



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการบัดกรีกับการเกิดสารประกอบ  
เชิงโลหะในรอยบัดกรีของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-58Bi กับแผ่นรองทองแดง

A study on relationship between soldering temperature and time and  
the formation of intermetallic compounds of Sn-58Bi lead-free solder and  
Cu substrate

นายกรรณชัย กัลยาศิริ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2556

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการบัดกรีกับการเกิดสารประกอบ  
เชิงโลหะในรอยบัดกรีของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-58Bi กับแผ่นรองทองแดง

A study on relationship between soldering temperature and time and  
the formation of intermetallic compounds of Sn-58Bi lead-free solder and  
Cu substrate

นายกรรณชัย กัลยาศิริ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2556

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการบัดกรีกับการเกิดสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรีของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-58Bi กับแผ่นรองทองแดง แห่เงิน เงินรายได้

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556

จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 80,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี

ตั้งแต่ 1 ตุลาคม พ.ศ. 2555 ถึง 30 กันยายน พ.ศ. 2556

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

นายกรรณชัย กัลยาศิริ

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการบัดกรีกับการเกิดสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรีของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-58Bi กับแผ่นรองทองแดง และทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ดังกล่าว โดยใช้การบัดกรีแบบจุ่มในการบัดกรีโลหะบัดกรี Sn-58Bi เข้ากับแผ่นรองทองแดงที่อุณหภูมิ 170, 190 และ 210 °C เป็นระยะเวลา 5, 15 และ 25 วินาที จากการบัดกรีภายใต้เงื่อนไขดังกล่าวพบเฉพาะสารประกอบเชิงโลหะ  $Cu_6Sn_5$  เกิดขึ้นที่รอยบัดกรี สำหรับการบัดกรีที่อุณหภูมิคงที่ พบว่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบัดกรี โดยมีลักษณะความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตรง มีค่าเลขยกกำลังของแบบจำลอง Power law เท่ากับหนึ่ง และเมื่อบัดกรีด้วยระยะเวลาที่เท่ากัน พบว่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นในลักษณะความสัมพันธ์แบบโพลิโนเมียลยกกำลังสอง ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงได้เลือกการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุในการสร้างแบบจำลองเพื่อรวมความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตรงและแบบโพลิโนเมียลเข้าด้วยกัน และพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นมีความสามารถในการทำนายความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะได้เป็นอย่างดี โดยมีค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดในการทำนายเท่ากับ 1.83%

คำสำคัญ: โลหะบัดกรีไร้ตะกั่ว การบัดกรี สารประกอบเชิงโลหะ แบบจำลองการเจริญเติบโต

**Research Title:** A study on relationship between soldering temperature and time and the formation of intermetallic compounds of Sn-58Bi lead-free solder and Cu substrate

**Researcher:** Kannachai Kanlayasiri

**Faculty:** Engineering

**Department:** Industrial Engineering

### ABSTRACT

The aim of this research was to develop a mathematical model to relate effect of soldering temperature and time to thickness of intermetallic compound (IMC) layer between Sn-58Bi lead-free solder and copper substrate. Dip soldering was performed to collect the experimental data for modeling. Soldering temperature was at 170, 190 and 210 °C with soldering time of 5, 15 and 25 seconds. The IMC layer found at the soldering interfaces of all soldering conditions was  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ . At a constant soldering temperature, thickness of the IMC layer was linearly increased with the increase of soldering time indicating that the IMC layer growth was a linear kinetics and the exponent of the power law model was equal to one. When the soldering time was kept constant, thickness of the IMC layer was well related with the soldering temperature in a second-order polynomial form. Therefore, by these reasons, multiple regression analysis was selected as the modeling approach to combine the linear and polynomial relationship of the IMC growth. The developed mathematical model was verified and showed a high prediction accuracy. The average prediction error was 1.83%.

**Keywords :** Lead-free solders, Soldering, Intermetallic compounds, Growth model

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง จากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556

กรรณชัย กัลยาศิริ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญตาราง .....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย .....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....</b>	<b>4</b>
2.1 โลหะนอกกลุ่มเหล็ก.....	4
2.2 โลหะผสม.....	8
2.3 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว.....	9
2.4 การบัดกรี .....	12
2.5 โลหะพื้.....	13
2.6 การแพร่ .....	13
2.7 ฟลักซ์ .....	15
2.8 แผนภาพสมดุล .....	16
2.9 ระบบที่อยู่ในสถานะสมดุล .....	17
2.10 เฟสมีชันตร์.....	18
2.11 เฟสไดอะแกรม.....	19
2.12 โลหศาสตร์.....	21
2.13 กล้องจุลทรรศน์โลหะการ.....	24
2.14 การทดสอบสมมติฐาน.....	26

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.15 หลักการเบื้องต้นเกี่ยวกับการออกแบบการทดลอง.....	27
2.16 การทดลองปัจจัยเดียวและการวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	34
2.17 การวิเคราะห์ทางสถิติ .....	40
2.18 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล .....	41
2.19 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบสามระดับ .....	46
2.20 วิธีการฟื้นผิวดอกสนองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ .....	48
2.21 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	51
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย .....</b>	<b>54</b>
3.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ.....	54
3.2 การวิเคราะห์ผลทางโครงสร้างจุลภาค .....	56
3.3 การออกแบบการทดลอง.....	57
3.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	58
3.5 การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุ.....	58
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัย .....</b>	<b>61</b>
4.1 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง .....	61
4.2 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด .....	62
4.3 ธาตุและเฟสของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ .....	63
4.4 ค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ.....	64
4.5 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเชิงถดถอย .....	65
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>70</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	70
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	71
<b>บรรณานุกรม/เอกสารอ้างอิง.....</b>	<b>72</b>
<b>ประวัตินักวิจัย .....</b>	<b>75</b>

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 โลหะผสมที่มีช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำกว่า 180 °C.....	11
2.2 โลหะผสมที่มีช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว 180 °C – 200 °C .....	11
2.3 โลหะผสมที่มีช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว 200 °C – 230 °C .....	11
2.4 โลหะผสมที่มีช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวมากกว่า 230 °C .....	12
2.5 ชนิดของโลหะต่อความยากง่ายในการบัดกรี .....	13
2.6 รูปแบบการทดลองที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน .....	33
2.7 แสดงข้อมูลสำหรับการทดลองปัจจัยเดียว.....	35
2.8 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับปัจจัยเดียว แบบจำลองผลกระทบคงที่.....	41
2.9 รูปแบบของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย.....	42
2.10 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ตัวแปร .....	45
4.1 ค่าความหนาเฉลี่ยของชั้นสารเชิงประกอบที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ .....	65
4.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสามระดับ โดยเลือก รูปแบบ Full Quadratic .....	65
4.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสามระดับ โดยเลือก รูปแบบ Full Quadratic .....	66

## สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 การแพร่โดยอาศัยช่องว่าง.....	14
2.2 การแพร่แบบแทรกที่ .....	14
2.3 เฟสไดอะแกรม Ternary ที่ประกอบด้วย Sn-Bi-Cu.....	20
2.4 Cu-Bi Phase Diagram.....	21
2.5 กล้องจุลทรรศน์เชิงแสง.....	25
2.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	26
2.7 แบบจำลองทั่วไปสำหรับกระบวนการหรือระบบ .....	28
2.8 ตัวอย่างของการระบุสาเหตุของปัญหาโดยการใช้แผนภูมิแกงปลา .....	32
2.9 ผลตอบสนองแบบสามมิติ.....	49
2.10 กราฟเส้นโครงร่างของพื้นผิวตอบสนอง.....	50
2.11 วิธีการอย่างมีลำดับขั้นตอนของการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ.....	51
3.1 ลักษณะของแผ่นรองทองแดงที่ตัดด้วยเครื่องตัดแบบคันโยก .....	54
3.2 ฟลักซ์ Ultracore Flux AMR N-1003.....	54
3.3 เต้าหลอมไฟฟ้า.....	55
3.4 ลักษณะของแผ่นรองทองแดงที่ถูกตัด .....	55
3.5 ชิ้นตัวอย่างที่หล่อเรซิน .....	56
3.6 เครื่อง Elma E30H Elmasonic .....	56
3.7 ภาพที่ได้จากการ SEM ด้วยวิธี Back Scattering electron ที่กำลังขยาย 6,000 เท่า .....	57
4.1 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีแบบจุ่มที่อุณหภูมิ 210°C เป็นเวลา 5 วินาที .....	61
4.2 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรี วิเคราะห์โดยใช้รูปแบบ Backscatter .....	62
4.3 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของชิ้น Cu <sub>6</sub> Sn <sub>5</sub> .....	63
4.4 เฟสไดอะแกรมของ Cu-Sn.....	64
4.5 การกระจายแบบปกติของค่า Residual (3 <sup>k</sup> Factorial Design).....	67
4.6 การกระจายตัวของค่า Residual เทียบกับ Observation (3 <sup>k</sup> Factorial Design) .....	67
4.7 การกระจายตัวของค่า Residual เทียบกับ Fitted Value (3 <sup>k</sup> Factorial Design).....	68

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากข้อบังคับเกี่ยวกับการใช้สารอันตรายในสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ หรือ Restriction on Hazardous Substances (RoHS) ที่กำหนดโดยคณะกรรมการยุโรปหรืออีซี (EC-European Commission) ทำให้มีการนำโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วมาใช้แทนโลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมของตะกั่วและดีบุก [1] แต่อย่างไรก็ตามเมื่อนำโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วมาบัดกรีกับทองแดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างทองแดงและดีบุกจะทำให้เกิดเป็นชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compounds) [2-4] โดยส่งผลต่อความน่าเชื่อถือของรอยบัดกรีที่ลดลงเมื่อนำไปใช้งาน [5] เนื่องจากมอดูลัสความยืดหยุ่นหรือยังมอดูลัสของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีค่าลดลงจากการเพิ่มความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะโดยสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างทองแดงและโลหะบัดกรีมีความหนาเพิ่มขึ้นก็จะมีความแข็งแรงลดลง [6] จึงต้องมีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วกับแผ่นรองทองแดง โดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาบัดกรีที่มีต่อความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในการบัดกรีด้วยโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว โดยนำความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะกับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการบัดกรีด้วยวิธีการจุ่ม มาสร้างเป็นสมการมาวิเคราะห์โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความถดถอย และนำมาสร้างสมการพยากรณ์ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจากอุณหภูมิที่ใช้ในการบัดกรี

รอยต่อบัดกรีจากการบัดกรีจะเกิดเป็นชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาของโลหะพื้นที่ใช้ในการบัดกรีและโลหะบัดกรี ความหนาที่เกิดขึ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจากการบัดกรีจะส่งผลโดยตรงต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม ซึ่งมีปัจจัยของความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่สำคัญ คือ อุณหภูมิและเวลาของการบัดกรี จะส่งผลให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะของแต่ละอุณหภูมิและเวลามีความหนาไม่เท่ากัน ส่งผลให้เกิดเฟสของชั้นสารประกอบเชิงโลหะอาจจะแตกต่างกันและส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม

ในโครงการวิจัยนี้จะทำการศึกษากการเกิดสารประกอบเชิงโลหะในการบัดกรีแผ่นรองทองแดงด้วยโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-58Bi ที่บัดกรีด้วยอุณหภูมิและเวลาต่างๆ ซึ่งโลหะบัดกรี Sn-58Bi เป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิดหนึ่งที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ โดยมีจุดหลอมเหลวประมาณ 139 °C จึงมีโอกาสรสร้างความเสี่ยงเนื่องจากความร้อนจากการบัดกรีให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้น้อย สามารถใช้งานกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่สามารถทนต่อความร้อนสูงในการบัดกรีโดยทั่วไปได้ และโลหะบัดกรีชนิดนี้มีความสามารถในการเชื่อมประสานที่ค่อนข้างดี และในโครงการวิจัยนี้จะทำการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple regression analysis) เพื่ออธิบาย

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะกับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการบัดกรี รวมทั้งจะทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรีที่ผ่านการบัดกรีที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆด้วย ซึ่งผลจากงานวิจัยนี้จะเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญทางด้านโลหะวิทยาของการบัดกรี

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการบัดกรีที่มีต่อความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-58Bi กับแผ่นรองทองแดง
- 2) เพื่อสร้างสมการทางคณิตศาสตร์อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นกับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการบัดกรีโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-58Bi กับแผ่นรองทองแดง
- 3) เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรีที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-58Bi กับแผ่นรองทองแดงที่ผ่านการบัดกรีที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ในโครงการวิจัยนี้จะทำการศึกษาเฉพาะโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-58Bi และใช้แผ่นรองทองแดงความบริสุทธิ์ 99.99% เป็นโลหะพื้นสำหรับการบัดกรี และศึกษาเฉพาะการบัดกรีแบบจุ่มที่อุณหภูมิ 170, 190 และ 210 °C และใช้เวลาบัดกรี 5, 15 และ 25 วินาที ตามข้อแนะนำ Test Procedures for Developing Solder Data ของ National Institute of Standards and Technology ประเทศสหรัฐอเมริกา

## 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

สำหรับในโครงการวิจัยนี้ ชั้นแรกของการศึกษาจะใช้การทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการบัดกรีกับการเกิดขึ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ซึ่งโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-58Bi จะถูกหลอมในเบ้าหลอมกราไฟท์ที่อุณหภูมิที่กำหนด คือ 170, 190 และ 210 °C และใช้เวลาบัดกรี 5, 15 และ 25 วินาที ด้วยวิธีการจุ่มแผ่นรองทองแดงลงไป (Dip soldering) ตามข้อแนะนำ Test Procedures for Developing Solder Data ของ National Institute of Standards and Technology ประเทศสหรัฐอเมริกา จากนั้นจึงนำรอยบัดกรีที่ได้จากการบัดกรีที่เงื่อนไขต่างๆไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและวัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้น การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของพิวเตอร์จะใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) และ Energy dispersive spectroscopy (EDS) ส่วนการวัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจะใช้ซอฟต์แวร์ Image-Pro Express ช่วยในการวัด สำหรับในขั้นตอนต่อไปของโครงการวิจัยนี้จะใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองในช่วงแรกมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะกับอุณหภูมิและเวลาในการบัดกรี และทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นด้วยการนำผลการ

ทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง (ในส่วนผสมใหม่ที่ไม่เคยใช้ในการสร้างแบบจำลอง แต่เป็นส่วนผสมที่ยังอยู่ในช่วงของส่วนผสมที่ได้กำหนดไว้) ในการทำโครงการวิจัยนี้จะใช้อุปกรณ์และสถานที่ของสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ยกเว้นการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของสารประกอบเชิงโลหะด้วย SEM และ EDS จะทำที่หน่วยงานภายนอกที่มีเครื่องมือดังกล่าวช่วยในการตรวจสอบ

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลการวิจัยที่ได้คาดว่าจะสามารถตีพิมพ์เผยแพร่เป็นบทความฉบับเต็ม (Full paper) ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติที่อยู่ในระบบฐานข้อมูลของ ISI หรือ SJR ได้ รวมทั้งผลการวิจัยที่ได้จะเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญทางด้านกรบัดกรีโดยใช้โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วและโลหะวิทยาของการบัดกรี และเป็นองค์ความรู้ที่ภาคอุตสาหกรรมสามารถนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ได้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 โลหะนอกกลุ่มเหล็ก

โลหะที่ไม่ใช่เหล็ก ในทางอุตสาหกรรมการผลิตแล้วจะใช้ประมาณ 25% โดยน้ำหนักของโลหะเหล็กเท่านั้น อาจเนื่องมาด้วย การขาดความแข็งแรงทางด้าน โครงสร้างหรือคุณสมบัติทางเชิงกลที่ไม่ดีนัก จึงทำให้การนำไปใช้โดยตรงไม่เป็นที่นิยม แต่จะถูกใช้ในรูปแบบของสารผสมเพิ่มหรือธาตุที่เพิ่มเติมคุณสมบัติพิเศษให้กับโลหะอื่น ๆ เช่น คุณสมบัติทางด้านความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดและด่าง การนำไฟฟ้า หรือการทำให้โลหะอื่นง่ายต่อการขึ้นรูป

การถลุง (Smelting) โลหะที่ไม่ใช่เหล็กนั้นจะเริ่มจากการคัดแยกหรือแต่งสินแร่ (Ore Dressing) ก่อนแล้วจึงนำไปถลุงในเตาสูง (Blast Furnace) ที่นำมาใช้ในการถลุงโลหะที่ไม่ใช่เหล็กนั้นจะมีลักษณะและรูปร่างรวมทั้งคุณสมบัติเหมือนกับเตาสูงที่ใช้สำหรับผลิตเหล็กคิบ (Pig Iron) ยกเว้นเพียงแต่มีขนาดที่เล็กกว่า และ ถลุงในเตาสะท้อน (Reverberatory Furnace) ซึ่งเป็นเตาอีกชนิดที่นิยมใช้กันมากในการถลุงโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก โดยจะมีการใช้ตัวล่อขี้ตะกรัน (Slag Inducer) หรือ ฟลักซ์ (Flux) ลงไปเพื่อลดการออกซิเดชัน (Oxidation)

##### 2.1.1 ทองแดง (Copper)

ทองแดง (Copper) มีสัญลักษณ์ทางเคมี คือ Cu มีความแข็งตามสเกลของมอห์ (Moh's scale) 2.5 – 3.0 มีจุดหลอมเหลว 1083°C จุดเดือดที่ 2595°C อ่อนตัวที่ 20°C มีความหนาแน่น 8.89 มีความต้านทานไฟฟ้า (Electrical Resistivity) 1.71 ที่ 20°C และมีความนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) ในแนวตั้ง และโดยน้ำหนักที่เด่นมากเป็นรองก็แต่เงินและอลูมิเนียมเท่านั้น มนุษย์รู้จักใช้ประโยชน์ของทองแดง ทำเครื่องใช้ไม้สอยและอาวุธต่าง ๆ ตั้งแต่สมัยดึกดำบรรพ์ที่เรียกว่ายุคสัมฤทธิ์ (Bronze age) มาตรฐานปัจจุบันนี้ทองแดงยังเป็นโลหะที่ใช้งานอย่างแพร่หลายมาก มาเป็นที่สองรองลงมาจากเหล็กและเป็นโลหะที่สำคัญในกลุ่มโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก (Non – Ferrous Metals) ทองแดงเป็นวัสดุที่เป็นตัวนำความร้อนที่ดีและมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนดีอีกด้วย ดังนั้นทองแดงจึงถูกใช้ทำเป็นส่วนประกอบของหม้อต้มน้ำเครื่องถ่ายเทความร้อน ฯลฯ คุณสมบัติของทองแดงอีกประการหนึ่งก็คือ มีความต้านทานจำเพาะต่ำเป็นที่สองรองจากเงิน ปริมาณทองแดงที่ผลิตได้ประมาณครึ่งหนึ่งใช้ในการอุตสาหกรรมไฟฟ้า เช่น ใช้ทำสายไฟฟ้าขดลวดที่ใช้ในมอเตอร์และเจนเนอเรเตอร์ (Generators) ไฟฟ้า ฯลฯ ความต้านทานจำเพาะของทองแดงที่มีค่าสูงกว่าเงินเพียงเล็กน้อยและต่ำกว่าอลูมิเนียม

ทองแดงและทองแดงผสมมีคุณสมบัติเด่นหลายประการ เช่น

1. คุณสมบัติต้านทานแรงดึงดี และมีช่วงพิคคกว้าง (ขึ้นกับชนิดของทองแดงและกรรมวิธีผลิต) ทองแดงบริสุทธิ์มีคุณสมบัติอ่อนและเหนียวสามารถรีดให้เป็นแผ่นบาง ๆ ขนาด 1/500" สามารถดึงเป็นเส้นลวดเล็ก ๆ ขนาด 1/1,000" โดยไม่ขาดทูปตีเป็นวัตถุสำเร็จรูป โดยไม่มีการแตกร้าว
2. ความเหนียวของทองแดงสูงมากสามารถขึ้นรูปโดยไม่เสี่ยงต่อการแตกหัก
3. เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีมาก (100 เปอร์เซ็นต์ แต่เงิน 106 เปอร์เซ็นต์)
4. เป็นตัวนำความร้อนที่ดีมาก (100 เปอร์เซ็นต์ แต่เงิน 108 เปอร์เซ็นต์)
5. กลึงไสขึ้นรูปได้ง่าย เมื่อผสมธาตุอื่นบางตัวเข้าไป
6. ต้านทานความล้าได้ดี
7. ไม่มีสารแม่เหล็ก
8. ทนทานต่อการกัดกร่อน โดยเฉพาะเมื่อใช้กับกรดและน้ำทะเล
9. ทดทานต่อการสึกกร่อน (Wear Resistance)
10. มีสีสวยงามใช้
11. ทองแดงและโลหะผสมทองแดงแทบทุกชนิดสามารถเชื่อมได้อย่างง่ายดาย

โดยทั่วไปเราเรียกโลหะว่าทองแดง (Copper) เมื่อโลหะนั้นเป็นทองแดงเกือบบริสุทธิ์มีสิ่งแปลกปนอื่นๆ ผสมปนอยู่ไม่เกิน 0.5% โดยน้ำหนักและเรียกว่าทองแดงผสมหรือโลหะผสมของทองแดงเมื่อโลหะนั้นมีทองแดง เป็นธาตุที่ผสมอยู่มากที่สุด แต่ไม่น้อยกว่า 40% และไม่สูงกว่า 99% โดยน้ำหนัก

#### คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของทองแดง

น้ำหนักอะตอม (Atomic Weight)	63.57
โครงสร้างของผลึก Face Centered Cubic (FCC.)	
มิติของแลตทิซ (°A)	3.6078 (°A)
ความหนาแน่น (20°C)	8.94
จุดหลอมเหลว	1083°C
จุดเดือดกลายเป็นไอ	2595°C
ความร้อนจำเพาะ (25°C)	0.0919 cal/g°C
สัมประสิทธิ์การขยายตัว	16.47 x 10 <sup>-6</sup> /°C
ความต้านทานจำเพาะ (30°C)	1.682 ไมโคร โอห์ม/ซม <sup>3</sup>

คุณสมบัติทางกล

Tensile Strength	17 kg/mm <sup>2</sup>
Elastic Limit	10 kg/mm <sup>2</sup>
Elongation	35 – 50 %
Hardness	35 – 50 HB
Modulus of Elasticity	12,000 kg/mm <sup>2</sup>

2.1.1.1 สินแร่ทองแดง (Copper Ores)

เราพบอนุสาวรีย์ของชาวอียิปต์โบราณซึ่งสร้างไว้เมื่อ 2,600 ปีก่อนคริสตวรรษ ทำด้วยโลหะทองแดงบริสุทธิ์ จึงทำให้เราสันนิษฐานกันว่าอาจจะมีแหล่งแร่ทองแดงบริสุทธิ์โดยธรรมชาติ (Native Copper) ในแถบนั้นซึ่งก็เป็นความจริงที่เราพบแหล่งแร่ทองแดงบริสุทธิ์อยู่บ้านในเอธิโอเปีย (Ethiopia) เป็นแร่ทองแดงบริสุทธิ์มีลักษณะเป็นก้อนสีดำ คุกล้ำหินมากกว่าโลหะ ปัจจุบันนี้ยังพบในที่ต่าง ๆ อยู่บ้างที่ปะปนอยู่กับแร่อื่น ๆ เช่น แร่เงินหรือแร่ทองแต่มีปริมาณไม่มากนักแร่ทองแดงที่จัดว่ามีความสำคัญในการผลิตโลหะทองแดงส่วนมากจะเป็นแร่ประเภทซัลไฟด์ (Sulfide) มีสองชนิดคือ แร่ทองแดงแคลโคไซต์ (Chalcocite;  $Cu_2S$ ) มี Cu ประมาณ 79.8% และแร่ทองแดงแคลโคไพไรท์ (chalcopyrite;  $CuFeS_2$ ) มี Cu ประมาณ 34.5% นอกจากแร่ซัลไฟด์แล้วยังมีแร่ทองแดงออกไซด์ ( $Cu_2O$ ) แต่ปริมาณที่พบมีน้อย แร่ทองแดงอีกชนิดหนึ่งที่เป็นแร่ทองแดงคาร์บอเนต  $CuCO_3 (OH)_2$  เรียกกันทั่ว ๆ ไปว่า Malachite มีสีเขียวสวยงามมากใช้เจียรนัยทำเป็นเครื่องประดับ

แร่ทองแดงมีหลายชนิด แร่ที่สำคัญ ๆ ได้แก่

1. แร่ทองแดงไพไรท์ ซึ่งเกิดเป็นแร่ควบคู่กับแร่เหล็กที่เรียกว่า Chalcopyrite ( $CuFeS_2$ )
2. แร่ทองแดงออกไซด์ (Cuprite)  $Cu_2O$  สีแดง
3. แร่ทองแดงดำ Copper glance (Chalcocite)  $Cu_2S$
4. แร่ทองแดงคาร์บอเนต  $CuCO_3 Cu (OH)_2$  ซึ่งเป็นแร่สีเขียวสวยงามมาก ใช้เจียรนัยเป็นเครื่องประดับ
5. แร่ทองแดงบอร์ไนท์ ( $Cu_2FeS_2$ )
6. แร่ทองแดงโคเวลไพไรท์ ( $CuS$ )

เนื่องจากทองแดงมีคุณสมบัติ Ductility สูงและมีความต้านทานไฟฟ้าต่ำดังนั้น Cu ประมาณมากกว่า 50% ใช้ในการทำ Alloy เช่น Brass, Bronze และ Monel และอีกประมาณ 20% ใช้ทำเครื่องมือถ่ายเทความร้อน เช่น Condenser, Evaporator และอื่น ๆ

ตัวอย่างการใช้งานของ Cu เช่น คอมพิวเตอร์ (Cu + Ag) ชิ้นส่วนในเครื่องยนต์, ปลอกกระสุน (Cu + Sn) สปริงชนิดต่าง ๆ ทำจากบรอนซ์ ดีบุก ผสมฟอสฟอรัส, คาร์บิวเรเตอร์ (Cu + Sn + Zn + Pb) บุษและแบร็ง เป็นต้น โลหะผสมทองแดง เช่น ท่อกลั่น (Condensortube) ปลอกกระสุนปืน ดอก

คุณภาพ เหริยคุณระชาปณ์ เช่น เหริยคุณบาท และห้ำบาท ทองแดงที่ใช้ในงานไฟฟ้าวิหุจะต้งมึความบริสุทฐ์มากถึง 99 – 99% ถ้ทำห้บริสุทฐ์ 100 เปอร์เซนต์ ต้งใช้วิธีแยกด้วยไฟฟ้าถ้ต้งการความบริสุทฐ์เพียง 99.5% ใช้วิธีหลอมกรรมคาแล้วกวนด้วยไม้สค

### 2.1.2 ดีบุก (Tin)

ดีบุกมึสัณฐ์ลักษณะว่า Sn ความหนาแน่น 7.3 กก/ตรม<sup>3</sup> จุดหลอมเหลว 232 °C อัตราการยี้ดตัว 40% ดีบุกเป็นโลหะที่ห้การเปลี่ยนแปลงอัญรูป (Allotropic) คล้ายคลึงกับเหล็ก กล่าวคือดีบุกจะเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากระบบหนึ่งไปอีกระบบหนึ่งคือจากเบต้า (β) ไปเป็น แอลฟา (α) การเปลี่ยนแปลงจะเกิเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 18°C ปกติดีบุก α จะเปราะแตกง่ายและมักจะเกิการขยายตัวมากในขณะเกิการเปลี่ยนแปลงจาก β ไปเป็น α ดังนั้นดีบุกมักจะแตกได้ง่ายเมืออยู่ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 18° C เรียกลักษณะนี้ว่าโรคดีบุก (Sickness of Tin or Warts) ทั่ว ๆ ไปที่อุณหภูมิบรรยากาศดีบุกเป็นโลหะอ่อนที่จุดหลอมตัวต่ำและมีคุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อนได้ดี ดีบุกเป็นโลหะสีขาวคล้ายเงิน อ่อนและรีดเป็นแผ่นได้ง่าย ดีบุกเป็นโลหะยุทธปัจจัยเพราะมึปรากฏอยู่บนผิวโลกไม่มากแห่ง ดีบุกมึในประเทศไทย เช่นภาคใต้จังหวัดภูเก็ต พังงา ตรัง ยะลา สงขลา นครศรีธรรมราช สุราษฎร์ธานี ชุมพร ภาคกลางจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ราชบุรี กาญจนบุรี และภาคเหนือ แม่ฮ่องสอน เชียงราย เชียงใหม่ ลำปาง ตาก อุทัยธานี และคาบสมุทธรอินโดจีน มีมากอีกแห่งหนึ่งที่มีดีบุก คือ ประเทศโบลิเวียในทวีปอเมริกาใต้

#### 2.1.2.1 สิ้นแร่และการถลุงดีบุก

ดีบุกมาจากออกไซด์ของมันเอง เช่น Cassiterite ส่วนมากพบที่โบลิเวียตะวันออก อัฟริกากลาง ไทย มาเลเซีย ทำการถลุงโดยใช้คาร์บอนเป็นตัวรีดิวซ์ (Reduce) ในเตาพ่นลม (Blast Furnace) จะได้ดีบุกเป็นของเหลวแล้วทำห้บริสุทฐ์โดย Electrolytical หรือโดยวิธี Chemical Process แร่ดีบุกที่สำคัญในการผลิตดีบุก ได้แก่ แร่ดีบุกออกไซด์ (SnO<sub>2</sub>) ซึ่งเรียกว่า Cassiterite หรือ Tenstone เป็นแร่ที่มีดีบุกประมาณ 80% แร่ดีบุกนี้พบหลายสี แต่ที่พบบันมากได้แก่ สีน้ำตาลหรือดำ มีความวาวเหมือนเพชร แจ็ง 6 – 7 และมี ถ.พ. 6.8 – 7.1 จึงหนักและทนต่อการสึกกร่อน ผุพัง แร่ดีบุกที่จะนำมาถลุงจะต้งผ่านการแยกแร่เอาหินหรือแร่อื่นๆที่ติดมาออกในบางกรณีอาจจต้งเอามาทำ Roasting หรือผสมกับกรดเกลือเพื่อแยกเอาพวก Impurities ออกเช่นเหล็กเมือได้แร่ดีบุกออกไซด์แล้วก็นำไปถลุงในเตา Blast Furnace โดยใช้ทั้งถ่านหิน และหินปูน เป็นตัวดึงออกซิเจนออก ดีบุกที่ได้ อาจจะมีโลหะอื่น ๆ ปนอยู่เล็กน้อย ซึ่งจต้งนำไปทำห้บริสุทฐ์ต่อไปการทำดีบุกบริสุทฐ์อาจใช้การแยกด้วยกระแสไฟฟ้า หรือใช้วิธีการหลอมซึ่งง่ายและสะดวกกว่าเพราะดีบุกมีจุดหลอมละลายต่ำอยู่แล้วเมือหลอมดีบุกในอ่างแล้วพยายามรักษาอุณหภูมิอย่าให้สูงกว่า 232° C (450° F) ดีบุกจะละลาย ส่วนสารเจือปนซึ่งมีจุดหลอมเหลวสูงกว่ายังคงเป็นของแข็ง เราก็ระบายเอาดีบุกบริสุทฐ์ออกนำไปหล่อเป็นแท่งลักษณะกรรมวิธีถลุง หากเป็นแร่

ดีบุกซัลไฟต์ก็ต้องเผาคว่ำให้เป็นดีบุกออกไซด์เสียก่อน ต่อจากนั้นจึงถลุงโดยลดออกซิเจนออกจากดีบุกโดยใช้คาร์บอน  $\text{SnO}_2 + \text{C} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{Sn}$

เนื่องจากดีบุกมีสมบัติต้านทานการกัดกร่อนได้ดี จึงใช้ดีบุกเคลือบแผ่นเหล็ก และภาชนะใส่อาหารเพื่อป้องกันสนิมและผลิตภัณฑ์กันชื้น เช่น ห่อบุหรี่, ใบชา ประมาณ 40% ของดีบุกที่ผลิตได้ใช้เคลือบแผ่นเหล็กหรือที่เราเรียกว่าเหล็กกิลาส (Tin Plate) ที่ใช้บุงหลังคาและผลิตภัณฑ์ทำโลหะผสมเพื่อทำตัวพิมพ์หนังสือ ทำหลอดบรรจุของเหลวเช่น ยาสีฟัน ประมาณ 20% ใช้ทำโลหะบัดกรีและ 15% ของดีบุกที่ผลิตได้ใช้ทำโลหะผสม เช่น บรอนซ์ (Phosphor Bronze) “white metal” bearing die casting และโลหะตัวพิมพ์ใช้ผสมในน้ำมันหล่อลื่นหรือตัวบายอย่างและโลหะผสมดีบุกที่สำคัญ เช่น ทองสัมฤทธิ์ เป็นโลหะผสมระหว่างทองแดง ดีบุก และสังกะสี เป็นต้น

ตะกั่วบริสุทธิ์จุดหลอมละลายที่  $621^\circ\text{F}$  เป็นโลหะที่สามารถนำไปใช้ทำอะไรได้หลายอย่างซึ่งได้มาจากคุณสมบัติพิเศษของตะกั่วคือน้ำหนักอะตอมสูงและความหนาแน่น ความอ่อน ความเหนียว ความแข็งแรงต่ำ จุดหลอมละลายต่ำต้านทานการกัดกร่อนและความสามารถในการหล่อขึ้นความแข็งแรงทางด้านความล้าไม่ดี ดังนั้นจึงไม่สามารถจะนำมาใช้ภายใต้สภาวะของการสั่นสะเทือน มันจะเกิดการตีบตัว ณ อุณหภูมิห้องและยังมีข้อเสียอื่น ๆ อีกคือเป็นสารประกอบที่มีพิษ

## 2.2 โลหะผสม

โลหะบริสุทธิ์นำมาใช้ในงานด้านวิศวกรรมน้อยมาก ปกตินิยมใช้เมื่อต้องการคุณสมบัติการนำไฟฟ้าสูง ความเหนียวสูง หรือมีความต้านทานการกัดกร่อนดี คุณสมบัติดังกล่าวจะมีค่าสูงสุดในโลหะบริสุทธิ์ แต่คุณสมบัติเชิงกล เช่น ความแข็งแรง ความต้านทานการคราก และความแข็ง จะมีค่าสูงเมื่อโลหะอยู่ในรูปของโลหะผสม ขบวนการผลิตโลหะผสมจะนำโลหะตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปมาหลอมแล้วปล่อยให้แข็งตัวในแบบหล่อที่เหมาะสม โลหะผสมจะแสดงคุณสมบัติของโลหะเนื้อของโลหะที่เป็นเนื้อเดียวกันเรียกว่าเฟส (Phase) หรือภาค เฟสที่เป็นของแข็งอาจจะเป็นโลหะบริสุทธิ์หรือสารละลายของแข็ง หรืออาจเป็นเฟสมัธยันต์ (Intermediate Phase) (ประกอบด้วยโลหะ 2 ชนิดหรือมากกว่า) จากกฎของเฟส (Phase Rule) ซึ่งเสนอโดย Josiah W Gibbs สำหรับโลหะผสมที่เป็นของแข็งประกอบด้วยโลหะ 2 ชนิด จะมีลักษณะเป็นไปตามข้อใดข้อหนึ่งดังนี้คือ

- ก) ประกอบด้วยโลหะบริสุทธิ์ 2 ชนิดแยกตัวออกจากกันอย่างอิสระ
- ข) ประกอบด้วยสารละลายของแข็งอย่างเดียว โดยที่โลหะชนิดหนึ่งสามารถละลายในโลหะอีกชนิดหนึ่งได้ทั้งหมด
- ค) ประกอบด้วยสารละลายของแข็งที่สามารถละลายได้บางส่วน 2 ชนิด
- ง) ประกอบด้วยเฟสมัธยันต์อย่างเดียว
- จ) ประกอบด้วยเฟสมัธยันต์ต่างกัน 2 ชนิดอยู่ร่วมกัน
- ฉ) ประกอบด้วยสารละลายของแข็งชนิดหนึ่งและเฟสมัธยันต์อีกชนิดหนึ่ง

ปกติการผลิตโลหะผสม จะนำโลหะที่มีจุดหลอมละลายสูงมาทำการหลอมก่อนแล้วค่อยเติมโลหะที่มีจุดหลอมละลายต่ำกว่าเข้าไปและผสมส่วนผสมให้เข้ากันเป็นสารละลายของเหลว เมื่อโลหะเหลวเปลี่ยนเป็นของแข็งจะเกิดของแข็งที่มีโครงสร้างต่างๆกัน ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ และความสัมพันธ์ในตารางพีริออดิก (Periodic Table) ของโลหะทั้งสองชนิด

ถ้าโลหะทั้งสองชนิดอยู่ใกล้กันในตารางพีริออดิก โลหะทั้งสองมีโอกาสที่จะรวมกันเป็นผลึกอย่างเดียวกันเป็นสารละลายของแข็ง โดยอะตอมของโลหะแต่ละชนิดจะเข้าไปแทนที่ซึ่งกันและกันเป็นแบบแรนดอม (Random) ในโครงสร้างผลึก

ถ้าโลหะทั้งสองชนิดอยู่ห่างกันในตารางพีริออดิก คุณสมบัติทางเคมีและขนาดอะตอมของโลหะทั้งสองชนิดอาจจะแตกต่างกันอย่างชัดเจน โลหะทั้งสองชนิดมีโอกาสจะรวมตัวกันเปิดเป็นสารประกอบทางเคมีชนิดใดชนิดหนึ่งขึ้น เช่น สารประกอบระหว่างโลหะ (Intermetallic Compounds) หรืออะตอมของโลหะทั้งสองชนิดจะเกี่ยวพันกันในรูปแบบที่แตกต่างออกไปเกิดเป็นเฟส ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีที่ต่างๆ เรียกรวมว่า เฟสมัธยันตร์

### 2.3 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-Free Solder)

โลหะบัดกรีที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมมาเป็นเวลานาน คือ โลหะบัดกรีชนิด 63Sn-37Pb (Eutectic Tin-Lead Solder) หรือ 60Sn-40Pb (Near Eutectic Tin-Lead Solder) โลหะชนิดนี้มีข้อดีหลายประการ ได้แก่ ราคาถูก หาง่าย มีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ คุณสมบัติทางไฟฟ้า และคุณสมบัติทางความร้อนดีเยี่ยม ดังนั้น ในการนำโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-Free Solder) มาใช้ทดแทนโลหะบัดกรีชนิดที่มีตะกั่วผสม คุณลักษณะเบื้องต้นของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วนำมาใช้เป็นเกณฑ์พิจารณา ได้แก่

1. ต้องไม่เป็นพิษ
2. ราคาถูก
3. มีความหลอมเหลวใกล้เคียงกับจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีชนิด Sn-Pb
4. มีช่วงคุณสมบัติแบบพลาสติกแคบ (Narrow Plastic Range)
5. มีสมบัติการเปียก (Wettability) และการเชื่อมบัดกรี (Solder Ability) ที่ดี
6. มีสมบัติทางฟิสิกส์อื่นๆ เช่น การนำไฟฟ้า การนำความร้อนที่ดี และไม่ด้อยกว่าโลหะบัดกรีชนิด Sn-Pb
7. มีสมบัติต้านทานการล้าที่ดี (Good Fatigue Resistance)
8. สามารถใช้ได้กับระบบพลาซมาที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบัน
9. เมื่อทำเป็นโลหะบัดกรีชนิดครีม (Solder Paste) จะต้องมีอายุการเก็บยาวนาน ไม่เสื่อมคุณภาพ
10. สามารถผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆที่ใช้กันอยู่ทั่วไปได้หลายรูปแบบ เช่น โลหะแท่ง ลวดบัดกรี ผงโลหะ คริมโลหะ เป็นต้น

## ธาตุที่ใช้เชื่อมสมกับดีบุกเพื่อผลิตเป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

โลหะบัดกรีทั่วไปจะมีส่วนผสมของโลหะดีบุกเป็นหลัก เนื่องจากดีบุกมีสมบัติการเปียก การแผ่กระจาย เวลาการเชื่อมบัดกรีได้ดี สามารถใช้ได้กับ Substrate หลายชนิด ดีบุกมีจุดหลอมเหลวที่  $231^{\circ}\text{C}$  ส่วนธาตุเจือที่นำมาผสมกับดีบุกแล้วทำเป็นโลหะบัดกรี ได้แก่ เงิน อินเดียม บิสมัท พลวง ทองแดง และสังกะสี

เงิน (Ag) เป็นโลหะที่ใช้เป็นส่วนผสมในโลหะบัดกรี มีราคาสูง โลหะเงินจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะบัดกรี ทำให้มีสมบัติการแผ่กระจายดีขึ้น และมีจุดหลอมเหลวต่ำลง

อินเดียม (In) เป็นโลหะที่มีราคาค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับโลหะบัดกรีชนิดอื่น แต่มีข้อดี คือ อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำจึงเป็นข้อดีสำหรับการใช้งานกับอุปกรณ์ที่ทนความร้อนได้ต่ำ นอกจากนี้อินเดียมยังมีความสามารถในการลดการเกิดออกซิเดชันและเพิ่มคุณสมบัติความเหนียวให้ดีขึ้น

บิสมัท (Bi) โลหะบัดกรีที่อัตราส่วน  $42\text{Sn}-58\text{Bi}$  มีโครงสร้างแบบยูเทคติก โลหะบัดกรีกลุ่มนี้มีจุดเด่น คือ มีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ต่ำมากที่อุณหภูมิ  $139^{\circ}\text{C}$  จึงสามารถใช้กับอุปกรณ์ที่ไม่สามารถทนความร้อนสูงในการบัดกรีได้ลักษณะโครงสร้างโลหะบัดกรีชนิดนี้ มีลักษณะเป็นแผ่นแบบ Lamellar มีความสามารถในการเชื่อมประสานได้ดีมาก แต่มีข้อเสียคือ บิสมัทมีราคาสูง

พลวง (Sb) การเติมพลวงในปริมาณที่พอเหมาะจะช่วยเพิ่มสมบัติการต้านทานการคืบและการต้านทานความล้าของโลหะบัดกรีให้ดีขึ้น แต่พลวงมีข้อเสียคือ ทำให้สมบัติการเปียกและการแผ่กระจายของโลหะบัดกรีด้อยลง

ทองแดง (Cu) โลหะบัดกรีที่อัตราส่วน  $99.3\text{Sn}-0.7\text{Cu}$  มีโครงสร้างแบบยูเทคติก มีจุดหลอมเหลวต่ำมากที่อุณหภูมิ  $227^{\circ}\text{C}$  โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟส  $\text{Cu}_3\text{Sn}_2$  ลักษณะเป็นแท่งฝังประอยู่ในเนื้อดีบุก โดยทองแดงจะทำให้โลหะบัดกรีมีความแข็งแรงมากขึ้น แต่ข้อเสียของโลหะบัดกรีในกลุ่ม Sn-Cu คือ การมีธาตุเจือผสมอยู่น้อยอาจเกิดเส้นใยดีบุก (Tin-Whisker) ขึ้นได้ ซึ่งอาจเกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรโลหะบัดกรีในกลุ่ม Sn-Cu จึงเหมาะสำหรับงานบัดกรีแบบ Reflow Soldering แต่ไม่เหมาะสำหรับงานบัดกรีแบบ Wave Soldering

สังกะสี (Zn) เป็นโลหะที่มีจุดเด่น คือ อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำและราคาถูก โดยมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ  $199^{\circ}\text{C}$  ซึ่งใกล้เคียงกับโลหะบัดกรีชนิด Sn-Pb โดยโลหะบัดกรีในกลุ่ม Sn-Zn มีข้อด้อยเช่น Zn สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย เกิดเป็นสังกะสีออกไซด์มาก เมื่อใช้การบัดกรีแบบ Wave Soldering นอกจากนี้ Zn ยังไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับสารเคมีที่ผสมอยู่ในฟลักซ์ที่ใช้กับโลหะกลุ่ม Sn-Pb ทำให้เกิดการกัดกร่อน

โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วสามารถจัดแบ่งกลุ่มตามช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวออกเป็น 4 กลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1 โลหะผสมช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ (<180°C) ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 โลหะผสมที่มีช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำกว่า 180°C

ระบบ โลหะผสม	องค์ประกอบ (wt%)	ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว (°C)
Sn-Bi	Sn-58Bi	139
Sn-In	Sn-52In	118
	Sn-50In	118-125
Bi-In	Bi-33In	109

กลุ่มที่ 2 โลหะผสมช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวปานกลาง (180 °C – 200 °C) ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 โลหะผสมที่มีช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว 180°C – 200°C

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

กลุ่มที่ 3 โลหะผสมช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวสูง (200 °C – 230 °C) ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 โลหะผสมที่มีช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว 200°C – 230°C

ระบบ โลหะผสม	องค์ประกอบ (wt%)	ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว(°C)
Sn-Ag	Sn-3.5Ag	221
	Sn-2Ag	221-226
Sn-Cu	Sn-0.7Cu	227
Sn-Ag-Bi	Sn-3.5Ag-3Bi	206 -213
	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

กลุ่มที่ 4 โลหะผสมช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวสูงมาก ( $> 230^{\circ}\text{C}$ ) ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 โลหะผสมที่มีช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวมากกว่า  $230^{\circ}\text{C}$

ระบบโลหะผสม	องค์ประกอบ (wt%)	ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว( $^{\circ}\text{C}$ )
Sn-Sb	Sn-5Sb	232 -240
Sn-Au	Sn-80Au	280
Sn-Ag-Sb	Sn-25Ag-10Sb	233

## 2.4 การบัดกรี (Soldering)

การบัดกรี หมายถึง กรรมวิธีในการยึดหรือต่อ (Joining) แผ่นโลหะงานสองชิ้นเข้าด้วยกัน โดยโลหะที่นำมาต่อจะไม่หลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกันเหมือนการเชื่อม (Welding) แต่การบัดกรีจะใช้วิธีนำเอาโลหะผสมที่เรียกว่า โลหะบัดกรีหรือตะกั่วบัดกรี (Solder) ซึ่งมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำกว่าโลหะชิ้นงานที่นำมาบัดกรีเป็นตัวประสานชิ้นงานให้ติดกัน การบัดกรีต้องอาศัยตัวช่วยประสานหรือฟลักซ์ (Flux) เพื่อทำความสะอาดผิวหน้าตรงส่วนที่จะบัดกรีก่อน และต้องอาศัยความร้อนที่ใช้หลอมละลายโลหะบัดกรีพร้อมทั้งให้ความร้อนแก่ชิ้นงานจากหัวแร้งบัดกรี (Soldering- Copper)

การบัดกรีโดยทั่วไปแบ่งเป็นชนิดใหญ่ๆ ได้ 2 ชนิดได้แก่

1. การบัดกรีแข็ง (Brazing) หรือการแล่นประสาน เป็นการบัดกรีที่ต้องใช้ความร้อนหลอมตัวประสานหรือโลหะบัดกรีซึ่งมีจุดหลอมละลายเกินกว่า  $450^{\circ}\text{C}$  (ประมาณ  $840^{\circ}\text{F}$ ) แต่ต่ำกว่าจุดหลอมละลายของชิ้นงาน โดยปกติตัวประสานจะเป็นโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก (Non-Ferrous Metal) และให้ความร้อนแก่ชิ้นงานจนร้อนแดง (แต่ไม่ละลาย) การบัดกรีชนิดนี้รวมทั้งการบัดกรีเงิน (Silver Soldering) ซึ่งมีรอยต่อที่แข็งแรงเกือบเท่ารอบเชื่อม

2. การบัดกรีอ่อน (Soft Soldering) เป็นการบัดกรีชนิดที่ต้องใช้ความร้อนหลอมละลายโลหะหรือตะกั่วบัดกรีต่ำกว่า  $450^{\circ}\text{C}$  ใช้สำหรับบัดกรีโลหะแผ่นโดยทั่วไป ซึ่งในการศึกษานี้จะทำการทดลองในกระบวนการบัดกรีอ่อน

การบัดกรีที่ได้นั้นจะทำให้ได้รอยต่อที่มีคุณภาพขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ 3 ประการด้วยกันคือ

1. ธรรมชาติของผิวโลหะ (Base Metal) ซึ่งครอบคลุมถึงชนิดของโลหะและสภาพผิวของผิวหน้าด้วย
2. ชนิดของโลหะบัดกรีที่ใช้ (Soldering Metal)
3. สารประสานหรือฟลักซ์ (Soldering Flux)

องค์ประกอบทั้ง 3 นี้จะแปรผันไปตามอุณหภูมิที่ใช้ในการบัดกรี จึงอาจกล่าวได้ว่าตัวประกอบทั้ง 3 ชนิดนี้สัมพันธ์กันอยู่ด้วยความร้อนที่ใช้ในการบัดกรี

## 2.5 โลหะพื้น (Base Metal)

โลหะพื้นส่วนใหญ่จะเป็นเหล็กและทองแดง ส่วนอะลูมิเนียมก็มีความสำคัญเพราะมีน้ำหนักเบา แต่จะบัดกรียากกว่าเหล็ก ทองแดง เพราะอัลลอยของเหล็กกับทองแดง ดังแสดงในตารางที่ 2.5 แสดงถึง ชนิดของโลหะต่อความยากง่ายในการบัดกรี แต่จะต้องคำนึงถึงฟลักซ์ที่เหมาะสมด้วยว่าเป็นชนิดว่องไวหรือไม่ ซึ่งจะมีผลต่อการบัดกรี

ตารางที่ 2.5 ชนิดของโลหะต่อความยากง่ายในการบัดกรี

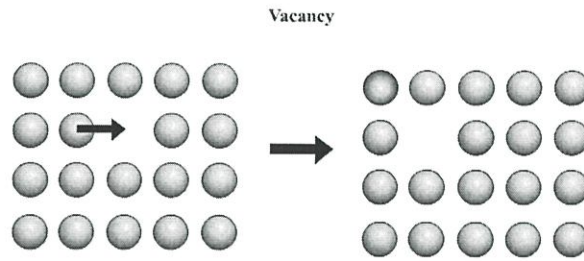
โลหะพื้นหรือโลหะขึ้นงาน	การบัดกรี
เงิน ดีบุก แคดเมียม แพลลาเดียม โรเดียม ทองแดง	ดีเยี่ยม
บรอนซ์ ทองเหลือง ตะกั่ว นิกเกิลผสมเงิน	ดีเยี่ยม
เบอริลเลียมผสมทองแดง	ดี
เหล็ก สังกะสี นิกเกิล	พอใช้
อะลูมิเนียม อะลูมิเนียมผสมบรอนซ์ เหล็กผสมโครเมียม	ยาก
เหล็กหล่อ โครเมียม ไททานเนียม แทนทาลัม แมกนีเซียม	เคลือบด้วยโลหะบัดกรีก่อน

โลหะที่เป็นดีบุก แคดเมียม ทองแดงจะง่ายต่อการเปียกของโลหะบัดกรี โดยไม่ต้องทำความสะอาดก่อนและใช้ฟลักซ์ที่ไม่ว่องไวได้ ถ้าเป็นเงินจะเกิดฟิล์มของอัลไพด์บนผิว ซึ่งจะเป็นตัวลดประสิทธิภาพการบัดกรีทันที ตะกั่วจะเกิดออกไซด์ที่ผิวเมื่ออยู่ในสภาพขึ้นและอาจต้องทำความสะอาดก่อนบัดกรี ทองแดง ทองเหลือง บรอนซ์ และเหล็กจะเกิดออกไซด์บางบริเวณ ซึ่งต้องทำความสะอาดหรือล้างด้วยกรดอ่อน ความจำเป็นในการทำความสะอาดจะขึ้นกับขอบเขตของผิวโลหะที่เกิดออกซิเดชันและความว่องไวของฟลักซ์

## 2.6 การแพร่ (Diffusion)

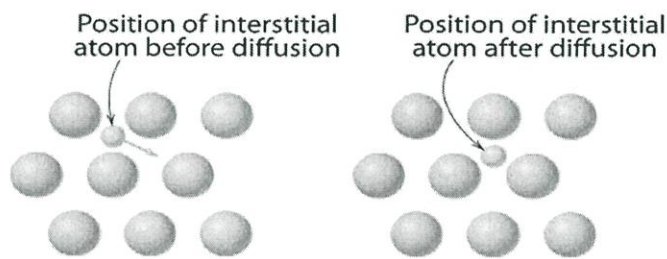
การแพร่ คือ การขนถ่ายมวลจากเฟสของเหลว ก๊าซ หรือของแข็งอื่นมายังเฟสของแข็งเฉพาะอีกเฟสหนึ่ง แต่ในระดับอะตอมการแพร่เป็นการเคลื่อนที่ของอะตอมจากตำแหน่งแลตทิซหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง โดยกลไกการแพร่ในโลหะแบ่งเป็น 2 แบบคือ

1. การแพร่โดยอาศัยช่องว่าง (Vacancy Diffusion) เป็นกลไกการเปลี่ยนตำแหน่งของอะตอมจากตำแหน่งแลตทิซ ปกติไปยังตำแหน่งแลตทิซข้างๆ ที่ยังว่างอยู่หรือเป็นช่องว่างดังแสดงในภาพที่ 2.1 กระบวนการนี้จำเป็นต้องมีช่องว่างอยู่ในวัสดุ และการแพร่โดยอาศัยช่องว่างจะเกิดได้มากน้อยเพียงใดก็ขึ้นกับช่องว่างนั่นเอง เนื่องจากอะตอมที่กำลังแพร่และช่องว่างต้องแลกเปลี่ยนตำแหน่งกัน ดังนั้นการแพร่ของอะตอมในทิศทางหนึ่งจึงหมายถึงการเคลื่อนที่ของช่องว่างในทิศทางตรงกันข้ามด้วย ทั้งการแพร่ในตัวเองและการแพร่ของอะตอมต่างชนิดสามารถเกิดได้ด้วยกลไกนี้



ภาพที่ 2.1 การแพร่โดยอาศัยช่องว่าง

2. การแพร่แบบแทรกที่ (Interstitial Diffusion) เป็นกลไกการเคลื่อนที่ของอะตอมจากตำแหน่งแทรกที่ไปยังตำแหน่งข้างเคียงที่ยังว่างอยู่ดังแสดงในภาพที่ 2.2 กลไกนี้จะพบในการแพร่ของอะตอมต่างชนิดของธาตุมลทิน เช่น H C O N ซึ่งมีอะตอมขนาดเล็กพอที่จะแทรกเข้าไปในตำแหน่งระหว่างอะตอมได้ ส่วนอะตอมของโลหะหลักและอะตอมธาตุมลทินที่ละลายแบบแทนที่นั้นมีโอกาสอยู่ในตำแหน่งระหว่างอะตอมน้อยมาก ดังนั้นตามปกติการแพร่จึงไม่แพร่ด้วยกลไกนี้



ภาพที่ 2.2 การแพร่แบบแทรกที่

ปัจจัยที่มีผลต่อการแพร่

### 1. สารที่แพร่ (Diffusion Species)

ขนาดของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะเป็นดัชนีชี้วัดความเร็วที่อะตอมนั้นๆ จะแพร่ไปได้ทั้งกรณีการแพร่ในตัวเองและการแพร่ระหว่างอะตอมต่างชนิดในระบบ ชนิดของสาร (อะตอม) ที่แพร่เองและตัวโลหะแม่ (โครงสร้างหลัก-Host Metal) ล้วนมีผลต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ ตัวอย่างเช่น การแพร่ในตัวเองและการแพร่ของคาร์บอน (อะตอมต่างชนิด) ในเหล็กแอลฟาที่  $500^{\circ}\text{C}$  มีความแตกต่างกันมาก ค่า  $D$  ของการแพร่ของคาร์บอนมีค่าสูงกว่ามาก ความแตกต่างที่บ่งบอกถึงความแตกต่างของอัตราเร็วในการแพร่โดยอาศัยช่องว่าง และการแพร่แบบแทรกที่ดังได้อภิปรายไว้ข้างต้นแล้ว การแพร่ในตัวเองต้องอาศัยช่องว่างขณะที่การแพร่ของคาร์บอนในเหล็กเป็นการแพร่แบบแทรกที่

## 2. อุณหภูมิ (Temperature)

เนื่องจากการแพร่ในระดับอะตอมเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของอะตอม อุณหภูมิจึงมีผลอย่างรุนแรงที่สุดต่อสัมประสิทธิ์และอัตราเร็วของการแพร่ผลของอุณหภูมิต่อสัมประสิทธิ์การแพร่มักเขียนอยู่ในรูปของสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius Equation)

### 2.7 ฟลักซ์ (Fluxes)

คำว่าฟลักซ์ มาจากภาษาละตินมีความหมายว่า Flow ในโลหะบัดกรีฟลักซ์ยังมีหน้าที่อื่นๆ นอกจากช่วยให้โลหะบัดกรีไหล เป็นที่เชื่อกันว่าฟลักซ์จะไม่เกิดพันธะ แต่เหมือนจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี การบัดกรีโดยไม่มีฟลักซ์ซึ่งใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมก็อาจทำได้แต่ถ้ามีฟลักซ์จะทำให้การบัดกรีสะดวกขึ้น โดยฟลักซ์ทำหน้าที่หลักๆ ดังนี้คือ เป็นตัวทำให้ผิวหน้าโลหะพื้นไม่ให้มีสิ่งสกปรกพวกออกไซด์และทำให้ชิ้นงานสะอาด อีกทั้งทำให้โลหะบัดกรีแผ่ขยายไปเป็นผลให้เกาะติดได้ง่าย

ฟลักซ์สามารถแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 2 ประเภทคือ

1. ฟลักซ์อินทรีย์ (Organic Fluxes) จัดเป็นฟลักซ์ประเภทที่ไม่มีการกัดกร่อน (Noncorrosive Fluxes)

ได้แก่ ยางไม้ (Natural Rosin) ไขสัตว์ ยางสน แอลกอฮอล์ กรดอินทรีย์และเกลือของธาตุหมู่ 7 โดยทั่วไปแล้วฟลักซ์กลุ่มนี้ใช้กับการบัดกรีอุปกรณ์ไฟฟ้าหรืออิเล็กทรอนิกส์

2. ฟลักซ์อนินทรีย์ (Inorganic Fluxes) เป็นฟลักซ์ประเภทที่มีการกัดกร่อน (Corrosive Fluxes) ได้แก่

กรดและเกลืออนินทรีย์ชนิดต่างๆ โดยปกติจะใช้ฟลักซ์จำพวกนี้เมื่อมีปัญหาจากการเกิดออกซิเดชันระหว่างโลหะบัดกรีกับอากาศ เนื่องจากฟลักซ์กลุ่มนี้สามารถปกป้องรอยเชื่อมได้ค่อนข้างดี หลังจากการบัดกรี ฟลักซ์ที่หลงเหลืออยู่จะถูกกำจัดออกไปโดยใช้สารละลายหรือตัวทำละลายเคมี

กรดเกลือ (Muriatic Acid) และ Raw Acid เป็นกรดที่เข้มข้นและมีอันตรายมาก โดยมีลักษณะเป็นสีเหลืองใช้เป็นฟลักซ์เมื่อเวลาบัดกรีเหล็กอบสังกะสีจะเดือดและมีควัน แผ่นเหล็กอบสังกะสีจะมีรอยดำ Muriatic Acid ใช้ในการผลิต Zinc Chloride สำหรับทำความสะอาดโลหะก่อนบัดกรี โดยเฉพาะเหล็กอบสังกะสี (Galvanized Steel) ในงานโลหะแผ่นทั่วไปกรดเกลือหรือ Muriatic Acid จะถูกเรียกว่า Raw Acid

สังกะสีคลอไรด์ (Zinc Chloride) หรือบางครั้งเรียกว่า Cut Acid, Cured Acid หรือ Killed Acid ใช้เป็นฟลักซ์ในการบัดกรี เหล็กอบสังกะสี (Galvanized Steel) สังกะสี ทองเหลือง ทองแดงและตะกั่ว เป็นฟลักซ์ที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น กัดกร่อนโลหะและอันตรายมากเท่าๆกรดเกลือ ฉะนั้นในการทำฟลักซ์ชนิดนี้จะต้องทำความระมัดระวัง

การทำสังกะสีคลอไรด์สามารถทำได้โดยการตัดแผ่นสังกะสีเป็นชิ้นเล็กๆ ใส่งไปในตัวที่บรรจุกรดเกลือและเกิดการทำให้ปฏิกิริยาโดยกรดเกลือจะละลายสังกะสีได้ก๊าซไฮโดรเจนระเหยขึ้นมา น้ำกรดที่เหลือนี้จะเป็นสังกะสีคลอไรด์ดังสมการ  $2\text{HCl} + \text{Zn} \longrightarrow \text{ZnCl}_2 + \text{H}_2$

## 2.8 แผนภาพสมดุล (Equilibrium Phase Diagram)

คุณสมบัติของโลหะจำนวนมากขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเฟสและลักษณะ ซึ่งเฟสเหล่านั้นอยู่รวมกันเป็นกลุ่มคือ เป็นผลึกๆ หลายๆ ผลึกอยู่รวมกัน (Polycrystalline Aggregate) ความสำคัญอยู่ที่วิธีหาความสัมพันธ์ระหว่างเฟสที่เกิดขึ้น ในระบบหนึ่งๆ เราจะต้องทราบว่า เฟสใดเป็นเฟสที่อยู่ในสภาพสมดุล (Equilibrium) ที่อุณหภูมิต่างๆ กันตลอดจนความเข้มข้น (Concentration) ของส่วนที่เป็นองค์ประกอบของเฟสนั้นๆ สิ่งที่จะช่วยในการศึกษาเรื่องนี้ได้ดีก็คือ แผนภูมิ (Diagram) ซึ่งแสดงถึงส่วนผสม (Composition) ของเฟสที่อยู่ในสภาวะสมดุลของทุกๆ อุณหภูมิดังกล่าวนี้เรียกว่า Phase Equilibrium หรือ Constitution Diagram ซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรดังต่อไปนี้

- อุณหภูมิ (Temperature)
- ส่วนผสม (Composition)
- ความดัน (Pressure)
- ภาส (Phase)

อุณหภูมิ (Temperature) เป็นตัวแปรสำคัญมีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสสาร เช่น ทำให้เปลี่ยนสถานะ

เป็นของแข็ง ของเหลว หรือ ก๊าซ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพิ่มหรือลด จะทำให้สสารเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่างๆ ไป ซึ่งรวมทั้งภาสด้วย ดังนั้น ในการปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆ ของสสารหรือโลหะมักจะใช้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (ก็คือการใช้ความร้อน) เป็นหลัก

ส่วนผสม (Composition) หมายถึง ส่วนผสมของสสารหรือโลหะต่างๆ การที่สสารผสมกันในอัตราส่วนที่แตกต่างกันจะทำให้คุณสมบัติต่างๆ ทั้งภาสของสสารนั้นเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราส่วนผสมนั้นเสมอ ดังนั้น การนำสสารมาใช้จำเป็นต้องทราบปริมาณและอัตราส่วนผสมต่างๆ เพื่อจะสามารถทราบถึงการใช้งานที่เหมาะสม

ความดัน (Pressure) คือ ความดันเป็นตัวแปรที่มีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสสารเช่น ทำให้เปลี่ยนสถานะ เป็นของแข็ง ของเหลว หรือ ก๊าซ เช่นเดียวกับ อุณหภูมิทุกประการ ดังนั้นเมื่อเราเปลี่ยนแปลงความดัน อาทิ การเก็บก๊าซในถัง จำเป็นต้องเพิ่มความดัน ทำให้ก๊าซเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว และมีปริมาณลดลง (ในขณะที่มีอุณหภูมิเท่าเดิม) ซึ่งเป็นไปตามกฎของบอย (Boyle's Law) ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า เมื่อเปลี่ยนแปลงความดันของสสารที่อุณหภูมิตั้งแต่จะเกิดการเปลี่ยนแปลง เทียบได้กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสสารที่ความดันคงที่

ภาค (Phase) คือ บริเวณที่มีลักษณะที่แตกต่างกันในลักษณะ เช่น อาจมีสถานะ (Status) เหมือนกันแต่โครงสร้าง (Structure) แตกต่างกันหรือส่วนผสม (Composition) เหมือนกันแต่มีสถานะ และโครงสร้างแตกต่างกันก็ได้

แต่การที่จะหาความสัมพันธ์ของเฟสต่างๆภายใต้ภาวะสมดุลที่เป็นจริงนั้นยากมากและต้องใช้เวลามีใช้น้อยในการศึกษาอย่างละเอียด แผนภูมิมีหลายประเภทขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของส่วนที่เป็นองค์ประกอบ (Component) ในสภาวะหลอมเหลวและของแข็ง เช่น

1. ประเภทที่เป็นสารละลายโดยสมบูรณ์ (Complete Soluble) ในสภาวะของเหลว แต่จะทำให้ลักษณะที่แตกต่างกันในสภาวะของแข็งมี 3 ประเภทย่อย คือ

ก. ละลายได้สมบูรณ์ (Completely Soluble) ในสภาวะของแข็ง

ข. ละลายได้บางส่วน (Partially Soluble) ในสภาวะของแข็ง

ค. แยกตัวอิสระ (Insoluble) ในสภาวะของแข็ง

2. ประเภทที่ละลายได้บางส่วน (Partially Soluble) ในสภาวะของเหลวแบ่งออกเป็นดังนี้

ก. ละลายได้บางส่วน (Partially Soluble) ในสภาวะของแข็ง

ข. แยกตัวอิสระ (Insoluble) ในสภาวะของแข็ง

3. ประเภทแยกตัวอิสระ (Completely Insoluble) ในสภาวะของเหลวมีประเภทเดียว คือ แยกตัวอิสระในสภาวะของแข็งด้วย แผนภูมิสมดุลประเภทแรกเป็นประเภทที่พบมากที่สุดในโลกผสมทางวิศวกรรม เพราะโลหะส่วนมากจะละลายเข้าด้วยกันได้เป็นอย่างดีในสภาวะหลอมเหลว เราจะศึกษาเฉพาะแผนภูมิประเภทนี้กันมากที่สุด [8]

## 2.9 ระบบที่อยู่ในสภาวะสมดุล (System in Equilibrium)

คำว่า ระบบหรือ System ตามความหมายทางด้าน Thermodynamics หมายถึง วัตถุหรือกลุ่มวัตถุที่เราจัดแยกไว้เพื่อการพิจารณาและศึกษา ตัวอย่างเช่น โลหะบริสุทธิ์และโลหะผสม เมื่อหลอมเหลวรวมกันอยู่ในเบ้าก็จัดเป็นระบบหนึ่งคือ เราต้องการจะพิจารณาเฉพาะ โลหะบริสุทธิ์และโลหะผสมภายในเบ้าเท่านั้น ในขณะที่เดียวกันถ้าเราต้องการพิจารณาถึงการถ่ายเทความร้อนจากเบ้า ระบบในที่นี้ก็จะต้องประกอบด้วยเบ้าและโลหะทั้งสองด้วยในการที่กำหนดลักษณะของระบบ เราจะต้องรู้ว่าระบบประกอบด้วยธาตุหรือวัตถุอะไรบ้างประกอบกันเป็นเฟส เช่น เป็นของแข็ง ของเหลว หรือ ก๊าซ ถ้าเป็นของแข็งหรือของเหลวจะผสมกันลักษณะใดเป็นเนื้อเดียวกันหรือไม่ และส่วนผสมของแต่ละเฟสมีอะไรบ้าง นอกจากนี้จะต้องรู้อีกว่าอุณหภูมิและความดันของระบบเป็นเท่าไร

ในกรณีนี้เราถือว่า ระบบอยู่ในสภาวะสมดุลได้นั้นอุณหภูมิและความดันจะมีค่าคงที่ตลอดทั้งระบบส่วนผสมของแต่ละเฟสจะต้องอยู่ในสภาวะสมดุลด้วย กล่าวคือ การไหลถ่ายเทของพลังงานและสสารจากเฟสหนึ่งไปยังอีกเฟสหนึ่งมีค่าเป็นศูนย์ ฉะนั้นส่วนผสมในแต่ละเฟสจะต้องคงที่

สรุปแล้วตัวแปรค่า (Unknown หรือ Variable) ของระบบที่เราจะต้องกำหนดเพื่อบอกลักษณะของระบบให้เด่นชัดลงไปก็คือ จำนวนธาตุหรือสาร (จำนวนองค์ประกอบ) จำนวนเฟสที่มีอยู่ในส่วนผสมของแต่ละเฟสและอุณหภูมิกับความดัน

ตัวอย่าง สมมติว่าระบบของเราประกอบด้วยน้ำกับน้ำแข็ง ในกรณีนี้สารที่ประกอบเป็นระบบมีเพียงองค์ประกอบเดียวคือน้ำ จำนวนเฟสมี 2 ก็คือของแข็งกับของเหลว แต่บอกเพียงแค่นี้ยังกำหนดลักษณะของระบบไม่สมบูรณ์ ต้องกำหนดว่าอุณหภูมิ ความดันเป็นเท่าไรอีกด้วย ขอให้สังเกตว่าเราเพียงแต่กำหนดลักษณะของเฟสแต่ไม่ได้กำหนดปริมาณมากน้อยของเฟส ปัญหาที่มีอยู่เมื่อรู้จำนวนองค์ประกอบและจำนวนเฟสในระบบแล้ว ตัวแปรค่าอื่นๆที่เราจะต้องกำหนดเพื่อให้ระบบสมบูรณ์มีอะไรบ้าง ในกรณีเช่นนี้ เราจะต้องอาศัยกฎ Phase Rule [8]

## 2.10 เฟสมัธยันตร์ (Intermediate Phase)

สารละลายของแข็งชนิดอะตอมละลายแทนที่ไม่เป็นระเบียบในแลตทิซของโลหะตัวทำละลายเกิดขึ้นเมื่อโลหะทั้งสองมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเคมีคล้ายกัน แต่ถ้าโลหะสองชนิดมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเคมีต่างกันจะรวมกันเกิดเป็นสารประกอบทางเคมีขึ้น เช่น โลหะแมกนีเซียม (Mg) มีค่าไฟฟ้าบวกสูงจะรวมกับดีบุก (Sn) มีค่าไฟฟ้าบวกต่ำเกิดเป็นสารประกอบ  $Mg_2Sn$  ซึ่งเป็นสารประกอบระหว่างโลหะขึ้นการอ้างอิงเฟสในแผนภาพสมดุล เฟสที่เป็นสารประกอบทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะบริสุทธิ์ทั้งสองปกติจะมีโครงสร้างผลึก ต่างไปจากโลหะบริสุทธิ์ทั้งสองชนิดเรียกว่าเฟสมัธยันตร์

เฟสมัธยันตร์ (Intermediate Phase) สามารถแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 3 กลุ่มคือ

1. สารประกอบระหว่างโลหะ (Intermetallic Compounds) หรือสารประกอบเวเลนซ์ (Valence Compounds) เป็นสารประกอบที่เกิดจากการรวมตัวของโลหะที่เป็นไปตามกฎเกณฑ์ของวาเลนซ์ เช่น  $Mg_2Sn$ ,  $Mg_2Pb$ ,  $Mg_2Sb_2$  และ  $Mg_3Bi_2$  สารประกอบชนิดนี้ปกติจะเกิดขึ้นเมื่อโลหะชนิดหนึ่ง (เช่น แมกนีเซียม) มีคุณสมบัติทางเคมีของความเป็นโลหะสูงและโลหะอื่น (เช่น แอนติโมนี ดีบุก หรือ บิสมัท) มีคุณสมบัติทางเคมีของความเป็นโลหะต่ำ (อยู่ใกล้กับวัสดุพวกอโลหะในตารางพีริออดิก) สารประกอบในกลุ่มนี้จำนวนมากมีจุดหลอมละลายสูงกว่าโลหะหลัก เช่น สารประกอบ  $Mg_2Sn$  หลอมละลายที่  $780^{\circ}C$  ขณะที่โลหะหลักแมกนีเซียมและดีบุกมีจุดหลอมละลายที่  $650^{\circ}C$  และ  $232^{\circ}C$  ตามลำดับซึ่งแสดงถึงความแข็งแรงของพันธะเคมีใน  $Mg_2Sn$

2. Electron Compounds เป็นสารประกอบที่ไม่เป็นไปตามกฎของวาเลนซ์ โดยธาตุทั้งสองชนิดจะรวมกันเป็นสัดส่วนคงที่ ระหว่างจำนวนเวเลนซ์ทั้งหมดของทุกอะตอมที่เกี่ยวข้องกับจำนวนอะตอมทั้งหมดสารประกอบกลุ่มนี้มีสัดส่วน 3 แบบ ปกติจะเป็นไปตามสัดส่วนของ Hume-Rothery คือ

- i) สัดส่วน 3/2 (21/14) – โครงสร้าง  $\beta$  เช่น  $CuZn$ ,  $Cu_3Al$ ,  $Cu_3Sn$  และ  $Ag_3Al$
- ii) สัดส่วน 21/13 – โครงสร้าง  $\gamma$  เช่น  $Cu_5Zn_8$ ,  $Cu_9Al_4$ ,  $Cu_{31}Sn_8$ ,  $Ag_5Zn_8$  และ  $Na_{31}Pb_8$
- iii) สัดส่วน 7/4 (21/12) – โครงสร้าง  $\epsilon$  เช่น  $CuZn_3$ ,  $Cu_3Sn$ ,  $AgCd_3$  และ  $Ag_5Al_3$

3. Size Factor Compounds เป็นสารประกอบเฟสมีชั้นซึ่งมีส่วนผสมและโครงสร้างผลึก ที่มีการจัดตัวเองโดยอะตอมที่เป็นส่วนประกอบจะจัดตัวอัดตัวแน่นอยู่ด้วยกัน สูตรทั่วไปคือ  $AB_2$  เช่น  $MgNi_2$ ,  $MgCu_2$ ,  $TiCr_2$  การรวมตัวขึ้นอยู่กับสัดส่วนผสมของอะตอมที่มีขนาดต่างกันประมาณ 22.5 % แต่จะจัดตัวอัดแน่นอยู่ด้วยกัน

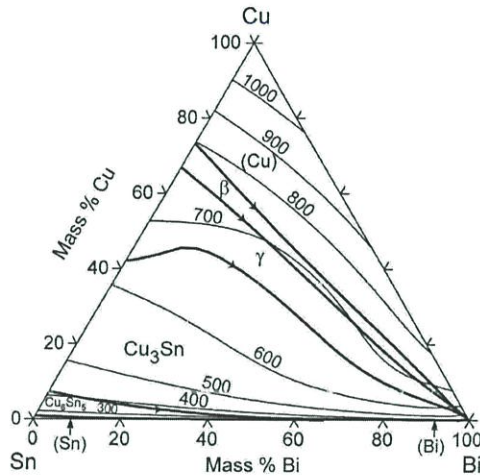
สารประกอบกลุ่ม Size Factor Compounds ที่สำคัญคือสารประกอบแบบอะตอมแทรกตัวซึ่งเกิดจากการรวมตัวของธาตุทรานซิชันและธาตุกลุ่มโลหะที่มีอะตอมขนาดเล็ก เมื่อความสามารถละลายของธาตุที่ละลายแทรกตัวเกินพิกัดที่สามารถละลายได้ ก็จะเกิดการแยกตัวตกตะกอน (Precipitated) เป็นสารประกอบออกมา อะตอมขนาดเล็กยังคงบรรจุอยู่ในช่องว่าง แต่โครงสร้างแลตทิซจะแตกต่างกันออกไป จากตอนแรกที่อยู่ในรูปสารละลายของแข็งแทรกตัว สารประกอบในกลุ่มนี้มีคุณสมบัติเป็นโลหะได้แก่ สารประกอบไฮไดรด์ ไนไตรด์ โบไรด์ เช่น  $TiH_2$ ,  $TiN$ ,  $Mn_2N$ ,  $TiB_2$ ,  $TaC$ ,  $W_2C$ ,  $WC$ ,  $Mo_2C$  และ  $Fe_3C$  สารประกอบทั้งหมดนี้มีความแข็งแรงสูงมาก คาร์ไบด์จะเป็นส่วนสำคัญในเหล็กกล้าเครื่องมือ และวัสดุพวก cemented carbides,  $Fe_3C$  เป็นเฟสซีเมนไทต์ที่พบตามปกติในเหล็กกล้าคาร์บอน หลายชนิดของคาร์ไบด์ มีความทนไฟสูงมาก มีจุดหลอมละลายสูงกว่า  $3,000^\circ C$  ในโลหะผสมพวกเบร็งจะมีเฟสมีชั้นทราน ปกติจะเป็นกลุ่ม electron compounds มีลักษณะเป็นอนุภาคที่แข็งทนต่อความสึกหรอและมีความเสียดทานต่ำ ผังตัวยึดแน่นในเมทริกซ์ของสารละลายของแข็งที่มีค่าความต้านทานการแตกหักสูง เป็นผลให้โลหะผสมดังกล่าวมีความต้านทานต่อการกระชากเชิงกล (Mechanical Shock) และต้านแรงอัดได้ดี

เฟสมีชั้นทราน กลุ่ม สารประกอบระหว่างโลหะที่เสถียรภาพมีคุณสมบัติทนความร้อนสูง สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุทางวิศวกรรมได้ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมอากาศยาน แต่จะมีความเหนียวต่ำและต้านทานแรงกระแทกได้ต่ำ ปัจจุบันได้มีการวิจัยและปรับปรุงให้มีคุณสมบัติเหนียวต้านทานแรงกระแทกได้มากขึ้น เช่น  $Ni_3Al$  หลอมละลายที่  $1390^\circ C$  มีโครงสร้างแบบ FCC ถ้าเป็นผลึกเดี่ยวจะเหนียวมาก แต่ใน Polycrystalline จะเกิดความเปราะตามขอบเกรน ถ้าเติม 0.05% โบรอน จะเพิ่ม % การยึดจากเดิม 0 เป็น 50 การแตกจะเปลี่ยนจากแตกระหว่างเกรนเป็นแบบผสมคือ แตกระหว่างเกรนและผ่านเกรน การขึ้นรูปดีมาก อาจเกิดจากการแยกตัวของโบรอนเป็นผลให้เกิดการเรียงตัวไม่เป็นระเบียบตามบริเวณขอบเกรน ความเค้นที่เกิดจากการกระจุกตัวของดิสโลเคชันจะกระจายกว้างขึ้น เมื่อเกิดการเลื่อนผ่านเม็ดเกรนความเค้นจะถูกกำจัดออกมาได้มากขึ้นมากกว่าที่โลหะผสมเกิดการแตกผ่านตามแนวบริเวณขอบเกรนเพียงอย่างเดียว [7]

## 2.11 เฟสไดอะแกรม

เฟสไดอะแกรม Ternary จะมีรูปแบบเป็นสามเหลี่ยมด้านเท่าและองค์ประกอบของระบบ Ternary จะถูกแสดงบนสามเหลี่ยมด้านเท่านี้ เฟสไดอะแกรม Ternary ที่เป็นสามเหลี่ยมด้านเท่านี้จะถูกสร้างขึ้นที่ความดันคงที่ 1 บรรยากาศ และถ้ามีอุณหภูมิก็สามารถพิจารณาให้มีค่าคงที่ตลอดทั่วทั้งไดอะแกรมนี้ได้ ซึ่งไดอะแกรมประเภทนี้จะถูกเรียกว่า ไอโซเทอร์มัล (Isothermal Section)

โลหะบริสุทธิ์แต่ละชนิดจะถูกกำหนดโดยวิธีการดังต่อไปนี้ เส้นตั้งฉากจะถูกลากจากมุมของโลหะบริสุทธิ์ แต่ละมุมไปยังด้านตรงข้ามของมุมนั้นๆ และระยะทางจากด้านนั้นไปยังมุมของสามเหลี่ยมตลอดทั้งแนวเส้นตั้งฉากนี้ จะถูกพิจารณาเท่ากับ 100% โดยน้ำหนักของโลหะบริสุทธิ์ของมุมนั้นในโลหะผสมดังแสดงในภาพที่ 2.3



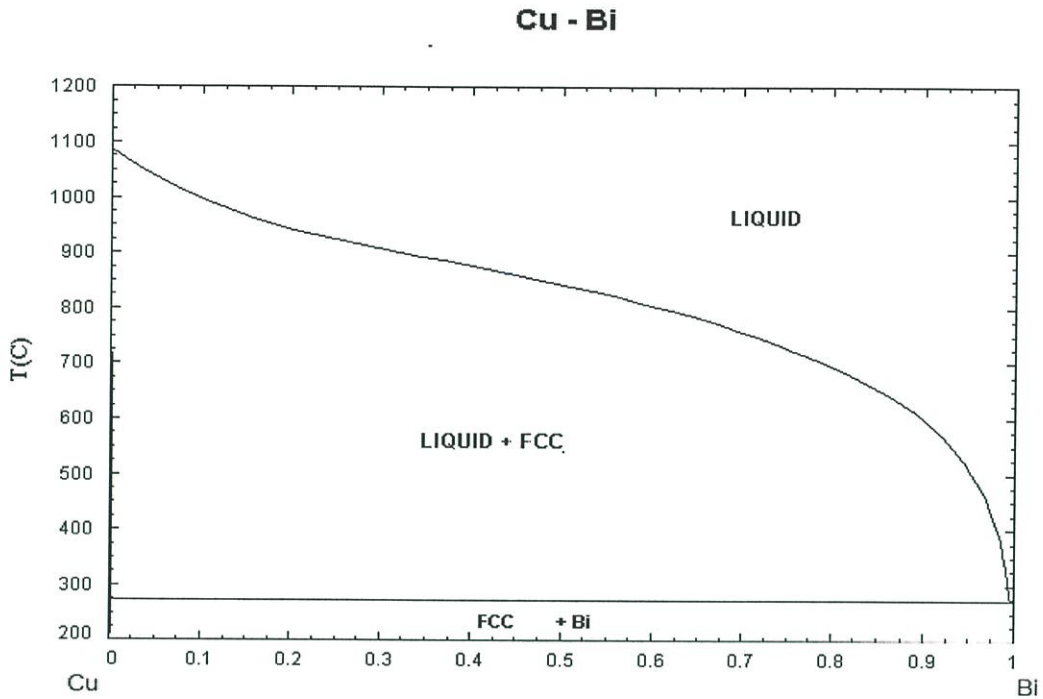
ภาพที่ 2.3 เฟสไดอะแกรม Ternary ที่ประกอบด้วย Sn-Bi-Cu

### 2.11.1 เฟสไดอะแกรมของ Bi-Cu (Bismuth-Copper)

เฟสไดอะแกรมของ Bi-Cu นั้นมีสถานะเป็นของเหลวผสมกันอยู่ทุกสัดส่วน ซึ่งโลหะอ้างอิงที่ใช้ในการศึกษาเฟสไดอะแกรมจากภาพคือโลหะทองแดงที่มีโครงสร้างจุลภาคแบบ FCC ซึ่งมีขีดจำกัดการละลายของ Bi ใว้ที่ 0.003 %wt ที่ 800°C และโลหะบิสมัทที่มีโครงสร้างจุลภาคมีการจัดเรียงตัวกันแบบไอซ์บอฮีดรอลซึ่งโลหะทองแดงสามารถละลายรวมตัวกันได้เล็กน้อย

จากการศึกษาเฟสไดอะแกรมของ Cu-Bi บริเวณจุดยูเทคติกพบว่าตำแหน่งของจุดยูเทคติกของโลหะผสมชนิดนี้เป็นจุดที่มีสัดส่วนใกล้เคียงกับความเป็น Bi บริสุทธิ์มาก และโลหะผสมที่เกิดขึ้นใหม่จากการรวมตัวกันของโลหะผสมชนิดนี้ที่เกิดขึ้นคือ  $\text{Cu}_5\text{Bi}_2$  (เป็นการทดลองภายใต้ความดันควบคุมทองแดง 99.999% และบิสมัท 99.999%) ซึ่งเป็นชั้นสารประกอบที่จะถูกพบในเฉพาะช่วงอุณหภูมิในการให้ความร้อนต่ำกว่า 300°C และพบตะกอนของทองแดงที่อึดตัวจากการรวมตัวกับบิสมัทในสถานะของเหลว

จากการวิเคราะห์รูปแบบทาง Thermodynamics ได้แสดงให้เห็นว่าช่วงที่จะพบสารประกอบโลหะผสมนี้จะพบในบริเวณของสัดส่วนที่อยู่บริเวณใกล้เคียงตามแนวเส้นโค้งของเส้น Liquidus



ภาพที่ 2.4 Cu-Bi Phase Diagram

## 2.12 โลหศาสตร์ (Metallography)

โลหศาสตร์ เป็นวิชาที่ว่าด้วยโครงสร้างของโลหะและโลหะผสม ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับคุณสมบัติทั้งกายภาพและทางกล สามารถศึกษาโดยการตรวจสอบในลักษณะต่างๆ เช่น การตรวจสอบแบบจุลทรรศน์ และการตรวจสอบอื่นๆ

การตรวจสอบแบบจุลทรรศน์ (Microscopical Examination)

การตรวจสอบแบบจุลทรรศน์ เป็นการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะและโลหะผสม โดยใช้กล้องจุลทรรศน์เป็นเครื่องมือที่สำคัญ เพื่อตรวจสอบหรือวิเคราะห์รายละเอียดบนพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่างที่ได้เตรียมมาเป็นอย่างดี เช่น ขนาดเกรน และ ขนาด รูปร่าง และการกระจายของเฟส และ สารปลอมปน ชนิดต่างๆ โครงสร้างจุลภาคที่ปรากฏอาจจะเป็นผลมาจากกรรมวิธีทางกล หรือ กรรมวิธีทางความร้อนหรือทั้งสองวิธี

ความสำเร็จในการตรวจสอบแบบจุลทรรศน์ เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของโลหะและโลหะผสมขึ้นอยู่กับ การเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง ถ้าการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างไม่เหมาะสม ถึงแม้จะมีกล้องจุลทรรศน์ที่มีคุณภาพดีมากขนาดไหนก็ตาม ก็ไม่สามารถวิเคราะห์ผลออกมาอย่างชัดเจนและถูกต้องได้ ชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการตรวจสอบ จะต้องเตรียมให้มีผิวเรียบ มีลักษณะผิวมันเป็นเงาเหมือนกระจกเงา ปราศจากริ้วรอยขีดข่วน โดยต้องมีขั้นตอนการเตรียมอย่างถูกต้องและเหมาะสม เริ่มต้นจากนำโลหะมาตัดทำชิ้นตัวอย่างตามทิศทางที่ต้องการให้มีขนาดพอเหมาะ นำชิ้นตัวอย่างที่ตัดไว้มาแต่งรูปร่างให้

เหมาะสม แล้วนำมาขัดระนาบ (Grinding) ขัดเงา (Polishing) เพื่อให้ผิวเรียบเป็นเงา แล้วจึงนำไปกัดชั้นรอย (Etching) ด้วยสารเคมีที่เหมาะสมตามชนิดของโลหะที่ต้องการตรวจสอบ ให้ปรากฏลักษณะของเกรน หรือผลึกบนผิวหน้าของชิ้นงานตัวอย่าง เพื่อนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ต่อไป

#### การเลือกตัวอย่าง (Selecting the Specimen)

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะด้วยกล้องจุลทรรศน์ เป็นการตรวจสอบบนพื้นที่เล็กๆ กรณีโลหะมีขนาดใหญ่ มีเนื้อ และส่วนผสมไม่สม่ำเสมอ อาจต้องใช้ชิ้นตัวอย่างมากกว่าหนึ่งชิ้น เพื่อให้สามารถตรวจสอบรายละเอียดโดยรวมของโลหะนั้นได้ โลหะบางชนิดที่ผ่านการรีด เช่น เหล็กแปรรูป ถ้าตัดโลหะขนานตามทิศทางการรีด จะเห็นภาคโลหะมีลักษณะเป็นรูปยาวตามทิศทางการรีด ถ้าตัดโลหะในแนวตั้งฉากกับการรีด จะเห็นภาคโลหะมีลักษณะเป็นรูปกลม หรือกรณีที่ต้องการตรวจสอบความเสียหายหรือรอยแตกหักของโลหะ ต้องตัดเตรียมชิ้นงานตัวอย่างบนพื้นผิวรอยแตก เพื่อนำมาวิเคราะห์ถึงสาเหตุหรือลักษณะของรอยแตกได้

#### การเตรียมตัวอย่าง (Specimen Preparation)

การเตรียมตัวอย่างปกติจะใช้เครื่องจักรกล เช่น เครื่องเลื่อย เครื่องกลึง ฯลฯ ให้ชิ้นตัวอย่างมีรูปร่างกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 – 38 มิลลิเมตร หนา 12 – 15 มิลลิเมตร หรืออาจจะเตรียมเป็นชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมที่มีขนาดใกล้เคียงกัน เพื่อให้สามารถจับยึดได้ง่าย ถ้าหน้าตัดมีขนาดเล็กจะเป็นอุปสรรคในการจับยึดให้ได้ระนาบ ถ้าชิ้นงานตัวอย่างขนาดใหญ่เกินไปจะเสียเวลาในการขัดและลับเปลืองวัสดุที่ใช้ในการขัดมากขึ้น

กรณีต้องการรักษาขอบของโลหะไม่ให้หลุดลอก หรือชิ้นงานมีขนาดเล็กเกินไป เป็นการยากที่จะขัดให้ได้ระนาบ ต้องนำชิ้นงานไปยึดในวัสดุพอลิเมอร์ที่เหมาะสม เพื่อทำเป็นชิ้นงานตัวอย่างแบ่งได้เป็น 2 วิธี คือการยึดชิ้นงานในวัสดุพอลิเมอร์แบบเย็น และการยึดชิ้นงานในวัสดุพอลิเมอร์แบบร้อน

#### การยึดชิ้นงานในวัสดุพอลิเมอร์แบบเย็น (Cold Mounting)

นำชิ้นงานมาวางไว้บนพื้นผิวเรียบ เช่น แผ่นแก้ว นำแบบที่จะหล่อวัสดุพอลิเมอร์มาวางครอบชิ้นงาน ผสมวัสดุพอลิเมอร์ประเภทของเหลว 2 ชนิด เข้าด้วยกันแล้วเทลงบนชิ้นงาน ปล่อยให้แข็งจะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน กลายเป็นของแข็งในช่วงเวลาประมาณ 30 นาที จากนั้นแกะเอาวัสดุพอลิเมอร์ที่แข็งตัวแล้วออกจากแบบ แล้วนำไปขัดตามขั้นตอนต่อไป พอลิเมอร์ที่ใช้มีหลายชนิด เช่น อีพอกซี อะคลีติก หรือ พอลิเอสเตอร์

การยึดชิ้นงานในวัสดุพอลิเมอร์แบบเย็น เหมาะกับการเตรียมชิ้นตัวอย่างชิ้นเดียว หรือ การเตรียมชิ้นตัวอย่างจากชิ้นงานที่แตกต่างกันหลายประเภท

#### การยึดชิ้นงานในวัสดุพอลิเมอร์แบบร้อน (Hot Mounting)

เป็นวิธีการเตรียมชิ้นตัวอย่างโดยยึดชิ้นงานในวัสดุพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมเซตติงพลาสติกที่เกิดการเซตตัวหรือแข็งตัวภายใต้ความร้อนและความดัน มีขั้นตอนเริ่มจากการนำชิ้นงานไปวางบนแท่นภายในทรงกระบอกที่มีชุดทำความร้อนอยู่รอบๆ เทพงเทอร์โมเซตติงพลาสติก เช่น เบคไลต์ (Bakelite)

ลงไปในทรงกระบอกให้คลุมชิ้นงานให้หมด แล้วปิดฝาครอบให้แน่น อัดความดันประมาณ 4000 psi ให้พลาสติกร้อนประมาณ 150 °C หลอมละลายอัดตัวปลอกคลุมชิ้นงานทิ้งไว้ในช่วงเวลาหนึ่ง ประมาณ 10 นาที จะเกิดการเชื่อมตัวกลายเป็นพลาสติกแข็ง ลดความดันแล้วเปิดฝาครอบ ดันเอาชิ้นงานตัวอย่างออกจากเครื่องอัดชิ้นงาน นำไปขัดในขั้นตอนนี้ต่อไปได้

การขัดชิ้นงานในวัสดุพอลิเมอร์แบบร้อน เหมาะในการเตรียมชิ้นงานจำนวนมากๆ และต้องการชิ้นงานตัวอย่างที่มีคุณภาพสูง

การขัดระนาบและการขัดเงาชิ้นงานตัวอย่าง (Grinding and Polishing the Specimen)

การขัดระนาบ (Grinding) เป็นการนำชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมไว้หรือยึดไว้ในวัสดุพอลิเมอร์ มาขัดผิวให้ระนาบเรียบด้วยกระดาษทราย (Emery Paper) เริ่มต้นขัดหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ

การขัดระนาบด้วยกระดาษทราย ในระหว่างการขัดต้องเปิดน้ำหล่อเพื่อขับไล่เศษผงหรือเศษโลหะที่หลุด ให้ไหลไปก้นน้ำเพื่อป้องกันไม่ให้คุณผิวชิ้นงานตัวอย่าง และเป็นการระบายความร้อนไม่ให้เพิ่มสูงขึ้นจนทำให้โครงสร้างเปลี่ยนไป

เมื่อทำการขัดระนาบด้วยกระดาษทรายจนมีผิวเรียบและละเอียดพอแล้ว จึงทำการขัดเงา (Polishing) เป็นขั้นตอนนี้ต่อไป การขัดเงาจะต้องขัดโดยใช้ผ้าขัดและใช้ผงขัดที่เหมาะสม ขึ้นอยู่กับชนิดโลหะชิ้นตัวอย่าง ผงที่ใช้อาจเป็นผงอะลูมินา (Alumina ;  $Al_2O_3$ ) ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) หรือ ผงเพชร เมื่อขัดเสร็จแล้วจะได้ผิวที่ปราศจากรอยขีดข่วน

การขัดเงาจะต้องขัดบนผ้าที่เหมาะสมกับชนิดโลหะ ในขณะที่ขัดจะทำให้เนื้อโลหะที่ผิวหน้าของชิ้นตัวอย่างเกิดการไหล เกิดเป็นชั้นฟิล์มที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน ถ้าชิ้นตัวอย่างผ่านการขัดระนาบขั้นสุดท้ายแล้วยังคงปรากฏร่องรอยขีดข่วน เมื่อนำมาขัดเงาจะไม่สามารถกำจัดร่องรอยขีดข่วนให้หมดได้ ถึงแม้หลังการขัดเงาอาจจะเห็นว่าผิวโลหะเรียบดีแล้ว เนื่องจากขณะขัดเงาจะเกิดการไหลของเนื้อโลหะเป็นชั้นฟิล์มมาปิดร่องไว้ เมื่อกัดขึ้นรอยด้วยสารเคมีที่เหมาะสม สารเคมีจะกัดผิวที่เป็นฟิล์มบางออกไป ร่องรอยขีดข่วนดังกล่าวก็จะปรากฏขึ้นมาอีก ซึ่งแสดงถึงการขัดผิวหน้าชิ้นตัวอย่างได้ไม่สมบูรณ์

สรุปองค์ประกอบที่สำคัญที่มีผลต่อความสำเร็จในการเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง ดังนี้ คือ

- 1) ต้องระวังไม่ให้เกิดความร้อนสูงเกินไป (Overheat) บนผิวชิ้นตัวอย่างในระหว่างการขัดระนาบ สำหรับเหล็กกล้า อาจเกิดผลของการเทมเปอริงขึ้น
- 2) ชิ้นตัวอย่างต้องสะอาดทุกขั้นตอนในการขัด
- 3) ถ้าชิ้นตัวอย่างมีร่องรอยขีดข่วนในขั้นตอนการขัดระนาบสุดท้าย จะไม่สามารถกำจัดออกไปได้จากขั้นตอนการขัดเงา ถ้าขัดเงาเป็นเวลานานเกินไป ผิวชิ้นงานตัวอย่างจะปรากฏเป็นคลื่น (Rippled)
- 4) ในระหว่างการขัดระนาบและการขัดเงา ให้กดชิ้นตัวอย่างเบาๆ

### การกัดขึ้นรอยขึ้นตัวอย่าง (Etching The Specimen)

การกัดขึ้นรอยเป็นการนำโลหะขึ้นตัวอย่างที่ผ่านการขัดผิว และทำความสะอาดแล้วไปกัดผิวหน้าด้วยสารเคมีเพื่อให้เกิดรูรอยที่สัมพันธ์กับลักษณะของโครงสร้าง เมื่อนำขึ้นตัวอย่างที่ผ่านการกัดขึ้นรอยไปดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะสามารถสังเกตเห็นลักษณะโครงสร้างจุลภาคหรือลักษณะของเกรนได้

ก่อนทำการกัดขึ้นรอย จะต้องนำขึ้นตัวอย่างที่ผ่านการขัดเงาแล้วไปทำความสะอาดเพื่อกำจัดสารประกอบหรือผงขัดที่ใช้ในการขัดเงา โดยหลีกเลี่ยงการสัมผัสพื้นผิวที่ขัดเงาแล้วขั้นแรกผู้ปฏิบัติจะต้องล้างมือให้สะอาดด้วยสารละลายสบู่ แล้วล้างน้ำให้สะอาด ต่อไปนำขึ้นตัวอย่างที่อาจจะมีไขมันติดอยู่บนพื้นผิวที่ต้องการตรวจสอบ ไปล้างในเอธานอลต้มเดือด (Boiling Ethanol) เป็นเวลาประมาณ 2 นาที ไม่ควรต้มเอธานอลเหนือเปลวไฟโดยตรง แต่ควรวางอ่างเอธานอลในอ่างน้ำที่ต้มบนเตาไฟฟ้า

เมื่อต้มขึ้นตัวอย่างในเอธานอลได้ 2 นาทีแล้ว ขึ้นตัวอย่างจะปราศจากไขมัน ใช้คีมคีบขึ้นตัวอย่างไปทำให้เย็น โดยเปิดน้ำให้ไหลผ่านผิวหน้าจนเย็นและสะอาดดีแล้ว นำไปแช่กัดขึ้นรอยในสารเคมีที่มีปฏิกิริยาในช่วงเวลาที่เหมาะสม อาจจะเป็น 2-3 วินาที หรือ อาจจะเป็นหลายนาที ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะและความเข้มข้นของสารเคมี แล้วนำขึ้นตัวอย่างไปล้างน้ำโดยปล่อยให้ น้ำไหลผ่านเพื่อล้างสารเคมีออก พื้นผิวของขึ้นตัวอย่างที่ผ่านการกัดขึ้นรอยที่ดีจะมีสภาพผิวด้านมัน โลหะผสมบางชนิดใช้เวลาในการกัดขึ้นรอย 2-3 วินาที แต่สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีความต้านทานการกัดของสารเคมีสูง จะต้องกัดเป็นเวลานานถึง 30 นาที [7]

## 2.13 กล้องจุลทรรศน์โลหการ (The Metallurgical Microscope)

### กล้องจุลทรรศน์เชิงแสง (Optical Microscope)

กล้องจุลทรรศน์โลหการใช้หลักการเชิงแสง (Optical Principles) เหมือนกับกล้องจุลทรรศน์อื่นๆ ดังแสดง

ในภาพที่ 2.5 แต่มีข้อแตกต่างที่กล้องจุลทรรศน์โลหการจะปล่อยให้แสงตกกระทบ และสะท้อนบนขึ้นตัวอย่างที่มีลักษณะทึบแสง ขณะที่ขึ้นตัวอย่างทางชีววิทยามีลักษณะบาง โปร่งแสง แหล่งกำเนิดแสงจะจัดวางไว้ด้านล่างของขึ้นตัวอย่าง ส่วนกล้องจุลทรรศน์โลหการ แหล่งกำเนิดแสงจะอยู่ภายในกล้องจุลทรรศน์ในแนวนอน ลำแสงจากแหล่งกำเนิดจะปล่อยออกมาในแนวระดับ บางส่วนของแสงจะสะท้อนเมื่อตกกระทบกระจกเงาระนาบที่ฉายปรอทหรือเงินไว้บ้าง ให้แสงบางส่วนผ่านได้ ลำแสงที่ตกกระทบและสะท้อนจะเปลี่ยนทิศทางลงส่วนล่างของกล้องจุลทรรศน์ผ่านเลนส์ชุดล่าง หรือ เลนส์วัตถุ (Objective Lens) ไปตกกระทบบนผิวขึ้นตัวอย่าง บางส่วนของลำแสงจะสะท้อนกลับขึ้นด้านบนผ่านเลนส์วัตถุ และส่องผ่านกระจกเงาระนาบไปหาระบบเลนส์ชุดบน หรือ เลนส์ตา (Eye Piece) เกิดภาพขึ้นเมื่อมองผ่านกล้องจุลทรรศน์จากเลนส์ตา จะเห็นภาพพื้นผิวของวัตถุหรือขึ้นตัวอย่างมีขนาดโตกว่าขนาดจริง กำลังขยายของภาพที่มองเห็นขึ้นอยู่กับระบบเลนส์ของวัตถุ และ เลนส์ตา กล้องจุลทรรศน์โลหวิทยา

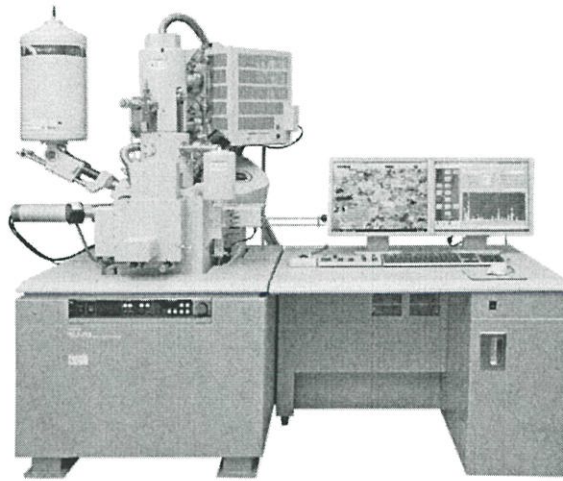
ต่างๆไป มีเลนส์วัตถุ 4-5 ชุด สามารถเปลี่ยนเพื่อให้ได้กำลังขยายที่เหมาะสม ปกติจะมีกำลังขยาย 5 เท่า 10 เท่า 20 เท่า 50 เท่า และ 100 เท่า โดยจะมีรายละเอียดเขียนไว้หรือแกะสลักเพื่อบอกกำลังขยายของแต่ละชุดไว้ที่เลนส์ ส่วนเลนส์ตา ปกติมีกำลังขยาย 10 เท่า การหากล้องจุลทรรศน์ของภาพที่มองเห็นจะใช้กำลังขยายของเลนส์วัตถุที่อยู่เหนือชิ้นตัวอย่าง คูณด้วยกำลังขยายของเลนส์ตา กำลังขยายที่สามารถดูได้จากกล้องจุลทรรศน์ทั่วไปมีตั้งแต่ 50 เท่า 100 เท่า 200 เท่า 500 เท่า และ 1,000 เท่า



ภาพที่ 2.5 กล้องจุลทรรศน์เชิงแสง

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นอุปกรณ์ดังแสดงในภาพที่ 2.6 ที่ยิงลำอิเล็กตรอนไปตกบนจุดเล็กๆบนชิ้นตัวอย่าง ทำการรวบรวม สัญญาณอิเล็กตรอนที่กระเจิงจากผิวชิ้นตัวอย่าง แล้วแปลงสัญญาณอิเล็กตรอนิกส์เป็นภาพที่มีกำลังขยายได้สูงมาก ปืนอิเล็กตรอนจะผลิตลำอิเล็กตรอนแล้วควบคุมโดยใช้ระบบขดลวดที่สร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทำหน้าที่เหมือนเลนส์ควบคุมลำอิเล็กตรอนแล้วปล่อยให้ตกกระทบบนเป้าหรือชิ้นตัวอย่าง อิเล็กตรอนจะมีอันตรกิริยา (Interact) กับพื้นผิวตามลักษณะความโค้งนูน เกิดอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back Scattering Electron) และเกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) มีการกระจายที่สอดคล้องกับลักษณะผิวชิ้นตัวอย่าง รับสัญญาณอิเล็กตรอนแล้วแปลงเป็นภาพที่สามารถขยายได้สูงถึง 2 ล้านเท่าหรือมากกว่า [7]



ภาพที่ 2.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

## 2.14 การทดสอบสมมติฐาน

ความหมายของคำว่า สมมติฐานทางสถิติว่า สมมติฐานทางสถิติคือ ประโยคหรือข้อความที่กล่าวเกี่ยวกับพารามิเตอร์ของการแจกแจงความน่าจะเป็นซึ่งอาจจะเป็นจริงหรือเท็จก็ได้ ข้อความหรือประโยคดังกล่าวนี้จะต้องระบุกลุ่มของประชากรที่เกี่ยวข้องมาด้วยกลุ่มหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งกลุ่มก็ได้

สมมติฐานทางสถิติที่เขียนไว้ในเชิงปริมาณการเท่ากันของค่าสถิติเราเรียกว่า สมมติฐานที่ไม่มี ความแตกต่างกัน ภาษานักวิจัยเรียกกันว่า โนล ไฮโปทีสิส (Null Hypothesis) หรือสมมติฐานหลักแทนด้วยสัญลักษณ์  $H_0$  ส่วนสมมติฐานที่มีความแตกต่างกันเรียกว่า อัลเทอเนทีฟ ไฮโปทีสิส (Alternative Hypothesis) หรือสมมติฐานรองแทนด้วยสัญลักษณ์  $H_1$  [9]

### 2.14.1 การทดสอบสมมติฐานแบบทางเดียว

เป็นการตั้ง  $H_0$  โดยกำหนด  $H_0: \mu = \mu_0$

และกำหนด  $H_1$  ดังนี้คือ  $H_1: \mu < \mu_0$  หรือ  $H_1: \mu > \mu_0$

โดยที่

$\mu$  คือ ค่าเฉลี่ยของประชากรทั้งหมดที่สนใจ

$\mu_0$  คือ ค่าเฉลี่ยอ้างอิง

### 2.14.2 การทดสอบสมมติฐานแบบสองทาง

เป็นการตั้ง  $H_0$  โดยกำหนด  $H_0: \mu = \mu_0$

และกำหนด  $H_1$  ดังนี้คือ  $H_1: \mu \neq \mu_0$

โดยที่

$\mu$  คือ ค่าเฉลี่ยของประชากรทั้งหมดที่สนใจ

$\mu_0$  คือ ค่าเฉลี่ยอ้างอิง

หรือเป็นการตั้ง  $H_0$  โดยกำหนด  $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots \mu_n$

และกำหนด  $H_1$  ดังนี้คือ  $H_1: \mu_i \neq \mu_j$  อย่างน้อย 1 คู่ (i,j)

โดยที่

$\mu$  คือ ค่าเฉลี่ยของประชากรทั้งหมดที่สนใจ

i, j คือ 1, 2, ..., n

ในการทดสอบสมมติฐาน จะอาศัยวิธีการในการสุ่มตัวอย่าง การคำนวณค่าสถิติที่ใช้ในการทดสอบที่เหมาะสม และทำการสรุปเพื่อปฏิเสธหรือยอมรับ  $H_0$  ซึ่งกลุ่มของค่านี้เรียกว่า “พื้นที่วิกฤต” หรือ “พื้นที่ของการปฏิเสธ” ของการทดสอบ

ในการทดสอบสมมติฐานจะเกิดลักษณะของความผิดพลาดในการยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐาน ซึ่งความผิดพลาดทั้ง 2 ประเภทนี้สามารถเกิดขึ้นได้ในขณะทดสอบสมมติฐาน ถ้าหากค่า  $H_0$  ถูกปฏิเสธ ทั้งๆที่  $H_0$  ถูกต้อง จะเกิดความผิดพลาดประเภทที่ 1 ขึ้นแต่ถ้าหาก  $H_0$  ไม่ถูกปฏิเสธทั้งๆที่  $H_0$  นั้นไม่ถูกต้อง ความผิดพลาดประเภทที่ 2 ก็เกิดขึ้น ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดทั้ง 2 ประเภทก่อให้เกิดสัญลักษณ์พิเศษคือ  $\alpha$  และ  $\beta$

$$\alpha = P(\text{type I error}) = P(\text{reject } H_0 / H_0 \text{ is true})$$

$$\beta = P(\text{type II error}) = P(\text{reject } H_0 / H_0 \text{ is false})$$

โดยที่

$\alpha$  หมายถึง ความเสี่ยงในการปฏิเสธสมมติฐานหลัก (Null Hypothesis) ทั้งที่สมมติฐานหลักเป็นจริง

$\beta$  หมายถึง ความเสี่ยงในการยอมรับสมมติฐานหลัก (Null Hypothesis) ทั้งที่สมมติฐานหลักไม่เป็นจริง

และจากความเสี่ยงของทั้งสองแบบนี้เองจึงต้องมีการกำหนดจำนวนซ้ำของการทดลองไว้เพื่อให้มีความเชื่อมั่นหรือมีความเสี่ยงในการยอมรับข้อมูลตามที่กำหนดไว้ และในการวิเคราะห์ก็มักจะกำหนดให้ค่าของ  $\alpha$  มีค่าคงที่และค่าของ  $\beta$  ให้มีค่าน้อยที่สุด

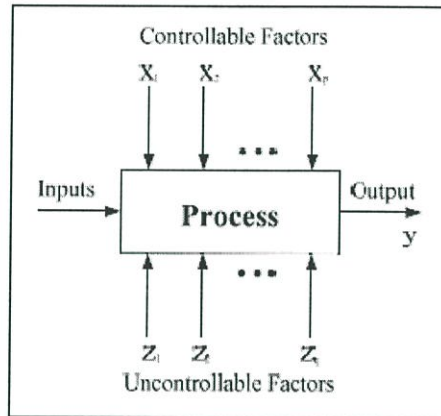
## 2.15 หลักการเบื้องต้นเกี่ยวกับการออกแบบการทดลอง

### 2.15.1 กลยุทธ์ในการทดลอง (Strategy of Experimentation)

ไม่ว่าเราจะอยู่ในสาขาวิชาใดก็ตาม เราจะต้องมีความเกี่ยวข้องกับการทดลองบ้างไม่มากก็น้อย ทั้งนี้เพื่อให้เราทราบหรือค้นพบถึงบางสิ่งบางอย่างเกี่ยวกับกระบวนการหรือระบบบางอย่าง โดยศัพท์

แล้ว การทดลองจะหมายถึงการทดสอบ เราอาจจะให้คำนิยามของการทดลองว่าเป็นการทดสอบหรือเป็นชุดของการทดสอบที่มีการเปลี่ยนแปลงกับตัวแปรขาเข้า (Input Variable) ของกระบวนการหรือระบบ เพื่อที่เราอาจจะสังเกต หรือบ่งชี้ถึงเหตุผลของการเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดขึ้นกับผลขาออกได้

ในการทดลองใดๆก็ตาม ผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับวิธีการเก็บข้อมูล ตามปกติแล้ว การทดลองถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพในการทำงานของกระบวนการและระบบซึ่งทั้งกระบวนการและระบบสามารถที่จะแทนด้วยแบบจำลองดังแสดงในภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 แบบจำลองทั่วไปสำหรับกระบวนการหรือระบบ

เราอาจจะมองได้ว่า กระบวนการ คือ การรวมเอาคนงาน เครื่องจักร วิธีการ และทรัพยากรอื่นๆ เข้าด้วยกัน เพื่อเปลี่ยน อินพุต (เช่น วัตถุดิบ) ไปสู่เอาต์พุตที่มีผลตอบแทนออกมาในรูปแบบหนึ่งหรือมากกว่าซึ่งเราสามารถเห็นได้ ตัวแปรกระบวนการบางชนิด  $z_1, z_2, \dots, z_q$  เป็นตัวแปรที่เราไม่สามารถควบคุมได้ (ถึงแม้ว่าในบางครั้งเราอาจจะควบคุมตัวแปรพวกนี้ได้ในขณะที่การทดลองก็ตาม) ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการทดลองอาจจะเกี่ยวข้องกับ

1. หาตัวแปรที่มีผลมากที่สุดต่อผลตอบ  $y$
2. หาวิธีการตั้งค่าของ  $x$  ที่มีผลต่อค่าผลตอบ  $y$  เพื่อให้  $y$  อยู่ที่ค่าที่ต้องการ
3. หาวิธีการตั้งค่าของ  $x$  ที่มีผลต่อค่าผลตอบ  $y$  เพื่อให้  $y$  มีค่าน้อย
4. หาวิธีการตั้งค่าของ  $x$  ที่มีผลต่อค่าผลตอบ  $y$  เพื่อให้ผลของตัวแปรที่เราไม่สามารถควบคุมได้  $z_1, z_2, \dots, z_q$  มีค่าน้อยที่สุด

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า การทดลองส่วนมากจะเกี่ยวข้องกับปัจจัยหลายตัวและวัตถุประสงค์ของบุคคลที่ทำ

การทดลอง (เรียกว่าผู้ทดลอง) ก็คือ หาผลกระทบของปัจจัยเหล่านี้กับผลตอบของระบบ เราเรียกการวางแผนและการดำเนินการทดลองว่า กลยุทธ์ของการทดลอง (Strategy of Experimentation) ซึ่งมีกลยุทธ์

หลายอย่างที่ผู้ทดลองสามารถนำไปใช้ได้ เช่น แบบหนึ่งปัจจัยต่อครั้ง (One-Factor-At-A-Time) หรือการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design)

### 2.15.2 หลักการพื้นฐาน

การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments: DOE) เป็นเทคนิคทางสถิติขั้นสูงที่ใช้ในการปรับตั้งค่าสถานะของกระบวนการให้เป็นไปตามสภาพที่เราต้องการ ซึ่งข้อแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดระหว่างวิธีการโดยทั่วไปกับเทคนิคของการออกแบบการทดลองคือ วิธีการโดยทั่วไปมักเป็นแบบการทดลองผิวดินหรือใช้การทดลองปรับตั้งค่าของกระบวนการทีละค่า (One-Factor-At-A-Time) เช่น ถ้าหากเราสงสัยว่าเราควรที่จะปรับตั้งค่าของอุณหภูมิในการอบชิ้นงาน เวลาที่ใช้ในการอบ และส่วนผสมของชิ้นงานเป็นเท่าไรดี จึงจะทำให้ชิ้นงานที่ได้มีคุณภาพสูงสุดไม่เป็นของเสีย ดังนั้นแนวทางที่เรามักใช้กันโดยทั่วไปก็คือเรามักที่จะไปลองปรับตั้งในส่วนของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบก่อน (ในขณะที่คงค่าของเวลาที่ใช้ในการอบกับอัตราส่วนผสมไว้) เมื่อทดลองจนได้ค่าของอุณหภูมิที่เราต้องการแล้วจึงค่อยไปปรับตั้งเรื่องของเวลา (และก็คงค่าของอุณหภูมิกับอัตราส่วนผสมไว้) จากนั้นสุดท้ายจึงไปทำการปรับตั้งเรื่องของอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม (โดยการคงค่าของอุณหภูมิกับเวลาไว้) และเราอาจทำซ้ำวงจรนี้ไปเรื่อยๆ เพื่อที่จะหาจุดที่ดีที่สุดของกระบวนการ ซึ่งลักษณะการทำเช่นนี้เรียกว่า One-Factor-At-A-Time นั่นเอง โดยทั่วไปการทดลองแบบ One-Factor-At-A-Time จะให้ผลของการเข้าสู่จุดหมายที่เราต้องการของกระบวนการได้ช้ามากและสิ้นเปลืองทรัพยากรในการวิเคราะห์และเก็บข้อมูลสูงและยังไม่เหมาะสมอย่างยิ่งกับกระบวนการที่มีผลของความสัมพันธ์ร่วม (Interaction Effect) ระหว่างตัวแปรของกระบวนการด้วยตนเอง

ถ้าต้องการให้การทดลองเกิดประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ผลได้สูงสุด เราจะต้องนำวิธีการทดลองทางวิทยาศาสตร์เข้ามาช่วยในการวางแผนการทดลอง คำว่า “การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistical Design of Experiment)” หมายถึง กระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อว่าจะได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ ซึ่งจะทำให้เราสามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้ วิธีการออกแบบการทดลองในเชิงสถิติเป็นสิ่งที่จำเป็น ถ้าเราต้องการหาข้อสรุปที่มีความหมายจากข้อมูลที่เรามีอยู่ และถ้ายังปัญหาที่สนใจนั้นเกี่ยวข้องกับความผิดพลาดในการทดลอง (Experimental Error) วิธีการทางสถิติเป็นวิธีการเพียงอย่างเดียวเท่านั้นที่จะสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นได้ ดังนั้นสิ่งสำคัญ 2 ประการสำหรับปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการทดลองก็คือ การออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ซึ่งศาสตร์ทั้งสองนี้มีความเกี่ยวข้องกันอย่างมาก ทั้งนี้เพราะว่าวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติที่เหมาะสมนั้นจะขึ้นกับการออกแบบการทดลองที่จะนำมาใช้

หลักการพื้นฐาน 3 ประการสำหรับการออกแบบการทดลองคือ เพลกซ์ชัน (Replication) แรนดอมไมเซชัน (Randomization), และการบล็อกกิง (Blocking) ในที่นี้เรากำหนดไว้ว่า

เรพลิเคชัน หมายถึง การทำการทดลองซ้ำ เรพลิเคชันมีคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการคือ ประการแรกเรพลิเคชันทำให้ผู้ทดลองสามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ ตัวประมาณค่าความผิดพลาดนี้กลายเป็นหน่วยของการวัดขั้นพื้นฐานสำหรับพิจารณาว่าความแตกต่างสำหรับข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นมีความแตกต่างกันในเชิงสถิติหรือประการที่สองถ้าค่าเฉลี่ยถูกนำมาใช้เพื่อประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งในการทดลอง ดังนั้นเรพลิเคชันทำให้ผู้ทดลองสามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการประมาณผลกระทบนี้อีก

แรนดอมไมเซชัน เป็นพื้นฐานหลักสำหรับการใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบการทดลอง แรนดอมไมเซชัน หมายถึง การทดลองที่มีทั้งวัสดุที่ใช้ในการทดลองและลำดับของการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม (Random) วิธีการเชิงสถิติกำหนดว่าข้อมูล (หรือความผิดพลาด) จะต้องเป็นตัวแปรแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระ แรนดอมไมเซชันจะทำให้สมมติฐานนี้เป็นจริง การที่เราแรนดอมไมซ์การทดลอง ทำให้เราสามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจจะปรากฏในการทดลองได้

การบล็อกกิ้งเป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรง (Precision) ให้แก่การทดลอง การบล็อกอีกอันหนึ่งอาจจะหมายถึงส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซตทั้งหมดของวัสดุ การเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจต่างๆ ภายในแต่ละบล็อกจะเกิดขึ้นได้จากการทำการบล็อกกิ้ง

### 2.15.3 ข้อดีของเทคนิคการออกแบบการทดลอง

ข้อดีของเทคนิคการออกแบบการทดลองไว้ดังนี้คือ ให้ผลของความแม่นยำ และความถูกต้องในการวิเคราะห์ข้อมูลได้สูง โคนสามารถระบุออกมาเป็นค่าตัวเลขทางสถิติที่แสดงถึงค่าระดับความสำคัญของตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการ นอกจากนี้ยังมีความรวดเร็วในการดำเนินการตรวจสอบสาเหตุของปัญหา โดยทั่วไปแล้วถ้าหากเรามีปัจจัยในการทดสอบอยู่ประมาณ 10 ปัจจัย ซึ่งในการดำเนินการทดสอบว่าปัจจัยใดบ้างที่ส่งผลจริงๆ ต่อกระบวนการด้วยวิธีแบบ One-Factor-At-A-Time จะใช้เวลาถึง 1 ปีในการทดสอบได้ครบทุกปัจจัย แต่ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองจะใช้เวลาเพียงแค่ 1-3 อาทิตย์เท่านั้นในการตรวจสอบปัจจัย

### 2.15.4 แนวทางในการออกแบบการทดลอง

การใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ทุกคนที่เกี่ยวข้องในการทดลองจะต้องมีความเข้าใจอย่างถ่องแท้ล่วงหน้าว่าเรากำลังศึกษาอะไรอยู่ จะเก็บข้อมูลได้อย่างไร และจะวิเคราะห์ข้อมูลที่เก็บได้นั้นอย่างไร ขั้นตอนในการดำเนินการอาจจะทำได้ดังต่อไปนี้

#### 2.15.4.1 ทำความเข้าใจถึงปัญหา

บางคนอาจคิดว่าขั้นตอนนี้น่าจะง่ายและตรงไปตรงมา แต่ในความเป็นจริงแล้ว ขั้นตอนนี้ไม่ได้ง่ายอย่างที่คิด ในขั้นตอนนี้เราจะต้องพยายามพัฒนาแนวความคิดเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง และบ่อยครั้งที่เราจะต้องหาข้อมูลอินพุตจากบุคคลหรือหน่วยงานต่างๆที่เกี่ยวข้อง ถ้อยแถลงของปัญหาที่มีความชัดเจนและจะมีผลอย่างมากต่อความเข้าใจเกี่ยวกับปรากฏการณ์และคำตอบสุดท้ายของปัญหานั้นๆ ด้วยเหตุนี้เองการออกแบบการทดลองทุกครั้งควรมีการทำงานเป็นทีม

#### 2.15.4.2 เลือกปัจจัย ระดับ และ ขอบเขต

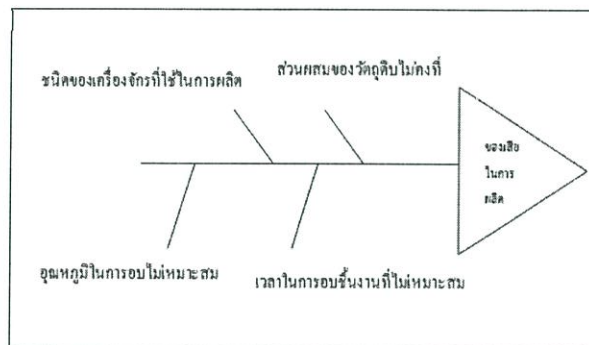
ผู้ทดลองต้องเลือกปัจจัยที่จะนำมาเปลี่ยนแปลงในระหว่างทำการทดลอง กำหนดขอบเขตที่ปัจจัยเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลง และกำหนดระดับ (Level) ที่จะเกิดขึ้นในการทดลอง จะต้องพิจารณาด้วยว่าจะควบคุมปัจจัยเหล่านี้ ณ จุดที่กำหนดอย่างไรและจะวัดผลตอบโต้ได้อย่างไร ดังนั้นในกรณีเช่นนี้ผู้ทดลองจะต้องมีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการอย่างมาก ซึ่งความรู้นี้อาจจะได้มาจากประสบการณ์และความรู้จากทางทฤษฎี มีความจำเป็นที่เราจะต้องตรวจสอบดูว่า ปัจจัยที่กำหนดขึ้นมาทั้งหมดนี้มีความสำคัญหรือไม่ และเมื่อวัตถุประสงค์ของการทดลองคือการกรองปัจจัย (Screening) เราควรที่จะกำหนดให้ระดับต่างๆที่ใช้ในการทดลองมีจำนวนน้อยๆ การเลือกขอบเขตของการทดลองมีความสำคัญเช่นกัน ในการทดลองเพื่อกรองปัจจัย เราควรที่จะเลือกขอบเขตให้มีความกว้างมากๆ หมายถึง ขอบเขตที่ปัจจัยแต่ละตัวจะเปลี่ยนแปลงได้ควรมีค่ากว้างๆและเมื่อเราได้เรียนรู้เพิ่มขึ้นว่า ตัวแปรใดมีความสำคัญและระดับใดที่ทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุด เราอาจจะลดขอบเขตลงมาให้แคบลงได้

ในขั้นตอนการระบุปัญหาปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อกระบวนการนี้ เราใช้วิธีการประชุมกลุ่มเพื่อช่วยกันระดมความคิดจากประสบการณ์แล้วพิจารณาว่ามีปัจจัยใดบ้างที่อาจจะส่งผลต่อปัญหาที่เราสนใจ เช่น ถ้าหากปัญหาของเราคือ อัตราของเสียในการผลิตที่สูง ดังนั้นจากการประชุมร่วมกับพนักงานที่เกี่ยวข้องเป็นพนักงานที่มีประสบการณ์ในการผลิตตรงพื้นที่ปัญหานั้นก็จะทำให้เราสามารถระบุรายการของปัจจัยต่างๆ มากมายที่อาจจะส่งผลต่ออัตราการเกิดของเสียได้ เช่น เวลาในการอบชิ้นงาน (อบนานเสียอบเร็วได้ชิ้นงานดีมากกว่า) อุณหภูมิในการอบ (ความร้อนสูงให้คุณภาพดีกว่าความร้อนต่ำ) ฯลฯ ซึ่งประสบการณ์ต่างๆเหล่านี้เป็นพื้นฐานสำคัญในการก้าวไปสู่ขั้นต่อไปของการออกแบบการทดลองโดยจะส่งผลให้การดำเนินการมีความรวดเร็วมากขึ้นไปไม่ต้องไปเสียเวลาตรวจสอบทุกปัจจัย (เช่น ถ้าจากประสบการณ์ที่ผ่านมา ทำให้มั่นใจได้ว่าปัจจัยเรื่องความชื้นในส่วนผสมไม่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงาน ดังนั้นเราก็ไม่จำเป็นต้องนำเอาปัจจัยเรื่องความชื้นมาบรรจุไว้ในการทดลองก็ได้) ซึ่งจะเห็นได้ว่าประสบการณ์ขององค์กร (Wisdom of Organization) นั้นเป็นองค์ประกอบหนึ่งของการออกแบบการทดลองเพราะเป็นจุดเริ่มต้นของการดำเนินงานคือ การใช้ประสบการณ์คาดคะเนว่าปัจจัยใดบ้างที่น่าจะมีผลต่อปัญหาที่เราสนใจ ซึ่งถ้าหากเราไม่มีในส่วนของประสบการณ์ขององค์กรเข้ามาเกี่ยวข้องเลย (เช่น

ทีมงานเป็นพนักงานใหม่ทั้งหมด) การออกแบบการทดลองก็ยังคงดำเนินต่อไปได้แต่จะใช้เวลานานขึ้น เพราะต้องเสียเวลาในการตรวจสอบทุกๆ ปัจจัยที่มีอยู่ทั้งหมด

โดยทั่วไปแล้วทีมงานของการออกแบบการทดลองนั้นจะต้องประกอบไปด้วยพนักงานอย่างน้อย 1 คนขึ้นไป ที่เป็นพนักงานที่มีประสบการณ์สูงที่ปฏิบัติงานอยู่ในพื้นที่ของปัญหาเป็นระยะเวลาค่อนข้างนาน ทั้งนี้เพื่อจุดประสงค์ในการช่วยคณะทำงานท่านอื่นๆ ในการระดมความคิดหาปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อกระบวนการและจะได้นำเอาปัจจัยทั้งหลายเหล่านี้ไปดำเนินการออกแบบการทดลองได้ต่อไป

เครื่องมือคุณภาพที่มักนิยมนำมาใช้ในการช่วยระดมความคิดเพื่อระบุสาเหตุที่คาดว่าจะส่งผลต่อปัญหานั้น ได้แก่ แผนภูมิแก๊งปลา (C&E Diagram), FMEA, Selection Matrix เป็นต้น



ภาพที่ 2.8 ตัวอย่างของการระบุสาเหตุของปัญหาโดยการใช้แผนภูมิแก๊งปลา

เมื่อระบุได้แล้วว่าปัจจัยใดบ้างที่น่าจะส่งผลต่อปัญหาที่เราสนใจ ดังนั้นขั้นตอนถัดไปคือการกำหนดค่าระดับในการทดลองของปัจจัยแต่ละตัว เช่น หากปัจจัยที่เราคาดว่าจะมีผลต่ออัตราการเกิดของเสียคืออุณหภูมิและเวลาในการอบชิ้นงาน ดังนั้นเราก็ลองปรับเปลี่ยนค่าอุณหภูมิที่ระดับ 100 กับ 200°C และลองตั้งเวลาในการอบที่ 45 กับ 60 นาที เป็นต้น ซึ่งการตั้งค่าระดับในการทดลองของปัจจัยนี้ต้องพึงระวังว่าเราจะต้องเลือกระดับความแตกต่างที่ไม่น้อยจนเกินไป (เช่น ทำการทดลองที่ 10°C กับ 10.5°C) เป็นต้น เนื่องจากการที่เรากำหนดค่าระดับของปัจจัยในการทดลองที่แคบเกินไปหรือกว้างเกินไปอาจส่งผลให้เราไม่สามารถเห็นผลของการทดลองที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน

#### 2.15.4.3 เลือกตัวแปรผลตอบ

ในการเลือกตัวแปรผลตอบผู้ทดลองควรแน่ใจว่า ตัวแปรนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่ บ่อยครั้งที่ค่าเฉลี่ยหรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (หรือทั้งคู่) ของกระบวนการจะเป็นตัวแปรผลตอบ เป็นไปได้ว่าในการทดลองหนึ่งอาจจะมีผลตอบสนองหลายตัว และมีความจำเป็นอย่างมากที่เรา

จะต้องกำหนดให้ได้ว่า อะไรคือตัวแปรผลตอบ และจะวัดตัวแปรเหล่านี้ได้อย่างไร ก่อนที่จะเริ่มดำเนินการทดลองจริง

#### 2.15.4.4 การเลือกการออกแบบการทดลอง

ถ้ากิจกรรมการวางแผนก่อนการทดลองทำได้ถูกต้อง ขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนที่ง่ายมาก การเลือกการออกแบบเกี่ยวข้องกับการพิจารณาขนาดของตัวอย่าง (จำนวนเรพลีเคต) การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่จะใช้ในการเก็บข้อมูล และการตัดสินใจว่า ควรจะใช้วิธีบล็อกหรือใช้การแรนดอมไมเซชันอย่างใดอย่างหนึ่งหรือไม่ ในการเลือกการออกแบบ เราจำเป็นต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการทดลองอยู่ตลอดเวลา ในการทดลองทางวิศวกรรมส่วนมาก เราจะทราบตั้งแต่เริ่มต้นแล้วว่า ปัจจัยบางตัวจะมีผลต่อผลตอบที่เกิดขึ้น ดังนั้นเราจะหาว่าปัจจัยตัวใดที่ทำให้เกิดความแตกต่าง และประมาณขนาดของความแตกต่างที่เกิดขึ้น

ชนิดของรูปแบบการทดลองนั้นมีให้เลือกอยู่อย่างหลากหลาย แต่เราจำเป็นต้องเลือกมาเพียงแค่ 1-2 รูปแบบเท่านั้นเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาซึ่งหลักเกณฑ์ในการพิจารณาว่าเราควรที่จะเลือกรูปแบบการทดลองแบบไหนนั้นขึ้นอยู่กับเกณฑ์ดังต่อไปนี้ ได้แก่ เวลาที่มีให้เพื่อการวิเคราะห์ ระดับความถูกต้องในการวิเคราะห์ งบประมาณที่มีให้ในการออกแบบการทดลอง เป็นต้น โดยทั้งนี้เราสามารถสรุปรูปแบบของการทดลองที่นิยมใช้กันในปัจจุบันได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.6 รูปแบบการทดลองที่นิยมใช้ในปัจจุบัน

รูปแบบการทดลอง	ลักษณะการทดลอง	เวลาในการวิเคราะห์	ความถูกต้อง	งบประมาณ
Single Design	การทดลองสำหรับหนึ่งปัจจัยโดยปัจจัยดังกล่าวเป็นปัจจัยสำคัญที่สุดต่อปัญหา	รวดเร็ว	ปานกลาง	น้อย
Factorial Design	การทดลองที่มีมากกว่าหนึ่งปัจจัยและเป็นการทดลองเต็มรูปแบบ	ใช้เวลานาน	มากที่สุด	มาก
$2^k$ Design	การทดลองที่มีมากกว่าหนึ่งปัจจัยและเป็นการทดลองเต็มรูปแบบแต่กำหนดระดับของแต่ละปัจจัยอยู่ที่ปัจจัยละ 2 ระดับ	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
$2^{k-p}$ Design	การทดลองที่มีมากกว่าหนึ่งปัจจัยแต่ไม่ทำการทดลองแบบเต็มรูปแบบทั้งหมด (ลดรูป)	รวดเร็ว	น้อย	น้อย

#### 2.15.4.5 ทำการทดลอง

เมื่อทำการทดลองเราจะต้องติดตามดูกระบวนการทำงานอย่างระมัดระวัง เพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตามแผน ถ้ามีอะไรผิดพลาดเกิดขึ้นเกี่ยวกับวิธีการทดลองในขั้นตอนนี้ จะทำให้

การทดลองที่ทำมานั้นใช้ไม่ได้ ดังนั้นการวางแผนในตอนแรกจะมีความสำคัญอย่างมากต่อความสำเร็จที่จะเกิดขึ้น

#### 2.15.4.6 วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ

เราควรจะนำเอาวิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อว่าผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง ถ้าการทดลองได้ถูกออกแบบไว้เป็นอย่างดี และถ้าเราทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ วิธีการทางสถิติที่จะนำมาใช้นั้นจะเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อน ข้อได้เปรียบของวิธีการทางสถิติก็คือ ทำให้ผู้ที่มิชำนาญตัดสินใจมีเครื่องมือช่วยที่มีประสิทธิภาพ และถ้านำเอาวิธีการทางสถิติมาผนวกกับความรู้ทางวิศวกรรม ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการ และสามัญสำนึก จะทำให้ข้อสรุปที่ได้ออกมานั้นมีเหตุผลสนับสนุนและมีความน่าเชื่อถือ

#### 2.15.4.7 สรุปและข้อเสนอแนะ

เมื่อได้วิเคราะห์ข้อมูลเรียบร้อยแล้ว ผู้ทดลองจะต้องหาข้อสรุปในทางปฏิบัติและแนะนำแนวทางของกิจกรรมที่จะเกิดขึ้น ในขั้นตอนนี้เราจะนำเอาวิธีการทางกราฟเข้ามาช่วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเราต้องการนำเสนอผลงานนี้ให้ผู้อื่นฟัง นอกจากนี้แล้วการทำการทดลองเพื่อยืนยันผล (Confirmation Testing) ควรจะทำการขึ้นเพื่อที่จะตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุปที่เกิดขึ้นอีกด้วย

### 2.16 การทดลองปัจจัยเดียวและการวิเคราะห์ความแปรปรวน

#### 2.16.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

กระบวนการที่เหมาะสมเพื่อทดสอบความเท่ากันของมัชฌิมหลายค่า คือการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance)

สมมติว่ามีระดับซึ่งแตกต่างของปัจจัยเดียวที่ต้องการทำการเปรียบเทียบ และคำตอบสนองที่ได้จากการสังเกตในแต่ละระดับเป็นตัวแปรสุ่ม ข้อมูลควรมีลักษณะเหมือนในตารางที่ 2.7 ซึ่งค่าต่างๆที่แสดงในตารางเช่น  $y_{ij}$  หมายถึงค่าสังเกตที่  $j$  ภายใต้ระดับที่  $i$  หรือโดยทั่วไปจะมีค่าสังเกต  $n$  ค่าภายใต้ระดับ  $i$

ตารางที่ 2.7 แสดงข้อมูลสำหรับการทดลองปัจจัยเดียว

Treatment (level)	Observations				Totals	Averages
1	$y_{11}$	$y_{12}$	...	$y_{1n}$	$y_{1n}$	$y_1$
2	$y_{21}$	$y_{22}$	...	$y_{2n}$	$y_{2n}$	$y_2$
...	...	...	...	...	...	...
a	$y_{a1}$	$y_{a2}$	...	$y_{an}$	$y_{an}$	$y_a$
					$y_{..}$	$y_{..}$

สามารถอธิบายค่าสังเกตต่างๆ นี้ด้วยแบบจำลองทางสถิติเชิงเส้นคือ

$$y_{ij} = \mu + \tau_{ij} + e_{ij} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (2.1)$$

โดยที่  $y_{ij}$  เป็นค่าสังเกตที่  $ij$  และ  $\mu$  คือค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ร่วมกันทุกระดับซึ่งเรียกว่า “มัชฌิมรวม (Overall Mean)”  $\tau_{ij}$  คือ ค่าพารามิเตอร์สำหรับระดับที่  $i$  หรือผลกระทบจากระดับที่  $i$  และ  $e_{ij}$  คือองค์ประกอบของความผิดพลาดแบบสุ่ม (Random Error) จุดประสงค์ของเราคือเพื่อทำการทดสอบสมมติฐานที่เหมาะสมเกี่ยวกับผลกระทบของระดับต่างๆ และทำการประมาณค่าของมัน สำหรับการทดสอบทางสมมติฐานความผิดพลาดของแบบจำลองถูกสมมติให้เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการกระจายแบบปกติและเป็นอิสระต่อกันด้วยมัชฌิมเท่ากับ 0 และความแปรปรวน  $\sigma^2$  ซึ่งสมมติให้มีค่าคงตัวตลอดทุกระดับของปัจจัย

แบบจำลองนี้เรียกว่า “การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบปัจจัยเดียว (Single Factor Analysis of Variance)” เพราะมีเพียงแค่ปัจจัยเดียวที่นำมาพิจารณา ยิ่งกว่านั้นลำดับในการทดลองจะต้องเป็นแบบสุ่มเพื่อให้สิ่งแวดล้อมที่ทำการทดลองในต่างๆ จะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ดังนั้นการทดลองนี้จึงเป็นการออกแบบการทดลองที่เรียกว่า “การออกแบบสุ่มสมบูรณ์”

แบบจำลองทางสถิติในสมการ (2.1) อธิบายความแตกต่างของ 2 สถานการณ์ที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของระดับ อันดับแรกคือ ระดับ  $\alpha$  ระดับสามารถถูกกำหนดขึ้นโดยผู้ทดลอง ในที่นี้เราต้องการที่จะทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับมัชฌิมของระดับ และบทสรุปที่เกิดขึ้นจะนำไปประยุกต์ได้กับระดับของปัจจัยที่เราพิจารณาเท่านั้น ข้อสรุปที่ได้ไม่สามารถไปใช้กับระดับอื่นที่มีค่าใกล้เคียงที่เราไม่ได้พิจารณาหรือทำการทดลองได้ นอกจากนั้น เราก็อาจต้องการที่จะประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง ( $\mu, \tau, \sigma^2$ ) ซึ่งเรียกว่า “แบบจำลองผลกระทบคงที่ (Fixed Effects Model)” ในทางกลับกัน ถ้าระดับ  $\alpha$  ถูกสุ่มเลือกจากประชากรขนาดใหญ่ของระดับต่างๆที่เป็นไปได้ ในกรณีนี้เราสามารถที่จะขยายผลสรุป (ซึ่งขึ้นกับตัวอย่างของระดับที่ใช้) ของเราไปยังทุกระดับของประชากร ถึงแม้ว่าเราอาจจะไม่ได้ทำการ

พิจารณาระดับนั้นๆ อย่างชัดเจนก็ตาม ในการวิเคราะห์ ในที่นี้  $\tau_i$  คือ ตัวแปรสุ่ม และความรู้เกี่ยวกับค่าตัวแปรสุ่มตัวใดตัวหนึ่งจะไม่มีประโยชน์แต่อย่างไร เราทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับความแปรผันของ  $\tau_i$  และพยายามที่จะประมาณค่าความแปรผันนี้ ซึ่งเรียกว่า “แบบจำลองผลกระทบแบบสุ่ม”

### 2.16.2 การวิเคราะห์แบบจำลองผลกระทบคงที่

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบปัจจัยเดียวของแบบจำลองผลกระทบคงที่ไว้ว่า ผลกระทบของระดับ ( $\tau_i$ ) มีนิยามเหมือนกับส่วนของค่าที่เบี่ยงเบนจากมัชฌิมรวม

$$\sum_{i=1}^n \tau_i = 0 \quad (2.2)$$

ให้  $y_i$  แทนค่าของค่าสังเกตทุกๆ ตัวของระดับ  $i$  ในทำนองเดียวกันให้  $y_{..}$  แทนค่าสังเกตทั้งหมด และ  $\bar{y}_i$  แทนค่าเฉลี่ยของค่าสังเกตภายใต้ระดับที่  $i$  ในทำนองเดียวกัน  $y_{..}$  แทนผลรวมของค่าสังเกตทั้งหมด และ  $\bar{y}_{..}$  แทนค่าเฉลี่ยของค่าสังเกตทั้งหมด ซึ่งเราสามารถเขียนในรูปของสัญลักษณ์คือ

$$y_i = \sum_{j=1}^n y_{ij} \quad (2.3)$$

$$\bar{y}_i = \frac{y_i}{n} \quad (2.4)$$

$$y_{..} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij} \quad (2.5)$$

$$\bar{y}_{..} = \frac{y_{..}}{N} \quad (2.6)$$

โดยที่  $i = 1, 2, \dots, a$  และ  $N = an$  คือจำนวนค่าสังเกตทั้งหมด จะสังเกตว่าเครื่องหมาย “ ” แทนผลรวมของตัวห้อยที่เครื่องหมายนั้นเข้าไปแทนที่อยู่

มัชฌิมของระดับ  $i$  คือ  $E(y_{ij}) \equiv \mu_i = \mu + \tau_i, i = 1, 2, \dots, a$  ดังนั้นมัชฌิมของระดับที่  $i$  ประกอบขึ้นด้วย มัชฌิมรวมบวกกับผลกระทบที่เกิดจากระดับที่  $i$  เราสนใจในการทดสอบความเท่ากันของมัชฌิม  $a$  ระดับคือ

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

$$H_1 : \mu_i \neq \mu_j \text{ อย่างน้อยหนึ่งคู่ของ } (i,j)$$

ถ้าหาก  $H_0$  เป็นจริง ทุกระดับจะมีมัธยฐานที่เท่ากันคือ  $\mu$  เราอาจจะเขียนสมมติฐานใหม่ในรูปของผลกระทบของระดับ  $\tau_i$  ได้คือ

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1 : \tau_i \neq 0 \text{ อย่างน้อยหนึ่ง } i$$

ดังนั้น เราสามารถกล่าวได้ว่า การทดลองความเท่ากันของมัธยฐานของระดับหรือการทดสอบผลที่เกิดขึ้นจากระดับ ( $\tau_i$ ) เท่ากับศูนย์ก็ได้ กระบวนการที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบความเท่ากันของมัธยฐานของระดับ  $a$  คือการวิเคราะห์ความแปรปรวน

### 2.16.3 การแยกย่อยของผลรวมกำลังสอง

การวิเคราะห์ความแปรปรวน มาจากความหมายของการแบ่งความแปรปรวนทั้งหมดออกเป็น ส่วนประกอบย่อยๆ จะได้ว่า Total Corrected Sum of Square คือ

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n ((y_{ij} - \bar{y}_{...}))^2 \quad (2.7)$$

ใช้สำหรับวัดความแปรผันทั้งหมดของข้อมูล เป็นการเหมาะสมถ้าเราหาร  $SS_T$  ด้วยระดับขั้นความเสรีที่เหมาะสม (ในกรณีนี้  $an - 1 = N - 1$ ) เราจะได้ความแปรปรวนของตัวอย่าง  $y$

สังเกตว่า Total Corrected Sum of Square .  $SS_T$  , สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n [(\bar{y}_i - \bar{y}_{..}) + (y_{ij} - \bar{y}_i)]^2 \quad (2.8)$$

หรือ

$$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 = n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_i - \bar{y}_{..})^2 + \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 + 2 \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (\bar{y}_i - \bar{y}_{..}) + (y_{ij} - \bar{y}_i) \quad (2.9)$$

อย่างไรก็ตาม พจน์ของผลคูณไขว้ในสมการ 2.10 มีค่าเป็น 0 เพราะว่า

$$\sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i) = y_i - n\bar{y}_i = y_i - n\left(\frac{y_i}{n}\right) = 0 \quad (2.10)$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 = n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..})^2 + \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{i.})^2 \quad (2.11)$$

สมการ 2.11 กล่าวว่า ความแปรปรวนทั้งหมดของข้อมูล ซึ่งวัดจาก Total Corrected Sum of Square สามารถแบ่งออกเป็น ส่วนของผลรวมกำลังสองของความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยในแต่ละระดับกับค่าเฉลี่ยรวม รวมกับผลรวมกำลังสองของความแตกต่างระหว่างค่าสังเกตภายในระดับกับค่าเฉลี่ยของระดับนั้นๆ ค่าของความแตกต่างระหว่างค่าสังเกตเฉลี่ยของแต่ละระดับกับค่าเฉลี่ยรวมคือ ตัววัดความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของระดับ ในขณะที่ค่าความแตกต่างระหว่างค่าสังเกตภายในระดับกับค่าเฉลี่ยของระดับคือ ความผิดพลาดสุ่ม (Random Error) ดังนั้นเราสามารถเขียนสมการ 2.12 ได้เป็น

$$SS_T = SS_{\text{Treatment}} + SS_E \quad (2.12)$$

ซึ่ง  $SS_{\text{Treatment}}$  เรียกว่า ผลรวมของกำลังสองที่เกิดเนื่องจากระดับ (นั่นคือ ระหว่างระดับต่างๆ) และ  $SS_E$  เรียกว่า ผลรวมของกำลังสองที่เกิดเนื่องจากการผิดพลาด เนื่องจากมีค่าสังเกตทั้งหมด  $an = N$  ค่า ดังนั้น  $SS_{\text{Treatment}}$  มีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ  $a-1$  และภายในทุกๆระดับจะมี  $n$  เพลทเกิด ทำให้มีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ  $n-1$  สำหรับประมาณความผิดพลาดในการทดลอง ดังนั้นถ้าปัจจัยมี  $a$  ระดับ เราจะมี  $a(n-1) = an - a = N - a$  ระดับขั้นความเสรีสำหรับความผิดพลาด

จะมีประโยชน์อย่างมากถ้าเราพิจารณาในรายละเอียดของสองพจน์ทางด้านขวามือของสมการ 2.13 ให้พิจารณาค่าผิดพลาดของผลรวมกำลังสอง

$$SS_E = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{i.})^2 = \sum_{i=1}^a \left[ \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{i.})^2 \right] \quad (2.13)$$

ในรูปแบบนี้ จะเป็นการง่ายที่พิจารณาพจน์ที่อยู่ในวงเล็บซึ่งถูกหารด้วย  $n-1$  ว่าเป็น ความแปรปรวนของตัวอย่างในระดับที่  $i$

$$S_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{i.})^2}{n-1} \quad i = 1, 2, \dots, a \quad (2.14)$$

ตอนนี้ความแปรปรวนตัวอย่าง  $a$  ค่า อาจจะถูกรวมให้เป็นค่าประมาณหนึ่งค่าของความแปรปรวนร่วมของประชากร ซึ่งแสดงโดย

$$\frac{(n-1)S_1^2 + (n-1)S_2^2 + \dots + (n-1)S_a^2}{(n-1) + (n-1) + \dots + (n-1)} = \frac{\sum_{i=1}^a \left[ \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \right]}{\sum_{i=1}^a (n-1)} \quad (2.15)$$

$$= \frac{SS_E}{(N-a)}$$

ดังนั้น  $\frac{SS_E}{(N-a)}$  คือ ค่าประมาณความแปรปรวนร่วมภายในในระดับแต่ละระดับ ซึ่งมีทั้งหมด  $a$  ระดับ

ในทำนองเดียวกัน ถ้าหากไม่มีความแตกต่างระหว่างมัธมิมของระดับทั้งหมด  $a$  ระดับ เราสามารถนำค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของระดับค่าเฉลี่ยรวมเพื่อประมาณ  $\sigma^2$  โดยเฉพาะอย่างยิ่ง

$$\frac{SS_{Treatments}}{a-1} = \frac{n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_i - \bar{y})^2}{a-1} \quad (2.16)$$

คือ ค่าประมาณของ  $\sigma^2$  ถ้าหากมัธมิมของระดับมีค่าเท่ากัน เหตุผลสำหรับอธิบายเป็นดังนี้คือ ค่า  $\sum_{i=1}^a (\bar{y}_i - \bar{y})^2 / (a-1)$  ประมาณค่าของ  $\sigma^2/n$  ซึ่งหมายถึงความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยของระดับ ดังนั้น  $n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_i - \bar{y})^2 / (a-1)$  จะเป็นตัวประมาณของ  $\sigma^2$  ถ้าหากไม่มีความแตกต่างในมัธมิมของระดับ

เราพบว่า การวิเคราะห์เอกลักษณะความแปรปรวน (สมการ (2.11)) ทำให้ได้ค่าประมาณของ  $\sigma^2$  2 ตัว ตัวหนึ่งเป็นความแปรผันภายในระดับ และอีกตัวหนึ่งอยู่ในความแปรผันระหว่างระดับ ถ้าหากไม่มีความแตกต่างในมัธมิมของระดับ ค่าประมาณทั้ง 2 ค่า จะคล้ายคลึงกันมาก แต่หากว่าไม่เป็นเช่นนั้น ควรจะสงสัยว่า ความแตกต่างของค่าสังเกตต้องเกิดมาจากความแตกต่างของมัธมิมของระดับ ถึงแม้ว่าค่ากล่าวนี้จะมาจากความรู้สึกเท่านั้น แต่ก็มีวิธีการอย่างเป็นทางการที่สามารถนำมาใช้อธิบายได้เช่นกัน

เราเรียกจำนวน  $MS_{Treatment} = SS_{Treatment} / (a-1)$  และ  $MS_E = SS_E / (N-a)$  ว่าค่ากำลังสองเฉลี่ย ตอนนี้เราจะมาพิจารณา ค่าคาดหวังของค่ากำลังสองเฉลี่ยเหล่านี้ กล่าวคือ

$$E(MS_E) = \frac{1}{N-a} \left[ N\mu^2 + n \sum_{i=1}^a \tau_i^2 + N\sigma^2 - N\mu^2 - n \sum_{i=1}^a \tau_i^2 - a\sigma^2 \right] \quad (2.17)$$

หรือ

$$E(MS_E) = \sigma^2 \quad (2.18)$$

และในทำนองเดียวกัน

$$E(MS_{\text{Treatment}}) = \sigma^2 + \frac{n \sum_{i=1}^a \tau_i^2}{a-1} \quad (2.19)$$

ดังนั้น เราสามารถกล่าวได้ว่า  $MS_E = SS_E / (N-n)$  เป็นตัวประมาณของ  $\sigma^2$  และหากไม่มีความแตกต่างของมัชฌิมของระดับ (ซึ่งหมายความว่า  $\tau_i = 0$ )  $MS_{\text{Treatment}} = SS_{\text{Treatment}} / (a-1)$  จะเป็นตัวประมาณของ  $\sigma^2$  เช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตาม สังเกตว่าถ้าหากมัชฌิมของระดับแตกต่างกัน ค่าคาดหวังของมัชฌิมของระดับยกกำลังสองจะมากกว่า  $\sigma^2$

การทดสอบสมมติฐานซึ่งไม่มีความแตกต่างของมัชฌิมของระดับสามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบ  $MS_{\text{Treatment}}$  และ  $MS_E$

### 2.17 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การทดสอบสมมติฐานอย่างเป็นทางการในกรณีที่ไม่มี ความแตกต่างในมัชฌิมของระดับ ( $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_a$ ) หรือ ( $H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$ ) จะทำได้อย่างไร เนื่องจากเราต้องสมมติให้  $e_{ij}$  มีการกระจายแบบปกติและมีอิสระต่อกัน มีมัชฌิม = 0 และค่าความแปรปรวน =  $\sigma^2$  ค่าสังเกต  $y_{ij}$  มีการแจกแจงแบบปกติและเป็นอิสระ มีมัชฌิม =  $\mu + \tau_i$  และความแปรปรวน  $\sigma^2$  ดังนั้น  $SS_T$  คือผลรวมของกำลังสองของตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบปกติ ดังนั้นเราสามารถแสดงได้ว่า  $SS_T / \sigma^2$  มีการแจกแจงแบบ Chi-Square ที่มีขั้น  $N-a$  ระดับขั้นความเสรี และ  $SS_{\text{treatment}}$  มีการแจกแจงแบบ Chi-Square ที่มีขั้น  $N-1$  ระดับขั้นความเสรี ถ้าสมมติฐานหลัก  $H_0: \tau_i = 0$  เป็นจริง อย่างไรก็ตาม ค่าผลรวมของกำลังสองทั้ง 3 ไม่ได้เป็นอิสระต่อกัน เพราะ  $SS_E$  และ  $SS_{\text{treatment}}$  รวมกันเป็น  $SS_T$  ทฤษฎีที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้มีประโยชน์ในการสร้างความอิสระให้แก่  $SS_E$  และ  $SS_{\text{treatment}}$

#### ทฤษฎีของ Cochran

ให้  $Z_i$  เป็น NID (0,1) สำหรับ  $i = 1, 2, \dots, v$  และ  $\sum_{i=1}^v Z_i^2 = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_s$  ซึ่ง  $s \leq v$  และ  $Q_i$  มี  $v_i$  ระดับขั้นความเสรี ( $i=1, 2, \dots, s$ ) ดังนั้น  $Q_1, Q_2, \dots, Q_s$  เป็นการแจกแจง Chi-Square ที่เป็นอิสระต่อกัน ด้วยค่า  $v_1, v_2, \dots, v_s$  ระดับขั้นความเสรีตามลำดับ ก็ต่อเมื่อ  $v = v_1 + v_2 + \dots + v_s$  เพราะระดับขั้นความเสรีของ  $SS_{\text{treatment}}$  และ  $SS_E$  รวมกันเท่ากับ  $N-1$  ซึ่งเป็นระดับขั้นเสรีรวมทั้งหมด ทฤษฎีของ Cochran บอกเป็นนัยไว้ว่า  $SS_{\text{treatment}} / \sigma^2$  และ  $SS_E / \sigma^2$  เป็นตัวแปรอิสระที่มีการแจกแจงแบบ Chi-Square ที่เป็นอิสระต่อกัน ดังนั้น ถ้าหากสมมติฐานหลักคือ ไม่มีความแตกต่างของมัชฌิมของระดับความเป็นจริง ดังนั้นอัตราส่วน

$$F_0 = \frac{SS_{\text{Treatment}} / (a-1)}{SS_E / (N-a)} = \frac{MS_{\text{Treatment}}}{MS_E} \quad (2.20)$$

จะมีการแจกแจงแบบ F ด้วยระดับชั้นความเสรีเท่ากับ  $a-1$  และ  $N-a$  สมการ 2.19 คือสถิติทดสอบสำหรับสมมติฐานที่ว่าไม่มีความแตกต่างของมัธยิมของระดับ

จากค่าคาดหวังกำลังสองเฉลี่ยเราพบว่าโดยทั่วไป  $MS_E$  จะเป็นค่าประมาณที่ไม่ลำเอียงของ  $\sigma^2$  ภายใต้สมมติฐานหลัก  $MS_{Treatment}$  จะเป็นค่าประมาณที่ไม่ลำเอียงของ  $\sigma^2$  เช่นกัน อย่างไรก็ตาม ถ้าสมมติฐานหลักเป็นเท็จ ค่าคาดหวังของ  $MS_{Treatment}$  จะมากกว่า  $\sigma^2$  ดังนั้นภายใต้สมมติฐานรอง ค่าคาดหวังของตัวตั้งของสถิติทดสอบ สมการ 2.20 จะมากกว่าค่าคาดหวังของตัวหาร และเราจะปฏิเสธ  $H_0$  ถ้าค่าของสถิติทดสอบมีค่าที่มาก หรือ ค่าดังกล่าวตกอยู่ในบริเวณวิกฤตซึ่งหมายถึงพื้นที่ด้านขวาของค่าวิกฤต ( $F_{\alpha, a-1, N-a}$ ) ดังนั้นเราจะปฏิเสธ  $H_0$  และสรุปว่า มีความแตกต่างระหว่างมัธยิมของระดับ ถ้า

$$F_0 > F_{\alpha, a-1, N-a} \quad (2.21)$$

ซึ่ง  $F_0$  คำนวณได้จากสมการ 2.20 หรือ โดยการใช้ P-Value ในการตัดสินใจก็ได้

สูตรสำหรับคำนวณผลรวมของกำลังสองสามารถหาได้จากการเขียนและลดรูปของ  $MS_{Treatment}$  และ  $SS_T$  ในสมการ ให้ง่ายขึ้น ซึ่งจะได้ว่า

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n \left( y_{ij}^2 - \frac{y_i^2}{N} \right) \quad (2.22)$$

และ

$$SS_{Treatment} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a y_i^2 - \frac{y^2}{N} \quad (2.23)$$

ค่าผิดพลาดของผลรวมของกำลังสองสามารถหาค่าได้จากการลบ กล่าวคือ

$$SS_E = SS_T - SS_{treatment} \quad (2.24)$$

ขั้นตอนการทดสอบได้ถูกสรุปไว้ในตารางที่ 2.8 ซึ่งเรียกว่า ตารางวิเคราะห์ ความแปรปรวน

**ตารางที่ 2.8** ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับปัจจัยเดียว แบบจำลองผลกระทบคงที่

Source of Variation	Sum of Squares	Degrees of Freedom	Mean Square	$F_0$
Between Treatments	$SS_{Treatment}$	$a-1$	$MS_{treatments}$	$F_0 = \frac{MS_{treatments}}{MS_E}$
Error (within treatments)	$SS_E$	$N-a$	$MS_E$	
Total	$SS_T$	$N-1$		

## 2.18 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

การทดลองส่วนมากในทางปฏิบัติจะเกี่ยวข้องกับการศึกษาถึงผลของปัจจัย (Factor) ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป ในกรณีเช่นนี้ การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) จะเป็นวิธีการทดลองที่มี

ประสิทธิภาพสูงสุด การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่จะเกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น ตัวอย่างเช่น กรณี 2 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับและปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับ ในการทดลอง 1 เพลทิกेट (Replicate) จะประกอบด้วย การทดลองทั้งหมด  $ab$  การทดลอง และเมื่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องถูกนำมาจัดให้อยู่ในรูปแบบของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลเราจะกล่าวว่าปัจจัยเหล่านี้มีการไขว้ (Crossed) ซึ่งกันและกัน

ในการทดลองบางอย่าง เราอาจจะพบว่าความแตกต่างของผลที่เกิดขึ้นบนระดับต่างๆ ของปัจจัยหนึ่งจะมีค่าไม่เท่ากันที่ระดับอื่นๆ ทั้งหมดของปัจจัยอื่น ซึ่งหมายความว่า ผลตอบของปัจจัยหนึ่งจะขึ้นกับระดับของปัจจัยอื่นๆ นั่นเองและเราเรียกเหตุการณ์นี้ว่า การมีอันตรกิริยา (Interaction) ต่อกันระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.18.1 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่ง่ายที่สุดจะเกี่ยวข้องกับปัจจัย 2 ปัจจัย คือ A และ B ปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับและปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับ ซึ่งทั้งหมดนี้ถูกจัดให้อยู่ในรูปแบบเชิงแฟกทอเรียล นั่นคือ ในแต่ละเพลทิกेटของการทดลองจะประกอบด้วย การทดลองร่วมปัจจัยทั้งหมด  $ab$  การทดลอง และ โดยปกติจะมีจำนวนเพลทิกेटทั้งหมด  $n$  ครั้ง

กำหนดให้  $y_{ijk}$  คือผลตอบที่สังเกตได้เมื่อปัจจัย A อยู่ที่ระดับ  $i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, a$ ) และปัจจัย B อยู่ที่ระดับ  $j$  ( $j=1, 2, 3, \dots, b$ ) สำหรับเพลทิกेटที่  $k$  ( $k=1, 2, 3, \dots, n$ ) รูปแบบทั่วไปของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย สามารถแสดงได้ที่ตารางที่ 2.9 เนื่องจากลำดับของการสังเกตทั้ง  $abn$  ครั้ง ถูกเลือกมาอย่างสุ่ม ดังนั้น การออกแบบเช่นนี้เรียกว่า การออกแบบสุ่มบริบูรณ์ (Completely Randomized Design)

ตารางที่ 2.9 รูปแบบของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย

		Factor B			
		1	2	...	B
Factor A	1	$Y_{111}, Y_{112}, \dots, Y_{11n}$	$Y_{121}, Y_{122}, \dots, Y_{12n}$		$Y_{1b1}, Y_{1b2}, \dots, Y_{1bn}$
	2	$Y_{211}, Y_{212}, \dots, Y_{21n}$	$Y_{221}, Y_{222}, \dots, Y_{22n}$		$Y_{2b1}, Y_{2b2}, \dots,$ $Y_{2bn}$
	...				
	A	$Y_{a11}, Y_{a12}, \dots, Y_{a1n}$	$Y_{a21}, Y_{a22}, \dots, Y_{a2n}$		$Y_{ab1}, Y_{ab2}, \dots, Y_{abn}$

ข้อมูลจากการทดลองอาจจะเขียนในรูปของแบบจำลองสถิติเชิงเส้น (Linear Statistical Model) คือ

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad \begin{cases} i=1,2,3,\dots,a \\ j=1,2,3,\dots,b \\ k=1,2,3,\dots,n \end{cases} \quad (2.25)$$

โดยที่  $\mu$  หมายถึง ผลเฉลี่ยทั้งหมด;  $\tau_i$  หมายถึง ผลที่เกิดขึ้นจากระดับที่  $i$  ของแถว (Row) ของปัจจัย A;  $\beta_j$  หมายถึง ผลที่เกิดขึ้นจากระดับที่  $j$  ของคอลัมน์ (Column) ของปัจจัย B;  $(\tau\beta)_{ij}$  หมายถึง ผลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง  $\tau_i$  และ  $\beta_j$  และ  $\varepsilon_{ijk}$  หมายถึง องค์ประกอบของความผิดพลาดแบบสุ่ม สมมติว่าปัจจัยทั้งคู่มีค่าตายตัว (Fixed) และผลจากการทดลอง (Treatment Effect) หมายถึง ส่วนเบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยทั้งหมด ดังนั้น  $\sum_{i=1}^a \tau_i = 0$  และ  $\sum_{j=1}^b \beta_j = 0$  ในทำนองเดียวกัน สมมติว่าผลที่เกิดจากอันตรกิริยามีค่าตายตัว และกำหนดว่า  $\sum_{i=1}^a (\tau\beta)_{ij} = \sum_{j=1}^b (\tau\beta)_{ij} = 0$  เนื่องจากในการทดลองครั้งนี้ มีจำนวนเรพลีเคต  $n$  ครั้ง ดังนั้น จำนวนข้อมูลที่ได้จากการสังเกตทั้งหมดเท่ากับ  $abn$

ในการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย ทั้งปัจจัยที่เกิดจาก A (แถว) และ B (คอลัมน์) มีความสำคัญเท่ากัน ดังนั้น เราต้องการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับความเท่ากันของผลที่เกิดจากปัจจัย A หรือกล่าวได้ว่า

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1 : \text{at least one } \tau_a \neq 0 \quad (2.26)$$

และความเท่ากันของผลที่เกิดจากปัจจัย B

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0 \quad (2.27)$$

$$H_1 : \text{at least one } \beta_j \neq 0$$

นอกจากนั้นแล้ว เรายังสนใจผลที่จะทราบว่า อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างปัจจัย A และ B มีนัยสำคัญหรือไม่ หรือกล่าวได้ว่า

$$H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0$$

$$H_1 : \text{at least one } (\tau\beta)_{ij} \neq 0 \quad (2.28)$$

### 2.18.2 การวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับ Fixed Effect Model

กำหนดให้  $y_{i..}$  เป็นผลรวมของข้อมูลจากการทดลองทั้งหมดภายใต้ระดับที่  $i$  ของระดับปัจจัย A;  $y_{.j.}$  เป็นผลรวมของข้อมูลจากการทดลองทั้งหมดภายใต้ระดับที่  $j$  ของระดับปัจจัย B;  $y_{ij.}$  เป็นค่าผลรวมของข้อมูลจากการทดลองทั้งหมดภายใต้เซลล์ตำแหน่งที่  $ij$  และ  $y_{...}$  เป็นผลรวมของข้อมูลจากการทดลองทั้งหมดที่ได้ กำหนดให้  $\bar{y}_{i..}$ ,  $\bar{y}_{.j.}$ ,  $\bar{y}_{ij.}$  และ  $\bar{y}_{...}$  เป็นค่าเฉลี่ยของแถว คอลัมน์ เซลล์ และผลรวมทั้งหมด ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$y_{i..} = \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad \bar{y}_{i..} = \frac{y_{i..}}{bn} \quad i=1,2,3,\dots,a$$

$$y_{.j.} = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad \bar{y}_{.j.} = \frac{y_{.j.}}{an} \quad j=1,2,3,\dots,b \quad (2.29)$$

$$y_{ij.} = \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad \bar{y}_{ij.} = \frac{y_{ij.}}{n} \quad \begin{matrix} i=1,2,3,\dots,a \\ j=1,2,3,\dots,b \end{matrix}$$

$$y_{...} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad \bar{y}_{...} = \frac{y_{...}}{abn}$$

ค่าผลรวมทั้งหมดของกำลังสองสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{AB} + SS_E \quad (2.30)$$

โดยที่

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (2.31)$$

$$SS_A = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a y_{i..}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (2.32)$$

$$SS_B = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b y_{.j.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (2.33)$$

$$SS_{Subtotals} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (2.34)$$

$$SS_{AB} = SS_{Subtotals} - SS_A - SS_B \quad (2.35)$$

$$SS_E = SS_T - SS_{AB} - SS_A + SS_B \quad (2.36)$$

หรือ

$$SS_E = SS_T - SS_{Subtotals} \quad (2.37)$$

เมื่อนำค่าของผลรวมของกำลังสองมาหารด้วยระดับขั้นความเสรีจะได้ค่าของกำลังสองเฉลี่ยสังเกตว่า สมมติฐานว่าง (Null Hypothesis) ที่ว่า ไม่มีผลเนื่องจากปัจจัยของ แลว คอลัมน์ และอันตรกิริยามีค่าเป็นจริง ดังนั้น  $MS_A$ ,  $MS_B$ ,  $MS_{AB}$  และ  $MS_{AE}$  จะมีค่าประมาณเท่ากับ  $\sigma^2$  อย่างไรก็ตาม ถ้ามีความแตกต่างเนื่องจากปัจจัยแลว จะได้ว่า  $MS_A$  จะมีค่ามากกว่า  $MS_E$  เหตุการณ์ทำนองเดียวกันจะเกิดขึ้นกับ  $MS_B$  และ  $MS_E$  เช่นกัน ดังนั้นในการทดสอบความมีนัยสำคัญของผลหลักและอันตรกิริยา เราก็กึ่งพิจาราค่ากำลังสองเฉลี่ยที่เกี่ยวข้องด้วยค่า  $MS_E$  และถ้าอัตราส่วนนี้มีค่ามาก หมายความว่า ข้อมูลที่ได้จากการทดลองไม่สนับสนุนสมมติฐานว่าง(ปฏิเสธสมมติฐานว่าง)

ถ้าสมมติว่าแบบจำลองตามสมการที่ 2.25 เป็นแบบจำลองที่เหมาะสม และพจน์ของความผิดพลาด  $\epsilon_{ijk}$  มีการกระจายแบบปกติและมีอิสระ โดยมีค่าความแปรปรวนคงตัวเท่ากับ  $\sigma^2$  ดังนั้น อัตราส่วนค่ากำลังสองเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจาก  $MS_A/MS_E$ ,  $MS_B/MS_E$  และ  $MS_{AB}/MS_E$  จะมีการกระจายแบบ F ซึ่งมีระดับขั้นความเสรีของตัวตั้งเป็น  $a-1$ ,  $b-1$  และ  $(a-1)(b-1)$  และมีระดับขั้นความเสรีของตัวหารคือ  $ab(n-1)$  ค่าบริเวณวิกฤตคือ ปลายทางด้านบนของการกระจายแบบ F-Value วิธีการทดสอบจะทำได้โดยการอาศัยตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน ดังตารางที่ 2.10

**ตารางที่ 2.10** ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ตัวแปร แบบ Fixed Effects Model

Source of Variation	Sum of Squares	Degrees of Freedom	Mean Square	$F_0$
A treatments	$SS_A$	$a - 1$	$MS_A = SS_A / a - 1$	$F_0 = MS_A / MS_E$
B treatments	$SS_B$	$b - 1$	$MS_B = SS_B / b - 1$	$F_0 = MS_B / MS_E$
Interaction	$SS_{AB}$	$(a - 1)(b - 1)$	$MS_{AB} = SS_{AB} / (a - 1)(b - 1)$	$F_0 = MS_{AB} / MS_E$
Error	$SS_E$	$ab(n - 1)$	$MS_E = SS_E / ab(n - 1)$	
Total	$SS_T$	$abn - 1$		

### 2.18.3 การตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง

ก่อนที่จะนำข้อสรุปที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนไปใช้ จะต้องมีการตรวจสอบความเพียงพอ (Adequacy) ของแบบจำลองทางสถิติที่นำมาใช้เสียก่อน เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบคือ การวิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Residual Analysis) ส่วนตกค้างสำหรับแบบจำลองแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย คือ

$$E_{ijk} = y_{ijk} - \hat{y}_{ijk} \quad (2.38)$$

และเนื่องจากว่าค่าของ  $\hat{y}_{ijk} = \bar{y}_{ijk}$  (ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากการสังเกตในเซลล์ที่ ij) สมการที่ 2.38 กลายเป็น

$$E_{ijk} = y_{ijk} - \bar{y}_{ijk} \quad (2.39)$$

### 2.18.4 รูปแบบทั่วไปของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล

ผลของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้นยังไม่อาจจะขยายไปสู่กรณีทั่วไปได้ในกรณีที่ปัจจัย A มีจำนวนระดับเท่ากับ a, ปัจจัย B มีจำนวนระดับเท่ากับ b, ปัจจัย C มีจำนวนระดับเท่ากับ c ต่อไปเช่นนี้เรื่อยๆ และทั้งหมดนี้ถูกจัดให้อยู่ในลักษณะการทดลองเชิงแฟกทอเรียล ซึ่งจะมีจำนวนข้อมูลในการทดลองเท่ากับ  $abc \dots n$  และต้องมีเรพลิเคตอย่างน้อย 2 เรพลิเคต ( $n \geq 2$ ) เพื่อที่จะทำให้สามารถหาค่าผลรวมของกำลังสองที่เกิดจากความผิดพลาดได้ ถ้าอันตรกิริยาที่เป็นไปได้ทั้งหมดถูกนำไปพิจารณาในแบบจำลอง

ถ้าปัจจัยในการทดลองทั้งหมดเป็นค่าตายตัว เราสามารถที่จะคิดสูตรและทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับผลหลักและอันตรกิริยาได้โดยง่าย สำหรับแบบจำลองแบบผลตายตัว ตัวทดสอบเชิงสถิติสำหรับผลหลักและอันตรกิริยาสามารถหาได้โดยสร้างค่ากำลังสองเฉลี่ยของสิ่งนั้นขึ้น แล้วหารด้วยค่ากำลังสองเฉลี่ยของความผิดพลาด (เหมือนกับกรณี 2 ปัจจัย) และการทดสอบสมมติฐานจะใช้ F-Test แบบทดสอบปลายด้านบนหนึ่งด้าน จำนวนระดับขึ้นความเสรีสำหรับผลหลักของปัจจัยใดๆ มีค่าเท่ากับจำนวนระดับของปัจจัยนั้นลบด้วย 1 และจำนวนระดับขึ้นเสรีของอันตรกิริยามีค่าเท่ากับ ผลคูณของระดับขึ้นความเสรีของส่วนประกอบของอันตรกิริยานั้นๆ

### 2.19 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบสามระดับ

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล  $3^k$  หมายถึง การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 3 ระดับกำหนดให้สัญลักษณ์ของปัจจัยแต่ละอันตรกิริยาแทนด้วยตัวอักษรตัวใหญ่ และระดับทั้งสามของแต่ละปัจจัยมีค่าเป็น ต่ำ ปานกลาง และสูง สัญลักษณ์ที่ใช้แทนระดับทั้งสามอาจจะใช้เป็นตัวเลข 0 (ต่ำ), 1 (ปานกลาง) และ 2 (สูง) การทดลองร่วมปัจจัยในการออกแบบ  $3^k$  จะแทนด้วยตัวเลข k ตัว โดยที่ตัวเลขตัวแรกแทนระดับของปัจจัย A, ตัวเลขตัวที่สองแทนด้วยระดับของปัจจัย B, ..., และตัวเลขตัวที่ k แทนระดับของปัจจัย k ตัวอย่างเช่น การออกแบบ  $3^2$  ตัวเลข 00 หมายถึงการทดลองร่วมปัจจัยซึ่งทั้ง A และ B อยู่ในระดับต่ำ, 01 หมายถึงการทดลองร่วมปัจจัยที่ A อยู่ในระดับต่ำ และ B อยู่ในระดับปานกลาง

ในการออกแบบ  $3^k$  เมื่อปัจจัยมีลักษณะเป็นเชิงปริมาณ เราจะแทนระดับต่ำ, ปานกลาง และ สูง ด้วย  $-1, 0, 1$  ตามลำดับ ซึ่งการใช้สัญลักษณ์เช่นนี้จะทำให้ง่ายในการสร้างแบบจำลองการถดถอยของผลตอบที่เกิดจากแต่ละระดับของปัจจัย ตัวอย่างเช่นการออกแบบ  $3^2$  ให้  $x_1$  แทนปัจจัย A และ  $x_2$  แทนปัจจัย B แบบจำลองของความสัมพันธ์ระหว่าง  $y$  กับ  $x_1$  และ  $x_2$  สามารถแสดงได้โดย

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \varepsilon \quad (2.40)$$

สังเกตว่ามีระดับที่สามของปัจจัยเพิ่มเข้ามาในแบบจำลองซึ่งทำให้เราสามารถที่จะแสดงความสัมพันธ์ผลตอบและปัจจัยที่สนใจในลักษณะสมการที่เป็นสมการแบบควอดราติก (Quadratic) การออกแบบ  $3^k$  ไม่ได้การออกแบบที่ดีที่สุดในการสร้างแบบจำลองแสดงความสัมพันธ์ แบบควอดราติก ซึ่งในกรณีเช่นนี้ การออกแบบพื้นผิวผลตอบแทน (Response Surface Design) ที่จะกล่าวต่อไปจะเป็นทางเลือกที่ดีกว่า

### 2.19.1 รูปทั่วไปของการออกแบบ $3^k$

แนวความคิดของการออกแบบ  $3^2$  และ  $3^3$  สามารถขยายไปสู่กรณีของปัจจัย  $k$  ตัวแต่ละตัวประกอบด้วย 3 ระดับ นั่นคือ การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ  $3^k$  สัญลักษณ์แบบดิเจทัลถูกนำมาใช้แทนการทดลองร่วมปัจจัยที่เกิดขึ้นเช่น 0120 หมายถึงการทดลองร่วมปัจจัยในการออกแบบ  $3^4$  ที่มี A และ D อยู่ที่ระดับต่ำ B อยู่ที่ระดับกลาง และ C อยู่ที่ระดับสูง การออกแบบ  $3^k$  นี้จะประกอบด้วย การทดลองร่วมปัจจัยทั้งสิ้น  $3^k$  การทดลอง และมีระดับความเสรีเท่ากับ  $3^k - 1$  จากการทดลองร่วมปัจจัยเหล่านี้จะทำให้เกิดผลรวมของกำลังสองของผลหลัก  $k$  ตัว ที่แต่ละตัวมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 2; อัตราการกระทำแบบสองปัจจัยจำนวน  $c_2^k$  ซึ่งมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 4;...; และอัตราการกระทำแบบ  $k$  ปัจจัย ซึ่งมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ  $2^k$  ถ้ามีการทดลองทั้งสิ้น  $n$  เปรดิเคต จะทำให้เกิดระดับขั้นความเสรีทั้งหมดเท่ากับ  $n3^k - 1$  และค่าผิดพลาดของระดับความเสรีเท่ากับ  $3^{k(n-1)}$

ค่าผลรวมของกำลังสองสำหรับผลหลักและอัตราการกระทำสามารถคำนวณได้โดยใช้วิธีการตามปกติของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลธรรมดาแล้ว อัตราการกระทำแบบสามปัจจัยและสูงกว่าจะไม่ถูกแยกอีกต่อไป อย่างไรก็ตามอัตราการกระทำแบบ  $h$  ปัจจัย จะมีส่วนประกอบแบบเชิงตั้งฉาก จำนวน  $2^{k-1}$  ตัว ซึ่งแต่ละตัวจะมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 2 ตัวอย่างเช่น อัตราการกระทำสี่ปัจจัย ABCD จะมีส่วนประกอบแบบเชิงตั้งฉาก จำนวน  $2^{4-1} = 8$  ตัว ซึ่งเขียนได้คือ  $ABCD^2, ABC^2D, AB^2CD, ABCD, ABC^2D^2, AB^2C^2D, AB^2CD^2$  และ  $AB^2C^2D^2$  ในการเขียนส่วนประกอบเหล่านี้ สังเกตว่าตัวเลขยกกำลังของตัวอักษรแรกจะมีค่าเท่ากับ 1 เสมอ ถ้าตัวเลขยกกำลังนี้ไม่เท่ากับ 1 แล้ว ให้นำพจน์นี้มายกกำลังสองและตัวเลขยกกำลังจะลดลงโดยใช้มอดุลัส 3 ดังตัวอย่างต่อไปนี้

$$A^2BBD = (A^2BCD)^2 = A^4B^2C^2D^2 = AB^2C^2D^2 \quad (2.41)$$

อัตรากิริยาส่วนประกอบเหล่านี้ไม่มีความหมายในทางกายภาพแต่ประการใด และจะมีประโยชน์ในการสร้างการออกแบบที่ซับซ้อน

จะเห็นได้ว่าขนาดของการออกแบบจะมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วตามขนาด  $k$  ตัวอย่างเช่น การออกแบบ  $3^3$  จะประกอบด้วย การทดลองร่วมปัจจัยทั้งสิ้น 27 ตัวต่อหนึ่งเรพลิเคต, การออกแบบ  $3^4$  จะมี 81 ตัว, การออกแบบ  $3^5$  จะมี 243 ตัว, ..., เช่นนี้เรื่อยไป ดังนั้น บ่อยครั้งที่เราจะทำการทดลองแบบ  $3^k$  เพียง 1 เรพลิเคตเท่านั้น และนำอัตรากิริยาขึ้นสูงมารวมกันเพื่อให้ได้ค่าประมาณของค่าความผิดพลาด ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ถ้าอัตรากิริยาแบบ 3 ปัจจัย หรือมากกว่าสามารถละเอียดได้ ดังนั้นการออกแบบ  $3^3$  ที่มี 1 เรพลิเคต จะให้ค่าระดับขึ้นความเสถียร สำหรับความผิดพลาดเท่ากับ 8 และสำหรับการออกแบบ  $3^4$  ที่มี 1 เรพลิเคต จะให้ค่าระดับขึ้นความเสถียรสำหรับความผิดพลาดเท่ากับ 48 ซึ่งการออกแบบเช่นนี้ยังคงใหญ่เกินไปสำหรับปัจจัย  $k \geq 3$  ดังนั้น ไม่ค่อยมีประโยชน์เท่าใดนัก

## 2.20 วิธีการพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาสถานะที่เหมาะสมของกระบวนการ

วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology : RSM) เป็นการรวมเอากระบวนการเทคนิคทั้งคณิตศาสตร์ และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลอง และการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบสนองที่สนใจจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย และต้องการที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลการตอบสนองเหล่านี้ ตัวอย่างเช่น สมมติว่ามีวิศวกรคนหนึ่งมีความต้องการที่จะหาระดับอุณหภูมิ ( $x_1$ ) และความดัน ( $x_2$ ) ที่จะส่งผลให้ผลผลิตของกระบวนการมีค่ามากที่สุด ซึ่งผลของกระบวนการนี้เป็นฟังก์ชันของระดับอุณหภูมิและความดันกล่าวคือ

$$y = f(x_1, x_2) + \epsilon \quad (2.42)$$

โดยที่  $y$  คือค่าความผิดพลาดของผลตอบสนอง  $y$  ที่เป็นผลมาจากการทดลอง ถ้ากำหนดให้  $E(y) = f(x_1, x_2) = \eta$  ดังนั้น สามารถเขียนสมการของพื้นผิวได้ดังนี้

$$\eta = f(x_1, x_2) \quad (2.43)$$

ซึ่งเรียกว่าพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface) โดยมากแล้ว จะทำการแสดงพื้นผิวผลตอบสนองในรูปแบบของกราฟ (ภาพที่ 2.9) โดยที่  $\eta$  จะถูกพล็อตกับระดับของ  $x_1$  และ  $x_2$  เพื่อที่จะช่วยให้เรามองรูปร่างของพื้นผิวตอบสนองได้ดียิ่งขึ้น ส่วนใหญ่แล้วการจะทำการพล็อตเป็นเส้นโครงร่างของพื้นผิว

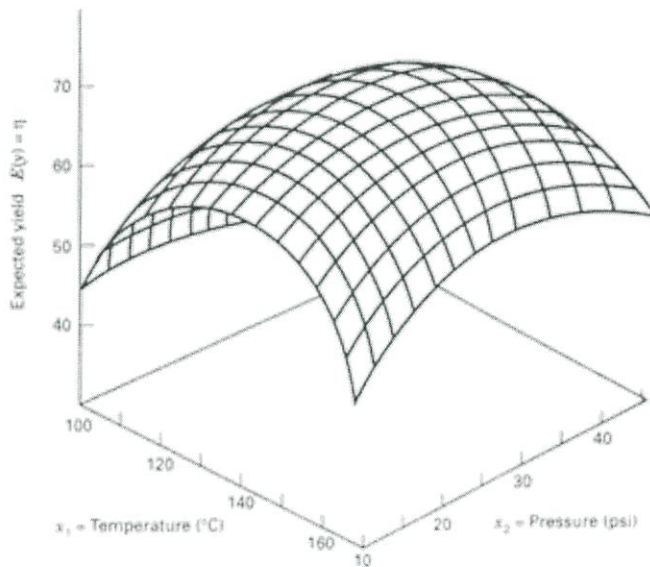
ผลตอบสนอง (ภาพที่ 2.10) ในการสร้างเส้น โครงร่างนี้ เส้นที่มีค่าของผลตอบสนองคงที่จะถูกวาดอยู่บน ระนาบ  $x_1$  และ  $x_2$  ซึ่งเส้นโครงร่างแต่ละเส้นจะมีความสูงของพื้นผิวผลตอบสนองที่เท่ากันอยู่ค่าหนึ่ง

ในปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบสนองส่วนมากจะไม่ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ผลตอบสนองและตัวแปรอิสระ ดังนั้นขั้นตอนแรกคือ จะต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่จะใช้เป็น ตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง  $y$  และเซตของตัวแปรอิสระ ซึ่งตามปกติแล้วจะใช้ ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังต่ำๆ ที่อยู่ภายใต้อาณาเขตบางส่วนของตัวแปรอิสระ ถ้าแบบจำลองของผลตอบมี ความสัมพันธ์ เป็นแบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่จะใช้ในการประมาณความสัมพันธ์นี้คือ แบบจำลองกำลังหนึ่ง

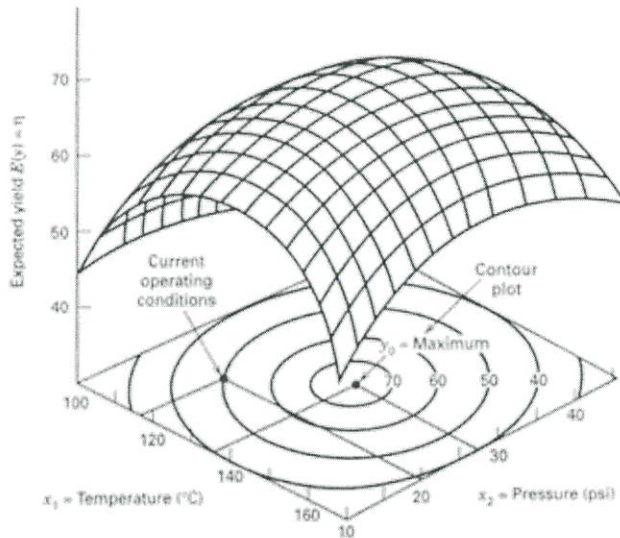
$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (2.44)$$

แต่ถ้ามีเส้น โครงร่างเข้ามาเกี่ยวข้องในระบบ จะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสอง

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_j x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon_i \quad (2.45)$$



ภาพที่ 2.9 ผลตอบสนองแบบสามมิติ

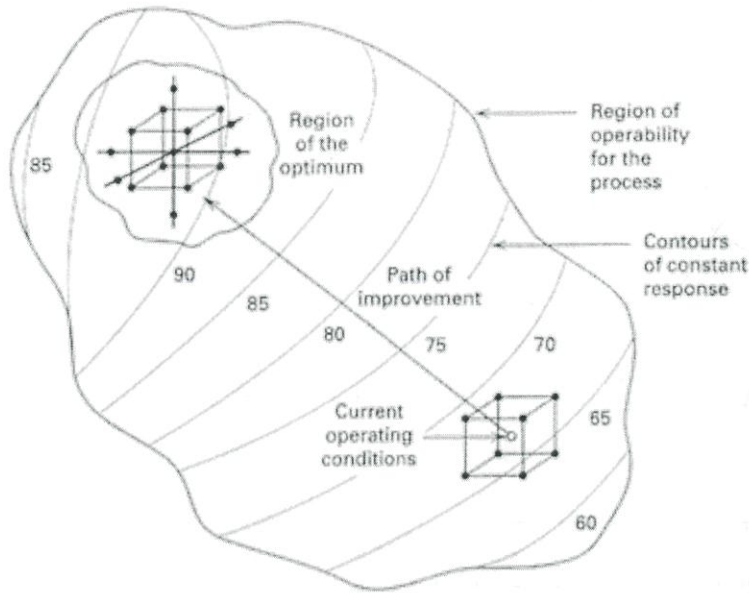


ภาพที่ 2.10 กราฟเส้น โคร่งร่างของพื้นผิวตอบสนอง

ปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวตอบสนองส่วนใหญ่จะใช้หนึ่งในสองแบบจำลองขั้นต้นแน่นอนว่าแบบจำลองดังกล่าวเหล่านี้ จะไม่สามารถใช้ประมาณค่าความสัมพันธ์ตลอดพื้นผิวทั้งหมดของตัวแปรอิสระ แต่ทว่าพื้นผิวที่สนใจอยู่นั้นมีขนาดค่อนข้างเล็กแล้ว แบบจำลองเหล่านี้จะใช้งานได้ดีพอสมควร

วิธีการกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Method) จะถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองพหุนาม การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองจะเกิดขึ้นกับพื้นผิวที่สร้างขึ้นนี้ ถ้าพื้นผิวที่สร้างขึ้นสามารถใช้ประมาณฟังก์ชันผลตอบสนองได้เป็นอย่างดีเพียงพอ ดังนั้นการวิเคราะห์พื้นผิวที่สร้างขึ้นมานี้ จะประมาณค่าได้เหมือนกับการวิเคราะห์ระบบจริงพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองสามารถที่จะถูกประมาณค่าได้อย่างดีถ้าเราทำการออกแบบการทดลองเพื่อที่จะเก็บค่าได้อย่างเหมาะสม การออกแบบชนิดนี้เรียกว่า การออกแบบโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง(Response Surface Design)

การวิเคราะห์พื้นผิวเป็นวิธีการที่มีลำดับขั้นตอน บ่อยครั้งที่เราอยู่บนพื้นผิวตอบสนองที่ห่างไกลออกไปจากจุดที่ดีที่สุด ตัวอย่างเช่น ที่เงื่อนไขการทำงานปัจจุบัน ภาพที่ 2.11 ซึ่งจะพบว่าผลตอบสนองของระบบนี้ไม่ค่อยเป็นส่วน โด่งและแบบจำลองกำลังหนึ่งก็พอเพียงในการสร้างแบบจำลองแล้ววัตถุประสงค์คือ การนำการทดลองไปตามแนวทางที่มีการปรับปรุงมากที่สุด และอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อที่จะไปใกล้จุดที่ดีที่สุดได้อย่างรวดเร็วที่สุด และเมื่อค้นพบอาณาเขตของค่าที่ดีที่สุดแล้วจะนำเอาแบบจำลองที่ซับซ้อนยิ่งขึ้น เช่น แบบจำลองกำลังสองเป็นต้น เข้ามาใช้ในการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนองเปรียบเสมือนการปีนภูเขา ซึ่งยอดเขามักจะเป็นจุดที่มีผลตอบสนองสูงสุด หรือถ้าค่าที่ดีที่สุดคือค่าต่ำที่สุด ในที่นี้อาจคิดเสมือนว่า กำลังเคลื่อนที่ลงสู่หุบเขาจุดประสงค์สุดท้ายของการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองคือ การหาเงื่อนไขการทำงานที่ดีที่สุดสำหรับระบบ หรือเพื่อที่จะหาอาณาเขตของปัจจัยที่ก่อให้เกิดการทำงานที่น่าพอใจที่สุด



ภาพที่ 2.11 วิธีการอย่างมีลำดับขั้นตอนของการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ

เมื่อผู้ทำการทดลองอยู่ใกล้กับจุดที่ดีที่สุดแล้ว แบบจำลองที่สามารถแสดงส่วนโค้งจะถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าผลตอบสนอง ส่วนใหญ่แบบจำลองกำลังสองจะมีรูปแบบดังนี้

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_j x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon_i \quad (2.46)$$

จากตัวแบบข้างต้นผู้วิจัยสามารถสร้างแบบจำลองกำลังสองเพื่อที่จะนำไปสู่การหาเงื่อนไขในการทำงานที่ดีที่สุดต่อไป ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบนี้ต้องมีระดับที่สามของปัจจัย ซึ่งนอกจากอาศัยออกแบบ  $3^k$  Factorial Design แล้วยังมีการออกแบบเพื่อการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนอง อีกหลายชนิดเช่น การออกแบบส่วนผสมกลาง หรือ CCD การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design การออกแบบที่เรียกว่า Face-Centered Central Composite หรือ Face-Central Cube ซึ่งการออกแบบการทดลองเหล่านี้จะสามารถทำให้ลดเวลา ค่าใช้จ่าย หรือลดการทดลองที่ไม่สามารถดำเนินการได้เนื่องจากข้อจำกัดในด้านกายภาพของกระบวนการ แต่ยังคงสามารถวิเคราะห์ผลสรุปภายใต้เงื่อนไขการทดลองทางสถิติ

## 2.21 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องแสดงให้เห็นว่า การเกิดขึ้นและการเจริญเติบโตของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรีเป็นปัญหาที่สำคัญของความเชื่อถือได้ (Reliability) ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ [2] มีงานวิจัยที่แสดงให้เห็นว่าการเจริญเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีผลในทาง

ลบต่อความเชื่อถือได้ของรอยบัดกรี เนื่องจากชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เจริญเติบโตขึ้นจะไปลด Thermal fatigue life, Tensile strength และ Fracture toughness ของรอยบัดกรี [10, 11, 14-16] สารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรีจะเริ่มเกิดขึ้นในขณะที่ทำการบัดกรีและจะมีความหนาเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบัดกรี เมื่อทำการบัดกรีเสร็จก็จะมีความหนาค่าหนึ่ง และเมื่อนำไปใช้งานและได้รับความร้อนก็จะเกิดการเจริญเติบโต ทำให้ชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีความหนาเพิ่มขึ้น [9, 19-23] ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องพบว่า งานวิจัยโดยส่วนใหญ่จะทำการศึกษาการเจริญเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรีเนื่องจากการใช้งานมากกว่าทำการศึกษาการเกิดขึ้นและการเจริญเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรีเนื่องจากการบัดกรี

มีงานวิจัยเป็นจำนวนมากทั้งในกรณีของโลหะบัดกรีแบบที่มีตะกั่วผสมและโลหะบัดกรีแบบไร้สารตะกั่วที่ทำการศึกษาการเจริญเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรีเนื่องจากการใช้งาน โดยจำลองการได้รับความร้อนในระหว่างการใช้งานด้วยการบ่มด้วยความร้อน (Thermal aging) เช่น Yoon และ Jung [9] ได้ศึกษาการเจริญเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นทองแดงและโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-5Bi และพบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีความหนาเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการรับความร้อนที่เพิ่มขึ้นในระหว่างการใช้งาน Schaefer และคณะ [17] และ Kim และ Tu [18] ได้ศึกษาการเจริญเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นรองทองแดงและโลหะบัดกรีที่มีดีบุกและตะกั่วเป็นธาตุหลัก และพบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีความหนาเพิ่มขึ้นตามเวลาการใช้งานในรูปแบบสมการยกกำลังสอง Mookam และ Kanlayasiri [19] ได้ทำการศึกษาการเจริญเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดจากการบัดกรีโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu กับแผ่นรองทองแดงที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ พบว่าสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นมีความหนาเพิ่มขึ้นตามเวลาการใช้งานที่นานขึ้นและตามอุณหภูมิการใช้งานที่สูงขึ้น รวมทั้งพบว่ามีเกิดการเกิดสารประกอบเชิงโลหะชนิดใหม่เพิ่มขึ้นมาในรอยบัดกรีหลังจากการใช้งานไปช่วงระยะเวลาหนึ่ง Sun และคณะ [20] ได้ทำการศึกษาการเจริญเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดจากการบัดกรีโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-3.5Ag และ Sn-4.0Ag-0.5Cu กับแผ่นรอง Ni(P) พบว่าโลหะบัดกรีต่างชนิดกันให้รอยบัดกรีที่มีสารประกอบเชิงโลหะต่างกัน และสารประกอบเชิงโลหะแต่ละชนิดมีความหนาเพิ่มขึ้นตามเวลาการใช้งาน แต่มีอัตราการเพิ่มความหนาของสารประกอบเชิงโลหะแต่ละชนิดไม่เท่ากัน

อย่างไรก็ตามผลการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการบัดกรีที่มีต่อการเกิดขึ้นและการเจริญเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในระหว่างการบัดกรียังปรากฏไม่มากนัก ได้แก่ Yoon และคณะ [21] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของเวลาบัดกรีที่มีต่อความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในการบัดกรีโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.7Cu กับแผ่นรองทองแดง และแผ่นรอง Ni-P ซึ่งพบว่า การเกิดปฏิกิริยากับแผ่นรองทั้งสองชนิดจะให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่มีความหนาเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบัดกรี และระยะเวลาบัดกรีที่แตกต่างกันทำให้เกิดสารประกอบเชิงโลหะต่างชนิดกัน Mookam และ Kanlayasiri [22] ได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและ

เวลาในการบัดกรีโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu กับแผ่นรองทองแดง พบว่าการบัดกรีที่อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกันทำให้เกิดสารประกอบเชิงโลหะต่างชนิดกันและมีความหนาที่แตกต่างกัน Nagaoka และคณะ [23] ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิในการบัดกรีโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วในกลุ่ม Zn-Al กับแผ่นรองอลูมิเนียม พบว่าอุณหภูมิบัดกรีที่สูงขึ้นทำให้เกิดสารประกอบเชิงโลหะ  $MgZn_2$  ที่รอยบัดกรีในปริมาณที่มากขึ้น แต่ในงานวิจัยนี้พบว่าการใช้อุณหภูมิบัดกรีที่แตกต่างกันไม่ได้ทำให้เกิดสารประกอบเชิงโลหะต่างชนิดกัน

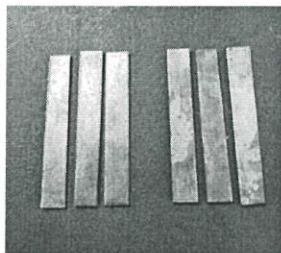
สำหรับการทบทวนผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า ในการศึกษาโดยวิธีการทำการทดลอง วิธีการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเป็นวิธีการทางสถิติวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนองกับตัวแปรอิสระต่างๆ โดยจะนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และเป็นวิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ให้แบบจำลองที่มีความแม่นยำในการทำนายสูง ซึ่งพบว่าการประยุกต์ใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณสามารถใช้ได้ดีกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการวิจัยด้านต่างๆหลายด้าน เช่น การตัดวัสดุ การเชื่อมโลหะ และการสังเคราะห์วัสดุ [24-28]

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ในการเตรียมชิ้นงานจะใช้แผ่นทองแดงบริสุทธิ์ 99.99 % มีค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเชิงตัวเลข (Arithmetic Mean Roughness :  $R_a$ ) ประมาณ  $0.164 \mu\text{m}$  มีความหนา 1 mm. เป็นโลหะพื้นในการบัดกรี และนำมาตัดด้วยเครื่องตัดแบบคั่น โยกให้มีขนาด 10 x 70 mm. ดังแสดงในภาพที่ 3.1 จากนั้น นำชิ้นงานเข้าสู่กระบวนการเตรียมชิ้นตัวอย่าง โดยในขั้นตอนแรกจะทำความสะอาดพื้นผิวชิ้นงานในสบู่เพื่อขจัดคราบไขมันที่อยู่บนชิ้นตัวอย่าง จากนั้นทำความสะอาดพื้นผิวชิ้นงานในกรดเกลือ 35% จากนั้นล้างในเอทานอลโดยปล่อยให้แห้งในอากาศแล้วนำชิ้นตัวอย่างไปจุ่มลงใน ฟลักซ์ Ultracore Flux AMR N-1003 ดังแสดงในภาพที่ 3.2 จากนั้นนำชิ้นงานไปจุ่มในโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วด้วยเตาหลอมไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 3.3 ที่อุณหภูมิ 170, 190 และ  $210^\circ\text{C}$  แต่ละอุณหภูมิใช้เวลาในการจุ่ม 5, 15 และ 25 วินาทีตามลำดับ

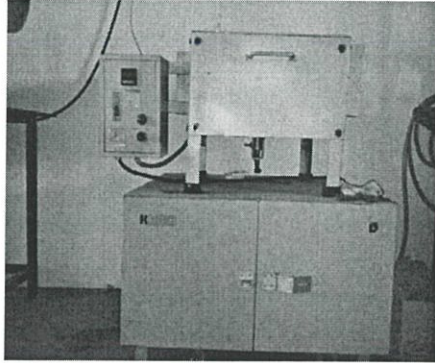


ภาพที่ 3.1 ลักษณะของแผ่นรองทองแดงที่ตัดด้วยเครื่องตัดแบบคั่น โยก

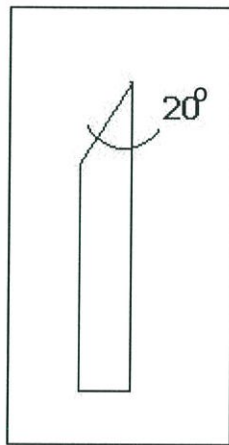


ภาพที่ 3.2 ฟลักซ์ Ultracore Flux AMR N-1003

นำชิ้นตัวอย่างไปตัดด้วยเครื่องตัดแบบแรงโน้มถ่วงยี่ห้อ Struers รุ่น Minitom โดยการตัดจะทำมุมเอียง 20 องศา เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการวัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ เนื่องจากระนาบที่เอียง 20 องศา จะขยายให้ชั้นบางมีความหนาเพิ่มขึ้นถึง 2.92 เท่า ดังแสดงในภาพที่ 3.4

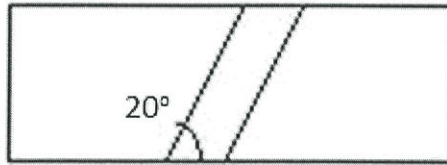


ภาพที่ 3.3 เต้าหลอมไฟฟ้า



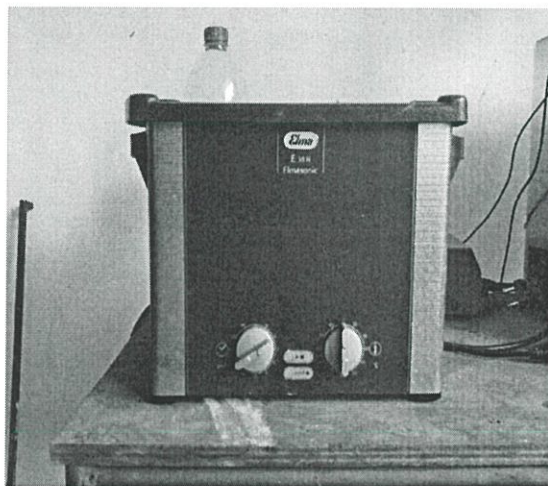
ภาพที่ 3.4 ลักษณะของแผ่นรองทองแดงที่ถูกตัด

จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างมาหล่อเรซินในแม่แบบทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว สูง 1 cm ด้วยเรซินส่วนผสม CPJ-422Tp โดยใช้ด้านที่ตัดทำมุมสัมผัสกับวัสดุรองและหล่อในเรซิน ดังแสดงในภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 ชิ้นงานตัวอย่างที่หล่อเรซิน

นำชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการหล่อเรซินไปขัดด้วยกระดาษทรายที่มีความละเอียดตั้งแต่เบอร์ 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ หลังจากนั้นจึงทำการขัดโดยใช้ผงอะลูมินา ( $Al_2O_3$ ) ขนาด 1.0 และ 0.3 ไมครอนบนสั๊กหลาดโดยใช้เครื่องขัดยี่ห้อ Struers รุ่น LaboPol-1 จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการขัดโดยผงอะลูมินา ( $Al_2O_3$ ) แล้วไปทำการกัดผิวหน้าชิ้นงาน ด้วยสารละลายที่ประกอบด้วย 93% Ethanol: 5% Nitric: 2% Hydrochloric จากนั้นล้างกรดจากการกัดผิวหน้าด้วยเครื่อง Elma E30H Elmasonic ดังแสดงในภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 เครื่อง Elma E30H Elmasonic

### 3.2 การวิเคราะห์ผลทางโครงสร้างจุลภาค

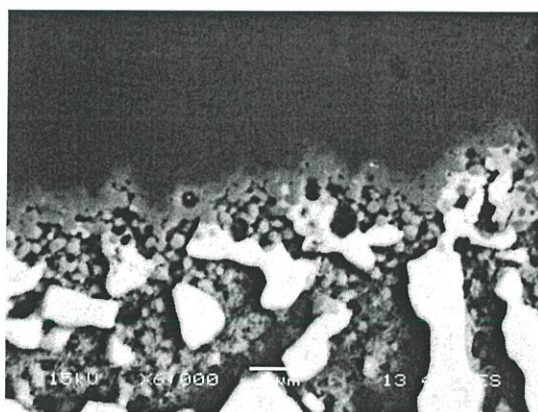
#### 3.2.1 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเบื้องต้นโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง

ในเบื้องต้นจะทำการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน เพื่อตรวจสอบความเรียบของหน้าผิวชิ้นตัวอย่าง รวมถึงลักษณะของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic Compound) รวมถึงลักษณะ

และขนาดของเกรน เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคเหล่านั้นส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติทางกลของรอยต่อ บัคกรี โดยนำชิ้นตัวอย่างที่ผ่านขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบ นำไปตรวจดูด้วยกล้อง Optical Microscope ยี่ห้อ Zeiss รุ่น Axiolab ซึ่งมีกำลังขยายสูงสุดอยู่ที่ 500 เท่า

### 3.2.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมี

ในการศึกษาชิ้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นและองค์ประกอบทางเคมี จะทำการศึกษาด้วย กล้องจุลทรรศน์ แบบส่องกราดยี่ห้อ JEOL JSM-6380LV ด้วยการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วย วิธี Back Scatter Electron เพื่อตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างที่เกิดขึ้นสารประกอบเชิงโลหะ จากนั้นจะทำการปรับฟังก์ชันให้เป็นการตรวจสอบปริมาณธาตุที่พบบนพื้นผิวของชิ้นตัวอย่าง ด้วยวิธี EDX จะได้ผลเป็นปริมาณธาตุที่พบตรงบริเวณจุดสำรวจของผิวชิ้นตัวอย่าง แสดงผลเป็นสเปกตรัม เฉพาะของธาตุที่ค้นพบและรายงานผลเป็นเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของธาตุที่ค้นพบ และนำภาพที่ถ่ายได้จาก กระบวนการ SEM ดังแสดงในภาพที่ 3.7 ไปทำการค้นหาความหนาของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะด้วย โปรแกรม Image Pro Express ต่อไป



ภาพที่ 3.7 ภาพที่ได้จากการ SEM ด้วยวิธี Back Scatter Electron ที่กำลังขยาย 6,000 เท่า

### 3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัยของขั้นตอนการออกแบบการทดลองและดำเนินการทดลองโดยใช้การออกแบบ การทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสามระดับ ( $3^k$ Factorial Design)

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการทดลองเพื่อค้นหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมจากการออกแบบการทดลอง เชิงแฟกทอเรียลแบบสามระดับ ( $3^k$  Factorial Design)

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสามระดับ ( $3^k$  Factorial Design) คือการออกแบบที่ประกอบด้วย  $k$  ปัจจัย ในระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสามระดับ ( $3^k$  Factorial Design) ครั้งนี้ จะกำหนดระดับของปัจจัยออกเป็น 3 ระดับ โดยจะนำระดับของปัจจัยที่เคยทำการทดลองเบื้องต้นมาทำการทดลองซ้ำอีกครั้ง และทำการกำหนดค่าระดับกลางเพิ่มขึ้นให้กับปัจจัยต่างๆ ซึ่งจะต้องทำการทดลองทั้งหมด  $3 \times 3 \times 3 \times \dots \times 3 = 3^k$  การทดลอง

เมื่อได้ทำการออกแบบการทดลองเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็คือ การดำเนินการทดลองตามรูปแบบการทดลองที่ได้ออกแบบไว้ พร้อมทั้งบันทึกผลการทดลอง

### 3.4 วิธีการดำเนินงานวิจัยของขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการทดลอง

เมื่อได้ผลการทดลองครบถ้วนแล้วให้นำผลการทดลองทั้งหมดไปวิเคราะห์ผลและสรุปผล ในการวิเคราะห์ได้ใช้วิธีการสถิติเชิงวิศวกรรม เพื่อให้ได้ผลการทดลองและข้อสรุปจากการทดลองโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนจากผลการดำเนินการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสามระดับ ( $3^k$  Factorial Design) ซึ่งอาศัย โปรแกรม Minitab Version 16 มาทำการวิเคราะห์ผลการทดลองดังนี้

1. การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking)
2. การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

### 3.5 การดำเนินงานของการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุ

ในขั้นตอนของการดำเนินงานของการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุจะกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ ดังนี้

$x_1$  = อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )

$x_2$  = เวลา (s)

$y$  = ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

วิธีการดำเนินงานประกอบด้วย 3 ขั้นตอน

1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุ
2. ศึกษาการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุในโปรแกรม Minitab Version 16
3. ตรวจสอบ เงื่อนไขเบื้องต้นของการวิเคราะห์ความถดถอย

### 3.5.1 การทำนายความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะโดยใช้การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุ

ก่อนที่จะเริ่มต้นการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุ เพื่อนำไปใช้ในการตัดสินใจเลือกรูปแบบความสัมพันธ์ของสมการถดถอยจะต้องสร้างสมการหรือตัวแบบจำลองโดยทั่วไปที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระ เพื่อเป็นสมการพื้นฐานในการศึกษารูปแบบความสัมพันธ์ที่เหมาะสม

การนำวิธีการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุ มาใช้ในการเลือกรูปแบบความสัมพันธ์ที่เหมาะสมของสมการถดถอย เพื่อศึกษาการทำนายความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะนั้น มีองค์ประกอบหลายอย่างที่มีผลต่อการเรียนรู้ของการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุ การเรียนรู้ได้ดีจะส่งผลให้สมการถดถอยมีความสามารถในการคำนวณหาค่าตอบได้แม่นยำขึ้น ดังนั้นก่อนทำการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุ จึงต้องมีการพิจารณาถึงองค์ประกอบที่มีผลต่อการเรียนรู้และประสิทธิภาพของสมการถดถอย ดังนี้

#### 3.5.1.1 การตรวจสอบการแจกแจงข้อมูล

การตรวจสอบการแจกแจงข้อมูลว่ามีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ เป็นองค์ประกอบสำคัญที่มีผลต่อการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุ ซึ่งในปริยญาณิพนธ์นี้จะใช้วิธีการตรวจสอบการแจกแจงข้อมูลซึ่งแบ่งออกเป็น 3 วิธีดังนี้

การตรวจสอบโดยใช้กราฟ กราฟที่ใช้ในการตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลคือ

1. การตรวจสอบการกระจายตัวปกติ (Normal Distribution) ของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) จากการพิจารณาการกระจายของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) ซึ่งใช้ในการทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Plot) โดยการนำข้อมูลมาสร้างแผนภูมิ ค่าส่วนตกค้าง (Residuals) มีการกระจายตัวเป็นเส้นตรงทำให้ประมาณได้ว่า ค่าส่วนตกค้าง (Residuals) มีการแจกแจงปกติ

2. การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) ของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) สามารถพิจารณาโดยการสร้างแผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) โดยการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) ที่มีรูปแบบที่เป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน หรือไม่สามารประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้แสดงว่าส่วนตกค้าง (Residuals) มีความเป็นอิสระต่อกัน (Independent)

3. การตรวจสอบความเสถียรของ  $\sigma^2$  (Variance Stability) สามารถพิจารณาจากแผนภูมิการกระจาย ซึ่งเป็นแผนภูมิการกระจายของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับ Fitted Value ถ้า  $\sigma^2$  ของค่าส่วนตกค้าง  $\sigma^2$  มีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละตำแหน่ง และไม่พบว่ารูปแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) มีลักษณะเป็นแนวโน้มจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน

### 3.5.1.2 จำนวนตัวแปรอิสระแบบตัวแปรตาม

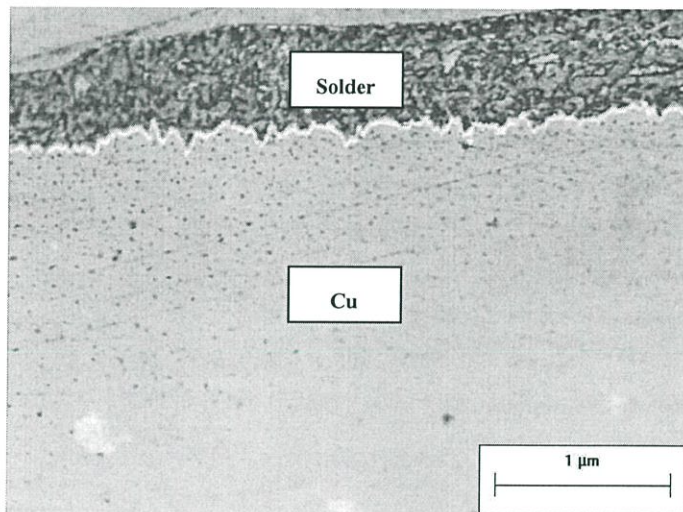
โครงการวิจัยนี้ได้กำหนดจำนวนตัวแปรอิสระ 2 ปัจจัย จากปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะของชิ้นงาน คือ เวลาและอุณหภูมิ ส่วนตัวแปรตามจะกำหนดจากค่าผลลัพธ์ที่ต้องการให้สมการถอดออกจำนวนออกมา คือ ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

#### 4.1 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

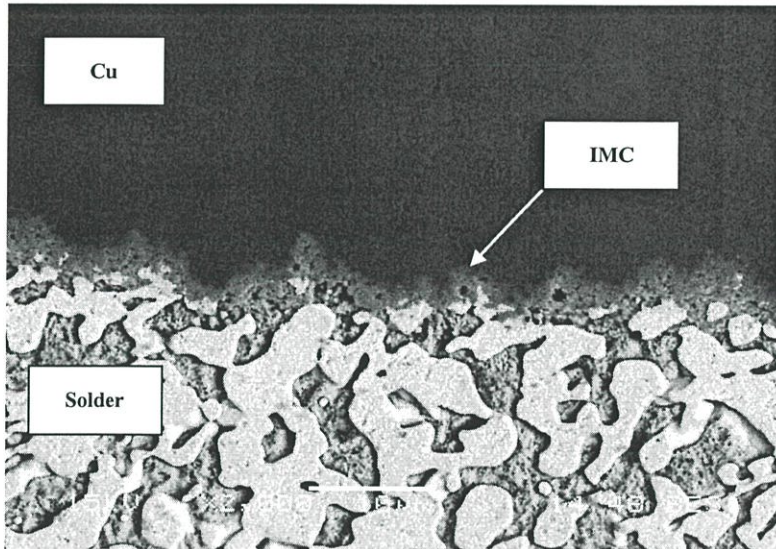
จากการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของการบัดกรีด้วยวิธีการจุ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับโลหะพื้นรองทองแดงโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงแสดงได้ดังภาพที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคที่ กำลังขยาย 500 เท่า ของการบัดกรีที่อุณหภูมิ 210°C เป็นเวลา 5 วินาที หลังการบัดกรี ปรากฏชั้น สารประกอบเชิงโลหะระหว่างทองแดงและโลหะบัดกรี โดยชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่ปรากฏจากการ บัดกรีมีชั้นความหนาแน่นน้อยมากจึงมองเห็นไม่ชัดเจน เนื่องจากเป็นชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่มีความหนา ในระดับไมโครเมตร เมื่อนำตัวอย่างที่ผ่านการบัดกรีมาทำการตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่ อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ชั้นสารประกอบเชิง โลหะระหว่างพื้นผิวปรากฏขึ้นชัดเจนมากขึ้น



ภาพที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีแบบจุ่มที่อุณหภูมิ 210°C เป็นเวลา 5 วินาที

#### 4.2 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

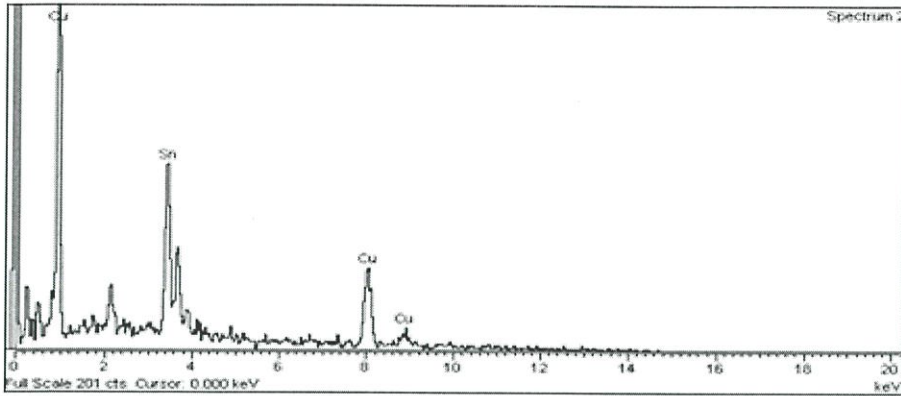
จากการตรวจสอบลักษณะของรอยต่อบัดกรีและโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดยี่ห้อ JEOL- JSM6380LV ตรวจสอบชิ้นตัวอย่างหลังการบัดกรีแบบจุ่มที่อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกันได้โครงสร้างจุลภาคของบริเวณรอยบัดกรีดังแสดงในภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรี วิเคราะห์โดยใช้รูปแบบ Backscatter

ภาพที่ 4.2 แสดงโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 2,000 เท่าของรอยต่อบัดกรี Sn-58Bi กับโลหะพื้นรองทองแดง บัดกรีโดยวิธีการจุ่มที่อุณหภูมิ 210°C เป็นเวลา 25 วินาที ในการบัดกรีด้วยวิธีการจุ่มทองแดงลงในโลหะบัดกรีเหลวที่มีจุดหลอมเหลวประมาณ 138°C เมื่อทองแดงสัมผัสกับโลหะบัดกรีเหลว ทำให้เกิดการแพร่ของอะตอมอย่างรวดเร็ว และเกิดการรวมตัวเป็นชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

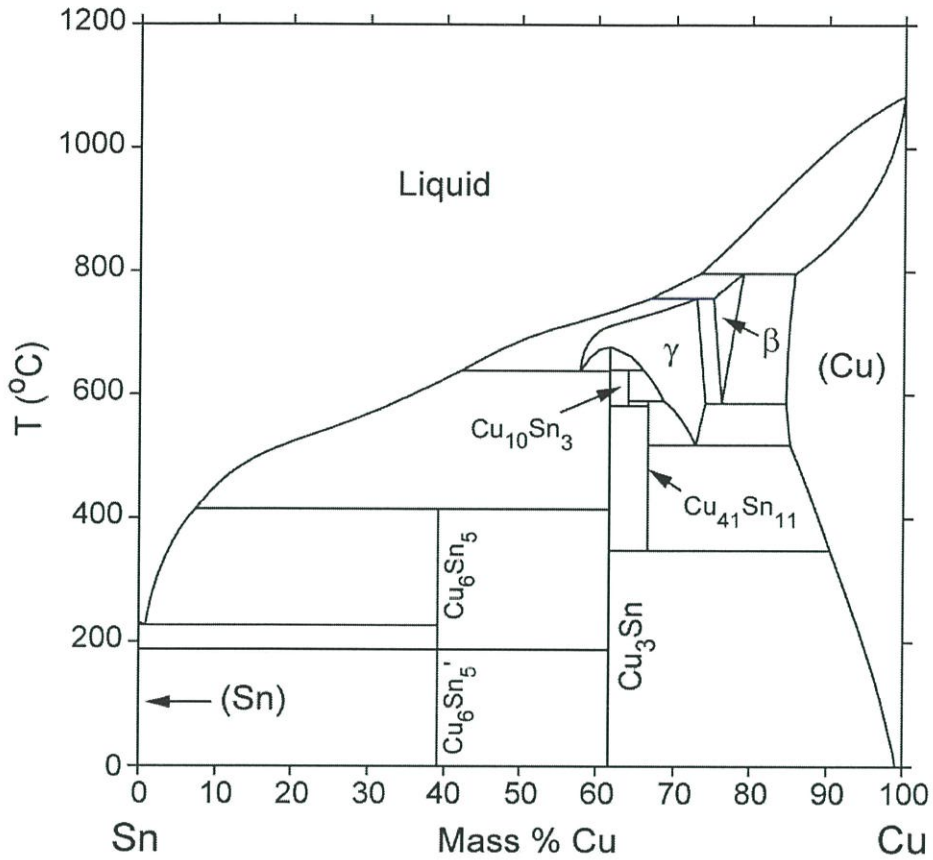
โดยพื้นที่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะบัดกรีและโลหะพื้นจะปรากฏเป็นส่วนที่ตรวจสอบจากด้านบน (Top View) ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะแสดงได้ดังภาพที่ 4.3 ได้จากการตรวจสอบโดยใช้รูปแบบ Backscatter จากการตรวจสอบจากด้านบน ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้ EDX เพื่อระบุองค์ประกอบทางเคมีสำหรับชั้นสารประกอบเชิงโลหะในภาพที่ 4.3 มีปริมาณ 57.29 wt% Cu และ 42.71 wt% Sn ดังแสดงในภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของชั้น  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$

#### 4.3 ชาติและเฟสของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

จากการส่องกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดด้วยวิธี Backscatter ที่กำลังขยาย 6,000 เท่า และทำการสำรวจบริเวณรอยต่อบัดกรี ด้วยวิธีการบัดกรีแบบจุ่มที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ และทำการใช้ฟังก์ชัน EDX ทำให้ค้นพบชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นเป็นชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เป็นสารประกอบของ  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  หรือที่เรียกว่า  $\eta$ -Phase (Eta Phase) โดยดังแสดงจากเฟสไดอะแกรมในภาพที่ 4.4 เกิดที่ระหว่างพื้นผิวโลหะบัดกรีและโลหะพื้นทองแดง (Solder/ $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ /Cu)



ภาพที่ 4.4 เฟสไดอะแกรม ของ Cu-Sn

#### 4.4 ค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

จากการศึกษาและการเก็บข้อมูลจากชิ้นตัวอย่างจากการบัดกรีแบบจุ่ม ด้วยโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับโลหะ พื้นรองทองแดง ที่อุณหภูมิ  $170^{\circ}\text{C}$ ,  $190^{\circ}\text{C}$  และ  $210^{\circ}\text{C}$  แต่ละอุณหภูมิใช้เวลาในการจุ่ม 5, 15 และ 25 วินาทีตามลำดับ

โดยได้ผลการทดลองเป็นความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความหนาเฉลี่ยของชั้นสารเชิงประกอบที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

Factor		Thickness ( $\mu\text{m}$ )		Phase
Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )	Time (sec)	Replicate 1	Replicate 2	
170	5	0.211	0.219	$\text{Cu}_6\text{Sn}_5$
170	15	0.248	0.249	$\text{Cu}_6\text{Sn}_5$
170	25	0.277	0.272	$\text{Cu}_6\text{Sn}_5$
190	5	0.344	0.351	$\text{Cu}_6\text{Sn}_5$
190	15	0.375	0.379	$\text{Cu}_6\text{Sn}_5$
190	25	0.416	0.417	$\text{Cu}_6\text{Sn}_5$
210	5	0.426	0.434	$\text{Cu}_6\text{Sn}_5$
210	15	0.473	0.471	$\text{Cu}_6\text{Sn}_5$
210	25	0.519	0.516	$\text{Cu}_6\text{Sn}_5$

#### 4.5 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเชิงถดถอย

ทำการสร้างสมการถดถอยโดยใช้ โปรแกรม Minitab 16 โดยใช้การออกแบบ แบบสามระดับ โดยใช้คำสั่ง Analyze Response Surface Design โดยเลือกแบบทอมแบบ Full Quadratic สามารถแสดงผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสามระดับ

Term	Coef	SE Coef	T	P-Value
Constant	0.029500	0.011210	2.632	0.022
Temp	0.182583	0.008341	21.889	0.000
Time	0.018000	0.008341	2.158	0.049
Temp* Temp	-0.020750	0.001948	-10.651	0.000
Time* Time	0.001000	0.001948	0.513	0.617
Temp* Time	0.007000	0.001378	5.082	0.000

โดยมีสมการความถดถอยที่ได้มีค่า  $R\text{-Sq} = 99.89\%$  และ  $R\text{-Sq} (\text{adj}) = 99.85\%$  จากตารางที่ 4.2 พบว่า ปัจจัยหลัก (Main Effect) มีผลต่อค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะอย่างมีนัยสำคัญ ( $P\text{-Value} < 0.05$ ) และเมื่อทำการพิจารณาความสัมพันธ์ของอิทธิพลร่วม 2 ปัจจัยในตารางที่ 4.2 พบว่าอิทธิพลร่วมของอุณหภูมิและเวลาในการบัดกรีมีผลต่อค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะอย่างมี

นัยสำคัญ แต่พจน์ของเวลายกกำลังสองไม่มีผลต่อค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ เนื่องจากค่า P-Value >0.05 ดังนั้นจึงทำการตัดพจน์ของเวลายกกำลังสองออกจากสมการ ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนใหม่อีกครั้ง โดยการเลือกรูปแบบทอมแบบ Full Quadratic โดยตัดพจน์ของเวลายกกำลังสองออกจากสมการได้ผลดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสามระดับ

Term	Coef	SE Coef	T	P-Value
Constant	0.026167	0.008875	2.948	0.011
Temp	0.182583	0.008102	22.537	<0.001
Time	0.022000	0.002890	7.612	<0.001
Temp* Temp	-0.020750	0.001892	-10.967	<0.001
Temp* Time	0.007000	0.001338	5.232	<0.001

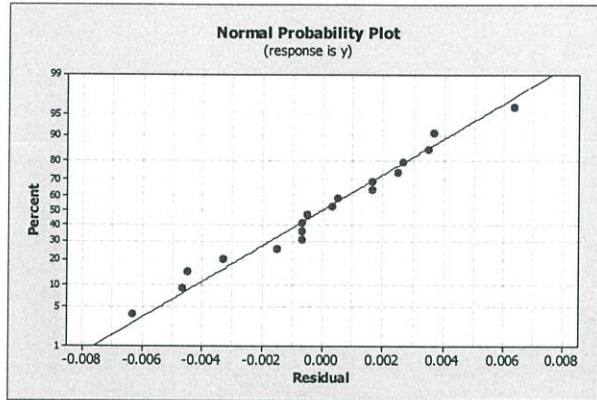
โดยมีความสัมพันธ์ของสมการความถดถอย  $R-Sq = 99.89\%$  และ  $R-Sq (adj) = 99.86\%$  จากตารางที่ 4.3 พบว่าหลังจากตัดพจน์ของยกเวลายกกำลังสองออกจากสมการ ค่าของ P-Value ของแต่ละพจน์มีค่าลดลง และมีผลต่อค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) ทุกพจน์ สามารถเขียนแบบจำลองสมการถดถอยที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆที่มีอิทธิพลต่อชั้นสารประกอบเชิงโลหะได้ดังนี้

$$y = 0.026167 + 0.182583x_1 + 0.022000 x_2 - 0.020750x_1^2 + 0.007000x_1x_2$$

เมื่อ  $y$  คือ ค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ( $\mu\text{m}$ )  $x_1$  คือ อุณหภูมิในการบัดกรี ( $^{\circ}\text{C}$ )  $x_2$  คือ เวลาในการบัดกรี (s) และเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R-sq$  และ  $R-sq(adj)$ ) ซึ่งเป็นค่าวัดความเหมาะสมของสมการพบว่ามีค่า  $R-sq (adj)$  เท่ากับ 99.86% หมายความว่าสมการถดถอยที่ประมาณเหมาะสมกับข้อมูล จากนั้นทำการตรวจสอบ การแจกแจงข้อมูลว่ามีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ เป็นองค์ประกอบสำคัญที่มีผลต่อการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุ ซึ่งจะใช้วิธีการตรวจสอบค่าส่วนตกค้าง (Residuals) ดังนี้

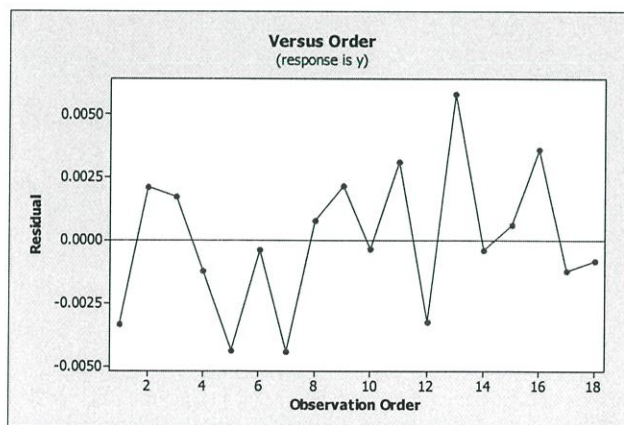
1. การตรวจสอบการกระจายตัวปกติ (Normal Distribution) ของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) จากการพิจารณา การกระจายของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) ซึ่งใช้ในการทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Plot) โดยการนำข้อมูลจากตารางที่ 4.1 มาสร้างแผนภูมิดังภาพที่ 4.5 ค่าส่วนตกค้าง

(Residuals) มีการกระจายตัวเป็นเส้นตรงทำให้ประมาณได้ว่า ค่าส่วนตกค้าง (Residuals) มีการแจกแจงปกติ



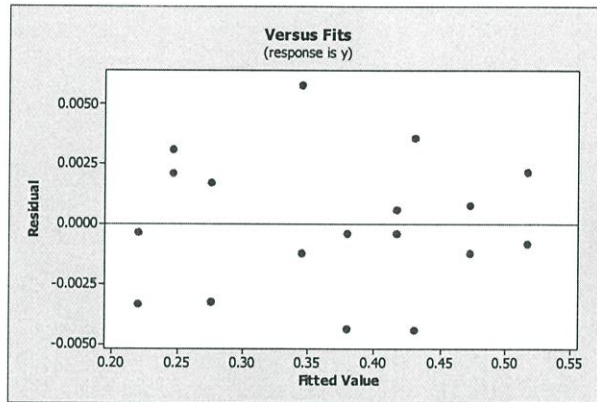
ภาพที่ 4.5 การกระจายแบบปกติของค่า Residual ( $3^k$  Factorial Design)

2. การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) ของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) สามารถพิจารณาโดยการสร้างแผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) จากตารางที่ 4.1 สร้างแผนภูมิดังภาพที่ 4.6 โดยการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) ที่มีรูปแบบที่เป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน หรือไม่ สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้แสดงว่าส่วนตกค้าง (Residuals) มีความเป็นอิสระต่อกัน (Independent)



ภาพที่ 4.6 การกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) เทียบกับ Observation ( $3^k$  Factorial Design)

3. การตรวจสอบความเสถียรของ  $\sigma^2$  (Variance Stability) สามารถพิจารณาจากแผนภูมิการกระจาย โดยการนำข้อมูลจากตารางที่ 4.1 มาสร้างแผนภูมิดังภาพที่ 4.7 เป็นแผนภูมิการกระจายของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับ Fitted Value  $\sigma^2$  ของค่าส่วนตกค้าง  $\sigma^2$  มีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละตำแหน่งและไม่พบว่ารูปแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) มีลักษณะเป็นแนวโน้มจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน



ภาพที่ 4.7 การกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) เทียบกับ Fitted Value ( $3^k$  Factorial Design)

หลังจากตรวจสอบเงื่อนไขเบื้องต้นของการแจกแจงของข้อมูลพบว่า จากกราฟ Normal Probability Plot, Versus Fits และ Versus Order ค่าความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติทั้งหมด และเพื่อเป็นการทดสอบความแม่นยำในการทำนายของแบบจำลองสมการถดถอย จึงทำการบัดกรีที่อุณหภูมิ  $180^{\circ}\text{C}$  และ  $200^{\circ}\text{C}$  ด้วยเวลา 5, 15 และ 25 วินาที มาทดสอบแบบจำลอง และได้ผลการทดสอบแบบจำลองสมการถดถอยดังแสดงในตารางที่ 4.4 จากผลการทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองสมการถดถอยที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ พบว่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนในการทำนายมีค่าเท่ากับ 1.83% แสดงว่าสมการที่สร้างขึ้นมีความแม่นยำในการทำนายเป็นอย่างดี

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแบบจำลองสมการถดถอย

ปัจจัย		Thickness ( $\mu\text{m}$ )		
Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	Time (sec)	ทดลอง	ทำนาย	%Error
180	5	0.292	0.286	2.05
180	15	0.325	0.318	2.15
180	25	0.357	0.351	1.68
200	5	0.385	0.392	1.82
200	15	0.441	0.432	2.04
200	25	0.477	0.471	1.26

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

##### 5.1.1 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

จากการศึกษากลไกการเติบโตและเปลี่ยนแปลงของชั้นประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรีชนิด Sn-58Bi กับแผ่นรองทองแดง สามารถสรุปผลได้ว่า หลังการจุ่มแผ่นทองแดงลงในโลหะบัดกรีเหลวที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าที่อุณหภูมิ 170°C, 190°C และ 210°C ที่เวลา 5, 15 และ 25 วินาที จะเกิดสารประกอบเชิงโลหะ  $Cu_6Sn_5$  ขึ้นที่บริเวณรอยต่อในทุกกรณี โดยไม่พบเฟสอื่นๆที่เป็นสารประกอบเชิงโลหะระหว่าง Cu และ Sn โดยชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นจะมีความหนาเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิหรือเวลาในการบัดกรี การเพิ่มความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจะเป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับเวลาในการบัดกรี และเป็นแบบโพลิโนเมียลกำลังสองกับอุณหภูมิในการบัดกรี

##### 5.1.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากการศึกษารูปแบบการเจริญเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะเทียบกับเวลาและอุณหภูมิในการบัดกรี ทำให้ทราบว่าเป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นและแบบโพลิโนเมียลกำลังสอง ดังนั้นจึงนำการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุมาใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อรวมความสัมพันธ์ทั้งสองแบบเข้าด้วยกัน ในการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุจะเลือกพิจารณารูปแบบความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระและตัวแปรตามโดยใช้รูปแบบความสัมพันธ์แบบควอดราติกเต็มรูป (Full Quadratic) แล้วพิจารณาค่าสถิติทดสอบ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และผลของการตรวจสอบเงื่อนไขเกี่ยวกับความคลาดเคลื่อนต่างๆ โดยใช้โปรแกรมทางสถิติในการวิเคราะห์ข้อมูล (Minitab 16) โดยได้สมการถดถอยเชิงพหุในการประมาณค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะดังนี้

$$y = 0.026167 + 0.182583x_1 + 0.022x_2 - 0.02075x_1^2 + 0.007x_1x_2$$

เมื่อ  $y$  คือ ค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ( $\mu\text{m}$ )  $x_1$  คือ อุณหภูมิในการบัดกรี ( $^{\circ}\text{C}$ ) และ  $x_2$  คือ เวลาในการบัดกรี (s) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ *adjusted R<sup>2</sup>* เท่ากับ 99.86% และเพื่อเป็นการทดสอบความแม่นยำในการทำนายของแบบจำลองสมการถดถอย จึงทำการบัดกรีที่อุณหภูมิ 180 $^{\circ}\text{C}$  และ 200 $^{\circ}\text{C}$  ด้วยเวลา 5, 15 และ 25 วินาที มาทดสอบแบบจำลอง และพบว่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนในการทำนายมีค่าเท่ากับ 1.83% แสดงว่าสมการที่สร้างขึ้นมีความแม่นยำในการทำนายเป็นอย่างดี

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรทำการศึกษาที่ระยะเวลาการบัดกรีที่นานขึ้น เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพฤติกรรมในการเจริญเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ เนื่องจากผลการวิจัยที่ได้พบว่าพฤติกรรมการเจริญเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในช่วงระยะเวลาการบัดกรี 5-25 วินาที เป็นการเจริญเติบโตแบบ Linear kinetics ซึ่งมีค่า Growth exponent ตามกฎ Power law เท่ากับ 1 ซึ่งแตกต่างจากค่า Growth exponent ที่พบโดยทั่วไป ที่มีค่าเท่ากับ 1/3 หรือ 1/2 ดังนั้นจึงควรจะทำการศึกษาว่า การเปลี่ยนแปลงของพฤติกรรมในการเจริญเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะเมื่อผ่านการเวลาการบัดกรีที่นานขึ้น จะมีลำดับการเปลี่ยนแปลงค่า Growth exponent อย่างไร

## เอกสารอ้างอิง

- [1] [www.thaigov.go.th](http://www.thaigov.go.th)
- [2] Abtew, M., Selvaduray, G., 2000, "Lead-free solders in microelectronics," *Materials Science and Engineering R*, Vol.27, pp:95-141.
- [3] Tu, K.N., 2007, *Solder Joint Technology*, Springer Series in Materials Science.
- [4] Ma, X., Wang, F., Qian, Y., Yoshida, F., 2003, "Development of Cu-Sn intermetallic compound at Pb-free solder/Cu joint interface," *Journal of Material Letters*, Vol.57, pp:3361-3365.
- [5] Rizvi, M.J., Bailey, C., Chan, Y., Islam, M.N., Lu, H., 2007, "Effect of adding 0.3 wt% Ni into Sn 0.7wt% Cu solder Part II: Growth of intermetallic layer with Cu during wetting and aging," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol.438, pp:122-128.
- [6] Zbrzezny, A.R., Saugovsky, P., Perovic, D.D., 2007, "Impact of board and component metallizations on microstructure and reliability of lead-free solder joints," *Microelectronics Reliability*, Vol.47, pp:2205-2214.
- [7] Limaye, P., Vandavelde, B., Labie, R., Vandepitte, D., Valinden, B., 2008, "Influence of intermetallic properties on reliability of lead-free flip-chip solder joints," *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, Vol.31, pp:51-57.
- [8] Kim, K.S., Huh, S.H., Sukanuma, K., 2003, "Effect of intermetallic compounds on properties of Sn-Ag-Cu lead-free soldered joints," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol.352, pp:226-236.
- [9] Yoon, J.W., Jung, S.B., 2003, "Investigation of interfacial reactions between Sn-5Bi solder and Cu substrate," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol.359, pp:202-208.
- [10] Chew, K.H., Pang, J.H.L., 2005, "Impact of drop-in lead free solders on microelectronics packaging," *Electronics Packaging Technology Conference*, pp:451-454.
- [11] Amagai, M., Toyoda, Y., Ohnishi, T., Akita, S., 2004, "High drop test reliability: Lead-free solders," *Electronic Components and Technology Conference*, pp:1304-1309.
- [12] Bath, J., 2010, *Lead-Free Soldering*, Springer.
- [13] *Test Procedures for Developing Solder Data*, National Institute of Standards and Technology, USA.
- [14] Yu, D.Q., Wu, C.M.L., Law, C.M.T., Wang, L., Lai, J.K.L., 2005, "Intermetallic compounds growth between Sn-3.5Ag lead-free solder and Cu substrate by dipping method," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol.392, pp:192-199.

- [15] Ma, X., Qian, Y., Yoshida, F., 2002, "Effect of La on the Cu-Sn intermetallic compound (IMC) growth and solder joint reliability," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol.334, pp:224-227.
- [16] Ghosh, G., 2000, "Interfacial microstructure and the kinetics of interfacial reaction in diffusion couples between Sn-Pb solder and Cu/Ni/Pd metallization," *Acta Materialia*, Vol.48, pp:3719-3738.
- [17] Schaefer, M., Fournelle, R.A., Liang, J., 1998, "Theory for intermetallic phase growth between Cu and liquid Sn-Pb solder based on grain boundary diffusion control," *Journal of Electronic Materials*, Vol.27, pp:1167-1176.
- [18] Kim, H.K., Tu, K.N., 1996, "Kinetic analysis of the soldering reaction between eutectic SnPb alloy and Cu accompanied by ripening," *Physics Review B*, Vol.53, pp:16027-16034.
- [19] Mookam, N., Kanlayasiri, K., 2012, "Evolution of the intermetallic compounds found between Sn-0.3Ag-0.7Cu low-silver, lead-free solder and Cu substrate during thermal aging," *Journal of Materials Science and Technology*, Vol.28, pp:53-59.
- [20] Sun, P., Andersson, C., Wei, X., Cheng, Z., Shangguan, D., Liu, J., 2006, "High temperature aging study of intermetallic compound formation of Sn-3.5Ag and Sn-4.0Ag-0.5Cu solders on electroless Ni(P) metallization," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol.425, pp:191-199.
- [21] Yoon, J.W., Kim, S.W., Jung, S.B., 2004, "Effect of reflow time on interfacial reaction and shear strength of Sn-0.7Cu solder/Cu and electroless Ni-P BGA joints," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol.385, pp:192-198.
- [22] Mookam, N., Kanlayasiri, K., 2011, "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*, Vol.509, pp:6276-6279.
- [23] Nagaoka, T., Morisada, Y., Fukusumi, M., Takemoto, T., 2011, "Selection of soldering temperature for ultrasonic-assisted soldering of 5056 aluminum alloy using Zn-Al system solders," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.211, pp:154-1539.
- [24] Lin, J.T., Bhattacharyya, D., Kecman, V., 2003, "Multiple regression and neural networks analyses in composites machining," *Composites Science and Technology*, Vol.63, pp:539-548.
- [25] Korkut, I., Acir, A., Boy, M., 2011, "Application of regression and artificial neural network analysis in modeling of tool-chip interface temperature in machining," *Expert Systems with Applications*, Vol.38, pp:11651-11656.
- [25] Lee, J., Um, K., 2000, "A comparison in back-bead prediction of gas metal arc welding using multiple regression analysis and artificial neural network," *Optics and Lasers in Engineering*, Vol.34, pp:149-158.

[27] Kanlayasiri, K., 2008, "Prediction of weld geometry using artificial neural networks and multiple regression technique," First Regional Conference in Manufacturing Engineering, November 24-25, 2008, Manila, Philippines.

[28] Ren, F., Case, E.D., Timm, E.J., and Schock, H.J., 2008, "Hardness as a function of composition for n-type LAST thermoelectric material," Journal of Alloys and Compounds, Vol.455, pp:340-345.

## ประวัตินักวิจัย

### ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล            วรรณชัย กัลยาศิริ

ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์

### ประวัติการศึกษา

วุฒิการศึกษา	สาขาวิชา	สถาบัน	ปีที่สำเร็จ
Ph.D.	Industrial Engineering Major: Manufacturing Engineering Minor: Materials Science	Oregon State University, USA.	2546
M.Eng	Industrial Engineering	Lehigh University, USA.	2541
วศป.	วิศวกรรมเครื่องกล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2536

### สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

- 1) Joining of Materials (Soldering and Brazing)
- 2) Electric-Discharge Machining

### รางวัลด้านวิชาการ/ด้านวิจัย/งานสร้างสรรค์ (ด้านศิลปะ หรืออื่นๆ) ที่ได้รับ

ปี พ.ศ.	ชื่อรางวัล	สถาบันที่ให้
2555	รางวัลชมเชย ผลงานวิจัยสาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
2552	รางวัลชนะเลิศ บทความดีเด่น ประเภทการวิจัยพื้นฐาน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

### ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2555	ทุนงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555	สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)
2554	ทุนงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2554	สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)
2553	ทุนงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2553	สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)
2552	ทุนงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2552	สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)
2551	ทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของ อาจารย์รุ่นใหม่	สกอ. และ สกว.
2539	ทุนพัฒนาอาจารย์ เพื่อศึกษาต่อในระดับปริญญาโท-เอก ในต่างประเทศ	ทบวงมหาวิทยาลัย

### ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

Kanlayasiri K, Jattakul P. Simultaneous optimization of dimensional accuracy and surface roughness for finishing cut of wire-EDMed K460 tool steel. *Precision Engineering*. 2013; 37: 556-561.

Mookam N, Kanlayasiri K. Evolution of the intermetallic compounds found 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.

Mookam N, 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.

Kanlayasiri K, Ariga T. Influence of thermal aging on microhardness and microstructure of Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn lead-free solders. *Journal of Alloys and Compounds*. 2010; 504: L5-L9.

Kanlayasiri K, Mongkolwongrojn M, Ariga T. Influence of indium addition on characteristics of Sn-0.3Ag-0.7Cu solder alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2009; 485: 225-230.

Kanlayasiri K, Boonmung S. Effects of wire-EDM machining variables on surface roughness of newly developed DC53 die steel: Design of experiments and regression model. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007; 192-193: 459-464.

Boonmung S, Chomtee B, Kanlayasiri K. Evaluation of artificial neural networks for pineapple grading. *Journal of Texture Studies*. 2006; 37: 568-579.