



การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความต้านทานแรงเฉือน
ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมและโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

โดย

อรจิตร แจ่มแสง

ปิยะวรรณ สุนาสวน

นิวัฒน์ มุแก้ม

สนับสนุนงบประมาณโดย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ประจำปีงบประมาณ 2557

A study of factors affecting on shear strength
between stainless steel and lead-free solder

By

Orajit Jaemsang
Piyawan Sunasuan
Niwat Mookam

Granted by

Rajamangala University of Technology Rattanakosin
Fiscal year 2013

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่องการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความต้านทานแรงเฉือนระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมและโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วมีวัตถุประสงค์เพื่อ เพื่อศึกษาค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยบัดกรีที่เกิดจากการเติมโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu ระหว่างแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม เพื่อศึกษาอิทธิพลของระยะต่อเกย ความหนาผิว และช่องว่างที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยบัดกรี และเพื่อทำนายค่าความต้านทานแรงเฉือนที่เหมาะสมสำหรับการต่อเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยวิธีการทางสถิติ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่ได้ให้การสนับสนุนโครงการวิจัยนี้

อรจิตร แจ่มแสง และคณะ
กันยายน 2557

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : Social 001/2557

ชื่อโครงการ : การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความต้านทานแรงเฉือนระหว่างเหล็กกล้าไร้
สนิมและโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

ชื่อนักวิจัย : นางอรจิตร์ แจ่มแสง, นางสาวปิยะวรรณ สุนาสวน และ นายนิวัฒน์ มูแก้ม

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยฉบับนี้เพื่อกำหนดตัวแปรกระบวนการที่เหมาะสมสำหรับการบัดกรีระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu เมื่อกำหนดตัวแปรคือ ระยะต่อเกย พื้นผิวของโลหะพื้น และระยะห่างระหว่างชิ้นงาน เมื่อผลทดสอบคือ ความต้านทานแรงเฉือนของรอยต่อ ในการทดลองใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชีสำหรับเลือกตัวแปรการบัดกรีที่เหมาะสมจากการทดลองผลพบว่า ตัวแปรการบัดกรีส่งผลกระทบต่อความต้านทานแรงเฉือน โดยตัวแปรการบัดกรีที่เหมาะสมได้จากการกำหนดระยะต่อเกย 10 มิลลิเมตร พื้นผิวของโลหะพื้นที่ 600 กริต ระยะช่องว่าง 0.3 มิลลิเมตร ผลการทำนายปรากฏว่ามีค่าความต้านทานแรงเฉือนสูงสุด 107.89 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร และจากการทดลองยืนยันผลจากการทำนายตัวแปรที่เหมาะสมมีค่าความผิดพลาดน้อยกว่า 3.50 %

คำสำคัญ: โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว, โลหะเติม, ความต้านทานแรงเฉือน, เหล็กกล้าไร้สนิม

E-mail Address : orajit.jam@at.rmutr.ac.th

ระยะเวลาโครงการ : 1 ตุลาคม 2556 - 30 กันยายน 2557

Abstract

Code of project : Social 001/2014

Project name : A STUDY OF FACTORS AFFECTING ON SHEAR STRENGTH BETWEEN
STAINLESS STEEL AND LEAD-FREE SOLDER

Researcher name : Mrs. Orajit Jaemsang, Ms. Piyawan Sunasuan
and Mr. Niwat Mookam

This research aims to determine the parameters of appropriate process on soldering between AISI 304 stainless steel and Sn-0.3Ag-0.7Cu lead-free solder. The parameters determined in this study were lap joint, base metal surface and the space of each work piece whereas the responses were shear resistance of joint. In this study, Taguchi method was used as experimental design technique for selecting optimized soldering parameters. The findings reveal that soldering parameters influencing the shear resistance. Moreover, the optimal soldering parameters were determined from the clearance of lap joint 10 mm, base metal surface was 600 grids, and the clearance was 0.3 mm. In addition, the result of prediction reveals that the value of maximum shear resistance was 107.89 N/mm^2 . Finally, this study had also been verified that the result of prediction error was less than 3.50 %.

Keyword: Lead-free solder, Filler Metal, Shear Strength, Stainless Steel.

E-mail Address : orajit.jam@at.rmutr.ac.th

Period of project : 1 October 2013 – 30 September 2014

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ	ง
สารบัญภาพ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
3. สมมุติฐานของการวิจัย.....	2
4. ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	2
5. นิยามศัพท์เฉพาะ.....	2
6. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ	3
7. แนวทางการนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
1. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
1.1 การบัดกรีและกระบวนการ.....	4
1.2 ทฤษฎีการขาดของชิ้นงาน	10
1.3 วิธีทาทุชิ	13
1.4 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	17
2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
3 วิธีดำเนินการวิจัย	25
1. วัสดุและวิธีการทดลอง.....	25
2. การวิเคราะห์ผล	29
4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	31
1. ผลการทดสอบความต้านทานแรงเฉือน	31
2. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ.....	33
5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	39
1. สรุปผลการวิจัย.....	39
2. ข้อเสนอแนะ	39
บรรณานุกรม.....	40

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ประวัติผู้วิจัย..... 42

สารบัญภาพประกอบ

ภาพที่	หน้า
1 การบัดกรีแบบรอยต่อเกย	5
2 ลักษณะของแรงเฉือน	10
3 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield).....	11
4 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก.....	13
5 การเปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุพลาสติก	13
6 แผนผังแสดงขั้นตอนของการทดลองโดยวิธีทาทุชิ.....	15
7 โครงสร้างจุลภาค Sn-3.5Ag	21
8 โครงสร้างจุลภาค Sn-5.0Ag	22
9 โครงสร้างจุลภาค Sn-8.0Ag	22
10 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงเฉือน ความหนาของโลหะเติมและเวลา	23
11 รอยต่อออลูมิเนียม 6063 กับโลหะผสม Sn-Pb-Zn	23
12 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรง อุณหภูมิและเวลาในการต่อ	24
13 ชิ้นงานโลหะพื้น	25
14 เครื่องขัดชิ้นงาน.....	26
15 การทำความสะอาดโลหะพื้น	26
16 ฟลักซ์บัดกรี	26
17 โลหะบัดกรีแบบแห้ง	27
18 อุปกรณ์จับยึด	27
19 ติดตั้งชิ้นงานลงบนอุปกรณ์จับยึด	28
20 เครื่องให้ความร้อน.....	28
21 ชิ้นงานที่ผ่านการบัดกรี	28
22 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์.....	29
23 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงเฉือน	32
24 ตัวอย่างผลการทดสอบ	32
25 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกค้างของค่าความต้านทานแรงเฉือน	34
26 ค่าส่วนตกค้างของความต้านทานแรงเฉือนกับค่าที่ถูกฟิต	34
27 ค่าส่วนตกค้างของความต้านทานแรงเฉือนกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล	35
28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของระดับต่างๆของปัจจัยควบคุมที่ใช้ในการทดลองกับค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu.....	37

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำกว่า 180 °C.....	8
2 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 180 °C ถึง 200 °C	8
3 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 200 °C ถึง 230 °C	8
4 ตารางการเลือกใช้ Standard Orthogonal Array	17
5 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304.....	25
6 ปัจจัยในการทดลองและระดับของปัจจัย.....	29
7 แผนการทดลอง.....	30
8 ค่าความต้านทานแรงเฉือนจากการทดลอง.....	33
9 ค่า S/N-Ratio.....	36
10 ค่า S/N Ratio เฉลี่ยของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง.....	37

บทที่ 1 บทนำ

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โลหะบัดกรีนิยมนำมาเป็นโลหะเติม (Filler Metal) ระหว่างรอยต่อของโลหะพื้นสำหรับนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่งโลหะบัดกรีชนิดตะกั่วและดีบุก (Sn-Pb Solder) นอกจากจะใช้ในการประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ากับแผ่นบอร์ดแล้วยังสามารถใช้สำหรับประสานรอยต่อชนิดอื่นๆ ได้อีกด้วย เนื่องจากมีจุดเด่นด้านการบัดกรีที่ดี อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วงที่เหมาะสม มีสมบัติทางกลและกายภาพที่ดีตลอดจนเป็นโลหะเติมที่มีราคาถูก แต่อย่างไรก็ตามโลหะบัดกรีชนิดนี้ยังคงมีความเป็นพิษเนื่องจากมีตะกั่วผสมอยู่ในปริมาณสูง สำหรับส่วนผสมที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่ Sn-37Pb และ Sn-40Pb เป็นต้น [1-3] ดังนั้นเพื่อป้องกันอันตรายจากตะกั่วจึงมีการนำโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-Free Solder) มาใช้แทนโลหะบัดกรีชนิดดีบุก-ตะกั่ว และในปัจจุบันมนุษย์เราหันมาให้ความสำคัญในเรื่องสุขภาพกันมากขึ้น วิธีที่ทำให้มีสุขภาพที่ดีมีด้วยกันหลายวิธีหนึ่งในนั้นก็คือการบริโภคอาหารที่สะอาดปราศจากสารปนเปื้อน ซึ่งอาหารสามารถเกิดการปนเปื้อนได้โดยตรงจากการประกอบอาหาร สารปนเปื้อนที่อันตรายตัวหนึ่งก็คือ ตะกั่วที่มีอยู่ เช่น ในท่อน้ำ ภาชนะบรรจุอาหาร (Food Packaging) หรือเครื่องใช้ในครัวเรือน (Kitchen Articles) [4] ซึ่งการปนเปื้อนของตะกั่วเกิดจากการละลายของตะกั่วที่อยู่ในรูปของไอออนโลหะสามารถออกจากแนวการบัดกรีเข้าสู่สารละลายที่สัมผัสโดยตรงกับตะกั่ว เช่น น้ำ ซึ่งการละลายดังกล่าวจะค่อยๆ ดำเนินไป อย่างไรก็ตามการละลายของตะกั่วจะเกิดขึ้นในอัตราเร็วเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีปัจจัยของสิ่งแวดล้อมมาเป็นตัวกระตุ้น เช่น การเพิ่มอุณหภูมิ การเพิ่มปริมาณเกลือในน้ำ นอกจากนี้การนำตะกั่วซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าต่ำมาสัมผัสโดยตรงกับ สเตนเลสซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าจะทำให้เกิดการเร่งการละลายของตะกั่วหรือเกิดการกัดกร่อนที่เรียกว่า การกัดกร่อนเนื่องจากความต่างศักย์ไฟฟ้า ทำให้กระทรวงสาธารณสุขได้กำหนดปริมาณการปนเปื้อนของตะกั่วในอาหารได้ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับอาหารในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท ดังนั้นการเลือกใช้วัสดุต้องมั่นใจว่าส่วนประกอบของภาชนะบรรจุอาหารสามารถเคลื่อนย้ายลงสู่อาหารต้องอยู่ในปริมาณที่ปลอดภัย [5-8] ในปัจจุบันโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่สามารถนำมาใช้ทดแทนโลหะบัดกรีดั้งเดิมที่มีตะกั่วเป็นส่วนผสม ซึ่งอยู่ในรูปแบบโลหะผสม (Alloy) มีอยู่ด้วยกันหลายชนิด ได้แก่ Sn-Ag, Sn-Cu, Sn-Zn, Sn-Bi Sn-In และ Sn-Ag-Cu เป็นต้น สำหรับโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่นิยมใช้กันมาก คือ โลหะบัดกรีในกลุ่ม Sn-Ag-Cu (SAC) ซึ่งเป็นโลหะบัดกรีที่มีคุณสมบัติทางกลและความสามารถในการบัดกรีที่ดีกว่าอีกทั้งยังมีจุดหลอมเหลวที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะบัดกรีที่มีตะกั่วผสมอยู่ [9, 10] แต่อย่างไรก็ตามนอกจากองค์ประกอบทางเคมีของโลหะเติมแล้วมีอีกหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลของรอยต่อบัดกรีจากปัจจัยต่างๆ ที่สามารถควบคุมได้ เช่น ระยะการเกย อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการบัดกรี เป็นต้น [11-14]

ในงานวิจัยนี้จึงนำโลหะผสม Sn-0.3Ag-0.7Cu ซึ่งเป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วในกลุ่ม SAC ที่มีเงินผสมอยู่น้อยมาใช้เป็นโลหะเติมเพื่อทำการศึกษาปัจจัย ได้แก่ ระยะต่อเกย ความหนาของโลหะพื้นและระยะช่องว่างที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงเฉือนของเหล็กกล้าไร้สนิม SS 304 ด้วยการบัดกรีในเตาอบ

2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยบัดกรีที่เกิดจากการเติมโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu ระหว่างแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SS304

2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของระยะต่อเกย ความหนาผิวและช่องว่างที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยบัดกรี

2.3 เพื่อทำนายค่าความต้านทานแรงเฉือนที่เหมาะสมสำหรับการต่อเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยวิธีการบัดกรี

3. สมมุติฐานของการวิจัย

โลหะบัดกรีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมได้แก่ โลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมของตะกั่วและดีบุก (Sn-Pb Solder) เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นหลายประการ เช่น จุดหลอมเหลวต่ำ มีการกระจายตัวบนโลหะพื้นได้ดี บัดกรีได้ง่ายและมีคุณสมบัติทางกลที่น่าเชื่อถือ แต่อย่างไรก็ตามการมีอยู่ของตะกั่วจะเป็นอันตรายต่อร่างกายมนุษย์และสิ่งแวดล้อม จึงมีการนำธาตุต่างๆมาทดแทนตะกั่ว ซึ่งมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน เช่น Ag, Cu, In และ Bi เป็นต้น เพื่อนำมาทำเป็นโลหะผสมซึ่งอาจจะอยู่ในรูปแบบ 2 หรือ 3 ชนิดผสมเข้าด้วยกัน แต่การผสมกันของโลหะผสมและการนำมาใช้งานก็ต้องพิจารณาถึง ปัจจัยต่างๆ โดยเฉพาะคุณสมบัติทางกล เช่น ค่าความต้านทานแรงเฉือน ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการต่อวัสดุ ดังนั้นโลหะผสมโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu จึงเป็นอีกชนิดหนึ่งที่น่าสนใจ

4. ขอบเขตของโครงการวิจัย

งานวิจัยนี้จะศึกษาความต้านทานแรงเฉือนของรอยบัดกรีที่เกิดจากการเติมอัลลอยที่มีความเข้มข้นของดีบุกระหว่างแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SS304 โดยการบัดกรีชิ้นงานสแตนเลสแบบต่อเกย (Lap Joint) กันด้วยการบัดกรีในเตา (Furnace Soldering) จากตัวแปรที่กำหนด ได้แก่ ระยะต่อเกย ความหนาผิว และระยะช่องว่าง จากนั้นทำการทดสอบความต้านทานแรงเฉือนของรอยต่อเพื่อทำนายความแข็งแรงและเลือกตัวแปรที่เหมาะสมด้วยวิธีการทางสถิติ

5. นิยามศัพท์เฉพาะ

5.1 การบัดกรี (Soldering) หมายถึง การต่อซึ่งโลหะพื้นไม่มีการหลอมติดกัน แต่จะยึดติดกันด้วยพันธะทางกล กระบวนการเหมือนกันกับการเล่นประสาน (Brazing) แต่ใช้อุณหภูมิไม่เกิน 450 °C

5.2 โลหะเติม (Filler Metal) หมายถึง โลหะที่ถูกหลอมในการเชื่อมเพื่อเติมเต็มในรอยต่อระหว่างผิวสัมผัสของโลหะพื้น

5.3 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-Free Solder) หมายถึง โลหะบัดกรีปราศจากการผสมของตะกั่ว

5.4 ความต้านทานแรงเฉือน (Shear Strength) หมายถึง ความเค้นเฉือนที่มากที่สุดที่วัสดุสามารถทนได้

6. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

6.1 องค์ความรู้ที่ได้จากการวิจัยสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการนำโลหะเติมที่มีความเข้มข้นของดีบุกไปใช้งานในการบัดกรีกับเหล็กกล้าไร้สนิมได้อย่างเหมาะสม

6.2 เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการบัดกรีให้มีความแข็งแรงสามารถรับแรงเฉือนได้ดี เหมาะสมกับการใช้งาน ตลอดจนเพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพและมีความน่าเชื่อถือ

7. แนวทางการนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

สามารถถ่ายทอดองค์ความรู้หรือผลการวิจัยสู่กลุ่มเป้าหมายโดยการนำเสนอในการประชุมวิชาการหรือวารสารวิชาการในระดับชาติในรูปแบบของภาษาไทยเพื่อให้สามารถเข้าถึงกลุ่มเป้าหมาย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ประกอบด้วยทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งเป็นข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีกระบวนการและวิธีการต่างๆที่ใช้ในงานวิจัยตลอดจนสรุปงานวิจัยในกลุ่มเรื่องที่ใกล้เคียงกับงานวิจัย

1. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1.1 การบัดกรีและกระบวนการ

การบัดกรี (Soldering) คือ กรรมวิธีการต่อโลหะตั้งแต่สองชิ้นหรือมากกว่าเข้าด้วยกัน โดยที่โลหะนั้นจะเป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ ให้ความร้อนแก่รอยต่อที่อุณหภูมิต่ำกว่า 450 °C ใช้โลหะเติมที่เป็นโลหะที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ เช่นตะกั่วหรือดีบุก เติมนลงไปที่รอยต่อของชิ้นงาน โลหะเติมนี้จะหลอมละลายและแทรกตัวซึมเข้าไปในช่องว่างระหว่างรอยต่อด้วยปฏิกิริยาคาปิลลารี (Capillary Action) ลักษณะงานที่ใช้การต่อโลหะด้วยการบัดกรีอ่อนได้แก่ งานบัดกรีท่อทองแดง สำหรับงานแรงดันต่ำ หรือ งานที่มีอุณหภูมิใช้งานไม่เกิน 200-300 °C หรืองานบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ติดกับแผ่นวงจรพิมพ์ จากที่ได้กล่าวมาแล้ว เพื่อให้เป็นที่เข้าใจมากยิ่งขึ้น อาจพอสรุปได้ว่าจุดสังเกตของการบัดกรีที่ต่างจากการเชื่อม คือ โลหะที่นำมาประสานรอยต่อ อุณหภูมิการปฏิบัติงาน รวมทั้งลักษณะการประสานของรอยต่อ เมื่อเรานำชิ้นงานที่ได้จากการบัดกรี มาตัดในแนวขวางของรอยต่อ เราจะเห็นได้ชัดเจนว่าในการต่อโลหะด้วยวิธีการบัดกรีนั้นโลหะหลักจะไม่หลอมละลาย [15]

1.1.1 ประเภทของการบัดกรี

การแบ่งประเภทของการบัดกรีตาม AWS ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ได้แก่

1. การบัดกรีในเตา (Furnace Soldering: FS)
2. การบัดกรีในเตาเหนี่ยวนำ (Induction Soldering: IS)
3. การบัดกรีด้วยอินฟราเรด (Infrared Soldering: IRS)
4. การบัดกรีแบบจุ่ม (Dip Soldering: DS)
5. การบัดกรีด้วยความต้านทาน (Resistance Soldering: RS)
6. การบัดกรีด้วยเปลวไฟ (Torch Soldering: TS)
7. การบัดกรีด้วยคลื่น (Wave Soldering: WS)
8. การบัดกรีด้วยหัวแร่ (Iron Soldering: INS)

1.1.2 อุณหภูมิใช้งานของโลหะบัดกรี

อุณหภูมิใช้งาน คือ อุณหภูมิที่โลหะบัดกรีจะเกิดการหลอมละลาย จากนั้นจึงไหลเข้าไปในช่องว่างระหว่างชิ้นงานและเกิดการประสานกันระหว่างชิ้นงานในที่สุด โดยทั่วไปอุณหภูมิใช้งานของโลหะบัดกรีจะสูงกว่าอุณหภูมิหลอมละลายของโลหะบัดกรี ซึ่งถ้าหากอุณหภูมิของชิ้นงานในขณะนั้นต่ำกว่าอุณหภูมิใช้งานโลหะบัดกรีจะไม่ไหลถึงแม้โลหะบัดกรีจะหลอมละลายแล้วก็ตาม และถ้าหากให้ความร้อนชิ้นงานสูงกว่าอุณหภูมิใช้งาน ฟลักซ์จะไหม้ ก่อให้เกิดสิ่งสกปรกขึ้น ส่งผลทำให้การบัดกรีได้ผลไม่ดี ความแข็งแรงของรอยบัดกรีจะลดลงอย่างมาก โลหะบัดกรีที่แข็งแล้วจะเป็นรู

พรม ดังนั้นจำเป็นต้องรักษาอุณหภูมิใช้งานไว้ เพื่อการบัดกรีที่สมบูรณ์โดยอุณหภูมิใช้งานที่ใช้สำหรับ ตะกั่วบัดกรี Sn-40Pb เท่ากับ 230 °C และโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.7Cu เท่ากับ 270 °C

1.1.3 การให้ความร้อนเกินขนาด

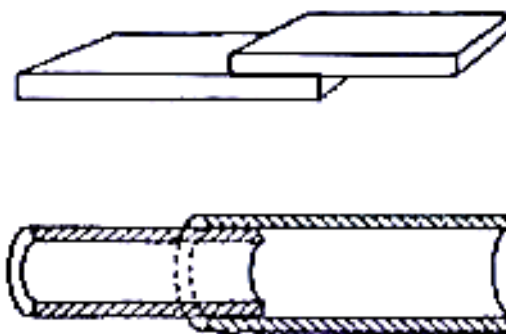
การป้องกันไม่ให้เกิดการให้ความร้อนเกินขนาดระหว่างขั้นตอนการบัดกรีนับว่าเป็นเรื่องสำคัญยิ่งเพราะความร้อนที่เกินขนาดอาจจะทำให้น้ำยาประสานหรือ ฟลักซ์ (Flux) เสื่อมประสิทธิภาพอันจะส่งผลให้สารนี้ไม่สามารถกัดสนิมที่จะก่อตัวขึ้นในระหว่างขั้นตอนการให้ความร้อน และทำลายมันในที่สุดปัญหาดังกล่าวเกิดขึ้นบ่อยครั้งในการบัดกรีที่ไม่เป็นผลเพื่อหลีกเลี่ยงการให้ความร้อนเกินขนาด จึงควรตรวจสอบอย่างสม่ำเสมอว่าโลหะผสมมีอุณหภูมิถึงจุดหลอมเหลวแล้ว โดยนำเข้าไปใกล้บริเวณที่มีความร้อนซึ่งต่อไปจะต้องนำมาเชื่อมกันหรือทางที่ได้อีกทางก็คือ การผสมน้ำยาประสานและโลหะผสมให้อยู่ในรูปผงทองแดงจะสูญเสียคุณสมบัติทางกลไกไปถ้าได้รับความร้อนเกินขนาดสิ่งที่สำคัญเช่นกันก็คือการใช้แหล่งความร้อนที่มีขนาดไม่ใหญ่จนเกินไปเช่นการใช้ท่อนำก๊าซอะเซทิลีนผสมออกซิเจนสำหรับการบัดกรี Fitting

1.1.4 แคพิลลารีตี (Capillarity)

โลหะเต็มทีนำมาใช้จะละลายในลักษณะของเหลวอยู่ในพื้นที่แคบๆ ซึ่งอยู่ระหว่างชิ้นงานทั้งสองที่ต่อแยกกัน ปฏิกริยาดังกล่าวเรียกว่า แคพิลลารีตี (Capillarity) เมื่อโลหะผสมเย็นตัวลงจะเหลือเพียงรอยเชื่อมที่คงทนถาวรระหว่างโลหะโลหะผสมและอโลหะ

1.1.5 การบัดกรีแบบต่อแยก

การบัดกรีชิ้นงานที่มีรอยต่อของชิ้นงานเป็นแบบต่อแยก (Lap Joint) คือ การนำชิ้นงานสองชิ้นมาวางซ้อนกันตามระยะที่เหมาะสม แล้วทำการบัดกรีพื้นผิวสัมผัสระหว่างชิ้นงานทั้งสอง ตัวอย่างแสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 การบัดกรีแบบรอยต่อแยก

1.1.6 ระยะต่อแยก

ระยะต่อแยก คือ ระยะที่ชิ้นงานทั้งสองชิ้นซ้อนทับกัน ซึ่งโดยทั่วไประยะต่อแยกที่เหมาะสมจะมีความยาวเป็น 3-6 เท่าของความหนาของชิ้นงาน

1.1.7 ระยะช่องว่าง

การเว้นช่องรอยต่อระหว่างชิ้นงานต้องกระทำด้วยความระมัดระวังต้องเว้นช่องให้เล็กพอที่เกิดปฏิกิริยาแทรกซึมได้ดีไม่เว้นช่องใหญ่เกินไปเพราะนอกจากจะได้อรอยบัดกรีที่ไม่แข็งแรงการเว้นช่องรอยต่อยังขึ้นกับชนิดของโลหะทั้งสองที่นำมาต่อกันเนื่องจากการขยายตัวของโลหะจากความร้อน (สัมประสิทธิ์การขยายตัว) แต่ละชนิดไม่เท่ากันการเกิดการแทรกซึมที่ดีจะขึ้นอยู่กับความหนืดของเหลวและระยะช่องรอยต่อ ดังนั้นการเว้นช่องรอยต่อของงานบัดกรีแข็งต้องคำนึงถึงชนิดของโลหะลวดเชื่อมอีกด้วยถ้าระยะช่องว่างน้อยความแข็งแรงของรอยต่อจะมากขึ้นความแข็งแรงของรอยต่อบัดกรียังขึ้นอยู่กับ การแทรกตัวของโลหะลวดบัดกรีที่แทรกเข้าไปในขอบเกรนของชิ้นงานอีกด้วย ปริมาณการแทรกตัวขึ้นอยู่กับชนิดของลวดบัดกรีชนิดของโลหะงานและเวลาที่ได้รับความร้อนเช่นเดียวกัน

1.1.8 ฟลักซ์

ฟลักซ์ (Flux) สำหรับการบัดกรีทำหน้าที่รักษาโลหะบัดกรีและชิ้นงานให้สะอาดในขณะที่บัดกรีฟลักซ์ที่ใช้ควรเป็นสารเคมีบริสุทธิ์หน้าที่หลักของฟลักซ์ที่ใช้ในการบัดกรีแข็งมี 3 ประการ คือ (1). กำจัดออกไซด์บางๆเมื่อได้รับความร้อน (2). ให้การไหลตัวของโลหะลวดเชื่อมได้ดี และ (3). ช่วยให้เกิดปฏิกิริยาแทรกซึมได้ดี ฟลักซ์เมื่อได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิใช้งานจะไหลตัวเข้าไปตลอดรอยต่อช่วยลดยุทออกไซด์และทำหน้าที่ดึงโลหะลวดบัดกรีไหลเข้าไปในรอยต่อ ภายหลังการบัดกรีสมบูรณ์ดีแล้ว ฟลักซ์ตกค้างจะต้องกำจัดออกได้ง่าย ฟลักซ์มีอยู่หลายลักษณะ ได้แก่ ของเหลวผงของแข็งครีมและเป็นรูปแบบอื่นๆอีกด้วยเมื่อบัดกรีเสร็จเรียบร้อยแล้วจะต้องกำจัดฟลักซ์ที่หลงเหลือออกทันที เพราะฟลักซ์ที่ตกค้างจะเกิดปฏิกิริยากัดกร่อนชิ้นงาน การกำจัดฟลักซ์ตกค้างทำได้หลายวิธี เช่น นำงานที่เชื่อมเสร็จจุ่มน้ำเย็นหรือจุ่มน้ำร้อนทันทีแล้วล้างฟลักซ์ออกหรือกำจัดออกได้ด้วยสารเคมีก็ได้ทั้งนี้ทั้งนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุงาน

1.1.9 ชนิดของน้ำยาประสาน

น้ำยาประสานยางสน (Resin Flux) เป็นน้ำยาประสานที่ไม่ทำให้เกิดสนิม ไม่กัดโลหะและไม่เป็นตัวนำไฟฟ้า หลังจากบัดกรีแล้วจึงเป็นน้ำประสานที่เหมาะสมแก่งานจำพวกเครื่องใช้ไฟฟ้า วิทยุ โทรทัศน์และงานละเอียดอื่นๆ น้ำประสานชนิดนี้มีขายเป็นก้อน เป็นผง และใช้ผสมกับแอลกอฮอล์แล้วนำมาใช้ก็ได้

น้ำยาประสานสำเร็จรูปจำพวกสังกะสีคลอไรด์ ที่เขาทำมาบรรจุในกระป๋องสำเร็จรูปมีลักษณะเป็นของเหลวคล้ายๆจารบี หรือวาสลิน ซึ่งเมื่อใช้บัดกรีแล้วก็ต้องล้างให้สะอาดเช่นกัน น้ำยาประสานจำพวกสังกะสีคลอไรด์ ที่ทำมาขายในลักษณะเป็นผลึกคือ เป็นก้อนๆ เอามาละลายน้ำสะอาดแล้วใช้ได้ และต้องล้างให้สะอาดเมื่อบัดกรีเสร็จแล้วเช่นเดียวกัน เพราะเป็นพวกกัดโลหะ

น้ำยาประสานกรดเกลือกรด เกลือธรรมดาก็สามารถใช้เป็นน้ำยาประสานได้ดีสำหรับโลหะจำพวกเหล็กและเหล็กอาบตีบุกสังกะสี น้ำยาประสานกรดเกลือนี้ เราต้องทาบนรอยที่จะบัดกรีและทิ้งไว้ประมาณ 10-20 วินาที แล้วจึงลงมือบัดกรีถ้าจะทำการบัดกรีเหล็กหล่อหรือเหล็กไม่เกิดสนิม จะใช้น้ำยาประสานกรดเกลือก็ได้แต่ไม่ค่อยดี โลหะที่มีส่วนผสมของเหล็กอยู่เวลาบัดกรีแล้วจะแน่นสนิทดีเช่นเดียวกับสารที่ไม่มีเหล็กผสมอยู่ การใช้กรดเกลือเป็นน้ำยาประสานนี้ ต้องล้างออกทันทีเมื่อบัดกรีเสร็จแล้วเพราะน้ำกรดที่ติดอยู่บนแผ่นโลหะจะกัดโลหะทำให้เกิดสนิมและผุพังได้ง่าย

น้ำยาประสานสำหรับบัดกรีเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) มีน้ำยาประสานพิเศษสำหรับบัดกรีโลหะชนิดนี้และมีขายอยู่หลายยี่ห้อด้วยกัน และต้องระมัดระวังมากในการบัดกรี ควรทำตามคำแนะนำที่ให้ไว้เฉพาะชนิดๆ ที่ติดอยู่กับขวดหรือกล่องน้ำยาประสานที่เราซื้อ มา น้ำยาประสานแบบนี้ส่วนมากมักจะทำปฏิกิริยากับโลหะอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจะต้องล้างออกทันทีเมื่อบัดกรีเสร็จแล้ว โดยล้างด้วยน้ำสบู่หรือต่างชนิด 10 เปอร์เซ็นต์ก็ยิ่งดี

น้ำยาประสานสำหรับบัดกรีอะลูมิเนียม มีอยู่หลายชนิดด้วยกัน แต่การบัดกรีโลหะชนิดนี้ต้องระวังเป็นพิเศษ เพราะจุดหลอมตัวของโลหะต่ำมาก (ราวๆ 125 °F) และการบัดกรีต้องใช้เตาฟู่หรือ แก๊ส ใช้หัวแรงไม่ค่อยได้ผล และจุดหลอมตัวของตัวบัดกรี (Solder) บางชนิดก็ใกล้กับจุดหลอมตัวของโลหะ

น้ำยาประสานสังกะสีคลอไรด์ (Zinc Chloride Flux) น้ำยาประสานชนิดนี้แรงกว่าชนิดข้างบน และใช้กันมากกว่าชนิดข้างบน จัดเป็นจำพวกน้ำประสานกรด เพราะทำจากน้ำกรดเกลืออย่างแรง โดยเอาสังกะสีละลายเข้าไป วิธีทำก็คือ เอากรดเกลืออย่างเข้มข้นมาแล้วเอาสังกะสีบริสุทธิ์ใส่เข้าไปเรื่อยๆ จนใสครั้งแรกจะปรากฏว่ามีแก๊สไฮโดรเจนเกิดขึ้นมาก (ระวังอย่าเข้าใกล้และหายใจเอาแก๊สนี้เข้าไปเพราะมีอันตราย) แต่ปฏิกิริยาเคมีนี้จะค่อยๆ ลดลงเมื่อใสสังกะสีเพิ่มเข้าไปเรื่อยๆ จนไม่มีปฏิกิริยาเกิดขึ้น แล้วเอาน้ำสะอาดเติมเข้าไปเท่าตัว ก็ใช้เป็นน้ำยาประสานบัดกรีได้น้ำยาประสานสังกะสีคลอไรด์นี้ทำให้โลหะที่เราบัดกรีเกิดสนิมได้ง่าย เพราะมันกัดโลหะและเป็นตัวนำไฟฟ้าด้วย ดังนั้นเวลาบัดกรีเสร็จแล้วต้องล้างรอยบัดกรีด้วยน้ำยาหรือน้ำให้สะอาด น้ำประสานชนิดนี้เหมาะสำหรับงานบัดกรีจำพวกกระป๋อง เหล็กแผ่น สังกะสีแผ่น ทองแดง ทองเหลือง และนิกเกิล

1.1.10 บทบาทของน้ำยาประสานระหว่างการให้ความร้อน

เมื่อพื้นผิวของโลหะปราศจากสิ่งแปลกปลอมสนิมหรือเศษของมันแล้ว เราก็ยังไม่สามารถให้ความร้อนกับตัวโลหะหรือตัวโลหะผสมได้ในทันที เนื่องจากเราจะต้องป้องกันโลหะจากการก่อตัวของสนิมอีกครั้งในระหว่างการให้ความร้อนสารซึ่งใช้สำหรับป้องกันการก่อตัวของสนิมระหว่างการให้ความร้อน และช่วยให้พื้นผิวสะอาดตลอดขั้นตอนการบัดกรีนี้มีชื่อเรียกว่า น้ำยาประสานหรือฟลักซ์ และเนื่องจากว่าน้ำยาประสานถูกนำมาใช้เพื่อขัดขวางการก่อตัวของสนิมในบริเวณพื้นผิวที่จะบัดกรีเราจึงต้องแน่ใจว่าในระหว่างการใช้งาน สารดังกล่าวถูกทาทั่วบริเวณที่ตัวโลหะผสมจะปกคลุม ซึ่งหลายครั้งกรณีดังกล่าวเป็นสาเหตุที่ทำให้การบัดกรีล้มเหลวในการที่จะได้พื้นผิวโลหะที่สะอาดนั้นสามารถกระทำได้โดยสองวิธีคือทางกลไกและทางเคมี การทำความสะอาดทางกลไกสามารถกระทำได้โดยง่ายด้วยการใช้แปรง หรือฝอยลวดขจัดสิ่งแปลกปลอมและสนิมออกจากพื้นผิวเพื่อที่จะได้ไม่มีสิ่งกีดขวางเมื่อโลหะผสมแผ่มาปกคลุม ในระหว่างการทำความสะอาดนี้ผิวของโลหะจะโดนขูดขีดเล็กน้อยเป็นผลให้เกิดรอยขนาดจิ๋วซึ่งทำให้พื้นผิวของโลหะขยายขึ้นกล่าวคือพื้นผิวขรุขระนี้ช่วยให้โลหะผสมเกาะยึดกับตัวโลหะมากขึ้นเนื่องจากปริมาณพื้นที่ที่เพิ่มขึ้นการทำความสะอาดทางเคมีหมายถึงการใช้ผลิตภัณฑ์เคมีซึ่งผสมกรดหรือผลิตภัณฑ์ที่ออกฤทธิ์กับสนิมและขจัดมันออกจากพื้นผิวโลหะ

1.1.11 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

โลหะบัดกรีชนิดดีบุก-ตะกั่ว (Sn-Pb) จะใช้กันมากในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และอุตสาหกรรมอื่นๆ ซึ่งมีข้อดีคือ ราคาถูก มีคุณสมบัติการบัดกรีที่ดี อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วงที่

เหมาะสม มีคุณสมบัติทางกายภาพ ทางกลและทางโลหะวิทยาที่ดี แต่อย่างไรก็ตามโลหะบัดกรีชนิดนี้ยังคงมีความเป็นพิษเนื่องจากมีปริมาณของตะกั่วผสมอยู่ในปริมาณสูง ส่วนผสมของโลหะบัดกรีที่นิยมใช้กันมาก คือ 63Sn-37Pb และ 60Sn-40Pb เป็นต้น โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว(Lead-Free Solder) จึงได้มีการพัฒนาเพื่อทดแทนโลหะบัดกรีชนิดที่มีส่วนผสมของตะกั่ว สามารถแบ่งได้ตามช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวได้ 3 กลุ่มดังแสดงในตารางดังตารางที่ 2.1-2.3

ตารางที่ 1. กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำกว่า 180 °C

โลหะผสม	ส่วนประกอบ (wt.%)	ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว °C
Sn-Bi	Sn-58Bi	138
Sn-In	Sn-52In	118
Sn-In	Sn-50Bi	118-125
Bi-In	Bi33-In	109

ตารางที่ 2. กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 180 °C ถึง 200 °C

โลหะผสม	ส่วนประกอบ (wt.%)	ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว °C
Sn-Zn	Sn-9Zn	198
Sn-Zn-Bi	Sn-8Zn-3Bi	188-189
Sn-Bi-In	Sn-20Bi-10In	143-193

ตารางที่ 3. กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 200 °C ถึง 230 °C

โลหะผสม	ส่วนประกอบ (wt.%)	ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว °C
Sn-Ag	Sn-3.5Ag	221
Sn-Ag	Sn-2Ag	221-226
Sn-Cu	Sn-0.7Cu	227
Sn-Ag-Bi	Sn-3.5Ag-3Bi	206-213
Sn-Ag-Bi	Sn-2Ag-7.5Bi	207-212
Sn-Ag-Cu	Sn-0.3Ag-0.7Cu	217
Sn-Ag-Cu-Sb	Sn-2Ag-0.8Cu-0.5Sb	216-222

เพื่อป้องกันอันตรายจากสารตะกั่วจึงมีการนำโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-Free Solder) มาใช้แทนโลหะบัดกรีชนิด ดีบุก-ตะกั่ว ซึ่งคุณลักษณะเบื้องต้นของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ใช้เป็นเกณฑ์พิจารณาเป็นดังนี้

1. อุณหภูมิหลอมเหลวใกล้เคียงกับโลหะบัดกรีชนิด Sn-Pb โดยเฉพาะโลหะบัดกรีชนิด 63Sn-37Pb

2. มีช่วงความเป็นพลาสติกที่แคบ

3. มีคุณสมบัติด้านการเปียกที่ดีเพื่อนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรม

4. มีสมคุณบัติด้านกายภาพไม่ด้อยกว่าโลหะบัดกรีชนิด Sn-Pb

5. มีสมคุณบัติด้านทานการล้าที่ดี

6. สามารถใช้ได้กับระบบฟลักซ์เหลวที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบัน

7. เมื่อทำเป็นโลหะบัดกรีชนิดครีมจะต้องมีอายุการเก็บยาวนานไม่เสื่อม

คุณภาพ

8. ต้องไม่เป็นพิษ

9. ราคาถูก

ธาตุที่ผสมกับดีบุกเพื่อใช้ผลิตโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วโลหะบัดกรีทั่วไปจะไม่มีส่วนผสมของดีบุกเป็นหลัก เนื่องจากดีบุกมีคุณสมบัติการเปียก และการแพร่กระจายตัวในการนำไปบัดกรีได้ดี ส่วนธาตุเจือที่นำมาผสมกับดีบุกทำเป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วนั้นมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน ธาตุโลหะเจือที่สำคัญๆ ได้แก่ บิสมัท (Bi), แคดเมียม(Cd), อินเดียม (In), สังกะสี (Zn), ทองคำ (Au), ทองแดง (Cu), พลวง (Sb) และ เงิน (Ag) เป็นต้น ซึ่งธาตุเจือที่มีจุดหลอมเหลวต่ำๆ ที่ใช้ผสมกับดีบุกเพื่อทำโลหะบัดกรี

1.1.12 สมบัติของธาตุเจือชนิดต่างๆ

เงิน (Ag) เป็นโลหะที่ใช้ผสมในโลหะบัดกรี ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะบัดกรี ทำให้สมบัติการแพร่ดีขึ้น มีจุดหลอมเหลวที่ต่ำลง แต่มีราคาแพง

อินเดียม (In) เป็นโลหะที่มีราคาค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับธาตุเจือชนิดอื่น โลหะบัดกรีที่มีอินเดียมผสมอยู่จะมีราคาแพง แต่มีข้อดีคือ อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ ยังช่วยลดการเกิดออกซิเดชัน และเพิ่มคุณสมบัติความเหนียวได้ดีขึ้น

บิสมัท (Bi) โลหะดีบุกผสมบิสมัทที่อัตราส่วน 45Sn-58Pb มีโครงสร้างแบบยูเทคติก โลหะกลุ่มนี้มีจุดเด่นคือ มีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ต่ำมาก คือ 139 °C ลักษณะโครงสร้างของโลหะบัดกรีชนิดนี้เป็นแผ่นแบบ Lamella มีความสามารถในการเชื่อมประสานที่ดีมาก แต่มีราคาสูง

พลวง (Sp) การเติมในปริมาณที่พอเหมาะจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติการต้านทานการคืบ และการต้านความล้าของโลหะบัดกรีให้ดีขึ้น แต่พลวงมีข้อเสียคือ ทำให้คุณสมบัติการเปียกและการแพร่กระจายของโลหะบัดกรีลดลง

ทองแดง (Cu) เมื่อผสมดีบุกกับทองแดงอัตราส่วน 99.3Sn-0.7Cu จะทำให้เกิดโครงสร้างยูเทคติกที่จุดหลอมเหลว 227 °C โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟส Cu_6Sn_5 ลักษณะเป็นแท่งฝังอยู่ในเนื้อดีบุก ทองแดงจะทำให้โลหะบัดกรีมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ข้อเสียของโลหะบัดกรีกลุ่ม Sn-Cu คือ การมีธาตุเจือผสมอยู่น้อยจึงอาจเกิดเส้นใยดีบุกขึ้นได้ ซึ่งเป็นปัญหาทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรได้

สังกะสี (Zn) เป็นโลหะที่มีจุดเด่นด้านอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำและราคาถูก โลหะบัดกรีชนิด ดีบุก-สังกะสี ที่จุดยูเทคติก (Sn9Wt.%Zn) ที่อุณหภูมิหลอมเหลว 199 °C ซึ่งใกล้เคียงกับโลหะ

บัดกรีชนิด ดีบุก-ตะกั่ว Sn-Pb ที่จุดยูเทคติกส์ 183 °C (Sn9Wt.%Zn) ประกอบด้วยเฟสสองเฟสคือ เนื้อพื้นดีบุก และ Hexagonal Zn ซึ่งรวมตัวกับดีบุกอยู่ในลักษณะสารละลายของแข็งที่ดีบุกน้อยกว่า 1% ของโครงสร้างจุลภาค Sn-Zn มีลักษณะเป็นแผ่นบางสลับกันระหว่างเฟส Sn กับ Zn ซึ่งทั้งดีบุกและสังกะสีต่างก็สามารถทำปฏิกิริยากับ Substrate ที่เป็นทองแดงได้ โลหะบัดกรีกลุ่มนี้มีข้อด้อยบางประการเช่น Zn สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ง่ายเกิดเป็นสังกะสีออกไซด์มากเมื่อใช้งานในกระบวนการบัดกรีแบบ Wave นอกจากนี้ Zn ยังไวต่อปฏิกิริยากับสารเคมีที่ผสมอยู่ใน ฟลักซ์ทำให้เกิดการกัดกร่อน

1.2 ทฤษฎีการขาดของชิ้นงาน

1.2.1 ความเค้น (Stress)

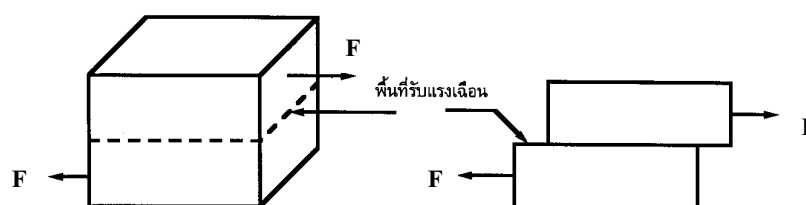
ตามความเป็นจริงความเค้น หมายถึง แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่เนื่องจากความไม่เหมาะสมทางปฏิบัติ และความยากในการวัดหาค่านี้ เราจึงมักจะพูดถึงความเค้นในรูปของแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ด้วยเหตุผลที่ว่า แรงกระทำภายนอกมีความสมดุลกับแรงต้านทานภายใน การหาค่าความเค้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

เมื่อ σ คือ ความเค้น (Stress) มีหน่วยเป็น (Pa, 1 Pa = 1N/m²) หรือ kgf/mm² หรือ psi (lbf/in²)
F คือ แรงภายนอกที่มากระทำ มีหน่วยเป็น N หรือ kgf หรือ lbf และ A คือ พื้นที่ภาคตัดขวางที่แรงกระทำ (m² หรือ mm² หรือ in²)

โดยทั่วไปความเค้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ตามลักษณะของแรงที่มากระทำ

1. ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึงมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง โดยพยายามจะแยกเนื้อวัสดุให้แยกขาดออกจากกัน
2. ความเค้นแรงอัด (Compressive Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อพยายามอัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลง
3. ความเค้นแรงเฉือน (Shear Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำให้ทิศทางขนานกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อให้วัสดุเคลื่อนผ่านจากกันดังภาพที่ 2. มีค่าเท่ากับแรงเฉือน (Shear Force) หารด้วยพื้นที่ภาคตัดขวาง A ซึ่งขนานกับทิศทางของแรงเฉือน



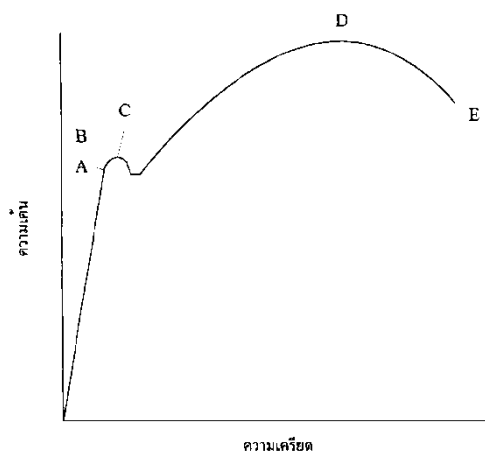
ภาพที่ 2 ลักษณะของแรงเฉือน

1.2.2 ความเครียดและการเปลี่ยนรูป

ความเครียด (Strain) คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (Deformation) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ (เกิดความเค้น) การเปลี่ยนรูปของวัสดุนี้เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งลักษณะของมันสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ (1). การเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นหรือความเครียดแบบคืนรูป (Elastic Deformation or Elastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปในลักษณะที่เมื่อปลดแรงกระทำ อะตอมซึ่งเคลื่อนไหวยังคงอยู่เนื่องจากผลของความเค้นจะเคลื่อนกลับเข้าตำแหน่งเดิมทำให้วัสดุคงรูปร่างเดิมไว้ได้ ตัวอย่างเช่น พวงยางยืด สปริง ถ้าเราดึงมันแล้วปล่อยมันจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม และ (2). การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกหรือความเครียดแบบคงรูป (Plastic Deformation or Plastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปที่ถึงแม้ว่าจะปลดแรงกระทำนั้นออกแล้ววัสดุก็ยังคงรูปร่างตามที่ถูกเปลี่ยนไปนั้น โดยอะตอมที่เคลื่อนที่ไปแล้วจะไม่กลับไปตำแหน่งเดิมวัสดุทุกชนิดจะมีพฤติกรรมเปลี่ยนรูปทั้งสองชนิดนี้ขึ้นอยู่กับแรงที่มากกระทำ หรือความเค้นว่ามีมากน้อยเพียงใด หากไม่เกินพิกัดการคืนรูป (Elastic Limit) แล้ว วัสดุนั้นก็จะมีพฤติกรรมคืนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic Behavior) แต่ถ้าความเค้นเกินกว่าพิกัดการคืนรูปแล้ววัสดุก็จะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวรหรือแบบพลาสติก (Plastic Deformation)

1.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด

ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Stress-Strain Relationship) ในที่นี้เราจะใช้เส้นโค้งความเค้น - ความเครียด (Stress-Strain Curve) ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) เป็นหลัก โดยจะพล็อตค่าของความเค้นในแกนตั้งและความเครียดในแกนนอน ดังภาพที่ 3 การทดสอบแรงดึง นอกจากจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดแล้ว ยังจะแสดงความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุ ความเปราะและเหนียวของวัสดุ (Brittleness and Ductility) และบางครั้งอาจใช้บอกความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุ (Formability) ได้อีกด้วย

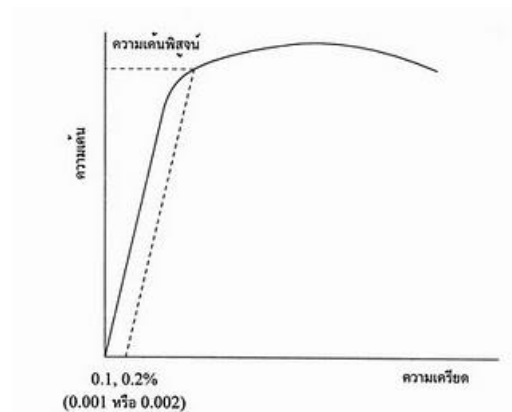


ภาพที่ 3 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield)

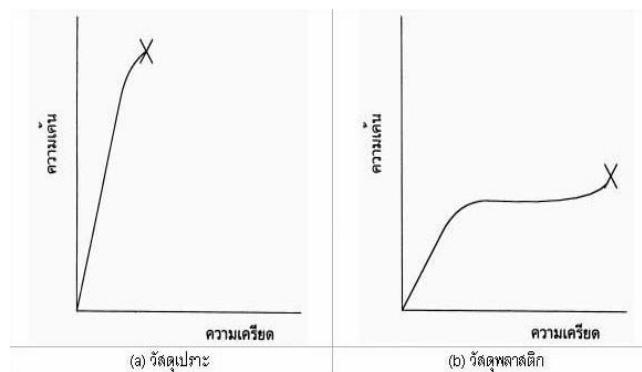
1.2.4 การทดสอบแรงดึง

การทดสอบแรงดึง (Tension Test) วิธีการทดสอบนั้นจะนำตัวอย่างที่จะทดสอบมาดึงอย่างช้า ๆ แล้วบันทึกค่าของความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นไว้แล้วมาพล็อตเป็นเส้นโค้งดังภาพ 3 ขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบมีต่าง ๆ กันขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุชิ้น ๆ มาตรฐานต่าง ๆ ของการทดสอบ เช่น มาตรฐานของ ASTM (American Society of Testing and Materials) BS (British Standards) JIS (Japanese Industrial Standards) หรือแม้แต่ มอก. (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย) ได้กำหนดขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบไว้ ทั้งนี้เพื่อให้ผลของการทดสอบเชื่อถือได้พร้อมกับการกำหนดความเร็วในการเพิ่มแรงกระทำเอาไว้ด้วย จากการศึกษาเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดเราพบว่า เมื่อเราเริ่มดึงชิ้นทดสอบอย่างช้า ๆ ชิ้นทดสอบจะค่อย ๆ ยืดออกจนถึงจุดจุดหนึ่ง (จุด A) ซึ่งในช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจะเป็นสัดส่วนคงที่ ทำให้เราได้กราฟที่เป็นเส้นตรง ตามกฎของฮุก (Hook's law) ซึ่งกล่าวว่าความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด จุด A นี้เรียกว่าพิสัยสัดส่วน (Proportional Limit) และภายใต้พิสัยสัดส่วนนี้วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic Behavior) นั่นคือเมื่อปล่อยแรงกระทำชิ้นทดสอบจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม เมื่อเราเพิ่มแรงกระทำต่อไปจนเกินพิสัยสัดส่วนเส้นกราฟจะค่อย ๆ โค้งออกจากเส้นตรงวัสดุหลายชนิดจะยังคงแสดงพฤติกรรมการคืนรูปได้อีกเล็กน้อยจนถึงจุด ๆ หนึ่ง (จุด B) เรียกว่า พิกัดยืดหยุ่น (Elastic limit) ซึ่งจุดนี้จะเป็นจุดกำหนดว่าความเค้นสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการแปรรูปถาวรกับวัสดุชิ้นนั้นเมื่อผ่านจุดนี้ไปแล้ววัสดุจะมีการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Plastic Deformation) ลักษณะการเริ่มต้นของความเครียดแบบพลาสติกนี้เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของวัสดุ โลหะหลายชนิดเช่น พวกลูกเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) จะเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างรวดเร็วโดยไม่มีการเพิ่มความเค้น (บางครั้งอาจจะลดลงก็มี) ที่จุด C ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก จุด C นี้เรียกว่าจุดคราก (Yield Point) และค่าของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นจุดคราก (Yield Stress) หรือ Yield Strength ค่า Yield Strength นี้มีประโยชน์กับวิศวกรมาก เพราะเป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูปและในกรณีของโลหะจะเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่เราคงใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดการเสียหายวัสดุหลายชนิดเช่นอะลูมิเนียม ทองแดง จะไม่แสดงจุดครากอย่างชัดเจนแต่เราก็มีวิธีที่จะหาได้โดยกำหนดความเครียดที่ 0.10 - 0.20% ของความยาวกำหนดเดิม (Original Gage Length) แล้วลากเส้นขนานกับกราฟช่วงแรกไปจนตัดเส้นกราฟที่โค้งไปทางด้านขวา ดังภาพที่ 4 ค่าความเค้นที่จุดตัดนี้จะนำมาใช้แทนค่าความเค้นจุดครากได้ความเค้นที่จุดนี้บางครั้งเรียกว่า ความเค้นพิสูจน์ (Proof Stress) หรือความเค้น 0.1 หรือ 0.2% Offset ดังแสดงในภาพที่ 4 หลังจากจุดครากแล้ว วัสดุจะเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกโดยความเค้นจะค่อย ๆ เพิ่มอย่างช้า ๆ หรืออาจจะคงที่จนถึงจุดสูงสุด (จุด D) ค่าความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า Ultimate Strength หรือความเค้นแรงดึง (Tensile Strength) ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะทนได้ก่อนที่จะขาดหรือแตกออกจากกัน (Fracture) เนื่องจากวัสดุหลายชนิดสามารถเปลี่ยนรูปอย่างพลาสติกได้มาก ๆ ค่าความเค้นสูงสุดนี้สามารถนำมาคำนวณใช้งานได้ นอกจากนี้ค่านี้ยังใช้เป็นดัชนีเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุได้ด้วยว่าค่าว่า ความแข็งแรง (Strength) ของวัสดุ หรือ กำลังวัสดุนั้น โดยทั่วไปจะหมายถึงค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุทนได้นี้เองที่จุดสุดท้าย (จุด E) ของกราฟเป็นจุดที่วัสดุเกิดการแตกหรือขาดออกจากกัน (Fracture) สำหรับโลหะบางชนิด เช่นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหรือ

โลหะเหนียว ค่าความเค้นประลัย (Rupture Strength) นี้จะต่ำกว่าความเค้นสูงสุดเพราะเมื่อเลยจุด D ไปพื้นที่ภาคตัดขวางของตัวอย่างทดสอบลดลงทำให้พื้นที่ที่ต้านทานแรงดึงลดลงด้วยในขณะที่เรายังคงคำนวณค่าของความเค้นจากพื้นที่หน้าตัดเดิมของวัสดุก่อนที่จะทำการทดสอบแรงดึงดังนั้นค่าของความเค้นจึงลดลง ส่วนโลหะอื่น ๆ เช่น โลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น (Cold Work) มาแล้ว มันจะแตกหักที่จุดความเค้นสูงสุด โดยไม่มีการลดขนาดพื้นที่ภาคตัดขวางดังภาพที่ 5 a ทำนองเดียวกับพวกวัสดุเปราะ (Brittle Materials) เช่น เซรามิกที่มีการเปลี่ยนรูปอย่างพลาสติกน้อยมากหรือไม่มีเลย ส่วนกรณีของวัสดุที่เป็นพลาสติกจะเกิดแตกหักโดยที่อัตราการความเค้นสูงขึ้น ดังภาพที่ 5 b



ภาพที่ 4 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก



ภาพที่ 5 การเปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุพลาสติก

1.3 วิธีทาคุชิ (Taguchi Method)

ในประเทศญี่ปุ่นในห้วงปฏิบัติการ Electronic Control ดอกเตอร์ เกนอิชิทาคุชิได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับความมั่นคงสำคัญโดยใช้เทคนิค DOE ในปลายปี ค.ศ. 1940 เขาใช้ความพยายามอย่างมากเพื่อที่จะทำเทคนิค DOE นี้ให้ง่ายขึ้นต่อการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพของการผลิตสินค้า DOE ฉบับมาตรฐานของดอกเตอร์ทาคุชินี้รู้จักกันในชื่อ Taguchi Method หรือ Taguchi Approach และถูกนำไปใช้ในสหรัฐอเมริกาเมื่อต้นปี ค.ศ. 1980 ในปัจจุบันเทคนิคนี้เป็นหนึ่งใน

โครงสร้างคุณภาพที่วิศวกรทุกแขนงใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเทคนิค DOE ที่ใช้ Taguchi Approach นี้จะช่วยให้วิศวกรนักวิทยาศาสตร์และนักวิจัยประหยัดเวลาในการตรวจสอบการทดลองคุณภาพกับการออกแบบ

คุณภาพ หมายถึง สินค้าและบริการที่ส่งมอบให้กับลูกค้าแล้วตรงตามมาตรฐานที่ลูกค้าต้องการ รวมไปถึงการบรรลุถึงความต้องการและความคาดหวังของลูกค้าการประกันคุณภาพโดยทั่วไปแล้วจะใช้วิธีการทางสถิติเป็นเครื่องมือ (Statistical Process Control; SPC) SPC พยายามเข้าถึงคุณภาพโดยการต่อต้านความแปรผันที่เกิดมาจากการผลิตในบทความนี้จะเป็นการแนะนำแนวทางใหม่ที่แตกต่างจากแนวทางเดิมๆในการประกันคุณภาพแนวทางนี้เชื่อว่าคุณภาพมาจากการออกแบบที่ดีจึงให้ความสำคัญไปที่การออกแบบการทดลองโดยแนวทางใหม่นี้มีชื่อว่าวิธีการทาคุชิ (Taguchi Method) รากฐานของวิธีการทาคุชิเกิดขึ้นมาจากเหตุผลที่สำคัญ 2 ประการ คือ

1. สังคมจะเกิดความสูญเสียทุกๆ ครั้งที่คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ไม่ตรงตามเป้าหมาย ดังนั้น Taguchi จึงให้เหตุผลว่าการเบี่ยงเบนออกไปจากเป้าหมายเป็นผลให้เกิดความสูญเสีย Taguchi จึงได้ให้คำจำกัดความ “คุณภาพ” ใหม่ว่าเป็นความสูญเสียที่ผลิตภัณฑ์สร้างขึ้นแก่สังคม

2. การออกแบบผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตต้องการระบบที่พัฒนา มีความก้าวหน้าในทุกขั้นตอนตั้งแต่การออกแบบระบบ (System Design) การกำหนดพารามิเตอร์ (Parametric Design) รวมไปถึงการออกแบบค่าเผื่อ (Tolerance Design) ซึ่งวิธีการ Taguchi เป็นวิธีการออกแบบการทดลองที่มีประสิทธิภาพครอบคลุมในเรื่องต่างๆ เหล่านี้

ลักษณะเด่น 7 ประการที่วิธีการ Taguchi แตกต่างไปจากวิธีอื่นๆ

ทาคุชินิยามคำว่า “คุณภาพ” ในลักษณะของการเบี่ยงเบน (Deviation) ออกไปจากเป้าหมายในการแข่งขันทางเศรษฐกิจถือว่าการพัฒนาและการปรับปรุงคุณภาพอย่างต่อเนื่อง (Continuous Quality Improvement ; CQI) รวมถึงการลงทุนในการผลิตเป็นสิ่งสำคัญในการดำเนินกิจกรรมทางธุรกิจการดำเนินการ CQI ต้องรวมถึงการลดการแปรผันออกไปจากเป้าหมาย ของคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์สิ่งที่ลูกค้าสูญเสียไปอันเนื่องมาจากคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์แปรผัน มักจะมีสัดส่วนเป็นกำลังสองของคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่เบี่ยงเบนไปจากเป้าหมายคุณภาพสุดท้ายและต้นทุนของผลิตภัณฑ์ขึ้นกับการเริ่มต้นออกแบบผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ความผันแปรในคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ (หรือกระบวนการ) สามารถลดลงได้โดยการศึกษาจากความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) ของค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์การวางแผนการทดลองโดยอาศัยวิธีการทางสถิติสามารถช่วยลดความผันแปรของคุณลักษณะผลิตภัณฑ์

1.3.1 การออกแบบการทดลองโดยวิธีทาคุชิ

สำหรับในกรณีนี้เป็นชนิดหนึ่งในการประยุกต์การออกแบบการทดลองปัจจัยควบคุม (Control Factor) ประกอบด้วย ระยะเวลาต่อเกย ความหยาบผิวและระยะช่องว่างปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factor) หรือ Noise Factor เช่น อุณหภูมิในการบัดกรีด้วยความร้อนที่ จะมีการถ่ายเทความร้อนอยู่ตลอด ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ยังเป็นแหล่งของความผันแปรอีกด้วยซึ่งอิทธิพลที่เกิดจากตัวแปรเหล่านี้ไม่สามารถที่จะกำจัดได้เพราะฉะนั้นหน้าที่หลักของ Robust Design (RD) เป็นการลดความผันแปรของผลิตภัณฑ์โดยทำการลดความไวของผลิตภัณฑ์ที่มีต่อแหล่งความผันแปรโดยทำการควบคุมแหล่งความผันแปรเหล่านี้หรืออีกนัยหนึ่งคือ Robust Design (RD) จะลดความผันแปร

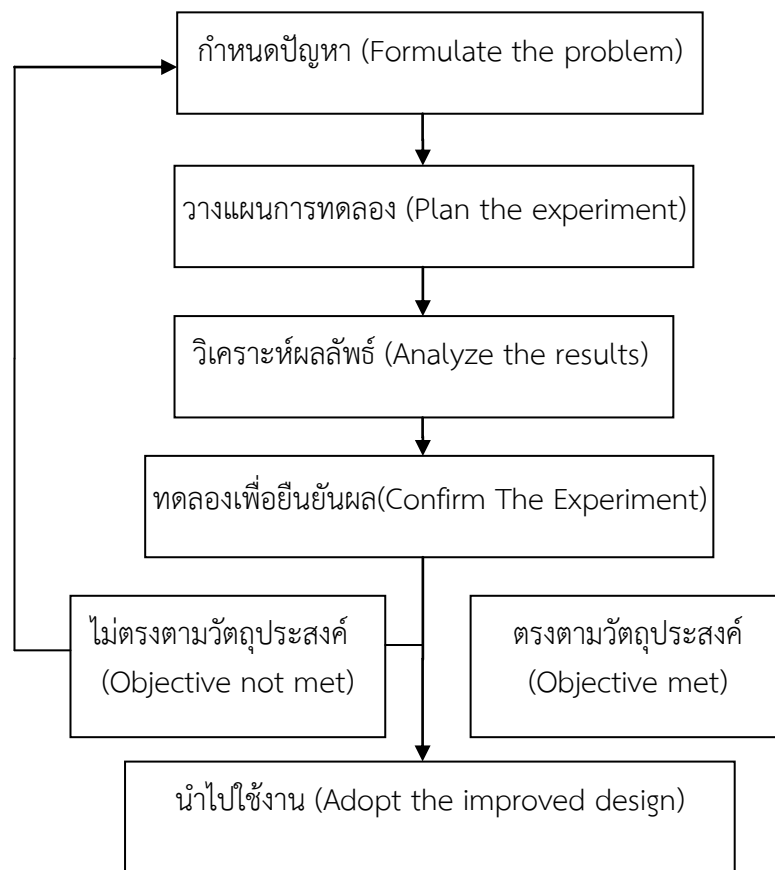
ของค่าตอบสนองโดยทำการเลือกปรับตั้งปัจจัยควบคุม (Control Factor) เพื่อลดอิทธิพลของตัวแปรที่ควบคุมได้ยาก (Hard – to – Control Noise) นี้เป็นจุดสำคัญของการควบคุมคุณภาพ

1.3.2 ขั้นตอนของการทดลองโดยวิธีทากูชิ

วิธีทากูชิสำหรับสนับสนุน Robust Design (RD) มีขั้นตอนในการปฏิบัติที่สำคัญ 4 ขั้นตอนในการออกแบบการทดลองดังแสดงดังภาพที่ 6

1.3.2.1 กำหนดปัญหา

ในขั้นตอนนี้วิศวกรจะต้องจัดการกับปัญหาของ Robust Design (RD) ให้แน่นอนโดยการกำหนดวัตถุประสงค์เริ่มต้นของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการให้ชัดเจนและกำหนดข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์คุณลักษณะเฉพาะของค่าตอบสนองของกระบวนการและทำการไต่ร่องวัตถุประสงค์เหล่านี้ในขั้นตอนของการกำหนดปัญหามีบ่อยครั้งสมบูรณ์ได้ด้วยการนั่งประชุมระดมสมองของกลุ่มวิศวกรสำหรับการออกแบบปัญหาสามารถทำได้โดยการรวบรวมผู้ออกแบบกระบวนการและวิศวกรฝ่ายผลิตผู้รับผิดชอบในการปรับตั้งและซ่อมบำรุงสายการผลิต



ภาพที่ 6 แผนผังแสดงขั้นตอนของการทดลองโดยวิธีทากูชิ

1.3.2.2 วางแผนการทดลอง

ขั้นตอนในการวางแผนการทดลอง (Plan The Experiment) สามารถแยกออกเป็นขั้นตอนย่อยได้ 2 ขั้นตอนคือ ออกแบบตารางการทดลอง (Design The Matrix Experiment) ทำการทดลองและรวบรวมข้อมูล

1. ออกแบบตารางการทดลอง (Design The Matrix Experiment) ทางเลือกหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการศึกษาปัจจัยหลายๆปัจจัยพร้อมๆกันคือการกำหนดตารางแผนการทดลองโดยใช้ Orthogonal Array ประโยชน์ของ Orthogonal Array มีหลายประการด้วยกันคือ

- ผลสรุปที่ได้จากการทดลองแต่ละการทดลองจะใช้ได้ครอบคลุมกับขอบเขตของการทดลองทั้งสิ้นโดยการควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อการทดลอง

- ประหยัดค่าใช้จ่ายและเวลาในการทดลองเป็นอย่างมาก

- ง่ายในการวิเคราะห์ข้อมูล

- สามารถตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงได้จาก Additive Model

2. ทำการทดลองและรวบรวมข้อมูล (Conduct the Experiment and Collect data) การทดลองจริงเป็นการทำให้บรรลุซึ่งผลสำเร็จและการปฏิบัติการทดลองนี้เป็นการหาค่าตอบสนองของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการผลการทดลองดิบจะถูกนำไปใส่ในตารางโดยที่เครื่องชีวิตการปฏิบัติสำหรับการทดลองทั้งหมดจะทำการแปลงให้อยู่ในรูปของอัตราส่วนของ Signal to Noise (S/N Ratio) โดยที่คุณลักษณะของ S/N Ratio สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ Smaller-The-Better Type Problem, Nominal-The-Best-Type Problem และ Larger-The-Better Type Problem

Smaller-The-Better Type Problem คือ ค่าความต้องการของค่าตอบสนองของผลิตภัณฑ์ หรือกระบวนการที่ดีที่สุดมีค่าเป็นศูนย์เช่นต้องการให้เกิดข้อบกพร่องน้อยที่สุดในการผลิตคอมพิวเตอร์เวเฟอร์ ต้องการให้เกิดมลภาวะน้อยที่สุดจากโรงงาน และต้องการให้เกิดการรั่วของกระแสไฟน้อยที่สุด เป็นต้น

Nominal-The-Best Type Problem คือ ค่าความต้องการของค่าตอบสนองของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการที่ดีที่สุดมีค่าเท่ากับค่าที่ได้กำหนดไว้หรือเป็นค่าที่จำกัดไว้

Larger-The-Better Type Problem คือ ค่าความต้องการของค่าตอบสนองของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการที่ดีที่สุดจะต้องมีค่าให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

ในการกำหนดตารางแผนการทดลอง (Matrix Experiment) โดยใช้ตารางมาตรฐานของวิธีทากูชิ (Orthogonal Array) ตารางแผนการทดลอง (Matrix Experiment) จะประกอบด้วยเขตของการทดลองซึ่งมีผลิตภัณฑ์หรือปัจจัยของกระบวนการที่เราต้องการ ศึกษาจากการทดลอง หลังจากดำเนินการกำหนดตารางแผนการทดลอง (Matrix Experiment) จะต้องดำเนินการทดลอง โดยกำหนดเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองตามตารางแผนการทดลอง (Matrix Experiment) ที่ได้กำหนดไว้ และเมื่อดำเนินการทดลองเสร็จแล้วจะต้องนำข้อมูลที่ได้ จากการทดลองทั้งหมดไปทำการวิเคราะห์เพื่อหาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆดังแสดงดังตารางที่ 2.4

การสร้างตารางแผนการทดลอง (Matrix Experiment) โดยใช้ตารางพิเศษที่เรียกว่า Orthogonal Array จะทำให้สามารถหาอิทธิพลของปัจจัยหลายๆปัจจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพและเป็นเทคนิคที่มีความสำคัญใน Robust Design (RD) ในการจัดปัจจัยควบคุมหรือตัวแปรที่ออกแบบไว้ให้กับ Orthogonal Array จะต้องจัดให้อยู่ในคอลัมน์ของตาราง (Array) โดยแปลงจำนวนเต็มในคอลัมน์ของตาราง (Array) ให้เป็นเซตที่แท้จริงของปัจจัยที่ได้ถูกจัดไว้คอลัมน์ที่ไม่ได้

ตารางที่ 4. ตารางการเลือกใช้ Standard Orthogonal Array

Orthogonal Array	จำนวนแถว	จำนวนปัจจัยสูงสุด	จำนวนสูงสุดของคอลัมน์ที่ 3 ระดับ			
			2	3	4	5
L4	4	3	3	-	-	-
L8	8	7	7	-	-	-
L9	9	4	-	4	-	-
L12	12	11	11	-	-	-
L16	16	15	15	-	-	-
L16	16	5	-	-	5	-
L18	18	8	1	7	-	-
L25	25	6	-	-	-	6
L27	27	13	-	13	-	-
L32	32	31	31	-	-	-
L32	32	10	1	-	9	-
L36	36	23	11	12	-	-
L36	36	16	3	13	-	-
L50	50	12	1	-	-	11
L54	54	26	1	25	-	-
L64	64	63	63	-	-	-
L64	64	21	-	-	21	-
L81	81	40	-	40	-	-

1.4 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์

หลังจากที่ได้ตารางผลลัพธ์ของการทดลองที่ถูกต้องแล้วการสรุปผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองเป็นการวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ของอิทธิพลของปัจจัยหลายๆปัจจัยขั้นตอนหลักในการวิเคราะห์ผลลัพธ์คือวิเคราะห์ข้อมูลจากตารางผลลัพธ์ของการทดลองและใช้ผลลัพธ์นี้ทำนายค่าที่ดีที่สุดของการรวมกันของระดับปัจจัย (Optimal Factor Level Combination) ซึ่งจะให้ผลการปฏิบัติที่ดีที่สุดขั้นตอนนี้เรียกว่าการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย (Analysis of Mean) หรือ ANOM การประมาณค่าความคลาดเคลื่อนของความแปรปรวนและหาความสัมพันธ์ที่สำคัญของปัจจัยหลายๆปัจจัยโดยใช้วิธีแยก

ความแปรปรวนซึ่งเรียกอย่างง่ายว่าการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) หรือ ANOVA

1.4.1 ทำการหาค่า S/N-Ratio

โดยใช้สูตรของ Static S/N-Ratio โดยใช้รูปแบบ Larger – the – better เนื่องจากต้องการค่าที่เหมาะสมที่สุดเป็นค่ามากที่สุดนั่นคือ ต้องการให้ค่าความต้านทานแรงเฉือนมีค่ามากที่สุด

$$S/N = -10\log\left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{y_j^2}\right) \quad (2.2)$$

เมื่อ S/N คือ อัตราส่วนของ S/N ในแต่ละ Experiment Number, N คือ จำนวนการทดลองซ้ำในแต่ละ Experiment Number และ y_j คือ ค่าตอบสนอง (Respond) ในแต่ละครั้งของการทดลองของแต่ละ Experiment Number

1.4.2 ทำการประมาณอิทธิพลของแต่ละปัจจัย

โดยใช้การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย ANOM (The Analysis of Means) สำหรับ L16 โดยมีขั้นตอนในการวิเคราะห์ดังนี้

1. คำนวณหาค่าเฉลี่ยรวมของ S/N Ratio ในการทดลองโดยใช้สูตร

$$\overline{S/N} = \frac{1}{16} (\sum_{i=1}^{16} S/N_i) \quad (2.3)$$

2. หาค่าเฉลี่ยของ S/N Ratio ของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยควบคุม (The Mean S/N for Each level Of Control Factor) โดยใช้สูตรดังนี้

หาค่าเฉลี่ยของ S/N-Ratio ของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัย A โดยใช้สูตร

$$S/\overline{NA}_1 = \frac{1}{4} (S/N_1 + S/N_2 + S/N_3 + S/N_4) \quad (2.4)$$

$$S/\overline{NA}_2 = \frac{1}{4} (S/N_5 + S/N_6 + S/N_7 + S/N_8) \quad (2.5)$$

$$S/\overline{NA}_3 = \frac{1}{4} (S/N_9 + S/N_{10} + S/N_{11} + S/N_{12}) \quad (2.6)$$

$$S/\overline{NA}_4 = \frac{1}{4} (S/N_{13} + S/N_{14} + S/N_{15} + S/N_{16}) \quad (2.7)$$

หาค่าเฉลี่ยของ S/N-Ratio ของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัย B โดยใช้สูตร

$$S/\overline{NB}_1 = \frac{1}{4} (S/N_1 + S/N_5 + S/N_9 + S/N_{13}) \quad (2.8)$$

$$\overline{S/NB_2} = \frac{1}{4} (S/N_2 + S/N_6 + S/N_{10} + S/N_{14}) \quad (2.9)$$

$$\overline{S/NB_3} = \frac{1}{4} (S/N_3 + S/N_7 + S/N_{11} + S/N_{15}) \quad (2.10)$$

$$\overline{S/NB_4} = \frac{1}{4} (S/N_4 + S/N_8 + S/N_{12} + S/N_{16}) \quad (2.11)$$

หาค่าเฉลี่ยของ S/N-Ratio ของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัย C โดยใช้สูตร

$$\overline{S/NC_1} = \frac{1}{4} (S/N_1 + S/N_6 + S/N_{11} + S/N_{16}) \quad (2.12)$$

$$\overline{S/NC_2} = \frac{1}{4} (S/N_2 + S/N_5 + S/N_{12} + S/N_{15}) \quad (2.13)$$

$$\overline{S/NC_3} = \frac{1}{4} (S/N_3 + S/N_8 + S/N_9 + S/N_{14}) \quad (2.14)$$

$$\overline{S/NC_4} = \frac{1}{4} (S/N_4 + S/N_7 + S/N_{10} + S/N_{13}) \quad (2.15)$$

3. หาอิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยโดยคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนของ S/N-Ratio เฉลี่ยของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยที่เบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยทั้งหมดของ S/N Ratio ในการทดลองโดยสามารถคำนวณได้จากสูตรดังต่อไปนี้

$$\Delta X_y = (\overline{S/NX_y} - \overline{S/N}) \quad (2.16)$$

โดยที่ X คือ ปัจจัยของการทดลอง (X = A, B, C) y คือ ระดับของแต่ละปัจจัย (y = 1, 2, 3, 4)

- สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยกับระดับของปัจจัยในแต่ละปัจจัย

- บอกชื่อและระดับของปัจจัยควบคุมที่ให้ค่าที่ดีที่สุด (Identifying the Optimum Control factor Set Point) โดยกำหนดปัจจัยให้ค่าเท่ากันก็แสดงว่ามีหลายทางเลือกให้ระบุในแต่ละทางเลือกที่เป็นไปได้ทั้งหมดให้เลือกระดับของปัจจัยควบคุมที่ให้ค่าสูงสุด

4. วิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA (Analysis of Variance)

- คำนวณหาค่า GTSS (Grand Total Sum of Squares) จากสูตร

$$GTSS = \sum_{i=1}^{16} (S/N)_i^2 \quad (2.17)$$

เมื่อ GTSS คือ Grand total Sum of Squares, S/N คือ S/N Ratio และ i คือ ลำดับที่ของ Experiment Number ($i = 1,2,3,\dots,16$)

- คำนวณหาค่าผลบวกกำลังสองของค่าเฉลี่ยรวมจากสูตร

$$SS \text{ due to the mean} = (\text{Number of Experiment}) \times \overline{S/N}^2 \quad (2.18)$$

เมื่อ SS due to the mean คือ ผลบวกกำลังสองของค่าเฉลี่ย, Number of experiment คือ 16 Experiment (สำหรับ L16) และ $\overline{S/N}$ คือ ค่าเฉลี่ยรวม

- คำนวณหาผลบวกกำลังสองของค่า S/N-Ratio ในแต่ละ Experiment Number ที่เบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยรวม (Total sum of the square) จากสูตร

$$\text{Total SS} = \sum_{i=1}^{16} (S/N_i - \overline{S/N})^2 \quad (2.19)$$

เมื่อ Total SS คือ Total sum of the square $\overline{S/N_i}$ คือ S/N-Ratio ของแต่ละ Experiment Number และ $\overline{S/N}$ คือ ค่าเฉลี่ยรวมของผลการทดลอง (Overall Mean)

- คำนวณหาค่า GTSS (Grand total sum of squares) จากสูตร

$$\text{GTSS} = \text{Total SS} + \text{SS due to Mean} \quad (2.20)$$

- คำนวณหาผลบวกกำลังสองของ S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย A ที่เบี่ยงไปจากค่าเฉลี่ยรวมจากสูตร

$$SS_A = 4[(\overline{S/N}_{A1} - \overline{S/N})^2 + (\overline{S/N}_{A2} - \overline{S/N})^2 + (\overline{S/N}_{A3} - \overline{S/N})^2 + (\overline{S/N}_{A4} - \overline{S/N})^2] \quad (2.21)$$

- คำนวณหาผลบวกกำลังสองของ S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย B ที่เบี่ยงไปจากค่าเฉลี่ยรวมจากสูตร

$$SS_B = 4[(\overline{S/N}_{B1} - \overline{S/N})^2 + (\overline{S/N}_{B2} - \overline{S/N})^2 + (\overline{S/N}_{B3} - \overline{S/N})^2 + (\overline{S/N}_{B4} - \overline{S/N})^2] \quad (2.22)$$

- คำนวณหาผลบวกกำลังสองของ S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย C ที่เบี่ยงไปจากค่าเฉลี่ยรวมจากสูตร

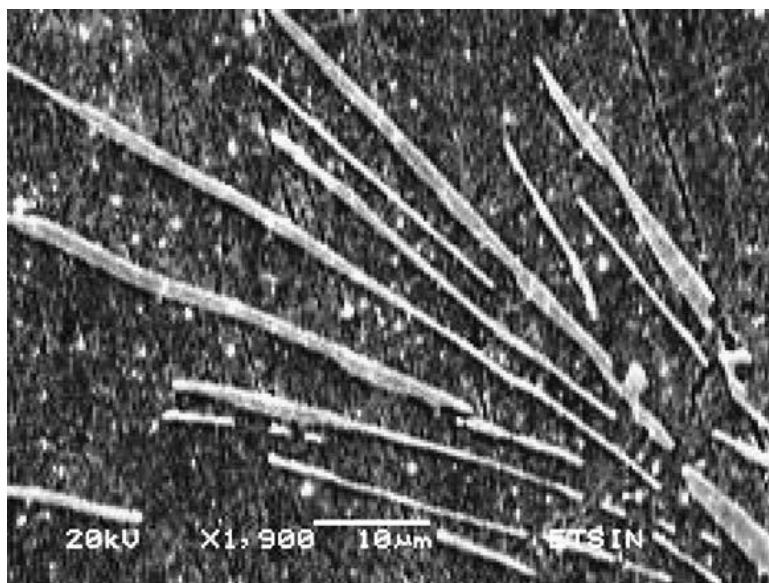
$$SS_C = 4[(\overline{S/N}_{C1} - \overline{S/N})^2 + (\overline{S/N}_{C2} - \overline{S/N})^2 + (\overline{S/N}_{C3} - \overline{S/N})^2 + (\overline{S/N}_{C4} - \overline{S/N})^2] \quad (2.23)$$

- คำนวณหาผลบวกกำลังสองของ S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัยควบคุมที่
เบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยรวม (Total sum of the square) จากสูตร

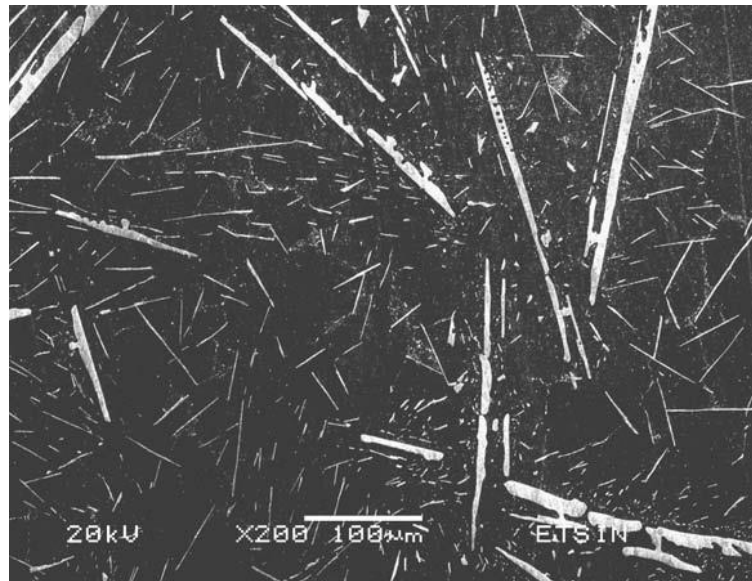
$$\text{Total SS} = \text{SS}_A + \text{SS}_B + \text{SS}_C \quad (2.24)$$

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

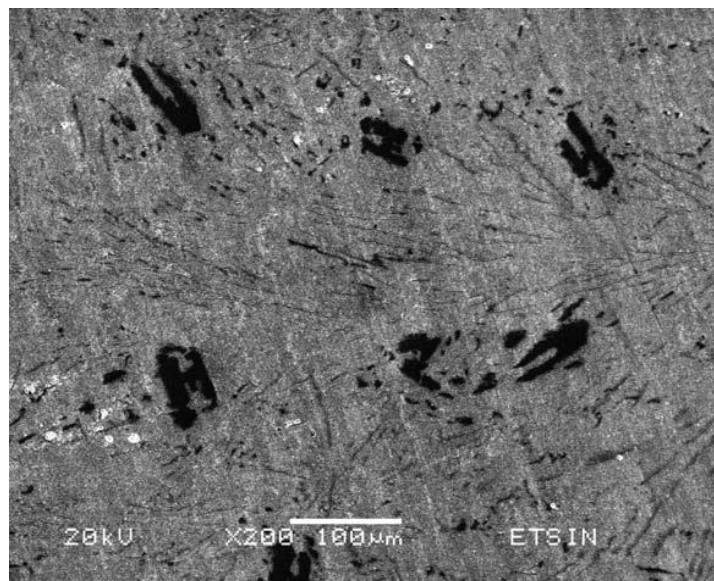
ในงานวิจัยของ Mollada และคณะ [11] ได้ศึกษาการบัดกรีเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำโดยใช้โลหะเติมได้แก่ Sn-3.5Ag, Sn-5.0Ag, และ Sn-8.0Ag ซึ่งมีโครงสร้างจุลภาคดังภาพที่ 7-9 นำมาบัดกรีโดยใช้ระยะเกย 25 mm. และช่องว่าง 4 mm. สำหรับโครงสร้างจุลภาคในโลหะเติมจะปรากฏเฟส ϵ และ β -Sn เป็นเส้นยาว เมื่อตรวจสอบค่าความแข็งเฟส β และ ϵ จะมีค่าเท่ากับ 55.4 และ 12.4 HV ตามลำดับ สำหรับความแข็งแรงของรอยต่อจากการใช้โลหะพื้นซึ่งต้านทานการแตกหักได้ 34.909 kN เมื่อนำมาบัดกรีโดยใช้โลหะเติม Sn-5.0Ag ทำให้รอยต่อต้านทานการแตกหักได้ 27.805 kN ในขณะที่ใช้โลหะเติม Sn-8.0Ag ทำให้รอยต่อต้านทานการแตกหักได้ 29.212 kN แสดงให้เห็นว่าความแข็งแรงของรอยบัดกรีจะขึ้นอยู่กับปริมาณเงินในโลหะเติม ในการศึกษาการต่ออลูมิเนียมด้วยวิธีการบัดกรี โดยใช้อลูมิเนียมเกรด 3003 เป็นโลหะพื้นและใช้สังกะสี (Zn) มีจุดหลอมเหลว 416 °C เป็นโลหะเติมซึ่งในการทดลองกำหนดระยะเกย ที่ 3 mm. เตรียมตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM D 1002-94 โดยกำหนดขนาดของโลหะเติมที่ความหนาต่างกัน และใช้เวลาในการบัดกรีต่างกัน ซึ่งผลปรากฏว่า ค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยต่อบัดกรีจะลดลงเมื่อความหนาของแผ่นโลหะเติมเพิ่มขึ้นดังภาพที่ 10



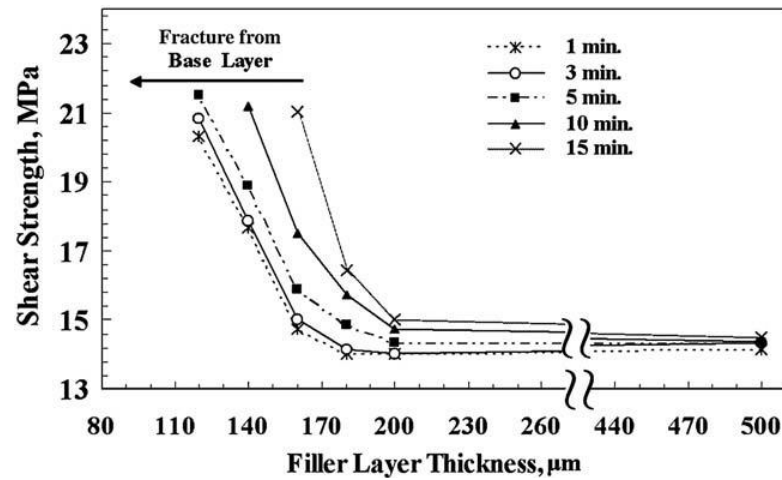
ภาพที่ 7 โครงสร้างจุลภาค Sn-3.5Ag [11]



ภาพที่ 8 โครงสร้างจุลภาค Sn-5.0Ag [11]

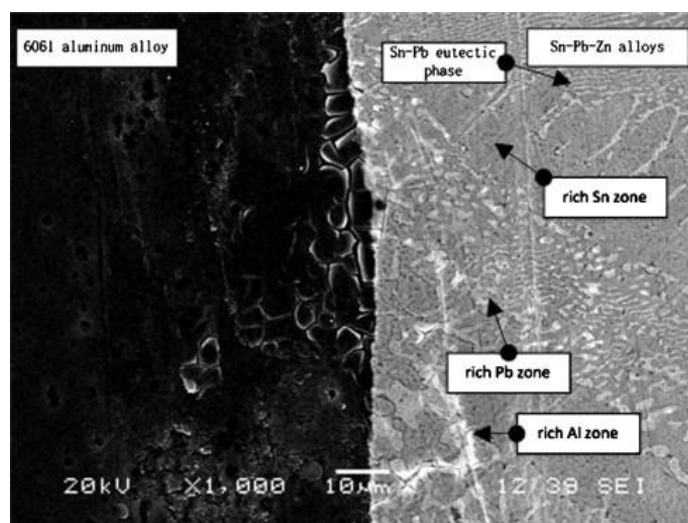


ภาพที่ 9 โครงสร้างจุลภาค Sn-8.0Ag [11]

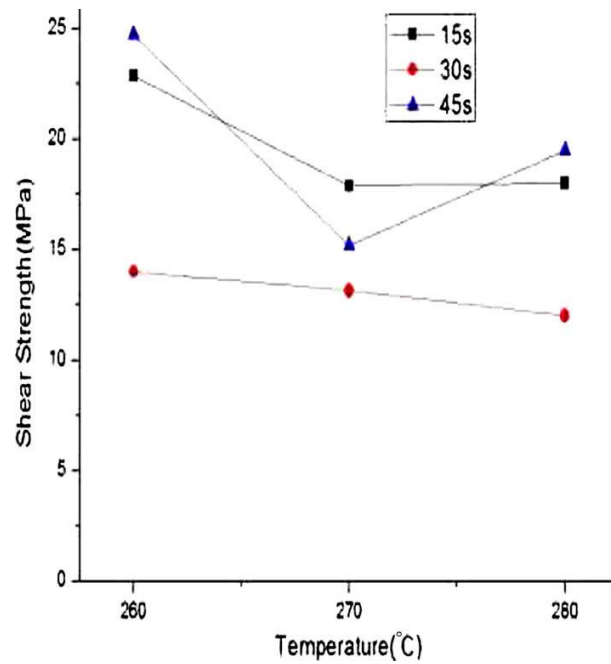


ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงเฉือน ความหนาของโลหะเติมและเวลา [12]

แต่การเพิ่มเวลาการบัดกรีจะทำให้ความต้านทานแรงเฉือนของรอยต่อเพิ่มขึ้นเนื่องจากการแพร่ของ Zn ไปยัง Al สำหรับรอยต่ออลูมิเนียม 6063 กับโลหะผสม Sn-Pb-Zn ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคจะพบเฟสที่มีความเข้มข้นของ Sn, Pb และ Al ตลอดจน Sn-Pb ยูเทคติกส์ แสดงดังภาพที่ 11 และผลการทดสอบความต้านทานแรงเฉือนจากการบัดกรีที่อุณหภูมิ 260 °C เวลา 45 s จะให้ผลดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิ 270 และ 280 °C และเวลา 10 และ 30 s ผลจากการบัดกรียังสามารถพบสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compound) เกิดขึ้นระหว่างการเชื่อมต่อของอลูมิเนียมและโลหะผสม [12, 13] สำหรับรอยต่ออลูมิเนียมเกรด 5056 เมื่อนำมาบัดกรีด้วยวิธีอัลตราโซนิก (Ultrasonic soldering) โดยใช้โลหะเติม Zn-Al ความแข็งแรงของรอยต่อจะลดลงกับการเพิ่มอุณหภูมิการบัดกรีซึ่งแสดงตัวอย่างได้ดังภาพที่ 11 เนื่องจากการเติบโตของชั้น MgZn₂ ที่เกิดขึ้นระหว่างรอยต่อ ในการบัดกรีเมื่อกำหนดให้อุณหภูมิบัดกรีสูงกว่าอุณหภูมิเส้นโค้งของเหลว (Liquidus temperature) เล็กน้อยจะทำให้รอยต่อมีความแข็งแรง [14]



ภาพที่ 11 รอยต่ออลูมิเนียม 6063 กับโลหะผสม Sn-Pb-Zn [13]



ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรง อุณหภูมิและเวลาในการต่อ [14]

จากงานวิจัยในอดีตแสดงให้เห็นว่าในการบัดกรีมีหลายปัจจัยที่จะส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยต่อ อีกทั้งยังไม่มีงานวิจัยที่ศึกษาความแข็งแรงในแง่ความต้านทานแรงเฉือนระหว่างโลหะพื้นเหล็กกล้าไร้สนิมโดยใช้โลหะเติมชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความต้านทานแรงเฉือนระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมและโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว ซึ่งมีการเตรียมตัวอย่างและการดำเนินการวิจัยตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. วัสดุและวิธีการทดลอง

ชิ้นงานโลหะพื้น (Substrate) ที่ใช้ในการทดลองจะใช้เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก (Austenitic) กลุ่ม 300 โดยเลือกใช้เหล็กกล้าไร้สนิมตามมาตรฐาน AISI 304 หนา 2 มิลลิเมตร มีองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 5 การทดลองเตรียมโลหะพื้นด้วยเครื่องตัดแผ่นโลหะให้ได้ขนาด 25.4x114.3 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 13 และเตรียมพื้นผิวโลหะพื้นโดยการขัดผิวพื้นผิวด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400, 600, 800 และ 1,000 บนเครื่องขัดยี่ห้อ Struers รุ่น LaboPol-1 ดังภาพที่ 14 เพื่อให้โลหะพื้นมีพื้นผิวที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 5. องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 [15]

ส่วนประกอบ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (%wt))								
<u>Cr</u>	Ni	<u>Mn</u>	<u>Si</u>	Mo	<u>C</u>	S	<u>P</u>	Fe
17.960	9.210	1.060	0.640	0.090	0.025	0.020	0.005	Bal.



ภาพที่ 13 ชิ้นงานโลหะพื้น

หลังการขั้ดนำนำโลหะพื้มาทำความสะอาดโดยจุ่มในสารละลายกรดไนตริก (Nitric Acid) ผสมเอทานอล (Ethanol) ดังภาพที่ 15 และปล่อยให้แห้งในอากาศ ขั้นตอนการบัดกรีนำโลหะพื้ที่ทำความสะอาดแล้วจุ่มลงใน ฟลักซ์ SS-204 ดังภาพที่ 16 เพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน และทำให้พื้ผิวสัมผัสระหว่างชิ้นงานสะอาด



ภาพที่ 14 เครื่องขั้ดชิ้นงาน



ภาพที่ 15 การทำความสะอาดโลหะพื้



รูปที่ 16 ฟลักซ์บัดกรี

สำหรับโลหะเต็มจะนำโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบแท่งดังภาพที่ 17 มาหลอมและเตรียมให้เป็นแผ่น และวางโลหะเต็มไว้ระหว่างรอยต่อพร้อมทั้งทำการกำหนดระยะต่อเกย และระยะช่องว่างด้วยลวด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1-0.4 มิลลิเมตร ตามที่ได้กำหนดไว้ในการออกแบบการทดลอง จากนั้นทำการติดตั้งโลหะพื้นทั้งสองลงบนอุปกรณ์จับยึดที่เตรียมไว้เพื่อเตรียมตัวอย่างทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 1002 – 05



ภาพที่ 17 โลหะบัดกรีแบบแท่ง

โลหะพื้นที่ติดตั้งลงบนอุปกรณ์จับยึดดังภาพที่ 18 และชิ้นงานที่ผ่านการจับยึดแล้วดังภาพที่ 19 จะนำเข้าไปในเครื่องให้ความร้อนซึ่งจะกำหนดอุณหภูมิที่ 300 °C ดังภาพที่ 20 โลหะเต็มจะหลอมละลายแล้วค่อยๆไหลเข้าไปในช่องว่างระหว่างชิ้นงานโดยอาศัยแรงดึงตามรูเล็ก (Capillary Force) จนเต็มแล้วจึงนำอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานออกจากเตา เมื่อตัวอย่างเย็นตัวจึงทำการถอดชิ้นงานที่ผ่านการบัดกรีออกจากอุปกรณ์จับยึดโดยชิ้นงานตัวอย่างสำหรับนำไปทดสอบความต้านทานแรงเฉือนแสดงดังภาพที่ 21 การทดลองจะทำการทดลองโดยเปลี่ยนเงื่อนไขตามที่ได้ออกแบบการทดลองไว้จนครบทั้ง 16 เงื่อนไขหลังการบัดกรี นำตัวอย่างมาทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์แสดงดังภาพที่ 22 ให้แรงในลักษณะการเฉือนจนขาดออกจากกันโดยใช้ความเร็วทดสอบอยู่ที่ 10 มิลลิเมตร/นาที



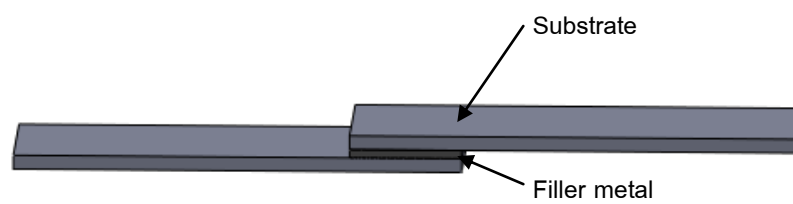
ภาพที่ 18 อุปกรณ์จับยึด



ภาพที่ 19 ติดตั้งชิ้นงานลงบนอุปกรณ์จับยึด



ภาพที่ 20 เครื่องให้ความร้อน



ภาพที่ 21 ชิ้นงานที่ผ่านการบัดกรี



ภาพที่ 22 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์

2. การวิเคราะห์ผล

ในงานวิจัยนี้ออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของทากูชิ จากการกำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัยแสดงดังตารางที่ 6 ค่าที่ได้จากการทดสอบแรงดึงนำไปคำนวณหาค่าความต้านทานแรงเฉือนในทุกสภาวะการทดลองจากตารางแผนการทดลองดังตารางที่ 7 จึงนำไปวิเคราะห์ผลทางสถิติ คือ การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย (ANOM) วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA), การตรวจสอบความถูกต้อง (Model Adequacy Checking) ทำการวิเคราะห์ค่าความต้านทานแรงเฉือนที่ได้ด้วยวิธีทากูชิและเลือกตัวแปรที่เหมาะสม

ตารางที่ 6. ปัจจัยในการทดลองและระดับของปัจจัย

ปัจจัยในการทดลอง	ระดับของปัจจัย			
	1	2	3	4
ระยะต่อเกย (มิลลิเมตร)	4	6	8	10
ความหนาผิว (กริต)	400	600	800	1,000
ระยะห่างระหว่างชิ้นงาน (มิลลิเมตร)	0.1	0.2	0.3	0.4

ตารางที่ 7. แผนการทดลอง

ลำดับการทดลอง	ระยะต่อเกย (มม.)	ความหนาพิว (กริต)	ระยะช่องว่าง (มม.)	ความต้านทานแรงเฉือนเฉลี่ย
1	4	400	0.1	X
2	4	600	0.2	X
3	4	800	0.3	X
4	4	1,000	0.4	X
5	6	400	0.2	X
6	6	600	0.1	X
7	6	800	0.4	X
8	6	1,000	0.3	X
9	8	400	0.3	X
10	8	600	0.4	X
11	8	800	0.1	X
12	8	1,000	0.2	X
13	10	400	0.4	X
14	10	600	0.3	X
15	10	800	0.2	X
16	10	1,000	0.1	X

บทที่ 4

การวิเคราะห์ผลการทดลอง

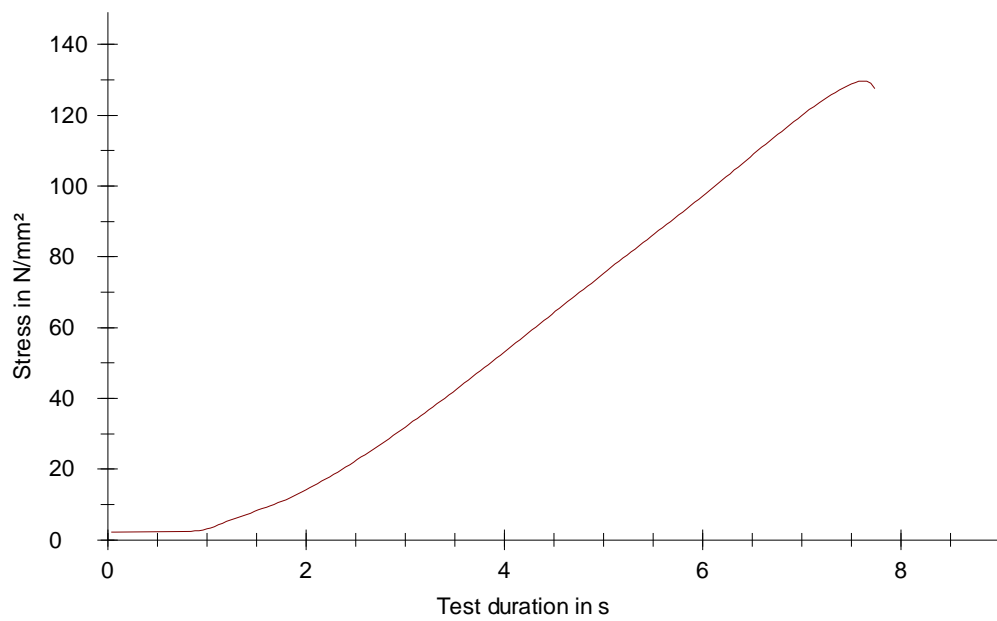
จากการศึกษาค่าความต้านทานแรงเฉือนของโลหะไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.07Cu โดยใช้วิธีทางจุลทรรศน์ที่เข้ากันได้กับการบัดกรีผลที่ได้จากการทดลองมีดังนี้

1. ผลการทดสอบความต้านทานแรงเฉือน

เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 นอกจากองค์ประกอบทางเคมีของเหล็ก (Fe) ยังมีธาตุโครเมียม (Cr) ผสมอยู่มากในการบัดกรีเมื่อนำโลหะบัดกรีที่มีความเข้มข้นของดีบุก (Sn-base solder) มาใช้เป็นโลหะเติม โลหะพื้นที่สัมผัสกับโลหะบัดกรีซึ่งอยู่ในสถานะของเหลวที่ระหว่างรอยต่อออกจากสารประกอบเชิงโลหะ Fe-Sn แล้วยังสามารถเกิดสารประกอบเชิงโลหะชนิด (Fe, Cr)Sn₂ ได้ เช่น จากการบัดกรีเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 กับดีบุกบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 240 °C สามารถเกิดขึ้นสารประกอบเชิงโลหะ (Fe, Cr)Sn₂ ที่มีความหนาเฉลี่ยได้ถึง 10 um และในกรณีใช้สังกะสี (Zn) เป็นโลหะเติมนอกจากจะเกิดเฟส Fe-Zn แล้วยังสามารถเกิดเฟส δ (Fe, Cr)Zn₁₀ และเฟส ξ (Fe, Cr)Zn₁₃ [15] อย่างไรก็ตามในการทดลองใช้โลหะผสมที่มีดีบุกผสมอยู่ถึง 99.0 %wt ซึ่งจะใกล้เคียงกับการใช้ดีบุกบริสุทธิ์ จึงยากที่จะเกิดสารประกอบเชิงโลหะที่มีองค์ประกอบทางเคมีของเงินและทองแดง (Ag-Cu) ที่มีอยู่ในโลหะผสม เนื่องจากมีองค์ประกอบทางเคมีของทั้งสองธาตุเพียง 0.3 และ 0.7 %wt สำหรับเงินและทองแดงตามลำดับ เมื่อตรวจสอบโดยใช้สมดุลเฟสของ Fe-Ag และ Fe-Cu สำหรับชั้นปฏิกิริยามีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาที่ใช้ในการต่อเนื่องจากการแพร่ระหว่างอะตอม (Interdiffusion) จากการแพร่ของ Cu, Fe, Cr และ Ni แต่สำหรับการแพร่ของ Cu และ Ni สามารถแพร่ได้เร็วกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ Fe และ Cr [16] จากการแพร่ของธาตุอุณหภูมิที่ใช้จึงเป็นอีกปัจจัยในกระบวนการที่สำคัญโดยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อเพิ่มขึ้นเช่นกัน [17] โดยธรรมชาติชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นที่ระหว่างรอยต่อจะมีความเปราะและส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลได้ จากการทดลองตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการบัดกรีและนำมาทดสอบความต้านทานแรงเฉือนแสดงดังภาพที่ 23 และผลจากการทดสอบแสดงดังภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Test duration ของระยะต่อเกย 10 มิลลิเมตร, ความหนาผิว 800 กริต และระยะช่องว่าง 0.2 มิลลิเมตร



ภาพที่ 23 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงเฉือน



ภาพที่ 24 ตัวอย่างผลการทดสอบ

ผลการทดลองตามเงื่อนไขที่มีการกำหนดไว้ภายใต้ปัจจัยและระดับต่างๆ ข้อมูลค่าความต้านทานแรงเฉือนและค่าเฉลี่ยสำหรับนำไปใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแสดงได้ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8. ค่าความต้านทานแรงเฉือนจากการทดลอง

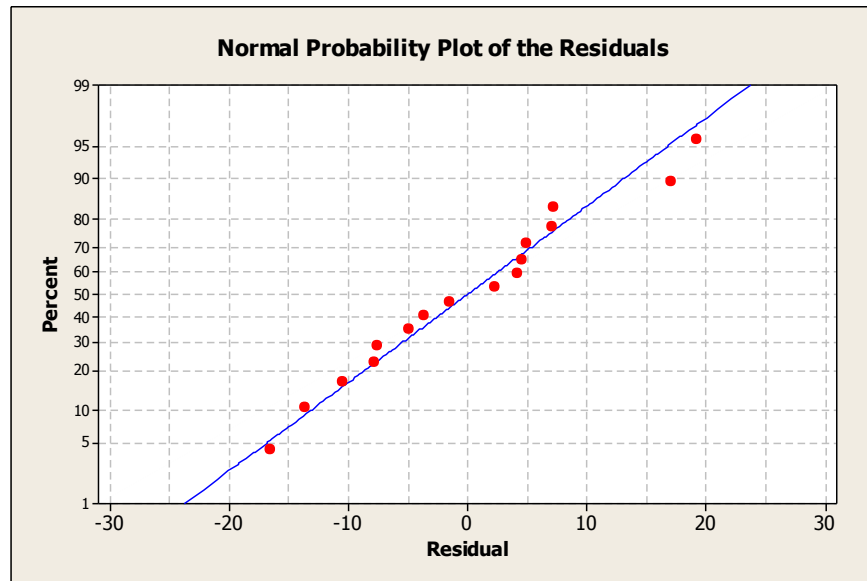
ลำดับ	ระยะต่อ เกย (มม.)	ความ หยาบ ผิว (กริต)	ระยะ ช่องว่าง (มม.)	ค่าความต้านทาน แรงเฉือน ครั้งที่ 1 (นิวตัน/มม. ²)	ค่าความต้านทาน แรงเฉือน ครั้งที่ 2 (นิวตัน/มม. ²)	ค่าความ ต้านทานแรง เฉือนเฉลี่ย (นิวตัน/มม. ²)
1	4	400	0.1	80.07	45.21	62.65
2	4	600	0.2	76.73	75.42	76.07
3	4	800	0.3	87.83	76.12	81.98
4	4	1000	0.4	70.75	94.02	82.38
5	6	400	0.2	74.94	60.74	67.68
6	6	600	0.1	117.02	82.31	99.66
7	6	800	0.4	62.45	47.08	54.76
8	6	1000	0.3	84.35	83.63	83.99
9	8	400	0.3	77.63	80.65	79.15
10	8	600	0.4	94.92	98.04	96.48
11	8	800	0.1	77.59	65.26	71.42
12	8	1000	0.2	70.15	93.35	81.75
13	10	400	0.4	90.43	83.16	86.79
14	10	600	0.3	83.25	106.77	95.01
15	10	800	0.2	101.97	129.72	115.84
16	10	1000	0.1	75.39	102.22	88.80

2. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ในเบื้องต้นนำข้อมูลจากการทดลองมาวิเคราะห์ผลด้วยวิธีทางทฤษฎีเพื่อเลือกตัวแปรเงื่อนไขที่เหมาะสมกับการบัดกรีเพื่อให้ค่าความต้านทานแรงเฉือนสูงสุดซึ่งประกอบด้วย การตรวจสอบความรูปแบบของข้อมูล ค่าอัตราส่วน S/N – Ratio และการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย

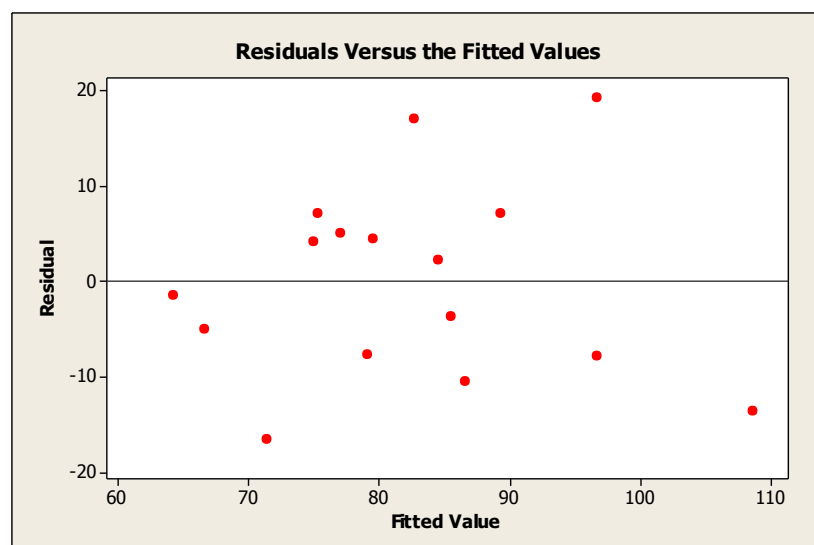
2.1 การตรวจสอบรูปแบบของข้อมูล

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking) เป็นการตรวจสอบข้อมูลพื้นฐานทางสถิติ โดยการตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูล ตรวจสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวนและการตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล เป็นต้น เพื่อตรวจสอบจากภาพที่ 25 กราฟการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability)



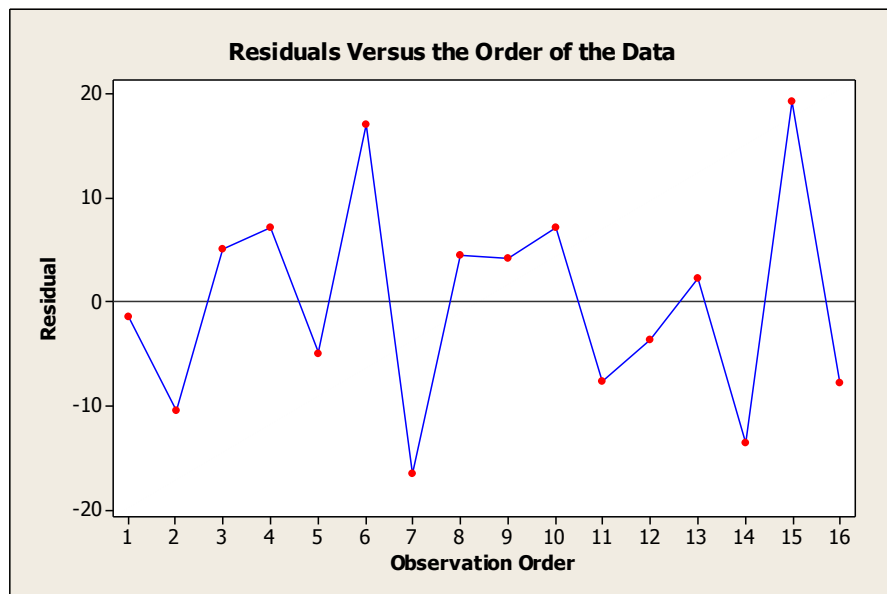
รูปที่ 25 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกค้างของค่าความต้านทานแรงเฉือน

สำหรับค่าส่วนตกค้างของค่าความต้านทานแรงเฉือน จะเห็นได้ว่าค่าส่วนตกค้างเกาะกลุ่มกันเป็นลักษณะเกือบจะตรง แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้มีลักษณะของการกระจายตัวแบบปกติ นั่นหมายถึงข้อมูลการวิเคราะห์สามารถเชื่อถือได้เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล โดยการใช้ข้อมูลค่าส่วนตกค้างและค่าที่ถูกฟิต (Fitted) ในที่นี้คือ ค่าความต้านทานแรงเฉือน นำมาสร้างกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิต ซึ่งจะแสดงดังภาพที่ 26 จากลักษณะของกราฟสรุปได้ว่า ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติมีความเป็นอิสระของข้อมูลไม่มีแนวโน้มในลักษณะรูปแบบใดๆ และมีความสม่ำเสมอของความแปรปรวน



ภาพที่ 26 ค่าส่วนตกค้างของความต้านทานแรงเฉือนกับค่าที่ถูกฟิต

การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูลเป็นการทดสอบความสัมพันธ์ของส่วนตกค้างโดยใช้ค่าส่วนตกค้างและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล มาทำการพล็อตกราฟค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลอยู่บนแกนนอนจากภาพที่ 27 ค่าส่วนตกค้างของความต้านทานแรงเฉือนกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล ที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งลักษณะของกราฟมีการกระจายตัวอย่างไม่มีรูปแบบแสดงว่าข้อมูลในการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกัน



ภาพที่ 27 ค่าส่วนตกค้างของความต้านทานแรงเฉือนกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล

2.2 ค่าอัตราส่วน S/N – Ratio

ค่าความต้านทานแรงเฉือนในตารางที่ 8 จะนำมาใช้ในการหาค่า S/N-Ratio ดังแสดงในตารางที่ 9 โดยที่ค่า S/N-Ratio จะเป็นชนิดค่าตอบสนองที่มากที่สุดคือค่าที่ดีที่สุด (The Larger – The – Better Type Problem)

ตารางที่ 9 ค่า S/N-Ratio

ลำดับการทดลอง	ระยะต่อเกย (มม.)	ความหยาบผิว (กริต)	ระยะช่องว่าง (มม.)	ค่าความต้านทานแรงเฉือนเฉลี่ย (นิวตัน/มม. ²)	S/N Ratio
1	4	400	0.1	62.65	35.94
2	4	600	0.2	76.07	37.62
3	4	800	0.3	81.98	38.27
4	4	1000	0.4	82.38	38.32
5	6	400	0.2	67.68	36.61
6	6	600	0.1	99.66	39.97
7	6	800	0.4	54.76	34.77
8	6	1000	0.3	83.99	38.48
9	8	400	0.3	79.15	37.97
10	8	600	0.4	96.48	39.69
11	8	800	0.1	71.42	37.08
12	8	1000	0.2	81.75	38.25
13	10	400	0.4	86.79	38.77
14	10	600	0.3	95.01	39.56
15	10	800	0.2	115.84	41.28
16	10	1000	0.1	88.80	38.97

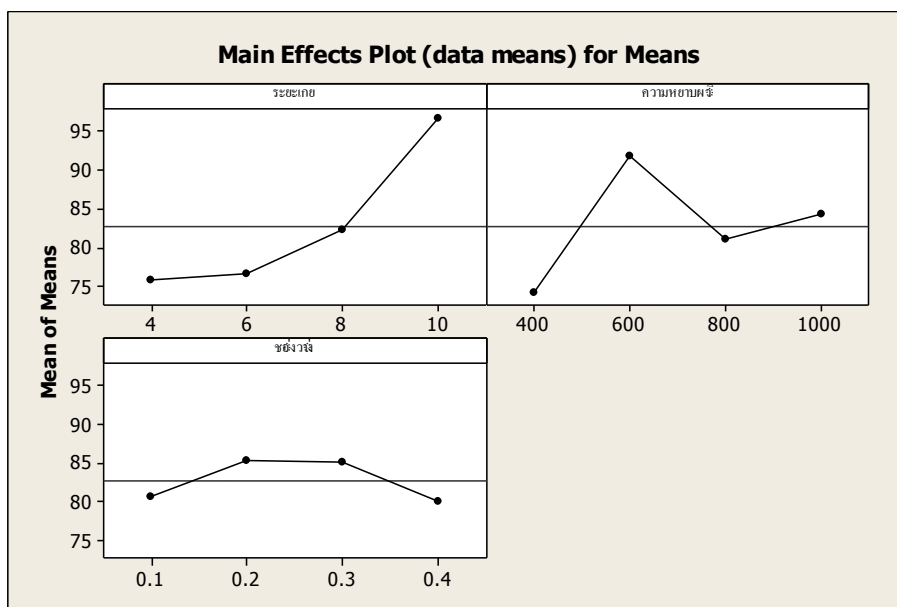
3.3 การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย (Analysis of mean, ANOM)

ในการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย (ANOM) นั้น ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยควบคุม จะแสดงถึงผลของระดับแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยควบคุม ถ้าค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของระดับของปัจจัยควบคุมใดมีค่ามากหมายถึง ระดับของปัจจัยควบคุมนั้นจะมีผลทำให้ชิ้นงานมีความต้านทานแรงเฉือนมาก ตัวอย่างเช่น ถ้าพิจารณาค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของระยะต่อเกย ในตารางที่ 10 จะพบว่าที่ระดับ 4 หรือระยะต่อเกย จะมีค่า S/N-Ratio เฉลี่ย มากที่สุด หมายความว่าถ้าใช้ระยะต่อเกย ที่ระดับ 4 เป็นองค์ประกอบของเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง จะมีผลทำให้ชิ้นงานมีความต้านทานแรงเฉือนมากที่สุด เมื่อเทียบกับระยะต่อเกยที่ระดับ 1, 2 และระดับ 3 เป็นองค์ประกอบของเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองเดียวกัน ส่วนความหยาบผิวและระยะช่องว่างที่มีค่า S/N

Ratio เฉลี่ยมากที่สุดคือ ระดับที่ 2 และ 3 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาจากภาพที่ 28 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของระดับต่างๆของปัจจัยควบคุมที่ใช้ในการทดลองกับค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu พบว่าเงื่อนไขของแต่ละปัจจัยที่ให้ค่า S/N เฉลี่ยมากที่สุดคือ ที่ระยะต่อเกยที่ 10 มิลลิเมตร ความหนาผิว 600 กริต และระยะช่องว่าง 0.3 มิลลิเมตร จะให้ชิ้นงานมีค่าความต้านทานแรงเฉือนดีที่สุด

ตาราง 10 ค่า S/N Ratio เฉลี่ยของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ค่า S/N Ratio เฉลี่ย			
	ระดับ 1	ระดับ 2	ระดับ 3	ระดับ 4
ระยะต่อเกย (มม.)	37.54	37.46	38.25	<u>39.64</u>
ความหนาผิว(กริต)	37.32	<u>39.21</u>	37.85	38.50
ระยะช่องว่าง (มม.)	37.99	38.44	<u>38.57</u>	37.89



ภาพที่ 28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของระดับต่างๆของปัจจัยควบคุมที่ใช้ในการทดลองกับค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu

จากการทำนายผลการทดลองโดยวิธีทากูชิ โดยกำหนดจากปัจจัยการทดลองที่ดีที่สุด คือ ระยะต่อเกย 10 มิลลิเมตร ความหนาผิว 600 กริต ระยะช่องว่าง 0.3 มิลลิเมตร ผลการทำนายปรากฏว่ามีค่าความต้านทานแรงเฉือนสูงสุด 107.89 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร มีค่า S/N Ratio 40.98 และได้ทำการยืนยันผล (Confirmation Test) การทำนายโดยการทดลองที่ปัจจัยดังกล่าว พบว่ามีค่าความต้านทานแรงเฉือนเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 104.16 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร โดยมีความผิดพลาดเท่ากับ 3.46 % ดังนั้นในการออกแบบรอยต่อตลอดจนการเตรียมพื้นผิวของโลหะ

พื้นจึงเป็นสิ่งที่สำคัญสำหรับออกแบบให้รอยต่อมีความแข็งแรงเนื่องจากส่งผลต่อการเปียก (Wetting) การกระจายตัว (Spreading) และ Capillary Action ของโลหะเติมในการบัดกรี [18] ถึงแม้ในงานวิจัยของ Zang และคณะ [19] ได้แสดงให้เห็นสถานะการเปียก (Wetting) ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีความเข้มข้นของดีบุกบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ในช่วงอุณหภูมิ 503-673 K (230-400 °C) การยึดติดของโลหะบัดกรีจะด้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะพื้นทองแดงและนิกเกิล เนื่องจากมุมสัมผัสของเหลวมีค่าน้อยมาก แต่สำหรับเทคนิคการบัดกรีในเตาเป็นวิธีที่เหมาะสมกับการบัดกรีที่ให้ความแข็งแรงสูงเนื่องจากสามารถควบคุมกระบวนการได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เปลวไฟและอินฟราเรด [20]

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความต้านทานแรงเฉือนระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมและโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วสามารถสรุปได้ดังนี้

1. สรุปผลการวิจัย

ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความต้านทานแรงเฉือนระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมและโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว จากการกำหนด ระยะต่อเกยที่ 4, 6, 8, และ 10 มิลลิเมตร ความหนาผิวของโลหะพื้นที่ 400, 600, 800, และ 1,000 กริต และระยะช่องว่างที่ 0.1, 0.2, 0.3 และ 0.4 มิลลิเมตร จากการวิเคราะห์ผลด้วยวิธีทาคุชิปัจจัยการทดลองที่ดีที่สุด คือ ระยะต่อเกย 10 มิลลิเมตร ความหนาผิว 600 กริต ระยะช่องว่าง 0.3 มิลลิเมตร และจากการทำนายผลค่าความต้านทานแรงเฉือนสูงสุด 107.89 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร เมื่อทดลองยืนยันผลการทำนายมีค่าความความต้านทานแรงเฉือนเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 104.16 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร โดยมีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 3.46 %

2. ข้อเสนอแนะ

2.1 ข้อเสนอแนะเพื่อนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

การนำผลจากการวิจัยไปใช้ประโยชน์ควรคำนึงถึงปัจจัยต่างๆที่ใช้ในการทดลอง เนื่องจากในการทดลองมีการควบคุมและกำหนดเฉพาะปัจจัยที่สนใจในการศึกษา ดังนั้นจึงมีปัจจัยอื่นๆนอกเหนือจากการทดลองซึ่งหลายๆงานวิจัยได้แสดงให้เห็นว่ามีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของรอยต่อได้เช่นกัน ดังนั้นการเลือกปัจจัยในกระบวนการจึงเป็นสิ่งสำคัญ

2.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยในครั้งต่อไป

ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อซึ่งอาจจะเกิดขึ้นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic Compound) ในรูปแบบต่างๆหรือมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน เนื่องจากขนาดและชนิดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะสามารถส่งผลกระทบต่อค่าความต้านทานแรงเฉือนจากการบัดกรีได้ เช่นเดียวกับตรวจสอบอิทธิพลของอุณหภูมิการใช้งานและผลจากการกัดกร่อนเพื่อจำลองสภาวะแวดล้อมการใช้งานของรอยต่อ เพื่อให้รอยต่อมีความน่าเชื่อถือและเหมาะสมการสภาวะแวดล้อมการใช้งาน

บรรณานุกรม

- [1] Joseph R. Davis, Kelly Ferjutz. (1993). Welding Brazing and soldering V 6. Publisher: ASM International.
- [2] Abtew, M. and Selvaduray, G. (2000, May). Lead-free Solders in Microelectronics. Materials Science and Engineering: R: Reports. 27(5-6): 95-141.
- [3] Chellaih, T. Kumar, G. K. Prabhu, K.N. (2007, September). Effect of thermal contact heat transfer on solidification of Pb–Sn and Pb-free solders. Materials and Design. 28(3): 1006–1011.
- [4] Islam, R.A. Chan, Y.C. Jillek, W. and Islam, S. (2006, August). Comparative study of wetting behavior and mechanical properties (microhardness) of Sn–Zn and Sn–Pb solders. Microelectronics Journal. 37(8): 705–713.
- [5] <http://www.siamstainless.com/>
- [6] Science and technology knowledge center,
<http://www1.stkc.go.th/stportalDocument/1203063111.html>
- [7] Materials of construction for equipment in contact with food. (2007, January). Trends in Food Science & Technology. 18: S40–S50.
- [8] DUFFY, E. HEARTY, A.P. GILSEMAN, M.B. and GIBNEY, M.J. (2006, July). Estimation of exposure to food packaging materials. 1: Development of a food-packaging database. Food Additives and Contaminants. 23(6): 623–633.
- [9] กรรณชัย กัลยาศิริ. (2553, มกราคม-เมษายน). การศึกษาอิทธิพลของอินเดียมที่มีต่อจุดหลอมเหลว ความต้านแรงดึงและความแข็งจุลภาคของ โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu. วารสารการเชื่อมไทย. (52). 20-24.
- [10] Kim, K.S. Huh, S.H. and , Sukanuma, K. (2003, March). Effects of intermetallic compounds on properties of Sn– Ag–Cu lead-free soldered joints. Journal of Alloys and Compounds. 352(1-2): 226-236.
- [11] Molleda, F. Molleda, F.J. Carillo, E. and Mellor, B.G. (2003, December). Soldering of mild steels: functional joints. Materials Characterization. 51(5): 285–292.
- [12] Movahedi, M. Kokabi, A.H. and Madaah Hosseini, H.R. (2009, May). An investigation on the soldering of Al 3003/Zn sheets. Materials Characterization. 60(5): 441–446.
- [13] Ding, M. Zhang, P.I. Zhang, Z.Y. and Yao, S. (2010, February). Direct-soldering 6061 aluminum alloys with ultrasonic coating. Ultrasonics Sonochemistry. 17(2): 292–297.

- [14] Nagaoka, T. Morisada, Y. Fukusumi, M and Takemoto, T. (2011, September). Selection of soldering temperature for ultrasonic-assisted soldering of 5056 aluminum alloy using Zn–Al system solders. Journal of Materials Processing Technology. 9(211): 1534-1539.
- [15] Zhao, Y. Cheng, C.Q. Cao, Z. Y. and Zhao, J. (2012, December). Interaction of liquid tin and zinc with AISI 304 stainless steel after passivation in air and nitric acid. Materials Characterization. 77: 1-9.
- [16] Yuan, X. Tang, K. Deng, Y. Luo, J. and Sheng, G. (2013, December). Impulse pressuring diffusion bonding of a copper alloy to a stainless steel with/without a pure nickel interlayer. Materials and Design. 52: 359–366.
- [17] Wu, X.W. Chandel, H.P and Seow, H L. (2001, June). Wide gap brazing of stainless steel to nickel-based superalloy. Journal of Materials Processing Technology. 113(1-3):215-221.
- [18] Huang, Y. Gong, J. Shixiong. L. Leng, J. Li, Y. (2012, August). Fluxless soldering with surface abrasion for joining metal foams. Materials Science and Engineering: A. 552: 283-287.
- [19] Zang, L. Yuan, Z. Xu, H. and Xu, B. (2011, March). Wetting process and interfacial characteristic of Sn–3.0Ag–0.5Cu on different substrates at temperatures ranging from 503K to 673 K. Applied Surface Science. 257(11): 4877–4884.
- [20] Chaves, M. Vermilyea, S.G. Papazoglou, E. and Brantley, W.A. (1998, June) Effects of three soldering techniques on the strength of high-palladium alloy solder joints. The Journal of Prosthetic Dentistry. 79(6): 677-684.

ประวัติผู้วิจัย

1. ชื่อ สกุล นางอรจิตร แจ่มแสง
2. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ (สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม)
3. หน่วยงานที่สามารถติดต่อได้ สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล โทร 032-618570# 4047, Email: orajit.jam@at.rmutr.ac.th
4. ประวัติการศึกษา
2547 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งทอ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล (ศรม.) (ประเทศไทย)
2552 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (ประเทศไทย)
5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ
 - Applied statistics and Quality control
 - Operations Research
 - Work study and Ergonomic
6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย
 - อรจิตร ประดา อนุธา คุปต์ชฐีเยธ การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและ ผลกระทบในการผลิตชุดกันไฟและการวางแผนควบคุมกระบวนการผลิตเพื่อเพิ่มผลิตภาพ กรณีศึกษาโรงงาน ตัวอย่าง การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2551 20 – 22 ตุลาคม 2551.
 - อรจิตร แจ่มแสง ปริญญา กวีกิจบัณฑิต การลดของเสียจากกระบวนการผลิตชุดกันความร้อน กรณีศึกษาโรงงานตัวอย่าง การประชุมวิชาการระดับชาติ “เครือข่ายวิจัยสถาบันอุดมศึกษาทั่วประเทศ” ประจำปี 2556 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ 27 กุมภาพันธ์ – 1 มีนาคม 2556.
 - นิวัฒน์ มุกแก้ว และ อรจิตร แจ่มแสง. การศึกษาการเกิดขึ้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่าง โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.7Cu และโลหะพื้นต่างชนิดโดยการบัดกรีแบบรีโฟลว์. การประชุมช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรมประจำปี 2555, 30-31 ตุลาคม 2557.

1. ชื่อ สกุล นางสาวปิยะวรรณ สุนาสวน
2. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ (สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม)
3. หน่วยงานที่สามารถติดต่อได้ สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล โทร 032-618570# 4047, Email: notp20@hotmail.com
4. ประวัติการศึกษา
 - 2542 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
 - 2550 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการวิศวกร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ
 - Quality Assurance and Quality Control
 - Performance evaluation by applying the analytic hierachy process
6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย
 - ปิยะวรรณ สุนาสวน และ ปวีณา พงษ์วารินทร์. แบบจำลองการคัดเลือกและประเมินผู้จัดหาวัตถุดิบในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยใช้เทคนิคกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น การประชุมขำงานวิศวกรรมอุตสาหกรรมประจำปี 2554
 - นิวัฒน์ มุกแก้ว และ ปิยะวรรณ สุนาสวน. อิทธิพลของตัวแปรในการตัดด้วยวิธี EDM ต่อลักษณะเฉพาะของการตัดเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 61 การประชุมขำงานวิศวกรรมอุตสาหกรรมประจำปี 2555, 17-19 ตุลาคม 2555.

1. ชื่อ สกุล นายนิวัฒน์ มูแก้ม
2. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ (หัวหน้าสาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม)
3. หน่วยงานที่สามารถติดต่อได้ สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล โทร 032-618570# 4047, Email: niwat.moo@rmutr.ac.th, niwat_ie@hotmail.com
4. ประวัติการศึกษา
2550 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2552 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ
 - Joining of Materials (Welding, Soldering and Brazing).
 - Electric Discharge Machining (EDM) / Wire-EDM.
 - Design and Analysis of Experiments.
 - Non-Traditional Manufacturing Processes.
6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย
 - Mookam, N. and Kanlayasiri, K. Effect of soldering condition on formation of intermetallic phases developed between Sn-0.3Ag-0.7Cu low-silver lead-free solder and Cu substrate. Journal of Alloys and Compounds, 2011; 509: 6276-6279.
 - Mookam, N. and Kanlayasiri, K. Evolution of Intermetallic Compounds between Sn-0.3Ag-0.7Cu Low-silver Lead-free Solder and Cu Substrate during Thermal Aging. Journal of Materials Science & Technology. 2012; 28: 53-59.
 - นิวัฒน์ มูแก้ม. ผลกระทบของสภาวะการเย็นตัวต่อโครงสร้างจุลภาค โครงสร้างผลึกและชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.7Cu และ Sn-0.3Ag-0.7Cu กับโลหะพื้นทองแดง. การประชุมช่วยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรมประจำปี 2554, 20-21 ตุลาคม 2554.
 - นิวัฒน์ มูแก้ม, ธิติพัทธ์ ลิ้มกุล และ กรรณชัย กัลยาศิริ. การเกิดปฏิกิริยารอยต่อระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วกลุ่ม SnAgCu และโลหะพื้นทองแดง. วารสารการเชื่อมไทย, ฉบับที่ 54 มกราคม-เมษายน 2554. หน้า 36-46.

- นิวัฒน์ มูแก้ม และ ปิยะวรรณ สุนาสวน. อิทธิพลของตัวแปรในการตัดด้วยวิธี EDM ต่อลักษณะเฉพาะของการตัดเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 61 การประชุมข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรมประจำปี 2555, 17-19 ตุลาคม 2555.
- นิวัฒน์ มูแก้ม. การศึกษาผลกระทบของสภาวะการเย็นตัวที่มีต่อโครงสร้างจุลภาค ความแข็งจุลภาคและความต้านทานแรงดึงของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu. วารสารสมาคมส่งเสริมวิจัย. ปีที่ 4 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม – สิงหาคม 2556.
- Mookam, N. Using Grey Relational Analysis in Wire-Cutting of Titanium. The Journal of Industrial Technology, Vol. 10, No. 2 May – August 2014.
- นิวัฒน์ มูแก้ม และ อรจิตร แจ่มแสง. การศึกษาการเกิดขึ้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.7Cu และโลหะพื้นต่างชนิดโดยการบัดกรีแบบรีโฟว์. การประชุมข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรมประจำปี 2555, 30-31 ตุลาคม 2557.

การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความต้านทานแรงเฉือนระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมและโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว อรจิตร แจ่มแสง และคณะ
2557