

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รายงานการวิจัย

การพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn

Development of Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn Lead-Free Solder Alloy



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 116899
วัน,เดือน,ปี 16 ส.ค. 2554

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดินประจำปีงบประมาณ 2552

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

b. 12/26/54
i.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) สำหรับเงินทุนสนับสนุนโครงการวิจัยนี้ (เงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2552)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn
(ภาษาอังกฤษ) Development of Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn Lead-Free Solder Alloy

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก เงินงบประมาณแผ่นดินประจำปีงบประมาณ 2552

ประจำปี 2552 จำนวนเงิน 239,080 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2551 ถึง 30 กันยายน 2552

หน่วยงานและผู้ดำเนินการวิจัยพร้อมหน่วยงานที่สังกัดและเลขหมายโทรศัพท์

ชื่อ-สกุล (ภาษาไทย) กระณชัย กัลยาศิริ

ชื่อ-สกุล (ภาษาอังกฤษ) Kannachai Kanlayasiri

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

โทรศัพท์ 02 739 0653

โทรสาร 02 739 2392

บทคัดย่อ

เนื่องจากการออกข้อบังคับ RoHS ของสหภาพยุโรป ทำให้อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ต้องเปลี่ยนโลหะบัดกรีจากแบบที่มีตะกั่วผสมมาใช้โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว ซึ่งโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง คือ โลหะบัดกรีในกลุ่ม Sn-Ag-Cu โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Sn-3.0Ag-0.5Cu เนื่องจากมีคุณสมบัติหลายประการที่เหมาะสมกับการใช้งานทางอิเล็กทรอนิกส์ อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะบัดกรีแบบเดิม (Sn-Pb Eutectic solder) พบว่า Sn-3.0Ag-0.5Cu มีข้อดีอยู่สองประการใหญ่ๆด้วยกัน คือ ประการแรก Sn-3.0Ag-0.5Cu มีจุดหลอมเหลวที่สูงกว่าโลหะบัดกรีแบบเดิม จึงต้องใช้อุณหภูมิในการบัดกรีที่สูงขึ้นกว่าเดิม ทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และแผ่นวงจรมีโอกาสเกิดความเสียหายได้มากขึ้น ประการที่สอง Sn-3.0Ag-0.5Cu มีเงินผสมอยู่ในปริมาณที่ค่อนข้างมาก ทำให้โลหะบัดกรีชนิดนี้มีราคาค่อนข้างสูง ในโครงการวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการวิจัยเบื้องต้นร่วมกับ บริษัทอัลตราคอร์ จำกัด ซึ่งเป็นบริษัทผลิตโลหะบัดกรีของคนไทย ในการทดลองใช้อินเดียมเพื่อลดจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท และเป็นโลหะบัดกรีในกลุ่ม Sn-Ag-Cu ที่มีราคาค่อนข้างต่ำ เนื่องจากมีเงินผสมอยู่ในปริมาณน้อย ในโครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอินเดียมที่มีต่อจุดหลอมเหลว คุณสมบัติทางกล และ โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu รวมทั้งทำการศึกษาอิทธิพลของการบ่มด้วยความร้อนที่มีต่อคุณสมบัติทางกล และ โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn ด้วย

ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้ สามารถสรุปได้ว่า อินเดียมมีอิทธิพลเป็นอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติและ โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu โดยทำให้

อุณหภูมิโซลิตัสและอุณหภูมิลิกวิดัสของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu มีค่าลดลง สำหรับ Microhardness และ Tensile strength ของโลหะบัดกรีที่มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดหลังจากเติมอินเดียมลงไป สำหรับโครงสร้างจุลภาคของ Sn-0.3Ag-0.7Cu ประกอบขึ้นมาจากโครงสร้างแบบ β -Sn เป็นส่วนใหญ่และล้อมรอบด้วยอนุภาคของสารประกอบเชิงโลหะระหว่าง Cu, Sn และ Ag เช่น Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn และ Ag_3Sn และเมื่อเติมอินเดียมลงไปจะทำให้โครงสร้างแบบ β -Sn มีขนาดเล็กลงและอนุภาคของสารประกอบเชิงโลหะเกิดการกระจายตัวที่สม่ำเสมอขึ้น ซึ่งทำให้ค่า Microhardness และ Tensile strength ของโลหะบัดกรีมีค่าเพิ่มขึ้น

สำหรับการศึกษาอิทธิพลของการบ่มด้วยความร้อนที่มีต่อคุณสมบัติทางกล และ โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn จากผลการศึกษาพบว่า โครงสร้างจุลภาคมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการบ่มด้วยความร้อน โดยขนาดเกรนโดยเฉลี่ยของโครงสร้างมีขนาดใหญ่ขึ้น และเกิดการสลายตัวของสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ตามระยะเวลาที่ทำการบ่ม และอุณหภูมิที่สูงขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งลดลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ABSTRACT

Due to the RoHS directive, electronics industry is forced to employ Pb-free solders. Pb-free solder alloys in Sn-Ag-Cu family are widely used, especially Sn-3.0Ag-0.5Cu. This is due to its various compatibilities with electronics applications. However, compared to the traditional Sn-Pb eutectic solder, Sn-3.0Ag-0.5Cu possesses two major disadvantages. Firstly, Sn-3.0Ag-0.5Cu has a higher melting temperature. As a result, electronics devices and print circuit boards are easier to be damaged by its higher soldering temperature. Moreover, the higher soldering temperature causes the industry to consume more energy for the production. Secondly, Sn-3.0Ag-0.5Cu contains a high percentage of costly Ag. Therefore, this solder alloy is also expensive. The researcher of this project has been doing a preliminary research with a Thai-owned solders-making company named Ultracore Ltd. to lower the melting point of Sn-0.3Ag-0.7Cu by adding some indium. Sn-0.3Ag-0.7Cu is a product of the company, and it is a low-cost solder alloy due to its low Ag content. In this research, influence of indium addition on melting point, mechanical properties, and microstructures of Sn-0.3Ag-0.7Cu was investigated. In addition, influence of thermal aging on mechanical properties and microstructures of Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn was studied as well.

It was found that In had a strong influence on these properties of Sn-0.3Ag-0.7Cu. Solidus and liquidus temperatures of the solder alloys were lowered as the In content was increased. However, In addition increased the melting range between solidus and liquidus temperatures. The tensile strength and microhardness of the solder alloys were increased as the amount of In increased. Basic microstructure of the alloys was β -Sn phase surrounded by intermetallic compounds of Cu, Sn, and Ag such as Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn , and Ag_3Sn . With the addition of In, the β -Sn phase and intermetallic compounds particles were smaller in size, and the intermetallic compounds were more uniformly distributed. As a result, the tensile strength and microhardness of the solder alloys were increased.

For the study on effect of thermal aging on mechanical properties and microstructure of Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn, results showed that after thermal aging, the solder alloy was softer with the increase of aging temperature and aging time due to its larger grain size, and the dissolution of intermetallic compound Cu_6Sn_5 .

สารบัญ

บทนำ	1
วิธีการดำเนินการวิจัย	6
ผลการวิจัยและวิเคราะห์	14
สรุปผลการวิจัย	52
เอกสารอ้างอิง	54



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทนำ

ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ประเทศไทยผลิตและส่งออกสินค้าอิเล็กทรอนิกส์เป็นจำนวนมากในแต่ละปี เช่น ในปี 2549 มูลค่าการส่งออกสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ของประเทศไทยมีค่าสูงถึง 1,019,724 ล้านบาท [1] และเนื่องจากปัญหาเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัยในสุขภาพของมนุษย์ สหภาพยุโรปได้ออกข้อบังคับ RoHS (The Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances) ออกมาเพื่อควบคุมการใช้งานสารมีพิษบางชนิด ทำให้ผู้ส่งออกสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ไม่สามารถส่งสินค้าที่ใช้โลหะบัดกรีที่มีตะกั่วเป็นส่วนผสมเข้าไปขายในสหภาพยุโรปได้ ส่งผลให้อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์จำเป็นต้องปรับตัวโดยนำโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-Free Solders) มาใช้งานแทนโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิมที่มีส่วนผสมของดีบุกและตะกั่วเป็นหลัก (Tin-Lead Solders) โดยสหภาพยุโรปได้ใช้ข้อบังคับ RoHSs ตั้งแต่ วันที่ 1 กรกฎาคม ค.ศ. 2006 ในช่วงเวลาที่ผ่านมามีการพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วขึ้นมาหลายกลุ่มเพื่อทดแทนโลหะบัดกรีที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ เช่น กลุ่ม Sn-Ag-Cu กลุ่ม Sn-Zn กลุ่ม Sn-Cu และกลุ่ม Sn-Ag เป็นต้น ซึ่งโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์มากที่สุดในปัจจุบัน คือ โลหะบัดกรีในกลุ่ม Sn-Ag-Cu เนื่องจากมีคุณสมบัติต่างๆเหมาะสมกับงานอิเล็กทรอนิกส์มากกว่าโลหะบัดกรีกลุ่มอื่น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Sn-3.0Ag-0.5Cu เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีในการนำไฟฟ้า ความแข็งแรง และความสวยงามของจุดบัดกรี [2] แต่ Sn-3.0Ag-0.5Cu มีคุณสมบัติด้อยกว่าโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิม (Sn-Pb Eutectic Solder) ในเรื่องจุดหลอมเหลวที่สูงกว่า โดย Sn-3.0Ag-0.5Cu จะมีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 217-221°C ในขณะที่ Sn-Pb Eutectic Solder มีจุดหลอมเหลวเพียง 183°C [2] ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตชิ้นงานอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการบัดกรีที่สูงขึ้นนั้นทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และแผ่นวงจรมีโอกาสเสียหายได้ง่ายขึ้น และทำให้อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ต้องใช้พลังงานในการผลิตมากขึ้นด้วย นอกจากนี้ Sn-3.0Ag-0.5Cu มีเงิน (Ag) เป็นองค์ประกอบในปริมาณที่ค่อนข้างสูง ทำให้ราคาของโลหะบัดกรีชนิดนี้สูงตามไปด้วย

การลดจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีอาจทำได้โดยการเติมธาตุบางชนิดลงไป เช่น บิสมัท (Bi) แกลเลียม (Ga) หรือ อินเดียม (In) แต่ก็ทำให้คุณสมบัติอื่นๆ เช่น คุณสมบัติทางกลของโลหะบัดกรีเปลี่ยนแปลงไปเช่นกัน [3-12] สำหรับปัญหาเรื่องราคานี้ผู้ผลิตโลหะบัดกรีหลายรายพยายามลดปริมาณของเงินในโลหะบัดกรีลงเพื่อลดต้นทุนในการผลิต เช่น โลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu ของบริษัทอัลตราคอร์ จำกัด (www.ultracore.co.th) อย่างไรก็ตามโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu นี้ก็มีปัญหา

ในเรื่องจุดหลอมเหลวที่สูงเช่นเดียวกับโลหะบัดกรีตัวอื่นๆในกลุ่ม Sn-Ag-Cu โดยมีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 217-227°C

ส่วนหนึ่งของงานวิจัยที่ขอรับทุนนี้มีความเกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่ผู้สมัครขอรับทุนกำลังดำเนินการศึกษาอยู่กับภาคอุตสาหกรรม โดยที่ผู้สมัครขอรับทุนกำลังร่วมทำการวิจัยเบื้องต้นกับบริษัทอัลตราคอร์ จำกัด ซึ่งเป็นผู้ผลิตโลหะบัดกรีของคนไทย ในการใช้อินเดียมเพื่อลดจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัทฯ โดยได้ทำการวิจัยที่ปริมาณของอินเดียมต่ำๆเพื่อไม่ให้โลหะบัดกรีที่ได้มีราคาสูงเกินไป และถ้าพิจารณาในแง่ของราคาพบว่าการเติมอินเดียมลงไปทำได้สูงสุดประมาณ 3% โดยน้ำหนักเท่านั้นราคาของโลหะบัดกรีชนิดใหม่นี้จึงจะอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ คือ ไม่สูงกว่าราคาของ Sn-3.0Ag-0.5Cu ซึ่งเป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบัน

สำหรับในงานวิจัยนี้จะทำการพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิดใหม่ Sn-0.3Ag-0.7Cu-X In จากโลหะบัดกรีพื้นฐาน Sn-0.3Ag-0.7Cu รวมทั้งทำการศึกษาอิทธิพลของอินเดียมที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของจุดหลอมเหลว คุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu นอกจากนี้เนื่องจากคุณสมบัติของโลหะบัดกรีสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามอุณหภูมิและเวลา ดังนั้นในงานวิจัยนี้ยังจะศึกษาถึงอิทธิพลของการบ่ม (Thermal aging) คือ อุณหภูมิและเวลาที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu หลังจากเติมอินเดียมลงไป ผลจากงานวิจัยนี้นอกจากจะเป็นแนวทางในการพัฒนาโลหะบัดกรีชนิดใหม่สำหรับภาคอุตสาหกรรมแล้ว ยังสร้างองค์ความรู้พื้นฐานทางด้านโลหะบัดกรีอีกด้วย

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิดใหม่ Sn-0.3Ag-0.7Cu-X In จากโลหะบัดกรีพื้นฐาน Sn-0.3Ag-0.7Cu
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของอินเดียมที่มีต่อจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu
3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของอินเดียมที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu
4. เพื่อศึกษาอิทธิพลของการบ่มที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu หลังจากเติมอินเดียมลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขอบเขตของโครงการวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาอิทธิพลของอินเดียมที่มีต่อโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu เท่านั้นเนื่องจากเป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัทอัลตราคอร์ จำกัด ที่ผู้ขอรับทุนกำลังร่วมทำงานวิจัยอยู่ โดยจะทำการศึกษาที่ความเข้มข้นของอินเดียมไม่เกิน 3% โดยน้ำหนักเท่านั้นเนื่องจากเหตุผลทางด้านราคาของโลหะบัดกรีดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

การลดจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีสามารถทำได้โดยการเติมธาตุบางชนิดลงไป โดยที่ธาตุที่สามารถใช้เติมลงไปเพื่อลดจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วจะต้องไม่เป็นธาตุต้องห้ามตามข้อบังคับ RoHS และเป็นธาตุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เพื่อที่จะทำให้เกิดสารประกอบกับธาตุอื่นๆกลายเป็นสารประกอบยูเทคติก (Eutectic alloy) ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ อย่างไรก็ตามการเติมธาตุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำลงไปจะมีข้อจำกัด คือ จะต้องไม่ทำให้โลหะบัดกรีชนิดใหม่ที่ได้มีราคาสูงเกินไป

โดยทั่วไปแล้วการใช้เฟสไดอะแกรม (Phase diagrams) สามารถบอกจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีได้สะดวกถ้าโลหะบัดกรีนั้นมีจำนวนธาตุที่เป็นองค์ประกอบไม่เกิน 3 ธาตุ แต่ถ้าโลหะบัดกรีนั้นมีองค์ประกอบมากกว่า 3 ธาตุ เช่น โลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-X In ในโครงการวิจัยนี้ ข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวกับจุดหลอมเหลว และส่วนผสมจะหาได้ยาก ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการทดลองจึงมีความสำคัญมากในการที่จะพัฒนาโลหะบัดกรีชนิดใหม่ที่มีจำนวนธาตุที่เป็นองค์ประกอบมากกว่า 3 ธาตุ

การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ผลงานวิจัยที่ปรากฏมาก่อนได้แสดงให้เห็นว่าการเติมธาตุบางชนิดลงไปในโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วสามารถลดจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีลงได้แต่จะทำให้คุณสมบัติอื่นๆ เช่น คุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาค เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย [3-12] ธาตุที่สามารถใช้เติมลงไปเพื่อลดจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วจะต้องไม่เป็นธาตุต้องห้ามตามข้อบังคับ RoHS และเป็นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เช่น บิสมัท (Bi) แกลเลียม (Ga) และ อินเดียม (In) [2, 10, 13] ตัวอย่างผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น การเติม Bi ลงไป 1-3% โดยน้ำหนักในโลหะบัดกรี Sn-3.0Ag-0.5Cu ทำให้อุณหภูมิ Solidus ของโลหะบัดกรีลดลงโดยที่อุณหภูมิ Liquidus ยังมีค่าเท่าเดิม โดยที่ Tensile strength และ Microhardness มีค่าเพิ่มขึ้น และทำให้เฟส Sn-rich มีขนาดเล็กลง [7] การเติม Ga ลงไป 0.5% โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนักในโลหะบัดกรี Sn-9Zn สามารถทำให้จุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีลดลงโดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของ Tensile strength และ Elongation อย่างมีนัยยะสำคัญ และเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น [5,6] สำหรับกรณีของ In การเติม In ลงไป 3% โดยน้ำหนักในโลหะบัดกรี Sn-8.6Zn สามารถทำให้จุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีลดลงแต่ส่งผลให้ช่วงของการหลอมเหลวกว้างขึ้น และทำให้โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไม่สม่ำเสมอ [3] นอกจากนี้จากผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องยังพบว่าอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการบ่ม (Aging) มีอิทธิพลเป็นอย่างมากต่อคุณสมบัติต่างๆของโลหะบัดกรี [12, 14-16] เช่น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกลของโลหะบัดกรี

อย่างไรก็ตามได้มีการค้นพบว่า การเติมบิสมีทลงไปทำให้มีปัญหาเกี่ยวกับการนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) ของโลหะบัดกรีซึ่งจะขัดกับข้อบังคับ WEEE (The Waste Electrical and Electronic Equipment Directive) ของสหภาพยุโรปที่มีวัตถุประสงค์ในการป้องกันการเพิ่มปริมาณของซากผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ [13, 17] ส่วนเกลือเป็นธาตุที่มีราคาสูงมากโดยมีราคาประมาณ 850 US\$/kg ดังนั้นเมื่อนำมาใช้ก็จะทำให้ต้นทุนในการผลิตโลหะบัดกรีสูงขึ้นมากตามไปด้วย สำหรับอินเดียมเป็นธาตุที่มีราคาสูงเช่นกันแต่ยังต่ำกว่าเกลือ คือ มีราคาประมาณ 700 US\$/kg และอินเดียมไม่ก่อให้เกิดปัญหาการนำโลหะบัดกรีกลับมาใช้ใหม่จึงเป็นธาตุที่มีแนวโน้มที่ดีที่จะนำมาใช้เพื่อลดจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว [9, 13, 17]

จากผลงานการวิจัยที่เกี่ยวข้องหลายผลงานได้แสดงให้เห็นว่าการเติมธาตุบางชนิดลงไปโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วสามารถลดจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีลงได้ และทำให้คุณสมบัติต่างๆของโลหะบัดกรีเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย อย่างไรก็ตามยังไม่ปรากฏผลงานการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu หรือการเติมอินเดียมลงไปโลหะบัดกรีชนิดนี้ ดังนั้นการศึกษาอิทธิพลของอินเดียมที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติและโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu ในงานวิจัยนี้จะสามารถสร้างองค์ความรู้พื้นฐานทางด้านโลหะบัดกรีและใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วในเชิงพาณิชย์ต่อไป

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลการวิจัยที่ได้คาดว่าจะสามารถตีพิมพ์เผยแพร่ได้ทั้งในระดับการประชุมทางวิชาการ และระดับวารสารทางวิชาการต่างประเทศ นอกจากนี้ผลการวิจัยที่ได้อาจจะสามารถนำไปจดสิทธิบัตรได้ รวมทั้งผลการวิจัยที่ได้จะเป็นองค์ความรู้พื้นฐานทางด้านโลหะบัดกรีและสามารถใช้เป็นแนวทางเบื้องต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับนักวิจัย นักวิชาการ และภาคอุตสาหกรรมที่จะทำการวิจัยและพัฒนา โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วต่อไปได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการดำเนินการวิจัย

การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ทำการเตรียมชิ้นงานเพื่อใช้ทดสอบ โดยการหล่อโลหะบัดกรีเป็นรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร และยาว 160 มิลลิเมตร เพื่อใช้ในการทดสอบ ซึ่งโลหะบัดกรีแต่ละชนิดจะทำการหล่อในเบ้าหลอมที่เป็นกราฟไฟต์ และทำการวิเคราะห์ส่วนผสมโดยใช้เครื่อง Spark-OES (Optical Emission Spectroscopy) รุ่น Spectrolab M-8 โดยทำการปรับเปลี่ยนส่วนผสมที่แตกต่างกันออก ทั้งนี้ ปริมาณ In ที่เติมลงไปเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะบัดกรีนั้นอ้างอิงมาจากการคำนวณเปรียบเทียบราคาระหว่างโลหะบัดกรีชนิด Sn-3.0Ag-0.5Cu ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในท้องตลาดกับโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn โดยให้มีราคาใกล้เคียงกันมากที่สุดเพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิต ซึ่งจากการคำนวณในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบราคาระหว่างโลหะบัดกรีชนิด Sn-3.0Ag-0.5Cu และ โลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn

Solder Alloys	Composition (%)					Cost (Bath/Kilogram)
	Sn	Pb	Ag	Cu	In	
1. 63Sn-37Pb	63.0%	37.0%	0.0%	0.0%	0.0%	97.52
2. Sn-0.3Ag-0.7Cu	99.0%	0.0%	0.3%	0.7%	0.0%	183.49
3. Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In	98.7%	0.0%	0.3%	0.7%	0.3%	252.37
4. Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In	98.0%	0.0%	0.3%	0.7%	1.0%	413.09
5. Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In	97.5%	0.0%	0.3%	0.7%	1.5%	527.89
6. Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In	97.0%	0.0%	0.3%	0.7%	2.0%	642.69
7. Sn-3.0Ag-0.5Cu	96.5%	0.0%	3.0%	0.5%	0.0%	573.31

ซึ่งพบว่าปริมาณ In ที่เติมลงไปแล้วส่งผลให้โลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn มีราคาเทียบเท่ากับโลหะบัดกรีชนิด Sn-3.0Ag-0.5Cu จะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 1.7 wt% In ดังนั้นจึงทำการศึกษาอิทธิพลของ In โดยทำการปรับเปลี่ยนส่วนผสม In ให้อยู่ในช่วง 0 – 3.0 wt%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 ส่วนผสมของตัวอย่างที่ใช้ทำการทดลอง

Solder Alloys	Composition(wt%)				
	Sn	Pb	Ag	Cu	In
Sn-3.0Ag-0.5Cu	96.5	0.0	3.0	0.5	0.0
63Sn-37Pb	63.0	37.0	0.0	0.0	0.0
Sn-0.3Ag-0.7Cu	99.0	0.0	0.3	0.7	0.0
Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In	98.5	0.0	0.3	0.7	0.5
Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In	98.0	0.0	0.3	0.7	1.0
Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In	97.5	0.0	0.3	0.7	1.5
Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In	97.0	0.0	0.3	0.7	2.0
Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In	96.5	0.0	0.3	0.7	2.5
Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In	96.0	0.0	0.3	0.7	3.0



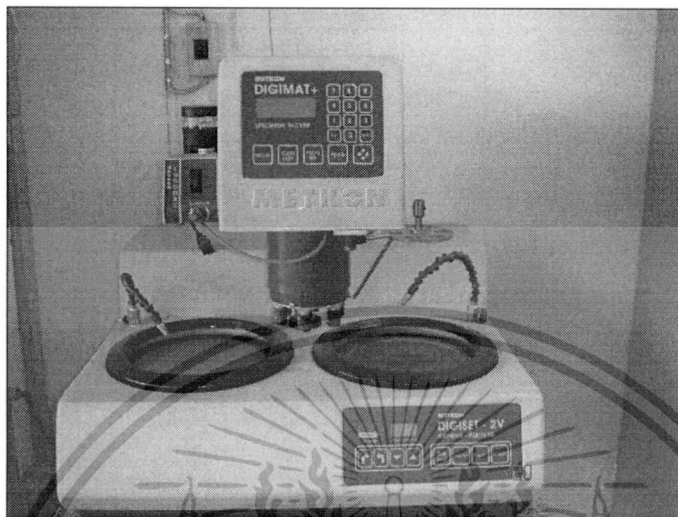
รูปที่ 1 ตัวอย่างชิ้นงานที่ได้หลังจากการหล่อ

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเบื้องต้นโดยใช้ Optical Microscope

ในเบื้องต้นต้องทำการทดสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน เพื่อตรวจสอบเกี่ยวกับลักษณะโครงสร้าง การกระจายตัว รวมถึงลักษณะและขนาดของเกรน เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคเหล่านั้นส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติทางกลของโลหะผสม ทำการทดสอบโดยการตัดชิ้นงานให้มีความสูงประมาณ 15 มิลลิเมตร แล้วนำชิ้นงานไปขัดด้วยกระดาษทรายที่ความละเอียดตั้งแต่เบอร์ 800, 1000, 1200, 1500 และ 2000 ตามลำดับ หลังจากนั้นจึงทำการขัดโดยใช้ผงอะลูมิเนียมออกไซด์ขนาด 0.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมครอน โดยใช้เครื่องขัด ยี่ห้อ METKON รุ่น DIGIMAT แล้วจึงทำการกัดผิวหน้าชิ้นงาน (Etching) โดยใช้กรด FeCl_3 5 %Vol ผสมกับน้ำ เป็นเวลานาน 3-5 วินาที แล้วจึงนำไปตรวจสอบโครงสร้างด้วย Optical Microscope ยี่ห้อ Zeiss รุ่น Axiolab ซึ่งมีกำลังขยายสูงสุดอยู่ที่ 500 เท่า



รูปที่ 2 เครื่องขัดกระดาษทราย



รูปที่ 3 Optical Microscope

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบโดยใช้ SEM และ EDS

ทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ขนาดของเกรนและชั้นของสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic Compound) โดยใช้ Scanning Electron Microscope (SEM) ซึ่งเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์โครงสร้างที่มีความละเอียดสูง ใช้ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของวัสดุ โดยอาศัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกวาดของลำอิเล็กตรอน ไปบนผิววัสดุแทนการใช้แสงธรรมดา ซึ่งจะทำให้มีกำลังขยายสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ธรรมดา โดยสามารถขยายภาพได้มากกว่า 1,000 เท่า จนถึงระดับ 100,000 เท่าขึ้นไป และใช้วิธีทดสอบ Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) สำหรับช่วยวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบของวัสดุทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ

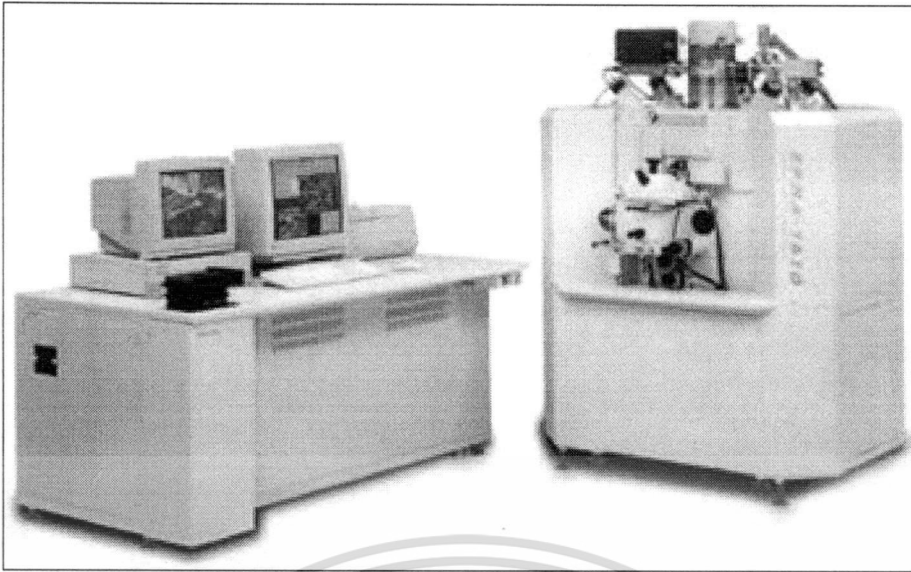


รูปที่ 4 Scanning Electron Microscope (SEM)

การตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุโดยใช้ EPMA

ทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของแต่ละธาตุโดยใช้ Electron Probe Micro Analyzer (EPMA) รุ่น EPMA 1610 ของบริษัท SHIMADZU ซึ่งเป็นเครื่องที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่มีความแม่นยำสูง มีหลายช่องการวัดให้เลือกตั้งแต่ 2 ช่อง 3 ช่อง 4 ช่อง และ 5 ช่อง การวัดสามารถทำได้ทั้งเชิงคุณภาพ เชิงปริมาณ ได้ถึงระดับ PPM เครื่อง EPMA นี้ เปรียบเหมือนการรวมเครื่อง X-Ray กับเครื่อง Electron Microscope เข้าด้วยกัน สามารถตรวจวิเคราะห์พื้นผิวโดยสามารถทำการขยายภาพได้ถึง 50 - 400,000 เท่า การได้มาซึ่งข้อมูลหรือผลการวิเคราะห์อาศัยหลักการของ Secondary Electrons, Back Scattered Electrons, Electrons Absorption, Electrons Transmission, X- Rays, UV-Ray, Visible light Rays และ Infrared Rays สามารถหาปริมาณธาตุได้ทั้งเชิงคุณภาพ เชิงปริมาณ Line analysis, State analysis และยังสามารถทำ Mapping analysis ได้ด้วย โดยในการทดสอบจะใช้ความต่างศักย์ที่ 15 kV ขนาด Beam size 1 ไมครอนและ กำลังขยาย 500 เท่า

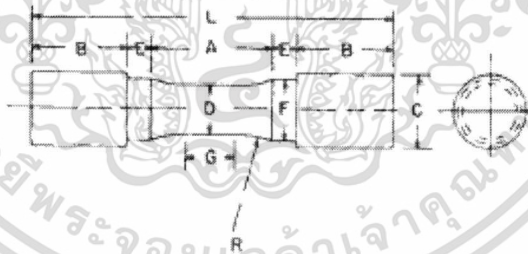
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5 Electron Probe Micro analyzer (EPMA)

การทดสอบการทนต่อแรงดึง (Tensile Test)

ในการศึกษานี้ได้ทำการทดสอบการทนต่อแรงดึงของโลหะบัดกรีโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E8M ซึ่งเป็นมาตรฐานในการทดสอบค่า Tensile strength ของวัสดุประเภทโลหะ และโลหะผสม โดยชิ้นงานทดสอบนำมาทำการกลึงด้วยเครื่องกลึง CNC ยี่ห้อ DOOSAN จากประเทศเกาหลี เพื่อให้มีรูปร่างตามมาตรฐานดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 มาตรฐานชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบการทนต่อแรงดึง

โดยชิ้นงานที่ใช้ทดสอบมีขนาด Diameter: $D = 12.5 \text{ mm.}$, Radius of fillet (R) = 25 mm. Length of reduced section (A) = 32 mm. , Overall length (L) = 95 mm. , Length of end section (B) = 25 mm. , Diameter of end section (C) = 20 mm. , Length of shoulder (E) = 6 mm. , Diameter of shoulder (F) = 16 mm. ซึ่งทำการทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine ของบริษัท Testometric จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเทศอังกฤษ รุ่น AX-100kN ซึ่งเครื่องทดสอบวัสดุนี้สามารถสร้างแรงกดได้สูงสุด 10 ตัน หรือ 1000 กิโลกรัม และสามารถควบคุมการทำงานต่าง ๆ รวมถึงกระบวนการประมวลผลด้วยระบบคอมพิวเตอร์ โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง และทำการทดสอบชนิดละ 3 ชิ้นเพื่อหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 7 เครื่องกลึง CNC



รูปที่ 8 เครื่องทดสอบการทนต่อแรงดึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

ในการศึกษานี้ได้ทำการทดสอบความแข็งของชิ้นงานโดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Vickers Micro Hardness ยี่ห้อ Mitutoyo ซึ่งเป็นการวัดความแข็งโดยใช้หัวกดเพชรที่มีลักษณะรูปทรงเป็นปิรามิดฐานสี่เหลี่ยม ที่ปลายหัวกดทำมุม 136 องศา (เป็นมุมที่มีองศาใกล้เคียงกับหัวกดลักษณะกลมมากที่สุด) กดลงบนชิ้นงานเป็นเวลา 10-15 วินาที และรอยกดจะมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว โดยใช้แรงกดที่ 20 kgf สามารถวัดค่าความแข็งได้ตั้งแต่โลหะที่นิ่มมาก (HV ประมาณ 5) จนถึงโลหะที่แข็งมากๆ (VHN ประมาณ 1500) โดยไม่ต้องเปลี่ยนหัวกด จะเปลี่ยนก็เฉพาะแรงกดเท่านั้น โดยขึ้นอยู่กับความแข็งของโลหะที่ทดสอบ



รูปที่ 9 เครื่องทดสอบความแข็ง

การทดสอบจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรี

ทำการทดสอบจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีโดยใช้ Differential scanning calorimeter (DSC) โดยใช้ตัวอย่างทดสอบที่มีน้ำหนักประมาณ 65 กรัม ทำการทดสอบในเครื่อง DSC รุ่น DSC-50 ของบริษัท SHIMADZU ซึ่งเป็นเครื่องสำหรับวัดความแตกต่างของพลังงาน หรือการไหลของความร้อน (Heat flow) ระหว่างสารทดสอบกับสารอ้างอิง ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับเวลาหรืออุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงเชิงพลังงานที่เกิดขึ้น สามารถบอกขนาด และทิศทางการเปลี่ยนแปลงความร้อนในระบบที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและ / หรือทางเคมีที่เกิดขึ้นเมื่อได้รับความร้อนหรือถูกทำให้เย็นตัวลง ซึ่งสามารถตรวจวัดพลังงานได้ทั้ง Exothermic และ Endothermic สามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิ 140°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

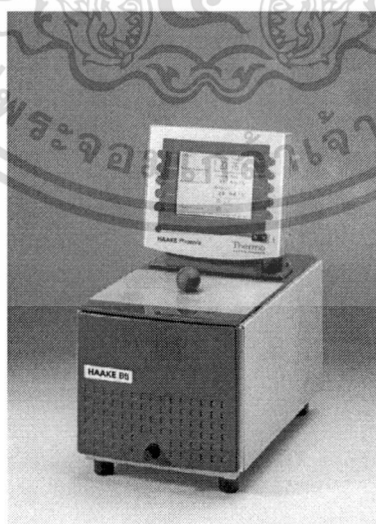
ถึง 600°C โดยทำการทดสอบที่ Heating rate $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ และ Flow rate ที่ $50\text{ ml}/\text{min}$ โดยใช้ก๊าซอาร์กอน (Argon) ฟ่นปกคลุมเพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชัน



รูปที่ 10 Differential Scanning Calorimeter (DSC)

การอบบ่มชิ้นงานด้วยความร้อน

นำชิ้นงานที่เตรียมไว้ ไปทำการบ่มด้วยความร้อน (Thermal aging) ด้วยเครื่องบ่มชิ้นงานซึ่งเป็นอ่างน้ำมันควบคุมอุณหภูมิ ยี่ห้อ Haake รุ่น P2-B5 ที่อุณหภูมิ 75 , 100 และ 125°C โดยทำการอบบ่มเป็นระยะเวลาต่างกัน คือ 1 , 10 , 100 และ $1,000$ ชั่วโมง ตามลำดับ เพื่อเป็นการจำลองสภาพการใช้งานจริงที่ระยะเวลาต่างๆ หลังจากบ่มชิ้นงานด้วยความร้อนจนครบตามเวลาที่กำหนด ทำการลดอุณหภูมิชิ้นงานลง (Quenching) ด้วยอากาศ จนถึงอุณหภูมิห้อง



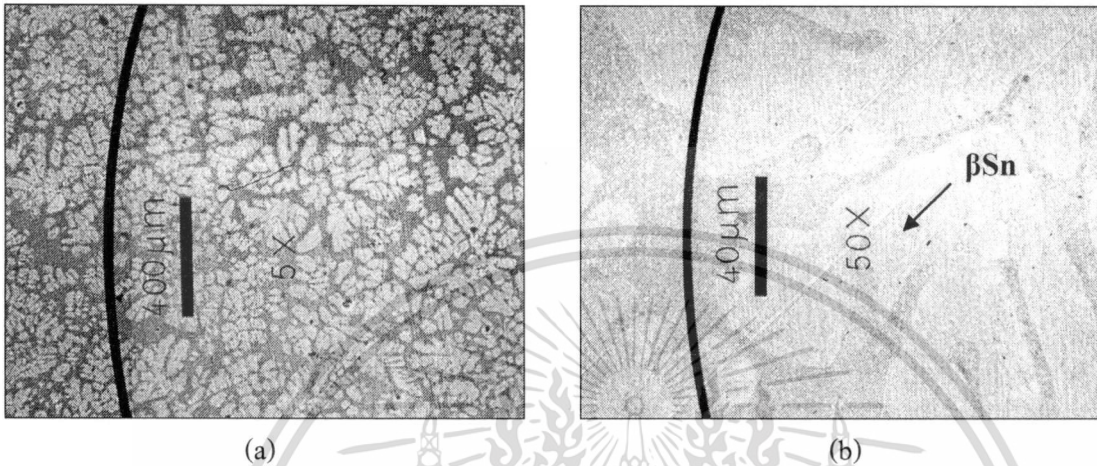
รูปที่ 11 อ่างน้ำมันควบคุมอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

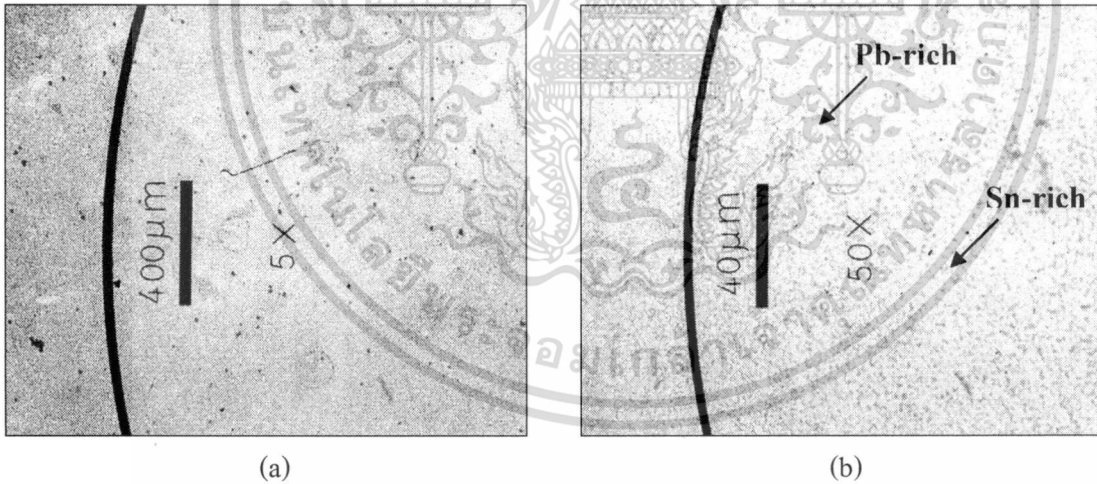
ผลการวิจัยและการวิเคราะห์

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้ Optical Microscope

จากการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีแต่ละชนิดได้ผลดังนี้คือ

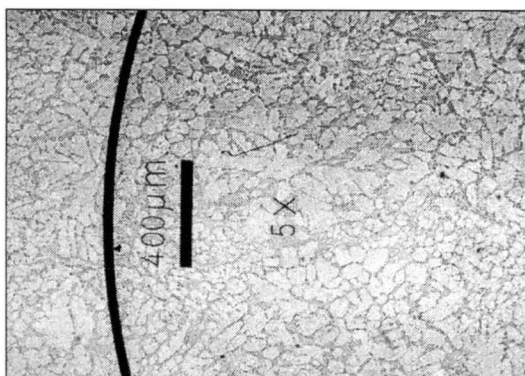


รูปที่ 1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn-3.0Ag-0.5Cu
(a) กำลังขยาย 50 เท่า (b) กำลังขยาย 500 เท่า

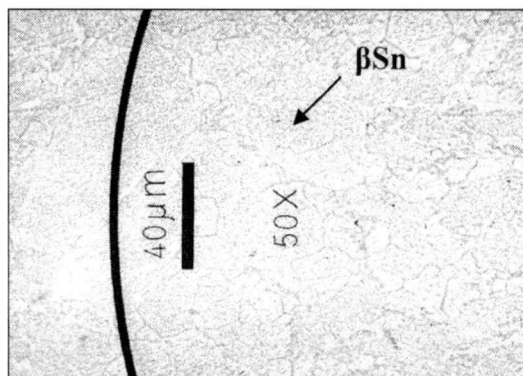


รูปที่ 2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn-Pb
(a) กำลังขยาย 50 เท่า (b) กำลังขยาย 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



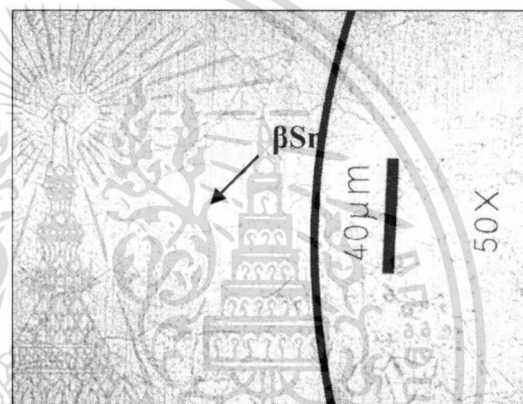
(b)

รูปที่ 3 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu

(a) กำลังขยาย 50 เท่า (b) กำลังขยาย 500 เท่า



(a)

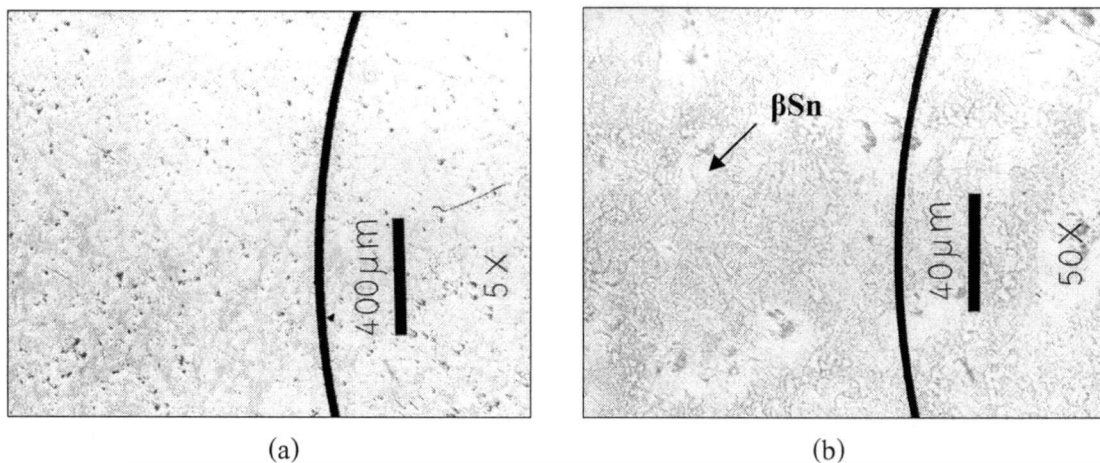


(b)

รูปที่ 4 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In

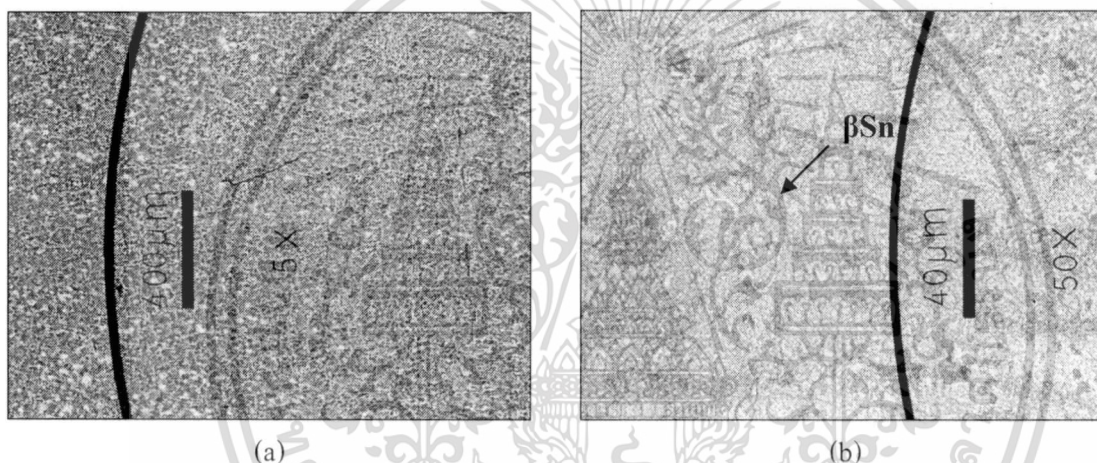
(a) กำลังขยาย 50 เท่า (b) กำลังขยาย 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In

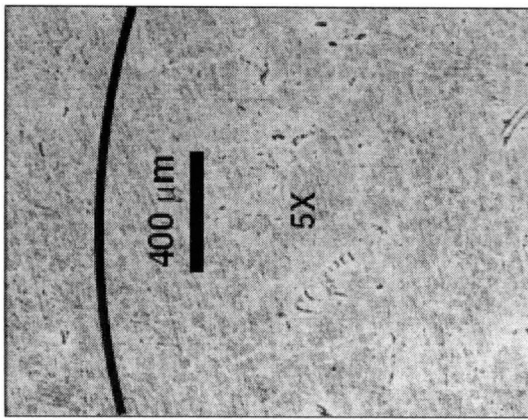
(a) กำลังขยาย 50 เท่า (b) กำลังขยาย 500 เท่า



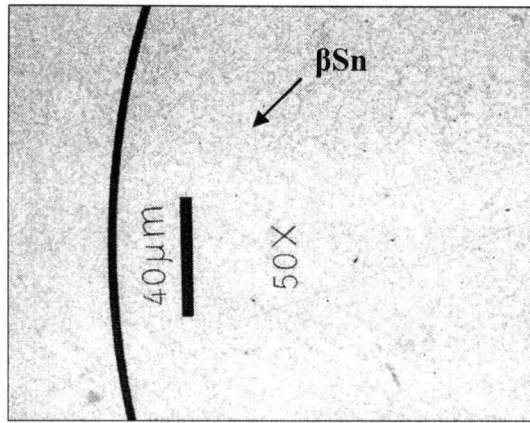
รูปที่ 6 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In

(a) กำลังขยาย 50 เท่า (b) กำลังขยาย 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



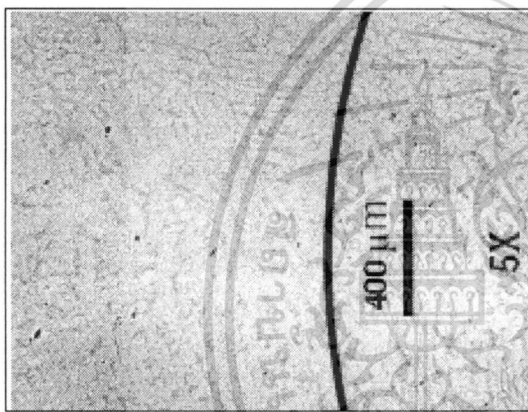
(a)



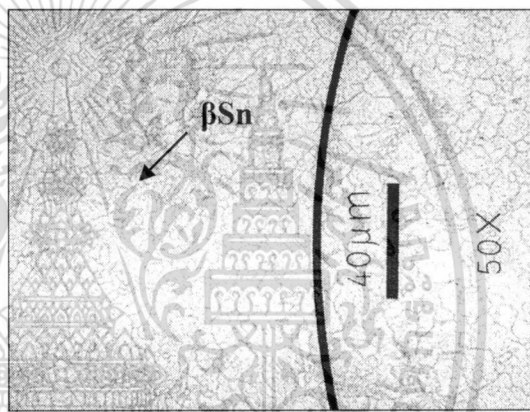
(b)

รูปที่ 7 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In

(a) กำลังขยาย 50 เท่า (b) กำลังขยาย 500 เท่า



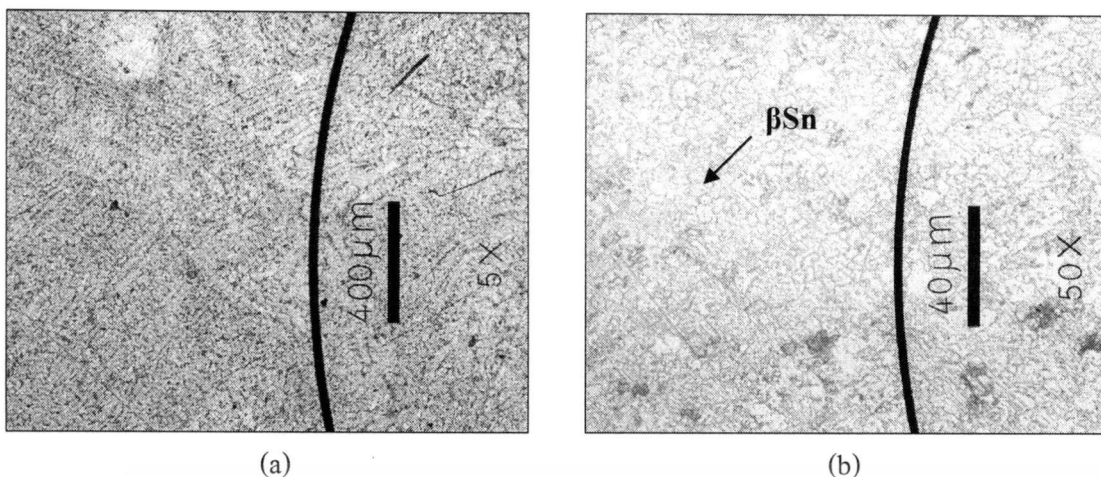
(a)



(b)

รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In

(a) กำลังขยาย 50 เท่า (b) กำลังขยาย 500 เท่า



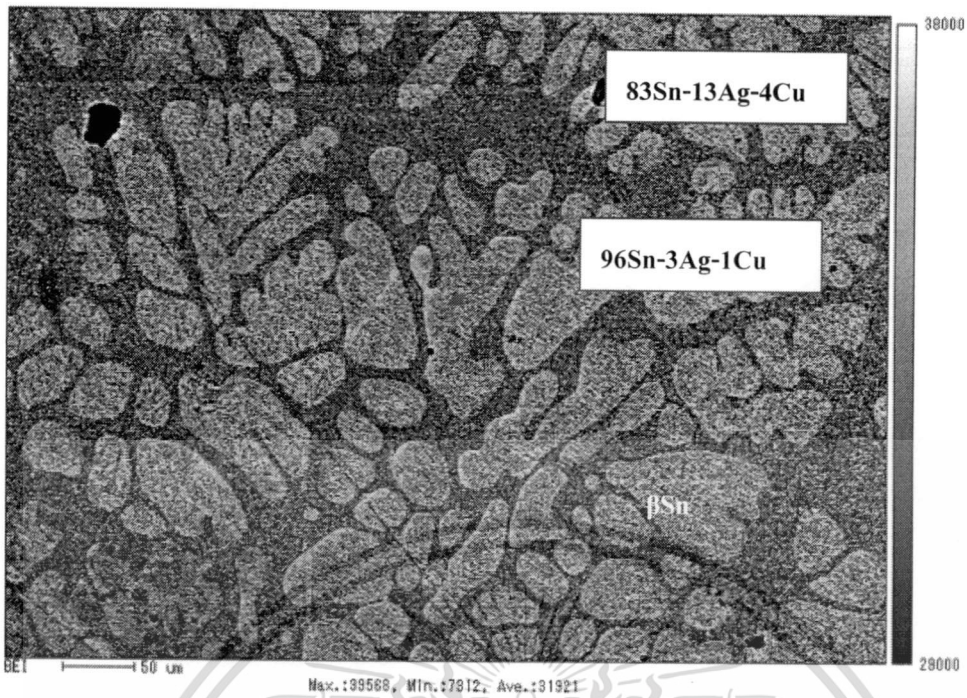
รูปที่ 9 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In
(a) กำลังขยาย 50 เท่า (b) กำลังขยาย 500 เท่า

จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีจะเห็นได้ว่า ลักษณะเกรนของโลหะบัดกรี Sn-3.0Ag-0.5Cu และ Sn-0.3Ag-0.7Cu มีลักษณะที่คล้ายกันคือมีโครงสร้างพื้นฐานเป็น β -Sn Phase โดยอ้างอิงจากเฟสไดอะแกรม (Phase Diagram) สำหรับสารประกอบซึ่งมีส่วนผสมของ Sn มากกว่า 90% ขึ้นไป ซึ่งลักษณะโครงสร้างของ β -Sn Phase จะดูสว่าง มีขนาดประมาณ 20-30 ไมครอน โดยขนาดของ β -Sn Phase ในโลหะบัดกรีชนิด Sn-3.0Ag-0.5Cu จะมีขนาดเล็กกว่าเล็กน้อย นอกจากนี้ลักษณะโครงสร้างดังกล่าวยังพบว่าแตกต่างกันอย่างชัดเจนกับโครงสร้างของโลหะบัดกรีชนิด SnPb โดยในโครงสร้างของโลหะบัดกรีชนิด SnPb จะมีลักษณะที่ประกอบไปด้วยโครงสร้างของ Sn-rich (บริเวณที่สว่าง) และ Pb-rich (บริเวณที่ทึบแสง) ดังในรูปที่ 2 และเมื่อทำการสังเกตุลักษณะโครงสร้างของโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu ที่มีการปรับปรุงคุณสมบัติโดยทำการเติมธาตุ In เข้าไปพบว่า ลักษณะโครงสร้าง β -Sn Phase จะมีขนาดเล็กลง เมื่อมีการเติม In เพิ่มมากขึ้น และจะสังเกตเห็นว่าลักษณะ β -Sn Phase ที่มีขนาดเล็กนั้น จะกระจายตัวอยู่รอบ ๆ โครงสร้าง β -Sn ที่มีขนาดใหญ่

การตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุแต่ละชนิดโดยใช้ SEM, EDS และ EPMA

จากการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีผ่านการทดสอบโดยใช้ SEM, EDS และ EPMA เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแต่ละธาตุในโลหะบัดกรี ได้ผลการทดลองดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

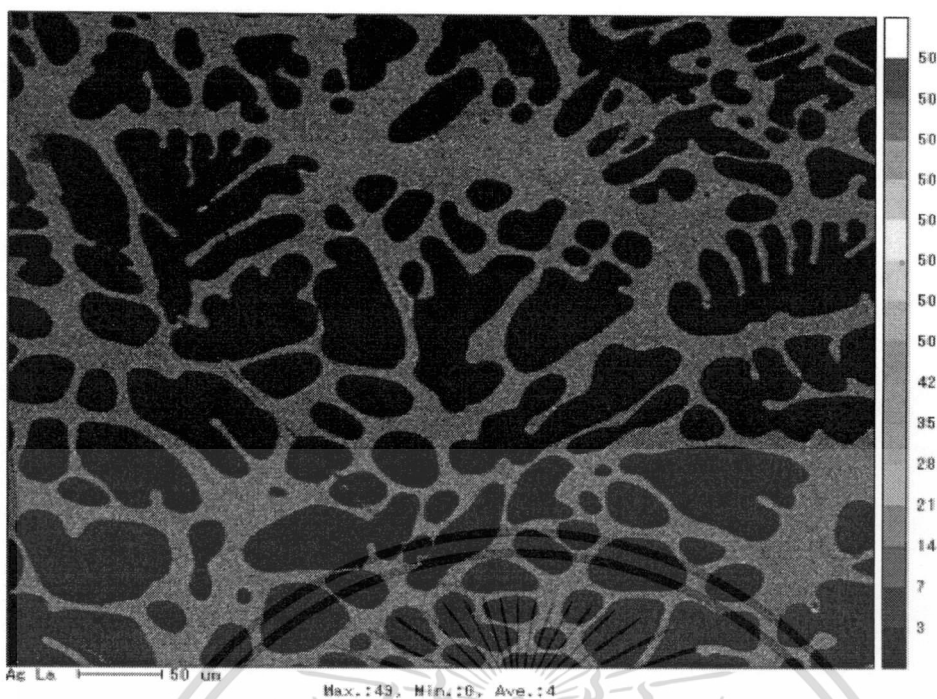


รูปที่ 10 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn-3.0Ag-0.5Cu



รูปที่ 11 การกระจายตัวของ Sn ในโลหะบัดกรีชนิด Sn-3.0Ag-0.5Cu

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 12 การกระจายตัวของ Ag ในโลหะบัดกรีชนิด Sn-3.0Ag-0.5Cu

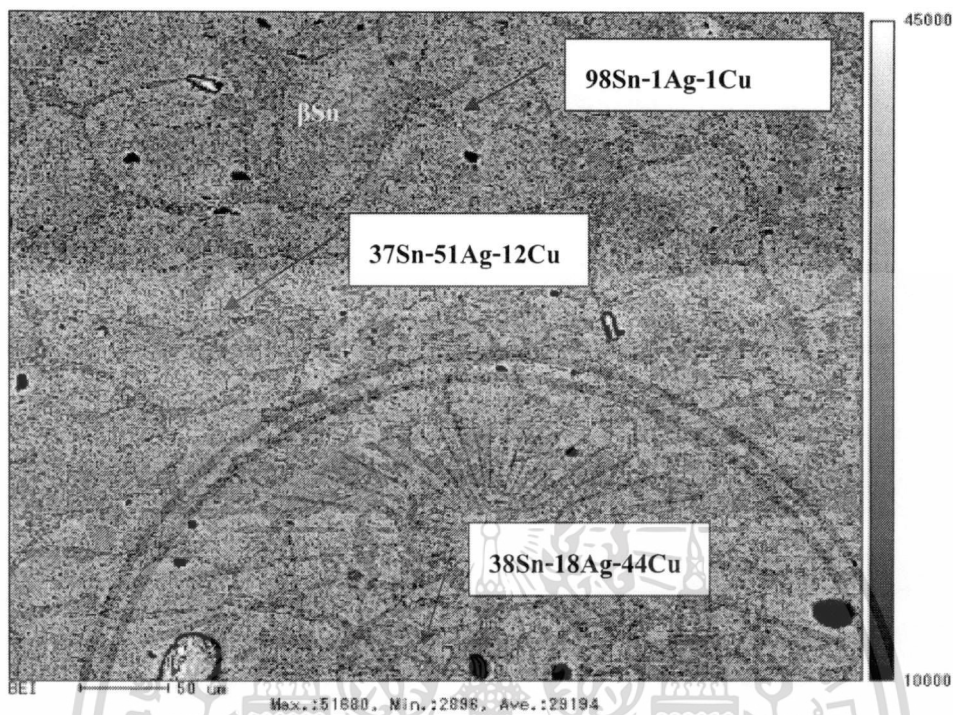


รูปที่ 13 การกระจายตัวของ Cu ในโลหะบัดกรีชนิด Sn-3.0Ag-0.5Cu

จากผลการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรีชนิด Sn-3.0Ag-0.5Cu จะพบว่าพื้นผิวหลักของชิ้นงานจะประกอบไปด้วยโครงสร้าง Dendrite ซึ่งมีส่วนผสมประมาณ 96Sn-3Ag-1Cu ซึ่งเป็นโครงสร้างของ β -

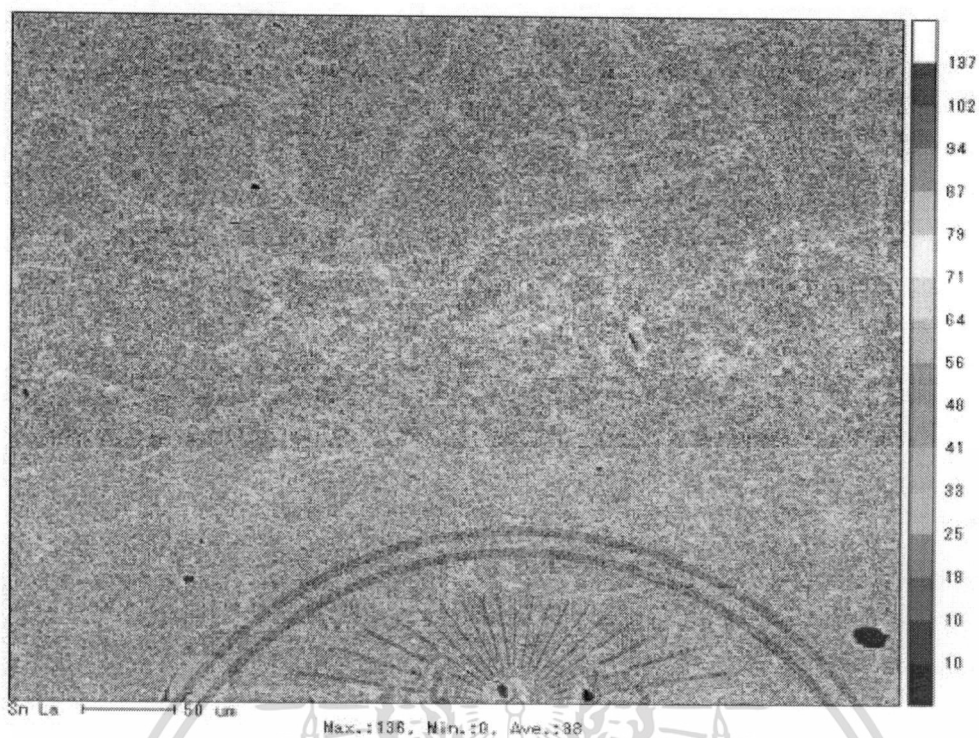
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sn Phase จะสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่ามีสีสว่างกว่า ส่วนบริเวณที่มีสีทึบเป็นโครงสร้างที่เป็นของผสมระหว่าง Cu_6Sn_5 และ Ag_3Sn ในโครงสร้าง Sn-rich

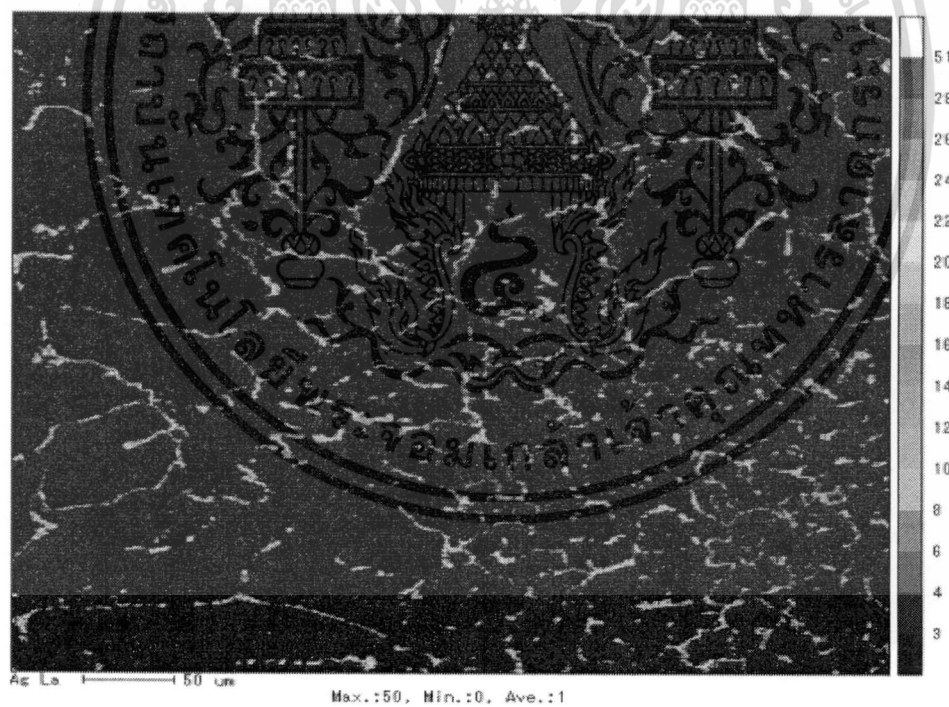


รูปที่ 14 โครงสร้างทางจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

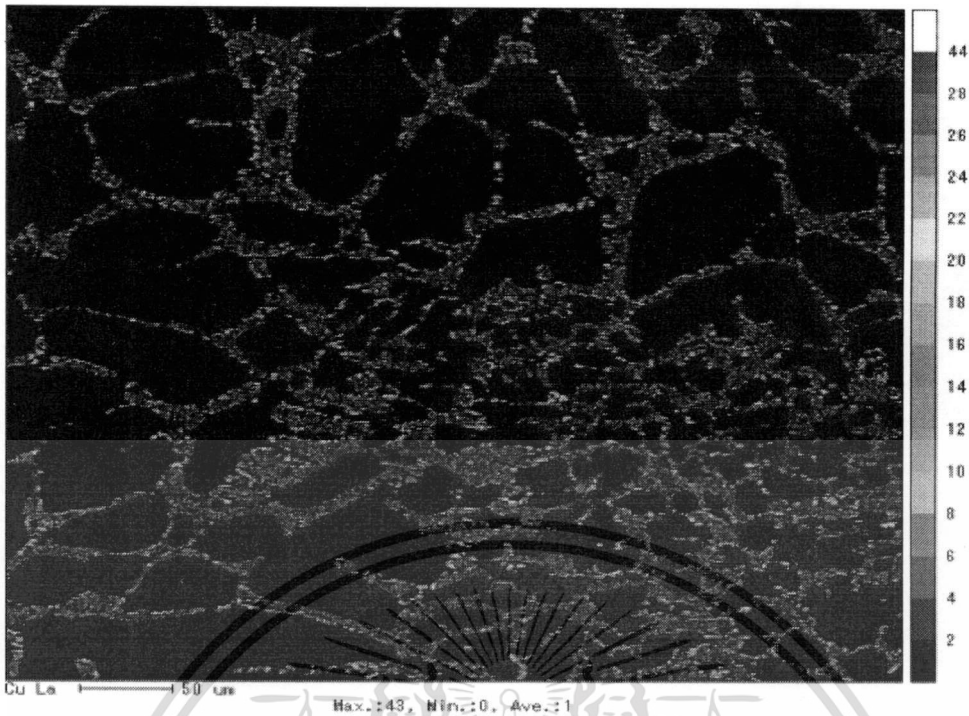


รูปที่ 15 การกระจายตัวของ Sn ในโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu



รูปที่ 16 การกระจายตัวของ Ag ในโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu

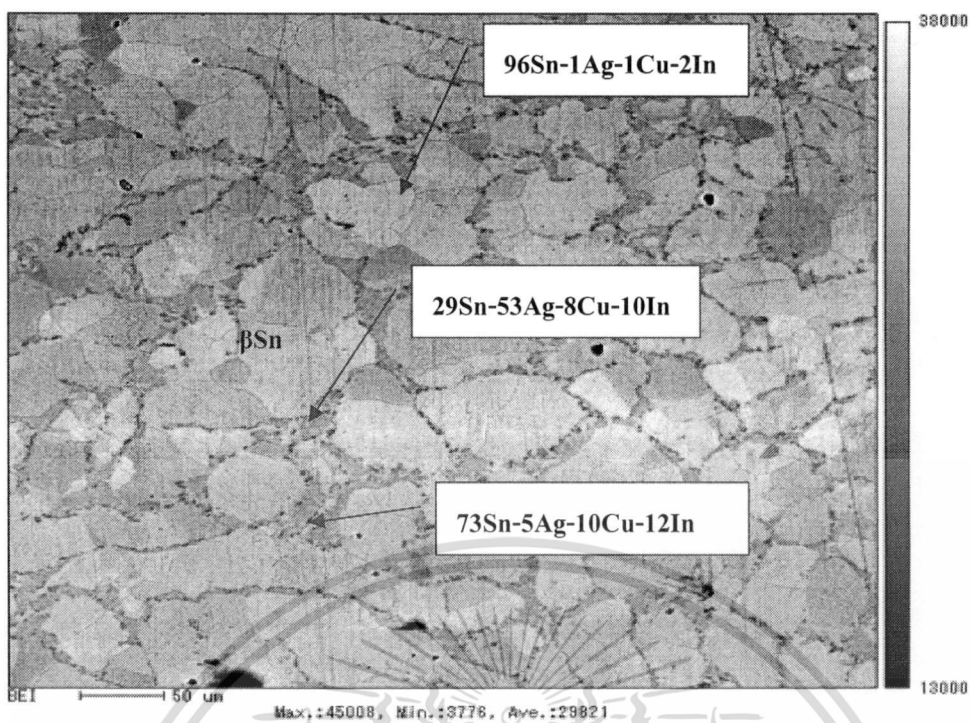
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 17 การกระจายตัวของ Cu ในโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu

จากผลการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu จะพบว่าพื้นผิวหลักของชิ้นงานจะประกอบไปด้วยโครงสร้างพื้นฐานซึ่งมีส่วนผสมประมาณ 98Sn-1Ag-1Cu ซึ่งเป็นโครงสร้างของ β -Sn Phase โดยจะสังเกตเห็นอย่างชัดเจนว่ามีสีสว่างกว่าบริเวณอื่น ส่วนโครงสร้างซึ่งอยู่บริเวณขอบเกรน และมีลักษณะเรียวยาวเป็นโครงสร้างของ Ag_3Sn โดยดูจากสัดส่วนของสารประกอบที่ได้ และโครงสร้างที่มีลักษณะทึบแสง และมีรูปร่างกลมมนเป็นโครงสร้างของ Cu_6Sn_5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

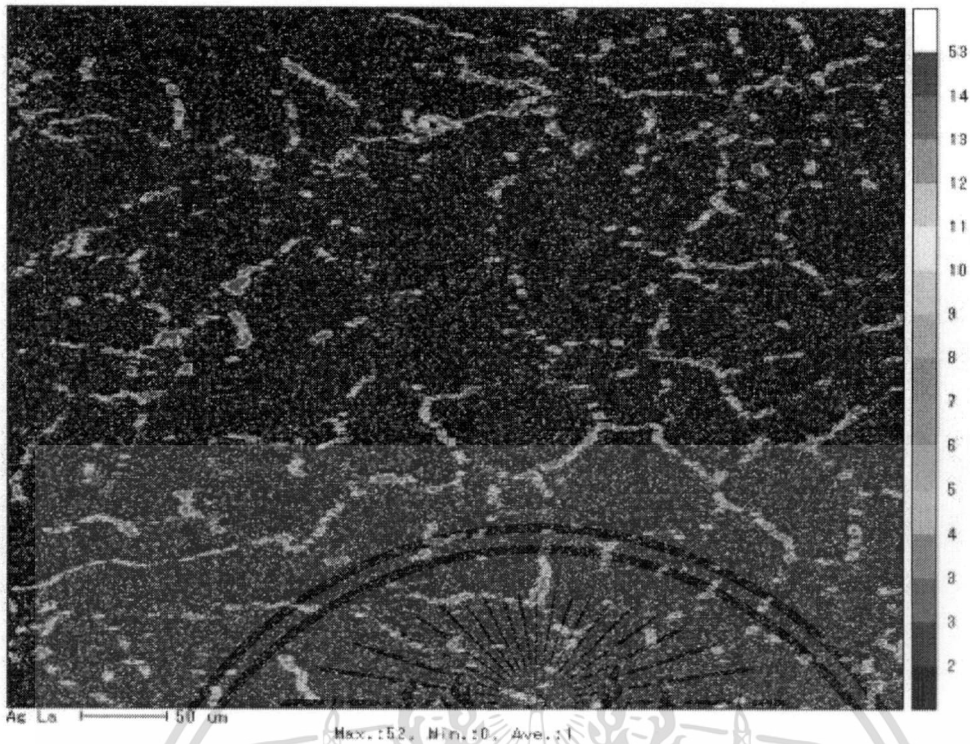


รูปที่ 18 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In

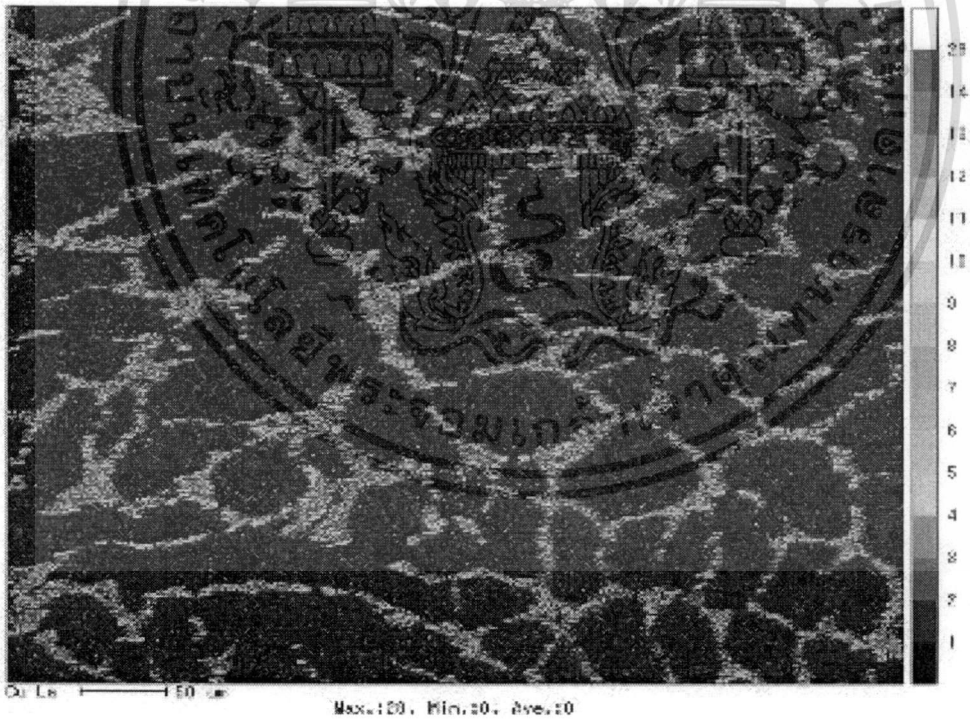


รูปที่ 19 การกระจายตัวของ Sn ในโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

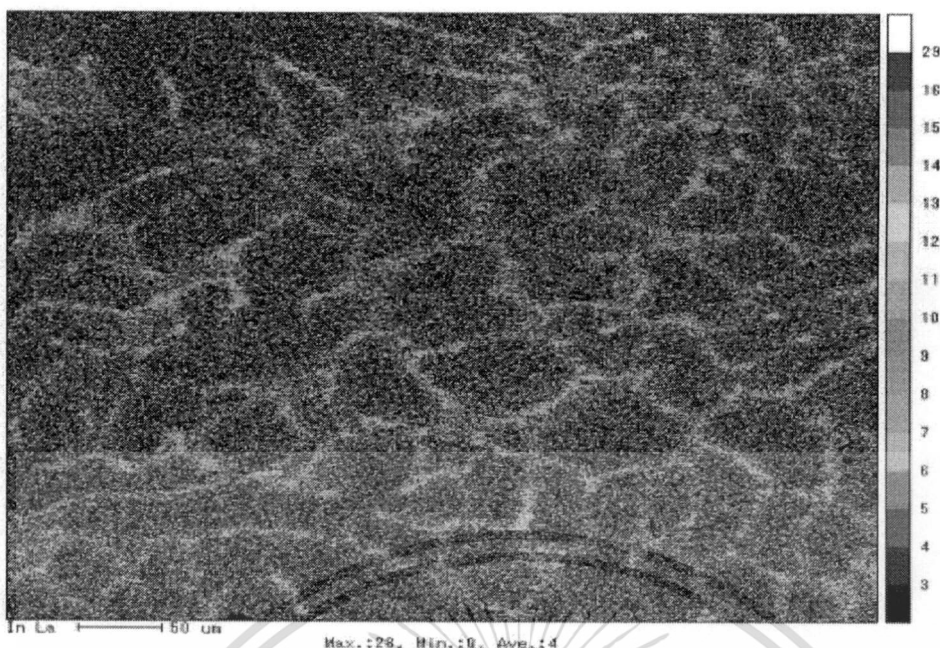


รูปที่ 20 การกระจายตัวของ Ag ในโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In



รูปที่ 21 การกระจายตัวของ Cu ในโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In

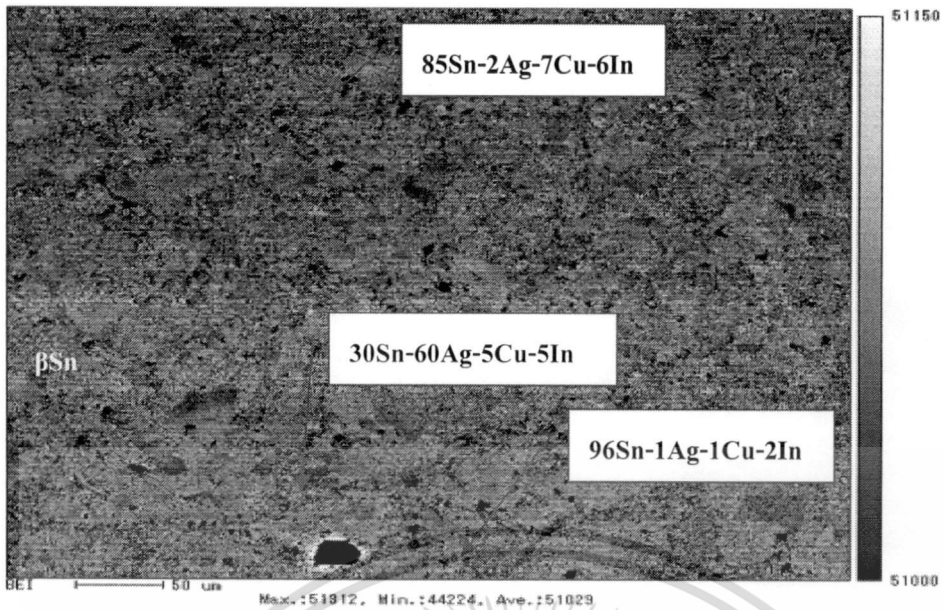
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 22 การกระจายตัวของ In ใน โลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In

จากผลการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In จะพบว่าพื้นผิวหลักของชิ้นงานจะประกอบไปด้วย โครงสร้างพื้นฐานซึ่งมีส่วนผสมประมาณ 96Sn-1Ag-1Cu-2In ซึ่งเป็นโครงสร้างของ β -Sn Phase จะสังเกตเห็นอย่างชัดเจนว่ามีสีสว่างกว่าบริเวณอื่น โดยจะพบว่าขนาดของเกรนโดยเฉลี่ยจะมีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu ส่วน โครงสร้างซึ่งอยู่บริเวณขอบเกรน และมีลักษณะเรียวยาว เมื่อพิจารณาจากปริมาณสัดส่วนของสารประกอบที่ได้เป็นโครงสร้างของ Ag_3Sn

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

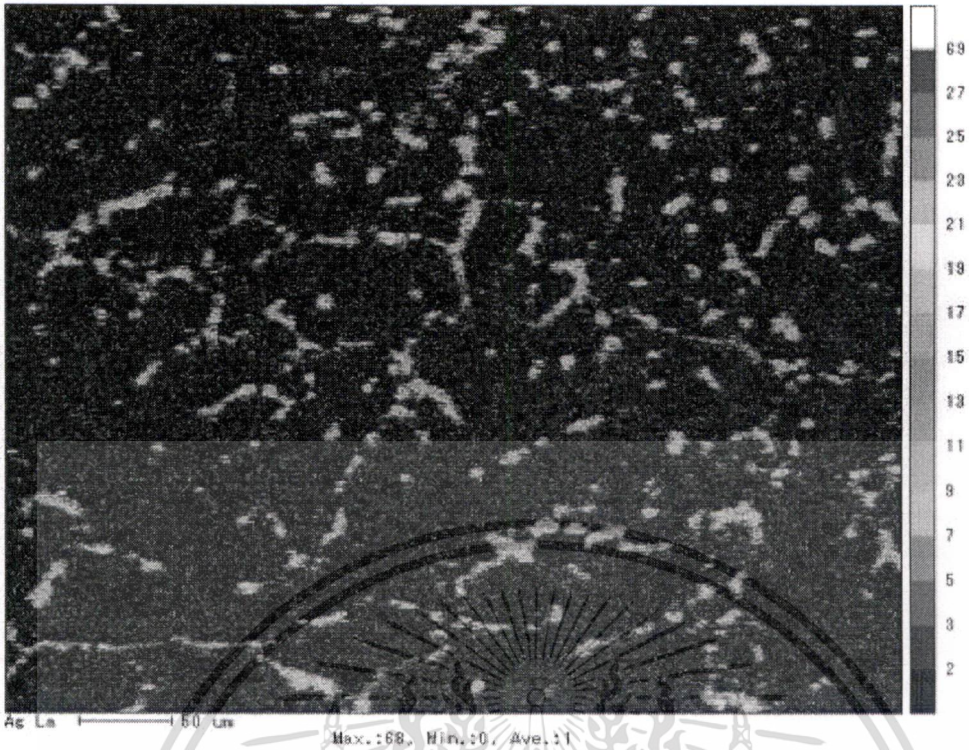


รูปที่ 23 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In

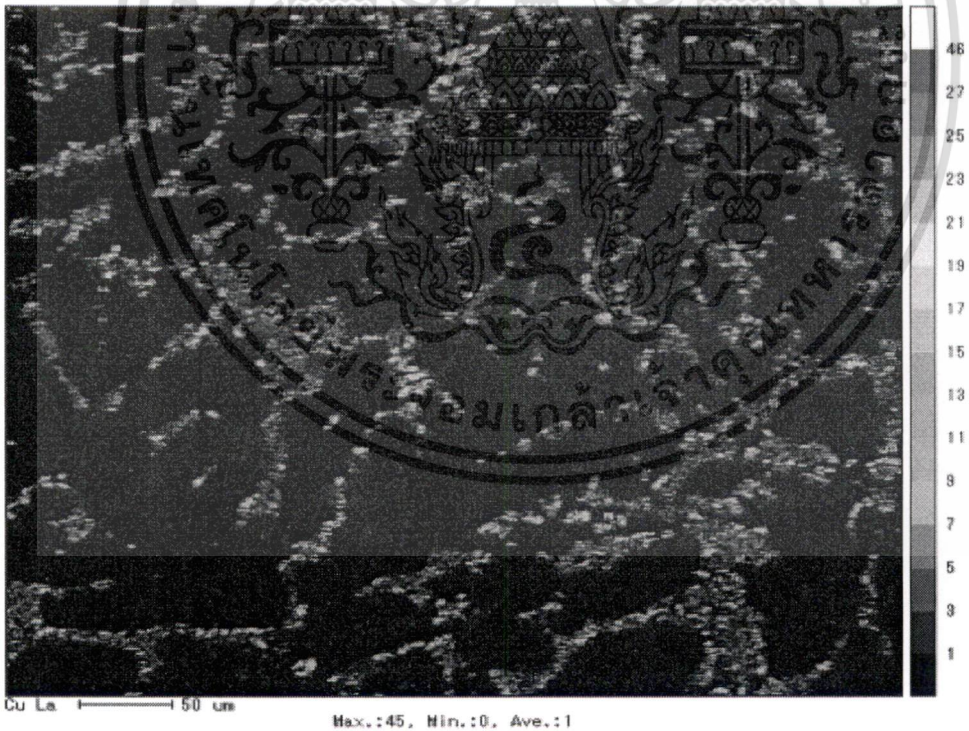


รูปที่ 24 การกระจายตัวของ Sn ในโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

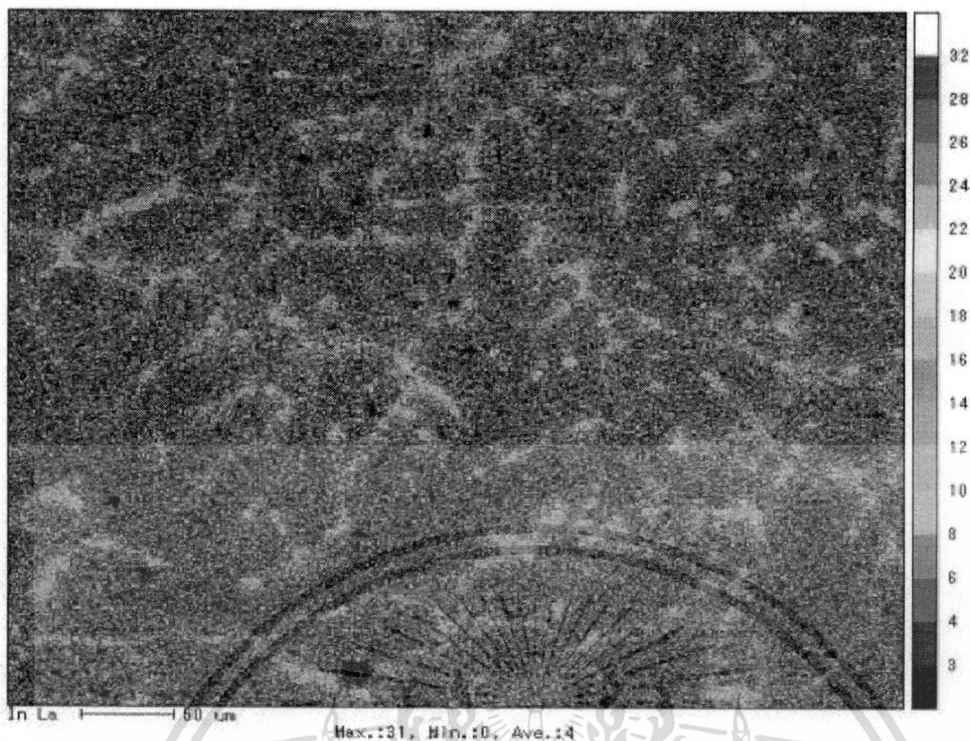


รูปที่ 25 การกระจายตัวของ Ag ในโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In



รูปที่ 26 การกระจายตัวของ Cu ในโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In

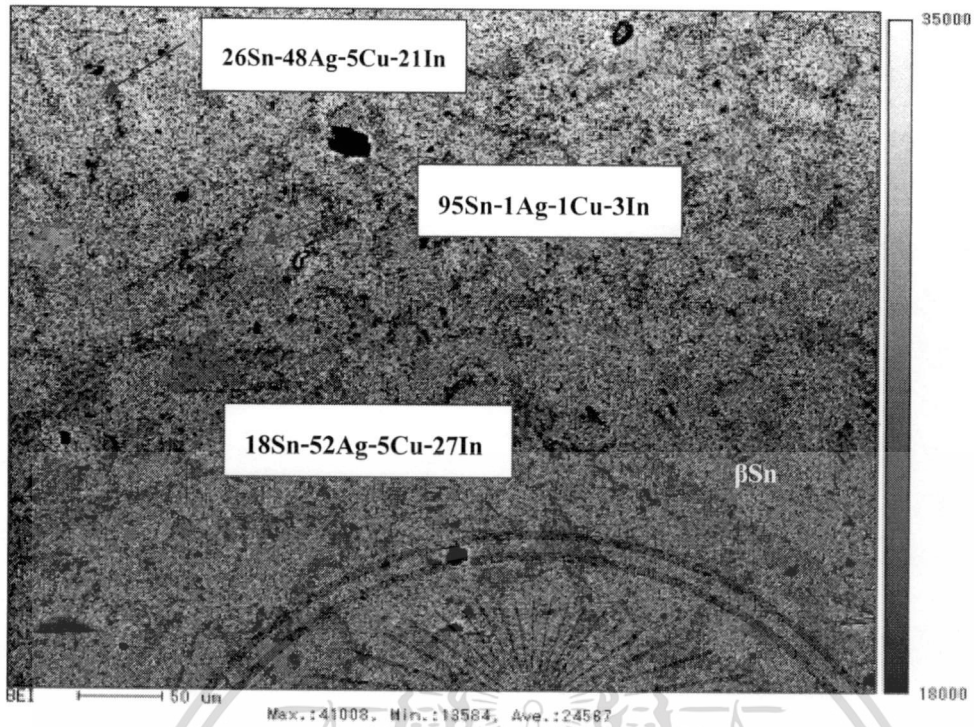
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



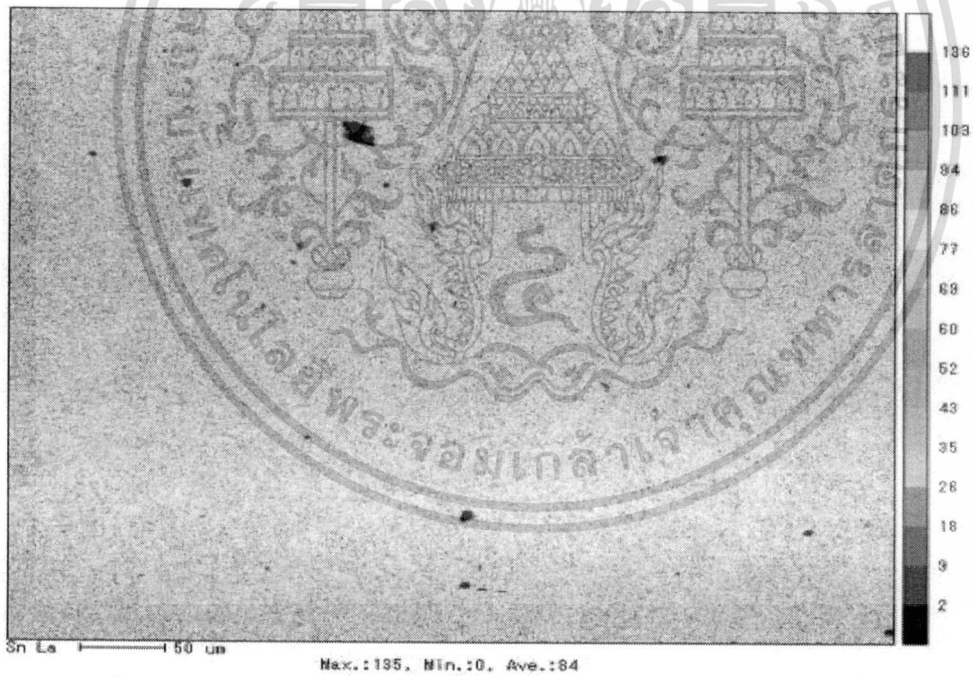
รูปที่ 27 การกระจายตัวของ In ในโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In

จากผลการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In จะพบว่าพื้นผิวหลักของชิ้นงานจะประกอบไปด้วย โครงสร้างพื้นฐานซึ่งมีส่วนผสมประมาณ 96Sn-1Ag-1Cu-2In ซึ่งเป็นโครงสร้างของ β -Sn Phase จะสังเกตเห็นอย่างชัดเจนว่ามีสีสว่างกว่าบริเวณอื่น โดยจะพบว่าขนาดของเกรนโดยเฉลี่ยจะมีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In ส่วนโครงสร้างซึ่งอยู่บริเวณขอบเกรน และมีลักษณะเรียวยาว เมื่อพิจารณาจากสัดส่วนของสารประกอบที่ได้เป็นโครงสร้างของ Ag_3Sn

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

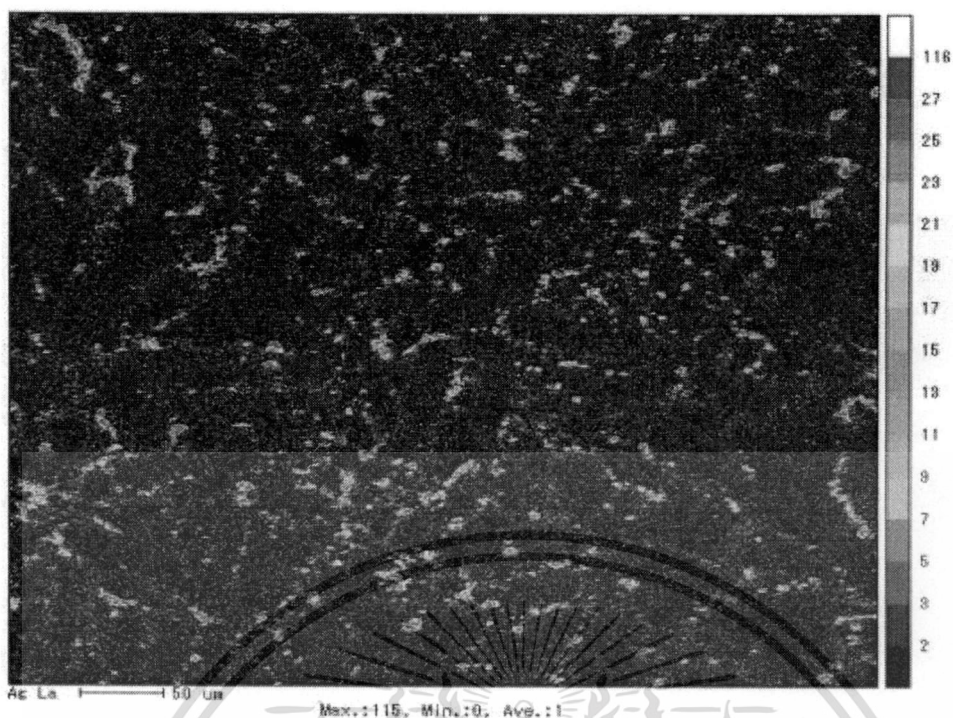


รูปที่ 28 โครงสร้างทางจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In

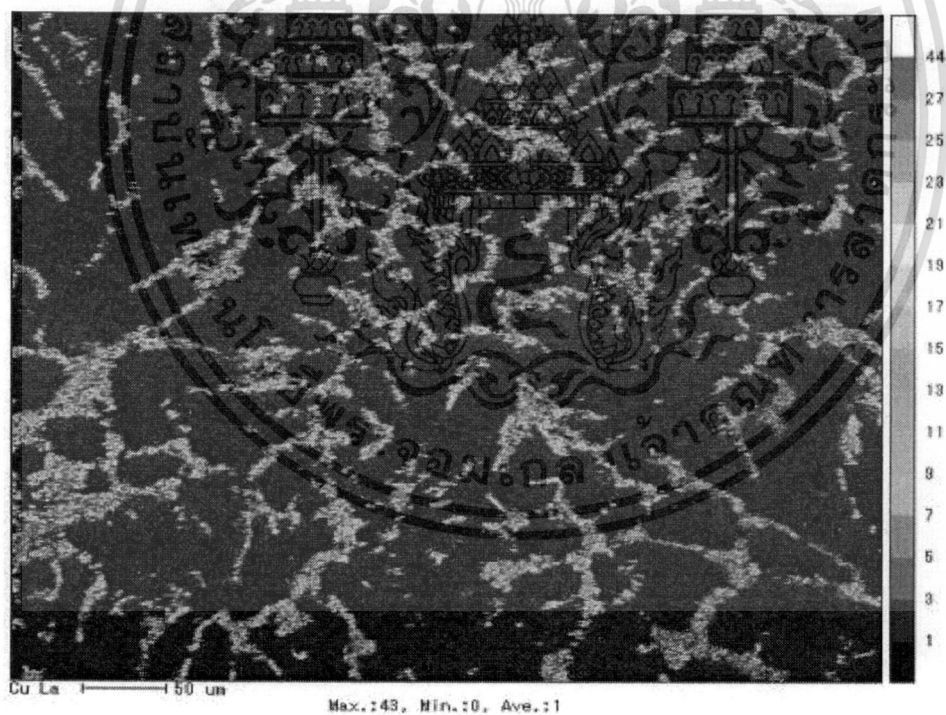


รูปที่ 29 การกระจายตัวของ Sn ในโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

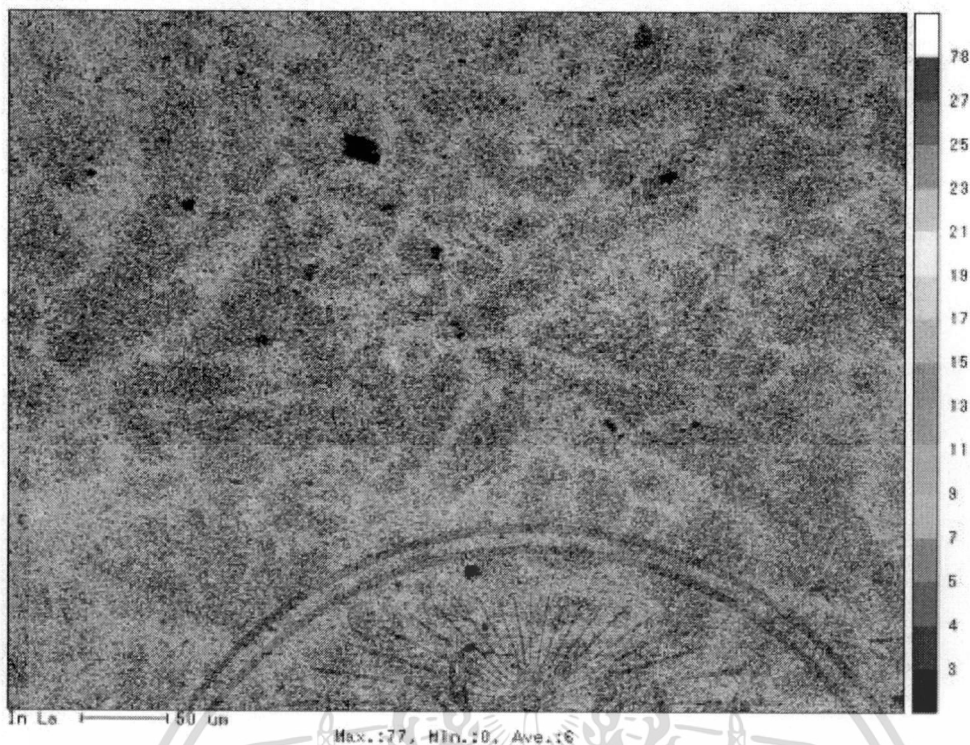


รูปที่ 30 การกระจายตัวของ Ag ในโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In



รูปที่ 31 การกระจายตัวของ Cu ในโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In

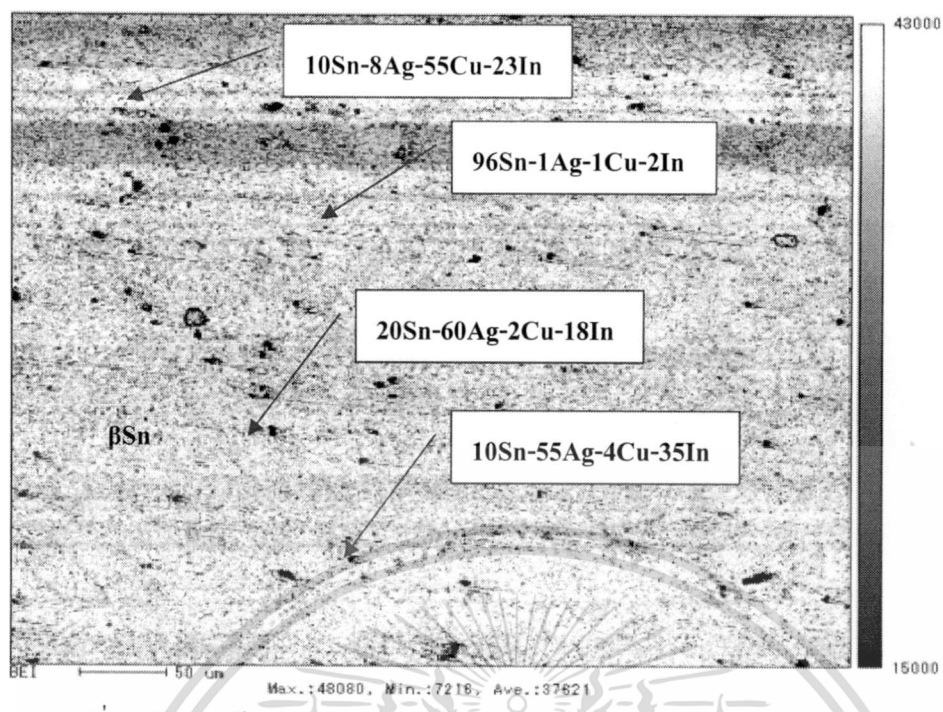
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 32 การกระจายตัวของ In ในโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In

จากผลการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In จะพบว่าพื้นผิวหลักของชิ้นงานจะประกอบไปด้วยโครงสร้างพื้นฐานซึ่งมีส่วนผสมประมาณ 95Sn-1Ag-1Cu-3In ซึ่งเป็นโครงสร้างของ β -Sn Phase จะสังเกตเห็นอย่างชัดเจนว่ามีสีสว่างกว่าบริเวณอื่น โดยจะพบว่าขนาดของเกรนโดยเฉลี่ยจะมีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In ส่วนโครงสร้างซึ่งอยู่บริเวณขอบเกรน และมีลักษณะเรียวยาว เมื่อพิจารณาจากสัดส่วนของสารประกอบที่ได้เป็นโครงสร้างของ $Ag_3(Sn,In)$ และ Ag_2In

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

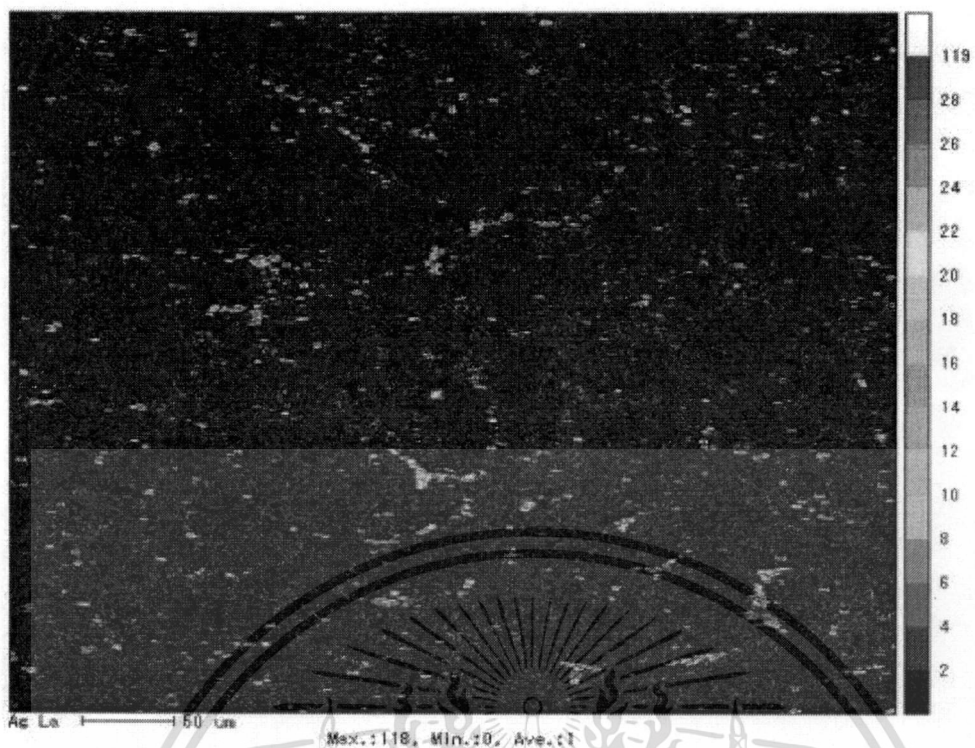


รูปที่ 33 โครงสร้างทางจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In



รูปที่ 34 การกระจายตัวของ Sn ในโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

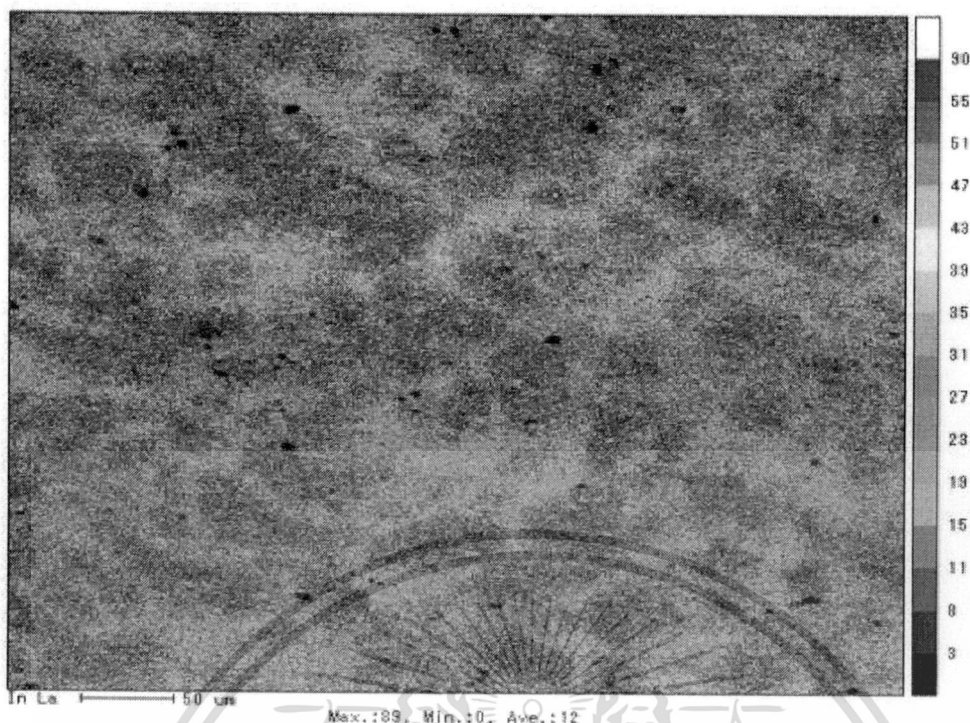


รูปที่ 35 การกระจายตัวของ Ag ในโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In



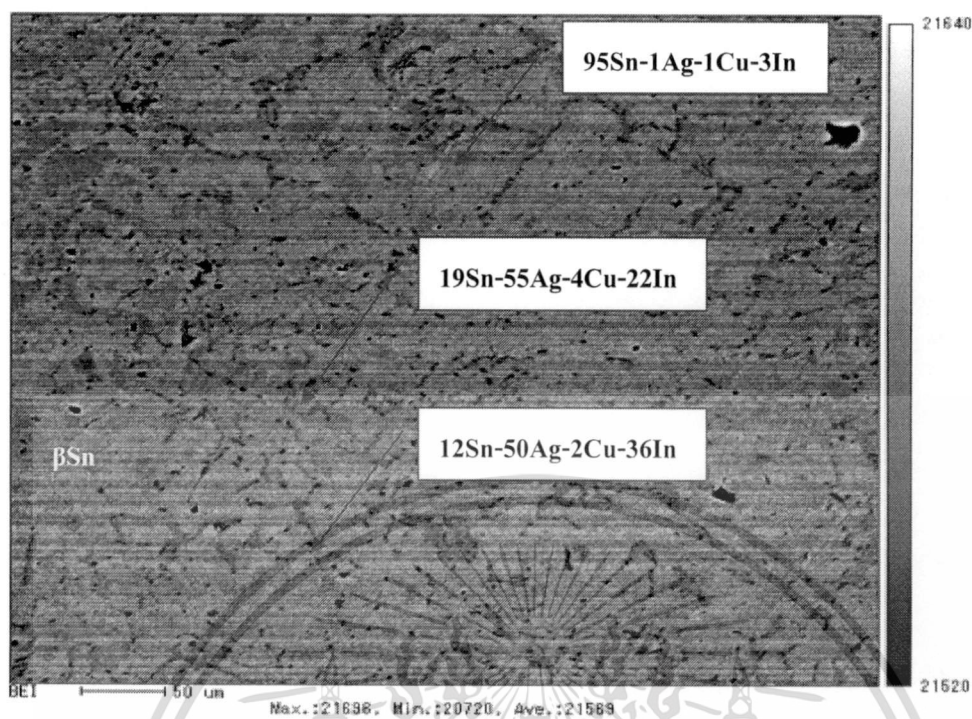
รูปที่ 36 การกระจายตัวของ Cu ในโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 37 การกระจายตัวของ In ในโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In

จากผลการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In จะพบว่าพื้นผิวหลักของชิ้นงานจะประกอบไปด้วยโครงสร้างพื้นฐานซึ่งมีส่วนผสมประมาณ 96Sn-1Ag-1Cu-2In ซึ่งเป็นโครงสร้างของ β -Sn Phase ซึ่งจะสังเกตเห็นอย่างชัดเจนว่ามีสีสว่างกว่าบริเวณอื่น ส่วนโครงสร้างซึ่งอยู่บริเวณขอบเกรน และมีลักษณะเรียวยาว เมื่อพิจารณาจากสัดส่วนของสารประกอบที่ได้เป็นโครงสร้างของ $Ag_3(Sn,In)$ และ Ag_2In และอีกโครงสร้างหนึ่งซึ่งพบบริเวณขอบเกรนเช่นกันแต่มีรูปร่างค่อนข้างกลม เมื่อดูจากสัดส่วนของสารประกอบที่ได้เป็นโครงสร้างของ Cu_2In

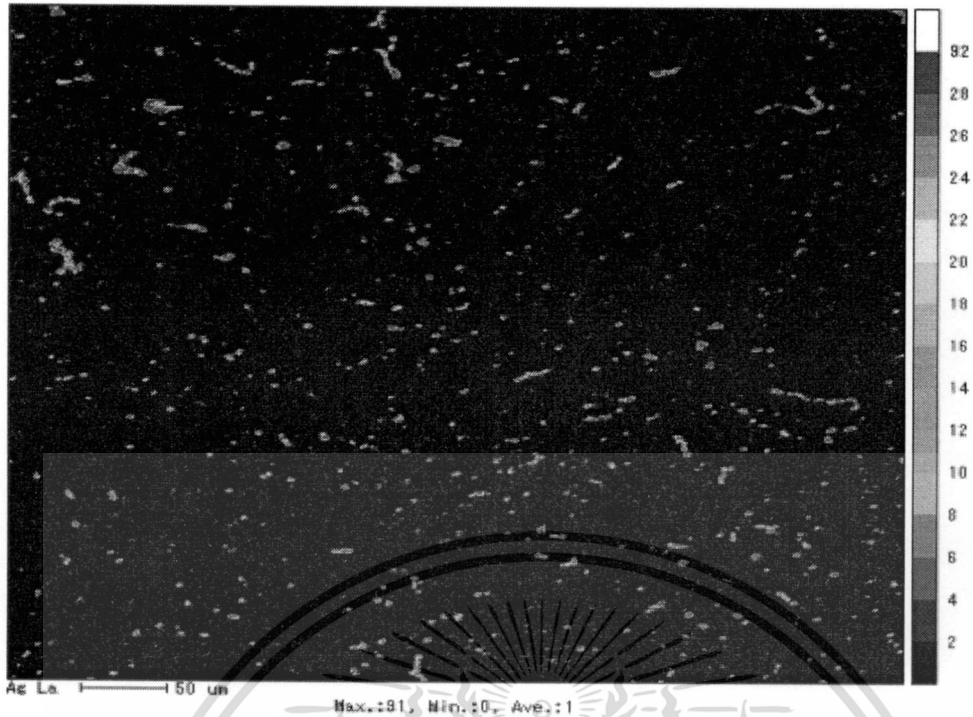


รูปที่ 38 โครงสร้างทางจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In

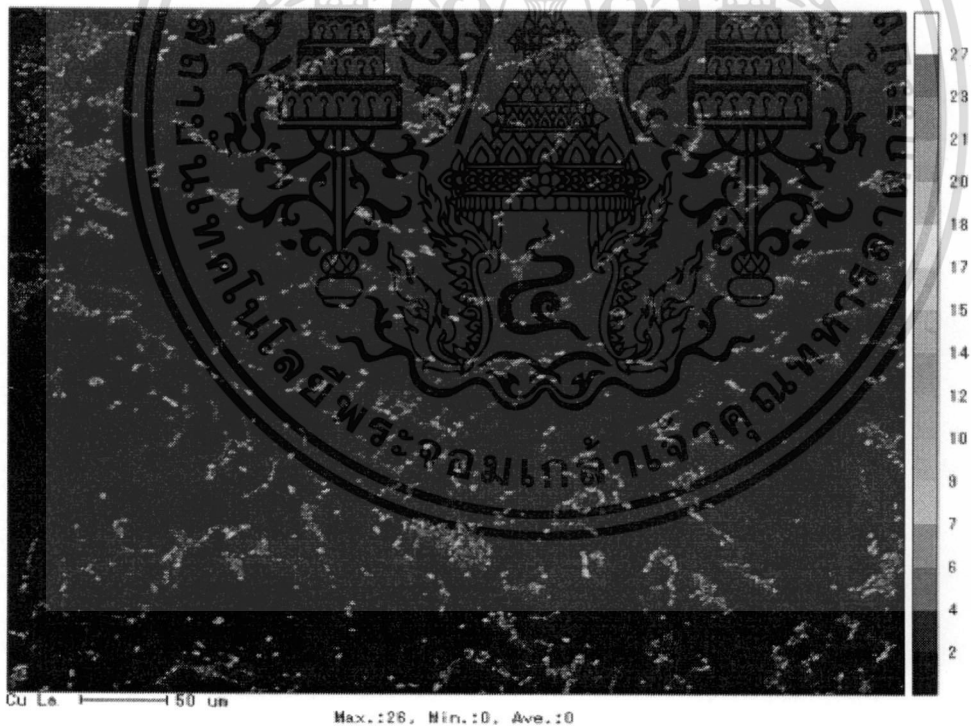


รูปที่ 39 การกระจายตัวของ Sn ในโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

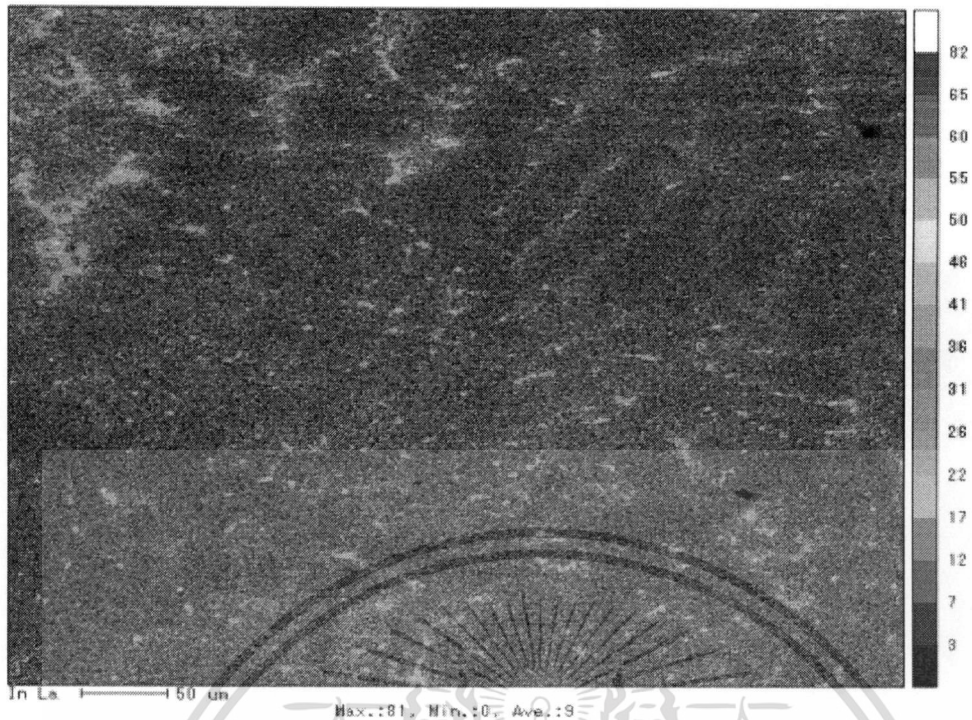


รูปที่ 40 การกระจายตัวของ Ag ในโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In



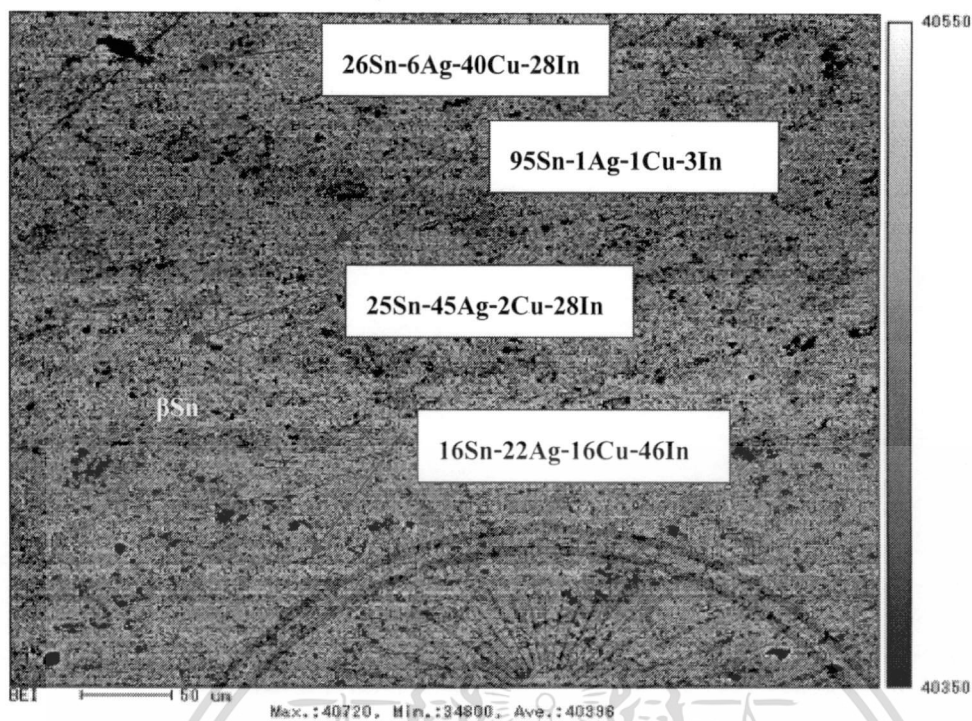
รูปที่ 41 การกระจายตัวของ Cu ในโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 42 การกระจายตัวของ In ในโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In

จากผลการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In จะพบว่าพื้นผิวหลักของชิ้นงานจะประกอบไปด้วยโครงสร้างพื้นฐานซึ่งมีส่วนผสมประมาณ 95Sn-1Ag-1Cu-3In ซึ่งเป็นโครงสร้างของ β -Sn Phase จะสังเกตเห็นอย่างชัดเจนว่ามีสีสว่างกว่าบริเวณอื่นและพบว่าขนาดของเกรนโดยเฉลี่ยจะมีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In ส่วนโครงสร้างซึ่งอยู่บริเวณขอบเกรน และมีลักษณะเรียวยาว เมื่อพิจารณาจากสัดส่วนของสารประกอบที่ได้เป็นโครงสร้างของ $Ag_3(Sn,In)$ และ Ag_2In

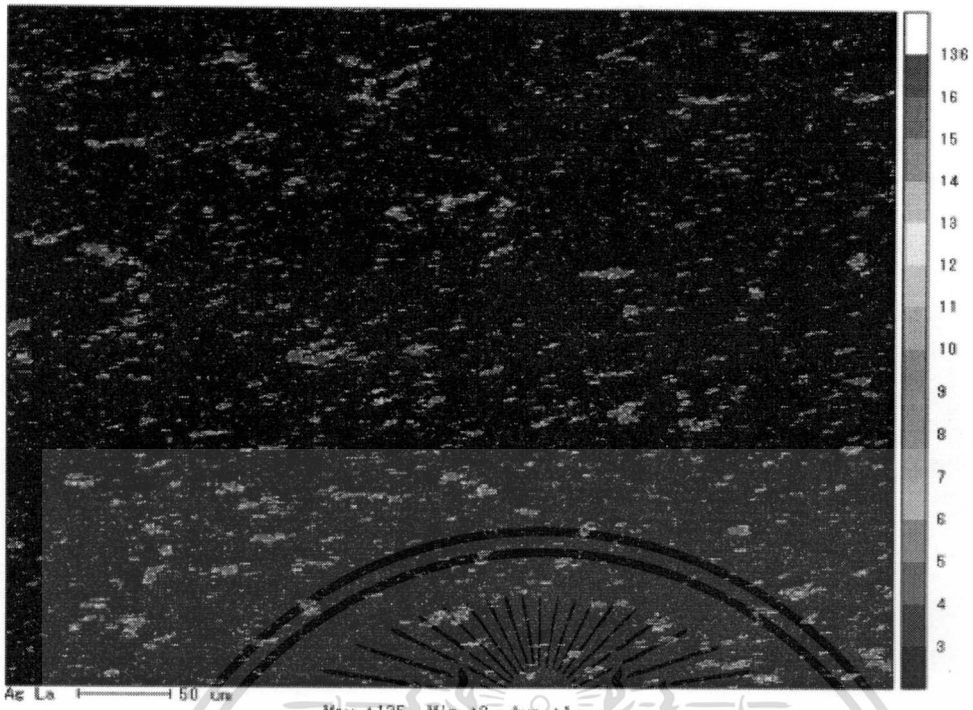


รูปที่ 43 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In



รูปที่ 44 การกระจายตัวของ Sn ในโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

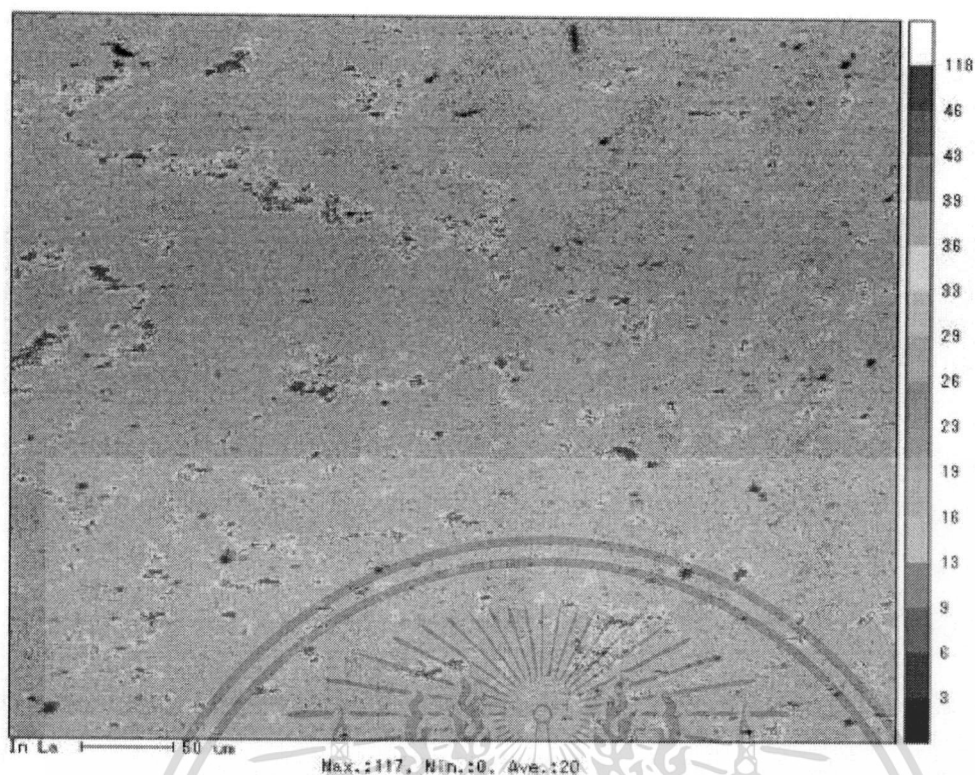


รูปที่ 45 การกระจายตัวของ Ag ในโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In



รูปที่ 46 การกระจายตัวของ Cu ในโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 47 การกระจายตัวของ In ในโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In

จากผลการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In จะพบว่าพื้นผิวหลักของชิ้นงานจะประกอบไปด้วยโครงสร้างพื้นฐานซึ่งมีส่วนผสมประมาณ 95Sn-1Ag-1Cu-3In ซึ่งเป็นโครงสร้างของ β -Sn Phase ซึ่งจะสังเกตเห็นอย่างชัดเจนว่ามีสีสว่างกว่าบริเวณอื่นและพบว่าขนาดของเกรนโดยเฉลี่ยจะมีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In ส่วนโครงสร้างซึ่งอยู่บริเวณขอบเกรน และมีลักษณะเรียวยาวเมื่อพิจารณาจากสัดส่วนของสารประกอบที่ได้เป็นโครงสร้างของ $Ag_3(Sn,In)$ และ $AgIn_2$ นอกจากนี้บริเวณขอบเกรน พบโครงสร้างซึ่งมีลักษณะกลมเมื่อพิจารณาจากสัดส่วนของสารประกอบที่ได้เป็นลักษณะโครงสร้างของ Cu_2In

จากผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วย SEM, EDS และ EPMA โดยรวมแล้วพบว่าเมื่อพิจารณาจากสัดส่วนของสารประกอบที่ได้พบว่า พื้นผิวโดยส่วนมากของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-Ag-Cu จะประกอบด้วย β Sn เป็นโครงสร้างพื้นฐานนอกจากนี้ยังมีโครงสร้างที่ดูทึบแสงเป็นซึ่งเป็นสารประกอบของ Ag_3Sn และ Cu_6Sn_5 ที่ละลายอยู่ใน Sn Matrix ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Yu และคณะ [19] โดย Ag_3Sn นั้นจะมีลักษณะยาวรี ส่วน Cu_6Sn_5 นั้นจะมีลักษณะกลมมน และลักษณะโครงสร้างของ Ag_3Sn จะมีลักษณะสว่างกว่าเล็กน้อย ทั้งนี้เมื่อทำการปรับปรุงคุณสมบัติโดยการเติม In เข้าไปจะพบว่า ขนาดของเกรนโดยเฉลี่ยนั้นพบว่าจะมีขนาดเล็กลงเมื่อมีส่วนผสมของ In

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น โดย In จะกระจายตัวอยู่ทั้งในบริเวณที่เป็นพื้นผิวปกติ และในบริเวณที่เป็นขอบเกรน โดยจะพบอยู่ในรูปของสารประกอบหลายชนิด เช่น สารประกอบระหว่าง $Ag_3(Sn,In)$ ดังเช่นที่พบในโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In, Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In, Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In และ Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In หรืออาจพบในรูปของสารประกอบ Ag_2In ซึ่งตรวจพบในโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In และ Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In และ อาจพบในรูปสารประกอบ Cu_2In โดยตรวจพบในโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In และ Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In เป็นต้น

การทดสอบการทนต่อแรงดึง (Tensile Test)

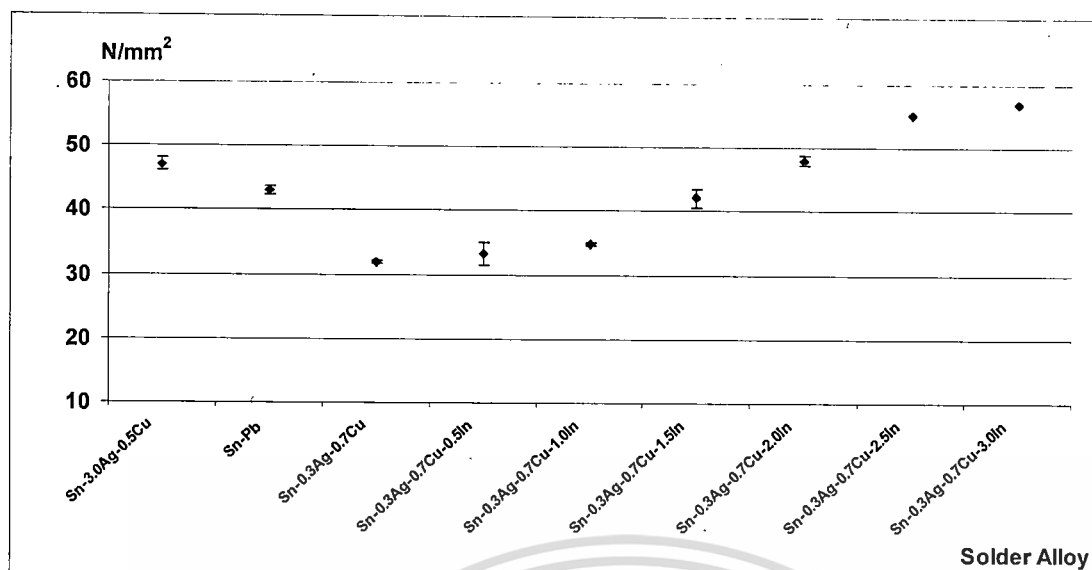
จากการทดสอบค่า Tensile Strength ของโลหะบัดกรีโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E8M ได้ผลการทดลองดังนี้คือ

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบ Tensile Strength

Sample No.	Solder alloy	Tensile Strength (N/mm ²)
1	Sn-3.0Ag-0.5Cu	47.00
2	Sn-Pb	43.00
3	Sn-0.3Ag-0.7Cu	31.86
4	Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In	33.28
5	Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In	34.73
6	Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In	41.99
7	Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In	47.91
8	Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In	55.15
9	Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In	56.98

จากผลการทดลองที่ได้สามารถนำมาสร้างกราฟเพื่อวิเคราะห์แนวโน้ม และอิทธิพลของการเติม In ต่อคุณสมบัติทางด้าน Tensile Strength ได้ดังรูปที่ 48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 48 Tensile Strength ของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด

จากผลของค่า Tensile strength ที่ได้จากการทดลองพบว่า ค่า Tensile strength ของโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu จะมีค่าต่ำสุด และต่ำกว่าค่า Tensile Strength ของโลหะบัดกรีชนิด SnPb และ Sn-3.0Ag-0.5Cu นั้นแสดงว่าโลหะบัดกรีดังกล่าวไม่สามารถรับแรงกดสูง ๆ ได้ดีเท่ากับโลหะบัดกรีชนิด SnPb และ Sn-3.0Ag-0.5Cu แต่เมื่อทำการปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu โดยการเติม In เข้าไปแล้วพบว่าค่า Tensile Strength จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ In ที่เพิ่มมากขึ้นโดยโลหะบัดกรีที่มีค่า Tensile Strength สูงที่สุดคือโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In และสูงกว่าโลหะบัดกรีชนิด Sn-3.0Ag-0.5Cu

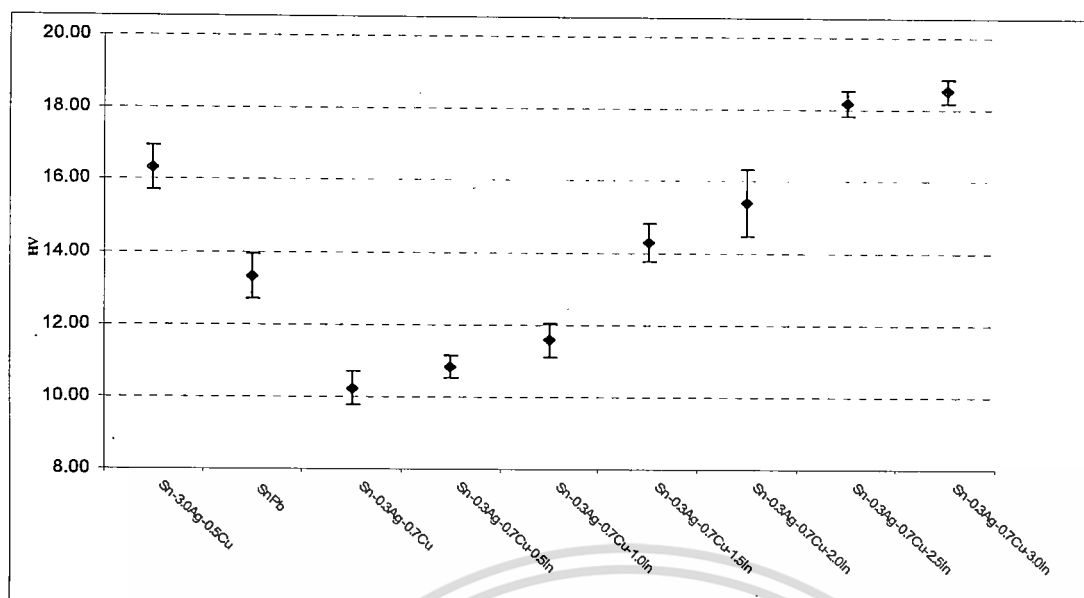
การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

จากการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Vickers Micro Hardness ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบ Vickers Microhardness

Sample	Hardness (HV)					
	1	2	3	4	Avg	Stdev
Sn-3.0Ag-0.5Cu	15.8	16.8	16.9	15.8	16.33	0.61
SnPb	13.4	13.4	14	12.5	13.33	0.62
Sn-0.3Ag-0.7Cu	10.7	10.4	10.2	9.6	10.23	0.46
Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In	10.9	10.4	11.1	10.9	10.83	0.30
Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In	11.1	12.1	11.3	11.8	11.58	0.46
Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In	13.5	14.4	14.6	14.6	14.28	0.53
Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In	14.7	15.7	14.6	16.6	15.40	0.94
Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In	17.7	18.4	18.1	18.5	18.18	0.36
Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In	18.4	18.8	18.1	18.8	18.53	0.34

จากผลการทดลองที่ได้เห็นว่า ค่าความแข็งของโลหะบัดกรีชนิด Sn-3.0Ag-0.5Cu จะมีค่าสูงกว่าตะกั่วบัดกรี SnPb และสูงกว่าโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu ด้วย แต่ทั้งนี้ เมื่อนำโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu มาทำการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลโดยการเพิ่มธาตุตัวที่ 4 เข้าไปคือ In พบว่าค่าความแข็งของโลหะบัดกรีที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้น และค่าความแข็งจะสูงมากขึ้นตามปริมาณ Indium (In) ที่มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่า Tensile strength ที่ได้จากการทดสอบในรูปที่ 48 ทั้งนี้อาจอธิบายได้ว่า จากลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีจะสังเกตเห็นว่าเมื่อมีการเติม In ในปริมาณที่มากขึ้น ขนาดเกรนโดยเฉลี่ยจะมีขนาดเล็กลง จึงส่งผลให้มีค่าความแข็งเพิ่มมากขึ้น และค่า Tensile Strength สูงขึ้นตามไปด้วย โดยโลหะบัดกรีที่มีค่าความแข็งสูงสุดคือโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In และโลหะบัดกรีที่ค่าความแข็งต่ำที่สุดคือโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu



รูปที่ 49 ค่าความแข็งของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด

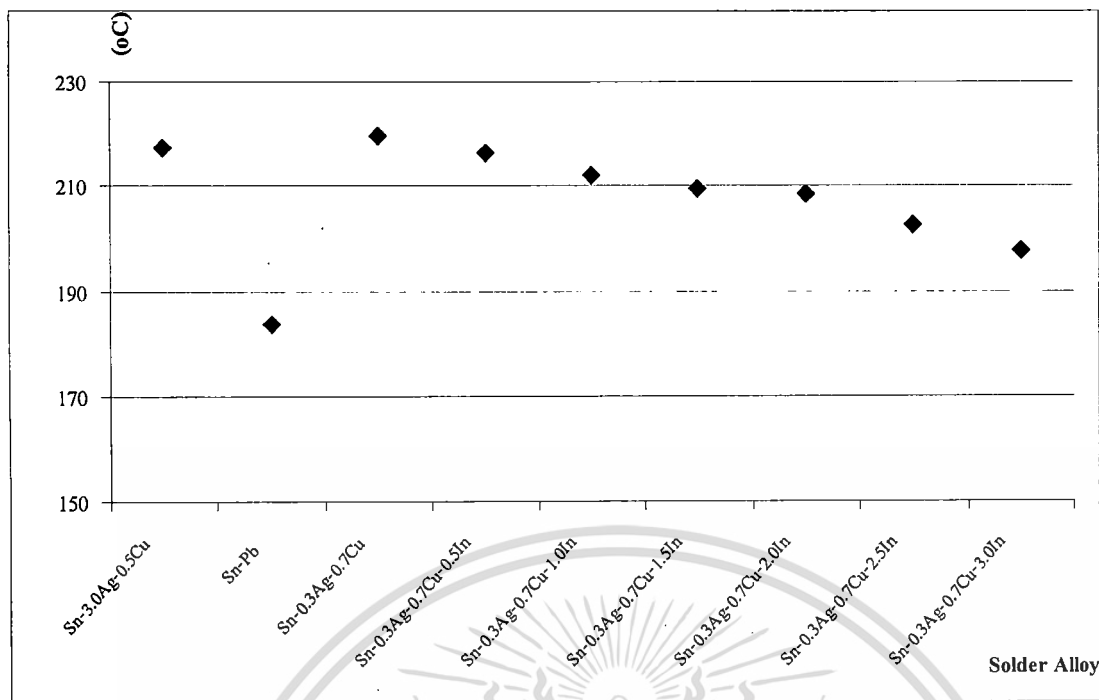
การทดสอบจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรี

จากผลการวิเคราะห์จุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีแต่ละชนิดโดยใช้ Differential scanning calorimeter (DSC) ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 จุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด

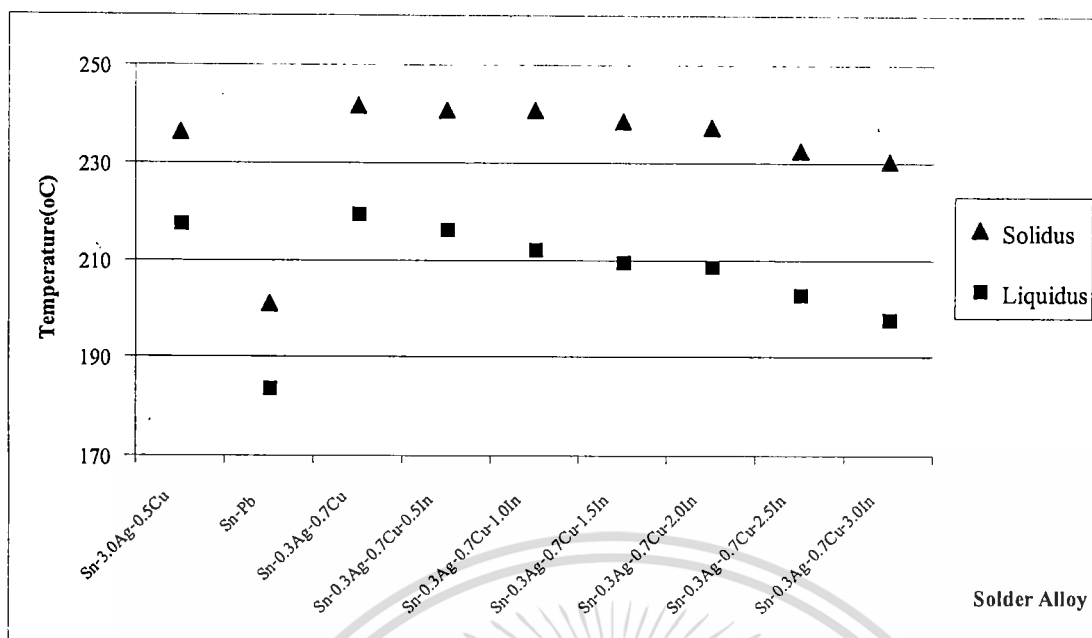
Solder Alloys	Solidus Temperature (°C)	Liquidus Temperature (°C)
Sn-3.0Ag-0.5Cu	217.4	236.2
63Sn-37Pb	183.7	200.8
Sn-0.3Ag-0.7Cu	219.4 _{max}	241.7
Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In	216.2	240.8
Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In	212.2	240.6
Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.5In	209.4	238.4
Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.0In	208.5	237.4
Sn-0.3Ag-0.7Cu-2.5In	202.7	232.6
Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In	197.7	230.2

จากผลที่ได้สามารถบอกได้ว่าโลหะบัดกรีที่มีจุดหลอมเหลวสูงที่สุดคือ โลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu และโลหะบัดกรีที่มีจุดหลอมเหลวต่ำสุดคือ โลหะบัดกรีชนิด Sn-Pb และสำหรับกลุ่มของโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu ซึ่งเป็นกลุ่มที่นำมาปรับปรุงคุณสมบัติโดยการเติม In ลงไปนั้น จะสังเกตพบว่า เมื่อมีการเติม In ในปริมาณที่มากขึ้น จุดหลอมเหลวจะมีค่าต่ำลง ดังกราฟที่แสดงในรูปที่ 50 สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Song และ คณะ ได้อธิบายไว้ว่าธาตุ In ที่เติมลงไปจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง Eutectic เกิดโครงสร้าง β -Sn ที่ละเอียดมากขึ้น รวมทั้งเกิดสารประกอบซึ่งมีจุดหลอมเหลวต่ำใน Solder Matrix ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของจุดหลอมเหลว [20, 21] นั้น แสดงว่าการเติม In ลงในโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu สามารถช่วยลดจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีได้ โดยไม่ทำลายคุณสมบัติทางกลของโลหะบัดกรี



รูปที่ 50 กราฟแสดงค่าจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด

นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิ Liquidus และ Solidus พบว่า โลหะบัดกรีที่มีการเติมปริมาณ In ที่มากขึ้นจะส่งผลให้ช่วงระหว่างอุณหภูมิ Liquidus และ Solidus มีความกว้างมากขึ้นตามไปด้วยดังรูปที่ 51 ซึ่งเมื่อทำการอ้างอิงจากลักษณะ โครงสร้างทางจุลภาคแล้ว จะพบว่าเมื่อมีการเติม In ในปริมาณที่มากขึ้น จะทำให้เกิดโครงสร้างที่หยาบและโครงสร้างที่ละเอียดสลับกันไปมากขึ้นตามปริมาณ In ที่มากขึ้น ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ Eutectic และ มีการขยายช่วงของอุณหภูมิ Solidus และ Liquidus ได้ โดยโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In จะมีช่วงระหว่างอุณหภูมิ Liquidus และ Solidus สูงที่สุดคือ 25.8 องศาเซลเซียส และช่วงต่ำสุดคือโลหะบัดกรีชนิด Sn-Pb ซึ่งช่วงความกว้างระหว่างอุณหภูมิ Liquidus และ Solidus นี้ถือเป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกใช้โลหะบัดกรีเช่นกัน เนื่องจากช่วงระหว่างอุณหภูมิ Liquidus และ Solidus ที่กว้างมากขึ้นนั้นจะทำให้ควบคุมอุณหภูมิได้ยากในกระบวนการผลิต

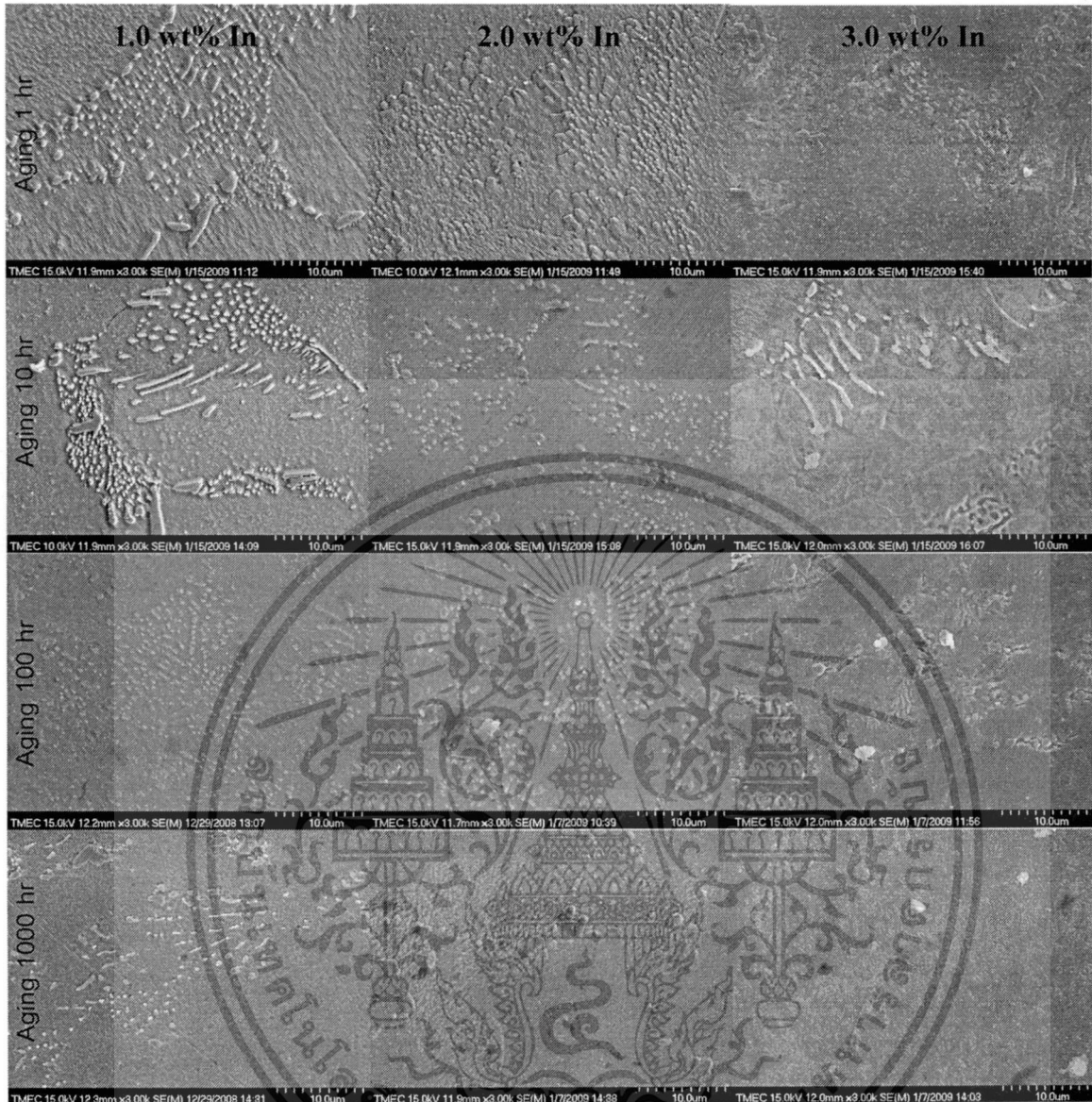


รูปที่ 51 ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ Liquidus และ Solidus ของโลหะบัดกรีชนิดต่างๆ

การอบบ่มชิ้นงานด้วยความร้อน

จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรี ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



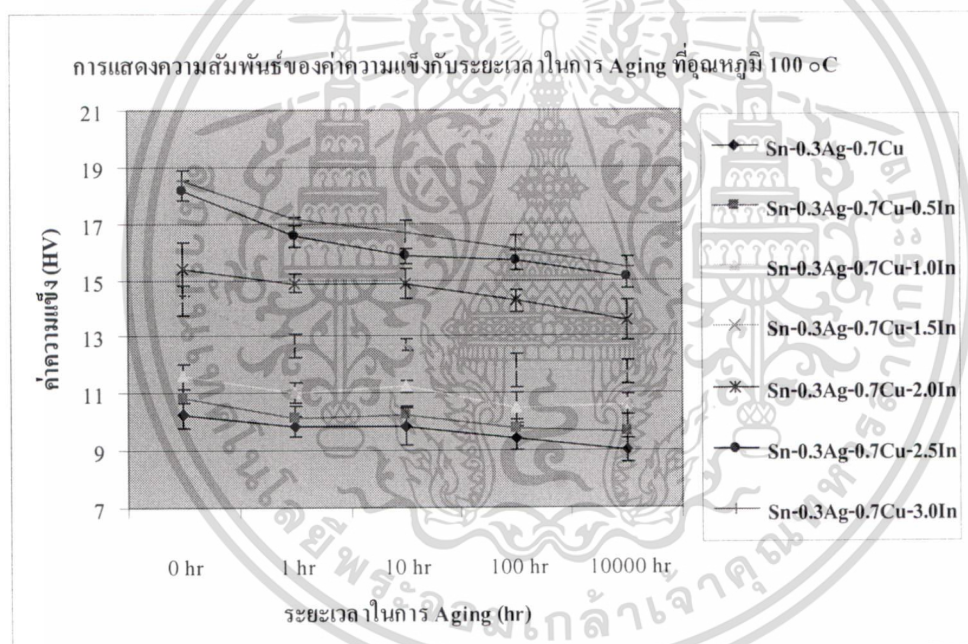
รูปที่ 52 ตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0In ถึง Sn-0.3Ag-0.7Cu-3.0In หลังผ่านการป้อน (Aging) ที่อุณหภูมิ 100 °C

จากภาพตัวอย่างที่ถ่ายด้วย SEM จะเห็นได้ว่าโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu ที่ผ่านการเติมอินเดียม (In) เข้าไปพบว่า ขนาดของเกรนโดยเฉลี่ยนั้นจะมีขนาดเล็กลง เมื่อมีส่วนผสมของ In ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น โดย In จะกระจายตัวอยู่ทั่วไปทั้งในบริเวณที่เป็นพื้นผิวปกติ และในบริเวณที่เป็นสารประกอบเชิงโลหะ เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ของส่วนผสมด้วยเทคนิค EDS พบว่า ธาตุดีบุก (Sn) จะพบมากทั่วบริเวณของโครงสร้าง ส่วนธาตุเงิน (Ag) จะพบมากตามสารประกอบเชิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โลหะที่มีลักษณะกลมมน ส่วนธาตุทองแดง (Cu) จะพบมากตามสารประกอบเชิงโลหะที่มีลักษณะแท่งยาวรี และ In จะกระจายเฉลี่ยอยู่ทั่วทั้งโครงสร้างของโลหะบัดกรี และหลังจากโลหะบัดกรี ได้ผ่านการบ่ม จากภาพถ่าย SEM พบว่า ขนาดของเกรน โดยเฉลี่ยมีขนาดใหญ่ขึ้นตามระยะเวลาที่ทำการบ่มเพิ่มขึ้น และอุณหภูมิที่สูงขึ้น จากนั้นทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของส่วนผสมด้วยเทคนิค EDS พบว่า โครงสร้างพื้นฐานของโลหะบัดกรียังคงเป็น Sn ส่วน Cu ยังพบมากตามสารประกอบเชิงโลหะที่มีลักษณะแท่งยาวรี แต่จะพบน้อยลงกว่าเดิม เนื่องจากความร้อนจากการบ่ม ทำให้เกิดการกระจายของสารประกอบเชิงโลหะออกเป็นก้อนเล็กๆ เพิ่มมากขึ้น ซึ่งปริมาณของ Cu ที่ตรวจพบก็ลดน้อยลง เนื่องจากได้ละลายเข้าไปอยู่ในโครงสร้างพื้นฐานมากขึ้น ส่วน Ag มีการกระจายอยู่ทั่วบริเวณ โครงสร้างพื้นฐานมากขึ้น และ In ยังคงกระจายอยู่ทั่วบริเวณของ โครงสร้างเช่นเดิม

ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Vickers micro hardness ที่ทำการวัดค่าความแข็งชิ้นงานละ 5 จุด ได้ผลเฉลี่ยของค่าความแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 53



รูปที่ 53 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับระยะเวลาในการบ่มที่อุณหภูมิ 100 °C

จากรูปที่ 53 แสดงให้เห็นว่า เมื่อผสมธาตุอินเดียม (In) ลงในโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu พบว่า ค่าความแข็งของโลหะบัดกรีที่ได้มีแนวโน้มที่มีค่าเพิ่มขึ้น และค่าความแข็งจะสูงมากขึ้นตามปริมาณ In ที่มากขึ้นด้วย เนื่องจากการเติม In ช่วยทำให้ Cu จับตัวรวมกันเป็นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ที่มีลักษณะเป็นก้อนต่างๆ ได้ดี และโครงสร้างโดยรวมมีความละเอียดขึ้น ส่งผลให้มีค่าความแข็งเพิ่มมากขึ้น แต่หลังจากโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu ได้ผ่านการบ่ม พบว่า ค่าความแข็งมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวโน้มลดลงตามระยะเวลาของการบ่มที่นานขึ้นและอุณหภูมิที่สูงขึ้น เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_7 ที่ทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นนั้น ได้ละลายกลับเข้าไปในโครงสร้างพื้นฐาน โดยได้ตรวจพบ Cu_6Sn_7 ในปริมาณที่น้อยลง และยังพบว่า ขนาดเกรนของโครงสร้างโดยเฉลี่ยมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ความแข็งลดลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองศึกษาอิทธิพลของธาตุ In (Indium) ต่อคุณสมบัติทางกล และจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu โดยในการศึกษานี้ได้ทำการเปรียบเทียบกับโลหะบัดกรีชนิด SnPb และ Sn-3.0Ag-0.5Cu ด้วยนั้น สามารถสรุปได้ว่า

1. จากลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค พบว่าโครงสร้างพื้นฐานของโลหะบัดกรีชนิด Sn-Ag-Cu เป็น β -Sn Phase และการปรับปรุงคุณสมบัติโดยการเติม In เข้าไปส่งผลให้ขนาดเกรนโดยเฉลี่ยจะมีขนาดเล็กลงเมื่อปริมาณ In เพิ่มมากขึ้น

2. จากผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วย EPMA โดยรวมแล้วพบว่า พื้นผิวโดยส่วนมากของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-Ag-Cu ประกอบด้วย β Sn เป็นโครงสร้างพื้นฐาน ส่วน ธาตุ Ag และ Cu นั้นส่วนมากกระจายอยู่บริเวณที่เป็นขอบเกรนซึ่งอยู่ในรูปของสารประกอบชนิด Ag_3Sn และ Cu_6Sn_5 โดยโครงสร้าง Ag_3Sn นั้นมีลักษณะยาวรี ส่วน Cu_6Sn_5 นั้นมีลักษณะกลมมน และสำหรับ In ที่เติมลงไปเพื่อทำการปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะบัดกรีนั้นสังเกตเห็นว่า กระจายตัวอยู่ทั้งในบริเวณที่เป็นพื้นผิวปกติ และในบริเวณที่เป็นขอบเกรน โดยพบอยู่ในรูปของสารประกอบหลายชนิดเช่น สารประกอบระหว่าง $Ag_3(Sn,In)$, Ag_2In หรือ Cu_2In เป็นต้น

3. เมื่อนำโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu มาทำการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลโดยการเพิ่มธาตุตัวที่ 4 เข้าไปคือ In พบว่าค่า Tensile Strength และ ค่าความแข็งของโลหะบัดกรีที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ In ที่มากขึ้น

4. จากผลการนำโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu ปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านจุดหลอมเหลวโดยการเติม In ลงไปนั้นสังเกตพบว่า เมื่อมีการเติม In ในปริมาณที่มากขึ้นแล้ว จุดหลอมเหลวมีค่าต่ำลงโดยธาตุ In ที่เติมลงไปทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง Eutectic เกิดโครงสร้าง β -Sn ที่ละเอียดมากขึ้น นอกจากนี้ปริมาณ In ที่มากขึ้นส่งผลให้ช่วงความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ Liquidus และ Solidus มากขึ้นตามไปด้วย

5. การเติม In สามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางด้าน Wettability ให้กับโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วได้ โดยพบว่าโลหะบัดกรีจะมี ค่า Wetting Time มีแนวโน้มลดลง และ Wetting Force มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมปริมาณ In ที่มากขึ้น

6. เมื่อทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติโดยรวมระหว่างโลหะบัดกรีชนิด Sn-3.0Ag-0.5Cu ซึ่งเป็นโลหะบัดกรีที่นิยมใช้ตามท้องตลาดกับ โลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu ซึ่งมีราคาต่ำกว่า พบว่าคุณสมบัติโดยรวมของโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu ดีกว่าโลหะบัดกรีชนิด Sn-3.0Ag-0.5Cu

อยู่มาก แต่เมื่อนำโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu มาทำการปรับปรุงคุณสมบัติโดยการเติม In เข้าไป พบว่าโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu มีคุณสมบัติดีขึ้นตามปริมาณ In ที่เพิ่มมากขึ้น โดยพบว่า เมื่อมีการเติม In ตั้งแต่ 2.0% โดยน้ำหนักขึ้นไปแล้ว คุณสมบัติโดยรวมของโลหะบัดกรีเทียบเท่าหรือดีกว่าโลหะบัดกรีชนิด Sn-3.0Ag-0.5Cu ดังนั้นหากต้องการใช้โลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu โดยต้องการให้มีคุณสมบัติเทียบเคียงได้กับโลหะบัดกรีชนิด Sn-3.0Ag-0.5Cu สามารถทำได้โดยเติม In มากกว่า 2 % โดยน้ำหนักเข้าไป แต่ทั้งนี้ต้องมีการพิจารณาเรื่องต้นทุนควบคู่ไปด้วย

7. การปรับปรุงคุณสมบัติโดยการเติม In เข้าไปในโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu นั้นส่งผลให้คุณสมบัติโดยรวมดีขึ้นตามปริมาณ In ที่เพิ่มมากขึ้น แต่ทั้งนี้คุณสมบัติดังกล่าวยังถือว่าด้อยกว่าตะกั่วบัดกรีแบบดั้งเดิมที่ได้ถูกห้ามใช้

8. จากผลการศึกษาที่ได้ พบว่าการบ่มด้วยความร้อนมีอิทธิพลเป็นอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn จากผลการทดลองสรุปได้ว่า หลังจากโลหะบัดกรีได้ผ่านการบ่มด้วยความร้อนพบว่า โครงสร้างจุลภาคเกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาดเกรน โดยเฉลี่ยมีขนาดใหญ่มากขึ้น และเกิดการสลายตัวของสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ตามระยะเวลาการบ่มที่นานเพิ่มขึ้น และอุณหภูมิที่สูงขึ้น จึงส่งผลให้ค่าความแข็งของโลหะบัดกรีลดลง

ดังนั้นจากผลการวิจัยการพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn สามารถสรุปได้ว่าการเติม In เข้าไปในโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu นั้นส่งผลให้คุณสมบัติโดยรวมของโลหะบัดกรีดีขึ้นตามปริมาณ In ที่เพิ่มมากขึ้น สำหรับในกรณีของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn นี้ มีศักยภาพที่จะผลิตในเชิงพาณิชย์ได้ที่ปริมาณของ In ประมาณ 2% โดยน้ำหนัก แต่ทั้งนี้ในการพัฒนาโลหะบัดกรีชนิดใหม่ขึ้นมาต้องพิจารณาเรื่องต้นทุนควบคู่ไปด้วย เนื่องจากราคาของธาตุต่างๆที่เป็นองค์ประกอบของโลหะบัดกรีมีการเปลี่ยนแปลงที่ค่อนข้างเร็ว

เอกสารอ้างอิง

- [1] www.thaigov.go.th
- [2] Abtew, M., Selvaduray, G. Lead-free solders in microelectronics. *Materials Science and Engineering R*. 2000; 27: 95-141.
- [3] Song, J.M., Wu, Z.M. Variable eutectic temperature caused by inhomogeneous solute distribution in Sn-Zn system. *Scripta Materialia*. 2006; 54: 1479-1483.
- [4] Chew, K.H., Pang, J.H.L. Impact of drop-in lead free solders on microelectronics packaging. *Electronics Packaging Technology Conference*. 2005; 451-454.
- [5] Chen, K.I., Lin, K.L. Effects of gallium on wettability, microstructures and mechanical properties of the Sn-Zn-Ag-Al-Ga solder alloys. *International Symposium on Electronic Materials and Packaging*. 2002; 49-54.
- [6] Chen, K.I., Cheng, S.C., Wu, S., Lin, K.L. Effects of small additions of Ag, Al, and Ga on the structure and properties of the Sn-9Zn eutectic alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2006; 416: 98-105.
- [7] Zhao, J., Qi, L., Wang, X., Wang, L. Influence of Bi on microstructures evolution and mechanical properties in Sn-Ag-Cu lead-free solder. *Journal of Alloys and Compounds*. 2004; 375: 196-201.
- [8] Rizvi, M.J., Chan, Y.C., Bailey, C., Lu, H., 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*. 2006; 407: 208-214.
- [9] Amagai, M., Toyoda, Y., Ohnishi, T., Akita, S. High drop test reliability: Lead-free solders. *Electronic Components and Technology Conference*. 2004; 1304-1309.
- [10] 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; 414-415.
- [11] Zhang, X.P., Yu, C.B., Zhang, Y.P., Shrestha, S., Dorn, L. Processing treatment of a lead-free Sn-Ag-Cu-Bi solder by rapid laser-beam reflowing and the creep property of its soldered connection. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007; 192-193: 539-542.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] Zhu, F., Zhang, H., Guan, R., Liu, S. Effects of temperature and strain rate on mechanical property of Sn96.5Ag3Cu0.5. *Journal of Alloys and Compounds*. 2007; 438: 100-105.
- [13] Fukuda, Y., Casey, P., Pecht, M. Evaluation of selected Japanese lead-free consumer electronics. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*. 2003; 26: 305-312.
- [14] Hsuan, T.C., Lin, K.L. Effects of aging treatment on mechanical properties and microstructure of Sn-8.5Zn-0.5Ag-0.01Al-0.1Ga solder. *Materials Science & Engineering A*. 2007; 456:202-209.
- [15] Ding, Y., Wang, C., Tian, Y., Li, M. Influence of aging treatment on deformation behavior of 96.5Sn3.5Ag lead-free solder alloy during in situ tensile tests. *Journal of Alloys and Compounds*. 2007; 428: 274-285.
- [16] Miyazawa, Y., Ariga, T. Influences of aging treatment on microstructure and hardness of Sn-(Ag, Bi, Zn) eutectic solder alloys. *Materials Transactions*. 2001; 5: 776-782.
- [17] Kitajima, M., Shono, T. Development of Sn-Zn-Al lead-free solder alloys. *Fujitsu Scientific & Technical Journal*. 2005; 41: 225-235.
- [18] www.metalprices.com
- [19] Yu, D.Q., Zhao, J., Wang, L. Improvement on the microstructure stability, mechanical and wetting properties of Sn-Ag-Cu lead-free solder with the addition of rare earth elements. *Journal of Alloys and Compounds*. 2004; 376: 170-175.
- [20] Song, J.M., Wu, Z.M. Variable eutectic temperature caused by inhomogeneous solute distribution in Sn-Zn system. *Scripta Materialia*. 2006; 54: 1479-1483.
- [21] Song, J.M., Wu, Z.M., Huang, D.A. Two-stage nonequilibrium eutectic transformation in Sn-3.5Ag-3In solder. *Scripta Materialia*. 2007; 56: 413-416.