

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคและความแข็ง
ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-Cu-Sb
A STUDY ON MICROSTRUCTURE AND HARDNESS
OF Sn-Cu-Sb LEAD-FREE SOLDERS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2561

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคและความแข็ง
ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-Cu-Sb
A STUDY ON MICROSTRUCTURE AND HARDNESS
OF Sn-Cu-Sb LEAD-FREE SOLDERS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A STUDY ON MICROSTRUCTURE AND HARDNESS
OF Sn-Cu-Sb LEAD-FREE SOLDERS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคและความแข็งของโลหะบัดกรี
ไร้สารตะกั่ว Sn-Cu-Sb
A STUDY ON MICROSTRUCTURE AND HARDNESS
OF Sn-Cu-Sb LEAD-FREE SOLDERS

นักศึกษา

นางสาวนภาพรประไพ พิชัยรัตน์ รหัสประจำตัว 58010620

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์


(รศ.ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ)


(ดร.เพชรพล ตันทวีรุฬห์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การศึกษาโครงสร้างจุลภาคและความแข็งของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-Cu-Sb
นักศึกษา	นางสาวนภาพรประไพ พิชัยรัตน์
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	รศ.ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ ดร.พชรพล ตันตวิรุฬห์

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคและค่าความแข็งของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-Cu-Sb ที่มีส่วนผสมของดีบุก (Sn) 89-100% ทองแดง (Cu) 0-3 % และพลวง (Sb) 0-8% โดยนำหน้าจากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าโลหะบัดกรีกลุ่ม Sn-Cu จะพบโครงสร้างจุลภาคที่ประกอบไปด้วย เฟส β Sn และสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 โลหะบัดกรีกลุ่ม Sn-Sb จะพบโครงสร้างจุลภาคที่ประกอบไปด้วย เฟส β Sn และสารประกอบเชิงโลหะ Sn_3Sb_2 โลหะบัดกรีกลุ่ม Sn-Cu-Sb จะพบโครงสร้างจุลภาคที่ประกอบไปด้วย เฟส β Sn และสารประกอบเชิงโลหะ 2 ชนิด คือ Cu_6Sn_5 และ Sn_3Sb_2 จากการตรวจสอบค่าความแข็ง (Hardness) โดยวิธี Vickers Micro Hardness ประกอบกับการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการออกแบบของผสม (Mixture design) ได้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างค่าความแข็งและส่วนผสมทางเคมี เป็นไปดังสมการ $Hardness = 6.79Sn - 99.72Cu + 14.19Sb + 174.42SnCu + 39.98SnSb + 195.88CuSb - 422.72Sn^2CuSb + 663.25SnCu^2Sb - 193.29SnCuSb^2$ โดยมีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 เท่ากับ 95.67% และมีความผิดพลาดในการทำนาย 7.83% ซึ่งจากสมการสามารถอธิบายได้ว่าโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-Cu-Sb มีค่าความแข็งเปลี่ยนแปลงไปตามส่วนผสมทางเคมีของธาตุทั้งสามชนิด

Thesis Title A Study on Microstructure and Hardness of Sn-Cu-Sb Lead-Free Solders

Student Ms. Nadapapai Pichairat

Degree Bachelor of Engineering in Industrial Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Academic Year 2018

Thesis Advisor Assoc.Prof.Dr. Kannachai Kanlayasiri
Dr. Phacharaphon Tunthawiroon

ABSTRACT

The objective of this research is to study microstructure and hardness of Sn-Cu-Sb lead-free solders. The experimental solders composed of 89-100 wt% of Sn, 0-3 wt% of Cu and 0-8 wt% of Sb. The microstructure analysis using scanning electron microscope indicated that the microstructure of Sn-Cu solders mainly consisted of β Sn and Cu_6Sn_5 intermetallic compound and the microstructure of Sn-Sb solders exhibited β Sn and Sn_3Sb_2 intermetallic compound. In the ternary Sn-Cu-Sb solders, two intermetallic compounds, Cu_6Sn_5 and Sn_3Sb_2 , were found along with β Sn phase. The results of micro Vickers hardness test and mixture design technique revealed the relation between hardness and solder compositions as following equation: $\text{Hardness} = 6.79\text{Sn} - 99.72\text{Cu} + 14.19\text{Sb} + 174.42\text{SnCu} + 39.98\text{SnSb} + 195.88\text{CuSb} - 422.72\text{Sn}^2\text{CuSb} + 663.25\text{SnCu}^2\text{Sb} - 193.29\text{SnCuSb}^2$ with coefficient of determination of 95.67% and prediction error was 7.83%. Based on the obtained relation the hardness of Sn-Cu-Sb solder system depended on its chemical composition.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากความช่วยเหลือจากคณาจารย์และบุคคลหลายฝ่าย ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบุคคลทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้สละเวลาในการให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะต่าง ๆ ช่วยเหลือในการแก้ไขข้อบกพร่องระหว่างการปฏิบัติงาน รวมทั้งตรวจแก้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้อง และสามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ดร.พชรพล ตันทวีรุฬห์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้สละเวลาในการให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะต่าง ๆ ช่วยเหลือในการเตรียมชิ้นงานและแก้ไขข้อบกพร่องระหว่างการปฏิบัติงาน รวมทั้งตรวจแก้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้องสมบูรณ์ให้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการทุกท่านที่คอยอำนวยความสะดวกในการปฏิบัติการทดลองต่าง ๆ การดำเนินการด้านเอกสารที่เกี่ยวข้องจนการทดลองสำเร็จไปได้ด้วยดี

อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและอาจารย์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้แก่คณะผู้จัดทำให้มีความรู้ในการคิดแก้ไข ปัญหา และนำความรู้ได้ศึกษามาประยุกต์ใช้ในการจัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ บริษัท อุลตราคอร์ จำกัด (มหาชน) เป็นอย่างสูงที่ให้การสนับสนุนชิ้นงานทดสอบ และใช้เครื่อง Spectrometer ในการตรวจสอบวิเคราะห์ปริมาณธาตุของตัวชิ้นงานที่ใช้ในการศึกษาโครงการ

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมไปถึงผู้เกี่ยวข้องอื่น ๆ ที่ได้เอื้อย่นาม และเพื่อนๆที่คอยให้การสนับสนุนและคำแนะนำตลอดมา หากมีสิ่งผิดพลาดประการใด คณะผู้จัดทำขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้

นางสาวนภาพรประไพ พิชัยรัตน์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 ตารางการดำเนินการ.....	3

บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คุณสมบัติส่วนผสมของโลหะบัดกรี.....	4
2.1.1 ดีบุก (Tin).....	4
2.1.2 ทองแดง (Copper).....	7
2.1.3 พลวง (Antimony).....	9
2.2 โลหะบัดกรี (Solder).....	10
2.3 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-free solder).....	13
2.3.1 คุณสมบัติเบื้องต้นในการพิจารณาเลือกใช้โลหะบัดกรีแบบไร้สารตะกั่ว.....	14
2.3.2 โลหะทดแทนสารตะกั่ว.....	15
2.3.3 แนวทางในการเลือกธาตุที่เป็นส่วนผสมที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิต.....	18

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 แผนภูมิเฟสของโลหะบัดกรี	20
2.4.1 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุก-ทองแดง (Sn-Cu).....	20
2.4.2 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุก-พลวง (Sn-Sb)	21
2.4.3 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมทองแดง-พลวง (Cu-Sb)	22
2.4.4 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุก-ทองแดง-พลวง (Sn-Cu-Sb).....	24
2.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure analysis).....	25
2.5.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope, OM).....	25
2.5.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM).....	26
2.5.3 หลักการของการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์ด้วยเทคนิค EDS.....	28
2.6 การทดสอบความแข็ง (Hardness test).....	29
2.6.1 การทดสอบความแข็งวิกเกอร์ส (Vickers hardness test).....	29
2.7 การออกแบบการทดลอง (Design of experiments, DOE)	31
2.7.1 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง	31
2.7.2 Design Expert Software	33
2.7.3 การออกแบบส่วนผสม (Mixture design).....	35
2.7.4 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization)	36
2.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance: ANOVA)	37
2.8.1 จุดเด่นของการวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	37
2.8.2 ข้อตกลงเบื้องต้น	37
2.8.3 หลักการวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	38
2.8.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA).....	39
2.8.5 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Analysis of coefficient of determination) ...	41

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	45
3.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบ.....	46
3.3 การตรวจสอบและวิเคราะห์ผลทางโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี.....	47
3.3.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ	47
3.3.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	49
3.4 การทดสอบและวิเคราะห์ผลความแข็งของโลหะบัดกรี	51
3.4.1 การทดสอบค่าความแข็งด้วยวิธีการทดสอบความแข็งวิกเกอร์ส (Vickers hardness test).....	51
3.4.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบค่าความแข็งด้วยโปรแกรม Design Expert.....	52
3.4.3 การวิเคราะห์สมการจากโปรแกรม Design Expert.....	62
3.5 การยืนยันแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	63
3.5.1 การเลือกส่วนผสมในการทดลอง	63
3.5.2 การทดสอบ.....	64
3.5.3 การเปรียบเทียบ.....	64
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	
4.1 การวิเคราะห์ผลทางโครงสร้างจุลภาค.....	65
4.1.1 การตรวจสอบโครงสร้างโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope, OM).....	65
4.1.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM).....	71
4.2 การวัดความแข็งด้วยวิธีการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส.....	93

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1 ผลการทดสอบ.....	93
4.2.2 การวิเคราะห์ Transform ในโปรแกรม Design Expert.....	93
4.2.3 การวิเคราะห์ Fit summary ในโปรแกรม Design Expert	94
4.2.4 การวิเคราะห์ Model ในโปรแกรม Design Expert	96
4.2.5 การวิเคราะห์ ANOVA ในโปรแกรม Design Expert.....	96
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	99
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	100
เอกสารอ้างอิง.....	101
ภาคผนวก	



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำกว่า 180 °C.....	16
ตารางที่ 2.2 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 180-200 °C.....	16
ตารางที่ 2.3 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำกว่าอยู่ในช่วง 200-230 °C.....	16
ตารางที่ 2.4 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวมากกว่า 230 °C.....	17
ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบของโลหะบัดกรีชนิดต่างๆที่สามารถนำมาใช้ทดแทนตะกั่วบัดกรี.....	17
ตารางที่ 2.6 แสดงคุณสมบัติบางประการของโลหะทดแทนสารตะกั่ว.....	18
ตารางที่ 2.7 Temperature-invariant reactions in the Cu-Sb system.....	23
ตารางที่ 2.8 Sequential model sum of squares.....	33
ตารางที่ 2.9 Lack of fit tests.....	34
ตารางที่ 2.10 Model summary statistics.....	35
ตารางที่ 2.11 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว.....	39
ตารางที่ 2.12 ตารางสรุปสูตรการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว.....	40
ตารางที่ 2.13 สรุปความสัมพันธ์ ANOVA ของการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ.....	41
ตารางที่ 3.1 แสดงส่วนผสมของโลหะบัดกรีแต่ละชนิดที่นำมาใช้ในงานวิจัย.....	44
ตารางที่ 3.2 ปริมาณส่วนผสมของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่จะทดสอบเพื่อยืนยันสมการทำนาย.....	63
ตารางที่ 4.1 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด 98.5Sn-1.5Cu...73	
ตารางที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด 97Sn-3Cu.....	75
ตารางที่ 4.3 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด 95.75Sn-2.25Cu-2Sb.....	77
ตารางที่ 4.4 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด 97.33Sn-2.67Sb.....	79
ตารางที่ 4.5 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด 94.5Sn-1.5Cu-4Sb.....	81
ตารางที่ 4.6 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด 93Sn-3Cu-4Sb.....	83
ตารางที่ 4.7 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด 92.5Sn-1.5Cu-6Sb.....	85

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.8	เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด 92Sn-8Sb.....	87
ตารางที่ 4.9	เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรี ชนิด 90.5Sn-1.5Cu-8Sb.....	89
ตารางที่ 4.10	เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรี ชนิด 89Sn-3Cu-8Sb.....	91
ตารางที่ 4.11	ผลการทดสอบความแข็งด้วยวิธี Vickers hardness.....	93
ตารางที่ 4.12	ผลการวิเคราะห์ Sequential model sum of squares ของความแข็ง.....	94
ตารางที่ 4.13	ผลการวิเคราะห์ Lack of fit ของความแข็ง.....	95
ตารางที่ 4.14	ผลการวิเคราะห์ Model summary statistics ของความแข็ง.....	96
ตารางที่ 4.15	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความแข็ง.....	97
ตารางที่ 4.16	ค่าทางสถิติของสมการทำนายผลของความแข็ง.....	97
ตารางที่ 4.17	การวิเคราะห์เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณหาความแข็ง.....	98
ตารางที่ 4.18	การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสมการทำนายและการทดสอบ.....	98

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ลักษณะของแร่ดีบุก (Sn).....	5
รูปที่ 2.2 แผ่นดีบุกใช้ทำกระป๋องและภาชนะต่างๆ.....	6
รูปที่ 2.3 ลักษณะของแร่ทองแดง (Cu).....	7
รูปที่ 2.4 สายลวดที่ทำจากทองแดง.....	8
รูปที่ 2.5 ลักษณะของแร่พลวง (Sb).....	9
รูปที่ 2.6 การเกิดการประสานกันระหว่างชิ้นงานโลหะโดยใช้การบัดกรี.....	11
รูปที่ 2.7 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมที่ประกอบด้วยตะกั่วและดีบุก.....	12
รูปที่ 2.8 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุก-ทองแดง (Sn-Cu).....	20
รูปที่ 2.9 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุก-พลวง (Sn-Sb).....	21
รูปที่ 2.10 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมทองแดง-พลวง (Cu-Sb).....	22
รูปที่ 2.11 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุก-ทองแดง-พลวง (Sn-Cu-Sb).....	24
รูปที่ 2.12 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....	26
รูปที่ 2.13 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	27
รูปที่ 2.14 ลักษณะห้วกดและวิธีการวัดขนาดเส้นทแยงมุม.....	30
รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ของส่วนผสมในแผนการทดลองที่มีส่วนผสม 3 ชนิด.....	35
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	45
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานโลหะบัดกรีเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค.....	46
รูปที่ 3.3 ลักษณะชิ้นงานที่นำมาตัดให้ได้ขนาด 5x5 มิลลิเมตร.....	47
รูปที่ 3.4 การหล่อเรซิน.....	47
รูปที่ 3.5 เครื่องขัดชิ้นงานทดลองยี่ห้อ Struers รุ่น Labopol-1.....	48
รูปที่ 3.6 แสดงการขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทราย.....	48
รูปที่ 3.7 ชนิดผงอะลูมินาที่ใช้ในการขัดมัน.....	49
รูปที่ 3.8 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope) ยี่ห้อ Zeiss รุ่น Axiolab.....	49
รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6510LV.....	50
รูปที่ 3.10 เครื่องตรวจวัดรังสีเอ็กซ์แบบกระจายพลังงานของธาตุ (EDS) ยี่ห้อ Oxford รุ่น X-Max ^N	50
รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบความแข็ง ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น SM-113.....	51
รูปที่ 3.12 ลักษณะรอยกดที่เกิดขึ้นจะเป็นรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส.....	51

ญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.13 นำค่าความแข็งที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design Expert 11.....	52
รูปที่ 3.14 การวิเคราะห์ผลในแถบ Transform.....	53
รูปที่ 3.15 การวิเคราะห์ผลในแถบ Fit summary.....	54
รูปที่ 3.16 การวิเคราะห์ผลในแถบ Model.....	55
รูปที่ 3.17 การวิเคราะห์ผลในแถบ ANOVA.....	55
รูปที่ 3.18 การวิเคราะห์ผลในแถบ Diagnostics.....	56
รูปที่ 3.19 การวิเคราะห์ Normal plot of residuals ในแถบ Diagnostics.....	57
รูปที่ 3.20 การวิเคราะห์ Residuals Vs Predicted ในแถบ Diagnostics.....	57
รูปที่ 3.21 การวิเคราะห์ Residuals Vs Run ในแถบ Diagnostics.....	58
รูปที่ 3.22 การวิเคราะห์ Residuals Vs Factor ในแถบ Diagnostics.....	58
รูปที่ 3.23 การวิเคราะห์ Cook's distance ในแถบ Diagnostics.....	59
รูปที่ 3.24 การวิเคราะห์ Leverage ในแถบ Diagnostics.....	60
รูปที่ 3.25 การวิเคราะห์ Predicted Vs Actual ในแถบ Diagnostics.....	60
รูปที่ 3.26 การวิเคราะห์ Box-Cox plot for power transforms ในแถบ Diagnostics.....	61
รูปที่ 3.27 การวิเคราะห์ในแถบ Model graphs.....	62
รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรีชนิด Sn Pure จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 50 เท่า.....	65
รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรีชนิด 98.5Sn-1.5Cu จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 100 เท่า.....	66
รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรีชนิด 97Sn-3Cu จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 50 เท่า.....	66
รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรีชนิด 95.75Sn-2.25Cu-2Sb จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 50 เท่า.....	67
รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรีชนิด 97.33Sn-2.67Sb จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 50 เท่า.....	67
รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรีชนิด 94.5Sn-1.5Cu-4Sb จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 100 เท่า.....	68

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรีชนิด 93Sn-3Cu-4Sb จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 50 เท่า.....	68
รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรีชนิด 92.5Sn-1.5Cu-6Sb จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 100 เท่า.....	69
รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรีชนิด 92Sn-8Sb จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 50 เท่า.....	69
รูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรีชนิด 90.5Sn-1.5Cu-8Sb จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 100 เท่า.....	70
รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรีชนิด 89Sn-3Cu-8Sb จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 50 เท่า.....	70
รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรีชนิด Sn Pure จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 100 เท่า.....	71
รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรีชนิด 98.5Sn-1.5Cu จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1000 เท่า.....	72
รูปที่ 4.14 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของโลหะบัดกรีชนิด 98.5Sn-1.5Cu ที่ตำแหน่ง IMC.....	73
รูปที่ 4.15 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของโลหะบัดกรีชนิด 98.5Sn-1.5Cu ที่ตำแหน่ง β Sn.....	73
รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรีชนิด 97Sn-3Cu จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1000 เท่า.....	74
รูปที่ 4.17 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของโลหะบัดกรีชนิด 97Sn-3Cu ที่ตำแหน่ง IMC.....	75
รูปที่ 4.18 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของโลหะบัดกรีชนิด 97Sn-3Cu ที่ตำแหน่ง β Sn.....	75
รูปที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรีชนิด 95.75Sn-2.25Cu-2Sb จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1000 เท่า.....	76
รูปที่ 4.20 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของโลหะบัดกรีชนิด 95.75Sn-2.25Cu-2Sb ที่ตำแหน่ง IMC.....	77
รูปที่ 4.21 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของโลหะบัดกรีชนิด 95.75Sn-2.25Cu-2Sb ที่ตำแหน่ง β Sn.....	77

ฉ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.22 โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรีชนิด 97.33Sn-2.67Sb จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1000 เท่า.....	78
รูปที่ 4.23 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของโลหะบัดกรีชนิด 97.33Sn-2.67Sb ที่ตำแหน่ง IMC....	79
รูปที่ 4.24 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของโลหะบัดกรีชนิด 97.33Sn-2.67Sb ที่ตำแหน่ง β Sn....	79
รูปที่ 4.25 โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรีชนิด 94.5Sn-1.5Cu-4Sb จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1000 เท่า.....	80
รูปที่ 4.26 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของโลหะบัดกรีชนิด 94.5Sn-1.5Cu-4Sb ที่ตำแหน่ง IMC.....	81
รูปที่ 4.27 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของโลหะบัดกรีชนิด 94.5Sn-1.5Cu-4Sb ที่ตำแหน่ง β Sn.....	81
รูปที่ 4.28 โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรีชนิด 93Sn-3Cu-4Sb จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1000 เท่า.....	82
รูปที่ 4.29 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของโลหะบัดกรีชนิด 93Sn-3Cu-4Sb ที่ตำแหน่ง IMC.....	83
รูปที่ 4.30 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของโลหะบัดกรีชนิด 93Sn-3Cu-4Sb ที่ตำแหน่ง β Sn.....	83
รูปที่ 4.31 โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรีชนิด 92.5Sn-1.5Cu-6Sb จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1000 เท่า.....	84
รูปที่ 4.32 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของโลหะบัดกรีชนิด 92.5Sn-1.5Cu-6Sb ที่ตำแหน่ง IMC.....	85
รูปที่ 4.33 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของโลหะบัดกรีชนิด 92.5Sn-1.5Cu-6Sb ที่ตำแหน่ง β Sn.....	85
รูปที่ 4.34 โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรีชนิด 92Sn-8Sb จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1000 เท่า.....	86
รูปที่ 4.35 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของโลหะบัดกรีชนิด 92Sn-8Sb ที่ตำแหน่ง IMC.....	87
รูปที่ 4.36 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของโลหะบัดกรีชนิด 92Sn-8Sb ที่ตำแหน่ง β Sn.....	87
รูปที่ 4.37 โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรีชนิด 90.5Sn-1.5Cu-8Sb จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1000 เท่า.....	88
รูปที่ 4.38 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของโลหะบัดกรีชนิด 90.5Sn-1.5Cu-8Sb ที่ตำแหน่ง IMC.....	89

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.39 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของโลหะบัดกรีชนิด 90.5Sn-1.5Cu-8Sb ที่ตำแหน่ง β Sn.....	89
รูปที่ 4.40 โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรีชนิด 89Sn-3Cu-8Sb จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1000 เท่า.....	90
รูปที่ 4.41 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของโลหะบัดกรีชนิด 89Sn-3Cu-8Sb ที่ตำแหน่ง IMC.....	91
รูปที่ 4.42 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของโลหะบัดกรีชนิด 89Sn-3Cu-8Sb ที่ตำแหน่ง β Sn.....	91



บทที่ 1

บทนำ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคและความแข็งของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-Cu-Sb และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณส่วนผสมของธาตุ Sn, Cu และ Sb ที่ถูกผสมขึ้นมาเป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว ทั้งหมด 11 ชนิด ที่มีผลกับค่าความแข็ง ซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดของงานวิจัยเป็นดังนี้

- 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ
- 1.2 วัตถุประสงค์
- 1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์
- 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ
- 1.5 ตารางการดำเนินการ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันประเทศไทยผลิตและส่งออกสินค้าอิเล็กทรอนิกส์เป็นจำนวนมาก และมีมูลค่าการส่งออกสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ในแต่ละปีมากกว่าหนึ่งล้านล้านบาท [1] และเนื่องจากปัญหาเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัยในสุขภาพของมนุษย์ สหภาพยุโรปได้ออกข้อบังคับ RoHS (The Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances) เพื่อควบคุมการใช้สารมีพิษบางชนิดรวมทั้งตะกั่ว ทำให้ผู้ส่งออกสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ไม่สามารถส่งสินค้าที่ใช้โลหะบัดกรีที่มีตะกั่วเป็นส่วนผสมเข้าไปขายในสหภาพยุโรปได้ [2] ส่งผลให้อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์จำเป็นต้องปรับตัว โดยนำโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-free solders) มาใช้งานแทนโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิมที่มีส่วนผสมของดีบุกและตะกั่วเป็นหลัก โดยในช่วงเวลาที่ผ่านมามีการพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วขึ้นมาหลายกลุ่ม เพื่อทดแทนโลหะบัดกรีที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ มีทั้งที่เป็นสารประกอบระหว่างโลหะ 2 ชนิด เช่น Sn-Ag, Sn-Cu, Sn-Zn, Sn-Bi และ Sn-In หรือเป็นสารประกอบระหว่างโลหะ 3 ชนิด เช่น Sn-Ag-Cu, Sn-Ag-Bi และ Sn-Zn-Bi ซึ่งโลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมต่างชนิดกันก็จะมีคุณสมบัติและลักษณะเด่นที่แตกต่างกันไป [52]

ดังนั้น จึงได้มีการพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วกลุ่มใหม่ๆ อยู่ตลอดเวลา เพื่อให้ได้โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ดีที่สุดสำหรับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ทั้งนี้โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วกลุ่มหนึ่งที่มีศักยภาพสูงสำหรับการพัฒนาต่อไปในอนาคต คือ โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วกลุ่ม Sn-Cu เนื่องจากเป็นโลหะบัดกรีที่

มีราคาต่ำ แต่โลหะบัดกรีกลุ่ม Sn-Cu มีข้อเสีย คือ มีจุดหลอมเหลวที่ค่อนข้างสูง (227-230 °C) และมีความสามารถในการบัดกรี (Solderability) ที่ต่ำ [6] โดยทั่วไปแล้วการลดจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรี อาจทำได้โดยการเติมธาตุเจือ (Alloying element) บางชนิดลงไป เช่น เงิน (Ag) บิสมัท (Bi) แกลเลียม (Ga) อินเดียม (In) หรือ พลวง (Sb) แต่การเติมธาตุเจือเหล่านี้ลงไปอาจทำให้คุณสมบัติอื่นๆ เช่น ความสามารถในการบัดกรี โครงสร้างจุลภาค หรือคุณสมบัติทางกลของโลหะบัดกรีเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย และการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติต่างๆ ที่เกิดขึ้นก็มีความแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะบัดกรีและส่วนประกอบของธาตุเจือที่ใช้ [7-34] Sb เป็นธาตุเจือชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว เนื่องจากไม่ได้เป็นสารมีพิษที่ถูกควบคุมการใช้งานในสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ และมีราคาถูกเมื่อเทียบกับธาตุเจือชนิดอื่นๆ [35] รวมทั้งสามารถละลายเข้ากับ Sn และ Cu ได้ [36]

จากที่กล่าวมาข้างต้นปริญญาณีพนธ์ฉบับนี้จึงจัดทำเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคและความแข็งของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-Cu-Sb โดยใช้วิธีการออกแบบของผสม (Mixture design) ซึ่งผลจากงานวิจัยนี้สามารถใช้พัฒนาเป็นโลหะบัดกรีชนิดใหม่ได้ อีกทั้งยังสร้างองค์ความรู้พื้นฐานทางด้านโลหะวิทยาของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของ Cu และ Sb ที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วในกลุ่ม Sn-Cu-Sb
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของ Cu และ Sb ที่มีผลต่อความแข็งของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วในกลุ่ม Sn-Cu-Sb

1.3 ขอบเขตของปริญญาณีพนธ์

ศึกษาโดยใช้โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วในกลุ่ม Sn-Cu-Sb ซึ่งปริมาณของ Sn มีค่าตั้งแต่ 89-100 % โดยน้ำหนัก Cu มีค่าตั้งแต่ 0-3 % โดยน้ำหนัก และ Sb มีค่าตั้งแต่ 0-8 % โดยน้ำหนัก และทดสอบความแข็ง โดยใช้วิธี Micro Vickers Hardness Test

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมกับโครงสร้างจุลภาคและความแข็งของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว
2. สามารถนำไปเป็นมาตรฐานในการเลือกส่วนผสมเพื่อให้มีลักษณะความแข็งที่ต้องการได้
3. สามารถวิเคราะห์เลือกใช้โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วในกลุ่ม Sn-Cu-Sb ไปใช้งานได้อย่างเหมาะสม

1.5 ตารางการดำเนินการ

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการ									
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1.ศึกษาเพื่อหาหัวข้อที่สนใจในการทำวิทยานิพนธ์	←→									
2.ศึกษาข้อมูล ทฤษฎี และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง										
2.1 ศึกษาข้อมูลของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว										
2.2 ศึกษาการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค										
3.เตรียมชิ้นงานโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว										
3.1 ตัดชิ้นงานขนาด 5*5 มม.										
3.2 ขัดผิวหยาบด้วยกระดาษทราย (Grinding)										
3.3 ขัดผิวมัน (Polishing)										
4.ตรวจสอบและศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน										
5.ทดสอบคุณสมบัติความแข็งของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วในกลุ่ม Sn-Cu-Sb										
6.วิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อสรุปผลการดำเนินงานและเสนอแนวทางพัฒนา										
7.จัดทำวิทยานิพนธ์										

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้ดำเนินงานวิจัยได้ทำการศึกษาทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้ในการดำเนินการทดลองตามที่วางแผนไว้ ตลอดจนการวิเคราะห์ข้อมูล โดยทำการศึกษาหัวข้อที่เกี่ยวข้องดังรายละเอียดต่อไปนี้

- 2.1 คุณสมบัติส่วนผสมของโลหะบัดกรี
- 2.2 โลหะบัดกรี (Solder)
- 2.3 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-free solder)
- 2.4 แผนภูมิเฟสของโลหะบัดกรี
- 2.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure analysis)
- 2.6 การทดสอบความแข็ง (Hardness tester)
- 2.7 การออกแบบการทดลอง (Design of experiments: DOE)
- 2.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance: ANOVA)

2.1 คุณสมบัติส่วนผสมของโลหะบัดกรี

โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-Cu-Sb มีดีบุก (Sn) เป็นส่วนประกอบพื้นฐาน และมีการเติมธาตุอื่นๆ คือ ทองแดง (Cu) และพลวง (Sb) เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการใช้งาน

2.1.1 ดีบุก (Tin) [37]

ดีบุก มีคุณสมบัติทั่วไป ดังนี้

1. มีความต้านทานการกัดกร่อน และไม่เป็สนิม
2. มีจุดหลอมเหลวต่ำ
3. ต้านทานการเสียดสี
4. มีความอ่อนตัวสูง สามารถตีขึ้นรูปหรือดัดให้โค้งงอได้ง่าย
5. ไม่เป็นพิษต่อร่างกาย
6. เพิ่มความแข็งแรงเมื่อผสมกับโลหะอื่น
7. มีค่าดัชนีความหักเหแสงสูง ทำให้แลดูแวววาว (Luster)
8. จับผิวโลหะต่างๆได้ดี จึงนิยมใช้เคลือบโลหะ

2.1.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี [38]

สัญลักษณ์ธาตุ	Sn (มาจากคำในภาษาละตินว่า Stannum)
เลขอะตอม	50
มวลอะตอม	118.7 g/mol
จุดหลอมเหลว	231.97 °C (505.08 K)
จุดเดือด	2270 °C (2875 K)
ความหนาแน่น	7.31 g/cm ³ ที่ 20 °C
โครงสร้างผลึก	Tetragonal
ความแข็ง	7-9 kg/mm ³
อนุกรมเคมี	โลหะหลังทรานซิชัน
ลักษณะ	สีเทาเงิน เป็นประกาย เป็นมัน
สถานะ	ของแข็ง ณ อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 2.1 ลักษณะของแร่ดีบุก (Sn)

2.1.1.2 การใช้ประโยชน์

ดีบุกเป็นโลหะชนิดหนึ่งที่มีการใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง ตัวอย่างการใช้ประโยชน์ที่สำคัญมีดังนี้

1. ใช้ทำแผ่นดีบุก (Tinplate) ซึ่งเป็นแผ่นเหล็กกล้าบาง มีปริมาณคาร์บอนต่ำ เคลือบด้วยผิวดีบุกโดยกระบวนการชุบไฟฟ้า (Electro deposition) ปริมาณกึ่งหนึ่งของดีบุกที่ผลิตได้นำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตแผ่นดีบุกนี้ แผ่นดีบุกใช้ทำกระป๋องและภาชนะต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระป๋องและภาชนะบรรจุอาหาร
2. ใช้ทำโลหะเจือกับโลหะอื่น เช่น เจือกับตะกั่วเกิดโลหะเจือที่นิยมเรียกว่า Soft solders เจือกับทองแดงเรียกว่า Tin-bronzes เจือกับพลวงและทองแดงใช้ทำ Pewtrate เป็นต้น
3. ใช้เคลือบผิวโลหะอื่นๆ
4. ใช้เตรียมสารประกอบต่างๆของดีบุก



รูปที่ 2.2 แผ่นดีบุกใช้ทำกระป๋องและการภาชนะต่างๆ

2.1.1.3 ความเป็นพิษของดีบุก

ดีบุกเป็นธาตุที่พบได้ตามธรรมชาติ แต่จะพบดีบุกในดินและอาหารต่างๆในปริมาณน้อย ดีบุกใช้ในการผลิตกระป๋อง ตะกั่วขั้วดี เหล็ก ท่อทองแดง ตัวดีบุกเองไม่มีโทษร้ายแรงต่อร่างกายมนุษย์แต่สารอินทรีย์ของดีบุกจะมีโทษร้ายแรง เช่น DIMETHYLTIN, DALKYL TIN AND TRIPHENYLTIN

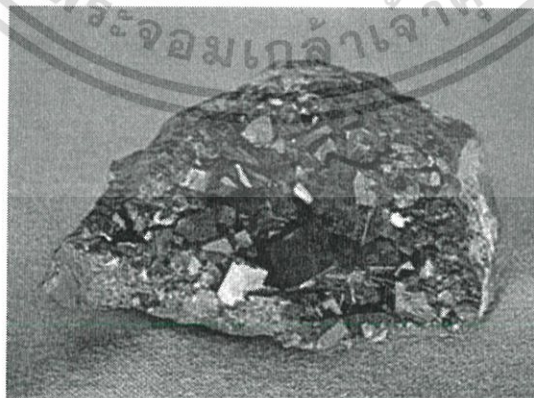
2.1.2 ทองแดง (Copper)

ทองแดง มีคุณสมบัติทั่วไป ดังนี้

1. มีความแข็งแรงในช่วงที่พอใช้งานได้ ทั้งยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกลได้หลายระดับ (ขึ้นอยู่กับชนิดทองแดง และกรรมวิธีการผลิต)
2. ความเหนียวของทองแดงสูงมาก สามารถขึ้นรูปได้โดยไม่เสี่ยงต่อการแตกหัก
3. นำไฟฟ้าได้ดี
4. นำความร้อนได้ดี
5. กลึงไสขึ้นรูปได้ง่าย เมื่อผสมธาตุบางชนิด

2.1.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี

สัญลักษณ์ธาตุ	Cu
เลขอะตอม	29
มวลอะตอม	63.546 g/mol
จุดหลอมเหลว	1084.62 °C (1357.77 K)
จุดเดือด	2562 °C (2835 K)
ความหนาแน่น	8.92 g/cm ³ ที่ 20 °C
โครงสร้างผลึก	Face centered cubic (FCC)
ความแข็ง	77-99 kg/mm ³
อนุกรมเคมี	โลหะทรานซิชัน
ลักษณะ	สีน้ำตาล
สถานะ	ของแข็ง ณ อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 2.3 ลักษณะของแร่ทองแดง (Cu)

2.1.2.2 การใช้ประโยชน์

ทองแดงสามารถขึ้นรูปได้ง่าย จึงใช้แพร่หลายในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ดังนี้

1. สายลวดทองแดง
2. ท่อน้ำทองแดง
3. ชิ้นส่วนในเครื่องจักรไฟฟ้า โดยเฉพาะมอเตอร์แม่เหล็กไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
4. หลอดสุญญากาศ หลอดรังสีแคโทด (Cathode ray tube) และแมกนีตรอนในเตาอบไมโครเวฟ
5. มีการใช้ทองแดงเพิ่มขึ้นในวงจรไอซีแทนอะลูมิเนียมเนื่องจากนำไฟฟ้าได้ดีกว่า
6. เป็นเหรียญกษาปณ์ ในรูปของโลหะคิวโปรนิกเกิดส่วนใหญ่
7. เป็นส่วนประกอบของสารเคลือบเงาสำหรับเครื่องเซรามิก และเป็นสีสำหรับกระจก
8. เครื่องดนตรี โดยเฉพาะเครื่องดนตรีประเภทแตร



รูปที่ 2.4 สายลวดที่ทำจากทองแดง

2.1.2.3 ความเป็นพิษของทองแดง

การเกิดพิษจากทองแดงขึ้นอยู่กับปริมาณที่ได้รับเข้าไป ช่องทางที่ได้รับและสภาพร่างกายของแต่ละบุคคล ทองแดงถูกดูดซึมได้ดีในกระเพาะอาหารและลำไส้ส่วนบนโดยซึมผ่านเข้าผนังลำไส้ไปที่ตับ จากนั้นจะรวมตัวกับน้ำดีแล้วถูกหลั่งออกมาบริเวณลำไส้ขับออกไปกับอุจจาระหรืออาจถูกดูดกลับเข้าสู่ร่างกายได้ 30% โดยไปสะสมที่กระดูก กล้ามเนื้อ ตับ และสมอง

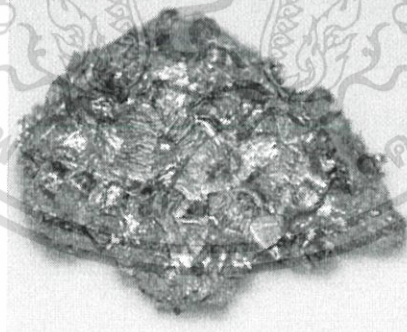
เมื่อได้รับทองแดงในปริมาณมากจะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อร่างกายคือ คลื่นไส้ อาเจียน เกิดการอักเสบในช่องท้องและกล้ามเนื้อ ท้องเสีย การทำงานของหัวใจผิดปกติ กดระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย และอาจส่งผลให้เกิดความผิดปกติทางจิต ส่วนอาการเรื้อรังจากการได้รับติดต่อกันเป็นเวลานาน และตับทำหน้าที่บกพร่องไม่สามารถขับทองแดงออกจากร่างกายได้ตามปกติ จึงทำให้มีการสะสมอยู่ในร่างกายเป็นปริมาณมากส่งผลให้เกิดความผิดปกติของร่างกาย หรือกลุ่มอาการ Wilson' Diseases คือร่างกายสันอยู่ตลอดเวลา กล้ามเนื้อแข็งเกร็ง มีน้ำมูกน้ำลายไหล ควบคุมการพูดลำบาก ส่วนมากพบทั้งในรูปไอและเกลือของทองแดง ถ้าร่างกายได้รับไอทองแดงมาก ๆ จะทำให้เกิดการคลื่นไส้อาเจียน เป็นไข้

(Metal fume fever) อาจทำให้ผิวหนังและผมเปลี่ยนสีได้ ถ้าได้รับในปริมาณมากทำให้เนื้อเยื่อจุ่มกอักเสบและเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดโรคโลหิตจาง

2.1.3 พลวง (Antimony)

2.1.3.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี

สัญลักษณ์ธาตุ	Sb (มาจากคำในภาษาละตินว่า Stibinum)
เลขอะตอม	51
มวลอะตอม	121.76 g/mol
จุดหลอมเหลว	630.63 °C (903.78 K)
จุดเดือด	1587 °C (1860 K)
ความหนาแน่น	6.697 g/cm ³ ที่ 20 °C
โครงสร้างผลึก	Rhombohedral หรือ Trigonal
ความแข็ง (HV)	50-69 kg/mm ³
อนุกรมเคมี	กึ่งโลหะ
ลักษณะ	พลวงที่เสถียรจะเป็นโลหะสีฟ้า และอโลหะที่ไม่เสถียรจะมีสีเหลืองหรือสีดำ
สถานะ	ของแข็ง ณ อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 2.5 ลักษณะของแร่พลวง (Sb)

2.1.3.2 การใช้ประโยชน์

พลวงเป็นโลหะชนิดหนึ่งที่มีการใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง ตัวอย่างการใช้ประโยชน์ที่สำคัญมีดังนี้

1. พลวงผสมตะกั่วทำแผ่นธาตุแบตเตอรี่รถยนต์
2. ผสมตะกั่วและดีบุกในการทำตะกั่วตัวพิมพ์
3. ใช้เป็นส่วนประกอบของกระสุนปืน ใช้ในอุตสาหกรรมไม้ขีดไฟทาข้างกล่องไม้ขีด
4. อุตสาหกรรมทำยางพีวีซีหุ้มสายไฟฟ้า และทำผ้าทนไฟ วัสดุทนไฟ เสื้อกันไฟ และในอุตสาหกรรมเครื่องเคลือบเป็นต้น

2.1.3.3 ความเป็นพิษของพลวง

แร่พลวงและโลหะพลวงทุกชนิดเป็นพิษมีผลกระทบต่อร่างกายมนุษย์เช่นเดียวกับสารหนูกระตุ้นประสาททั้งภายในและภายนอกร่างกาย มีผลกระทบต่อหัวใจ การหายใจและระบบประสาท

2.2 โลหะบัดกรี (Solder) [36]

โลหะบัดกรี คือ โลหะผสมที่มีจุดหลอมละลายต่ำใช้เป็นตัวเชื่อมประสานชิ้นงานโลหะเข้าด้วยกัน โดยทั่วไปอุณหภูมิในการหลอมละลายของตัวเชื่อมประสานควรต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมละลายของชิ้นงานเสมอ และโลหะบัดกรีนี้อาจทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานเท่านั้น โดยโลหะบัดกรีที่ใช้กันแพร่หลายทั่วไปคือ โลหะผสมของตะกั่วและดีบุก (Sn-Pb) ซึ่งมีข้อดี คือ ราคาถูก มีคุณสมบัติการบัดกรีที่ดี อุณหภูมิหลอมละลายต่ำ มีการกระจายตัวบนผิวโลหะต่างๆได้ดี และให้รอยต่อที่มีความแข็งแรง แต่ยังคงมีความเป็นพิษเนื่องจากมีปริมาณตะกั่วที่ผสมอยู่ในปริมาณสูง

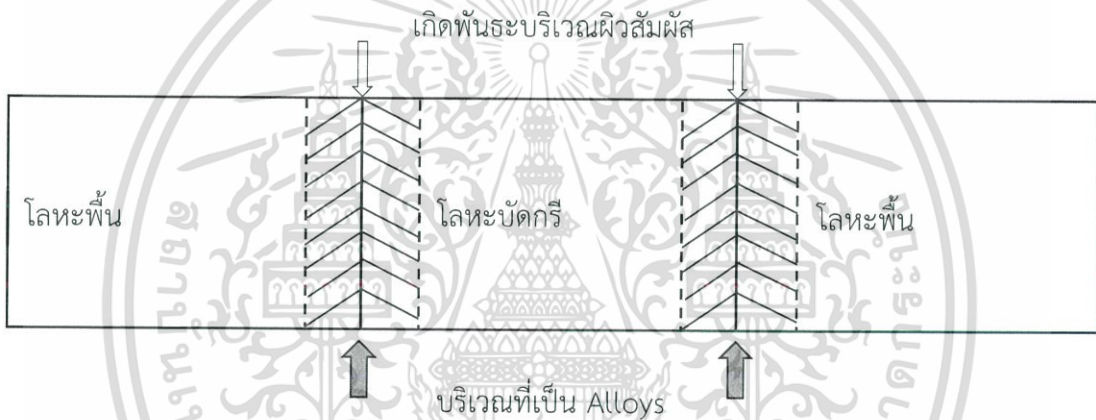
ซึ่งในระหว่างการบัดกรีจะก่อให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างโลหะบัดกรีกับชิ้นงานโลหะ (Base metal) โดยจะเกิดการเกาะติดกันทางกลของโลหะบัดกรีกับความหยวบบนผิวหน้าที่ไม่สม่ำเสมอของแผ่นโลหะชิ้นงาน พร้อมทั้งเกิดพันธะโลหะระหว่างโลหะบัดกรีกับชิ้นงาน โดยปกติแล้วพันธะโลหะที่จะเกิดขึ้นจะมีความแข็งแรงมากกว่าการเกาะติดทางกล นอกจากนี้ในส่วนที่เกิดปฏิกิริยาจะพบการเกิดสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compound) ระหว่างโลหะบัดกรีกับแผ่นชิ้นงานโลหะด้วย ลักษณะการเกิดการประสานกันระหว่างชิ้นงานโลหะโดยการใช้บัดกรีแสดงไว้ในรูปที่ 2.6

โดยบริเวณการบัดกรีจะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ

1. บริเวณที่ชิ้นงานโลหะทำปฏิกิริยากับโลหะบัดกรีเกิดเป็นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compounds)

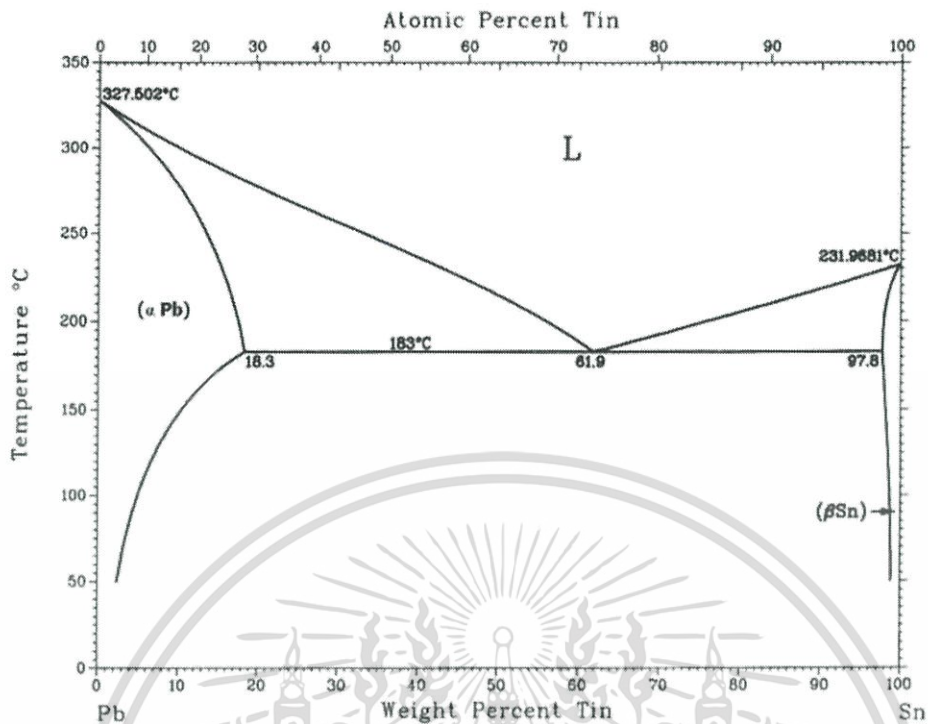
2. บริเวณที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยากับโลหะบัดกรี บริเวณนี้โครงสร้างจุลภาคจะไม่มีเปลี่ยนแปลงไปจากโลหะบัดกรีเดิมแต่บริเวณนี้มีพื้นที่ค่อนข้างน้อยในการวิจัยจึงใช้ชิ้นงานอีกชิ้นเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีเฉพาะในส่วนนี้เพื่อง่ายต่อการวิเคราะห์และมีบริเวณที่จะศึกษามากกว่าชิ้นงานที่ผ่านการบัดกรีแล้ว แสดงดังรูปที่ 2.6

บริเวณทั้งสองส่วนนี้จะถูกแรงกระทำเหมือนกัน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องศึกษาโครงสร้างจุลภาคของทั้งสองบริเวณ เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างที่เกิดขึ้นซึ่งส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลหลังจากนำไปใช้งาน



รูปที่ 2.6 การเกิดการประสานกันระหว่างชิ้นงานโลหะโดยใช้การบัดกรี [42]

เนื่องจากโลหะบัดกรีทำมาจากโลหะผสม (Alloys) ระหว่างดีบุกและตะกั่ว (Sn-Pb) มีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ แต่อาจไม่เหมาะสมกับการใช้งานบางประเภท จึงทำให้มีการนำเอาโลหะชนิดอื่นเข้ามาผสมในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน เช่น พลวง (Sb) เงิน (Ag) แคดเมียม (Cd) อินเดียม (In) และบิสมัท (Bi) เพื่อช่วยในการควบคุมสมบัติทางกลและทางกายภาพของตะกั่วบัดกรี เช่น ช่วงของอุณหภูมิการหลอมเหลว ความแข็ง และความต้านทานการกัดกร่อน ซึ่งส่วนผสมจะถูกออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยโลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมระหว่างดีบุกและตะกั่วในอัตราส่วนแตกต่างกันจะมีผลทำให้อุณหภูมิวิกฤต (Liquidus temperature) มีความแตกต่างกัน แสดงในเฟสไดอะแกรมดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมที่ประกอบด้วยตะกั่วและดีบุก

ดีบุกจะเริ่มหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 183 °C และกลายเป็นของเหลวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 232 °C ส่วนตะกั่วจะเริ่มหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 283 °C และกลายเป็นของเหลวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 327 °C หากใช้ดีบุกหรือตะกั่วเพียงอย่างใดอย่างหนึ่งในการบัดกรีจะไม่เหมาะสม เนื่องจากจุดหลอมเหลวสูงเกินไป แต่เมื่อนำเอาดีบุกและตะกั่วมาผสมกันในอัตราส่วนที่พอเหมาะ จะทำให้ได้ตะกั่วบัดกรีที่มีจุดหลอมเหลวและอุณหภูมิช่วงอ่อนตัวลดต่ำลง ถ้าใช้อัตราส่วนระหว่างดีบุก 61.9% โดยน้ำหนัก และตะกั่ว 38.1% โดยน้ำหนัก จะทำให้ส่วนผสมนี้ไม่มีบริเวณที่เป็นสถานะของผสม โดยจะเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นของเหลวที่อุณหภูมิ 183 °C ดังในเฟสไดอะแกรม แต่ส่วนผสมนี้ไม่นิยมใช้งาน เนื่องจากจะทำให้เกิดความเปราะของรอยบัดกรีภายใต้สภาวะการใช้งาน

อัตราส่วนที่นิยมใช้กันมากที่สุดของตะกั่วบัดกรีที่ใช้ในงานทางอิเล็กทรอนิกส์ คือ ดีบุก 60% และตะกั่ว 40% โดยน้ำหนัก ซึ่งเรียกว่า ตะกั่วบัดกรีแบบ 60/40 และถูกจัดว่าเป็นตะกั่วแบบอ่อนโดยจะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 188 °C และมีช่วงการหลอมเหลวประมาณ 5 °C ซึ่งจะทำให้ได้ความแข็งแรงดีที่สุด และมีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าต่ำสุดด้วย สำหรับรอยต่อที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูงหรือต้องการความแข็งแรงทางกลมากๆ จำเป็นต้องใช้ตะกั่วบัดกรีแบบแข็ง ซึ่งจะประกอบด้วยอัตราส่วนผสมของดีบุกต่อตะกั่ว 30/70 และมีช่วงหลอมเหลวประมาณ 255 ถึง 275 °C

2.3 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-free solder)

สินค้าอิเล็กทรอนิกส์เป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญของประเทศไทย โดยในแต่ละปีมีมูลค่าการส่งออกมากกว่า 1 ล้านล้านบาท [1] และเนื่องจากสินค้าอิเล็กทรอนิกส์เป็นสินค้าที่มีองค์ประกอบที่เป็นสารมีพิษหลายชนิด ส่งผลให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัยในสุขภาพของมนุษย์ตามมา ทำให้หลายๆประเทศได้ออกข้อบังคับ มาเพื่อควบคุมการใช้สารมีพิษบางชนิดในสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ ข้อบังคับที่เป็นที่รู้จักกันในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คือ ข้อบังคับ RoHS (The restriction of the use of certain hazardous substances) ของสหภาพยุโรป ซึ่งระบุสารมีพิษที่ถูกควบคุมการใช้งานในสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ ตะกั่ว (Pb)ปรอท (Hg) แคดเมียม (Cd) Hexavalent chromium (Cr^{6+}) Polybrominated biphenyls และ Polybrominated diphenyl ether [2] จากการออกข้อบังคับเหล่านี้ ทำให้ผู้ส่งออกสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ไม่สามารถส่งสินค้าที่ใช้โลหะบัดกรีที่มีตะกั่วเป็นส่วนผสมเข้าไปจำหน่ายในสหภาพยุโรปได้ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์จึงต้องเปลี่ยนโลหะบัดกรีและกระบวนการบัดกรี โดยนำโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-free solders) มาใช้งานแทนโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิมที่เป็นโลหะผสม (Alloys) ระหว่างดีบุกและตะกั่ว (Tin-lead solders)

ตั้งแต่คณะกรรมาธิการยุโรปหรืออีซี (EC-European commission) ซึ่งเป็นหน่วยงานที่กำหนดนโยบายและการบริหารงานร่วมของประเทศในเครือสหภาพยุโรป (EU-European union) ได้ใช้ข้อบังคับ RoHS เมื่อวันที่ 1 กรกฎาคม ค.ศ. 2006 จึงทำให้มีการพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วขึ้นมาหลายกลุ่มเพื่อใช้ทดแทนโลหะบัดกรีที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ เช่น กลุ่ม Sn-Ag กลุ่ม Sn-Bi กลุ่ม Sn-Cu กลุ่ม Sn-Zn และกลุ่ม Sn-Ag-Cu เป็นต้น ซึ่งโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบัน คือ โลหะบัดกรีในกลุ่ม Sn-Ag-Cu เนื่องจากมีคุณสมบัติหลายประการที่เหมาะสมกับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้การบัดกรีด้วยวิธี Reflow soldering หรือ Wave soldering โดยเฉพาะอย่างยิ่งโลหะบัดกรี Sn-3.0Ag-0.5Cu เนื่องจากเป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าที่ดี และมีความแข็งแรงของรอยบัดกรีสูง [3-6] แต่ Sn-3.0Ag-0.5Cu มีคุณสมบัติด้อยกว่าโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิม (Sn-Pb eutectic solder) ในเรื่องจุดหลอมที่สูงกว่า โดย Sn-3.0Ag-0.5Cu จะมีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 221-217°C ในขณะที่ Sn-Pb eutectic solder มีจุดหลอมเหลวเพียง 183°C [3] ซึ่งการใช้อุณหภูมิในการบัดกรีที่สูงขึ้นนั้น ทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และแผงวงจรมีโอกาสเกิดความเสียหายได้ง่ายขึ้น อีกทั้งโลหะบัดกรี Sn-3.0Ag-0.5Cu มีส่วนผสมของเงิน (Ag) ในปริมาณมากถึง 3% โดยน้ำหนัก ทำให้พบการแตกร้าวของโลหะบัดกรีได้ง่ายเมื่อได้รับความเค้นอย่างต่อเนื่อง เพราะเงินทำให้มีสารประกอบเชิงโลหะ Ag_3Sn ที่มีความเปราะสูง เกิดขึ้นในเนื้อโลหะบัดกรี นอกจากนี้โลหะบัดกรีที่มีเงินผสมอยู่จะมีผิวของรอยบัดกรีที่ขุ่นมัวอีกด้วย [4] และที่สำคัญอีกประการ คือ Sn-3.0Ag-0.5Cu เป็นโลหะบัดกรีที่มีเงินเป็นองค์ประกอบในปริมาณที่ค่อนข้างสูง จึงทำให้ราคาของโลหะบัดกรีชนิดนี้สูงตามไปด้วย

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วกลุ่มใหม่ๆอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้ได้โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ดีที่สุดสำหรับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ทั้งนี้โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วกลุ่มหนึ่งที่มีศักยภาพสูงสำหรับการพัฒนาต่อไปในอนาคต คือ โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วกลุ่ม Sn-Cu เนื่องจากเป็นโลหะบัดกรีที่มีราคาต่ำ แต่โลหะบัดกรีกลุ่ม Sn-Cu มีข้อเสีย คือ มีจุดหลอมเหลวที่ค่อนข้างสูง (230-227°C) และมีความสามารถในการบัดกรี (Solderability) ที่ต่ำ [6] โดยทั่วไปแล้วการลดจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีอาจทำได้โดยการเติมธาตุเจือ (Alloying element) บางชนิดลงไป เช่น เงิน (Ag) บิสมัท (Bi) แกลเลียม (Ga) อินเดียม (In) หรือ พลวง (Sb) แต่การเติมธาตุเจือเหล่านี้ลงไปอาจทำให้คุณสมบัติอื่นๆ เช่น ความสามารถในการบัดกรี โครงสร้างจุลภาค หรือคุณสมบัติทางกลของโลหะบัดกรีเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย และการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติต่างๆที่เกิดขึ้นก็มีความแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะบัดกรีและธาตุเจือที่ใช้ [7-34]

2.3.1 คุณสมบัติเบื้องต้นในการพิจารณาเลือกใช้โลหะบัดกรีแบบไร้สารตะกั่ว

ตะกั่วบัดกรีที่เป็นส่วนผสมระหว่างดีบุกและตะกั่ว (Sn-Pb) โดยส่วนผสมที่นิยมใช้งาน คือ 63Sn-37Pb โลหะบัดกรีชนิดนี้มีข้อดีหลายประการ เช่น ราคาถูก รอยต่อมีความแข็งแรง ความเงางาม และนำไฟฟ้าได้ดี เป็นต้น ดังนั้นการที่จะนำโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วมาใช้งานแทนตะกั่วบัดกรีชนิดนั้นมีข้อควรพิจารณาเบื้องต้นดังนี้

1. ต้องมีราคาถูก หาได้ง่าย เนื่องจากราคาของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วโดยทั่วไปจะสูงกว่าตะกั่วบัดกรีคือ 63Sn-37Pb อย่างน้อย 35 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป เนื่องจากโลหะที่จะนำมาทดแทนสารตะกั่วเป็นโลหะที่หาได้ยากและมีอยู่อย่างจำกัดเช่นบิสมัท อินเดียม หรือเงิน เป็นต้น จะส่งผลให้ต้นทุนของสินค้าสูงขึ้นด้วย
2. จุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วโดยทั่วไปจะสูงกว่าตะกั่วบัดกรี การที่โลหะบัดกรีมีจุดหลอมเหลวสูงก็หมายถึงเราต้องปรับตั้งอุณหภูมิของเครื่องหลอมตะกั่วให้สูงขึ้นด้วย ซึ่งอาจทำให้ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์เสียหายได้ หรืออาจทำให้แผงวงจรเกิดการเปลี่ยนสีหรือเสียรูปเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงเกินไป
3. ความสามารถในการนำไฟฟ้าดี ไม่ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ลดลง
4. ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ดี
5. ต้องไม่มีความเป็นพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมตามข้อบังคับของ RoHs
6. ต้องใช้ได้ดีกับเครื่องหลอมโลหะที่มีอยู่โดยไม่ต้องดัดแปลงมากหรืออาจยอมรับการดัดแปลงเพียงเล็กน้อย เช่น เพิ่มระบบจ่ายก๊าซไนโตรเจนในเครื่องบัดกรีแบบคลื่น (Wave soldering) หรือเครื่องบัดกรีแบบรีโฟลว์ (Reflow soldering) เพื่อปรับปรุงคุณภาพของจุดบัดกรี

7. คุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ความแข็งแรงความทนทานของจุดบัดกรีต้องไม่น้อยไปกว่าตะกั่วบัดกรี

8. มีสมบัติการต้านทานการล้าที่ดี

9. มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันต่ำ

10. สามารถใช้กับระบบพลาซมาเคลือบที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบัน

11. ควรมีจุดหลอมเหลวคงที่เนื่องจากในการผลิตสินค้าปริมาณมากๆ (Mass volume) จะต้องมีการควบคุมความผันแปรต่างๆในกระบวนการผลิตเพื่อไม่ให้ปริมาณของเสียในการผลิตมีมากเกินไป ถ้าสังเกตว่าโลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมของโลหะตั้งแต่ 4 ชนิดขึ้นไปจะมีจุดหลอมเหลวที่มีลักษณะเป็นช่วงอุณหภูมิไม่คงที่ที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่งดังนั้นการเลือกใช้โลหะบัดกรีประเภทนี้จะทำให้ประสบปัญหาในกระบวนการผลิตได้

12. ความสวยงามของจุดบัดกรี (Solder joint cosmetics) ควรจะใกล้เคียงกับตะกั่วบัดกรีชนิด 63Sn-37Pb

13. โลหะที่จะนำมาทดแทนสารตะกั่วจะต้องหาได้ง่ายผู้ผลิตสามารถผลิตออกมาแข่งขันได้อย่างกว้างขวางซึ่งจะส่งผลให้ราคาตกลงในอนาคต

14. ผู้ผลิตแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดติดตั้งบนพื้นผิว (Surface mounted devices: SMD) หลายรายยังคงไม่สามารถเลิกใช้โลหะบัดกรีที่มีสารตะกั่วได้ในเวลาอันสั้น ทำให้ชิ้นส่วนของอุปกรณ์ SMD หรือลายวงจรบนแผ่นวงจรพิมพ์บางชนิดก็ยังมีสารตะกั่วเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงความสามารถในการเชื่อมประสานกันระหว่างโลหะบัดกรีแบบไร้สารตะกั่วกับโลหะกับสารตะกั่วที่ติดตั้งชิ้นส่วนของอุปกรณ์ SMD และแผ่นวงจรพิมพ์ด้วยซึ่งถ้าไม่สามารถเชื่อมประสานกันได้ดีก็อาจทำให้จุดบัดกรีนั้นไม่แข็งแรงเพียงพอต่อการนำมาใช้งานหรือมีผลกับการใช้งานของผลิตภัณฑ์ในระยะยาว (Reliability)

2.3.2 โลหะทดแทนสารตะกั่ว [45]

การพิจารณาโลหะที่จะนำมาทดแทนสารตะกั่ว และนำมาผสมกับดีบุกมีหลายชนิดด้วยกัน เช่น เงิน อินเดียม สังกะสี พลวง ทองแดง และบิสมัท สาเหตุที่โลหะดังกล่าวถูกนำมาพิจารณา เนื่องจากเมื่อนำโลหะเหล่านี้มาผสมกับดีบุกแล้ว จุดหลอมเหลวที่ได้ของโลหะบัดกรีมีแนวโน้มลดลง มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกายภาพที่ดีพอเป็นที่ยอมรับได้

โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีการพัฒนา เพื่อทดแทนโลหะบัดกรีชนิดผสมตะกั่ว สามารถจัดแบ่งกลุ่มตามช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลวออกเป็น 4 กลุ่ม ดังนี้

1. กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำกว่า 180 °C แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำกว่า 180 °C

โลหะผสม	องค์ประกอบ (wt%)	ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว (°C)
Sn-Bi	Sn-58Bi	138
Sn-In	Sn-52In	118
Sn-In	Sn-50In	118-125
Bi-In	Bi-33In	109

2. กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 180 ถึง 200 °C แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 180 ถึง 200 °C

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

3. กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 200 ถึง 230 °C แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 200 ถึง 230 °C

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

4. กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวมากกว่า 230 °C แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวมากกว่า 230 °C

โลหะผสม	องค์ประกอบ (wt%)	ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว (°C)
Sn-Sb	Sn-5Sb	231-240
Sn-Au	Sn-80Au	280
Sn-Ag-Sb	Sn-25Ag-10Sb	233

นอกจากโลหะชนิดต่างๆที่กล่าวมาแล้ว ผู้ผลิตหลายรายก็ได้มีการนำเสนอส่วนผสมแบบต่างๆ ออกมามากมายกว่า 75 ชนิดในปัจจุบัน แต่จะสรุปมาเพียง 12 ชนิด แสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบของโลหะบัดกรีชนิดต่างๆ ที่สามารถนำมาใช้ทดแทนตะกั่วบัดกรี

ชนิดโลหะผสม	จุดหลอมเหลว (°C)	ความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 25°C ปอนด์ต่อลูกบาศก์นิ้ว
63Sn-37Pb	138	0.318
42Sn-58Bi	138	0.316
77.2Sn-20In-2.8Ag	179-189	0.267
91Sn-9Zn	199	0.263
92.8Sn-3.4Ag-4.8Bi	208-215	0.272
90Sn-7.5Bi-0.5Cu	186-212	0.273
95.5Sn-4Ag-0.5Cu	217-218	0.269
95.5Sn-3.5Ag-1.5In	218	0.268
95.5Sn-3.5Ag-1.5Bi	216-220	0.269
96.5Sn-3.5Ag	221	0.368
99.3Sn-0.7Cu	227	0.264
95Sn-5Sb	232-240	0.263
96.2Sn-2.5Ag-0.8Cu-0.5Sb	213-219	0.267

โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วได้มีการพัฒนาขึ้นเป็นจำนวนมาก บางชนิดถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆบ้างแล้ว และมีอีกจำนวนมากที่มีเพียงการศึกษาวิจัยเท่านั้น และยังไม่มีการนำไปประยุกต์ใช้

- หมายเหตุ :
- สังเกตว่าส่วนผสมของโลหะบัดกรีทุกชนิดในตารางจะมีดีบุกเป็นส่วนประกอบหลัก
 - ราคาต่อปริมาตรหนึ่งลูกบาศก์นิ้วเป็นที่นิยมใช้ในการเปรียบเทียบราคาของตะกั่วเหลว

ตารางที่ 2.6 แสดงคุณสมบัติบางประการของโลหะทดแทนสารตะกั่ว

ชนิดโลหะ	ราคาโดยประมาณ (US) ต่อน้ำหนักหนึ่งปอนด์	ความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 25°C ปอนด์ต่อลูกบาศก์นิ้ว	จำนวนที่สามารถผลิตได้ต่อปี (ล้านปอนด์)	ความยากง่ายในการหามาใช้งาน
สังกะสี (Zn)	0.5	0.258	1560	หาง่าย
ทองแดง (Cu)	0.65	0.324	4900	หาง่าย
พลวง (Sb)	0.80	0.239	100	หาง่าย
ดีบุก (Sn)	3.5	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

ความเป็นไปได้ที่จะใช้โลหะบัดกรีชนิดที่ปราศจากสารตะกั่ว มักจะจำเป็นต้องใช้สัดส่วนร้อยละของดีบุกสูงมากกว่าร้อยละ 90 เนื่องจากดีบุกเป็นโลหะที่มีราคาถูก หาได้ง่าย มีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดี นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี หมายความว่าโลหะเหล่านี้จะมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น และทำให้มีราคาสูงขึ้นด้วยคือสูงกว่าประมาณ 2 เท่าของโลหะบัดกรีแบบตะกั่วกับดีบุกทั่วไป

2.3.3 แนวทางในการเลือกธาตุที่เป็นส่วนผสมที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิต

โลหะบัดกรีทั่วไปจะมีส่วนผสมของดีบุก (Sn) เป็นหลัก เนื่องจากดีบุกมีสมบัติการเปียกและการแผ่กระจายขณะบัดกรีได้ดี ส่วนธาตุเจือที่นำมาผสมกับดีบุกทำเป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วมีหลายชนิดด้วยกัน ซึ่งธาตุเจือที่สำคัญๆ ได้แก่ เงิน (Ag) อินเดียม (In) บิสมัท (Bi) พลวง (Sb) ทองแดง (Cu) และสังกะสี (Zn) เป็นต้น

2.3.3.1.1 ธาตุเจือที่ผสมกับดีบุกเพื่อผลิตเป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

1. ทองแดง (Coper) ช่วยให้การเชื่อมประสานของรอยบัดกรีมีลักษณะดีขึ้นทนต่อการสึกกร่อนได้ดีและหาได้ง่าย
2. นิกเกิล (Nickel) ลดการกัดกร่อนของแผ่นทองแดง
3. เจอเมเนียม (Germanium) ลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน น้ำหนักเบาจะลอยและครอบผิวของบ่อโลหะเหลวไม่ให้ออกซิเจนเข้าไปได้

4. พลวง (Antimony) เป็นโลหะที่ทำให้จุดหลอมเหลวของโลหะผสมลดลงได้และทำให้ความสามารถในการต้านความล้าดีขึ้น

5. อินเดียม (Indium) เป็นโลหะที่สามารถทำให้จุดหลอมเหลวของส่วนผสมลดลงได้เมื่อนำมาผสมกับดีบุกมีคุณสมบัติทางกายภาพและความสามารถในการเชื่อมประสานที่ดีทำให้ความต้านแรงดึงและความแข็งจุลภาคของโลหะบัดกรีมีค่าเพิ่มขึ้นแต่อินเดียมเป็นโลหะที่มีจำนวนจำกัดทำให้มีราคาสูง

6. บิสมัท (Bismuth) เป็นโลหะที่สามารถทำให้จุดหลอมเหลวของโลหะผสมลดลงได้ดีเหมือนอินเดียมและยังมีสมบัติทางกายภาพความสามารถในการเชื่อมประสานที่ดีมาก แต่ข้อเสียคือจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีที่มีบิสมัทเป็นส่วนผสมจะค่อนข้างต่ำเกินไปโดยเฉพาะถ้าบิสมัทมีการปนเปื้อนกับตะกั่วที่อยู่บนแผ่นวงจรพิมพ์หรือขั้วของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เกิดเป็นส่วนผสมของ Sn-Pb-Bi ซึ่งจุดหลอมเหลวต่ำถึง 96 °C จึงทำให้ไม่เหมาะสมกับการใช้งาน อาจมีผลทำให้จุดบัดกรีไม่แข็งแรงเกิดรอยแตกร้าวได้ง่ายเนื่องจากนี้ราคาของบิสมัทในปัจจุบันก็ยังสูง

7. เงิน (Silver) ทำให้ความสามารถในการต้านความล้าดีขึ้น มีอยู่จำกัดทำให้มีราคาแพง

สาเหตุที่โลหะดังกล่าวนำมาพิจารณาก็เพราะว่าเมื่อนำโลหะเหล่านี้มาผสมกับดีบุกแล้วโดยรวมจะทำให้จุดหลอมเหลวมียุติและมีสมบัติทางกายภาพที่ดีเป็นที่ยอมรับได้แต่เนื่องจากโลหะที่นำมาทดแทนเป็นโลหะที่หาได้ยากและมีอยู่อย่างจำกัดจึงนำมาใช้เป็นส่วนผสมในปริมาณน้อย

การเติม Sb ลงไปในโลหะบัดกรีกลุ่ม Sn-Ag-Cu นั้น พบว่าสามารถช่วยลดจุดหลอมเหลว เพิ่มความสามารถในการเปียก เพิ่มความต้านทานแรงดึงของโลหะบัดกรี ลดขนาดเกรนของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ที่รอยบัดกรี และเมื่อใช้ในความเข้มข้นที่เหมาะสมจะช่วยลดอัตราการเกิดสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ที่รอยบัดกรี [24-29] ในขณะที่การเติม Sb ลงในโลหะบัดกรีกลุ่ม Sn-Bi ช่วยเพิ่มความสามารถในการเปียก และความแข็งแรงเหนือนของรอยบัดกรี แต่ทำให้จุดหลอมเหลวสูงขึ้น และทำให้อัตราการเกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่รอยบัดกรีเพิ่มขึ้น [30] ส่วนการเติม Sb ลงในโลหะบัดกรีกลุ่ม Sn-Cu-Ni-Ge ทำให้ความสามารถในการเปียกลดลง แต่ทำให้ขนาดเกรนของโลหะบัดกรีเล็กลง และมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยยะสำคัญของจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีกลุ่ม Sn-Cu-Ni-Ge หลังจากการเติม Sb ลงไป [31] ในขณะที่การเติม Sb ลงในโลหะบัดกรีกลุ่ม Sn-Ag จะช่วยทำให้สารประกอบเชิงโลหะ Ag_3Sn มีขนาดลดลง ส่งผลให้โลหะบัดกรีมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเติม Sb มากกว่า 10% โดยน้ำหนัก กลับทำให้โลหะบัดกรีกลุ่ม Sn-Ag มีความแข็งแรงลดลง [32]

2.4 แผนภูมิเฟสของโลหะบัดกรี

2.4.1 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุก-ทองแดง (Sn-Cu)

ปฏิกิริยาที่สำคัญประการหนึ่งของโลหะผสมดีบุก-ทองแดง คือปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 226.8 °C ซึ่งเป็นปฏิกิริยายูเทกติก ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ปฏิกิริยายูเทกติก (Eutectic reaction) คือปฏิกิริยาที่สารผสมละลายกันอย่างสมบูรณ์ในสภาพของเหลว เมื่อเย็นตัวลงแล้วสารผสมทั้งสองจะแยกออกจากกัน เนื่องจากไม่สามารถละลายเข้ากันในสภาพของแข็ง เกิดเป็นสารสองชนิดที่แตกต่างกัน โดยที่จุดยูเทกติกนี้ของเหลวจะเปลี่ยนไปเป็นเฟสของแข็ง 2 เฟส ได้แก่ สารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 กับเฟสของ Sn ซึ่งปฏิกิริยายูเทกติก เป็นไปตามสมการดังนี้

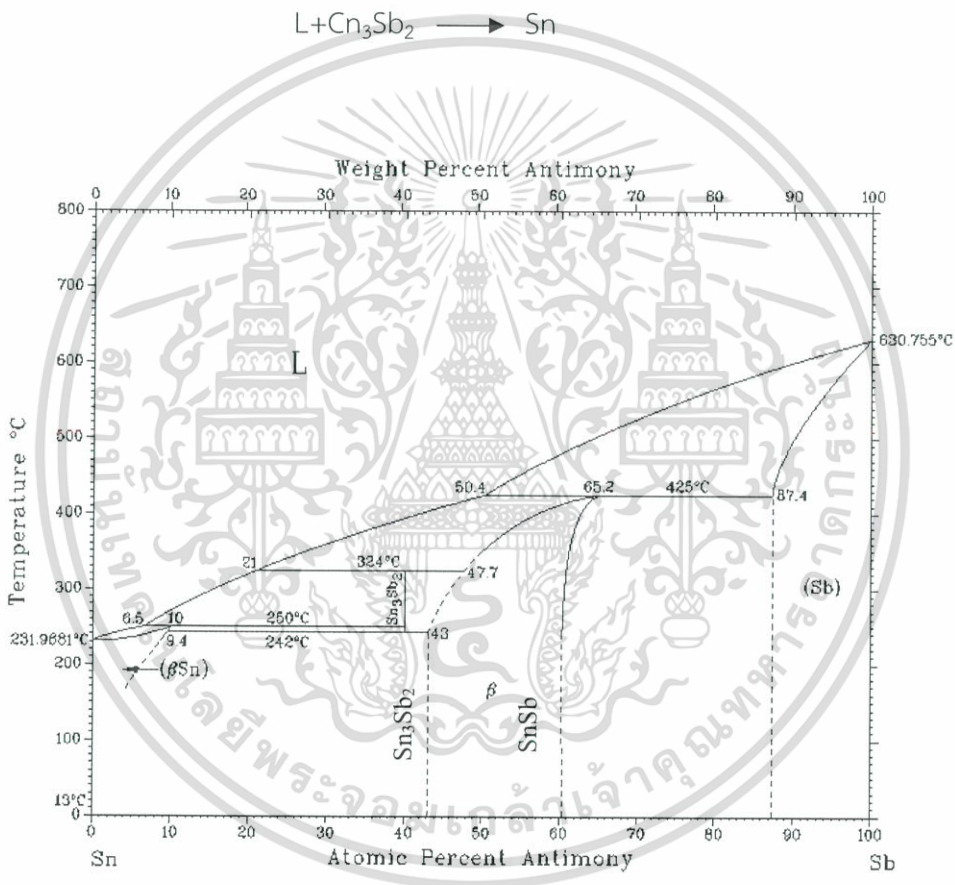
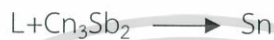


รูปที่ 2.8 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุก-ทองแดง (Sn-Cu)

2.4.2 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุก-พลวง (Sn-Sb)

จากแผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุก-พลวง ดังรูปที่ 2.9 ในระบบนี้จะเกิดเฟสของสารประกอบเชิงโลหะ 4 เฟส ได้แก่ βSn , Sn_3Sb_2 , SnSb และ Sb ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 231.96 °C เป็นปฏิกิริยาเพอริเทกติก (Peritectic reaction) คือ การที่สารละลายที่มีสภาพของเหลวกับสารของแข็งเกิดปฏิกิริยารวมตัว เป็นสารของแข็งชนิดใหม่เพียงชนิดเดียวเมื่ออุณหภูมิลดลง โดยที่จุดเพอริเทกติกนี้ของเหลว (L) และสารประกอบเชิงโลหะ Cn_3Sb_2 จะเปลี่ยนไปเป็นเฟสของแข็ง ได้แก่ เฟสของ βSn

ซึ่งปฏิกิริยาเพอริเทกติก เป็นไปตามสมการดังนี้

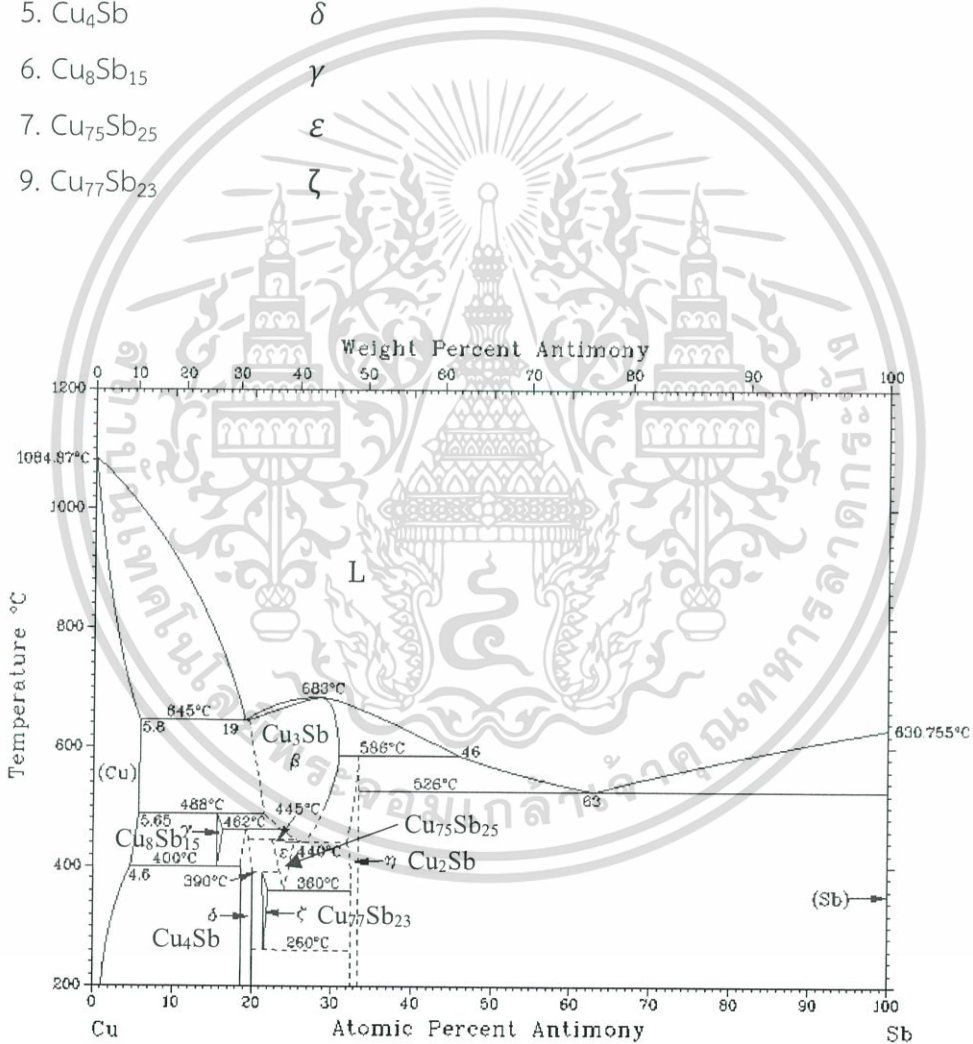


รูปที่ 2.9 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุก-พลวง (Sn-Sb)

2.4.3 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมทองแดง-พลวง (Cu-Sb)

จากแผนภูมิเฟสของโลหะผสมทองแดง-พลวง ดังรูปที่ 2.10 ในระบบนี้จะเกิดเฟสของสารประกอบเชิงโลหะ 8 เฟส ได้แก่ Cu, Sb, Cu₂Sb, Cu₃Sb, Cu₄Sb, Cu₈Sb₁₅, Cu₇₅Sb₂₅ และ Cu₇₇Sb₂₃ และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น อุณหภูมิต่างๆ แสดงในตารางที่ 2.7 ซึ่งแต่ละเฟสจะเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังต่อไปนี้

1. Cu -
2. Sb -
3. Cu₂Sb η
4. Cu₃Sb β
5. Cu₄Sb δ
6. Cu₈Sb₁₅ γ
7. Cu₇₅Sb₂₅ ε
9. Cu₇₇Sb₂₃ ζ



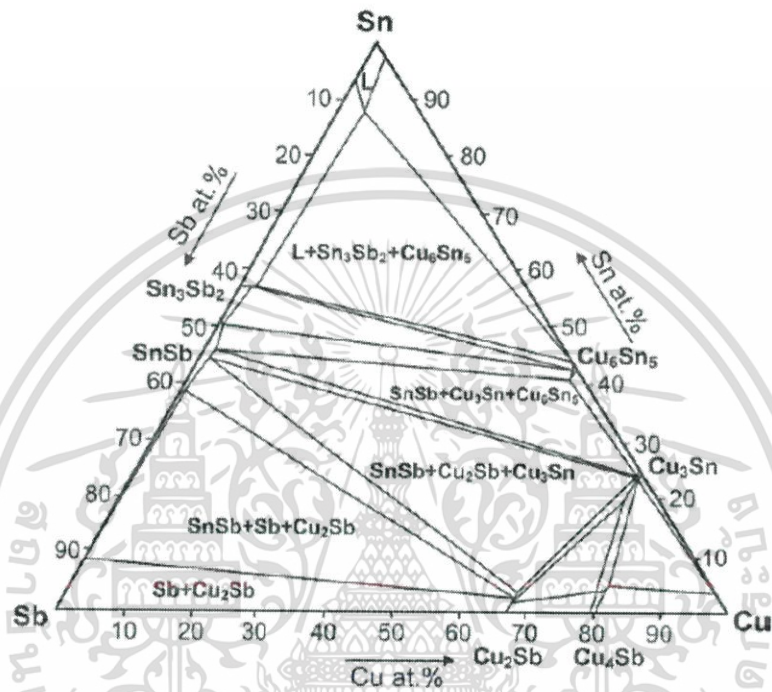
รูปที่ 2.10 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมทองแดง-พลวง (Cu-Sb)

ตารางที่ 2.7 Temperature-invariant reactions in the Cu–Sb system [40]

ปฏิกิริยา	อุณหภูมิ (°C)	ชนิดของปฏิกิริยา
$L \rightarrow \beta$	683	Congruent melt
$L \rightarrow Cu + \beta$	645	Eutectic
$L + \beta \rightarrow \eta$	586	Peritectic
$L \rightarrow \eta + Sb$	526	Eutectic
$Cu + \beta \rightarrow \gamma$	488	Peritectoid
$\beta + \gamma \rightarrow \delta$	462	Peritectoid
$\beta + \delta \rightarrow \varepsilon$	445	Peritectoid
$\beta \rightarrow \varepsilon + \eta$	440	Eutectoid
$\gamma \rightarrow Cu + \delta$	400	Eutectoid
$\gamma + \varepsilon \rightarrow \zeta$	390	Peritectoid
$\varepsilon \rightarrow \zeta + \eta$	360	Eutectoid
$\zeta \rightarrow \delta + \eta$	260	Eutectoid

2.4.4 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุก-ทองแดง-พลวง (Sn-Cu-Sb)

แผนภูมิเฟส 3 ธาตุ (Ternary equilibrium diagram) ของโลหะผสมดีบุก-ทองแดง-พลวง จะเกิดเฟสและสารประกอบเชิงโลหะ ที่อุณหภูมิ 250 °C ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ในการศึกษาส่วนผสมทั้ง 3 เมื่อเกิดปฏิกิริยาจะมีโอกาสเกิดตามแผนภูมิเฟส ดังนี้



รูปที่ 2.11 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุก-ทองแดง-พลวง (Sn-Cu-Sb)

หมายเหตุ : เนื่องจากยังไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับ Ternary phase diagram ของธาตุ ชนิดนี้ในช่วงส่วนผสม 3 ที่ทำการศึกษาและยังไม่พบผลการวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการศึกษาอิทธิพลของส่วนผสมที่มีต่อคุณสมบัติของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-Cu-Sb ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการศึกษาถึงอิทธิพลของส่วนผสมต่างๆที่มีต่อคุณสมบัติของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-Cu-Sb [36]

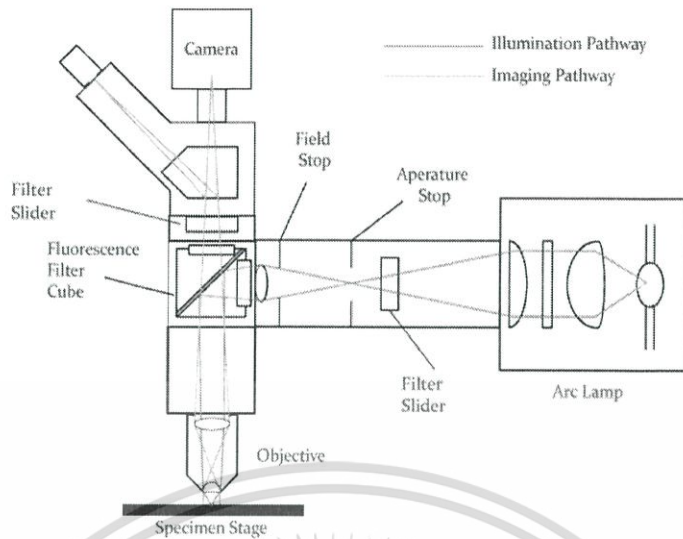
2.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure analysis)

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะ จะช่วยให้เราสามารถอธิบายคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของโลหะได้ การศึกษาโครงสร้างของโลหะจะมีประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับการเตรียมชิ้นงานทดสอบเป็นสำคัญ กล่าวคือชิ้นงานทดสอบจะต้องผ่านการปรับระดับของผิวหน้าและขัดผิวให้เรียบไม่มีรอยขีดข่วน มีลักษณะเป็นมัน ถ้าขั้นตอนการเตรียมงานไม่ดี ก็ไม่สามารถวิเคราะห์หรือมองภาพจากกล้องจุลทรรศน์ได้ชัดเจน

ภายหลังจากที่ชิ้นงานผ่านการขัดมันมาแล้ว เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์จะมองเห็นภาพเป็นพื้นเรียบสว่างตลอดผิวงาน ไม่สามารถมองเห็นโครงสร้างจุลภาคได้จึงต้องนำชิ้นทดสอบไปทำการกัดด้วยสารเคมีเพื่อให้ผิวงานเกิดลักษณะที่แตกต่างกันเนื่องจากชิ้นงานประกอบด้วยเฟสหลายเฟสและหลายชนิด เฟสใดที่มีความต้านทานสูง กรดสามารถกัดได้น้อยและเฟสใดมีความต้านทานต่ำ กรดสามารถกัดได้ลึกกว่าทำให้ผิวชิ้นงานเปลี่ยนเป็นขรุขระ เมื่อนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่ส่องลงไปบนผิวหน้าที่ขรุขระจะสะท้อนแสงกลับมากนละทิศทาง ทำให้บริเวณที่แสงสะท้อนกลับมาน้อยเห็นเป็นสีดำ ส่วนบริเวณที่แสงสะท้อนกลับมากได้มากก็จะเห็นเป็นสีขาว

2.5.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope, OM)

กล้องจุลทรรศน์แบบแสงคือกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยใช้แสงและระบบกำเนิดแสงเป็นพื้นฐาน กล้องประเภทนี้สามารถตรวจสอบโครงสร้างเฉพาะที่ผิวเท่านั้นโดยการสะท้อนแสง เพื่อตรวจสอบหรือวิเคราะห์รายละเอียดบนพื้นผิวชิ้นงานที่ได้เตรียมมาเป็นอย่างดี เช่น ขนาดและรูปร่างของเกรน สำหรับวัตถุทึบแสง เช่น โลหะทุกชนิด เซรามิก และพอลิเมอร์บางชนิด ความดำของภาพแตกต่างกันเกิดจากความสามารถในการสะท้อนแสงที่แตกต่างกันในบริเวณต่างๆ การตรวจสอบนี้เรียกว่า เมทัลโลกราฟี (Metallography) ซึ่งรูปที่ 2.12 จะแสดงหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

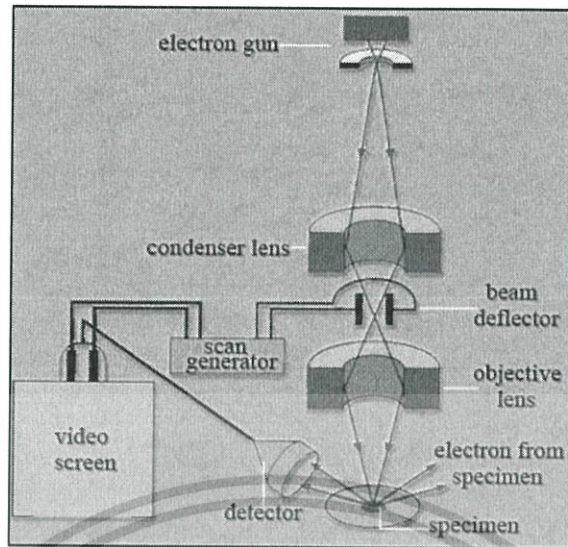


รูปที่ 2.12 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

ชิ้นงานที่ผ่านการขัดจนเรียบให้สะท้อนแสงได้เหมือนกระจก หลังจากกัด้วยสารเคมีและนำมาตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะมองเห็นโครงสร้างจุลภาค เพราะทิศทางการเรียงตัวของอะตอมที่แตกต่างกัน จึงมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาต่างกัน แสงที่สะท้อนออกจากผิวของเกรนที่มีทิศทางการเรียงตัวของอะตอมที่ต่างกัน หลังการขัดผิวด้วยความเงาและเนื้อผิวที่เห็นในแต่ละเกรนขึ้นอยู่กับการสะท้อนแสงของเกรนนั้นๆ หลังการขัดผิวที่ขอบเกรนเกิดร่องขนาดเล็กขึ้นที่บริเวณมีความไวต่อปฏิกิริยามากกว่าบริเวณจึงถูกตัดออกไปมากกว่าบริเวณอื่นๆ ภายในเกรน โดยร่องขนาดเล็กสามารถสะท้อนแสงที่แตกต่างจากบริเวณพื้นเกรน

2.5.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ศึกษารายละเอียดของลักษณะพื้นผิวชิ้นงานทดสอบเช่นพื้นที่หน้าตัดของโลหะ และวัสดุขนาดและรูปร่างของเกรนหรือตำแหน่งที่สนใจบนชิ้นงานทดสอบและแสดงให้เห็นลักษณะและการกระจายของเฟสในโครงสร้างจุลภาค การสร้างภาพตามโดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากผิวหน้าของตัวอย่าง ซึ่งภาพที่ได้จากกล้องนี้จะเป็ภาพ 3 มิติ นอกจากนี้ยังดัดแปลงโดยเติมอุปกรณ์อื่นๆ (Energy dispersive X-ray spectrophotometry, EDS) เพื่อให้มีการแสดงผลในรูปแบบต่างๆ เช่น การวิเคราะห์ธาตุ กล้องจุลทรรศน์แบบนี้มีกำลังขยายสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ธรรมดาและยังมีอุปกรณ์ที่สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุได้



รูปที่ 2.13 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เป็นอุปกรณ์ซึ่งยิงลำอิเล็กตรอนไปตกกระทบบนเป้าที่เป็นชิ้นงานตัวอย่าง จะมีการรวบรวมและแสดงสัญญาณอิเล็กตรอนิกส์ (Electron signals) ซึ่งปล่อยออกมา โดยชิ้นงานที่ใช้ทำเป็นเป้าไม่จำเป็นต้องผ่านการขัดผิวแต่จะต้องนำไฟฟ้าได้ถ้าวัสดุไม่นำไฟฟ้าจะต้องเคลือบผิวด้วยโลหะหรือวัสดุที่นำไฟฟ้า เช่น การเคลือบทองคำหรือคาร์บอน รูปที่ 2.13 แสดงรายละเอียดหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยปืนอิเล็กตรอนจะผลิตลำอิเล็กตรอน (Electron beam) และควบคุมให้พุ่งมาตกกระทบบนจุดเล็กๆ บนเป้าตัวอย่าง โดย Scanning coils จะปล่อยให้ลำอิเล็กตรอนแยกภาพพื้นผิวชิ้นงานตัวอย่าง และจะมีอุปกรณ์สำหรับตรวจจับสัญญาณ (Detector) ชนิดต่างๆ แล้วส่งไปประมวลผลเป็นภาพแสดงบนจอภาพต่อไปตัวอย่างสัญญาณที่เกิดขึ้นนั้น ได้แก่

1. อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electrons, SE) สัญญาณอิเล็กตรอนชนิดนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะพื้นผิวตัวอย่าง เป็นสัญญาณที่ถูกนำมาใช้ในการสร้างภาพมากที่สุดซึ่งทำให้เกิดภาพสามารถขยายได้ถึง 500,000 เท่าภาพที่ได้จากสัญญาณชนิดนี้เรียกว่า ภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electrons, SE)

2. อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back scattered electrons, BE) สัญญาณชนิดนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนประกอบทางเคมีบนผิวของชิ้นงานตัวอย่างและแสดงให้เห็นลักษณะความสูงต่ำของพื้นผิว

2.5.3 หลักการของการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ด้วยเทคนิค EDS (Energy dispersive x-ray spectrophotometry, EDS) [44]

การวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ด้วยเทคนิค EDS เป็นระบบที่นิยมใช้กันมากในกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) เนื่องจากสามารถวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของวัตถุ และใช้เวลาไม่นานในการวิเคราะห์ โดยเทคนิค EDS มีหลักการวิเคราะห์ คือ เมื่อลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงเคลื่อนที่เข้าชนอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นในของอะตอม เช่น ชั้น K หรือ L แล้วเกิดการถ่ายโอนพลังงานให้แก่อิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนในชั้นที่ได้รับพลังงานดังกล่าวมีพลังงานสูงกว่าพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy) ของชั้นโคจร อิเล็กตรอนจึงหลุดจากวงโคจรทำให้เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอนในชั้นโคจร หลังจากนั้นอะตอมที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นจะลดระดับพลังงานลงสู่สภาวะปกติในช่วงเวลาอันสั้น โดยอิเล็กตรอนของวงโคจรชั้นถัดออกไปจะลดระดับพลังงานลงมาให้เท่ากับพลังงานยึดเหนี่ยวของวงโคจรที่เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอน โดยการปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของรังสีเอกซ์แล้วอิเล็กตรอนจะเข้ามาแทนที่พลังงานส่วนเกินนี้มีพลังงานเท่ากับความแตกต่างของระดับพลังงานยึดเหนี่ยวเฉพาะชั้นโคจรของอิเล็กตรอน และเฉพาะของธาตุนั้นๆ สำหรับการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์แบบ EDS สามารถกระทำได้ 3 วิธีคือ

1. การวิเคราะห์ส่องกราดเฉพาะพื้นที่ (Area scan analysis) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า เอกซ์เรย์แมปปิง (X-ray mapping) ซึ่งจะเป็นการวิเคราะห์โดยใช้ลำอิเล็กตรอนส่องกราดบนพื้นผิวตัวอย่างเป็นพื้นที่เล็กๆ โดยความกว้างของพื้นที่ขึ้นกับกำลังขยายที่ใช้ ลักษณะการส่องกราดเป็นแนวจากซ้ายไปขวา และจากบนลงล่าง ภาพที่ได้จากการวิเคราะห์จะแสดงลักษณะการกระจายของธาตุนั้นๆ

2. การวิเคราะห์ส่องกราดตามแนวเส้น (Line scan analysis) เป็นการวิเคราะห์โดยใช้การส่องกราดลำอิเล็กตรอนตามแนวบนตัวอย่างตรงตำแหน่งที่สนใจ เพื่อวัดความเข้มของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวนิยมใช้ในกรณีที่ต้องการจะหาขอบเขตของรอยต่อหรือเฟสของโครงสร้าง

3. การวิเคราะห์เฉพาะจุด เป็นการวิเคราะห์ที่ให้ลำอิเล็กตรอนกระทบอยู่หนึ่งกับที่บนพื้นผิวตัวอย่าง ตรงจุดที่ต้องการวิเคราะห์เพื่อวัดค่าปริมาณรังสีเอกซ์เฉพาะตรงจุดที่ต้องการ รังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่เกิดจากตัวอย่างจะมีพลังงานตามสมการ

$$E = hU \quad (2.1)$$

เมื่อ E = พลังงานของรังสีเอกซ์

h = ค่าคงที่ของพลัง (Planck's constant $\approx 6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$)

U = ความถี่ของรังสีเอกซ์

2.6 การทดสอบความแข็ง (Hardness test) [45]

ความแข็ง (Hardness) คือ คุณสมบัติที่สามารถต้านทานหรือทนต่อการเสีรูปร่างของวัสดุชิ้นงาน โดยปกติเกิดจากการทำให้เป็นรอยจากการกด อย่างไรก็ตามความแข็งอาจรวมถึงความต้านทานการกัด การขีด และการตัด

ความแข็งของวัสดุไม่สามารถบ่งบอกด้วย น้ำหนัก ความยาว หรือเวลา แต่เป็นค่าที่ได้จากกระบวนการทดสอบความแข็ง นานมาแล้วการทดสอบวัดความแข็งนั้นประเมินจากความทนทานต่อการตัดหรือการขูดขีด โดยการนำวัสดุที่ต้องการทดสอบมาขูดขีดกัน และสังเกตด้วยตาเปล่าว่าวัสดุชิ้นใดทำให้เกิดรอยขูดมากกว่า วิธีการทดสอบนี้คิดค้นโดยชาวเยอรมันชื่อ Friedrich Mohr ในปี 1812 และได้กำหนดระดับความแข็ง 10 ระดับด้วยแร่ 10 ชนิด ต่อมาได้มีการทดสอบอีกประเภทหนึ่งซึ่งมีลักษณะคล้ายกัน เรียกว่า File test โดยใช้วัสดุที่มีความแข็งมาตรฐานมาขูดกับวัสดุทดสอบและจัดเรียงลำดับค่าความแข็งของวัสดุทดสอบว่าอยู่ในระดับใด จะเห็นว่าการทดสอบดังกล่าวไม่สามารถบ่งบอกค่าความแม่นยำออกเป็นตัวเลขได้ ในปัจจุบันการทดสอบความแข็งของวัสดุได้ก้าวหน้าไปมากและสามารถบ่งบอกค่าความแข็งออกมาในเชิงตัวเลขได้อีกด้วย

วิธีที่นิยมใช้นั้นมีอยู่ 4 วิธีดังนี้

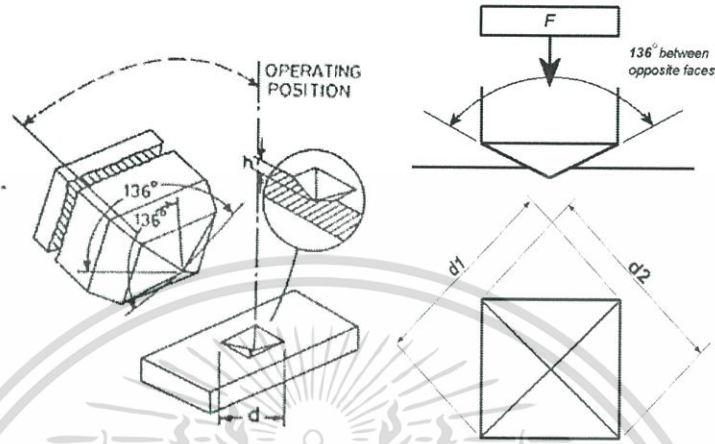
1. การทดสอบความแข็งบริเนลล์ (Brinell hardness test)
2. การทดสอบความแข็งวิกเกอร์ส (Vickers hardness test)
3. การทดสอบความแข็งนูบ (Knoop hardness test)
4. การทดสอบความแข็งร็อกเวลล์ (Rockwell hardness test)

2.6.1 การทดสอบความแข็งวิกเกอร์ส (Vickers hardness test)

การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส มีลักษณะการวัดที่คล้ายกับการทดสอบแบบบริเนลล์แต่เปลี่ยน Indenter หรือ หัวกดทดสอบจากทรงกลมเป็นหัวกดรูปพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมยอดมีขนาด 136 องศาทำจากเพชร ดังแสดงในรูปที่ 2.14 การทดสอบวิธีนี้เหมาะสำหรับวัสดุที่มีลักษณะอ่อนไปจนถึงแข็งมาก (VHN ประมาณ 1500) โดยไม่ต้องเปลี่ยนหัวกด จะเปลี่ยนก็เฉพาะแรงกดเท่านั้น โดยมีตั้งแต่ 1-120 kgf ขึ้นอยู่กับความแข็งของโลหะที่ทดสอบ ซึ่งทำให้วิธีนี้มีข้อได้เปรียบกว่า Brinell คือ ไม่ต้องคำนึงถึงอัตราส่วน P/D2 และข้อจำกัดในด้านความหนาของชิ้นงานทดสอบเนื่องจากหัวกดเพชรมีขนาดเล็กมาก

วิธีการทดสอบ

ในที่นี้จะกล่าวถึง วิธีการทดสอบความแข็งวิกเกอร์ส โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งยูนิเวอร์แซลตามมาตรฐานเยอรมัน (DIN 50351) และเวลาทดสอบก็ดำเนินการตามวิธี ดังนี้



รูปที่ 2.14 ลักษณะหัวกด และวิธีการวัดขนาดเส้นทแยงมุม

1. ปรับและตั้งค่าเครื่องทดสอบให้อยู่ที่ค่ามาตรฐาน
2. นำชิ้นทดสอบวางบนแท่นรองรับ
3. หมุนยกแท่นรองรับขึ้นทดสอบขึ้นมาจนภาพของผิวชิ้นทดสอบไปปรากฏชัดบนจอภาพแล้วยึดชิ้นทดสอบให้แน่นด้วยหัวจับครอบชิ้นทดสอบ
4. เลือกตำแหน่งบนชิ้นงานทดสอบที่ต้องการทดสอบความแข็ง เลือกแรงกดทดสอบตามต้องการ
5. กดสวิตช์เพื่อให้หัวกดทดสอบเริ่มเคลื่อนที่ลงกดผิวชิ้นทดสอบอย่างช้าๆ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการกระแทกขณะกด และปล่อยระยะเวลาทดสอบตามต้องการ
6. วัดขนาดเส้นทแยงมุมของรอยบุ๋มที่ปรากฏบนจอภาพ ซึ่งรับภาพผ่านเลนส์ขยาย โดยสามารถวัดได้ละเอียดถึง 0.01 มิลลิเมตร และวิธีการวัดขนาดเส้นทแยงมุมของรอยบุ๋มนั้น ควรวัดดังรูป 2.14 แล้วหาค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุมทั้ง d_1 และ d_2 เพื่อนำไปคำนวณความแข็งวิกเกอร์ส

สมการการคำนวณค่าความแข็งวิกเกอร์ส

$$HV = \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2}, \quad HV = 1.854 \frac{F}{d^2} \quad (2.2)$$

2.7 การออกแบบการทดลอง (Design of experiments: DOE) [47]

การออกแบบการทดลอง (Design of experiments, DOE) เป็นกระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อจะได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ ซึ่งจะช่วยให้สามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้ ซึ่งวิธีการออกแบบการทดลองเชิงสถิติเป็นสิ่งจำเป็น หากต้องการหาข้อสรุปจากข้อมูลที่มีอยู่ และถ้าปัญหาที่สนใจนั้นเกี่ยวข้องกับความผิดพลาดในการทดลอง

2.7.1 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง [49]

การทดลองที่ได้รับการออกแบบมาโดยส่วนมากจะมี 4 ขั้นตอนคือ การวางแผน (Planning) การคัดเลือก (Screening) การหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization) และการทวนสอบ (Verification)

2.7.1.1 การวางแผน (Planning)

การวางแผนที่ดีจะช่วยให้เกิดปัญหาระหว่างการทดลองน้อยลง ตัวอย่างเช่น บุคลากร อุปกรณ์ ที่ทำ การทดลอง เงินทุน และกรรมวิธีการผลิต ซึ่งอาจส่งผลให้ไม่สามารถทำการทดลองได้ครบสมบูรณ์ ถ้าโครงการที่ ทำการทดลองนี้มีความสำคัญอันดับรองลงมากกว่าอีกโครงการหนึ่ง ซึ่งทำให้ต้องมีการแบ่งใช้ทรัพยากรบางส่วนไป การแบ่งการทดลองเป็นส่วนๆทำให้ผลการทดลองที่ได้มานั้นยังไม่สามารถใช้ได้ และเมื่อทรัพยากรที่ถูกแบ่งไปใช้นั้นกลับคืนมาก็สามารถทำการทดลองได้เหมือนเดิมและดำเนินต่อจากตอนที่หยุดไว้ก่อนหน้านี้

การเตรียมการทดลองขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหาที่กำลังเจอ ซึ่งขั้นตอนที่ต้องทำการ เป็นดังนี้

1. กำหนดปัญหาซึ่งปัญหาที่มีขอบเขตชัดเจนจะช่วยทำให้การกำหนดตัวแปรที่ถูกต้องเพื่อให้สามารถตอบคำถามได้ตามต้องการ

2. กำหนดวัตถุประสงค์ซึ่งวัตถุประสงค์ที่ชัดเจนจะมั่นใจได้ว่าการทดลองที่จะทำนั้นสามารถตอบสนองคำถามได้ตรงและสาระของข้อมูลที่จะได้มานี้ใช้ได้จริง

3. การสร้างแผนการทดลองเพื่อให้ได้สาระข้อมูลที่ต้องการ ในขั้นตอนนี้ควรมีการทบทวนถึงสิ่งต่างๆที่มีความเกี่ยวข้องกัน

4. กระบวนการและการวัดจะต้องอยู่ภายใต้การควบคุมโดยหลักทางทฤษฎีทั้งกระบวนการและระบบการวัด ควรจะอยู่ภายใต้การควบคุมทางสถิติด้วยการใช้หลักการทางการควบคุมกระบวนการทางสถิติ ในกรณีทีกระบวนการไม่ได้อยู่ภายใต้การควบคุมแบบสมบูรณ์ แต่อย่างน้อยกระบวนการนั้นก็ควรจะ สามารถทำซ้ำและให้ค่ากระบวนการแบบเดิม รวมทั้งต้องมีการวัดความแปรปรวนของกระบวนการ ซึ่ง ถ้าความแปรปรวนของกระบวนการนี้ที่ได้มามีค่ามากกว่าความแตกต่างหรืออิทธิพลที่กำลังพิจารณาผลการทดลองที่ได้นี้อาจไม่ได้ประโยชน์มากนัก

2.7.1.2 การคัดเลือก (Screening)

ในงานการพัฒนากระบวนการและงานการผลิตส่วนมากมีตัวแปรจำนวนมากที่มีแนวโน้มว่าจะมีส่วนในการปรับปรุง การคัดเลือกเป็นการลดจำนวนตัวแปรเหล่านี้ให้มีจำนวนน้อยลง โดยคัดเลือกตัวแปรที่มีความสำคัญมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การลดจำนวนตัวแปรนี้ทำให้สามารถจะพิจารณาเฉพาะที่ตัวแปรที่มีความสำคัญต่อกระบวนการเท่านั้นได้ หรือพิจารณาตามหลักการความสำคัญจำนวนน้อย การคัดเลือกอาจจะสามารถทำได้ถึงการหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรนั้นๆรวมทั้งบอกด้วยว่าค่าตอบสนองมีสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้ง

2.7.1.3 การหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization)

หลังจากการที่มีการคัดเลือกตัวแปรที่มีความสำคัญจำนวนน้อยต้องการที่จะทำการหาค่าที่ดีที่สุดของปัจจัยเหล่านี้ซึ่งค่าปัจจัยที่ดีที่สุดจะเป็นค่าอะไรขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการทดลองด้วย

1. ในหัวข้อภาพรวม Fractional design เป็นการอธิบายถึงวิธีการออกแบบและการวิเคราะห์รูปแบบของ Two-level fractional, Plackett-burman และ Servedal full factorial
2. ในหัวข้อภาพรวม Response surface design เป็นการอธิบายถึงวิธีการออกแบบและการวิเคราะห์ รูปแบบของ Central composite design และ Box-Behincken
3. ในหัวข้อ Response optimization เป็นการอธิบายถึงวิธีการหาค่าที่ดีที่สุดในกรณีที่มีค่าตอบสนอง มากกว่าหนึ่งค่า (Multiple response) และมีหลายวิธีที่ใช้การหาค่าที่ดีที่สุดเพื่อเป็นเงื่อนไขของการเกิดค่าตอบสนองหลายๆค่าไป พร้อมกัน

2.7.1.4 การทวนสอบ (Verification)

การทวนสอบเป็นการทดลองซ้ำเพื่อดูว่า ค่าที่วิเคราะห์มาเป็นค่าที่ดีที่สุดนั้นยังคงให้ผลลัพธ์ที่ดีจริงหรือไม่ เช่น การทำการทดลองที่มีเงื่อนไขตามที่หามาจากการหาค่าที่ดีที่สุดเพื่อหาขนาดของช่วงความเชื่อมั่นของค่าเฉลี่ยของค่าตอบสนอง

2.7.2 Design Expert Software [49]

โปรแกรม Design Expert เป็นโปรแกรมที่ช่วยในการหาค่าที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์โดยจะมีการใช้ข้อมูลทางสถิติในการออกแบบให้อยู่ในขอบเขตและเงื่อนไขที่ต้องการ ซึ่งสามารถจำแนกออกได้เป็น 4 ประเภทหลักๆ ดังนี้

1. Response surface
2. Fractional
3. Crossed
4. Mixture

Design Expert จะใช้ข้อมูลทางสถิติในการหาสมการที่ใช้ในการทำนายผลให้ใกล้เคียงกับความ เป็นจริงมากที่สุดซึ่งจะใช้ข้อมูลทางสถิติดังนี้

2.7.2.1 Sequential model sum of squares

Sequential model sum of squares เป็นการแสดงการปรับปรุงสะสมของแต่ละเทอมที่เพิ่ม ขึ้นมา แสดงดังตารางที่ 2.8 ในตารางนี้ควรเลือกแบบจำลองที่มีกำลังสูงสุดและมีค่า P-value หรือ Prob F ที่มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ก็คือ 0.05

ตารางที่ 2.8 Sequential model sum of squares

Source	Sum of squares	df	Mean square	F-value	p-value	
Mean vs Total	33147.18	1	33147.18			
Linear vs Mean	2190.18	2	1095.09	246.89	< 0.0001	
Quadratic vs Linear	294.85	3	98.28	56.86	< 0.0001	
Sp Cubic vs Quadratic	8.99	1	8.99	5.43	0.0218	
Cubic vs Sp Cubic	46.41	3	15.47	12.44	< 0.0001	
Quartic vs Cubic	56.75	1	56.75	83.10	< 0.0001	Aliased
Residual	67.61	99	0.6829			
Sp Quartic vs Quadratic	64.33	3	21.44	18.76	< 0.0001	Suggested
Quartic vs Sp Quartic	47.82	2	23.91	35.02	< 0.0001	Aliased
Residual	67.61	99	0.6829			
Total	35811.97	110	325.56			

2.7.2.2 Lack of fit tests lack of fit tests

เป็นตารางที่แสดงว่าแต่ละแบบจำลองมีความเหมาะสมมากน้อยเพียงใดใช้ในการทำนาย Mean squared ผลตอบสนองการทดสอบเป็นการเปรียบเทียบระหว่าง Residual mean squared กับ Pure error ตารางที่ 2.9 แสดงตัวอย่างตาราง Lack of fit tests

ตารางที่ 2.9 Lack of fit tests

Source	Sum of squares	df	Mean square	F-value	p-value	
Linear	407.00	8	50.87	74.50	< 0.0001	
Quadratic	112.15	5	22.43	32.85	< 0.0001	
Special Cubic	103.16	4	25.79	37.76	< 0.0001	
Cubic	56.75	1	56.75	83.10	< 0.0001	
Special Quartic	47.82	2	23.91	35.02	< 0.0001	Suggested
Quartic	0.0000	0				Aliased
Pure Error	67.61	99	0.6829			

2.7.2.3 Model summary statistics

Model summary statistics ซึ่งแสดงตารางตัวอย่าง ดังตารางที่ 10 เป็นตารางที่แสดงค่าทางสถิติที่ใช้ในการเปรียบเทียบความของแบบจำลอง ค่าทางสถิติที่ใช้นั้นประกอบด้วย

- Standard deviation เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่เกิดขึ้นจากความผิดพลาดในการทดลองซึ่งควรมีค่าน้อย
- R-Squared และ Adjust R-Squared เป็นค่าที่แสดงถึงกรณีในทางอุดมคติที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการพยากรณ์ควรมีค่าเข้าใกล้ 1
- Predicted R-Squared เป็นการประมาณความแปรปรวนของข้อมูลควรมีค่าเข้าใกล้ 1
- ค่า PRESS (Predicted Residual Error Sum of Square) จะเป็นค่าที่ได้จากการทำนายความผิดพลาดที่เกิดขึ้นซึ่งควรมีค่าน้อย

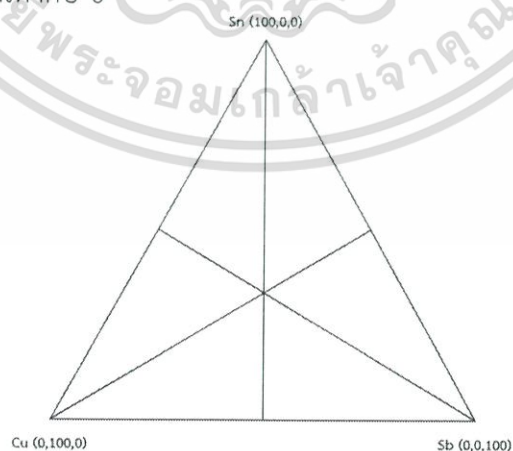
ตารางที่ 2.10 Model summary statistics

Source	Std. Dev.	R ²	Adjusted R ²	Predicted R ²	PRESS	
Linear	2.11	0.8219	0.8186	0.8098	506.83	
Quadratic	1.31	0.9325	0.9293	0.9250	199.74	
Special Cubic	1.29	0.9359	0.9322	0.9273	193.77	
Cubic	1.12	0.9533	0.9491	0.9448	147.11	
Special Quartic	1.07	0.9567	0.9533	0.9490	135.83	Suggested
Quartic	0.8264	0.9746	0.9721	0.9687	83.47	Aliased

เมื่อโปรแกรมได้ทำการวิเคราะห์หาสมการที่เหมาะสมจากข้อมูลทางสถิติเสร็จสิ้นจะสามารถคำนวณค่าที่เหมาะสมกับเงื่อนไขที่ต้องการได้

2.7.3 การออกแบบส่วนผสม (Mixture Design) [49]

แผนการทดลองแบบผสมเป็นเทคนิคซึ่งเหมาะสมสำหรับการพัฒนาสูตรเนื่องจากการทดลองแบบแฟคทอเรียลไม่เหมาะสมเมื่อมีส่วนผสมมากกว่า 1 ชนิดแผนการทดลองแบบผสมอาศัยหลักการที่ว่าเมื่อส่วนผสมส่วนใดส่วนหนึ่งเปลี่ยน ส่วนประกอบที่เหลือในสูตรจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงด้วยโดยที่ผลรวมของส่วนประกอบ ทั้งหมดรวมกันเท่ากับ 1.0 หรือ 100% และผลตอบสนองขึ้นกับสัดส่วนของส่วนผสมความสัมพันธ์ของส่วนผสมในแผนการทดลองที่มีส่วนผสม 3 ชนิด สามารถแสดงโดยใช้ระบบแกนเส้นตรง 3 เส้นดังแสดงในรูปที่ 2.15 โดยที่จุดยอดของแต่ละแกนมีค่าเท่ากับ 1 หรือ 100% ส่วนปลายที่ตั้งฉากกับฐานจะมีค่าเท่ากับ 0



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ของส่วนผสมในแผนการทดลองที่มีส่วนผสม 3 ชนิด

รูปแบบของการออกแบบส่วนผสม Mixture design สามารถแบ่งได้ดังนี้

1. Simplex lattice ส่วนประกอบทั้งหมดในการทดลองจะต้องมีสัดส่วนอยู่ในช่วงเดียวกันและมีการออกแบบ การทดลองที่จุดพิคัด อยู่บนแนวแกนในแต่ละด้านของการออกแบบ
2. Simplex centroid ส่วนประกอบทั้งหมดในการทดลองจะต้องมีสัดส่วนอยู่ในช่วงเดียวกันและมีการออกแบบ การทดลองที่จุดพิคัด อยู่บนแนวแกนในแต่ละด้านของการออกแบบและจุดกึ่งกลาง
3. Optimal ส่วนประกอบทั้งหมดในการทดลองมีสัดส่วนที่ต่างกันเป็นการเลือกค่าที่ดีที่สุดสามารถใช้ในกรณี ที่พื้นที่ในการออกแบบ มีข้อจำกัดหลายจุดที่สามารถเป็นไปได้การเลือกพิคัดในการทดลองจะใช้อัลกอริทึมที่ ค่าพิคัดจะไปตามจุดหลักๆใน Design spec เพื่อหาค่าแนวโน้มของค่าดีเทอมีแนนท์ของ xx ที่มากที่สุดเมื่อได้ครบ ตามรอบที่กำหนดจะหยุดการสุ่มแล้วนำ Candidate point ที่ได้มาสร้างเป็นการทดลอง

2.7.4 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) [48]

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) เกิดขึ้นจากนักวิทยาศาสตร์ที่ต้องการแก้โจทย์ปัญหาทางคณิตศาสตร์เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ออกมาเหมาะสมที่สุด ซึ่งปัญหาส่วนใหญ่เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่มาจากหลักพื้นฐานทางด้านฟิสิกส์ของระบบนั้นๆก่อนปี ค.ศ. 1940 วิธีที่ใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฟังก์ชันที่มีหลายตัวแปรนั้นมีไม่มากนัก เช่น การทำ Least square ซึ่งถูกนำมาประยุกต์ใช้กับปัญหาทางด้านฟิสิกส์บางประเภทแต่วิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย และเป็นที่ยุติ คือการทำวิธีของนิวตัน (Newton method) ซึ่งถูกนำมาใช้กับปัญหาของระบบที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีทางเคมีในช่วงปี ค.ศ. 1940 – ค.ศ. 1950 มีการแนะนำสาขาใหม่ทางการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่เรียกกันว่า กำหนดการเชิงเส้น (Linear programming) จากนั้นได้มีการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จนถึงปัจจุบันนี้ได้มีการนำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมาใช้อย่างกว้างขวางไม่ว่าจะเป็นทางด้านวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ คณิตศาสตร์และ เศรษฐศาสตร์ เป็นต้น

สำหรับในภาคอุตสาหกรรมนั้น การตัดสินใจที่จะปรับปรุงให้ดีที่สุดเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นให้เห็นอยู่บ่อยครั้ง ตัวอย่างเช่น การเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการอุตสาหกรรมการผลิตทั้งหมด การลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการต่างๆ ซึ่งผู้จัดการต้องมีการวางแผนการทำงานที่ดีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในด้านต่างๆให้ได้ตามที่ต้องการ และในทางเดียวกันวิศวกรต้องออกแบบระบบใหม่ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น แต่เสียค่าใช้จ่ายน้อยลง บางปัญหาที่เกิดกลายเป็นเรื่องยุ่งยากขึ้นมา เมื่อผู้จัดการหรือวิศวกรพบกับทางเลือกมากมายในการแก้ไขปัญหานั้น และจะอย่างไรถึงจะสามารถเลือกทางที่ให้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการและดีที่สุด

2.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance: ANOVA) [36]

เป็นวิธีการทดสอบสมมติฐานทางสถิติเพื่อทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย (Mean) ของประชากรที่มี ตั้งแต่ 2 กลุ่มขึ้นไป

2.8.1 จุดเด่นของการวิเคราะห์ความแปรปรวน

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance : ANOVA) เป็นวิธีการทางสถิติที่ใช้ทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ย (Mean) ของกลุ่มตัวอย่างตั้งแต่ 2 กลุ่มขึ้นไปอันเกิดจากการจัดกระทำที่ต่างกัน

จุดเด่นของการวิเคราะห์ความแปรปรวน

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

2.8.2 ข้อตกลงเบื้องต้น

เนื่องจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนใช้ค่า F เป็นสถิติทดสอบโดยที่ F เป็นอัตราส่วนระหว่างความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (Mean square between) กับความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Mean square within) การวิเคราะห์ความแปรปรวนจึงมีข้อตกลงเบื้องต้นเกี่ยวกับลักษณะข้อมูลที่จะนำมาวิเคราะห์ดังนี้

1. กลุ่มตัวอย่างได้มาโดยสุ่มจากประชากร (Random sampling) และหากกลุ่มตัวอย่างเลือกมาโดยการสุ่ม จากประชากรที่มีการกระจายเป็นโค้งปกติในการคำนวณค่า F ความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (Mean square between) และความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Mean square within) จะเป็นอิสระจากกัน
2. ข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ต้องได้มาจากประชากรที่มีความแปรปรวนเท่ากันทุกกลุ่ม (Variance homogeneity) $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_x^2 = \sigma^2$
3. ความเป็นปกติ (Normality) ตัวอย่างแต่ละกลุ่มสุ่มมาจากประชากรที่มีการแจกแจงปกติหากจำเป็นต้องแปลงข้อมูล (Transformation) ให้มีการแจกแจงแบบโค้งปกติก่อน หรือเพิ่มตัวอย่างให้มีขนาดมากขึ้น และใช้กลุ่มตัวอย่างที่มีขนาดเท่า ๆ กันในแต่ละกลุ่มจะหลีกเลี่ยงการละเมิดข้อตกลงข้อนี้ได้
4. ข้อมูลของตัวแปรตามที่จะนำมาวิเคราะห์ต้องอยู่ในมาตราอันตรภาคหรืออัตราส่วน ส่วนตัวแปรอิสระเป็นตัวแปรประเภทพหุวิภาค (Polytomous)

2.8.3 หลักการวิเคราะห์ความแปรปรวน

ความแปรปรวนของข้อมูลหรือคะแนนหรือค่าการวัดนั้นพิจารณาจากแหล่งที่มาแบ่งได้เป็น 3 แหล่งคือ

1. ความแปรปรวนรวม (Total group variance หรือ Mean square total, MS_T) เป็นความแปรปรวนอันเกิดจากคะแนนแต่ละตัวเบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยของกลุ่มรวม

2 ความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (Mean square between group, MS_B) เป็นความแปรปรวนของค่าตัวแปรตามระหว่างตัวแปรต้นแต่ละกลุ่ม ซึ่งความแปรปรวนที่เกิดขึ้นนี้อาจเนื่องมาจากอิทธิพลของตัวแปรต้น หรืออาจเกิดจากอิทธิพลของตัวแปรต้นเกิดขึ้นอย่างสุ่ม (Chance) ที่เนื่องมาจากความแตกต่างระหว่างตัวอย่าง หรือเกิดจากความคลาดเคลื่อนในการทดลอง เช่น ใช้การวัดที่แตกต่างกัน

3. ความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Within treatment variance หรือ Mean square within group, MS_W) เป็นความแปรปรวนอันเกิดจากคะแนนแต่ละตัวในแต่ละกลุ่มเบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่ม ซึ่งความแปรปรวนชนิดนี้คือความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนนั่นเอง

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นการนำความแปรปรวนของตัวแปรหรือปรากฏการณ์มาแบ่งเป็นส่วน ๆ ตามความต้องการของผู้วิจัย แล้วนำความแปรปรวนแต่ละส่วนมาเปรียบเทียบกับตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย กล่าวคือการวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นการเปรียบเทียบความแปรปรวนอันเกิดจากความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่ม ซึ่งเป็นผลของตัวแปรอิสระกับความแปรปรวนภายในกลุ่มหรือความคลาดเคลื่อนว่าตัวใดมีค่ามากกว่ากัน ในการทดสอบสมมติฐานจึงใช้อัตราส่วนของความแปรปรวนอันเกิดจากความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่ม (Mean square between group) กับความแปรปรวนภายในกลุ่มอันเกิดจากความคลาดเคลื่อน (Within-group หรือ Error variance) เป็นหลักในการตัดสินใจ และเรียกอัตราส่วนนี้ว่า F-ratio

$$F = \frac{\text{ความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม}}{\text{ความแปรปรวนภายในกลุ่ม}}$$

โดยมี $df = df$ ระหว่างกลุ่ม, df ภายในกลุ่ม

$$F = \frac{MS_B}{MS_W} \quad (2.3)$$

2.8.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวหรือ One-way ANOVA เป็นวิธีการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นตัวเดียวกับตัวแปรตามเพียงตัวเดียว โดยที่ตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นอาจมีลักษณะเป็นตัวแปรเชิงคุณภาพ (Qualitative variable) ที่จำแนกออกเป็นระดับหรือ ประเภทต่าง ๆ เช่น เก่ง-ปานกลาง-อ่อน, ดีมาก-ดี-พอใช้-แย่ เป็นต้น ส่วนตัวแปรตามอาจมีลักษณะเป็นตัวแปรเชิงปริมาณ (Quantitative variable) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นว่าจะส่งผลอย่างไรกับตัวแปรตามตามสมมติฐานการวิจัยที่กำหนดไว้

1. สูตรและตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว

ตารางที่ 2.11 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว

Source of variable	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F-statistic
Between groups (Treatment)	$SSB = \sum_{i=1}^k \frac{T_i^2}{n_i} - \frac{T^2}{n}$	$k - 1$	$MSB = \frac{SSB}{k - 1}$	$F = \frac{MSB}{MSW}$
Within groups (Error)	$SSW = SST - SSB$	$n - k$	$MSW = \frac{SSW}{n - k}$	$F = \frac{MSB}{MSW}$
Total	$SST = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij}^2 - \frac{T^2}{n}$	$n - 1$		

โดยที่ $SST = SSB + SSW$

จากตารางข้างต้นสามารถเขียนโดยสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 2.12 ตารางสรุปสูตรการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว

Source of variable	Degree of freedom	Sum square (SS)	Mean square (MS)	F-ratio
Between groups (Treatment)	$k - 1$	SSB	MSB	$F = \frac{MSB}{MSW}$
Within groups (Error)	$n - k$	SSW	$MSW = \frac{SSW}{n - k}$	
Total	$n - 1$	SST		

2. ขั้นตอนการทดสอบสมมติฐานมีดังนี้

1) ตั้งสมมติฐาน

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

H_1 : มีอย่างน้อยหนึ่งคู่ที่ไม่เหมือนกัน

2) กำหนดระดับนัยสำคัญ (α)

3) กำหนดตัวสถิติทดสอบและคำนวณค่า (ตัวสถิติทดสอบคือเอฟ และสร้างตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน)

4) ดูบริเวณการทดสอบ

5) ถ้าค่าเอฟที่คำนวณน้อยกว่าค่าที่เปิดจากตารางหมายถึงค่าที่คำนวณได้จากตัวอย่างตกบริเวณยอมรับ H_0 ตัดสินใจยอมรับ H_0 สรุปว่าไม่มีเหตุผลเพียงพอที่ปฏิเสธสมมติฐาน H_0 หากค่าเอฟที่คำนวณได้มากกว่า ค่าในตารางหมายถึงค่าที่คำนวณได้จากตัวอย่างตกบริเวณปฏิเสธ H_0 ตัดสินใจปฏิเสธ H_0 และสรุปผลว่า มีค่าเฉลี่ยอย่างน้อย 1 คู่ที่ไม่เท่ากัน

2.8.5 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Analysis of coefficient of determination)

[46]

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) เป็นค่าที่ใช้สำหรับอธิบายความสามารถของสมการถดถอยหรือตัวแปรอิสระในสมการถดถอยว่าสามารถจะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าตอบสนองหรือตัวแปร (y) ได้ในสัดส่วนเท่าใด ดังนั้นค่า R^2 ยิ่งมากสมการก็ยิ่งมีความเหมาะสมมาก โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ความแปรปรวนแยกความแปรปรวนของตัวแปรตาม y เนื่องจากค่าประมาณความแปรปรวนของ y คือ

$$s_y^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n-1} \text{ หรือ } s_y^2 \propto \sum (y_i - \bar{y})^2 \quad (2.4)$$

โดยที่ $\sum (y_i - \bar{y})^2$ คือ ผลบวกของผลต่างกำลังสองของ Y จากค่าเฉลี่ย

$$\begin{aligned} \sum (y_i - \bar{y})^2 &= \sum_{i=1}^n ((y_i - \hat{y}_i) + (\hat{y}_i - \bar{y}))^2 \\ \sum (y_i - \bar{y})^2 &= \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 + \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \end{aligned} \quad (2.5)$$

LHS เรียกว่า Sum Total of Y หรือ

$$SST = \sum (y_i - \bar{y})^2 \quad (2.6)$$

RHS; จะได้ว่า $\sum (y_i - \hat{y}_i)^2 = \text{Sum Square Error} = SSE$

SSE คือ ส่วนที่อธิบายไม่ได้ด้วยสมการถดถอย (Unexplained part)

$$\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2 = \text{Sum Square Regression} = SS_{\text{Regr}}$$

SS_{Regr} คือ ส่วนที่อธิบายได้ (Explained part) ด้วยสมการถดถอย

จึงสรุปได้ว่า $SST = SS_{\text{Regr}} + SSE$

และสรุปความสัมพันธ์ได้ตาราง ANOVA ดังตารางที่ 2.13

ตารางที่ 2.13 สรุปความสัมพันธ์ ANOVA ของการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ [46]

แหล่งที่มา	$df.$	SS	MS	F
Regression	p	SS_{Regr}	SS_{Regr}	$\frac{MS_{\text{Regr}}}{MSE}$
Error	$n-p$	SSE	MSE	
Total (adj)	$n-1$	SST		

โดยที่ p = จำนวนพจน์ตัวแปรอิสระในสมการ หรือ
 = จำนวนสัมประสิทธิ์ในการถดถอยไม่นับค่าจุดตัดแกน
 N = จำนวนข้อมูล
 $SS_{\text{Regr}} = \beta_1 S_{xy}$ (กรณีสมการเส้นตรงคงรูป)

ดังนั้น $SSE = SST - SS_{\text{Regr}}$ (2.7)

$$= S_{yy} - \beta_1 S_{xy}; \sum (y_i - \bar{y}) = S_{yy}$$

$$MSE = \frac{SSE}{d.f._E} = \frac{SSE}{n-p} S^2$$
 (2.8)

สำหรับสมการเต็มรูป จะสรุปได้ว่า

$$S^2 = MSE = \frac{S_{yy} - \beta_1 S_{xy}}{n-1}; p=2 \Rightarrow (\beta_0, \beta_1)$$
 (2.9)

ตัวสถิติ F ในตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนใช้ในการทดสอบสมมติต่อไปนี้ คือ

$$H_0 : \beta_i = 0 \quad \forall_i ; i = 1, 2, \dots, k \text{ (ไม่รวม } \beta_0)$$

(ตัวแปรอิสระไม่สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของ y ได้)

$$H_1 : \beta_i \neq 0 \exists_i$$

(ตัวแปรอิสระบางตัวสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของ y ได้)

หรือ สำหรับกรณีการถดถอยเชิงเส้น

$$H_0 : \beta_1 = 0 \text{ (ไม่มีสมการถดถอย)}$$

$$H_1 : \beta_1 \neq 0 \text{ (สมการถดถอยสร้างได้)}$$

$$F = \frac{MS_{\text{Regr}}}{MSE}; v = (p, n-p) \text{ และสมการทดสอบทางเดียวด้านบน}$$

บริเวณปฏิเสธ H_0 คือ $F > F_{\alpha}(p, n-p)$

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) นั้น เกิดจากอัตราส่วนระหว่างค่า SS_{Regr} และค่า SST ดังนั้นค่า

R^2 จึงระบุเป็นเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของ y ที่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการถดถอยที่ประมาณขึ้น

$$R^2 = \frac{SS_{\text{Regr}}}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST}$$
 (2.10)

หรือ

$$R^2 = r^2$$

$$r = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx}S_{yy}}}$$

โดยที่ r คือ ค่าที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างตัวแปร X และ Y นั้นเอง ในทางปฏิบัติ เนื่องจากค่า R^2 มีการเปลี่ยนแปลง กล่าวคือ เมื่อเพิ่มจำนวนตัวแปรอิสระในสมการ ค่า R^2 จะมีค่าสัมพันธ์การตัดสินใจ จึงให้ค่า R^2 ที่ทำการปรับค่าแล้ว (R^2_{adj}) แทน

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{MSE}{MST}; MST = \frac{MST}{n-1} \quad (2.11)$$

ซึ่งอธิบายเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของ y ที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระในสมการ ถดถอยเช่นกัน



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

ในการจัดทำปฏิญญาพันธเรื่อง การศึกษาโครงสร้างจุลภาคและความแข็งของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-Cu-Sb โดยจะนำชิ้นงานทดสอบที่มีส่วนผสมของ Sn-Cu-Sb ตามอัตราส่วนที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม Design Expert จะได้ส่วนผสมที่แตกต่างกันทั้งสิ้น 11 ชิ้น [49] ซึ่งมีปริมาณส่วนผสมของดีบุก (Sn) 89-100% , ทองแดง (Cu) 0-3 % และพลวง (Sb) 0-8% โดยน้ำหนัก แสดงดังตารางที่ 3.1 ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนในการดำเนินการ โดยมีรายละเอียดของเนื้อหา ดังนี้

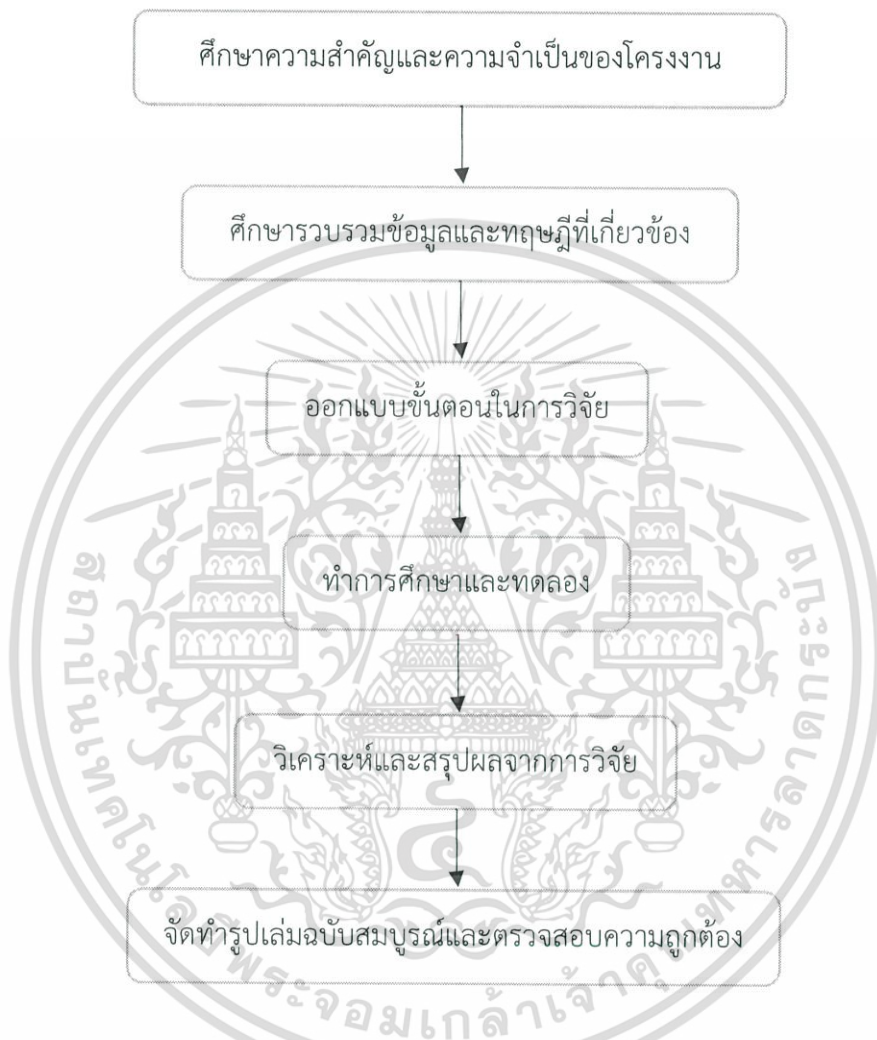
- 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน
- 3.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบ
- 3.3 การตรวจสอบและวิเคราะห์ผลทางโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี
- 3.4 การทดสอบและวิเคราะห์ผลความแข็งของโลหะบัดกรี
- 3.5 การยืนยันแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ตารางที่ 3.1 แสดงส่วนผสมของโลหะบัดกรีแต่ละชนิดที่นำมาใช้ในงานวิจัย [49]

ชิ้นงาน	ส่วนประกอบ (%)		
	Sn	Cu	Sb
1	100	0	0
2	98.5	1.5	0
3	97	3	0
4	95.75	2.25	2
5	97.33	0	2.67
6	94.5	1.5	4
7	93	3	4
8	92.5	1.5	6
9	92	0	8
10	90.5	1.5	8
11	89	3	8

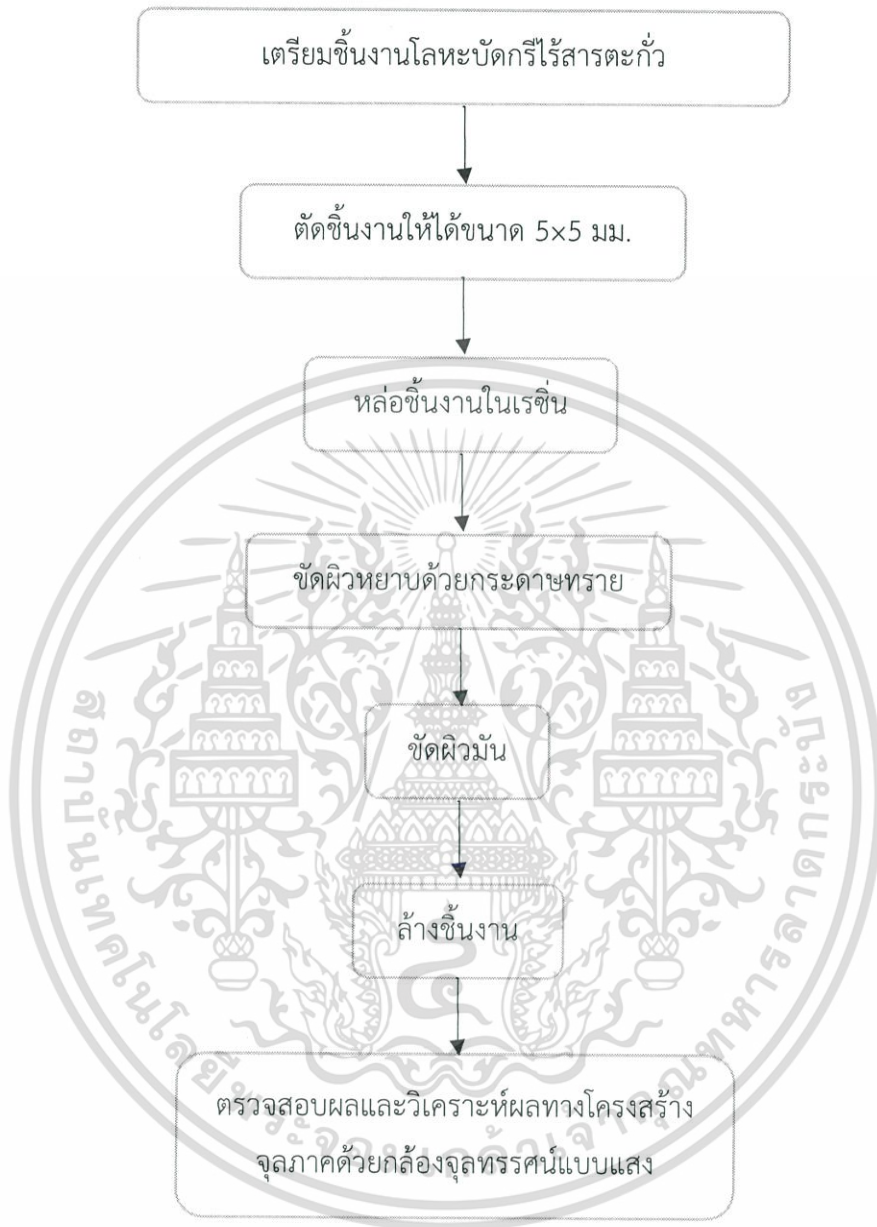
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

สำหรับการทำงานวิจัยเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคและความแข็งของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-Cu-Sb มีขั้นตอนในการดำเนินงานดังนี้



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบ



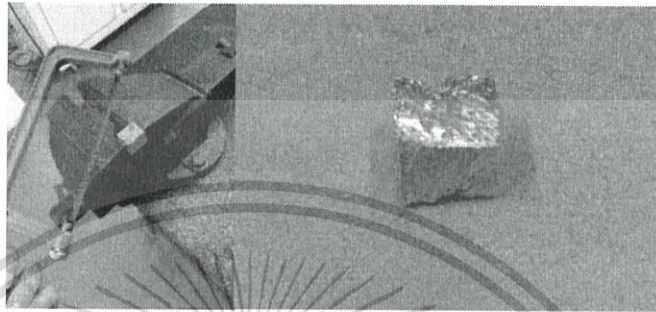
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานโลหะบัดกรีเพื่อศึกษาโครงสร้างจุภาค

3.3 การตรวจสอบและวิเคราะห์ผลทางโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี

3.3.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

3.3.1.1 การตัดชิ้นงานทดสอบ

นำชิ้นงานทดสอบที่เป็นก้อนอินก๊อท (Ingot) มาตัดให้ได้ขนาด 5×5 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ลักษณะชิ้นงานที่นำมาตัดให้ได้ขนาด 5×5 มิลลิเมตร

3.3.1.2 การหล่อเรซิน

นำชิ้นงานมาทำการหล่อเรซินเพื่อให้จับชิ้นงานสะดวกในการขัดระราบ โดยแม่แบบที่ใช้ในการหล่อเรซินจะเป็นท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.5 เซนติเมตร โดยจะตัดแบ่งท่อให้มีความสูงมากกว่าชิ้นงาน ทำการปรับผิวของท่อ PVC ให้ระนาบเท่ากันก่อน เพื่อให้ไม่ให้เกิดเรซินเหลวที่ตกลงบนชิ้นงานไหลออกจากแม่แบบ หลังจากนั้นทาสีที่ผิวด้านในของท่อและพื้นระนาบที่จะวางแม่แบบ เพื่อให้เรซินติดกับแม่แบบและเพื่อความสะดวกในการแกะชิ้นงานเรซินออกจากแม่แบบ หลังจากนั้นนำชิ้นงานวางในแม่แบบแล้วเทเรซินเหลวที่ผสมเรียบร้อยแล้วลงไป รอจนเรซินแข็งตัวก่อนแล้วจึงแกะชิ้นงานออกจากแม่แบบ จะได้ชิ้นงานดังรูปที่ 3.4

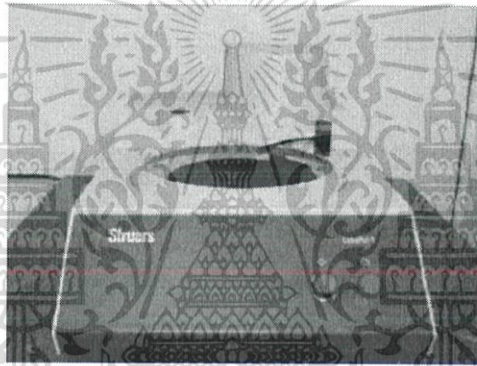


รูปที่ 3.4 การหล่อเรซิน

3.3.1.3 การขัดระนาบผิวชิ้นงานทดสอบ

1. การขัดผิวหยาบ (Grinding)

การนำชิ้นงานมาขัดด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 400, 800, 1000, 2000 และ 4000 ตามลำดับ โดยใช้เครื่องขัดชิ้นงานทดสอบยี่ห้อ Struers รุ่น LabolPol-1 ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ในการขัดให้นำกระดาษทรายวางบนพื้นผิวเรียบแล้วขัดผิวชิ้นงานที่จะตรวจสอบลงบนกระดาษทรายนั้น ขณะขัดต้องใช้น้ำหล่อให้เปียกตลอดเวลาเพื่อไม่ให้โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีเปลี่ยนไปเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการขัดและเพื่อเป็นการล้างสิ่งปนเปื้อนที่อาจจะติดอยู่กับชิ้นงาน เมื่อต้องการเปลี่ยนเบอร์กระดาษเบอร์ถัดไปควรทำการขัดในทิศทางที่ตั้งฉาก (90°) กับรอยขัดเดิม จากนั้นขัดต่อจนรอยขัดที่เกิดจากกระดาษทรายเบอร์ก่อนหน้าหายไปแล้วจึงเปลี่ยนเบอร์กระดาษทรายเบอร์ถัดไปทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆตามลำดับเบอร์ของกระดาษทราย ดังแสดงในรูปที่ 3.6



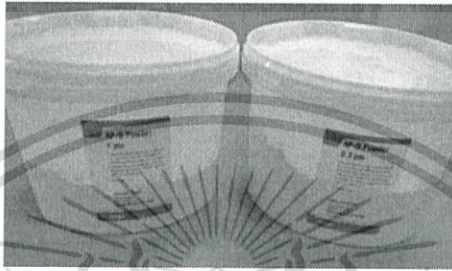
รูปที่ 3.5 เครื่องขัดชิ้นงานทดสอบยี่ห้อ Struers รุ่น LabolPol-1



รูปที่ 3.6 แสดงการขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทราย

2. การขัดผิวมัน (Polishing)

หลังจากการขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเสร็จแล้ว จะนำชิ้นงานมาขัดผิวมันเพื่อเป็นการกำจัดรอยกระดาษทรายที่ปรากฏบนผิวของชิ้นงานชิ้นงาน ด้วยผงอะลูมินา (Aluminum oxide) ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่งผงอะลูมินาที่ใช้จะมีขนาด 1 และ 0.3 ไมครอน ตามลำดับ เนื่องจากชิ้นงานทดสอบนั้นเป็นชิ้นงานอ่อน ซึ่งการขัดมันด้วยผงขัดจะทำให้ผิวของชิ้นงานมีความมันเงา การขัดจึงต้องใช้แรงกดน้อย เพื่อไม่ให้เกิดรอยบนชิ้นงานเนื่องจากเศษโลหะที่ฝังในงานขัด



รูปที่ 3.7 ชนิดผงอะลูมินาที่ใช้ในการขัดมัน

3.3.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

3.3.2.1 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเบื้องต้นด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

หลังจากผ่านขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานแล้ว ชิ้นงานจะถูกนำมาส่องที่กล้องจุลทรรศน์แบบแสงยี่ห้อ Zeiss รุ่น Axiolab ดังแสดงในรูปที่ 3.8 เพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและลักษณะโดยรวมของผิวชิ้นงานว่ามีรอยตำหนิหรือไม่



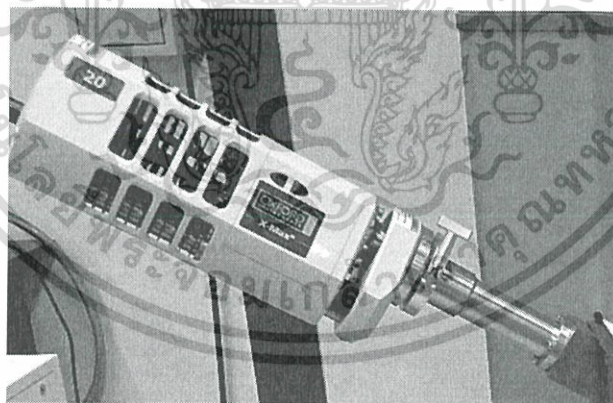
รูปที่ 3.8 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope) ยี่ห้อ Zeiss รุ่น Axiolab

3.3.2.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมี

นำชิ้นงานที่ขัดผิวหน้าเรียบร้อยแล้ว มาทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6510LV ดังแสดงในรูปที่ 3.9 และตรวจวัดรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงานของธาตุ (Energy dispersive x-ray spectrometer, EDS) ยี่ห้อ Oxford รุ่น X-Max^N ดังแสดงในรูปที่ 3.10 เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ



รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6510LV

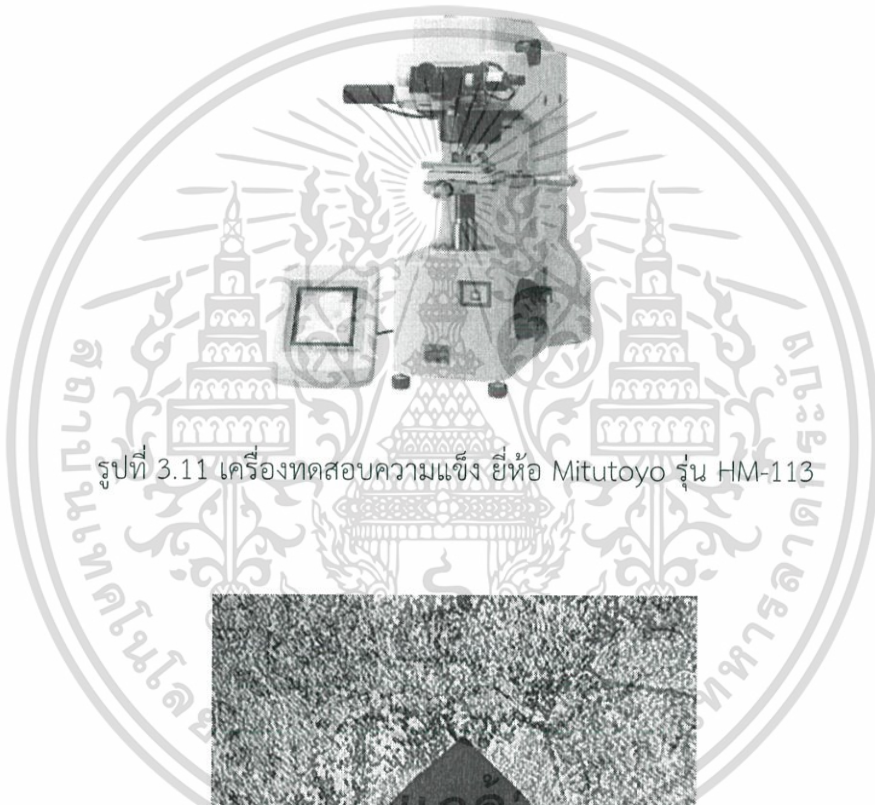


รูปที่ 3.10 เครื่องตรวจวัดรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงานของธาตุ (EDS) ยี่ห้อ Oxford รุ่น X-Max^N

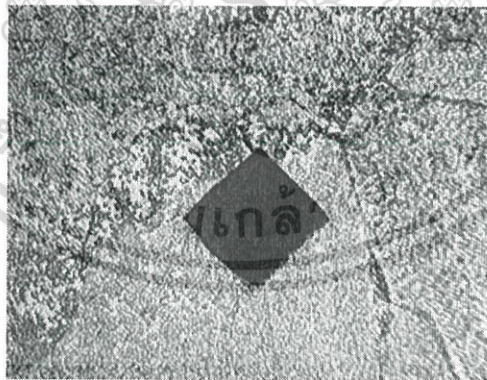
3.4 การทดสอบและวิเคราะห์ผลความแข็งของโลหะบัดกรี

3.4.1 การทดสอบค่าความแข็งด้วยวิธีการทดสอบความแข็งวิกเกอร์ส (Vickers hardness test)

นำชิ้นงานที่ผ่านการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเรียบร้อยแล้วมาทดสอบค่าความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness testing machine) ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น HM-113 ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ซึ่งเป็นการวัดความแข็งโดยใช้หัวกดเพชรที่มีลักษณะเป็นพีระมิดฐานสี่เหลี่ยม ปลายหัวกดทำมุม 136 องศา กดลงบนชิ้นงาน รอยที่เกิดขึ้นจะเป็นรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ค่าความแข็งที่ได้ เครื่องจะคำนวณมาจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว ในการทดสอบจะใช้แรงกดขนาด 0.1 กิโลกรัม เป็นเวลา 10 วินาที



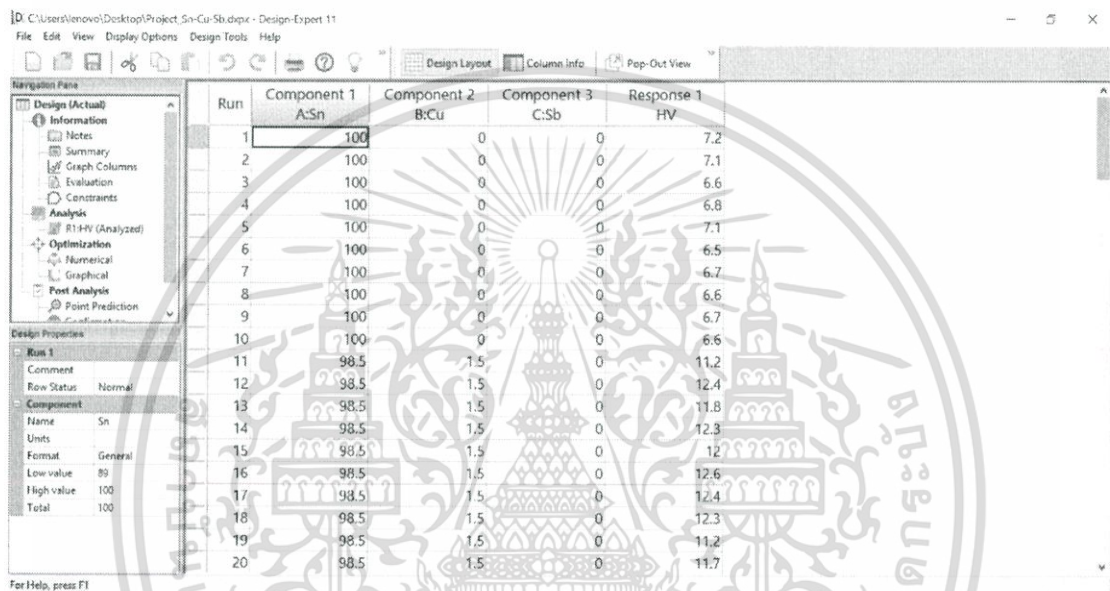
รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบความแข็ง ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น HM-113



รูปที่ 3.12 ลักษณะรอยกดที่เกิดขึ้นจะเป็นรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส

3.4.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบค่าความแข็งด้วยโปรแกรม Design Expert

หลังทำการทดสอบความแข็งด้วยวิธีการทดสอบความแข็งวิกเกอร์ส (Vickers hardness test) จะนำค่าที่ได้มาใส่ในโปรแกรม Design Expert version 11 เพื่อวิเคราะห์ผล ดังแสดงในรูปที่ 3.13 โดยเลือก Mixture แบบ Optimal เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ ซึ่งการวิเคราะห์ (Analysis) ของโปรแกรม จะมีหน้าต่างการวิเคราะห์ทั้งหมด 6 แบบ นั่นคือ Transform, Fit summary, Model, ANOVA, Diagnostics และ Model graphs

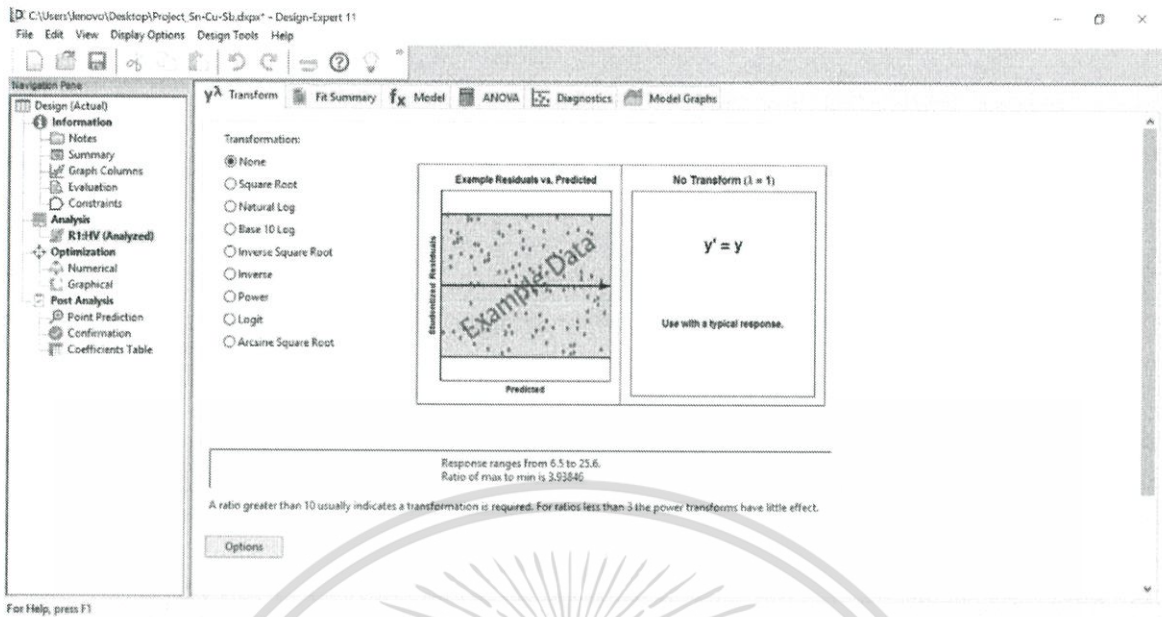


Run	Component 1 A:Sn	Component 2 B:Cu	Component 3 C:Sb	Response 1 HV
1	100	0	0	7.2
2	100	0	0	7.1
3	100	0	0	6.6
4	100	0	0	6.8
5	100	0	0	7.1
6	100	0	0	6.5
7	100	0	0	6.7
8	100	0	0	6.6
9	100	0	0	6.7
10	100	0	0	6.6
11	98.5	1.5	0	11.2
12	98.5	1.5	0	12.4
13	98.5	1.5	0	11.8
14	98.5	1.5	0	12.3
15	98.5	1.5	0	12
16	98.5	1.5	0	12.6
17	98.5	1.5	0	12.4
18	98.5	1.5	0	12.3
19	98.5	1.5	0	11.2
20	98.5	1.5	0	11.7

รูปที่ 3.13 นำค่าความแข็ง (HV) ที่ได้มาวิเคราะห์ด้วย โปรแกรม Design Expert 11

3.4.2.1 Transform

ในแถบ Transform สามารถเลือกรูปแบบของสมการว่ามีฟังก์ชันหรือไม่ เช่น None, Square Root, Natural log, Base 10 log, Inverse square root, Inverse, Power, Logit, และ Arcsine square root สำหรับปริญญาโทฉบับนี้เลือกใช้รูปแบบสมการแบบไม่มีฟังก์ชัน (None)



รูปที่ 3.14 การวิเคราะห์ผลในแถบ Transform

3.4.2.2 Fit summary

ในแถบ Fit summary โปรแกรมจะทำการคำนวณและวิเคราะห์เพื่อหาความเหมาะสมของรูปแบบ ของสมการว่าครมึรูปแบบใด รูปแบบของสมการมีดังนี้ Linear, Quadratic, Special cubic, Cubic, Special quartic, และ Quartic โดยใช้การวิเคราะห์ 3 วิธี คือ

1. Sequential model sum of squares

แสดงการปรับปรุงสะสมของแต่ละเทอมที่เพิ่มขึ้นมา เช่น

- Linear แสดงค่านัยสำคัญของพจน์ Linear หลังการคำนวณค่า Block และค่า Mean
- Quadratic ระบุค่านัยสำคัญของการเพิ่มพจน์ Quadratic เข้าไปยัง Linear, Block และ Mean

สำหรับ Sequential model sum of squares จะเลือกแบบจำลองที่มีกำลังสูงที่สุด (Sum of spares) และมีค่า P-value หรือ Prob> F ที่มีค่าน้อยกว่าค่านัยสำคัญที่กำหนดไว้คือ 0.05

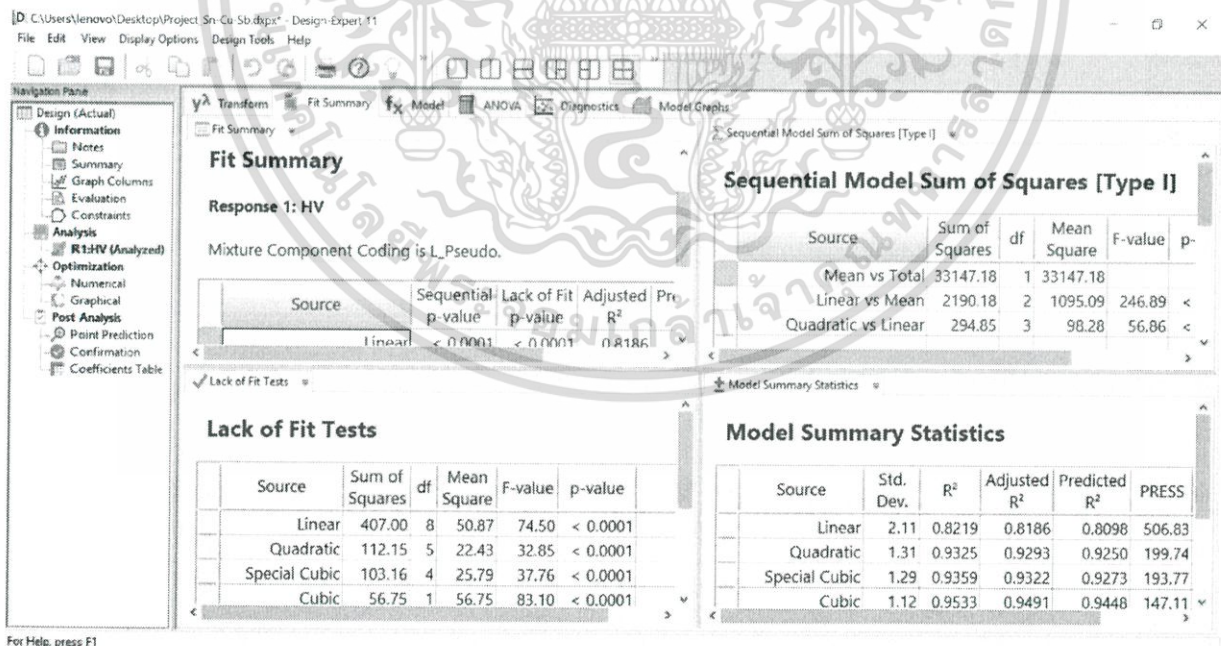
2. Lack of fit tests

แสดงว่าแบบจำลองที่ทำการเลือกมีความเหมาะสมมากน้อยแค่ไหน การทดสอบ Lack of fit จะเป็นการเปรียบเทียบค่าระหว่าง Residual error mean squared กับ Pure error mean squared แบบจำลองที่ทำการเลือกจะต้องไม่มีนัยสำคัญของค่า Lack of fit สำหรับแบบจำลองที่ไม่มีความเหมาะสม จะมีนัยสำคัญของค่า Lack of fit ซึ่งจะมีค่า P-value หรือ Prob> F ที่มีค่าน้อยกว่าค่านัยสำคัญที่กำหนดไว้คือ 0.05

3. Model summary statistics

แสดงการเปรียบเทียบของแบบจำลองประกอบด้วยค่าทางสถิติ ดังนี้

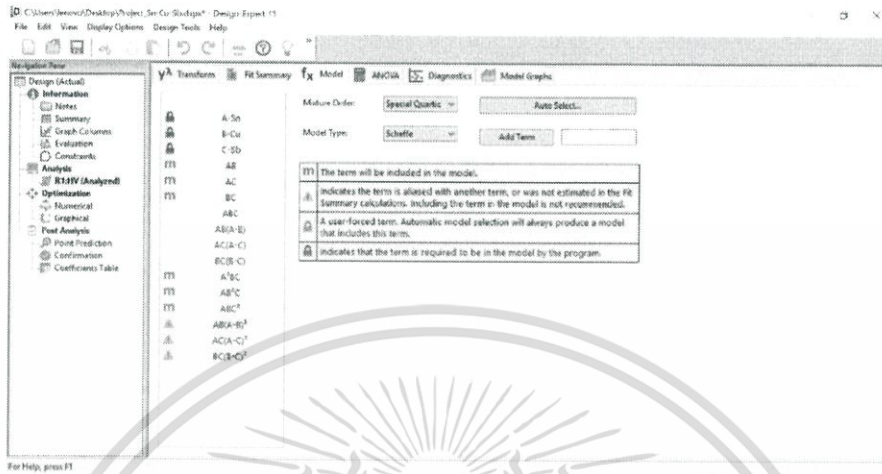
- Standard deviation ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเกิดจากความผิดพลาดในการทดลองควรจะมีค่าน้อยๆ
- R-Squared และ Adjusted R-Squared ค่าที่ได้ควรเข้าใกล้เนื่องจากค่าที่เท่ากับ 1 จะแสดงถึงกรณีในอุดมคติที่ค่าจากการทดลองมีความใกล้เคียงกับค่าจากการพยากรณ์มากที่สุด
- Predicted R-Squared ประมาณจำนวนความแปรปรวนของข้อมูลค่าที่ได้ควรเข้าใกล้ 1
- PRESS (Predicted Residual Error Sum of Square) ทำนายความผิดพลาดที่เกิดขึ้นควรจะมีค่าน้อยๆ



รูปที่ 3.15 การวิเคราะห์ผลในแถบ Fit summary

3.4.2.3 Model

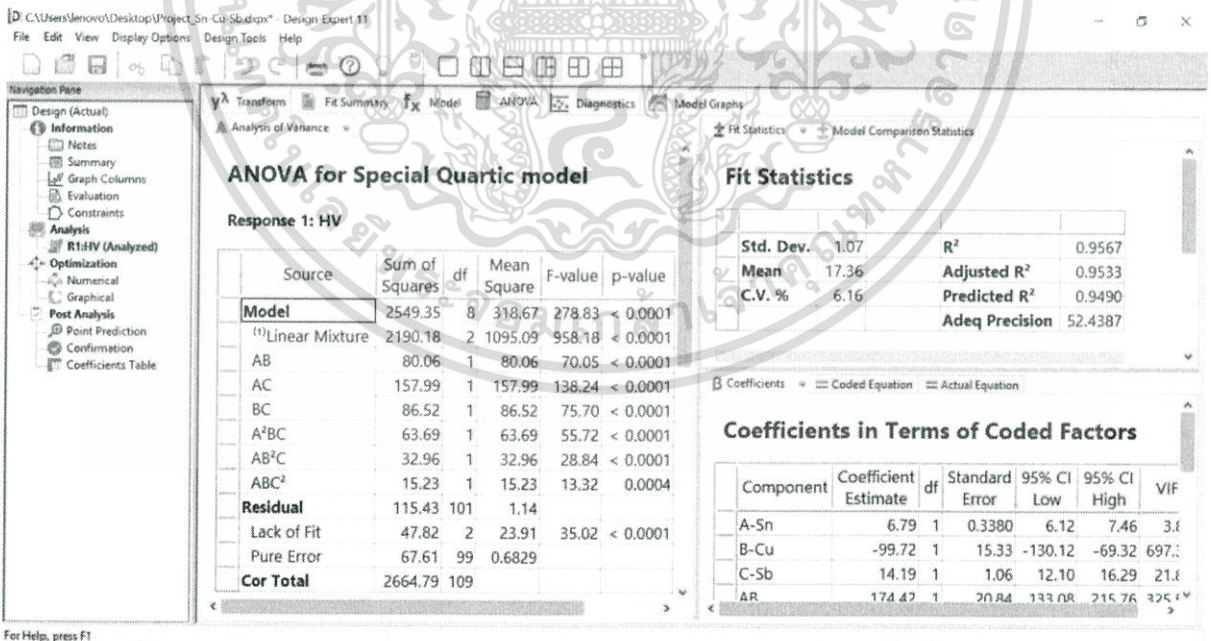
ในแถบ Model จะทำการเลือกรูปแบบของสมการตามที่โปรแกรม Design Expert ได้ทำการแนะนำให้



รูปที่ 3.16 การวิเคราะห์ผลในแถบ Model

3.4.2.4 ANOVA

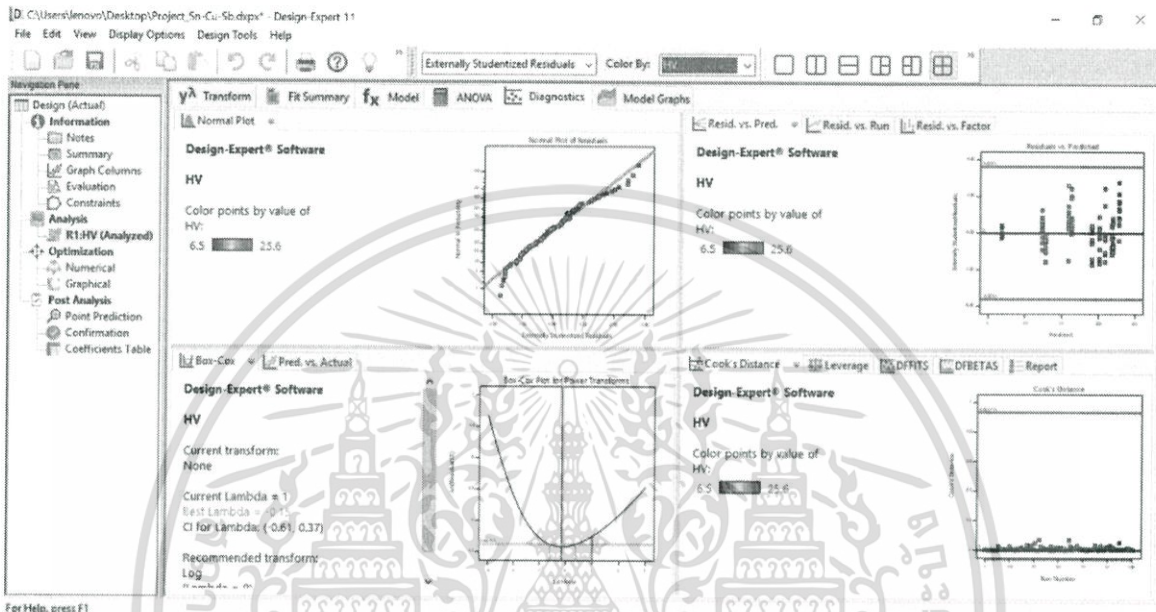
ในแถบ ANOVA ในโปรแกรม Design Expert จะทำการวิเคราะห์รูปแบบสมการที่เลือกและคำนวณสมการสำหรับทำนายผลตอบสนองหรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 3.17 การวิเคราะห์ผลในแถบ ANOVA

3.4.2.4_Diagnostics

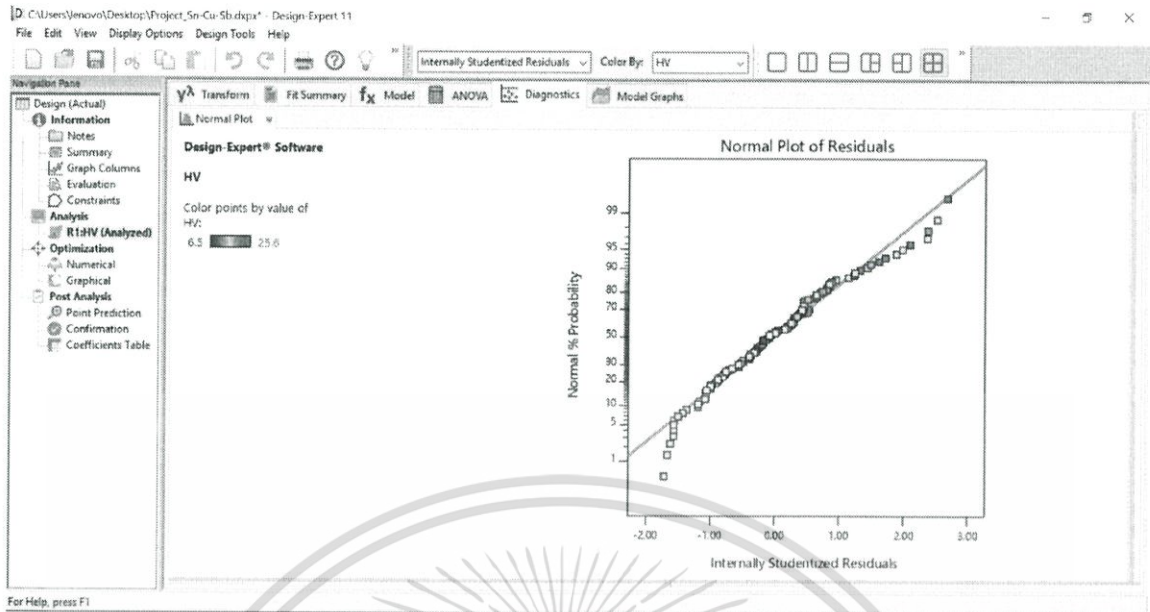
ในแถบ Diagnostics จะแสดงกราฟเพื่อยืนยันว่าสมการที่เลือกนั้นมีความเหมาะสมกับผลตอบสนองหรือไม่ แสดง Residual plot สำหรับการตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติ เพื่อยืนยันความเหมาะสมของสมการ



รูปที่ 3.18 การวิเคราะห์ผลในแถบ Diagnostics

1. Normal plot of residuals

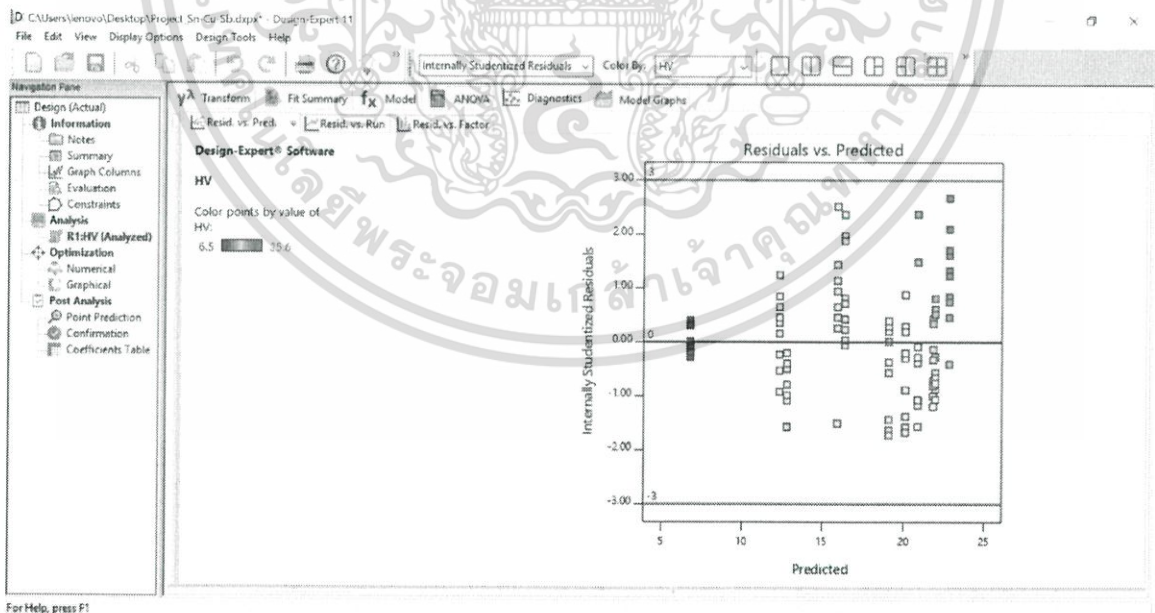
ลักษณะกราฟจะแสดงการกระจายตัวเพื่อหาการกระจายที่ไม่ปกติ (Non-normality) โดยดูจากการเรียงตัวของข้อมูล ถ้ากราฟมีการเรียงตัวเป็นเส้นตรง แสดงว่ามีเศษเหลือ (Residual) ที่มีการกระจายแบบปกติ



รูปที่ 3.19 กราฟวิเคราะห์ Normal plot of residuals ในแถบ Diagnostics

2. Residuals Vs Predicted

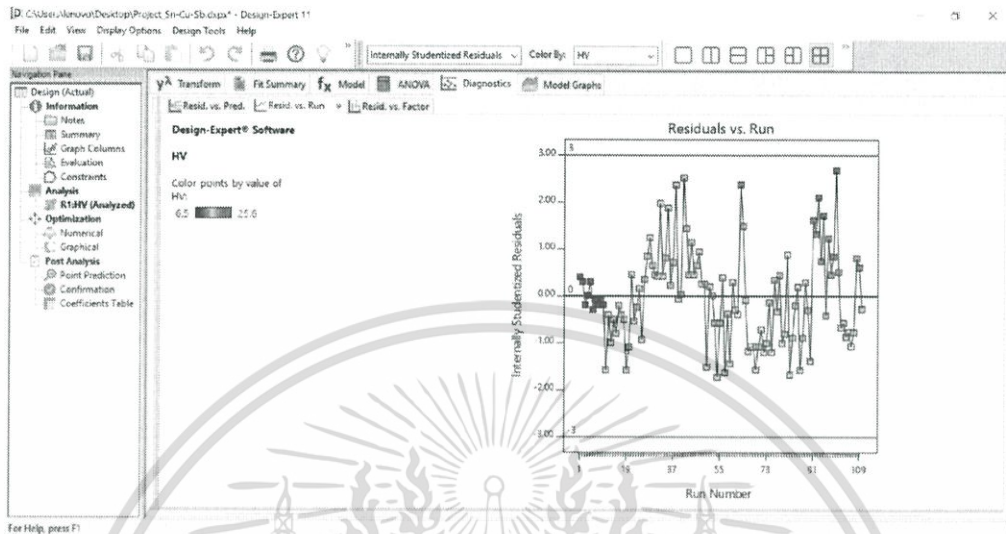
กราฟแสดงค่าระหว่างเศษเหลือ (Residual) กับค่าของผลตอบสองที่ได้จากการทำนายเพื่อทดสอบสมมติฐานของความแปรปรวนแบบคงที่ (Constant variance) ลักษณะการกระจายของกราฟจะเป็นแบบสุ่ม



รูปที่ 3.20 กราฟวิเคราะห์ Residuals Vs Predicted ในแถบ Diagnostics

3. Residuals vs Run

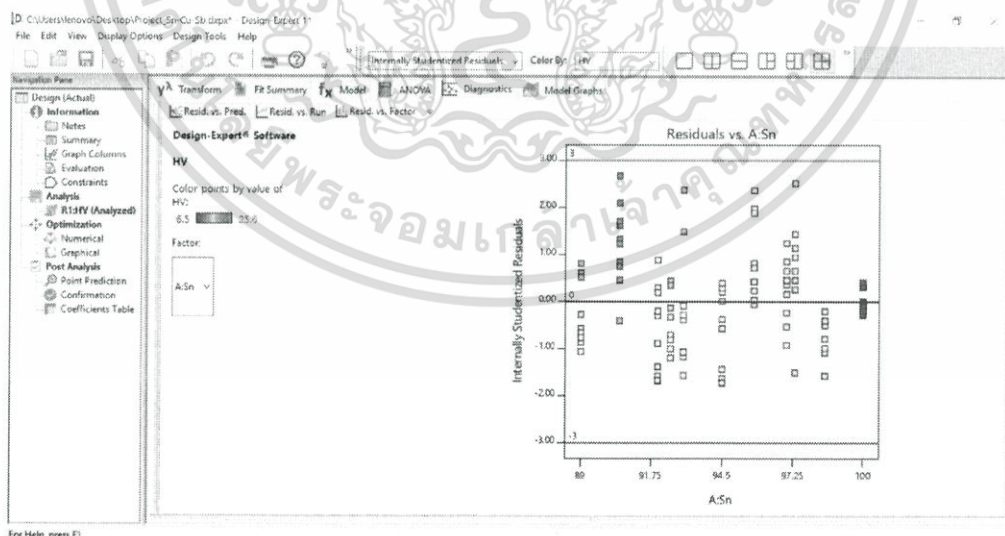
กราฟตรวจสอบตัวแปรซ่อนเร้น (Lurking variables) ว่ามีหรือไม่ ซึ่งตัวแปรเหล่านี้มักเกิดขึ้นในขั้นตอนของการทดลองเพื่อหาผลตอบสนอง โดยควรมีลักษณะกราฟที่มีการกระจายแบบสุ่ม



รูปที่ 3.21 การวิเคราะห์ Residuals VS Run ในแถบ Diagnostics

4. Residuals VS Factor

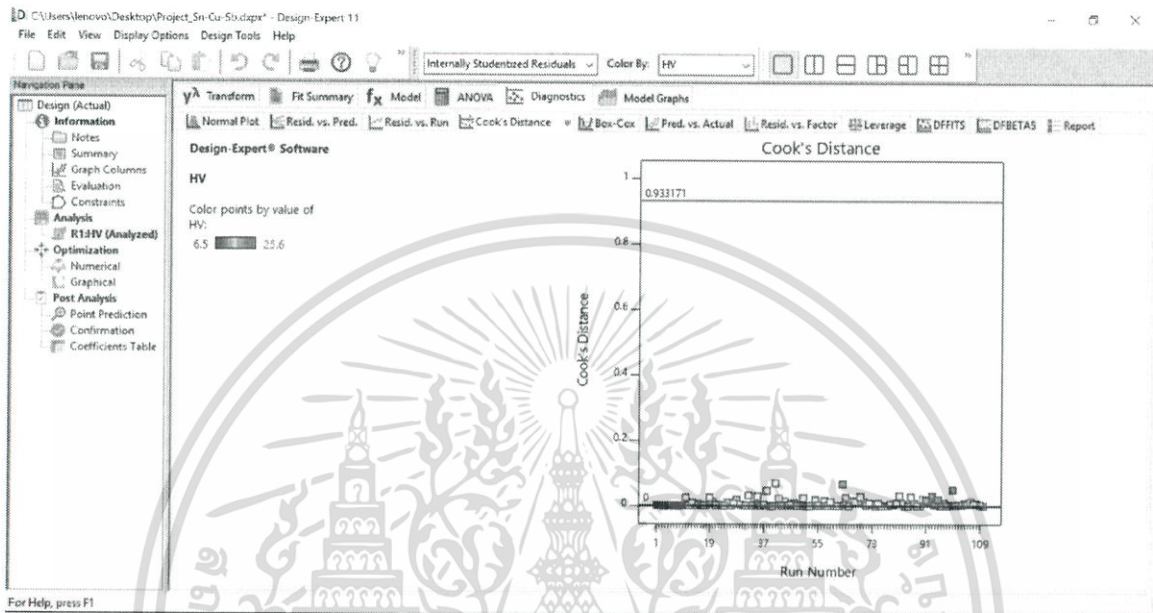
กราฟสำหรับพิจารณาความแปรปรวนว่ามีความเหมาะสมกับแต่ละตัวแปรในสมการทำนายหรือไม่ กราฟควรมีลักษณะการกระจายแบบสุ่ม



รูปที่ 3.22 การวิเคราะห์ Residuals Vs Factor ในแถบ Diagnostics

5. Cook's distance

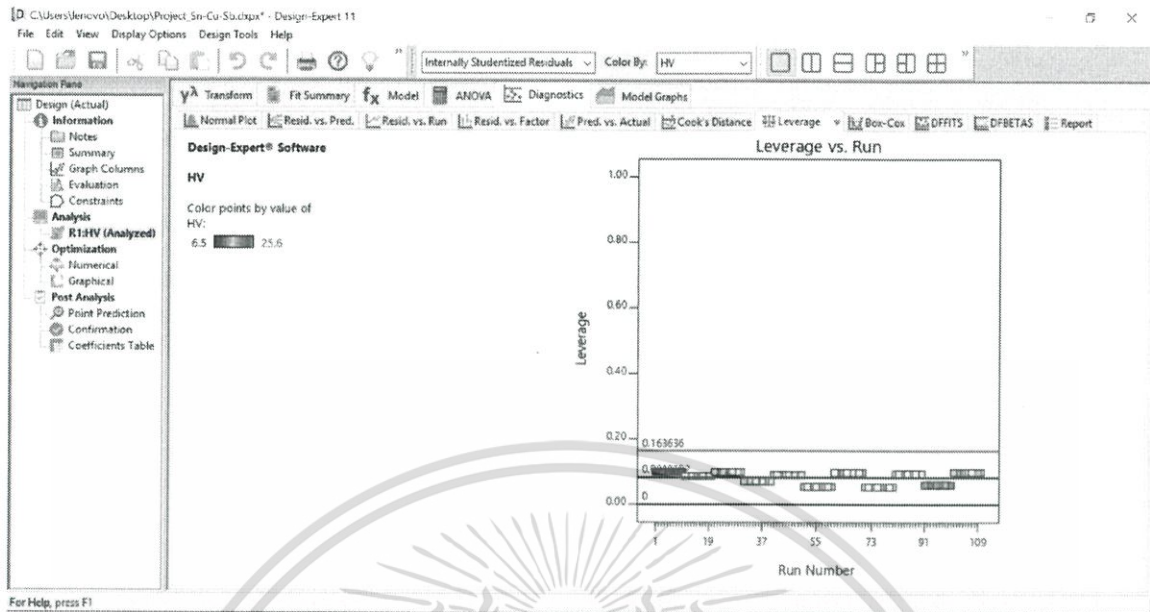
กราฟสำหรับพิจารณาผลกระทบของจุดที่ทำการทดลองที่มีต่อสมการทำนาย โดยควร มีลักษณะที่เกาะกลุ่มกัน ไม่มีจุดใดโดดออกมาจากกลุ่มหรือไม่เข้ากลุ่ม ถ้าเกิดกรณีนี้ควรได้รับการแก้ไขโดยทำการทดสอบจุดนั้นใหม่ หรือการเพิ่มการทดสอบเข้าไปแทนที่การทดลองนั้น



รูปที่ 3.23 การวิเคราะห์ Cook's distance ในแถบ Diagnostics

6. Leverage

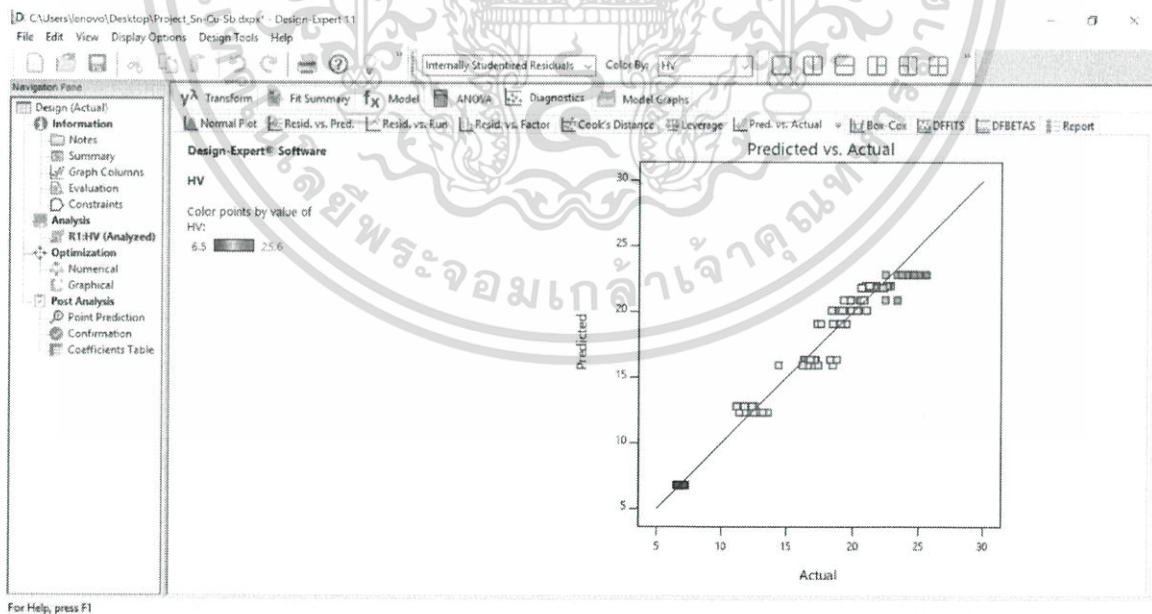
กราฟสำหรับพิจารณาอิทธิพลของแต่ละจุดที่ทำการทดลองที่มีต่อสมการทำนาย ถ้าค่าที่ได้เข้าใกล้ 1 จะมีอิทธิพลมาก ถือว่าเป็นลักษณะที่ไม่ดี เนื่องจากสมการทำนายจะแปรตามจุดการทดลองจุดนั้นเพียงจุดเดียว ไม่ได้กระจายไปทั่วทุกจุดการทดลอง ดังนั้นจุดที่มีค่า Leverage เข้าใกล้ 1 มากควรได้รับการแก้ไข โดยทำการทดสอบจุดนั้นใหม่ หรือการเพิ่มการทดสอบเข้าไปแทนที่การทดลองนั้น



รูปที่ 3.24 การวิเคราะห์ Leverage ในแถบ Diagnostics

7. Predicted VS Actual

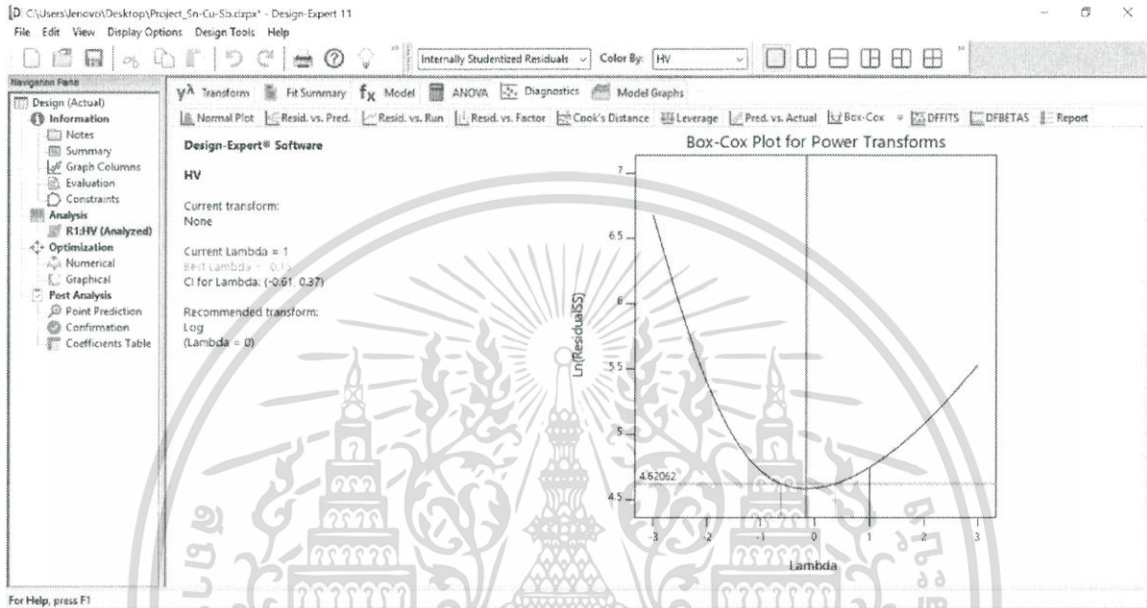
ใช้เปรียบเทียบและติดตามผลระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายจากสมการ ว่าค่าของผลตอบสนองตรงกับค่าที่ได้จากการสมการทำนายหรือไม่



รูปที่ 3.25 การวิเคราะห์ Predicted VS Actual ในแถบ Diagnostics

8. Box-Cox plot for power transforms

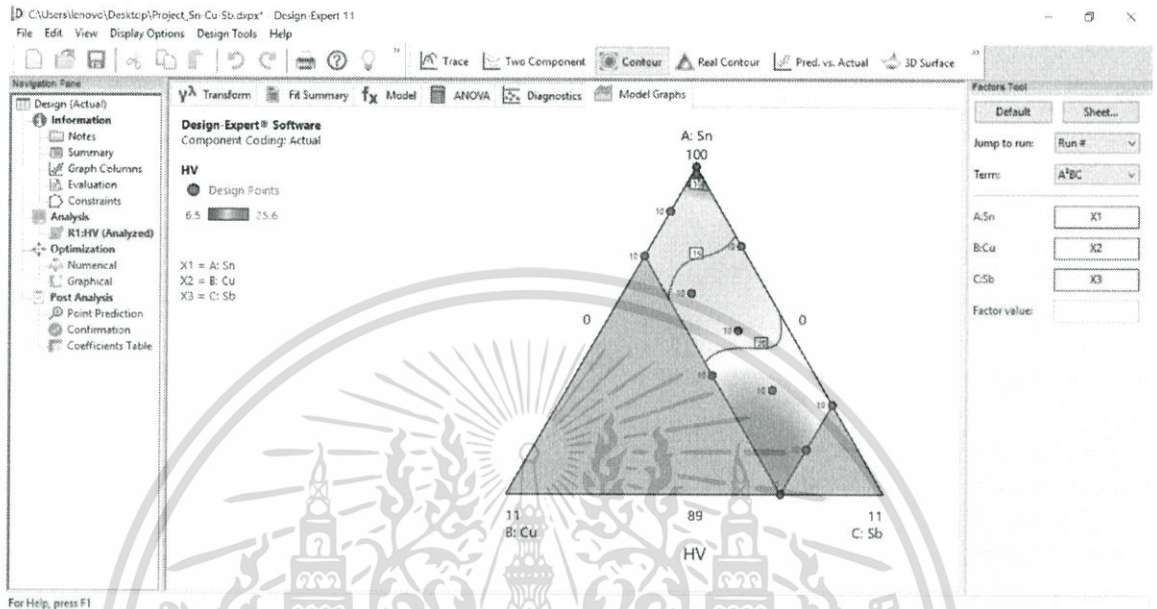
กราฟสำหรับช่วยเลือกค่าความเปลี่ยนแปลงของสมการ (Transformation model) ที่น้อยที่สุดที่สามารถยอมรับได้เพื่อนำค่าที่ได้ไปทำการเปรียบเทียบกับค่า Residual sum of square เพื่อพิจารณา รูปแบบของสมการว่าความเหมาะสมหรือไม่ โดยค่า Lambda คือค่าความเชื่อมั่น ถ้ามีค่าเท่ากับ 1 หมายความว่ามีความเชื่อมั่น 100%



รูปที่ 3.26 การวิเคราะห์ Box-Cox plot for power transforms ในแถบ Diagnostics

3.4.2.5 Model graphs

ในแถบ Model Graphs จะจำลองกราฟที่ได้จากสมการโดยเป็น Ternary phase diagram ระหว่างดีบุก (Sn) ทองแดง (Cu) และพลวง (Sb)



รูปที่ 3.27 การวิเคราะห์ในแถบ Model graphs

3.4.3 การวิเคราะห์สมการจากโปรแกรม Design Expert

หลังจากทำการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยโปรแกรม Design Expert จะได้สมการทำนายของผลตอบสนอง ซึ่งในปริภูมิตำแหน่งนี้ทำการศึกษาคำนวณ 1 ผลตอบสนอง นั่นคือ Hardness จึงมีจำนวนสมการทำนาย 1 สมการ

เมื่อได้สมการในการทำนายจะนำมาวิเคราะห์หาค่าความสัมพันธ์ของแต่ละปริมาณส่วนผสมของโลหะบัดกรีกับค่าความแข็ง ว่าปริมาณของแต่ละส่วนผสมจะส่งผลต่อความแข็งหรือไม่อย่างไร

3.5 การยืนยันแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เป็นการหาค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เทียบกับค่าจริง โดยการสุ่มเลือกอัตราส่วนผสมของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว แล้วทำการทดสอบซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลองก่อนทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการทำนาย

3.5.1 การเลือกส่วนผสมในการทดลอง

ทำการเลือกอัตราส่วนผสมของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว ที่อยู่ในขอบเขตของการศึกษา คือ ดีบุก (Sn) 89 - 100% ทองแดง (Cu) 0 - 3% และพลวง (Sb) 0 - 8% โดยน้ำหนัก และกระจายตัวอยู่ในขอบเขตการศึกษา รวมถึงไม่มีปริมาณส่วนผสมที่ซ้ำกับ 11 การทดลองที่ทำการทดลองเพื่อหาสมการทำนาย จากนั้นทำการคำนวณค่าความแข็งที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แล้วนำค่าผลตอบแทน (Response) แต่ละตัวที่ได้จากการคำนวณและค่าที่ได้จากการทำการทดลองจริง มาคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนจากสมการที่ 3.1 สำหรับปริมาณบัดกรีบัดกรีนี้ ทำการเลือกปริมาณส่วนผสมเพื่อทำการทดสอบซ้ำจำนวน 6 ส่วนผสมหรือ 6 การทดลอง แสดงดังตารางที่ 3.2 โดยจะทำการกดชิ้นงานเป็นจำนวน 10 จุดๆ ละ 10 วินาที

สมการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อน

$$\%Error = \frac{\text{ค่าที่ได้จากการคำนวณ} - \text{ค่าที่ได้จากการทดลอง}}{\text{ค่าที่ได้จากการทดลอง}} \quad (3.1)$$

ตารางที่ 3.2 ปริมาณส่วนผสมของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่จะทดสอบเพื่อยืนยันสมการทำนาย

No.	wt% Sn	wt% Cu	wt% Sb
1	90	2	8
2	92	1	7
3	93.75	1	5.25
4	95	2	3
5	96.5	2	1.5
6	98	1	1

3.5.2 การทดสอบ

หลังจากเลือกปริมาณส่วนผสมของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว จะทำการหล่อ การเตรียมชิ้นงาน ทดสอบและวิธีการทดสอบจะเหมือนกับ 11 การทดลองที่ทำการทดลองเพื่อหาสมการทำนาย โดยจะทำการทดสอบ การวัดความแข็งด้วยวิธี Vickers hardness

3.5.3 การเปรียบเทียบ

ทำการเปรียบเทียบผลตอบสนองที่ได้จากสมการทำนายและค่าที่ได้จากการทดลอง คำนวณค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นว่ามีมากน้อยแค่ไหน ถ้าค่าที่ได้จากการทดลองและจากสมการทำนายมีค่าใกล้เคียงกันแสดงว่า สมการทำนายที่ได้มีความถูกต้อง แต่ถ้ามีความแตกต่างกันมาก ควรหาสาเหตุว่าเกิดความผิดพลาดที่จุดไหน ก่อนทำการทดลองใหม่

หลังจากการทดลองเพื่อยืนยันสมการทำนายที่ได้จากโปรแกรม Design Expert จะทำการสรุปผลการทดลองหาความสัมพันธ์และอิทธิพลของปริมาณของแต่ละส่วนผสมของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ส่งผลต่อความแข็งของชิ้นงาน



บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้ดำเนินงานวิจัยได้ทำการศึกษาและทดลองตามที่วางแผนไว้ใน การดำเนินงาน และได้ผลลัพธ์จากการดำเนินงานวิจัย ซึ่งสามารถจำแนกได้ 2 หัวข้อ โดยแต่ละหัวข้อ มี รายละเอียดต่อไปนี้

4.1 การวิเคราะห์ผลทางโครงสร้างจุลภาค

4.2 การวัดความแข็งด้วยวิธีการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส

4.1 การวิเคราะห์ผลทางโครงสร้างจุลภาค

4.1.1 การตรวจสอบโครงสร้างโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope, OM)

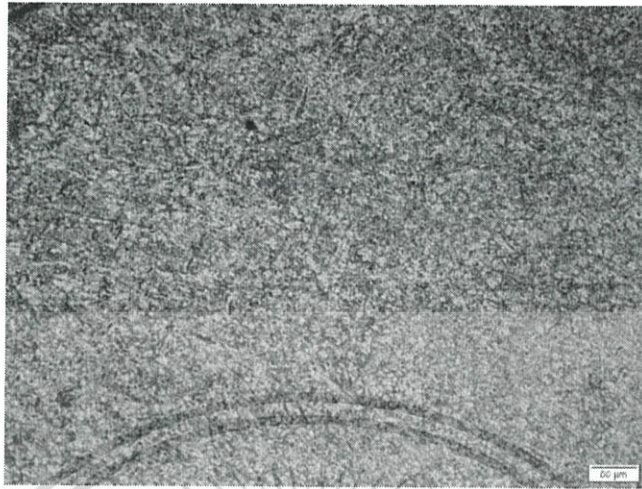
จากการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงของตัวอย่างโลหะ บัตกิริไรสารตะกั่ว Sn-Cu-Sb ได้ผลดังนี้

1. โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัตกิริชนิด Sn pure



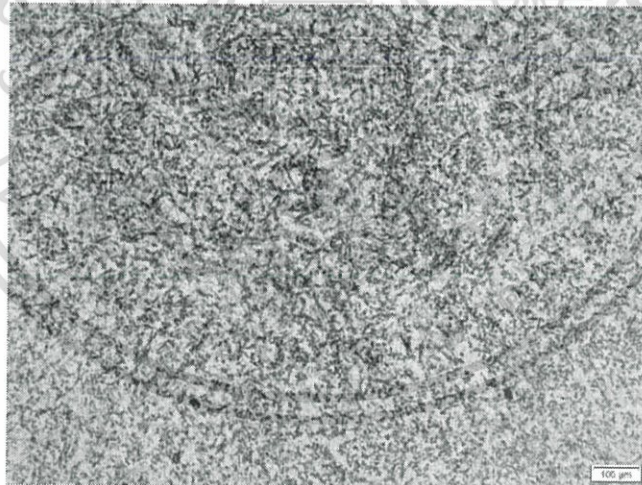
รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัตกิริชนิด Sn pure จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 50 เท่า

2. โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด 98.5Sn-1.5Cu



รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรีชนิด 98.5Sn-1.5Cu จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 100 เท่า

3. โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด 97Sn-3Cu



รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรีชนิด 97Sn-3Cu จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 50 เท่า

4. โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด 95.75Sn-2.25Cu-2Sb



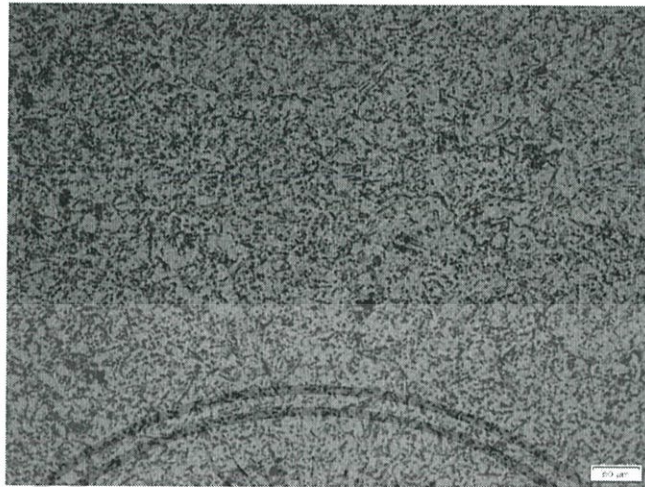
รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรีชนิด 95.75Sn-2.25Cu-2Sb จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 50 เท่า

5. โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด 97.33Sn-2.67Sb



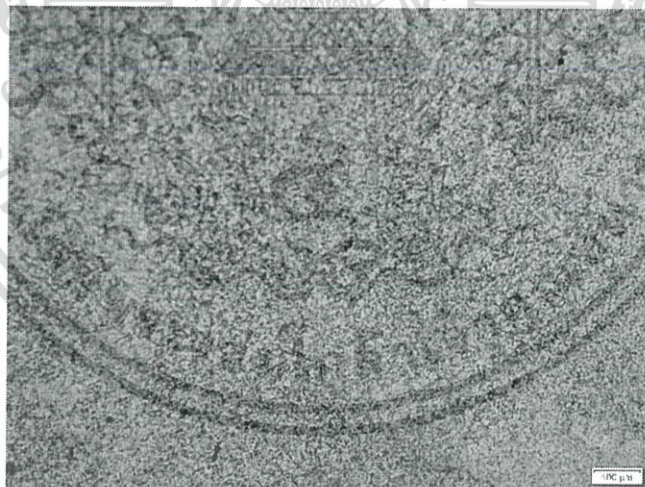
รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรีชนิด 97.33Sn-2.67Sb จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 50 เท่า

6. โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด 94.5Sn-1.5Cu-4Sb



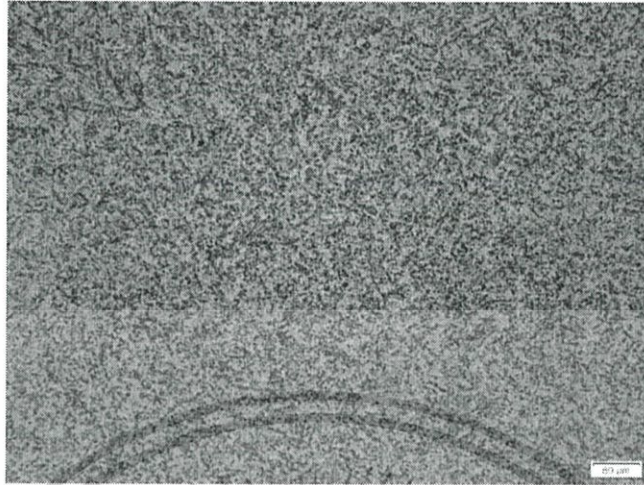
รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรีชนิด 94.5Sn-1.5Cu-4Sb จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 100 เท่า

7. โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด 93Sn-3Cu-4Sb



รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรีชนิด 93Sn-3Cu-4Sb จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 50 เท่า

8. โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด 92.5Sn-1.5Cu-6Sb



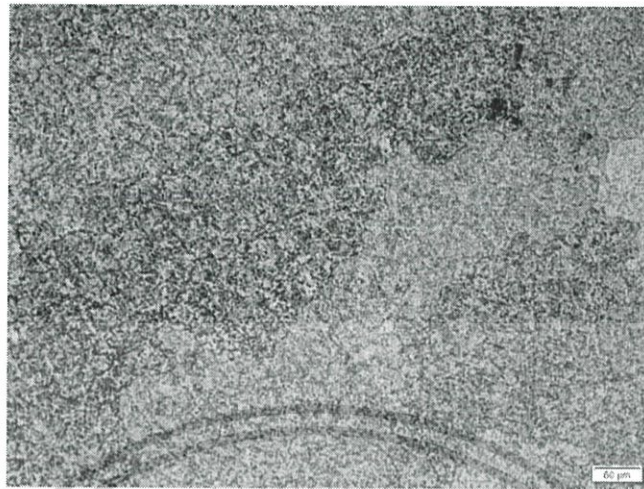
รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรีชนิด 92.5Sn-1.5Cu-6Sb จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 100 เท่า

9. โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด 92Sn-8Sb



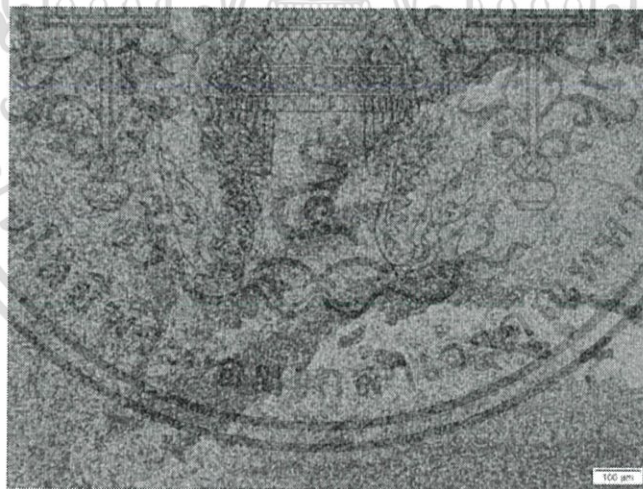
รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรีชนิด 92Sn-8Sb จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 50 เท่า

10. โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด 90.5Sn-1.5Cu-8Sb



รูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรีชนิด 90.5Sn-1.5Cu-8Sb จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 100 เท่า

11. โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด 89Sn-3Cu-8Sb



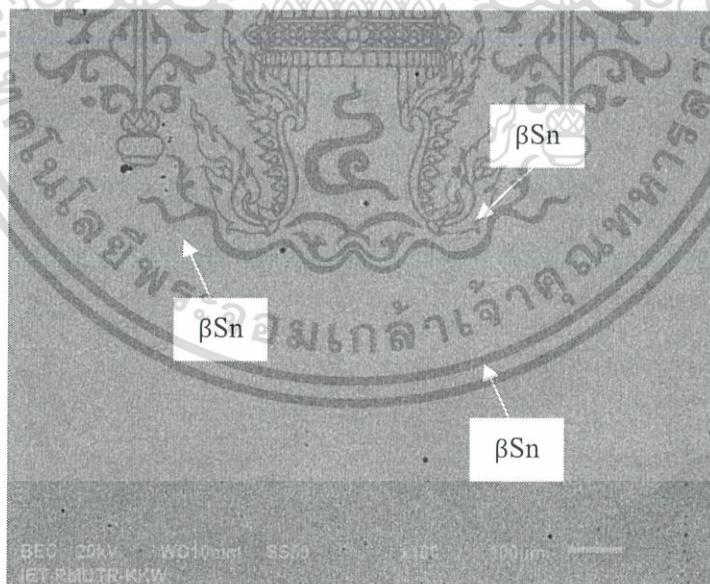
รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรีชนิด 89Sn-3Cu-8Sb จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 50 เท่า

จากผลการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาค โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงจะเห็นได้ว่า ลักษณะโครงสร้างของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วทั้ง 11 ชนิด มีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน คือ มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นเฟส βSn โดยอ้างอิงจากแผนภูมิเฟส (Phase diagram) สำหรับสารประกอบซึ่งมีส่วนผสมของ Sn มากกว่า 90% ขึ้นไป [51] จากการสังเกตผิวของชิ้นงานทดสอบ พบว่า จุดที่มีสีขาวหรือจุดสว่างจะเป็นโลหะพื้น คือ Sn และจะเห็นเป็นจุดเล็กๆ สีสดำกระจายอยู่ทั่วทั้งพื้นผิวที่ตรวจสอบ ซึ่งจากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์นี้ยังไม่สามารถสรุปผลได้ชัดเจน ว่าคือสารประกอบใด ดังนั้นเราจึงต้องทำการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และวิเคราะห์ด้วยระบบ EDS ต่อไป

4.1.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

ผลการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และผลการวิเคราะห์ด้วย EDS ของตัวอย่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว ได้ผลดังนี้

1. โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรีชนิด Sn pure



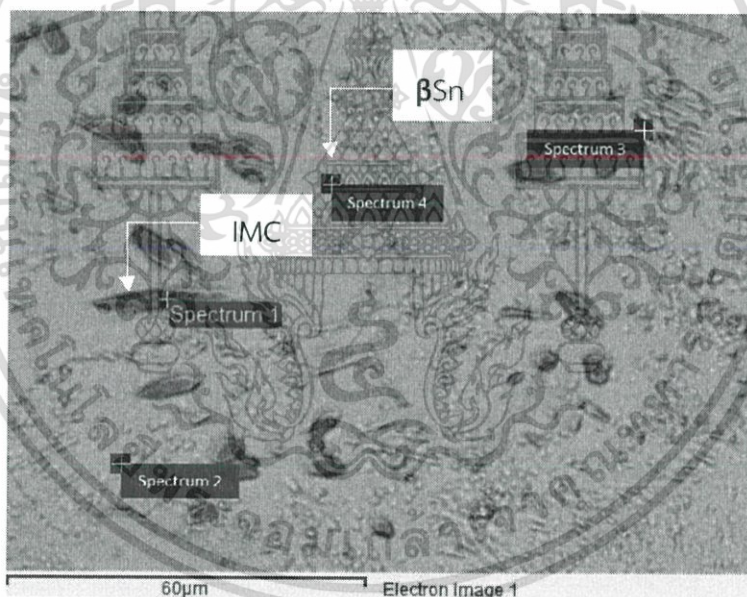
รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคโลหะบัดกรีชนิด Sn pure จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 100 เท่า

จากรูปที่ 4.12 แสดงโครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรีชนิด Sn pure ซึ่งเป็นพื้นผิวของธาตุหลักของชิ้นงานที่ศึกษา มีโครงสร้างเป็นเฟส β Sn จากผลการวิเคราะห์โดยใช้ EDS พบว่าเฟส β Sn มีปริมาณ Sn เท่ากับ 100% โดยน้ำหนัก

2. โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 98.5Sn-1.5Cu

จากภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 98.5Sn-1.5Cu พบว่ามีสารประกอบเชิงโลหะเป็นจุดสีดำและเส้นเรียวยาวที่เกาะกลุ่มกันเกิดขึ้นชัดเจนกระจายทั่วผิวชิ้นงาน และลักษณะโดยทั่วไปมีขนาดไม่สม่ำเสมอ เห็นความแตกต่างของผิวชิ้นงานชัดเจน แสดงในรูปที่ 4.13

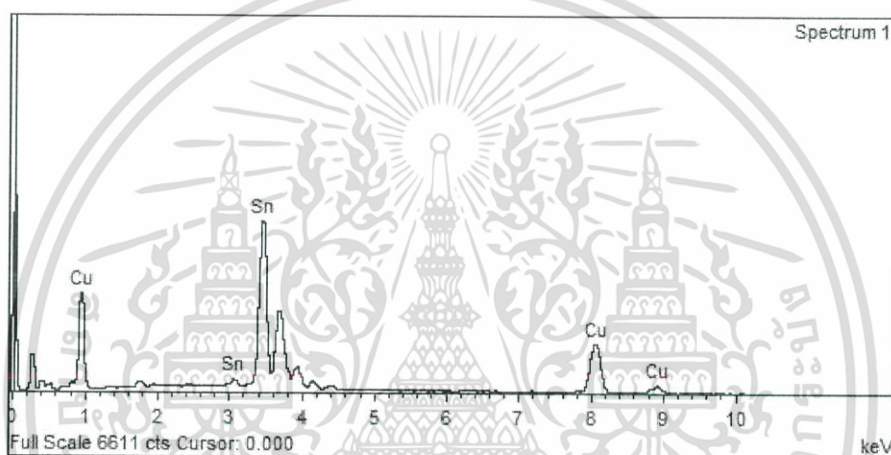
ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้ EDS เพื่อระบุองค์ประกอบทางเคมีสำหรับสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compound: IMC) ที่เกิดขึ้น แสดงผลของเปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้น โดยพบธาตุ Sn ในช่วง 49.35-100% และ ธาตุ Cu ในช่วง 1.71-50.65% ดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.14 และ 4.15 ตามลำดับ



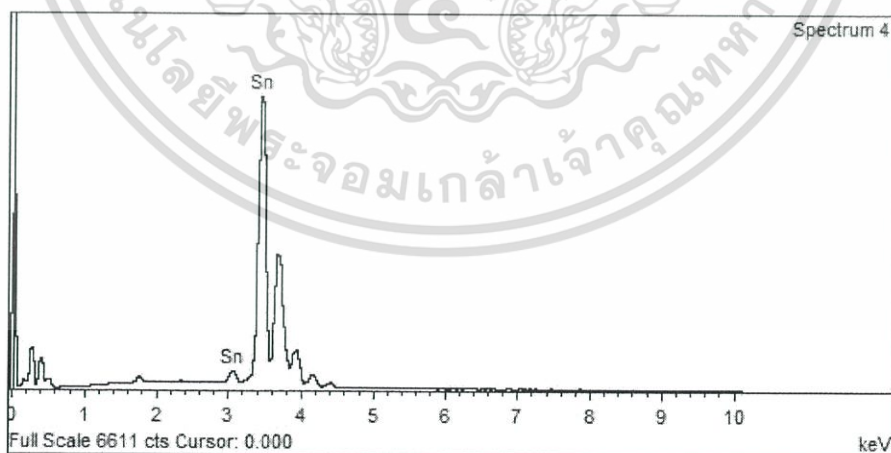
รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด 98.5Sn-1.5Cu ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1000 เท่า

ตารางที่ 4.1 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด 98.5Sn-1.5Cu

Points	Element (at %)			Possible Phase
	Sn	Cu	Sb	
Spectrum 1	49.35	50.65	-	Cu ₆ Sn ₅
Spectrum 2	97.35	2.61	-	βSn
Spectrum 3	98.29	1.71	-	βSn
Spectrum 4	100	-	-	βSn



รูปที่ 4.14 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของโลหะบัดกรีชนิด 98.5Sn-1.5Cu ที่ตำแหน่ง IMC

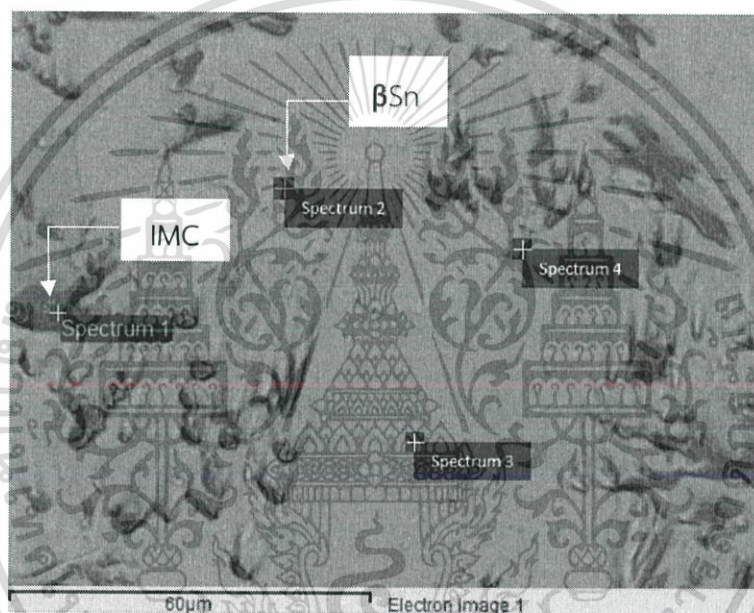


รูปที่ 4.15 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของโลหะบัดกรีชนิด 98.5Sn-1.5Cu ที่ตำแหน่ง βSn

3. โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 97Sn-3Cu

จากภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 97Sn-3Cu พบว่ามีสารประกอบเชิงโลหะเป็นจุดสีดำและสีขาวเกาะกลุ่มกัน เกิดขึ้นชัดเจนกระจุกกระจายทั่วผิวชิ้นงาน และลักษณะโดยทั่วไป จุดสีดำมีขนาดไม่สม่ำเสมอ เกิดความแตกต่างของผิวชิ้นงาน แสดงในรูปที่ 4.16

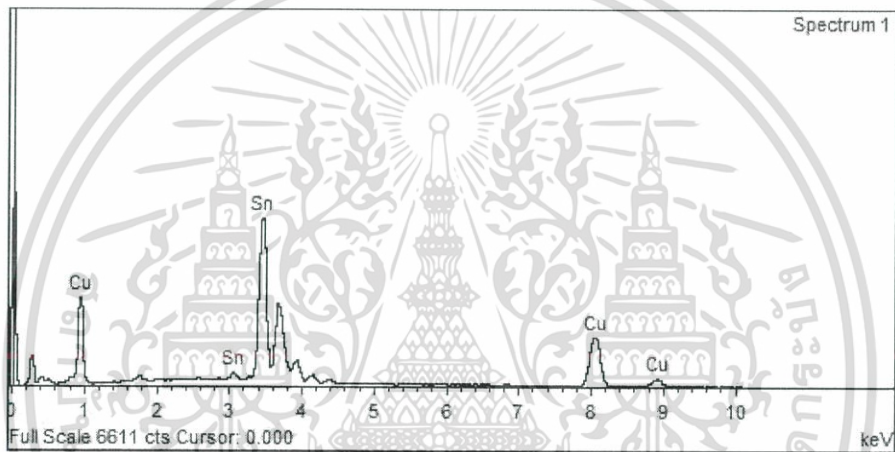
ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้ EDS เพื่อระบุองค์ประกอบทางเคมีสำหรับสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compound: IMC) ที่เกิดขึ้น แสดงผลของเปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้น โดยพบธาตุ Sn ในช่วง 48.25-100% และ ธาตุ Cu ในช่วง 0.2-51.75% ดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ



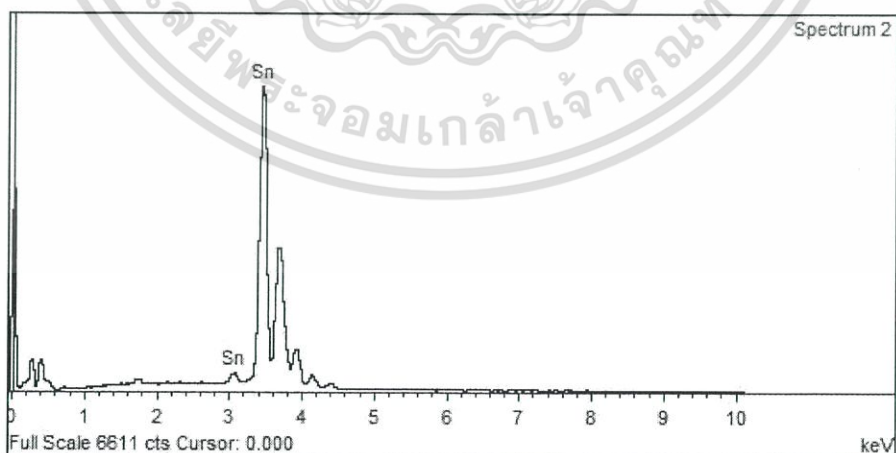
รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด 97Sn-3Cu ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1000 เท่า

ตารางที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด 97Sn-3Cu

Points	Element (at %)			Possible Phase
	Sn	Cu	Sb	
Spectrum 1	48.25	51.75	-	Cu ₆ Sn ₅
Spectrum 2	100	-	-	βSn
Spectrum 3	99.8	0.2	-	βSn
Spectrum 4	69.3	30.7	-	Cu ₆ Sn ₅



รูปที่ 4.17 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของโลหะบัดกรีชนิด 97Sn-3Cu ที่ตำแหน่ง IMC

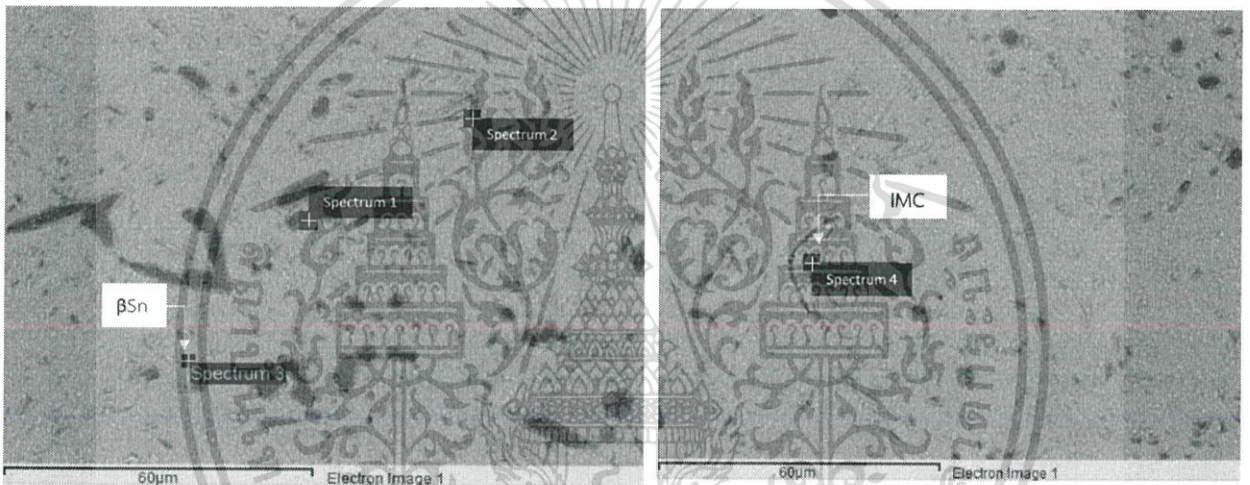


รูปที่ 4.18 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของโลหะบัดกรีชนิด 97Sn-3Cu ที่ตำแหน่ง βSn

4. โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 95.75Sn-2.25Cu-2Sb

จากภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 95.75Sn-2.25Cu-2Sb พบว่ามีสารประกอบเชิงโลหะเป็นจุดและเส้นเรียวยาวสีดำเกิดขึ้นชัดเจนกระจายทั่วผิวชิ้นงาน ลักษณะโดยทั่วไป จุดสีดำมีขนาดไม่สม่ำเสมอ เกิดความแตกต่างของผิวชิ้นงาน แสดงในรูปที่ 4.19

ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้ EDS เพื่อระบุองค์ประกอบทางเคมีสำหรับสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compound: IMC) ที่เกิดขึ้น แสดงผลของเปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้น โดยพบธาตุ Sn ในช่วง 48.95-99.08% ธาตุ Cu ในช่วง 0.20-51.05% และ Sb ในช่วง 0.62-40.10% ดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ

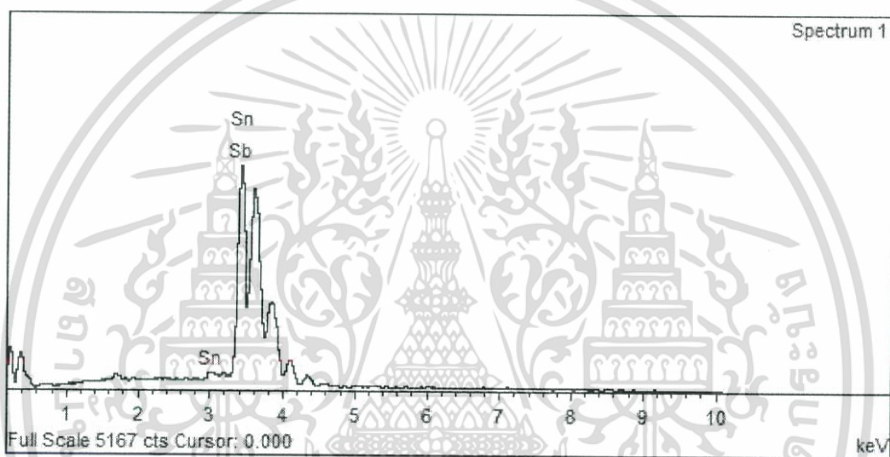


รูปที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด 95.75Sn-2.25Cu-2Sb ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1000 เท่า

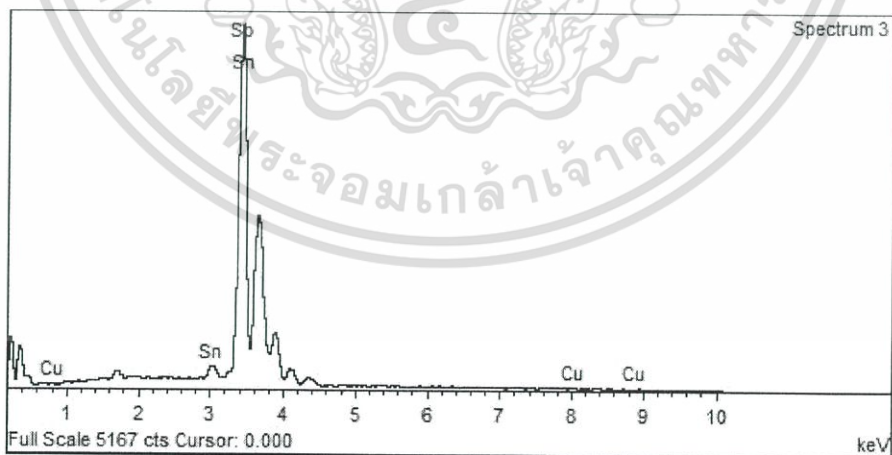
ตารางที่ 4.3 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด

95.75Sn-2.25Cu-2Sb

Points	Element (at %)			Possible Phase
	Sn	Cu	Sb	
Spectrum 1	48.95	51.05	-	Cu ₆ Sn ₅
Spectrum 2	99.08	0.20	0.62	βSn
Spectrum 3	67.87	32.13	-	Cu ₆ Sn ₅
Spectrum 4	59.90	-	40.10	Sn ₃ Sb ₂



รูปที่ 4.20 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของโลหะบัดกรีชนิด 95.75Sn-2.25Cu-2Sb ที่ตำแหน่ง IMC

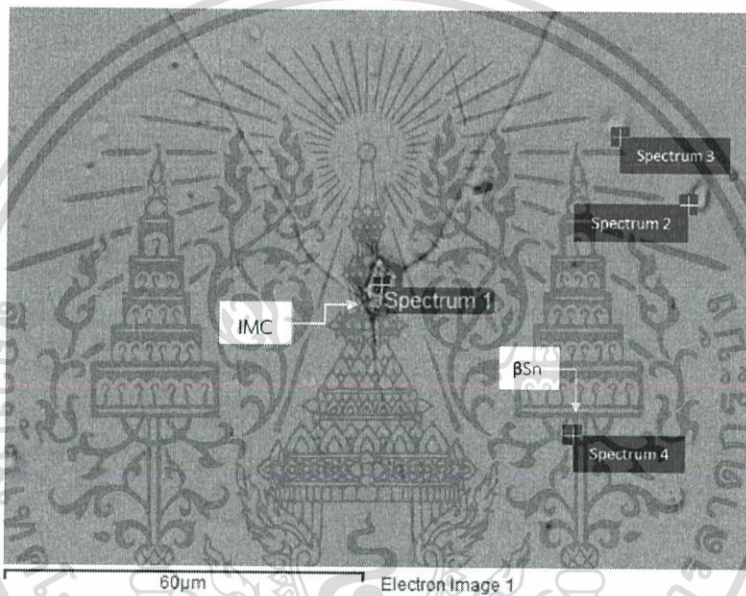


รูปที่ 4.21 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของโลหะบัดกรีชนิด 95.75Sn-2.25Cu-2Sb ที่ตำแหน่ง βSn

5. โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 97.33Sn-2.67Sb

จากภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 97.33Sn-2.67Sb พบว่ามีสารประกอบเชิงโลหะ ลักษณะเป็นเม็ดก้อนสีเทาเกิดขึ้นชัดเจนบริเวณตรงกลางผิวชิ้นงาน เห็นเส้นเกรนและความไม่สม่ำเสมอของผิวชิ้นงาน แสดงในรูปที่ 4.22

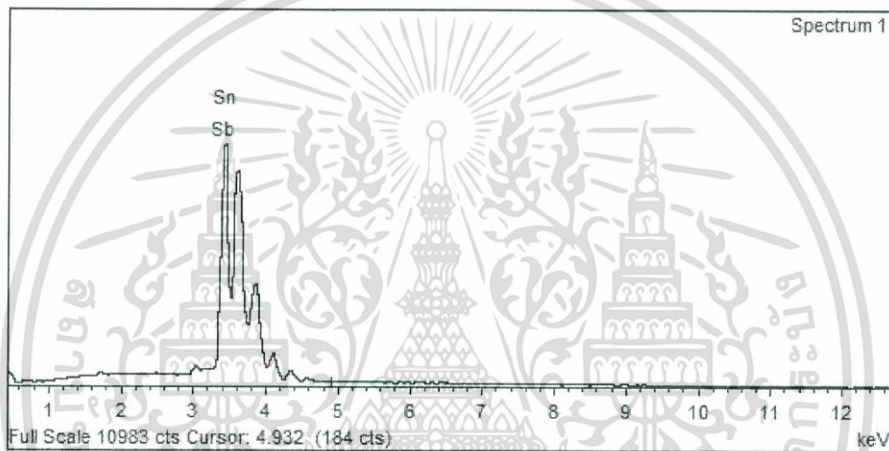
ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้ EDS เพื่อระบุองค์ประกอบทางเคมีสำหรับสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compound: IMC) ที่เกิดขึ้น แสดงผลของเปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้น โดยพบธาตุ Sn ในช่วง 59.52-100% และ Sb ในช่วง 1.39-40.48% ดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.23 และ 4.24 ตามลำดับ



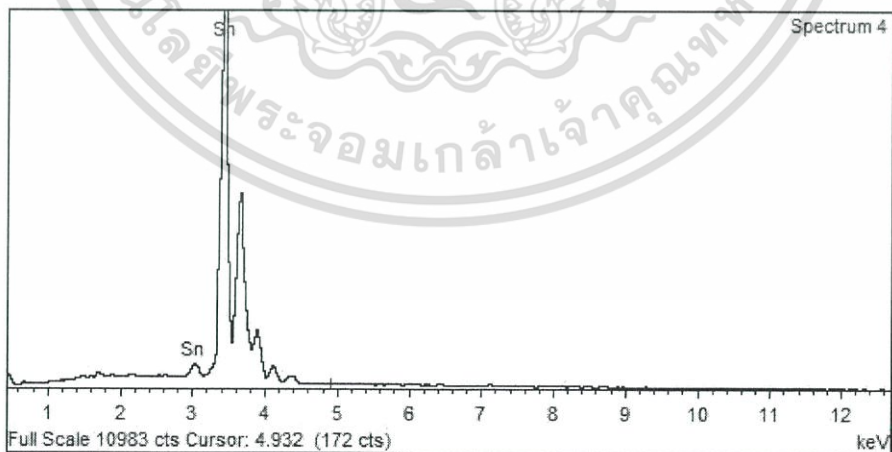
รูปที่ 4.22 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด 97.33Sn-2.67Sb ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1000 เท่า

ตารางที่ 4.4 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด 97.33Sn-2.67Sb

Points	Element (at %)			Possible Phase
	Sn	Cu	Sb	
Spectrum 1	59.52	-	40.48	Sn ₃ Sb ₂
Spectrum 2	98.61	-	1.39	βSn
Spectrum 3	100	-	-	βSn
Spectrum 4	100	-	-	βSn



รูปที่ 4.23 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของโลหะบัดกรีชนิด 97.33Sn-2.67Sb ที่ตำแหน่ง IMC

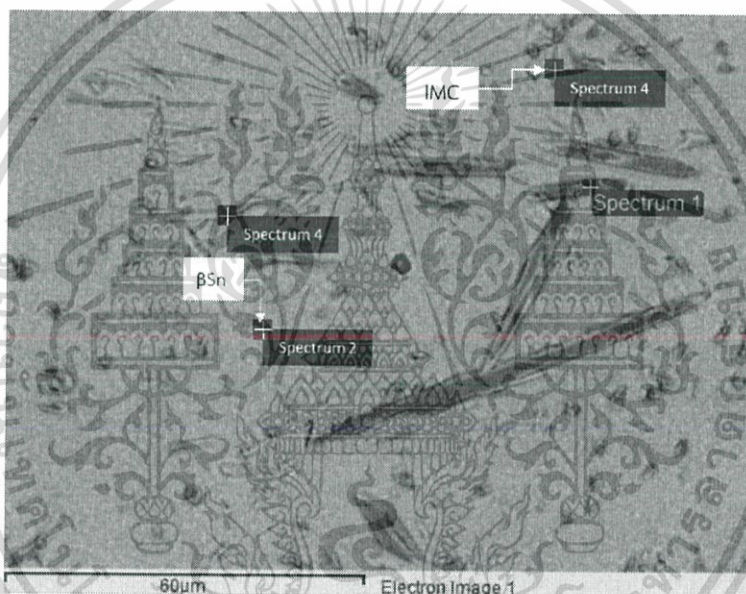


รูปที่ 4.24 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของโลหะบัดกรีชนิด 97.33Sn-2.67Sb ที่ตำแหน่ง βSn

6. โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 94.5Sn-1.5Cu-4Sb

จากภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 94.5Sn-1.5Cu-4Sb พบว่ามีสารประกอบเชิงโลหะเป็นจุดสีขาวเทาและเส้นเรียวยาวสีเทาขนาดใหญ่เกิดขึ้นชัดเจนทั่วผิวชิ้นงาน และลักษณะโดยทั่วไป จุดสีดำมีขนาดไม่สม่ำเสมอ เส้นสีเทายาวและเรียว เห็นความแตกต่างของผิวชิ้นงาน แสดงในรูปที่ 4.25

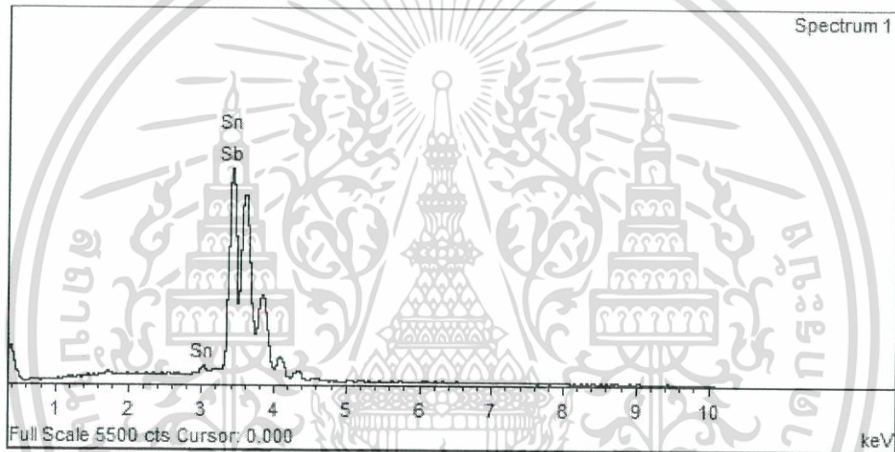
ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้ EDS เพื่อระบุองค์ประกอบทางเคมีสำหรับสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compound: IMC) ที่เกิดขึ้น แสดงผลของเปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้น โดยพบธาตุ Sn ในช่วง 58.93-98.52% ธาตุ Cu ในช่วง 3.69-40.72% และ Sb ในช่วง 0.35-40.72% ดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.26 และ 4.27 ตามลำดับ



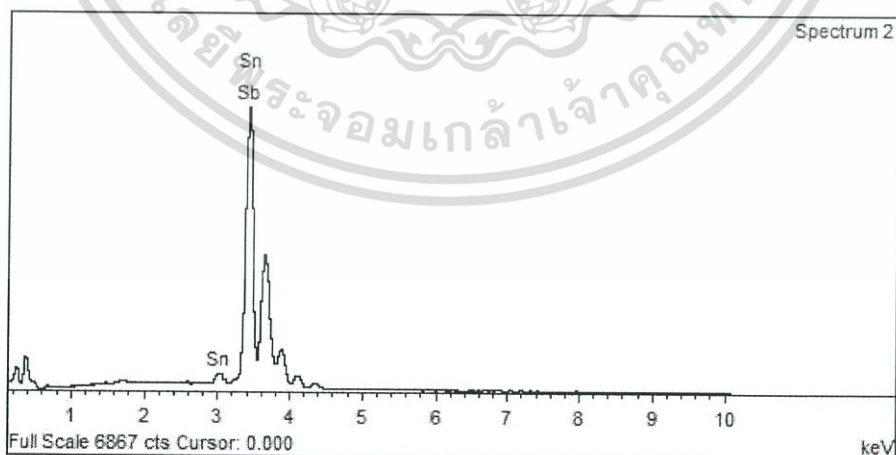
รูปที่ 4.25 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด 94.5Sn-1.5Cu-4Sb ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1000 เท่า

ตารางที่ 4.5 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด
94.5Sn-1.5Cu-4Sb

Points	Element (at %)			Possible Phase
	Sn	Cu	Sb	
Spectrum 1	58.93	40.72	0.35	Cu ₆ Sn ₅
Spectrum 2	98.52	-	1.48	βSn
Spectrum 3	94.26	3.69	2.05	βSn
Spectrum 4	59.28	-	40.72	Sn ₃ Sb ₂



รูปที่ 4.26 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของโลหะบัดกรีชนิด 94.5Sn-1.5Cu-4Sb ที่ตำแหน่ง IMC

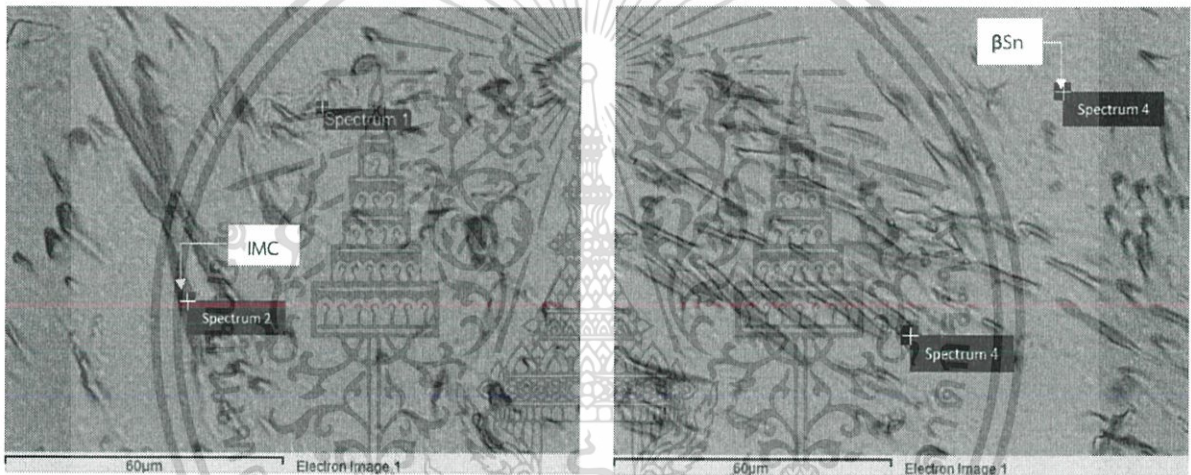


รูปที่ 4.27 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของโลหะบัดกรีชนิด 94.5Sn-1.5Cu-4Sb ที่ตำแหน่ง βSn

7. โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 93Sn-3Cu-4Sb

จากภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 93Sn-3Cu-4Sb พบว่ามีสารประกอบเชิงโลหะเป็นจุดสีขาวและเส้นสีเทาเรียวยาว เกิดขึ้นชัดเจนกระจายทั่วผิวชิ้นงาน และลักษณะโดยทั่วไป เส้นสีเทามีขนาดยาวไม่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดความแตกต่างของผิวชิ้นงานชัดเจน แสดงในรูปที่ 4.28

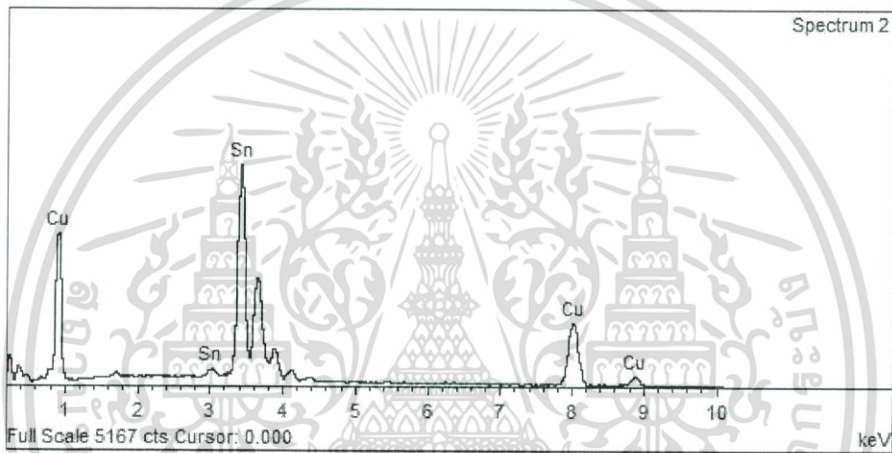
ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้ EDS เพื่อระบุองค์ประกอบทางเคมีสำหรับสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compound: IMC) ที่เกิดขึ้น แสดงผลของเปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้น โดยพบธาตุ Sn ในช่วง 48.25-100% ธาตุ Cu ในช่วง 0.2-51.05% และ Sb ในช่วง 0.62-40.10% ดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.29 และ 4.30 ตามลำดับ



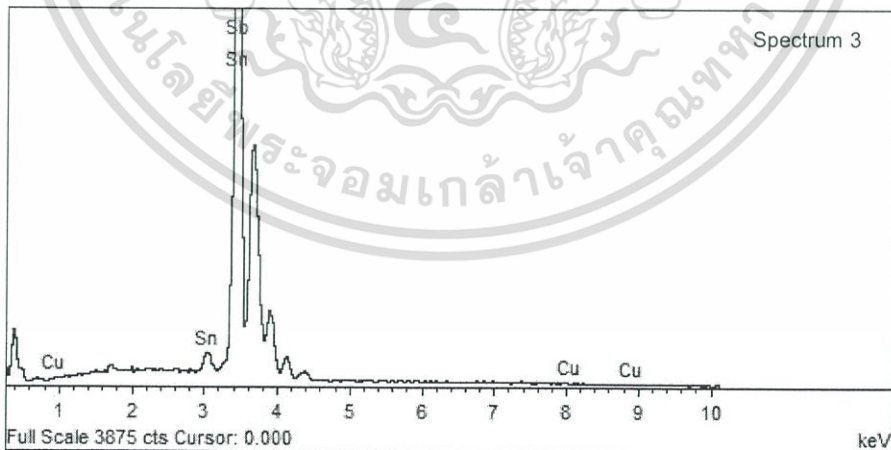
รูปที่ 4.28 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด 93Sn-3Cu-4Sb ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1000 เท่า

ตารางที่ 4.6 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด 93Sn-3Cu-4Sb

Points	Element (at %)			Possible Phase
	Sn	Cu	Sb	
Spectrum 1	58.06	-	41.94	Sn ₃ Sb ₂
Spectrum 2	50.67	49.33	-	Cu ₆ Sn ₅
Spectrum 3	99.36	0.06	0.58	βSn
Spectrum 4	51.76	48.24	-	Cu ₆ Sn ₅



รูปที่ 4.29 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของโลหะบัดกรีชนิด 93Sn-3Cu-4Sb ที่ตำแหน่ง IMC

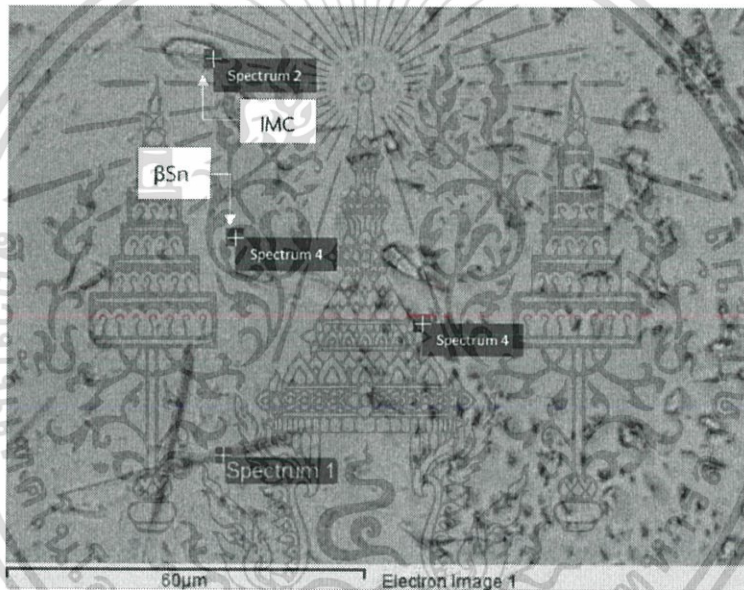


รูปที่ 4.30 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของโลหะบัดกรีชนิด 93Sn-3Cu-4Sb ที่ตำแหน่ง βSn

8. โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 92.5Sn-1.5Cu-6Sb

จากภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 92.5Sn-1.5Cu-6Sb พบว่ามีสารประกอบเชิงโลหะมีลักษณะรูปร่างและสีที่แตกต่างกัน ทั้งแบบจุด แบบเส้น และแบบก้อน เกิดขึ้นชัดเจนกระจายทั่วผิวชิ้นงาน ลักษณะโดยทั่วไปแต่ละจุดมีขนาดไม่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดความแตกต่างของผิวชิ้นงานชัดเจน แสดงในรูปที่ 4.31

ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้ EDS เพื่อระบุองค์ประกอบทางเคมีสำหรับสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compound: IMC) ที่เกิดขึ้น แสดงผลของเปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้น โดยพบธาตุ Sn ในช่วง 56.24-95.66% ธาตุ Cu ในช่วง 0.2-51.05% และ Sb ในช่วง 2.81-39.58% ดังตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.32 และ 4.33 ตามลำดับ

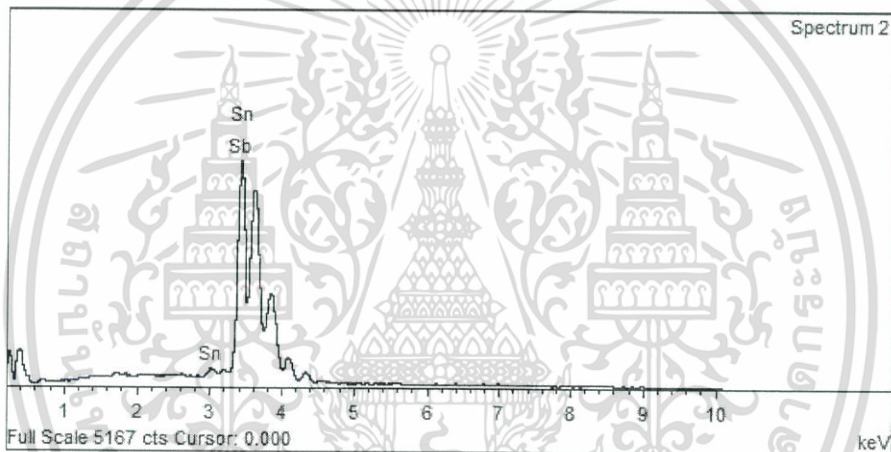


รูปที่ 4.31 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด 92.5Sn-1.5Cu-6Sb ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1000 เท่า

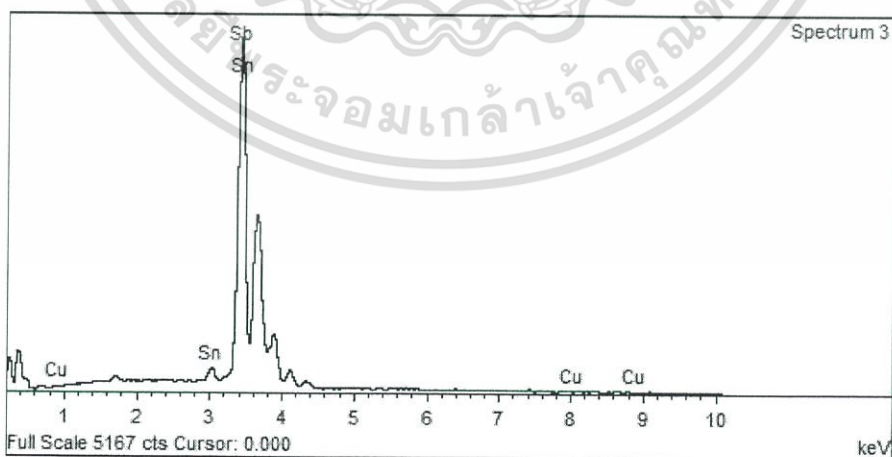
ตารางที่ 4.7 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด

92.5Sn-1.5Cu-6Sb

Points	Element (at %)			Possible Phase
	Sn	Cu	Sb	
Spectrum 1	56.24	40.94	2.81	Cu ₆ Sn ₅
Spectrum 2	60.42	-	39.58	Sn ₃ Sb ₂
Spectrum 3	95.66	0.06	4.29	βSn
Spectrum 4	67.62	22.14	10.25	Cu ₆ Sn ₅



รูปที่ 4.32 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของโลหะบัดกรีชนิด 92.5Sn-1.5Cu-6Sb ที่ตำแหน่ง IMC

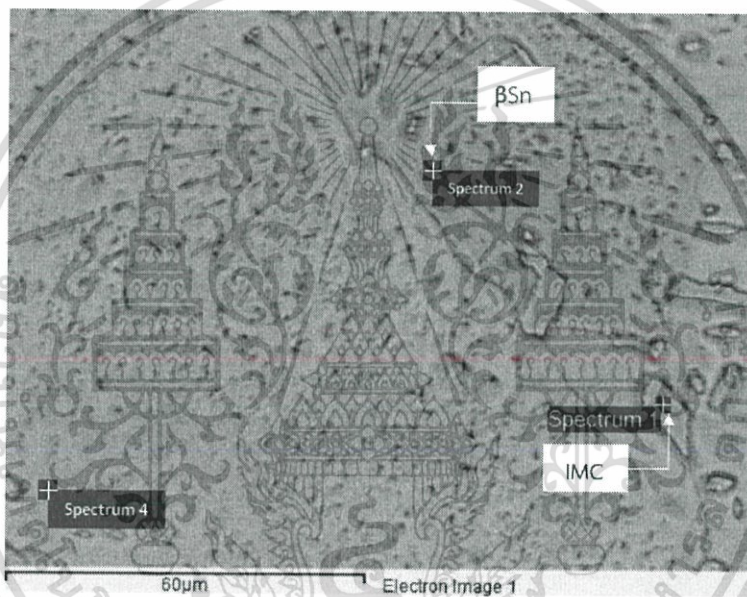


รูปที่ 4.33 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของโลหะบัดกรีชนิด 92.5Sn-1.5Cu-6Sb ที่ตำแหน่ง βSn

9. โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 92Sn-8Sb

จากภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 92Sn-8Sb พบว่ามีสารประกอบเชิงโลหะมีลักษณะรูปร่างที่แตกต่างกัน ทั้งแบบจุดและแบบก้อน เกิดขึ้นกระจายทั่วผิวชิ้นงาน ลักษณะโดยทั่วไปแต่ละจุดมีขนาดไม่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดความแตกต่างของผิวชิ้นงานชัดเจน แสดงในรูปที่ 4.34

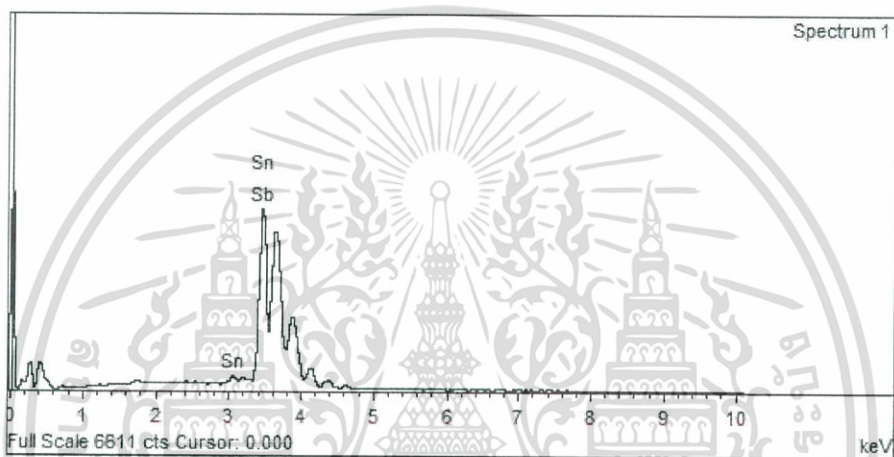
ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้ EDS เพื่อระบุองค์ประกอบทางเคมีสำหรับสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compound: IMC) ที่เกิดขึ้น แสดงผลของเปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้น โดยพบธาตุ Sn ในช่วง 57.51-99.97% และ ธาตุ Sb ในช่วง 0.03-41.49% ดังตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.35 และ 4.36 ตามลำดับ



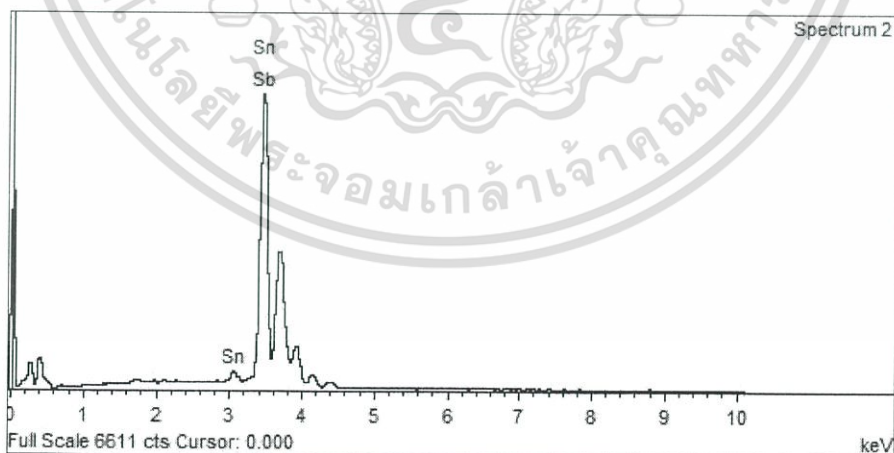
รูปที่ 4.34 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด 92Sn-8Sb ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1000 เท่า

ตารางที่ 4.8 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด 92Sn-8Sb

Points	Element (at %)			Possible Phase
	Sn	Cu	Sb	
Spectrum 1	58.51	-	41.49	Sn ₃ Sb ₂
Spectrum 2	99.97	-	0.03	βSn
Spectrum 3	97.58	-	2.42	βSn



รูปที่ 4.35 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของโลหะบัดกรีชนิด 92Sn-8Sb ที่ตำแหน่ง IMC

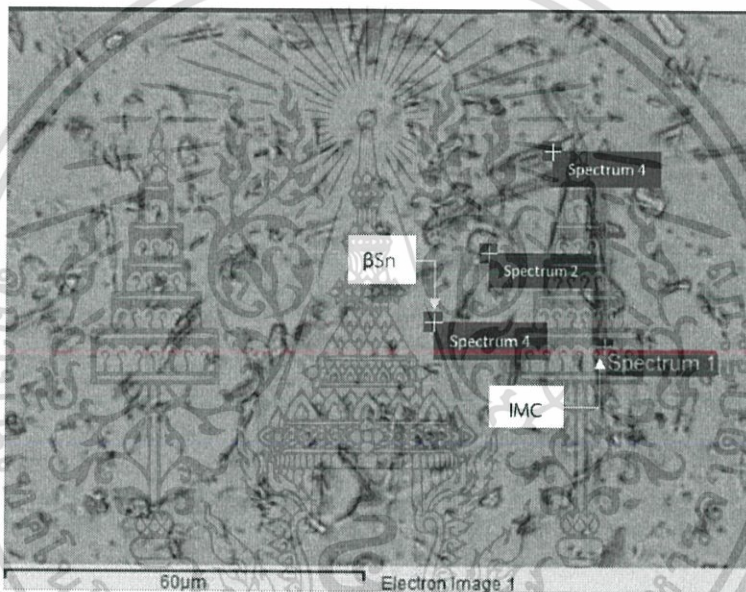


รูปที่ 4.36 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของโลหะบัดกรีชนิด 92Sn-8Sb ที่ตำแหน่ง βSn

10. โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 90.5Sn-1.5Cu-8Sb

จากภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 90.5Sn-1.5Cu-8Sb พบว่ามีสารประกอบเชิงโลหะมีลักษณะรูปร่างที่แตกต่างกัน ทั้งแบบจุด แบบเส้น และแบบก้อน เกิดขึ้นชัดเจนกระจุกกระจายทั่วผิวชิ้นงาน ลักษณะโดยทั่วไปแต่ละแบบมีขนาดไม่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดความแตกต่างของผิวชิ้นงานชัดเจน แสดงในรูปที่ 4.37

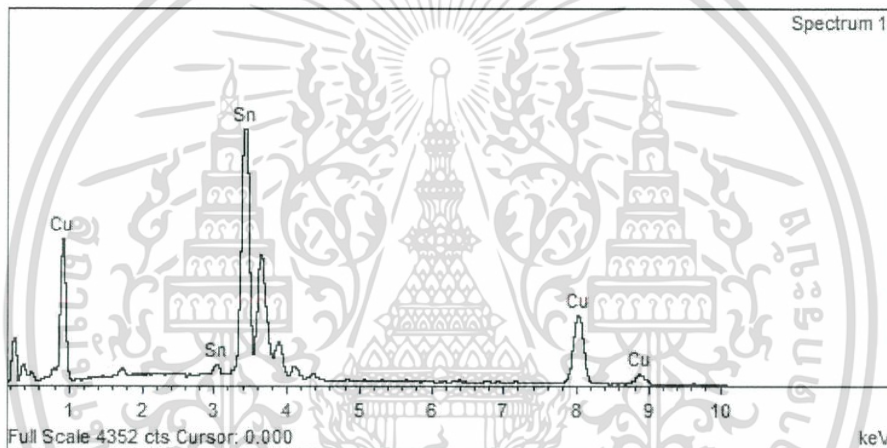
ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้ EDS เพื่อระบุองค์ประกอบทางเคมีสำหรับสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compound: IMC) ที่เกิดขึ้น แสดงผลของเปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้น โดยพบธาตุ Sn ในช่วง 50.69-96.30% Cu 0.20-49.31% และ Sb ในช่วง 0.03-41.49% ดังตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.38 และ 4.39 ตามลำดับ



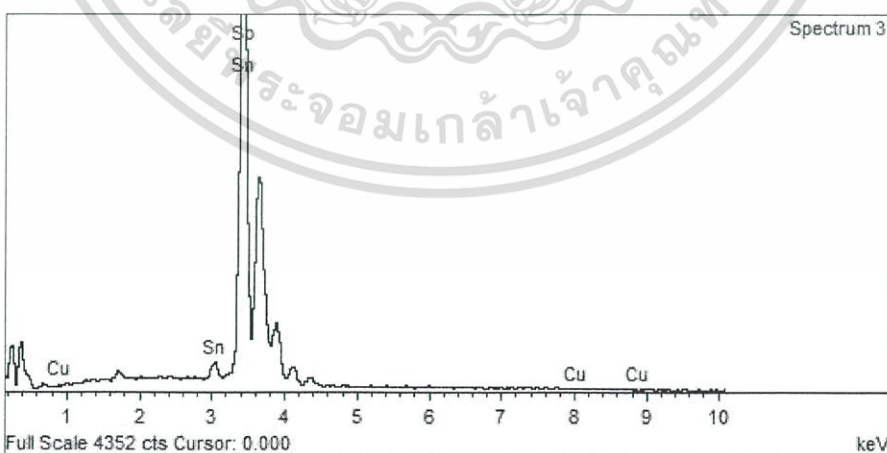
รูปที่ 4.37 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด 90.5Sn-1.5Cu-8Sb ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1000 เท่า

ตารางที่ 4.9 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด
90.5Sn-1.5Cu-8Sb

Points	Element (at %)			Possible Phase
	Sn	Cu	Sb	
Spectrum 1	50.69	49.31	-	Cu ₆ Sn ₅
Spectrum 2	59.36	-	40.64	Sn ₃ Sb ₂
Spectrum 3	96.30	0.20	3.50	βSn
Spectrum 4	53.82	46.18	-	Cu ₆ Sn ₅



รูปที่ 4.38 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของโลหะบัดกรีชนิด 90.5Sn-1.5Cu-8Sb ที่ตำแหน่ง IMC

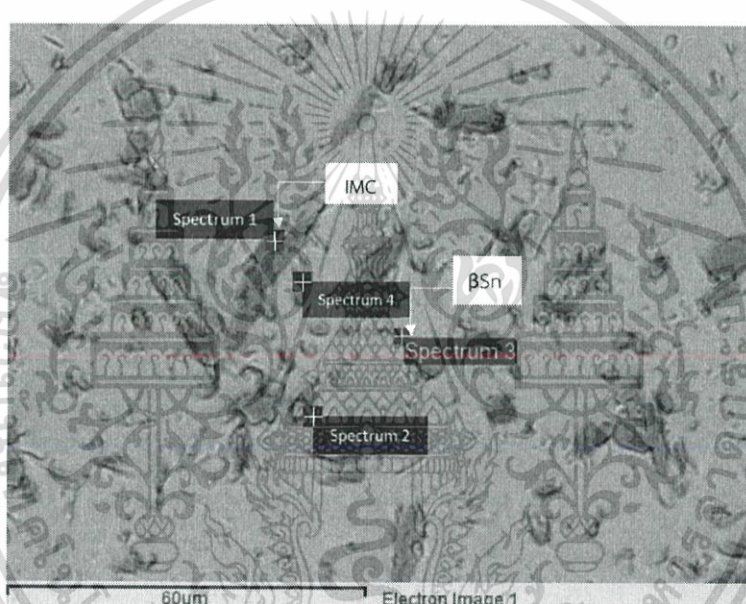


รูปที่ 4.39 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของโลหะบัดกรีชนิด 90.5Sn-1.5Cu-8Sb ที่ตำแหน่ง βSn

11. โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 89Sn-3Cu-8Sb

จากภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 89Sn-3Cu-8Sb พบว่ามีสารประกอบเชิงโลหะมีลักษณะรูปร่างที่แตกต่างกัน ทั้งแบบจุด แบบเส้น และแบบก้อน เกิดขึ้นชัดเจนกระจัดกระจายทั่วผิวชิ้นงาน ลักษณะโดยทั่วไปแต่ละแบบมีขนาดไม่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดความแตกต่างของผิวชิ้นงานชัดเจน แสดงในรูปที่ 4.40

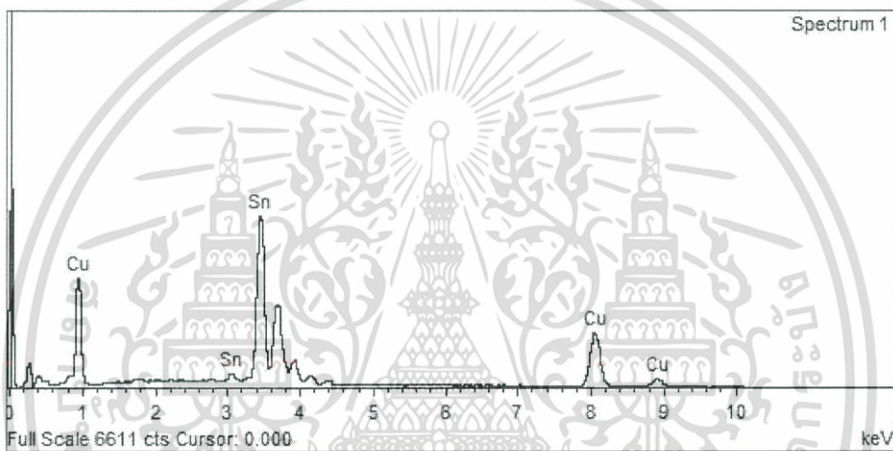
ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้ EDS เพื่อระบุองค์ประกอบทางเคมีสำหรับสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compound: IMC) ที่เกิดขึ้น แสดงผลของเปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้น โดยพบธาตุ Sn ในช่วง 50.69-96.30% Cu 0.20-49.31% และ Sb ในช่วง 0.03-41.49% ดังตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.41 และ 4.42 ตามลำดับ



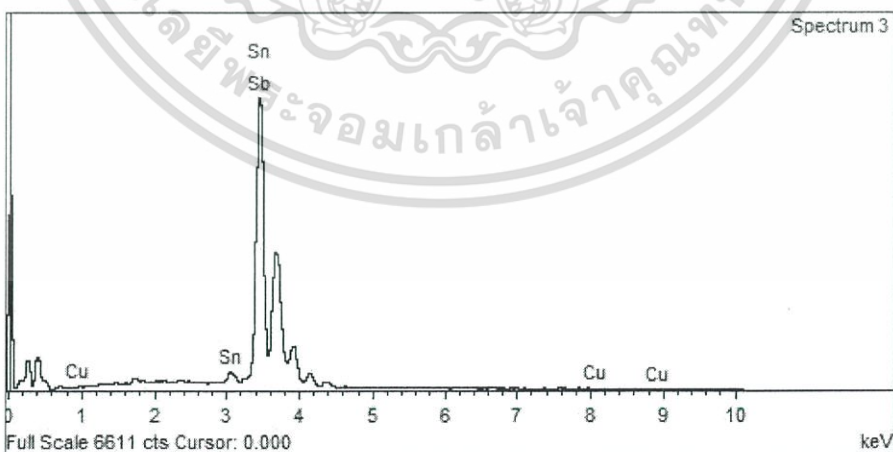
รูปที่ 4.40 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด 89Sn-3Cu-8Sb ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1000 เท่า

ตารางที่ 4.10 เปอร์เซนต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีชนิด 89Sn-3Cu-8Sb

Points	Element (at %)			Possible Phase
	Sn	Cu	Sb	
Spectrum 1	47.92	52.08	-	Cu ₆ Sn ₅
Spectrum 2	93.40	6.28	0.31	βSn,Cu
Spectrum 3	97.65	0.11	2.24	βSn
Spectrum 4	58.90	0.74	40.36	Sn ₃ Sb ₂



รูปที่ 4.41 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของโลหะบัดกรีชนิด 89Sn-3Cu-8Sb ที่ตำแหน่ง IMC



รูปที่ 4.42 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของโลหะบัดกรีชนิด 89Sn-3Cu-8Sb ที่ตำแหน่ง βSn

จากการวิเคราะห์ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและเทคนิค EDS พบว่าลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วทั้ง 11 ชนิด มีลักษณะที่แตกต่างกัน เนื่องจากส่วนผสมทางเคมีที่ไม่เหมือนกัน โดยพื้นฐานพื้นผิวจะเป็นเฟส βSn โดยอ้างอิงจากแผนภูมิเฟส (Phase diagram) จากการสังเกตผิวของชิ้นงานทดสอบ พบว่า จะเห็นเป็นจุดเล็กๆหรือกลุ่มก้อนสีดำกระจายอยู่ทั่วทั้งพื้นผิวที่ตรวจสอบ ซึ่งสามารถบอกได้ว่าจุดนั้นๆจะพบเฟสของสารประกอบเชิงโลหะ โดยอ้างอิงจากแผนภูมิเฟสเช่นเดียวกัน สามารถสรุปผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีแต่ละชนิดได้แสดงดังต่อไปนี้

ชิ้นงาน	ชนิดโลหะบัดกรี	Phase ที่พบ
1	Pure Sn	βSn
2	92Sn-8Sb	Sn_3Sb_2 , βSn
3	97Sn-3Cu	Cu_6Sn_5 , βSn
4	98.5Sn-1.5Cu	Cu_6Sn_5 , βSn
5	97.33Sn-2.67Sb	Sn_3Sb_2 , βSn
6	89Sn-3Cu-8Sb	Cu_6Sn_5 , Sn_3Sb_2 , βSn
7	90.5Sn-1.5Cu-8Sb	Cu_6Sn_5 , Sn_3Sb_2 , βSn
8	94.5Sn-1.5Cu-4Sb	Cu_6Sn_5 , Sn_3Sb_2 , βSn
9	93Sn-3Cu-4Sb	Cu_6Sn_5 , Sn_3Sb_2 , βSn
10	92.5Sn-1.5Cu-6Sb	Cu_6Sn_5 , Sn_3Sb_2 , βSn
11	95.75Sn-2.25Cu-2Sb	Cu_6Sn_5 , Sn_3Sb_2 , βSn

4.2 การวัดความแข็งด้วยวิธีการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส

4.2.1 ผลการทดสอบ

การทดสอบความแข็งของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแต่ละชนิด ค่าความแข็งที่ได้เครื่องจะคำนวณมาจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว ในการทดสอบจะใช้แรงกดขนาด 0.1 กิโลกรัม เป็นเวลา 10 วินาที จะทำการทดสอบ 10 ครั้งต่อหนึ่งชิ้นงาน แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยของความแข็งของแต่ละชิ้นงาน ซึ่งค่าที่ได้จากการทดสอบ แสดงผลดังตารางที่ 4.11

ตาราง 4.11 ผลการทดสอบความแข็งด้วยวิธี Vickers Hardness

ชิ้นงาน	ส่วนประกอบ (wt%)			ความแข็ง (HV)	
	Sn	Cu	Sb	Average	Standard deviation
1	100	0	0	6.79	0.25
2	98.5	1.5	0	11.99	0.50
3	97	3	0	12.59	0.66
4	95.75	2.25	2	17.27	0.90
5	94.5	1.5	4	18.53	0.84
6	97.33	0	2.67	16.61	1.04
7	93	3	4	20.6	1.29
8	92.5	1.5	6	21.67	0.70
9	92	0	8	19.54	0.88
10	90.5	1.5	8	24.1	0.90
11	89	3	8	21.26	0.63

4.2.2 การวิเคราะห์ Transform ในโปรแกรม Design Expert

ในการทดลองความแข็งด้วยวิธี Vickers hardness สำหรับปริมาตรนิพจน์ฉบับนี้จะถูกออกแบบสมการแบบไม่มีฟังก์ชัน

4.2.3 การวิเคราะห์ Fit summary ในโปรแกรม Design Expert

4.2.3.1 Sequential model sum of squares

ทำการเลือกรูปแบบที่มีค่า Sum of squares สูงที่สุด และมีค่า P-value หรือ Prob > F ที่มีค่าน้อยกว่าค่านัยสำคัญ (α) ที่กำหนดไว้ คือ 0.05 เมื่อพิจารณาแบบจำลองจะพบว่า แบบจำลองที่มีค่า Sum of squares สูงที่สุด คือ Mean คือ 33147.18 ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลแสดงดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ Sequential model sum of squares ของความแข็ง (HV)

Source	Sum of squares	df	Mean square	F-value	p-value	
Mean vs Total	33147.18	1	33147.18			
Linear vs Mean	2190.18	2	1095.09	246.89	< 0.0001	
Quadratic vs Linear	294.85	3	98.28	56.86	< 0.0001	
Sp Cubic vs Quadratic	8.99	1	8.99	5.43	0.0218	
Cubic vs Sp Cubic	46.41	3	15.47	12.44	< 0.0001	
Quartic vs Cubic	56.75	1	56.75	83.10	< 0.0001	Aliased
Residual	67.61	99	0.6829			
Sp Quartic vs Quadratic	64.33	3	21.44	18.76	< 0.0001	Suggested
Quartic vs Sp Quartic	47.82	2	23.91	35.02	< 0.0001	Aliased
Residual	67.61	99	0.6829			
Total	35811.97	110	325.56			

4.2.3.2 Lack of fit tests

เลือกแบบจำลองที่มีค่า P-value หรือ Prob > F มากกว่าค่านัยสำคัญที่กำหนดไว้ คือ 0.05 เมื่อพิจารณาแบบจำลองจะพบว่าแบบจำลองที่มีค่า P-value หรือ Prob > F ที่มากกว่าค่านัยสำคัญ ซึ่งเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมนั้นคือ แบบ Special quartic ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลแสดงดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ Lack of fit ของความแข็ง

Source	Sum of squares	df	Mean square	F-value	P-value Prob > F	
Linear	407.00	8	50.87	74.50	< 0.0001	
Quadratic	112.15	5	22.43	32.85	< 0.0001	
Special Cubic	103.16	4	25.79	37.76	< 0.0001	
Cubic	56.75	1	56.75	83.10	< 0.0001	
<u>Special Quartic</u>	<u>47.82</u>	<u>2</u>	<u>23.91</u>	<u>35.02</u>	<u>< 0.0001</u>	<u>Suggested</u>
Quartic	0.0000	0				Aliased
Pure Error	67.61	99	0.6829			

4.2.3.3 Model summary statistics

เลือกแบบจำลองที่มี Standard deviation หรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มีค่าน้อยๆ ค่า R-Squared, Adjusted R-Squared และ Predicted R-Squared ควรมีค่าเข้าใกล้ 1 และ PRESS (Predicted Residual Error Sum of Square) ควรจะมีค่าน้อยๆ

เมื่อพิจารณาแบบจำลองจะพบว่าแบบจำลองที่มี

- Standard deviation น้อยที่สุด คือ Quartic มีค่าเท่ากับ 0.8264
- ค่า R-Squared ที่เข้าใกล้ 1 มากที่สุด คือ Quartic มีค่าเท่ากับ 0.9746
- Adjusted R-Squared ที่เข้าใกล้ 1 มากที่สุด คือ Quartic มีค่าเท่ากับ 0.9721
- Predicted R-Squared ที่เข้าใกล้ 1 มากที่สุด คือ Quartic มีค่าเท่ากับ 0.9687
- PRESS น้อยที่สุด คือ Quartic มีค่าเท่ากับ 83.47

เมื่อพิจารณาค่าทางสถิติของแต่ละแบบจำลอง พบว่าแบบจำลองที่มีความเหมาะสมมากที่สุด คือ Special quartic

ตารางที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์ Model summary statistics ของความแข็ง

Source	Std. Dev.	R ²	Adjusted R ²	Predicted R ²	PRESS	
Linear	2.11	0.8219	0.8186	0.8098	506.83	
Quadratic	1.31	0.9325	0.9293	0.9250	199.74	
Special Cubic	1.29	0.9359	0.9322	0.9273	193.77	
Cubic	1.12	0.9533	0.9491	0.9448	147.11	
Special Quartic	1.07	0.9567	0.9533	0.9490	135.83	Suggested
Quartic	0.8264	0.9746	0.9721	0.9687	83.47	Aliased

4.2.4 การวิเคราะห์ Model ในโปรแกรม Design Expert

เลือกรูปแบบของสมการตามที่โปรแกรม Design Expert ได้ทำการแนะนำไว้ใน Fit summary โดยในปริภูมิตำแหน่งนี้เลือกใช้รูปแบบสมการ Special quartic ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีความเหมาะสมมากที่สุด

4.2.5 การวิเคราะห์ ANOVA ในโปรแกรม Design Expert

โปรแกรม Design Expert จะทำการวิเคราะห์รูปแบบสมการที่เลือกและคำนวณสมการสำหรับการทำนายผลตอบสนอง รูปแบบของสมการทำนายคือ Special quartic ซึ่งโปรแกรมจะทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมการก่อนจะคำนวณสมการทำนายหรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณหาค่าความแข็ง แสดงดังตารางที่ 4.15 และ ตารางที่ 4.17

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณหาค่าความแข็ง (Hardness) แสดงดังสมการที่ 4.1 (Coefficients in terms of coded factors)

$$\begin{aligned} \text{Hardness} = & 6.79A - 99.72B + 14.19C + 174.42AB + 39.98AC + 195.88BC \\ & - 422.72A^2BC + 663.25AB^2C - 193.29ABC^2 \end{aligned} \quad (4.1)$$

โดย A คือ ปริมาณของดีบุก (Sn)

B คือ ปริมาณของทองแดง (Cu)

C คือ ปริมาณของพลวง (Sb)

ตารางที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความแข็ง

Source	Sum of squares	df	Mean square	F-value	P-value	
Model	2549.35	8	318.67	278.83	< 0.0001	significant
Linear Mixture	2190.18	2	1095.09	958.18	< 0.0001	
AB	80.06	1	80.06	70.05	< 0.0001	
AC	157.99	1	157.99	138.24	< 0.0001	
BC	86.52	1	86.52	75.70	< 0.0001	
A ² BC	63.69	1	63.69	55.72	< 0.0001	
AB ² C	32.96	1	32.96	28.84	< 0.0001	
ABC ²	15.23	1	15.23	13.32	0.0004	
Residual	115.43	101	1.14			
Lack of Fit	47.82	2	23.91	35.02	< 0.0001	significant
Pure Error	67.61	99	0.6829			
Cor Total	2664.79	109				

ตารางที่ 4.16 ค่าทางสถิติของสมการทำนายผลของความแข็ง

Std. Dev.	1.07	R ²	0.9567
Mean	17.36	Adjusted R ²	0.9533
C.V. %	6.16	Predicted R ²	0.9490
		Adeq Precision	52.4387

จากตารางที่ 4.16 แสดงค่าทางสถิติของสมการทำนายผลของความแข็ง พบว่าปริมาณส่วนผสมของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแต่ชนิดมีความสัมพันธ์ค่าความแข็ง และมีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of determination) หรือค่า R-sq เป็น 95.67% หมายถึง สมการทำนายที่ได้มา มีความสามารถในการอธิบายปริมาณส่วนผสมที่สัมพันธ์กับค่าความแข็งได้เป็นอย่างดี

ตารางที่ 4.17 การวิเคราะห์เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณหาค่าความแข็ง

Component	Coefficient estimate	df	Standard error	95% CI Low	95% CI High	VIF
A-Sn	6.79	1	0.3380	6.12	7.46	3.80
B-Cu	-99.72	1	15.33	-130.12	-69.32	697.38
C-Sb	14.19	1	1.06	12.10	16.29	21.85
AB	174.42	1	20.84	133.08	215.76	325.57
AC	39.98	1	3.40	33.23	46.72	17.81
BC	195.88	1	22.51	151.22	240.54	303.28
A ² BC	-422.72	1	56.63	-535.06	-310.39	16.33
AB ² C	663.25	1	123.51	418.25	908.25	19.19
ABC ²	-193.29	1	52.95	-298.34	-88.25	13.10

โดยสามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (% Error) ได้จากสมการที่ 3.1

จากตารางที่ 4.18 แสดงให้เห็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าที่ได้จากสมการทำนายและการทดสอบ พบว่าความคลาดเคลื่อนของค่าความแข็งมีค่าน้อย และเมื่อทำการวิเคราะห์กราฟในแถบ Diagnostics และการวิเคราะห์ค่าทางสถิติในตารางที่ 4.15 4.16 และ 4.17 สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณหาค่าความแข็งสามารถใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของส่วนผสมกับค่าความแข็งได้

ตารางที่ 4.18 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสมการทำนายและการทดสอบ

No.	ชนิดโลหะบัดกรี	Hardness (การทำนาย) (HV)	Hardness (การทดลอง) (HV)	%Error
1	90Sn-2Cu-8Sb	23.53	25.45	7.50
2	92Sn-1Cu-7Sb	21.60	24.76	12.76
3	93.75Sn-1Cu-5.25Sb	20.20	20.99	3.76
4	95Sn-2Cu-3Sb	18.00	19.74	8.81
5	96.5Sn-2Cu-1.5Sb	15.35	16.69	8.02
6	98Sn-1Cu-1Sb	13.30	14.17	6.14
			เฉลี่ย	7.83

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคและความแข็งของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-Cu-Sb และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณส่วนผสมทั้ง 11 ขึ้นงานกับค่าความแข็ง ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะมีรายละเอียดดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนพบว่า พื้นผิวโดยส่วนมากของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด ประกอบด้วยเฟส β Sn เป็นโครงสร้างพื้นฐาน และมีสารประกอบเชิงโลหะกระจายอยู่ในโครงสร้าง β Sn โลหะบัดกรีกลุ่ม Sn-Cu จะพบโครงสร้างจุลภาคที่ประกอบไปด้วยเฟส β Sn และสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 โลหะบัดกรีกลุ่ม Sn-Sb จะพบโครงสร้างจุลภาคที่ประกอบไปด้วยเฟส β Sn และสารประกอบเชิงโลหะ Sn_3Sb_2 โลหะบัดกรีกลุ่ม Sn-Cu-Sb จะพบโครงสร้างจุลภาคที่ประกอบไปด้วยเฟส β Sn และสารประกอบเชิงโลหะ 2 ชนิด คือ Cu_6Sn_5 และ Sn_3Sb_2

จากการตรวจสอบค่าความแข็ง (Hardness) พบว่าโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-Cu-Sb มีค่าความแข็งเปลี่ยนแปลงไปตามส่วนผสมทางเคมีและโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างกัน จากสมการทางคณิตศาสตร์ตามวิธีการออกแบบของผสม (Mixture design) ; $\text{Hardness} = 6.79\text{Sn} - 99.72\text{Cu} + 14.19\text{Sb} + 174.42\text{SnCu} + 39.98\text{SnSb} + 195.88\text{CuSb} - 422.72\text{Sn}^2\text{CuSb} + 663.25\text{SnCu}^2\text{Sb} - 193.29\text{SnCuSb}^2$ พบว่า Cu และ Sb เป็นส่วนผสมที่มีผลต่อความแข็งของโลหะบัดกรี โดยมีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 เท่ากับ 95.67% และมีค่าความผิดพลาดในการทำนาย (Prediction) ของสมการเฉลี่ยอยู่ที่ 7.83%

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในอนาคตควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพอื่นๆ เนื่องจากเป็นโลหะบัดกรีที่มีการพัฒนาขึ้นมาใหม่ จึงจำเป็นที่จะต้องมามีข้อมูลทุกๆ ด้านประกอบกัน เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับโลหะบัดกรีชนิดไร้สารตะกั่วนี้ ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาใหม่



เอกสารอ้างอิง

- [1] วารสารสำนักเลขาธิการนายกรัฐมนตรี, [Online] Available: <https://www.thaigov.go.th/uploads/document/175/2018/09/pdf/23%20july-sep-n.pdf>
- [2] Available: www.thairohs.org
- [3] Abtew, M., Selvaduray, G. Lead-free solders in microelectronics. *Materials Science and Engineering R*. 2000; 27: 95-141.
- [4] Kim, K.S., Suganuma, K. Development of new Sn-Ag-Cu lead-free solders containing fourth elements. 3rd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing. 2003; 414-415.
- [5] Chada, S., Fournelle, R.A., Laub, W., Shangquan, D. Copper substrate dissolution in eutectic Sn-Ag solder and its effect on microstructure. *Journal of Microelectronic Materials*. 2000; 29: 1214-1221.
- [6] Yen, Y.W., Chiang, Y.C., C., Jao, C.C., Liaw, D.W., Lo, S.C., Lee, C. Interfacial reaction and mechanical properties between Sn-4.0Ag-0.5Cu and Sn-4.0Ag-0.5Cu-0.005Ni-0.01Ge lead-free solders with the Au/Ni/Cu substrate. *Journal of Alloys and Compounds*. 2011; 509: 4595-4602.
- [7] 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*, 2011, Vol. 22, 565-578.
- [8] Huh S.H., Kim K.S., Suganuma K., Effect of Ag addition on the microstructural and mechanical properties of Sn-Cu eutectic solder, *Materials Transactions*, 2001, Vol. 42, 739-744.

- [9] 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.
- [10] Wenxue, C., Songbai, X., Hui, W., Yuhua, H. Effects of Ag on Properties of Sn-9Zn Lead-Free Solder. *Rare Metal Materials and Engineering*. 2010; 39: 1702-1706.
- [11] 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.
- [12] Wang Y., Zhao X.C., Liu Y., Cheng J.W., Li H., Xie X.C., Effect of Bi addition on microstructures, properties and interfacial intermetallic compound growth of low-Ag Sn-Cu lead-free solder, *Materials Science Forum*, 2015, Vol. 815, 109-114.
- [13] Shen J., Pu Y., Wu D., Tang Q., Zhao M., Effects of minor Bi, Ni on the wetting properties, microstructures, and shear properties of Sn-0.7Cu lead-free solder joints, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2015, Vol. 26, 1572-1580.
- [14] Yan Y.F., Feng L.F., Guo X.X., Tang K., Song K.X., Effect of the content of Cu on solderability and mechanical properties of Bi5Sb solder alloy, *Materials Science Forum*, 2009, Vols. 610-613, 537-541.
- [15] Wang Y.W., Lin Y.W., Kao C.R., Inhibiting the formation of microvoids in Cu₃Sn by additions of Cu to solders, *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, Vol. 493, 233-239.
- [16] Wang H., Fang J., Xu Z., Zhang X., Improvement of Ga and Zn alloyed Sn-0.7Cu solder alloys and joints, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2015, Vol. 26, 3589-3595.

- [17] Luo D.X., Xue S.B., Li Z.Q., Effects of Ga addition on microstructure and properties of Sn-0.5Ag-0.7Cu solder, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2014, Vol. 25, 3566-3571.
- [18] Luo D.X., Xue S.B., Liu S., Investigation on the intermetallic compound layer growth of Sn-0.5Ag-0.7Cu-xGa/Cu solder joints during isothermal aging, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2014, Vol. 25, 5195-5200.
- [19] Chen H.M., Guo C.J., Huang J.P., Wang H., Influence of gallium addition in Sn-Ag-Cu lead-free solder, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2015, Vol. 26, 5459-5464.
- [20] Zhang Q.K., Long W.M., Yu X.Q., Pei Y.Y., Qiao P.X., Effects of Ga addition on microstructure and properties of Sn-Ag-Cu/Cu solder joints, *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, Vol. 622, 973-978.
- [21] Song, J.M., Wu, Z.M. Variable eutectic temperature caused by inhomogeneous solute distribution in Sn-Zn system. *Scripta Materialia*. 2006; 54: 1479-1483.
- [22] Kanlayasiri, K., Mongkolwongrojn, M., Ariga, T. Influence of indium addition on characteristics of Sn-0.3Ag-0.7Cu solder alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2009; 485: 225-230.
- [23] Mosera, Z., Sebob, P., Gjsior, W., Svec, P., Pstru, J. Effect of indium on wettability of Sn-Ag-Cu solders. Experiment vs. modeling, Part I. *CALPHAD: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry*. 2009; 33: 63-68.
- [24] Chen B.L., Li G.Y., Effects of antimony on the growth of intermetallic compounds in Sn-Ag-Cu Pb-free solder joints, *Electronic Components and Technology Conference*, 2003, 1235-1242.
- [25] Chen B.L., Li G.Y., Influence of Sb on IMC growth in Sn-Ag-Cu-Sb Pb-free solder joints in reflow process, *Thin Solid Films*, 2004, Vols. 462-463, 395-401.

- [26] Li G.Y., Chen B.L., Shi X.Q., Wong S.C.K., Wang Z.F., Effect of Sb addition on tensile strength of Sn-3.5Ag-0.7Cu solder alloy and joint, *Thin Solid Films*, 2006, Vol. 504, 421-425.
- [27] Cheong K.Y., Ng M.C., Ismail A.B., Hussain L.B., Effects of Sb on SnAgCu lead-free solder, 33rd International Electronics Manufacturing Technology Conference, 2008, 1-6.
- [28] Tang Y., Pang Y.C., Zhan J.X., Li G.Y., Effects of Sb addition on grain ripening growth at interface of Sn-Ag-Cu-xSb/Cu in wetting reactions, *International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging*, 2012, 219-223.
- [29] El-Daly, A.A., Hammad, A.E., Fawzy, A., Nasrallah, D.A. Microstructure, mechanical properties, and deformation behavior of Sn-1.0Ag-0.5Cu solder after Ni and Sb additions. *Materials and Design*. 2013; 43: 40-49.
- [30] Zhang, C., Liu S.D., Qian G.T., Zhou J., Xue F., Effect of Sb content on properties of Sn-Bi solders, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, Vol. 24, 184-191.
- [31] รชต คงขยาสุขวัฒน์, “การศึกษาอิทธิพลของธาตุ Ag, Bi, In และ Sb ต่อสมบัติทางกายภาพของโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.6Cu-0.05Ni-Ge”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2557.
- [32] Lee H.T., Hu S.Y., Hong T.F., Chen Y.F., The shear strength and fracture behavior of Sn-Ag-xSb solder joints with Au/Ni-P/Cu UBM, *Journal of Electronic Materials*, 2008, Vol. 37, 867-873.
- [33] Xing F., Qiu X.M., Li Y.D., Effects of Sn element on microstructure and properties of Zn-Cu-Bi-Sn high-temperature solder, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, Vol. 25, 879-884.

- [34] Sheng Y., Yan Y., Tang K., Zhao K., Effect of content of Sn on spreading properties and tensile properties of Bi5Sb solder alloy, Hanjie Xuebao/Transactions of the China Welding Institution, 2011, Vol. 32, 85-88.
- [35] www.metalprices.com
- [36] Massalski, T.B., Okamoto, H., Binary Alloy Phase Diagrams, 2nd Edition, 1990, ASTM International, Materials Park, OH, USA.
- [36] กัลยรัตน์ อารังวินิจฉัย, “การศึกษาอิทธิพลของธาตุเจือคู่ต่อโครงสร้างจุลภาคและปฏิกิริยารอยต่อของโลหะบัดกรี Sn-0.6Cu-0.05Ni-0.005Ge”, 2555, วิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [37] อภิรดี สุนทรภา, “เคมีชีวะฟิสิกส์พื้นฐาน”, 2549. [Online]
Available: <https://www.siamchemi.com/%E0%B8%94%E0%B8%B5%E0%B8%9A%E0%B8%B8%E0%B8%81/>
- [38] BotKung, “ธาตุเคมี”, 2561. [Online]
Available: <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%94%E0%B8%B5%E0%B8%9A%E0%B8%B8%E0%B8%81>
- [39] Chen et al., Phase equilibria of Sn–Sb–Cu system, Materials Chemistry and Physics 2012, 132: 703-715.
- [40] Fürtauer and Flandorfer, A new experimental phase diagram investigation of Cu–Sb, Monatsh Chem, 2012, 143: 1275-1287.
- [41] นิรนาม, ภาค 2 คุณสมบัติของโลหะ/บทที่ 3 ความแข็ง, 2558, [Online]
Available: http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?passTo=fbcbe15436ce6143ca95c68334b464d1&pageid=8&bookID=1818&read=true&count;
- [42] กรรณชัย กัลยาศิริ. กรรมวิธีการผลิต. พิมพ์ครั้งที่1. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2551.

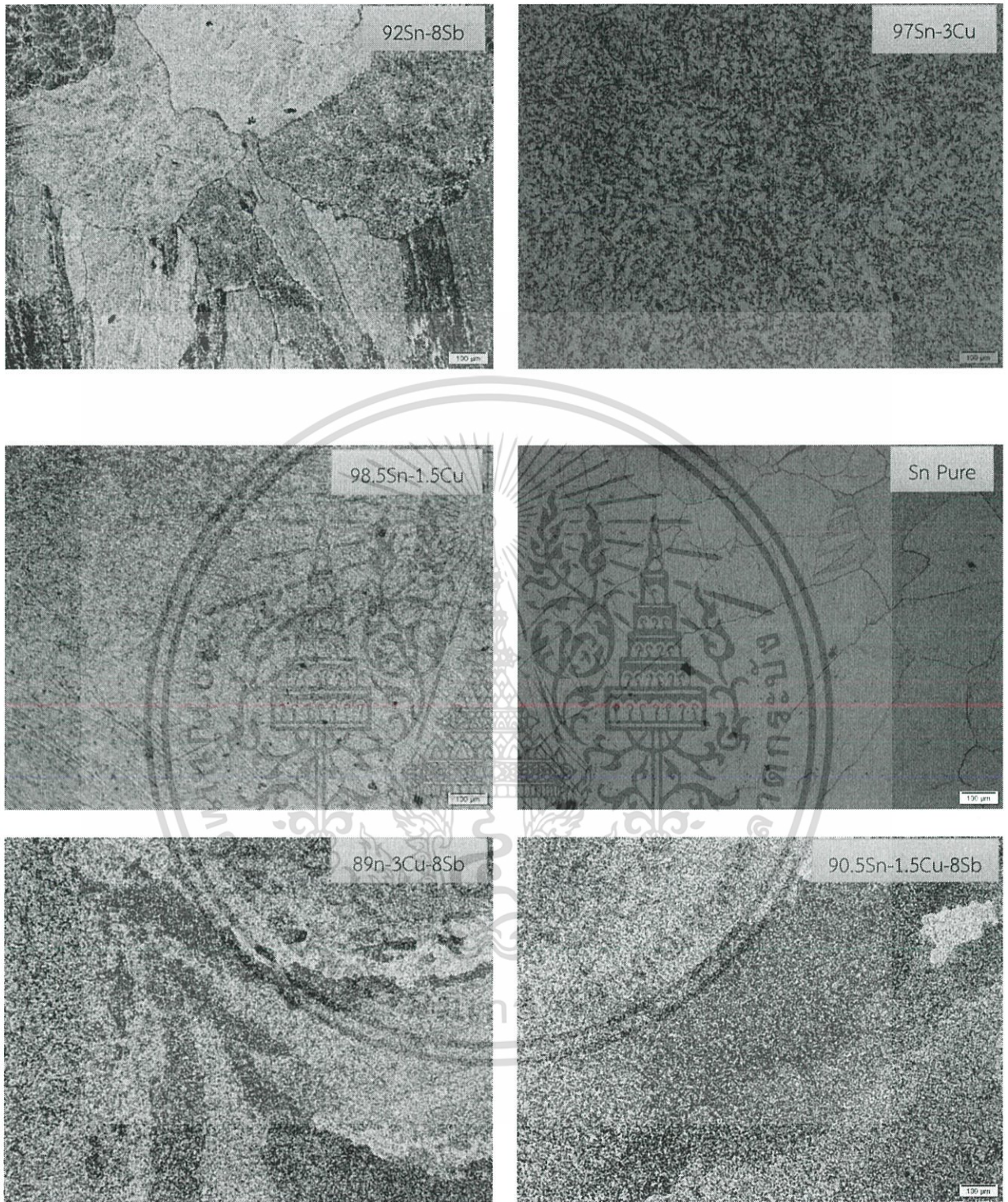
- [43] นิวัฒน์ มูเก็ม, “การศึกษาผลกระทบบของสภาวะการเย็นตัวที่มีต่อโครงสร้างจุลภาค ความแข็งแรง จุลภาคและความต้านทานแรงดึงของ โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วSn-0.3Ag-0.7Cu”, 2555, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล
- [44] ยุทธนา ทิพย์ทิพากร, “การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของวัสดุ”, 2013. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสวนดุสิต
- [45] สมนึก วัฒนศรีกุล, การทดสอบวัสดุ, 2549. กรุงเทพฯ : กรีนเวิลด์ มีเดีย
- [46] ปารเมศ ชูติมา, “การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม”, 2545. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [47] ประณิธิ กาวารี, “การศึกษากระบวนการถ่ายแบบกรีหลายผลตอบสนอง”, 2545. วิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- [48] Chinyere Onwubiko, 1999. Introduction to Engineering Design Optimization. Prentice Hall
- [49] วชกร เตชากัณฑ์โชติกร, วัลลภา ศรีรัตนพิทักษ์ และวาทีณี ก่อชื้อวานิช, “การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรง สี และส่วนผสมของโลหะผสมพิวเตอร์ไร้สารตะกั่ว”, 2554. วิศวกรรมอุตสาหการ , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [50] J. Cornell. Experiments with Mixtures. Wiley, 3rd edition, 2002. [Online] Available: <https://shop.statease.com/docs/v11/contents/advanced-topics/convert-l-pseudo-mixture-model-to-real.html>
- [51] Schmetterer, C. Flandorfer, H. Luef, CH. Kodentsov, A. and Ipser, H. “Cu-Ni-Sn: A key system for lead-free soldering”. Journal of electronic materials, Vol.38, No.1, 2009.
- [52] Cristina Andersson, Peng Sun and Johan Liu.2007.Tensile properties and microstructural characterization of Sn-0.7Cu-0.4Co bulk solder alloy for electronics applications.Journal of Alloys and Compounds.



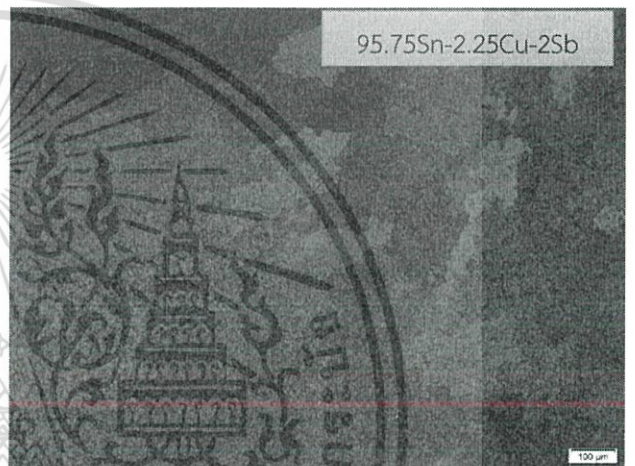
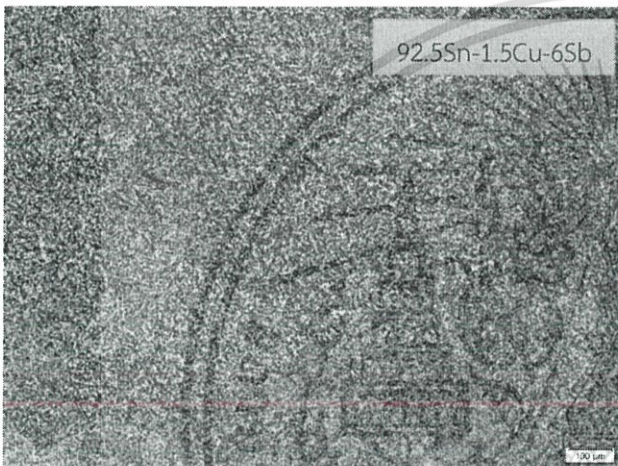
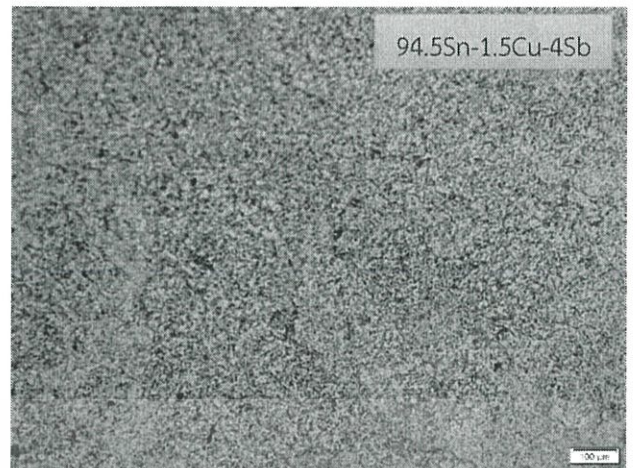
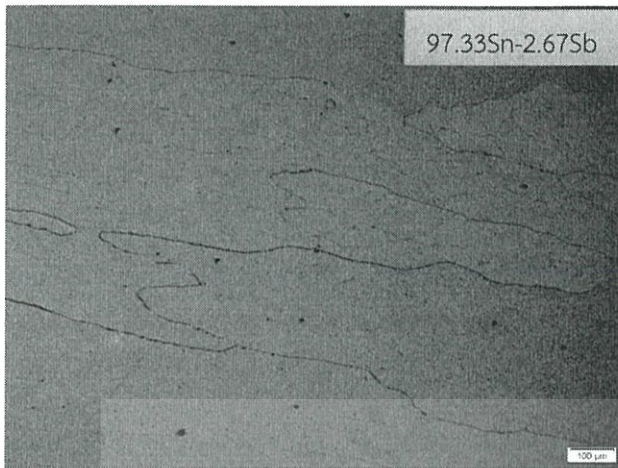


ภาคผนวก ก.

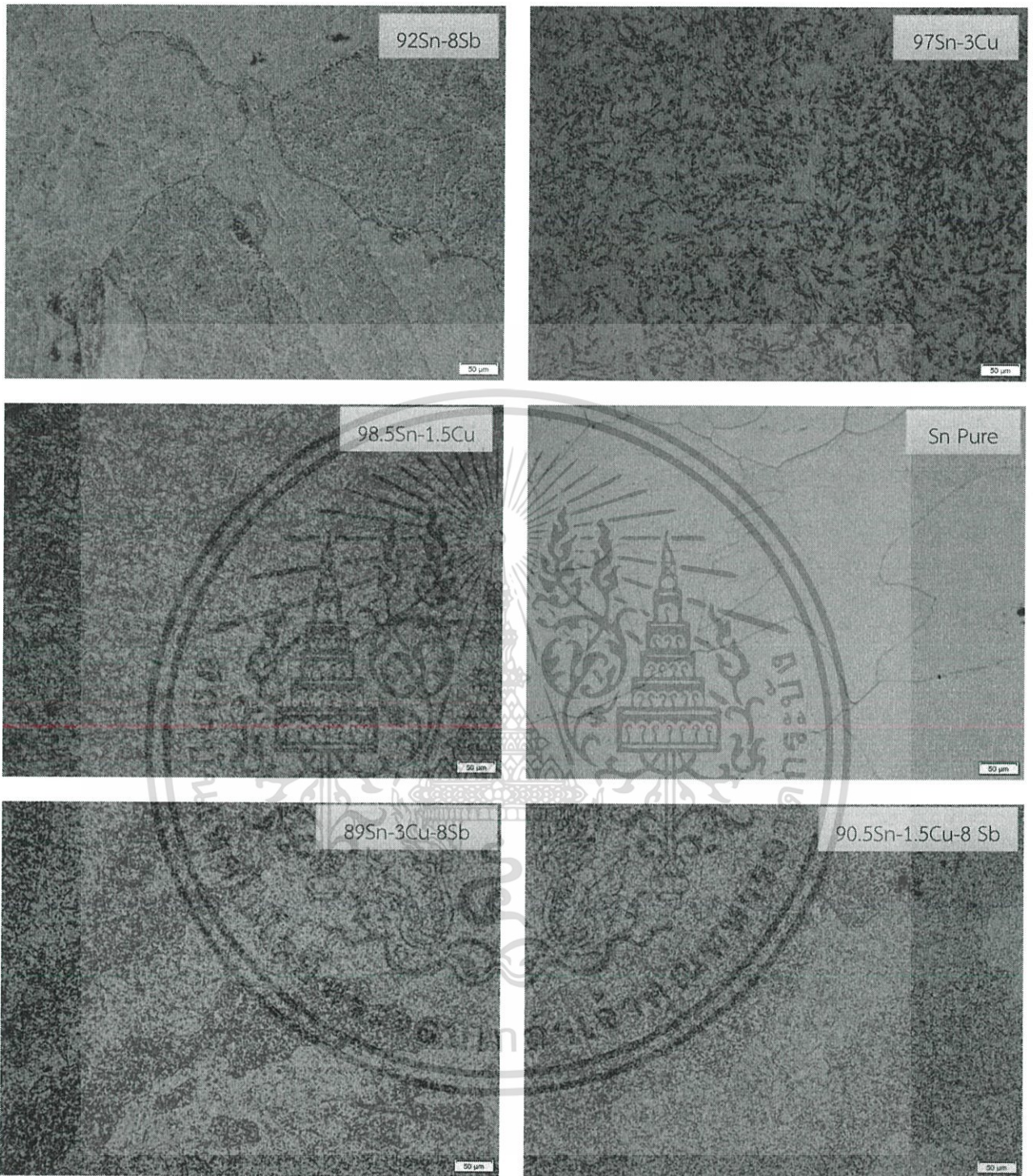
โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง
ที่กำลังขยาย 50, 100 และ 200 เท่า



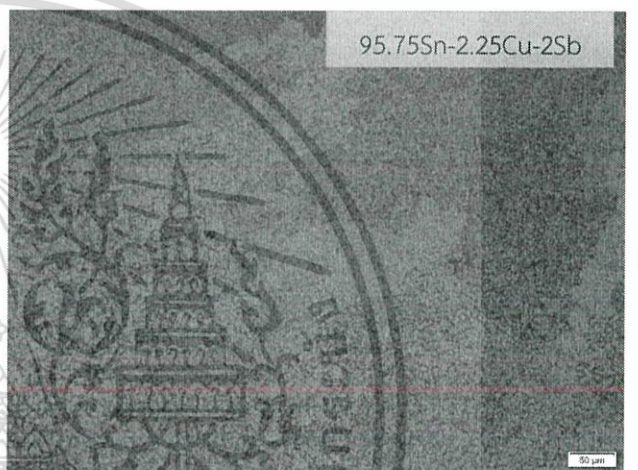
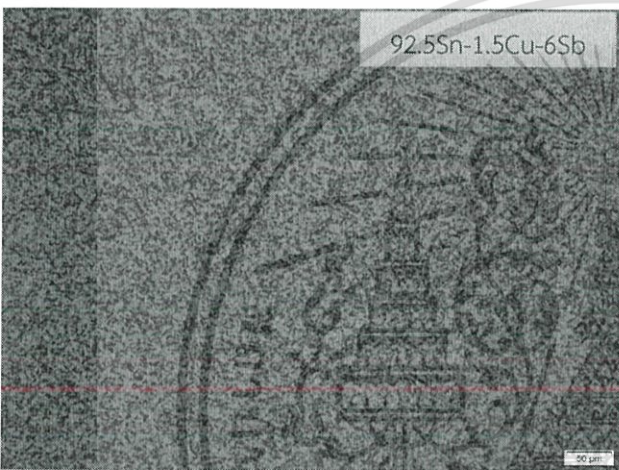
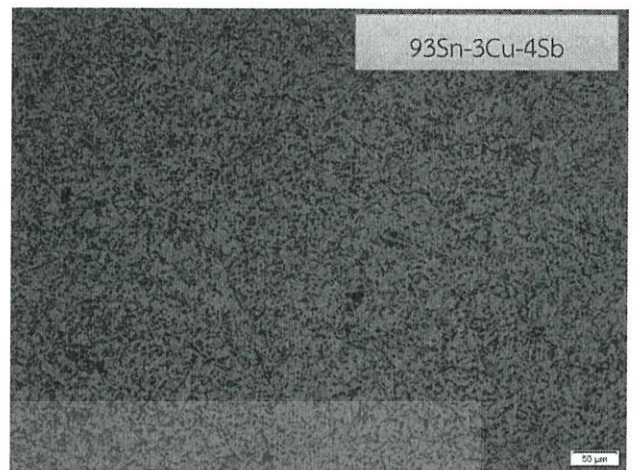
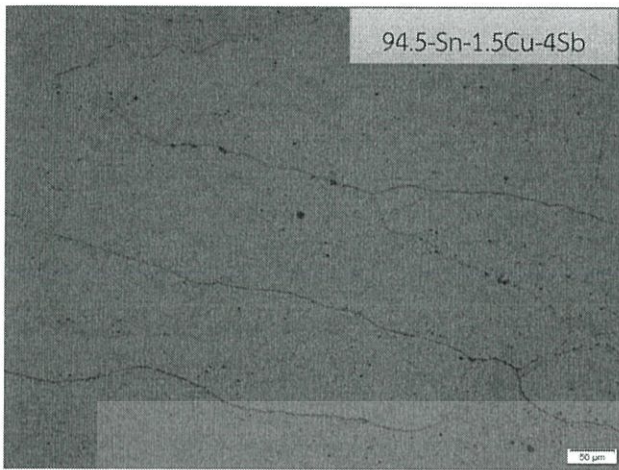
รูปที่ ก.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแต่ละชนิดจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง
ที่กำลังขยาย 50 เท่า



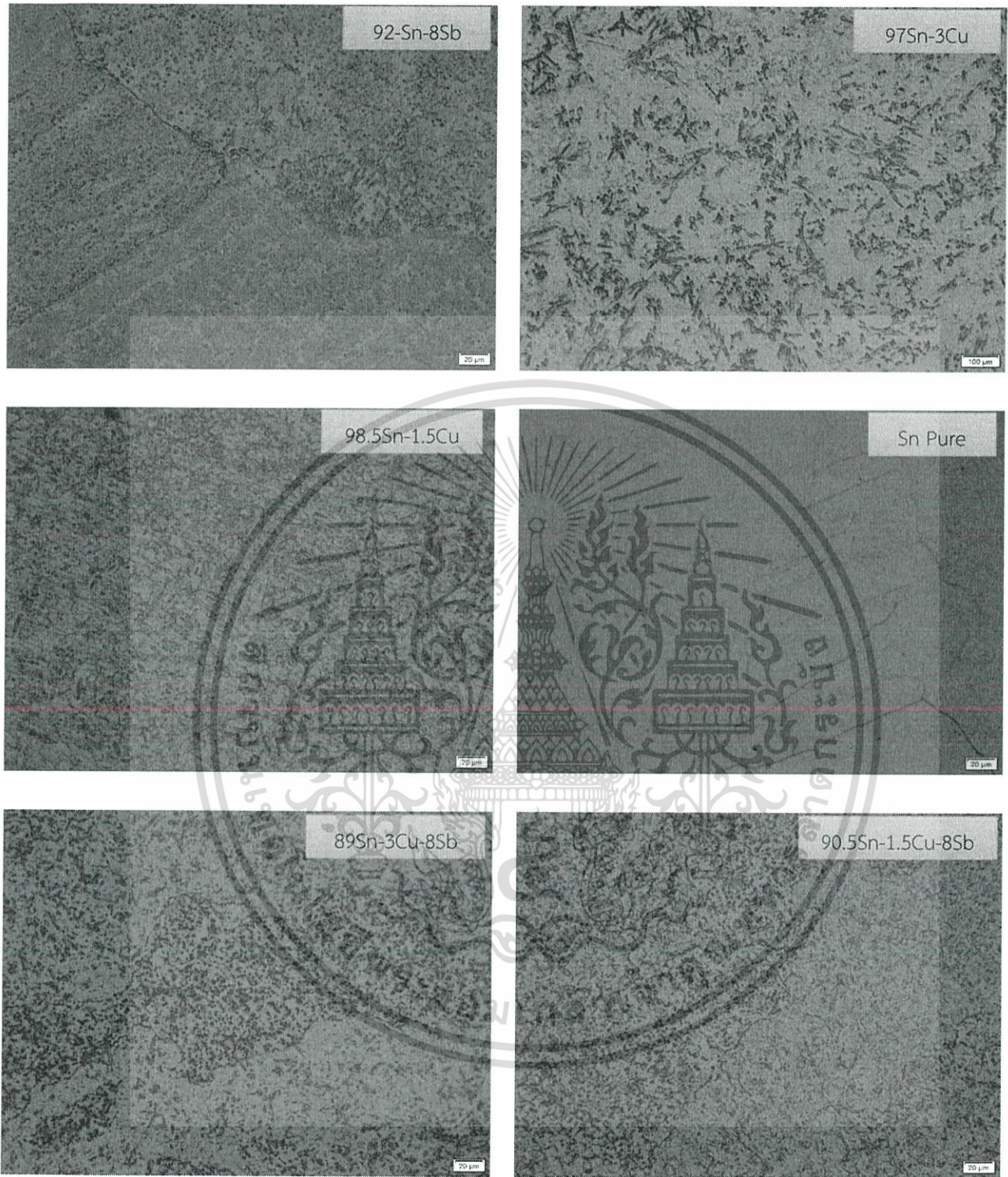
รูปที่ ก.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแต่ละชนิดจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง
ที่กำลังขยาย 50 เท่า (ต่อ)



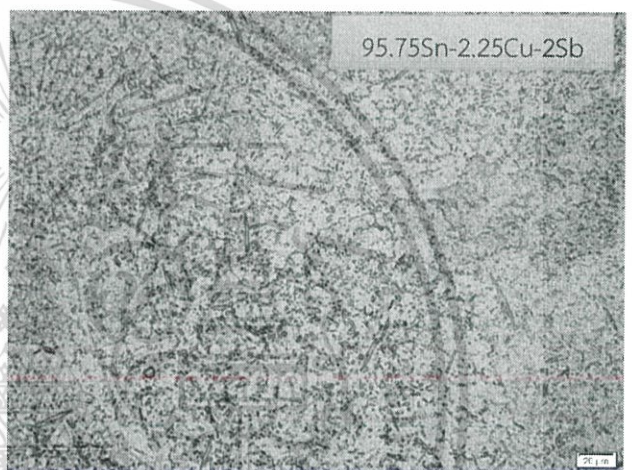
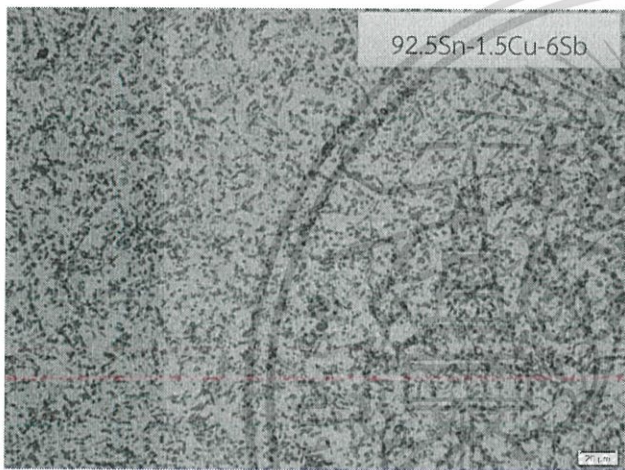
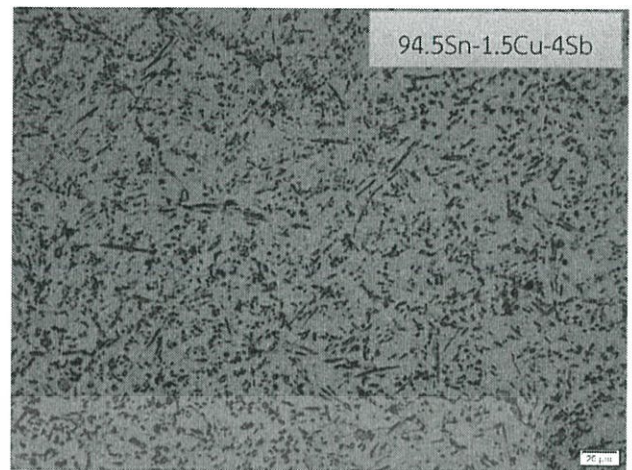
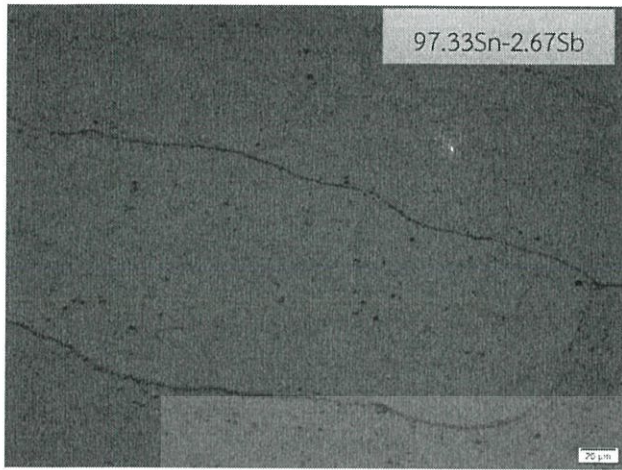
รูปที่ ก.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแต่ละชนิดจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง
ที่กำลังขยาย 100 เท่า



รูปที่ ก.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแต่ละชนิดจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ที่กำลังขยาย 100 เท่า (ต่อ)



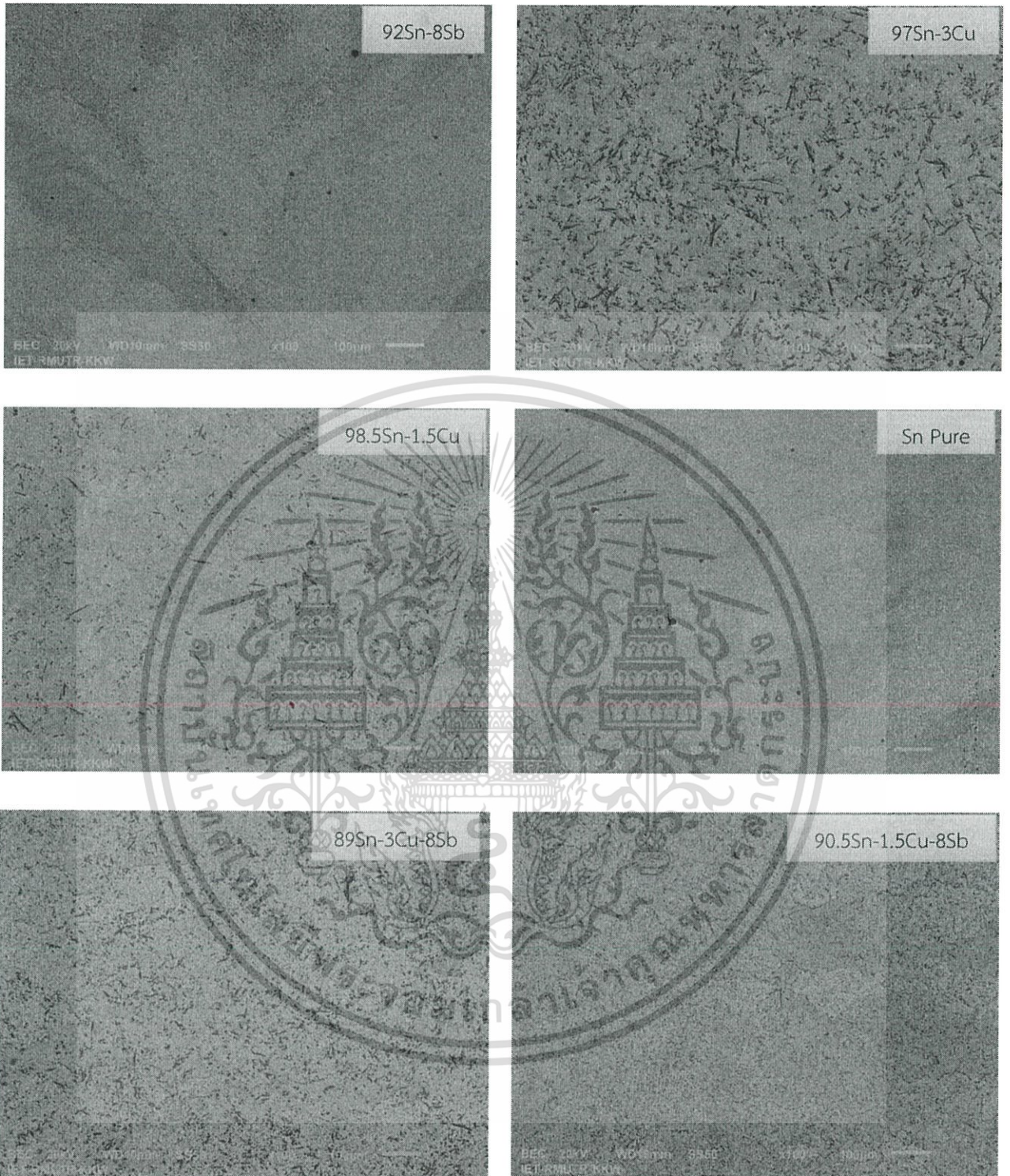
รูปที่ ก.3 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแต่ละชนิดจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง
ที่กำลังขยาย 200 เท่า



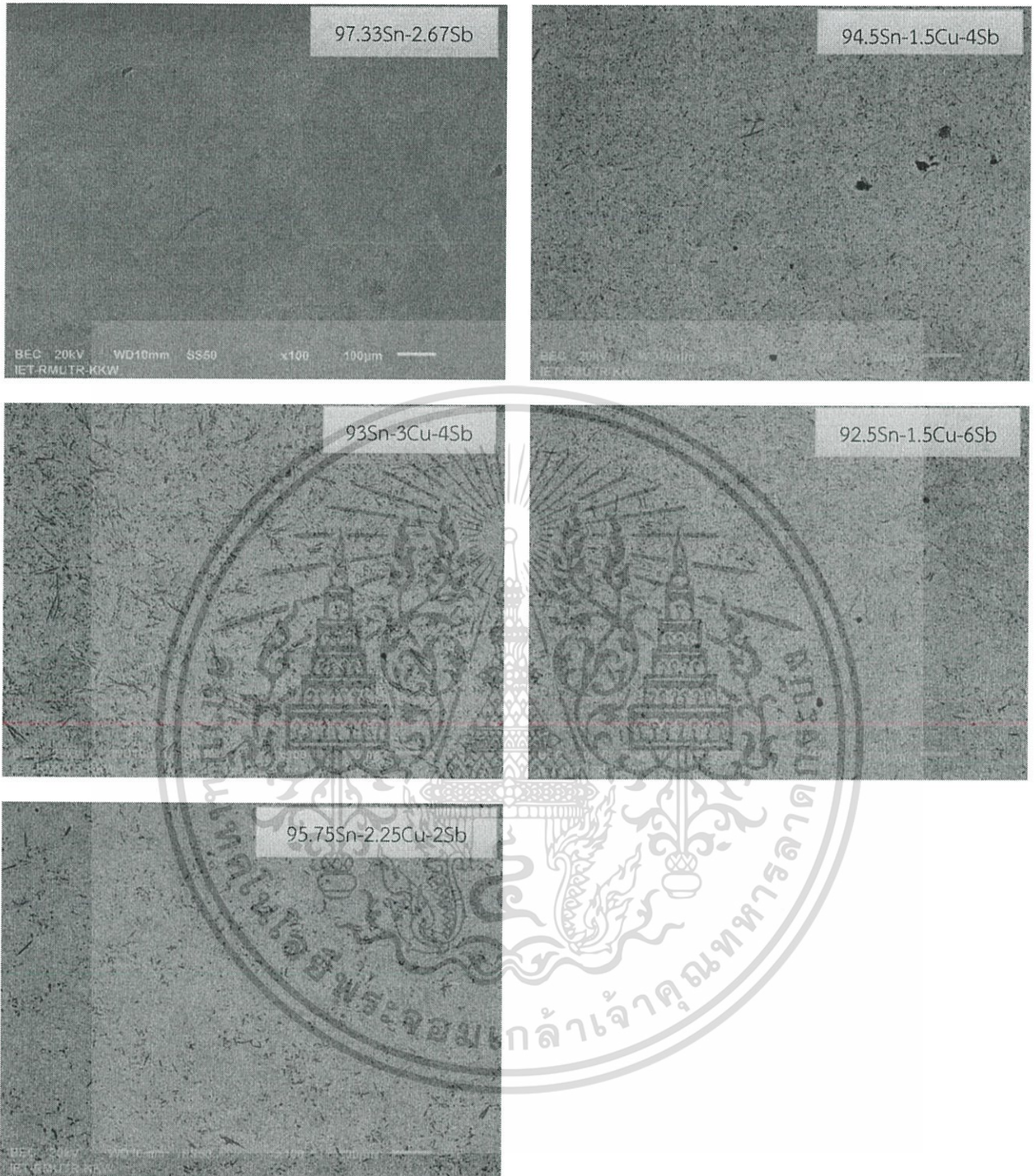
รูปที่ ก.3 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแต่ละชนิดจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง
ที่กำลังขยาย 200 เท่า (ต่อ)



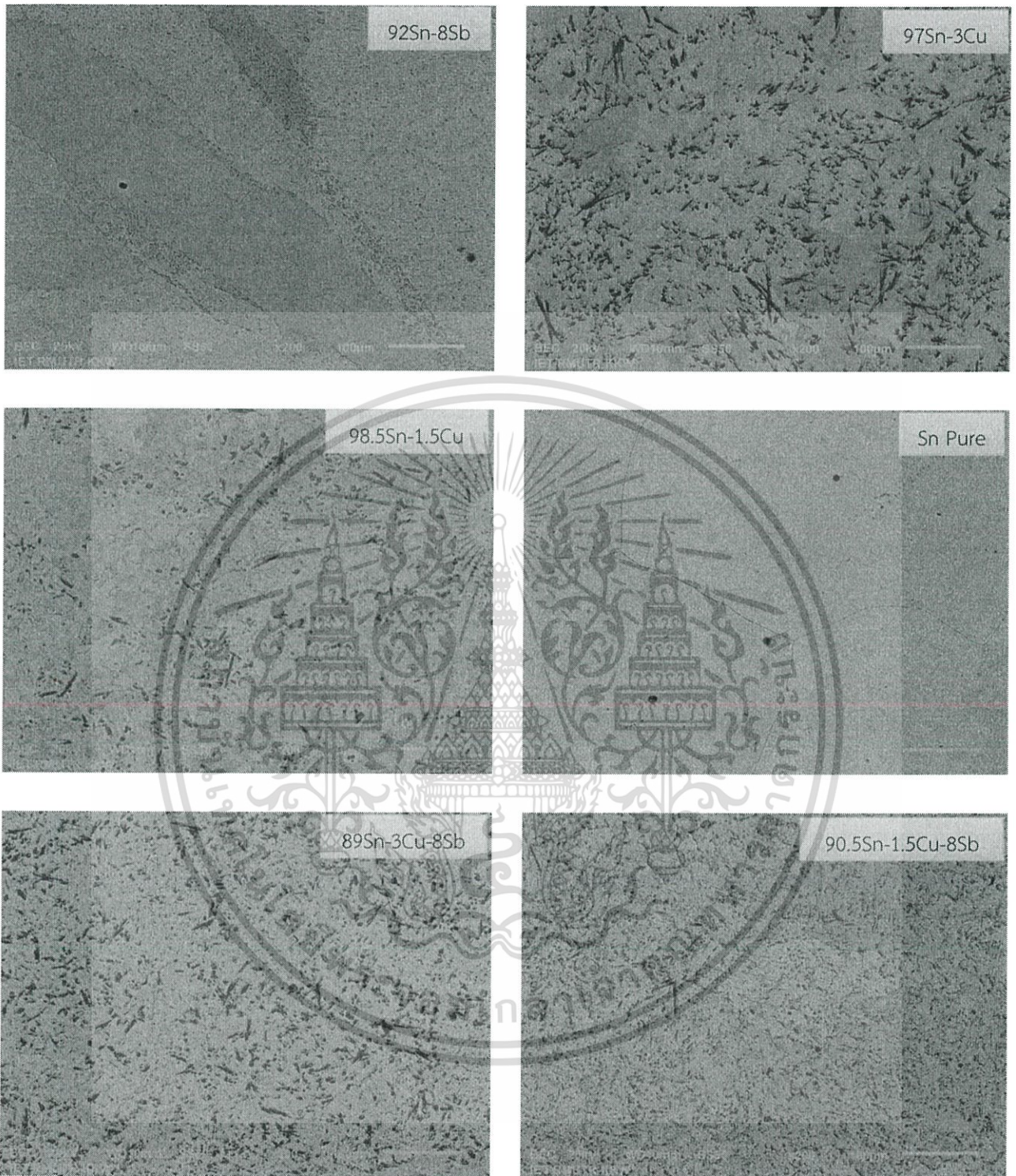
ภาคผนวก ข.
โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
ที่กำลัษขยาย 100, 200, 500 และ 1000 เท่า



รูปที่ ข.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแต่ละชนิด
ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 100 เท่า



รูปที่ ข.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแต่ละชนิด
ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 100 เท่า (ต่อ)

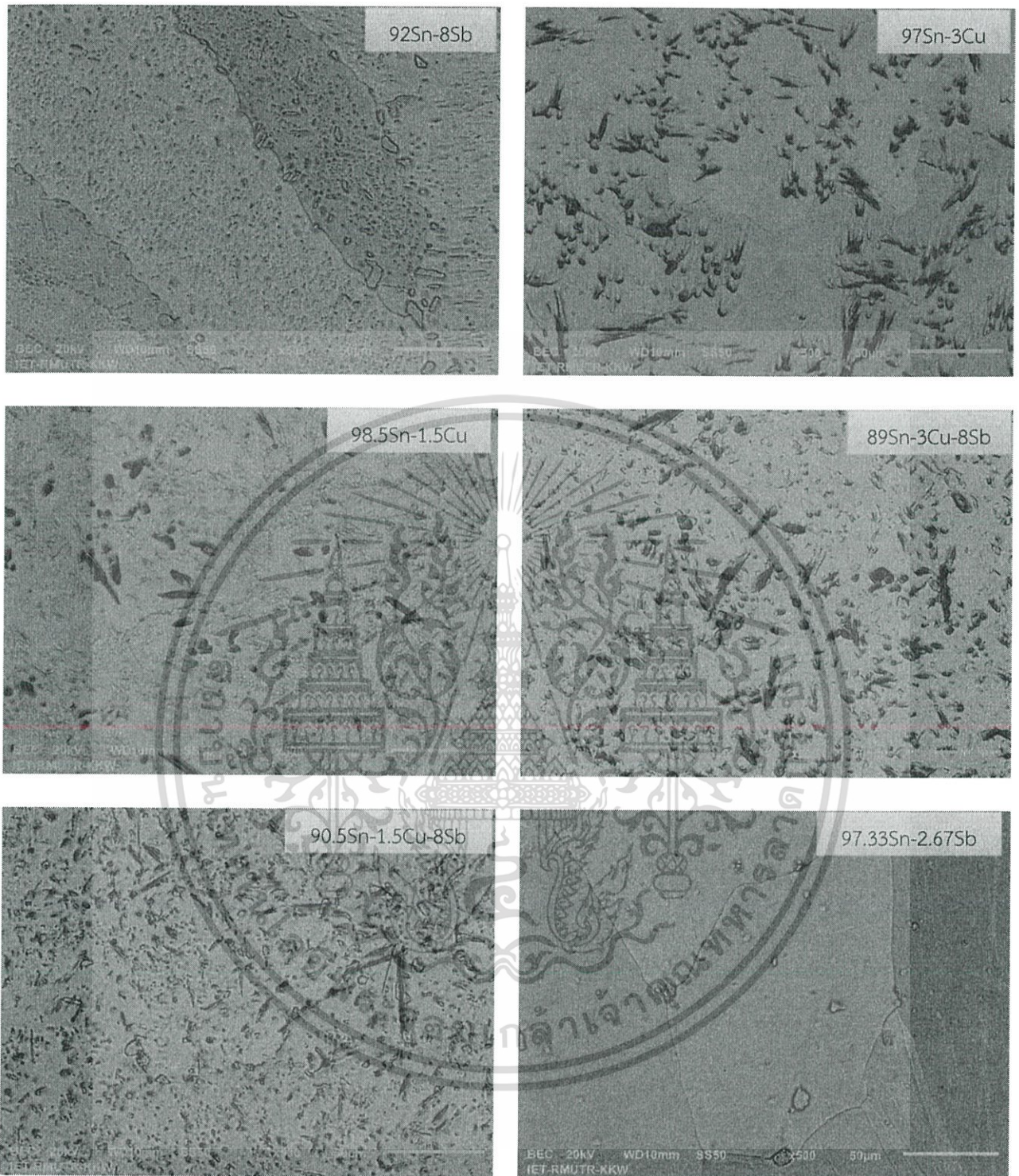


รูปที่ ข.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแต่ละชนิด ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 200 เท่า

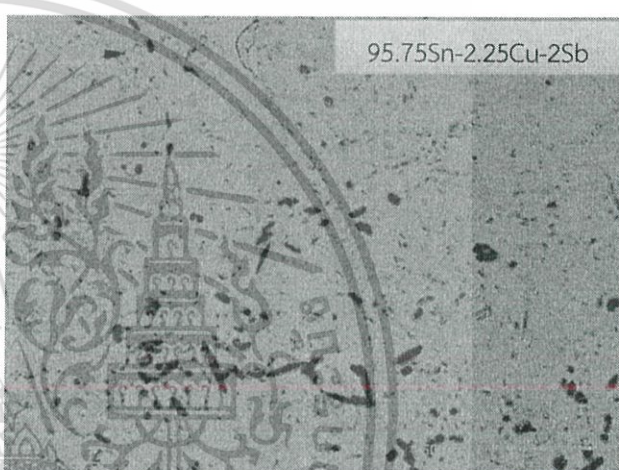
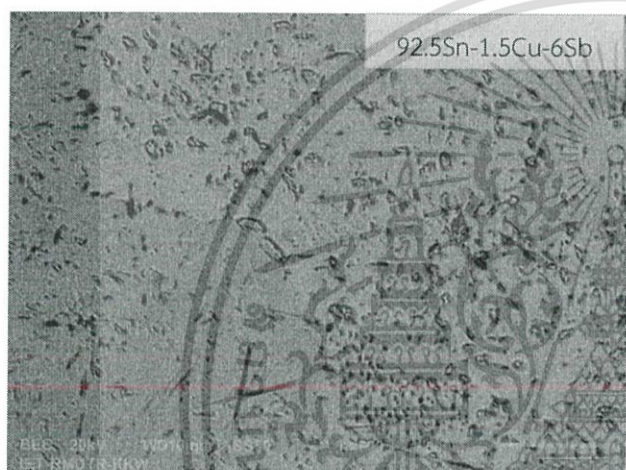
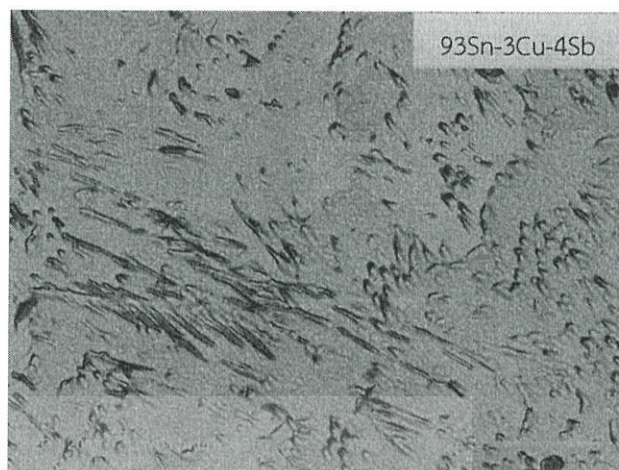
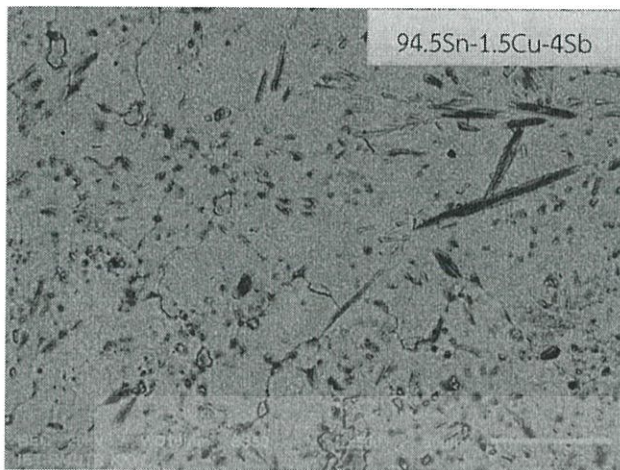


รูปที่ ข.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแต่ละชนิด ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 200 เท่า (ต่อ)

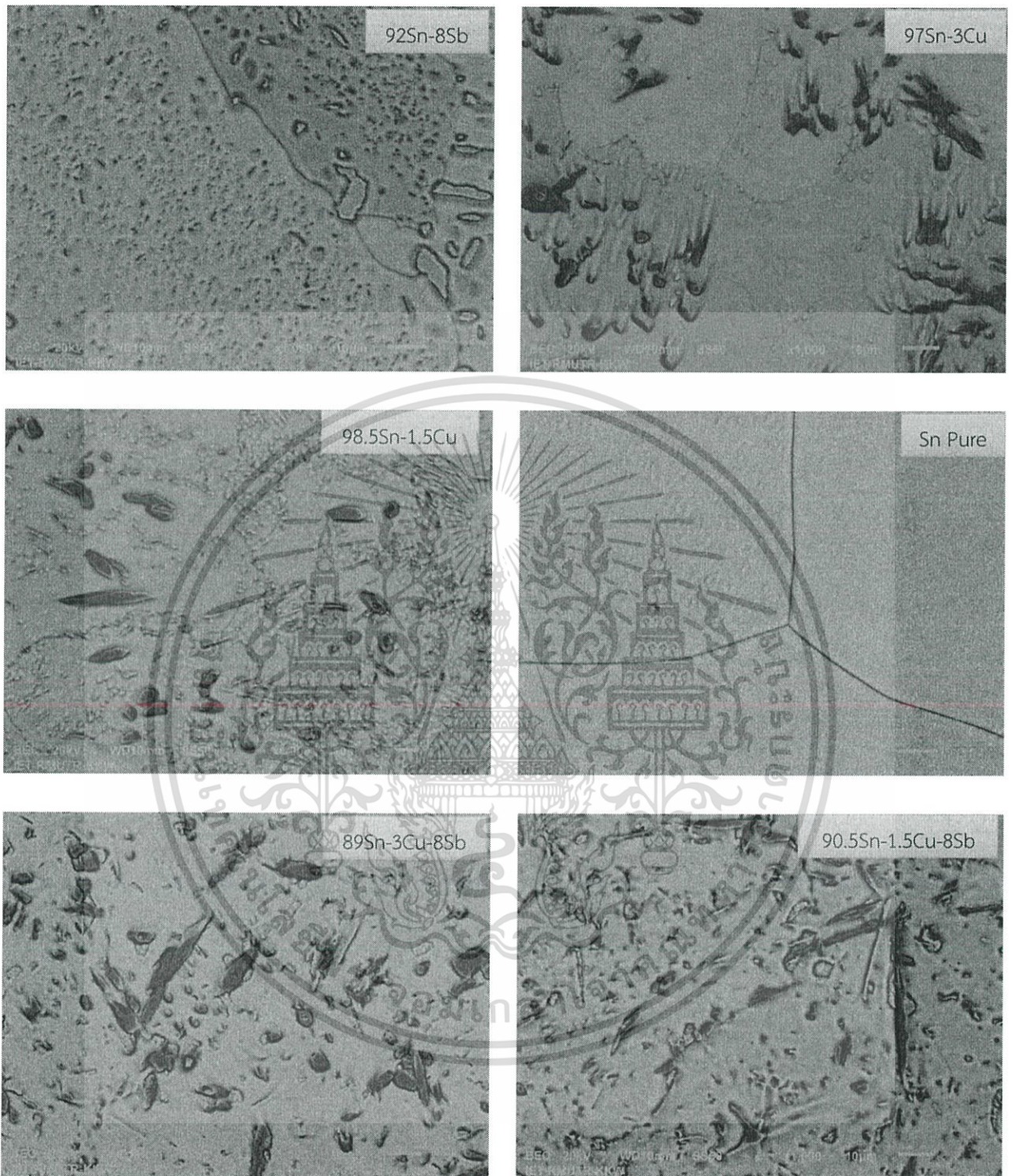
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



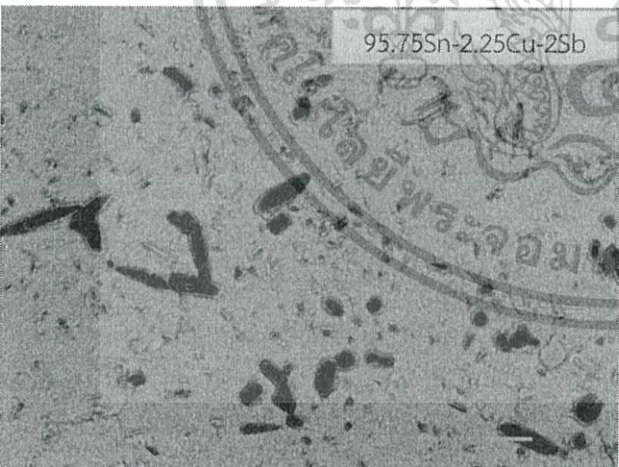
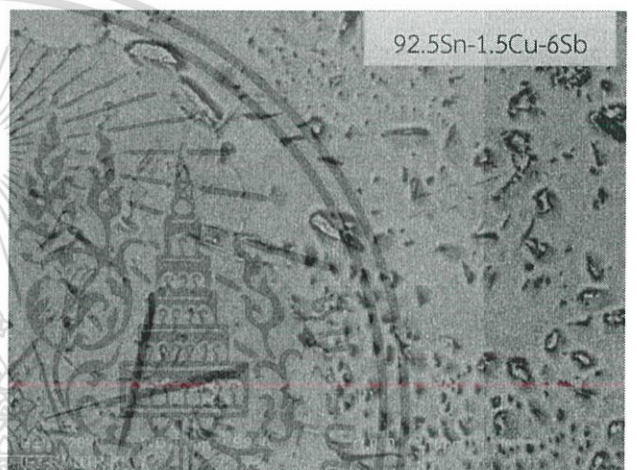
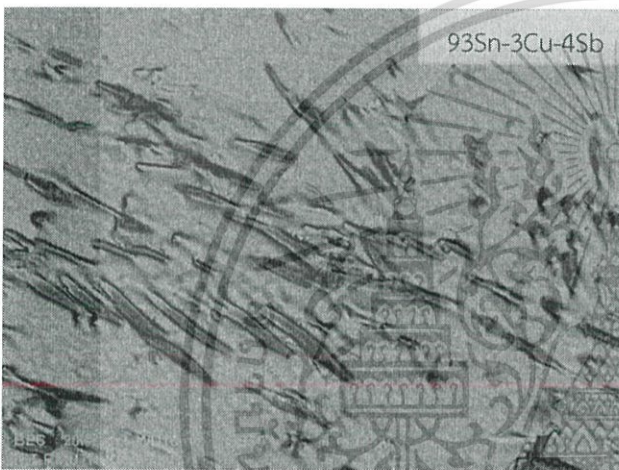
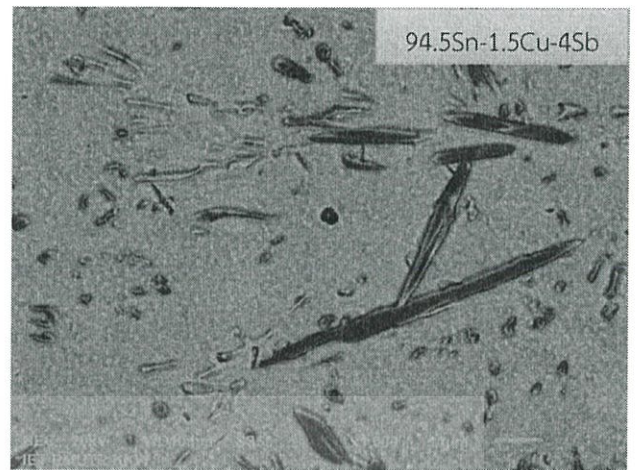
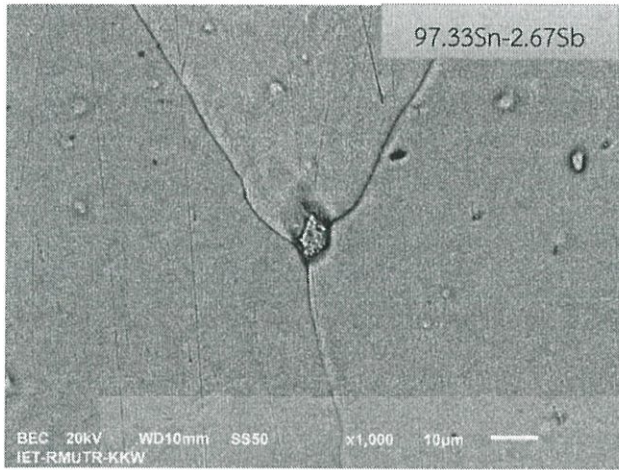
รูปที่ ข.3 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแต่ละชนิด ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ ข.3 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแต่ละชนิด
ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 500 เท่า (ต่อ)

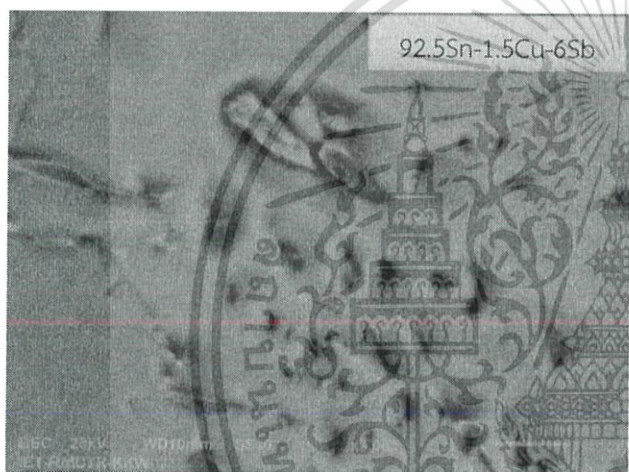


รูปที่ ข.4 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแต่ละชนิด
ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

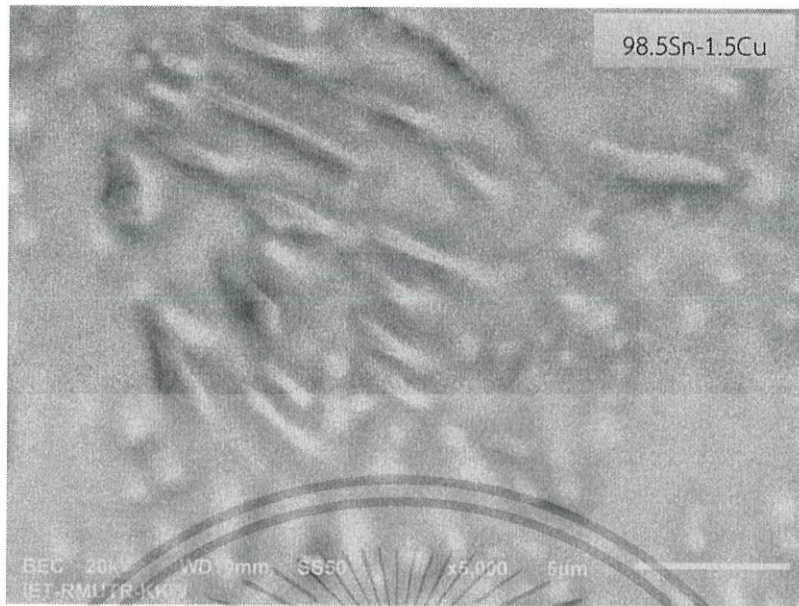


รูปที่ ข.4 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแต่ละชนิด
ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



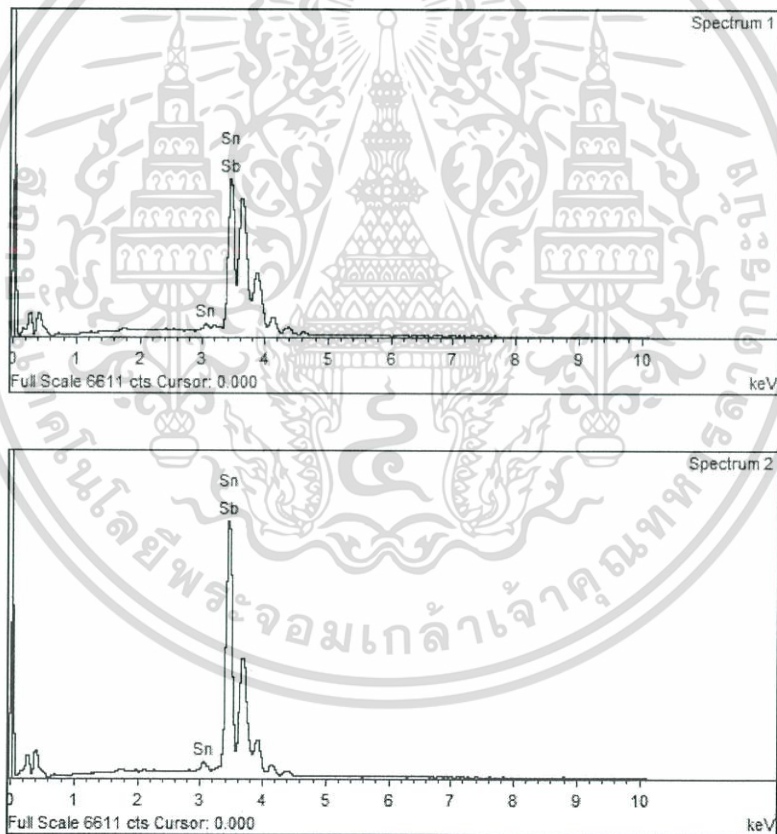
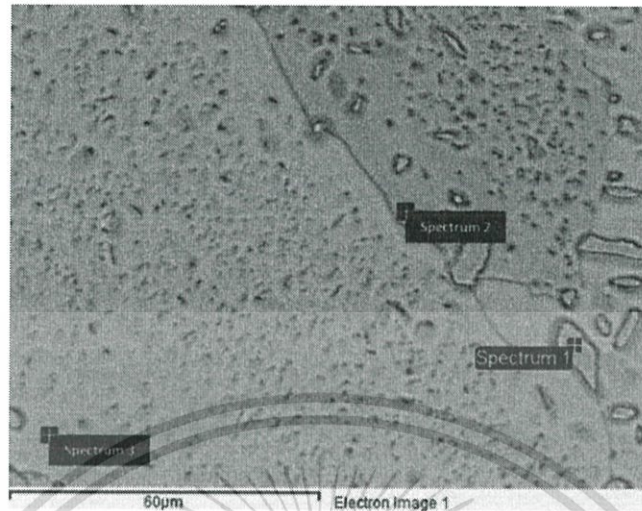
รูปที่ ข.5 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแต่ละชนิด
ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 3000 เท่า



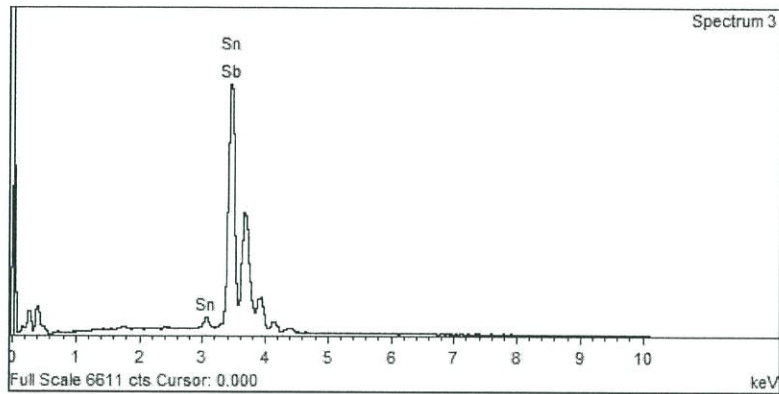
รูปที่ ข.6 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแต่ละชนิด จากห้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 5000 เท่า



1. โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 92Sn-8Sb



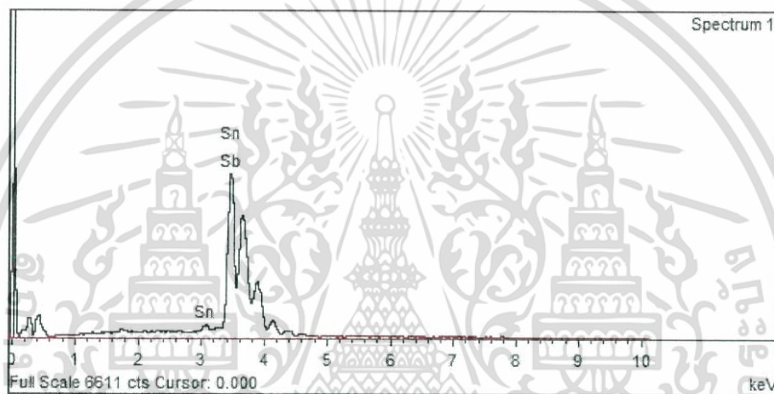
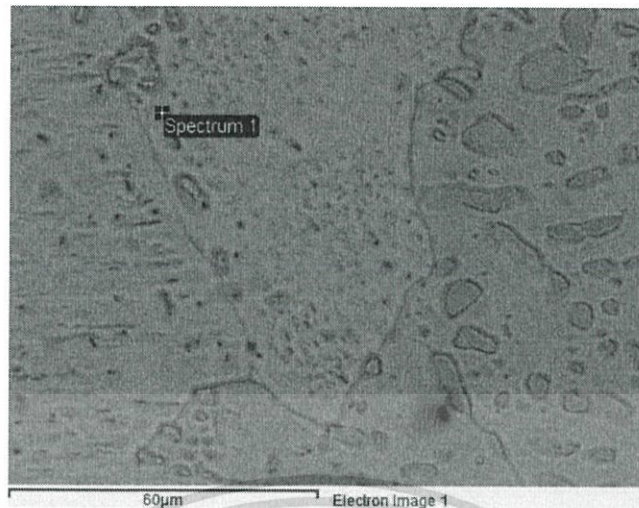
รูปที่ ค.1 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 92Sn-8Sb และสเปกตรัมจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง EDS



รูปที่ ค.1 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 92Sn-8Sb และสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง EDS (ต่อ)

ตารางที่ ค.1 เปอร์เซนต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรี

Points	Element (at %)		
	Sn	Cu	Sb
Spectrum 1	58.51	-	41.49
Spectrum 2	99.97	-	0.03
Spectrum 3	97.58	-	2.42

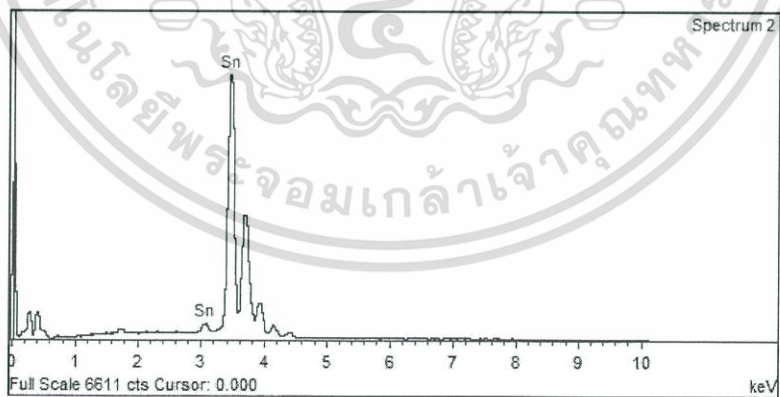
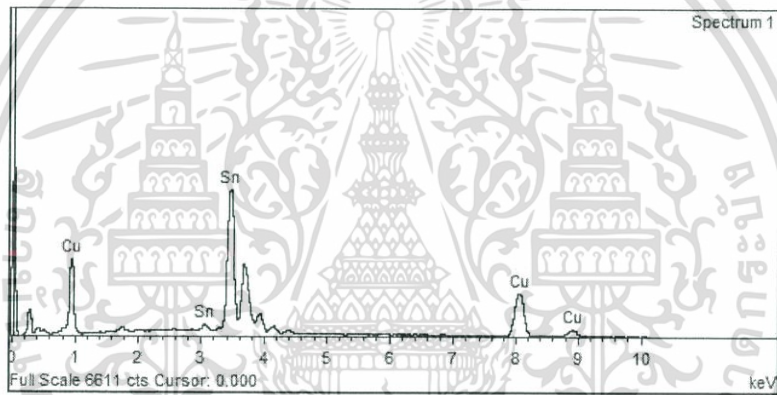
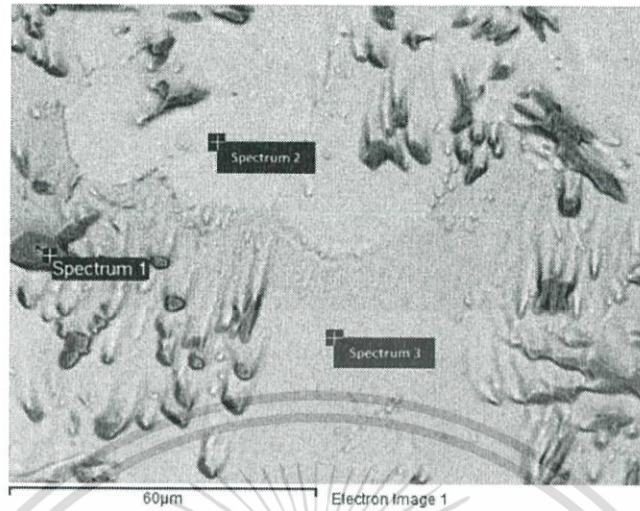


รูปที่ ค.1 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 92Sn-8Sb และสเปกตรัมจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง EDS (ต่อ)

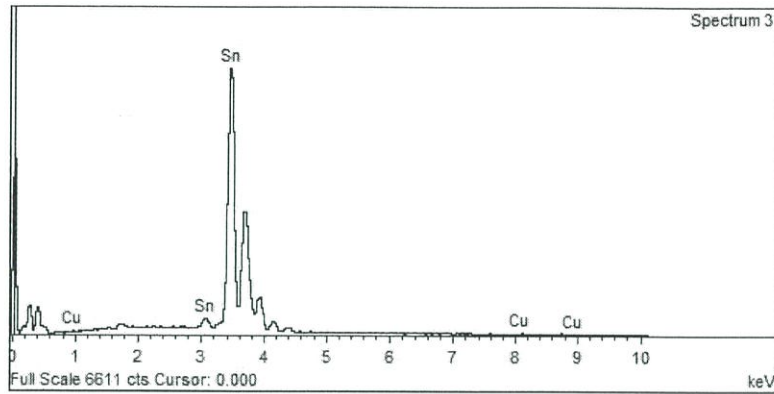
ตารางที่ ค.1 เปอร์เซนต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรี(ต่อ)

Points	Element (at %)		
	Sn	Cu	Sb
Spectrum 1	66.86	-	33.14

2. โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 97Sn-3Cu



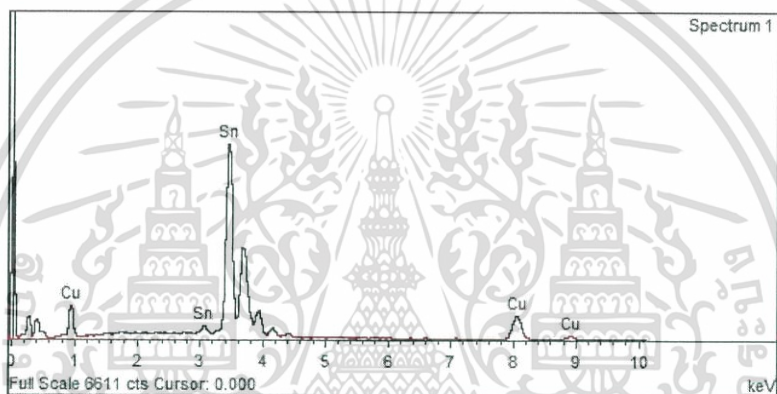
รูปที่ ค.2 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 97Sn-3Cu และสเปกตรัมจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง EDS



รูปที่ ค.2 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 97Sn-3Cu และสเปกตรัมจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง EDS

ตารางที่ ค.2 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรี

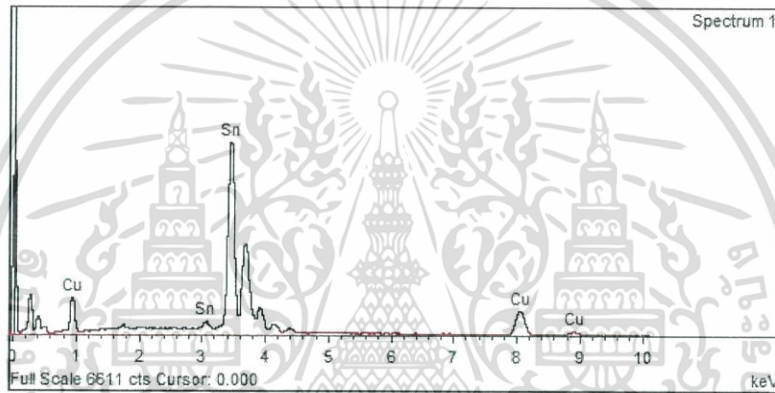
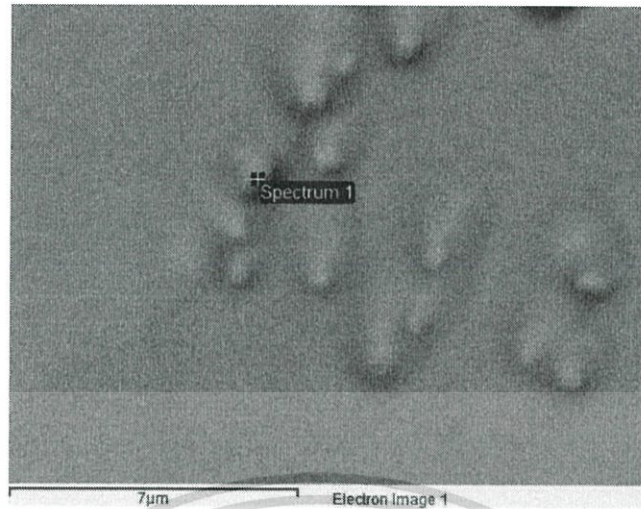
Points	Element (at %)		
	Sn	Cu	Sb
Spectrum 1	48.25	51.75	-
Spectrum 2	100	-	-
Spectrum 3	99.8	0.2	-



รูปที่ ค.2 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 97Sn-3Cu และสเปกตรัมจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง EDS (ต่อ)

ตารางที่ ค.2 เปอร์เซนต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรี(ต่อ)

Points	Element (at %)		
	Sn	Cu	Sb
Spectrum 1	69.30	30.70	-

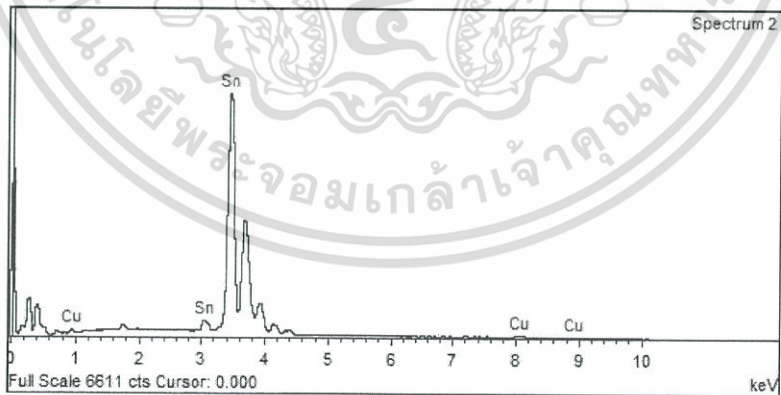
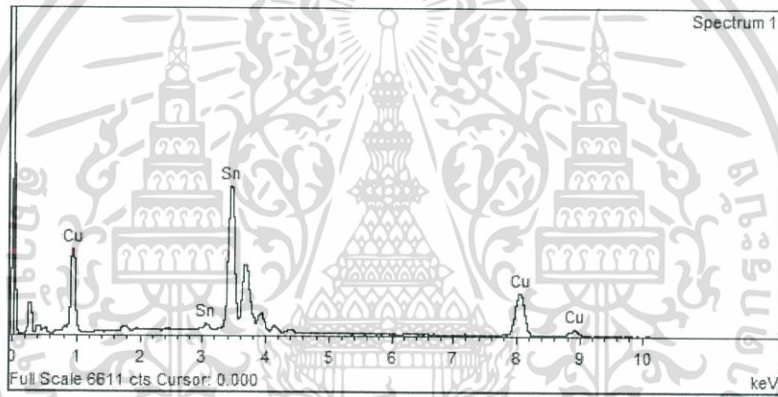
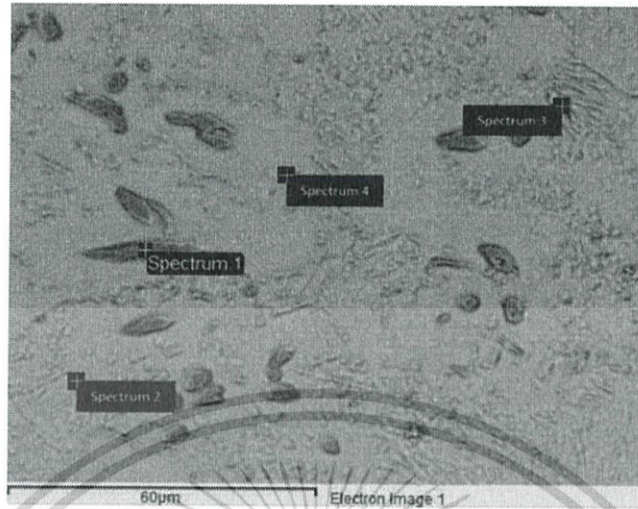


รูปที่ ค.2 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 97Sn-3Cu และสเปกตรัมจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง EDS (ต่อ)

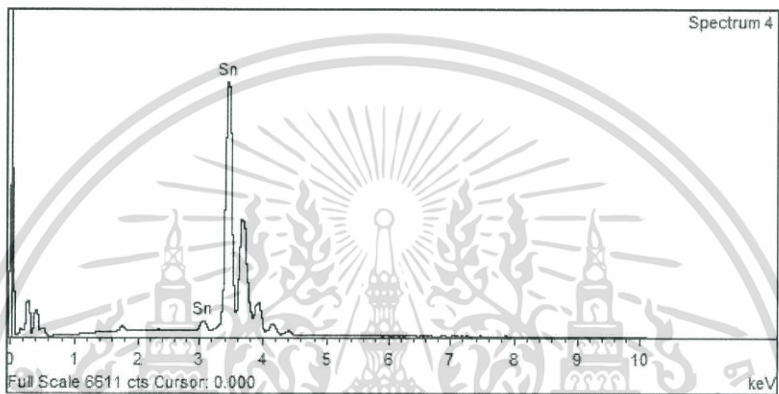
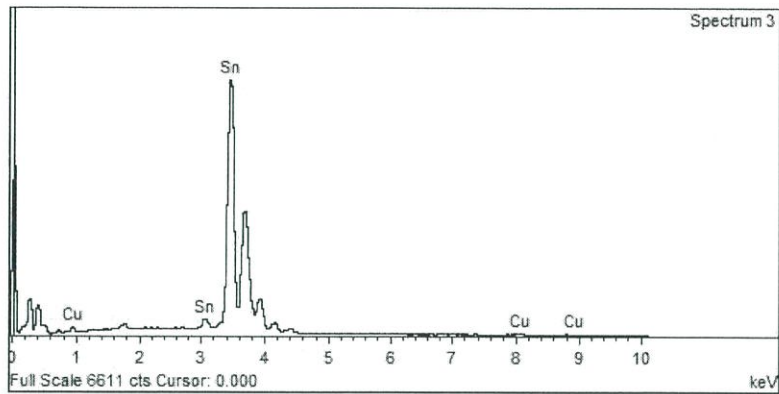
ตารางที่ ค.2 เปอร์เซนต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรี(ต่อ)

Points	Element (at %)		
	Sn	Cu	Sb
Spectrum 1	69.43	30.57	-

3. โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 98.5Sn-1.5Cu



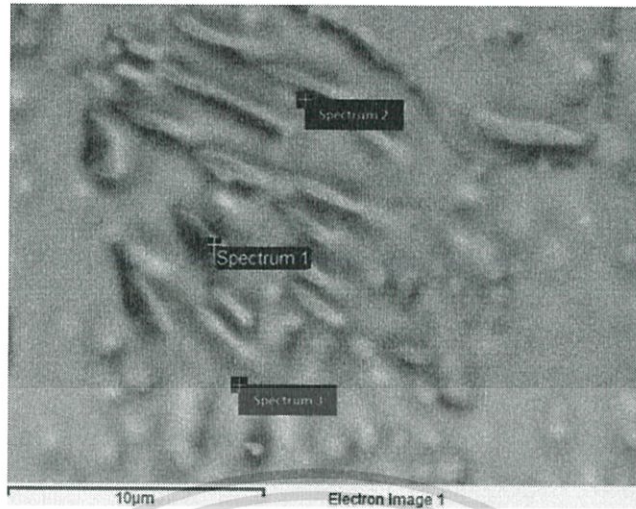
รูปที่ ค.3 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 98.5Sn-1.5Cu และสเปกตรัมจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง EDS



รูปที่ ค.3 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 98.5Sn-1.5Cu และสเปกตรัมจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง EDS (ต่อ)

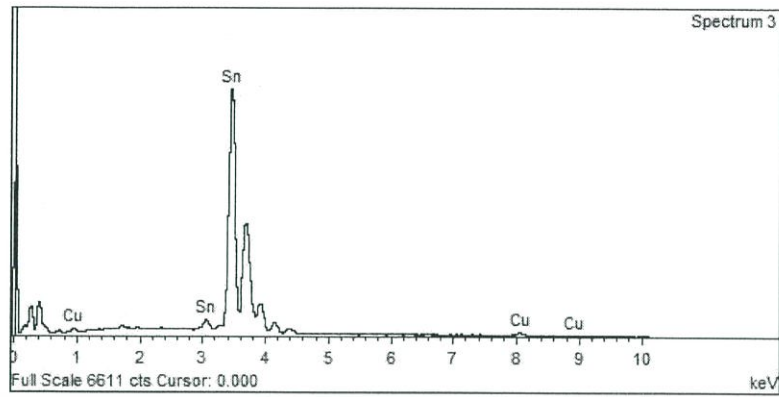
ตารางที่ ค.3 เปรียบเทียบองค์ประกอบของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรี

Points	Element (at %)		
	Sn	Cu	Sb
Spectrum 1	49.35	50.65	-
Spectrum 2	97.35	2.61	-
Spectrum 3	98.29	1.71	-
Spectrum 4	100	-	-



รูปที่ ค.3 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 98.5Sn-1.5Cu และสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ห้องประกอบของธาตุด้วยเครื่อง EDS (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



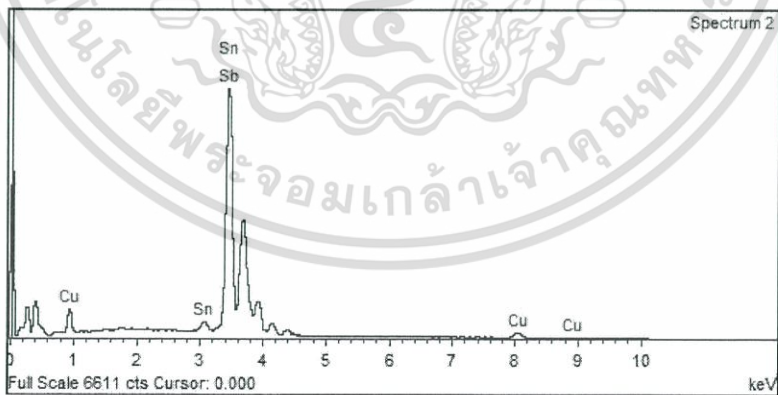
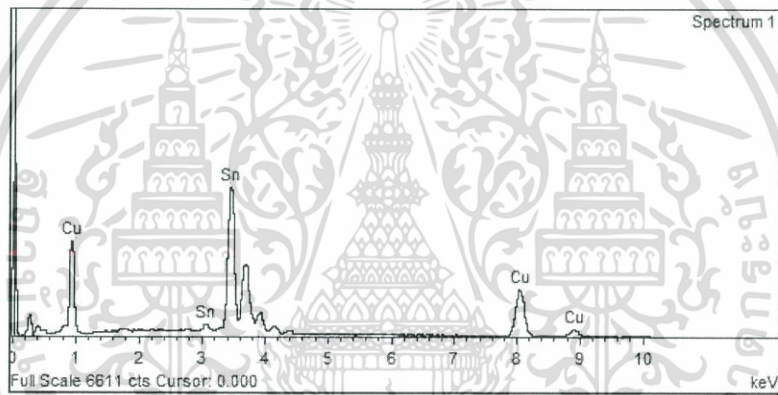
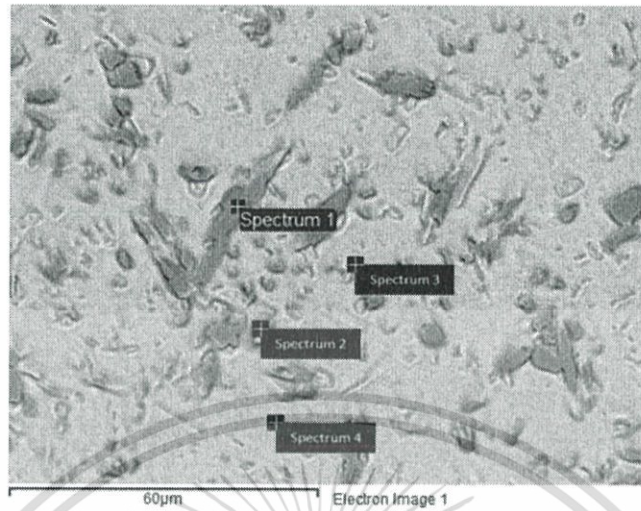
รูปที่ ค.3 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 98.5Sn-1.5Cu

และสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการของธาตุด้วยเครื่อง EDS (ต่อ)

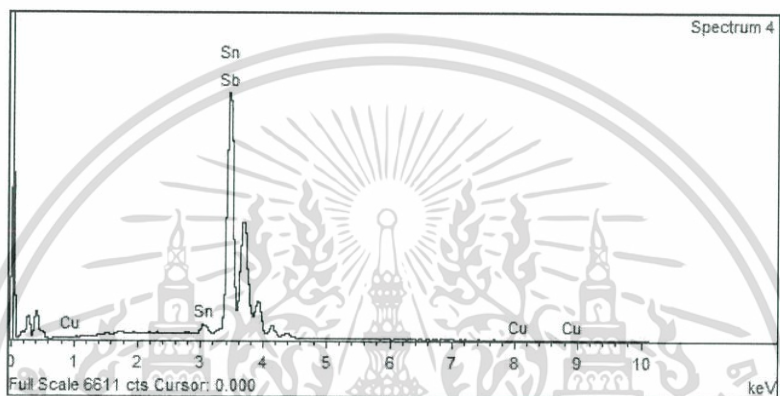
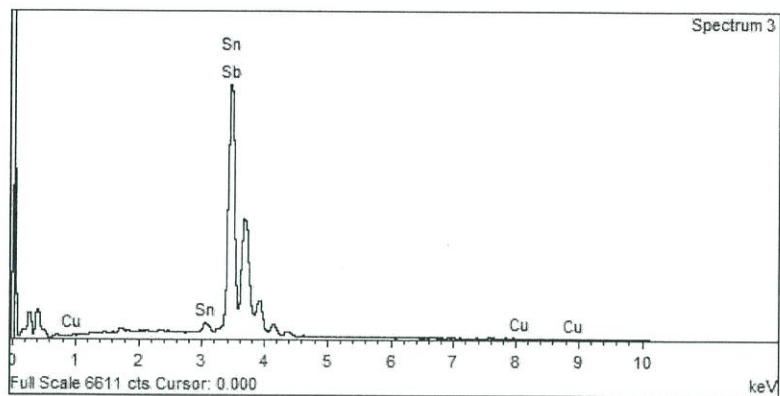
ตารางที่ ค.3 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรี (ต่อ)

Points	Element (at %)		
	Sn	Cu	Sb
Spectrum 1	73.83	26.17	-
Spectrum 2	89.61	10.39	-
Spectrum 3	96.42	3.58	-

4. โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 89Sn-3Cu-8Sb



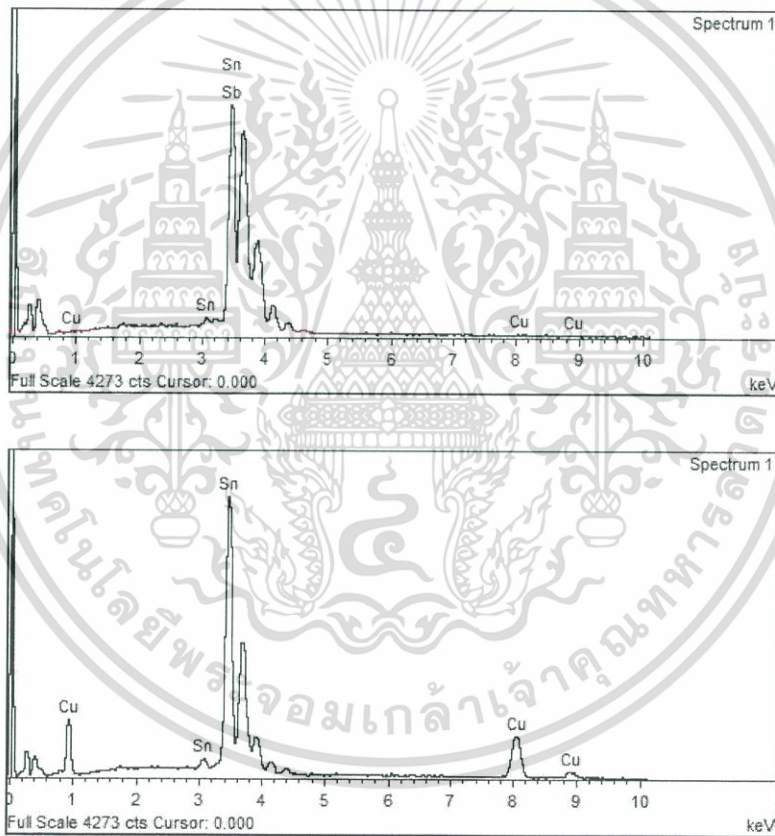
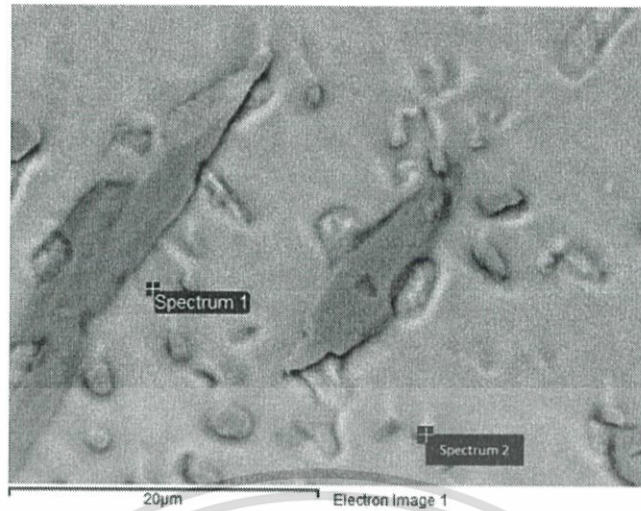
รูปที่ ค.4 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 89Sn-3Cu-8Sb และสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง EDS



รูปที่ ค.4 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 89Sn-3Cu-8Sb และสเปกตรัมจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง EDS (ต่อ)

ตารางที่ ค.4 เปอร์เซนต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรี

Points	Element (at %)		
	Sn	Cu	Sb
Spectrum 1	47.92	52.08	-
Spectrum 2	93.40	6.28	0.31
Spectrum 3	97.65	0.11	2.24
Spectrum 4	58.90	0.74	40.36



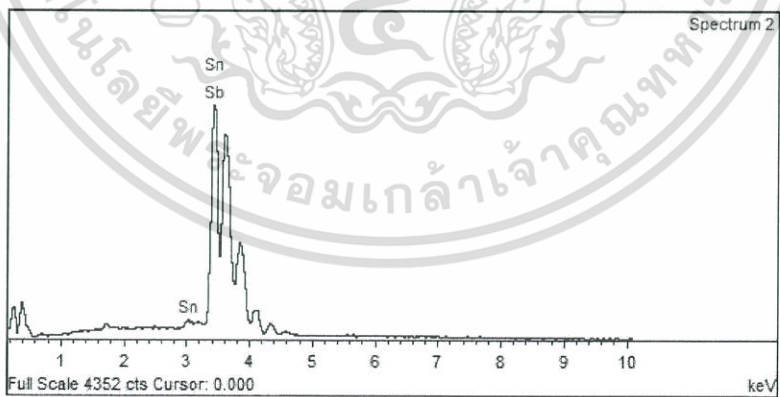
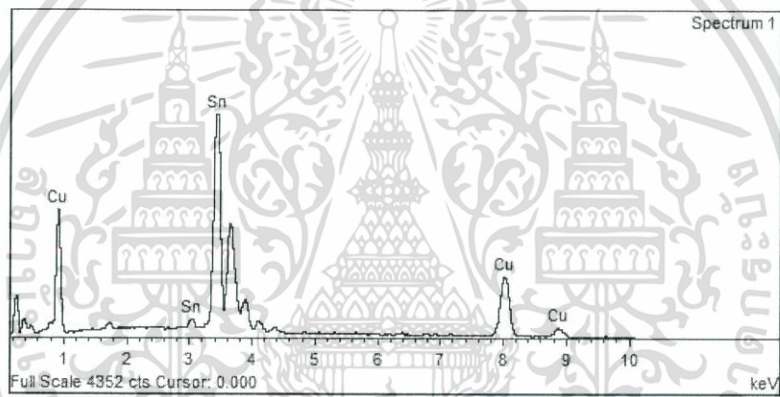
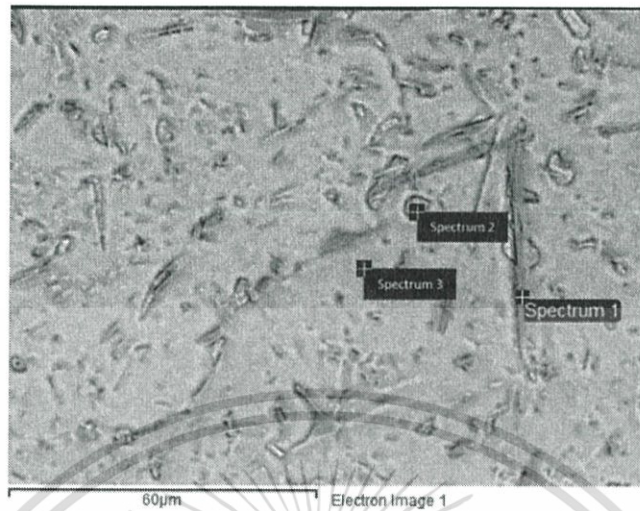
รูปที่ ค.4 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 89Sn-3Cu-8Sb และสเปกตรัมจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง EDS (ต่อ)

ตารางที่ ค.4 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรี(ต่อ)

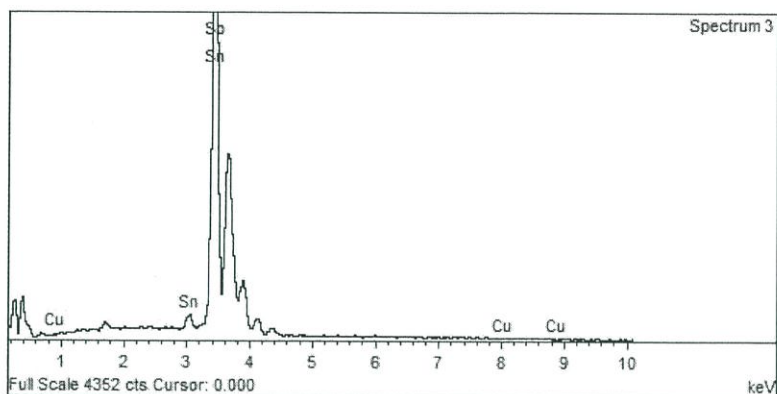
Points	Element (at %)		
	Sn	Cu	Sb
Spectrum 1	58.90	0.47	40.36
Spectrum 2	64.04	35.96	-



5. โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 90.5Sn-1.5Cu-8Sb



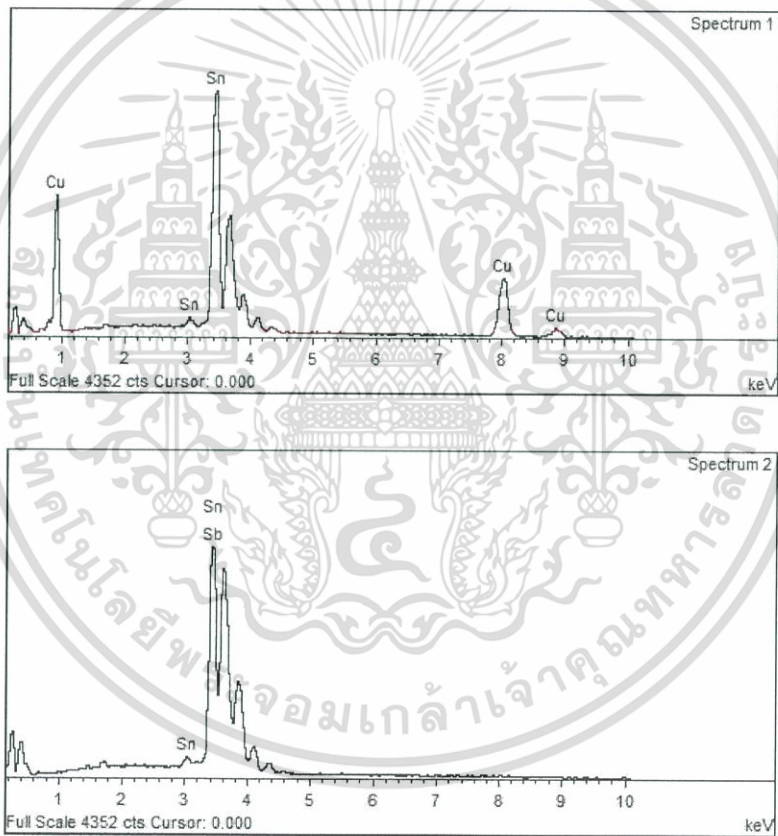
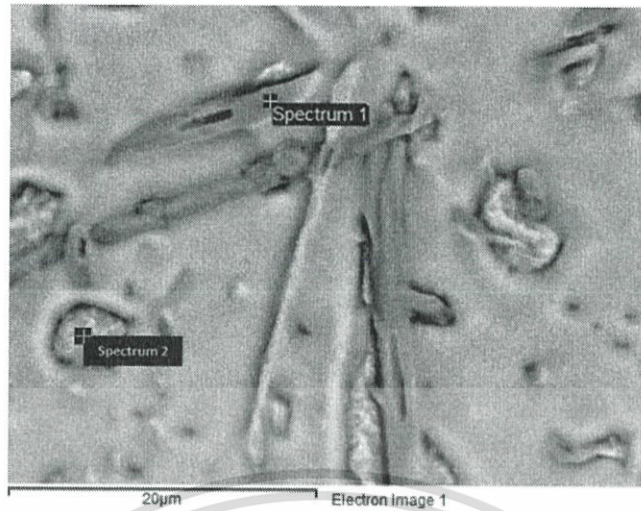
รูปที่ ค.5 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 90.5Sn-1.5Cu-8Sb และสเปกตรัมจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง EDS



รูปที่ ค.5 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 90.5Sn-1.5Cu-8Sb และสเปกตรัมจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง EDS (ต่อ)

ตารางที่ ค.5 เปอร์เซนต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรี

Points	Element (at %)		
	Sn	Cu	Sb
Spectrum 1	50.69	49.31	-
Spectrum 2	59.36	-	40.64
Spectrum 3	96.30	0.20	3.50



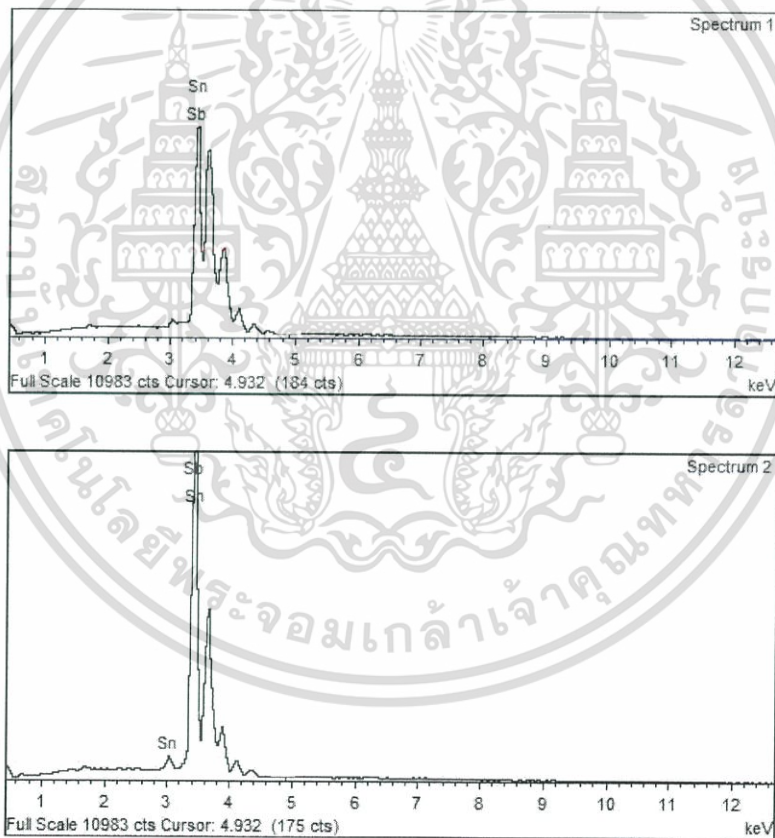
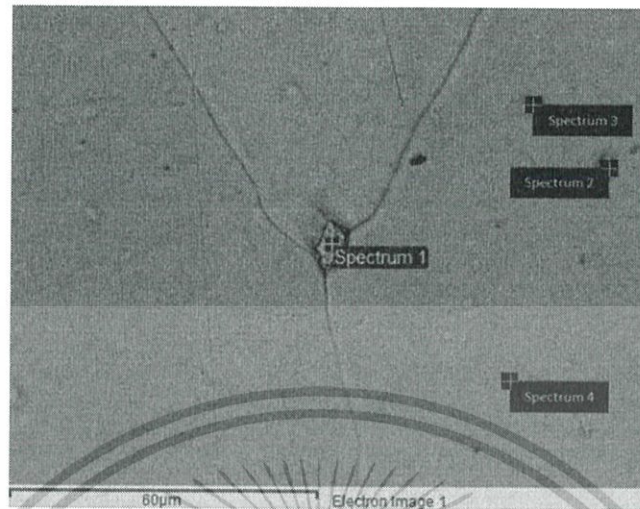
รูปที่ ค.5 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 90.5Sn-1.5Cu-8Sb และสเปกตรัมจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง EDS (ต่อ)

ตารางที่ ค.5 เปอร์เซนต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรี(ต่อ)

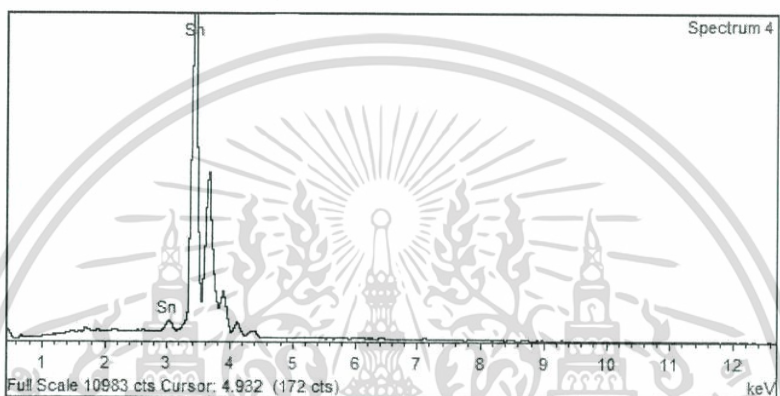
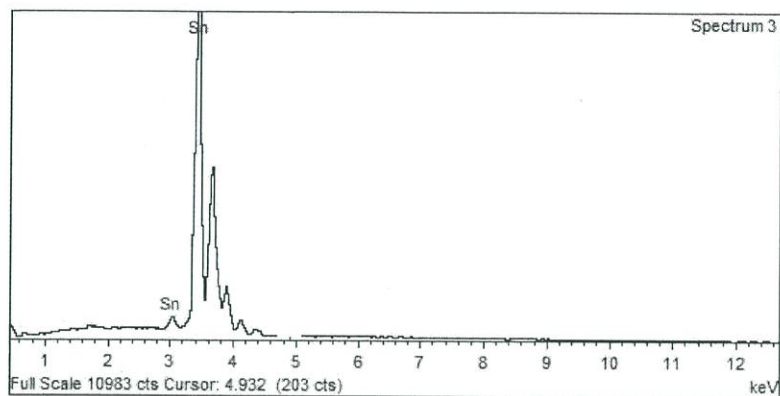
Points	Element (at %)		
	Sn	Cu	Sb
Spectrum 1	53.82	46.18	-
Spectrum 2	59.16	-	40.84



6. โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 97.33Sn-2.67Sb



รูปที่ ค.6 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 97.33Sn-2.67Sb และสเปกตรัมจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง EDS

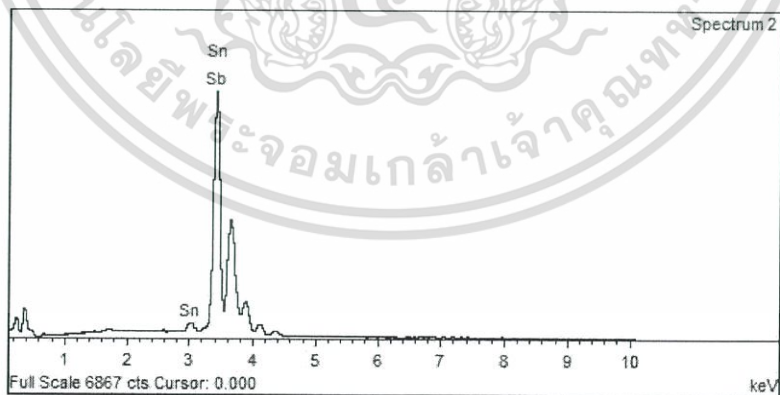
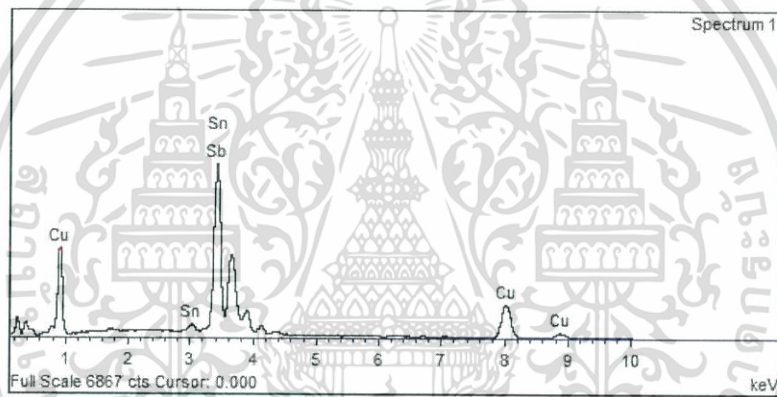
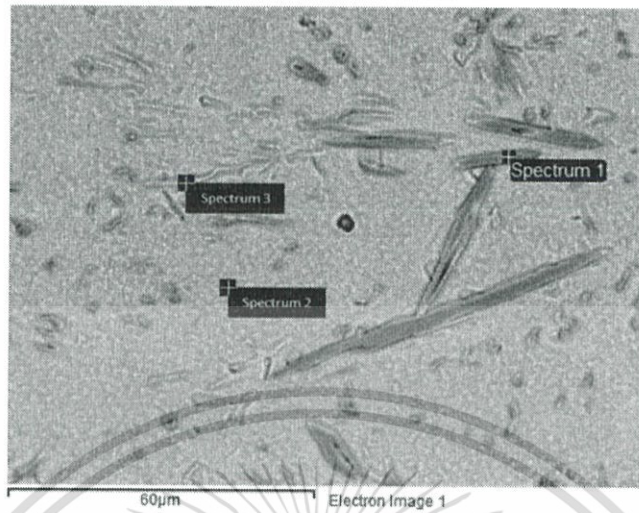


รูปที่ ค.6 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 97.33Sn-2.67Sb และสเปกตรัมจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง EDS (ต่อ)

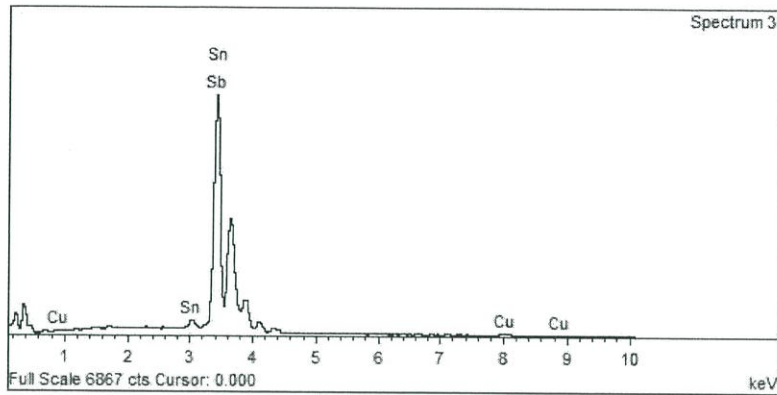
ตารางที่ ค.6 เปอร์เซนต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรี

Points	Element (at %)		
	Sn	Cu	Sb
Spectrum 1	59.52	-	40.48
Spectrum 2	98.61	-	1.39
Spectrum 3	100	-	-
Spectrum 4	100	-	-

7. โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 94.5Sn-1.5Cu-4Sb



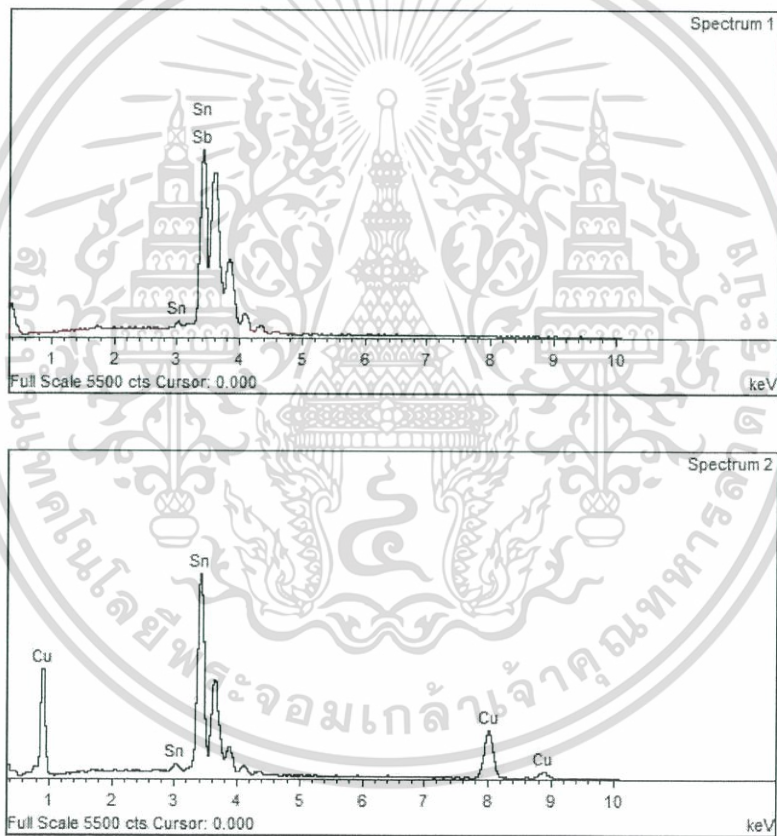
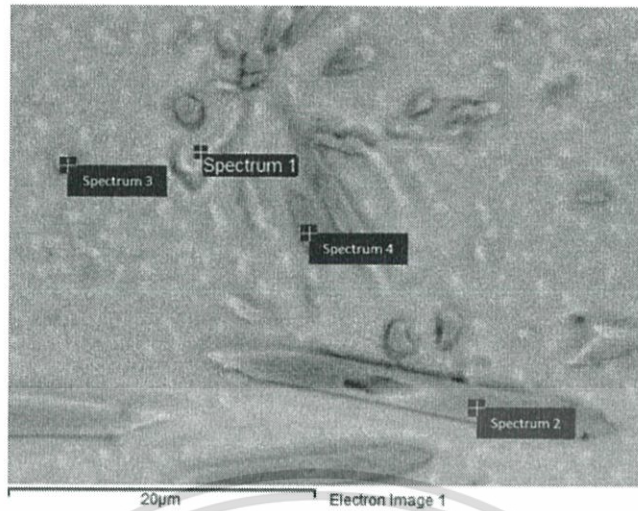
รูปที่ ค.7 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 94.5Sn-1.5Cu-4Sb และสเปกตรัมจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง EDS



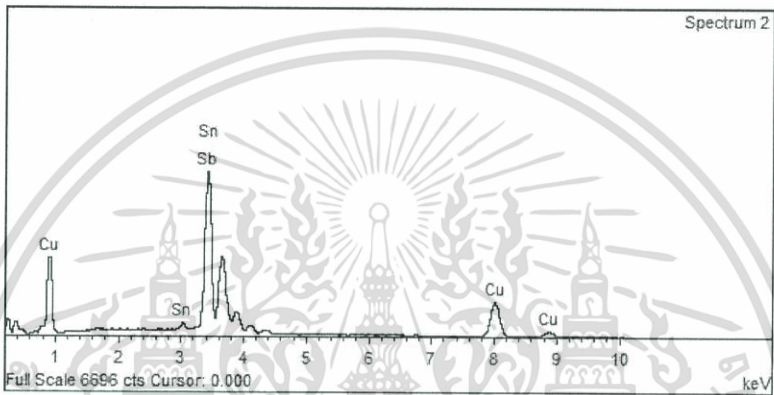
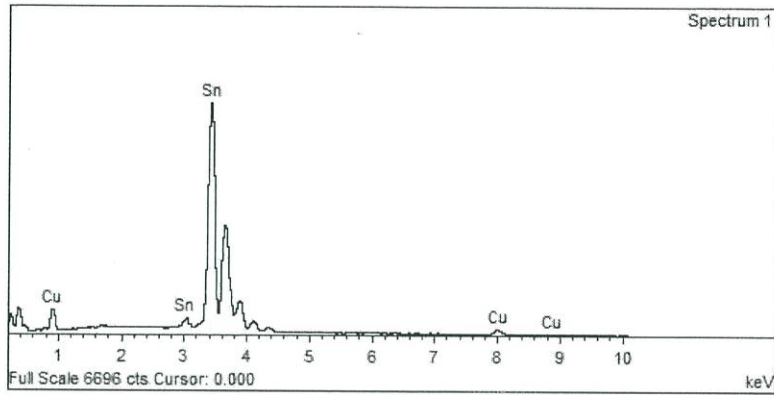
รูปที่ ค.7 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 94.5Sn-1.5Cu-4Sb และสเปกตรัมจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง EDS (ต่อ)

ตารางที่ ค.7 เปอร์เซนต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรี

Points	Element (at %)		
	Sn	Cu	Sb
Spectrum 1	58.93	40.72	0.35
Spectrum 2	98.52	-	1.48
Spectrum 3	94.26	3.69	2.05



รูปที่ ค.7 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 94.5Sn-1.5Cu-4Sb และสเปกตรัมจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง EDS (ต่อ)

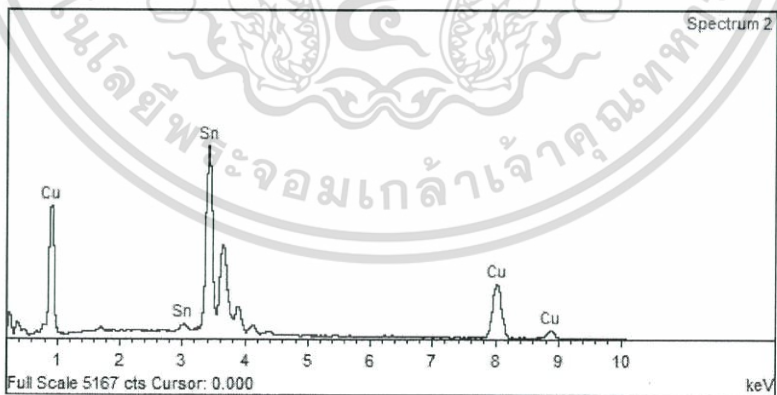
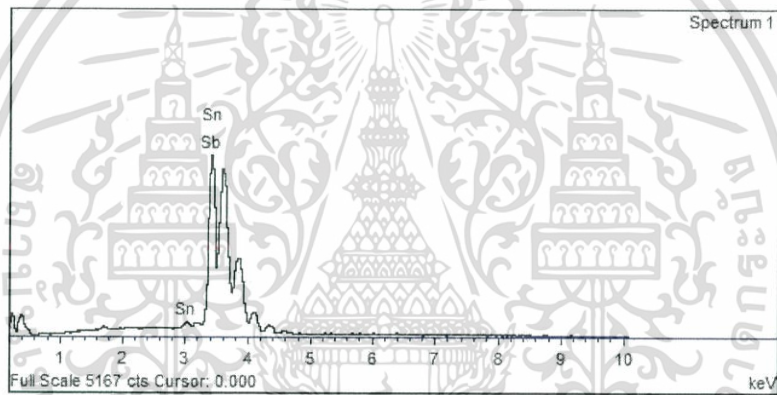
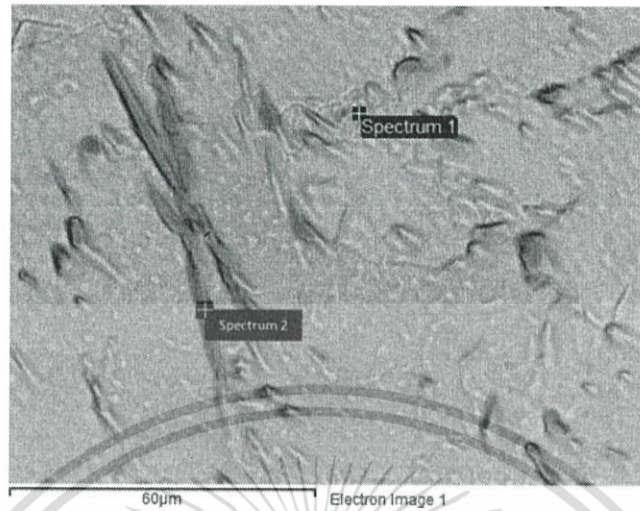


รูปที่ ค.7 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 94.5Sn+1.5Cu-4Sb และสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง EDS (ต่อ)

ตารางที่ ค.7 เปอร์เซนต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรี(ต่อ)

Points	Element (at %)		
	Sn	Cu	Sb
Spectrum 1	59.28	-	40.72
Spectrum 2	54.98	45.02	-
Spectrum 3	93.34	6.66	-
Spectrum 4	57.01	42.85	0.14

8. โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 93Sn-3Cu-4Sb

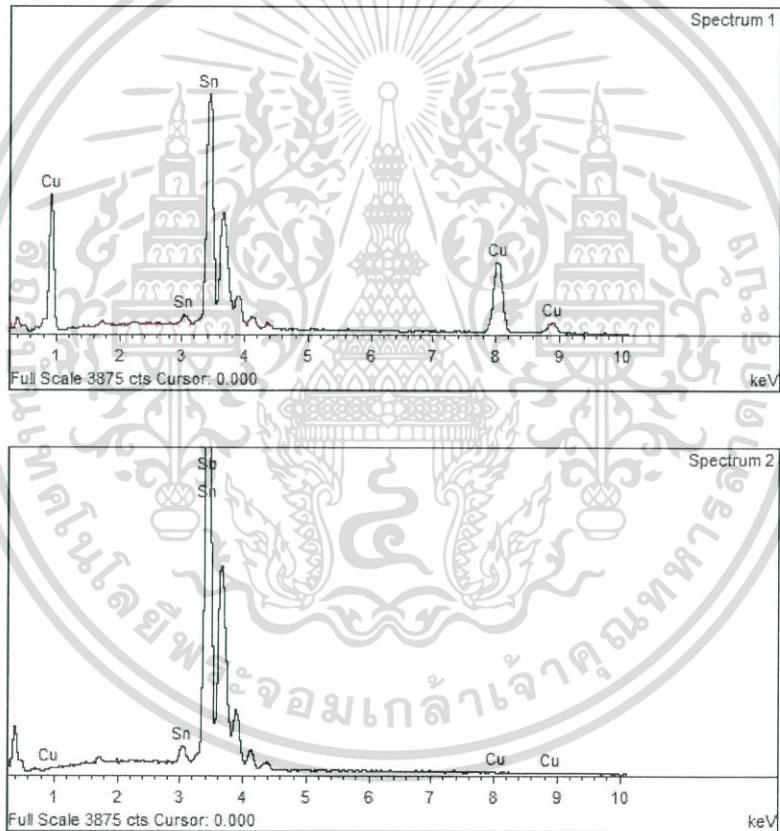
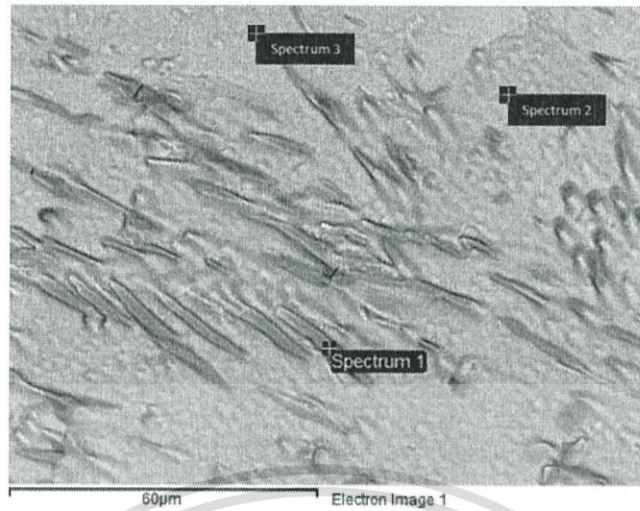


รูปที่ ค.8 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 93Sn-3Cu-4Sb และสเปกตรัมจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง EDS

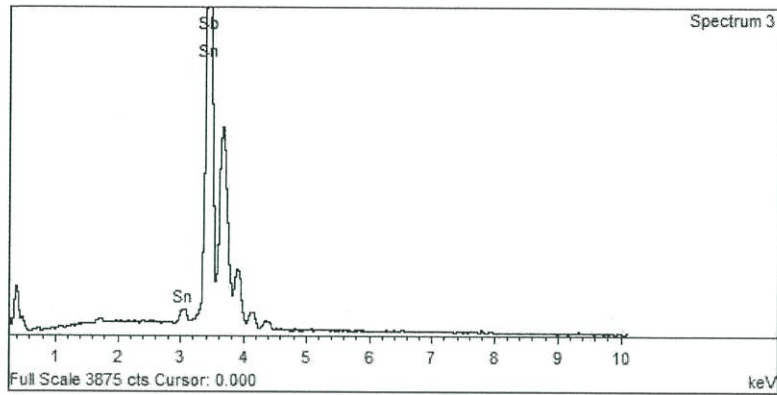
ตารางที่ ค.8 เปอร์เซนต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรี

Points	Element (at %)		
	Sn	Cu	Sb
Spectrum 1	58.06	-	41.94
Spectrum 2	49.33	50.67	-





รูปที่ ค.8 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 93Sn-3Cu-4Sb และสเปกตรัมจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง EDS (ต่อ)

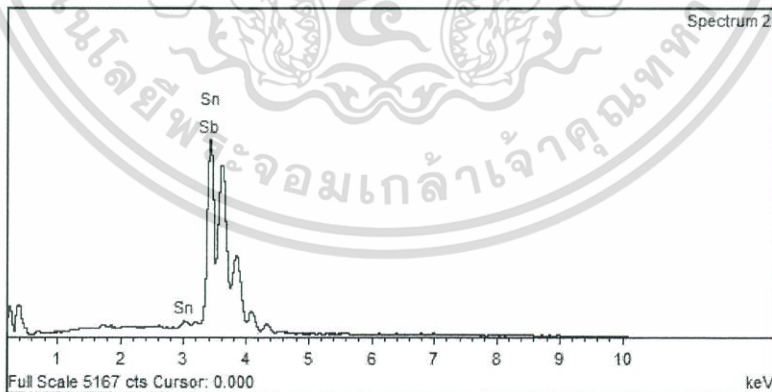
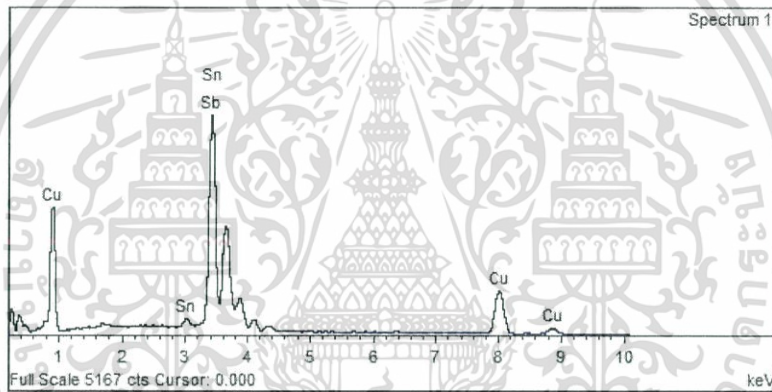
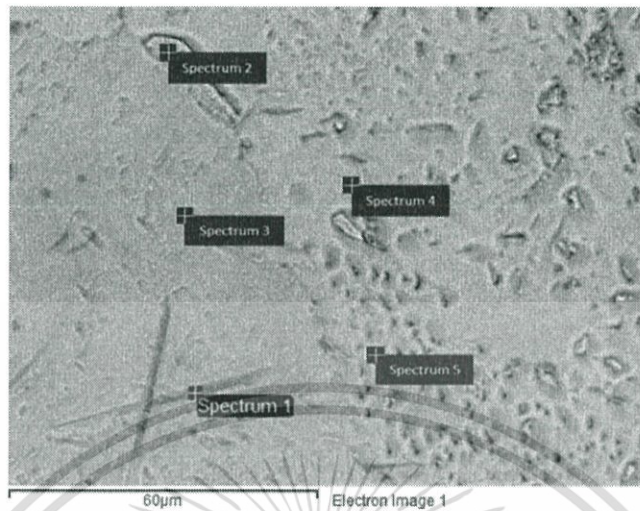


รูปที่ ค.8 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 93Sn-3Cu-4Sb และสเปกตรัมจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง EDS (ต่อ)

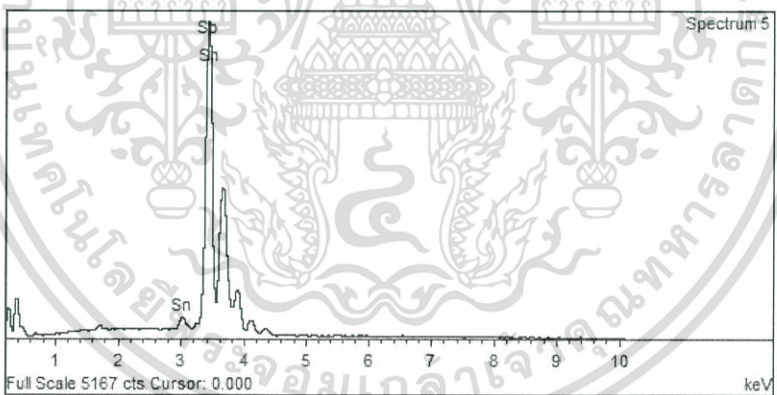
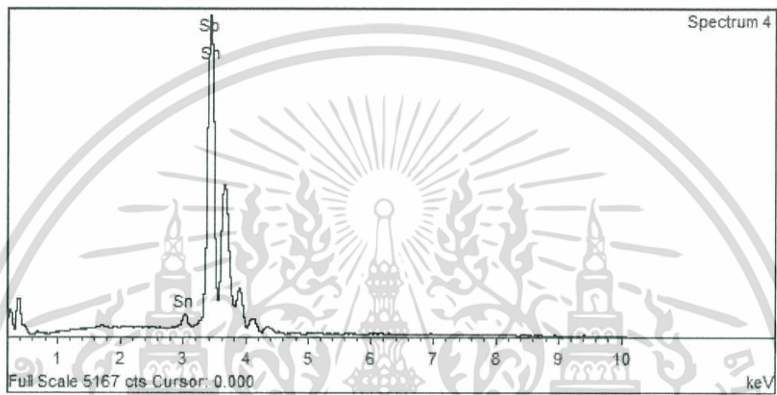
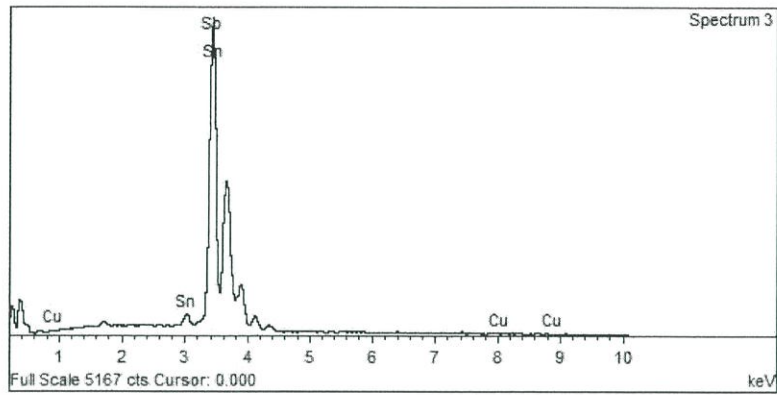
ตารางที่ ค.8 เปอร์เซนต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรี(ต่อ)

Points	Element (at %)		
	Sn	Cu	Sb
Spectrum 1	48.24	51.76	-
Spectrum 2	99.36	0.06	0.58
Spectrum 3	99.14	-	0.86

9. โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 92.5Sn-1.5Cu-6Sb



รูปที่ ค.9 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 92.5Sn-1.5Cu-6Sb และสเปกตรัมจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง EDS

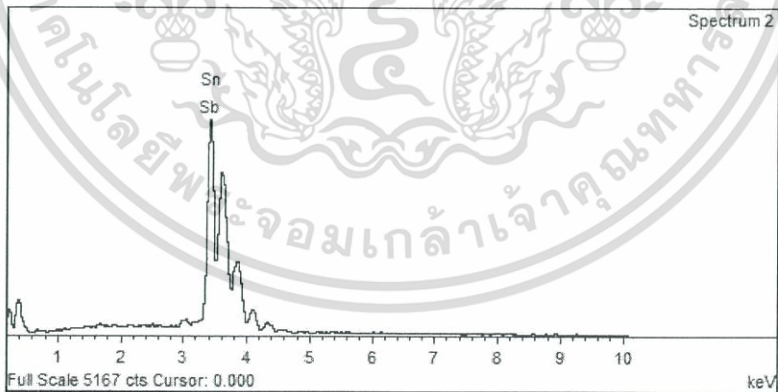
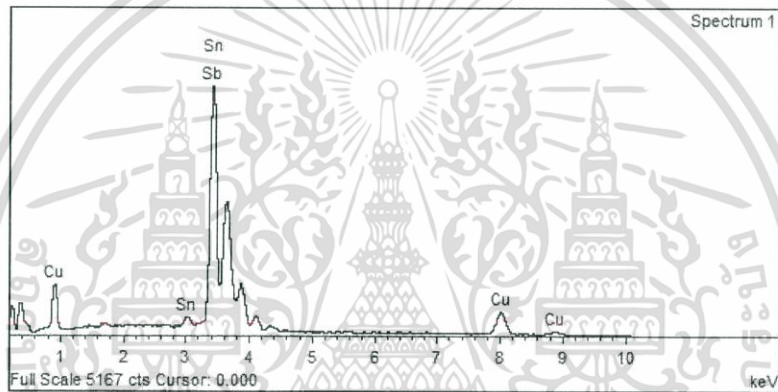
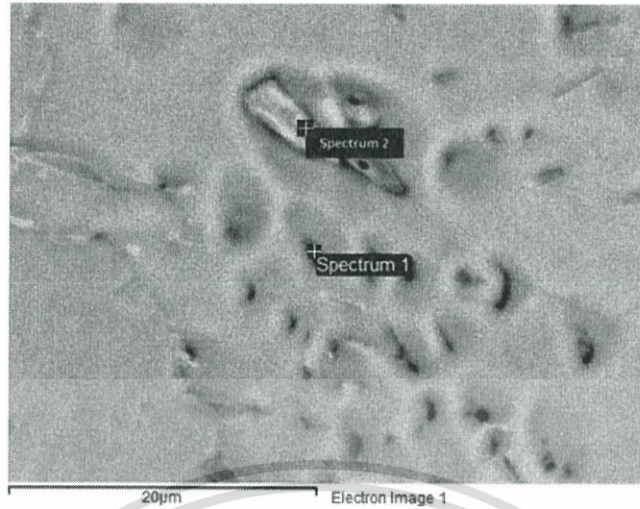


รูปที่ ค.9 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 92.5Sn-1.5Cu-6Sb และสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง EDS (ต่อ)

ตารางที่ ค.9 เปอร์เซนต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรี

Points	Element (at %)		
	Sn	Cu	Sb
Spectrum 1	56.24	40.94	2.81
Spectrum 2	60.42	-	39.58
Spectrum 3	95.66	0.06	4.29
Spectrum 4	98.54	-	1.46
Spectrum 5	98.39	-	1.61





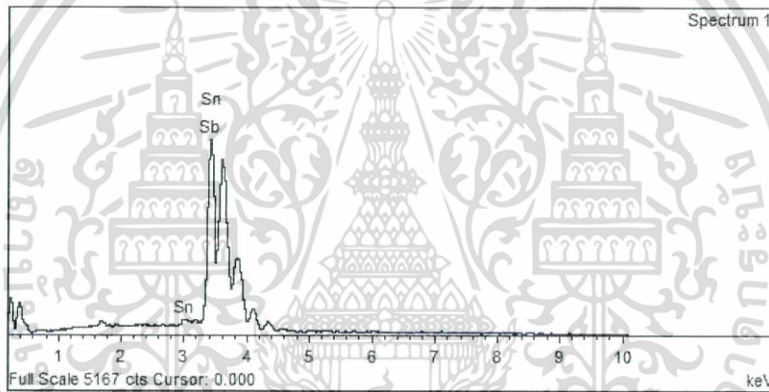
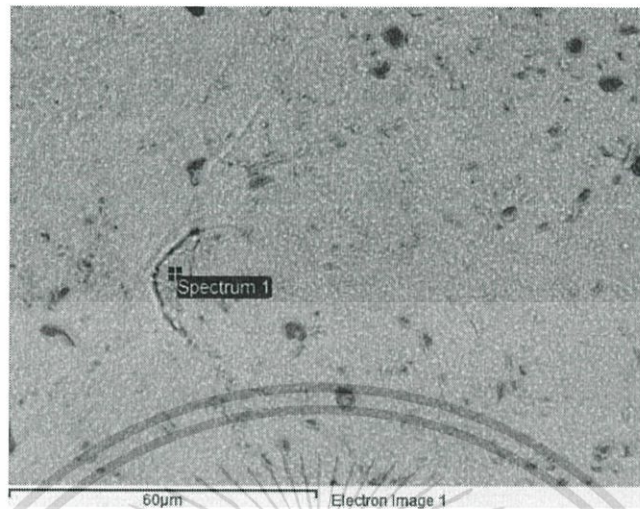
รูปที่ ค.9 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 92.5Sn-1.5Cu-6Sb และสเปกตรัมจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง EDS (ต่อ)

ตารางที่ ค.9 เปอร์เซนต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรี(ต่อ)

Points	Element (at %)		
	Sn	Cu	Sb
Spectrum 1	67.62	22.14	10.25
Spectrum 2	65.39	-	34.61



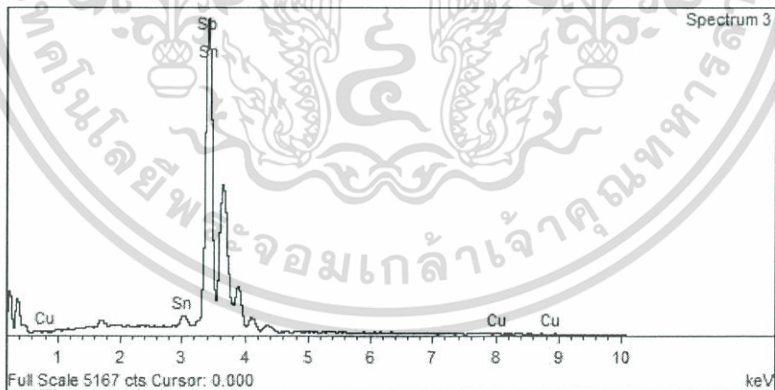
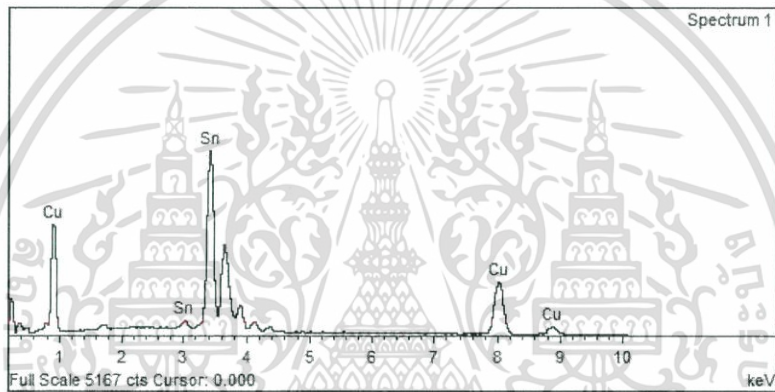
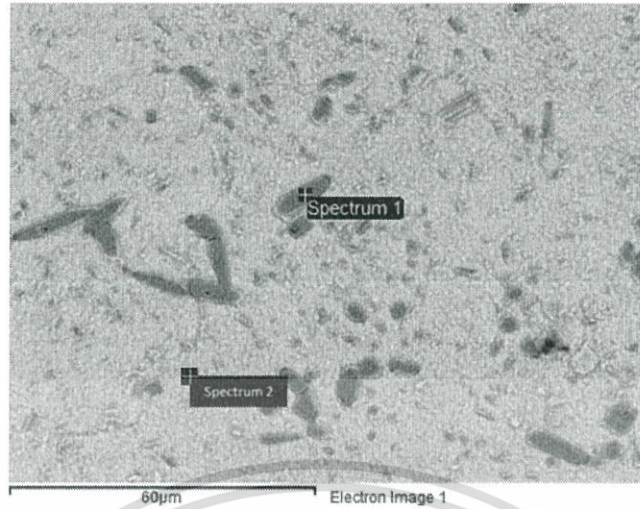
10. โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 97.75Sn-2.25Cu-2Sb



รูปที่ ค.10 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 97.75Sn-2.25Cu-2Sb และสเปกตรัมจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง EDS

ตารางที่ ค.10 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรี

Points	Element (at %)		
	Sn	Cu	Sb
Spectrum 1	59.90	-	40.10

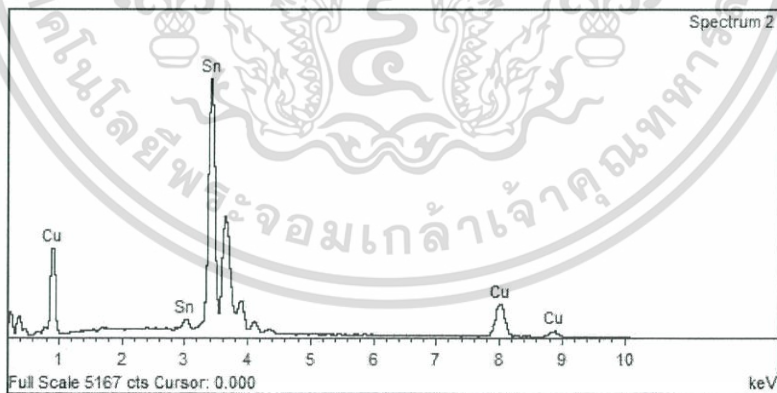
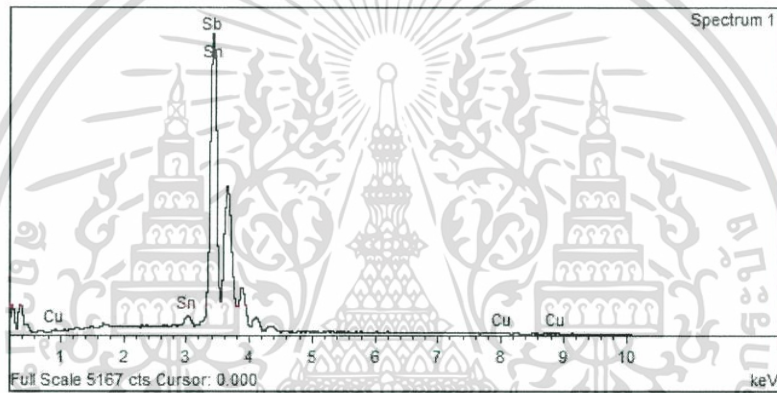
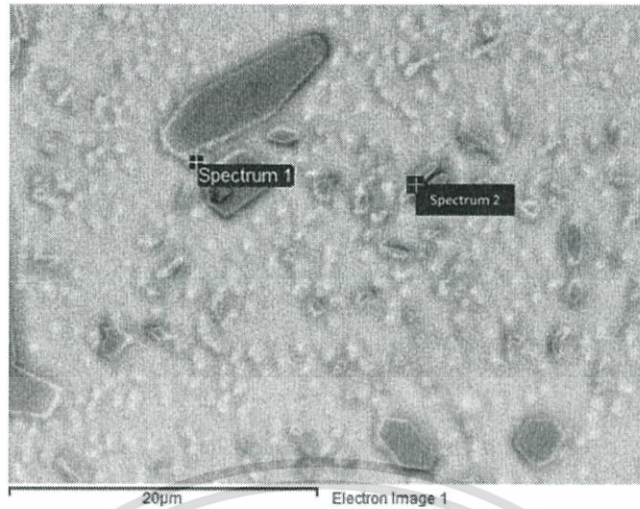


รูปที่ ค.10 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 97.75Sn-2.25Cu-2Sb และสเปกตรัมจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง EDS (ต่อ)

ตารางที่ ค.10 เปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรี (ต่อ)

Points	Element (at %)		
	Sn	Cu	Sb
Spectrum 1	48.95	51.05	-
Spectrum 2	99.18	0.20	0.62





รูปที่ ค.10 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 97.75Sn-2.25Cu-2Sb และสเปกตรัมจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง EDS (ต่อ)

ตารางที่ ค.10 เปอร์เซนต์อะตอมของธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรี (ต่อ)

Points	Element (at %)		
	Sn	Cu	Sb
Spectrum 1	99.32	0.5	0.18
Spectrum 2	67.87	-	32.13





ภาคผนวก ง.
การทดสอบความแข็ง ด้วยวิธี Micro Vickers Hardness Test

ตารางที่ ง.1 ผลการทดสอบความแข็งของโลหะบัดกรีที่ใช้ในการศึกษา

ชั้นงาน	ชนิดโลหะบัดกรี	HV (ทำการทดสอบ 10 ครั้งต่อชั้นงาน)										เฉลี่ย
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	Pure Sn	7.2	7.1	6.6	6.8	7.1	6.5	6.7	6.6	6.7	6.6	6.79
2	92Sn-8Sb	21	18.4	19.2	19.9	20.3	18.5	19.2	20.4	19.8	18.7	19.54
3	97Sn-3Cu	12.8	11.8	12.1	12.5	11.4	12.7	13.2	13.6	13	12.8	12.59
4	98.5Sn-1.5Cu	11.2	12.4	11.8	12.3	12	12.6	12.4	12.3	11.2	11.7	11.99
5	97.33Sn-2.67Sb	18.5	17.4	16.4	17.1	16.4	16.6	16.9	16.2	16.2	14.4	16.61
6	89Sn-3Cu-8Sb	21.1	20.6	20.8	21.7	20.6	22.2	21.5	22.3	20.8	21	21.26
7	90.5Sn-1.5Cu-8Sb	24.5	24.2	25	23.6	24.6	22.4	24.1	23.3	23.7	25.6	24.10
8	94.5Sn-1.5Cu-4Sb	19.3	19.1	18.5	18.5	19.5	17.4	18.7	17.6	19.4	17.3	18.53
9	93Sn-3Cu-4Sb	20.6	20.5	23.3	22.4	20.8	19.7	19.8	19.8	19.3	19.8	20.60
10	92.5Sn-1.5Cu-6Sb	22.5	21.3	21.4	21.1	21.2	20.9	21.2	22.8	22.6	21.7	21.67
11	95.75Sn-2.25Cu-2Sb	16.8	18.4	16.8	17.2	18.3	16.6	17.1	18.8	16.3	16.4	17.27

ตารางที่ ง.2 ผลการทดสอบความแข็งของโลหะบัดกรีที่ใช้ในการยืนยันสมการทางคณิตศาสตร์

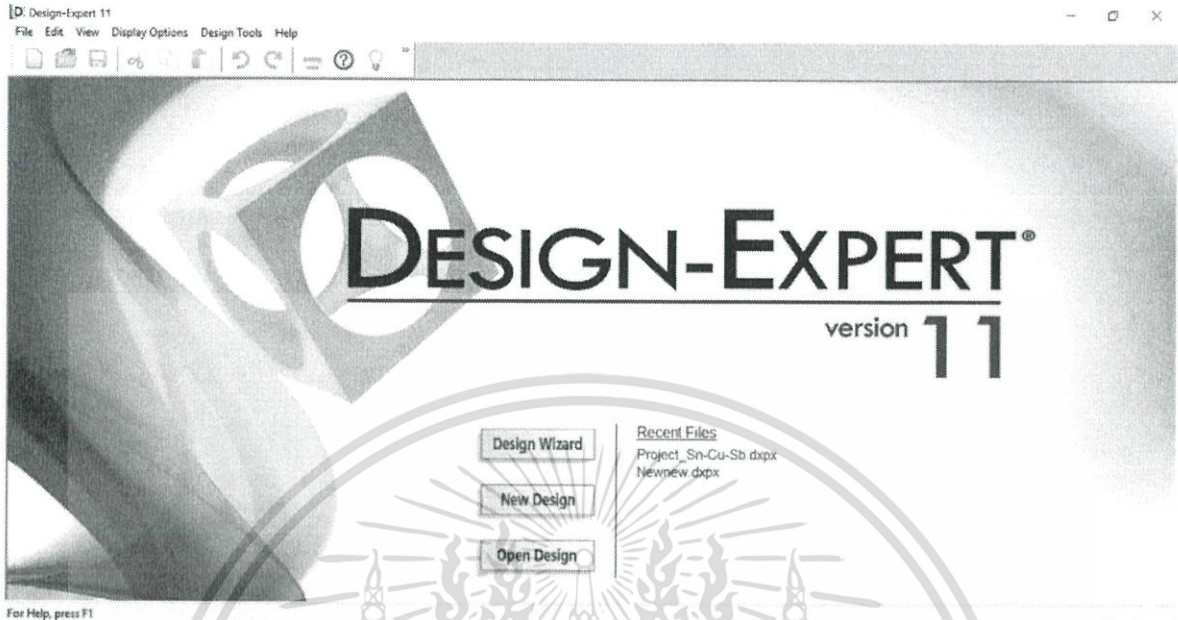
ชั้นงาน	ชนิดโลหะบัดกรี	HV (ทำการทดสอบ 10 ครั้งต่อชั้นงาน)										เฉลี่ย
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	90Sn-2Cu-8Sb	24.8	25.5	25.2	26	25.7	26.1	26.3	25.6	24.9	24.7	25.48
2	92Sn-1Cu-7Sb	23.7	24.2	24.6	25.3	25.4	24.8	25.1	25.2	24.9	24.4	24.76
3	93.75Sn-1Cu-5.25Sb	19.7	20.7	21.6	21.1	20.9	21.3	20.6	21.5	21.1	21.4	20.99
4	95Sn-2Cu-3Sb	19.6	19.1	19.6	20.3	19.8	21.2	21.3	19.2	18.2	19.1	19.74
5	96.5Sn-2Cu-1.5Sb	17.2	16.4	16.8	16.9	16.5	16	17.1	16.8	16.5	16.7	16.69
6	98Sn-1Cu-1Sb	14.1	13.6	15.2	14.4	14.3	13.3	15.2	14.2	13.8	13.6	14.17



ภาคผนวก จ.

การวิเคราะห์ผลการทดสอบค่าความแข็งด้วยโปรแกรม Design Expert V.11

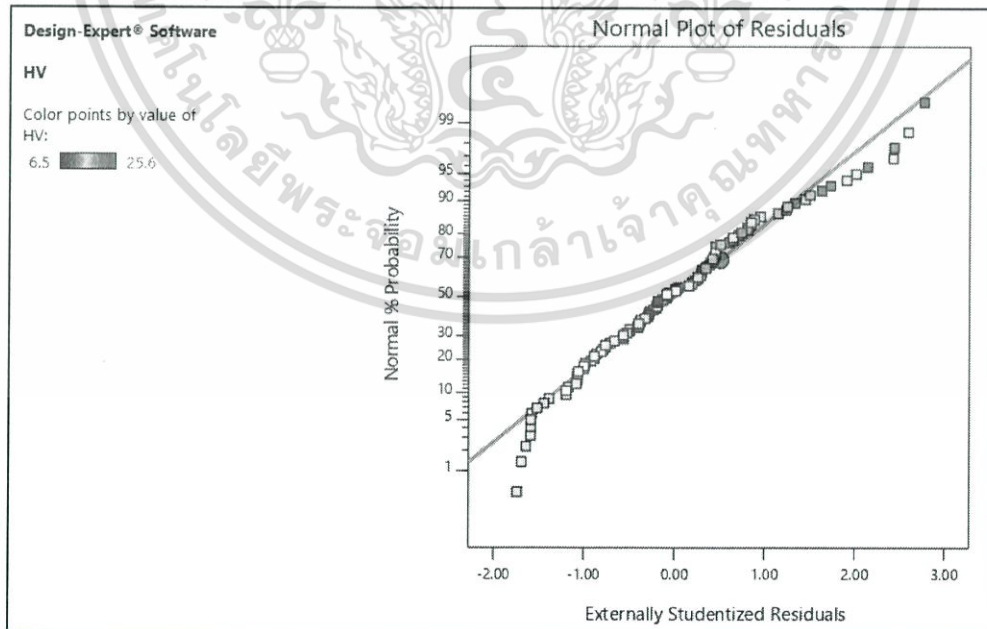
1. โปรแกรม Design-Expert



รูปที่ จ.1 แสดงลักษณะของโปรแกรม Design-Expert

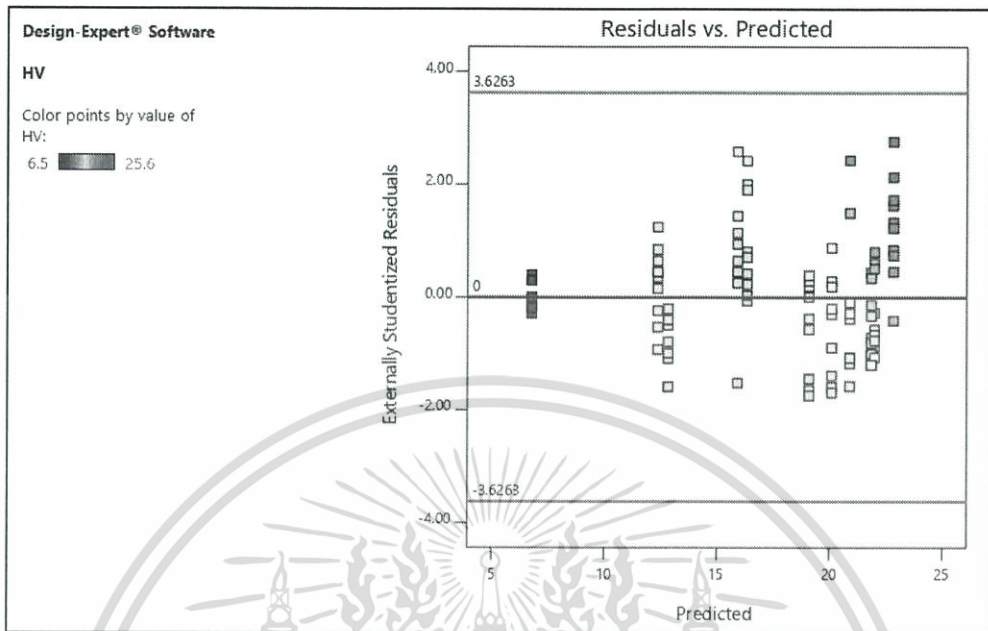
2. การวิเคราะห์ Diagnostics

2.1 Normal Plot of Residuals



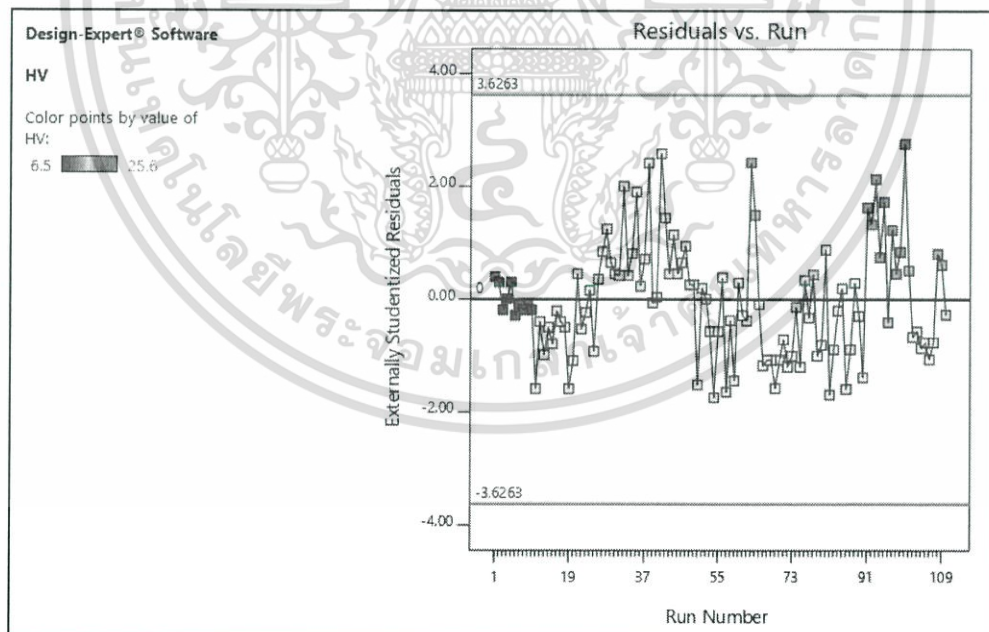
รูปที่ จ.2 การวิเคราะห์ Normal Plot of Residuals ของสมการ Special Quartic (Hardness)

2.2 Residuals vs. Predicted



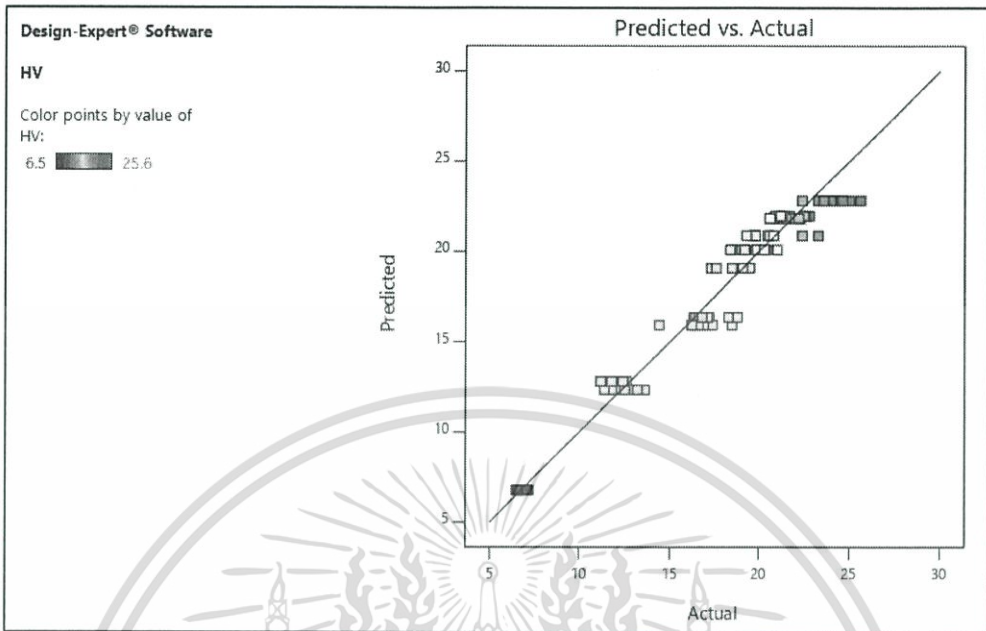
รูปที่ จ.3 การวิเคราะห์ Residuals vs. Predicted ของสมการ Special Quartic (Hardness)

3. Residuals vs. Run



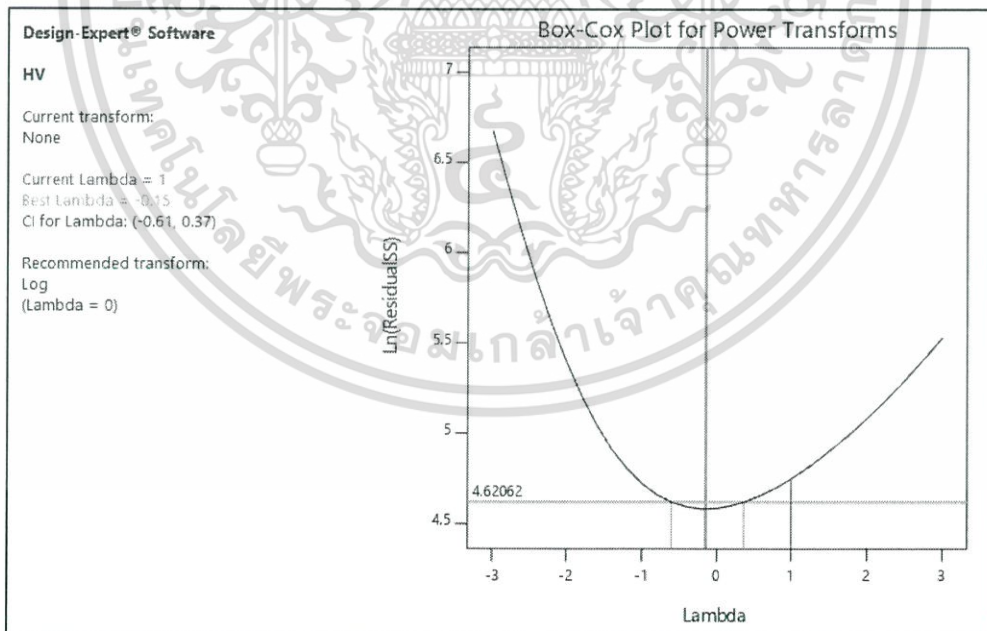
รูปที่ จ.4 การวิเคราะห์ Residuals vs. Run ของสมการ Special Quartic (Hardness)

4. Predicted vs. Actual



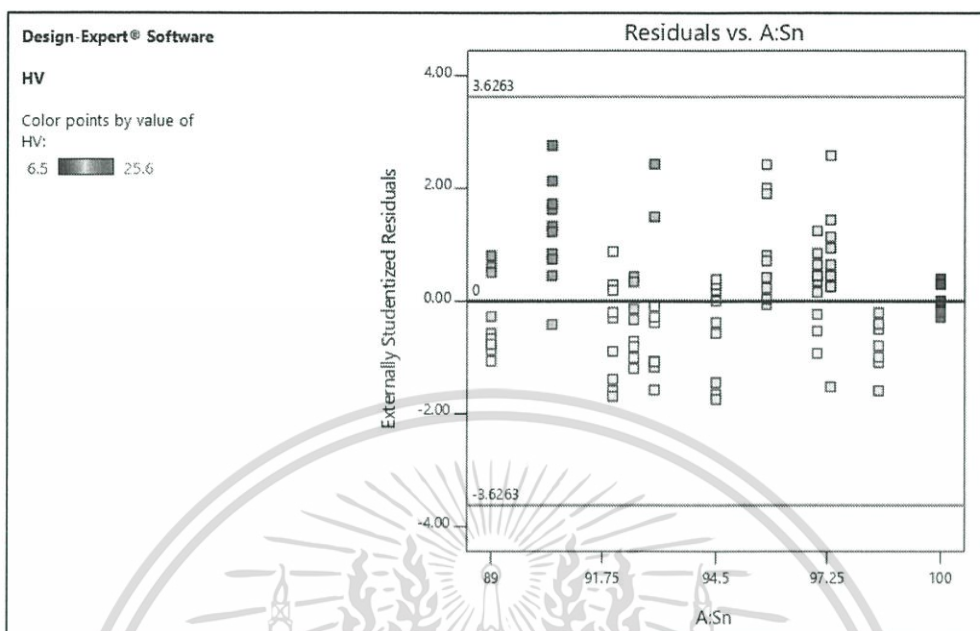
รูปที่ 4.5 การวิเคราะห์ Predicted & Actual ของสมการ Special Quartic (Hardness)

5. Box-Cox Plot for Power Transforms



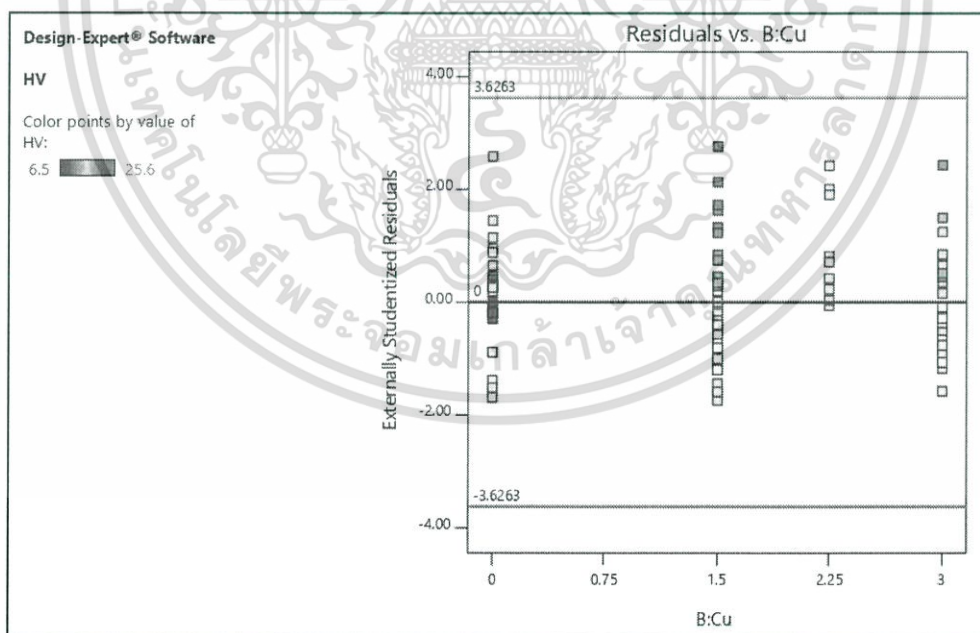
รูปที่ 4.6 การวิเคราะห์ Box-Cox Plot for Power Transforms ของสมการ Special quartic

6. Residuals vs. Factor (Sn)



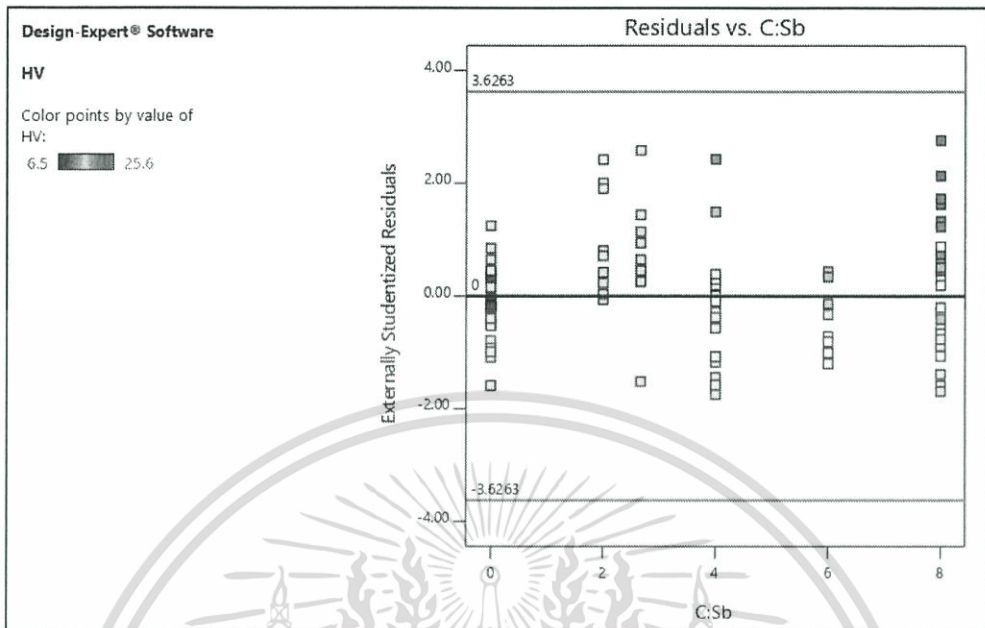
รูปที่ จ.7 การวิเคราะห์ Residuals vs Factor (Sn) ของสมการ Special Quartic (Hardness)

7. Residuals vs. Factor (Cu)



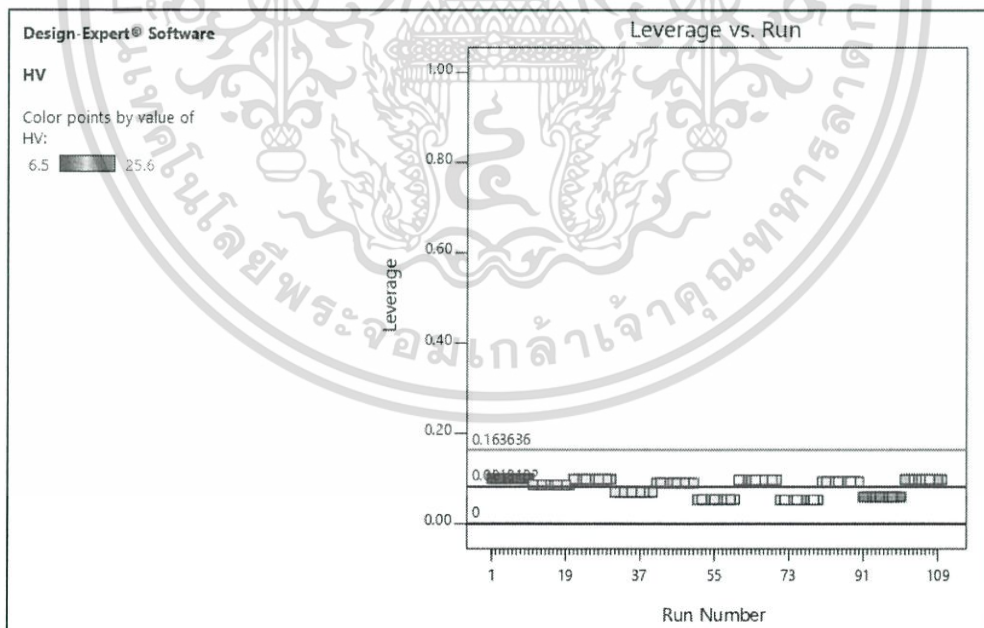
รูปที่ จ.8 การวิเคราะห์ Residuals vs Factor (Cu) ของสมการ Special Quartic (Hardness)

8. Residuals vs. Factor (Sb)



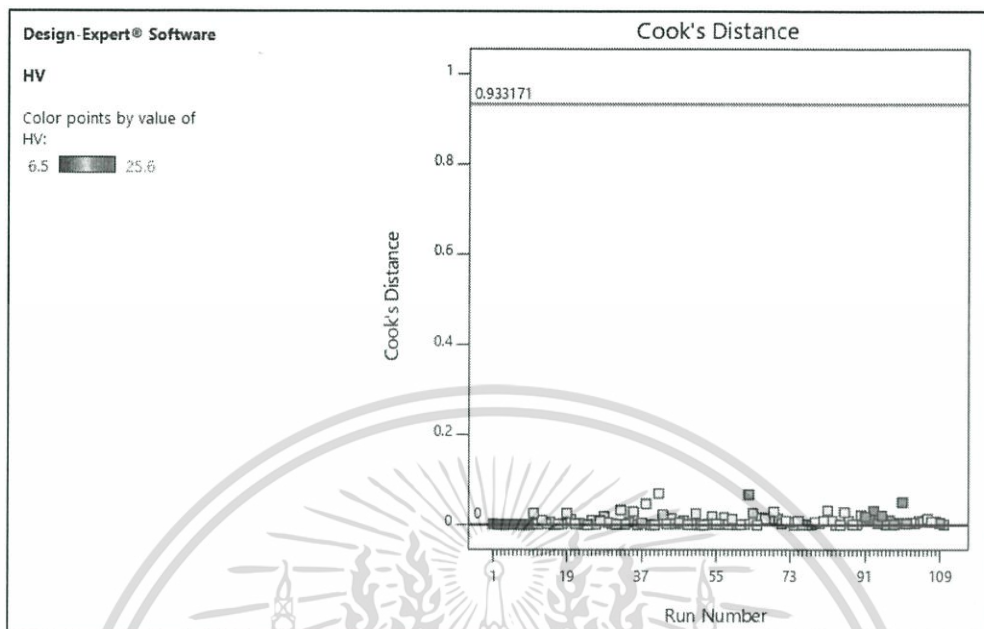
รูปที่ จ.9 การวิเคราะห์ Residuals vs Factor (Sb) ของสมการ Special Quartic (Hardness)

9. Leverage vs. Run



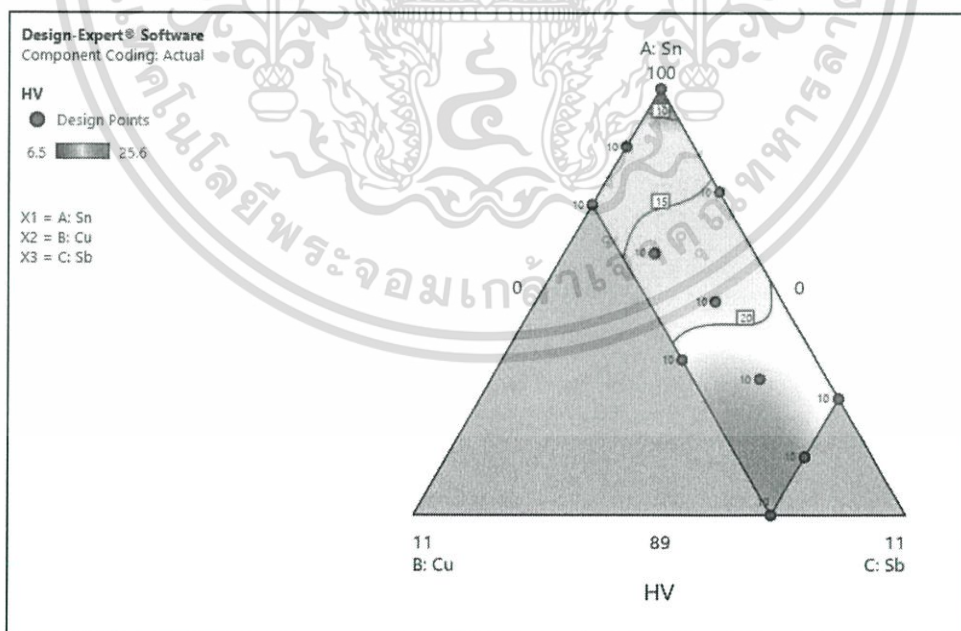
รูปที่ จ.10 การวิเคราะห์ Leverage vs Run ของสมการ Special Quartic (Hardness)

10. Cook 's Distance



รูปที่ จ.11 การวิเคราะห์ Cook 's Distance ของสมการ Special Quartic (Hardness)

3. การวิเคราะห์ Molet Graph



รูปที่ จ.12 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมกับความแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้