จ.86 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

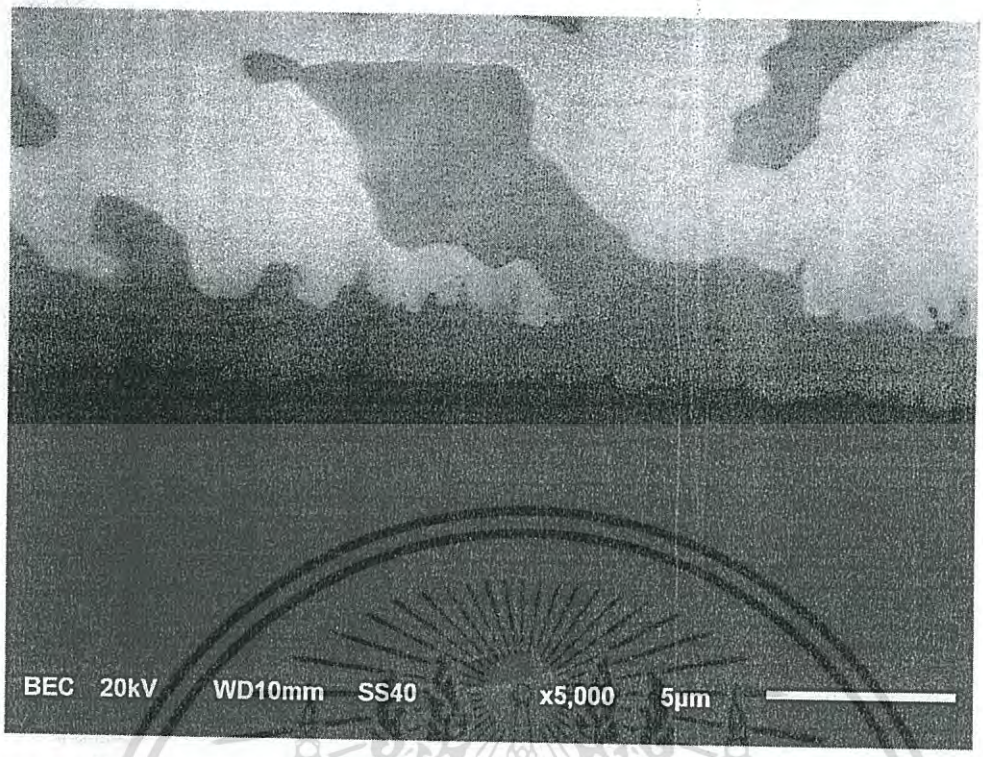


รูปที่ จ.87 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่ม ที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 100 ชั่วโมง

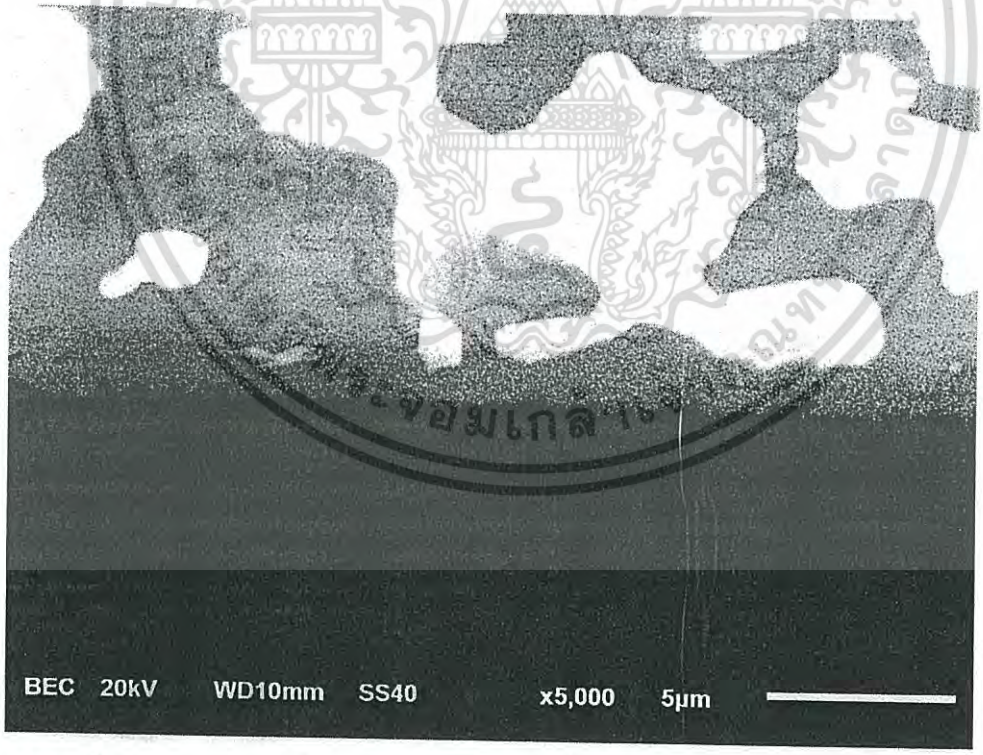


รูปที่ จ.88 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่ม ที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

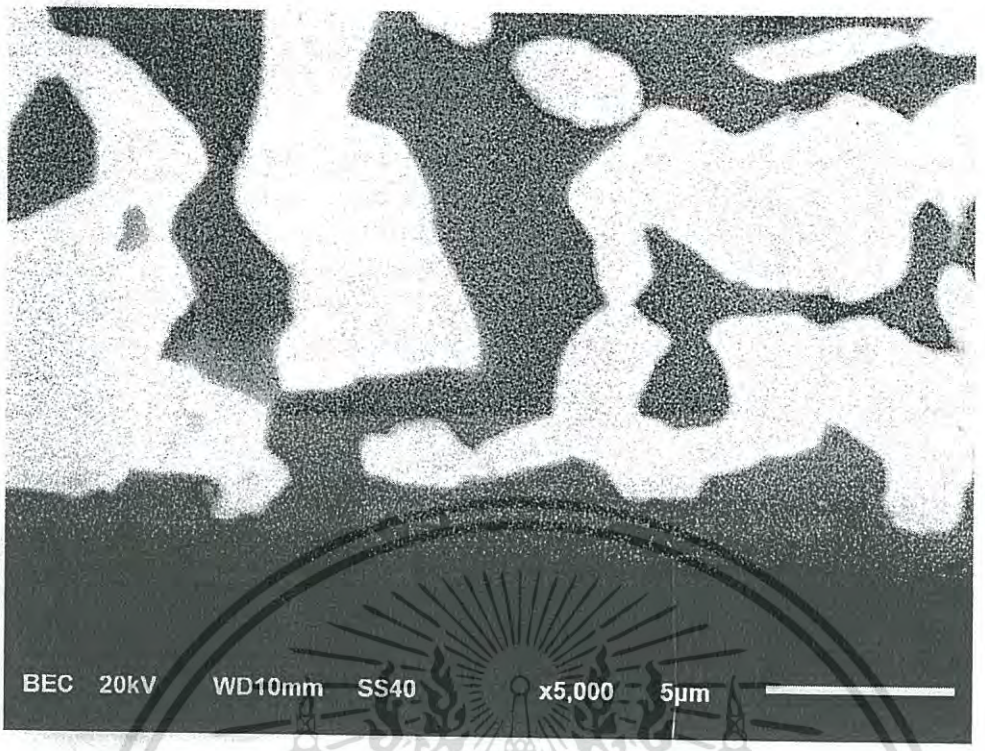


รูปที่ จ.89 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 100 ชั่วโมง

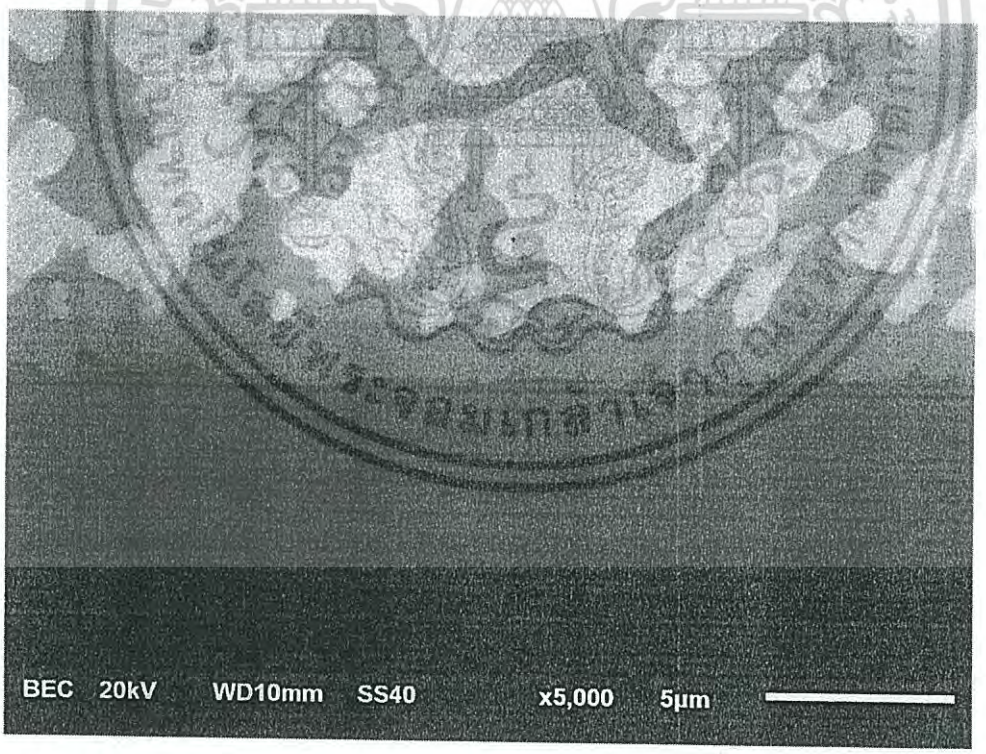


รูปที่ จ.90 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

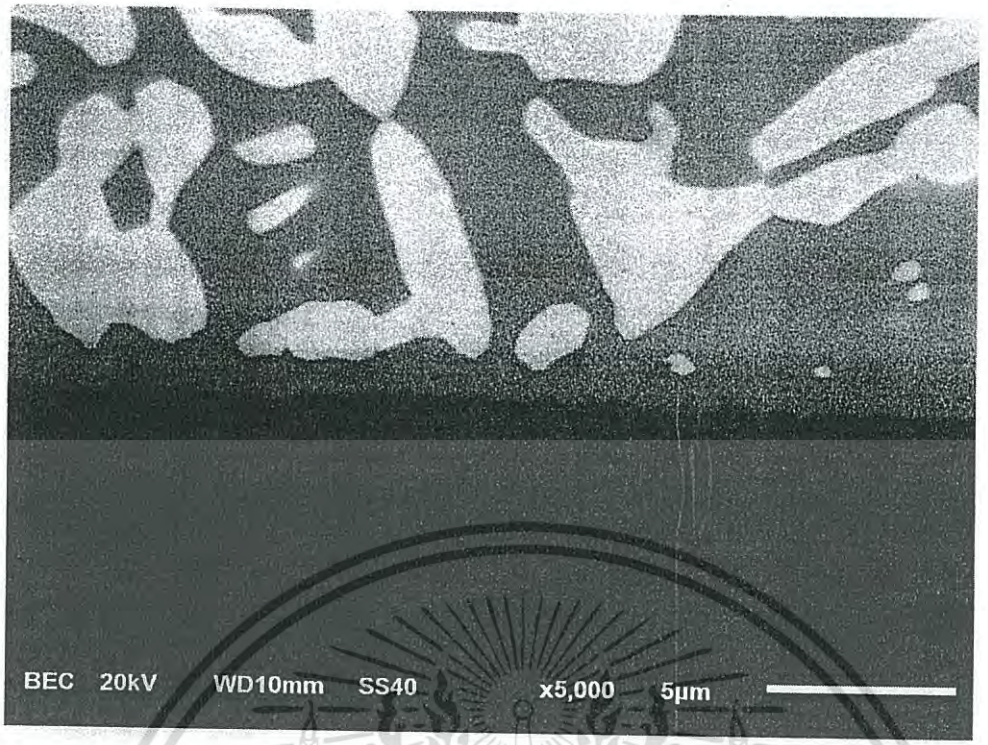


รูปที่ จ.91 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 100 ชั่วโมง

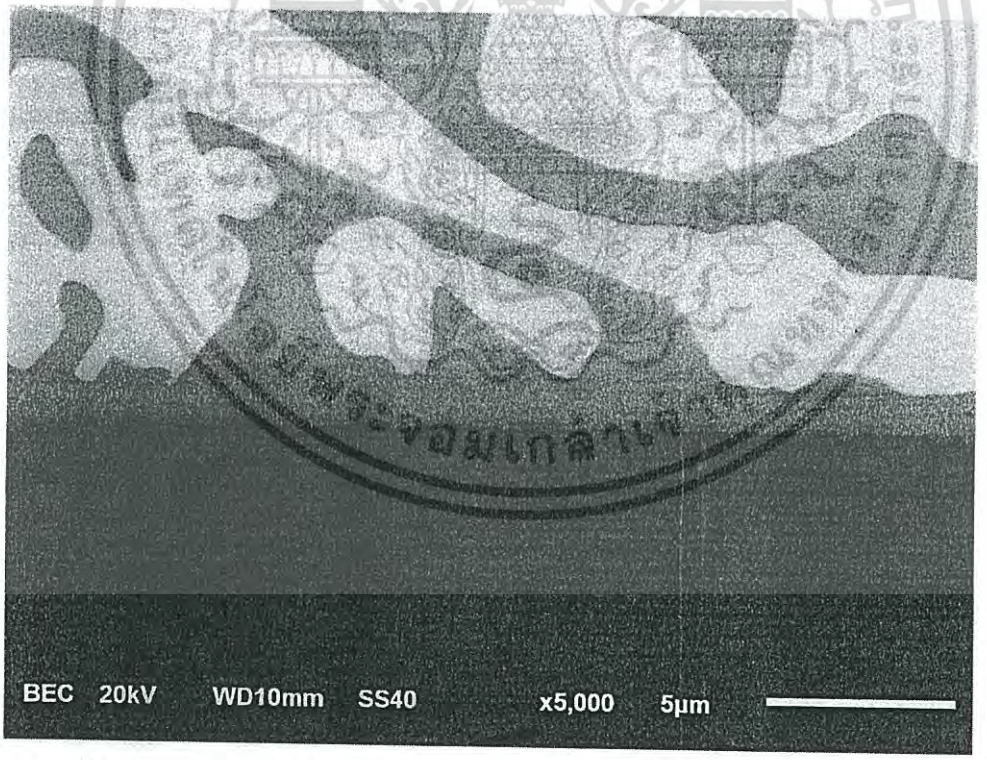


รูปที่ จ.92 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

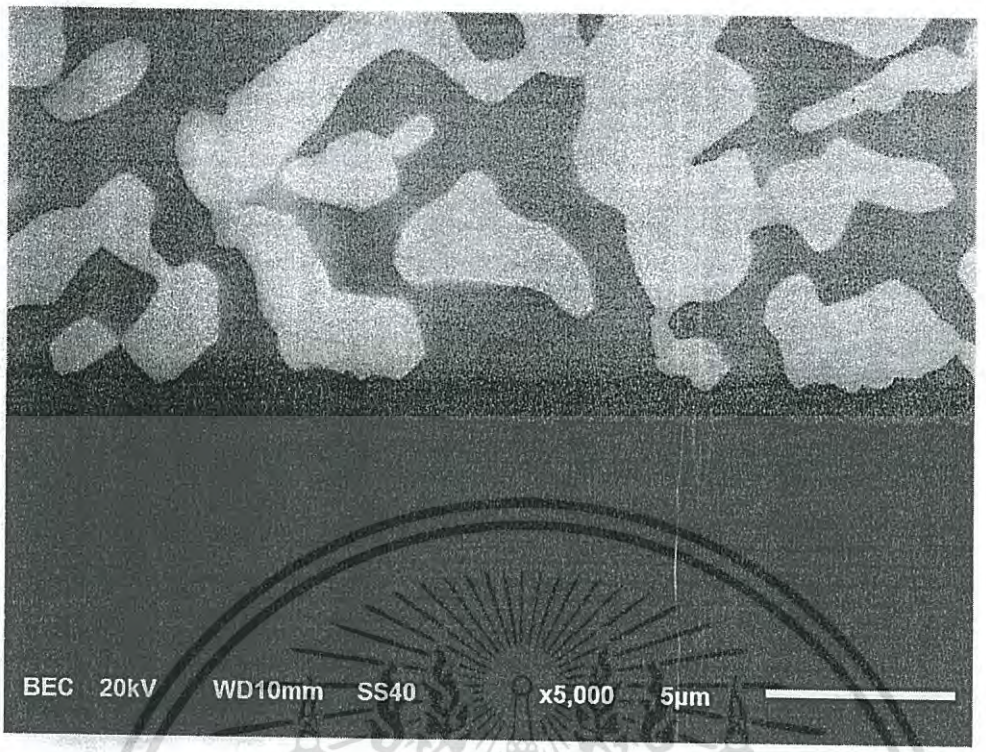


รูปที่ จ.93 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 100 ชั่วโมง

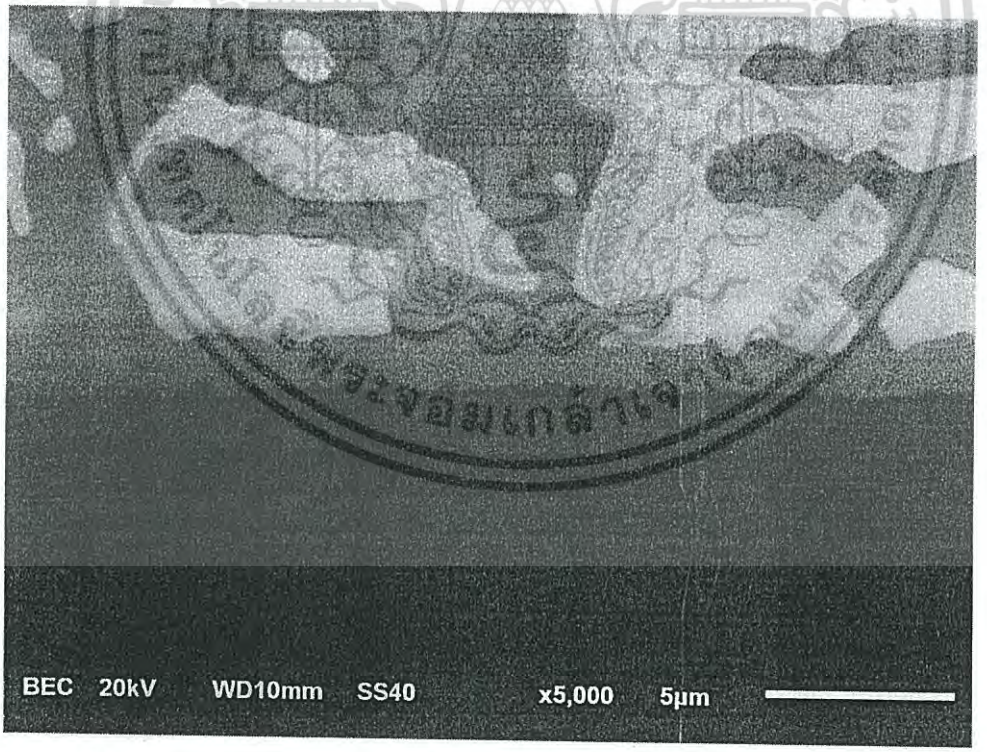


รูปที่ จ.94 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

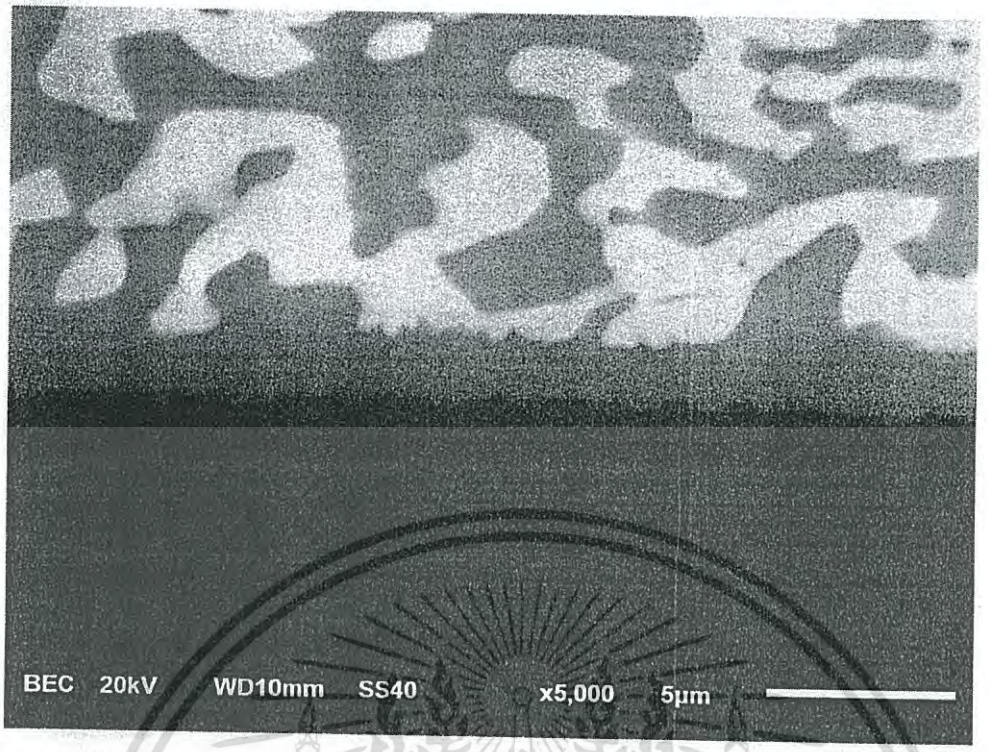


รูปที่ จ.95 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 100 ชั่วโมง

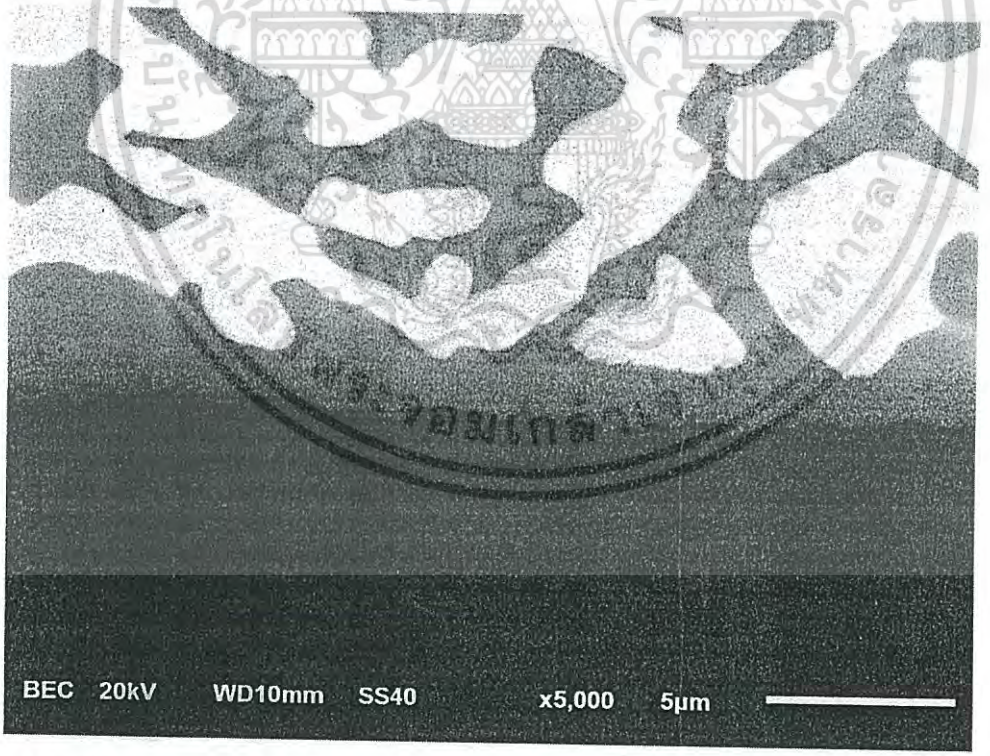


รูปที่ จ.96 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

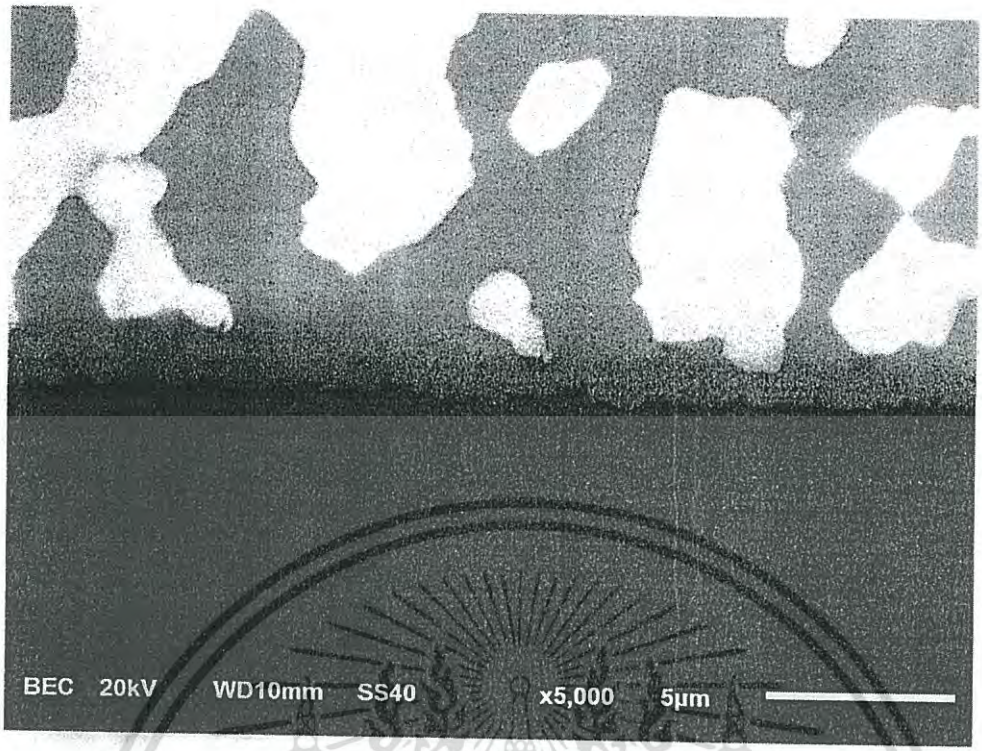


รูปที่ จ.97 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 100 ชั่วโมง

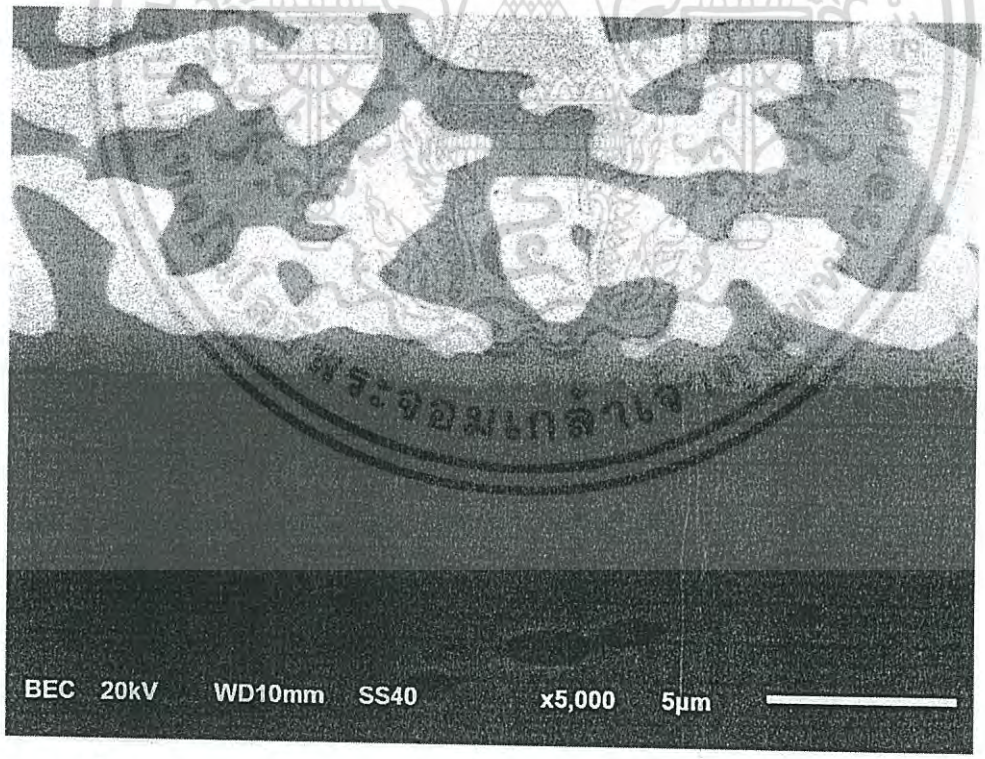


รูปที่ จ.98 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

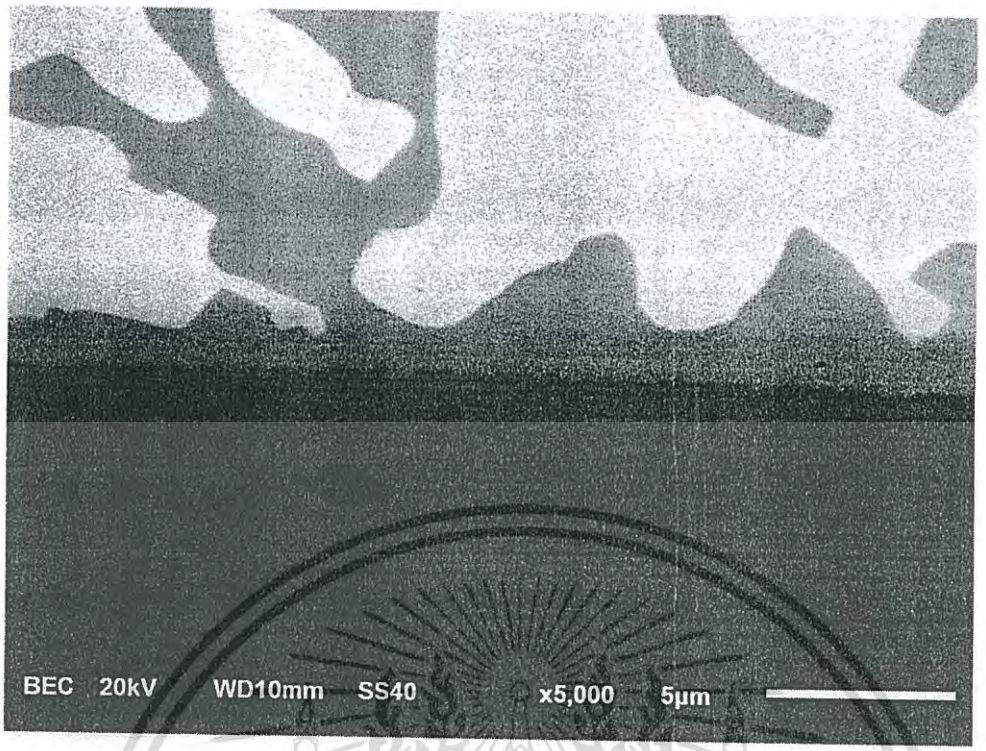


รูปที่ จ.99 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 100 ชั่วโมง

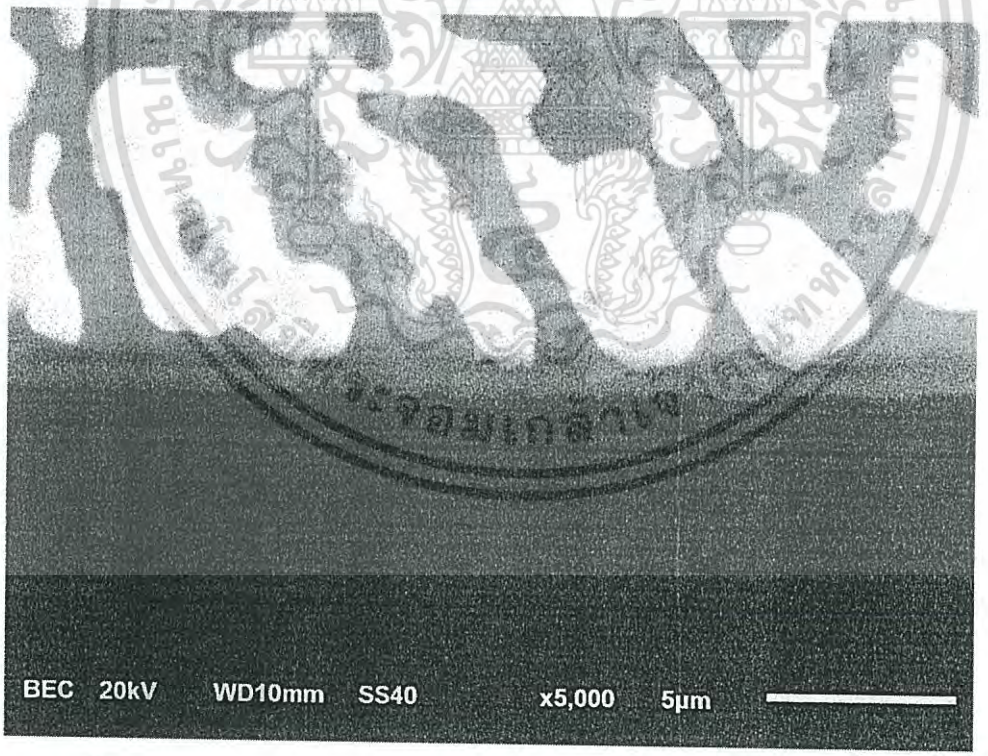


รูปที่ จ.100 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

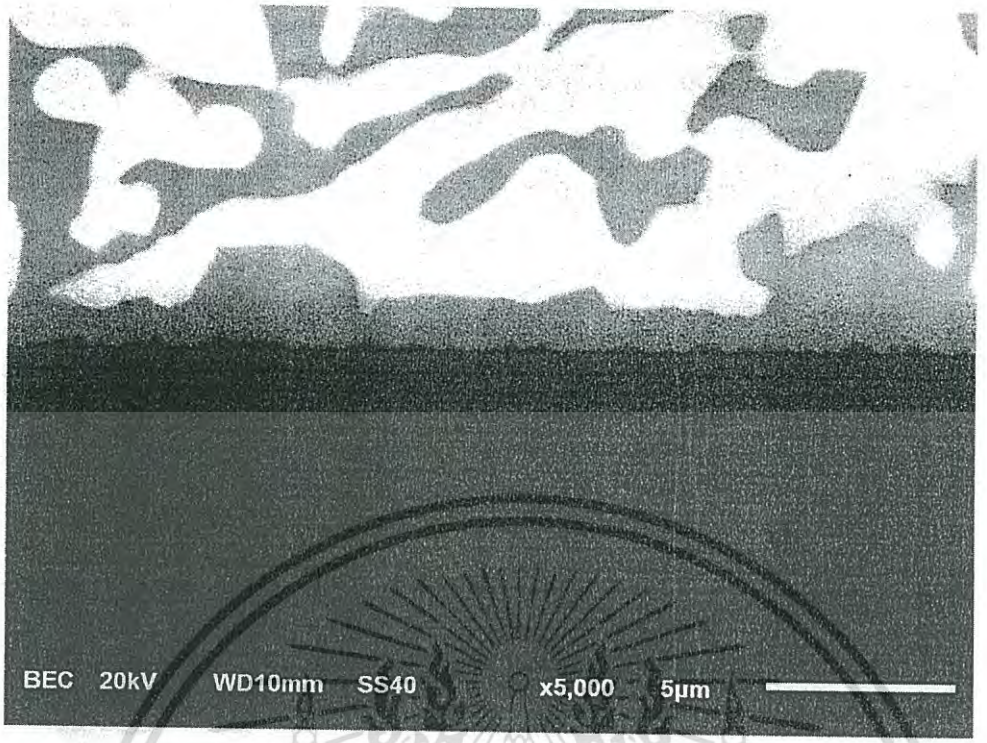


รูปที่ จ.101 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 100 ชั่วโมง

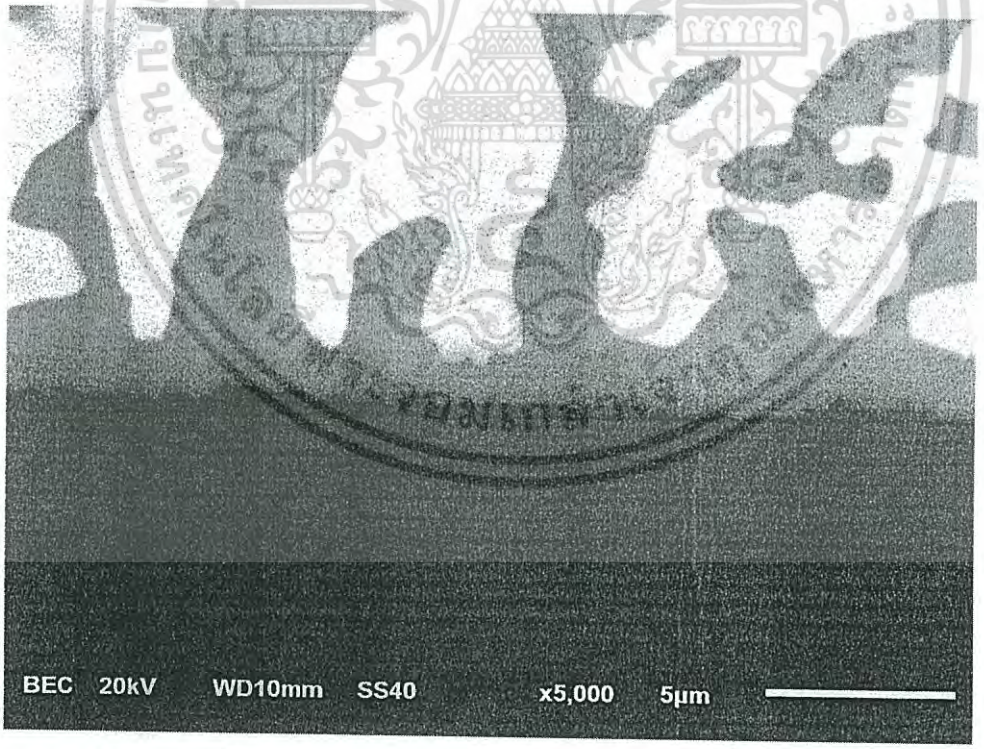


รูปที่ จ.102 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

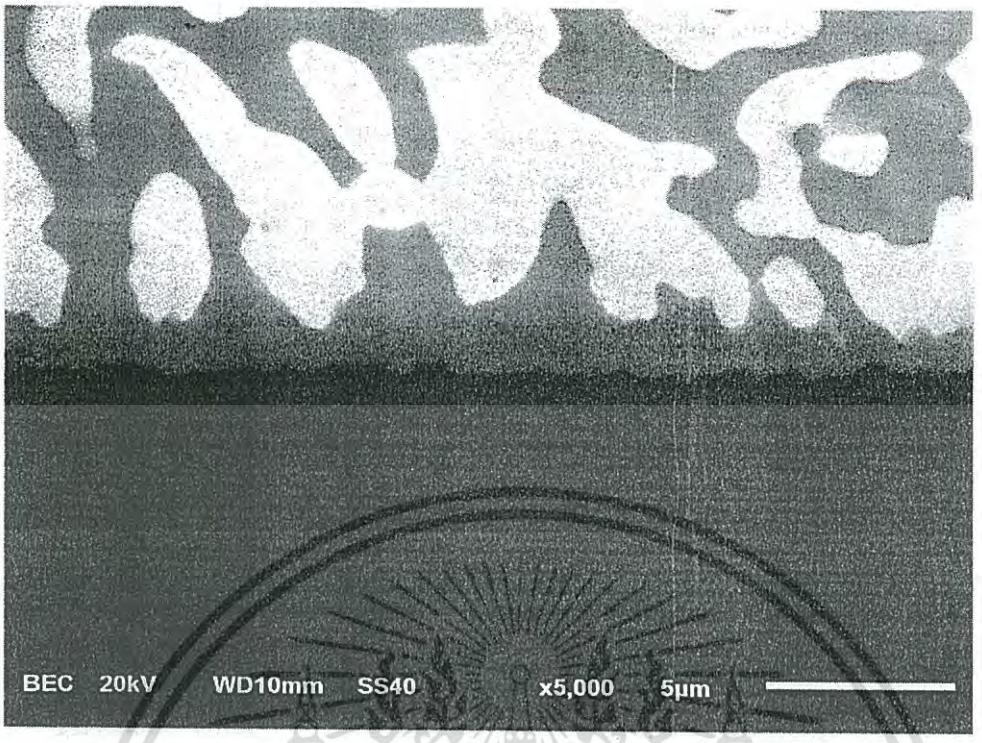


รูปที่ จ.103 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 100 ชั่วโมง

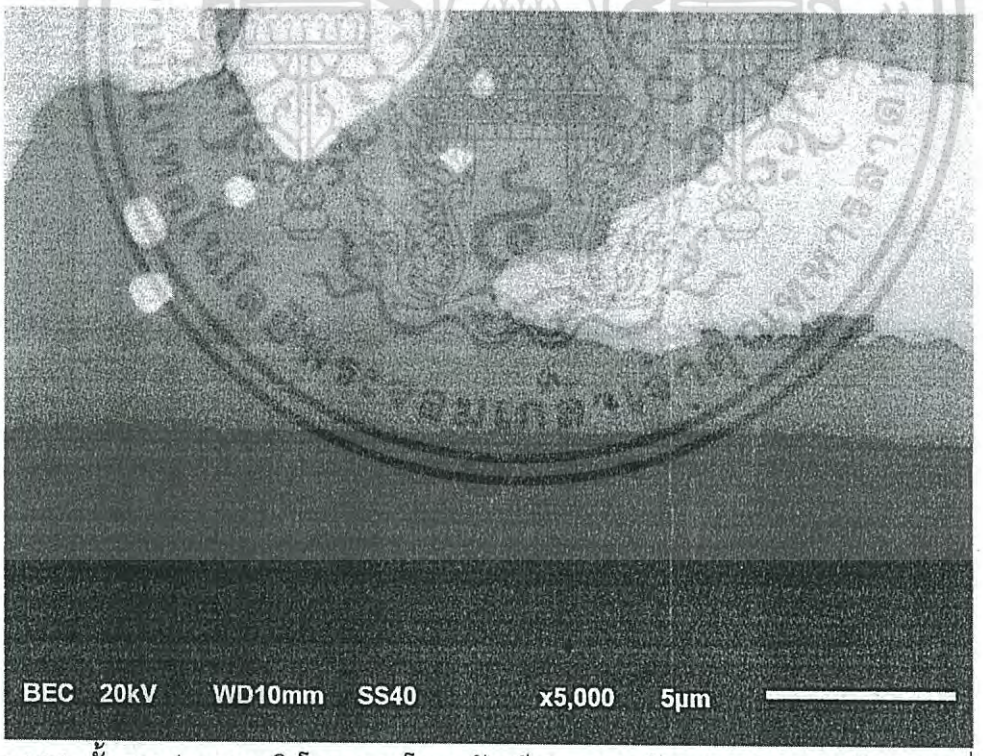


รูปที่ จ.104 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

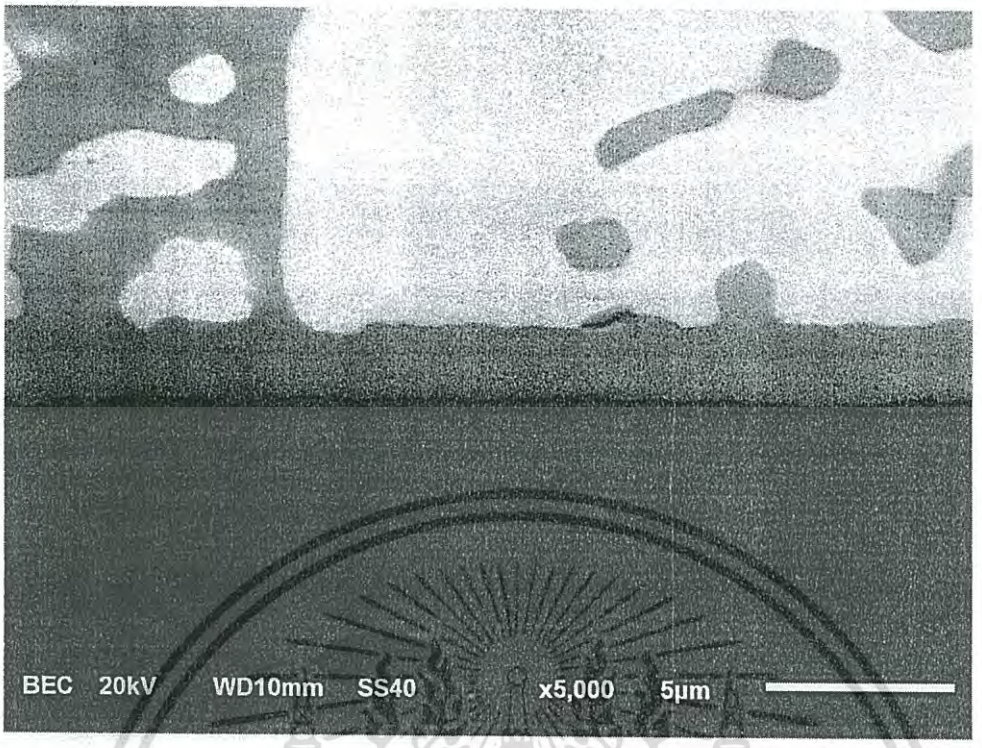


รูปที่ จ.105 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 100 ชั่วโมง

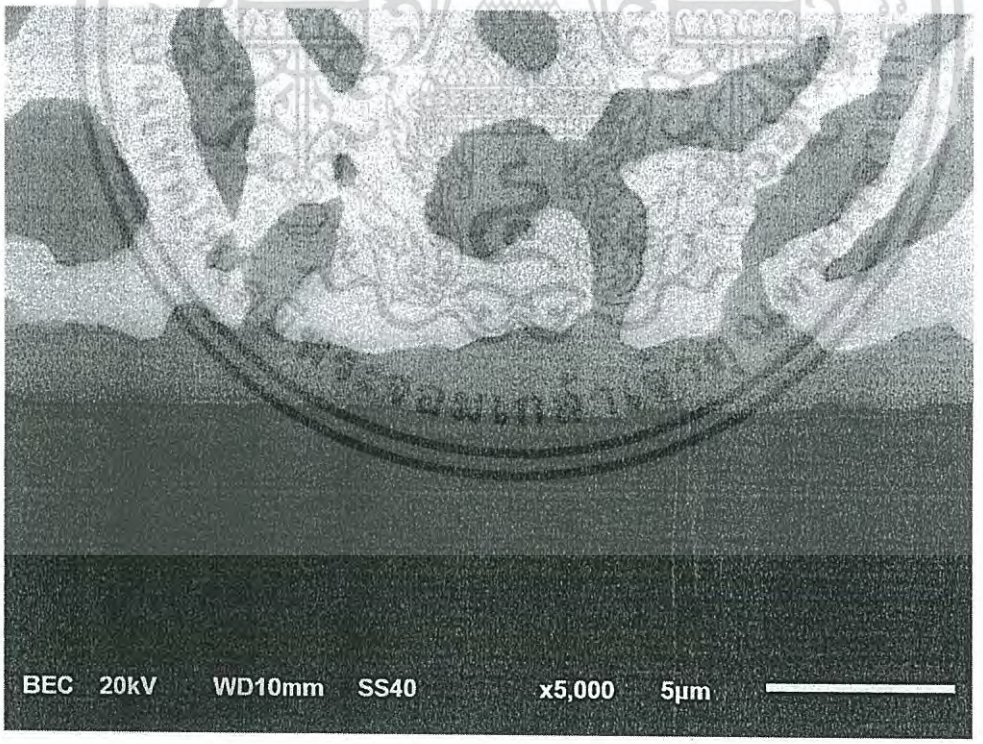


รูปที่ จ.106 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

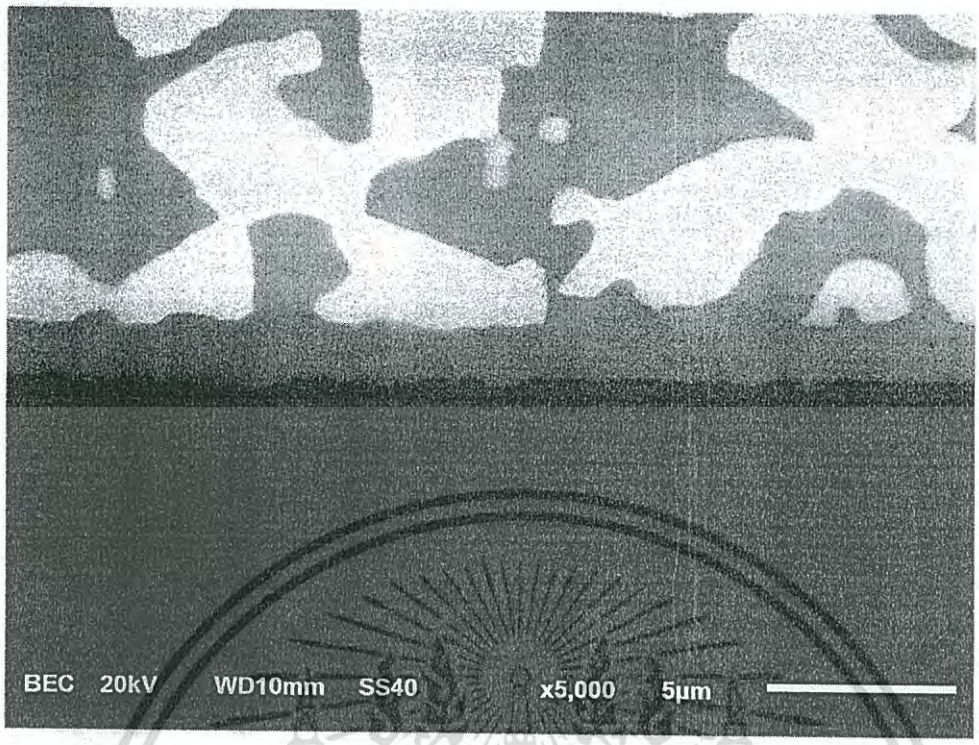


รูปที่ จ.107 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่ม ที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 100 ชั่วโมง

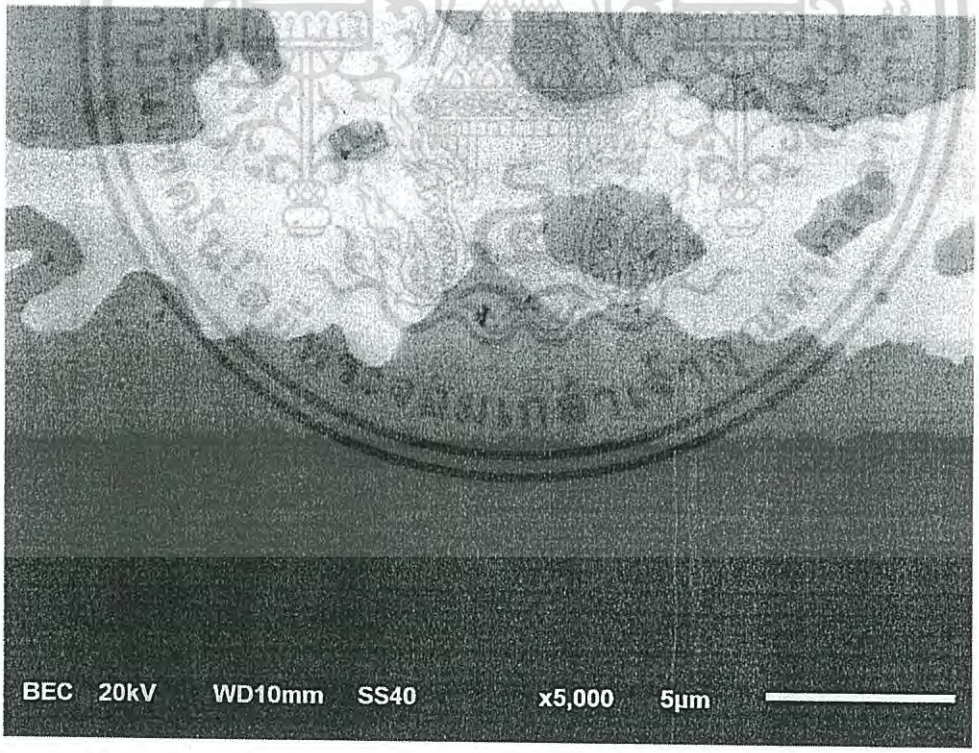


รูปที่ จ.108 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่ม ที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

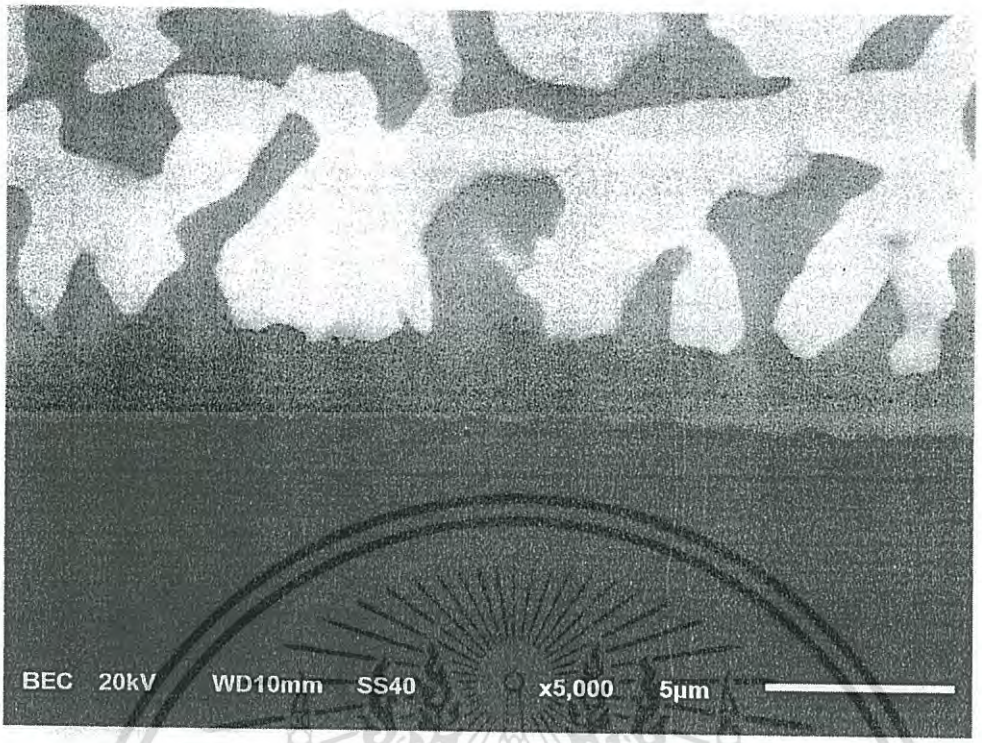


รูปที่ จ.109 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 100 ชั่วโมง

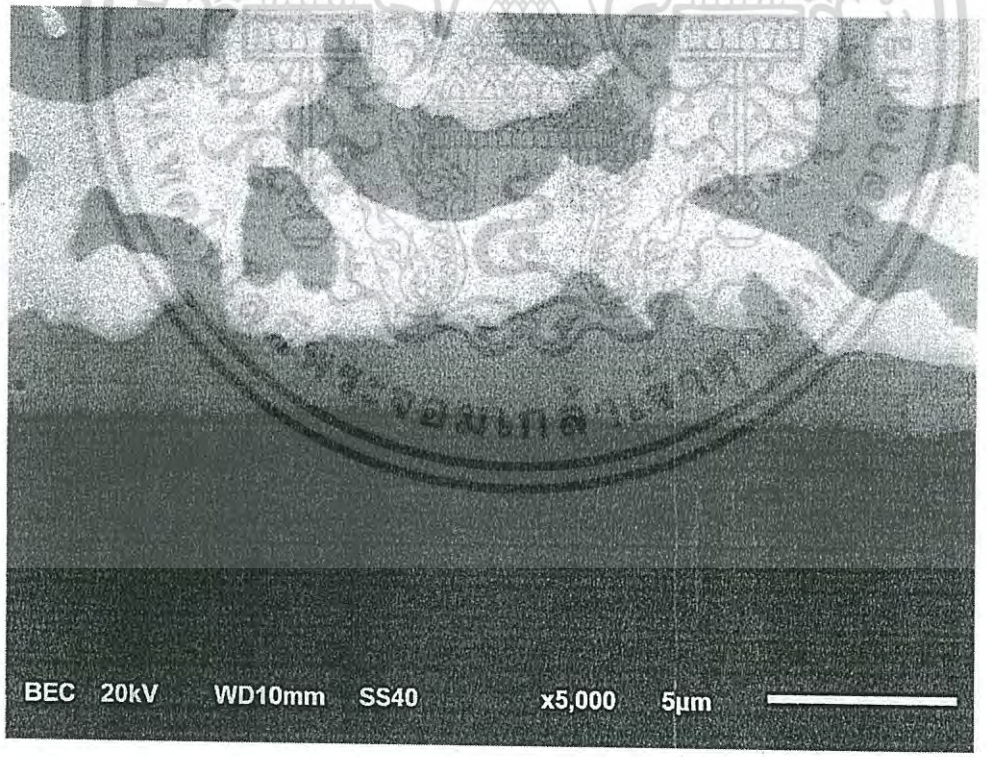


รูปที่ จ.110 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

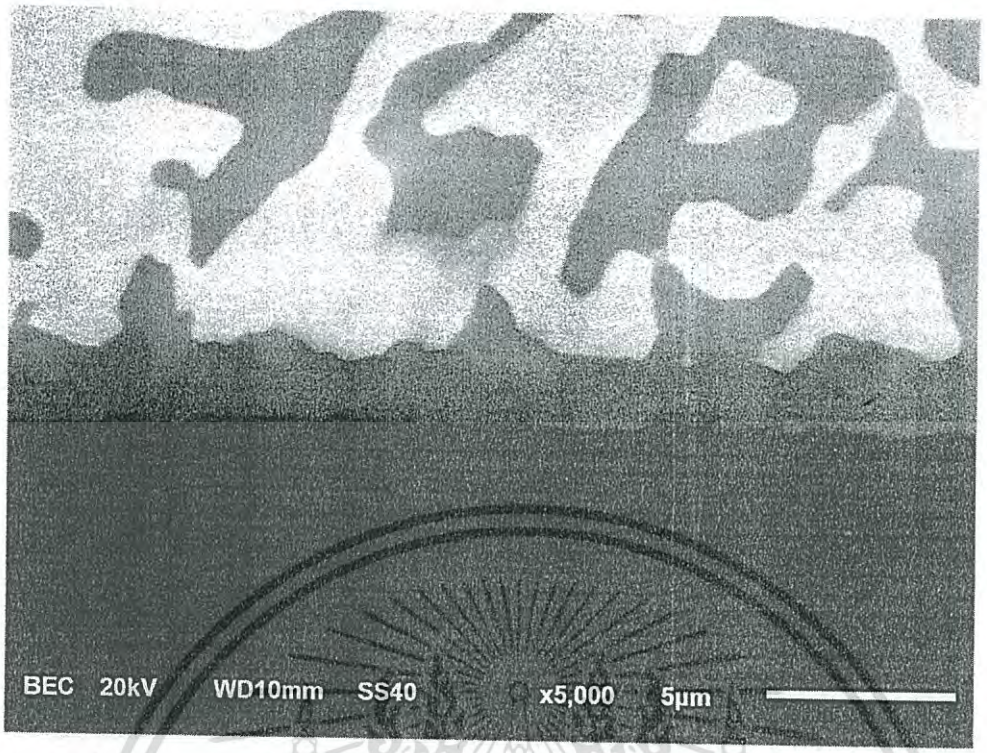


รูปที่ จ.111 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 100 ชั่วโมง

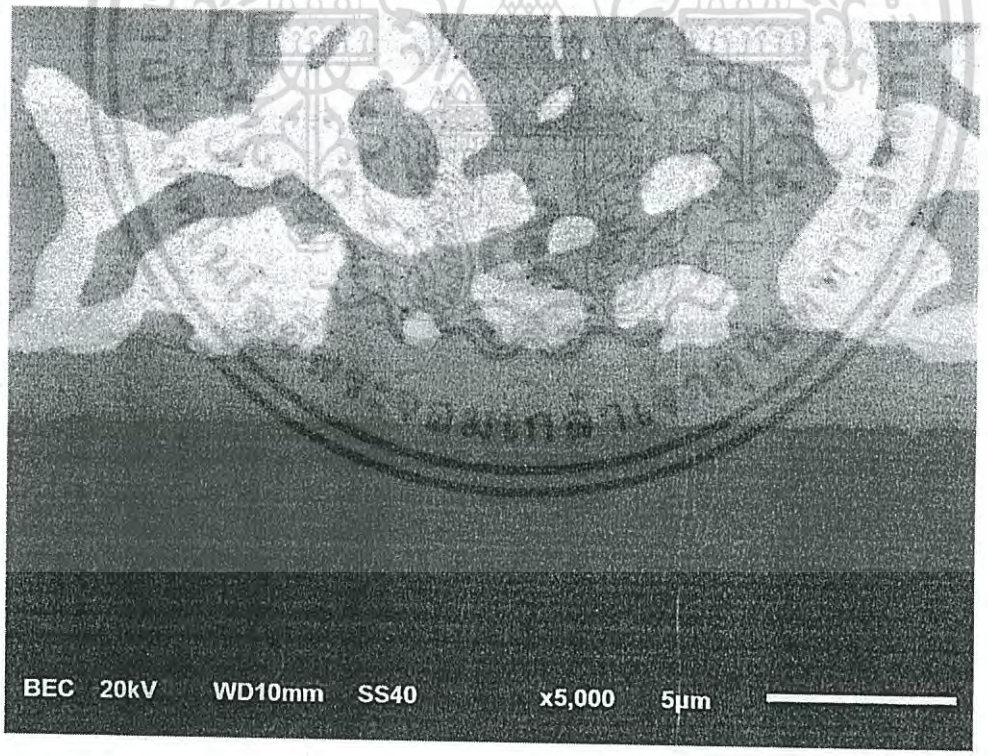


รูปที่ จ.112 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

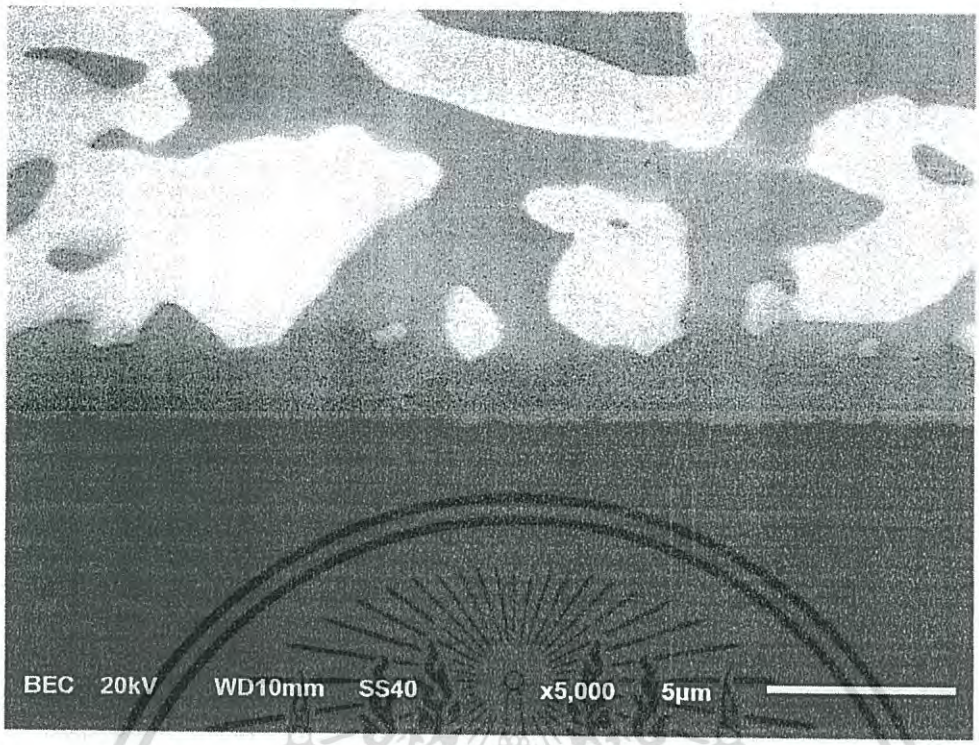


รูปที่ จ.113 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 100 ชั่วโมง

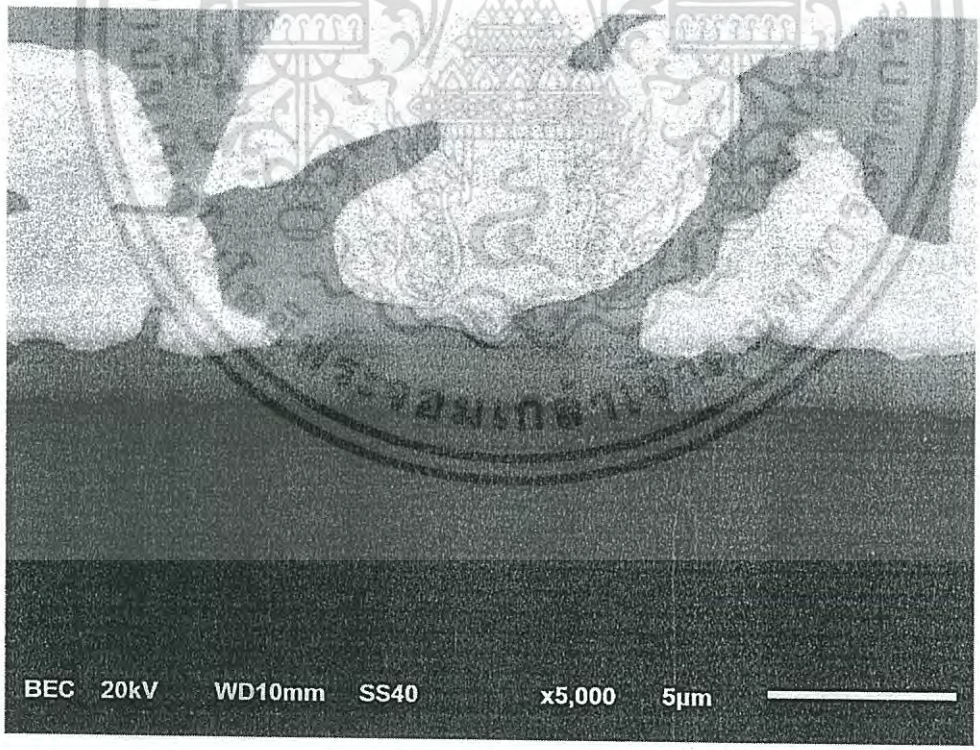


รูปที่ จ.114 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

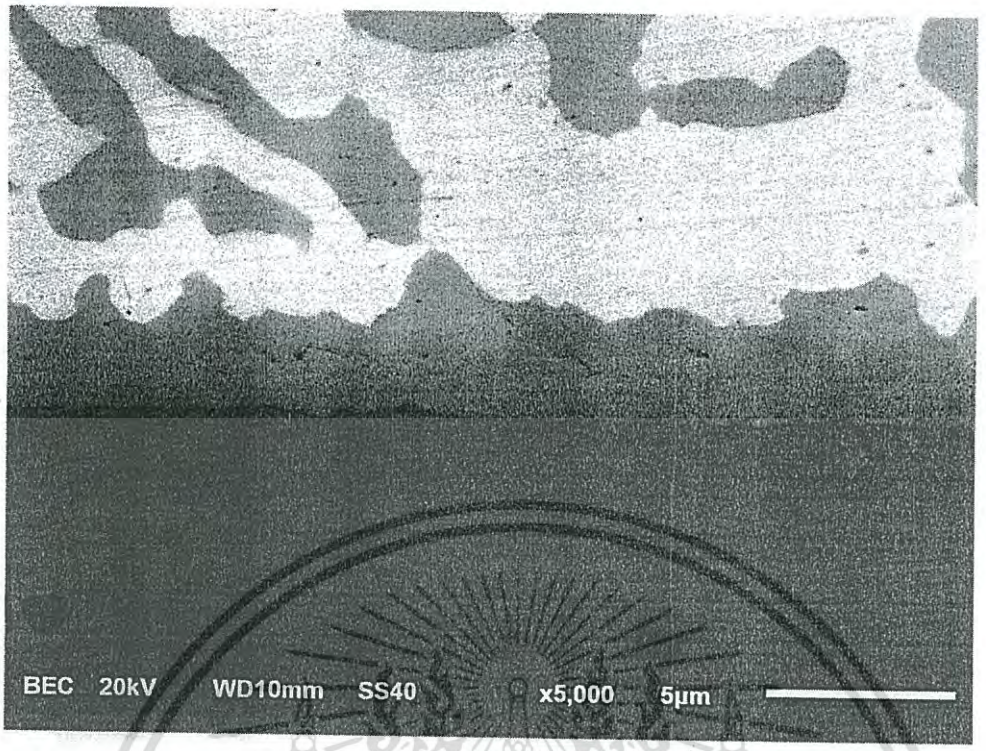


รูปที่ จ.115 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 100 ชั่วโมง

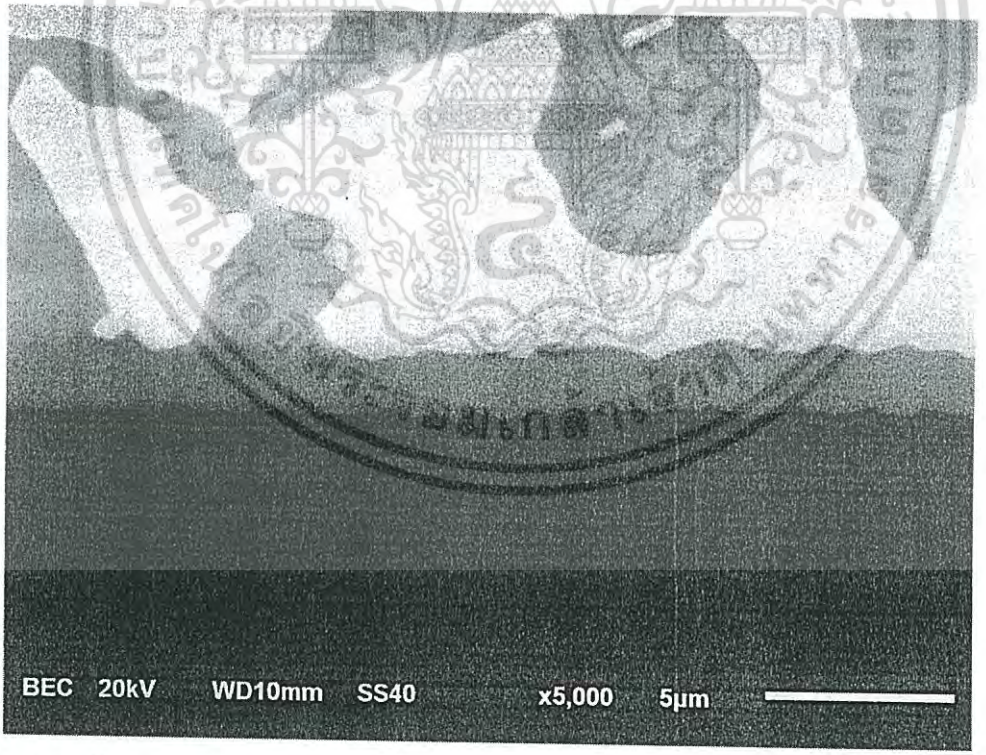


รูปที่ จ.116 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

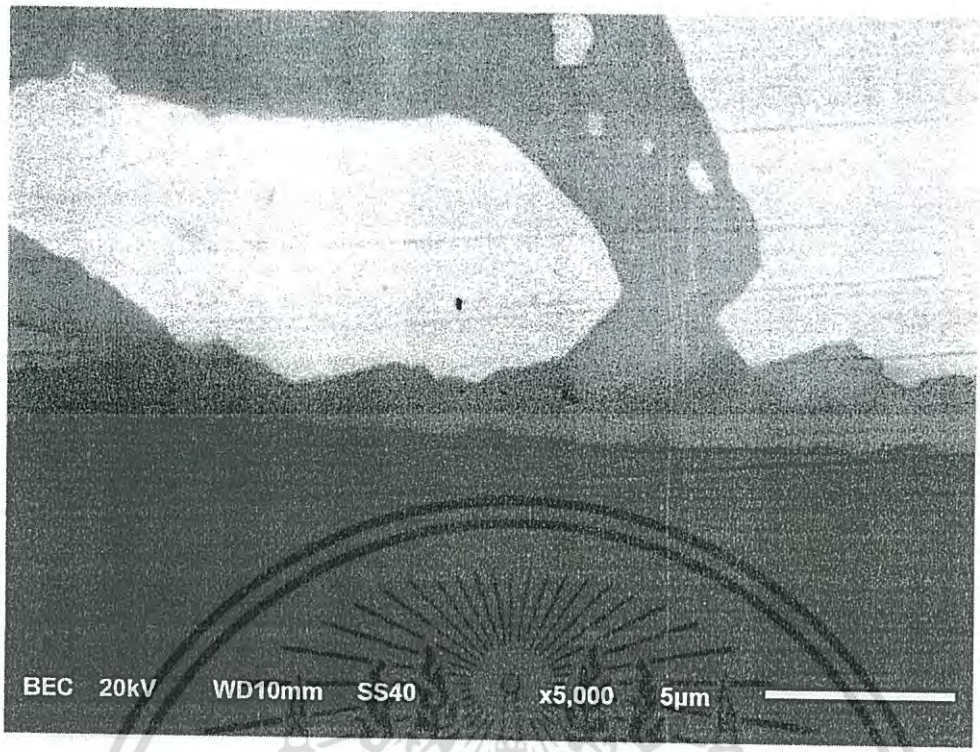


รูปที่ จ.117 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 100 ชั่วโมง

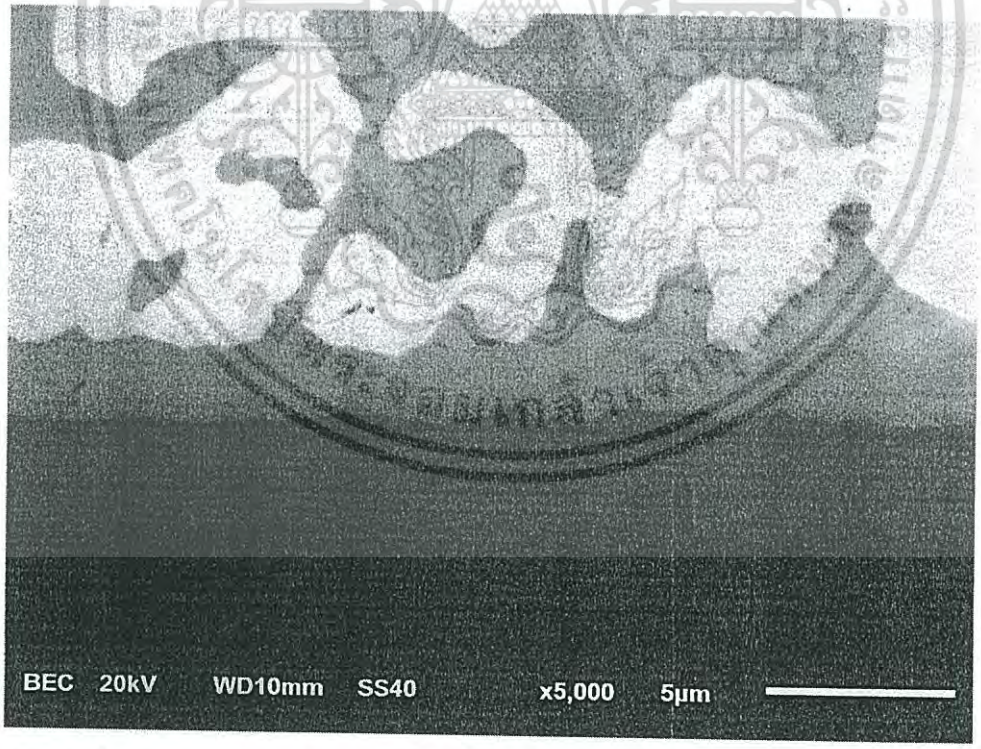


รูปที่ จ.118 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

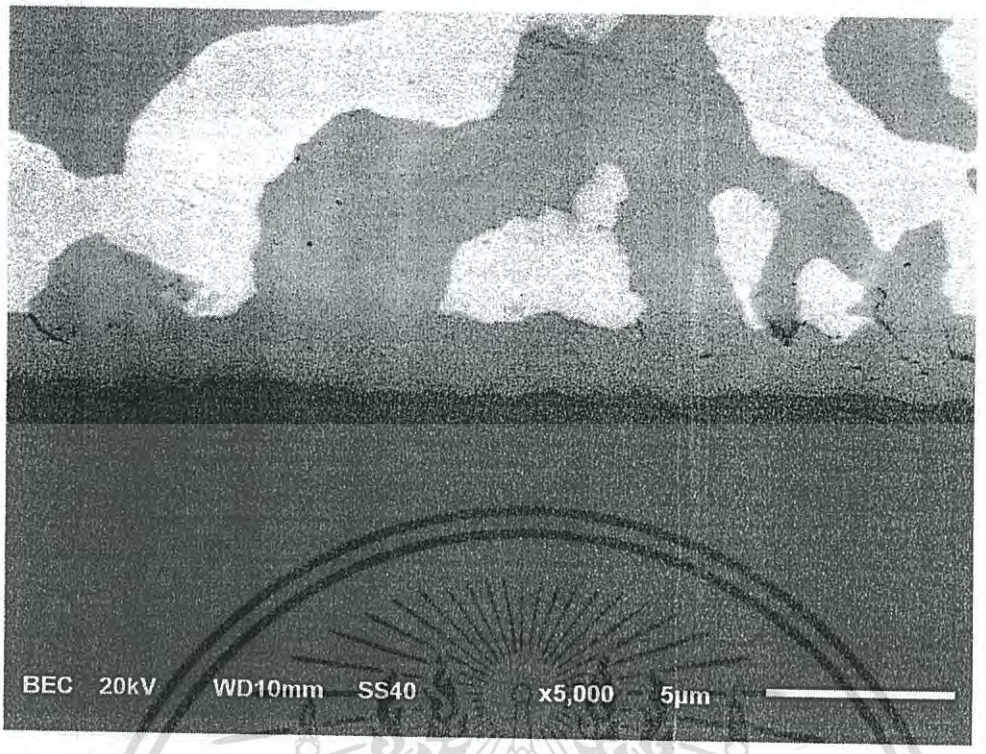


รูปที่ จ.119 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 100 ชั่วโมง

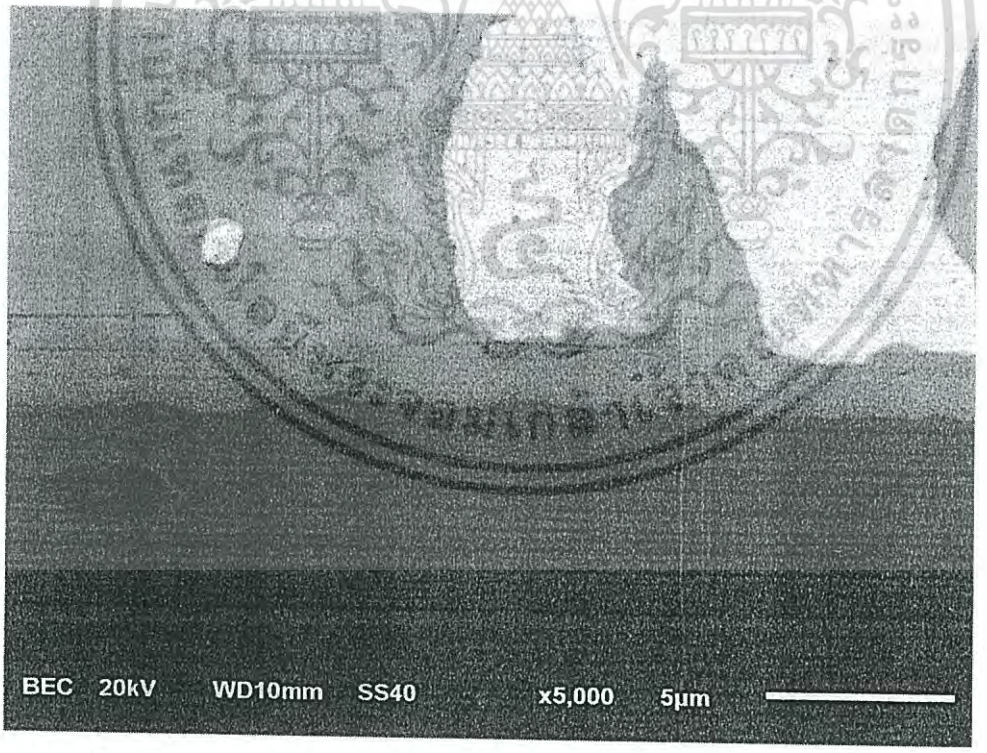


รูปที่ จ.120 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

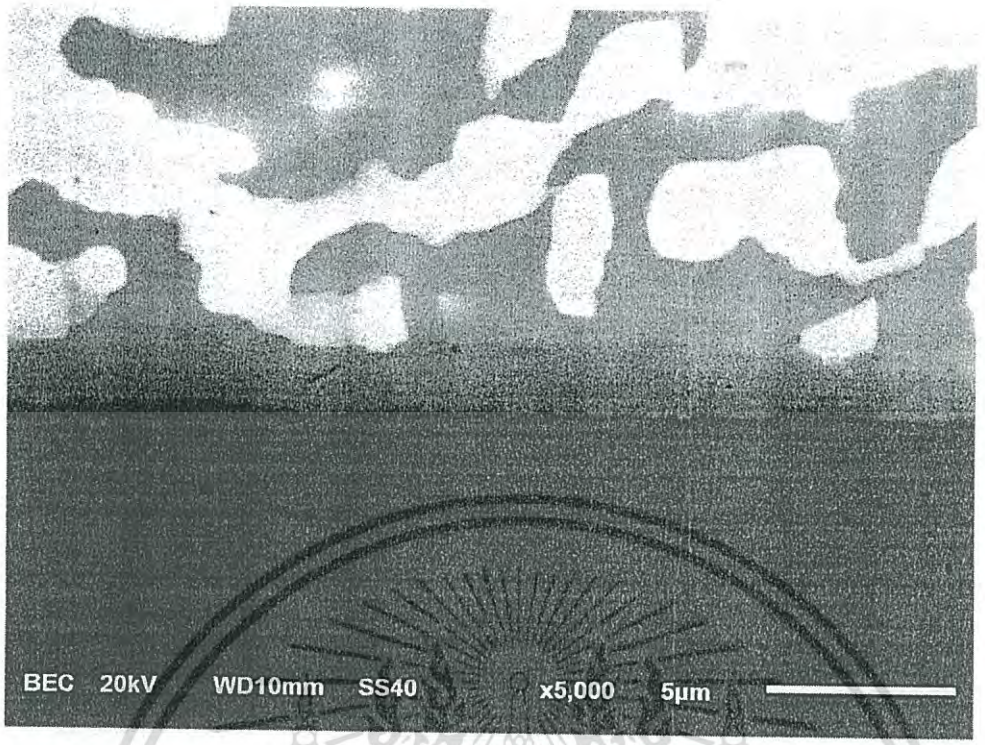


รูปที่ จ.121 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 100 ชั่วโมง

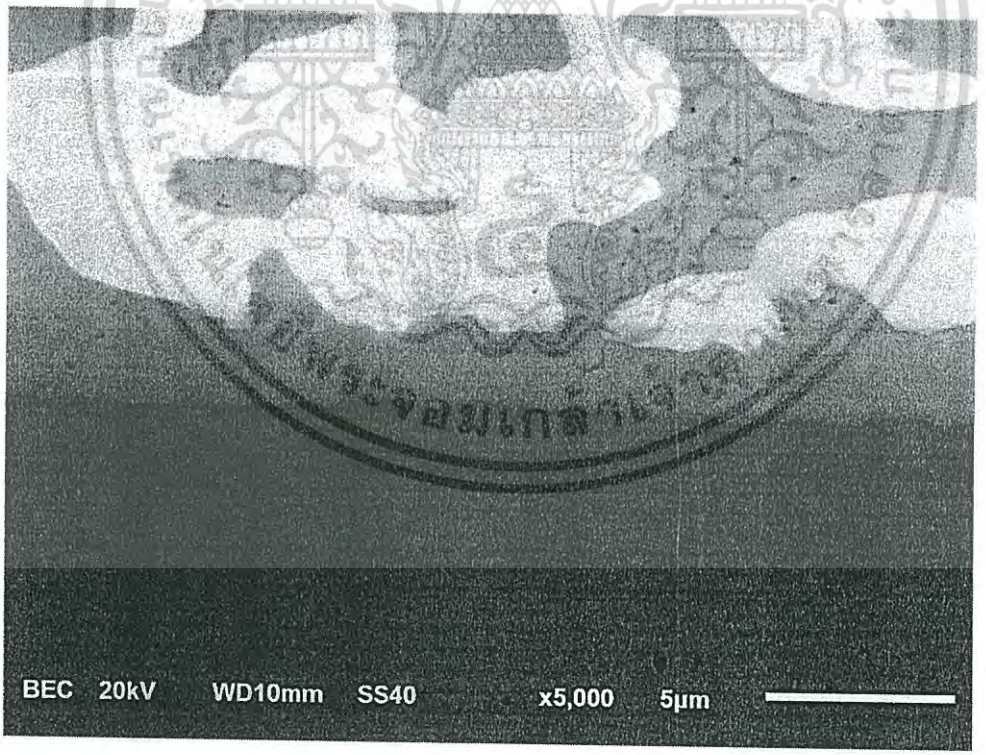


รูปที่ จ.122 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

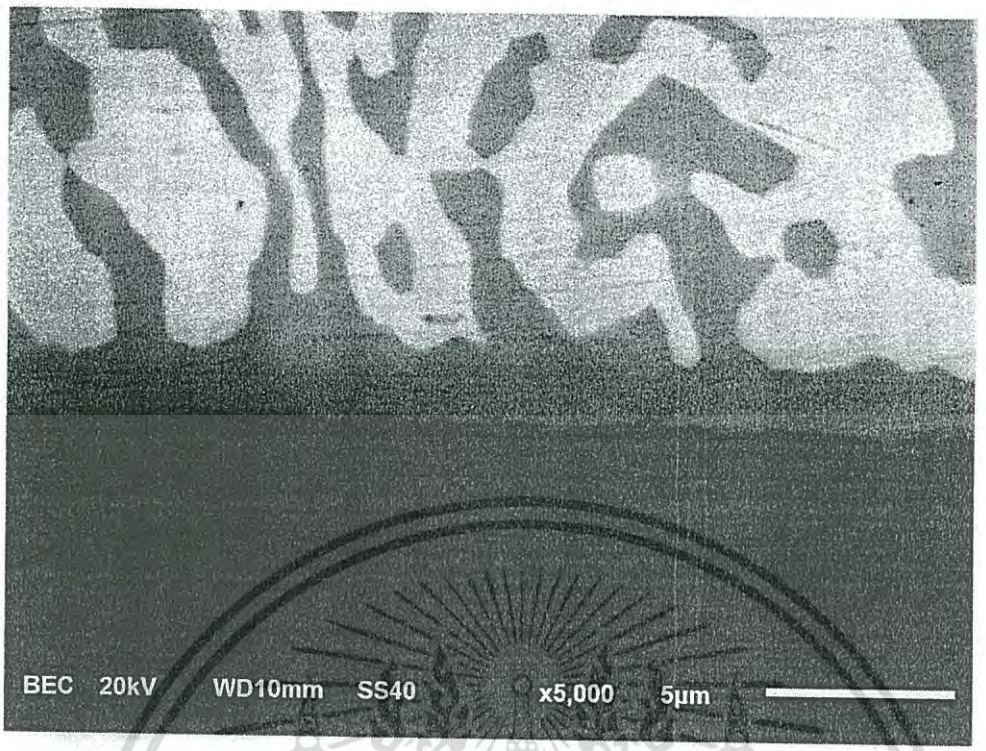


รูปที่ จ.123 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 100 ชั่วโมง

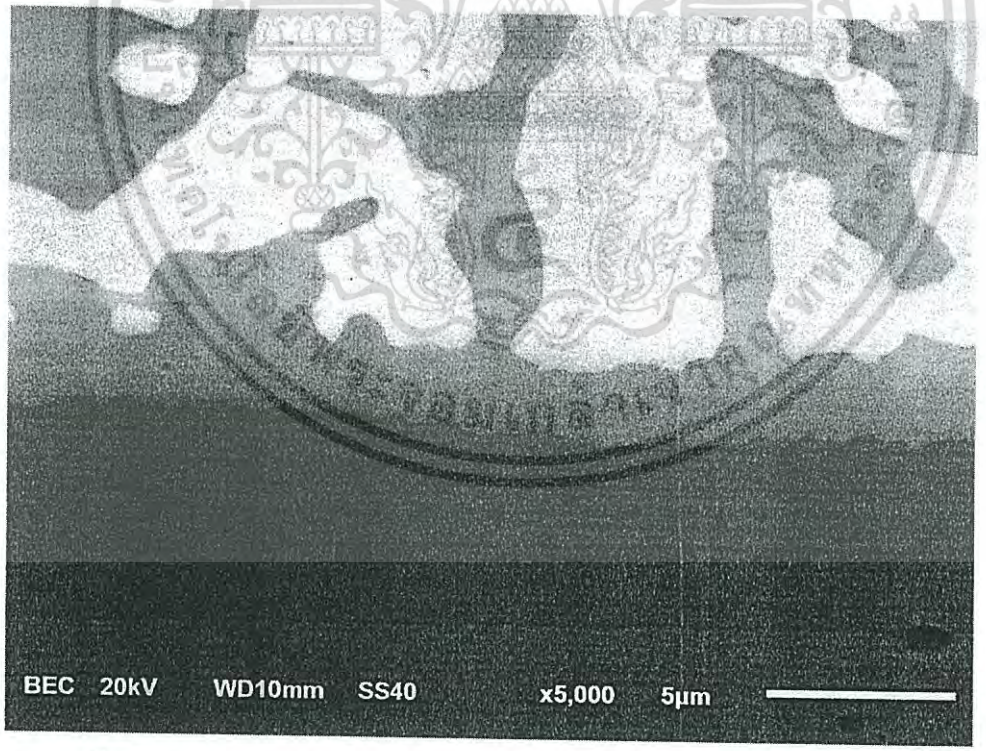


รูปที่ จ.124 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

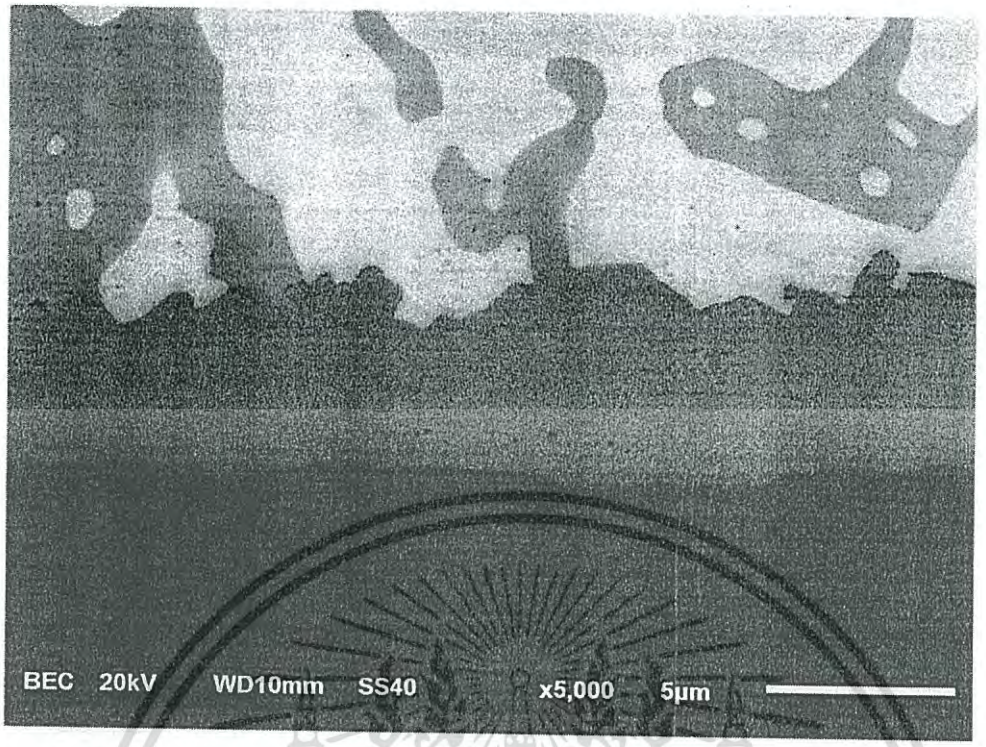


รูปที่ จ.125 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 100 ชั่วโมง

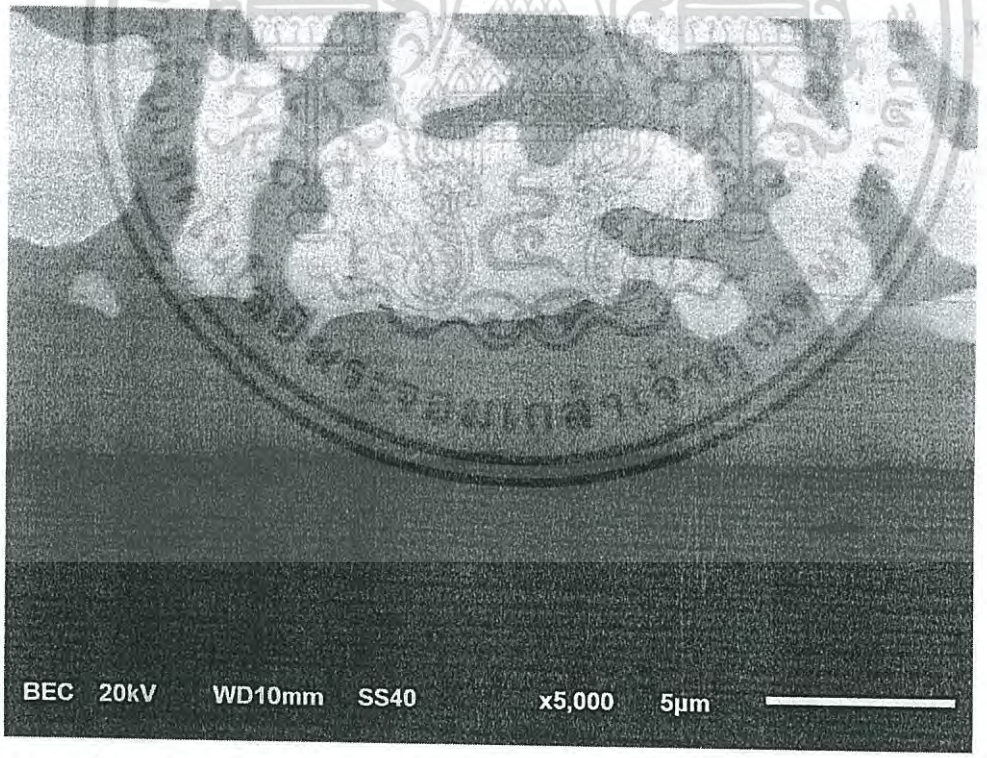


รูปที่ จ.126 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

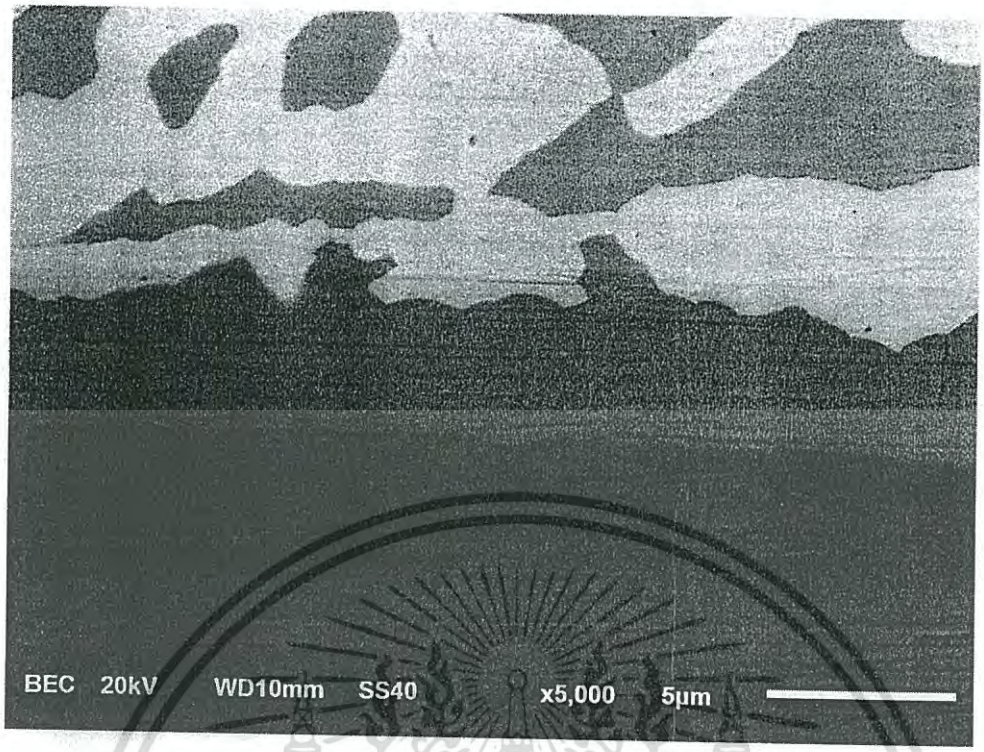


รูปที่ จ.127 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 100 ชั่วโมง

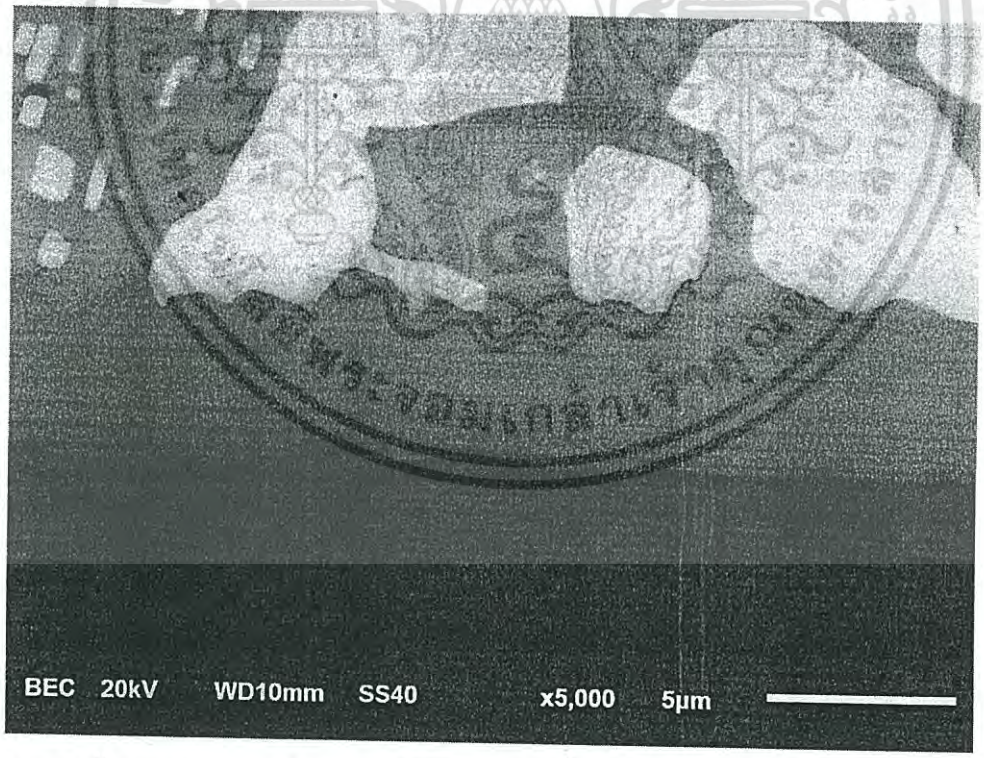


รูปที่ จ.128 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

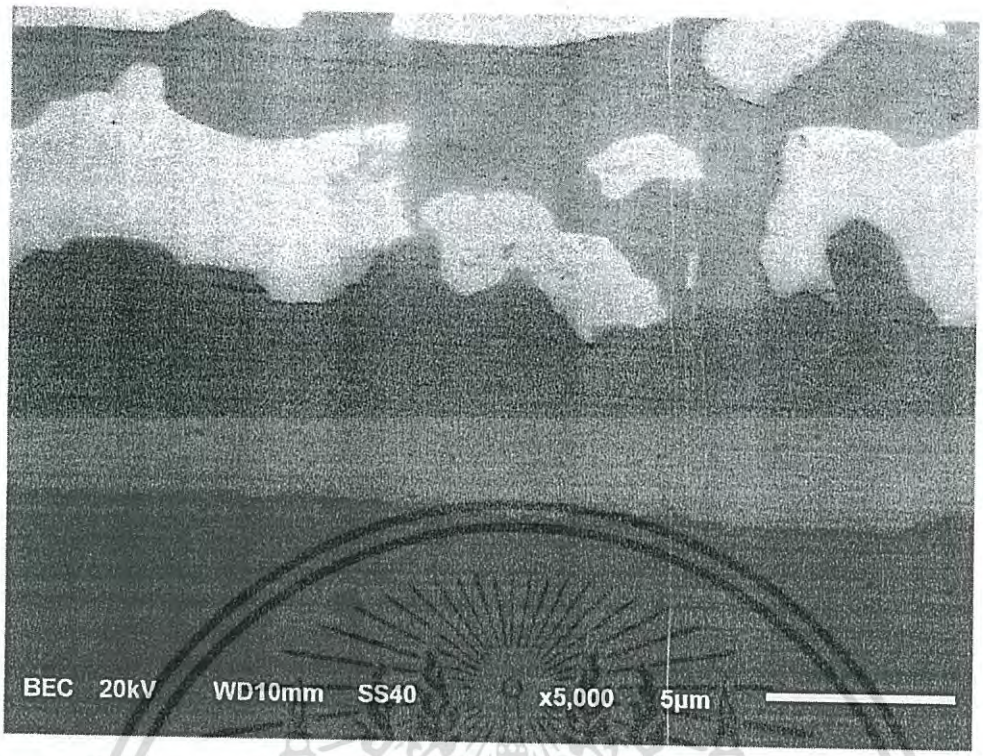


รูปที่ จ.129 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 100 ชั่วโมง

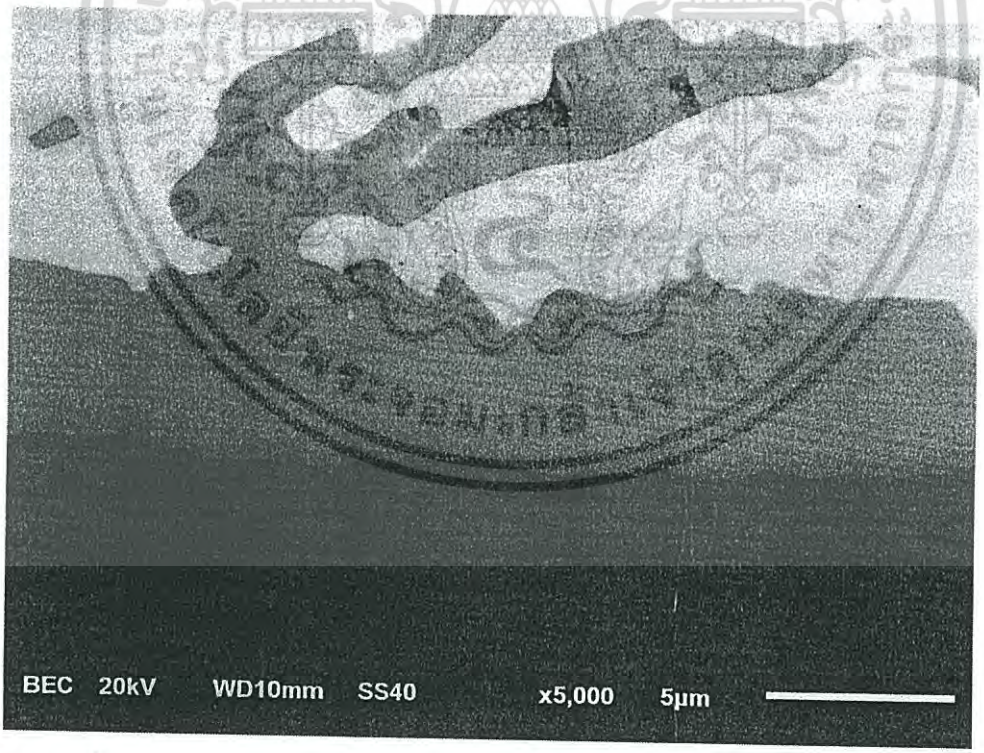


รูปที่ จ.130 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

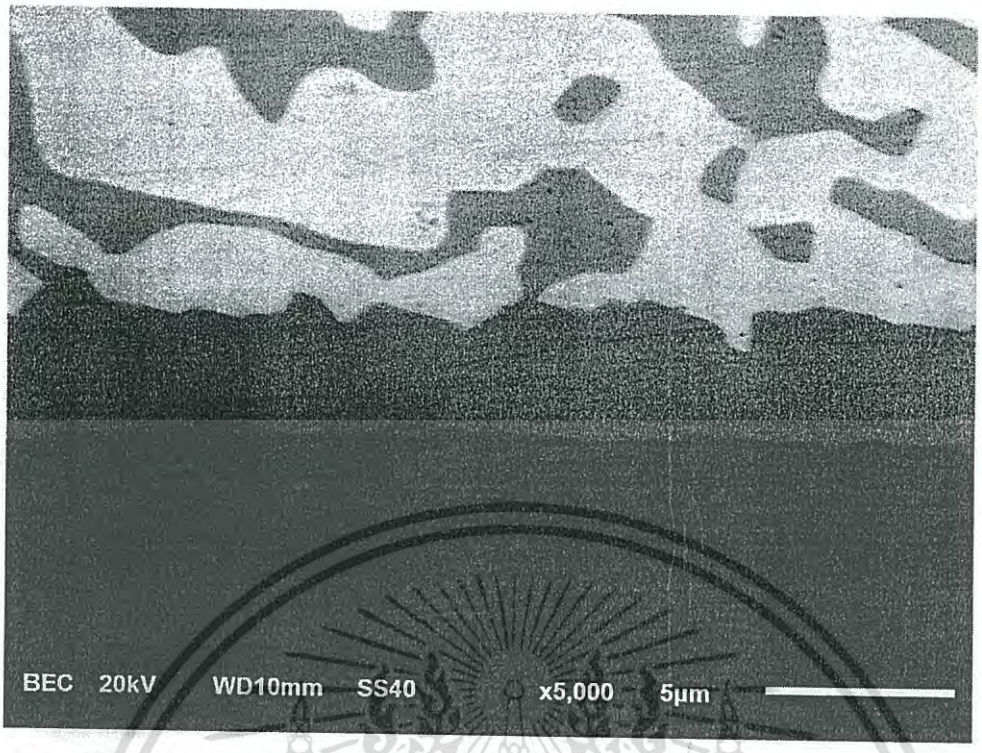


รูปที่ จ.131 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 100 ชั่วโมง

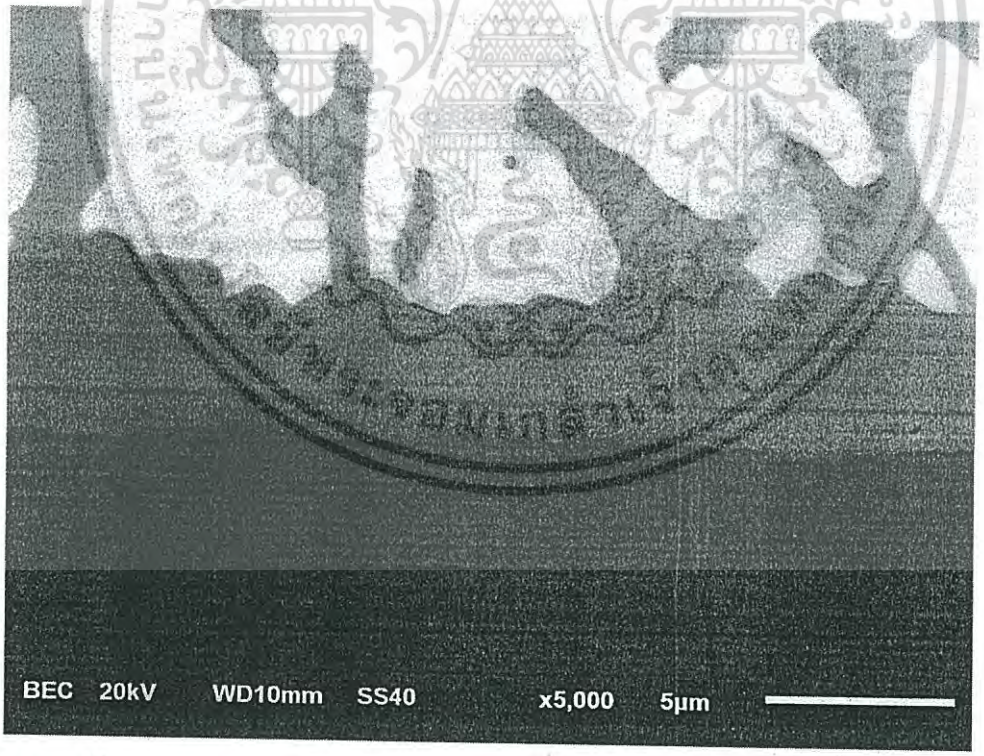


รูปที่ จ.132 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

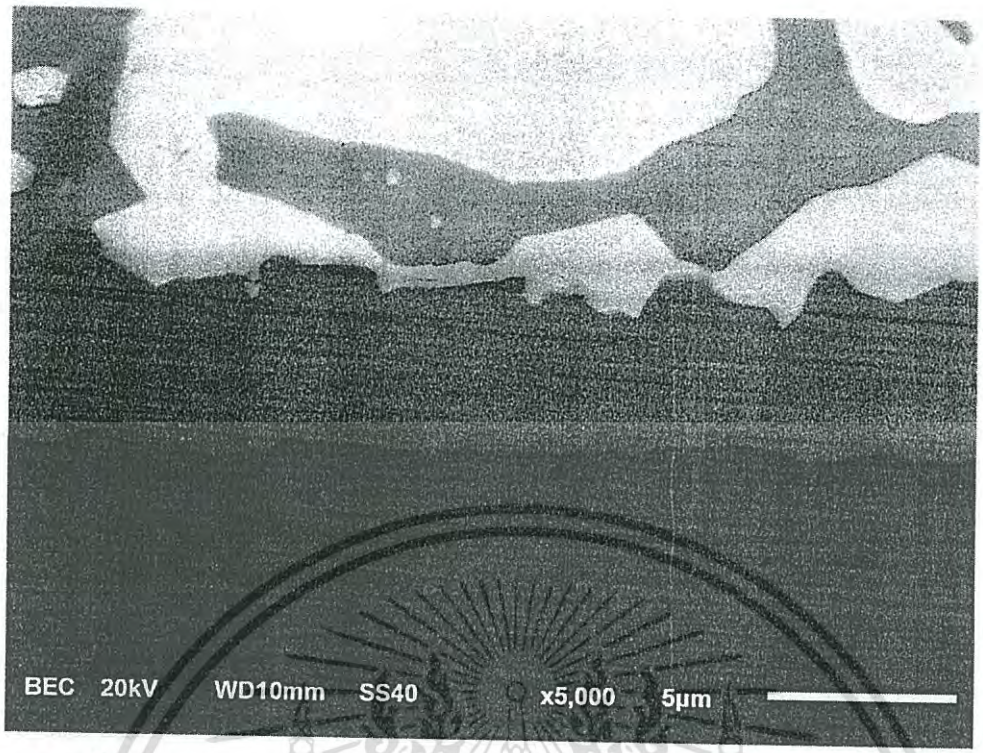


รูปที่ จ.133 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 100 ชั่วโมง

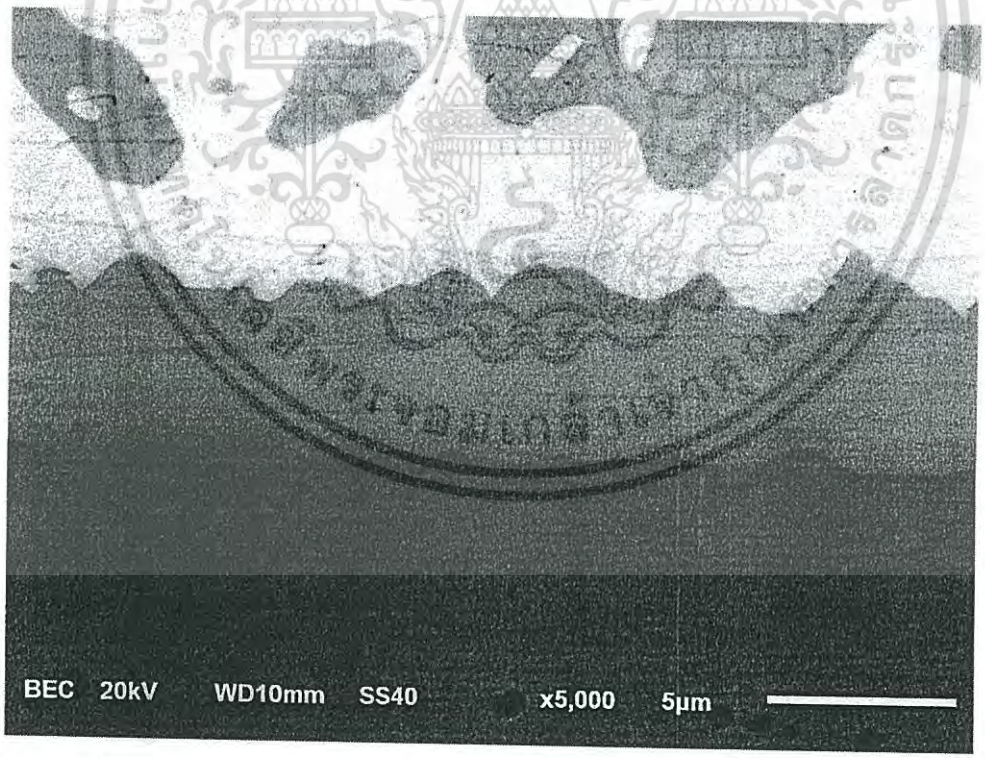


รูปที่ จ.134 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

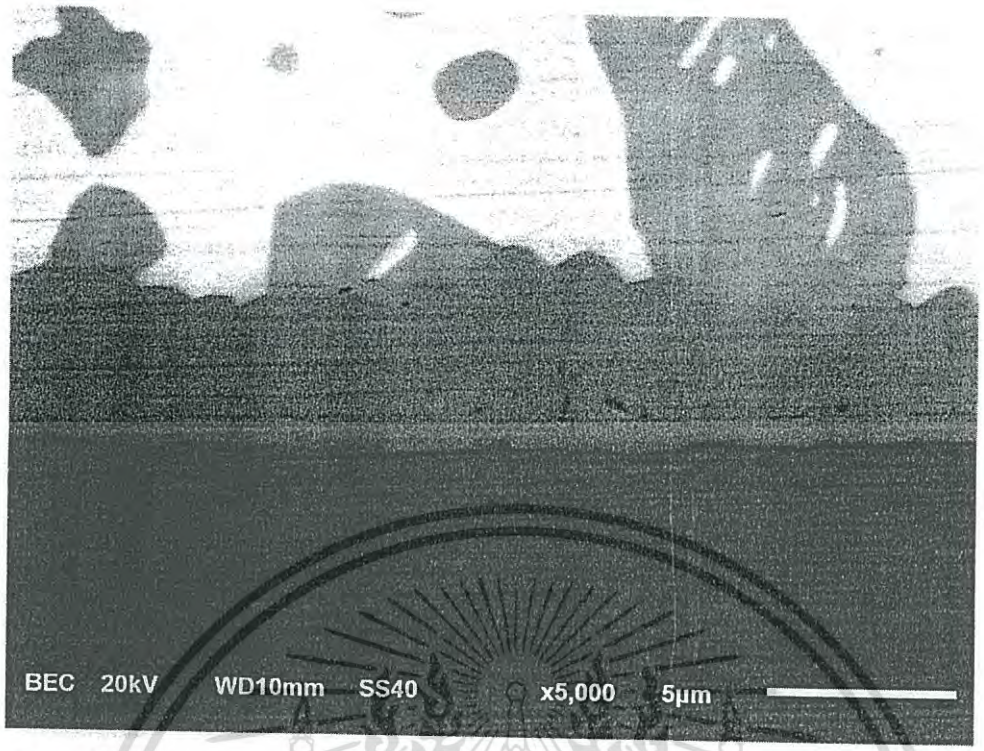


รูปที่ จ.135 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 100 ชั่วโมง

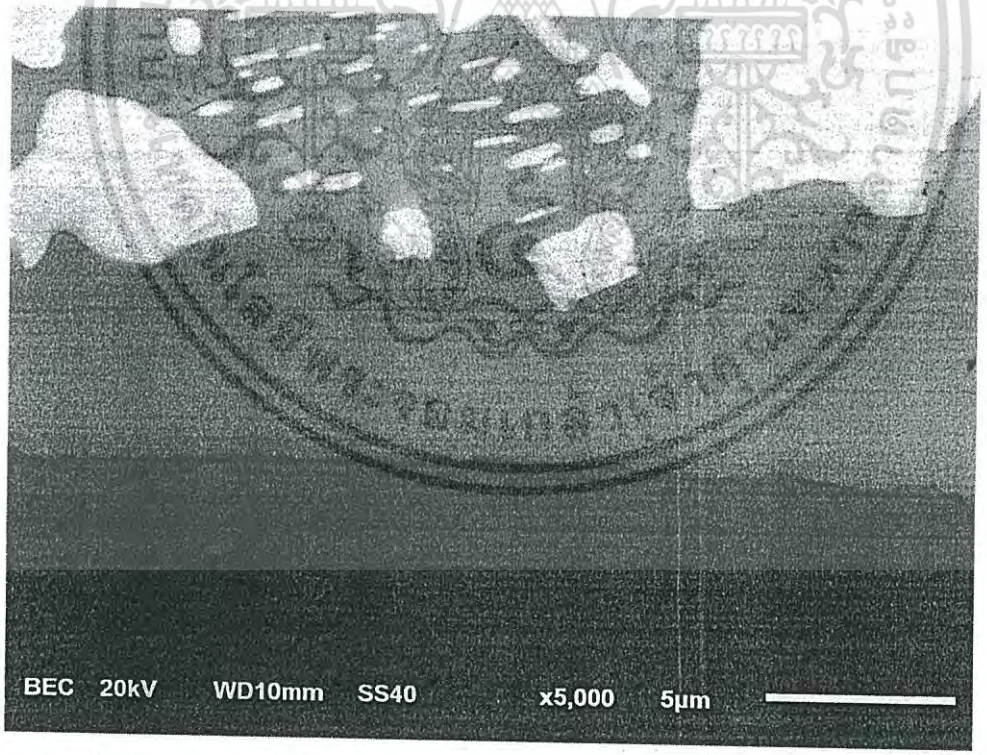


รูปที่ จ.136 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

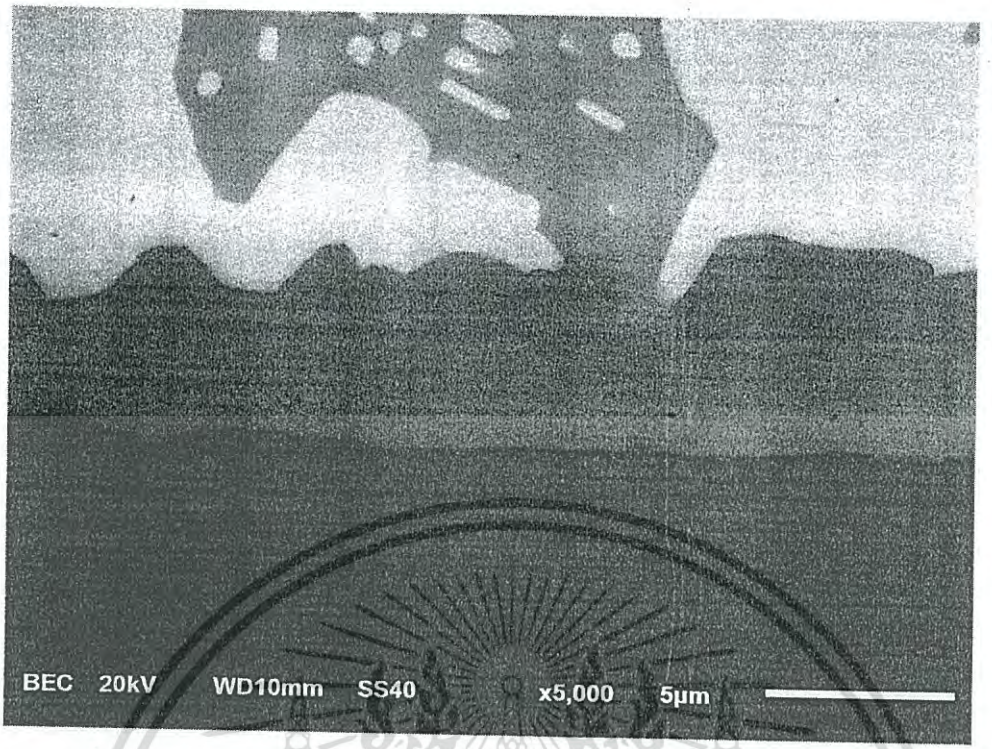


รูปที่ จ.137 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 100 ชั่วโมง

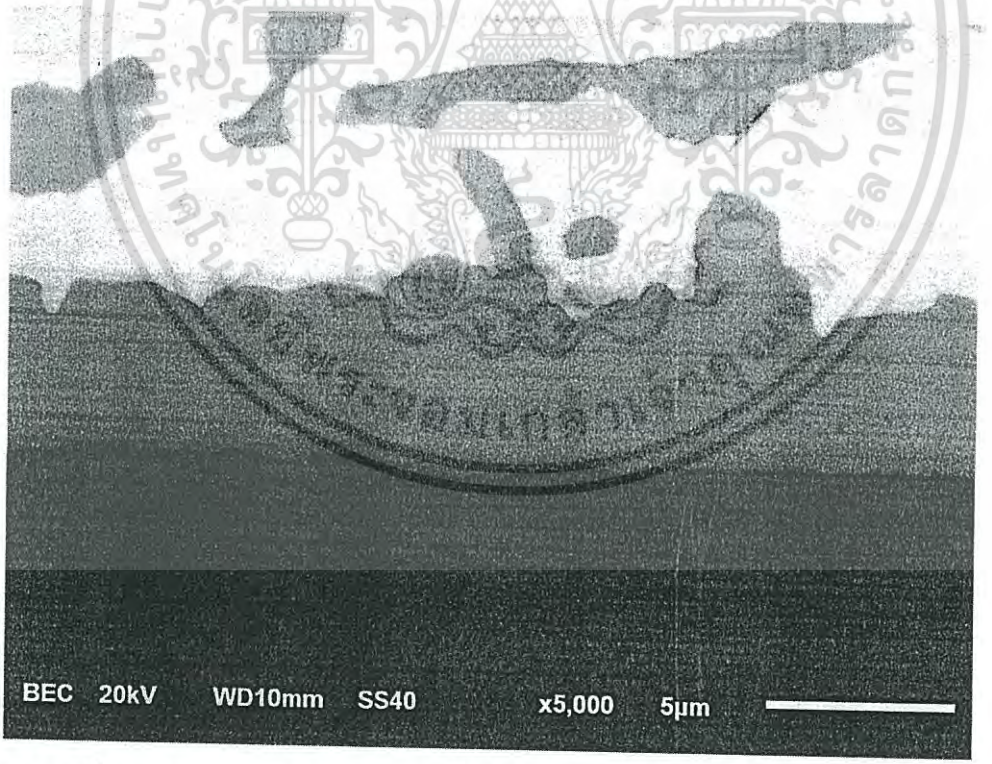


รูปที่ จ.138 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

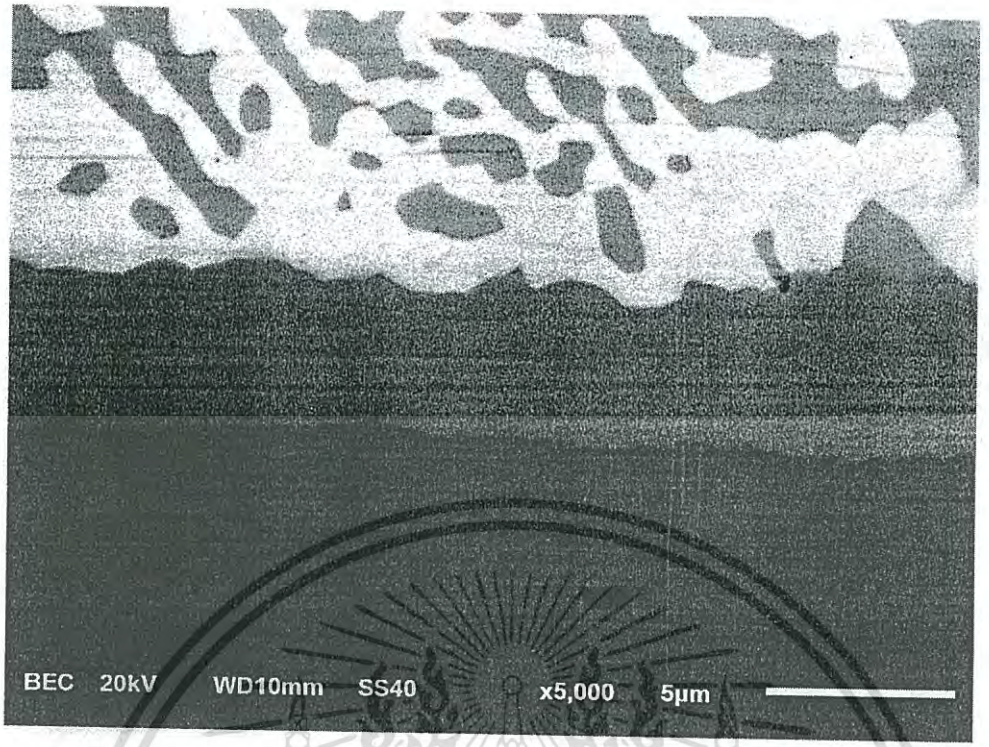


รูปที่ จ.139 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 100 ชั่วโมง

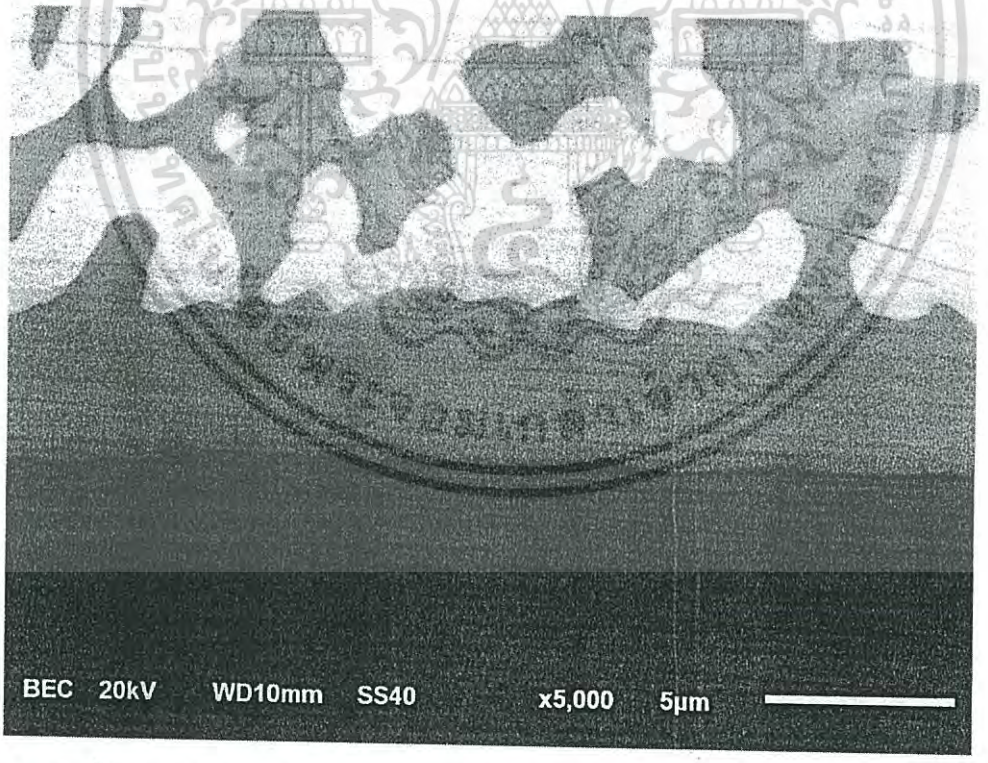


รูปที่ จ.140 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

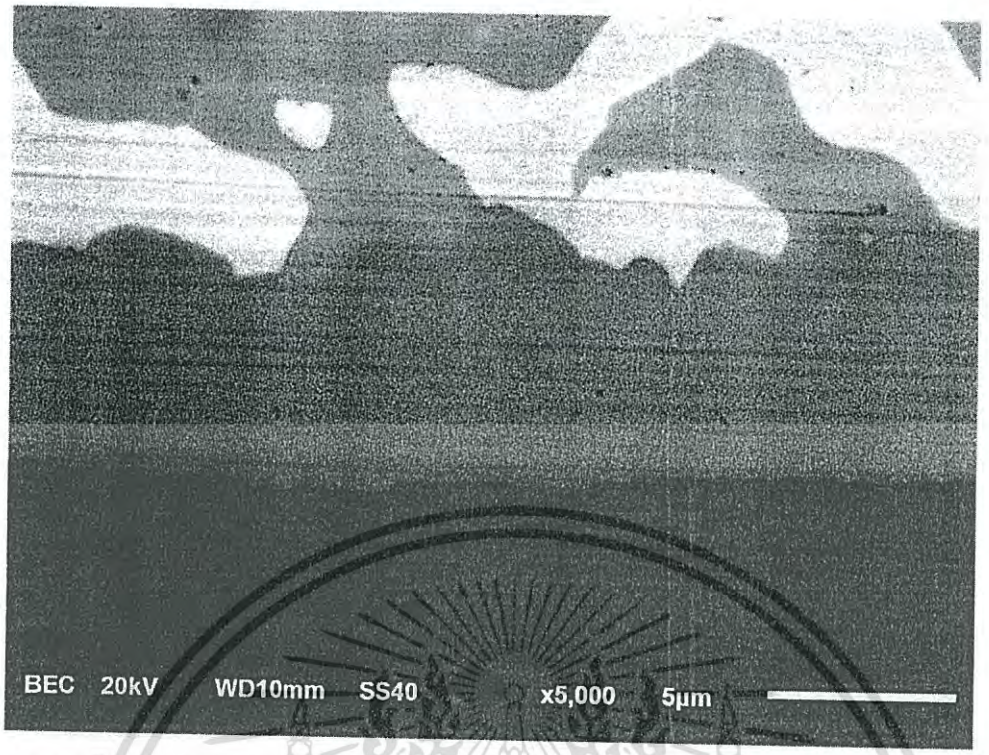


รูปที่ จ.141 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 100 ชั่วโมง

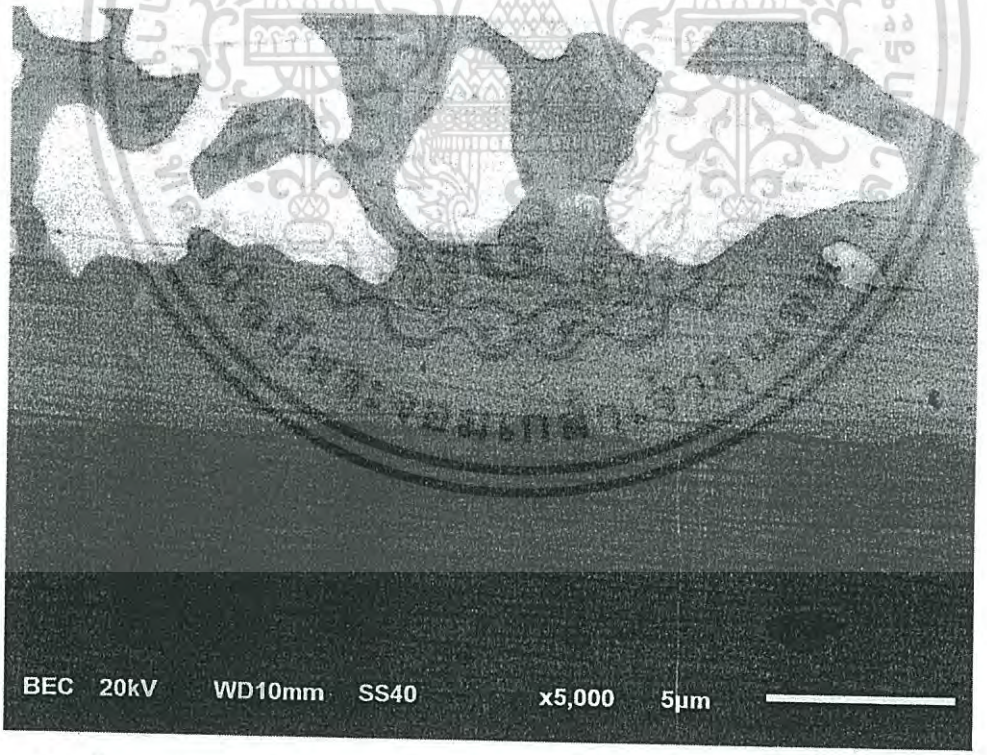


รูปที่ จ.142 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

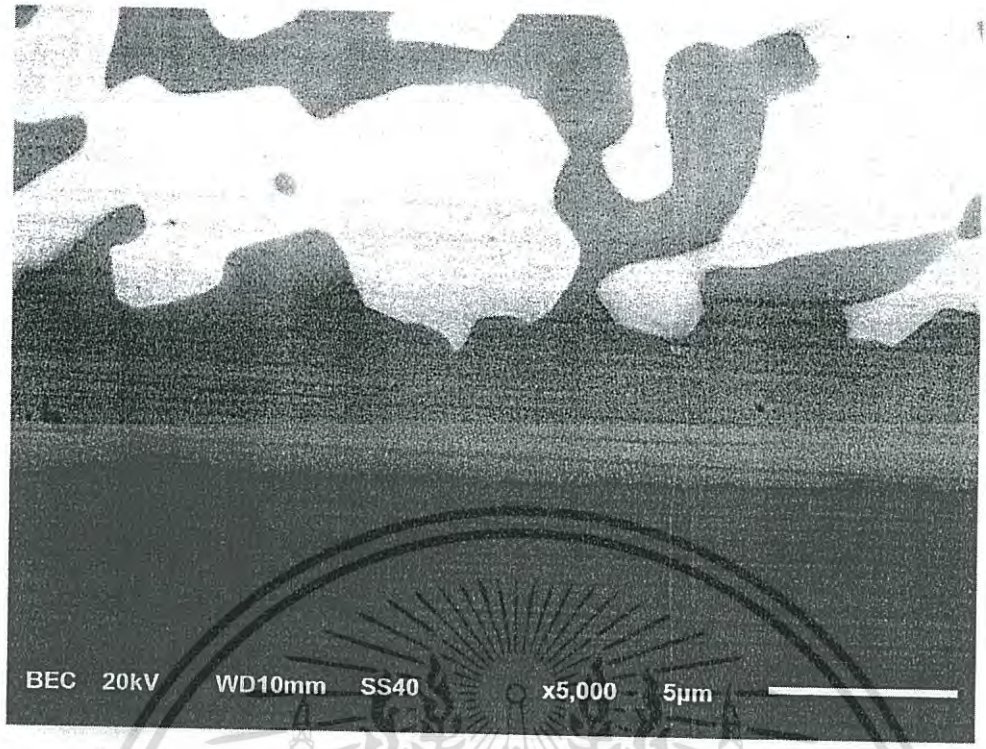


รูปที่ จ.143 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 100 ชั่วโมง

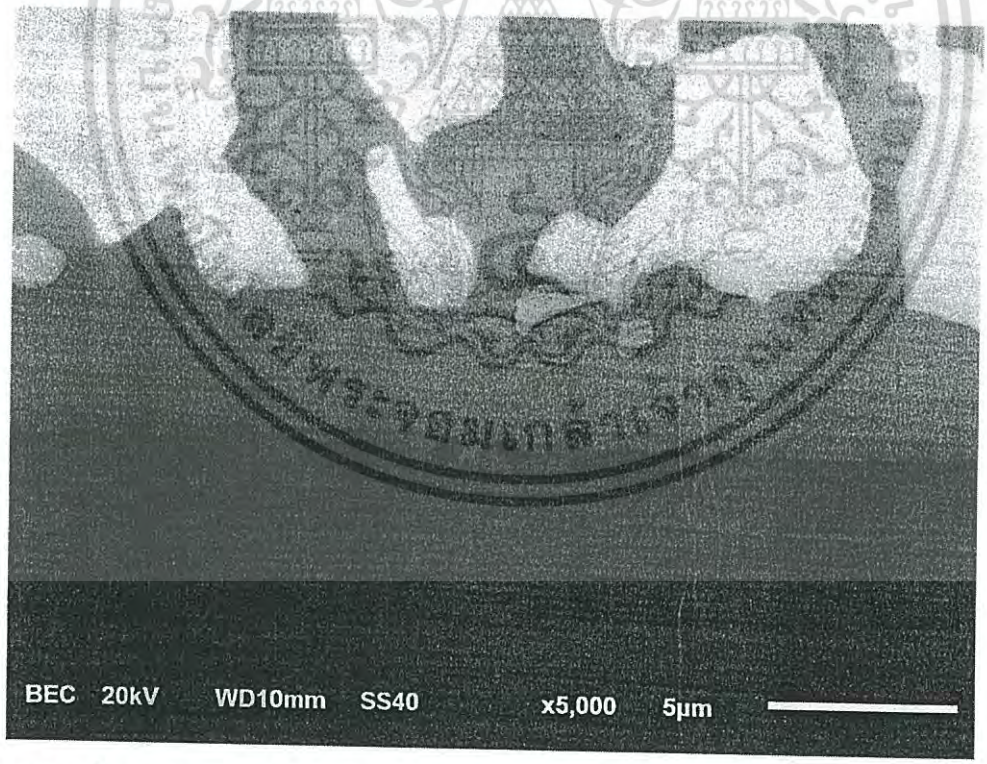


รูปที่ จ.144 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

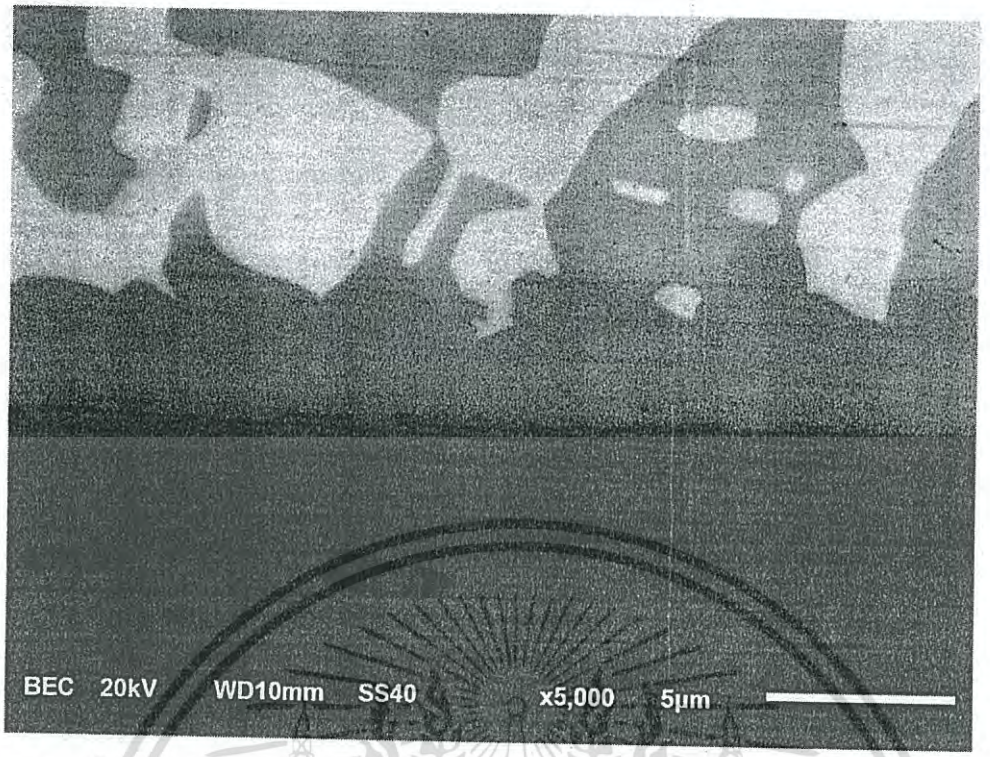


รูปที่ จ.145 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 100 ชั่วโมง

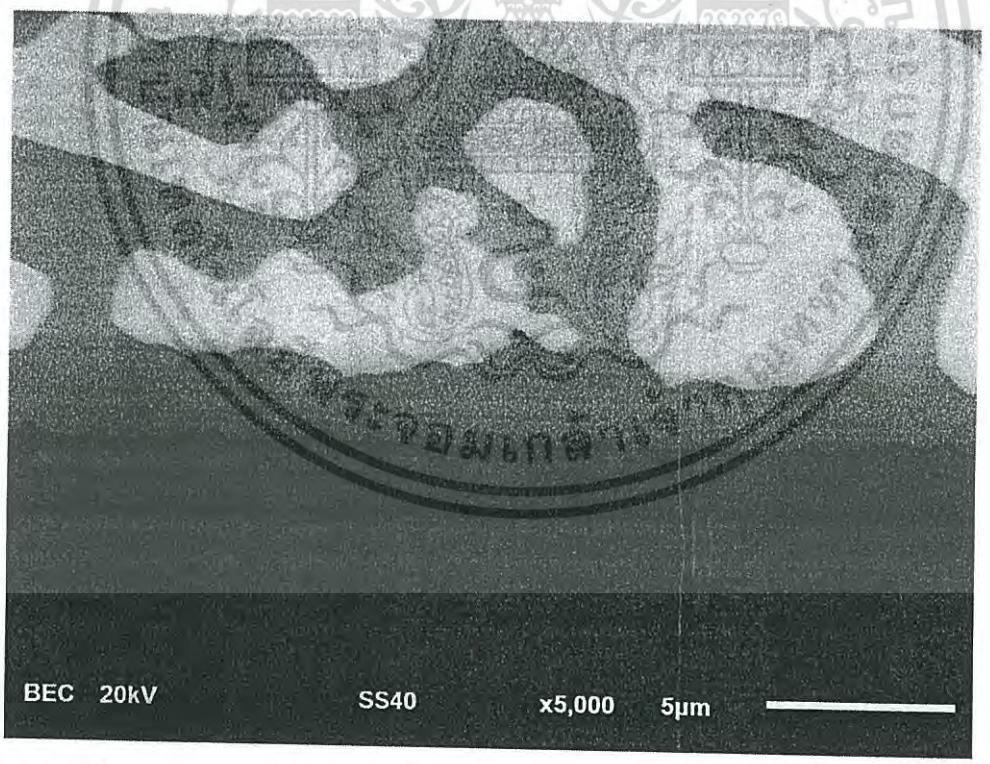


รูปที่ จ.146 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

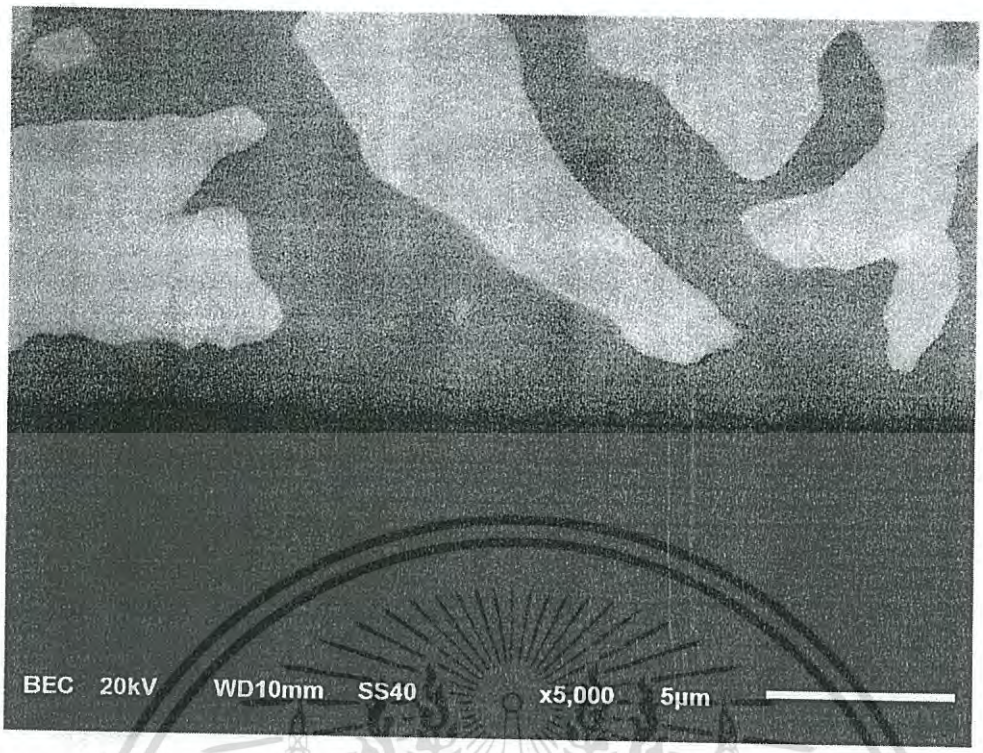


รูปที่ จ.147 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 100 ชั่วโมง

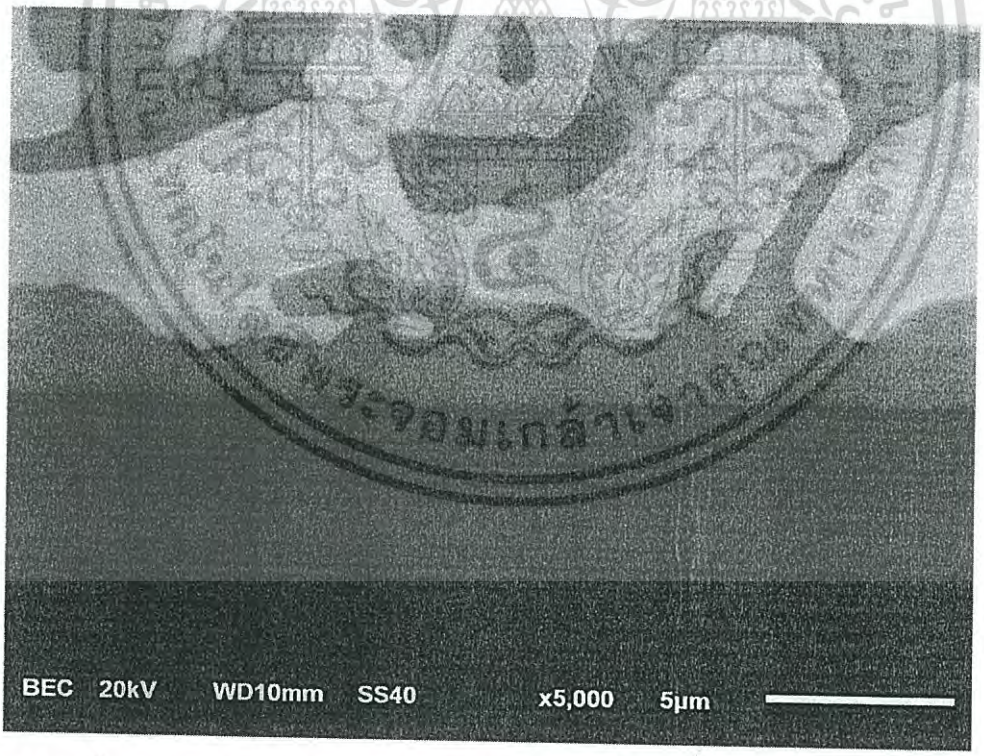


รูปที่ จ.148 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

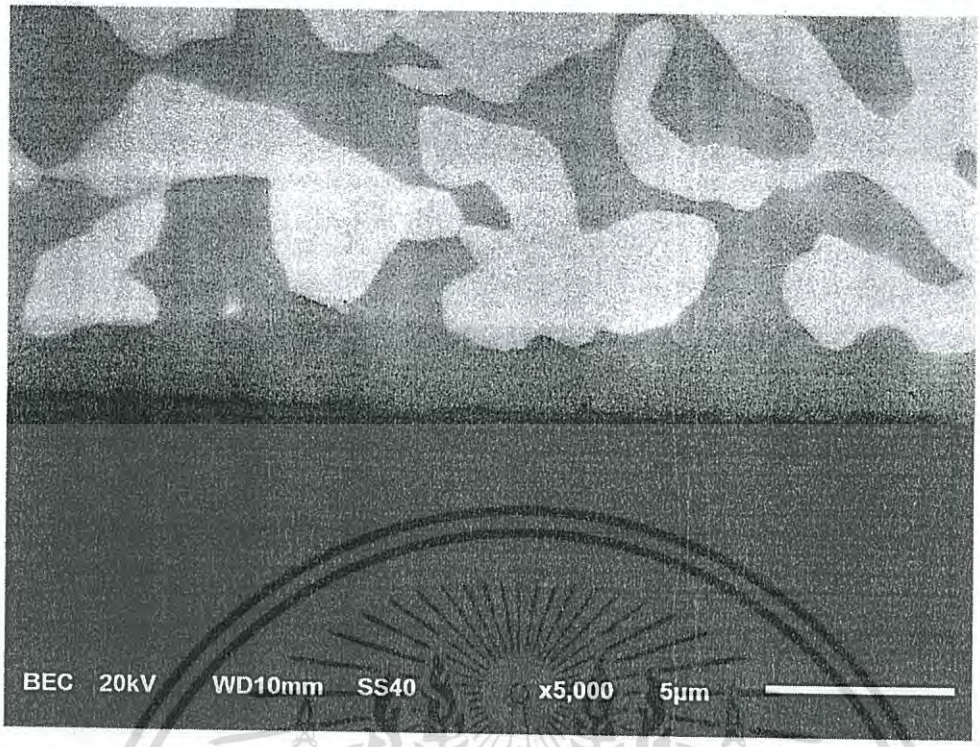


รูปที่ จ.149 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่ม ที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 1000 ชั่วโมง

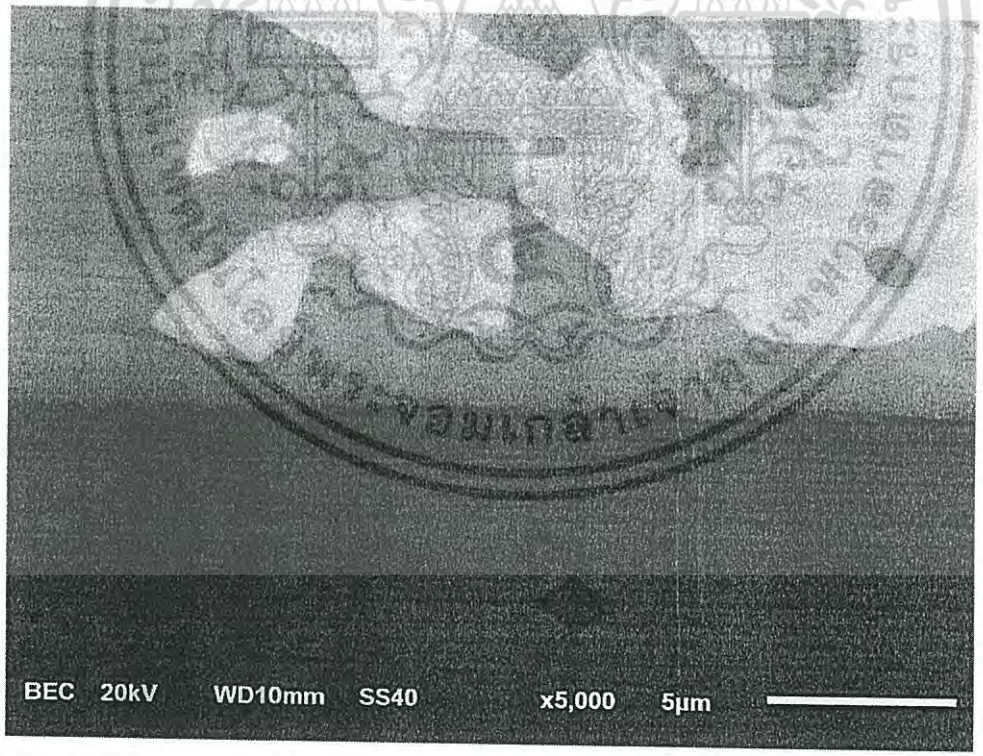


รูปที่ จ.150 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่ม ที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

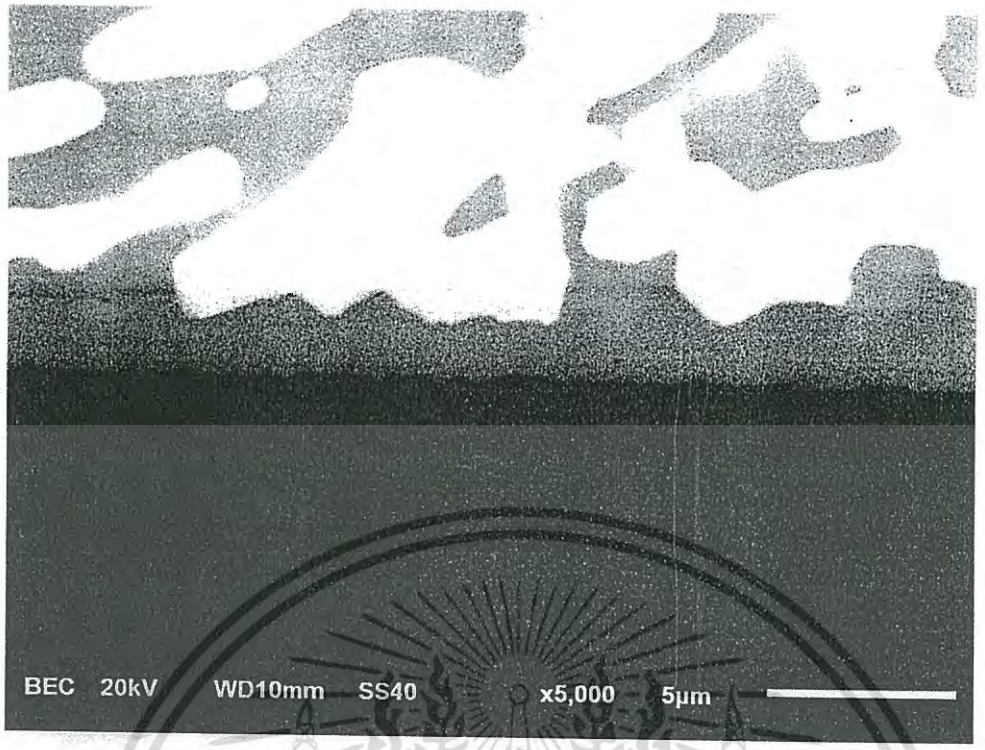


รูปที่ จ.151 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่ม ที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 1000 ชั่วโมง

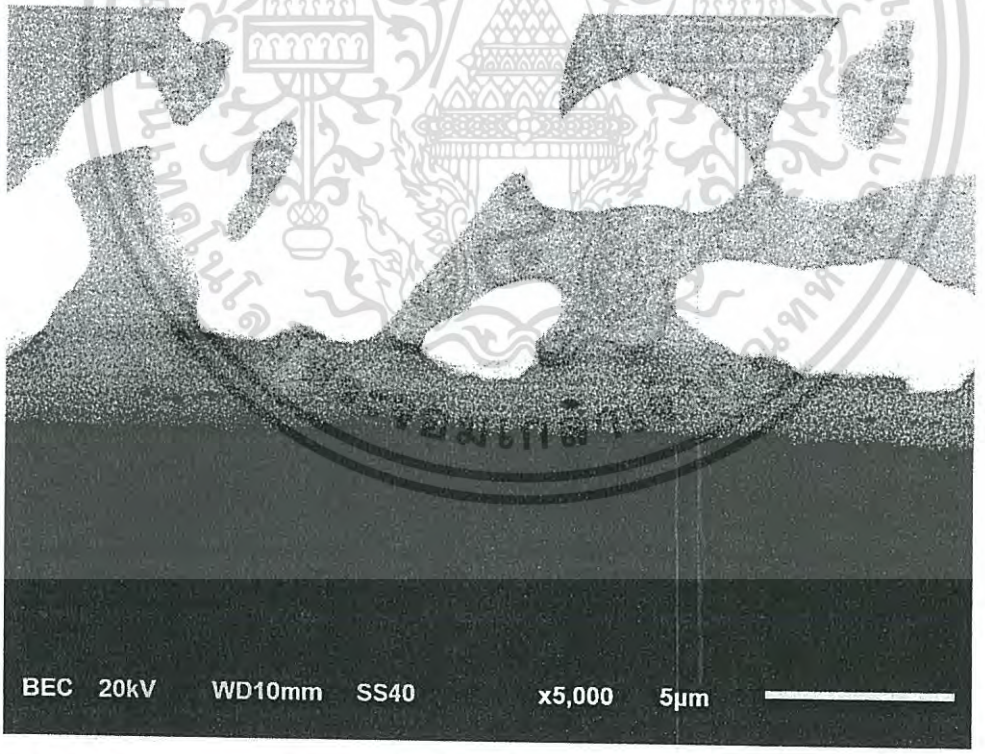


รูปที่ จ.152 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่ม ที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

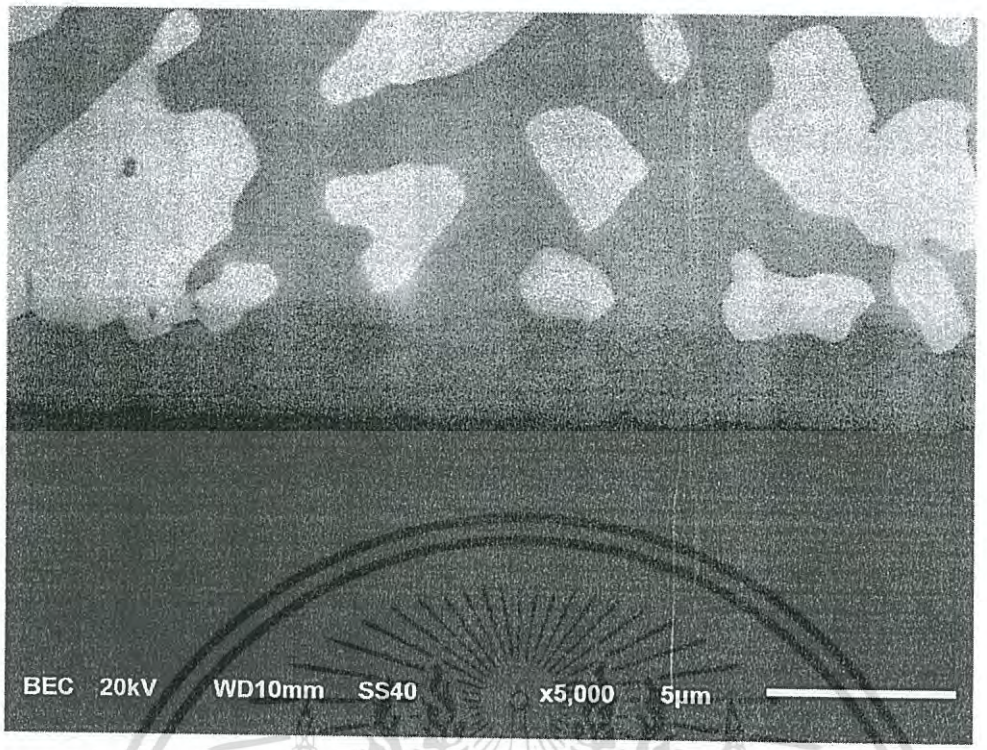


รูปที่ จ.153 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 1000 ชั่วโมง

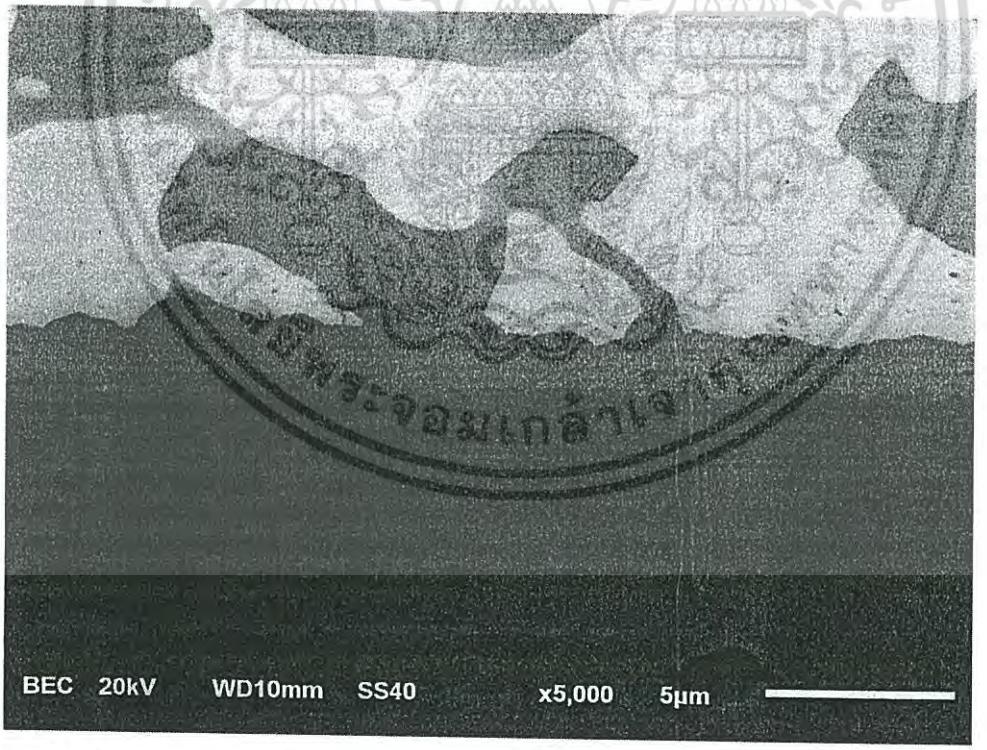


รูปที่ จ.154 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C.เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

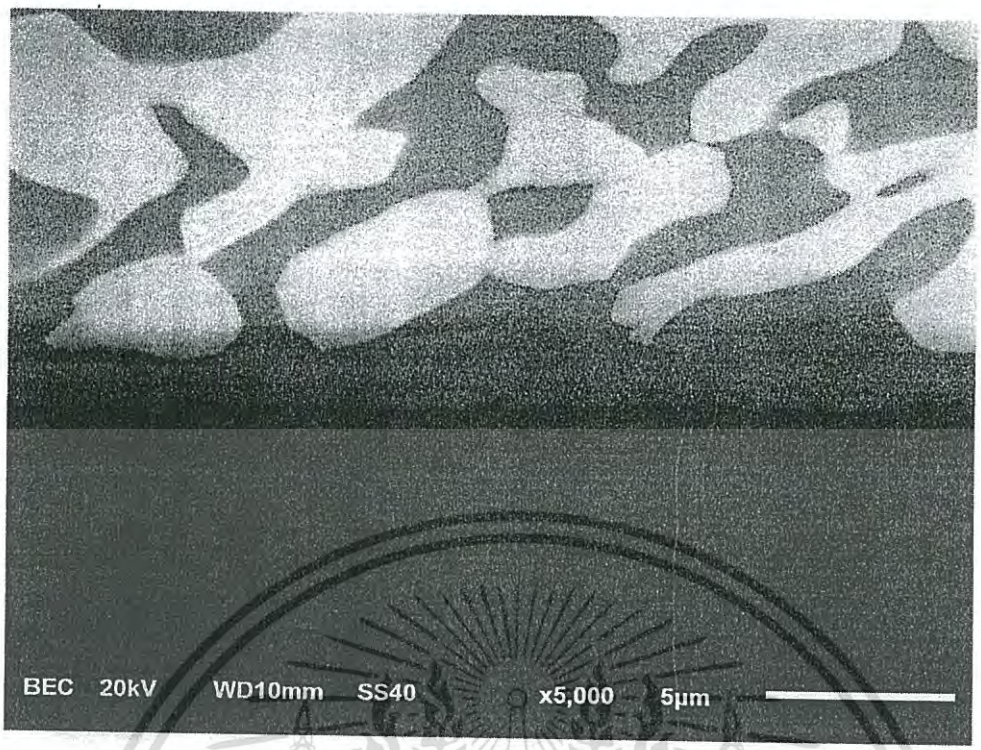


รูปที่ จ.155 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 1000 ชั่วโมง

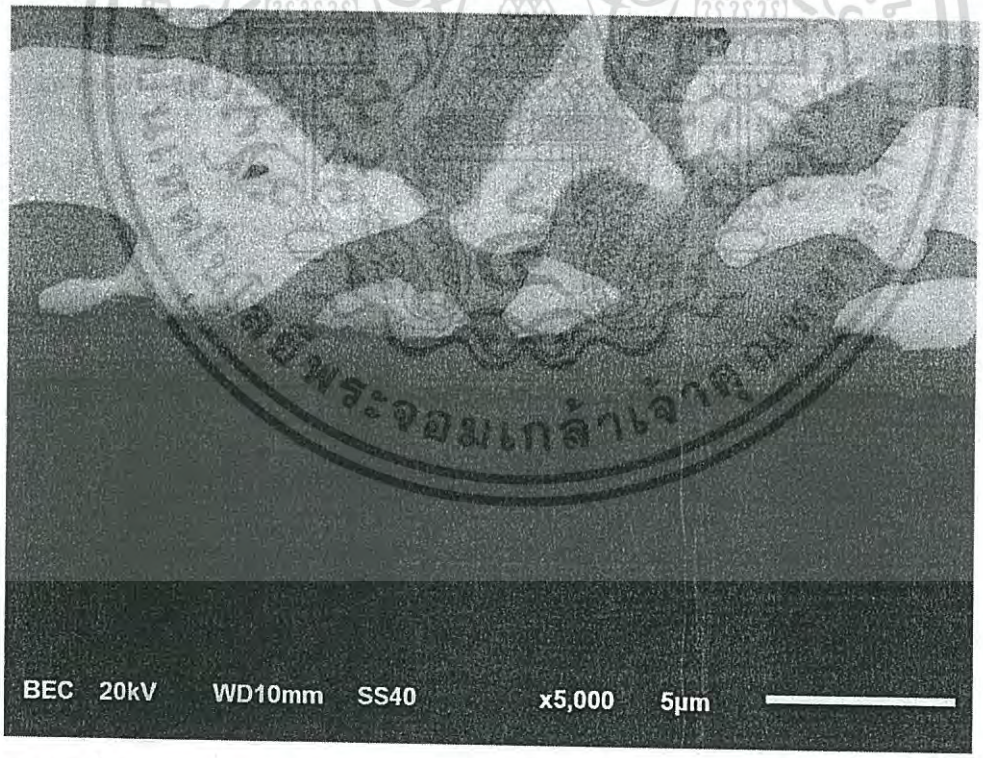


รูปที่ จ.156 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

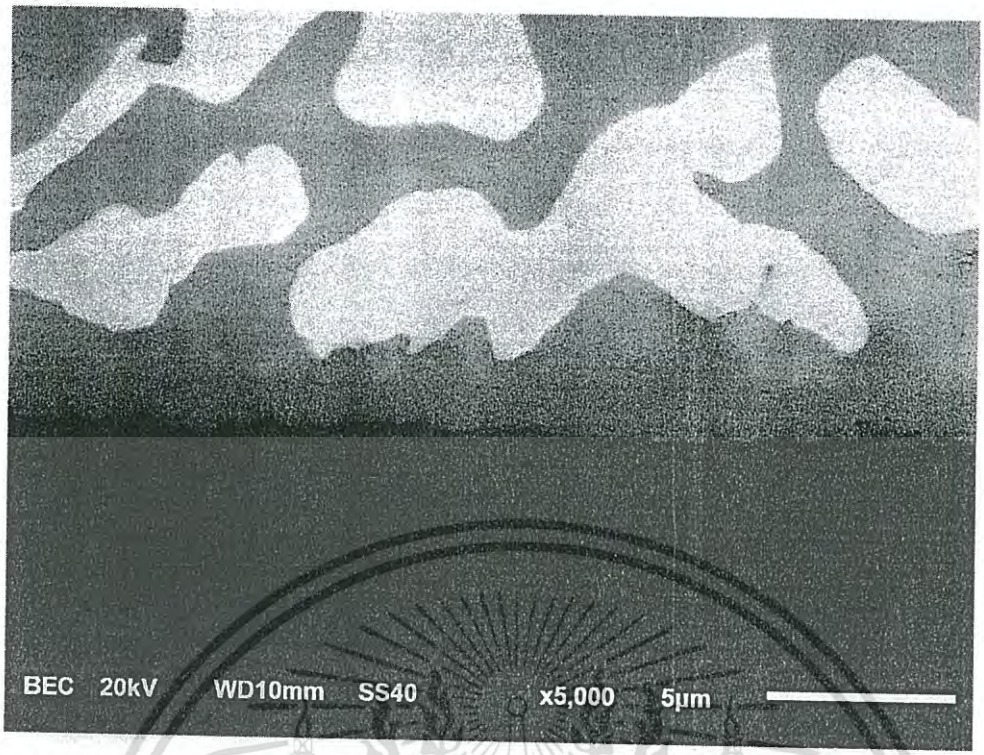


รูปที่ จ.157 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 1000 ชั่วโมง

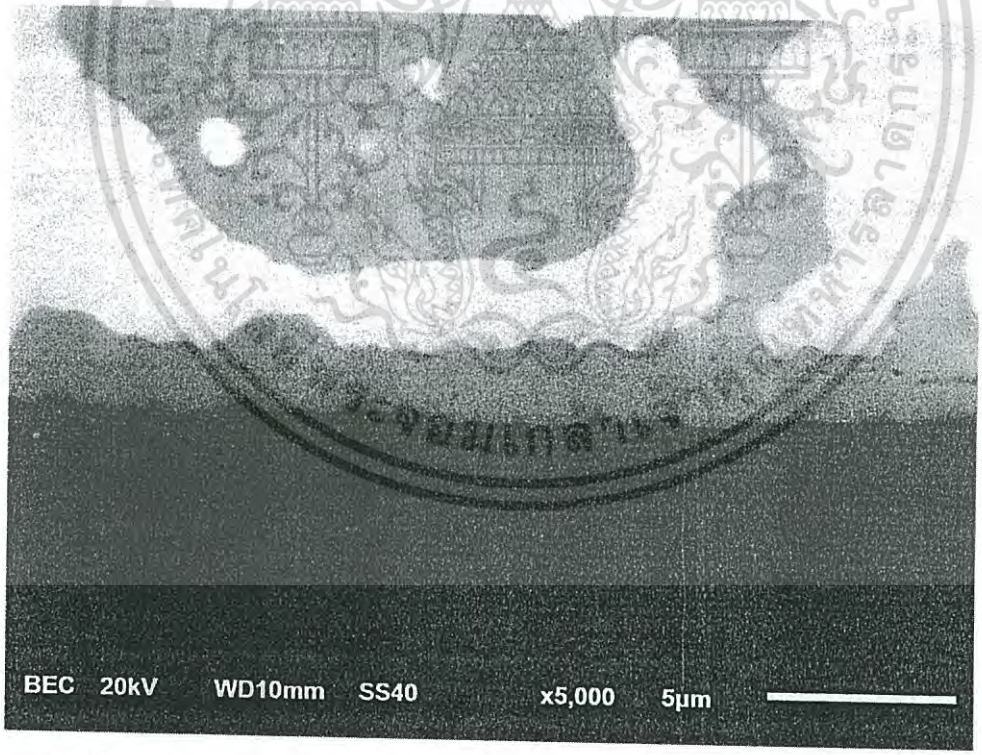


รูปที่ จ.158 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

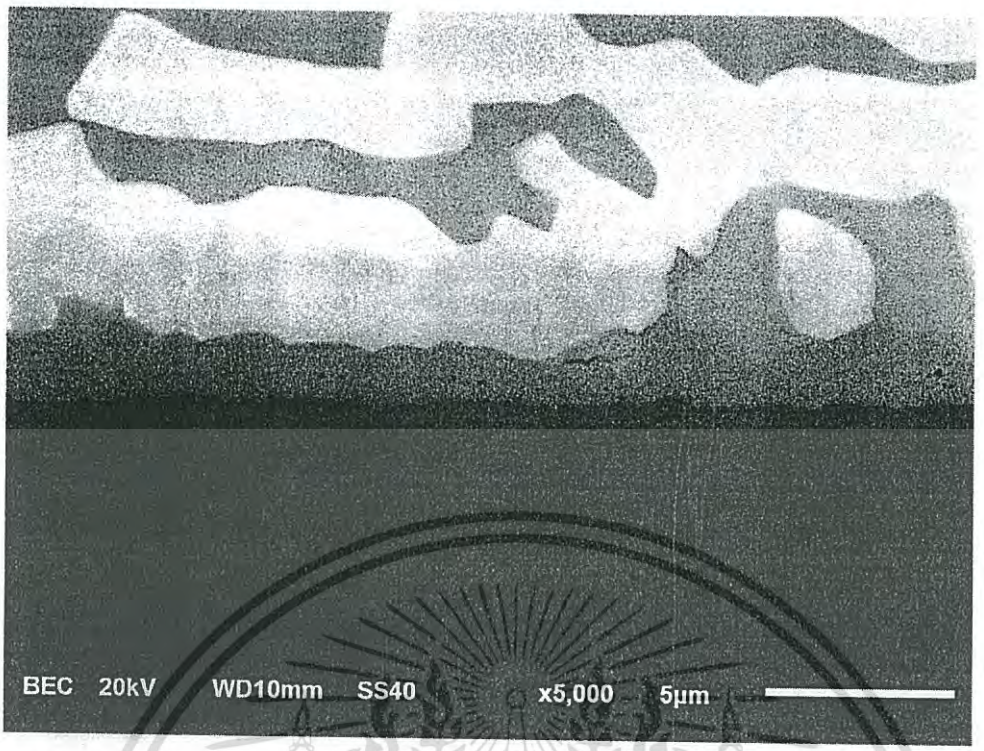


รูปที่ จ.159 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 1000 ชั่วโมง

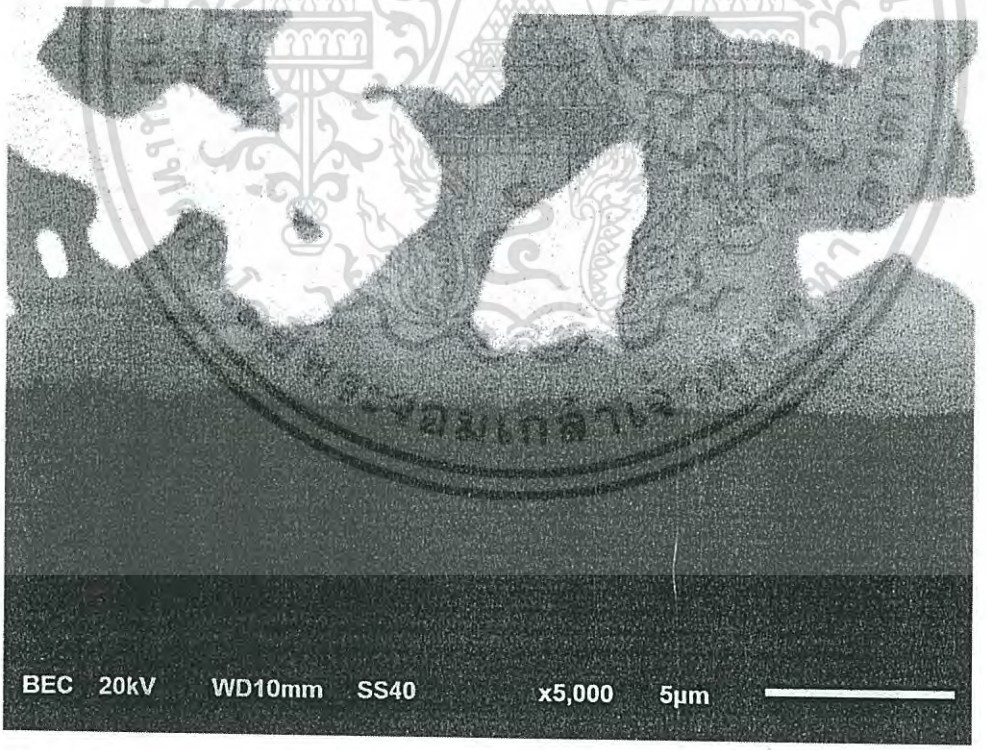


รูปที่ จ.160 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

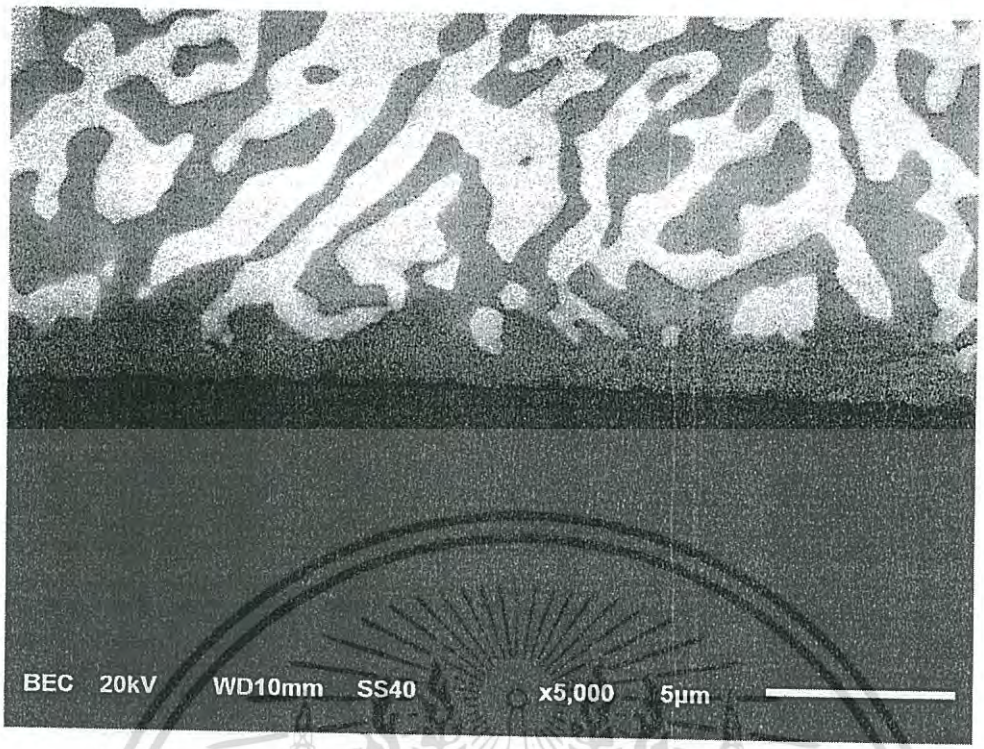


รูปที่ จ.161 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 1000 ชั่วโมง

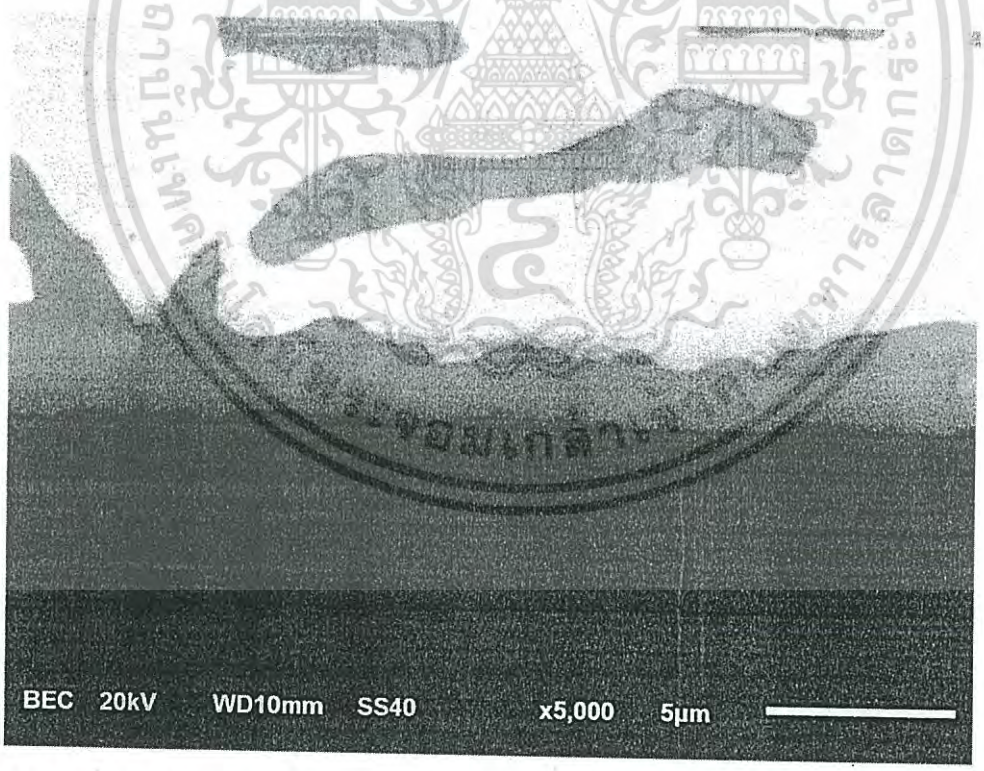


รูปที่ จ.162 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

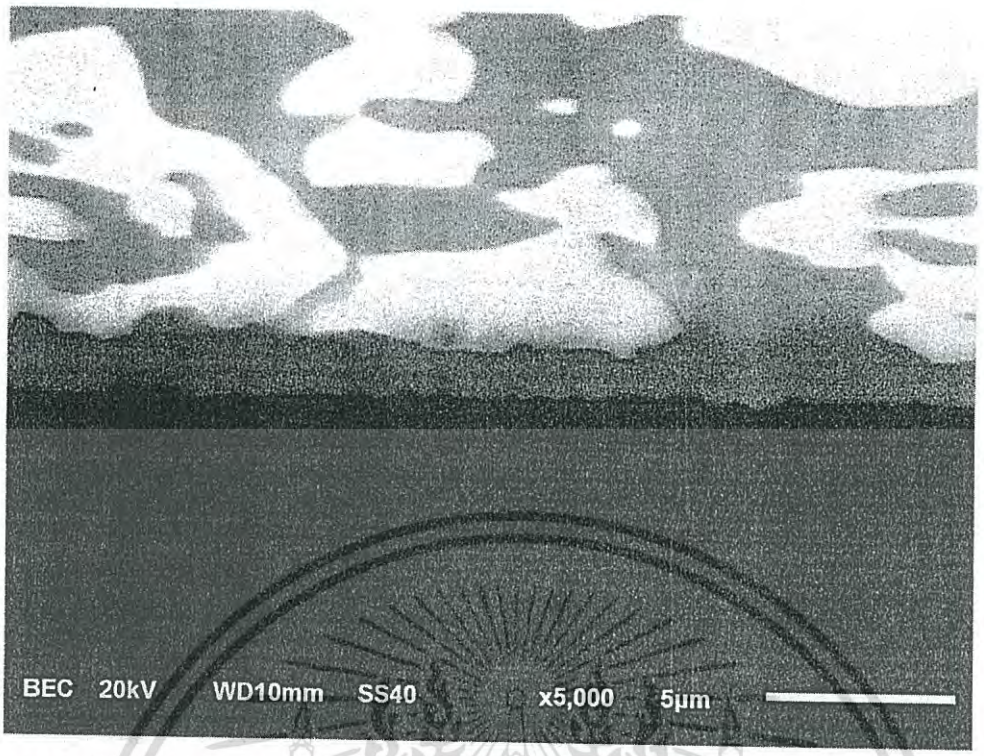


รูปที่ จ.163 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 1000 ชั่วโมง

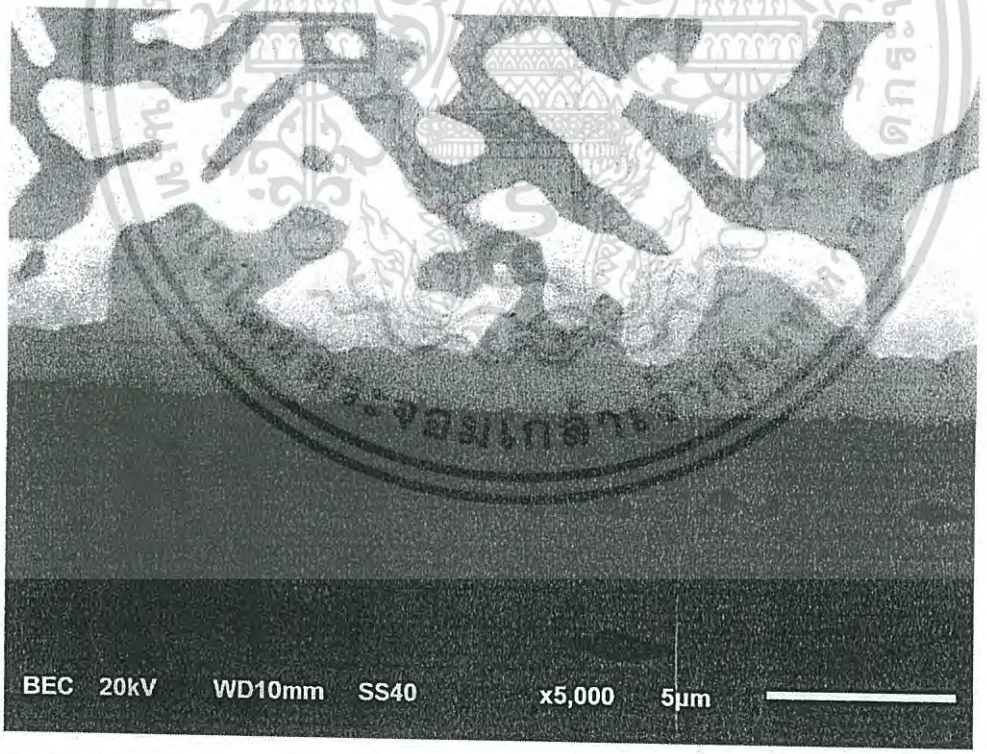


รูปที่ จ.164 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

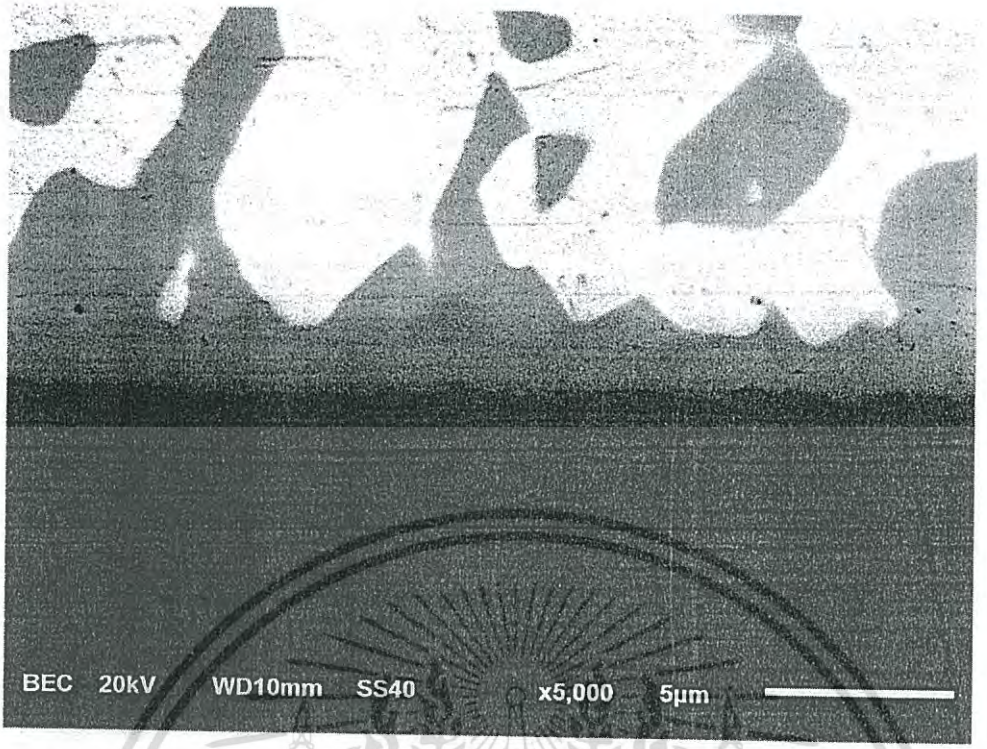


รูปที่ จ.165 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 1000 ชั่วโมง

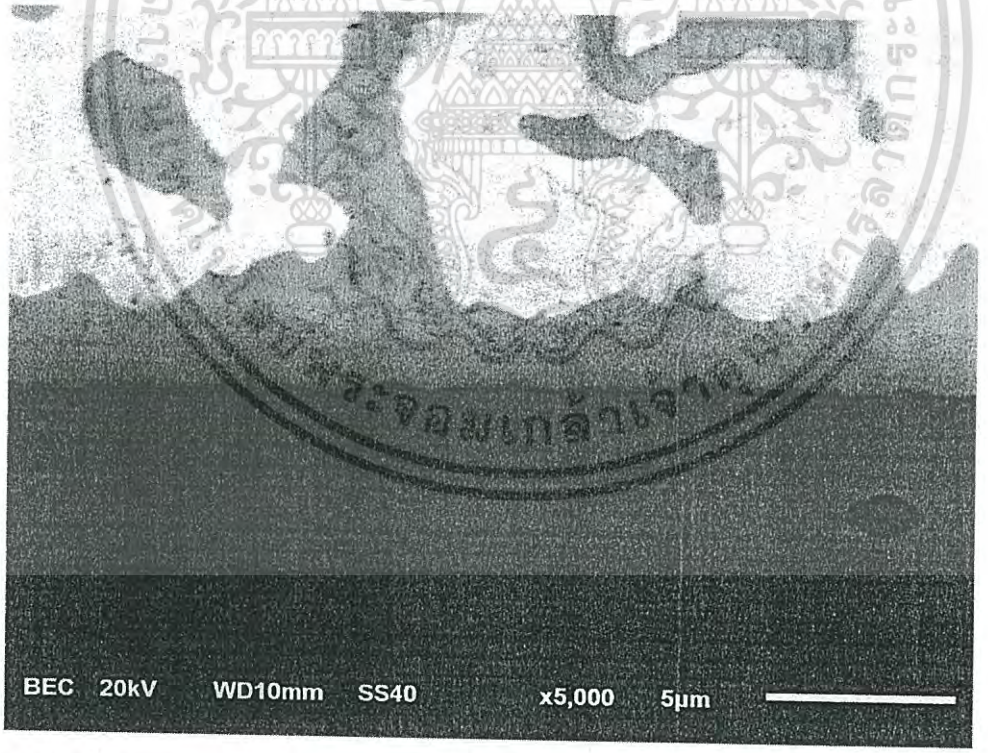


รูปที่ จ.166 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

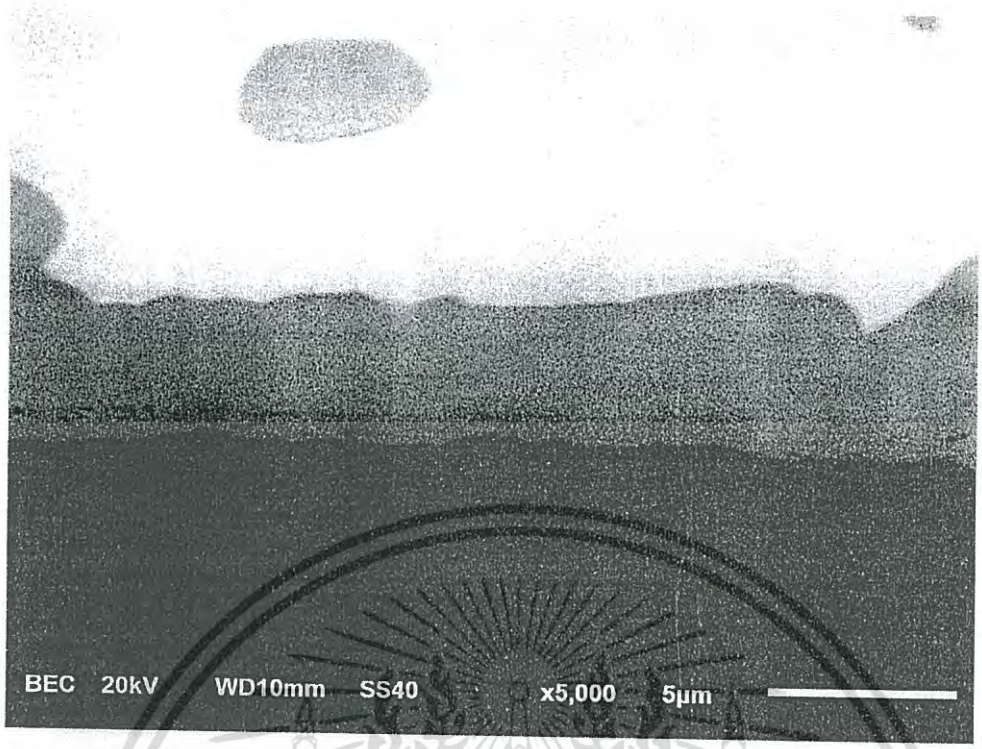


รูปที่ จ.167 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 1000 ชั่วโมง

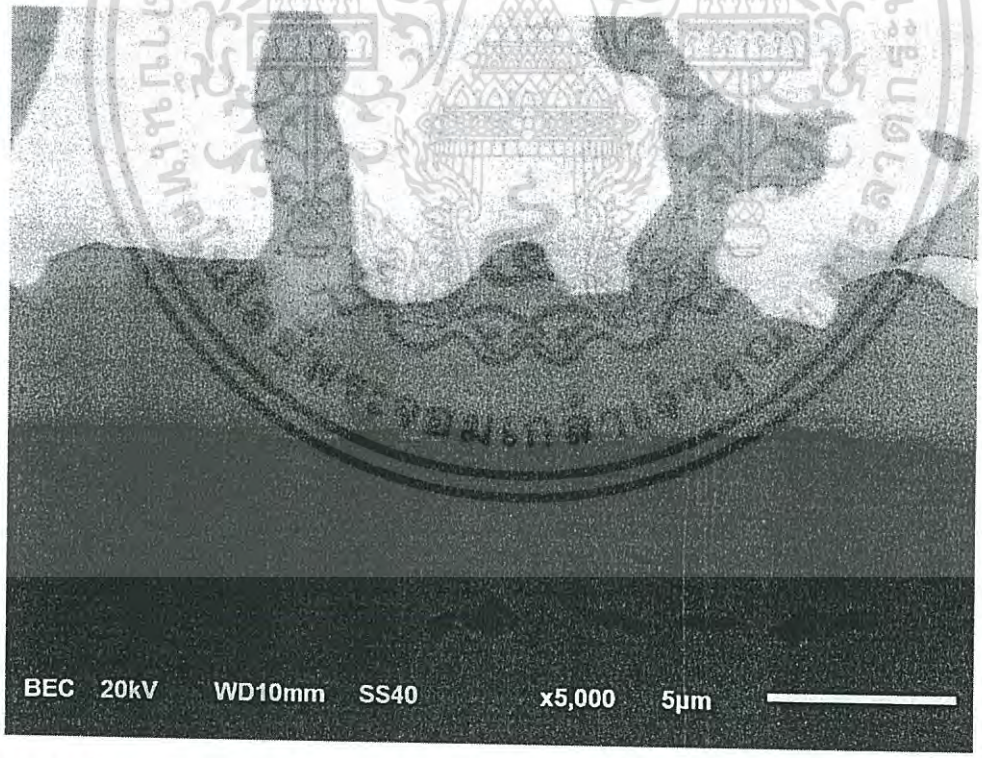


รูปที่ จ.168 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

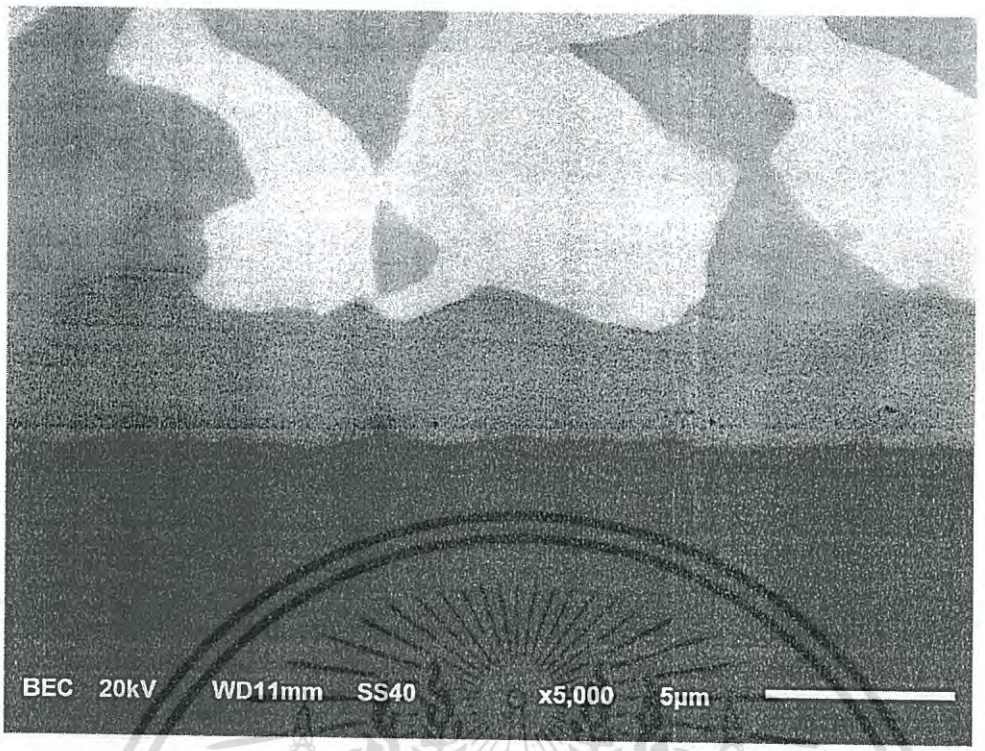


รูปที่ จ.169 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 1000 ชั่วโมง

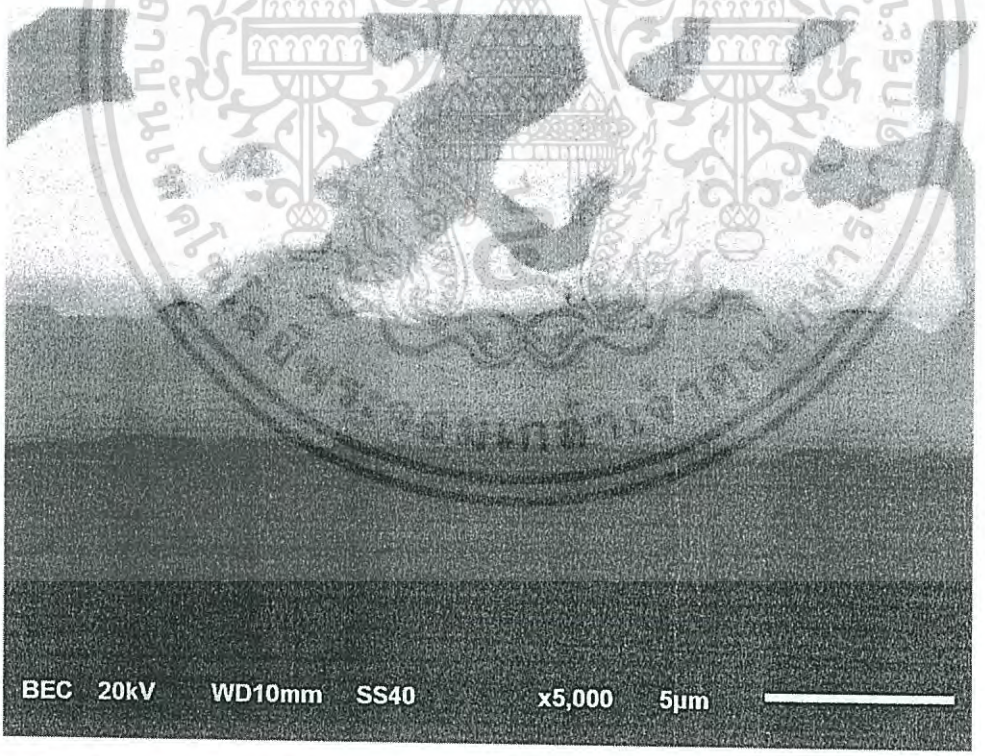


รูปที่ จ.170 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

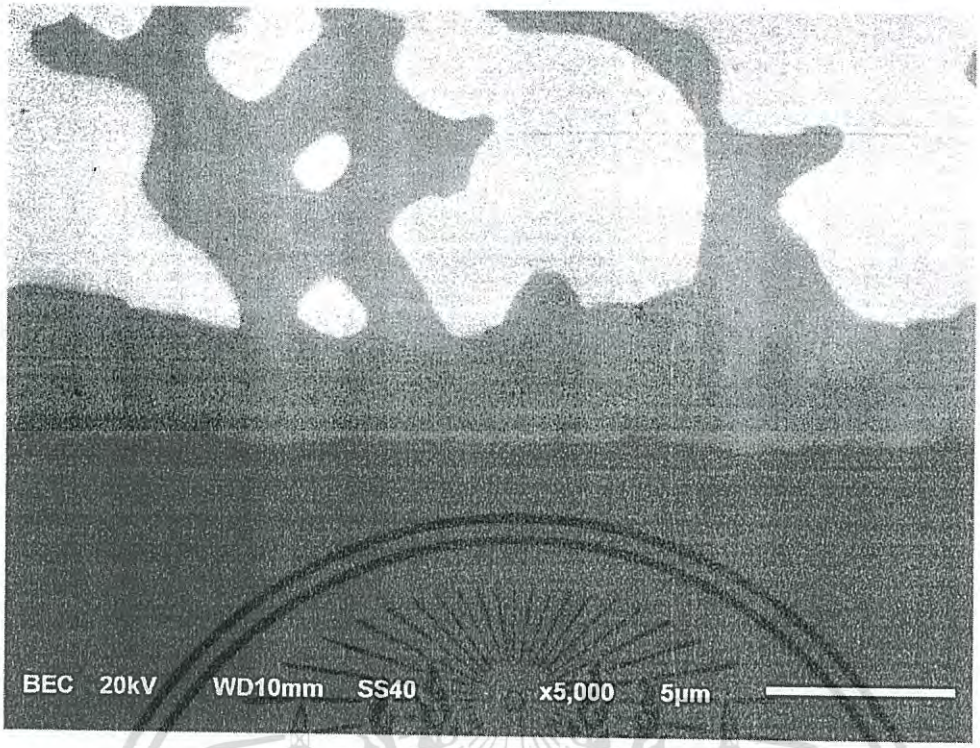


รูปที่ จ.171 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่ม ที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 1000 ชั่วโมง

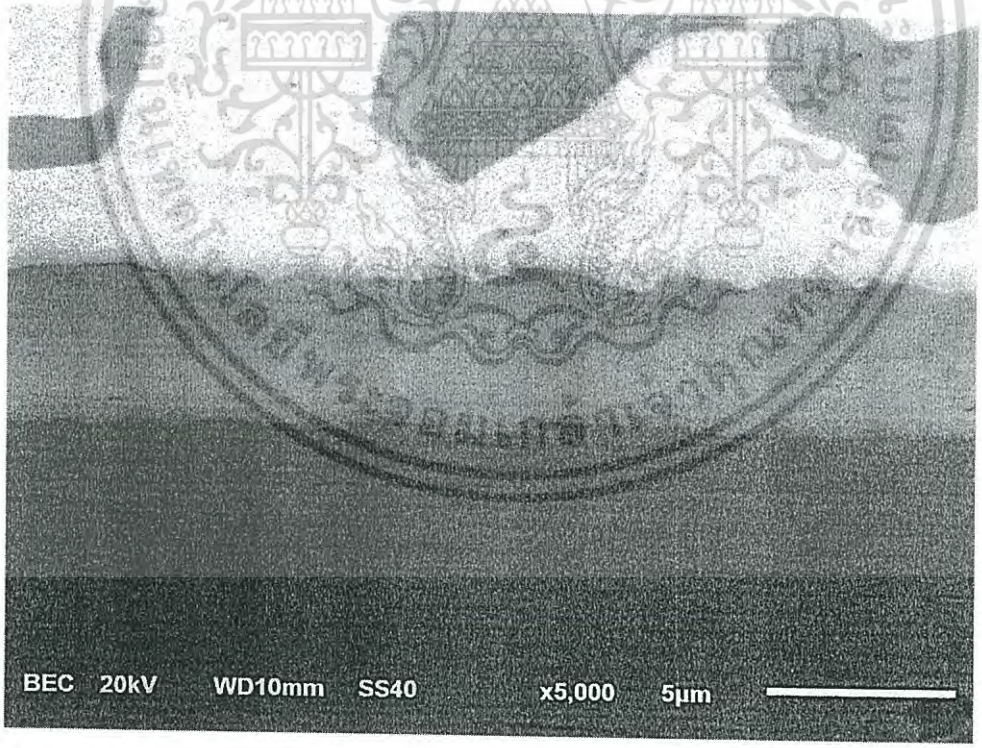


รูปที่ จ.172 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่ม ที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

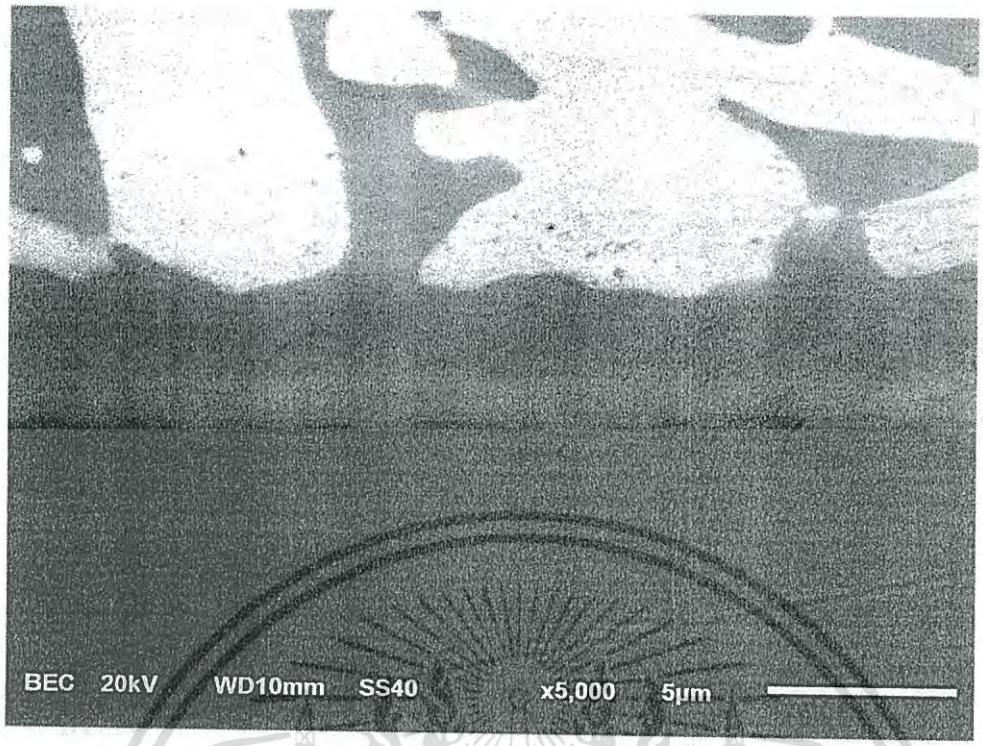


รูปที่ จ.173 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 1000 ชั่วโมง

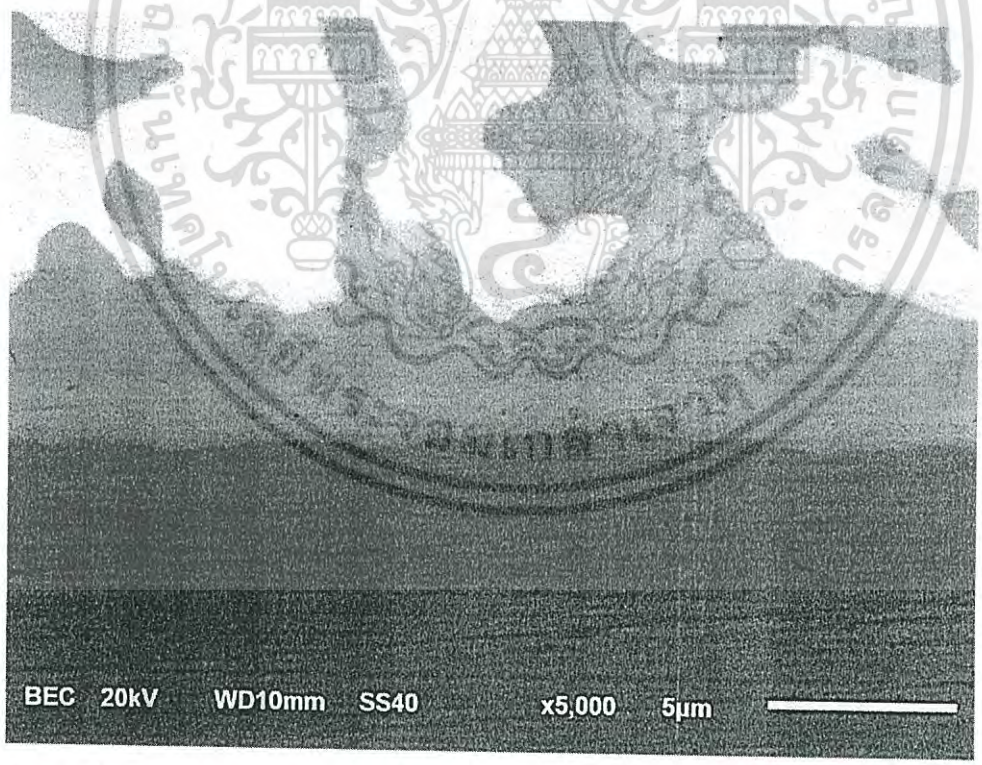


รูปที่ จ.174 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

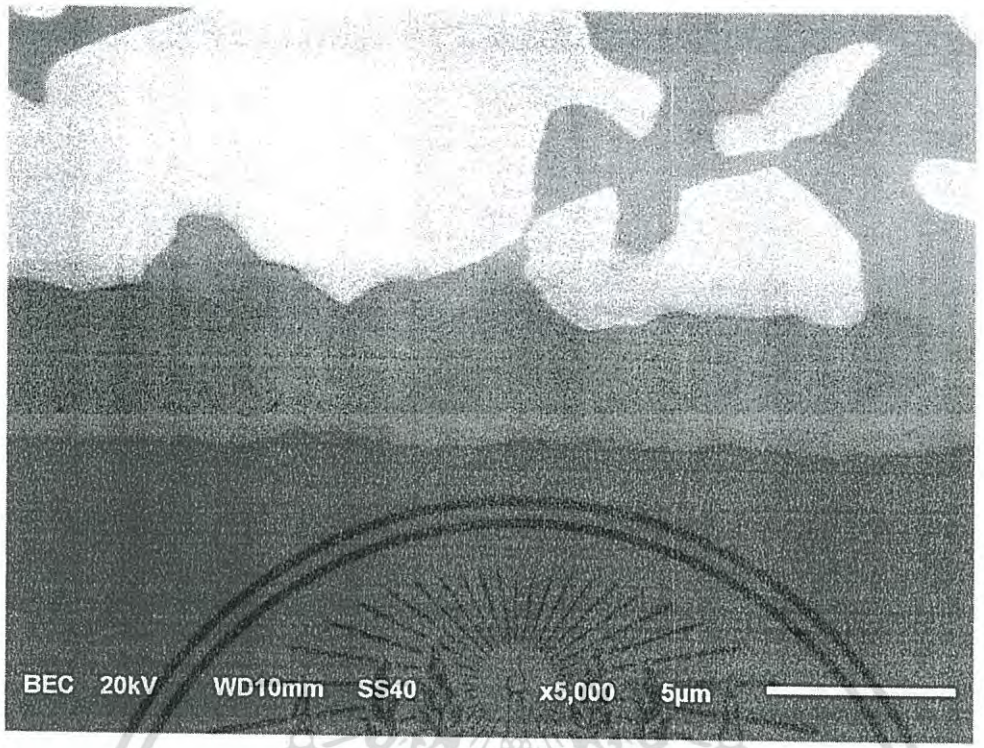


รูปที่ จ.175 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 1000 ชั่วโมง

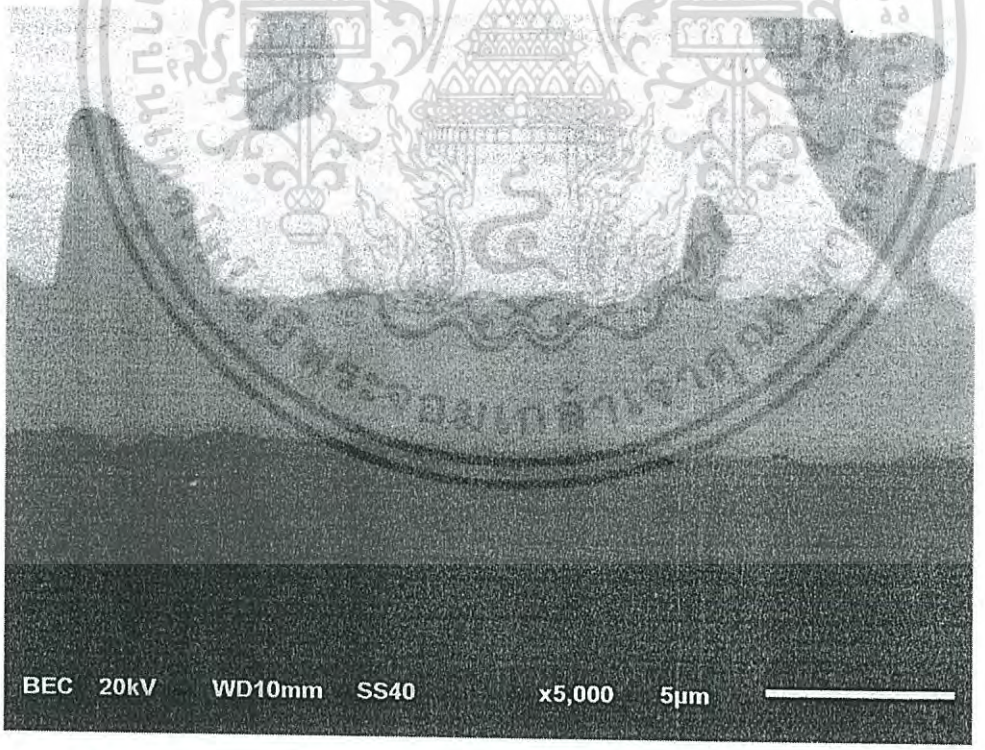


รูปที่ จ.176 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

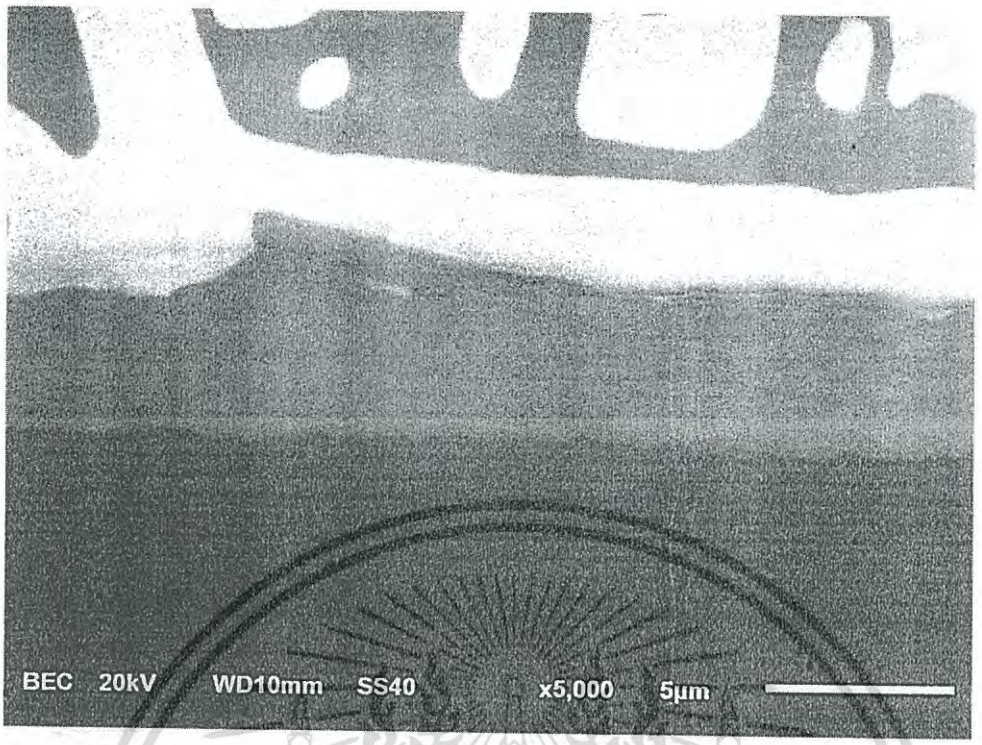


รูปที่ จ.177 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 1000 ชั่วโมง

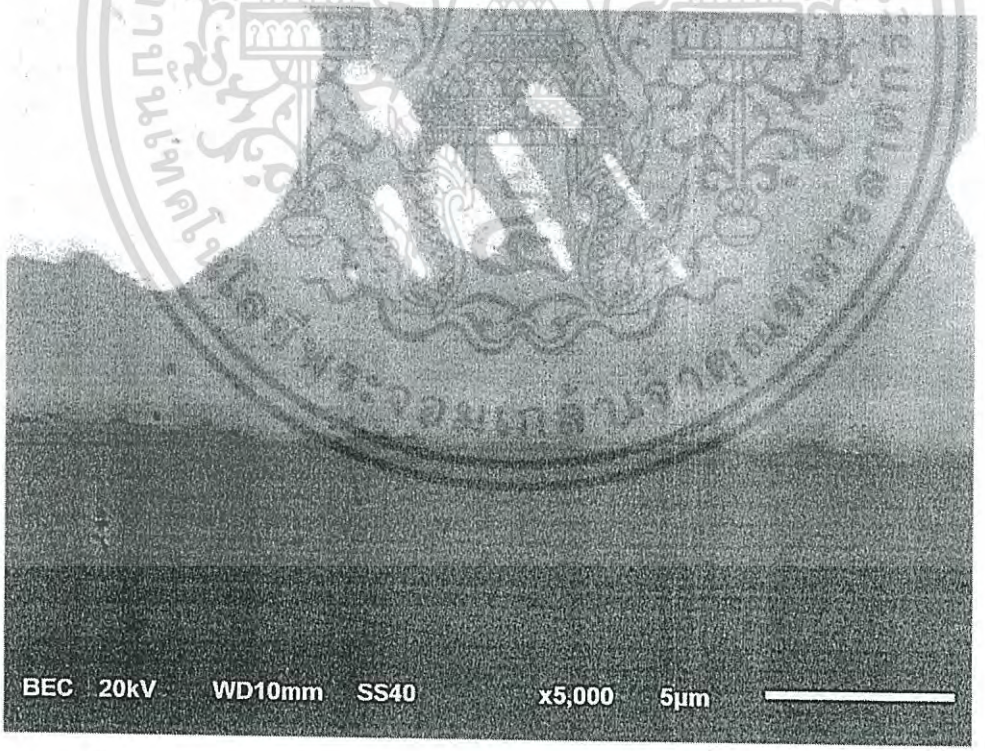


รูปที่ จ.178 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

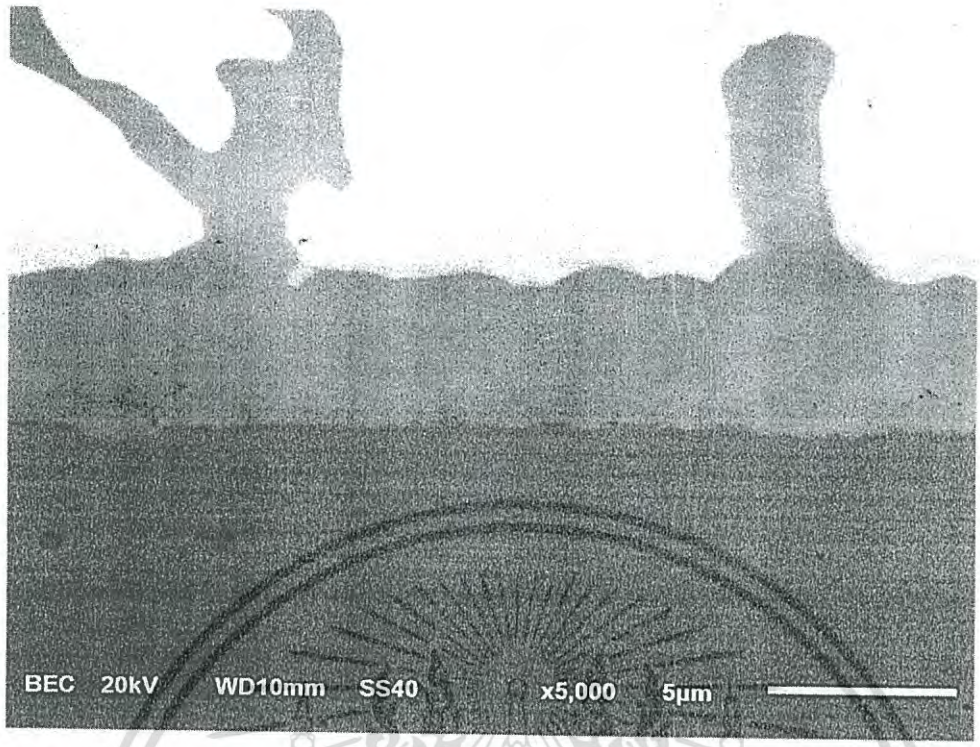


รูปที่ จ.179 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 1000 ชั่วโมง

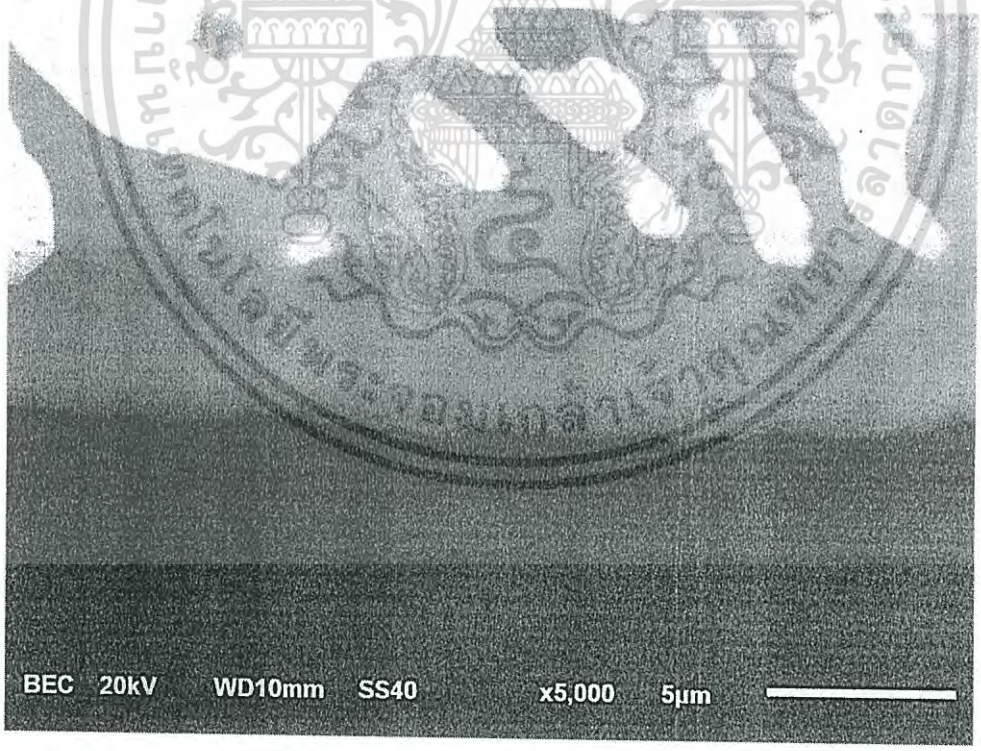


รูปที่ จ.180 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

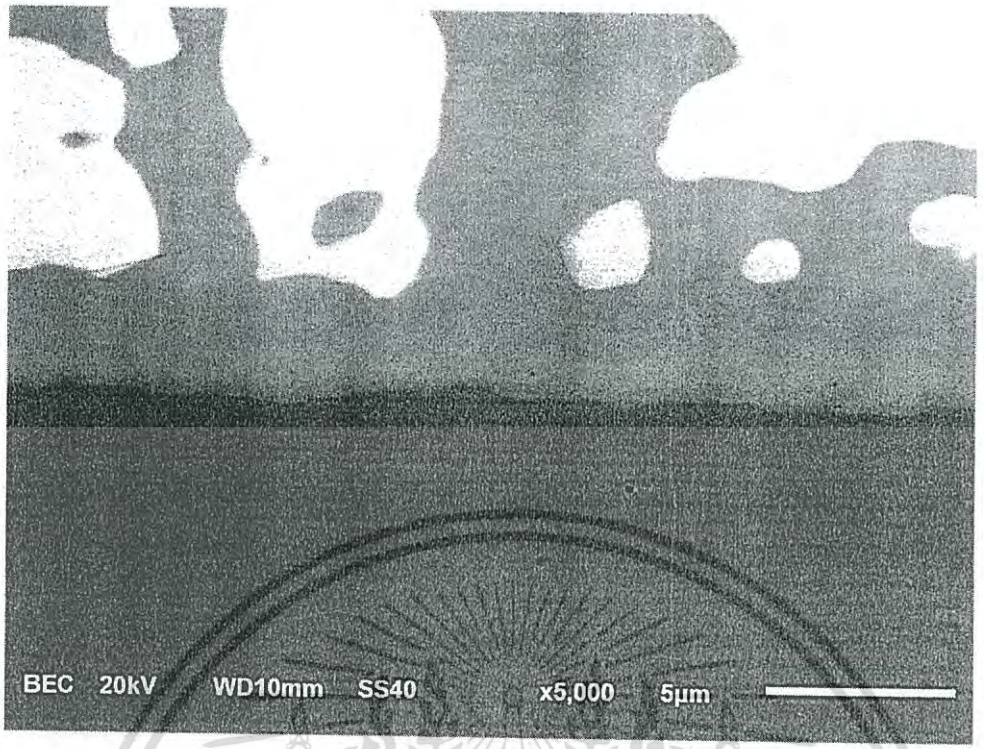


รูปที่ จ.181 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 1000 ชั่วโมง

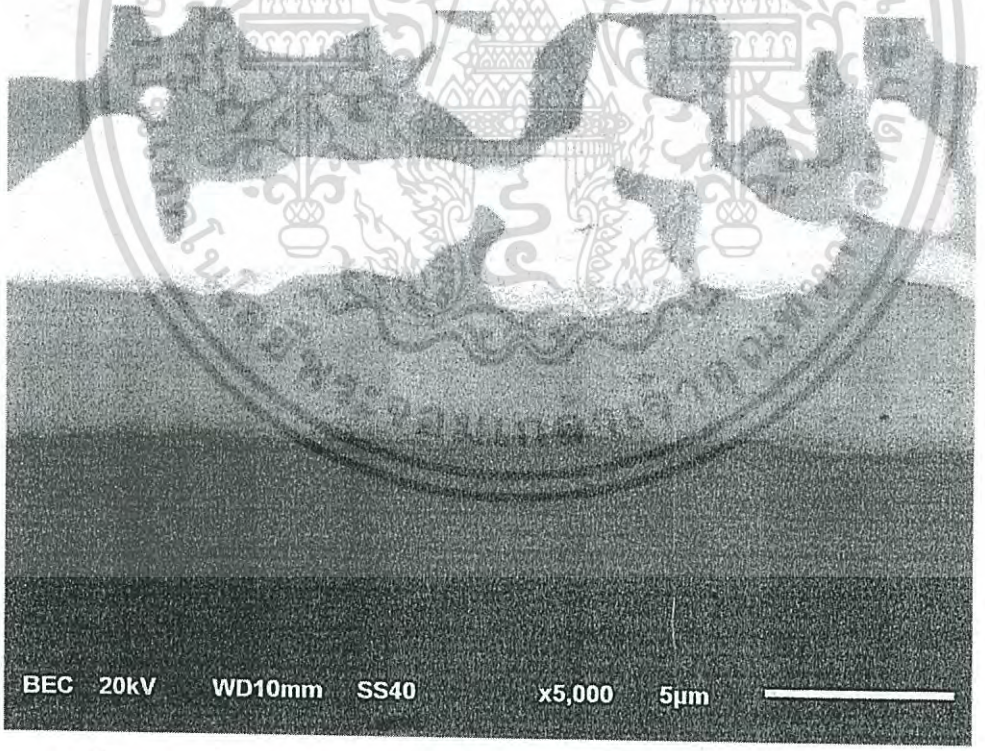


รูปที่ จ.182 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

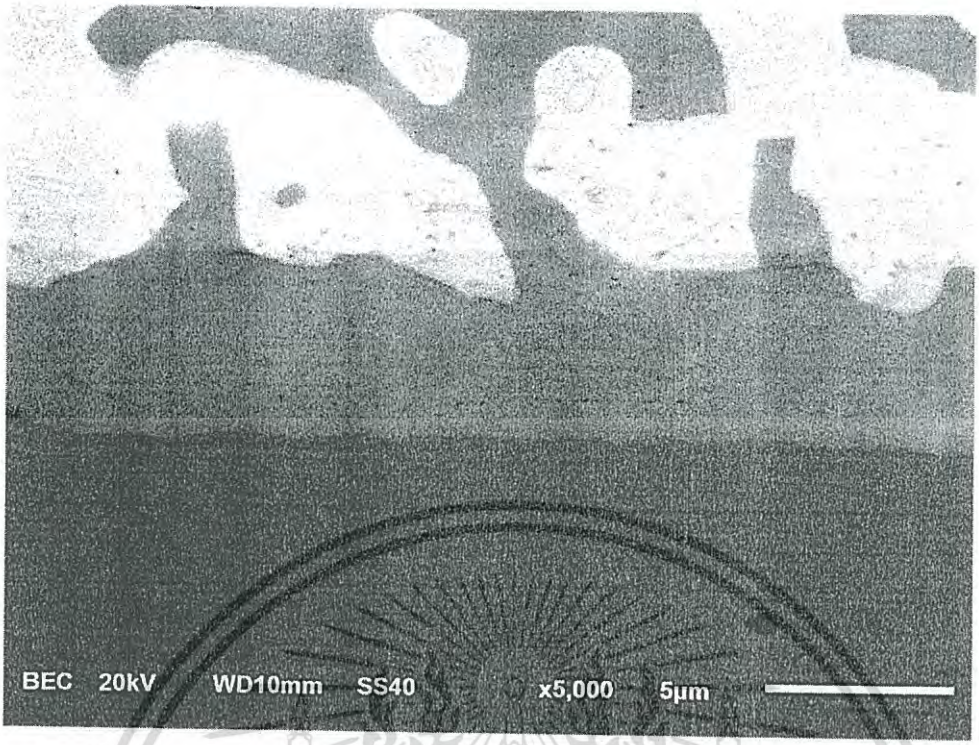


รูปที่ จ.183 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 1000 ชั่วโมง

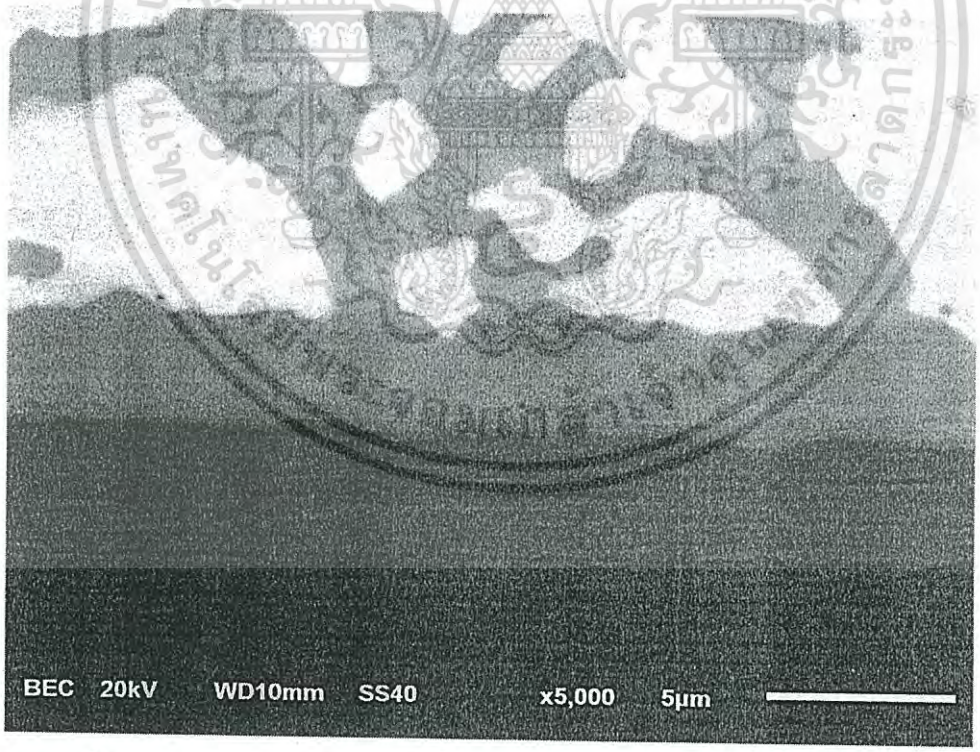


รูปที่ จ.184 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

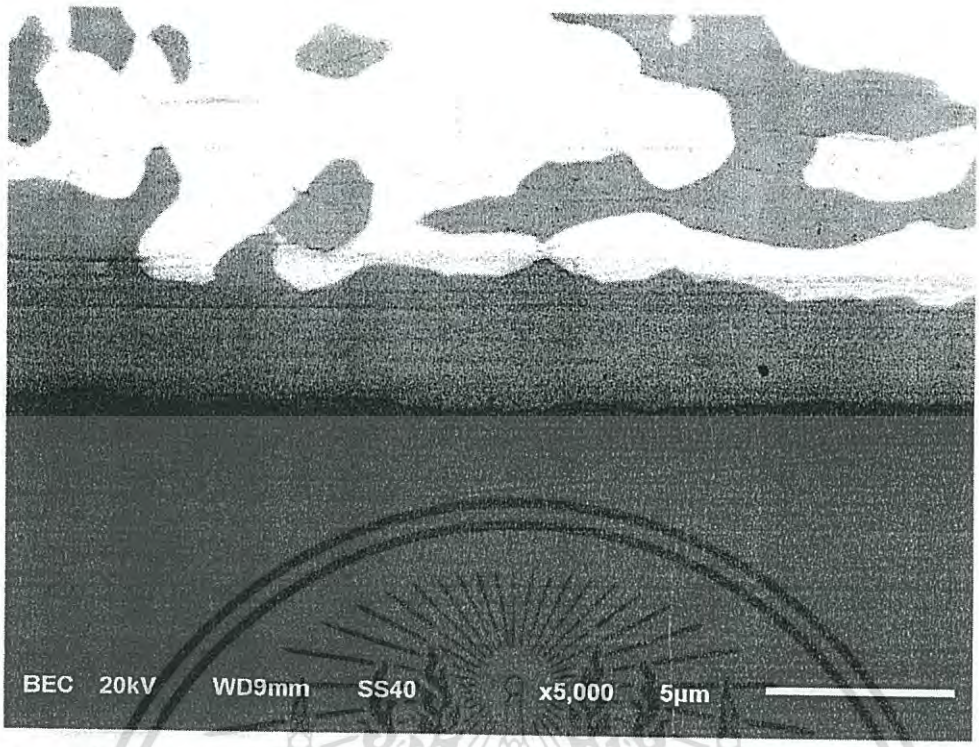


รูปที่ จ.185 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 1000 ชั่วโมง

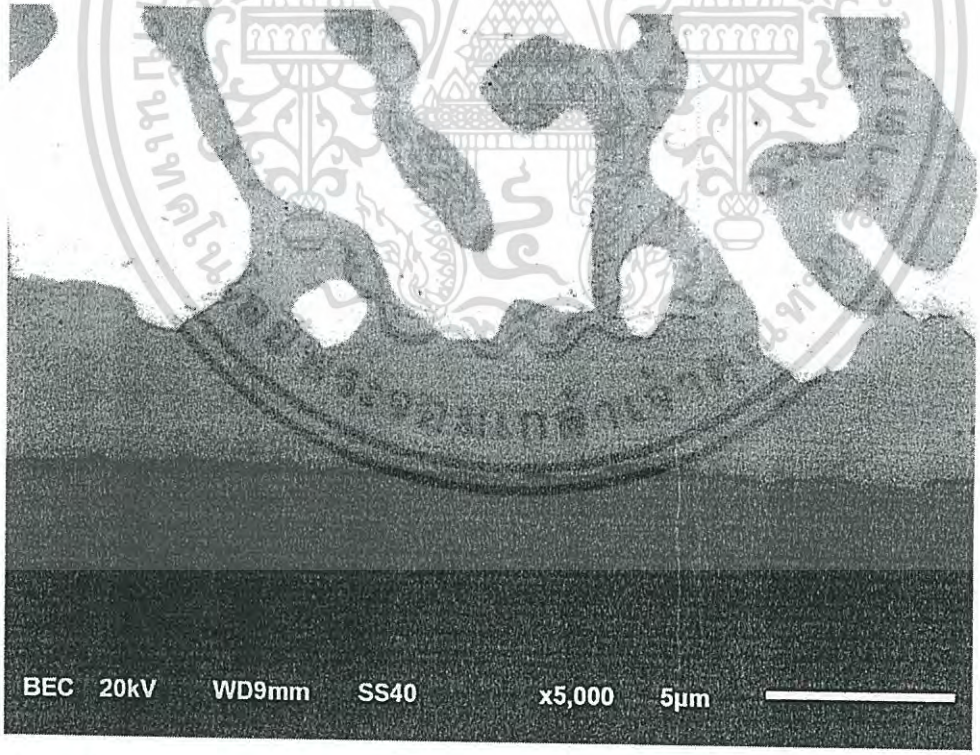


รูปที่ จ.186 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

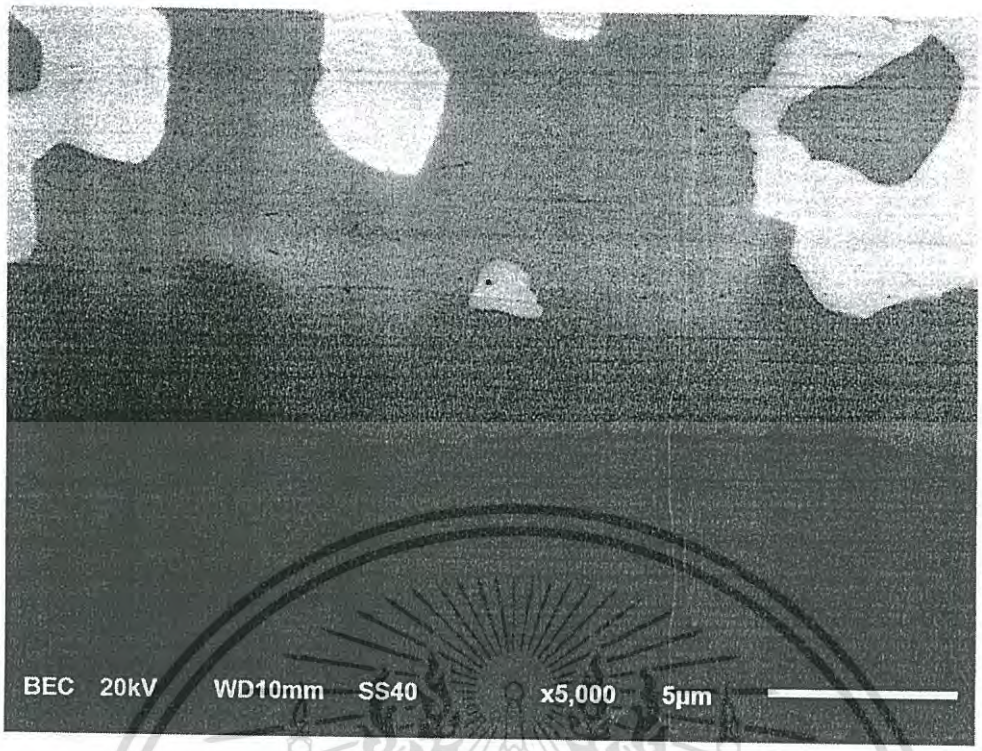


รูปที่ จ.187 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 1000 ชั่วโมง

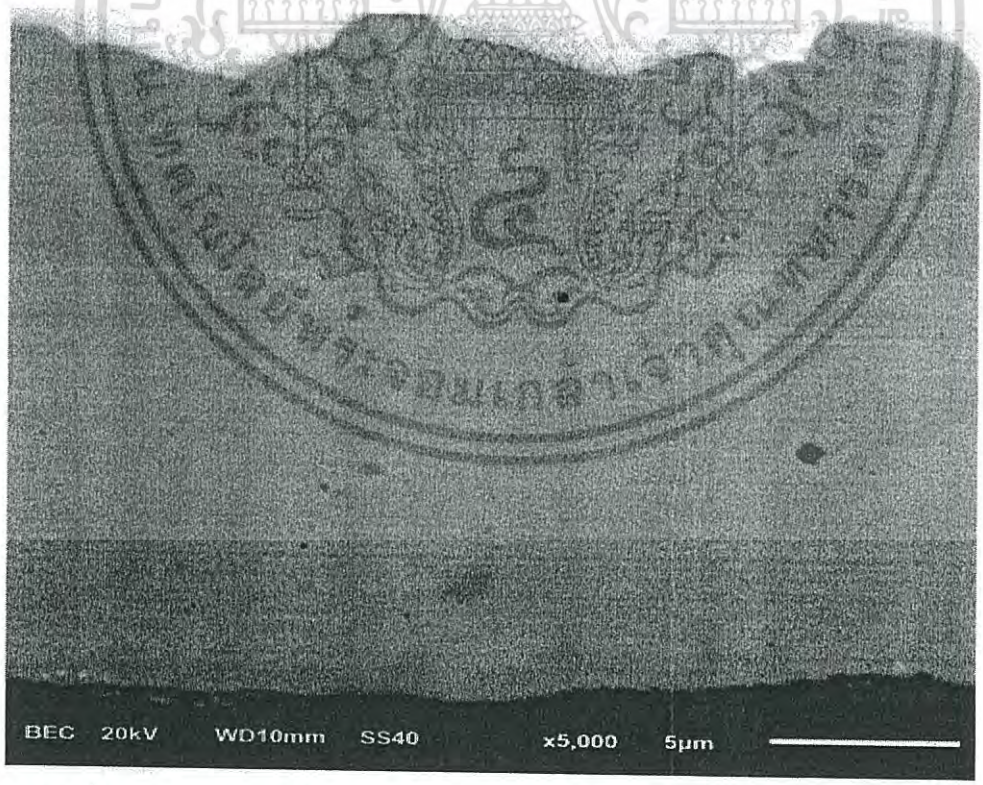


รูปที่ จ.188 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

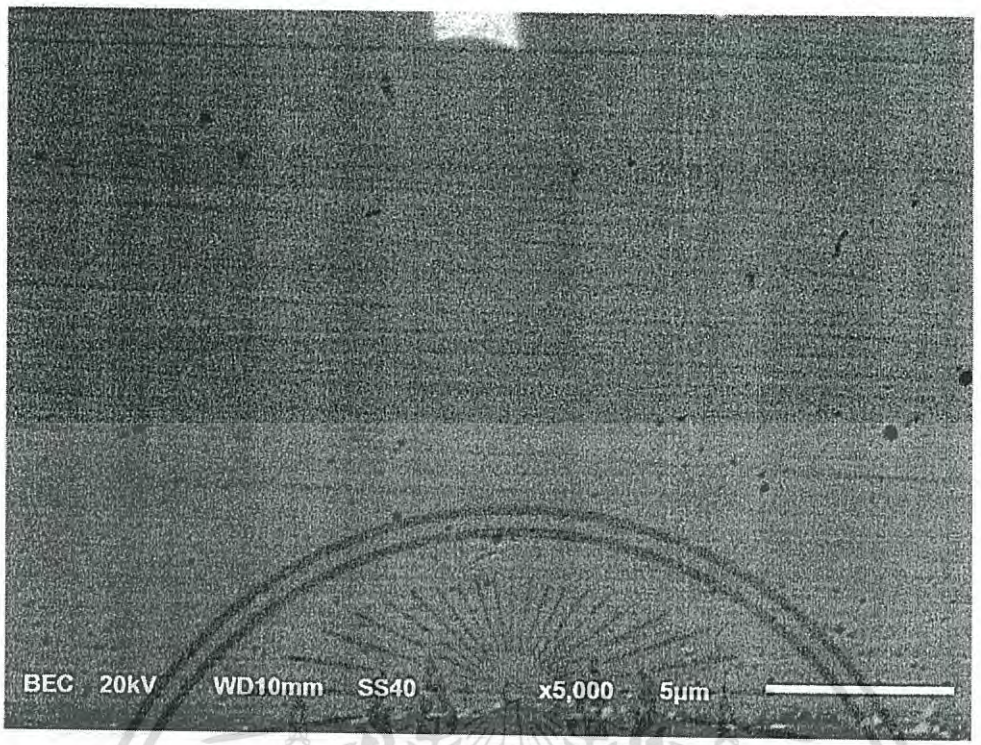


รูปที่ จ.189 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 1000 ชั่วโมง

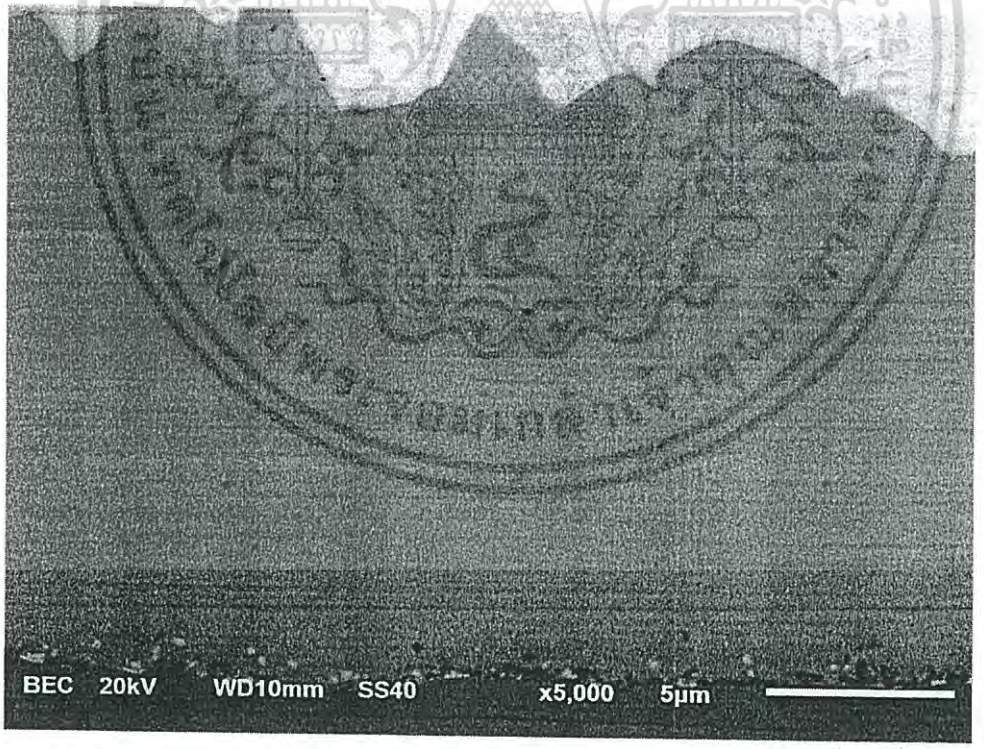


รูปที่ จ.190 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

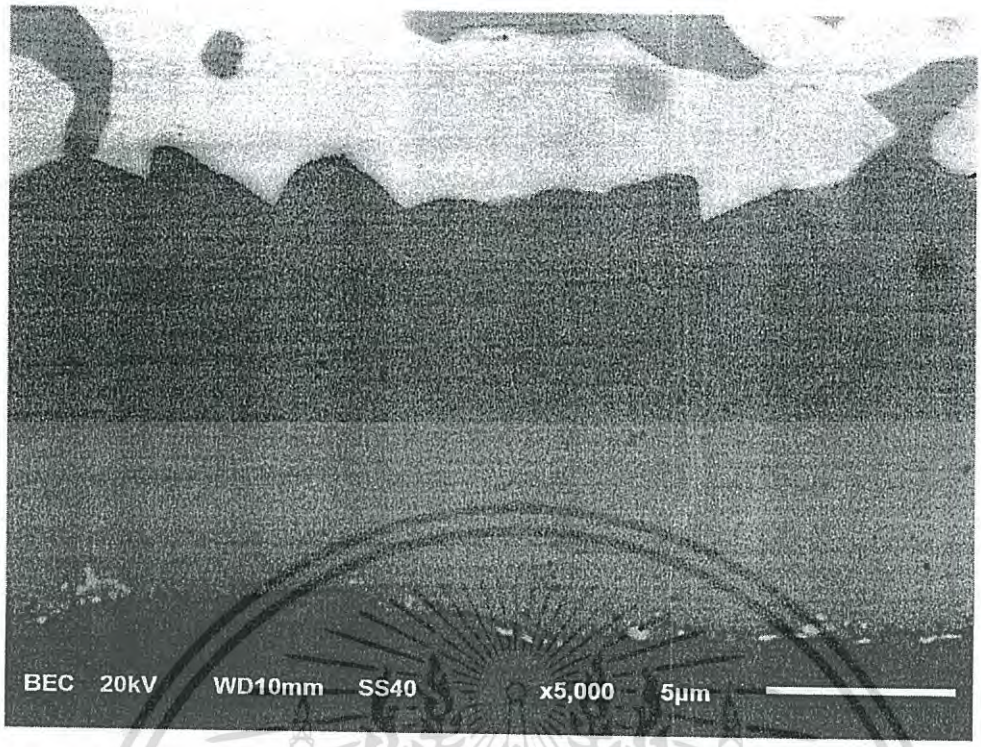


รูปที่ จ.191 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่ม ที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 1000 ชั่วโมง

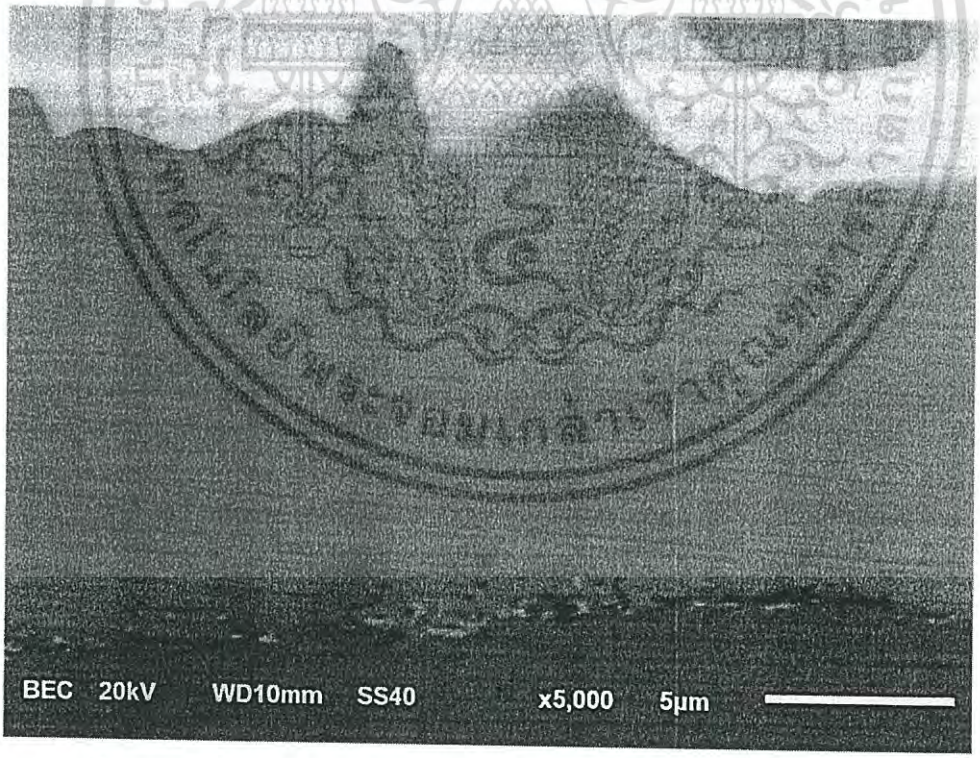


รูปที่ จ.192 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่ม ที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

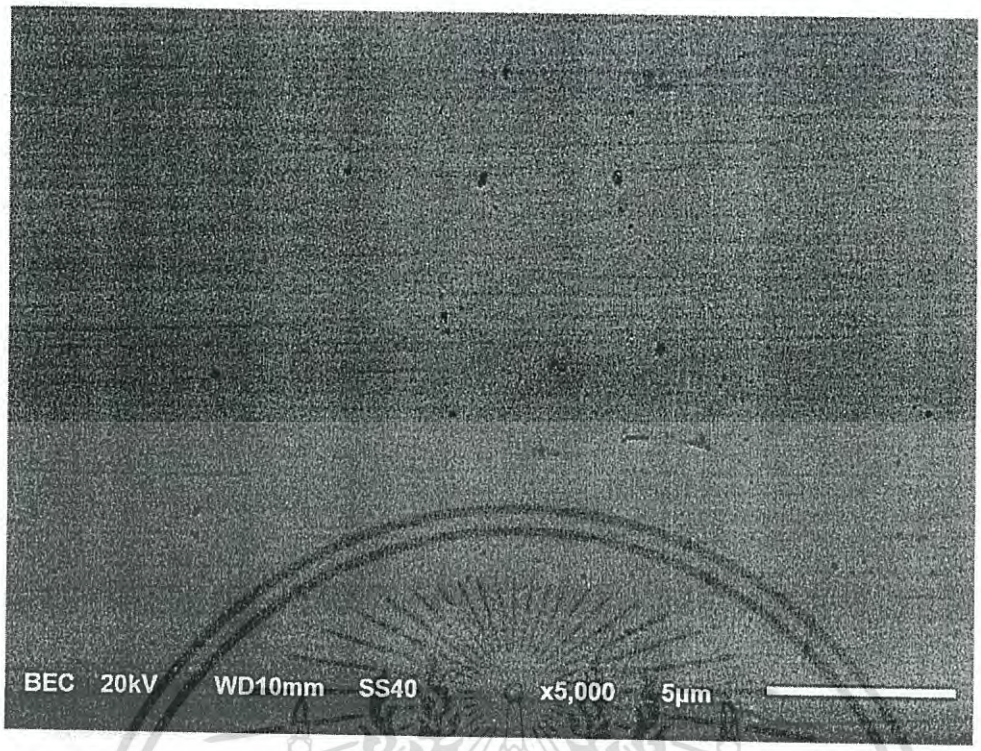


รูปที่ จ.193 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่ม ที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 1000 ชั่วโมง

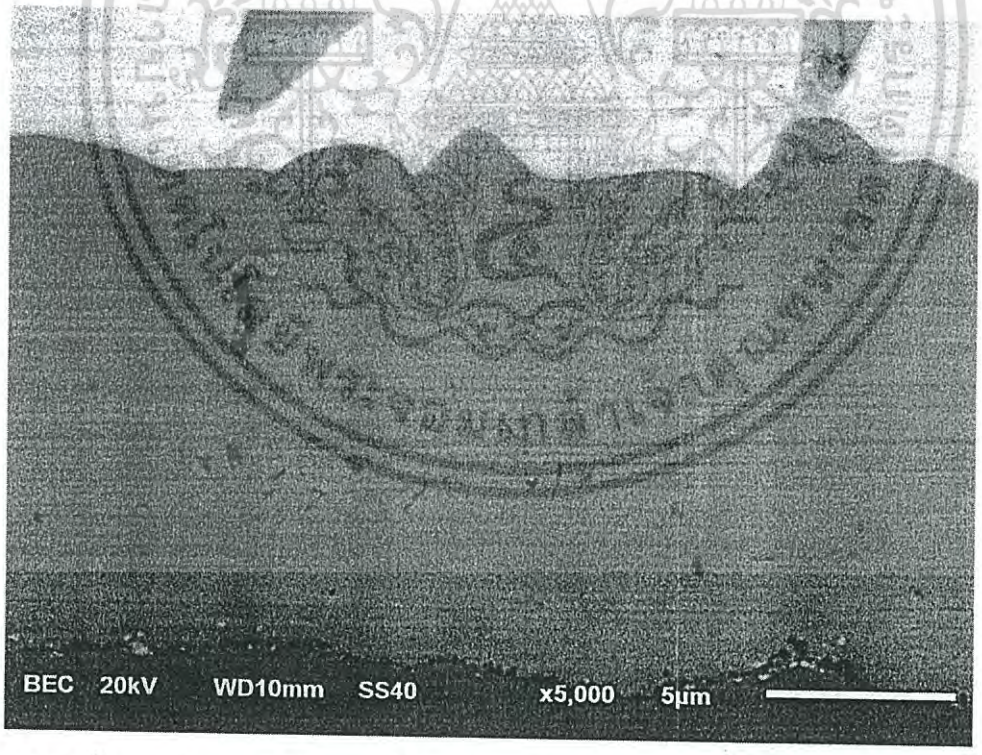


รูปที่ จ.194 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่ม ที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

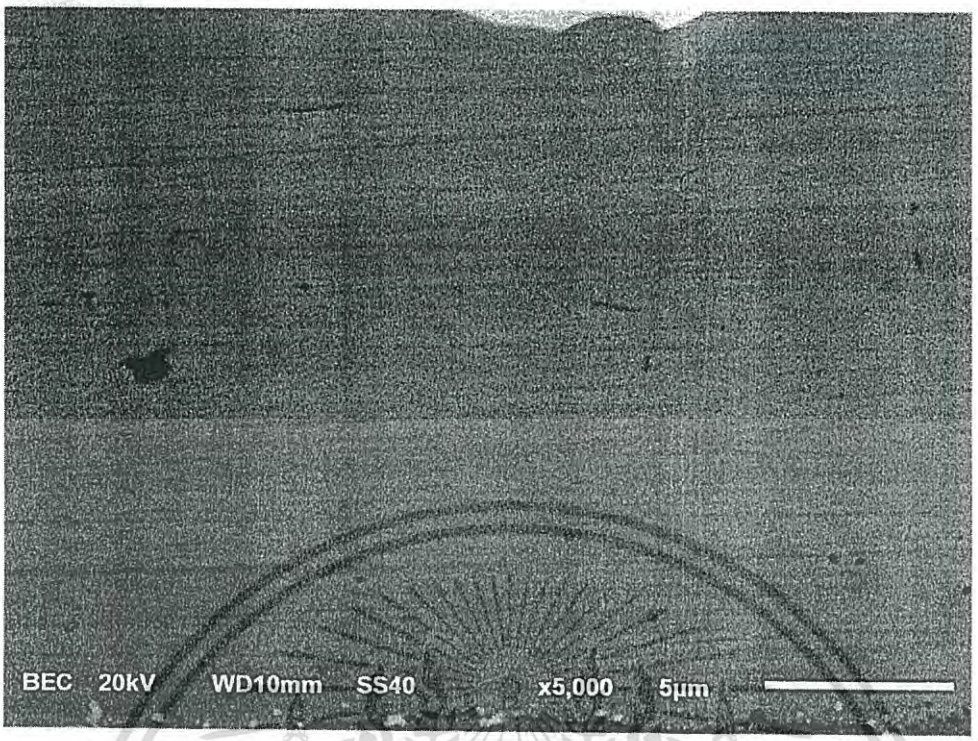


รูปที่ จ.195 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 1000 ชั่วโมง

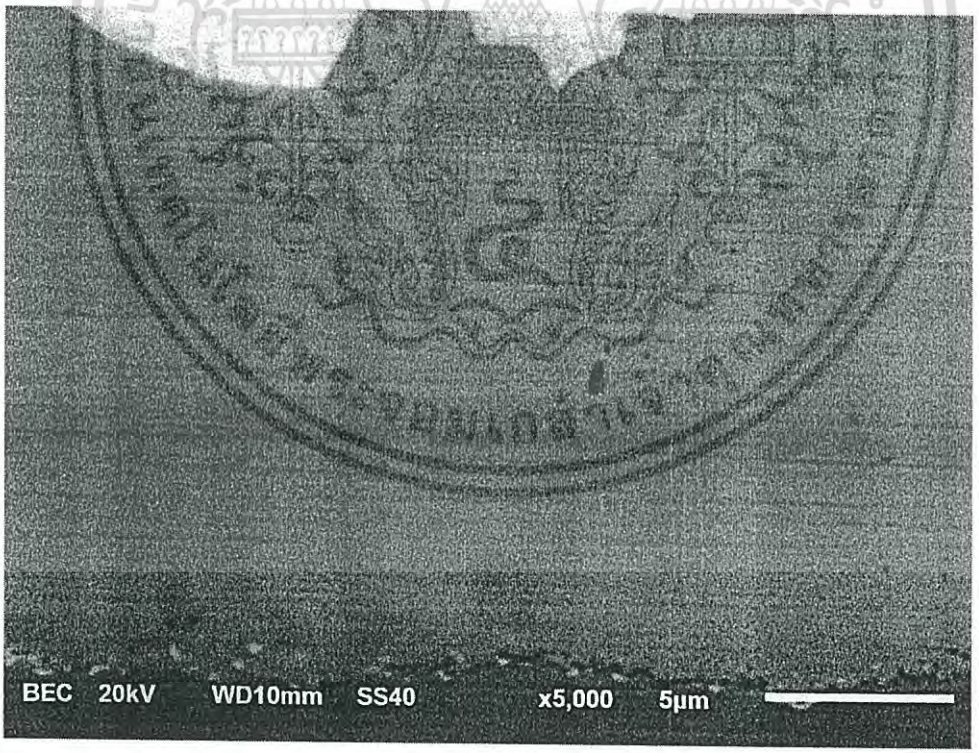


รูปที่ จ.196 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

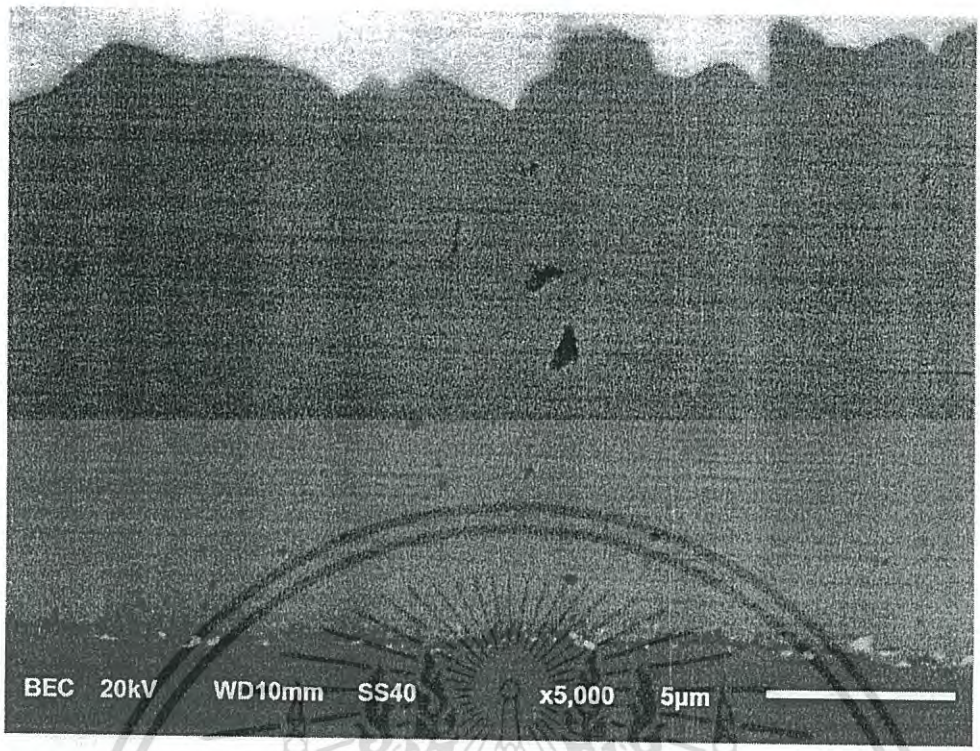


รูปที่ จ.197 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 1000 ชั่วโมง

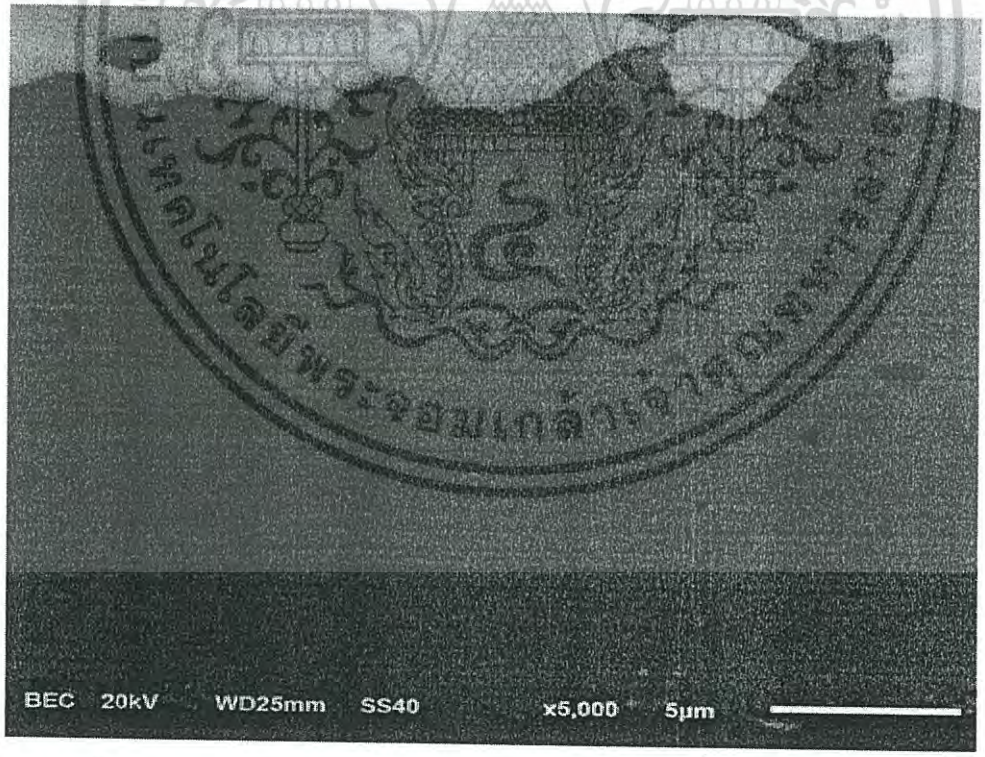


รูปที่ จ.198 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

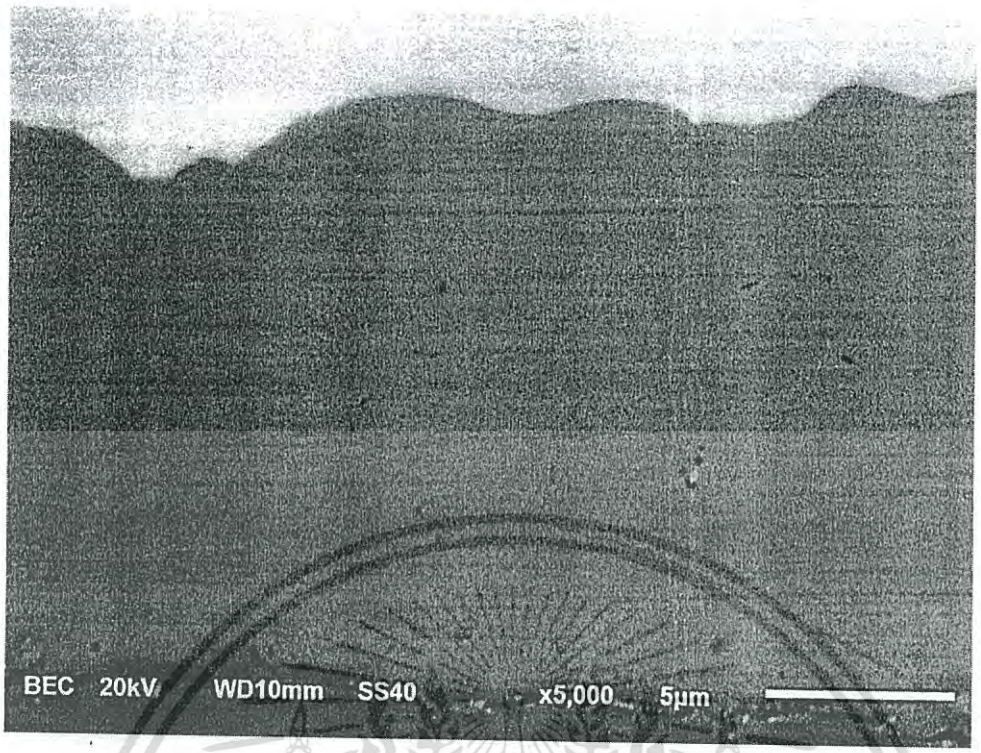


รูปที่ จ.199 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 1000 ชั่วโมง

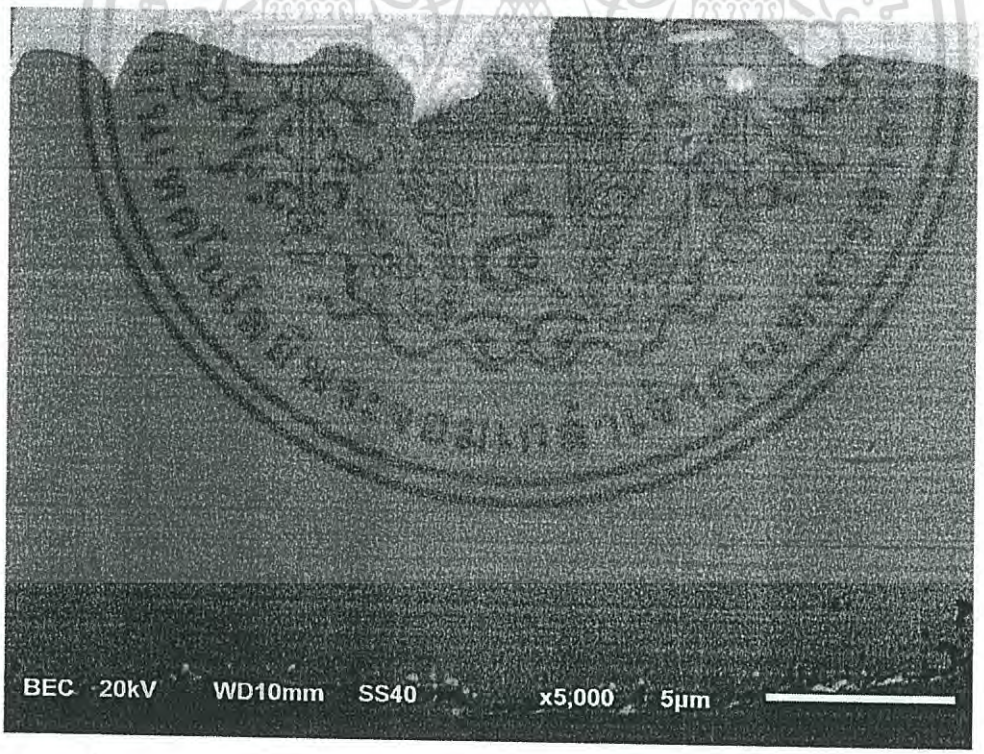


รูปที่ จ.200 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

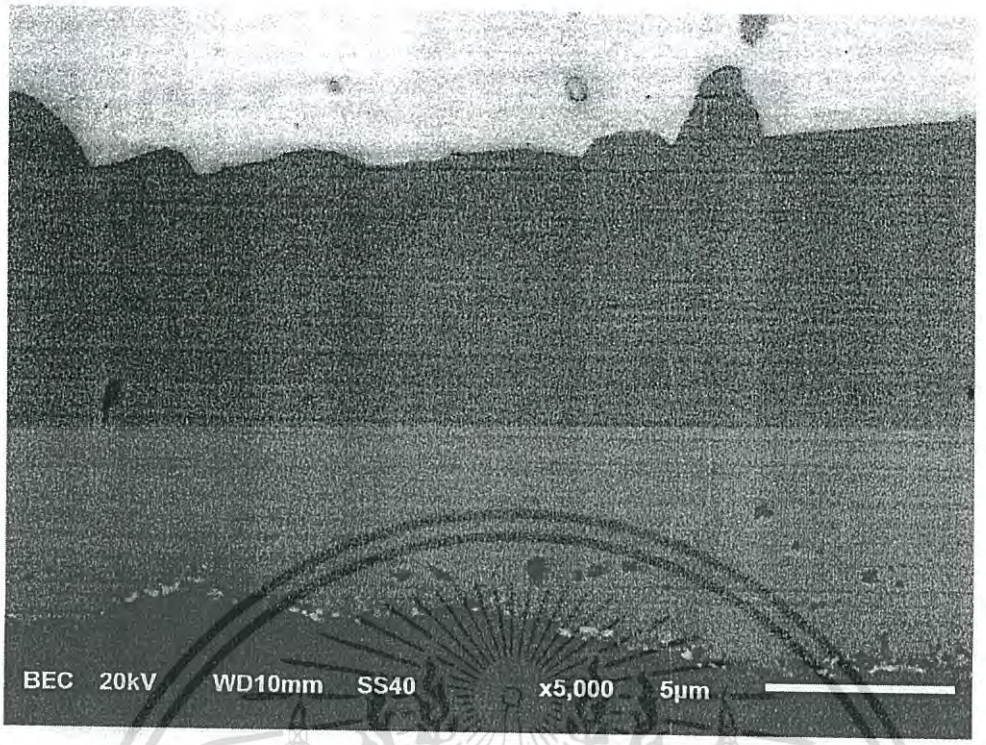


รูปที่ จ.201 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.05In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 1000 ชั่วโมง

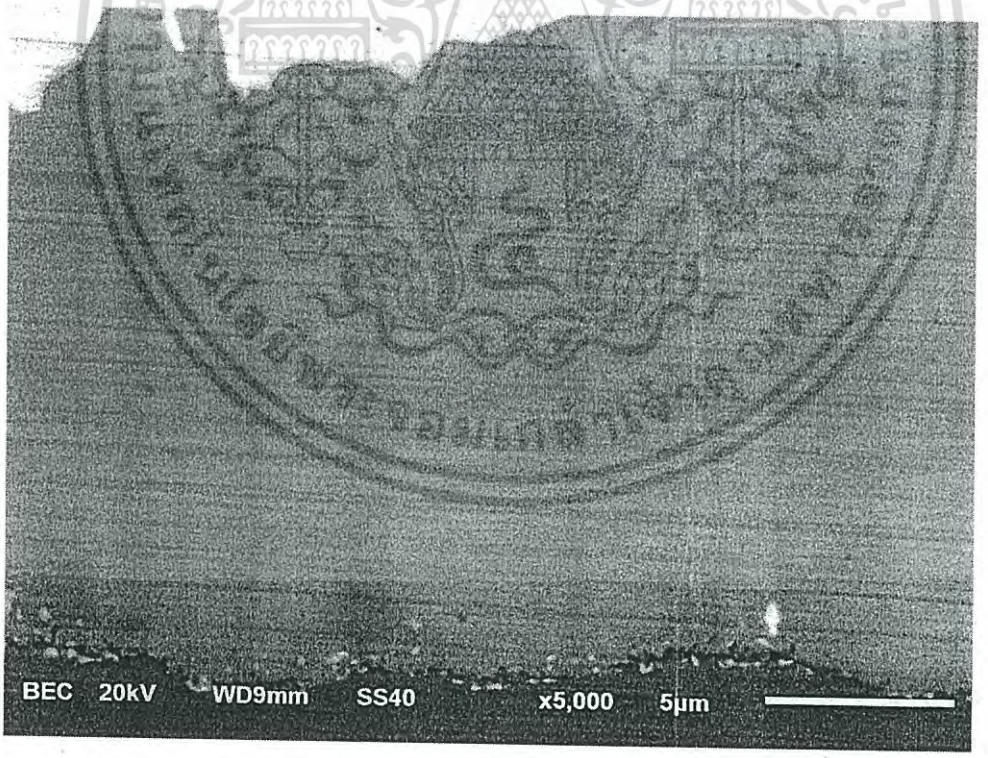


รูปที่ จ.202 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

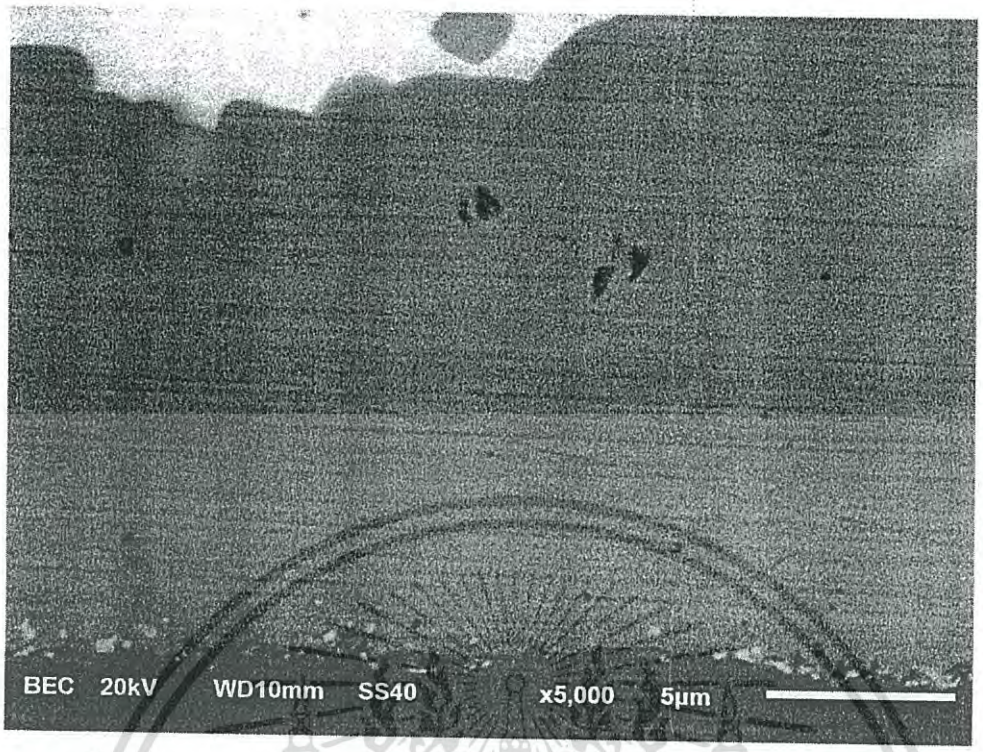


รูปที่ จ.203 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 1000 ชั่วโมง

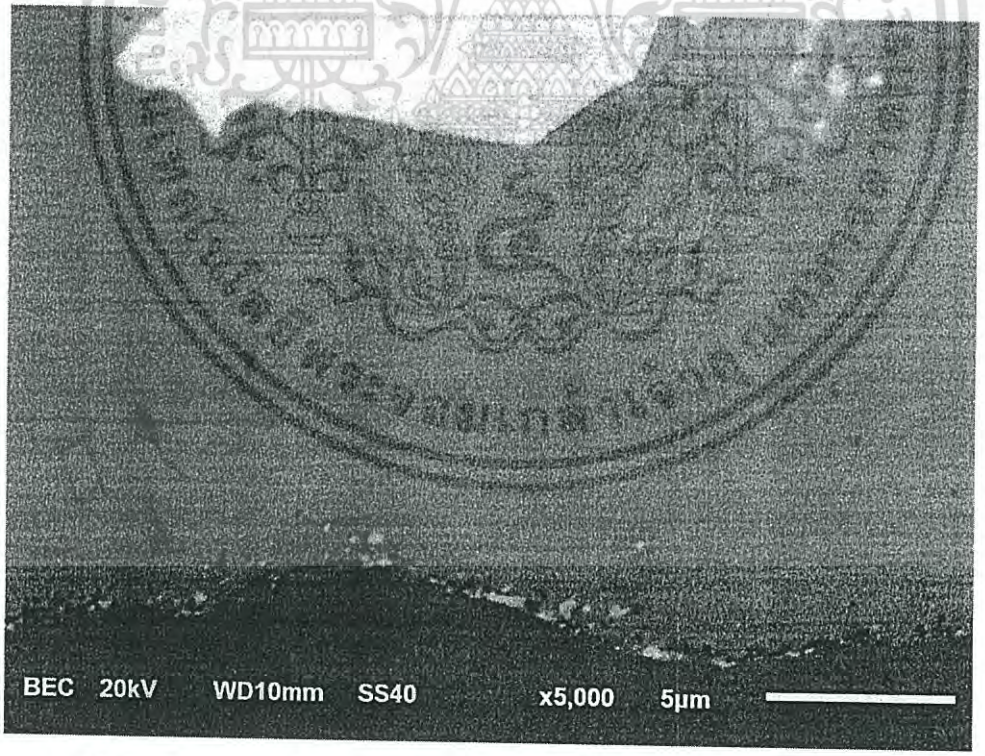


รูปที่ จ.204 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.05Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

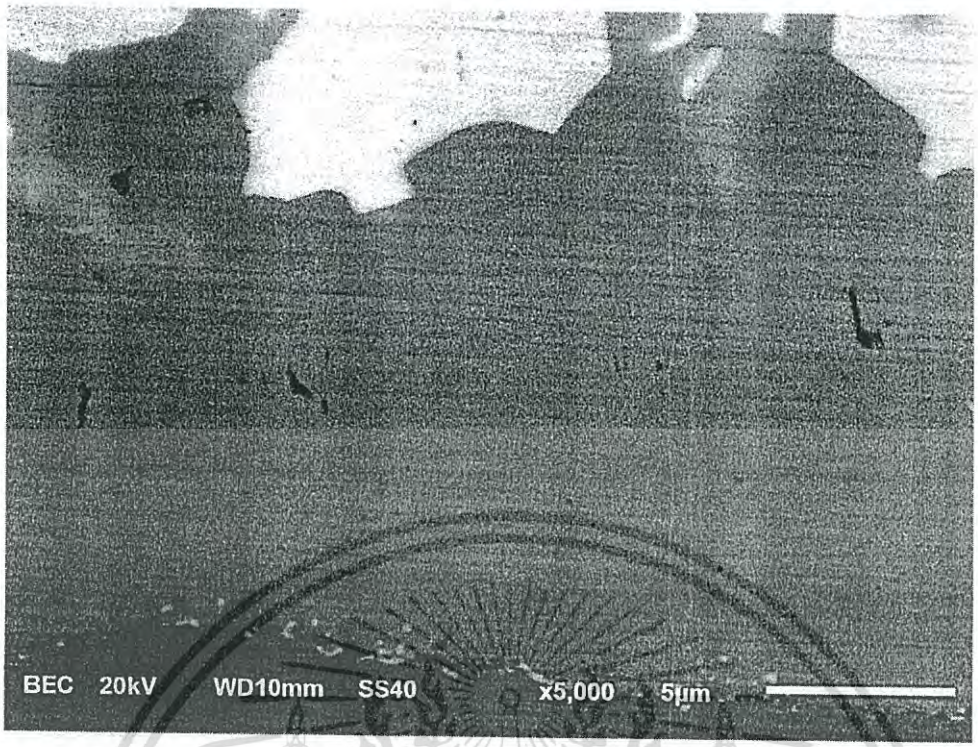


รูปที่ จ.205 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 1000 ชั่วโมง

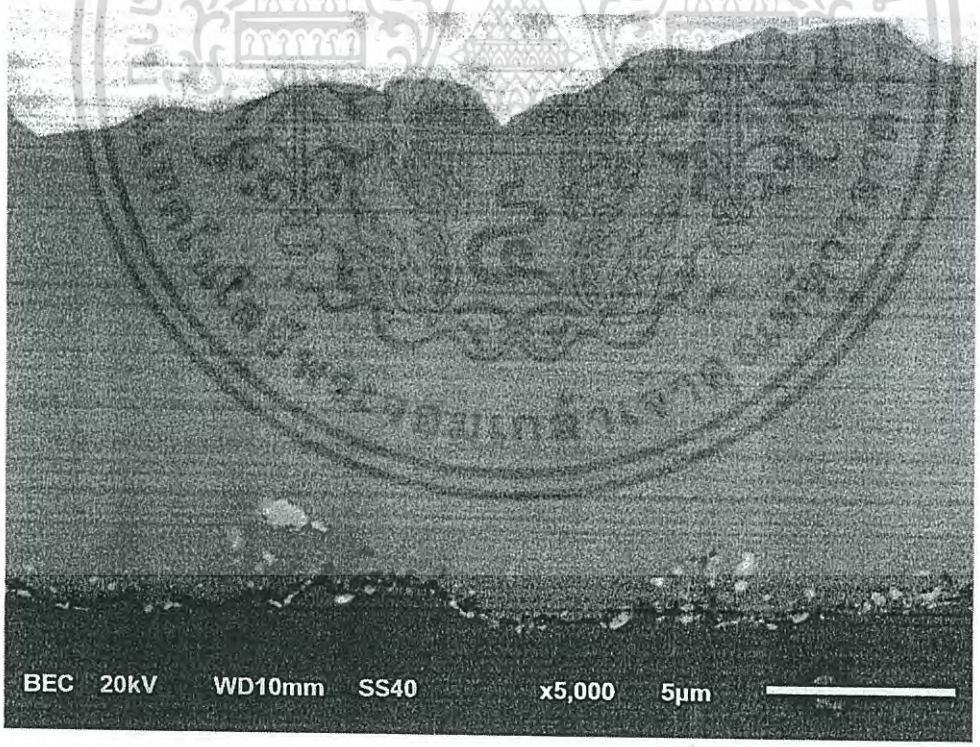


รูปที่ จ.206 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.1Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

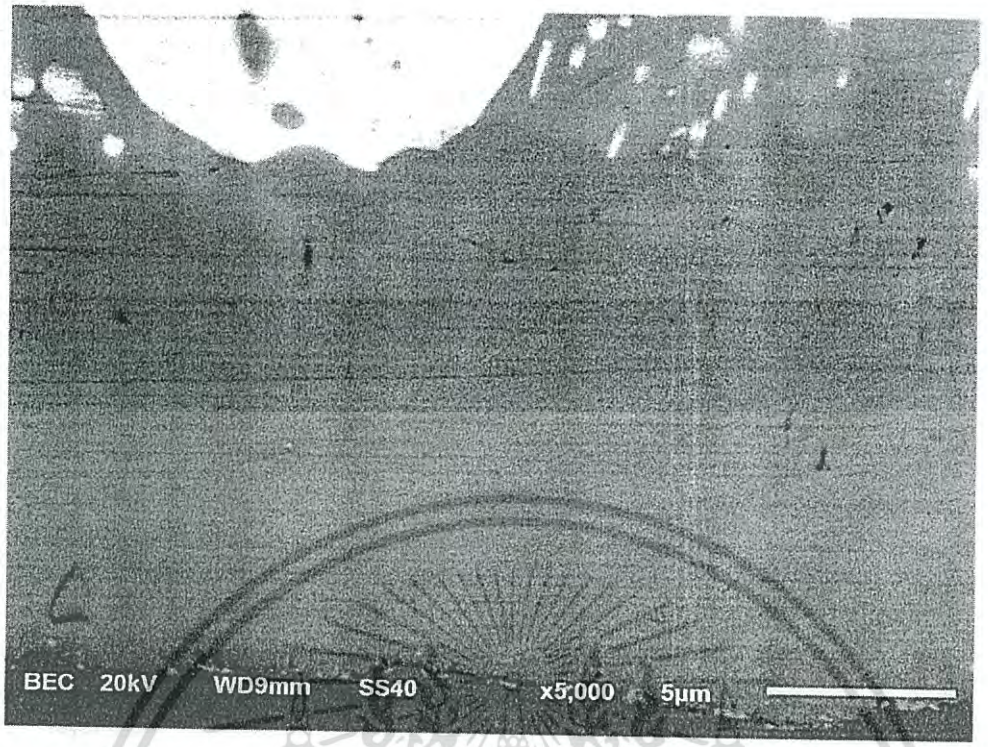


รูปที่ จ.207 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 1000 ชั่วโมง

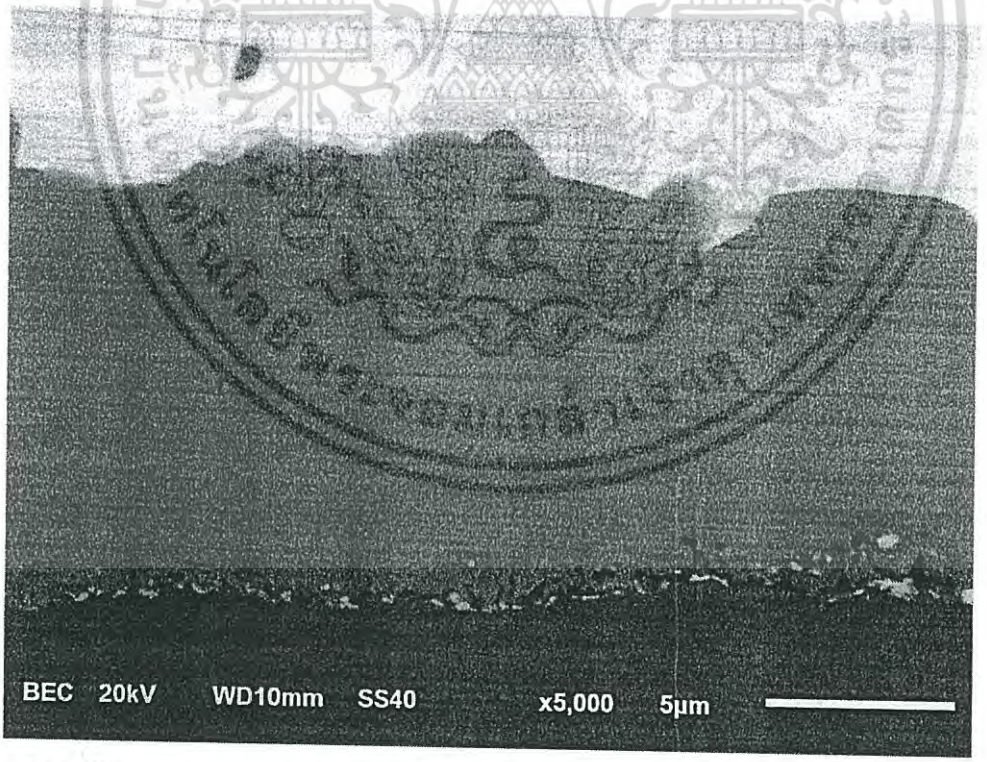


รูปที่ จ.208 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-0.5Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

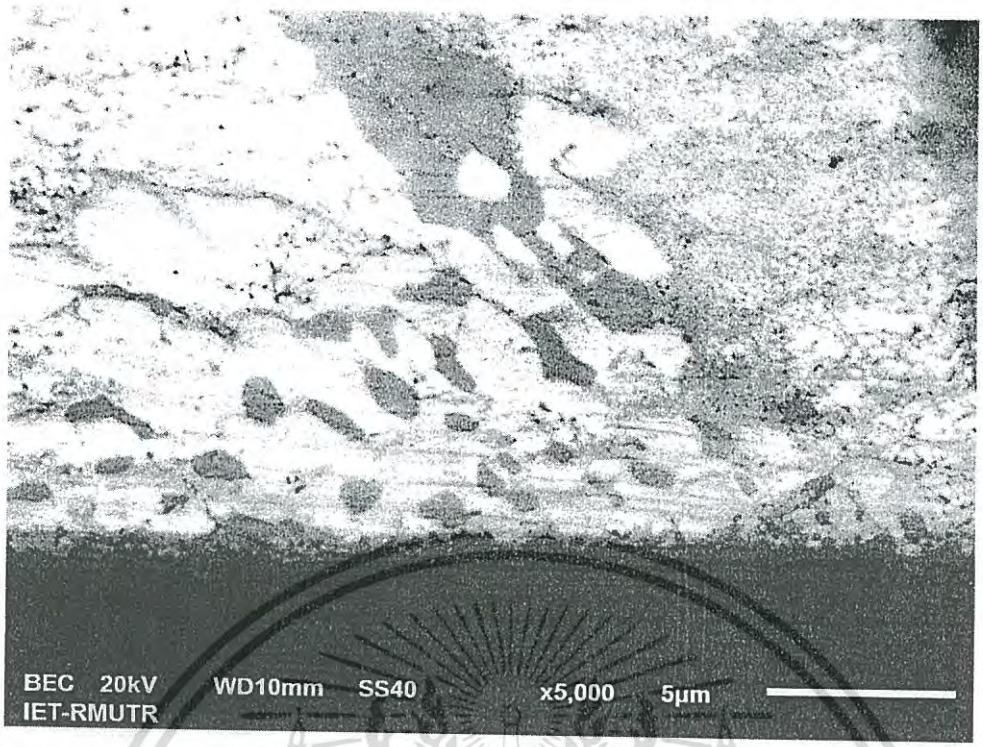


รูปที่ จ.209 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.05Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 1000 ชั่วโมง

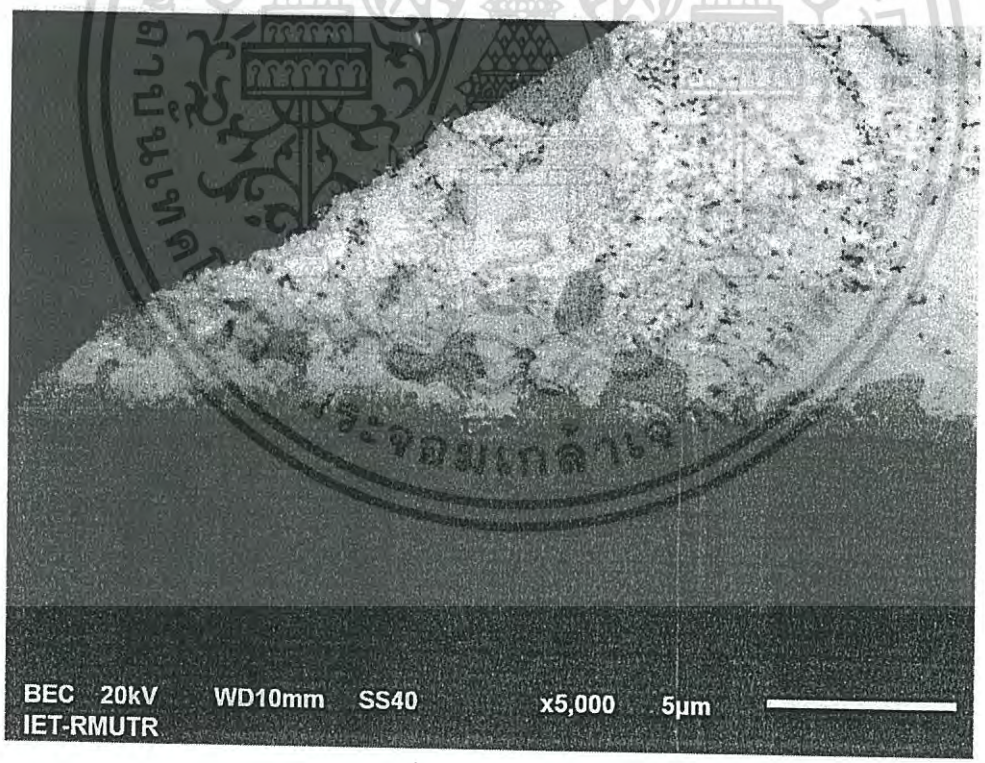


รูปที่ จ.210 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

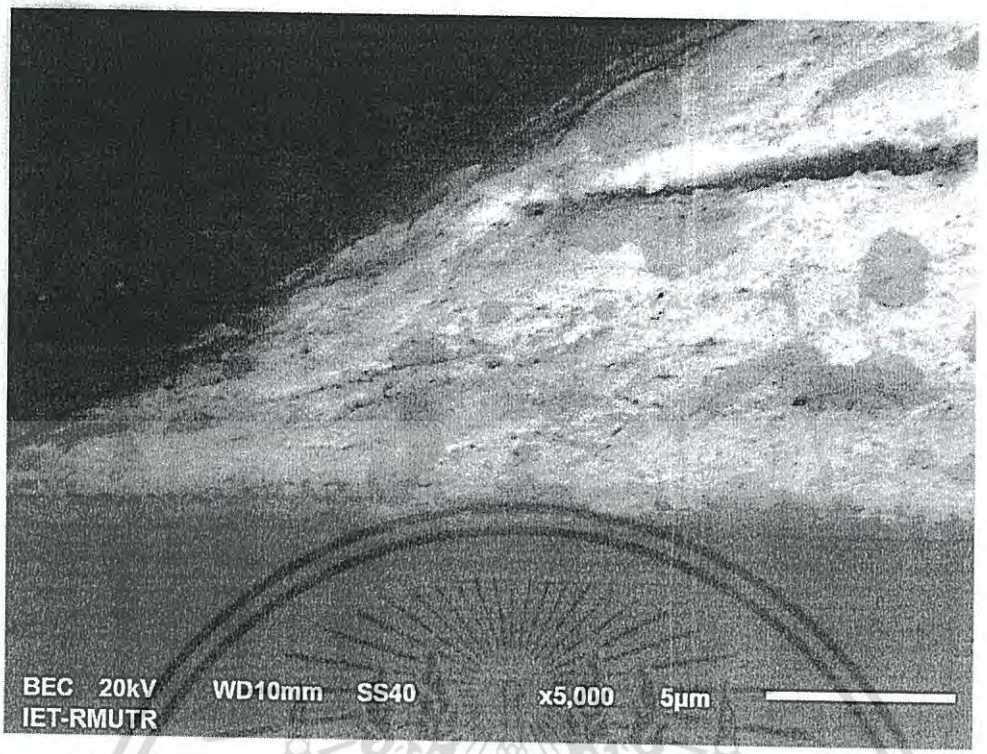


รูปที่ จ.211 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi ปนเปื้อนตะกั่วบริสุทธิ์กับแผ่นทองแดง หลังการบัดกรี

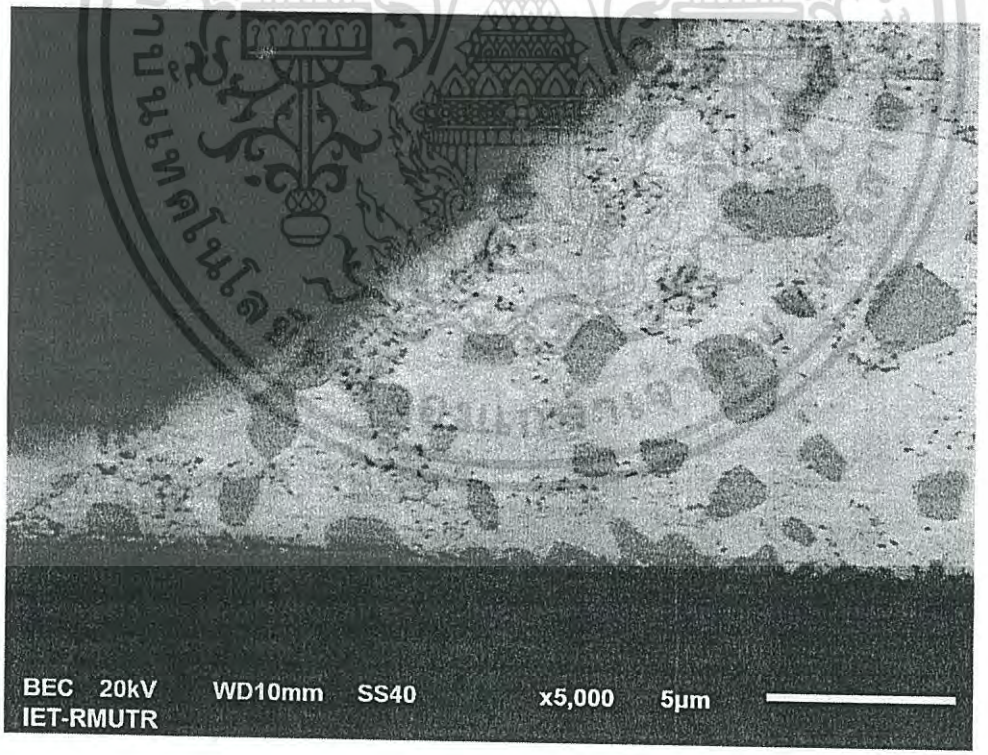


รูปที่ จ.212 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni ปนเปื้อนตะกั่วบริสุทธิ์กับแผ่นทองแดง หลังการบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

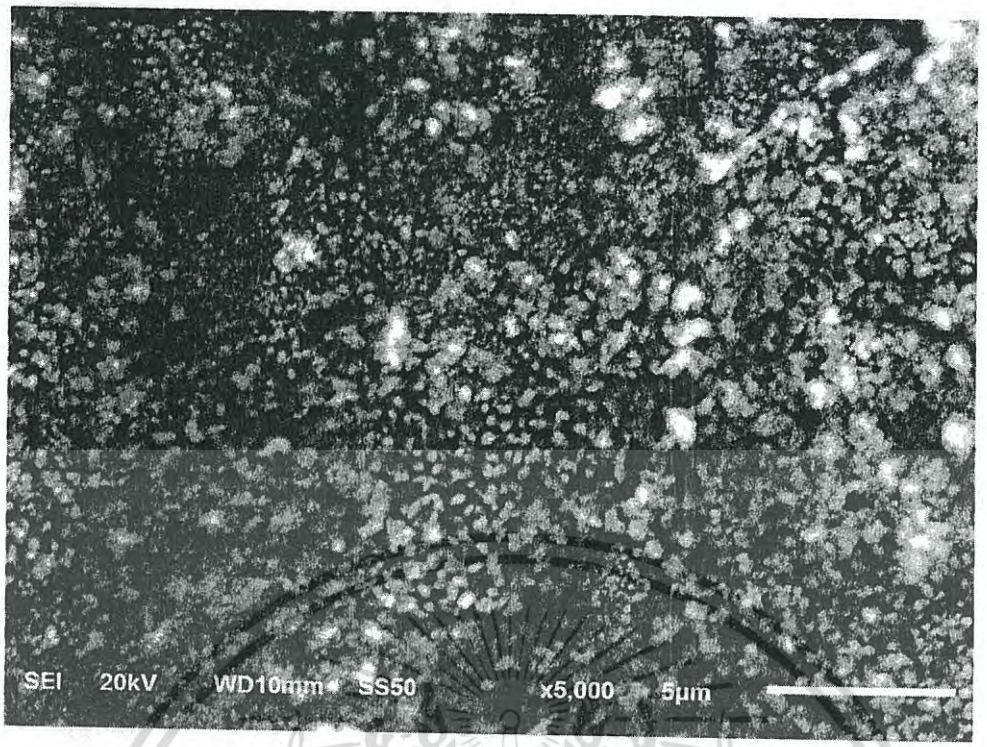


รูปที่ จ.213 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In ปนเปื้อนตะกั่วบริสุทธิ์กับแผ่นทองแดง หลังการบัดกรี

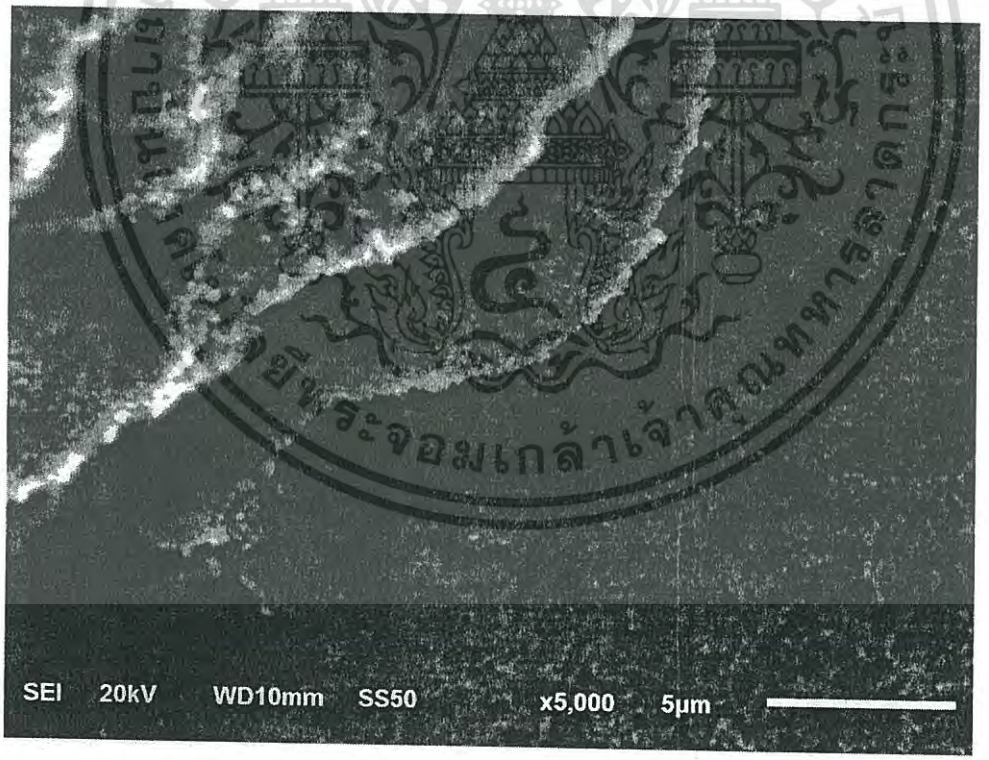


รูปที่ จ.214 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag ปนเปื้อนตะกั่วบริสุทธิ์กับแผ่นทองแดง หลังการบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ.215 พื้นผิวของโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi ที่หลุดออกจากชิ้นงาน หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 125°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง



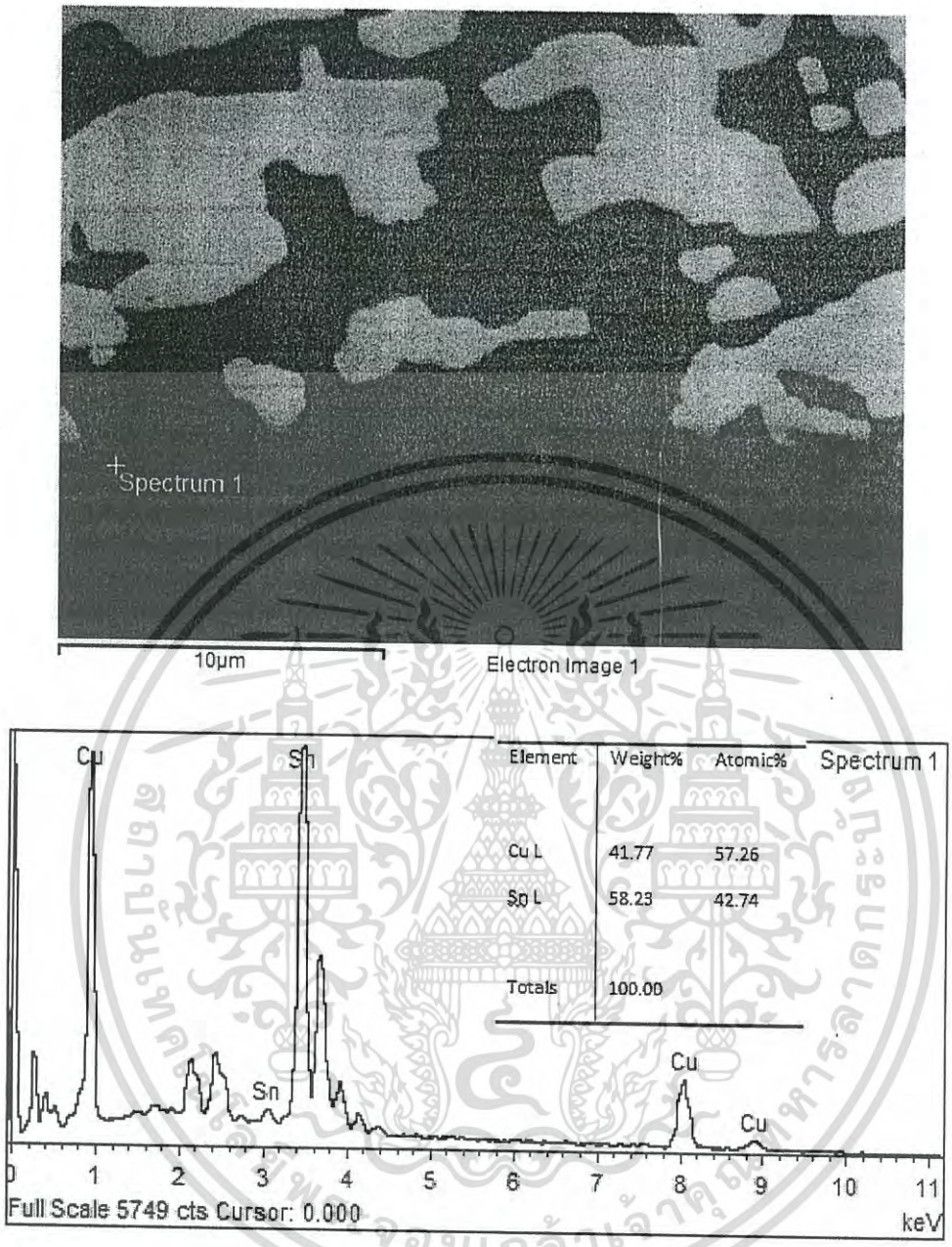
รูปที่ จ.216 พื้นผิวแผ่นทองแดงที่หลุดออกจากชิ้นงาน หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 125°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ

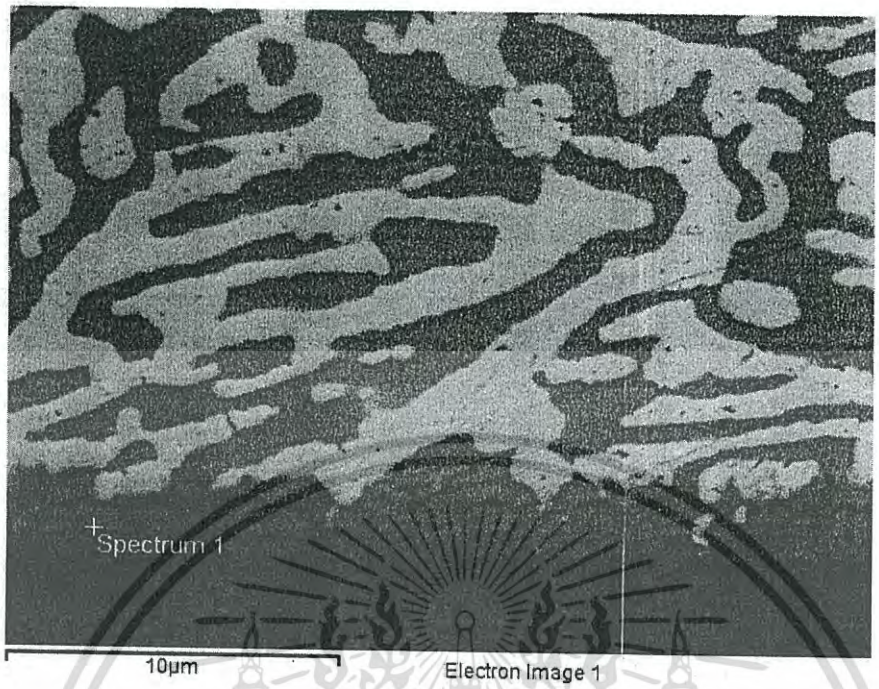
การตรวจสอบปริมาณธาตุด้วยวิธี Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS)

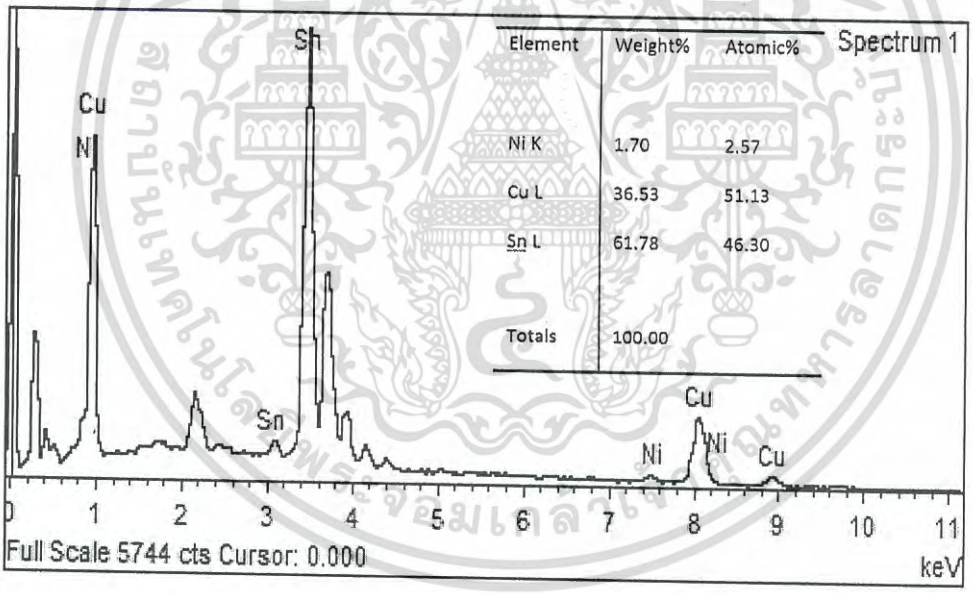
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ฉ.1 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับแผ่นทองแดง หลังการบัดกรี

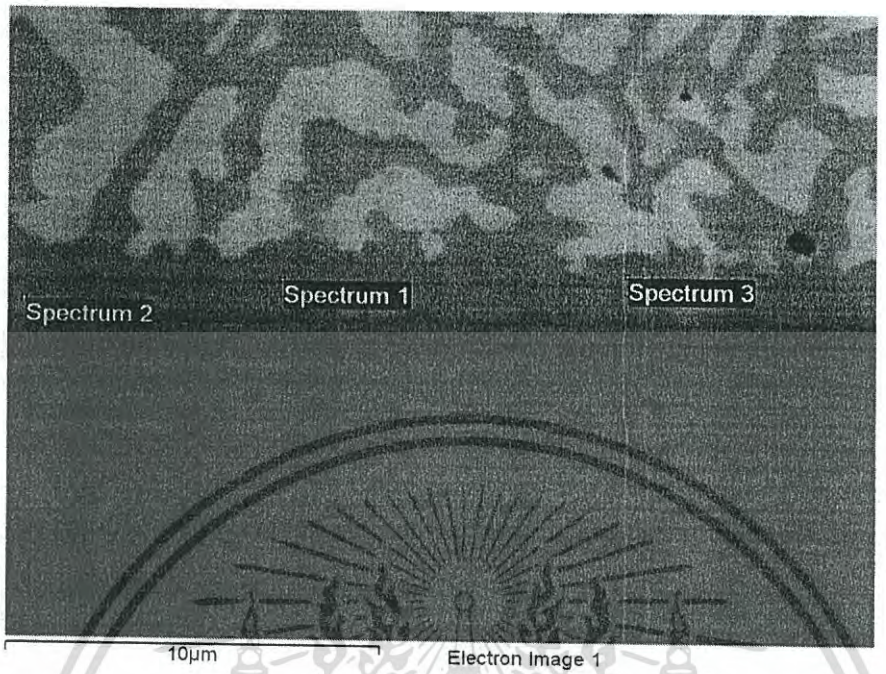
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

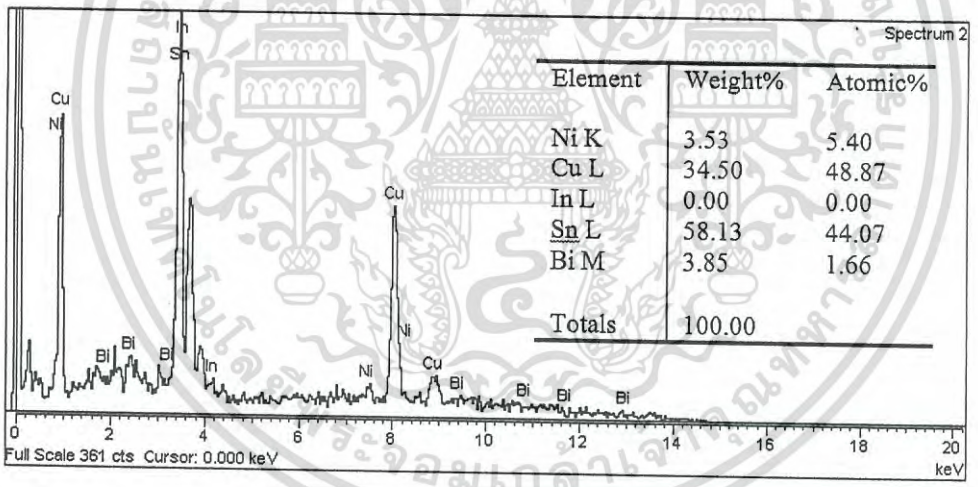




รูปที่ ฉ.2 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

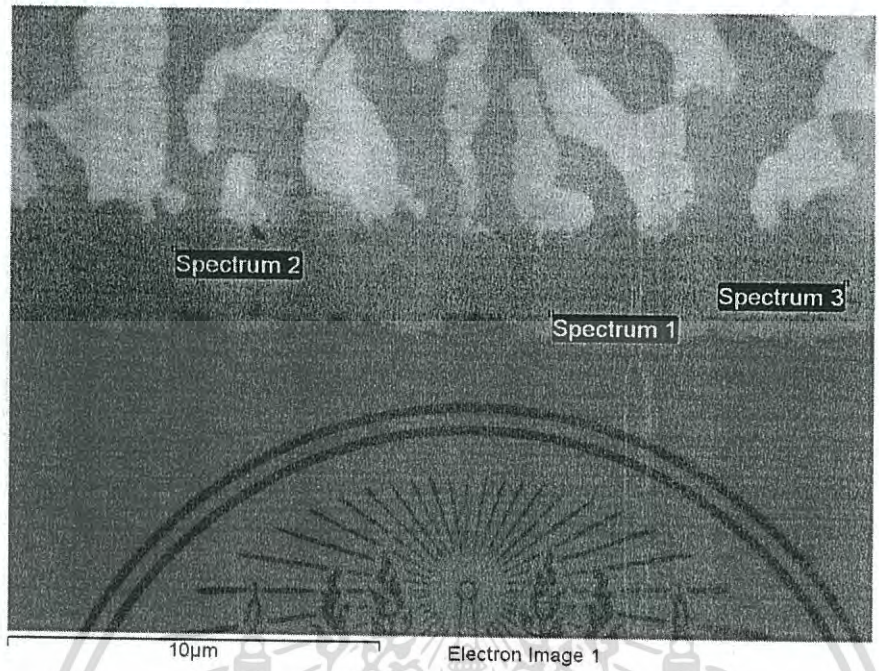


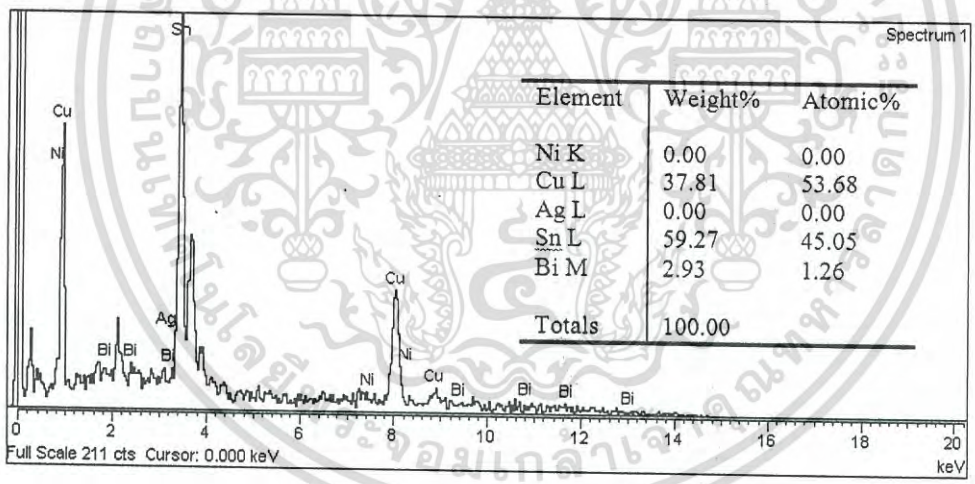


Element	Weight%	Atomic%
Ni K	3.53	5.40
Cu L	34.50	48.87
In L	0.00	0.00
Sn L	58.13	44.07
Bi M	3.85	1.66
Totals	100.00	

รูปที่ ฉ.3 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

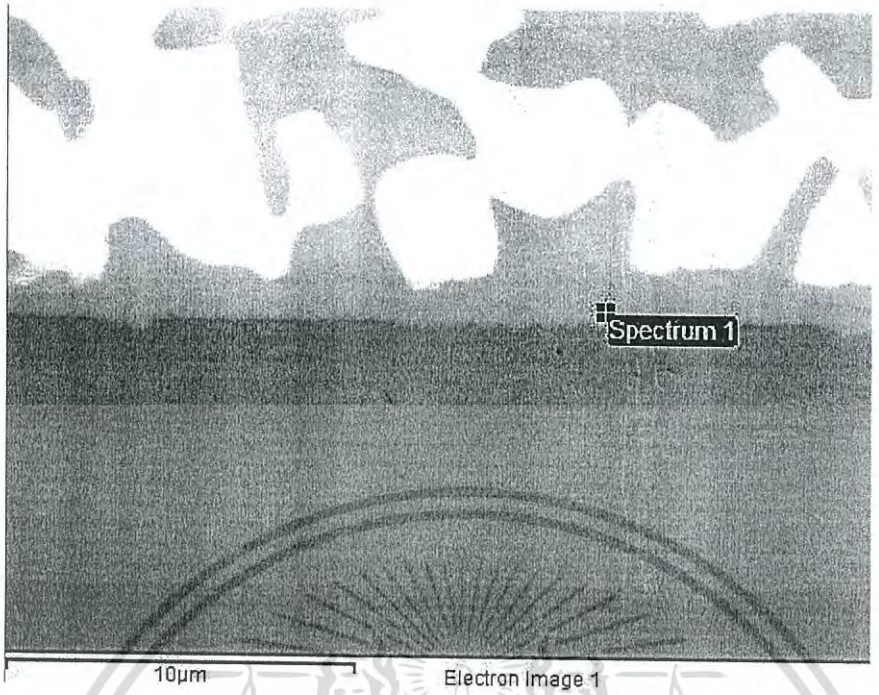


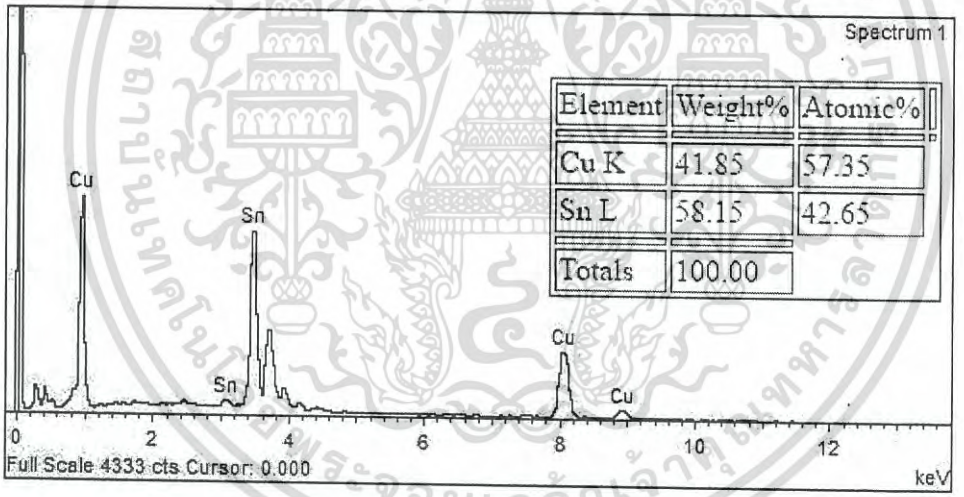


Element	Weight%	Atomic%
Ni K	0.00	0.00
Cu L	37.81	53.68
Ag L	0.00	0.00
Sn L	59.27	45.05
Bi M	2.93	1.26
Totals	100.00	

รูปที่ ฉ.4 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

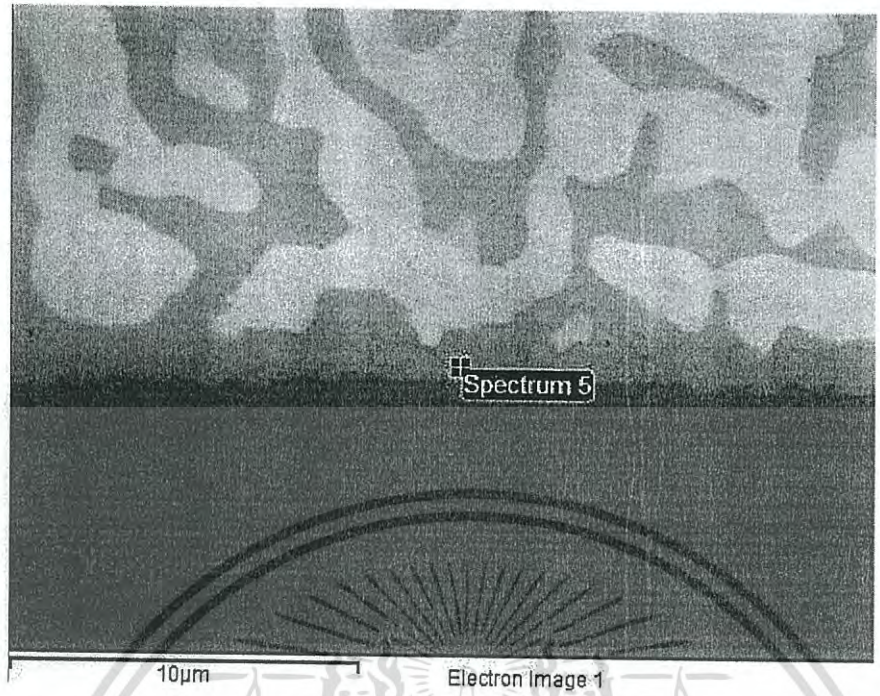


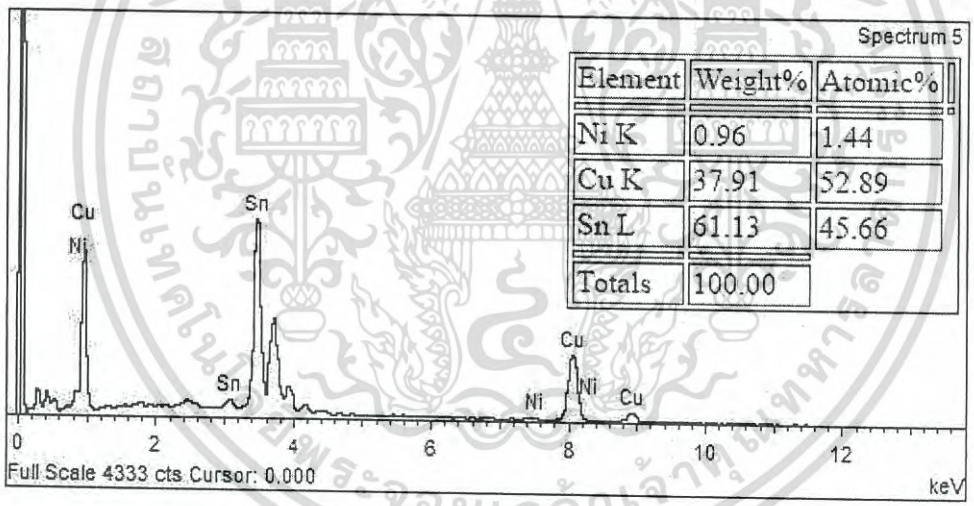


Element	Weight%	Atomic%
Cu K	41.85	57.35
Sn L	58.15	42.65
Totals	100.00	

รูปที่ ฉ.5 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 75 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

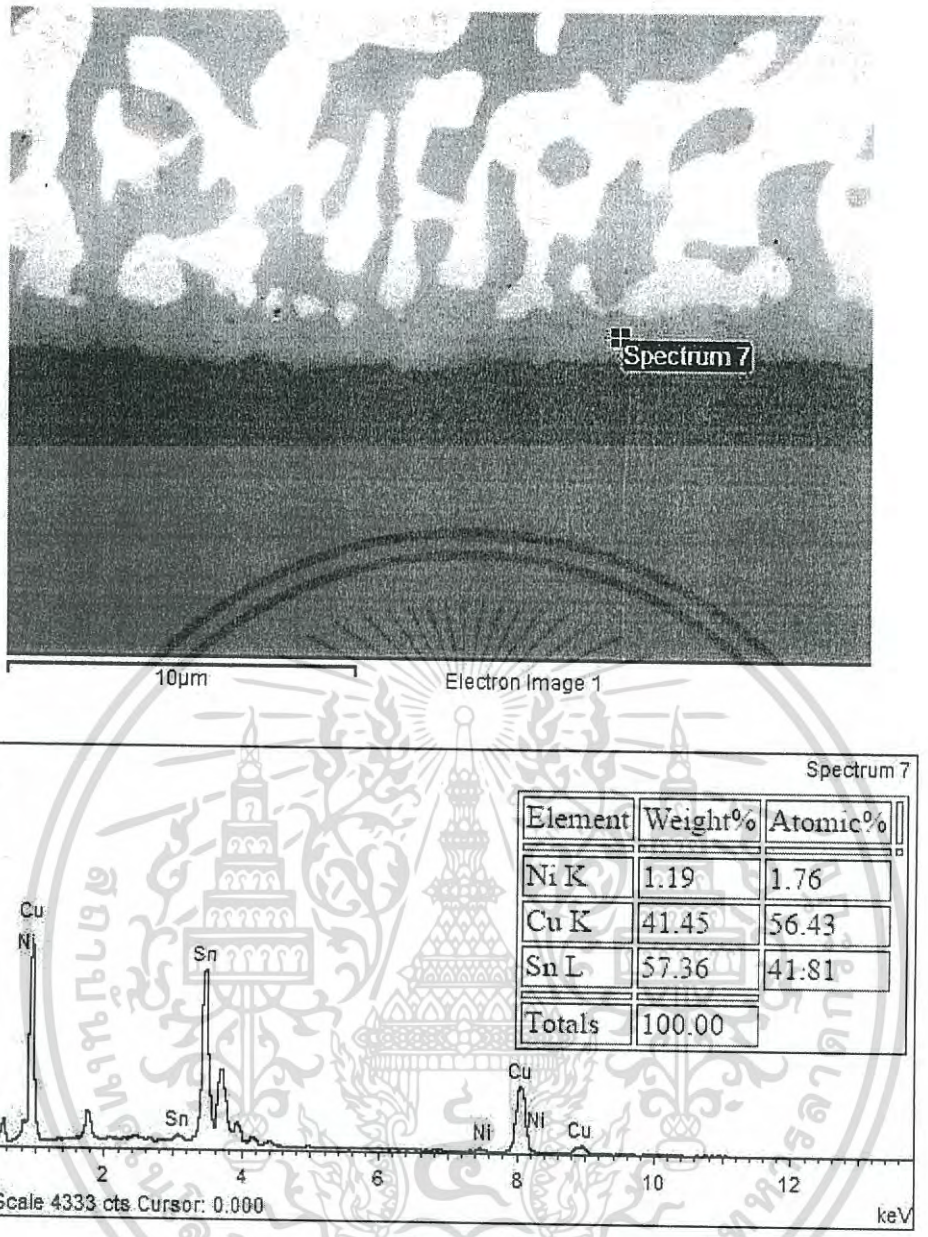
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





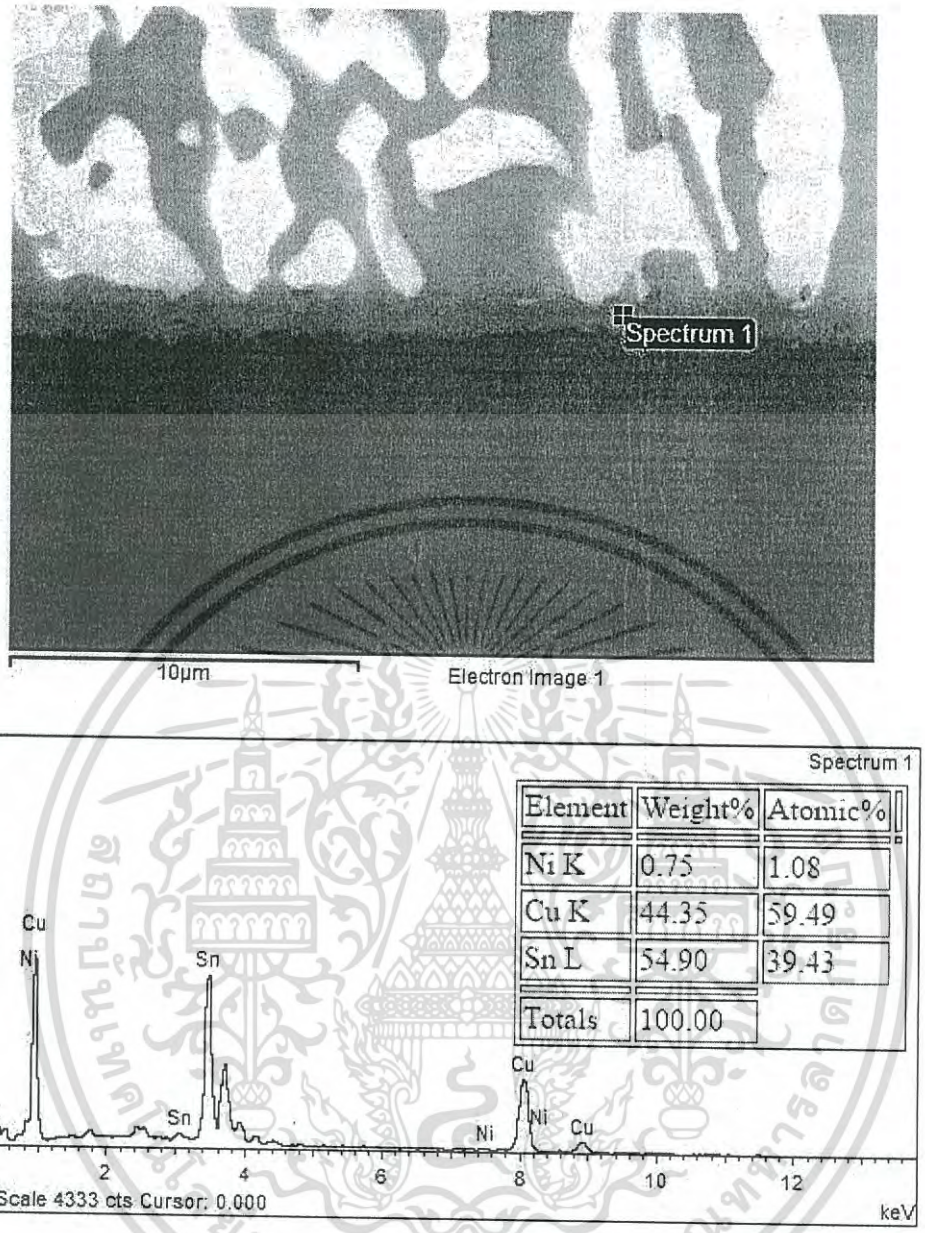
รูปที่ ฉ.6 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 75 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



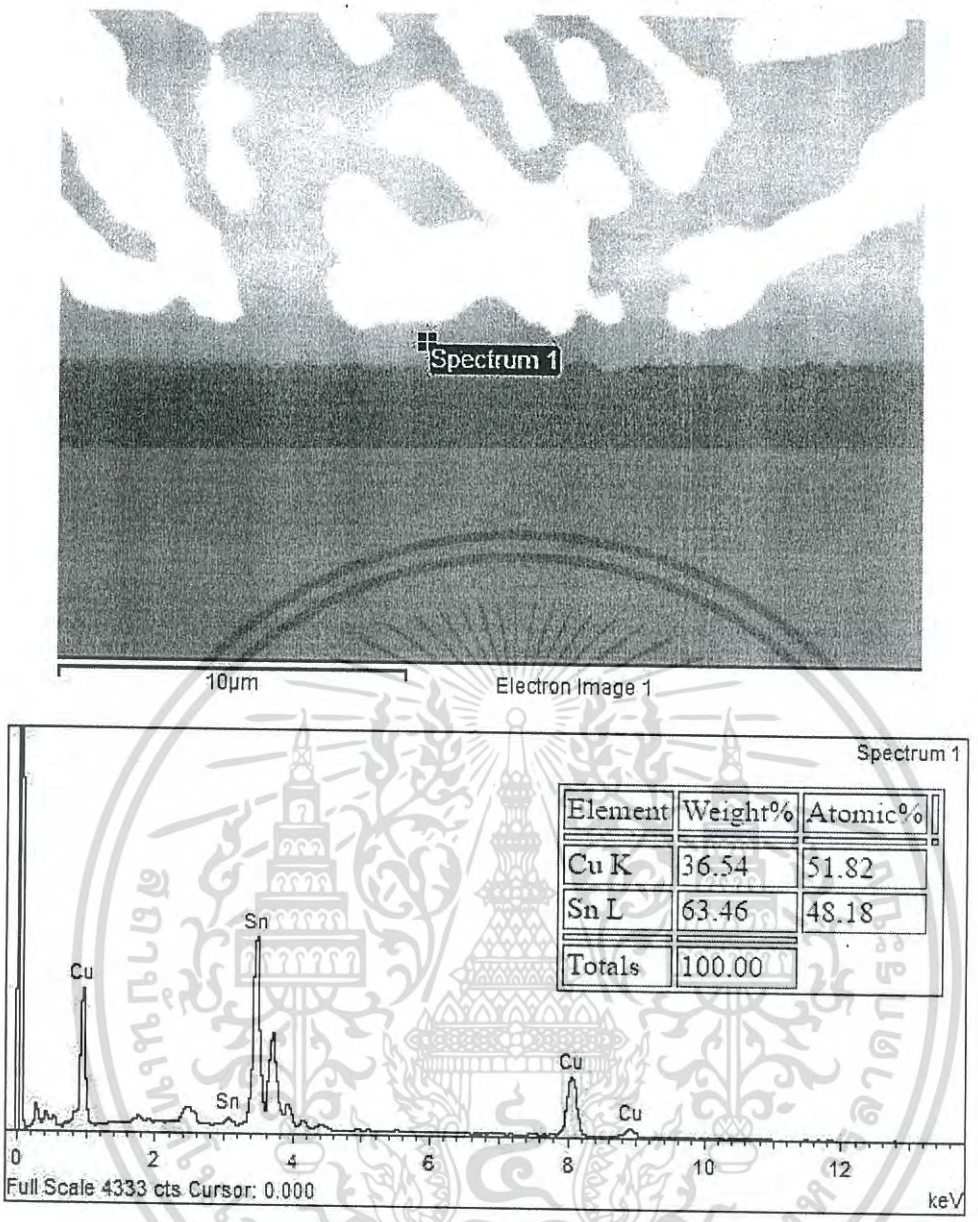
รูปที่ ฉ.7 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 75 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



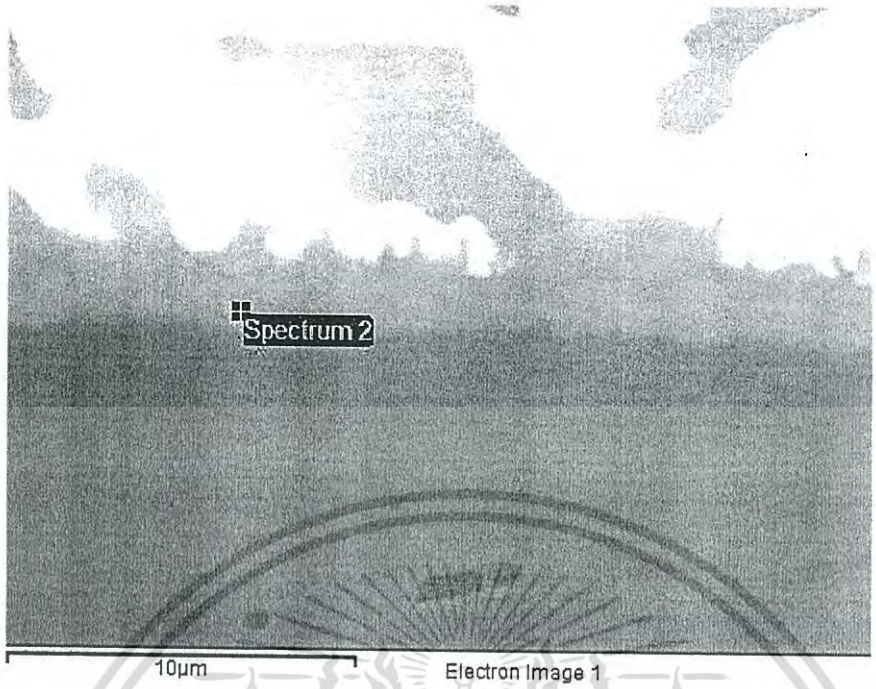
รูปที่ ฉ.8 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 75 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

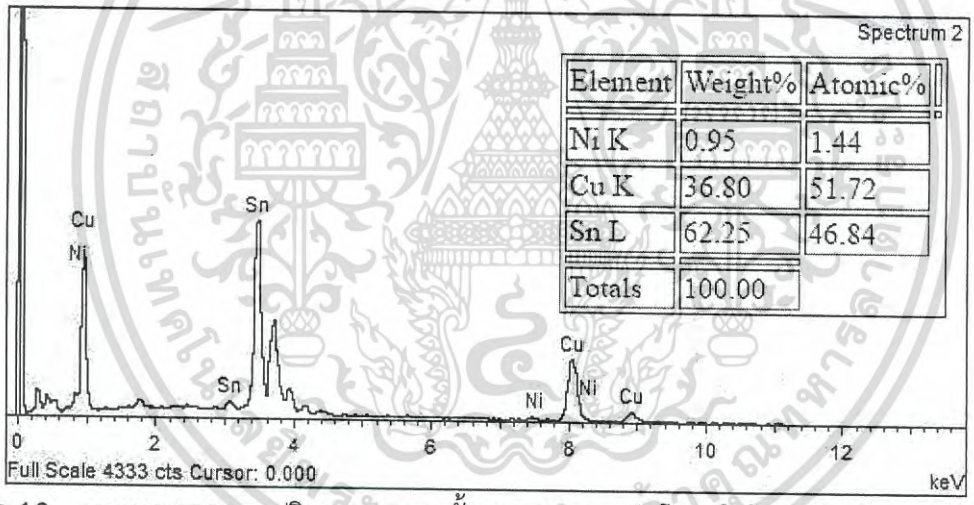
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ฉ.9 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 75 °C เป็นเวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

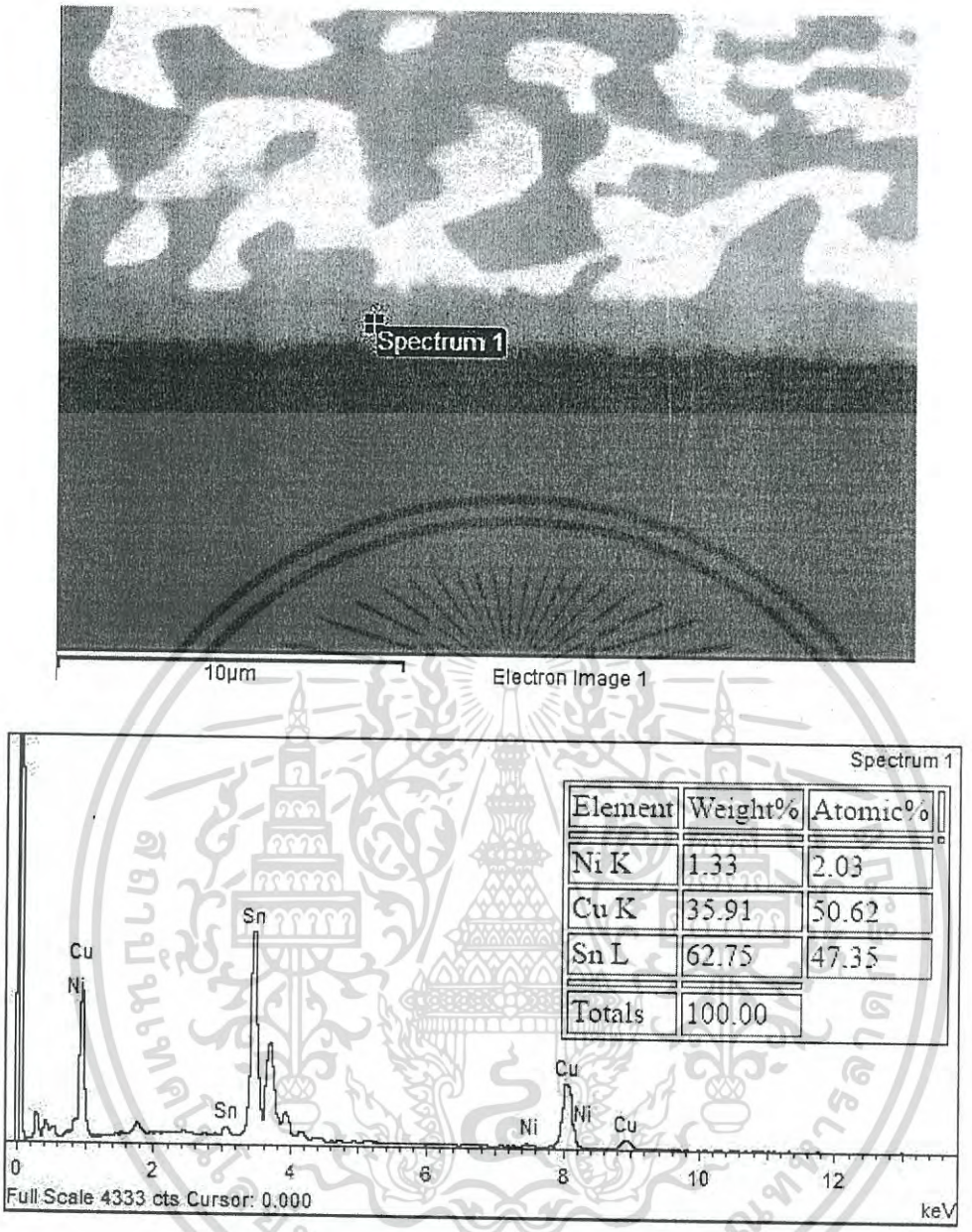




Element	Weight%	Atomic%
Ni K	0.95	1.44
Cu K	36.80	51.72
Sn L	62.25	46.84
Totals	100.00	

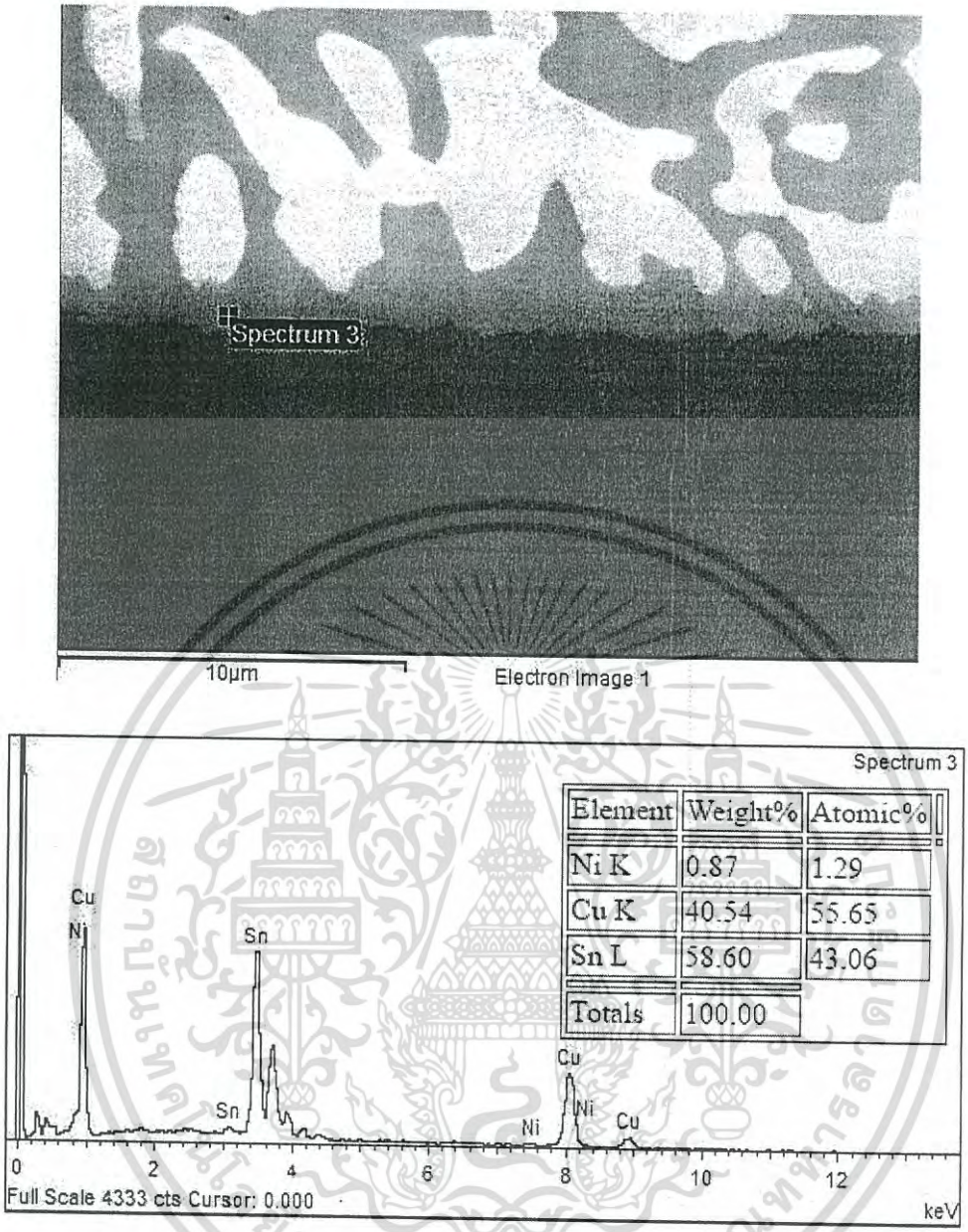
รูปที่ ฉ.10 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 75 °C เป็นเวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



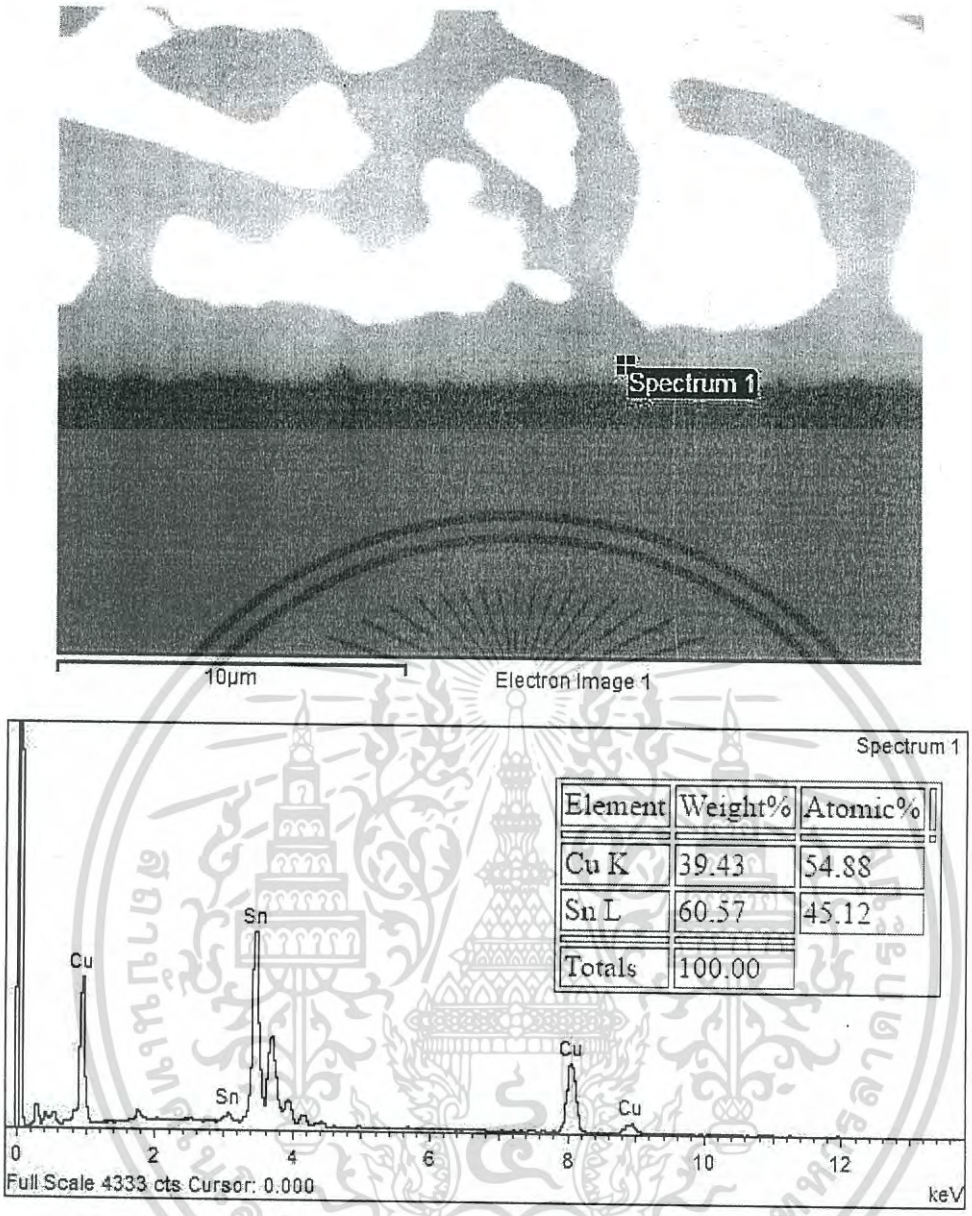
รูปที่ ฉ.11 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 75 °C เป็นเวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



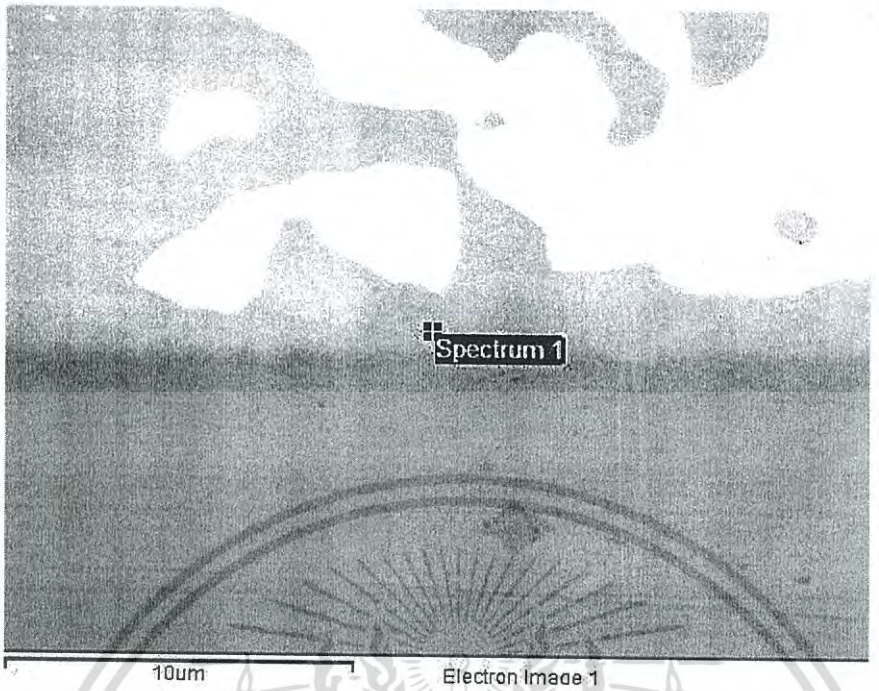
รูปที่ ฉ.12 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 75 °C เป็นเวลา 100 ชั่วโมง

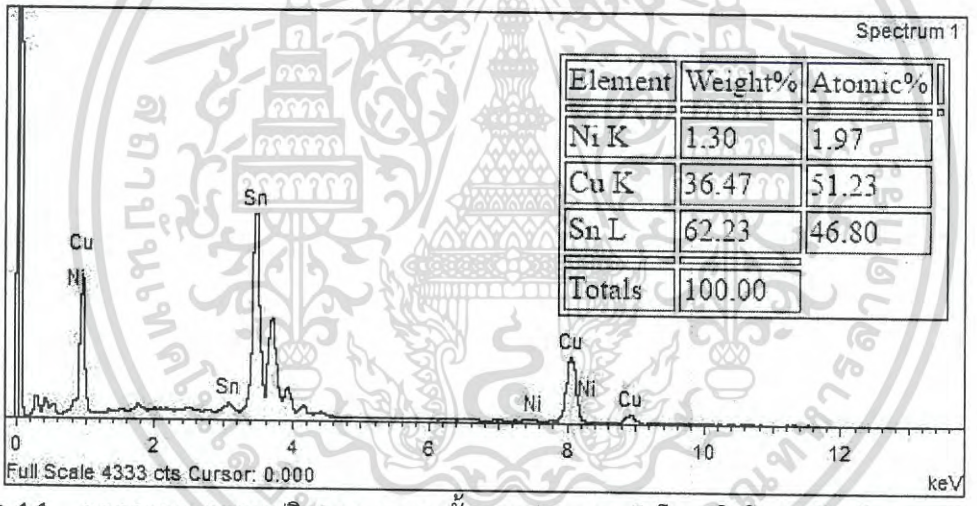
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ฉ.13 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 75 °C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

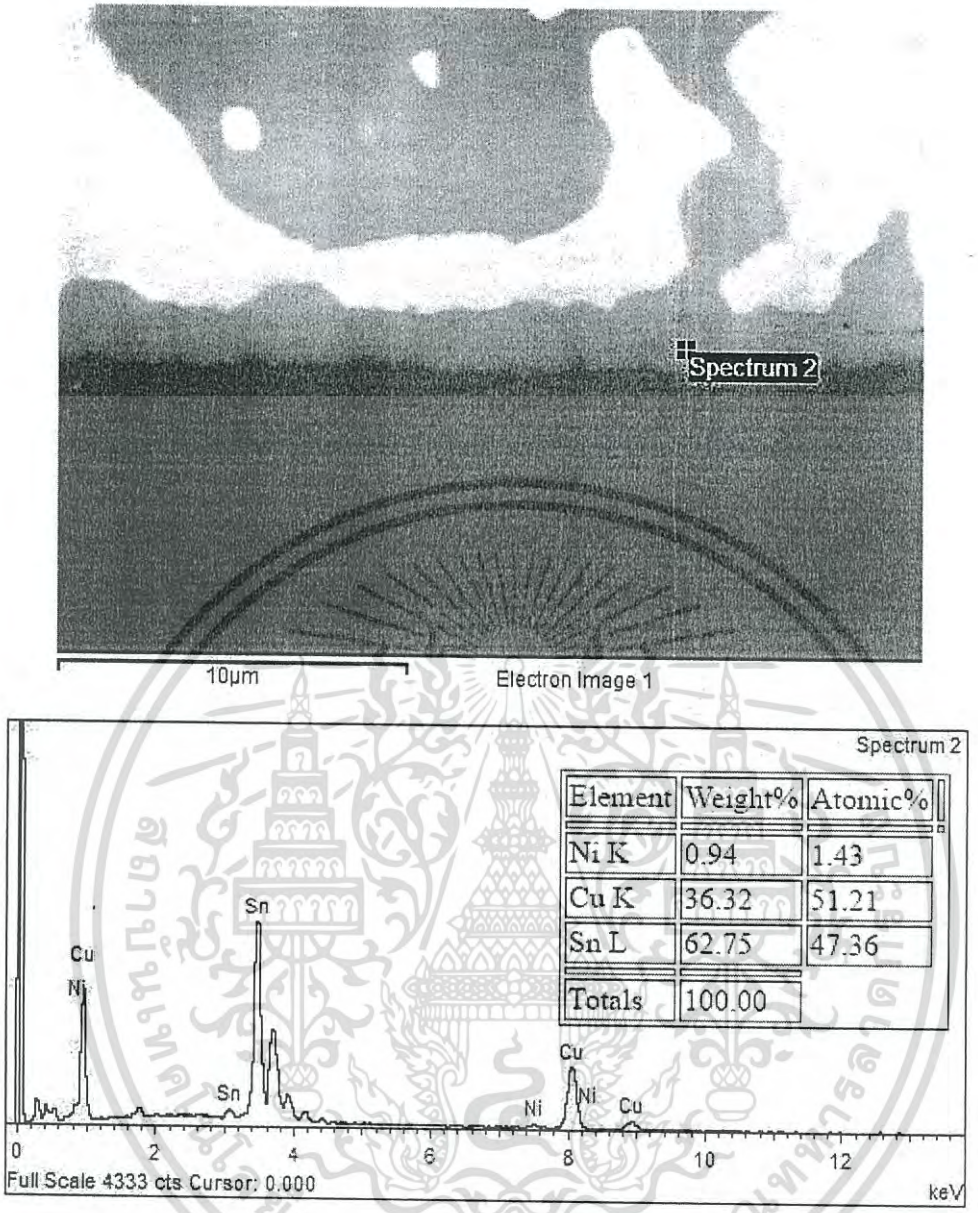




Element	Weight%	Atomic%
Ni K	1.30	1.97
Cu K	36.47	51.23
Sn L	62.23	46.80
Totals	100.00	

รูปที่ ฉ.14 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 75 °C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

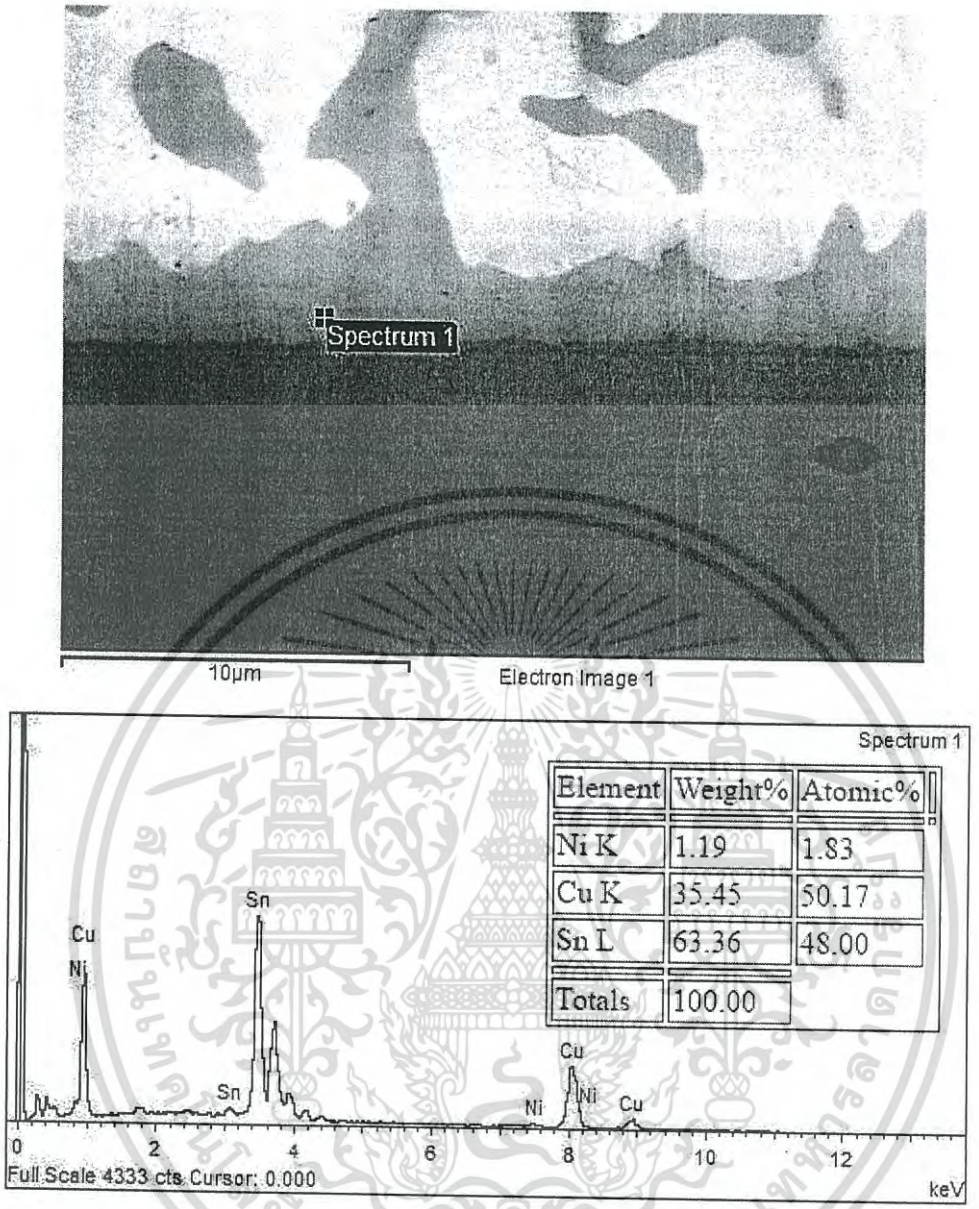
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Element	Weight%	Atomic%
Ni K	0.94	1.43
Cu K	36.32	51.21
Sn L	62.75	47.36
Totals	100.00	

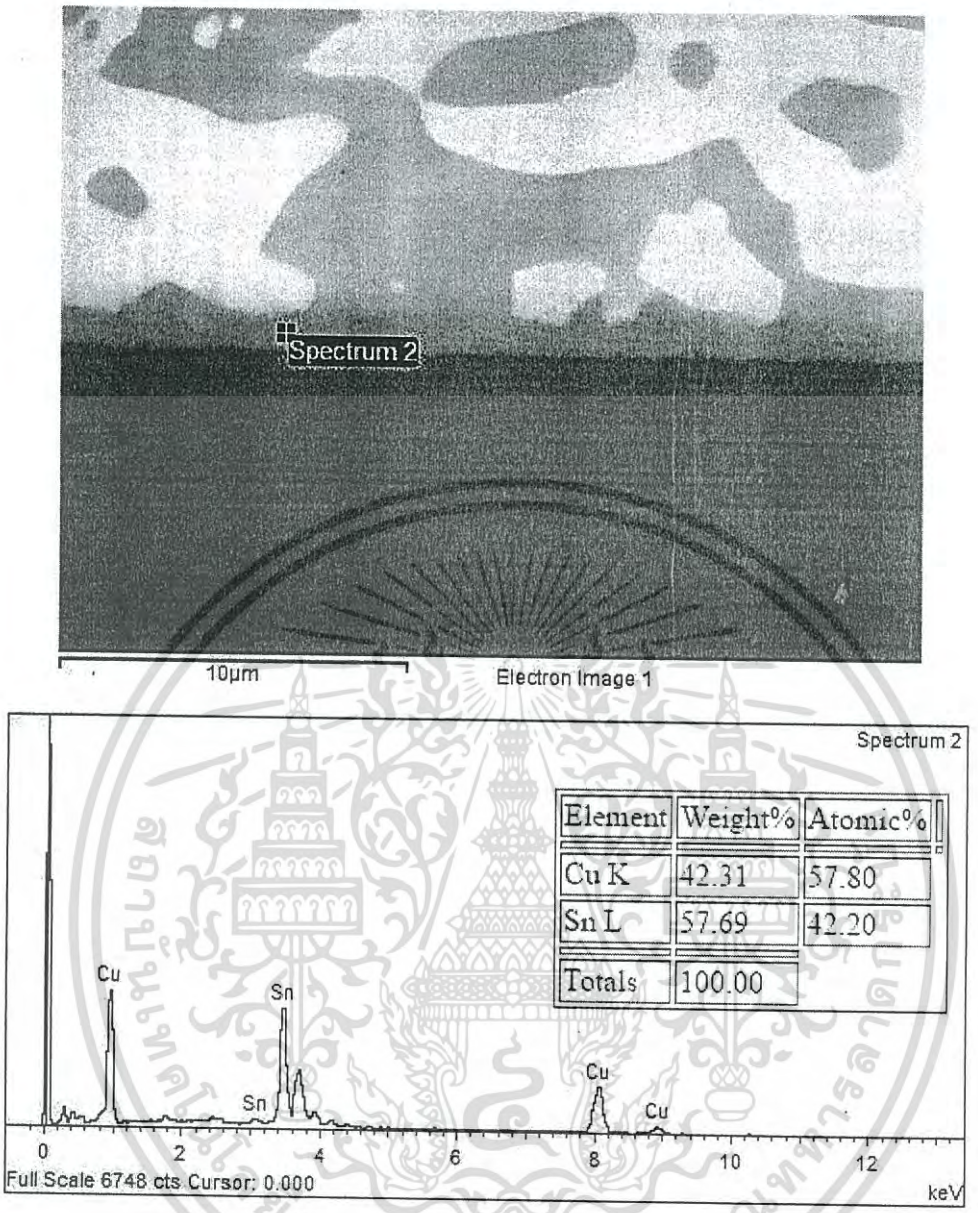
รูปที่ ฉ.15 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 75 °C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ฉ.16 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 75 °C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

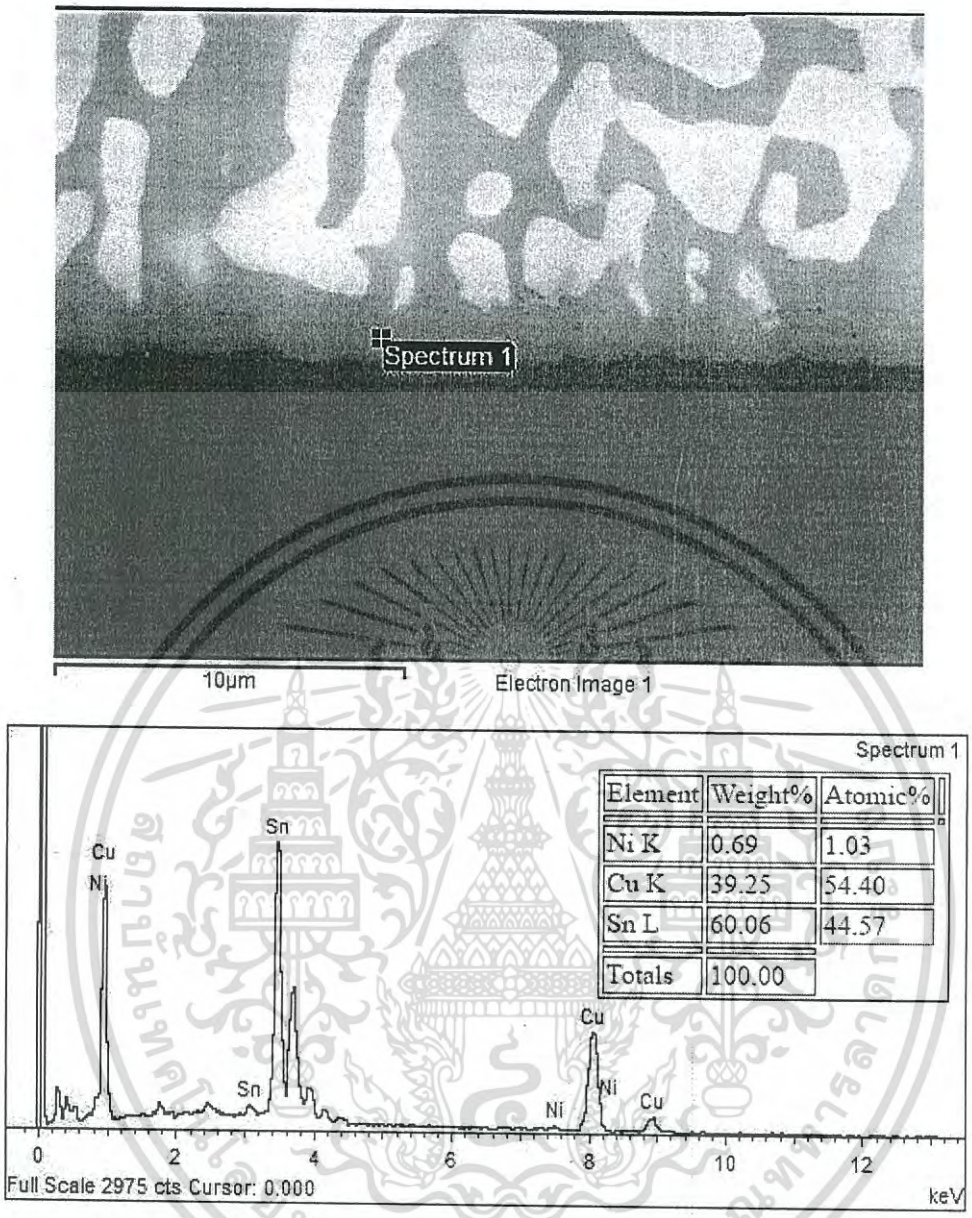
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Element	Weight%	Atomic%
Cu K	42.31	57.80
Sn L	57.69	42.20
Totals	100.00	

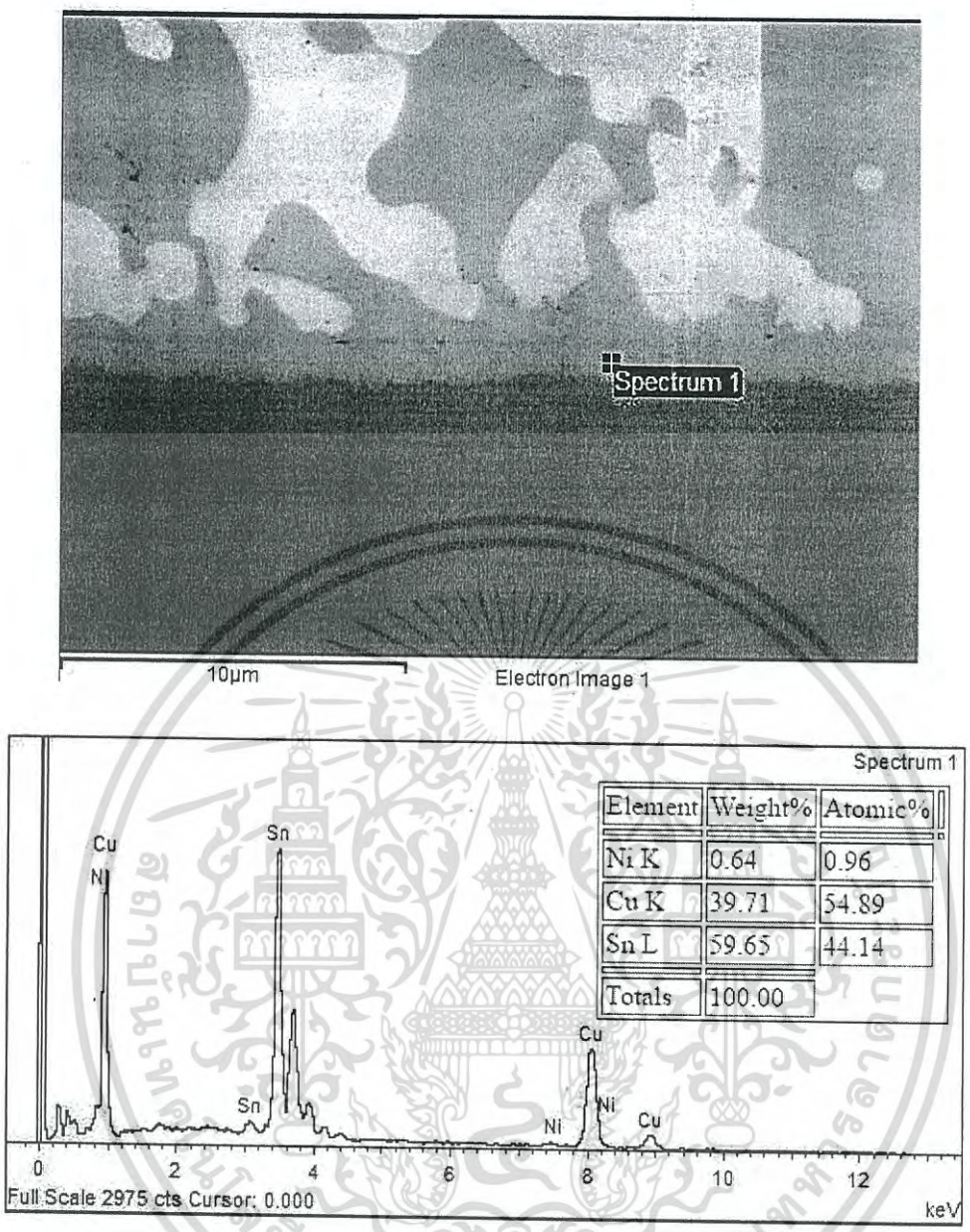
รูปที่ ฉ.17 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



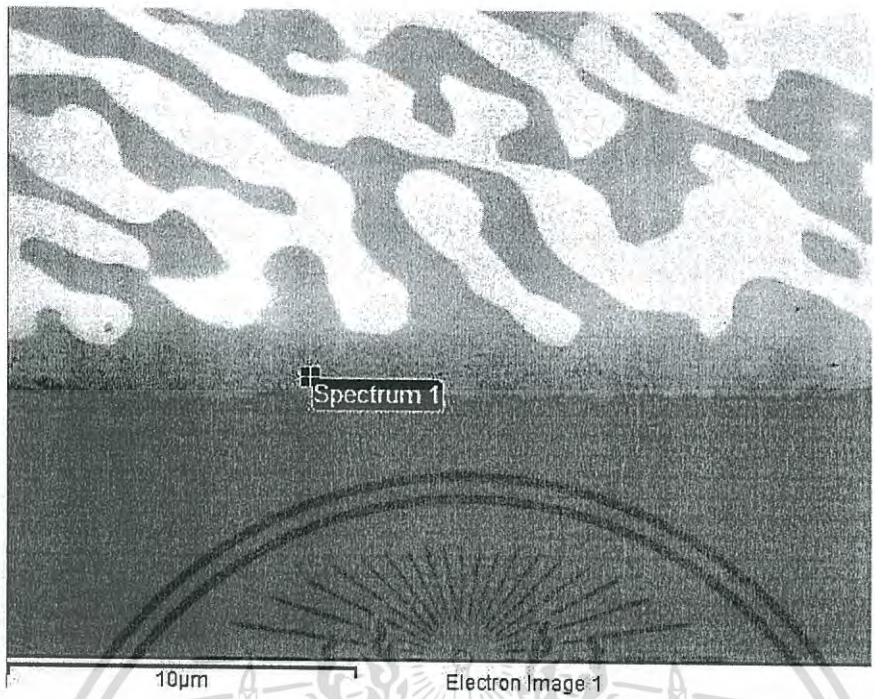
รูปที่ ฉ.18 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

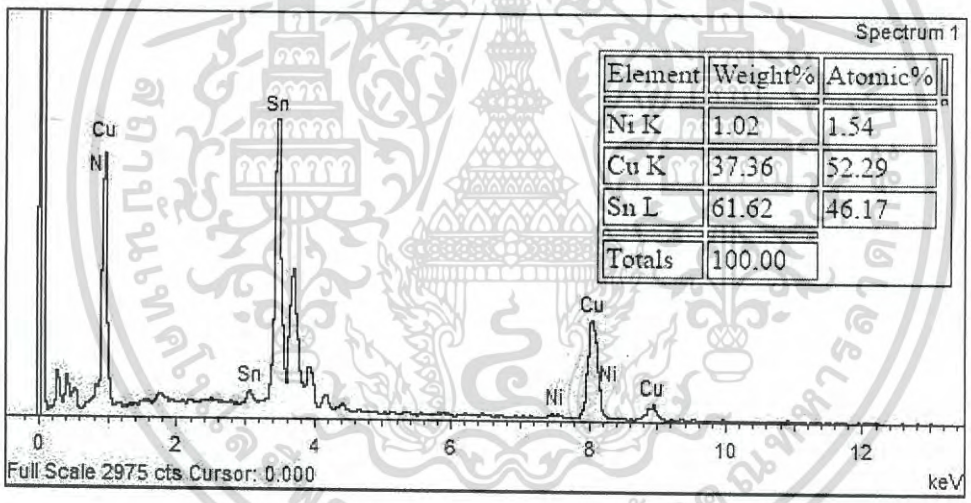
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ฉ.19 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

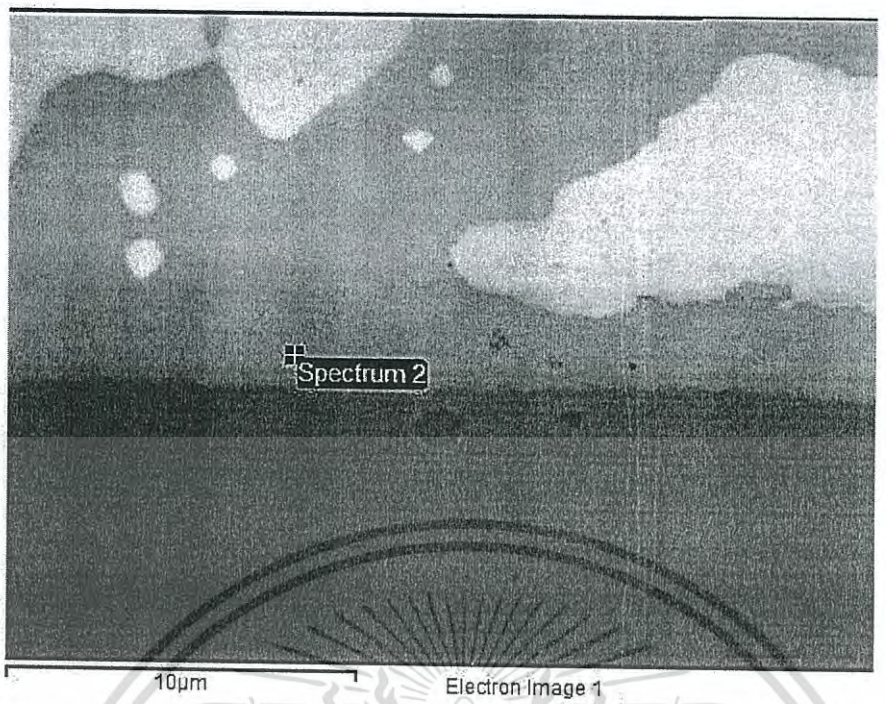
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

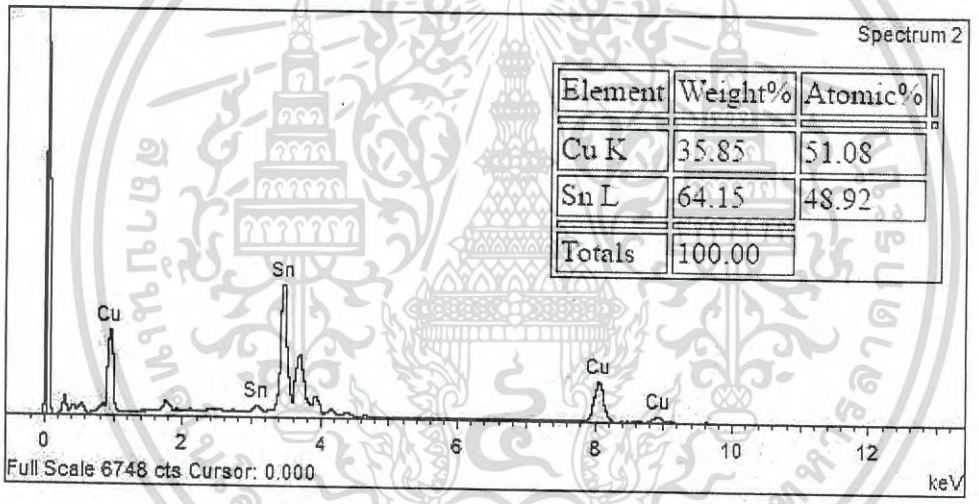




รูปที่ ฉ.20 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

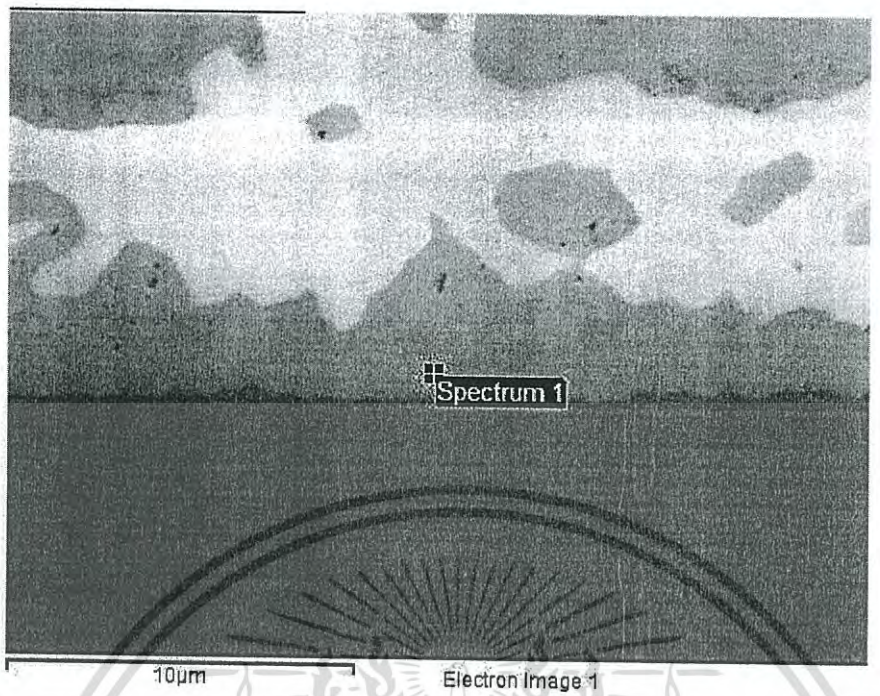


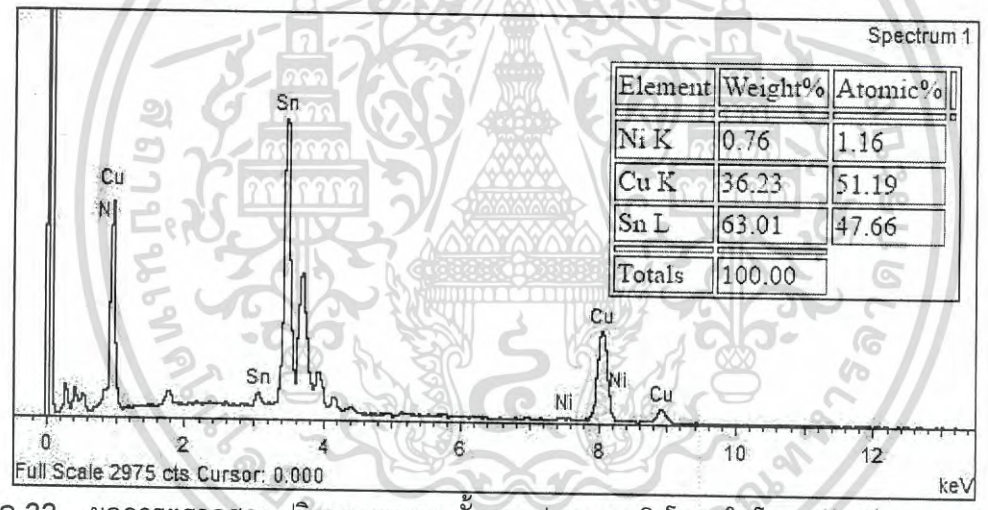


Element	Weight%	Atomic%
Cu K	35.85	51.08
Sn L	64.15	48.92
Totals	100.00	

รูปที่ ฉ.21 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 100 ชั่วโมง

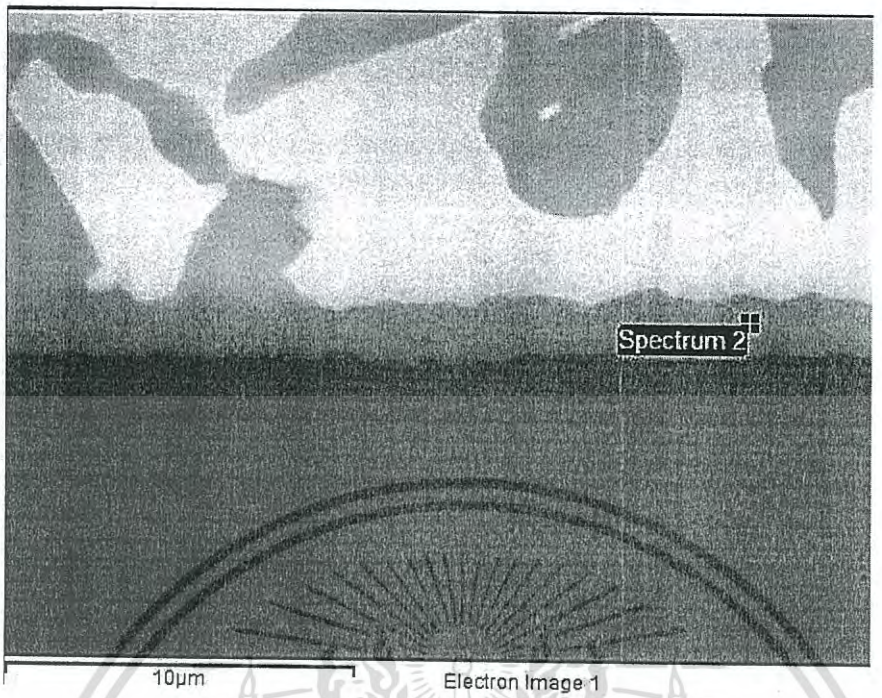
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

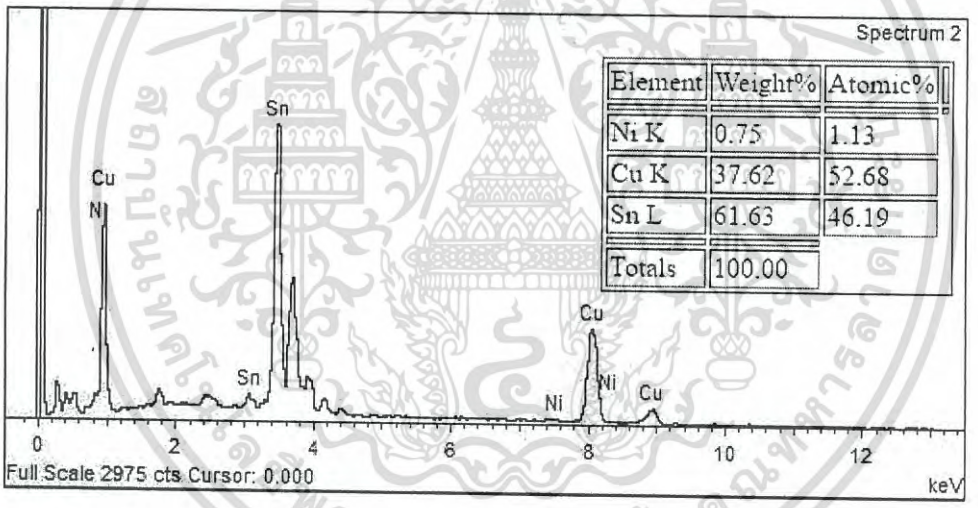




รูปที่ ฉ.22 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 100 ชั่วโมง

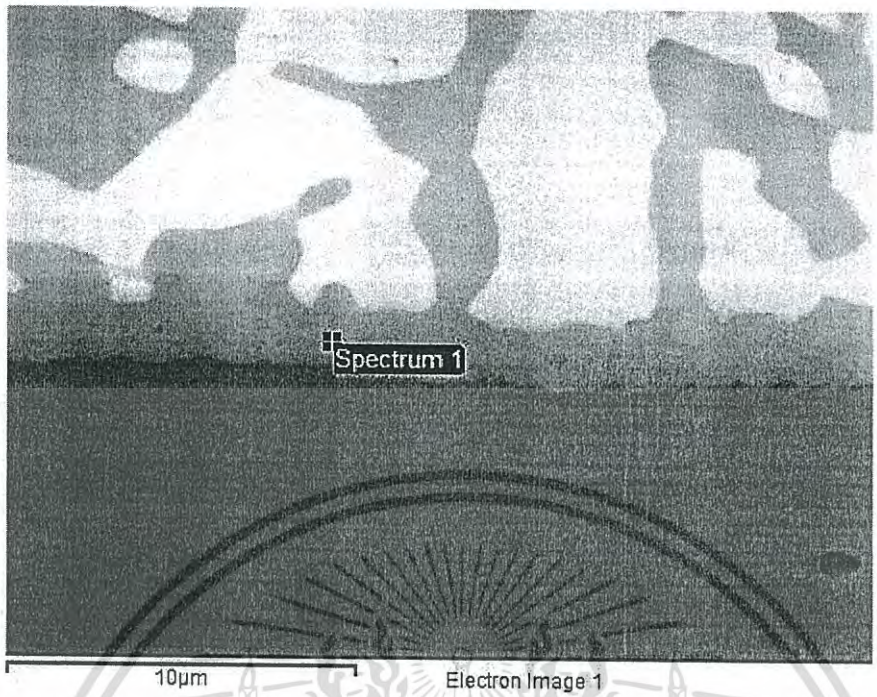
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

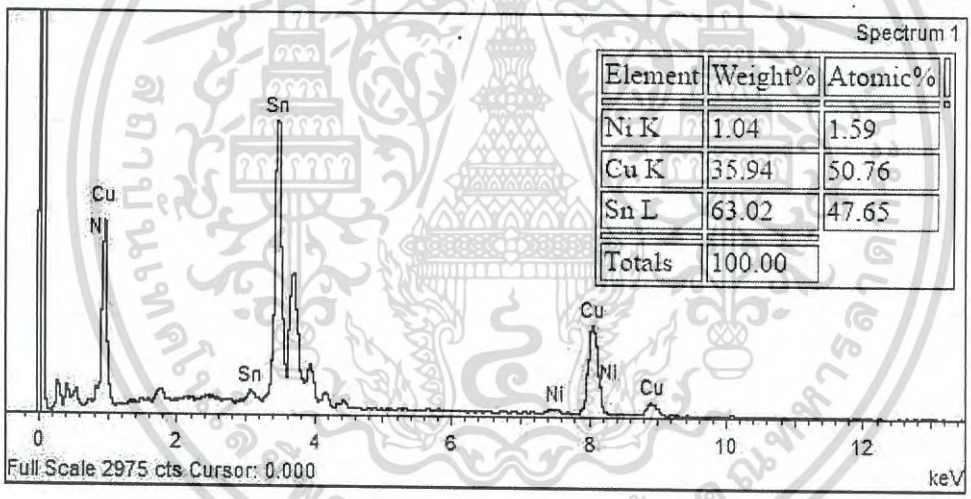




รูปที่ ฉ.23 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 100 ชั่วโมง

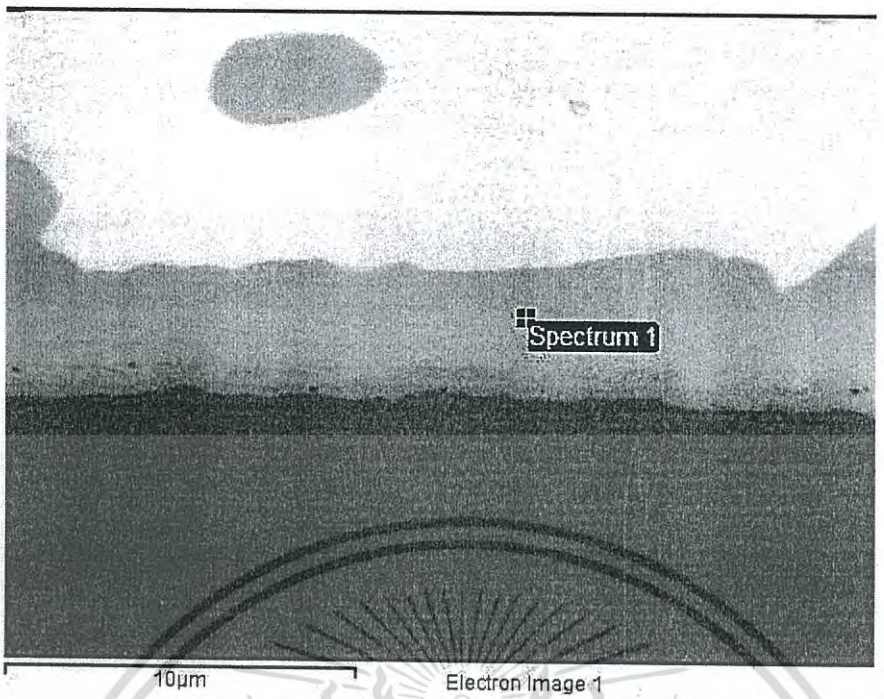
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

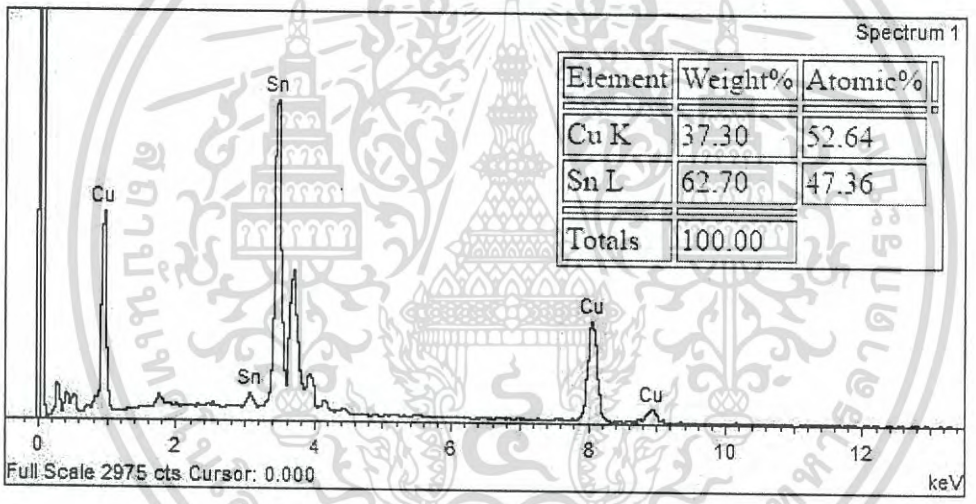




รูปที่ ฉ.24 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 100 ชั่วโมง

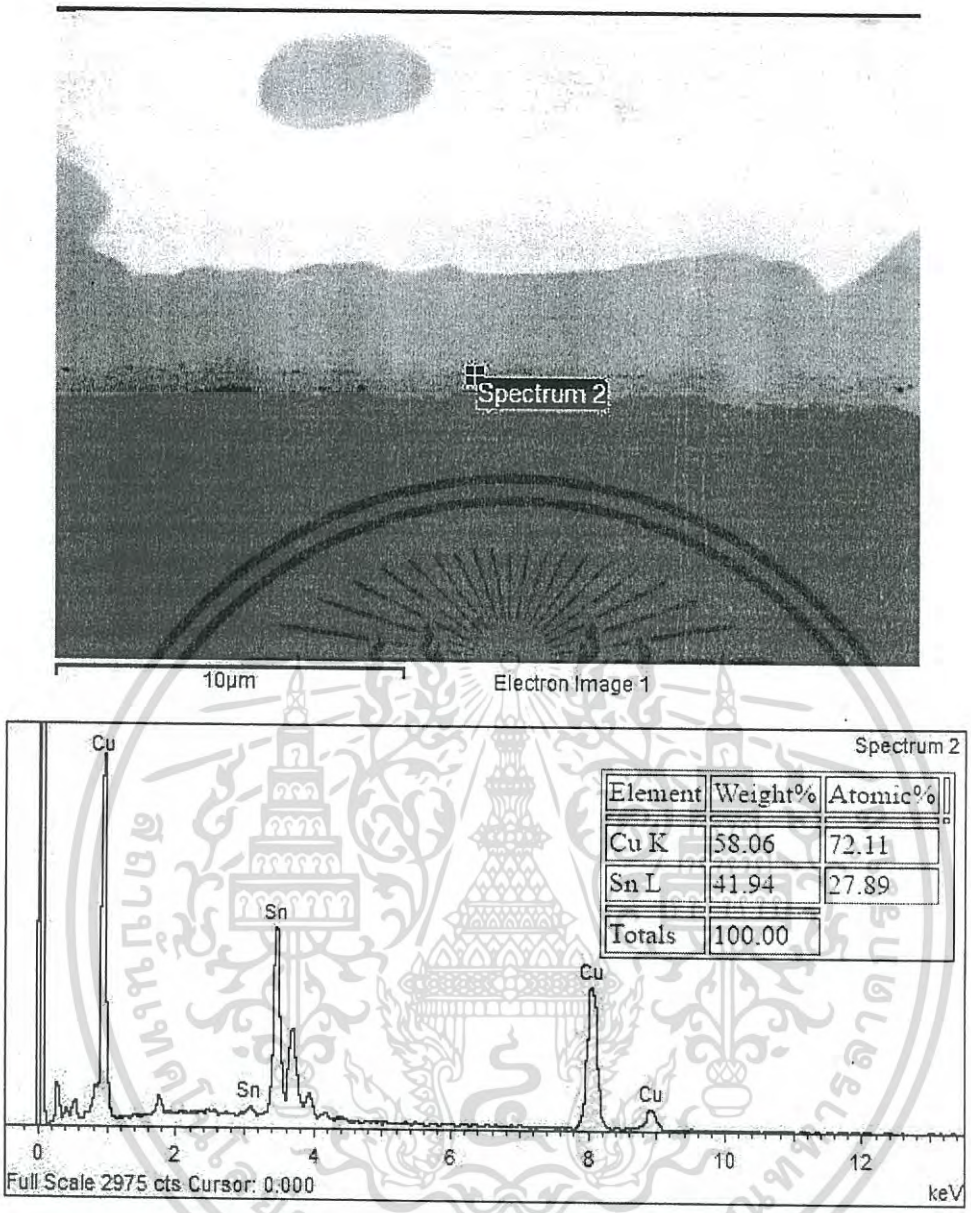
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





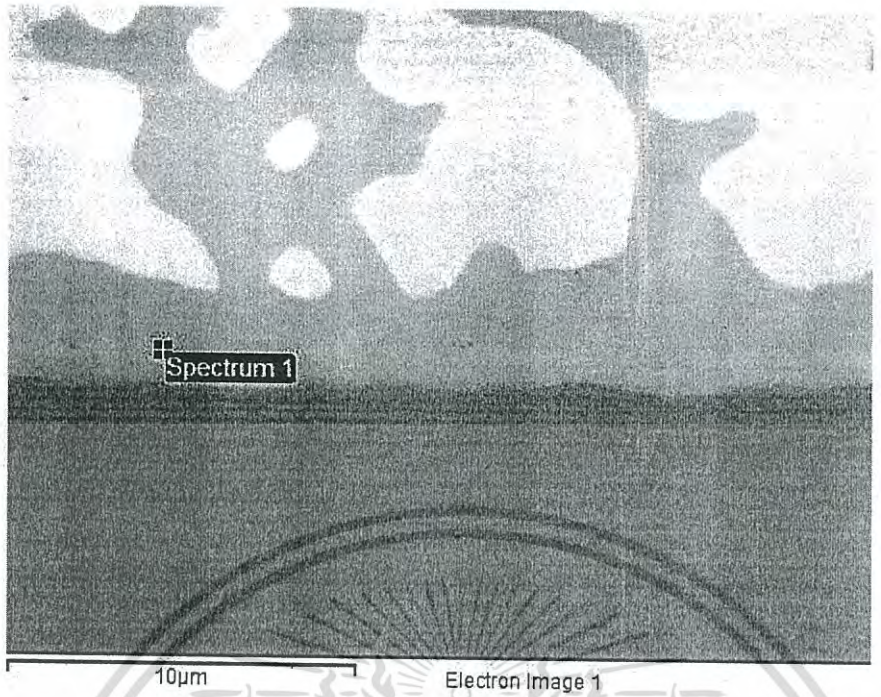
รูปที่ ฉ.25 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

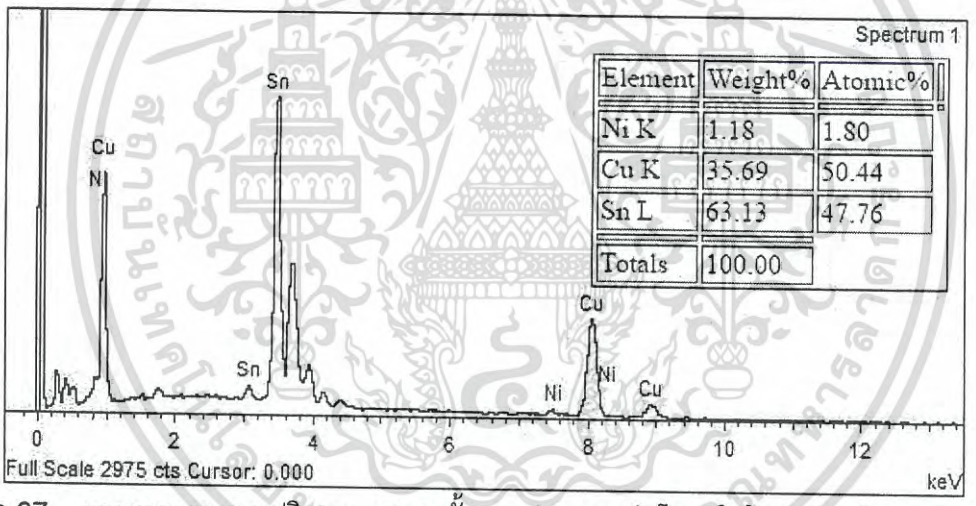
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ฉ.26 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง (2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

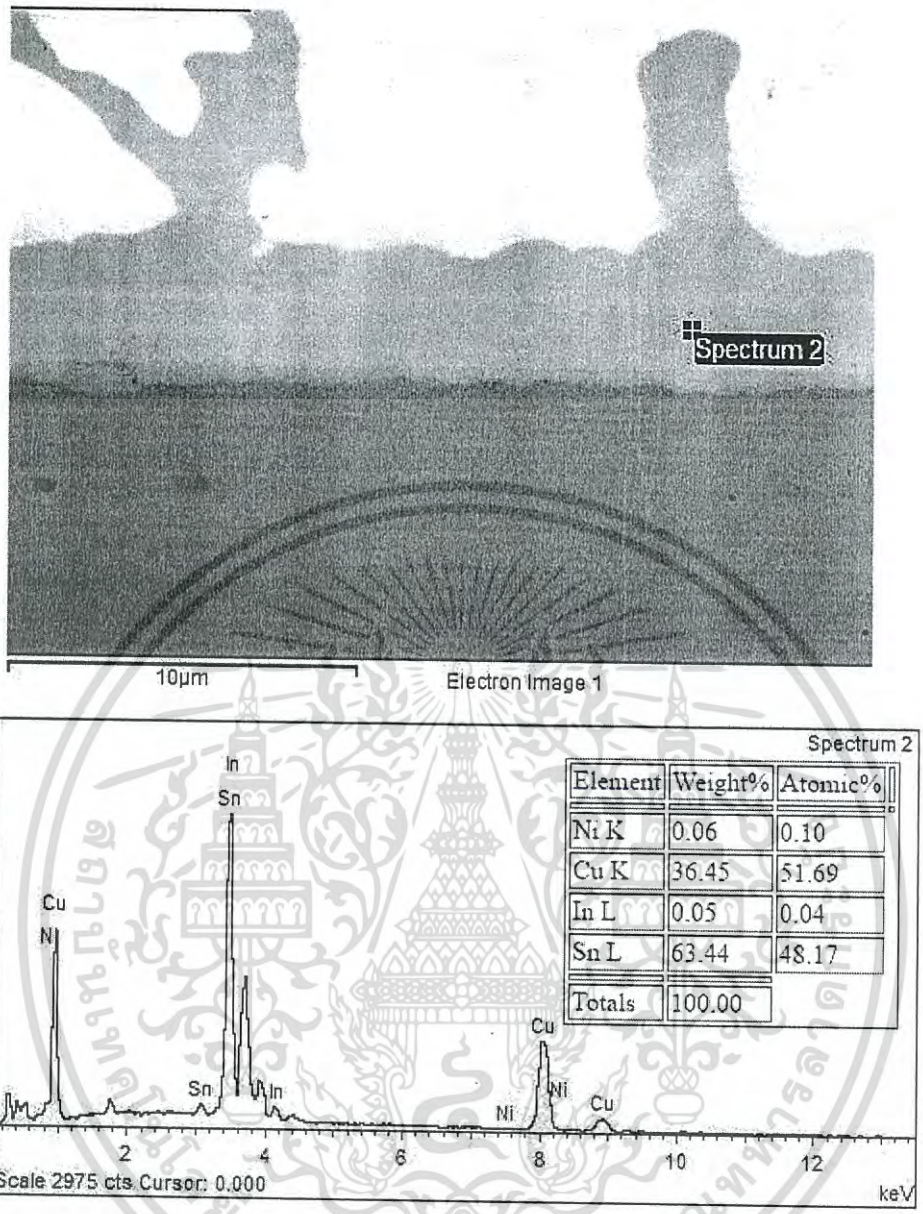




Element	Weight%	Atomic%
Ni K	1.18	1.80
Cu K	35.69	50.44
Sn L	63.13	47.76
Totals	100.00	

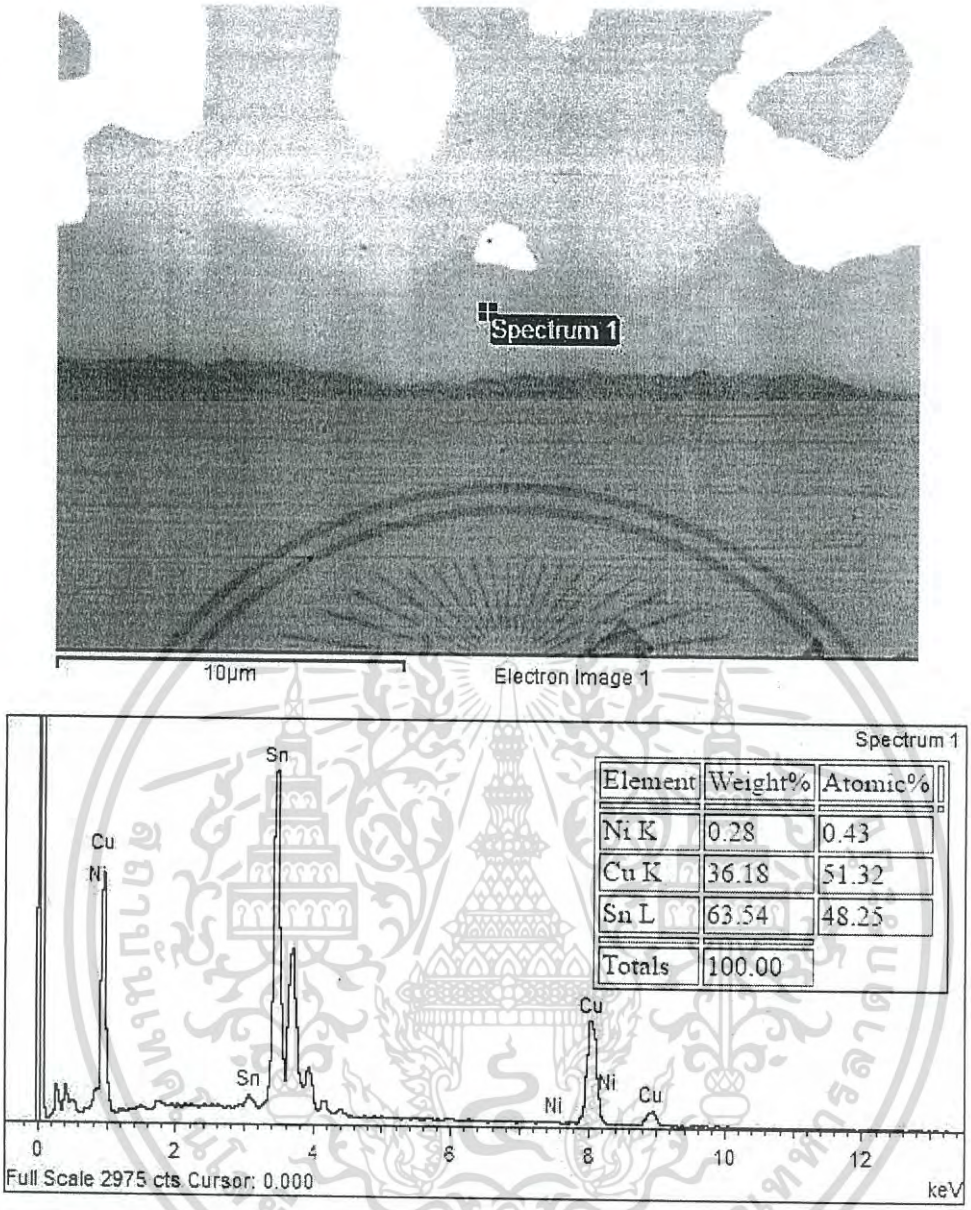
รูปที่ ฉ.27 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



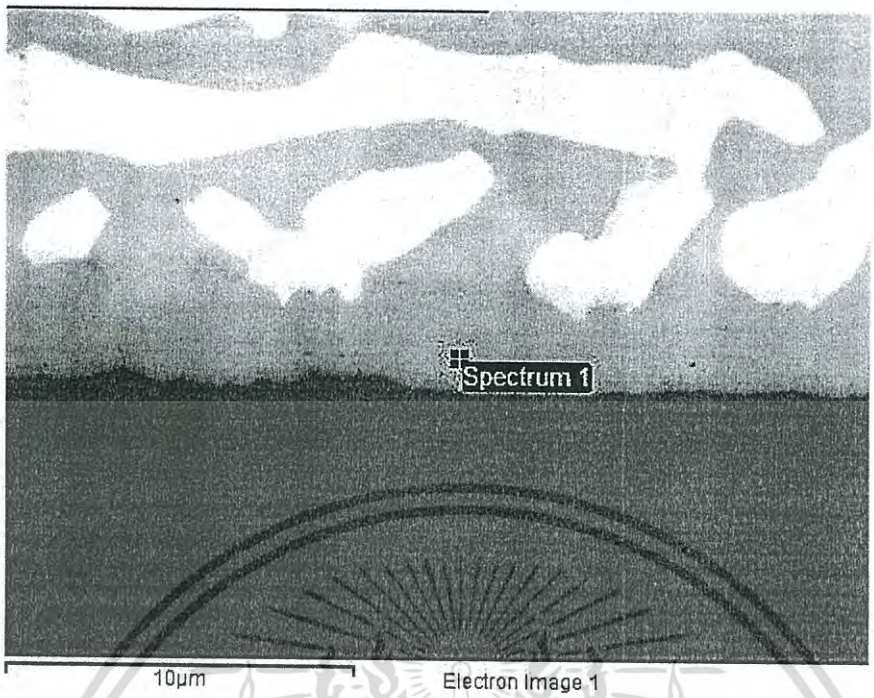
รูปที่ ฉ.28 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

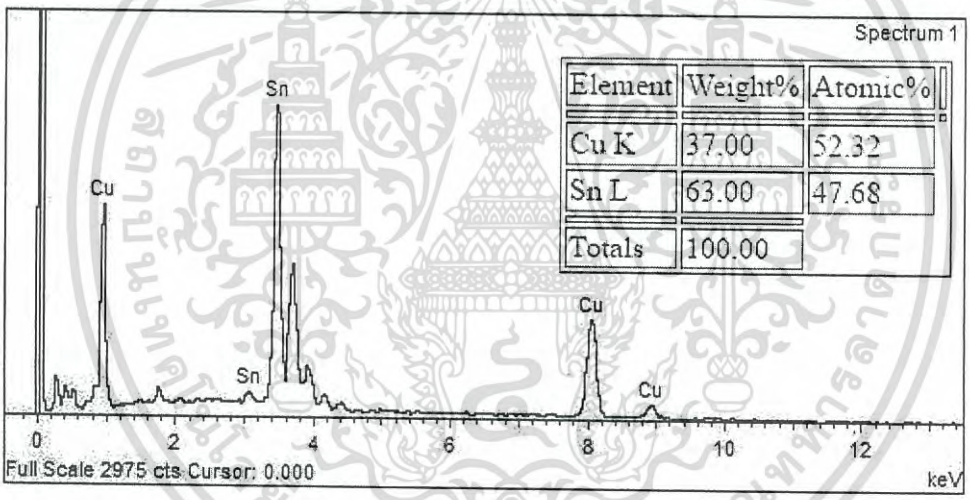
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ฉ.29 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

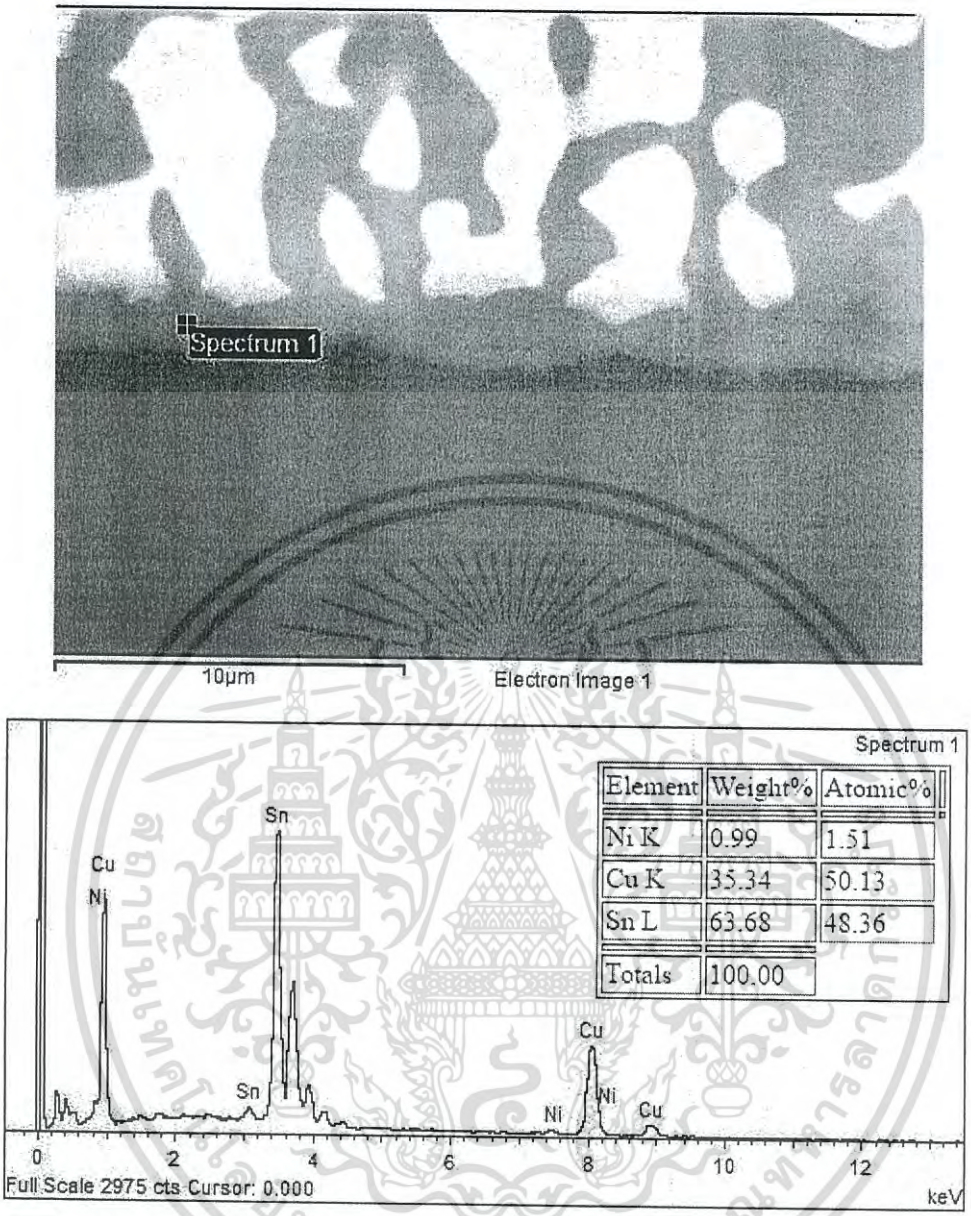
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





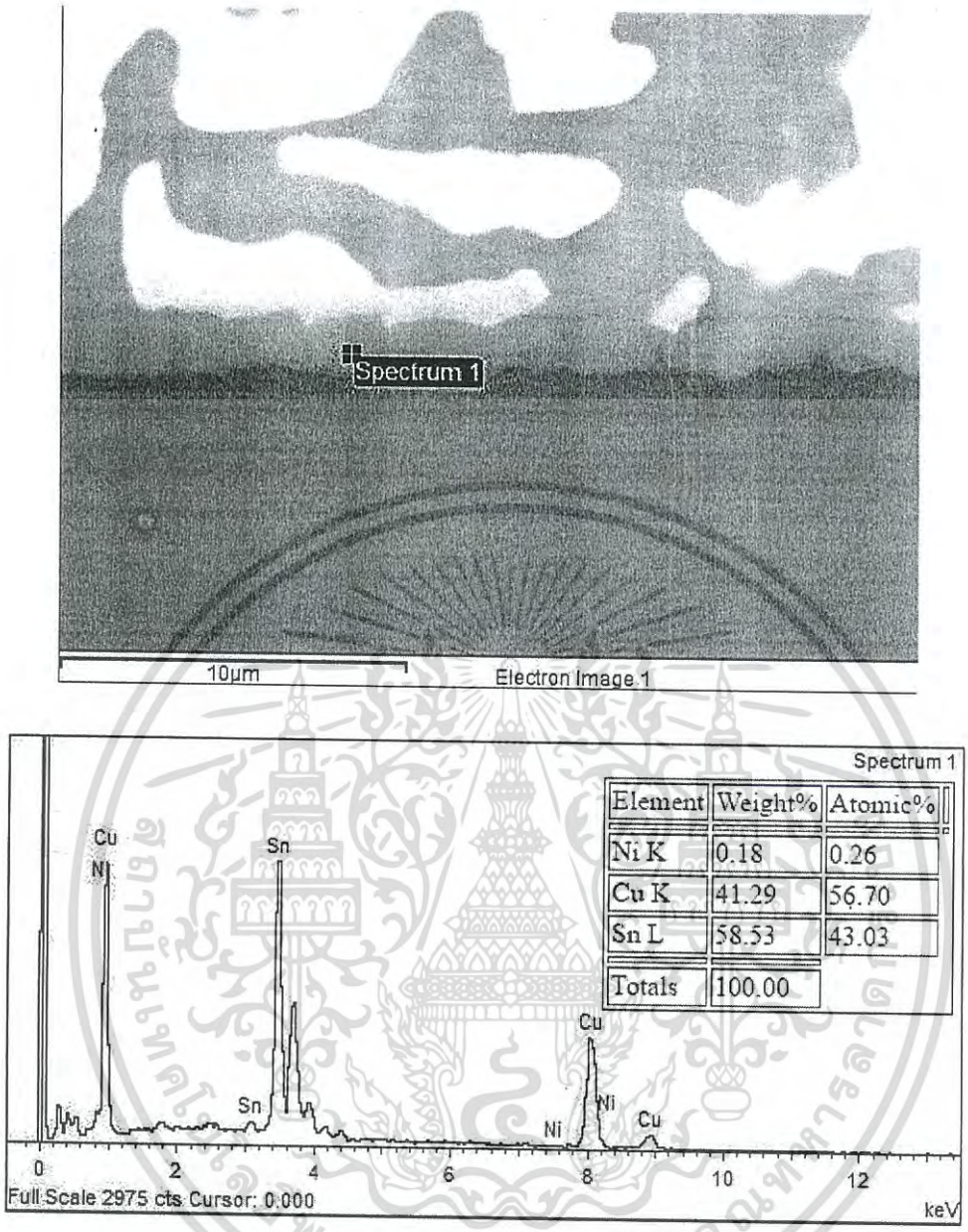
รูปที่ ฉ.30 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 125 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ฉ.31 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 125 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

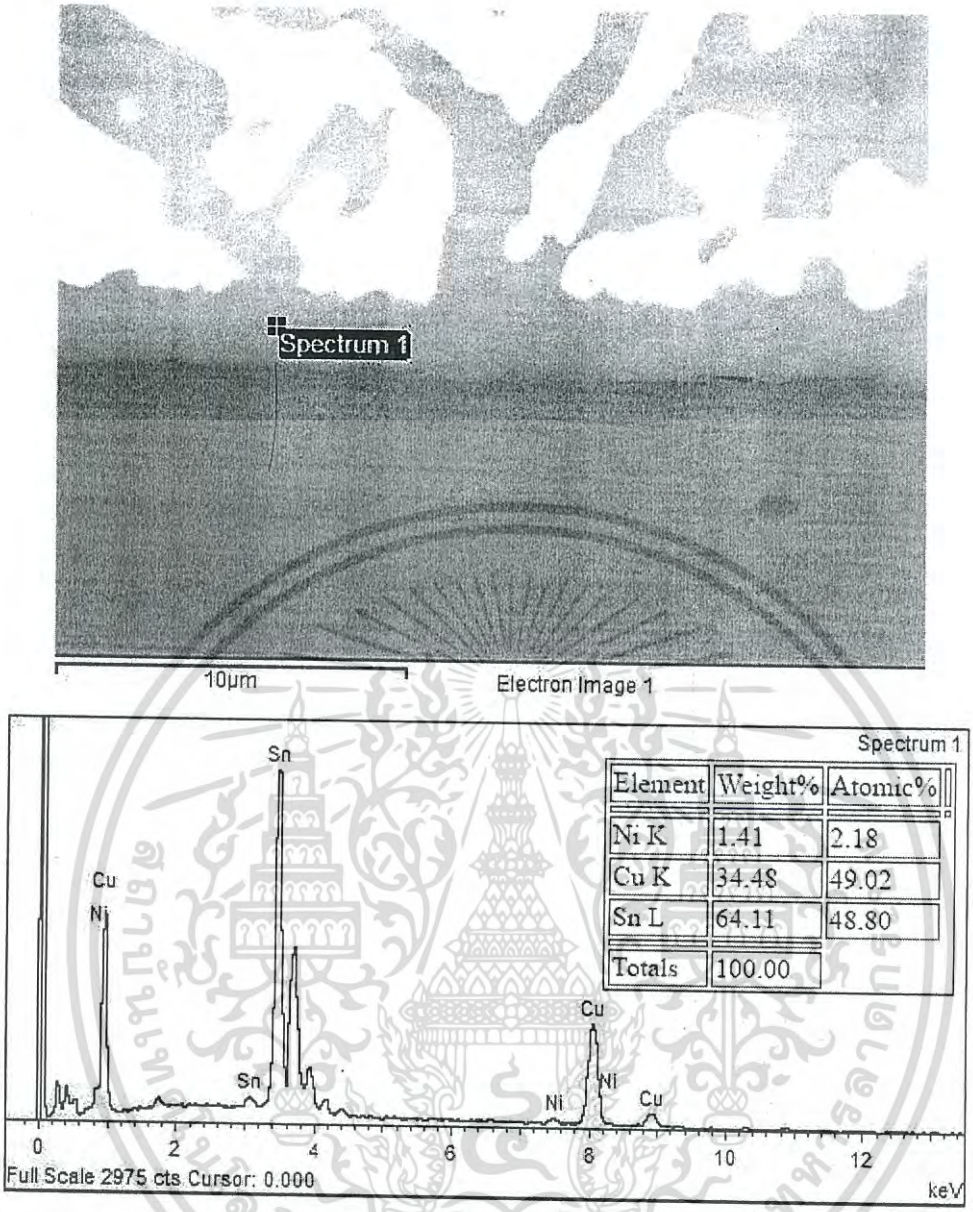
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Element	Weight%	Atomic%
Ni K	0.18	0.26
Cu K	41.29	56.70
Sn L	58.53	43.03
Totals	100.00	

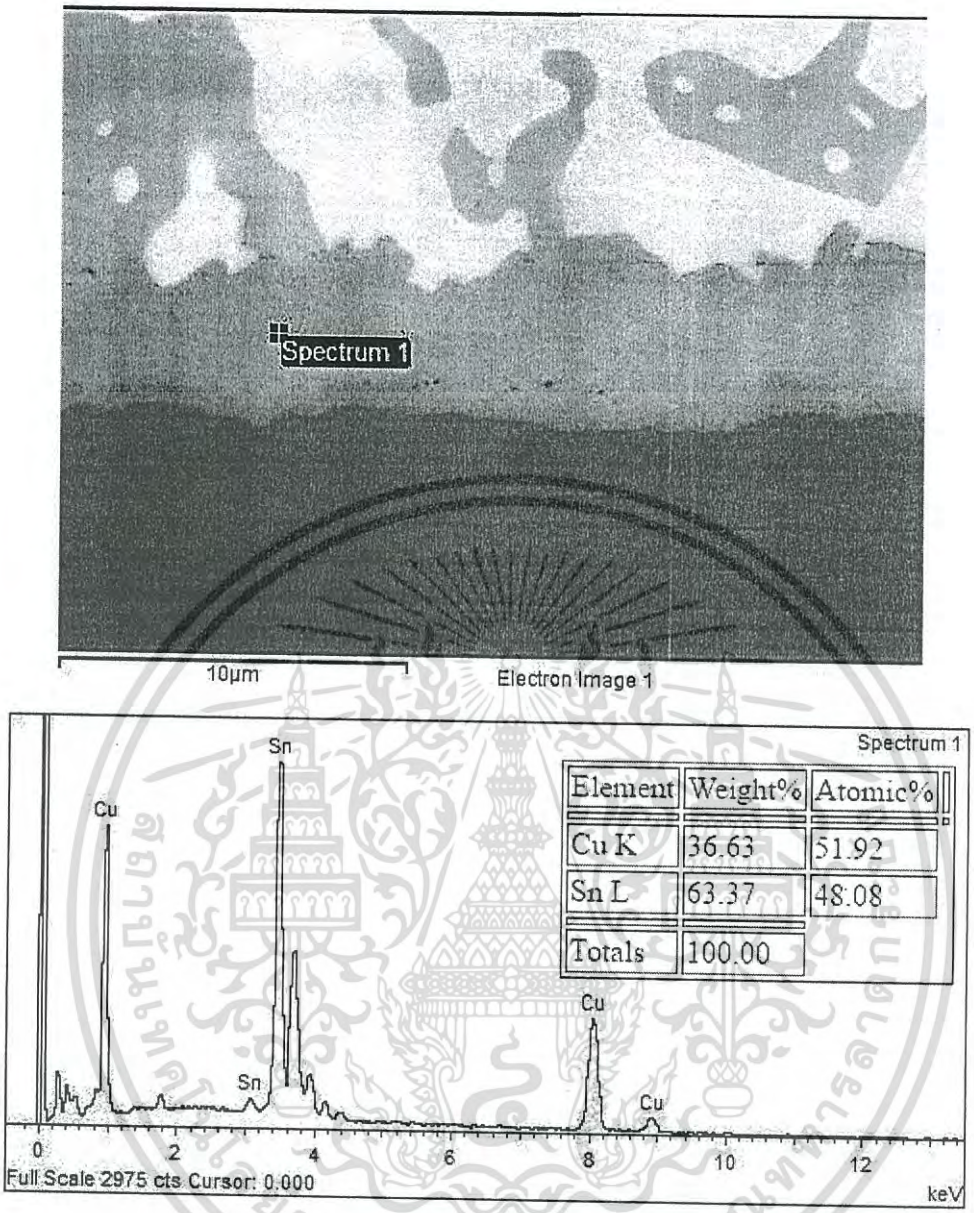
รูปที่ ฉ.32 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 125 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



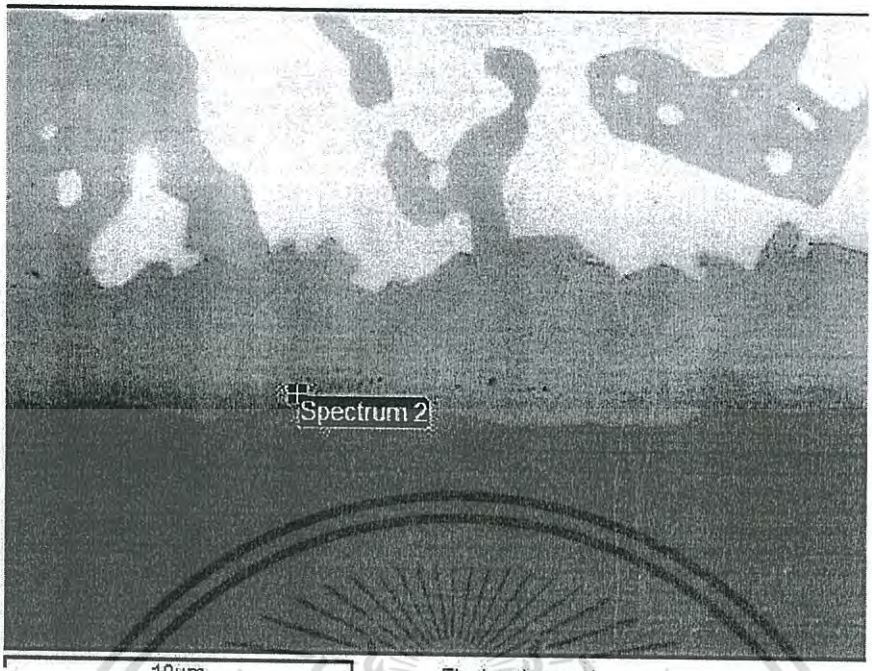
รูปที่ ฉ.33 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 125 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

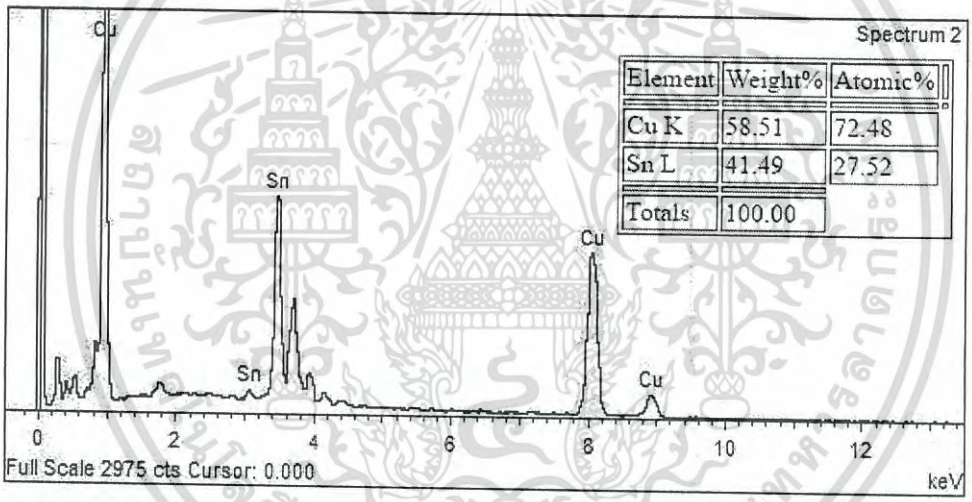
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ฉ.34 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 125 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

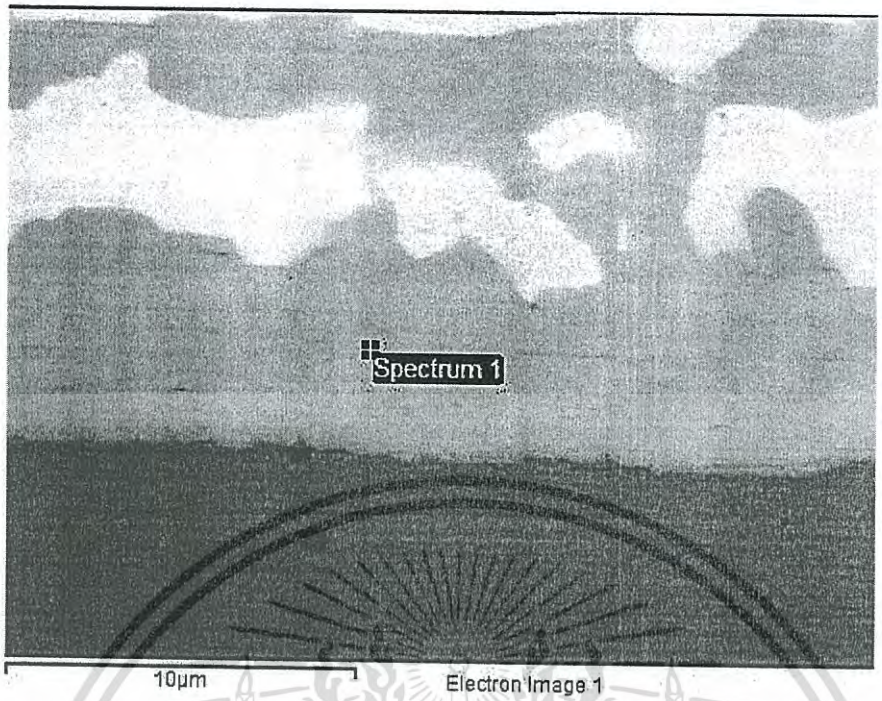


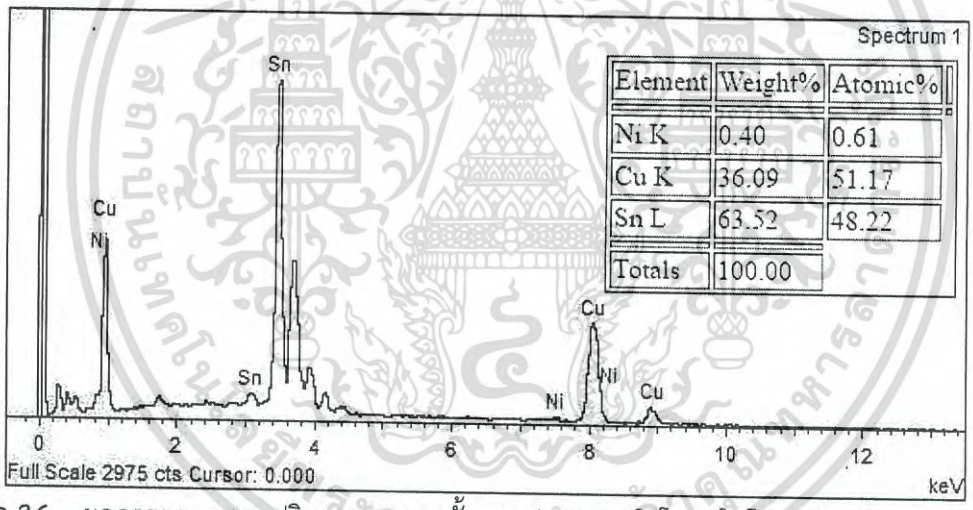


Element	Weight%	Atomic%
Cu K	58.51	72.48
Sn L	41.49	27.52
Totals	100.00	

รูปที่ ฉ.35 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 125 ชั่วโมง (2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

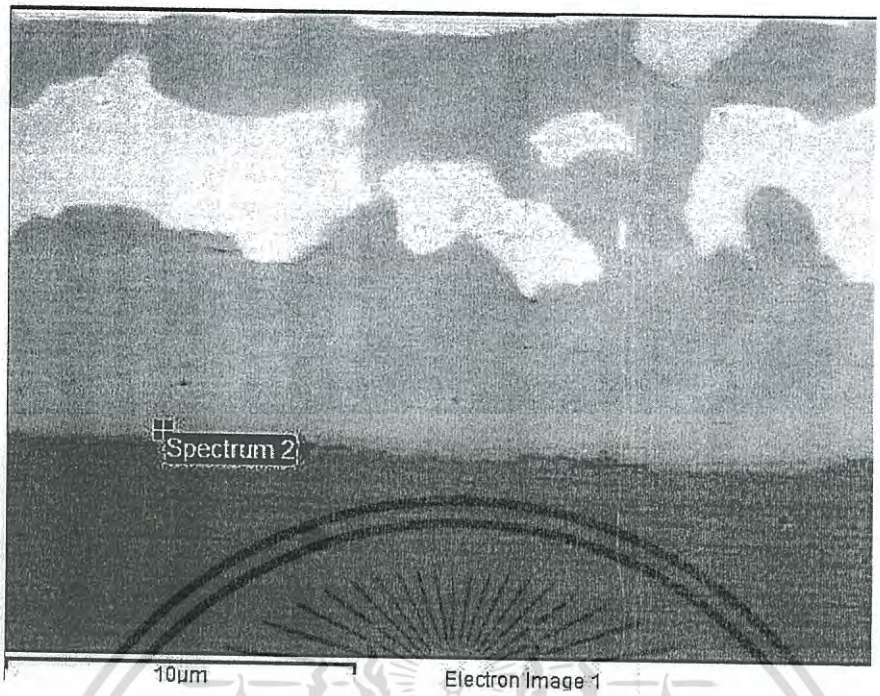


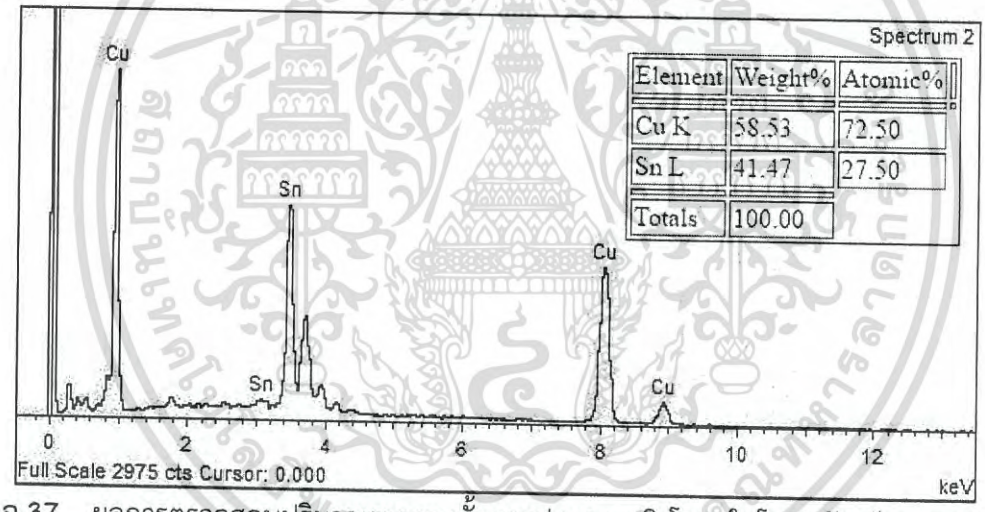


Element	Weight%	Atomic%
Ni K	0.40	0.61
Cu K	36.09	51.17
Sn L	63.52	48.22
Totals	100.00	

รูปที่ ฉ.36 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 125 °C เป็นเวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

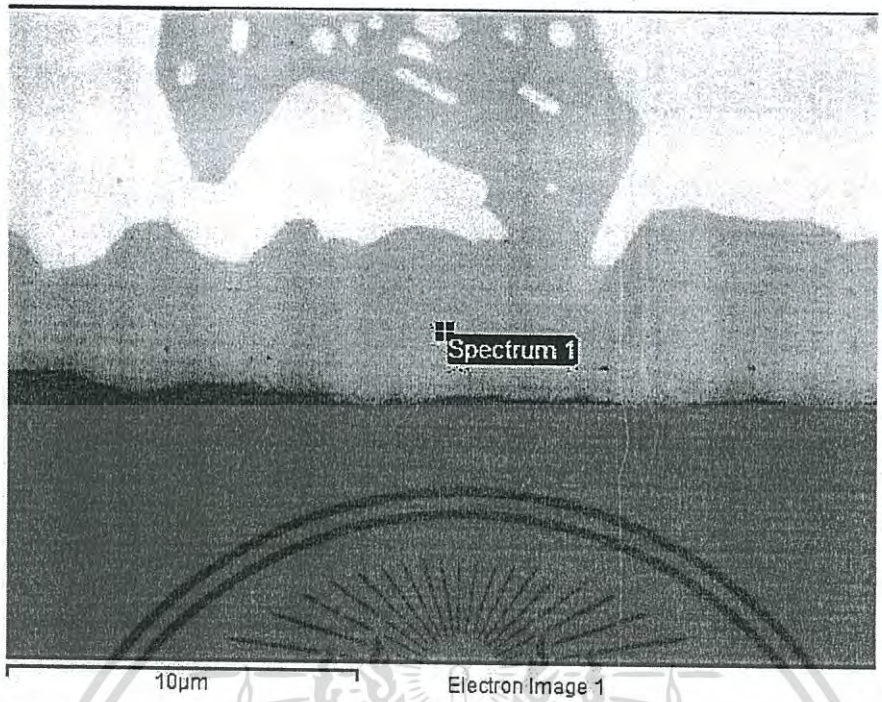


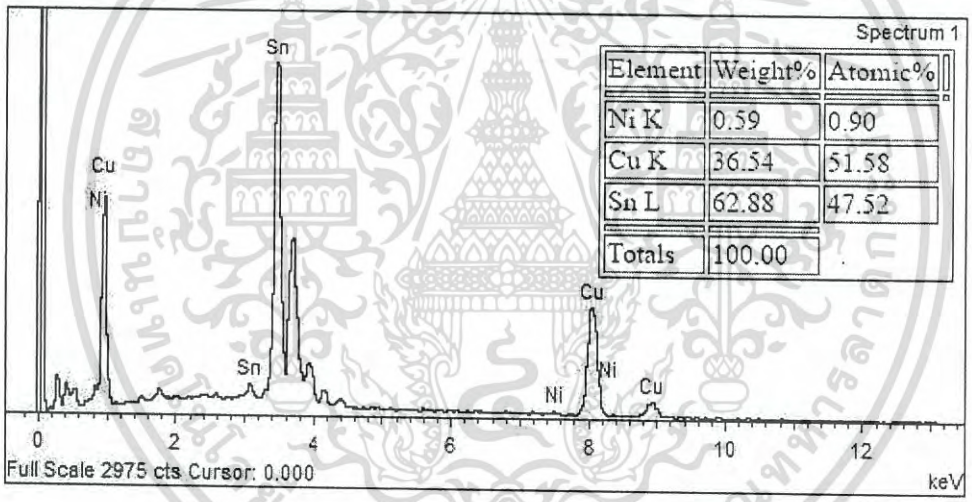


Element	Weight%	Atomic%
Cu K	58.53	72.50
Sn L	41.47	27.50
Totals	100.00	

รูปที่ ฉ.37 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 125 °C เป็นเวลา 100 ชั่วโมง (2)

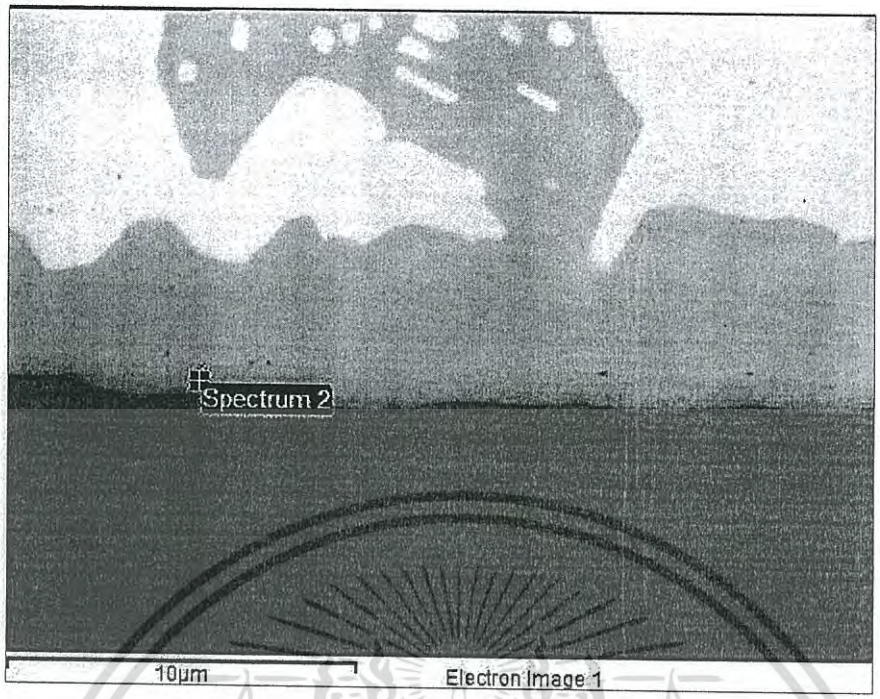
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

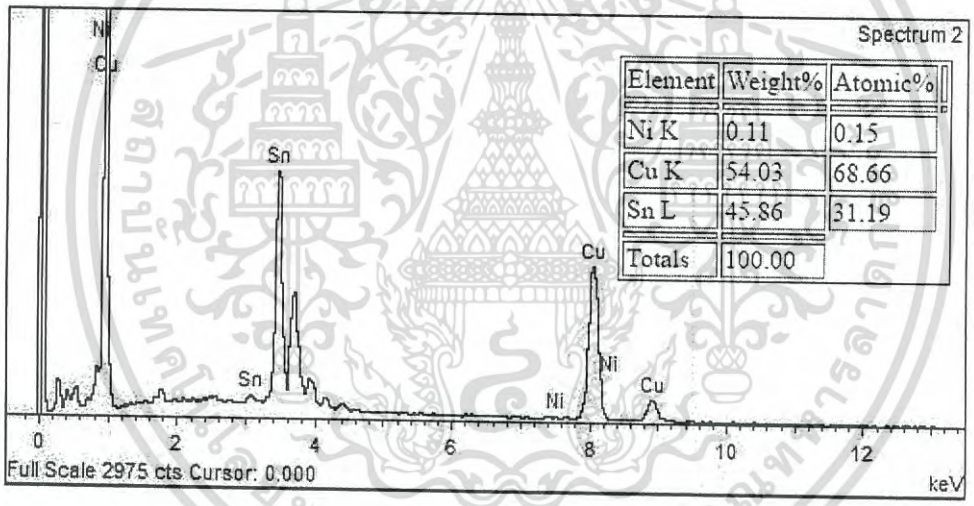




รูปที่ ฉ.38 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 125 °C เป็นเวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

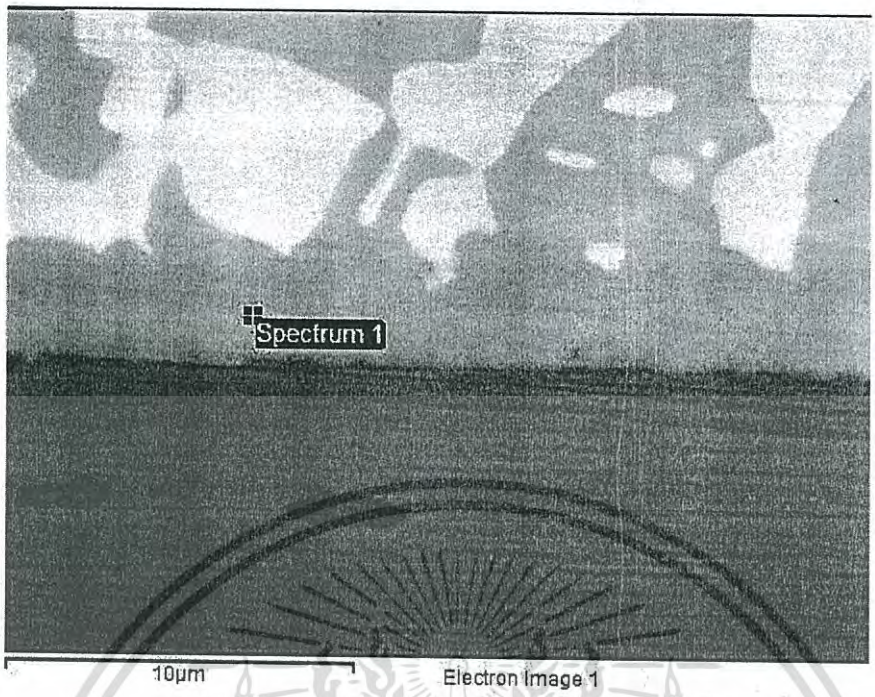


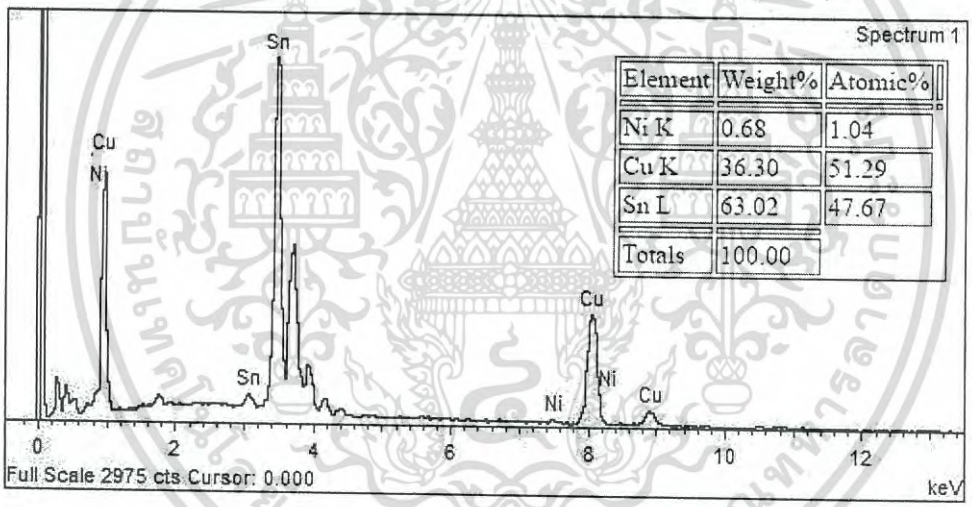


Element	Weight%	Atomic%
Ni K	0.11	0.15
Cu K	54.03	68.66
Sn L	45.86	31.19
Totals	100.00	

รูปที่ ฉ.39 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 125 °C เป็นเวลา 100 ชั่วโมง (2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

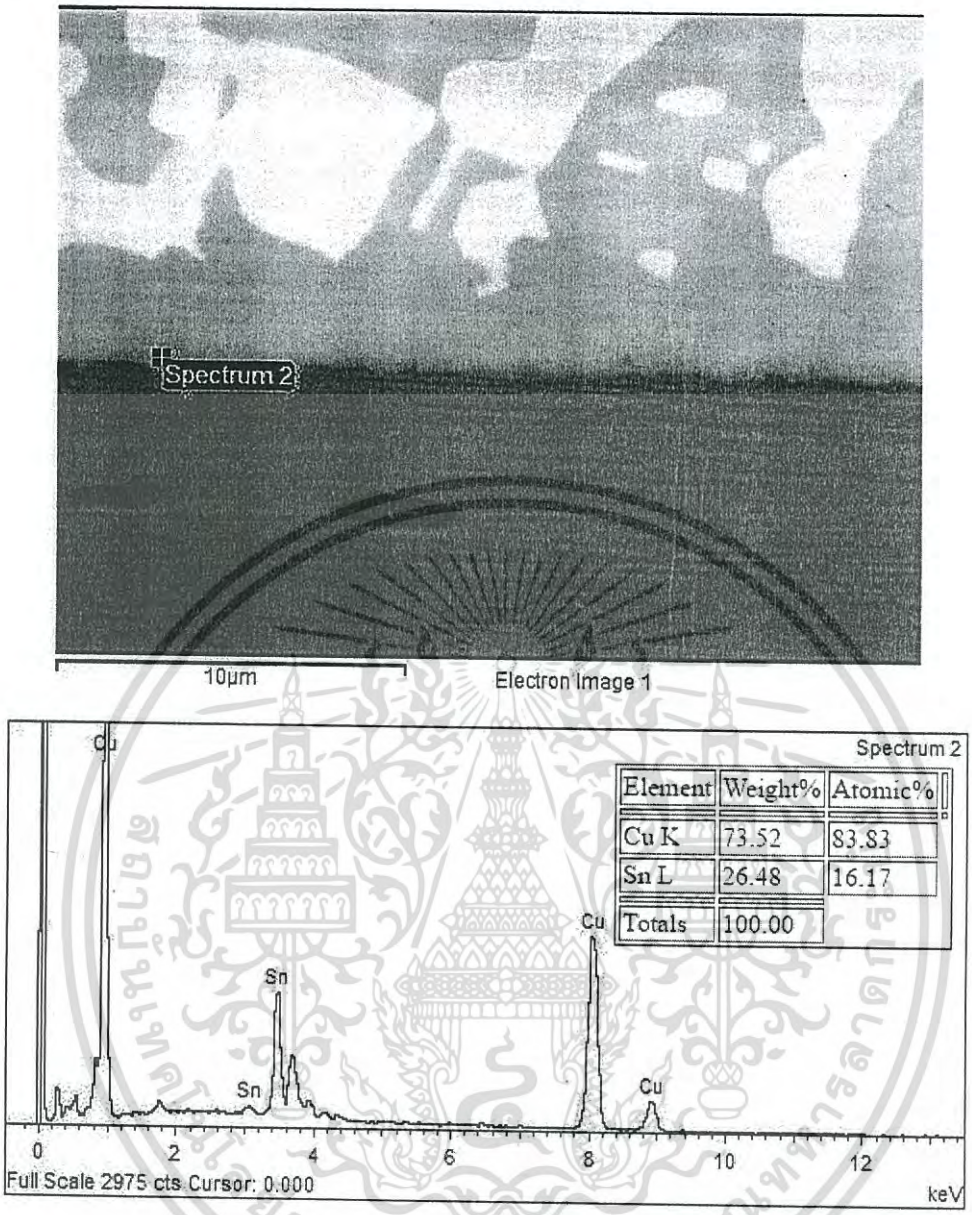




Element	Weight%	Atomic%
Ni K	0.68	1.04
Cu K	36.30	51.29
Sn L	63.02	47.67
Totals	100.00	

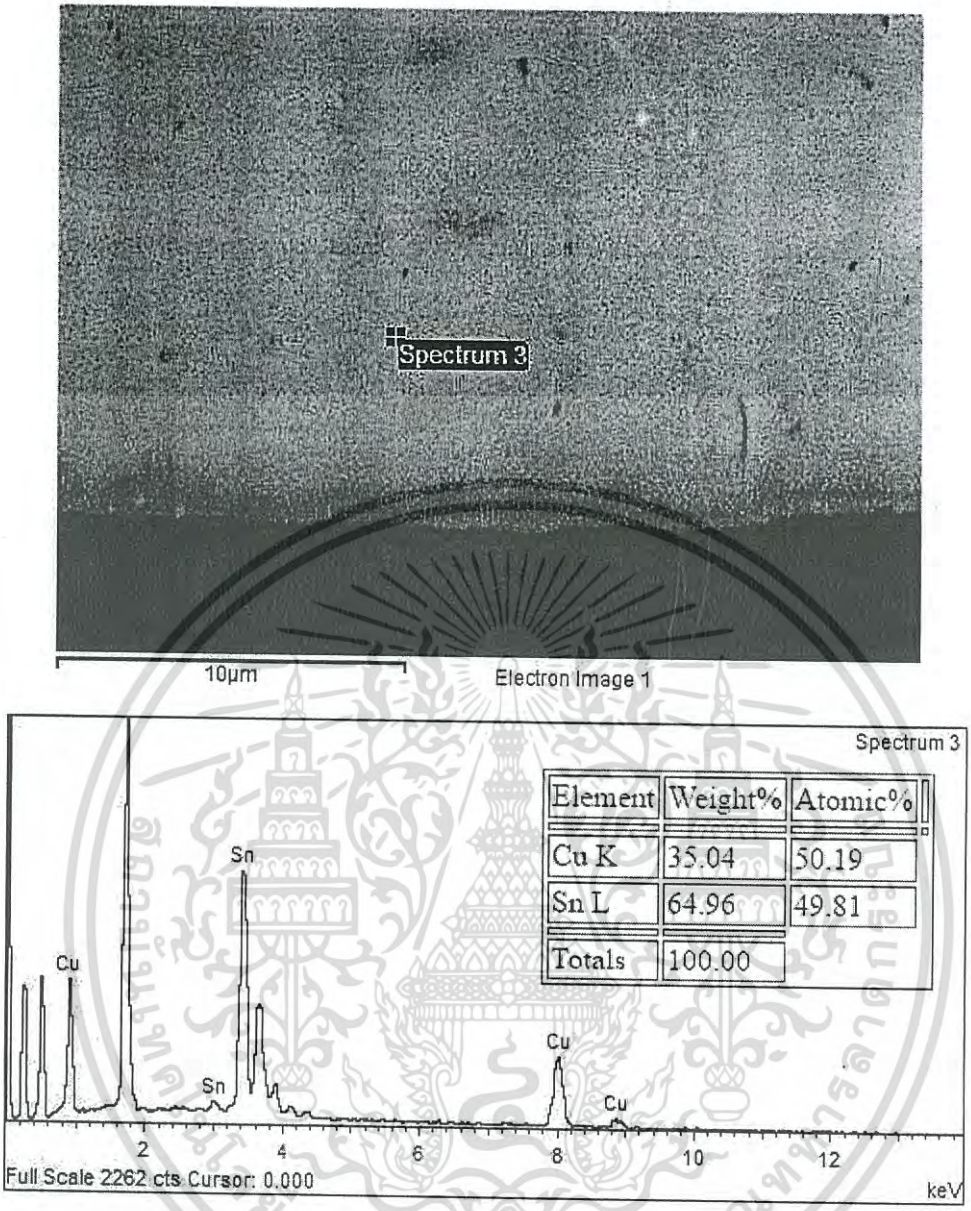
รูปที่ ฉ.40 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 125 °C เป็นเวลา 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



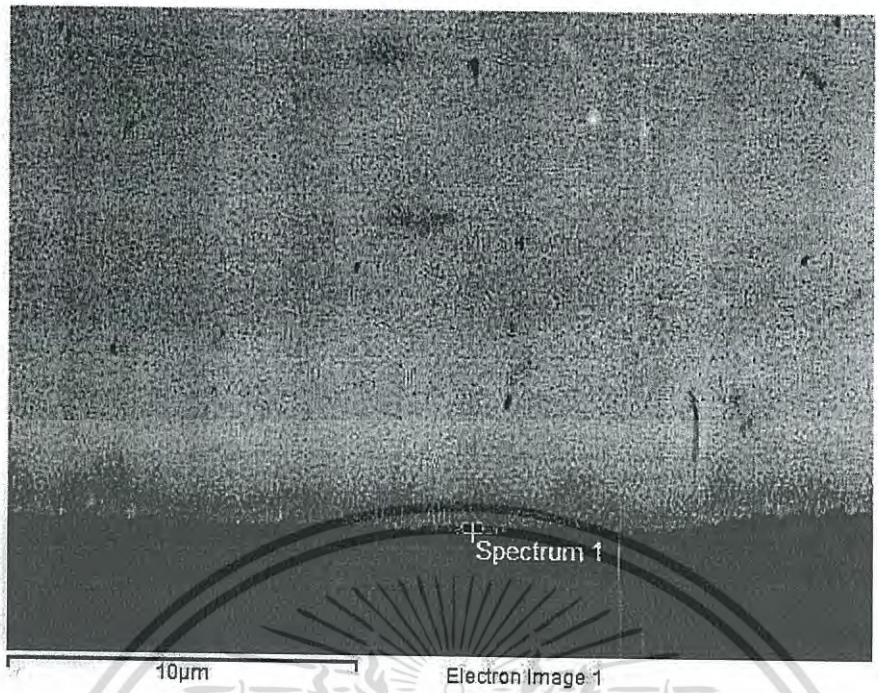
รูปที่ ฉ.41 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 125 °C เป็นเวลา 100 ชั่วโมง (2)

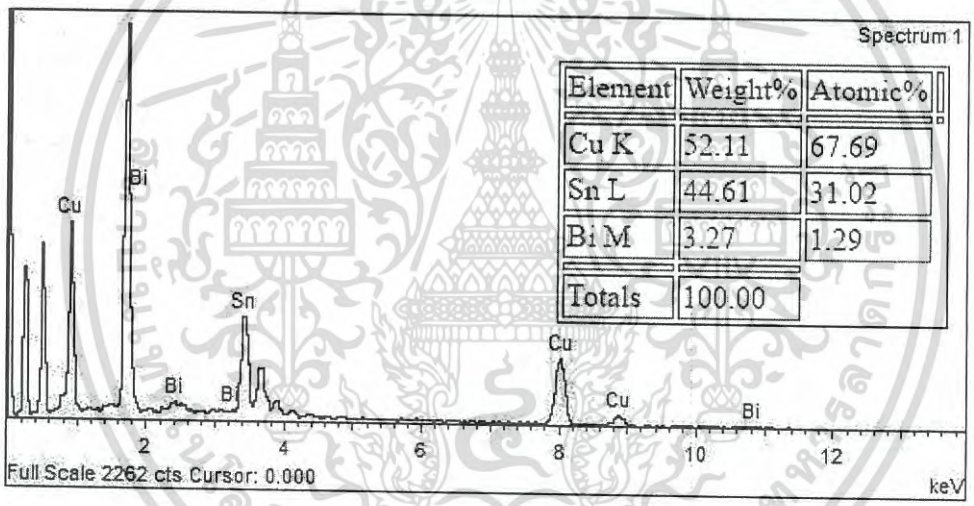
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ฉ.42 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 125 °C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

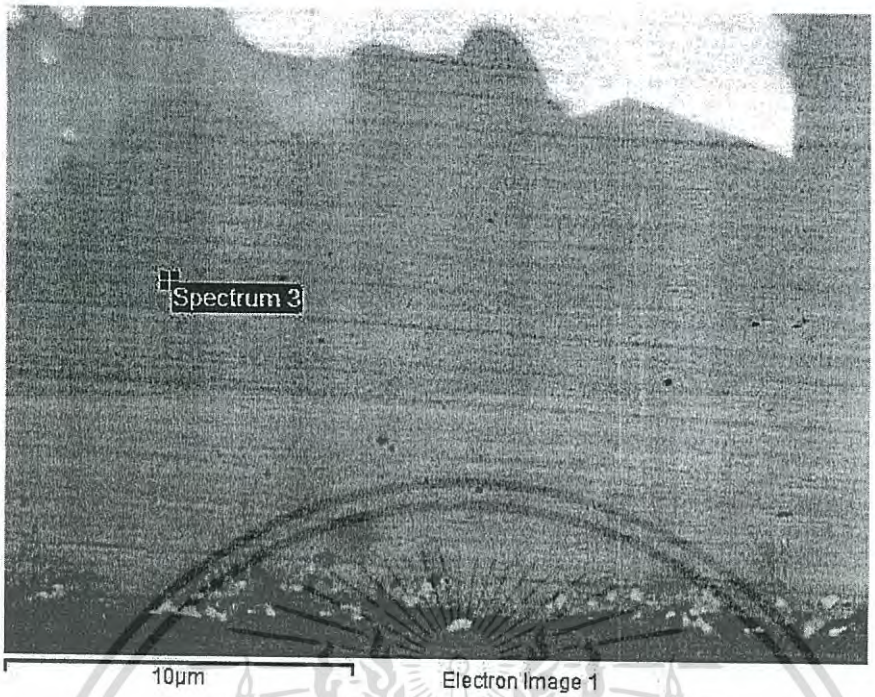


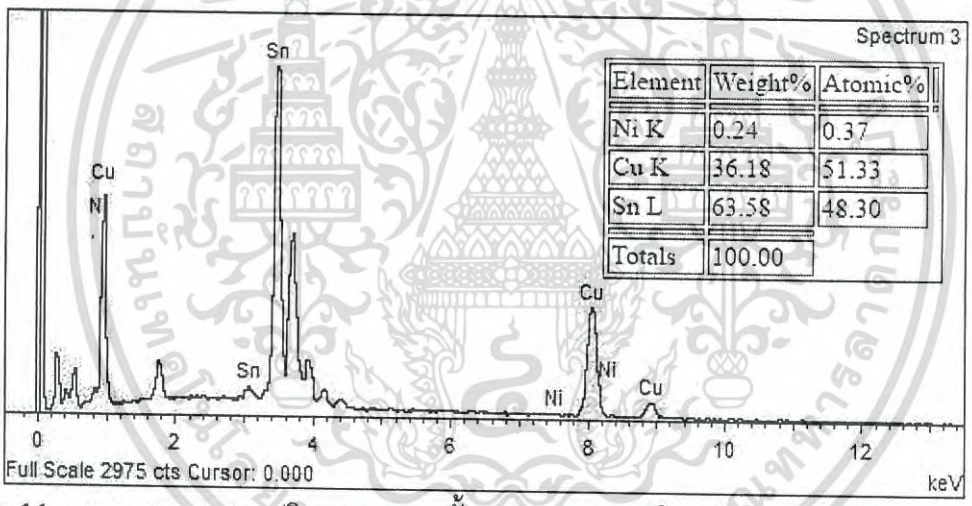


Element	Weight%	Atomic%
Cu K	52.11	67.69
Sn L	44.61	31.02
Bi M	3.27	1.29
Totals	100.00	

รูปที่ ฉ.43 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 125 °C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง (2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

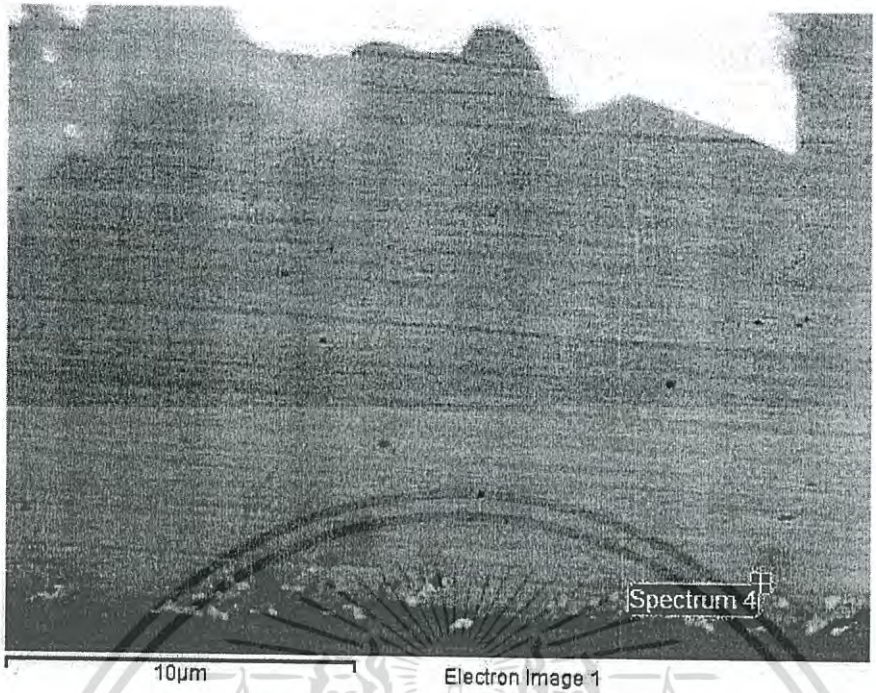


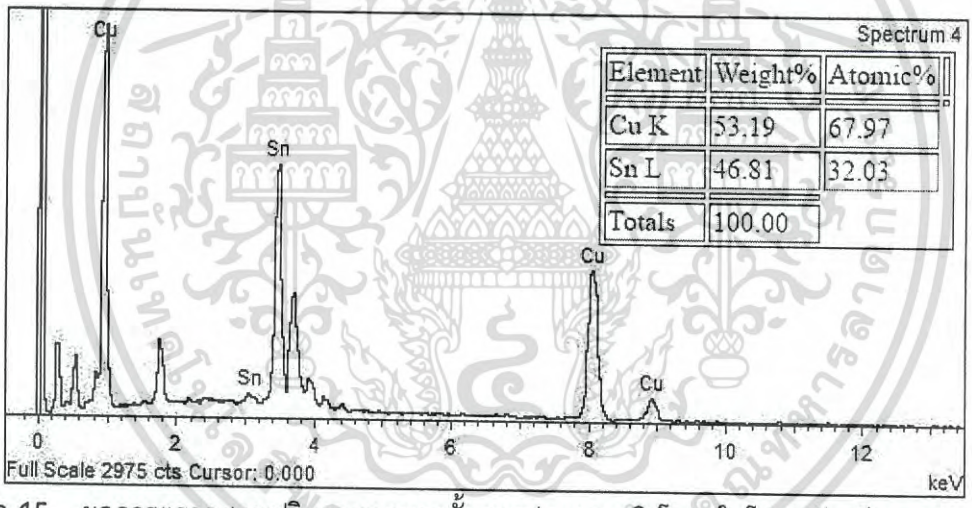


Element	Weight%	Atomic%
Ni K	0.24	0.37
Cu K	36.18	51.33
Sn L	63.58	48.30
Totals	100.00	

รูปที่ ฉ.44 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 125 °C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

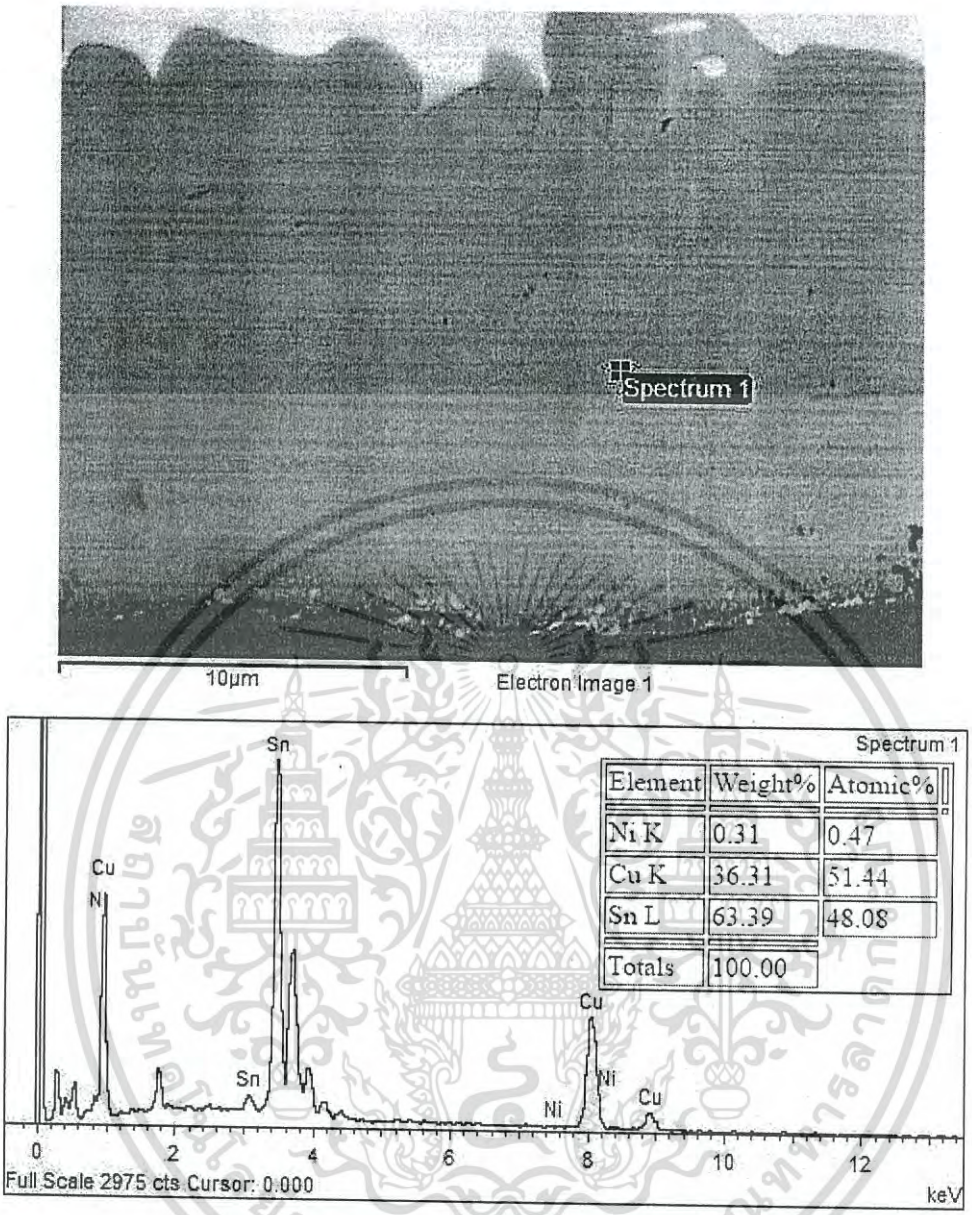




Element	Weight%	Atomic%
Cu K	53.19	67.97
Sn L	46.81	32.03
Totals	100.00	

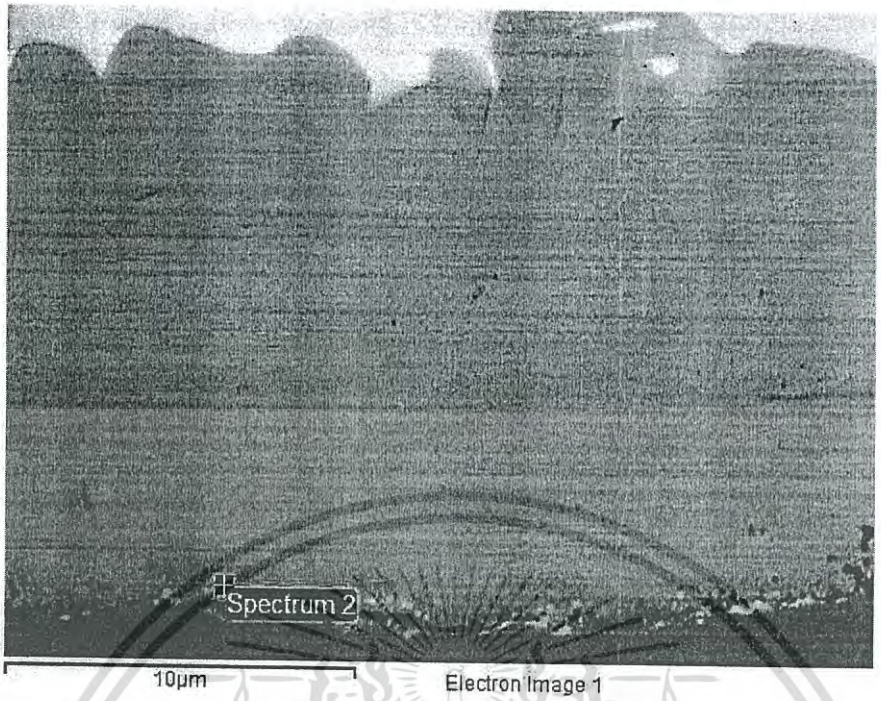
รูปที่ ฉ.45 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 125 °C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง (2)

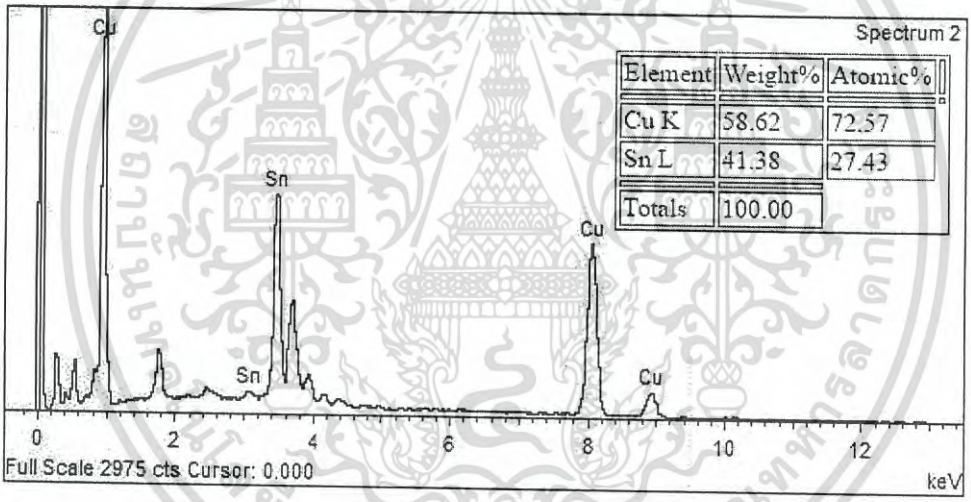
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ฉ.46 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 125 °C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

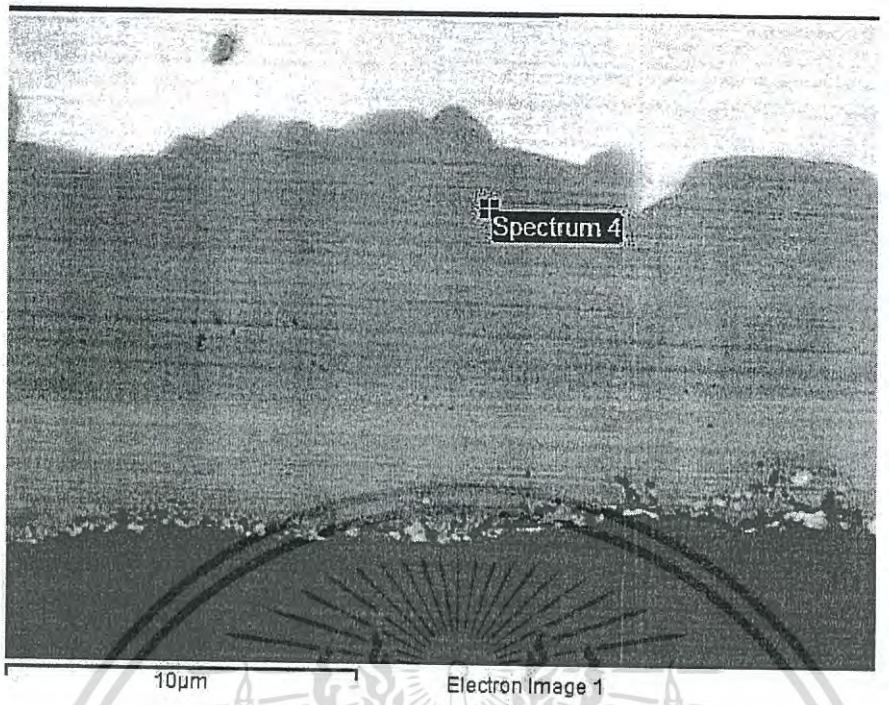


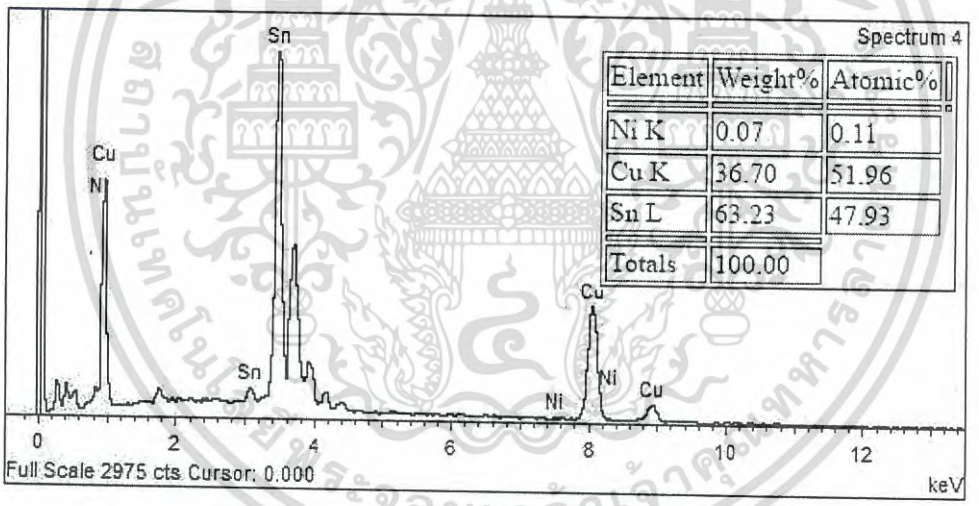


Element	Weight%	Atomic%
Cu K	58.62	72.57
Sn L	41.38	27.43
Totals	100.00	

รูปที่ ฉ.47 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 125 °C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง (2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

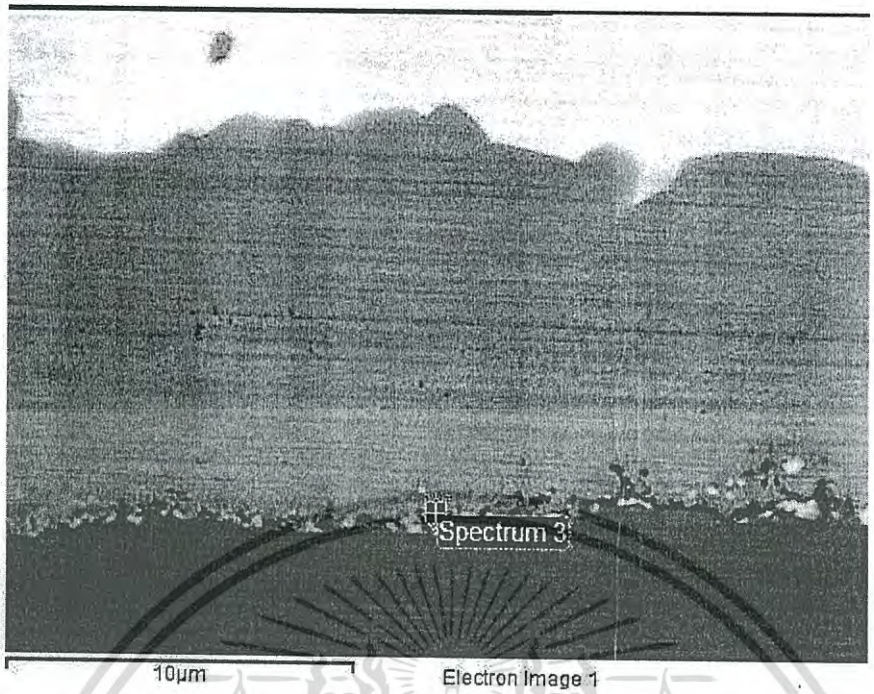


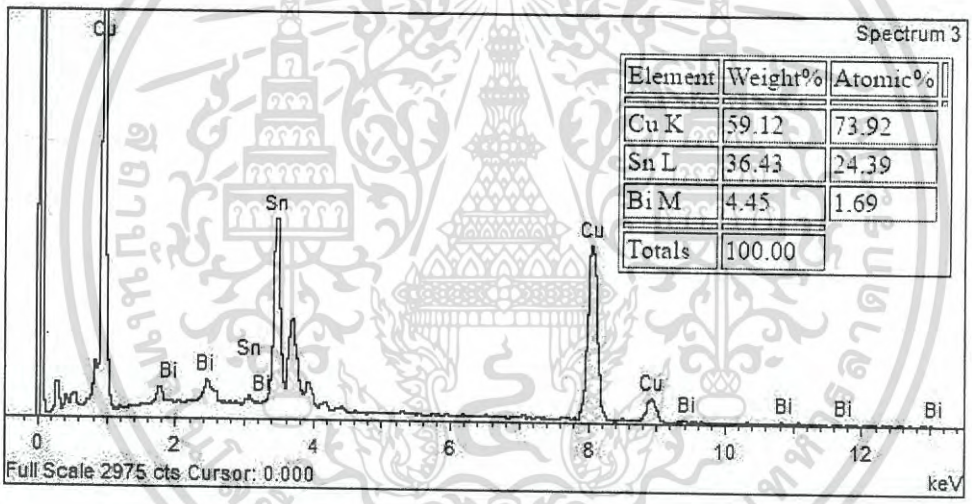


Element	Weight%	Atomic%
Ni K	0.07	0.11
Cu K	36.70	51.96
Sn L	63.23	47.93
Totals	100.00	

รูปที่ ฉ.48 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 125 °C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

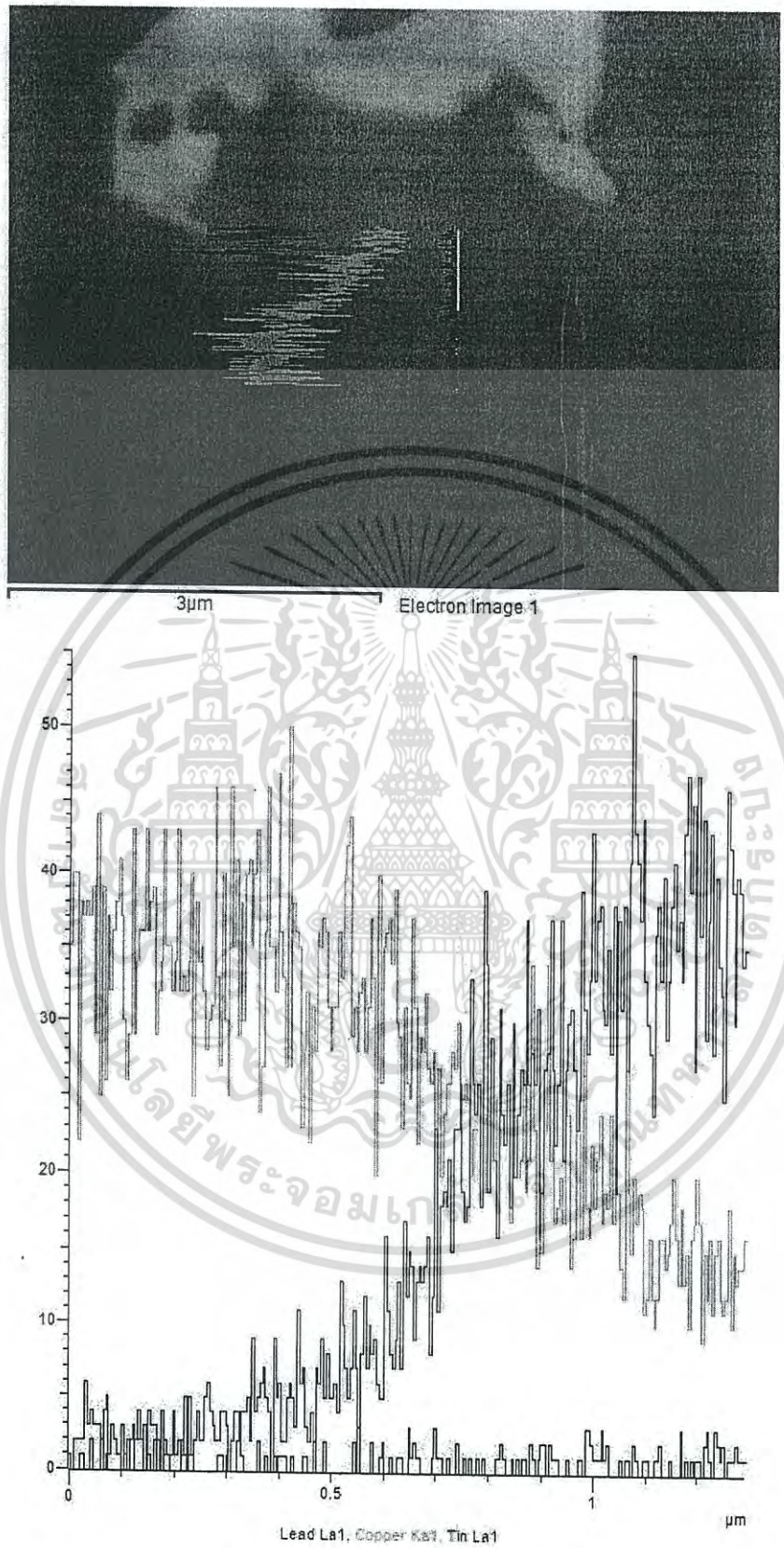
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





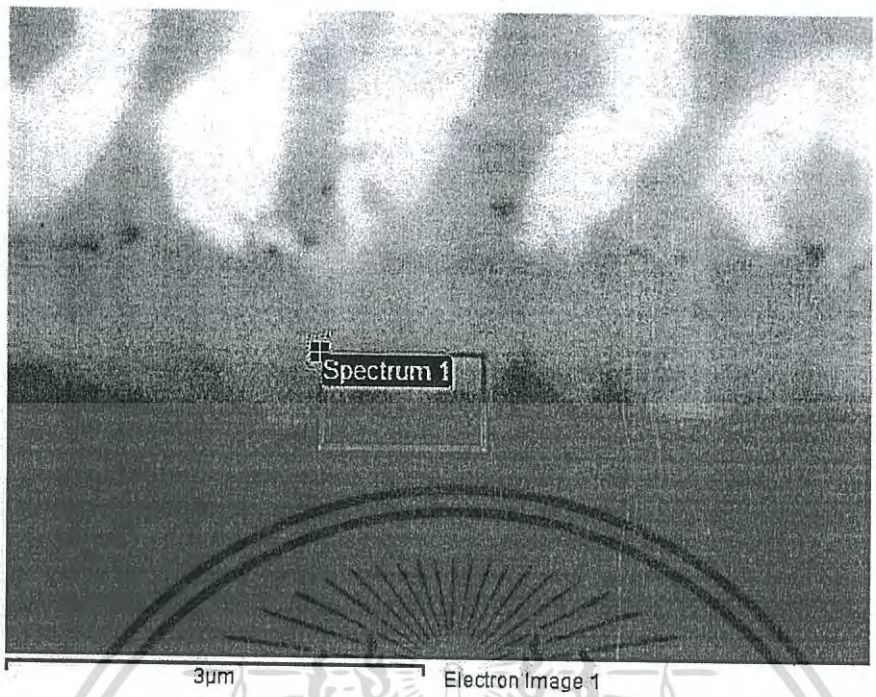
รูปที่ ฉ.49 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 125 °C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง (2)

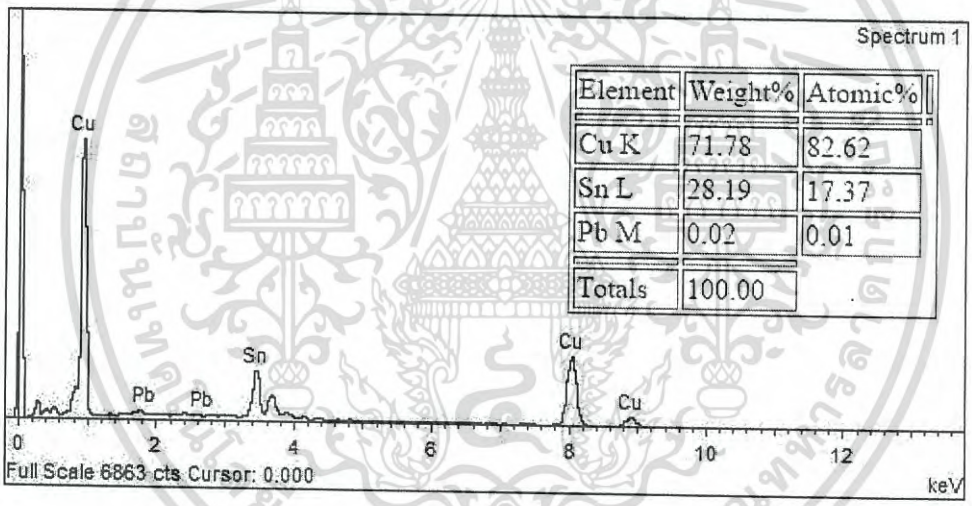
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ฉ.50 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับแผ่นทองแดงชุบตะกั่ว หลังการบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

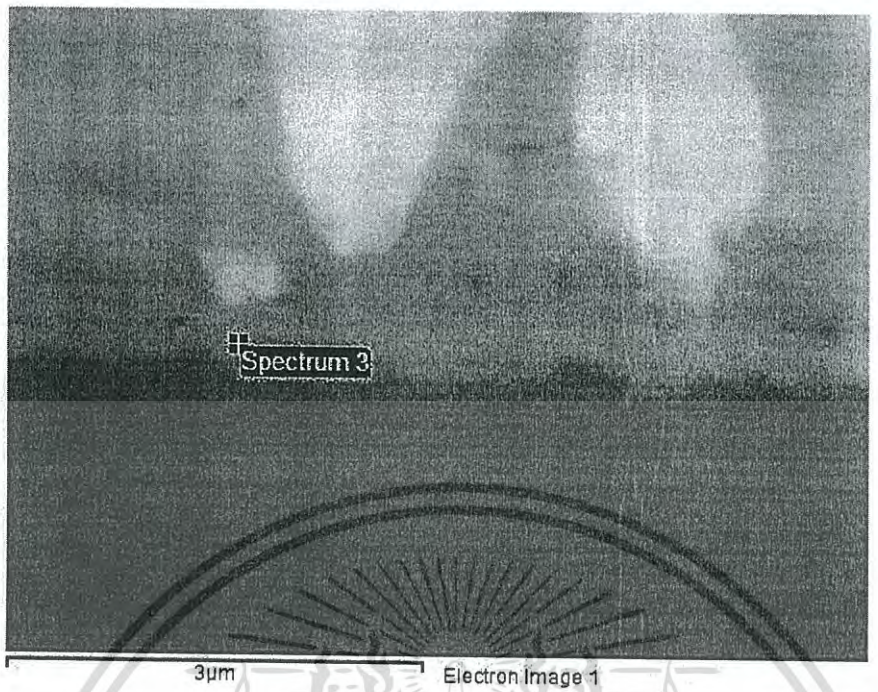


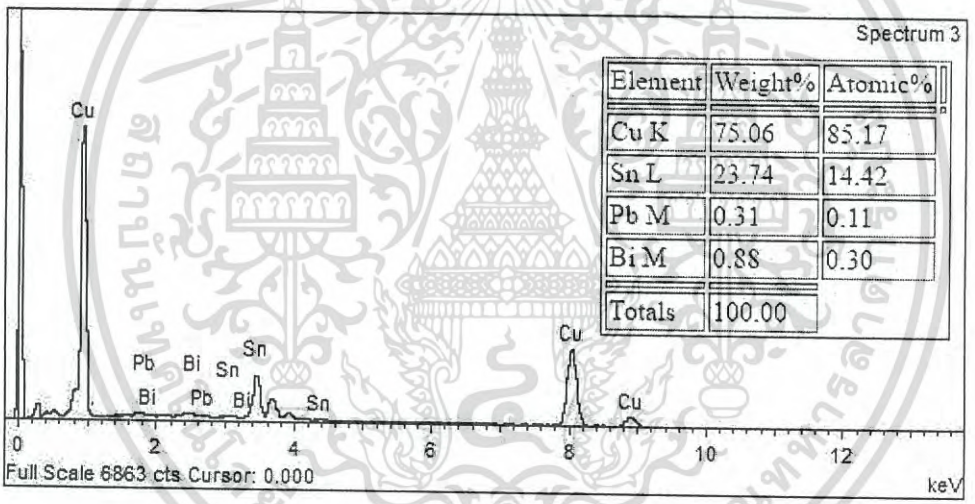


Element	Weight%	Atomic%
Cu K	71.78	82.62
Sn L	28.19	17.37
Pb M	0.02	0.01
Totals	100.00	

รูปที่ ฉ.51 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni กับแผ่นทองแดงชุบตะกั่ว หลังการบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

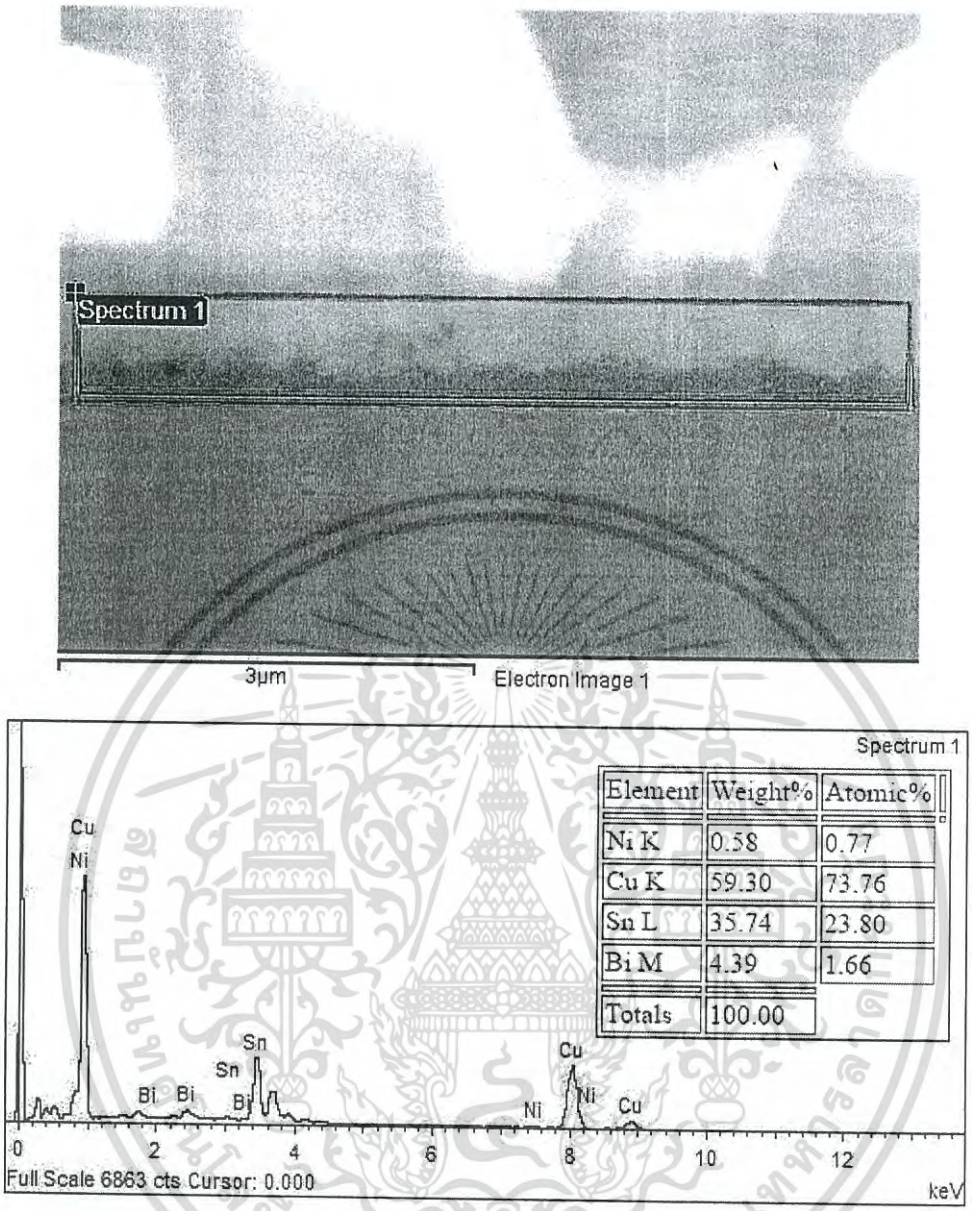




Element	Weight%	Atomic%
Cu K	75.06	85.17
Sn L	23.74	14.42
Pb M	0.31	0.11
Bi M	0.88	0.30
Totals	100.00	

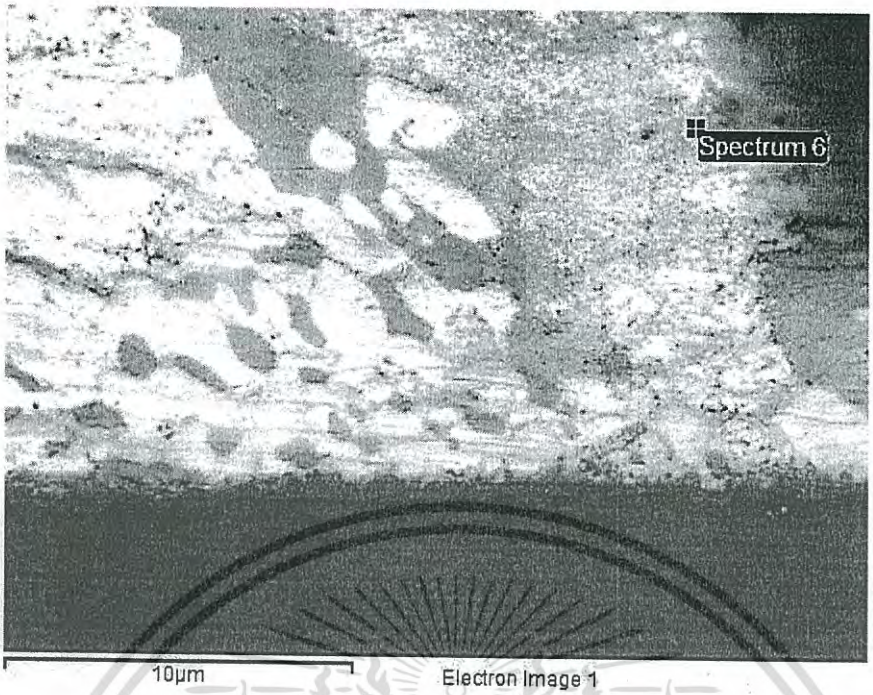
รูปที่ ฉ.52 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In กับแผ่นทองแดงชุบตะกั่ว หลังการบัดกรี

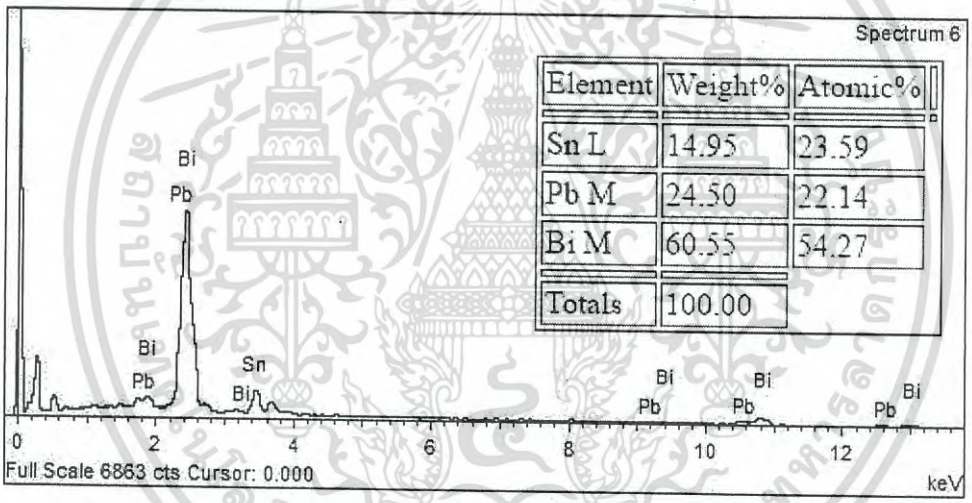
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ฉ.53 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag กับแผ่นทองแดงชุบตะกั่ว หลังการบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

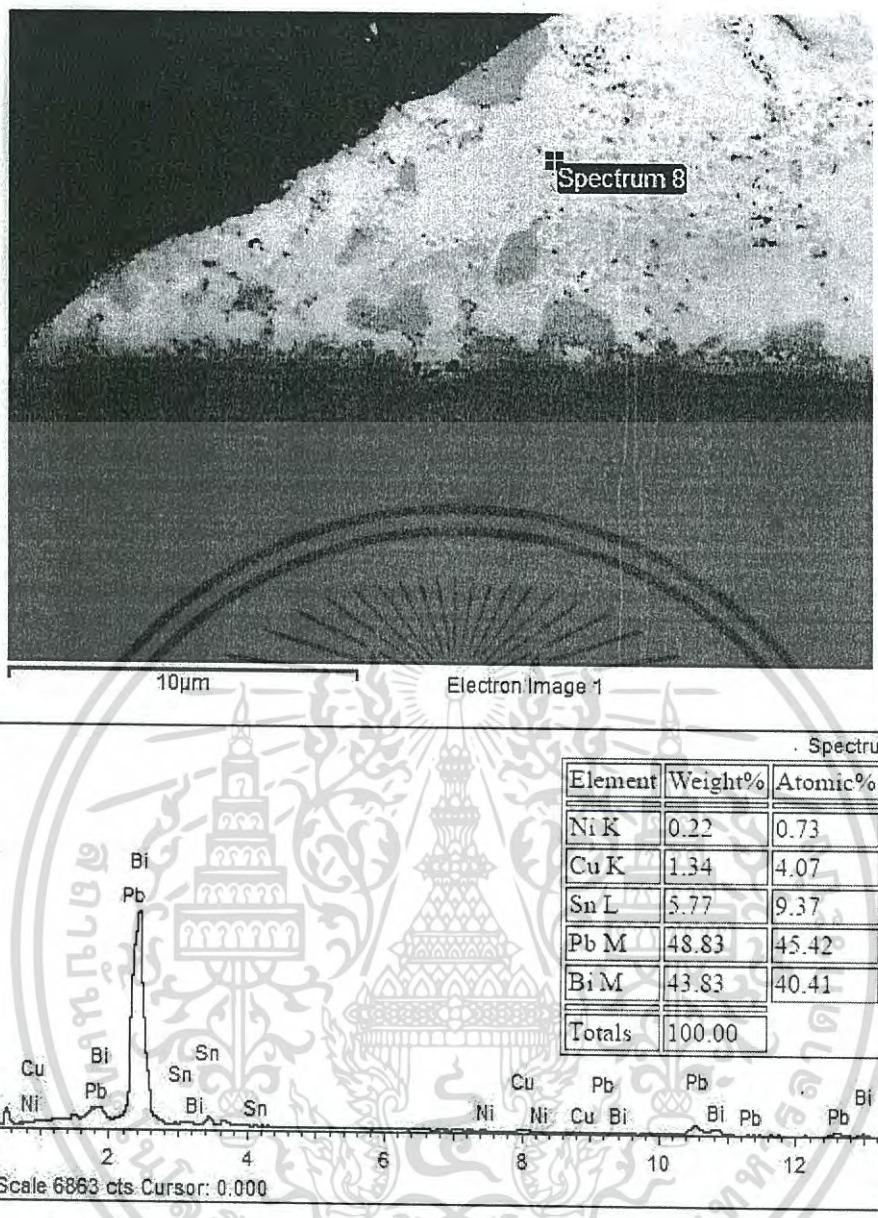




Element	Weight%	Atomic%
Sn L	14.95	23.59
Pb M	24.50	22.14
Bi M	60.55	54.27
Totals	100.00	

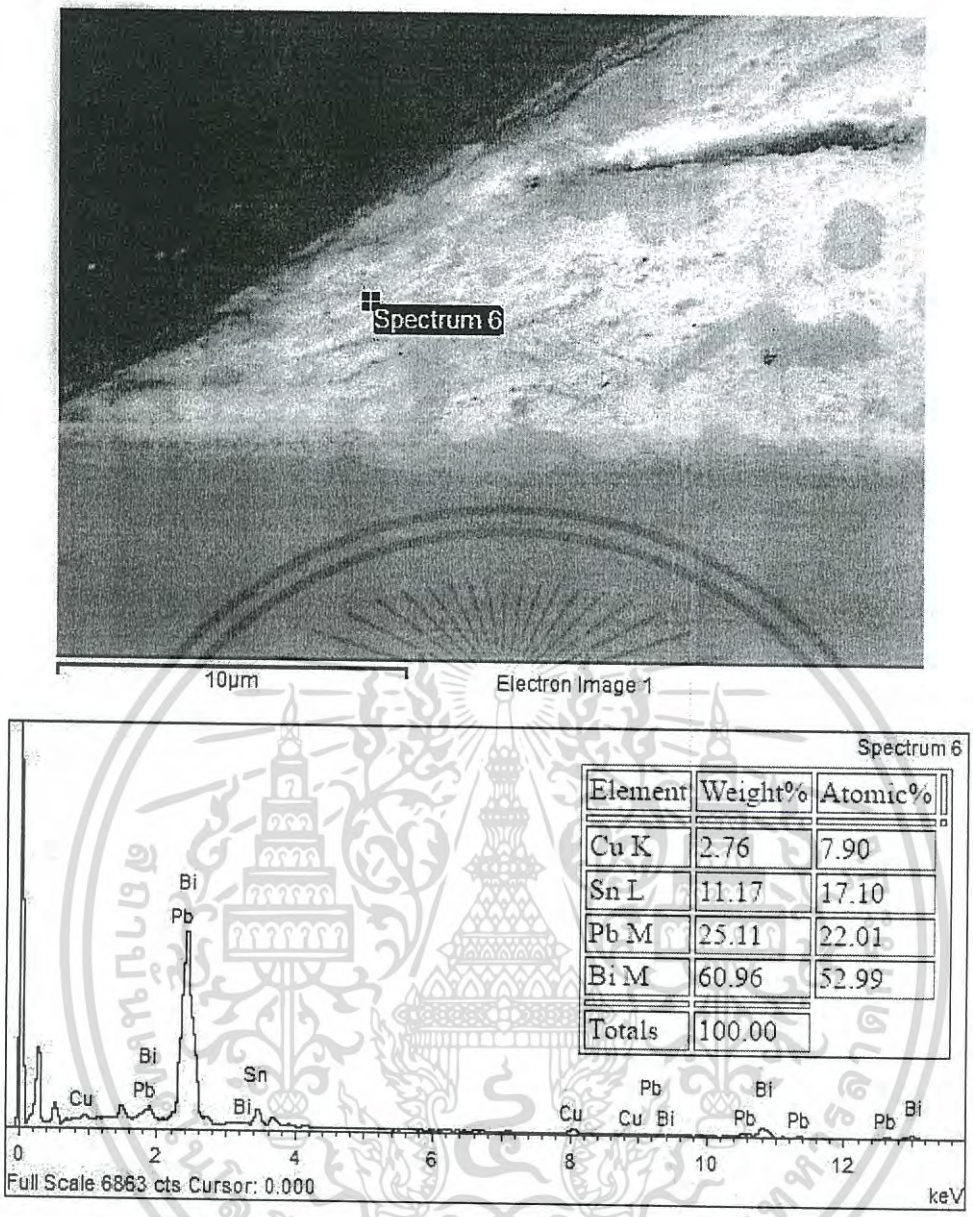
รูปที่ ฉ.54 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุบริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi บนเปื้อนตะกั่วบริสุทธิ์กับแผ่นทองแดง หลังการบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



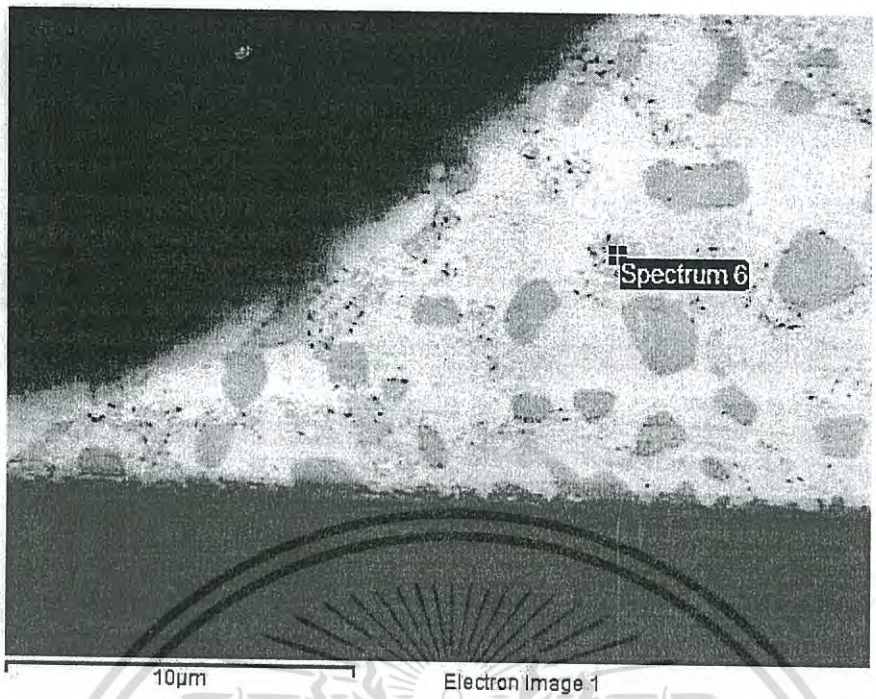
รูปที่ ฉ.55 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุบริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni ปนเปื้อนตะกั่วบริสุทธิ์กับแผ่นทองแดง หลังการบัดกรี

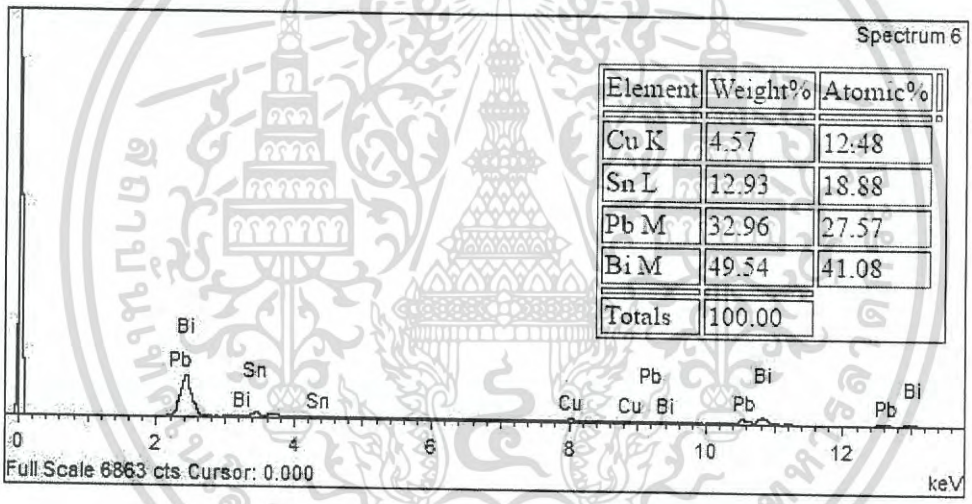
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ฉ.56 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุบริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1In ปนเปื้อนตะกั่วบริสุทธิ์กับแผ่นทองแดง หลังการบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

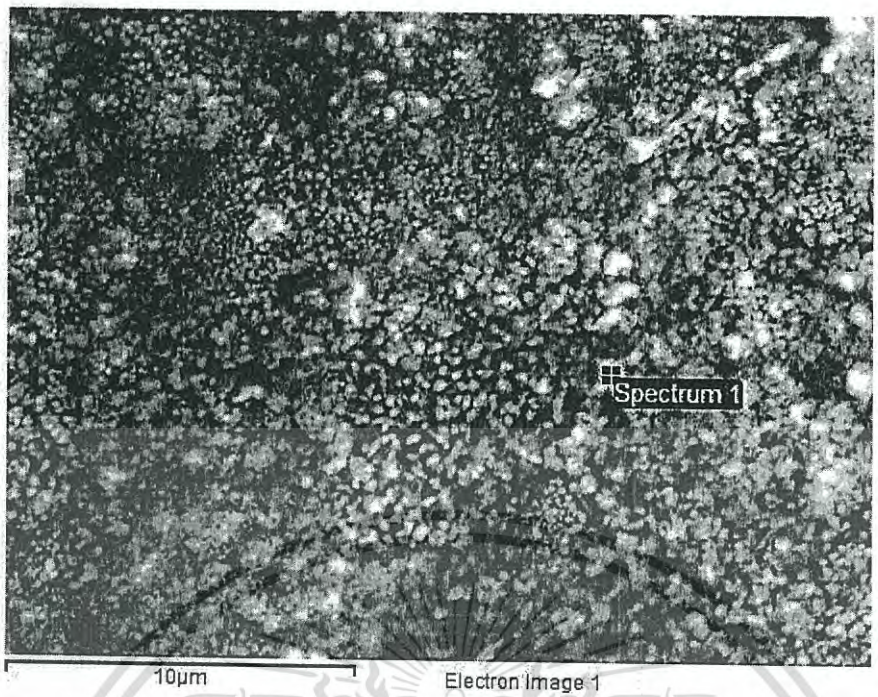


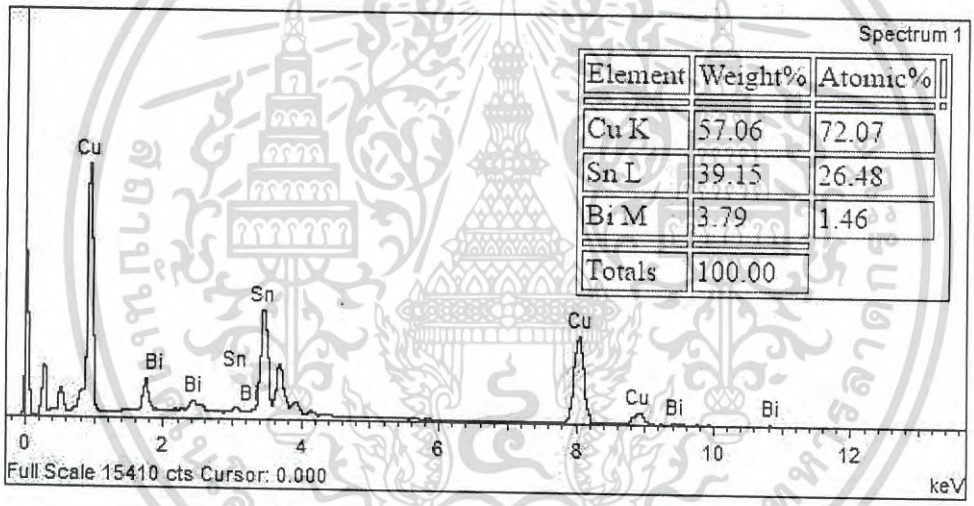


Element	Weight%	Atomic%
Cu K	4.57	12.48
Sn L	12.93	18.88
Pb M	32.96	27.57
Bi M	49.54	41.08
Totals	100.00	

รูปที่ ฉ.57 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุบริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-1.0Ni-0.1Ag บนเปื้อนตะกั่วบริสุทธิ์กับแผ่นทองแดง หลังการบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

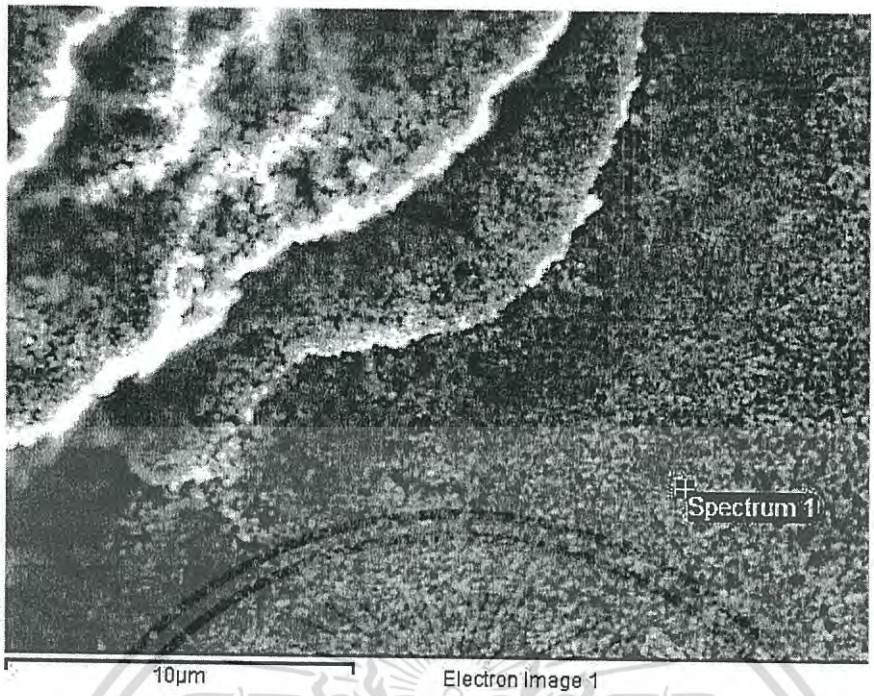


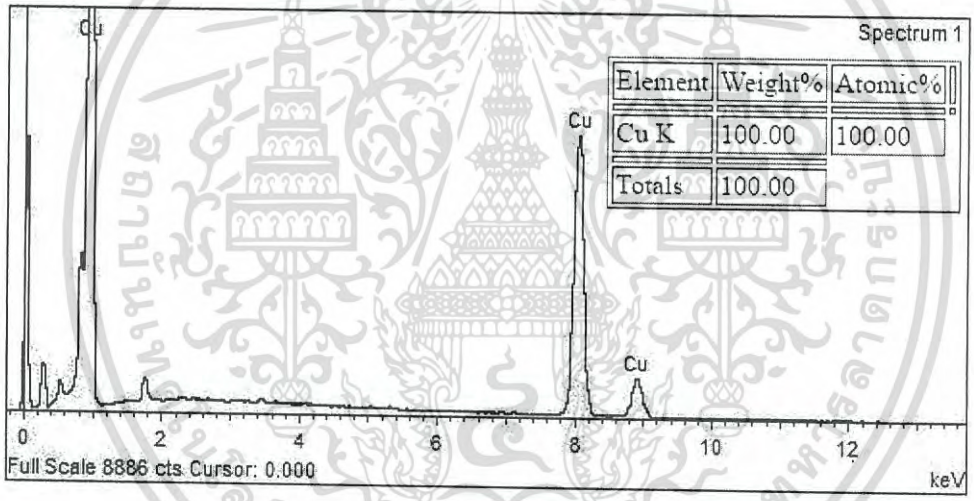


Element	Weight%	Atomic%
Cu K	57.06	72.07
Sn L	39.15	26.48
Bi M	3.79	1.46
Totals	100.00	

รูปที่ ฉ.58 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุบนพื้นผิวรอยแตกของโลหะบัดกรี Sn-58Bi หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 125 °C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ ฉ.59 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุบนพื้นผิวรอยแตกของแผ่นทองแดง หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 125 °C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ช.

การทดสอบทางสถิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ช.1 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi หลังการบ่มด้วยความร้อนที่ 125 °C เป็นเวลา 100 ชั่วโมง

ชิ้นงานที่	ชนิดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ	ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (μm)
1	Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	5.05
	Cu_6Sn_5	4.25
	Cu_3Sn	0.81
2	Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	4.88
	Cu_6Sn_5	3.93
	Cu_3Sn	0.95
3	Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	6.08
	Cu_6Sn_5	5.22
	Cu_3Sn	0.85
4	Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	4.35
	Cu_6Sn_5	3.86
	Cu_3Sn	0.49
5	Cu_6Sn_5+Cu_3Sn	4.65
	Cu_6Sn_5	3.90
	Cu_3Sn	0.75

ตารางที่ ช.2 ผลการทดสอบทางสถิติของความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวมของโลหะบัดกรี Sn-58Bi หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 125 °C เป็นเวลา 100 ชั่วโมง

One-Sample T: Total thickness

Test of μ = 4.85 vs ≠ 4.85

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
Total thickness	5	5.002	0.657	0.294	(4.186,5.818)	0.52	0.632

ตารางที่ ช.3 ผลการทดสอบทางสถิติของความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ของโลหะบัดกรี Sn-58Bi หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 125 °C เป็นเวลา 100 ชั่วโมง

One-Sample T: Cu6Sn5 thickness

Test of μ = 4.19 vs ≠ 4.19

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
Cu6Sn5 thickness	5	4.232	0.574	0.257	(3.520,4.944)	0.16	0.878

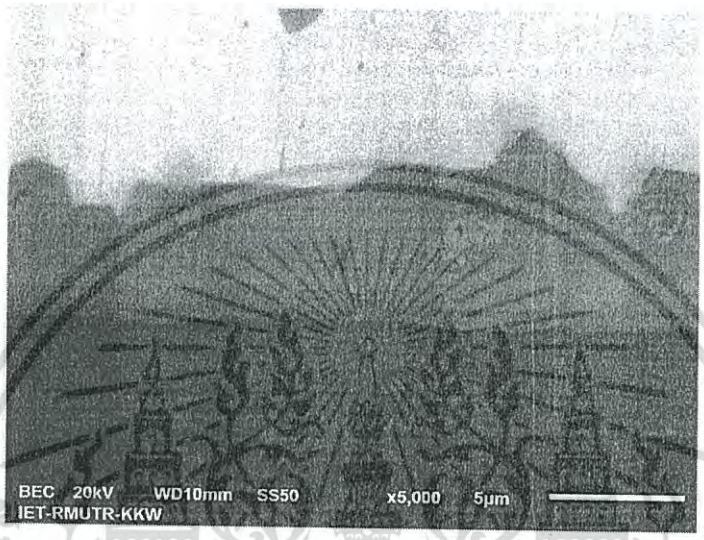
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ช.4 ผลการทดสอบทางสถิติของความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn ของโลหะบัดกรี Sn-58Bi หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 125 °C เป็นเวลา 100 ชั่วโมง

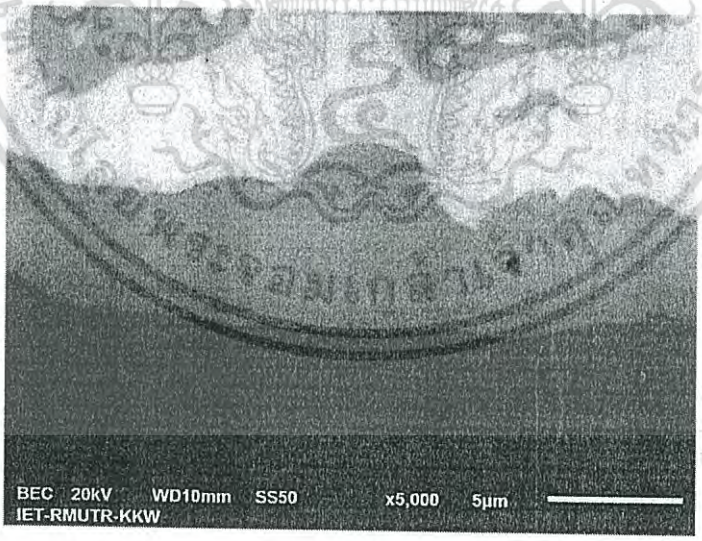
One-Sample T: Cu3Sn thickness

Test of μ = 0.66 vs ≠ 0.66

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
Cu3Sn thickness	5	0.7700	0.1726	0.0772	(0.5557,0.9843)	1.42	0.227

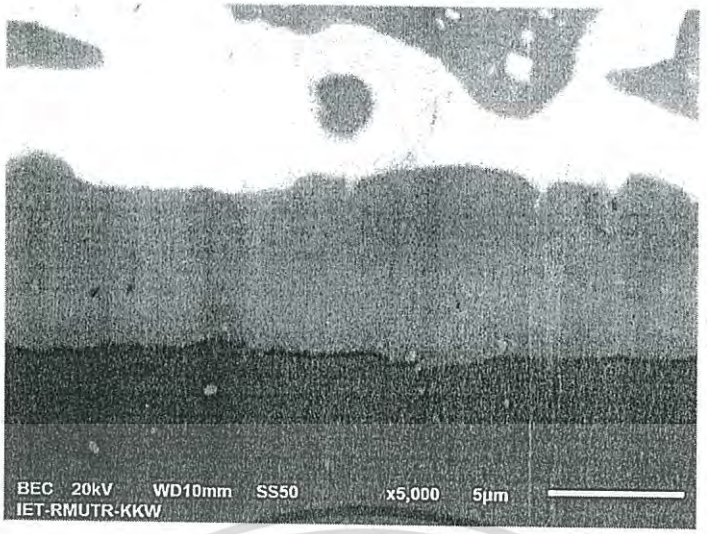


รูปที่ ช.1 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 125 °C เป็นเวลา 100 ชั่วโมง ชิ้นที่ 1

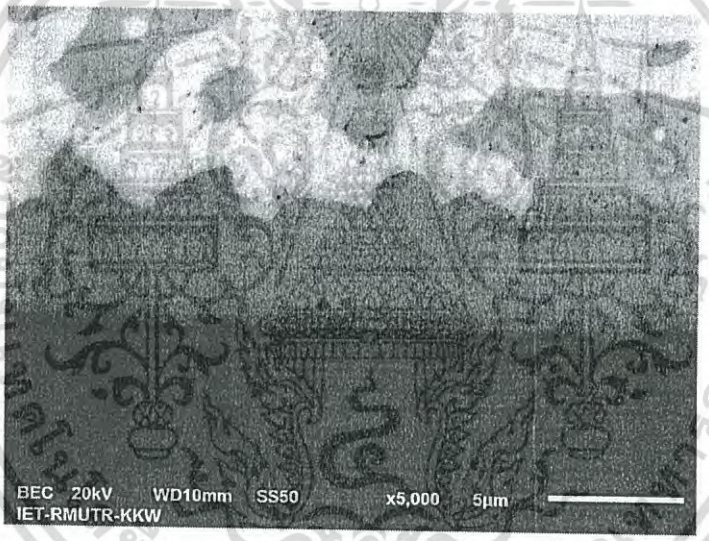


รูปที่ ช.2 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 125 °C เป็นเวลา 100 ชั่วโมง ชิ้นที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

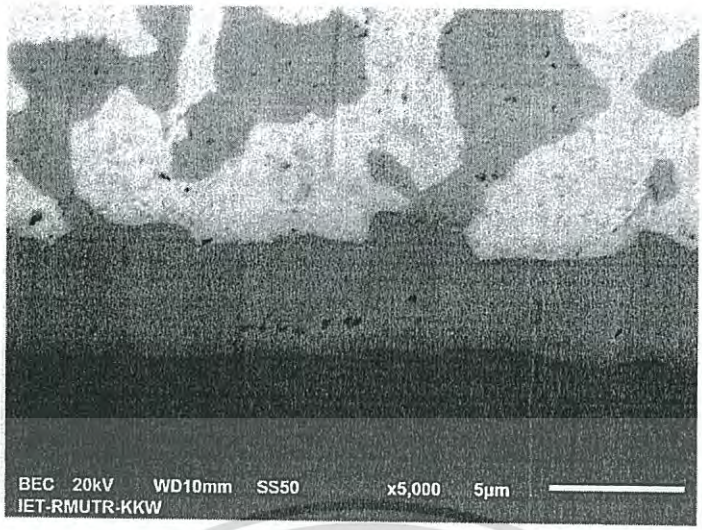


รูปที่ ช.3 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 125 °C เป็นเวลา 100 ชั่วโมง ชิ้นที่ 3



รูปที่ ช.4 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 125 °C เป็นเวลา 100 ชั่วโมง ชิ้นที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ช.5 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-58Bi หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 125 °C เป็นเวลา 100 ชั่วโมง ชิ้นที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ซ.

Energy-dispersive X-ray spectroscopy calibration

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Energy Installation

8/4/2015 9:50:03 AM

System supplied by:
Oxford Instruments NanoAnalysis
Halifax Road
High Wycombe
HP12 3SE
UK
Telephone: +44 (0)1494 442255
Customer Support: +44 (0)1494 479222
Fax: +44 (0)1494 461033
Email: NA.IDR@oxinst.com
http://www.oxford-instruments.com

System received by:
Rajamangala University of Technology Rattanakosin
Industrial Engineering Technology Department
Wang Klai Kangwon Campus Hua-Hin
Hua-Hin
Prachuapkirikhan
77110
Thailand
Telephone: +66 32 618500
Fax: +66 32 618500
niwat.moo@rmutr.ac.th

System installed by:
Adirek Lakornkaew, BECThai

System installed:
Tuesday 4 August 2015

Installation Details:
Sales Order Number: 71002
Hardware: mics, x-stream
Detector Model: 1018
Detector Serial Number: 71002-X020
Info file: X-Max 6
Imaging Device Inputs: SE, BSE
Suite Revision: 5.05
Software: Standardize
Microscope: JEOL JSM-6510LV 2 SEM
Microscope column / stage control: (MPO450) JEOL 5000 series 6510; Revision 2.313, C:\Program Files (x86)\INCA\MPO\JEOL5000.dll, File Version 2.3.0.13
Customer training has not been completed.

Detector Test Results
Process Time used for tests: 5
Specified resolution at Mn Ka: 127 eV
Measured resolution at Mn Ka: 124 eV (passed)
Ni L:K ratio: 1.05
Measured resolution at C Ka: 51 eV
Measured resolution at F Ka: 60 eV
Resolution of this detector has been tested in line with ISO15632 :2002

Customer comments:

For the Engineer:
I certify that I have fully completed this installation. (Adirek Lakornkaew, BECThai)

For the Customer:
I am satisfied with the installation. (Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Industrial Engineering Technology Departmen t)

OXFORD INSTRUMENTS

รูปที่ ซ.1 ผลการ calibrate ของอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจสอบปริมาณธาตุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นายปรัชญ์ เจียรสถาวงศ์
วัน เดือน ปีเกิด	6 เมษายน 2535
ที่อยู่	633/2 ซอยพหลโยธิน 35 แยก 17 แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900
ประวัติการศึกษา	2557 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานทางวิชาการ	ปรัชญ์ เจียรสถาวงศ์ กัลยา ผ่าโผน กำธร สุขพิมาย กรรณชัย กัลยาศิริ. 2558 "ผลกระทบของ Ni, Ag และ In ต่อปฏิกิริยาผิวสัมผัสระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-Bi กับแผ่นทองแดง" การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี พ.ศ. 2558 มหาวิทยาลัยศิลปากร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้