

การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของโลหะบัดกรี
ดีบุก-ทองแดง-พลวง

A STUDY ON PHYSICAL PROPERTIES OF
TIN-COPPER-ANTIMONY SOLDER ALLOYS

นายจิตวัต เทียมเมือง

MR. JITTAWAT THIEMMUANG

นายภูเบศ เลิศพรเจริญ

MR. PUBASE LERTPORNCHAROEN

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของโลหะบัดกรี
ดีบุก-ทองแดง-พลวง
A STUDY ON PHYSICAL PROPERTIES OF
TIN-COPPER-ANTIMONY SOLDER ALLOYS



T147920

นายจิตวัต เทียมเมือง

MR. JITTAWAT THIEMMUANG

นายภูเบศ เลิศพรเจริญ

MR. PUBASE LERTPORNCHAROEN

สาขา...
เลขทะเบียน 147920
ชั้นเดือนปี 16 ต.ค. 2560

b. 12864602
i.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

A STUDY ON PHYSICAL PROPERTIES OF
TIN-COPPER-ANTIMONY SOLDER ALLOYS

MR. JITTAWAT THIEMMUANG
MR. PUBASE LERTPORNCHAROEN

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 2015

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์ การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของโลหะบัดกรีดีบุก-ทองแดง-พลวง
A STUDY ON PHYSICAL PROPERTIES OF TIN-COPPER-
ANTIMONY SOLDER ALLOYS

นักศึกษา นายจิตวัต เทียมเมือง รหัสประจำตัว 55010162
 นายภูเบศ เลิศพรเจริญ รหัสประจำตัว 55010960

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์


(รศ.ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ)

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของโลหะบัดกรีดีบุก-ทองแดง-พลวง
นักศึกษา	นายจิตวัต เทียมเมือง นายภูเบศ เลิศพรเจริญ
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา	2558
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	รศ.ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการกระจายตัวและโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีดีบุก-ทองแดง-พลวงที่ประกอบไปด้วยส่วนผสมของดีบุก 89-100 wt%, ทองแดง 0-3 wt% และพลวง 0-8 wt% โดยจะใช้ส่วนผสมของโลหะบัดกรีดีบุก-ทองแดง-พลวงทั้งหมด 16 สูตรในการศึกษา ซึ่งส่วนผสมทั้งหมดนั้นได้มาจากหลักการออกแบบส่วนผสมที่ได้มีการศึกษาไว้ สำหรับความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดงนั้นถูกศึกษาในรูปแบบของ spread ratio, spread factor และ contact angle และใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เพื่อที่จะวัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะและใช้เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (Energy dispersive x-ray Spectrometer, EDX) ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโลหะหลังการบัดกรี พบว่า ความสามารถการกระจายตัวของโลหะบัดกรีนั้นมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณของดีบุกกับทองแดงเพิ่มขึ้น และความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อส่วนผสมของดีบุกหรือทองแดงมีค่าเพิ่มขึ้นและมีแนวโน้มลดลงเมื่อส่วนผสมของพลวงมีค่าเพิ่มขึ้น

Thesis Title	A Study on Physical Properties of tin-copper-antimony Solder Alloys
Student	Mr. Jittawat Thiemmuang Mr. Pubase Lertporncharoen
Degree	Bachelor of Engineering in Industrial Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year	2015
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Kannachai Kanlayasiri

ABSTRACT

The purpose of this project is to study on wettability and microstructure of Sn-Cu-Sb solders. The composition of Sn, Cu and Sb was ranged from 89-100, 0-3 and 0-8 wt%, respectively. Sixteen formulae of Sn-Cu-Sb alloys obtained from a mixture design were studied. Wettability of the alloys on copper substrate was measured in terms of spread factor and contact angle. Microstructure of the alloys and the interfacial layers were then investigated using scanning electron microscope and energy dispersive x-ray spectrometer. According to the experimental results, wettability of the alloys was decreased when copper was added and increased when antimony was increased. Thickness of intermetallic compound layers was increased when copper was added and decreased when antimony was added to the solder alloys.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือและให้คำแนะนำจากอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ ที่คอยชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหาข้อบกพร่องต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงาน ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ผู้จัดทำปริญญาานิพนธ์

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือในการทำารวิจัย ตลอดจนอำนวยความสะดวกให้แก่ผู้จัดทำปริญญาานิพนธ์จนสามารถทำปริญญาานิพนธ์ฉบับสำเร็จ

ขอขอบคุณนายกำธร สุขพิมาย นักวิจัยภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยให้คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือ และชี้แนะแนวทางในการปฏิบัติระหว่างการดำเนินงาน ตลอดจนอำนวยความสะดวกให้แก่ผู้จัดทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จ

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอขอบคุณครอบครัวและเพื่อน รวมไปถึงผู้เกี่ยวข้องอื่น ๆ ที่มีได้เอื้อนาม ที่คอยให้กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือ และคอยผลักดันคณะผู้จัดทำเสมอมา

นายจิตวัต เทียมเมือง

นายภูเบศ เลิศพรเจริญ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 การบัดกรี.....	3
2.1.1 โลหะพื้น.....	4
2.1.2 โลหะบัดกรี.....	5
2.1.3 นํ้ายาประสานหรือฟลักซ์.....	7
2.1.4 วิธีการบัดกรี.....	11
2.2 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว.....	13
2.2.1 คุณสมบัติเบื้องต้นในการพิจารณาเลือกใช้โลหะบัดกรีแบบไร้สารตะกั่ว.....	14
2.2.2 โลหะทดแทนสารตะกั่ว.....	15
2.2.3 แนวทางในการเลือกธาตุที่เป็นส่วนผสมที่เหมาะสมกับขบวนการผลิต.....	17
2.2.3.1 ธาตุเจือที่ใช้ผสมกับดีบุกเพื่อผลิตเป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว.....	17
2.2.3.2 สมบัติของธาตุเจือชนิดต่างๆ.....	18
2.3 ความสามารถในการกระจายตัว.....	19
2.3.1 วิธีทดสอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรี (Spread test method).....	19

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.1.1	ค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor).....	20
2.3.1.2	ค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio).....	20
2.3.2	การทดสอบค่ามุมสัมผัสหลังการบัดกรี (Contact angle method).....	21
2.3.3	Wetting balance method.....	24
2.3.4	ความสัมพันธ์ของ spread factor, Spread ratio และ Contact angle.....	26
2.3.4.1	ความสัมพันธ์ของ Spread ratio และ Contact angle.....	26
2.3.4.2	ความสัมพันธ์ของ Spread factor และ Contact angle.....	27
2.3.4.3	ความสัมพันธ์ของ Contact angle และ มิติของโลหะบัดกรีหลอมละลาย.....	27
2.4	แผนภูมิเฟสของโลหะบัดกรี.....	28
2.5	การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	30
2.5.1	กล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....	30
2.5.2	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	31
2.5.3	การวิเคราะห์ Energy Dispersive X-ray (EDX).....	33
2.6	Design Expert Software.....	35
2.7	การออกแบบส่วนผสม.....	38
บทที่ 3	การดำเนินงาน.....	40
3.1	การวางแผนการดำเนินงาน.....	40
3.2	การวิเคราะห์ความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรี.....	41
3.2.1	การเตรียมชิ้นงานทดสอบ.....	41
3.2.2	การเตรียมแผ่นทองแดง.....	44
3.2.3	วิธีการทดสอบหาค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรี.....	44
3.3	การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรี.....	46
3.3.1	การเตรียมชิ้นงานทดสอบ.....	46
3.3.1.1	การตัดชิ้นงานทดสอบ.....	46
3.3.1.2	การหล่อเรซิน.....	47
3.3.1.3	การขัดผิวชิ้นงานทดสอบ.....	48

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.2	ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมี.....	49
3.3.3	การวัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ	50
3.4	การวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยโปรแกรม Design Expert	51
บทที่ 4	ผลการทดลอง	57
4.1	การวิเคราะห์ค่าความสามารถในการกระจายตัวด้วยวิธี Spread factor	58
4.1.1	การวิเคราะห์ Fit Summary	58
4.1.1.1	Sequential Model Sum of Squares	58
4.1.1.2	Lack of Fit Tests.....	59
4.1.1.3	Model Summary Statistics	59
4.1.1.4	Summary	60
4.1.2	การวิเคราะห์ ANOVA.....	61
4.1.3	การวิเคราะห์ Diagnostics	62
4.1.3.1	Normal Plot of Residuals	62
4.1.3.2	Residuals vs. Predicted.....	63
4.1.3.3	Residuals vs. Run	64
4.1.3.4	Residuals vs. Actual	64
4.1.3.5	Box-Cox Plot for Power Transforms.....	65
4.1.3.6	Residuals vs. A: Sn (%).....	65
4.1.3.7	Residuals vs. B: Cu (%)	66
4.1.3.8	Residuals vs. C: Sb (%)	66
4.1.3.9	Cook's Distance	67
4.1.3.10	Leverage vs. Run	67
4.1.3.11	Summary report	68
4.1.4	การวิเคราะห์ Model Graph.....	69
4.2	การวิเคราะห์ค่าความสามารถในการกระจายตัวด้วยวิธี Contact angle	69
4.2.1	การวิเคราะห์ Fit Summary	69
4.2.1.1	Sequential Model Sum of Squares.....	69

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1.2 Lack of Fit Tests.....	70
4.2.1.3 Model Summary Statistics	71
4.2.1.4 Summary	72
4.2.2 การวิเคราะห์ ANOVA.....	72
4.2.3 การวิเคราะห์ Diagnostics	74
4.2.3.1 Normal Plot of Residuals	74
4.2.3.2 Residuals vs. Predicted.....	75
4.2.3.3 Residuals vs. Run	76
4.2.3.4 Predicted vs. Actual.....	76
4.2.3.5 Box-Cox Plot for Power Transforms.....	77
4.2.3.6 Residuals vs. A: Sn (%).....	77
4.2.3.7 Residuals vs. B: Cu (%)	78
4.2.3.8 Residuals vs. C: Sb (%)	78
4.2.3.9 Cook's Distance	79
4.2.3.10 Leverage vs. Run	79
4.2.3.11 Summary report	80
4.2.4 การวิเคราะห์ Model Graph.....	81
4.3 การวิเคราะห์ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ	81
4.3.1 การวิเคราะห์ Fit Summary	81
4.3.1.1 Sequential Model Sum of Squares.....	81
4.3.1.2 Lack of Fit Tests.....	82
4.3.1.3 Model Summary Statistics	83
4.3.1.4 Summary	84
4.3.2 การวิเคราะห์ค่า ANOVA	84
4.3.3 การวิเคราะห์ Diagnostics	86
4.3.3.1 Normal Plot of Residuals	86
4.3.3.2 Residuals vs. Predicted.....	87
4.3.3.3 Residuals vs. Run	87

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.3.4 Predicted vs. Actual	88
4.3.3.5 Box-Cox Plot for Power Transforms.....	88
4.3.3.6 Residuals vs. A: Sn (%).....	89
4.3.3.7 Residuals vs. B: Cu (%)	89
4.3.3.8 Residuals vs. C: Sb (%)	90
4.3.3.9 Cook's Distance	90
4.3.3.10 Leverage vs. Run	91
4.3.3.11 Summary report	92
4.3.4 การวิเคราะห์ Model Graph.....	93
4.4 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ .	93
4.4.1 ส่วนผสมที่ 1 (92Sn-8Sb).....	93
4.4.2 ส่วนผสมที่ 2 (97Sn-3Cu)	95
4.4.3 ส่วนผสมที่ 3 (98.5Sn-1.5Cu).....	98
4.4.4 ส่วนผสมที่ 4 (97Sn-3Cu)	100
4.4.5 ส่วนผสมที่ 5 (100Sn)	101
4.4.6 ส่วนผสมที่ 6 (89Sn-3Cu-8Sb)	103
4.4.7 ส่วนผสมที่ 7 (92Sn-8Sb).....	105
4.4.8 ส่วนผสมที่ 8 (90.5Sn-1.5Cu-8Sb).....	106
4.4.9 ส่วนผสมที่ 9 (97.33Sn-2.67Sb).....	108
4.4.10 ส่วนผสมที่ 10 (94.5Sn-1.5Cu-4Sb)	110
4.4.11 ส่วนผสมที่ 11 (93Sn-3Cu-4Sb).....	112
4.4.12 ส่วนผสมที่ 12 (93Sn-3Cu-4Sb).....	114
4.4.13 ส่วนผสมที่ 13 (92.5Sn-1.5Cu-6Sb)	116
4.4.14 ส่วนผสมที่ 14 (89Sn-3Cu-8Sb).....	118
4.4.15 ส่วนผสมที่ 15 (95.75Sn-2.25Cu-2Sb).....	120
4.4.16 ส่วนผสมที่ 16 (100Sn).....	122

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5	
สรุปผลการดำเนินงาน	125
5.1 สรุปผลการวิเคราะห์ความสามารถการกระจายตัวของโลหะบัดกรี	125
5.1.1 ผลการวิเคราะห์ความสามารถการกระจายตัวด้วยวิธี Spread test method	125
5.1.2 ผลการวิเคราะห์ความสามารถการกระจายตัวด้วยวิธี Contact angle method	125
5.2 สรุปผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของโลหะบัดกรี	125
5.2.1 ผลการวิเคราะห์ความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะ	125
5.2.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี	125
5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการศึกษาในอนาคต	126
เอกสารอ้างอิง.....	127

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ชนิดของโลหะต่อความยากง่ายในการบัดกรี.....	5
ตารางที่ 2.2 โลหะที่ทำการบัดกรีและน้ำยาประสานที่ใช้	9
ตารางที่ 2.3 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำกว่า 180 องศาเซลเซียส	15
ตารางที่ 2.4 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 180 ถึง 200 องศาเซลเซียส..	16
ตารางที่ 2.5 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 200 ถึง 230 องศาเซลเซียส..	16
ตารางที่ 2.6 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวมากกว่า 230 องศาเซลเซียส.....	16
ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบของโลหะบัดกรีชนิดต่างๆที่สามารถนำมาใช้ทดแทนตะกั่วบัดกรี	17
ตารางที่ 2.8 ลำดับเวลาในการดำเนินการทดสอบ	22
ตารางที่ 2.9 Sequential Model Sum of Squares	36
ตารางที่ 2.10 Lack of Fit Tests.....	37
ตารางที่ 2.11 Model Summary Statistics	38
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมของโลหะบัดกรีที่ใช้ในการทดสอบ	41
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบหาค่า Spread factor, Contact angle และความหนาของชั้นสารประกอบ เชิงโลหะ	57
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ Sequential Model Sum of Squares ของ Spread factor.....	58
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ Lack of Fit Tests ของ Spread factor.....	59
ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ Model Summary Statistics ของ Spread factor	60
ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ Summary ของ Spread factor	60
ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของ Spread factor	61
ตารางที่ 4.7 ค่าสถิติของสมการทำนายของ Spread factor	61
ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์หาสมการทำนายค่า Spread factor	62
ตารางที่ 4.9 ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์สมการทำนาย	68
ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ Sequential Model Sum of Squares ของ Contact angle.....	70
ตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ Lack of Fit Tests ของ Contact angle.....	71
ตารางที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ Model Summary Statistics ของ Contact angle	71
ตารางที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ Summary ของ Contact angle	72
ตารางที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของ Contact angle	73
ตารางที่ 4.15 ค่าสถิติของสมการทำนายของ Contact angle	73

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์หาสมการทำนายค่า Contact angle	74
ตารางที่ 4.17 ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์สมการทำนาย	80
ตารางที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์ Sequential Model Sum of Squares ของความหนาชั้นสารประกอบ เชิงโลหะ.....	82
ตารางที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์ Lack of Fit Tests ของความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะ	83
ตารางที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์ Model Summary Statistics ของความหนาชั้นสารประกอบ เชิงโลหะ.....	83
ตารางที่ 4.21 ผลการวิเคราะห์ Summary ของความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะ	84
ตารางที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะ	85
ตารางที่ 4.23 ค่าสถิติของสมการทำนายความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะ.....	85
ตารางที่ 4.24 ผลการวิเคราะห์หาสมการทำนายค่าความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะ	86
ตารางที่ 4.25 ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์สมการทำนาย	92
ตารางที่ 4.26 เพอร์เซ็นต์อะตอมธาตุที่เกิดขึ้นในชั้นสารประกอบเชิงโลหะของส่วนผสมที่ 1	95
ตารางที่ 4.27 เพอร์เซ็นต์อะตอมธาตุที่เกิดขึ้นในชั้นสารประกอบเชิงโลหะของส่วนผสมที่ 2.....	97
ตารางที่ 4.28 เพอร์เซ็นต์อะตอมธาตุที่เกิดขึ้นในชั้นสารประกอบเชิงโลหะของส่วนผสมที่ 3.....	99
ตารางที่ 4.29 เพอร์เซ็นต์อะตอมธาตุที่เกิดขึ้นในชั้นสารประกอบเชิงโลหะของส่วนผสมที่ 4.....	101
ตารางที่ 4.30 เพอร์เซ็นต์อะตอมธาตุที่เกิดขึ้นในชั้นสารประกอบเชิงโลหะของส่วนผสมที่ 5.....	103
ตารางที่ 4.31 เพอร์เซ็นต์อะตอมธาตุที่เกิดขึ้นในชั้นสารประกอบเชิงโลหะของส่วนผสมที่ 6.....	104
ตารางที่ 4.32 เพอร์เซ็นต์อะตอมธาตุที่เกิดขึ้นในชั้นสารประกอบเชิงโลหะของส่วนผสมที่ 7.....	106
ตารางที่ 4.33 เพอร์เซ็นต์อะตอมธาตุที่เกิดขึ้นในชั้นสารประกอบเชิงโลหะของส่วนผสมที่ 8.....	108
ตารางที่ 4.34 เพอร์เซ็นต์อะตอมธาตุที่เกิดขึ้นในชั้นสารประกอบเชิงโลหะของส่วนผสมที่ 9.....	110
ตารางที่ 4.35 เพอร์เซ็นต์อะตอมธาตุที่เกิดขึ้นในชั้นสารประกอบเชิงโลหะของส่วนผสมที่ 10.....	112
ตารางที่ 4.36 เพอร์เซ็นต์อะตอมธาตุที่เกิดขึ้นในชั้นสารประกอบเชิงโลหะของส่วนผสมที่ 11.....	114
ตารางที่ 4.37 เพอร์เซ็นต์อะตอมธาตุที่เกิดขึ้นในชั้นสารประกอบเชิงโลหะของส่วนผสมที่ 12.....	116
ตารางที่ 4.38 เพอร์เซ็นต์อะตอมธาตุที่เกิดขึ้นในชั้นสารประกอบเชิงโลหะของส่วนผสมที่ 13.....	118
ตารางที่ 4.39 เพอร์เซ็นต์อะตอมธาตุที่เกิดขึ้นในชั้นสารประกอบเชิงโลหะของส่วนผสมที่ 14.....	120
ตารางที่ 4.40 เพอร์เซ็นต์อะตอมธาตุที่เกิดขึ้นในชั้นสารประกอบเชิงโลหะของส่วนผสมที่ 15.....	122
ตารางที่ 4.41 เพอร์เซ็นต์อะตอมธาตุที่เกิดขึ้นในชั้นสารประกอบเชิงโลหะของส่วนผสมที่ 16.....	124

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 ตัวอย่างของรอยต่อที่ใช้ทางกล	4
รูปที่ 2.2 การเกิดการประสานกันระหว่างชิ้นงานโลหะโดยใช้การบัดกรี.....	6
รูปที่ 2.3 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมที่ประกอบด้วยตะกั่วและดีบุก	6
รูปที่ 2.4 การแผ่กระจายของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะพื้นของแผ่นทองแดงที่ให้อุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ..	10
รูปที่ 2.5 การทำงานของฟลักซ์.....	11
รูปที่ 2.6 การบัดกรีแบบใช้มือ	12
รูปที่ 2.7 การบัดกรีแบบคลื่น.....	12
รูปที่ 2.8 การบัดกรีแบบรีโฟลว์	13
รูปที่ 2.9 ความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรี.....	20
รูปที่ 2.10 Contact angle method	21
รูปที่ 2.11 ลำดับขั้นตอนในช่วงเวลาทดสอบ	22
รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ของมุมสัมผัสที่มีต่อโลหะบัดกรี พื้นผิวโลหะและบรรยากาศโดยรอบ	23
รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ของมุมสัมผัสที่มุมใดๆ กับการกระจายตัวของโลหะบัดกรี.....	23
รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างรัศมี ความสูง และมุมสัมผัสของโลหะบัดกรี	24
รูปที่ 2.15 Wetting balance method	25
รูปที่ 2.16 Wetting curve ที่ได้จากเครื่องทดสอบ	26
รูปที่ 2.17 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุก-ทองแดง	28
รูปที่ 2.18 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุก-พลวง.....	29
รูปที่ 2.19 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมทองแดง-พลวง.....	29
รูปที่ 2.20 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....	31
รูปที่ 2.21 การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับตัวอย่างที่ระดับชั้นความลึกต่างๆ.....	32
รูปที่ 2.22 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	33
รูปที่ 2.23 การเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่ระดับพลังงานของชั้นวงโคจรต่างๆ	34
รูปที่ 2.24 การกระตุ้นให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวโดยใช้ลำอิเล็กตรอน	34
รูปที่ 2.25 ความสัมพันธ์ของส่วนผสมในแผนการทดลองที่มีส่วนผสม 3 ชนิด.....	39
รูปที่ 3.1 เบ้าหลอมกราไฟต์.....	42
รูปที่ 3.2 แม่พิมพ์โลหะที่ใช้ในการหล่อ.....	42
รูปที่ 3.3 ชิ้นงานที่ได้จากการหล่อด้วยแม่พิมพ์โลหะ.....	43

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.4 เครื่องชั่งน้ำหนักยี่ห้อ Sartorius รุ่น BSA224S-CW.....	43
รูปที่ 3.5 แผ่นทองแดงบริสุทธิ์ 99.99% ขนาด 30x30x30 มิลลิเมตร	44
รูปที่ 3.6 แช่แผ่นทองแดงทิ้งไว้ใน Isopropyl alcohol.....	44
รูปที่ 3.7 ฟลักซ์ชนิด AMR2020.....	45
รูปที่ 3.8 ชิ้นงานทดสอบที่วางอยู่บนแผ่นทองแดง	45
รูปที่ 3.9 เตารีดฟลูว์ยี่ห้อ LPKF รุ่น ProtoFlow E	46
รูปที่ 3.10 ชิ้นงานทดสอบภายหลังการบัดกรี	46
รูปที่ 3.11 เครื่องตัดแบบแรงโน้มถ่วง	47
รูปที่ 3.12 แม่แบบที่ใช้ในการหล่อเรซิน	47
รูปที่ 3.13 ชิ้นงานระหว่างรอเรซินแข็งตัว	48
รูปที่ 3.14 ด้วยเครื่องขัดยี่ห้อ Struers LoboPol-1	49
รูปที่ 3.15 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope)	49
รูปที่ 3.16 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope).....	50
รูปที่ 3.17 การหาพื้นที่ของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะ.....	51
รูปที่ 3.18 บันทึกผลการทดลองลงในโปรแกรม	52
รูปที่ 3.19 การเลือกรูปแบบของฟังก์ชัน.....	53
รูปที่ 3.20 วิเคราะห์ด้วยวิธี Sequential Model Sum of Squares.....	53
รูปที่ 3.21 วิเคราะห์ด้วยวิธี Lack of Fit Tests และ Model Summary Statistics	54
รูปที่ 3.22 เลือกรูปแบบสมการเพื่อใช้ในการสร้างสมการทำนาย	54
รูปที่ 3.23 การวิเคราะห์ ANOVA ระหว่างค่าจากการทดลองกับค่าจากสมการทำนาย	55
รูปที่ 3.24 ตัวอย่างการแสดงผลกราฟในแถบ Diagnostics.....	55
รูปที่ 3.25 จำลองแผนภาพ Contour ในแถบ Model Graphs	56
รูปที่ 4.1 กราฟ Normal Plot of Residuals ของ Spread factor.....	63
รูปที่ 4.2 กราฟ Residuals vs Predicted ของ Spread factor	63
รูปที่ 4.3 กราฟ Residuals vs Run ของ Spread factor.....	64
รูปที่ 4.4 กราฟ Predicted vs Actual ของ Spread factor.....	64
รูปที่ 4.5 กราฟ Box-Cox Plot for Power Transforms ของ Spread factor	65
รูปที่ 4.6 กราฟ Residuals vs A:Sn(%) ของ Spread factor.....	65

สารบัญรูปร่าง (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.7 กราฟ Residuals vs B:Cu(%) ของ Spread factor.....	66
รูปที่ 4.8 กราฟ Residuals vs C:Sb(%) ของ Spread factor.....	66
รูปที่ 4.9 กราฟ Cook's Distance ของ Spread factor.....	67
รูปที่ 4.10 กราฟ Leverage vs Run ของ Spread factor.....	67
รูปที่ 4.11 Contour ของ Spread factor ทั้ง 3 ส่วนผสม.....	69
รูปที่ 4.12 กราฟ Normal Plot of Residuals ของ Contact angle.....	75
รูปที่ 4.13 กราฟ Residuals vs Predicted ของ Contact angle.....	75
รูปที่ 4.14 กราฟ Residuals vs Run ของ Contact angle.....	76
รูปที่ 4.15 กราฟ Predicted vs Actual ของ Contact angle.....	76
รูปที่ 4.16 กราฟ Box-Cox Plot for Power Transforms ของ Contact angle.....	77
รูปที่ 4.17 กราฟ Residuals vs A:Sn(%) ของ Contact angle.....	77
รูปที่ 4.18 กราฟ Residuals vs B:Cu(%) ของ Contact angle.....	78
รูปที่ 4.19 กราฟ Residuals vs. C: Sb (%) ของ Contact angle.....	78
รูปที่ 4.20 กราฟ Cook's Distance ของ Contact angle.....	79
รูปที่ 4.21 กราฟ Leverage vs. Run ของ Contact angle.....	79
รูปที่ 4.22 Contour ของ Contact angle ทั้ง 3 ส่วนผสม.....	81
รูปที่ 4.23 กราฟ Normal Plot of Residuals ของความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะ.....	86
รูปที่ 4.24 กราฟ Residuals vs. Predicted ของความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะ.....	87
รูปที่ 4.25 กราฟ Residuals vs. Run ของความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะ.....	87
รูปที่ 4.26 กราฟ Predicted vs. Actual ของความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะ.....	88
รูปที่ 4.27 กราฟ Box-Cox Plot for Power Transforms ของความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะ.....	88
รูปที่ 4.28 กราฟ Residuals vs. A: Sn (%) ของความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะ.....	89
รูปที่ 4.29 กราฟ Residuals vs. B: Cu (%) ของความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะ.....	89
รูปที่ 4.30 กราฟ Residuals vs. C: Sb (%) ของความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะ.....	90
รูปที่ 4.31 กราฟ Cook's Distance ของความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะ.....	90
รูปที่ 4.32 กราฟ Leverage vs. Run ของความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะ.....	91
รูปที่ 4.33 Contour ของความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ทั้ง 3 ส่วนผสม.....	93
รูปที่ 4.34 โครงสร้างจุลภาคของส่วนผสมที่ 1.....	94

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.91 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 2	123
รูปที่ 4.92 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 3	123

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาของโครงการ

โลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมของตะกั่วและดีบุกนั้นถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในวงการอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ของประเทศไทย เนื่องจากมีคุณสมบัติที่โดดเด่นมากมาย เช่น จุดหลอมเหลวต่ำ คุณสมบัติการเปียกผิวดี หาซื้อได้ง่าย และราคาถูก เป็นต้น แต่ปริมาณสารตะกั่วจากโลหะบัดกรีนั้นเป็นอันตรายต่อระบบประสาท ระบบทางเดินอาหาร ระบบหายใจ และสามารถทำลายระบบสมองซึ่งควบคุมอวัยวะต่างๆ ภายในร่างกายมนุษย์ได้ รวมไปถึงการก่อมลพิษให้แก่สิ่งแวดล้อม จึงมีข้อจำกัดเกี่ยวกับการใช้สารอันตราย หรือ Restriction on Hazardous Substances (RoHS) ที่กำหนดโดยคณะกรรมการยุโรปหรืออีซี (EC-European Commission) ซึ่งเป็นหน่วยงานที่กำหนดนโยบายและการบริหารงานร่วมของประเทศในเครือสหภาพยุโรปหรืออียู (EU-European Union) ระบุให้มีการลดปริมาณการใช้สารตะกั่วในอุตสาหกรรม เพื่อป้องกันปัญหาสิ่งแวดล้อม จึงทำให้วงการอุตสาหกรรมในประเทศไทยมีการปรับตัวโดยใช้โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-Free Solder) เพิ่มมากขึ้น ซึ่งโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่นำมาทดแทนนั้นจะต้องมีคุณสมบัติต่างๆ เทียบเท่าหรือใกล้เคียงกับโลหะบัดกรีชนิดที่มีตะกั่วผสมแบบเดิม

โลหะบัดกรีที่สามารถนำมาใช้แทนตะกั่วบัดกรีได้ดี มีมากมายหลายชนิด ทั้งที่เป็นสารประกอบ 2 ชนิดอันได้แก่ Sn-Ag, Sn-Cu, Sn-Zn, Sn-Bi และ Sn-In หรือเป็นสารประกอบระหว่างโลหะ 3 ชนิดอันได้แก่ Sn-Ag-Cu, Sn-Ag-Bi และ Sn-Zn-Bi ซึ่งโลหะบัดกรีแต่ละชนิดก็จะมีลักษณะเด่นแตกต่างกัน แต่ที่นิยมใช้กันค่อนข้างมากในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ของประเทศไทย คือ Sn-Ag-Cu เนื่องจากมีข้อได้เปรียบทางด้านคุณสมบัติทางกล รวมถึงความสามารถในการบัดกรีที่โดดเด่นกว่าโลหะบัดกรีชนิดอื่น แต่มีข้อเสียที่โลหะบัดกรีชนิดนี้มีราคาค่อนข้างสูง และเมื่อทำปฏิกิริยาแล้วจะเกิดสารประกอบ Ag_3Sn ซึ่งมีความเปราะสูง ทำให้รอยต่อบัดกรีนั้นทนต่อแรงกระแทกได้ไม่มากนัก จึงเป็นที่มาของการศึกษาค้นคว้าโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิดใหม่

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของโลหะบัดกรีดีบุก-ทองแดง-พลวง ที่มีส่วนผสมของดีบุก (Sn) 89-100%wt ทองแดง (Cu) 0-3%wt และพลวง (Sb) 0-8%wt โดยเติมทองแดง เพื่อช่วยเสริมความแข็งแรงและการต้านทานการกัดกร่อน และเติมพลวงเพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรงของรอยต่อบัดกรี โดยใช้เทคนิค Spread Test และ Contact Angle เพื่อทดสอบการเปียกผิวของโลหะบัดกรี

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของธาตุต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการกระจายตัว (Wettability) ของโลหะบัดกรีดีบุก-ทองแดง-พลวง
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของธาตุต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ของรอยบัดกรีบนแผ่นทองแดง

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. ศึกษาส่วนผสมของโลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมของดีบุก (Sn) 89-100%, ทองแดง (Cu) 0-3% และพลวง (Sb) 0-8% โดยน้ำหนัก
2. ใช้แผ่นทองแดงบริสุทธิ์ 99.99% เป็นโลหะพื้นในการบัดกรี

1.4 ประโยชน์ที่ได้จากโครงการ

1. ได้รับองค์ความรู้เกี่ยวกับการพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิดใหม่
2. เป็นการเพิ่มทางเลือกให้กับอุตสาหกรรมโลหะบัดกรี

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การบัดกรี (Soldering)

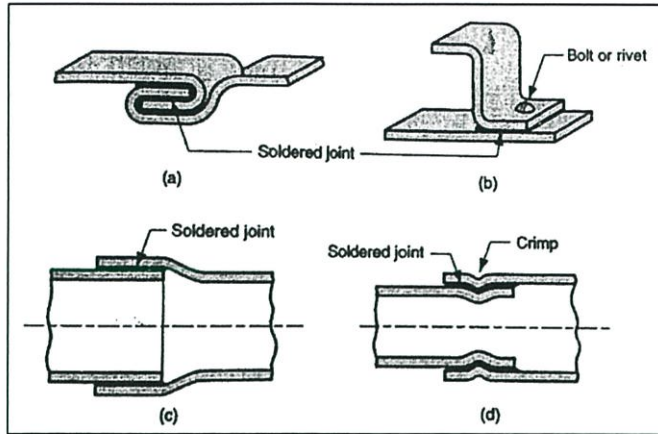
การบัดกรี หมายถึง กรรมวิธีในการยึดหรือต่อ (Joining) แผ่นโลหะสองชิ้นเข้าด้วยกัน โดยแผ่นโลหะที่นำมาต่อจะไม่หลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกันเหมือนการเชื่อม (Welding) แต่การบัดกรีจะนำเอาโลหะผสมที่เรียกว่า โลหะบัดกรี (Solder) ซึ่งมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าแผ่นโลหะที่นำมาบัดกรี โดยในระหว่างการบัดกรีนั้นโลหะบัดกรีที่หลอมละลายจะกระจายเข้าไปที่รอยต่อระหว่างแผ่นโลหะด้วยแรงดึงตามรูเล็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

การบัดกรีโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. การบัดกรีแข็ง (Brazing) หรือ การแล่นประสาน คือ กรรมวิธีการต่อโลหะตั้งแต่สองชิ้นขึ้นไปหรือมากกว่าเข้าด้วยกัน โดยโลหะนั้นจะเป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ โลหะเติมนี้เป็นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า 450 องศาเซลเซียส แต่ต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะที่นำมาทำการบัดกรีแข็ง และเติมลงไปที่ยรอยต่อของชิ้นงาน โดยโลหะเติมนี้จะหลอมละลายและแทรกตัวซึมเข้าไปในช่องว่างระหว่างรอยต่อด้วยปฏิกิริยาคาปิลารี (Capillary Action) ปกติตัวประสาน จะเป็นพวกโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก (Non-ferrous Metal) ซึ่งจะให้รอยต่อที่มีความแข็งแรงเกือบเท่ารอยเชื่อม

2. การบัดกรีอ่อน (Soft Soldering) คือ กรรมวิธีการต่อโลหะตั้งแต่สองชิ้นหรือมากกว่าเข้าด้วยกัน โดยที่โลหะนั้นจะเป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ ให้ความร้อนแก่รอยต่อที่อุณหภูมิต่ำกว่า 450 องศาเซลเซียสใช้โลหะเติมที่เป็นโลหะที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ เช่น ตะกั่วหรือดีบุกเติมลงไปที่ยรอยต่อของชิ้นงาน โลหะเติมนี้จะหลอมละลายและแทรกตัวซึมเข้าไปในช่องว่างระหว่างรอยต่อด้วยปฏิกิริยาคาปิลารีซึ่งใช้สำหรับการบัดกรีโลหะแผ่นโดยทั่วไป

ในการบัดกรีแผ่นโลหะ นอกจากจะใช้รอยต่อแบบต่อชนและต่อเกยในลักษณะเดียวกับการแล่นประสานแล้ว การบัดกรียังใช้รอยต่อแบบอื่น ๆ อีกในการประสานชิ้นงานดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างของรอยต่อที่ใช้ทางกล (กรรณชัย กัลยาศิริ, 2551)

ข้อดีของการบัดกรี ได้แก่ ใช้พลังงานต่ำเมื่อเทียบกับการเชื่อมหลอมหรือการแล่นประสานและสามารถใช้แหล่งพลังงานความร้อนได้หลากหลาย ซึ่งรอยบัดกรีที่นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดีสามารถให้รอยต่อที่อากาศหรือของเหลวไม่สามารถผ่านไปได้ และรอยต่อจากการบัดกรีสามารถที่จะซ่อมแซมหรือเปลี่ยนแปลงได้ง่าย ส่วนข้อเสียของการบัดกรี ได้แก่ รอยต่อที่มีความแข็งแรงต่ำและมีความแข็งแรงน้อยลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

ในการบัดกรีนั้นจะต้องอาศัยตัวช่วยประสานหรือน้ำยาประสาน (Flux) เพื่อทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นโลหะชิ้นงานบริเวณที่จะทำการบัดกรีก่อนการบัดกรี และต้องอาศัยความร้อนที่ใช้หลอมละลายโลหะบัดกรี พร้อมทั้งให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน

การบัดกรีที่จะทำให้รอยต่อมีคุณภาพดีนั้น ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ 3 ประการ คือ

1. ธรรมชาติของผิวโลหะชิ้นงาน (Base Metal) ซึ่งครอบคลุมถึงชนิดของโลหะชิ้นงาน และสภาพผิวของผิวหน้าโลหะด้วย

2. ชนิดของโลหะบัดกรีที่ใช้ (Solder)

3. ชนิดของน้ำยาประสานหรือฟลักซ์ (Flux)

องค์ประกอบทั้ง 3 ประการนี้จะแปรเปลี่ยนไปด้วยอุณหภูมิที่ใช้ในการบัดกรี จึงอาจกล่าวได้ว่า องค์ประกอบทั้ง 3 นี้สัมพันธ์กันด้วยความร้อนที่ใช้ในการบัดกรี

2.1.1 โลหะพื้น (Base Metal)

โลหะพื้นที่ถูกบัดกรีส่วนใหญ่จะเป็นเหล็กและทองแดง ส่วนอลูมิเนียมก็นิยมเพราะมีน้ำหนักเบา แต่จะบัดกรียากกว่าเหล็ก ทองแดง และโลหะผสมของเหล็กกับทองแดง จากตารางที่ 2.1 จะแสดงถึงชนิดของโลหะต่อความยากง่ายในการบัดกรี แต่จะต้องคำนึงถึงฟลักซ์ที่เหมาะสมด้วยว่าเป็นชนิดที่ว่องไวหรือไม่ซึ่งมีผลต่อการบัดกรี

ตารางที่ 2.1 ชนิดของโลหะต่อความยากง่ายในการบัดกรี

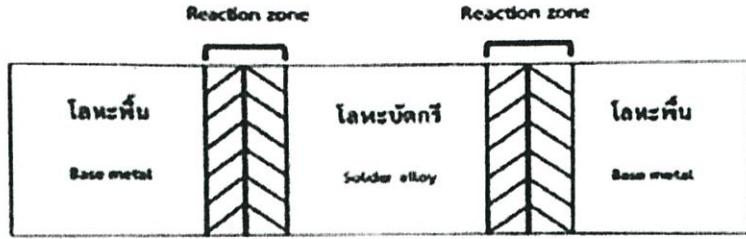
โลหะพื้นหรือโลหะชิ้นงาน	การบัดกรี
เงิน ดีบุก แพลลาเดียม โรเดียม ทองแดง บรอนซ์ ทองเหลือง ตะกั่ว นิกเกิลผสมเงิน	ดีเยี่ยม
เบอร์ิลเลียมผสมทองแดง	ดี
เหล็ก สังกะสี นิกเกิล	พอใช้
อลูมิเนียม อลูมิเนียมผสมบรอนซ์ เหล็กผสมโครเมียม	ยาก
เหล็กหล่อ โครเมียม ไททาเนียม แทนทาลัม แมกนีเซียม	เคลือบโลหะบัดกรีก่อน

โลหะที่เป็นดีบุก แคดเมียม และ ทองแดง จะง่ายต่อการเชื่อมประสานของโลหะบัดกรี โดยไม่ต้องทำความสะอาดก่อน และใช้ฟลักซ์ที่ไม่ว่องไวได้ ถ้าเป็นเงินจะเกิดฟิล์มของซัลไฟด์บนผิว ซึ่งเป็นตัวลดประสิทธิภาพการบัดกรีทันที ตะกั่วจะเกิดออกไซด์ที่ผิวเมื่ออยู่ในสภาพขึ้น และอาจต้องทำความสะอาดก่อนการบัดกรี ทองแดง ทองเหลือง บรอนซ์ และ เหล็ก จะเกิดออกไซด์บางบริเวณซึ่งต้องทำความสะอาดหรือล้างด้วยกรดอ่อน ความจำเป็นในการทำความสะอาดจะขึ้นอยู่กับขอบเขตของผิวโลหะที่เกิดออกซิเดชัน และความไวของฟลักซ์

2.1.2 โลหะบัดกรี (Solder)

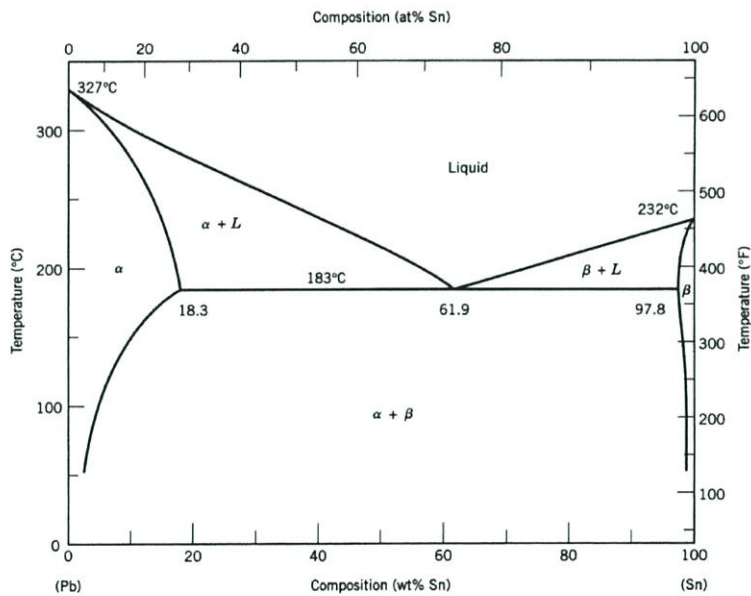
โลหะบัดกรี คือ โลหะผสมที่มีจุดหลอมเหลวต่ำใช้เป็นตัวเชื่อมประสานชิ้นงานโลหะเข้าด้วยกัน โดยทั่วไปอุณหภูมิในการหลอมละลายของตัวเชื่อมประสานควรต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมละลายของชิ้นงานเสมอ และโลหะบัดกรีนีจะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานเท่านั้นแต่ไม่ทำปฏิกิริยากับโลหะที่ถูกเชื่อม โดยโลหะบัดกรีที่ใช้กันแพร่หลายทั่วไป คือ โลหะผสมของตะกั่วและดีบุก (Sn-Pb) ซึ่งมีข้อดี คือ ราคาถูก มีสมบัติการบัดกรีที่ดี อุณหภูมิหลอมละลายต่ำ มีการกระจายตัวบนผิวโลหะต่างๆได้ดี และมีรอยต่อที่มีความแข็งแรง แต่ยังคงมีความเป็นพิษเนื่องจากมีปริมาณตะกั่วผสมอยู่ในปริมาณที่สูง

ซึ่งในระหว่างการบัดกรีนั้นจะก่อให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างโลหะบัดกรีกับแผ่นโลหะชิ้นงาน (Base Metal) เกิดเป็นการเกาะติดทางกลระหว่างโลหะบัดกรีกับความหยาบบนผิวหน้าที่ไม่สม่ำเสมอของแผ่นโลหะชิ้นงานพร้อมทั้งเกิดพันธะโลหะระหว่างโลหะบัดกรีกับแผ่นโลหะชิ้นงาน โดยปกติแล้วพันธะโลหะที่เกิดขึ้นนั้นจะมีความแข็งแรงมากกว่าการเกาะติดทางกล นอกจากนี้ในส่วนที่เกิดปฏิกิริยาจะพบการเกิดสารประกอบเชิงโลหะหรือสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิก (Intermetallic Compounds) ระหว่างโลหะบัดกรีกับแผ่นโลหะชิ้นงานด้วย ลักษณะการเกิดการประสานกันระหว่างชิ้นงานโลหะโดยใช้การบัดกรีแสดงไว้ดังรูปที่ 2.2 (กรรณชัย กัลยาศิริ, 2551)



รูปที่ 2.2 การเกิดการประสานกันระหว่างชิ้นงานโลหะโดยใช้การบัดกรี (กรรณชัย กัลยาศิริ, 2551)

เนื่องจากโลหะบัดกรีที่ทำมาจากโลหะผสม (Alloys) ของดีบุกและตะกั่ว (Sn-Pb) มีคุณสมบัติที่ดีหลายประการแต่อาจไม่เหมาะกับการใช้งานบางประเภท จึงทำให้มีการนำเอาโลหะชนิดอื่นเข้ามาผสมในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน เช่น แอนติโมนี (Antimony) เงิน (Silver) แคดเมียม (Cadmium) อินเดียม (Indium) และบิสมัท (Bismuth) เพื่อช่วยในการควบคุมคุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางกลของตะกั่วบัดกรี เช่น ช่วงของอุณหภูมิการหลอมเหลว ความแข็งและความต้านทานการกัดกร่อนซึ่งส่วนผสมจะถูกออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้งานโดยโลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมระหว่างดีบุกและตะกั่วในอัตราส่วนต่างกัน จะมีผลทำให้อุณหภูมิลiquidus (Liquidus Temperature) มีความแตกต่างกันดังแสดงในเฟสไดอะแกรมในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมที่ประกอบด้วยตะกั่วและดีบุก (University of Wisconsin Moodle, 2014)

ดีบุกจะเริ่มหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 283 องศาเซลเซียส และกลายเป็นของเหลวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 327 องศาเซลเซียส ส่วนตะกั่วนั้นจะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 183 องศาเซลเซียส และกลายเป็นของเหลวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 232 องศาเซลเซียส หากใช้ดีบุกหรือตะกั่วเพียงอย่างเดียวอย่างหนึ่งในการบัดกรีจะไม่เหมาะสมเนื่องจากจุดหลอมเหลวสูงเกินไป แต่เมื่อนำตะกั่วและดีบุกมาผสมกันในอัตราส่วนที่พอเหมาะ จะทำให้ได้ตะกั่วบัดกรีที่มีจุดหลอมเหลวและช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลวที่ลดต่ำลง ถ้าใช้อัตราส่วนระหว่างดีบุก 61.9% และตะกั่ว 38.1% โดยน้ำหนัก จะทำให้ส่วนผสมนี้ไม่มีบริเวณที่เป็นสถานะของผสม โดยจะเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นของเหลวทันทีที่อุณหภูมิ 183 องศาเซลเซียส ดังในแผนภูมิเฟส แต่ส่วนผสมนี้ไม่นิยมในการใช้งานเนื่องจากทำให้เกิดความเปราะของรอยบัดกรีภายใต้สภาวะการใช้งาน

อัตราส่วนที่นิยมใช้กันมากที่สุดของตะกั่วบัดกรีที่ใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์ คือ ดีบุก 60% และตะกั่ว 40% โดยน้ำหนัก ซึ่งเรียกว่าตะกั่วแบบ 60/40 และถูกจัดว่าเป็นตะกั่วแบบอ่อน โดยจะหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 188 องศาเซลเซียส และมีช่วงการหลอมเหลวประมาณ 5 องศาเซลเซียส ซึ่งจะทำให้ได้ความแข็งแรงที่ดีที่สุดและมีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าต่ำที่สุดด้วย สำหรับรอยต่อที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูงหรือต้องการความแข็งแรงทางกลมากๆ จำเป็นต้องใช้ตะกั่วบัดกรีแบบแข็ง ซึ่งจะประกอบด้วยอัตราส่วนผสมของดีบุกและตะกั่ว 30/70 และมีช่วงหลอมเหลวประมาณ 255-275 องศาเซลเซียส

2.1.3 น้ำยาประสานหรือฟลักซ์ (Fluxes)

ในการบัดกรีจะประสบความสำเร็จหรือไม่ขึ้นขึ้นอยู่กับความสามารถในการกระจายตัว (Spreading) ของโลหะบัดกรีและภาวะเปียก (Wetting) บนพื้นผิวโลหะพื้น อุปสรรคใหญ่ของการบัดกรีคือ ชั้นฟิล์มและคราบสกปรกต่างๆที่ปกคลุมอยู่บนพื้นผิวโลหะพื้น ซึ่งจะขัดขวางไม่ให้โลหะบัดกรีนั้นเกิดการกระจายตัวและเกิดภาวะเปียกในบริเวณที่จะทำการบัดกรี

ดังนั้นก่อนการบัดกรีทุกครั้งต้องทำความสะอาดพื้นผิวโลหะพื้นด้วยสารเคมี ที่เรียกว่า น้ำยาประสานหรือฟลักซ์ (Fluxes) ซึ่งฟลักซ์มีหน้าที่ทำความสะอาดพื้นผิวโลหะบริเวณที่จะทำการบัดกรี โดยฟลักซ์จะทำปฏิกิริยาและกำจัดชั้นฟิล์มออกไซด์ (Oxide) กับคราบสกปรกต่างๆ ให้หมดไปเหลือแต่ผิวหน้าโลหะพื้นที่แท้จริง และฟลักซ์มีหน้าที่ลดความตึงผิวของโลหะบัดกรีทำให้โลหะบัดกรีมีการไหลที่ดี กระจายตัวบนพื้นผิวโลหะได้ดี และช่วยเพิ่มภาวะเปียก อีกทั้งฟลักซ์ยังช่วยป้องกันพื้นผิวโลหะพื้นสัมผัสกับออกซิเจนจากอากาศ (Oxidation) เข้ามาปะปนบนพื้นผิวโลหะพื้นที่กำลังทำการบัดกรีเพราะปกติที่ผิวหน้าพื้นผิวโลหะพื้นจะมีชั้นฟิล์มออกไซด์อยู่แล้ว แต่จะมีเพิ่มมากขึ้นเมื่อพื้นผิวโลหะได้รับความร้อน ส่วนตกค้างของฟลักซ์หลังจากการบัดกรีต้องไม่กัดกร่อนรอยต่อหรือชิ้นงานโลหะ รวมทั้งไม่นำไฟฟ้าและสามารถกำจัดออกไปได้โดยใช้สารละลายหรือตัวทำละลายเคมี

ฟลักซ์ที่ใช้ในกระบวนการบัดกรีมีหลายรูปแบบ ได้แก่ ของแข็ง (Solid) กึ่งของเหลว (Paste) และแบบของเหลว (Liquid) ดังตารางที่ 2.2 ซึ่งฟลักซ์ที่ดีจะต้องหลอมละลายที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะบัดกรี และฟลักซ์ที่หลอมละลายแล้วต้องแผ่กระจายตัวบนผิวหน้าโลหะพื้นบริเวณที่จะทำการบัดกรีและทำความสะอาดผิวหน้าโลหะพื้นก่อนที่โลหะบัดกรีจะหลอมละลายและแผ่เข้ามาแทนที่ฟลักซ์

น้ำยาประสานหรือฟลักซ์ แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทตามฤทธิ์การกัดกร่อน ได้แก่

1. น้ำยาประสานประเภทที่มีฤทธิ์การกัดกร่อน (Corrosive Fluxes) หรือฟลักซ์อนินทรีย์ (Inorganic Fluxes) เช่น สังกะสีคลอไรด์ (Zinc Chloride) กรดเกลือ (Muriatic Acid) และเกลืออนินทรีย์ชนิดต่างๆโดยปกติจะใช้ฟลักซ์จำพวกนี้เมื่อมีปัญหาจากการเกิดออกซิเดชันระหว่างโลหะบัดกรีกับอากาศ เนื่องจากฟลักซ์กลุ่มนี้สามารถปกป้องรอยเชื่อมได้ค่อนข้างดี

กรดเกลือหรือ Muriatic Acid เป็นกรดที่เข้มข้นและมีอันตรายมาก มีสีเหลือง ใช้เป็นน้ำยาประสานเมื่อถึงเวลาบัดกรีเหล็กอาบสังกะสีจะเดือดและมีควัน แผ่นเหล็กอาบสังกะสีจะมีรอยดำ กรดเกลือใช้ในการผลิตสังกะสีคลอไรด์สำหรับทำความสะอาดก่อนการบัดกรี โดยเฉพาะเหล็กอาบสังกะสี (Galvanized Steel) ในงานแผ่นโลหะต่างๆไป กรดเกลือจะถูกเรียกว่า Raw Acid

สังกะสีคลอไรด์ (Zinc Chloride) หรือ Cut Acid เป็นน้ำยาประสานที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น กัดกร่อนโลหะ และอันตรายมากเท่าๆกรดเกลือ ใช้เป็นน้ำยาประสานในการบัดกรีเหล็กอาบสังกะสี (Galvanized Steel) สังกะสี (Zinc) ทองเหลือง (Bass) ทองแดง (Copper) และตะกั่ว (Lead)

การทำสังกะสีคลอไรด์ทำได้โดยการตัดแผ่นสังกะสีเป็นชิ้นเล็กๆใส่ลงในถ้วยที่บรรจุกรดเกลือ กรดเกลือจะละลายสังกะสี ไล่ออกไฮโดรเจนระเหยขึ้นมาและน้ำกรดที่เหลือก็จะเป็นสังกะสีคลอไรด์ดังสมการ



ตารางที่ 2.2 โลหะที่ทำการบัดกรีและน้ำยาประสานที่ใช้

ชนิดของโลหะ	น้ำยาประสาน	ชื่อทางเคมีของน้ำยาประสาน
แผ่นสังกะสี (Zinc)	สังกะสีคลอไรด์ (Cut acid)	Zinc chloride
แผ่นเหล็กอาบสังกะสี (Galvanized steel)	กรดเกลือ (Muriatic acid)	Hydrochloric acid
แผ่นดีบุก (Tin)	ยางสน (Rosin)	Colophony
แผ่นเหล็กอาบดีบุก (Tin plate)	สังกะสีคลอไรด์ (Cut acid)	Zinc chloride
แผ่นเหล็ก (Mild steel)	สังกะสีคลอไรด์ (Cut acid)	Zinc chloride
แผ่นเหล็กทองเหลือง	สังกะสีคลอไรด์ (Cut acid)	Zinc chloride
แผ่นทองแดง	ยางสน (Rosin)	Colophony
แผ่นตะกั่ว	ยางสน (Rosin)	Colophony
แผ่นอลูมิเนียม	น้ำยาประสานชนิดพิเศษ (Special flux)	

2. น้ำยาประสานประเภทที่ไม่มีฤทธิ์กัดกร่อน (Noncorrosive Fluxes) หรือฟลักซ์อินทรีย์ (Organic Fluxes) เช่น ไชส์ตว์ (Tallow) ยางสน (Rosin) ยางไม้ (Natural Rosin) แอลกอฮอล์ กรดอินทรีย์ และเกลือของฮาโลเจน 7 (Halogen) โดยทั่วไปแล้วฟลักซ์ในกลุ่มนี้ใช้กับการบัดกรีอุปกรณ์ไฟฟ้าหรืออิเล็กทรอนิกส์

ยางสน เป็นน้ำยาประสานชนิดที่ไม่มีฤทธิ์กัดกร่อน เป็นผลิตภัณฑ์ธรรมชาติที่ได้จากการกลั่นน้ำมันสน ประกอบด้วยสารประกอบอินทรีย์ที่เรียกว่า Abietic Acid มีฤทธิ์เป็นกรดอ่อนๆ ที่ไม่ทำให้เกิดการกัดกร่อน เมื่อได้รับความร้อนจะเริ่มอ่อนตัวที่อุณหภูมิ 50-70 องศาเซลเซียส และหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส โดยยางสนสามารถทำความสะอาดออกไซด์ที่บริเวณผิวหน้าของพื้นผิวโลหะพื้นได้ เช่น ทองแดง ใช้ในการบัดกรีงานที่เล็กๆ โดยเฉพาะในงานอุปกรณ์ไฟฟ้าและวิทยุ และยางสนอาจจะผลิตออกมาทั้งในรูปของก้อน ผง และผสมเบนซินเป็นยางเหนียว (Semi Solid)

ประเภทของน้ำยาประสานทางการค้าเชิงพาณิชย์ที่ใช้สำหรับการบัดกรีทั่วไป ได้แก่

1. R (Rosin)
2. RMA (Rosin Mildly Activated)
3. RA (Rosin Activated)
4. OA (Organic Acid)

- 5. IA (Inorganic Acid)
- 6. SA (Synthetically Activated)
- 7. WS (Water Soluble)

น้ำยาประสานประเภท R, RMA, และ RA จะประกอบไปด้วยยางสนเป็นส่วนประสมหลัก โดยความแตกต่างระหว่างน้ำยาประสานประเภท R, RMA, และ RA คือระดับของ Chemical Activity ที่เพิ่มขึ้นจาก R ไปยัง RA และในน้ำยาประสานสมัยใหม่ส่วนใหญ่ยางสนคือสิ่งที่ได้จากการสังเคราะห์ทางเคมี โดยจะไม่มีผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติ

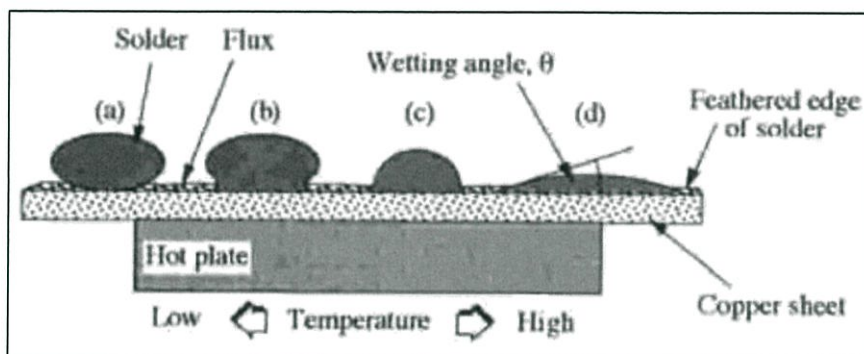
น้ำยาประสานประเภท OA คือ กรดอินทรีย์ (Organic Acid) จะมีระดับ Chemical Activity มากกว่า RA แต่ไม่เท่า IA

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

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

น้ำยาประสานประเภท WS จะประกอบไปด้วยฮาโลด์ ซึ่งใช้กันมาหลายสิบปีแล้ว โดยเป็นน้ำยาประสานที่นิยมใช้ในการค้าเชิงพาณิชย์และมีการพัฒนาให้ใช้ได้อย่างกว้างขวาง คือใช้ได้ในทุกระดับของ Chemical Activity และถ้าใช้น้ำยาประสานประเภทนี้ในกระบวนการบัดกรี หลังบัดกรีเสร็จต้องมีการล้างทำความสะอาดเอาน้ำยาประสานที่ตกค้างบนบริเวณที่ทำการบัดกรีออก เพราะน้ำยาประสานที่ตกค้างอาจทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ อีกทั้งยังยากต่อการนำไปใช้ในกระบวนการบัดกรีแบบรีโฟลด์ด้วย

การทำงานของฟลักซ์

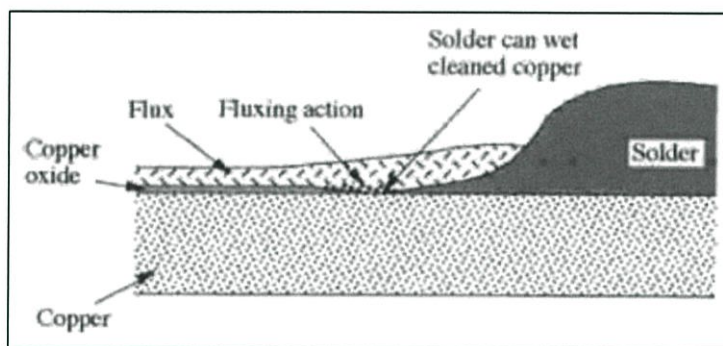


รูปที่ 2.4 การแผ่กระจายของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะพื้นของแผ่นทองแดงที่ให้อุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ

(Brindley et al., 1999)

จากรูปที่ 2.4 ได้แสดงแผ่นทองแดงที่มีฟลักซ์คลุมอยู่บนพื้นผิวและวางอยู่บนแผ่นความร้อน (Hot plate) ที่กำลังเพิ่มอุณหภูมิของแผ่นทองแดงให้สูงขึ้นเหนืออุณหภูมิหลอมละลายของโลหะบัดกรี ในตอนแรกโลหะบัดกรีจะมีลักษณะเป็นทรงกลมวางอยู่บนแผ่นทองแดง (a) หลังจากนั้นแผ่นความร้อนจะให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจนแผ่นทองแดงมีอุณหภูมิสูงถึงอุณหภูมิหลอมละลายของโลหะบัดกรี จะเห็นได้ว่าโลหะบัดกรีทรงกลมเริ่มหลอมละลาย (b) เริ่มไหล (c) และเกิดภาวะเปียกบนแผ่นทองแดง (d)

จากรูปที่ 2.5 บริเวณที่โลหะบัดกรีกำลังหลอมละลายและไหลบนผิวหน้าแผ่นทองแดงจะเห็นชั้นออกไซด์ของทองแดง ฟลักซ์ โลหะบัดกรี และออกไซด์ของโลหะบัดกรี โดยกระบวนการที่สำคัญ 2 อย่างคือ บนแผ่นทองแดงที่ร้อนโลหะบัดกรีเริ่มหลอมละลายและฟลักซ์เริ่มทำปฏิกิริยา คือ เริ่มกำจัดออกไซด์บนผิวหน้าของแผ่นทองแดง พื้นผิวโลหะบัดกรีและป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อาจเกิดขึ้นอีก อีกทั้งชนิดของฟลักซ์ที่ใช้โดยทั่วไปขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นของออกไซด์ของพื้นผิวที่จะบัดกรี ถ้าชั้นของออกไซด์บางจะใช้ฟลักซ์ที่รุนแรงน้อย (Low Activity)

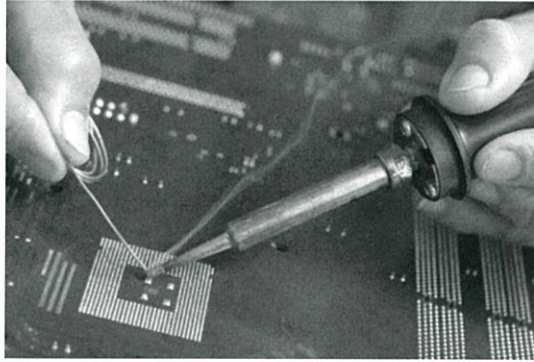


รูปที่ 2.5 การทำงานของฟลักซ์ (Brindley et al., 1999)

2.1.4 วิธีการบัดกรี

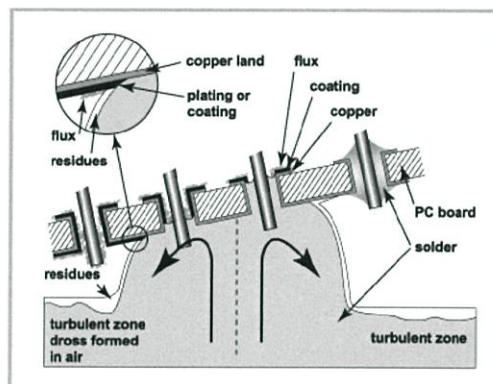
การบัดกรีเป็นที่นิยมอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมการผลิตวงจรไฟฟ้าและวงจรอิเล็กทรอนิกส์ รวมไปถึงอุตสาหกรรมเครื่องประดับด้วย การบัดกรีส่วนใหญ่จะมีวิธีการคล้ายกับวิธีการเล่นประสานหรือการบัดกรีแข็ง (Brazing) เช่น การบัดกรีในเตา (Furnace Soldering , FS) การบัดกรีด้วยความต้านทาน (Resistance Soldering , RS) การบัดกรีด้วยอินฟราเรด (Infrared Soldering , IRS) และการบัดกรีแบบจุ่ม (Dip Soldering , DS) เป็นต้น แต่จะมีบางวิธีที่สามารถทำได้เฉพาะการบัดกรีเท่านั้น คือ ไม่สามารถทำการเล่นประสานได้ ได้แก่ การบัดกรีแบบใช้มือ การบัดกรีแบบคลื่น และการบัดกรีแบบปริโฟลว์ เป็นต้น โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การบัดกรีแบบใช้มือ (Hand Soldering) เป็นการบัดกรีด้วยตนเองโดยใช้หัวแร้งและลวดบัดกรี ส่วนใหญ่การบัดกรีแบบนี้จะบัดกรีชิ้นงานที่เป็นข้อต่อขนาดเล็กหรือแผ่นวงจรพิมพ์ที่ไม่ซับซ้อนดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การบัดกรีแบบใช้มือ (Das, 2008)

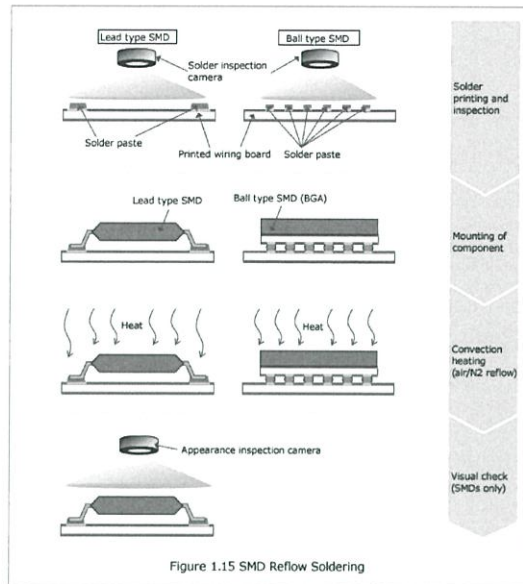
2. การบัดกรีแบบคลื่น (Wave Soldering) เป็นการบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ลงบนแผ่นวงจรพิมพ์หรือแผ่น PCB (Printed Circuit Board) โดยแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ติดอยู่จะเคลื่อนที่ด้วยสายพานลำเลียงไปยังสถานีฟลักซ์ก่อน เพื่อทำการพ่นฟลักซ์บนแผ่นวงจรพิมพ์ หลังจากนั้นแผ่นวงจรพิมพ์จะเคลื่อนที่ไปบนอ่างของโลหะบัดกรีหลอมเหลว ซึ่งอ่างบัดกรีจะมีบีมจุ่มเพื่อสร้างคลื่นของโลหะบัดกรีหลอมเหลว โลหะบัดกรีหลอมเหลวดังกล่าวจะถูกดูดและพ่นไปยังด้านล่างของแผ่นวงจรพิมพ์เพื่อให้โลหะบัดกรีเชื่อมต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ากับวงจรดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การบัดกรีแบบคลื่น (Tarr, 2005)

3. การบัดกรีแบบรีโฟลว์ (Reflow Soldering) เป็นการบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดติดตั้งบนพื้นผิว (Surface Mount Components) กับแผ่นวงจรพิมพ์ ในกระบวนการนี้จะใช้โลหะบัดกรีที่อยู่ในรูปของครีม (Paste) โดยโลหะบัดกรีจะผสมอยู่กับฟลักซ์และตัวยึด (Binder) ซึ่งจะถูกสกรีนลงบนตำแหน่งที่ต้องการบัดกรีบนแผ่นวงจรพิมพ์แล้ววางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ลงบนโลหะบัดกรี หลังจากนั้น

แผ่นวงจรพิมพ์จะถูกให้ความร้อนจนกระทั่งโลหะบัดกรีหลอมละลายและเชื่อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ากับวงจร เมื่ออุณหภูมิลดลงโลหะบัดกรีก็จะกลายเป็นของแข็งที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การบัดกรีแบบรีโฟลว์ (Renesas, 2016)

2.2 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-Free Solders)

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุตสาหกรรม อิเล็กทรอนิกส์มีการใช้โลหะบัดกรี (Solder) เป็นโลหะเติม (Filler Metal) ในการเชื่อมต่อชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆเข้ากับแผงวงจร (Printed Circuit Board) ด้วยวิธีการบัดกรี (Soldering) ซึ่งโลหะบัดกรีดั้งเดิมที่มีการใช้อยู่ทั่วไปจะมี ส่วนผสมของตะกั่วและ ดีบุก (Sn-Pb) โดยตะกั่วถือเป็นสารอันตรายที่ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมและ ร่างกายมนุษย์ จึงทำให้คณะกรรมการยุโรปหรืออีซี (EC-European Commission) ซึ่งเป็นหน่วยงานที่ กำหนดนโยบายและการบริหารงานร่วมของประเทศในเครือสหภาพยุโรปหรืออียู (EU- European Union) ได้ออกข้อบังคับใช้ตั้งแต่วันที่ 1 กรกฎาคม ค.ศ.2006 กำหนดให้ตะกั่วเป็นสารต้องห้ามตามระเบียบ RoHs (Restriction on Hazardous Substances) [1] และ WEEE (Waste from Electrical and Electronic Equipment) จึงทำให้อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ ต้องมีการปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตและมีการพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-Free Solder) ขึ้นมาทดแทนโลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมของตะกั่วและดีบุก โดยโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่พัฒนาขึ้นมา นั้น ต้องมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าหรือเทียบเท่ากับโลหะบัดกรีแบบเดิม ตัวอย่างของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว เช่น กลุ่มโลหะผสมของดีบุกและทองแดง กลุ่มโลหะผสมของดีบุก ทองแดง และเงิน และกลุ่มโลหะผสมของ ดีบุกและสังกะสี เป็นต้น จะเห็นได้ว่า โลหะหลักที่ยังใช้เป็นส่วนประกอบของโลหะบัดกรียังคงเป็นดีบุกอยู่

ทั้งนี้เนื่องจากดีบุกเป็นโลหะที่สามารถหาได้ง่าย มีคุณสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสม เช่น จุดหลอมเหลวต่ำ นำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดี และโลหะผสมของดีบุกยังมีคุณสมบัติในการเป็นโลหะประสานที่ดี ซึ่งการวิจัยและพัฒนาโลหะบัดกรีชนิดใหม่นี้ยังคงต้องการการศึกษาในเรื่องของคุณสมบัติต่างๆของโลหะบัดกรีเหล่านี้ก็เป็นอันมากจึงจะนำไปใช้งานได้อย่างเหมาะสมและปลอดภัย

2.2.1 คุณลักษณะเบื้องต้นในการพิจารณาเลือกใช้โลหะบัดกรีแบบไร้สารตะกั่ว

1. อุณหภูมิหลอมเหลวใกล้เคียงกับโลหะบัดกรีดั้งเดิม โดยทั่วไปอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะบัดกรีแบบไร้สารตะกั่วจะสูงกว่าตะกั่วบัดกรีชนิด 63Sn/37Sn การที่โลหะบัดกรีมีอุณหภูมิหลอมเหลวสูง เวลาทำการบัดกร้อาจทำให้ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์เสียหายหรืออาจทำให้แผ่นวงจรพิมพ์เกิดการเปลี่ยนสีหรือบิดงอเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงเกินไป

2. มีสมบัติด้าน Wettability และ Solderability ที่ดี

3. มีคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ความแข็งแรง ความแข็ง ความทนทานและความสวยงามของรอยบัดกรีต้องไม่ด้อยไปกว่าตะกั่วบัดกรีชนิด 63Sn/37Pb

4. โลหะบัดกรีต้องสามารถถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และสามารถนำไฟฟ้าได้ดี โดยไม่ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ลดลง

5. มีสมบัติต้านทานการล้าที่ดี

6. มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันต่ำ

7. สามารถใช้กับระบบพ्लักซ์เหลวที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบัน

8. ต้องไม่เป็นพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมตามข้อบังคับของ RoHs และ WEEE

9. ต้องมีราคาถูก หาได้ง่ายเพราะราคาของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว โดยทั่วไปจะสูงกว่าตะกั่วบัดกรี 63Sn/37Pb ส่งผลให้ต้นทุนสูงขึ้น แต่ราคาของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันมีแนวโน้มที่จะต่ำลงเรื่อยๆ

10. ต้องใช้ได้ดีกับเครื่องหลอมโลหะบัดกรีที่มีอยู่โดยไม่ต้องดัดแปลงมากหรือต้องซื้อระบบใหม่ ผู้ผลิตอาจยอมรับการดัดแปลงเล็กน้อย เช่น เพิ่มระบบจ่ายแก๊สไนโตรเจน (N_2) ในเครื่องบัดกรีแบบคลื่นหรือเครื่องบัดกรีแบบรีโฟลว์ เพื่อปรับปรุงคุณภาพของรอยบัดกรี เนื่องจากต้นทุนของการติดตั้งระบบจ่ายแก๊สไนโตรเจนโดยทั่วไปจะไม่สูงมากนัก

11. โลหะบัดกรีควรมีจุดหลอมเหลวคงที่ เนื่องจากในการผลิตสินค้าจำนวนมากๆ (Mass Volume) ต้องมีการควบคุมความผันแปรต่างๆในกระบวนการผลิตเพื่อไม่ให้ปริมาณของเสียในการผลิตมากเกินไป ในการผลิตโลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมของโลหะหลายๆชนิด จะควบคุมส่วนผสมให้คงที่ได้ยาก จึงทำให้โลหะบัดกรีเหล่านี้มีจุดหลอมเหลวที่มีลักษณะเป็นช่วงอุณหภูมิไม่คงที่ ดังนั้นการเลือกใช้โลหะบัดกรีประเภทนี้อาจทำให้ประสบปัญหาในกระบวนการผลิตได้

12. ผู้ผลิตแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดติดตั้งบนพื้นผิว (Surface Mounted Devices : SMD) หลายรายยังไม่สามารถเลิกใช้สารตะกั่วในเวลาอันสั้น ทำให้ข้อของอุปกรณ์ SMD หรือลายวงจรบนแผ่นพิมพ์บางชนิดยังมีสารตะกั่วเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงความสามารถในการเชื่อมประสานกันระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วกับสารตะกั่ว ที่อยู่บนข้อของอุปกรณ์ SMD และแผ่นวงจรพิมพ์ด้วย ซึ่งถ้าไม่สามารถเชื่อมประสานกันได้ดีก็อาจทำให้จุดบัดกรีนั้นไม่แข็งแรงเพียงพอต่อการนำไปใช้งานหรือมีผลกับการใช้งานของผลิตภัณฑ์ในระยะยาว (Reliability)

2.2.2 โลหะทดแทนสารตะกั่ว

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

โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีการพัฒนา เพื่อทดแทนโลหะบัดกรีชนิดผสมตะกั่ว สามารถจัดแบ่งกลุ่มตามช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวออกเป็น 4 กลุ่ม ดังนี้

1. กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำกว่า 180 องศาเซลเซียส ได้แก่ โลหะผสมระบบ Sn-Bi, Sn-In และ Bi-In ตัวอย่างแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำกว่า 180 องศาเซลเซียส

ระบบโลหะผสม	องค์ประกอบ (wt%)	ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)
Sn-Bi	Sn-58Bi	138
Sn-In	Sn-52In	118
Sn-In	Sn-50In	118-125
Bi-In	Bi-33In	109

2. กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 180 ถึง 200 องศาเซลเซียส ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 180 ถึง 200 องศาเซลเซียส

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

3. กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 200 ถึง 230 องศาเซลเซียส ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 200 ถึง 230 องศาเซลเซียส

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

4. กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวมากกว่า 230 องศาเซลเซียส ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวมากกว่า 230 องศาเซลเซียส

ระบบโลหะผสม	องค์ประกอบ (wt%)	ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)
Sn-Sb	Sn-5Sb	232-240
Sn-Au	Sn-80Au	280
Sn-Ag-Sb	Sn-25Ag-10Sb	233

ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบของโลหะบัดกรีชนิดต่างๆที่สามารถนำมาใช้ทดแทนตะกั่วบัดกรี

อัตราส่วน	จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	ความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 25 องศา เซลเซียส (ปอนด์ต่อลูกบาศก์นิ้ว)
63Sn-37Pb	183	0.318
42Sn-58Bi	138	0.316
77.2Sn-20In-2.8Ag	179-189	0.267
91Sn-9Zn	199	0.263
92.8Sn-3.4Ag-4.8Bi	208-215	0.272
90Sn-7.5Bi-0.5Cu	186-212	0.273
95.5Sn-4Ag-0.5Cu	217-218	0.269
95.5Sn-3.5Ag-1.5In	218	0.268
93.5Sn-3.5Ag-1.5Bi	216-220	0.269
96.5Sn-3.5Ag	221	0.368
99.3Sn-0.7Cu	227	0.264
95Sn-5Sb	232-240	0.263
96.2Sn-2.5Ag-0.8Cu-0.5Sb	213-219	0.267

โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วได้มีการพัฒนาขึ้นเป็นจำนวนมาก ดังแสดงในตารางที่ 2.7 บางชนิดถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆบ้างแล้ว และมีอีกจำนวนมากที่มีเพียงการศึกษาวิจัยเท่านั้น แต่ยังไม่มีการนำไปประยุกต์ใช้

2.2.3 แนวทางในการเลือกธาตุที่เป็นส่วนผสมที่เหมาะสมกับขบวนการผลิต

2.2.3.1 ธาตุเจือที่ใช้ผสมกับดีบุกเพื่อผลิตเป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

โลหะบัดกรีทั่วไปจะมีส่วนผสมของโลหะดีบุกเป็นหลัก เนื่องจากดีบุกมีคุณสมบัติการแผ่กระจายตัวเวลาบัดกรีได้ดี ส่วนธาตุเจือที่นำมาผสมกับดีบุกทำเป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วมีหลายชนิดด้วยกัน ธาตุโลหะเจือที่สำคัญๆ ได้แก่ เงิน (Ag) อินเดียม (In) บิสมัท (Bi) พลวง (Sb) ทองแดง (Cu) และสังกะสี (Zn) เป็นต้น

2.2.3.2 สมบัติของธาตุเจือชนิดต่างๆ

1. เงิน (Ag) เป็นโลหะที่ใช้เป็นส่วนผสมในบัดกรี มีราคาสูง โลหะเงินช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะบัดกรี ทำให้สมบัติการแผ่กระจายดีขึ้นและมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำลง

2. อินเดียม (In) เป็นโลหะที่มีราคาค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับธาตุเจือชนิดอื่นๆ โลหะบัดกรีที่มีอินเดียมผสมจะมีราคาแพง แต่มีข้อดีคือ อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ ตัวอย่างเช่น อินเดียมที่เติมลงในโลหะบัดกรีชนิด Sn-Zn สามารถช่วยลดอุณหภูมิหลอมเหลวลง ระยะห่างระหว่างเส้นของแข็งและของเหลวกว้างขึ้น จึงเป็นข้อดีสำหรับการใช้งานกับอุปกรณ์ที่ทนความร้อนได้ต่ำ และยังสามารถลดการเกิดออกซิเดชันและเพิ่มสมบัติความเหนียวให้ดีขึ้น

3. บิสมัท (Bi) โลหะดีบุกผสมบิสมัทที่อัตราส่วน 42Sn-58Bi มีโครงสร้างแบบยูเทคติก โลหะบัดกรีในกลุ่มนี้มีจุดเด่นคือ มีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ต่ำมากคือ 139 องศาเซลเซียส จึงเป็นข้อดี คือ สามารถใช้งานกับอุปกรณ์ที่ไม่สามารถทนความร้อนในการบัดกรีสูงได้ ลักษณะโครงสร้างของโลหะบัดกรีชนิดนี้จะมีลักษณะเป็นแผ่นแบบ Lamellar มีความสามารถในการเชื่อมประสานที่ดีมากแต่มีข้อเสียคือบิสมัทมีราคาสูง

4. พลวง (Sb) การเติมพลวงในปริมาณที่พอเหมาะจะช่วยเพิ่มสมบัติการต้านทานคืบและการต้านทานการล้าของโลหะบัดกรีให้ดีขึ้น แต่พลวงมีข้อเสียคือ ทำให้สมบัติการเปียกและการแผ่กระจายของโลหะบัดกรีน้อยลง

5. ทองแดง (Cu) เมื่อผสมดีบุกกับทองแดงในอัตราส่วน 99.3Sn-0.7Cu จะทำให้เกิดโครงสร้างยูเทคติก มีจุดหลอมเหลวที่ 227 องศาเซลเซียส โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟส Cu_6Sn_5 ลักษณะเป็นแท่งฝังอยู่ในเนื้อดีบุก ทองแดงจะทำให้โลหะบัดกรีมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ข้อเสียของโลหะบัดกรีในกลุ่ม Sn-Cu คือการมีธาตุเจือผสมอยู่น้อยจึงอาจเกิดเส้นใยดีบุกขึ้นได้ซึ่งปัญหาเหล่านี้ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจร

6. สังกะสี (Zn) เป็นโลหะที่มีจุดเด่นด้านอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำและราคาถูก โลหะบัดกรีชนิดดีบุก-สังกะสีที่จุดยูเทคติก (Sn-9wt.%Zn) มีอุณหภูมิจุดหลอมเหลวที่ 199 องศาเซลเซียส ซึ่งใกล้เคียงกับโลหะบัดกรีชนิดดีบุก-ตะกั่ว (Sn-Pb) ที่จุดยูเทคติก (183 องศาเซลเซียส) Sn-9wt.%Zn ประกอบด้วยเฟส 2 เฟส คือ Sn matrix และ Hexagonal Zn ซึ่งรวมตัวกับดีบุกอยู่ในลักษณะเป็นแผ่นบางสลับกันระหว่างเฟส Sn rich กับ Zn rich ซึ่งทั้งดีบุกและสังกะสีต่างก็สามารถทำปฏิกิริยากับโลหะพื้นที่เป็นทองแดงได้ โลหะบัดกรีในกลุ่ม Sn-Zn มีข้อด้อยบางประการ เช่น Zn สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ง่าย เกิดเป็นสังกะสีออกไซด์ (Dross) มาก เมื่อใช้งานในกระบวนการบัดกรีแบบ Wave Soldering นอกจากนี้แล้ว Zn ยังไวต่อปฏิกิริยากับสารเคมีที่ผสมอยู่ในฟลักซ์ที่ใช้กับโลหะบัดกรีในกลุ่ม Sn-58Bi ทำให้เกิดการกัดกร่อน

2.3 ความสามารถในการกระจายตัว (Wettability)

ความสามารถในการกระจายตัว คือ ค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะพื้น โดยถ้าค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีนั้นมีค่าสูง แสดงว่า โลหะบัดกรีชนิดนั้น มีการกระจายตัว (Wetting) ที่ดี มีการไหล (Fluidly) ที่ดี และมีแรงยึดติด (Adhesive) บนพื้นผิวโลหะพื้นที่ต่ำ ผลที่ได้คือ เกิดการเชื่อมประสานและรอยบัดกรีที่ดีบนพื้นผิวโลหะพื้น

ถ้าค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะนั้นสามารถบ่งบอกความสามารถ ในการบัดกรีได้ ดังนั้น สิ่งที่เป็นเวลาจะทำการบัดกรีต้องคำนึงถึงโลหะบัดกรีที่มีค่าความสามารถในการกระจายตัว (Wettability) บนพื้นผิวโลหะที่สูง ซึ่งค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีนั้นสามารถหาได้ 3 วิธี ได้แก่

1. Spread test method อ้างอิงมาตรฐาน JIS Z 3198-3: 2003 (JWES), Test methods for lead-free solders – Part 3: Methods for spread test

2. Contact angle method อ้างอิงมาตรฐาน JIS Z 31984-4:2003 (JWES), Test methods for lead-free solders – Part 4: Methods for solderability test by a wetting balance method and a contact angle method

3. Wetting balance method อ้างอิงมาตรฐาน JIS Z 31984-4:2003 (JWES), Test methods for lead-free solders – Part 4: Methods for solderability test by a wetting balance method and a contact angle method

2.3.1 วิธีทดสอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรี (Spread Test Method)

ตามมาตรฐานของ JIS Z3198-3 : 2003 (JWES) ว่าด้วยเรื่อง Test methods for lead-free solder – Part 3 : Methods for spread test

Spread Test Method คือ วิธีการทดสอบหาค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะพื้น โดยมีวิธีการทดสอบดังนี้

1. หยดน้ำยาประสาน 0.02 มิลลิลิตร ที่จุดศูนย์กลางของแผ่นทองแดงและวางโลหะบัดกรีทดสอบที่จุดศูนย์กลางบนแผ่นทองแดง

2. ให้ความร้อน 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 2 นาที เพื่อให้ฟลักซ์ระเหยออกไป

3. ตั้งค่าอุณหภูมิอ่างบัดกรีที่ 300 องศาเซลเซียส \pm 3 องศาเซลเซียส

4. นำชิ้นงานทดสอบสัมผัสกับโลหะบัดกรีหลอมเหลวในอ่างบัดกรี และกำจัดชั้นฟิล์มออกไซด์บนผิว หน้าโลหะบัดกรีหลอมเหลวด้วย Scrubber

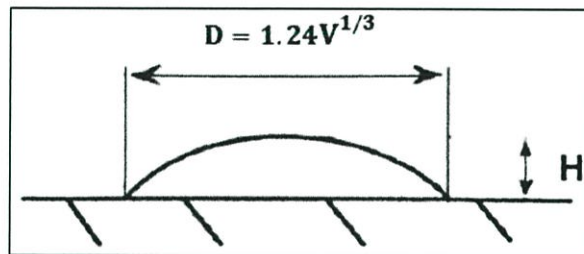
5. หลังจากชิ้นงานสัมผัสกับโลหะบัดกรีหลอมเหลวในอ่างบัดกรีเป็นระยะเวลา 30 วินาที ให้โลหะบัดกรีที่ใช้ทดสอบหลอมละลายบนแผ่นทองแดง

6. เลื่อนชิ้นงานขึ้น จากนั้นปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
7. ล้างน้ำยาประสานออกโดยใช้สารละลายที่เหมาะสม

การหาค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะพื้นโดย Spread Test Method สามารถหาได้ดังนี้

2.3.1.1 ค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread Factor, S_f)

หลังจากทำการทดสอบโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดงแล้วและปล่อยให้โลหะบัดกรีเย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง ทำการวัดค่าความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรีที่แข็งตัวแล้วด้วยไมโครมิเตอร์ดังรูปที่ 2.9 และนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread Factor, S_f) ดังสมการ 2.1



รูปที่ 2.9 ความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรี

$$S_f = \frac{D-H}{D} \times 100 \quad (2.1)$$

เมื่อ H คือ ความสูงของโลหะบัดกรีที่แผ่กระจาย

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรีที่ถูกทดสอบ เมื่อ $D = 1.24V^{\frac{1}{3}}$

V คือ ปริมาตรของโลหะบัดกรีที่ใช้ทดสอบ

2.3.1.2 ค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread Ratio, S_r)

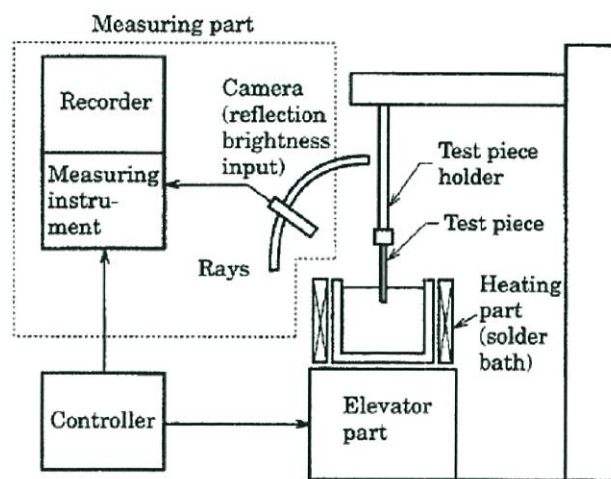
นอกจากนี้ค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรียังสามารถคำนวณเป็นค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread Ratio, S_r) ได้ดังสมการ 2.2

$$S_r = \frac{\text{Plan area of spread on the substrate surface}}{\text{Plan area of the original pellet}} \quad (2.2)$$

2.3.2 การทดสอบค่ามุมสัมผัสหลังการบัดกรี (Contact Angle Method)

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

Contact Angle เป็นวิธีการทดสอบในการวัดค่ามุมสัมผัสที่บริเวณปลายขอบของโลหะบัดกรีเมื่อผ่านกระบวนการทดสอบ วิธีการนี้จะทำการวัดมุมสัมผัสของโลหะบัดกรีที่แผ่กระจายบนชิ้นงานทดสอบ จากจุดของแผ่นชิ้นงานทดสอบที่ทำการจุ่มและดึงขึ้นจากอ่างโลหะบัดกรีและบันทึกผลที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งการทดสอบนั้นมีขั้นตอนต่างๆตามตารางที่ 2.8 และรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 Contact Angle Method (Japanese Standards Association, 2003)

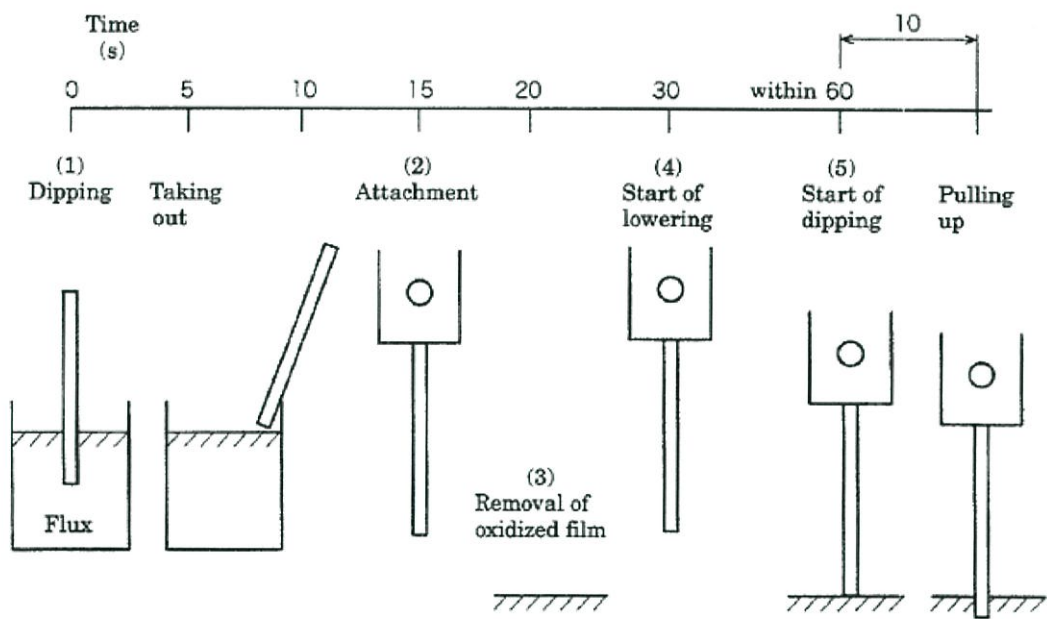
ขั้นตอนการทดสอบ

1. หลอมโลหะบัดกรีในอ่างบัดกรี (Solder Tank) ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส \pm 3 องศาเซลเซียส
2. ใส่ฟลักซ์ที่ใช้ในการทดสอบตามมาตรฐานลงในจานทดลอง (Petri Dish)
3. จุ่มชิ้นงานทดสอบลงในฟลักซ์ ลึกลงไป 4-5 มิลลิเมตรจากขอบ เป็นเวลา 5 วินาที แล้วยกขึ้นเพื่อกำจัดออกไซด์ที่ผิวหน้า
4. ให้นำชิ้นงานทดสอบที่ทำการจุ่มฟลักซ์แล้ว จุ่มลงในอ่างบัดกรีอย่างช้าๆ ลึกลงไป 2 มิลลิเมตรทิ้งไว้ประมาณ 10 วินาที และเริ่มให้เครื่องบันทึกผลทำงาน จากนั้นบันทึกผลค่ามุมสัมผัส (Contact Angle) ที่เปลี่ยนแปลงไป ณ เวลาหนึ่งๆ ของโลหะบัดกรีบนแผ่นชิ้นงานทดสอบที่เกิดการยึดประสานกันที่ผิวหน้าของชิ้นงานในระหว่างการจุ่ม เมื่อเวลาเปลี่ยนไป

ตารางที่ 2.8 ลำดับเวลาในการดำเนินการทดสอบ

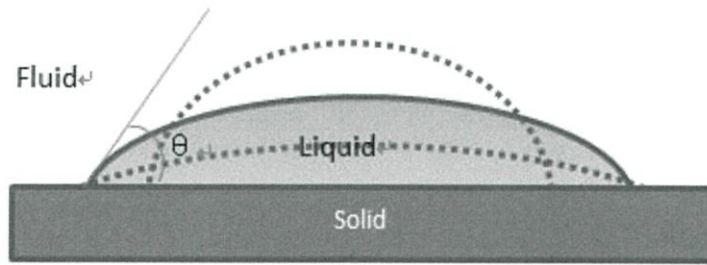
Unit: s

Operation item	Time	Continuing time
(1) Dipping into flux	0	5
(2) Attachment of a test piece to a holder	15	—
(3) Removal of the oxidized film from a solder bath surface	20	—
(4) Start of lowering of the test piece	30	—
(5) Dipping into the solder bath	60 or under	10



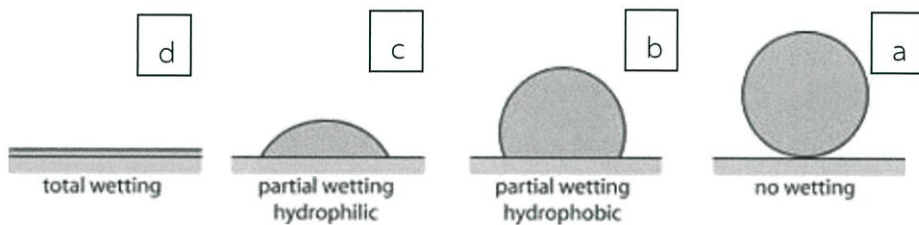
รูปที่ 2.11 ลำดับขั้นตอนในช่วงเวลาทดสอบ (Japanese Standards Association, 2003)

Contact Angle Method คือ วิธีการทดสอบหาค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะ บัดกรีบนพื้นผิวโลหะพื้นโดยวัดจากค่ามุมสัมผัส (Contact Angle, Θ) โดยมุมสัมผัสเป็นการวัดการประสานระหว่างของแข็งและของเหลวในเชิงปริมาณ ค่ามุมสัมผัสที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของพื้นผิวโลหะพื้นและรูปร่างของโลหะบัดกรีหลอมเหลว ซึ่งมุมสัมผัสที่ได้นั้นจะเกิดจากการที่ของเหลวมีอาณาเขตติดต่อกัน 3 เฟส ได้แก่ ของแข็ง (Solid, S) ของเหลว (Liquid, L) และก๊าซ (Gas, G)



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ของมุมสัมผัสที่มีต่อโลหะบัดกรี พื้นผิวโลหะและบรรยากาศโดยรอบ (USA KINO, 2014)

จากรูปที่ 2.12 มุมที่เกิดจากระนาบของแข็งและของเหลว (θ) เรียกว่า Wetting Angle หรือ Contact Angle โดยมุมนี้จะขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะแผ่น



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ของมุมสัมผัสที่มุมใดๆ กับการกระจายตัวของโลหะบัดกรี (Stave et al., 2013)

จากรูปที่ 2.13 จะแสดงให้เห็นถึงค่า θ หรือ Contact Angle ที่มุมใดๆ โดยที่ รูปที่ 2.13 (a) มี Contact Angle เท่ากับ 180 องศา คือยังไม่มี การกระจายตัวของโลหะบัดกรี (Non-wetted) จึงยังไม่เกิดการประสานของพื้นผิวโลหะพื้น รูปที่ 2.13 (b) มี Contact Angle ระหว่าง 0 ถึง 90 องศา เนื่องจากมี บางส่วนของโลหะบัดกรีเริ่มหลอมละลาย รูปที่ 2.13 (c) มี Contact Angle ระหว่าง 90 ถึง 180 องศา คือโลหะบัดกรีเริ่มมีการหลอมละลายบนพื้นผิวโลหะแล้วกลับคืนไปเป็นของแข็งอีกครั้ง (Dewetting) เนื่องจากอุณหภูมิในการหลอมละลายต่ำลง จึงไม่เกิดการประสานกันบนพื้นผิวโลหะพื้น รูปที่ 2.12 (d) มี Contact Angle เท่ากับ 0 องศา คือมีการกระจายตัวของโลหะบัดกรีแบบสมบูรณ์ (Total wetting) จน เกิดเป็นชั้นฟิล์มขึ้นบนผิวของพื้นผิวโลหะพื้น อาจกล่าวได้ว่า Contact Angle จะแปรผกผันกับค่า ความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรี

ในกระบวนการบัดกรีมีจุดประสงค์คือ บัดกรีให้มี Contact Angle เท่ากับ 0 องศา ซึ่งเป็นได้แค่ ในอุดมคติเท่านั้น ในความเป็นจริงในกระบวนการบัดกรีขอแค่การบัดกรีที่มี Contact Angle น้อยกว่า 75

องศา ก็ถือว่าเป็นการบัดกรีที่ดีแล้ว ทั้งนี้ Contact Angle จะขึ้นอยู่กับแรงตึงผิวของโลหะบัดกรีด้วย ถ้าแรงตึงผิวของโลหะบัดกรีมีค่าต่ำลง จะยิ่งทำให้ Contact Angle มีค่าน้อยลงด้วย

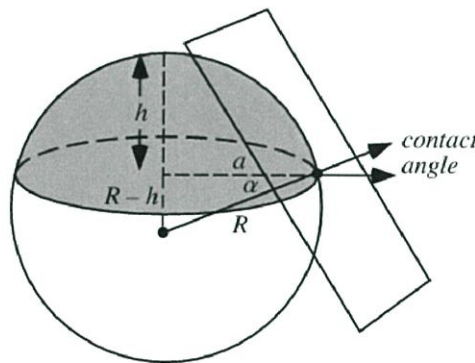
ค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะพื้น สามารถหาได้จากค่า Contact Angle โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างรัศมี และความสูงของโลหะบัดกรี ดังรูปที่ 2.14 จากนั้นจะนำมาคำนวณหาค่ามุมสัมผัสด้วยสมการ 2.3

$$\sin \theta = \frac{2}{\left(\frac{A}{h} + \frac{h}{A}\right)} \quad (2.3)$$

เมื่อ θ คือ มุมสัมผัส

A คือ รัศมีของโลหะบัดกรี

h คือ ความสูงของโลหะบัดกรี



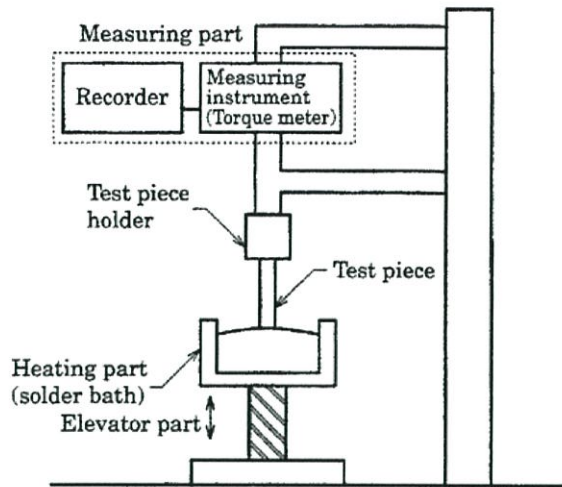
รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างรัศมี ความสูง และมุมสัมผัสของโลหะบัดกรี

(WolframMathWord, 2010)

2.3.3 Wetting Balance Method

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

Wetting Balance เป็นวิธีการทดสอบสำหรับวัดค่าเวลาและแรงในภาวะการฉีก (Wetting) ของโลหะบัดกรีขณะทำการทดสอบ วิธีการนี้เป็นวิธีการตรวจสอบแรงที่กระทำบนแผ่นชิ้นงานทดสอบ จากจุดของแผ่นชิ้นงานทดสอบที่ทำการจุ่มและดึงขึ้นจากอ่างโลหะบัดกรี ดังรูปที่ 2.15 และแสดงผลโดยการบันทึกอย่างต่อเนื่องเป็นฟังก์ชันของเวลาผ่านเครื่องแปลงสัญญาณ

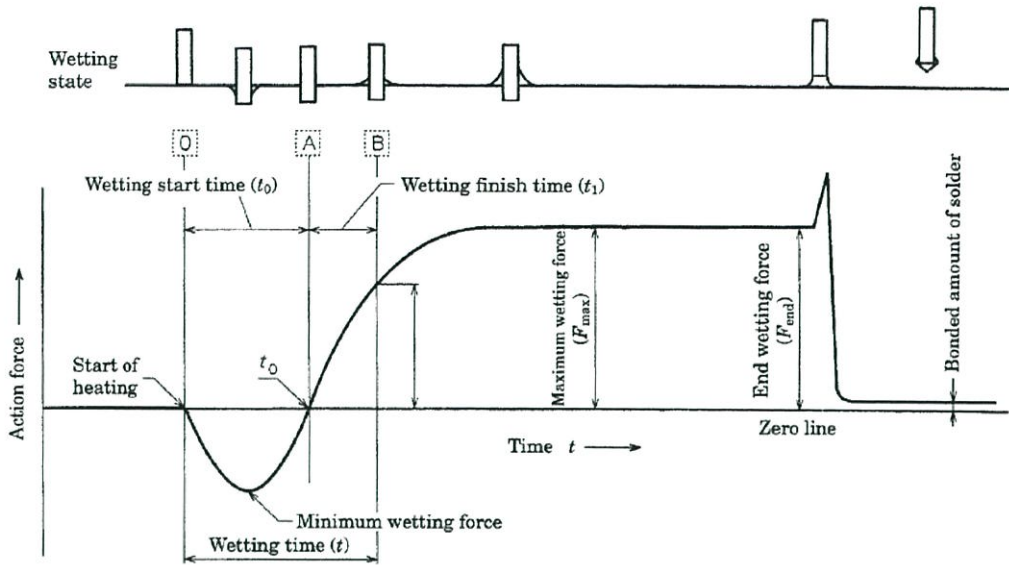


รูปที่ 2.15 Wetting Balance Method (Japanese Standards Association, 2003)

ขั้นตอนการทดสอบ

1. หลอมโลหะบัดกรีในอ่างบัดกรี (Solder tank) ที่อุณหภูมิ 300 ± 3 องศาเซลเซียส
2. ใส่ฟลักซ์ที่ใช้ในการทดลองตามมาตรฐานลงในจานทดลอง (Petri dish)
3. จุ่มชิ้นงานทดสอบลงในฟลักซ์ ลึกลงไป 4-5 มิลลิเมตรจากขอบ เป็นเวลา 5 วินาที แล้วยกขึ้นเพื่อกำจัดออกไซด์ที่ผิวหน้า
- 4.ให้นำชิ้นงานทดสอบที่ทำการจุ่มฟลักซ์แล้ว จุ่มลงในอ่างบัดกรีอย่างช้าๆ ลึกลงไป 2 มิลลิเมตรทิ้งไว้ประมาณ 10 วินาที และบันทึกผลการทดลองลงบนแผนภูมิการเปลี่ยนแปลงของโหลดในช่วงเวลาต่างๆ จากจุดที่ชิ้นงานทดสอบเกิดการยึดประสานกันที่ผิวชิ้นงานทดสอบในระหว่างการจุ่ม

Wetting Balance Method คือ วิธีการทดสอบหาค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นโลหะพื้น โดยจะนำชิ้นงานโลหะที่ชุบด้วยฟลักซ์ แล้วมาจุ่มลงในโลหะบัดกรีหลอมเหลวที่อยู่ในอ่างบัดกรี ด้วยความเร็วและระยะความลึกในการจุ่มตามที่กำหนด แล้วนำค่าที่ได้จากการทดสอบมาสร้าง Wetting Curve ได้ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 Wetting Curve ที่ได้จากเครื่องทดสอบ
(Japanese Standards Association, 2003)

จากรูปที่ 2.16 สามารถอธิบายได้ว่า ในช่วงแรกที่ชิ้นงานทดสอบเริ่มสัมผัสกับโลหะบัดกรี หลอมเหลวเมื่อจุ่มลงในโลหะบัดกรีนั้นค่าแรงที่ได้จะเป็นค่าลบ เนื่องจากต้องมีแรงพยายามอย่างมากเพื่อเอาชนะแรงลอยตัวที่บริเวณผิวของโลหะบัดกรีหลอมเหลว จากนั้นแรงที่ได้จะเป็นค่าบวก และเมื่อชิ้นงานเริ่มสัมผัสกับโลหะบัดกรีจนกระทั่งมีมุมสัมผัสเป็น 90 องศา ช่วงที่แรงอยู่ในภาวะสมดุลคือ Wetting Time (t_0) และมีแรงที่กระทำสูงสุดต่อหน่วยพื้นที่ระหว่างผิวของโลหะทดสอบกับโลหะบัดกรีหลอมเหลวคือ Wetting Force (F_{max})

2.3.4 ความสัมพันธ์ของ spread Factor, Spread Ratio และ Contact Angle

2.3.4.1 ความสัมพันธ์ของ Spread Ratio และ Contact Angle

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

Solder เมื่อ A และ a มีความสัมพันธ์ในเรื่องการอนุรักษ์ของปริมาตรของโลหะบัดกรีหลอมละลาย

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

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

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

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

จะได้ว่า
$$S_r = \frac{4\left(\frac{a^2}{h^2}\right)}{\left(1 + 3\frac{A^2}{h^2}\right)^{\frac{2}{3}}} = \frac{4 \cot^2 \frac{\theta}{2}}{\left(1 + 3 \cot^2 \frac{\theta}{2}\right)^{\frac{2}{3}}} \quad (2.4)$$

เมื่อ $0^\circ < \theta < 180^\circ$

2.3.4.2. ความสัมพันธ์ของ Spread Factor และ Contact Angle

จากสมการ (2.1) Spread Factor :
$$\begin{aligned} S_f &= \frac{D-H}{D} \times 100 \\ &= \frac{(h^3 + 3A^2h)^{\frac{1}{3}} - h}{(h^3 + 3A^2h)^{\frac{1}{3}}} \\ &= 1 - \frac{1}{\left(1 + 3\frac{A^2}{h^2}\right)^{\frac{1}{3}}} \\ &= 1 - \frac{1}{\left(1 + 3 \cot^2 \frac{\theta}{2}\right)^{\frac{1}{3}}} \end{aligned} \quad (2.5)$$

เมื่อ $0^\circ < \theta < 180^\circ$

2.3.4.3 ความสัมพันธ์ของ Contact Angle และมิติของโลหะบัดกรีหลอมละลาย

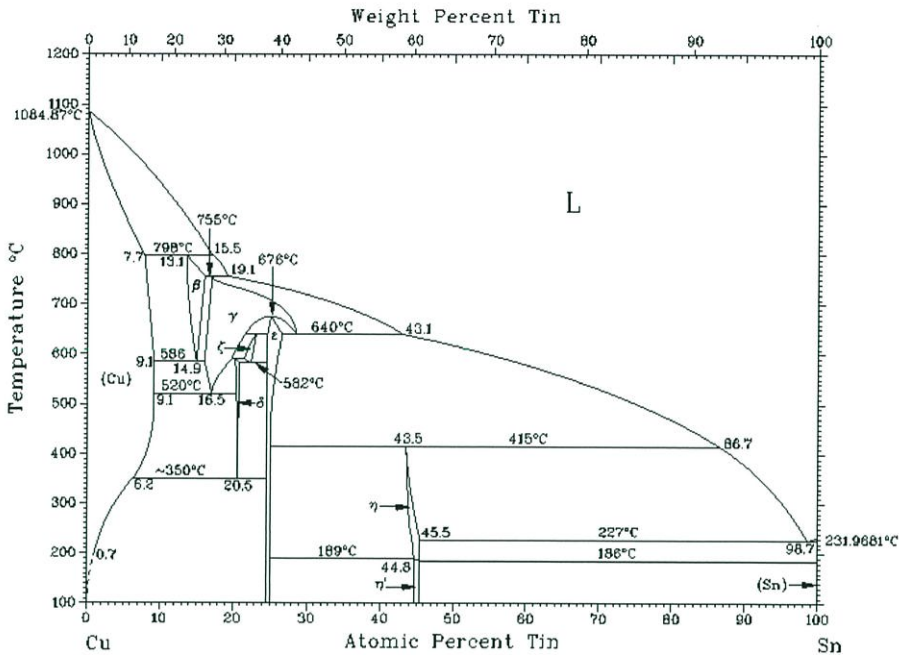
จาก
$$R^2 = A^2 + (R - h)^2 \quad (2.6)$$

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

จะได้ว่า
$$\sin \theta = \frac{2}{\left(\frac{A}{h}\right) + \left(\frac{h}{A}\right)} \quad (2.7)$$

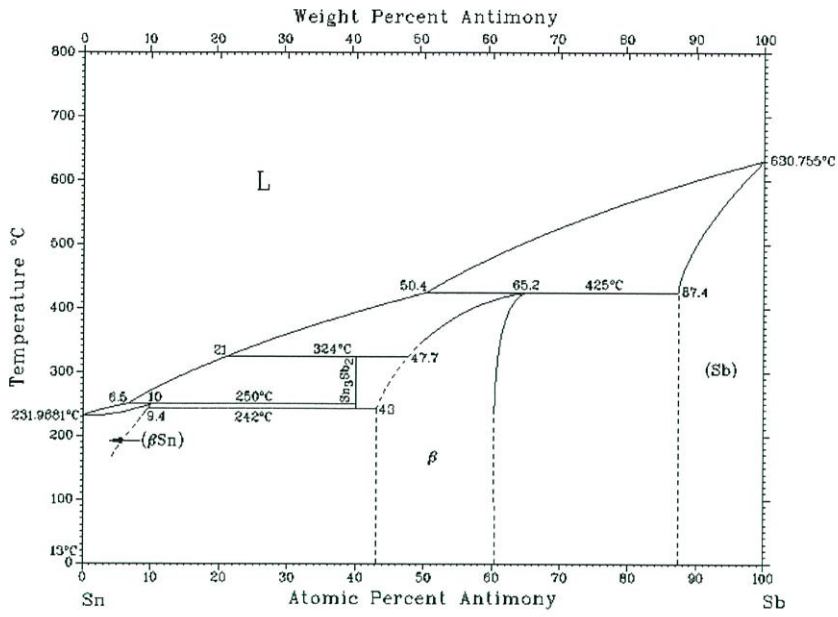
2.4 แผนภูมิเฟสของโลหะบัดกรี

ปฏิกิริยาที่สำคัญประการหนึ่งของโลหะผสมดีบุก-ทองแดง คือปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 226.8 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นปฏิกิริยายูเทกติก ทำให้ของเหลวเปลี่ยนไปเป็นของแข็ง Cu_6Sn_5 และ Sn ดังรูปที่ 2.17



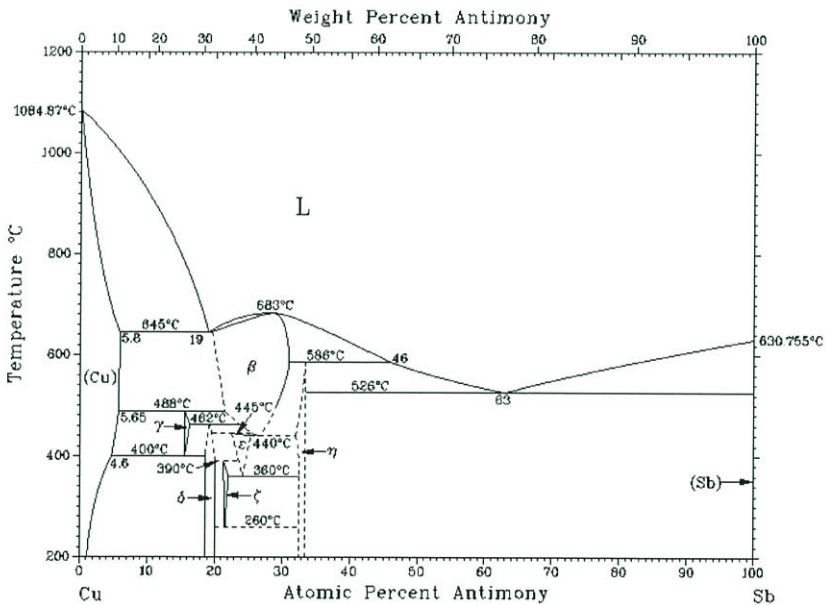
รูปที่ 2.17 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุก-ทองแดง (himikatus.ru, 1996)

ปฏิกิริยาที่สำคัญของโลหะผสมดีบุก-พลวง คือปฏิกิริยาเพอริเทกติกที่อุณหภูมิ 425 องศาเซลเซียส เกิดการรวมตัวของเฟสของเหลวกับพลวงที่อยู่ในสถานะของแข็งได้เป็นเฟส β -SnSb นอกจากนี้ ที่อุณหภูมิ 324 องศาเซลเซียส ยังมีการรวมตัวของเฟสของเหลวกับ β -SnSb ได้เป็นเฟส Sn_3Sb_2 และที่อุณหภูมิ 243 องศาเซลเซียส มีการรวมตัวของเฟสของเหลวกับ Sn_3Sb_2 จนเกิดเป็นเฟส Sn ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุก-พลวง (himikatus.ru, 1996)

ปฏิกิริยาที่สำคัญของโลหะผสมทองแดง-พลวง คือปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 526 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นปฏิกิริยายูเทกติก ทำให้ของเหลวเปลี่ยนไปเป็นของแข็ง Cu₂Sb และ Sb ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมทองแดง-พลวง (himikatus.ru, 1996)

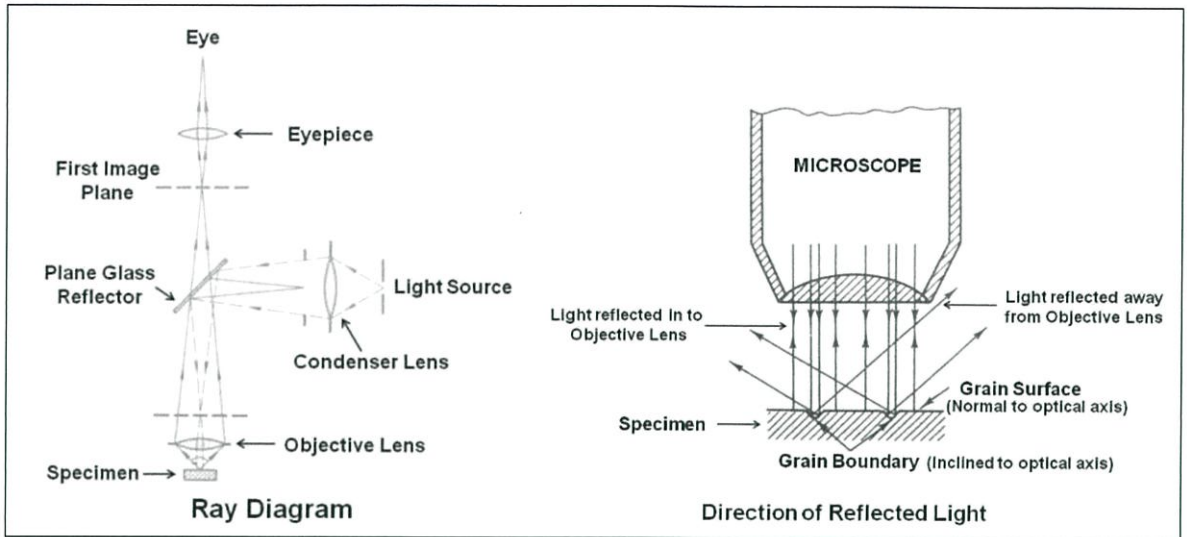
2.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะ จะช่วยให้เราสามารถอธิบายคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของโลหะได้ การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะจะมีประสิทธิภาพ และคุณภาพขึ้นอยู่กับการเตรียมชิ้นงานทดสอบเป็นสำคัญ กล่าวคือ ชิ้นงานทดสอบจะต้องผ่านการปรับระดับของผิวหน้า และขัดผิวให้เรียบร้อยไม่มีรอยขีดข่วน มีลักษณะเป็นมัน ถ้าขั้นตอนการเตรียมงานไม่ดี ก็ไม่สามารถวิเคราะห์หรือมองภาพจากกล้องจุลทรรศน์ได้ชัดเจน

ภายหลังจากที่ชิ้นงานผ่านการขัดมันมาแล้ว เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์จะมองเห็นเป็นภาพพื้นเรียบสว่างตลอดผิวงาน ไม่สามารถมองเห็นโครงสร้างจุลภาคได้ จึงต้องนำชิ้นงานทดสอบไปทำการกัดด้วยสารเคมี เพื่อให้ผิวชิ้นงานเกิดลักษณะที่แตกต่างกัน เนื่องจากชิ้นงานประกอบด้วยเฟสหลายเฟสและหลายชนิด เฟสใดที่มีความต้านทานสูงกรดสามารถกัดได้น้อย และเฟสใดที่มีความต้านทานต่ำ กรดสามารถกัดได้ลึกกว่า ทำให้ผิวชิ้นงานเปลี่ยนเป็นขรุขระ เมื่อนำไปตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่ส่องลงไปบนผิวหน้าที่ขรุขระสะท้อนแสงกลับมาคนละทิศทาง ทำให้บริเวณที่แสงสะท้อนกลับมาน้อยเห็นเป็นสีดำ ส่วนบริเวณที่แสงสะท้อนกลับมาได้มากก็จะเห็นเป็นสีขาว

2.5.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM)

กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงเป็นกล้องที่ใช้ศึกษาโครงสร้างจุลภาค โดยใช้แสงและระบบกำเนิดแสงเป็นพื้นฐาน กล้องประเภทนี้สามารถตรวจสอบโครงสร้างได้เฉพาะที่ผิวเท่านั้นโดยการสะท้อนแสง สำหรับวัตถุที่บ่งแสง เช่น โลหะทุกประเภท เซรามิก และ โพลีเมอร์บางชนิด ความดำของภาพแตกต่างกันเกิดจากความสามารถในการสะท้อนแสงที่แตกต่างกันในบริเวณต่างๆ การตรวจสอบแบบนี้เรียกว่า เมทัลโลกราฟี (Metallography) ชิ้นงานที่ผ่านการขัดจะเรียบขนสะท้อนแสงได้เหมือนกระจก หลังจากการกัดด้วยสารเคมีและนำมาตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงจะมองเห็นโครงสร้างจุลภาค ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเกรนมีทิศทางที่แตกต่างกัน จึงมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาต่างกัน แสงที่สะท้อนออกจากผิวของเกรนที่มีทิศทางการเรียงตัวของอะตอมที่แตกต่างกันหลังการกัดผิว โดยความเงาและเนื้อผิวที่เห็นในแต่ละเกรนขึ้นอยู่กับการสะท้อนแสงของเกรนนั้นๆ หลังจากการขัดผิวที่ขอบเกรนจะเกิดร่องขนาดเล็กขึ้น เนื่องจากอะตอมที่บริเวณขอบเกรนมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยามากกว่าบริเวณอื่นๆ จึงถูกกัดออกไปมากกว่าบริเวณอื่นภายในเกรน ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Practical Maintenance, 2008)

2.5.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

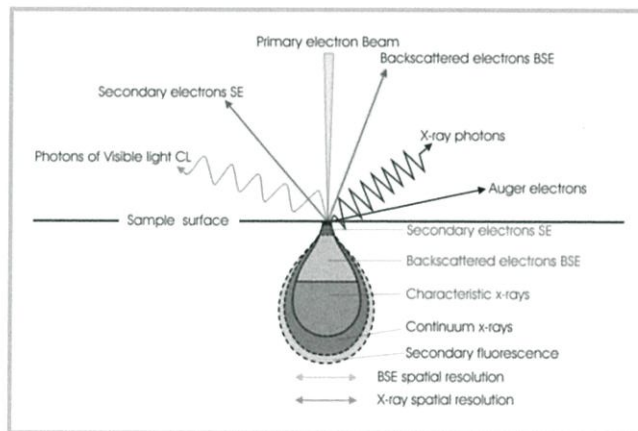
ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) สัญญาณภาพที่ได้เกิดจากการใช้ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Detector, SE Detector) มาจับสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดขึ้น หรือใช้ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscatter Electron, BSE) มาจับสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับที่เกิดขึ้น ดังนั้นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบนี้จะสามารถประกอบกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ได้ทั้งแบบ Energy Dispersive X-ray (EDX) และ Wavelength Dispersive X-ray (WDX) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ธาตุโดยอาศัยหลักการแยกรังสีตามพลังงาน

หลักการเกิดภาพของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด คือ อิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary Electron) จากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron Gun) จะถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าสูงที่สามารถปรับค่าได้ (1000-3000 อิเล็กตรอนโวลต์หรือมากกว่า) จากนั้นจึงถูกดูดลงสู่แผ่นเบี่ยงล่างโดยแผ่นแอโนด (Anode Plate) ภายใต้ความดันสุญญากาศ 10^{-5} ถึง 10^{-7} ทอร์ และมีจุดคอนเด็นเซอร์เลนส์ที่ปรับลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดเล็กลงเพื่อเป็นการเพิ่มความเข้มของลำอิเล็กตรอน จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะวิ่งลงสู่เบี่ยงล่างผ่านเลนส์วัตถุ ซึ่งมีหน้าที่ในการปรับลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้มีจุดโฟกัสบนผิวตัวอย่างพอดี และลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบบนผิววัตถุหรือตัวอย่างจะมีขนาดในช่วง 5 ถึง 200 นาโนเมตร โดยมีชุดขดลวดควบคุมการส่องกราด (Scan Coil) ของลำอิเล็กตรอนทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนบนผิวตัวอย่างดังรูปที่ 2.22 และเกิดการถ่ายโอนพลังงานที่ชั้นความลึกจากผิวที่ระดับต่างๆทำให้เกิดการปลดปล่อยสัญญาณอิเล็กตรอนชนิดต่างๆออกมาดังรูปที่ 2.21 ซึ่งใช้ประโยชน์ในการศึกษาลักษณะผิวของตัวอย่างและวิเคราะห์ธาตุที่มีในชิ้นงานตัวอย่างได้ตามลักษณะสัญญาณภาพที่ได้จากลักษณะสัญญาณอิเล็กตรอนชนิดต่างๆที่เกิด คือ

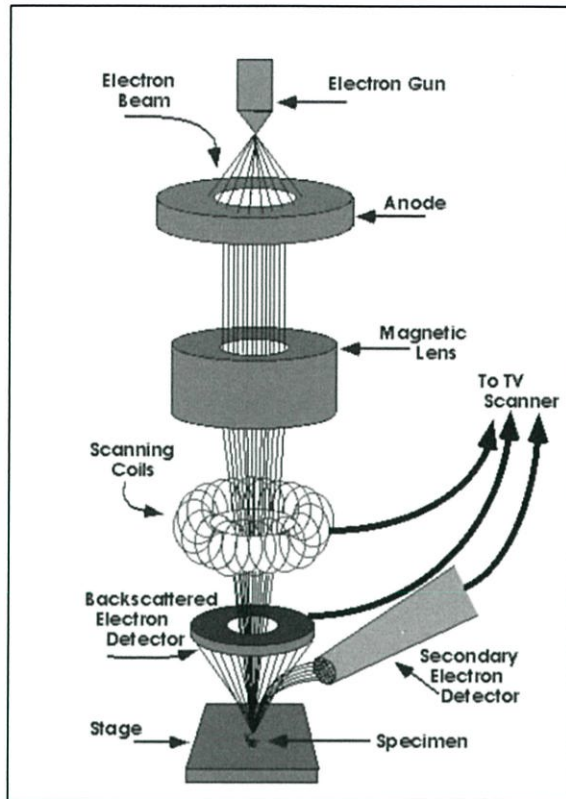
1. สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Secondary Electron Image, SEI) หรือเป็นกลุ่มพลังงานต่ำ 3-5 อิเล็กตรอนโวลต์ เกิดที่พื้นผิวระดับลึกไม่เกิน 10 นาโนเมตร โดยเกิดกับธาตุที่มีแรงยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนที่ผิวต่ำ

2. สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscatter Electron Image, BEI) หรือกลุ่มอิเล็กตรอนที่สูญเสียพลังงานให้กับอะตอมในชั้นงานเพียงบางส่วน และการกระเจิงกลับออกมามีพลังงานสูงกว่าอิเล็กตรอนทุติยภูมิ เกิดที่ผิวระดับลึกกว่า 10 นาโนเมตร โดยเกิดได้ดีกับธาตุที่มีเลขอะตอมสูง

3. สัญญาณภาพจากรังสีเอกซ์ (X-ray Image, XRI) ชนิดที่เป็นรังสีเอกซ์เฉพาะตัวเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดจากอิเล็กตรอนในระดับชั้นโคจรต่างๆ (K, L, M,...) ถูกกระตุ้นหรือได้รับพลังงานมากพอจนหลุดออกมาจากวงโคจรทำให้อะตอมต้องรักษาสสมดุลของโครงสร้างรวมภายในโดยการดึงอิเล็กตรอนจากวงโคจรชั้นถัดไปเข้ามาแทนที่และต้องลดระดับพลังงานภายใน เนื่องจากอิเล็กตรอนที่ถูกดึงมามีพลังงานสูงกว่าโดยการปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อให้ตัวเองมีพลังงานเท่ากับชั้นวงโคจรที่เข้าไปแทนที่ ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้มีความยาวคลื่นเฉพาะในแต่ละธาตุ จึงสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ธาตุตามระดับพลังงานของตัวอย่างได้ทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณ



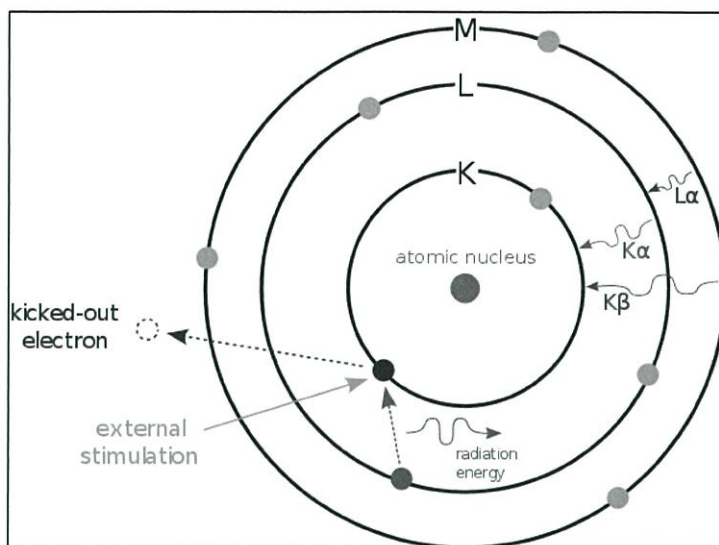
รูปที่ 2.21 การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับตัวอย่างที่ระดับชั้นความลึกต่างๆ (University of Glasgow, 2012)



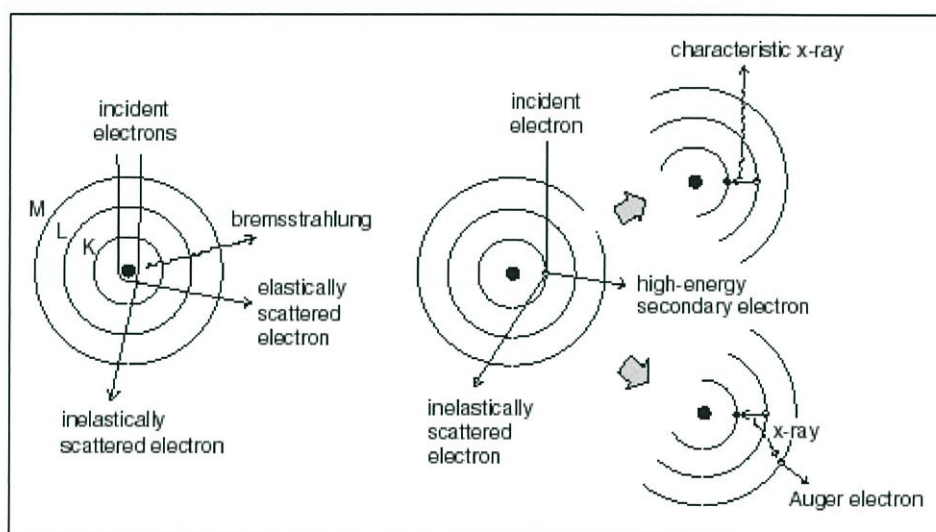
รูปที่ 2.22 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Chia, 2015)

2.5.3 การวิเคราะห์ Energy Dispersive X-ray (EDX)

ในระบบวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์สำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จะใช้ระบบการวิเคราะห์แบบ Energy Dispersive X-ray (EDX) โดยระบบ EDX มีหลักการการวิเคราะห์คือ เมื่อลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงเคลื่อนที่เข้าชนอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นในของอะตอม เช่น ชั้น K หรือ L แล้วเกิดการถ่ายโอนพลังงานให้แก่อิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนในชั้นที่ได้รับพลังงานดังกล่าวมีพลังงานสูงขึ้นเกินพลังงานยึดเหนี่ยวของชั้นวงโคจร อิเล็กตรอนจึงหลุดออกจากวงโคจรและทำให้เกิดที่ว่างในชั้นวงโคจรนั้น จากนั้นอะตอมที่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้นจะลดระดับพลังงานลงมาให้เท่ากับพลังงานยึดเหนี่ยวของวงโคจรที่เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอน ด้วยการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินในรูปของรังสีเอกซ์แล้วอิเล็กตรอนจะเข้ามาแทนที่ พลังงานส่วนเกินนี้จะมีพลังงานเท่ากับความต่างของพลังงานยึดเหนี่ยวเฉพาะชั้นโคจรของอิเล็กตรอนเฉพาะของธาตุนั้นๆ จึงเป็นพลังงานเฉพาะค่า เราเรียกรังสีเอกซ์ชนิดนี้ว่า รังสีเอกซ์เฉพาะตัวดังรูปที่ 2.23 และ 2.24



รูปที่ 2.23 การเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่ระดับพลังงานของชั้นวงโคจรต่างๆ
(International association of MicroAnalysis, 1935)



รูปที่ 2.24 การกระตุ้นให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวโดยใช้ลำอิเล็กตรอน
(International association of MicroAnalysis, 1935)

ในระบบการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์แบบ EDX หัววัดรังสีที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ หัววัดรังสีแบบ Si (Li) ซึ่งเหมาะกับการวัดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่มีพลังงานในช่วง 1-30 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV) หรือหัววัดเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง (High Purity Germanium, HPGe) ซึ่งสามารถวัดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวได้ในช่วง 3-200 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ แม้ว่าหัววัด HPGe จะสามารถวัดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวได้ใน

ช่วงกว้างกว่า แต่ในการวิเคราะห์ธาตุเบาหัตถ์ชนิด Si (Li) ก็ยังมีความจำเป็นอยู่มาก หัตถ์รังสีเอกซ์ทั้งสองแบบจะเปลี่ยนพลังงานของรังสีให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าในรูปของศักย์ไฟฟ้า โดยขนาดของสัญญาณไฟฟ้าที่ออกทางหัตถ์ จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบบนหัตถ์ จากนั้นวงจรขยายแบบช่องเดี่ยวหรือหลายช่องจะเก็บสัญญาณไฟฟ้าจากหัตถ์ในหน่วยความจำที่อยู่ภายในเครื่องและแสดงผลวิเคราะห์บนจอภาพในรูปของสเปกตรัมพร้อมทั้งผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณและคุณภาพ โดยโปรแกรมสำเร็จรูปที่มีอยู่ซึ่งมีความซับซ้อนแตกต่างกันไปในแต่ละกลุ่มผู้ผลิต

การประยุกต์ใช้งานของ SEM-EDX

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

2.6 Design Expert Software

โปรแกรม Design Expert เป็นโปรแกรมที่ช่วยในการหาค่าที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์โดยจะมีการใช้ข้อมูลทางสถิติในการออกแบบให้อยู่ในขอบเขตและเงื่อนไขที่ต้องการ ซึ่งสามารถจำแยกออกได้เป็น 4 ประเภทหลักๆดังนี้

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

Design Expert จะใช้ข้อมูลทางสถิติในการหาสมการที่ใช้ในการทำนายผลให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด ซึ่งจะใช้ข้อมูลทางสถิติดังนี้

1. Sequential Model Sum of Squares

Sequential Model Sum of Squares เป็นการแสดงการปรับปรุงสะสมของแต่ละเทอมที่เพิ่มขึ้นมา เช่น Quadratic แสดงค่านัยสำคัญของพจน์ Quadratic หลังจากการคำนวณค่า Mean และค่า Block ส่วนค่า Special Cubic จะระบุนัยสำคัญของการเพิ่มพจน์ Special Cubic เข้าไปยัง Quadratic

Block และ Mean ดังตารางที่ 2.9 ในตารางนี้ควรเลือกแบบจำลองที่มีกำลังสูงสุด และมีค่า P-Value หรือ Prob>F ที่มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ก็คือ 0.05

ตารางที่ 2.9 Sequential Model Sum of Squares

Sequential Model Sum of Squares						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Mean vs Total	150.4828	1	150.4828			
<u>Linear vs Mean</u>	<u>9.3941</u>	<u>2</u>	<u>4.6970</u>	<u>9.5695</u>	<u>0.0028</u>	<u>Suggested</u>
Quadratic vs Linear	0.8872	3	0.2957	0.5383	0.6666	
Sp Cubic vs Quadratic	0.4003	1	0.4003	0.7074	0.4221	
Cubic vs Sp Cubic	1.2511	3	0.4170	0.6512	0.6106	
Quartic vs Cubic	0.9474	1	0.9474	1.6365	0.2570	Aliased
Residual	2.8948	5	0.5790			
Sp Quartic vs Quadratic	0.4591	3	0.1530	0.2128	0.8845	
Quartic vs Sp Quartic	2.1397	2	1.0699	1.8479	0.2507	Aliased
Residual	2.8948	5	0.5790			
Total	166.2577	16	10.3911			

2. Lack of Fit Tests

Lack of Fit Tests เป็นตารางที่แสดงว่าแต่ละแบบจำลองมีความเหมาะสมมากน้อยเพียงใด ใช้ในการทำนายผลตอบสนอง การทดสอบเป็นการเปรียบเทียบระหว่าง Residual Mean Squared กับ Pure Error Mean Squared ดังตารางที่ 2.10 แบบจำลองที่เลือกจะต้องไม่มีค่า Lack of Fit อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งดูได้จากค่า P-Value ที่มากกว่า 0.05

ตารางที่ 2.10 Lack of Fit Tests

Lack of Fit Tests						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Linear	391.7612	8	48.9702	0.7005	0.6888	
Quadratic	212.6684	5	42.5337	0.6084	0.7006	
<u>Special Cubic</u>	<u>94.6684</u>	<u>4</u>	<u>23.6671</u>	<u>0.3385</u>	<u>0.8419</u>	<u>Suggested</u>
Cubic	1.3727	1	1.3727	0.0196	0.8940	
Special Quartic	36.4022	2	18.2011	0.2604	0.7806	
Quartic	0.0000	0				Aliased
Pure Error	349.5437	5	69.9087			

3. Model Summary Statistics

Model Summary Statistics เป็นตารางที่แสดงค่าทางสถิติที่ใช้ในการเปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลอง ดังตารางที่ 2.11 ค่าทางสถิติที่ใช้นั้นประกอบด้วย

- Standard Deviation เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่เกิดขึ้นจากความผิดพลาดในการทดลองซึ่งควรมีค่าน้อย

- R-Squared และ Adjust R-Squared เป็นค่าที่แสดงถึงกรณีในทางอุดมคติที่ได้จากการทดลองใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการพยากรณ์ ควรมีค่าเข้าใกล้ 1

- Predicted R-Squared เป็นการประมาณความแปรปรวนของข้อมูล ควรมีค่าเข้าใกล้ 1

- ค่า PRESS (Predicted Residual Error Sum of Square) จะเป็นค่าที่ได้จากการทำนายความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ซึ่งควรมีค่าน้อย

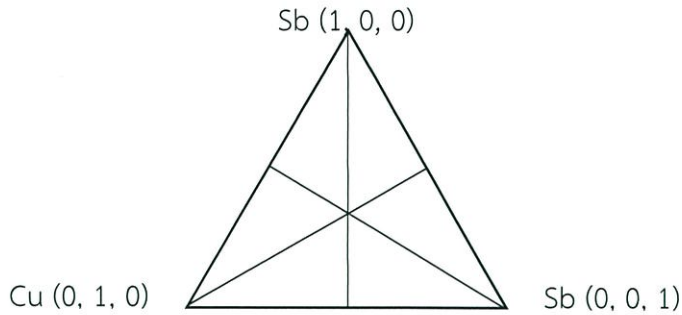
ตารางที่ 2.11 Model Summary Statistics

Model Summary Statistics						
Source	Std. Dev.	R-Squared	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	PRESS	
Linear	4.3681	0.1961	0.0724	-0.3050	402.6620	
Quadratic	4.3519	0.3862	0.0793	-0.6319	503.5245	
<u>Special Cubic</u>	<u>4.0960</u>	<u>0.5106</u>	<u>0.1844</u>	<u>-0.4824</u>	<u>457.3723</u>	<u>Suggested</u>
Cubic	4.3993	0.6236	0.0591		+	
Special Quartic	4.3269	0.5752	0.0898	-4.6061	1729.7283	
Quartic	4.8140	0.6244	-0.1267		+	Aliased

เมื่อโปรแกรมได้ทำการวิเคราะห์หาสมการที่เหมาะสมจากข้อมูลทางสถิติเสร็จสิ้น จะสามารถคำนวณหาค่าที่เหมาะสมกับเงื่อนไขที่ต้องการได้

2.7 การออกแบบส่วนผสม (Mixture Design)

แผนการทดลองแบบผสมเป็นเทคนิคซึ่งเหมาะสมสำหรับการพัฒนาสูตร เนื่องจากการทดลองแบบแฟคทอเรียลไม่เหมาะสมเมื่อมีส่วนผสมมากกว่า 1 ชนิด แผนการทดลองแบบผสมอาศัยหลักการที่ว่าเมื่อส่วนผสมส่วนใดส่วนหนึ่งเปลี่ยน ส่วนประกอบที่เหลือในสูตรจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงด้วย โดยที่ผลรวมของส่วนประกอบทั้งหมดทั้งหมดรวมกันเท่ากับ 1.0 หรือ 100% และผลตอบสนองขึ้นกับสัดส่วนของส่วนผสม ความสัมพันธ์ของส่วนผสมในแผนการทดลองที่มีส่วนผสม 3 ชนิด สามารถแสดงโดยใช้ระบบแกนเส้นตรง 3 เส้น ดังแสดงในรูปที่ 2.25 โดยที่จุดยอดของแต่ละแกนจะมีค่าเท่ากับ 1 หรือ 100% ส่วนปลายที่ตั้งฉากกับฐานจะมีค่าเท่ากับ 0



รูปที่ 2.25 ความสัมพันธ์ของส่วนผสมในแผนการทดลองที่มีส่วนผสม 3 ชนิด

รูปแบบของการออกแบบส่วนผสม (Mixture Design) สามารถแบ่งได้ดังนี้

1. Simplex Lattice ส่วนประกอบทั้งหมดในการทดลอง จะต้องมีส่วนอยู่ในช่วงเดียวกัน และมีการออกแบบการทดลองที่จุดพิกัดอยู่บนแนวแกนในแต่ละด้านของการออกแบบ
2. Simplex Centroid ส่วนประกอบทั้งหมดในการทดลอง จะต้องมีส่วนอยู่ในช่วงเดียวกัน และมีการออกแบบการทดลองที่จุดพิกัดอยู่บนแนวแกนในแต่ละด้านของการออกแบบและจุดกึ่งกลาง
3. Extreme Vertice สัดส่วนของแต่ละปัจจัยไม่จำเป็นต้องอยู่ในช่วง 0 – 100% และเป็น การออกแบบการทดลองที่มีข้อจำกัดสัดส่วนหรือมีข้อจำกัดในการทดลอง
4. D-optimal ส่วนประกอบทั้งหมดในการทดลอง มีสัดส่วนที่ต่างกัน เป็นการเลือกค่าที่ดีที่สุดที่สามารถใช้ในกรณีที่พื้นที่ในการออกแบบมีข้อจำกัดหลายจุดที่สามารถเป็นไปได้ การเลือกพิกัดในการทดลองจะใช้อัลกอริทึมที่ค่าพิกัดจะไปตามจุดหลักๆ ใน Design Spec เพื่อหาค่าแนวโน้มของค่า Determinant ของ $x'x$ ที่มากที่สุด เมื่อได้ครบตามรอบที่กำหนดจะหยุดการสุ่ม แล้วนำ Candidate Point ที่ได้มาสร้างเป็นการทดลอง

แผนการทดลองแบบผสมสามารถสร้างได้ 2 วิธี คือ

1. แผนอย่างง่ายโดยพิจารณาข้อจำกัดในส่วนประกอบว่ามีข้อกำหนดสูงต่ำเท่าไร แล้วนำมาสร้างพื้นที่ที่เป็นไปได้สำหรับข้อกำหนดของส่วนประกอบทุกตัว หลังจากนั้นจะกำหนดสิ่งทดลองโดยนิยามกำหนดสูตรที่ใช้ส่วนประกอบที่น้อยสุดและมากที่สุดให้อยู่บริเวณมุมของพื้นที่ที่เป็นไปได้ และมักเลือกสูตรที่มีส่วนประกอบทุกตัวในปริมาณที่เท่ากัน ซึ่งมักอยู่ตรงกลางของพื้นที่ที่เป็นไปได้
2. จากแผนการทดลองมาตรฐาน ซึ่งมักนิยามกำหนดสิ่งทดลองให้เป็นจามรูปร่างที่สมมาตรของรูปทรงเรขาคณิต เช่น แผนการทดลองแบบซิมเพลค (Simplex Design) ซึ่งกำหนดที่จุดยอดของสามเหลี่ยมและจุดมัธยฐาน

บทที่ 3

การดำเนินงาน

ในการจัดทำปฏิญานิพนธ์เรื่องการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของโลหะบัดกรีดีบุก-ทองแดง-พลวงที่ประกอบไปด้วยส่วนผสมของดีบุก 89-100 wt%, ทองแดง 0-3 wt% และพลวง 0-8 wt% ทั้งหมด 16 ส่วนผสมตามการออกแบบส่วนผสมแบบ D-optimal โดยจะทำการวัดความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดงด้วยวิธี Spread Test และ Contact Angle แล้วก็จะทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีและองค์ประกอบทางเคมีที่ได้หลังจากการบัดกรีโลหะบัดกรีแต่ละชนิดกับแผ่นทองแดงบริสุทธิ์

3.1 การวางแผนการดำเนินงาน

สำหรับงานวิจัยเพื่อการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของโลหะบัดกรีดีบุก-ทองแดง-พลวง มีขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยดังนี้

1. ศึกษาความเป็นมาและความสำคัญของโครงการงาน
2. รวบรวมข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
3. วางแผนและออกแบบขั้นตอนในการทำการทดลอง
4. ทำการทดลองและวิเคราะห์ความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรี
5. ทำการทดลองและวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี
6. วิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้
7. สรุปผลการทดลอง
8. จัดทำรูปเล่มและตรวจสอบความถูกต้อง

3.2 การวิเคราะห์ความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรี

3.2.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

เตรียมโลหะบัดกรีที่ประกอบไปด้วยส่วนผสมต่างๆตามที่กำหนดไว้เพื่อใช้เป็นชิ้นงานทดสอบในการทำการทดลองดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมของโลหะบัดกรีที่ใช้ในการทดสอบ

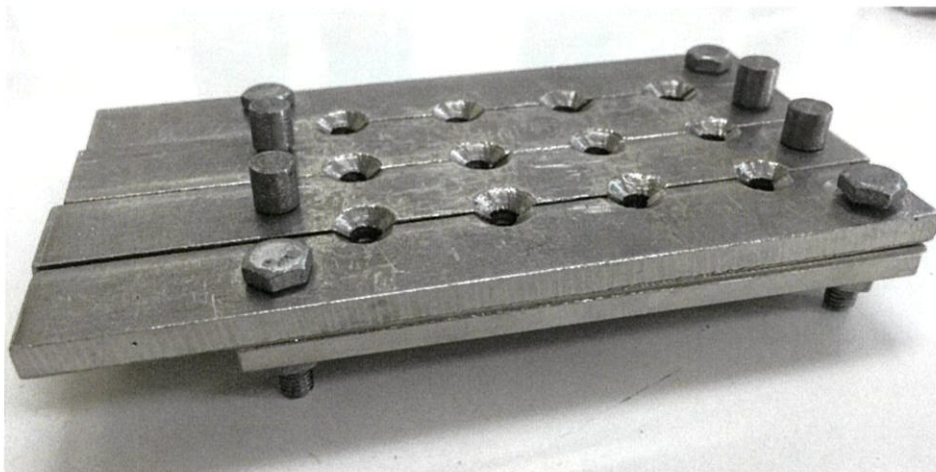
No.	Composition (%)		
	Sn	Cu	Sb
1	92	0	8
2	97	3	0
3	98.5	1.5	0
4	97	3	0
5	100	0	0
6	89	3	8
7	92	0	8
8	90.5	1.5	8
9	97.33	0	2.67
10	94.5	1.5	4
11	93	3	4
12	93	3	4
13	92.5	1.5	6
14	89	3	8
15	95.75	2.25	2
16	100	0	0

ในการเตรียมชิ้นงานเพื่อใช้ในการทดสอบเริ่มต้นด้วยการหล่อโลหะบัดกรีแต่ละชนิด โดยใช้เบ้าหลอมกราไฟต์ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เบ้าหลอมกราไฟต์

เมื่อโลหะบัดกรีหลอมเหลวแล้วทำการเทโลหะบัดกรีลงในแม่พิมพ์โลหะดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แม่พิมพ์โลหะที่ใช้ในการหล่อ

ซึ่งชิ้นงานโลหะบัดกรีที่ได้จากการหล่อจะมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 มิลลิเมตร หนา 1.6 มิลลิเมตร ตามมาตรฐานการทดสอบของ JES Z 3198-3 : 2003 (JWES) ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ชิ้นงานที่ได้จากการหล่อด้วยแม่พิมพ์โลหะ

รอให้ชิ้นงานเย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้องแล้วจึงทำการแกะเอาโลหะบัดกรีออกมาจากแม่พิมพ์ แล้วชั่งน้ำหนักของโลหะบัดกรีด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักยี่ห้อ Sartorius รุ่น BSA224S-CW ดังรูปที่ 3.4 ชัดชิ้นงานทดสอบด้วยกระดาษทรายเพื่อให้ได้ชิ้นงานทดสอบที่มีน้ำหนักตามที่ต้องการสำหรับการทดสอบต่อไป



รูปที่ 3.4 เครื่องชั่งน้ำหนักยี่ห้อ Sartorius รุ่น BSA224S-CW

3.2.2. การเตรียมแผ่นทองแดง

เตรียมแผ่นทองแดงบริสุทธิ์ 99.99% ขนาด 30x30x0.35 มิลลิเมตรดังรูปที่ 3.5 เพื่อใช้เป็นโลหะบัดกรีฐานจากนั้นนำแผ่นทองแดงมาล้างด้วย IPA (Isopropyl Alcohol) แช่ทิ้งไว้ประมาณ 2 ชั่วโมง รูปที่ 3.6 และนำแผ่นทองแดงขึ้นมาเป่าลมด้วยเครื่องเป่าลมให้แห้งก่อนนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แผ่นทองแดงบริสุทธิ์ 99.99% ขนาด 30x30x30 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.6 แช่แผ่นทองแดงทิ้งไว้ใน Isopropyl Alcohol

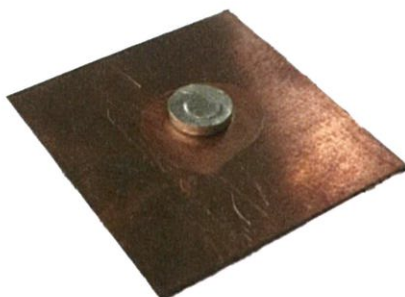
3.2.3 วิธีการทดสอบหาค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะพื้น

หยดฟลักซ์ชนิด AMR2020 รูปที่ 3.7 ซึ่งมีสถานะเป็นของเหลวปริมาณ 0.02 มิลลิลิตร ลงบนแผ่นทองแดงขนาด 30x30x0.35 มิลลิเมตร ที่ได้ทำการเตรียมไว้



รูปที่ 3.7 ฟลักซ์ชนิด AMR2020

จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 มิลลิเมตร หนา 1.6 มิลลิเมตร มาวางบนแผ่นทองแดง รูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ชิ้นงานทดสอบที่วางอยู่บนแผ่นทองแดง

ทำการบัดกรีโดยใช้เตารีดพลั่วยี่ห้อ LPKF รุ่น ProtoFlow E ดังรูปที่ 3.9 โดยตั้งอุณหภูมิตุ๋นที่ใช้ในการบัดกรีที่ 296 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการหลอมโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดง 30 วินาที นับเมื่อโลหะบัดกรีเริ่มหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 296 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน JIS Z 3198-3:2003 ยกชิ้นงานออกจากตุ๋นและปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง ล้างฟลักซ์ออกด้วย IPA (Isopropyl Alcohol) และนำไมโครมิเตอร์มาวัดความสูงของโลหะบัดกรีที่จุดสูงสุดของชิ้นงานโดยต้องหักความสูงของแผ่นทองแดงออกไปด้วย



รูปที่ 3.9 เตาโรฟลวี่ห้อ LPKF รุ่น ProtoFlow E

จากนั้นนำชิ้นงานหลังการทดสอบหาค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะพื้น มาคำนวณหาค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread Factor, S_f) ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2

3.3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรี

3.3.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

3.3.1.1 การตัดชิ้นงานทดสอบ

นำเอาชิ้นงานทดสอบที่ทำการบัดกรีเสร็จเรียบร้อยแล้วดังรูปที่ 3.10 มาตัดด้วยเครื่องตัดแบบแรงโน้มถ่วงยี่ห้อ Struers รุ่น Minitom รูปที่ 3.11 โดยตัดในทิศตั้งฉากกับผิวของแผ่นทองแดงบริเวณส่วนกลางของโลหะบัดกรี ให้มีขนาดของหน้าตัดกว้าง 1.5 เซนติเมตร และยาว 2.0 เซนติเมตร จำนวน 16 ชิ้น หลังจากตัดชิ้นงานเสร็จแล้วให้นำชิ้นงานไปทำความสะอาดก่อนแล้วจึงนำไปหล่อเรซิน



รูปที่ 3.10 ชิ้นงานทดสอบภายหลังจากการบัดกรี



รูปที่ 3.11 เครื่องตัดแบบแรงโน้มถ่วง

3.3.1.2 การหล่อเรซิน

นำชิ้นงานทดสอบที่ตัดแล้วมาทำการหล่อเรซินเพื่อให้สามารถจับชิ้นงานได้สะดวกในการนำไปขัด ระบาย โดยแม่แบบที่ใช้ในการหล่อเรซินจะเป็นท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.60 เซนติเมตร รูปที่ 3.12 และตัดแบ่งท่อให้มีความสูงมากกว่าชิ้นงาน ทำการปรับผิวของท่อ PVC และพื้น ระบายที่วางแม่แบบ นำเอาวาสลินมาทาผิวด้านในของท่อ PVC ก่อนทำการหล่อเรซินเพื่อให้ง่ายต่อการ แกะชิ้นงานออกจาก



รูปที่ 3.12 แม่แบบที่ใช้ในการหล่อเรซิน

จากนั้นนำชิ้นงานวางลงในแม่แบบแล้วเทเรซินที่ผสมเรียบร้อยแล้วลงไป รอจนเรซินแข็งตัวก่อน แล้วจึงแกะชิ้นงานออกจากแม่แบบรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ชิ้นงานระหว่างรอเรซินแข็งตัว

3.3.1.3 การขัดผิวชิ้นงานทดสอบ

นำชิ้นงานที่หล่อเรซินเสร็จแล้วไปขัดด้วยกระดาษทรายโดยใช้ความละเอียดตั้งแต่เบอร์ 400, 600, 1000, 2000 และ 4000 ตามลำดับ ด้วยเครื่องขัดมือ Struers รุ่น LaboPol-1 ดังรูปที่ 3.14 โดยที่ในขณะที่ขัดนั้นต้องใช้น้ำหล่อให้เปียกอยู่ตลอดเวลา เพื่อเป็นการระบายความร้อนและระบายเศษของชิ้นงานที่ถูกขัดออกมาไม่ให้ค้างอยู่บนกระดาษทรายเพราะจะทำให้ชิ้นงานเป็นรอยได้ ซึ่งการขัดนั้นจะต้องขัดในทิศทางเดียวกันตลอดผิว และเมื่อเปลี่ยนกระดาษทรายเบอร์ใหม่จะต้องหมุนชิ้นงานไป 90 องศาจากทิศทางเดิมที่ใช้ขัด แล้วขัดจนรอยเดิมหายไป และภายหลังจากขัดชิ้นงานทดสอบด้วยกระดาษทรายจนครบทุกเบอร์แล้วให้นำชิ้นงานทดสอบไปขัดผิวละเอียดบนผ้าสักหลาดด้วยเครื่องขัดผิว โดยใช้ผงอะลูมินา ขนาด 1.0 ไมครอน ผสมกับน้ำแล้วขัดโดยใช้แรงกดเบาๆเพื่อไม่ให้เกิดรอยบนผิวหน้าของชิ้นงานทดสอบ อันเนื่องมาจากเศษโลหะที่ฝังตัวบนผ้าสักหลาด ตลอดเวลาที่ทำการขัดนั้นต้องทำการหล่อสลับใช้น้ำเพื่อลดความร้อนที่เกิดขึ้น ซึ่งจะขัดจนกว่าผิวหน้าของชิ้นงานทดสอบมีความเงาและไม่มียรอยที่เกิดจากการขัดผิวหยาบ



รูปที่ 3.14 ด้วยเครื่องขัดยี่ห้อ Struers รุ่น LoboPol-1

3.3.2. ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชั้นสารประกอบเชิงโลหะและองค์ประกอบทางเคมี

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชั้นสารประกอบเชิงโลหะและองค์ประกอบทางเคมี แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ

1. ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเบื้องต้นด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM)

เมื่อทำการเตรียมชิ้นงานเรียบร้อยแล้วให้นำไปตรวจดูโครงสร้าง ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM) ยี่ห้อ ZEISS รุ่น AXIOLAB รูปที่ 3.15 เพื่อดูลักษณะโดยรวมของผิวชิ้นงาน ว่ามีรอยที่เกิดจากการขัดเหลืออยู่หรือไม่



รูปที่ 3.15 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope)

2. ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

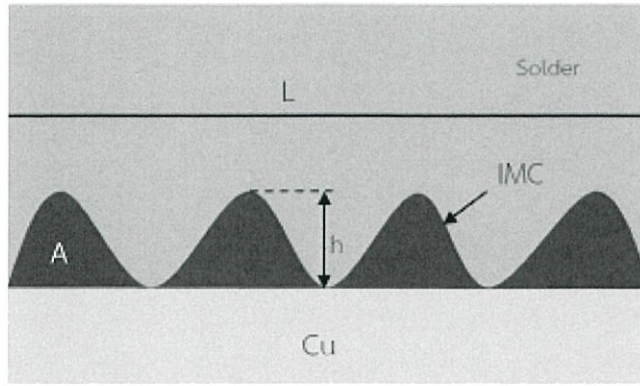
ในการศึกษาชั้นสารประกอบเชิงโลหะและองค์ประกอบทางเคมีของเฟสที่เกิดขึ้นในโลหะบัดกรีแต่ละชนิด จะทำการศึกษาโดยใช้ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6510 LV รูปที่ 3.16 ด้วยวิธี Back Scatter Electron เพื่อตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของชิ้นงาน หลังจากนั้นจะทำการตรวจสอบปริมาณธาตุที่พบบนพื้นผิวชิ้นงานทดสอบด้วยวิธี Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) จะได้ผลเป็นปริมาณธาตุที่ผิวชิ้นงานในแต่ละสเปกตรัม ซึ่งจะแสดงผลเฉพาะธาตุที่ค้นพบและรายงานผลเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักหรือโดยจำนวนอะตอม



รูปที่ 3.16 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)

3.3.3. การวัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

การวัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะบัดกรีกับแผ่นทองแดงบริสุทธิ์ ทำได้โดยใช้รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยายเท่ากันในทุกๆ ชิ้นงานทั้งหมด 16 ชิ้น นำมาหาพื้นที่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะโดยใช้โปรแกรม Image-Pro Express ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 การหาพื้นที่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

ความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะสามารถคำนวณได้จากการแบ่งพื้นที่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นโดยคำนวณได้จากสมการที่ 3.1

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

- เมื่อ h คือ ความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (ไมโครเมตร)
 A คือ พื้นที่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (ตารางไมโครเมตร)
 L คือ ความยาวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (ไมโครเมตร)

3.4 การวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยโปรแกรม Design Expert

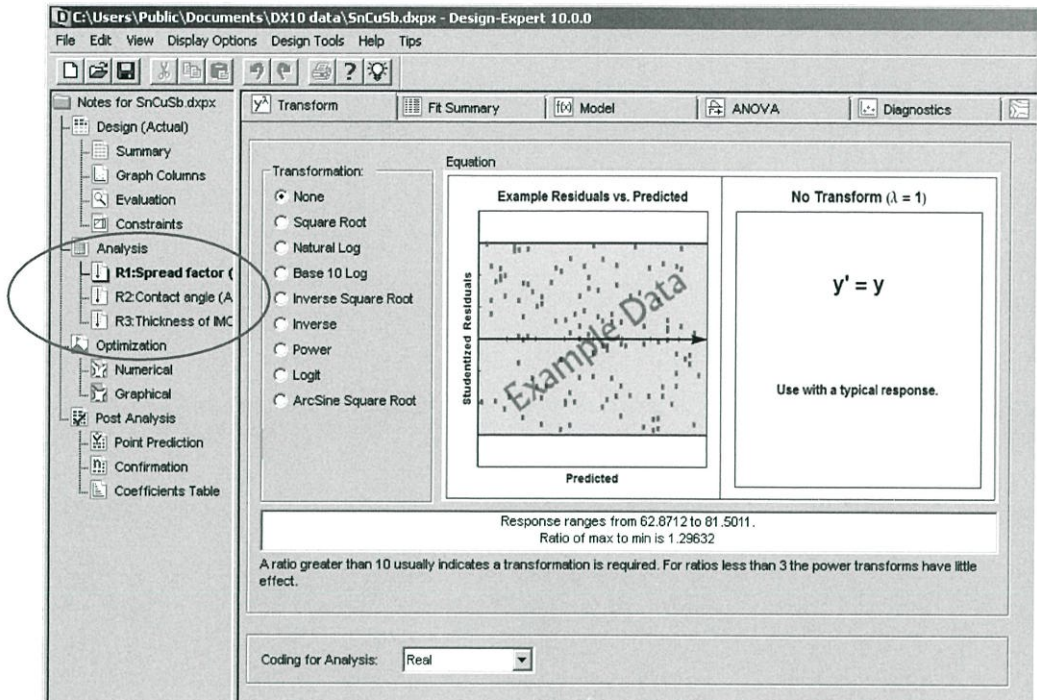
หลังจากคำนวณหาค่าความสามารถการกระจายตัวของโลหะบัดกรีทั้งวิธี Spread Test และ Contact Angle รวมถึงคำนวณหาค่าความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะแล้ว จะนำข้อมูลเหล่านี้ไปวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Design Expert เพื่อดูแนวโน้มว่า ธาตุใดมีอิทธิพลต่อความสามารถการกระจายตัวและความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ซึ่งมีขั้นตอนต่างๆดังนี้

1. บันทึกค่าที่คำนวณได้จากผลการทดลองลงในโปรแกรมดังรูปที่ 3.18

Run	Component 1 A:Sn %	Component 2 B:Cu %	Component 3 C:Sb %	Response 1 Spread factor %	Response 2 Contact angle degree	Response 3 Thickness of... micrometer
1	92	0	8	66.1	68.2745	2.31782
2	97	3	0	62.8712	73.1934	3.86157
3	98.5	1.5	0	67.6262	65.8441	3.73082
4	97	3	0	68.5934	64.2684	4.85787
5	100	0	0	72.5491	57.5351	1.79259
6	89	3	8	66.1595	68.181	3.86507
7	92	0	8	74.2729	54.4554	0.939315
8	90.5	1.5	8	69.7955	62.2715	2.39289
9	97.33	0	2.67	68.678	64.1293	2.34671
10	94.5	1.5	4	65.8638	68.6445	4.50167
11	93	3	4	66.417	67.7754	3.88995
12	93	3	4	71.4844	59.3933	3.26416
13	92.5	1.5	6	64.5116	70.7318	3.11784
14	89	3	8	71.2968	59.7171	2.57477
15	95.75	2.25	2	71.9964	58.5039	2.90634
16	100	0	0	81.5011	40.6068	2.70919

รูปที่ 3.18 บันทึกผลการทดลองลงในโปรแกรม

2. เลือกตัวแปรที่ต้องการวิเคราะห์ด้านซ้ายมือในหัวข้อ Analysis จากนั้นในแถบ Transform จะมีให้เลือกฟังก์ชันของสมการ ซึ่งในการวิเคราะห์ครั้งนี้จะเลือกใช้รูปแบบสมการแบบไม่มีฟังก์ชัน (None) ดังรูปที่ 3.19

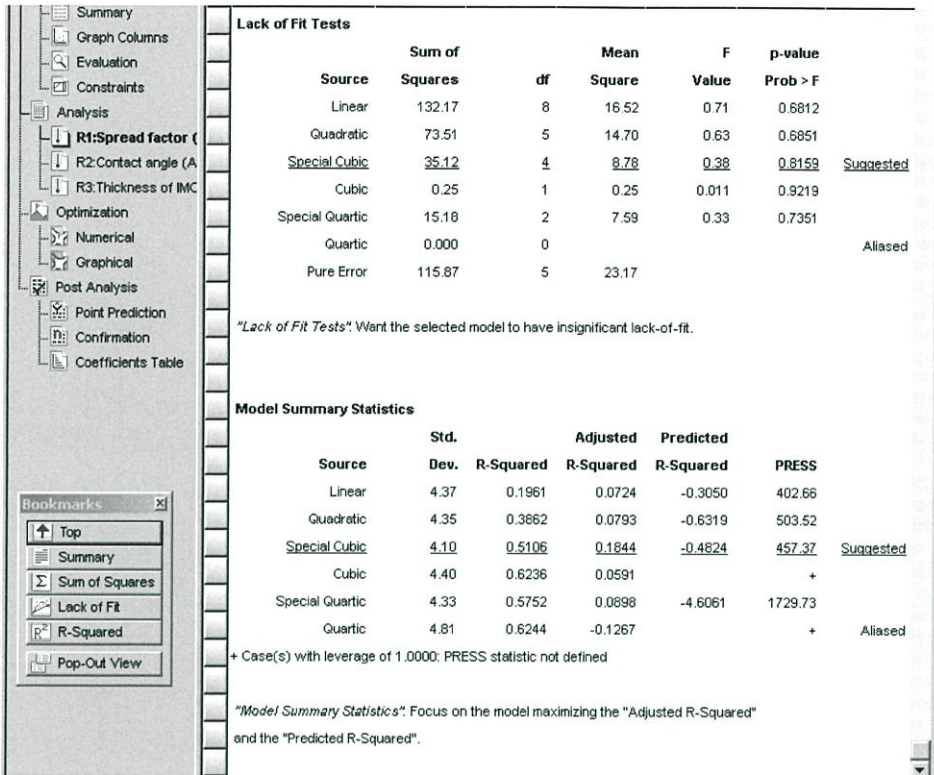


รูปที่ 3.19 การเลือกรูปแบบของฟังก์ชัน

3. ในแถบ Fit Summary นี้ ตัวโปรแกรม Design Expert จะคำนวณและวิเคราะห์ข้อมูลทีป้อนเข้าไปเพื่อหารูปแบบสมการทำนายที่เหมาะสมที่สุด โดยจะวิเคราะห์ทั้งหมด 3 วิธีคือ Sequential Model Sum of Squares, Lack of Fit Tests และ Model Summary Statistics ดังรูปที่ 3.20 และ 3.21

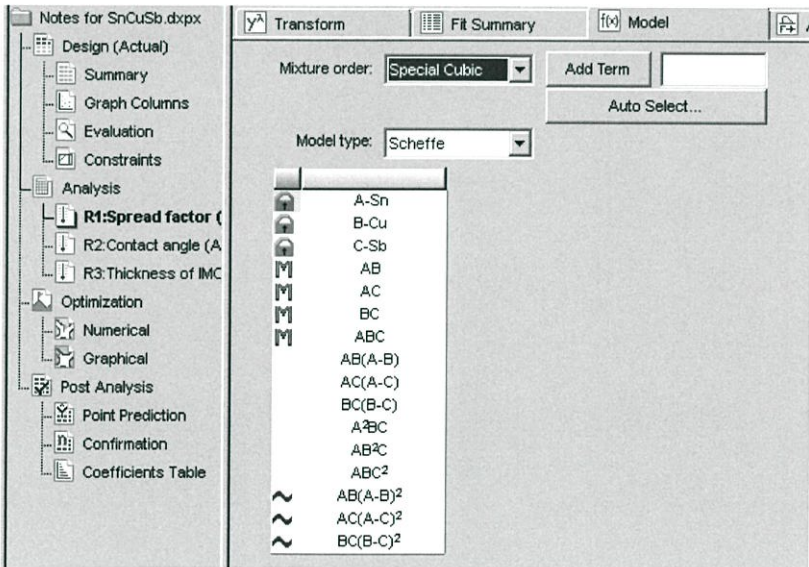
Sequential Model Sum of Squares [Type I]						
	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value	
Source						
Mean vs Total	76967.02	1	76967.02			<u>Suggested</u>
Linear vs Mean	60.50	2	30.25	1.59	0.2420	
Quadratic vs Linear	58.65	3	19.55	1.03	0.4195	
<u>Sp Cubic vs Quadratic</u>	<u>38.39</u>	1	<u>38.39</u>	<u>2.29</u>	<u>0.1647</u>	<u>Suggested</u>
Cubic vs Sp Cubic	34.88	3	11.63	0.60	0.6378	
Quartic vs Cubic	0.25	1	0.25	0.011	0.9219	Aliased
Residual	115.87	5	23.17			
Sp Quartic vs Quadratic	58.33	3	19.44	1.04	0.4326	
Quartic vs Sp Quartic	15.18	2	7.59	0.33	0.7351	Aliased
Residual	115.87	5	23.17			
Total	77275.56	16	4829.72			

รูปที่ 3.20 วิเคราะห์ด้วยวิธี Sequential Model Sum of Squares



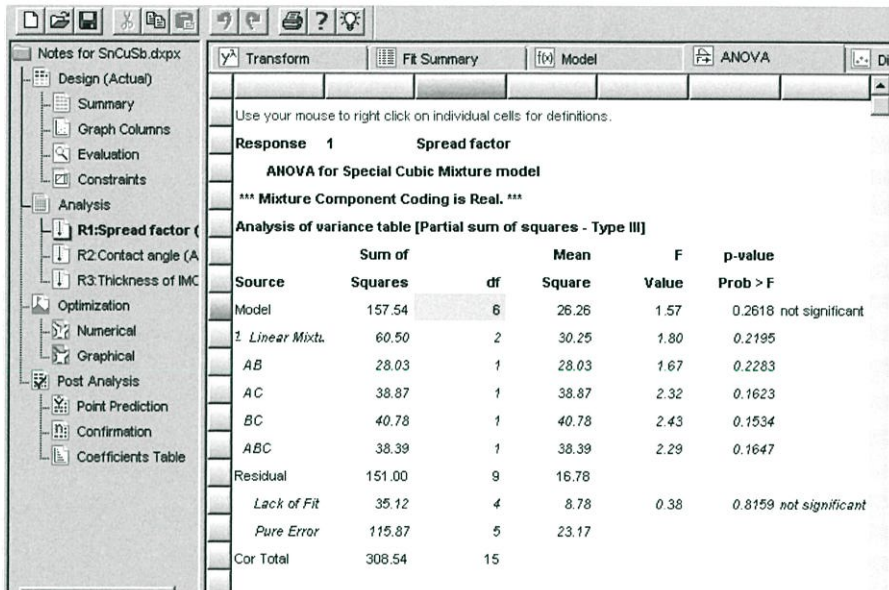
รูปที่ 3.21 วิเคราะห์ด้วยวิธี Lack of Fit Tests และ Model Summary Statistics

4. ในแถบ Model นี้จะต้องเลือกสมการที่จะใช้เป็นสมการทำนายดังรูปที่ 3.22 โดยปกติแล้วจะใช้รูปแบบสมการที่ทางโปรแกรมแนะนำในขั้นตอนที่แล้ว



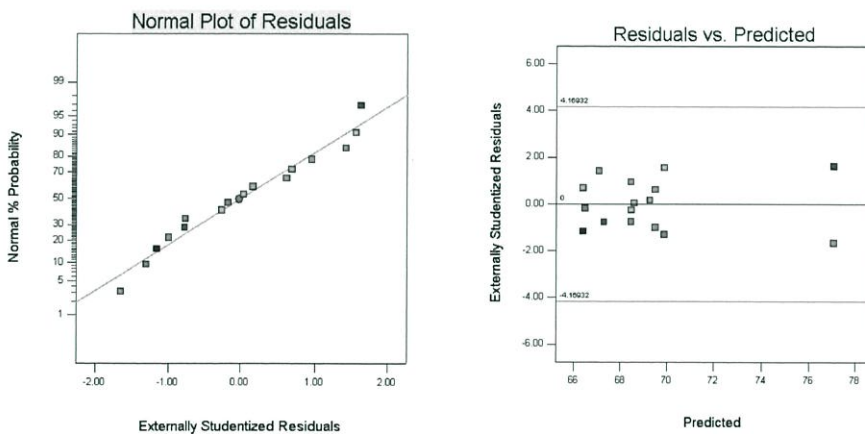
รูปที่ 3.22 เลือกรูปแบบสมการเพื่อใช้ในการสร้างสมการทำนาย

5. ในแถบ ANOVA นี้จะเป็นการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการทำนาย รวมถึงค่าทางสถิติต่างๆดังรูปที่ 3.23 เพื่อให้ผู้ใช้พิจารณาถึงความแม่นยำจากสมการทำนายที่ทางโปรแกรมได้สร้างขึ้นมา



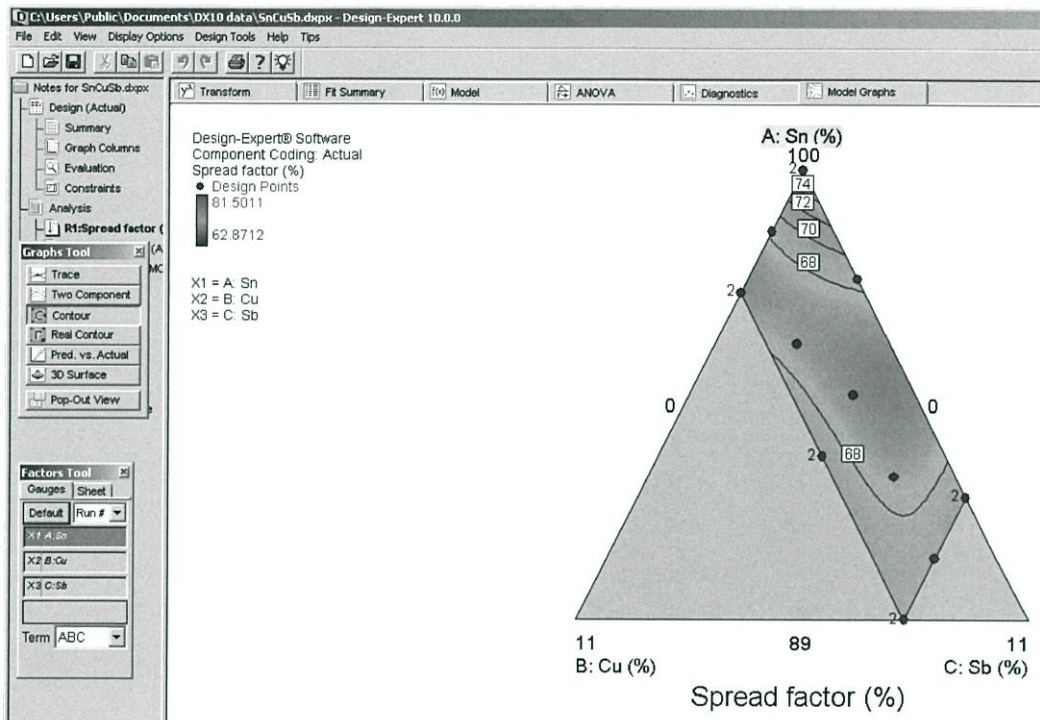
รูปที่ 3.23 การวิเคราะห์ ANOVA ระหว่างค่าจากการทดลองกับค่าจากสมการทำนาย

6. ในแถบ Diagnostics นี้จะเป็นการแสดงผลกราฟต่างๆเพื่อดูว่าสมการที่เลือกนั้นมีความเหมาะสมกับผลตอบสนองมากน้อยเพียงใดดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 ตัวอย่างการแสดงผลกราฟในแถบ Diagnostics

7. ในแถบ Model Graphs นี้จะเป็นการจำลองแผนภาพ Contour ออกมาเพื่อดูแนวโน้มอิทธิพลของธาตุที่มีผลต่อผลตอบแทนดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 จำลองแผนภาพ Contour ในแถบ Model Graphs

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

จากการศึกษาและทดสอบหาค่าความสามารถในการกระจายตัวบนผิวโลหะพื้นทองแดงด้วยวิธี Spread Test กับ Contact Angle และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีหลังการบัดกรีเพื่อวิเคราะห์ธาตุและความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบหาค่า Spread Factor, Contact Angle และความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

No.	Composition (%)			Wettability		Thickness of IMC (μm)
	Sn	Cu	Sb	Spread Factor (%)	Contact Angle (degree)	
1	92	0	8	66.1000	68.2745	2.3178
2	97	3	0	62.8712	73.1934	3.8616
3	98.5	1.5	0	67.6262	65.8441	3.7308
4	97	3	0	68.5934	64.2684	4.8579
5	100	0	0	72.5491	57.5351	1.7926
6	89	3	8	66.1595	68.1810	3.8651
7	92	0	8	74.2729	54.4554	0.9393
8	90.5	1.5	8	69.7955	62.2715	2.3929
9	97.33	0	2.67	68.6780	64.1293	2.3467
10	94.5	1.5	4	65.8638	68.6445	4.5017
11	93	3	4	66.4170	67.7754	3.8899
12	93	3	4	71.4844	59.3933	3.2642
13	92.5	1.5	6	64.5116	70.7318	3.1178
14	89	3	8	71.2968	59.7171	2.5748
15	95.75	2.25	2	71.9964	58.5039	2.9063
16	100	0	0	81.5011	40.6068	2.7092

4.1 การวิเคราะห์ค่าความสามารถในการกระจายตัวด้วยวิธี Spread Test

จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.1 สามารถนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design Expert เพื่อที่จะทำนายสมการและดูแนวโน้มของปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีหลังการบัดกรี

4.1.1 การวิเคราะห์ Fit Summary

4.1.1.1 Sequential Model Sum of Squares

จากผลการวิเคราะห์ตามตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าแบบจำลอง Special Cubic มีค่า P-Value เท่ากับ 0.1647 ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ค่านัยสำคัญที่กำหนดไว้ คือ 0.05 มากที่สุด จึงเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ Sequential Model Sum of Squares ของ Spread Factor

Sequential Model Sum of Squares						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	P-Value Prob > F	
<u>Mean vs Total</u>	<u>76967.0174</u>	<u>1</u>	<u>76967.0174</u>	-	-	<u>Suggested</u>
Linear vs Mean	60.5025	2	30.2513	1.5855	0.2420	
Quadratic vs Linear	58.6526	3	19.5509	1.0323	0.4195	
<u>Sp Cubic vs Quadratic</u>	<u>38.3898</u>	<u>1</u>	<u>38.3898</u>	<u>2.2882</u>	<u>0.1647</u>	<u>Suggested</u>
Cubic vs Sp Cubic	34.8771	3	11.6257	0.6007	0.6378	
Quartic vs Cubic	0.2465	1	0.2465	0.0106	0.9219	Aliased
Residual	115.8740	5	23.1748			
Sp Quartic vs Quadratic	58.3308	3	19.4436	1.0385	0.4326	
Quartic vs Sp Quartic	15.1825	2	7.5912	0.3276	0.7351	Aliased
Residual	115.8740	5	23.1748			
Total	77275.5598	16	4829.7225			

4.1.1.2 Lack of Fit Tests

จากผลการวิเคราะห์ตามตารางที่ 4.3 จะเห็นว่าแบบจำลอง Special Cubic ที่ทางโปรแกรมแนะนำนั้นมีค่า P-Value เท่ากับ 0.8159 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่านัยสำคัญที่กำหนดไว้ คือ 0.05 สรุปได้ว่าแบบจำลอง Special Cubic ไม่มีนัยสำคัญของค่า Lack of Fit จึงมีความเป็นไปได้ที่แบบจำลองนี้มีความเหมาะสมต่อการนำมาวิเคราะห์ในลำดับถัดไป

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ Lack of Fit Tests ของ Spread Factor

Lack of Fit Tests						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	P-Value Prob > F	
Linear	132.1659	8	16.5207	0.7129	0.6812	
Quadratic	73.5133	5	14.7027	0.6344	0.6851	
<u>Special Cubic</u>	<u>35.1235</u>	<u>4</u>	<u>8.7809</u>	<u>0.3789</u>	<u>0.8159</u>	<u>Suggested</u>
Cubic	0.2465	1	0.2465	0.0106	0.9219	
Special Quartic	15.1825	2	7.5912	0.3276	0.7351	
Quartic	0.0000	0				Aliased
Pure Error	115.8740	5	23.1748			

4.1.1.3 Model Summary Statistics

จากผลการวิเคราะห์ตามตารางที่ 4.4 จะเห็นว่าแบบจำลอง Special Cubic ที่ทางโปรแกรมแนะนำนั้นมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุดคือ 4.0960 และมีค่า R-Squared เข้าใกล้ 1 รวมถึงมีค่า PRESS (Predicted Residual Error Sum of Square) เท่ากับ 457.3723 ซึ่งมีค่าไม่มากจนเกินไปเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่นๆ จึงทำให้แบบจำลองนี้มีความเหมาะสมที่สุด

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ Model Summary Statistics ของ Spread Factor

Model Summary Statistics						
Source	Std. Dev.	R-Squared	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	PRESS	
Linear	4.3681	0.1961	0.0724	-0.3050	402.6620	
Quadratic	4.3519	0.3862	0.0793	-0.6319	503.5245	
<u>Special Cubic</u>	<u>4.0960</u>	<u>0.5106</u>	<u>0.1844</u>	<u>-0.4824</u>	<u>457.3723</u>	<u>Suggested</u>
Cubic	4.3993	0.6236	0.0591		+	
Special Quartic	4.3269	0.5752	0.0898	-4.6061	1729.7283	
Quartic	4.8140	0.6244	-0.1267		+	Aliased

4.1.1.4 Summary

จากผลการวิเคราะห์ตามตารางที่ 4.5 จะเห็นว่าแบบจำลอง Special Cubic มีค่า P-Value จาก Sequential, Lack of Fit และค่า R-Squared เหมาะสมที่สุดสำหรับการวิเคราะห์ Fit Summary

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ Summary ของ Spread Factor

Summary					
Source	Sequential P-Value	Lack of Fit P-Value	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	
Linear	0.2420	0.6812	0.0724	-0.3050	
Quadratic	0.4195	0.6851	0.0793	-0.6319	
<u>Special Cubic</u>	<u>0.1647</u>	<u>0.8159</u>	<u>0.1844</u>	<u>-0.4824</u>	<u>Suggested</u>
Cubic	0.6378	0.9219	0.0591		
Sp Quartic Vs Quadratic	0.4326	0.7351	0.0898	-4.6061	
Quartic vs Cubic	0.9219		-0.1267		Aliased
Quartic vs Sp Quartic	0.7351		-0.1267		Aliased

4.1.2 การวิเคราะห์ ANOVA

จากผลการวิเคราะห์ตามตารางที่ 4.6 จะเห็นว่าค่า P-Value ของ Lack of Fit นั้นไม่มีนัยสำคัญต่อแบบจำลอง Special Cubic นั้นมีความหมายว่า แบบจำลอง Special Cubic มีความเหมาะสมต่อการนำมาสร้างสมการทำนาย

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของ Spread Factor

Analysis of variance table						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	P-Value Prob > F	
Model	157.5449	6	26.2575	1.5650	0.2618	not significant
[1] Linear Mixture	60.5025	2	30.2513	1.8031	0.2195	
AB	28.0330	1	28.0330	1.6709	0.2283	
AC	38.8673	1	38.8673	2.3166	0.1623	
BC	40.7756	1	40.7756	2.4304	0.1534	
ABC	38.3898	1	38.3898	2.2882	0.1647	
Residual	150.9975	9	16.7775			
Lack of Fit	35.1235	4	8.7809	0.3789	0.8159	not significant
Pure Error	115.8740	5	23.1748			
Cor Total	308.5424	15				

จากตารางที่ 4.7 จะเห็นว่า ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากสมการทำนายโดยใช้แบบจำลอง Special Cubic ทั้งหมด 16 ส่วนผสม นั้นมีค่าเท่ากับ 69.3573 และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 4.0960 รวมถึงแสดงค่าอื่นๆทางสถิติเพื่อประกอบการตัดสินใจ

ตารางที่ 4.7 ค่าสถิติของสมการทำนายของ Spread Factor

Std. Dev.	4.0960	R-Squared	0.5106
Mean	69.3573	Adj R-Squared	0.1844
C.V. %	5.9057	Pred R-Squared	-0.4824
PRESS	457.3723		

ค่าสัมประสิทธิ์จากตารางที่ 4.8 สามารถสร้างสมการทำนายค่าของ Spread Factor ได้ดังนี้

$$\text{Spread factor} = 77.0542*A + 13731.8244*B + 3912.8292*C - 14443.6249*AB - 4266.6292*AC - 179758.6210*BC + 185275.5110*ABC \quad (4.1)$$

โดยที่ A = ปริมาณของดีบุก (%)

B = ปริมาณของทองแดง (%)

C = ปริมาณของพลวง (%)

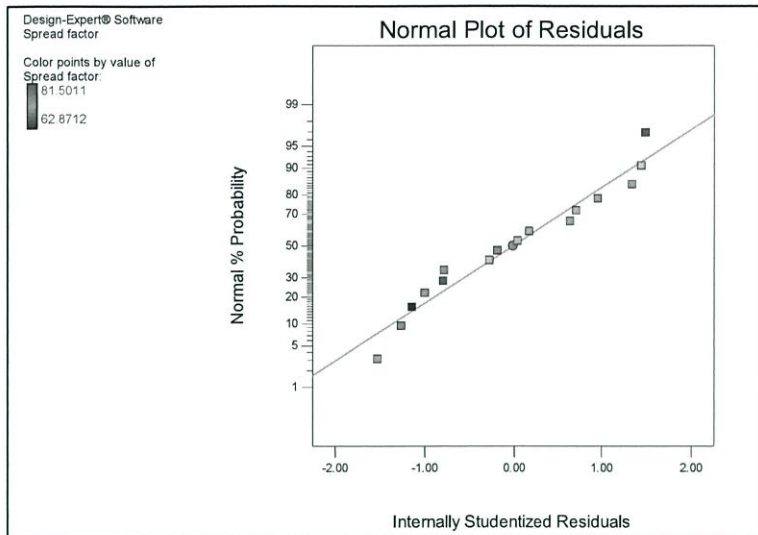
ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์หาสมการทำนายค่า Spread Factor

Coefficients in Terms of Real Components						
Component	Coefficient Estimate	df	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
A-Sn	77.0542	1	2.8179	70.6796	83.4287	6.7637
B-Cu	13731.8244	1	10823.4650	-10752.5544	38216.2033	47524.0358
C-Sb	3912.8292	1	2570.3909	-1901.7990	9727.4573	16347.6037
AB	-14443.6249	1	11173.9076	-39720.7601	10833.5102	44177.8603
AC	-4266.6292	1	2803.2141	-10607.9400	2074.6816	16174.2604
BC	-179758.6210	1	115306.3014	-440599.5967	81082.3546	13640.2654
ABC	185275.5110	1	122482.4662	-91799.0772	462350.0993	12514.3702

4.1.3 การวิเคราะห์ Diagnostics

4.1.3.1 Normal Plot of Residuals

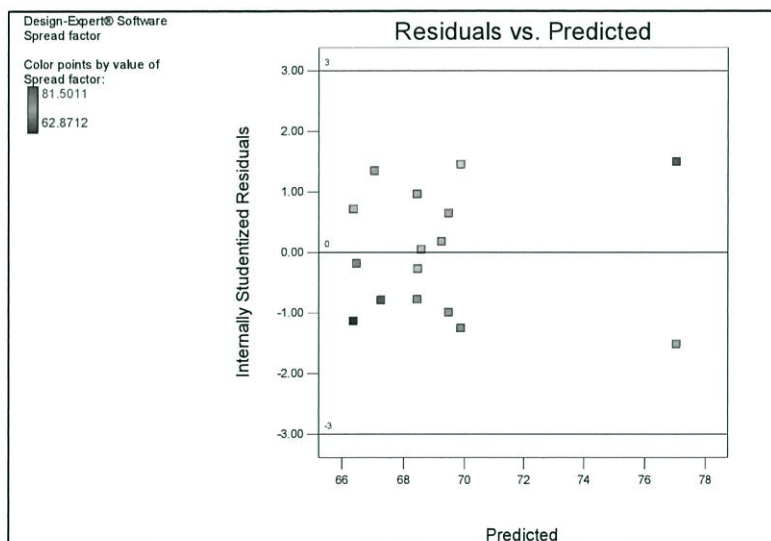
จากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่า การเรียงตัวของข้อมูลนั้นมีลักษณะเป็นเส้นตรง มีความคลาดเคลื่อนไม่มากนัก และมีการเกาะกลุ่มกันบนเส้นตรง แสดงถึงความเหมาะสมของข้อมูลที่จะนำไปใช้ในการสร้างสมการทำนาย



รูปที่ 4.1 กราฟ Normal Plot of Residuals ของ Spread Factor

4.1.3.2 Residuals vs Predicted

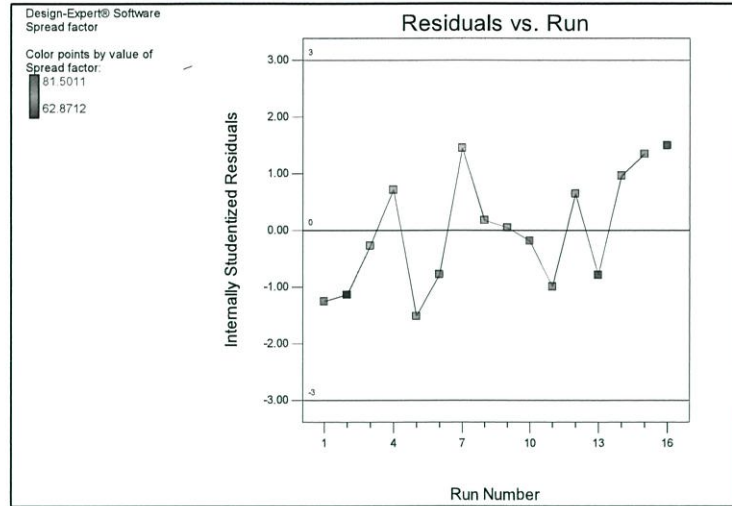
จากรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าข้อมูลมีการเกาะกลุ่มกัน แสดงถึงความไม่เหมาะสมของข้อมูลที่จะใช้ในการสร้างสมการทำนาย



รูปที่ 4.2 กราฟ Residuals vs Predicted ของ Spread Factor

4.1.3.3 Residuals vs Run

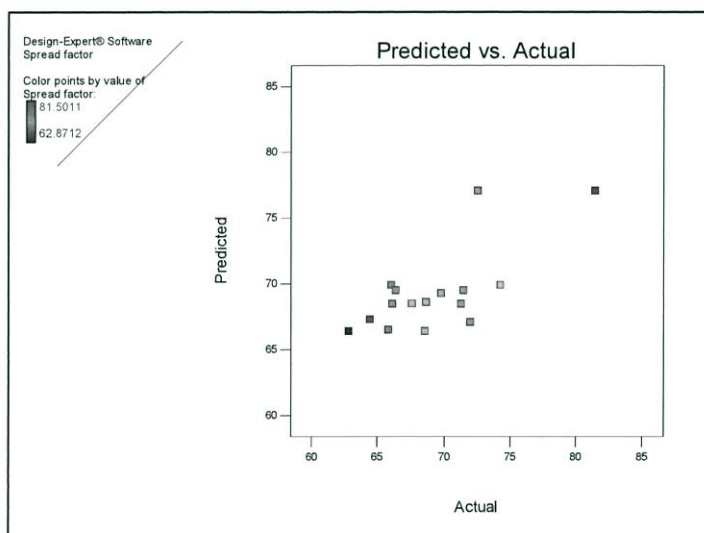
จากรูปที่ 4.3 จะเห็นว่า การกระจายตัวของข้อมูลนั้นเป็นแบบสุ่ม ไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจน แสดงถึงความเหมาะสมของการนำข้อมูลไปใช้ในการสร้างสมการทำนาย



รูปที่ 4.3 กราฟ Residuals vs Run ของ Spread Factor

4.1.3.4 Predicted vs Actual

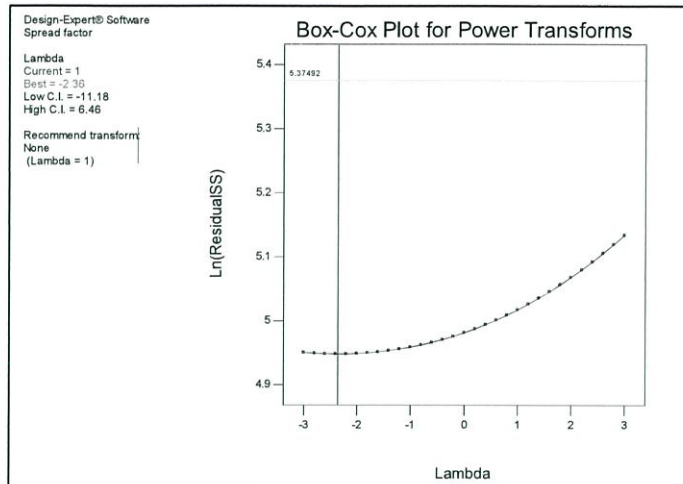
จากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าค่าที่ทำนายจากสมการและค่าที่ได้จากการทดลองนั้นมีความคลาดเคลื่อนกันพอสมควร ซึ่งส่งผลต่อความแม่นยำของสมการทำนาย



รูปที่ 4.4 กราฟ Predicted vs Actual ของ Spread Factor

4.1.3.5 Box-Cox Plot for Power Transforms

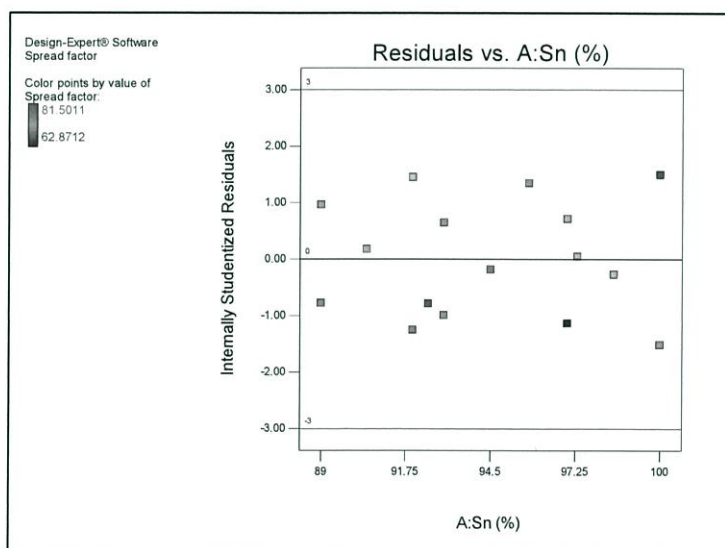
จากรูปที่ 4.5 จะเห็นว่ากราฟที่ได้นั้นมีค่าความเชื่อมั่นต่ำเพราะ ค่า lambda นั้นไม่เข้าใกล้ 1 แสดงว่า สมการทำนายนั้นมีประสิทธิภาพต่ำ



รูปที่ 4.5 กราฟ Box-Cox Plot for Power Transforms ของ Spread Factor

4.1.3.6 Residuals vs A: Sn (%)

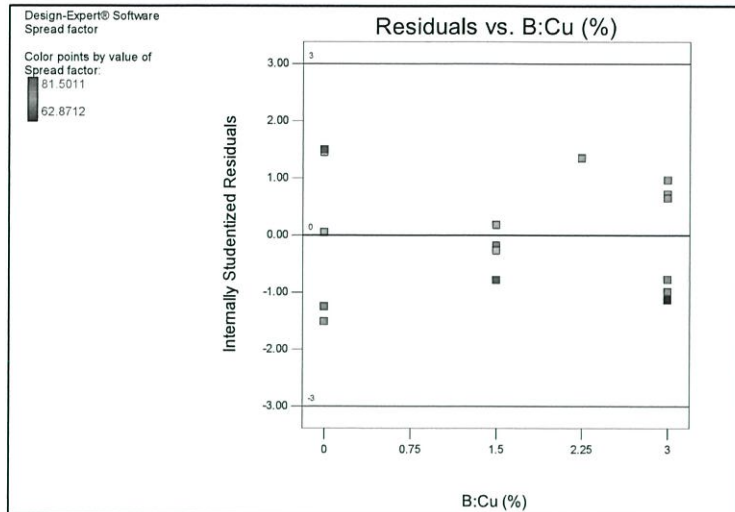
จากรูปที่ 4.6 จะเห็นว่า ข้อมูลมีลักษณะไม่เกาะกลุ่มกัน แสดงถึงความเหมาะสมของข้อมูลที่จะใช้ในการสร้างสมการทำนายผล



รูปที่ 4.6 กราฟ Residuals vs A:Sn(%) ของ Spread Factor

4.1.3.7 Residuals vs B: Cu (%)

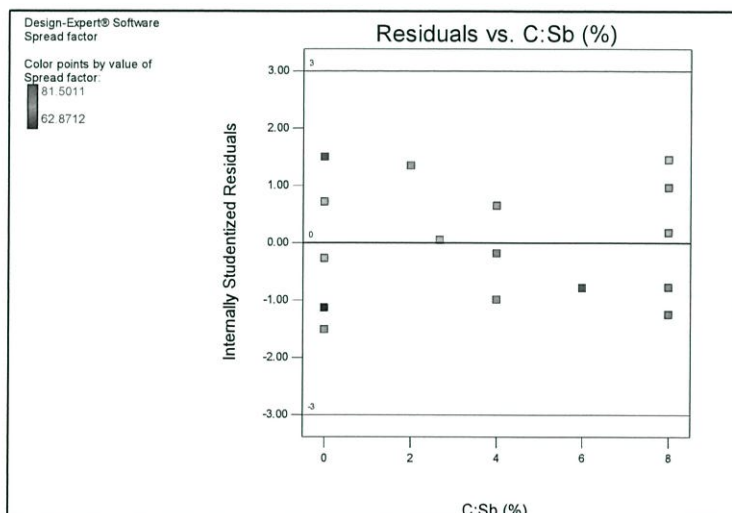
จากรูปที่ 4.7 จะเห็นว่า ข้อมูลมีลักษณะเกาะกลุ่มกัน แสดงถึงความไม่เหมาะสมของข้อมูลที่จะใช้ในการสร้างสมการทำนายผล



รูปที่ 4.7 กราฟ Residuals vs B:Cu(%) ของ Spread Factor

4.1.3.8 Residuals vs C: Sb (%)

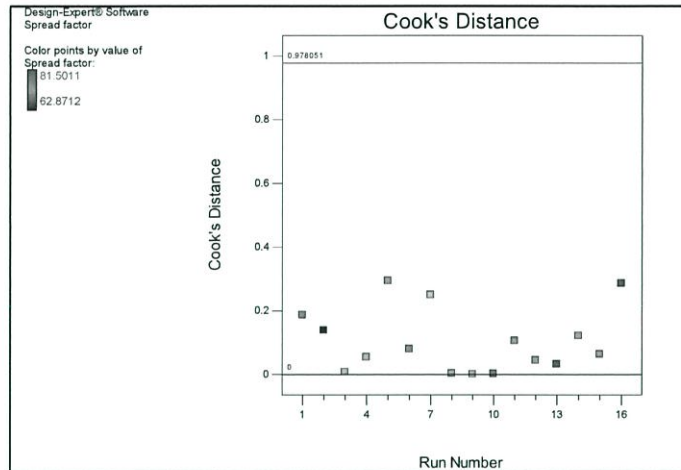
จากรูปที่ 4.8 จะเห็นว่า ข้อมูลมีลักษณะเกาะกลุ่มกัน แสดงถึงความไม่เหมาะสมของข้อมูลที่จะใช้ในการสร้างสมการทำนายผล



รูปที่ 4.8 กราฟ Residuals vs C:Sb(%) ของ Spread Factor

4.1.3.9 Cook's Distance

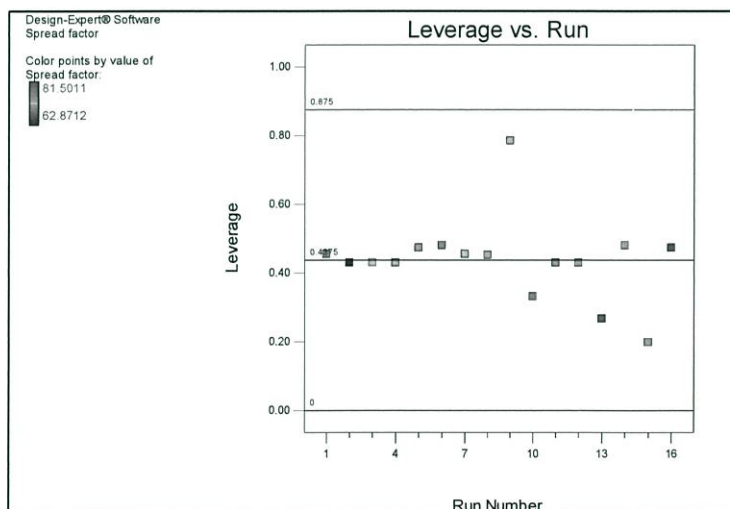
ลักษณะของกราฟที่ดีของ Cook's Distance นั้นคือ ไม่ควรมีข้อมูลตัวใดโดดออกมาจากกลุ่ม จากรูปที่ 4.9 นั้นแสดงให้เห็นว่า มีข้อมูลหลายตัวที่มีการกระโดดออกจากกลุ่ม ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อสมการทำนายผล



รูปที่ 4.9 กราฟ Cook's Distance ของ Spread Factor

4.1.3.10 Leverage vs Run

จากรูปที่ 4.10 จะเห็นว่าข้อมูลตัวที่ 9 นั้นมีค่าเข้าใกล้ 1 เพียงตัวเดียว นั่นมีความหมายคือ ข้อมูลตัวนี้จะส่งผลกระทบต่อความผิดพลาดของสมการทำนายผล



รูปที่ 4.10 กราฟ Leverage vs Run ของ Spread Factor

4.1.3.11 Summary Report

ตารางที่ 4.9 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์สมการทำนาย

Run Order	Actual Value	Predicted Value	Residual	Leverage	Internally Studentized Residual	Externally Studentized Residual	Cook's Distance	Standard Order
1	66.1000	69.8923	-3.7922	0.4550	-1.2541	-1.3015	0.1875	9
2	62.8712	66.3878	-3.5166	0.4297	-1.1369	-1.1583	0.1391	2
3	67.6262	68.4712	-0.8449	0.4302	-0.2733	-0.2587	0.0081	10
4	68.5934	66.3878	2.2056	0.4297	0.7131	0.6921	0.0547	1
5	72.5491	77.0542	-4.5050	0.4733	-1.5155	-1.6556	0.2948	4
6	66.1595	68.4583	-2.2988	0.4804	-0.7785	-0.7600	0.0800	3
7	74.2729	69.8923	4.3807	0.4550	1.4487	1.5597	0.2503	6
8	69.7955	69.2604	0.5351	0.4521	0.1765	0.1667	0.0037	7
9	68.6780	68.5920	0.0860	0.7850	0.0453	0.0427	0.0011	12
10	65.8638	66.4858	-0.6220	0.3312	-0.1857	-0.1754	0.0024	8
11	66.4170	69.4897	-3.0727	0.4296	-0.9933	-0.9925	0.1062	16
12	71.4844	69.4897	1.9947	0.4296	0.6448	0.6225	0.0447	11
13	64.5116	67.2781	-2.7665	0.2670	-0.7889	-0.7709	0.0324	14
14	71.2968	68.4583	2.8386	0.4804	0.9613	0.9568	0.1220	5
15	71.9964	67.0654	4.9310	0.1985	1.3447	1.4182	0.0640	15
16	81.5011	77.0542	4.4469	0.4733	1.4959	1.6271	0.2873	13

ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ Sequential Model Sum of Squares ของ Contact Angle

Sequential Model Sum of Squares						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	P-Value Prob > F	
<u>Mean vs Total</u>	<u>62941.4624</u>	<u>1</u>	<u>62941.4624</u>	-	-	<u>Suggested</u>
Linear vs Mean	190.2933	2	95.1466	1.6686	0.2265	
Quadratic vs Linear	179.0929	3	59.6976	1.0618	0.4081	
<u>Sp Cubic vs Quadratic</u>	<u>117.9999</u>	<u>1</u>	<u>117.9999</u>	<u>2.3907</u>	<u>0.1565</u>	<u>Suggested</u>
Cubic vs Sp Cubic	93.2957	3	31.0986	0.5317	0.6771	
Quartic vs Cubic	1.3727	1	1.3727	0.0196	0.8940	Aliased
Residual	349.5437	5	69.9087			
Sp Quartic vs Quadratic	176.2661	3	58.7554	1.0657	0.4227	
Quartic vs Sp Quartic	36.4022	2	18.2011	0.2604	0.7806	Aliased
Residual	349.5437	5	69.9087			
Total	63873.0606	16	3992.0663			

4.2.1.2 Lack of Fit Tests

จากผลการวิเคราะห์ตามตารางที่ 4.11 จะเห็นว่าแบบจำลอง Special Cubic ที่ทางโปรแกรมแนะนำนั้นมีค่า P-value เท่ากับ 0.8419 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่านัยสำคัญที่กำหนดไว้คือ 0.05 สรุปได้ว่าแบบจำลอง Special Cubic ไม่มีนัยสำคัญของค่า Lack of Fit จึงมีความเป็นไปได้ที่แบบจำลองนี้มีความเหมาะสมต่อการนำมาวิเคราะห์ในลำดับถัดไป

ตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ Lack of Fit Tests ของ Contact Angle

Lack of Fit Tests						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Linear	391.7612	8	48.9702	0.7005	0.6888	
Quadratic	212.6684	5	42.5337	0.6084	0.7006	
<u>Special Cubic</u>	<u>94.6684</u>	<u>4</u>	<u>23.6671</u>	<u>0.3385</u>	<u>0.8419</u>	<u>Suggested</u>
Cubic	1.3727	1	1.3727	0.0196	0.8940	
Special Quartic	36.4022	2	18.2011	0.2604	0.7806	
Quartic	0.0000	0				Aliased
Pure Error	349.5437	5	69.9087			

4.2.1.3 Model Summary Statistics

จากผลการวิเคราะห์ตามตารางที่ 4.12 จะเห็นว่าแบบจำลอง Special Cubic ที่ทางโปรแกรมแนะนำนั้นมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุดคือ 7.0254 และมีค่า R-Squared เข้าใกล้ 1 รวมถึงมีค่า PRESS (Predicted Residual Error Sum of Square) เท่ากับ 1367.9169 ซึ่งมีค่าไม่มากจนเกินไปเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่นๆ จึงทำให้แบบจำลองนี้มีความเหมาะสมที่สุด

ตารางที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ Model Summary Statistics ของ Contact Angle

Model Summary Statistics						
Source	Std. Dev.	R-Squared	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	PRESS	
Linear	7.5514	0.2043	0.0818	-0.3015	1212.4694	
Quadratic	7.4981	0.3965	0.0948	-0.6156	1505.0605	
<u>Special Cubic</u>	<u>7.0254</u>	<u>0.5232</u>	<u>0.2053</u>	<u>-0.4684</u>	<u>1367.9169</u>	<u>Suggested</u>
Cubic	7.6476	0.6233	0.0583		+	
Special Quartic	7.4253	0.5857	0.1122	-3.5785	4265.3140	
Quartic	8.3611	0.6248	-0.1256		+	Aliased

4.2.1.4 Summary

จากผลการวิเคราะห์ตามตารางที่ 4.13 จะเห็นว่าแบบจำลอง Special Cubic มีค่า P-Value จาก Sequential, Lack of Fit และค่า R-Squared เหมาะสมที่สุดสำหรับการวิเคราะห์ Fit Summary

ตารางที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ Summary ของ Contact Angle

Summary					
Source	Sequential P-Value	Lack of Fit P-Value	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	
Linear	0.2265	0.6888	0.0818	-0.3015	
Quadratic	0.4081	0.7006	0.0948	-0.6156	
<u>Special Cubic</u>	<u>0.1565</u>	<u>0.8419</u>	<u>0.2053</u>	<u>-0.4684</u>	<u>Suggested</u>
Cubic	0.6771	0.8940	0.0583		
Sp Quartic vs Quadratic	0.4227	0.7806	0.1122	-3.5785	
Quartic vs Cubic	0.8940		-0.1256		Aliased
Quartic vs Sp Quartic	0.7806		-0.1256		Aliased

4.2.2 การวิเคราะห์ ANOVA

จากผลการวิเคราะห์ตามตารางที่ 4.14 จะเห็นว่าค่า P-Value ของ Lack of Fit นั้นไม่มีนัยสำคัญต่อแบบจำลอง Special Cubic นั้นมีความหมายว่า แบบจำลอง Special Cubic มีความเหมาะสมต่อการนำมาสร้างสมการทำนาย

ตารางที่ 4.14 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของ Contact Angle

Analysis of variance table						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	P-Value Prob > F	
Model	487.3861	6	81.2310	1.6458	0.2406	not significant
[1] Linear Mixture	190.2933	2	95.1466	1.9277	0.2010	
AB	85.6779	1	85.6779	1.7359	0.2202	
AC	121.2294	1	121.2294	2.4562	0.1515	
BC	125.3669	1	125.3669	2.5400	0.1455	
ABC	117.9999	1	117.9999	2.3907	0.1565	
Residual	444.2121	9	49.3569			
Lack of Fit	94.6684	4	23.6671	0.3385	0.8419	not significant
Pure Error	349.5437	5	69.9087			
Cor Total	931.5982	15				

จากตารางที่ 4.15 จะเห็นว่า ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากสมการทำนายโดยใช้แบบจำลอง Special Cubic ทั้งหมด 16 ส่วนผสม นั้นมีค่าเท่ากับ 62.7203 และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 7.0254 รวมถึงแสดงค่าอื่นๆทางสถิติเพื่อประกอบการตัดสินใจ

ตารางที่ 4.15 แสดงค่าสถิติของสมการทำนายของ Contact Angle

Std. Dev.	7.0254	R-Squared	0.5232
Mean	62.7203	Adj R-Squared	0.2053
C.V. %	11.2012	Pred R-Squared	-0.4684
PRESS	1367.9169		

ค่าสัมประสิทธิ์จากตารางที่ 4.16 สามารถสร้างสมการทำนายค่าของ Contact Angle ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Contact Angle} = & 49.12*A - 23823.3087*B - 6724.2045*C + 25250.8376*AB \\ & + 7535.2318*AC + 315196.0812*BC - 324826.3164*ABC \end{aligned} \quad (4.2)$$

- โดยที่ A = ปริมาณของดีบุก (%)
 B = ปริมาณของทองแดง (%)
 C = ปริมาณของพลวง (%)

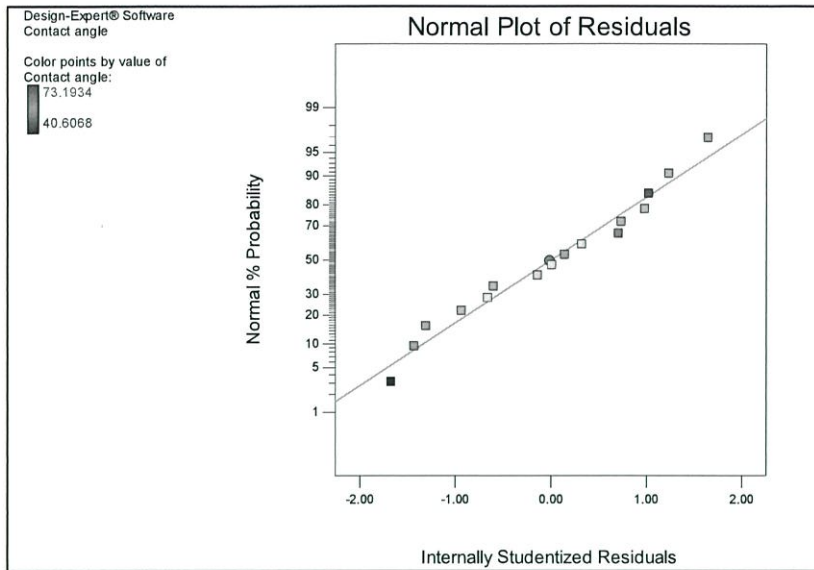
ตารางที่ 4.16 แสดงผลการวิเคราะห์หาสมการทำนายค่า Contact Angle

Coefficients in Terms of Real Components						
Component	Coefficient Estimate	df	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
A-Sn	49.1200	1	4.8333	38.1865	60.0536	6.7637
B-Cu	-23823.3087	1	18564.2170	-65818.4851	18171.8678	47524.0358
C-Sb	-6724.2045	1	4408.6893	-16697.3525	3248.9436	16347.6037
AB	25250.8376	1	19165.2900	-18104.0605	68605.7356	44177.8603
AC	7535.2318	1	4808.0235	-3341.2731	18411.7366	16174.2604
BC	315196.0812	1	197771.3419	-132193.7765	762585.9389	13640.2654
ABC	-324826.3164	1	210079.7737	-800059.7812	150407.1485	12514.3702

4.2.3 การวิเคราะห์ Diagnostics

4.2.3.1 Normal Plot of Residuals

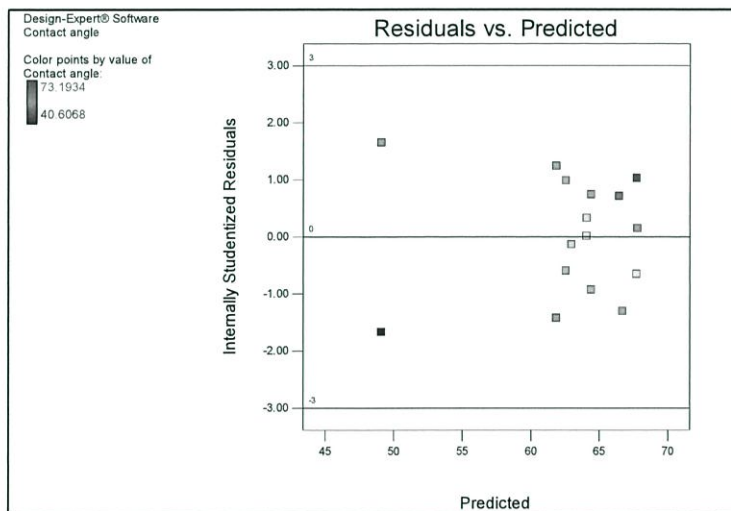
จากรูปที่ 4.12 จะเห็นว่าการเรียงตัวของข้อมูลนั้นมีลักษณะเป็นเส้นตรง มีความคลาดเคลื่อนไม่มากนัก และมีการเกาะกลุ่มกันบนเส้นตรง แสดงถึงความเหมาะสมของข้อมูลที่จะนำไปใช้ในการสร้างสมการทำนาย



รูปที่ 4.12 กราฟ Normal Plot of Residuals ของ Contact Angle

4.2.3.2 Residuals vs Predicted

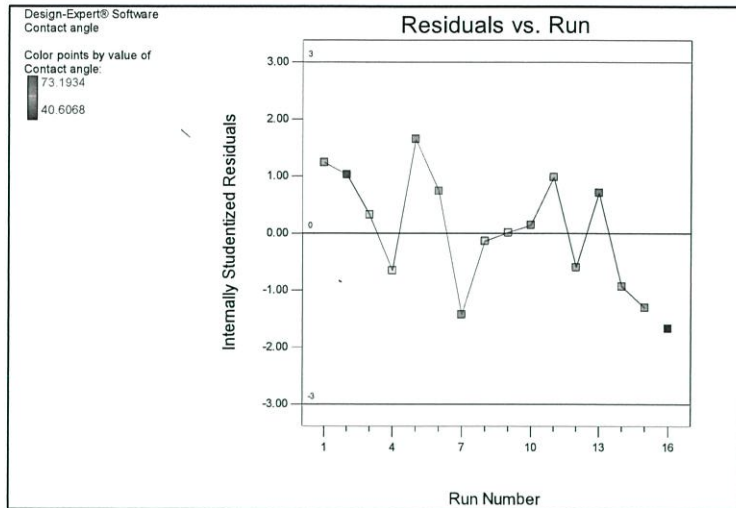
จากรูปที่ 4.13 จะเห็นว่าข้อมูลมีการเกาะกลุ่มกัน แสดงถึงความไม่เหมาะสมของข้อมูลที่จะใช้ในการสร้างสมการทำนาย



รูปที่ 4.13 กราฟ Residuals vs Predicted ของ Contact Angle

4.2.3.3 Residuals vs Run

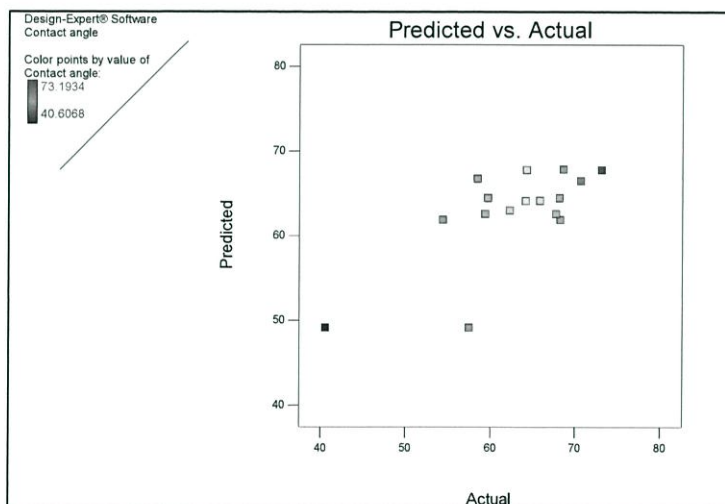
จากรูปที่ 4.14 จะเห็นว่าการกระจายตัวของข้อมูลนั้นเป็นแบบสุ่ม ไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจน แสดงถึงความเหมาะสมของการนำข้อมูลไปใช้ในการสร้างสมการทำนาย



รูปที่ 4.14 กราฟ Residuals vs Run ของ Contact Angle

4.2.3.4 Predicted vs Actual

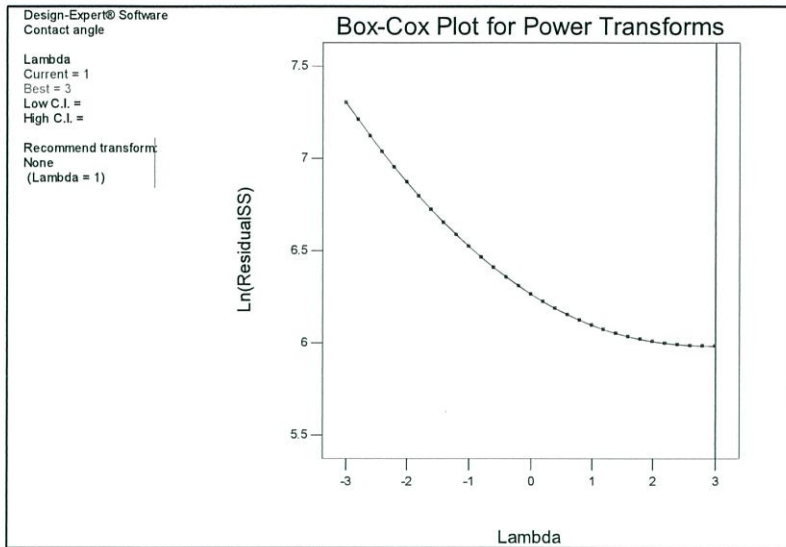
จากรูปที่ 4.15 จะเห็นว่าค่าที่ทำนายจากสมการและค่าที่ได้จากการทดลองนั้นมีความคลาดเคลื่อนกันพอสมควร ซึ่งส่งผลต่อความแม่นยำของสมการทำนาย



รูปที่ 4.15 กราฟ Predicted vs Actual ของ Contact Angle

4.2.3.5 Box-Cox Plot for Power Transforms

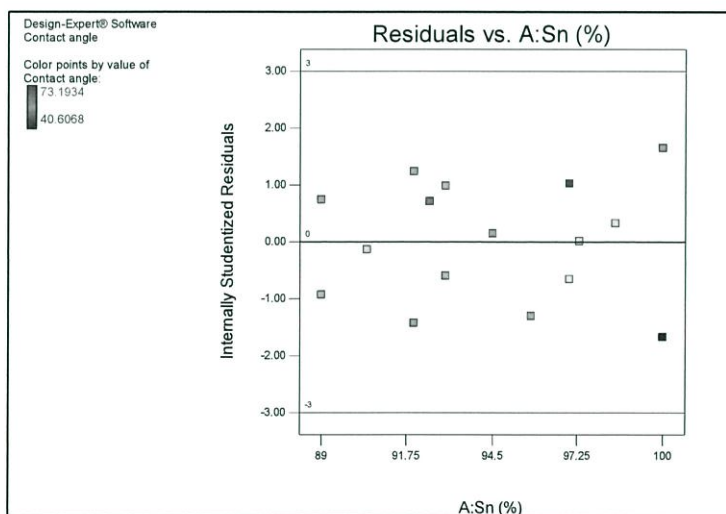
จากรูปที่ 4.16 จะเห็นว่ากราฟที่ได้นั้นมีค่าความเชื่อมั่นต่ำเพราะ ค่า lambda นั้นไม่เข้าใกล้ 1 แสดงว่า สมการทำนายนั้นมีประสิทธิภาพต่ำ



รูปที่ 4.16 กราฟ Box-Cox Plot for Power Transforms ของ Contact Angle

4.2.3.6 Residuals vs A: Sn (%)

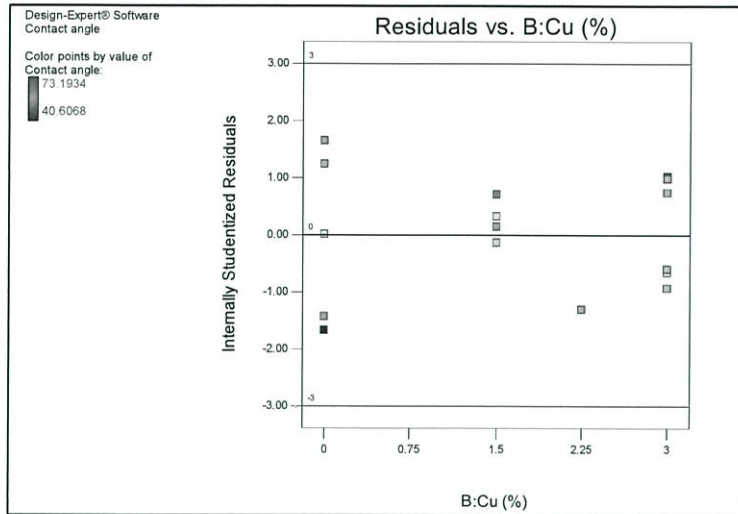
จากรูปที่ 4.17 จะเห็นว่า ข้อมูลมีลักษณะไม่เกาะกลุ่มกัน แสดงถึงความเหมาะสมของข้อมูลที่จะใช้ในการสร้างสมการทำนายผล



รูปที่ 4.17 กราฟ Residuals vs A:Sn(%) ของ Contact Angle

4.2.3.7 Residuals vs B: Cu (%)

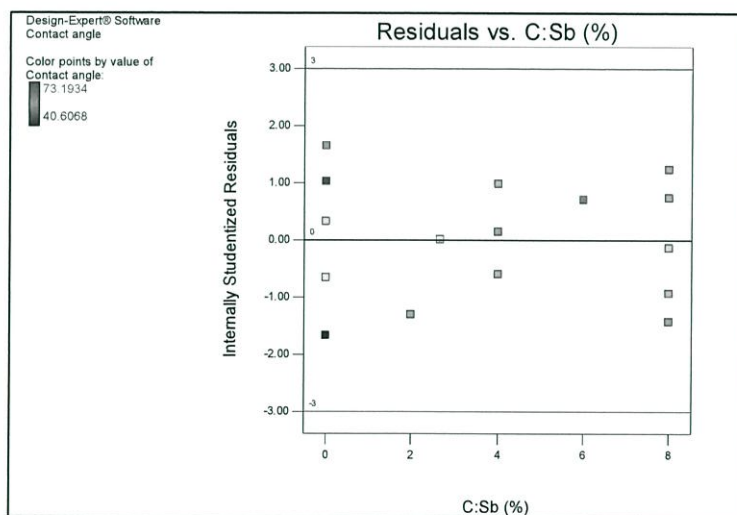
จากรูปที่ 4.18 จะเห็นว่า ข้อมูลมีลักษณะเกาะกลุ่มกัน แสดงถึงความไม่เหมาะสมของข้อมูลที่จะใช้ในการสร้างสมการทำนายผล



รูปที่ 4.18 กราฟ Residuals vs B:Cu(%) ของ Contact Angle

4.2.3.8 Residuals vs C: Sb (%)

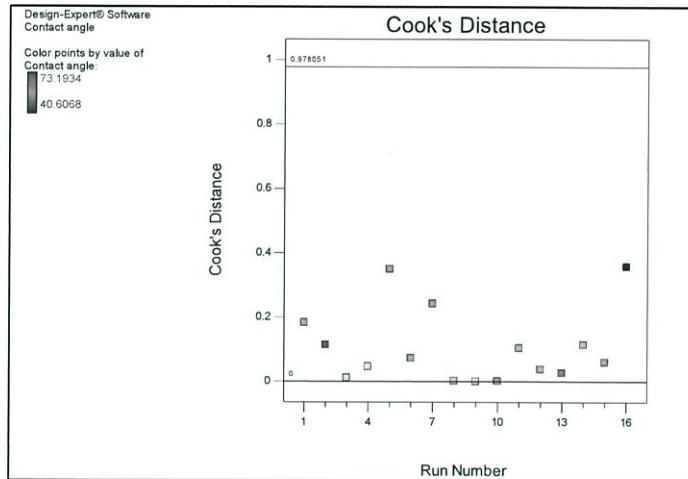
จากรูปที่ 4.19 จะเห็นว่า ข้อมูลมีลักษณะเกาะกลุ่มกัน แสดงถึงความไม่เหมาะสมของข้อมูลที่จะใช้ในการสร้างสมการทำนายผล



รูปที่ 4.19 กราฟ Residuals vs C:Sb(%) ของ Contact Angle

4.2.3.9 Cook's Distance

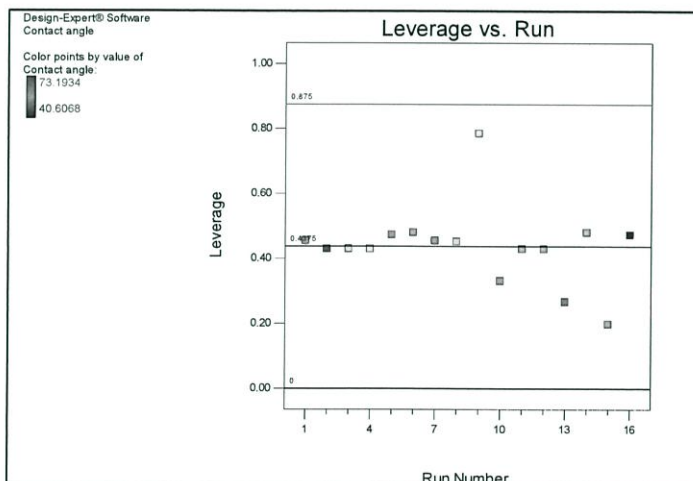
ลักษณะของกราฟที่ดีของ Cook's Distance นั้นคือ ไม่ควรมีข้อมูลตัวใดโดดออกมาจากกลุ่ม จากรูปที่ 4.20 นั้นแสดงให้เห็นว่า มีข้อมูลหลายตัวที่มีการกระโดดออกมาจากกลุ่ม ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อสมการทำนายผล



รูปที่ 4.20 กราฟ Cook's Distance ของ Contact Angle

4.2.3.10 Leverage vs Run

จากรูปที่ 4.21 จะเห็นว่าข้อมูลตัวที่ 9 นั้นมีค่าเข้าใกล้ 1 เพียงตัวเดียว นั้นมีความหมายคือ ข้อมูลตัวนี้จะส่งผลกระทบต่อความผิดพลาดของสมการทำนายผล



รูปที่ 4.21 กราฟ Leverage vs Run ของ Contact Angle

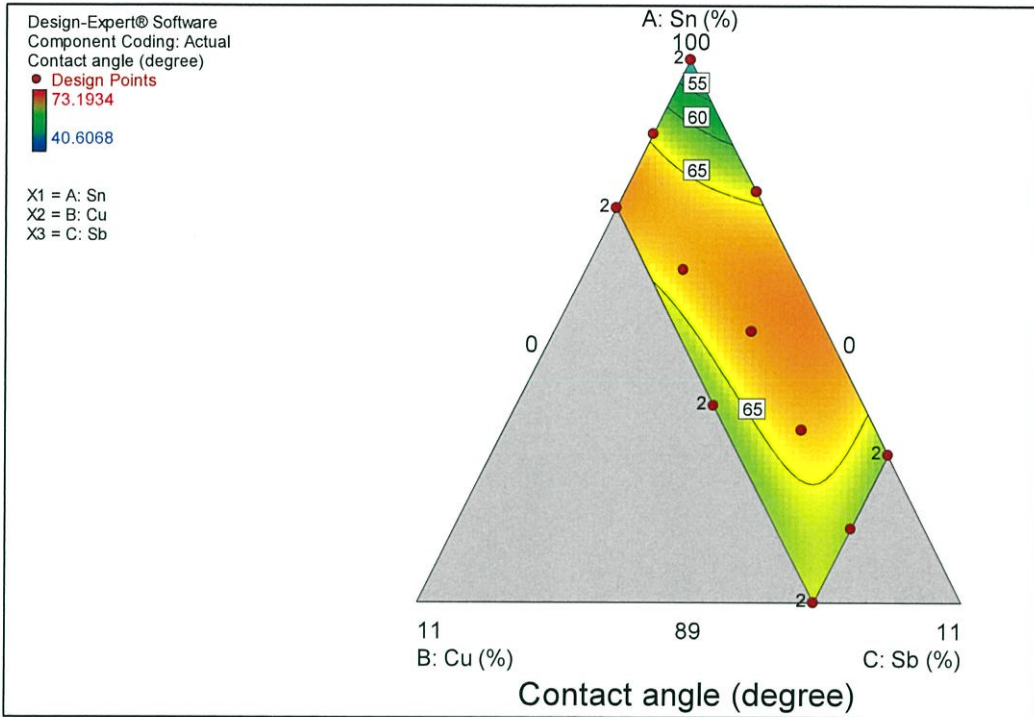
4.2.3.11 Summary Report

ตารางที่ 4.17 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์สมการทำนาย

Run Order	Actual Value	Predicted Value	Residual	Leverage	Internally Studentized Residual	Externally Studentized Residual	Cook's Distance	Standard Order
1	68.2745	61.8471	6.4273	0.4550	1.2392	1.2829	0.1831	9
2	73.1934	67.7466	5.4468	0.4297	1.0267	1.0301	0.1135	2
3	65.8441	64.1147	1.7294	0.4302	0.3261	0.3093	0.0115	10
4	64.2684	67.7466	-3.4781	0.4297	-0.6556	-0.6334	0.0463	1
5	57.5351	49.1200	8.4150	0.4733	1.6504	1.8634	0.3497	4
6	68.1810	64.4287	3.7524	0.4804	0.7409	0.7209	0.0725	3
7	54.4554	61.8471	-7.3918	0.4550	-1.4252	-1.5270	0.2422	6
8	62.2715	62.9725	-0.7010	0.4521	-0.1348	-0.1272	0.0021	7
9	64.1293	64.0912	0.0381	0.7850	0.0117	0.0110	0.0001	12
10	68.6445	67.8041	0.8404	0.3312	0.1463	0.1381	0.0015	8
11	67.7754	62.5523	5.2231	0.4296	0.9844	0.9825	0.1043	16
12	59.3933	62.5523	-3.1590	0.4296	-0.5954	-0.5727	0.0381	11
13	70.7318	66.4534	4.2784	0.2670	0.7113	0.6903	0.0263	14
14	59.7171	64.4287	-4.7116	0.4804	-0.9303	-0.9226	0.1143	5
15	58.5039	66.7000	-8.1961	0.1985	-1.3031	-1.3640	0.0601	15
16	40.6068	49.1200	-8.5132	0.4733	-1.6697	-1.8948	0.3579	13

4.2.4 การวิเคราะห์ Model Graph

จากรูปที่ 4.22 จะเห็นว่า ค่ามุมสัมผัส (Contact Angle) นั้นจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของทองแดงและพลวงเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.22 Contour ของ Contact Angle ทั้ง 3 ส่วนผสม

4.3 การวิเคราะห์ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

4.3.1 การวิเคราะห์ Fit Summary

4.3.1.1 Sequential Model Sum of Squares

จากผลการวิเคราะห์ตามตารางที่ 4.18 จะเห็นว่าแบบจำลอง Linear มีค่า P-Value เท่ากับ 0.0028 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่านัยสำคัญที่กำหนดไว้คือ 0.05 จึงเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด

ตารางที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์ Sequential Model Sum of Squares ของความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

Sequential Model Sum of Squares						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	P-Value Prob > F	
Mean vs Total	150.4828	1	150.4828			
<u>Linear vs Mean</u>	<u>9.3941</u>	<u>2</u>	<u>4.6970</u>	<u>9.5695</u>	<u>0.0028</u>	<u>Suggested</u>
Quadratic vs Linear	0.8872	3	0.2957	0.5383	0.6666	
Sp Cubic vs Quadratic	0.4003	1	0.4003	0.7074	0.4221	
Cubic vs Sp Cubic	1.2511	3	0.4170	0.6512	0.6106	
Quartic vs Cubic	0.9474	1	0.9474	1.6365	0.2570	Aliased
Residual	2.8948	5	0.5790			
Sp Quartic vs Quadratic	0.4591	3	0.1530	0.2128	0.8845	
Quartic vs Sp Quartic	2.1397	2	1.0699	1.8479	0.2507	Aliased
Residual	2.8948	5	0.5790			
Total	166.2577	16	10.3911			

4.3.1.2 Lack of Fit Tests

จากผลการวิเคราะห์ตามตารางที่ 4.19 จะเห็นว่าแบบจำลอง Linear ที่ทางโปรแกรมแนะนำนั้นมีค่า P-Value เท่ากับ 0.6573 ซึ่งมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่นและมีความมากกว่าค่านัยสำคัญที่กำหนดไว้คือ 0.05 สรุปได้ว่าแบบจำลอง Linear ไม่มีนัยสำคัญของค่า Lack of Fit จึงมีความเป็นไปได้ที่แบบจำลองนี้มีความเหมาะสมต่อการนำมาวิเคราะห์ในลำดับถัดไป

ตารางที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์ Lack of Fit Tests ของความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

Lack of Fit Tests						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	P-Value Prob > F	
<u>Linear</u>	<u>3.4861</u>	<u>8</u>	<u>0.4358</u>	<u>0.7527</u>	<u>0.6573</u>	<u>Suggested</u>
Quadratic	2.5988	5	0.5198	0.8978	0.5457	
Special Cubic	2.1985	4	0.5496	0.9494	0.5063	
Cubic	0.9474	1	0.9474	1.6365	0.2570	
Special Quartic	2.1397	2	1.0699	1.8479	0.2507	
Quartic	0.0000	0				Aliased
Pure Error	2.8948	5	0.5790			

4.3.1.3 Model Summary Statistics

จากผลการวิเคราะห์ตามตารางที่ 4.20 จะเห็นว่าแบบจำลอง Linear ที่ทางโปรแกรมแนะนำนั้นมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุดคือ 0.7006 และมีค่า PRESS (Predicted Residual Error Sum of Square) เท่ากับ 9.3579 ซึ่งมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่นๆ จึงทำให้แบบจำลองนี้มีความเหมาะสมที่สุด

ตารางที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์ Model Summary Statistics ของความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

Model Summary Statistics						
Source	Std. Dev.	R-Squared	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	PRESS	
<u>Linear</u>	<u>0.7006</u>	<u>0.5955</u>	<u>0.5333</u>	<u>0.4068</u>	<u>9.3579</u>	<u>Suggested</u>
Quadratic	0.7412	0.6518	0.4776	0.1146	13.9671	
Special Cubic	0.7523	0.6771	0.4619	-0.0303	16.2530	
Cubic	0.8002	0.7564	0.3911		+	
Special Quartic	0.8481	0.6809	0.3161	-2.2109	50.6510	
Quartic	0.7609	0.8165	0.4495		+	Aliased

4.3.1.4 Summary

จากผลการวิเคราะห์ตามตารางที่ 4.21 จะเห็นว่าแบบจำลอง Linear มีค่า P-Value จาก Sequential, Lack of Fit และค่า R-Squared เหมาะสมที่สุดสำหรับการวิเคราะห์ Fit Summary

ตารางที่ 4.21 ผลการวิเคราะห์ Summary ของความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

Summary					
Source	Sequential P-Value	Lack of Fit P-Value	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	
<u>Linear</u>	<u>0.0028</u>	<u>0.6573</u>	<u>0.5333</u>	<u>0.4068</u>	<u>Suggested</u>
Quadratic	0.6666	0.5457	0.4776	0.1146	
Special Cubic	0.4221	0.5063	0.4619	-0.0303	
Cubic	0.6106	0.2570	0.3911		
Sp Quartic vs Quadratic	0.8845	0.2507	0.3161	-2.2109	
Quartic vs Cubic	0.2570		0.4495		Aliased
Quartic vs Sp Quartic	0.2507		0.4495		Aliased

4.3.2 การวิเคราะห์ ANOVA

จากผลการวิเคราะห์ตามตารางที่ 4.22 จะเห็นว่าค่า P-Value ของ Lack of Fit นั้นไม่มีนัยสำคัญต่อแบบจำลอง Linear นั้นมีความหมายว่า แบบจำลอง Linear มีความเหมาะสมต่อการนำมาสร้างสมการทำนาย

ตารางที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

Analysis of variance table						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	9.3941	2	4.6970	9.5695	0.0028	significant
[1] Linear Mixture	9.3941	2	4.6970	9.5695	0.0028	
Residual	6.3808	13	0.4908			
Lack of Fit	3.4861	8	0.4358	0.7527	0.6573	not significant
Pure Error	2.8948	5	0.5790			
Cor Total	15.7749	15				

จากตารางที่ 4.23 จะเห็นว่า ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากสมการทำนายโดยใช้แบบจำลอง Linear ทั้งหมด 16 ส่วนผสม นั้นมีค่าเท่ากับ 3.0668 และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.7006 รวมถึงแสดงค่าอื่นๆทางสถิติเพื่อประกอบการตัดสินใจ

ตารางที่ 4.23 ค่าสถิติของสมการทำนายความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

Std. Dev.	0.7006	R-Squared	0.5955
Mean	3.0668	Adj R-Squared	0.5333
C.V. %	22.8446	Pred R-Squared	0.4068
PRESS	9.3579		

จากตารางที่ 4.24 สามารถสร้างสมการทำนายค่าความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ได้ดังนี้

$$\text{ความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะ} = 2.5956*A + 57.2651*B - 8.2738*C \quad (4.3)$$

โดยที่ A = ปริมาณของดีบุก (%)

B = ปริมาณของทองแดง (%)

C = ปริมาณของพลวง (%)

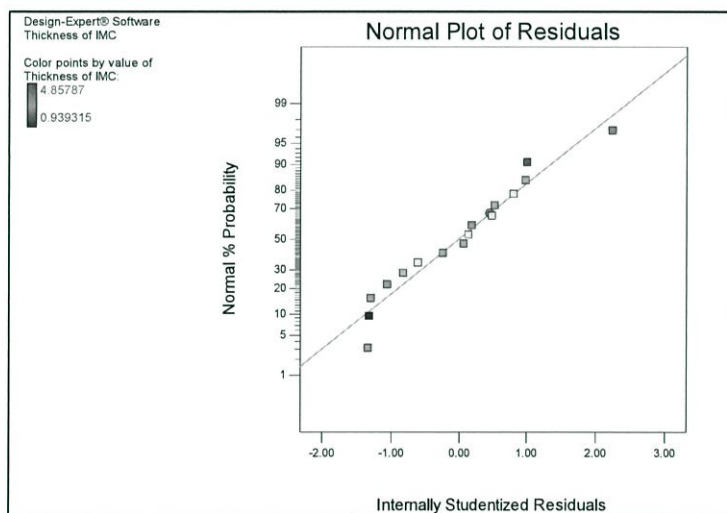
ตารางที่ 4.24 ผลการวิเคราะห์หาสมการทำนายค่าความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

Coefficients in Terms of Real Components:						
Component	Coefficient Estimate	df	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
A-Sn	2.5956	1	0.3562	1.8260	3.3652	3.6951
B-Cu	57.2651	1	13.7888	27.4763	87.0539	2.6365
C-Sb	-8.2738	1	5.1788	-19.4619	2.9144	2.2683

4.3.3 การวิเคราะห์ Diagnostics

4.3.3.1 Normal Plot of Residuals

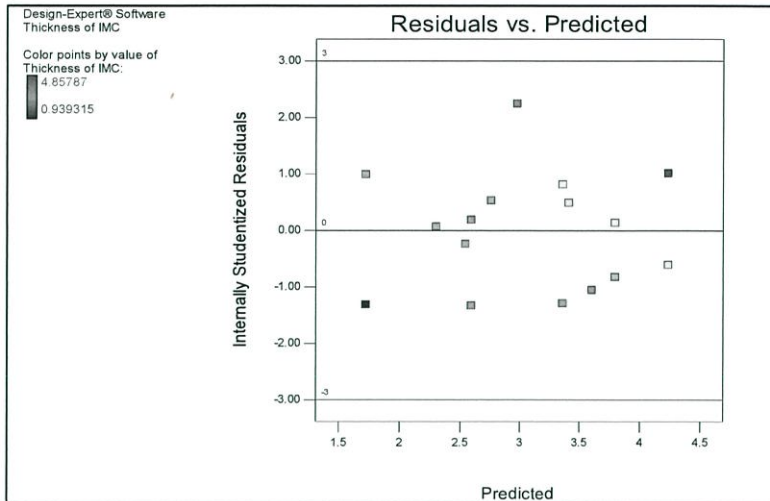
จากรูปที่ 4.23 จะเห็นว่าการเรียงตัวของข้อมูลนั้นมีลักษณะเป็นเส้นตรง มีความคลาดเคลื่อนไม่มากนัก และมีการเกาะกลุ่มกันบนเส้นตรง แสดงถึงความเหมาะสมของข้อมูลที่จะนำไปใช้ในการสร้างสมการทำนาย



รูปที่ 4.23 กราฟ Normal Plot of Residuals ของความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

4.3.3.2 Residuals vs Predicted

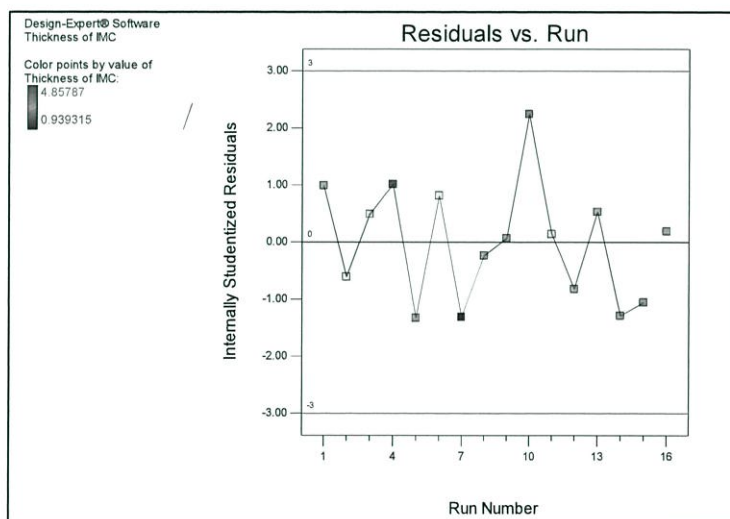
จากรูปที่ 4.24 จะเห็นว่าข้อมูลมีลักษณะกระจาย ไม่เกาะกลุ่มกัน แสดงถึงความเหมาะสมของข้อมูลที่จะใช้ในการสร้างสมการทำนาย



รูปที่ 4.24 กราฟ Residuals vs Predicted ของความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

4.3.3.3 Residuals vs Run

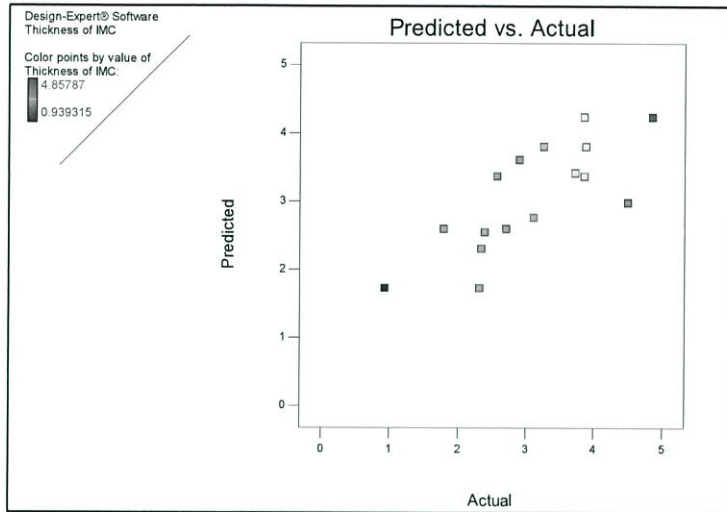
จากรูปที่ 4.25 จะเห็นว่า การกระจายตัวของข้อมูลนั้นเป็นแบบสุ่ม ไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจน แสดงถึงความเหมาะสมของการนำข้อมูลไปใช้ในการสร้างสมการทำนาย



รูปที่ 4.25 กราฟ Residuals vs Run ของความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

4.3.3.4 Predicted vs Actual

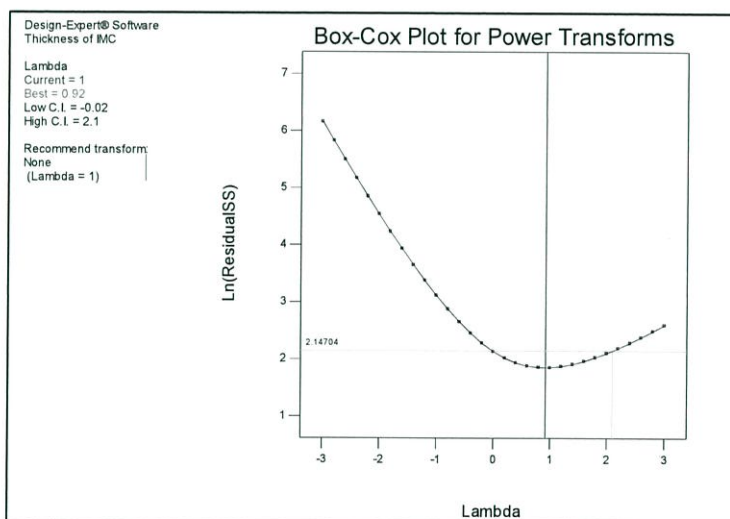
จากรูปที่ 4.26 จะเห็นว่าค่าที่ทำนายจากสมการและค่าที่ได้จากการทดลองนั้นมีความคลาดเคลื่อนกันพอสมควร ซึ่งส่งผลต่อความแม่นยำของสมการทำนาย



รูปที่ 4.26 กราฟ Predicted vs Actual ของความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

4.3.3.5 Box-Cox Plot for Power Transforms

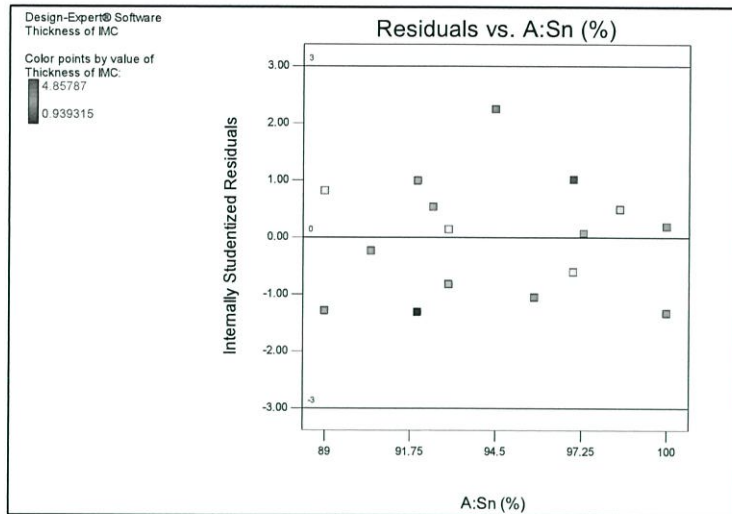
จากรูปที่ 4.27 จะเห็นว่ากราฟที่ได้นั้นมีค่าความเชื่อมั่นสูงเพราะ ค่า lambda นั้นเข้าใกล้ 1 แสดงว่า สมการทำนายนั้นมีประสิทธิภาพสูง



รูปที่ 4.27 กราฟ Box-Cox Plot for Power Transforms ของความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

4.3.3.6 Residuals vs A: Sn (%)

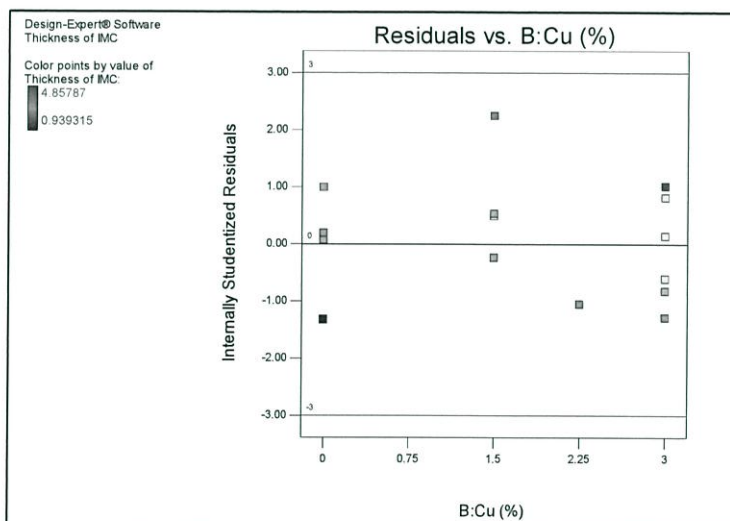
จากรูปที่ 4.28 จะเห็นว่า ข้อมูลมีลักษณะไม่เกาะกลุ่มกัน แสดงถึงความเหมาะสมของข้อมูลที่จะใช้ในการสร้างสมการทำนายผล



รูปที่ 4.28 กราฟ Residuals vs A:Sn(%) ของความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

4.3.3.7 Residuals vs B: Cu (%)

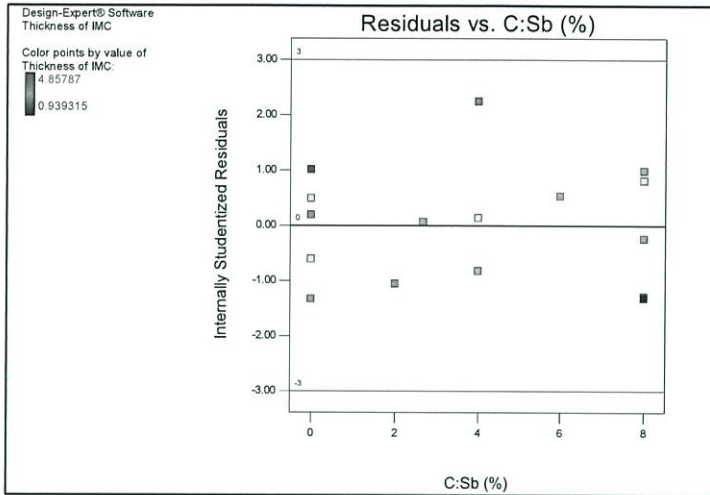
จากรูปที่ 4.29 จะเห็นว่า ข้อมูลมีลักษณะเกาะกลุ่มกัน แสดงถึงความไม่เหมาะสมของข้อมูลที่จะใช้ในการสร้างสมการทำนายผล



รูปที่ 4.29 กราฟ Residuals vs B:Cu(%) ของความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

4.3.3.8 Residuals vs C: Sb (%)

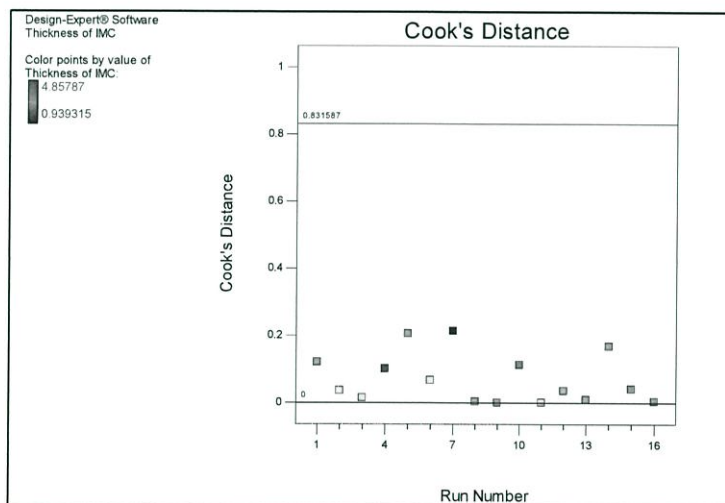
จากรูปที่ 4.30 จะเห็นว่า ข้อมูลมีลักษณะเกาะกลุ่มกัน แสดงถึงความไม่เหมาะสมของข้อมูลที่จะใช้ในการสร้างสมการทำนายผล



รูปที่ 4.30 กราฟ Residuals vs C:Sb(%) ของความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

4.3.3.9 Cook's Distance

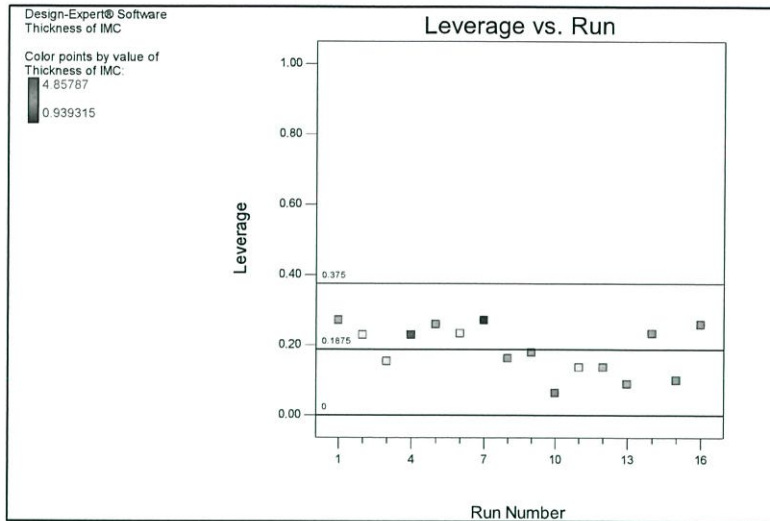
ลักษณะของกราฟที่ดีของ Cook's distance นั้นคือ ไม่ควรมีข้อมูลตัวใดโดดออกมาจากกลุ่ม จากรูปที่ 4.31 นั้นแสดงให้เห็นว่า มีข้อมูลบางตัวที่มีการกระโดดออกจากกลุ่ม ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อสมการทำนายผล



รูปที่ 4.31 กราฟ Cook's Distance ของความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

4.3.3.10 Leverage vs Run

จากรูปที่ 4.32 จะเห็นว่า ไม่มีข้อมูลตัวใดเข้าใกล้ค่า 1 นั้นมีความหมายคือ สมการทำนายที่ได้จะไม่แปรตามการทดลองใดการทดลองหนึ่งเพียงการทดลองเดียว



รูปที่ 4.32 กราฟ Leverage vs Run ของความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

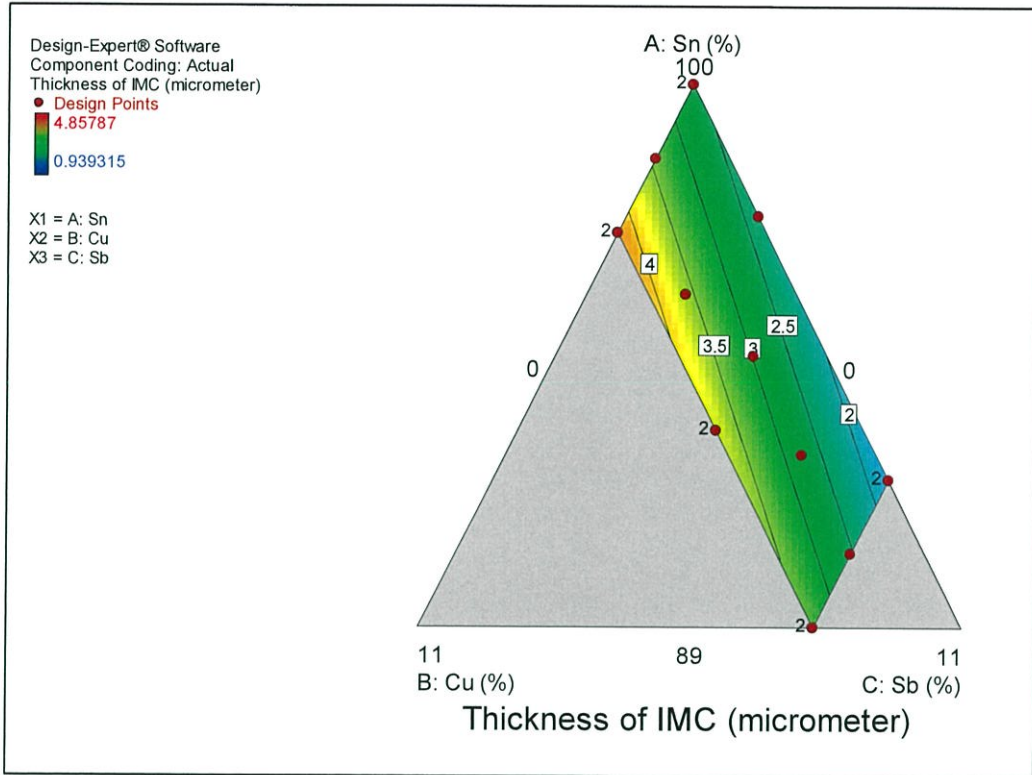
4.3.3.11 Summary report

ตารางที่ 4.25 ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์สมการทำนาย

Run Order	Actual Value	Predicted Value	Residual	Leverage	Internally Studentized Residual	Externally Studentized Residual	Cook's Distance	Standard Order
1	2.3178	1.7261	0.5918	0.2706	0.9890	0.9881	0.1210	9
2	3.8616	4.2357	-0.3741	0.2286	-0.6080	-0.5926	0.0365	2
3	3.7308	3.4156	0.3152	0.1536	0.4890	0.4742	0.0145	10
4	4.8579	4.2357	0.6222	0.2286	1.0111	1.0121	0.1010	1
5	1.7926	2.5956	-0.8030	0.2586	-1.3311	-1.3761	0.2060	4
6	3.8651	3.3661	0.4989	0.2329	0.8131	0.8019	0.0669	3
7	0.9393	1.7261	-0.7867	0.2706	-1.3149	-1.3567	0.2138	6
8	2.3929	2.5461	-0.1532	0.1618	-0.2388	-0.2300	0.0037	7
9	2.3467	2.3054	0.0413	0.1787	0.0651	0.0625	0.0003	12
10	4.5017	2.9809	1.5208	0.0633	2.2429	2.7523	0.1134	8
11	3.8899	3.8009	0.0890	0.1364	0.1368	0.1315	0.0010	16
12	3.2642	3.8009	-0.5368	0.1364	-0.8245	-0.8137	0.0358	11
13	3.1178	2.7635	0.3544	0.0890	0.5299	0.5147	0.0091	14
14	2.5748	3.3661	-0.7914	0.2329	-1.2897	-1.3269	0.1684	5
15	2.9063	3.6083	-0.7019	0.0994	-1.0558	-1.0608	0.0410	15
16	2.7092	2.5956	0.1136	0.2586	0.1883	0.1811	0.0041	13

4.3.4 การวิเคราะห์ Model Graph

จากรูปที่ 4.33 จะเห็นว่า ความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะนั้นจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของทองแดงเพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของพลวงเพิ่มขึ้น



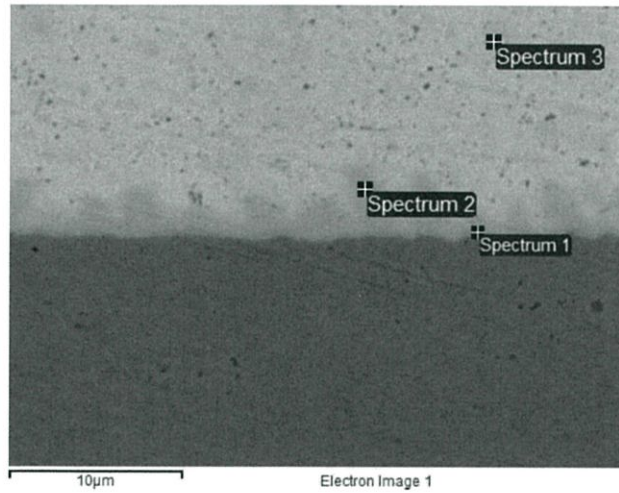
รูปที่ 4.33 Contour ของความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ทั้ง 3 ส่วนผสม

4.4 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

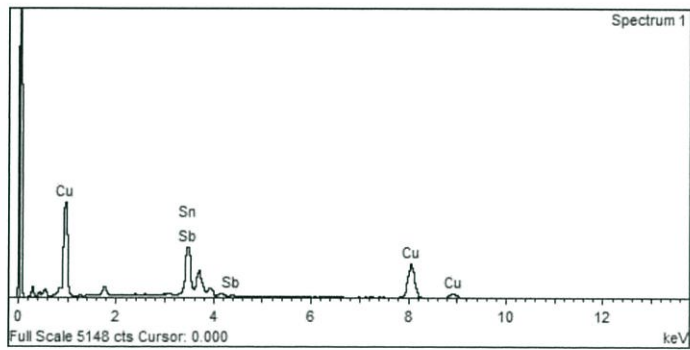
จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีและองค์ประกอบทางเคมีของโลหะบัดกรีในแต่ละส่วนผสมที่ได้กำหนดไว้เบื้องต้นด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และทำการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณด้วย EDX ที่ความละเอียด x3500 ได้ผลการทดลองดังนี้

4.4.1 ส่วนผสมที่ 1 (92Sn-8Sb)

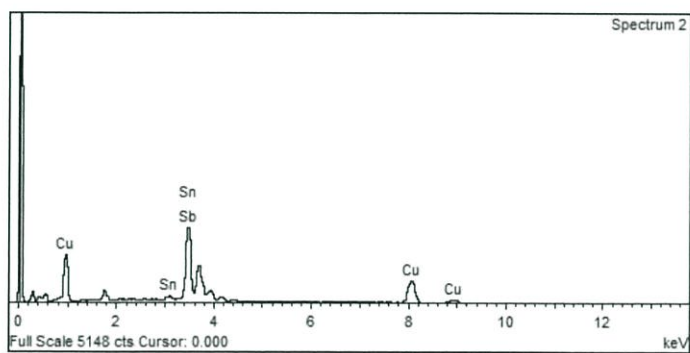
หลังจากทำการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วย EDX โดยการยิงสเปกตรัมตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 ดังรูปที่ 4.34 จะพบปริมาณทองแดง ดีบุก และพลวงดังแสดงในรูปที่ 4.35-4.37 และสรุปออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์อะตอมธาตุได้ดังตารางที่ 4.26



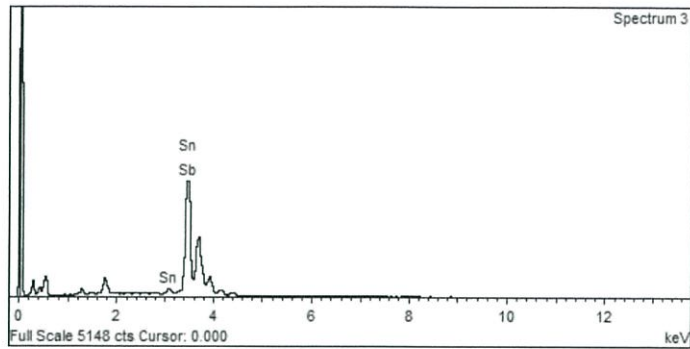
รูปที่ 4.34 โครงสร้างจุลภาคของส่วนผสมที่ 1



รูปที่ 4.35 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 4.36 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 2



รูปที่ 4.37 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 3

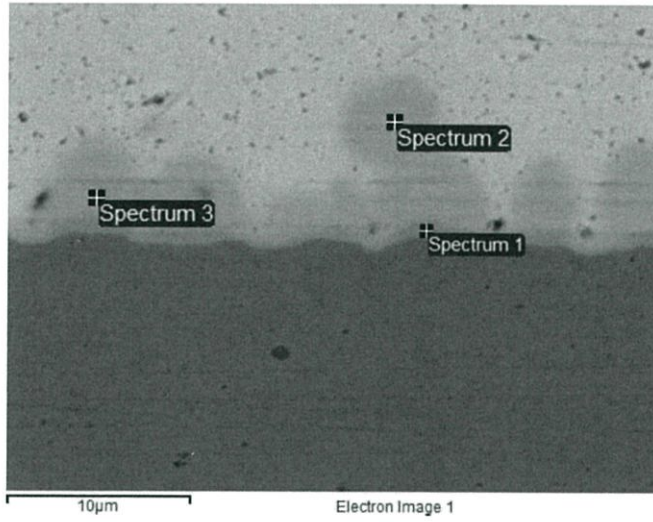
ตารางที่ 4.26 เปอร์เซนต์อะตอมธาตุที่เกิดขึ้นในชั้นสารประกอบเชิงโลหะของส่วนผสมที่ 1

Element	Atomic%		
	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
Cu	68.28	50.29	-
Sn	30.22	47.63	93.62
Sb	1.50	2.08	6.38

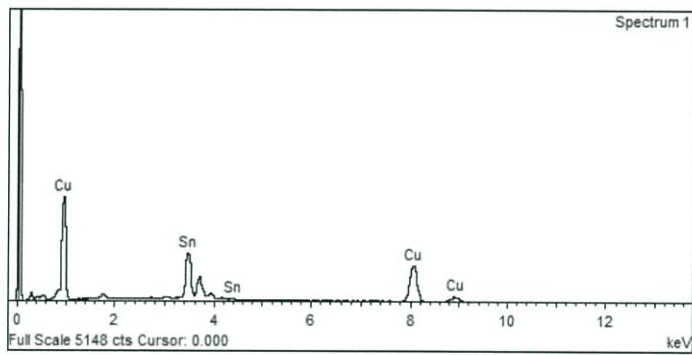
จากรูปที่ 4.34 จะเห็นว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีลักษณะสูง-ต่ำต่างกันเพียงเล็กน้อยและมีความหนาเฉลี่ย 2.3178 ไมโครเมตร เมื่อทำการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบธาตุด้วย EDX จะเห็นว่า บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะนั้นมีปริมาณของทองแดงสูงมาก และเมื่อตรวจสอบบริเวณที่อยู่ห่างจากชั้นสารประกอบเชิงโลหะออกไปจะพบปริมาณของทองแดงที่ลดลงเรื่อยๆ แต่ในทางกลับกันปริมาณของดีบุกและพลวงจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆดังแสดงในตารางที่ 4.26 หากนำไปตรวจสอบกับแผนภูมิเฟสจะพบว่าเกิดสารประกอบ Cu_6Sn_5 กับ Cu_3Sn ที่บริเวณชั้นประกอบเชิงโลหะ

4.4.2 ส่วนผสมที่ 2 (97Sn-3Cu)

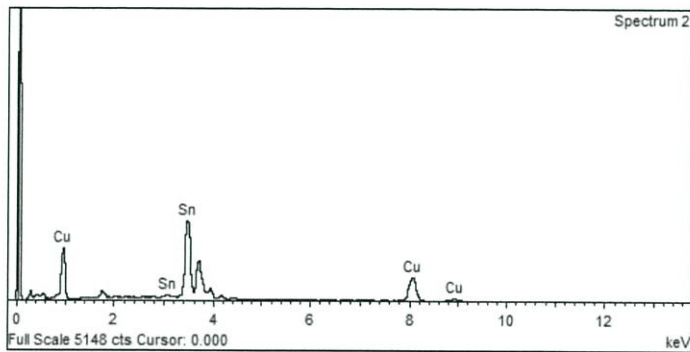
หลังจากทำการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบธาตุด้วย EDX โดยการยิงสเปกตรัมตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 ดังรูปที่ 4.38 จะพบปริมาณทองแดง ดีบุก และพลวงดังแสดงในรูปที่ 4.39-4.41 และสรุปออกมาเป็นเปอร์เซนต์อะตอมธาตุได้ดังตารางที่ 4.27



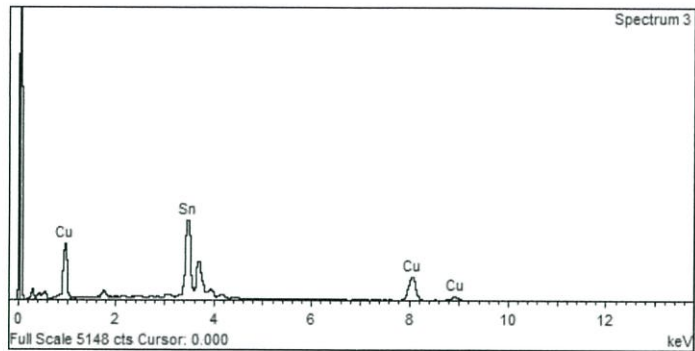
รูปที่ 4.38 โครงสร้างจุลภาคของส่วนผสมที่ 2



รูปที่ 4.39 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 4.40 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 2



รูปที่ 4.41 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 3

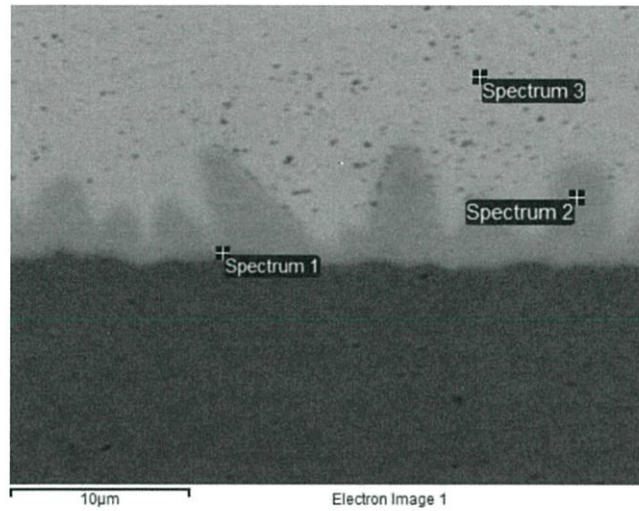
ตารางที่ 4.27 เปอร์เซนต์อะตอมธาตุที่เกิดขึ้นในชั้นสารประกอบเชิงโลหะของส่วนผสมที่ 2

Element	Atomic%		
	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
Cu	73.10	51.12	51.38
Sn	26.90	48.88	48.62
Sb	-	-	-

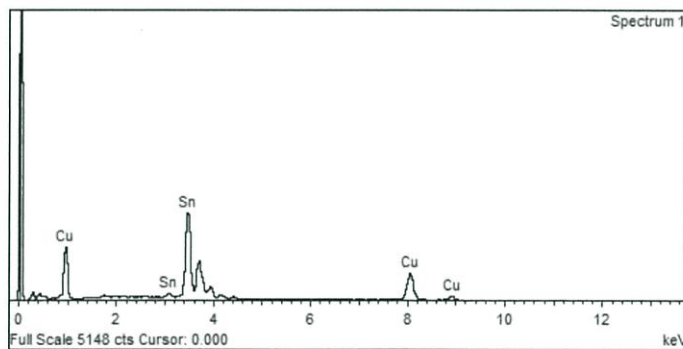
จากรูปที่ 4.38 จะเห็นว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีลักษณะสูง-ต่ำแตกต่างกันโดยเฉพาะสเปกตรัมตำแหน่งที่ 2 และมีความหนาเฉลี่ย 3.8616 ไมโครเมตร เมื่อทำการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบธาตุด้วย EDX จะเห็นว่า บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะนั้นมีปริมาณของทองแดงที่สูงมาก และเมื่อตรวจสอบบริเวณที่อยู่ห่างจากชั้นสารประกอบเชิงโลหะออกไปจะพบปริมาณของทองแดงลดลงและพบปริมาณของดีบุกเพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.27 หากนำไปตรวจสอบกับแผนภูมิเฟสจะพบว่าเกิดสารประกอบ Cu_6Sn_5 กับ Cu_3Sn ที่บริเวณชั้นประกอบเชิงโลหะ

4.4.3 ส่วนผสมที่ 3 (98.5Sn-1.5Cu)

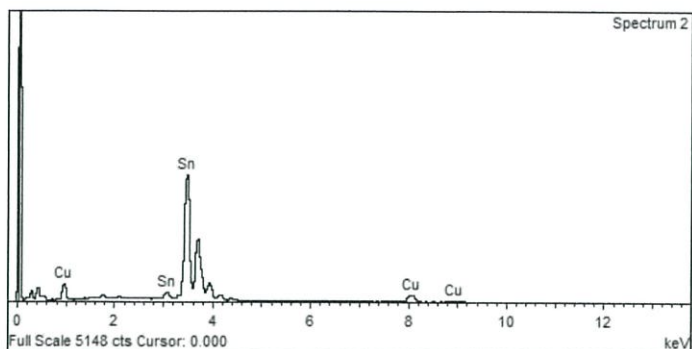
หลังจากทำการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบธาตุด้วย EDX โดยการยิงสเปกตรัมตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 ดังรูปที่ 4.42 จะพบปริมาณทองแดง ดีบุก และพลวงดังแสดงในรูปที่ 4.43-4.45 และสรุปออกมาเป็น เปอร์เซ็นต์อะตอมธาตุได้ดังตารางที่ 4.28



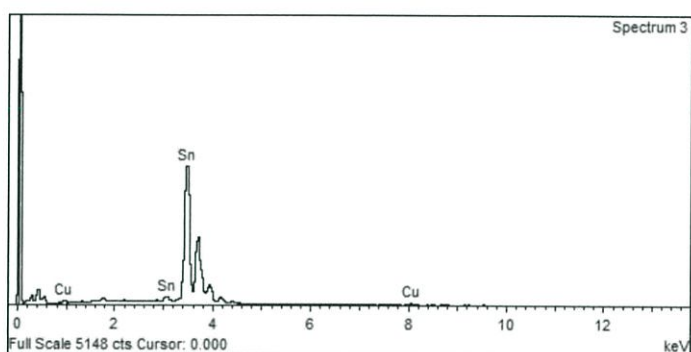
รูปที่ 4.42 โครงสร้างจุลภาคของส่วนผสมที่ 3



รูปที่ 4.43 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 4.44 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 2



รูปที่ 4.45 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 3

ตารางที่ 4.28 เปอร์เซนต์ต่อธาตุที่เกิดขึ้นในชั้นสารประกอบเชิงโลหะของส่วนผสมที่ 3

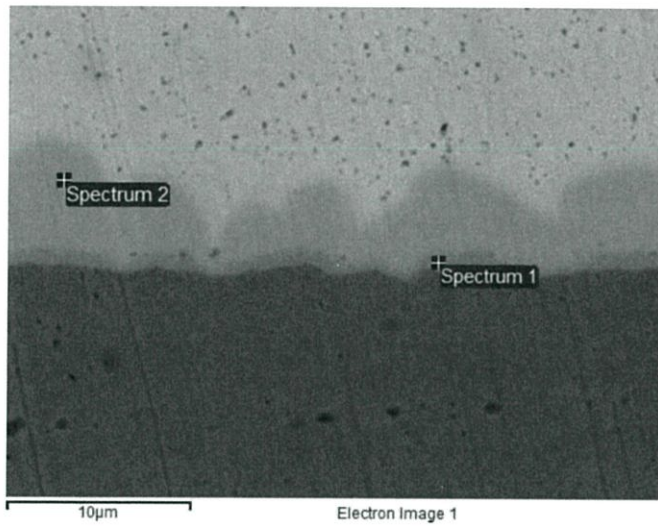
Element	Atomic%		
	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
Cu	52.61	16.59	3.84
Sn	47.39	83.41	96.16
Sb	-	-	-

จากรูปที่ 4.42 จะเห็นว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีลักษณะสูง-ต่ำแตกต่างกันเล็กน้อย และมีความหนาเฉลี่ย 3.7308 ไมโครเมตร เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วย EDX จะเห็นว่า บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะนั้นมีปริมาณของทองแดงสูง และเมื่อตรวจสอบบริเวณที่อยู่ห่างจากชั้นสารประกอบเชิงโลหะออกไปจะพบปริมาณของทองแดงลดลงและพบปริมาณของดีบุกเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของธาตุที่

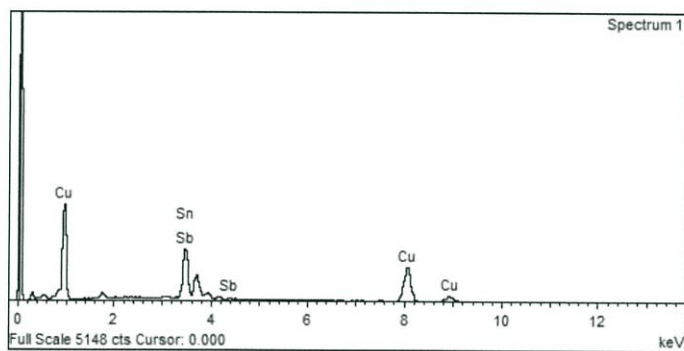
นำมาทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.28 หากนำไปตรวจสอบกับแผนภูมิเฟสจะพบว่าเกิดสารประกอบ Cu_6Sn_5 กับเฟสของเหลวที่บริเวณชั้นประกอบเชิงโลหะ

4.4.4 ส่วนผสมที่ 4 (97Sn-3Cu)

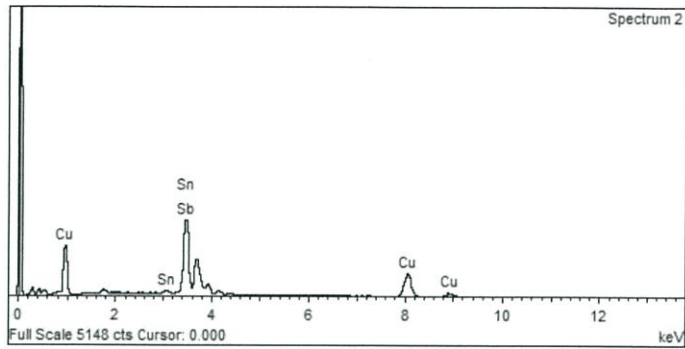
หลังจากทำการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วย EDX โดยการยิงสเปกตรัมตำแหน่งที่ 1 และ 2 ดังรูปที่ 4.46 จะพบปริมาณทองแดง ดีบุก และพลวงดังแสดงในรูปที่ 4.47-4.48 และสรุปออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์อะตอมธาตุได้ดังตารางที่ 4.29



รูปที่ 4.46 โครงสร้างจุลภาคของส่วนผสมที่ 4



รูปที่ 4.47 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 4.48 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 2

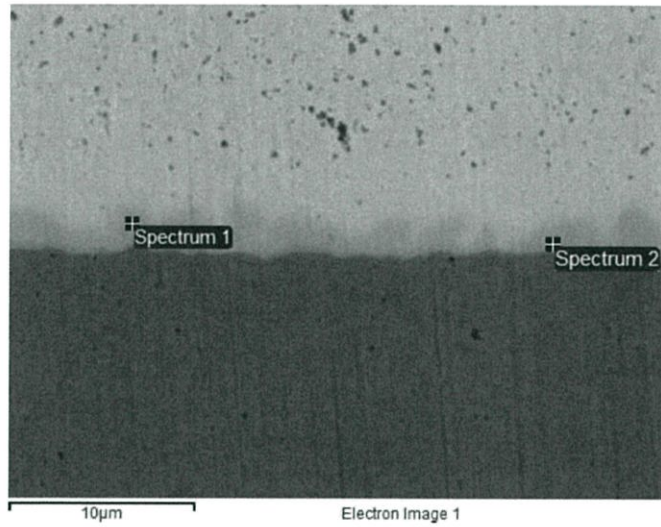
ตารางที่ 4.29 เปอร์เซนต์อะตอมธาตุที่เกิดขึ้นในชั้นสารประกอบเชิงโลหะของส่วนผสมที่ 4

Element	Atomic%	
	Spectrum 1	Spectrum 2
Cu	69.94	50.97
Sn	29.95	48.90
Sb	0.11	0.13

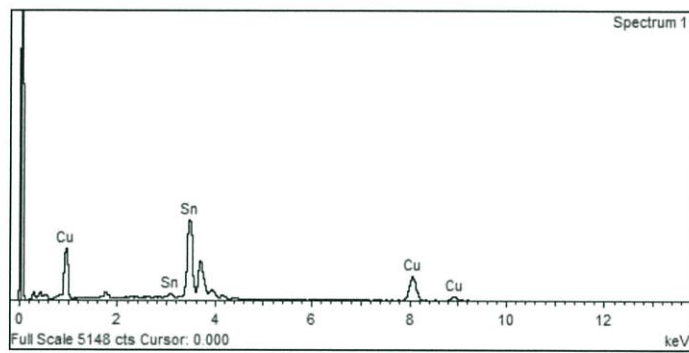
จากรูปที่ 4.46 จะเห็นว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีลักษณะสูง-ต่ำแตกต่างกันไม่มากนัก และมีความหนาเฉลี่ย 4.8579 ไมโครเมตร เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วย EDX จะเห็นว่า บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะนั้นมีปริมาณของทองแดงที่สูงมาก และเมื่อตรวจสอบบริเวณที่อยู่ห่างจากชั้นสารประกอบเชิงโลหะออกไปจะพบปริมาณของทองแดงลดลงและพบปริมาณของดีบุกกับพลวงเพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.29 หากนำไปตรวจสอบกับแผนภูมิเฟสจะพบว่าเกิดสารประกอบ Cu_6Sn_5 กับ Cu_3Sn ที่บริเวณชั้นประกอบเชิงโลหะ

4.4.5 ส่วนผสมที่ 5 (100Sn)

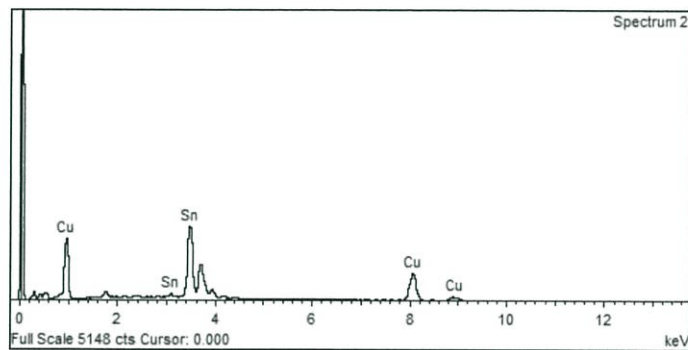
หลังจากทำการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วย EDX โดยการยิงสเปกตรัมตำแหน่งที่ 1 และ 2 ดังรูปที่ 4.49 จะพบปริมาณทองแดง ดีบุก และพลวงดังแสดงในรูปที่ 4.50-4.51 และสรุปออกมาเป็นเปอร์เซนต์อะตอมธาตุได้ดังตารางที่ 4.30



รูปที่ 4.49 โครงสร้างจุลภาคของส่วนผสมที่ 5



รูปที่ 4.50 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 4.51 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 2

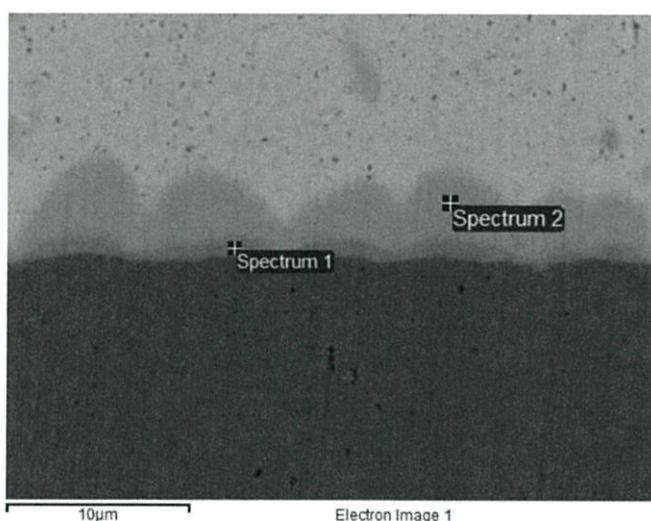
ตารางที่ 4.30 เปอร์เซนต์อะตอมธาตุที่เกิดขึ้นในชั้นสารประกอบเชิงโลหะของส่วนผสมที่ 5

Element	Atomic%	
	Spectrum 1	Spectrum 2
Cu	51.16	56.84
Sn	48.84	43.16
Sb	-	-

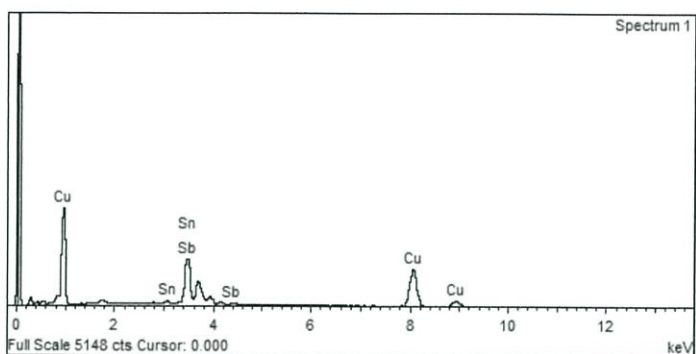
จากรูปที่ 4.49 จะเห็นว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีลักษณะสูง-ต่ำแต่ไม่แตกต่างกัน และมีความหนาเฉลี่ย 1.7926 ไมโครเมตร เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วย EDX จะเห็นว่า บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะนั้นมีปริมาณของทองแดงสูง และเมื่อตรวจสอบบริเวณที่อยู่ห่างจากชั้นสารประกอบเชิงโลหะออกไปจะพบปริมาณของทองแดงลดลงและพบปริมาณของดีบุกเพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.30 หากนำไปตรวจสอบกับแผนภูมิเฟสจะพบว่าเกิดสารประกอบ Cu_6Sn_5 กับ Cu_3Sn ที่บริเวณชั้นประกอบเชิงโลหะ

4.4.6 ส่วนผสมที่ 6 (89Sn-3Cu-8Sb)

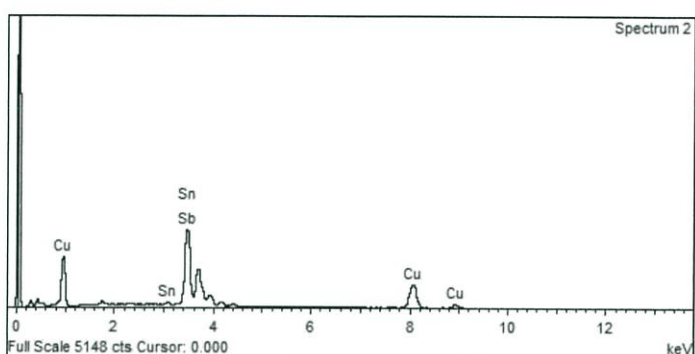
หลังจากทำการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วย EDX โดยการยิงสเปกตรัมตำแหน่งที่ 1 และ 2 ดังรูปที่ 4.52 จะพบปริมาณทองแดง ดีบุก และพลวงดังแสดงในรูปที่ 4.53-4.54 และสรุปออกมาเป็นเปอร์เซนต์อะตอมธาตุได้ดังตารางที่ 4.31



รูปที่ 4.52 โครงสร้างจุลภาคของส่วนผสมที่ 6



รูปที่ 4.53 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 4.54 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 2

ตารางที่ 4.31 เปอร์เซ็นต์อะตอมธาตุที่เกิดขึ้นในชั้นสารประกอบเชิงโลหะของส่วนผสมที่ 6

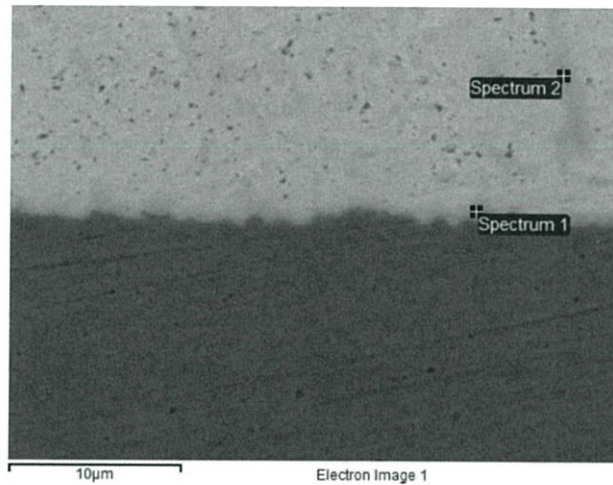
Element	Atomic%	
	Spectrum 1	Spectrum 2
Cu	71.73	50.30
Sn	26.21	46.19
Sb	2.06	3.51

จากรูปที่ 4.52 จะเห็นว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีลักษณะสูง-ต่ำแตกต่างกันไม่มากนัก และมีความหนาเฉลี่ย 3.8651 ไมโครเมตร เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วย EDX จะเห็นว่า บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะนั้นมีปริมาณของทองแดงที่สูงมาก และเมื่อตรวจสอบบริเวณที่อยู่ห่างจากชั้นสารประกอบเชิงโลหะออกไปจะพบปริมาณของทองแดงลดลงและพบปริมาณของดีบุกกับพลวงเพิ่มขึ้นดัง

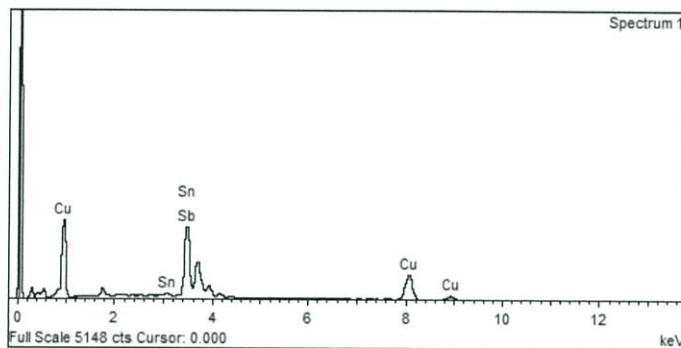
แสดงในตารางที่ 4.31 หากนำไปตรวจสอบกับแผนภูมิเฟสจะพบว่าเกิดสารประกอบ Cu_6Sn_5 กับ Cu_3Sn ที่บริเวณชั้นประกอบเชิงโลหะ

4.4.7 ส่วนผสมที่ 7 (92Sn-8Sb)

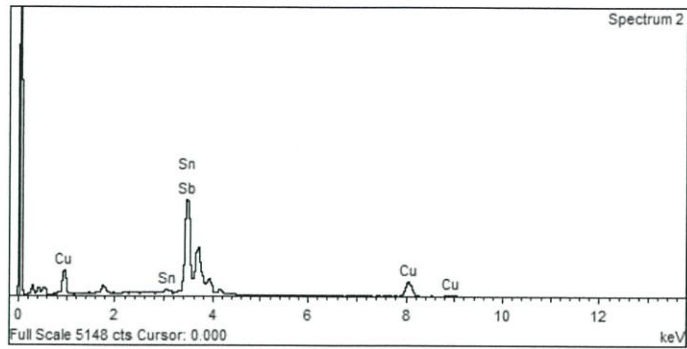
หลังจากทำการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบธาตุด้วย EDX โดยการยิงสเปกตรัมตำแหน่งที่ 1 และ 2 ดังรูปที่ 4.55 จะพบปริมาณทองแดง ดีบุก และพลวงดังแสดงในรูปที่ 4.56-4.57 และสรุปออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์อะตอมธาตุได้ดังตารางที่ 4.32



รูปที่ 4.55 โครงสร้างจุลภาคของส่วนผสมที่ 7



รูปที่ 4.56 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 4.57 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 2

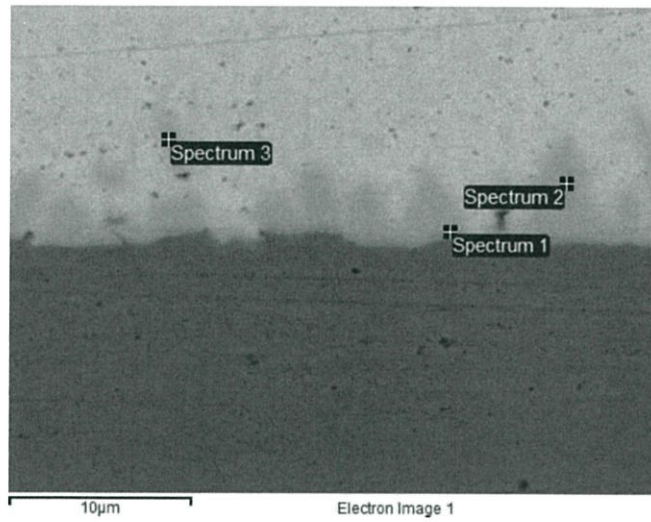
ตารางที่ 4.32 เปอร์เซนต์อะตอมธาตุที่เกิดขึ้นในชั้นสารประกอบเชิงโลหะของส่วนผสมที่ 7

Element	Atomic%	
	Spectrum 1	Spectrum 2
Cu	52.69	32.07
Sn	43.87	62.54
Sb	3.44	5.39

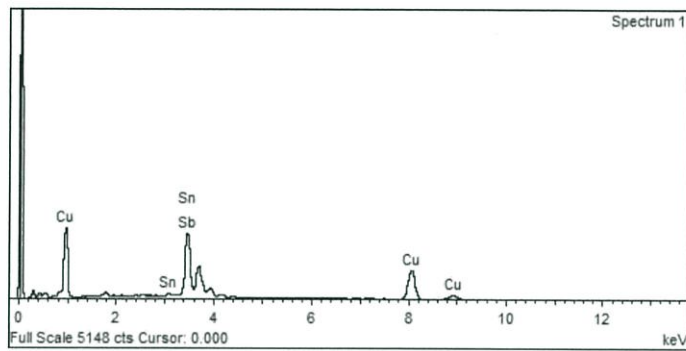
จากรูปที่ 4.55 จะเห็นว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีลักษณะขอบเขตไม่ค่อยชัดเจน พื้นผิวไม่สม่ำเสมอ และมีความหนาเฉลี่ย 0.9393 ไมโครเมตร เมื่อทำการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบธาตุด้วย EDX จะเห็นว่า บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะนั้นมีปริมาณของทองแดงสูง และเมื่อตรวจสอบบริเวณที่อยู่ห่างจากชั้นสารประกอบเชิงโลหะออกไปจะพบปริมาณของทองแดงลดลงและพบปริมาณของดีบุกกับพลวงเพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.32 หากนำไปตรวจสอบกับแผนภูมิเฟสจะพบว่าเกิดสารประกอบ Cu_6Sn_5 กับ Cu_3Sn ที่บริเวณชั้นประกอบเชิงโลหะ

4.4.8 ส่วนผสมที่ 8 (90.5Sn-1.5Cu-8Sb)

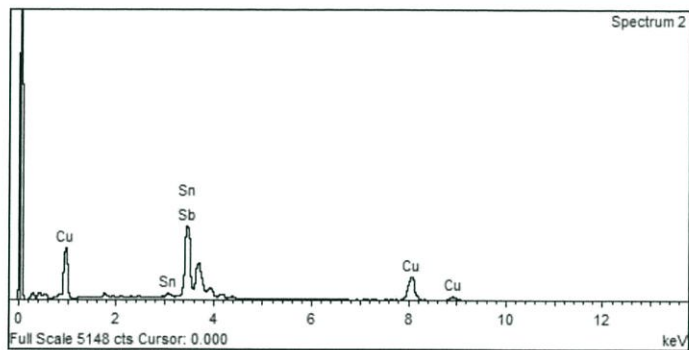
หลังจากทำการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบธาตุด้วย EDX โดยการยิงสเปกตรัมตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 ดังรูปที่ 4.58 จะพบปริมาณทองแดง ดีบุก และพลวงดังแสดงในรูปที่ 4.59-4.61 และสรุปออกมาเป็น เปอร์เซนต์อะตอมธาตุได้ดังตารางที่ 4.33



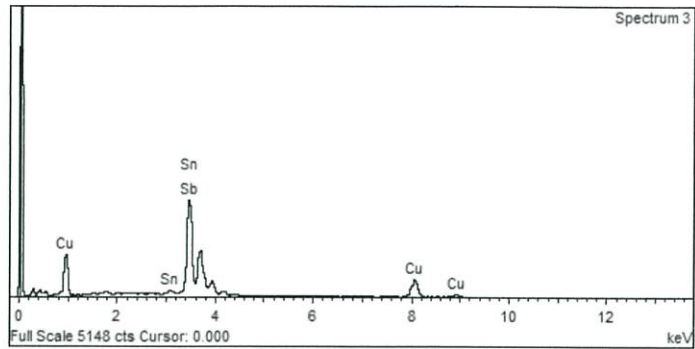
รูปที่ 4.58 โครงสร้างจุลภาคของส่วนผสมที่ 8



รูปที่ 4.59 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 4.60 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 2



รูปที่ 4.61 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 3

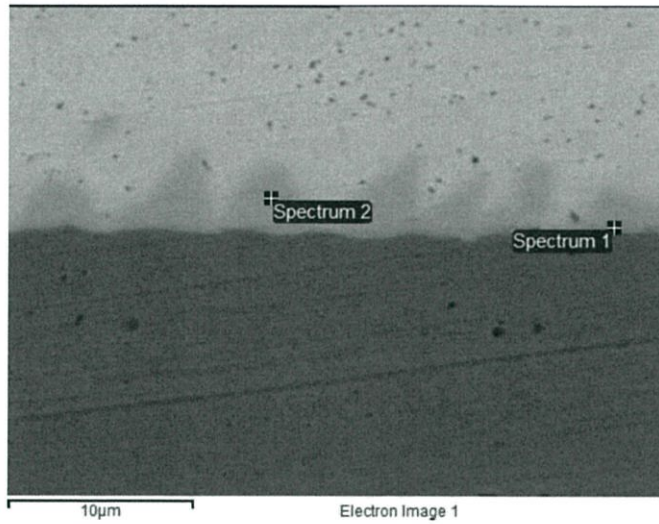
ตารางที่ 4.33 เปอร์เซนต์อะตอมธาตุที่เกิดขึ้นในชั้นสารประกอบเชิงโลหะของส่วนผสมที่ 8

Element	Atomic%		
	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
Cu	60.97	51.97	37.50
Sn	37.95	46.24	59.94
Sb	1.08	1.79	2.56

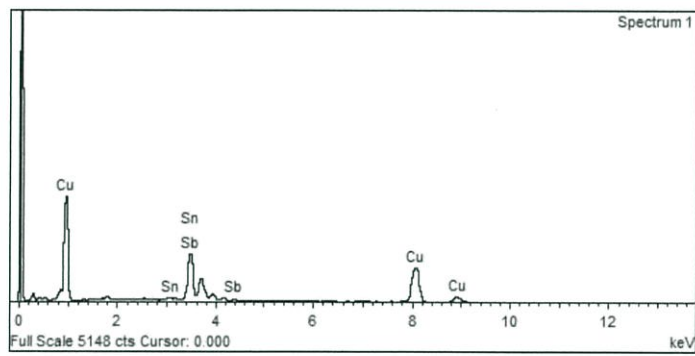
จากรูปที่ 4.58 จะเห็นว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีลักษณะสูง-ต่ำแตกต่างกัน พื้นผิวไม่สม่ำเสมอ และมีความหนาเฉลี่ย 2.3929 ไมโครเมตร เมื่อทำการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบธาตุด้วย EDX จะเห็นว่า บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะนั้นมีปริมาณของทองแดงสูง และเมื่อตรวจสอบบริเวณที่อยู่ห่างจากชั้น สารประกอบเชิงโลหะออกไปจะพบปริมาณของทองแดงลดลงและพบปริมาณของดีบุกกับพลวงเพิ่มขึ้นดัง แสดงในตารางที่ 4.33 หากนำไปตรวจสอบกับแผนภูมิเฟสจะพบว่าเกิดสารประกอบ Cu_6Sn_5 กับ Cu_3Sn ที่ บริเวณชั้นประกอบเชิงโลหะ

4.4.9 ส่วนผสมที่ 9 (97.33Sn-2.67Sb)

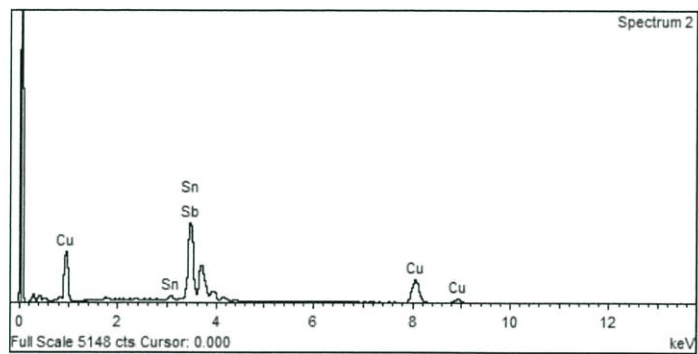
หลังจากทำการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบธาตุด้วย EDX โดยการยิงสเปกตรัมตำแหน่งที่ 1 และ 2 ดัง รูปที่ 4.62 จะพบปริมาณทองแดง ดีบุก และพลวงดังแสดงในรูปที่ 4.63-4.64 และสรุปออกมาเป็น เปอร์เซนต์อะตอมธาตุได้ดังตารางที่ 4.34



รูปที่ 4.62 โครงสร้างจุลภาคของส่วนผสมที่ 9



รูปที่ 4.63 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 4.64 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 2

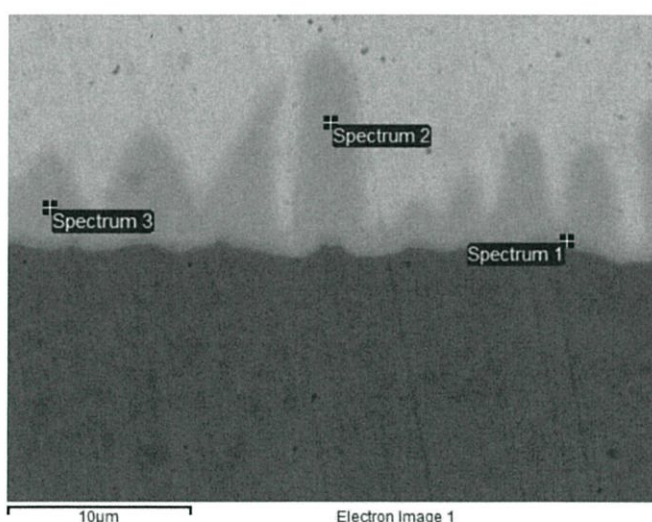
ตารางที่ 4.34 เปอร์เซนต์อะตอมธาตุที่เกิดขึ้นในชั้นสารประกอบเชิงโลหะของส่วนผสมที่ 9

Element	Atomic%	
	Spectrum 1	Spectrum 2
Cu	71.56	51.72
Sn	27.31	48.16
Sb	1.13	0.12

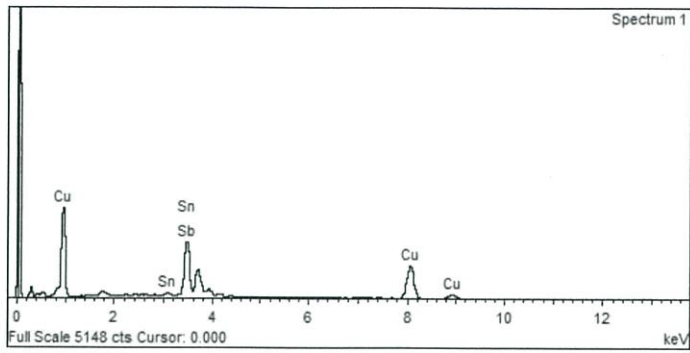
จากรูปที่ 4.62 จะเห็นว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีลักษณะสูง-ต่ำแตกต่างกันเล็กน้อย และมีความหนาเฉลี่ย 2.3467 ไมโครเมตร เมื่อทำการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบธาตุด้วย EDX จะเห็นว่า บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะนั้นมีปริมาณของทองแดงและพลวงที่สูงมาก และเมื่อตรวจสอบบริเวณที่อยู่ห่างจากชั้นสารประกอบเชิงโลหะออกไปจะพบปริมาณของทองแดงกับพลวงลดลงและพบปริมาณของดีบุกเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.34 หากนำไปตรวจสอบกับแผนภูมิเฟสจะพบว่าเกิดสารประกอบ Cu_6Sn_5 กับ Cu_3Sn ที่บริเวณชั้นประกอบเชิงโลหะ

4.4.10 ส่วนผสมที่ 10 (94.5Sn-1.5Cu-4Sb)

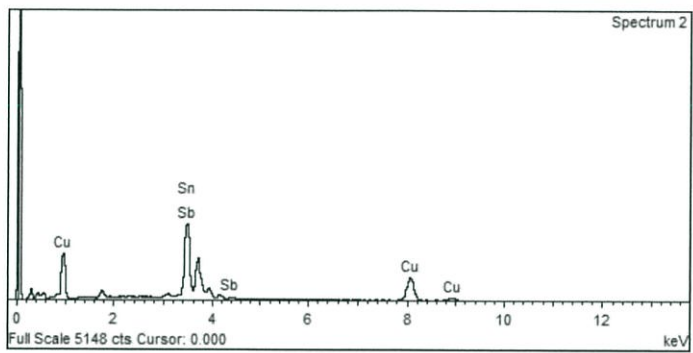
หลังจากทำการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบธาตุด้วย EDX โดยการยิงสเปกตรัมตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 ดังรูปที่ 4.65 จะพบปริมาณทองแดง ดีบุก และพลวงดังแสดงในรูปที่ 4.66-4.68 และสรุปออกมาเป็น เปอร์เซนต์อะตอมธาตุได้ดังตารางที่ 4.35



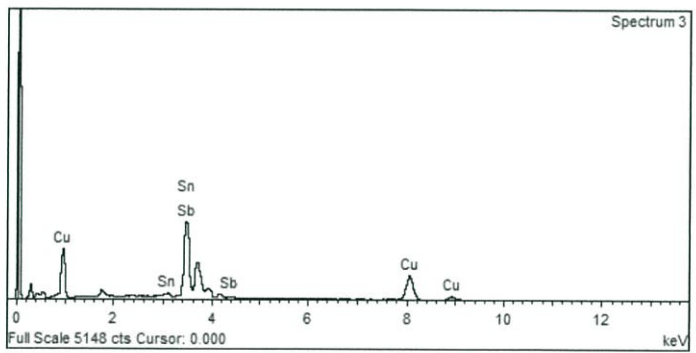
รูปที่ 4.65 โครงสร้างจุลภาคของส่วนผสมที่ 10



รูปที่ 4.66 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 4.67 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 2



รูปที่ 4.68 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 3

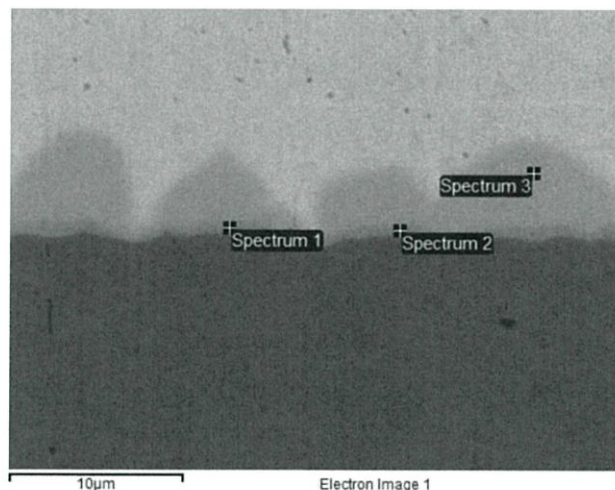
ตารางที่ 4.35 เปอร์เซ็นต์อะตอมธาตุที่เกิดขึ้นในชั้นสารประกอบเชิงโลหะของส่วนผสมที่ 10

Element	Atomic%		
	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
Cu	66.69	51.16	51.70
Sn	32.84	48.77	47.37
Sb	0.47	0.07	0.94

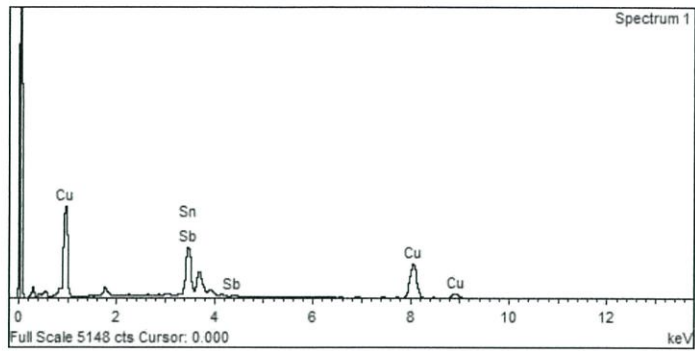
จากรูปที่ 4.65 จะเห็นว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีลักษณะสูง-ต่ำแตกต่างกันมาก พื้นผิวไม่สม่ำเสมอ และมีความหนาเฉลี่ย 4.5017 ไมโครเมตร เมื่อทำการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบธาตุด้วย EDX จะเห็นว่า บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะนั้นมีปริมาณของทองแดงสูง และเมื่อตรวจสอบบริเวณที่อยู่ห่างจากชั้นสารประกอบเชิงโลหะออกไปจะพบปริมาณของทองแดงลดลงและพบปริมาณของดีบุกเพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.35 หากนำไปตรวจสอบกับแผนภูมิเฟสจะพบว่าเกิดสารประกอบ Cu_6Sn_5 กับ Cu_3Sn ที่บริเวณชั้นประกอบเชิงโลหะ

4.4.11 ส่วนผสมที่ 11 (93Sn-3Cu-4Sb)

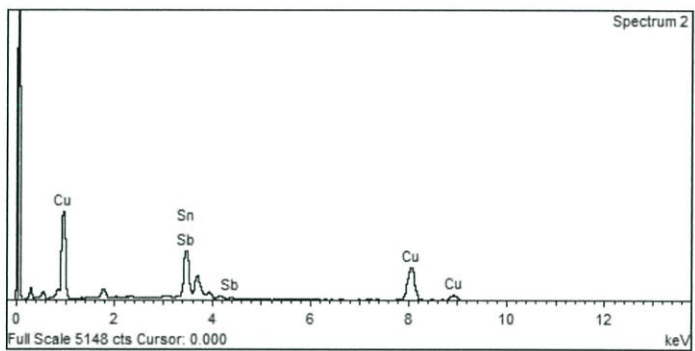
หลังจากทำการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบธาตุด้วย EDX โดยการยิงสเปกตรัมตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 ดังรูปที่ 4.69 จะพบปริมาณทองแดง ดีบุก และพลวงดังแสดงในรูปที่ 4.70-4.72 และสรุปออกมาเป็น เปอร์เซ็นต์อะตอมธาตุได้ดังตารางที่ 4.36



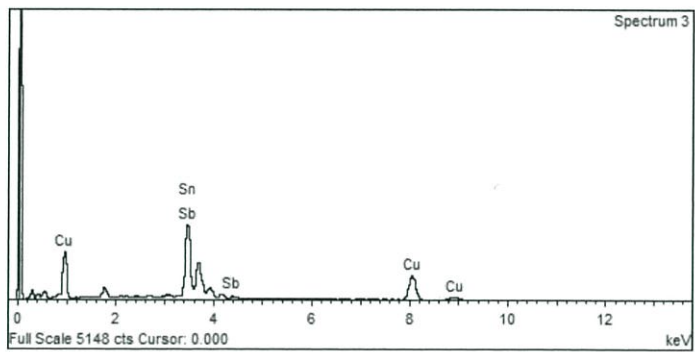
รูปที่ 4.69 โครงสร้างจุลภาคของส่วนผสมที่ 11



รูปที่ 4.70 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 4.71 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 2



รูปที่ 4.72 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 3

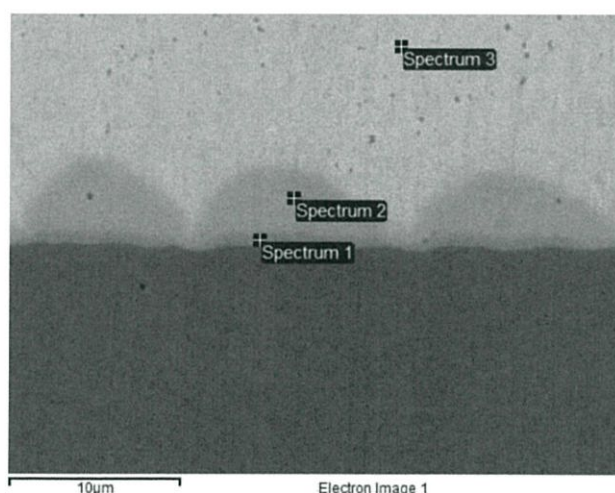
ตารางที่ 4.36 เปอร์เซนต์อะตอมธาตุที่เกิดขึ้นในชั้นสารประกอบเชิงโลหะของส่วนผสมที่ 11

Element	Atomic%		
	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
Cu	70.78	70.18	52.71
Sn	28.85	28.82	46.08
Sb	0.37	1.00	1.21

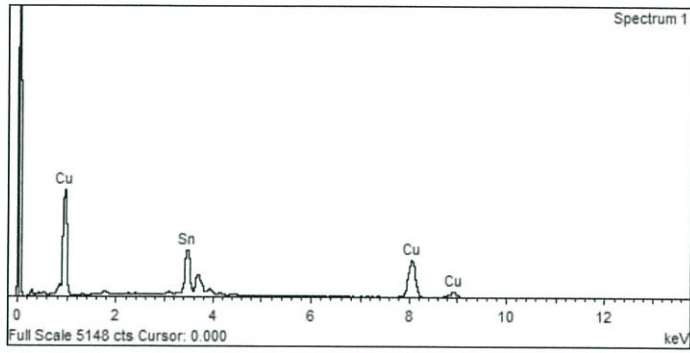
จากรูปที่ 4.69 จะเห็นว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีลักษณะสูง-ต่ำแตกต่างกันเล็กน้อย และมีความหนาเฉลี่ย 3.8899 ไมโครเมตร เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วย EDX จะเห็นว่า บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะนั้นมีปริมาณของทองแดงสูงมาก และเมื่อตรวจสอบบริเวณที่อยู่ห่างจากชั้นสารประกอบเชิงโลหะออกไปจะพบปริมาณของทองแดงลดลงและพบปริมาณของดีบุกกับพลวงเพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.36 หากนำไปตรวจสอบกับแผนภูมิเฟสจะพบว่าเกิดสารประกอบ Cu_6Sn_5 กับ Cu_3Sn ที่บริเวณชั้นประกอบเชิงโลหะ

4.4.12 ส่วนผสมที่ 12 (93Sn-3Cu-4Sb)

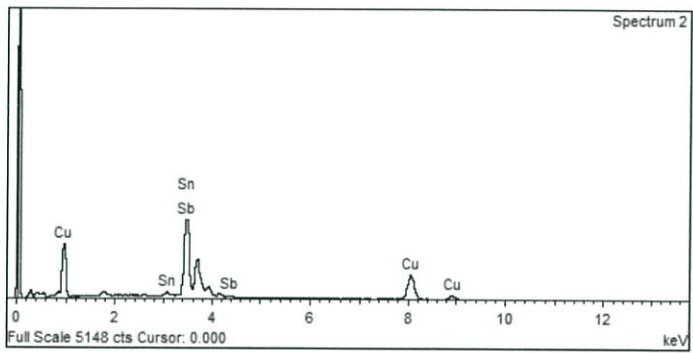
หลังจากทำการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วย EDX โดยการยิงสเปกตรัมตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 ดังรูปที่ 4.73 จะพบปริมาณทองแดง ดีบุก และพลวงดังแสดงในรูปที่ 4.74-4.76 และสรุปออกมาเป็นเปอร์เซนต์อะตอมธาตุได้ดังตารางที่ 4.37



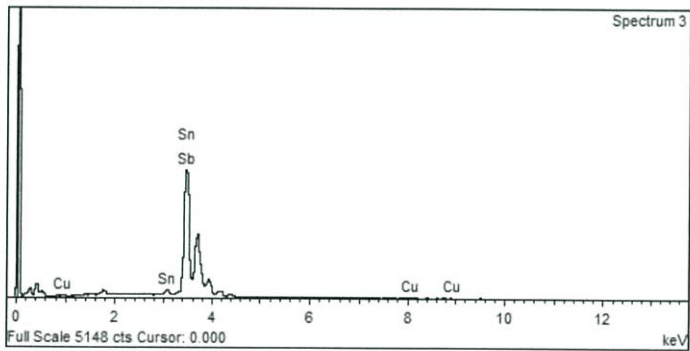
ที่ 4.73 โครงสร้างจุลภาคของส่วนผสมที่ 12



รูปที่ 4.74 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 4.75 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 2



รูปที่ 4.76 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 3

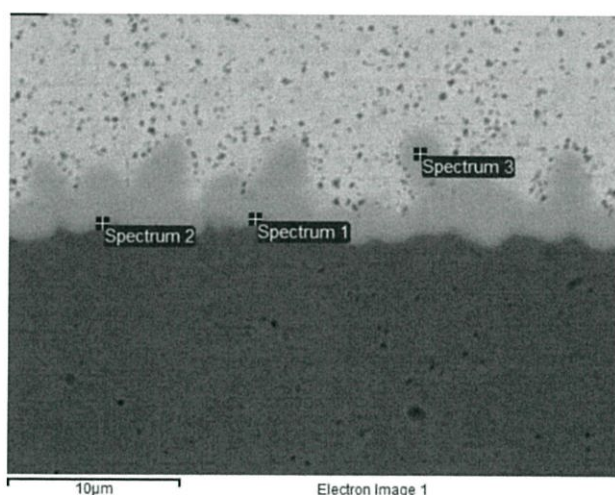
ตารางที่ 4.37 เปอร์เซนต์อะตอมธาตุที่เกิดขึ้นในชั้นสารประกอบเชิงโลหะของส่วนผสมที่ 12

Element	Atomic%		
	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
Cu	74.29	51.27	2.10
Sn	25.71	47.14	94.40
Sb	-	1.59	3.50

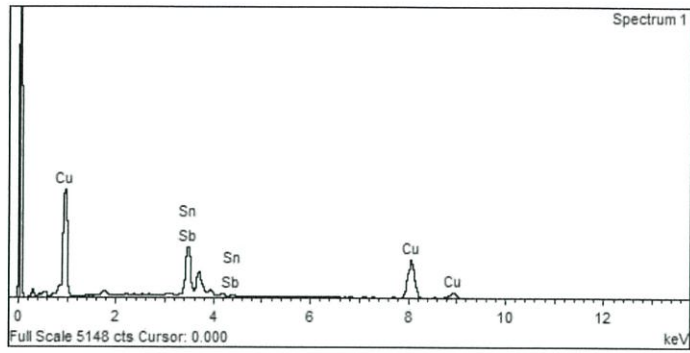
จากรูปที่ 4.73 จะเห็นว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีลักษณะสูง-ต่ำแตกต่างกันเล็กน้อย และมีความหนาเฉลี่ย 3.2642 ไมโครเมตร เมื่อทำการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบธาตุด้วย EDX จะเห็นว่า บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะนั้นมีปริมาณของทองแดงสูงมาก และเมื่อตรวจสอบบริเวณที่อยู่ห่างจากชั้นสารประกอบเชิงโลหะออกไปจะพบปริมาณของทองแดงลดลงและพบปริมาณของดีบุกกับพลวงเพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.37 หากนำไปตรวจสอบกับแผนภูมิเฟสจะพบว่าเกิดสารประกอบ Cu_6Sn_5 กับ Cu_3Sn ที่บริเวณชั้นประกอบเชิงโลหะ

4.4.13 ส่วนผสมที่ 13 (92.5Sn-1.5Cu-6Sb)

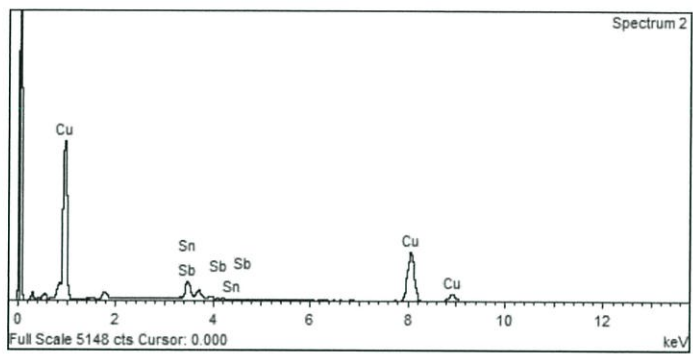
หลังจากทำการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบธาตุด้วย EDX โดยการยิงสเปกตรัมตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 ดังรูปที่ 4.77 จะพบปริมาณทองแดง ดีบุก และพลวงดังแสดงในรูปที่ 4.78-4.80 และสรุปออกมาเป็น เปอร์เซนต์อะตอมธาตุได้ดังตารางที่ 4.38



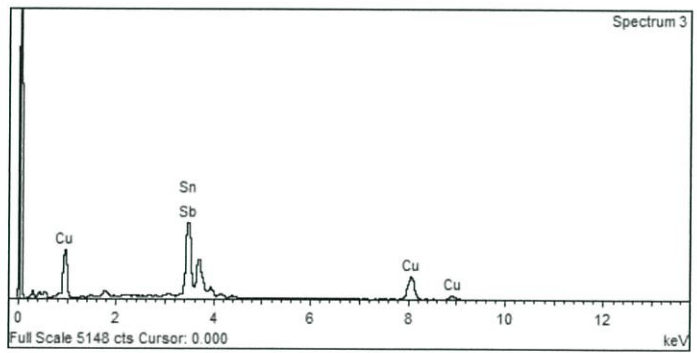
รูปที่ 4.77 โครงสร้างจุลภาคของส่วนผสมที่ 13



รูปที่ 4.78 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 4.79 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 2



รูปที่ 4.80 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 3

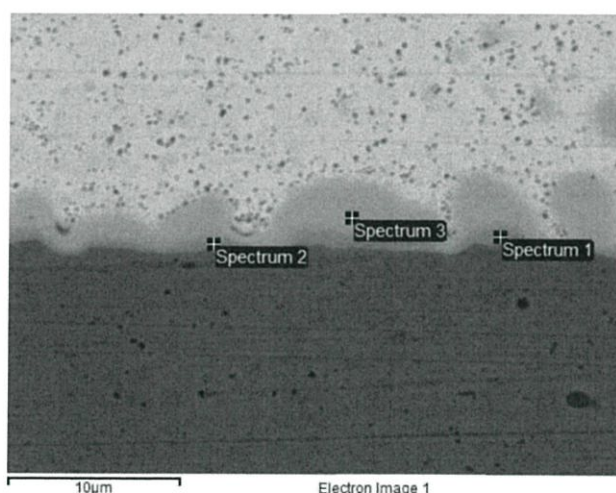
ตารางที่ 4.38 เปอร์เซ็นต์อะตอมธาตุที่เกิดขึ้นในชั้นสารประกอบเชิงโลหะของส่วนผสมที่ 13

Element	Atomic%		
	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
Cu	72.36	90.47	51.16
Sn	27.45	9.24	47.46
Sb	0.20	0.29	1.38

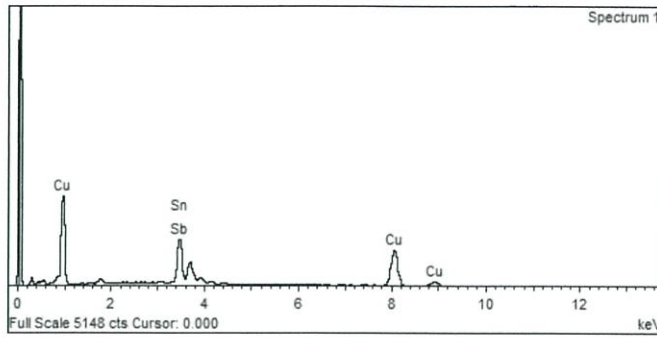
จากรูปที่ 4.77 จะเห็นว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีลักษณะสูง-ต่ำแตกต่างกันมาก พื้นผิวไม่สม่ำเสมอ และมีความหนาเฉลี่ย 3.1178 ไมโครเมตร เมื่อทำการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบธาตุด้วย EDX จะเห็นว่า บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะนั้นมีปริมาณของทองแดงสูงมาก และเมื่อตรวจสอบบริเวณที่อยู่ห่างจากชั้นสารประกอบเชิงโลหะออกไปจะพบปริมาณของทองแดงลดลงและพบปริมาณของดีบุกกับพลวงเพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.38 หากนำไปตรวจสอบกับแผนภูมิเฟสจะพบว่าเกิดสารประกอบ Cu_6Sn_5 กับ Cu_3Sn ที่บริเวณชั้นประกอบเชิงโลหะ

4.4.14 ส่วนผสมที่ 14 (89Sn-3Cu-8Sb)

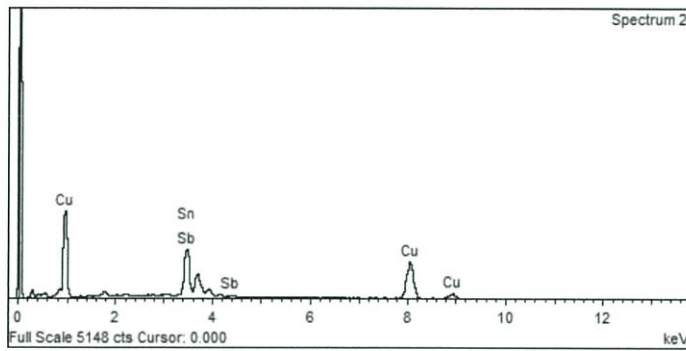
หลังจากทำการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบธาตุด้วย EDX โดยการยิงสเปกตรัมตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 ดังรูปที่ 4.81 จะพบปริมาณทองแดง ดีบุก และพลวงดังแสดงในรูปที่ 4.82-4.84 และสรุปออกมาเป็น เปอร์เซ็นต์อะตอมธาตุได้ดังตารางที่ 4.39



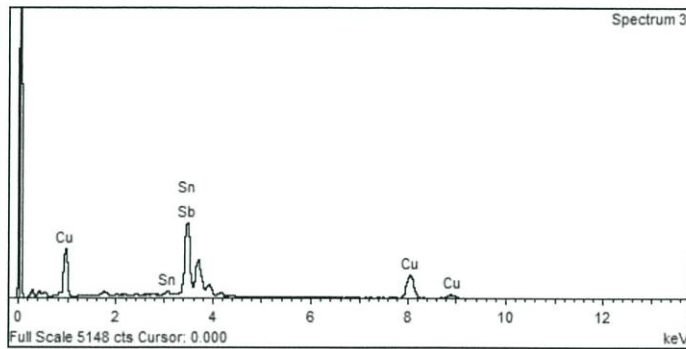
รูปที่ 4.81 โครงสร้างจุลภาคของส่วนผสมที่ 14



รูปที่ 4.82 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 4.83 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 2



รูปที่ 4.84 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 3

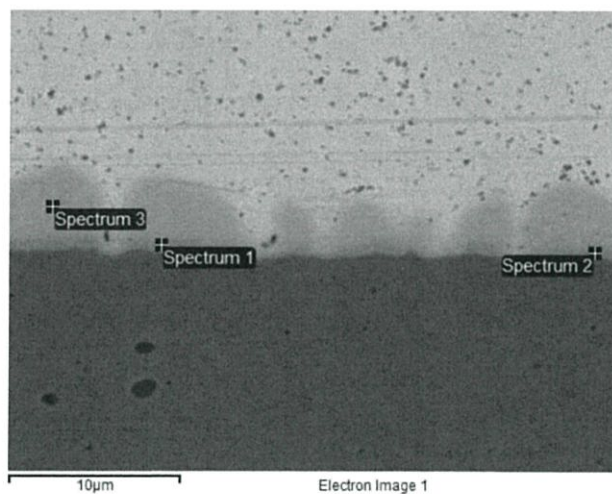
ตารางที่ 4.39 เปอร์เซนต์อะตอมธาตุที่เกิดขึ้นในชั้นสารประกอบเชิงโลหะของส่วนผสมที่ 14

Element	Atomic%		
	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
Cu	71.95	71.00	52.77
Sn	26.95	27.44	45.80
Sb	1.10	1.56	1.43

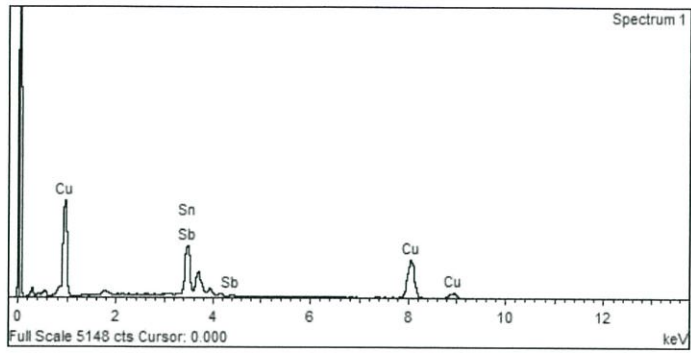
จากรูปที่ 4.81 จะเห็นว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีลักษณะสูง-ต่ำแตกต่างกันเล็กน้อย และมีความหนาเฉลี่ย 2.5748 ไมโครเมตร เมื่อทำการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบธาตุด้วย EDX จะเห็นว่า บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะนั้นมีปริมาณของทองแดงสูงมาก และเมื่อตรวจสอบบริเวณที่อยู่ห่างจากชั้นสารประกอบเชิงโลหะออกไปจะพบปริมาณของทองแดงลดลงและพบปริมาณของดีบุกเพิ่มขึ้น ส่วนพลวงนั้นไม่มีนัยสำคัญดังแสดงในตารางที่ 4.39 หากนำไปตรวจสอบกับแผนภูมิเฟสจะพบว่าเกิดสารประกอบ Cu_6Sn_5 กับ Cu_3Sn ที่บริเวณชั้นประกอบเชิงโลหะ

4.4.15 ส่วนผสมที่ 15 (95.75Sn-2.25Cu-2Sb)

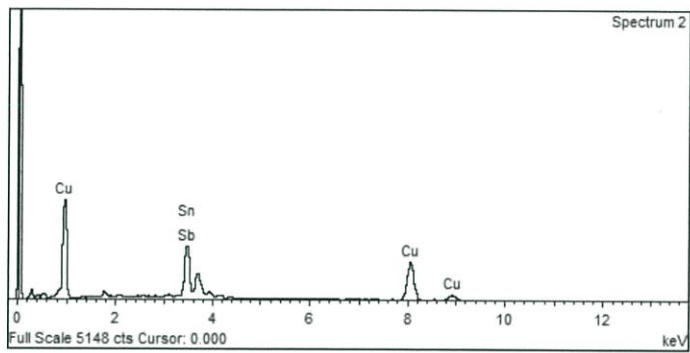
หลังจากทำการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบธาตุด้วย EDX โดยการยิงสเปกตรัมตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 ดังรูปที่ 4.85 จะพบปริมาณทองแดง ดีบุก และพลวงดังแสดงในรูปที่ 4.86-4.88 และสรุปออกมาเป็น เปอร์เซนต์อะตอมธาตุได้ดังตารางที่ 4.40



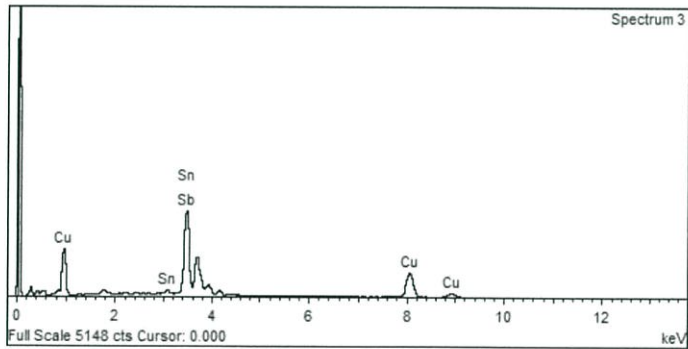
รูปที่ 4.85 โครงสร้างจุลภาคของส่วนผสมที่ 15



รูปที่ 4.86 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 4.87 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 2



รูปที่ 4.88 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 3

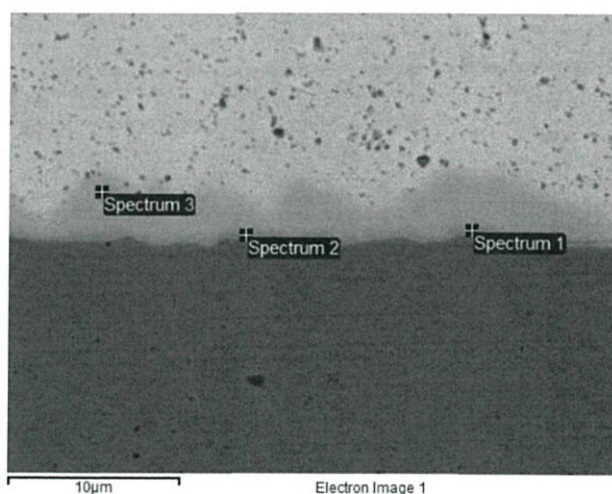
ตารางที่ 4.40 เปอร์เซ็นต์อะตอมธาตุที่เกิดขึ้นในชั้นสารประกอบเชิงโลหะของส่วนผสมที่ 15

Element	Atomic%		
	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
Cu	71.83	70.97	51.35
Sn	27.70	28.36	47.31
Sb	0.47	0.67	1.33

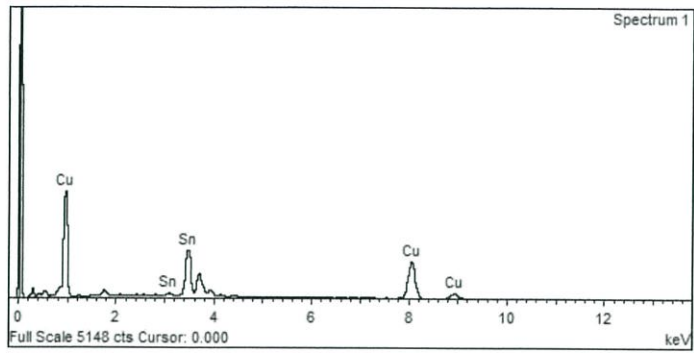
จากรูปที่ 4.85 จะเห็นว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีลักษณะสูง-ต่ำแตกต่างกันเล็กน้อย และมีความหนาเฉลี่ย 2.9063 ไมโครเมตร เมื่อทำการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบธาตุด้วย EDX จะเห็นว่า บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะนั้นมีปริมาณของทองแดงสูงมาก และเมื่อตรวจสอบบริเวณที่อยู่ห่างจากชั้นสารประกอบเชิงโลหะออกไปจะพบปริมาณของทองแดงลดลงและพบปริมาณของดีบุกกับพลวงเพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.40 หากนำไปตรวจสอบกับแผนภูมิเฟสจะพบว่าเกิดสารประกอบ Cu_6Sn_5 กับ Cu_3Sn ที่บริเวณชั้นประกอบเชิงโลหะ

4.4.16 ส่วนผสมที่ 16 (100Sn)

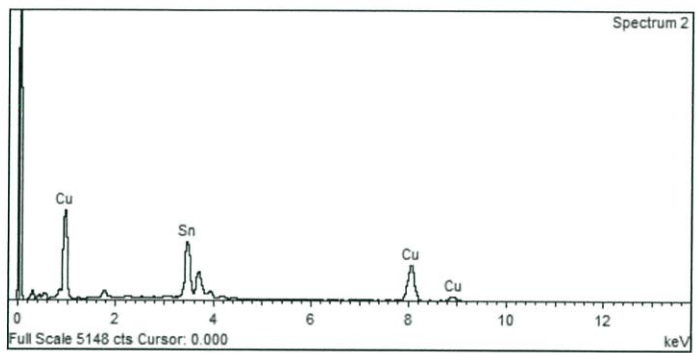
หลังจากทำการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบธาตุด้วย EDX โดยการยิงสเปกตรัมตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 ดังรูปที่ 4.89 จะพบปริมาณทองแดง ดีบุก และพลวงดังแสดงในรูปที่ 4.90-4.92 และสรุปออกมาเป็น เปอร์เซ็นต์อะตอมธาตุได้ดังตารางที่ 4.41



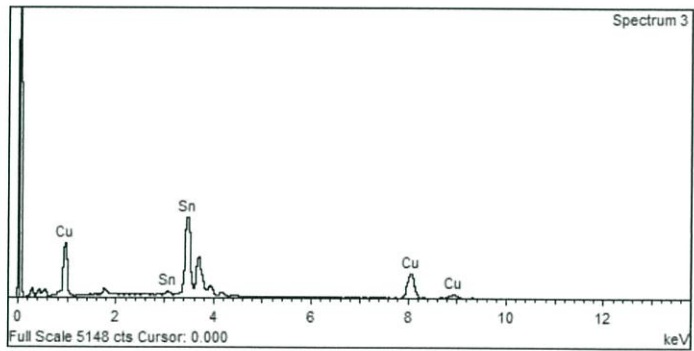
รูปที่ 4.89 โครงสร้างจุลภาคของส่วนผสมที่ 16



รูปที่ 4.90 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 4.91 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 2



รูปที่ 4.92 ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วย EDX ที่สเปกตรัมตำแหน่งที่ 3

ตารางที่ 4.41 เปอร์เซนต์อะตอมธาตุที่เกิดขึ้นในชั้นสารประกอบเชิงโลหะของส่วนผสมที่ 16

Element	Atomic%		
	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
Cu	72.89	67.80	52.28
Sn	27.11	32.20	47.72
Sb	-	-	-

จากรูปที่ 4.89 จะเห็นว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีลักษณะสูง-ต่ำแตกต่างกันเล็กน้อย และมีความหนาเฉลี่ย 2.7092 ไมโครเมตร เมื่อทำการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบธาตุด้วย EDX จะเห็นว่า บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะนั้นมีปริมาณของทองแดงสูงมาก และเมื่อตรวจสอบบริเวณที่อยู่ห่างจากชั้นสารประกอบเชิงโลหะออกไปจะพบปริมาณของทองแดงลดลงและพบปริมาณของดีบุกเพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.41 หากนำไปตรวจสอบกับแผนภูมิเฟสจะพบว่าเกิดสารประกอบ Cu_6Sn_5 กับ Cu_3Sn ที่บริเวณชั้นประกอบเชิงโลหะ

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงาน

5.1 สรุปผลการวิเคราะห์ความสามารถการกระจายตัวของโลหะบัดกรี

สำหรับการวิเคราะห์ความสามารถการกระจายตัวของโลหะบัดกรีทั้ง 2 วิธี ได้ผลสรุปดังนี้

5.1.1 ผลการวิเคราะห์ความสามารถการกระจายตัวด้วยวิธี Spread test method

จากการวิเคราะห์ค่าประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีทั้งหมด 16 ส่วนผสม พบว่า เมื่อปริมาณของทองแดงและพลวงเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าประกอบการกระจายตัวมีแนวโน้มลดลง นั่นหมายความว่าปริมาณของทองแดงและพลวงที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความสามารถการกระจายตัวของโลหะบัดกรีน้อยลง

5.1.2 ผลการวิเคราะห์ความสามารถการกระจายตัวด้วยวิธี Contact angle method

จากการวิเคราะห์ค่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรีทั้งหมด 16 ส่วนผสม พบว่า เมื่อปริมาณของทองแดงและพลวงเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสมีแนวโน้มสูงขึ้น นั่นหมายความว่าปริมาณของทองแดงและพลวงที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความสามารถการกระจายตัวของโลหะบัดกรีน้อยลง

5.2 สรุปผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของโลหะบัดกรี

5.2.1 ผลการวิเคราะห์ความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

จากการวิเคราะห์ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีทั้งหมด 16 ส่วนผสม พบว่า เมื่อปริมาณของทองแดงเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีแนวโน้มสูงขึ้น และเมื่อปริมาณของพลวงเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีแนวโน้มลดลง

5.2.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย EDX พบว่า บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะนั้นประกอบด้วยทองแดงและดีบุกเป็นส่วนใหญ่ และเมื่อตรวจสอบบริเวณที่ห่างออกจากชั้นสารประกอบเชิงโลหะจะพบว่าปริมาณของทองแดงนั้นมีแนวโน้มลดลง ส่วนปริมาณของดีบุกและพลวงนั้นมีแนวโน้ม

เพิ่มขึ้นตามส่วนผสมที่กำหนด นั้นเป็นเพราะว่า โครงสร้างผลึกของดีบุกกับทองแดงนั้นมีลักษณะคล้ายคลึงกัน ส่งผลให้ดีบุกกับทองแดงนั้นละลายเข้าหากันได้ดีจนเกิดเป็นสารประกอบ Cu_6Sn_5 กับ Cu_3Sn ส่วนพลวงนั้นมีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างออกไปจึงทำให้พบพลวงอยู่บริเวณที่ห่างออกไปจากชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการศึกษาในอนาคต

การวิเคราะห์ค่าความสามารถการกระจายตัวและความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะนั้นควร จะทำการทดลองซ้ำหลายๆครั้งเพื่อค้นหาสภาพแวดล้อมการทดลองที่ดีที่สุด เพราะสภาพแวดล้อมในการทดลองที่ต่างกัันจะส่งผลต่อการบัดกรีที่เกิดขึ้น สำหรับสมการทำนายที่ได้จำลองจากโปรแกรม Design expert นั้นจะต้องนำไปทดสอบความแม่นยำโดยการทดลองเพิ่มเติมจากเดิมแล้วทำการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย

เอกสารอ้างอิง

- กรมชัช กัลยาศิริ, 2551. กรรมวิธีการผลิต พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ฉันทพร ทองมณี และ สุวรรณา คุณากรกุล, 2557. การศึกษาผลของ Ni, Ag และ In ต่อปฏิกิริยารอยต่อระหว่างโลหะบัดกรี Sn-58Bi-Ni-X กับแผ่นทองแดง
- WolframMathWorld. Contact Angle. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก <http://mathworld.wolfram.com/ContactAngle.html>
- วชกร เตชภักดิ์โชติ และคณะ, 2554. การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความแข็ง สี และส่วนผสมของโลหะผสมพิวเตอร์ไร้สารตะกั่ว
- Mike Judd and Keith Brindley, second edition, (1999). Soldering in Electronics Assembly
- The University of Glasgow. ISAAC: Imaging Spectroscopy and Analysis Centre. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก <http://www.gla.ac.uk/schools/ges/research/researchfacilities/isaac/services/scanningelectronmicroscopy/>
- MARTIN TARR ASSOCIATES LIMITED. The wave soldering process. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก http://www.mtarr.co.uk/courses/topics/0225_wave/
- Santosh Das. (2008). How to Solder-Hand Soldering Tutorial. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก <http://www.electronicandyou.com/blog/how-to-solder-hand-soldering-tutorial.html>
- Renesas. (2016). Single-sided Soldering. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก http://www.renesas.eu/products/package/manual/1/1_1/1_1_8/index.jsp
- University of Wisconsin Moodle. (2014). Pb-Sn Phase Diagram. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก <https://ay14-15.moodle.wisc.edu/prod/mod/resource/view.php?id=14965>
- Japanese Standards Association, 2003. Test methods for lead-free solders – Part 4: Methods for solderability test by a wetting balance method and a contact angle method.
- USA KINO. (2014) Measurement of contact angle and interface tension--method and ways [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก <http://www.surface-tension.org/article/63.html>

- TEACHENGINEERING. Wetting and Contact Angle [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก
https://www.teachengineering.org/lessons/view/duk_surfacetensionunit_lesson3
- Himikatus.ru. (1996). Phase diagram [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก
<http://www.himikatus.ru/art/phase-diagr1/Sb-Sn.php>