

การออกแบบและพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิดใหม่



ฉ.พ.
ว. 341 ก
2550

เลขที่.....
 เลขทะเบียน..... **83164**
 วัน,เดือน,ปี..... - 6 ส.ค. 2551

b.....	11a60b1a
i.....	

ปริญญาโท เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
 สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**DESIGN AND DEVELOPMENT OF
A NEW LEAD FREE SOLDER ALLOY**



MR.TITIPHON LOVHAVATTANAVANISH

MR.PANASCHAI ARUNSOMSIRI

MR.PHINYAWAT THUMMANON

MR.AEGASIT EWPUN

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2007**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาโท

หัวข้อปริญญาโท

การออกแบบและพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิดใหม่
DESIGN AND DEVELOPMENT OF A NEW LEAD FREE SOLDER
ALLOY

นักศึกษา

นายฐิติพล เลาหวัฒนาวณิช	รหัสประจำตัว	47010205
นายพนัสชัย อรุณสมศิริ	รหัสประจำตัว	47010482
นายภิญญวัฒน์ ทูมมานนท์	รหัสประจำตัว	47010570
นายเอกสิทธิ์ เอียวพันธ์	รหัสประจำตัว	47011016

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท

(ผศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ)

(ดร.อนิรุท ไชยจรรวม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การออกแบบและพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิดใหม่		
นักศึกษา	นายฐิติพล เกฬาวัฒนาวิชัย	รหัสประจำตัว	47010205
	นายพนัสชัย อรุณสมศิริ	รหัสประจำตัว	47010482
	นายภิญญวัฒน์ ทูมมานนท์	รหัสประจำตัว	47010570
	นายเอกสิทธิ์ เอียวพันธ์	รหัสประจำตัว	47011016
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ		
	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง		
ปีการศึกษา	2550		
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	ผศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ		
	ดร.อนิรุท ไชยจรรูมิช		

บทคัดย่อ

โครงการปริญญานิพนธ์นี้จัดทำขึ้นเพื่อออกแบบและพัฒนาส่วนผสมของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว โดยเลือกปัจจัยที่ใช้พิจารณาเพียงสองปัจจัย คือ จุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรี และต้นทุนในการผลิตซึ่งคิดจากราคาของธาตุแต่ละชนิดที่นำมาเป็นส่วนผสมในสูตรนั้น ในการทดลองได้ใช้ทฤษฎี Mixture ในการออกแบบการทดลองโดยใช้โปรแกรม Design Expert ช่วยในการทดลองหาส่วนผสมและวิเคราะห์ผล ในการทดลองได้เลือกใช้ธาตุสามธาตุโดยเลือก ดีบุก (Sn) เป็นส่วนผสมพื้นฐานเพื่อเพิ่มความสามารถในการบัดกรี ส่วนผสมที่สองคือ บิสมัท (Bi) เพื่อช่วยลดจุดหลอมเหลวและเพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน และ ทองแดง (Cu) เป็นส่วนผสมที่สามเพื่อเพิ่มความต้านทานในการกัดกร่อนและความแข็งแรงของรอยเชื่อม

จากการศึกษาพบว่าโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ได้มีส่วนผสมอยู่ที่ 95.18%Sn, 4.21%Bi และ 0.16%Cu โดยมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 221.22 องศาเซลเซียส และมีต้นทุนอยู่ที่ 17.57 US\$/kg

Thesis Title Design and Development of a New Lead Free Solder Alloy
Student Mr.Titiphon Lovhavattanavanish
Mr.Panaschai Arunsomsiri
Mr.Phinyawat Thummanon
Mr.Aegasit Ewpun
Degree Bachelor of Engineering in Industrial Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year 2007
Thesis Advisor Asst.Prof.Dr.Kannachai Kanlayasiri
Dr.Anirut Chaijaruwanich

ABSTRACT

The purpose of this study is to design and development a new lead free solder alloy. In this study 2 factor, melting point and cost of lead free solder alloy, are selected to design and development a new lead free solder alloy. Also, Mixture theory and Design Expert software are applied in this study. Since Tin (Sn) can improve the quality of soldering, Bismuth (Bi) can decrease melting point and Copper (Cu) improve corrosion resistance. During design process, three basic elements (Tin, bismuth and copper) are used to be the main mixture of lead free solder alloy.

Finally the best mixture of three basic elements for a new lead free solder alloy should be 95.18%Sn, 4.21%Bi and 0.16%Cu. The melting point of this new lead free solder alloy is around 221.22°C and the cost is 17.57 US\$/kg .

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การออกแบบและพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิดใหม่ สามารถสำเร็จ
ถูกลงไปได้ด้วยดี กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลทุกคนที่มีส่วนเกี่ยวข้องส่งผลให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้
เสร็จสมบูรณ์

ผศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ
เป็นอย่างสูง สำหรับการให้โอกาสในการศึกษาปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือ
และความเอาใจใส่ในทุกๆ ด้านที่ผ่านมา

ดร.อนิรุท ไชยจารุวิช อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็น
อย่างสูง สำหรับการให้โอกาสในการศึกษาปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือและ
ความเอาใจใส่ในทุกๆ ด้านที่ผ่านมา

ดร.ศกนธ์ คล่องบุญจิต อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ
เป็นอย่างสูง สำหรับการให้ความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือและความเอาใจใส่ในทุกๆ ด้านที่ผ่านมา

อาจารย์กิตติวัฒน์ สิริเกษมสุข อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมกลุ่มผู้วิจัยขอกราบ
ขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับการให้ความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือและความเอาใจใส่ในทุกๆ ด้านที่ผ่านมา
ขอขอบคุณเพื่อนทุกคนสำหรับความช่วยเหลือจนทำให้ปริญญาานิพนธ์สำเร็จถูกลงไปได้ด้วยดี และ
คอยเป็นกำลังที่คิดตลอดมา

นายฐิติพล เลาหวัฒนาวณิชย์
นายพนัสชัย อรุณสมศิริ
นายภิญญวัฒน์ ทูมมานนท์
นายเอกสิทธิ์ เอียวพันธ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 สารสำคัญของระเบียบ Waste Electrical and Electronic Equipment: WEEE.....	3
2.1.1 ประเด็นสำคัญของระเบียบ WEEE ที่ส่งผลกระทบต่อผู้ผลิตไทย.....	4
2.2 สารสำคัญของระเบียบ The Restriction of the Use of Certain Hazardous Substance in Electronic Equipment: RoHS.....	6
2.3 สินค้าที่ RoHS ครอบคลุม.....	7
2.4 สารต้องห้ามตามระเบียบ RoHS.....	7
2.5 การใช้งานที่ได้รับการยกเว้น.....	8
2.6 ความเป็นมาในการพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว.....	10
2.7 การเชื่อมโดยใช้ตัวเชื่อมแบบไร้สารตะกั่ว.....	13
2.8 ปัจจัยที่สำคัญในการผลิตโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว.....	13
2.9 การพิจารณาในการเลือกธาตุที่เป็นส่วนผสม.....	14
2.10 รายละเอียดของธาตุ.....	15
2.10.1 โลหะดีบุก (Sn).....	15
2.10.2 โลหะทองแดง (Cu).....	16
2.10.3 โลหะบิสมัท (Bi).....	17
2.11 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment).....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.12 R-Squared.....	18
2.13 การตรวจสอบค่าทางสถิติ.....	20
2.13.1 t-Statistic.....	20
2.13.2 F-Statistic.....	20
2.13.3 หลักการสรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติ.....	20
2.14 Lack of Fit.....	21
2.15 การทดลองแบบผสม (Mixture Design).....	21
2.16 Differential Scanning Calorimetry (DSC).....	22
2.16.1 Heat Flux DSC.....	23
2.16.2 Power Compensation DSC.....	23
2.16.3 DSC ที่ใช้ T-zero Technology.....	24
2.17 Wave Soldering.....	25
2.18 โปรแกรม Design Expert.....	27
2.19 Ternary Phase Diagram.....	29
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	
3.1 ค้นหาข้อมูล.....	30
3.2 เลือกธาตุที่ใช้ในการทำการทดลอง.....	30
3.3 ออกแบบการทดลอง ด้วยโปรแกรม Design Expert.....	30
3.4 ทดสอบหาจุดหลอมเหลวโดยวิธี DCS.....	33
3.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง ด้วย โปรแกรม Design Expert.....	34
3.6 เลือกส่วนผสมที่เหมาะสม.....	38
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	
4.1 เลือกธาตุที่ใช้การผสมโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว.....	39
4.2 พิจารณารูปแบบของสมการ.....	39
4.2.1 Sequential Model Sum of Squares.....	39
4.2.2 Lack of Fit Tests.....	40
4.2.3 Model Summary Statistics.....	41
4.3 กราฟ Residual Plot.....	42

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 สมการทำนายจุดหลอมเหลว.....	48
4.5 กราฟ Ternary Phase.....	48
4.6 ต้นทุนราคาธาตุ.....	49
บทที่ 5 สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน	
5.1 สรุปผลการศึกษา.....	52
หนังสืออ้างอิง	55



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 การนำทรัพยากรกลับมาใช้ใหม่.....	3
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของธาตุ ตะกั่ว (Pb) ดีบุก (Sn) บิสมัท (Bi) ทองแดง (Cu).....	30
ตารางที่ 3.2 ผลการออกแบบการทดลอง.....	32
ตารางที่ 3.3 ผลการทดลองหาจุดหลอมเหลว.....	33
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Sequential Model Sum of Squares.....	40
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Lack of Fit Test.....	40
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Model Summary Statistics.....	41
ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบราคาของแต่ละส่วนผสม.....	51



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โลหะทองแดง.....	15
รูปที่ 2.2 โลหะทองแดง.....	16
รูปที่ 2.3 โลหะบิสมีท.....	17
รูปที่ 2.4 ระบบของ DOE.....	18
รูปที่ 2.5 Heat Flux DSC.....	23
รูปที่ 2.6 การตรวจสอบแบบ DSC ที่ใช้ T-zero Technology.....	24
รูปที่ 2.7 กราฟระหว่างการเคลื่อนที่ของความร้อนกับอุณหภูมิ.....	25
รูปที่ 2.8 การทำงานของเครื่อง Wave soldering.....	26
รูปที่ 2.9 การเกิด Bridge ในกระบวนการ Wave Soldering.....	26
รูปที่ 2.10 กระบวนการของ Wave Soldering.....	26
รูปที่ 2.11 Ternary Phase Diagram.....	29
รูปที่ 3.1 การกำหนดขอบเขตของธาตุ.....	31
รูปที่ 3.2 การกำหนดจุดที่ทำให้การทดลอง.....	31
รูปที่ 3.3 การกำหนดผลตอบสนองที่เราสนใจ.....	32
รูปที่ 3.4 ผลการวิเคราะห์ผลการทดลอง ในแถบ Transform.....	34
รูปที่ 3.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง ในแถบ Fit Summary.....	35
รูปที่ 3.6 ผลการวิเคราะห์ผลการทดลอง ในแถบ Model.....	36
รูปที่ 3.7 ผลการวิเคราะห์ผลการทดลอง ในแถบ ANOVA.....	36
รูปที่ 3.8 ผลการวิเคราะห์ผลการทดลอง ในแถบ Diagnostics.....	37
รูปที่ 3.9 ผลการวิเคราะห์ผลการทดลอง ในแถบ Model Graphs.....	37
รูปที่ 4.1 กราฟ Normality Probability Plot ของสมการรูปแบบ Cubic.....	42
รูปที่ 4.2 กราฟ Residuals Versus Predicted ของสมการรูปแบบ Cubic.....	43
รูปที่ 4.3 รูปที่ 4.3 กราฟ Residuals Versus Run ของสมการรูปแบบ Cubic.....	43
รูปที่ 4.4 กราฟ Residual Versus Sn ของสมการรูปแบบ Cubic.....	44
รูปที่ 4.5 กราฟ Residual Versus Cu ของสมการรูปแบบ Cubic.....	44
รูปที่ 4.6 กราฟ Normality Probability Plot ของสมการรูปแบบ Cubic.....	45
รูปที่ 4.7 กราฟ Outlier ของสมการรูปแบบ Cubic.....	45
รูปที่ 4.8 กราฟ Cook's Distance ของสมการรูปแบบ Cubic.....	46
รูปที่ 4.9 กราฟ Leverage ของสมการรูปแบบ Cubic.....	46
รูปที่ 4.10 กราฟ Actual Versus Predicted ของสมการรูปแบบ Cubic.....	47
รูปที่ 4.11 Box Cox Plot for Power Transforms ของสมการรูปแบบ Cubic.....	47
รูปที่ 4.12 กราฟ Ternary Phase Diagram ระหว่าง Sn-Bi-Cu.....	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.13 รูปขยายจากกราฟ Ternary Phase Diagram ระหว่าง Sn-Bi-Cu.....	49
รูปที่ 4.14 กราฟราคาของ Cu ในปัจจุบัน.....	49
รูปที่ 4.15 กราฟราคาของ Pb ในปัจจุบัน.....	50
รูปที่ 4.16 กราฟราคาของ Ni ในปัจจุบัน.....	50
รูปที่ 4.17 กราฟราคาของ Ag ในปัจจุบัน.....	50
รูปที่ 4.18 กราฟราคาของ Sn ในปัจจุบัน.....	51
รูปที่ 5.1 กราฟ Ternary Phase Diagram ระหว่าง Sn-Bi-Cu.....	53



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีต่างๆ ได้เข้ามามีส่วนร่วมในชีวิตประจำวันมากขึ้น ซึ่งสืบเนื่องมาจากความเจริญก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยี ทำให้ทุกครัวเรือนจำเป็นต้องมีเครื่องอำนวยความสะดวกต่างๆ ไม่มากก็น้อย ทำให้บริษัทต่างๆ เร่งผลิตสินค้าเข้ามาแข่งขันทางการตลาดมากขึ้น ซึ่งส่งผลกระทบต่อให้เกิดปัญหาสภาพแวดล้อมตามมา ในปัจจุบันประเทศต่างๆ จึงให้ความสำคัญกับปัจจัยทางด้านสุขภาพ และสิ่งแวดล้อมที่มีบทบาทต่อโลก ซึ่งสังเกตได้จาก ทางทวีปยุโรปได้ออกระเบียบข้อบังคับต่างๆ เช่น Waste Electrical and Electronic Equipment: WEEE ซึ่งเป็นระเบียบข้อบังคับที่กล่าวถึง การจัดการเศษเหลือทิ้งของผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยผู้ผลิตจะต้องรับผิดชอบค่าใช้จ่ายทั้งหมดเกี่ยวกับการรับคืนหรือกำจัดเศษเหลือทิ้งหรือสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ที่หมดอายุทั้งหมด และ The Restriction of the Use of Certain Hazardous Substance in Electronic Equipment: RoHS ซึ่งเป็นระเบียบข้อบังคับที่กล่าวถึง การจำกัดการใช้สารอันตรายบางชนิดในผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อให้ซากเหลือทิ้งมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด ดังนั้นการที่จะสร้างหรือคิดค้นผลิตภัณฑ์ขึ้นมา จึงควรมีการคำนึงถึงการใช้สารที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้ใช้งาน โดยนำไปใช้ทดแทนสารที่เป็นพิษที่มีอยู่เดิมในผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงการกำจัดและการรีไซเคิลผลิตภัณฑ์ ที่สร้างขึ้นเมื่อหมดอายุการใช้งาน โดยไม่ให้มีสารตกค้างและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม รวมถึงมีค่าใช้จ่ายในการกำจัดและการรีไซเคิลไม่สูงจนเกินไป

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อค้นคว้าส่วนผสมของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิดใหม่โดยใช้วิธีการออกแบบของผสม (Mixture Design)

1.3 ขอบเขต

1. พิจารณาเฉพาะปัจจัยเรื่องจุดหลอมเหลว (Liquidus) ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วและต้นทุนของธาตุที่ใช้ในการผลิต
2. พิจารณาธาตุที่นำมาผสมเพียง 3 ธาตุเท่านั้น อันได้แก่ ดีบุก (Sn) ทองแดง (Cu) และบิสมีท (Bi)
3. ออกแบบการทดลองของผสมโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถพัฒนาส่วนผสมชนิดใหม่ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีคุณสมบัติเหมาะสมทางด้านราคาและจุดหลอมเหลว
2. เพิ่มทางเลือกในการใช้งาน โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว
3. เป็นแนวทางการพัฒนาโลหะที่ใช้ในการบัดกรีไร้สารตะกั่ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 สาระสำคัญของระเบียบ Waste Electrical and Electronic Equipment: WEEE

ระเบียบ WEEE มีวัตถุประสงค์เพื่อวางมาตรการในการป้องกันการเพิ่มปริมาณของซากผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (WEEE) ส่งเสริมการนำชิ้นส่วน/วัสดุกลับคืน (Recovery) และการใช้ซ้ำ/การนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle/reuse) โดยผ่านระบบการรับคืน (Return) และการจัดเก็บรวบรวม (Collection) ของผู้ผลิต และเพื่อลดความเสี่ยงและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอันเกิดจากการกำจัดซาก ระเบียบนี้พัฒนาขึ้น โดยอาศัยหลักความรับผิดชอบของผู้ผลิต (The Principle of Producer Responsibility) โดยสหภาพยุโรปใช้วิธีกำหนดมาตรฐานขั้นต่ำในการจัดการเศษเหลือทิ้งของผลิตภัณฑ์และกำหนดเป้าหมายขั้นต่ำในการ Recovery/Reuse/Recycle และใช้กลไกตลาดเป็นเครื่องมือในการบังคับให้ผู้ผลิตหาวิธีในการจัดการกับซากผลิตภัณฑ์ทั้งหมดอายุ ที่มีประสิทธิภาพและคุ้มค่าที่สุด โดยการกำหนดให้ผู้ผลิตต้องเป็นผู้รับผิดชอบค่าใช้จ่ายในการจัดการทั้งหมด

ระเบียบนี้ครอบคลุมถึงผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 10 กลุ่ม ที่ผลิตขึ้นทั้งก่อนและหลังจากที่ระเบียบนี้จะมีผลบังคับใช้ และใช้กับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับไม่เกิน 1000 โวลต์ หรือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไม่เกิน 1500 โวลต์ ประเภทของผลิตภัณฑ์ทั้ง 10 กลุ่มที่จัดเป็นเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ได้สรุปในตารางที่ 1

ตารางที่ 2.1 การนำทรัพยากรกลับมาใช้ใหม่

กลุ่ม	กลุ่มผลิตภัณฑ์	ทรัพยากรคืนกลับ (Recovery)	วัสดุกลับมาใช้ใหม่ (Reuse/Recycle)
1	เครื่องใช้ขนาดใหญ่ที่ใช้ในครัวเรือน (Large Household Appliances)	80%	75%
2	เครื่องใช้ขนาดเล็กที่ใช้ในครัวเรือน (Small Household Appliances)	70%	50%
3	อุปกรณ์โทรคมนาคม (IT and Telecommunication Equipment)	75%	65%
4	Consumer Equipment เช่น โทรทัศน์ วิทยุ Hi-Fi กล้องวิดีโอ	75%	65%
5	อุปกรณ์ให้แสงสว่าง (Lighting Equipment)	70%	50%

ตารางที่ 2.1 การนำทรัพยากรกลับมาใช้ใหม่

กลุ่ม	กลุ่มผลิตภัณฑ์	ทรัพยากรคืนกลับ (Recovery)	วัสดุกลับมาใช้ใหม่ (Reuse/Recycle)
6	เครื่องมือไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (Electrical and Electronic Tools)	70%	50%
7	ของเล่นเด็ก (Toys) เครื่องเล่นเพื่อความ บันเทิงและเครื่องกีฬา	70%	50%
8	อุปกรณ์การแพทย์	ยังไม่กำหนด	ยังไม่กำหนด
9	เครื่องมือวัดหรือควบคุมต่างๆ (Monitoring and Control Instruments)	70%	50%
10	อุปกรณ์ขายของอัตโนมัติ (Automatic Dispensers)	80%	75%
ซีเอกวีน	Gas Discharge Lamp	0	80%

2.1.1 ประเด็นสำคัญของระเบียบ WEEE ที่ส่งผลกระทบต่อผู้ผลิตไทย

1. ผู้ผลิตซึ่งครอบคลุมทั้งผู้ผลิตสินค้าและผู้นำเข้าสินค้าใน EU ต้องรับผิดชอบของผลิตภัณฑ์ดังกล่าวที่หมดอายุการใช้งานแล้วโดยไม่คิดมูลค่า ไม่ว่าสินค้าดังกล่าวจะถูกจำหน่ายโดยวิธีใด (รวมถึงการจำหน่ายทางอินเทอร์เน็ต)
2. ตั้งแต่วันที่ 31 ธันวาคม 2549 ผู้ผลิตต้องแสดงให้เห็นว่าตนมีขีดความสามารถจัดการกับผลิตภัณฑ์ตามเกณฑ์กำหนด เป้าหมายขั้นต่ำของนำทรัพยากรกลับคืน และการใช้ซ้ำ/การนำกลับมาใช้ใหม่ ตามที่แสดงในตารางที่ 1
3. ผู้ผลิตต้องเป็นผู้รับผิดชอบภาระค่าใช้จ่ายทั้งสิ้นในการจัดการซากผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่การเก็บรวบรวม (Collection) การนำทรัพยากร การปรับสภาพการใช้งานซ้ำ/การนำกลับมาใช้ใหม่ ไปจนถึงการกำจัดเศษเหลือทิ้ง โดยอย่างน้อย กระบวนการจัดการดังกล่าวจะต้องประกอบด้วยขั้นตอนต่อไปนี้

3.1 แยกชิ้นส่วนหรือวัตถุที่มีสารต่อไปนี้จากซากผลิตภัณฑ์ฯ เพื่อนำไปกำจัดอย่างถูกต้อง (การกำจัดต้องเป็นไปตาม EU Directive 75/442/EEC: Article 4)

ตัวเก็บประจุที่มีสาร โพลีคลอริเนท-ไบฟีนิล (Polychlorinated Biphenyl (PCB))

- ชิ้นส่วนที่มีสารปรอท
- แบตเตอรี่
- แผงวงจรไฟฟ้า (Printed Circuit Boards)
- ดับหมึกพิมพ์ ทั้งที่เป็นหมึกเหลว หมึกหลอด (Pasty) รวมทั้งหมึกถั่ว
- พลาสติกที่มี สาร ไบรอมิน เป็นองค์ประกอบ เพื่อหน่วงการติดไฟ
- ของเสียจาก แอสเบตตอส
- หลอดภาพ (Cathode Ray Tube)
- สารคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (สาร CFC), สารไฮโดรคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (สาร HCFC), สารไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (สาร HFC)
- หลอด Gas Discharge Lamps

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จอ LCD ที่มีพื้นที่มากกว่า 100 ตารางเซนติเมตร และจอชนิดที่ใช้ Back Light ชนิด Gas Discharge Lamps
- สายไฟฟ้าที่อยู่ภายนอก (External Electric Cables)
- ชิ้นส่วนที่มี Ceramic Fibers ตามที่ระบุใน EU Directive 67/69/EC
- ชิ้นส่วนที่มีสารกัมมันตภาพรังสี
- ตัวเก็บประจุชนิด Electrolyte ที่มีสารที่นำเป็นห่วง ที่มีขนาดสูงกว่า 25 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่กว่า 25 มิลลิเมตร หรือที่มีปริมาตรระดับเดียวกัน

3.2 แยกชิ้นส่วนต่อไปนี้ออกจากผลิตภัณฑ์ฯ เพื่อทำการกำจัดตามที่ระบุ

- หลอดภาพ (Cathode Ray Tube): ต้องแยกสารเรืองแสงที่เคลือบอยู่ออก
- อุปกรณ์ที่มีสารทำลายชั้นโอโซน หรือมี Global Warming Potential (GWP) สูงกว่า 15 เช่นสารที่มีอยู่ในโฟมและวงจรทำความเย็น
 - i. ต้องแยกแก๊สออกและทำลายอย่างเหมาะสม
 - ii. แก๊สที่ทำลายชั้นโอโซนต้องได้รับการบำบัดตามกฎหมาย EC No. 2037/2000 วันที่ 29 มิ.ย. 2543 เรื่องสารที่ทำลายชั้นโอโซน
- Gas discharge lamps: แยกสารปรอทออก

3.3 ผู้ดำเนินการ จัดการซากผลิตภัณฑ์ฯ และสถานที่จัดการ ต้องมีใบอนุญาตและต้องถูกตรวจสอบทุกปี

4. ตั้งแต่วันที่ 13 สิงหาคม 2548 เป็นต้นไป ผู้ผลิตต้องออกค่าใช้จ่ายในการจัดเก็บ การบำบัด การนำทรัพยากรกลับคืน สำหรับซากสินค้าประเภทเครื่องใช้ไฟฟ้าตามบ้านเรือน และหลังจากวันที่กำหนดนี้ การจะนำสินค้าเข้าสู่ตลาดในประเทศสมาชิกได้ผู้ผลิตต้องแสดงหลักฐานเพื่อประกันการจัดการซากผลิตภัณฑ์ การประกันการจัดการซากผลิตภัณฑ์ฯ อาจเป็นในรูปแบบ การประกันการรีไซเคิล (Recycling Insurance) หรือเงินค้ำประกันก็ได้ (Blocked Bank Account) กรณีสินค้าที่นำเข้าสู่ตลาดก่อนวันที่ 13 สิงหาคม 2548 (Historical Waste) ให้ผู้ผลิตที่อยู่ในตลาดในขณะที่มีค่าใช้จ่ายเกิดขึ้น ร่วมกันรับผิดชอบ ตามสัดส่วนที่เหมาะสม เช่นอาจคิดตามส่วนแบ่งตลาด

5. ผู้ผลิตมีหน้าที่ต้องให้ข้อมูลต่อไปนี้

- 5.1 ขั้นตอนการดำเนินการเมื่อผลิตภัณฑ์หมดอายุแก่ผู้ใช้
- 5.2 วิธีการแยกชิ้นส่วนและข้อมูลรายละเอียดเกี่ยวกับสารอันตรายที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ แก่ผู้ทำการรีไซเคิล
- 5.3 ข้อมูล ขอดขาย ขอดการเก็บคืน และขอดการนำกลับมาใช้ใหม่ แก่รัฐบาล

2.2 สาระสำคัญของระเบียบ The Restriction of the Use of Certain Hazardous Substance in Electronic Equipment: RoHS

ระเบียบ RoHS เป็นระเบียบที่มุ่งเน้นการจำกัดการใช้สารที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมที่ต้นเหตุ โดยจำกัดการใช้สารอันตรายบางประเภทในผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ และทำให้การนำทรัพยากรกลับคืนและการทิ้งซากผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าฯ ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด ระเบียบนี้ครอบคลุมผลิตภัณฑ์เดียวกับ WEEE ยกเว้นเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในกลุ่ม 8 และ 9 (เครื่องมือแพทย์ และเครื่องมือวัดและควบคุม ตามลำดับ) โดยระเบียบนี้เสนอให้ใช้สารอื่นทดแทน สารตะกั่ว สารปรอท สารแคดเมียม สารโครเมียม-เฮกซะวาเลนซ์ (Cr-VI) สารโพลีโบรมินเนท-

ไบฟีนิล (Polybrominated Biphenyls - PBB) และ สารโพลีโบรมินเนท-ไดฟีนิล-อีเทอร์ (PolyBrominated DiphenylEthers -PBDE) ใน ผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าฯ ภายในวันที่ 1 กรกฎาคม 2549 ทั้งนี้ไม่รวมชิ้นส่วนที่นำเข้าตลาดก่อนปี พ.ศ. 2546 แต่มีข้อยกเว้นสารตะกั่ว ปรอท แคดเมียม และ โครเมียม-เฮกซะวาเลนซ์ (Cr-VI) ในผลิตภัณฑ์บางชนิดดังนี้

1. สารปรอทใน Compact Fluorescent Lamps ในปริมาณไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อหลอด
2. สารปรอทในหลอดฟลูออเรสเซนต์ แบบตรงสำหรับใช้งานทั่วไปโดย
 - 2.1 หลอดที่ใช้ Halophosphate ให้มีปรอทได้ไม่เกิน 10 มิลลิกรัมต่อหลอด
 - 2.2 Triphosphate ที่มีช่วงชีวิตปกติ ไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อหลอดและ
 - 2.3 Triphosphate ที่มีช่วงชีวิตยาว ไม่เกิน 8 มิลลิกรัมต่อหลอด
3. สารปรอทในหลอดหลอดฟลูออเรสเซนต์ แบบตรง สำหรับใช้งานพิเศษ
4. สารปรอทในหลอดไฟที่ไม่ได้กล่าวในที่นี้
5. สารตะกั่วที่ผสมในแก้วหลอดภาพ ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ และหลอดฟลูออเรสเซนต์
6. สารตะกั่วที่ใช้ในโลหะผสม
 - 6.1 ในเหล็ก ให้ที่มีปริมาณตะกั่วได้ไม่เกิน 0.35% โดยน้ำหนัก
 - 6.2 ในอลูมิเนียม ให้มีปริมาณตะกั่วได้ไม่เกิน 0.4% โดยน้ำหนัก
 - 6.3 และในทองแดง ให้มีที่มีปริมาณตะกั่วได้ไม่เกิน 4% โดยน้ำหนัก
7. สารตะกั่วในสารบัดกรีชนิดจุดหลอมเหลวสูง ตะกั่วบัดกรีใน เครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย หน่วยเก็บข้อมูล และชุดเก็บข้อมูล (ได้รับการยกเว้นถึงปี ค.ศ. 2010) ตะกั่วบัดกรีในระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับตัวพีซีซึ่ง ให้สัญญาณส่งผ่านข้อมูล รวมถึงการบริหารเครือข่ายในการสื่อสาร และสารตะกั่ว ในชิ้นส่วนเซรามิกอิเล็กทรอนิกส์
8. สารแคดเมียมในการเคลือบผิวหน้าเพื่อป้องกันการกัดกร่อนในการใช้งานบางประเภท
9. สาร โครเมียม-เฮกซะวาเลนซ์ในการป้องกันการกัดกร่อนเหล็กคาร์บอนในระบบหล่อเย็นของเครื่องทำความเย็น

2.3 สินค้าที่ RoHS ครอบคลุม

เครื่องใช้ไฟฟ้าที่จะถูกควบคุมตามระเบียบ RoHS ได้แก่เครื่องใช้ไฟฟ้าที่ถูกออกแบบสำหรับใช้กับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับไม่เกิน 1000 โวลต์ และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไม่เกิน 1500 โวลต์ โดยในระยะแรก ระเบียบ RoHS จะมีผลบังคับใช้กับ หลอดไฟ โคมไฟในบ้าน และสินค้าอีก 8 กลุ่มได้แก่

1. เครื่องใช้ไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่ใช้ในครัวเรือน (Large Household Appliances) เช่น ตู้เย็น เครื่องซักผ้า และเครื่องปรับอากาศ เป็นต้น
2. เครื่องใช้ไฟฟ้าขนาดกลางที่ใช้ในครัวเรือน (Small Household Appliances) เช่น เครื่องดูดฝุ่น และเครื่องปั่นขนมปัง เป็นต้น
3. อุปกรณ์ไอทีและโทรคมนาคม (IT and Telecommunication Equipment) เช่น คอมพิวเตอร์ โทรศัพท์ โทรสาร และเครื่องพิมพ์ เป็นต้น
4. สินค้าอุปโภค (Consumer Equipment) เช่น โทรทัศน์ วิทยุ เครื่องขยายเสียง และเครื่องดนตรี เป็นต้น
5. อุปกรณ์ให้แสงสว่าง
6. เครื่องไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic and Electronic Tools) เช่น สว่าน เลื่อยไฟฟ้า และเครื่องตัดหญ้า เป็นต้น
7. ของเล่น เครื่องเล่นเพื่อความบันเทิง และเครื่องกีฬา (Toys, Leisure and Sports Equipment)
8. เครื่องขายของอัตโนมัติ (Automatic Dispensers)

ทั้งนี้ไม่รวมอะไหล่ที่ใช้สำหรับซ่อมเครื่องใช้ไฟฟ้าที่นำเข้ามาในตลาดก่อนวันที่ 1 กรกฎาคม 2549

ระเบียบ RoHS ไม่ครอบคลุมวัสดุชิ้นส่วนที่มั่วเพื่อ เช่น คลิปหนีบทันที แผ่นซีดี และไม่ครอบคลุมแบตเตอรี่และบรรจุภัณฑ์ ซึ่งมีระเบียบเฉพาะทางควบคุมอยู่ สำหรับเครื่องใช้ไฟฟ้าประเภทอื่นที่มีได้กล่าวในที่นี้ คณะกรรมการวิชาการสหภาพจะทำการศึกษาและเสนอข้อเสนอเพื่อเพิ่มเติมความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์ในอนาคต

2.4 มาตรการห้ามตามระเบียบ RoHS

ตั้งแต่วันที่ 1 กรกฎาคม 2549 เป็นต้นไป เครื่องใช้ไฟฟ้าที่จะนำเข้ามาตลาดสหภาพยุโรป ต้องปราศจาก ตะกั่ว (Pb) ปรอท (Hg) แคดเมียม (Cd) โครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr-VI) โพลีโบรมิเนท-ไบฟีนิล (PBB) และโพลีโบรมิเนท-ไดฟีนิล-อีเทอร์ (PBDE) ไม่ว่าจะอยู่ในรูปใด ยกเว้นการใช้งานเฉพาะบางอย่างที่ระบุให้เป็นข้อยกเว้นสำหรับกรณี PBDE ซึ่งเป็นชื่อรวมของกลุ่มโพลีเมอร์ที่มีหมู่ โบรมิเนท-ไดฟีนิล-อีเทอร์ ตั้งแต่ 2 ชุดขึ้นไปนั้น คณะกรรมการวิชาการได้เสนอให้ยกเว้น deca-PBDE ตามมติคณะมนตรีฯ วันที่ 2 กันยายน 2548 เห็นชอบให้ยกเว้น deca-PBDE ตามข้อเสนอของคณะกรรมการฯ ซึ่งจะมีประกาศอย่างเป็นทางการต่อไป

2.5 การใช้งานที่ได้รับยกเว้น

แม้ว่าจะจำกัดการใช้สารอันตรายในเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์เกือบทุกชนิด แต่ก็ยังมีความยืดหยุ่นอยู่บ้าง ในกรณีที่พิสูจน์ได้ว่าไม่สามารถหาวิธีอื่นมาใช้เพื่อทดแทนสารที่ห้ามได้อย่างเหมาะสม และ/หรือ ในกรณีที่พิสูจน์ได้ว่าการเลิกใช้ดังกล่าวส่งผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมมากกว่าข้อดี ในกรณีเหล่านี้ ระเบียบ RoHS ของอียูได้กำหนดกลไกให้ผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย สามารถเสนอรายการพร้อมหลักฐานทางวิทยาศาสตร์ให้อัยุพิจารณา (ผ่าน Internet Consultation) ซึ่งข้อเสนอเหล่านี้จะถูกนำเสนอให้คณะกรรมการเทคนิค (TAC) พิจารณา กรณีที่ไม่แน่ใจ หรือไม่มีข้อมูลเพียงพอ TAC อาจเสนอให้ทำการศึกษเพิ่มเติมได้ และเมื่อได้ข้อมูล TAC มีหน้าที่นำเสนอคำแนะนำให้กับคณะมนตรียุโรป เพื่อนำเสนอต่อคณะกรรมการบริหารยุโรป เพื่อลงคะแนนเสียง กรณีที่ได้มติเห็นชอบอย่างเป็นทางการ คณะกรรมการบริหารจะทำการประกาศข้อยกเว้นนั้นๆ อย่างเป็นทางการ ในรูปของคำตัดสินคณะกรรมการต่อไป

รายการการใช้งานตะกั่ว ปรอท แคดเมียม เฮกซะวาเลนซ์โครเมียม โพลีโบรมิเนตเต็ด ไบฟีนิล (PBB) หรือ โพลีโบรมิเนตเต็ด ไดฟีนิล อีเทอร์ (PBDE) ที่ได้รับการยกเว้น

1. ปรอทใน Compact fluorescent lamps ในปริมาณไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อหลอด
2. ปรอทในหลอดฟลูออเรสเซนต์แบบตรงสำหรับใช้งานทั่วไป โดย
 - 2.1 หลอดที่ใช้ Halophosphate ให้มีปรอทได้ไม่เกิน 10 มิลลิกรัมต่อหลอด
 - 2.2 หลอดที่ใช้ Triphosphate ที่มีช่วงชีวิตปกติ ให้มีปรอทได้ ไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อหลอดและ
 - 2.3 หลอดที่ใช้ Triphosphate ที่มีช่วงชีวิตยาว ให้มีปรอทได้ ไม่เกิน 8 มิลลิกรัมต่อหลอด
3. ปรอทในหลอดฟลูออเรสเซนต์ แบบตรงสำหรับใช้งานพิเศษ
4. ปรอทในหลอดไฟที่ไม่ได้กล่าวในภาคผนวกที่นี้
5. ตะกั่ว ที่ใช้ในโลหะอัลลอย (Alloying Element) ดังนี้
 - 5.1 เหล็ก ที่มีตะกั่วไม่เกิน 0.35% โดยน้ำหนัก
 - 5.2 อลูมิเนียมที่มีตะกั่วไม่เกิน 0.4% โดยน้ำหนัก และ
 - 5.3 ทองแดงที่มีตะกั่วไม่เกิน 4% โดยน้ำหนัก
6. ตะกั่วที่ผสมในแก้วของ หลอดภาพ CRT ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ และ หลอดฟลูออเรสเซนต์
7. ตะกั่วในสารบัคกรีชนิดจุดหลอมเหลวสูง (เช่น ตะกั่วบัคกรีที่มีตะกั่ว 85% หรือสูงกว่า)
 - 7.1 ตะกั่วบัคกรีใน เครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย หน่วยเก็บข้อมูล และชุดเก็บข้อมูล ระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับสวิทซ์ซึ่ง ให้สัญญาณ ส่งผ่านข้อมูล รวมถึงการบริหารเครือข่ายในการสื่อสาร
 - 7.2 ตะกั่วในชิ้นส่วนเซรามิกส้ออิเล็กทรอนิกส์ (เช่น Piezoelectronic Devices)
8. แคดเมียมและสารประกอบแคดเมียม ในหน้าสัมผัสทางไฟฟ้า (Electrical Contacts) และงานชุบเคลือบผิว ยกเว้นการใช้งานที่ถูกห้ามใช้ภายใต้ระเบียบสารอันตราย (ระเบียบ 91/338/EEC แก๊วระเบียบ 76/769/EEC) เกี่ยวกับการจำกัดการวางตลาดและใช้สารและการเตรียมที่เป็นอันตรายบางชนิด
9. โครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ ในงานป้องกันการกัดกร่อนเหล็กคาร์บอน ในระบบหล่อเย็นในเครื่องทำความเย็นประเภทดูดซับ (Absorption Refrigerators)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. คณะกรรมการต้องประเมินการใช้งานต่อไปนี้ ตามขั้นตอนที่กำหนดในมาตรา 7(2)

10.1 Deca BDE

10.2 ปะทอกในหลอดฟลูออเรสเซนต์แบบตรงสำหรับใช้งานพิเศษ

10.3 ตะกั่วในการบัดกรี สำหรับเครื่องแม่ข่าย หน่วยเก็บข้อมูล และชุดเก็บข้อมูล ระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับสวิทซ์ซึ่ง ให้สัญญาณ ส่งผ่านข้อมูล รวมถึงการบริหารเครือข่ายในการสื่อสาร (เพื่อกำหนดวันสิ้นสุดข้อยกเว้นนี้)

10.4 หลอดไฟ

11. ตะกั่วที่ใช้ในระบบ Compliant Pin Connector

12. ตะกั่วที่ใช้เป็นสารเคลือบสำหรับเพิ่มความนำความร้อนของโมดูล C-ring

13. ตะกั่วและแคดเมียม ในแก้วที่ใช้ในงานในเชิงแสง (Optical and Filter Glass)

14. ตะกั่วในสารบัดกรีที่มีส่วนผสมมากกว่า 2 สาร สำหรับเชื่อมต่อทางไฟฟ้าระหว่าง Pin and Package ในไมโครโปรเซสเซอร์ ที่มีส่วนผสมตะกั่วมากกว่า 80% แต่ไม่ถึง 85% โดยน้ำหนัก

15. ตะกั่วในสารบัดกรีเพื่อให้เกิดการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าระหว่าง Semiconductors Die และแผ่นฐานในแผงวงจรรวม (IC) ประเภท Flip Chip

16. ตะกั่วในหลอดไส้แบบตรง ที่หลอดเคลือบด้วยซิลิเกต

17. ตะกั่วฮาโลด์ที่ใช้เป็นสารกระจายรังสี ในหลอด High Intensity Discharge (HID) สำหรับการใช้งาน Professional Reprography

18. ตะกั่วที่ใช้เป็นสารกระตุ้น (Activator) ในผงเรืองแสง (มีตะกั่ว 1% โดยน้ำหนักหรือต่ำกว่า) ในหลอด Discharge เมื่อใช้ในงาน Sun Tanning Lamp ที่มีสารเรืองแสงประเภท BSP (BiSi2O5:Pb) และในหลอดเฉพาะทาง สำหรับ Diazo-printing Reprography, Lithography, เครื่องจับแมลง, Photochemical และ Curing Processes ที่มีสารเรืองแสงประเภท SMS ((Sr,Ba)2MgSi2O7:Pb)

19. ตะกั่วใน PbBiSn-Hg และ PbInSn-Hg ในส่วนผสมเฉพาะ สำหรับเป็นสารอมัลกัมหลัก และ PbSn-Hg สำหรับเป็นสารอมัลกัมช่วย ใน Very Compact Energy Saving Lamps (ESL)

20. ตะกั่วออกไซด์ในแก้วที่ใช้สำหรับเชื่อมแผ่นหน้า และแผ่นหลังของหลอดฟลูออเรสเซนต์แบบแบน ที่ใช้สำหรับ Liquid Crystal Displays (LCD)

21. ตะกั่วและแคดเมียมในหมึกพิมพ์สำหรับใช้เคลือบ Borosilicate Glass

22. ตะกั่วที่เป็นสารปนเปื้อนใน RIG (Rare Earth Iron Garnet) Faraday Rotators ที่ใช้สำหรับระบบการสื่อสารใยแก้วนำแสง

23. ตะกั่วในการเคลือบขาชิ้นส่วนที่มีช่องละเอียด (Fine Pitch) ที่ไม่ใช่คอนเนกเตอร์ที่มีช่องว่างระหว่างขา 0.65 mm หรือต่ำกว่า ที่มีกรอบตัวนำ (Lead frames) ทำด้วย NiFe และตะกั่วในการเคลือบขาชิ้นส่วนที่มีช่องละเอียดที่ไม่ใช่คอนเนกเตอร์ที่มีช่องว่างระหว่างขา 0.65 mm หรือต่ำกว่า ที่มีกรอบตัวนำทำด้วยทองแดง

24. ตะกั่วในสารบัดกรีสำหรับบัดกรี Machined Through Hole Discoidal เข้ากับ ตัวเก็บประจุ แบบ Planar Array Ceramic Multilayer Capacitors

25. ตะกั่วออกไซด์ใน Plasma Display Panels (PDP) และ Surface Conduction Electron Emitter Displays (SED) ที่ใช้ในชิ้นส่วน โครงสร้าง; ซึ่งได้แก่ในชั้นแก้วโคอีเล็กทริกแผ่นหน้าและแผ่นหลัง Bus Electrode, Black Stripe, Address Electrode, Barrier Ribs, Seal Frit และ Frit Ring และสปีทิมท์ (Print Pastes)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

26. ตะกั่วออกไซด์ในขอบแก้วของหลอด Black Light Blue (BLB)
27. ตะกั่วอัลลอยที่ใช้เป็นสารบัคกรีสำหรับ Transducer ที่ใช้ในลำโพงกำลังสูง (ที่ออกแบบให้ทำงานติดต่อกันหลายชั่วโมง ที่ระดับกำลังเสียง 125 dB SPL หรือสูงกว่า)
28. โครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ ในการเคลือบแผ่นโลหะเพื่อป้องกันการกัดกร่อน และ Fastener ที่ใช้สำหรับป้องกันการกัดกร่อนและสำหรับ Electromagnetic Interface Shielding ในบริบทที่อยู่ที่ได้กลุ่ม 3 ของระเบียบ 2002/96/EC (IT and Telecommunications Equipment). ยกเว้นให้ถึง 1 กรกฎาคม 2550
29. ตะกั่วที่ยึดอยู่ในแก้วคริสตัลตามที่กำหนด ภาคผนวก I (ประเภท 1, 2, 3, และ 4) ของระเบียบคณะมนตรีที่ 69/493/EEC

2.6 ความเป็นมาในการพัฒนาโลหะบัคกรีไร้สารตะกั่ว

แรงผลักดันจากทั่วโลกในความต้องการแทนที่การใช้งานการใช้ตะกั่วและโลหะผสมของตะกั่วซึ่งมีพิษ ในการใช้งานภาคอุตสาหกรรมได้นำมาสู่การพัฒนาโลหะบัคกรีผสมซึ่งไม่มีตะกั่ว นอกจากความเป็นพิษของตะกั่วแล้ว ยังมีปัญหาอื่น ๆ ที่เกิดจากการใช้งาน ดีบุก (Sn) และตะกั่ว (Pb) ซึ่งมีราคาถูก โลหะบัคกรีซึ่งมีตะกั่วเป็นสารประกอบในปัจจุบันขาดความสามารถในการรับแรงเฉือนและความต้านทานต่อการคืบและความล้าเนื่องจากอุณหภูมิและแรงกด ดังนั้นโลหะบัคกรีที่ได้รับการพัฒนาคุณสมบัติดังกล่าวจะมีความสำคัญ เป็นอย่างมากในอุตสาหกรรมรถยนต์ และอุตสาหกรรมหนักอื่น ๆ ซึ่งรอยเชื่อมมักจะต้องผ่านการเปลี่ยนอุณหภูมิหลายต่อหลายครั้ง อีกทั้งยังต้องได้รับแรงสั่นสะเทือนอย่างหนัก และต้องทนความร้อนสูงถึง 150 ถึง 170 องศาเซลเซียส ซึ่งผลลัพธ์จากการที่รอยเชื่อมเกิดการเสียหายในอุปกรณ์ต่างๆ ที่ถูกคาดหวังว่าควรจะมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่านั้น อาจสร้างความเสียหายในอุตสาหกรรมนั้นๆ ได้

ความสามารถที่เชื่อมโยงในการบัคกรีของ Sn-37Pb น่าจะเป็นผลมาจากการเกิดขึ้นของชั้นบางๆ ของสารประกอบที่มีความมั่นคงมากที่บริเวณผิวสัมผัสของโลหะบัคกรีกับโลหะที่นำมาบัคกรีนั้น เป็นที่น่าสนใจว่าสารประกอบที่บริเวณผิวสัมผัสที่ช่วยในการบัคกรีนั้นเป็นสารประกอบที่ประกอบด้วยดีบุกเป็นหลัก ไม่ใช่ตะกั่ว สารประกอบดังกล่าว เช่น Cu_6Sn_5 จะเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสของโลหะบัคกรีหลอมเหลวกับตัวทองแดงที่นำมาบัคกรี บทบาทของตะกั่วในการที่มันเข้ามามีส่วนช่วยในการบัคกรียังไม่เป็นที่เข้าใจนัก แต่คาดว่าตะกั่วน่าจะสามารถในการหยุดยั้งความตึงผิวของโลหะบัคกรีหลอมเหลว ทำให้มุมสัมผัสของโลหะบัคกรีหลอมเหลวกับโลหะที่นำมาบัคกรีนี้น้อยลง ส่งผลให้มีการกระจายตัวที่ดีและทำให้มีพื้นที่ผิวที่ใช้ในการยึดเกาะมากขึ้น นอกจากนั้นปฏิกิริยาขณะแข็งตัวของ Sn-37Pb ก็ช่วยสร้างส่วนผสมที่มีความละเอียดของ ดีบุกและตะกั่วขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดโครงสร้างที่มีความแข็งแรงมากซึ่งไม่น่าเชื่อว่าจะเกิดขึ้นจากส่วนประกอบที่ค่อนข้างมีความอ่อนแอของ ดีบุกกับตะกั่ว อีกทั้งยังทำให้ง่ายต่อการขึ้นรูปให้เป็นลวดหรือฟอยล์ได้อีกด้วย ดังนั้นกลวิธีในการออกแบบโลหะผสมอย่างมีประสิทธิภาพเพื่อจะพัฒนาโลหะบัคกรีไร้สารตะกั่วควรเริ่มจากการใช้ดีบุกเป็นโลหะผสมพื้นฐาน เพื่อสร้างความสามารถในการบัคกรี แล้วจึงเพิ่มส่วนประกอบที่สองหรือสามเพื่อให้เกิดการกระจายตัวที่ดีและช่วยลดอุณหภูมิของการหลอมเหลวของดีบุก จากนั้นจึงหาสัดส่วนของส่วนผสมของสารประกอบที่เหมาะสมที่จะให้เกิด โครงสร้างจุลภาคที่มีความละเอียดสูงซึ่งให้ทั้งกำลังในการรับแรงและความยืดหยุ่นในเวลาเดียวกัน

หลักเกณฑ์ในการออกแบบ โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วซึ่งต้องการนำไปใช้งานหนักคือการเพิ่มความสามารถของ Sn-37Pb ในการต้านทานการเกิดความหยาบกระด้างในโครงสร้างทางจุลภาคซึ่งจะส่งผลให้รอยเชื่อมสามารถคงความแข็งแรงและต้านทานความล้าได้แม้ในอุณหภูมิสูง หรือในสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลับไปกลับมาได้ โครงสร้างของรอยเชื่อมของโลหะบัดกรีแบบ Sn-37Pb เริ่มจากสารผสมที่มีความละเอียดและมีจุดหลอมเหลวต่ำระหว่างคืนุกกับตะกั่ว แต่หลังจากนั้นสามารถเปลี่ยนโครงสร้างจนมีความหยาบขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งส่งผลให้ขาดความสามารถในการต้านทานแรงเฉือน การคืบและความล้าเนื่องจากอุณหภูมิและแรงกล โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วควรจะใช้เทคนิคการออกแบบโครงสร้างจุลภาคซึ่งจะยับยั้งการเกิดการกระจายตัว เช่น การสนับสนุนการเกิดสารประกอบโลหะในเฟสที่สองเพื่อให้อายุการใช้งานแข็งแรงให้กับ Matrix ของคืนุกแทนที่จะสนับสนุนการทำให้แข็งขึ้นหรือเกิดการแข็งตัวของสารที่มีการกระจายตัวอย่างละเอียดในเฟสแรก เช่น Bi โครงสร้างจุลภาคอีกส่วนหนึ่งที่ได้รับพิจารณาเช่นกันคือการยับยั้งการเกิดชั้นสารประกอบโลหะของตะกั่วและคืนุก ซึ่งมีประโยชน์กับการบัดกรีในตอนแรก แต่หากเกิดชั้นของสารประกอบนี้มากเกินไป รอยต่อระหว่างโลหะบัดกรีกับทองแดงจะเป็นบริเวณที่มีความอ่อนแอและจะสามารถเกิดรอยแตกจากความล้า ความต้องการที่แท้จริงในขณะนี้คือพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วซึ่งมีกระบวนการผลิตและราคาใกล้เคียงกับโลหะบัดกรีที่มีส่วนประกอบของคืนุกและตะกั่ว แต่ต้องได้รับการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลและความเสถียรของโครงสร้างจุลภาค

ขณะนี้ภาคอุตสาหกรรมได้มีการลงทุนอย่างกว้างขวางในอุปกรณ์การบัดกรีและกระบวนการผลิตที่มีความเกี่ยวข้องกับโลหะบัดกรีแบบเก่าอยู่ ดังนั้นการพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบใหม่จึงต้องให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับโลหะบัดกรีแบบเดิมให้มากที่สุด ในอุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์มีความต้องการวัสดุที่จะนำมาแทนที่โลหะบัดกรีแบบ Sn-37Pb ซึ่งมีจุดหลอมเหลวที่ 183 องศาเซลเซียส และที่ๆ ไปแล้วการที่จะนำไปใช้ได้อย่างแพร่หลายควรมี รอยเชื่อมที่นำไฟฟ้าได้ จุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิดใหม่นี้ควรต่ำกว่า 280 องศาเซลเซียส เพราะที่อุณหภูมินี้เป็นอุณหภูมิสูงที่สุดของเตาหลอมโลหะบัดกรีตามท้องตลาด และเป็นบัดกรีที่ใช้กับโลหะบัดกรีที่มีส่วนประกอบของคืนุกและตะกั่ว ซึ่งสาเหตุที่ต้องมีค่าต่ำกว่าค่าสูงสุดที่ 280 องศาเซลเซียสนี้เพื่อเป็นการป้องกันการเกิดความร้อนที่สูงเกินปกติขณะบัดกรีซึ่งโดยทั่วไปความร้อนอาจมีค่าสูงกว่าปกติประมาณ 25 ถึง 30 องศาเซลเซียส

สาเหตุหนึ่งของความนิยมใช้โลหะบัดกรีแบบ Sn-37Pb คือคุณสมบัติในการหลอมเหลวที่สอดคล้องในขณะที่เชื่อมโลหะทั่วไป เช่น ทองแดง, เหล็ก, ทองเหลือง, และสแตนเลส Sn-37Pb จะสามารถหลอมเหลวได้ง่ายและไหลได้ทันทีที่เริ่มเกิดการหลอมเหลวเนื่องจากมันไม่มีช่วงของการหลอมเหลวที่กว้าง การบัดกรีอย่างมีประสิทธิภาพด้วย Sn-37Pb โดยปกติแล้วจะต้องการอัตราการไหลของพลังงานเพียงเล็กน้อยเท่านั้นในการที่จะกำจัดออกไซด์ที่ผิวโลหะและเริ่มต้นสร้างรอยต่อในสภาพบรรยากาศธรรมชาติ ดังนั้น โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบใหม่จะต้องใช้อัตราการไหลของพลังงานน้อยมาๆเช่นเคียวกันอีกทั้งมันไม่ควรจะไวต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันในอากาศอีกด้วย

ความต้องการโลหะบัดกรีในอุตสาหกรรมเครื่องแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อน อุตสาหกรรมหม้อน้ำรถยนต์ ระบบควบคุมอุณหภูมิ และการใช้งานในอุตสาหกรรมหนักอื่นๆเช่น ข้อต่อท่อหรือลม อาจเป็นแหล่งที่มีการใช้งานสารตะกั่วมากกว่าอุตสาหกรรมที่เคยกล่าวถึงมาแล้วก็ได้ สาเหตุที่อุตสาหกรรมเหล่านี้มีการใช้งานสารตะกั่วมากก็เนื่องมาจากมีการใช้งานโลหะบัดกรีที่มีสารประกอบของตะกั่วที่นอกเหนือไปจาก Sn-37Pb เป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะ โลหะบัดกรีแบบ Pb-5Sn ซึ่งจะหลอมอย่างช้าๆที่อุณหภูมิระหว่าง 305 ถึง 316 องศาเซลเซียส โลหะบัดกรีแบบ Pb-5Sn นี้มักจะถูกใช้ในขั้นตอนขั้นต้นของการจุ่มเคลือบแกนทองแดงของเครื่องทำความร้อน และรอยตะเข็บดึงน้ำที่ทำจากทองเหลืองและเหล็ก โดยที่ Sn-37Pb จะถูกใช้สำหรับการเชื่อมรอยตะเข็บรอบสองและขั้นตอนสุดท้ายเท่านั้น คุณสมบัติของรอยเชื่อมที่สำคัญสำหรับการใช้งานในลักษณะนี้คือความทนทาน ความคงทนต่อสารเคมี และ

การนำความร้อน ข้อเสียของ Pb-5Sn คือไม่ค่อยคงทนต่อการกัดกร่อนและความต้านทานโดยเฉพะภายใต้แรงดันที่เปลี่ยนแปลงไปมา ที่อุณหภูมิประมาณ 120 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญที่โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วใหม่จะต้องทดแทนได้อย่างไรก็ตามราคาของก้อนและลวดโลหะบัดกรีเป็นหลักเกณฑ์สำคัญในการพิจารณา วัสดุที่จะมาแทนที่ Pb-5Sn ซึ่งมีราคาถูกได้มากนั้นจะต้องสามารถใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพมาก ๆ เพื่อให้สามารถแข่งกับ Pb-5Sn ได้เมื่อคำนึงถึงต้นทุนการผลิตรวม

สหรัฐอเมริกา นับได้ว่าเป็นประเทศแรกๆที่เริ่มมีการปรับปรุง โดยได้มีการร่วมมือกันระหว่างกรมพลังงานของสหรัฐและมหาวิทยาลัย Iowa State ได้พัฒนาส่วนผสมที่ประกอบไปด้วย ดีบุก เงินและทองแดง ซึ่งมีจุดหลอมเหลวประมาณ 217 องศาเซลเซียสและได้ทำการจดสิทธิบัตรที่เป็นของมหาวิทยาลัย Iowa State เรียบร้อยแล้ว

โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีจุดหลอมเหลวต่ำประกอบด้วยโลหะผสม 3 ชนิดคือ Sn-4.7Ag-1.7Cu เป็นสิทธิบัตรของสหรัฐอเมริกาหมายเลข 5, 527, 628 ซึ่งได้ออกใช้เมื่อวันที่ 18 มิถุนายน ค.ศ. 1996 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วนี้มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 217 องศาเซลเซียสและสามารถใช้ในการบัดกรีได้มาก โลหะผสมที่ใช้ทำเป็นโลหะบัดกรีอันนี้แข็งตัวในลักษณะที่มีโครงสร้างจุลภาคที่ละเอียดและมีจุดหลอมเหลวต่ำ โครงสร้างทางจุลภาคในลักษณะนี้มีความแข็งแรงมากกว่าโครงสร้างของลวดแบบ Sn-Pb แม้ว่าโลหะผสมจาก Sn-Ag-Cu ตัวนี้ยังไม่เคยได้รับการรายงานในการทดลอง แต่ผลจากการทดสอบชิ้นต้นก็ได้ชี้ให้เห็นว่ามันเหมาะที่จะถูกนำมาผลิตใช้เป็นโลหะบัดกรี ข้อเสียเพียงอย่างเดียวก็คือมันไวต่อการสร้างชั้นสารประกอบโลหะ บริเวณที่โลหะบัดกรีสัมผัสกับทองแดง โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิสูง ซึ่งข้อเสียอันนี้เป็นสิ่งที่พบได้ในโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีดีบุก ปริมาณสูงทุกตัว

ได้มีการพัฒนาโลหะบัดกรีที่ประกอบด้วยโลหะผสม 2 ส่วนของ Sn-Ag, Sn-Sb และ Sn-Bi ให้เป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว ยกตัวอย่างเช่น โลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมเป็น 96.5Sn- 3.5Au, 95Sn-5Sb, 43Sn-57Bi โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วเหล่านี้มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 221, 245, และ 139 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งจุดหลอมของโลหะบัดกรีแบบ Sn-Ag นั้นสูงเกินไปเล็กน้อยในขณะที่จุดหลอมของโลหะบัดกรีแบบ Sn-Sb นั้นสูงเกินไปเช่นกัน สำหรับโลหะบัดกรีแบบ Sn-Bi แม้จะมีจุดหลอมเหลวก่อนข้างต่ำแต่โครงสร้างจุลภาคของมันก็เปลี่ยนโครงสร้างเป็นโครงสร้างแบบหยาดอย่างรวดเร็ว ซึ่งทำให้บัดกรีได้ไม่ดีและยังมีความต้านทานต่อการคืบต่ำอีกด้วย

นอกจากนี้ยังมีโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ประกอบด้วยส่วนผสม 2 ส่วนชนิดอื่นอีกที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาซึ่งก็คือโลหะบัดกรีแบบ Sn-In และ Sn-Au อย่างไรก็ตามโลหะบัดกรีทั้งสองนี้ยังมีข้อเสียคือ มีความเปราะค่อนข้างมาก อีกทั้งส่วนผสมที่ใช้นั้นมีราคาสูงและไม่สามารถหาซื้อได้ในลักษณะของโลหะผสมที่ใช้งานมาแล้ว ยิ่งกว่านั้นโลหะบัดกรีแบบ Sn-Au ยังมีจุดหลอมเหลวที่สูงถึง 278 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงมาก

โลหะบัดกรีที่ประกอบด้วย 3 ส่วนประกอบคือ Sn-Ag-Cu ได้รับการพัฒนาโดยอุตสาหกรรมท่อน้ำ เช่น โลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมของ ดีบุก 96%, ทองแดง 3.5%, และเงิน 0.5% โดยน้ำหนักเป็นต้น ซึ่งมีจุดหลอมเหลวที่ 260 องศาเซลเซียส ซึ่งไม่เหมาะกับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากมีอุณหภูมิสูงเกินไป

ขณะที่เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ได้รับการพัฒนาขึ้นเรื่อยๆ ไมโครโปรเซสเซอร์ก็ยิ่งซับซ้อนและเกิดความร้อนง่าย ส่งผลให้เพิ่มความเครียดเนื่องจากอุณหภูมิให้กับรอยเชื่อมที่บริเวณแผงวงจร ผลจากการที่ต้องการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในสถานะที่รุนแรงมากขึ้นนั้น ทำให้เกิดความต้องการโลหะบัดกรีนั้นไม่เพียงแต่ต้องปลอดภัยรวมทั้งยังต้องมีความแข็งแรงและต้านทานความต้านทานได้มากกว่าโลหะบัดกรีชนิดเก่าอีกด้วย

2.7 การเชื่อมโดยใช้ตัวเชื่อมแบบไร้สารตะกั่ว

การนำโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีส่วนผสมของทองแดงหรือเงินนั้นจำเป็นต้องระวังเรื่องการปนเปื้อนของตะกั่วในอ่างเชื่อมของเครื่อง Wave Soldering เพื่อป้องกันปัญหาด้านความทนทานของรอยเชื่อม

2.8 ปัจจัยที่สำคัญในการผลิตโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

โลหะบัดกรีที่เป็นส่วนผสมระหว่าง ดีบุกและตะกั่วซึ่งส่วนผสมที่นิยมใช้งานคือ 63Sn/37Pb มีข้อดีหลายอย่างเช่น ราคาถูก จุดบัดกรีมีความแข็งแรง และนำไฟฟ้าได้ดีเป็นต้น ดังนั้นการที่จะพัฒนาส่วนผสมใหม่ที่ไม่ใช่ตะกั่วเป็นส่วนประกอบนั้นควรพิจารณาเบื้องต้นดังนี้

2.8.1 วัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสมของโลหะบัดกรีจะต้องไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งวัสดุที่เป็นสารพิษต่างๆ เช่น ตะกั่ว จะไม่ถูกนำมาใช้เป็นส่วนผสม

2.8.2 วัสดุที่ใช้จะต้องมีปริมาณมากเพียงพอที่จะตอบสนองความต้องการ ในปัจจุบันและอนาคต

2.8.3 จุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีควรต่ำกว่า 200°C หรือควรใกล้เคียงกับ ส่วนผสมเดิม Sn37Pb ที่ 183°C เพราะถ้ามีจุดหลอมเหลวที่สูงเกินไปจะทำให้ต้องปรับตั้งอุณหภูมิของเครื่องหลอมตะกั่วให้สูงขึ้นด้วย อาจทำให้ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์เสียหายได้ หรือแผงวงจรเปลี่ยนลักษณะ เพราะอุณหภูมิที่สูงเกินไป

2.8.4 รอยเชื่อมที่ได้ต้องมีความแข็งแรงและต้านทานการกัดจากความร้อน เนื่องจากในการใช้งานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เมื่อไม่ใช้งานก็จะมีอุณหภูมิค่าแต่พอใช้งานก็จะเกิดความร้อนทำให้มีอุณหภูมิสูงจึงเป็นผลให้บริเวณรอยเชื่อมเกิดความเครียดที่เป็นรอบๆ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

2.8.5 ควรจะมีต้นทุนต่ำ เนื่องจากโลหะที่จะนำมาแทนตะกั่วจะเป็นโลหะที่หาได้ยากและมีอยู่อย่างจำกัด เช่น อินเดียม (Indium) เงิน (Silver) เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าเป็นการใช้โลหะบัดกรีแบบแท่ง (Solder bar) สำหรับเครื่อง Wave Soldering หรือโลหะบัดกรีแบบเส้น (Solder Wire) สำหรับบัดกรีด้วยมือ จะมีปริมาณการใช้สูงกว่าตะกั่วเหลวซึ่งโดยทั่วไปปริมาณบัดกรีแบบแท่งหรือแบบเส้นจะเป็นต้นทุนการผลิตดังนั้นควรมีต้นทุนต่ำ เพื่อที่สามารถนำไปใช้ได้ในทุกอุตสาหกรรม

2.8.6 ความสามารถในการนำไฟฟ้าต้องดีพอที่จะไม่ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานวงจรอิเล็กทรอนิกส์ลดลง

2.8.7 ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต้องดีพอ

2.8.8 ควรมีจุดหลอมเหลวคงที่ เนื่องจากในการผลิตสินค้าปริมาณมากๆ จะต้องมีกระบวนการควบคุม ความผันแปรต่างๆ ในกระบวนการผลิตเพื่อไม่ให้ปริมาณของเสียในการผลิตมากเกินไป ซึ่งพบว่า โลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมของโลหะตั้งแต่ 4 ชนิดขึ้นไปจะมีจุดหลอมเหลวที่มีลักษณะเป็นช่วงอุณหภูมิไม่คงที่ที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง ซึ่งถ้าเลือกใช้ส่วนผสมนี้ อาจเกิดปัญหาในการผลิตได้และในการผสมโลหะหลายๆชนิดเข้าด้วยกันให้มีอัตราส่วนที่คงที่แน่นอนในแต่ละครั้งก็ทำได้ยากกว่าการผสมโลหะเพียงแค่ 2-3 ชนิด การทำส่วนผสมเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยก็อาจทำให้คุณสมบัติโดยรวมเปลี่ยนไปมากจึงทำให้ส่วนผสมของโลหะ 4-5 ชนิดไม่เป็นที่นิยม

2.8.9 ต้องพิจารณาถึงความสามารถในการเชื่อมประสานกันระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วกับสารตะกั่วที่อยู่บนขั้วของอุปกรณ์และแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเนื่องจาก ขั้วของอุปกรณ์แผงวงจรยังคงมีสารตะกั่วเป็นส่วนประกอบสำคัญ ซึ่งถ้าไม่สามารถเชื่อมประสานกันได้ดีก็อาจทำให้จุดบัดกรีนั้นไม่แข็งแรงเพียงพอต่อการใช้งาน

2.8.10 สามารถนำไปใช้ได้ กระบวนการผลิตที่มีอยู่ในปัจจุบันได้ โดยไม่ต้องคิดแปลงมากหรือซื้อระบบใหม่

2.9 การพิจารณาในการเลือกธาตุที่เป็นส่วนผสม

โลหะบัดกรีโดยทั่วไปจะเป็นส่วนผสมระหว่างโลหะตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป เช่น ดีบุก-ตะกั่วซึ่งต่อมา มีความพยายามในการเลิกใช้สารตะกั่วโดยหาโลหะชนิดอื่นมาทดแทนในการพิจารณาการเลือกธาตุโดยดูจากตาราง ธาตุ ธาตุเคมีที่ใช้คือ Pb จึงเลือกธาตุที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับธาตุเคมีซึ่งก็คือ คุณสมบัติที่ธาตุจะเหมือนกันตามหมู่ และตามคาบนอกจากนั้นยังได้พิจารณาถึงธาตุที่ใกล้เคียงๆ ในแถวเชื่อม ดังนี้

Ag สามารถหาได้ง่ายผลิตออกมาเพียงพอแต่ไม่เลือก เนื่องจากมีราคาแพง

Cu สามารถหาได้ง่าย ละลายได้ดีใน Sn และทนการสึกกร่อนได้ดี

Ga หาได้ยากเนื่องจากผลิตออกมาน้อยและมีความเปราะ

In เป็นโลหะที่สามารถทำให้จุดหลอมเหลวของสวารนผสมลดลงได้ดี เมื่อนำมาผสมกับดีบุก มี คุณสมบัติทางกายภาพและความสามารถในการเชื่อมประสานที่ดี แต่อินเดียมเป็นโลหะที่มีจำนวนจำกัด และเริ่มขาดแคลนในปัจจุบันทำให้มีราคาสูง และที่สำคัญจะเกิดการ Oxidize อย่างรวดเร็วในระหว่างการหลอมทำให้รอยเชื่อมเปราะ

Sn ราคาถูกหาได้ง่ายมีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดี นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีคุณสมบัติ ในการเชื่อมประสานที่ดีและเป็นพื้นฐานที่ทุกส่วนผสมมี

Zn เป็นโลหะที่มีราคาถูกหาใช้งานได้ง่าย แต่ข้อเสียคือสังกะสีทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้เร็วเกิดเป็นสังกะสีออกไซด์ซึ่งออกไซด์นี้ จะไปลดความสามารถในการเชื่อมประสานและทำให้รอยเชื่อมเปราะ

Bi เป็นโลหะที่สามารถทำให้จุดหลอมเหลวของส่วนผสมลดลงได้ดี มีคุณสมบัติทางกายภาพและความสามารถในการเชื่อมประสานที่ดีมากนำไฟฟ้าได้ดี ราคาไม่แพง แต่เมื่อแข็งตัวจะเกิดการขยายตัวและเป็นสารประกอบที่กำจัดยาก

Cd เป็นโลหะที่มีความเป็นพิษต่อคนและสิ่งแวดล้อม

Ti เป็นโลหะที่หาได้ยากทำให้มีราคาแพง

2.10 รายละเอียดของธาตุ

2.10.1 โลหะดีบุก (Sn)



รูปที่ 2.1 โลหะทองแดง

เลขอะตอม	50 เป็นธาตุที่ 4 ของหมู่ IV ในตารางธาตุ จัดเป็นโลหะ
น้ำหนักอะตอม	118.71 amu
จุดหลอมเหลว	231.93°C
จุดเดือด	2602°C
เลขออกซิเดชันสามัญ	+4, +2

แร่ดีบุกที่สำคัญได้แก่ ดีบุกออกไซด์ (SnO_2) เรียกว่า Cassiterite หรือบางที่เรียก Tin stone โลหะดีบุกเป็นโลหะสีขาว และเป็นโลหะอ่อนที่มีความต้านทานการกัดกร่อนสูง และมีคุณสมบัติด้านหล่อขึ้น ดีบุกสามารถเปลี่ยนอัญรูปได้จากอุณหภูมิปกติจะมีโครงสร้างผลึก เตตราโกนอล ซึ่งเป็นโลหะที่มีสีขาว แต่เมื่ออุณหภูมิลดลงมาที่ประมาณ 13.2°C ดีบุกจะมีโครงสร้างผลึกเป็นลูกบาศก์ ซึ่งเป็นโลหะที่มีสีเทา และการเปลี่ยนแปลงนี้จะมีการขยายตัว โดยเปลี่ยนค่าความหนาแน่นจาก 7.30 g/cm³ ไปเป็น 5.75 g/cm³ ทำให้เกิดการแตกเป็นผงซึ่งเรียกว่า Tin Pest แต่อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระบบนี้จะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ค่อยเป็นค่อยไป แต่ถ้าทำให้เย็นอย่างรวดเร็วจะมีโอกาสเกิดได้ง่าย สารเจือปนที่ติดมากับดีบุกมีส่วนช่วยต้านทานการเปลี่ยนแปลงนี้ ซึ่งในทางปฏิบัติดีบุกมักจะไม่มีบริสุทธิ์ทำให้การเปลี่ยนแปลงเกิดได้ยาก

เนื่องจากดีบุกเป็นโลหะอ่อน จึงไม่ใช้ดีบุกทำเครื่องจักรกล แต่ดีบุกมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนสูง จึงนิยมใช้ดีบุกเคลือบโลหะ โดยเฉพาะเหล็กเพื่อป้องกันสนิม โดยทำเป็นกระป๋องบรรจุอาหาร ดีบุกเมื่อรีดเป็นแผ่นบางๆ (Tin Foil) สามารถนำไปใช้ห่อสิ่งของต่างๆ เพื่อป้องกันความชื้นได้ดี

2.10.2 โลหะทองแดง (Cu)



รูปที่ 2.2 โลหะทองแดง

เลขอะตอม	29 เป็นธาตุแรกของหมู่ IB จัดเป็นโลหะและโลหะทรานซิชัน
น้ำหนักอะตอม	63.54 amu
จุดหลอมเหลว	1084.62°C
จุดเดือด (โดยประมาณ)	2562°C
เลขออกซิเดชันสามัญ	+1, +2

ทองแดงเป็นโลหะชนิดแรกๆ ที่มนุษย์รู้จักและนำมาใช้งาน ทองแดงเป็นธาตุที่พบในปริมาณน้อยบนผิวโลก (Earth's Crust) แต่เป็นธาตุหนึ่งในจำนวนสองธาตุที่ปรากฏพบในสภาพบริสุทธิ์โดยธรรมชาติ เรียกว่าพบในสภาพที่เป็นโลหะ (Metallic State) หรือในสภาพ Native Copper ซึ่งปรากฏพบกระจัดกระจายตามแหล่งต่างๆ แร่ทองแดงที่ปรากฏพบมีมากมายหลากหลายชนิด มีทั้งที่อยู่ในฟอร์มของซัลไฟด์ ออกไซด์ คาร์บอเนต ซัลเฟต ซิลิเกต และที่อยู่ในลักษณะผสมกันและยังปนอยู่กับแร่อื่นๆ เช่น แร่ निकเกิล เงิน พลวง และบิตม์ ปริมาณของทองแดงในแร่จะอยู่ในช่วงไม่เกินร้อยละ 10 ในเชิงอุตสาหกรรมผลิตทองแดง โดยการถลุงทองแดงนำมาใช้ทำเครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆ แม้ว่าทองแดงจะมีปริมาณน้อยมาก ในเปลือกโลก (เพียงร้อยละ 0.0001) เมื่อเทียบกับโลหะอื่นอย่างเหล็ก (ร้อยละ 5) หรืออลูมิเนียม (ร้อยละ 8) แต่ทองแดงเป็นโลหะตระกูลซึ่งสามารถพบได้ทั้งในรูปอิสระ และในรูปสารประกอบ ซึ่งสามารถถลุงออกมาเป็นโลหะได้ง่าย การถลุงทองแดงในปัจจุบัน จะนำสินแร่ทองแดง เช่น แร่ชาลโคไซต์ (Chalcocite, Cu_2S) แร่ชาลโคไพไรต์ (Chalcopyrite, $CuFeS_2$) เป็นต้น มาเผาในอากาศ จะได้ทองแดงที่มีความบริสุทธิ์ประมาณ ร้อยละ 97-99 จากนั้นจึงนำมาผ่านกระบวนการแยกด้วยกระแสไฟฟ้าอีกครั้ง เพื่อให้ได้ทองแดงที่มีความบริสุทธิ์มากกว่าร้อยละ 99 และเป็นโลหะที่ใช้มากที่สุดโลหะหนึ่งในรูปของโลหะอิสระ เพราะมีสมบัติเชื่อมหลายประการ เช่น สมบัติการนำไฟฟ้าและความร้อนที่ดีเยี่ยม ทนต่อการผุกร่อน แข็งแรง คงเป็นเส้นและตีเป็นแผ่นบางๆ ได้

การค้นพบโลหะทองแดงเป็นที่รู้จักกันตั้งแต่ก่อนประวัติศาสตร์ และได้มีการนำมาใช้ประโยชน์มากกว่า 6,000 ปีแล้ว ถึงแม้จะมีหลักฐานค่อนข้างแน่ชัดว่ามนุษย์รู้จักเอาทองคำและเหล็กมาใช้ประโยชน์ก่อนทองแดง แต่ก็เป็นที่มั่นใจได้ว่าทองแดงมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งในการช่วยพัฒนาวัฒนธรรมในสมัยโบราณ

การใช้ประโยชน์

ประโยชน์ของทองแดง เนื่องจากโลหะทองแดงเป็นโลหะที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดีเป็นอันดับที่ 2 รองจากเงิน แต่มีราคาถูกกว่าเงินมาก การที่ทองแดงสามารถนำไฟฟ้าได้ดีทำให้สามารถลดพลังงานที่สูญเสียไปในรูปของความร้อนขณะที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านสายไฟ นอกจากนี้ทองแดงยังเป็นส่วนผสมที่สำคัญของโลหะผสมหลายๆ ชนิด เช่น ทองเหลือง (ทองแดงผสมสังกะสี) สำริด (ทองแดงผสมดีบุก) โมเนล (ทองแดง นิกเกิล เหล็ก และแมงกานีส) รวมทั้งยังใช้ผสมในเงินและทอง เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของโลหะที่มีค่าเหล่านั้นสำหรับใช้ทำเครื่องประดับและเหรียญตราต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ 16 อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดเด่นอีกอย่างหนึ่งของทองแดงก็คือ ทนต่อการกัดกร่อนได้ดีมาก แม้ในสภาวะถูกกัดกร่อนอย่างรุนแรง เช่น ในน้ำทะเลจากการสำรวจซากเรือที่จมอยู่ใต้ทะเล การใช้ประโยชน์

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

ตัวอย่างการนำไปใช้ของ Cu เช่น คอมพิวเตอร์ (Cu + Ag) ชิ้นส่วนในเครื่องยนต์, ปลอกกระสุนระฆัง (Cu + Sn) สปริงชนิดต่าง ๆ ทำจากบรอนซ์ ดีบุก ผสมฟอสฟอรัส, คาร์บิวเรเตอร์ (Cu + Sn + Zn + Pb) บุษและแบร็ง เป็นต้น โลหะผสมทองแดง เช่น ท่อกลั่น (condensortube) ปลอกกระสุนปืน ดอกกุญแจ เหยี่ยูกระษาปณ์ เช่น เหยี่ยูบาท และห้าบาท ทองแดงที่ใช้ในงานไฟฟ้าวิหะจะต้องมีความบริสุทธิ์มากถึง 99 - 99% ถ้าทำให้บริสุทธิ์ 100 เปอร์เซ็นต์ ต้องใช้วิธีแยกด้วยไฟฟ้าถ้าต้องการความบริสุทธิ์เพียง 99.5% ใช้วิธีหลอมธรรมดาแล้วกวาดด้วยไม้ส

2.10.3 โลหะบิสมีท (Bi)



รูปที่ 2.3 โลหะบิสมีท

เลขอะตอม	83 เป็นธาตุที่ 5 ของหมู่ VIA ในตารางธาตุ จัดเป็นโลหะ
น้ำหนักอะตอม	208.98 amu
จุดหลอมเหลว	271.5°C
จุดเดือด (โดยประมาณ)	1564°C
เลขออกซิเดชันสามัญ	+3, +5

การค้นพบ

ผู้ค้นพบ รู้จักโดยชาวตะวันออก กรีกและโรมัน ตั้งแต่สมัยโบราณ แต่หลักฐานไม่เด่นชัด ศตวรรษที่ 15 Basil Valentine เรียกธาตุนี้ว่า wismut ปลายศตวรรษที่ 16 Georgus Agricola เปลี่ยนชื่อ wismuth ไปเป็น bisemutum ซึ่งเป็นชื่อลาติน กลางศตวรรษที่ 18 J. Pott, C. Geoffrey และ T. Bergman ได้ทำการศึกษาธาตุนี้อย่างจริงจัง จนแน่ใจว่าเป็นธาตุที่มีสมบัติเป็นโลหะธาตุหนึ่ง

การใช้ประโยชน์

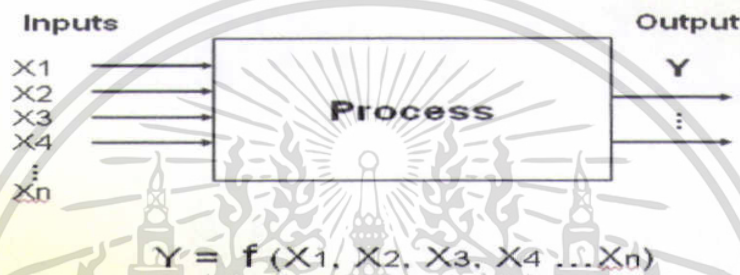
ใช้ในรูปของสารประกอบ

1. ใช้ในอุตสาหกรรมเภสัชภัณฑ์ สารประกอบของบิสมีทหลายชนิดมีสมบัติรักษาโรคได้ จึงใช้ทำยารักษาโรคเช่น ยารักษา indigestion ยารักษาโรค syphilis, gastric spasms และ dyspepsia
2. อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง (cosmetics) ที่ใช้มากได้แก่ บิสมีทออกซิคลอไรด์ ใช้เป็นส่วนผสมของลิปสติก (lipstick) น้ำยาทาเล็บ, eye shadow ฯลฯ

3. อุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ เช่น อุตสาหกรรมพลาสติก การผลิตเมทานอล
4. ใช้ทำโลหะเจือที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เรียกว่า "fusible alloys"
5. อื่น ๆ เช่น ใช้ผสมกับโลหะ เคลือบผิว Se ทำแม่เหล็กถาวร และทำกึ่งตัวนำ (semiconductors)

2.11 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)

การออกแบบการทดลอง หรือ Design of experiment เป็นเครื่องมือคุณภาพตัวหนึ่งซึ่งจะมีการทำการทดลองตามรูปแบบที่ได้ถูกออกแบบไว้เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ แล้วสร้างเป็นสมการทางสถิติ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์แบบประมาณการระหว่างค่าตัวแปรอิสระกับตัวแปรตาม อันจะช่วยอำนวยความสะดวกในการปรับกระบวนการเพื่อให้ผลลัพธ์ที่ต้องการ



รูปที่ 2.4 ระบบของ DOE

จากรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่ามี Input (X_1, X_2, X_3, X_4) ต่างๆ ที่ส่งผลต่อค่า Y ซึ่งเป็นคุณลักษณะด้านคุณภาพของกระบวนการ ในการออกแบบการทดลองต้องทำอย่างเป็นระบบเพื่อหาความสัมพันธ์เชิงสถิติของ Y และ X ต่างๆ โดยใช้ทรัพยากรให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด

2.12 R-Squared

ถ้าค่าความแปรปรวนของค่าความผิดพลาดหรือ Residual ซึ่งเกิดจากการนำค่าที่ได้จริงลบกับค่าที่ได้จากการพยากรณ์ รอบๆ เส้นถดถอยเมื่อเทียบกับความแปรปรวนดั้งเดิม มีค่าน้อยแล้ว ก็จะทำให้ความสามารถในการทำนายดีขึ้น ตัวอย่างเช่น ถ้าไม่มีความสัมพันธ์ระหว่าง X กับ Y ดังนั้น อัตราส่วนของความแปรปรวนของค่า Residual ของ Y ต่อค่าความแปรปรวนดั้งเดิมจะเท่ากับ 1 ถ้า X กับ Y มีความสัมพันธ์กันอย่างสมบูรณ์ ดังนั้นจะไม่มีค่า Residual อัตราส่วนค่าความแปรปรวนจะเท่ากับ 0 โดยทั่วไปค่านี้จะอยู่ระหว่าง 0 กับ 1 และ ถ้า 1 ลบด้วย อัตราส่วนนี้ก็คือค่า R^2 หรือ The Coefficient of Determination ถ้าค่านี้เท่ากับ 0.40 หมายความว่า ความแปรปรวนของค่า Y รอบๆ เส้นถดถอยเท่ากับ 0.60 เท่าของความแปรปรวนทั้งหมดหรือสมการถดถอยสามารถอธิบายได้ร้อยละ 40 ของความแปรปรวนดั้งเดิม ส่วนร้อยละ 60 เป็นความแปรปรวนอันเกิดจากค่า Residual ต่อค่าความแปรปรวนดั้งเดิม R-square เป็นตัวชี้ว่าตัวแบบของมีความเหมาะสม (Fit) กับค่ามูลมากน้อยเพียงใดหรือสมการถดถอยนั้น

ตามความหมายของ R^2 (The Coefficient of Determination) ที่กล่าวข้างต้นนั้นมีจุดอ่อนก็คือ การคำนวณดังกล่าวอยู่ในรูปร้อยละ กล่าวคือ ตัวหารนั้นมีค่าคงที่ (TSS) แต่ตัวเศษมีค่าลดลง (RSS) ดังนั้น การเพิ่มตัวแปรอิสระในสมการทำให้ตัวเศษลดลง เป็นผลให้ R^2 มีค่าสูงขึ้น หรือ การเพิ่มตัวแปรใหม่เข้าไปทำให้สมการดัดดอยมีประสิทธิภาพ (Efficient) ลดลง

กรณีที่จำนวนข้อมูลตัวอย่างที่นำมาใช้ในการพยากรณ์มีจำนวนน้อย ($n < 30$) การพิจารณาค่า R^2 ที่ได้จากการคำนวณจะมีค่าสูงเกินความเป็นจริง และเพื่อขจัดปัญหานี้จึงมีการปรับแก้ค่า R^2 โดยเรียกว่าค่า R^2 ที่ปรับปรุงแล้ว (Adjusted R^2)

ในทางทฤษฎีการเพิ่มตัวแปรอิสระแบบไม่จำกัด (Infinity) จะทำให้ R มีค่าเท่ากับ 1 Adjusted R

หรือ \bar{R}^2 เป็นความพยายามทำให้ข้อบกพร่องนี้ถูกต้องด้วยการปรับทั้งตัวเศษและตัวส่วนด้วยค่าองศาอิสระ (Degrees of Freedom) ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$1 - (1 - R^2) \frac{n-1}{n-k-1} \quad (2.1)$$

- R^2 แทน Coefficient of Determinant
- \bar{R}^2 แทน Adjusted Coefficient of Determinant
- n แทน Number of Observations
- k แทน Number of Independent Variables

ตัวอย่างเช่น

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } R^2 &= 0.9, n = 100, \text{ และ } k = 5 \\ \bar{R}^2 &= 1 - (1 - 0.9) \frac{100 - 1}{100 - 5 - 1} \\ &= 1 - (1 - 0.9) \frac{99}{94} \\ &= 1 - (0.1)(1.05319) \end{aligned}$$

2.13 การตรวจสอบค่าทางสถิติ

2.12.1 t-Statistic

t-Statistic ก็คือ ค่าสัมประสิทธิ์หารด้วย Standard Error ของค่าสัมประสิทธิ์ ค่า Standard Error เป็นตัวประมาณของ Standard Deviation ของค่าสัมประสิทธิ์ ค่ามันจึงเปลี่ยนไปแล้วแต่กรณี ถ้าค่าสัมประสิทธิ์มีค่าใหญ่มากเมื่อเทียบกับค่า Standard Error ของมันเอง ก็เป็นไปได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์นั้นจะไม่เท่ากับศูนย์

2.13.2 F-Statistic

F-Statistic ใช้ทดสอบสัมประสิทธิ์ของตัวแปรทุกตัวเท่ากับศูนย์หรือไม่ หรือ ตัวแปรทุกตัวมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามหรือไม่ ถ้าปฏิเสธสมมติฐานหลักหมายความว่าอย่างน้อยหนึ่งตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม

2.13.3 หลักการสรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

การทดสอบสมมติฐานทางสถิติด้วยตัวทดสอบสถิติเช่น t หรือ F อาจพอสรุปขั้นตอนโดยทั่วไปได้ดังนี้

1. ตั้งสมมติฐานที่จะทดสอบค่าพารามิเตอร์
2. คำนวณค่า t-Value หรือ F-Value จากข้อมูลที่มีอยู่
3. กำหนดระดับนัยสำคัญของความผิดพลาด (α) หรือความเชื่อมั่น ($1-\alpha$)
4. เปิดค่า t-Table หรือ F-Table จากตารางสถิติ โดยอาศัย Degree of Freedom และระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ในข้อ 3
5. ถ้าค่า t-Value หรือ F-Value มีค่าน้อยกว่า t-Table หรือ F-Table จึงสรุปว่ายอมรับสมมติฐานหลัก (Accept H_0) และมิค่า

t-Value หรือ F-Value มีค่ามากกว่า t-Table หรือ F-Table จึงสรุปว่าปฏิเสธสมมติฐานหลัก (Reject H_0) ซึ่งแสดงว่าค่าพารามิเตอร์ที่ทดสอบมีความแตกต่างกัน

ทั้งนี้หากกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 แสดงว่าพารามิเตอร์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (Significant difference) ถ้าหากกำหนดระดับนัยสำคัญที่ .01 แสดงว่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง (Highly Significant Difference)

2.13.4 การสรุปผลการวิเคราะห์จากความเป็นไปได้โดยคอมพิวเตอร์

ในการสรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติจากผลที่ได้นั้นสามารถกระทำได้สะดวกโดยอ่านค่าจากความน่าจะเป็น (Probability) ที่คอมพิวเตอร์คำนวณไว้ให้ ทั้งนี้ไม่จำเป็นต้องอ่านค่า t-Value หรือ F-Value และ t-Table หรือ F-Table รวมถึงค่า Degree of Freedom แต่อย่างใด โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ตั้งสมมติฐานทดสอบค่าพารามิเตอร์
2. กำหนดระดับนัยสำคัญของความผิดพลาด (α) เช่น 0.05, 0.01, 0.10 เป็นต้น
3. อ่านค่าความน่าจะเป็น Prob มากกว่า F หรือ P-Value จากผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยคอมพิวเตอร์
4. ถ้าค่า Prob มากกว่า F หรือ P-Value มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด จึงสรุปว่ายอมรับสมมติฐานหลัก (Accept H_0) และถ้าค่า Prob มากกว่า F หรือ P-Value มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด จึงสรุปว่าปฏิเสธสมมติฐานหลัก (Reject H_0) ซึ่งแสดงว่ามีความแตกต่างในพารามิเตอร์ที่ทดสอบ

Prob มากกว่า F หรือ P-Value คือค่าความน่าจะเป็นที่มากกว่า t-value หรือ F-value ที่คำนวณจากข้อมูล ซึ่งหมายถึงความน่าจะเป็นที่จะสรุปผลผิดพลาดจากการปฏิเสธสมมติฐานเดิม

ดังนั้นถ้าจะสรุปว่าค่าพารามิเตอร์มีความแตกต่างกันทางสถิติ (Significant difference) ค่าความน่าจะเป็นที่ คอมพิวเตอร์คำนวณนี้จะต้องมีความสำคัญกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด

2.14 Lack of Fit

การวิเคราะห์ Lack of Fit จะช่วยยืนยันให้ทราบถึงความเหมาะสมของแบบจำลองซึ่งค่านี้ควรมีค่าน้อยๆ ถ้ามีค่ามากแสดงว่ามี แบบจำลองสมการอื่นที่เหมาะสมมากกว่า

$$Y = b_0 + b_1 * \text{Linear Term} + b_2 * \text{Quadratic Term} + b_3 * \text{Special Cubic} + b_4 * \text{Cubic}$$

$$H_0: b_0 = b_1 = b_2 = b_3 = b_4 = 0 \text{ (ไม่มี Lack of Fit)}$$

$$H_a: \text{อย่างน้อย 1 เทอม ไม่เท่ากับ 0}$$

ถ้าแบบจำลองมีนัยสำคัญ แสดงว่าแบบจำลองที่สร้างไว้เหมาะสมดีแล้ว แต่ถ้ามี Lack of Fit Significant เกิดขึ้นแสดงว่า นอกจากแบบจำลองที่สร้างขึ้นแล้วยังมีแบบจำลองอื่นที่เหมาะสมกว่า

การทดสอบ Lack of Fit

1. Total Residual Sum of Square (df1)

2. Total Pure Error Sum of Square (df2)

3. Lack of Fit Sum of Square (df3) = Residual - Pure Error โดยที่ $df3 = df1 - df2$

4. Lack of Fit Mean Square = Lack of Fit Sum of Square / df3

นัยสำคัญของ Lack of Fit ทดสอบ โดย

$$F = \text{Lack of Fit Mean Square} / \text{Pure Error Mean Square} \text{ เทียบกับค่า } F \text{ ที่เปิดจากตารางที่ } df3 \text{ และ } df2$$

2.15 การทดลองแบบผสม (Mixture Design)

การออกแบบสิ่งทดลองแบบ Mixture ใช้ปัจจัยที่เป็นเชิงปริมาณตั้งแต่ 2 ปัจจัยเป็นต้นไป โดยปัจจัยนั้นๆ จะมีความเกี่ยวเนื่องกัน ซึ่งปริมาณของแต่ละปัจจัยเมื่อรวมกันจะเป็น 100% กล่าวคือ เมื่อปัจจัยหนึ่งมีปริมาณเพิ่มขึ้น ย่อมทำให้ปัจจัยอื่นๆ มีสัดส่วนลดลง ซึ่งแตกต่างจากการทดลองที่ไม่ใช่ Mixture ที่ตัวแปรแต่ละตัวจะเป็นอิสระจากกันแบบหุ่นสำหรับ Mixture เนื่องจากตัวแปรทุกตัวรวมกันได้ 100% ดังนั้นแบบหุ่นรีเกรสชันของ Mixture

จึงไม่มีค่าคงที่ หรือเทอม β_0 และ $\beta_{ij} x_i^2 x_j$ โดยแบบหุ่นที่ใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระมีดังนี้

สมการ Linear

$$Y = \sum (\beta_i x_i) \quad (2.2)$$

สมการ Quadratic

$$Y = \sum (\beta_i x_i) + \sum (\beta_{ij} x_i x_j) \quad (2.3)$$

สมการ Special Cubic

$$Y = \sum (\beta_i x_i) + \sum (\beta_{ij} x_i x_j) + \sum (\beta_{ijk} x_i x_j x_k) \quad (2.4)$$

สมการ Cubic

$$Y = \sum (\beta_i x_i) + \sum (\beta_{ij} x_i x_j) + \sum (\beta_{ij} x_i x_j (x_i - x_j)) + \sum (\beta_{ijk} x_i x_j x_k) \quad (2.5)$$

2.16 Differential Scanning Calorimetry (DSC)

ในปัจจุบันมีการใช้เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ (Analytical Instruments) ชนิดต่างๆ ทั้งในภาครัฐและเอกชน เหตุผลหนึ่งคือเพื่อการวิจัยและพัฒนา ซึ่งเครื่องมือดังกล่าว แต่ละชนิดมีเทคนิคการวิเคราะห์ (Analytical Techniques) ที่แตกต่างกัน การวิเคราะห์โดยการใช้ความร้อน (Thermal Analysis) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ชนิดหนึ่งที่วัดสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties) ของสารต่างๆ เปรียบเทียบกับอุณหภูมิหรือเวลา เทคนิคชนิดนี้ที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ Differential Scanning Calorimetry หรือเรียกย่อๆว่า DSC ซึ่งวัดอุณหภูมิ และ Heat Flow จากการเปลี่ยนแปลงความร้อน (Thermal Transition) ของวัสดุเปรียบเทียบกับอุณหภูมิหรือเวลา ทำให้ได้ข้อมูลทั้งทางด้านคุณภาพและปริมาณ (Qualitative and Quantitative) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมี การเปลี่ยนแปลงนี้จะเกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดหรือคายความร้อน (Endothermic or Exothermic Processes) หรือการเปลี่ยนแปลงความจุความร้อน (Heat Capacity Changes) จึงนำมาใช้เพื่อศึกษาสมบัติที่เป็นลักษณะพิเศษของวัสดุต่างๆ ได้แก่ โพลีเมอร์ ยา อาหาร และตัวอย่างทางชีววิทยา วัสดุอินทรีย์และอนินทรีย์ สำหรับการวิจัยและพัฒนา การควบคุมคุณภาพและการผลิต

ปกติแล้วการเปลี่ยนแปลง (Transitions) ที่วัด ได้แก่ กลาสทรานซิชัน (Glass Transition, T_g) การหลอมเหลว (Melting) กระบวนการตกผลึก (Crystallization Process) การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของพลาสติกเทอร์โมเซตที่เปลี่ยนจากผงหรือของเหลวไปเป็นของแข็งจากการเชื่อมโยงและสร้างพันธะใหม่ตามระยะเวลาหรืออุณหภูมิที่เหมาะสม (Curing) จลนศาสตร์ของการ Cure (Cure Kinetics) จุด onset การออกซิเดชัน (Onset of Oxidation) และความจุความร้อน (Heat Capacity) เป็นต้น

Differential Scanning Calorimeter ในปัจจุบันที่ใช้งานอยู่มี 3 ชนิดดังรายละเอียดต่อไปนี้

- (1) Heat Flux DSC นิยมใช้กันมากที่สุดเพราะมีข้อดีคือมีความสม่ำเสมอของเส้น Baseline (Baseline Stability) และ Cell ที่คงทน
- (2) Power Compensation DSC ให้ความละเอียดของ DSC Curve (Resolution) ที่ดีและมีอัตราการเพิ่มความร้อนและการเย็นตัวที่รวดเร็ว
- (3) DSC ที่ใช้ T-Zero Technology ซึ่งเป็นเทคโนโลยีล่าสุดด้วยการรวมเอาข้อดีหรือลักษณะที่ดีที่สุดจากเทคโนโลยีของ Heat Flux DSC และ Power Compensation DSC เข้าด้วยกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.16.1 Heat Flux DSC

Heat Flux DSC มีรายละเอียดดังนี้คือ ตัวอย่าง Encapsulate อยู่ใน Aluminum Pan เรียกว่า Sample Pan และมี Aluminum Pan เปล่าๆ ที่ Encapsulate แล้วเรียกว่า Reference pan โดยที่ pan ทั้งสองแบบดังกล่าววางอยู่บน Thermoelectric Disk ที่อยู่ในเตาเผา (Furnace) เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจะทำให้ความร้อนผ่าน Thermoelectric Disk เข้าไปในตัวอย่างและสารอ้างอิงทำให้เกิดความแตกต่างของ heat flow ที่ตัวอย่างและสารอ้างอิงซึ่งจะวัดโดย thermocouple และการใช้กฎของโอห์ม (Ohm's law) โดยใช้สมการตามสมการที่ (2.6)

$$q = \frac{DT}{R} \quad (2.6)$$

q คือ Heat Flow ของตัวอย่าง

DT คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างตัวอย่างและสารอ้างอิง

R คือ ความต้านทานของ Thermoelectric Disk

สมการข้างต้นดังกล่าวเป็น One-term Equation ง่ายที่ไม่บันทึก Heat Flow ที่เข้าและออกจาก Sensor และ Sample Pan ทำให้ผลที่ได้ค่อนข้างดีแต่จะมีข้อจำกัดเรื่อง Baseline Flatness ความไว (Sensitivity) และความละเอียดของ DSC curve



รูปที่ 2.5 Heat Flux DSC

2.16.2 Power Compensation DSC

Power Compensation DSC มีรายละเอียดดังนี้คือ สัญญาณที่ได้จากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่าง ตัวอย่าง และสารอ้างอิงจะถูกชดเชยด้วย Heating Power ในส่วนของตัวอย่างในทันที โดยที่ Differential Heating Power จะเท่ากับ Differential Heat Flow Rate เมื่อเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นความร้อน

2.16.3 DSC ที่ใช้ T-zero Technology

DSC ที่ใช้ T-Zero Technology เป็นเทคโนโลยีใหม่ของเครื่อง DSC ที่ได้รับการออกแบบมา โดยเฉพาะ เพื่อที่จะวัด Heat Flow ที่เข้าและออกจากตัวอย่างให้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น ดังที่แสดงในรูปที่ 2.6 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

Cell ที่ได้รับการออกแบบใหม่มี sensor ประกอบด้วย Constantan Body ที่ตอบสนองสัญญาณอย่างรวดเร็ว (Fast Signal Response) กับ Platforms ของตัวอย่างและสารอ้างอิงที่ยกสูงขึ้น และแยกออกจากกัน ทำให้แยกตัวอย่างและสารอ้างอิงออกจากกันได้ดีขึ้น อีกทั้งยังช่วยให้การวาง Pan อยู่ในตำแหน่งเดียวกันทุกครั้งเพื่อความแม่นยำของข้อมูล และ Platforms ดังกล่าวเชื่อมต่ออยู่กับฐานของ Heating Block โดยท่อที่มีผนังบางๆเพื่อที่จะทำให้เกิดความต้านทานความร้อน (Thermal Resistance) ระหว่าง Platforms และฐานของ Heating Block สำหรับ Thermocouple ที่อยู่ข้างใต้ของ Platform แต่ละอันทำหน้าที่วัดอุณหภูมิของตัวอย่างและสารอ้างอิง



รูปที่ 2.6 การตรวจสอบแบบ DSC ที่ใช้ T-zero Technology

อย่างไรก็ตามระบบนี้จะมี Sensor ที่ตรวจความไม่สมดุล (Imbalance) ของความต้านทาน (Resistance) และประจุ (Capacitance) และขดเชยความไม่สมดุลดังกล่าว สำหรับความไม่สมดุลนี้มีผลทำให้ Baseline Flatness, Sensitivity, และ Resolution แย่ลง ดังนั้น T-Zero Technology จึงใช้สมการ Four-Term Heat Flow Equation ที่บันทึกความไม่สมดุลและความแตกต่างของอัตราการเพิ่มความร้อนระหว่างการเปลี่ยนแปลงความร้อน เช่น การหลอมเหลว (Melting) ทำให้วัด Heat Flow ที่เข้าและออกจากตัวอย่างได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น หัวใจของเทคโนโลยีชนิดนี้คือ T-Zero Cell ที่ทำให้วัดค่าต่างๆ ได้มากขึ้นและให้สมรรถนะที่ดีกว่า (Superior Performance) ในการวัดทั้งแบบที่ร้อนขึ้น (Heating) และแบบที่เย็นลง (Cooling) เพราะมีการรวมคุณสมบัติที่ดีที่สุดของการออกแบบ Heat flux และ Power Compensation DSC เข้าด้วยกัน

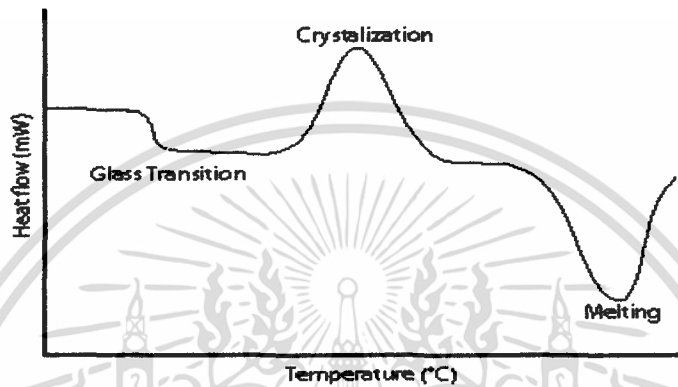
ผลของการทดลอง DSC จะได้ Heating and Cooling Curve ซึ่งสามารถใช้คำนวณการเปลี่ยนแปลงพลังงาน Enthalpies กราฟดังกล่าวนี้จะเป็นไปตามสมการ (2.7)

$$\Delta H = KA \quad (2.7)$$

ΔH แทน การเปลี่ยนแปลงพลังงาน Enthalpies

K แทน Calorimetric Constant

A แทน พื้นที่ใต้กราฟเส้นโค้ง



รูปที่ 2.7 กราฟระหว่างการเคลื่อนที่ของความร้อนกับอุณหภูมิ

2.17 Wave Soldering

การเชื่อมต่อโดยการบัดกรี รอยเชื่อมที่ได้ต้องแข็งแรงและมั่นคง ทนทานต่อการสั่นสะเทือน สามารถรับน้ำหนักได้พอสมควร ไม่ก่อให้เกิดปัญหาทางไฟฟ้าระหว่างผิวหน้าสัมผัสตรงจุดบัดกรี ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์ที่ไม่ต้องการโยกย้ายภายหลังจากการประกอบเสร็จแล้ว การบัดกรีที่ดียิ่งจะทำให้ได้รอยต่อที่มีคุณภาพนั้น ขึ้นอยู่กับตัวประกอบหลัก 3 ประการคือ

1. โลหะพื้นฐาน (Base Metal)

โลหะที่ถูกบัดกรีส่วนใหญ่จะเป็นเหล็กและทองแดง ส่วนอลูมิเนียมก็สำคัญเพราะมีน้ำหนักเบาแต่จะบัดกรียากกว่าเหล็ก ทองแดง และอัลลอยของเหล็กกับทองแดงแต่ก็ต้องคำนึงถึงฟลักซ์ที่เหมาะสมด้วยซึ่งจะมีผลต่อการบัดกรี

โลหะที่เป็นดีบุก แคดเมียม จะง่ายต่อการเชื่อมประสานของโลหะบัดกรี ตะกั่วจะเกิดออกไซด์ที่ผิวเมื่ออยู่ในสภาพขึ้นและอาจต้องทำความสะอาดก่อนการบัดกรี ทองเหลือง ทองแดง บรอนซ์ และเหล็กจะเกิดออกไซด์บางบริเวณ

2. ชนิดของโลหะบัดกรีที่ใช้

จุดบัดกรีจะเกิดขึ้นจากการใช้โลหะบัดกรีเป็นตัวกลางในการอุดให้แน่น และเชื่อมยึดระหว่างโลหะที่ต้องการเชื่อมยึดให้ติดกัน การบัดกรีจะก่อให้เกิดการเชื่อม โยงกันด้านกลศาสตร์ของโลหะบัดกรีกับโลหะพื้นฐาน พันธะระหว่างโลหะบัดกรีกับโลหะที่จะบัดกรีจะมีมากกว่าแรงเกาะติดทางกล ซึ่งก็คือพันธะโลหะ ทั้งสองแรงจะส่งผลให้เกิดความแข็งแรงของการยึดติด

โลหะบัดกรีที่สามารถใช้ได้กับโลหะเกือบทุกชนิด คือโลหะผสมของดีบุกและตะกั่ว เนื่องจากดีบุกสามารถเกิดโลหะผสมได้ดีกับ เหล็ก ทองแดง นิกเกิลและตะกั่ว

3. สารประสานหรือฟลักซ์

ฟลักซ์มีหน้าที่ทำให้การบัดกรีสะดวกขึ้น คือช่วยให้ตะกั่วบัดกรีไหล ซึ่งฟลักซ์ที่ใช้ในการบัดกรีอาจเป็นชนิดของแข็ง ของเหลวหรือก๊าซ เมื่อได้รับความร้อนจะเป็นตัวเร่งให้โลหะอ่อนตัวโดยการบัดกรี

ฟลักซ์ทำหน้าที่หลักดังนี้

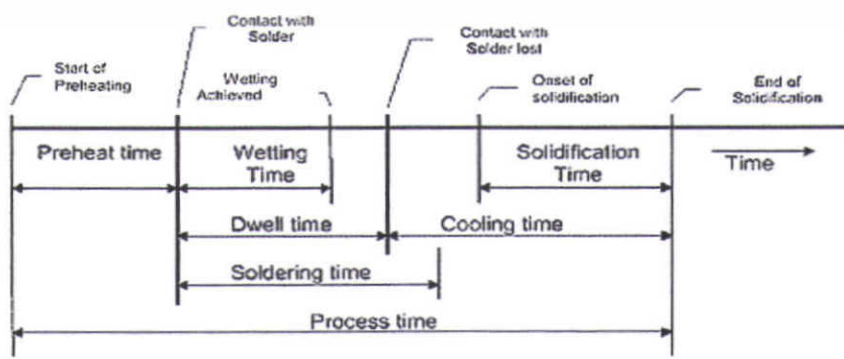
1. เป็นตัวทำให้ผิวหน้าของโลหะพื้น สะอาดปราศจากพวกคราบออกไซด์
2. ทำให้ตะกั่วบัดกรีไหลได้มากขึ้นเป็นผลให้เกิดการยึดติดได้ง่าย
3. เป็นตัวป้องกันการเกิดออกซิเดชันระหว่างการบัดกรี

Wave Soldering เป็นกระบวนการเชื่อม IC เข้ากับแผ่นวงจรไฟฟ้า หรือ PCB โดยนำแผ่น PCB เคลื่อนที่ผ่านโลหะบัดกรีที่หลอมเหลวที่ถูกบีบขึ้นมา โดยให้ขาของ IC และ แผ่น PCB ผ่านบริเวณยอดคลื่น การเชื่อมที่เกิดขึ้นนี้จะไม่มีกรข้ามขาของ IC และมีการปรับยอดคลื่นให้พอเหมาะ ไม่ให้มากเกินไปเพื่อป้องกันการลัดวงจร หรือ ลักษณะที่เรียกว่า Bridge



รูปที่ 2.8 การทำงานของเครื่อง Wave soldering

รูปที่ 2.9 การเกิด Bridge ในกระบวนการ Wave Soldering



รูปที่ 2.10 กระบวนการของ Wave Soldering

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการที่เกิดขึ้นในการทำ Wave Soldering จะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ตั้งแต่เริ่มต้นทำให้ร้อน จนถึงสุดท้ายการแข็งตัวของโลหะบัดกรี ซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนต่างๆดังนี้

Preheating ในช่วงนี้อุณหภูมิของแผ่น PCB จะถูกทำให้อยู่ที่ 45 องศาเซลเซียส และจะถูกทำให้สูงขึ้น ไปก่อนการบัดกรีที่ 85 องศาเซลเซียส

Wetting time เป็นช่วงเวลาระหว่างการสัมผัสครั้งแรก ของแผ่น PCB และโลหะบัดกรีที่หลอมเหลว จนถึงช่วงที่ โลหะบัดกรีเริ่มเกาะกันแข็งตัวเป็นรอยเชื่อม

Dwell Time เป็นช่วงเวลาตั้งแต่ การสัมผัสกันครั้งแรกของโลหะบัดกรีและแผ่น PCB จนกระทั่งแยกออกจากกัน

Soldering Time เป็นช่วงเวลาจริงๆที่แผ่น PCB สัมผัสกับโลหะบัดกรีและเริ่มแข็งตัว

Solidification Time เป็นช่วงเวลาทีโลหะบัดกรีจับตัวกันเป็นของแข็งตรงด้านล่างของแผ่น PCB

Cooling Time เป็นช่วงที่โลหะบัดกรีที่หลอมเหลวติดอยู่กับแผ่น PCB เริ่มลดอุณหภูมิลงจากอุณหภูมิสูงสุด ช่วงนี้จะเป็นช่วงที่เกิดขึ้นหลังจากช่วง Dwell Time ในช่วงนี้ อาจเกิดรอยแตกขึ้นได้ ถ้ามีการสัมผัสกันที่ผิดเพียงพอ

2.18 โปรแกรม Design Expert

โปรแกรม Design Expert เป็น Software ที่ช่วยในการหาค่าที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการ โดยการออกแบบการทดลองซึ่งมีเครื่องมือทางสถิติที่มีประโยชน์มากมาย

Factorial Designs ใช้ในการระบุปัจจัยที่สำคัญซึ่งส่งผลกระทบต่อกระบวนการหรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการจะปรับปรุง

Response Surface Methods ทักษะในการปรับกระบวนการเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด

Mixture Design Techniques ใช้ในการหาสูตรที่เหมาะสมที่สุด

สำหรับโปรแกรม Design Expert สามารถสร้างกราฟ 3มิติของพื้นผิวตอบสนองได้ โดยเลือก เส้น Contour บนกราฟ 2 มิติ เพื่อแสดงผลของค่าตอบสนอง

Mixture Design เป็นการทดลองที่มีลักษณะดังนี้

1. ส่วนประกอบเมื่อรวมกันจะต้องได้คงที่ เช่น สาร ก มี 10% ของส่วนผสม สาร ข มี 30 % และ สาร ค จะเป็นส่วนที่เหลือคือ 60% ถ้าปริมาณของของส่วนประกอบหนึ่งเพิ่มขึ้นแล้วปริมาณของส่วนประกอบที่เหลือจะต้องลดลง ถ้าปริมาณของส่วนประกอบ ไม่มีผลต่อกันควรจะใช้ Response Surface Design มากกว่า Mixture Design

2. ผลตอบสนองต้องขึ้นอยู่กับสัดส่วนของส่วนประกอบ เช่นรสชาติของ ไอศกรีมขึ้นอยู่กับสัดส่วนของส่วนผสม ไม่ใช่ปริมาณของไอศกรีม ถ้าผลตอบสนองไม่ขึ้นกับสัดส่วนของส่วนผสมควรใช้ Response Surface Design ขั้นตอนแรกในการสร้าง Mixture Design เลือก New Design จาก File เมนู และเลือกการทดลองแบบ Mixture ซึ่งจากนั้นจะยังมีอีกหลายชนิดการทดลองให้เลือก เช่น Simplex Design ซึ่งจะมีส่วนประกอบอยู่บนพื้นที่ Simplex เป็นรูปแบบที่ง่ายที่สุดจะมี จุดขอบเขตที่ $n+1$ ใน n ทิศทางของพื้นที่ พื้นที่ของ Simplex ที่มี 2 ส่วนประกอบจะเป็นเส้นตรง, 3 ส่วนประกอบจะเป็น 3 เหลี่ยม, 4 ส่วนประกอบจะเป็น 4 เหลี่ยม) สำหรับการทดลองแบบ Non-Simplex ควรเลือก D-Optimal Design บนหน้าแรกในโปรแกรมจะต้องใส่ชื่อของแต่ละส่วนประกอบ ปริมาณต่ำสุดสูงสุด และ ปริมาณทั้งหมดของส่วนผสม รวมทั้งหน่วยด้วย โดยโปรแกรมจะมีให้ใส่ชื่อจำกัดในกรณีที่เป็นชื่อจำกัดของแต่ละ

ส่วนประกอบ และข้อจำกัดของหลายส่วนประกอบ เช่น $2 < A < 10$, $A + B < 10$ ตามลำดับ สำหรับกรณีที่ต้องการใส่ข้อจำกัดของหลายส่วนประกอบ ให้กำหนดใส่ใน Edit Constraints ถ้าใส่ค่าต่ำสุดสูงสุดของส่วนประกอบอยู่ในช่วงที่มีขนาดไม่เท่ากันหรือมีการเพิ่มข้อจำกัดของหลายส่วนประกอบเข้าไป จะทำให้ไม่สามารถใช้การทดลองแบบ Simplex ได้ซึ่งจะทำให้เลือก Simplex Lattice หรือ Simplex Centroid Design ได้ ซึ่งจะยังมีรูปแบบการทดลองอีกหลากหลายให้เลือกสำหรับการทดลองแบบ Non-Simplex แต่การทดลองแบบ D-Optimal จะเป็นตัวเลือกที่ดีที่สุด ส่วนประกอบแต่ละอันจะถูกให้ชื่อกำกับด้วยตัวอักษร ปริมาณของส่วนประกอบจะอยู่ในช่วง 0-100% ในโปรแกรม Design Expert จะตรวจสอบข้อจำกัดของส่วนประกอบซึ่งต้องเข้ากันได้ ถ้าส่วนประกอบมีช่วงเกินสัดส่วนที่จะเป็นไปไม่ได้ ตัวโปรแกรมจะบอกให้ปรับช่วงขอบเขตใหม่ซึ่งในบางครั้งโปรแกรมจะแนะนำช่วงมาให้

โปรแกรม Design Expert ใช้แบบจำลองในการเลือกจุดที่จะทำการทดลอง ซึ่งกำลังของแบบจำลองยิ่งสูงยิ่งต้องใช้จุดในการทดลองมาก การเลือกกระดิ่งกำลังของแบบจำลองสูงก็จะต้องทำการทดลองมากครั้งเพื่อให้มีข้อมูลเพียงพอที่จะคำนวณได้ แบบจำลองพร้อมกำลังที่โปรแกรมใช้มีดังนี้

กำลัง	รูปแบบจำลอง
1	Linear - A, B, C....
2	Quadratic - AB, AC, BC ...
3	Special Cubic - ABC...
4	Cubic - AB (A-B), AC (A-C)...

เมื่อใส่ข้อมูลครบและสั่งให้โปรแกรมดำเนินการจะได้สัดส่วนของส่วนผสมและจะต้องนำส่วนผสมนั้นไปทดลองเพื่อให้ได้ค่าผลลัพธ์ที่สนใจ เมื่อได้คำตอบแล้วให้นำข้อมูลกลับไปใส่ในช่องผลตอบสนอง ซึ่งโปรแกรมจะทำการวิเคราะห์ค่าที่ได้โดยบอกเป็นค่าทางสถิติ เช่น Sequential Model Sum of Squares, Lack of Fit Test และ Model Summary Statistic เป็นต้น นอกจากนี้โปรแกรมยังมีการแสดงกราฟ Ternary Phase อีกด้วยบนกราฟจะมีเส้น Contour หลายเส้นปรากฏขึ้นซึ่งหมายความว่าส่วนผสมบนเส้นนั้นจะให้ค่าผลตอบสนอง 1 ค่า ในการทำการทดลองจะต้องเลือกค่าอุณหภูมิที่ต้องการจากนั้นจึงมาเลือกส่วนผสมที่ทำให้เกิดต้นทุนต่ำที่สุด

2.19 Ternary Phase Diagram

Ternary Phase Diagram เป็นแผนภาพที่มีส่วนประกอบของธาตุ 3 ชนิด มักถูกสร้างอยู่ในรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า และองค์ประกอบของระบบ Ternary จะถูกแสดงในรูปสามเหลี่ยมด้านเท่านี้ โดยทั่วไป Ternary Phase Diagram มักจะสร้างขึ้นที่ความดันคงที่ที่ 1 บรรยากาศ



รูปที่ 2.11 Ternary Phase Diagram

จากรูปที่ 2.10 จะเห็นได้ว่าส่วนประกอบที่บริสุทธิ์ A, B, และ C จะอยู่บริเวณมุมของรูปสามเหลี่ยม ส่วนผสม Binary AB, BC, และ AC นั้นจะแสดงบริเวณด้านแต่ละด้านของรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า ที่จุด X สามารถอ่านค่าได้ว่ามีส่วนประกอบ 40%A, 40%B, และ 20%C

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 ค้นหาข้อมูล

ทำการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติธาตุ ราคาธาตุ โปรแกรม Design Expert ทฤษฎีการผสม และวิธีทดสอบจุดหลอมเหลว (Liquidus Temperature) แบบ DSC

3.2 เลือกธาตุที่ใช้ในการทำการทดลอง

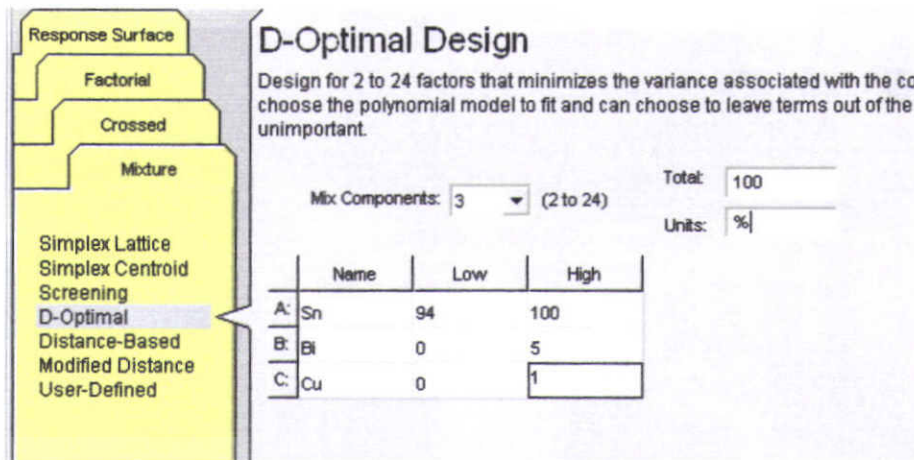
ทำการศึกษาธาตุที่นำมาใช้ในการทดลองผสม อันได้แก่ ดีบุก (Sn) ซึ่งเป็นโลหะพื้นฐานเพื่อสร้างความสามารถในการบัดกรี แล้วจึงเลือกส่วนผสมที่ 2 คือ บิสมัท (Bi) เพื่อช่วยลดจุดหลอมเหลวของส่วนผสมลง จากนั้นก็เลือกส่วนผสมที่ 3 คือ ทองแดง (Cu) เพื่อเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนและเพิ่มการกระจายตัวของโลหะบัดกรีที่ติดตั้งตารางที่ 3.1 ซึ่งแสดงจุดหลอมเหลว [8] และราคาของแต่ละธาตุ [10]

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของธาตุ ตะกั่ว (Pb) ดีบุก (Sn) บิสมัท (Bi) ทองแดง (Cu)

ธาตุ	จุดหลอมเหลว (°C)	ราคา (\$/Kg)
Pb	327.46	3.53
Sn	231.93	16.75
Bi	271.5	37.48
Cu	1084.62	7.44

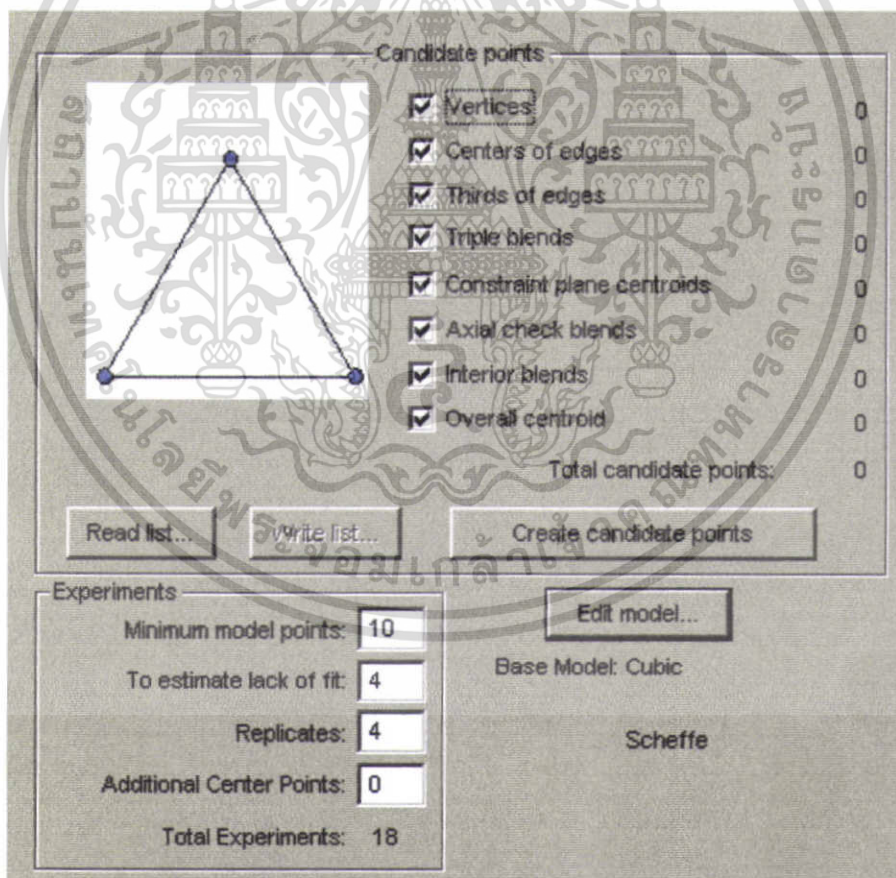
3.3 ออกแบบการทดลอง ด้วยโปรแกรม Design Expert

1. เลือกการทดลองแบบ Mixture D-Optimal Design เพื่อแสดงว่าเป็นการทดลองแบบผสมที่มีข้อจำกัดของแต่ละธาตุ ดังรูปที่ 3.1
2. กำหนดจำนวนของธาตุ ผลรวมของแต่ละส่วนผสม หน่วยของแต่ละธาตุ และขอบเขตของแต่ละธาตุ ดังรูปที่ 3.1
3. กำหนดขอบเขตของแต่ละธาตุดังรูปที่ 3.1 โดยการดูว่าในโลหะบัดกรีที่มีใช้กันในปัจจุบันนั้นมีส่วนประกอบของ ดีบุก (Sn), บิสมัท (Bi) หรือทองแดง (Cu) ตัวใดหรือไม่ ถ้ามีก็ให้ดูว่ามีปริมาณเท่าไร เพื่อนำมาประมาณขอบเขตของแต่ละธาตุว่ามีขอบเขตเท่าไรถึงเท่าไร



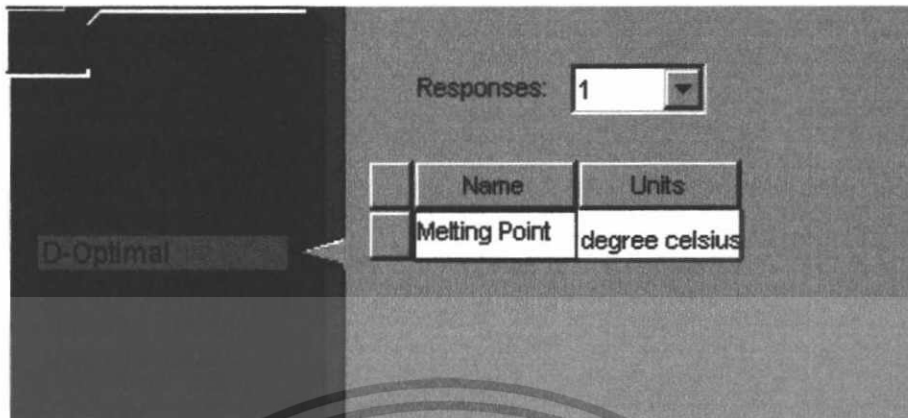
รูปที่ 3.1 การกำหนดขอบเขตของธาตุ

4. กำหนดจุดที่ทำการทดลอง ในส่วนนี้โปรแกรมจะแนะนำส่วนผสมที่ใช้ในการทดลองให้ โดยดูจากส่วนผสมที่มีการทำการทดสอบบ่อยๆ ซึ่งในปัญหานี้พบว่าโปรแกรมได้เลือกทุกๆ จุดที่โปรแกรมแนะนำให้ และได้รวม 18 ส่วนผสม ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การกำหนดจุดที่ทำการทดลอง

5. เลือกจำนวนผลตอบสนองที่สนใจ จากนั้นกำหนดชื่อและหน่วยของผลตอบสนองที่สนใจ ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การกำหนดผลตอบสนองที่สนใจ

6. หลังจากนั้น โปรแกรมจะทำการออกแบบการทดลองให้ว่าควรทำการทดลองอย่างน้อยกี่ครั้งและในแต่ละครั้งควรทำการทดลองที่ส่วนผสมใด ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ผลการออกแบบการทดลอง

Run	Sn (wt %)	Bi (wt %)	Cu (wt %)	MP (°C)
1	94.00	5.00	1.00	
2	97.33	1.67	1.00	
3	99.00	0.00	1.00	
4	95.00	5.00	0.00	
5	96.67	3.33	0.00	
6	98.00	1.25	0.75	
7	100.00	0.00	0.00	
8	94.67	5.00	0.33	
9	95.50	3.75	0.75	
10	94.00	5.00	1.00	
11	95.00	5.00	0.00	
12	99.00	0.00	1.00	
13	99.67	0.00	0.33	
14	100.00	0.00	0.00	
15	96.00	3.75	0.25	
16	97.50	2.50	0.00	
17	98.33	1.67	0.00	
18	96.50	2.50	1.00	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ทดสอบหาจุดหลอมเหลวโดยวิธี DCS

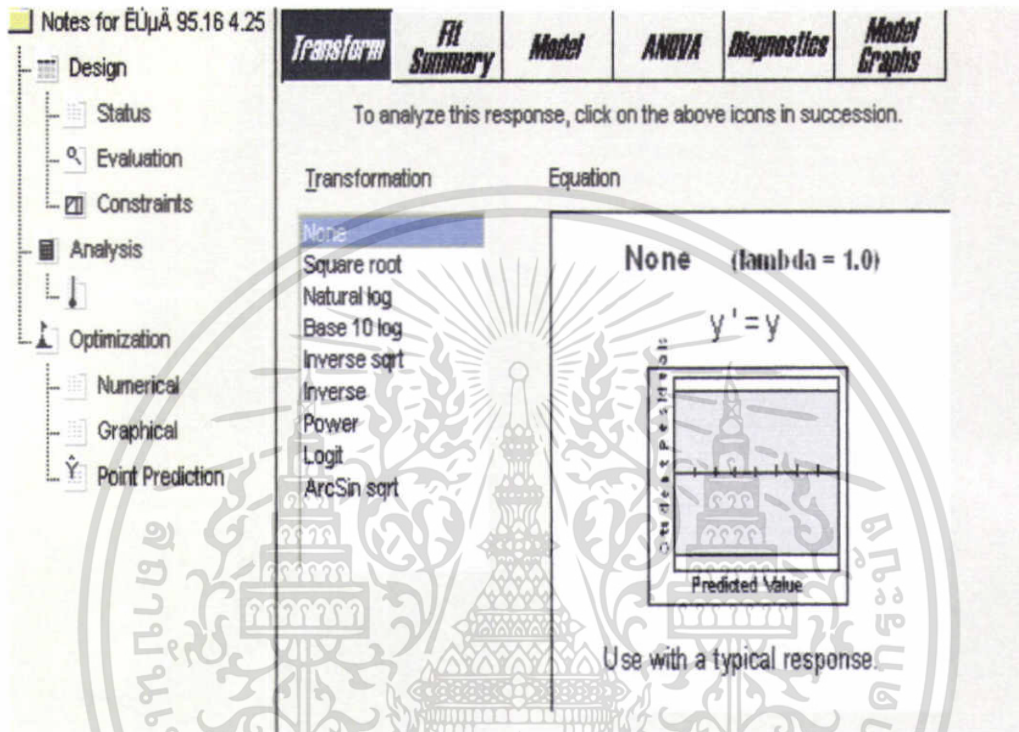
ทดสอบหาจุดหลอมเหลวด้วยวิธี DSC จากนั้นนำค่าจุดหลอมเหลวที่ได้มาใส่ในโปรแกรม Design Expert เพื่อให้โปรแกรมวิเคราะห์ผลการทดลองให้ ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ผลการทดลองหาจุดหลอมเหลว

Run	Sn (wt %)	Bi (wt %)	Cu (wt %)	MP (°C)
1	94.00	5.00	1.00	244.23
2	97.33	1.67	1.00	237.14
3	99.00	0.00	1.00	234.67
4	95.00	5.00	0.00	226.50
5	96.67	3.33	0.00	228.80
6	98.00	1.25	0.75	225.70
7	100.00	0.00	0.00	231.93
8	94.67	5.00	0.33	225.12
9	95.50	3.75	0.75	222.86
10	94.00	5.00	1.00	244.23
11	95.00	5.00	0.00	226.50
12	99.00	0.00	1.00	232.50
13	99.67	0.00	0.33	231.85
14	100.00	0.00	0.00	231.93
15	96.00	3.75	0.25	226.67
16	97.50	2.50	0.00	230.00
17	98.33	1.67	0.00	231.11
18	96.50	2.50	1.00	239.00

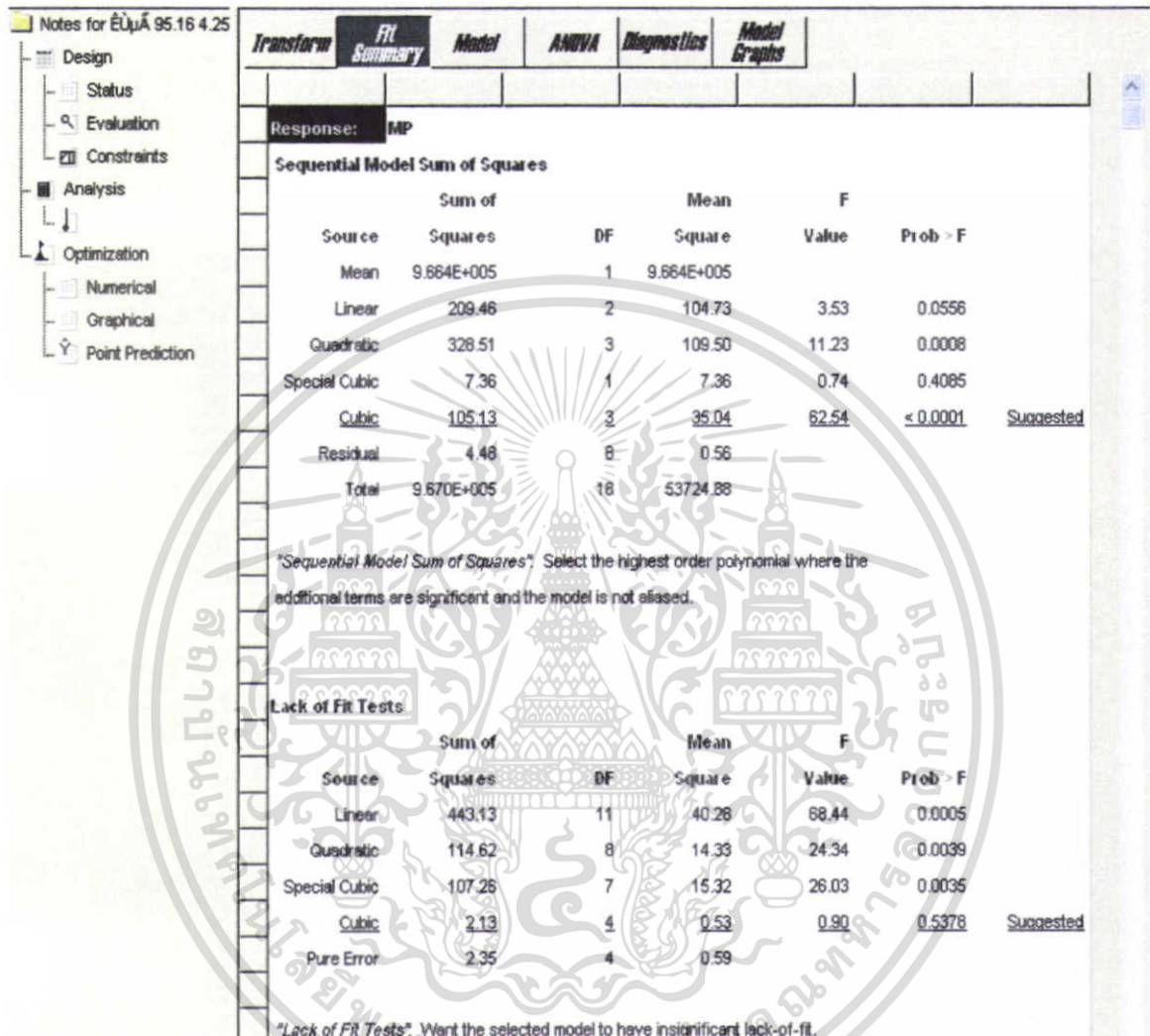
3.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง ด้วยโปรแกรม Design Expert

1. เลือก MP (Analysis) จะปรากฏหน้าที่มีแถบให้เลือก 6 แถบ คือ Transform, Fit Summary, Model, ANOVA, Diagnostics, Model Graphs
2. ในแถบ Transform ให้เลือกรูปแบบของสมการว่ามีฟังก์ชันหรือไม่ เช่น อาจมีฟังก์ชันของ Square root, Log หรือ ฟังก์ชันอื่นๆ ส่วนในปรัญญาพันธฉบับนี้เลือกแบบไม่มีฟังก์ชัน ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ผลการวิเคราะห์ผลการทดลอง ในแถบ Transform

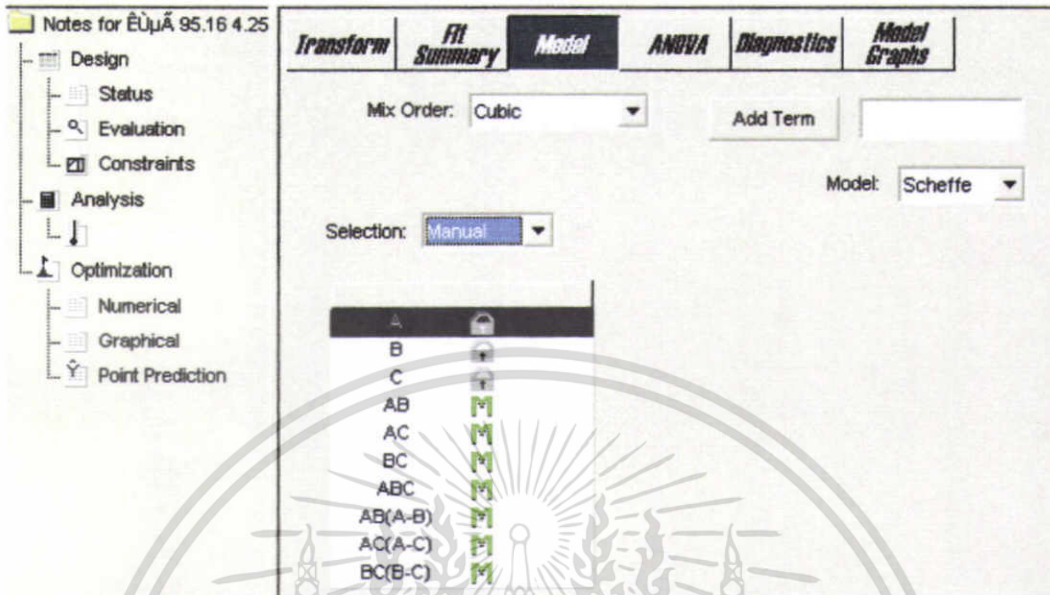
3. ในแถบ Fit Summary ในส่วนนี้โปรแกรมจะทำการวิเคราะห์ดูว่าสมการควรมีรูปแบบใด Linear, Quadratic, Special Cubic หรือ Full Cubic โดยใช้วิธี 3 วิธี คือ 1) Sequential Model Sum of Squares 2) Lack of Fit Tests และ 3) Model Summary Statistics ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ผลการวิเคราะห์ผลการทดลอง ในแถบ Fit Summary

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ในแถบ Model ให้เลือกรูปแบบสมการที่โปรแกรมแนะนำ โดยในปริศยานี้พจนซ์ฉบับนี้เลือกรูปแบบสมการแบบ Cubic ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ผลการวิเคราะห์ผลการทดลอง ในแถบ Model

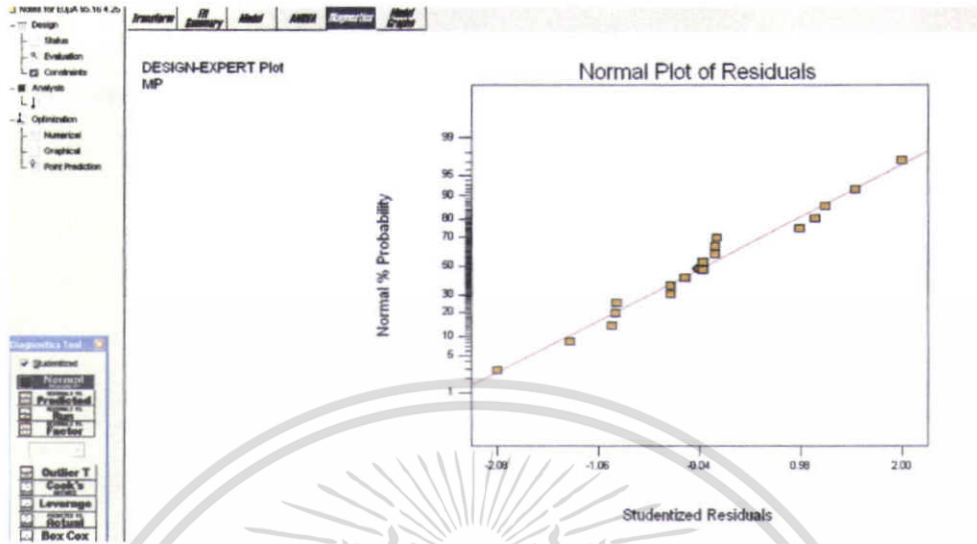
5. ในแถบ ANOVA โปรแกรมจะทำการวิเคราะห์รูปแบบสมการที่เลือก และคำนวณหาสมการที่ใช้ทำนาย ผลตอบสนองออกมาให้ ดังรูปที่ 3.7

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F
Model	850.48	9	94.49	128.96	< 0.0001
Linear Mixture	225.12	2	112.56	200.88	< 0.0001
AB	86.51	1	86.51	154.39	< 0.0001
AC	89.59	1	89.59	159.88	< 0.0001
BC	1.11	1	1.11	1.99	0.1961
ABC	81.04	1	81.04	144.62	< 0.0001
AB(A-B)	78.65	1	78.65	136.79	< 0.0001
AC(A-C)	85.89	1	85.89	153.28	< 0.0001
BC(B-C)	4.55	1	4.55	8.11	0.0215
Residual	4.48	8	0.56		
Lack of Fit	2.13	4	0.53	0.90	0.5378
Pure Error	2.35	4	0.59		
Cor Total	854.94	17			

รูปที่ 3.7 ผลการวิเคราะห์ผลการทดลอง ในแถบ ANOVA

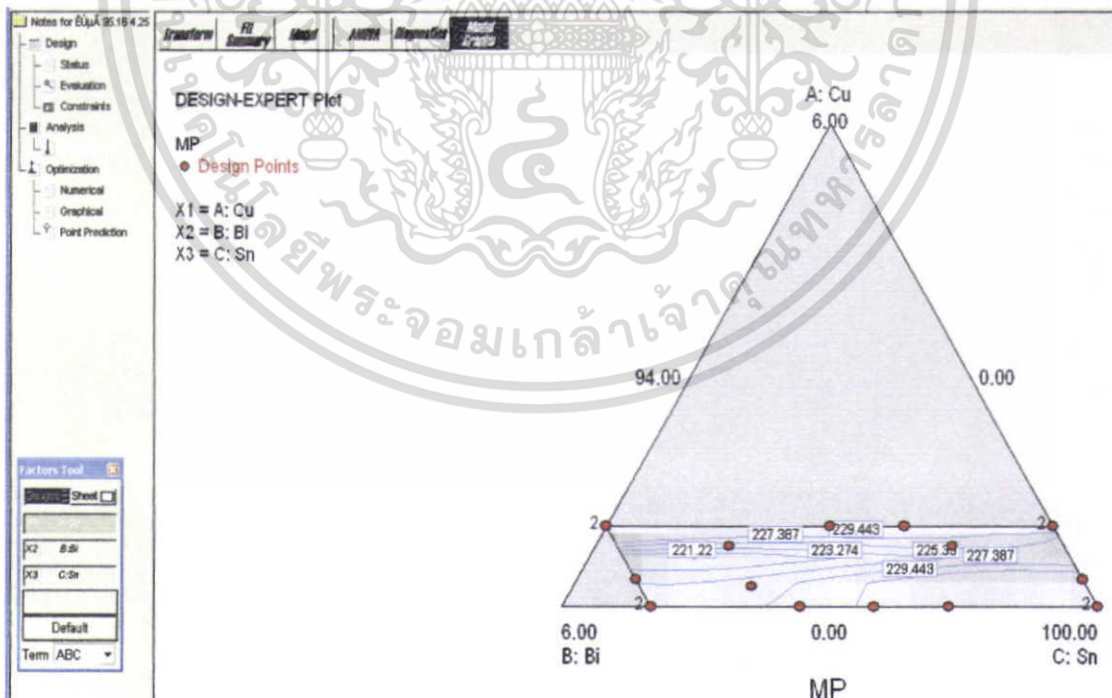
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ 36 อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ในแถบ Diagnostics จะมีกราฟต่างๆ มากมายเพื่อใช้ยืนยันว่าสมการที่ได้มามีความเหมาะสมกับผลตอบสนองหรือไม่ โดยในส่วนรายละเอียดของกราฟในส่วนนี้จะอธิบายในบทต่อไป ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ผลการวิเคราะห์ผลการทดลอง ในแถบ Diagnostics

7. ในแถบ Model Graphs ในส่วนนี้โปรแกรมจะจำลองสมการออกมาเป็นกราฟให้ โดยเป็นกราฟ Ternary Phase Diagram ระหว่างธาตุ ดีบุก (Sn) บิสมัท (Bi) ทองแดง (Cu) ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ผลการวิเคราะห์ผลการทดลอง ในแถบ Model Graphs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 เลือกส่วนผสมที่เหมาะสม

ทำการเลือกส่วนผสมที่เหมาะสม โดยพิจารณาจาก 2 ปัจจัย คือ 1) จุดหลอมเหลว และ 2) ต้นทุน โดยการเลือกจุดหลอมเหลวนั้นต้องเลือกให้มีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง $183^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}$ หรือให้ใกล้เคียงกับช่วงอุณหภูมินี้ที่สุด เนื่องจากถ้าต่ำกว่านี้รอยเชื่อมที่ได้จะไม่สามารถใช้ในงานที่เกิดความร้อนสูงได้ แต่ถ้ามากกว่าช่วงนี้อาจส่งผลให้วงจรอิเล็กทรอนิกส์เสียหายขณะทำการเชื่อม และอาจต้องมีการปรับกระบวนการผลิตเพื่อให้สามารถหลอมเหลวโลหะบัดกรีที่มีจุดหลอมเหลวสูงขึ้น การพิจารณาปัจจัยด้านจุดหลอมเหลวนั้นจะเลือกอุณหภูมิจากเส้นกราฟภายใน Ternary Phase Diagram ที่สร้างขึ้น และเลือกส่วนผสมภายในเส้นที่ได้จากการเลือกด้วยจุดหลอมเหลวให้มีต้นทุนในการผลิตเมื่อคิดจากต้นทุนในแต่ละธาตุให้ต่ำที่สุด ส่วนรายละเอียดนั้นจะอธิบายอย่างละเอียดในบทต่อไป



บทที่ 4

ผลการทดลอง

จากวิธีการดำเนินงานบทที่ 3 ได้ทำการศึกษาและทดลองใช้โปรแกรมในการหาส่วนผสมของโลหะ บัคกรีไร้สารตะกั่ว ที่มีส่วนผสมของ Sn, Cu, และ Bi และได้ใส่ค่าจริงจากการทำ DSC เพื่อทำการวิเคราะห์ ซึ่งมีผลการดำเนินงานดังนี้

4.1 เลือกธาตุที่ใช้ในการผสมโลหะบัคกรีไร้สารตะกั่ว

ได้ทำการพิจารณาเลือกธาตุ 3 ธาตุ ที่จะใช้ในการทำการทดลอง อันได้แก่ ดีบุก (Sn) บิสมัท (Bi) และทองแดง (Cu) โดยมีปัจจัยในการเลือกคือ จุดหลอมเหลวและราคาของแต่ละธาตุ

4.2 พิจารณารูปแบบของสมการ

จากการทดลองสามารถสรุปรูปแบบของสมการได้เป็นแบบ Cubic ซึ่งโปรแกรมได้เตรียมตารางทางสถิติที่มีประโยชน์มากมายซึ่งสามารถใช้เลือกแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดได้ แล้วตัวโปรแกรมจะทำการแนะนำแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดไว้ให้เห็นตารางและในบางกรณีโปรแกรมยังแสดงแบบจำลองที่เกิดสมการคู่แฝด (Aliased) ซึ่งเกิดจากการทดลองไม่เพียงพอ

โปรแกรมจะคำนวณผลของแต่ละแบบจำลองซึ่งจะออกมาในรูปของค่าทางสถิติ เช่น F Value, Lack of Fit และค่า R Squared ด้วย ซึ่งใช้ในการเปรียบเทียบแต่ละแบบจำลอง โดยที่โปรแกรมจะแสดงตารางทางสถิติให้ 3 ตาราง คือ

4.2.1 Sequential Model Sum of Squares

เป็นการแสดงการปรับปรุงสะสมของแต่ละเทอมที่เพิ่มขึ้นมา เช่น Linear แสดงค่านัยสำคัญของพจน์ Linear หลังจากการคำนวณค่า Mean และค่า Block ส่วนค่า Quadratic จะระบุค่านัยสำคัญของการเพิ่มพจน์ Quadratic เข้าไปยัง Linear Block และ Mean ในตารางนี้ควรเลือกแบบจำลองที่มีกำลังสูงสุดและค่า P-Value หรือ Prob>F ที่มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ ก็คือ 0.05

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Sequential Model Sum of Squares

Sequential Model Sum of Squares					
Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F
Mean	966392.8971	1	966392.8971		
Linear	209.4591247	2	104.7295623	3.526363564	0.0556
Quadratic	328.5080618	3	109.5026873	11.23322191	0.0008
Special Cubic	7.360019493	1	7.360019493	0.738571472	0.4085
Cubic	105.1344941	3	35.04483136	62.54081305	< 0.0001
Residual	4.4828111	8	0.560351387		
Total	967047.8416	18	53724.88009		

จากตารางที่ 4.1 ถ้าพิจารณาค่าของแบบจำลองที่สูงที่สุดก็จะได้ 2 แบบจำลอง คือ Special Cubic และ Cubic และเมื่อพิจารณาค่า P Value ที่ต้องน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ก็จะได้แบบจำลองที่เหมาะสม ซึ่งก็คือ Cubic

4.2.2 Lack of Fit Tests

ตาราง Lack of Fit จะแสดงว่าแบบจำลองที่เลือกมีความเหมาะสมมากน้อยแค่ไหน การทดสอบ Lack of Fit จะเป็นการเปรียบเทียบระหว่าง Residual Error Mean Squared กับ Pure Error Mean Squared แบบจำลองที่เลือก จะต้องไม่มีค่า Lack of Fit อย่างมีนัยสำคัญ ถ้าแบบจำลองใดเกิดค่า Lack of Fit มีนัยสำคัญแปลว่าแบบจำลองนั้น ไม่มีความเหมาะสม ซึ่งดูได้จากค่า P Value ที่น้อยกว่า 0.05

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Lack of Fit Test

Lack of Fit Tests					
Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F
Linear	443.1309365	11	40.28463059	68.43998486	0.0005
Quadratic	114.6228747	8	14.32785934	24.34175172	0.0039
Special Cubic	107.2628552	7	15.32326503	26.03285698	0.0035
Cubic	2.1283611	4	0.532090275	0.903973794	0.5378
Pure Error	2.35445	4	0.5886125		

จากตารางที่ 4.2.เมื่อพิจารณาค่า P-Value ที่มากกว่า 0.05 จะพบว่า แบบจำลอง Cubic แบบเดียว เท่านั้นที่ Lack of Fit ไม่มีนัยสำคัญ

4.2.3 Model Summary Statistics

ตาราง Model Summary Statistics จะเป็นอีกตารางหนึ่งที่แสดงค่าทางสถิติที่ใช้ในการเปรียบเทียบแบบจำลองเช่นกัน ค่าทางสถิตินี้ประกอบด้วย Standard Deviation เป็นค่าการเบี่ยงเบนที่เกิดขึ้นจากความผิดพลาดในการทดลองซึ่งค่านี้ควรมีค่าน้อยๆ สำหรับค่า R-Squared และ Adjusted R-Squared ทั้ง 2 ค่านี้ควรมีค่าเข้าใกล้ 1 เนื่องจากค่าที่เท่ากับ 1 แสดงถึงกรณีในทางอุดมคติที่ค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงค่าที่ได้จากการพยากรณ์ที่สุด สำหรับค่า Predicted R-Squared เป็นการประมาณจำนวนของความแปรปรวนของข้อมูล ซึ่งค่านี้ควรมีค่าเข้าใกล้ 1 เช่นกัน และค่า PRESS (Predicted Residual Error Sum of Square) จะเป็นการทำนายค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ซึ่งควรมีค่าน้อยๆ

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Model Summary Statistics

Model Summary Statistics						
Source	Std.Dev.	R-Squared	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	PRESS	
Linear	5.449681253	0.319812016	0.229120285	0.018674642	642.7136565	
Quadratic	3.122196405	0.821393534	0.746974173	0.598677554	262.8439332	
Special Cubic	3.156772016	0.832631157	0.74133906	0.579932949	275.1206092	
Cubic	0.748566221	0.993155434	0.985455297	0.955776503	28.9639367	Suggested

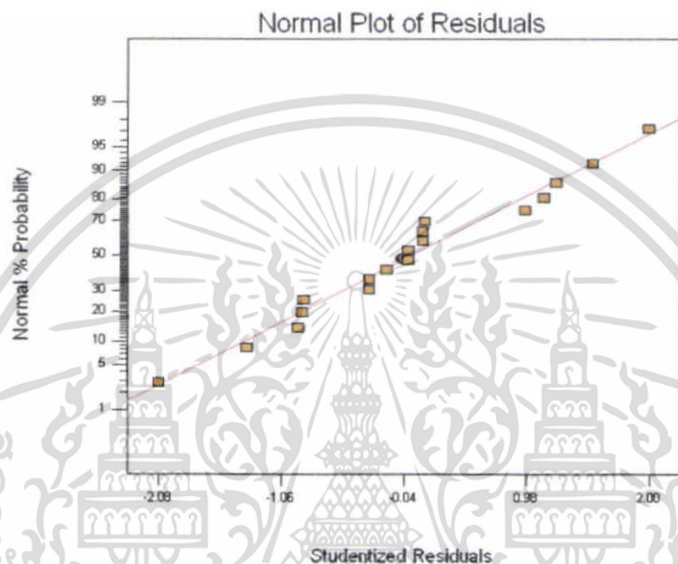
จากตารางที่ 4.3 เมื่อพิจารณาแบบจำลอง Cubic พบว่ามีค่า Standard Deviation และค่า PRESS น้อยที่สุดและเมื่อพิจารณาค่า R ทั้ง 3 ตัวแล้วพบว่ามีค่าเข้าใกล้ 1 ที่สุดเช่นกัน จึงสรุปได้ว่าสำหรับตาราง Model Summary Statistics แบบจำลอง Cubic มีความเหมาะสมกว่าแบบจำลองอื่นๆ

4.3 กราฟ Residual Plot

กราฟ Residual Plot จะเป็นกราฟที่ใช้ตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติเพื่อยืนยันความเหมาะสมของสมการที่ได้ โดยมีหลายรูปแบบ คือ

กราฟ Normality Probability Plot

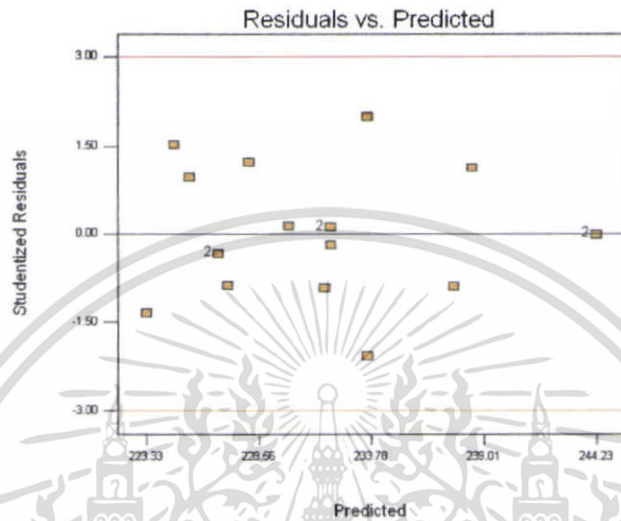
เป็นกราฟที่ใช้เพื่อตรวจสอบลักษณะการกระจายที่ไม่ปกติ (Nonnormality) โดยดูจากการที่กราฟมีการเรียงตัวกันเป็นลักษณะเส้นตรง จะแสดงว่าเศษเหลือ (Residuals) มีการกระจายแบบปกติ



รูปที่ 4.1 กราฟ Normality Probability Plot ของสมการรูปแบบ Cubic

กราฟ Residuals vs. Predicted

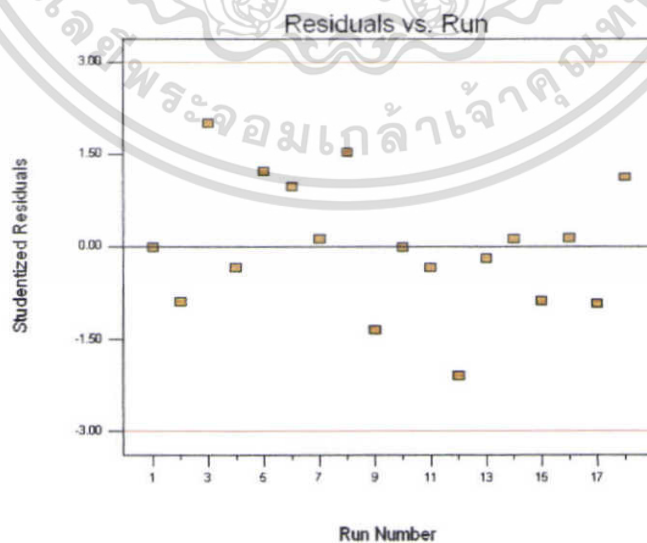
เป็นกราฟระหว่างค่าเศษเหลือ (Residual) กับค่าของผลตอบสนองที่ได้จากการทำนาย ใช้เพื่อทดสอบสมมติฐานของความแปรปรวนคงที่ (Constant Variance) โดยลักษณะกราฟที่ดีควรมีรูปแบบการกระจายเป็นแบบสุ่ม



รูปที่ 4.2 กราฟ Residuals vs. Predicted ของสมการรูปแบบ Cubic

กราฟ Residuals vs. Run

เป็นกราฟที่ใช้เพื่อตรวจว่ามีตัวแปรซ่อนเร้น (Lurking Variables) อยู่หรือไม่ ซึ่งตัวแปรเหล่านี้มักเกิดในระหว่างขั้นตอนการทำการทดลองเพื่อหาผลตอบสนอง โดยลักษณะกราฟที่ดีควรมีรูปแบบการกระจายเป็นแบบสุ่ม

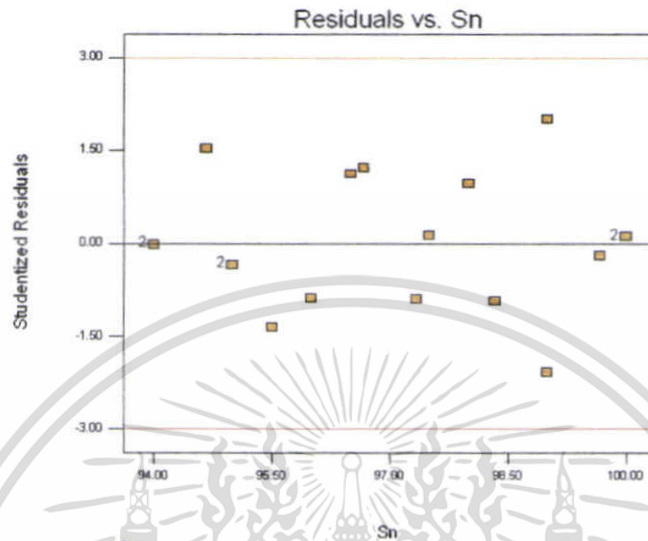


รูปที่ 4.3 กราฟ Residuals vs. Run ของสมการรูปแบบ Cubic

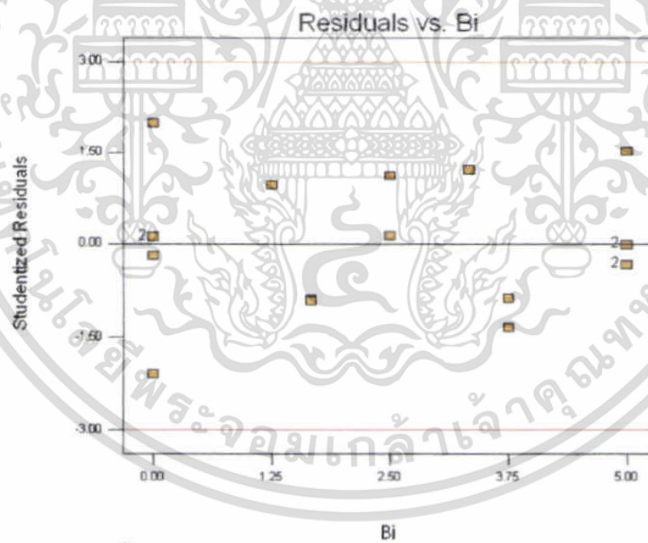
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟ Residual vs. Factor

เป็นกราฟที่ใช้เพื่อดูว่าความแปรปรวนมีความเหมาะสมกับตัวแปรแต่ละตัวในสมการทำนายหรือไม่ โดยลักษณะกราฟที่ดีควรมีรูปแบบการกระจายเป็นแบบสุ่ม

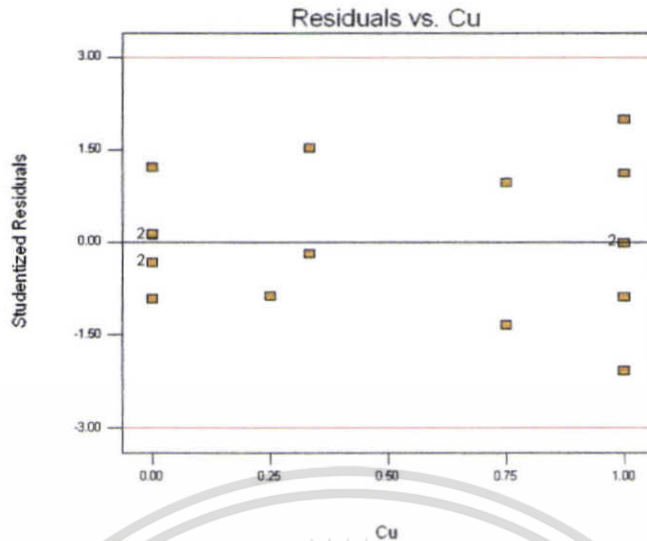


รูปที่ 4.4 กราฟ Residual vs. Sn ของสมการรูปแบบ Cubic



รูปที่ 4.5 กราฟ Residual vs. Bi ของสมการรูปแบบ Cubic

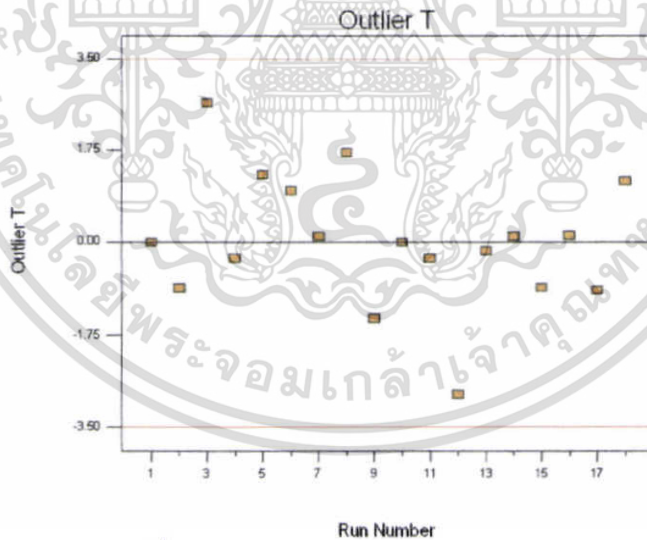
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 กราฟ Residual vs. Cu ของสมการรูปแบบ Cubic

กราฟ Outlier

เป็นกราฟที่ใช้เพื่อดูว่าจุดที่ทดลองมีความผิดปกติหรือไม่ โดยมีขอบเขต (Control Limit) ที่เกิดจากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) หากมีจุดที่ทำการทดลองโดยอยู่นอกขอบเขต (นอกเส้นสีแดง) ก็แสดงว่าจุดนั้นมีความผิดปกติควรได้รับการแก้ไข อาจทำได้โดยการทดลองซ้ำหรือเพิ่มการทดลองใหม่เข้าไปแทนที่

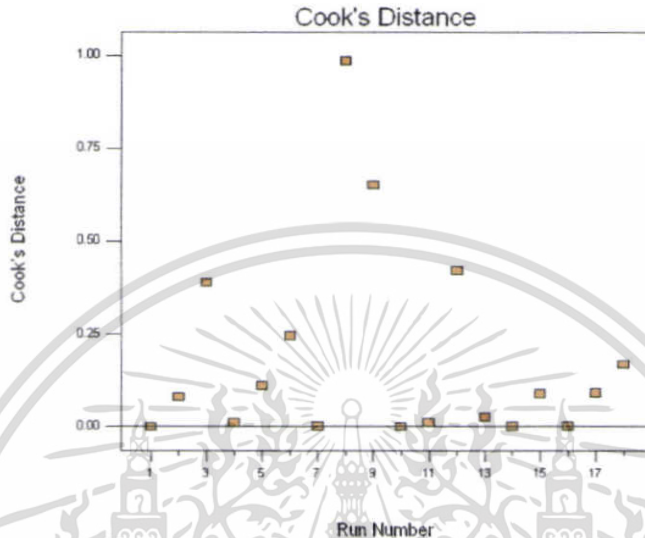


รูปที่ 4.7 กราฟ Outlier ของสมการรูปแบบ Cubic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟ Cook's Distance

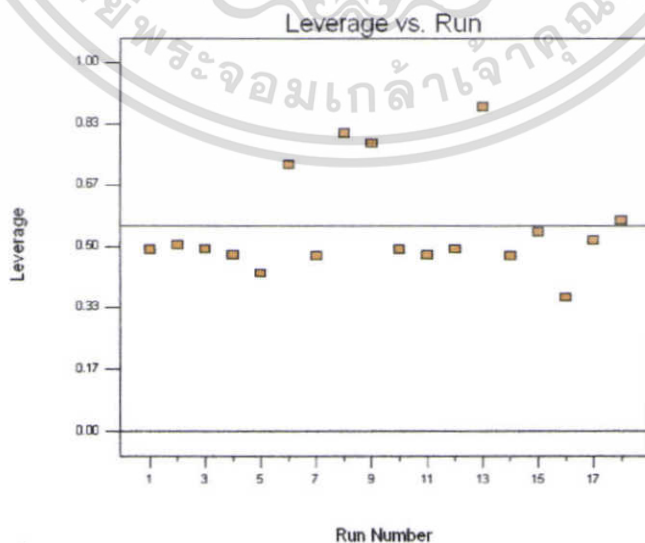
เป็นกราฟที่ใช้แสดงผลกระทบของจุดที่ทำการทดลองที่มีต่อสมการทำนาย โดยลักษณะที่ผิดปกติควรอยู่ เกาะกลุ่มกัน ไม่ควรมีจุดใดโคดออกมาไม่เข้ากลุ่ม สังเกตจากลักษณะของจุดบนกราฟที่โคดออกมา จุดที่โคดออกมานั้น ควรได้รับการแก้ไข อาจทำได้โดยการทดลองซ้ำหรือเพิ่มการทดลองใหม่เข้าไปแทนที่



รูปที่ 4.8 กราฟ Cook's Distance ของสมการรูปแบบ Cubic

กราฟ Leverage

เป็นกราฟที่ใช้ดูว่าแต่ละจุดที่ทำการทดลองมีอิทธิพลต่อสมการทำนายแค่ไหน โดยค่ายิ่งใกล้ 1 ยิ่งมี อิทธิพลมากซึ่งเป็นลักษณะที่ไม่ดี เพราะจะหมายถึงสมการนั้นแปรตามจุดนั้นจุดเดียวไม่ได้กระจายไปทุกๆ จุด ดังนั้น จุดที่เท่ากับ 1 หรือเข้าใกล้ 1 มากๆ ควรได้รับการแก้ไข อาจทำได้โดยการทดลองซ้ำหรือเพิ่มการทดลองใหม่เข้าไป แทนที่

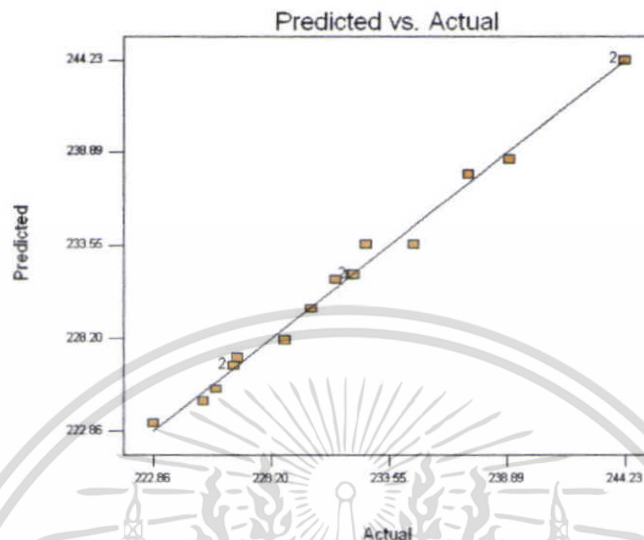


รูปที่ 4.9 กราฟ Leverage ของสมการรูปแบบ Cubic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟ Actual vs. Predicted

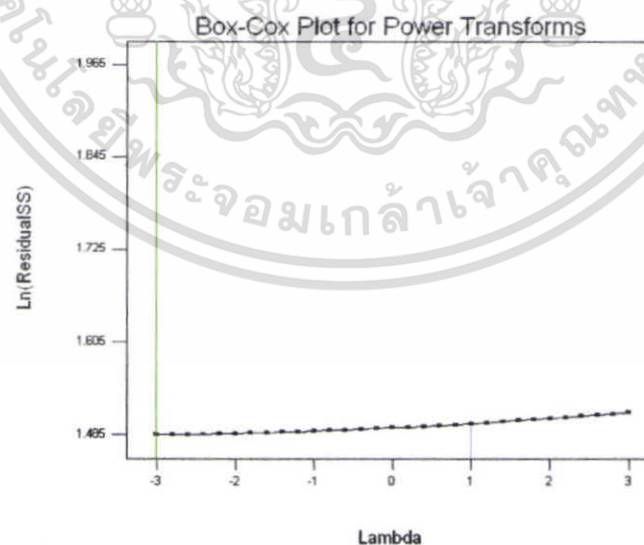
เป็นกราฟระหว่างค่าจริงที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายจากสมการ ซึ่งใช้เพื่อติดตามคุณค่าของผลตอบสนองว่ามีค่าตรงกับการทำนายหรือไม่



รูปที่ 4.10 กราฟ Actual vs. Predicted ของสมการรูปแบบ Cubic

กราฟ Box Cox Plot for Power Transforms

เป็นกราฟที่ใช้ช่วยในการเลือกค่าความเปลี่ยนแปลงของสมการ (Transformation Model) ที่น้อยที่สุดที่ยอมรับได้ โดยค่านี้ใช้เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่า Residual Sum of Square เพื่อเลือกรูปแบบของสมการนั้นมีความเหมาะสมหรือไม่ โดยค่า Lambda คือค่าความเชื่อมั่นหากมีค่าเท่ากับ 1 ค่าความเชื่อมั่นจะเท่ากับ 100%



รูปที่ 4.11 Box Cox Plot for Power Transforms ของสมการรูปแบบ Cubic

จากกราฟทั้งหมดจะเห็นว่าแทบจะไม่มีลักษณะกราฟที่ไม่ดีเลย จึงเป็นการยืนยันอีกครั้งว่ารูปแบบสมการแบบ Cubic นั้นเป็นรูปแบบที่เหมาะสมกับสมการทำนายจุดหลอมเหลวของสารประกอบ 3 ตัว ได้แก่ ดีบุก (Sn) บิสมัท (Bi) และทองแดง (Cu)

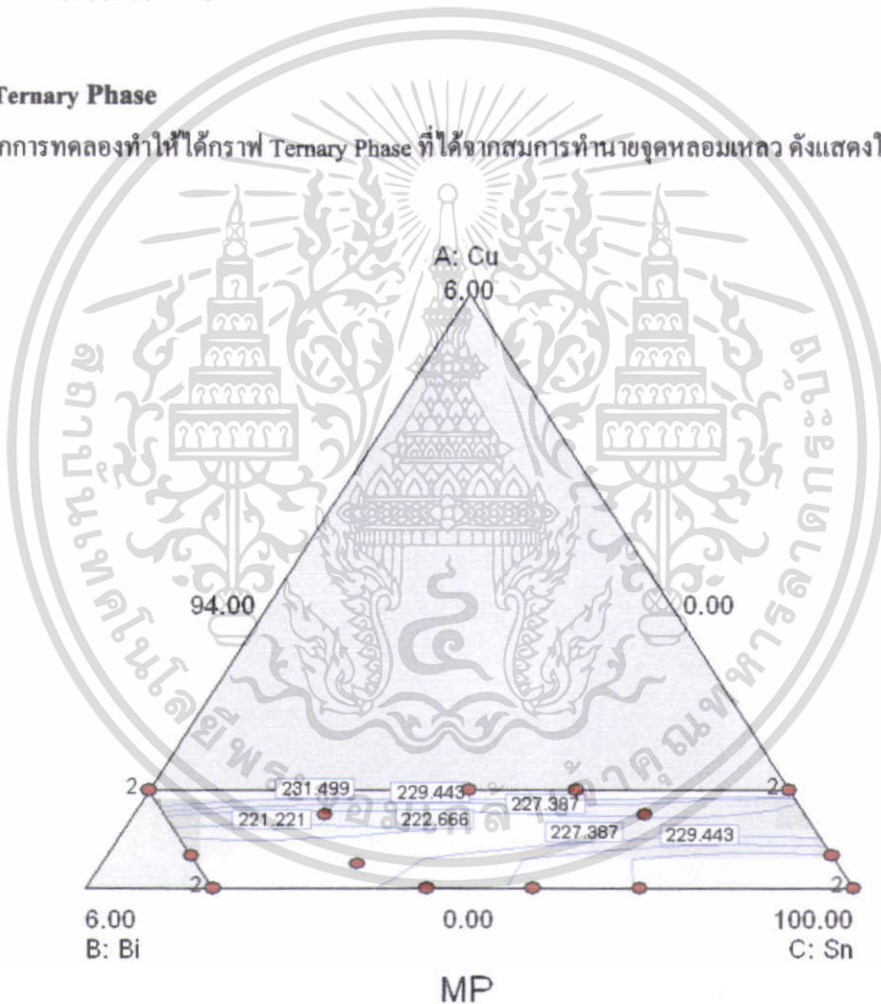
4.4 สมการทำนายจุดหลอมเหลว

จากการทดลองสามารถสรุปสมการที่ใช้ในการทำนายจุดหลอมเหลวของสารประกอบที่เกิดจากธาตุ 3 ธาตุได้ดังนี้

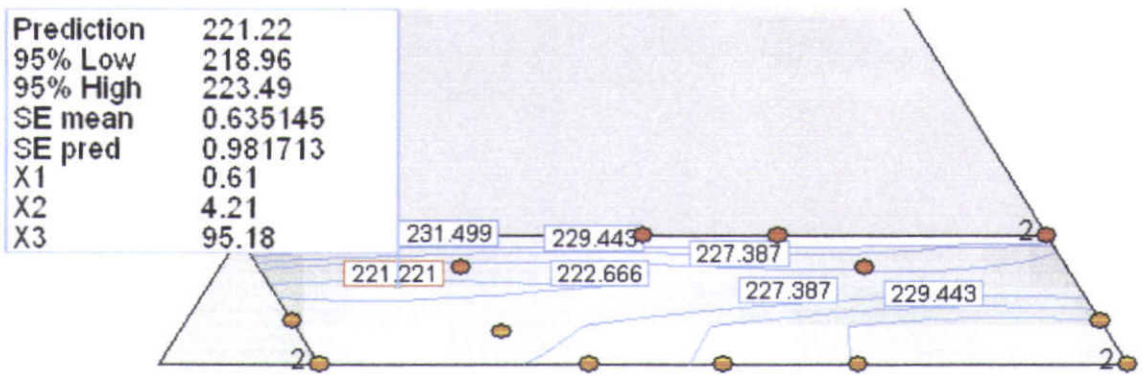
$$MP = +1.07024E+006(Cu) + 1745.89380(Bi) + 2.31868(Sn) - 15815.24489(Cu)(Bi) - 16124.15798(Cu)(Sn) - 26.88799(Bi)(Sn) + 105.22966(Cu)(Bi)(Sn) - 50.90352(Cu)(Bi)(Cu-Bi) - 54.22091(Cu)(Sn)(Cu-Sn) - 0.094707(Bi)(Sn)(Bi-Sn)$$

4.5 กราฟ Ternary Phase

จากการทดลองทำให้ได้กราฟ Ternary Phase ที่ได้จากสมการทำนายจุดหลอมเหลว ดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.12 กราฟ Ternary Phase Diagram ระหว่าง Sn-Bi-Cu

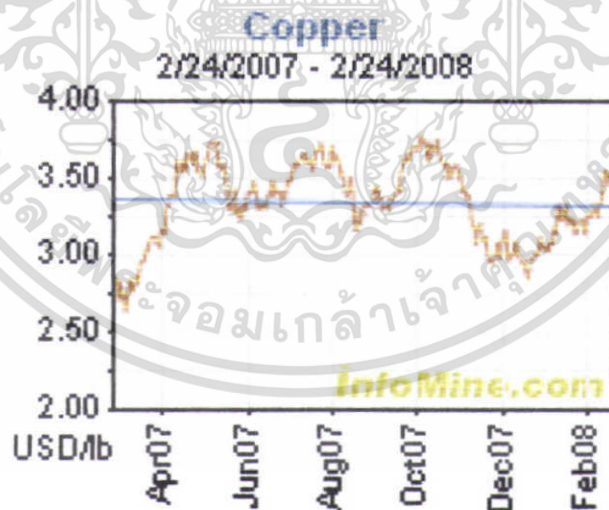


รูปที่ 4.13 รูปขยายจากกราฟ Ternary Phase Diagram ระหว่าง Sn-Bi-Cu

จากกราฟนี้ จุดสีแดงที่เห็นเป็นจุดที่ได้ทำการทดลอง ซึ่งโปรแกรมจะนำไปคำนวณและประมาณเส้นสีฟ้าขึ้นมา ซึ่งเส้นสีฟ้าแต่ละเส้นจะเป็นค่าตอบสนองที่สนใจ ไม่ว่าจะส่วนผสมใดๆ ก็ตามบนเส้นนั้นก็ให้ค่าผลตอบแทนเพียงค่าเดียว ในการทดลองได้เลือกจุดหลอมเหลวที่ต่ำที่สุดที่เป็นไปได้ ซึ่งก็คือ 221.22 องศาเซลเซียส และ โปรแกรมก็ได้กำหนดค่าว่าเส้นใดที่มีจุดหลอมเหลวเท่ากับ 221.22 องศาเซลเซียส จากนั้นได้เลือกส่วนผสมที่อยู่บนเส้นนั้น โดยเลือกจุดที่มีต้นทุนของธาตุค่าที่สุด และสุดท้ายจะได้ส่วนผสมที่เหมาะสมคือ 95.18Sn 4.21Bi 0.61Cu

4.6 ต้นทุนราคาธาตุ

จากการศึกษาค้นคว้าหาข้อมูลของราคาธาตุในปัจจุบัน พบว่าราคาธาตุต่างๆมีราคาเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันไปตามระดับการผลิตและความหายากของธาตุแต่ละชนิด โดยได้แสดงไว้เป็นกราฟดังนี้ [10]

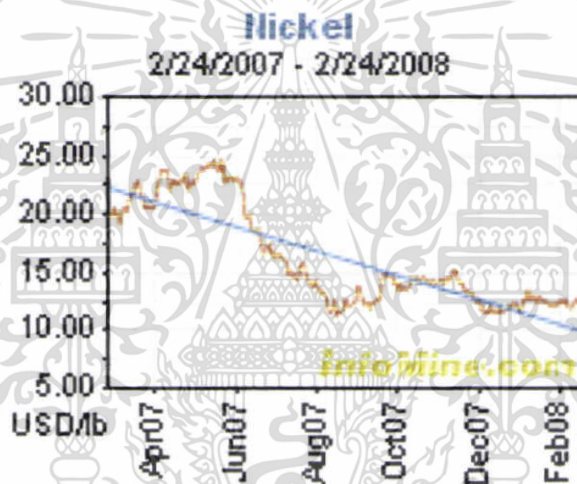


รูปที่ 4.14 กราฟราคาของ Cu ในปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 กราฟราคาของ Pb ในปัจจุบัน

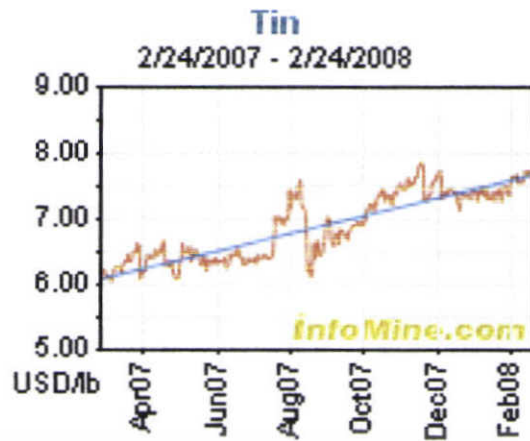


รูปที่ 4.16 กราฟราคาของ Ni ในปัจจุบัน



รูปที่ 4.17 กราฟราคาของ Ag ในปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 กราฟราคาของ Sn ในปัจจุบัน

จากกราฟที่แสดงถึงราคาธาตุต่างๆ ได้ทำการแปลงหน่วยให้อยู่ในรูป USS/kg และคำนวณราคารวมของแต่ละสูตรรวมทั้งนำอุณหภูมิของแต่ละส่วนผสมมาพิจารณาด้วยซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบแล้วพบว่าส่วนผสมที่ได้จากการทดลอง มีราคาอยู่ในระดับที่ไม่สูงมากเมื่อเทียบกับ ส่วนผสมที่นิยมคือ 96.5Sn3Ag0.5Cu ซึ่งมีราคาอยู่ที่ 32.08 USS/kg ในขณะที่ของได้ 17.57 USS/kg เมื่อพิจารณาที่จุดหลอมเหลวก็ถือว่าอยู่ในระดับที่ไม่สูงจนเกินไป

ตารางที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบราคาของแต่ละส่วนผสม

โลหะบัดกรี	ราคา USS/Kg	จุดหลอมเหลว(°C)
95.18Sn4.21Bi0.61Cu	17.57	221.22
63Sn37Pb	11.86	183
96.5Sn3Ag0.5Cu	32.08	218
99.3Sn0.7Cu	16.69	227
96.5Sn3.5Ag	34.69	221
42Sn58Bi	28.78	139
90Sn7.5Bi2Ag0.5Cu	28.51	210

จากผลการทดลองที่ได้กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ส่วนผสมที่ดีที่สุดที่ทำให้ได้จุดหลอมเหลวและต้นทุนต่ำที่สุดได้แก่ ส่วนผสมระหว่าง 96.5Sn3Ag0.5Cu โดยจะให้จุดหลอมเหลวที่ 221.22 องศาเซลเซียส และ ต้นทุนธาตุรวม 17.57 USS/Kg

บทที่ 5

สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน

5.1 สรุปผลการศึกษา

สิ่งประดิษฐ์ใหม่ในขณะนี้เกี่ยวข้องกับการการออกแบบและพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิดใหม่ที ประกอบไปด้วย Sn-Bi-Cu โดยเป็นการนำธาตุทั้งสามชนิดมาทำการผสมกันเป็นสารประกอบเพื่อทำการศึกษาดังจุด หลอมเหลวที่เกิดขึ้นให้ได้ใกล้เคียงกับจุดหลอมเหลวเดิม ที่ยังมีตะกั่ว (Pb) เป็นสารประกอบ รวมถึงมีการคำนึงถึงราคา ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับ โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีอยู่แล้วในปัจจุบัน ในการออกแบบและพัฒนา โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิดใหม่ ในการคิดค้นหาธาตุที่จะนำมาเป็นส่วนผสมของโลหะบัดกรีต้องทำการศึกษา คุณสมบัติของธาตุแต่ละตัวที่จะนำมาทดแทน โดยมีหลักการ ในการเลือกธาตุ ดังนี้

1. ธาตุที่ใช้เป็นส่วนผสมของโลหะบัดกรีจะต้องไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งธาตุที่เป็นสารพิษต่างๆ เช่น ตะกั่ว จะไม่ถูกนำมาใช้เป็นส่วนผสม
2. ธาตุที่ใช้จะต้องมีปริมาณมากเพียงพอที่จะตอบสนองความต้องการ ในปัจจุบันและอนาคต
3. จุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีควรต่ำกว่า 200°C หรือควร ใกล้เคียงกับ ส่วนผสมเดิม Sn37Pb ที่ 183°C เพราะถ้ามีจุด หลอมเหลวที่สูงเกินไปจะทำให้ต้องปรับตั้งอุณหภูมิของเครื่องหลอมตะกั่วให้สูงขึ้นด้วย อาจทำให้ชิ้นส่วน อิเล็กทรอนิกส์เสียหายได้ หรือแผงวงจรเปลี่ยนสี บิดงอ เพราะอุณหภูมิที่สูงเกินไป
4. ควรไม่มีต้นทุนต่ำ เนื่องจากโลหะที่จะนำมาแทนตะกั่วจะเป็นโลหะที่หาได้ยากและมีอยู่อย่างจำกัด เช่น อินเดียม (Indium) เงิน (Silver) เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าเป็นการใช้โลหะบัดกรีแบบแท่ง (Solder bar) สำหรับเครื่อง Wave Soldering หรือโลหะบัดกรีแบบเส้น (Solder Wire) สำหรับบัดกรีด้วยมือ จะมีปริมาณการใช้สูงกว่าตะกั่วเหลวซึ่ง โดยทั่วไปปริมาณบัดกรีแบบแท่งหรือแบบเส้นจะเป็นต้นทุนการผลิตดังนั้นควรไม่มีต้นทุนต่ำ เพื่อที่สามารถนำไปใช้ได้ ในทุกอุตสาหกรรม
5. มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับโลหะบัดกรีที่มีสารตะกั่วมีส่วนผสม

หลังจากการศึกษาคูสมบัติต่างๆ ของ ธาตุแต่ละชนิด ได้ทำการเลือกธาตุที่จะนำมาทำการทดลองได้ดังนี้

Sn ราคาถูกหาได้ง่ายมีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดี นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานที่ดี และเป็นพื้นฐานของโลหะบัดกรีแทบทุกชนิด

Cu สามารถหาได้ง่าย ละลายได้ดีใน Sn และทนการสึกกร่อนได้ดี

Bi เป็นโลหะที่สามารถทำให้จุดหลอมเหลวของส่วนผสมลดลงได้ดี มีคุณสมบัติทางกายภาพ และมีความสามารถในการเชื่อมประสานที่ดีมากนำไฟฟ้าได้ดี ราคาไม่แพง แต่เมื่อแข็งตัวจะเกิดการขยายตัวและเป็นสารประกอบที่กำจัดยาก

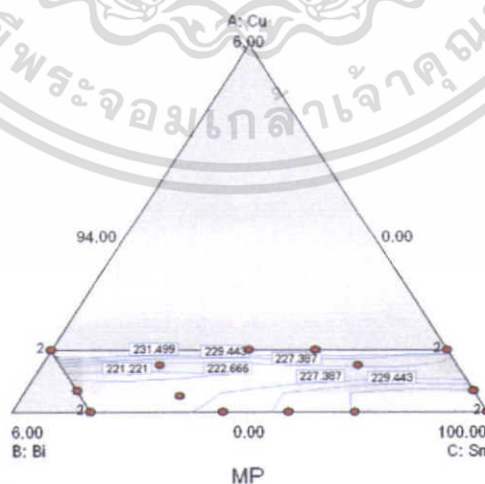
หลังจากได้ธาตุที่จะนำมาทำการทดลอง ต้องทำการกำหนดขอบเขตปริมาณของธาตุแต่ละชนิดที่จะทำการผสมลงไปในโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว โดยกำหนดขอบเขตจากเฟสโคอะแกรม และปริมาณของธาตุแต่ละตัวที่มีอยู่ในปัจจุบัน รวมถึงราคาของธาตุแต่ละชนิด สามารถกำหนดขอบเขตแต่ละตัวได้ดังนี้ Sn 94-100% Bi 0-5% Cu 0-1% เมื่อทำการกำหนดขอบเขตเรียบร้อยแล้ว นำขอบเขตที่ได้ไปใส่ในส่วนของโปรแกรม Design Expert ในการทดลองแบบ Mixture D-optimal Design ทำการกำหนดจุดที่จะทำการทดลองในปริภูมิพหุคูณ ฉบับนี้ได้ทำการทดลอง 18 ส่วนผสม

โดยเลือกผลตอบสนองที่สนใจคือ จุดหลอมเหลว หลังจากนั้น โปรแกรม จะทำการออกแบบการทดลองว่าควรทำการทดลองกี่ครั้ง หลังจากออกแบบการทดลอง นำไปทำการผสมและทดสอบหาจุดหลอมเหลวด้วยวิธี DSC และนำจุดหลอมเหลวที่ได้จากการทดสอบ DSC มาใส่ในช่องผลตอบสนองเพื่อให้โปรแกรมทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง ที่เกิด ขึ้น ในส่วนนี้โปรแกรมจะทำการวิเคราะห์ค่าความสมการควรมีรูปแบบใด Linear, Quadratic, Special Cubic, หรือ Full Cubic โดยใช้วิธี 3 วิธี คือ 1. Sequential Model Sum of Squares, 2. Lack of Fit Tests, และ 3. Model Summary Statistics จากการทดลองสามารถสรุปรูปแบบของสมการได้เป็นแบบ Cubic ซึ่งโปรแกรมได้เตรียมตารางทางสถิติที่มีประโยชน์มากมายซึ่งสามารถใช้เลือกแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดได้ แล้วตัวโปรแกรมจะทำการแนะนำแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดไว้ให้ในตารางและในบางกรณีโปรแกรมยังแสดงแบบจำลองที่เกิดสมการคู่แฝด (Aliased) ซึ่งเกิดจากการทดลองไม่เพียงพอ โปรแกรมจะคำนวณผลของแต่ละแบบจำลองซึ่งจะออกมาในรูปของค่าทางสถิติ เช่น F-Value, Lack of Fit และค่า R Squared ด้วย ซึ่งใช้ในการเปรียบเทียบแต่ละแบบจำลอง โดยที่โปรแกรมจะแสดงตารางทางสถิติให้ 3 ตาราง คือ

Sequential Model Sum of Squares, Lack of Fit Tests, Model Summary Statistics เพื่อทำการวิเคราะห์สมการที่เหมาะสม คือสมการรูปแบบ Cubic ซึ่งมีสมการ ทำนายจุดหลอมเหลวของสารประกอบที่เกิดจากธาตุ 3 ชนิด ดังนี้

$$MP = +1.07024E+006(Cu) + 1745.89380(Bi) + 2.31868(Sn) - 15815.24489(Cu)(Bi) - 16124.15798(Cu)(Sn) - 26.88799(Bi)(Sn) + 105.22966(Cu)(Bi)(Sn) - 50.90352(Cu)(Bi)(Cu-Bi) - 54.22091(Cu)(Sn)(Cu-Sn) - 0.094707(Bi)(Sn)(Bi-Sn)$$

จากการทดลองได้กราฟ Ternary Phase ที่ได้จากสมการทำนายจุดหลอมเหลว



รูปที่ 5.1 กราฟ Ternary Phase Diagram ระหว่าง Sn-Bi-Cu

จากรูปที่ 5.1 จุดที่เห็นเป็นจุดที่ได้ทำการทดลอง ซึ่งโปรแกรมจะนำไปคำนวณและประมาณเส้นตีฟ้าขึ้นมา ซึ่งเส้นตีฟ้าแต่ละเส้นจะเป็นค่าตอบสนองที่สนใจ ไม่ว่าจะส่วนผสมใดๆ ก็ตามบนเส้นนั้นก็ให้ค่าผลตอบสนองเพียงค่าเดียว ในการทดลองได้เลือกจุดหลอมเหลวที่ต่ำที่สุดที่เป็นไปได้ ซึ่งก็คือ 221.22 องศาเซลเซียส และ โปรแกรมก็ได้กำหนดมาว่าส่วนผสมนั้นคือ 95.18Sn, 4.21Bi, 0.61Cu จากนั้นต้องทำการการศึกษาค้นคว้าหาข้อมูลของราคาธาตุในปัจจุบัน เพื่อหาต้นทุนของสารประกอบที่ใช้ในโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว ซึ่งจากการคำนวณคิดราคาธาตุของสารประกอบที่เกิดขึ้น ได้ 17.57 US\$/Kg

ประโยชน์ที่ได้จากโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิดใหม่นี้ไม่ได้มีเพียงแต่ประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อมเท่านั้น แต่ยังมีประโยชน์ทางด้านราคา ซึ่งมีราคาไม่สูงมากเมื่อเทียบกับ โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ใช้ในปัจจุบันซึ่งมีราคาถึง 32.08 US\$/Kg และง่ายต่อการเสาะหาส่วนประกอบที่จะนำมาผลิตโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิดนี้ รวมถึงยังเป็นแนวทางในการพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิดใหม่ต่อไปในอนาคต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

- [1] ปารเมศ ชุติมา, การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ASM Handbook Volume 3 Alloy Phase Diagram
- [2] Darrel Frear, The mechanics of solder alloy Interconnects. New York: Van nostrand reinhold,
- [3] <http://patft1.uspto.gov/netahtml/PTO/search-bool.html>
- [4] http://gb.espacenet.com/search97cgi/s97_cgi.exe?Action=FormGen&Template=gb/en/advanced.hts
- [5] <http://thairecycle.igetweb.com/index.php?mo=3&art=14343>
- [6] <http://v3.espacenet.com/textdoc?DB=EPODOC&IDX=WO2006129713&F=10>
- [7] <http://web.ku.ac.th/schoolnet/snet5/topic2/Bi.html>
- [8] <http://www.chemicalelements.com>
- [9] <http://www.dmr.go.th/Interest/Data/Ti2tin1D.htm>
- [10] <http://www.infomine.com/investment/metalprices>
- [11] http://www.thairohs.org/index.php?option=com_content&task=view&id=55&Itemid=98
- [12] http://www.thairohs.org/index.php?option=com_content&task=view&id=65&Itemid=98
- [13] http://www.thairohs.org/index.php?option=com_content&task=view&id=68&Itemid=98
- [14] http://www.thairohs.org/index.php?option=com_content&task=view&id=71&Itemid=98
- [15] http://www.thairohs.org/index.php?option=com_content&task=view&id=72&Itemid=98
- [16] http://www.thairohs.org/index.php?option=com_content&task=view&id=104&Itemid=98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้