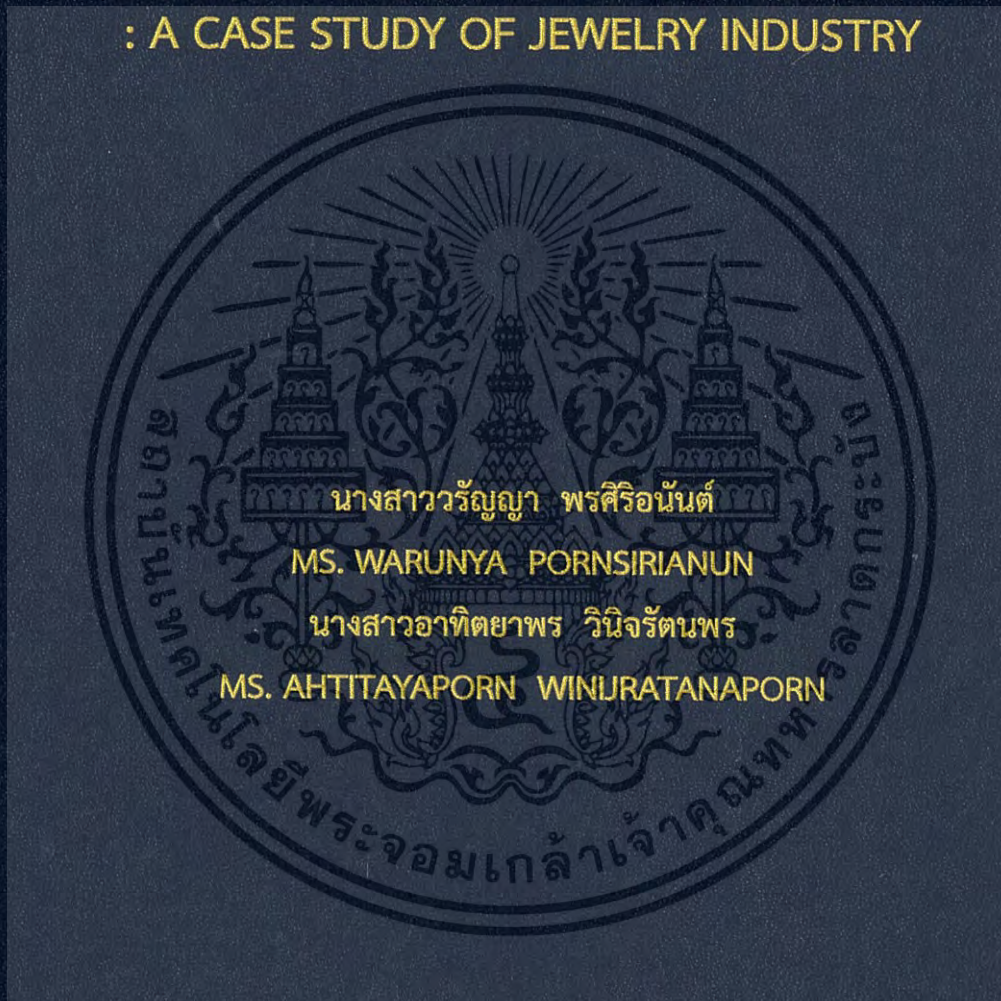


การศึกษากระบวนการทางความร้อนเพื่อเพิ่มความแข็ง
ของเงินสเตอร์ลิง : กรณีศึกษาอุตสาหกรรมอัญมณี
A STUDY ON HEAT TREATMENT PROCESS FOR
HARDNESS IMPROVEMENT OF STERLING SILVER
: A CASE STUDY OF JEWELRY INDUSTRY



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

การศึกษากระบวนการทางความร้อนเพื่อเพิ่มความแข็ง
ของเงินสเตอร์ลิง : กรณีศึกษาอุตสาหกรรมอัญมณี
A STUDY ON HEAT TREATMENT PROCESS FOR
HARDNESS IMPROVEMENT OF STERLING SILVER
: A CASE STUDY OF JEWELRY INDUSTRY



นางสาววรัญญา พรศิริอนันต์

MS. WARUNYA PORNSIRIANUN

นางสาวอาทิตย์ยาพร วินิจรัตน์พร

MS. AHTITAYAPORN WINIJRATANAPORN

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A STUDY ON HEAT TREATMENT PROCESS FOR
HARDNESS IMPROVEMENT OF STERLING SILVER
: A CASE STUDY OF JEWELRY INDUSTRY



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 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์

การศึกษากระบวนการทางความร้อนเพื่อเพิ่มความแข็ง
ของเงินสเตอร์ลิง : กรณีศึกษาอุตสาหกรรมอัญมณี
A STUDY ON HEAT TREATMENT PROCESS FOR
HARDNESS IMPROVEMENT OF STERLING SILVER
: A CASE STUDY OF JEWELRY INDUSTRY

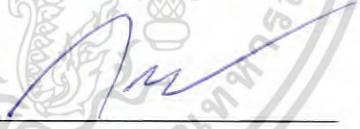
นักศึกษา

นางสาวรัญญา พรศิริอนันต์ รหัสประจำตัว 57011117
นางสาวอาทิตย์ยาพร วินิจรัตน์พร รหัสประจำตัว 57011534

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์


(รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การศึกษากระบวนการทางความร้อนเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของเงินสเตอร์ลิง : กรณีศึกษาอุตสาหกรรมอัญมณี
นักศึกษา	นางสาววรัญญา พรศิริอนันต์ นางสาวอาทิตยาพร วินิจรัตน์พร
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา	2560
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาความแข็งแรงของเงินสเตอร์ลิงที่ใช้ในบริษัทผลิตเครื่องประดับ ผลจากกระบวนการทางความร้อนในกระบวนการชุบแข็งแบบตกตะกอนพบว่า เวลาและอุณหภูมิในกระบวนการชุบแข็งแบบตกตะกอนมีผลต่อความแข็งแรงและโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิง โดยได้ทำการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนควบคู่กับฟังก์ชันความพึงพอใจเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมของปัจจัยในกระบวนการทางความร้อน โดยค่าปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการชุบแข็งแบบตกตะกอน คือ อุณหภูมิในการอบละลาย 700 องศาเซลเซียส และเวลาในการอบละลาย 60 นาที อุณหภูมิในการบ่มแข็งเทียม 300 องศาเซลเซียส และเวลาในการบ่มแข็งเทียม 41 นาที ผลของค่าความแข็งแรงที่ได้จากการใช้ปัจจัยดังกล่าวคือ 129 HV เมื่อเปรียบเทียบกับเทียบกับปัจจัยก่อนปรับปรุง พบว่าค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจากเดิมถึง 74.32 %

Thesis Title	A Study on Heat Treatment Process for Hardness Improvement of Sterling Silver : A Case Study of Jewelry Industry
Student	Ms. Waraunya Pornsirianun Ms. Ahtitayaporn Winijratanaporn
Degree	Bachelor of Engineering in Industrial Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year	2017
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Kannachai Kanlayasiri

ABSTRACT

The aim of this project was to improve the hardness of sterling silver used in a jewelry company. Effects of heat treatment temperatures and times in precipitation hardening process on the hardness and microstructure of sterling silver were studied. Box-Behnken experimental design coupled with the desirability function were employed to obtain the optimal heat treatment condition. The optimal condition was at 700 °C and 60 minutes of solution heat treatment and 300 °C and 41 minutes of precipitation hardening condition. The optimal hardness value was 129 HV which was 74.32% higher than that of the condition before the improvement.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากความช่วยเหลือจากคณาจารย์และบุคคลหลายฝ่าย คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบุคคลทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งคอยให้คำแนะนำและปรึกษาในด้านต่างๆที่เกี่ยวข้องกับโครงการ และเสนอแนะในการแก้ไขปัญหาของการทำโครงการ รวมทั้งตรวจแก้รายงานทำให้โครงการนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

บริษัท มิกิ ไชมีซ อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด ที่ให้การสนับสนุนในเรื่องการศึกษากระบวนการผลิตเครื่องประดับเงินและให้ตัวอย่างชิ้นงานในการศึกษาปริญญานิพนธ์ในครั้งนี้

เจ้าหน้าที่ประจำคณะวิทยาศาสตร์ภาควิชาเคมี และศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ ที่คอยช่วยเหลือในการทดลองทางเคมีให้สำเร็จไปได้ด้วยดี

เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมทุกท่าน ที่คอยอำนวยความสะดวกในการปฏิบัติการทดลองต่างๆ จวบจนการทดลองสำเร็จไปได้ด้วยดี

อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและอาจารย์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้แก่คณะผู้จัดทำ ทำให้มีความรู้ในการคิดแก้ไขปัญหา และนำความรู้ได้ศึกษามาประยุกต์ใช้ในการจัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมไปถึงผู้เกี่ยวข้องอื่นๆที่ไม่ได้เอ่ยนาม และเพื่อนๆที่คอยให้การสนับสนุนและคำแนะนำตลอดมา หากมีสิ่งผิดพลาดประการใด คณะผู้จัดทำขออน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้

นางสาว วรัญญา พรศิริอนันต์

นางสาว อาทิตยาพร วินิจรัตนพร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตปริญญานิพนธ์	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments).....	3
2.1.1 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง.....	3
2.1.2 ส่วนประกอบต่างๆของการทดลอง.....	4
2.1.3 หลักการพื้นฐาน 3 ประการ สำหรับการออกแบบการทดลอง	6
2.2 วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM).....	6
2.3 การออกแบบการทดลองของบ็อกซ์-เบนท์เคน (Box-Behnken Design).....	8
2.3.1 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Analysis of Coefficient of Determination)	9
2.3.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking).....	13
2.4 แบบจำลองการถดถอย (The Regression Model).....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function)	16
2.6 การหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization)	17
2.7 แผนภูมิเฟสของเงินและทองแดง	18
2.8 แผนภูมิเฟสของเงินและสังกะสี	19
2.9 แผนภูมิเฟสของทองแดงและสังกะสี	20
2.10 แผนภูมิเฟสของเงินทองแดงและสังกะสี	21
2.11 การชุบแข็งโดยวิธีการตกตะกอน (Precipitation Hardening)	22
2.12 ความแข็ง (Hardness)	24
2.13 การวัดความแข็ง (Hardness Tester)	24
2.13.1 การทดสอบความแข็งวิกเกอร์ส (Vickers Hardness Test)	24
2.14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)	26
2.15 หลักการของการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ด้วยเทคนิค EDS (Energy Dispersive x-ray Spectrophotometry, EDS)	28
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	
3.1 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการชุบแข็งแบบตกตะกอนที่ให้ค่าความแข็งสูงสุด	31
3.1.1 การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย	31
3.1.2 การทดลองอบชิ้นงาน	34
3.1.3 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดลอง	34
3.1.4 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติและหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยหลัก	36
3.1.5 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดลอง	36

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.6 การทดสอบค่าความแข็ง	36
3.2 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค	37
3.2.1 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดลอง	37
3.2.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและส่วนประกอบทางเคมี.....	38
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 ผลการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งของเงินสเตอร์ลิง.....	39
4.1.1 ผลการทดสอบความแข็ง	39
4.1.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	40
4.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิง.....	53
4.2.1 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคก่อนปรับปรุง.....	53
4.2.2 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคหลังปรับปรุง.....	60
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	
5.1 ผลการศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อเงินสเตอร์ลิง.....	65
5.2 ข้อเสนอแนะ	66
เอกสารอ้างอิง.....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนแบบสามตัวแปร	9
ตารางที่ 2.2 สรุปความสัมพันธ์ ANOVA ของการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ.....	10
ตารางที่ 2.3 Ag-Cu Crystal Structure Data.....	18
ตารางที่ 2.4 Ag-Zn Crystal Structure Data	19
ตารางที่ 2.5 Special Point of the Cu-Zn System.....	20
ตารางที่ 2.6 ความแข็งวิกเกอร์ส	26
ตารางที่ 3.1 ปัจจัยและระดับของการทดลอง.....	31
ตารางที่ 3.2 การออกแบบการทดลองบ็อกซ์-เบห์นเคน	33
ตารางที่ 4.1 ค่าความแข็งของเงินสเตอร์ลิงก่อนการปรับปรุง.....	39
ตารางที่ 4.2 ค่าความแข็งของเงินสเตอร์ลิง	40
ตารางที่ 4.3 Estimated Regression Coefficients for Hardness	41
ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์แปรปรวน.....	42
ตารางที่ 4.5 Estimated Regression Coefficients for Hardness (Reduced Model).....	43
ตารางที่ 4.6 Analysis of Variance (Reduced Model).....	44
ตารางที่ 4.7 การกำหนดค่าเป้าหมายที่ความแข็งสูงสุด.....	51
ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลองของค่าความแข็งและเปอร์เซ็นต์ ความผิดพลาด.....	52
ตารางที่ 4.9 ผลวิเคราะห์ EDS ของเงินสเตอร์ลิงในชิ้นงานหล่อ	56
ตารางที่ 4.10 ผลวิเคราะห์ EDS ของเงินสเตอร์ลิงในชิ้นงานอบละลาย	57
ตารางที่ 4.11 ผลวิเคราะห์ EDS ของเงินสเตอร์ลิงในชิ้นงานบ่มแข็งเทียม	58
ตารางที่ 4.12 ผลวิเคราะห์ EDS ของเงินสเตอร์ลิงในชิ้นงานอบละลาย	62
ตารางที่ 4.13 ผลวิเคราะห์ EDS ของเงินสเตอร์ลิงในชิ้นงานบ่มแข็งเทียม	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบต่างๆของการทดลอง.....	5
รูปที่ 2.2 พื้นผิวตอบแบบสามมิติ.....	7
รูปที่ 2.3 เส้นโครงร่างของพื้นผิวตอบ.....	7
รูปที่ 2.4 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนสำหรับสามตัวแปร.....	8
รูปที่ 2.5 แผนภูมิเฟสของเงินและทองแดง.....	18
รูปที่ 2.6 แผนภูมิเฟสของเงินและสังกะสี.....	19
รูปที่ 2.7 แผนภูมิเฟสของทองแดงและสังกะสี.....	20
รูปที่ 2.8 แผนภูมิเฟสของเงิน ทองแดง และสังกะสี.....	21
รูปที่ 2.9 การชุบแข็งโดยวิธีการตกตะกอน (Precipitation Hardening).....	22
รูปที่ 2.10 กระบวนการชุบแข็งโดยวิธีการตกตะกอน (Precipitation Hardening).....	22
รูปที่ 2.11 วิธีการวัดขนาดเส้นทแยงมุม และสมการการคำนวณค่าความแข็งวิกเกอร์ส.....	25
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนในการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการชุบแข็งแบบตกตะกอน ที่ให้ค่าความแข็งสูงสุด.....	30
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนในการทดลองเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค.....	30
รูปที่ 3.3 เต้าอบยี่ห้อ Nabertherm รุ่น B150.....	34
รูปที่ 3.4 เครื่องตัดแรงโน้มถ่วงยี่ห้อ Struers รุ่น Minitom.....	34
รูปที่ 3.5 ชิ้นงานทดสอบหลังขึ้นรูปด้วยเรซิน.....	35
รูปที่ 3.6 เครื่องขัดชิ้นงานทดลองยี่ห้อ Struers รุ่น LabolPol-1.....	35
รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบความแข็ง Mitutoyo รุ่น HM-113.....	35
รูปที่ 3.8 ชิ้นงานทดสอบหลังขึ้นรูปด้วยเรซินโดยใช้ปัจจัยที่ทำให้ได้ค่าความแข็งสูงสุด.....	36
รูปที่ 3.9 ชิ้นงานหล่อ ชิ้นงานอบละลาย และชิ้นงานบ่มแข็งเทียม หลังขึ้นรูปด้วยเรซิน.....	37
รูปที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope) ยี่ห้อ Zeiss รุ่น Axiolab.....	37
รูปที่ 3.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) ยี่ห้อ Quanta รุ่น FEG 250.....	38
รูปที่ 3.12 เครื่องตรวจวัดรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงานของธาตุ (EDS) ยี่ห้อ Oxford รุ่น X-Max.....	38
รูปที่ 4.1 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าความแข็งของเงินสเตอร์ลิง.....	45
รูปที่ 4.2 ค่าส่วนตกค้างกับค่าความแข็ง.....	46
รูปที่ 4.3 ค่าส่วนตกค้างของค่าความแข็งกับลำดับเวลา.....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังเว็บไซต์อื่นที่มีการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.4 กราฟโครงร่าง (Contour Plot) ระหว่างเวลาในการอบละลาย (Time of Solution Heat Treatment) กับเวลาในการบ่มแข็งเทียม (Time of Precipitation Heat Treatment).....	47
รูปที่ 4.5 พื้นผิวผลตอบสนองอิทธิพลร่วมระหว่างเวลาในการอบละลาย (Time of Solution Heat Treatment) กับเวลาในการบ่มแข็งเทียม (Time of Precipitation Heat Treatment) เทียบกับค่าความแข็ง.....	48
รูปที่ 4.6 กราฟโครงร่าง (Contour Plot) ระหว่างเวลาในการอบละลาย (Time of Solution Heat Treatment) กับอุณหภูมิในการอบละลาย (Time of Solution Heat Treatment) ...	49
รูปที่ 4.7 พื้นผิวผลตอบสนองอิทธิพลร่วมระหว่างเวลาในการอบละลาย (Time of Solution Heat Treatment) กับอุณหภูมิในการอบละลาย (Time of Solution Heat Treatment) เทียบค่าความแข็ง.....	49
รูปที่ 4.8 กราฟโครงร่าง (Contour Plot) ระหว่างเวลาในการบ่มแข็งเทียม (Time of Precipitation Heat Treatment) กับอุณหภูมิในการอบละลาย (Temperature of Solution Heat Treatment).....	50
รูปที่ 4.9 พื้นผิวผลตอบสนองอิทธิพลร่วมระหว่างเวลาในการบ่มแข็งเทียม (Time of Precipitation Heat Treatment) กับอุณหภูมิในการอบละลาย (Temperature of Solution Heat Treatment) เทียบกับค่าความแข็ง.....	51
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปรต่างๆ.....	52
รูปที่ 4.11 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope, OM)	54
รูปที่ 4.12 ผลจากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)	55
รูปที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ EDS ของเงินสเตอร์ลิงในชิ้นงานหล่อก่อนการปรับปรุงที่กำลังขยาย 10000x.....	56
รูปที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์ EDS ของเงินสเตอร์ลิงในชิ้นงานบ่มแข็งเทียมก่อนการปรับปรุงที่กำลังขยาย 10000x.....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ EDS ของเงินสเตอร์ลิงในชิ้นงานบ่มแข็งเทียมก่อนการปรับปรุง ที่กำลังขยาย 10000x.....	58
รูปที่ 4.16 โลหะผสมระหว่างเงิน 94.73% กับ ทองแดง 4.02% ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส.....	59
รูปที่ 4.17 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงด้วยกล้องจุลทรรศน์ แบบใช้แสง	60
รูปที่ 4.18 ผลจากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงด้วยกล้องจุลทรรศน์ แบบส่องกราด (SEM).....	61
รูปที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์ EDS ของเงินสเตอร์ลิงในชิ้นงานอบละลายหลังการปรับปรุง ที่กำลังขยาย 10000x.....	62
รูปที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์ EDS ของเงินสเตอร์ลิงในชิ้นงานบ่มแข็งเทียมหลังการปรับปรุง ที่กำลังขยาย 10000x.....	63
รูปที่ 4.21 โลหะผสมระหว่างเงิน 94.73% กับ ทองแดง 4.02% ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส.....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เงินเป็นโลหะที่ได้รับความนิยมชนิดหนึ่งสำหรับการผลิตเครื่องประดับ เนื่องจากมีข้อเด่น คือ มีสีขาว แวววาว และราคาไม่สูงมากจนเกินไป โดยเงินจะได้รับการยอมรับให้เป็นเครื่องประดับที่ได้มาตรฐานต้องมีปริมาณเงินอย่างน้อย 92.5% หรือที่เรียกว่าเงินสเตอร์ลิง โดยสาเหตุที่เราไม่นิยมใช้เงินบริสุทธิ์ผลิตเป็นเครื่องประดับเพราะเงินบริสุทธิ์นั้นมีความอ่อนตัวมากเกินไป ทำให้เสียรูปทรงได้ง่ายเมื่อมีการกระทบ และยังทำให้ไม่สามารถฝังพลอยบนเงินเหล่านั้นได้ เนื่องจากขาดความแข็งแรง ดังนั้นผู้ผลิตจึงต้องมีการเติม โลหะชนิดอื่น ๆ ลงไป คณะผู้จัดทำได้เข้าไปทำการศึกษากระบวนการผลิตเครื่องประดับเงินของบริษัท ซึ่งประกอบกิจการประเภทการผลิตเครื่องประดับจากทอง เงิน และอัญมณีอื่นๆ เพื่อจัดจำหน่ายทั้งในประเทศและต่างประเทศ โดยเงินสเตอร์ลิงที่ทางบริษัทใช้มีส่วนผสมของเงินเท่ากับ 94.73% ทองแดง 4.02% และสังกะสี 1.25% โดยน้ำหนัก เนื่องจากทราบกันดีว่าทองแดงจะส่งผลต่ออย่างมากในเรื่องการเพิ่มความแข็งให้เงินสเตอร์ลิง แต่ขณะเดียวกันก็มีข้อเสียที่สำคัญ คือ จะทำให้เงินสเตอร์ลิงมีการหมองได้ง่าย การหมองที่ว่านี้คือการเกิดสีน้ำตาลดำบนผิวโลหะ ซึ่งจะทำให้หมองและไม่ขาว การหมองนี้สามารถขจัดออกได้เนื่องจากเป็นชั้นบางๆ บนผิวเท่านั้น แต่เมื่อขจัดออกไปแล้ว และทิ้งโลหะไว้อีกไม่นาน โลหะนั้นก็จะกลับมาหมองอีก จึงนับเป็นปัญหาหลักที่ไม่สามารถแก้ไขให้หายขาดได้ สำหรับสังกะสีนั้นสามารถช่วยในเรื่องของการหล่อ ทำให้น้ำโลหะไหลตัวดีและหล่อได้ง่ายขึ้น [1] แต่อย่างไรก็ตามทางบริษัทประสบปัญหาในกระบวนการผลิตเงินสเตอร์ลิง โดยพบว่าเงินสเตอร์ลิงที่ผลิตได้มีค่าความแข็งต่ำกว่ามาตรฐานที่ทางบริษัทต้องการ ดังนั้นคณะผู้จัดทำจึงเข้าไปศึกษาและได้สังเกตเห็นถึงปัญหาในกระบวนการชุบแข็งแบบตกตะกอน (Precipitation Hardening) ของการผลิตเงินสเตอร์ลิง และวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้น เพื่อหาแนวทางในการแก้ไขปัญหา

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงความแข็งของเงินสเตอร์ลิงให้มีค่าความแข็งเป็นไปตามที่บริษัทต้องการ

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาและปรับปรุงกระบวนการทางความร้อนในการทำให้เครื่องประดับเงินมีความแข็งเพิ่มขึ้นตามมาตรฐานที่ทางบริษัทต้องการ
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการชุบแข็งแบบตกตะกอนที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิง
3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในกระบวนการชุบแข็งแบบตกตะกอนที่มีผลต่อความแข็งของเงินสเตอร์ลิง

1.3 ขอบเขตปริญญานิพนธ์

ศึกษากระบวนการทางความร้อนโดยวิธีการชุบแข็งแบบตกตะกอน (Precipitation Hardening) ของเงินสเตอร์ลิง ที่มีส่วนผสมของเงิน 94.73% ทองแดง 4.02% และสังกะสี 1.25% โดยน้ำหนัก และปรับปรุงปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็งของเงินสเตอร์ลิงให้เหมาะสม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจกระบวนการทางความร้อนโดยวิธีการชุบแข็งแบบตกตะกอน (Precipitation Hardening) ในการผลิตเงินสเตอร์ลิง
2. สามารถทำให้เงินสเตอร์ลิงมีความแข็งเพิ่มขึ้นตามที่บริษัทต้องการ
3. บริษัทสามารถนำแนวคิดไปใช้ในกระบวนการผลิตและพัฒนาให้ดียิ่งขึ้นต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments, DOE) [2]

การออกแบบการทดลองเป็นกระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อจะได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ ซึ่งจะทำให้สามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้ ซึ่งวิธีการออกแบบการทดลองเชิงสถิติเป็นสิ่งจำเป็น หากต้องการหาข้อสรุปจากข้อมูลที่มีอยู่ และถ้าปัญหาที่สนใจนั้นเกี่ยวข้องกับความผิดพลาดในการทดลอง

2.1.1 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

การใช้หลักการทางสถิติในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองเป็นสิ่งจำเป็นที่ผู้ทำการทดลองต้องมีความเข้าใจวิธีการเก็บข้อมูล ตลอดจนการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้มา ซึ่งขั้นตอนของการออกแบบการทดลอง สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การนิยามปัญหา (Statement of Problem) เป็นการระบุความต้องการในการกระบวนการคืออะไรและต้องการรู้อะไรบ้างในกระบวนการ ซึ่งการนิยามปัญหานี้จะเกี่ยวข้องไปถึงวัตถุประสงค์ของการทดลอง

2. การเลือกปัจจัย และระดับของปัจจัย (Choice of Factor, Level and Ranges) เป็นการใช้หลักการทางทฤษฎี และประสบการณ์จากงานวิจัยต่างๆ เพื่อระบุว่าเป็นปัจจัยใดบ้างที่น่าจะมีผลต่อการทดลอง และในแต่ละปัจจัยนั้นควรจะมีช่วงในการทดลองอย่างไร (Range) การกำหนดระดับของปัจจัยสามารถแบ่งได้ 3 แบบดังนี้

- 2.1 แบบกำหนด (Fixed Effect) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่สามารถควบคุมหรือกำหนดค่าได้แน่นอนโดยผู้ทดลองกำหนดเอง

- 2.2 แบบสุ่ม (Random Effect) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมหรือกำหนดค่าของปัจจัยได้แน่นอน ซึ่งผลการทดลองที่ได้จะเป็นตัวแทนของทั้งปัจจัยมีได้เป็นตัวแทนของระดับใดระดับหนึ่ง

- 2.3 แบบผสม (Mixed Effect) หมายถึง การผสมผสานระดับของปัจจัยที่เป็นทั้งแบบกำหนดและแบบสุ่มรวมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Selection of the Response Variable) ในการเลือกตัวแปรตอบสนอง ผู้วิจัยจะต้องเลือกตัวแปรที่สามารถให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการศึกษา และการวัดค่านั้นจะต้องมีความแม่นยำและถูกต้อง ซึ่งหมายถึงเครื่องมือวัดจะต้องมีความแม่นยำและถูกต้อง

4. การเลือกแบบการทดลอง (Choice of Experimental Design) เมื่อกำหนดทริทเมนต์ (Treatment) และตัวแปรตอบสนอง (Response Variables) แล้ว ต้องทำการตัดสินใจเกี่ยวกับขนาดของการทดลองซ้ำ หมายถึง จำนวนซ้ำของการทดลอง (Replicate) ความเหมาะสมของลำดับในการทดลอง ข้อจำกัดในการสุ่ม (Randomization) การบล็อก (Blocking) ที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้ต้องนำมาเกี่ยวข้องกันในด้านความเสี่ยงและต้นทุนในการทดลอง

5. การดำเนินการทดลอง (Performing the Experiment) ในระหว่างการดำเนินการทดลอง ผู้วิจัยจะต้องศึกษาดูแลอย่างใกล้ชิด ปฏิบัติตามหลักการที่ได้ออกแบบไว้ ข้อควรระวังในขณะทำการทดลอง คือ ความถูกต้องของเครื่องมือวัดและความสม่ำเสมอในการทดลองเพื่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ซึ่งจะมีเทคนิคแตกต่างกันไปในแต่ละสาขาวิจัย

6. การวิเคราะห์ข้อมูล (Statistical Analysis of Data) ในการวิเคราะห์ข้อมูล จะใช้ความรู้ทางด้านสถิติเข้ามาวิเคราะห์ และสรุปผลรวมทั้งตัดสินใจความถูกต้องของข้อมูลที่เกิดขึ้นก่อนที่จะตีความข้อมูล และวิธีการทางสถิติไม่สามารถบอกได้ว่าปัจจัยมีผล (Effect) เท่าใดแน่นอน แต่เป็นเพียงเครื่องมือที่ให้แนวทางในการวิเคราะห์ภายใต้ช่วงของความเชื่อมั่นในการสรุปผล

7. การสรุปผลและข้อเสนอแนะ (Conclusions and Recommendations) เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลแล้วจะต้องสรุปผลการวิเคราะห์ อาจแสดงในรูป กราฟ ตาราง แผนภูมิ เป็นต้น และให้ข้อเสนอแนะเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตให้ดีขึ้น เมื่อสรุปผลแล้วควรมีการทดสอบเพื่อยืนยันผลจากการทดลองอีกครั้งหนึ่ง

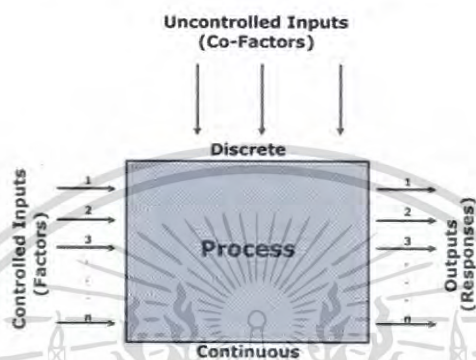
2.1.2 ส่วนประกอบต่างๆของการทดลอง

1. วิธีปฏิบัติหรือทริทเมนต์ (Treatment) คือ สิ่งหรือวิธีที่ผู้ดำเนินการทดลองปฏิบัติต่อสิ่งทดลอง เพื่อวัดผลเปรียบเทียบกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง

2. ปัจจัย (Factor) หมายถึง สิ่ง que คิดว่ามีผลต่อตัวแปรตอบสนองและนำมาพิจารณาในการทดลอง ปัจจัยอาจมีลักษณะเป็นเชิงคุณภาพหรือเชิงปริมาณก็ได้ กลุ่มของทริทเมนต์ทั้งหลายที่มีความเกี่ยวข้องกัน (A Particular Class of Related Treatment) อาจใช้คำว่าตัวแปรอิสระแทนก็ได้ โดยปัจจัยดังแสดงในรูปที่ 2.1 สามารถแบ่งออกได้เป็น

2.1 ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในการดำเนินการทดลอง ซึ่งเป็นผลดีต่อการทดลองเพราะโดยส่วนใหญ่ผู้ทำการทดลองต้องการกำหนดค่าต่างๆที่คิดว่ามีผลตอบสนองที่สนใจ

2.2 ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้อาจจะเนื่องมาจากมีข้อจำกัดทางด้านเทคโนโลยีและต้นทุนปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้แบ่งออกเป็นตัวแปรรบกวน (Noise Variable หรือ Background Variable) หมายถึง ตัวแปรที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง (Response Variable) ในการทดลองแต่ไม่ใช่ปัจจัยที่เรา กำลังทำการศึกษาค้นคว้า ใหญ่ มัก ได้แก่ เวลาหรือเครื่องมืออุปกรณ์ เป็นต้น และ Nuisance Variable คือ ตัวแปรที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง แต่เราไม่ทราบมาก่อน สามารถกำจัดอิทธิพลของ Nuisance Variable ได้โดยการสุ่ม



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบต่างๆของการทดลอง

3. ตัวแปรตอบสนอง (Response Variable) คือ ตัวแปรที่ถูกสังเกตหรือวัดค่าในการทดลอง หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าตัวแปรตาม ซึ่งเป็นตัวแปรที่สะท้อนให้เห็นถึงอิทธิพลของตัวแปรอิสระนั่นเอง ในการทดลองหนึ่งๆ อาจวัดค่าตัวแปรตามมากกว่า 1 ก็ได้ การเลือกตัวแปรตามที่ดีควรพิจารณาจากความไว (Sensitivity) ความเชื่อถือได้ (Reliability) การแจ่มแจ้งของตัวแปรนั้นและความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ นอกจากนี้ในการเลือกตัวแปรตามจะต้องพิจารณาว่า ค่าสังเกตที่ได้จากทริทเมนต์หนึ่งๆ ควรมีการแจ่มแจ้งแบบปกติโดยประมาณ ซึ่งข้อสมมติในเรื่องความเป็นปกติ (Normality) นี้เป็นสิ่งที่จำเป็นในการออกแบบทดลองซึ่งอาจจะใช้การแปลงข้อมูล (Transformation) ค่าสังเกตที่มีการแจ่มแจ้งไม่ปกติเป็นแบบปกติได้

2.1.3 หลักการพื้นฐาน 3 ประการ สำหรับการออกแบบการทดลอง

1. การทดลองซ้ำ (Replication) ซึ่งมีสมบัติที่สำคัญ 2 ประการ คือ ทำให้ทดลองสามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ และถ้าค่าเฉลี่ยถูกนำมาใช้เพื่อประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งการทดลองเรพลิเคชันทำให้ผู้ทดลองสามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการประมาณผลกระทบนี้

2. การทำแบบสุ่ม (Randomization) หมายถึง การทดลองที่มีทั้งวัสดุที่ใช้ในการทดลองและลำดับของการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม (Random) วิธีการเชิงสถิติกำหนดว่าข้อมูลจะต้องเป็นปัจจัยแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระ การที่เราสุ่มการทดลองทำให้เราสามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจปรากฏในการทดลองได้

3. บล็อกกิ้ง (Blocking) เป็นทางเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรงให้แก่การทดลองบล็อกอันหนึ่งอาจจะหมายถึง ส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้การทดลองที่ควรจะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซตทั้งหมดของวัตถุ การเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจต่างๆภายในแต่ละบล็อกจะเกิดขึ้นได้จากการทำบล็อกกิ้ง

2.2 วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM)

วิธีการพื้นผิวตอบสนองเป็นวิธีการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบสนองที่เราสนใจขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย และผู้ทดลองมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดที่เหมาะสมของผลตอบสนองนี้ เช่น ผลตอบสนอง y เป็นฟังก์ชันของ x_1 และ x_2 ดังนั้นจะสามารถเขียนในรูปแบบสมการได้ดังนี้

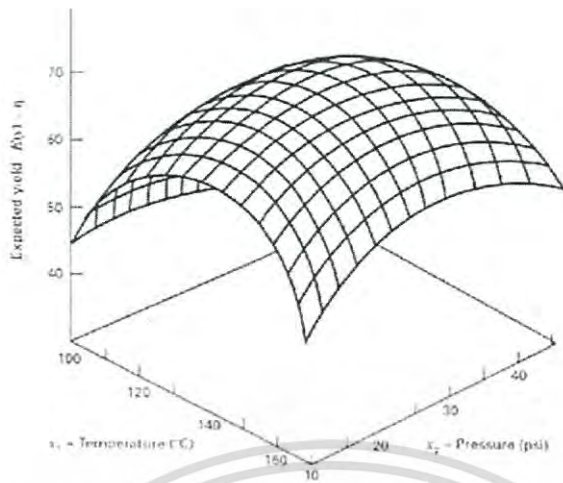
$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (2.1)$$

เมื่อ ε คือ ค่าความผิดพลาดของผลตอบสนอง y ที่มีผลมาจากการทดลอง ถ้าเรากำหนดว่า

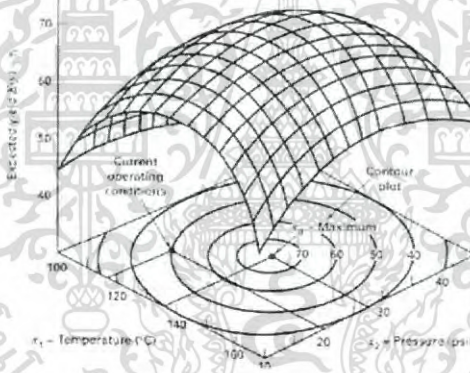
$E(y) = f(x_1, x_2) = \eta$ ดังนั้นเราสามารถเขียนสมการพื้นผิวได้ คือ

$$\eta = f(x_1, x_2) \quad (2.2)$$

โดยมากแล้วจะแสดงพื้นผิวตอบสนองในรูปของกราฟิก ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่ง η จะถูกพล็อตกับระดับของ x_1 และ x_2 เส้นโครงร่างแต่ละเส้นจะมีความสูงของพื้นผิวตอบสนองที่เท่ากันค่าหนึ่ง



รูปที่ 2.2 พื้นผิวตอบแบบสามมิติ [2]



รูปที่ 2.3 เส้นโครงร่างของพื้นผิวตอบ [2]

ในปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบส่วนมากมักจะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบและตัวแปรอิสระ ดังนั้นขั้นแรก คือ ผู้ทดลองต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และกลุ่มของตัวแปรอิสระ ซึ่งตามปกติแล้วจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังต่ำๆ ที่อยู่ได้อาณาเขตบางส่วนของตัวแปรอิสระ ถ้าแบบจำลองของผลตอบมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่จะใช้ในการประมาณความสัมพันธ์นี้ คือ แบบจำลองพหุนามกำลังหนึ่ง

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

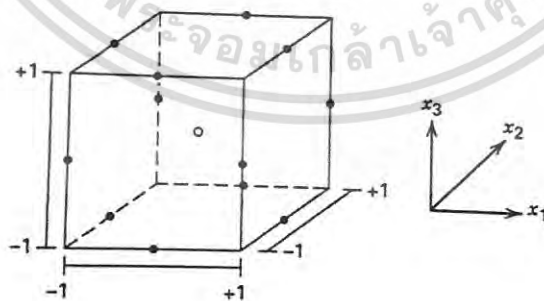
แต่ถ้ามีส่วนโค้งเข้ามาเกี่ยวข้องในระบบ จึงใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสอง

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1, j \neq i}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.4)$$

ปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวตอบสนองมาก จะใช้แบบจำลองพหุนามกำลังหนึ่งหรือกำลังสองในการหาผลตอบ แต่แบบจำลองทั้งสองชนิดนี้ไม่สามารถใช้ประมาณความสัมพันธ์ตลอดพื้นผิวทั้งหมดของตัวแปรอิสระ ถ้าพื้นผิวที่สนใจมีขนาดใหญ่ การออกแบบพื้นผิวตอบมีวิธีการที่นำมาใช้ในการหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบอยู่หลายวิธีด้วยกัน ได้แก่ วิธีการป็นขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุด (Steepest Ascent)

2.3 การออกแบบการทดลองของบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) [3]

การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) เป็นการออกแบบสามระดับสำหรับฟิตพื้นผิวผลตอบ การออกแบบนี้ถูกสร้างขึ้นจากการรวมการออกแบบแฟกทอเรียล 2^k กับการออกแบบบล็อกไม่บริบูรณ์ ผลของการออกแบบมีประสิทธิภาพมากในด้านจำนวนของการรันที่ต้องการ และการออกแบบนี้ยังมีความสามารถในการหมุนหรือเกือบหมุนได้อีกด้วย ตารางที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนที่มีตัวแปร 3 ตัวรูปทรงเรขาคณิตของการออกแบบแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.4 สังเกตว่า การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนเป็นการออกแบบรูปทรงกลมที่ทุกจุดวางอยู่บนรูปทรงกลมรัศมีรากที่ 2 นอกจากนี้การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนไม่ได้รวมเอาจุดใด ๆ ที่เป็นจุดยอดของลูกบาศก์ที่สร้างขึ้นจากขีดจำกัดบนและล่างของแต่ละตัวแปรเอาไว้ การกระทำเช่นนี้เป็นประโยชน์อย่างมากเมื่อทุกจุดที่อยู่บนมุมของลูกบาศก์ คือ การรวมของปัจจัยระดับ (Factor-Level Combination) ที่แพงมากหรือเป็นไปได้ที่จะทำการทดลองเนื่องจากข้อจำกัดในด้านทางกายภาพของกระบวนการ



รูปที่ 2.4 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนสำหรับสามตัวแปร [3]

ตารางที่ 2.1 การออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนแบบสามตัวแปร

Run	X ₁	X ₂	X ₃
1	-1	-1	0
2	-1	1	0
3	1	-1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	1
7	1	0	-1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	-1	1
11	0	1	-1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

2.3.1 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Analysis of Coefficient of Determination)

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R²) เป็นค่าที่ใช้สำหรับอธิบายความสามารถของสมการถดถอยหรือตัวแปรอิสระในสมการถดถอยที่สามารถจะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าตอบสนองหรือตัวแปร (y) ได้ในสัดส่วนเท่าใด ดังนั้นค่า R² ยิ่งมากสมการก็ยิ่งมีความเหมาะสมมาก โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ความแปรปรวนแยกความแปรปรวนของตัวแปรตาม y เนื่องจากค่าประมาณความแปรปรวนของ y คือ

$$S_y^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n-1} \text{ หรือ } S_y^2 \propto \sum (y_i - \bar{y})^2 \quad (2.5)$$

โดยที่ $\sum (y_i - \bar{y})^2$ คือ ผลบวกของผลต่างกำลังสองของ Y จากค่าเฉลี่ย

$$\begin{aligned} \sum (y_i - \bar{y})^2 &= \sum_{i=1}^n ((y_i - \hat{y}_i) + (\hat{y}_i - \bar{y}))^2 \\ \sum (y_i - \bar{y})^2 &= \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 + \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \end{aligned} \quad (2.6)$$

LHS เรียกว่า Sum Total of Y หรือ

$$SST = \sum (y_i - \bar{y})^2 \quad (2.7)$$

RHS; จะได้ว่า $\sum (y_i - \hat{y}_i)^2 = \text{Sum Square Error} = SSE$

SSE คือ ส่วนที่อธิบายไม่ได้ (Unexplained Part) ด้วยสมการถดถอย

$\sum (y_i - \hat{y}_i)^2 = \text{Sum Square Regression} = SS_{\text{Regr}}$

SS_{Regr} คือ ส่วนที่อธิบายได้ (Explained Part) ด้วยสมการถดถอย

จึงสรุปได้ว่า $SST = SS_{\text{Regr}} + SSE$

และสรุปความสัมพันธ์ได้ตาราง ANOVA ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สรุปความสัมพันธ์ ANOVA ของการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ [3]

แหล่งที่มา	d.f.	SS	MS	F
Regression	p	SS_{Regr}	MS_{Regr}	$\frac{MS_{\text{Regr}}}{MSE}$
Error	n-p	SSE	MSE	
Total (adj)	n-1	SST		

โดยที่ p = จำนวนพจน์ตัวแปรอิสระในสมการ หรือ
 = จำนวนสัมประสิทธิ์ในการถดถอยไม่นับค่าจุดตัดแกน
 N = จำนวนข้อมูล

$$SS_{\text{Regr}} = \beta_1 S_{xy} \text{ (กรณีสมการเส้นตรงคงรูป)}$$

ดังนั้น

$$SSE = SST - SS_{\text{Regr}} \quad (2.8)$$

$$= S_{yy} - \hat{\beta}_1 S_{xy}; \sum (y_i - \bar{y}) = S_{yy}$$

$$MSE = \frac{SSE}{d.f._E} = \frac{SSE}{n-p} S^2 \quad (2.9)$$

สำหรับสมการเต็มรูป จะสรุปได้ว่า

$$S^2 = MSE = \frac{S_{yy} - \hat{\beta}_1 S_{xy}}{n-1}; p=2 \Rightarrow (\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1) \quad (2.10)$$

ตัวสถิติ F ในตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนใช้ในการทดสอบสมมติต่อไปนี้ คือ

$$H_0 : \beta_i = 0 \quad \forall_i ; i = 1, 2, \dots, k \text{ (ไม่รวม } \beta_0)$$

(ตัวแปรอิสระไม่สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของ y ได้)

$$H_1 : \beta_i \neq 0 \exists_i$$

(ตัวแปรอิสระบางตัวสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของ y ได้)

หรือ สำหรับกรณีการถดถอยเชิงเส้น

$$H_0 : \beta_1 = 0 \text{ (ไม่มีสมการถดถอย)}$$

$$H_1 : \beta_1 \neq 0 \text{ (สมการถดถอยสร้างได้)}$$

$$F = \frac{MS_{\text{Regr}}}{MSE}; v = (p, n-p) \text{ และสมการทดสอบทางเดียวด้านบน}$$

บริเวณปฏิเสธ H_0 คือ $F > F_{\alpha}(p, n-p)$

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) นั้น เกิดจากอัตราส่วนระหว่างค่า SS_{Regr} และค่า SST ดังนั้นค่า (R^2) จึงระบุเป็นเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของ y ที่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการถดถอยที่ประมาณขึ้น

$$R^2 = \frac{SS_{\text{Regr}}}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (2.11)$$

หรือ

$$R^2 = r^2$$

$$r = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx} S_{yy}}}$$

โดยที่ r คือ ค่าที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างตัวแปร X และ Y นั้นเองในทางปฏิบัติ เนื่องจากค่า R^2 มีความในการเปลี่ยนแปลงกล่าวคือ เมื่อเพิ่มจำนวนตัวแปรอิสระในสมการค่า R^2 จะมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจจึงให้ค่า R^2 ที่ทำการปรับค่าแล้ว (R^2_{adj}) แทน

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{MSE}{MST}; MST = \frac{MST}{n-1} \quad (2.12)$$

ซึ่งอธิบายเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของ y ที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระในสมการถดถอยเช่นกัน



2.3.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking) เป็นวิธีการตรวจสอบที่ทำให้ทราบว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนมีความน่าเชื่อถือเป็นไปตามหลักการสถิติหรือไม่โดยอาศัย ข้อสมมติฐานที่สำคัญซึ่งอธิบายได้โดยใช้แบบจำลองดังต่อไปนี้

$$y_{ij} = \mu + \tau_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (2.13)$$

โดยที่ y_{ij} คือ ค่าตัวแปรตอบสนองหรือตัวแปรตาม
 μ คือ ค่าเฉลี่ยซึ่งเป็นค่าคงที่
 τ_{ij} คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของความผิดพลาดแบบสุ่ม
 ε_{ij} คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของความผิดพลาดแบบสุ่ม

โดยความผิดพลาดแบบสุ่ม (Random Error) จะต้องมีการแจกแจงแบบปกติและเป็นอิสระต่อกันด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และ σ^2 มีค่าคงตัวแต่ไม่ทราบค่าซึ่งเขียนเป็นสัญลักษณ์ได้ดังนี้ $\varepsilon_{ij} \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$ ถ้าสมมติฐานเหล่านี้เป็นจริงกระบวนการวิเคราะห์ความแปรปรวนนี้ก็จะเป็นการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับการไม่มีความแตกต่างในค่าเฉลี่ยของระดับที่ถูกต้อง

ในทางปฏิบัติสมมติฐานมักจะไม่เป็นเช่นนั้น ซึ่งจะเชื่อถือผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ก็ต่อเมื่อสามารถตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานว่าเป็นจริงเสียก่อน โดยสามารถตรวจสอบสมมติฐานขั้นต้นและความถูกต้องของแบบจำลองได้โดยการตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual) สำหรับค่าสังเกต j ของระดับที่ i ส่วนตกค้างจะมีค่าเป็น

$$e_{ij} = y_{ij} - \hat{y}_{ij} \quad (2.14)$$

โดยที่ \hat{y}_{ij} คือค่าประมาณของค่าสังเกต y_{ij} ซึ่งหาได้จาก

$$\begin{aligned} y_{ij} &= \hat{\mu} + \hat{\tau}_i \\ &= \bar{y}_{..} + (\bar{y}_{i..} - \bar{y}_{..}) \\ &= \bar{y}_{i..} \end{aligned} \quad (2.15)$$

จากสมการประมาณของค่าสังเกตใดๆ ในระดับที่ i ก็คือค่าเฉลี่ยของระดับนั้นๆ ดังนั้นการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบมีอยู่ 3 ประเภท คือ

1. การตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลง่ายเป็นการกระจายแบบปกติหรือไม่ โดยนำส่วนตกค้าง (Residual) ไปทดสอบโดยใช้วิธีดังต่อไปนี้

- การทดสอบแบบไคร์สแควร์ (χ^2 – Goodness of Fit Test)
- การทดสอบแบบโคลโกโมรอฟ – สเมอร์นอฟ (Kolmogorov – Smirnov Test)
- การทดสอบโดยใช้กระดาษตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ (NOPP)

2. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูลเป็นการตรวจสอบข้อมูลว่ามีความเป็นอิสระซึ่งกันและกันหรือไม่ทดสอบโดยใช้แผนภูมิกระจาย (Scatter Plot) ระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลแล้วดูลักษณะของข้อมูลว่ามีการกระจายตัวเป็นอิสระหรือมีลักษณะเป็นรูปแบบใดๆ

3. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูลทดสอบโดยใช้แผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) ระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual Plot) กับค่าที่ถุกฟิต (Fitted Value) ถ้าหากข้อมูลนั้นมีความเสถียรของความแปรปรวนหรือมีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวข้อมูล รูปที่พล็อตขึ้นมาจะกระจายอยู่ทั่วไปไม่มีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆ ทั้งสิ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นใด และทดสอบโดยใช้แผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) ระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับระดับของปัจจัยแต่ละปัจจัย ถ้าหากข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวนหรือมีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล รูปที่พล็อตขึ้นมาจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอก แต่ถ้ารูปที่พล็อตขึ้นมาเป็นการเพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นลำดับแสดง

2.4 แบบจำลองการถดถอย (The Regression Model) [4]

เป็นการศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปรปัจจัยหรือตัวแปรอิสระ กับค่าตอบสนองหรือตัวแปรตามที่มีความสัมพันธ์กันในลักษณะใด เพื่อประโยชน์ในด้านการพยากรณ์ค่าตัวแปรตาม โดยอาจกล่าวได้ว่าการออกแบบการทดลองเป็นส่วนหนึ่งของการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรและมักใช้ร่วมกันเสมอ

รูปแบบของการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้น แบ่งได้ 2 ลักษณะ ขึ้นกับตัวแปรอิสระ ดังนี้

1. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression Analysis) คือ การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ 1 ตัว กับตัวแปรตาม 1 ตัว เรียกสมการที่ 2.16 และ 2.17 ว่า สมการเส้นตรงเต็มรูปและสมการพหุนามอันดับสอง ตามลำดับ

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \epsilon \quad (2.16)$$

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 + \epsilon \quad (2.17)$$

2. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงพหุ (Multiple Regression Analysis) คือ การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปกับตัวแปรตาม 1 ตัว

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \epsilon \quad (2.18)$$

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \epsilon \quad (2.19)$$

2.5 ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function) [5]

เป็นทฤษฎีที่ใช้ในการหาค่าปัจจัยที่ดีที่สุดของการทดลองที่มีผลตอบหลายตัว โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าผลตอบหลายค่า (Multi-Response) ไปสู่ค่าผลตอบเดี่ยว (Single Response) โดยอาศัยหลักการทางคณิตศาสตร์ซึ่งกำหนดให้

$Y_j(x), j = 1, 2, 3 \dots m$ คือ ค่าผลตอบของแต่ละตัว

$d_j(Y_j(x))$ คือ ค่าดีไซรอะบิลิตีฟังก์ชันของผลตอบ

$Y_j(x)$ โดยค่าฟังก์ชัน $d_j(Y_j(x))$ จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.0 ถึง 1.0

x คือ ปัจจัยหรือตัวแปรอิสระ

ซึ่งจะทำให้ได้ค่าผลรวมของค่าความพึงพอใจ (The Total Desirability) โดยการรวมค่าความพึงพอใจของผลตอบแต่ละตัว ดังสมการที่ 2.20

$$D(x) = [d_1(Y_1(x)) d_2(Y_2(x)) \dots d_m(Y_m(x))]^{\frac{1}{m}} \quad (2.20)$$

ในการแปลงค่าผลตอบไปสู่ค่าความพึงพอใจมี 2 กรณี คือ การเปลี่ยนแปลงแบบทิศทางเดียว (One-side transformation) และการเปลี่ยนแปลงแบบสองทิศทาง (Two-side Transformation)

1. การเปลี่ยนแปลงแบบทิศทางเดียว สำหรับกรณีนี้ค่า d_j จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า Y_j เพิ่มขึ้น และจะมีค่าสูงสุดคือ ($d_j = 1$) เมื่อค่า Y_j มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าเป้าหมาย

$$d_j = \begin{cases} 0 & \text{ถ้า } Y_j(x) \leq Y_{\min j} \\ \left(\frac{Y_j - Y_{\min j}}{Y_{\max j} - Y_{\min j}} \right)^t & \text{ถ้า } Y_{\min j} \leq Y_j(x) \leq T_j \\ 1 & \text{ถ้า } Y_j(x) \geq Y_{\max j} \end{cases} \quad (2.21)$$

$$d_j = \begin{cases} 1 & \text{ถ้า } Y_j(x) \leq T_j \\ \left(\frac{Y_{\max} - Y_j}{Y_{\max j} - Y_{\min j}} \right)^t & \text{ถ้า } T_j \leq Y_j(x) \leq Y_{\max j} \\ 0 & \text{ถ้า } Y_j(x) \geq Y_{\max j} \end{cases} \quad (2.22)$$

2. การเปลี่ยนแปลงแบบสองทิศทาง สำหรับกรณีที่ต้องการให้ค่าผลตอบมี 2 ค่า คือทั้งค่าน้อยที่สุดและค่ามากที่สุด ดังสมการที่ 2.23 โดยที่ค่า s, t, r เป็นค่าน้ำหนักที่กำหนดขึ้นและ m คือจำนวนผลตอบทั้งหมด

$$d_j = \begin{cases} \left(\frac{Y_j - Y_{\min j}}{T_j - Y_{\min j}} \right)^s & \text{ถ้า } Y_{\min j} \leq Y_j^{(x)} \leq T_j \\ \left(\frac{Y_j - Y_{\max j}}{T_j - Y_{\max j}} \right)^t & \text{ถ้า } T_j \leq Y_j^{(x)} \leq Y_{\max j} \end{cases} \quad (2.23)$$

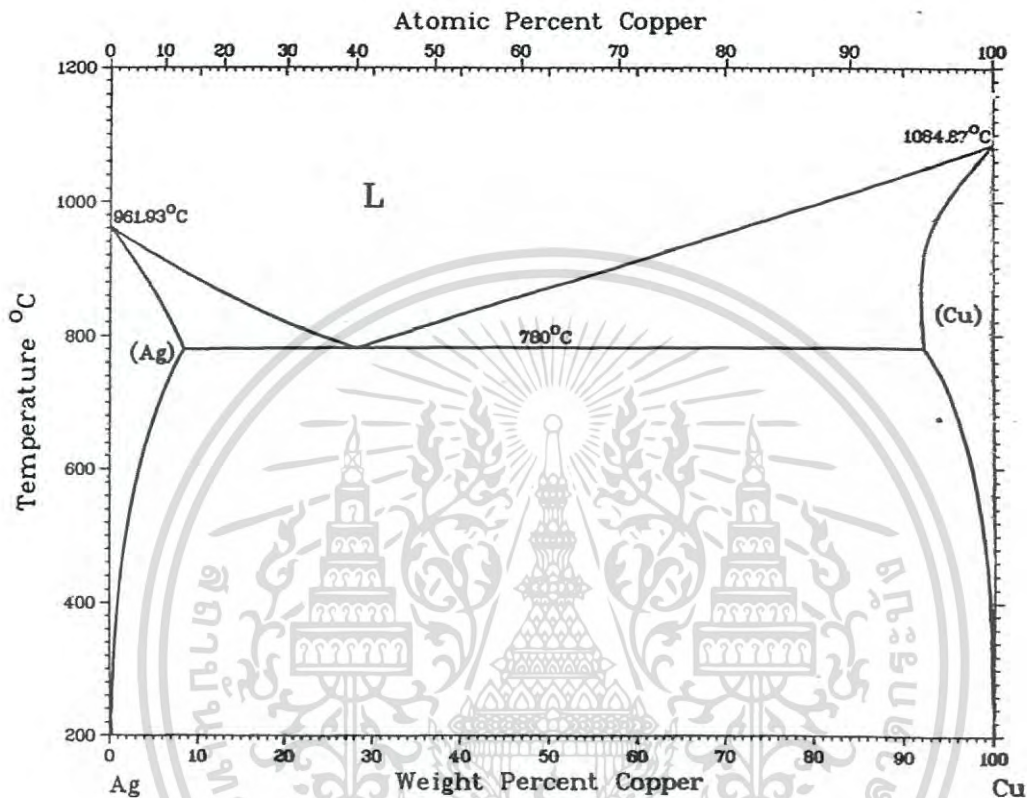
2.6 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) [6]

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) เกิดขึ้นจากนักวิทยาศาสตร์ที่ต้องการแก้โจทย์ปัญหาทางคณิตศาสตร์เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ออกมาเหมาะสมที่สุด ซึ่งปัญหาส่วนใหญ่นั้นเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่มาจากหลักพื้นฐานทางด้านฟิสิกส์ของระบบนั้นๆ ก่อนปี ค.ศ. 1940 วิธีที่ใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฟังก์ชันที่มีหลายตัวแปรนั้นมีไม่มากนัก เช่น การทำ Least Square ซึ่งถูกนำมาประยุกต์ใช้กับปัญหาทางด้านฟิสิกส์บางประเภทแต่วิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย และเป็นที่ยอมรับ คือการทำวิธีของนิวตัน (Newton Method) ซึ่งถูกนำมาใช้กับปัญหาของระบบที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีทางเคมีในช่วงปี ค.ศ. 1940 – ค.ศ. 1950 มีการแนะนำสาขาใหม่ทางการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่เรียกกันว่า กำหนดการเชิงเส้น (Linear Programming) จากนั้นได้มีการศึกษาและพัฒนากันมาอย่างต่อเนื่อง จนถึงปัจจุบันนี้ได้มีการนำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมาใช้อย่างกว้างขวางไม่ว่าจะเป็นทางด้านวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ คณิตศาสตร์ และ เศรษฐศาสตร์ เป็นต้น

สำหรับในภาคอุตสาหกรรมนั้น การตัดสินใจที่จะปรับปรุงให้ดีที่สุดเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นให้เห็นอยู่บ่อยครั้ง ตัวอย่างเช่น การเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการอุตสาหกรรมการผลิตทั้งหมด การลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการต่างๆ ซึ่งผู้จัดการต้องมีการวางแผนการทำงานที่ดีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในด้านต่างๆ ให้ได้ตามที่ต้องการ และในทางเดียวกันวิศวกรต้องออกแบบระบบใหม่ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น แต่เสียค่าใช้จ่ายน้อยลง บางปัญหาที่เกิดขึ้นกลายเป็นเรื่องยุ่งยากขึ้นมา เมื่อผู้จัดการหรือวิศวกรพบกับทางเลือกมากมายในการแก้ไขปัญหาเหล่านั้น และจะอย่างไรถึงจะสามารถเลือกทางที่ให้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการและดีที่สุด

2.7 แผนภูมิเฟสของเงินและทองแดง

เป็นแผนภาพสมดุระบบ (Binary Phase Diagram) ระหว่างเงินและทองแดง โดยแสดงการเกิดเฟสต่างๆระหว่างเงินและทองแดง ดังรูปที่ 2.5



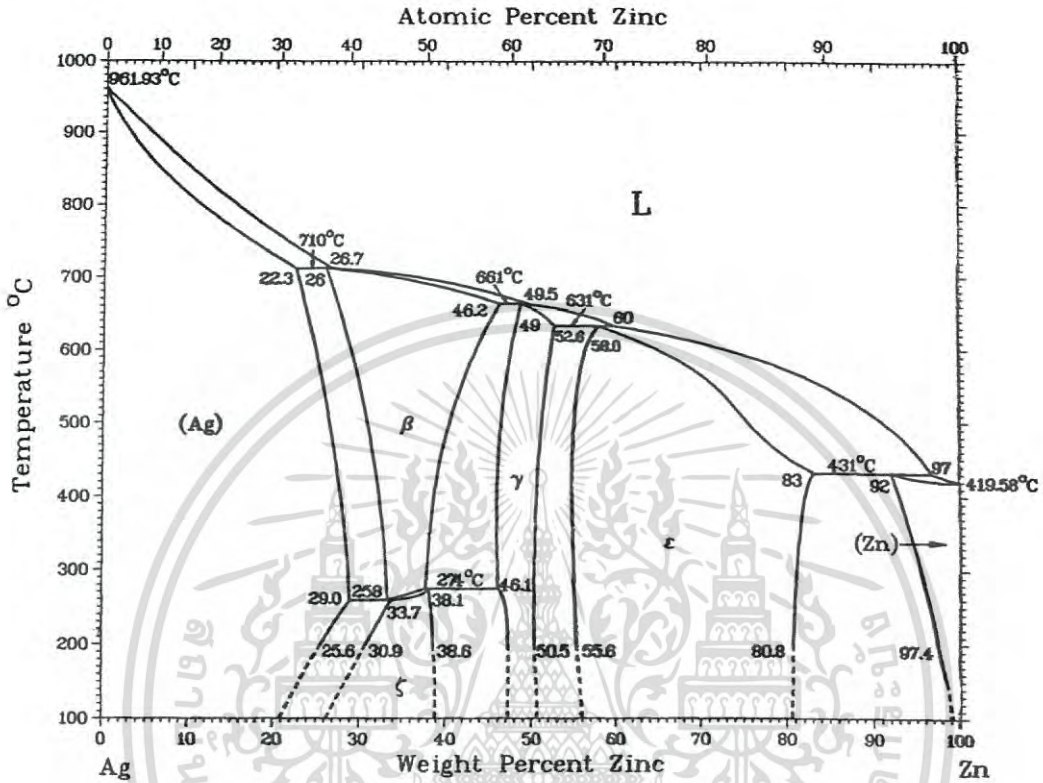
รูปที่ 2.5 แผนภูมิเฟสของเงินและทองแดง [7]

ตารางที่ 2.3 Ag-Cu Crystal Structure Data [7]

Phase	Composition, at.% Cu	Pearson symbol	Space group	Strukturbericht designation	Prototype
(Ag).....	0 to ~14	cF4	Fm $\bar{3}$ m	A1	Cu
(Cu).....	~95 to 100	cF4	Fm $\bar{3}$ m	A1	Cu

2.8 แผนภูมิเฟสของเงินและสังกะสี

เป็นแผนภาพสมดุลระบบ (Binary Phase Diagram) ระหว่างเงินและสังกะสี โดยแสดงการเกิดเฟสต่างๆระหว่างเงินและสังกะสี ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แผนภูมิเฟสของเงินและสังกะสี [7]

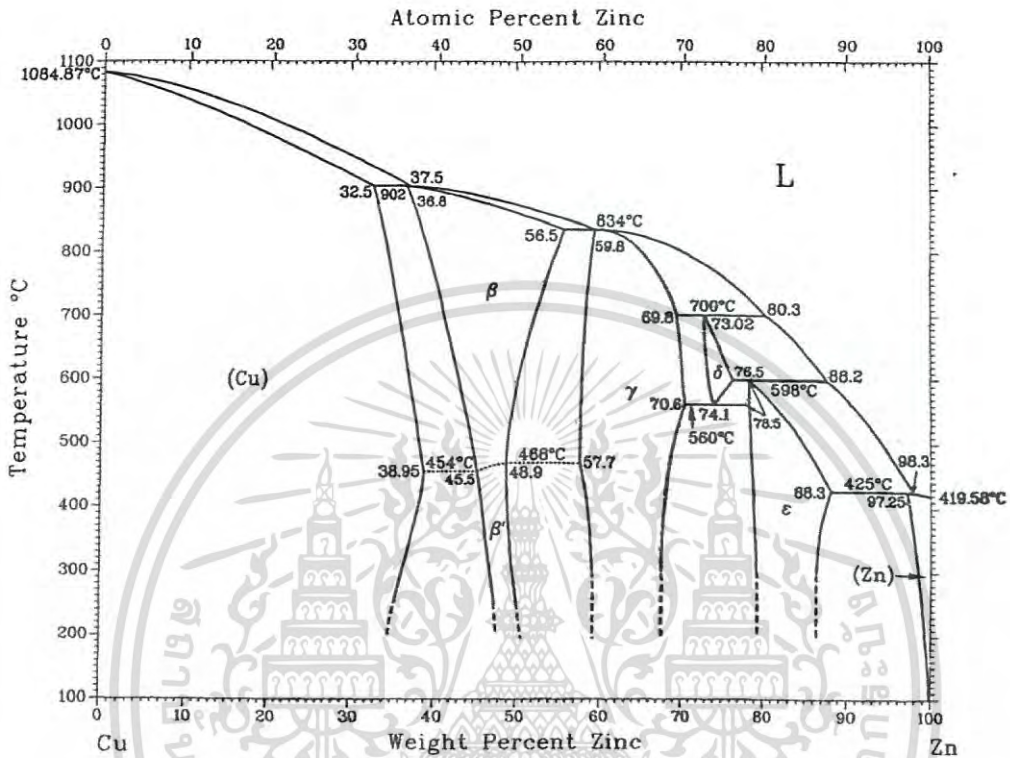
ตารางที่ 2.4 Ag-Zn Crystal Structure Data [7]

Phase	Composition, at.% Zn	Pearson symbol	Space group	Strukturbericht designation	Prototype
(Ag).....	0 to ~40.2	cF4	Fm $\bar{3}$ m	A1	Cu
ζ(AgZn).....	37 to ~51.2	(a)
β(Ag ₂ Zn).....	36.7 to 58.6	cI2	Im $\bar{3}$ m	A2	W
γ(Ag ₅ Zn ₈)....	58.5 to 64.7	cI52	I $\bar{4}$ 3m	D ₈ ₂	Cu ₅ Zn ₈
ε.....	~66.2 to 89	hP2	P6 ₃ /mmc	A3	Mg
(Zn).....	95 to 100	hP2	P6 ₃ /mmc	A $\bar{3}$	Mg
(a).Ordered hexagonal.					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 แผนภูมิเฟสของทองแดงและสังกะสี

เป็นแผนภาพสมดุลระบบ (Binary Phase Diagram) ระหว่างทองแดงและสังกะสี โดยแสดงการเกิดเฟสต่างๆระหว่างเงินและสังกะสี ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แผนภูมิเฟสของทองแดงและสังกะสี [7]

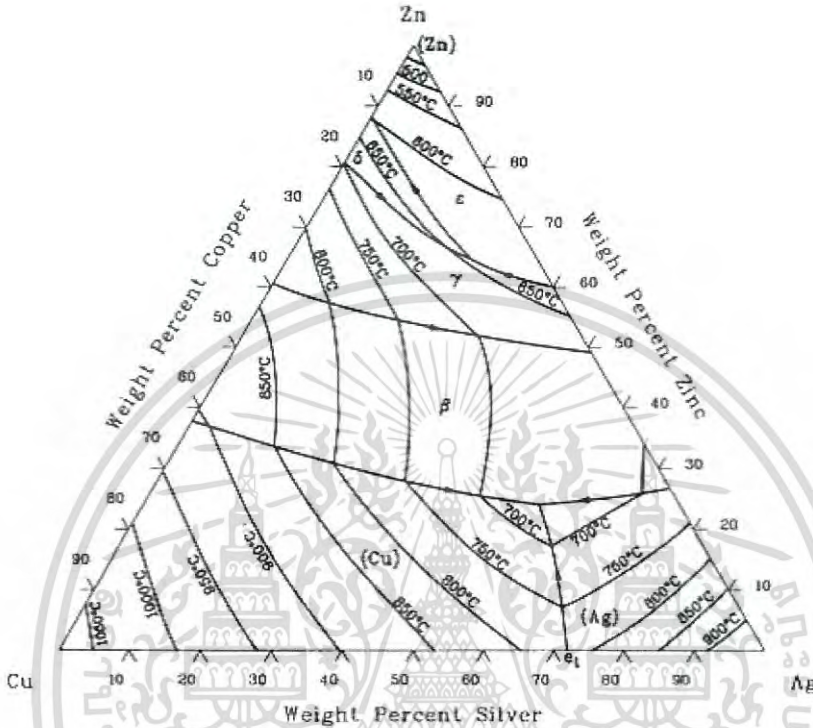
ตารางที่ 2.5 Special Point of the Cu-Zn System [7]

Reaction		Composition, at.% Zn		Temperature, °C	Reaction type
$\alpha + L \leftrightarrow \beta$	31.9	36.8	36.1	902	Peritectic
$\beta + L \leftrightarrow \gamma$	55.8	59.1	59.1	834	Peritectic
$\gamma + L \leftrightarrow \delta$	69.2	79.8	72.45	700	Peritectic
$\delta + L \leftrightarrow \epsilon$	76.0	87.9	78.0	598	Peritectic
$\epsilon + L \leftrightarrow \eta$	88.0	98.25	97.17	425	Peritectic
$\delta \leftrightarrow \gamma + \epsilon$	73.5	70.0	78.0	560	Eutectoid

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 แผนภูมิเฟสของเงิน ทองแดง และสังกะสี

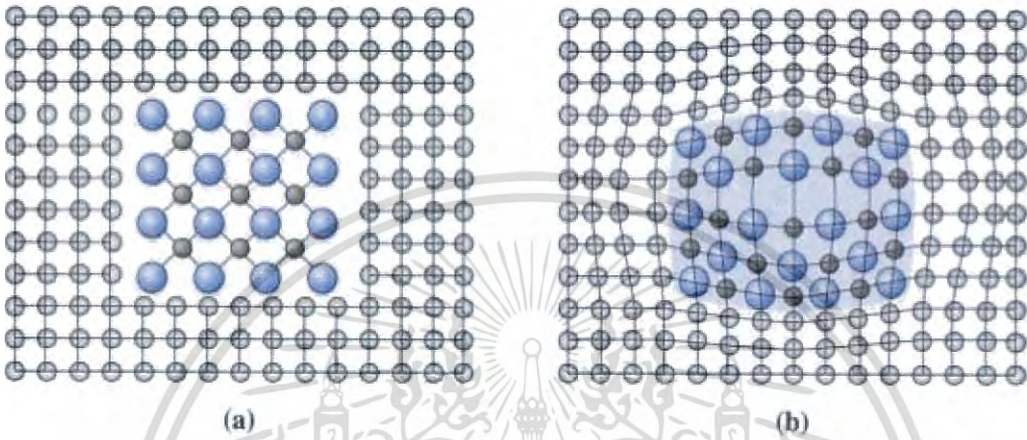
เป็นแผนภาพสมดุกระบบ (Ternary Phase Diagram) ระหว่างเงิน ทองแดง และสังกะสี โดยแสดงการเกิดเฟสต่างๆระหว่างเงินและสังกะสี ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แผนภูมิเฟสของเงิน ทองแดง และสังกะสี [8]

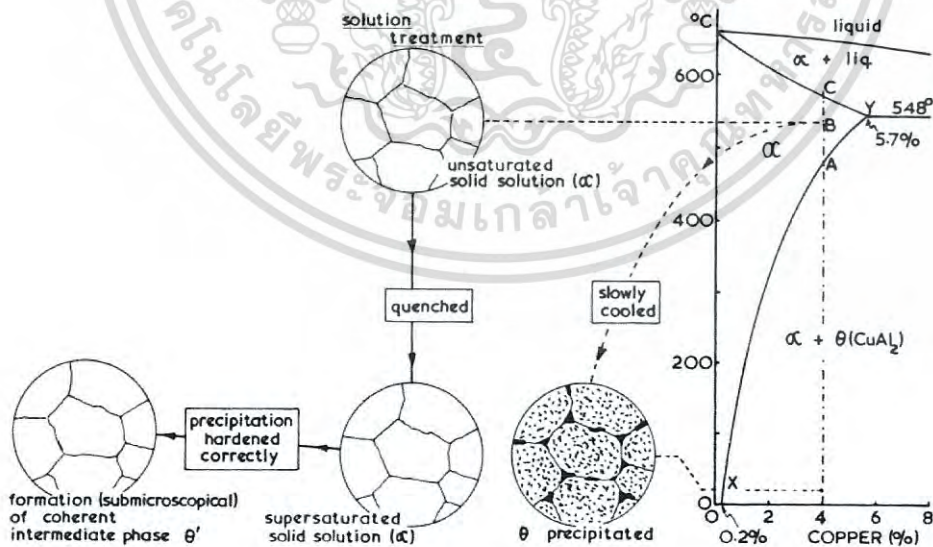
2.11 การชุบแข็งโดยวิธีการตกตะกอน (Precipitation Hardening) [9]

เป็นกระบวนการที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงเฟสที่เกิดขึ้นในสภาวะของแข็งโดยมีการเกิดเฟสของแข็งที่เป็นอนุภาคเล็กในระดับนาโนเมตรที่เกิดขึ้นจากการตกตะกอนและมีแรงยึดเหนี่ยวกับเมทริกซ์ที่มีความอ่อนเหนียว ทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น การตกตะกอนแล้วมีแรงยึดเหนี่ยวกับเมทริกซ์ เรียกว่า โคเฮเรนต์พรีซิพิตเตด (Coherent Precipitation)



รูปที่ 2.9 การชุบแข็งโดยวิธีการตกตะกอน (Precipitation Hardening) [9]

- (a) การตกตะกอนที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยวกับเมทริกซ์ (Non-Coherent Precipitation)
- (b) การตกตะกอนแบบมีแรงยึดเหนี่ยวกับเมทริกซ์ (Coherent Precipitation)



รูปที่ 2.10 กระบวนการชุบแข็งโดยวิธีการตกตะกอน (Precipitation Hardening) [10]

ในกระบวนการชุบแข็งแบบตกตะกอนจะแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน

ขั้นตอนที่ 1 : การอบให้เป็นสารละลายเนื้อเดียวกัน (Solution Heat Treatment)

เป็นการเพิ่มความสามารถในการละลายของธาตุที่ผสมให้อยู่ในรูปของสารละลายของแข็งกระจายตัวเข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับธาตุหลักมากขึ้น โดยอาศัยหลักที่ว่าความสามารถในการละลายของธาตุผสมเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นเมื่อเวลาในการอบละลายเพียงพอจะทำให้ธาตุผสมละลายและกระจายตัวในธาตุหลักอย่างทั่วถึง ทำให้โครงสร้างเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นหรือเป็นเฟสแอลฟาทั้งหมด และการอบละลายยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเฟส โดยธาตุผสมที่ไม่ละลายเข้าไปเป็นเนื้อเดียวกันกับธาตุหลักจะมีการแตกตัวเป็นชิ้นเล็กๆกว่าเดิมและมีลักษณะกลมมนมากขึ้น

ขั้นตอนที่ 2 : การจุ่มชุบ (Quenching)

นำชิ้นงานจากขั้นตอนแรก มาจุ่มชุบลงในน้ำเพื่อให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้อะตอมของเฟสธาตุผสมมีเวลาไม่มากพอที่จะแพร่ออกมารวมตัวกันเป็นนิวเคลียส ดังนั้นโครงสร้างที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิห้องจึงเป็นเฟสแอลฟาที่มีสภาพเป็นสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturated Solid Solution)

ขั้นตอนที่ 3 : การบ่ม (Aging)

ขั้นตอนนี้ทำให้ธาตุผสมที่อยู่ในสภาวะสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวดเกิดการตกตะกอนและฟอร์มตัวเป็นเฟสใหม่ที่มีความละเอียดมากโดยอาศัยการแพร่ภายในแลตทิซ และส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งเพิ่มขึ้นเนื่องจากอนุภาคที่ได้จากการตกตะกอนจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้และช่วงระยะเวลาจะมีผลต่อความแข็งที่เกิดขึ้น หากใช้อุณหภูมิต่ำเกินไปและใช้เวลาน้อยขนาดของอะตอมจะเล็กมากเกินไป ทำให้ได้ความแข็งแรงต่ำ เรียกว่า ต่ำกว่ากระบวนการบ่ม (Under Aging) แต่ถ้าเลือกใช้อุณหภูมิสูงและเวลานานเกินไปจะทำให้ตะกอนเกิดการรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่และมีจำนวนลดลง ทำให้ได้ความแข็งแรงต่ำ เรียกว่า สูงกว่ากระบวนการบ่ม (Over aging) โดยการบ่มด้วยวิธีให้ความร้อน จะเรียกว่า การบ่มเทียม (Artificial Aging)

2.12 ความแข็ง (Hardness) [11]

ความแข็ง (Hardness) คือ คุณสมบัติของวัสดุที่สามารถทนต่อการกระทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบถาวร (Plastic Deformation) เฉพาะที่มักจะทดสอบด้วยกันหลายวิธีเช่น การกด การเสียดสี การเจาะ เป็นต้น

2.13 การวัดความแข็ง (Hardness Tester)

ความแข็งของวัสดุไม่สามารถบ่งบอกด้วย น้ำหนัก ความยาว หรือเวลา แต่เป็นค่าที่ได้จากกระบวนการทดสอบความแข็ง นานมาแล้วการทดสอบวัดความแข็งนั้นประเมินจากความทนทานต่อการตัดหรือการขูดขีด โดยการนำวัสดุที่ต้องการทดสอบมาขูดขีดกัน และสังเกตด้วยตาเปล่าว่าวัสดุชิ้นใดทำให้เกิดรอยขูดมากกว่า วิธีการทดสอบนี้คิดค้นโดยชาวเยอรมันชื่อ Friedrich Mohr ในปี 1812 และได้กำหนดระดับความแข็ง 10 ระดับด้วยแร่ 10 ชนิด ต่อมาได้มีการทดสอบอีกประเภทหนึ่งซึ่งมีลักษณะคล้ายกันเรียกว่า File Test โดยใช้วัสดุที่มีความแข็งมาตรฐานมาขูดกับวัสดุทดสอบและจัดเรียงลำดับค่าความแข็งของวัสดุทดสอบว่าอยู่ในระดับใด จะเห็นว่า การทดสอบดังกล่าวไม่สามารถบ่งบอกค่าความแข็งออกมาในเชิงตัวเลขได้ ในปัจจุบันการทดสอบความแข็งของวัสดุได้ก้าวหน้าไปมากและสามารถบ่งบอกค่าความแข็งออกมาในเชิงตัวเลขได้อีกด้วย

วิธีที่นิยมใช้นั้นมีอยู่ 4 วิธีดังนี้

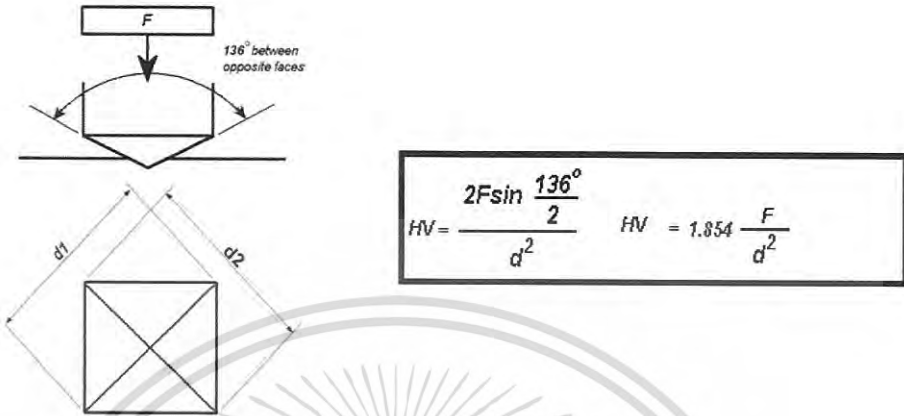
1. การทดสอบความแข็งบริเนลล์ (Brinell Hardness Test)
2. การทดสอบความแข็งวิกเกอร์ส (Vickers Hardness Test)
3. การทดสอบความแข็งนูบ (Knoop Hardness Test)
4. การทดสอบความแข็งร็อกเวลล์ (Rockwell Hardness Test)

2.13.1 การทดสอบความแข็งวิกเกอร์ส (Vickers Hardness Test)

การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส มีลักษณะการวัดที่คล้ายกับการทดสอบแบบบริเนลล์แต่เปลี่ยน Indenter หรือ หัวกดทดสอบจากทรงกลมเป็นหัวกดรูปพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมยอดมีขนาด 136 องศาทำจากเพชร การทดสอบวิธีนี้เหมาะสำหรับวัสดุที่มีลักษณะอ่อนไปจนถึงแข็งมาก (VHN ประมาณ 1500) โดยไม่ต้องเปลี่ยนหัวกด จะเปลี่ยนก็เฉพาะแรงกดเท่านั้น โดยมีตั้งแต่ 1-120 kgf ขึ้นอยู่กับความแข็งของโลหะที่ทดสอบ ซึ่งทำให้วิธีนี้มีข้อได้เปรียบกว่า Brinell คือ ไม่ต้องคำนึงถึงอัตราส่วน P/D2 และข้อจำกัดในด้านความหนาของชิ้นงานทดสอบเนื่องจากหัวกดเพชรมีขนาดเล็กมาก

วิธีการทดสอบ

ในที่นี้จะกล่าวถึง วิธีการทดสอบความแข็งวิกเกอร์ส โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งยูนิเวอร์แซลตามมาตรฐานเยอรมัน (DIN 50351) และเวลาทดสอบก็ดำเนินการตามวิธี ดังนี้



รูปที่ 2.11 วิธีการวัดขนาดเส้นทแยงมุม และสมการการคำนวณค่าความแข็งวิกเกอร์ส [11]

1. ปรับและตั้งค่าเครื่องทดสอบให้อยู่ที่ค่ามาตรฐาน
2. นำชิ้นทดสอบวางบนแท่นรองรับ
3. หมุนยกแท่นรองรับชิ้นทดสอบขึ้นมาจนภาพของผิวชิ้นทดสอบไปปรากฏชัดบนจอภาพแล้วยึดชิ้นทดสอบให้แน่นด้วยหัวจับครอบชิ้นทดสอบ
4. เลือกตำแหน่งบนชิ้นงานทดสอบที่ต้องการทดสอบความแข็ง เลือกแรงกดทดสอบตามต้องการ
5. กดสวิตช์เพื่อให้หัวกดทดสอบเริ่มเคลื่อนที่ลงกดผิวชิ้นทดสอบอย่างช้าๆ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการกระแทกขณะกด และปล่อยระยะเวลากดตามต้องการ
6. วัดขนาดเส้นทแยงมุมของรอยบุ๋มที่ปรากฏบนจอภาพ ซึ่งรับภาพผ่านเลนส์ขยาย โดยสามารถวัดได้ละเอียดถึง 0.01 มิลลิเมตร และวิธีการวัดขนาดเส้นทแยงมุมของรอยบุ๋มนั้น ควรวัดดังรูป 2.11 แล้วหาค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุมทั้ง d_1 และ d_2 เพื่อนำไปคำนวณหรือเปิดตารางความแข็งวิกเกอร์ส ดังแสงในตารางที่ 2.3 ต่อไป

ตารางที่ 2.6 ความแข็งวิกเกอร์ส [11]

Material	Load P, (N)	Diagonal 2a, (μm)	Crack length c, (μm)	Hardness H _v , (GPa)	Toughness K _{IC} , (MPam ^{1/2})
F	4.91	19.2 ± 0.5	21.3 ± 0.5	24.80 ± 1.5	3.16 ± 0.4
	9.81	29.8 ± 0.2	36.5 ± 0.4	19.88 ± 0.5	2.95 ± 0.4
	49.1	69.1 ± 0.5	114.5 ± 1.5	19.05 ± 0.3	2.89 ± 0.3
	98.1	95.5 ± 1.7	179.2 ± 3.7	19.97 ± 0.1	2.89 ± 0.3
	147.2	117.4 ± 0.4	235.7 ± 5.7	19.81 ± 0.2	2.88 ± 0.2
	196.2	137.5 ± 0.7	287.6 ± 19.2	19.24 ± 0.2	2.91 ± 0.3
	245.3	152.1 ± 2.4	330.1 ± 20.8	19.66 ± 0.3	2.93 ± 0.2
M	4.91	20.3 ± 0.5	22.5 ± 0.4	22.23 ± 1.3	3.09 ± 0.3
	9.81	29.8 ± 0.2	36.6 ± 0.3	18.92 ± 0.3	2.96 ± 0.4
	49.1	70.1 ± 0.5	115.3 ± 6.6	18.51 ± 0.2	2.92 ± 0.2
	98.1	96.3 ± 0.5	179.6 ± 2.6	19.61 ± 0.1	2.90 ± 0.1
	147.2	120.1 ± 2.4	234.7 ± 7.3	18.94 ± 0.2	2.97 ± 0.4
	196.2	139.9 ± 1.2	282.2 ± 9.7	18.57 ± 0.3	3.04 ± 0.3
	245.3	154.8 ± 3.0	323.9 ± 14.5	18.98 ± 0.2	3.06 ± 0.1
C	4.91	21.89 ± 0.7	24.5 ± 0.3	19.02 ± 1.1	2.95 ± 0.4
	9.81	31.2 ± 1.1	38.7 ± 1.6	18.76 ± 1.3	2.96 ± 0.4
	49.1	70.2 ± 0.5	115.1 ± 2.1	18.51 ± 0.2	2.91 ± 0.2
	98.1	98.7 ± 0.5	179.4 ± 4.2	18.67 ± 0.1	2.98 ± 0.1
	147.2	121.7 ± 0.6	238.9 ± 16.6	18.43 ± 0.2	3.01 ± 0.2
	196.2	140.9 ± 0.8	278.8 ± 18.2	18.31 ± 0.4	3.14 ± 0.2
	245.3	156.1 ± 1.2	314.6 ± 23.6	18.68 ± 0.3	3.23 ± 0.3

2.14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) [12]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ Electron เป็นแหล่งกำเนิดแสง เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะสัณฐานของวัสดุในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมาก และเนื่องจากข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่มีความยาวคลื่นแสงขนาดใหญ่กว่าลักษณะสัณฐานบางชนิดที่ต้องการศึกษา และกำลังความสามารถในการแยกชัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดา มีค่าต่ำใช้ดูวัตถุเล็กสุดประมาณ 0.2 ไมโครเมตร และให้กำลังขยายสูงสุดไม่เกิน 3000 เท่า ซึ่งไม่สามารถตรวจสอบรายละเอียดของวัตถุที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง มีความสามารถในการแยกชัดดี เนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้นเพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของวัสดุ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีกำลังขยายมากกว่า 3000 เท่า จนถึงระดับมากกว่า 100000 เท่า และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพ ซึ่งขึ้นกับลักษณะตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100 นาโนเมตร อีกทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์อื่น เช่น Energy

Dispersive Spectrometry (EDS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) ที่เป็นข้อมูลทางเคมี จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีต้นกำเนิดเป็นอิเล็กตรอนแทนแสง โดยต้นกำเนิดอิเล็กตรอนถูกสร้างจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงแก่ขดลวดทั้งสแตน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากขดลวด จากนั้นอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะถูกควบคุมทิศทางภายใต้สนามแม่เหล็ก ซึ่งอาศัยหลักการการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กหรือที่เรียกว่าเลนส์แม่เหล็กทำให้ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้ามากระทบกับชิ้นงาน เกิดอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนต่อชิ้นงานหลายแบบ เนื่องจากลำอิเล็กตรอนที่วิ่งมากระทบชิ้นงานมีพลังงานสูง ทำให้อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชิ้นงานมีหลายระดับพลังงาน แบ่งได้เป็น อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) เป็นอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชั้นแถบการนำ (Conduction Band) หรือแถบพลังงานเวเลนซ์ (Valence Band) ซึ่งไม่ต้องใช้พลังงานสูงสามารถหลุดออกจากผิวชิ้นงานได้ง่าย บางครั้งเรียกว่าอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งจะมีช่วงพลังงาน 10 ถึง 50 อิเล็กตรอนโวลต์ อิเล็กตรอนชนิดนี้จะใช้ในการสร้างภาพที่บริเวณพื้นผิวของชิ้นงานสำหรับ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

อิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (Back Scattered Electron) เป็นอิเล็กตรอนที่เกิดจากการที่ ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้าชนกับชิ้นงาน โดยสูญเสียพลังงานให้กับอะตอมในชิ้นงานเพียงบางส่วน แล้วเกิดการกระเจิงกลับออกมาจากชิ้นงาน ซึ่งพลังงานของอิเล็กตรอนชนิดนี้จะมีค่าตั้งแต่พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิไปจนถึงพลังงานอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ค่าพลังงานต่างๆที่กระเจิงกลับมานั้นจะขึ้นกับเลขมวลอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน ดังนั้นอิเล็กตรอนชนิดนี้จึงสามารถใช้สร้างภาพที่แสดงความแตกต่างของธาตุได้ โดยแสดงในรูปแบบของความเข้ม และความสว่างของภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณ ใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน

รังสีเอกซ์ (X-ray) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้น มีความถี่สูง เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนชิ้นงาน ทำให้อิเล็กตรอนในระดับชั้นโคจรต่างๆ (K, L, M, ...) ได้รับพลังงานมากพอจนหลุดออกจากวงโคจร แล้วอิเล็กตรอนจากชั้นโคจรถัดไปเข้ามาแทนที่ ทำให้มีการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา ซึ่งสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ที่ปล่อยออกมานี้สามารถนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยค่าพลังงานนี้จะขึ้นกับเลขอะตอมของธาตุ ซึ่งจะใช้หัววัดรังสีเอกซ์ (EDS) ในการวิเคราะห์ข้อมูลประกอบกับ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

2.15 หลักการของการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ด้วยเทคนิค EDS (Energy Dispersive x-ray Spectrophotometry, EDS) [13]

การวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ด้วยเทคนิค EDS เป็นระบบที่นิยมใช้กันมากในกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) เนื่องจากสามารถวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของวัตถุ และใช้เวลาไม่มากในการวิเคราะห์โดยเทคนิค EDS มีหลักการวิเคราะห์ คือ เมื่อลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงเคลื่อนที่เข้าชนอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นในของอะตอม เช่น ชั้น K หรือ L แล้วเกิดการถ่ายโอนพลังงานให้แก่อิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนในชั้นที่ได้รับพลังงานดังกล่าวมีพลังงานสูงกว่าพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding Energy) ของชั้นโคจร อิเล็กตรอนจึงหลุดจากวงโคจรทำให้เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอนในชั้นโคจร หลังจากนั้นอะตอมที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นจะลดระดับพลังงานลงสู่สภาวะปกติในช่วงเวลาอันสั้น โดยอิเล็กตรอนของวงโคจรชั้นถัดออกไปจะลดระดับพลังงานลงมาให้เท่ากับพลังงานยึดเหนี่ยวของวงโคจรที่เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอน โดยการปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของรังสีเอกซ์แล้วอิเล็กตรอนจะเข้ามาแทนที่พลังงานส่วนเกินนี้มีพลังงานเท่ากับค่าความแตกต่างของระดับพลังงานยึดเหนี่ยวเฉพาะชั้นโคจรของอิเล็กตรอน และเฉพาะของธาตุนั้นๆ สำหรับการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์แบบ EDS สามารถกระทำได้ 3 วิธีคือ

1. การวิเคราะห์ส่องกราดเฉพาะพื้นที่ (Area Scan Analysis) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า เอกซ์เรย์แมปปิง (X-ray Mapping) ซึ่งจะเป็นการวิเคราะห์โดยใช้ลำอิเล็กตรอนส่องกราดบนพื้นผิว ตัวอย่างเป็นพื้นที่เล็กๆ โดยความกว้างของพื้นที่ขึ้นกับกำลังขยายที่ใช้ ลักษณะการส่องกราดเป็นแนวจากซ้ายไปขวา และจากบนลงล่าง ภาพที่ได้จากการวิเคราะห์จะแสดงลักษณะการกระจายของธาตุนั้นๆ
2. การวิเคราะห์ส่องกราดตามแนวเส้น (Line Scan Analysis) เป็นการวิเคราะห์ที่ใช้การส่องกราดลำอิเล็กตรอนตามแนวนอนตัวอย่างตรงตำแหน่งที่สนใจ เพื่อวัดความเข้มของรังสีเอกซ์เฉพาะตัว นิยมใช้ในกรณีที่ต้องการจะหาขอบเขตของรอยต่อหรือเฟสของโครงสร้าง
3. การวิเคราะห์เฉพาะจุด เป็นการวิเคราะห์ที่ให้ลำอิเล็กตรอนกระทบอยู่กับที่บนพื้นผิว ตัวอย่าง ตรงจุดที่ต้องการวิเคราะห์เพื่อวัดค่าปริมาณรังสีเอกซ์เฉพาะตรงจุดที่ต้องการ รังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่เกิดจากตัวอย่างจะมีพลังงานตามสมการ

$$E = h\nu \tag{2.24}$$

เมื่อ E = พลังงานของรังสีเอกซ์

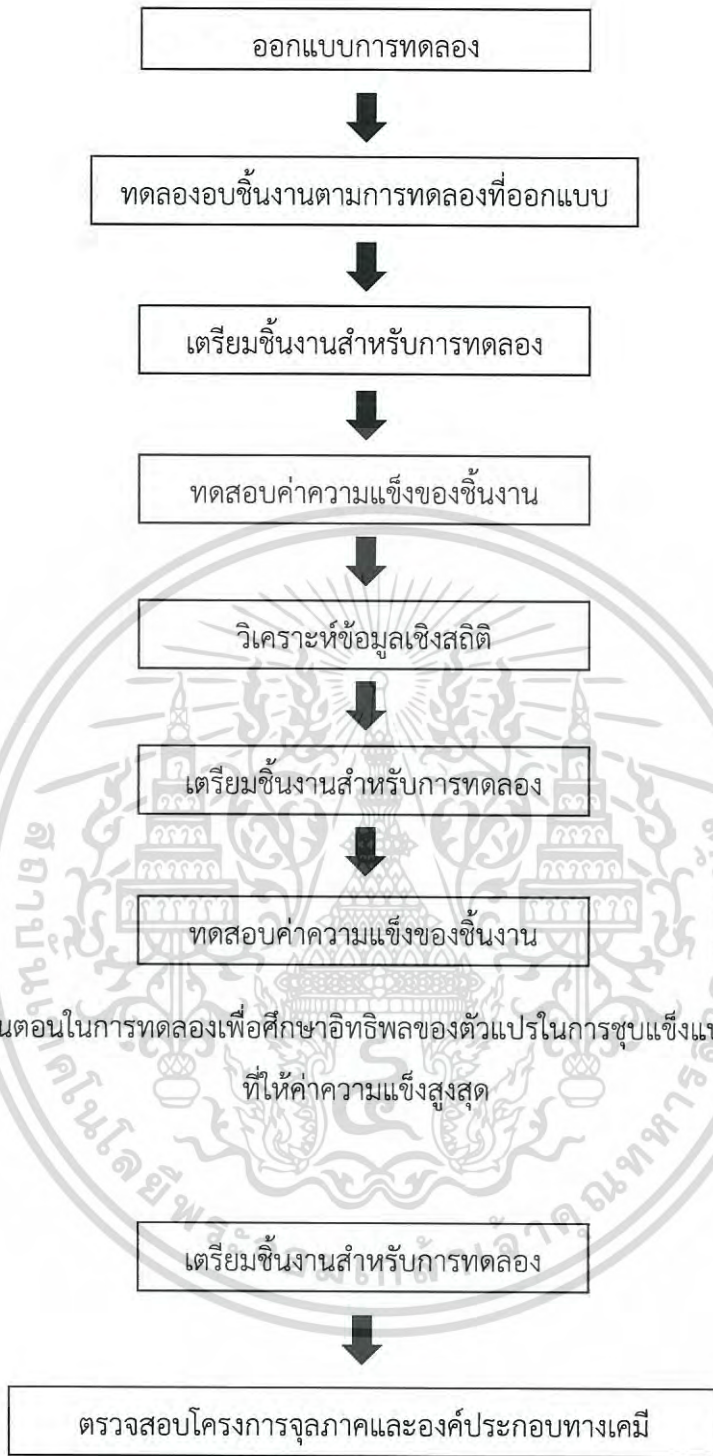
h = ค่าคงที่ของพลัง (Planck's constant $\approx 6.626 \times 10^{-34}$ J·s)

ν = ความถี่ของรังสีเอกซ์

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

ในการจัดทำปฏิญญาพันธกิจเรื่อง การศึกษากระบวนการทางความร้อนเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของเงินสเตอร์ลิง กรณีศึกษาอุตสาหกรรมอัญมณี โดยทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในกระบวนการชุบแข็งแบบตกตะกอน (Precipitation Hardening) และทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนที่เงื่อนไขแตกต่างกัน เพื่อให้ได้อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการปรับปรุง กระบวนการผลิตเครื่องประดับเงินให้มีความแข็งแรงตามมาตรฐานที่ทางบริษัทต้องการ ขั้นตอนในการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการชุบแข็งแบบตกตะกอนที่ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด แสดงดังรูปที่ 3.1 ขั้นตอนในการทดลองเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนในการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการชุบแข็งแบบตกตะกอน
ที่ให้ค่าความแข็งสูงสุด

รูปที่ 3.2 ขั้นตอนในการทดลองเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค

3.1 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการชุบแข็งแบบตกตะกอนที่ให้ค่าความแข็งสูงสุด

3.1.1 การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย

การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการเพิ่มค่าความแข็งของเงินสเตอร์ลิง เพื่อนำค่าของปัจจัยที่ดีที่สุดไปเป็นมาตรฐานในการผลิตเงินสเตอร์ลิงของทางบริษัท ผู้วิจัยมีปัจจัยที่อยู่ในความสนใจอยู่ 3 ปัจจัยด้วยกัน ซึ่งการออกแบบการทดลองมีขั้นตอน 4 ขั้นตอนดังนี้

3.1.1.1 เลือกปัจจัย ระดับ และขอบเขต

โดยปกติแล้วกระบวนการชุบแข็งแบบตกตะกอน ในขั้นตอนของการอบให้เป็นสารละลายเนื้อเดียวกัน (Solution Heat Treatment) ทางบริษัทจะใช้อุณหภูมิในการอบละลาย 650 องศาเซลเซียส เวลาในการอบละลาย 30 นาที และขั้นตอนการบ่มแข็งเทียม (Precipitation Heat Treatment) ใช้ อุณหภูมิในการบ่มแข็งเทียม 300 องศาเซลเซียส เวลาในการบ่มแข็งเทียม 60 นาที ซึ่งก่อนออกแบบการทดลองทางผู้วิจัยได้ศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับค่าความแข็งของเงินสเตอร์ลิง โดยศึกษาปัจจัยจากประสบการณ์ของพนักงาน ซึ่งประสบการณ์ต่าง ๆ เหล่านี้เป็นพื้นฐานที่สำคัญในการก้าวไปสู่ขั้นตอนต่อไปของการออกแบบการทดลองโดยจะส่งผลให้การดำเนินการมีความรวดเร็วมากขึ้นไม่ต้องไปเสียเวลาตรวจสอบทุกปัจจัย รวมทั้งมีการศึกษาดำรง คุ่มือประกอบการศึกษาและจากการทดลองต่างๆ ผู้วิจัยพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งของเงินสเตอร์ลิงจากการทำกระบวนการชุบแข็งแบบตกตะกอนโดยใช้เตาอบ มี 3 ปัจจัย คือ อุณหภูมิในการอบละลาย (Temperature of Solution Heat Treatment) เวลาในการอบละลาย (Time of Solution Heat Treatment) และเวลาในการบ่มแข็งเทียม (Time of Precipitation Heat Treatment) ซึ่งเป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมและหาค่าที่เหมาะสมในการทดลองได้ โดยปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยนี้จะประกอบด้วย 2 ระดับคือ ระดับต่ำ และสูง โดยผู้วิจัยได้กำหนดปัจจัย ระดับ และสัญลักษณ์แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ปัจจัยและระดับของการทดลอง

ปัจจัย	ระดับ	
	ต่ำ (-1)	สูง (+1)
1. อุณหภูมิในการอบละลาย (°C)	630	700
2. เวลาในการอบละลาย (นาที)	30	60
3. เวลาในการบ่มแข็งเทียม (นาที)	30	60

3.1.1.2 เลือกตัวแปรผลตอบสนอง

ตัวแปรที่ใช้ในการหาค่าความแข็งแรงของเงินสเตอร์ลิง คือ อุณหภูมิในการอบละลาย (Temperature of Solution Heat Treatment) เวลาในการอบละลาย (Time of Solution Heat Treatment) และ เวลาในการบ่มแข็งเทียม (Time of Precipitation Heat Treatment)

3.1.1.3 เลือกการออกแบบการทดลอง

การเลือกวิธีการออกแบบการทดลองนี้จะต้องเกี่ยวข้องกับปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัยตามตารางที่ 3.1 และต้องใช้การออกแบบการทดลองที่สามารถหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีต่อความแข็งแรง จากศึกษาการออกแบบการทดลองพบว่าวิธีที่เหมาะสม คือ การออกแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design) การออกแบบมีวิธีอยู่ 2 วิธีคือ การออกแบบส่วนผสมกลาง (CCD) และการออกแบบบ็อกซ์-เบนเคน (Box-Behnken Design) ซึ่งงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจะใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบนเคน เป็นวิธีที่สามารถศึกษาค่าในระดับต่ำ กลาง และสูงได้ (เฉพาะในขอบเขตที่ศึกษาเท่านั้น) เนื่องจากงานวิจัยนี้จะศึกษาเฉพาะค่าที่อยู่ในช่วงต่ำ กลาง สูงนี้เท่านั้น จึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาระดับอื่นๆ นอกเหนือจากที่กล่าวมา การออกแบบการทดลองนี้มีปัจจัยนำเข้า 3 ปัจจัย แสดงดังตาราง 3.2



ตารางที่ 3.2 การออกแบบการทดลองบ็อกซ์-เบห์นเคน

ลำดับการทดลอง มาตรฐาน	ลำดับการทดลอง ตามการสุ่ม	อุณหภูมิในการ อบละลาย (°C)	เวลาในการ อบละลาย (นาที)	เวลาในการบ่ม แข็งเทียม (นาที)
1	3	665	30	60
2	1	665	30	30
3	11	700	45	30
4	2	665	60	30
5	12	700	45	60
6	10	630	45	60
7	13	665	45	45
8	4	665	60	60
9	15	665	45	45
10	6	630	60	45
11	14	665	45	45
12	5	630	30	45
13	8	700	60	45
14	7	700	30	45
15	9	630	45	30

3.1.1.4 ทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย

จากการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งใช้โปรแกรม Minitab Releases 17 สุ่มลำดับชั้นการทดลอง จากนั้นทดลองปฏิบัติงานตามลำดับชั้นที่ได้มีการออกแบบไว้

3.1.2 การทดลองอบชิ้นงาน

ทำการอบชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงโดยใช้เตาอบยี่ห้อ Nabertherm รุ่น B150 แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เตาอบยี่ห้อ Nabertherm รุ่น B150

3.1.3 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดลอง

ในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบความแข็ง จะทำการตัดด้วยเครื่องตัดแรงโน้มถ่วงยี่ห้อ Struers รุ่น Minitom ดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยชิ้นงานทดสอบมีขนาด 1 ใน 6 ของแหวนเพื่อให้ง่ายต่อการหล่อเรซินและการศึกษาโครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 3.4 เครื่องตัดแรงโน้มถ่วงยี่ห้อ Struers รุ่น Minitom

นำชิ้นงานทดสอบมาทำความสะอาดแล้วล้างด้วยอะซิโตน เพื่อป้องกันการตกค้างของน้ำมันหล่อเย็นจากการตัด หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปหล่อเรซิน แสดงดังรูปที่ 3.5 และนำชิ้นงานที่ได้ไปขัดผิวหน้าด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระดาษทรายละเอียดตั้งแต่เบอร์ 800, 1000 และ 1,500 โดยใช้เครื่องขัดชิ้นงานทดสอบยี่ห้อ Struers รุ่น LabolPol-1 ดังแสดงรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ชิ้นงานทดสอบหลังขึ้นรูปด้วยเรซิน



รูปที่ 3.6 เครื่องขัดชิ้นงานทดลองยี่ห้อ Struers รุ่น LabolPol-1

หลังจากขัดชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเรซินแล้ว จะนำชิ้นงานไปทดสอบค่าความแข็งโดยใช้เครื่องทดสอบความแข็ง Mitutoyo รุ่น HM-113 ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบความแข็ง Mitutoyo รุ่น HM-113

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติและหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยหลัก

หลังจากทดสอบวัดค่าความแข็งของเงินสเตอร์ลิง จะนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์ผล โดยใช้เทคนิคทางสถิติ เพื่อให้ได้ตัวแปรที่ให้ค่าความแข็งของเงินสเตอร์ลิงสูงสุด ซึ่งในขั้นตอนนี้จะใช้โปรแกรม Minitab Releases 17 ในการวิเคราะห์ข้อมูล

3.1.5 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดลอง

หลังจากทำการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติโดยใช้โปรแกรม Minitab Releases 17 จะได้ค่าความแข็งสูงสุด ซึ่งจะต้องทำการทดลองซ้ำแล้ววัดค่าความแข็งเพื่อพิสูจน์ว่าปัจจัยที่ได้จากการคำนวณทางสถิติส่งผลให้ค่าความแข็งของเงินสเตอร์ลิงมีความแข็งเป็นไปตามการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ โดยนำชิ้นงานหล่อไปอบตามปัจจัยที่คำนวณได้ในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติแล้วได้ค่าความแข็งสูงสุด จากนั้นนำชิ้นงานไปขึ้นรูปด้วยเรซิน แสดงดังรูปที่ 3.8 แล้วขัดผิวหน้าด้วยกระดาษทรายเบอร์ 800, 1000 และ 1500 ตามลำดับ



รูปที่ 3.8 ชิ้นงานทดสอบหลังขึ้นรูปด้วยเรซินโดยใช้ปัจจัยที่ทำให้ได้ค่าความแข็งสูงสุด

3.1.6 การทดสอบค่าความแข็ง

นำชิ้นงานที่ขัดด้วยกระดาษทรายแล้วมาทดสอบค่าความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง Mitutoyo รุ่น HM-113 ดังแสดงในรูปที่ 3.7

3.2 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิง จากการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็งของเงินสเตอร์ลิงมีขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้

3.2.1 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดลอง

ในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดลองเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงในแต่ละขั้นตอนตั้งแต่กระบวนการหล่อ กระบวนการอบละลาย และกระบวนการบ่มแข็งเทียม เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นว่ามีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร โดยนำแหวนมาตัดด้วยเครื่องตัดแรงโน้มถ่วงยี่ห้อ Struers รุ่น Minitom ดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยจะตัดชิ้นงานให้มีขนาด 1 ใน 6 ของแหวน นำชิ้นงานทดสอบที่ตัดแล้วมาทำความสะอาดแล้วล้างด้วยอะซิโตน เพื่อป้องกันการตกค้างของน้ำมันหล่อเย็นจากการตัดหลังจากนั้นนำชิ้นงานไปขึ้นรูปด้วยเรซิน ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ชิ้นงานหล่อ ชิ้นงานอบละลาย และชิ้นงานบ่มบ่มแข็งเทียม หลังขึ้นรูปด้วยเรซิน

จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปขัดผิวหน้าด้วยกระดาษทรายละเอียดตั้งแต่เบอร์ 800, 1000, 1500, 2000 และ 4000 จากนั้นจึงขัดบนผ้าสักหลาดด้วยผงอะลูมินาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 และ 0.3 ไมโครเมตร (μm) ตามลำดับ โดยใช้เครื่องขัดชิ้นงานทดลองยี่ห้อ Struers รุ่น LabolPol-1 ดังแสดงในรูปที่ 3.6 หลังจากขัดผิวหน้าชิ้นงานแล้วจะนำชิ้นงานไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเบื้องต้น เพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยรวมด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope) ยี่ห้อ Zeiss รุ่น Axiolab ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope) ยี่ห้อ Zeiss รุ่น Axiolab

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมี

นำชิ้นงานที่ขัดผิวหน้าเรียบร้อยแล้ว มาทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) ยี่ห้อ Quanta รุ่น FEG 250 ดังแสดงในรูปที่ 3.11 และตรวจวัดรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงานของธาตุ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer, EDS) ยี่ห้อ Oxford รุ่น X-Max ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ Quanta รุ่น FEG 250



รูปที่ 3.12 เครื่องตรวจวัดรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงานของธาตุ (EDS) ยี่ห้อ Oxford รุ่น X-Max

บทที่ 4

ผลการทดลอง

จากการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในการชุบแข็งแบบตกตะกอนที่มีผลต่อความแข็งของเงินสเตอร์ลิงโดยมีปัจจัยที่ศึกษาคือ อุณหภูมิในการอบละลาย เวลาในการอบละลาย และเวลาในการบ่มแข็งเทียมซึ่งได้ทำการออกแบบการทดลอง แบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) และหาค่าตัวแปรในการชุบแข็งแบบตกตะกอนที่ให้ค่าความแข็งมีค่าเหมาะสมที่สุดโดยใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจ ผลจากการทดลองมีค่าดังต่อไปนี้

4.1 ผลการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งของเงินสเตอร์ลิง

4.1.1 ผลการทดสอบความแข็ง

4.1.1.1 ค่าความแข็งของเงินสเตอร์ลิงก่อนการปรับปรุง

การทดสอบความแข็งของเงินสเตอร์ลิงโดยของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งแบบตกตะกอนโดยใช้เงื่อนไขที่ทางบริษัทกำหนด คือ อุณหภูมิในการอบละลาย 650 องศาเซลเซียส เวลาในการอบละลาย 30 นาที อุณหภูมิในการบ่มแข็งเทียม 300 องศาเซลเซียส เวลาในการบ่มแข็งเทียม 60 นาที จะได้ค่าความแข็งแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความแข็งของเงินสเตอร์ลิงก่อนการปรับปรุง

ค่าความแข็ง (HV)					
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
73.1	71.9	80.1	66.1	78.8	74.0

หลังจากการทดสอบความแข็งของเงินสเตอร์ลิง โดยที่ปัจจัยที่ศึกษาคือ อุณหภูมิในการอบละลาย เวลาในการอบละลาย และเวลาในการบ่มแข็งเทียม ซึ่งออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนทำซ้ำ 5 ครั้ง จำนวนการทดลองทั้งหมด คือ 75 การทดลอง แสดงผลดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าความแข็งของเงินสเตอร์ลิง

ลำดับ การ ทดลอง มาตรฐาน	ลำดับการ ทดลองตาม การสุ่ม	ปัจจัย			ค่าความแข็ง (HV)					
		อุณหภูมิใน การอบ ละลาย (°C)	เวลาในการ อบละลาย (นาที)	เวลาในการ บ่มแข็ง เทียม (นาที)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
1	3,16,26,40,51	665	30	60	58.1	62.7	60.8	57.6	63.0	60.44
2	1,22,29,45,57	665	30	30	55.0	53.6	64.3	63.9	64.9	60.34
3	11,17,28,52,61	700	45	30	93.4	107.9	96.7	96.1	96.8	98.18
4	2,27,34,38,65	665	60	30	104.2	98.2	112.6	91.1	97.4	100.7
5	12,23,39,46,63	700	45	60	63.9	60.4	54.8	50.7	53.6	56.68
6	10,24,44,53,64	630	45	60	54.0	47.4	49.2	48.6	55.5	50.82
7	13,30,35,54,70	665	45	45	117.4	113.8	114.9	114.8	116.7	115.52
8	4,18,43,50,62	665	60	60	127.9	114.7	112.3	113.2	116.1	116.82
9	15,31,36,59,75	665	45	45	53.1	55.9	54.5	56.9	59.4	55.96
10	6,19,49,56,72	630	60	45	59.9	51.6	57.8	65.7	76.4	62.28
11	14,25,42,66,71	665	45	45	108.2	105.1	106.3	101.9	124.3	109.16
12	5,21,41,55,74	630	30	45	106.7	121.2	115.9	114.1	110.4	113.66
13	8,32,37,67,73	700	60	45	111.5	125.8	122.7	107.4	113.8	116.24
14	7,33,48,58,69	700	30	45	54.1	53.9	55.3	56.2	67.3	57.63
15	9,20,47,60,68	630	45	30	67.3	58.1	52.3	75.6	89.6	68.58

4.1.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติจะนำผลจากการทดลองมาวิเคราะห์ ANOVA และการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking) โดยใช้โปรแกรม Minitab Releases 17 แสดงผลจากการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

4.1.2.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA)

การวิเคราะห์ผลการทดลองที่มีผลต่อค่าแรงดึงเฉือน สามารถทำการวิเคราะห์โดยใช้การวิเคราะห์โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งผลวิเคราะห์จะพิจารณาจากค่า P-Value หากค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า 0.05 ($\alpha = 0.05$) จะสรุปได้ปัจจัยนั้นมีผลต่อความแข็งของเงินสเตอร์ลิงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 Estimated Regression Coefficients for Hardness

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	-	93.55	4.86	19.25	<0.001
Temp of Solution	8.25	4.12	2.98	1.39	0.170
Time of Solution	26.06	13.03	2.98	4.38	<0.001
Time of Precipitation	-10.72	-5.36	2.98	-1.80	0.076
Temp of Solution * Temp of Solution	-22.15	-11.07	4.38	-2.53	0.014
Time of Solution * Time of Solution	9.82	4.91	4.38	1.12	0.266
Time of Precipitation * Time of Precipitation	-27.76	-13.88	4.38	-3.17	0.002
Temp of Solution * Time of Solution	55.13	27.57	4.21	6.55	<0.001
Temp of Solution * Time of Precipitation	-11.93	-5.96	4.21	-1.42	0.161
Time of Solution * Time of Precipitation	8.02	4.01	4.21	0.95	0.344
Model Summary					
S = 18.8218 R-sq = 57.46% R-sq (adj) = 51.57 % R-sq (pred) = 45.94 %					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj Ms	F-Value	P-Value
Model	9	31106.1	3456.2	9.76	<0.001
Linear	3	8624.7	2874.9	8.12	<0.001
Temp of Solution	1	680.6	680.6	1.92	0.170
Time of Solution	1	6793.8	6793.8	19.18	<0.001
Time of Precipitation	1	1150.3	1150.3	3.25	0.076
Square	3	6251.6	2083.9	5.88	0.001
Temp of Solution *	1	2263.7	2263.7	6.39	0.014
Temp of Solution					
Time of Solution *	1	445.4	445.4	1.26	0.266
Time of Solution					
Time of Precipitation *	1	3555.8	3555.8	10.04	0.002
Time of Precipitation					
2-Way Interaction	3	16229.8	5409.9	15.27	<0.001
Temp of Solution *	1	15196.6	15196.6	42.90	<0.001
Time of Solution					
Temp of Solution *	1	711.6	711.6	2.01	0.161
Time of Precipitation					
Time of Solution *	1	321.6	321.6	0.91	0.344
Time of Precipitation					
Error	65	23025.3	354.2	-	-
Lack-of-Fit	3	9418.3	3139.4	14.30	<0.001
Pure Error	62	13607.0	219.5	-	-
Total	74	54131.4	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 42
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งตามเงื่อนไขอุณหภูมิการอบละลาย เวลาในการอบละลาย และเวลาในการบ่มแข็งเทียม เมื่อวิเคราะห์ที่ค่า P-Value พบว่า

1. อุณหภูมิในการอบละลาย (Time of Solution Heat Treatment)
2. อันตรกิริยาของอุณหภูมิในการอบละลาย (Temp of Solution Heat Treatment*Temp of Solution Heat Treatment)
3. อันตรกิริยาของเวลาในการบ่มแข็งเทียม (Time of Precipitation Heat Treatment * Time of Precipitation Heat Treatment)
4. อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิในการอบละลายกับเวลาในการอบละลาย (Temp of Solution Heat Treatment * Time of Solution Heat Treatment)

เป็นตัวแปรที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ซึ่งบ่งบอกว่าตัวแปรเหล่านี้เป็นตัวแปรที่มีผลต่อความแข็งของเงินสเตอร์ลิง ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ หรือที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % และเมื่อวิเคราะห์เฉพาะปัจจัยที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 จะได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.5 และตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.5 Estimated Regression Coefficients for Hardness (Reduced Model)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	-	96.57	4.17	23.17	<0.001
Time of Solution	26.06	13.03	3.07	4.25	<0.001
Temp of Solution* Temp of Solution	-22.90	-11.45	4.50	-2.54	0.013
Time of Precipitation * Time of Precipitation	-28.51	-14.26	4.50	-3.17	0.002
Temp of Solution * Time of Solution	55.13	27.56	4.34	6.36	<0.001
Model Summary					
S = 19.3962 R-sq = 51.35 % R-sq (adj) = 48.57 % R-sq (pred) = 45.39 %					

ตารางที่ 4.6 Analysis of Variance (Reduced Model)

Source	DF	Adj SS	Adj Ms	F-Value	P-Value
Model	4	27797	6949.2	18.47	<0.001
Linear	1	6794	6793.8	18.06	<0.001
Time of Solution	1	6794	6793.8	18.06	<0.001
Square	2	5806	2903.1	7.72	0.001
Temp of Solution Temp of Solution	1	2435	2435.3	6.47	0.013
Time of Precipitation * Time of Precipitation	1	3374	3374.4	10.03	0.002
2-Way Interaction	1	15197	15196.6	40.39	<0.001
Temp of Solution * Time of Solution	1	15197	15196.6	40.39	<0.001
Error	70	26335	376.2	-	-
Lack-of-Fit	8	12728	1591.0	7.25	<0.001
Pure Error	62	13607	219.5	-	-
Total	74	54131	-	-	-

หลังจากตัดปัจจัยที่มีค่า P=Value ที่มีค่ามากกว่า 0.05 ออกจากการวิเคราะห์ แล้ววิเคราะห์ใหม่ด้วยโปรแกรม Minitab จากนั้นทำการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Sq) ซึ่งจากตารางที่ 4.5 Estimated Regression Coefficients for Hardness จะเห็นว่า ค่า R-Sq มีค่าเท่ากับ 51.35 % และ R-Sq (adj) มีค่าเท่ากับ 48.57 % โดยทั่วไปแล้วค่า R-Sq สูง หมายความว่าตัวแบบทางคณิตศาสตร์นั้นน่าพอใจ แต่ในกรณีที่ค่า R-Sq มีค่าต่ำ ไม่ได้หมายความว่าตัวแบบทางคณิตศาสตร์นั้นไม่น่าพอใจเสมอไป เมื่อทำการเปลี่ยนค่าตัวแปรที่มีนัยสำคัญทางสถิติ พบว่าตัวแปรสองยังคงมีการเปลี่ยนแปลง และค่า Lack-of-fit เป็นตัวบอกความเพียงพอของตัวแปรในสมการ ในการวิเคราะห์ความแปรปรวน ค่า P-Value ของ Lack-of-fit มีค่าน้อยกว่า 0.001 ซึ่งค่านี้น้อยกว่า α จึงสามารถสรุปได้ว่าฟังก์ชันการถดถอยไม่เป็นเชิงเส้น

Regression Equation in Uncoded Units

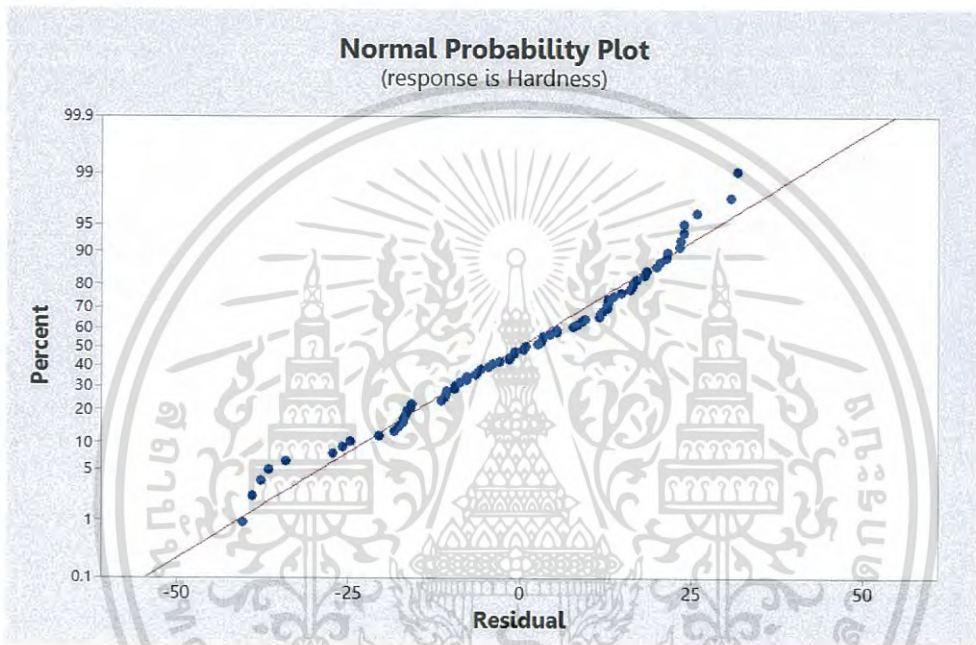
$$\text{Hardness} = 96.57 + 13.03 \text{ Time of Solution} - 14.26 \text{ Time of Precipitation} * \text{Time of Precipitation} + 11.45 \text{ Temp of Solution} * \text{Time of Solution} + 27.5603 \text{ Time of Solution} * \text{Temp of Solution} \quad (4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

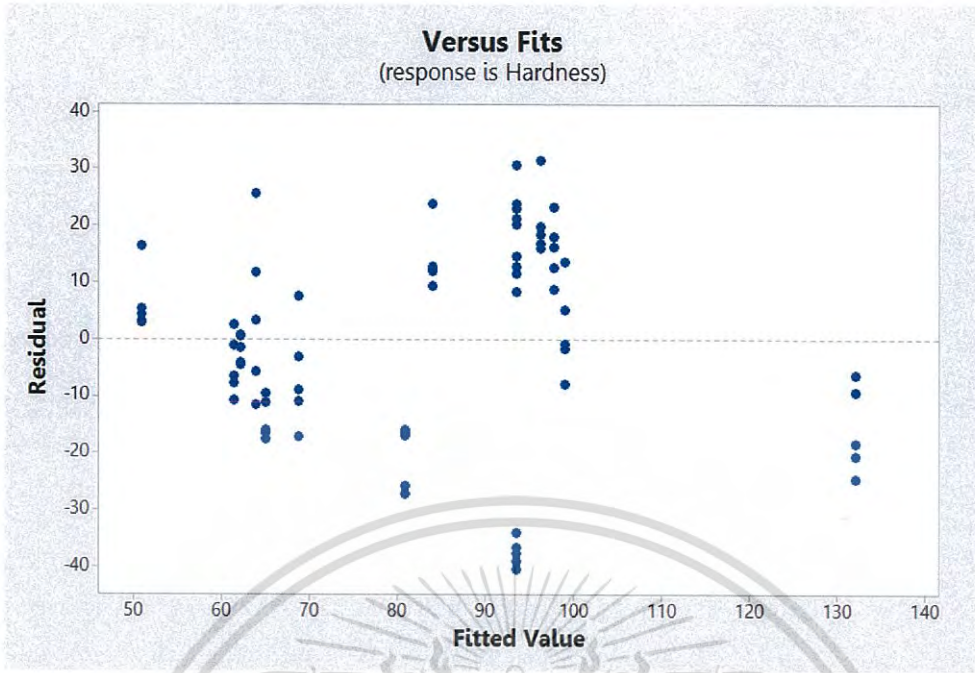
การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล เป็นการตรวจสอบที่ทราบถึงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนว่ามีความเหมาะสมหรือไม่ โดยมีการตรวจสอบดังนี้

1. การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal Distribution) เป็นการตรวจสอบค่าส่วนตกค้าง (Residual) ของข้อมูลว่ามีการกระจายตัวแบบปกติหรือไม่ โดยจะตรวจสอบได้จากกราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือใกล้เคียง จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าลักษณะเป็นเส้นตรงหรือใกล้เคียงเป็นเส้นตรง ข้อมูลจากการทดลองมีลักษณะการกระจายตัวแบบปกติ



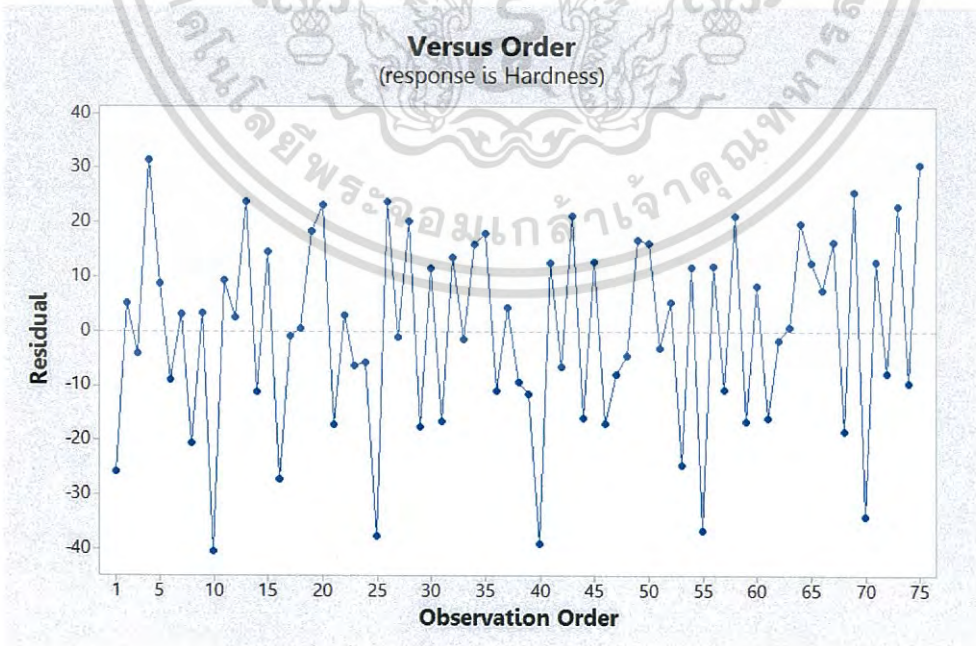
รูปที่ 4.1 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าความแข็งของเงินสเตอร์ลิง

2. การตรวจสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวน เป็นการตรวจสอบถึงความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล จากรูปที่ 4.2 ส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบปกติ ไม่มีแนวโน้ม เป็นรูปที่ 4.2 ส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบปกติ ไม่มีแนวโน้มเป็นรูปแบบใดๆ มีการกระจายตัวสม่ำเสมอ นั้นหมายถึงข้อมูลของความแข็งที่นำมาวิเคราะห์สามารถเชื่อถือได้



รูปที่ 4.2 ค่าส่วนตกค้างกับค่าความแข็ง

3. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล เป็นการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างและเวลาที่เปลี่ยนแปลง โดยจะดูถึงจุดที่แทนข้อมูลว่ามีการกระจายแบบอิสระหรือไม่ จากรูปที่ 4.3 ส่วนตกค้างของการทดสอบค่าความแข็งมีการกระจายตัวแบบสม่ำเสมอ แสดงว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบเป็นอิสระ

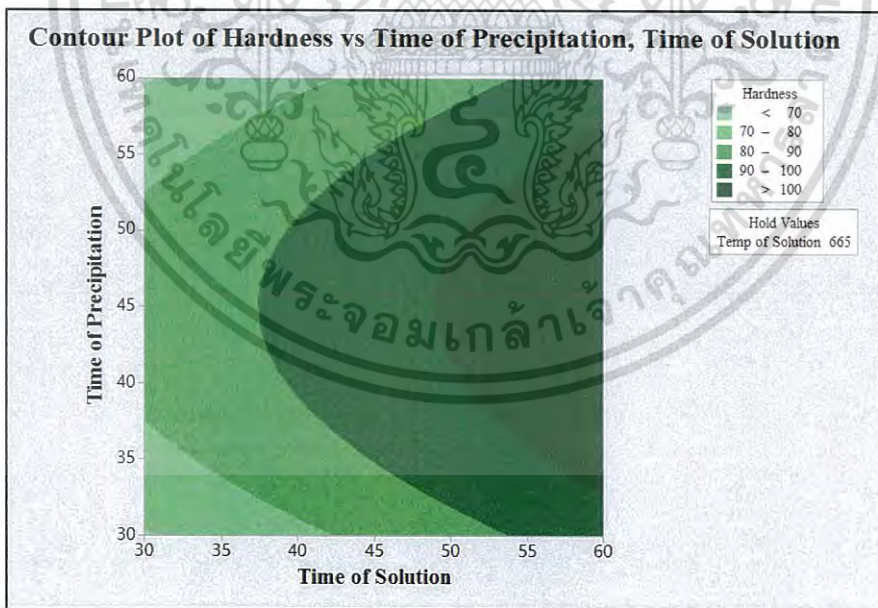


รูปที่ 4.3 ค่าส่วนตกค้างของค่าความแข็งกับลำดับเวลา

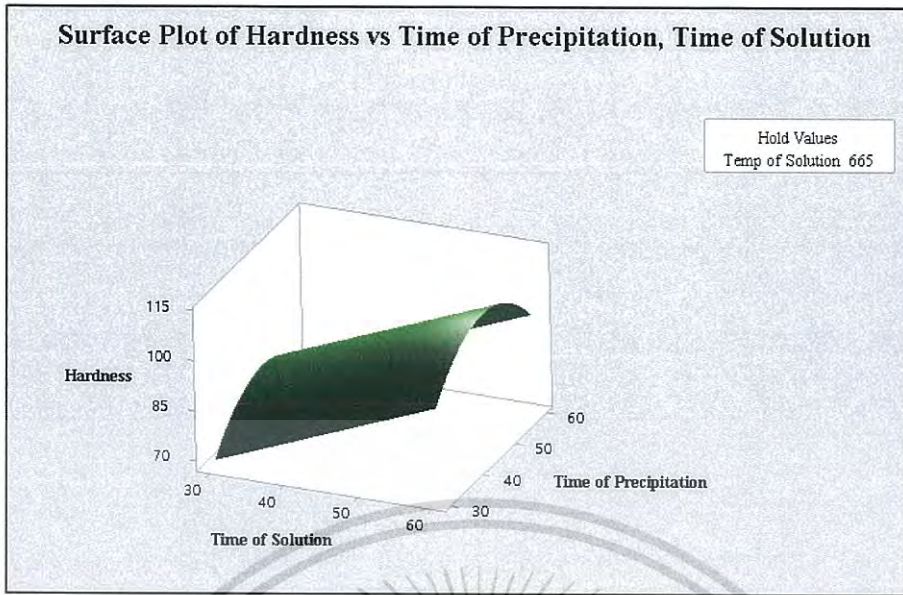
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบของความแข็ง (Response Surface) จากการตรวจสอบความพองตัวของแบบจำลอง และการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อใช้ในการทำนายค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกับค่าความแข็งที่ต้องการมากที่สุด หลังจากนั้นทำการสร้างพื้นผิวตอบสนองของความแข็งที่ใกล้เคียงกับค่าความแข็งที่ต้องการมากที่สุดเทียบกับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง คือ อุณหภูมิในการอบละลาย (Temperature of Solution Heat Treatment) เวลาในการอบละลาย (Time of Solution Heat Treatment) และเวลาในการบ่มแข็งเทียม (Time of Precipitation Heat Treatment) ซึ่งเป็นกราฟโครงร่างที่แสดงค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมเปรียบเทียบกับค่าความแข็งจากการชุบแข็งแบบตกตะกอน ตามรูปที่ 4.4-4.9

จากรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 เป็นกราฟโครงร่าง (Contour Plot) และโครงร่างพื้นผิวผลตอบ (Surface Plot) ระหว่างเวลาในการอบละลาย (Time of Solution Heat Treatment) กับเวลาในการบ่มแข็งเทียม (Time of Precipitation Heat Treatment) เป็นกราฟ และพื้นผิวตอบสนองลักษณะที่ให้ผลตอบสนองของค่าความแข็งที่เหมาะสม (ต้องการค่าความแข็งที่มากที่สุด) เพื่อตรวจสอบค่าผลตอบสนองที่ให้ค่าความแข็งที่มากที่สุด โดยคงค่าอุณหภูมิในการอบละลายที่ 665 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดในการชุบแข็งแบบตกตะกอน เพื่อตรวจสอบค่าผลตอบสนองที่ให้ค่าความแข็งที่มากที่สุด จะเห็นได้ว่าค่าผลตอบสนองที่ให้ค่าความแข็งมากที่สุดจะมีค่าเวลาในการอบละลายประมาณ 60 นาที และเวลาในการบ่มแข็งเทียม ประมาณ 45 นาที

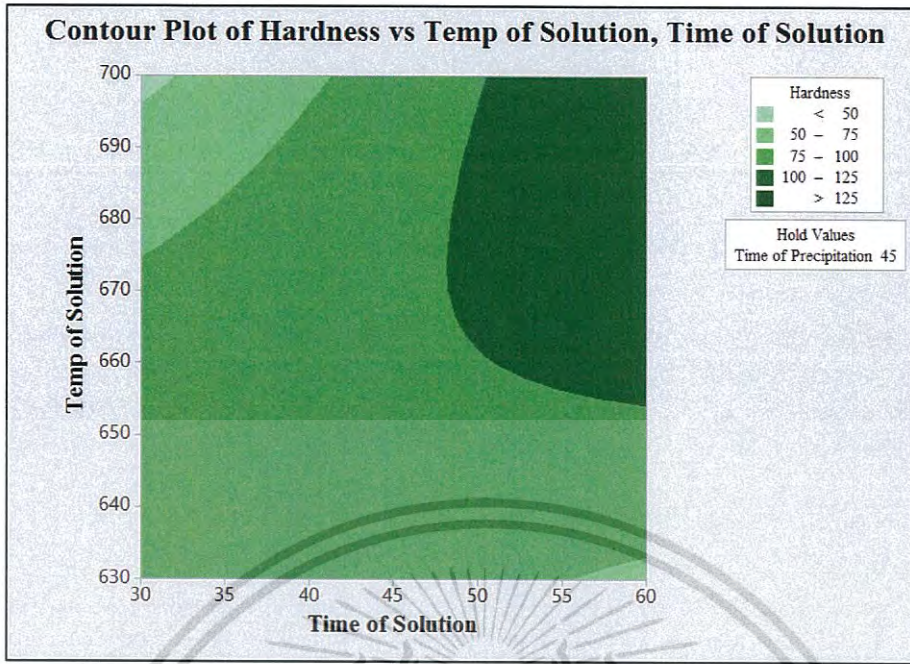


รูปที่ 4.4 กราฟโครงร่าง (Contour Plot) ระหว่างเวลาในการอบละลาย (Time of Solution Heat Treatment) กับเวลาในการบ่มแข็งเทียม (Time of Precipitation Heat Treatment)

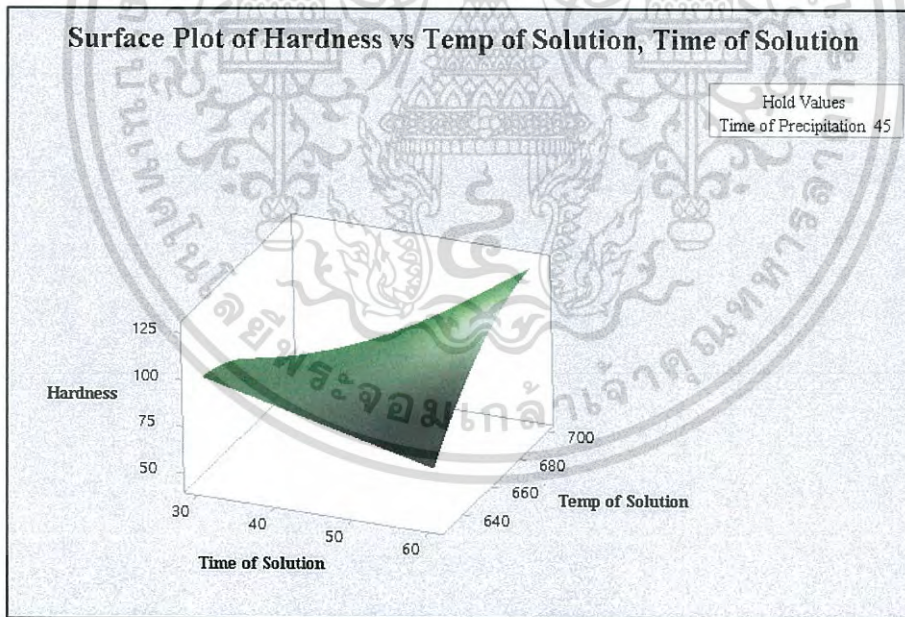


รูปที่ 4.5 พื้นผิวผลตอบสนองอิทธิพลร่วมระหว่างเวลาในการอบละลาย (Time of Solution Heat Treatment) กับเวลาในการบ่มแข็งเทียม (Time of Precipitation Heat Treatment) เทียบกับค่าความแข็ง

จากรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 เป็นกราฟโครงร่าง (Contour Plot) และโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนอง (Surface plot) ระหว่างเวลาในการอบละลาย (Time of Solution Heat Treatment) กับอุณหภูมิในการอบละลาย (Temp of Solution Heat Treatment) เป็นกราฟ และพื้นผิวผลตอบสนองแสดงลักษณะที่ให้ผลตอบสนองของค่าความแข็งที่เหมาะสม (ต้องการค่าความแข็งที่มากที่สุด) โดยคงค่าเวลาในการบ่มแข็งเทียมที่ 45 นาที ซึ่งเป็นตัวแปรในการชุบแข็งแบบตกตะกอนที่เหมาะสมที่สุด เพื่อตรวจสอบค่าผลตอบสนองที่ให้ค่าความแข็งที่มากที่สุด จะเห็นได้ว่าค่าผลตอบสนองที่ให้ค่าความแข็งที่มากที่สุดโดยค่าอุณหภูมิในการอบละลายประมาณ 700 องศาเซลเซียส และเวลาในการอบละลายประมาณ 60 นาที

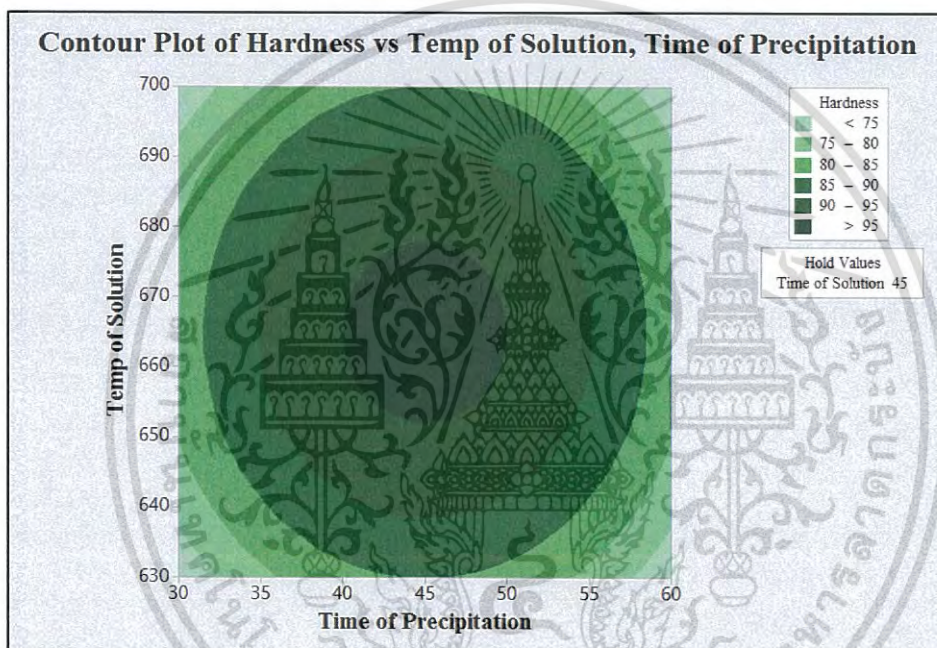


รูปที่ 4.6 กราฟโครงร่าง (Contour Plot) ระหว่างเวลาในการอบละลาย (Time of Solution Heat Treatment) กับอุณหภูมิในการอบละลาย (Temp of Solution Heat Treatment)

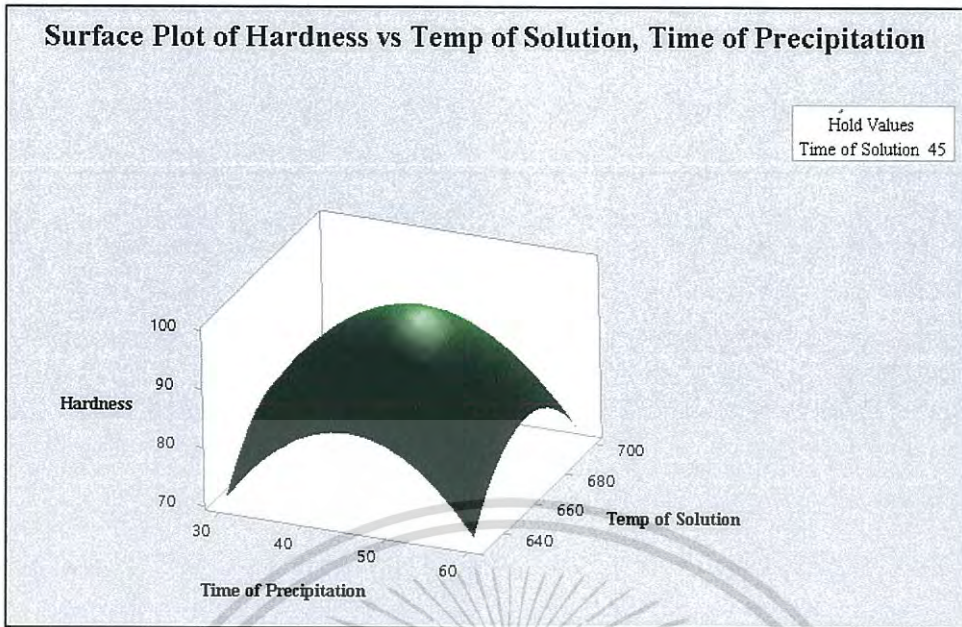


รูปที่ 4.7 พื้นผิวผลตอบสนองอิทธิพลร่วมระหว่างเวลาในการอบละลาย (Time of Solution Heat Treatment) กับอุณหภูมิในการอบละลาย (Temp of Solution Heat Treatment) เทียบค่าความแข็ง

จากรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 เป็นกราฟโครงร่าง (Contour Plot) และโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนอง (Surface plot) ระหว่างเวลาในการบ่มแข็งเทียม (Time of Precipitation Heat Treatment) กับ อุณหภูมิในการอบละลาย (Temperature of Solution Heat Treatment) เป็นกราฟ และพื้นผิวผลตอบสนองแสดงลักษณะที่ให้ผลตอบสนองของค่าความแข็งที่เหมาะสม (ต้องการค่าความแข็งที่มากที่สุด) โดยคงค่าเวลาในการอบละลายที่ 45 นาที ซึ่งเป็นตัวแปรในการชุบแข็งแบบตกตะกอนที่เหมาะสมที่สุด เพื่อตรวจสอบค่าผลตอบสนองที่ให้ค่าความแข็งที่มากที่สุด จะเห็นได้ว่าค่าผลตอบสนองที่ให้ค่าความแข็งที่มากที่สุดโดยค่าอุณหภูมิในการอบละลายประมาณ 700 องศาเซลเซียส และเวลาในการบ่มแข็งเทียมประมาณ 45 นาที



รูปที่ 4.8 กราฟโครงร่าง (Contour Plot) ระหว่างเวลาในการบ่มแข็งเทียม (Time of Precipitation Heat Treatment) กับอุณหภูมิในการอบละลาย (Temperature of Solution Heat Treatment)



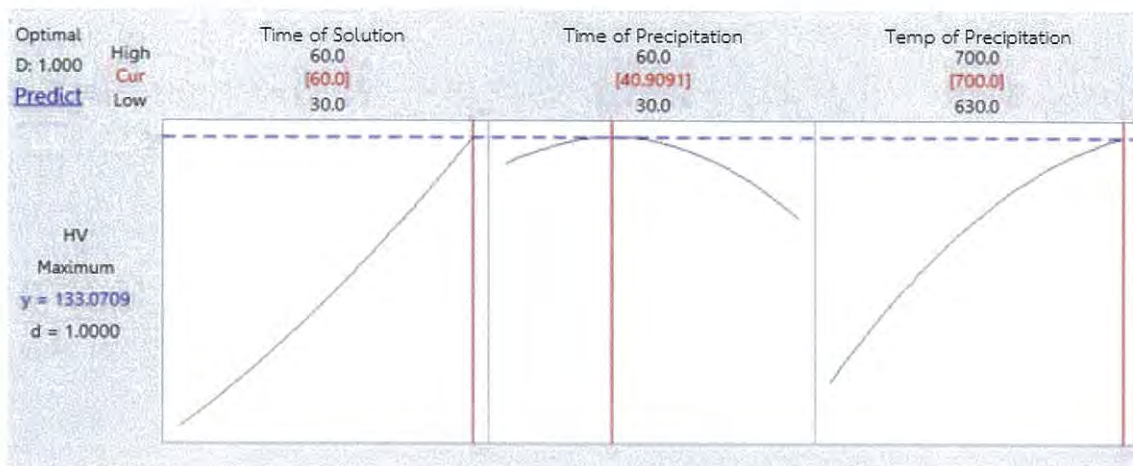
รูปที่ 4.9 พื้นผิวผลตอบสนองอิทธิพลร่วมระหว่างเวลาในการป้อนแข็งเทียม (Time of Precipitation Heat Treatment) กับอุณหภูมิในการอบละลาย (Temperature of Solution Heat Treatment) เทียบกับค่าความแข็ง

4.1.2.2 การหาค่าตัวแปรการชุบแข็งแบบตกตะกอนที่เหมาะสมที่สุด

จากการวิเคราะห์เพื่อหาตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดสำหรับค่าความแข็งที่มากที่สุด โดยใช้การกำหนดเป้าหมายของความแข็งแบบ Maximize โดยที่ตามปกติแล้วค่า Lower และ Target จะกำหนดตามลักษณะที่ต้องการ แต่เนื่องจากงานวิจัยไม่มีการกำหนดลักษณะดังกล่าวจึงกำหนดค่า Lower และ Target เป็นค่าต่ำสุดและสูงสุดที่ได้จากการทดลองตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.10

ตารางที่ 4.7 การกำหนดค่าเป้าหมายที่ความแข็งสูงสุด

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import.
Hardness	Maximize	47.4	127.9	-	1	1



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปรต่างๆ

ค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดมีดังนี้

1. อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการอบละลาย เท่ากับ 700 องศาเซลเซียส
2. เวลาที่ใช้ในกระบวนการอบละลาย เท่ากับ 60 นาที
3. เวลาที่ใช้ในกระบวนการบ่มแข็งเทียม เท่ากับ 41 นาที

ช่วงการทำนาย (Prediction Interval) = (92.66, 173.48) HV

ช่วงความเชื่อมั่น 95 % (Confident Interval) = (118.23, 147.91) HV

จากนั้นทำการทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลอง เป็นการทดลองบนค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งของเงินสเตอร์ลิง ที่ได้จากการทดลองทำซ้ำ 5 ครั้ง เพื่อเพิ่มความมั่นใจให้กับผลการทดลอง ผลการทดลองซ้ำแสดงตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลองของค่าความแข็งและเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด

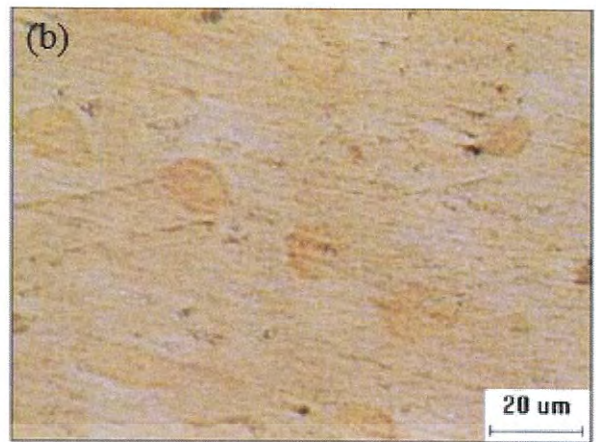
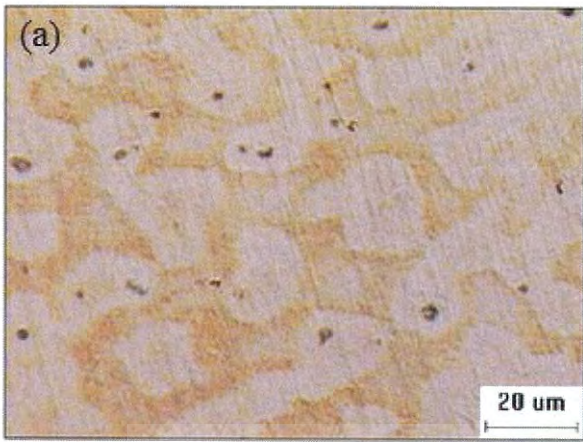
ค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย			ทดลอง	ทดลอง	ทดลอง	ทดลอง	ทดลอง
อุณหภูมิใน	เวลาใน	เวลาใน	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
การอบ	การอบ	การบ่ม	(HV)	(HV)	(HV)	(HV)	(HV)
ละลาย	ละลาย	แข็งเทียม					
(°C)	(นาที)	(นาที)					
700	60	41	128.5	129.4	128.6	129.6	128.9
%error			3.434	2.758	3.359	2.608	3.134
Predicted Interval			92.66 - 173.48HV				

จากผลการทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลองของค่าความแข็ง มีค่าความแข็งเฉลี่ย 129 HV ซึ่งค่าความแข็งเพิ่มขึ้น 74.32% เมื่อเปรียบเทียบกับเงินสเตอร์ลิงก่อนปรับปรุง มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.4847 HV และอยู่ในช่วงความเชื่อมั่นที่ค่า $\alpha = 0.05$ ที่ 118.23 ถึง 147.91 HV ซึ่งช่วงความเชื่อมั่น 95% ของผลยืนยันการทดลองอยู่ภายในช่วงการทำนาย (Prediction Interval) ทำให้ผลการทดลองยืนยันค่าความแข็งว่ามีความน่าเชื่อถือ โดยที่ค่าเฉลี่ยผลการทดลองสำหรับการยืนยันมีค่าน้อยกว่าค่าที่ทำนายจากการวิเคราะห์ที่อาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนในการวัดค่าความแข็ง จึงทำให้ค่าความแข็งจริงที่ทดสอบได้แตกต่างจากค่าทำนาย โดยมีค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด คือ 3.0586 ถ้าหากค่าปัจจัยด้านเวลาในการบ่มแข็งเทียมมีค่ามากเกินไป อาจทำให้สารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturated Solid Solution) เกิดการตกผลึกออกมามากเกินไป จะเกิดสภาวะที่เรียกว่า Over Aging ส่งผลให้ค่าความแข็งของเงินสเตอร์ลิงลดลง

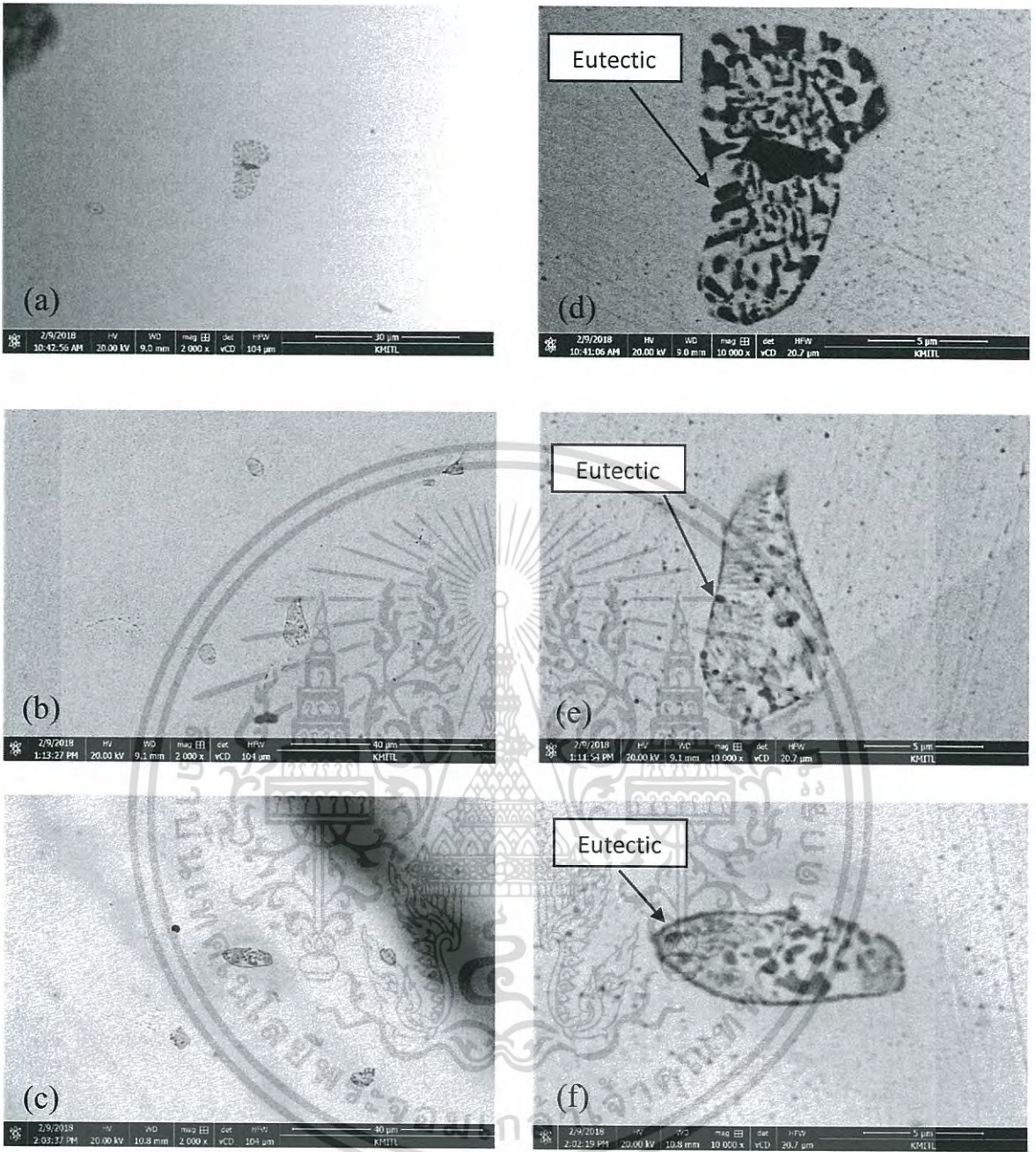
4.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิง

4.2.1 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคก่อนปรับปรุง

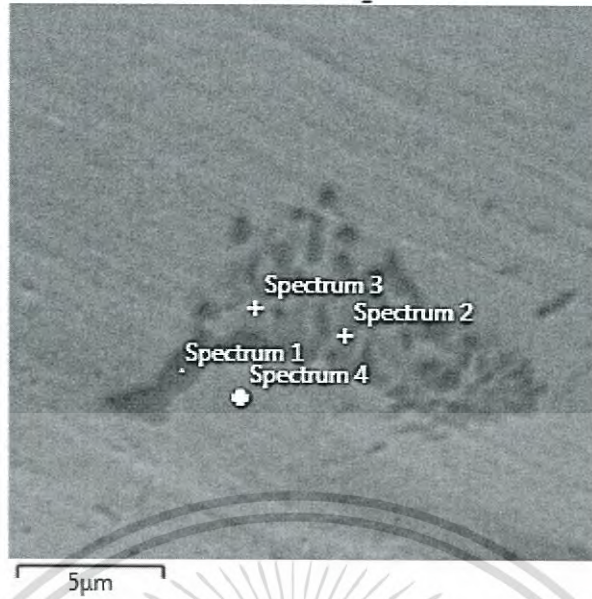
ผลจากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงซึ่งมีส่วนผสมของเงิน 94.73 % ทองแดง 4.02 % และสังกะสี 1.25 % โดยใช้ปัจจัยของทางบริษัทนั้น คือ อุณหภูมิในการอบละลาย 650 องศาเซลเซียส เวลาในการอบละลาย 30 นาที อุณหภูมิในการบ่มแข็งเทียม 300 องศาเซลเซียส เวลาในการบ่มแข็งเทียม 60 นาที โดยใช้กล้องจุลภาคทรรศน์แบบใช้แสง (OM) ผลพบว่าในชิ้นงานหล่อ ชิ้นงานอบละลาย และชิ้นงานบ่มแข็งเทียม มีจุดเล็กๆสีดำกระจายตัวอยู่บนผิวของเงินสเตอร์ลิงดังแสดงในรูปที่ 4.11 และทางผู้วิจัยต้องการตรวจสอบว่าจุดเล็กๆสีดำที่กระจายตัวอยู่คือสิ่งใด โดยทางผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลภาคทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) แสดงดังรูปที่ 4.12 และทำการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะด้วยเทคนิคการตรวจวัดรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงานของธาตุ (EDS) ในชิ้นงานหล่อ ชิ้นงานอบละลาย และชิ้นงานบ่มแข็งเทียมของเงินสเตอร์ลิงก่อนการปรับปรุงแสดงดังรูปที่ 4.13 4.14 4.15 และตารางที่ 4.9 4.10 4.11 ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope, OM) ภาพถ่าย OM (a) ชิ้นงานหล่อ (b) ชิ้นงานอบละลาย (c) ชิ้นงานบ่มแข็งเทียม
กำลังขยาย 20 เท่า



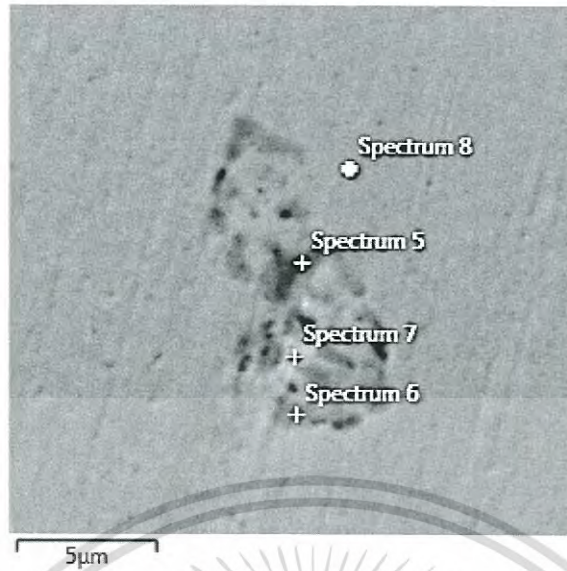
รูปที่ 4.12 ผลจากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ภาพถ่าย SEM (a) ชิ้นงานหล่อ (b) ชิ้นงานอบละลาย (c) ชิ้นงานบ่มแข็งเทียมที่กำลังขยาย 2000 เท่า ภาพถ่าย SEM (d) ชิ้นงานหล่อ (e) ชิ้นงานอบละลาย (f) ชิ้นงานบ่มแข็งเทียมที่กำลังขยาย 10000 เท่า



รูปที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ EDS ของเงินสเตอร์ลิงในชิ้นงานหล่อก่อนการปรับปรุงที่กำลังขยาย 10000x

ตารางที่ 4.9 ผลวิเคราะห์ EDS ของเงินสเตอร์ลิงในชิ้นงานหล่อ

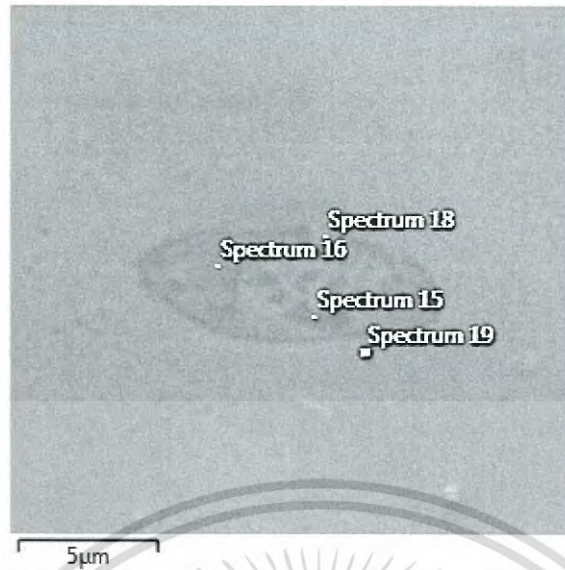
Points	Element (at %)			Possible Phase
	Ag	Cu	Zn	
1	27.64	65.71	6.65	AgCuZn
2	90.95	6.69	2.36	AgCuZn
3	89.17	8.18	2.66	AgCuZn
4	91.55	6.05	2.40	AgCuZn



รูปที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์ EDS ของเงินสเตอร์ลิงในชิ้นงานอบละลายก่อนการปรับปรุงที่กำลังขยาย 10000x

ตารางที่ 4.10 ผลวิเคราะห์ EDS ของเงินสเตอร์ลิงในชิ้นงานอบละลาย

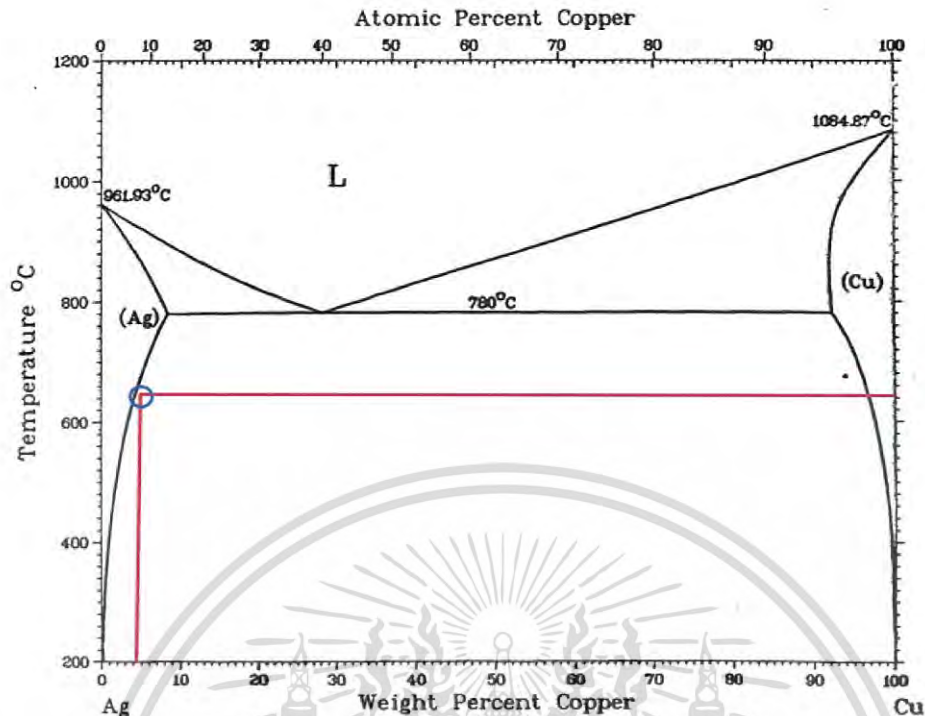
Points	Element (at %)			Possible
	Ag	Cu	Zn	Phase
5	84.19	13.31	2.50	AgCuZn
6	86.98	10.66	2.36	AgCuZn
7	90.13	7.57	2.30	AgCuZn
8	83.18	14.27	2.55	AgCuZn



รูปที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ EDS ของเงินสเตอร์ลิงในชิ้นงานปั๊มแข็งเทียมก่อนการปรับปรุงที่กำลังขยาย 10000x

ตารางที่ 4.11 ผลวิเคราะห์ EDS ของเงินสเตอร์ลิงในชิ้นงานปั๊มแข็งเทียม

Points	Element (at %)			Possible Phase
	Ag	Cu	Zn	
15	42.63	51.70	5.66	AgCuZn
16	47.65	46.92	5.43	AgCuZn
18	48.59	45.99	5.42	AgCuZn
19	90.03	7.18	2.79	AgCuZn



รูปที่ 4.16 โลหะผสมระหว่างเงิน 94.73 % กับ ทองแดง 4.02 % ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส

จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชั้นสารประกอบเชิงโลหะด้วยเทคนิคการตรวจวัดรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงานของธาตุ (EDS) และการศึกษาแผนภูมิเฟสของธาตุ ได้ผลดังนี้

ชิ้นงานอบละลาย (Solution Heat Treatment) ก่อนปรับปรุง ที่อุณหภูมิในการอบละลาย 650 องศาเซลเซียส เวลาในการอบละลาย 30 นาที จะพบว่าจุดสีดำบนผิวของเงินสเตอร์ลิงนั้นมีโครงสร้างเป็นเฟสยูเทคติก (Eutectic Phase) ซึ่งสอดคล้องกับที่ปรากฏตามเฟสไดแกรม ดังรูปที่ 4.16 จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส และเวลา 30 นาที นั้นหมายความว่าอุณหภูมิและเวลายังไม่เหมาะสมเพียงพอที่จะทำให้ธาตุผสมทองแดง (Cu) สามารถละลายและกระจายตัวในธาตุหลักเงิน (Ag) ได้อย่างทั่วถึง ซึ่งจะทำให้โครงสร้างมีลักษณะเป็นชั้นสลับไปมาระหว่างแต่ละเฟส ส่งผลให้โครงสร้างยังไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

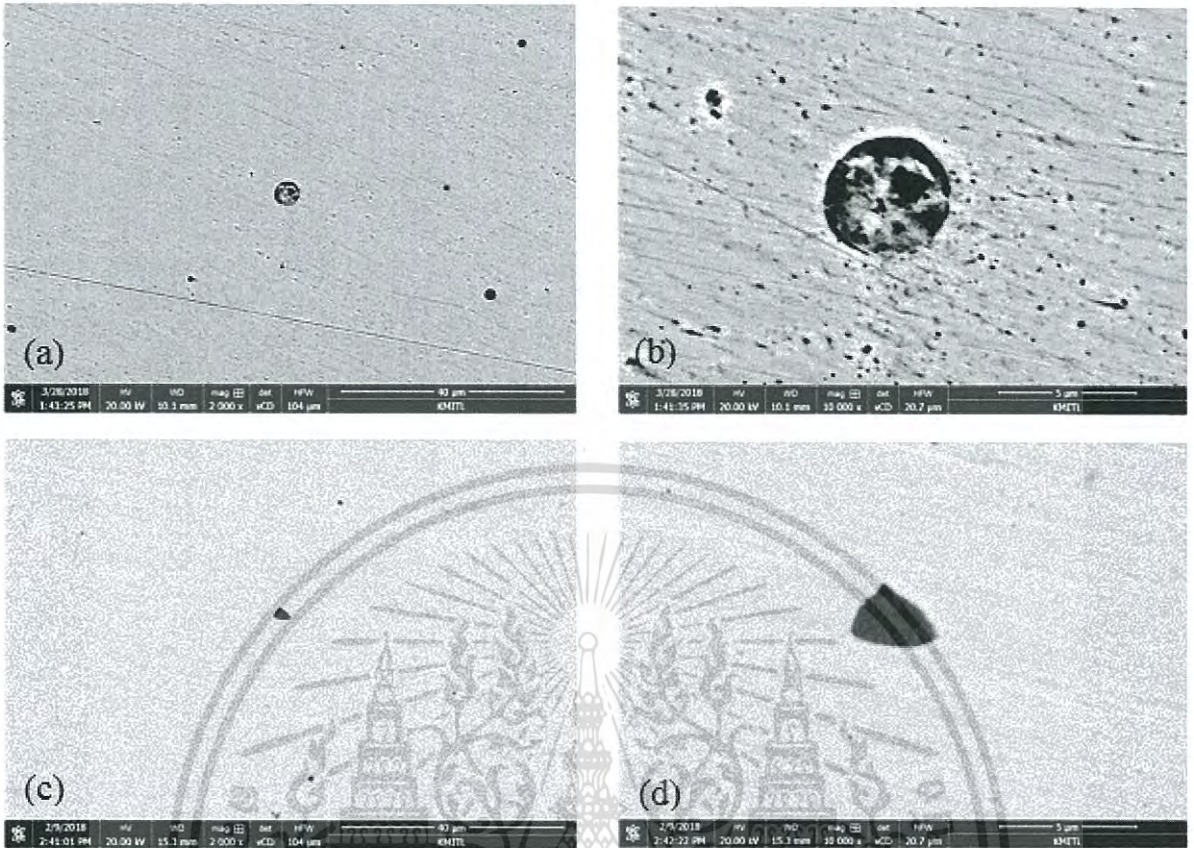
ชิ้นงานบ่มแข็งเทียม (Precipitation Hardening) ก่อนปรับปรุง อุณหภูมิในการบ่มแข็งเทียม 300 องศาเซลเซียส เวลาในการบ่มแข็งเทียม 60 นาที ตามทฤษฎีเฟสของแข็งที่ตกตะกอนจะมีขนาดอนุภาคเล็กระดับนาโนเมตรซึ่งจะไม่สามารถมองเห็นได้หากใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) แต่ในชิ้นงานนี้เราส่องเห็นจุดสีดำซึ่งเป็นโครงสร้างเฟสยูเทคติก (Eutectic Phase) นั้นหมายความว่า ธาตุเกิดการตกตะกอนโดยอะตอมของธาตุผสมมีขนาดอะตอมใหญ่กว่าอะตอมของธาตุหลัก ส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงไม่มากพอเนื่องจากอนุภาคที่ตกตะกอนไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน (Dislocation) ได้ไม่ดีพอ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคหลังปรับปรุง

การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุและการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงของชิ้นงานระหว่างชิ้นงานที่มีค่าปัจจัยที่เหมาะสมกับชิ้นงานที่มีค่าปัจจัยไม่เหมาะสม โดยชิ้นงานที่มีค่าปัจจัยที่เหมาะสมได้แก่ ชิ้นงานที่มีอุณหภูมิในการอบละลาย 700 องศาเซลเซียส เวลาในการอบละลาย 60 นาที และเวลาในการบ่มแข็งเทียม 41 นาที ผลจากการวิเคราะห์ที่โดยการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM) แสดงดังรูปที่ 4.17 และได้ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคอย่างละเอียดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) แสดงดังรูปที่ 4.18 และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะด้วยเทคนิคการตรวจวัดรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงานของธาตุ (EDS) ของเงินสเตอร์ลิงหลังทำการปรับปรุงแสดงดังรูปที่ 4.19 4.20 และตารางที่ 4.12 4.13



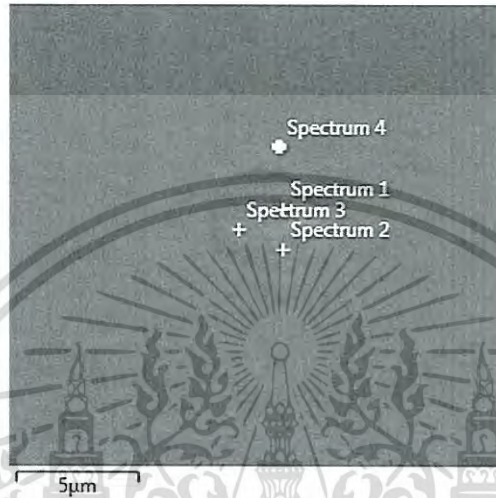
รูปที่ 4.17 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ภาพถ่าย OM (a) ชิ้นงานอบละลาย (b) ชิ้นงานบ่มแข็งเทียม ที่กำลังขยาย 20 เท่า



รูปที่ 4.18 ผลจากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานอบละลาย (a) ที่กำลังขยาย 2000 เท่า (b) ที่กำลังขยาย 10000 เท่า ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานบ่มแข็งเทียม (c) ที่กำลังขยาย 2000 เท่า (d) ที่กำลังขยาย 10000 เท่า

4.2.2.1 ผลการศึกษาชิ้นงานอบละลายที่มีปัจจัยเหมาะสม (อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที)

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะด้วยเทคนิคการตรวจวัดรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงานของธาตุ (EDS) ของเงินสเตอร์ลิงหลังทำการปรับปรุงของชิ้นงานอบละลาย ที่อุณหภูมิในการอบละลาย 700 องศาเซลเซียส เวลาในการอบละลาย 60 นาที แสดงดังรูปที่ 4.15 และตารางที่ 4.8

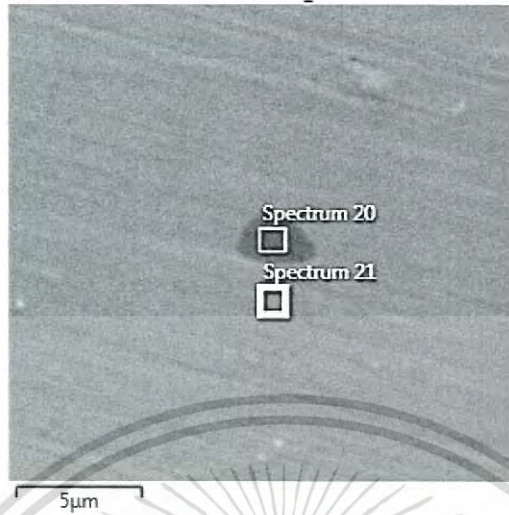


รูปที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์ EDS ของเงินสเตอร์ลิงในชิ้นงานอบละลายหลังการปรับปรุงที่กำลังขยาย 10000x

ตารางที่ 4.12 ผลวิเคราะห์ EDS ของเงินสเตอร์ลิงในชิ้นงานอบละลาย

Points	Element (at %)			Possible Phase
	Ag	Cu	Zn	
1	81.09	13.07	5.04	AgCuZn
2	88.76	8.32	2.92	AgCuZn
3	89.63	7.75	2.61	AgCuZn
4	72.02	25.17	2.81	AgCuZn

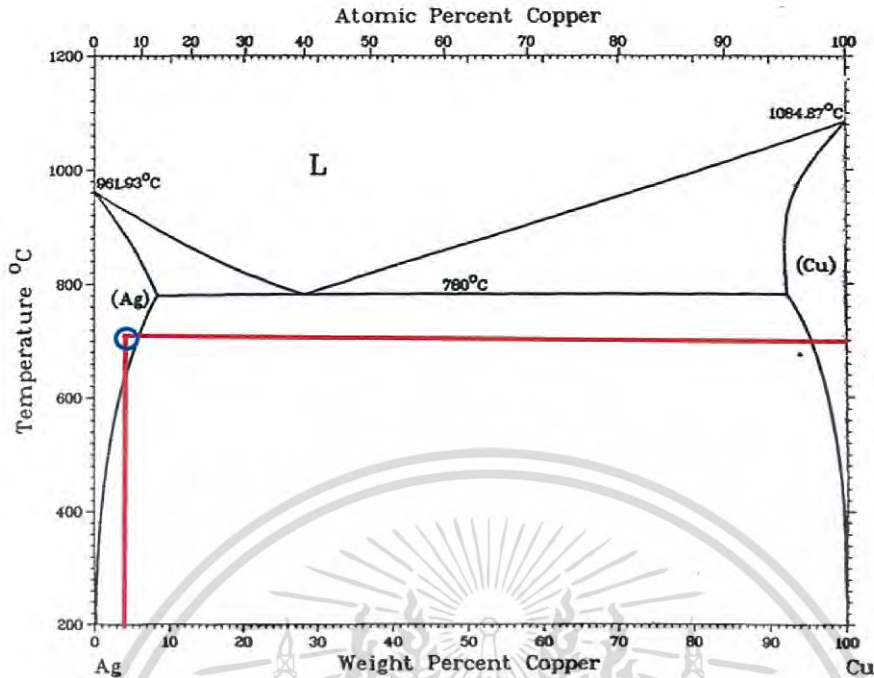
4.2.2.2 ผลการศึกษาชิ้นงานบ่มแข็งเทียมที่มีปัจจัยเหมาะสม (อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เวลา 41 นาที)



รูปที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์ EDS ของเงินสเตอร์ลิงในชิ้นงานบ่มแข็งเทียมหลังการปรับปรุงที่กำลังขยาย 10000x

ตารางที่ 4.13 ผลวิเคราะห์ EDS ของเงินสเตอร์ลิงในชิ้นงานบ่มแข็งเทียม

Points	Element (at %)			Possible Phase
	Ag	Cu	Zn	
20	23.30	72.46	4.24	AgCuZn
21	89.70	7.57	2.73	AgCuZn



รูปที่ 4.21 โลหะผสมระหว่างเงิน 94.73 % กับ ทองแดง 4.02 % ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชั้นสารประกอบเชิงโลหะด้วยเทคนิคการตรวจวัดรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงานของธาตุ (EDS) และการศึกษาแผนภูมิเฟสของธาตุ ได้ผลดังนี้

ชิ้นงานอบละลาย (Solution Heat Treatment) หลังปรับปรุง ที่อุณหภูมิในการอบละลาย 700 องศาเซลเซียส เวลาในการอบละลาย 60 นาที จะพบว่าโครงสร้างจุลภาคจะมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาจากเฟสไดอะแกรม แสดงดังรูปที่ 4.21 จะพบว่าธาตุผสมทองแดงและสังกะสีจะสามารถละลายและกระจายตัวในธาตุหลักเงินได้อย่างทั่วถึง หรือมีโครงสร้างเป็นสภาพของแข็งอิ่มตัวอย่างยิ่งยวด (Super Saturated Solid Solution) โดยบนผิวของชิ้นงานมีจุดสีดำที่กระจายตัวอยู่ แต่เมื่อทำการวิเคราะห์จุดสีดำเหล่านั้นเป็นเพียงแค่ความบกพร่องบนผิวของชิ้นงานเท่านั้น

ชิ้นงานบ่มแข็งเทียม (Precipitation Heat Treatment) หลังปรับปรุง ที่อุณหภูมิในการบ่มแข็งเทียม 300 องศาเซลเซียส เวลาในการอบละลาย 41 นาที จะพบว่าธาตุผสมที่อยู่ในสภาวะสารละลายของแข็งอิ่มตัวอย่างยิ่งยวดเกิดการตกตะกอนและเกิดเป็นเฟสใหม่ที่มีความละเอียดมากขึ้น (Coherent Precipitation) ซึ่งการเกิดเฟสของแข็งขนาดที่เป็นอนุภาคเล็กระดับนาโนเมตรจะทำให้เกิดการแข็งตัวมากยิ่งขึ้น โดยกำลังขยายของกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) มีกำลังขยายไม่เพียงพอที่จะมองเห็นเฟสของแข็งขนาดเล็กที่กระจายตัวอยู่ โดยหากต้องการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับเฟสของแข็งอนุภาคขนาดเล็กที่เกิดขึ้น จะต้องนำไปศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาความแข็งแรงของเงินสเตอร์ลิงที่ใช้ในบริษัทผลิตเครื่องประดับ โดยทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการชุบแข็งแบบตกตะกอนของเงินสเตอร์ลิงที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรง และโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิง ตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ อุณหภูมิในการอบละลาย เวลาในการอบละลาย อุณหภูมิในการบ่มแข็งเทียม และเวลาในการบ่มแข็งเทียม โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนควบคู่กับฟังก์ชันความพึงพอใจ เพื่อให้ได้มาซึ่งค่าของปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการทางความร้อน ซึ่งสรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะมีรายละเอียดได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

ผลการทดสอบระดับปัจจัยเพื่อหาค่าที่เหมาะสมต่อการออกแบบการทดลอง และศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการชุบแข็งแบบตกตะกอนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ทางสถิติ

1. ปัจจัยที่เหมาะสมที่จะทำให้ค่าความแข็งแรงของเงินสเตอร์ลิงเพิ่มขึ้นคือ อุณหภูมิในการอบละลาย 700 องศาเซลเซียส เวลาในการอบละลาย 60 นาที อุณหภูมิในการบ่มแข็งเทียม 300 องศาเซลเซียส และเวลาในการบ่มแข็งเทียม 41 นาที ผลของค่าความแข็งแรงที่ได้จากการใช้เงื่อนไขดังกล่าว คือ 129 HV เมื่อเปรียบเทียบกับปัจจัยที่ทางบริษัทใช้ก่อนปรับปรุง ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจากเดิม 74.32 %

2. ผลจากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงของเงินสเตอร์ลิงที่ระดับ $\alpha = 0.05$ คือ เวลาในการอบละลาย และอันตรกิริยาร่วมระหว่างเวลาในการอบละลายกับอุณหภูมิในการอบละลาย ซึ่งเป็นตัวแปรหลักที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของเงินสเตอร์ลิงมากที่สุด รองลงมา คือ อันตรกิริยาของเวลาในการบ่มแข็งเทียม และลำดับสุดท้ายอันตรกิริยาของอุณหภูมิในการอบละลาย ส่วนตัวแปรอื่นๆ ไม่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของเงินสเตอร์ลิงที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 65 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ระดับปัจจัยที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิในการอบละลาย 700 องศาเซลเซียส เวลาในการอบละลาย 60 นาที อุณหภูมิในการบ่มแข็งเทียม 300 องศาเซลเซียส เวลาในการบ่มแข็งเทียม 41 นาที พบว่าชิ้นงานอบละลาย (Solution Heat Treatment) มีโครงสร้างจุลภาคจะมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน เนื่องจากธาตุผสมทองแดงและสังกะสีจะสามารถละลายและกระจายตัวในธาตุหลักเงินได้อย่างทั่วถึง และชิ้นงานบ่มแข็งเทียม (Precipitation Heat Treatment) จะพบว่าไม่มีเฟสยูเทคติกเกิดขึ้น เนื่องจากธาตุผสมที่อยู่ในสภาวะสารละลายของแข็งอิมตัวยังยวดยิ่งเกิดการตกตะกอนและเกิดเฟสของแข็งขนาดที่เป็นอนุภาคเล็กระดับนาโนเมตรส่งผลให้ชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงมีความแข็งสูงขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะในการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของคุณสมบัติของธาตุที่ใช้ผสมในเงินสเตอร์ลิง เพื่อที่จะปรับปรุงเงินสเตอร์ลิงให้มีคุณสมบัติด้านอื่นๆ ที่ดียิ่งขึ้น และจากข้อจำกัดในเรื่องเตาอบของบริษัทที่สามารถให้ความร้อนได้สูงสุดเพียง 720 องศาเซลเซียส ซึ่งอาจทำให้ธาตุผสมละลายในธาตุหลักได้ไม่หมด โดยจากการศึกษาอุณหภูมิในการอบละลายที่เหมาะสมอาจใช้อุณหภูมิสูงถึง 745 องศาเซลเซียส เพื่อให้ธาตุผสมละลายในธาตุหลักได้อย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้ขั้นตอนการอบละลายสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น เมื่อคุณสมบัติของเงินสเตอร์ลิงดีขึ้น ทางบริษัทก็จะมีผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสร้างความพึงพอใจให้แก่ลูกค้าต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Chamuang, W. Kongmuang, T. Chairuang Sri, 2012. Influence of Casting Techniques on Hardness Tarnish Behavior and Microstructure of Ag-Cu-Zn-si Sterling Silver Jewelry Alloys. Journal of Metals, Materials and Minerals 22 : 19-26.
- [2] ประณิธิ กาวารี, 2545. การศึกษากระบวนการถ่ายแบบกรณีหลายผลตอบสนอง. วิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [3] ปารเมศ ชูติมา, 2545. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [4] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, พงศ์ชนัน เหลืองไพบุลย์, 2549. การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง. กรุงเทพฯ: ท็อป.
- [5] อภินันท์ แต่ตระกูล, 2553. การหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมทิก. วิศวกรรมอุตสาหการ, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [6] Chinyere Onwubiko, 1999. Introduction to Engineering Design Optimization. Prentice Hall.
- [7] Linda Kacprzak, Hiroaki Okamoto, 1990. Binary alloy phase diagrams. United States of America : William W. Scott.
- [8] G. Effenberg, G. Petzow, 1988. Ternary Alloys. Germany. VCH Verlagsgesellschaft.
- [9] S. Tantriratn, 2009. Non Ferrous Metallic Materials in Aircraft. Bangkok.
- [10] H. K. Khaira, 2013. Precipitation Hardening. Manit. Bhopal.
- [11] สมนึก วัฒนศรีกุล, 2549. การทดสอบวัสดุ. กรุงเทพฯ ฯ : กรีนเวิลด์ มีเดีย.
- [12] หัสวิภา หมายมั่น, 2012. Scanning Electron Microscope : SEM. มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง.
- [13] ยุทธนา ทิพย์ทิพากร, 2013. การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของวัสดุ. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสวนดุสิต.