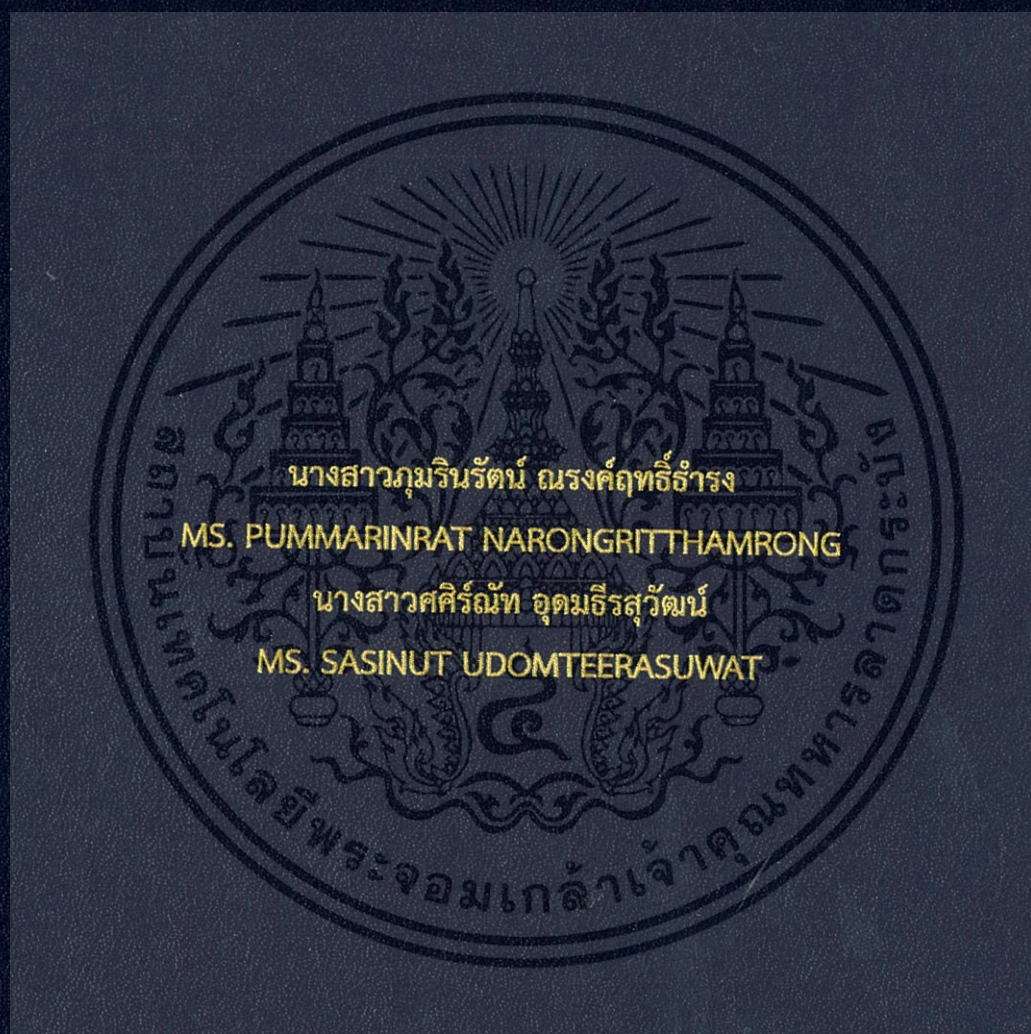


การพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขนาดเล็กสำหรับ
แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน
DEVELOPMENT OF MICRO CHANNEL HEAT EXCHANGER
FOR LITHIUM-ION BATTERY



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขนาดเล็กสำหรับ
แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน
DEVELOPMENT OF MICRO CHANNEL HEAT EXCHANGER
FOR LITHIUM-ION BATTERY



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF MICRO CHANNEL HEAT EXCHANGER FOR LITHIUM-ION BATTERY



MS. PUMMARINRAT NARONGRITTHAMRONG

MS. SASINUT UDOMTEERASUWAT

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 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์

การพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขนาดเล็กสำหรับ
แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน
DEVELOPMENT OF MICRO CHANNEL HEAT EXCHANGER FOR
LITHIUM-ION BATTERY

นักศึกษา

นางสาวกมลรัตนันต์ ณรงค์ฤทธิ์ธำรง รหัสประจำตัว 56011269
นางสาวศศิธรันท์ อุดมธีรสวัฒน์ รหัสประจำตัว 56011195

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์

(รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขนาดเล็กสำหรับ แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน
นักศึกษา	นางสาวกมลรินรัตน์ ณรงค์ฤทธิ์อารัง นางสาวศศิธรณ์ อุดมธีรสวัสดิ์
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ เวลา และความดัน ในการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขนาดเล็ก โดยทำการแลกเปลี่ยนความร้อนในเตาอบภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจน โดยใช้โลหะเติมชนิดทองแดง-ฟอสฟอรัส และใช้แผ่นทองแดงเป็นโครงสร้างของชิ้นงาน ในการศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ใช้การออกแบบทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken) และฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability function) เพื่อให้ได้เงื่อนไขในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมที่ให้ค่าแรงดึงเฉือนของรอยต่อสูงสุด เมื่อทำการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่าระดับของปัจจัยที่ส่งผลให้ชิ้นงานมีค่าแรงดึงเฉือนสูงสุด คือ อุณหภูมิในการแลกเปลี่ยน 620 องศาเซลเซียส เวลาในการแลกเปลี่ยน 30 นาที และความดันที่ใช้กดชิ้นงาน 12.173 กิโลปาสคาล ซึ่งได้ค่าเฉลี่ยแรงดึงเฉือนสูงสุดที่ 736.2 นิวตัน และจากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยแลกเปลี่ยน พบว่ารอยต่อระหว่างโลหะเติมกับทองแดงของชิ้นงานที่มีค่าแรงดึงเฉือนสูงสุดจะไม่มีช่องว่างระหว่างชิ้นงาน แตกต่างจากชิ้นงานที่มีค่าปัจจัยไม่เหมาะสม จะมีช่องว่างระหว่างโลหะเติมกับแผ่นทองแดงส่งผลให้ค่าแรงดึงเฉือนน้อยกว่าชิ้นงานที่มีค่าปัจจัยที่เหมาะสม และผู้วิจัยได้นำเงื่อนไขในการแลกเปลี่ยนที่เหมาะสมที่ได้ ไปทำการสร้างต้นแบบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขนาดเล็ก สำหรับการประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมด้านต่าง ๆ ต่อไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

Thesis Title	Development of Micro Channel Heat Exchanger for Lithium-ion Battery
Student	Ms. Pummarinrat Narongritthamrong Ms. Sasinut Udomteerasuwat
Degree	Bachelor of Engineering in Industrial Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year	2016
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Kannachai Kanlayasiri

ABSTRACT

This thesis is aimed to study the effect of temperature, time and pressure on the tensile shear force of the solid-state brazed joint. This brazing process is developed to fabricate a micro-channel heat exchanger. The CuP filler metal was employed to join copper sheets under the hydrogen atmosphere. Box-Behnken experimental design and desirability function were used to obtain the optimal brazing conditions providing the maximum tensile shear force of the joints. Based on the statistical analysis with 95% confidence level, the optimal brazing conditions were at 620 °C of the brazing temperature, 30 minutes of the brazing time, and 12.173 kPa of the applied pressure. The average tensile shear force obtained from these brazing conditions was 736.2 N. From the microstructural examination, there was no interfacial void presented at the filler metal/copper sheet interface when brazed under the optimal conditions. On the other hand, small voids were observed at the interfacial zone when the brazing process was performed under the non-optimal conditions resulting in a lower tensile shear force of the joints. The optimal brazing conditions will then be used to fabricate a prototype of the micro-channel heat exchanger to apply for various engineering applications, especially lithium-ion battery.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากความช่วยเหลือจากคณาจารย์ และบุคคลหลายฝ่าย คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบุคคลทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งคอยให้คำแนะนำและปรึกษาในด้านต่างๆ ที่เกี่ยวข้องทั้งกับโครงการ และเสนอแนะในการแก้ไขปัญหาของการทำโครงการ รวมทั้งตรวจแก้รายงาน ทำให้โครงการนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

บริษัท ทรอนต้า (ประเทศไทย) จำกัด และสำนักวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องจักร และอุปกรณ์ ตลอดจนอำนวยความสะดวกในการปฏิบัติการทดลองต่าง ๆ จนสำเร็จไปได้ด้วยดี

อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและอาจารย์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้แก่คณะผู้จัดทำ ทำให้มีความรู้ในการคิดแก้ไขปัญหา และนำความรู้ที่ได้ศึกษามาประยุกต์ใช้ในการจัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการทุกท่าน ที่คอยอำนวยความสะดวกในการปฏิบัติการทดลองต่าง ๆ จวบจนการทดลองสำเร็จไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมไปถึงผู้เกี่ยวข้องอื่น ๆ ที่มีได้เอื้อนาม และเพื่อน ๆ ที่คอยให้กำลังใจ และคำแนะนำตลอดมา หากมีสิ่งผิดพลาดประการใดคณะผู้จัดทำขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้

นางสาวภุมรินรัตน์ ณรงค์ฤทธิ์ธำรง

นางสาวศศิธรณ์ท อุดมธีรสุวัฒน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	11
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	12
1.3 ขอบเขตของปริญญาานิพนธ์	12
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	12
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchangers).....	13
2.2 กระบวนการไหลระดับไมโคร (Microfluid Process).....	14
2.3 การต่อวัสดุ (Joining of Materials)	14
2.3.1 การเชื่อม (Welding).....	15
2.3.2 การบัดกรีและการเล่นประสาน	15
2.4 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมทองแดงและฟอสฟอรัส	25
2.5 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมเงินและทองแดง.....	26
2.6 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมเงินและฟอสฟอรัส	27
2.7 การออกแบบการทดลองของบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design)	27
2.7.1 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Analysis of Coefficient of Determination).....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.7.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking).....	33
2.8 แบบจำลองการถดถอย (The Regression Model).....	34
2.9 ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function).....	35
2.10 ทฤษฎีการขาดของชิ้นงาน.....	37
2.10.1 ความเค้น (Stress).....	37
2.10.2 ความเครียดและการเปลี่ยนรูป (Strain and Deformation).....	38
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	
3.1 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเล่นประสานที่ให้ค่าแรงดึงเดือนสูงสุด.....	43
3.1.1 การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย.....	43
3.1.2 วัสดุพื้นและโลหะเติม.....	47
3.1.3 การเล่นประสานโดยใช้เตาอบควบคุมบรรยากาศ.....	48
3.1.4 การทดสอบแรงดึงเดือนของชิ้นงาน.....	49
3.1.5 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติและหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยหลัก.....	50
3.2 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค.....	50
3.2.1 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดลอง.....	50
3.2.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมี.....	52
3.3 การจัดทำแผนกระจายความร้อน.....	53
3.3.1 การออกแบบแผนกระจายความร้อน.....	53
3.3.2 การตัดแผนกระจายความร้อนด้วยการตัดเลเซอร์.....	55
3.3.3 การเล่นประสานโดยใช้เตาอบควบคุมบรรยากาศ.....	57
3.4 การตรวจสอบแผนกระจายความร้อนโดยการตัดตามขวาง.....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4	ผลการทดลอง	
4.1	ผลการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลกระทบต่อแรงดึงเฉือนของรอยต่อจากการเล่นประสาน.....	58
4.1.1	ผลการทดสอบแรงดึง.....	58
4.1.2	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	59
4.2	ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อ.....	73
4.2.1	ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคก่อนทำการเล่นประสาน.....	73
4.2.2	ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคหลังทำการเล่นประสาน.....	75
บทที่ 5	สรุปผลการทดลอง	
5.1	ผลการศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อแรงดึงเฉือนของรอยต่อ.....	91
5.1.1	ผลการทดสอบระดับปัจจัยเพื่อหาช่วงที่เหมาะสมต่อการออกแบบการทดลอง....	91
5.1.2	ผลการศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อแรงดึงเฉือนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ทางสถิติ	92
5.2	ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อ.....	92
5.3	ผลจากการตัดแนวตามขวางของแผงระบายความร้อน.....	93
5.4	ข้อจำกัดในการทำงานวิจัย.....	93
5.5	ข้อเสนอแนะ.....	93
	เอกสารอ้างอิง.....	94

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนแบบสามตัวแปร.....	29
ตารางที่ 2.2 สรุปความสัมพันธ์ ANOVA ของการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดลื่นใจ.....	30
ตารางที่ 3.1 ปัจจัยและระดับของการทดลอง.....	44
ตารางที่ 3.2 การออกแบบการทดลองบ็อกซ์-เบห์นเคนทำซ้ำ 3 ครั้ง.....	45
ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมทางเคมีและคุณสมบัติทางความร้อนของโลหะเติมทองแดง-ฟอสฟอรัส.....	47
ตารางที่ 3.4 เงื่อนไขการตัดแผ่นโลหะทองแดงและแผ่นโลหะเติมทองแดงฟอสฟอรัส.....	56
ตารางที่ 4.1 ค่าแรงดึงเฉือนของรอยต่อจากการแล่นประสาน.....	58
ตารางที่ 4.2 Estimated Regression Coefficients for Tensile Shear Force.....	60
ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	60
ตารางที่ 4.4 Estimated Regression Coefficients for Tensile Shear Force (Reduced Model).....	62
ตารางที่ 4.5 Analysis of Variance (Reduced Model).....	62
ตารางที่ 4.6 การกำหนดค่าเป้าหมายที่แรงดึงเฉือนสูงสุด.....	71
ตารางที่ 4.7 ตารางผลการทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลองของแรงดึงเฉือนและเปอร์เซ็นต์ ความผิดพลาดแต่ละการทดลอง.....	72
ตารางที่ 4.8 ผลวิเคราะห์ EDS ของโลหะเติมทองแดง-ฟอสฟอรัส.....	75
ตารางที่ 4.9 ผลวิเคราะห์ EDS ของชิ้นงานที่มีปัจจัยที่เหมาะสม (อุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ความดัน 12.173 กิโลปาสคาล).....	77
ตารางที่ 4.10 ผลวิเคราะห์ EDS ของชิ้นงานที่มีปัจจัยอุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที ความดัน 8.656 กิโลปาสคาล.....	79
ตารางที่ 4.11 ผลวิเคราะห์ EDS ของชิ้นงานที่มีปัจจัย 600 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ความดัน 12.173 กิโลปาสคาล.....	82
ตารางที่ 4.12 ผลวิเคราะห์ EDS ของชิ้นงานที่มีปัจจัยอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ความดัน 4.713 กิโลปาสคาล.....	84
ตารางที่ 4.13 ผลวิเคราะห์ EDS ของชิ้นงานที่มีปัจจัยอุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส เวลา 20 นาที ความดัน 12.173 กิโลปาสคาล.....	87
ตารางที่ 4.14 ผลวิเคราะห์ EDS ของชิ้นงานที่มีปัจจัยอุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ความดัน 8.656 กิโลปาสคาล.....	89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ช
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การเล่นประสานในเตาของอัลลอย.....	17
รูปที่ 2.2 การเล่นประสานเหนียวน้ำ.....	18
รูปที่ 2.3 การเล่นประสานด้านทาน.....	19
รูปที่ 2.4 การเล่นประสานแบบจุ่ม.....	19
รูปที่ 2.5 การเล่นประสานอินฟราเรด.....	20
รูปที่ 2.6 ตัวอย่างระยะต่อเกยของกระบวนการเล่นประสาน.....	21
รูปที่ 2.7 ลักษณะของรอยต่อแบบต่างๆ.....	21
รูปที่ 2.8 อิทธิพลระยะห่างระหว่างชิ้นงานต่อความแข็งแรงของรอยต่อ.....	22
รูปที่ 2.9 การใช้งานโลหะเติมของการเล่นประสานในรูปแบบต่างๆ.....	24
รูปที่ 2.10 แผนภูมิเฟสของทองแดงและฟอสฟอรัส.....	25
รูปที่ 2.11 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมเงินและทองแดง.....	26
รูปที่ 2.12 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมเงินและฟอสฟอรัส.....	27
รูปที่ 2.13 การออกแบบบ็อกซ์-เบ้าชิ้นสำหรับสามตัวแปร.....	28
รูปที่ 2.14 ลักษณะของแรงเฉือน.....	37
รูปที่ 2.15 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield).....	39
รูปที่ 2.16 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก.....	39
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนในการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเล่นประสานที่ให้ ค่าแรงดึงเฉือนสูงสุด.....	42
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนในการทดลองเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค.....	43
รูปที่ 3.3 แบบชิ้นงานทดสอบระหว่างโลหะทองแดงและโลหะเติมบัดกรีแข็งทองแดง-ฟอสฟอรัส.....	47
รูปที่ 3.4 ตัวยึดจับชิ้นงานทดสอบประกอบเข้ากับชิ้นงานทดสอบ.....	48
รูปที่ 3.5 เตาอบควบคุมบรรยากาศ Borel Special Furnaces รุ่น S0908.....	49
รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบแรงดึงเฉือน SHIMADZU รุ่น AG-X Floor TYPE.....	49
รูปที่ 3.7 เครื่องตัดแรงโน้มถ่วงยี่ห้อ Struers รุ่น Minitom.....	50

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.8	ชิ้นงานทดสอบหลังขึ้นรูปด้วยเรซิน.....	51
รูปที่ 3.9	เครื่องขัดชิ้นงานทดลองยี่ห้อ Struers รุ่น LaboPol-1	51
รูปที่ 3.10	กล้องจุลทรรศน์แบบแสง Optical Microscope ยี่ห้อ Zeiss รุ่น Axiolab	52
รูปที่ 3.11	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6610LV	52
รูปที่ 3.12	ลักษณะของแผนกระจายความร้อนของโลหะทองแดงและโลหะเติมทองแดงฟอสฟอรัส	53
รูปที่ 3.13	ขนาดและระยะของแผนกระจายความร้อนของโลหะทองแดง และโลหะเติมทองแดง-ฟอสฟอรัส.....	54
รูปที่ 3.14	ลักษณะของแผนกระจายความร้อน	55
รูปที่ 3.15	เครื่องตัดเลเซอร์ Air-Cooled Nanosecond Fiber Lasers ยี่ห้อ JENOPTIK	56
รูปที่ 3.16	ชิ้นงานที่ผ่านการตัดเลเซอร์.....	57
รูปที่ 4.1	การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกค้างของแรงดึงเฉือน.....	64
รูปที่ 4.2	ค่าส่วนตกค้างกับค่าแรงดึงเฉือน.....	65
รูปที่ 4.3	ค่าส่วนตกค้างของแรงดึงเฉือนกับลำดับเวลา	66
รูปที่ 4.4	กราฟโครงร่าง (Contour Plot) ระหว่างอุณหภูมิในการแล่นประสาน (Temperature)	67
รูปที่ 4.5	พื้นผิวผลตอบของอิทธิพลร่วมระหว่าง อุณหภูมิในการแล่นประสาน (Temperature)	67
รูปที่ 4.6	กราฟโครงร่าง (Contour Plot) ระหว่างอุณหภูมิในการแล่นประสาน (Temperature)	68
รูปที่ 4.7	พื้นผิวผลตอบของอิทธิพลร่วมระหว่าง อุณหภูมิในการแล่นประสาน (Temperature)	69
รูปที่ 4.8	กราฟโครงร่าง (Contour plot) ระหว่างเวลาในการแล่นประสาน (Time).....	70
รูปที่ 4.9	พื้นผิวผลตอบของอิทธิพลร่วมระหว่างเวลาในการแล่นประสาน (Time) กับ ค่าความดันที่ใช้กดชิ้นงาน (Pressure) เทียบกับค่าแรงดึงเฉือน	70
รูปที่ 4.10	กราฟแสดงค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปรต่างๆ	71
รูปที่ 4.11	ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping ของโลหะเติมทองแดง-ฟอสฟอรัส	73
รูปที่ 4.12	ผลวิเคราะห์ EDS ของโลหะเติมทองแดง-ฟอสฟอรัสก่อนการแล่นประสาน.....	74

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.13 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping ของชิ้นงานที่มี ปัจจัยที่เหมาะสม (อุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ความดัน 12.173 กิโลปาสคาล).....	75
รูปที่ 4.14 ผลวิเคราะห์ EDS ของชิ้นงานที่มีปัจจัยที่เหมาะสม (อุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ความดัน 12.173 กิโลปาสคาล).....	76
รูปที่ 4.15 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping ของชิ้นงานที่ อุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที ความดัน 8.656 กิโลปาสคาล.....	78
รูปที่ 4.16 ผลวิเคราะห์ EDS ของชิ้นงานที่มีปัจจัยอุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที ความดัน 8.656 กิโลปาสคาล.....	79
รูปที่ 4.17 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping ของชิ้นงานที่ อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ความดัน 12.173 กิโลปาสคาล.....	80
รูปที่ 4.18 ผลวิเคราะห์ EDS ของชิ้นงานที่มีปัจจัยอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ความดัน 12.173 กิโลปาสคาล.....	81
รูปที่ 4.19 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping ของชิ้นงานที่ อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ความดัน 4.713 กิโลปาสคาล.....	83
รูปที่ 4.20 ผลวิเคราะห์ EDS ของชิ้นงานที่มีปัจจัยอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ความดัน 4.713 กิโลปาสคาล.....	84
รูปที่ 4.21 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping ของชิ้นงานที่ อุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส เวลา 20 นาที ความดัน 12.173 กิโลปาสคาล.....	85
รูปที่ 4.22 ผลวิเคราะห์ EDS ของชิ้นงานที่มีปัจจัยอุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส เวลา 20 นาที ความดัน 12.173 กิโลปาสคาล.....	86
รูปที่ 4.23 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping ของชิ้นงานที่ อุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ความดัน 8.656 กิโลปาสคาล.....	87
รูปที่ 4.24 ผลวิเคราะห์ EDS ของชิ้นงานที่มีปัจจัยอุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ความดัน 8.656 กิโลปาสคาล.....	88
รูปที่ 4.25 ภาพตัดขวางของแผงระบายความร้อน.....	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แบตเตอรี่ลิเธียมไอออนเป็นแหล่งเก็บพลังงานไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีการนำไปใช้อย่างแพร่หลาย เช่น ในรถยนต์ไฟฟ้าและรถยนต์ประเภทไฮบริด ในแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนหนึ่งก้อน จะให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) และกระแสไฟฟ้า (I) ไม่สูงมากพอ สำหรับการนำไปใช้ในรถยนต์ไฟฟ้าหรือรถยนต์ไฮบริด ที่ต้องใช้พลังงานสูง ดังนั้นจึงต้องนำแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนมาต่ออนุกรมเพื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้า หรือต่อขนานเพื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้า และเมื่อแบตเตอรี่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (Discharges) ออกไป จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในตัวแบตเตอรี่ ซึ่งแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนจะทำงานได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 30-40 องศาเซลเซียส เมื่อนำแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนจํกักรวมกัน (Pack) ความแตกต่างของอุณหภูมิในแต่ละก้อนต้องไม่เกิน 5 องศาเซลเซียส [1] ถ้ามีการใช้งานจนอุณหภูมิเกิน 40 องศาเซลเซียส จะส่งผลให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ลดลงและส่งผลถึงความปลอดภัย แต่ถ้าใช้งานที่อุณหภูมิต่ำกว่า 30 องศาเซลเซียส จะทำให้ความต้านทานทางไฟฟ้าในแบตเตอรี่นั้นเพิ่มขึ้น เมื่อใช้งานต่อไปความต่างศักย์ทางไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ไม่มีพลังงานไม่มากพอในการใช้งาน [2]

ดังนั้นการรักษาอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 30-40 องศาเซลเซียส มีความสำคัญอย่างมากสำหรับแบตเตอรี่ชนิดนี้ เพราะมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของแบตเตอรี่ ซึ่งการรักษาอุณหภูมิเมื่อมีการใช้งานในประเทศไทยนั้นเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมาก เนื่องจากรถยนต์ไฟฟ้าส่วนใหญ่ออกแบบและผลิตจากประเทศญี่ปุ่นและจากทวีปยุโรป ซึ่งเป็นประเทศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าประเทศไทย เมื่อนำรถยนต์ไฟฟ้ามาใช้งานในประเทศไทยอุณหภูมิของแบตเตอรี่อาจจะสูงกว่า 40 องศาเซลเซียส เพราะฉะนั้นระบบระบายความร้อนจึงมีความสำคัญมากต่อแบตเตอรี่ที่ใช้ในรถยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย

วิธีการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนมีหลายรูปแบบ เช่น ใช้พัดลมเป่าที่แบตเตอรี่โดยตรง [3-5] ซึ่งวิธีนี้มีข้อจำกัด คือ มีความสามารถในการพาความร้อนต่ำ ลดอุณหภูมิได้ไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากแบตเตอรี่ที่อยู่ในระยะใกล้พัดลมจะสามารถถ่ายความร้อนได้ดีกว่าแบตเตอรี่ที่อยู่ไกลพัดลม อีกวิธีหนึ่ง คือ การใช้ Heat Pipe ระบายความร้อน แต่ถ้าต้องการให้อุณหภูมิของแบตเตอรี่เพิ่มสูงขึ้นในประเทศที่มีอุณหภูมิต่ำจะไม่สามารถใช้วิธีนี้ได้ [6] แต่ด้วยข้อจำกัดของแต่ละวิธีทำให้ไม่สามารถลดความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผู้วิจัยจึงทำการศึกษาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขนาดเล็กที่สามารถนำมอลดความร้อนของแบตเตอรี่ได้ซึ่งวิธีนี้จะเพิ่มพื้นที่ผิวเทียบกับปริมาตรของ

ของเหลวที่นำมาลดความร้อน เพราะฉะนั้นยิ่งพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้นเท่าไรจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในกระบวนการระบายความร้อนดียิ่งขึ้น ทำให้อุณหภูมิของแบตเตอรี่อยู่ในช่วงที่เหมาะสม

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสนอแนวทางการพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขนาดเล็กเพื่อประยุกต์ใช้ในการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบกึ่งใส่เหล็ย

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ เวลา และความดันในการแลกเปลี่ยนประสานครึ่งต่อความแข็งแรงเนื่องจากรอยต่อจากการแลกเปลี่ยนประสานครึ่งในสถานะของแข็ง
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ เวลา และความดันในการแลกเปลี่ยนประสานครึ่งต่อโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อจากการแลกเปลี่ยนประสานครึ่งในสถานะของแข็ง
3. เพื่อหาเงื่อนไขการแลกเปลี่ยนประสานครึ่งที่เหมาะสมที่สุดระหว่างทองแดง และโลหะเติมทองแดง-ฟอสฟอรัส
4. เพื่อสร้างต้นแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขนาดเล็กสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

1. สร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้แผ่นทองแดงบริสุทธิ์ความหนา 0.1 มิลลิเมตร
2. ใช้โลหะเติมทองแดง-ฟอสฟอรัส (CuP) เป็นตัวประสานครึ่งกับแผ่นทองแดง
3. สร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต้นแบบชนิด Micro Channel Arrays

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงอิทธิพลของอุณหภูมิ เวลา และความดันในการแลกเปลี่ยนประสานครึ่งต่อความแข็งแรงเนื่องและโครงสร้างจุลภาคของแผ่นทองแดง
2. ได้ต้นแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchangers)

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน คือ เครื่องมือที่ใช้สำหรับถ่ายเทความร้อนจากของไหลชนิดหนึ่งไปยังของไหลอีกชนิดหนึ่ง โดยที่ของไหลไม่จำเป็นต้องผสมกัน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นเครื่องมือที่สำคัญมากอย่างหนึ่ง เพราะเป็นเครื่องมือที่ใช้ในระบบต่าง ๆ ทางวิศวกรรมศาสตร์อย่างกว้างขวาง วิศวกรควรมีความรู้ที่จะคำนวณการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ ในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน วิศวกรต้องมีความรู้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน การส่งผ่านของความร้อน และความรู้ทางกลศาสตร์ของไหล

ในปัจจุบัน กระบวนการอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับพลังงานความร้อน ส่วนใหญ่มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นองค์ประกอบ เช่น อุตสาหกรรมน้ำมัน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะถูกใช้สำหรับการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำมันดิบ สำหรับเปลี่ยนสถานะของไอที่ออกมาจากหอกลั่นให้เป็นของเหลว และสำหรับการลดอุณหภูมิของน้ำมันหรือก๊าซ ในทำนองเดียวกันกับในอุตสาหกรรมปิโตร อุตสาหกรรมเส้นใยสังเคราะห์ และอุตสาหกรรมอื่น ๆ ก็ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเพิ่มอุณหภูมิ ลดอุณหภูมิ หรือหมุนเวียนความร้อนจากของไหลกลับมาใช้ใหม่

หน้าที่หลักของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนก็คือ การนำเอาพลังงานความร้อนมาใช้อย่างถูกหลักการ และมีประสิทธิภาพ ดังนั้น วิธีใช้และเลือกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งสัมพันธ์กับต้นทุนของกระบวนการ และอาจมีผลต่อราคาของผลิตภัณฑ์ การเลือกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะต้องทำอย่างระมัดระวัง เงื่อนไขที่สำคัญอย่างหนึ่งในการเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในอุตสาหกรรมก็คือ ความมีประสิทธิภาพในการทำงานที่สูงและราคาถูก

2.2 กระบวนการไหลระดับไมโคร (Microfluid Process)

เทคโนโลยีขบวนการระดับไมโคร คือวิทยาศาสตร์หนึ่งที่ศึกษาพฤติกรรมทางกายภาพ และทางเคมีของกระบวนการในปริมาตรเล็ก ๆ โดยทั่วไปจะอยู่ในช่อง (Channel) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร หรือในโครงสร้างอื่น ๆ ที่มีขนาดน้อยกว่า 10^{-3} เมตร กระบวนการนี้มีลักษณะการไหลแบบต่อเนื่อง ความได้เปรียบของโครงสร้างระดับไมโคร คือ การที่ทำให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมาก และทำให้การถ่ายเทมวลสูงขึ้นด้วย ตัวอย่างเช่น ที่สเกลความยาวของการแพร่ธรรมดา (Diffusion Processes) เทียบกับท่อไมครอน (Microchannel) แบบ Microscale จะมีความยาวสั้นกว่าและผสมกันได้ดีกว่าในเวลาอันสั้น (ในหน่วยมิลลิวินาที) คุณสมบัติของการถ่ายเทความร้อนที่ดีควรควบคุมอุณหภูมิของปฏิกิริยาให้ค่าแน่นอน เช่น ในปฏิกิริยาคายความร้อนสูงๆจะมีพฤติกรรมเป็น Isothermal เมื่ออยู่ในระบบ Microstructured Reactors แต่ถ้ามีปริมาณของของไหลที่เย็นในปริมาณมากก็อาจทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงได้แม้ว่าส่วนใหญ่งานวิจัยจะมุ่งเน้นไปที่การประยุกต์ในการวิเคราะห์ แต่ก็มีการเพิ่มความสนใจในการทำ Chemical on a Chip ด้วย เพื่อประยุกต์ใช้กับการทดลองทำปฏิกิริยาที่มีจำนวนมากและ/หรือหลายๆ สภาวะ (Condition) แต่ใช้สารตั้งต้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการทำปฏิกิริยาในแบบดั้งเดิม ด้วยข้อได้เปรียบในหลายด้านนี้ ทำให้การศึกษาทางด้าน Micro Process มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน

2.3 การต่อวัสดุ (Joining of Materials)

การต่อวัสดุ คือ การนำวัสดุตั้งแต่สองชิ้นหรือมากกว่ามาต่อให้ติดกัน ซึ่งส่วนใหญ่จะนิยมใช้ในการต่อโลหะ โดยปกติการเชื่อมต่อวัสดุจะใช้วิธีที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการหลอมละลาย และเพิ่มเนื้อโลหะเติมลงในแอ่งหลอมละลายของวัสดุที่หลอมเหลว เมื่อเย็นตัวรอยต่อจะมีความแข็งแรง บางครั้งใช้ความดันร่วมกับความร้อน หรือใช้อย่างเดียวเพื่อให้เกิดรอยเชื่อม ซึ่งตรงข้ามกับการบัดกรีอ่อนและการบัดกรีแข็ง ซึ่งชิ้นงานจะไม่เกิดการหลอมละลาย โดยทั่วไปมีแหล่งพลังงานหลายอย่างสำหรับนำมาใช้ในกระบวนการเชื่อม เช่น การใช้ความร้อนจากเปลวแก๊ส การอาร์คโดยการใช้อิทธิพลของกระแสไฟฟ้า ลำแสงเลเซอร์ การใช้อิเล็กตรอน การเสียดทาน การใช้คลื่นเสียง เป็นต้น โดยกระบวนการต่อวัสดุจะมีอยู่จำนวนมากเมื่อนำมาจัดเข้ากลุ่มใหญ่ ๆ สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กระบวนการ คือ การเชื่อม (Welding) การบัดกรี (Soldering) การเล่นประสาน (Brazing) และการต่อยึดทางกล (Fasteners) [7]

2.3.1 การเชื่อม (Welding)

การเชื่อมเป็นกระบวนการที่ทำให้ตัวของชิ้นงานบริเวณรอยต่อหลอมติดกัน หรือ อาจจะเติมวัสดุประสานในระหว่างรอยต่อของงานเชื่อมเพื่อให้ตัวชิ้นงานนั้นติดกัน ที่พบบ่อยใน กระบวนการผลิตทั่วไปนั้น การเชื่อมจะอาศัยอุณหภูมิ (ในบางประเภทจะใช้ความดันร่วมด้วย) มาใช้ในการทำให้วัสดุเกิดการหลอมละลายที่บริเวณรอยต่อ โดยการเชื่อมทั่วไป สามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท ใหญ่ๆ คือ

1. การเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion) ใช้ความร้อนในการทำให้วัสดุหลอมละลายที่ บริเวณจุดเชื่อม ซึ่งทำให้เกิดการเชื่อมประสานเมื่อเย็นตัวลง
2. การเชื่อมแบบไม่เปลี่ยนสถานะ (Solid State) ใช้ความดันและความร้อนที่จะทำให้เกิดการเชื่อมประสานโดยไม่เกิดการหลอมละลายของวัสดุ

2.3.2 การบัดกรีและการแล่นประสาน

การบัดกรีจัดอยู่ในกระบวนการเชื่อมในสภาวะของแข็งเป็นการเชื่อมวัสดุให้เป็นชิ้น เดียวกันโดยใช้ความร้อนและความดันพร้อม ๆ กัน หรือใช้ความดันเพียงอย่างเดียว ถ้ามีการใช้ความร้อน อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมจะต้องต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะที่เชื่อมโดยปกติแล้วจะไม่มีการใช้ โลหะเติมในการเชื่อมในสภาวะของแข็งประเภทต่าง ๆ

2.3.2.1 การบัดกรี (Soldering) [8]

การบัดกรี คือ กรรมวิธีการต่อโลหะตั้งแต่สองชิ้นหรือมากกว่าเข้าด้วยกัน โดยที่โลหะนั้น จะเป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ ซึ่งเป็นการให้ความร้อนแก่รอยต่อที่อุณหภูมิต่ำกว่า 450°C ใช้ โลหะเติมที่เป็นโลหะที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ เช่น ตะกั่วหรือดีบุกเติมลงไปที่ยูรอยต่อของชิ้นงาน โลหะ เติมนี้จะหลอมละลายและแทรกตัวซึมเข้าไปในช่องว่างระหว่างรอยต่อด้วยปฏิกิริยาคาปิลลารี (Capillary Reaction) ในขั้นตอนการทำให้เย็น การบัดกรีจะสามารถต้านทานการขยายตัว การบิดตัวและการงอตัว โดยไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ต่อรอยต่อบัดกรี เมื่อเวลาผ่านไปและอยู่ภายใต้สภาพที่การบัดกรี จะถูกใช้งาน เช่น ความดันอากาศ อุณหภูมิ เป็นต้น ลักษณะงานที่ใช้การต่อโลหะด้วยการบัดกรีอ่อนได้แก่ งานที่บัดกรีท่อทองแดงสำหรับงานแรงดันต่ำ งานที่มีอุณหภูมิการใช้งานไม่เกิน 200 – 300 องศาเซลเซียส หรืองานบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ติดกับแผ่นวงจรพิมพ์ จากที่ได้กล่าวมาแล้วเพื่อให้เป็นที่เข้าใจมาก ยิ่งขึ้น อาจจะพอสรุปได้ว่าจุดสังเกตของการบัดกรีที่ต่างจากการเชื่อม คือโลหะที่นำมาประสานรอยต่อ อุณหภูมิการปฏิบัติงานรวมทั้งลักษณะการประสานของรอยต่อ เมื่อเรานำชิ้นงานที่ได้จากการบัดกรีมาตัด ในแนวขวางของรอยต่อจะเห็นได้ชัดเจนว่าในการต่อโลหะด้วยวิธีการบัดกรีนั้นโลหะหนักจะไม่หลอม ละลาย ซึ่งมีวิธีการบัดกรีแบบต่างๆ เช่น

1. การบัดกรีด้วยมือ (Hand Soldering) วิธีนี้จะอาศัยแหล่งพลังงานความร้อนจากปืนบัดกรีหรือหัวแร้งบัดกรี เพื่อให้ความร้อนกับโลหะบัดกรีที่อยู่ในรูปแบบลวด (Solder Wire) วิธีนี้เหมาะกับการบัดกรีซ่อมแซมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

2. การบัดกรีแบบคลื่น (Wave Soldering) เป็นการบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ หรือแผ่นบอร์ด (Printed Circuit Board; PCB) โดยที่แผ่นวงจรพิมพ์ที่มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ติดอยู่เคลื่อนที่ไปบนอ่างของโลหะบัดกรีเหลว และของเหลวดังกล่าวจะถูกดูดและพันไปยังด้านล่างของแผ่นวงจรพิมพ์เพื่อให้โลหะบัดกรีเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ากับวงจร

3. การบัดกรีแบบรีโฟลว์ (Reflow Soldering) โดยทั่วไปจะใช้ในการบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดติดตั้งบนพื้นผิว (Surface Mount Components) กับแผ่นวงจรพิมพ์ในกระบวนการนี้ใช้โลหะบัดกรีที่อยู่ในรูปของครีม (Paste) โดยโลหะบัดกรีจะผสมกับฟลักซ์และตัวยึด (Binder) ซึ่งจะถูกสกรีนลงบนตำแหน่งที่ต้องการ

2.3.2.2 การเล่นประสาน (Brazing) [9]

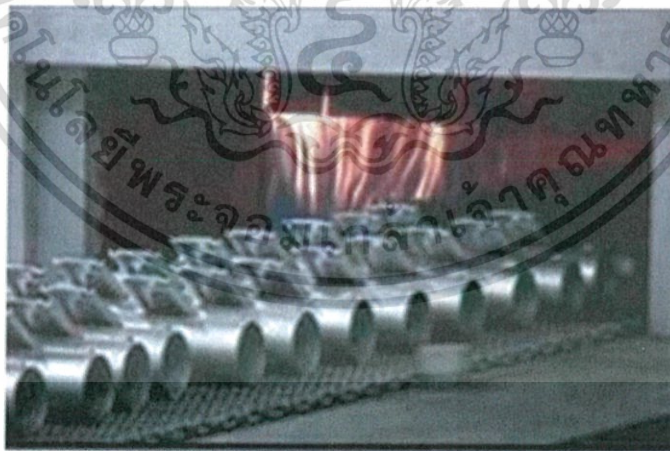
การเล่นประสานหรือการบัดกรีแข็งคือ กรรมวิธีการต่อโลหะตั้งแต่สองชิ้นหรือมากกว่าเข้าด้วยกันซึ่งโลหะนั้นจะเป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ โดยการให้ความร้อนแก่รอยต่อที่อุณหภูมิสูงกว่า 450°C แต่ไม่ถึงกับอุณหภูมิหลอมละลายของโลหะหลักที่นำมาเล่นประสาน วิธีนี้ใช้โลหะเติมที่เป็นโลหะที่ไม่อยู่ในจำพวกเหล็ก เช่น ลวดเงินหรืออาจเป็นโลหะผสม เช่น ลวดทองเหลือง ลวดทองแดงผสมฟอสฟอรัสก็ได้ ซึ่งโลหะเติมจะเป็นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า 450 องศาเซลเซียสแต่ต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะที่นำมาทำการเล่นประสานโลหะเติมลงจะถูกเติมลงไปที่ยรอยต่อของชิ้นงาน โดยโลหะเติมที่หลอมละลายจะแทรกตัวซึมเข้าไปในช่องว่างระหว่างรอยต่อด้วยปฏิกิริยาแคปิลารี ซึ่งข้อดีในการเล่นประสาน คือ สามารถทำได้รวดเร็ว สามารถต่อโลหะต่างชนิดและความหนาเข้าด้วยกันได้ แต่มีข้อควรระวังที่ต้องคำนึงถึงในเรื่องฟลักซ์ที่ใช้ เพราะสารเคมีอาจมีอันตรายต่อร่างกาย จึงควรทำการเล่นประสานในที่อากาศถ่ายเทสะดวกลักษณะงานที่ใช้การต่อโลหะด้วยการเล่นประสาน ได้แก่ งานต่อคมตัดคาร์ไบด์ติดกับด้านมีด งานต่อท่อทองแดงในระบบเครื่องทำความเย็นหรืองานเชื่อมต่อท่ออะลูมิเนียมบาง ๆ เป็นต้น ข้อดีของการเล่นประสาน ได้แก่ ได้รับความร้อนที่ต่ำและไม่ต้องตกแต่งภายหลังการเชื่อม ใช้ความร้อนต่ำ ลดการเปลี่ยนรูปของโลหะชิ้นงาน ไม่มีประกายไฟและและการกระเด็นของเม็ดโลหะขณะทำการเล่นประสาน สำหรับชิ้นงานที่ต้องการตกแต่งภายหลังการเชื่อมก็ตกแต่งได้ไม่ยาก ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการต่อยึดชิ้นงาน และที่สำคัญสามารถต่อวัสดุต่างชนิดที่ยากแก่การเชื่อมด้วยวิธีอื่น ๆ ได้

ในกระบวนการเล่นประสาน เมื่อพิจารณาตามวิธีการให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน สามารถแบ่งกระบวนการเล่นประสานดังต่อไปนี้ การเล่นประสานโดยใช้ทอร์ชเชื่อม (Torch Brazing) การเล่นประสานในเตา (Furnace Brazing) การเล่นประสานโดยการเหนี่ยวนำ (Induction Brazing) การเล่น

ประสานด้วยความต้านทาน (Resistance Brazing) การเล่นประสานด้วยการจุ่ม (Dip Brazing) และการเล่นประสานด้วยอินฟราเรด (Infrared Brazing) [10]

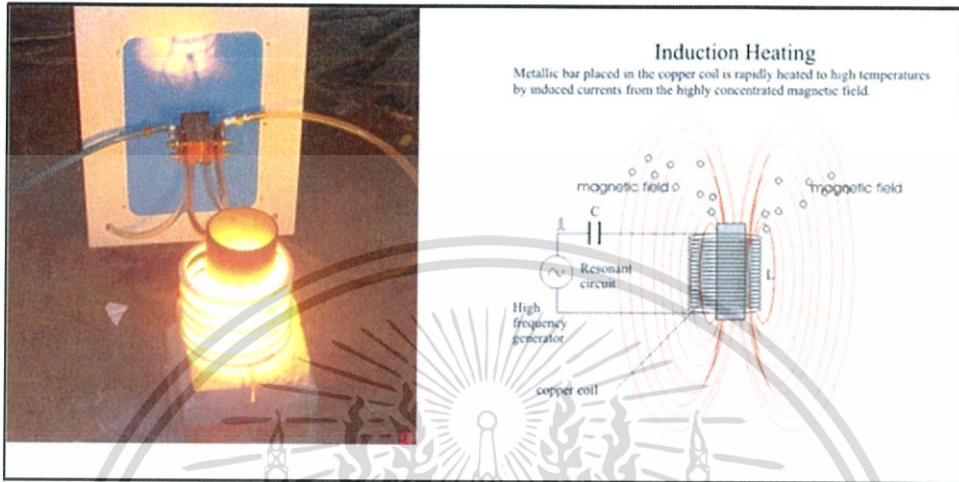
1. การเล่นประสานโดยใช้ทอร์ชเชื่อม (Torch Brazing) เป็นการเล่นประสานโดยใช้หัวทอร์ชเชื่อมหัวเดียวหรือหลายหัวเผาชิ้นงานให้ร้อน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและปริมาณความร้อนที่ต้องการ และก๊าซที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง ได้แก่ อะเซทิลีน โพรเพน และก๊าซหุงต้มทั่วไป

2. การเล่นประสานในเตา (Furnace Brazing) วิธีนี้เป็นการประสานงานที่สามารถวางประกอบกันได้ง่าย โดยวางบนสายพานเติมโลหะเติม และฟลักซ์ไว้ที่รอยต่อแล้วให้สายพานจะเคลื่อนพาชิ้นงานผ่านเข้าไปในเตาโดยที่งานจะเล่นประสานจนเสร็จสิ้นเมื่อเคลื่อนออกจากเตา การเล่นประสานแบบนี้เหมาะสมกับงานที่ต้องการผลผลิตจำนวนมาก ส่วนโลหะเติมที่เติมบนรอยต่ออาจเป็นชนิดเส้น แผ่น บาง ผง ก้อนขนาดเล็กหรือ คริม เป็นต้น เตาที่ใช้ให้ความร้อนแก่งานเพื่อให้เกิดการเล่นประสาน ส่วนใหญ่จะเป็นเตาที่ควบคุมบรรยากาศให้เป็นแก๊สรีดิวซิ่ง เช่น ไฮโดรเจน แก๊สเอ็กโซเทอร์มิก หรือเป็นแก๊สเฉื่อย เช่น อาร์กอน หรือฮีเลียม ถ้าเป็นเตาขนาดใหญ่มักนิยมใช้แบบสุญญากาศเพื่อป้องกันออกซิเดชัน บางครั้งไม่ต้องใช้ฟลักซ์ เตาสุญญากาศเหมาะกับการเล่นประสานงานที่ใช้กับอากาศยานหรืออุปกรณ์นิวเคลียร์ ถ้าคงสภาวะสุญญากาศโดยใช้ปั๊มสุบอากาศออกอย่างต่อเนื่อง สารต่าง ๆ ที่ระเหยขณะเล่นประสานจะถูกดูดออกไปด้วย อย่างไรก็ตามโลหะงานหรือโลหะเติมหลายชนิดไม่เหมาะสมกับเล่นประสานในเตาสุญญากาศ เพราะอาจสูญเสียสารหรือธาตุผสมที่มีจุดเดือดต่ำหรือความดันไอสูงไป ตัวอย่างการเล่นประสานในเตาแสดงดังรูปที่ 2.1



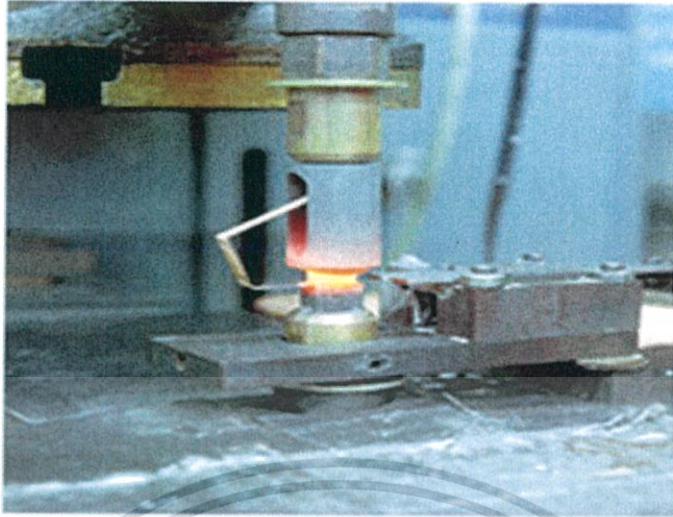
รูปที่ 2.1 การเล่นประสานในเตาของอัลลอย [10]

3. การลั่นประสานโดยการเหนี่ยวนำ (Induction Brazing) เป็นกระบวนการลั่นประสานแบบอาศัยกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำงานจนเกิดความร้อนสูงพอที่จะทำให้โลหะเติมละลาย โดยจะวางงานที่ต้องการลั่นประสานไว้ใกล้กับขดลวดเหนี่ยวนำ แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การลั่นประสานเหนี่ยวนำ [10]

4. การลั่นประสานด้วยความต้านทาน เป็นการลั่นประสานโดยอาศัยความร้อนจากการต้านทานไฟฟ้าของโลหะงาน โดยงานจะเป็นส่วนหนึ่งของวงจรไฟฟ้าส่วนโลหะเติมควรเติมก่อนที่จะลั่นประสานและใช้ฟลักซ์เสมอ นอกจากจะควบคุมบรรยากาศ เมื่อจะลั่นประสานให้วางงานระหว่างแท่งอิเล็กโทรด (2 แท่ง) และกตอิเล็กโทรดเข้ากับชิ้นงานพร้อมกับปล่อยกระแสไฟในขณะเดียวกันซึ่งเมื่อกระแสไหลผ่านงานจะทำให้ร้อนต่อร้อน (เนื่องจากความต้านทาน) โลหะเติมจะละลายและไหลเข้าตามซอกผิวสัมผัส และต้องให้อิเล็กโทรดกดงานอยู่จนกว่าโลหะเติมจะแข็งตัว สำหรับการลั่นประสานด้วยวิธีนี้จะแสดงตัวอย่างดังรูปที่ 2.3



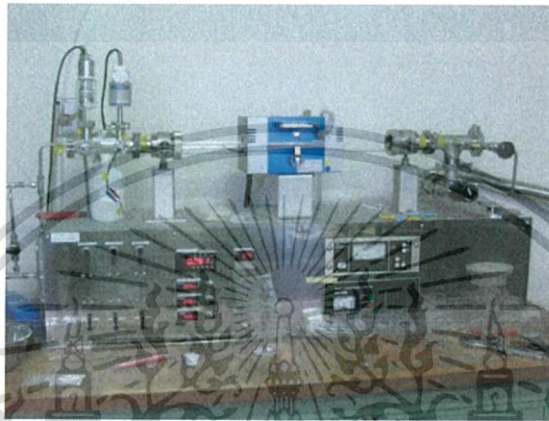
รูปที่ 2.3 การเล่นประสานต้านทาน [10]

5. การเล่นประสานแบบการจุ่มในน้ำยาสารเคมี (Chemical Bath Dip Brazing) โดยเติมโลหะเติมบนรอยต่อแล้วจุ่มงานลงในเกลือเหลว เกลือจะเป็นตัวให้ความร้อนแก่งานและโลหะเติมช่วยป้องกันงานจากออกซิเจน ซึ่งอาจไม่ต้องใช้ฟลักซ์ ภาชนะบรรจุเกลืออาจเป็นเบ้าหรือหม้อที่เหมาะสมจุ่มในโลหะเหลว (Molten Metal Bath Brazing) โดยจุ่มงานลงในโลหะเติมซึ่งหลอมเหลวบรรจุอยู่ในเบ้าหรือที่เหมาะสม ที่สำคัญคืองานต้องสะอาดและต้องใช้ฟลักซ์คลุมผิวโลหะเติมเหลวตลอดเวลาเพื่อป้องกันออกซิเจนแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การเล่นประสานแบบจุ่ม [10]

6. การเล่นประสานด้วยอินฟราเรด (Infrared Brazing) เป็นการประสานโดยอาศัยความร้อนอินฟราเรด (Infrared Heat) ซึ่งแผ่รังสีออกจากรังสีสีแดงในสเปกตรัมหลอดไฟที่เป็นแหล่งความร้อนในการเล่นประสานเรียกว่า Quartz Lamp มีถึงขนาด 5,000 วัตต์ หลอดไม่จำเป็นต้องมีรูปร่างตามลักษณะงาน แต่อาจใช้วิธีสะท้อนความร้อนให้ไปรวมตัวที่จุดหนึ่งตามต้องการ งานที่จะเล่นประสานต้องประกอบและอยู่ในตำแหน่งที่สามารถรับความร้อนได้ดีแสดงตัวอย่างดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การเล่นประสานอินฟราเรด [10]

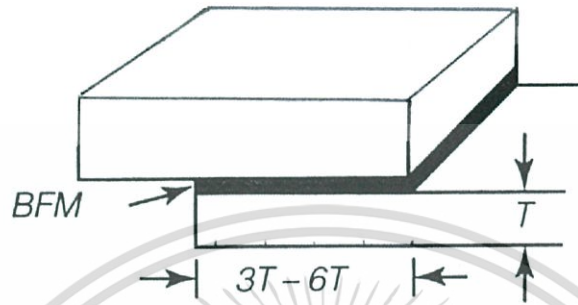
บางครั้งจะวางงานและหลอดไฟให้ความร้อนไว้ในภาชนะที่สามารถสูบล้ออากาศออกได้ (เพื่อทำให้เป็นสุญญากาศขณะเล่นประสาน) หรือสามารถควบคุมบรรยากาศ (อาจใช้แก๊สเฉื่อย) หลังจากนั้นจึงเริ่มให้ความร้อนแก่งานจนถึงอุณหภูมิบัดกรี

ชนิดของรอยต่อในการเล่นประสาน

ในการต่อวัสดุ มีรอยต่อแบบต่าง ๆ ได้แก่ รอยต่อชน รอยต่อมุม รอยต่อขอบ รอยต่อเกลย และรอยต่อตัวที่ แสดงลักษณะรอยต่อต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.8

1. รอยต่อชน (Butt Joint) เป็นการนำขอบชิ้นงานทั้งสองชิ้นมาชนกัน โดยผิวของงานทั้งสองอยู่ในระนาบเดียวกัน ลักษณะของการต่อชนแบ่งออกเป็นหลายแบบขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงาน เช่น ต่อชนไม่เว้นช่องว่าง ต่อชนไม่บากงาน และต่อชนรูปตัววี เป็นต้น
2. รอยต่อมุม (Conner Joint) เป็นการนำขอบชิ้นงานสองชิ้นมาชนกันโดยผิวของชิ้นงานทั้งสองทำมุมประมาณ 90 องศา (จะมากกว่าหรือน้อยกว่าก็ได้)
3. รอยต่อขอบ (Edge Joint) เป็นการนำขอบชิ้นงานทั้งสองมาชนกันในลักษณะผิวของชิ้นงานทั้งสองมาทาบกันแนบชิด ทำให้ขอบของงานทั้งสองชิดกันและขนานกันตลอดแนว

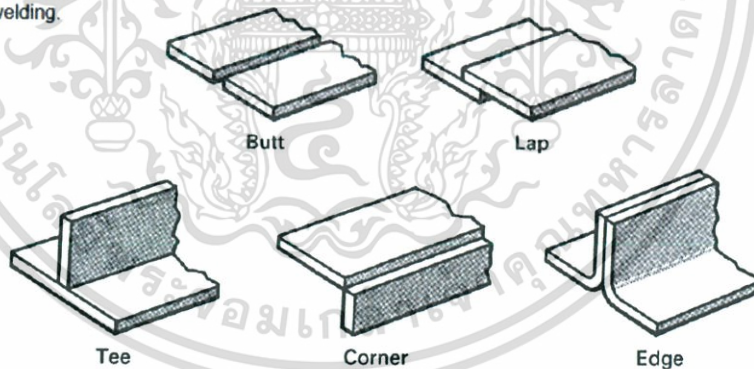
4. รอยต่อเกลย (Lap Joint) เป็นวิธีการนำชิ้นงานสองชิ้นมาวางซ้อนกันหรือเกลยกัน (ในกรณีของกระบวนการเล่นประสานควรระยะต่อเกลย (Overlap) 3-6 เท่าของความหนาชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างระยะต่อเกลยของกระบวนการเล่นประสาน[11]

5. รอยต่อตัวที (Tee Joint) เป็นการนำขอบของชิ้นงานชิ้นหนึ่งตั้งบนผิวชิ้นงานอีกชิ้น มีลักษณะเป็นรูปตัวที

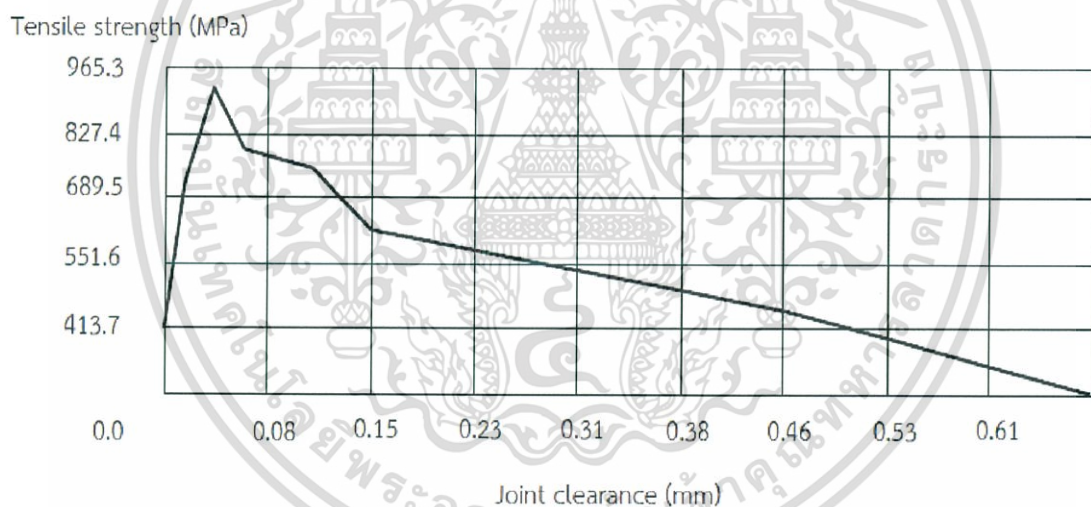
Five basic joint designs for fusion welding.



รูปที่ 2.7 ลักษณะของรอยต่อแบบต่าง ๆ [7]

ระยะระหว่างชิ้นงานในการแล่นประสาน

โดยทั่วไปแล้วรอยต่อระหว่างชิ้นงานที่ทำการแล่นประสานมีอยู่ 2 แบบด้วยกัน คือ รอยต่อชน (Butt Joint) และรอยต่อเกย (Lap Joint) ซึ่งระยะห่างระหว่างชิ้นงาน (Clearance) เป็นสิ่งสำคัญในการแล่นประสาน เนื่องจากเป็นสิ่งที่ทำให้เกิดแรงดึงตามรูเล็กระหว่างโลหะเติมที่กำลังหลอมเหลวกับตัวชิ้นงาน ระยะห่างระหว่างชิ้นงานจะต้องไม่น้อยเกินไปจนทำให้โลหะไม่สามารถไหลเข้าไปในรอย ต่อได้อย่างทั่วไป และระยะห่างระหว่างชิ้นงานจะต้องไม่มากเกินไปจะทำให้แรงดึงตามรูเล็กน้อยลงจนกระทั่งไม่สามารถที่จะอุดโลหะเติมเข้าไปบรรจุในรอยต่อได้จนเต็ม รูปที่ 2.8 แสดงอิทธิพลของระยะห่างระหว่างชิ้นงานต่อความต้านแรงดึงของรอยต่อแบบต่อชนที่เกิดจากการแล่นประสานด้วยระยะห่างระหว่างชิ้นงานต่าง ๆ กัน ในการแล่นประสานจะมีช่วงระยะห่างระหว่างชิ้นงานที่เหมาะสม (Optimum Clearance) ที่ทำให้ได้รอยประสานที่แข็งแรงที่สุด ซึ่งระยะห่างระหว่างชิ้นงานเหมาะสมนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยคือ ชนิดของวัสดุชิ้นงานและโลหะเติม ลักษณะของรอยต่อและเงื่อนไขในการแล่นประสาน เช่น อุณหภูมิในการแล่นประสาน [7]



รูปที่ 2.8 อิทธิพลระยะห่างระหว่างชิ้นงานต่อความแข็งแรงของรอยต่อ [8]

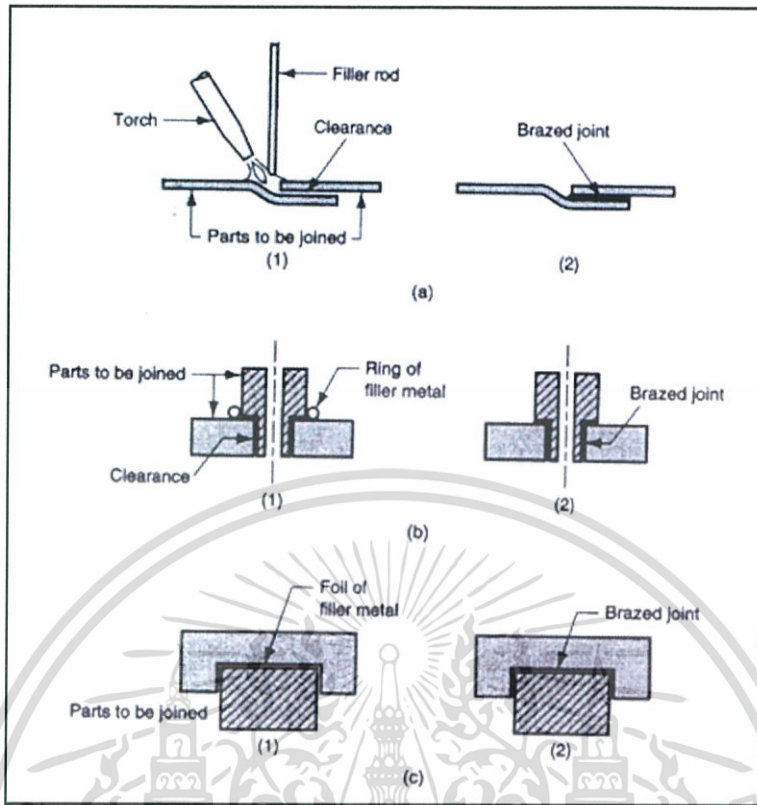
ในการแล่นประสานยังมีปัจจัยที่สำคัญมากอยู่อีกปัจจัยหนึ่งคือ ความสะอาดของผิวชิ้นงาน โดยผิวชิ้นงานที่จะแล่นประสานจะต้องปราศจากออกไซด์ (Oxide) น้ำมันหรือสิ่งเจือปนอย่างอื่นซึ่งผิว ชิ้นงานที่สะอาดจะทำให้โลหะเติมกระจายติดกับผิวชิ้นงานได้ดีและแรงดึงตามรูเล็กก็เกิดขึ้นได้ดีเช่นกัน นอกจากนี้การแล่นประสานก็จะเกิดขึ้นอย่างทั่วถึงบนผิวของชิ้นงาน การทำความสะอาดผิวชิ้นงานสามารถทำได้ทั้งวิธีทางเคมีและวิธีทางกลโดยจะใช้ฟลักซ์ (Flux) รักษาความสะอาดของผิวชิ้นงานไว้ทั้งหลังจากทำความสะอาดและระหว่างการแล่นประสาน นอกจากนี้ฟลักซ์ยังช่วยให้โลหะเติมกระจายติดกับผิวชิ้นงานได้ดีและเกิดแรงดึงตามรูเล็กได้ดี

ฟลักซ์สำหรับการแล่นประสาน (Fluxes for Brazing)

ฟลักซ์ทำหน้าที่กำจัดหรือป้องกันการเกิดออกไซด์หรือสารเคมีอื่น ๆ ที่ไม่ต้องการที่สามารถเกิดขึ้นได้ในระหว่างการแล่นประสาน โดยที่ลักษณะของฟลักซ์ที่ดีคือ มีจุดหลอมเหลวต่ำ มีความหนืดต่ำ สามารถทำให้โลหะเติมกระจายตัวบนชิ้นงานได้ดีขึ้น และปกป้องรอยแล่นประสานจนกระทั่งการแข็งตัวของโลหะเติมเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ และง่ายต่อการกำจัดออกไปหลังจากทำการแล่นประสานเสร็จเรียบร้อยแล้ว ในฟลักซ์มีองค์ประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่ง คือ สารลดแรงตึงผิว ซึ่งทำหน้าที่ลดแรงตึงผิวของโลหะเติมขณะที่อยู่ในสภาพของเหลว โดยทั่วไปแล้วฟลักซ์สามารถพบได้ในหลายรูปแบบ เช่น เป็นผง เป็นครีม หรือเป็นสารละลาย นอกจากนี้ในการแล่นประสานสามารถใช้วิธีการอื่นแทนการใช้ฟลักซ์ได้เช่นเดียวกัน เช่น การแล่นประสานในเตาสุญญากาศหรือในบรรยากาศของแก๊สเฉื่อย

โลหะเติม (Filler Metal)

โลหะเติมที่ใช้ในการแล่นประสานมีอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งการเลือกใช้โลหะเติมจะต้องเลือกให้เหมาะสมกับวัสดุชิ้นงาน นอกจากนี้จุดหลอมเหลวของโลหะเติมที่ใช้จะต้องไม่สูงกว่าจุดหลอมเหลวของวัสดุงาน เมื่อโลหะเติมอยู่ในสถานะของเหลวจะต้องมีค่าแรงตึงผิวต่ำเพื่อให้มีการกระจายตัว (Wettability) ที่ดีบนผิว มีความสามารถในการไหล (Fluidity) สูง ซึ่งทำให้โลหะเติมไหลเข้าไปในรอยต่อได้ดีและให้ความแข็งแรงของรอยต่อที่เหมาะสมกับการใช้งาน นอกจากนี้โลหะเติมที่ใช้ต้องไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมีหรือทางกายภาพกับชิ้นงาน เช่น การเกิดการกัดกร่อน สำหรับโลหะเติมที่ใช้ในการแล่นประสานนั้นมีหลายรูปแบบ เช่น เป็นแท่งโลหะ เป็นแผ่นโลหะ อยู่ในรูปครีม (Paste) อยู่ในรูปผง (Powder) หรืออาจจะอยู่ในรูปแบบอื่น ๆ ที่เหมาะสมกับการใช้งาน [8]

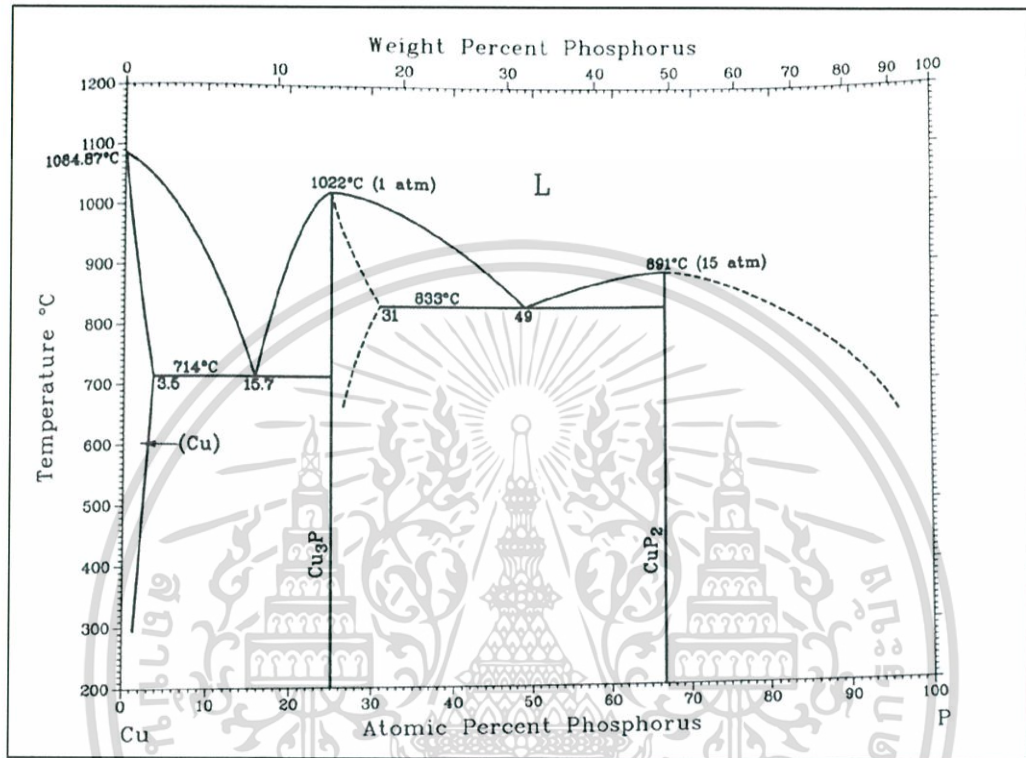


รูปที่ 2.9 การใช้งานโลหะเติมของการแล่นประสานในรูปแบบต่าง ๆ [8]

รูปที่ 2.9 แสดงการใช้งานโลหะเติมของการแล่นประสานในลักษณะรูปแบบต่าง ๆ โดยรูปที่ 2.10 (a) เป็นการแล่นประสานโดยใช้เปลวไฟทอร์ชเชื่อมและใช้โลหะเติมแบบแท่ง แต่สำหรับ 2.10 (b) เป็นการใช้โลหะเติมที่มีลักษณะเหมือนแหวนซึ่งเหมาะกับการแล่นประสานในเตาเช่นเดียวกับ 2.10 (c) ใช้โลหะเติมแบบแผ่นบาง

2.4 แผนภูมิเฟสของทองแดงและฟอสฟอรัส

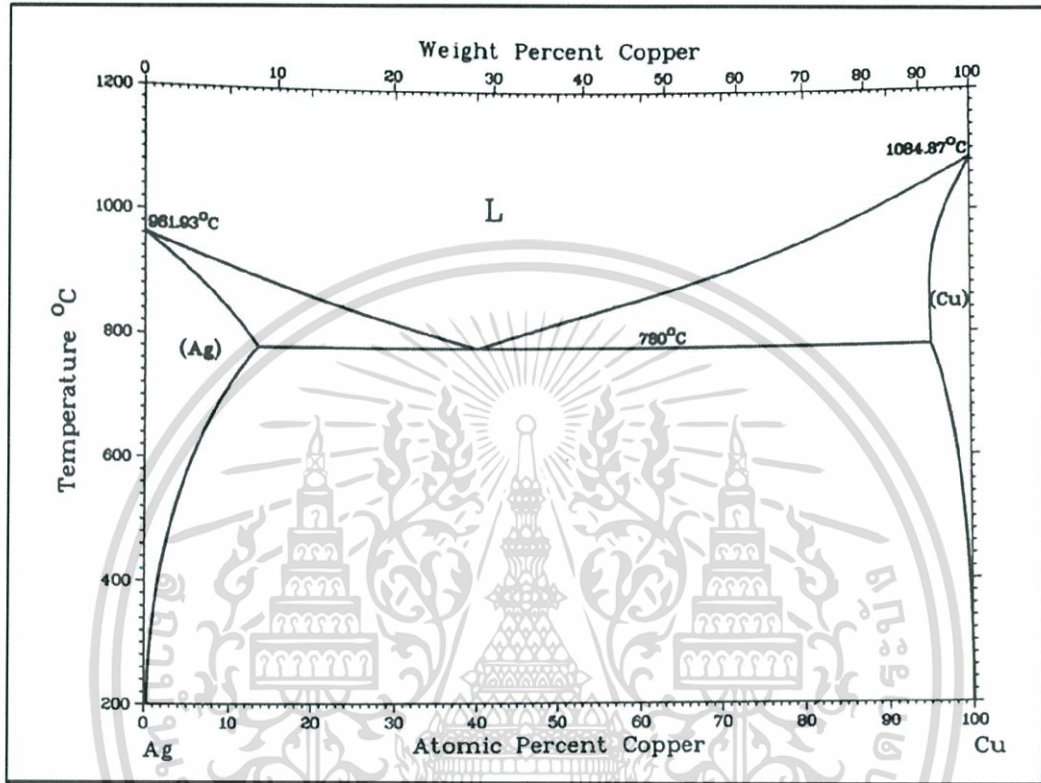
เป็นแผนภาพสมดุลระบบของธาตุระหว่างทองแดงและฟอสฟอรัส โดยแสดงการเกิดเฟสต่างๆระหว่างทองแดงและฟอสฟอรัส แสดงดังภาพที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แผนภูมิเฟสของทองแดงและฟอสฟอรัส [12]

2.5 แผนภูมิเฟสของเงินและทองแดง

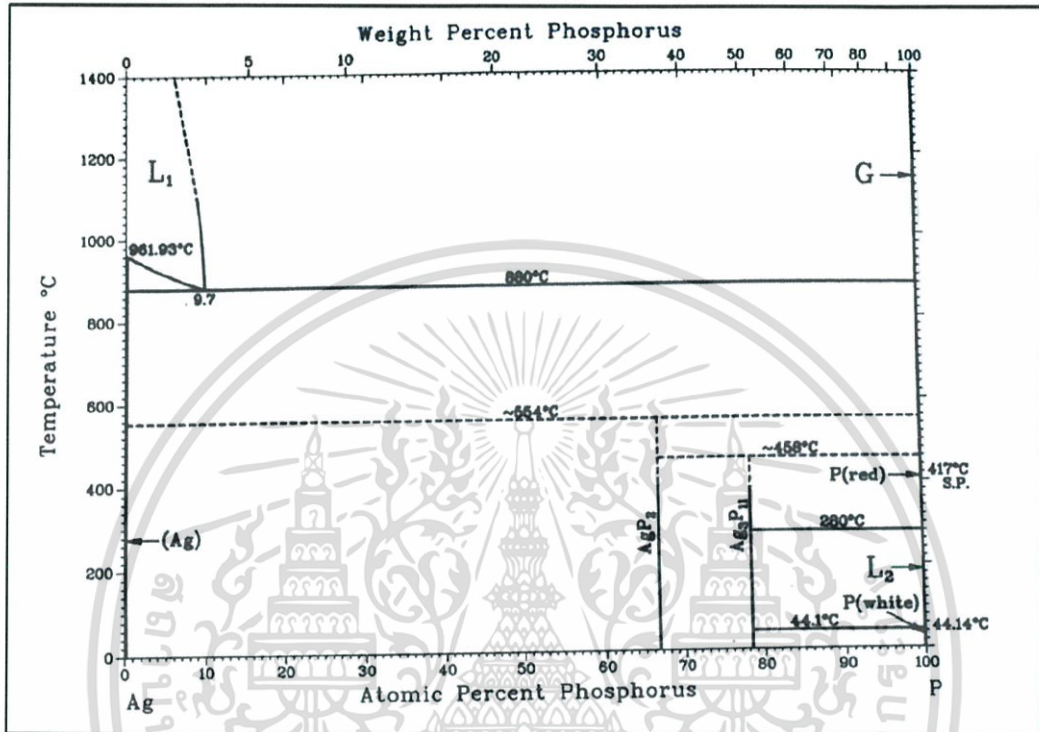
เป็นแผนภาพสมดุลระบบของธาตุระหว่างเงินและทองแดง โดยแสดงการเกิดเฟสต่างๆ ระหว่างเงินและทองแดง แสดงดังภาพที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แผนภูมิเฟสของเงินและทองแดง [13]

2.6 แผนภูมิเฟสของเงินและฟอสฟอรัส

เป็นแผนภาพสมดุลระบบของธาตุระหว่างเงินและฟอสฟอรัส โดยแสดงการเกิดเฟสต่างๆ ระหว่างเงินและฟอสฟอรัส แสดงดังภาพที่ 2.12

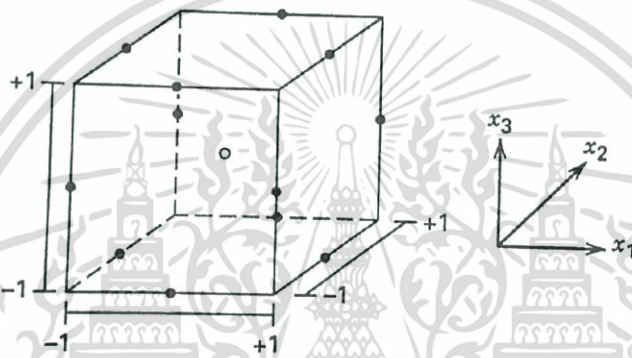


รูปที่ 2.12 แผนภูมิเฟสของเงินและฟอสฟอรัส [13]

2.7 การออกแบบการทดลองของบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) [14]

การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) เป็นการออกแบบสามระดับ สำหรับพิตพื้นผิวผลตอบ การออกแบบนี้ถูกสร้างขึ้นจากการรวมการออกแบบแฟกทอเรียล 2^k กับการออกแบบบล็อกไม่บริบูรณ์ ผลของการออกแบบมีประสิทธิภาพมากในด้านจำนวนของการรันที่ต้องการ และการออกแบบนี้ยังมีความสามารถในการหมุนหรือเกือบหมุนได้อีกด้วย

ตารางที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงการออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนที่มีตัวแปร 3 ตัวรูปทางเรขาคณิตของการออกแบบแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.13 สังเกตว่า การออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนเป็นการออกแบบรูปทรงกรมที่ทุกจุดวางอยู่บนรูปทรงกลมรัศมี $\sqrt{2}$ นอกจากนี้ การออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนไม่ได้รวมเอาจุดใด ๆ ที่เป็นจุดยอดของรูปบาศก์ที่สร้างขึ้นจากขีดจำกัดบนและล่างของแต่ละตัวแปรเอาไว้ การกระทำเช่นนี้เป็นประโยชน์อย่างมากเมื่อทุกจุดที่อยู่บนมุมของลูกบาศก์ คือ การรวมของปัจจัยระดับ (Factor-Level Combination) ที่แพงมากหรือเป็นไปได้ที่จะทำการทดลองเนื่องจากข้อจำกัดในด้านทางกายภาพของกระบวนการ



รูปที่ 2.13 การออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนสำหรับสามตัวแปร [14]

ตารางที่ 2.1 การออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนแบบสามตัวแปร [14]

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

2.7.1 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Analysis of Coefficient of Determination) [14]

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination; R^2) เป็นค่าที่ใช้สำหรับอธิบายความสามารถของสมการถดถอยหรือตัวแปรอิสระในสมการถดถอยว่าสามารถจะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าตอบสนองหรือตัวแปร (y) ได้ในสัดส่วนเท่าใด ดังนั้นค่า R^2 ยิ่งยากสมการก็ยิ่งมีความเหมาะสมมาก โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ความแปรปรวนแยกความแปรปรวนของตั้งแปรตาม y เนื่องจากค่าประมาณความแปรปรวนของ y คือ

$$S_y^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n-1} \text{ หรือ } S_y^2 \propto \sum (y_i - \bar{y})^2 \quad (2.1)$$

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

$$\sum (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n ((y_i - \hat{y}_i) + (\hat{y}_i - \bar{y}))^2$$

$$\sum (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 + \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (2.2)$$

LHS เรียกว่า Sum Total of Y หรือ

$$SST = \sum (y_i - \bar{y})^2 \quad (2.3)$$

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 [14]

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

$$SS_{\text{Regr}} = \hat{\beta}_1 s_{xy} \text{ (กรณีสมการเส้นตรงคงรูป)}$$

ดังนั้น

$$SSE = SST - SS_{\text{Regr}} \quad (2.4)$$

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

$$MSE = \frac{SSE}{\text{d.f.}_E} = \frac{SSE}{n-p} S^2 \quad (2.5)$$

สำหรับสมการเต็มรูป จะสรุปได้ว่า

$$S^2 = MSE = \frac{s_{yy} - \hat{\beta}_1 s_{xy}}{n-1}; p=2 \Rightarrow (\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1) \quad (2.6)$$

ตัวสถิติ F ในตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนใช้ในการทดสอบสมมติต่อไปนี้ คือ

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

(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

$$R^2 = \frac{SS_{\text{Regr}}}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (2.7)$$

หรือ

$$R^2 = r^2$$

r = ค่าสัมประสิทธิ์สหพันธ์ (Correlation Coefficient)

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

โดยที่ r คือ ค่าที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างตัวแปร X และ Y นั้นเอง ในทางปฏิบัติ เนื่องจากค่า R^2 มีความในการเปลี่ยนแปลงกล่าวคือ เมื่อเพิ่มจำนวนตัวแปรอิสระในสมการ ค่า R^2 จะมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจจึงให้ค่า R^2 ที่ทำการปรับค่าแล้ว (R^2_{adj}) แทน

$$R^2_{\text{adj}} = 1 - \frac{MSE}{MST}; \quad MST = \frac{MST}{n-1} \quad (2.8)$$

ซึ่งอธิบายเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของ y ที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระในสมการถดถอยเช่นกัน

2.7.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) [14]

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking) เป็นวิธีการตรวจสอบที่ทำให้ทราบว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนมีความน่าเชื่อถือเป็นไปตามหลักการสถิติหรือไม่โดยอาศัยข้อสมมติฐานที่สำคัญซึ่งอธิบายได้โดยใช้แบบจำลองดังต่อไปนี้

$$y_{ij} = \mu + \tau_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (2.9)$$

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 $\varepsilon_{ij} \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$ ถ้าสมมติฐานเหล่านี้เป็นจริงกระบวนการวิเคราะห์ความแปรปรวนนี้จะเป็นการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับการไม่มีความแตกต่างในค่าเฉลี่ยของระดับที่ถูกต้อง

ในทางปฏิบัติสมมติฐานมักจะไม่เป็นเช่นนั้น ซึ่งจะเชื่อถือผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ก็ต่อเมื่อสามารถตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานว่าเป็นจริงเสียก่อน โดยสามารถตรวจสอบสมมติฐานขั้นต้นและความถูกต้องของแบบจำลองได้โดยการตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual) สำหรับค่าสังเกต j ของระดับที่ i ส่วนตกค้างจะมีค่าเป็น

$$e_{ij} = y_{ij} - \hat{y}_{ij} \quad (2.10)$$

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

$$\begin{aligned} \hat{y}_{ij} &= \hat{\mu} + \hat{\tau}_i \\ &= \bar{y}_{..} + (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..}) \\ &= \bar{y}_{i.} \end{aligned} \quad (2.11)$$

จากสมการประมาณของค่าสังเกตใด ๆ ในระดับที่ i ก็คือค่าเฉลี่ยของระดับนั้น ๆ ดังนั้น การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบมีอยู่ 3 ประเภท คือ

1. การตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลง่ายเป็นการกระจายแบบปกติหรือไม่ โดยนำ ส่วนตก ค้าง (Residual) ไปทดสอบโดยใช้วิธีดังต่อไปนี้

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

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

3. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูลทดสอบโดยใช้แผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) ระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual Plot) กับค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) ถ้าหากข้อมูลนั้นมีความเสถียรของความแปรปรวนหรือมีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวข้อมูล รูปที่พล็อตขึ้นมาจะกระจายอยู่ทั่วไป ไม่มีรูปแบบหรือโครงสร้างใด ๆ ทั้งสิ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นใด และทดสอบโดยใช้แผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) ระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับระดับของปัจจัยแต่ละปัจจัย ถ้าหากข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวนหรือมีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล รูปที่พล็อตขึ้นมาจะ มีลักษณะเป็นทรงกระบอก แต่ถ้ารูปที่พล็อตขึ้นมาเป็นการเพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นลำดับแสดง

2.8 แบบจำลองการถดถอย (The Regression Model)

เป็นการศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปรปัจจัยหรือตัวแปรอิสระ กับค่าตอบสนองหรือตัวแปรตามว่ามีความสัมพันธ์กันในลักษณะใด เพื่อประโยชน์ในด้านการพยากรณ์ค่าตัวแปรตาม โดยอาจกล่าวได้ว่าการออกแบบการทดลองเป็นส่วนหนึ่งของการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปร และมักใช้ร่วมกันเสมอ [15]

รูปแบบของการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้น แบ่งได้ 2 ลักษณะ ขึ้นกับตัวแปรอิสระ ดังนี้

1. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression Analysis) คือ การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ 1 ตัว กับตัวแปรตาม 1 ตัว เรียกสมการที่ 2.12 และ 2.13 ว่า สมการเส้นตรงเต็มรูปและสมการพหุนามอันดับสอง ตามลำดับ

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \epsilon \quad (2.12)$$

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 + \epsilon \quad (2.13)$$

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

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \epsilon \quad (2.14)$$

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_1 X_1^2 + \beta_2 X_2^2 + \epsilon \quad (2.15)$$

2.9 ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability function)

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 2.16

$$D(x) = [d_1(Y_1(x))d_2(Y_2(x))\dots d_m(Y_m(x))]^{\frac{1}{m}} \quad (2.16)$$

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

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

$$d_j = \begin{cases} 0 & \text{ถ้า } Y_j(x) \leq Y_{\min j} \\ \left(\frac{Y_j - Y_{\min j}}{Y_{\max j} - Y_{\min j}} \right)^r & \text{ถ้า } Y_{\min j}(x) \leq Y_j(x) \leq T_j \\ 1 & \text{ถ้า } Y_j(x) \geq T_j \end{cases} \quad (2.17)$$

$$d_j = \begin{cases} 1 & \text{ถ้า } Y_j(x) \leq T_j \\ \left(\frac{Y_{\max j} - Y_j}{Y_{\max j} - Y_{\min j}} \right)^r & \text{ถ้า } T_j(x) \leq Y_j(x) \leq Y_{\max j} \\ 0 & \text{ถ้า } Y_j(x) \geq Y_{\max j} \end{cases} \quad (2.18)$$

2. การเปลี่ยนแปลงแบบสองทิศทาง สำหรับกรณีที่ต้องการให้ค่าผลตอบมี 2 ค่า คือ ทั้งค่าน้อยที่สุดและค่ามากที่สุด ดังสมการที่ 2.19 โดยที่ค่า s, t, r เป็นค่าน้ำหนักที่กำหนดขึ้นและ m คือจำนวนผลตอบทั้งหมด

$$d_j = \begin{cases} \left(\frac{Y_j - Y_{\min j}}{Y_{\max j} - Y_{\min j}} \right)^s & \text{ถ้า } Y_{\min j}(x) \leq Y_j(x) \leq T_j \\ \left(\frac{Y_j - Y_{\max j}}{T_j - Y_{\max j}} \right)^t & \text{ถ้า } T_j(x) \leq Y_j(x) \leq Y_{\max j} \\ 0 & \end{cases} \quad (2.19)$$

2.10 ทฤษฎีการขาดของชิ้นงาน [16]

2.10.1 ความเค้น (Stress)

ความเค้น หมายถึง แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่เนื่องจากความไม่เหมาะสมทางปฏิบัติ และความยากในการวัดหาค่านี้ จึงมักจะพูดถึงความเค้นในรูปของแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ด้วยเหตุผลที่ว่าแรงที่มากระทำภายนอกมีความสมดุลกับแรงต้านทานภายใน การหาค่าความเค้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.20)$$

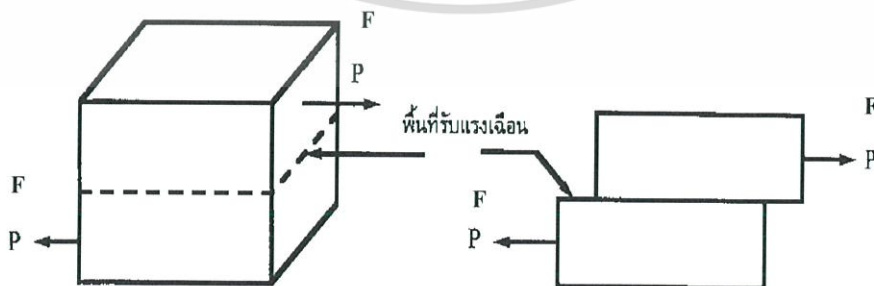
เมื่อ σ = ความเค้น (Stress) มีหน่วยเป็น (Pa, $1 \text{ Pa} = 1\text{N/m}^2$) หรือ kgf/mm^2 หรือ psi (lbf/in^2)

F = แรงภายนอกที่มากระทำ มีหน่วยเป็น N หรือ kgf หรือ lbf

A = พื้นที่ภาคตัดขวางที่แรงกระทำ m^2 หรือ mm^2 หรือ in^2

โดยทั่วไปความเค้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ตามลักษณะของแรงที่มากระทำ

1. ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึงมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง โดยพยายามจะแยกเนื้อวัสดุให้แยกขาดออกจากกัน
2. ความเค้นแรงอัด (Compressive Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อพยายามอัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลง
3. ความเค้นแรงเฉือน (Shear Stress) ใช้สัญลักษณ์ τ เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำให้ทิศทางขนานกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อให้วัสดุเคลื่อนผ่านจากกันดังรูปที่ 2.11 มีค่าเท่ากับแรงเฉือน (Shear force) หารด้วยพื้นที่ภาคตัดขวาง A ซึ่งขนานกับทิศทางของแรงเฉือน



รูปที่ 2.14 ลักษณะของแรงเฉือน [14]

2.10.2 ความเครียดและการเปลี่ยนรูป (Strain and Deformation)

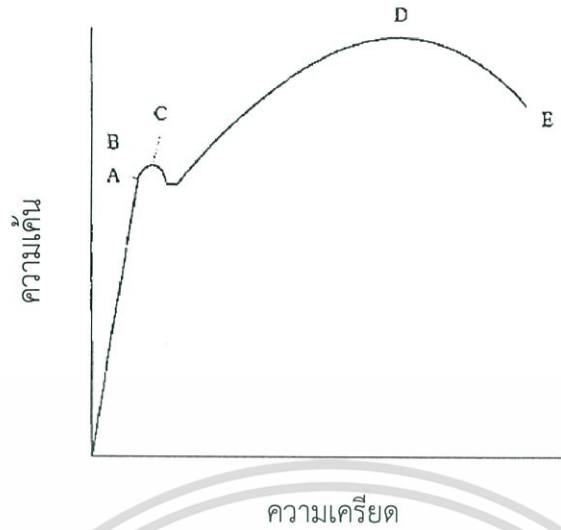
ความเครียด (Strain) คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (Deformation) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ (เกิดความเค้น) การเปลี่ยนรูปของวัสดุนี้เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ภายในเนื้อวัสดุ ลักษณะของมันสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ

1. การเปลี่ยนรูปแบบอิลาสติกหรือความเครียดแบบคืนรูป (Elastic Deformation or Elastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปในลักษณะที่เมื่อปลดแรงกระทำ อะตอมซึ่งเคลื่อนไหวยเนื่องจากผลของความเค้นจะเคลื่อนกลับเข้าตำแหน่งเดิมทำให้วัสดุคงรูปร่างเดิมไว้ได้ ตัวอย่างได้แก่ ยางยืด สปริง ถ้าดึงมันแล้วปล่อยมันจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม

2. การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกหรือความเครียดแบบคงรูป (Plastic Deformation or Plastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปที่ถึงแม้ว่าจะปลดแรงกระทำนั้นออกแล้ววัสดุก็ยังคงรูปร่างตามที่ถูกเปลี่ยนไปนั้น โดยอะตอมที่เคลื่อนที่ไปแล้วจะไม่กลับไปตำแหน่งเดิมวัสดุทุกชนิดจะมีพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปทั้งสองชนิดนี้ขึ้นอยู่กับแรงที่มากกระทำหรือความเค้นว่ามีมากน้อยเพียงใด หากไม่เกินขีดจำกัดการคืนรูป (Elastic Limit) แล้ว วัสดุนั้นก็จะมีพฤติกรรมคืนรูปแบบอิลาสติก (Elastic Behavior) แต่ถ้าความเค้นมากเกินกว่าขีดจำกัดการคืนรูปแล้ววัสดุก็จะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวรหรือแบบพลาสติก (Plastic Deformation)

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain Relationship)

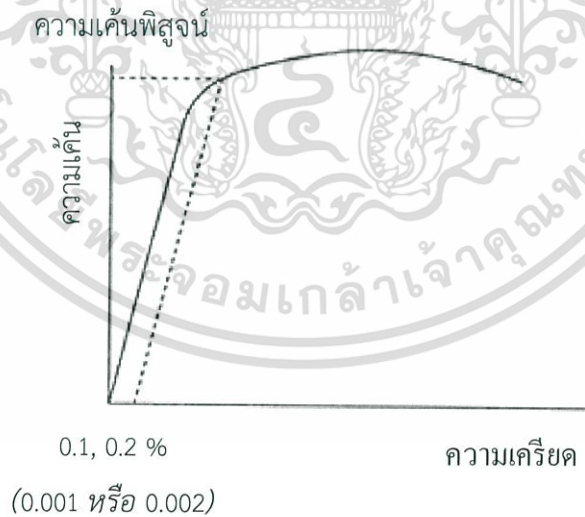
ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในที่นี้จะใช้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) เป็นหลักโดยจะพล็อตค่าของความเค้นในแกนตั้งและความเครียดในแกนนอน ดังรูป 2.15 การทดสอบแรงดึง นอกจากจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดแล้ว ยังจะแสดงความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุ ความเปราะและเหนียวของวัสดุ (Brittleness and Ductility) และบางครั้งอาจใช้บอกความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุ (Formability) ได้อีกด้วย



รูปที่ 2.15 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curve) แบบมีจุดคราก (Yield) [16]

การทดสอบแรงดึง (Tension test)

วิธีการทดสอบนั้น อธิบายโดยการนำตัวอย่างที่จะทดสอบมาดึงอย่างช้า ๆ แล้วบันทึกค่าของความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นไว้แล้วมาพล็อตเป็นเส้นโค้งดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก [16]

ขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ นั้น ๆ มาตรฐานต่าง ๆ ของการทดสอบชิ้นงาน เช่น มาตรฐานของ ASTM (American Society of Testing and Materials), BS (British Standards), JIS (Japanese Industrial Standards) หรือแม้แต่ มอก.(มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย) ได้กำหนดขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบไว้ ทั้งเพื่อให้ผลของการทดสอบเชื่อถือได้พร้อมกับกำหนดความเร็วในการเพิ่มแรงกระทำเอาไว้ด้วย จากการศึกษาเส้นโค้งความเค้น - ความเครียดพบว่า เมื่อเราเริ่มดึงชิ้นทดสอบอย่างช้า ๆ ชิ้นทดสอบจะค่อย ๆ ยืดออกจนถึงจุดจุดหนึ่ง (จุด A) ซึ่งในช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจะเป็นสัดส่วนคงที่ทำให้ได้กราฟที่เป็นเส้นตรงตามกฎของฮุก (Hook's Law) ซึ่งกล่าวว่าความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด จุด A นี้ เรียกว่า พิกัดสัดส่วน (Proportional Limit) และภายใต้พิกัดสัดส่วนนี้วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบอิลาสติก (Elastic Behavior) นั่นคือเมื่อปล่อยให้แรงกระทำชิ้นทดสอบจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม เมื่อเราเพิ่มแรงกระทำต่อไปจนเกินพิกัดสัดส่วนเส้นกราฟจะค่อย ๆ โค้งออกจากเส้นตรงวัสดุหลายชนิดจะยังคงแสดงพฤติกรรมการคืนรูปได้อีกเล็กน้อยจนถึงจุด ๆ หนึ่ง (จุด B) เรียกว่า พิกัดยืดหยุ่น (Elastic Limit) ซึ่งจุดนี้จะเป็นจุดกำหนดว่าความเค้นสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการแปรรูปถาวร (Permanent Deformation or Offset) กับวัสดุนั้นเมื่อผ่านจุดนี้ไปแล้วทำให้วัสดุจะเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Plastic Deformation) ลักษณะการเริ่มต้นของความเครียดแบบพลาสติกนี้เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของวัสดุในโลหะหลายชนิดเช่น พวกเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) จะเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างรวดเร็วโดยไม่มีการเพิ่มความเค้น (บางครั้งอาจจะลดลงก็มี) ที่จุด C ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก จุด C นี้เรียกว่า จุดคราก (Yield Point) และค่าของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นจุดคราก (Yield Stress) หรือ Yield Strength ซึ่งค่า Yield Strength นี้จะมีประโยชน์กับวิศวกรอย่างมากเพราะเป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูป และในกรณีของโลหะจะเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่คงใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดการเสียหายวัสดุหลายชนิด เช่น อะลูมิเนียม ทองแดง จะไม่แสดงจุดครากอย่างชัดเจนแต่ก็มีวิธีที่จะหาได้โดยกำหนดความเครียดที่ 0.10 - 0.20 % ของความยาวกำหนดเดิม (Original Gage Length) แล้วลากเส้นขนานกับกราฟช่วงแรกไปจนตัดเส้นกราฟที่โค้งไปทางด้านขวา ดังรูปที่ 2.24 ค่าความเค้นที่จุดตัดนี้จะนำมาใช้แทนค่าความเค้นจุดครากได้ความเค้นที่จุดนี้ บางครั้งเรียกว่า ความเค้นพิสูจน์ (Proof Stress) หรือความเค้น 0.1 หรือ 0.2 % Offset หลังจากจุดครากแล้ว วัสดุจะเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกโดยความเค้นจะค่อย ๆ เพิ่มอย่างช้า ๆ หรืออาจจะคงที่จนถึงจุดสูงสุด (จุด D) ค่าความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า Ultimate Strength หรือความเค้นแรงดึง (Tensile Strength) ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะทนได้ก่อนที่จะขาดหรือแตกออกจากกัน (Fracture) เนื่องจากวัสดุหลายชนิดสามารถเปลี่ยนรูปอย่างพลาสติกได้มากมาย ค่าความเค้นสูงสุดนี้สามารถนำมาคำนวณใช้งานได้ นอกจากนี้ค่านี้ยังใช้เป็นดัชนีเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุได้ด้วยคำว่า ความแข็งแรง (Strength) ของวัสดุหรือกำลังวัสดุนั้นโดยทั่วไปจะหมายถึง ค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุทนได้นี้เองที่จุด

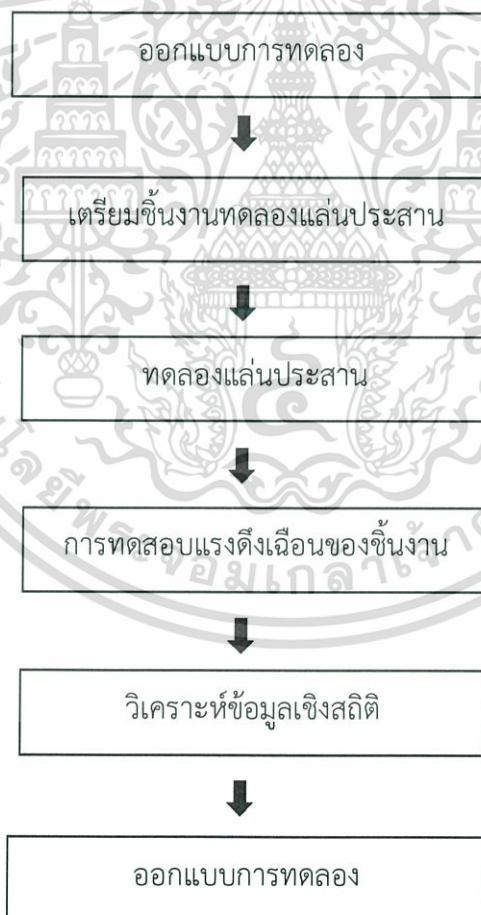
สุดท้าย (จุด E) ของกราฟเป็นจุดที่วัสดุเกิดการแตกหรือขาดออกจากกัน (Fracture) สำหรับโลหะบางชนิดเช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหรือโลหะเหนียว ค่าความเค้นประลัย (Rupture Strength) นี้จะต่ำกว่าความเค้นสูงสุดเพราะเมื่อเลยจุด D ไปพื้นที่ภาคตัดขวางของตัวอย่างทดสอบลดลงทำให้พื้นที่ที่ต้านทานแรงดึงลดลงด้วยในขณะที่เรายังคงคำนวณค่าของความเค้นจากพื้นที่หน้าตัดเดิมของวัสดุก่อนที่จะทำการทดสอบแรงดึงดังนั้นค่าของความเค้นจึงลดลง ส่วนโลหะอื่นๆ เช่น โลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น (Cold Work) มาแล้วมันจะแตกหักที่จุดความเค้นสูงสุดโดยไม่มีการลดขนาดพื้นที่ภาคตัดขวาง ในทำนองเดียวกับพวกวัสดุเปราะ (Brittle Materials) เช่น เซรามิกที่มีการเปลี่ยนรูปอย่างพลาสติกน้อยมากหรือไม่มีเลย ส่วนกรณีของวัสดุที่เป็นพลาสติกจะเกิดการแตกหักโดยที่อัตราการความเค้นสูงขึ้น



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

ในการจัดทำปฏิญญาพันธระรื่อง การพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขนาดเล็กสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฉบับนี้ ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในการเล่นประสาณในสถานะของแข็งที่มีต่อแรงดึงเดื่อนของรอยต่อจากการเล่นประสาณ โดยอาศัยการออกแบบการทดลองและฟังก์ชันความพึงพอใจ เพื่อให้ได้เงื่อนไขในการเล่นประสาณที่เหมาะสมที่ให้ค่าแรงดึงเดื่อนของรอยต่อสูงสุด ขั้นตอนในการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเล่นประสาณที่ให้ค่าแรงดึงเดื่อนสูงสุดแสดงดังในรูปที่ 3.1 ขั้นตอนในการทดลองเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนในการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเล่นประสาณที่ให้ค่าแรงดึงเดื่อนสูงสุด

การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดลอง



การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมี

รูปที่ 3.2 ขั้นตอนในการทดลองเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค

3.1 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเล่นประสานที่ให้ค่าแรงดึงเดือนสูงสุด

3.1.1 การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย

การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแรงดึงเดือนของรอยต่อจากการเล่นประสานของชิ้นงานที่ได้ เพื่อนำค่าของปัจจัยที่ดีที่สุดไปพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขนาดเล็กต่อไป โดยในเบื้องต้น ผู้วิจัยมีปัจจัยที่อยู่ในความสนใจอยู่ 3 ปัจจัยด้วยกัน ซึ่งการออกแบบการทดลองมีขั้นตอน 4 ขั้นตอนดังนี้

3.1.1.1. เลือกปัจจัย ระดับ และขอบเขต

ก่อนออกแบบการทดลองทางผู้วิจัยได้ศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขนาดเล็ก โดยศึกษาปัจจัยจากประสบการณ์ของผู้ทำงาน ซึ่งประสบการณ์ต่าง ๆ เหล่านี้เป็นพื้นฐานที่สำคัญในการก้าวไปสู่ขั้นตอนไปของการออกแบบการทดลองโดยจะส่งผลให้การดำเนินการมีความรวดเร็วมากขึ้นไม่ต้องไปเสียเวลาตรวจสอบทุกปัจจัย รวมทั้งมีการศึกษาดำเนินการคู่มือประกอบการศึกษาและจากการทดลองต่าง ๆ ผู้วิจัยพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อแรงดึงเดือนของรอยต่อจากการเล่นประสานโดยใช้เตาอบควบคุมบรรยากาศ มี 3 ปัจจัย คือ อุณหภูมิ เวลา และความดัน ซึ่งเป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมและหาค่าที่เหมาะสมในการทดลองได้ โดยปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยนี้จะประกอบด้วย 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ กลาง และสูง โดยผู้วิจัยได้กำหนดปัจจัย และระดับ แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ปัจจัยและระดับของการทดลอง

ปัจจัย	ระดับ		
	ต่ำ (-1)	กลาง (0)	สูง (+1)
1. อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	580	600	620
2. เวลา (นาที)	10	20	30
3. ความดัน (kPa)	4.713	8.656	12.173

3.1.1.2. เลือกตัวแปรผลตอบ

ตัวแปรที่ใช้ในการหาค่าความแข็งแรงเฉือนของรอยต่อจากการเล่นประสาน คือ อุณหภูมิ เวลา และ ความดัน

3.1.1.3. เลือกการออกแบบการทดลอง

การเลือกวิธีการออกแบบการทดลองนี้จะต้องเกี่ยวข้องกับปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัยตาม ตารางที่ 3.1 และต้องใช้การออกแบบการทดลองที่สามารถหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีต่อแรงดึงเฉือน จากศึกษาการออกแบบการทดลองพบว่าวิธีที่เหมาะสมคือ การออกแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design) การออกแบบมีวิธีอยู่ 2 วิธี คือ การออกแบบส่วนผสมกลาง (CCD) และการออกแบบ บ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) ซึ่งงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจะใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ บ็อกซ์-เบห์นเคนเป็นวิธีที่สามารถศึกษาค่าในระดับต่ำ กลาง และสูงได้ (เฉพาะในขอบเขตที่ศึกษาเท่านั้น) เนื่องจากงานวิจัยนี้จะศึกษาเฉพาะค่าที่อยู่ในช่วงระดับต่ำ กลาง สูง นี้เท่านั้น จึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้อง ศึกษาในระดับอื่น ๆ นอกเหนือจากที่กล่าวมา การออกแบบการทดลองนี้มีปัจจัยนำเข้า 3 ปัจจัย และทำการซ้ำ 3 ครั้ง แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การออกแบบการทดลองบล็อกซ์-เบห์นเคนทำซ้ำ 3 ครั้ง

ลำดับการทดลอง มาตรฐาน	ลำดับการทดลอง ตามการสุ่ม	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ความดัน (กิโลปาสกาล)
1	4	580 (-1)	10 (-1)	8.656 (0)
2	10	620 (1)	10 (-1)	8.656 (0)
3	25	580 (-1)	30 (1)	8.656 (0)
4	1	620 (1)	30 (1)	8.656 (0)
5	18	580 (-1)	20 (0)	4.713 (-1)
6	38	620 (1)	20 (0)	4.713 (-1)
7	37	580 (-1)	20 (0)	12.173 (1)
8	30	620 (1)	20 (0)	12.173 (1)
9	29	600 (0)	10 (-1)	4.713 (-1)
10	11	600 (0)	30 (1)	4.713 (-1)
11	39	600 (0)	10 (-1)	12.173 (1)
12	32	600 (0)	30 (1)	12.173 (1)
13	28	600 (0)	20 (0)	8.656 (0)
14	31	600 (0)	20 (0)	8.656 (0)
15	33	600 (0)	20 (0)	8.656 (0)
16	20	580 (-1)	10 (-1)	8.656 (0)
17	23	620 (1)	10 (-1)	8.656 (0)
18	43	580 (-1)	30 (1)	8.656 (0)
19	42	620 (1)	30 (1)	8.656 (0)
20	14	580 (-1)	20 (0)	4.713 (-1)
21	26	620 (1)	20 (0)	4.713 (-1)
22	5	580 (-1)	20 (0)	12.173 (1)
23	8	620 (1)	20 (0)	12.173 (1)
24	41	600 (0)	10 (-1)	4.713 (-1)
25	16	600 (0)	30 (1)	4.713 (-1)
26	27	600 (0)	10 (-1)	12.173 (1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 45
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 (ต่อ) การออกแบบการทดลองบล็อกซ์-เบห์นเคนทำซ้ำ 3 ครั้ง

ลำดับการทดลอง มาตรฐาน	ลำดับการทดลอง ตามการสุ่ม	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ความดัน (กิโลปาสกาล)
27	17	600 (0)	30 (1)	12.173 (1)
28	19	600 (0)	20 (0)	8.656 (0)
29	21	600 (0)	20 (0)	8.656 (0)
30	35	600 (0)	20 (0)	8.656 (0)
31	36	580 (-1)	10 (-1)	8.656 (0)
32	15	620 (1)	10 (-1)	8.656 (0)
33	40	580 (-1)	30 (1)	8.656 (0)
34	34	620 (1)	30 (1)	8.656 (0)
35	7	580 (-1)	20 (0)	4.713 (-1)
36	6	620 (1)	20 (0)	4.713 (-1)
37	22	580 (-1)	20 (0)	12.173 (1)
38	12	620 (1)	20 (0)	12.173 (1)
39	3	600 (0)	10 (-1)	4.713 (-1)
40	13	600 (0)	30 (1)	4.713 (-1)
41	44	600 (0)	10 (-1)	12.173 (1)
42	9	600 (0)	30 (1)	12.173 (1)
43	45	600 (0)	20 (0)	8.656 (0)
44	2	600 (0)	20 (0)	8.656 (0)
45	24	600 (0)	20 (0)	8.656 (0)

3.1.1.4 ทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย

จากการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งใช้โปรแกรม Minitab releases 17 สุ่มลำดับชั้นการทดลอง จากนั้นทดลองตามลำดับชั้นที่ได้มีการออกแบบไว้ สำหรับการทดลองนำชิ้นงานเข้าเตาอบนั้นจะต้องมีการจัดเตรียมชิ้นงานไว้ให้พร้อม

3.1.2 วัสดุพื้นและโลหะเติม

ขั้นตอนการเตรียมโลหะพื้นและโลหะเติม ในส่วนของโลหะพื้นจะใช้ทองแดง (Cu) การทดสอบมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดความกว้าง 10 มิลลิเมตร ความยาว 27.70 มิลลิเมตร และหนา 0.35 มิลลิเมตร เนื่องจากโลหะทองแดงมีคุณสมบัติสภาพด้านทานการกัดกร่อนที่สูง ขึ้นรูปง่ายเพราะเป็นโลหะอ่อน และมีคุณสมบัติในการนำความร้อนสูง เมื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติดังกล่าวจึงเลือกใช้วัสดุดังกล่าว เพราะแพร่กระจายความร้อนแบบท่อขนาดเล็กจำเป็นต้องมีการนำความร้อนที่สูง และมีน้ำไหลผ่านเพื่อใช้เป็นตัวพาความร้อนจึงต้องมีคุณสมบัติที่ทนต่อการกัดกร่อนที่สูง และในส่วนของโลหะเติมแบบแผ่นชนิดทองแดง-ฟอสฟอรัส (CuP284) เนื่องจากโลหะเติมประเภทนี้มีคุณสมบัติในการลดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้น รวมทั้งสามารถเล่นประสานกับโลหะพื้นประเภททองแดง โดยตัดโลหะเติมให้ได้ขนาด 5 X 10 X 0.25 มิลลิเมตร ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของโลหะเติมแสดงดังตารางที่ 3.3 โดยขนาดของชิ้นงานทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมทางเคมีและคุณสมบัติทางความร้อนของโลหะเติมทองแดง-ฟอสฟอรัส

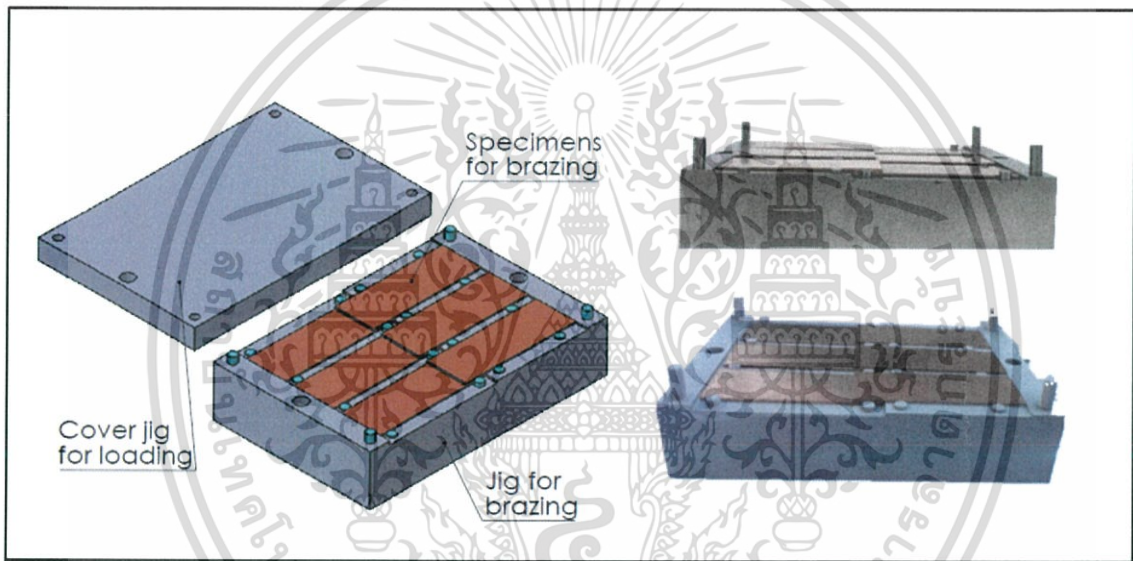
Code	% Composition by Weight			Melting Temperature		Working Temperature (°C)
	Cu	P	Ag	Solidus (°C)	Liquidus (°C)	
CuP284	Remainder	5	15	645	800	700



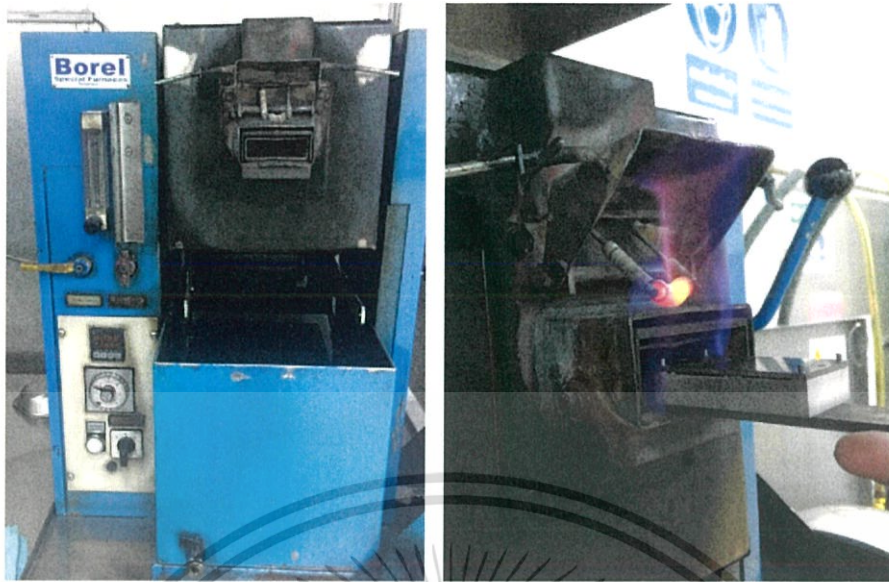
รูปที่ 3.3 แบบชิ้นงานทดสอบระหว่างโลหะทองแดงและโลหะเติมบัดกรีแข็งทองแดง-ฟอสฟอรัส

3.1.3 การเล่นประสานโดยใช้เตาอบควบคุมบรรยากาศ

ขั้นตอนการเล่นประสานจะเริ่มจากเตรียมโลหะทองแดงและโลหะเติมทองแดง-ฟอสฟอรัสโดยล้างโลหะทองแดงและโลหะเติมด้วยสารละลายอะซิโตนก่อนเข้าเตาอบเพื่อขจัดคราบน้ำมันที่ผิวและรอให้แห้ง จากนั้นประกอบชิ้นงานทดสอบตามรูปที่ 3.3 และเตรียมชิ้นงานทดสอบประกอบด้วยยึดจับชิ้นงานตามรูปที่ 3.4 หลังจากนั้นนำเข้าสู่เครื่องควบคุมบรรยากาศไฮโดรเจน Borel Special Furnaces รุ่น S0908 ตามรูปที่ 3.5 หลังจากทำการเตรียมชิ้นงานทดสอบจะนำเข้าสู่เตาอบควบคุมบรรยากาศเพื่อทำการเล่นประสานระหว่างโลหะทองแดงและโลหะเติมบัดกรีแข็งตามเวลา อุณหภูมิ และความดันที่กำหนด



รูปที่ 3.4 ตัวยึดจับชิ้นงานทดสอบประกอบเข้ากับชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 3.5 เตาอบควบคุมบรรยากาศ Borel Special Furnaces รุ่น S0908

3.1.4 การทดสอบแรงดึงเดือนของชิ้นงาน

ขั้นตอนการทดสอบแรงดึงเดือนของรอยต่อ จะนำชิ้นงานที่ผ่านการแล่นประสานโดยการอบมาทดสอบค่าแรงดึงเดือน โดยใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น AG-X Floor TYPE แสดงดังรูปที่ 3.6 โดยใช้ความเร็ว 0.5 มิลลิเมตรต่อนาที



รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบแรงดึงเดือน SHIMADZU รุ่น AG-X Floor TYPE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติและหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยหลัก

หลังจากการทดสอบแรงดึงเดือน จะนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์ผล โดยใช้เทคนิคทางสถิติ เพื่อให้ได้ตัวแปรที่ให้ค่าแรงดึงเดือนของรอยต่อสูงสุด ซึ่งในขั้นตอนนี้จะใช้โปรแกรม Minitab releases 17 ในการวิเคราะห์ข้อมูล

3.2 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อ จากศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในการเล่นประสานในสถานะของแข็งที่มีต่อแรงดึงเดือนของรอยต่อจากการเล่นประสานระหว่างทองแดงกับโลหะเติมทองแดง-ฟอสฟอรัสมีขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้

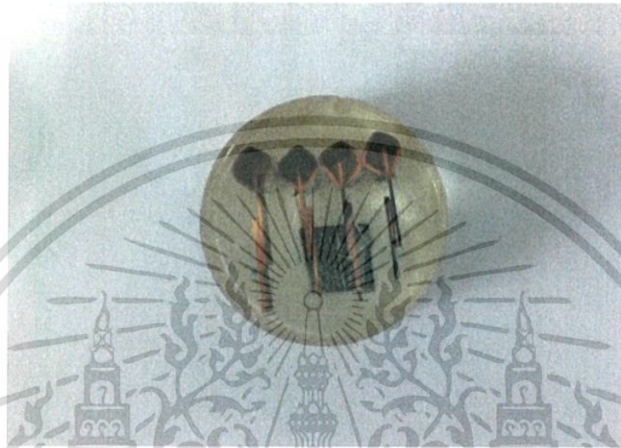
3.2.1 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดลอง

ในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดลอง เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทั้งก่อนและหลังการเล่นประสานเพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นว่ามีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร โดยขนาดชิ้นงานที่ได้จากการเล่นประสาน มีขนาด 10 × 27.70 × 0.35 มิลลิเมตร โดยนำชิ้นงานมาตัดด้วยเครื่องตัดแรงโน้มถ่วงยี่ห้อ Struers รุ่น Minitom ดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยจะตัดชิ้นงานผ่านบริเวณเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อมตามแนวยาว



รูปที่ 3.7 เครื่องตัดแรงโน้มถ่วงยี่ห้อ Struers รุ่น Minitom

นำชิ้นงานทดสอบหลังตัดผิวรอยเชื่อมมาทำความสะอาด แล้วล้างด้วยอะซิโตน เพื่อป้องกันการตกค้างของน้ำมันหล่อเย็นจากการตัด หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปหล่อเรซิน แสดงดังรูปที่ 3.8 และนำชิ้นงานที่ได้ไปขัดผิวหน้าด้วยกระดาษทรายละเอียดตั้งแต่เบอร์ 400, 800, 1000, 1200 และ 4000 จากนั้นจึงขัดบนผ้าสักหลาดด้วยผงอะลูมินา (Al_2O_3) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 และ 0.3 μm ตามลำดับ โดยใช้เครื่องขัดชิ้นงานทดลองยี่ห้อ Struers รุ่น LabolPol-1 ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 ชิ้นงานทดสอบหลังขึ้นรูปด้วยเรซิน



รูปที่ 3.9 เครื่องขัดชิ้นงานทดลองยี่ห้อ Struers รุ่น LabolPol-1

หลังจากขัดผิวหน้าชิ้นงานแล้ว จะนำชิ้นงานไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคในเบื้องต้นเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยรวมด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง Optical microscope ยี่ห้อ Zeiss รุ่น Axiolab ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง Optical microscope ยี่ห้อ Zeiss รุ่น Axiolab

3.2.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมี

นำชิ้นงานที่ขัดผิวหน้าเรียบร้อยแล้ว มาทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6610LV และตรวจวัดรังสีเอ็กซ์แบบกระจายพลังงานของธาตุ (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer; EDS) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6610LV ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6610LV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การจัดทำแผงระบายความร้อน

ในการจัดทำจัดทำแผงระบายความร้อน ซึ่งประกอบด้วย แผ่นโลหะทองแดงและแผ่นโลหะเติมทองแดง-ฟอสฟอรัส ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.3.1 การออกแบบแผงระบายความร้อน

ในการจัดทำแผงระบายความร้อนได้มีการแบ่งชั้นของแผงระบายความร้อน โดยแบ่งออกเป็น 4 ส่วน

1. แผ่นโลหะทองแดงแผ่นเต็มหนา 0.1 มิลลิเมตร 1 แผ่น
2. แผ่นโลหะทองแดงตัดเป็นแผงระบายความร้อนหนา 0.1 มิลลิเมตร 1 แผ่น
3. แผ่นโลหะทองแดงเจาะรูทางเข้า-ออกหนา 2 มิลลิเมตร 1 แผ่น
4. แผ่นโลหะเติมทองแดง-ฟอสฟอรัสตัดเป็นแผงระบายความร้อนหนา 0.25 มิลลิเมตร

จำนวน 2 แผ่น

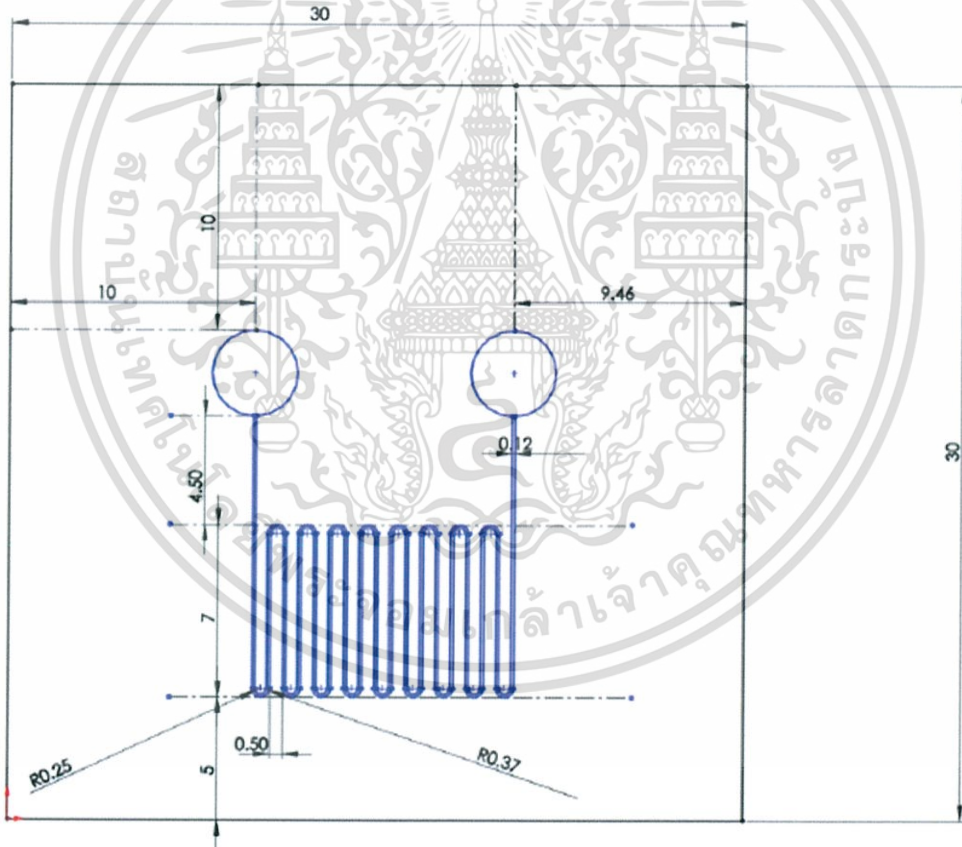


รูปที่ 3.12 ลักษณะของแผงระบายความร้อนของโลหะทองแดงและโลหะเติมทองแดงฟอสฟอรัส

จากรูปที่ 3.12 ลักษณะของแผงระบายความร้อนของโลหะทองแดงและโลหะเติมทองแดง-ฟอสฟอรัส ความกว้างและความยาวดังแสดงในรูปที่ 3.13 ซึ่งมีค่าของขนาดความกว้างของท่อขนาดเล็ก ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 0.12 มิลลิเมตรซึ่งสามารถคำนวณจากสูตรเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของช่องการไหล(Hydraulic diameter, D_H) ดังแสดงในสมการที่ 3.1

$$D_H = \frac{2ab}{a+b} \quad (3.1)$$

- เมื่อ
- D_H คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของช่องการไหล (เมตร)
 - a คือ ขนาดความกว้างท่อขนาดเล็ก (เมตร)
 - b คือ ความลึกของท่อขนาดเล็ก (เมตร)



รูปที่ 3.13 ขนาดและระยะของแผงระบายความร้อนของโลหะทองแดงและโลหะเติมทองแดง-ฟอสฟอรัส

ในการคำนวณหาขนาดความกว้างของท่อขนาดเล็กจำเป็นต้องกำหนดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของช่องการไหล ซึ่งค่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของช่องการไหลจะอยู่ในช่วง $10 \mu m < D_H \leq 200 \mu m$ จึงกำหนดให้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของช่องการไหลเท่ากับ $200 \mu m$ และความลึกของท่อขนาดเล็กมีค่าเท่ากับ 0.85 มิลลิเมตร

กำหนดให้แทนค่า D_H เท่ากับ $200 \mu m$ ลงในสมการที่ 2

$$200 \times 10^{-3} = \frac{2a \times 0.6}{a + 0.6} \quad (2)$$

$$a = 0.12 mm$$

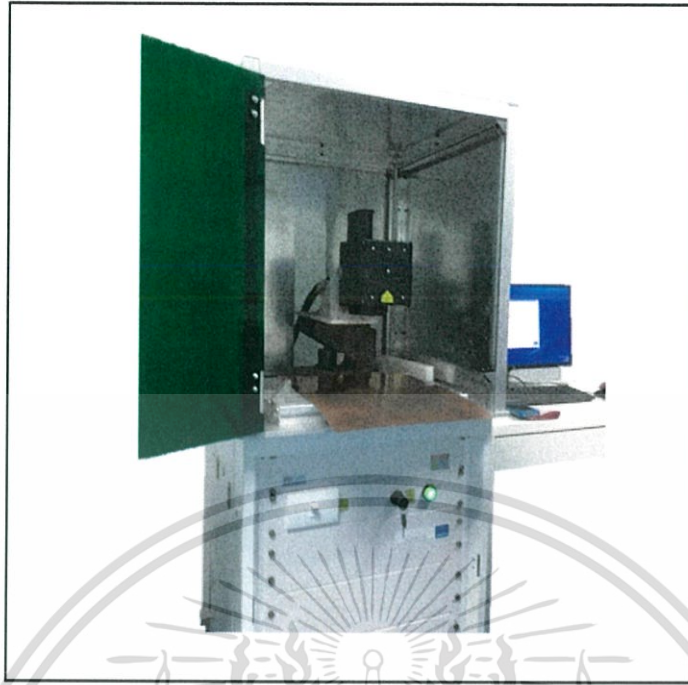
ลักษณะของแผงระบายความร้อนดังแสดงในรูปที่ 3.14 ในชั้นแรกจะเป็นแผ่นโลหะทองแดงแผ่นเต็มและชั้นที่สองเป็นแผ่นโลหะเต็มทองแดง-ฟอสฟอรัส ทำหน้าที่ประสานแผ่นโลหะทองแดงแผ่นเต็มและแผ่นโลหะทองแดงตัดเป็นแผงระบายความร้อนและมีแผ่นโลหะเต็มทองแดง-ฟอสฟอรัสเป็นชั้นที่สี่ทำหน้าที่ประสานกับแผ่นโลหะทองแดงเจาะรูทางเข้า-ออก



รูปที่ 3.14 ลักษณะของแผงระบายความร้อน

3.3.2 การตัดแผงระบายความร้อนด้วยการตัดเลเซอร์

หลังจากออกแบบแผงระบายความร้อน จะทำการตัดชิ้นงานด้วยการตัดเลเซอร์ ด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ Air-cooled Nanosecond Fiber Lasers ยี่ห้อ JENOPTIK รุ่น JenLas® fiber ns 50 ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 เครื่องตัดเลเซอร์ Air-cooled Nanosecond Fiber Lasers ยี่ห้อ JENOPTIK รุ่น JenLas® fiber ns 50

โดยก่อนการตัดนั้นได้เตรียมแผ่นโลหะทองแดงและแผ่นโลหะเติมทองแดง-ฟอสฟอรัส ด้วยการตัดเป็นแผ่นขนาดเล็ก เพื่อสะดวกต่อการตัดและการขนย้าย และทำการตัดด้วยรายละเอียดดังตารางที่ 3.4 โดยชิ้นงานที่ทำการตัดเลเซอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.16 จะนำไปทำการเล่นประสานในเตาควบคุมบรรยากาศเป็นขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 3.4 เงื่อนไขการตัดแผ่นโลหะทองแดงและแผ่นโลหะเติมทองแดงฟอสฟอรัส

	ความถี่เลเซอร์	Mark speed	Jump speed
แผ่นโลหะทองแดง	60 Hz	0.1 m/s	3 m/s
แผ่นโลหะเติมทองแดง ฟอสฟอรัส	5 Hz	0.05 m/s	4 m/s

บทที่ 4

ผลการทดลอง

จากการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในการเล่นประสานในสถานะของแข็งที่มีต่อแรงดึงเฉือนของรอยต่อจากการเล่นประสาน โดยมีปัจจัยที่ศึกษาคือ อุณหภูมิ เวลา และความดัน ซึ่งได้ทำการออกแบบการทดลอง แบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) และหาค่าตัวแปรการเล่นประสานที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจ ผลจากการทดลองมีดังต่อไปนี้

4.1 ผลการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลกระทบต่อแรงดึงเฉือนของรอยต่อจากการเล่นประสาน

4.1.1 ผลการทดสอบแรงดึง

หลังจากการทดสอบแรงดึงเฉือนของรอยต่อจากการเล่นประสานของชิ้นงาน โดยที่ปัจจัยที่ศึกษาคือ อุณหภูมิ เวลา และความดัน ซึ่งออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนทำซ้ำ 3 ครั้ง การทดลองทั้งหมด คือ 45 การทดลอง แสดงผลดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าแรงดึงเฉือนของรอยต่อจากการเล่นประสาน

ลำดับการทดลองมาตรฐาน	ลำดับการทดลองตามการสุ่ม	ปัจจัย			แรงดึงเฉือน (N)		
		อุณหภูมิ (°C)	เวลา (min)	ความดัน (kPa)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1	4,20,36	580 (-1)	10 (-1)	8.656 (0)	208.3780	113.5350	87.1980
2	10,23,15	620 (1)	10 (-1)	8.656 (0)	224.0500	386.5240	370.7570
3	25,43,40	580 (-1)	30 (1)	8.656 (0)	147.1520	171.8680	160.7420
4	1,42,34	620 (1)	30 (1)	8.656 (0)	696.0070	545.5180	559.5530
5	18,14,7	580 (-1)	20 (0)	4.713 (-1)	87.6910	194.6130	113.4500
6	38,26,6	620 (1)	20 (0)	4.713 (-1)	259.4470	287.7870	471.8300

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) ค่าแรงดึงเฉือนของรอยต่อจากการแล่นประสาน

ลำดับการทดลองมาตรฐาน	ลำดับการทดลองตามการสุ่ม	ปัจจัย			แรงดึงเฉือน (N)		
		อุณหภูมิ (°C)	เวลา (min)	ความดัน (kPa)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
7	37,5,22	580 (-1)	20 (0)	12.173 (1)	187.2700	151.5230	230.6300
8	30,8,12	620 (1)	20 (0)	12.173 (1)	646.7030	545.8830	501.9190
9	29,41,3	600 (0)	10 (-1)	4.713 (-1)	143.3530	152.3020	136.5660
10	11,16,13	600 (0)	30 (1)	4.713 (-1)	151.3640	193.2300	91.5059
11	39,27,44	600 (0)	10 (-1)	12.173 (1)	180.6260	202.5290	203.9590
12	32,17,9	600 (0)	30 (1)	12.173 (1)	421.6040	218.4870	332.3080
13	28,19,45	600 (0)	20 (0)	8.656 (0)	272.7350	272.9580	256.3470
14	31,21,2	600 (0)	20 (0)	8.656 (0)	210.1740	171.1850	186.3640
15	33,35,24	600 (0)	20 (0)	8.656 (0)	259.9080	125.3920	257.6670

4.1.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติจะนำผลจากการทดลองมาวิเคราะห์ ANOVA และการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model adequacy checking) โดยใช้โปรแกรม Minitab แสดงผลจากการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

4.1.2.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance: ANOVA)

การวิเคราะห์ผลการทดลองที่มีผลต่อค่าแรงดึงเฉือน สามารถทำการวิเคราะห์โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งผลวิเคราะห์จะพิจารณาจากค่า P-Value หากค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า 0.05 ($\alpha = 0.05$) จะสรุปได้ว่าปัจจัยนั้นมีผลต่อแรงดึงเฉือนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังในตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 Estimated regression coefficients for tensile shear force

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	-	233.6	21.6	10.37	<0.001
Temp	303.5	151.7	13.2	11.49	<0.001
Time	106.6	53.3	13.2	4.04	<0.001
Pressure	128.4	64.2	13.2	4.86	<0.001
Temp*Temp	186.5	93.3	19.4	4.80	<0.001
Time*Time	-21.9	-11.0	19.4	-0.56	0.576
Pressure*Pressure	-20.7	-10.3	19.4	-0.53	0.598
Temp*Time	124.8	62.4	18.7	3.34	0.002
Temp*Pressure	83.6	41.8	18.7	2.24	0.032
Time*Pressure	63.6	31.8	18.7	1.70	0.098
Model Summary					
S = 64.6877 R-sq = 86.04% R-sq(adj) = 82.45% R-sq(pred) = 76.27%					

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	902578	100286	23.97	<0.001
Linear	3	719727	239909	57.33	<0.001
Temp	1	552652	552652	132.07	<0.001
Time	1	68220	68220	16.30	<0.001
Pressure	1	98855	98855	23.62	<0.001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 (ต่อ) การวิเคราะห์ความแปรปรวน

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Square	3	102985	34328	8.20	<0.001
Temp*Temp	1	96368	96368	23.03	<0.001
Time*Time	1	1333	1333	0.32	0.576
Pressure*Pressure	1	1186	1186	0.28	0.598
2-Way Interaction	3	79866	26622	6.36	0.001
Temp*Time	1	46762	46762	11.18	0.002
Temp*Pressure	1	20981	20981	5.01	0.032
Time*Pressure	1	12123	12123	2.90	0.098
Error	35	146457	4184	-	-
Lack-of-Fit	3	12385	4128	0.99	0.412
Pure Error	32	134072	4190	-	-
Total	44	1049035	-	-	-

จากตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าแรงดึงเดือนตามเงื่อนไข อุณหภูมิ เวลา และความดันที่กำหนดไว้ นั้น เมื่อวิเคราะห์ที่ค่า P-Value พบว่า

1. อุณหภูมิในการเล่นประสาน (Temp)
2. เวลาในการเล่นประสาน (Time)
3. ความดันที่ใช้กดชิ้นงาน (Pressure)
4. อันตรกิริยาของอุณหภูมิในการเล่นประสาน (Temp*Temp)
5. อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิในการเล่นประสานกับเวลาในการเล่นประสาน (Temp*Time)
6. อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิในการเล่นประสานกับความดันที่ใช้กดชิ้นงาน (Temp*Pressure)

เป็นตัวแปรที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ซึ่งบ่งบอกว่าตัวแปรเหล่านี้เป็นตัวแปรที่มีผลต่อค่าแรงดึงเฉือนของรอยต่อจากการแล่นประสาน ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha=0.05$ หรือที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเมื่อวิเคราะห์เฉพาะปัจจัยที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 จะได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.4 และตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.4 Estimated regression coefficients for tensile shear force (Reduced Model)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	-	211.5	14.2	14.89	0.000
Temp	303.5	151.7	13.3	11.42	<0.001
Time	106.6	53.3	13.3	4.01	<0.001
Pressure	128.4	64.2	13.3	4.83	<0.001
Temp*Temp	189.6	94.8	19.4	4.88	<0.001
Temp*Time	124.8	62.4	18.8	3.32	0.002
Temp*Pressure	83.6	41.8	18.8	2.23	0.032
Model Summary					
S = 65.0747 R-sq = 84.66% R-sq (adj) = 82.24% R-sq (pred) = 77.81%					

ตารางที่ 4.5 Analysis of Variance (Reduced Model)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	6	888116	148019	34.95	<0.001
Linear	3	719727	239909	56.65	<0.001
Temp	1	552652	552652	130.50	<0.001

ตารางที่ 4.5 (ต่อ) Analysis of Variance (Reduced Model)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Time	1	68220	68220	16.11	<0.001
Pressure	1	98855	98855	23.34	<0.001
Square	1	100646	100646	23.77	<0.001
Temp*Temp	1	100646	100646	23.77	<0.001
2-Way Interaction	2	67743	33872	8.00	0.001
Temp*Time	1	46762	46762	11.04	0.002
Temp*Pressure	1	20981	20981	4.95	0.032
Error	38	160919	4235	-	-
Lack-of-Fit	6	26847	4474	1.07	0.402
Pure Error	32	134072	4190	-	-
Total	44	1049035	-	-	-

หลังจากตัดปัจจัยที่มีค่า P-Value มากกว่า 0.05 ออกจากการวิเคราะห์ แล้ววิเคราะห์ใหม่ด้วยโปรแกรม Minitab จากนั้นทำการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Sq) ซึ่งจากตารางที่ 4.4 Estimated regression coefficients for tensile shear force จะเห็นว่าค่า R-Sq มีค่าเท่ากับ 84.66% และ R-sq (adj) มีค่าเท่ากับ 82.24% จึงเป็นค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่น่าพอใจ และ ค่า Lack-of-fit เป็นตัวบอกความเพียงพอของตัวแปรในสมการ ในการวิเคราะห์ความแปรปรวน จะสรุปว่า ฟังก์ชันการถดถอยไม่เป็นเชิงเส้น ถ้าค่า P-Value น้อยกว่า α จากค่า P-Value ของ Lack-of-fit มีค่าเท่ากับ 0.412 ซึ่งมากกว่า α จึงสรุปได้ว่าทอมของสมการ Linear มีความพอเพียงและฟังก์ชันการถดถอยเป็นเชิงเส้นและสามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมได้ดังสมการที่ 4.1

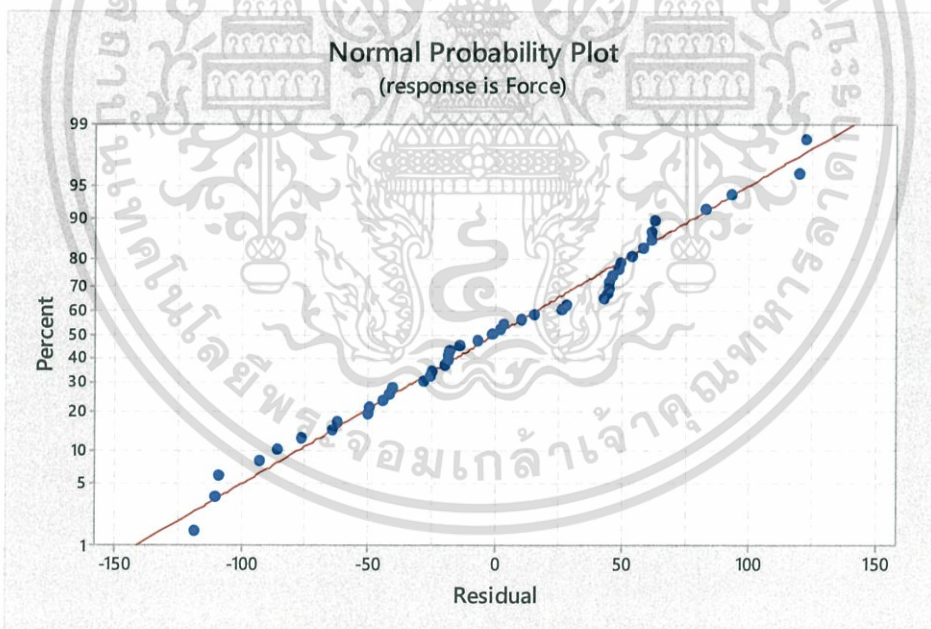
Regression Equation in Uncoded Units

$$\begin{aligned} \text{Tensile Shear Force} = & 211.5 + 151.7 \text{ Temp} + 53.3 \text{ time} + 64.2 \text{ Pressure} \\ & + 94.8 \text{ Temp*Temp} + 62.4 \text{ Temp*time} + 41.8 \text{ Temp*Pressure} \quad (4.1) \end{aligned}$$

4.1.2.2 ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

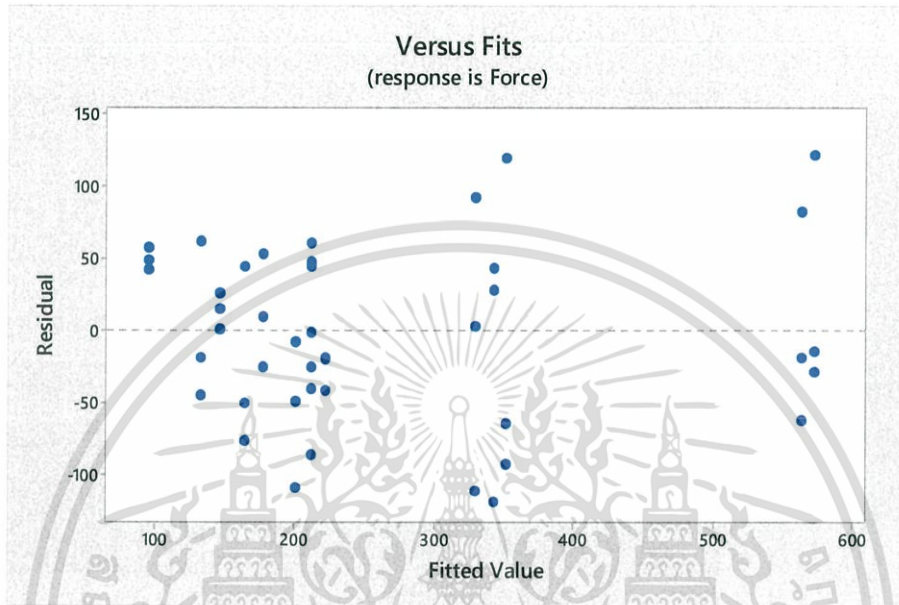
การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล เป็นการตรวจสอบที่ทราบถึงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนมีความเหมาะสมหรือไม่ โดยมีการตรวจสอบดังนี้

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



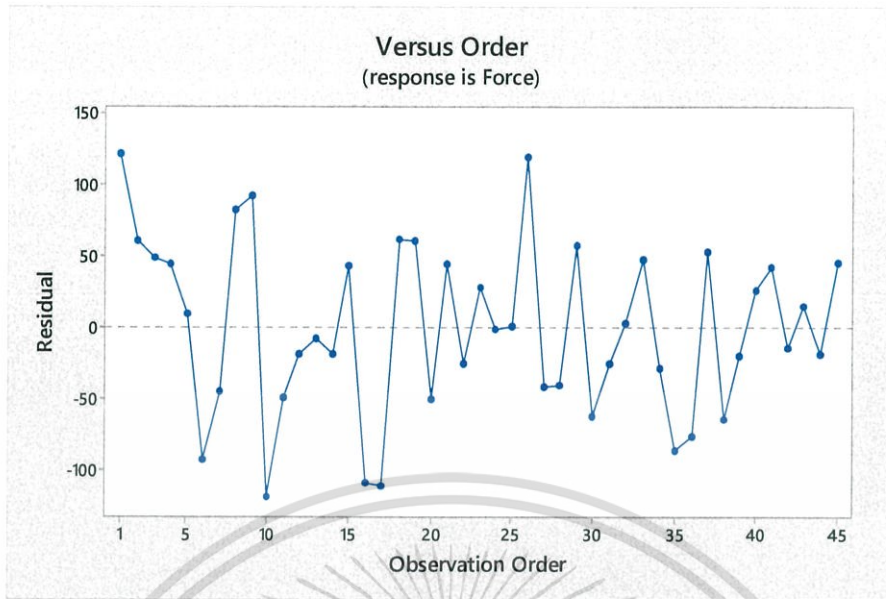
รูปที่ 4.1 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกค้างของแรงดึงเฉือน

2. การตรวจสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวน เป็นการตรวจสอบถึงความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล จากรูปที่ 4.2 ส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบปกติ ไม่มีแนวโน้มเป็นรูปแบบใด ๆ มีการกระจายตัวสม่ำเสมอ นั่นหมายถึงข้อมูลของแรงดึงเดือนที่นำมาวิเคราะห์สามารถเชื่อถือได้



รูปที่ 4.2 ค่าส่วนตกค้างกับค่าแรงดึงเดือน

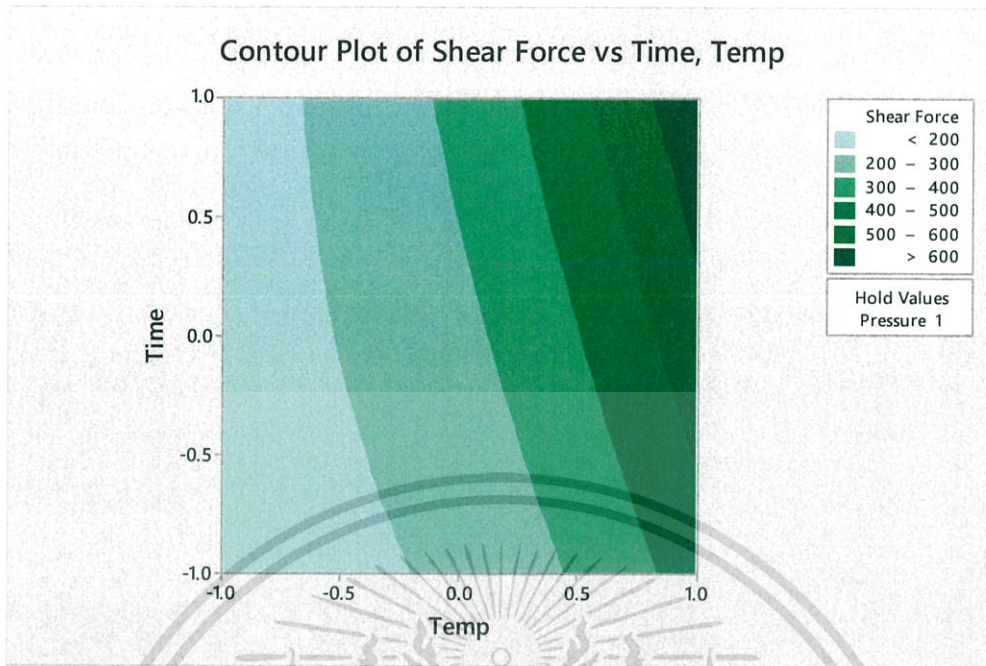
3. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล เป็นการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างและเวลาที่เปลี่ยนไป โดยจะดูถึงจุดที่แทนข้อมูลว่ามีการกระจายแบบอิสระหรือไม่ จากรูปที่ 4.3 ส่วนตกค้างของการทดสอบแรงดึงเดือนมีการกระจายตัวแบบสม่ำเสมอ แสดงว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน



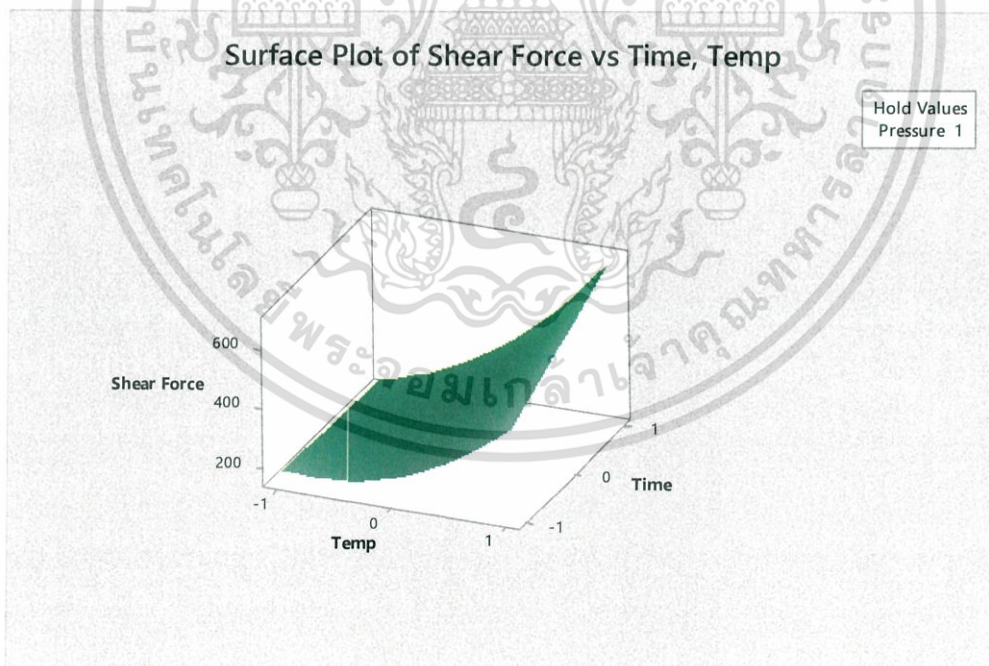
รูปที่ 4.3 ค่าส่วนตกค้างของแรงดึงเทียบกับลำดับเวลา

4. การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบของแรงดึงเดือน (Response Surface) จากการตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลอง และการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อใช้ในการทำนายค่าแรงดึงเดือนของชิ้นงานที่ใกล้เคียงกับแรงดึงเดือนที่ต้องการมากที่สุด หลังจากนั้นทำการสร้างพื้นผิวผลตอบของแรงดึงเดือนที่ใกล้เคียงกับแรงดึงเดือนที่ต้องการมากที่สุดเทียบกับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง คือ อุณหภูมิในการเล่นประสาน (Temperature) เวลาในการเล่นประสาน (Time) ความดันที่ใช้กดชิ้นงาน (Pressure) ซึ่งเป็นกราฟโครงร่างที่แสดงค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมเปรียบเทียบกับค่าแรงดึงเดือนของรอยต่อจากการเล่นประสาน ตามรูปที่ 4.4 – 4.9

จากรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 เป็นกราฟโครงร่าง (Contour Plot) และโครงร่างพื้นผิวผลตอบ (Surface Plot) ระหว่างอุณหภูมิในการเล่นประสาน (Temperature) กับเวลาในการเล่นประสาน (Time) เป็นกราฟ และพื้นผิวผลตอบแสดงลักษณะที่ให้ผลตอบของแรงดึงเดือนที่เหมาะสม (ต้องการค่าแรงดึงเดือนที่มากที่สุด) โดยคงค่าความดันที่ใช้กดชิ้นงาน (Pressure) ที่ 12.173 กิโลปาสคาล ซึ่งเป็นตัวแปรในการเล่นประสานที่เหมาะสมที่สุด เพื่อตรวจสอบค่าผลตอบที่ให้ค่าแรงดึงเดือนที่มากที่สุด จะเห็นได้ว่าค่าผลตอบที่ให้ค่าค่าแรงดึงเดือนที่มากที่สุดโดยค่าอุณหภูมิในการเล่นประสานประมาณ 620 องศาเซลเซียส และเวลาในการเล่นประสานประมาณ 30 นาที

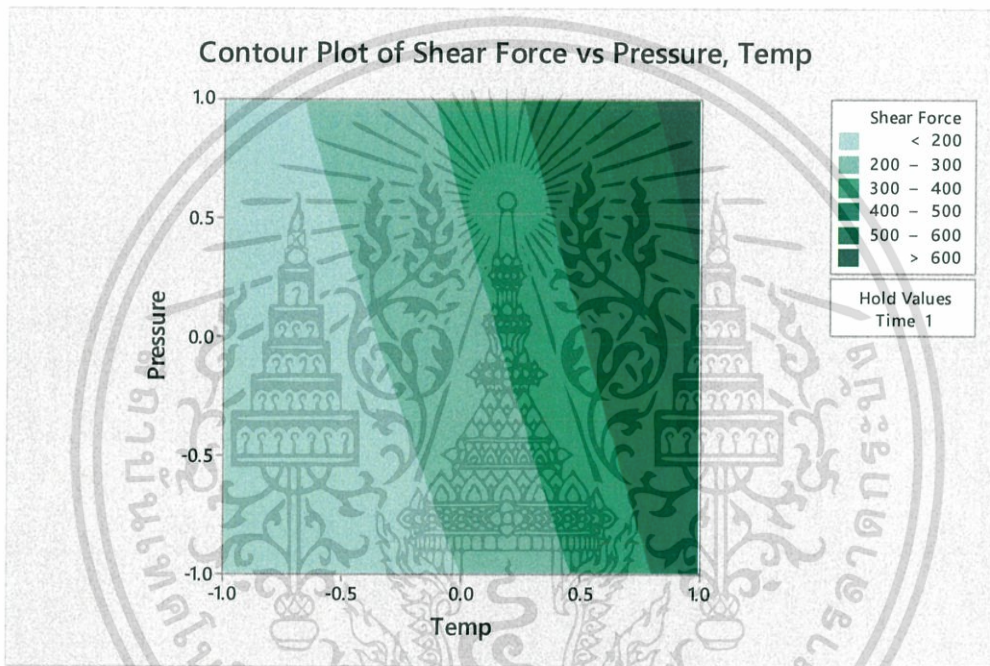


รูปที่ 4.4 กราฟโครงร่าง (Contour plot) ระหว่างอุณหภูมิในการเล่นประสาน (Temperature) เวลาในการเล่นประสาน (Time)

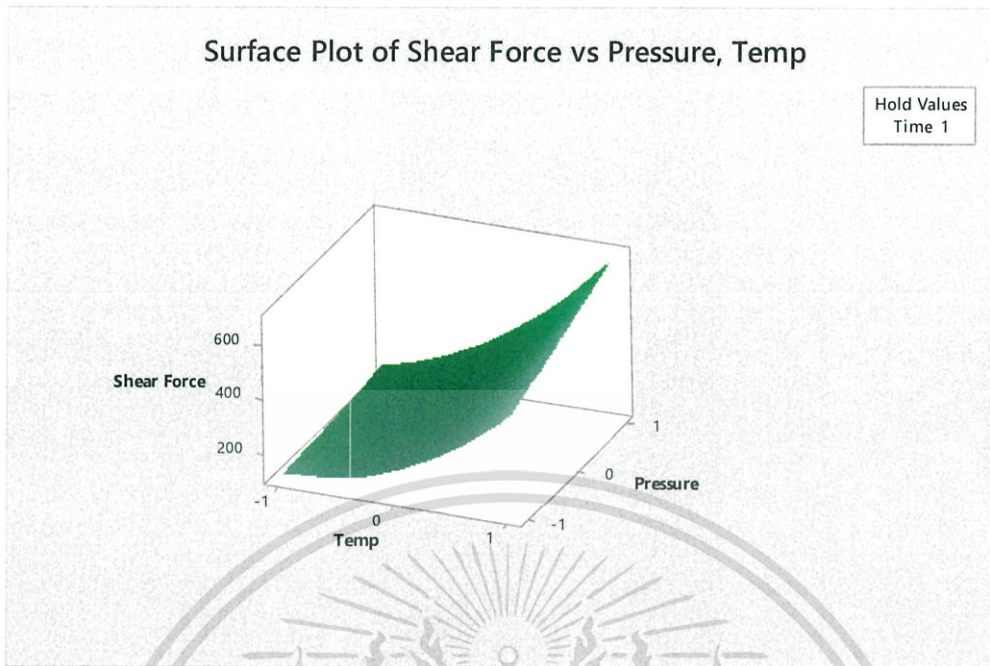


รูปที่ 4.5 พื้นผิวผลตอบของอิทธิพลร่วมระหว่าง อุณหภูมิในการเล่นประสาน (Temperature) กับเวลาในการเล่นประสาน (Time) เทียบกับค่าแรงดึงเฉือน

จากรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 เป็นกราฟโครงร่าง (Contour plot) และโครงร่างพื้นผิวผลตอบ (Surface plot) ระหว่างอุณหภูมิในการเล่นประสาน (Temperature) กับค่าความดันที่ใช้กดชิ้นงาน (Pressure) เป็นกราฟ และพื้นผิวผลตอบแสดงลักษณะที่ให้ผลตอบของแรงดึงเฉือนที่เหมาะสม (ต้องการค่าแรงดึงเฉือนที่มากที่สุด) โดยคงค่าเวลาในการเล่นประสาน (Time) ที่ 30 นาที ซึ่งเป็นตัวแปรในการเล่นประสานที่เหมาะสมที่สุด เพื่อตรวจสอบค่าผลตอบที่ให้ค่าแรงดึงเฉือนที่มากที่สุด จะเห็นได้ว่าค่าผลตอบที่ให้ค่าค่าแรงดึงเฉือนที่มากที่สุดโดยค่าอุณหภูมิในการเล่นประสานประมาณ 620 องศาเซลเซียส และค่าความดันที่ใช้กดชิ้นงาน (Pressure) ประมาณ 12.173 กิโลปาสกาล

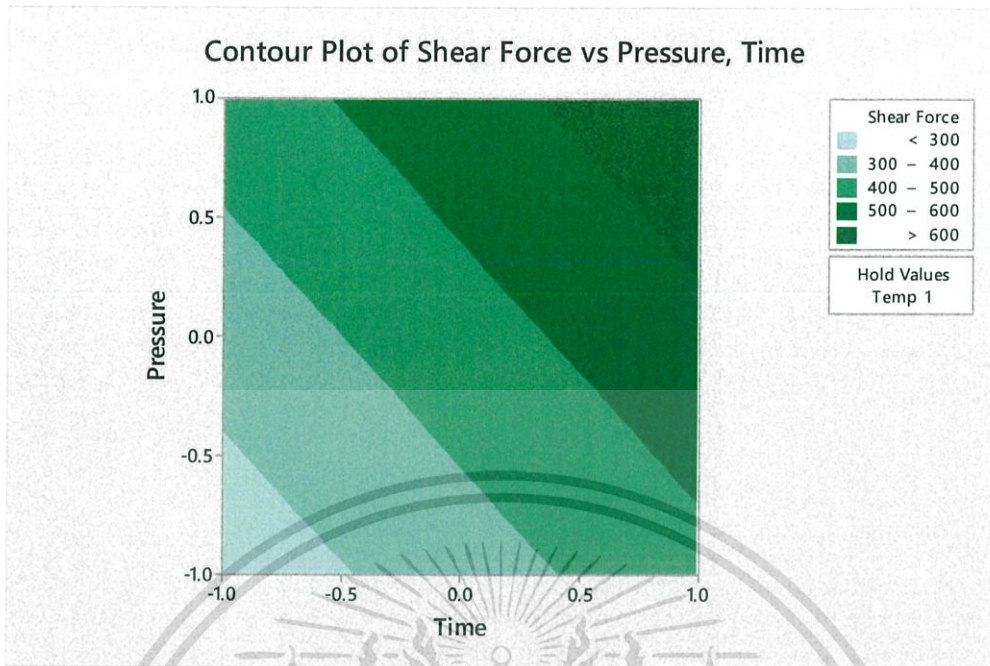


รูปที่ 4.6 กราฟโครงร่าง (Contour plot) ระหว่างอุณหภูมิในการเล่นประสาน (Temperature) ค่าความดันที่ใช้กดชิ้นงาน (Pressure)

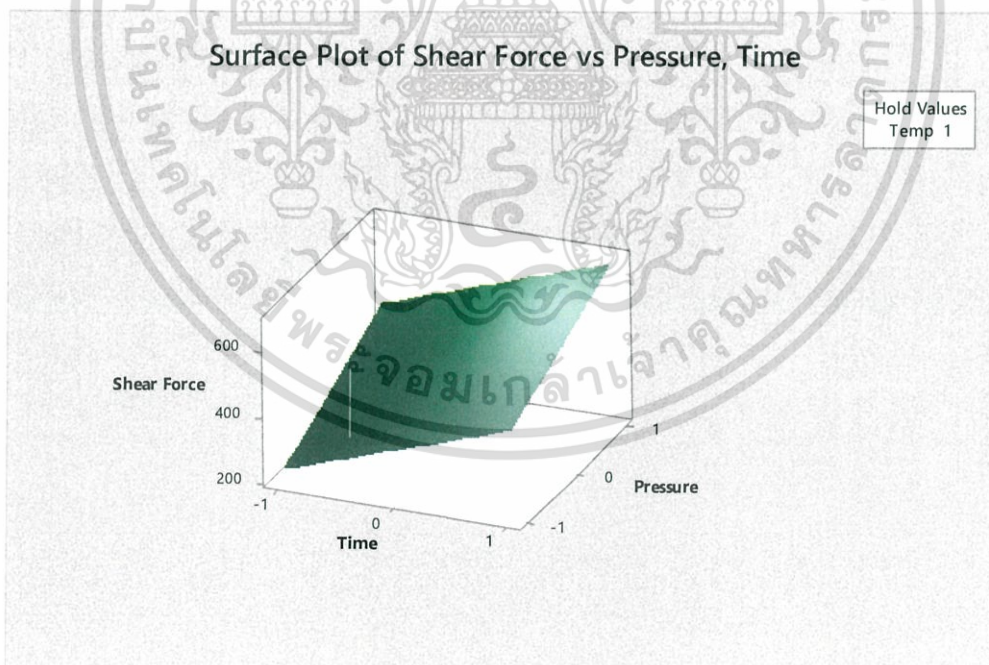


รูปที่ 4.7 พื้นผิวผลตอบของอิทธิพลร่วมระหว่าง อุณหภูมิในการเล่นประสาน (Temperature) กับค่าความดันที่ใช้กดชิ้นงาน (Pressure) เทียบกับค่าแรงดึงเฉือน

จากรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 เป็นกราฟโครงร่าง (Contour plot) และโครงร่างพื้นผิวผลตอบ (Surface plot) ระหว่างเวลาในการเล่นประสาน (Time) กับค่าความดันที่ใช้กดชิ้นงาน (Pressure) เป็นกราฟ และพื้นผิวผลตอบแสดงลักษณะที่ให้ผลตอบของแรงดึงเฉือนที่เหมาะสม (ต้องการค่าแรงดึงเฉือนที่มากที่สุด) โดยคงค่าอุณหภูมิในการเล่นประสาน (Temperature) ที่ 620 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นตัวแปรในการเล่นประสานที่เหมาะสมที่สุด เพื่อตรวจสอบค่าผลตอบที่ให้ค่าแรงดึงเฉือนที่มากที่สุด จะเห็นได้ว่าค่าผลตอบที่ให้ค่าค่าแรงดึงเฉือนที่มากที่สุดโดยค่าเวลาในการเล่นประสานประมาณ 30 นาที และค่าความดันที่ใช้กดชิ้นงาน (Pressure) ประมาณ 12.173 กิโลปาสคาล



รูปที่ 4.8 กราฟโครงร่าง (Contour plot) ระหว่างเวลาในการเล่นประสาน (Time) ค่าความดันที่ใช้กดชิ้นงาน (Pressure)



รูปที่ 4.9 พื้นผิวผลตอบของอิทธิพลร่วมระหว่างเวลาในการเล่นประสาน (Time) กับ ค่าความดันที่ใช้กดชิ้นงาน (Pressure) เทียบกับค่าแรงดึงเฉือน

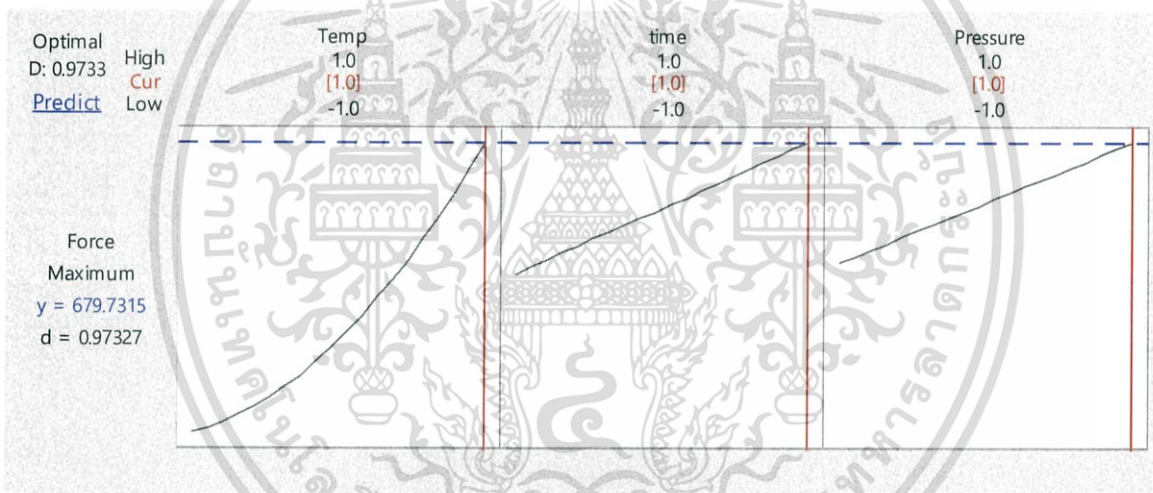
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.3 การหาค่าตัวแปรการเล่นประดานที่เหมาะสมที่สุด

จากการวิเคราะห์เพื่อหาตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดสำหรับค่าแรงดึงเชือกที่มากที่สุด โดยใช้การกำหนดเป้าหมายของดึงเชือกแบบ Maximum โดยที่ตามปกติแล้วค่า Lower และ Target จะกำหนดตามลักษณะที่ต้องการ แต่เนื่องจากงานวิจัยไม่มีการกำหนดลักษณะดังกล่าวจึงกำหนดค่า Lower และ Target เป็นค่าต่ำสุดและสูงสุดที่ได้จากการทดลองตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.10

ตารางที่ 4.6 การกำหนดค่าเป้าหมายที่แรงดึงเชือกสูงสุด

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import.
Shear Force	Maximum	87.198	696.007	-	1	1



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปรต่างๆ

ค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดมีดังนี้

1. อุณหภูมิที่ใช้ เท่ากับ 620 องศาเซลเซียส
2. เวลาที่ใช้ เท่ากับ 30 นาที
3. ความดันที่ใช้ เท่ากับ 12.173 กิโลปาสกาล

ช่วงการทำนาย (Prediction Interval) = (527.6, 831.8) นิวตัน

ช่วงความเชื่อมั่น 95% (Confident Interval) = (603.7, 755.8) นิวตัน

จากนั้นทำการทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลอง เป็นการทดลองบนค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อแรงดึงเชือกของรอยต่อการจากเล่นประดาน ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูล โดยทดลองทำซ้ำทั้งหมด 6 ครั้ง เพื่อเพิ่มความมั่นใจให้กับการทดลอง ผลการทดลองชี้แจงดังตารางที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ตารางผลการทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลองของแรงดึงเฉือนและเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด
แต่ละการทดลอง

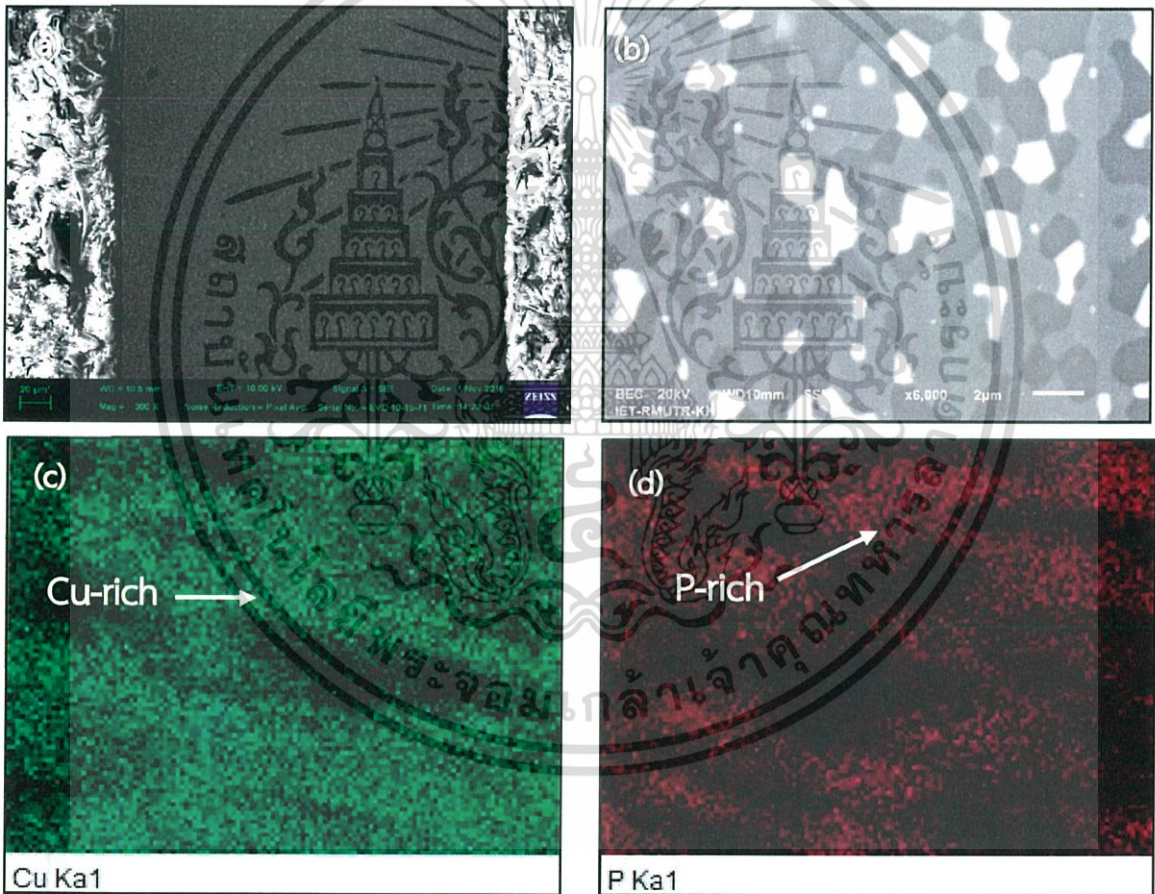
ค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย			ทดลอง	ทดลอง	ทดลอง	ทดลอง	ทดลอง	ทดลอง
อุณหภูมิ (°C)	เวลา (min)	ความดัน (kPa)	ครั้งที่ 1 (N)	ครั้งที่ 2 (N)	ครั้งที่ 3 (N)	ครั้งที่ 4 (N)	ครั้งที่ 5 (N)	ครั้งที่ 6 (N)
620	30	12.173	743.771	746.838	731.411	744.565	713.015	737.842
%error			9.4213	9.8725	7.6029	9.5381	4.8966	8.5490
Predicted Interval			527.6 N – 831.8 N					

จากผลการทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลองของแรงดึงเฉือน มีค่าเฉลี่ยแรงดึงเฉือน 736.2403 นิวตัน มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 12.6777 นิวตันและอยู่ในช่วงความเชื่อมั่นที่ค่า $\alpha = 0.05$ ที่ 722.94 ถึง 749.54 นิวตัน ซึ่งช่วงความเชื่อมั่น 95% ของผลยืนยันการทดลองอยู่ภายในช่วงการทำนาย (Prediction Interval) ทำให้ผลการทดลองยืนยันค่าแรงดึงเฉือนมีความน่าเชื่อถือ โดยที่ค่าเฉลี่ยผลการทดลองสำหรับการยืนยันมีค่ามากกว่าค่าที่ทำนายจากการวิเคราะห์ เนื่องจากเงื่อนไขในขณะทำการทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลอง แม้มิเพิ่มมีอุณหภูมิค่อนข้างคงที่เมื่อเทียบกับการทดลองปกติ ทำให้โลหะเต็มแผ่นประสานกับชิ้นงานได้ดี เมื่อไปทำการทดสอบแรงดึงเฉือนจึงได้ค่าที่สูง ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด คือ 7.5282 และค่าต่ำสุดและสูงสุดของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดมีค่าเท่ากับ 4.6680 และ 8.9854 ตามลำดับ เพื่อบอกถึงระดับเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้ที่ระดับต่ำสุดและสูงสุด

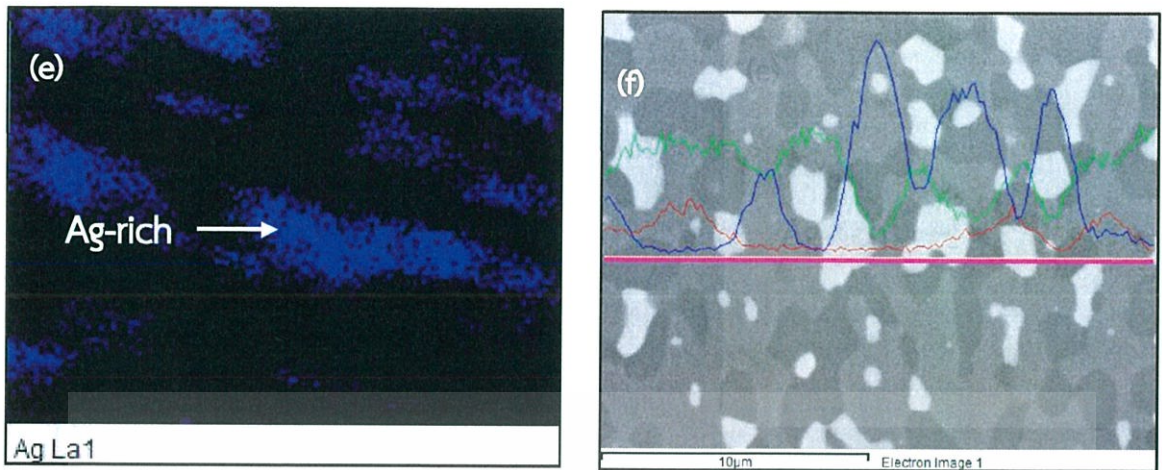
4.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อ

4.2.1 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคก่อนทำการแล่นประสาน

ผลจากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะเติมทองแดง-ฟอสฟอรัส ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลพบว่ามีกระจายตัวของเฟสทั้งหมด 3 แบบ เฟสที่มีสีเทา คือ เฟส Ag-rich เฟสที่มีสีเทา คือ เฟส Cu-rich และเฟสที่มีสีดำ คือ เฟส Cu-rich ซึ่งขนาดเกรนของเฟสสีดำและเฟสสีเทามีลักษณะใกล้เคียงกันคือเป็นเกรนขนาดเล็กกระจายทั่วบริเวณโครงสร้างทั้งหมด โดยพื้นที่ส่วนใหญ่จะเป็นเฟสสีเทา การตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping ของโลหะเติม ทองแดง-ฟอสฟอรัส แสดงดังรูปที่ 4.11 พบว่าในพื้นที่ส่วนใหญ่มีการกระจายตัวของธาตุทองแดงและฟอสฟอรัส ส่วนธาตุเงินโดยรวมจะอยู่ในบริเวณเฟสสีเทา

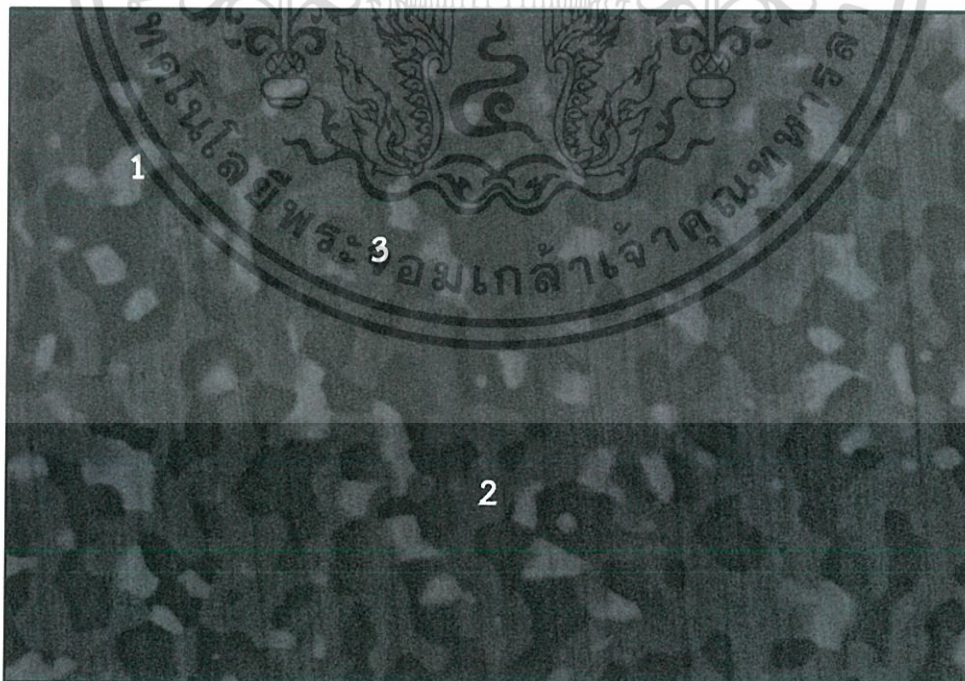


รูปที่ 4.11 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping ของโลหะเติมทองแดง-ฟอสฟอรัส (a) ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 300 เท่า (b) ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 6000 เท่า สำหรับรูป (c), (d) ผลวิเคราะห์ Mapping ของธาตุ Cu และ ธาตุ P ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 (ต่อ) ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping ของโลหะ
 เต็มทองแดง-ฟอสฟอรัส (e) คือ ผลวิเคราะห์ Mapping ของธาตุ Ag (f) ผลวิเคราะห์ line
 scan ที่กำลังขยาย 6000 เท่า

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชั้นสารประกอบเชิงโลหะด้วยเทคนิคการ
 ตรวจวัดรังสีเอ็กซ์แบบกระจายพลังงานของธาตุ (EDS) ของโลหะเต็มทองแดง-ฟอสฟอรัสก่อนทำการเล่น
 ประสาน แสดงดังรูปที่ 4.12 และตารางที่ 4.8



รูปที่ 4.12 ผลวิเคราะห์ EDS ของโลหะเต็มทองแดง-ฟอสฟอรัสก่อนการเล่นประสาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ผลวิเคราะห์ EDS ของโลหะเติมทองแดง-ฟอสฟอรัส

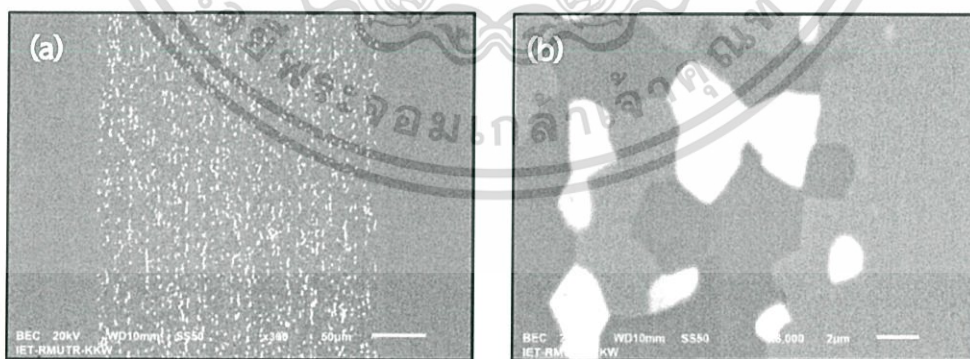
Points	Element (at%)		
	Ag	Cu	P
1	72.89	22.28	4.83
2	-	25.11	74.89
3	0.73	97.24	2.02

4.2.2 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคหลังทำการแล่นประสาน

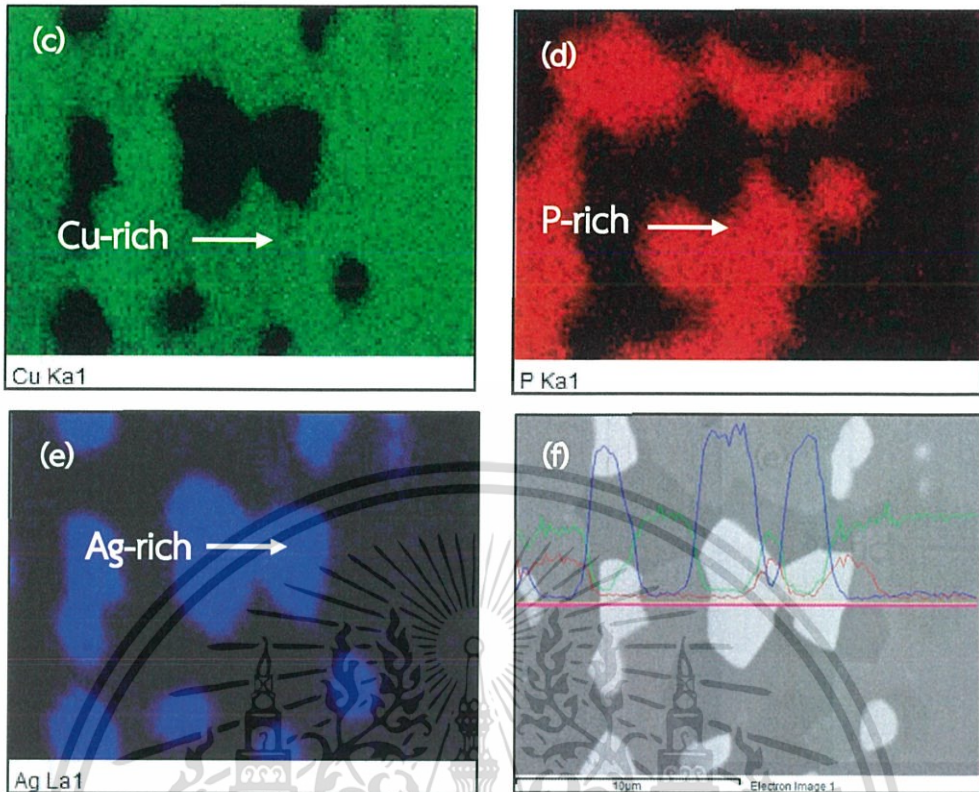
การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุและการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping การแล่นประสานระหว่างโลหะพื้นทองแดงกับโลหะเติมทองแดง-ฟอสฟอรัส โดยตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคระหว่างชิ้นงานที่มีค่าปัจจัยเหมาะสมกับชิ้นงานที่มีค่าปัจจัยไม่เหมาะสม โดยชิ้นงานที่มีปัจจัยที่เหมาะสมได้แก่ ชิ้นงานที่มีอุณหภูมิในการแล่นประสาน 620 องศาเซลเซียส เวลาในการแล่นประสาน 30 นาที และความดันที่ใช้กดชิ้นงาน 12.7 กิโลปาสคาล ผลจากการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.13 - 4.24

4.2.2.1 ผลการศึกษาชิ้นงานที่มีปัจจัยที่เหมาะสม (อุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ความดัน 12.173 กิโลปาสคาล)

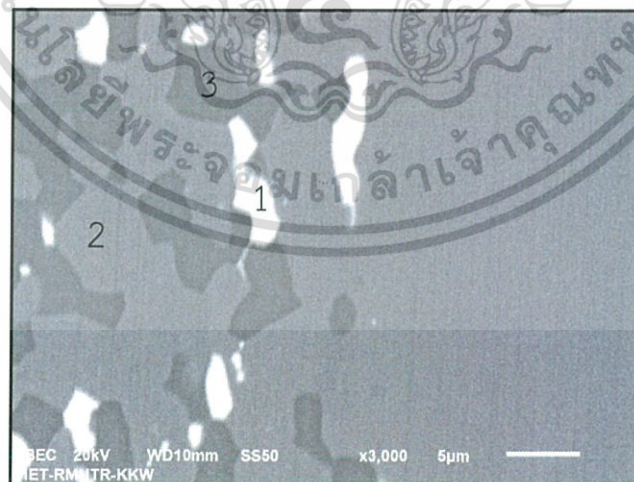
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุและตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping ของชิ้นงานที่มีปัจจัยที่เหมาะสม แสดงดังรูปที่ 4.13 - 4.14 และตารางที่ 4.9



รูปที่ 4.13 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping ของชิ้นงานที่มีปัจจัยที่เหมาะสม (อุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ความดัน 12.173 กิโลปาสคาล) (a) ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 300 เท่า (b) ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 6000 เท่า



รูปที่ 4.13 (ต่อ) ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping ของชิ้นงานที่มีปัจจัยที่เหมาะสม (อุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ความดัน 12.173 กิโลปาสคาล) (c), (d) และ (e) คือ ผลวิเคราะห์ Mapping ของธาตุ Cu, ธาตุ P และธาตุ Ag ตามลำดับ (f) ผลวิเคราะห์ line scan ที่กำลังขยาย 6000 เท่า



รูปที่ 4.14 ผลวิเคราะห์ EDS ของชิ้นงานที่มีปัจจัยที่เหมาะสม (อุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ความดัน 12.173 กิโลปาสคาล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

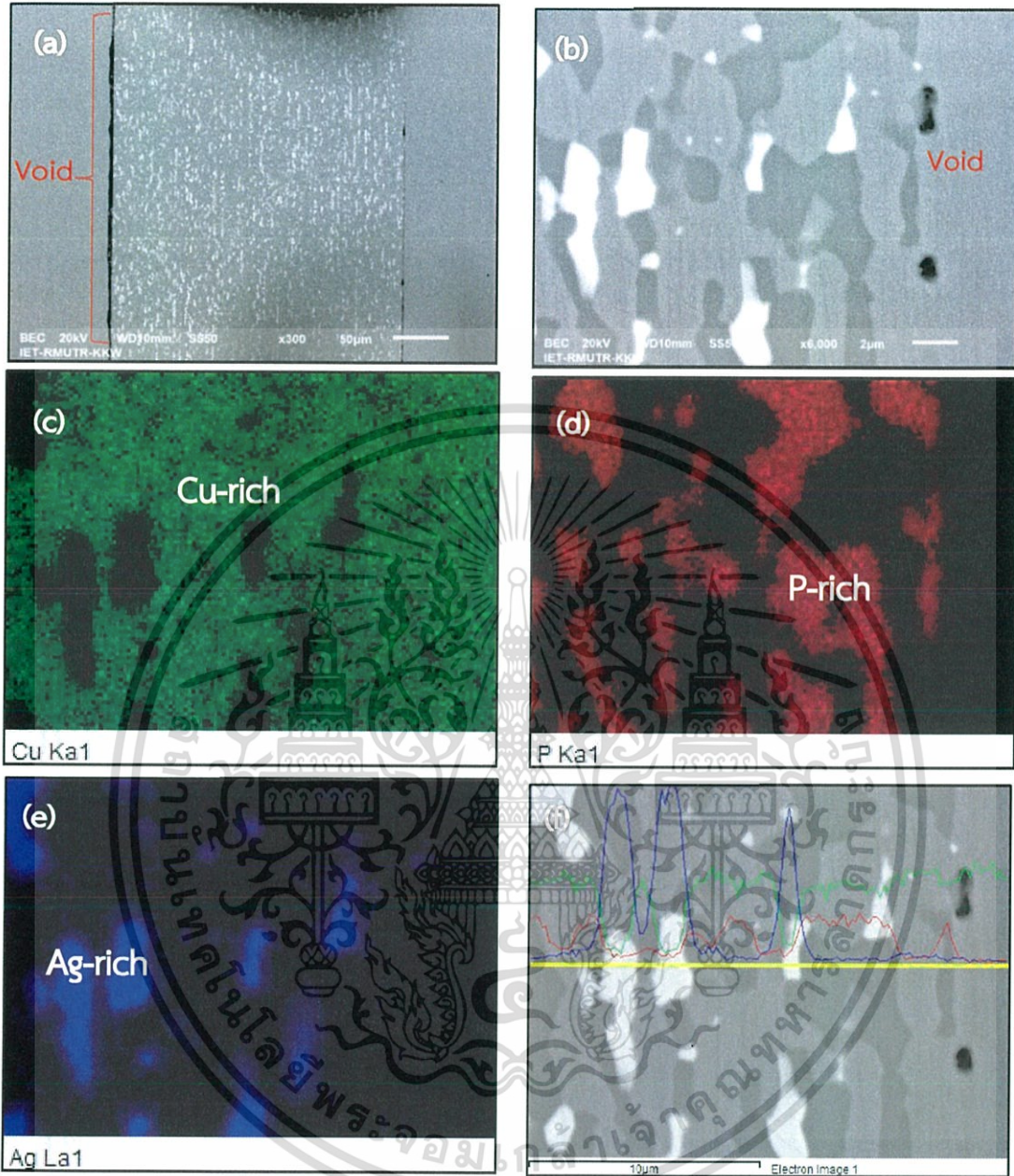
ตารางที่ 4.9 ผลวิเคราะห์ EDS ของชิ้นงานที่มีปัจจัยที่เหมาะสม (อุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ความดัน 12.173 กิโลปาสคาล)

Points	Element (at%)		
	Ag	Cu	P
1	85.35	14.07	0.58
2	1.85	95.35	2.80
3	0.57	74.43	25.01

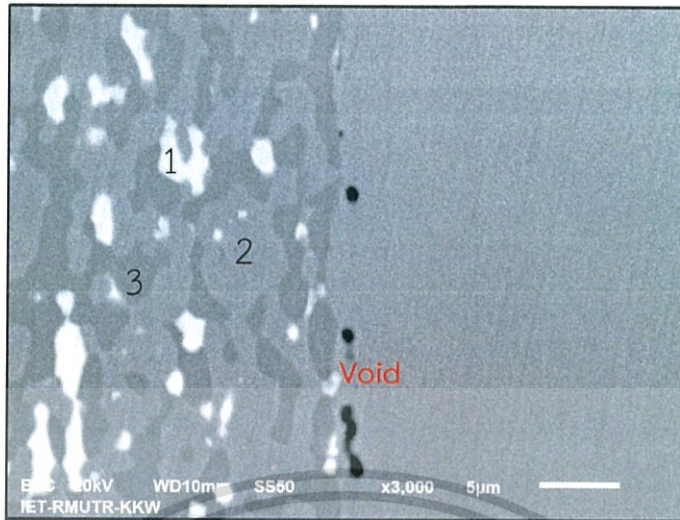
จากการวิเคราะห์ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping ของการศึกษาอิทธิพลของแรงดึงเฉือน เมื่อนำผลการตรวจสอบชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ความดัน 12.173 กิโลปาสคาล มาเปรียบเทียบกับโลหะเดิมก่อนทำการเล่นประสาน ที่บริเวณโครงสร้างจุลภาคของโลหะเดิมของชิ้นงานที่มีปัจจัยที่เหมาะสมมีขนาดเกรนของแต่ละเฟสที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งสาเหตุที่ทำให้เกรนขยายตัวเกิดจากการเพิ่มอุณหภูมิ เวลา และความดัน จึงทำให้บริเวณโลหะเดิมเกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาดเกรน ซึ่งส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน และเกิดสารประกอบใหม่ ฟอสไฟด์ (Cu_3P) ขึ้นบริเวณตำแหน่งที่ 3 เป็นไปตามเฟสไดอะแกรมระหว่างทองแดงกับฟอสฟอรัส

4.2.2.2 ผลการศึกษาชิ้นงานที่มีปัจจัยอุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที ความดัน 8.656 กิโลปาสคาล

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุและตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping ของชิ้นงานที่มีปัจจัยอุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที ความดัน 8.656 กิโลปาสคาล แสดงดังรูปที่ 4.15 – 4.16 และตารางที่ 4.10



รูปที่ 4.15 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping ของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที ความดัน 8.656 กิโลปาสคาล (a) ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 300 เท่า (b) ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 6000 เท่า สำหรับรูป (c), (d) และ (e) คือ ผลวิเคราะห์ Mapping ของธาตุ Cu, ธาตุ P และธาตุ Ag ตามลำดับ (f) ผลวิเคราะห์ line scan ที่กำลังขยาย 6000 เท่า



รูปที่ 4.16 ผลวิเคราะห์ EDS ของชิ้นงานที่มีปัจจัยอุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที ความดัน 8.656 กิโลปาสคาล

ตารางที่ 4.10 ผลวิเคราะห์ EDS ของชิ้นงานที่มีปัจจัยอุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที ความดัน 8.656 กิโลปาสคาล

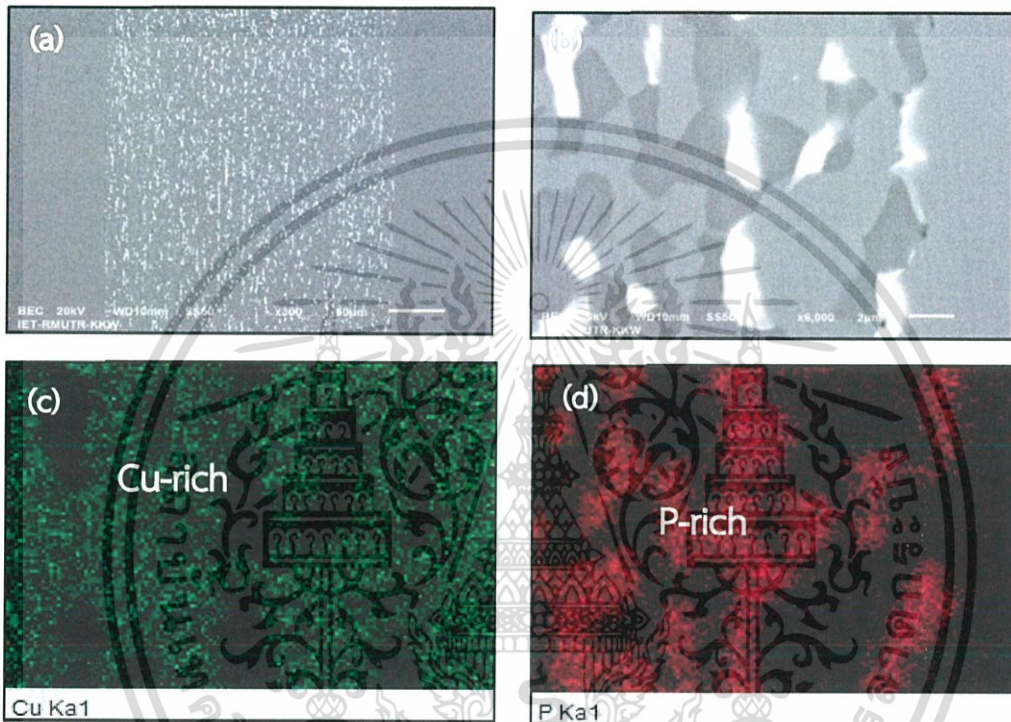
Points	Element (at%)		
	Ag	Cu	P
1	64.09	28.88	7.03
2	1.47	95.87	2.66
3	8.27	70.12	21.61

จากการวิเคราะห์ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping เมื่อนำผลการตรวจสอบของชิ้นงานที่ อุณหภูมิในการเล่นประสาน 580 องศาเซลเซียส เวลาในการเล่น ประสาน 10 นาที ความดันที่ใช้ในการกดชิ้นงาน 8.656 กิโลปาสคาล จะพบว่าขนาดเกรนของชิ้นงานที่ กำลังขยาย 6000 เท่า มีขนาดไม่ต่างจากเดิมเมื่อเทียบกับโลหะเดิมก่อนการเล่นประสาน เนื่องจากระดับ ของปัจจัยในการเล่นประสานเป็นระดับต่ำสุดในการศึกษา ซึ่งไม่มากพอที่จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลง ของโครงสร้างจุลภาคแบบเห็นได้ชัด และเกิดช่องว่างระหว่างรอยต่อจากการเล่นประสาน ผลการ วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุเปอร์เซ็นต์ของธาตุที่มีมากที่สุดในแต่ละจุดมีดังนี้ จุดที่ 1 Ag= 64.09 at% จุด ที่ 2 Cu=95.87 at% และ จุดที่ 3 Cu=70.12 at%

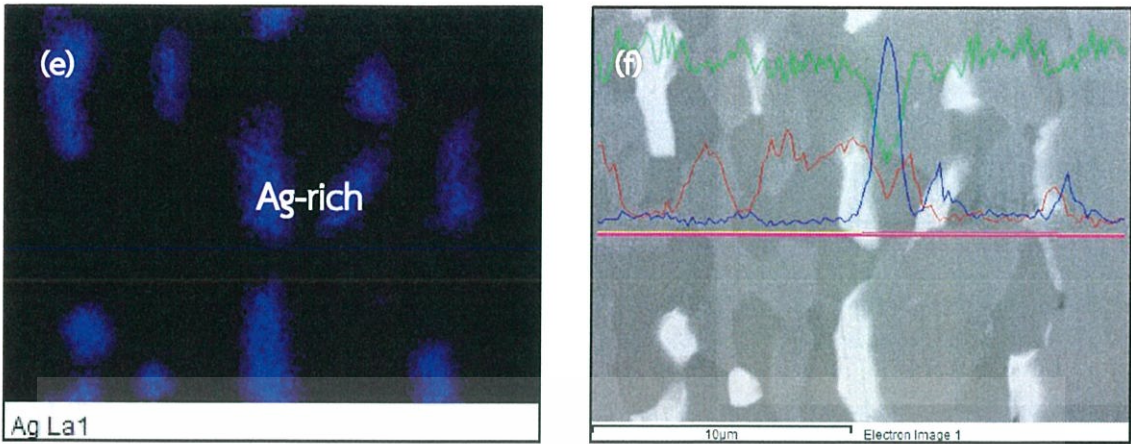
4.2.2.3 ผลการศึกษาชิ้นงานที่มีปัจจัยอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ความดัน 12.173

กิโลปาสคาล

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุและตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping ของชิ้นงานที่มีปัจจัยอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ความดัน 12.173 กิโลปาสคาล แสดงดังรูปที่ 4.17 – 4.18 และตารางที่ 4.11



รูปที่ 4.17 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping ของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ความดัน 12.173 กิโลปาสคาล (a) ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 300 เท่า (b) ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 6000 เท่า สำหรับรูป (c), (d) คือ ผลวิเคราะห์ Mapping ของธาตุ Cu, ธาตุ P ตามลำดับ



รูปที่ 4.17 (ต่อ) ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping ของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ความดัน 12.173 กิโลปาสคาล (e) คือ ผลวิเคราะห์ Mapping ของธาตุ Ag (f) ผลวิเคราะห์ line scan ที่กำลังขยาย 6000 เท่า



รูปที่ 4.18 ผลวิเคราะห์ EDS ของชิ้นงานที่มีปัจจัยอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ความดัน 12.173 กิโลปาสคาล

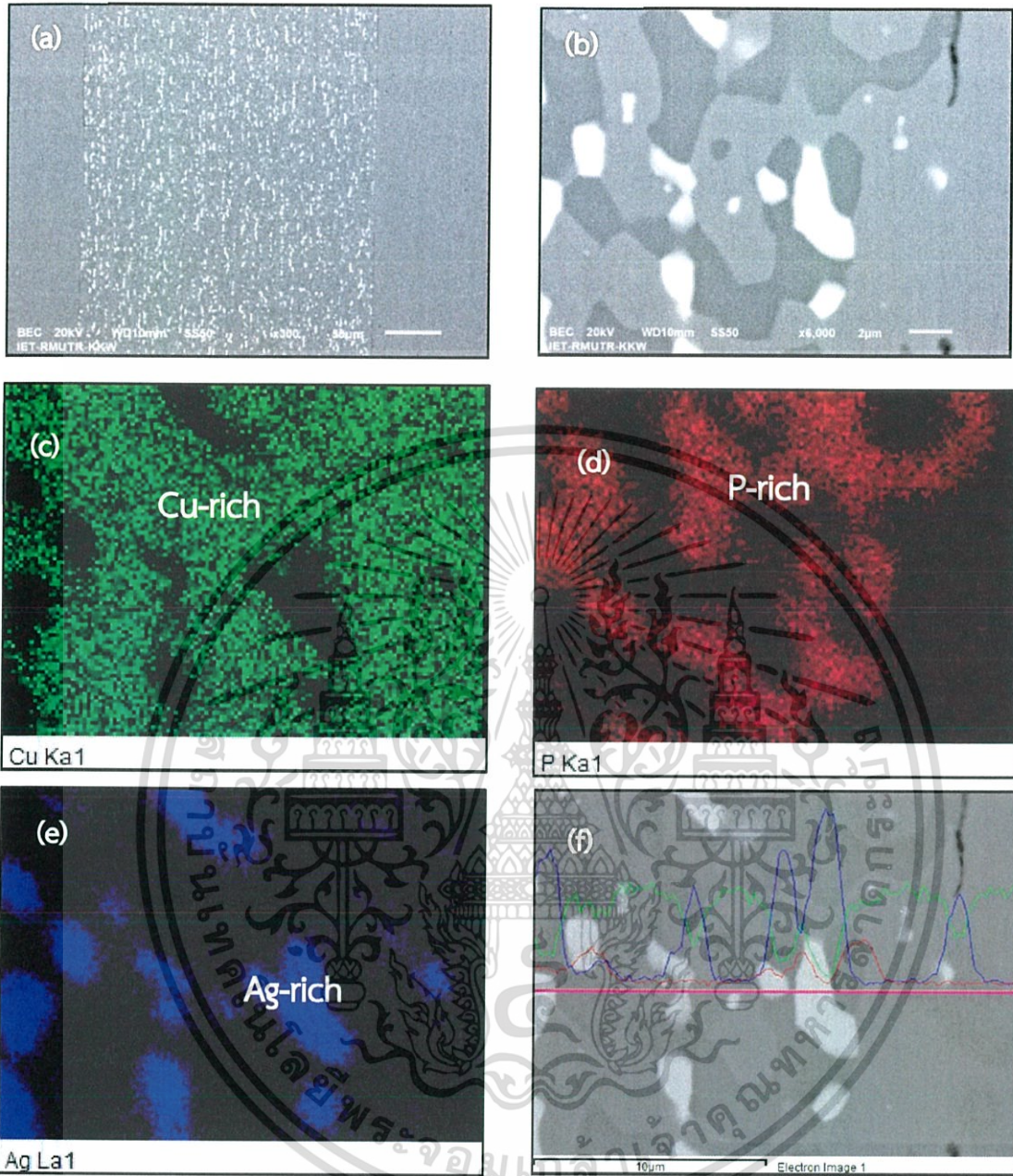
ตารางที่ 4.11 ผลวิเคราะห์ EDS ของชิ้นงานที่มีปัจจัย 600 องศาเซลเซียส
เวลา 30 นาที ความดัน 12.173 กิโลปาสคาล

Points	Element (at%)		
	Ag	Cu	P
1	56.37	42.97	0.65
2	0.79	79.70	19.51
3	1.66	85.79	12.54

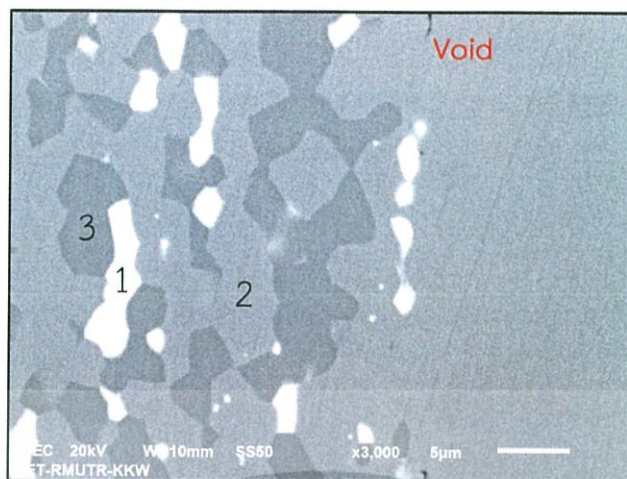
จากการวิเคราะห์ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping เมื่อนำผลการตรวจสอบของชิ้นงานที่ อุณหภูมิในการเล่นประสาน 600 องศาเซลเซียส เวลาในการเล่นประสาน 30 นาที ความดันที่ใช้ในการกดชิ้นงาน 12.173 กิโลปาสคาล จะพบว่าขนาดเกรนของชิ้นงานที่กำลังขยาย 6000 เท่า มีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเทียบกับโลหะเดิมก่อนการเล่นประสาน เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเป็น 600 องศาเซลเซียส เวลาเพิ่มเป็น 30 นาที และความดันที่เพิ่มขึ้นเป็น 12.173 กิโล-ปาสคาล ทั้งสามปัจจัยที่มีระดับที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคเกิดการเปลี่ยนแปลง ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุเปอร์เซ็นต์ของธาตุที่มีมากที่สุดในแต่ละจุดมีดังนี้ จุดที่ 1 Ag= 56.37 at% จุดที่ 2 Cu=79.70 at% และ จุดที่ 3 Cu=85.79 at%

4.2.2.4 ผลการศึกษาชิ้นงานที่มีปัจจัยอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ความดัน 4.713 กิโลปาสคาล

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุและตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping ของชิ้นงานที่มีปัจจัยอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ความดัน 4.713 กิโลปาสคาล แสดงดังรูปที่ 4.19 – 4.20 และตารางที่ 4.12



รูปที่ 4.19 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping ของชิ้นงานที่ อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ความดัน 4.713 กิโลปาสคาล (a) ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 300 เท่า (b) ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 6000 เท่า สำหรับรูป (c), (d) และ (e) คือ ผลวิเคราะห์ Mapping ของธาตุ Cu, ธาตุ P และธาตุ Ag ตามลำดับ (f) ผลวิเคราะห์ line scan ที่กำลังขยาย 6000 เท่า



รูปที่ 4.20 ผลวิเคราะห์ EDS ของชิ้นงานที่มีปัจจัยอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ความดัน 4.713 กิโลปาสคาล

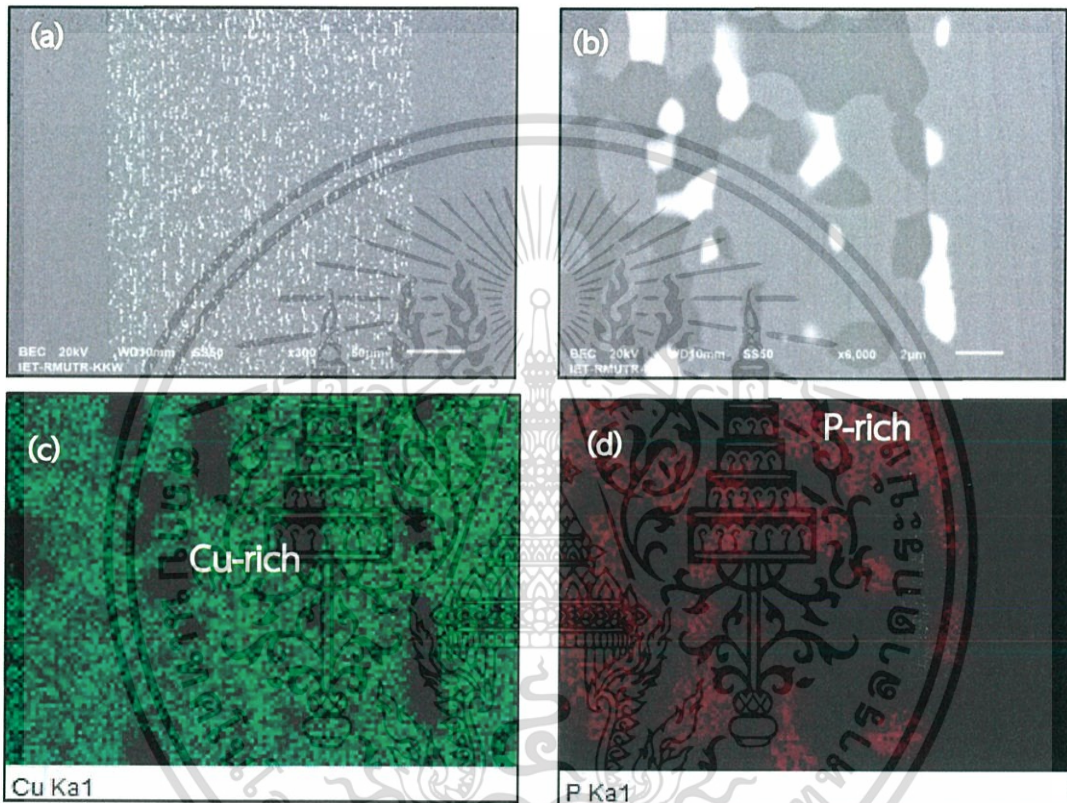
ตารางที่ 4.12 ผลวิเคราะห์ EDS ของชิ้นงานที่มีปัจจัยอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ความดัน 4.713 กิโลปาสคาล

Points	Element (at%)		
	Ag	Cu	P
1	61.63	30.27	8.10
2	2.26	95.07	2.67
3	0.27	70.57	29.16

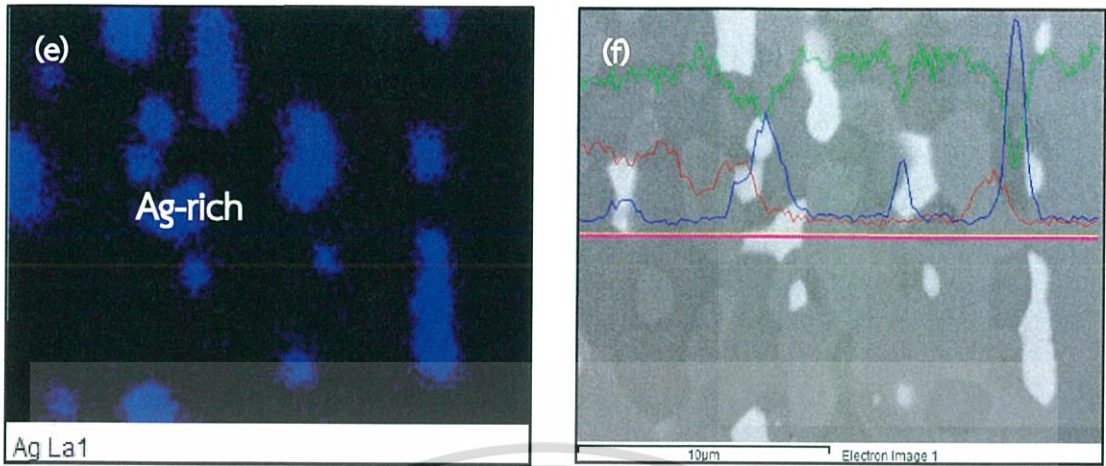
จากการวิเคราะห์ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping เมื่อนำผลการตรวจสอบของชิ้นงานที่ อุณหภูมิในการเล่นประสาน 600 องศาเซลเซียส เวลาในการเล่นประสาน 30 นาที ความดันที่ใช้ในการกดชิ้นงาน 4.713 กิโลปาสคาล จะเห็นได้ว่าการเกิดช่องว่างระหว่างรอยต่อจากการเล่นประสาน เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 14.5 ที่อุณหภูมิในการเล่นประสาน 600 องศาเซลเซียส เวลาในการเล่นประสาน 30 นาที ความดันที่ใช้ในการกดชิ้นงาน 12.173 กิโลปาสคาล จะเห็นได้ว่าเมื่อคงที่อุณหภูมิกับเวลาในการเล่นประสาน และเปลี่ยนแปลงความดันโดยลดความดันจาก 12.173 กิโลปาสคาล เป็น 4.713 กิโลปาสคาล ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างรอยต่อจากการเล่นประสาน สาเหตุเกิดความดันที่ไม่มากพอที่จะกดให้ชิ้นงานแนบสนิทกัน

4.2.2.5 ผลการศึกษาชิ้นงานที่มีปัจจัยอุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส เวลา 20 นาที ความดัน 12.173 กิโลปาสกาล

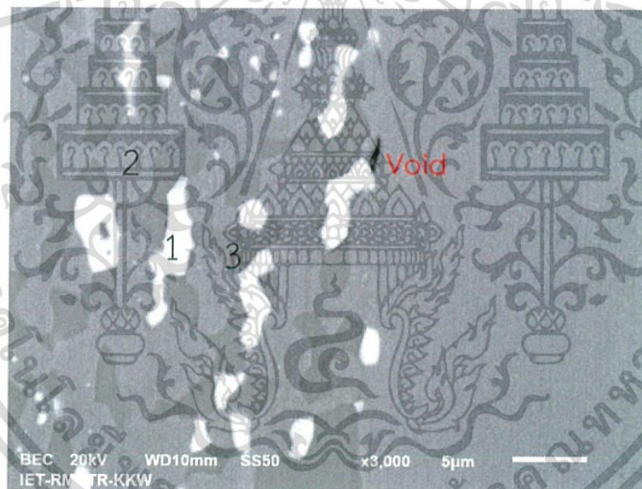
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุและตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping ของชิ้นงานที่มีปัจจัยอุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส เวลา 20 นาที ความดัน 12.173 กิโลปาสกาล แสดงดังรูปที่ 4.21 – 4.22 และตารางที่ 4.13



รูปที่ 4.21 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping ของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส เวลา 20 นาที ความดัน 12.173 กิโลปาสกาล (a) ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 300 เท่า (b) ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 6000 เท่า สำหรับรูป (c), (d) และ (e) คือ ผลวิเคราะห์ Mapping ของธาตุ Cu, ธาตุ P และธาตุ Ag ตามลำดับ



รูปที่ 4.21 (ต่อ) ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping ของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส เวลา 20 นาที ความดัน 12.173 กิโลปาสคาล (e) คือ ผลวิเคราะห์ Mapping ของธาตุ Ag (f) ผลวิเคราะห์ line scan ที่กำลังขยาย 6000 เท่า



รูปที่ 4.22 ผลวิเคราะห์ EDS ของชิ้นงานที่มีปัจจัยอุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส เวลา 20 นาที ความดัน 12.173 กิโลปาสคาล

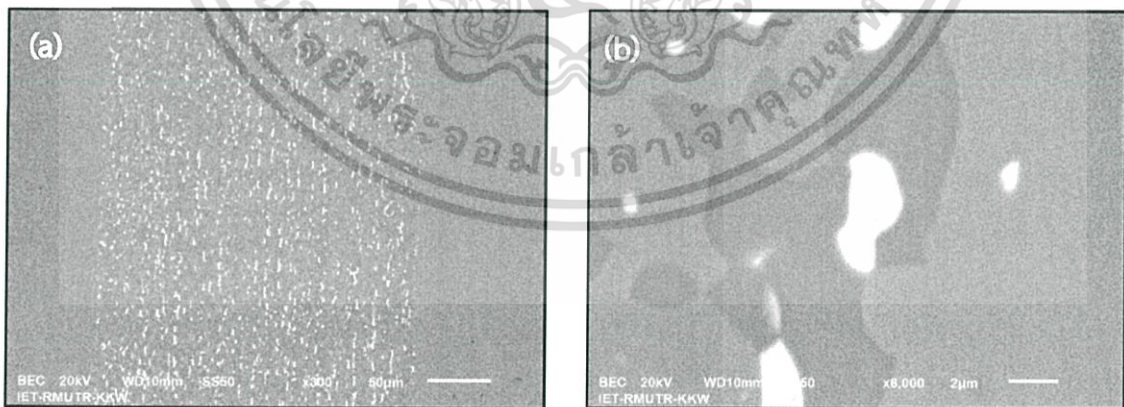
ตารางที่ 4.13 ผลวิเคราะห์ EDS ของชิ้นงานที่มีปัจจัยอุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส
เวลา 20 นาที ความดัน 12.173 กิโลปาสคาล

Points	Element (at%)		
	Ag	Cu	P
1	7.77	69.86	22.37
2	1.25	83.76	14.99
3	4.19	92.69	3.12

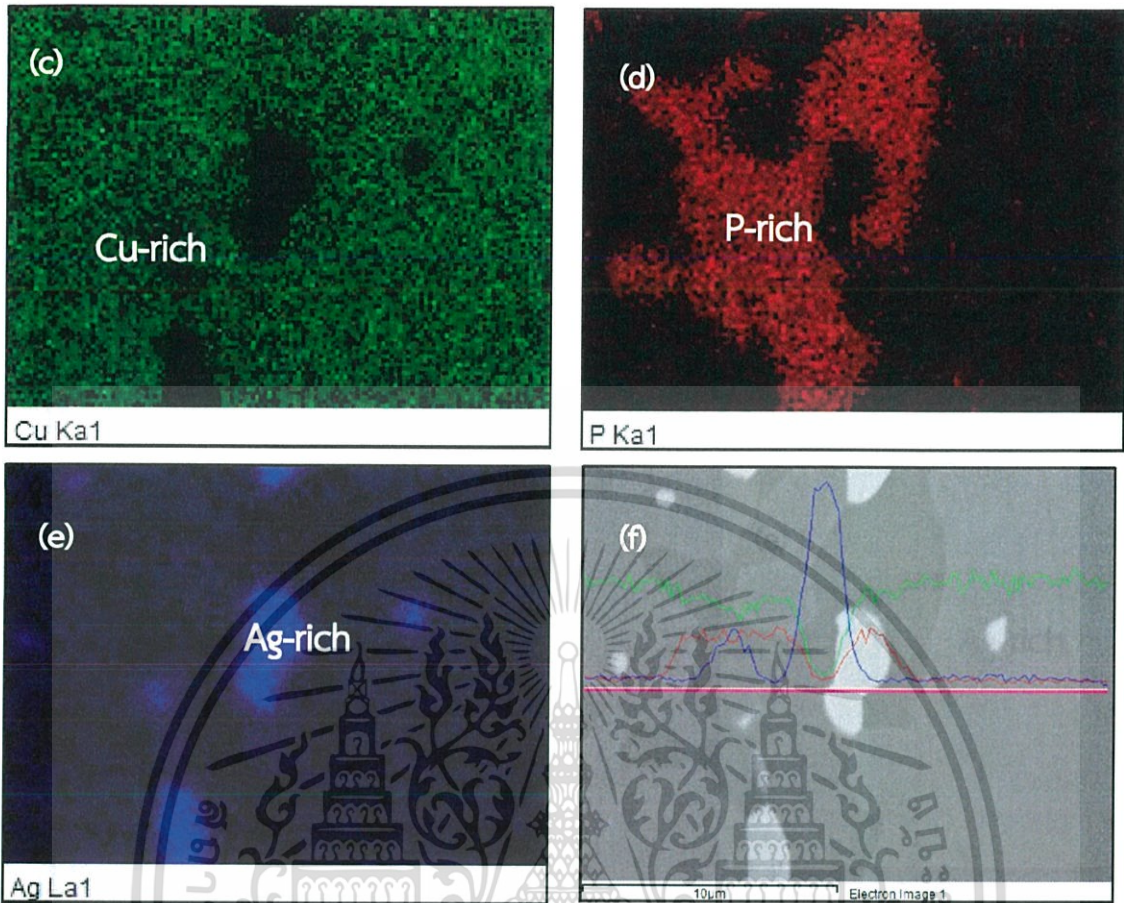
จากการวิเคราะห์ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping เมื่อนำผลการตรวจสอบของชิ้นงานที่ อุณหภูมิในการเล่นประสาน 620 องศาเซลเซียส เวลาในการเล่นประสาน 20 นาที ความดันที่ใช้ในการกดชิ้นงาน 12.173 กิโลปาสคาล และเกิดช่องว่างระหว่างรอยต่อจากการเล่นประสาน

4.2.2.6 ผลการศึกษาชิ้นงานที่มีปัจจัยอุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ความดัน 8.656 กิโลปาสคาล

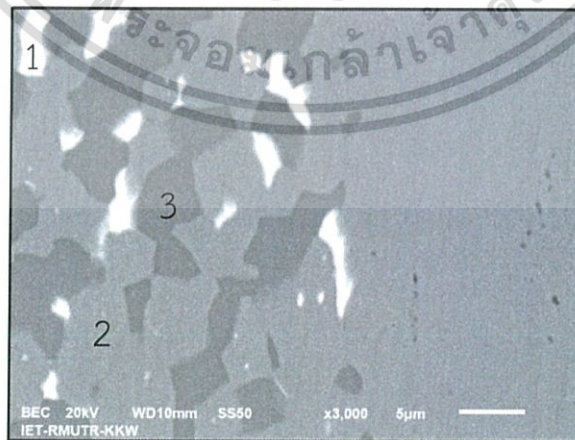
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุและตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping ของชิ้นงานที่มีปัจจัยอุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส เวลา 20 นาที ความดัน 12.173 กิโลปาสคาล แสดงดังรูปที่ 4.23– 4.24 และตารางที่ 4.14



รูปที่ 4.23 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping ของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ความดัน 8.656 กิโลปาสคาล (a) ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 300 เท่า (b) ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 6000 เท่า



รูปที่ 4.23 (ต่อ) ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping ของชิ้นงาน ที่อุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ความดัน 8.656 กิโลปาสคาล (c), (d) และ (e) คือ ผลวิเคราะห์ Mapping ของธาตุ Cu, ธาตุ P และธาตุ Ag ตามลำดับ (f) ผลวิเคราะห์ line scan ที่กำลังขยาย 6000 เท่า



รูปที่ 4.24 ผลวิเคราะห์ EDS ของชิ้นงานที่มีปัจจัยอุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ความดัน 8.656 กิโลปาสคาล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 ผลวิเคราะห์ EDS ของชิ้นงานที่มีปัจจัยอุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส

เวลา 30 นาที ความดัน 8.656 กิโลปาสคาล

Points	Element (at%)		
	Ag	Cu	P
1	78.73	20.60	0.66
2	2.05	94.87	3.08
3	1.86	70.40	27.74

จากการวิเคราะห์ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping เมื่อนำผลการตรวจสอบของชิ้นงานที่ อุณหภูมิในการเล่นประสาน 620 องศาเซลเซียส เวลาในการเล่นประสาน 30 นาที ความดันที่ใช้ในการกดชิ้นงาน 8.656 กิโลปาสคาล จะพบว่าขนาดเกรนของชิ้นงานที่กำลังขยาย 6000 เท่า มีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเทียบกับโลหะเดิมก่อนการเล่นประสาน เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเป็น 620 องศาเซลเซียส เวลาเพิ่มเป็น 30 นาที และความดันที่เพิ่มขึ้นเป็น 8.656 กิโลปาสคาล ทั้งสามปัจจัยที่มีระดับที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคเกิดการเปลี่ยนแปลง

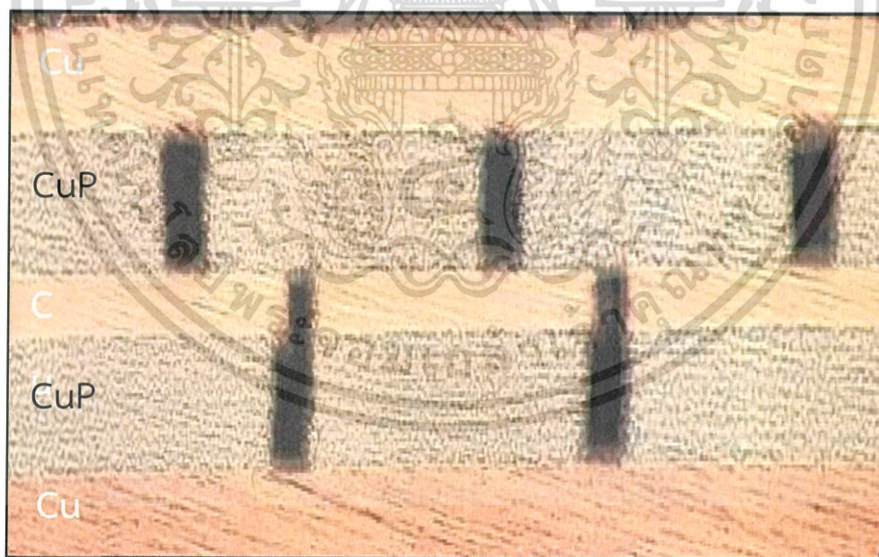
ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Mapping จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการเล่นประสาน เวลาในการเล่นประสาน และความดันที่ใช้กดชิ้นงานพบว่า การใช้อุณหภูมิในการเล่นประสาน 620 องศาเซลเซียส เวลาในการเล่นประสาน 30 นาที และความดันที่ใช้กดชิ้นงาน 12.173 กิโลปาสคาล มีผลทำให้เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้มีขอบเกรนน้อยลง ซึ่งส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลของโลหะ ทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลง แต่เนื่องจากชิ้นงานที่มีปัจจัยเหมาะสมไม่มีช่องว่างระหว่างรอยต่อจากการเล่นประสาน โลหะพื้กับโลหะเดิมเกิดการเล่นประสานในสถานะของแข็งกันอย่างสมบูรณ์ ในขณะที่ชิ้นงานที่มีปัจจัยไม่เหมาะสมมีช่องว่างระหว่างรอยต่อจากการเล่นประสาน ซึ่งช่องว่างระหว่างรอยต่อมีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของชิ้นงานมากกว่าขนาดเกรน จึงส่งผลให้ชิ้นงานที่มีปัจจัยเหมาะสมมีค่าแรงดึงเดือนมากที่สุด

ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Mapping และ Line scan ของชิ้นงานที่มีปัจจัยเหมาะสม และชิ้นงานที่มีปัจจัยไม่เหมาะสมที่รอยต่อจากการเล่นประสานและบริเวณโลหะพื้นทองแดง จะไม่พบธาตุ Ag และ P เนื่องจากเป็นการประสานกันในสถานะของแข็งโดยไม่เกิดการหลอมละลาย จึงไม่เกิดธาตุ Ag และ P กระจายตัวอยู่ในโลหะพื้นทองแดง แต่สาเหตุที่ชิ้นงานที่มีปัจจัยที่เหมาะสมสามารถเชื่อมติดกันได้โดยที่โลหะเดิมไม่ละลายเกิดจากการแพร่ของธาตุทองแดงไปยังบริเวณรอยต่อระหว่างการเล่นประสาน ก่อนเล่นประสานโลหะเดิมมีทองแดง 81.52 at% หลังจากเล่นประสานมีเปอร์เซ็นต์ของทองแดงที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

บริเวณรอยต่อเพิ่มขึ้นเป็น 95.16 at% เกิดจากการแพร่ของทองแดงจากโลหะพื้นมายังโลหะเติม ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ชิ้นงานที่มีปัจจัยเหมาะสมคือที่อุณหภูมิในการเล่นประสาน 620 องศาเซลเซียส เวลาในการเล่นประสาน 30 นาที และความดันที่ใช้กดชิ้นงาน 12.173 กิโลปาสคาล เกิดสารประกอบใหม่ ฟอสไฟด์ (Cu_3P) ไม่มีช่องว่างระหว่างรอยต่อจากการจากการเล่นประสาน เกิดการเล่นประสานในสภาวะของแข็งโดยไม่มี การหลอมละลายของโลหะเติม เป็นผลให้แรงดึงเฉือนของรอยต่อมีค่าสูงกว่าชิ้นงานที่มีปัจจัยไม่เหมาะสม

4.3 ผลการทดลองหลังจากการตัดแนวตามขวางของแผงระบายความร้อน

โดยก่อนทำการเล่นประสานแผงระบายความร้อนที่ได้ออกแบบไว้ ต้องทำการอุ่นตัวยึดจับชิ้นงานก่อนที่อุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้อุณหภูมิของตัวยึดจับชิ้นงานมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายในเตาอบ โดยผลจากการตัดตามขวางของแผงระบายความร้อนที่ได้หลังจากทำการเล่นประสาน แล้วนำชิ้นงานมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง โดยรวม พบว่าไม่พบโลหะเติมทองแดง-ฟอสฟอรัสละลายลงในท่อขนาดเล็กของแผงระบายความร้อนดังรูปที่ 4.25 จึงสรุปได้ว่าปัจจัยที่ใช้ในการเล่นประสาน ที่อุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการเล่นประสานที่ 30 นาที ความดันที่ใช้ 12.173 กิโลปาสคาล เป็นปัจจัยที่เหมาะสมต่อการเล่นประสาน โดยที่โลหะเติมทองแดง-ฟอสฟอรัสไม่ละลาย



รูปที่ 4.25 ภาพตัดขวางของแผงระบายความร้อน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเล่นประสานในเตาอบภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจนที่มีต่อแรงดึงเฉือนของรอยต่อระหว่างแผ่นทองแดงกับโลหะเติมทองแดง-ฟอสฟอรัส โดยมีตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ อุณหภูมิในการเล่นประสาน เวลาในการเล่นประสาน และ ความดันที่ใช้กดชิ้นงาน ผลจากการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 ผลการศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อแรงดึงเฉือนของรอยต่อ

5.1.1 ผลการทดสอบระดับปัจจัยเพื่อหาช่วงที่เหมาะสมต่อการออกแบบการทดลอง

ก่อนออกแบบการทดลอง ได้ทำการทดลองหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมกับการศึกษาการเล่นประสานในสถานะของแข็ง โดยทดลองเล่นประสานในเตาอบที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะเติมทองแดง-ฟอสฟอรัส ที่อุณหภูมิ 645 องศาเซลเซียส ซึ่งโลหะเติมมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าทองแดง เมื่อเล่นประสานชิ้นงานทดสอบพบว่า

1. ถ้าคงที่เวลาในการเล่นประสานที่ 5 นาที และความดันที่ใช้กดชิ้นงานที่ 16.35 กิโลปาสคาล ที่อุณหภูมิการเล่นประสานที่ต่ำกว่า 550 องศาเซลเซียส โลหะเติมไม่ละลาย แต่เมื่อชิ้นงานทดสอบเย็นตัวลงโลหะเติมกับทองแดงหลุดออกจากกัน

2. อุณหภูมิในการเล่นประสาน 560 องศาเซลเซียส เวลาในการเล่นประสาน 5 นาที และความดันที่ใช้กดชิ้นงาน 16.35 กิโลปาสคาล โลหะเติมไม่ละลาย เมื่อชิ้นงานทดสอบเย็นตัวลงโลหะเติมกับทองแดงไม่หลุดออกจากกัน ทดสอบแรงดึงเฉือนได้เท่ากับ 14 นิวตัน

3. อุณหภูมิในการเล่นประสาน 625 องศาเซลเซียส เวลาในการเล่นประสาน 5 นาที และความดันที่ใช้กดชิ้นงาน 11.12 กิโลปาสคาล โลหะเติมละลาย เมื่อทดลองเพิ่มอุณหภูมิในการเล่นประสานขึ้นจาก 625 องศาเซลเซียส เป็น 650 องศาเซลเซียส จะได้ผลลัพธ์ที่เหมือนกันคือโลหะเติมละลาย และเมื่อทดลองเพิ่มเวลาในการเล่นประสานจากเวลา 5 นาที เป็น 10 นาที ผลที่ได้คือโลหะเติมละลาย

ซึ่งการเล่นประสานในสถานะของแข็ง โลหะเติมและโลหะพื้นต้องไม่หลอมละลาย ดังนั้นขอบเขตของการศึกษาอิทธิพลที่มีผลต่อการเล่นประสานในสถานะของแข็ง อุณหภูมิที่ใช้ในการเล่นประสานจะต้องไม่ต่ำกว่า 560 องศาเซลเซียส และไม่สูงเกิน 625 องศาเซลเซียส

5.1.2 ผลการศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อแรงดึงเดือนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ทางสถิติ

จากการทดสอบแรงดึงเดือน และวิเคราะห์ข้อมูลด้วยเทคนิคทางสถิติพบว่า ตัวแปรหลัก อุดมภูมิในการเล่นประสาน เวลาในการเล่นประสาน ความดันที่ใช้กดชิ้นงาน อันตรกิริยาของอุดมภูมิในการเล่นประสาน อันตรกิริยาร่วมระหว่างอุดมภูมิในการเล่นประสานกับเวลาในการเล่นประสาน อันตรกิริยาร่วมระหว่างอุดมภูมิในการเล่นประสานกับความดันที่ใช้กดชิ้นงานมีอิทธิพลต่อค่าความแรงดึงเดือนของรอยต่อที่ระดับ $\alpha = 0.05$ และรอยต่อที่ได้จากการเล่นประสานในเตาอบ โดยใช้อุดมภูมิในการเล่นประสาน 620 องศาเซลเซียส เวลาในการเล่นประสาน 30 นาที และ ความดันที่ใช้กดชิ้นงาน 12.713 กิโลปาสคาล ให้ค่าแรงดึงเดือนสูงสุด

ผลจากการวิเคราะห์ ANOVA แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของแต่ละตัวแปรที่มีต่อแรงดึงเดือนของรอยต่อที่ต่างกัน ซึ่งจากการเปรียบเทียบพบว่า ตัวแปรหลัก อุดมภูมิในการเล่นประสานมีอิทธิพลต่อแรงดึงเดือนของรอยต่อมากที่สุด รองลงมาคือ อันตรกิริยาของอุดมภูมิในการเล่นประสาน ความดันที่ใช้กดชิ้นงาน อันตรกิริยาร่วมระหว่างอุดมภูมิในการเล่นประสานกับเวลาในการเล่นประสาน เวลาในการเล่นประสาน และลำดับสุดท้ายคือ อันตรกิริยาร่วมระหว่างอุดมภูมิในการเล่นประสานกับความดันที่ใช้กดชิ้นงาน ส่วนตัวแปรอื่น ได้แก่ อันตรกิริยาของเวลาในการเล่นประสาน อันตรกิริยาของความดันที่ใช้กดชิ้นงาน และ อันตรกิริยาร่วมระหว่างเวลาในการเล่นประสานกับความดันที่ใช้กดชิ้นงาน ไม่มีผลกระทบต่อแรงดึงเดือนของรอยต่อที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

5.2 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อ

จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด พบว่า ชิ้นงานที่ระดับปัจจัยที่เหมาะสม อุดมภูมิในการเล่นประสาน 620 องศาเซลเซียส เวลาในการเล่นประสาน 30 นาที ความดันที่ใช้กดชิ้นงาน 12.173 กิโลปาสคาล ไม่มีช่องว่างระหว่างรอยต่อ ส่งผลให้ค่าแรงดึงเดือนของรอยต่อสูงกว่าชิ้นงานที่มีระดับปัจจัยที่ไม่เหมาะสม ขณะที่ชิ้นงานที่มีปัจจัยไม่เหมาะสมจะมีช่องว่างบริเวณรอยต่อ ส่งผลให้เมื่อนำไปทดสอบแรงดึงเดือนชิ้นงานที่มีปัจจัยเหมาะสมจะมีค่าแรงดึงเดือนมากกว่า

ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค Mapping พบว่า ที่ระดับของปัจจัยที่ทำการศึกษาทั้งหมด ไม่มีการกระจายตัวของธาตุ Ag และ P ไปยังบริเวณโลหะพื้นทองแดง เนื่องจากระดับปัจจัยที่ทำการศึกษาไม่ได้สูงพอที่จะทำให้โลหะเติมละลาย แต่ชิ้นงานที่มีปัจจัยเหมาะสมสามารถเล่นประสานติดได้อย่างสมบูรณ์เนื่องจากเกิดการแพร่ของธาตุทองแดงจากโลหะพื้นไปยังบริเวณโลหะเติม จึงเป็นการเล่นประสานในสภาวะของแข็ง ธาตุ Ag และ P จึงไม่เกิดการกระจายตัว และเกิดขึ้นสารประกอบใหม่ฟอสไฟด์ (Cu_3P) ใกล้เคียงกับบริเวณรอยต่อของชิ้นงาน

5.3 ผลจากการตัดแนวตามขวางของแผงระบายความร้อน

ผลจากการตัดแนวตามขวางของแผงระบายความร้อนพบว่า ไม่มีโลหะเติมทองแดง-ฟอสฟอรัสละลายลงในท่อระบายความร้อนของแผงระบายความร้อนจึงสรุปได้ว่า ปัจจัยที่ใช้ในการเล่นประสาน ที่อุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการเล่นประสานที่ 30 นาที ความดันที่ใช้ 12.173 กิโลปาสคาล เป็นปัจจัยที่เหมาะสมต่อการเล่นประสาน

5.4 ข้อจำกัดในการทำงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดในการทำงานต่าง ๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. เนื่องจากเครื่องตัดเลเซอร์มีการตัดที่ไม่แม่นยำ เนื่องจากข้อจำกัดของตัวเครื่อง จึงทำให้ขนาดชิ้นงานและรายละเอียดของชิ้นงานไม่เป็นไปตามที่ออกแบบไว้
2. ด้วยชิ้นงานทดสอบที่จะนำไปเล่นประสานมีขนาดเล็ก จึงอาจทำให้ขั้นตอนการประกอบชิ้นงานก่อนการเล่นประสานมีความคลาดเคลื่อน จึงทำให้ต้องมีการทดลองหลายรอบ
3. ในขั้นตอนการตัดเลเซอร์ด้วยข้อจำกัดที่จะต้องนำเศษโลหะจากการตัดด้วยเลเซอร์ที่อยู่ระหว่างท่อระบายความร้อน จะมีปัญหาในการนำเศษโลหะออกมาจากท่อระบายความร้อนเนื่องจากท่อระบายความร้อนมีขนาดเล็ก

5.5 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยทำมีข้อเสนอแนะในการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของการปรับแนวของชิ้นงาน เพื่อให้จะให้ช่องขนาดเล็กของแต่ละชั้นของแผงระบายความร้อนให้ตรงกัน เมื่อช่องขนาดเล็กในแผงระบายความร้อนตรงกัน จะสามารถนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ahmad A. Pesaran, 2002. Battery thermal models for hybrid vehicle simulations. Journal of Power Sources 110 : 377-382.
- [2] Rui Zhao, Junjie Gu, Jie Liu, 2015. An experimental study of heat pipe thermal management system with wet cooling method for lithium ion batteries. Journal of Power Sources 273 : 1088-1097.
- [3] Heesung Park, 2013. A design of air flow configuration for cooling lithium ion battery in hybrid electric vehicles. Journal of Power Sources 239 : 30-36.
- [4] Rajib Mahamud, Chanwoo Park, 2011. Reciprocating air flow for Li-ion battery thermal management to improve temperature uniformity. Journal of Power Sources 196 : 5685-5696.
- [5] Liwu Fan, Jay M. Khodadadi, Ahmad A. Pesaran, 2013. A parametric study on thermal management of an air-cooled lithium-ion battery module for plug-in hybrid electric vehicles. Journal of Power Sources 238 : 301-312.
- [6] Zhonghao Rao, Shuangfeng Wang, Maochun Wu, Zirong Lin, Fuhuo Li, 2013. Experimental investigation on thermal management of electric vehicle battery with heat pipe. Energy Convers. Manage 65 : 92-97.
- [7] วสวัชร นาคเขียว. กระบวนการผลิต (Manufacturing Processes) กระบวนการต่อวัสดุ. วิศวกรรมอุตสาหการ, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [8] กรรณชัย กัลยาศิริ, 2551. กรรมวิธีการผลิต. กรุงเทพฯ : หจก. วี.เจ.พรินติ้ง.
- [9] ประภาส เกตุไทย, 2545. งานเชื่อมโลหะแผ่น. กรุงเทพฯ : สกายบุ๊กส์.
- [10] ยุคค จุลอุทัย, 2539. การเชื่อมบัดกรีแข็ง. เชื่อมและเทคโนโลยีโลหะ ปีที่ 14 ฉบับที่ 25 : 51-61.
- [11] AWS C3.1-63, 1963. Establishment of a Standard Test for Braze Joints. A committee Report, American Welding Society (AWS).
- [12] H. Okamoto, P.R. Subramanian, L. Kacpzak and Thaddeus B. Massalski. Binary alloy phase diagram of Cu-P Second edition. The Material Information Society 2001, vol.1: 28-29.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [13] H. Okamoto, P.R. Subramanian, L. Kacpzak and Thaddeus B. Massalski. Binary alloy phase diagram of Ag-Cu Second edition. The Material Information Society 2001, vol.1: 28-29.
- [14] ปารเมศ ชูติมา, 2545. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [15] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์, 2549. การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง. กรุงเทพฯ : ท็อป.
- [16] อมรรัตน์ เลิศวรสิริกุล, เอกสารเสริมประกอบการเรียนวิชา 213211 Material Sciences for Engineers.

