

การพัฒนากระบวนการผลิตเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจาก  
โฟมทองแดง  
MANUFACTURING PROCESS DEVELOPMENT OF HEAT  
EXCHANGER FROM POROUS COPPER



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมออกแบบการผลิตและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2563

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

# MANUFACTURING PROCESS DEVELOPMENT OF HEAT EXCHANGER FROM POROUS COPPER



MS. NARUEMON POOLJEAN

MS. APINYA MEESUP

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN  
PRODUCTION DESIGN AND MATERIALS ENGINEERING  
SCHOOL OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2020

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์

การพัฒนากระบวนการผลิตเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจาก  
โฟมทองแดง

MANUFACTURING PROCESS DEVELOPMENT OF HEAT  
EXCHANGER FROM POROUS COPPER

นักศึกษา

นางสาวนฤมล พูลจัน

รหัสประจำตัว 60010515

นางสาวอภิญญา มีทรัพย์

รหัสประจำตัว 60011151

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมออกแบบการผลิตและวัสดุ

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์

  
(รศ.ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การพัฒนากระบวนการผลิตเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจากโฟมทองแดง
นักศึกษา	นางสาวนฤมล พูลจิ้น นางสาวอภิญญา มีทรัพย์
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมออกแบบการผลิตและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา	2563
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	รศ.ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ

### บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจากโฟมทองแดง ด้วยการเล่นประสานระหว่างแผ่นทองแดงกับโฟมทองแดงขนาด 40 PPI โดยผ่านกระบวนการเล่นประสานในเตา และใช้โลหะเติมที่เป็นอสังฐาน CuNiSnP แบบแผ่นบางเป็นตัวเชื่อมติดแผ่นทองแดงกับโฟมทองแดง ทำการเล่นประสานที่อุณหภูมิเล่นประสาน 680 °C เป็นเวลา 15 นาที ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคลักษณะของรอยต่อเล่นประสานด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง จากการศึกษาพบว่าโลหะเติมสามารถสร้างชั้นรอยต่อได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้รอยต่อที่ได้มีความแข็งแรง แต่อย่างไรก็ตามยังคงสังเกตเห็นการปรากฏในปริมาณเพียงเล็กน้อยของช่องว่าง (Micro-voids) และรอยแตก (Micro-cracks) ตามบริเวณรอยต่อเล่นประสาน และผลการทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนภายใต้เงื่อนไขขอบเขตการทดสอบที่ 3 สภาวะอัตราการไหลของน้ำที่ 7.8 mL/min, 25 mL/min และ 49 mL/min เป็นเวลา 1 นาที ผลการศึกษาพบว่าที่อัตราการไหลของน้ำ 49 mL/min มีอุณหภูมิแผง LED ต่ำที่สุด และมีอัตราความร้อนสูญเสียมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use <sup>ก</sup> only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

<b>Thesis Title</b>	Manufacturing Process Development of Heat Exchanger from Porous Copper
<b>Student</b>	Ms. Naruemon Poojean Ms. Apinya Meesup
<b>Degree</b>	Bachelor of Engineering in Production Design and Materials Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
<b>Academic Year</b>	2020
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr. Kannachai Kanlayasiri

### ABSTRACT

The aim of this study was to design and prototype the porous copper foam (PCF) heat exchanger using furnace brazing. PCF with 40 PPI was joined to copper sheets using CuNiSnP amorphous filler metal. The brazing temperature was 680 °C with a brazing time of 15 minutes. An optical microscope was used to examine the interfacial microstructure and its bonding properties. The results showed that the CuNiSnP amorphous filler metal was efficient in forming a reaction layer and produced a sound bonding. However, small measurable micro-voids or cracks in the brazed joint were observed. In addition, PCF heat exchanger test was performed under three different cooling water flow rates at 7.8 mL/min, 25 mL/min, and 49 mL/min for 1 minute. The results showed that with the flow rate of 49 mL/min, the LED panel had the lowest temperature and highest heat loss.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การพัฒนากระบวนการผลิตเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจากโคมทองแดงสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีนั้น ข้าพเจ้าขอขอบคุณผู้มีส่วนเกี่ยวข้องที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำและตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่อง กระทั่งโครงการฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก รศ.ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ ที่ได้ให้โอกาสในการศึกษาปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้รวมทั้งที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ตลอดจนชี้แนะแนวทางสำหรับปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างยิ่ง คณะผู้จัดทำมีความซาบซึ้งเป็นอย่างสูงในความกรุณาและความทุ่มเทที่อาจารย์ได้มอบให้นี้ จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ดร. ประจักษ์ จิตกุล ที่คอยให้คำแนะนำในการปรับปรุงแก้ไข ให้ความรู้ ดูแลช่วยเหลือ รวมทั้งการเอื้อเฟื้ออุปกรณ์ในการจัดทำปริญญาานิพนธ์ และการใช้เครื่องมืออุปกรณ์การทดลองและการทดสอบต่าง ๆ ระหว่างการศึกษาวิจัยจนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ประสาทความรู้และประสบการณ์ จนผู้วิจัยสามารถดำเนินงานวิจัยเรียบร้อยสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ เจ้าของหนังสือ ตำรา เอกสาร และงานวิจัยอ้างอิงต่าง ๆ ที่เขียนเรียบเรียงรวบรวมข้อมูลต่าง ๆ ไว้เป็นอย่างดี ทำให้เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยสนับสนุน ให้กำลังใจ อีกทั้งเพื่อน ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ

อนึ่ง คณะผู้จัดทำหวังไว้เป็นอย่างสูงว่า ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ที่เกิดจากความทุ่มเทและความพยายามจะมีค่า และเกิดประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจ ตลอดจนผู้ที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ ดังนั้นคณะผู้จัดทำจึงมีความประสงค์ที่จะขอมอบส่วนดีทั้งหมดนี้ให้แก่เหล่าคณาจารย์ที่ช่วยประสิทธิประสาทวิชา และในส่วนของข้อบกพร่องของปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้จัดทำขอน้อมรับผิดไว้แต่เพียงผู้เดียว และยินดีที่จะรับฟังคำแนะนำต่าง ๆ จากทุกท่านที่ได้เข้ามาศึกษา เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนาต่อไป

นางสาว นฤมล พูลจิ้น

นางสาว อภิญญา มีทรัพย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ข
กิตติกรรมประกาศ .....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป .....	ซ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์ .....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 แผนการดำเนินงาน.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 กระบวนการเล่นประสาน (Brazing).....	4
2.1.1 ชนิดของรอยต่อในการเล่นประสาน .....	6
2.2 โลหะเติม (Filler Metal) .....	7
2.3 คุณสมบัติของทองแดง .....	10
2.4 โฟมโลหะ (Porous Metal).....	10
2.5 กระบวนการถ่ายเทความร้อน .....	11
2.6 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	12
2.6.1 ชนิดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน .....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญ

	หน้า
2.7 การทดสอบและวิเคราะห์อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	17
2.7.1 ปริมาณความร้อนของวัตถุ (Heat, Q).....	17
2.8 เครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค .....	20
2.8.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM).....	20
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	20
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน</b>	
3.1 การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจากโพมทองแดง .....	23
3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์ .....	23
3.1.2 ขั้นตอนการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน .....	25
3.2 การเล่นประสาน .....	27
3.3 การศึกษารอยต่อและโครงสร้างจุลภาค.....	29
3.4 การทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน .....	31
3.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	31
3.4.2 ขั้นตอนดำเนินการทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน .....	34
3.4.3 วิธีการวิเคราะห์และนำเสนอผลการวิเคราะห์ .....	36
<b>บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน</b>	
4.1 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดอสัณฐาน จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....	38
4.1.1 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชิ้นงานที่ 1 .....	38
4.1.2 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชิ้นงานที่ 2 .....	45
4.1.3 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชิ้นงานที่ 3 .....	53
4.1.4 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชิ้นงานที่ 4 .....	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญ

	หน้า
4.2 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	67
4.2.1 พารามิเตอร์เงื่อนไขและขอบเขตในการทดสอบ .....	68
4.2.2 กรณีที่หนึ่งการปรับอัตราการไหลของน้ำ ที่แรงดันไฟฟ้า 4 V.....	70
4.2.3 กรณีที่สองการปรับอัตราการไหลของน้ำ ที่แรงดันไฟฟ้า 8 V.....	72
4.2.4 กรณีที่สามการปรับอัตราการไหลของน้ำ ที่แรงดันไฟฟ้า 12 V.....	74
4.2.5 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิแผง LED ขณะอัตราการไหลของน้ำที่แรงดันไฟฟ้า 4 V, 8 V และ 12 V.....	76
4.2.6 วิเคราะห์ผลการทดสอบ โดยอัตราความร้อนที่สูงสูญเสียอุณหภูมิแผง LED เปรียบเทียบทั้ง 3 กรณี.....	78
<b>บทที่ 5 สรุปและอภิปรายผล</b>	
5.1 การสรุปผลและการอภิปรายผล .....	81
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	82
<b>เอกสารอ้างอิง .....</b>	<b>83</b>
<b>ภาคผนวก.....</b>	<b>87</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน .....	3
ตารางที่ 2.1 โลหะเติมที่เหมาะสมกับการใช้งานในโลหะชนิดต่าง ๆ .....	9
ตารางที่ 2.2 ความจุความร้อนจำเพาะของสารต่าง ๆ .....	19
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของโลหะเติม CuNiSnP ชนิดออสัณฐาน .....	24
ตารางที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ .....	33
ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขและขอบเขตของพารามิเตอร์ในการทดสอบ .....	68
ตารางที่ 4.2 อัตราการไหลของน้ำกรณีไม่มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน .....	68
ตารางที่ 4.3 อัตราการไหลของน้ำกรณีมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน .....	68
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบเวลากับอุณหภูมิของแผง LED กรณีไม่มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยศึกษาเป็นเวลา 1 min .....	69
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบเวลากับอุณหภูมิแผง LED ขณะอัตราการไหลของน้ำ 7.8 mL/min ที่แรงดันไฟฟ้า 4 V กรณีมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยศึกษาเป็นเวลา 1 min.....	71
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบเวลากับอุณหภูมิแผง LED ขณะอัตราการไหลของน้ำ 25 mL/min ที่แรงดันไฟฟ้า 8 V กรณีมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยศึกษาเป็นเวลา 1 min.....	73
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบเวลากับอุณหภูมิแผง LED ขณะอัตราการไหลของน้ำ 49 mL/min ที่แรงดันไฟฟ้า 12 V กรณีมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยศึกษาเป็นเวลา 1 min.....	75
ตารางที่ 4.8 ผลอัตราความร้อนที่สูญเสียอุณหภูมิแผง LED กรณีมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ขณะอัตราการไหลของน้ำที่ 7.8 mL/min, 25 mL/min และ 49 mL/min ที่เวลา 1 min.....	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การจำแนกประเภทของการประสานวัสดุ.....	5
รูปที่ 2.2 ลักษณะรอยต่อแบบต่าง ๆ.....	7
รูปที่ 2.3 ลักษณะรูพรุนแบบเปิด (a) และลักษณะรูพรุนแบบปิด (b).....	11
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างโคมทองแดง.....	11
รูปที่ 2.5 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น .....	14
รูปที่ 2.6 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัด.....	15
รูปที่ 2.7 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อและเปลือก .....	16
รูปที่ 2.8 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น.....	17
รูปที่ 3.1 แผ่นโคมทองแดง (a), โคมทองแดงที่กำลังขยาย 5x (b), แท่งทองแดงสี่เหลี่ยมกลาง (c), แผ่นทองแดงขึ้นฝาปิดด้านบน (d) และแผ่นทองแดงขึ้นฝาด้านล่าง (e).....	24
รูปที่ 3.2 รายละเอียดขนาดในการตัดแผ่นโคมทองแดง.....	25
รูปที่ 3.3 รายละเอียดขนาดในการตัดแท่งทองแดง.....	25
รูปที่ 3.4 รายละเอียดขนาดในการกัดแผ่นทองแดงขึ้นฝาปิดด้านบน .....	26
รูปที่ 3.5 รายละเอียดขนาดในการกัดแผ่นทองแดงขึ้นฝาด้านล่าง .....	26
รูปที่ 3.6 ลักษณะของชิ้นงานสมบูรณ์ (a) และลำดับการวางของชิ้นงานและโลหะเติมภายใน การเล่นประสาน (b) .....	27
รูปที่ 3.7 การวางชิ้นงานและโลหะเติม .....	28
รูปที่ 3.8 อุปกรณ์ยึดจับชิ้นงาน .....	28
รูปที่ 3.9 เครื่องเล่นประสาน .....	29
รูปที่ 3.10 ชิ้นงานหลังการเล่นประสาน .....	29
รูปที่ 3.11 เครื่องตัดชิ้นงาน.....	30
รูปที่ 3.12 การผ่าชิ้นงาน 4 ชั้นตาม Cross Section ของเครื่อง .....	30
รูปที่ 3.13 ชิ้นงานที่หล่อด้วยเรซิน .....	31
รูปที่ 3.14 ไตอะแกรมของชุดอุปกรณ์การทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	34
รูปที่ 3.15 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	34

เอกสารนี้สงวนลิขสิทธิ์โดยภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ และภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ วิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ใด ๆ การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 3.16 ชุดทดลองการทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน .....	35
รูปที่ 3.17 การทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน .....	36
รูปที่ 4.1 ภาพตัดขวางของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชิ้นงานที่ 1(A) .....	39
รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเดิม CuNiSnP ชนิดอสังฐาน และทองแดงบริเวณมุมซ้ายบนชิ้นที่ 1 ตำแหน่งที่ 1 ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า .....	39
รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเดิม CuNiSnP ชนิดอสังฐาน และทองแดงบริเวณมุมขวาบนชิ้นที่ 1 ตำแหน่งที่ 2 ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า.....	40
รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเดิม CuNiSnP ชนิดอสังฐาน และทองแดงบริเวณมุมขวาล่างชิ้นที่ 1 ตำแหน่งที่ 3 ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า.....	41
รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเดิม CuNiSnP ชนิดอสังฐาน และทองแดงบริเวณมุมซ้ายล่างชิ้นที่ 1 ตำแหน่งที่ 4 ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า .....	42
รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเดิม CuNiSnP ชนิดอสังฐาน และทองแดงชิ้นที่ 1 ตำแหน่งที่ 5 บริเวณขอบบนระหว่างทองแดงธรรมดา กับทองแดงรูปทูน ตำแหน่งที่ 6, 7, 8 และตำแหน่งที่ 9 บริเวณขอบล่างระหว่างทองแดงธรรมดา กับทองแดงรูปทูน ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า .....	44
รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเดิม CuNiSnP ชนิดอสังฐาน และทองแดงชิ้นที่ 1 ตำแหน่ง ที่ 10, 11 และ 12 บริเวณตรงกลางชิ้นงาน ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า.....	45
รูปที่ 4.8 ภาพตัดขวางของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชิ้นงานที่ 2(B).....	45
รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเดิม CuNiSnP ชนิดอสังฐาน และทองแดงบริเวณมุมซ้ายบนชิ้นที่ 2 ตำแหน่งที่ 1 ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า .....	46
รูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเดิม CuNiSnP ชนิดอสังฐาน และทองแดงบริเวณมุมขวาบนชิ้นที่ 2 ตำแหน่งที่ 2 ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า.....	47
รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเดิม CuNiSnP ชนิดอสังฐาน และทองแดงบริเวณมุมขวาล่างชิ้นที่ 2 ตำแหน่งที่ 3 ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า.....	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดอสัณฐาน และทองแดงบริเวณมุมซ้ายล่างชั้นที่ 2 ตำแหน่งที่ 4 ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า.....	49
รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดอสัณฐาน และทองแดงชั้นที่ 2 ตำแหน่งที่ 7, 8, 9 บริเวณขอบบนระหว่างทองแดงธรรมดา กับทองแดงรูปทูน และตำแหน่งที่ 10 บริเวณขอบล่างระหว่างทองแดงธรรมดา กับทองแดงรูปทูน ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า.....	51
รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดอสัณฐาน และทองแดงชั้นที่ 2 ตำแหน่งที่ 10, 11, 12, 13, 14 และตำแหน่งที่ 15 บริเวณตรงกลางชิ้นงาน ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า .....	52
รูปที่ 4.15 ภาพตัดขวางของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชิ้นงานที่ 3(C) .....	53
รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดอสัณฐาน และทองแดงบริเวณมุมซ้ายบนชั้นที่ 3 ตำแหน่งที่ 1 ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า.....	54
รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดอสัณฐาน และทองแดงบริเวณ มุมขวาบนชั้นที่ 3 ตำแหน่งที่ 2 ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า.....	55
รูปที่ 4.18 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดอสัณฐาน และทองแดงบริเวณ มุมขวาล่างชั้นที่ 3 ตำแหน่งที่ 3 ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า.....	56
รูปที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดอสัณฐาน และทองแดงบริเวณมุมซ้ายล่างชั้นที่ 3 ตำแหน่งที่ 4 ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า.....	57
รูปที่ 4.20 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดอสัณฐาน และทองแดงชั้นที่ 3 ตำแหน่งที่ 5 บริเวณขอบบนระหว่างทองแดงธรรมดา กับทองแดงรูปทูน ตำแหน่งที่ 6, 7, 8 และ 9 บริเวณขอบล่างระหว่างทองแดงธรรมดา กับทองแดงรูปทูนที่ กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า.....	59
รูปที่ 4.21 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดอสัณฐาน และทองแดงชั้นที่ 3 ตำแหน่งที่ 10, 11, 12 และตำแหน่งที่ 13 บริเวณตรงกลางชิ้นงาน ที่ กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า.....	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ใดๆ การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 4.22 ภาพตัดขวางของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชั้นงานที่ 4(D).....	60
รูปที่ 4.23 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดออสเทนไนต์ และทองแดงบริเวณมุมซ้ายบนชั้นที่ 4 ตำแหน่งที่ 1 ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า.....	61
รูปที่ 4.24 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดออสเทนไนต์ และทองแดงบริเวณมุมขวาบนชั้นที่ 4 ตำแหน่งที่ 2 ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า.....	62
รูปที่ 4.25 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดออสเทนไนต์ และทองแดงบริเวณมุมขวาล่างชั้นที่ 4 ตำแหน่งที่ 3 ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า.....	63
รูปที่ 4.26 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดออสเทนไนต์ และทองแดงบริเวณมุมซ้ายล่างชั้นที่ 4 ตำแหน่งที่ 4 ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า.....	64
รูปที่ 4.27 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดออสเทนไนต์ และทองแดงชั้นที่ 4 ตำแหน่งที่ 5 และ 6 บริเวณขอบบนระหว่างทองแดงธรรมดา กับทองแดงรูพรุน ตำแหน่งที่ 7 และ 8 บริเวณขอบล่างระหว่างทองแดงธรรมดา กับทองแดงรูพรุนที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า.....	65
รูปที่ 4.28 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดออสเทนไนต์ และทองแดงชั้นที่ 4 ตำแหน่งที่ 9, 10, 11 และตำแหน่งที่ 12 บริเวณตรงกลางชั้นงาน ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า.....	66
รูปที่ 4.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่บอลลูนหุ้มฉนวน LED กรณีไม่มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โคมทองแดง.....	70
รูปที่ 4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่บอลลูนหุ้มฉนวน LED กรณีมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ขณะอัตราการไหล 7.8 mL/min .....	72
รูปที่ 4.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่บอลลูนหุ้มฉนวน LED กรณีมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ขณะอัตราการไหล 25 mL/min .....	74
รูปที่ 4.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่บอลลูนหุ้มฉนวน LED กรณีมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ขณะอัตราการไหล 49 mL/min .....	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 4.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิแผง LED กรณีมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ขณะอัตราการไหลที่ 7.8 mL/min, 25 mL/min และ 49 mL/min .....	77
รูปที่ 4.34 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิแผง LED กรณีมี เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขณะอัตราการไหลที่ 7.8 mL/min, 25 mL/min และ 49 mL/min กับกรณีไม่มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน .....	77
รูปที่ 4.35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอัตราความร้อนสูญเสีย ขณะอัตราการไหลที่ 7.8 mL/min, 25 mL/min และ 49 mL/min.....	79
รูปที่ ผก. 1 การตรวจสอบอักขราวิสุทธิ.....	88



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

# บทที่ 1

## บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมา วัตถุประสงค์ ขอบเขตและประโยชน์ของงานวิจัยเรื่อง การพัฒนากระบวนการผลิตเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจากโคมทองแดง ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

1. ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ
2. วัตถุประสงค์ของโครงการ
3. ขอบเขตของปริญญานิพนธ์
4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ
5. แผนการดำเนินงาน

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ปัจจุบันความจำเป็นทางด้านการแลกเปลี่ยนความร้อนในโรงงานอุตสาหกรรมตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่มีความสำคัญมากขึ้น และกระบวนการอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับพลังงานความร้อนส่วนใหญ่มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นองค์ประกอบ [1] ทำให้เราจำเป็นต้องมีการศึกษาและวิจัยเพื่อการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านการแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มมากขึ้น

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนถูกใช้อย่างกว้างขวางในระบบต่าง ๆ ทางวิศวกรรมศาสตร์และในชีวิตประจำวัน เป็นอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนที่ใช้สำหรับการถ่ายโอนพลังงานความร้อนภายในระหว่างของไหลสองชนิดขึ้นไปที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน ส่วนใหญ่ของไหลจะถูกดันด้วยพื้นผิวการถ่ายเทความร้อนโดยที่ของไหลไม่จำเป็นต้องผสมกัน [2] และพบว่ามีการใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกันอย่างแพร่หลายในการผลิตกระแสไฟฟ้า การแปรรูปทางเคมี การระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เครื่องปรับอากาศ เครื่องทำความเย็น การใช้งานด้านยานยนต์ กระบวนการพลังงานปิโตรเลียม การขนส่ง การกักเก็บความร้อนและอุตสาหกรรมอื่น ๆ ตัวอย่างทั่วไปของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้งานในชีวิตประจำวัน ได้แก่ หม้อน้ำรถยนต์ คอนเดนเซอร์ เครื่องระเหยและเครื่องอุ่นอากาศ เป็นเครื่องมือที่สำคัญอย่างหนึ่งที่มีหน้าที่หลักคือการนำเอาพลังงานความร้อนมาใช้อย่างถูกหลักการและมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจุบันอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้กับของไหลไมโครโน้มที่มีขนาดเล็กลง จึงมีแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Micro-channel ซึ่งโดยทั่วไปแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้จะมีทางไหลผ่านของสารขนาดเล็กและพื้นที่ผิวสัมผัสก็น้อยตามไปด้วยและการผลิตแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนจะใช้เวลาในการผลิตนานเนื่องจากการใช้กระบวนการกัดเป็นร่องเพื่อเป็นทางไหลผ่านของสารหล่อเย็น [3] จึงนำไปสู่การศึกษาวัสดุที่เป็นรูพรุนมาใช้เป็นวัสดุในการทำอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน อันเนื่องด้วยโครงสร้างที่เป็นรูพรุนคล้ายฟองน้ำที่มีโครงสร้างแบบเปิดทำให้ของไหลสามารถไหลผ่านได้และผิวสัมผัสที่มากระหว่างของไหลหรืออากาศกับผิววัสดุแบบโฟมทำให้ประสิทธิภาพของการถ่ายโอนความร้อนมากขึ้นและคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุที่เหมาะสมต่อการถ่ายโอนความร้อนและความสามารถในการนำความร้อนที่ดีคือทองแดง จึงใช้โฟมทองแดงมาเป็นวัสดุในการสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และการนำแผ่นโฟมทองแดงมาทำหน้าที่ในการเป็นแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน ในวิธีการผลิตเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในอุตสาหกรรมนิยมใช้การแล่นประสานในเตาอบ โดยใช้แผ่นโลหะเดิมที่เป็นแบบบอสนันฐานเป็นตัวที่ทำหน้าที่ประสานแผ่นโฟมทองแดงกับแผ่นทองแดงธรรมดา อบไว้ที่อุณหภูมิ 680 °C หรือสูงกว่าแต่จะไม่เกินจุดหลอมละลายของทองแดง [3] วิศวกรได้มีการคิดค้นหาวิธีการต่าง ๆ มาใช้พัฒนากระบวนการให้มีประสิทธิภาพสูงสุด แต่ก็ประสบปัญหาอันมีสาเหตุมาจากข้อจำกัดในการเพิ่มประสิทธิภาพและการมีพื้นที่จำกัดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน จึงมีความพยายามที่จะหาทางเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการนำโฟมทองแดงมาใช้ในการสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจากโฟมทองแดง

## 1.3 ขอบเขตของปริญญาณิพนธ์

1. สร้างต้นแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจากทองแดงและโฟมทองแดง 40 PPI
2. ใช้ตัวประสานหรือโลหะเติม CuNiSnP ชนิดบอสนันฐาน (Amorphous brazing foil)
3. ใช้ LED COB Bulb Chip เป็นแหล่งพลังงานความร้อนสำหรับการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ออกแบบและสร้างต้นแบบที่สามารถนำไปพัฒนาสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในโรงงาน

อุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการแล่นประสานซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยต่อแล่นประสาน

### 1.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	พ.ศ. 2563					พ.ศ. 2564				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ระบุขอบเขต, วัตถุประสงค์ และ ประโยชน์ของโครงการนี้	↔									
2. ศึกษาเนื้อหาและทฤษฎีบทที่เกี่ยวข้อง 2.1 ศึกษาเกี่ยวกับโพลีโพรพิลีน 2.2 ศึกษาเกี่ยวกับเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อน 2.3 ศึกษากระบวนการแล่นประสาน 2.4 ศึกษากระบวนการถ่ายเทความร้อน 2.5 ศึกษาการทดสอบประสิทธิภาพ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน			↔							
3. ออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	↔	↔								
4. เริ่มต้นเตรียมชิ้นงานและจัดซื้อ อุปกรณ์สำหรับการทำชิ้นงาน		↔								
5. สร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ด้วยกระบวนการแล่นประสาน			↔	↔						
6. ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและ ทดสอบประสิทธิภาพเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อน						↔	↔			
7. วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลที่ได้จาก การทดสอบประสิทธิภาพเครื่อง แลกเปลี่ยนความร้อน								↔		
8. รวบรวมเนื้อหาและทฤษฎีทำรูปเล่ม ปรินต์									↔	↔

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยเรื่อง การพัฒนากระบวนการผลิตเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจากโพลีทองแดง ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

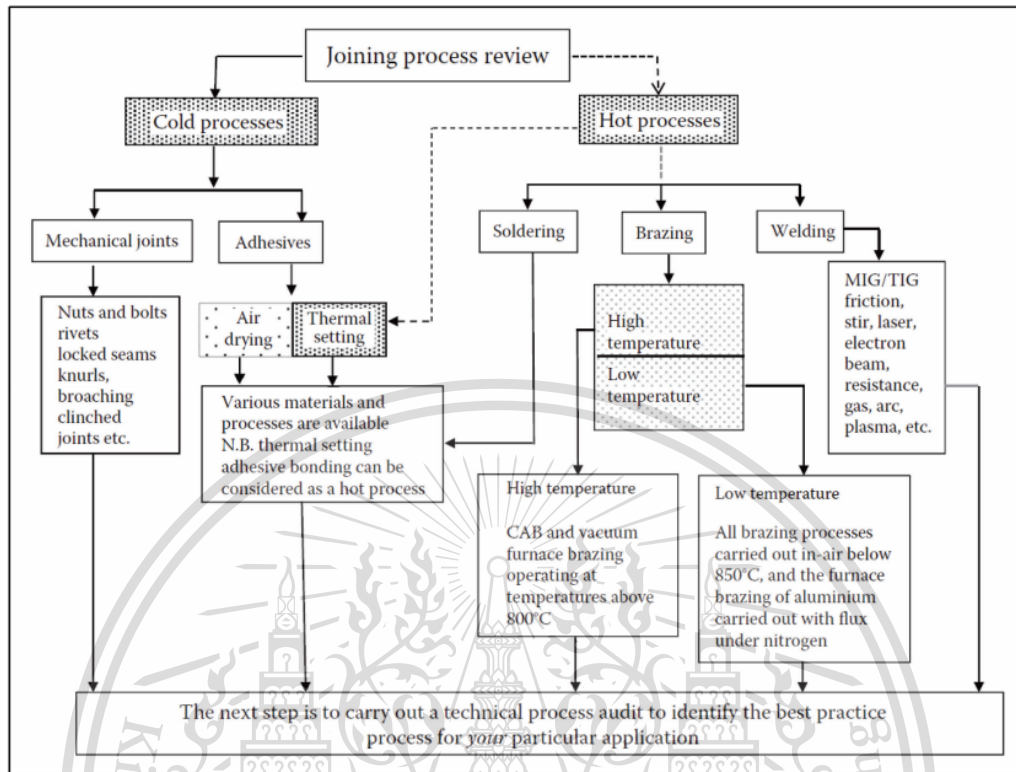
1. กระบวนการแล่นประสาน (Brazing)
2. โลหะเติม (Filler Metal)
3. คุณสมบัติของทองแดง
4. โพลีโลหะ (Porous Metal)
5. กระบวนการถ่ายเทความร้อน
6. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
7. การทดสอบและวิเคราะห์อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน
8. เครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค
9. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กระบวนการแล่นประสาน (Brazing)

การแล่นประสานทำให้โลหะติดกันโดยใช้ความร้อนจากเปลวไฟหลอมละลายสอดเชื่อมให้แทรกประสาน ระหว่างผิวงานจะถูกดูดซึมเข้าไปในลักษณะการดึงดูดของโลหะ (Capillary Attraction)

กระบวนการแล่นประสานหรือการบัดกรีแข็งคือ กรรมวิธีการต่อโลหะตั้งแต่สองชิ้นหรือมากกว่าเข้าด้วยกันซึ่งโลหะนั้นจะเป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ โดยการให้ความร้อนแก่รอยต่อที่อุณหภูมิสูงกว่า  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$  แต่ไม่ถึงกับอุณหภูมิหลอมละลายของโลหะหลักที่นำมาแล่นประสาน และโลหะเติมเป็นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$  แต่ต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะที่นำมาทำการแล่นประสาน โลหะเติมจะถูกเติมลงไปที่รอยต่อของชิ้นงาน โดยโลหะเติมที่หลอมละลายจะแทรกตัวซึมเข้าไปในช่องว่างระหว่างรอยต่อด้วยแรงดึงดูดของโลหะ (Capillary Attraction) ลักษณะงานที่ใช้การต่อโลหะด้วยการแล่นประสาน ได้แก่ งานต่อท่อทองแดงในระบบเครื่องทำความเย็น งานเชื่อมต่อท่ออลูมิเนียมบาง ๆ เป็นต้น [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 การจำแนกประเภทของการประสานวัสดุ [17]

กระบวนการเล่นประสานสามารถแบ่งตามกรรมวิธีการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานได้ดังต่อไปนี้

การเล่นประสานด้วยหัวเชื่อมแก๊ส (Torch Brazing) เป็นการบัดกรีแข็งโดยใช้หัวเชื่อมแก๊สหัวเดียวหรือหลายหัวเผาชิ้นงานให้ร้อน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและปริมาณความร้อนที่ต้องการและแก๊สที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง ได้แก่ อะเซทิลีน โพรเพน และแก๊สหุงต้มทั่วไป

การเล่นประสานแข็งในเตา (Furnace Brazing) เป็นการบัดกรีแข็งงานที่สามารถวางประกอบกันได้ง่าย โดยวางบนสายพาน และเติมลวดบัดกรีแข็งพร้อมฟลักซ์ไว้ที่รอยต่อ แล้วให้สายพานเคลื่อนพานผ่านเข้าไปในเตา เหมาะสมกับงานที่ต้องการผลผลิตโลหะชิ้นงานจำนวนมาก โลหะเติมที่เติมบนรอยต่ออาจเป็นชนิดเส้น แผ่นบาง ผงก้อนขนาดเล็กหรือ คริม เป็นต้น เตาที่ใช้ให้ความร้อนแก่งานเพื่อให้เกิดการเล่นประสานส่วนใหญ่จะเป็นเตาที่ควบคุมบรรยากาศให้เป็นก๊าซรีดิวซิ่ง เช่น ไฮโดรเจน ก๊าซเอ็กโซเธอร์มิก หรือก๊าซเฉื่อย เช่น อาร์กอน หรือฮีเลียม ถ้าเป็นเตาขนาดใหญ่มักนิยมใช้แบบสุญญากาศเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน บางครั้งไม่ต้องใช้ฟลักซ์ เตาสุญญากาศเหมาะกับการเล่นประสานงานที่ใช้กับอากาศยานหรืออุปกรณ์นิวเคลียร์ ถ้าคงสภาวะสุญญากาศโดยใช้ปั๊มสุญญากาศออกอย่างต่อเนื่องสารต่าง ๆ ที่ระเหยขณะเล่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานวิจัยทางวิชาการเท่านั้น มิอนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสานจะถูกคูดอกไปด้วย อย่างไรก็ตามโลหะผสมหรือโลหะเติมหลายชนิดไม่เหมาะกับแล่นประสานในเตาสุญญากาศ เพราะอาจสูญเสียสารหรือธาตุผสมที่มีจุดเดือดต่ำหรือความดันไอสูงไป [4]

การแล่นประสานแข็งโดยการเหนี่ยวนำ (Induction Brazing) เป็นการอาศัยกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำงานจนเกิดความร้อนสูงพอที่จะทำให้ลวดบัดกรีแข็งละลายโดยจะวางงานที่ต้องการบัดกรีไว้ใกล้กับขดลวดเหนี่ยวนำ

การแล่นประสานแข็งด้วยความต้านทาน (Resistance Brazing) เป็นการบัดกรีแข็งโดยอาศัยความร้อนจากการต้านทานไฟฟ้าของโลหะงาน โดยงานจะเป็นส่วนหนึ่งของวงจรไฟฟ้า ส่วนลวดบัดกรีแข็งควรเติมก่อนที่จะบัดกรี และใช้ฟลักซ์เสมอ นอกจากจะควบคุมบรรยากาศ เมื่อจะแล่นประสานให้วางงานระหว่างแท่งอิเล็กโทรด (2 แท่ง) และกอดอิเล็กโทรดเข้ากับชิ้นงานพร้อมกับปล่อยกระแสไฟในขณะเดียวกัน ซึ่งเมื่อกระแสไหลผ่านงานจะทำให้รอยต่อร้อน (เนื่องจากความต้านทาน) โลหะเติมจะละลายและไหลเข้าตามซอกผิวสัมผัส และต้องให้อิเล็กโทรดกอดชิ้นงานอยู่นานกว่าโลหะเติมจะแข็งตัว [29]

การแล่นประสานแข็งด้วยวิธีการจุ่ม (Dip Brazing) เป็นการจุ่มในน้ำยาเคมี (Chemical Bath Dip Brazing) โดยการเติมลวดบัดกรีแข็งบนรอยต่อแล้วจุ่มลงในเกลือเหลว เกลือจะเป็นตัวให้ความร้อนแก่งานและลวดบัดกรีแข็ง การจุ่มในโลหะเหลว (Molten Metal Bath Dip Brazing) โดยจุ่มงานลงในลวดบัดกรีแข็งซึ่งหลอมเหลวแล้ว และบรรจุอยู่ในเบ้าหรือหม้อที่เหมาะสม [29]

การแล่นประสานแข็งด้วยรังสีอินฟราเรด (Infrared Brazing) เป็นการบัดกรีแข็งโดยอาศัยความร้อนอินฟราเรดซึ่งแผ่รังสีออกจากรังสีสีแดงในสเปกตรัม หลอดไฟที่เป็นแหล่งความร้อนในการบัดกรีเรียกว่าควอร์ตแลมป์ (Quart Lamp) มีขนาดถึง 5,000 Watt กระบวนการนี้เหมาะสำหรับการเชื่อมชิ้นงานที่บางมาก โดยปกติจะมีความหนาน้อยกว่า 1 mm รวมถึงโลหะที่มีรูปร่างแบบรังผึ้งหรือแบบโลหะโฟม (Honeycomb Structures and Metal Foam) [4]

การแล่นประสานด้วยเลเซอร์ (Laser Brazing) ในภาคอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ถูกใช้ในการผลิตตัวถังรถยนต์ ซึ่งจะใช้การแล่นประสานด้วยลำแสงเลเซอร์เพื่อเชื่อมต่อแผ่นโลหะหรือส่วนประกอบที่มีน้ำหนักเบาที่ทำจากอะลูมิเนียมและรวมถึงวัสดุอื่น ๆ การแล่นประสานด้วยเลเซอร์นั้น ลำแสงเลเซอร์จะถูกทำให้วิ่งไปตามรอยต่อพร้อมกับโลหะเติมที่หลอมละลาย เช่น ลวดโลหะเติมทองแดงซิลิกอน ซึ่งจะคุณภาพรอยต่อที่ดี และมีความสวยงามของรอยต่อ [4]

### 2.1.1 ชนิดของรอยต่อในการแล่นประสาน

ในการต่อวัสดุ มีรอยต่อแบบต่าง ๆ ได้แก่ รอยต่อชน รอยต่อมุม รอยต่อขอบ รอยต่อเกย และรอยต่อตัวที่ลักษณะรอยต่อต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

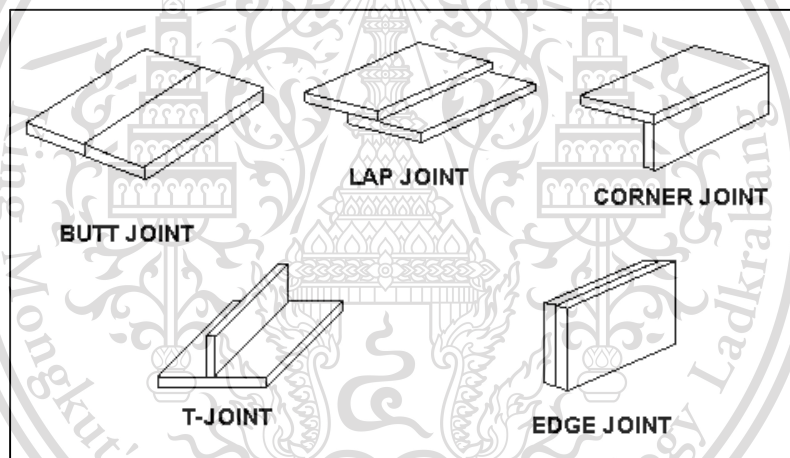
รอยต่อชน (Butt Joint) เป็นการนำขอบชิ้นงานทั้งสองชิ้นมาชนกัน โดยผิวของงานทั้งสองอยู่ในระนาบเดียวกัน ลักษณะของการต่อชนแบ่งออกเป็นหลายแบบขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงาน เช่น ต่อชนไม่เว้นช่องว่าง ต่อชนไม่บากงาน และต่อชนรูปตัววี เป็นต้น

รอยต่อมุม (Conner Joint) เป็นการนำขอบชิ้นงานสองชิ้นมาชนกันโดยผิวของชิ้นงานทั้งสองทำมุมประมาณ  $90^{\circ}$  (จะมากกว่าหรือน้อยกว่าก็ได้)

รอยต่อขอบ (Edge Joint) เป็นการนำขอบชิ้นงานทั้งสองมาชนกันในลักษณะผิวของชิ้นงานทั้งสองมาทาบแนบชิดกัน ทำให้ขอบของงานทั้งสองชิดกันและขนานกันตลอดแนว

รอยต่อเกย (Lap Joint) เป็นวิธีการนำชิ้นงานสองชิ้นมาวางซ้อนกันหรือเกยกัน

รอยต่อตัวที (Tee Joint) เป็นการนำขอบของชิ้นงานชิ้นหนึ่งตั้งบนผิวชิ้นงานอีกชิ้น มีลักษณะเป็นรูปตัวที [4]



รูปที่ 2.2 ลักษณะรอยต่อแบบต่าง ๆ [5]

## 2.2 โลหะเติม (Filler Metal)

โลหะเติมเป็นตัวยึดหรือประสานให้โลหะ 2 ชิ้นต่างชนิดกันหรือกับโลหะให้ติดกันด้วยการหลอมละลายโลหะเติม ลวดประสานจะทำจากโลหะผสมกันเพื่อที่จะใช้อุณหภูมิต่ำในการเล่นประสาน ในการเล่นประสานโลหะจะมีตัวเชื่อมที่เรียกว่าโลหะเติม โลหะเติมที่นำมาเล่นประสานมีจุดหลอมเหลวที่มากกว่า  $450^{\circ}\text{C}$  ซึ่งจะต้องต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะที่ต้องการเล่นประสาน โดยจะต้องมีลักษณะมีความสามารถในการกระจายตัวและติดกับโลหะฐานในงานเล่นประสาน มีจุดหลอมเหลวและช่วงการหลอมเหลวที่

เอกสารนี้เหมาะสมกับความสามารถในการไหลโดยมีแรงดึงตึงตัวของโลหะในบริเวณรอยต่อ นอกจากนี้ยังประกอบ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของความเป็นเนื้อเดียวกันและความมั่นคง จะไม่แยกองค์ประกอบของธาตุในสถานะของเหลวในขณะการเล่น  
ประสาน มีความแข็งแรงทางคุณสมบัติทางกลและลักษณะทางกายภาพที่ดีหลังจากที่ทำการเล่นประสานโดย  
ขึ้นอยู่กับความต้องการของงาน มีความสามารถในการสร้างหรือหลีกเลี่ยงปฏิกิริยาระหว่างโลหะฐานและโลหะ  
เติม และความเปราะเมื่อมีชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compounds: IMCs) ที่หนาหรือการกัด  
เซาะที่มากเกินไป สิ่งเหล่านี้เป็นสิ่งที่ไม่ต้องการในงานเล่นประสาน [6]

โลหะเติมเป็นส่วนสำคัญของงานเชื่อมโลหะเนื่องจากเป็นตัวที่ประสานขึ้นส่วนเข้าด้วยกัน ดังนั้นลวด  
เชื่อมหรือลวดเติมที่ใช้ในกระบวนการเล่นประสานต้องตอบสนองคุณลักษณะพื้นฐาน คือ มีความสามารถในการ  
การเล่นประสานระหว่างรอยต่อที่ดีซึ่งมีสมบัติทางกลและทางฟิสิกส์ที่เหมาะสมในการใช้งานเป็นการเติมลวด  
ในการเล่นประสาน ซึ่งส่วนมากจะคำนึงถึงความแข็งแรงในสมบัติทางฟิสิกส์ที่สำคัญคือ สัมประสิทธิ์การ  
ขยายตัวทางความร้อนต้องใกล้เคียงกับโลหะพื้นที่ทำการเล่นประสาน หรือมีการถ่ายเทความร้อนที่ใกล้เคียง  
กัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 โลหะเติมที่เหมาะสมกับการใช้งานในโลหะชนิดต่าง ๆ [6]

Base material	Nickel (Ni)	Cobalt (Co)	Silver (Ag)	Gold (Au)	Aluminum (Al)	Copper (Cu)
Braze range	927 - 1205 °C	1175 - 1245 °C	620 - 980 °C	890 - 1230 °C	570 - 620 °C	705 - 1150 °C
	1700 - 2200 °F	2150 - 2275 °F	1150 - 1800 °F	1635 - 2250 °F	1060 - 1150 °F	1300 - 2100 °F
Maximum useful service temperature	980 °C	1040 °C	370 °C	800 °C	150 °C	370 °C
	1800 °F	1900 °F	700 °F	1475 °F	300 °F	700 °C
Applications	Alloy steels	Cobalt alloys	Alloy steels	Alloy steels	Aluminum alloys	Alloy steels
	Carbon steels		Carbon steels	Carbon steels		Carbon steels
	Copper alloys		Cast iron	Copper alloys		Cast iron
	Stainless steels		Copper alloys	Nickel / Cobalt alloys		Copper alloys
	Nickel / Cobalt alloys		Nickel alloys	Stainless steels		Nickel alloys
			Stainless steels	Tool steels		Stainless steels
Brazeing methods/ Atmospheres	Dissociated ammonia	Hydrogen	Dip	Inert gas	Dip	Dip
	Hydrogen	Inert gas	Dissociated ammonia	Vacuum	Torch	Dissociated ammonia
	Induction	Vacuum	Fuel gas		Resistance	Fuel gas
	Inert gas		(carburizing/ decarburizing)		Vacuum	(carburizing/ decarburizing)
	Torch					
	Vacuum		Hydrogen			Hydrogen
			Induction			Induction
			Inert gas			Inert gas
Wild gap capability	Yes	Moderate	No		Moderate	No
	1.5 mm.	0.6 mm.			0.6 mm.	
	0.06 in.	0.025 in.			0.025 in.	
Costs	Moderate	Moderate to high	High market price Ag	Very high market price Au	Low	Low
ASTM designation	BNi	BCo	BAG	BAu	BAISI	BCu

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3 คุณสมบัติของทองแดง

โลหะทองแดงมีคุณสมบัติเด่นหลายประการ เป็นวัสดุทางวิศวกรรมที่สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย คุณสมบัติที่ทำให้ทองแดงมีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานได้หลากหลายประเภท คือ ความแข็งแรง สภาพการเป็นตัวนำ ความต้านทานการกัดกร่อน การแปรรูปและความอ่อน ทองแดงมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าและการนำความร้อนที่สูง มีความต้านทานการกัดกร่อนและการสึกกร่อน [8] โดยโลหะผสมทองแดงสามารถป้องกันการกัดกร่อนในสภาพอากาศของในทะเลและโรงงานอุตสาหกรรมได้ โดยการสร้างแผ่นฟิล์มบนพื้นผิวของวัสดุ และฟิล์มนี้จะทำหน้าที่ป้องกันการกัดกร่อนโลหะมีความสามารถในการขึ้นรูปและความเหนียวสูงจึงสามารถแปรรูปด้วยวิธีต่าง ๆ ได้ง่ายและไม่เสี่ยงต่อการแตกหักเสียหาย ส่วนทางด้านความอ่อนสามารถปรับปรุงได้ด้วยการหลอมเชื่อมขั้นตอนการประสานการชุบแข็ง การเพิ่มความแข็ง การเพิ่มความเครียด การเพิ่มความแข็งโดยสารละลายของแข็ง การทำให้เกิดสารประกอบขนาดเล็ก การเพิ่มความแข็งโดยการกระจายตัวของเฟสสอง นอกจากนี้ยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของทองแดงได้โดยการเติมธาตุผสมต่าง ๆ เช่น สังกะสี นิกเกิล เบอริลเลียม ก็จะทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและมีความต้านทานความล้าสูงสามารถนำไปใช้งานได้กว้างขวางมากขึ้น [7]

### 2.4 โฟมโลหะ (Porous Metal)

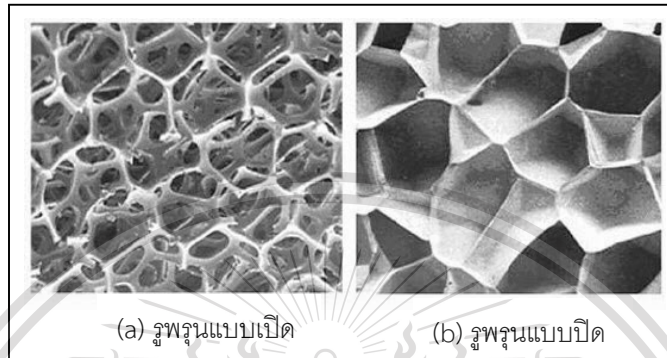
โฟมโลหะโดยปกติแล้วจะมีการแบ่งแยกวัสดุเหล่านี้โดยสัมพันธ์กับความหนาแน่นของวัสดุ ( $\rho^*/\rho_s$ ) ความหนาแน่นของโลหะที่มีรูพรุนมาก ๆ ต่อหน่วยพื้นที่  $\rho^*$  จะหารด้วยความหนาแน่นของวัสดุ นั้น ๆ ที่เป็นกัณฑ์ (ไม่ได้เป็นวัสดุที่มีรูพรุน)  $\rho_s$  วัสดุโฟมที่มีความหนาแน่นที่ต่ำมาก ๆ สามารถทำให้มีความหนาแน่นต่ำได้ถึง 0.001 โพรเมอริคโฟมถูกใช้ในการกันกระแทก การบรรจุและฉนวนกันความร้อนโดยมีความหนาแน่นสัมพันธ์ ในช่วง 0.05 และ 0.2 เช่น ความหนาแน่นสัมพันธ์ของโลหะโฟมเพิ่มขึ้น ผนังแท่งจะหนาและช่องรูพรุนจะมีขนาดเล็กลงมากกว่าประมาณ 0.3 จะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแบบเซลล์ไปเป็นโครงสร้างแบบโพรงขนาดใหญ่ ซึ่งจะทำให้มีความแข็งที่ต่ำกว่าในลักษณะของแข็งที่มีรูโพรงภายใน ดังนั้นวัสดุที่มีรูพรุนหรือวัสดุแบบโฟมจะถูกนิยาม คือวัสดุที่มีรูพรุนอยู่ในช่วงที่ต่ำกว่า 70% รูปร่างของรูพรุนในหลาย ๆ แบบโฟมและวัสดุที่ขึ้นรูปด้วยการเผา (Sintered Material) มีรูปร่างใกล้เคียงกับทรงกลมและ Isotropic ดังนั้นการศึกษารูปร่างของรูพรุนจะถูกนิยามด้วยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้

1. Pore Diameter
2. Pore Length
3. Pore Aspect Ratio
4. Pore Orientation

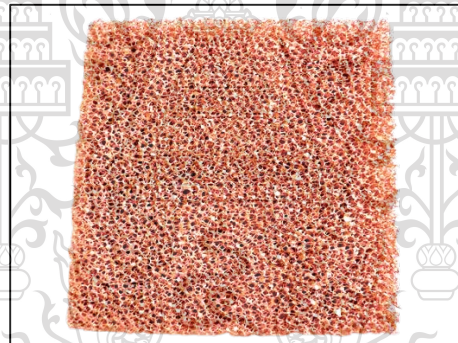
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5. Porosity

การเกิดขึ้นของรูพรุนจะขึ้นอยู่กับวิธีที่ใช้ในกระบวนการผลิตโดยจะมี 2 ลักษณะ คือ รูพรุนแบบปิด (Closed Pores) และรูพรุนแบบเปิด (Open Pores) [9]



รูปที่ 2.3 ลักษณะรูพรุนแบบเปิด (a) และลักษณะรูพรุนแบบปิด (b) [10]



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างโฟมทองแดง [11]

## 2.5 กระบวนการถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) คือ การถ่ายเทของพลังงานความร้อนหรือการส่งถ่ายความร้อนที่เกิดขึ้นในวัตถุหรือของไหลที่เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิมากจากการสัมผัสซึ่งกันและกัน วิธีการถ่ายเทความร้อน สามารถจำแนกได้ออกเป็น 3 แบบ ดังนี้

1. การนำความร้อน (Heat Conduction) คือ ปรากฏการณ์ที่พลังงานความร้อนถ่ายเทภายในวัตถุหนึ่ง ๆ หรือระหว่างวัตถุสองชิ้นที่สัมผัสกัน โดยมีทิศทางของการเคลื่อนที่ของพลังงานความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยที่ตัวกลางไม่มีการเคลื่อนที่ การนำความร้อนเป็นกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เกิดขึ้นบนชั้นอะตอมของอนุภาค เป็นหนึ่งในกระบวนการถ่ายเทความร้อนในโลหะ การนำความร้อนเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระในของเหลวและของแข็งที่มีสภาพการนำความร้อนต่ำเป็นผลมาจากการสั่นของโมเลกุลข้างเคียงในก๊าซ การนำความร้อนเกิดขึ้นผ่านการสั่นสะท้อนระหว่างโมเลกุลหรือกล่าวคือ การนำความร้อนเป็นลักษณะการถ่ายเทความร้อนผ่านโดยตรงจากวัตถุหนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่งโดยการสัมผัสกัน

2. การพาความร้อน (Heat Convection) เป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของของไหล การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นได้ในสสารสองสถานะคือของเหลวและก๊าซ เนื่องจากเป็นสิ่งที่สามารถเคลื่อนที่ได้โดยจะมีทิศทางลอยขึ้นเท่านั้น เนื่องจากเมื่อสสารได้รับความร้อนจะมีการขยายตัวทำให้ความหนาแน่นต่ำลง และสสารที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจะลงมาแทนที่ ปรากฏการณ์นี้มีตัวอย่างคือ การเกิดลมบก และลมทะเล เป็นต้น หรือการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวหน้าวัตถุกับของไหล

#### ประเภทของการพาความร้อน

การพาความร้อนแบบธรรมชาติหรือแบบอิสระ (Natural or Free Convection) การเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยไม่มีกลไกใด ๆ ทำให้ของไหลเคลื่อนที่แต่เกิดจากแรงลอยตัวของของไหลเอง หรือแรงลอยตัวที่เกิดจากผลการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น ที่มีอุณหภูมิของของไหลแตกต่างกันใน 2 บริเวณ

การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced Convection) การเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยของไหลถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวของของแข็งโดยกลไกภายนอก เช่น พัดลม และเครื่องสูบลม

3. การแผ่รังสีความร้อน (Radiation) เป็นการถ่ายเทความร้อนออกรอบตัวทุกทิศทาง โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการส่งถ่ายพลังงาน วัตถุทุกชนิดจะแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาว และความเข้มค่าหนึ่งจากพื้นผิวอยู่ตลอดเวลาโดยความยาว และความเข้มจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของวัตถุนั้น วัตถุที่มีอุณหภูมิสูงจะแผ่รังสีคลื่นสั้นและวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำจะแผ่รังสีคลื่นยาว ทั้งนี้การแผ่รังสี คือการถ่ายโอนความร้อนโดยไม่ต้องผ่านตัวกลางใด ๆ เช่น ความร้อนที่เกิดจากดวงอาทิตย์ถือเป็นความร้อนที่เกิดจากการถ่ายโอนความร้อนโดยการแผ่รังสี โดยที่วัตถุแต่ละชนิดสามารถดูดกลืนความร้อนจากการแผ่รังสีได้ไม่เท่ากัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสีของวัตถุ วัตถุสีดำหรือสีเข้มดูดกลืนความร้อนได้ดีกว่าวัตถุสีขาวหรือสีอ่อน และวัตถุผิวขรุขระดูดกลืนความร้อนได้ดีกว่าวัตถุผิวเรียบและขัดมัน [12]

## 2.6 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลที่มีอุณหภูมิต่างกัน ส่วนใหญ่แล้วจะมีผนังกันระหว่างของไหลไม่ให้ไหลปะปนกัน โดยความร้อนจะถูกถ่ายเทจากของไหลที่ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีอุณหภูมิสูงผ่านผนังไปยังของไหลที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า นอกจากนี้ยังมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบของไหลสัมผัสกันโดยตรง ซึ่งของไหลที่แลกเปลี่ยนความร้อนกันในอุปกรณ์ประเภทนี้จะต้องไม่ผสมและรวมตัวกันเมื่อสัมผัสกัน [29]

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีอยู่หลายชนิด ขึ้นอยู่กับระดับความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีและกระบวนการต่าง ๆ ในโรงงานอุตสาหกรรม หรือขนาดความความต้องการที่จะทำความร้อนและความเย็น ในปัจจุบันอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับพลังงานความร้อนส่วนใหญ่มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นองค์ประกอบ เช่น อุตสาหกรรมด้านอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งในปัจจุบันนี้การระบายความร้อนที่เกิดขึ้นในเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์นั้นจำเป็นต้องได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้สามารถระบายความร้อนที่เกิดขึ้นได้อย่างเพียงพอ เนื่องจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ในปัจจุบันนี้ได้พัฒนาให้มีขนาดเล็กลงเรื่อย ๆ และมีประสิทธิภาพในการมวลได้เร็วขึ้นหรือสามารถทำงานต่าง ๆ ได้ครอบคลุมปัจจัยหลายอย่างพร้อมกันมากขึ้น การที่เครื่องมือเหล่านี้มีขีดความสามารถสูงขึ้นนั้น ความร้อนที่เกิดจากการทำงานของเครื่องมือเหล่านี้ก็สูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นระบบระบายความร้อนออกจากเครื่องมือเหล่านี้จึงเป็นสิ่งสำคัญเป็นอย่างมากเพื่อยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์เหล่านี้ [18] ระบบระบายความร้อนของอุปกรณ์เหล่านี้ ในอดีตนั้นส่วนใหญ่เป็นการระบายความร้อนโดยธรรมชาติ ต่อมาได้มีการพัฒนาเป็นการระบายความร้อนโดยใช้พัดลมเป่าอากาศในการระบายความร้อน อย่างไรก็ตามการระบายความร้อนโดยใช้อากาศก็ไม่เพียงพอในการระบายความร้อนออกจากระบบอุปกรณ์สมัยใหม่ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาระบบการระบายความร้อนโดยใช้ของเหลว (น้ำ) อย่างไรก็ตามเมื่อเครื่องมือเหล่านี้มีประสิทธิภาพในการทำงานมากขึ้น ความร้อนที่เกิดขึ้นก็สูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นการระบายความร้อนโดยใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็นนั้นก็มีความจำเป็นเหมือนกัน ในเรื่องของสมบัติทางกายภาพของของไหลในการที่จะระบายความร้อน เช่น ค่าการนำความร้อน ค่าความจุความร้อน ค่าคุณสมบัติเหล่านี้มีผลอย่างมากต่อความสามารถในการระบายความร้อนของสารหล่อเย็น ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับของแข็ง [19] การแก้ปัญหาในการระบายความร้อนที่น่าสนใจกรณีหนึ่ง คือ การระบายความร้อนของหน่วยประมวลผล (Microprocessors) ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยการสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนบนแผ่นซิลิกอนไว้ใต้หน่วยประมวลผล เพื่อใช้ในการลดอุณหภูมิ โดยที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนี้ประกอบไปด้วยท่อขนาดเล็ก (Microchannels) จำนวนมากสำหรับให้ของเหลวไหลผ่าน ซึ่งพบว่าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้สามารถลดอุณหภูมิของหน่วยประมวลผลได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่มีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง (High Surface Area To Volume Ratio) ทำให้มีสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convective Heat Transfer Coefficient) และประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนสูงตามไปด้วย [20, 21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

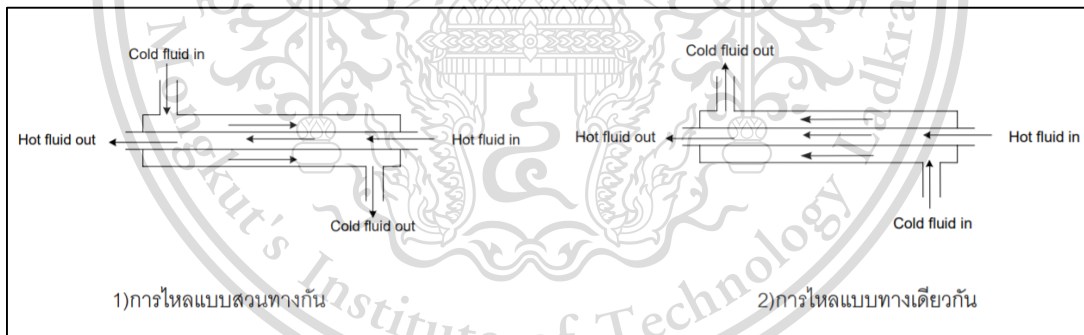
## 2.6.1 ชนิดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีหลากหลายประเภทขึ้นอยู่กับหลักการทำงานและการนำไปใช้งานตามความเหมาะสม การจำแนกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอาจแบ่งประเภทได้ตามลักษณะทิศทางการเคลื่อนที่ของของไหล และลักษณะรูปร่างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นหลัก เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่แบ่งตามลักษณะการไหลของของไหล สามารถแบ่งได้ 3 ประเภท [14] ดังนี้

1. การไหลแบบทางเดียวกัน (Parallel Flow)
2. การไหลสวนทางกัน (Counter Flow)
3. การไหลตั้งฉากกัน (Cross Flow)

และแบ่งตามลักษณะของรูปร่างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน สามารถแบ่งได้ 4 ประเภท ดังนี้

1. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น (Concentric Tube or Double Pipe) เป็นชนิดที่สามารถสร้างได้ง่ายที่สุด ลักษณะเป็นท่อสองท่อนวมกัน โดยของไหลในแต่ละท่ออาจเป็นของไหลต่างชนิดกันหรือชนิดเดียวกัน แต่ต้องมีอุณหภูมิแตกต่างกัน ซึ่งใช้แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลทั้งสอง ลักษณะการไหลของของไหลในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้ยังแบ่งการไหลได้อีก 2 ลักษณะการไหลของของไหล คือ การไหลแบบทางเดียวกัน (Parallel Flow) และการไหลแบบสวนทางกัน (Counter Flow)

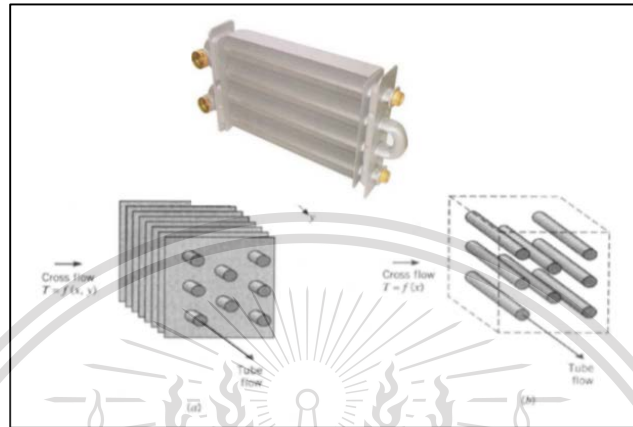


รูปที่ 2.5 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น [14]

2. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัด (Compact) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้จะมีพื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อนมาก โดยส่วนใหญ่ลักษณะการไหลในเครื่องชนิดนี้จะเป็นการไหลแบบตั้งฉากกัน (Cross Flow) และมักจะเป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศกับของเหลว เช่น หม้อน้ำในรถยนต์เป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำร้อนกับอากาศเย็น การเพิ่มพื้นที่การถ่ายเทความร้อนแบบกะทัดรัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

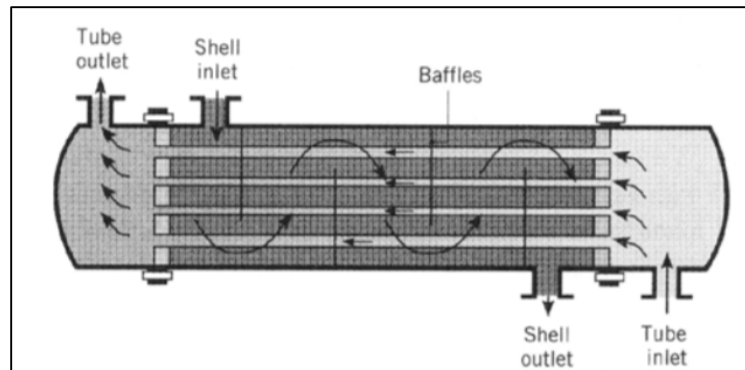
เมื่อเพิ่มพื้นที่ผลที่ตามมาคือแรงเสียดทานจะเพิ่มขึ้น จึงจำเป็นต้องให้งานในการขับอากาศเพิ่มขึ้น ดังนั้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้มักจะพบว่าการติดพัดลมช่วยในการขับการไหลของอากาศ



รูปที่ 2.6 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัด [14]

3. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อและเปลือก (Shell and Tube) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้ โครงสร้างเป็นชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำ ประกอบด้วยเปลือกด้านนอก (Shell) และท่อเล็ก (Tube) อยู่ภายใน การไหลของไหลชนิดหนึ่งจะอยู่ในท่อ และของไหลอีกชนิดหนึ่งจะอยู่ในเชลล์และจะมีแผ่นกันยึดกับผนังกับท่อ แผ่นกันจะช่วยให้ของไหลในเชลล์ถ่ายเทความร้อนกับของไหลที่อยู่ในท่อ ได้อย่างเต็มที่ ใช้ได้ทั้งการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของเหลวกับของเหลว และก๊าซกับก๊าซ สำหรับการไหลจะอยู่ในลักษณะการไหลแบบตั้งฉากและสวนทางหรือขนานกันในบางตำแหน่ง และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้ มีความสามารถที่จะทำการดึงความร้อนจำนวนมากเข้าหรือออกจากขบวนการได้เป็นอย่างดี ใช้กับเครื่องปรับอากาศขนาดใหญ่ในอาคารสำนักงานและโรงแรม มีหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนคือการถ่ายเทพลังงานความร้อนจากของไหลสายหนึ่งโดยมีขนาดแตกต่างกันไปตามภาระทางความร้อน (Heat Load) ที่ต้องการ ซึ่งมีหลายปัจจัยที่จะต้องนำมาพิจารณา เช่น อุณหภูมิการถ่ายเทความร้อนจากของไหลที่มีอุณหภูมิสูงให้กับของไหลที่มีอุณหภูมิต่ำ การออกแบบให้ของไหลที่มีอุณหภูมิสูงไหลอยู่ในท่อ ทำให้การถ่ายเทความร้อนของของไหลที่มีอุณหภูมิสูงนั้นทำได้แค่เพียงให้กับของไหลที่มีอุณหภูมิต่ำเท่านั้น และยังทำให้ส่วนของเชลล์ไม่ต้องเผชิญกับอุณหภูมิที่สูงจากของไหลที่ร้อน [29]

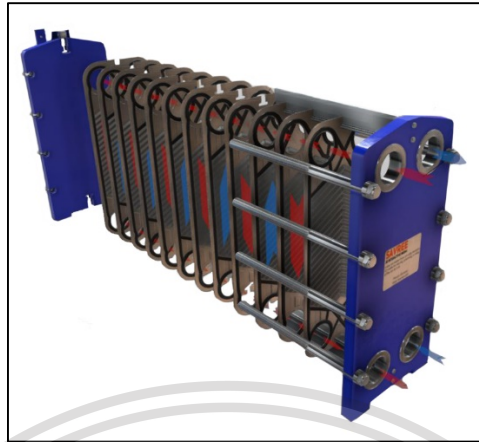
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อและเปลือก [14]

4. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น (Plate Type Exchanger) คุณสมบัติพิเศษของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น คือ การนำแผ่นถ่ายเทความร้อนหลาย ๆ แผ่นมาวางเรียงกันในระยะห่างคงที่ แล้วให้ของเหลวแต่ละชนิดไหลผ่านช่องว่างระหว่างแผ่นในลักษณะที่สลับกันช่องเว้นช่อง เครื่องแบบนี้มักใช้กับการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าหม้อไอน้ำ ในกรณีนี้มีค่าความดันสูญเสียต่ำ เครื่องผลิตจากแผ่นเหล็กสแตนเลสบาง ๆ หรือแผ่นไทเทเนียมซึ่งทนต่อสนิมได้ดี เอามามัดให้เกิดส่วนนูน และส่วนเว้า ประกอบกันหลาย ๆ แผ่น ช่องไหลแต่ละชนิดจะไหลสลับกันไปตามช่องว่างที่เกิดจากการประกอบเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อเพิ่มความแข็งแรงป้องกันการรั่วและให้มีช่องว่างสำหรับการไหล ผิวของแผ่นถ่ายเทความร้อนมีทั้งส่วนนูนและเว้า (Gasket) ถูกติดตั้งไว้ในตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อป้องกันไม่ให้อุณหภูมิสูงและรักรั่ว และรักษาระยะห่างระหว่างแผ่นตามที่ต้องการ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบปรับปรุงให้ค่าสูง ส่วนคุณลักษณะคืออย่างอื่น คือ สามารถถอดออกเป็นแผ่น ๆ ออกมาทำความสะอาดได้ทั่วถึง บำรุงรักษาได้ง่ายและสามารถปรับปริมาณการถ่ายเทความร้อนได้ โดยการเพิ่มหรือลดจำนวนแผ่นการถ่ายเทความร้อน และเนื่องจากปะเก็นที่ใช้ทำปกติทำจากยางหรือพลาสติก จึงไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งานที่สภาวะอุณหภูมิสูงและความดันสูง [22, 23, 29]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแบบแผ่น [24]

## 2.7 การทดสอบและวิเคราะห์อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

การแลกเปลี่ยนความร้อน ในจำนวนอุปกรณ์ที่ใช้ความร้อน อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ให้และรับพลังงานความร้อนระหว่างของไหลที่ทำหน้าที่ขนถ่ายความร้อน (ตัวกลางความร้อน) โดยทั่วไปความร้อนจากตัวกลางที่มีอุณหภูมิสูงจะถ่ายเทเข้ามาสะสมอยู่ในผนังของแข็งด้วยการพาความร้อน และความร้อนจะถ่ายเทภายในผนังของแข็งด้วยการนำความร้อน และถ่ายเทสู่ตัวกลางที่มีอุณหภูมิต่ำอีกด้านหนึ่งของผนังของแข็งด้วยการพาความร้อน การถ่ายเทของความร้อนนี้เมื่อพิจารณารวมทั้งหมดจะเรียกว่า Overall Heat Transmission [25]

### 2.7.1 ปริมาณความร้อนของวัตถุ (Heat, Q)

เป็นพลังงานความร้อนที่วัตถุรับเข้ามาหรือคายออกไป จากการศึกษาค้นคว้าของความร้อนต่อสารหรือวัตถุในชั้นนี้จะศึกษาเพียงสองด้าน คือ

- ความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) หมายถึง พลังงานความร้อนที่ทำให้วัตถุมีอุณหภูมิสูงขึ้นหรือต่ำลงโดยสถานะยังคงรูปเดิม
- ความร้อนแฝง (Latent Heat) หมายถึง พลังงานความร้อนที่ทำให้วัตถุเปลี่ยนสถานะโดยอุณหภูมิคงที่

#### 2.7.1.1 ความจุความร้อน (Heat Capacity, C)

ความจุความร้อน คือความร้อนที่ทำให้สารทั้งหมดที่กำลังพิจารณามีอุณหภูมิเปลี่ยนไปหนึ่งหน่วย โดยสถานะไม่เปลี่ยนแปลง สารต่างชนิดกันมีความสามารถในการรับหรือคายพลังงานความร้อนได้ต่างกัน และเราเรียกค่าพลังงานความร้อนที่ทำให้สารชนิดหนึ่งมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 หน่วย ว่าความจุความร้อน (Heat Capacity “C”) ของสารชนิดนั้นมีหน่วยในระบบเอสไอเป็น J/K โดยที่ค่าความจุความร้อนของสารดังกล่าวนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากจะต่างกันไปตามชนิดของสารแล้วยังขึ้นกับขนาด คือปริมาตรหรือมวล รวมถึงจำนวนโมล พิจารณาสารหลายชนิดเปรียบเทียบกัน โดยใช้ค่าความจุความร้อนของสารเพื่อเป็นเกณฑ์สำหรับการเปรียบเทียบ เรามักจะพิจารณาสารหลายชนิดเปรียบเทียบกัน โดยใช้ค่าความจุความร้อนต่อหนึ่งหน่วยมวลของสารแทน หรือกล่าวได้ว่าปริมาณความร้อนที่ต้องการทำให้วัตถุ 1 Kg มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 °C และเรียกปริมาณดังกล่าวนี้ว่า ความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat Capacity “c”) ของสารนั้นโดยมีหน่วยในระบบเอสไอเป็น J/kg.K หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ความร้อนจำเพาะ (Specific Heat “c”) เขียนเป็นสมการได้ว่า [26]

$$c = \frac{\Delta Q}{m\Delta t} \quad (2.1)$$

$$\Delta Q = mc\Delta t \quad (2.2)$$

เมื่อ c คือ ความร้อนจำเพาะ (J/kg.K หรือ J/kg.°C)

m คือ มวลของวัตถุ (kg)

$\Delta Q$  คือ ปริมาณความร้อนที่วัตถุมีอุณหภูมิเปลี่ยนไป (J)

$\Delta t$  คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป (°C)

นอกจากนี้ในกรณีสัมพันธ์กับจำนวนโมล (n) ของสาร ก็จะใช้ค่าความจุความร้อนต่อโมล โดยเรียกว่า ความจุความร้อนโมลาร์ (Molar Heat Capacity “C”) ของสารนั้นก็คือ C/n และเป็นหน่วย J/mole ในระบบเอสไอ ดังนั้นถ้าสารชนิดหนึ่งมีมวล m มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น  $\Delta T$  (K) และความจุความร้อนจำเพาะมีค่าคงตัว โดยมีพลังงานความร้อนที่ได้รับเป็น Q (J) จะได้ [27]

$$Q = c(\Delta T) = mc(\Delta T) = nC(\Delta T) \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ความจุความร้อนจำเพาะของสารต่าง ๆ [26]

สาร	ค่าความร้อนจำเพาะ (J/kg.°C)
เหล็ก	450
ทองแดง	390
อะลูมิเนียม	900
ตะกั่ว	130
โซเดียมคลอไรด์	880
คอนกรีต	880
มนุษย์ (ร่างกาย)	3470
น้ำ	4180
เอทานอล	2480
ปรอท	138
ไอน้ำ	1970
ออกซิเจน	910
ไนโตรเจน	1040

ในการออกแบบหรือเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมาใช้ในงานทางวิศวกรรม จำเป็นต้องมีความสามารถในการคาดคะเนอุณหภูมิตรงทางออกของของไหลร้อนและเย็น และสามารถหาอัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดระหว่างของไหลร้อนและเย็นได้ เมื่อทราบอัตราการไหลของมวลของของไหล อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยปกติมักใช้เวลานานโดยไม่เปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการทำงาน ดังนั้นอาจสมมุติว่าอุปกรณ์มีการไหลแบบสภาวะคงที่ คุณสมบัติของของไหล เช่น อุณหภูมิ ความเร็วที่ทางออกหรือทางเข้า มีค่าคงที่ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ และพลังงานศักย์ ความร้อนจำเพาะของของไหลจะใช้ค่าเฉลี่ยเป็นค่าคงที่ การนำความร้อนตามแนวแกนของท่อจะไม่นำมาคิดเมื่อมีสมมุติให้ผิวนอกสุดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนหุ้มด้วยฉนวนจนไม่มีการสูญเสียความร้อนให้แก่สิ่งแวดล้อม มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลทั้ง 2 ชนิดเท่านั้น ดังนั้นจากกฎการอนุรักษ์พลังงานจะได้ว่า อัตราการถ่ายโอนความร้อนจากของไหลที่ร้อนเท่ากับ อัตราการถ่ายโอนความร้อนของไหลเย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการคำนวณค่าอัตราการถ่ายเทพลังงานความร้อน

$$\dot{Q} = \dot{m}c\Delta T \quad (2.4)$$

และ

$$\dot{Q} = \dot{m}_c C_{pc}(T_{c,out} - T_{c,in}) \quad (2.5)$$

และ

$$\dot{Q} = \dot{m}_h C_{ph}(T_{h,out} - T_{h,in}) \quad (2.6)$$

เมื่อ  $h$  และ  $c$  สำหรับของไหลร้อนและเย็นตามลำดับ และ

$\dot{m}_c$   $\dot{m}_h$  = อัตราการไหลของมวล (Mass Flow Rates) (kg.s)

$C_{pc}$   $C_{ph}$  = ความร้อนจำเพาะ (Specific Heats) (J/kg.°C)

$T_{c,out}$   $T_{h,out}$  = อุณหภูมิเฉลี่ยที่ทางออกจากท่อ (Outlet Temperature) (°C)

$T_{c,in}$   $T_{h,in}$  = อุณหภูมิเฉลี่ยที่ทางเข้าท่อ (Inlet Temperature) (°C)

## 2.8 เครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ดังนี้

### 2.8.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM)

กล้องจุลทรรศน์แบบแสงเป็นเครื่องมือพื้นฐานของนักวิทยาศาสตร์และวิศวกรในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ เริ่มใช้งานตั้งแต่ปี ค.ศ. 1880 กล้องจุลทรรศน์แบบแสงได้นำมาใช้งานอย่างมากมาโดยนักโลหวิทยาในการตรวจสอบโลหะวัสดุ โดยพื้นฐานแล้วกล้องชนิดนี้ไม่ได้สร้างเพื่อตรวจสอบโลหะแต่จะเป็นวัสดุประเภทเซรามิกและพอลิเมอร์

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การผลิตเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยเทคนิคการหล่อประสานมีความสำคัญในการได้รับโครงสร้างความต้านทานการสัมผัสต่ำ [28] โลหะเติมต้องมีการไหลที่ดีเยี่ยมเพื่อสร้างข้อต่อที่มีความแข็งแรงดีและทนต่อการกัดกร่อนสูง

โลหะเติมอสัณฐาน Cu-Ni-Sn-P (ทองแดง ดีบุก นิกเกิล และฟอสฟอรัส) ถูกผลิตขึ้นโดยการทำให้แข็งตัวอย่างรวดเร็ว [30] ซึ่งมีข้อดีหลายประการ ความเหนียวและความยืดหยุ่นของโลหะเติมอสัณฐานทำให้โลหะเติมนั้นง่ายต่อการจัดการและติดตั้งสำหรับกระบวนการประสาน คุณสมบัติเหล่านี้ช่วยให้โลหะเติม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายงานว่โลหะเติมอัสฐานประกอบด้วยองค์ประกอบทางเคมีสูง มีความเป็นเนื้อเดียวกันและการแพร่กระจายที่ดี [31] และการเพิ่มองค์ประกอบของนิกเกิล ดีบุกและฟอสฟอรัสมากกว่า 5% ในโลหะเติมอัสฐานทำให้มีผลต่อข้อต่อประสาน องค์ประกอบที่ทำให้เป็นเนื้อเดียวกันในโลหะเติมอัสฐานประกอบด้วยอะตอมที่อยู่ใกล้กันมาก ทำให้สามารถหลอมได้ที่อุณหภูมิประสานในช่วงแคบ ๆ ฟอสฟอรัสในโลหะเติมอัสฐานมีบทบาทสำคัญในการลดจุดหลอมเหลว [32] และจำกัดช่วงการหลอมและการแข็งตัวให้แคบลง [8, 33] ฟอสฟอรัสทำหน้าที่เป็นสารฟลักซ์ (Deoxidant) โดยมีฤทธิ์ในการทำความสะอาดตัวเอง [34] เพื่อกำจัดการปนเปื้อนของออกไซด์และปรับปรุงการไหลของโลหะเติมในเฟสของเหลว การเติมนิกเกิลในโลหะเติมอัสฐานช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนและเสริมความแข็งแรงให้กับข้อต่อประสาน [35] และดีบุกช่วยให้โลหะเติมอัสฐานมีความสามารถในการเปียกได้ดีขึ้น [36]

งานวิจัยของ Weiyuan et al. ศึกษาการแล่นประสานวัสดุทองแดงโดยใช้โลหะเติมแบบอัสฐานและอัสฐาน Cu-9Sn-16Ni7P ที่อุณหภูมิในการแล่นประสานที่ 600 °C และ 630 °C ตามลำดับเป็นเวลา 10 min ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าโลหะเติมอัสฐานมีลักษณะของการละลายตัวได้อย่างรวดเร็วและเกิดการแพร่เข้าไปในโลหะพื้นได้อย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับโลหะเติมแบบอัสฐาน เนื่องจากโลหะเติมอัสฐานมีลักษณะที่บาง ส่งผลให้เกิดระยะของการแพร่ของอะตอมที่สั้นกว่า และพบว่าความหนาของชั้นรอยต่อลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและเวลาในการแล่นประสาน ในส่วนของความหนาของชั้นรอยต่อของโลหะเติมแบบอัสฐานนั้นพบว่ามีความหนาที่บางกว่ารอยต่อในการแล่นประสานของโลหะเติมแบบอัสฐานภายใต้อุณหภูมิและเวลาในการแล่นประสานเดียวกัน [31]

งานวิจัยของ Zhong et al. รายงานว่โลหะเติมอัสฐาน Cu-7Ni-9Sn-6P สามารถประสานกับ Kovar ได้สำเร็จด้วยความแข็งแรงของรอยต่อที่ 1.6 MPa ที่ 680 °C พบ Microcracks พร้อมกับส่วนต่อประสานแก้ว และเชื่อว่าสารประกอบของ  $Cu_3P$  และ  $Ni_2P$  ในชั้นของอินเทอร์เฟซจะช่วยลดความแข็งแรงของข้อต่อประสานได้ [34]

งานวิจัยของ Mian Muhammad Sami et al. ศึกษาการแล่นประสานโพมทองแดงกับแผ่นทองแดงโดยใช้โลหะเติมอัสฐาน Cu-9.7Sn-5.7Ni-7P มีการตรวจสอบผลของพารามิเตอร์การแล่นประสานโพมทองแดงและข้อต่อประสาน อุณหภูมิที่ใช้ในการประสานในเตาคือ 660 °C และ 680 °C เป็นเวลา 10 และ 15 min หลังจากการประสานได้วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) ผลพบว่าความหนาของรอยต่อประสาน ณ จุดรอยต่อที่ฐานลดลงตามอุณหภูมิและเวลาที่เพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิการประสานต่ำจะสังเกตเห็นช่องว่างขนาดเล็กและรอยแตกที่ส่วนเชื่อมต่อ ช่องว่างและรอยแตกหายไปในการแล่นประสานที่อุณหภูมิ 680 °C เป็นเวลา 15 min และมีการสังเกตการแพร่กระจายของโลหะเติมที่สูงขึ้นในบริเวณที่มีพันธะโดยรวม [37]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานเอกสารนี้โดยไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยของ Prajak et al. อิทธิพลของอุณหภูมิในการเล่นประสานที่มีต่อลักษณะโครงสร้างจุลภาคจากการเล่นประสานที่อุณหภูมิการเล่นประสาน 640 °C, 660 °C และ 680 °C เป็นเวลา 5 min พบว่าที่อุณหภูมิ 680 °C ให้รอยต่อการเล่นประสานที่ดีที่สุด เนื่องจากอุณหภูมิในการเล่นประสาน 640 °C และ 660 °C พบว่ามีรอยแตกหรือช่องว่างเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อ แต่ที่อุณหภูมิ 680 °C รอยต่อที่ได้จะมีลักษณะที่สมบูรณ์โดยไม่มีช่องว่างเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อ [4]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงาน

ในงานศึกษาวิจัยนี้มุ่งเน้นการผลิตชิ้นงานต้นแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจากโคมทองแดงด้วยกระบวนการเล่นประสานในเตา ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินงานและขั้นตอนต่าง ๆ ในการดำเนินงานของงานวิจัย ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

1. การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจากโคมทองแดง
2. การเล่นประสาน
3. การศึกษารอยต่อและโครงสร้างจุลภาค
4. การทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

#### 3.1 การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจากโคมทองแดง

การออกแบบลักษณะและการสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจากโคมทองแดง มีการเตรียมวัสดุในการสร้าง ดังนี้

##### 3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์

1. แผ่นโคมทองแดง PPI 40 ขนาด  $46 \times 42 \times 10$  mm จำนวน 1 ชิ้น
2. แท่งทองแดงเกรด C1100 สีเหลี่ยมกลวง ขนาดกรอบสี่เหลี่ยมด้านนอก  $50 \times 30 \times 10$  mm และกรอบสี่เหลี่ยมด้านในมีขนาด  $46.10 \times 26.40 \times 10$  mm จำนวน 1 ชิ้น
3. แผ่นทองแดงเกรด C1100 ขนาด  $50 \times 30 \times 2$  mm จำนวน 1 ชิ้น
4. แผ่นทองแดงเกรด C1100 ขนาด  $60 \times 40 \times 2$  mm จำนวน 1 ชิ้น
5. Fitting ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm
6. โลหะเติมอัสฐาน Amorphous Brazing Foil (CuNiSnP)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แผ่นโฟมทองแดง (a), โฟมทองแดงที่กำลังขยาย 5x (b), แท่งทองแดงสี่เหลี่ยมกลวง (c), แผ่นทองแดงชั้นฝาปิดด้านบน (d) และแผ่นทองแดงชั้นฝาด้านล่าง (e)

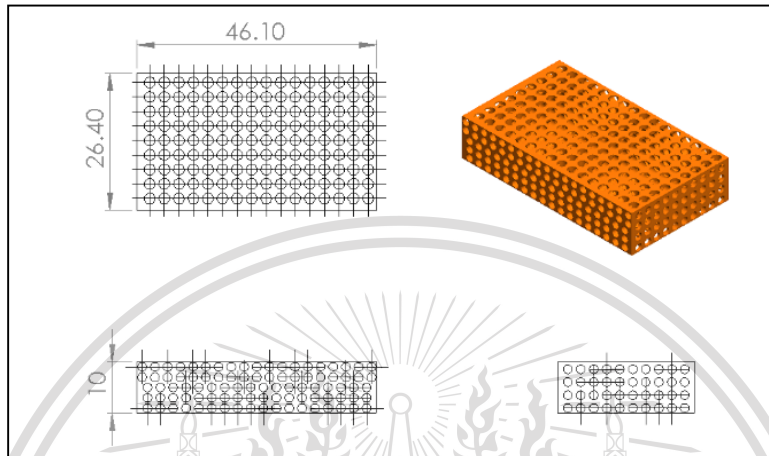
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของโลหะเติม CuNiSnP ชนิดอสังฐาน

ชนิดของธาตุ	องค์ประกอบทางเคมี (wt%)
Cu	77.40
Ni	7.00
Sn	9.30
P	6.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

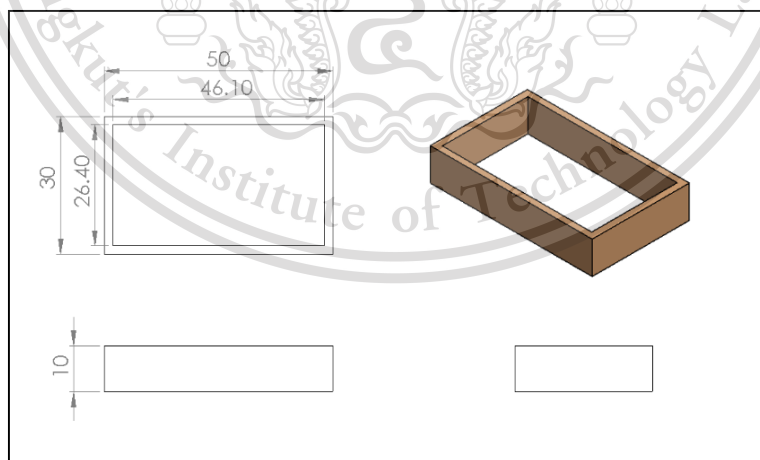
### 3.1.2 ขั้นตอนการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

1. ตัดแผ่นโฟมทองแดงด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ ให้ได้ขนาด  $46 \times 42 \times 10$  mm



รูปที่ 3.2 รายละเอียดขนาดในการตัดแผ่นโฟมทองแดง

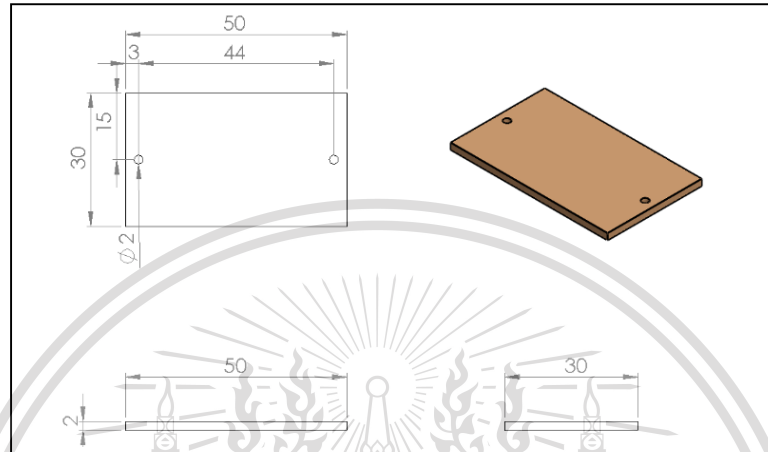
2. ตัดแท่งทองแดงให้มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมกลวง ด้วยเครื่องตัดโลหะด้วยเส้นลวด (Wire Cut) โดยมีขนาดกรอบสี่เหลี่ยมด้านนอก  $50 \times 30 \times 10$  mm และกรอบสี่เหลี่ยมด้านในมีขนาด  $46.10 \times 26.40 \times 10$  mm ดังแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 รายละเอียดขนาดในการตัดแท่งทองแดง

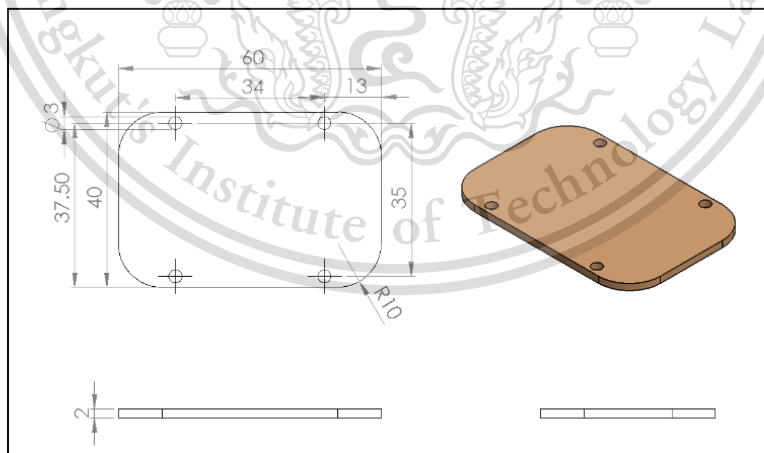
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ตัดแผ่นทองแดงให้มีขนาด 50 × 30 × 2 mm และรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 mm จำนวน 2 รู ด้วยเครื่องตัดโลหะด้วยเส้นลวด (Wire Cut) ตำแหน่งรูแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 รายละเอียดขนาดในการกัดแผ่นทองแดงชั้นฝาปิดด้านบน

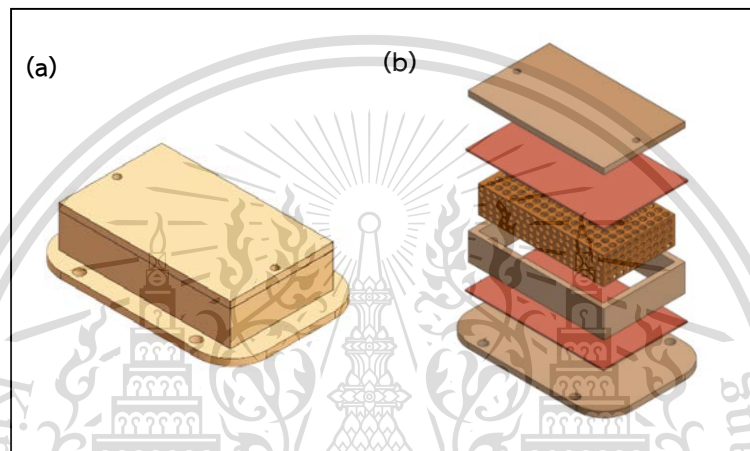
4. ตัดแผ่นทองแดงให้มีขนาด 60 × 40 × 2 mm ตรงมุมมีความโค้งรัศมี 10 mm และรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm จำนวน 4 รู ด้วยเครื่องตัดโลหะด้วยเส้นลวด ตำแหน่งรูแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 รายละเอียดขนาดในการกัดแผ่นทองแดงชั้นฝาด้านล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ทำการ Brazing ทั้ง 4 ส่วนเข้าด้วยกัน คือ แท่งทองแดงสี่เหลี่ยมกลวง แผ่นโพลีทองแดง แผ่นทองแดงขึ้นฝ้าปิดด้านบน และแผ่นทองแดงขึ้นฝ้าด้านล่าง ด้วยโลหะเติม Amorphous Brazing Foil (CuNiSnP) โดยตัดให้มีขนาด  $51 \times 31$  mm โดยตำแหน่งและลำดับการวางของโลหะเติมจะวางอยู่ระหว่างแผ่นทองแดงขึ้นฝ้าด้านล่างกับแผ่นโพลีทองแดง และอยู่ระหว่างแผ่นทองแดงขึ้นฝ้าปิดด้านบนกับแผ่นโพลีทองแดง แสดงลำดับการวางชิ้นส่วนและโลหะเติม Amorphous Brazing Foil ในการเล่นแสดงดังรูปที่ 3.6



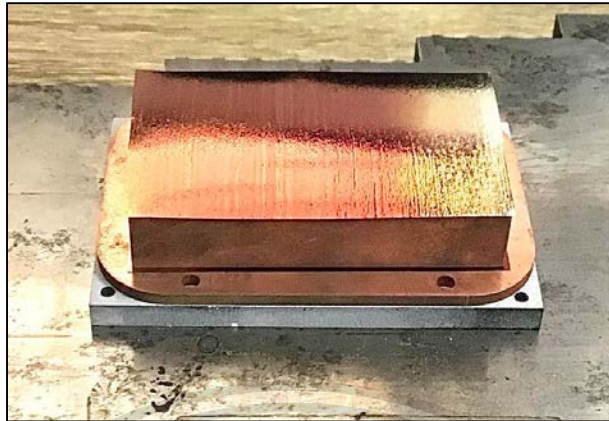
รูปที่ 3.6 ลักษณะของชิ้นงานสมบูรณ์ (a) และลำดับการวางชิ้นงานและโลหะเติมในการเล่นประสาน (b)

### 3.2 การเล่นประสาน

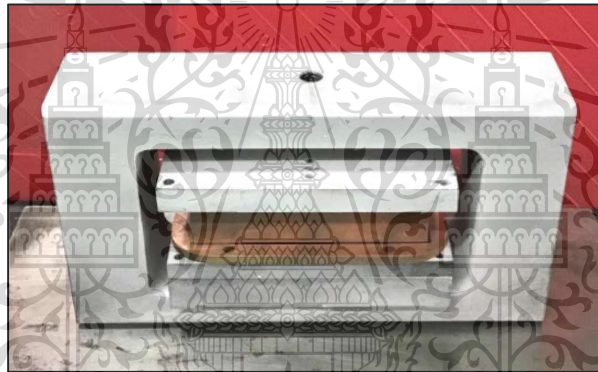
การเล่นประสานจะใช้การเล่นประสานในเตาอบยี่ห้อ Carbolite High Temperature Furnace รุ่น TZF โดยจะทำการเริ่มเล่นประสานที่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิเล่นประสานที่  $680^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 15 min (Holding Time) โดยมีอัตราการให้ความร้อนที่  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานก่อนการเล่นประสานมีดังต่อไปนี้

นำชิ้นงานที่จะทำการเล่นประสานมาทำความสะอาดด้วยอะซิโตน หลังจากนั้นทำการยึดจับชิ้นงานโดยใช้อุปกรณ์ยึดจับชิ้นงานดังรูปที่ 3.8 โดยฉีดยาเคลือบ BN รอบอุปกรณ์ยึดจับชิ้นงาน (Jig) เพื่อป้องกันไม่ให้โลหะเติมละลายไปเกาะบนอุปกรณ์ยึดจับชิ้นงาน โดยการวางชิ้นงานลงบนอุปกรณ์ยึดจับชิ้นงานจะวางตามลำดับการวางชิ้นงานดังรูปที่ 3.6 โดยจะทำการตัดแผ่นโลหะเติมให้มีขนาด  $51 \times 31$  mm โดยจะเผื่อไว้ด้านละ 5 mm สำหรับวางระหว่างแผ่นทองแดงขึ้นฝ้าด้านล่างกับแผ่นโพลีทองแดง และระหว่างแผ่นทองแดงขึ้นฝ้าปิดด้านบนกับแผ่นโพลีทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 การวางชิ้นงานและโลหะเติม



รูปที่ 3.8 อุปกรณ์ยึดจับชิ้นงาน

หลังจากนั้นตั้งค่าการแล่นประสาณที่เตาแล่นประสาณ ที่อุณหภูมิแล่นประสาณ 680 °C อบไว้ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 15 min (Holding Time) โดยมีอัตราการให้ความร้อนที่ 10 °C/min โดยมีการเติมอาร์กอน 5 L/min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.9 เครื่องเล่นประสาน

หลังจากครบเวลาในการเล่นประสาน ทำการลดอุณหภูมิรอจนเครื่องอุณหภูมิลดลงเหลือ 200 °C จึงจะทำการเปิดเตาและนำชิ้นงานออกจากเตา



รูปที่ 3.10 ชิ้นงานหลังการเล่นประสาน

### 3.3 การศึกษารอยต่อและโครงสร้างจุลภาค

การศึกษารอยต่อและโครงสร้างจุลภาคของรอยเล่นประสาน ในส่วนของการศึกษารอยเล่นประสาน นั้นเราจะพิจารณาบริเวณมุมซ้ายบน มุมขวาบน มุมล่างซ้าย มุมล่างขวา บริเวณขอบด้านล่างและด้านบน ระหว่างทองแดงรูปทรงแท่งกับทองแดงธรรมดา และบริเวณกลางชิ้นงาน ซึ่งบริเวณทั้งหมดที่กล่าวมานี้เป็นบริเวณรอยต่อที่มีการเล่นประสานระหว่างทองแดงกับโลหะเติม CuNiSnP ชนิดออสัญฐาน โดยการศึกษาโครงสร้างจุลภาคมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ตัดชิ้นงานด้วยเครื่องตัดดีห่อ Struers ผ่าแบ่งเป็น 5 ชิ้นตาม Cross Section ของเครื่อง เพื่อที่จะนำด้านที่ผ่านนี้มาเป็นด้านที่มาศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อ โดยผ่าขนาด 7.5 cm บริเวณหัวท้ายของตัวเครื่องและ 11.67 cm บริเวณที่เหลือ



รูปที่ 3.11 เครื่องตัดชิ้นงาน



รูปที่ 3.12 การผ่าชิ้นงาน 4 ชิ้นตาม Cross Section ของเครื่อง

2. นำชิ้นงานด้านที่จะศึกษาโครงสร้างจุลภาคมาหล่อเรซิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use<sup>30</sup> only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.13 ชิ้นงานที่หล่อด้วยเรซิน

3. นำชิ้นงานด้านที่จะศึกษาโครงสร้างมาขัดด้วยกระดาษทรายตามขนาดดังนี้ ได้แก่ 800, 1,000, 2,000 และ 4,000 ตามลำดับ
4. นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดกระดาษทรายตามขนาด มาปรับระนาบเพื่อให้ทั้งสองด้านได้ระนาบเดียวกันด้วยเครื่อง Milling Machine โดยกัดด้านที่ไม่ได้จะนำมาศึกษาโครงสร้างจุลภาค
5. นำชิ้นงานที่ผ่านการปรับระนาบแล้วมาทำการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 4,000 เพื่อลบรอยขีดข่วน
6. หลังจากนั้นนำมาขัดเงา (Polishing) ด้วยครีมขัดอลูมิเนียมขนาด 1  $\mu\text{m}$  และ 0.3  $\mu\text{m}$
7. นำชิ้นงานมาศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM)

### 3.4 การทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

การทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะอธิบายรายละเอียด ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ
2. ขั้นตอนดำเนินการทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
3. วิธีการวิเคราะห์และนำเสนอผลการวิเคราะห์

#### 3.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน มีดังนี้

1. ตัวกำเนิดความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. ระบบบันทึกข้อมูล

ยี่ห้อ YOKOW เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดและบันทึกข้อมูลที่ทำกรต่อจากเทอร์โมคัปเปิล ซึ่งเทอร์โมคัปเปิลจะรับอุณหภูมิจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งใช้วัดตามตำแหน่งที่กำหนดไว้ โดยผลจะแสดงแบบดิจิตอล

### 4. เทอร์โมคัปเปิล

### 5. เครื่องจ่ายไฟ

### 6. กระจกตวงวัดอัตราการไหล

### 7. ถังน้ำเข้าและถังน้ำออก










เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use<sup>32</sup> only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

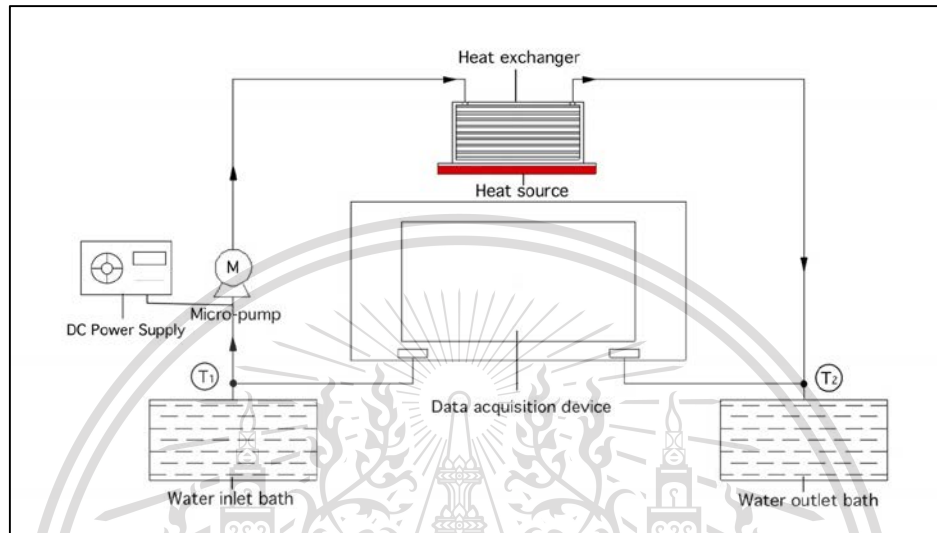
ตารางที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

ภาพตัวอย่างอุปกรณ์	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ
	ตัวกำเนิดความร้อน (LED COB Bulb Chip)
	ปั๊มสุบจ่ายของเหลว (Peristaltic Pump)
	ระบบบันทึกข้อมูล
	เทอร์โมคัปเปิล
	เครื่องจ่ายไฟ (APS3005S Regulated DC Power Supply)
	กระบอกตวงวัดอัตราการไหล
	ถังน้ำเข้าและถังน้ำออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.2 ขั้นตอนดำเนินการทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

#### 1. ออกแบบแผนผังชุดอุปกรณ์การทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



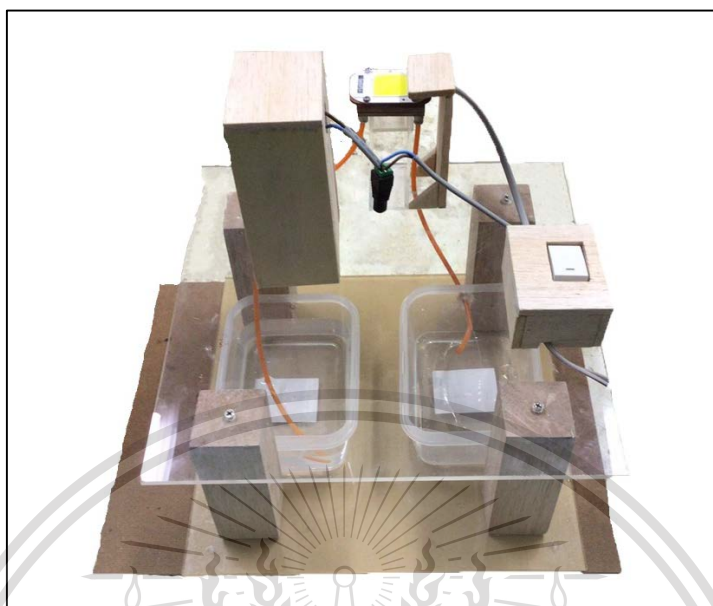
รูปที่ 3.14 ไดอะแกรมของชุดอุปกรณ์การทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

2. ดำเนินการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเข้ากับตัวกำเนิดความร้อน ทำการติดตั้งถังน้ำป้อนขนาด 500 mL เข้ากับปั๊มจ่ายของเหลวเพื่อป้อนน้ำเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีโฟมทองแดง และต่อท่อน้ำออกพร้อมกระบอกตวงเพื่อวัดอัตราการไหลของน้ำที่ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีโฟมทองแดง



รูปที่ 3.15 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



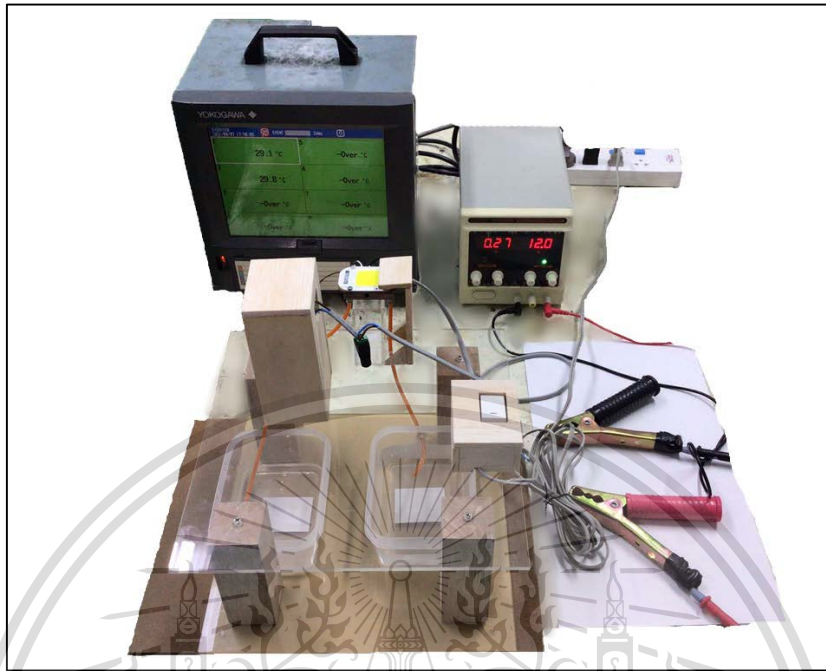
รูปที่ 3.16 ชุดทดลองการทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

3. ติดตั้งระบบบันทึกข้อมูล เข้ากับเทอร์โมคัปเปิล สัญญาณอุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิลเป็นสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยตรวจจับข้อมูลบริเวณพื้นที่รอบนอกของแผง LED (ตัวกำเนิดความร้อน)
4. ติดตั้งเครื่องจ่ายไฟปรับกระแสไฟป้อนเข้าปั๊มสุบจ่ายของเหลว ขนาด 4 V, 8 V และ 12 V ตามลำดับ โดยทำการวัดอัตราการไหลของน้ำและบันทึกอุณหภูมิแผง LED ศึกษาที่เวลา 1 min
5. นำข้อมูลที่บันทึกได้มาวิเคราะห์ผลเพื่อหาความสามารถเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.17 การทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

### 3.4.3 วิธีการวิเคราะห์และนำเสนอผลการวิเคราะห์

หลังจากที่ได้ทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อเก็บข้อมูลจนครบตามขั้นตอนแล้ว ตามขั้นตอนที่ได้กล่าวมาข้างต้น จากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์อุณหภูมิบริเวณพื้นที่รอบนอกของแผง LED ขณะอัตราการไหลของน้ำอยู่ที่ 4 V, 8 V และ 12 V ตามลำดับ อุณหภูมิน้ำเข้า-ขาออก อัตราการไหลของน้ำขนาด 4 V, 8 V และ 12 V โดยในรายละเอียดของผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์จะกล่าวในบทที่ 4 โดยจะมีการแสดงกราฟความสัมพันธ์ผลการวิจัยต่าง ๆ ดังนี้

1. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของแผง LED กรณีไม่มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
2. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของแผง LED กรณีมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ขณะอัตราการไหลของน้ำที่แรงดันไฟฟ้า 4 V
3. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของแผง LED กรณีมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ขณะอัตราการไหลของน้ำที่แรงดันไฟฟ้า 8 V
4. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของแผง LED กรณีมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ขณะอัตราการไหลของน้ำที่แรงดันไฟฟ้า 12 V
5. กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิแผง LED กรณีมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ขณะอัตราการไหลของน้ำที่แรงดันไฟฟ้า 4 V, 8 V และ 12 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับอุณหภูมิแผง LED กรณีมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ขณะอัตราการไหลของน้ำที่แรงดันไฟฟ้า 4 V, 8 V และ 12 V กับกรณีไม่มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

7. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับอัตราความร้อนสูญเสียของแผง LED ขณะอัตราการไหลของน้ำที่แรงดันไฟฟ้า 4 V

8. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับอัตราความร้อนสูญเสียของแผง LED ขณะอัตราการไหลของน้ำที่แรงดันไฟฟ้า 8 V

9. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับอัตราความร้อนสูญเสียของแผง LED ขณะอัตราการไหลของน้ำที่แรงดันไฟฟ้า 12 V

10. กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับอัตราความร้อนสูญเสียของแผง LED ขณะอัตราการไหลของน้ำที่แรงดันไฟฟ้า 4 V, 8 V และ 12 V



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use<sup>37</sup> only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการดำเนินงานหลังจากการออกแบบและสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจากโพมทองแดงโดยการเล่นประสานในเตา และใช้โลหะเติม CuNiSnP ชนิดออสถุฐาน ดังแสดงในหัวข้อต่อไป

1. การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดออสถุฐาน จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง
2. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

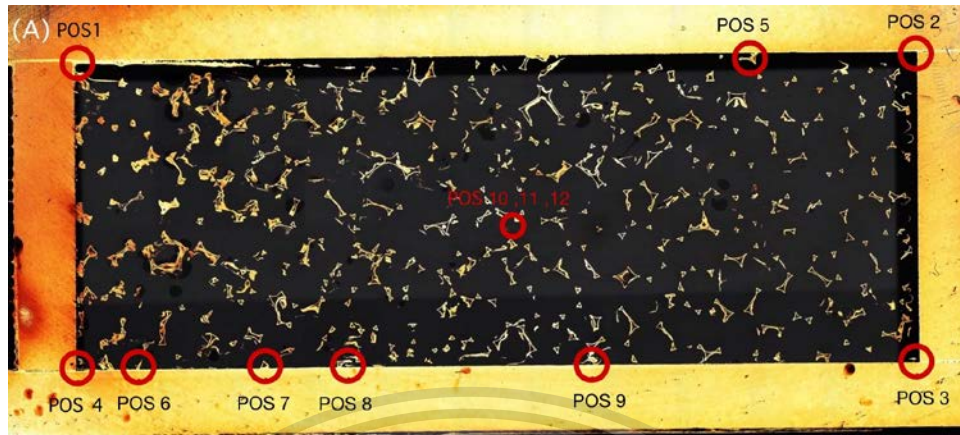
#### 4.1 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดออสถุฐาน จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

จากที่ทำการเล่นประสานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยนำเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ทำการเล่นประสานแล้วมาผ่านกระบวนการผ่าชิ้นงานแบบตัดขวางเป็นจำนวน 4 ชิ้น ซึ่งจะศึกษาที่ตำแหน่งรอยต่อต่าง ๆ ได้แก่ มุมซ้ายบน มุมขวาบน มุมล่างซ้าย มุมล่างขวา บริเวณขอบบนและล่างระหว่างทองแดงรูพรุนกับทองแดงธรรมดา และบริเวณกลางชิ้นงาน โดยศึกษาที่กำลังขยายต่าง ๆ ได้แก่ 5 เท่า 20 เท่า และ 50 เท่า ตามลำดับ

##### 4.1.1 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชิ้นงานที่ 1

จากรูปที่ 4.1(A) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดออสถุฐานกับทองแดงแบบเต็มชิ้นงาน จากการผ่าแบบตัดขวาง ที่กำลังขยาย 5 เท่า ซึ่งบอกตำแหน่งที่จะศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อบริเวณต่าง ๆ โดยชิ้นงานที่ 1 ศึกษาทั้งหมด 12 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.1

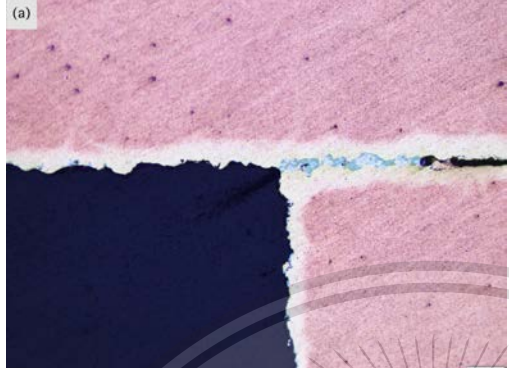


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 ภาพตัดขวางของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชิ้นงานที่ 1(A)

Position	ภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 20 เท่า	ภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50 เท่า
1	(a)	(b)
	ภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50 เท่า	
	(c)	

รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเดิม CuNiSnP ชนิดอสัณฐาน และทองแดงบริเวณเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ การค้า มุมซ้ายบนชิ้นที่ 1 ตำแหน่งที่ 1 ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

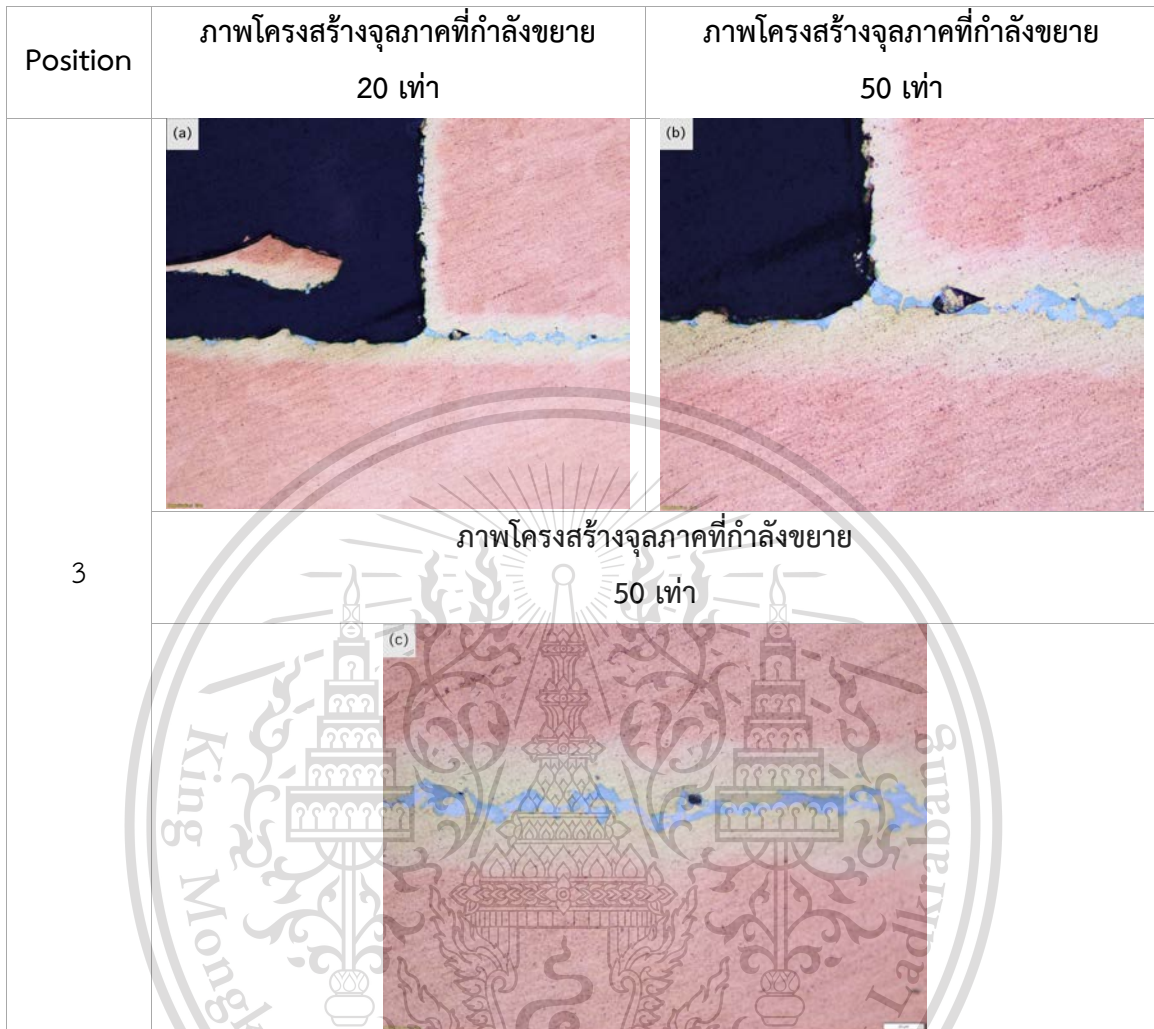
Position	ภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 20 เท่า	ภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50 เท่า
2		
	<p style="text-align: center;">ภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50 เท่า</p>	
		

รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดอสัณฐาน และทองแดงบริเวณมุม ขวาบน ชั้นที่ 1 ตำแหน่งที่ 2 ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.


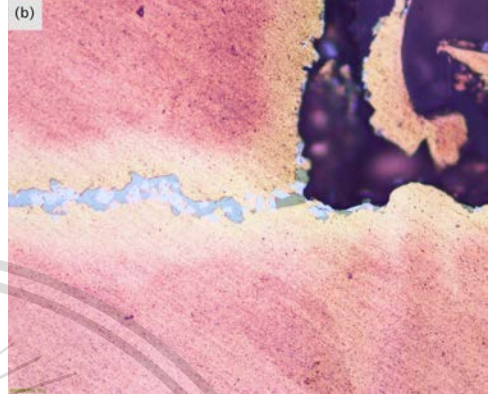



รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดอสัณฐาน และทองแดงบริเวณมุม  
ขวาล่างชั้นที่ 1 ตำแหน่งที่ 3 ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

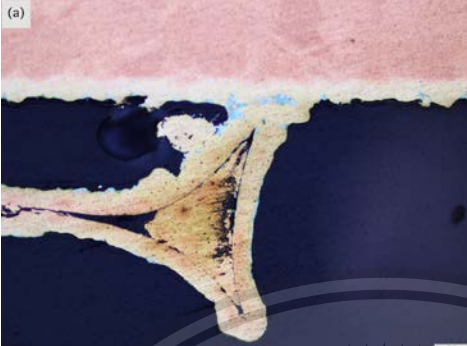







Position	ภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 20 เท่า	ภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50 เท่า
		
4	ภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50 เท่า	
		

รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดอสัณฐาน และทองแดงบริเวณมุมซ้ายล่าง ชั้นที่ 1 ตำแหน่งที่ 4 ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า

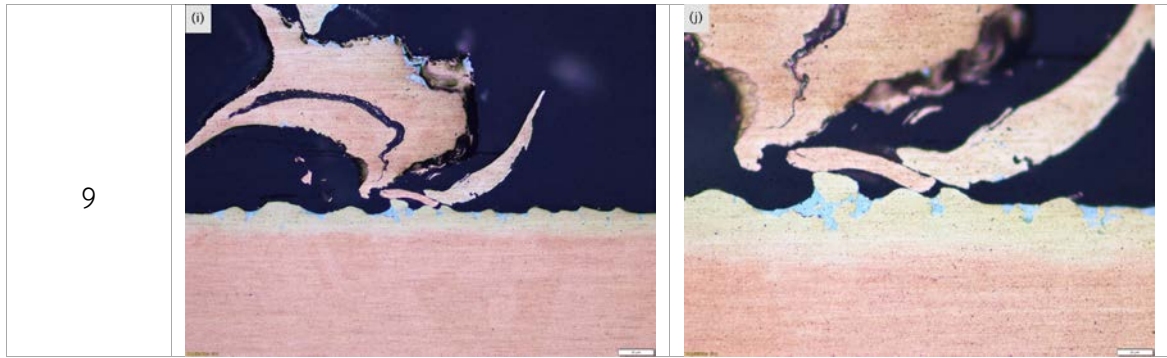
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.


Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Position	ภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 20 เท่า	ภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50 เท่า
5	(a) 	(b) 
6	(c) 	(d) 
7	(e) 	(f) 
8	(g) 	(h) 

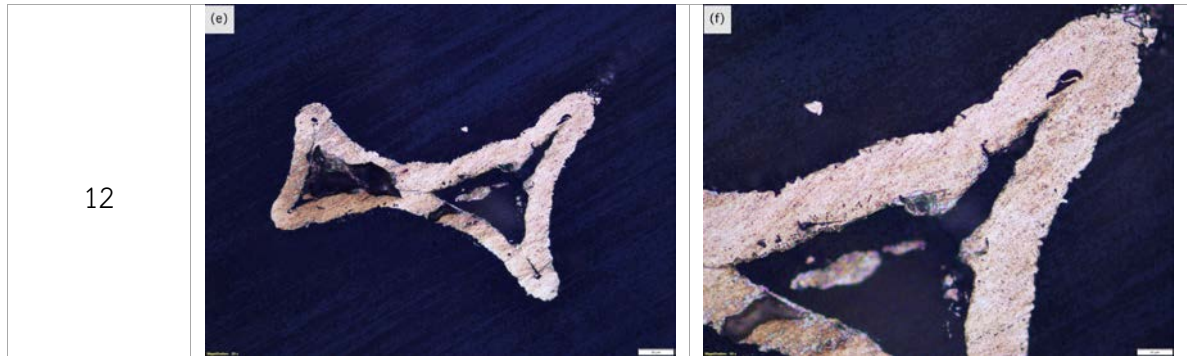
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดอสัณฐาน และทองแดงชั้นที่ 1 ตำแหน่งที่ 5 บริเวณขอบบนระหว่างทองแดงธรรมดา กับทองแดงรูปพรุน ตำแหน่งที่ 6, 7, 8 และตำแหน่งที่ 9 บริเวณขอบล่างระหว่างทองแดงธรรมดา กับทองแดงรูปพรุน ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า

Position	ภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 20 เท่า	ภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50 เท่า
10		
11		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดออสเทนไนต์ และทองแดงชั้นที่ 1 ตำแหน่งที่ 10, 11 และ 12 บริเวณตรงกลางชิ้นงานที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า

#### 4.1.2 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชิ้นงานที่ 2

จากรูปที่ 4.8(B) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดออสเทนไนต์กับทองแดงแบบเต็มชิ้นงาน จากการผ่าแบบตัดขวางที่กำลังขยาย 5 เท่า ซึ่งบอกตำแหน่งที่จะศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อบริเวณต่าง ๆ โดยชิ้นงานที่ 2 ศึกษาทั้งหมด 15 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.8

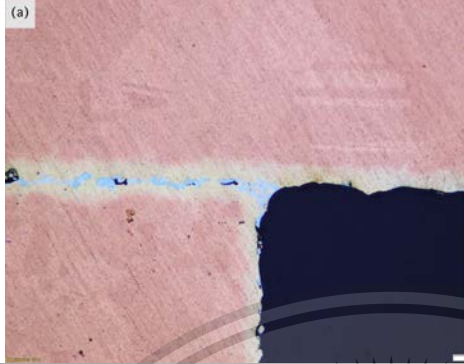




รูปที่ 4.8 ภาพตัดขวางของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชิ้นงานที่ 2(B)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

45  
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

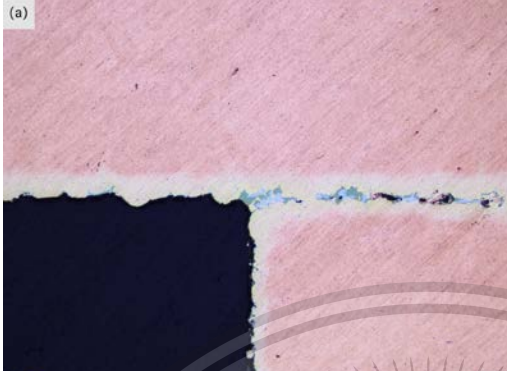


Position	ภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 20 เท่า	ภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50 เท่า
1	(a) 	(b) 
	ภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50 เท่า	
	(c) 	

รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดอสัณฐาน และทองแดงบริเวณมุมซ้ายบนชั้นที่ 2 ตำแหน่งที่ 1 ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

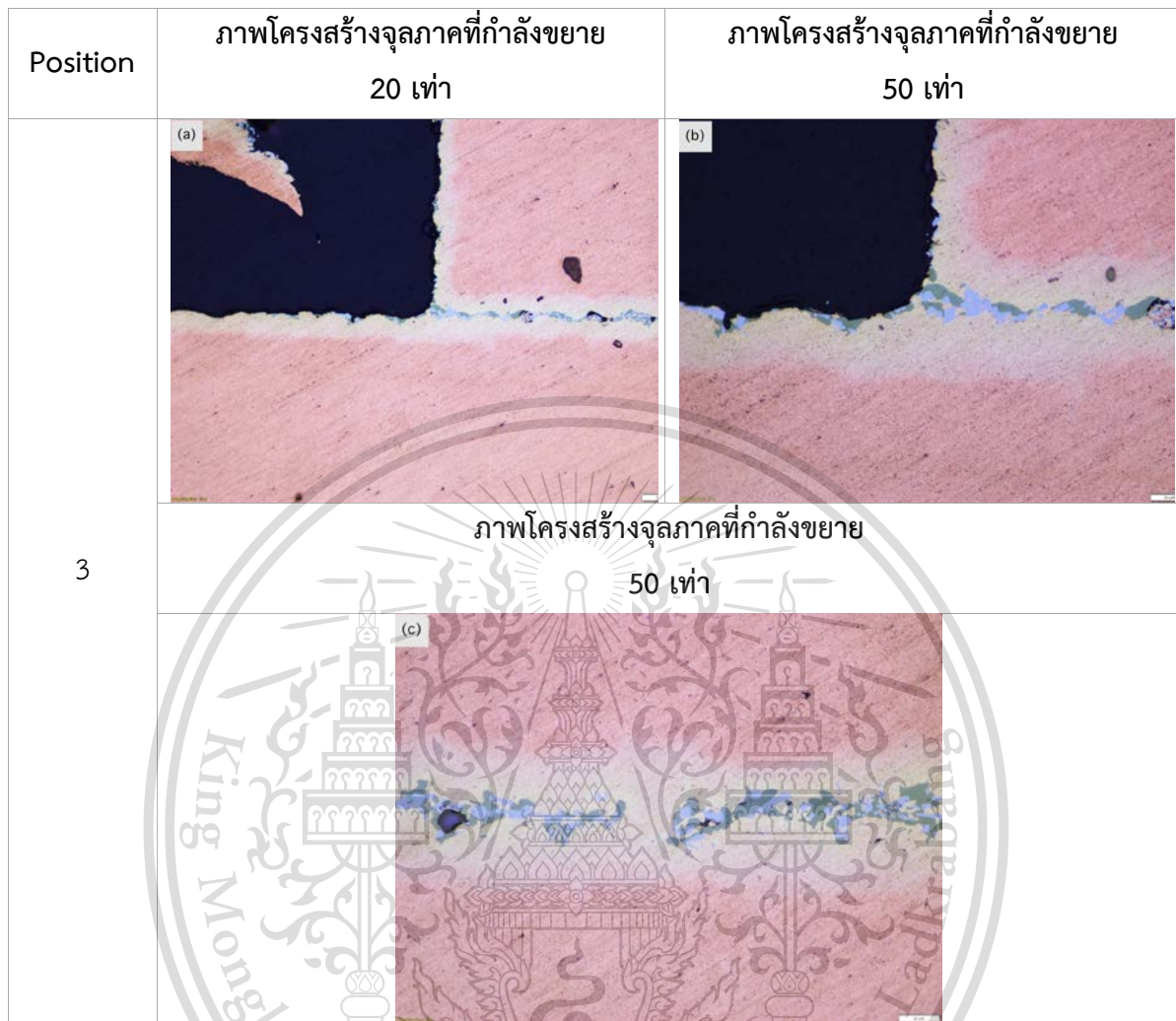
Position	ภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 20 เท่า	ภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50 เท่า
		
2	ภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 20 เท่า	
		

รูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดออสเทนไนต์ และทองแดงบริเวณมุม ขวาบน ชั้นที่ 2 ตำแหน่งที่ 2 ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

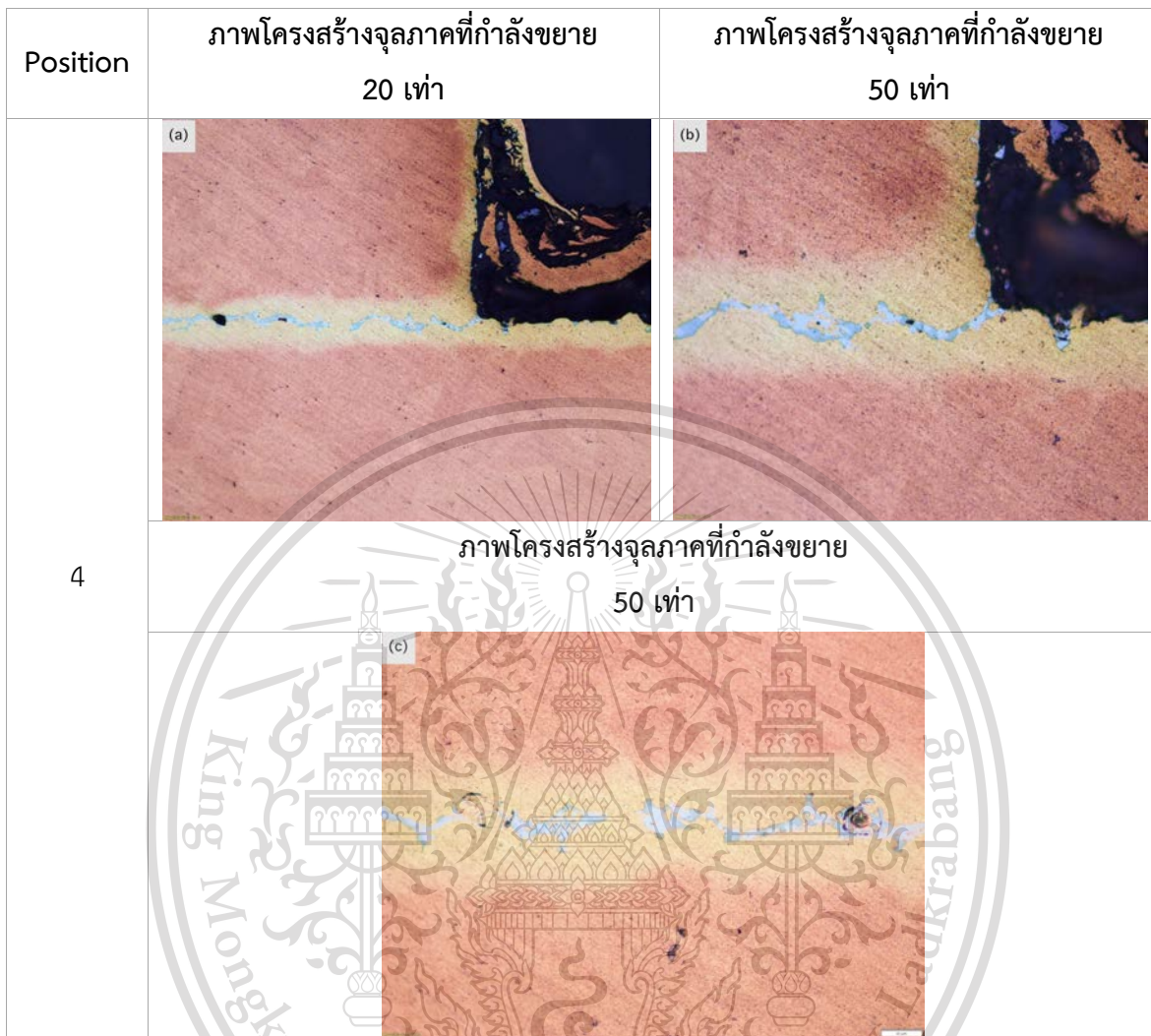


รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดอสัณฐาน และทองแดงบริเวณมุม  
ขวาล่างชั้นที่ 2 ตำแหน่งที่ 3 ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.











รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดอสัณฐาน และทองแดงบริเวณ  
มุมซ้ายล่างชั้นที่ 2 ตำแหน่งที่ 4 ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

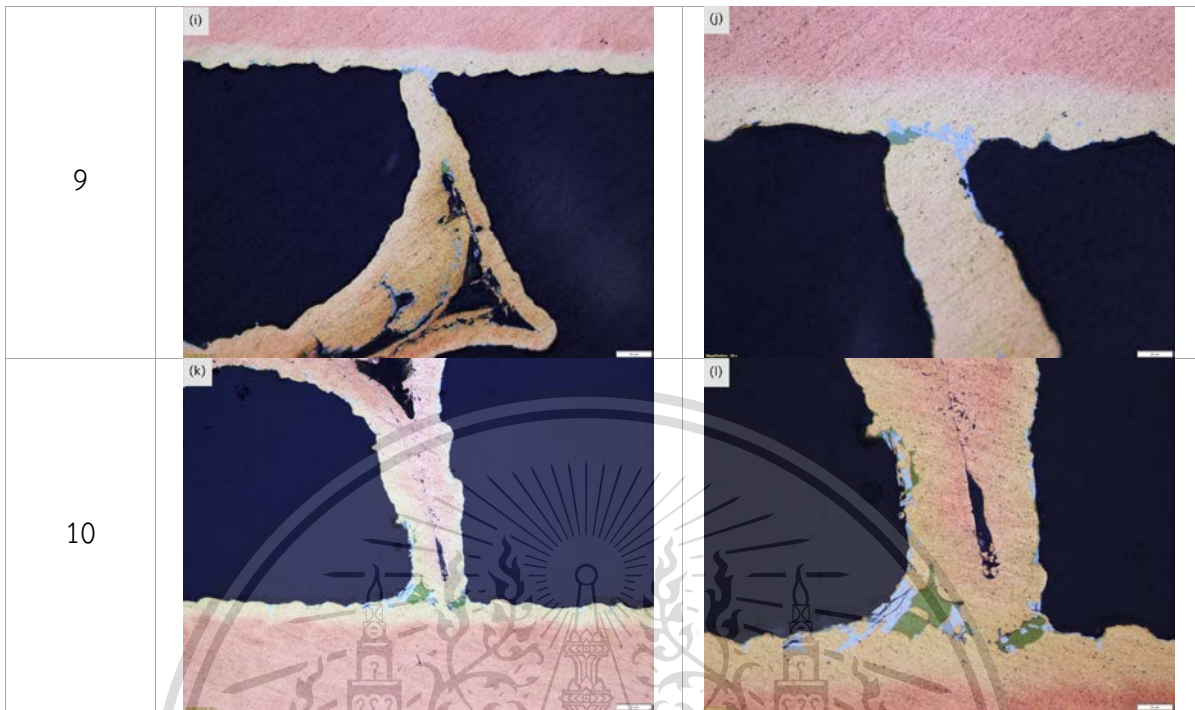
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Position	ภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 20 เท่า	ภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50 เท่า
5		
6		
7		
8		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use<sup>50</sup> only, not allowed for commercial use.

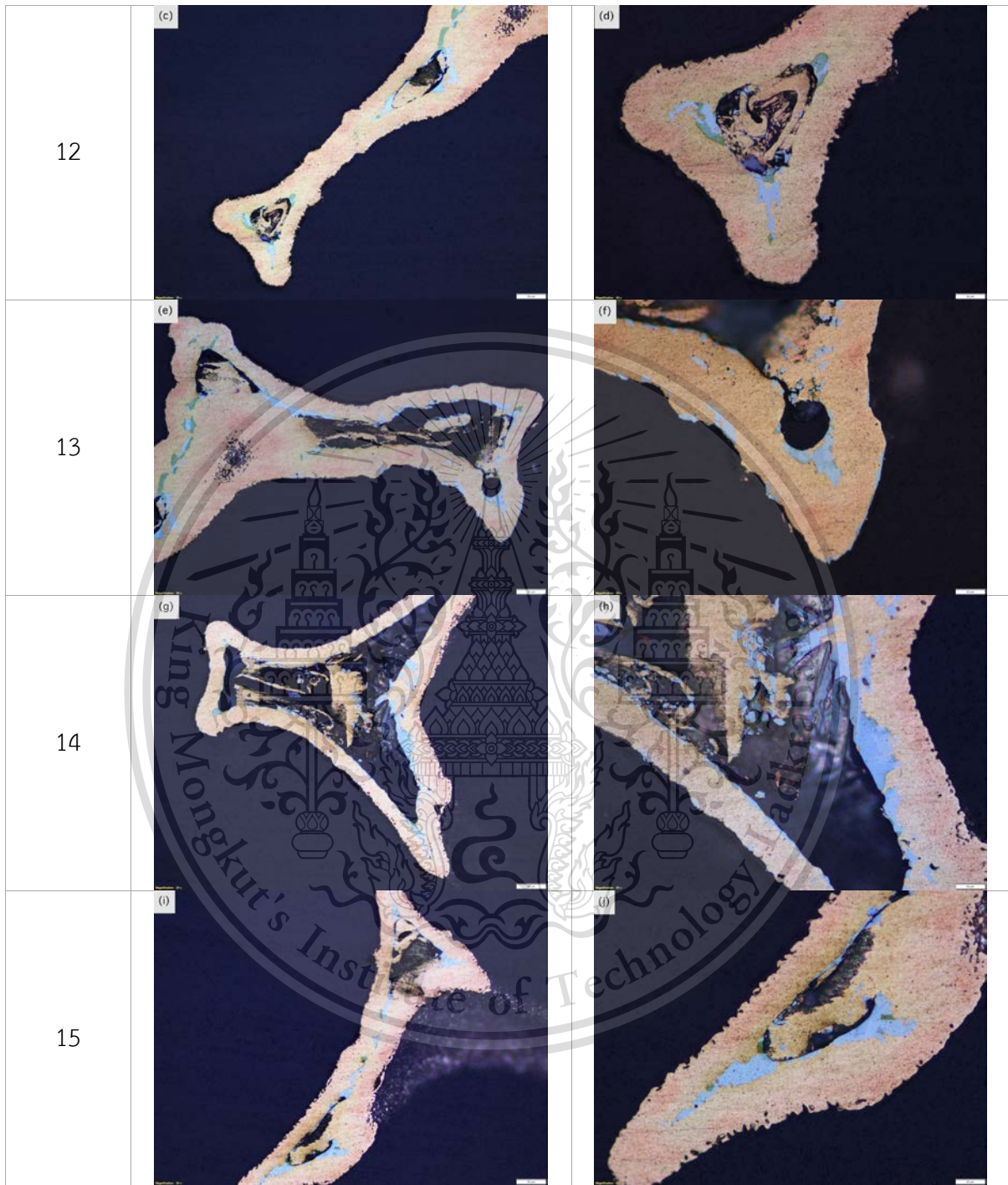
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดออสเทนไนต์ และทองแดงชั้นที่ 2 ตำแหน่งที่ 7, 8 และ 9 บริเวณขอบบนระหว่างทองแดงธรรมดากับทองแดงรูพรุน และตำแหน่งที่ 10 บริเวณขอบล่างระหว่างทองแดงธรรมดากับทองแดงรูพรุน ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

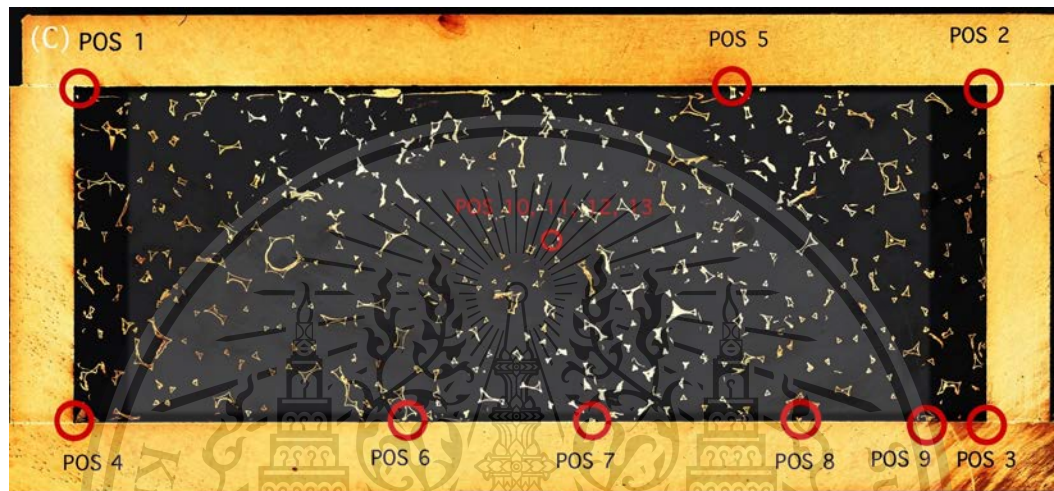


รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดอสัณฐาน และทองแดงชั้นที่ 2 ตำแหน่งที่ 10, 11, 12, 13, 14 และตำแหน่งที่ 15 บริเวณตรงกลางชิ้นงาน ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 50 เท่า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.1.3 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชั้นงานที่ 3

จากรูปที่ 4.15(C) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิด อสังฐานกับทองแดงแบบเต็มชิ้นงาน จากการผ่าแบบตัดขวาง ที่กำลังขยาย 5 เท่า ซึ่งบอกตำแหน่งที่จะศึกษา โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อบริเวณต่าง ๆ โดยชิ้นงานที่ 3 ศึกษาทั้งหมด 13 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูป 4.15

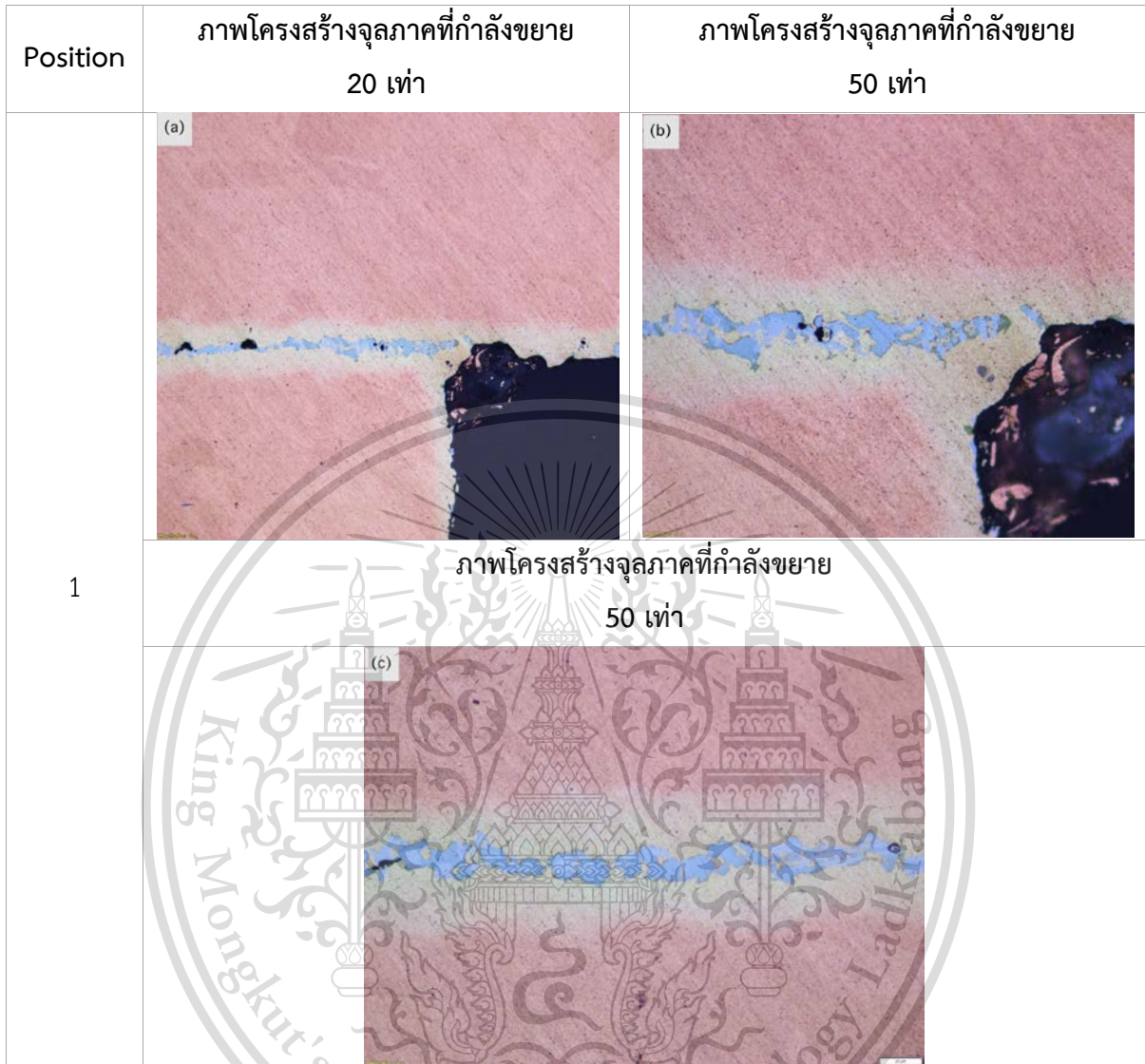


รูปที่ 4.15 ภาพตัดขวางของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชิ้นงานที่ 3(C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

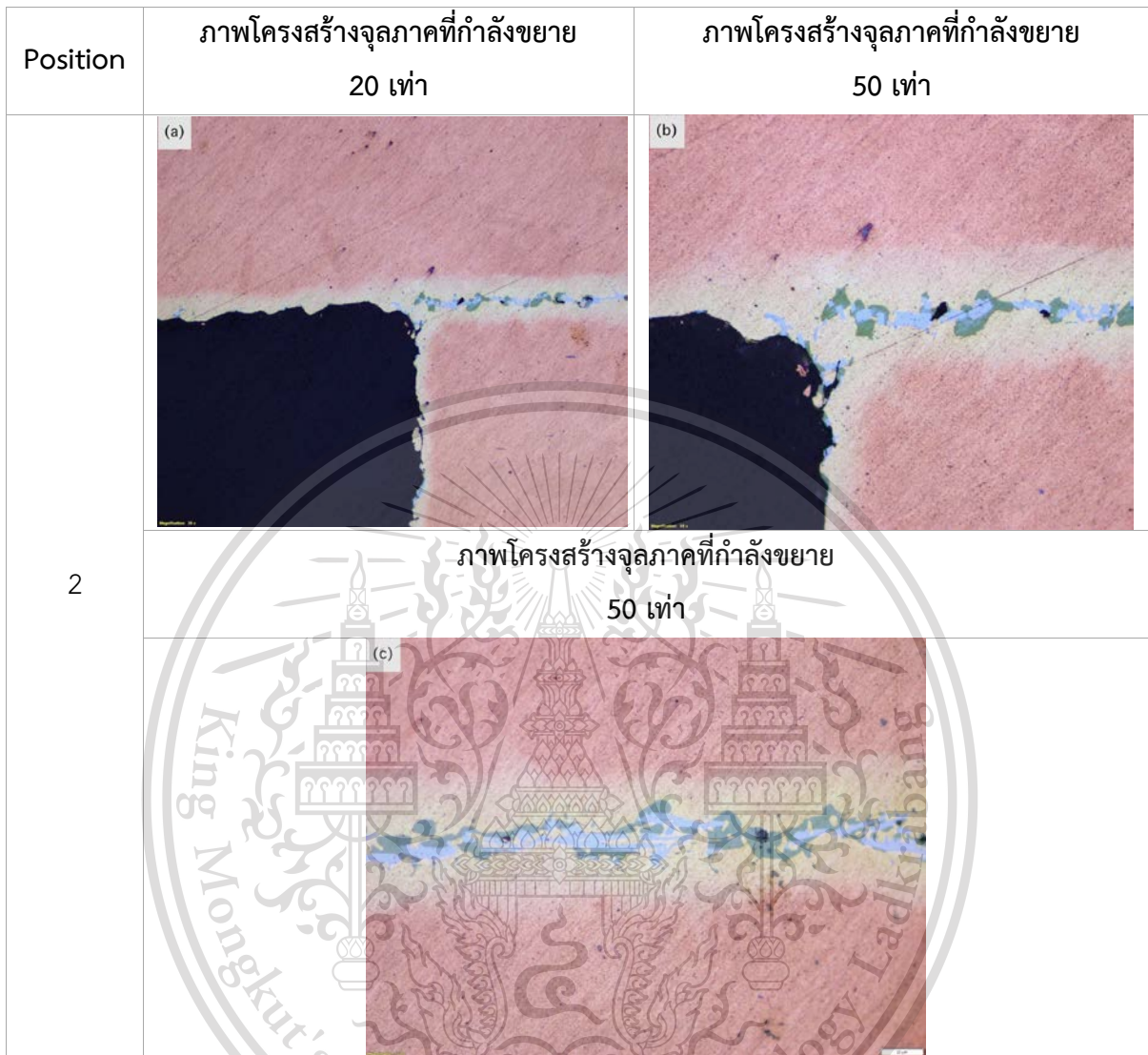


รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดอสัณฐาน และทองแดงบริเวณ  
มุมซ้ายบนชั้นที่ 3 ตำแหน่งที่ 1 ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

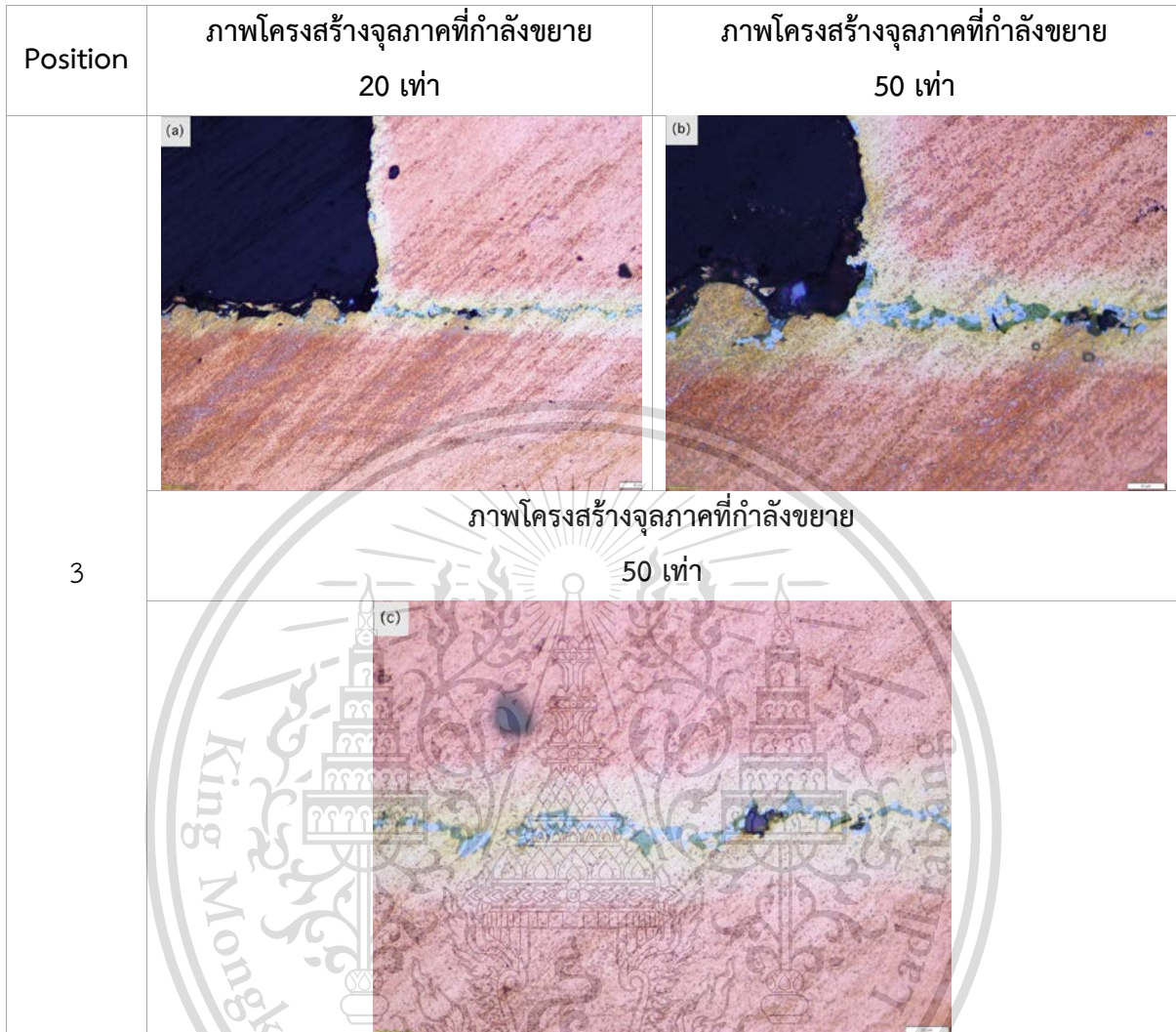


รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดอสัณฐาน และทองแดงบริเวณมุม ขวาบนชั้นที่ 3 ตำแหน่งที่ 2 ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use <sup>55</sup> only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

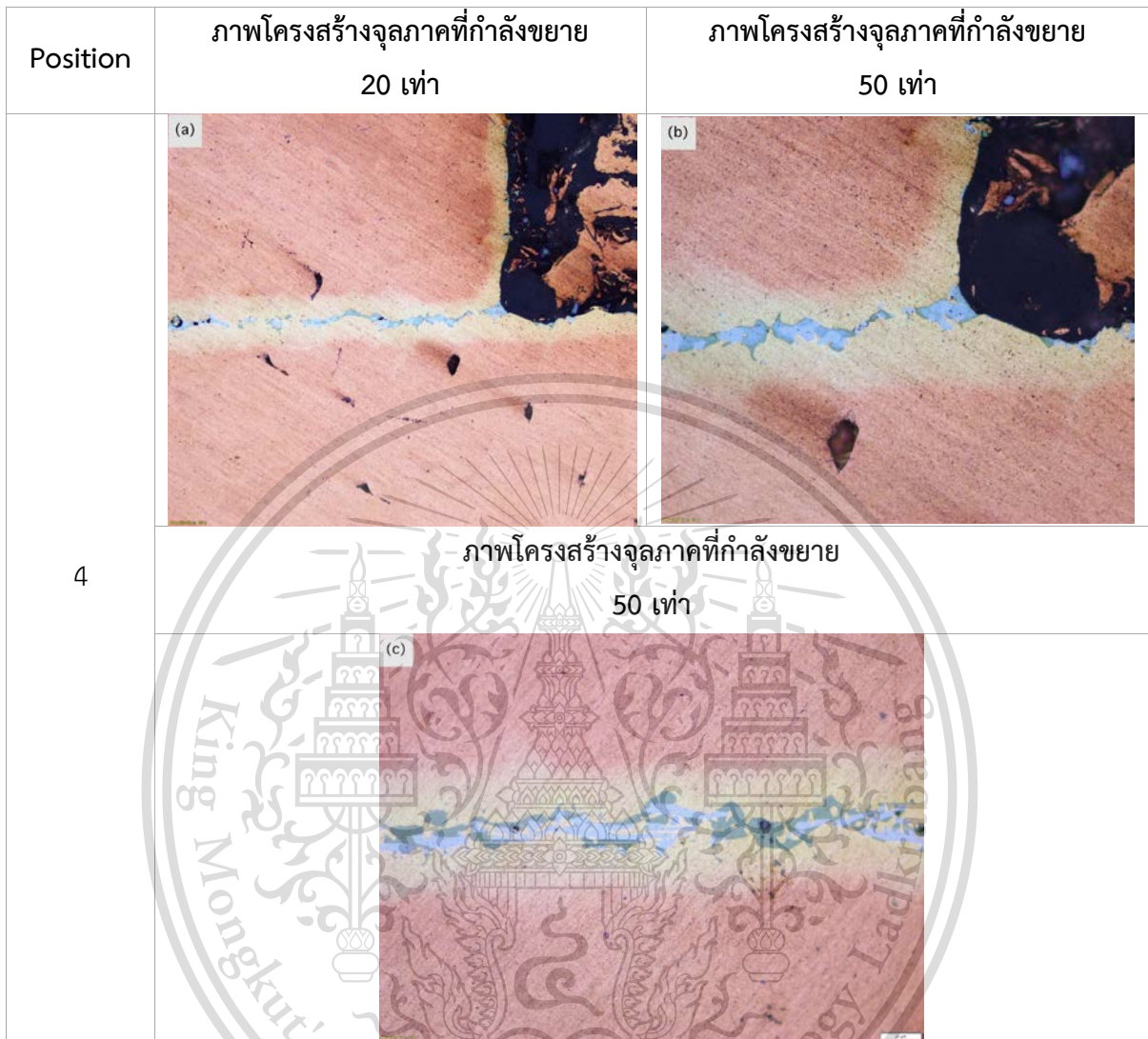


รูปที่ 4.18 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดออสติฐาน และทองแดงบริเวณมุม  
ขวาล่างชั้นที่ 3 ตำแหน่งที่ 3 ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use<sup>56</sup> only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.


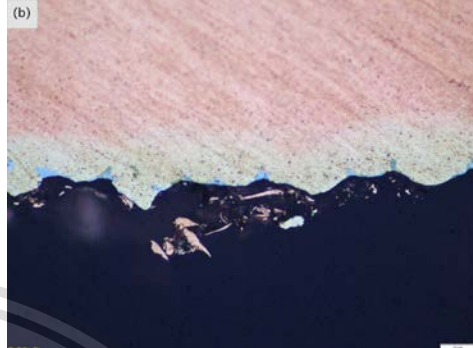








รูปที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดอสัณฐาน และทองแดงบริเวณมุมซ้ายล่าง ชั้นที่ 3 ตำแหน่งที่ 4 ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use <sup>57</sup> only, not allowed for commercial use.

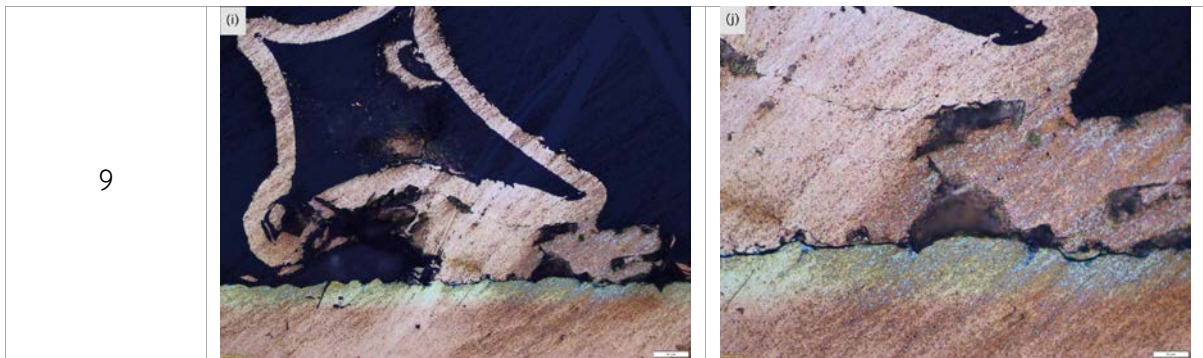
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Position	ภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 20 เท่า	ภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50 เท่า
5		
6		
7		
8		

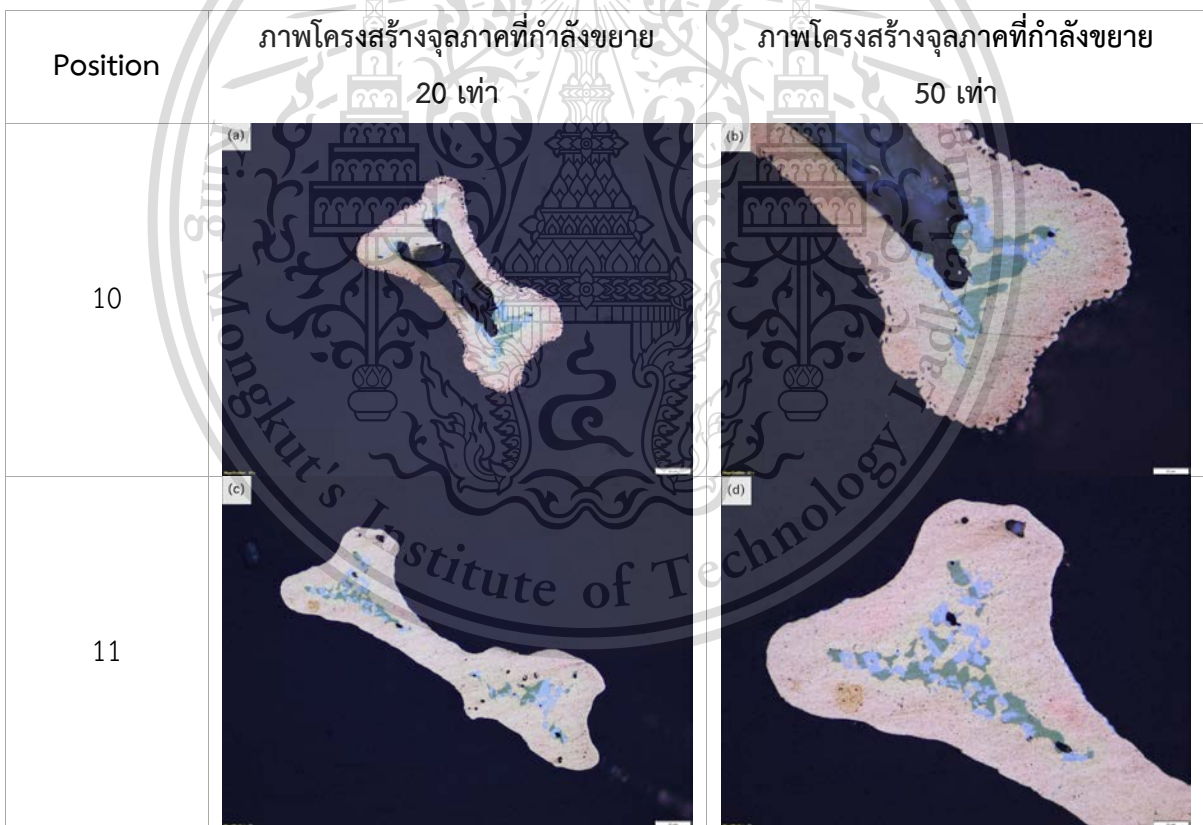
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use<sup>58</sup> only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



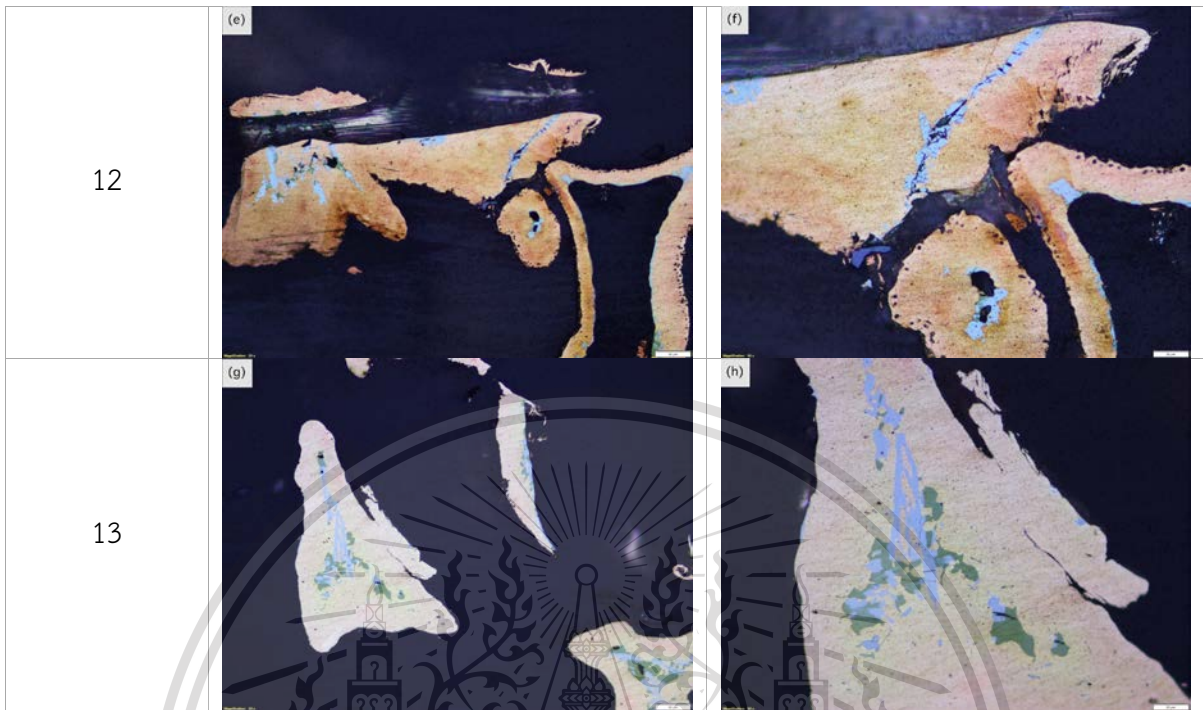
รูปที่ 4.20 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดออสติฐาน และทองแดงชั้นที่ 3 ตำแหน่งที่ 5 บริเวณขอบบนระหว่างทองแดงธรรมดากับทองแดงรูพรุน ตำแหน่งที่ 6, 7, 8 และ 9 บริเวณขอบล่างระหว่างทองแดงธรรมดากับทองแดงรูพรุน ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

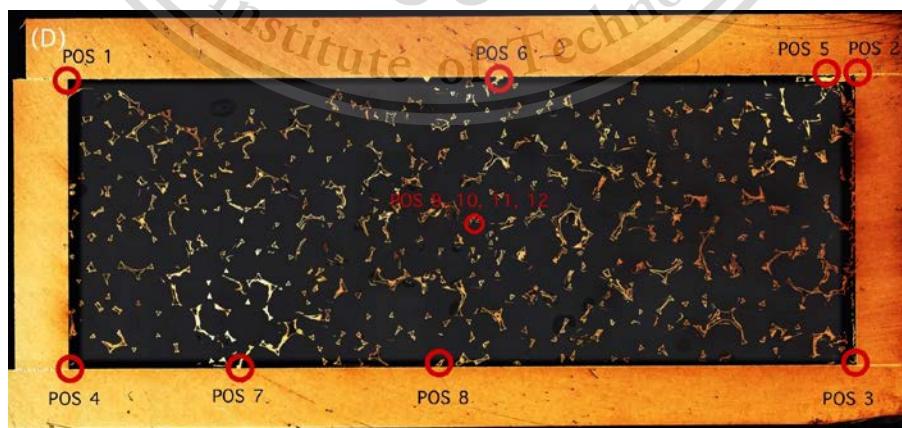
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



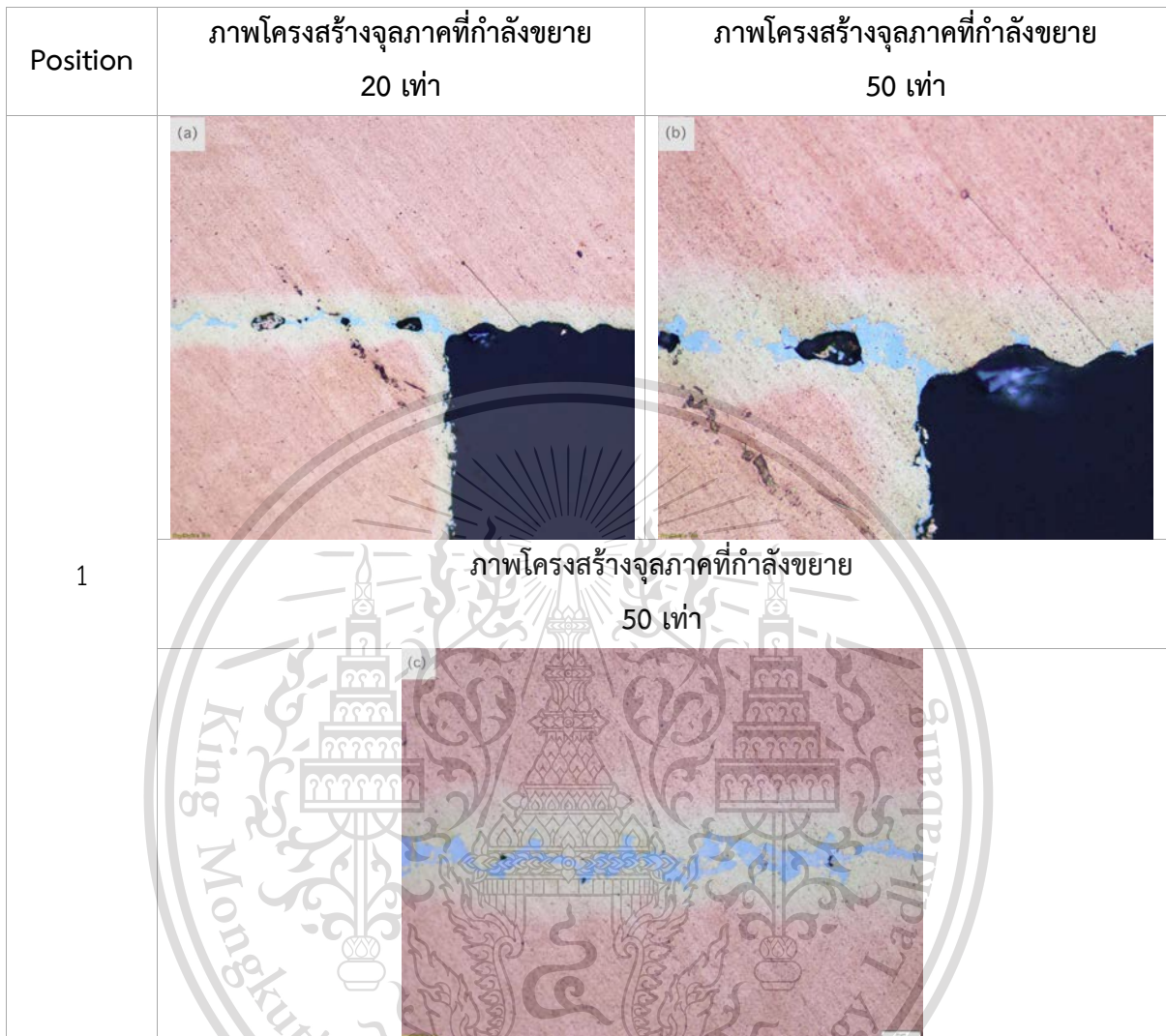
รูปที่ 4.21 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดออสถุฐาน และทองแดงชั้นที่ 3 ตำแหน่งที่ 10, 11, 12 และตำแหน่งที่ 13 บริเวณตรงกลางชิ้นงาน ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า

#### 4.1.4 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชิ้นงานที่ 4

จากรูปที่ 4.22(D) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดออสถุฐานกับทองแดงแบบเต็มชิ้นงาน จากการผ่าแบบตัดขวาง ที่กำลังขยาย 5 เท่า ซึ่งบอกตำแหน่งที่จะศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อบริเวณต่าง ๆ โดยชิ้นงานที่ 4 ศึกษาทั้งหมด 12 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 ภาพตัดขวางของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชิ้นงานที่ 4(D)  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของวิศวกรรมศาสตราจารย์ ดร. วรวิทย์ วัฒนศิริกุล โดยไม่อนุญาตให้ผู้อื่นใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

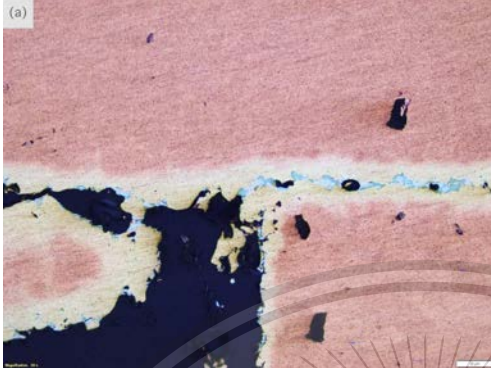




รูปที่ 4.23 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดออสเทนไนต์ และทองแดงบริเวณ  
มุมซ้ายบนชั้นที่ 4 ตำแหน่งที่ 1 ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.




Position	ภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 20 เท่า	ภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50 เท่า
		
2	<p data-bbox="711 737 1101 821" style="text-align: center;">ภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50 เท่า</p> 	

รูปที่ 4.24 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดอสัณฐาน และทองแดงบริเวณมุม  
ขวาบนชั้นที่ 4 ตำแหน่งที่ 2 ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use<sup>62</sup> only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

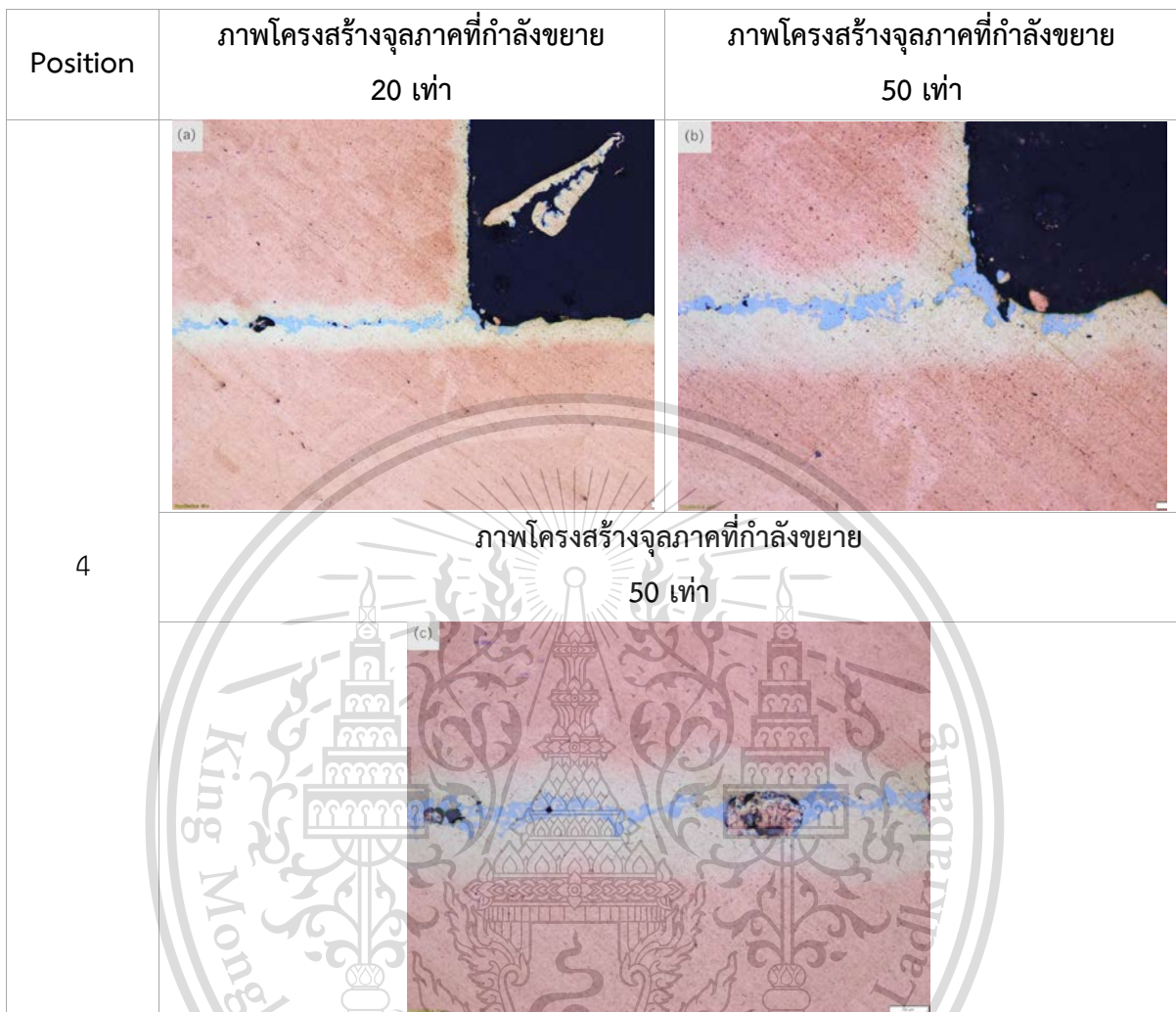
Position	ภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 20 เท่า	ภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50 เท่า
		
3	ภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50 เท่า	
		

รูปที่ 4.25 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดอสัณฐาน และทองแดงบริเวณมุม  
ขวาล่างชั้นที่ 4 ตำแหน่งที่ 3 ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use<sup>63</sup> only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



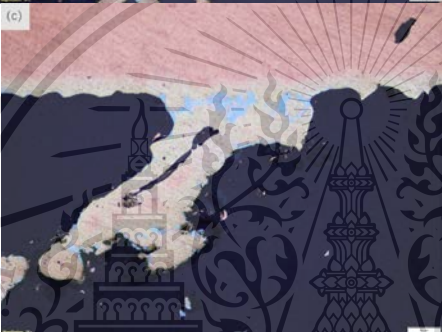







รูปที่ 4.26 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดอสัณฐาน และทองแดงบริเวณมุมซ้ายล่าง ชั้นที่ 4 ตำแหน่งที่ 4 ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า

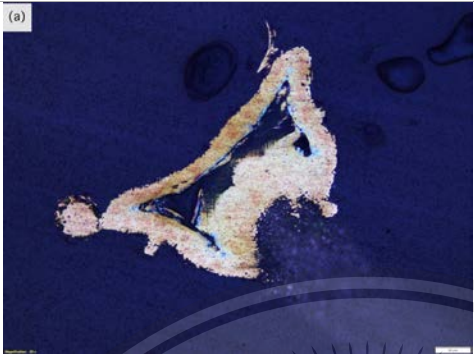
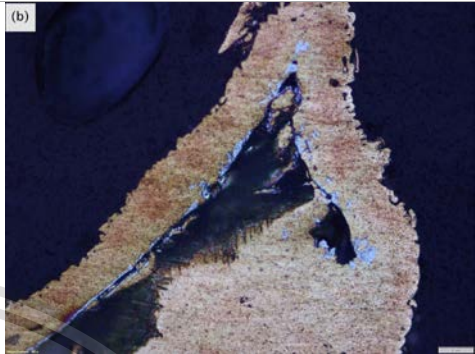






เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Position	ภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 20 เท่า	ภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50 เท่า
5		
6		
7		
8		

รูปที่ 4.27 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดอสัณฐาน และทองแดงขึ้นที่ 4 ตำแหน่งที่ 5 และ 6 บริเวณขอบบนระหว่างทองแดงธรรมดา กับทองแดงรูปพรุน ตำแหน่งที่ 7 และ 8 บริเวณขอบล่างระหว่างทองแดงธรรมดา กับทองแดงรูปพรุน ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Position	ภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 20 เท่า	ภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50 เท่า
9		
10		
11		
12		

รูปที่ 4.28 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะเติม CuNiSnP ชนิดอสัณฐาน และทองแดงชั้นที่ 4  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
 ตำแหน่งที่ 9, 10, 11 และ 12 บริเวณตรงกลางชิ้นงาน ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 50 เท่า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน ทำให้สังเกตโครงสร้างจุลภาคได้ชัดเจนแต่ยังไม่สามารถระบุเฟสที่แน่ชัด โดยจะสามารถแยกเฟสที่แตกต่างกันได้ประมาณ 3 ถึง 4 เฟส ตามความแตกต่างของจำนวนสีที่ปรากฏบนรอยต่อแล่นประสาน จากอุณหภูมิที่ใช้ในการเล่นประสาน 680 °C อบไว้ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 15 min

พบว่าโลหะเติมสามารถไหลไปตามชิ้นงาน และไหลไปยังบริเวณที่ต้องการแล่นประสานได้ค่อนข้างสมบูรณ์เพื่อสร้างชิ้นรอยต่อ แต่สังเกตได้ว่าโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อแล่นประสานยังคงปรากฏช่องว่างโดยสาเหตุที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องนี้ เนื่องจากอากาศหรือแก๊สถูกกักเก็บเอาไว้ในรอยแล่นประสานในขณะที่รอยแล่นประสานยังเป็นของเหลว และสาเหตุการเกิดรอยร้าวมาจากการใช้แรงกดขณะทำการแล่นประสาน พอนำแรงกดออกจากชิ้นงานทำให้รอยแล่นประสานแยกออกจากกันเกิดเป็นรอยร้าว หรือสาเหตุอีกประการเกิดจากขั้นตอนการตัดเพื่อเตรียมชิ้นงานส่งผลให้เกิดรอยร้าว

#### 4.2 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโคมทองแดง โดยการทดสอบกระทำภายใต้เงื่อนไขขอบเขตที่สภาวะต่าง ๆ เพื่อศึกษาถึงพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อความสามารถของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโคมทองแดง โดยแบ่งการอธิบายผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ ดังแสดงไว้ในหัวข้อต่อไปนี้

1. พารามิเตอร์เงื่อนไขและขอบเขตในการทดสอบ
2. กรณีที่หนึ่ง: การปรับอัตราการไหลของน้ำ ที่แรงดันไฟฟ้า 4 V
3. กรณีที่สอง: การปรับอัตราการไหลของน้ำ ที่แรงดันไฟฟ้า 8 V
4. กรณีที่สาม: การปรับอัตราการไหลของน้ำ ที่แรงดันไฟฟ้า 12 V
5. เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิแผง LED ขณะอัตราการไหลของน้ำที่แรงดันไฟฟ้า 4 V, 8 V และ 12 V
6. วิเคราะห์ผลการทดสอบ โดยคำนวณอัตราความร้อนสูญเสียของอุณหภูมิแผง LED เปรียบเทียบทั้ง 3 กรณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.1 พารามิเตอร์เงื่อนไขและขอบเขตในการทดสอบ

ในการทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโพลีเมทริกที่ทำการออกแบบไว้ เพื่อศึกษาถึงพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อความสามารถของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโพลีเมทริก โดยได้กำหนดเงื่อนไขและขอบเขตของการทดสอบไว้ ดังตารางที่ 4.1 เงื่อนไขและขอบเขตในการทดสอบ

ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขและขอบเขตของพารามิเตอร์ในการทดสอบ

พารามิเตอร์	เงื่อนไขและขอบเขต
อัตราการไหลของน้ำที่แรงดันไฟฟ้า	4 V
อัตราการไหลของน้ำที่แรงดันไฟฟ้า	8 V
อัตราการไหลของน้ำที่แรงดันไฟฟ้า	12 V
เวลา	1 min

ตารางที่ 4.2 อัตราการไหลของน้ำกรณีไม่มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

อัตราการไหลกรณีไม่มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	
ที่แรงดันไฟฟ้า (V)	อัตราการไหล (mL/min)
4	11
8	26.5
12	49

ตารางที่ 4.3 อัตราการไหลของน้ำกรณีมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

อัตราการไหลกรณีมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	
ที่แรงดันไฟฟ้า (V)	อัตราการไหล (mL/min)
4	7.8
8	25
12	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

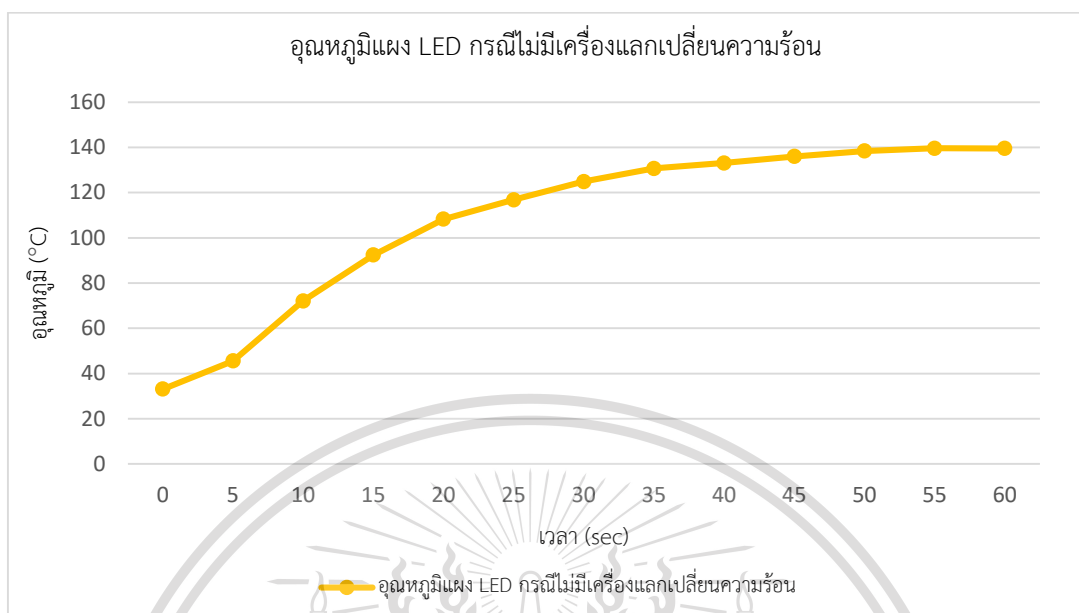
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบเวลากับอุณหภูมิของแผง LED กรณีไม่มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน  
โดยศึกษาเป็นเวลา 1 min

เวลา (sec)	อุณหภูมิแผง LED กรณีไม่มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (°C)
0	33.1
5	45.6
10	72.1
15	92.4
20	108.3
25	116.8
30	124.9
35	130.7
40	133.1
45	136.0
50	138.4
55	139.6
60	139.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use <sup>69</sup> only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิแผง LED กรณีไม่มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

#### 4.2.2 กรณีที่หนึ่งการปรับอัตราการไหลของน้ำ ที่แรงดันไฟฟ้า 4 V

การทดสอบกรณีที่หนึ่ง ปรับแรงดันไฟฟ้าที่ 4 V จากเครื่องจ่ายไฟป้อนเข้าปั๊มสุบจ่ายของเหลว ส่งผลให้อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโคมทองแดงอยู่ที่ 7.8 mL/min เมื่อทำการวัดอุณหภูมิแผง LED โดยศึกษาเป็นเวลา 1 min จะได้ผลการทดสอบเวลากับอุณหภูมิแผง LED ดังตารางที่ 4.5 และกราฟความสัมพันธ์ ดังรูปที่ 4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิแผง LED กรณีมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

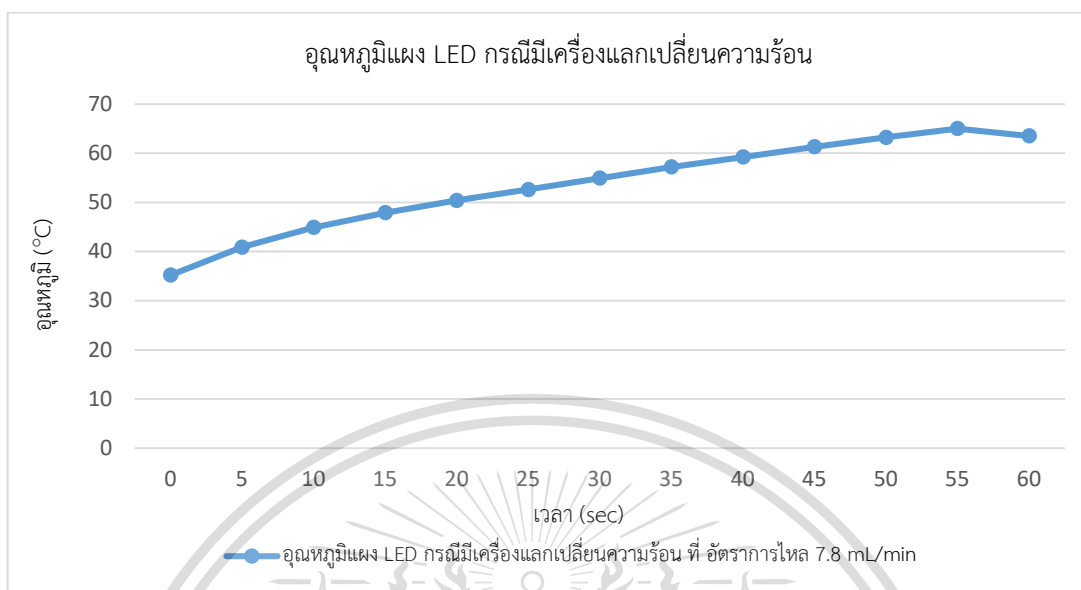
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบเวลากับอุณหภูมิแผง LED ขณะอัตราการไหลของน้ำ 7.8 mL/min ที่แรงดันไฟฟ้า 4 V กรณีมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยศึกษาเป็นเวลา 1 min

เวลา (sec)	อุณหภูมิแผง LED กรณีมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (°C)
0	35.2
5	40.9
10	44.9
15	47.9
20	50.4
25	52.6
30	54.9
35	57.2
40	59.2
45	61.3
50	63.2
55	65.0
60	63.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับอุณหภูมิแผง LED กรณีมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขณะ อัตราการไหล 7.8 mL/min

#### 4.2.3 กรณีที่สองการปรับอัตราการไหลของน้ำ ที่แรงดันไฟฟ้า 8 V

การทดสอบกรณีที่สอง ปรับแรงดันไฟฟ้าที่ 8 V จากเครื่องจ่ายไฟป้อนเข้าปั๊มสุบจ่ายของเหลว ส่งผลให้อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโคมทองแดงอยู่ที่ 25 mL/min เมื่อทำการวัดอุณหภูมิแผง LED โดยศึกษาเป็นเวลา 1 min จะได้ผลการทดสอบเวลากับอุณหภูมิแผง LED ดังตารางที่ 4.6 และกราฟความสัมพันธ์ ดังรูปที่ 4.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับอุณหภูมิแผง LED กรณีมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

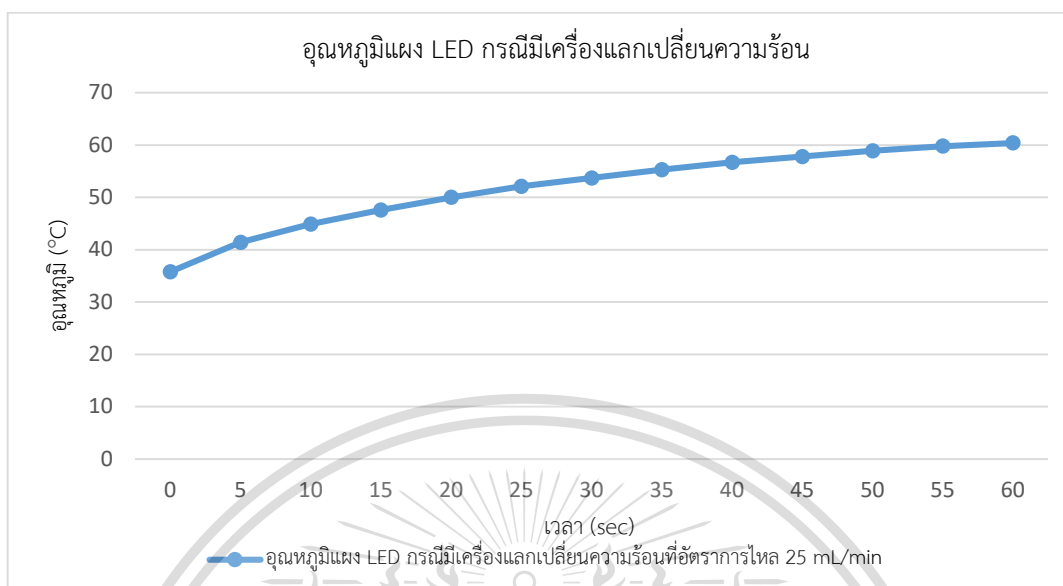
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบเวลากับอุณหภูมิแผง LED ขณะอัตราการไหลของน้ำ 25 mL/min ที่แรงดันไฟฟ้า 8 V กรณีมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยศึกษาเป็นเวลา 1 min

เวลา (sec)	อุณหภูมิแผง LED กรณีมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (°C)
0	35.8
5	41.4
10	44.9
15	47.6
20	50.0
25	52.1
30	53.7
35	55.3
40	56.7
45	57.8
50	58.9
55	59.8
60	60.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use <sup>73</sup> only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิแผง LED กรณีมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขณะ อัตราการไหล 25 mL/min

#### 4.2.4 กรณีที่สามการปรับอัตราการไหลของน้ำ ที่แรงดันไฟฟ้า 12 V

การทดสอบกรณีที่สาม ปรับแรงดันไฟฟ้าที่ 12 V จากเครื่องจ่ายไฟป้อนเข้าปั๊มสุบจ่ายของเหลวส่งผลให้อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโคมทองแดงอยู่ที่ 49 mL/min เมื่อทำการวัดอุณหภูมิแผง LED โดยศึกษาเป็นเวลา 1 min จะได้ผลการทดสอบเวลากับอุณหภูมิแผง LED ดังตารางที่ 4.7 และกราฟความสัมพันธ์ ดังรูปที่ 4.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิแผง LED กรณีมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

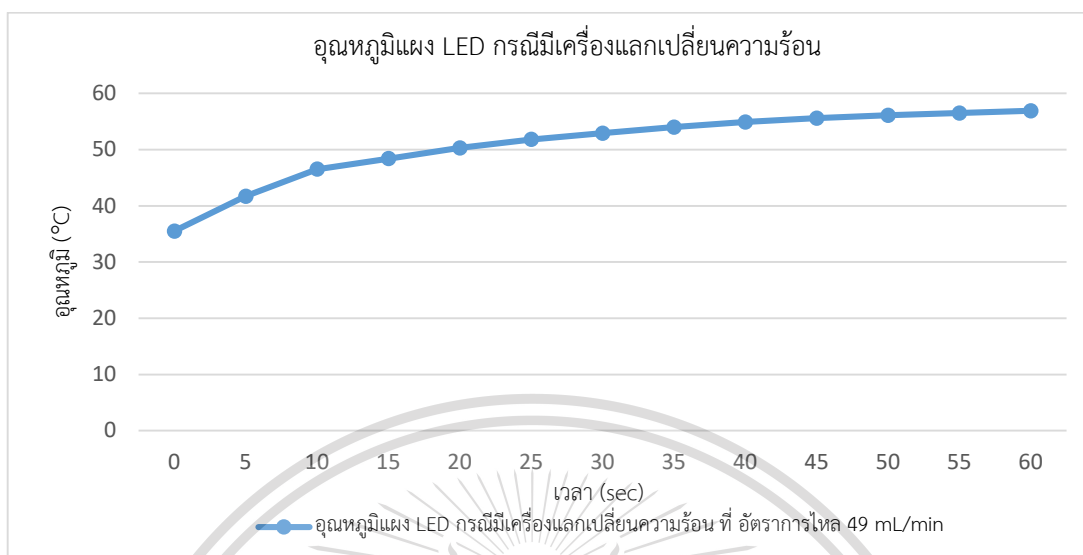
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบเวลากับอุณหภูมิแผง LED ขณะอัตราการไหลของน้ำ 49 mL/min ที่แรงดันไฟฟ้า 12 V กรณีมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยศึกษาเป็นเวลา 1 min

เวลา (sec)	อุณหภูมิแผง LED กรณีมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (°C)
0	35.5
5	41.7
10	46.5
15	48.4
20	50.3
25	51.8
30	52.9
35	54.0
40	54.9
45	55.6
50	56.1
55	56.5
60	56.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use <sup>75</sup> only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



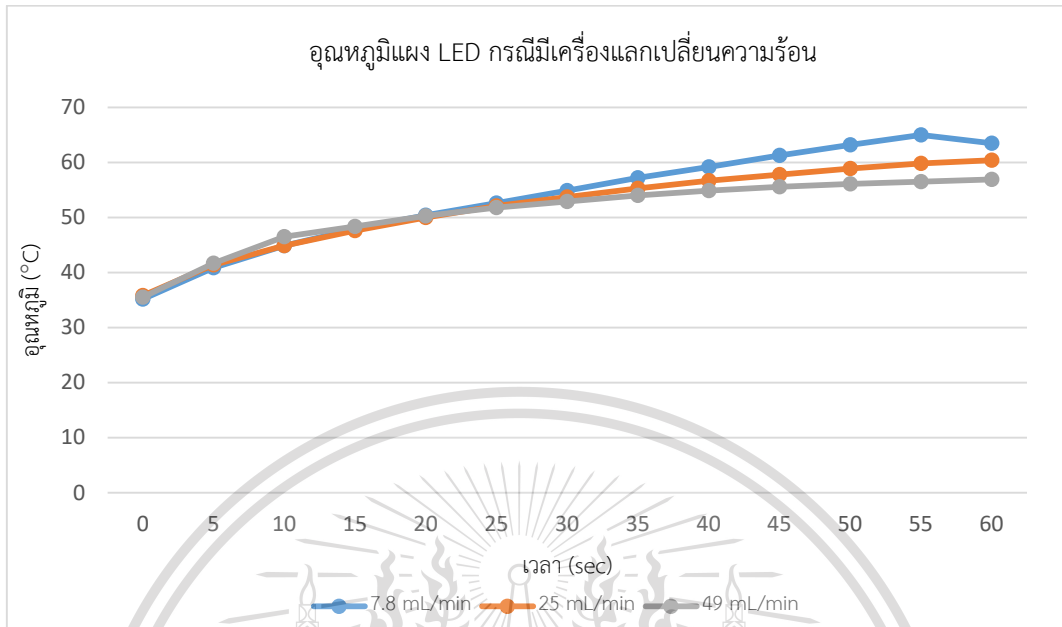
รูปที่ 4.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิแผง LED กรณีมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขณะ อัตราการไหล 49 mL/min

#### 4.2.5 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิแผง LED ขณะอัตราการไหลของน้ำที่แรงดันไฟฟ้า 4 V, 8 V และ 12 V

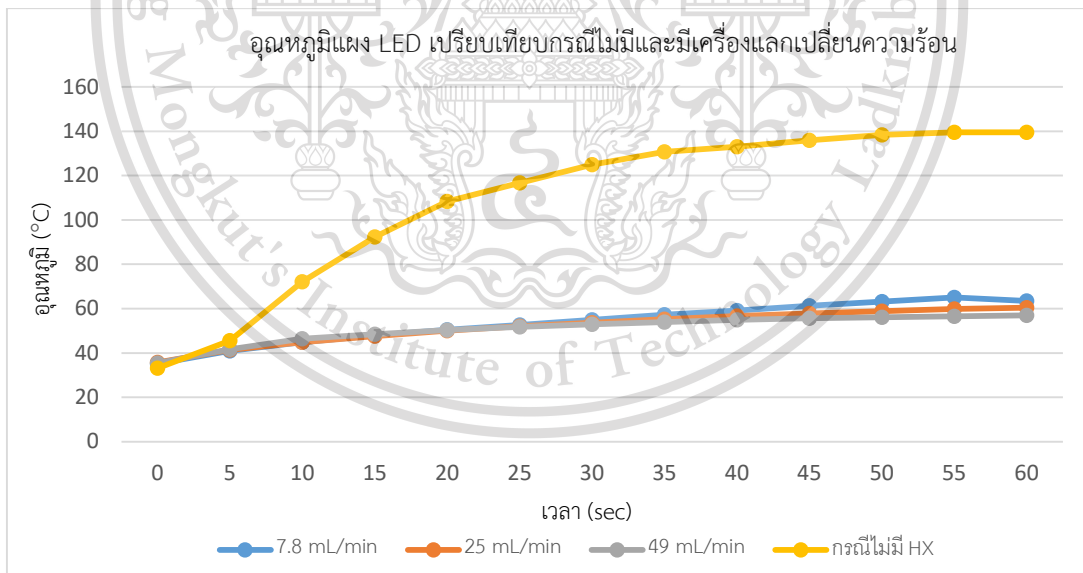
จากการนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิแผง LED ทั้ง 3 กรณี ขณะอัตราการไหลของน้ำ 7.8 mL/min, 25 mL/min และ 49 mL/min หรือที่แรงดันไฟฟ้า 4 V, 8 V และ 12 V ตามลำดับ โดยศึกษาเป็นเวลา 1 min ดังรูปที่ 4.33 ทำให้สังเกตได้ว่าอัตราการไหลของน้ำที่ 49 mL/min หรือที่แรงดันไฟฟ้า 12 V สามารถลดอุณหภูมิแผง LED ได้ดีที่สุด

เนื่องจากเมื่ออัตราการไหลของน้ำเพิ่มสูงขึ้น ทำให้อัตราการไหลที่ไหลผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โฟมทองแดงเร็วขึ้น ส่งผลให้น้ำไปดึงความร้อนจากโฟมทองแดงสามารถระบายความร้อนออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโฟมทองแดงได้เร็วมากขึ้น ด้วยสาเหตุนี้อัตราการไหลของน้ำที่ 49 mL/min ทำให้ความสามารถของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโฟมทองแดงสามารถลดอุณหภูมิแผง LED ได้ดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับอุณหภูมิแผง LED กรณีมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขณะ อัตราการไหลที่ 7.8 mL/min, 25 mL/min และ 49 mL/min



รูปที่ 4.34 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับอุณหภูมิแผง LED กรณีมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ขณะอัตราการไหลที่ 7.8 mL/min, 25 mL/min และ 49 mL/min กับกรณีไม่มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

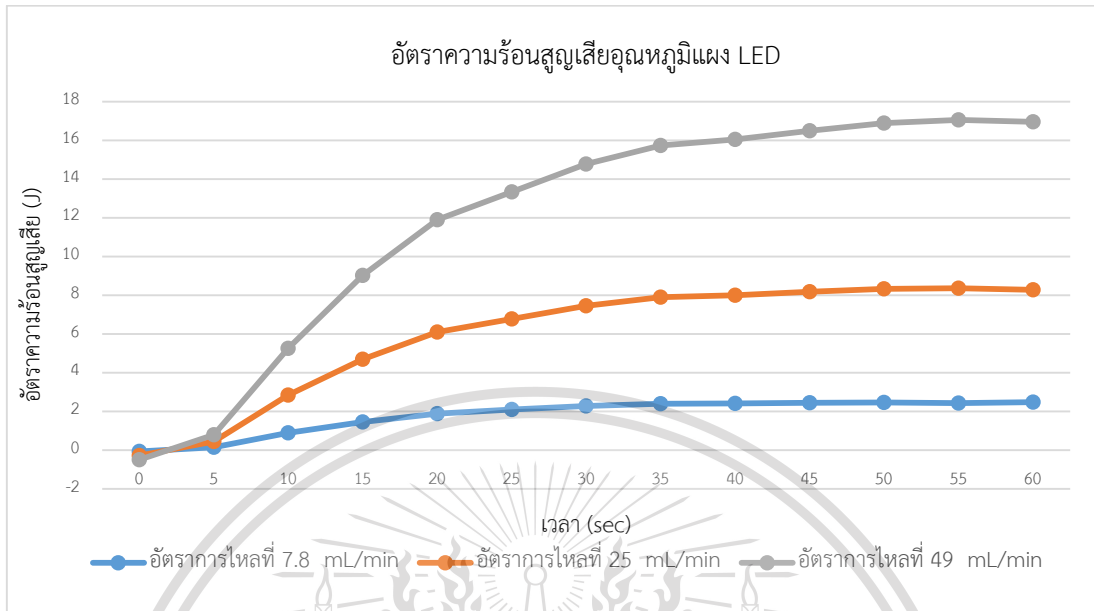
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.6 วิเคราะห์ผลการทดสอบ โดยคำนวณอัตราการความร้อนที่สูญเสียอุณหภูมิจาก LED เปรียบเทียบทั้ง 3 กรณี

ตารางที่ 4.8 ผลอัตราการความร้อนที่สูญเสียอุณหภูมิจาก LED กรณีมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ขณะอัตราการไหลของน้ำที่ 7.8 mL/min, 25 mL/min และ 49 mL/min ที่เวลา 1 min

เวลา (sec)	อัตราการความร้อนสูญเสีย อุณหภูมิแผง LED ที่ อัตราการไหลของน้ำ 7.8 mL/min (J)	อัตราการความร้อนสูญเสีย อุณหภูมิแผง LED ที่ อัตราการไหลของน้ำ 25 mL/min (J)	อัตราการความร้อนสูญเสีย อุณหภูมิแผง LED ที่ อัตราการไหลของน้ำ 49 mL/min (J)
0	-68.58	-526.5	-492.39
5	153.49	819.00	800.13
10	888.31	5,304.00	5,252.17
15	1,453.30	8,736.00	9,027.17
20	1,890.93	11,368.5	11,899.45
25	2,096.68	12,616.5	13,335.59
30	2,286.10	13,884.00	14,771.73
35	2,400.40	14,703.00	15,736.00
40	2,413.47	14,898.00	16,043.74
45	2,439.59	15,249.00	16,495.10
50	2,455.92	15,502.50	16,884.91
55	2,436.33	15,561.00	17,049.04
60	2,482.05	15,424.5	16,946.46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอัตราการสูญเสีย อุณหภูมิขณะอัตราการไหลที่ 7.8 mL/min, 25 mL/min และ 49 mL/min

การคำนวณอัตราการสูญเสียสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$Q = \dot{m}C\Delta T \quad (4.1)$$

เมื่อ

$Q$  คือ อัตราการสูญเสียของน้ำในการระบายความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โฟมทองแดง (J)

$\dot{m}$  คือ อัตราการไหลของน้ำขาเข้า (kg/s)

$C$  คือ ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/Kg.°C)

$\Delta T$  คือ ค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำขาเข้า-ขาออก (°C) ค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิแผง LED กรณีมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโฟมทองแดงและกรณีไม่มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโฟมทองแดง (°C)

โดยกำหนดให้ค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำเท่ากับค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิแผง LED

จากการนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอัตราการสูญเสีย ทั้ง 3 กรณี ขณะอัตราการไหลของน้ำ 7.8 mL/min, 25 mL/min และ 49 mL/min หรือที่แรงดันไฟฟ้า 4 V, 8 V

และ 12 V ตามลำดับ โดยศึกษาเป็นเวลา 1 min กราฟที่แสดงดังรูปที่ 4.35 ทำให้สังเกตเห็นว่าอัตราการไหลของน้ำที่ 49 mL/min หรือที่แรงดันไฟฟ้า 12 V มีอัตราการสูญเสียมากที่สุดเมื่อเทียบกับทั้ง 3 กรณี

ที่ 16,946.46 J เนื่องจากเมื่ออัตราการไหลของน้ำเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราหน้าไหลผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โฟมทองแดงเร็วขึ้น ส่งผลให้น้ำดึงความร้อนจากตัวเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้มากขึ้น สามารถระบาย ความร้อนออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโฟมทองแดงได้เร็วมากขึ้น ด้วยสาเหตุนี้อัตราการไหลของน้ำที่ 49 mL/min ทำให้มีอัตราความร้อนที่สูญเสียมากที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 5

### สรุปและอภิปรายผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงสรุปและอภิปรายผล การสรุปผลการทดสอบ รวมไปถึงข้อเสนอแนะของงานวิจัย เรื่อง การพัฒนากระบวนการผลิตเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

1. การสรุปผลและการอภิปรายผล
2. ข้อเสนอแนะ

#### 5.1 การสรุปผลและการอภิปรายผล

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จัดทำขึ้นโดยผู้วิจัยมีจุดหมายเพื่อออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจากโคมทองแดง ที่สามารถนำไปพัฒนาสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม โดยออกแบบและผลิตชิ้นงานต้นแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจากโคมทองแดงด้วยการเล่นประสานระหว่างแผ่นทองแดงกับโคมทองแดงขนาด 40 PPI โดยผ่านกระบวนการเล่นประสานในเตา และใช้โลหะเติมที่เป็นอสังกะสี  $\text{CuNiSnP}$  แบบแผ่นบางเป็นตัวเชื่อมติดแผ่นทองแดงกับโคมทองแดง ทำการเล่นประสานที่อุณหภูมิเล่นประสาน  $680\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 15 min ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง พบว่าโลหะเติมสามารถไหลไปตามชิ้นงานและบริเวณที่ต้องการเล่นประสานได้ค่อนข้างสมบูรณ์ สร้างชั้นรอยต่อได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้รอยต่อที่ได้มีความแข็งแรง แต่สังเกตได้ว่าโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเล่นประสานยังคงปรากฏในปริมาณเพียงเล็กน้อยของช่องว่าง (Micro-voids) และรอยแตก (Micro-cracks) ตามบริเวณรอยต่อเล่นประสาน โดยสาเหตุที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องนี้เนื่องจากอากาศหรือแก๊สถูกกักเก็บเอาไว้ในรอยเล่นประสานในขณะที่รอยเล่นประสานยังเป็นของเหลว และสาเหตุการเกิดรอยร้าวที่บริเวณรอยต่อเล่นประสานมาจากการใช้แรงกดขณะทำการเล่นประสาน เมื่อนำแรงกดออกจากชิ้นงานทำให้รอยเล่นประสานแยกออกจากกัน หรืออีกสาเหตุประการหนึ่งเกิดจากขั้นตอนการตัดเพื่อเตรียมชิ้นงานส่งผลให้เกิดรอยร้าว

การทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโคมทองแดง เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับ อุณหภูมิแผง LED (Heat Source) และความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับ อัตราความร้อนสูญเสียแผง LED ในกรณีไม่มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและกรณีมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่อัตราการไหลของน้ำ 7.8 mL/min, 25 mL/min และ 49 mL/min โดยศึกษาที่เวลา 1 min พบว่าอุณหภูมิแผง LED กรณีไม่มีเครื่องแลกเปลี่ยน

ความร้อน มีอุณหภูมิอยู่ที่ 139.5 °C อุณหภูมิแผง LED กรณีมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่อัตราการไหลของน้ำ 7.8 mL/min มีอุณหภูมิอยู่ที่ 63.5 °C ที่อัตราการไหลของน้ำ 25 mL/min มีอุณหภูมิอยู่ที่ 60.4 °C และที่อัตราการไหลของน้ำ 49 mL/min มีอุณหภูมิอยู่ที่ 56.9 °C สรุปได้ว่าอุณหภูมิแผง LED กรณีมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่อัตราการไหลของน้ำ 49 mL/min มีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิต่อเวลาต่ำสุด หรือสามารถลดอุณหภูมิแผง LED ได้ดีที่สุดใน 3 กรณี และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอัตราความร้อนสูญเสียแผง LED สรุปได้ว่าที่อัตราการไหลของน้ำ 49 mL/min หรือที่แรงดันไฟฟ้า 12 V มีอัตราความร้อนสูญเสียมากที่สุด ใน 3 กรณี มีค่าเท่ากับ 16,946.46 J

ทำให้สรุปได้ว่าการสร้างต้นแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจากโคมทองแดงด้วยการเล่นประสานในเตาครั้งนี้ สามารถลดอุณหภูมิได้จริง และเมื่ออัตราการไหลของน้ำเพิ่มสูงขึ้นมีแนวโน้มทำให้ลดอุณหภูมิและระบายความร้อนได้ดีมากขึ้น เนื่องจากเกิดอัตราความร้อนที่สูญเสียมากขึ้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

การเล่นประสานระหว่างแผ่นทองแดงกับโคมทองแดงที่อุณหภูมิเล่นประสาน 680 °C เป็นเวลา 15 min สังเกตได้ว่าโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเล่นประสานยังคงปรากฏช่องว่าง (Micro-voids) และรอยแตก (Micro-cracks) ตามบริเวณรอยต่อเล่นประสาน สาเหตุประการหนึ่งอาจเกิดจากขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานที่ไม่สะอาด จึงควรทำความสะอาดชิ้นงานในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานในการเล่นประสานไม่ให้เหลือคราบน้ำมันและจาระบีเพื่อลดการเกิดช่องว่างตามบริเวณรอยต่อเล่นประสาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

82  
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## เอกสารอ้างอิง

- [1] เขาว์อินทร์ประสิทธิ์และ พิรพล ชีระพงษ์รามกุล. (2554). *การออกแบบและทดสอบสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดใบมีดกวาดผิวสำหรับการผลิตน้ำจิ้มไถ่ระดับอุตสาหกรรม* (ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์).
- [2] นักสิทธิ์ คุ้มมนาชัย. (2533). *การถ่ายเทความร้อน Heat Transfer*. (น. 399). กรุงเทพฯ: ฟิสิกส์เซ็นเตอร์.
- [3] ฐานทัพ นาทองและศุภกิตต์ ปานต่อเหล่า. (2562). *การแล่นประสานโคมทองแดงโดยใช้การเชื่อมความต้านทานแบบทางอ้อม* (สาขาวิชาวิศวกรรมออกแบบการผลิตและวัสดุ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง).
- [4] Prajak Jattakul & Kannachai Kanlayasiri, Effects of brazing parameters on the microstructure and tensile shear force of copper sheets using amorphous filler metal, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (2018).
- [5] Kalpakjian S, Manufacturing Engineering and Technology, Pearson (2014).
- [6] An Introduction to Brazing. [online]. Available: [http://www.oerlikon.com/ecomaXL/files/metco/oerlikon\\_BRO0010.4\\_Introduction\\_to\\_Brazing\\_EN.pdf&download=1](http://www.oerlikon.com/ecomaXL/files/metco/oerlikon_BRO0010.4_Introduction_to_Brazing_EN.pdf&download=1) [Accessed: December 2020]
- [7] พิชญ์ หมื่นศรี, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.คุณสมบัติทองแดง. [online]. Available: [https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/304\\_64.pdf](https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/304_64.pdf) [Accessed: June 2020]
- [8] สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย. (2557). *การสำรวจสถานภาพอุตสาหกรรม โลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Non-ferrous metals) ทองแดง*
- [9] Hideo Nakajima, Porous Metals with Directional Pores, Tokyo: Springer. (2013).
- [10] Open cell porous materials. [online]. Available: <http://extd111-nicolechui.blogspot.com/2015/03/possible-pontoon-materials-and.html> [Accessed: December 2020]
- [11] Metallic Foams. [online]. Available: <https://www.filter-element.org/filterelements/metallic-foams.html> [Accessed: December 2020]
- [12] Principle of heat transfer. [online]. Available: [http://www2.dede.go.th/bhrd/old/Download/file\\_handbook/Pre\\_Heat/pre\\_heat\\_4.pdf](http://www2.dede.go.th/bhrd/old/Download/file_handbook/Pre_Heat/pre_heat_4.pdf) [Accessed: June 2020]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] Heat exchangers. [online]. Available: [http://www.completesengineering.com/style/article\\_heat%20exchanger1.pdf](http://www.completesengineering.com/style/article_heat%20exchanger1.pdf) [Accessed: June 2020]
- [14] เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน. [online]. Available: <http://eng.sut.ac.th/me/2014/laboratory/document/HeatExchanger.pdf> [Accessed: June 2020]
- [15] Yang Leng, Materials Characterization Introduction to Microscopic and Spectroscopic Methods, Second Edition, Singapore: Markono Print Media Pte Ltd, (2014).
- [16] เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความพรุน. [online]. Available: [http://www.stdb.most.go.th/equipment\\_detail.aspx?id=2866](http://www.stdb.most.go.th/equipment_detail.aspx?id=2866) [Accessed: January 2021]
- [17] Roberts P., Taylor & Francis Group, Industrial brazing practice. United state of America, (2013).
- [18] Zhang H.Y., Pinjala D., Wong T.N. and Joshi Y.K, Development of liquid cooling techniques for flip chip ball grid array packages with high heat flux dissipations, IEEE Trans, Components Packag, Technol 28 (2005) 127–135.
- [19] Tuckerman D.B. and Pease, R.F.W., High-performance heat sinking for VLSI, IEEE Electron Device Lett\_2 (1981) 126–129.
- [20] Calame J.P., Myers R.E, Binari S.C., Wood F.N. and Garven M., Experimental investigation of microchannel coolers for the high heat flux thermal management of GaN-on-SiC semiconductor devices, International Journal of Heat and Mass Transfer 50 (2007) 4767–4779.
- [21] Chauhan A. Sammakia B. Afram F.F. Ghose K. and Refai-Ahmed G. Agonafer D., Liquid cooling of a stacked quad-core processor and DRAM using laminar flow in microchannels, Proceedings of the proceedings of the ASME international mechanical engineering congress & exposition (2011) 927–940.
- [22] พัฒนพงศ์ ประดิษฐนิยกุล. (2557). *ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเทอร์โมไซฟอนมีครีบ สำหรับการประยุกต์ใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ* (วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยศิลปากร กรุงเทพมหานคร).
- [23] ไพศาล นาผล (2558). *การถ่ายเทความร้อนและการระบายความร้อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์* (ทริปเพิ้ล กรุ๊ปจำกัด: กรุงเทพฯ).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [24] Heat exchangers. [online]. Available: <https://www.ironsky.io/heat-exchanger-maintenance-and-cleaning/> [Accessed: April 2021]
- [25] หลักการถ่ายโอนความร้อน. สำนักพัฒนาทรัพยากรบุคคลด้านพลังงาน.[online]. Available: [http://www2.dede.go.th/bhrd/old/file\\_handbook.html](http://www2.dede.go.th/bhrd/old/file_handbook.html) [Accessed: April 2021]
- [26] ความร้อนและอุณหพลศาสตร์. สำนักพัฒนาทรัพยากรบุคคลด้านพลังงาน. [online]. Available: [http://old-book.ru.ac.th/e-book/p/PH111\(51\)/PH111-9.pdf](http://old-book.ru.ac.th/e-book/p/PH111(51)/PH111-9.pdf) [Accessed: March 2021]
- [27] ความร้อน. ฟิสิกส์ราชมงคล. [online]. Available: <http://www.rmutphysics.com/charud/scibook/nuch/introphysics/7.pdf> [Accessed: April 2021]
- [28] sma K, Poulikakos D, Zwick F, Metal foams as compact high performance heat exchangers, *Mechanics of Materials* 35 (2003) 1161–1176.
- [29] เฉลิมพร จินดาเพ็ง. (2559). การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ ถ่ายเทความร้อนและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตน้ำร้อนร่วมกับปรับอากาศแบบรวมศูนย์ (ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์).
- [30] Liu W, Li S, Li X, Gao X, Crystallization of amorphous Cu<sub>6</sub>Ni-10Sn-7P alloy ribbons, *Journal of Materials Science* (1990) 904–905.
- [31] Weiyuan Y, Wenjiang L, Tiandong X, Formation process of joints brazing with amorphous filler metal, *Rare Metal Materials and Engineering* 42 (2013) 688–691.
- [32] Zhang PL, Yao S, Ding M, Lu FG, Lou SN, Microstructural analysis in the vacuum brazing of copper to copper using a phosphor-copper brazing filler metal, *International Journal of Materials Research* (2010).
- [33] Jacobson DM, Humpston G, Diffusion brazing. In: *Principles of brazing*, ASM International, Ohio (2005) 207–216.
- [34] Zhong Z, Zhou J, Shen X, Ling X, Study on vacuum brazing of glass to Kovar ® alloy with Cu-Ni-Sn-P, *Welding Journal* (2012).
- [35] Serban VA, Codrean C, Utu D, Opris C, Amorphous alloys for brazing copper based alloys, *Journal of Physics Conference Series* (2009).
- [36] Xihui D, Xiaoqiang L, Study on vacuum brazed MGH956 alloy with Cu-P-Sn-Ni filler research of brazing MGH956 alloy with Cu-Ni-Sn-Ni filler metal in vacuum, *Materials Science and Technology* (2016) 14–19.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับเอาไว้ใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [37] Mian Muhammad Sami, Tuan Zaharinie, Farazila Yusof and Tadashi Ariga, Investigation on Strength and Microstructural Evolution of Porous Cu/Cu Brazed Joints Using Cu-Ni-Sn-P Filler, Department of Mechanical Engineering, University of Malaya, Kuala Lumpur (2020).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use<sup>86</sup> only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use <sup>87</sup> only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## Plagiarism Checking Report

Created on May 10, 2021 at 13:02 PM

### Submission Information

ID	SUBMISSION DATE	SUBMITTED BY	ORGANIZATION	FILENAME	STATUS	SIMILARITY INDEX
2063683	May 10, 2021 at 13:02 PM	60010515@kmitl.ac.th	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	draft-2-final-FULL ของจริง.pdf	Completed	4.47 %

### Match Overview

NO.	TITLE	AUTHOR(S)	SOURCE	SIMILARITY INDEX
1	การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการแล่นประสานที่มีต่อความต้านทานแรงเฉือนในรอยต่อระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ทรศ SS400 และทังสเตนคาร์ไบด์, A study on influence of brazing parameters on the shear strength between SS400 low carbon steel and tungsten carbide.	อาทร แสงทับทิม	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	1.55 %
2	การถ่ายเทความร้อน	วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี	Wikipedia	0.97 %
3	การประมาณ และควบคุมอุณหภูมิของน้ำเหล็ก ในเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำ, Temperature estimation and control of molten steel in the induction furnace	เขมรภัทร สมสังข์, 2519-	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	0.65 %
4	การศึกษาเชิงทดลองของการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนแบบช่องแผ่นขนานที่มีการติดตั้งครีบสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมผืนผ้ารูปตัว T, Experimental investigation of heat transfer in rectangular channel heat exchanger with v-shaped triangular and rectangular ribs	จิตรกร กนกนัยการ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	0.53 %
5	การศึกษาอิทธิพลของธาตุ Ag Bi In และ Sb ต่อสมบัติทางกายภาพของโลหะบัดกรีชนิด Sn-06Cu-005Ni-Ge	รัชต์ คงชาสุขวัฒน์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	0.44 %
6	ระบบตรวจสอบท่อระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์, Inspection system for heat pipe cooling in electronic circuit.	วรวิทย์ ม่วงช้าง	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	0.34 %

### รูปที่ ผก. 1 การตรวจสอบอักขรวิสุทธิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้