

การพัฒนาชุดเครื่องมือสำหรับทดสอบความสามารถในการละลายตัว
ของโลหะบัดกรี

A DEVELOPMENT OF A TOOLKIT FOR WETTABILITY
TESTING OF SOLDER ALLOYS

นายธงชัย กล่อมลอย

MR. TONGCHAI KLOMLOY

นางสาวสุรพร วัฒนศิริ

MS. SUREEPORN WATTANAKIT

นางสาวชรินทร์ทิพย์ สุทธิชัย

MS. CHARINTIP SUTTIPHON

ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร

ปีการศึกษา 2556

การพัฒนาชุดเครื่องมือสำหรับทดสอบความสามารถในการกระจายตัว
ของโลหะบัดกรี

A DEVELOPMENT OF A TOOLKIT FOR WETTABILITY
TESTING OF SOLDER ALLOYS

นายธงชัย กล่อมลอย

MR.TONGCHAI KLOMLOY

นางสาวสุรีพร วัฒนะกิจ

MS.SUREEPORN WATTANAKIT

นางสาวชรินทร์ทิพย์ สุทธิผล

MS.CHARINTIP SUTTIPHON

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

DEVELOPMENT OF A TOOLKIT FOR WETTABILITY TESTING OF SOLDER ALLOYS

MR.TONGCHAI KLOMLOY
MS.SUREEPORN WATTANAKIT
MS.CHARINTIP SUTTIPHON

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 2013

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การพัฒนาชุดเครื่องมือสำหรับทดสอบความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรี	
นักศึกษา	นายธงชัย	กลุ่มมลอย
	นางสาวสุรียพร	วิณะกิจ
	นางสาวชรินทร์ทิพย์	สุทธิผล
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	
ปีการศึกษา	2556	
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ	

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการออกแบบและสร้างชุดแม่พิมพ์ขึ้นสำหรับผลิตชิ้นงานทดสอบโลหะบัดกรีชนิด Sn-58Bi เพื่อนำชิ้นงานทดสอบที่ได้มาทำการทดสอบหาค่าตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีหรือค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรี (Wettability) ชนิด Sn-58Bi บนพื้นผิวโลหะพื้นทองแดงและศึกษาอิทธิพลของน้ำยาประสานประเภท RMA ต่อค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรี โดยใช้ น้ำยาประสานประเภท RMA ทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ NH-100VK-1, NF 1103 และ NF 2107 ค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีประเมินได้ 3 วิธี ได้แก่ ค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio : Sr) ค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor : Sf) และค่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรี (Contact angle : θ) ผลจากการศึกษาพบว่า น้ำยาประสานประเภท RMA ชนิด NH-100VK-1 ให้ค่าอัตราส่วนการกระจายตัวเฉลี่ยเท่ากับ 3.64 และค่าตัวประกอบการกระจายตัวเฉลี่ยเท่ากับ 82.44 ซึ่งมากกว่าของน้ำยาประสานประเภท RMA ชนิด NF 1103 และ NF 2107 และน้ำยาประสานประเภท RMA ชนิด NH-100VK-1 ให้ค่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรีเฉลี่ยเท่ากับ 14.66 องศา ซึ่งน้อยกว่าของน้ำยาประสานประเภท RMA ชนิด NF 1103 และ NF 2107 จากการสร้างชุดแม่พิมพ์เพื่อผลิตชิ้นงานทดสอบและทดสอบหาค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีโดยใช้ น้ำยาประสานประเภท RMA ที่ต่างชนิดกัน สรุปได้ว่า น้ำยาประสานประเภท RMA ชนิด NH-100VK-1 เหมาะสมกับโลหะบัดกรีชนิด Sn-58Bi

Thesis Title	A development a toolkit for wettability testing of solder alloys
Student	Mr. Tongchai Klomloy Ms. Sureeporn Wattanakit Ms. Charintip Suttiophon
Degree	Bachelor of Engineering in Industrial Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year	2013
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Kannachai Kanlayasiri

ABSTRACT

This research was aimed to design and build a mold for producing solder pellets and to test wettability of Sn-58Bi solder on copper substrate. Influence of RMA fluxes on wettability of Sn-58Bi solder was also investigated in this study. Three types of RMA fluxes including NH-100VK-1, NF 1103 and NF 2107 were used in the wettability test. Wettability of the solder was evaluated in terms of spread ratio (S_r), spread factor (S_p) and contact angle (θ). Results showed that NH-100VK-1 flux provides the highest wettability of Sn-58Bi on copper substrate.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยคำแนะนำและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รศ.ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการศึกษาค้นคว้า อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำงานตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

ขอขอบคุณ ดร. พลชัย โชติปรายนกุล ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ และความช่วยเหลือในการสร้างแม่พิมพ์โลหะสำหรับการหล่อชิ้นงาน

ขอขอบคุณ ดร. กิตติวัฒน์ สิริเกษมสุข ที่ได้ให้ความรู้และคำแนะนำในด้านการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ

ขอขอบคุณ บริษัท อุลตราคอร์ จำกัด (มหาชน) และคุณกัลยา ฝ่าโผน เป็นอย่างสูงที่ได้ให้ข้อมูล ความรู้ และคำแนะนำเกี่ยวกับฟลักซ์สำหรับการบัดกรี

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม และเจ้าหน้าที่ ที่ได้เอื้อเฟื้อเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำงานวิจัย ตลอดจนอำนวยความสะดวกให้สามารถทำปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จ

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ตลอดจนเพื่อนๆ ทุกคนสำหรับความช่วยเหลือในทุกๆเรื่อง และคอยเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา จนทำให้ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นายธงชัย กลุ่มมลอย

นางสาวสุรีพร วัฒนะกิจ

นางสาวชรินทร์ทิพย์ สุทธิผล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 การบัดกรี.....	3
2.1.1 โลหะพื้น.....	4
2.1.2 โลหะบัดกรี.....	5
2.1.3 น้ำยาประสานหรือฟลักซ์.....	7
2.1.3.1 การทำงานของฟลักซ์.....	9
2.1.4 วิธีการบัดกรี.....	10
2.2 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว.....	12
2.2.1 คุณลักษณะเบื้องต้นในการพิจารณาเลือกใช้โลหะบัดกรีแบบไร้สารตะกั่ว.....	13
2.2.2 โลหะทดแทนสารตะกั่ว.....	14
2.2.3 แนวทางในการเลือกธาตุที่เป็นส่วนผสมที่เหมาะสมกับขบวนการผลิต.....	16
2.2.3.1 ธาตุเจือที่ใช้ผสมกับดีบุกเพื่อผลิตเป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว.....	16
2.2.3.2 สมบัติของธาตุเจือชนิดต่างๆ.....	16
2.3 โลหะบัดกรี Sn-58Bi.....	17
2.3.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์.....	18
2.3.2 คุณสมบัติทางกล.....	18

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 การศึกษาวัสดุที่ใช้สร้างแม่พิมพ์.....	19
2.4.1 คุณสมบัติทั่วไปและคุณสมบัติทางกายภาพของเหล็กกล้าไร้สนิม.....	19
2.4.2 คุณสมบัติเชิงกล.....	19
2.4.3 ความต้านทานการกัดกร่อน.....	19
2.4.4 เหล็กกล้าไร้สนิม.....	20
2.4.5 วัสดุที่เลือกใช้สร้างแม่พิมพ์.....	21
2.4.6 วัสดุที่เลือกใช้ทำสลักของแม่พิมพ์.....	22
2.5 ความสามารถในการกระจายตัว.....	22
2.5.1 Spread test method.....	22
2.5.1.1 ค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor : S_p).....	23
2.5.1.2 ค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio : S_r).....	23
2.5.2 Contact angle method.....	24
2.5.3 Wetting balance method.....	27
2.5.4 ความสัมพันธ์ของ Spread factor, Spread ratio และ Contact angle.....	28
2.5.4.1 ความสัมพันธ์ของ Spread ratio และ Contact angle.....	28
2.5.4.2 ความสัมพันธ์ของ Spread factor และ Contact angle.....	29
2.5.4.3 ความสัมพันธ์ของ Contact angle และมิติของโลหะบัดกรีหลอมละลาย.....	29
2.6 วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA).....	30
2.6.1 ข้อกำหนดเบื้องต้นของข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์ความแปรปรวนได้.....	30
2.6.2 ชนิดของการวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	30
2.6.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA).....	30
2.7 การใช้โปรแกรม Minitab ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียว.....	32
2.8 การเปรียบเทียบเชิงพหุคูณ (Multiple comparison test).....	33
2.8.1 Least - Significant Different (LSD).....	33
2.8.2 Turkey's Honestly Significant Different (HSD).....	34
2.8.3 The Sheffe's Post hoc comparison (Sheffe').....	34
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการ.....	35
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	35
3.2 การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์โลหะ.....	36
3.2.1 การออกแบบแม่พิมพ์โลหะ.....	36

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.1.1 แม่พิมพ์ส่วนบน.....	36
3.2.1.2 แม่พิมพ์ส่วนกลาง.....	36
3.2.1.3 แม่พิมพ์ส่วนล่าง.....	37
3.2.1.4 สลัก.....	38
3.2.2 การสร้างแม่พิมพ์โลหะ.....	39
3.2.2.1 การสร้างแม่พิมพ์ส่วนบน.....	39
3.2.2.2 การสร้างแม่พิมพ์ส่วนล่าง.....	40
3.2.2.3 การสร้างแม่พิมพ์ส่วนกลาง.....	41
3.2.2.4 การสร้างสลัก.....	41
3.3 การวิเคราะห์ผลค่าความสามารถในการกระจายตัวหลังการบัดกรี.....	44
3.3.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ.....	44
3.3.2 การเตรียมแผ่นทองแดงทดสอบ.....	46
3.3.3 การทดสอบค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรี.....	48
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	50
4.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	51
4.1.1 ค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio : S_r).....	52
4.1.1.1 การวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio : S_r).....	53
4.1.2 ค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor : S_f).....	56
4.1.2.1 วัดความสูงของโลหะบัดกรีหลอมละลาย.....	56
4.1.2.2 คำนวณหาปริมาตรของชิ้นงานโลหะบัดกรีทดสอบ.....	57
4.1.2.3 การวิเคราะห์ค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor : S_f)	59
4.1.3 ค่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรี (Contact angle : θ).....	62
4.1.3.1 คำนวณหารัศมีของโลหะบัดกรีหลังหลอมละลายจากพื้นที่โลหะบัดกรีหลัง หลอมละลายที่ได้จากการวัดด้วยโปรแกรม Image-Pro Express และคำนวณด้วยสูตรพื้นที่วงกลม.....	62
4.1.3.2 การวิเคราะห์ค่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรี (Contact angle : θ).....	63

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5	
สรุปผลการทดลอง.....	66
5.1 จากการศึกษาหาความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีด้วย วิธี Spread test method.....	66
5.1.1 ค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio : S_r)	66
5.1.2 ค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor : S_p)	66
5.2 จากการศึกษาหาความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีด้วย วิธี Contact angle method.....	66
5.2.1 ค่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรี (Contact angle : θ).....	66
เอกสารอ้างอิง.....	67
ภาคผนวก.....	69
ภาคผนวก ก. แบบ Drawing ชุดแม่พิมพ์โลหะสำหรับหล่อชิ้นงาน.....	ผก

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ชนิดของโลหะต่อความยากง่ายในการบัดกรี.....	5
ตารางที่ 2.2 โลหะที่ทำการบัดกรีและน้ำยาประสานที่ใช้.....	8
ตารางที่ 2.3 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำกว่า 180 องศาเซลเซียส.....	14
ตารางที่ 2.4 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 180 ถึง 200 องศาเซลเซียส.....	14
ตารางที่ 2.5 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 200 ถึง 230 องศาเซลเซียส.....	15
ตารางที่ 2.6 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวสูงกว่า 230 องศาเซลเซียส.....	15
ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบของโลหะบัดกรีชนิดต่างๆที่สามารถนำมาใช้ทดแทนตะกั่วบัดกรี.....	15
ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ (Physical properties of solder alloy).....	18
ตารางที่ 2.9 ลำดับเวลาในการดำเนินการทดสอบ.....	24
ตารางที่ 2.10 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA.....	31
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองของค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio) ของโลหะบัดกรี Sn-58Bi บนแผ่นทองแดง.....	52
ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียวของค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio : S_r) ของน้ำยาประสานชนิด NH-100VK-1, NF 1103 และ NF 2107.....	54
ตารางที่ 4.3 Multiple comparisons ของค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio).....	55
ตารางที่ 4.4 ค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor) ของโลหะบัดกรี Sn-58Bi บนแผ่นทองแดง.....	58
ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียวของค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor : S_p)ของน้ำยาประสานชนิด NH-100VK-1, NF 1103 และ NF 2107.....	59
ตารางที่ 4.6 Multiple comparisons ของค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor).....	61
ตารางที่ 4.7 ค่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรี (Contact angle) ของโลหะบัดกรี Sn-58Bi บนแผ่นทองแดง.....	62
ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียวของค่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรี (Contact angle : θ) ของน้ำยาประสานชนิด NH-100VK-1, NF 1103 และ NF 2107.....	63
ตารางที่ 4.9 Multiple comparisons ของค่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรี (Contact angle).....	65

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ตัวอย่างของรอยต่อที่ใช้กันทางกล.....	4
รูปที่ 2.2 การเกิดการประสานกันระหว่างชิ้นงานโลหะโดยใช้การบัดกรี.....	6
รูปที่ 2.3 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมที่ประกอบด้วยตะกั่วและดีบุก.....	6
รูปที่ 2.4 การแผ่กระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะพื้นของแผ่นทองแดงที่ให้อุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ.....	9
รูปที่ 2.5 การทำงานของฟลักซ์.....	10
รูปที่ 2.6 การบัดกรีแบบใช้มือ.....	11
รูปที่ 2.7 การบัดกรีแบบคลื่น.....	11
รูปที่ 2.8 การบัดกรีแบบรีโฟลว์.....	12
รูปที่ 2.9 เฟสไดอะแกรมระหว่างดีบุกและบิสมีท.....	17
รูปที่ 2.10 ความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรี.....	23
รูปที่ 2.11 Contact angle method.....	24
รูปที่ 2.12 ลำดับขั้นตอนในช่วงเวลาทดสอบ.....	25
รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ของมุมสัมผัสที่มีต่อโลหะบัดกรี พื้นผิวพื้นโลหะและบรรยากาศโดยรอบเมื่อ Liquid คือ โลหะบัดกรีหลอมเหลว Solid คือ พื้นผิวพื้นโลหะ Gas คือ บรรยากาศโดยรอบ.....	25
รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ของมุมสัมผัสที่มุมใดๆ กับการกระจายตัวของโลหะบัดกรี.....	26
รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างรัศมี ความสูง และมุมสัมผัสของโลหะบัดกรี.....	27
รูปที่ 2.16 Wetting balance method.....	27
รูปที่ 2.17 Wetting curve ที่ได้จากเครื่องทดสอบ.....	28
รูปที่ 2.18 เรขาคณิตทรงกลม.....	28
รูปที่ 2.19 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียวด้วยโปรแกรม Minitab.....	33
รูปที่ 3.1 แม่พิมพ์โลหะส่วนบน.....	36
รูปที่ 3.2 แม่พิมพ์โลหะส่วนกลาง.....	37
รูปที่ 3.3 แม่พิมพ์โลหะส่วนล่าง.....	37
รูปที่ 3.4 สลักสำหรับยึดแม่พิมพ์.....	38
รูปที่ 3.5 นี้อตสำหรับยึดแม่พิมพ์.....	38
รูปที่ 3.6 แม่พิมพ์โลหะสำหรับการหล่อขึ้นงานทดสอบ.....	39
รูปที่ 3.7 แม่พิมพ์ส่วนบน.....	40
รูปที่ 3.8 แม่พิมพ์ส่วนล่าง.....	40
รูปที่ 3.9 แม่พิมพ์ส่วนกลาง.....	41
รูปที่ 3.10 (a) สลัก และ (b) นี้อตขนาดเบอร์ M6.....	41

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.11 เครื่องตัดโลหะ (Cutting machine)	42
รูปที่ 3.12 เครื่องกัด (Milling machine)	42
รูปที่ 3.13 (a) ดอกกัดโลหะ End mill 4 คม และ (b) ดอกกัดโลหะ Slot drill.....	42
รูปที่ 3.14 เครื่องกลึง (Turning machine).....	43
รูปที่ 3.15 เครื่องเจาะ (Drilling machine).....	43
รูปที่ 3.16 เครื่องเจียรระไน (Grinding machine).....	43
รูปที่ 3.17 (a) เลื่อยตัดโลหะ และ (b) ตะไบ.....	44
รูปที่ 3.18 กระจายทรายน้ำ TOA ความหนาผิว 100 กริต, 800 กริต และ 1,000 กริต.....	44
รูปที่ 3.19 เครื่อง Electrical melting furnace.....	45
รูปที่ 3.20 แม่พิมพ์หล่อโลหะบัดกรี Sn-58Bi.....	45
รูปที่ 3.21 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบที่ได้หลังจากการหล่อ.....	45
รูปที่ 3.22 เครื่องชั่งน้ำหนักยี่ห้อ Sartorius รุ่น BSA224S-CW.....	46
รูปที่ 3.23 เครื่องตัดแผ่นโลหะ (Sheet metal cutting machine)	46
รูปที่ 3.24 ตัวอย่างแผ่นทองแดงหลังทำการตัดและพับมุม.....	47
รูปที่ 3.25 สารเคมีทำความสะอาดแผ่นทองแดง (a) กรดไนตริก (b) เอทานอล และ (c) น้ำกลั่น.....	47
รูปที่ 3.26 อุปกรณ์สำหรับการปฏิบัติงาน.....	47
รูปที่ 3.27 น้ำประสาน (a) ชนิด NH-100VK-1 (b) ชนิด NF1103 และ (c) ชนิด NF2107.....	48
รูปที่ 3.28 แผ่นทองแดงที่ทำการหยดน้ำประสานและโลหะบัดกรีสำหรับการทดสอบ.....	48
รูปที่ 3.29 เครื่องให้ความร้อน Hot Plate.....	49
รูปที่ 3.30 ตัวอย่างชิ้นงานหลังผ่านการทดสอบ.....	49
รูปที่ 4.1 การกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดงหลังทำการทดสอบด้วยน้ำยาประสาน ประเภท RMA ชนิด NH-100VK-1.....	50
รูปที่ 4.2 การกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดงหลังทำการทดสอบด้วยน้ำยาประสาน ประเภท RMA ชนิด NF 1103.....	51
รูปที่ 4.3 การกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดงหลังทำการทดสอบด้วยน้ำยาประสาน ประเภท RMA ชนิด NF 2107.....	51
รูปที่ 4.4 การหาค่าพื้นที่และความยาวรอบรูปของโลหะบัดกรีที่หลอมละลายแล้วด้วย โปรแกรม Image-Pro Express.....	52

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.5 Boxplot ของค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio : S_r) ของน้ำยาประสาน ชนิด NH-100VK-1, NF 1103 และ NF 2107.....	54
รูปที่ 4.6 Residual Plots ของค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio : S_r) ของน้ำยาประสาน ชนิด NH-100VK-1, NF 1103 และ NF 2107.....	55
รูปที่ 4.7 ไมโครมิเตอร์.....	56
รูปที่ 4.8 Boxplot ของค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor : S_f) ของน้ำยาประสาน ชนิด NH-100VK-1, NF 1103 และ NF 2107.....	60
รูปที่ 4.9 Residual Plots ของค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor : S_f) ของน้ำยาประสาน ชนิด NH-100VK-1, NF 1103 และ NF 2107.....	60
รูปที่ 4.10 Boxplot ของค่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรี (Contact angle : θ) ของน้ำยาประสาน ชนิด NH-100VK-1, NF 1103 และ NF 2107.....	64
รูปที่ 4.11 Residual plots ของค่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรี (Contact angle : θ) ของน้ำยาประสาน ชนิด NH-100VK-1, NF 1103 และ NF 2107.....	64

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์มีการใช้โลหะบัดกรี (Solder) เป็นโลหะเติม (Filler metal) ในการเชื่อมต่อนชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เข้ากับแผงวงจร (Printed circuit board) ด้วยวิธีการบัดกรี (Soldering) ซึ่งโลหะบัดกรีดั้งเดิมที่มีการใช้อยู่ทั่วไปจะมีส่วนผสมของตะกั่วและดีบุก (Sn-Pb) โดยตะกั่วถือเป็นสารอันตรายที่ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมและร่างกายมนุษย์ จึงทำให้คณะกรรมการยุโรปหรืออีซี (EC-European Commission) ซึ่งเป็นหน่วยงานที่กำหนดนโยบายและการบริหารงานร่วมของประเทศในเครือสหภาพยุโรปหรืออียู (EU-European Union) ได้ออกข้อบังคับใช้ตั้งแต่วันที่ 1 กรกฎาคม ค.ศ.2006 กำหนดให้ตะกั่วเป็นสารต้องห้ามตามระเบียบ RoHS (Restriction on Hazardous Substances) [5] และ WEEE (Waste from Electrical and Electronic Equipment) จึงทำให้อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์มีความจำเป็นอย่างยี่งที่ต้องมีการปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตและมีการพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-free solder) ขึ้นมาทดแทนโลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมของตะกั่วและดีบุก โดยโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่พัฒนาขึ้นมาขึ้นมานั้นต้องมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าหรือเทียบเท่ากับโลหะบัดกรีแบบเดิม แต่ทั้งนี้โลหะบัดกรีไม่ใช่ปัจจัยเดียวที่ส่งผลต่อความสามารถในการบัดกรี ยังมีโลหะพื้น (Substrate) และน้ำยาประสาน (Flux) ที่ส่งผลได้เช่นกัน จึงกล่าวได้ว่า ถ้าใช้โลหะพื้น โลหะบัดกรีและน้ำยาประสานที่มีความเหมาะสมจะส่งผลให้ความสามารถในการบัดกรีและแนวรอยต่อมีความแข็งแรงและมีคุณภาพมากยิ่งขึ้น แต่หากใช้โลหะพื้น โลหะบัดกรี และน้ำยาประสานที่ไม่เหมาะสมก็จะส่งผลให้ความสามารถในการบัดกรีและแนวรอยต่อมีคุณภาพลดน้อยลง ซึ่งอาจส่งผลทำให้เกิดความเสียหายในขณะใช้งานได้

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นกรอกแบบและสร้างชุดแม่พิมพ์ขึ้นสำหรับผลิตชิ้นงานทดสอบโลหะบัดกรี เพื่อนำชิ้นงานทดสอบที่ได้มาทำการทดสอบหาค่าความสามารถในการกระจายตัว (Wettability) ของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะพื้นทองแดง โดยประเมินความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีใน 3 วิธีได้แก่ ค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio : S_r) ค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor : S_p) และค่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรี (Contact angle : θ) พร้อมทั้งศึกษาอิทธิพลของน้ำยาประสานประเภท RMA ทั้งหมด 3 ชนิดได้แก่ NH-100VK-1, NF 1103 และ NF 2107 ต่อค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรี เนื่องจากโลหะบัดกรีแต่ละชนิดจะมีค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีที่ต่างกัน ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้โลหะพื้นและน้ำยาประสานที่ต่างชนิดกัน และนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการเปรียบเทียบค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีชนิด Sn-58Bi เป็นกรณีศึกษา

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อสร้างชุดแม่พิมพ์สำหรับผลิตชิ้นงานทดสอบในการทดสอบหาค่าความสามารถในการกระจายตัว (Wettability) ของโลหะบัดกรี
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของน้ำยาประสานประเภท RMA ที่มีผลต่อค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรี Sn-58Bi บนโลหะพื้นทองแดง

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ออกแบบและสร้างชุดแม่พิมพ์เพื่อใช้ผลิตชิ้นงานทดสอบในการทดสอบหาค่าความสามารถในการกระจายตัว (Wettability) ของโลหะบัดกรี Sn-58Bi บนโลหะพื้นทองแดง
2. ทำการทดสอบความสามารถในการกระจายตัว (Wettability) ของโลหะบัดกรี Sn-58Bi บนโลหะพื้นทองแดงโดยใช้น้ำยาประสานประเภท RMA จำนวน 3 ชนิด คือ NH-100VK-1, NF 1103 และ NF 2107

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำชุดแม่พิมพ์ที่สร้างขึ้นไปใช้ในการผลิตชิ้นงานทดสอบในการทดสอบหาค่าความสามารถในการกระจายตัว (Wettability) ของโลหะบัดกรีชนิดอื่น
2. สามารถนำผลสรุปจากการทดสอบมาเป็นแนวทางในการเลือกใช้น้ำยาประสานประเภท RMA สำหรับโลหะบัดกรี Sn-58Bi บนโลหะพื้นทองแดง

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

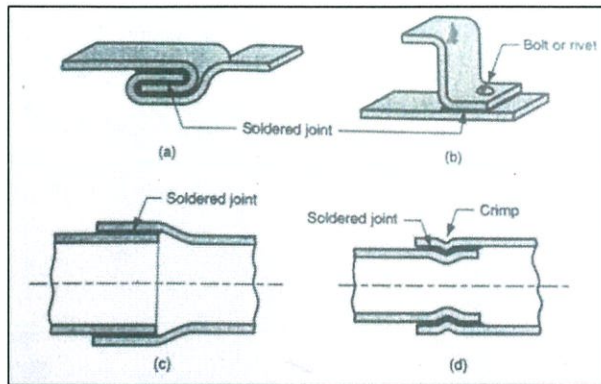
2.1 การบัดกรี (Soldering)

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

การบัดกรีโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. การบัดกรีแข็ง (Brazing) หรือการแล่นประสาน คือกรรมวิธีการต่อโลหะตั้งแต่สองชิ้นหรือมากกว่าเข้าด้วยกัน โดยโลหะนั้นจะเป็นชนิดเดียวหรือต่างชนิดกันก็ได้ โลหะเติมนี้เป็นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า 450 องศาเซลเซียส แต่ต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะที่นำมาทำการบัดกรีแข็ง และเติมลงไปที่ยรอยต่อของชิ้นงาน โดยโลหะเติมนี้จะหลอมละลายและแทรกตัวซึมเข้าไปในช่องว่างระหว่างรอยต่อด้วยปฏิกิริยาคาปิลารี (Capillary action) ปกติตัวประสานจะเป็นพวกโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก (Non-ferrous metal) ซึ่งจะให้รอยต่อที่มีความแข็งแรงเกือบเท่ากับรอยเชื่อม
2. การบัดกรีอ่อน (Soft soldering) คือกรรมวิธีการต่อโลหะตั้งแต่สองชิ้นหรือมากกว่าเข้าด้วยกัน โดยที่โลหะนั้นจะเป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ ให้ความร้อนแก่รอยต่อที่อุณหภูมิต่ำกว่า 450 องศาเซลเซียส ใช้โลหะเติมที่เป็นโลหะที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ เช่น ตะกั่วหรือดีบุกเติมลงไปที่ยรอยต่อของชิ้นงาน โลหะเติมนี้จะหลอมละลายและแทรกตัวซึมเข้าไปในช่องว่างระหว่างรอยต่อด้วยปฏิกิริยาคาปิลารี (Capillary action) ซึ่งใช้สำหรับการบัดกรีโลหะแผ่นโดยทั่วไป

ในการบัดกรีแผ่นโลหะ นอกจากจะใช้รอยต่อแบบต่อชนและต่อเกยในลักษณะเดียวกับการแล่นประสานแล้ว การบัดกรียังใช้รอยต่อแบบอื่นๆอีกในการประสานชิ้นงานดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างของรอยต่อที่ใช้กันทางกล

ข้อดีของการบัดกรี ได้แก่ ใช้พลังงานต่ำเมื่อเทียบกับการเชื่อมหลอมหรือการแล่นประสานและสามารถใช้แหล่งพลังงานความร้อนได้หลากหลาย ซึ่งรอยบัดกรีที่นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดีสามารถให้รอยต่อที่อากาศหรือของเหลวไม่สามารถผ่านไปได้และรอยต่อจากการบัดกรีสามารถที่จะซ่อมแซมหรือเปลี่ยนแปลงได้ง่าย ส่วนข้อเสียของการบัดกรี ได้แก่ รอยต่อที่มีความแข็งแรงต่ำและมีความแข็งแรงน้อยลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

ในการบัดกรีนั้นต้องอาศัยตัวช่วยประสานหรือน้ำยาประสาน (Flux) เพื่อทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นโลหะชิ้นงาน บริเวณที่จะทำการบัดกรีก่อนการบัดกรี และต้องอาศัยความร้อนที่ใช้หลอมละลายโลหะบัดกรี พร้อมทั้งให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน

การบัดกรีที่จะทำให้รอยต่อมีคุณภาพดีนั้น ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ 3 ประการ คือ

1. ธรรมชาติของผิวโลหะชิ้นงาน (Base metal) ซึ่งครอบคลุมถึงชนิดของโลหะชิ้นงานและสภาพผิวของผิวหน้าโลหะด้วย
2. ชนิดของโลหะบัดกรีที่ใช้ (Solder)
3. ชนิดของน้ำยาประสานหรือฟลักซ์ (Flux)

องค์ประกอบทั้ง 3 ประการนี้จะแปรเปลี่ยนไปด้วยอุณหภูมิที่ใช้ในการบัดกรี จึงอาจกล่าวได้ว่าองค์ประกอบทั้ง 3 นี้ สัมพันธ์กันด้วยความร้อนที่ใช้ในการบัดกรี

2.1.1 โลหะพื้น (Base metal)

โลหะพื้นที่ถูกบัดกรีส่วนใหญ่จะเป็นเหล็กและทองแดง ส่วนอลูมิเนียมก็นิยมเพราะมีน้ำหนักเบาแต่จะบัดกรียากกว่าเหล็ก ทองแดง และโลหะผสมของเหล็กกับทองแดง จากตารางที่ 2.1 จะแสดงถึงชนิดของโลหะต่อความยากง่ายในการบัดกรี แต่จะต้องคำนึงถึงฟลักซ์ที่เหมาะสมด้วยว่าเป็นชนิดว่องไวหรือไม่ ซึ่งมีผลต่อการบัดกรี

ตารางที่ 2.1 ชนิดของโลหะต่อความยากง่ายในการบัดกรี

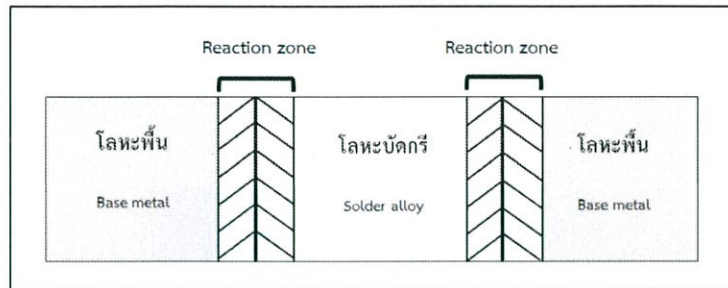
โลหะพื้นหรือโลหะชิ้นงาน	การบัดกรี
เงิน ดีบุก แคดเมียม แพลลาเดียม โรเดียม ทองแดง บรอนซ์ ทองเหลือง ตะกั่ว นิกเกิลผสมเงิน	ดีเยี่ยม
เบอร์ิลเลียมผสมทองแดง	ดี
เหล็ก สังกะสี นิกเกิล	พอใช้
อลูมิเนียม อลูมิเนียมผสมบรอนซ์ เหล็กผสมโครเมียม	ยาก
เหล็กหล่อ โครเมียม ไททาเนียม แทนทาลัม แมกนีเซียม	เคลือบโลหะบัดกรีก่อน

โลหะที่เป็นดีบุก แคดเมียม ทองแดงจะง่ายต่อการเชื่อมประสานของโลหะบัดกรี โดยไม่ต้องทำความสะอาดก่อนและใช้ฟลักซ์ที่ไม่ว่องไวได้ ถ้าเป็นเงินจะเกิดฟิล์มของซัลไฟด์บนผิว ซึ่งเป็นตัวลดประสิทธิภาพการบัดกรีทันที ตะกั่วจะเกิดออกไซด์ที่ผิวเมื่ออยู่ในสภาพชื้นและอาจต้องทำความสะอาดก่อนการบัดกรี ทองแดง ทองเหลือง บรอนซ์ และเหล็กจะเกิดออกไซด์บางบริเวณ ซึ่งต้องทำความสะอาดหรือล้างด้วยกรดอ่อน ความจำเป็นในการทำความสะอาดจะขึ้นอยู่กับขอบเขตของผิวโลหะที่เกิดออกซิเดชันและความไวของฟลักซ์ [2]

2.1.2 โลหะบัดกรี (Solders)

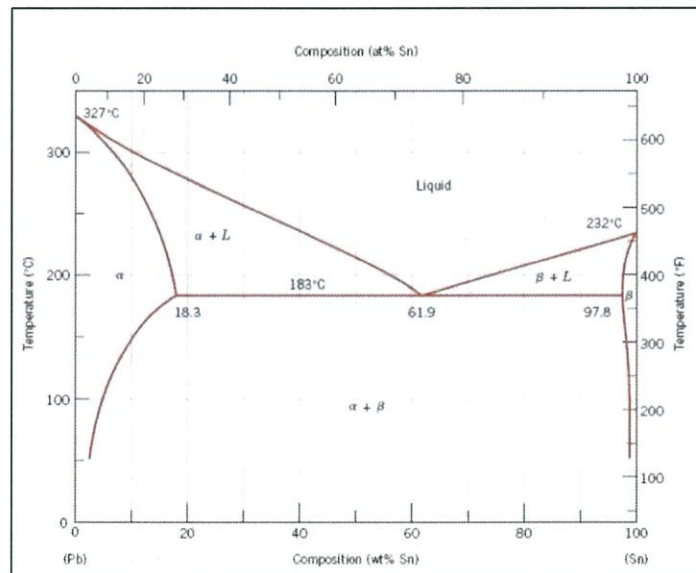
โลหะบัดกรี คือ โลหะผสมที่มีจุดหลอมละลายต่ำใช้เป็นตัวเชื่อมประสานชิ้นงานโลหะเข้าด้วยกัน โดยทั่วไปอุณหภูมิในการหลอมละลายของตัวเชื่อมประสานควรต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมละลายของชิ้นงานเสมอ และโลหะบัดกรีนีจะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานเท่านั้นแต่ไม่ทำปฏิกิริยากับโลหะที่ถูกเชื่อม โดยโลหะบัดกรีที่ใช้กันแพร่หลายทั่วไปคือ โลหะผสมของตะกั่วและดีบุก (Sn-Pb) ซึ่งมีข้อดีคือ ราคาถูก มีสมบัติการบัดกรีที่ดี อุณหภูมิหลอมละลายต่ำ มีการกระจายตัวบนผิวโลหะต่างๆได้ดี และให้รอยต่อที่มีความแข็งแรง แต่ยังคงมีความเป็นพิษเนื่องจากมีปริมาณตะกั่วผสมอยู่ในปริมาณที่สูง [6]

ซึ่งในระหว่างการบัดกรีนั้นจะก่อให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างโลหะบัดกรีกับแผ่นโลหะชิ้นงาน (Base metal) เกิดเป็นการเกาะติดทางกลระหว่างโลหะบัดกรีกับความหยาบบนผิวหน้าที่ไม่สม่ำเสมอของแผ่นโลหะชิ้นงานพร้อมทั้งเกิดพันธะโลหะระหว่างโลหะบัดกรีกับแผ่นโลหะชิ้นงาน โดยปกติแล้วพันธะโลหะที่เกิดขึ้นนั้นจะมีความแข็งแรงมากกว่าการเกาะติดทางกล นอกจากนี้ในส่วนที่เกิดปฏิกิริยาจะพบการเกิดสารประกอบเชิงโลหะหรือสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิก (Intermetallic compounds) ระหว่างโลหะบัดกรีกับแผ่นโลหะชิ้นงานด้วย ลักษณะการเกิดการประสานกันระหว่างชิ้นงานโลหะโดยใช้การบัดกรีแสดงไว้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การเกิดการประสานกันระหว่างชิ้นงานโลหะโดยใช้การบัดกรี

เนื่องจากโลหะบัดกรีที่ทำมาจากโลหะผสม (Alloys) ของดีบุกและตะกั่ว (Sn-Pb) มีคุณสมบัติที่ดีหลายประการแต่อาจไม่เหมาะกับการใช้งานบางประเภท จึงทำให้มีการนำเอาโลหะชนิดอื่นเข้ามาผสมในอัตราส่วนที่ต่างกันไป เช่น แอนติโมนี (Antimony) เงิน (Silver) แคดเมียม (Cadmium) อินเดียม (Indium) และบิสมัท (Bismuth) เพื่อช่วยในการควบคุมคุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางกลของตะกั่วบัดกรี เช่น ช่วงของอุณหภูมิการหลอมเหลว ความแข็งและความต้านทานการกัดกร่อนซึ่งส่วนผสมจะถูกออกแบบให้เหมาะกับการใช้งานโดยโลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมระหว่างดีบุกและตะกั่วในอัตราส่วนต่างกัน จะมีผลให้อุณหภูมิลิควิดัส (Liquidus temperature) มีความแตกต่างกันดังแสดงในเฟสไดอะแกรมในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมที่ประกอบด้วยตะกั่วและดีบุก

ดีบุกจะเริ่มหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 283 องศาเซลเซียส และกลายเป็นของเหลวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 327 องศาเซลเซียส ส่วนตะกั่วนั้นจะเริ่มหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 183 องศาเซลเซียส และกลายเป็นของเหลวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 232 องศาเซลเซียส หากใช้ดีบุกหรือตะกั่วเพียงอย่างเดียวหนึ่งในการบัดกรีจะไม่เหมาะสมเนื่องจากจุดหลอมเหลวสูงเกินไป แต่เมื่อนำดีบุกและตะกั่วมาผสมกันในอัตราส่วนที่พอเหมาะ จะทำให้ได้ตะกั่วบัดกรีที่มีจุดหลอมเหลวและช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลวที่ลดต่ำลง ถ้าใช้อัตราส่วนระหว่างดีบุก 61.9 % และตะกั่ว 38.1 % โดยน้ำหนัก จะทำให้ส่วนผสมนี้ไม่มีบริเวณที่เป็นสถานะของผสม โดยจะเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นของเหลวทันทีที่อุณหภูมิ 183 องศาเซลเซียส ดังในเฟสไดอะแกรม แต่ส่วนผสมนี้ไม่นิยมในการใช้งานเนื่องจากทำให้เกิดความเปราะของรอยบัดกรีภายใต้สภาวะการใช้งาน

อัตราส่วนที่นิยมใช้กันมากที่สุดของตะกั่วบัดกรีที่ใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์คือ ดีบุก 60% และตะกั่ว 40 % โดยน้ำหนัก ซึ่งเรียกว่าตะกั่วแบบ 60/40 และถูกจัดว่าเป็นตะกั่วแบบอ่อน โดยจะหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 188 องศาเซลเซียส และมีช่วงการหลอมเหลวประมาณ 5 องศาเซลเซียส ซึ่งจะทำให้ได้ความแข็งแรงที่สุดและมีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าต่ำที่สุดด้วย สำหรับรอยต่อที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูงหรือต้องการความแข็งแรงทางกลมากๆ จำเป็นต้องใช้ตะกั่วบัดกรีแบบแข็ง ซึ่งจะประกอบด้วยอัตราส่วนผสมของดีบุกและตะกั่ว 30/70 และมีช่วงหลอมเหลวประมาณ 255–275 องศาเซลเซียส [1]

2.1.3 น้ำยาประสานหรือฟลักซ์ (Fluxes)

ในการบัดกรีจะประสบความสำเร็จหรือไม่ขึ้นอยู่กับความสามารถในการกระจายตัว (Spreading) ของโลหะบัดกรี และภาวะเปียก (Wetting) บนพื้นผิวโลหะพื้น อุปสรรคใหญ่ของการบัดกรีคือชั้นฟิล์มและคราบสกปรกต่างๆที่ปกคลุมอยู่บนพื้นผิวโลหะพื้น ซึ่งจะขัดขวางไม่ให้โลหะบัดกรีนั้นเกิดการกระจายตัวและเกิดภาวะเปียกในบริเวณที่จะทำการบัดกรี

ดังนั้นก่อนการบัดกรีทุกครั้งต้องทำความสะอาดพื้นผิวโลหะพื้นด้วยสารเคมี ที่เรียกว่า น้ำยาประสานหรือฟลักซ์ (Fluxes) ซึ่งฟลักซ์มีหน้าที่ทำความสะอาดพื้นผิวโลหะพื้นบริเวณที่จะทำการบัดกรี โดยฟลักซ์จะทำปฏิกิริยาและกำจัดชั้นฟิล์มออกไซด์ (Oxide) กับคราบสกปรกต่างๆ ให้หมดไปเหลือแต่ผิวหน้าโลหะพื้นที่แท้จริง และฟลักซ์มีหน้าที่ลดความตึงผิวของโลหะบัดกรีทำให้โลหะบัดกรีมีการไหลที่ดี กระจายตัวบนพื้นผิวโลหะพื้นได้ดี และช่วยเพิ่มภาวะเปียก อีกทั้งฟลักซ์ยังช่วยป้องกันพื้นผิวโลหะพื้นสัมผัสกับออกซิเจนจากอากาศ (Oxidation) เข้ามาปะปนบนพื้นผิวโลหะพื้นที่กำลังทำการบัดกรีเพราะปกติที่ผิวหน้าพื้นผิวโลหะพื้นจะมีชั้นฟิล์มออกไซด์อยู่แล้ว แต่จะมีเพิ่มมากขึ้นเมื่อพื้นผิวโลหะพื้นได้รับความร้อน ส่วนตกค้างของฟลักซ์หลังจากการบัดกรีต้องไม่กัดกร่อนรอยต่อหรือชิ้นงานโลหะ รวมทั้งไม่นำไฟฟ้าและสามารถกำจัดออกไปได้โดยใช้สารละลายหรือตัวทำละลายเคมี

ฟลักซ์ที่ใช้ในกระบวนการบัดกรีมีหลายรูปแบบ ได้แก่ ของแข็ง (Solid) กึ่งของแข็งของเหลว (Paste) และแบบของเหลว (Liquid) ซึ่งฟลักซ์ที่ดีจะต้องหลอมละลายที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะบัดกรี และฟลักซ์ที่หลอมละลายแล้วต้องแผ่กระจายตัวบนผิวหน้าโลหะพื้นบริเวณที่จะทำการบัดกรีและทำความสะอาดผิวหน้าโลหะพื้นก่อนที่โลหะบัดกรีจะหลอมละลายและแผ่เข้ามาแทนที่ฟลักซ์

น้ำยาประสานหรือฟลักซ์ แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทตามฤทธิ์การกัดกร่อน ได้แก่

1. น้ำยาประสานประเภทที่มีฤทธิ์การกัดกร่อน (Corrosive fluxes) หรือฟลักซ์อนินทรีย์ (Inorganic fluxes) เช่น สังกะสีคลอไรด์ (Zinc chloride) กรดเกลือ (Muratic acid) และเกลืออนินทรีย์ชนิดต่างๆโดยปกติจะใช้ฟลักซ์จำพวกนี้เมื่อมีปัญหาจากการเกิดออกซิเดชันระหว่างโลหะบัดกรีกับอากาศ เนื่องจากฟลักซ์กลุ่มนี้สามารถปกป้องรอยเชื่อมได้ค่อนข้างดี

กรดเกลือหรือ Muriatic acid เป็นกรดที่เข้มข้นและมีอันตรายมาก มีสีเหลือง ใช้เป็นน้ำยาประสานเมื่อถึงเวลาบัดกรี เหล็กอาบสังกะสีจะเดือดและมีควัน 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 (Brass) ทองแดง (Copper) และตะกั่ว (Lead)

การทำสังกะสีคลอไรด์ทำได้โดยการตัดแผ่นสังกะสีเป็นชิ้นเล็กๆ ใส่ลงในถ้วยที่บรรจุกรดเกลือ กรดเกลือจะละลายสังกะสี ไล่ก๊าซไฮโดรเจนระเหยขึ้นมาและน้ำกรดที่เหลือก็จะเป็นสังกะสีคลอไรด์ดังสมการ



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
แผ่นอะลูมิเนียม	น้ำยาประสานชนิดพิเศษ (Special flux)	

2. น้ำยาประสานประเภทที่ไม่มีฤทธิ์การกัดกร่อน (Noncorrosive fluxes) หรือฟลักซ์อินทรีย์ (Organic fluxes) เช่น ไชสัตว์ (Tallow) ยางสน (Rosin) ยางไม้ (Natural rosin) แอลกอฮอล์ กรดอินทรีย์ และเกลือของฮาโลเจน 7 (Halogen) โดยทั่วไปแล้วฟลักซ์ในกลุ่มนี้ใช้กับการบัดกรีอุปกรณ์ไฟฟ้าหรืออิเล็กทรอนิกส์

ยางสน เป็นน้ำยาประสานชนิดไม่มีฤทธิ์การกัดกร่อน เป็นผลิตภัณฑ์ธรรมชาติที่ได้จากการกลั่นน้ำมันสน ประกอบด้วยสารประกอบอินทรีย์ที่เรียกว่า Abietic acid มีฤทธิ์เป็นกรดอ่อนๆ ที่ไม่ทำให้เกิดการกัดกร่อน เมื่อได้รับความร้อนจะเริ่มอ่อนตัวที่อุณหภูมิ 50 - 70 องศาเซลเซียส และหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส โดยยางสนสามารถทำความสะอาดออกไซด์ที่บริเวณผิวหน้าของพื้นผิวโลหะพื้นได้ เช่น ทองแดง ใช้ในการบัดกรีสานที่เล็กๆ 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 จะประกอบด้วย ยางสนเป็นส่วนผสมหลัก โดยความแตกต่างระหว่างน้ำยาประสานประเภท R, RMA และ RA คือระดับของ Chemical activity ที่เพิ่มขึ้นจาก R ไปยัง RA และในน้ำยาประสานสมัยใหม่ส่วนใหญ่ยางสนคือสิ่งที่ได้จากการสังเคราะห์ทางเคมี โดยจะไม่มีผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติ

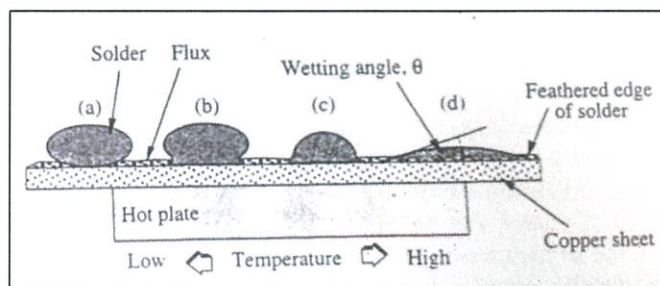
น้ำยาประสานประเภท OA คือกรดอินทรีย์ (Organic Acid) จะมีระดับ Chemical activity มากกว่า RA แต่ไม่เท่า IA

น้ำยาประสานประเภท IA คือกรดอนินทรีย์ (Inorganic Acid) ส่วนใหญ่จะเป็นกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid) และมีระดับ Chemical activity มากที่สุดในน้ำยาประสานทุกประเภท

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

น้ำยาประสานประเภท WS จะประกอบด้วยฮาไลด์ ซึ่งใช้กันมาหลายสิบปีแล้ว โดยเป็นน้ำยาประสานที่นิยมใช้ในการค้าเชิงพาณิชย์และมีการพัฒนาให้ใช้ได้อย่างกว้างขวางคือใช้ได้ในทุกระดับของ Chemical activity และถ้าใช้น้ำยาประสานประเภทนี้ในกระบวนการบัดกรี หลังบัดกรีเสร็จจะต้องมีการล้างทำความสะอาดเอาน้ำยาประสานที่ตกค้างบนบริเวณที่ทำการบัดกรีออก เพราะน้ำยาประสานที่ตกค้างอาจทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ อีกทั้งยากต่อการนำไปใช้ในกระบวนการบัดกรีแบบรีโฟลด์ด้วย

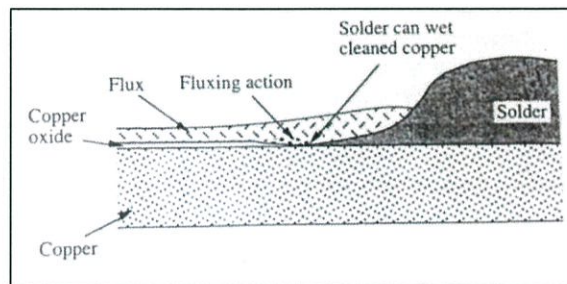
2.1.3.1 การทำงานของฟลักซ์



รูปที่ 2.4 การแผ่กระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะพื้นของแผ่นทองแดงที่ให้อุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ [18]

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

จากรูปที่ 2.5 บริเวณที่โลหะบัดกรีกำลังหลอมละลายและไหลบนผิวหน้าแผ่นทองแดงจะเห็นชั้นออกไซด์ของทองแดง ฟลักซ์ โลหะบัดกรี และออกไซด์ของโลหะบัดกรี โดยเกิดกระบวนการที่สำคัญ 2 อย่างคือ บนแผ่นทองแดงที่ร้อนโลหะบัดกรีเริ่มหลอมละลายและฟลักซ์เริ่มทำปฏิกิริยา คือ เริ่มกำจัดออกไซด์บนพื้นผิวหน้าของทองแดง พื้นผิวโลหะบัดกรีและป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อาจเกิดขึ้นอีก อีกทั้งชนิดของฟลักซ์ที่ใช้โดยทั่วไปขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นของออกไซด์ของพื้นผิวที่จะบัดกรี ถ้าชั้นออกไซด์บางจะใช้ฟลักซ์ที่รุนแรงน้อย (Low activity) [18]

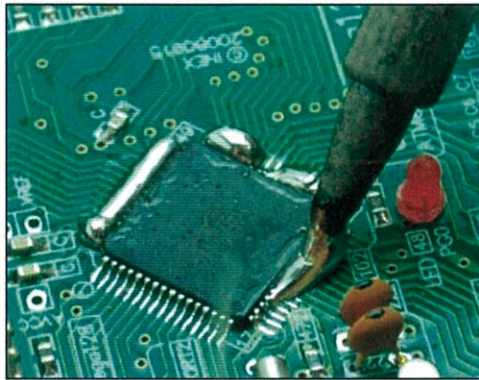


รูปที่ 2.5 การทำงานของฟลักซ์

2.1.4 วิธีการบัดกรี

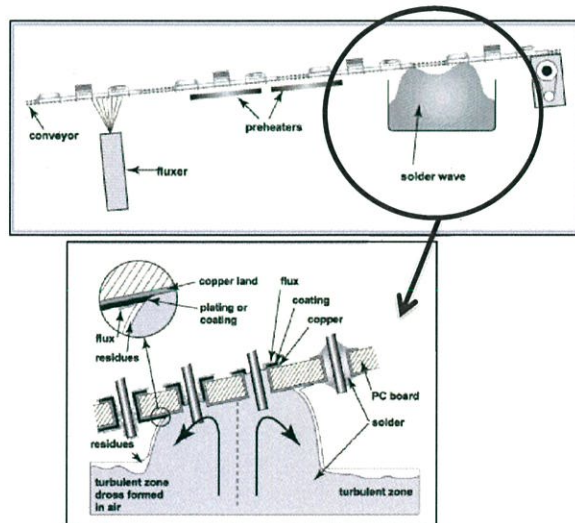
การบัดกรีเป็นที่นิยมอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมการผลิตวงจรไฟฟ้าและวงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์ รวมไปถึงอุตสาหกรรมเครื่องประดับด้วย การบัดกรีส่วนใหญ่จะมีวิธีการคล้ายกับวิธีการเล่นประสานหรือการบัดกรีแข็ง (Brazing) เช่น การบัดกรีในเตา (Furnace Soldering : FS) การบัดกรีด้วยความต้านทาน (Resistance Soldering : RS) การบัดกรีด้วยอินฟราเรด (Infrared Soldering : IRS) และการบัดกรีแบบจุ่ม (Dip Soldering : DS) เป็นต้น แต่จะมีบางวิธีที่สามารถทำได้ เฉพาะการบัดกรีเท่านั้น คือไม่สามารถทำการเล่นประสานได้ ได้แก่ การบัดกรีแบบใช้มือ การบัดกรีแบบคลื่น และการบัดกรีแบบรีโฟลว์ เป็นต้น โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การบัดกรีแบบใช้มือ (Hand soldering) เป็นการบัดกรีด้วยตนเองโดยใช้หัวแร้งและลวดบัดกรี ส่วนใหญ่การบัดกรีแบบนี้จะบัดกรีชิ้นงานที่เป็นข้อต่อขนาดเล็กหรือเป็นแผ่นวงจรพิมพ์ที่ไม่ซับซ้อนมากนัก



รูปที่ 2.6 การบัดกรีแบบใช้มือ

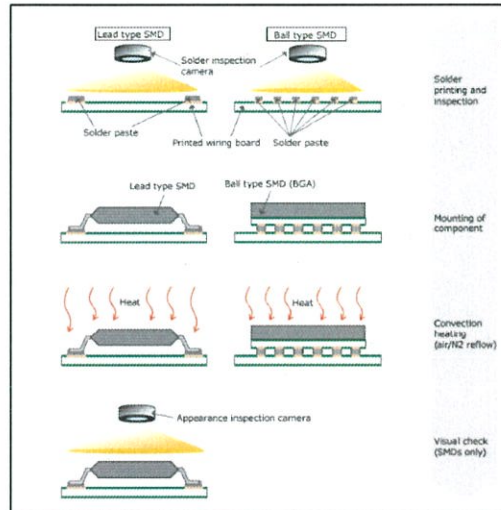
- การบัดกรีแบบคลื่น (Wave soldering) เป็นการบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ลงบนแผ่นวงจรพิมพ์หรือแผ่น PCB (Printed circuit board) โดยแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ติดอยู่จะเคลื่อนที่ด้วยสายพานลำเลียงไปยังสถานีฟลักซ์ก่อนเพื่อทำการพ่นฟลักซ์บนแผ่นวงจรพิมพ์ หลังจากนั้นแผ่นวงจรพิมพ์จะเคลื่อนที่ไปบนอ่างของโลหะบัดกรีหลอมเหลว ซึ่งอ่างบัดกรีจะมีปั๊มจุ่มเพื่อสร้างคลื่นของโลหะบัดกรีหลอมเหลว โลหะบัดกรีหลอมเหลวดังกล่าวจะถูกดูดและพ่นไปยังด้านล่างของแผ่นวงจรพิมพ์เพื่อให้โลหะบัดกรีเชื่อมต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ากับวงจรดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การบัดกรีแบบคลื่น

- การบัดกรีแบบรีโฟลว์ (Reflow soldering) เป็นการบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดติดตั้งบนพื้นผิว (Surface mount components) กับแผ่นวงจรพิมพ์ ในกระบวนการนี้จะใช้โลหะบัดกรีที่อยู่ในรูปของครีม (Paste) โดยโลหะบัดกรีจะผสมอยู่กับฟลักซ์และตัวยึด (Binder) ซึ่งจะถูกสกรีนลงบนตำแหน่งที่ต้องการบัดกรีบนแผ่นวงจรพิมพ์แล้ววางอุปกรณ์

อิเล็กทรอนิกส์ลงบนโลหะบัดกรี หลังจากนั้นแผ่นวงจรพิมพ์จะถูกให้ความร้อนจนกระทั่งโลหะบัดกรีหลอมละลายและเชื่อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ากับวงจร เมื่ออุณหภูมิลดลงโลหะบัดกรีก็นกลายเป็นของแข็งที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การบัดกรีแบบรีโฟลว์

2.2 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-Free Solders)

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์มีการใช้โลหะบัดกรีเป็นโลหะเติม (Filler metal) ในการเชื่อมต่อชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆเข้ากับแผงวงจร (Printed circuit board) ด้วยวิธีการบัดกรี ซึ่งโลหะบัดกรีดั้งเดิมที่มีการใช้อยู่ทั่วไปจะมีส่วนผสมของตะกั่วและดีบุก (Sn-Pb) ซึ่งตะกั่วนั้นถือเป็นสารอันตรายที่ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมและร่างกายมนุษย์ จึงทำให้คณะกรรมการการยุโรปหรืออีซี (EC-European Commission) ซึ่งเป็นหน่วยงานที่กำหนดนโยบายและการบริหารงานร่วมของประเทศในเครือสหภาพยุโรปหรืออียู (EU- European Union) ได้ออกข้อบังคับใช้ตั้งแต่วันที่ 1 กรกฎาคม ค.ศ.2006 กำหนดให้ตะกั่วเป็นสารต้องห้ามตามระเบียบ RoHs (Restriction on Hazardous Substances) และ WEEE (Waste from Electrical and Electronic Equipment) จึงทำให้อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์มีความจำเป็นต้องทำการปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิต และมีการพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-free solder) ขึ้นมาทดแทนโลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมของตะกั่วและดีบุก โดยโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่พัฒนาขึ้นมาจำเป็นต้องมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าหรือเทียบเท่ากับโลหะบัดกรีแบบเดิม ตัวอย่างของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว เช่น กลุ่มโลหะผสมของดีบุกและทองแดง กลุ่มโลหะผสมของดีบุก ทองแดง และเงิน และกลุ่มโลหะผสมของดีบุกและสังกะสี เป็นต้น จะเห็นได้ว่าโลหะหลักที่ยังใช้เป็นส่วนประกอบของโลหะบัดกรียังคงเป็นดีบุกอยู่นั่นเอง ทั้งนี้เนื่องมาจากดีบุกเป็นโลหะที่สามารถหาได้ง่าย มีคุณสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสม เช่น จุดหลอมเหลวต่ำ นำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดี และโลหะผสมของดีบุกยังมีคุณสมบัติในการเป็นโลหะประสานที่ดี ซึ่งการวิจัยและพัฒนาโลหะบัดกรีชนิดใหม่นี้ยังต้องการการศึกษาในเรื่องของคุณสมบัติต่างๆของโลหะบัดกรีเหล่านี้ก็เป็นอันมากจึงจะนำไปใช้งานได้อย่างเหมาะสมและปลอดภัย

ในปัจจุบันโลหะบัดกรีที่สามารถนำมาใช้แทนตะกั่วบัดกรีได้หลายชนิด ได้แก่ สารประกอบระหว่างโลหะ 2 ชนิดเช่น Sn-Ag, Sn-Cu, Sn-Zn, Sn-Bi และ Sn-In หรือเป็นสารประกอบระหว่างโลหะ 3 ชนิด เช่น Sn-Ag-Cu, Sn-Ag-Bi และ Sn-Zn-Bi ซึ่งโลหะบัดกรีแต่ละชนิดมีลักษณะเด่นแตกต่างกันไป เช่น Sn-Zn มีจุดหลอมเหลวที่ต่ำใกล้เคียงกับ Sn-Pb รวมถึงมีราคาค่อนข้างถูก แต่มีข้อเสีย คือ เกิดออกซิเดชันได้ง่าย โลหะบัดกรีที่นิยมใช้กันค่อนข้างมากในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์คือโลหะบัดกรีในกลุ่ม Sn-Ag-Cu ซึ่งเป็นโลหะบัดกรีที่มีราคาที่สูงเนื่องจากมี Ag เป็นส่วนผสม แต่มีข้อดีทางด้านคุณสมบัติทางกล รวมถึงความสามารถในการบัดกรีที่โดดเด่นกว่าโลหะบัดกรีชนิดอื่น จึงได้มีการใช้งานและปรับปรุงส่วนผสมของ Sn-Ag-Cu เพื่อให้ได้ส่วนผสมที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานมากที่สุด เช่น Sn-3.8Ag-0.7Cu, Sn-3.9Ag-0.6Cu หรือ Sn-4Ag-0.5Cu หรืออาจมีการเติมธาตุบางชนิดเพิ่มเข้าไปเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านจุดหลอมเหลวรวมทั้งคุณสมบัติทางกล ธาตุที่นิยมเติมเข้าไปเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะบัดกรีมีหลายธาตุด้วยกัน เช่น Bi, Sb, Ge, In, Ni, Co และ Mg ซึ่งแต่ละธาตุเมื่อเติมเข้าไปจะทำให้โลหะบัดกรีมีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไป อย่างไรก็ตามปัญหาที่สำคัญอีกประการหนึ่งของโลหะบัดกรีในกลุ่ม Sn-Ag-Cu คือจุดหลอมเหลวที่สูง ซึ่งสูงกว่าตะกั่วบัดกรีชนิดยูเทกติก Sn-Pb ที่มีจุดหลอมเหลวเพียง 183 องศาเซลเซียส ดังนั้นเมื่อนำไปใช้งานสามารถก่อให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์รวมถึงแผ่นวงจรพิมพ์ได้ [4]

2.2.1 คุณลักษณะเบื้องต้นในการพิจารณาเลือกใช้โลหะบัดกรีแบบไร้สารตะกั่ว

1. อุณหภูมิหลอมเหลวใกล้เคียงกับโลหะบัดกรีดั้งเดิม โดยทั่วไปอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะบัดกรีแบบไร้สารตะกั่วจะสูงกว่าตะกั่วบัดกรีชนิด 63Sn/37Pb การที่โลหะบัดกรีมีอุณหภูมิหลอมเหลวสูง เวลาทำการบัดกร้อาจทำให้ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์เสียหายได้หรืออาจทำให้แผ่นวงจรพิมพ์เกิดการเปลี่ยนสีหรือบิดงอเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงเกินไป
2. มีสมบัติด้าน Wettability และ Solderability ที่ดี
3. มีคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ความแข็งแรง ความแข็ง ความทนทานและความสวยงามของรอยบัดกรีต้องไม่ด้อยไปกว่าตะกั่วบัดกรีชนิด 63Sn/37Pb
4. โลหะบัดกรีต้องสามารถถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และสามารถนำไฟฟ้าได้ดี โดยไม่ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ลดลง
5. มีสมบัติด้านการล้าที่ดี
6. มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันต่ำ
7. สามารถใช้กับระบบพ्लักซ์เหลวที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบัน
8. ต้องไม่เป็นพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมตามข้อบังคับของ RoHs และ WEEE
9. ต้องมีราคาถูก หาได้ง่ายเพราะราคาของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว โดยทั่วไปจะสูงกว่าตะกั่วบัดกรี 63Sn/37Pb ส่งผลให้ต้นทุนสูงขึ้น แต่ราคาของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันมีแนวโน้มที่จะต่ำลงเรื่อยๆ
10. ต้องใช้ได้กับเครื่องหลอมโลหะบัดกรีที่มีอยู่โดยไม่ต้องดัดแปลงมากหรือต้องซื้อระบบใหม่ ผู้ผลิตอาจยอมรับการดัดแปลงเล็กน้อย เช่น เพิ่มระบบจ่ายแก๊สไนโตรเจน (N_2) ในเครื่องบัดกรีแบบคลื่น หรือเครื่องบัดกรีแบบรีโฟลว์ เพื่อปรับปรุงคุณภาพของรอยบัดกรี เนื่องจากต้นทุนของการติดตั้งระบบจ่ายแก๊สไนโตรเจนโดยทั่วไปจะไม่สูงมากนัก
11. โลหะบัดกรีควรมีจุดหลอมเหลวคงที่ เนื่องจากในการผลิตสินค้าปริมาณมากๆ (Mass volume) ต้องมีการควบคุมความผันแปรต่างๆ ในกระบวนการผลิตเพื่อไม่ให้ปริมาณของเสียในการผลิตมากเกินไป ในการผลิตโลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมของโลหะ

หลายๆ ชนิดจะควบคุมส่วนผสมให้คงที่ได้ยาก จึงทำให้โลหะบัดกรีเหล่านี้มีจุดหลอมเหลวที่มีลักษณะเป็นช่วงอุณหภูมิไม่คงที่ ดังนั้นการเลือกใช้โลหะบัดกรีประเภทนี้อาจทำให้ประสบปัญหาในกระบวนการผลิตได้

12. ผู้ผลิตแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดติดตั้งบนพื้นผิว (Surface mounted devices : SMD) หลายรายยังไม่สามารถเลิกใช้สารตะกั่วในเวลาอันสั้น ทำให้ตัวของอุปกรณ์ SMD หรือสายวงจบบนแผ่นวงจรพิมพ์บางชนิดก็ยังมีสารตะกั่วเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงความสามารถในการเชื่อมประสานกันระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วกับสารตะกั่วที่อยู่บนตัวของอุปกรณ์ SMD และแผ่นวงจรพิมพ์ด้วย ซึ่งถ้าไม่สามารถเชื่อมประสานกันได้ดีก็อาจทำให้จุดบัดกรีนั้นไม่แข็งแรงเพียงพอต่อการนำไปใช้งานหรือมีผลกับการใช้งานของผลิตภัณฑ์ในระยะยาว (Reliability)

2.2.2 โลหะทดแทนสารตะกั่ว

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

โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีการพัฒนา เพื่อทดแทนโลหะบัดกรีชนิดผสมตะกั่ว สามารถจัดแบ่งกลุ่มตามช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวออกเป็น 4 กลุ่ม [11] 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

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

ตารางที่ 2.5 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 200 ถึง 230 องศาเซลเซียส

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

4. กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวสูงมากกว่า 230 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 2.6 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวสูงมากกว่า 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 องศาเซลเซียส (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
91.8Sn-3.4Ag-4.8Bi	208-215	0.272
90Sn-7.5Bi-2Ag-0.5Cu	186-212	0.273
96.2Sn-2.5Ag-0.8Cu-0.5Sb	213-219	0.267

อัตราส่วน	จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	ความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (ปอนด์ต่อลูกบาศก์นิ้ว)
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

โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วได้ถูกพัฒนาขึ้นเป็นจำนวนมาก บางชนิดถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆบ้างแล้วและมีอีกจำนวนมากที่มีเพียงการศึกษาวิจัยเท่านั้น แต่ยังไม่มีการนำไปประยุกต์ใช้

2.2.3 แนวทางในการเลือกธาตุที่เป็นส่วนผสมที่เหมาะสมกับขบวนการผลิต

2.2.3.1 ธาตุเจือที่ใช้ผสมกับดีบุกเพื่อผลิตเป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

โลหะบัดกรีทั่วไปจะมีส่วนผสมของโลหะดีบุกเป็นหลัก เนื่องจากดีบุกมีสมบัติ Wettability และการแผ่กระจายเวลาบัดกรีได้ดี ส่วนธาตุเจือที่นำมาผสมกับดีบุกทำเป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วมีหลายชนิดด้วยกัน ธาตุโลหะเจือที่สำคัญ ได้แก่ เงิน (Ag) อินเดียม (In) บิสมัท (Bi) พลวง (Sb) ทองแดง (Cu) และสังกะสี (Zn) เป็นต้น

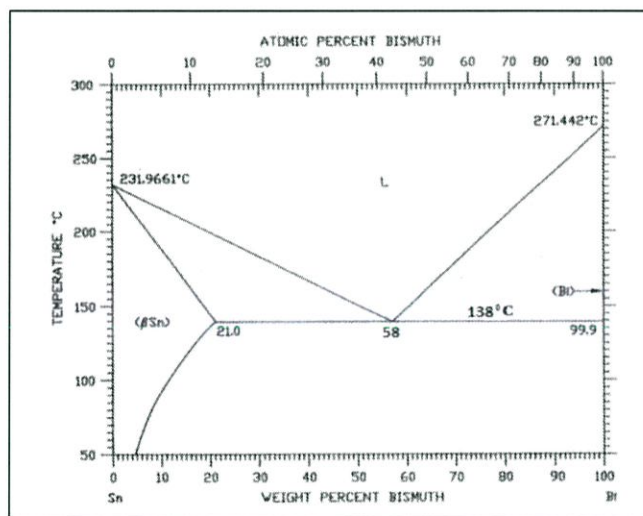
2.2.3.2 สมบัติของธาตุเจือชนิดต่างๆ [7]

1. เงิน (Ag) เป็นโลหะที่ใช้เป็นส่วนผสมในโลหะบัดกรี มีราคาสูง โลหะเงินช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะบัดกรี ทำให้สมบัติการแผ่กระจายดีขึ้น และมีจุดหลอมเหลวต่ำลง
2. อินเดียม (In) เป็นโลหะที่มีราคาค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับธาตุเจือชนิดอื่น โลหะบัดกรีที่มีอินเดียมผสมจะมีราคาแพง แต่มีข้อดี คือ อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ จึงเป็นข้อดีสำหรับการใช้งานกับอุปกรณ์ที่ทนความร้อนได้ต่ำ และอินเดียมยังมีความสามารถในการลดการเกิดออกซิเดชันและเพิ่มสมบัติความเหนียว (Ductility) ให้ดีขึ้น
3. บิสมัท (Bi) โลหะดีบุกผสมบิสมัทที่อัตราส่วน 42Sn-58Bi มีโครงสร้างแบบยูเทคติก โลหะบัดกรีในกลุ่มนี้มีจุดเด่นคือ มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำมากคือ 138 องศาเซลเซียส จึงเป็นข้อดี คือ สามารถใช้กับอุปกรณ์ที่ไม่สามารถทนความร้อนในการบัดกรีสูงๆ ได้ ลักษณะโครงสร้างของโลหะบัดกรีชนิดนี้จะมีลักษณะเป็นแผ่นแบบ Lamellar มีความสามารถในการเชื่อมประสาน (Solderability or Wetting) ที่ดีมาก แต่มีข้อเสียคือ บิสมัทมีราคาสูง
4. พลวง (Sb) การเติมพลวงในปริมาณที่พอเหมาะจะช่วยเพิ่มสมบัติการต้านการคืบและการต้านความล้าของโลหะบัดกรีให้ดีขึ้น แต่พลวงมีข้อเสียคือ ทำให้สมบัติ Wettability และการแผ่กระจายของโลหะบัดกรีด้อยลง
5. ทองแดง (Cu) เมื่อผสมดีบุกกับทองแดงในอัตราส่วน 99.3Sn-0.7Cu จะทำให้เกิดโครงสร้างยูเทคติก มีจุดหลอมเหลวที่ 227 องศาเซลเซียส โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟส Cu_6Sn_5 ลักษณะเป็นแท่งฝังอยู่ในเนื้อดีบุก ทองแดงจะทำให้โลหะบัดกรีมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ข้อเสียของโลหะบัดกรีในกลุ่ม Sn-Cu คือ การที่มีธาตุเจือผสมอยู่น้อยจึงอาจเกิดเส้นใยดีบุก (Tin whisker) ขึ้นได้ ซึ่งเป็นปัญหาทำให้เกิดกระแสไฟลัดวงจร

6. สังกะสี (Zn) เป็นโลหะที่มีจุดเด่นด้านอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำและราคาถูก โลหะบัดกรีชนิดดีบุก-สังกะสีที่จุดยูเทคติก (Sn-9 wt.% Zn) มีอุณหภูมิจุดหลอมเหลวที่ 199 องศาเซลเซียส ซึ่งใกล้เคียงกับโลหะบัดกรีชนิดดีบุก-ตะกั่วที่จุดยูเทคติก (183 องศาเซลเซียส) Sn-9 wt.% Zn ประกอบด้วยเฟส 2 เฟส คือ Sn matrix และ Hexagonal Zn ซึ่งรวมตัวกับดีบุกอยู่ในลักษณะสารละลายของแข็งที่ประกอบด้วยดีบุกน้อยกว่า 1% โครงสร้างจุลภาคของ Sn-9Zn จะมีลักษณะเป็นแผ่นบางสลับกันระหว่างเฟส Sn rich และ Zn rich ซึ่งทั้งดีบุกและสังกะสีต่างก็สามารถทำปฏิกิริยากับโลหะพื้นที่เป็นทองแดงได้ โลหะบัดกรีในกลุ่ม Sn-Zn นี้มีข้อดีบางประการ เช่น Zn สามารถเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ง่าย เกิดเป็นสังกะสีออกไซด์ (Dross) มาก เมื่อใช้ในกระบวนการบัดกรีแบบ Wave soldering นอกจากนี้แล้ว Zn ยังไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับสารเคมีที่ผสมอยู่ใน ฟลักซ์ที่ใช้กับโลหะบัดกรีในกลุ่ม Sn-Pb ทำให้เกิดการกัดกร่อน

2.3 โลหะบัดกรี Sn-58Bi

โลหะผสม Sn-58Bi คือ โลหะผสมระหว่างดีบุกและบิสมัทที่มีอัตราส่วนคือ 42%Sn - 58%Bi ซึ่งมีโครงสร้างแบบยูเทคติก เป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีคุณสมบัติดีกว่าหรือเทียบเท่ากับโลหะผสม Sn-Pb โดยจุดเด่นของโลหะบัดกรีกลุ่มนี้คือ มีอุณหภูมิหลอมเหลว 138 องศาเซลเซียส ราคาต่ำ มีความสามารถในการเชื่อมประสานที่ดี และไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม การที่โลหะบัดกรีนี้มีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ต่ำมาก จึงเหมาะสำหรับการบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่สามารถบัดกรีที่อุณหภูมิสูงๆ ได้ รวมไปถึงชิ้นส่วนที่มีพื้นผิวไวต่ออุณหภูมิ โดยลักษณะโครงสร้างของโลหะผสม Sn-58Bi แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 เฟสไดอะแกรมระหว่างดีบุกและบิสมัท

จากเฟสไดอะแกรมระหว่างดีบุกและบิสมัท บริเวณที่อยู่ปลายด้านซ้ายและด้านขวาของเฟสไดอะแกรมคือบริเวณ Terminal solid solution ซึ่งมีความสามารถในการละลายที่จำกัด กล่าวคือเฟส β เป็นโลหะผสมที่มีดีบุกเป็นตัวทำละลาย และมีบิสมัทเป็นตัวถูกละลาย โดยบิสมัทสามารถละลายได้มากที่สุด 21.0% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 138 องศาเซลเซียส ส่วนเฟสที่อยู่ปลายด้านขวาของเฟสไดอะแกรม จะเป็นโลหะผสมที่มีบิสมัทเป็นตัวทำละลายและดีบุกเป็นตัวถูกละลาย โดย

ดีบุกสามารถละลายได้มากที่สุด 0.1% โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 138 องศาเซลเซียส ดีบุกจะเริ่มหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 231.97 องศาเซลเซียส ส่วนบิสมัทนั้นเริ่มหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 271.44 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงโลหะผสมนี้จะแข็งตัวที่อุณหภูมิตั้งที่ 138 องศาเซลเซียส ซึ่งเรียกอุณหภูมินี้ว่า อุณหภูมิยูเทคติก (Eutectic temperature) เกิดเป็นโลหะผสมที่มีโครงสร้างแบบยูเทคติก

2.3.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ (Physical properties of solder alloy)

ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ (Physical properties of solder alloy) [19]

Alloy composition	42% Sn-58% Bi
Liquidus	138°C
Solidus	138°C
Ultimate tensile strength	8766 psi (60.4 MPa)
Yield strength (0.2% Offset)	7119 psi (49.1MPa)
Elastic modulus	1720 ksi (11.9 GPa)
Total elongation	46 %
Uniform elongation	3%
Strength coefficient	9829 psi (67.8 Mpa)
Density	8.56 g/ml ³
Hardening Exponent	0.029

2.3.2 คุณสมบัติทางกล (Mechanical properties)

โลหะบัดกรี 42Sn-58Bi จะมีความแข็งแรงแต่เปราะมากกว่าโลหะบัดกรี 63Sn-37Pb ที่อุณหภูมิห้อง และจะมีความแข็งแรงลดลงจนหลอมละลายที่อุณหภูมิหลอมละลาย เมื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติเชิงกลของ Sn-58Bi กับ 63Sn-Pb จะพบว่าโลหะผสม Sn-58Bi มีคุณสมบัติดังนี้

1. มีค่า Yield และความแข็งแรงสูงที่อุณหภูมิห้อง แต่ความแข็งแรงจะลดลงที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส
2. อายุการใช้งานเนื่องจากการล้าจากความร้อน อยู่ในช่วงอุณหภูมิคงที่คือ 20 องศาเซลเซียส ถึง 70 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะเมื่ออยู่ภายใต้ความเครียดแบบคงรูปมากๆ (Plastic strain)
3. จะมีความเปราะเมื่ออยู่ในลักษณะเป็นก้อนหรือผลึก แต่จะมีสมบัติแบบ Superplastic เมื่ออยู่ในลักษณะแท่งลวด

นอกจากนี้หากมีการเติมธาตุอื่นเข้าไปจะทำให้โลหะบัดกรีมีคุณสมบัติแตกต่างออกไป เช่น การเติม Ag หรือ Au ในปริมาณเล็กน้อย จะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติความเหนียวและอายุการใช้งานเนื่องจากการล้าจากความร้อน (Thermal fatigue life) ของโลหะผสมเพิ่มสูงขึ้น และในระหว่างกระบวนการบัดกรี หากมีการสลายตัวของวัสดุที่ใช้เป็นโลหะพื้นหรือมีธาตุอื่นเจือปนเข้าไปในโลหะบัดกรี จะส่งผลทำให้คุณสมบัติในการหลอมละลายเปลี่ยนไป รวมถึงคุณสมบัติทางกลที่เปลี่ยนไปของรอยต่อที่เกิดจากการบัดกรีด้วย

2.4 การศึกษาวัสดุที่ใช้สร้างแม่พิมพ์

หลังจากทำการออกแบบแม่พิมพ์ด้วยโปรแกรม Solid Work ที่ใช้ในการผลิตชิ้นงานทดสอบ ต่อมาจะเป็นการเลือกวัสดุ พร้อมทั้งศึกษาคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้สร้างแม่พิมพ์

วัสดุหลักที่ใช้ในการสร้างแม่พิมพ์คือโลหะ ซึ่งหลักการเลือกโลหะที่ใช้สร้างนั้นจะคำนึงถึงเรื่องคุณสมบัติของวัสดุ เช่น คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติเชิงกล การต้านทานการสึกหรอ ความแข็ง การต้านทานการเกิดสนิม ราคา เป็นต้น และสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงคือโครงสร้างอะตอมและองค์ประกอบ (Steel structure) ของโลหะที่จะนำมาใช้ เนื่องจากโลหะที่ใช้สร้างแม่พิมพ์บางชนิดหากได้รับการถ่ายเทความร้อนจากชิ้นงานอาจส่งผลให้เกรนของโลหะที่ใช้สร้างแม่พิมพ์เปลี่ยนคุณสมบัติได้ และอาจทำให้ผิวโลหะของแม่พิมพ์ในส่วนที่ขัดเงาไว้อย่างดีแบบ Mirror finished เกิดเป็นรูพรุน หรือเนื้อเกรนของเหล็กแม่พิมพ์ส่วนที่ขัดมันไว้หลุดขึ้นมาจากผิวหรือเข้าแม่พิมพ์ ส่งผลให้ผิวชิ้นงานทดสอบที่ต้องการมีตำหนิ ดังนั้นการศึกษาคูสมบัติของโลหะที่จะใช้สร้างแม่พิมพ์จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง โดยเหล็กที่เลือกใช้ในการสร้างแม่พิมพ์จะอยู่ในกลุ่มของเหล็กกล้า ซึ่งจะเลือกใช้เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel)

2.4.1 คุณสมบัติทั่วไปและคุณสมบัติทางกายภาพของเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel)

ค่าความหนาแน่นสูงของเหล็กกล้าไร้สนิมจะแตกต่างจากวัสดุอื่นๆ อย่างเห็นได้ชัดในส่วนของคุณสมบัติเกี่ยวกับความสามารถทนความร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิม มีข้อสังเกต 3 ประการคือ

1. การที่มีจุดหลอมเหลวสูง ทำให้มีอัตราความคืบติ เมื่อเทียบกับเซรามิกที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1000 องศาเซลเซียส
2. การที่มีค่านำความร้อนระดับปานกลาง ทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมเหมาะที่จะใช้ในงานที่ต้องทนความร้อน (ตู้คอนเทนเนอร์) หรือต้องการคุณสมบัตินำความร้อนได้ดี (เครื่องถ่ายความร้อน)
3. การมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวระดับปานกลาง จึงสามารถใช้ความยาวมาก ๆ ได้โดยใช้ตัวเชื่อมน้อย

2.4.2 คุณสมบัติเชิงกล

โดยทั่วไปเหล็กกล้าไร้สนิมจะมีส่วนผสมของเหล็กประมาณ 70-80% ทำให้มีคุณสมบัติของเหล็กที่สำคัญ 2 ประการคือ ความแข็งและความแกร่ง เมื่อนำคุณสมบัติเชิงกลเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดอื่น จะเห็นได้ว่าพลาตินิกซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางมีความแข็งแรง และโมดูลัสความยืดหยุ่นต่ำ ส่วนเซรามิกมีความแข็งแรงและความเหนียวสูงแต่มีความแกร่งหรือความสามารถรับแรงกระแทกโดยไม่แตกหักต่ำ

เหล็กกล้าไร้สนิม ให้ค่าเป็นกลางของทั้งความแข็ง ความแกร่ง และความเหนียว เนื่องจากมีส่วนผสมของธาตุเหล็กอยู่มาก และจะมีเพิ่มขึ้นอีกในชนิดออสเทนนิค ค่าความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate tensile strength) ของเหล็กกล้าไร้สนิม ไม่ว่าจะชนิดที่อ่อนตัวง่าย ซึ่งสามารถทำให้ขึ้นรูปเย็นได้ดี เช่น การขึ้นรูปลึก (Deep drawing) จนถึงชนิดความแข็งแรงสูงสุด ซึ่งได้จากการขึ้นรูปเย็นหรือการทำให้เย็นตัวโดยเร็ว (Quenching) หรือชนิดชุบแข็ง แบบตกผลึก (Precipitation hardening) ซึ่งเหมาะใช้ทำสปริง [9]

2.4.3 ความต้านทานการกัดกร่อน

โลหะทุกชนิดทั่วไปจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ เกิดเป็นชั้นฟิล์มออกไซด์บนผิวโลหะ โดยออกไซด์ที่เกิดบนผิวเหล็กทั่วไป จะทำปฏิกิริยาออกซิไดซ์ และทำให้เกิดสภาพพื้นผิวเหล็กผุกร่อน ที่เราเรียกว่า เป็นสนิม แต่เหล็กกล้าไร้สนิม

เป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ (น้อยกว่า 2%) ของน้ำหนัก หรือเป็นโลหะผสม (Alloy) มีส่วนผสมของโครเมียม อย่างน้อย 10.5% หรือโลหะอื่นแตกต่างกันไป ตามชนิดของคุณสมบัติเชิงกล ทำให้เหล็กกล้ามีความต้านทานการเกิดสนิมได้ โดยโครเมียมที่เป็นส่วนผสมหลักของเหล็กกล้าไร้สนิมจะทำให้เกิดการสร้างฟิล์มโครเมียมออกไซด์ (Chromium oxide film : CrO_2 ที่เรียกว่า Passive film) ที่มองไม่เห็นเกาะติดแน่นอยู่ที่ผิวหน้า ทำให้เหล็กกล้ามีความต้านทานการกัดกร่อน ถ้าฟิล์มที่ผิวหน้านั้น ถูกทำลายไม่ว่าจากแรงกล หรือสารเคมีใดๆ ออกซิเจนที่มีอยู่ในบรรยากาศจะเข้าทำปฏิกิริยากับโครเมียมและสร้างฟิล์มโครเมียมออกไซด์ทดแทนชั้นใหม่ด้วยตัวมันเอง

นอกจากนี้ ยังขึ้นอยู่กับสภาพการกัดกร่อน ได้แก่ ความรุนแรง ของปฏิกิริยาออกซิไดซ์ ความเป็นกรดปริมาณสารละลายคลอไรด์ และอุณหภูมิ โดยทั่วไปแล้วการเพิ่มปริมาณ โครเมียม (Cr) จะช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม การเติมนิเกิล (Ni) จะช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนโดยทั่วไป ให้ทนสภาวะกัดกร่อนรุนแรงได้ ส่วนโมลิบดีนัมจะช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนเฉพาะที่ เช่น การกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting corrosion)

ในทางปฏิบัติเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดเฟอร์ริติก มีการใช้งานจำกัดในสภาพการกัดกร่อนปานกลางและในสภาพชนบท ทั้งชนิดเฟอร์ริติกและออสเทนนิติก สามารถใช้ทำอุปกรณ์เครื่องใช้ในครัวเรือนได้ แต่เนื่องจากชนิดออสเทนนิติกสามารถทนการกัดกร่อนได้ดี และทำความสะอาดง่าย จึงนิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร และเครื่องดื่ม นอกจากนี้ชนิดออสเทนนิติกยังทนการกัดกร่อนจากสารเคมีหลายประเภทได้แก่ กรดอัลคาลายด์ เป็นต้น ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเคมี และกระบวนการผลิตต่าง ๆ

2.4.4 เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel)

แบ่งออกเป็น 5 กลุ่ม ดังนี้

1. กลุ่มเฟอร์ริติก (Ferritic stainless steel) จุลโครงสร้างแบบเฟอร์ไรต์ แม่เหล็กดูดติด มีส่วนผสมของคาร์บอนต่ำ และ มีโครเมียม เป็นส่วนผสมหลัก คือประมาณ 10.5-29% มักนำไปใช้ทำถังน้ำต่างๆ (Tank) ทำผนัง เครื่องใช้ภายในบ้าน ทำเครื่องครัว ทำเฟอร์นิเจอร์ ฯลฯ
ส่วนผสมทางเคมี Cr 10.5-29% C \leq 0.1% (คาร์บอนน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.1%) Ni 0%
เกรดที่พบ AISI 430, 430Ti, 439, 409 (เรียกเป็นซีรีส์)
2. กลุ่มมาร์เทนซิติก (Martensitic stainless steel) จุลโครงสร้างแบบมาร์เทนไซด์แม่เหล็กดูดติด โดยทั่วไปจะมีโครเมียมผสมอยู่ 10.5% -17 % และมีส่วนผสมของคาร์บอนในระดับปานกลาง มักนำไปใช้ทำส้อม มีด ใบมีดโกน เครื่องมือแพทย์ และเครื่องมือวิศวกรรมอื่นๆ ซึ่งต้องการคุณสมบัติเด่นในด้าน การต้านทานการสึกกร่อน และ ความแข็งแรงทนทาน
ส่วนผสมทางเคมี Cr 10.5-17% C $>$ 0.1% (คาร์บอนมากกว่า 0.1%) Ni 0% (ไม่มีนิเกิลผสมอยู่) มีค่า Yield strength และค่า Ultimate tensile strength สูงมากในสภาพที่ผ่านกระบวนการอบชุบ แต่จะมีค่า Elongation ต่ำ
เกรดที่พบ AISI 410, 420 (เรียกเป็นซีรีส์)
3. กลุ่มออสเทนนิติก (Austenitic stainless steel) จุลโครงสร้างแบบออสเทนไนต์ แม่เหล็กดูดไม่ติด นอกจากส่วนผสมของโครเมียม 16-18% แล้ว ยังมีนิเกิล ผสมอยู่ 8-13% ที่ช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนอีกด้วย ชนิดออสเทนนิติก เป็นที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางมากที่สุดในบรรดาสแตนเลสด้วยกัน ส่วนออสเทนนิติกที่มีโครเมียมผสมอยู่สูง 20% - 25% และนิเกิล 1% -20% จะสามารถทนการเกิดออกไซด์ได้ดีที่อุณหภูมิสูง ซึ่งใช้ในส่วนประกอบของเตาหลอม ท่อนำความร้อน และแผ่นกันความร้อนในเครื่องยนต์ จะเรียกว่า เหล็กกล้าไร้สนิม ชนิดทนความร้อน (Heat resisting steel)

ส่วนผสมทางเคมี Cr 16-18% C < = 0.08 % (คาร์บอนน้อยกว่า 0.08 %) Ni 8-13% (แม่เหล็กจึงดูไม่ติด)
เกรดที่พบ AISI 304, 316, 304L, 316 L (** L = เน้นงานเชื่อม)

4. กลุ่มดูเพล็กซ์ (Duplex) แม่เหล็กดูดติด มีโครงสร้างผสมระหว่างเฟอร์ไรต์และออสเทนไนต์ มีโครเมียมผสมอยู่ประมาณ 20% -25% และนิกเกิล 4-7 % เหล็กชนิดนี้ มีค่า Yield strength และค่า Elongation สูง จึงเรียกได้ว่า เหล็กชนิดนี้มีทั้งความแข็งแรง และความเหนียว (Ductility) ที่สูงเป็นเลิศ มักถูกนำไปใช้งานที่มีคลอรีนสูง เพื่อป้องกันมิให้เกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting corrosion) และช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนที่เป็นรอยร้าวอันเนื่องมาจากแรงกดดัน (Stress corrosion cracking resistance) ทำฐานชุดเจาะน้ำมัน ฯลฯ

ส่วนผสมทางเคมี Cr 20-25% C = 0% (ไม่มีส่วนผสมคาร์บอน) Ni 4-7%

5. กลุ่มพรีซิพิตชันฮาร์ดนิง (Precipitation hardening steel) กลุ่มนี้เกิดการตกผลึกโดยวิธีทางความร้อน เป็นเหล็กกล้าชุบแข็งแบบตกผลึก มีโครเมียมผสมอยู่ 17% และมีนิกเกิล 4% ทองแดง และไนโอเบียมผสมอยู่ด้วย มีความต้านทานการกัดกร่อนเทียบเคียงกับตระกูลออสเทนนิติกมีความแข็งแรงมากกว่าตระกูลมาร์เทนซิติก เกรด 17-4H เนื่องจากเหล็กชนิดนี้สามารถชุบแข็งได้ในคราวเดียว จึงเหมาะสำหรับทำแกนปั๊ม หัววาล์ว และส่วนประกอบของยานอวกาศ [20]

2.4.5 วัสดุที่เลือกใช้สร้างแม่พิมพ์

วัสดุที่เลือกใช้สร้างแม่พิมพ์คือ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 หรือ Stainless steel AISI 304 ตามมาตรฐานของอเมริกา เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดออสเทนนิติกที่พบเห็น และใช้แพร่หลายที่สุดในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมอาหาร เครื่องดื่ม อุปกรณ์ในกระบวนการทางเคมี อุปกรณ์เครื่องครัว เตาหลอม เครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร เครื่องใช้ในบ้าน เครื่องล้างจาน อ่างล้างจาน ภาชนะหุงต้ม เครื่องมือในโรงพยาบาล และเวชภัณฑ์

เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 มีส่วนผสมของโครเมียมประมาณ 18% และนิกเกิลประมาณ 8% (ใส่นิกเกิลเพื่อปรับอุณหภูมิยวดยืดให้ต่ำลง ทำให้เกรนละเอียด เพิ่มความแข็งแรง และความแข็งแรงโดยไม่ทำให้ความเหนียวลดลง ปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านทนต่อแรงกระแทกที่อุณหภูมิต่ำ และปรับปรุงคุณสมบัติต้านทานการผุกร่อนให้ดีขึ้น) หรือเรียกกันว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก 18/8 สามารถทนความร้อนได้สูงไม่เกิน 900 องศาเซลเซียส ซึ่งเหมาะกับการนำมาใช้สร้างแม่พิมพ์ผลิตชิ้นงานทดสอบ เนื่องจากชิ้นงานทดสอบมีอุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ 138 องศาเซลเซียส

คุณสมบัติทนความร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก สิ่งแรกที่พิจารณาคือ ความคงทนต่อการอ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อน ประการที่สองจะพิจารณาถึงคุณสมบัติในด้านต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง โดยเฉพาะในกรณีที่เหล็กสัมผัสกับแก๊สร้อน ปกติ O_2 จะสามารถแทรกเข้าไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชันให้ลึกลงไปได้ผิวของเหล็กโดยการแทรกซึมลงไปตามเกรน (Intercrystalline) ยิ่งเหล็กที่มีอุณหภูมิสูงมีเกรนโต การแทรกซึมของ O_2 จะยิ่งเพิ่มมากขึ้น ในการป้องกันหรือลดการเกิด Oxidation อาจช่วยได้โดยการผสมโลหะประเภทแคลเซียมและซีเรียมในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก จะช่วยป้องกันการขยายตัวของเกรนที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้ยังมีแก๊สไนโตรเจนที่มีบทบาทในการลดคุณสมบัติต้านทานการเกิดออกซิเดชัน โดยแก๊สไนโตรเจนที่มากับแก๊สจากการเผาไหม้ สามารถแทรกซึมเข้าไปในเนื้อเหล็กและรวมกับโครเมียมเป็นไนไตรด์ของโครเมียม ทำให้ปริมาณโครเมียมในออสเทนไนต์ลดลงซึ่งจะไปลดคุณสมบัติต้านทานการเกิดออกซิเดชันของเหล็ก แต่ในกรณีนี้ฟิล์มออกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันจะมีส่วนช่วยป้องกันแก๊สไนโตรเจนแทรกซึมได้มาก

2.4.6 วัสดุที่เลือกใช้ทำสลักของแม่พิมพ์

สลักที่ใช้ยึดตัวแม่พิมพ์จะใช้เป็นเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 ตามมาตรฐานญี่ปุ่นจัดอยู่ในกลุ่ม JIS G3101 ตรงกับมาตรฐาน DIN 1.0028 และ UST 34-2 ส่วนผสมคือ C < 0.15%, Mn 0.2-0.5%, P < 0.05%, S < 0.05% ซึ่งจัดเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางหรือเรียกว่าเหล็กละมุน (Mild steel)

โดยส่วนผสมของเหล็กกล้าคาร์บอนจะมีส่วนผสมใกล้เคียงกับเหล็ก SS41 ใน JIS G3101 มีความแข็งประมาณ 116–152 HB เหล็ก SS400 มีการใช้อย่างแพร่หลายในการประกอบหรือขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์เหล็ก ได้แก่ ชิ้นส่วนเครื่องจักรกล งานท่อเหล็กต่างๆ รวมถึงการผลิตชิ้นส่วนรถบรรทุก มีความต้านแรงดึง 400–510 N/mm²

2.5 ความสามารถในการกระจายตัว (Wettability)

ความสามารถในการกระจายตัว คือ ค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะพื้น โดยถ้าค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีนั้นมีค่าสูง แสดงว่า โลหะบัดกรีนั้นมีการกระจายตัว (Wetting) ที่ดี มีการไหล (Fluidly) ที่ดี และมีแรงยึดติด (Adhesive) บนพื้นผิวโลหะพื้นที่ดี ผลที่ได้คือเกิดการเชื่อมประสานและรอยบัดกรีที่ติดบนพื้นผิวโลหะพื้น [14]

ถ้าค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะพื้นนั้นสามารถบ่งบอกความสามารถในการบัดกรีได้ ดังนั้น สิ่งที่ต้องพิจารณาจะทำการบัดกรีต้องคำนึงถึงโลหะบัดกรีที่มีค่าความสามารถในการกระจายตัว (Wettability) บนพื้นผิวโลหะพื้นที่สูง ซึ่งค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีนั้นสามารถหาได้ 3 วิธี ได้แก่

1. Spread test method อ้างอิงมาตรฐานของ JIS Z 3198-3 : 2003 (JWES), Test methods for lead-free solder - Part 3 : Methods for spread test
2. Contact angle method อ้างอิงมาตรฐาน 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
3. Wetting balance method อ้างอิงมาตรฐาน 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

2.5.1 Spread test method

ตามมาตรฐานของ JIS Z 3198-3 : 2003 (JWES) ว่าด้วยเรื่อง Test methods for lead-free solder - Part 3 : Methods for spread test [15]

Spread test method คือวิธีการทดสอบหาค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะพื้น โดยมีวิธีทดสอบดังนี้

1. หยดน้ำยาประสาน 0.02 มิลลิลิตร ที่จุดศูนย์กลางของแผ่นทองแดงและวางโลหะบัดกรีทดสอบที่จุดศูนย์กลางบนแผ่นทองแดง
2. ให้ความร้อน 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 2 นาที เพื่อให้ฟลักซ์ระเหยออกไป
3. ตั้งค่าอุณหภูมิอ่างบัดกรีที่ 250 องศาเซลเซียส \pm 3 องศาเซลเซียส
4. นำชิ้นงานทดสอบสัมผัสกับโลหะบัดกรีหลอมเหลวในอ่างบัดกรี และกำจัดชั้นฟิล์มออกไซด์บนผิวหน้าโลหะบัดกรีหลอมเหลวด้วย Scrubber

5. หลังจากขึ้นงานสัมผัสกับโลหะบัดกรีหลอมเหลวในอ่างบัดกรีเป็นระยะเวลา 30 วินาที ให้โลหะบัดกรีที่ใช้ทดสอบหลอมละลายบนแผ่นทองแดง
 6. เลื่อนชิ้นงานขึ้น จากนั้นปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
 7. ล้างน้ำยาประสานออกโดยใช้สารละลายที่เหมาะสม
- การหาค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะพื้นโดย Spread test method สามารถหาได้ดังนี้

2.5.1.1 ค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor : S_f)

หลังจากทำการทดสอบโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดงแล้วและปล่อยให้โลหะบัดกรีเย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง ทำการวัดค่าความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรีที่แข็งตัวแล้วด้วยไมโครมิเตอร์ และนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor : S_f) ดังแสดงในสมการ 2.1



รูปที่ 2.10 ความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรี

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

เมื่อ H คือ ความสูงของโลหะบัดกรีที่แผ่กระจาย

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

โดย V คือ ปริมาตรของโลหะบัดกรีที่ใช้ทดสอบ

2.5.1.2 ค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio : S_r)

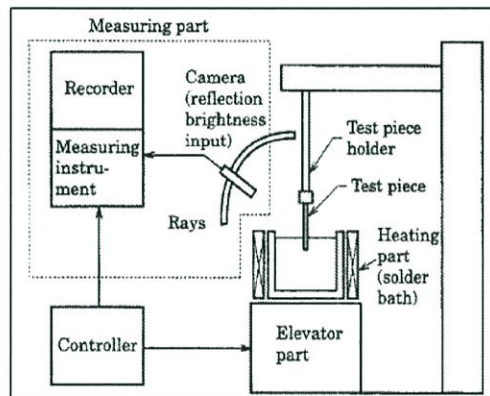
นอกจากนี้ค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรียังสามารถคำนวณเป็นค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio: S_r) ได้ดังสมการ 2.2 [3]

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

2.5.2 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 [16] กล่าวว่

Contact angle เป็นวิธีการทดสอบในการวัดค่ามุมสัมผัสที่บริเวณปลายขอบของโลหะบัดกรีเมื่อผ่านกระบวนการทดสอบ วิธีการนี้จะทำการวัดมุมสัมผัสของโลหะบัดกรีที่แผ่กระจายบนแผ่นชิ้นงานทดสอบ จากจุดของแผ่นชิ้นงานทดสอบที่ทำการจุ่มและดึงขึ้นจากอ่างโลหะบัดกรีและบันทึกผลที่เกิดขึ้น



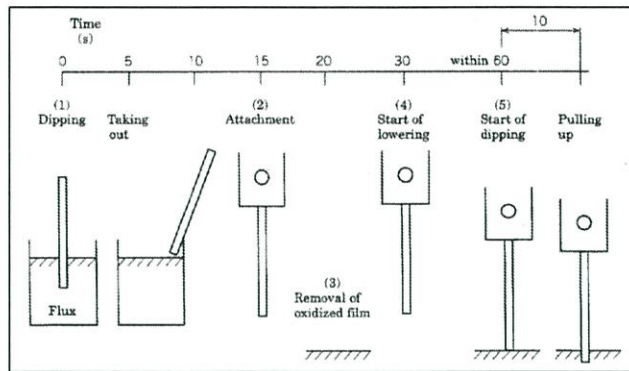
รูปที่ 2.11 Contact angle method

ขั้นตอนการทดสอบ

1. หลอมโลหะบัดกรีในอ่างบัดกรี (Solder tank) ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส \pm 3 องศาเซลเซียส
2. ใส่ฟลักซ์ที่ใช้ในการทดลองตามมาตรฐานลงในจานทดลอง (Petri dish)
3. จุ่มชิ้นงานทดสอบลงในฟลักซ์ ลีกลงไป 4-5 มิลลิเมตรจากขอบ เป็นเวลา 5 วินาที แล้วยกขึ้น เพื่อกำจัดออกไซด์ที่ผิวหน้า
4. ให้นำชิ้นงานทดสอบที่ทำการจุ่มฟลักซ์แล้ว จุ่มลงในอ่างบัดกรีอย่างช้าๆ ลีกลงไป 2 มิลลิเมตร ทิ้งไว้ประมาณ 10 วินาที และเริ่มให้เครื่องบันทึกผลทำงาน จากนั้นบันทึกผลค่ามุมสัมผัส (Contact angle) ที่เปลี่ยนแปลงไป ณ เวลาหนึ่งๆ ของโลหะบัดกรีบนแผ่นชิ้นงานทดสอบที่เกิดการยึดประสานกันที่ผิวหน้าของชิ้นงานในระหว่างการจุ่ม เมื่อเวลาเปลี่ยนไป

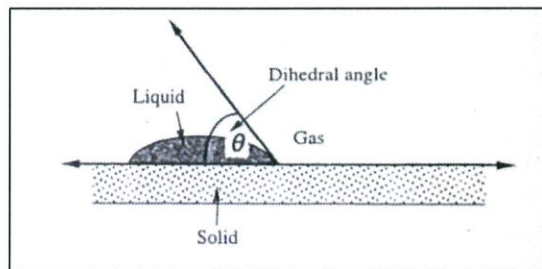
ตารางที่ 2.9 ลำดับเวลาในการดำเนินการทดสอบ

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



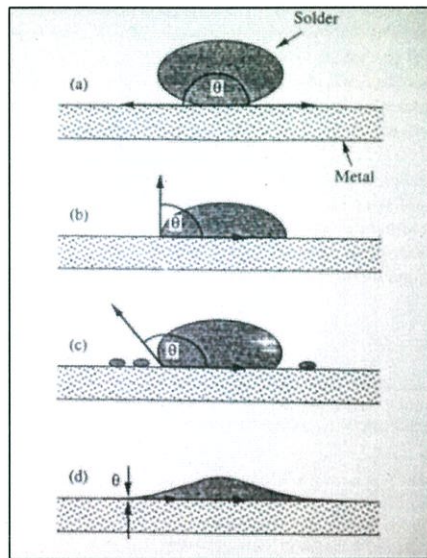
รูปที่ 2.12 ลำดับขั้นตอนในช่วงเวลาทดสอบ

Contact angle method คือวิธีการทดสอบหาค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะพื้น โดยวัดจากค่ามุมสัมผัส (Contact angle : θ) โดยมุมสัมผัสเป็นการวัดการประสานระหว่างของแข็งและของเหลวในเชิงปริมาณ ค่ามุมสัมผัสที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของพื้นผิวโลหะพื้นและรูปร่างของโลหะบัดกรีหลอมเหลวซึ่งมุมสัมผัสที่ได้นั้นจะเกิดจากการที่ของเหลวมีอาณาเขตติดต่อกัน 3 เฟส ได้แก่ ของแข็ง (Solid : S) ของเหลว (Liquid : L) และก๊าซ (Gas : G)



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ของมุมสัมผัสที่มีต่อโลหะบัดกรี พื้นผิวพื้นโลหะและบรรยากาศโดยรอบเมื่อ Liquid คือ โลหะบัดกรีหลอมเหลว Solid คือ พื้นผิวพื้นโลหะ Gas คือ บรรยากาศโดยรอบ

จากรูปที่ 2.13 มุมที่เกิดจากระนาบของแข็งและของเหลว (θ) เรียกว่า Wetting angle หรือ Contact angle โดยมุมนี้จะขึ้นอยู่กับความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะแผ่น



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ของมุมสัมผัสที่มุมใดๆ กับการกระจายตัวของโลหะบัดกรี

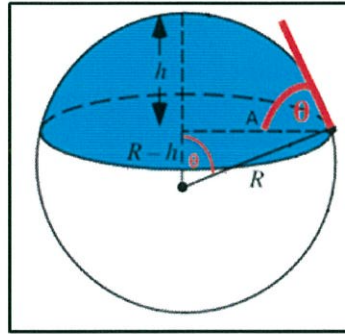
จากรูปที่ 2.14 จะแสดงให้เห็นถึงค่า θ หรือ Contact angle ที่มุมใดๆ โดยที่ รูปที่ 2.14 (a) มี Contact angle เท่ากับ 180 องศา คือยังไม่มี การกระจายตัวของโลหะบัดกรี (Non-wetted) จึงยังไม่เกิดการประสานของพื้นผิวโลหะพื้น รูป 2.14 (b) มี Contact angle ระหว่าง 0 องศา ถึง 90 องศา เนื่องจากมีบางส่วนของโลหะบัดกรีเริ่มหลอมละลาย รูปที่ 2.14 (c) มี Contact angle ระหว่าง 90 องศา ถึง 180 องศา คือโลหะบัดกรีเริ่มมีการหลอมละลายบนพื้นผิวโลหะแล้ว กลับคืนไปเป็นของแข็งอีกครั้ง (Dewetting) เนื่องจากจากอุณหภูมิในการหลอมละลายต่ำลง จึงไม่เกิดการประสานกันบน พื้นผิวโลหะพื้น รูปที่ 2.14 (d) มี Contact angle = 0 องศา คือมีการกระจายตัวของโลหะบัดกรีแบบสมบูรณ์ (Total wetting) จนเกิดเป็นชั้นฟิล์มขึ้นบนผิวของพื้นผิวโลหะพื้น อาจกล่าวได้ว่า Contact angle จะแปรผกผันกับค่า ความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรี

ในกระบวนการบัดกรีมีจุดประสงค์คือ บัดกรีให้มี Contact angle = 0 องศา ซึ่งเป็นได้แคในอุดมคติเท่านั้น ในความเป็นจริงในกระบวนการบัดกรีขอแค่การบัดกรีที่มี Contact angle น้อยกว่า 75 องศา ก็ถือว่าเป็นการบัดกรีที่ดีแล้ว ทั้งนี้ Contact angle จะขึ้นอยู่กับแรงตึงผิวของโลหะบัดกรีด้วย ถ้าแรงตึงผิวของโลหะบัดกรีมีค่าต่ำลง จะยิ่งทำให้ Contact angle มีค่าน้อยลงด้วย

ค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะพื้นสามารถหาได้จากค่า Contact angle ได้ดัง สมการ 2.3

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

θ คือ มุมสัมผัส, A คือ รัศมีของโลหะบัดกรี, h คือ ความสูงของโลหะบัดกรี

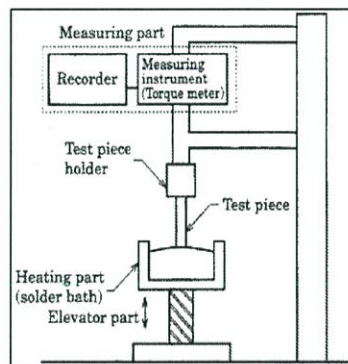


รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างรัศมี ความสูง และมุมสัมผัสของโลหะบัดกรี

2.5.3 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 [16] กล่าวว่

Wetting balance เป็นวิธีการทดสอบสำหรับวัดค่าเวลาและแรงในภาวการณ์เปียก (Wetting) ของโลหะบัดกรีขณะทำการทดสอบ วิธีการนี้เป็นวิธีการตรวจสอบแรงที่กระทำบนแผ่นชิ้นงานทดสอบ จากจุดของแผ่นชิ้นงานทดสอบที่ทำการจุ่มและดึงขึ้นจากอ่างโลหะบัดกรีและแสดงผลโดยการบันทึกอย่างต่อเนื่องเป็นฟังก์ชันของเวลาผ่านเครื่องแปลงสัญญาณ

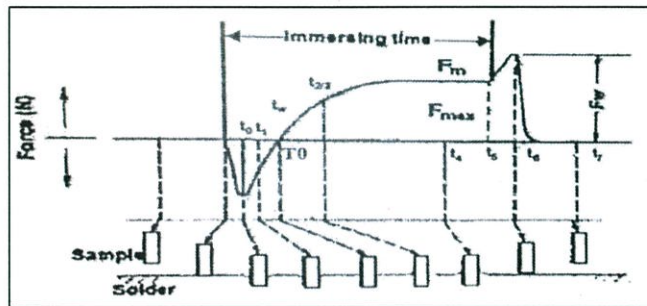


รูปที่ 2.16 Wetting balance method

ขั้นตอนการทดสอบ

1. หลอมโลหะบัดกรีในอ่างบัดกรี (Solder tank) ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ± 3 องศาเซลเซียส
2. ใส่ฟลักซ์ที่ใช้ในการทดสอบตามมาตรฐานลงในจานทดลอง (Petri dish)
3. จุ่มชิ้นงานทดสอบลงในฟลักซ์ ลีกลงไป 4-5 มิลลิเมตรจากขอบ เป็นเวลา 5 วินาที แล้วยกขึ้น เพื่อกำจัดออกไซด์ที่ผิวหน้า
4. ให้นำชิ้นงานทดสอบที่ทำการจุ่มฟลักซ์แล้ว จุ่มลงในอ่างบัดกรีอย่างช้าๆ ลีกลงไป 2 มิลลิเมตร ทิ้งไว้ประมาณ 10 วินาที และบันทึกผลลงบนแผนภูมิการเปลี่ยนแปลงของโหลดในช่วงเวลาต่างๆ จากจุดที่ชิ้นทดสอบเกิดการยึดประสานกันที่ผิวของชิ้นงานทดสอบในระหว่างการจุ่ม

Wetting balance method คือวิธีการทดสอบหาค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวโลหะ พื้นโดยจะนำชิ้นงานโลหะที่ชุบด้วยฟลักซ์แล้วมาจุ่มลงในโลหะบัดกรีหลอมเหลวที่อยู่ในอ่างบัดกรี ด้วยความเร็วและระยะความลึกในการจุ่มตามที่กำหนด แล้วนำค่าที่ได้จากการทดสอบมาสร้าง Wetting curve ได้ดังรูปที่ 2.17



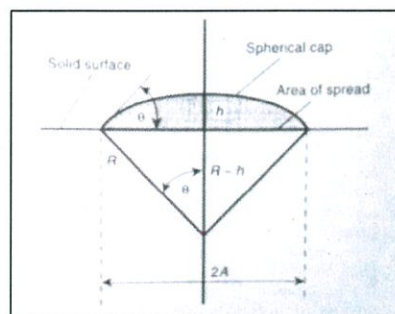
รูปที่ 2.17 Wetting curve ที่ได้จากเครื่องทดสอบ

จากราฟอธิบายได้ว่า ในช่วงแรกที่ชิ้นงานทดสอบเริ่มสัมผัสกับโลหะบัดกรีหลอมเหลวเมื่อจุ่มลงในโลหะบัดกรีนั้น ค่าแรงที่ได้จะเป็นค่าลบ เนื่องจากต้องมีแรงพยายามอย่างมากเพื่อเอาชนะแรงลอยตัวที่บริเวณผิวของโลหะบัดกรีหลอมเหลว ได้ จากนั้นแรงที่ได้จะเป็นค่าบวก และเมื่อชิ้นงานเริ่มสัมผัสกับโลหะบัดกรีจนกระทั่งมีมุมสัมผัสเป็น 90 องศา นั่นคือแรงอยู่ใน ภาวะสมดุล เวลาคือ Wetting time (T0) นอกจากนี้แรงที่กระทำสูงสุดต่อหน่วยพื้นที่ระหว่างผิวของโลหะทดสอบกับโลหะ บัดกรีหลอมเหลวคือค่า Wetting force (Fmax) และเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาในการจุ่ม จะต้องมีแรงในการดึงชิ้นงานออกนั่นคือ Withdrawal force (Fw)

2.5.4 ความสัมพันธ์ของ Spread factor, Spread ratio และ Contact angle

2.5.4.1 ความสัมพันธ์ของ Spread ratio และ Contact angle [13]

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



รูปที่ 2.18 เรขาคณิตทรงกลม

เมื่อ A และ a มีความสัมพันธ์ในเรื่องการอนุรักษ์ของปริมาตรของโลหะบัดกรีหลอมละลาย

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

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

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

จากรูปที่ 2.18 เมื่อ $A = R \sin \theta$, $h = R(1 - \cos \theta)$

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

เมื่อ $0 < \theta < 180$

2.5.4.2 ความสัมพันธ์ของ Spread factor และ Contact angle

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

เมื่อ $0 < \theta < 180$

2.5.4.3 ความสัมพันธ์ของ Contact angle และมิติของโลหะบัดกรีหลอมละลาย

จากรูปที่ 2.18

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

จากทฤษฎีพีทาโกรัส จัดเรียงใหม่ได้เป็น

$$R = \frac{A^2 + h^2}{2h}$$

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

2.6 วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) หรือ ANOVA เป็นวิธีการทางสถิติที่ใช้ในการตรวจสอบสมมติฐานเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของประชากรตั้งแต่ 2 กลุ่มขึ้นไป อันเกิดจากการกระทำที่ต่างกัน ซึ่งการวิเคราะห์ความแปรปรวนนอกจากจะใช้ในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของประชากรหลายกลุ่มแล้ว ยังถือว่าการวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต้น (Independent variable) ที่มีต่อตัวแปรตาม (Dependent variable) ดังนั้นการวิเคราะห์ความแปรปรวนจึงมีลักษณะดังนี้ [21]

1. สามารถวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยจากกลุ่มตัวอย่างมากกว่า 2 กลุ่มขึ้นไป
2. สามารถวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับการวิจัยที่ออกแบบซับซ้อนหรือมีตัวแปรอิสระมากกว่า 1 ตัวแปรได้
3. สามารถใช้วิเคราะห์เพื่อให้เห็นผลกระทบซึ่งกันและกันของปัจจัยต่างๆ (Interaction) ได้

2.6.1 ข้อกำหนดเบื้องต้นของข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์ความแปรปรวนได้

เนื่องจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนใช้ F เป็นสถิติทดสอบโดยที่ F คืออัตราส่วนระหว่างความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (Mean square between) และความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Mean square within) การวิเคราะห์ความแปรปรวนจึงมีข้อกำหนดเบื้องต้นเกี่ยวกับลักษณะของข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์ดังนี้ [22]

1. กลุ่มตัวอย่างแต่ละกลุ่มมาจากประชากรที่มีการแจกแจงปกติ
2. กลุ่มตัวอย่างแต่ละกลุ่มต้องเป็นอิสระจากกัน
3. กลุ่มตัวอย่างแต่ละกลุ่มมาจากประชากรที่มีความแปรปรวนเท่ากัน
4. ข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์ (ตัวแปรตาม) ต้องเป็นข้อมูลที่อยู่ในมาตราวัดแบบอันตรภาค (Interval scale) หรืออัตราส่วน (Ratio scale)

2.6.2 ชนิดของการวิเคราะห์ความแปรปรวน

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบ่งออกเป็น 4 ลักษณะ [26] ดังนี้

1. การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-Way ANOVA)
2. การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-Way ANOVA)
3. การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีการวัดซ้ำ (Repeated Measures ANOVA)
4. การวิเคราะห์ความแปรปรวนร่วม (Analysis of Co Variance : ANCOVA)

2.6.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว หรือ One-way ANOVA เป็นการวิเคราะห์ความแตกต่างของข้อมูลโดยพิจารณาจากปัจจัยที่มีผลต่อข้อมูลปัจจัยเดียว หรือเป็นการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ ระหว่างตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นตัวเดียวกับตัวแปรตาม [23] โดยที่ตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นอาจมีลักษณะเป็นตัวแปรเชิงคุณภาพ (Qualitative

variable) ที่จำแนกออกเป็นระดับหรือประเภทต่างๆ เช่น เก่ง-ปานกลาง-อ่อน ดีมาก-ดี-พอใช้-แย่มาก เป็นต้น ส่วนตัวแปรตามอาจมีลักษณะเป็นตัวแปรเชิงปริมาณ (Quantitative variable) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นว่าจะส่งผลอย่างไรกับตัวแปรตาม ตามสมมติฐานการวิจัยที่กำหนดไว้ [8]

ขั้นตอนการวิเคราะห์ความแปรปรวน มีดังนี้

1. ตั้งสมมติฐาน

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

H_1 : มี μ อย่างน้อย 1 คู่ที่แตกต่างกัน (หรือ $H_1 : \mu_i \neq \mu_j$ เมื่อ $i \neq j$)

2. กำหนดระดับนัยสำคัญ (α) เช่น 0.05

3. กำหนดตัวสถิติทดสอบและคำนวณหาค่าตัวสถิติทดสอบ คือ F และสร้างตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังตารางที่ 2.10

4. ดูบริเวณการทดสอบ

5. สรุปผล โดยถ้าค่า F ที่คำนวณได้น้อยกว่าที่เปิดตาราง หมายถึงค่าที่คำนวณได้จากตัวอย่างตกบริเวณยอมรับ H_0 ตัดสินใจยอมรับ H_0 สรุปว่าไม่มีผลเพียงพอที่ปฏิเสธสมมติฐาน H_0 หากค่า F ที่คำนวณได้มากกว่าค่าในตารางหมายถึง ค่าที่คำนวณได้จากตัวอย่างตกบริเวณปฏิเสธ H_0 ตัดสินใจปฏิเสธ H_0 และสรุปผลว่ามีค่าเฉลี่ยอย่างน้อย 1 คู่ที่ไม่เท่ากัน

ตารางที่ 2.10 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA

แหล่งความแปรผัน	df	SS	MS	F
ระหว่างกลุ่ม	k-1	SS_b	$MS_b = SS_b / k-1$	$\frac{MS_b}{MS_w}$
ภายในกลุ่ม	N-k	SS_w	$MS_w = SS_w / N-k$	
รวม	N-1	SS_T		

สูตรการคำนวณ

สำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวของตัวแปรที่ต้องการศึกษา จะต้องทำการวิเคราะห์ผลรวมของกำลังสองของความเบี่ยงเบนของค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง หรือที่เรียกว่า ผลรวมกำลังสอง (Sum of Squares) ของการแปรผันทั้งหมดโดยกำหนดให้

$$SS_T = SS_b + SS_w \tag{2.7}$$

เมื่อ

SS_T = ผลรวมของการแปรผันทั้งหมด (Total sum of squares)

SS_b = ผลรวมของการแปรผัน (ผลรวมกำลังสอง) ระหว่างกลุ่ม (Between sum of squares)

SS_w = ผลรวมของการแปรผันภายในกลุ่ม (Within group sum of squares)

จากสมการ 2.8 $SS_T = SS_b + SS_w$ จะเห็นว่าค่าของความแปรผันรวมทั้งหมด (SS_T) เกิดจากผลรวมของความแปรผันระหว่างกลุ่ม (SS_b) บวกกับผลรวมของการแปรผันภายในกลุ่ม (SS_w) ซึ่งค่าของ SS_T , SS_b และ SS_w สามารถหา

ได้หลายวิธีโดยที่การทดสอบสมมติฐานความแปรปรวนจะใช้วิธีการทดสอบค่า F ซึ่งค่า F เกิดจากผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของความแปรปรวนระหว่างกลุ่มกับค่าเฉลี่ยของความแปรปรวนภายในกลุ่ม ดังสมการ 2.9

$$F = \frac{MS_b}{MS_w} \quad (2.8)$$

เมื่อ

MS_b = ค่าเฉลี่ยของความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (Mean squares between groups)

MS_w = ค่าเฉลี่ยของความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Mean squares within groups)

โดยที่

$$MS_b = \frac{SS_b}{k-1}$$

$$MS_w = \frac{SS_w}{N-k}$$

เมื่อ

SS_b = ผลรวมของการแปรผัน (ผลรวมกำลังสอง) ระหว่างกลุ่ม (Between group sum of squares)

SS_w = ผลรวมของการแปรผัน (ผลรวมกำลังสอง) ภายในกลุ่ม (Within group sum of squares)

$k-1$ = Degree of freedom ของการแปรผันระหว่างกลุ่ม (df_b)

$N-k$ = Degree of freedom ของการแปรผันภายในกลุ่ม (df_w)

จากสมการ 2.8

$$SS_T = SS_b + SS_w$$

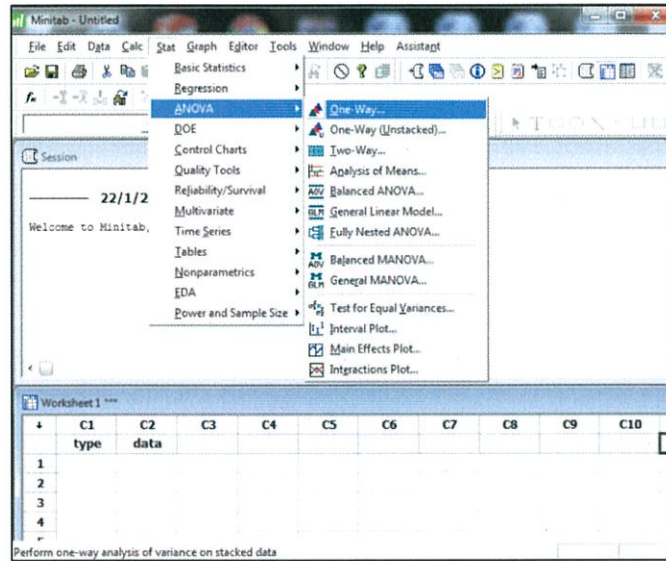
จะได้

$$SS_b = \sum_{j=1}^k n_j (\bar{x}_j - \bar{x})^2$$

$$SS_w = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (x_{ij} - \bar{x})^2$$

2.7 การใช้โปรแกรม Minitab ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียว

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียว (Completely randomized single factor ANOVA) สามารถใช้โปรแกรม Minitab ดังแสดงในรูปที่ 2.19 ช่วยในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามที่กำหนดขึ้นว่ามีอิทธิพลต่อกันหรือไม่ ซึ่งจะแสดงผลในรูปแบบข้อมูลเชิงสถิติและกราฟความสัมพันธ์ต่างๆ



รูปที่ 2.19 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียวด้วยโปรแกรม Minitab

2.8 การเปรียบเทียบเชิงพหุคูณ (Multiple comparison test)

ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One - way ANOVA) กรณีที่การวิเคราะห์ความแปรปรวนปฏิเสธ H_0 คือค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Significant) จะบอกเพียงแค่ว่ามีค่าเฉลี่ยอย่างน้อย 1 คู่ที่มีค่าแตกต่างกัน แต่จะไม่บอกว่าเป็นคู่ใด จึงต้องทำการเปรียบเทียบเชิงพหุคูณ (Multiple comparison test) หลังการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Post hoc test) ซึ่งการเปรียบเทียบเชิงพหุคูณเป็นการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยเป็นรายคู่ ดูว่ามีค่าเฉลี่ยคู่ใดบ้างที่แตกต่างกัน โดยวิธีการเปรียบเทียบเชิงพหุคูณมีหลายวิธีด้วยกัน โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

1. การเปรียบเทียบเชิงพหุคูณ ที่มีเงื่อนไขเกี่ยวกับความเท่ากันของค่าความแปรปรวน ได้แก่ LSD (Fisher's least significant difference), Shceffe, Sidak, Boforroni, RE-D-WF, R-E-G-WQ, S-N-K (Student-NBewman-Keuls), Turkey, Turkey's-b, Ducan, Gabriel, Dunett เป็นต้น
2. การเปรียบเทียบเชิงพหุคูณ ที่ไม่มีเงื่อนไขเกี่ยวกับความเท่ากันของค่าความแปรปรวน ได้แก่ Tamhane's T2, Dunnett's T3, Gamea-Howell, Dunnett's C เป็นต้น

ซึ่งวิธีการเปรียบเทียบทั้งหมดนี้สามารถเลือกวิเคราะห์ได้ในโปรแกรม SPSS อย่างไรก็ตามวิธีที่นิยมใช้กัน ได้แก่ LSD (Least significant difference), Shceffe และ Turkey [25] โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.8.1 Least - Significant Different (LSD)

วิธีการเปรียบเทียบเชิงพหุคูณแบบ LSD หรือ Least - Significant Different เป็นเทคนิคที่ R.A. Fisher ได้พัฒนาขึ้น โดยสามารถนำค่าสถิติ LSD ที่คำนวณได้ไปใช้เปรียบเทียบกับค่าสัมบูรณ์ของความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแต่ละคู่

$(\bar{X}_i - \bar{X}_j)$ หากค่าสัมบูรณ์ของความแตกต่างมากกว่าค่า LSD แสดงว่า ค่าเฉลี่ยคู่นั้นแตกต่างกันอย่างเชื่อถือได้ทางสถิติแบบ LSD

$$LSD = t_{1-\alpha/2} \sqrt{MS_E \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)} \quad (2.9)$$

ค่า MS_E ได้จากการคำนวณหาค่าได้จากความแปรปรวน One-way ANOVA

2.8.2 Turkey's Honestly Significant Different (HSD)

การเปรียบเทียบเชิงพหุคูณโดยวิธี HSD เป็นวิธีการเปรียบเทียบภายใต้เงื่อนไขที่ว่าจำนวนกลุ่มตัวอย่างแต่ละกลุ่มมีขนาดเท่ากัน ($n_1 = n_2 = \dots = n_K = n$) โดยสามารถนำค่าสถิติ HSD ที่คำนวณได้ไปใช้เปรียบเทียบกับค่าสัมบูรณ์ของความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแต่ละคู่ $(\bar{X}_i - \bar{X}_j)$ หากค่าสัมบูรณ์ของความแตกต่างมากกว่าค่า HSD แสดงว่า ค่าเฉลี่ยคู่นั้นแตกต่างกันอย่างเชื่อถือได้ทางสถิติแบบ HSD

$$HSD = q(\alpha, df_w, K) \sqrt{\frac{MS_w}{n}} \quad (2.10)$$

q หาได้จากตารางค่าวิกฤติของ Studentized rough statistic โดย df_w มาจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนซึ่งมีค่า $N-K$

2.8.3 The Sheffe's Post hoc comparison (Sheffe')

การเปรียบเทียบเชิงพหุคูณโดยวิธี Sheffe' เป็นการเปรียบเทียบค่าสัมบูรณ์ของความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแต่ละคู่เช่นเดียวกัน แต่ค่าที่ถึงระดับนัยสำคัญทางสถิติจะสูงกว่าและสามารถใช้ได้กับกลุ่มตัวอย่างที่มีขนาดเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้ โดยสามารถนำค่าสถิติ CV_d ที่คำนวณได้ไปใช้เปรียบเทียบกับค่าสัมบูรณ์ของความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแต่ละคู่ $(\bar{X}_i - \bar{X}_j)$ หากค่าสัมบูรณ์ของความแตกต่างมากกว่าค่า CV_d แสดงว่า ค่าเฉลี่ยคู่นั้นแตกต่างกันอย่างเชื่อถือได้ทางสถิติแบบ Sheffe'

$$CV_d = \sqrt{(K-1)(F^*)(MS_w) \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)} \quad (2.11)$$

F^* คือ ค่า F ที่เปิดจากตารางค่าวิกฤติของ F โดยมี $df_1 = K-1, df_2 = N-K$

MS_w คือ ค่าที่ได้จากการคำนวณความแปรปรวนภายในกลุ่มซึ่งได้จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน

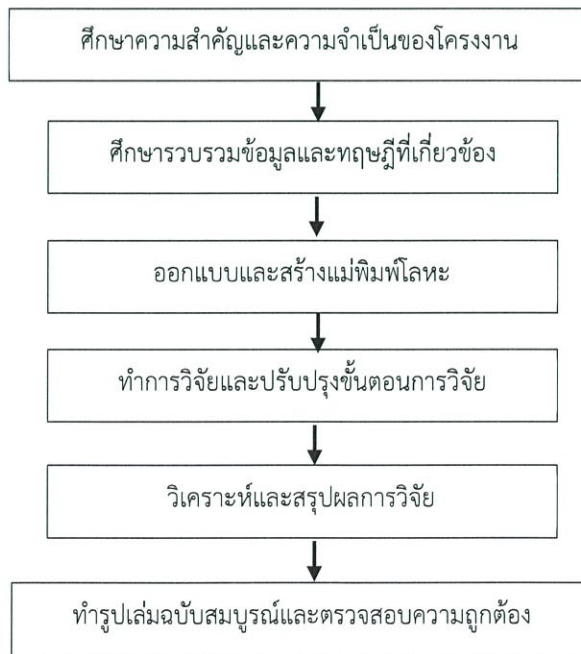
บทที่ 3

วิธีการดำเนินการ

ในการจัดทำปริญาานิพนธ์เรื่อง การพัฒนาชุดเครื่องมือสำหรับทดสอบค่าตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรี โดยจะทำการสร้างแม่พิมพ์สำหรับหล่อชิ้นงานทดสอบโลหะบัดกรี Sn-58Bi เพื่อนำชิ้นงานไปทำการทดสอบโดยมีตัวแปรที่สำคัญ คือชนิดของน้ำยาประสาน น้ำยาประสานที่ใช้ในการทดสอบนั้นมี 3 ชนิด ได้แก่ NH-100VK-1, NF1103 และ NF2107 โดยแต่ละชนิดจะถูกใช้ในปริมาณ 0.02 มิลลิลิตร หลังจากทำการทดสอบแล้วจะทำการศึกษาอิทธิพลของน้ำยาประสานที่มีผลต่อค่าตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีหลังการบัดกรีระหว่างโลหะบัดกรีกับแผ่นทองแดงบริสุทธิ์

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

สำหรับการทำงานวิจัยเพื่อการพัฒนาชุดเครื่องมือสำหรับทดสอบค่าตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีในครั้งนี้ มีขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยดังนี้



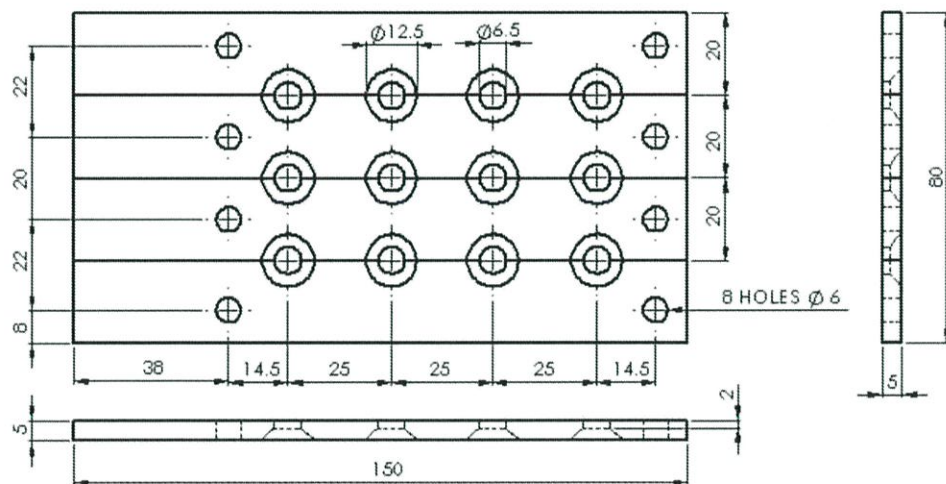
3.2 การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์โลหะ

3.2.1 การออกแบบแม่พิมพ์โลหะ

การออกแบบแม่พิมพ์โลหะสำหรับทำการหล่อชิ้นงานทดสอบนั้นอ้างอิงจากขนาดของชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบของ JIS Z 3198-3 : 2003 (JWES) ว่าด้วยเรื่อง Test methods for lead-free solders - Part 3 : Methods for spread test โดยกำหนดให้รูปร่างของชิ้นงานทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 มิลลิเมตร และหนา 1.6 มิลลิเมตร โดยแม่พิมพ์ที่ออกแบบนั้นประกอบด้วย 4 ส่วนคือ แม่พิมพ์ส่วนบน แม่พิมพ์ส่วนกลาง แม่พิมพ์ส่วนล่าง และสลัก โดยแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1.1 แม่พิมพ์ส่วนบน

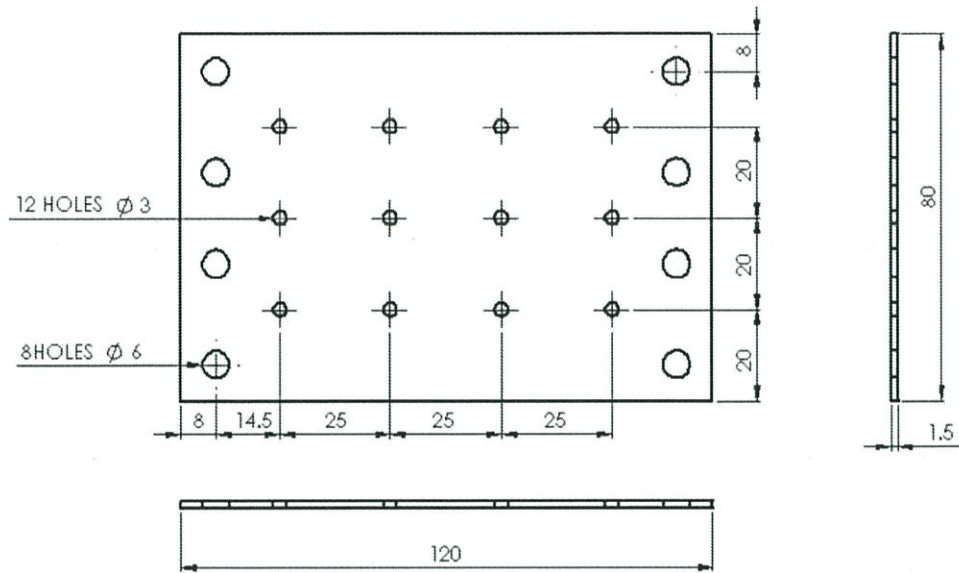
ออกแบบให้มีลักษณะเป็นแผ่นโลหะทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ประกอบด้วย 4 ส่วน โดยแต่ละส่วนมีขนาด ความยาว 150 มิลลิเมตร กว้าง 20 มิลลิเมตร หนา 5 มิลลิเมตร โดยบริเวณผิวหน้าแผ่นโลหะจะทำการสร้างรูเท ลักษณะทรงกรวย เพื่อเป็นทางเดินของโลหะเหลว (Mold sprue) ลึกลงไป 3 มิลลิเมตร จากนั้นสร้างรูตรง (Down sprue) ต่อจากรูเท ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 มิลลิเมตร จำนวน 12 รู และสร้างรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตรลึกตามความหนาของแม่พิมพ์ จำนวน 8 รู สำหรับใส่สลักเพื่อยึดแม่พิมพ์ส่วนบนและส่วนล่างเข้าด้วยกัน ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แม่พิมพ์โลหะส่วนบน

3.2.1.2 แม่พิมพ์ส่วนกลาง

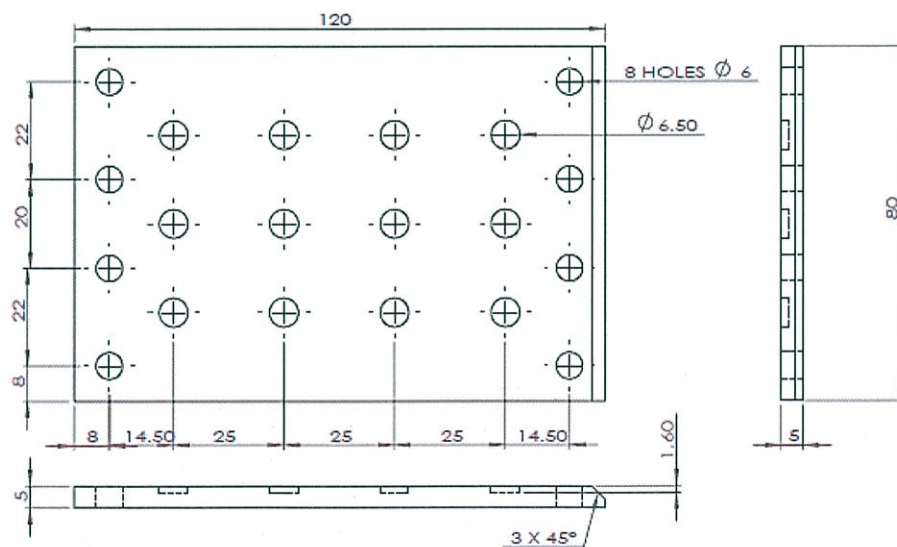
ออกแบบให้มีลักษณะเป็นแผ่นโลหะทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดความยาว 120 มิลลิเมตร กว้าง 80 มิลลิเมตร หนา 1.5 มิลลิเมตร บริเวณผิวหน้าแผ่นโลหะทำการสร้างรู (Down sprue) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ลึกลงไป 1.5 มิลลิเมตร จำนวน 12 รู และสร้างรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ลึก 1.5 มิลลิเมตร จำนวน 8 รู สำหรับใส่สลักเพื่อยึดแม่พิมพ์ส่วนบน ส่วนกลาง และส่วนล่างเข้าด้วยกัน ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แม่พิมพ์โลหะส่วนกลาง

3.2.1.3 แม่พิมพ์ส่วนล่าง

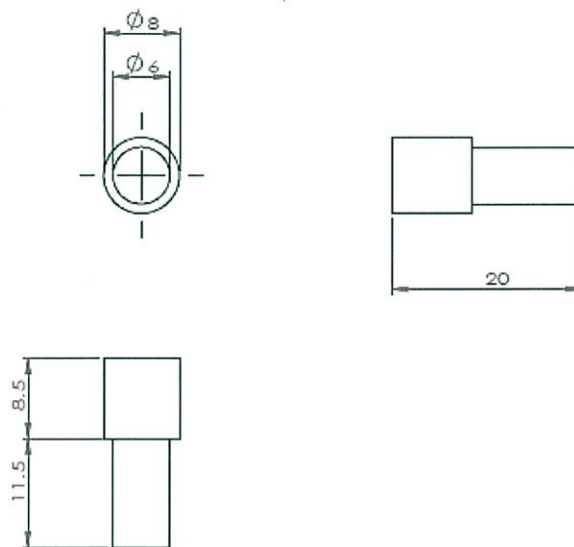
ออกแบบให้มีลักษณะเป็นแผ่นโลหะทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดความยาว 120 มิลลิเมตร กว้าง 80 มิลลิเมตร หนา 5 มิลลิเมตร บริเวณผิวหน้าแผ่นโลหะทำการสร้างรู (Mold cavity) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 มิลลิเมตร ลึกลงไป 1.6 มิลลิเมตร จำนวน 12 รู สำหรับการหล่อชิ้นงานทดสอบ และสร้างรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ลึกตามความหนาของแม่พิมพ์ จำนวน 8 รู สำหรับใส่สลักเพื่อยึดแม่พิมพ์ส่วนบน ส่วนกลาง และส่วนล่างเข้าด้วยกัน และทำการบากขอบด้านข้างของแม่พิมพ์ส่วนล่างออกหนึ่งด้าน ดังรูปที่ 3.3



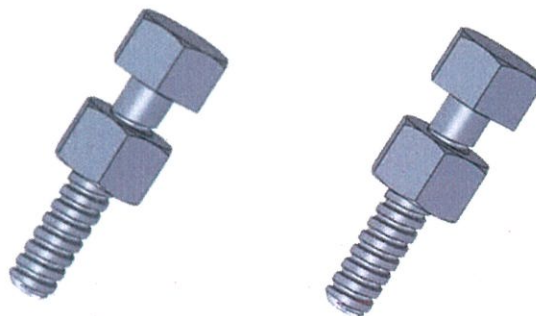
รูปที่ 3.3 แม่พิมพ์โลหะส่วนล่าง

3.2.1.4 สลัก

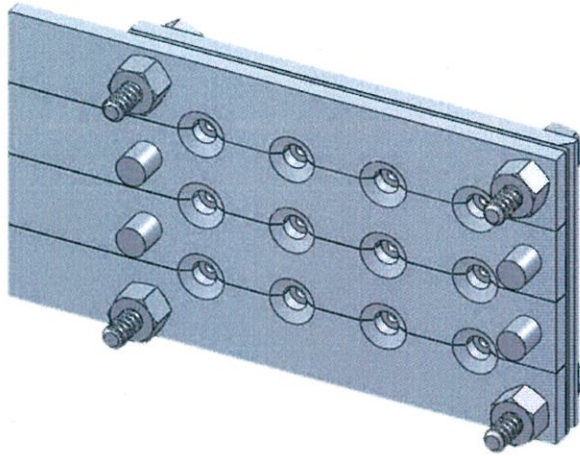
ออกแบบให้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกมีความยาวรวม 20 มิลลิเมตร ประกอบด้วยส่วนหัวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ความยาว 10 มิลลิเมตร และส่วนปลายมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ความยาว 10 มิลลิเมตร จำนวน 4 ตัว ดังรูปที่ 3.4 โดยสลักจะเป็นตัวยึดแม่พิมพ์ส่วนบน ส่วนกลาง และส่วนล่างเข้าด้วยกันโดยมีการเพิ่มน็อตยึดที่บริเวณมุม 4 ตัวเพื่อให้แม่พิมพ์แต่ละส่วนมีความแนบสนิทมากขึ้น ดังรูปที่ 3.5 โดยตำแหน่งการใส่น็อต และสลักแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.4 สลักสำหรับยึดแม่พิมพ์



รูปที่ 3.5 น็อตสำหรับยึดแม่พิมพ์



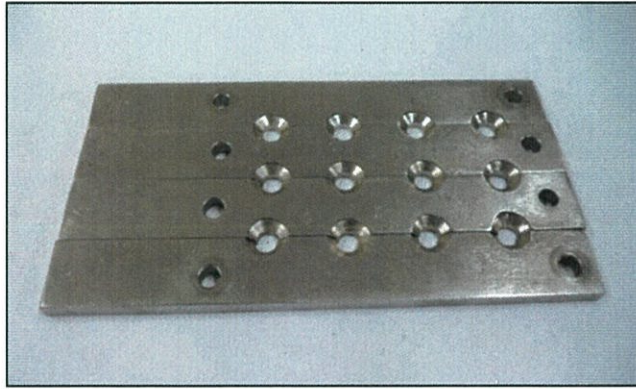
รูปที่ 3.6 แม่พิมพ์โลหะสำหรับการหล่อชิ้นงานทดสอบ

3.2.2 การสร้างแม่พิมพ์โลหะ

หลังจากทำการออกแบบแม่พิมพ์โลหะแล้ว ทำการสร้างแม่พิมพ์โลหะขึ้นตามแบบที่กำหนด โดยวัสดุที่นำมาสร้างแม่พิมพ์ส่วนบน ส่วนกลาง และส่วนล่างนั้นเป็นสแตนเลสเกรดออสเทนติก (Austenitic) ชนิด 304 และวัสดุที่ใช้ในการสร้างสลักเป็นเหล็กเพลาชาว SS400 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร ซึ่งต้องนำมาผ่านขั้นตอนในการสร้างแม่พิมพ์ดังนี้

3.2.2.1 การสร้างแม่พิมพ์ส่วนบน

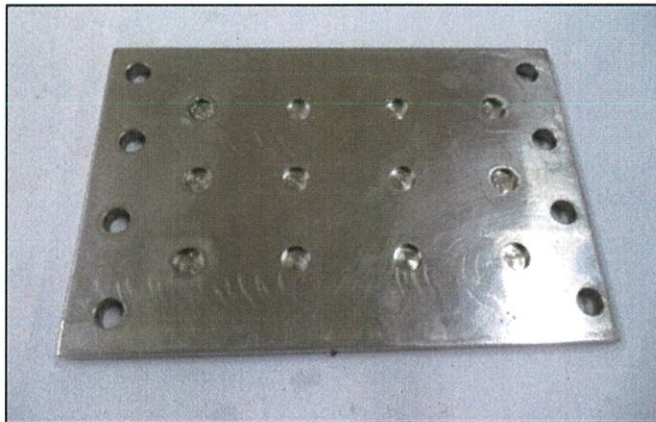
ทำการตัดแผ่นสแตนเลสที่มีความหนา 6 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องตัดโลหะดังรูปที่ 3.11 ให้มีขนาดความยาว 155 มิลลิเมตร กว้าง 25 มิลลิเมตร จำนวน 4 ชิ้น แล้วทำการกัดขอบด้านข้างทั้ง 4 ด้านด้วยเครื่องกัดดังรูปที่ 3.12 โดยใช้ดอกกัด End mill 4 คม (ฟัน) ให้ได้ขนาดความยาว 150 มิลลิเมตร กว้าง 20 มิลลิเมตร พร้อมทั้งกัดผิวหน้าด้วยดอกกัด Face mill ให้มีความหนา 5 มิลลิเมตร จากนั้นเจาะรูสลักจำนวน 2 รู ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร บนแผ่นสแตนเลสแต่ละชิ้น ด้วยเครื่องเจาะดังรูปที่ 3.15 แล้วนำชิ้นงานที่ได้ทั้ง 4 ชิ้นมาทำการเจาะรูตรงให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 มิลลิเมตร ลึก 5 มิลลิเมตร และทำการปาดรูเพื่อสำหรับทางเดินน้ำโลหะบริเวณปากรูที่เจาะไว้ โดยตำแหน่งที่ทำการเจาะรูต่างๆ เป็นไปตามที่กำหนดไว้ในแบบแม่พิมพ์ หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ได้มาทำการลบมุมคมด้วยตะไบและกระดาษทราย จะได้ชิ้นงานดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แม่พิมพ์ส่วนบน

3.2.2.2 การสร้างแม่พิมพ์ส่วนล่าง

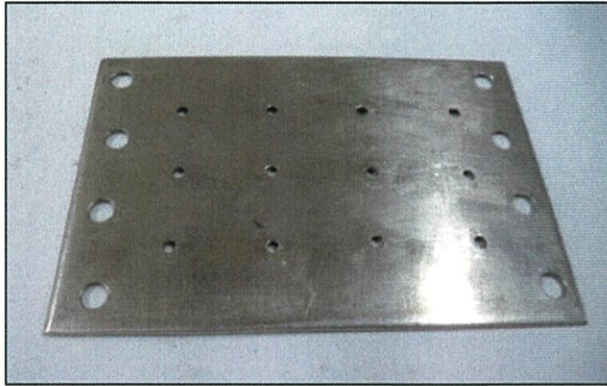
ทำการตัดแผ่นสแตนเลสที่มีความหนา 6 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องตัดโลหะดังรูปที่ 3.11 ให้มีความยาว 125 มิลลิเมตร และกว้าง 85 มิลลิเมตร จากนั้นทำการกัดขอบด้านข้างด้วยดอกกัด End mill 4 คม (ฟัน) ทั้ง 4 ด้านของชิ้นงานให้ได้ขนาดความยาว 120 มิลลิเมตร กว้าง 80 มิลลิเมตร พร้อมทั้งกัดผิวหน้าด้วยดอกกัด Face mill ให้ได้ความหนาของชิ้นงาน 5 มิลลิเมตร จากนั้นทำการเจาะรูสลักด้วยเครื่องเจาะดังรูปที่ 3.15 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ลึก 5 มิลลิเมตร จำนวน 8 รู และเจาะรูหล่อชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 มิลลิเมตร ลึก 1.6 มิลลิเมตร จำนวน 12 รู ด้วยดอกกัด Slot drill ของเครื่องกัด จากนั้นทำการบากขอบด้านข้างของแม่พิมพ์ทำมุมเอียง 45 องศา ขนาด 3 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องเจียรระโนดังรูปที่ 3.16 โดยตำแหน่งที่ทำการบากมุมและเจาะรูต่างๆ เป็นไปตามแบบแม่พิมพ์ หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ได้มาทำการลบมุมคมด้วยตะไบและกระดาษทราย จะได้ชิ้นงานดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แม่พิมพ์ส่วนล่าง

3.2.2.3 การสร้างแม่พิมพ์ส่วนกลาง

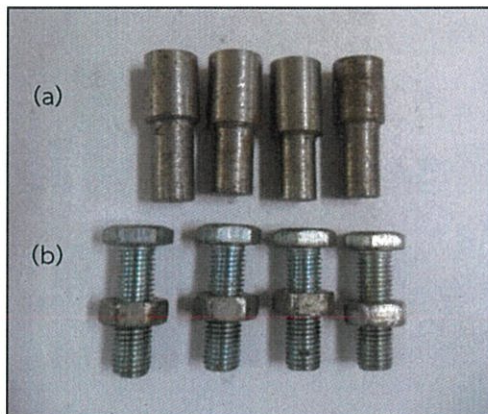
ทำการตัดแผ่นสแตนเลสที่มีความหนา 1.5 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องตัดโลหะดังรูปที่ 3.11 ให้มีขนาดความยาว 120 มิลลิเมตร กว้าง 80 มิลลิเมตร จากนั้นทำการเจาะรูสลักขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร สลัก 1.5 มิลลิเมตร จำนวน 8 รู และรูหล่อชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร สลัก 1.5 มิลลิเมตร จำนวน 12 รู ด้วยเครื่องเจาะดังรูปที่ 3.15 หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ได้มาทำการลบมุมคมด้วยตะไบและกระดาษทราย จะได้ชิ้นงานดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แม่พิมพ์ส่วนกลาง

3.2.2.4 การสร้างสลัก

ทำการตัดเหล็กเพลลาขาว SS400 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร ด้วยเลื่อยตัดโลหะดังรูปที่ 3.17 (a) ให้มีขนาดความยาว 24 มิลลิเมตร จำนวน 4 ชิ้น จากนั้นทำการกลึงผิวด้วยเครื่องกลึงดังรูปที่ 3.14 ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ยาว 20 มิลลิเมตร และทำการกลึงซ้าด้านปลายของชิ้นงานให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ความยาว 10 มิลลิเมตร จะได้ชิ้นงานดังรูปที่ 3.10 (a) ส่วนน็อตที่ใช้สำหรับทำการยึดนั้นสามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาดทั่วไปซึ่งขนาดที่ใช้คือ เบอร์ M6 ดังรูปที่ 3.10 (b)



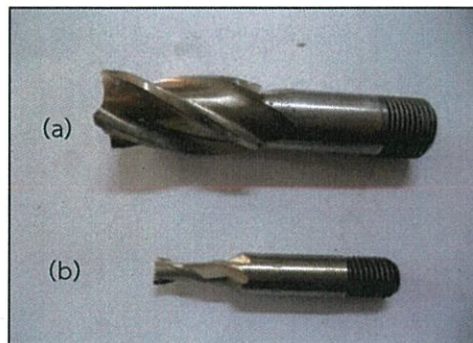
รูปที่ 3.10 (a) สลัก และ (b) น็อตขนาดเบอร์ M6



รูปที่ 3.11 เครื่องตัดโลหะ (Cutting machine)



รูปที่ 3.12 เครื่องกัด (Milling machine)



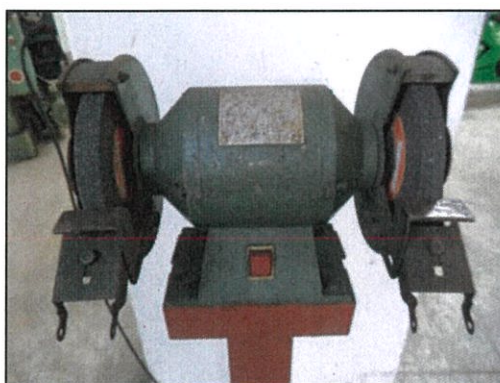
รูปที่ 3.13 (a) ดอกกัดโลหะ End mill 4 คม และ (b) ดอกกัดโลหะ Slot drill



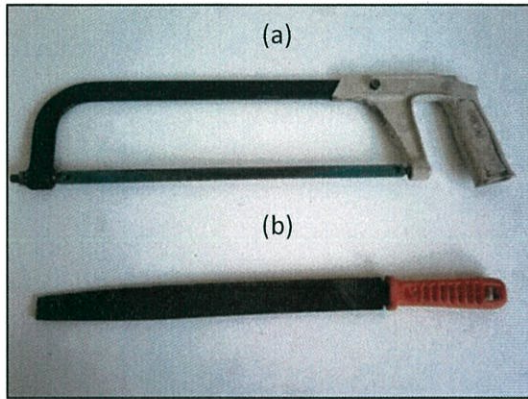
รูปที่ 3.14 เครื่องกลึง (Turning machine)



รูปที่ 3.15 เครื่องเจาะ (Drilling machine)



รูปที่ 3.16 เครื่องเจียรระไน (Grinding machine)



รูปที่ 3.17 (a) เลื่อยตัดโลหะ และ (b) ตะไบ



รูปที่ 3.18 กระดาษทรายน้ำ TOA ความหยาบผิว 100 กริต, 800 กริต และ 1,000 กริต

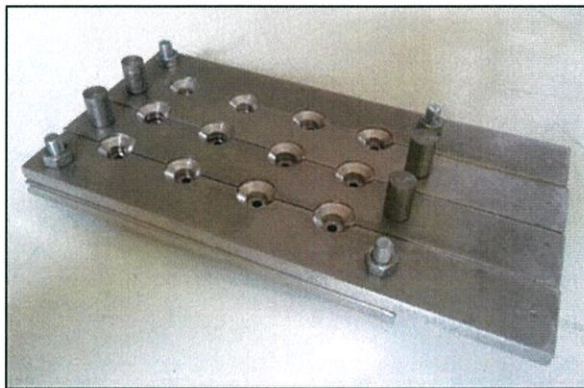
3.3 การวิเคราะห์ผลค่าความสามารถในการกระจายตัวหลังการบัดกรี

3.3.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ทำการเตรียมชิ้นงานทดสอบ โดยการหลอมโลหะบัดกรี Sn-58Bi ที่อุณหภูมิหลอมละลายประมาณ 180 องศาเซลเซียส ในเบ้าหลอมแกรไฟต์ด้วยเครื่อง Electrical melting furnace ดังรูปที่ 3.19 แล้วทำการหล่อโลหะบัดกรี Sn-58Bi ลงในแม่พิมพ์ที่สร้างขึ้นดังรูปที่ 3.20 ซึ่งชิ้นงานโลหะบัดกรีที่ได้จากการหล่อมมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 มิลลิเมตร หนา 1.6 มิลลิเมตร ตามมาตรฐานการทดสอบของ JIS Z 3198-3 : 2003 (JWES) ดังรูปที่ 3.21 หลังจากชิ้นงานเย็นตัวที่อุณหภูมิห้องแล้วจึงทำการชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งรุ่น BSA224S-CW ยี่ห้อ Sartorius ดังรูปที่ 3.22 เพื่อให้ได้ชิ้นงานทดสอบที่มีน้ำหนักตามที่ต้องการสำหรับการทำการทดสอบต่อไป



รูปที่ 3.19 เครื่อง Electrical melting furnace



รูปที่ 3.20 แม่พิมพ์หล่อโลหะบัดกรี Sn-58Bi



รูปที่ 3.21 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบที่ได้หลังจากการหล่อ



รูปที่ 3.22 เครื่องชั่งน้ำหนักยี่ห้อ Sartorius รุ่น BSA224S-CW

3.3.2 การเตรียมแผ่นทองแดงทดสอบ

ทำการเตรียมแผ่นทองแดงสำหรับการทดสอบ โดยนำแผ่นทองแดงชนิด C1220 ความบริสุทธิ์ 99.9% ที่มีความหนา 0.35 มิลลิเมตร มาทำการตัดด้วยเครื่องตัดแผ่นโลหะดังรูปที่ 3.23 ให้มีขนาดความกว้าง 30 มิลลิเมตร ยาว 30 มิลลิเมตร และพับมุมด้านหนึ่งของแผ่นทองแดงขึ้นดังรูปที่ 3.24 จากนั้นนำมาทำความสะอาดพื้นผิวด้วยสารละลายกรดไนตริก (HNO_3) ผสมกับน้ำกลั่น (H_2O) โดยมีอัตราส่วนของกรดไนตริก 14 มิลลิลิตร และน้ำกลั่น 86 มิลลิลิตร แช่ทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที แล้วทำการล้างสารละลายกรดออกด้วยเอทานอล (Ethanol) หลังจากนั้นนำมาเป่าให้แห้งและเก็บในภาชนะที่มีฝาปิดสนิทเพื่อรอทำการทดสอบต่อไป ซึ่งสารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการปฏิบัติงานนั้นแสดงดังรูปที่ 3.25 และรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.23 เครื่องตัดแผ่นโลหะ (Sheet metal cutting machine)



รูปที่ 3.24 ตัวอย่างแผ่นทองแดงหลังทำการตัดและพับมุม



รูปที่ 3.25 สารเคมีทำความสะอาดแผ่นทองแดง (a) กรดไนตริก (b) เอทานอล และ (c) น้ำกลั่น



รูปที่ 3.26 อุปกรณ์สำหรับการปฏิบัติงาน

3.3.3 การทดสอบค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรี

การทดสอบค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรี จะทำการทดสอบโดยใช้น้ำยาประสานอินทรีย์ประเภท RMA จำนวน 3 ชนิด คือ NH-100VK-1, NF 1103 และ NF 2107 ดังรูปที่ 3.27 ซึ่งทำการทดสอบโดย นำแผ่นทองแดงทดสอบที่เตรียมไว้มาทำการหยดน้ำยาประสานปริมาณ 0.02 มิลลิลิตร ที่บริเวณกึ่งกลางแผ่นและวาง ชิ้นงานทดสอบลงบนน้ำยาประสาน จะได้ชิ้นงานที่พร้อมทดสอบดังรูปที่ 3.28 จากนั้นนำชิ้นงานที่พร้อมทดสอบไปให้ ความร้อนที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียสด้วยเครื่องให้ความร้อน Hot Plate ดังรูปที่ 3.29 เป็นเวลา 30 วินาที ทำการยกชิ้นงานขึ้น แล้วปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง และนำไปล้างด้วยเอทานอลเพื่อกำจัดคราบน้ำยาประสานออก จะได้ชิ้นงานดังรูปที่ 3.30 โดยจะทำการทดสอบซ้ำ 10 ครั้งสำหรับน้ำประสานแต่ละชนิด หลังจากนั้นจะนำชิ้นงาน ที่ผ่านการทดสอบไปทำการวิเคราะห์ผลค่าประกอบการกระจายตัวต่อไป



(a)

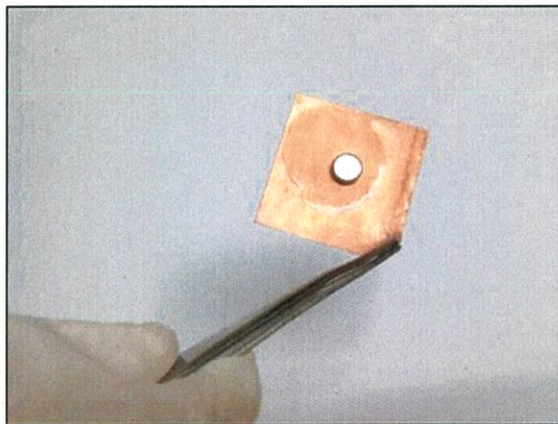


(b)



(c)

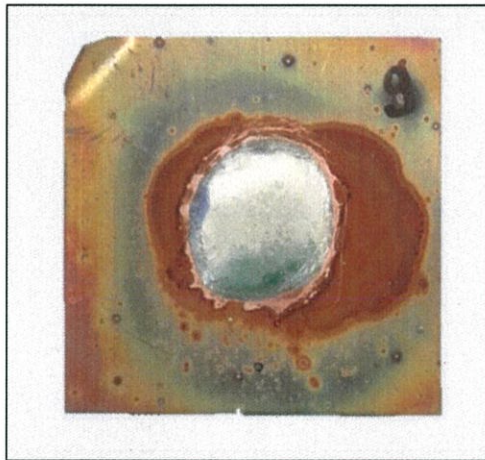
รูปที่ 3.27 น้ำประสาน (a) ชนิด NH-100VK-1 (b) ชนิด NF1103 และ (c) ชนิด NF2107



รูปที่ 3.28 แผ่นทองแดงที่ทำการหยดน้ำประสานและโลหะบัดกรีสำหรับการทดสอบ



รูปที่ 3.29 เครื่องให้ความร้อน Hot Plate

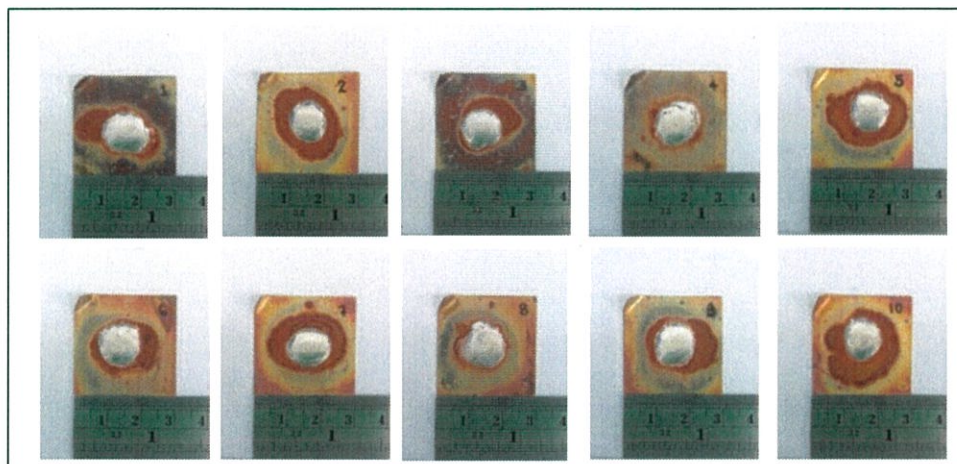


รูปที่ 3.30 ตัวอย่างชิ้นงานหลังผ่านการทดสอบ

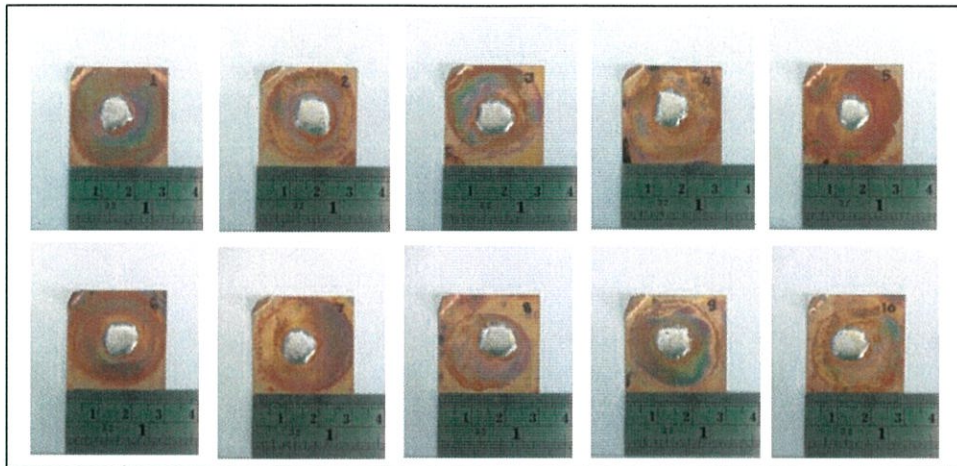
บทที่ 4

ผลการทดลอง

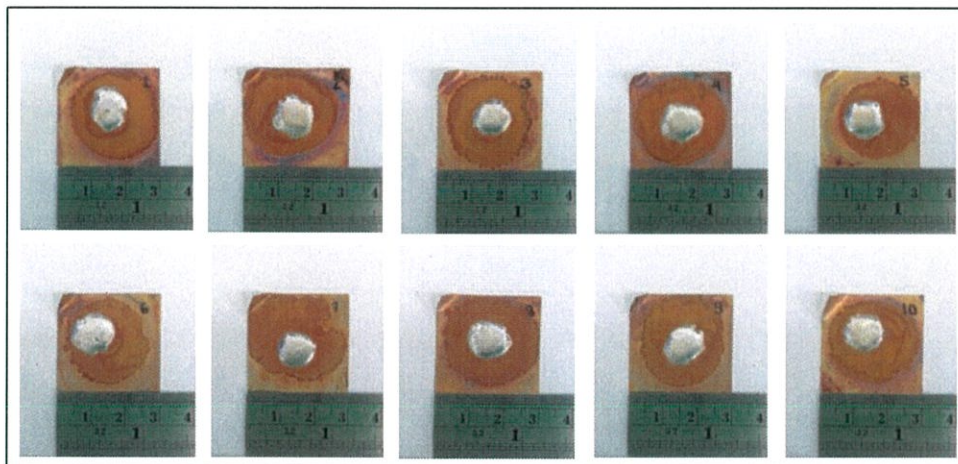
จากการศึกษาและทำการทดสอบหาค่าความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรี Sn-58Bi บนพื้นผิวโลหะพื้นทองแดง โดยใช้น้ำยาประสานประเภท RMA ทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ NH-100VK-1, NF 1103 และ NF 2107 ซึ่งผลจากการทดสอบเป็นดังรูปที่ 4.1, รูปที่ 4.2 และ รูปที่ 4.3



รูปที่ 4.1 การกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดงหลังทำการทดสอบด้วยน้ำยาประสานประเภท RMA ชนิด NH-100VK-1



รูปที่ 4.2 การกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดงหลังทำการทดสอบด้วยน้ำยาประสานประเภท RMA ชนิด NF 1103



รูปที่ 4.3 การกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดงหลังทำการทดสอบด้วยน้ำยาประสานประเภท RMA ชนิด NF 2107

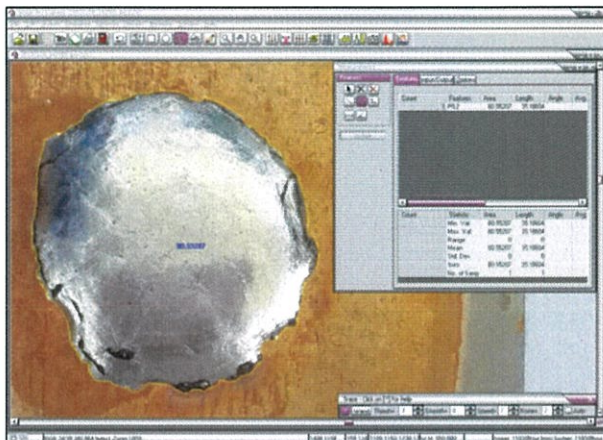
4.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

นำภาพแผ่นทองแดงหลังทำการทดสอบมาเก็บข้อมูลผลการทดสอบโดยทำการแบ่งแยกการเก็บข้อมูลออกเป็น 3 วิธี ซึ่งแต่ละวิธีจะเก็บผลการทดสอบที่ต่างกันตามวิธีการหาค่า Wettability ดังนี้

1. ค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio : S_r)
2. ค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor : S_p)
3. ค่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรี (Contact angle : θ)

4.1.1 ค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio : S_r)

นำภาพถ่ายแผ่นทองแดงหลังการทดสอบไปคำนวณหาค่าพื้นที่และความยาวรอบรูปของโลหะบัดกรีที่หลอมละลายบนแผ่นทองแดงด้วยโปรแกรม Image-Pro Express ดังรูปที่ 4.4 โดยแผ่นทองแดงแต่ละแผ่นจะทำการเก็บข้อมูล 3 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยและนำค่าเฉลี่ยที่ได้ไปเข้าสู่สูตรการคำนวณหาอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio: S_r) ดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.4 การหาพื้นที่และความยาวรอบรูปของโลหะบัดกรีที่หลอมละลายแล้วด้วยโปรแกรม Image-Pro Express

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองของค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio) ของโลหะบัดกรี Sn-58Bi บนแผ่นทองแดง

ชนิดฟลักซ์	ลำดับแผ่นทองแดง	พื้นที่โลหะบัดกรีก่อนหลอมละลาย (mm^2)	พื้นที่โลหะบัดกรีหลังหลอมละลาย (mm^2)	$S_r = \frac{\text{Plan area of spread on the substrate surface}}{\text{Plan area of the original pellet}}$
NH - 100VK - 1	แผ่นที่ 1	33.18	131.02500	3.95
	แผ่นที่ 2	33.18	106.00313	3.19
	แผ่นที่ 3	33.18	114.19393	3.44
	แผ่นที่ 4	33.18	137.37247	4.14
	แผ่นที่ 5	33.18	109.78187	3.31
	แผ่นที่ 6	33.18	126.31833	3.81
	แผ่นที่ 7	33.18	117.24267	3.53
	แผ่นที่ 8	33.18	135.99013	4.10
	แผ่นที่ 9	33.18	117.67213	3.55
	แผ่นที่ 10	33.18	113.00780	3.41

ชนิดฟลักซ์	ลำดับแผ่นทองแดง	พื้นที่โลหะบัดกรีก่อนหลอมละลาย (mm ²)	พื้นที่โลหะบัดกรีหลังหลอมละลาย (mm ²)	$S_r = \frac{\text{Plan area of spread on the substrate surface}}{\text{Plan area of the original pellet}}$
NF 1103	แผ่นที่ 1	33.18	87.02741	2.62
	แผ่นที่ 2	33.18	111.62273	3.36
	แผ่นที่ 3	33.18	101.73233	3.07
	แผ่นที่ 4	33.18	98.81188	2.98
	แผ่นที่ 5	33.18	84.33586	2.54
	แผ่นที่ 6	33.18	93.36061	2.81
	แผ่นที่ 7	33.18	93.59616	2.82
	แผ่นที่ 8	33.18	102.90073	3.10
	แผ่นที่ 9	33.18	99.91951	3.01
	แผ่นที่ 10	33.18	101.52487	3.06
NF 2107	แผ่นที่ 1	33.18	112.68607	3.40
	แผ่นที่ 2	33.18	120.63173	3.64
	แผ่นที่ 3	33.18	93.87159	2.83
	แผ่นที่ 4	33.18	115.82560	3.49
	แผ่นที่ 5	33.18	109.06753	3.29
	แผ่นที่ 6	33.18	125.81053	3.79
	แผ่นที่ 7	33.18	95.84219	2.89
	แผ่นที่ 8	33.18	115.47733	3.48
	แผ่นที่ 9	33.18	112.37770	3.39
	แผ่นที่ 10	33.18	111.75100	3.37

4.1.1.1 การวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio : S_r)

- ปัจจัยคือ ชนิดของน้ำยาประสาน ได้แก่ NH-100VK-1, NF 1103 และ NF 2107
- ผลตอบสนอง คือ ค่าอัตราส่วนการกระจายตัวของน้ำยาประสานแต่ละชนิดที่ได้จากการทดสอบ

ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียว โดยทดสอบสมมติฐานที่ว่า ค่าอัตราส่วนการกระจายตัวของโลหะบัดกรีของน้ำยาประสานทั้ง 3 ชนิดมีความแตกต่างกันหรือไม่ ที่ระดับนัยสำคัญ = 0.05 หรือที่ระดับความเชื่อมั่น = 1 - 0.05 = 0.95 (95%) โดยสามารถตั้งสมมติฐานทางสถิติ ได้ดังนี้

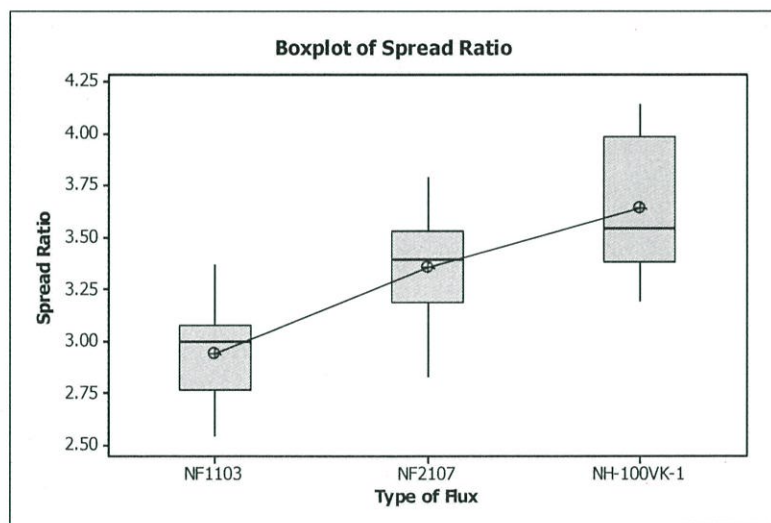
$$H_0 : \mu_{NH-100VK-1} = \mu_{NF 1103} = \mu_{NF 2107}$$

$$H_1 : \text{มี } \mu \text{ อย่างน้อย 1 คู่ที่แตกต่างกัน}$$

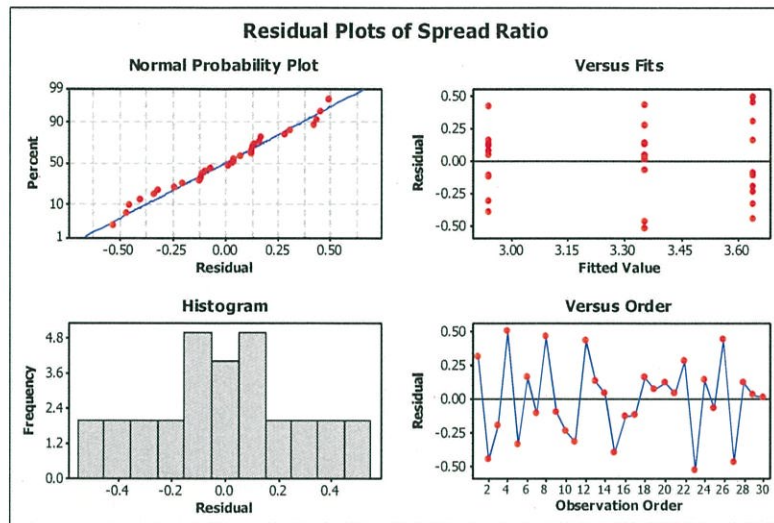
ซึ่งผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากตารางที่ 4.2 พบว่าค่า P-Value < 0.001 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐาน H₀ นั่นคือ ค่าอัตราส่วนการกระจายตัวของโลหะบัดกรีของน้ำยาประสานทั้ง 3 ชนิดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียวของค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio : S,) ของน้ำยาประสานชนิด NH-100VK-1, NF 1103 และ NF 2107

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	2.522	2	1.261	14.500	< 0.001
Within Groups	2.348	27	0.087		
Total	4.870	29			



รูปที่ 4.5 Boxplot ของค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio : S,) ของน้ำยาประสานชนิด NH-100VK-1, NF 1103 และ NF 2107



รูปที่ 4.6 Residual Plots ของค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio : S_r) ของน้ำยาประสานชนิด NH-100VK-1, NF 1103 และ NF 2107

เมื่อมีการปฏิเสธสมมติฐาน จะทราบเพียงว่ามีน้ำยาประสานอย่างน้อย 1 คู่ที่มีค่าอัตราส่วนการกระจายตัวแตกต่างกัน แต่ยังไม่ทราบว่าน้ำยาประสานคู่ใดบ้างที่แตกต่างกันจึงทำการเปรียบเทียบคู่ (Multiple comparisons) เพื่อหาว่าน้ำยาประสานที่มีความแตกต่างกันตามโปรแกรม SPSS ซึ่งได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 Multiple comparisons ของค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio)

	(I) TYPE	(J) TYPE	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	NH-100VK-1	NF 1103	0.7060(*)	0.13189	< 0.000	0.3790	1.0330
		NF 2107	0.2860	0.13189	0.095	-0.0410	0.6130
	NF 1103	NH-100VK-1	-0.7060(*)	0.13189	< 0.000	-1.0330	-0.3790
		NF 2107	-0.4200(*)	0.13189	0.010	-0.7470	-0.0930
	NF 2107	NH-100VK-1	-0.2860	0.13189	0.095	-0.6130	0.0410
		NF 1103	0.4200(*)	0.13189	0.010	0.0930	0.7470

	(I) TYPE	(J) TYPE	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
Scheffe	NH-100VK-1	NF 1103	0.7060(*)	0.13189	< 0.000	0.3644	1.0476
		NF 2107	0.2860	0.13189	0.114	-0.0556	0.6276
	NF 1103	NH-100VK-1	-0.7060(*)	0.13189	< 0.000	-1.0476	-0.3644
		NF 2107	-0.4200(*)	0.13189	0.014	-0.7616	-0.0784
	NF 2107	NH-100VK-1	-0.2860	0.13189	0.114	-0.6276	0.0556
		NF 1103	0.4200(*)	0.13189	0.014	0.0784	0.7616
LSD	NH-100VK-1	NF 1103	0.7060(*)	0.13189	< 0.000	0.4354	0.9766
		NF 2107	0.2860(*)	0.13189	0.039	0.0154	0.5566
	NF 1103	NH-100VK-1	-0.7060(*)	0.13189	< 0.000	-0.9766	-0.4354
		NF 2107	-0.4200(*)	0.13189	0.004	-0.6906	-0.1494
	NF 2107	NH-100VK-1	-0.2860(*)	0.13189	0.039	-0.5566	-0.0154
		NF 1103	0.4200(*)	0.13189	0.004	0.1494	0.6906

* The mean difference is significant at the 0.05 level.

จากตารางที่ 4.3 จะสังเกตเห็นได้ว่าในแต่ละวิธีการเปรียบเทียบคู่นั้นมีน้ำยาประสานอย่างน้อย 1 คู่ที่มีความแตกต่างกัน ดังนั้นจะเห็นว่า ค่าอัตราส่วนการกระจายตัวของโลหะบัดกรีของน้ำยาประสานทั้ง 3 ชนิดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

4.1.2 ค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor : S_p)

4.1.2.1 วัดความสูงของโลหะบัดกรีหลอมละลาย

นำแผ่นทองแดงที่ได้จากการทดสอบมาวัดความสูงของโลหะบัดกรีที่หลอมละลายบนแผ่นทองแดงด้วยไมโครมิเตอร์ ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ไมโครมิเตอร์

4.1.2.2 คำนวณหาปริมาตรของชิ้นงานโลหะบัดกรีทดสอบ

$$\text{จากสูตร } D = \frac{m}{V} \longrightarrow m = DV \quad (4.1)$$

เมื่อ $V = \pi r^2 h$ (ชิ้นงานเป็นทรงกระบอกขนาดเล็ก) และโลหะบัดกรี 42Sn-58Bi มีความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 25 °C = 0.316 ปอนด์ต่อลูกบาศก์นิ้ว

$$\text{แทนค่าลงในสูตร } m = DV$$

$$V = \frac{m}{D}$$

$$V = \frac{0.000464 \text{ kg}}{\left(0.316 \frac{\text{lb}}{\text{in}^3}\right) \times \left(\frac{1}{16387.064} \frac{\text{in}^3}{\text{mm}^3}\right) \times \left(\frac{0.4536 \text{ kg}}{1 \text{ lb}}\right)}$$

$$\therefore V = 53.047 \text{ mm}^3$$

ดังนั้นชิ้นงานโลหะบัดกรีที่ได้จากการหล่อของแม่พิมพ์ที่สร้างขึ้นมีปริมาตร 53.047 ลูกบาศก์มิลลิเมตร

นำข้อมูลที่ได้จากการวัดความสูงของโลหะบัดกรีหลอมละลายด้วยไมโครมิเตอร์และปริมาตรของชิ้นงานโลหะบัดกรีทดสอบมาคำนวณหาค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor : S_p) จะได้ค่าดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor) ของโลหะบัดกรี Sn-58Bi บนแผ่นทองแดง

ชนิดฟลักซ์	ลำดับแผ่นทองแดง	ขนาดของโลหะบัดกรีหลังหลอมละลาย		Spread factor (S_f) $S_f = \frac{D-H}{D} \times 100 = 1 - \frac{1}{\left(1+3 \frac{A^2}{h^2}\right)^{\frac{1}{3}}} \times 100$
		$D = 1.24V^{\frac{1}{3}}$ (mm)	ความสูง (H) (mm)	
NH - 100VK - 1	แผ่นที่ 1	4.66	0.72	83.96
	แผ่นที่ 2	4.66	0.88	80.35
	แผ่นที่ 3	4.66	0.86	81.11
	แผ่นที่ 4	4.66	0.69	84.65
	แผ่นที่ 5	4.66	0.87	80.72
	แผ่นที่ 6	4.66	0.77	83.03
	แผ่นที่ 7	4.66	0.80	82.15
	แผ่นที่ 8	4.66	0.71	84.30
	แผ่นที่ 9	4.66	0.79	82.32
	แผ่นที่ 10	4.66	0.81	81.79
NF 1103	แผ่นที่ 1	4.66	0.92	78.40
	แผ่นที่ 2	4.66	0.78	82.16
	แผ่นที่ 3	4.66	0.80	81.29
	แผ่นที่ 4	4.66	0.88	79.88
	แผ่นที่ 5	4.66	1.02	76.64
	แผ่นที่ 6	4.66	0.86	79.81
	แผ่นที่ 7	4.66	0.90	79.21
	แผ่นที่ 8	4.66	0.81	81.21
	แผ่นที่ 9	4.66	0.87	80.11
	แผ่นที่ 10	4.66	0.82	80.97
NF 2107	แผ่นที่ 1	4.66	0.85	81.18
	แผ่นที่ 2	4.66	0.80	82.32
	แผ่นที่ 3	4.66	0.93	78.78
	แผ่นที่ 4	4.66	0.79	82.23
	แผ่นที่ 5	4.66	0.87	80.68
	แผ่นที่ 6	4.66	0.77	83.00
	แผ่นที่ 7	4.66	0.97	78.33
	แผ่นที่ 8	4.66	0.74	82.97
	แผ่นที่ 9	4.66	0.79	82.05
	แผ่นที่ 10	4.66	0.74	82.78

4.1.2.3 การวิเคราะห์ค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor: S_p)

- ปัจจัยคือ ชนิดของน้ำยาประสานได้แก่ NH-100VK-1, NF 1103 และ NF 2107

- ผลตอบสนอง คือ ค่าตัวประกอบการกระจายตัวของน้ำยาประสานแต่ละชนิดที่ได้จากการทดสอบ

ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียว โดยทดสอบสมมติฐานที่ว่า ค่าตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีของน้ำยาประสานทั้ง 3 ชนิดมีความแตกต่างกันหรือไม่ ที่ระดับนัยสำคัญ = 0.05 หรือที่ระดับความเชื่อมั่น = $1-0.05 = 0.95$ (95%) โดยสามารถตั้งสมมติฐานทางสถิติ ได้ดังนี้

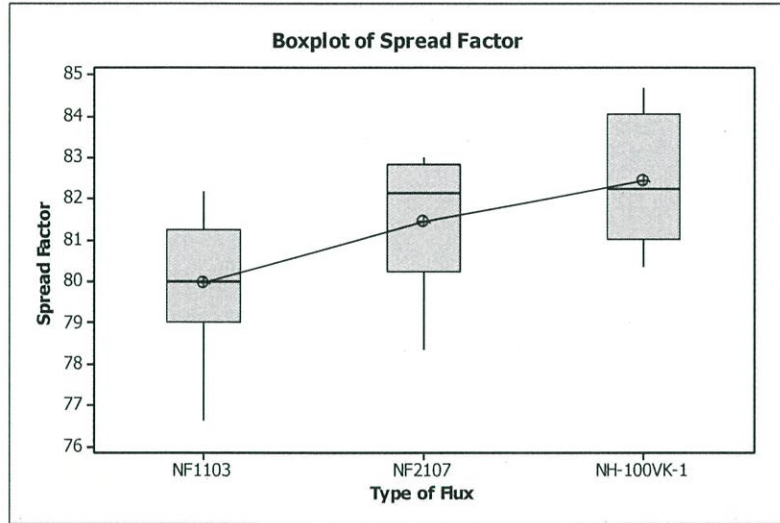
$$H_0 : \mu_{\text{NH-100VK-1}} = \mu_{\text{NF 1103}} = \mu_{\text{NF 2107}}$$

H_1 : มี μ อย่างน้อย 1 คู่ที่แตกต่างกัน

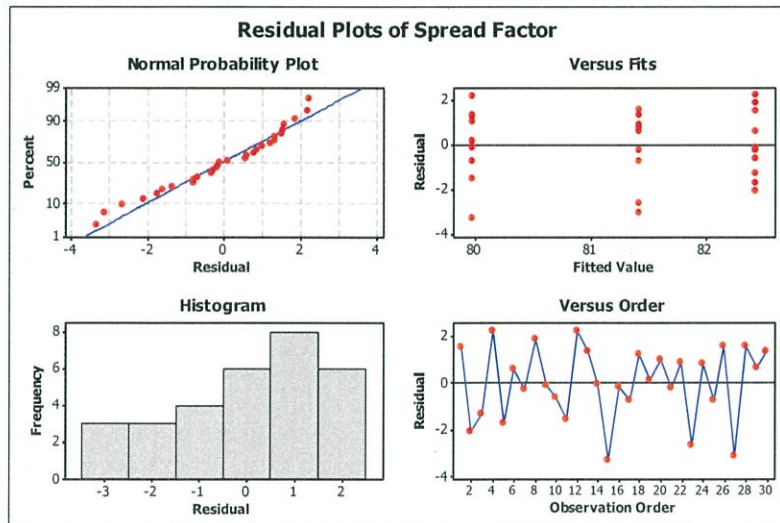
ซึ่งผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากตารางที่ 4.5 พบว่าค่า P-Value = 0.007 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐาน H_0 นั่นคือ ค่าตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีของน้ำยาประสานทั้ง 3 ชนิดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียวของค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor : S_p) ของน้ำยาประสานชนิด NH-100VK-1, NF 1103 และ NF 2107

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	30.854	2	15.427	5.984	0.007
Within Groups	69.612	27	2.578		
Total	100.466	29			



รูปที่ 4.8 Boxplot ของค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor : S_p) ของน้ำยาประสานชนิด NH-100VK-1, NF 1103 และ NF 2107



รูปที่ 4.9 Residual Plots ของค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor : S_p) ของน้ำยาประสานชนิด NH-100VK-1, NF 1103 และ NF 2107

เมื่อมีการปฏิเสธสมมติฐาน จะทราบเพียงว่ามีน้ำยาประสานอย่างน้อย 1 คู่ที่มีค่าตัวประกอบการกระจายตัวแตกต่างกัน แต่ยังไม่ทราบว่าน้ำยาประสานคู่ใดบ้างที่แตกต่างกันจึงทำการเปรียบเทียบคู่ (Multiple comparisons) เพื่อหาคู่ที่น้ำยาประสานที่มีความแตกต่างกันตามโปรแกรม SPSS ซึ่งได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 Multiple comparisons ของค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor)

	(I) TYPE	(J) TYPE	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	NH-100VK-1	NF 1103	2.4700(*)	0.71809	0.005	0.6896	4.2504
		NF 2107	1.0060	0.71809	0.355	-0.7744	2.7864
	NF 1103	NH-100VK-1	-2.4700(*)	0.71809	0.005	-4.2504	-0.6896
		NF 2107	-1.4640	0.71809	0.122	-3.2444	0.3164
	NF 2107	NH-100VK-1	-1.0060	0.71809	0.355	-2.7864	0.7744
		NF 1103	1.4640	0.71809	0.122	-0.3164	3.2444
Scheffe	NH-100VK-1	NF 1103	2.4700(*)	0.71809	0.007	0.6101	4.3299
		NF 2107	1.0060	0.71809	0.388	-0.8539	2.8659
	NF 1103	NH-100VK-1	-2.4700(*)	0.71809	0.007	-4.3299	-0.6101
		NF 2107	-1.4640	0.71809	0.145	-3.3239	0.3959
	NF 2107	NH-100VK-1	-1.0060	0.71809	0.388	-2.8659	0.8539
		NF 1103	1.4640	0.71809	0.145	-0.3959	3.3239
LSD	NH-100VK-1	NF 1103	2.4700(*)	0.71809	0.002	0.9966	3.9434
		NF 2107	1.0060	0.71809	0.173	-0.4674	2.4794
	NF 1103	NH-100VK-1	-2.4700(*)	0.71809	0.002	-3.9434	-0.9966
		NF 2107	-1.4640	0.71809	0.051	-2.9374	0.0094
	NF 2107	NH-100VK-1	-1.0060	0.71809	0.173	-2.4794	0.4674
		NF 1103	1.4640	0.71809	0.051	-0.0094	2.9374

* The mean difference is significant at the 0.05 level.

จากตารางที่ 4.6 จะสังเกตเห็นได้ว่าในแต่ละวิธีการเปรียบเทียบคู่มืออย่างน้อย 1 คู่มือที่มีความแตกต่างกัน ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ค่าตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีของน้ำยาประสานทั้ง 3 ชนิดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

4.1.3 ค่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรี (Contact angle : θ)

4.1.3.1 คำนวณหารัศมีของโลหะบัดกรีหลังหลอมละลายจากพื้นที่โลหะบัดกรีหลังหลอมละลายที่ได้จากการวัดด้วยโปรแกรม Image-Pro Express และคำนวณด้วยสูตรพื้นที่วงกลม (πr^2) ซึ่งได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรี (Contact angle) ของโลหะบัดกรี Sn-58Bi บนแผ่นทองแดง

ชนิดพลาซม์	ลำดับแผ่นทองแดง	Contact angle method		
		Contact angle (θ)		
		รัศมีของโลหะบัดกรีหลังหลอมละลาย (mm)	$\sin \theta = \frac{2}{\left(\frac{A}{h} + \frac{h}{A}\right)}$	θ (องศา)
NH - 100VK - 1	แผ่นที่ 1	6.45806	0.22	12.71
	แผ่นที่ 2	5.80877	0.30	17.46
	แผ่นที่ 3	6.02902	0.28	16.26
	แผ่นที่ 4	6.61264	0.21	12.12
	แผ่นที่ 5	5.91140	0.29	16.86
	แผ่นที่ 6	6.34101	0.24	13.89
	แผ่นที่ 7	6.10897	0.26	15.07
	แผ่นที่ 8	6.57929	0.21	12.12
	แผ่นที่ 9	6.12015	0.25	14.48
	แผ่นที่ 10	5.99762	0.27	15.66
NF 1103	แผ่นที่ 1	5.26324	0.34	19.88
	แผ่นที่ 2	5.96076	0.26	15.07
	แผ่นที่ 3	5.69055	0.28	16.26
	แผ่นที่ 4	5.60828	0.31	18.06
	แผ่นที่ 5	5.18121	0.38	22.33
	แผ่นที่ 6	5.45139	0.31	18.06
	แผ่นที่ 7	5.45826	0.32	18.66
	แผ่นที่ 8	5.72314	0.28	16.26
	แผ่นที่ 9	5.63962	0.30	17.46
	แผ่นที่ 10	5.68475	0.28	16.26

ชนิดพริกซ์	ลำดับแผ่นทองแดง	Contact angle method		
		Contact angle (θ)		
		รัศมีของโลหะบัดกรีหลังหลอมละลาย (mm)	$\sin \theta = \frac{2}{\left(\frac{A}{h} + \frac{h}{A}\right)}$	θ (องศา)
NF 2107	แผ่นที่ 1	5.98908	0.28	16.26
	แผ่นที่ 2	6.19663	0.25	14.48
	แผ่นที่ 3	5.46628	0.33	19.27
	แผ่นที่ 4	6.07194	0.26	15.07
	แผ่นที่ 5	5.89214	0.29	16.86
	แผ่นที่ 6	6.32825	0.24	13.88
	แผ่นที่ 7	5.52336	0.34	19.88
	แผ่นที่ 8	6.06280	0.24	13.89
	แผ่นที่ 9	5.98088	0.26	15.07
	แผ่นที่ 10	5.96418	0.24	13.89

4.1.3.2 การวิเคราะห์ค่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรี (Contact angle : θ)

- ปัจจัยคือ ชนิดของน้ำยาประสาน ได้แก่ NH-100VK-1, NF 1103 และ NF 2107
- ผลตอบสนอง คือ ค่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรีของน้ำยาประสานแต่ละชนิดที่ได้จากการทดสอบ

ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียว โดยทดสอบสมมติฐานที่ว่า ค่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรีของน้ำยาประสานทั้ง 3 ชนิดมีความแตกต่างกันหรือไม่ ที่ระดับนัยสำคัญ = 0.05 หรือที่ระดับความเชื่อมั่น = 1 - 0.05 = 0.95 (95%) โดยสามารถตั้งสมมติฐานทางสถิติ ได้ดังนี้

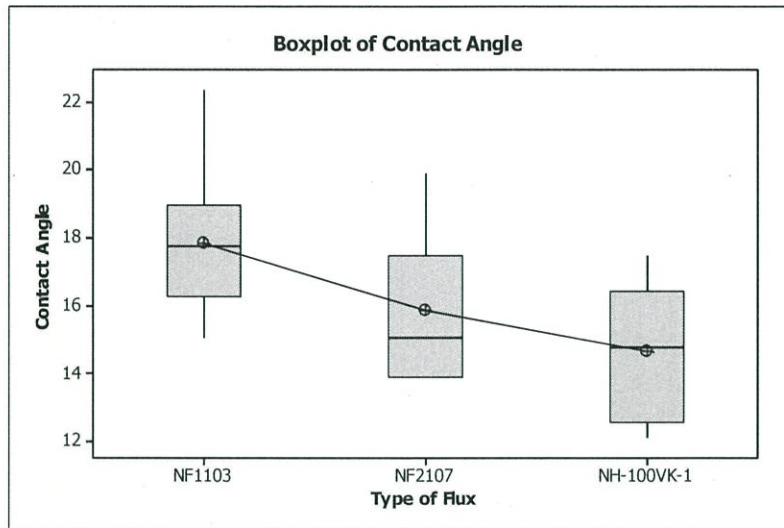
$$H_0 : \mu_{NH-100VK-1} = \mu_{NF 1103} = \mu_{NF 2107}$$

$$H_1 : \text{มี } \mu \text{ อย่างน้อย 1 คู่ที่แตกต่างกัน}$$

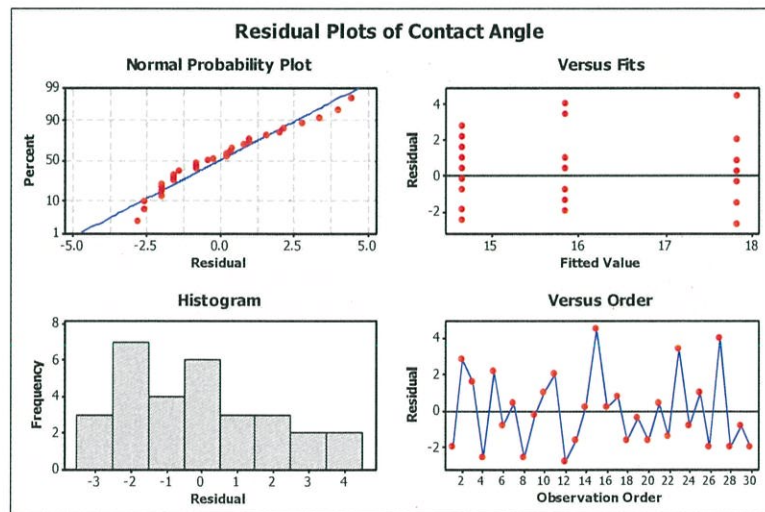
ซึ่งผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากตารางที่ 4.8 พบว่าค่า P-Value = 0.008 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐาน H_0 นั่นคือ ค่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรีของน้ำยาประสานทั้ง 3 ชนิดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียวของค่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรี (Contact angle : θ) ของน้ำยาประสานชนิด NH-100VK-1, NF 1103 และ NF 2107

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	51.171	2	25.586	5.858	0.008
Within Groups	117.918	27	4.367		
Total	169.090	29			



รูปที่ 4.10 Boxplot ของค่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรี (Contact angle : θ) ของน้ำยาประสานชนิด NH-100VK-1, NF 1103 และ NF 2107



รูปที่ 4.11 Residual plots ของค่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรี (Contact angle : θ) ของน้ำยาประสานชนิด NH-100VK-1, NF 1103 และ NF 2107

เมื่อมีการปฏิเสธสมมติฐาน จะทราบเพียงว่ามีน้ำยาประสานอย่างน้อย 1 คู่ที่มีค่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรีแตกต่างกัน แต่ยังไม่ทราบว่าน้ำยาประสานคู่ใดบ้างที่แตกต่างกันจึงทำการเปรียบเทียบคู่ (Multiple comparisons) เพื่อหาคู่ น้ำยาประสานที่มีความแตกต่างกันตามโปรแกรม SPSS ซึ่งได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 Multiple comparisons ของค่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรี (Contact angle)

	(I) TYPE	(J) TYPE	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	NH-100VK-1	NF 1103	-3.1670(*)	0.93460	0.006	-5.4843	-0.8497
		NF 2107	-1.1920	0.93460	0.421	-3.5093	1.1253
	NF 1103	NH-100VK-1	3.1670(*)	0.93460	0.006	0.8497	5.4843
		NF 2107	1.9750	0.93460	0.106	-0.3423	4.2923
	NF 2107	NH-100VK-1	1.1920	0.93460	0.421	-1.1253	3.5093
		NF 1103	-1.9750	0.93460	0.106	-4.2923	0.3423
Scheffe	NH-100VK-1	NF 1103	-3.1670(*)	0.93460	0.008	-5.5876	-0.7464
		NF 2107	-1.1920	0.93460	0.454	-3.6126	1.2286
	NF 1103	NH-100VK-1	3.1670(*)	0.93460	0.008	0.7464	5.5876
		NF 2107	1.9750	0.93460	0.127	-0.4456	4.3956
	NF 2107	NH-100VK-1	1.1920	0.93460	0.454	-1.2286	3.6126
		NF 1103	-1.9750	0.93460	0.127	-4.3956	0.4456
LSD	NH-100VK-1	NF 1103	-3.1670(*)	0.93460	0.002	-5.0846	-1.2494
		NF 2107	-1.1920	0.93460	0.213	-3.1096	0.7256
	NF 1103	NH-100VK-1	3.1670(*)	0.93460	0.002	1.2494	5.0846
		NF 2107	1.9750(*)	0.93460	0.044	0.0574	3.8926
	NF 2107	NH-100VK-1	1.1920	0.93460	0.213	-0.7256	3.1096
		NF 1103	-1.9750(*)	0.93460	0.044	-3.8926	-0.0574

* The mean difference is significant at the 0.05 level.

จากตารางที่ 4.9 Multiple comparisons จะสังเกตเห็นได้ว่าในแต่ละวิธีการเปรียบเทียบคู่มืออย่างน้อย 1 คู่ที่มีความแตกต่างกัน ดังนั้นจะเห็นได้ว่าคุณสมบัติของโลหะบัดกรีของน้ำยาประสานทั้ง 3 ชนิดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดสอบการหาค่าความสามารถในการกระจายตัว (Wettability) ของโลหะบัดกรี Sn-58Bi บนพื้นผิวโลหะพื้นทองแดงโดยใช้น้ำยาประสานประเภท RMA ทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ NH-100VK-1, NF 1103 และ NF 2107 สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1 จากการศึกษาหาค่าความสามารถในการกระจายตัว (Wettability) ของโลหะบัดกรีด้วยวิธี

Spread test method

5.1.1 ค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio: S_r)

น้ำยาประสานชนิด NH-100VK-1 ให้ค่าอัตราส่วนการกระจายตัวเท่ากับ 3.64 ซึ่งมากกว่าของน้ำยาประสานชนิด NF 1103 (ให้ค่าอัตราส่วนการกระจายตัวเท่ากับ 2.94) และชนิด NF 2107 (ให้ค่าอัตราส่วนการกระจายตัวเท่ากับ 3.36)

5.1.2 ค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor: S_f)

น้ำยาประสานชนิด NH-100VK-1 ให้ค่าตัวประกอบการกระจายตัวเท่ากับ 82.44 ซึ่งมากกว่าของน้ำยาประสานชนิด NF 1103 (ให้ค่าตัวประกอบการกระจายตัวเท่ากับ 79.97) และชนิด NF 2107 (ให้ค่าตัวประกอบการกระจายตัวเท่ากับ 81.43)

5.2 จากการศึกษาหาค่าความสามารถในการกระจายตัว (Wettability) ของโลหะบัดกรีด้วยวิธี

Contact angle method

5.2.1 ค่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรี (Contact angle : θ)

น้ำยาประสานชนิด NH-100VK-1 ให้ค่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรีเท่ากับ 14.66 องศา ซึ่งน้อยกว่าของน้ำยาประสานชนิด NF 1103 (ให้ค่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรีเท่ากับ 17.83 องศา) และชนิด NF 2107 (ให้ค่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรีเท่ากับ 15.86 องศา)

จากการทดสอบหาค่าความสามารถในการกระจายตัว (Wettability) ของโลหะบัดกรี Sn-58Bi บนพื้นผิวโลหะพื้นทองแดงด้วยวิธี Spread test method และ Contact angle method พบว่าน้ำยาประสานชนิด NH-100VK-1 มีความเหมาะสมกับโลหะบัดกรี Sn-58Bi มากที่สุด

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรรณชัย กัลยาศิริ. กรรมวิธีการผลิต พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [2] กัลยรัตน์ อ่างวินิจฉัยและกรรณชัย กัลยาศิริ, 2555. การศึกษาอิทธิพลของธาตุเจือจุ่มต่อโครงสร้างจุลภาคและปฏิกิริยารอยต่อ ของโลหะบัดกรี Sn-0.6Cu-0.05Ni-0.005Ge. ปรินญาณพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [3] กำธร สุขพิมาย, กัลยา ผ่าโผนและกรรณชัย กัลยาศิริ, 2556. การศึกษาอิทธิพลของอินเดียมต่อการกระจายตัวและการเกิดสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn บนแผ่นทองแดง. การประชุมวิชาการ ช่างงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี พ.ศ. 2556
- [4] ฉวีวรรณ ลิ้มสุวรรณและกรรณชัย กัลยาศิริ, 2551. การเปลี่ยนแปลงความแข็งของโลหะบัดกรีในกลุ่ม Sn-Ag-Cu เนื่องจากสภาพแวดล้อมในการใช้งาน. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [5] นิวัฒน์ มูแกม, 2554. ผลกระทบของสภาวะการเย็นตัวต่อโครงสร้างจุลภาค โครงสร้างผลึกและชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.7Cu และ Sn-0.3Ag-0.7Cu กับโลหะพื้นทองแดง. การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี 2554
- [6] ประพิศ ประคุณหังสิต, วาสนา คงสุข, 2544. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ 2549 ฉบับที่ 155 มกราคม 2544
- [7] ปริญญา เลิศวิริยะศักดิ์ และวรัชวัลย์ ลือนาม, 2555. การศึกษาการเกิดขม่อมโลหะบัดกรีในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์
- [8] มนต์ชัย เทียนทอง, 2548. สถิติและวิธีการวิจัยทางเทคโนโลยีสารสนเทศ. กรุงเทพฯ, บริษัท ทรูวิชั่นส์ จำกัด
- [9] มนัส สลธิจินดา , 2529. เหล็กกล้า STEEL. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์
- [10] รชต คงขยาสุขวัฒน์, กัลยา ผ่าโผนและกรรณชัย กัลยาศิริ, 2555. การศึกษาอิทธิพลของธาตุ In,Bi,Sb และ Ag ต่อสมบัติทางกายภาพของโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.6Cu-0.05Ni-Ge. การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี พ.ศ. 2555
- [11] ศิริกุล วิสุทธิ์เมธางกูรและอวิชชัย ปลุกผล, 2552. การผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วโดยกระบวนการอัลตราโซนิคอะตอมไมเซชัน
- [12] Fay Hua et al., 1998. Eutectic Sn-Bi as an Alternative Pb-Free Solder. Production Generation Solution – Technology Center.
- [13] Giles Humpston and David M. Jacobson, 2004. Principles of Soldering
- [14] Ing. Th. Herzog, 2007. Lecture: Electronic Packaging and Interconnection Technology Solderability and

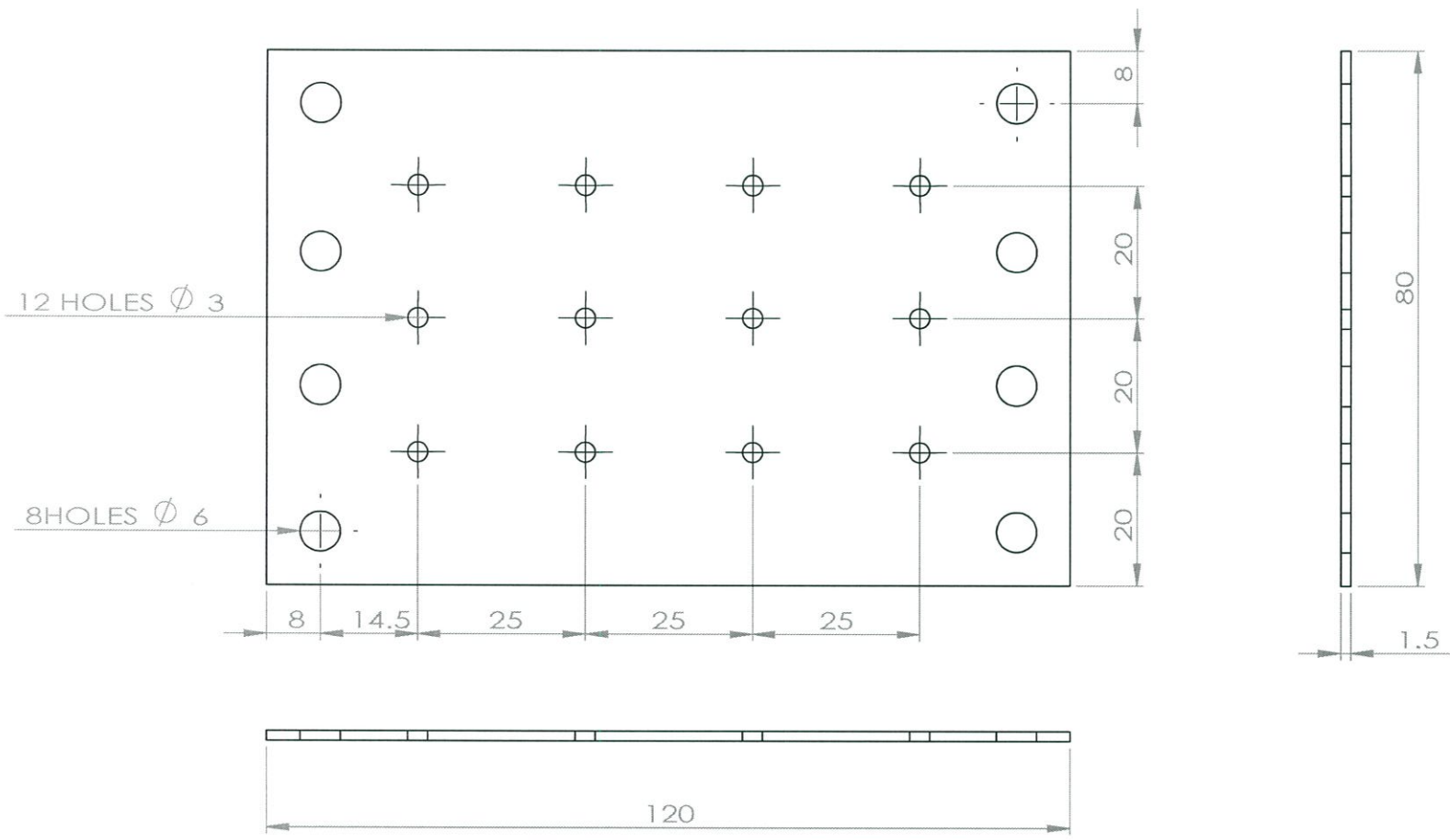
soldering related Issues, Federal University of Santa Catarina

- [15] Japanese Standards Association, 2003. Test methods for lead-free solders - Part 3 : Methods for spread test , JIS Z 3198-3
- [16] Japanese Standards Association, 2003. Test methods for lead-free solders - Part 4 : Methods for spread test by a wetting balance method and a contact angle method , JIS Z 3198-4
- [17] Jennie S.Hwang, 1996. Modern Solder Technology for Competitive Electronics Manufacturing.
- [18] Mike Judd and Keith Brindley, second edition, 1999. Soldering in Electronics Assembly
- [19] Siewert et al., 2002. Properties of Lead-Free Solders Release 4.0. Database for Solder Properties with Emphasis on New Lead-free Solders, National Institute of Standards and Technology & Colorado School of Mines
- [20] ความรู้เกี่ยวกับ(StainlessSteel) [ออนไลน์.], 14 กรกฎาคม 2556.
แหล่งที่มา http://www.navy.mi.th/ncd/main/knowledge/store_knowledge/p121109102714.pdf
- [21] บทที่ 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน. มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ [ออนไลน์.], 5 ธันวาคม 2556.
แหล่งที่มา www.hosting.cmru.ac.th/phitsinee/admin/blog/file/240811114435.pdf
- [22] บทที่ 17 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance : ANOVA) [ออนไลน์.], 22 มกราคม 2557.
แหล่งที่มา www.eng.kmutnb.ac.th/Engineering/.../บทที่%2017%20ANOVA.doc
- [23] สถิติและการวิเคราะห์ข้อมูลทางสุขภาพ [ออนไลน์.], 22 มกราคม 2557.
แหล่งที่มา http://intraserver.nurse.cmu.ac.th/mis/download/course/lec_567730_lesson_06A.pdf
- [24] เกียรติความรู้ บริษัท สยามพาร์ทโปรดักส์ จำกัด [ออนไลน์.], 23 มกราคม 2557.
แหล่งที่มา http://www.siampart.com/download/edownload_detail.php?chkID=9
- [25] เอกสารคำสอนวิชา พอ.4000 สถิติเบื้องต้นสำหรับงานพัฒนาทรัพยากรมนุษย์และองค์การ คณะพัฒนาทรัพยากรมนุษย์ สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์[ออนไลน์.], 22 มกราคม 2557.
แหล่งที่มา www.hrd.nida.ac.th/hrodnida/rtefile/rte_365.pdf
- [26] เอกสารชุดที่ 5 การใช้โปรแกรม SPSS for Windows 11..5 ในการวิเคราะห์ความแปรปรวน[ออนไลน์.], 22 มกราคม 2557. แหล่งที่มา http://202.28.25.163/mis/download/publication/460_file.pdf

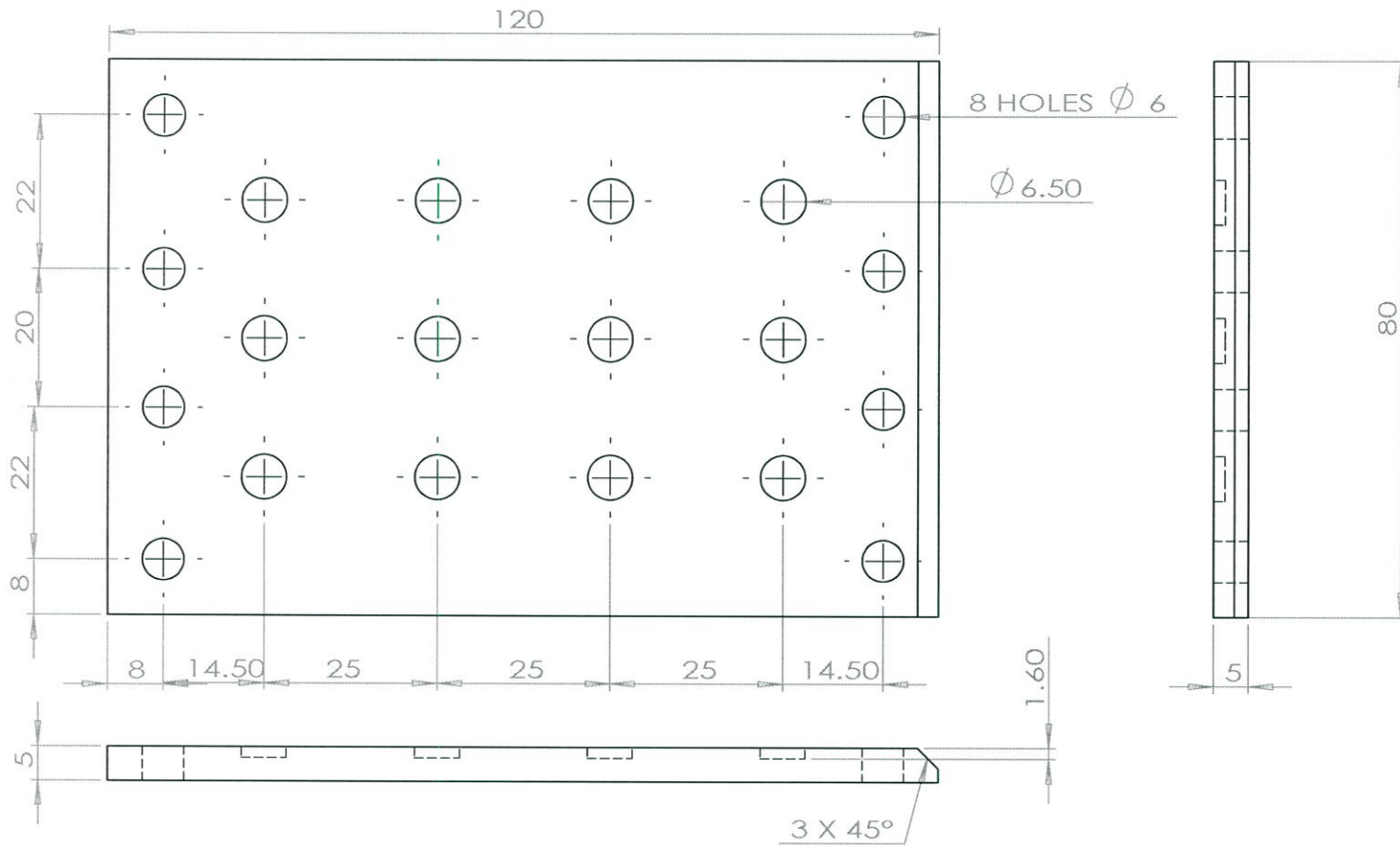
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

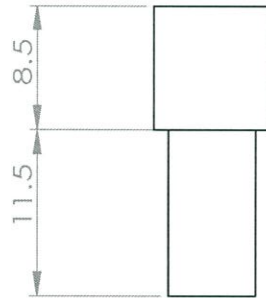
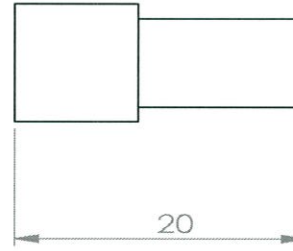
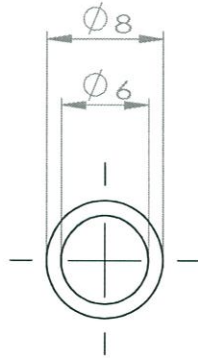
แบบ Drawing ชุดแม่พิมพ์โลหะสำหรับหล่อชิ้นงาน



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:			FINISH:	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
DRAWN	NAME	SIGNATURE	DATE		TITLE:	
CHK'D						
APPV'D						
MFG						
Q.A				MATERIAL:	DWG NO.	Middle Mold A4
				WEIGHT:	SCALE: 1:1	SHEET 1 OF 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN				NAME		SIGNATURE		DATE	
CHK'D				TITLE:					
APPV'D				MATERIAL:					
MFG				DWG NO.		Bottom Mold		A4	
Q.A				WEIGHT:		SCALE:1:1		SHEET 1 OF 1	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
DRAWN									
CHK'D									
APP'VD									
MFG									
Q.A				MATERIAL:		DWG NO.		Pin	
								A4	
1		2		WEIGHT:		SCALE:2:1		SHEET 1 OF 1	