

การเล่นประสานโฟมทองแดงโดยใช้การเชื่อมความต้านทานแบบ  
ทางอ้อม  
BRAZING OF COPPER FOAM USING INDIRECT RESISTANCE  
BRAZING



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมออกแบบการผลิตและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# BRAZING OF COPPER FOAM USING INDIRECT RESISTANCE BRAZING



MR. THANTHUP NATHONG  
MR. SUPHAKIT PANTORLAO

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN  
PRODUCTION DESIGN AND MATERIALS ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองปริญญาโท

หัวข้อปริญญาโท

การเล่นประสานโฟมทองแดงโดยใช้การเชื่อมความต้านทานแบบ  
ทางอ้อม

BRAZING OF COPPER FOAM USING INDIRECT RESISTANCE  
BRAZING

นักศึกษา

นายฐานทัพ นาทอง รหัสประจำตัว 59010358

นายศุภกิตติ ปานต่อเหล่า รหัสประจำตัว 59011323

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมออกแบบการผลิตและวัสดุ

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท



( รศ.ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การเล่นประสานโคมทองแดงโดยใช้การเชื่อมความต้านทานแบบทางอ้อม
นักศึกษา	นายฐานทัพ นาทอง นายศุภกิตต์ ปานต่อเหล่า
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมออกแบบการผลิตและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา	2562
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	รศ.ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ

### บทคัดย่อ

การศึกษานี้เป็นการศึกษาผลของค่ากระแสไฟฟ้าและเวลาเล่นประสานที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม โดยใช้โลหะเติมที่เป็นอสัณฐาน  $\text{Cu}_7\text{Ni}_9\text{Sn}_6\text{P}$  แบบแผ่นบางเป็นตัวเชื่อมติดแผ่นทองแดงกับโคมทองแดงขนาด 95 PPI ผ่านกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบทางอ้อม โดยมีตัวแปรในการเล่นประสานคือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ขนาด 232.5 A, 465 A, 697.5A และ 930 A และเวลาที่ 0.8, 0.9, 1 และ 1.1 วินาที แล้วทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมด้วย SEM ซึ่งพบเฟส Proeutectic alpha ( $\text{Cu}_3\text{P}$ ), เฟส Proeutectic beta (Cu-rich) และเฟส Eutectic ( $(\text{Cu},\text{Ni})_3\text{P}$ ) และพบว่าโครงสร้างเดนไดรต์ในรอยเชื่อมมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าและเวลาเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของเวลาทำให้เฟส Proeutectic beta (Cu-rich) มีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แต่ในขณะเดียวกันการเกิดเฟสอื่น ๆ ลดลง การเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าทำให้เฟส Proeutectic beta (Cu-rich) หลอมละลายเข้าที่บริเวณผิวสัมผัสของแผ่นทองแดงและโคมทองแดง

<b>Thesis Title</b>	Brazing of Copper Foam Using Indirect Resistance Brazing
<b>Student</b>	Mr. Thanthup Nathong Mr. Suphakit Pantorlao
<b>Degree</b>	Bachelor of Engineering in Production Design and Materials Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
<b>Academic Year</b>	2019
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr. Kannachai Kanlayasiri

### ABSTRACT

Brazing of copper foam using indirect resistance brazing was performed in this research. Effects of electrical current and brazing time on the microstructure of brazed joint were investigated. Copper foam with 95 PPI was joined to copper sheet using Cu<sub>7</sub>Ni<sub>9</sub>Sn<sub>6</sub>P amorphous filler metal. The brazing current was selected at 232.5, 465.0, 697.5 and 930.0 A while the brazing time was chosen at 0.8, 0.9, 1.0 and 1.1 s. By using SEM, the microstructure of brazed joint was composed of pro-eutectic alpha Cu<sub>3</sub>P, pro-eutectic beta Cu-rich and eutectic (Cu, Ni)<sub>3</sub>P. Dendritic structure in the brazed joint was increased in size with the increase of the electrical current and brazing time. The pro-eutectic beta Cu-rich was grown with the brazing time causing the reduction of other phases. In addition, increasing the brazing current enhanced the dissolving of pro-eutectic beta phase into the surface of porous copper foam and copper sheet.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่องการเล่นประสานโพนทองแดงโดยใช้การเชื่อมความต้านทานแบบทางอ้อม สำเร็จบรรลุตามเป้าหมายไปได้ด้วยดีและมีความสมบูรณ์ ต้องขอขอบคุณ รศ.ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ที่คอยให้คำแนะนำ ปรีกษา ช่วยเหลือ และชี้แนะในการจัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณท่านคณาจารย์ทุกท่าน ที่ให้วิชาความรู้ ให้ความช่วยเหลือ คำชี้แนะและคำปรึกษาแนวทางในเรื่องต่าง ๆ อันมีส่วนสำคัญที่มีความเกี่ยวข้องข้องในการจัดทำปริญญานิพนธ์ เพื่อใช้เป็นสื่อในการจัดการเรียนรู้และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดในชั้นต่อไป

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณคณาจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตโกลกังวล และบุคลากรทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและอนุเคราะห์อุปกรณ์และสถานที่ในการปฏิบัติงาน จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

นาย ฐานทัฬหะ นาทอง  
นาย ศุภกิตติ ปานต่อเหล่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 กระบวนการเชื่อมความต้านทาน.....	4
2.2 พารามิเตอร์ของการเชื่อมความต้านทาน.....	5
2.2.1 ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม.....	5
2.2.2 เวลาที่ใช้ในการเชื่อม.....	5
2.2.3 แรงกดในการเชื่อม.....	6
2.2.4 Contact Resistance.....	6
2.2.5 คุณสมบัติของวัสดุ.....	6
2.2.6 การเคลือบผิววัสดุ.....	7
2.2.7 ขนาดและรูปร่าง.....	7
2.2.8 ลักษณะเฉพาะของเครื่องจักร.....	7
2.3 การเชื่อมความต้านทานแบบทางอ้อม (Indirect resistance welding).....	7
2.3.1 หลักการทำงานของเครื่อง.....	7
2.3.2 ตัวแปรที่ต้องควบคุม.....	8
2.3.3 การจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบกระแสตรง (DC).....	9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
2.3.4 ค่าความร้อนที่ใช้ในการเชื่อม.....	9
2.4 โลหะเติม (Filler metal) .....	9
2.4.1 แผ่นแผ่นประสาน (Brazing foil) .....	11
2.5 คุณสมบัติของทองแดง .....	11
2.6 โฟมโลหะ (Porous metal) .....	12
2.7 เครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค .....	13
2.7.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM).....	13
2.7.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	13
2.8 เครื่องมือวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี.....	14
2.8.1 Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy .....	14
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน</b>	
3.1 การเตรียมชิ้นงานเพื่อใช้ในการทดลองเบื้องต้น .....	15
3.1.1 การยึดจับชิ้นงาน.....	15
3.2 การทดลองเชื่อมชิ้นงานเบื้องต้น .....	16
3.3 การปฏิบัติการเชื่อมชิ้นงานจริง .....	22
3.3.1 การเตรียมชิ้นงานเพื่อทดลองในกระแสไฟฟ้าและเวลาที่ต่างกัน.....	22
3.3.2 การเชื่อมชิ้นงานโดยใช้เครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Spot welding machine) แบบกระแสตรง .....	23
3.4 การเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค .....	24
<b>บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน</b>	
4.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....	26
4.2 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	32
4.2.1 ชิ้นงานภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 0.9 วินาที .....	47
4.2.2 ชิ้นงานภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 1 วินาที .....	53
4.2.3 ชิ้นงานภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 1.1 วินาที .....	55
4.2.4 ชิ้นงานภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 0.8 วินาที .....	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
4.2.5 ชิ้นงานภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 0.9 วินาที .....	67
4.2.6 ชิ้นงานภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 1 วินาที .....	73
4.2.7 ชิ้นงานภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 1.1 วินาที .....	75
4.2.8 ชิ้นงานภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 0.8 วินาที .....	77
4.2.9 ชิ้นงานภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 0.9 วินาที .....	79
4.2.10 ชิ้นงานภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 1 วินาที .....	81
4.2.11 ชิ้นงานภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 1.1 วินาที .....	85
4.2.12 ชิ้นงานภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 0.8 วินาที .....	89
4.2.13 ชิ้นงานภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 0.9 วินาที .....	93
4.2.14 ชิ้นงานภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 1 วินาที .....	99
4.2.15 ชิ้นงานภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 1.1 วินาที .....	103
4.3 การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาค .....	107
<b>บทที่ 5 สรุปและอภิปรายผล</b>	
5.1 การสรุปผลและการอภิปรายผล .....	110
5.1.1 การเชื่อมติดกันของชิ้นงาน .....	110
5.1.2 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง .....	110
5.1.3 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ...	110
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	111
<b>เอกสารอ้างอิง .....</b>	<b>112</b>
<b>ภาคผนวก .....</b>	<b>ผ1</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน .....	3
ตารางที่ 2.1 โลหะเติมที่เหมาะสมกับการใช้งานในโลหะชนิดต่าง ๆ .....	10
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของทองแดง .....	12
ตารางที่ 3.1 ค่ากระแสไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการเชื่อมชิ้นงาน.....	24
ตารางที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานจากการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง ที่กำลังขยาย 10 เท่า.....	26
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดออสตีไนต์กับแผ่นทองแดง ภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 0.9 วินาที .....	47
ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดออสตีไนต์กับโพลีทองแดง ภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 0.9 วินาที .....	49
ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดออสตีไนต์กับโพลีทองแดง ภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 0.9 วินาที ที่บริเวณด้านบนของชิ้นงาน.....	51
ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดออสตีไนต์กับแผ่นทองแดงและ โพลีทองแดง ภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 1 วินาที .....	53
ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดออสตีไนต์ ภายใต้ กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 1.1 วินาที.....	55
ตารางที่ 4.7 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดออสตีไนต์กับแผ่นทองแดง ภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 1.1 วินาที .....	57
ตารางที่ 4.8 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดออสตีไนต์กับโพลีทองแดง ภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 1.1 วินาที ที่บริเวณด้านบนของชิ้นงาน.....	59
ตารางที่ 4.9 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดออสตีไนต์ที่แทรกในโพลีทอง แดงที่บริเวณด้านบนของชิ้นงาน ภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 1.1 วินาที 61	
ตารางที่ 4.10 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดออสตีไนต์กับแผ่นทองแดง ภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 0.8 วินาที.....	63
ตารางที่ 4.11 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดออสตีไนต์กับโพลีทองแดง ภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 0.8 วินาที.....	65
ตารางที่ 4.12 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดออสตีไนต์กับแผ่นทองแดง ภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 0.9 วินาที.....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.13 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสังฐาน แผ่นทองแดง และโฝมทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 0.9 วินาที.....	69
ตารางที่ 4.14 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสังฐานและโฝมทองแดง ภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 0.9 วินาที ที่บริเวณด้านบนของชิ้นงาน .....	71
ตารางที่ 4.15 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสังฐานและแผ่นทองแดง ภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 1 วินาที.....	73
ตารางที่ 4.16 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสังฐานและแผ่นทองแดง ภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 1.1 วินาที.....	75
ตารางที่ 4.17 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสังฐานและแผ่นทองแดง ภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 0.8 วินาที.....	77
ตารางที่ 4.18 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสังฐาน แผ่นทองแดง และโฝมทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 0.9 วินาที.....	79
ตารางที่ 4.19 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสังฐาน แผ่นทองแดง และโฝมทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 1 วินาที.....	81
ตารางที่ 4.20 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสังฐานและโฝมทองแดง ภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 1 วินาที.....	83
ตารางที่ 4.21 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสังฐาน แผ่นทองแดง และโฝมทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 1.1 วินาที.....	85
ตารางที่ 4.22 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสังฐานและโฝมทองแดง ภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 1.1 วินาที.....	87
ตารางที่ 4.23 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสังฐาน แผ่นทองแดง และโฝมทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 0.8 วินาที .....	89
ตารางที่ 4.24 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสังฐานและโฝมทองแดง ภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 0.8 วินาที.....	91
ตารางที่ 4.25 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสังฐาน แผ่นทองแดง และโฝมทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 0.9 วินาที .....	93
ตารางที่ 4.26 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสังฐานและโฝมทองแดง ภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 0.9 วินาที.....	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.27 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสังฐานและโม่ทองแดง ภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 0.9 วินาที ที่บริเวณด้านบนของชิ้นงาน .....	97
ตารางที่ 4.28 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสังฐาน แผ่นทองแดง และโม่ทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 1 วินาที .....	99
ตารางที่ 4.29 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสังฐานและโม่ทองแดง ภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 1 วินาที .....	101
ตารางที่ 4.30 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสังฐาน แผ่นทองแดง และโม่ทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 1.1 วินาที .....	103
ตารางที่ 4.31 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสังฐานและโม่ทองแดง ภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 1.1 วินาที .....	105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดที่ใช้ในการเชื่อมและ Contact resistance .....	6
รูปที่ 2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงอิเล็กโทรดและเวลา.....	8
รูปที่ 2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและเวลา .....	8
รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้ากับเวลาในระบบ DC.....	9
รูปที่ 2.5 ตัวอย่าง Brazing foil .....	11
รูปที่ 2.6 ตัวอย่างโฟมทองแดง .....	13
รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ยึดจับชิ้นงาน .....	15
รูปที่ 3.2 ลักษณะการเชื่อมชิ้นงานของการทดลองเบื้องต้น .....	16
รูปที่ 3.3 ชิ้นงานทดลองหลังจากการทำ Cold mount.....	17
รูปที่ 3.4 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมจากการดูด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ที่กำลังขยาย 10 เท่า .....	17
รูปที่ 3.5 ชิ้นงานที่ทดลองพ่นก๊าซอาร์กอนหลังจากการทำ Cold mount.....	18
รูปที่ 3.6 ภาพโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของชิ้นงานที่ทดลองพ่นก๊าซอาร์กอน ที่กำลังขยาย 10 เท่า .....	18
รูปที่ 3.7 เครื่องเชื่อมความต้านทาน.....	19
รูปที่ 3.8 ชิ้นงานหลังจากการทดลองเชื่อมความต้านทาน.....	19
รูปที่ 3.9 ชิ้นงาน PPI 95 PPI 40 และ PPI 20 ในเรซินหลังการ Mounting .....	20
รูปที่ 3.10 การไหลของโลหะแผ่นประสานในชิ้นงาน PPI 20 ที่กำลังขยาย 5 เท่า.....	20
รูปที่ 3.11 การไหลของโลหะแผ่นประสานในชิ้นงาน PPI 40 ที่กำลังขยาย 10 เท่า.....	20
รูปที่ 3.12 การไหลของโลหะแผ่นประสานในชิ้นงาน PPI 95 ที่กำลังขยาย 5 เท่า.....	21
รูปที่ 3.13 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน PPI 95 ที่กำลังขยาย 15 เท่า.....	21
รูปที่ 3.14 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน PPI 40 ที่กำลังขยาย 15 เท่า.....	21
รูปที่ 3.15 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน PPI 20 ที่กำลังขยาย 15 เท่า.....	22
รูปที่ 3.16 แผ่นโลหะเติม โฟมทองแดง และแผ่นทองแดงที่ถูกตัดโค้ง.....	22
รูปที่ 3.17 เครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุดรุ่น FAN Proton E+ Spot-Welding Device.....	23
รูปที่ 3.18 ชิ้นงานที่ทดลองเชื่อมที่ค่ากระแสไฟฟ้าและเวลาต่าง ๆ.....	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A ที่เวลา 0.9 วินาที ที่กำลังขยาย 50 เท่า และ 500 เท่า.....	32
รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A ที่เวลา 1 วินาที ที่กำลังขยาย 50 เท่า และ 500 เท่า.....	33
รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A ที่เวลา 1.1 วินาที ที่กำลังขยาย 50 เท่า และ 500 เท่า.....	34
รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A ที่เวลา 0.8 วินาที ที่กำลังขยาย 50 เท่า และ 500 เท่า.....	35
รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A ที่เวลา 0.9 วินาที ที่กำลังขยาย 50 เท่า และ 500 เท่า.....	36
รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A ที่เวลา 1 วินาที ที่กำลังขยาย 50 เท่า และ 500 เท่า.....	37
รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A ที่เวลา 1.1 วินาที ที่กำลังขยาย 50 เท่า และ 500 เท่า.....	38
รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 679.5 A ที่เวลา 0.8 วินาที ที่กำลังขยาย 50 เท่า และ 500 เท่า.....	39
รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 679.5 A ที่เวลา 0.9 วินาที ที่กำลังขยาย 50 เท่า และ 500 เท่า.....	40
รูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 679.5 A ที่เวลา 1 วินาที ที่กำลังขยาย 50 เท่า และ 500 เท่า.....	41
รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 679.5 A ที่เวลา 1.1 วินาที ที่กำลังขยาย 50 เท่า และ 500 เท่า.....	42
รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A ที่เวลา 0.8 วินาที ที่กำลังขยาย 50 เท่า และ 500 เท่า.....	43
รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A ที่เวลา 0.9 วินาที ที่กำลังขยาย 50 เท่า และ 500 เท่า.....	44
รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A ที่เวลา 1 วินาที ที่กำลังขยาย 50 เท่า และ 500 เท่า.....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตัดฉีกอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 4.15	โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A ที่เวลา 1.1 วินาที ที่กำลังขยาย 50 เท่า และ 500 เท่า.....	46
รูปที่ 4.16	โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานกับแผ่นทองแดงภายใต้ กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 0.9 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า.....	47
รูปที่ 4.17	สเปกตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติม ชนิดอสัณฐานกับแผ่นทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 0.9 วินาที (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่งที่ 5 .....	48
รูปที่ 4.18	โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานกับโพลีทองแดงภายใต้ กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 0.9 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า.....	49
รูปที่ 4.19	สเปกตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติม ชนิดอสัณฐานกับโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 0.9 วินาที (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 .....	50
รูปที่ 4.20	โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานกับโพลีทองแดงภายใต้ กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 0.9 วินาที ที่บริเวณด้านบนของชิ้นงาน ผ่าน กระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า.....	51
รูปที่ 4.21	สเปกตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติม ชนิดอสัณฐานกับโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 0.9 วินาที ที่ บริเวณด้านบนของชิ้นงาน (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 .....	52
รูปที่ 4.22	โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐาน แผ่นทองแดงและโพลีทอง แดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 1 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า .....	53
รูปที่ 4.23	สเปกตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติม ชนิดอสัณฐาน แผ่นทองแดงและโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 1 วินาที (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่งที่ 5.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัดฉีกอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 4.24	โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 1.1 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า .....	55
รูปที่ 4.25	สเปกตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 1.1 วินาที (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 .....	56
รูปที่ 4.26	โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานกับแผ่นทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 1.1 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า .....	57
รูปที่ 4.27	สเปกตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานกับแผ่นทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 1.1 วินาที (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 .....	58
รูปที่ 4.28	โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานกับโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 1.1 วินาที ที่บริเวณด้านบนของชิ้นงาน ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า .....	59
รูปที่ 4.29	สเปกตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานกับโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 1.1 วินาที ที่บริเวณด้านบนของชิ้นงาน (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่งที่ 5 .....	60
รูปที่ 4.30	โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานที่แทรกในโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 1.1 วินาที ที่บริเวณด้านบนของชิ้นงาน ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า .....	61
รูปที่ 4.31	สเปกตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานที่แทรกในโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 1.1 วินาที ที่บริเวณด้านบนของชิ้นงาน (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่งที่ 5 .....	62
รูปที่ 4.32	โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานกับแผ่นทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 0.8 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า .....	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัดสิทธิ์อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 4.33	สเปคตรัมของการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติม ชนิดอสัณฐานกับแผ่นทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 0.8 วินาที (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 .....	64
รูปที่ 4.34	โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานกับโพลีทองแดงภายใต้ กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 0.8 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า .....	65
รูปที่ 4.35	สเปคตรัมของการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติม ชนิดอสัณฐานกับโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 0.8 วินาที (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่งที่ 5..	66
รูปที่ 4.36	โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานกับแผ่นทองแดงภายใต้ กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 0.9 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า .....	67
รูปที่ 4.37	สเปคตรัมของการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติม ชนิดอสัณฐานกับแผ่นทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 0.9 วินาที (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่งที่ 5..	68
รูปที่ 4.38	โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐาน แผ่นทองแดงและโพลีทอง แดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 0.9 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า .....	69
รูปที่ 4.39	สเปคตรัมของการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติม ชนิดอสัณฐาน แผ่นทองแดงและโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 0.9 วินาที (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่ง ที่ 5 (f) ตำแหน่งที่ 6 (g) ตำแหน่งที่ 7 (h) ตำแหน่งที่ 8.....	70
รูปที่ 4.40	โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานและโพลีทองแดงภายใต้ กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 0.9 วินาที ที่บริเวณด้านบนของชิ้นงาน ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า .....	71
รูปที่ 4.41	สเปคตรัมของการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติม ชนิดอสัณฐานและโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 0.9 วินาที ที่ บริเวณด้านบนของชิ้นงาน (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่งที่ 5.....	72

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 4.42 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานและแผ่นทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 1 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า .....	73
รูปที่ 4.43 สเปกตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานและแผ่นทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 1 วินาที (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่งที่ 5..	74
รูปที่ 4.44 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานและแผ่นทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 1.1 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า .....	75
รูปที่ 4.45 สเปกตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานและแผ่นทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 1.1 วินาที (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่งที่ 5..	76
รูปที่ 4.46 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานและแผ่นทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 0.8 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า .....	77
รูปที่ 4.47 สเปกตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานและแผ่นทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 0.8 วินาที (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 .....	78
รูปที่ 4.48 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐาน แผ่นทองแดงและโพลีเมอร์ทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 0.9 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า .....	79
รูปที่ 4.49 สเปกตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐาน แผ่นทองแดงและโพลีเมอร์ทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 0.9 วินาที (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่งที่ 5 (f) ตำแหน่งที่ 6 (g) ตำแหน่งที่ 7 .....	80
รูปที่ 4.50 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐาน แผ่นทองแดงและโพลีเมอร์ทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 1 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า .....	81

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 4.51	สเปคตรัมของการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติม ชนิดอสัณฐาน แผ่นทองแดงและโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 1 วินาที (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่งที่ 5.....	82
รูปที่ 4.52	โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานและโพลีทองแดงภายใต้ กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 1 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า .....	83
รูปที่ 4.53	สเปคตรัมของการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติม ชนิดอสัณฐานและโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 1 วินาที (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่งที่ 5..	84
รูปที่ 4.54	โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐาน แผ่นทองแดงและโพลีทอง แดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 1.1 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า .....	85
รูปที่ 4.55	สเปคตรัมของการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติม ชนิดอสัณฐาน แผ่นทองแดงและโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 1.1 วินาที (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่ง ที่ 5 (f) ตำแหน่งที่ 6 .....	86
รูปที่ 4.56	โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานและโพลีทองแดงภายใต้ กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 1.1 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า .....	87
รูปที่ 4.57	สเปคตรัมของการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติม ชนิดอสัณฐานและโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 1.1 วินาที (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่งที่ 5 (f) ตำแหน่งที่ 6.....	88
รูปที่ 4.58	โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐาน แผ่นทองแดงและโพลีทอง แดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 0.8 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า .....	89

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 4.59	สเปคตรัมของการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติม ชนิดอสัณฐาน แผ่นทองแดงและโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 0.8 วินาที (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่งที่ 5.....	90
รูปที่ 4.60	โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานและโพลีทองแดงภายใต้ กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 0.8 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า .....	91
รูปที่ 4.61	สเปคตรัมของการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติม ชนิดอสัณฐานและโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 0.8 วินาที (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่งที่ 5..	92
รูปที่ 4.62	โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐาน แผ่นทองแดงและโพลีทอง แดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 0.9 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า .....	93
รูปที่ 4.63	สเปคตรัมของการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติม ชนิดอสัณฐาน แผ่นทองแดงและโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 0.9 วินาที (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่ง ที่ 5 (f) ตำแหน่งที่ 6 .....	94
รูปที่ 4.64	โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานและโพลีทองแดงภายใต้ กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 0.9 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า .....	95
รูปที่ 4.65	สเปคตรัมของการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติม ชนิดอสัณฐานและโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 0.9 วินาที (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่งที่ 5..	96
รูปที่ 4.66	โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานที่แทรกเข้าไปในโพลีทอง แดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 0.9 วินาที ที่บริเวณด้านบนของชิ้นงาน ผ่าน กระบวนการ EDS กำลังขยาย 5000 เท่า .....	97

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 4.67	สเปกตรัมของการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติม ชนิดอสัณฐานที่แทรกเข้าไปในโคมทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 0.9 วินาที ที่บริเวณด้านบนของชิ้นงาน a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่งที่ 5.....	98
รูปที่ 4.68	โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐาน แผ่นทองแดงและโคมทอง แดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 1 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า .....	99
รูปที่ 4.69	สเปกตรัมของการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติม ชนิดอสัณฐาน แผ่นทองแดงและโคมทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 1 วินาที (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4.....	100
รูปที่ 4.70	โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานและโคมทองแดงภายใต้ กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 1 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า.....	101
รูปที่ 4.71	สเปกตรัมของการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติม ชนิดอสัณฐานและโคมทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 1 วินาที (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่งที่ 5 (f) ตำแหน่งที่ 6.....	102
รูปที่ 4.72	โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐาน แผ่นทองแดงและโคมทอง แดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 1.1 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า .....	103
รูปที่ 4.73	สเปกตรัมของการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติม ชนิดอสัณฐาน แผ่นทองแดงและโคมทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 1.1 วินาที (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่ง ที่ 5 (f) ตำแหน่งที่ 6 .....	104
รูปที่ 4.74	โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานและโคมทองแดงภายใต้ กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 1.1 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า .....	105

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 4.75 สเปกตรัมของการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติม ชนิดอสัณฐานและโพลีโพรพิลีนภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 1.1 วินาที (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่งที่ 5 .....	106
รูปที่ 4.76 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของชิ้นงานภายใต้กระแสไฟฟ้า 232.5 A และเวลา 0.9 วินาที ที่กำลังขยาย 5000 เท่า.....	107
รูปที่ 4.77 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของชิ้นงานภายใต้กระแสไฟฟ้า 930 A และเวลา 1.1 วินาที ที่กำลังขยาย 2000 เท่า.....	108
รูปที่ 4.78 โลหะเติมที่บริเวณด้านบนชิ้นงาน ที่กำลังขยาย 2000 เท่า (a) โลหะเติมที่แทรกเข้าไปใน โพรงภายในของโพลีโพรพิลีน และ (b) โลหะเติมที่เกาะอยู่ด้านบนของแท่งโพลี โพรพิลีน.....	109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมา วัตถุประสงค์และประโยชน์ของงานวิจัยเรื่อง การเล่น  
ประสานโคมทองแดงโดยใช้การเชื่อมความต้านทานแบบทางอ้อม ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา
2. วัตถุประสงค์ของโครงการ
3. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

การทำระบบแลกเปลี่ยนความร้อนลงไปในพื้นที่ที่มีขนาดเล็กและจำกัดนั้น แผ่นแลกเปลี่ยน  
ความร้อนต้องมีขนาดเล็ก จึงมีแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Micro-channel ซึ่งโดยทั่วไปแผ่น  
แลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้จะมีทางไหลผ่านของสารขนาดเล็กและพื้นที่ผิวสัมผัสก็น้อยตามไปด้วย  
และการผลิตแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้จะได้เวลาในการผลิตนานเนื่องจากการใช้กระบวนการ  
กัดเป็นร่องเพื่อเป็นทางไหลผ่านของสารหล่อเย็น จึงนำไปสู่การศึกษาวัสดุที่เป็นรูพรุนมาใช้เป็นวัสดุใน  
การทำแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน อันเนื่องด้วยโครงสร้างที่เป็นรูพรุนคล้ายฟองน้ำที่มีโครงสร้างแบบ  
เปิดทำให้ของไหลสามารถไหลผ่านได้และผิวสัมผัสที่มากระหว่างของไหลหรืออากาศกับผิววัสดุแบบ  
โพรม ทำให้ประสิทธิภาพของการถ่ายโอนความร้อนมากขึ้นและคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุที่เหมาะสม  
ต่อการถ่ายโอนความร้อนและความสามารถในการนำความร้อนที่ดีคือทองแดง จึงใช้ทองแดงโพรมา  
เป็นวัสดุในการทำแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน

การนำแผ่นทองแดงโพรมาทำหน้าที่ในการเป็นแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นจะมีวิธีการผลิต  
คือการเล่นประสานในเตาอบ โดยใช้แผ่นโลหะเดิมที่เป็นแบบอสังฐานเป็นตัวที่ทำหน้าที่ประสาน  
แผ่นทองแดงโพรมกับแผ่นทองแดงธรรมดา อบไว้ที่อุณหภูมิ 680 °C หรือสูงกว่าแต่จะไม่เกินจุดหลอม  
ละลายของทองแดง ซึ่งกระบวนการนี้จะใช้เวลาในการผลิตที่นาน ซึ่งนั่นจะเป็นผลเสียต่อวัสดุที่เป็น  
อสังฐาน อันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างให้เป็นผลึกซึ่งจะทำให้จุดหลอมเหลวสูงขึ้นและ  
อาจจะส่งผลเสียต่อชิ้นงานได้

ผลเสียจากปัญหาที่เกิดขึ้นทำให้นำไปสู่การศึกษากระบวนการผลิตอื่น ๆ ที่เป็นไปได้ ซึ่งก็คือ  
การเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Spot welding) อาศัยกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านทำให้เกิดความร้อน  
หลอมละลายโลหะเดิมให้เชื่อมติดกัน แต่เนื่องด้วยการเชื่อมวิธีนี้จะมีแรงกดจากหัวอิเล็กโทรดโดยตรง  
ซึ่งจะทำให้โพรมทองแดงเสียหายเนื่องจากโครงสร้างไม่เหมาะสมกับการกดเพราะมีความเปราะสูง จึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต่อ1อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้วิธีในกระบวนการที่คล้ายกันแต่เป็นการเชื่อมความต้านทานแบบทางอ้อม (Indirect resistance welding) โดยวิธีการนี้หัวอิเล็กโทรดจะไม่สัมผัสกับชิ้นงานโดยตรงจึงไม่เกิดความเสียหายกับชิ้นงาน เนื่องจากแรงกด อาศัยกระแสไฟฟ้าไหลผ่านชิ้นงานให้เกิดความร้อน ละลายโลหะเติมที่เป็นอสังฐานติดกับชิ้นงาน โดยการศึกษาจะต้องหาค่ากระแสไฟฟ้าและเวลาที่เหมาะสมในการเล่นประสานชิ้นงานและวิเคราะห์ผลจากโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อศึกษาผลของกระแสไฟฟ้าและเวลาในการเล่นประสานที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม

## 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ศึกษาการเชื่อมความต้านทานแบบทางอ้อม
2. ได้ศึกษาวัสดุโพมทองแดงและโลหะเติมชนิดอสังฐาน
3. ได้ศึกษาผลของค่ากระแสไฟฟ้าและเวลาที่มีผลต่อโครงสร้างบริเวณรอยเชื่อมของวัสดุโพมทองแดงและโลหะเติมชนิดอสังฐาน
4. ได้ศึกษาผิวของวัสดุโพมทองแดงและโลหะเติมชนิดอสังฐานหลังการเล่นประสานด้วย SEM และการหาค่าประกอบทางเคมีด้วย EDS

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงาน	เดือน				สิงหาคม				กันยายน				ตุลาคม				พฤศจิกายน				ธันวาคม				มกราคม				กุมภาพันธ์				มีนาคม				เมษายน				พฤษภาคม							
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4								
1. ศึกษาและระบุหัวข้อที่สนใจ																																																
2. รวบรวมเขตของงานวัตถุประสงค์และนโยบายของโครงการนี้																																																
3. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและออกแบบการทดลอง																																																
4. เริ่มต้นเตรียมงานและทำ jig เพื่อจับชิ้นงาน																																																
5. เชื่อมชิ้นงาน																																																
6. ศึกษาโครงสร้างทางจลศาสตร์ของชิ้นงาน																																																
7. ศึกษาข้อผิดพลาดและปรับปรุงข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น																																																
8. รวบรวมข้อมูลเพื่อทำแผนรายงานวิจัย																																																

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยเรื่อง การเล่นประสานโฟมทองแดง โดยใช้การเชื่อมความต้านทานแบบทางอ้อม ดังแสดงต่อไปนี้

#### 2.1 กระบวนการเชื่อมความต้านทาน

การเชื่อมความต้านทานเป็นเชื่อมชิ้นงานสองชิ้นหรือมากกว่าโดยการประกบกันทั้งแบบข้อต่อชนและรอยต่อเกย ซึ่งใช้ความร้อนและแรงกดที่เป็นช่วง ๆ

การเชื่อมความต้านทานความร้อนในการเชื่อมที่เกิดขึ้น เกิดจากค่าความต้านทานของวัสดุที่เป็นตัวกำหนดการวิ่งของกระแสไฟฟ้า การเชื่อมนี้แตกต่างจากการเชื่อมอื่น ๆ ที่ไม่ต้องใช้วัสดุอื่น ๆ เพิ่มเติม เช่น ฟลักซ์ แท่งโลหะเติมและอื่น ๆ เป็นต้น ดังนั้นกระบวนการเชื่อมจึงไม่ซับซ้อน การเชื่อมความต้านทานนั้นแตกต่างจากการเชื่อมหลอมละลาย โดยใช้ประโยชน์จากแรงกดเพิ่มให้ความร้อนในชิ้นงานและประสานเข้าด้วยกัน แรงกดจะส่งผลต่อโครงสร้างของเกรน ซึ่งการทำการเชื่อมไปพร้อมการค้ำึงถึงคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ ซึ่งจะใช้เวลาเท่ากับคุณสมบัติของวัสดุหรือมากกว่าแล้วแต่กรณี [1]

กระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบต่าง ๆ

รอยต่อเกย (Lap joint) กระบวนการนี้หัวอิเล็กโทรดจะจ่ายกระแสไฟฟ้าและในขณะเดียวกันจะออกแรงกดชิ้นงานไปด้วย กระบวนการนี้สามารถทำในวัสดุแบบแผ่นซีท แผ่นหนา แท่งยาวหรือแบบทรงกระบอกก็ได้

การเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Spot welding) วิธีการนี้เป็นวิธีที่ใช้มากที่สุดในการเชื่อมแบบรอยต่อเกยและรูปทรงของอิเล็กโทรดจะอยู่อย่างคงที่ขณะที่ทำการเชื่อม

การเชื่อมโพรเจกชัน (Projection welding) วิธีการนี้จะทำการเชื่อมให้เป็นแผ่นเรียบโดยชิ้นงานเพียงชิ้นเดียวหรือสองชิ้นก็ได้ ทิศทางการวิ่งของกระแสไฟฟ้าจะถูกจำกัดที่บริเวณโพรเจกชัน วิธีการนี้จะต้องใช้หัวอิเล็กโทรดแบบเรียบเท่านั้น

การเชื่อมแบบพัลส์หรือการเชื่อมพัลส์จิ้งหะ (Pulsation welding) วิธีการนี้จะเหมือนกับการเชื่อมแบบจุดหรือการเชื่อมแบบโพรเจกชัน แต่จะปล่อยกระแสไฟฟ้าเป็นจิ้งหะแต่หัวอิเล็กโทรดยังคงกดค้างไว้ที่ชิ้นงาน

การเชื่อมตะเข็บ (Seam welding) วิธีการนี้จะคล้ายคลึงกับการเชื่อมแบบจุด แบบอิเล็กโทรดจะเป็นแบบลูกกลิ้งและจะหมุนตลอดเวลาที่ทำการเชื่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเชื่อมหมุนหรือการเชื่อมจุดด้วยล้ออิเล็กทรอนิกส์ (Roll spot welding) ถ้าการจ่ายกระแสไฟฟ้าไม่ต่อเนื่องหรือถูกขัดจังหวะ โดยไม่คำนึงถึงการหมุนของล้ออย่างต่อเนื่องหรือไม่สม่ำเสมอก็ตาม หากเป็นเช่นนั้นแต่ว่ารอยเชื่อมไม่ซ้อนทับกัน ผลจากรอยเชื่อมจะเรียกว่าการเชื่อมหมุน

ข้อต่อชน (Butt joint) การเชื่อมต่อแบบชนนั้นเป็นวิธีการเชื่อมที่เกิดขึ้นที่ปลายแท่งกระบอกหรือขอบของแผ่นซีทหรือแผ่นหนา อิเล็กทรอนิกส์จะนำกระแสไฟฟ้าให้กับชิ้นงานทั้งสองชิ้นที่ถูกเชื่อมและอาจใช้หรือไม่ใช้เพื่อส่ง Upset force ถ้าหากใช้ในการส่ง Upset force ก็สามารทำได้ผ่านการจับของขั้วไฟฟ้าหรือแคลมป์หนีบ

การเชื่อมวาบ (Flash welding) วิธีการนี้เป็นการนำแท่งทรงกระบอกมาจับปลายชนปลายบริเวณที่สัมผัสกันเมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าจะเกิดแสงและเกิดการเชื่อม เมื่อเริ่มกระบวนการขึ้นงานด้านหนึ่งต้องเลื่อนเข้าไปเพราะเนื้อวัสดุเกิดการหลอมละลายออกไป

การเชื่อมกระทบ (Percussion welding) เป็นกระบวนการที่จัดอยู่ในการเชื่อมความต้านทาน ถึงแม้ว่าโดยทางเทคนิคแล้วนั้นไม่ใช่ เพราะทำให้เกิดความร้อนจากค่าความต้านทานในชิ้นงาน แต่ความร้อนเกิดจากการอาร์คของชิ้นงานจากช่องว่างของอิเล็กทรอนิกส์ แท้จริงแล้วการเชื่อมต่อกันในบริเวณนั้นเกิดขึ้นพร้อมกับการชนกันของผิวสัมผัสทั้งหมด ความร้อนเกิดจากการอาร์คโดยการปล่อยกระแสไฟฟ้าจากแหล่งประจุอย่างรวดเร็ว พร้อมกับแรงกระทบที่เกิดระหว่างการปล่อยกระแสไฟฟ้า

## 2.2 พารามิเตอร์ของการเชื่อมความต้านทาน

พารามิเตอร์ของการเชื่อมความต้านทานที่มีอิทธิพลในการเชื่อมมากที่สุดแบ่งได้ออกเป็น 8 พารามิเตอร์ดังนี้ [2]

### 2.2.1 ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม

ค่ากระแสไฟฟ้าเป็นตัวแปรสำคัญของการเชื่อมความต้านทานซึ่งจะเป็นตัวที่ส่งผลต่อความร้อนมากที่สุด ขนาดของรอยเชื่อมหรือที่เรียกว่า Welding nugget จะขยายตัวอย่างรวดเร็วจากการเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้า แต่หากกระแสไฟฟ้าที่มากเกินไปชิ้นงานอาจจะระเบิดและเกิดความเสียหายต่อหัวอิเล็กทรอนิกส์ โดยกระแสไฟฟ้าจะมีทั้งกระแสตรงและกระแสสลับ ขึ้นอยู่กับสเปคของเครื่องเชื่อม

### 2.2.2 เวลาที่ใช้ในการเชื่อม

เวลาที่ใช้ในการเชื่อมเป็นส่วนที่ส่งผลโดยตรงต่อการกำเนิดความร้อนในงานเชื่อม เนื่องจากความร้อนที่ถ่ายออกมาจากบริเวณรอยเชื่อมถึงชิ้นงานและถึงหัวอิเล็กทรอนิกส์ ตลอดจนการสูญเสียความร้อนจากพื้นผิววัสดุโดยรอบ ค่าต่ำสุดของกระแสไฟฟ้าและค่าต่ำสุดของเวลาที่ใช้ในการเชื่อมเป็นสิ่งที่จะต้องคำนึงถึง เพราะถ้าหากกระแสไฟฟ้าต่ำเกินไป ถึงจะเพิ่มเวลาในการเชื่อมก็ไม่สามารถทำให้เกิดการเชื่อมติดกันได้ เมื่อกระแสไฟฟ้าสูงมากพอและเวลาที่ใช้ในการเชื่อมเพิ่มขึ้นขนาดของ Nugget จะขยายใหญ่ขึ้นจนใกล้เคียงกับจุดปลายอิเล็กทรอนิกส์ที่สัมผัสกับชิ้นงาน ถ้าหาก

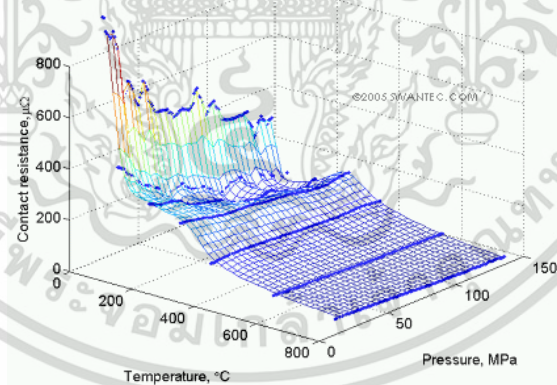
ยังคงการเชื่อมต่อไปเรื่อย ๆ ชิ้นงานอาจจะระเบิดออกและในกรณีเลวร้ายที่สุดคือหัวอิเล็กโทรดจะหลอมติดกับชิ้นงาน

### 2.2.3 แรงกดในการเชื่อม

แรงกดในการเชื่อมมีอิทธิพลต่อกระบวนการเชื่อมความต้านทานโดยส่งผลต่อ Contact resistance และพื้นที่สัมผัสที่จะส่งผลต่อการเสียรูปของวัสดุ ชิ้นงานเชื่อมจะต้องถูกกดด้วยแรงที่เหมาะสมเพื่อกระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านชิ้นงานได้ ถ้าหากแรงกดในการเชื่อมน้อยเกินไป อาจจะทำให้เกิดการระเบิดของชิ้นงานทันทีหลังจากเริ่มกระบวนการเนื่องจาก Contact resistance นั้นสูงเกินไป ผลให้เกิดความร้อนที่รวดเร็ว ในทางกลับกันถ้าหากแรงกดในการเชื่อมสูงเกินไป หน้าสัมผัสจะกว้างขึ้นทำให้กระแสไฟฟ้าไหลได้ง่าย ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าและ Contact resistance น้อยลง จะทำให้การเกิดความร้อนลดลงรวมถึงขนาดของ Nugget ที่เล็กลงด้วย

### 2.2.4 Contact Resistance

Contact resistance ที่บริเวณหน้าสัมผัสของการเชื่อมเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญและมีความสัมพันธ์กับชนิดของวัสดุที่ใช้ในงานเชื่อม อย่างไรก็ตามพารามิเตอร์ตัวนี้มีปฏิกิริยาต่อกระบวนการสูง ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับแรงกดที่ใช้ในการเชื่อมเช่นกัน โดย Contact resistance กับแรงกดในการเชื่อมจะมีความสัมพันธ์ โดยที่หากแรงกดสูง Contact resistance จะลดลงกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านได้ง่าย ทำให้ความร้อนลดลงและทางตรงกันข้ามหากแรงกดน้อย Contact resistance จะมากขึ้น ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านลำบากเป็นจุดสะสมความร้อน ทำให้ความร้อนในงานเชื่อมสูงขึ้น



รูปที่ 2.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดที่ใช้ในการเชื่อมและ Contact resistance

### 2.2.5 คุณสมบัติของวัสดุ

วัสดุหลายชนิดคุณสมบัติจะเปลี่ยนเมื่ออุณหภูมิของวัสดุเหล่านั้นเปลี่ยนแปลงซึ่งจะมีผลต่อค่าความต้านทานในกระบวนการเชื่อม ค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุจะส่งผลต่อการเกิดความร้อน ค่าความสามารถในการนำความร้อนและค่าความจุความร้อนมีอิทธิพลต่อการถ่ายโอนความร้อนในวัสดุที่เป็นโลหะเช่นเงินและทองแดง มีค่าความต้านทานจำเพาะที่ต่ำแต่มีค่าความสามารถในการนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต่อ 6 อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อนที่สูง จุดความร้อนเล็ก ๆ กำเนิดขึ้นแม้ในค่ากระแสไฟฟ้าที่สูงแต่ก็ถูกถ่ายโอนผ่านไปอย่างรวดเร็ว การที่จะเชื่อมความต้านทานด้วยวัสดุเหล่านี้จะยาก แต่อีกนัยหนึ่งวัสดุจำพวกนี้สามารถนำมาเป็นตัวอิเล็กโทรดในการเชื่อมได้ เมื่อเชื่อมโลหะที่ต่างชนิดกัน ความร้อนจะกำเนิดในโลหะที่มีค่าความต้านทานจำเพาะสูงกว่าโลหะที่มีค่าความต้านทานจำเพาะต่ำ ความแข็งของวัสดุก็ส่งผลต่อค่า Contact resistance ยิ่งวัสดุที่มีความแข็งมากจะมีค่า Contact resistance ที่สูงเนื่องจากผิวที่หยาบของวัสดุจะทำให้เกิดการเสียดสีรูปได้ยากกว่าผิวที่เรียบ

## 2.2.6 การเคลือบผิววัสดุ

การเคลือบผิววัสดุจะช่วยในการป้องกันการกัดกร่อนหรือเป็นสารตั้งต้นในการทำ Surface treatment การเคลือบผิววัสดุเหล่านี้มักจะใช้ในกระบวนการเชื่อมที่ซับซ้อน การปรับพารามิเตอร์ในกระบวนการพิเศษนี้จะต้องเป็นไปตามลักษณะเฉพาะของประเภทการเคลือบผิววัสดุ การเคลือบผิววัสดุบางอย่างใช้เพื่ออำนวยความสะดวกในการเชื่อมวัสดุที่เชื่อมได้ยาก การเคลือบผิววัสดุเหล่านี้ถูกใช้เพื่อเกิดการทำสมดุลความร้อนที่ผิวงานเชื่อม สารที่ใช้ในการเคลือบผิวหลาย ๆ ชนิดจะถูกพ่นระหว่างกระบวนการเชื่อม แต่บางชนิดจะถูกนำไปใช้เป็นโลหะประสาน

## 2.2.7 ขนาดและรูปร่าง

ขนาดและรูปร่างของอิเล็กโทรดและชิ้นงานนั้นเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงอย่างมาก เพราะพารามิเตอร์เหล่านี้จะส่งผลโดยตรงต่อความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าและค่าความต้านทานขณะเชื่อม รูปร่างของอิเล็กโทรดในการเชื่อมแบบจุดจะควบคุมความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าและขนาดของ Nugget ความหนาที่แตกต่างกันของแผ่นโลหะจะต้องการกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกันเช่นเดียวกับพารามิเตอร์ที่ตั้งอื่น ๆ

## 2.2.8 ลักษณะเฉพาะของเครื่องจักร

ประเภทของไฟฟ้าและลักษณะทางกลของเครื่องเชื่อมเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการเชื่อมความต้านทาน ประเภทของไฟฟารวมถึงเวลาในการตอบสนองต่อการปล่อยกระแสไฟฟ้าและค่าการสูญเสียความร้อนแม่เหล็กเนื่องจากการเชื่อม เวลาที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในเครื่องเชื่อมสามารถทำให้งานเชื่อมขนาดเล็กเกิดความเสียหาย เนื่องจากงานเชื่อมขนาดเล็กนี้จะต้องใช้เวลาในการเชื่อมที่น้อยมาก ๆ ค่าการสูญเสียแม่เหล็กในงานเชื่อมความต้านทานเป็นสิ่งที่จะต้องคำนึงในการควบคุมกระบวนการ ในส่วนของลักษณะทางกลของเครื่องนั้นคือความเร็วแล้วความแรงของหัวอิเล็กโทรด ความตรงของโครงสร้าง ถ้าการถอนตัวของหัวอิเล็กโทรดเข้าเกินไป ชิ้นงานอาจเกิดความเสียหายอันเนื่องจากการระเบิด

## 2.3 การเชื่อมความต้านทานแบบทางอ้อม (Indirect resistance welding)

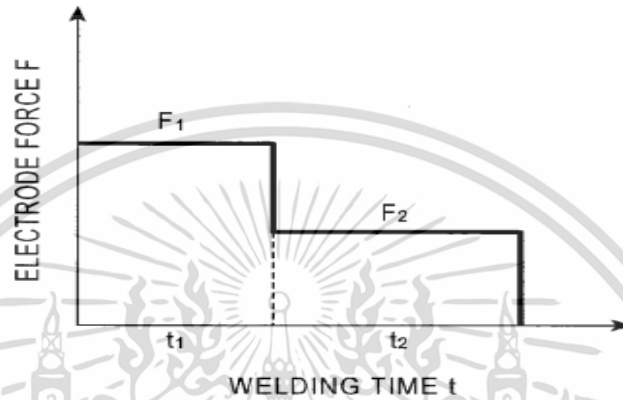
### 2.3.1 หลักการทำงานของเครื่อง

การเชื่อมจุดแบบจ่ายกระแสทางอ้อมเป็นเชื่อมโดยมีวัสดุที่เป็นโลหะสองแผ่นประกบกัน โดยการเชื่อมจะให้อิเล็กโทรดตัวหนึ่งอยู่ในจุดที่ต้องการเชื่อมและกดค้างไว้และจ่ายกระแสไฟฟ้า โดยมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต่อ 7 อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กโทรดอีกหนึ่งตัวในจุดหนึ่งที่ไม่ได้สัมผัสกับชิ้นงานแต่ต้องมีตัวกลางต่อกับชิ้นงาน กระแสไฟฟ้าจะไหลระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองตัวโดยไหลผ่านวัสดุที่ต้องการเชื่อม โดยกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านอย่างคงที่ [3]

### 2.3.1.1 กรณีแรงในอิเล็กโทรด

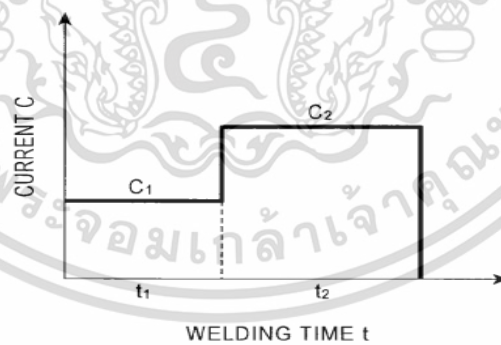
เวลาที่ใช้ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าจะถูกแบ่งเป็นสองช่วง  $t_1$  และ  $t_2$  และแรงอิเล็กโทรด  $F_1$  จะใช้ในช่วงเวลาแรก  $t_1$  และแรงอิเล็กโทรด  $F_2$  จะน้อยกว่า  $F_1$  ซึ่งจะใช้ในช่วงเวลาต่อมา  $t_2$



รูปที่ 2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงอิเล็กโทรดและเวลา

### 2.3.1.2 กรณีกระแสไฟฟ้า

เวลาที่ใช้ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าจะถูกแบ่งเป็นสองช่วง  $t_1$  และ  $t_2$  และกระแสไฟฟ้า  $C_1$  จะใช้ในช่วงเวลาแรก  $t_1$  และกระแสไฟฟ้า  $C_2$  จะมากกว่า  $C_1$  ซึ่งจะใช้ในช่วงเวลาต่อมา  $t_2$



รูปที่ 2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและเวลา

### 2.3.2 ตัวแปรที่ต้องควบคุม

$I$  = กระแสไฟฟ้า (kA)

$t$  = เวลาที่จ่ายกระแสไฟฟ้า (s)

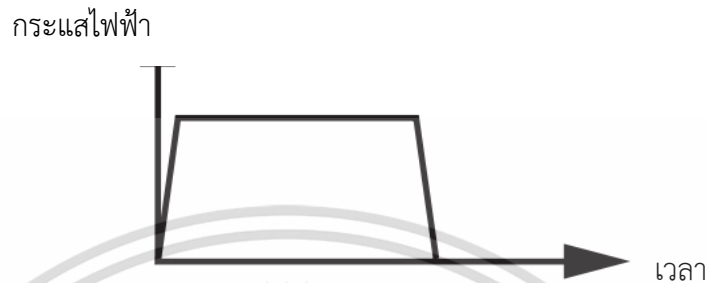
$R$  = ค่าความต้านทาน

$F$  = แรงในอิเล็กโทรด (N)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3 การจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบกระแสตรง (DC)

กระแสตรง (DC) เป็นกระแสไฟฟ้าที่มีทิศทางการเคลื่อนที่ของกระแสในวงจรไปในทิศทางเดียว โดยลักษณะของกระแสกับเวลาเป็น Square wave form ซึ่งสามารถควบคุมค่ากระแสและเวลาได้อย่างแม่นยำกว่ากระแสสลับ (AC) เหมาะกับการเชื่อมวัสดุที่เป็นอโลหะ [4]



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้ากับเวลาในระบบ DC

### 2.3.4 ค่าความร้อนที่ใช้ในการเชื่อม

$$Q = I^2 R t$$

Q = ความร้อนที่เกิดขึ้น (kJ)  
I = กระแสไฟฟ้า (mA)  
R = ค่าความต้านทานของวัสดุ ( $\Omega$ )  
T = เวลาที่ใช้ในการเชื่อม (s)

### 2.4 โลหะเติม (Filler metal)

ในการเล่นประสานโลหะจะมีตัวเชื่อมที่เรียกว่าโลหะเติม โลหะเติมเหล่านี้มีจุดหลอมเหลวที่มากกว่า 840 °F (450 °C) ซึ่งจะต้องต่ำกว่าโลหะที่ต้องการเล่นประสาน โดยจะต้องมีลักษณะดังนี้

1. ความสามารถในการกระจายตัวและติดกับโลหะฐานในงานเล่นประสาน
2. มีจุดหลอมเหลวและช่วงการหลอมเหลวที่เหมาะสมกับความสามารถในการไหลโดยมีแรง Capillary action ในบริเวณรอยต่อ
3. องค์ประกอบของความเป็นเนื้อเดียวกันและความมั่นคงที่จะไม่แยกองค์ประกอบของธาตุในสถานะของเหลวในขณะการเล่นประสาน
4. มีความแข็งแรงทางคุณสมบัติทางกลและลักษณะทางกายภาพที่ดีหลังจากที่ทำการเล่นประสาน
5. ขึ้นอยู่กับความต้องการและสเปคของงาน

ความสามารถในการสร้างหรือหลีกเลี่ยงปฏิกิริยาระหว่างโลหะฐานและโลหะเติม ความเปราะเมื่อมีชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compounds : IMCs) ที่หนาหรือการกัดเซาะที่มากเกินไป สิ่งเหล่านี้เป็นสิ่งที่ไม่ต้องการในงานเล่นประสาน [5]

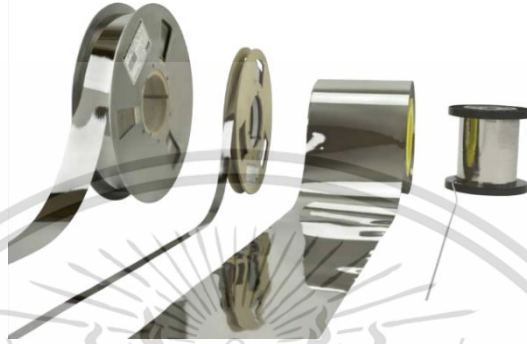
ตารางที่ 2.1 โลหะเติมที่เหมาะสมกับการใช้งานในโลหะชนิดต่าง ๆ [5]

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
			Tool steels			Tool steels
Braze 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		Hydrogen			Hydrogen
	Vacuum		Induction			Induction
			Inert gas			Inert gas
			Torch			Torch
			Vacuum			Vacuum
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	BAlSi	BCu

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.1 แผ่นแผ่นประสาน (Brazing foil)

แผ่นแผ่นประสาน (Brazing foil) เป็นวัสดุที่บิวดองได้ง่าย ไม่มีส่วนผสมของกาวหรือฟลักซ์ (Flux) และมีความบางได้ถึง 0.06 มิลลิเมตร (0.0025 นิ้ว) แผ่นฟอยล์สามารถตัดเป็นรูปร่างที่ต้องการได้และเพิ่มความต้านทานในชิ้นงานก่อนที่จะทำการประสานได้ แผ่นฟอยล์หลาย ๆ แผ่นสามารถช่วยเพิ่มความหนาให้กับชิ้นงานได้



รูปที่ 2.5 ตัวอย่าง Brazing foil [6]

#### 2.5 คุณสมบัติของทองแดง

โลหะทองแดงมีคุณสมบัติเด่นหลายประการโดยเฉพาะการนำไฟฟ้าและการนำความร้อนที่สูง มีความต้านทานการกัดกร่อนและการสึกกร่อน มีความสามารถในการขึ้นรูปและความเหนียวสูงจึงสามารถแปรรูปด้วยวิธีต่าง ๆ ได้ง่ายและไม่เสี่ยงต่อการแตกหักเสียหาย นอกจากนี้ยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของทองแดงได้ โดยการเติมธาตุผสมต่าง ๆ เช่น สังกะสี นิกเกิล เบอริลเลียม ก็จะทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและมีความต้านทานความล้าสูง สามารถนำไปใช้งานได้กว้างขวางมากขึ้น ทองแดงและโลหะผสมทองแดง เป็นวัสดุทางวิศวกรรมที่สามารถนำไปใช้งานได้อย่างหลากหลาย คุณสมบัติที่ทำให้ทองแดงมีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานได้หลากหลายประเภท คือ ความแข็งแรง, สภาพการเป็นตัวนำ, ความต้านทานการกัดกร่อน, การแปรรูปและความอ่อน [7]

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของทองแดง [8]

คุณสมบัติทางฟิสิกส์	
สัญลักษณ์ทางเคมี	Cu
ความหนาแน่น	$8.94 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3$ at $20^\circ$
จุดหลอมเหลว	$1084 \text{ }^\circ\text{C}$
Thermal conductivity	$385 \text{ W/m.K}$
Specific heat capacity	$0.385 \text{ J/g.mol}$ at $20^\circ\text{C}$
Electrical resistivity	$0.0192\text{-}0.0230 \text{ }\mu\text{Ohm}$ at $20 \text{ }^\circ\text{C}$
คุณสมบัติทางกล	
Modulus of elasticity	$110 \text{ GPa}$
Shear modulus	$46 \text{ GPa}$

## 2.6 โฟมโลหะ (Porous metal)

มีคำเรียกมากมายที่ไว้ใช้กับวัสดุโลหะที่เป็นโพรงภายใน โดยปกติแล้วจะคุ้นเคยกับการแบ่งแยกวัสดุเหล่านี้โดยสัมพันธ์กับความหนาแน่นของวัสดุ ( $\rho^*/\rho_s$ ) ความหนาแน่นของโลหะที่มีรูพรุนมาก ๆ ต่อหน่วยพื้นที่  $\rho^*$  จะหารด้วยความหนาแน่นของวัสดุนั้น ๆ ที่เป็นก้อนตัน (ไม่ได้เป็นวัสดุที่มีรูพรุน)  $\rho_s$  วัสดุโฟมที่มีความหนาแน่นที่ต่ำมาก ๆ สามารถทำให้มีความหนาแน่นต่ำได้ถึง 0.001, โพรเมอริคโฟมถูกใช้ในการกันกระแทก การบรรจุและฉนวนกันความร้อนโดยมีความหนาแน่นสัมพันธ์ในช่วง 0.05 และ 0.2 เช่นความหนาแน่นสัมพันธ์ของโลหะโฟมเพิ่มขึ้น ผนังแห่งจะหนาและช่องรูพรุนจะมีขนาดเล็กลง มากกว่าประมาณ 0.3 จะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแบบเซลล์ไปเป็นโครงสร้างแบบโพรงขนาดใหญ่ ซึ่งจะทำให้มีความแข็งที่ต่ำกว่าในลักษณะของแข็งที่มีรูโพรงภายใน ดังนั้นวัสดุที่มีรูพรุนหรือวัสดุแบบโฟมจะถูกนิยามคือวัสดุที่มีรูพรุนอยู่ในช่วงที่ต่ำกว่า 70%

รูปร่างของรูพรุนในหลาย ๆ แบบโฟมและวัสดุที่ขึ้นรูปด้วยการเผา (Sintered material) มีรูปร่างใกล้เคียงกับทรงกลมและ Isotropic ในขณะที่รูปร่างวัสดุที่เหมือนดอกบัวและ Gasar-type เป็น Anisotropic และเป็นทรงกระบอกยาว ซึ่งเป็นการแข็งตัวไปในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นการศึกษารูปร่างของรูพรุนจะถูกนิยามด้วยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้

1. Pore diameter
2. Pore length
3. Pore aspect ratio (สัดส่วนของความยาวของรูพรุนต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง)
4. Pore orientation

## 5. Porosity : pore volume fraction

ไม่ว่าความพรุน, ขนาดรูพรุนและรูปร่างรูพรุนจะเป็นอย่างไร การเกิดขึ้นของรูพรุนจะขึ้นอยู่กับวิธีที่ใช้ในกระบวนการผลิตโดยจะมี 2 ลักษณะ 1. รูพรุนแบบปิด (Closed pores) 2. รูพรุนแบบเปิด (Open pores) รูพรุนแบบปิดจะล้อมรอบไปด้วยผนังของวัสดุ โดยแต่ละรูจะแยกออกจากกัน ซึ่งกระบวนการมักจะผลิตพร้อมกับการใส่ก๊าซ ในขณะที่รูพรุนแบบเปิด รูแต่ละรูจะเชื่อมติดกัน ซึ่งรูพรุนจะมีแท่งที่ค้ำยันโครงสร้าง (Struts) ซึ่งรูพรุนแบบปิดก๊าซและของเหลวไม่สามารถซึมผ่านเข้าไปได้ แต่รูพรุนแบบเปิดสามารถผ่านได้ [9]



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างโฟมทองแดง [10]

## 2.7 เครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค 2 ชนิดดังนี้

### 2.7.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM)

กล้องจุลทรรศน์แบบแสงเป็นเครื่องมือพื้นฐานของนักวิทยาศาสตร์และวิศวกรในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ เริ่มใช้งานตั้งแต่ปี 1880 กล้องจุลทรรศน์แบบแสงได้นำมาใช้งานอย่างมากโดยนักโลหวิทยาในการตรวจสอบโลหะวัสดุ โดยพื้นฐานแล้วกล้องชนิดนี้ไม่ได้สร้างเพื่อตรวจสอบโลหะแต่จะเป็นวัสดุประเภทเซรามิกและพอลิเมอร์

### 2.7.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นประเภทกล้องที่ใช้งานมากที่สุดในบรรดากล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอน เครื่องมือนี้ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดนส่องกราดไปที่ผิวของวัสดุ มีความคมชัดที่สูงและความชัดลึกที่กว้าง ภาพที่ได้จากการส่องกราดมากกว่าการยิงลำแสงอิเล็กตรอนที่ส่องไปยังบริเวณผิวของชิ้นงาน นอกจากนี้ SEM ยังสามารถเทคนิคอื่น ๆ เพิ่มเติมในการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุโดยใช้กระบวนการ Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy

## 2.8 เครื่องมือวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

### 2.8.1 Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy

EDS เป็นสินค้าเชิงพาณิชย์ตั้งแต่ปี 1970 ถูกนำมาใช้งานแทนที่ WDS (Wavelength Dispersive Spectroscopy) เนื่องจากใช้งานได้ง่ายกว่า ไม่จำเป็นต้องหมุนชิ้นงานไปมา กระบวนการของ EDS ค่อนข้างเร็วเนื่องจากตัวจับสัญญาณจับสัญญาณของลักษณะพลังงาน X-rays จากช่วงของธาตุในชิ้นงานพร้อมกัน สำหรับ EDS ค่าความชัดเจนของพลังงานที่กระจายตัวจะอยู่ที่ประมาณ 150 – 200 eV ซึ่งไม่ดีเท่า WDS และธาตุเบาที่สุดที่จับได้คือ O ( $Z = 8$ ) ไม่ใช่ C ( $Z = 6$ ) แต่ข้อเสียเหล่านี้ไม่ใช่ส่วนสำคัญเท่าข้อดีของ EDS ซึ่งมีค่าใช้จ่ายต่ำและวิเคราะห์ผลอย่างรวดเร็ว [11]



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการและขั้นตอนต่าง ๆ ในการดำเนินงานของงานวิจัยเรื่อง การเล่นประสานโฟมทองแดงโดยใช้การเชื่อมความต้านทานแบบทางอ้อม ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

1. การเตรียมชิ้นงานเพื่อใช้ในการทดลองเบื้องต้น
2. การทดลองเชื่อมชิ้นงานเบื้องต้น
3. การปฏิบัติการเชื่อมชิ้นงานจริง
4. การเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค

#### 3.1 การเตรียมชิ้นงานเพื่อใช้ในการทดลองเบื้องต้น

เตรียมวัสดุเพื่อการทดสอบเบื้องต้นกับเครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุด ที่เป็นกระแสไฟฟ้าแบบกระแสตรง เพื่อทดลองเบื้องต้นและศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง โดยมีวัสดุที่ใช้ในการทดลองเบื้องต้น ดังนี้

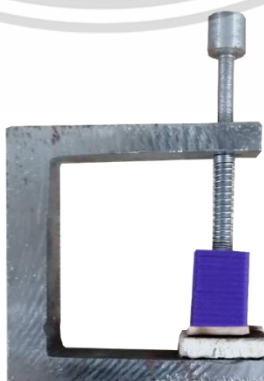
1. แผ่นทองแดงขนาด 12\*55\*0.5 มม. ตัดโค้งด้วยขนาดรัศมี 2.1 มม. จำนวน 1 แผ่น
2. แผ่นโฟมทองแดง PPI 95 ขนาด 10\*10\*1.5 มม. จำนวน 1 แผ่น
3. โลหะเติมซินโตอัสฐาน (Amorphous brazing foil CuNiSnP) ขนาด 10\*10\*0.025 มม.

จำนวน 1 แผ่น

4. อุปกรณ์ยึดจับชิ้นงาน

##### 3.1.1 การยึดจับชิ้นงาน

ในขณะที่ทำการทดลอง ทำการยึดจับชิ้นงานโดยใช้อุปกรณ์ยึดจับชิ้นงานดังรูปที่ 3.1

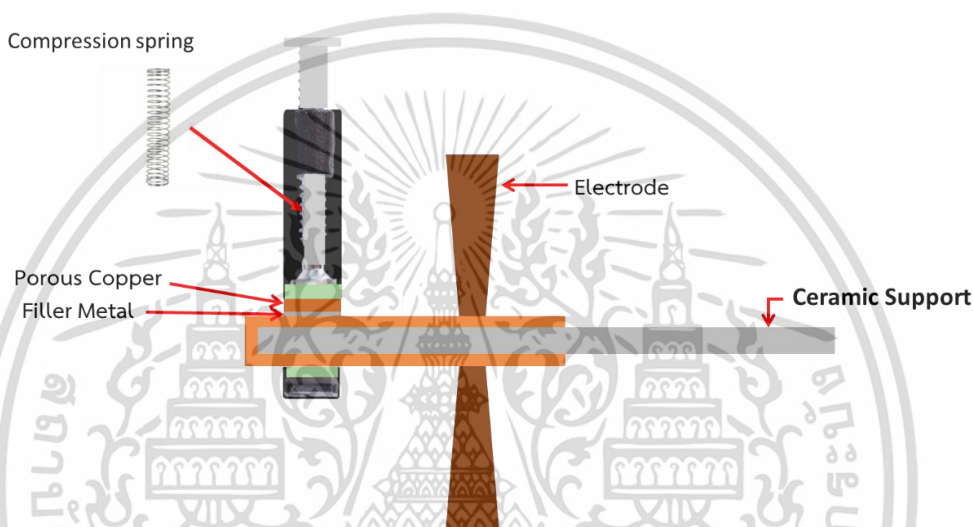


รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ยึดจับชิ้นงาน

อุปกรณ์ยึดจับชิ้นงาน จับชิ้นงานโดยใช้แรงกดชิ้นงานจากสปริง ซึ่งในการทดลองนี้ใช้สปริงที่มีค่าคงที่ของสปริง 168 นิวตัน/เมตร และในขณะที่ทำการทดลองมีแรงกดจากสปริงในการยึดจับชิ้นงาน 3.024 นิวตัน

### 3.2 การทดลองเชื่อมชิ้นงานเบื้องต้น

ก่อนทำการเชื่อมได้ทำการล้างวัสดุด้วย Ethyl alcohol และ Acetone หลังจากนั้นได้เตรียมวัสดุเพื่อทำการเชื่อมในลักษณะดังภาพ



รูปที่ 3.2 ลักษณะการเชื่อมชิ้นงานของการทดลองเบื้องต้น

ทำการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้าที่ระดับ 4 ของเครื่องเชื่อมความต้านทาน อาศัยกระแสไฟฟ้าที่วิ่งผ่านแผ่นทองแดงให้เป็นความร้อนละลายแผ่นโลหะเติม เพื่อใช้ในการเล่นประสาน กดค้างเป็นเวลาประมาณ 1 - 2 วินาที เมื่อเห็นว่าทองแดงเปลี่ยนสีเป็นสีดำจากการเกิดออกซิเดชัน จึงปล่อยออก หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานไปตัดผ่าครึ่งด้วยเครื่องตัดชิ้นงาน หลังจากนั้นก็นำไปล้างด้วย Acetone อีกครั้งเพื่อล้างคราบออกไซด์

หลังจากการล้าง ได้นำชิ้นงานไป Mounting ด้วยเรซิน (Cold mount) เพื่อทำการขัดชิ้นงาน และนำไปศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง



รูปที่ 3.3 ชิ้นงานทดลองหลังจากการทำ Cold mount



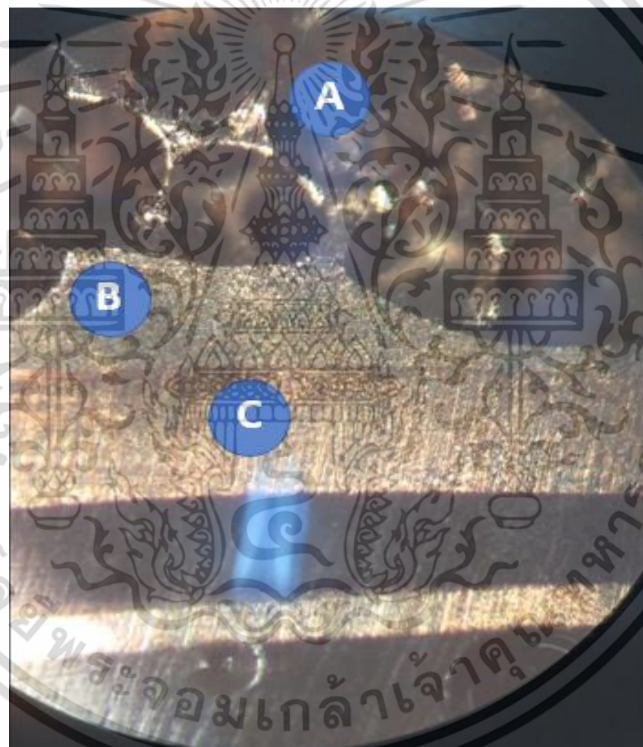
รูปที่ 3.4 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมจากการดูด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ที่กำลังขยาย 10 เท่า

จากการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคในเบื้องต้น สามารถเห็นโครงสร้างได้คือ A คือ โฟมทองแดง, B คือ แผ่นทองแดง และ C คือ โลหะเติม แต่เนื่องด้วยการทดสอบเบื้องต้นยังคงไม่สมบูรณ์ จะต้องทำการทดลองเบื้องต้นใหม่โดยจะมีการพ่นก๊าซอาร์กอนปกคลุมขณะเชื่อมเพื่อป้องกันการออกซิเดชัน ซึ่งจะทำให้เห็นโครงสร้างขนาดจุลภาคชัดเจน

ทำการทดลองซ้ำอีกครั้งหนึ่ง แต่ในการทดลองครั้งนี้มีการพ่นก๊าซอาร์กอนปกคลุมชิ้นงานขณะเชื่อมเพื่อป้องกันการออกซิเดชัน



รูปที่ 3.5 ชิ้นงานที่ทดลองพ่นก๊าซอาร์กอนหลังจากการทำ Cold mount



รูปที่ 3.6 ภาพโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของชิ้นงานที่ทดลองพ่นก๊าซอาร์กอน  
ที่กำลังขยาย 10 เท่า

จากการทดลองซ้ำโดยการพ่นก๊าซอาร์กอนปกคลุมชิ้นงานขณะเชื่อม สามารถเห็นได้ว่า  
ชิ้นงานเกิดการออกซิเดชันลดลงและทำให้สามารถเห็นโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานได้ชัดเจนมากขึ้น  
โดย A คือ โฟมทองแดง, B คือ โลหะเติม และ C คือ แผ่นทองแดง

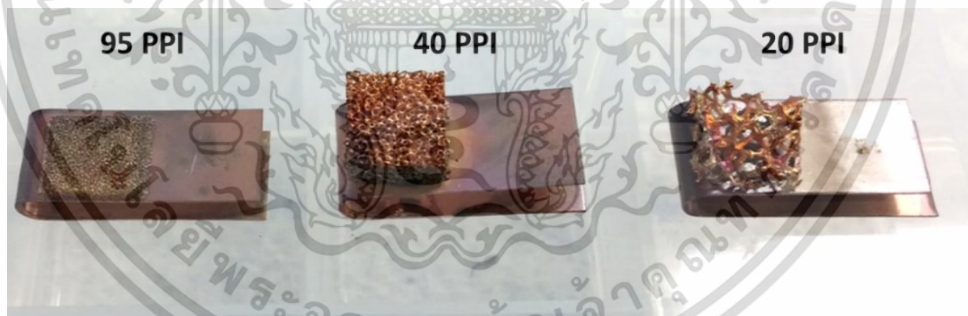
ทำการทดลองเบื้องต้นอีกครั้ง โดยเชื่อมชิ้นงานด้วยโฟมทองแดงแบบ PPI 95, PPI 40 และ  
PPI 20 ขนาดของ PPI 95 เท่ากับ  $10 \times 10 \times 1.5$  มม. ส่วน PPI 40 และ PPI 20 เท่ากับ  $10 \times 10 \times 5$  มม.  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โลหะเติมชนิดอสังฐานขนาด 10\*10\*0.025 มม. แผ่นทองแดงบริสุทธิ์ขนาด 12\*55\*0.5 มม. โดยใช้เครื่องเชื่อมความต้านทานที่เป็นกระแสไฟฟ้าแบบตรงและใช้กระแสระดับ 5 โดยในระหว่างการเชื่อมจะมีการพ่นก๊าซอาร์กอนปกคลุมชิ้นงานตลอดเวลาการเชื่อม เพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์ในชิ้นงาน โดยในการทดสอบใช้อัตราการไหลของก๊าซที่ 15 ลิตร/นาที

หลังจากการเชื่อมชิ้นงานจะนำไปศึกษาศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

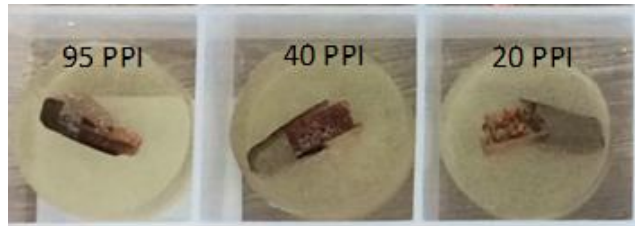


รูปที่ 3.7 เครื่องเชื่อมความต้านทาน



รูปที่ 3.8 ชิ้นงานหลังจากการทดลองเชื่อมความต้านทาน

หลังจากการทดลองทำการเชื่อมความต้านทานชิ้นงานที่มีขนาดของโพมทองแดงต่างกัน 3 ชนิดแล้ว ได้นำชิ้นงานทั้ง 3 ชิ้น ไปทำการ Mounting ด้วยเรซิน (Cold mount) เพื่อนำชิ้นงานไปขัดและนำไปศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง



รูปที่ 3.9 ชิ้นงาน PPI 95 PPI 40 และ PPI 20 ในเรซินหลังการ Mounting

หลังจากการ Mounting ชิ้นงาน ได้นำชิ้นงานไปขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 240 400 800 1200 2000 และ 4000 ตามลำดับและนำไปขัดละเอียดด้วยผงลูมินาขนาด 1 ไมครอนและ 0.3 ไมครอนตามลำดับ จากนั้นจึงล้างด้วยน้ำเปล่าและ Ethyl alcohol แล้วจึงนำไปศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานและการไหลของโลหะหล่อประสานโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

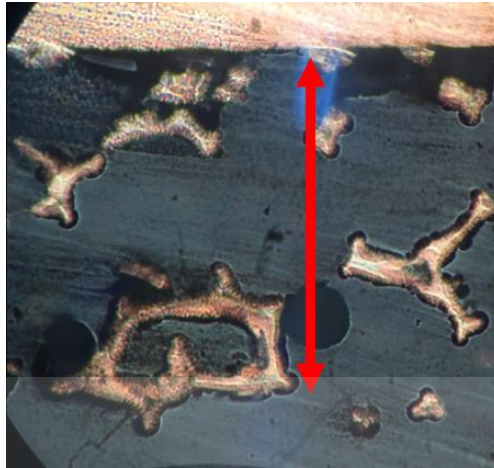


รูปที่ 3.10 การไหลของโลหะหล่อประสานในชิ้นงาน PPI 20 ที่กำลังขยาย 5 เท่า



รูปที่ 3.11 การไหลของโลหะหล่อประสานในชิ้นงาน PPI 40 ที่กำลังขยาย 10 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

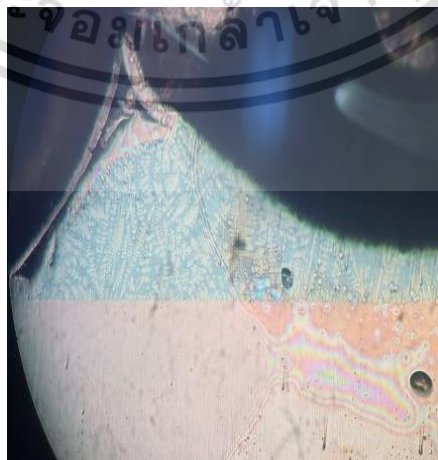


รูปที่ 3.12 การไหลของโลหะแผ่นประสานในชิ้นงาน PPI 95 ที่กำลังขยาย 5 เท่า

การตรวจสอบบริเวณรอยแผ่นประสานด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงเพื่อตรวจสอบเบื้องต้นว่าบริเวณจุดเชื่อมนั้นเชื่อมติดกันอย่างสมบูรณ์ โดยแต่ละชิ้นงานมีลักษณะรอยเชื่อมดังนี้

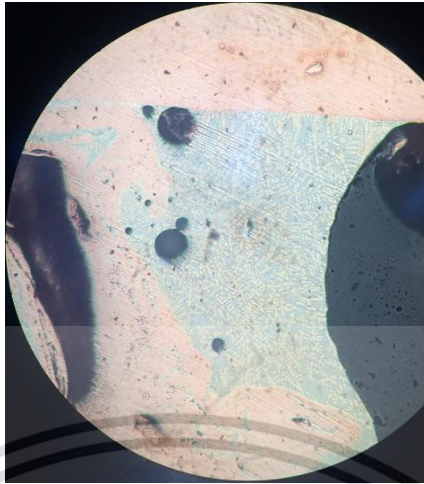


รูปที่ 3.13 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน PPI 95 ที่กำลังขยาย 15 เท่า



รูปที่ 3.14 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน PPI 40 ที่กำลังขยาย 15 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตั้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน PPI 20 ที่กำลังขยาย 15 เท่า

จากการตรวจสอบด้วยสายตาเบื้องต้น สามารถจำแนกได้ว่าบริเวณที่มีลักษณะของเกรนแบบเดนไดรท์นั้นคือตัวโลหะเติมชนิดอสัณฐานและจากการทดลองนี้จึงเลือกโฟมทองแดง PPI 95 เพียงชนิดเดียวมาใช้ในการทดลองจริง เนื่องจากในชิ้นงานของโฟมทองแดง PPI 95 มีการไหลของโลหะผ่านประสานที่คงที่และสามารถเห็นได้ชัด

### 3.3 การปฏิบัติการเชื่อมชิ้นงานจริง

หลังจากทำการทดลองเชื่อมชิ้นงานเบื้องต้นแล้วจึงทำการทดลองจริง โดยทำการทดลองเชื่อมชิ้นงาน ในกระแสไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการทดลองต่าง ๆ กัน โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

#### 3.3.1 การเตรียมชิ้นงานเพื่อทดลองในกระแสไฟฟ้าและเวลาที่ต่างกัน

1. ทำการตัดแผ่นทองแดงจำนวน 50 แผ่น ขนาด  $12*0.5*60$  มม. และทำการตัดโค้ง
2. ตัดแผ่นโฟมทองแดง PPI 95 จำนวน 50 ชิ้น ขนาด  $10*1.5*10$  มม.
3. ตัดแผ่นโลหะเติมชนิดอสัณฐาน จำนวน 50 แผ่น ขนาด  $12*0.025*12$  มม.



รูปที่ 3.16 แผ่นโลหะเติม โฟมทองแดง และแผ่นทองแดงที่ถูกตัดโค้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตั้งชื่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 การเชื่อมชิ้นงานโดยใช้เครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Spot welding machine) แบบกระแสตรง

ทำการเชื่อมชิ้นงานโดยใช้เครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Spot welding machine) รุ่น FAN Proton E+ Spot-Welding Device โดยเครื่องเชื่อมชิ้นงานนี้เป็นเครื่องเชื่อมแบบไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งสามารถปล่อยกระแสไฟฟ้าได้สูงสุดที่ 5 kA. และสามารถทำการเชื่อมที่เวลาสูงสุดได้ที่ 2 วินาที และในระหว่างการเชื่อมชิ้นงานมีการพ่นก๊าซอาร์กอนปกคลุมชิ้นงานขณะเชื่อมเพื่อป้องกันการออกซิเดชัน ของชิ้นงาน โดยในการเชื่อมชิ้นงานใช้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนที่ 15 ลิตร/นาที



รูปที่ 3.17 เครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุดรุ่น FAN Proton E+ Spot-Welding Device [12]

โดยในการเชื่อมชิ้นงานได้ทำการทดลองเชื่อมชิ้นงานเพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้าและเวลาที่เหมาะสมในการใช้เชื่อมชิ้นงาน จนได้ค่าที่เหมาะสมแล้วจึงทำการเชื่อมชิ้นงาน โดยทำการเชื่อมชิ้นงานที่ค่ากระแสไฟฟ้า 4 ระดับคือ 250 A, 500 A, 750 A และ 1,000 A และใช้เวลาในการเชื่อม 4 ค่าคือ 0.8 วินาที, 0.9 วินาที, 1 วินาที และ 1.1 วินาที ซึ่งทำการทดลองดังตารางต่อไปนี้และทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง

ตารางที่ 3.1 ค่ากระแสไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการเชื่อมชิ้นงาน

232.5 A. / 0.8 Sec.	232.5 A. / 0.9 Sec.	232.5 A. / 1 Sec.	232.5 A. / 1.1 Sec.
465 A. / 0.8 Sec.	465 A. / 0.9 Sec.	465 A. / 1 Sec.	465 A. / 1.1 Sec.
697.5 A. / 0.8 Sec.	697.5 A. / 0.9 Sec.	697.5 A. / 1 Sec.	697.5 A. / 1.1 Sec.
930 A. / 0.8 Sec.	930 A. / 0.9 Sec.	930 A. / 1 Sec.	930 A. / 1.1 Sec.

โดยไม่ทำการทดลองที่ค่ากระแสไฟฟ้าและเวลาต่ำกว่านี้เนื่องจากจะทำให้โลหะเติมไม่สามารถละลายได้และไม่ทำการทดลองที่ค่ากระแสไฟฟ้าและเวลาที่สูงกว่านี้เนื่องจากจะทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียรูปได้ ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ชิ้นงานที่ทดลองเชื่อมที่ค่ากระแสไฟฟ้าและเวลาต่าง ๆ

### 3.4 การเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค

หลังจากทำการทดลองเชื่อมชิ้นงานโดยใช้ค่ากระแสไฟฟ้าและเวลาต่าง ๆ เสร็จสิ้นแล้ว จึงทำการเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานโดยมีเริ่มจากการตัดชิ้นงาน จากนั้นจึงนำชิ้นงานที่ตัดไปทำการ Mounting ด้วยเรซิน (Cold mount) หลังจากการ Mounting ชิ้นงาน ได้นำชิ้นงานไปขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 240 400 800 1200 2000 และ 4000 ตามลำดับและนำไปขัดละเอียดด้วยผงอลูมินาขนาด 1 ไมครอนและ 0.3 ไมครอนตามลำดับ จากนั้นจึงล้างด้วยน้ำเปล่าและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ethyl alcohol แล้วจึงนำไปศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงในเบื้องต้น และนำไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงาน

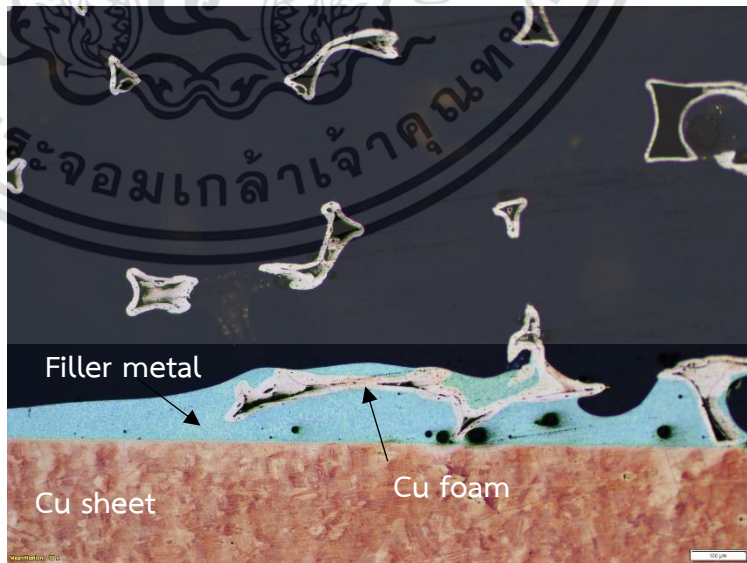
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการดำเนินงานหลังจากทำการทดลองเชื่อมความต้านทานด้วยค่ากระแสไฟฟ้าและเวลาที่ต่างกัน ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

1. โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง
2. โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
3. การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาค

#### 4.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

หลังจากทำการเตรียมชิ้นงานเสร็จแล้ว จึงนำชิ้นงานไปศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานจากการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 10 เท่า

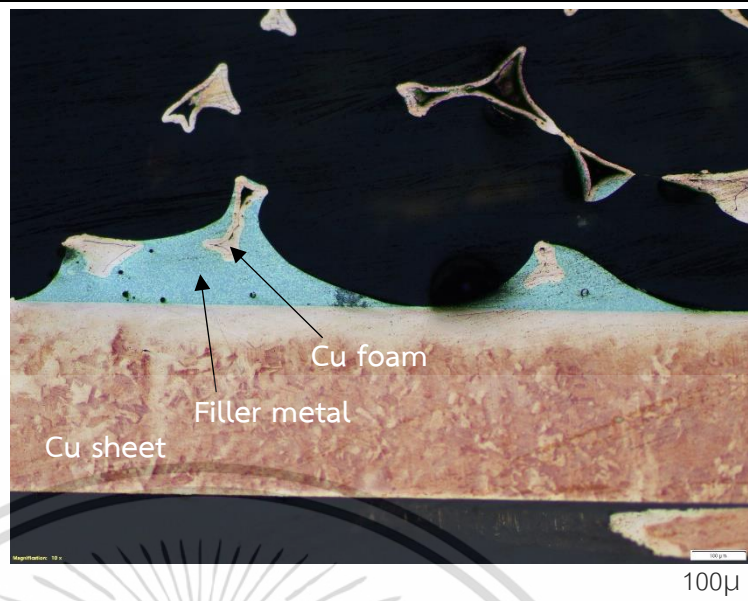
Current(A.)/ Time (Sec.)	ภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 10 เท่า
232.5A./0.9 Sec.	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

465 A. / 0.9 Sec



465 A. / 1 Sec



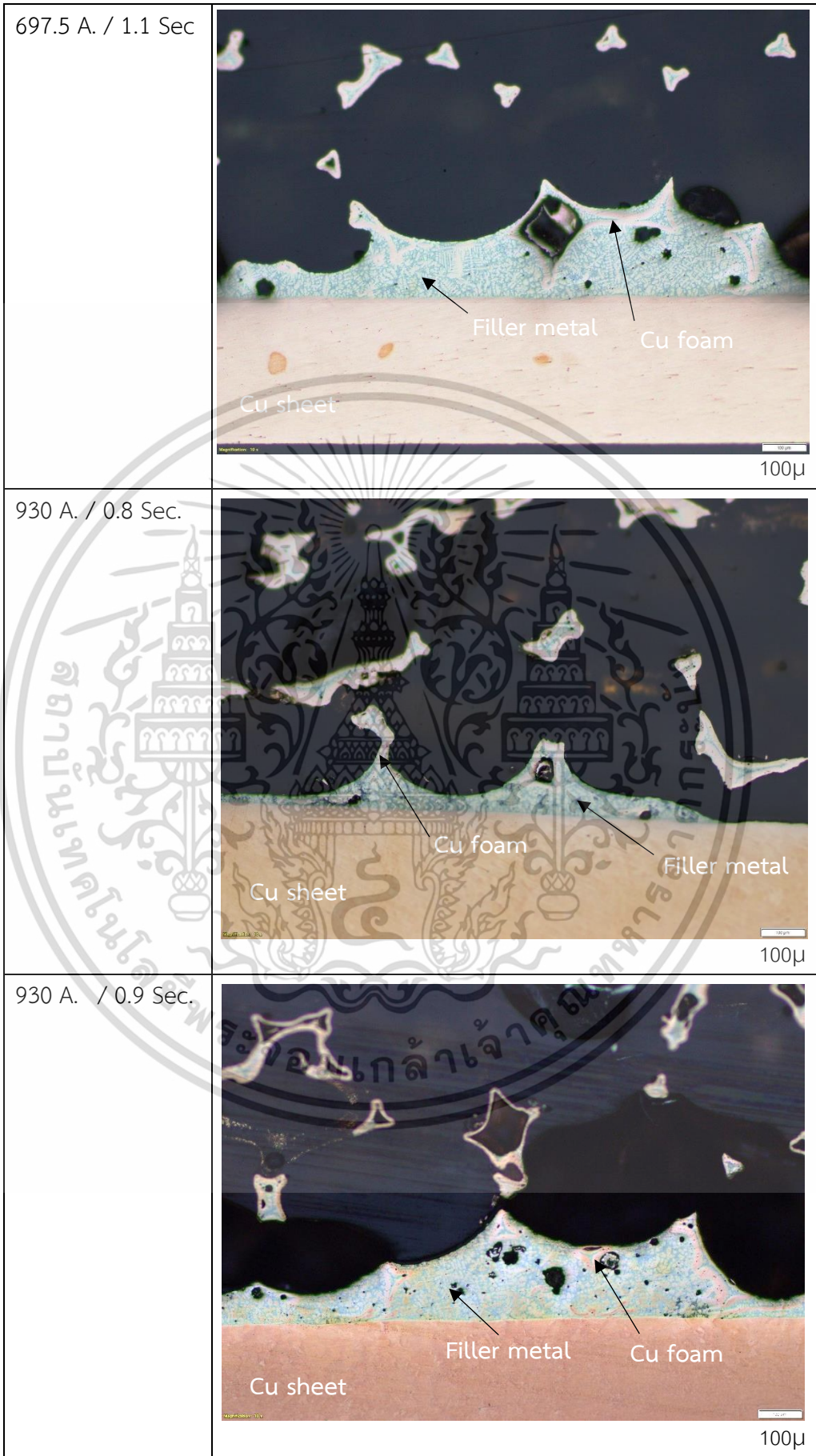
465 A. / 1.1 Sec



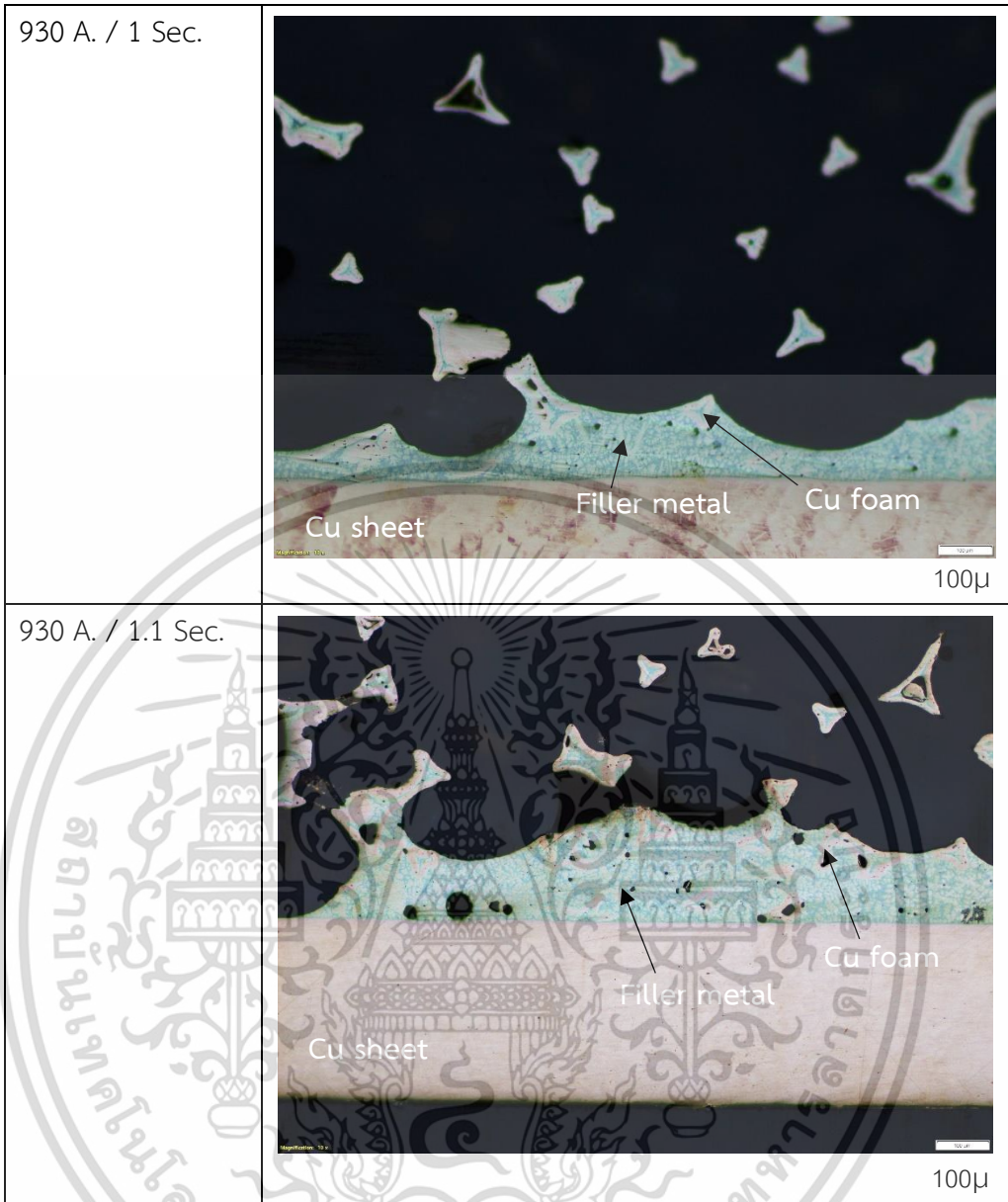
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

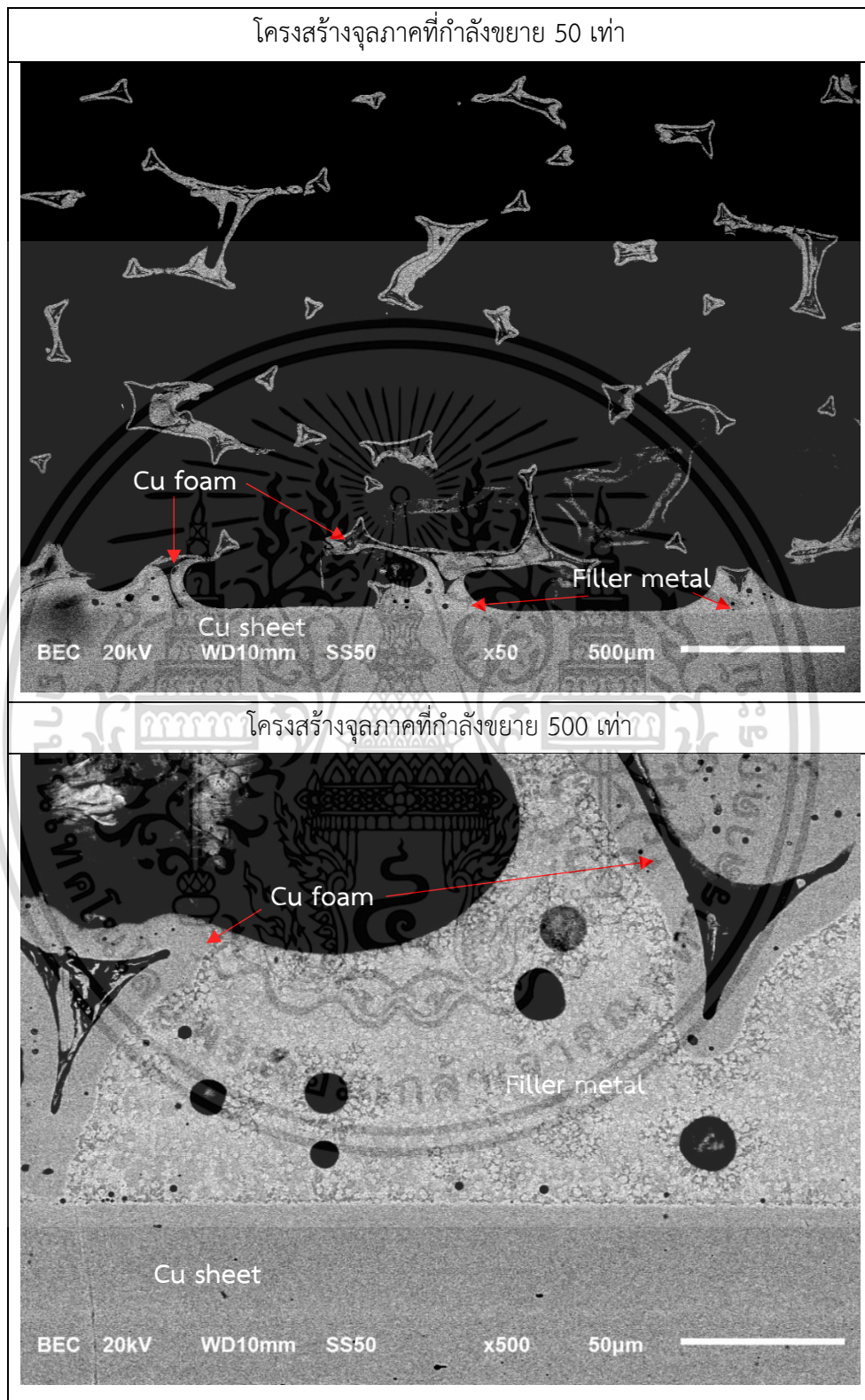


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



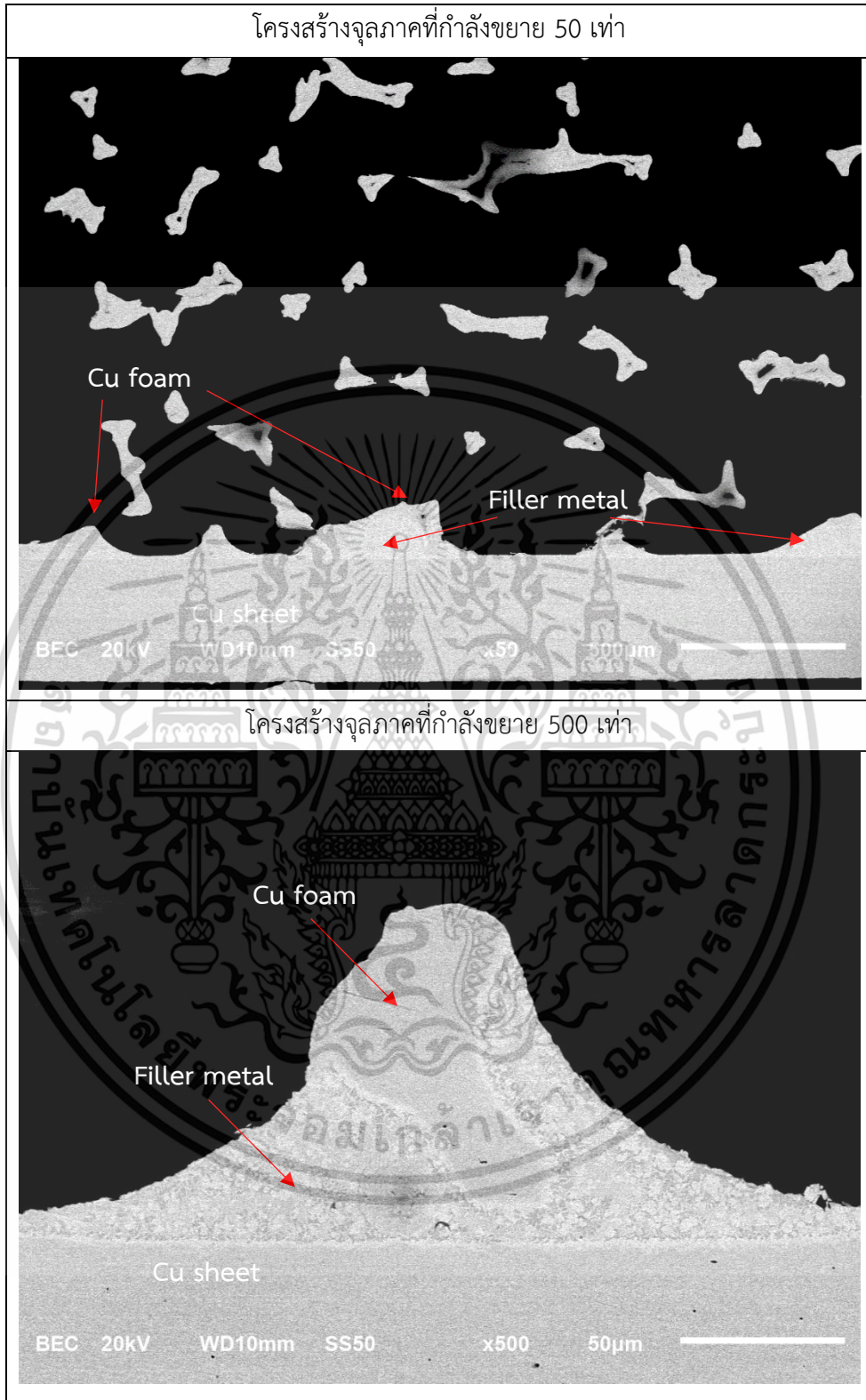
จากการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน ทำให้สังเกตโครงสร้างของชิ้นงานได้ชัดเจน โดยจะสามารถแยกโลหะเติมและทองแดงออกจากกันได้ด้วยตาเปล่า และจะสังเกตได้ว่าโลหะเติมจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อค่ากระแสไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการเชื่อมมีการเปลี่ยนแปลง โดยเมื่อใช้ค่ากระแสไฟฟ้าและเวลาในการเชื่อมมากขึ้น จะทำให้เกิดพลังงานมากขึ้น ซึ่งจะทำให้โลหะเติมเกิดการละลาย จะสังเกตได้ว่าโลหะเติมมีแนวโน้มในการละลายและสามารถไหลไปตามชิ้นงานได้มากขึ้นเรื่อย ๆ ตามพลังงานที่เกิดมากขึ้นและจากรูปจะสามารถสังเกตเห็นเกรนของโลหะเติมซึ่งเกรนของโลหะเติมมีแนวโน้มที่ใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ ตามพลังงานที่เกิดมากขึ้น

#### 4.2 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)



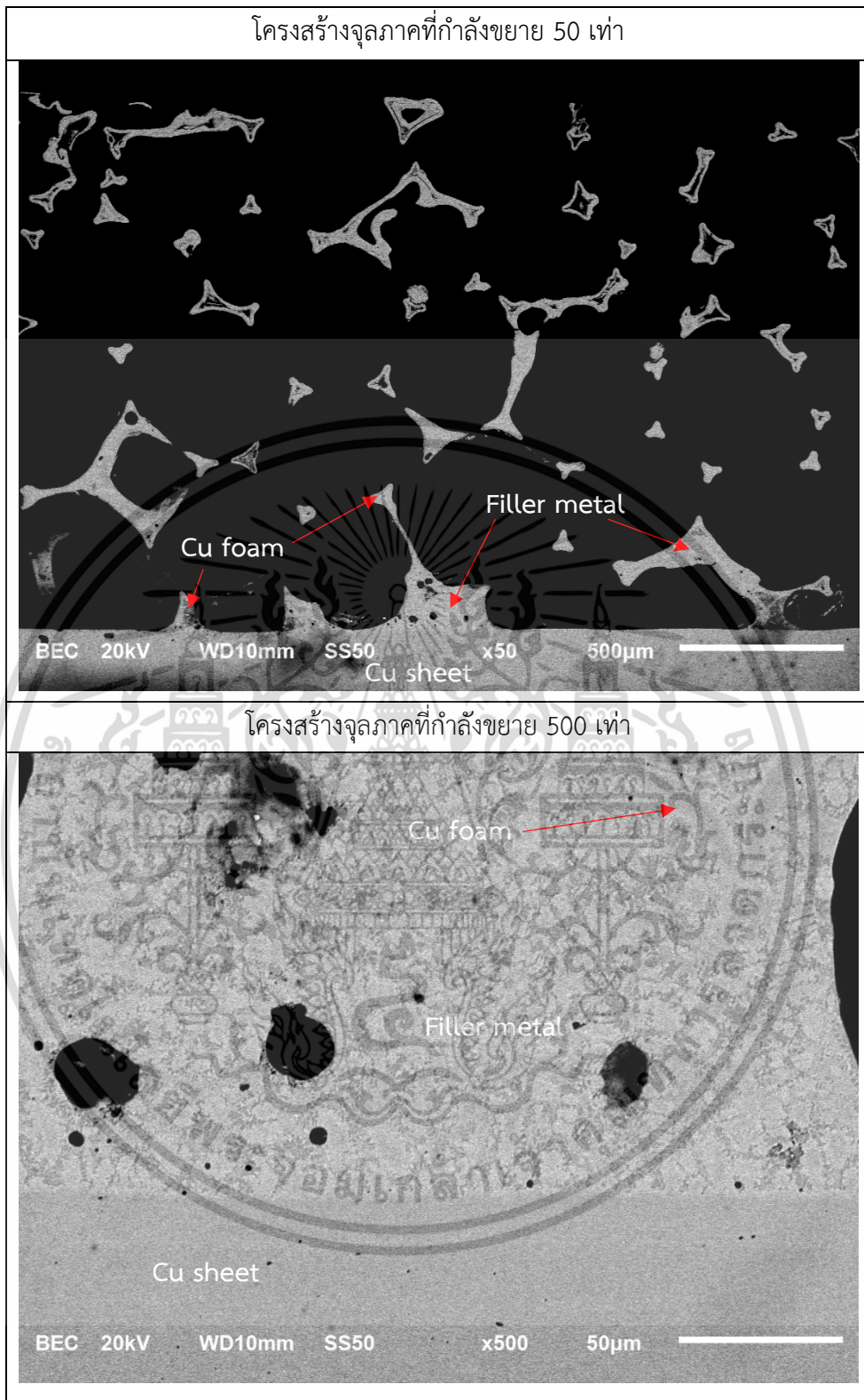
รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A ที่เวลา 0.9 วินาที ที่กำลังขยาย 50 เท่า และ 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



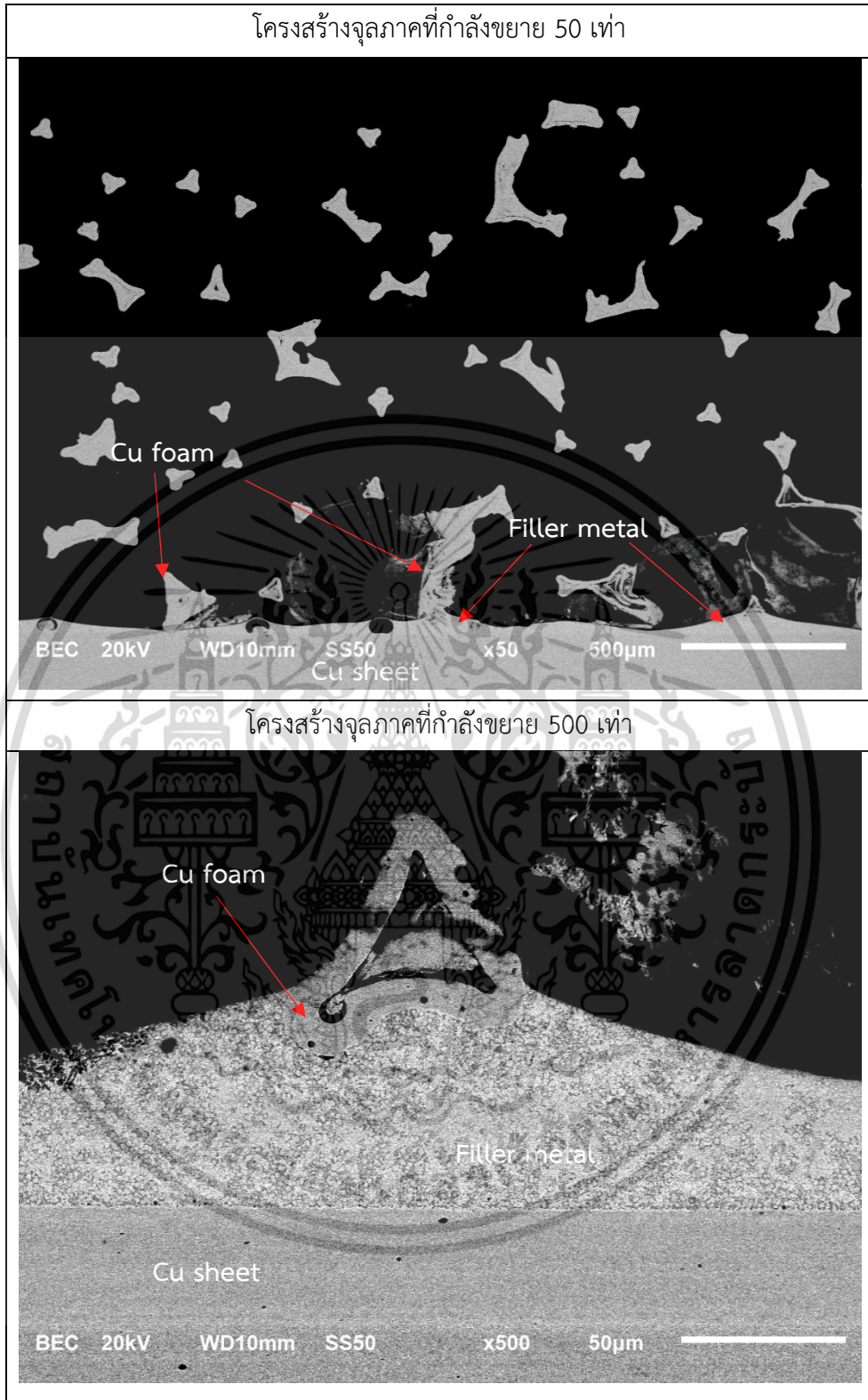
รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุดภาคบริเวณรอยเชื่อมภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A ที่เวลา 1 วินาที  
ที่กำลังขยาย 50 เท่า และ 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

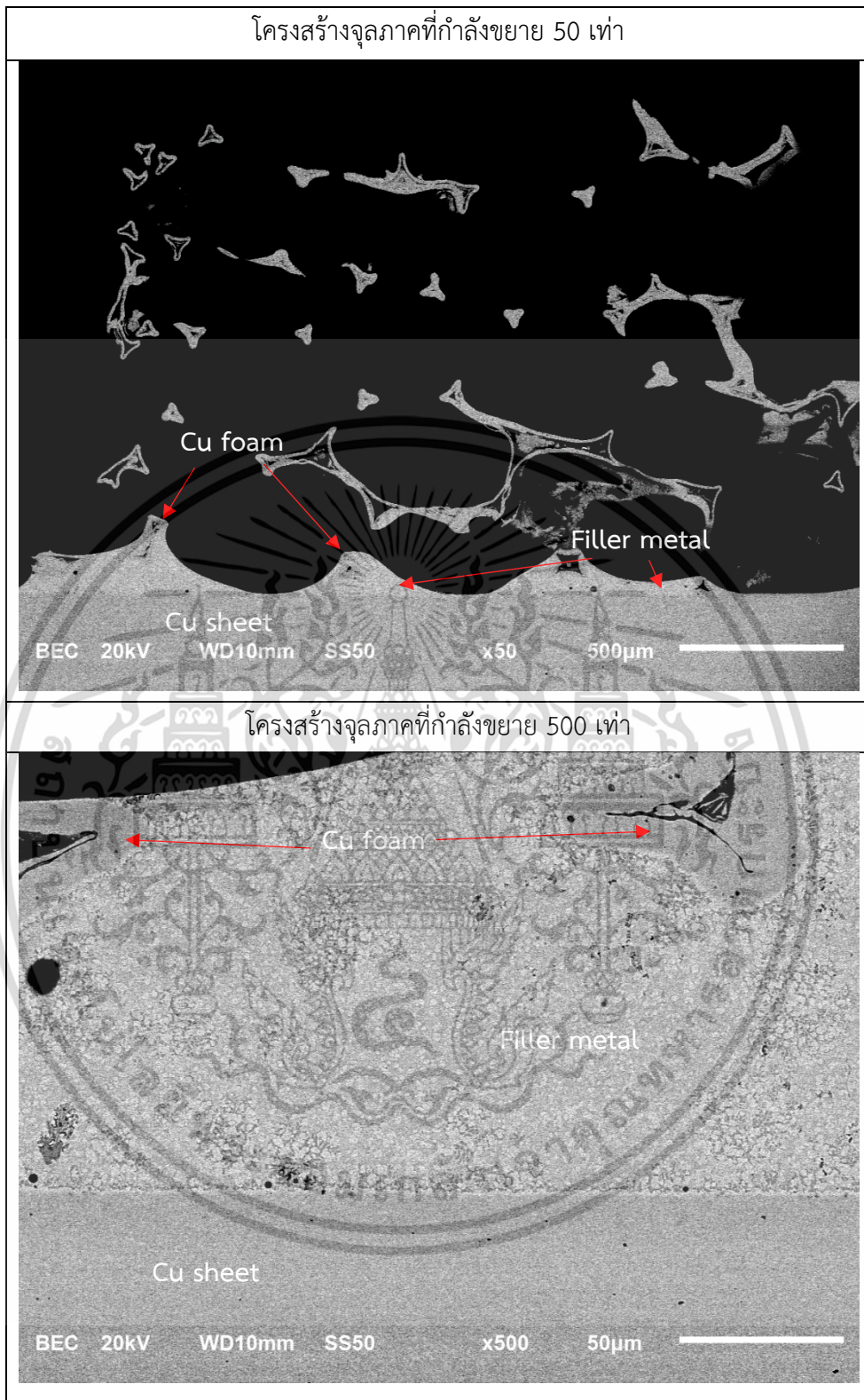


รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A ที่เวลา 1.1 วินาที  
ที่กำลังขยาย 50 เท่า และ 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

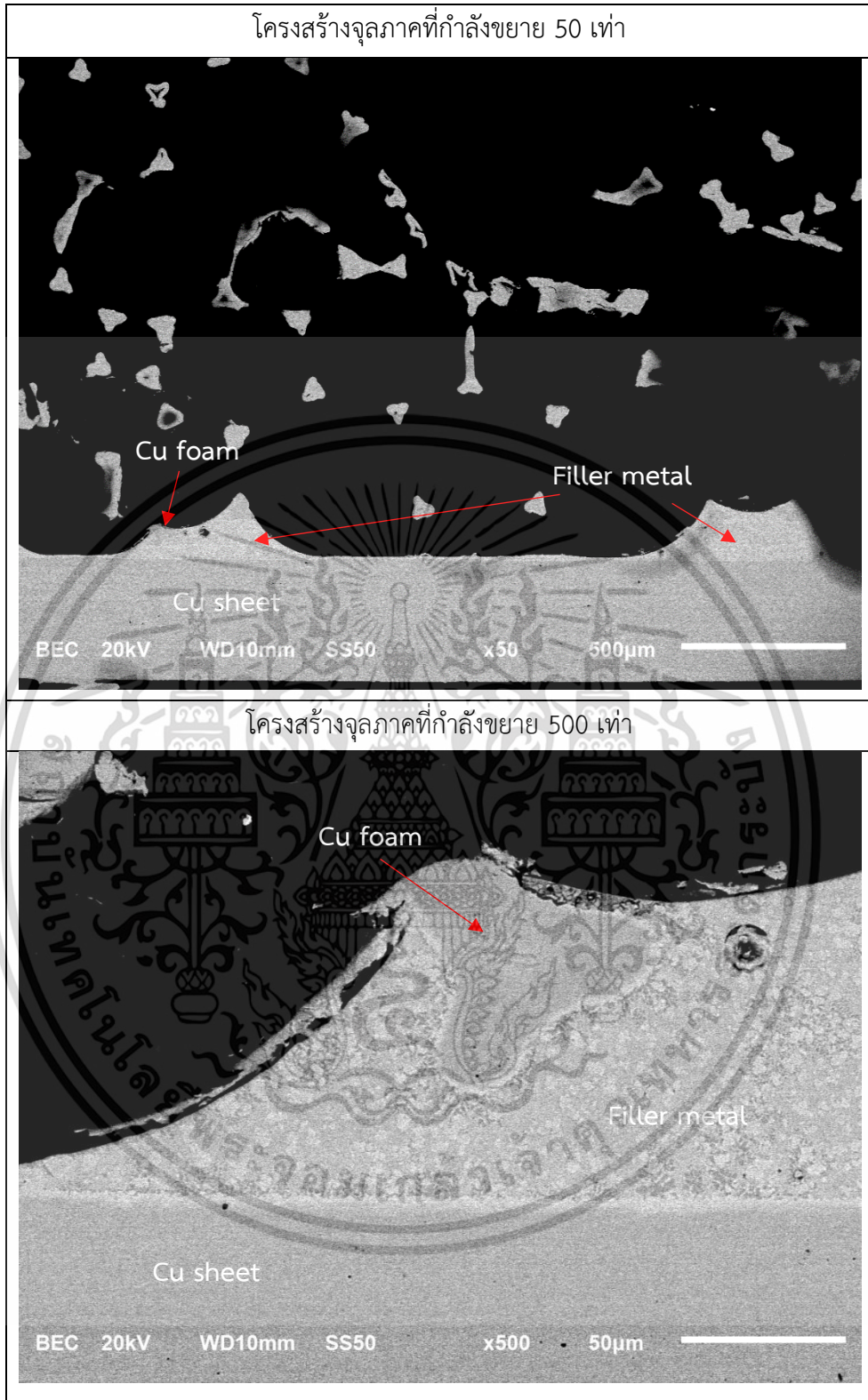


รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A ที่เวลา 0.8 วินาที  
ที่กำลังขยาย 50 เท่า และ 500 เท่า



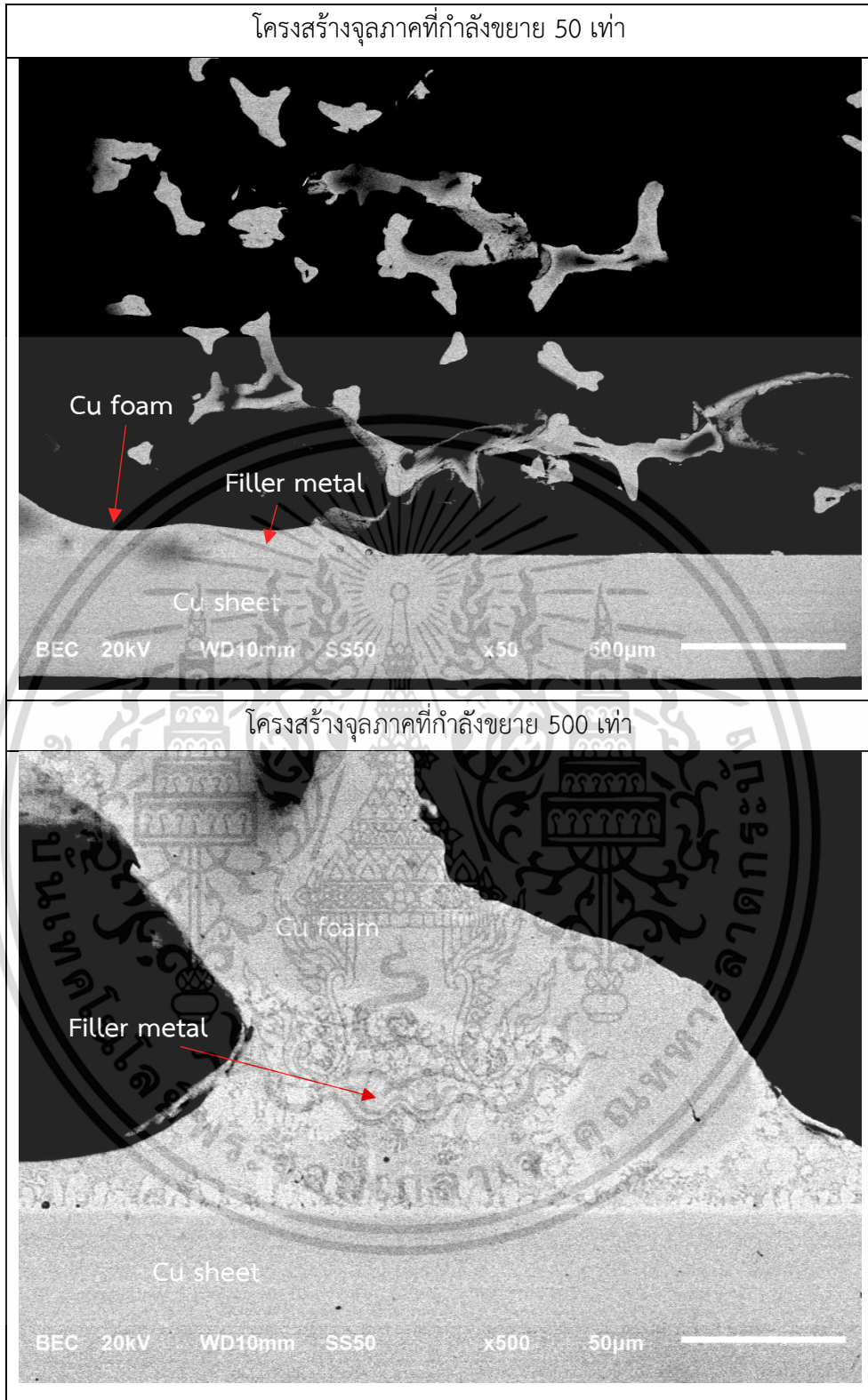
รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A ที่เวลา 0.9 วินาที  
ที่กำลังขยาย 50 เท่า และ 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

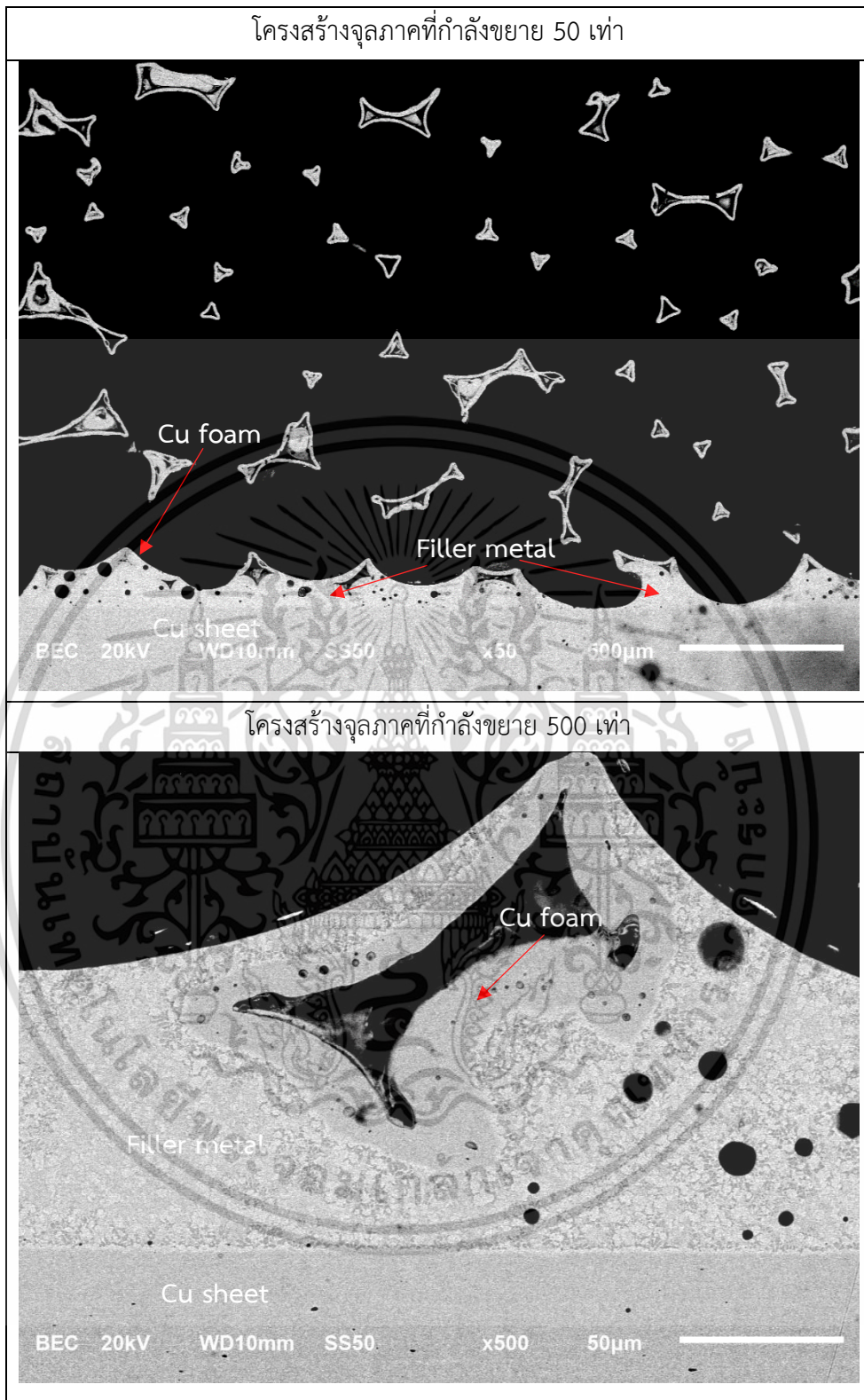


รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A ที่เวลา 1 วินาที  
ที่กำลังขยาย 50 เท่า และ 500 เท่า

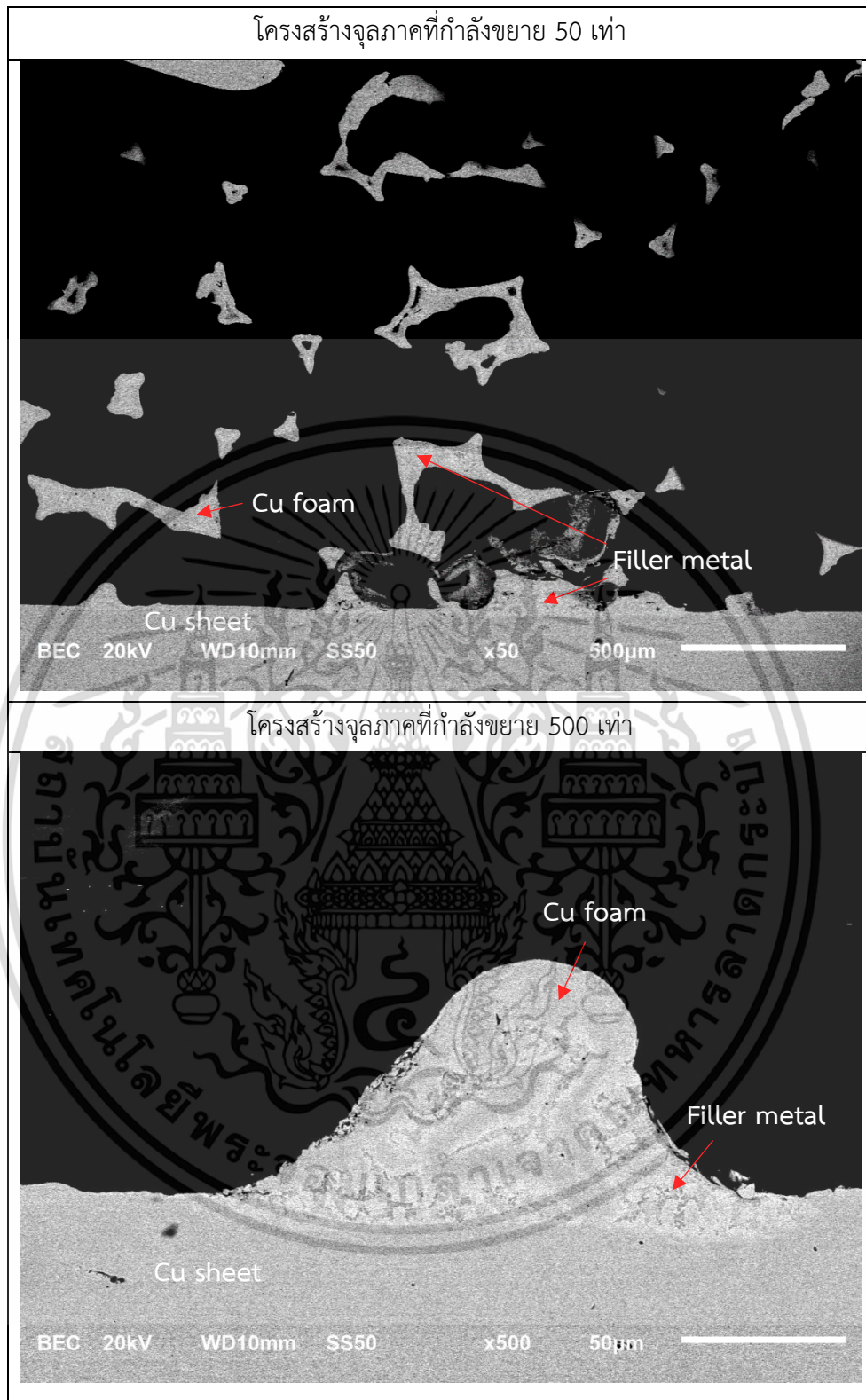
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A ที่เวลา 1.1 วินาที  
ที่กำลังขยาย 50 เท่า และ 500 เท่า

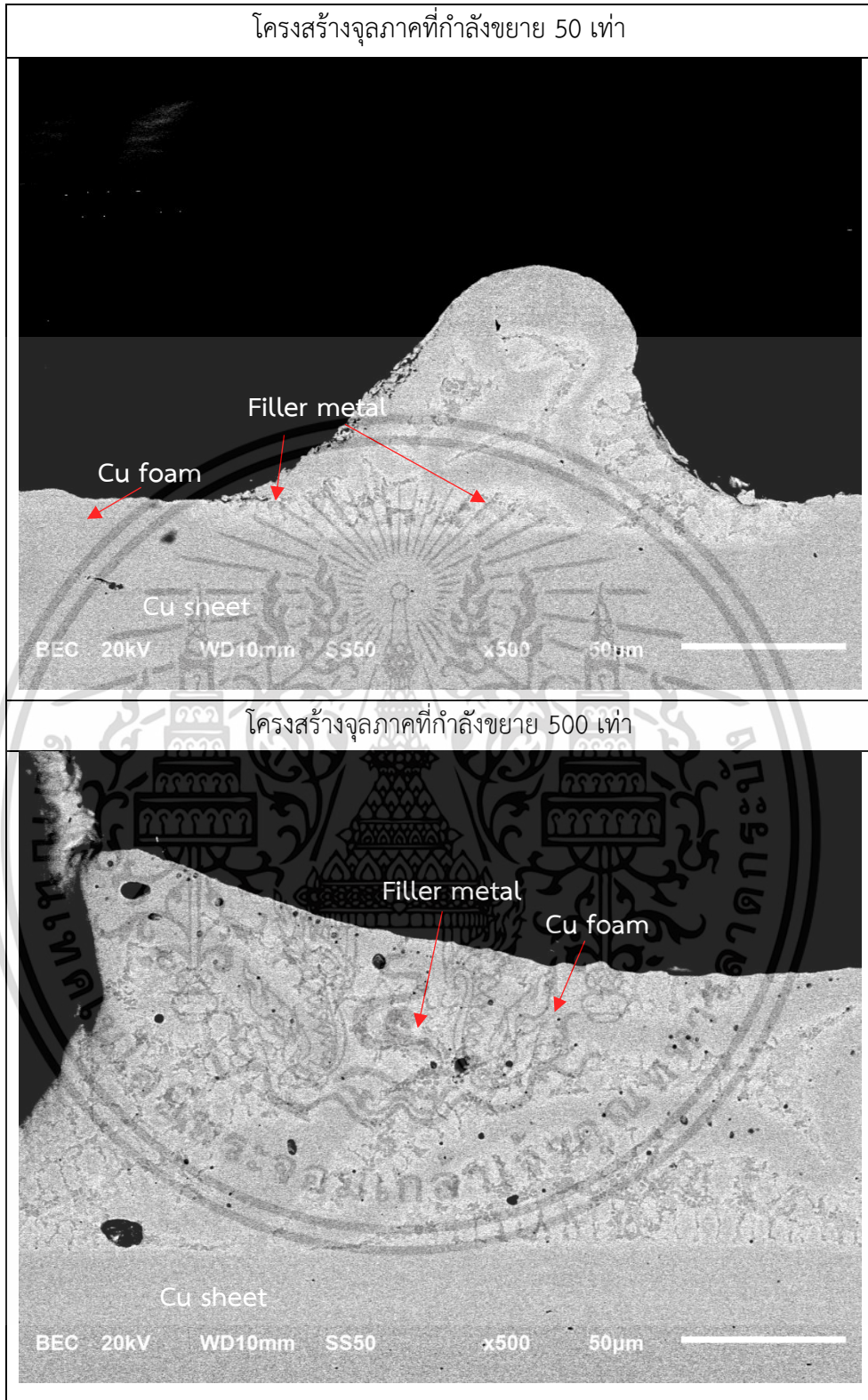


รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 679.5 A ที่เวลา 0.8 วินาที  
ที่กำลังขยาย 50 เท่า และ 500 เท่า

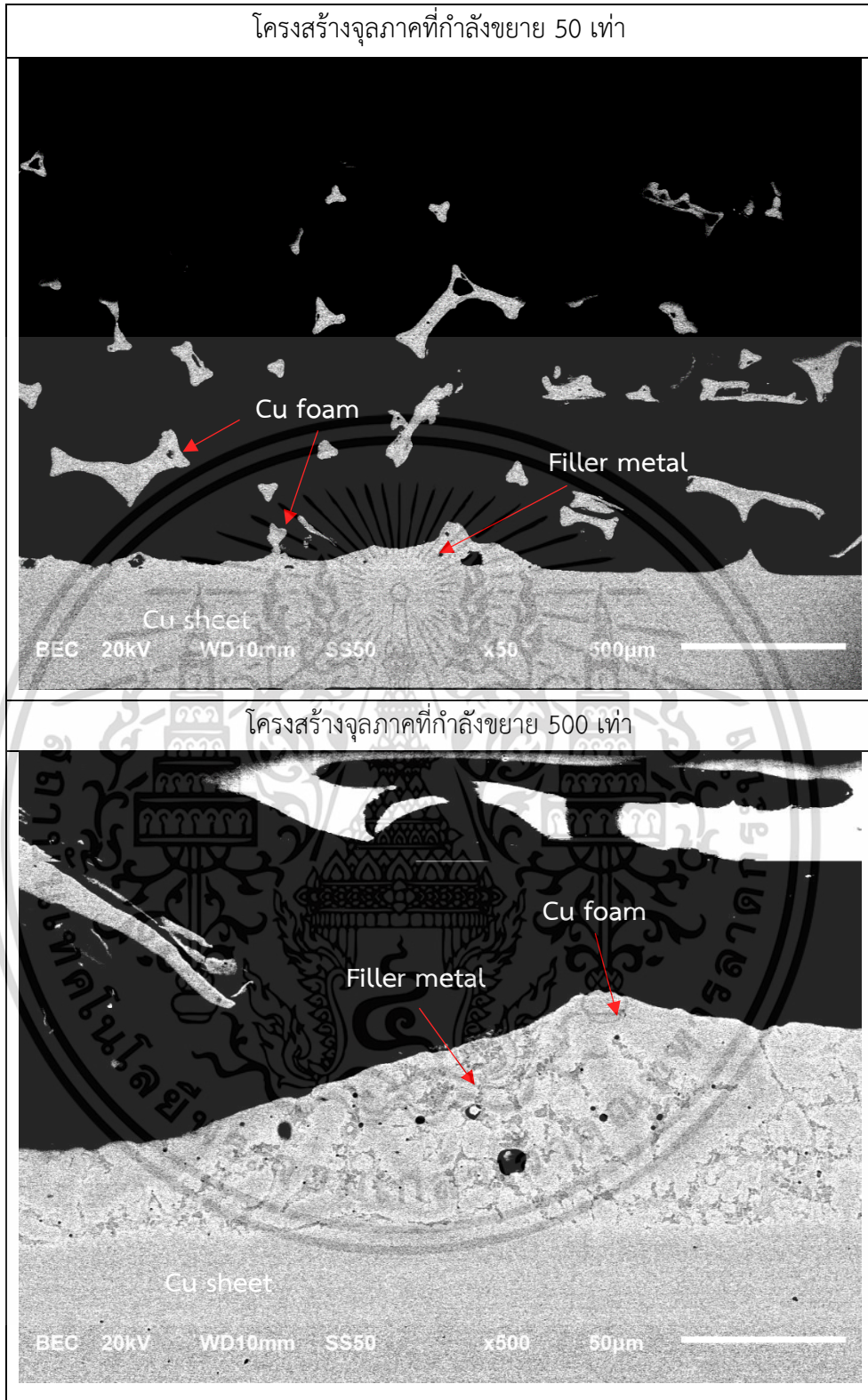


รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 679.5 A ที่เวลา 0.9 วินาทีที่กำลังขยาย 50 เท่า และ 500 เท่า

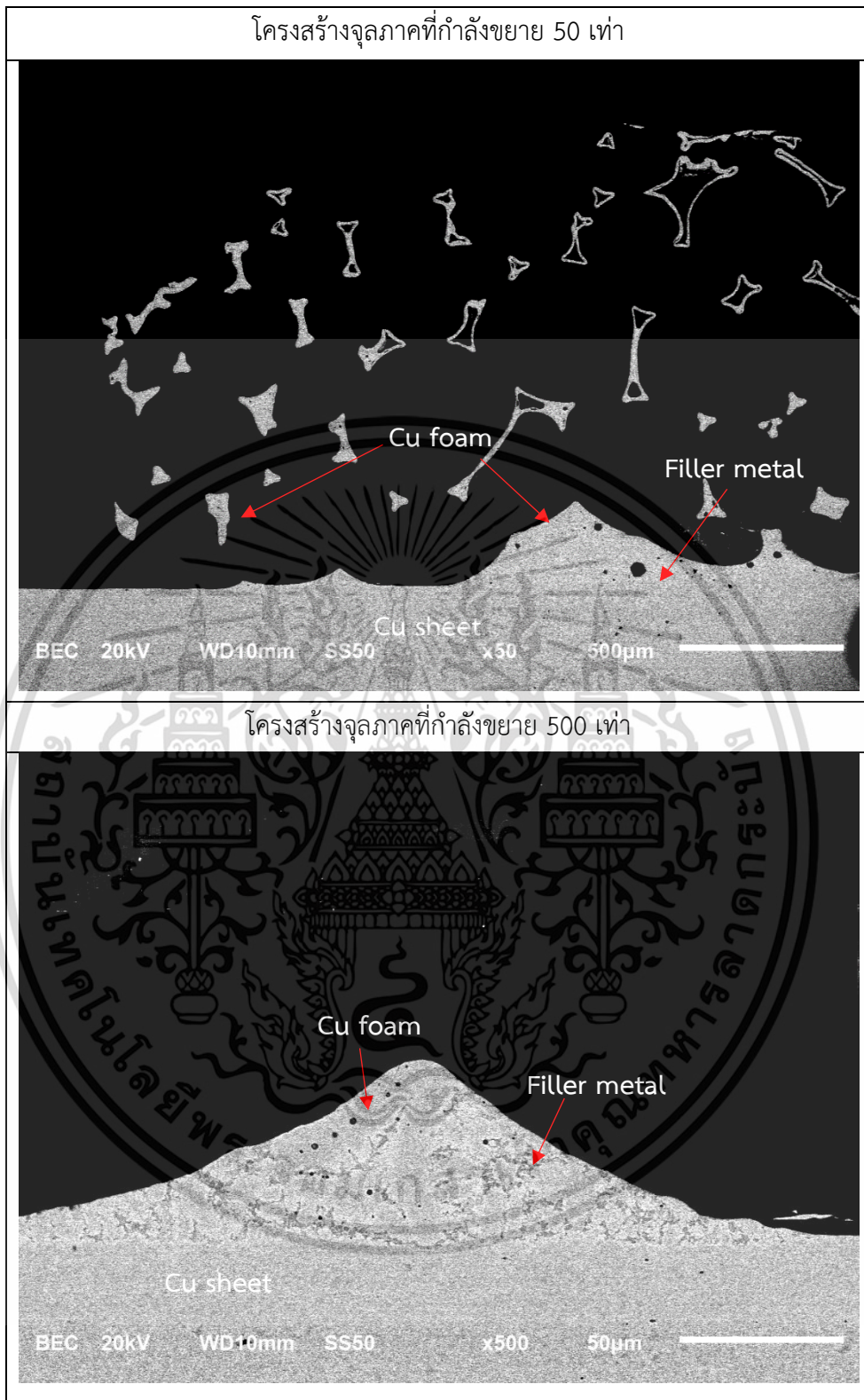
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



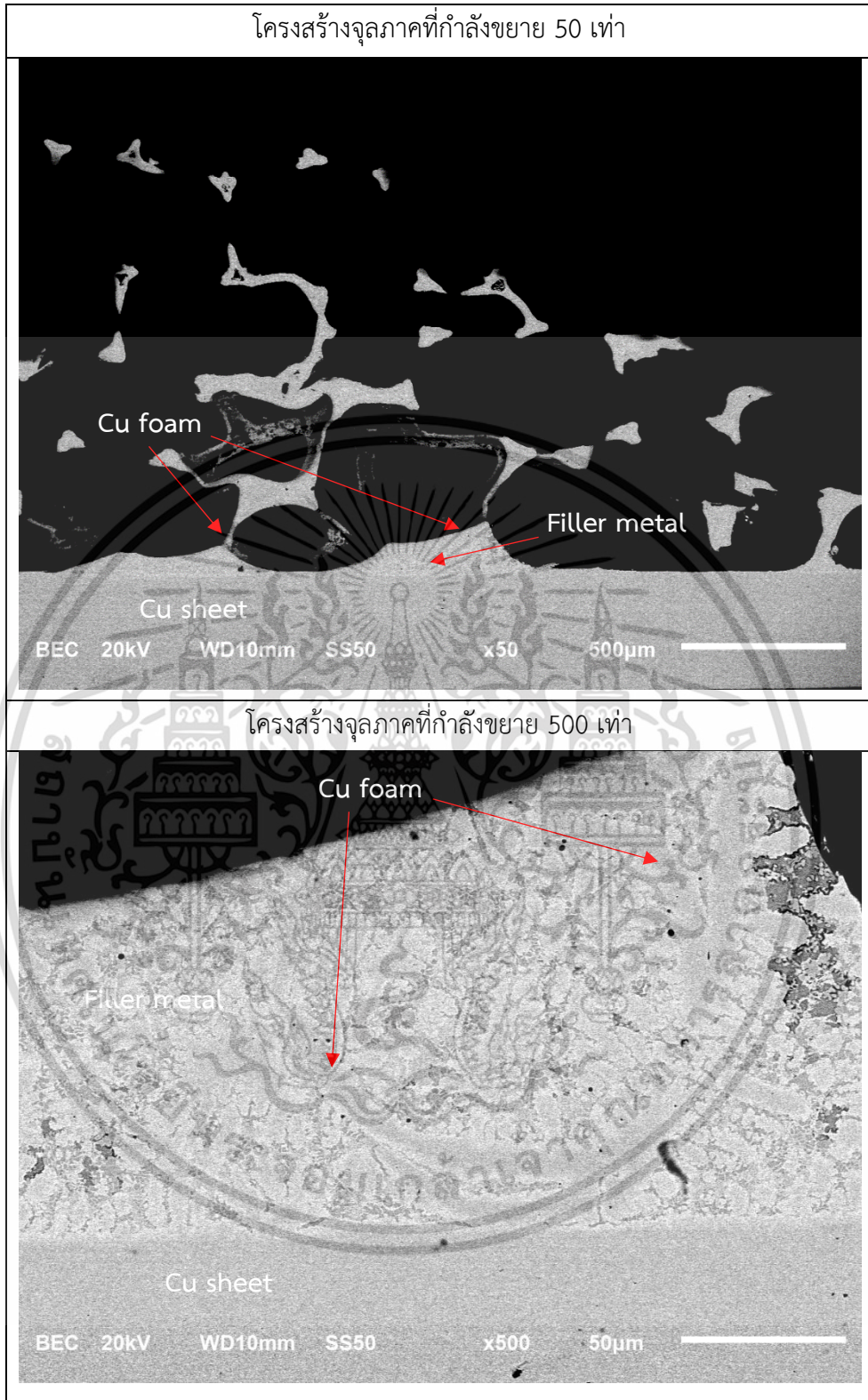
รูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 679.5 A ที่เวลา 1 วินาที  
ที่กำลังขยาย 50 เท่า และ 500 เท่า



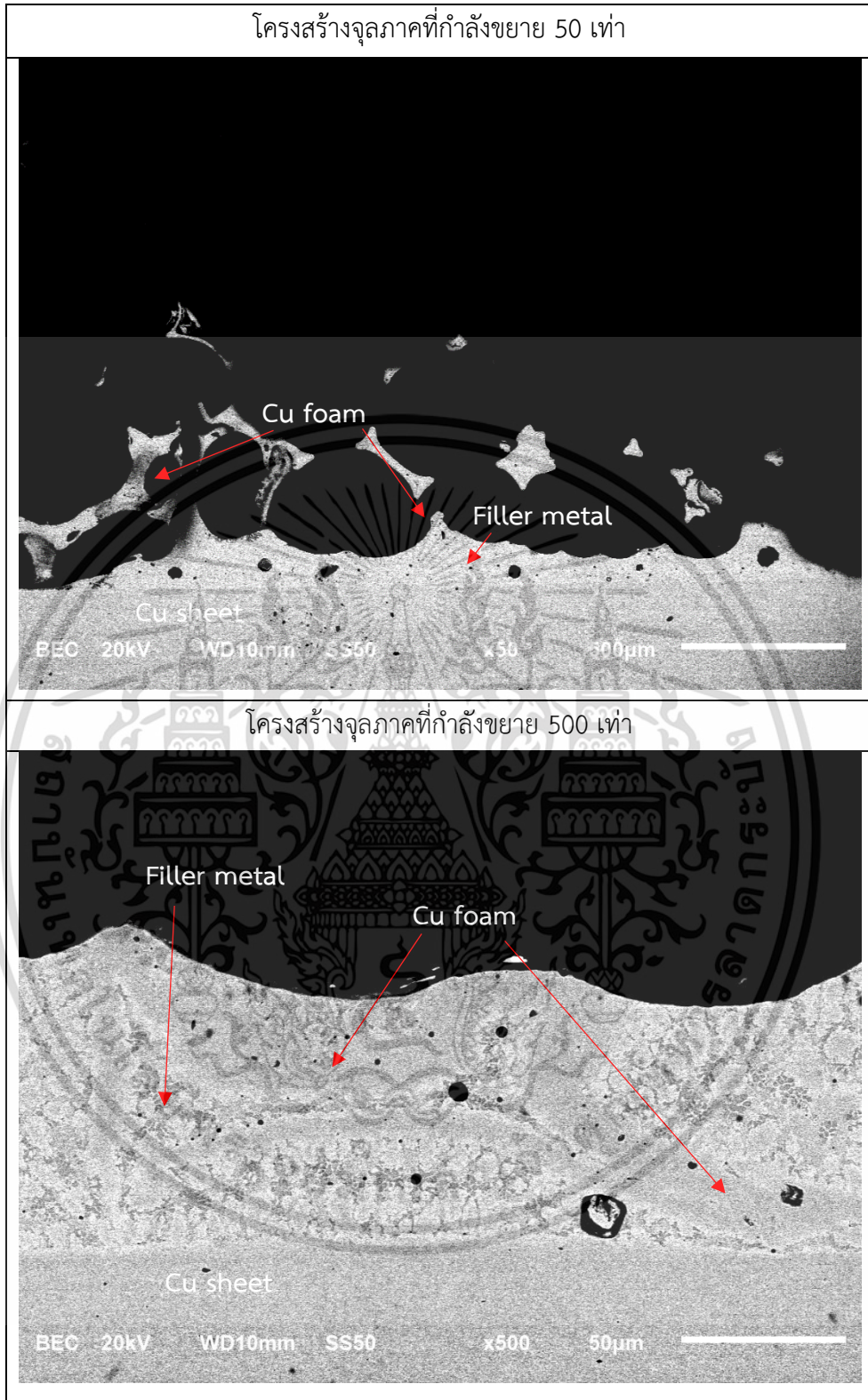
รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 679.5 A ที่เวลา 1.1 วินาที  
ที่กำลังขยาย 50 เท่า และ 500 เท่า



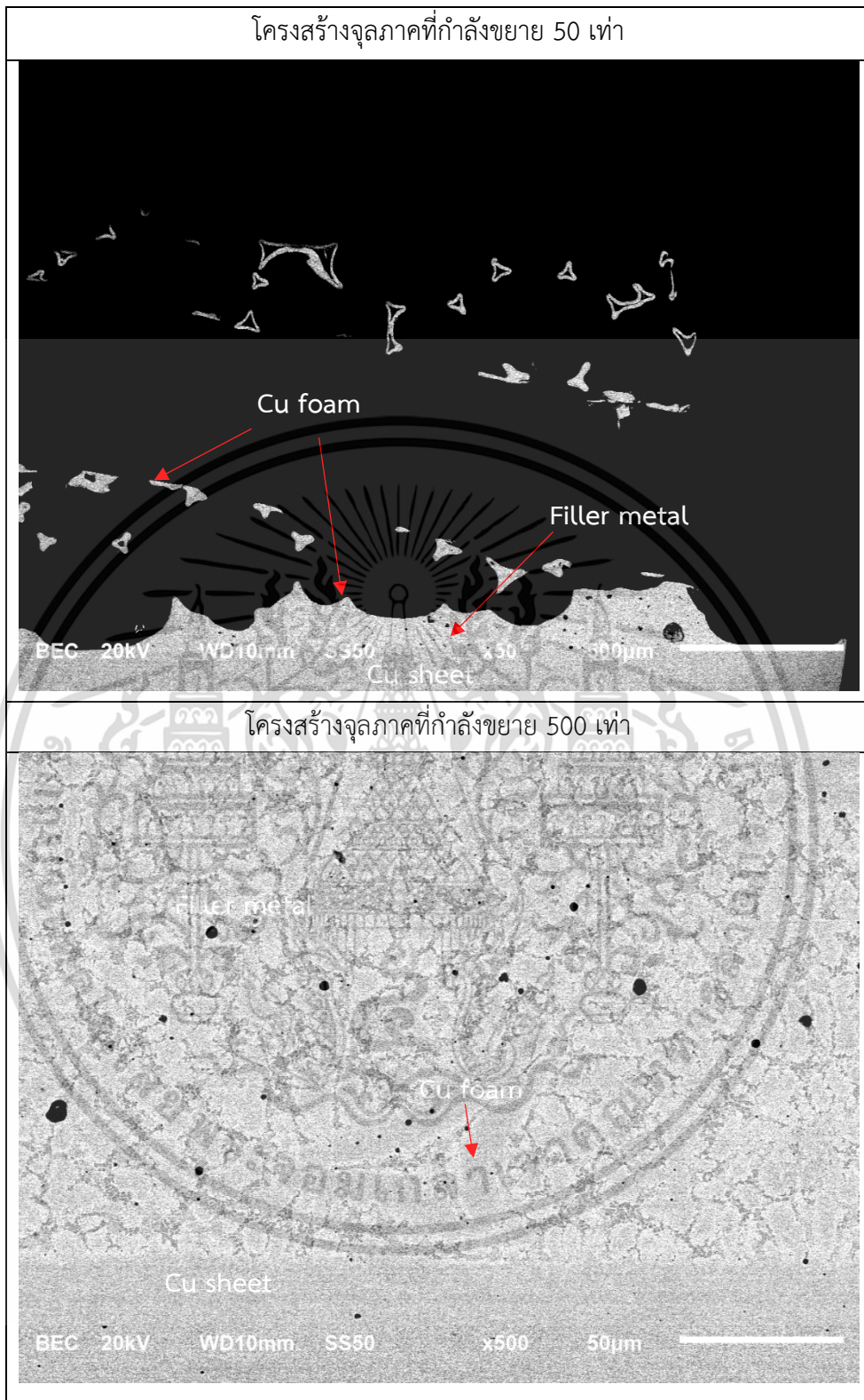
รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A ที่เวลา 0.8 วินาที  
ที่กำลังขยาย 50 เท่า และ 500 เท่า



รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A ที่เวลา 0.9 วินาที  
ที่กำลังขยาย 50 เท่า และ 500 เท่า



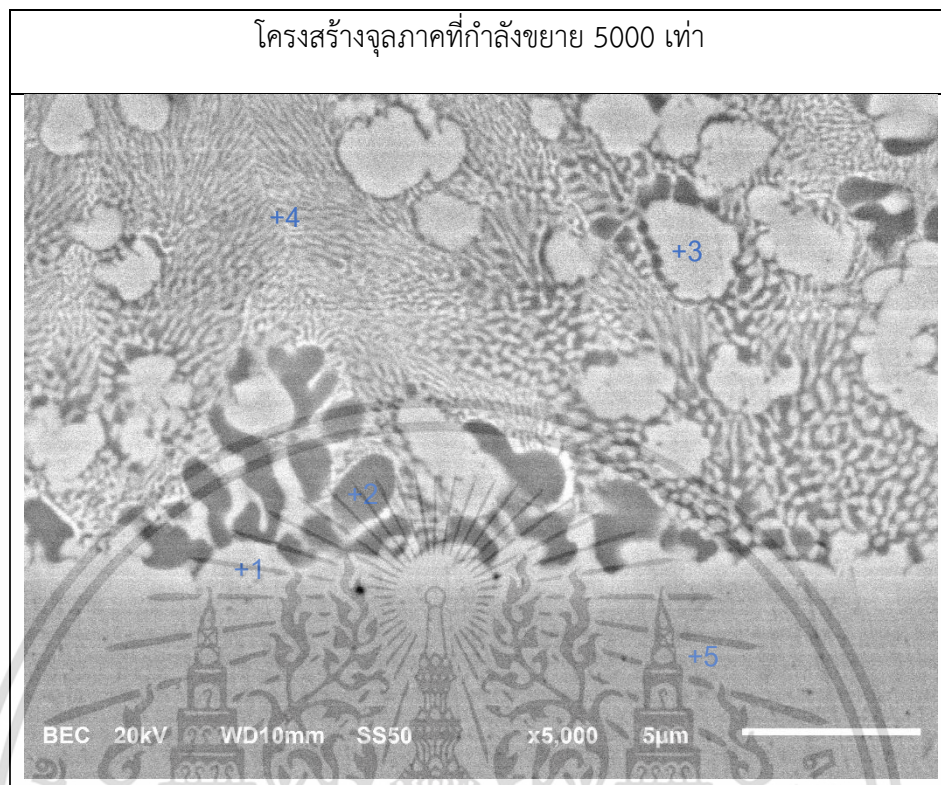
รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A ที่เวลา 1 วินาที  
ที่กำลังขยาย 50 เท่า และ 500 เท่า



รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A ที่เวลา 1.1 วินาที  
ที่กำลังขยาย 50 เท่า และ 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

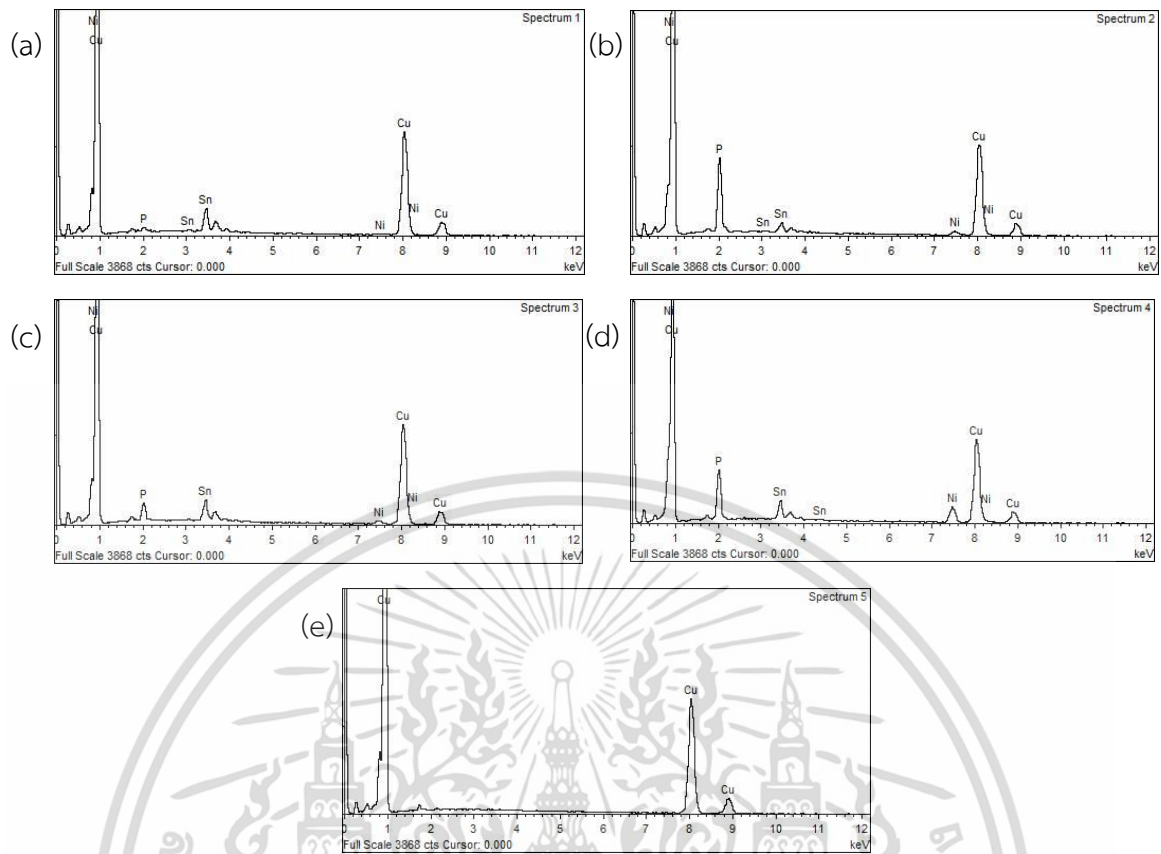
#### 4.2.1 ชิ้นงานภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 0.9 วินาที



รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานกับแผ่นทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 0.9 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

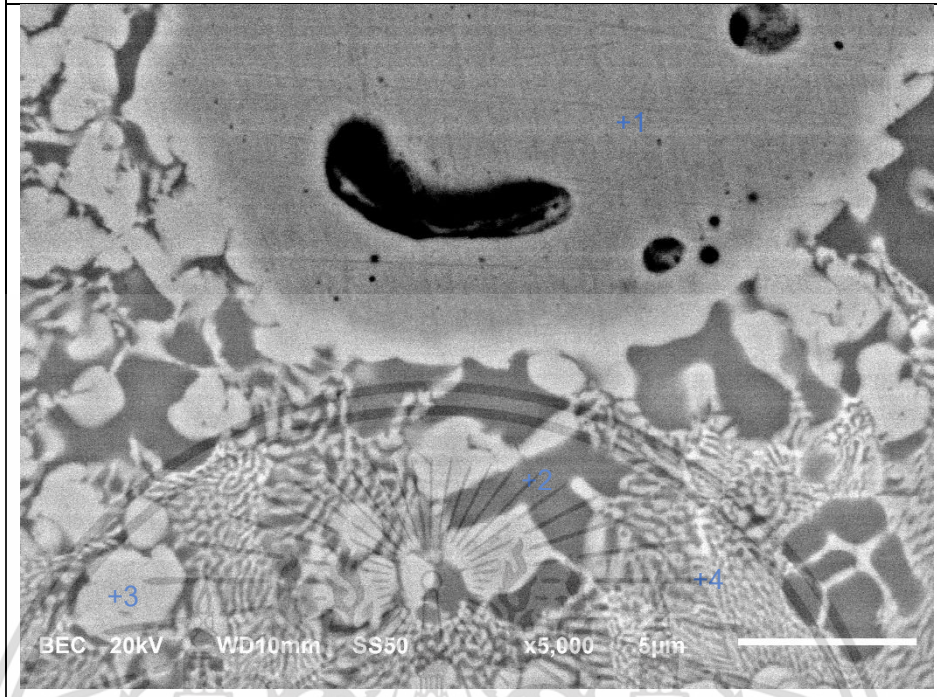
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานกับแผ่นทองแดง ภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 0.9 วินาที

ตำแหน่ง	องค์ประกอบทางเคมี								Possible Phase
	Cu		Ni		Sn		P		
	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	
1	87.21	91.26	0.40	0.46	11.54	6.47	0.85	1.82	Cu-rich
2	79.04	70.17	2.52	2.42	4.59	2.18	13.85	25.23	Cu <sub>3</sub> P
3	84.59	85.04	2.21	2.41	9.62	5.18	3.58	7.38	Cu-rich
4	71.44	66.71	9.98	10.08	8.76	4.38	9.83	18.82	(Cu,Ni) <sub>3</sub> P
5	100	100	-	-	-	-	-	-	Cu



รูปที่ 4.17 สเปกตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติม  
 ชนิดออสตีไนต์กับแผ่นทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 0.9 วินาที (a) ตำแหน่งที่ 1  
 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่งที่ 5

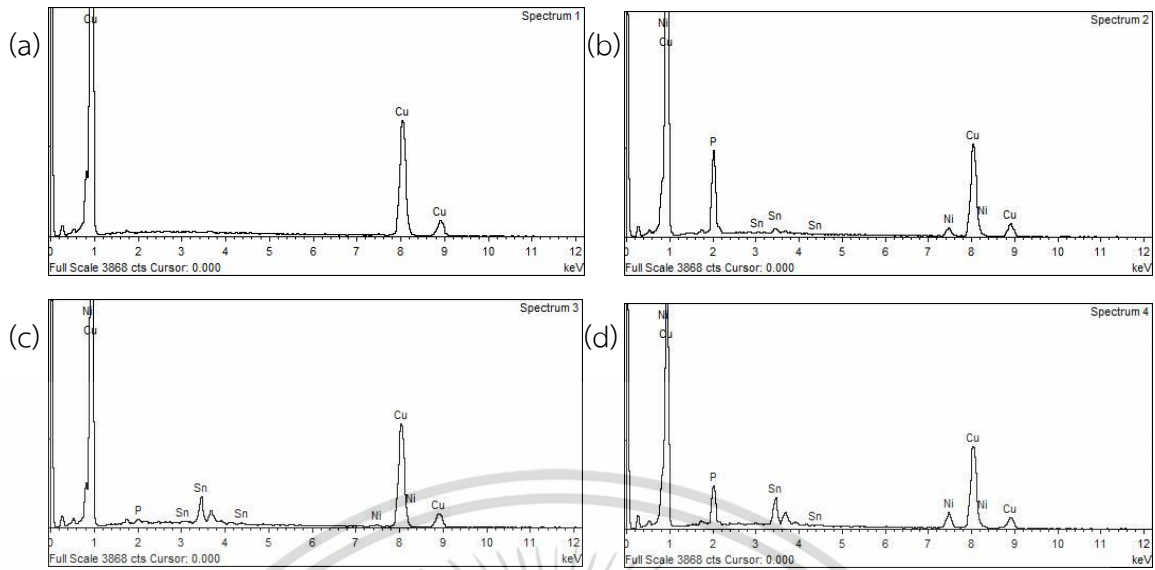
โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 5000 เท่า



รูปที่ 4.18 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานกับโพลีเมอร์ภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 0.9 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

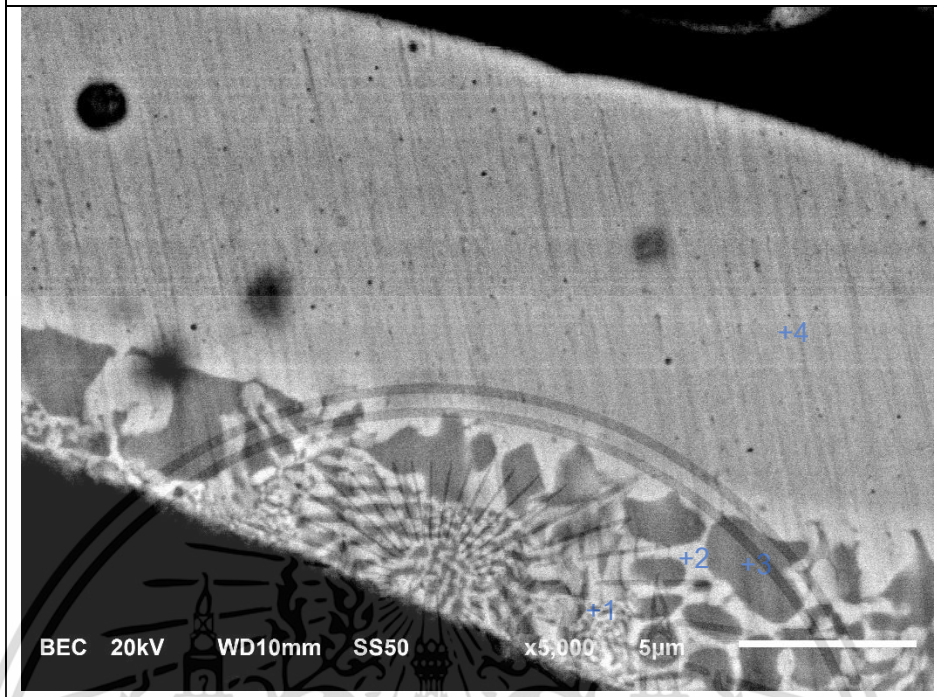
ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานกับโพลีเมอร์ภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 0.9 วินาที

ตำแหน่ง	องค์ประกอบทางเคมี								Possible Phase
	Cu		Ni		Sn		P		
	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	
1	100	100	-	-	-	-	-	-	Cu
2	77.00	66.66	5.13	4.80	2.43	1.13	15.43	27.41	(Cu,Ni) <sub>3</sub> P
3	86.36	90.64	0.84	0.95	12.03	6.76	0.76	1.65	Cu-rich
4	69.61	67.74	9.12	9.61	13.43	7.00	7.84	15.66	Cu <sub>3</sub> P



รูปที่ 4.19 สเปกตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติม  
 ชนิดออสถินฐานกับโพลีเมทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 0.9 วินาที (a) ตำแหน่งที่ 1  
 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4

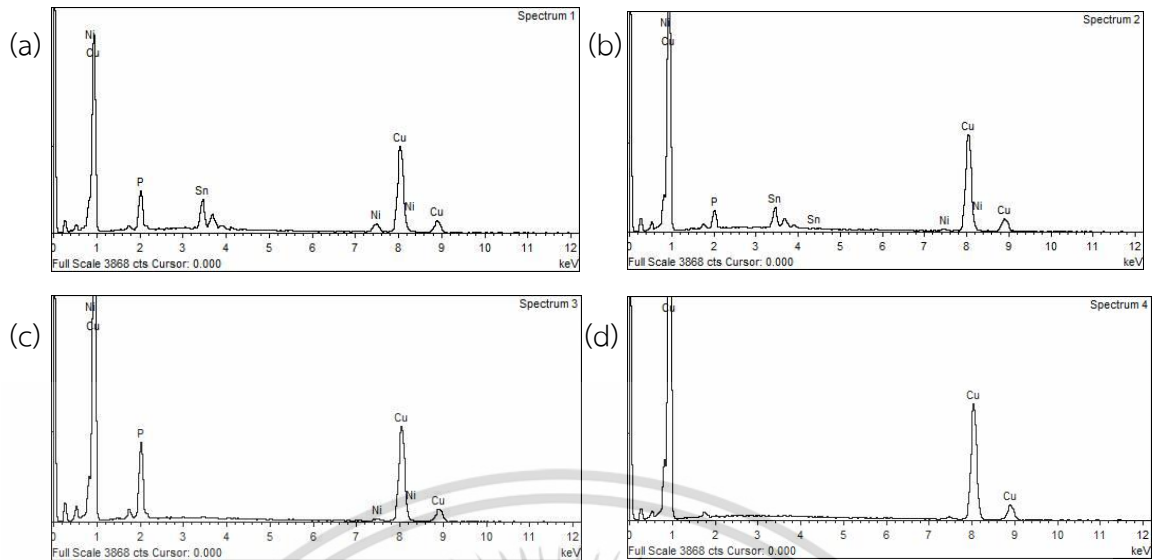
โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 5000 เท่า



รูปที่ 4.20 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานกับโพลีโพรพิลีนภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 0.9 วินาที ที่บริเวณด้านบนของชิ้นงาน ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

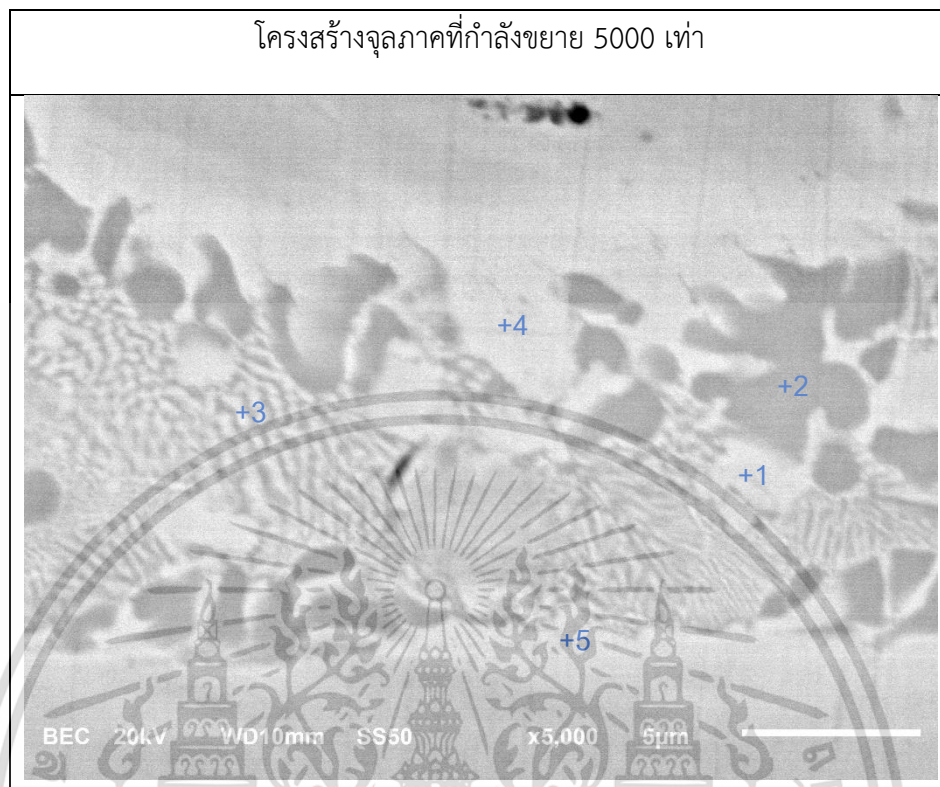
ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานกับโพลีโพรพิลีนภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 0.9 วินาที ที่บริเวณด้านบนของชิ้นงาน

ตำแหน่ง	องค์ประกอบทางเคมี								Possible Phase
	Cu		Ni		Sn		P		
	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	
1	72.71	71.74	5.04	5.38	14.81	7.82	7.44	15.05	(Cu,Ni) <sub>3</sub> P
2	84.76	85.34	1.38	1.51	10.14	5.46	3.72	7.69	Cu-rich
3	83.67	72.24	1.38	1.29	-	-	14.95	26.48	Cu <sub>3</sub> P
4	100	100	-	-	-	-	-	-	Cu



รูปที่ 4.21 สเปกตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดออสตีไนต์กับโพลีเอทิลีนภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 0.9 วินาที ที่บริเวณด้านบนของชิ้นงาน (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4

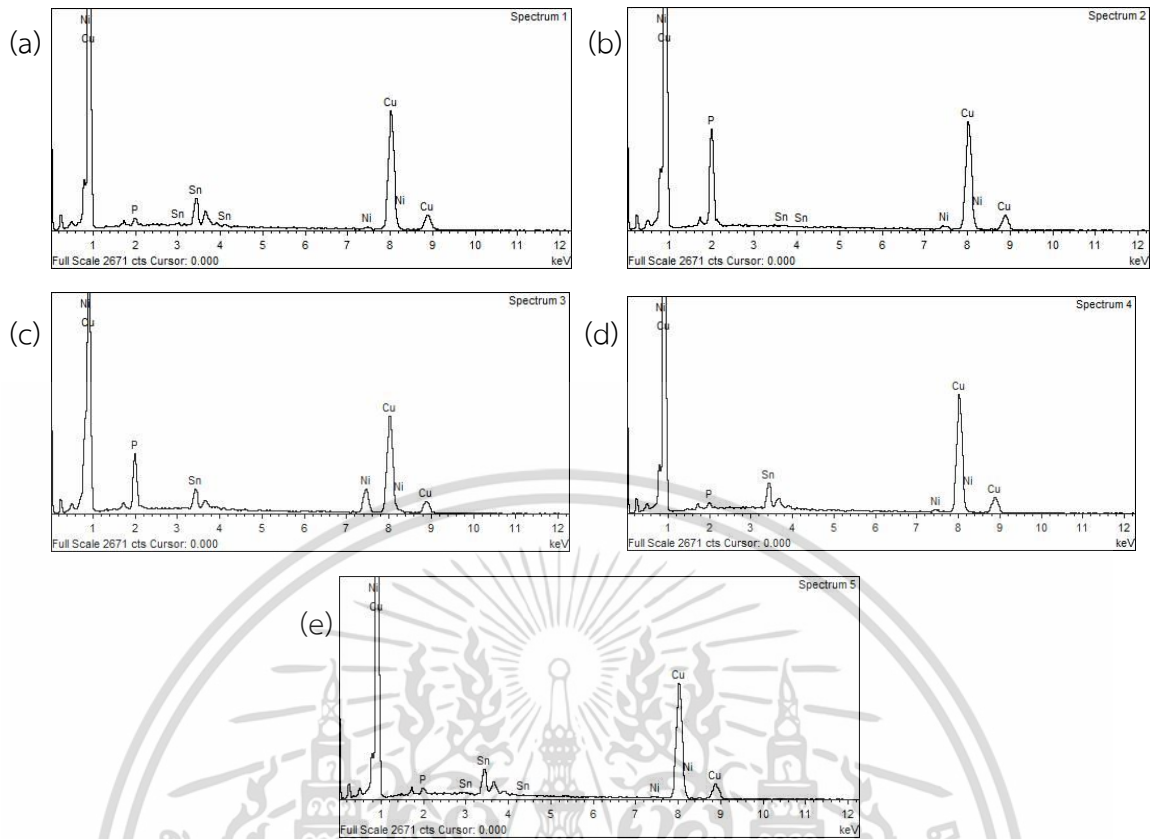
#### 4.2.2 ชิ้นงานภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 1 วินาที



รูปที่ 4.22 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดออสตริตฐาน แผ่นทองแดงและโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 1 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

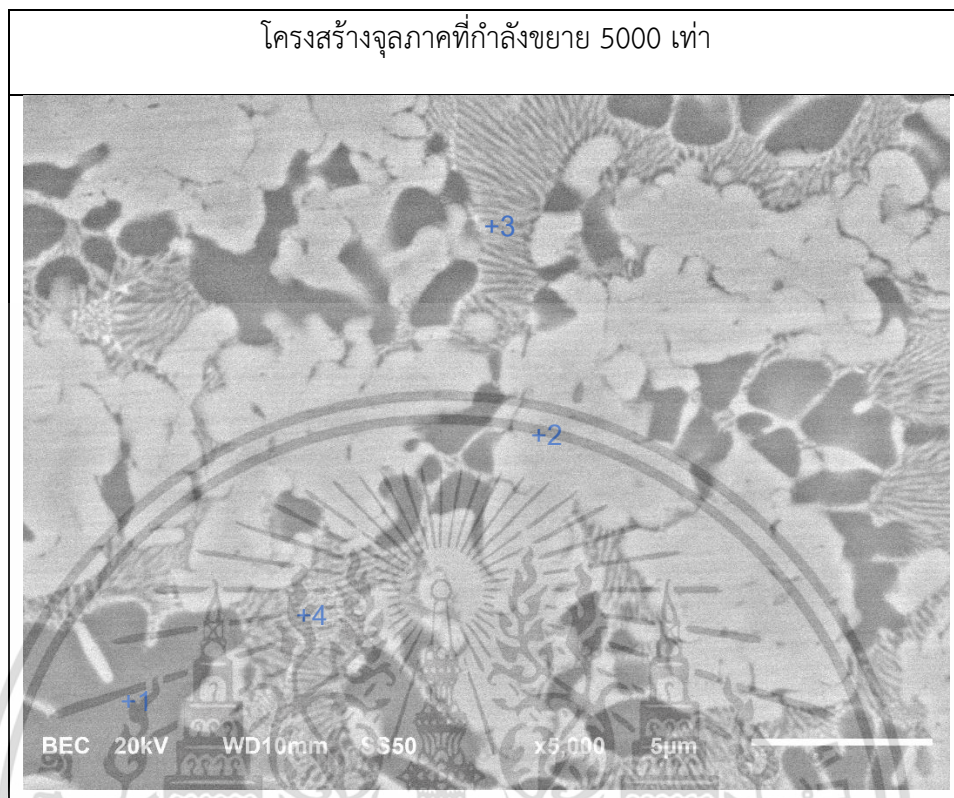
ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดออสตริตฐาน แผ่นทองแดงและโพลีทองแดง ภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 1 วินาที

ตำแหน่ง	องค์ประกอบทางเคมี								Possible Phase
	Cu		Ni		Sn		P		
	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	
1	86.02	89.58	1.18	1.32	11.57	6.45	1.24	2.65	Cu-rich
2	81.60	69.34	1.62	1.49	0.06	0.03	16.72	29.14	Cu <sub>3</sub> P
3	69.81	65.36	13.10	13.28	8.07	4.04	9.02	17.32	(Cu,Ni) <sub>3</sub> P
4	87.12	90.73	1.07	1.21	10.87	6.06	0.94	2.00	Cu-rich
5	87.34	90.76	0.70	0.79	10.81	6.01	1.14	2.43	Cu-rich



รูปที่ 4.23 สเปกตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติม  
 ชนิดอสังฐาน แผ่นทองแดงและโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 1 วินาที  
 (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่งที่ 5

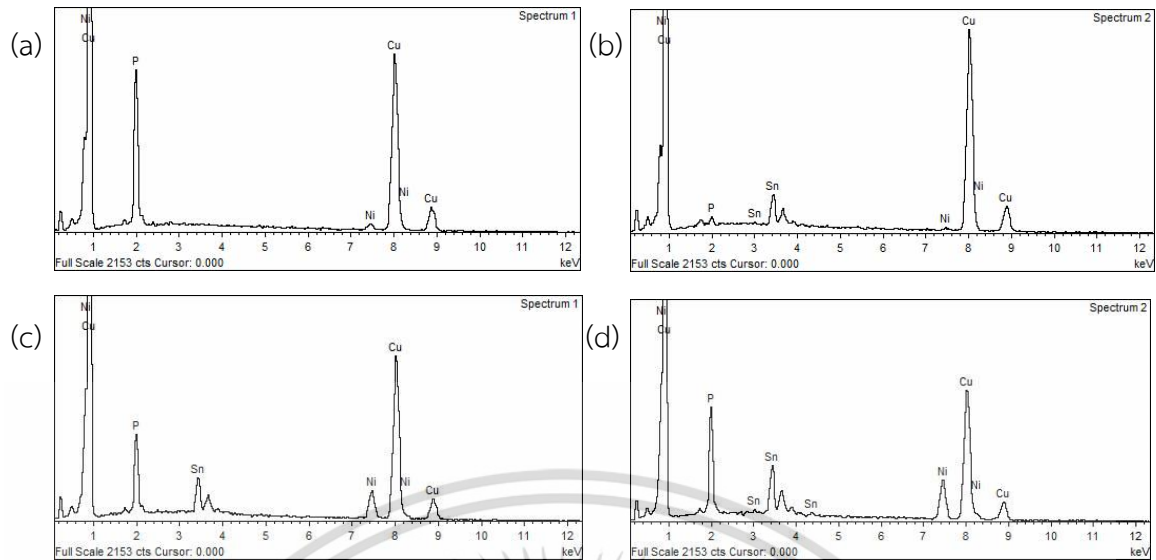
#### 4.2.3 ชิ้นงานภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 1.1 วินาที



รูปที่ 4.24 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 1.1 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

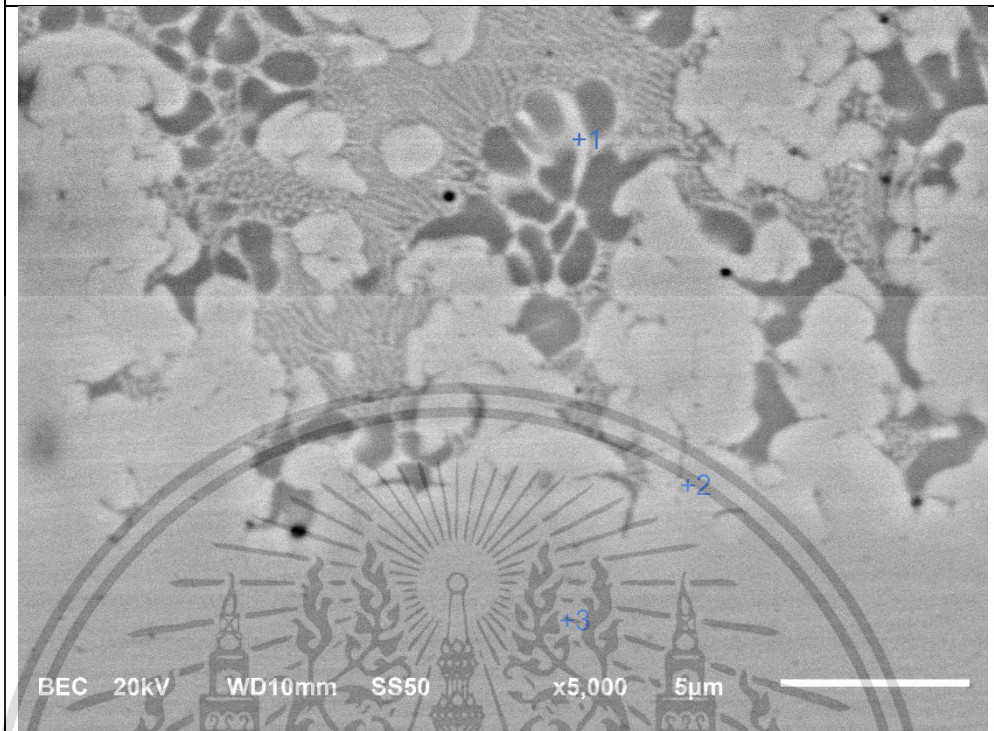
ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐาน ภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 1.1 วินาที

ตำแหน่ง	องค์ประกอบทางเคมี								Possible Phase
	Cu		Ni		Sn		P		
	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	
1	81.59	69.59	2.17	2.01	-	-	16.24	28.41	Cu <sub>3</sub> P
2	90.25	92.85	0.83	0.92	8.08	4.45	0.84	1.78	Cu-rich
3	73.41	69.95	9.39	9.68	9.17	4.68	8.03	15.69	(Cu,Ni) <sub>3</sub> P
4	62.27	58.58	13.93	14.18	13.10	6.60	10.70	20.64	(Cu,Ni) <sub>3</sub> P



รูปที่ 4.25 สเปคตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเดิม ชนิดอสัณฐานภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 1.1 วินาที (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4

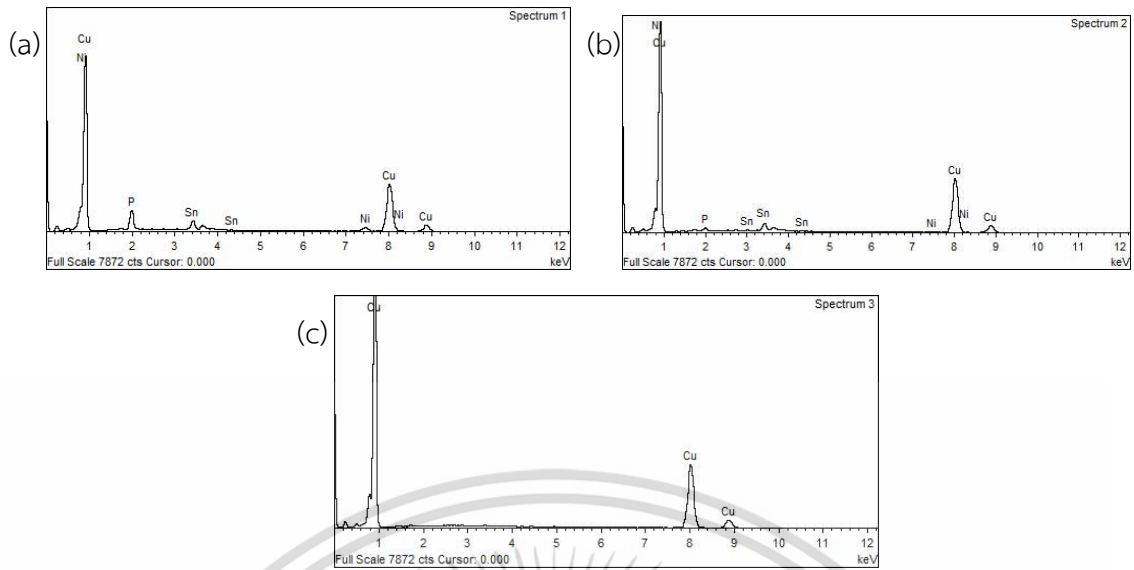
โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 5000 เท่า



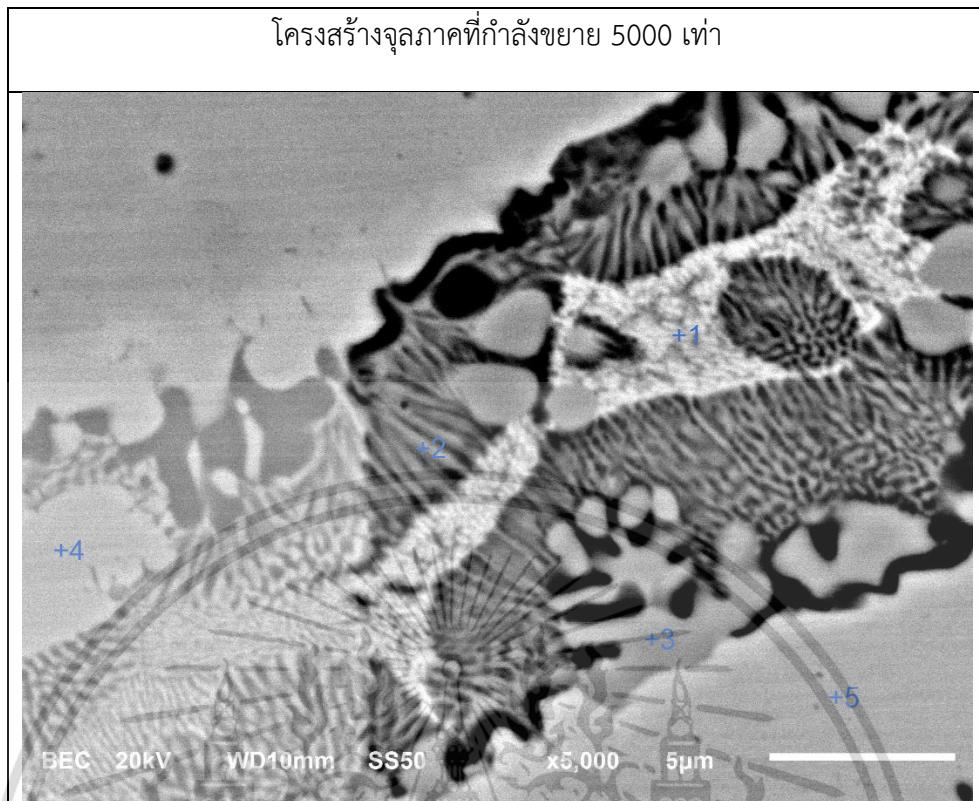
รูปที่ 4.26 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานกับแผ่นทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 1.1 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

ตารางที่ 4.7 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานกับแผ่นทองแดง ภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 1.1 วินาที

ตำแหน่ง	องค์ประกอบทางเคมี								Possible Phase
	Cu		Ni		Sn		P		
	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	
1	79.16	75.87	4.78	4.96	8.53	4.38	7.52	14.79	Cu <sub>3</sub> P
2	90.74	92.74	0.72	0.79	7.39	4.04	1.16	2.43	Cu-rich
3	100.00	100.00	-	-	-	-	-	-	Cu



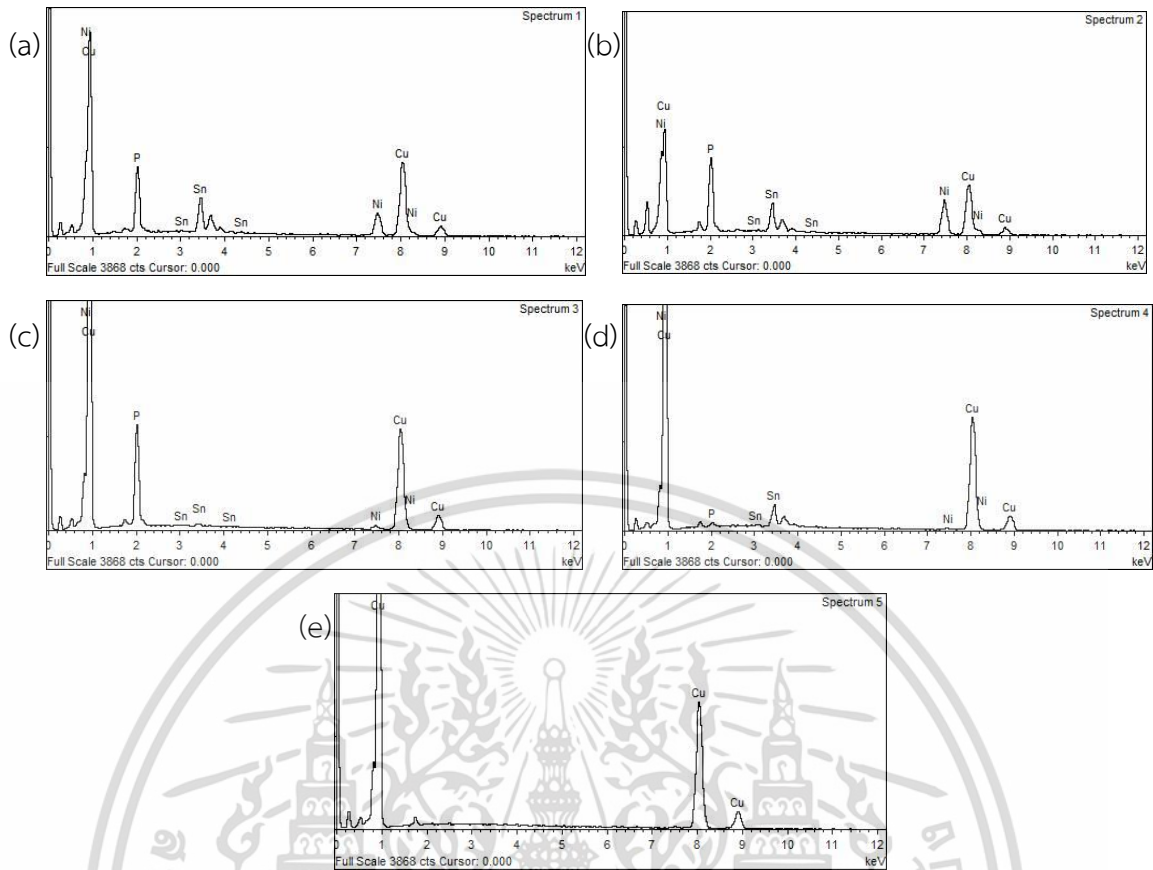
รูปที่ 4.27 สเปกตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติม  
 ชนิดออสถินฐานกับแผ่นทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 1.1 วินาที (a) ตำแหน่งที่ 1  
 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3



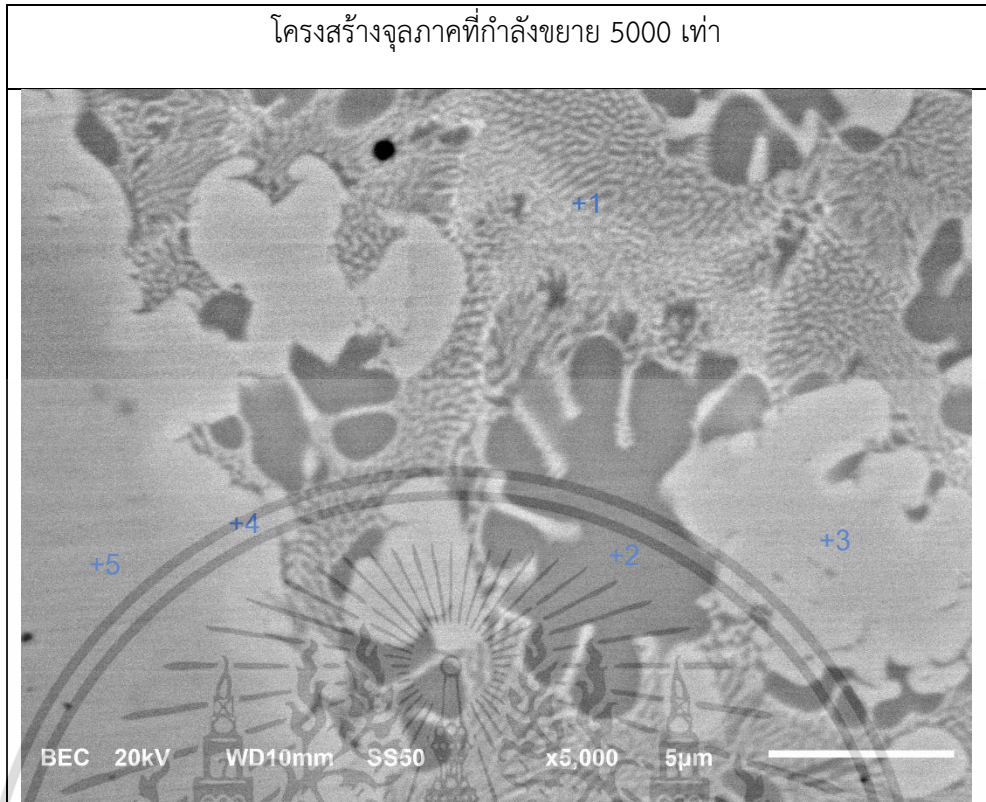
รูปที่ 4.28 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานกับโพลีเมทอลภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 1.1 วินาที ที่บริเวณด้านบนของชิ้นงาน ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

ตารางที่ 4.8 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานกับโพลีเมทอลภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 1.1 วินาที ที่บริเวณด้านบนของชิ้นงาน

ตำแหน่ง	องค์ประกอบทางเคมี								Possible Phase
	Cu		Ni		Sn		P		
	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	
1	58.43	55.23	14.07	14.40	16.02	8.11	11.48	22.27	(Cu,Ni) <sub>3</sub> P
2	46.67	42.22	24.01	23.51	14.67	7.10	14.64	27.17	(Cu,Ni) <sub>2</sub> P
3	79.69	67.40	1.91	1.75	0.84	0.38	17.56	30.47	Cu <sub>3</sub> P
4	89.54	92.87	0.62	0.70	9.23	5.12	0.62	1.31	Cu-rich
5	100.00	100.00	-	-	-	-	-	-	Cu



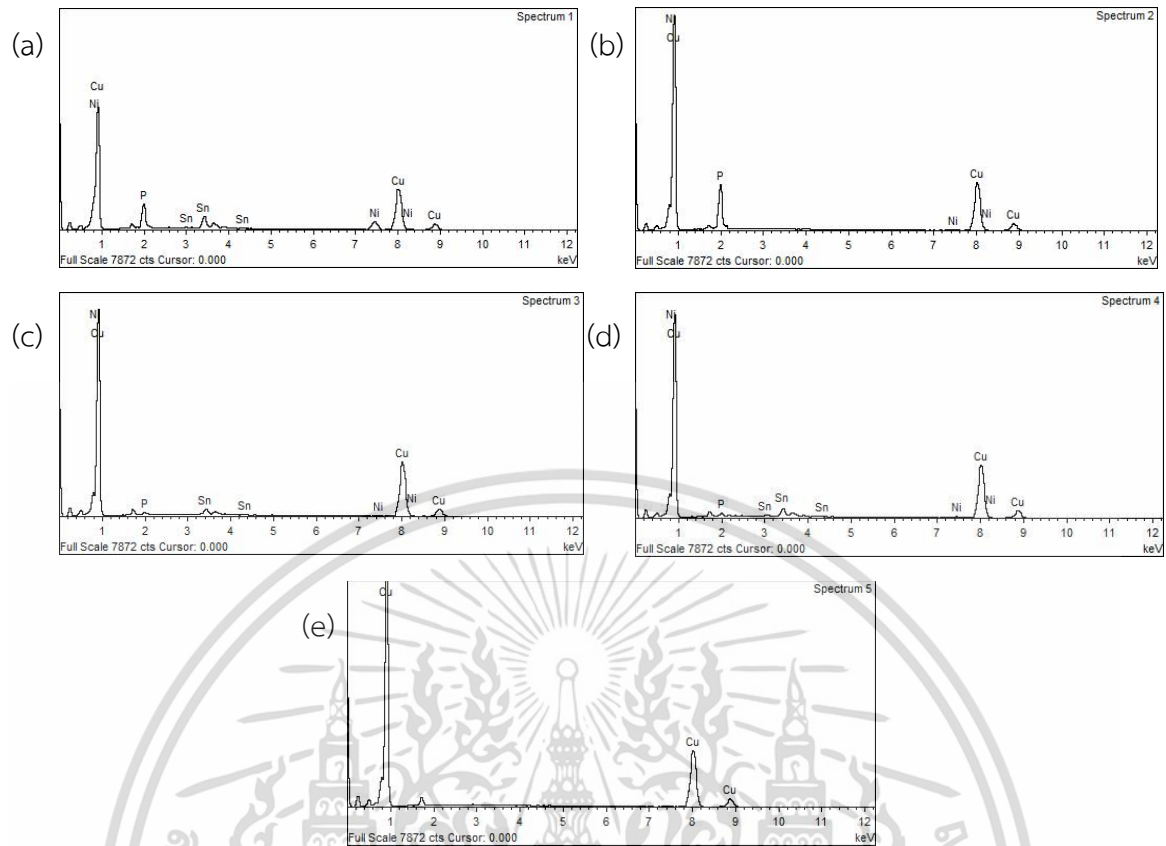
รูปที่ 4.29 สเปกตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสังฐานกับฟิมทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 1.1 วินาที ที่บริเวณด้านบนของชิ้นงาน (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่งที่ 5



รูปที่ 4.30 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานที่แทรกในโฟมทองแดง ภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 1.1 วินาที ที่บริเวณด้านบนของชิ้นงาน ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

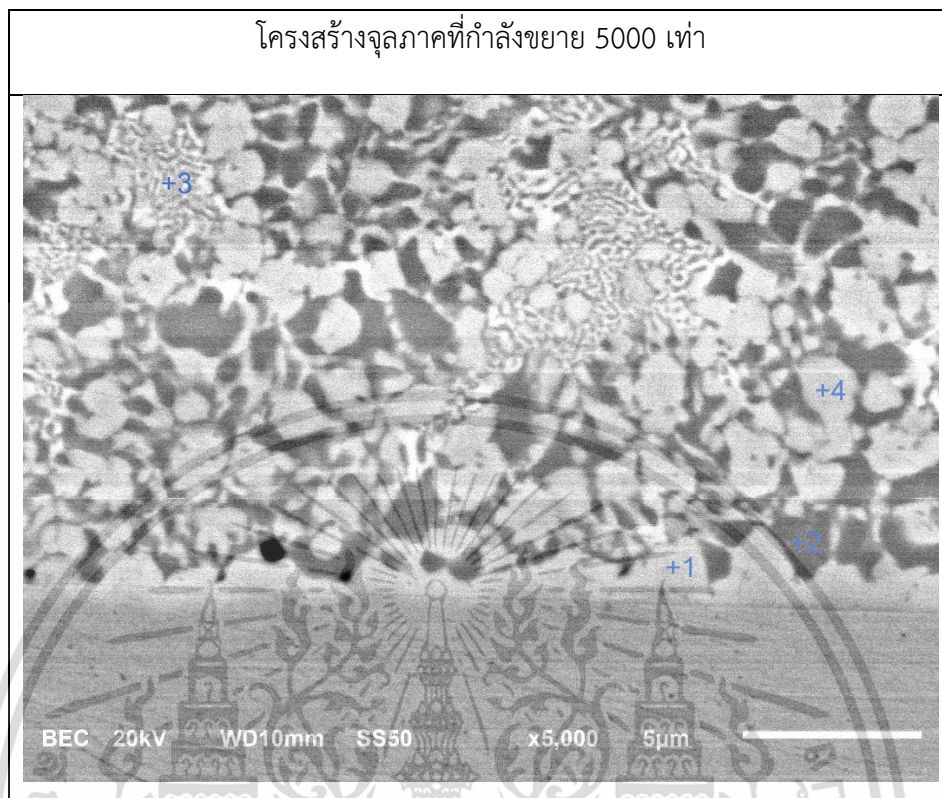
ตารางที่ 4.9 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานที่แทรกในโฟมทองแดง ที่บริเวณด้านบนของชิ้นงาน ภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 1.1 วินาที

ตำแหน่ง	องค์ประกอบทางเคมี								Possible Phase
	Cu		Ni		Sn		P		
	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	
1	70.11	66.53	10.05	10.32	10.76	5.46	9.09	17.69	(Cu,Ni) <sub>3</sub> P
2	81.97	69.56	1.14	1.05	-	-	16.88	29.39	Cu <sub>3</sub> P
3	92.88	94.77	0.48	0.53	5.94	3.24	0.69	1.45	Cu-rich
4	89.85	91.59	1.39	1.53	7.41	4.04	1.36	2.84	Cu-rich
5	100.00	100.00	-	-	-	-	-	-	Cu



รูปที่ 4.31 สเปกตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติม  
 ชนิดอสังฐานที่แทรกในโคมทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 232.5 A เวลา 1.1 วินาที ที่บริเวณ  
 ด้านบนของชิ้นงาน (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4  
 (e) ตำแหน่งที่ 5

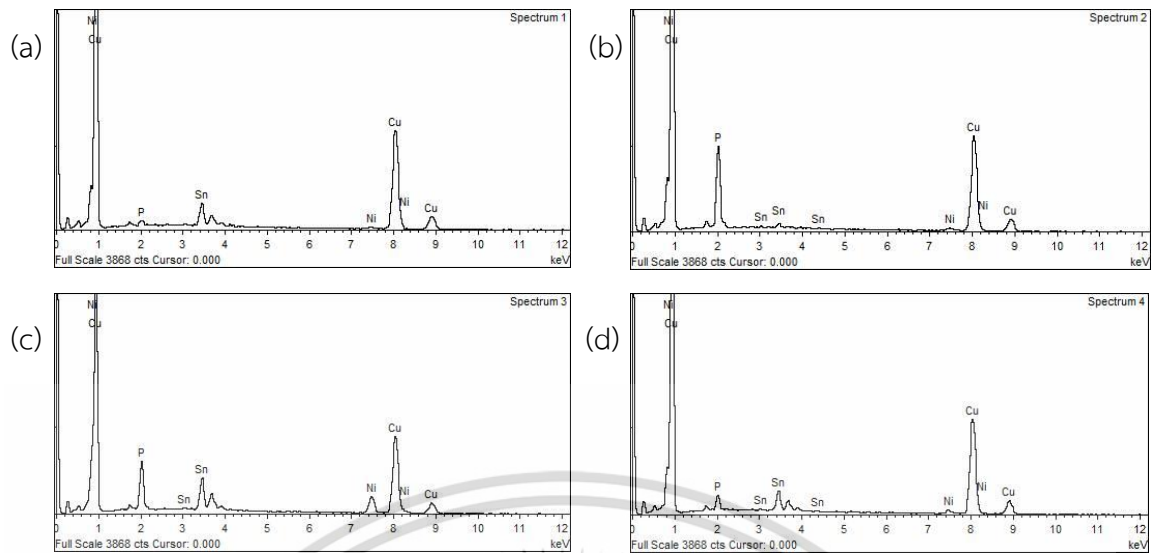
#### 4.2.4 ชิ้นงานภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 0.8 วินาที



รูปที่ 4.32 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานกับแผ่นทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 0.8 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

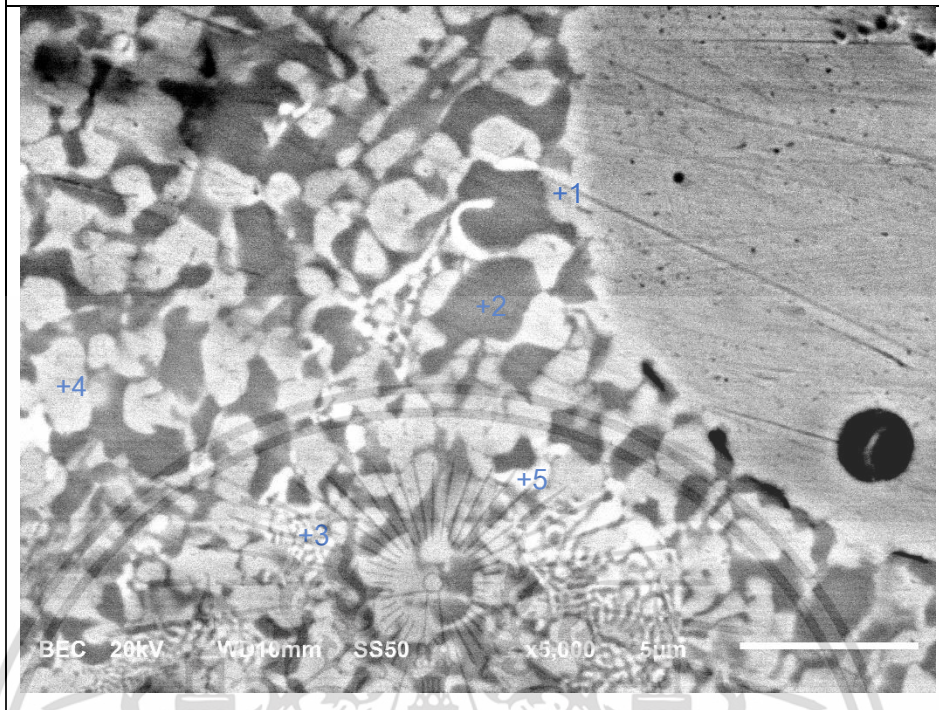
ตารางที่ 4.10 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานกับแผ่นทองแดง ภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 0.8 วินาที

ตำแหน่ง	องค์ประกอบทางเคมี								Possible Phase
	Cu		Ni		Sn		P		
	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	
1	87.13	90.61	0.68	0.76	11.03	6.14	1.16	2.48	Cu-rich
2	81.17	70.20	1.26	1.18	1.95	0.90	15.62	27.71	Cu <sub>3</sub> P
3	64.50	62.80	10.64	11.21	16.03	8.36	8.83	17.64	(Cu,Ni) <sub>3</sub> P
4	84.32	85.48	1.99	2.19	10.50	5.70	3.19	6.64	Cu-rich



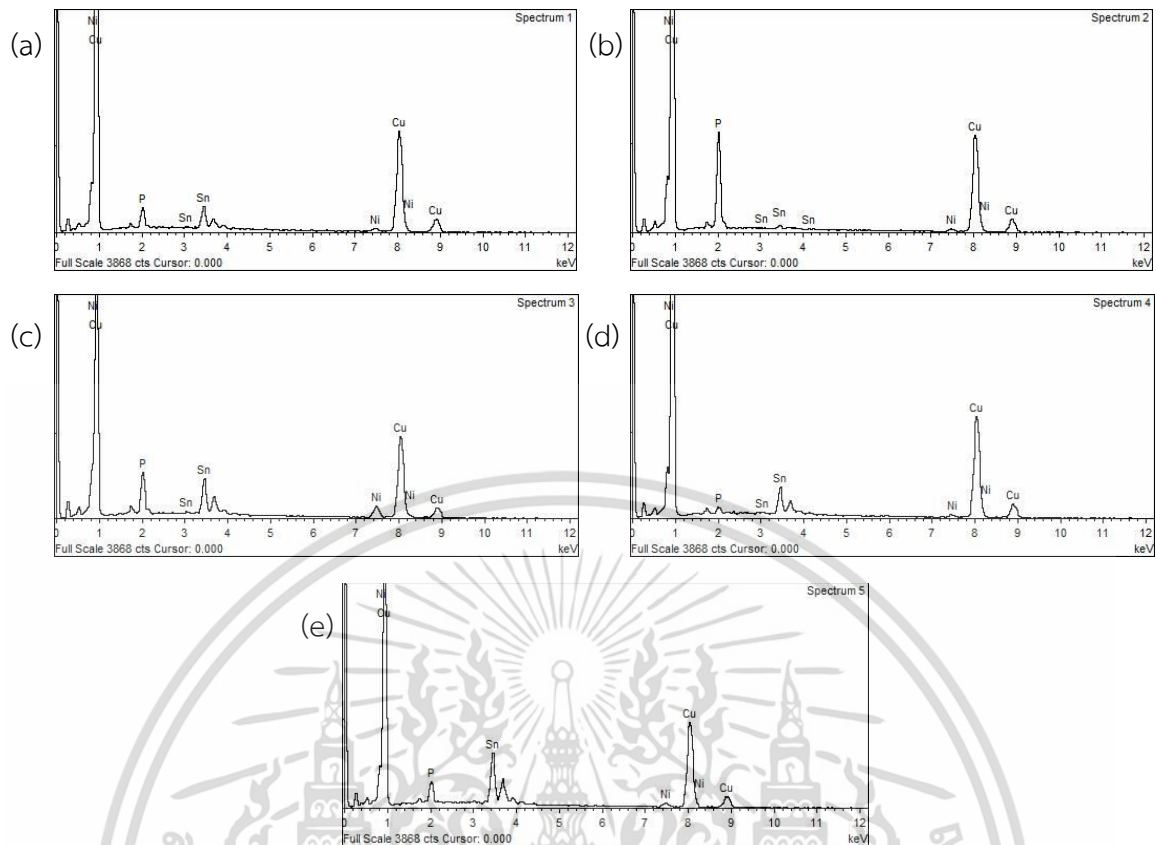
รูปที่ 4.33 สเปกตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติม  
 ชนิดอสัณฐานกับแผ่นทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 0.8 วินาที (a) ตำแหน่งที่ 1  
 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4

โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 5000 เท่า



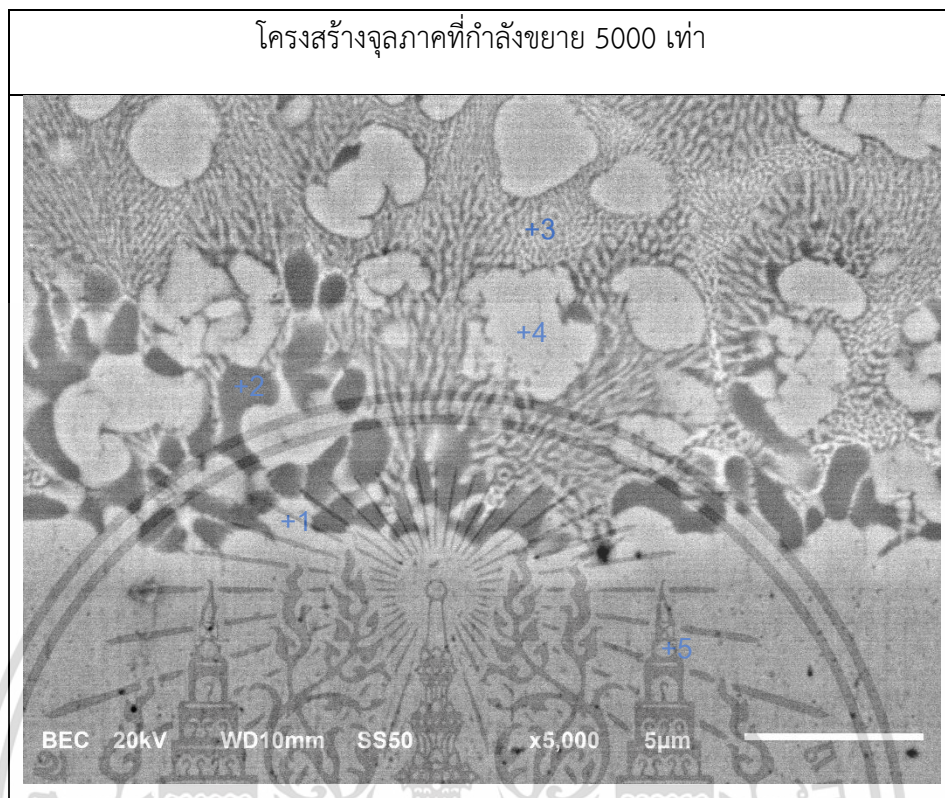
รูปที่ 4.34 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานกับโพลีโพรพิลีนภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 0.8 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ตารางที่ 4.11 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานกับโพลีโพรพิลีนภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 0.8 วินาที

ตำแหน่ง	องค์ประกอบทางเคมี								Possible Phase
	Cu		Ni		Sn		P		
	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	
1	83.80	84.35	1.84	2.01	10.50	5.66	3.86	7.98	Cu-rich
2	80.15	68.43	1.27	1.18	1.66	0.76	16.92	29.63	Cu <sub>3</sub> P
3	67.59	67.13	7.02	7.55	17.55	9.33	7.84	15.98	(Cu,Ni) <sub>3</sub> P
4	84.78	88.66	1.34	1.52	12.60	7.05	1.29	2.77	Cu-rich
5	70.34	75.14	2.31	2.68	23.29	13.32	4.05	8.87	Cu <sub>2</sub> SnP



รูปที่ 4.35 สเปกตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติม  
 ชนิดออสตีไนต์กับพุ่มทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 0.8 วินาที (a) ตำแหน่งที่ 1 (b)  
 ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่งที่ 5

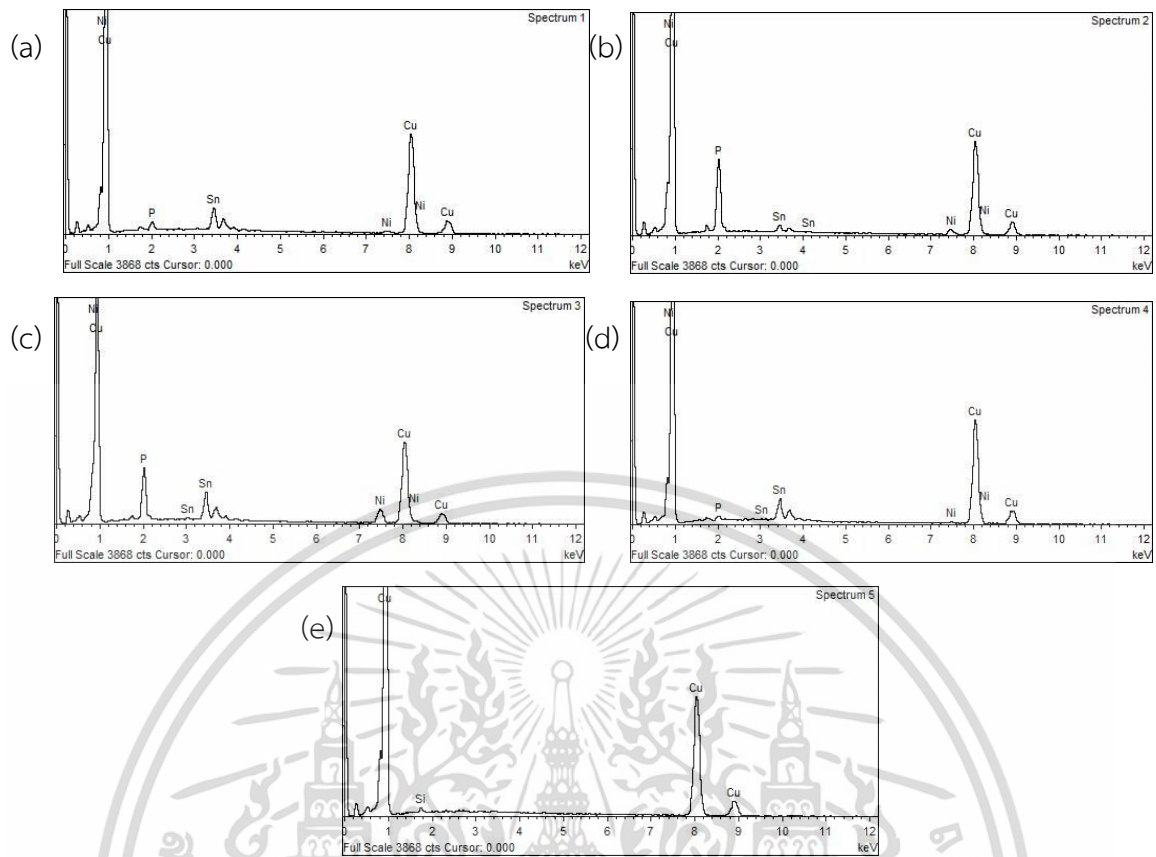
#### 4.2.5 ชั้นงานภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 0.9 วินาที



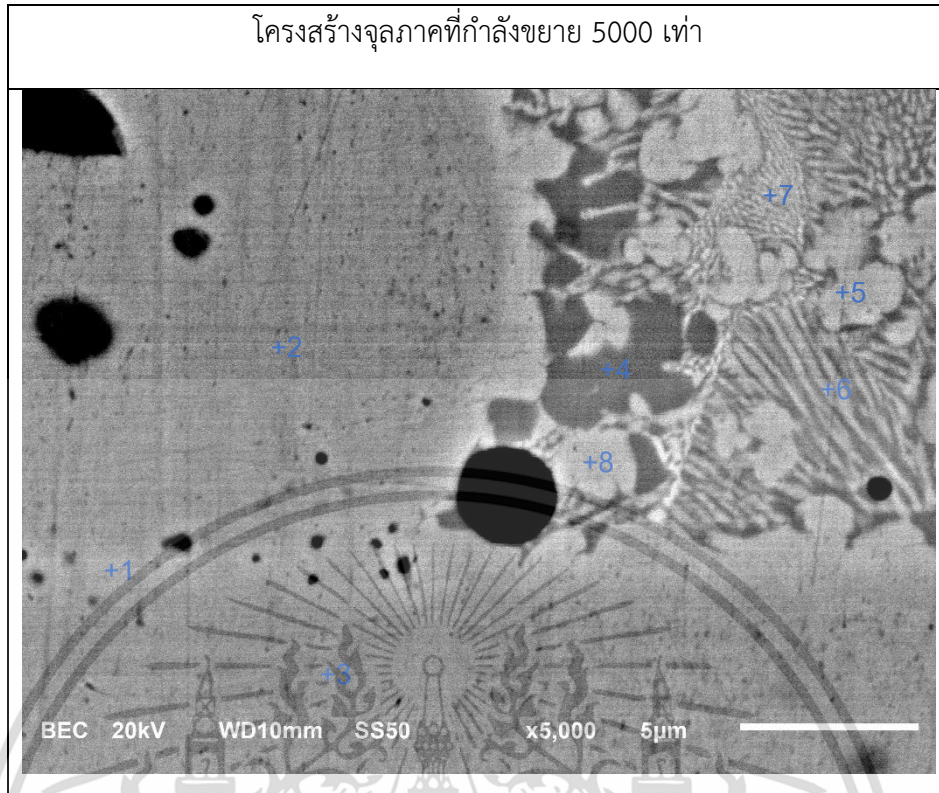
รูปที่ 4.36 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานกับแผ่นทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 0.9 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

ตารางที่ 4.12 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานกับแผ่นทองแดง ภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 0.9 วินาที

ตำแหน่ง	องค์ประกอบทางเคมี								Possible Phase
	Cu		Ni		Sn		P		
	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	
1	85.94	88.81	1.45	1.62	10.95	6.06	1.66	3.51	Cu-rich
2	79.34	69.92	3.43	3.27	3.25	1.53	13.98	25.28	Cu <sub>3</sub> P
3	68.54	65.52	8.73	9.03	13.20	6.76	9.53	18.69	(Cu,Ni) <sub>3</sub> P
4	87.95	91.41	0.97	1.09	10.23	5.69	0.85	1.81	Cu-rich
5	100	100	-	-	-	-	-	-	Cu



รูปที่ 4.37 สเปคตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเต็ม  
 ชนิดออสตีไนต์กับแผ่นทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 0.9 วินาที (a) ตำแหน่งที่ 1  
 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่งที่ 5

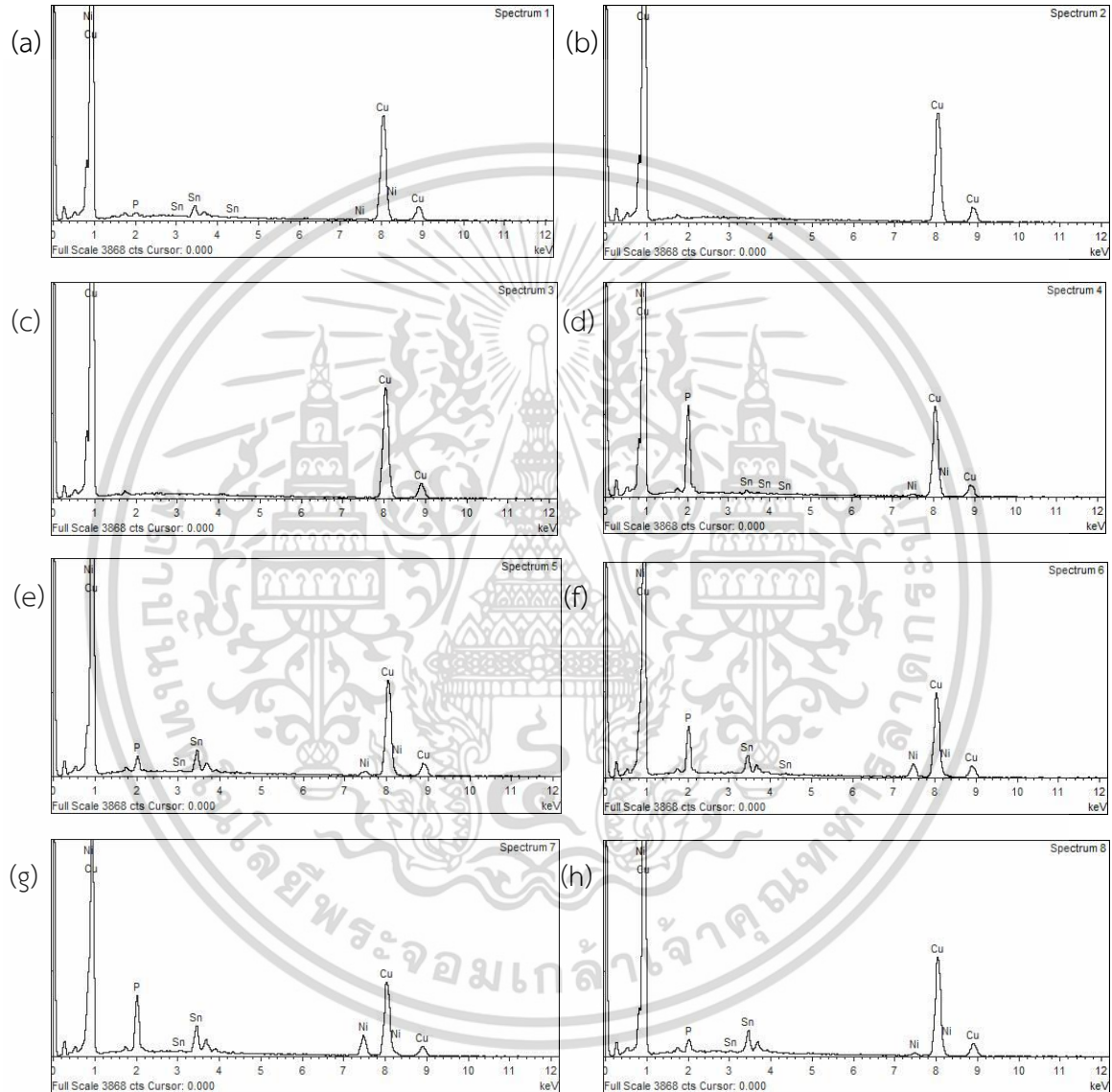


รูปที่ 4.38 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐาน แผ่นทองแดงและโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 0.9 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

ตารางที่ 4.13 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐาน แผ่นทองแดงและโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 0.9 วินาที

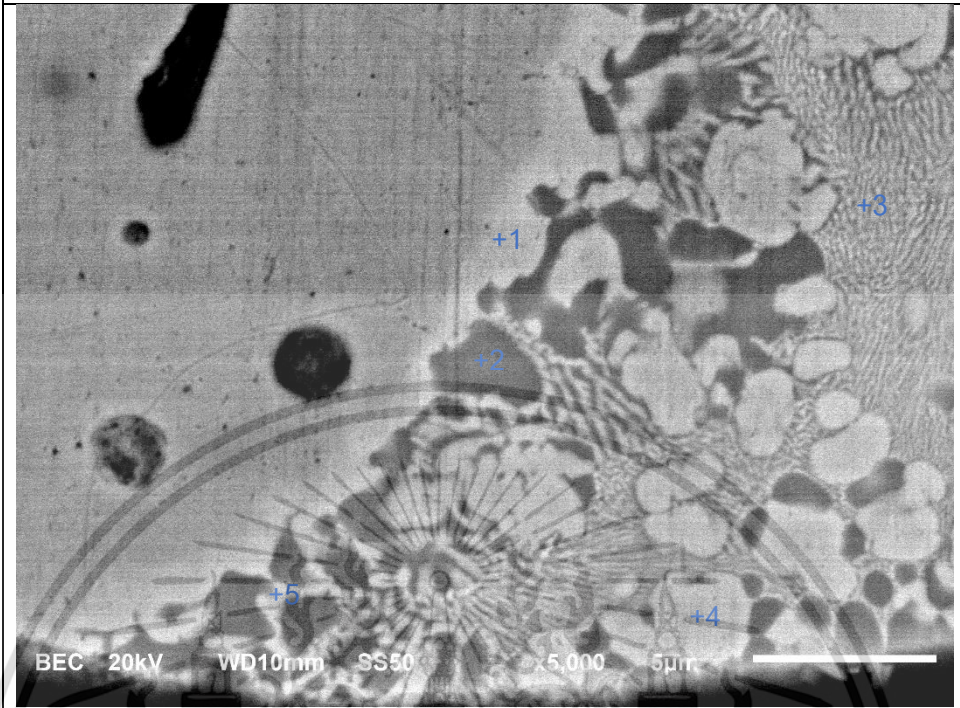
ตำแหน่ง	องค์ประกอบทางเคมี								Possible Phase
	Cu		Ni		Sn		P		
	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	
1	93.48	95.10	0.42	0.46	5.38	2.93	0.72	1.51	Cu-rich
2	100	100	-	-	-	-	-	-	Cu
3	100	100	-	-	-	-	-	-	Cu
4	80.42	68.33	1.08	1.00	1.21	0.55	17.29	30.13	Cu <sub>3</sub> P
5	83.97	85.30	2.62	2.88	10.47	5.70	2.94	6.12	Cu-rich
6	73.32	68.93	8.24	8.38	9.04	4.55	9.40	18.13	(Cu,Ni) <sub>3</sub> P
7	63.54	59.94	12.68	12.94	13.22	6.68	10.56	20.44	(Cu,Ni) <sub>2</sub> P

ตำแหน่ง	องค์ประกอบทางเคมี								Possible Phase
	Cu		Ni		Sn		P		
	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	
8	85.48	87.23	1.75	1.94	10.28	5.61	2.50	5.22	Cu-rich



รูปที่ 4.39 สเปกตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดออสตราณ แผ่นทองแดงและโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 0.9 วินาที  
 (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่งที่ 5  
 (f) ตำแหน่งที่ 6 (g) ตำแหน่งที่ 7 (h) ตำแหน่งที่ 8

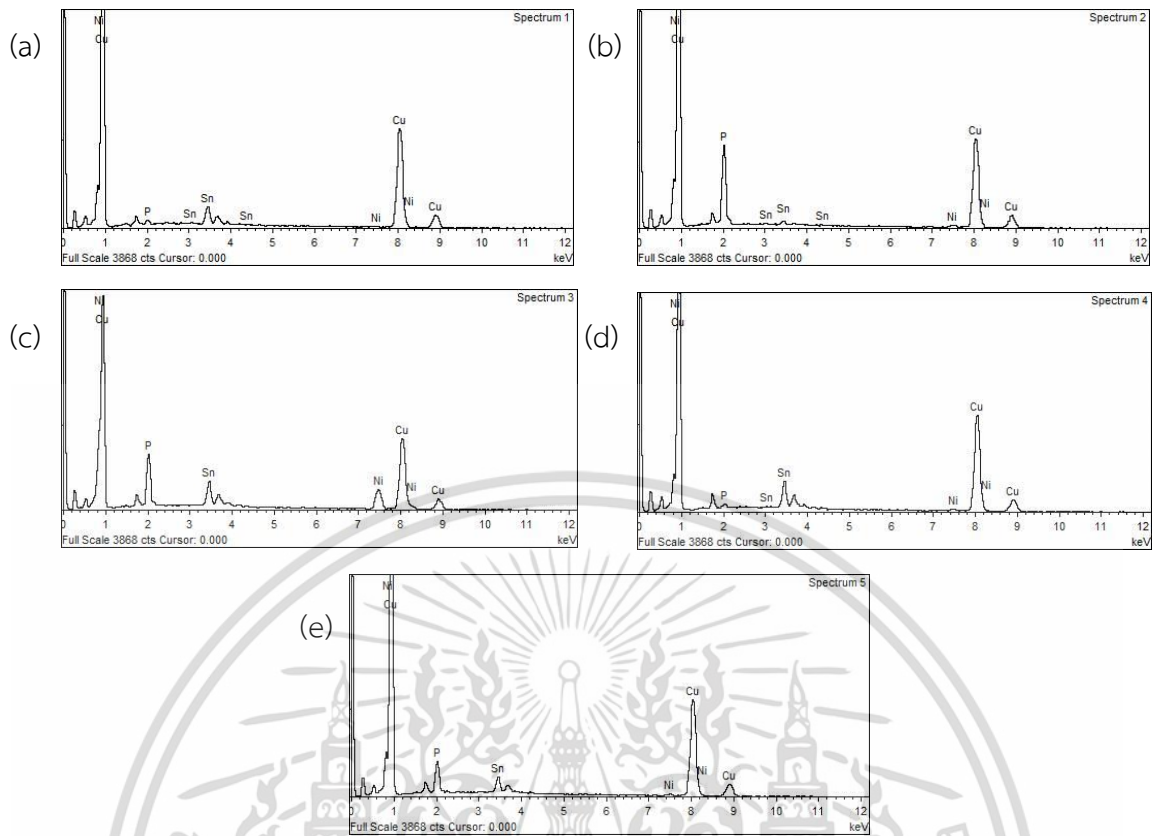
โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 5000 เท่า



รูปที่ 4.40 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานและฟอสฟอรัสภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 0.9 วินาที ที่บริเวณด้านบนของชิ้นงาน ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

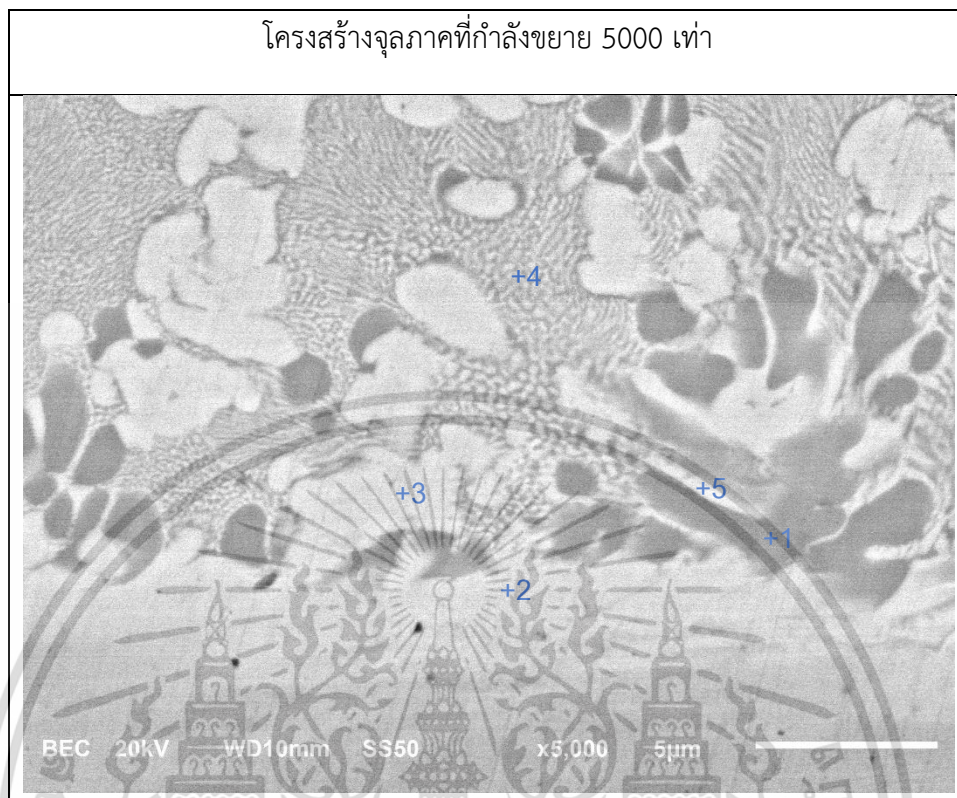
ตารางที่ 4.14 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานและฟอสฟอรัสภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 0.9 วินาที ที่บริเวณด้านบนของชิ้นงาน

ตำแหน่ง	องค์ประกอบทางเคมี								Possible Phase
	Cu		Ni		Sn		P		
	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	
1	89.33	92.38	0.40	0.45	9.32	5.16	0.95	2.01	Cu-rich
2	81.59	70.39	1.04	0.97	1.60	0.74	15.77	27.91	Cu <sub>3</sub> P
3	63.28	59.47	13.87	14.10	12.37	6.22	10.48	20.21	(Cu,Ni) <sub>3</sub> P
4	84.89	89.69	0.82	0.94	13.48	7.62	0.81	1.75	Cu-rich
5	85.05	82.32	0.79	0.83	7.68	3.98	6.49	12.88	Cu <sub>2</sub> P



รูปที่ 4.41 สเปกตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเดิม ชนิดอสังฐานและโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 0.9 วินาที ที่บริเวณด้านบนของชิ้นงาน (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่งที่ 5

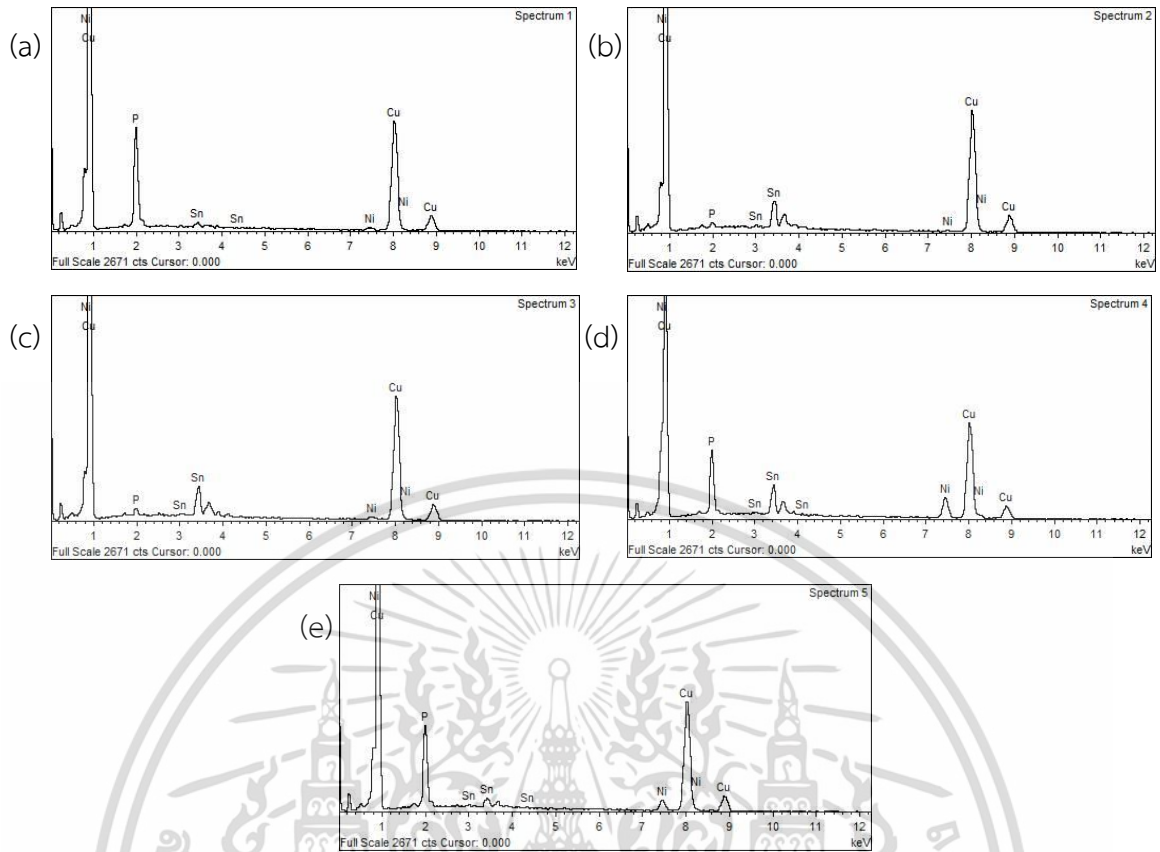
#### 4.2.6 ชิ้นงานภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 1 วินาที



รูปที่ 4.42 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานและแผ่นทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 1 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

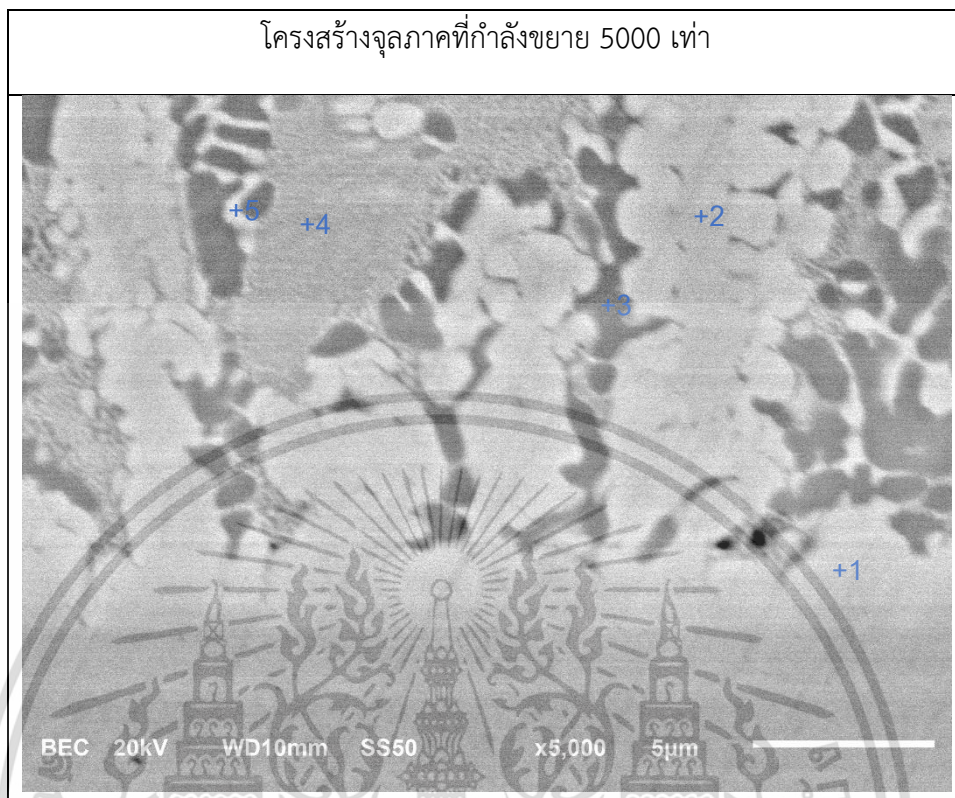
ตารางที่ 4.15 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานและแผ่นทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 1 วินาที

ตำแหน่ง	องค์ประกอบทางเคมี								Possible Phase
	Cu		Ni		Sn		P		
	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	
1	81.01	69.87	1.51	1.41	1.68	0.78	15.79	27.95	Cu <sub>3</sub> P
2	87.32	91.39	0.34	0.38	11.51	6.45	0.83	1.79	Cu-rich
3	86.20	89.57	1.17	1.31	11.30	6.29	1.33	2.83	Cu-rich
4	67.99	64.04	10.73	10.94	11.27	5.68	10.01	19.33	(Cu,Ni) <sub>3</sub> P
5	77.75	69.06	5.27	5.06	3.76	1.79	13.23	24.10	Cu <sub>2</sub> P



รูปที่ 4.43 สเปกตรัมของการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติม  
 ชนิดออสตีไนต์และแผ่นทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 1 วินาที (a) ตำแหน่งที่ 1  
 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่งที่ 5

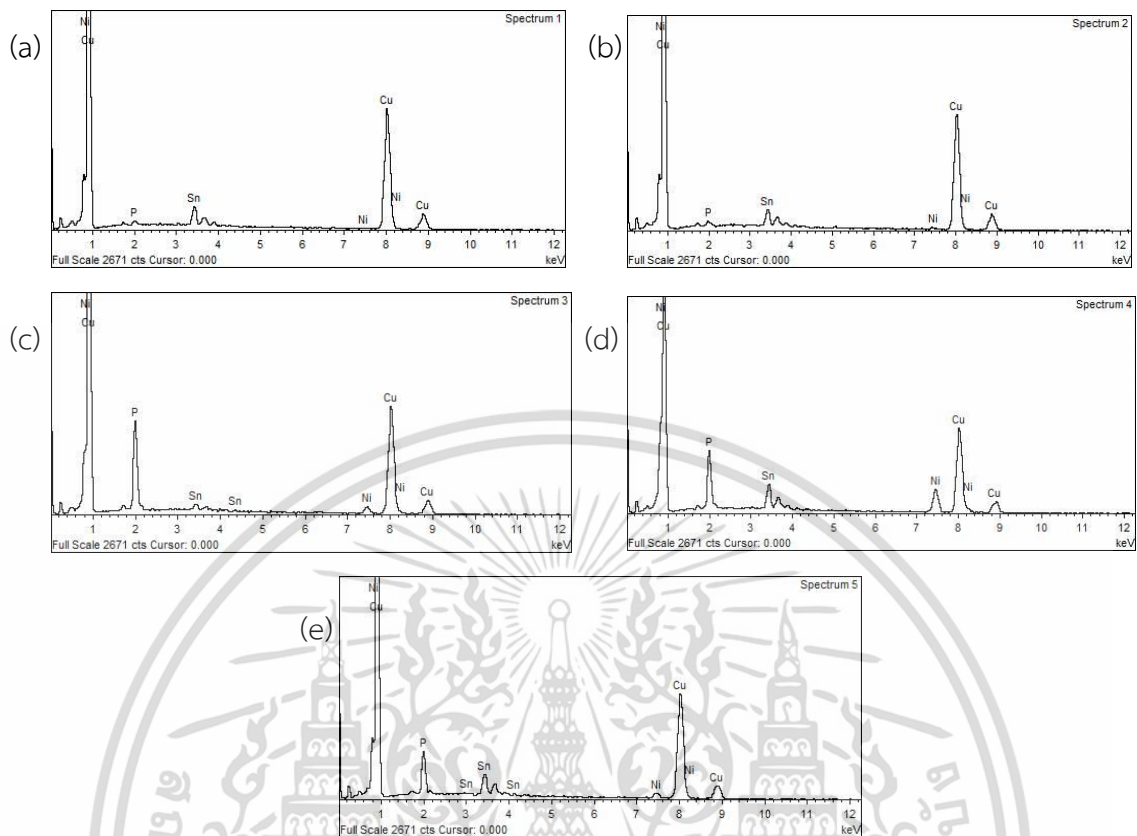
#### 4.2.7 ชิ้นงานภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 1.1 วินาที



รูปที่ 4.44 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานและแผ่นทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 1.1 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

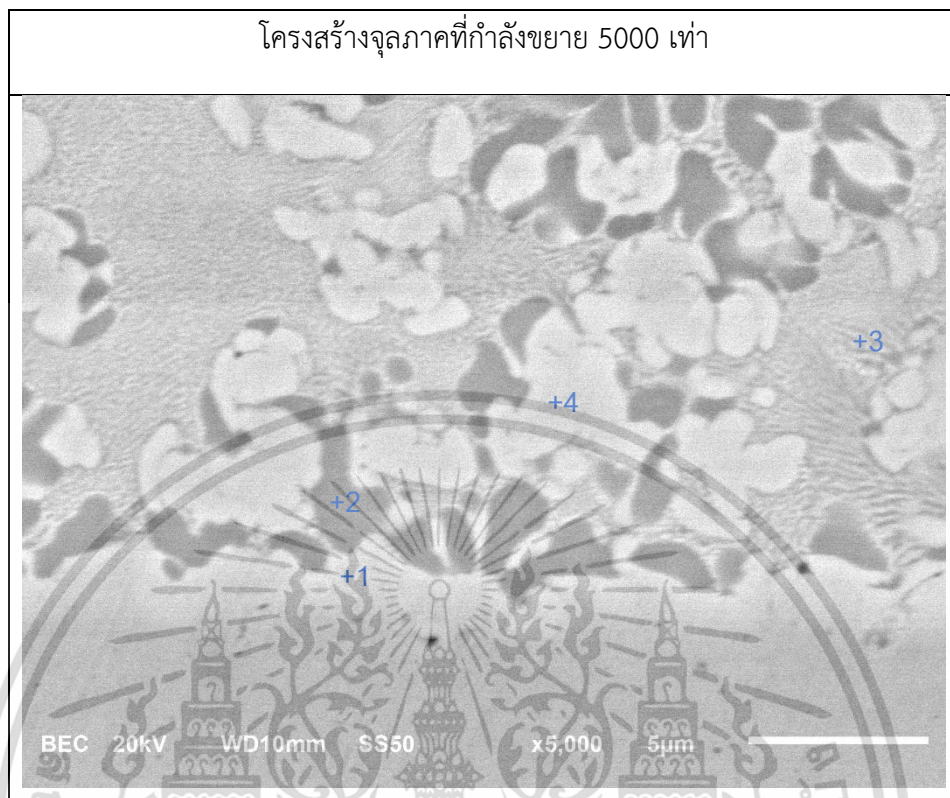
ตารางที่ 4.16 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานและแผ่นทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 1.1 วินาที

ตำแหน่ง	องค์ประกอบทางเคมี								Possible Phase
	Cu		Ni		Sn		P		
	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	
1	90.53	93.43	0.37	0.41	8.38	4.63	0.72	1.53	Cu-rich
2	90.75	93.29	0.96	1.06	7.60	4.18	0.69	1.46	Cu-rich
3	78.71	68.56	3.62	3.41	2.69	1.26	14.98	26.77	Cu <sub>3</sub> P
4	65.67	61.70	13.61	13.84	10.87	5.47	9.85	18.99	(Cu,Ni) <sub>3</sub> P
5	80.24	77.15	2.95	3.07	9.17	4.72	7.63	15.06	Cu <sub>2</sub> P



รูปที่ 4.45 สเปกตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติม  
 ชนิดอสังฐานและแผ่นทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 465 A เวลา 1.1 วินาที (a) ตำแหน่งที่ 1  
 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่งที่ 5

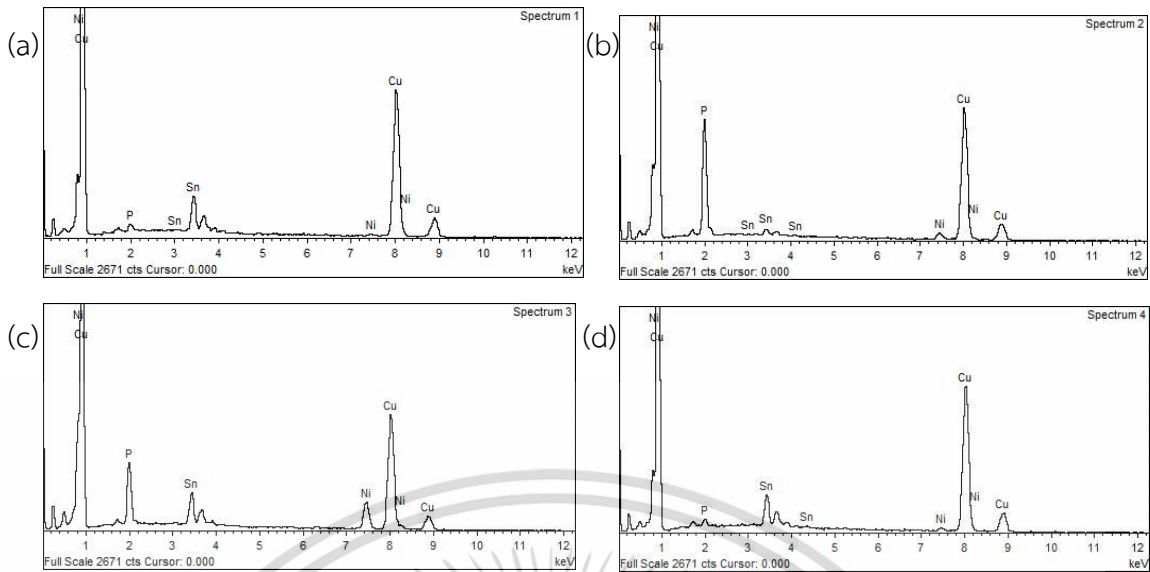
#### 4.2.8 ชิ้นงานภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 0.8 วินาที



รูปที่ 4.46 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดออสตีไนต์และแผ่นทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 0.8 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

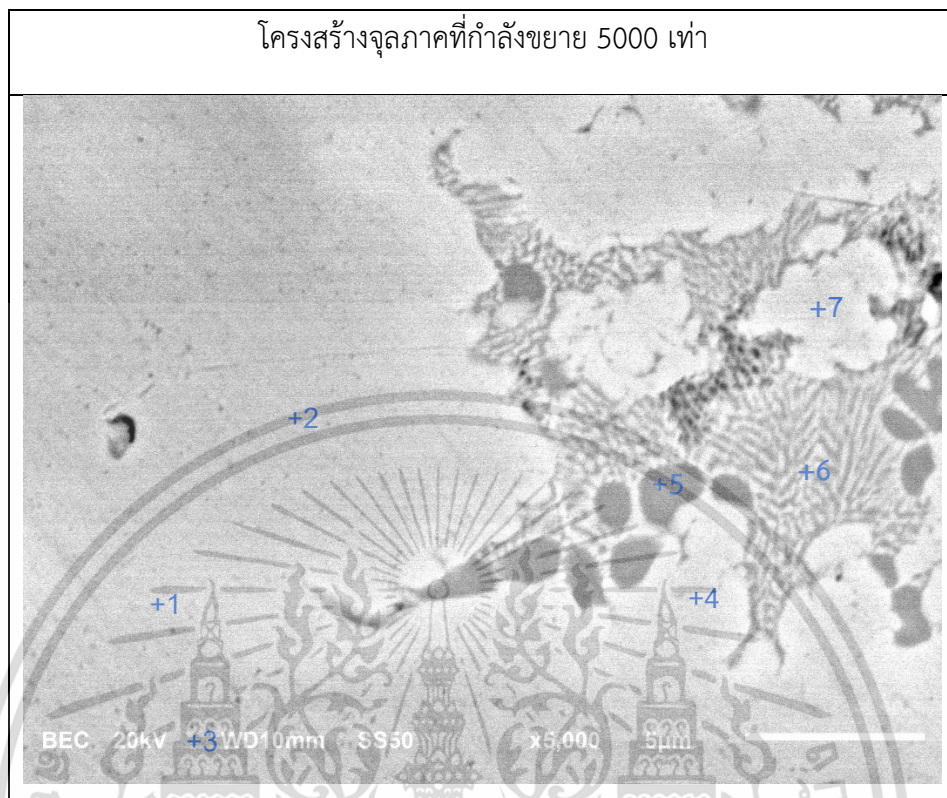
ตารางที่ 4.17 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดออสตีไนต์และแผ่นทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 0.8 วินาที

ตำแหน่ง	องค์ประกอบทางเคมี								Possible Phase
	Cu		Ni		Sn		P		
	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	
1	86.64	90.60	0.69	0.79	11.70	6.55	0.96	2.07	Cu-rich
2	79.50	68.85	2.82	2.64	2.21	1.03	15.47	27.49	Cu <sub>3</sub> P
3	68.71	65.34	12.21	12.56	10.49	5.34	8.59	16.76	(Cu,Ni) <sub>3</sub> P
4	87.32	90.66	1.20	1.35	10.45	5.81	1.02	2.17	Cu-rich



รูปที่ 4.47 สเปกตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติม  
 ชนิดอสัณฐานและแผ่นทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 0.8 วินาที (a) ตำแหน่งที่ 1  
 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4

#### 4.2.9 ชิ้นงานภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 0.9 วินาที

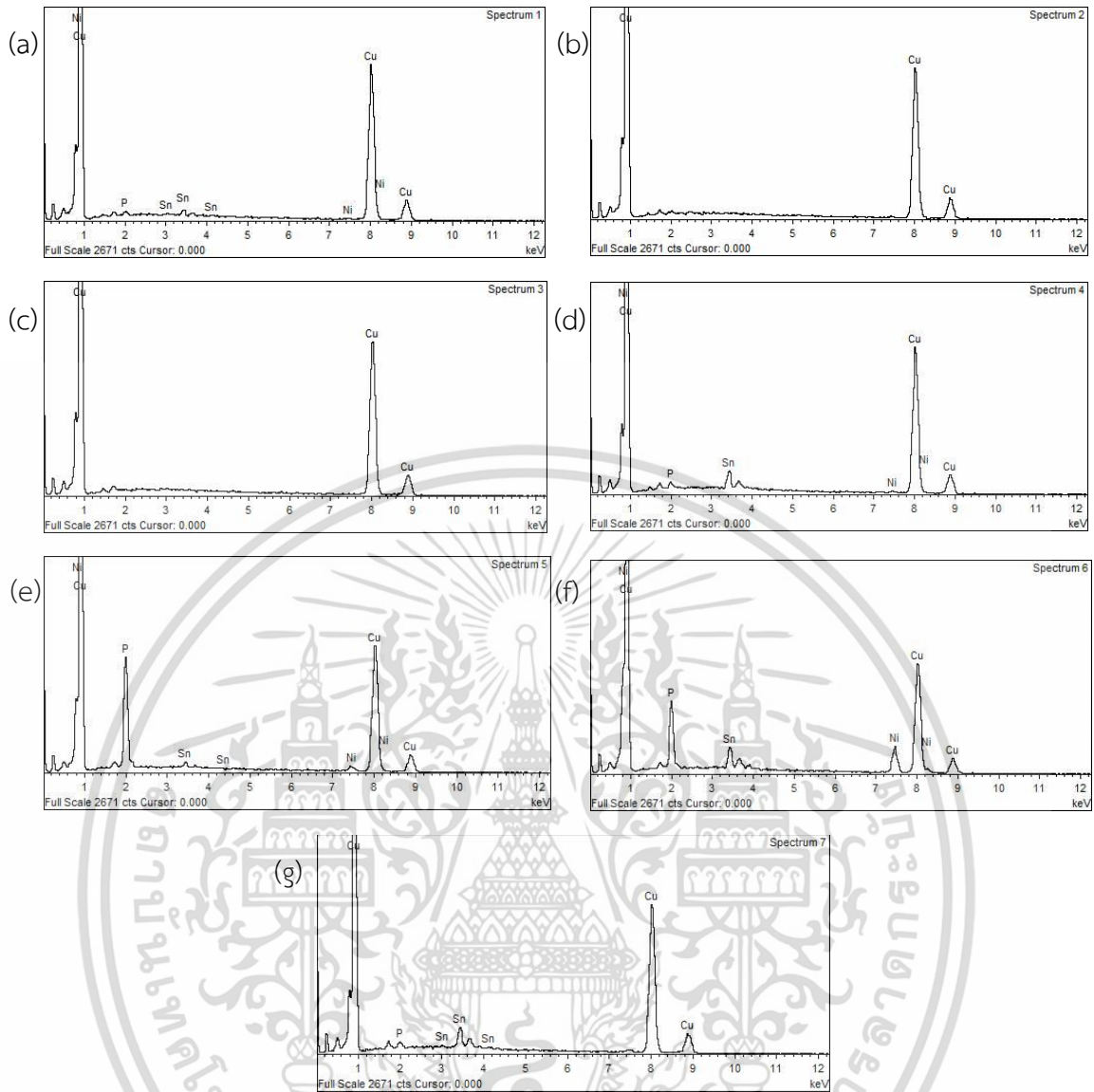


รูปที่ 4.48 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสังฐาน แผ่นทองแดงและโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 0.9 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

ตารางที่ 4.18 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสังฐาน แผ่นทองแดงและโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 0.9 วินาที

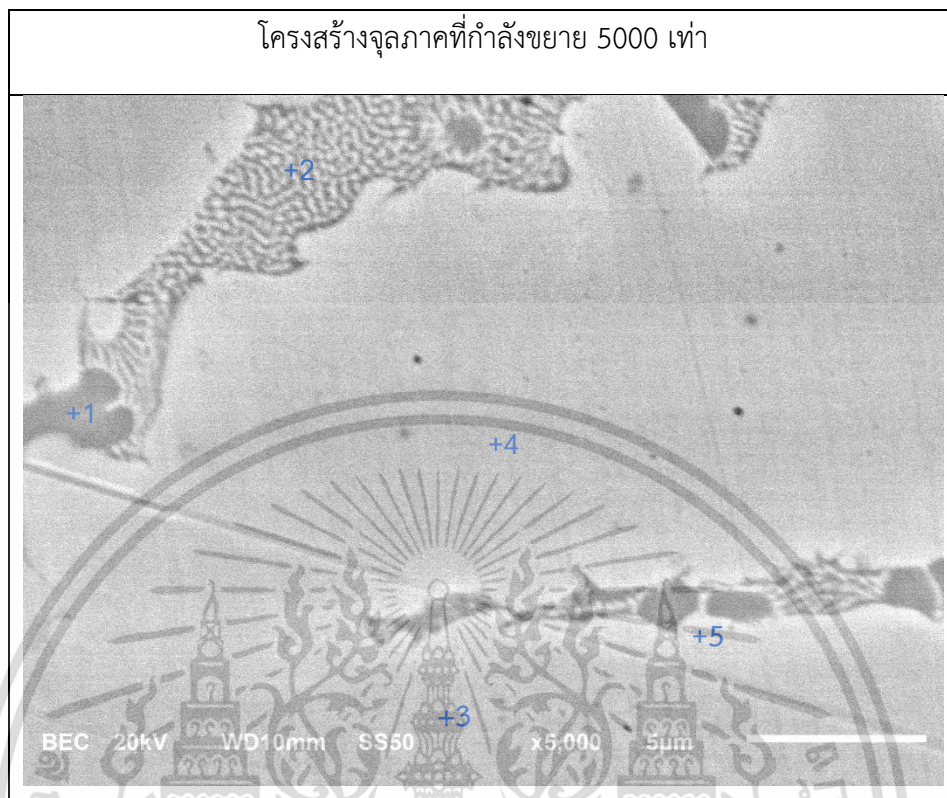
ตำแหน่ง	องค์ประกอบทางเคมี								Possible Phase
	Cu		Ni		Sn		P		
	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	
1	96.70	97.20	0.58	0.63	2.26	1.22	0.46	0.96	Cu-rich
2	100.00	100.00	-	-	-	-	-	-	Cu
3	100.00	100.00	-	-	-	-	-	-	Cu
4	91.81	93.50	0.92	1.01	6.28	3.43	0.99	2.06	Cu-rich
5	80.71	69.59	2.12	1.98	1.49	0.69	15.68	27.74	Cu <sub>3</sub> P
6	70.65	65.74	11.66	11.74	7.98	3.97	9.71	18.54	(Cu,Ni) <sub>3</sub> P
7	92.05	94.37	-	-	7.14	3.92	0.81	1.71	Cu-rich

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.49 สเปกตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติม  
 ชนิดออสตริเทน แผ่นทองแดงและโพมทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 0.9 วินาที  
 (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่งที่ 5  
 (f) ตำแหน่งที่ 6 (g) ตำแหน่งที่ 7

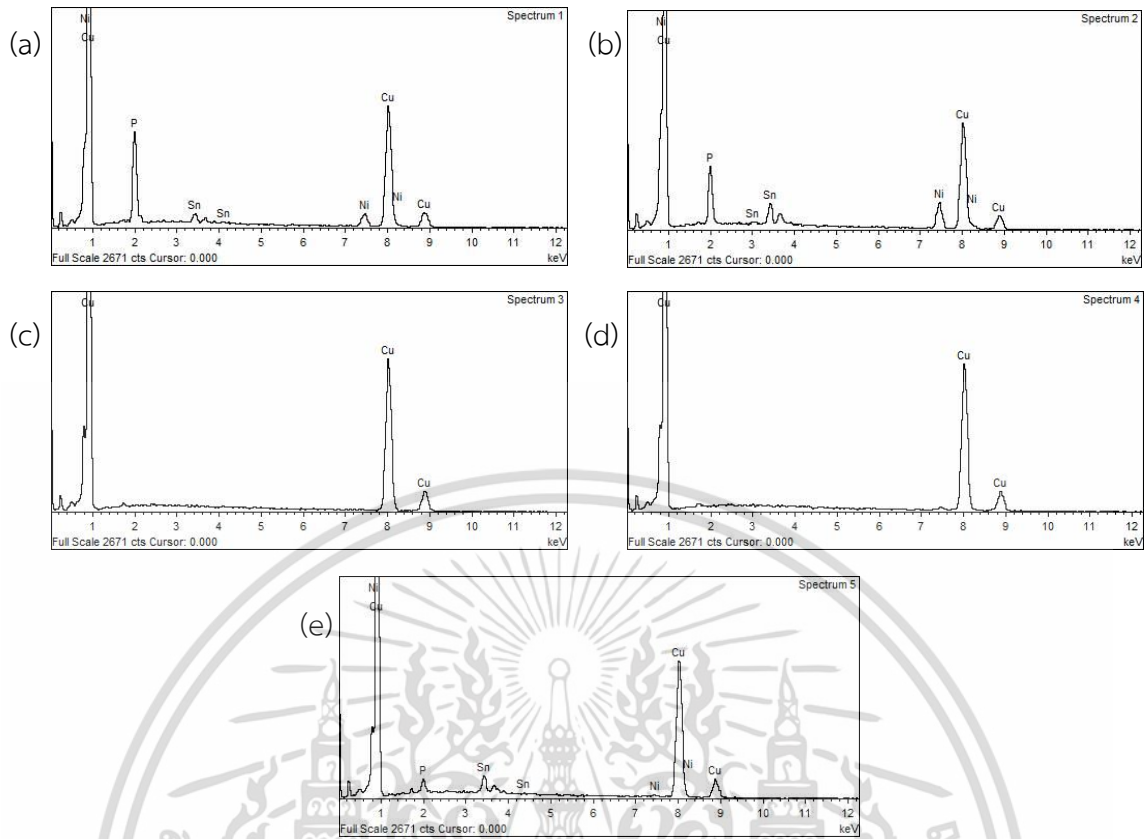
#### 4.2.10 ชิ้นงานภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 1 วินาที



รูปที่ 4.50 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐาน แผ่นทองแดงและโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 1 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

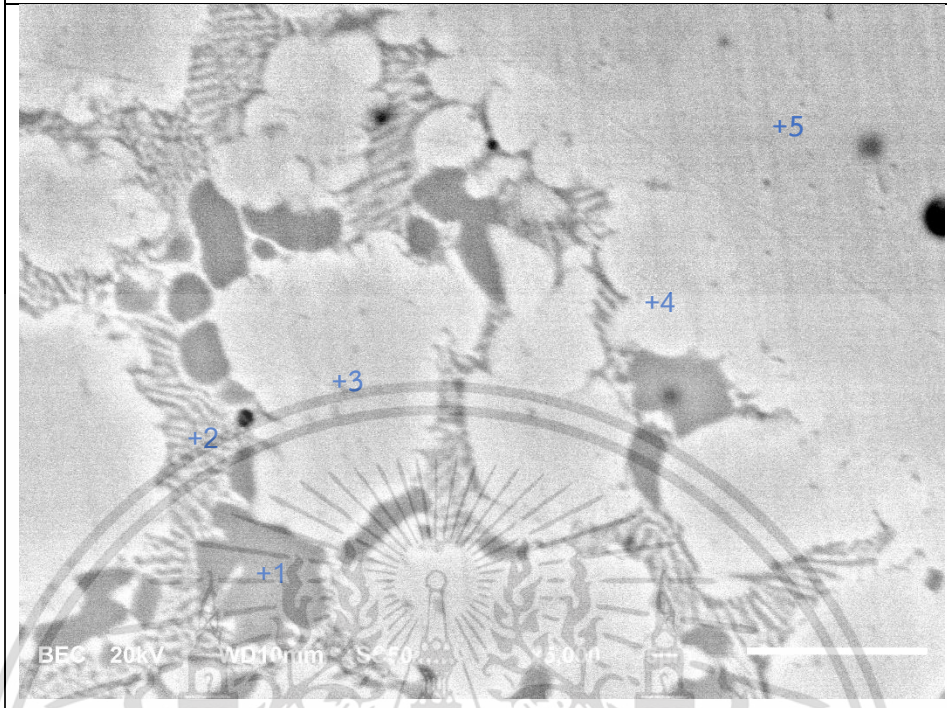
ตารางที่ 4.19 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐาน แผ่นทองแดงและโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 1 วินาที

ตำแหน่ง	องค์ประกอบทางเคมี								Possible Phase
	Cu		Ni		Sn		P		
	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	
1	77.17	68.41	6.18	5.93	3.44	1.63	13.21	24.03	Cu <sub>3</sub> P
2	70.53	66.35	12.82	13.05	8.09	4.08	8.56	16.52	(Cu,Ni) <sub>3</sub> P
3	100.00	100.00	-	-	-	-	-	-	Cu
4	100.00	100.00	-	-	-	-	-	-	Cu
5	91.52	92.18	0.69	0.75	5.92	3.19	1.88	3.88	Cu-rich



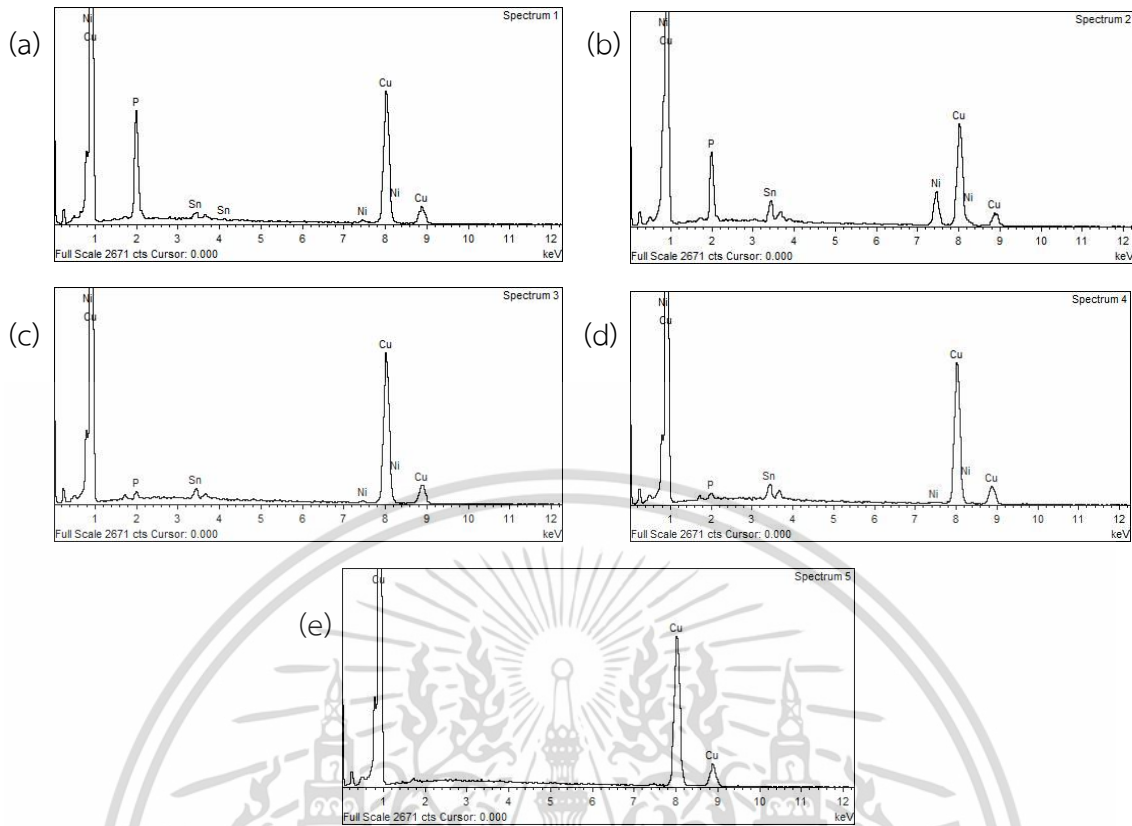
รูปที่ 4.51 สเปกตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติม  
 ชนิดออสเทนไนต์ แผ่นทองแดงและโพลีเอทิลีนภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 1 วินาที  
 (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่งที่ 5

โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 5000 เท่า



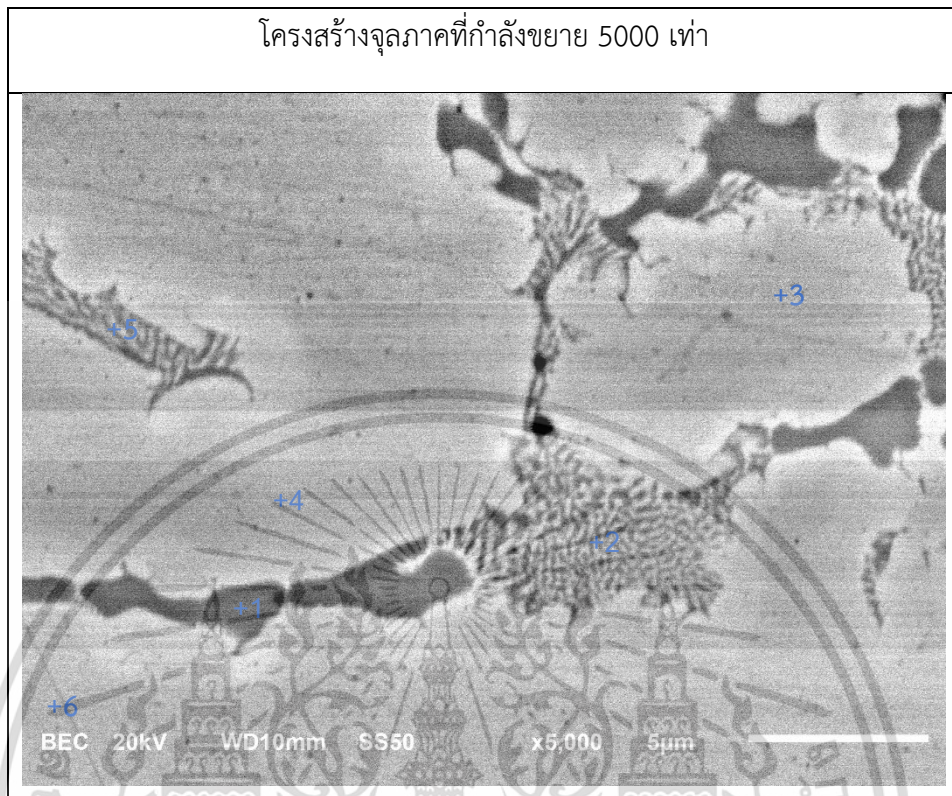
รูปที่ 4.52 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานและโพลีเมทอลภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 1 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ตารางที่ 4.20 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานและโพลีเมทอลภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 1 วินาที

ตำแหน่ง	องค์ประกอบทางเคมี								Possible Phase
	Cu		Ni		Sn		P		
	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	
1	81.83	71.61	0.94	0.89	2.58	1.21	14.65	26.30	Cu <sub>3</sub> P
2	66.01	60.82	16.13	16.08	7.64	3.77	10.23	19.33	(Cu,Ni) <sub>3</sub> P
3	94.43	94.78	0.91	0.98	3.53	1.90	1.13	2.33	Cu-rich
4	93.06	94.58	0.19	0.21	5.75	3.13	1.00	2.08	Cu-rich
5	100.00	100.00	-	-	-	-	-	-	Cu



รูปที่ 4.53 สเปกตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติม  
 ชนิดอสังฐานและโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 1 วินาที (a) ตำแหน่งที่ 1  
 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่งที่ 5

#### 4.2.11 ชิ้นงานภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 1.1 วินาที

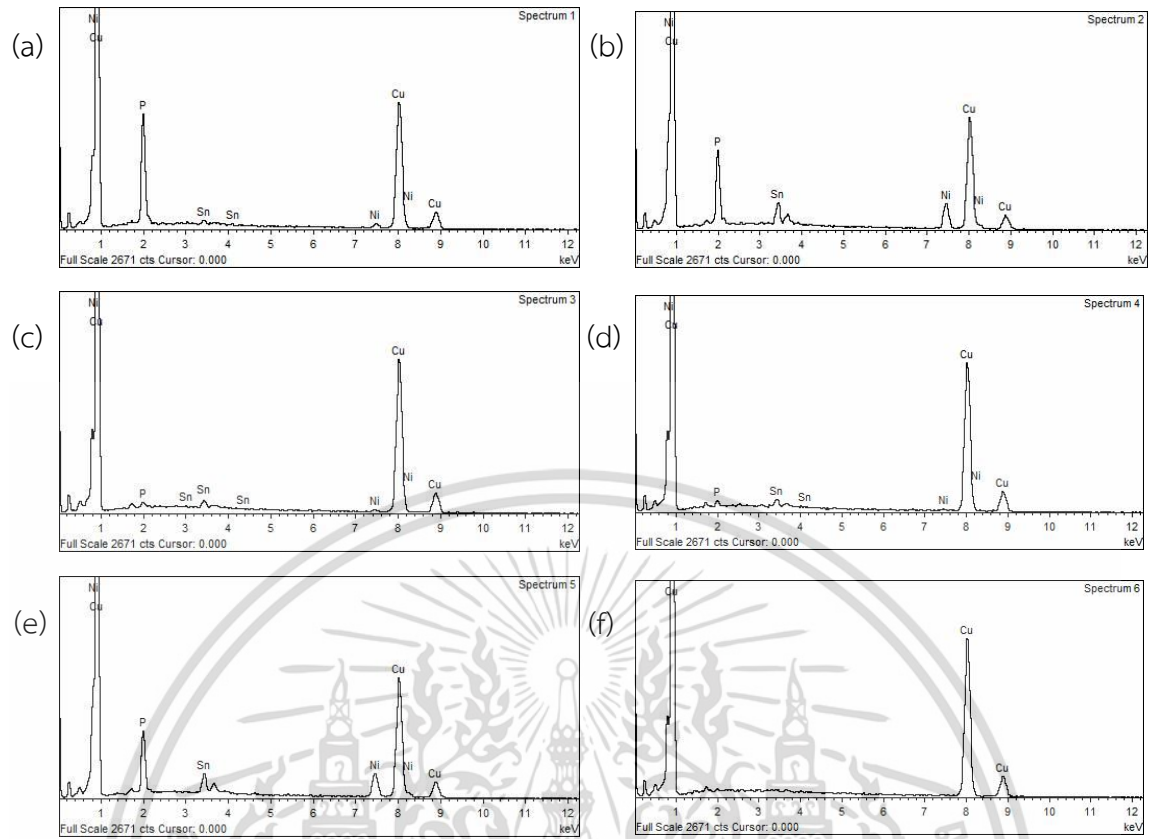


รูปที่ 4.54 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐาน แผ่นทองแดงและโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 1.1 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

ตารางที่ 4.21 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐาน แผ่นทองแดงและโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 1.1 วินาที

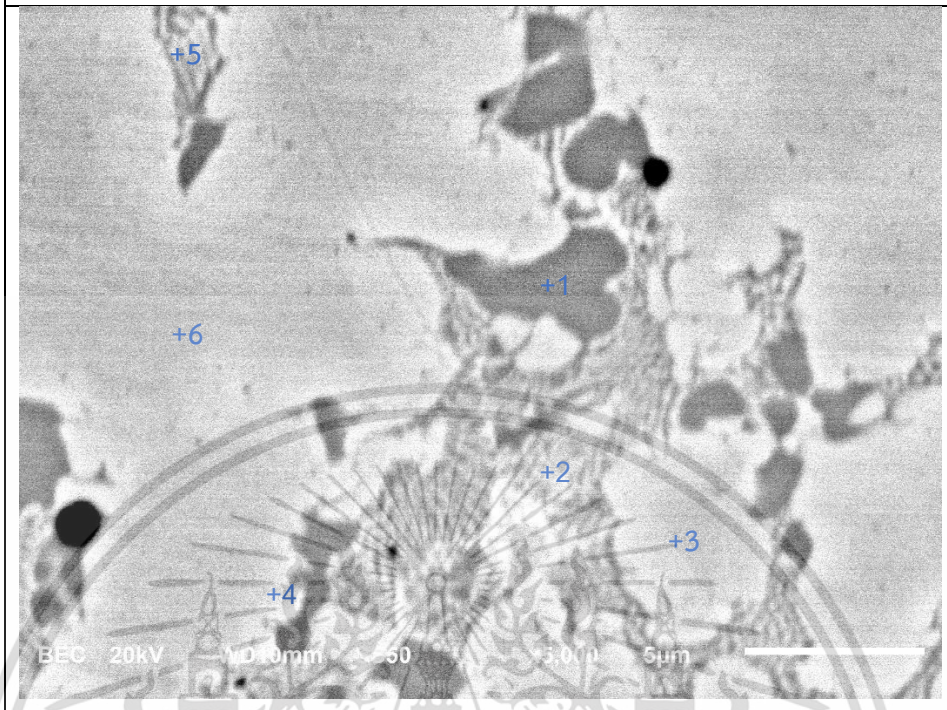
ตำแหน่ง	องค์ประกอบทางเคมี								Possible Phase
	Cu		Ni		Sn		P		
	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	
1	81.42	70.39	1.63	1.52	1.52	0.70	15.44	27.39	Cu <sub>3</sub> P
2	69.53	64.28	12.59	12.60	7.69	3.81	10.18	19.31	(Cu,Ni) <sub>3</sub> P
3	95.74	96.02	0.87	0.94	2.60	1.39	0.80	1.64	Cu-rich
4	95.95	96.13	0.47	0.51	2.63	1.41	0.95	1.95	Cu-rich
5	73.15	68.13	11.28	11.37	6.56	3.27	9.02	17.24	(Cu,Ni) <sub>3</sub> P
6	100.00	100.00	-	-	-	-	-	-	Cu

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



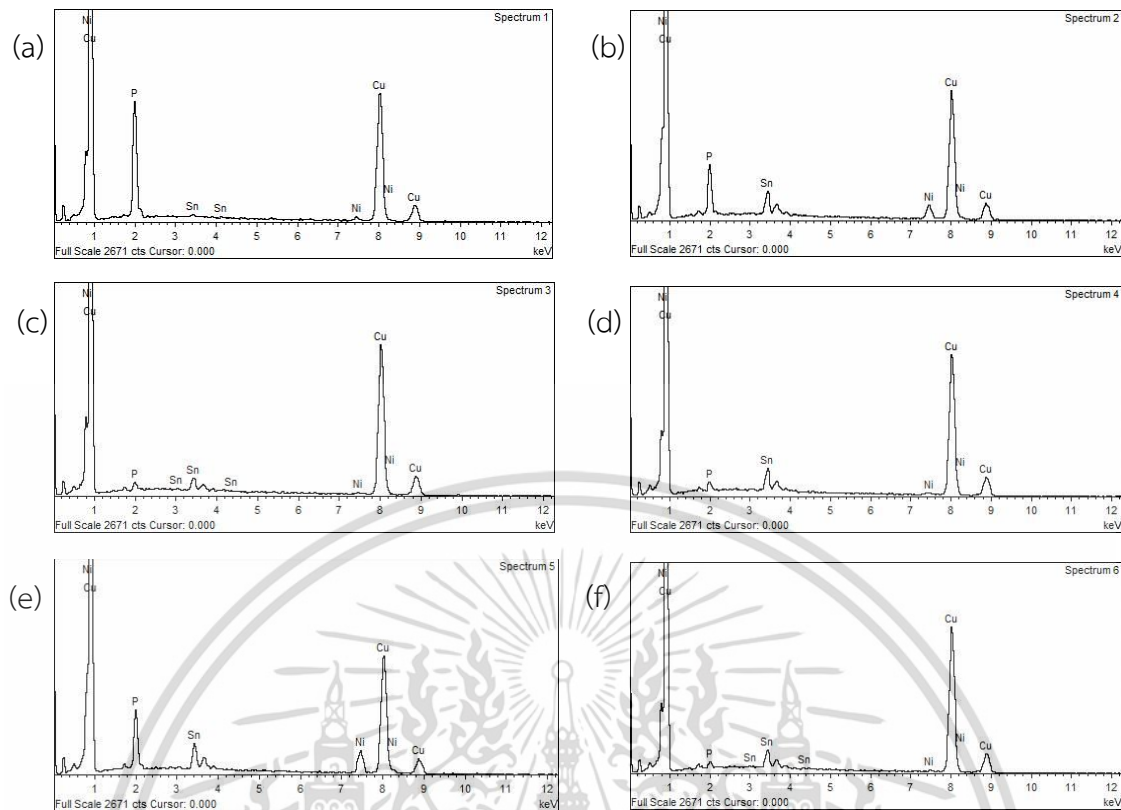
รูปที่ 4.55 สเปกตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติม  
 ชนิดออสเมียม แผ่นทองแดงและฟิมทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 1.1 วินาที  
 (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่งที่ 5  
 (f) ตำแหน่งที่ 6

โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 5000 เท่า



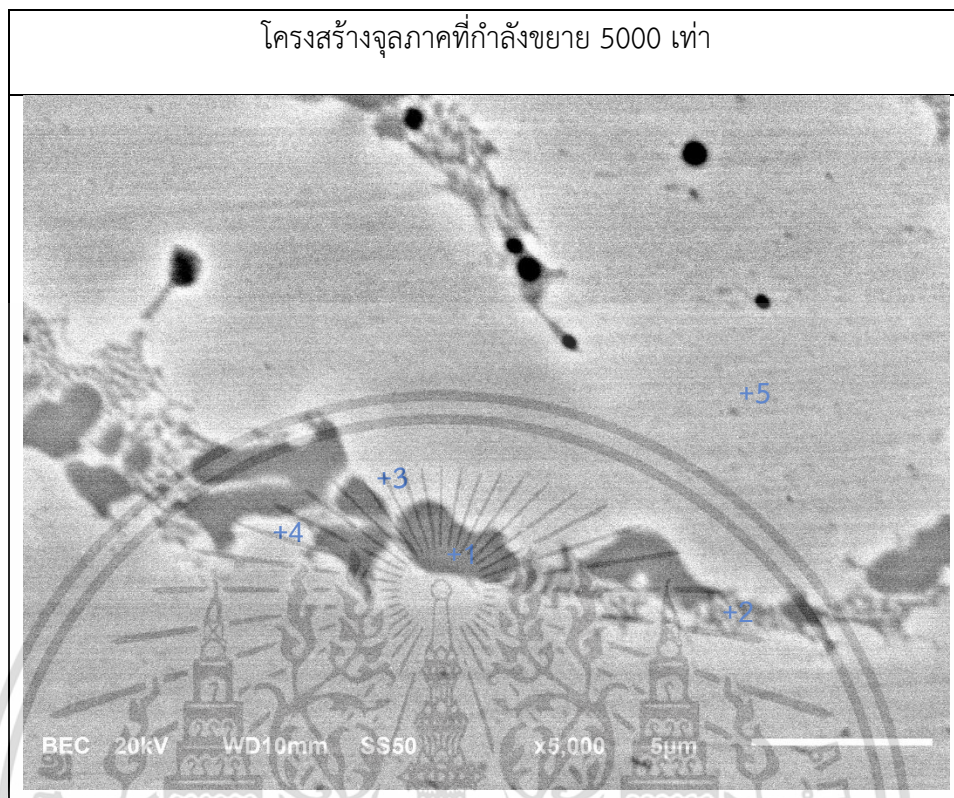
รูปที่ 4.56 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานและโพลีเมทอแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 1.1 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ตารางที่ 4.22 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานและโพลีเมทอแดง ภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 1.1 วินาที

ตำแหน่ง	องค์ประกอบทางเคมี								Possible Phase
	Cu		Ni		Sn		P		
	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	
1	81.73	69.73	1.31	1.21	0.48	0.22	16.48	28.84	Cu <sub>3</sub> P
2	78.59	75.27	6.28	6.51	7.93	4.06	7.21	14.16	(Cu,Ni) <sub>3</sub> P
3	93.63	94.43	0.50	0.54	4.66	2.51	1.21	2.51	Cu-rich
4	90.39	92.25	0.63	0.69	7.59	4.15	1.39	2.91	Cu-rich
5	72.72	69.07	10.59	10.89	8.66	4.40	8.03	15.64	(Cu,Ni) <sub>3</sub> P
6	92.24	94.04	0.49	0.54	6.32	3.45	0.94	1.97	Cu-rich



รูปที่ 4.57 สเปกตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติม  
 ชนิดอสังฐานและโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 697.5 A เวลา 1.1 วินาที (a) ตำแหน่งที่ 1  
 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่งที่ 5 (f) ตำแหน่งที่ 6

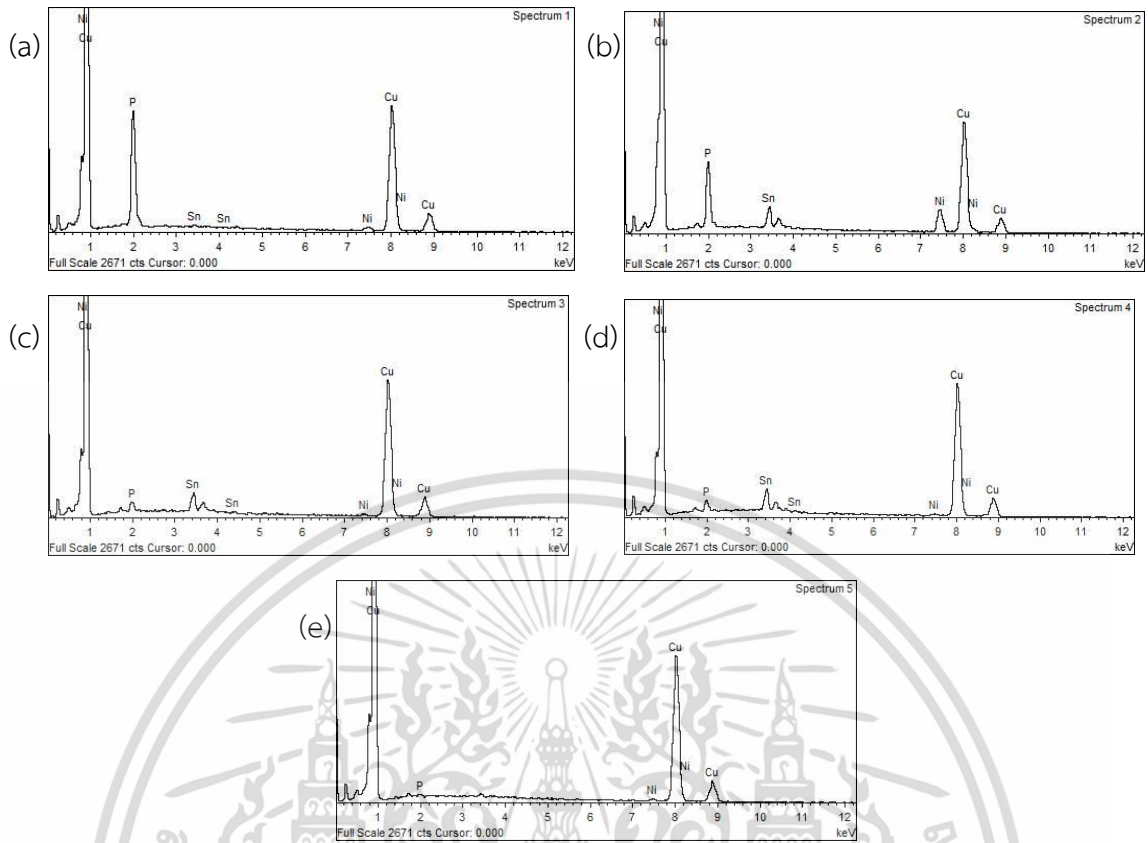
#### 4.2.12 ชิ้นงานภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 0.8 วินาที



รูปที่ 4.58 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสังฐาน แผ่นทองแดงและโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 0.8 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

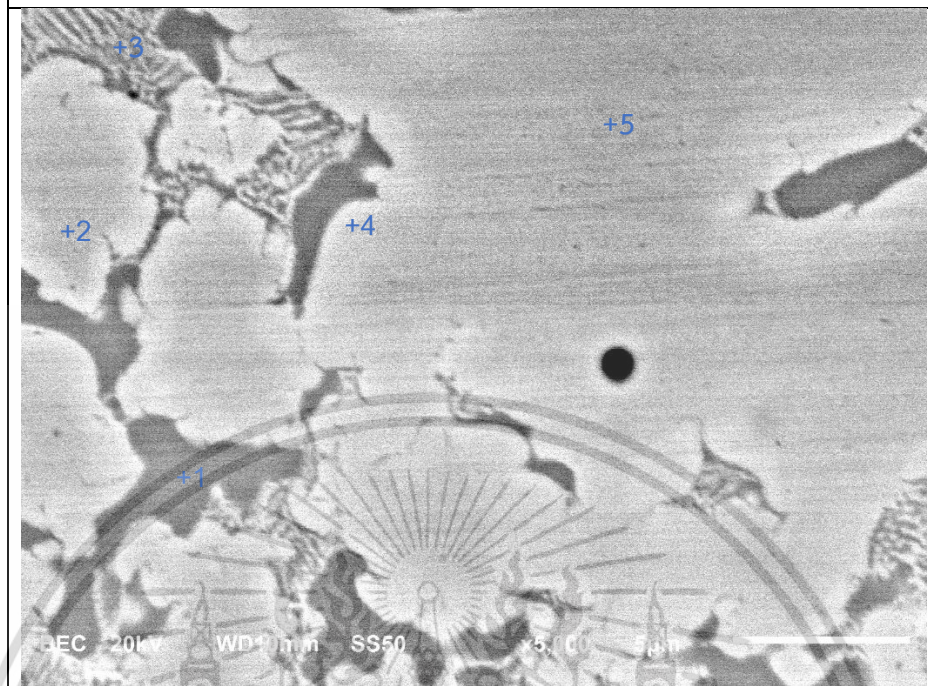
ตารางที่ 4.23 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสังฐาน แผ่นทองแดงและโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 0.8 วินาที

ตำแหน่ง	องค์ประกอบทางเคมี								Possible Phase
	Cu		Ni		Sn		P		
	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	
1	81.45	69.60	1.51	1.39	0.67	0.31	16.37	28.70	Cu <sub>3</sub> P
2	71.33	66.22	11.46	11.51	7.47	3.71	9.74	18.55	(Cu,Ni) <sub>3</sub> P
3	90.72	91.82	0.92	1.01	6.64	3.60	1.72	3.57	Cu-rich
4	89.54	91.22	0.67	0.74	8.04	4.38	1.75	3.66	Cu-rich
5	98.37	97.82	1.19	1.28	-	-	0.44	0.90	Cu-rich



รูปที่ 4.59 สเปกตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติม  
 ชนิดออสตินิทัน แผ่นทองแดงและโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 0.8 วินาที  
 (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่งที่ 5

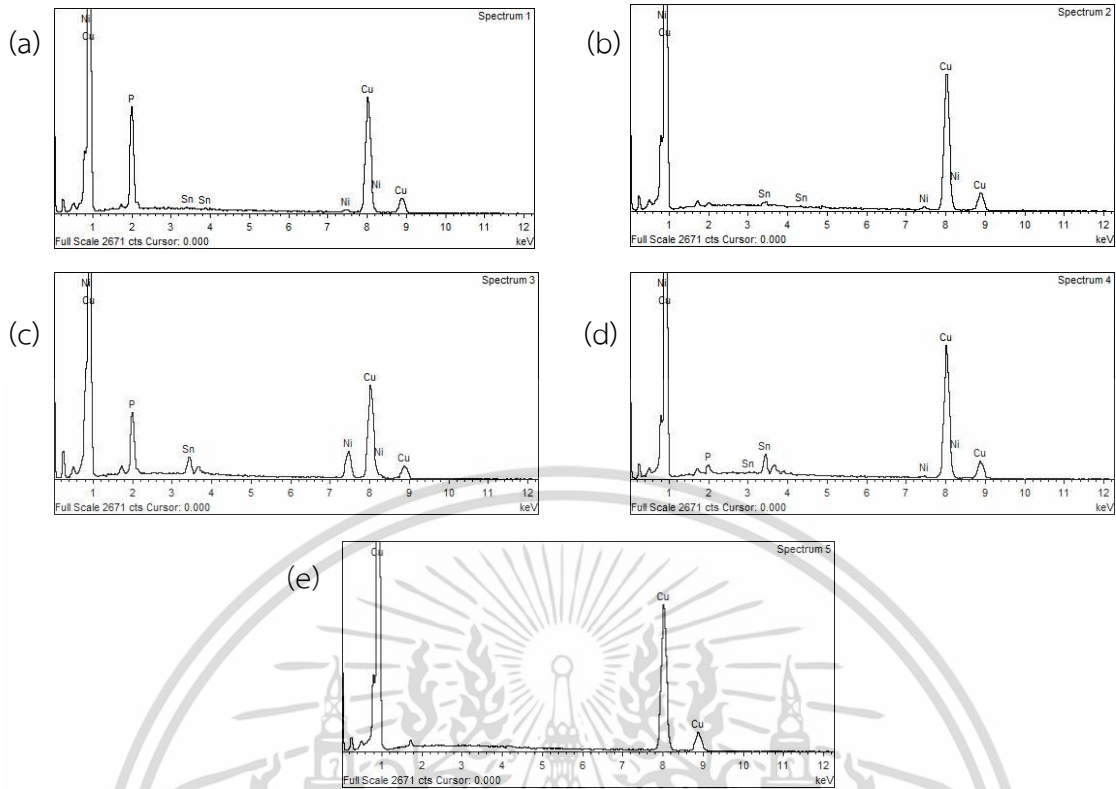
โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 5000 เท่า



รูปที่ 4.60 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสังฐานและโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 0.8 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

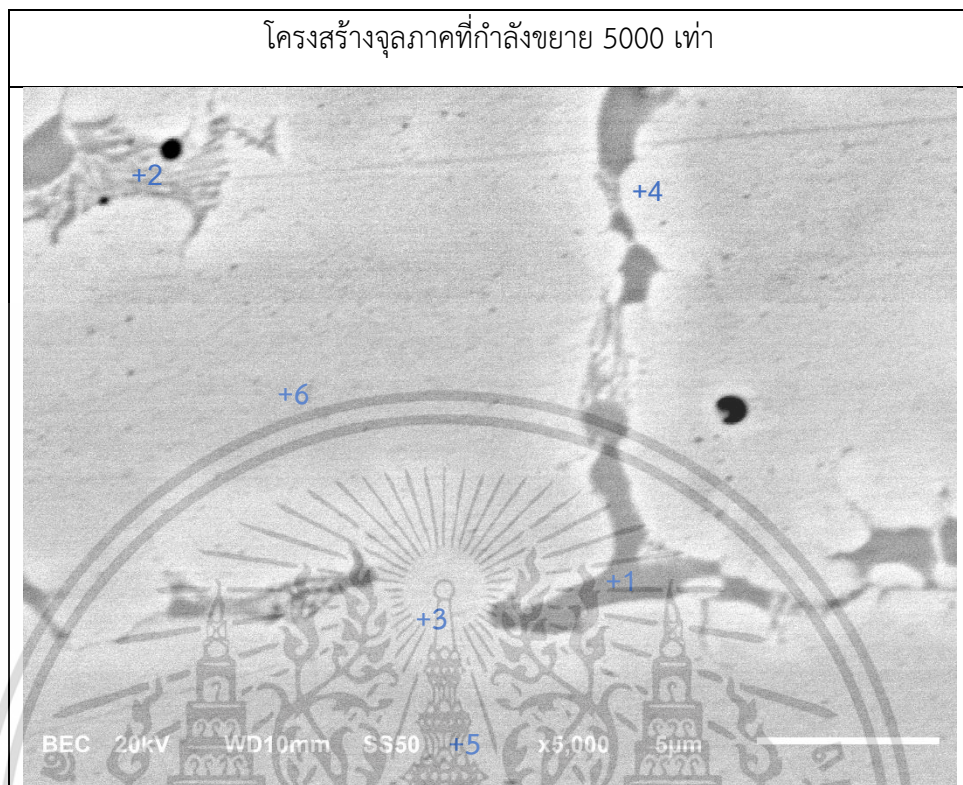
ตารางที่ 4.24 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสังฐานและโพลีทองแดง ภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 0.8 วินาที

ตำแหน่ง	องค์ประกอบทางเคมี								Possible Phase
	Cu		Ni		Sn		P		
	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	
1	82.08	69.94	1.17	1.08	0.23	0.10	16.52	28.87	Cu <sub>3</sub> P
2	97.43	97.95	1.21	1.32	1.36	0.73	-	-	Cu-rich
3	68.26	62.65	14.70	14.60	6.69	3.29	10.34	19.46	(Cu,Ni) <sub>3</sub> P
4	90.50	92.23	0.69	0.76	7.38	4.03	1.43	2.99	Cu-rich
5	100.00	100.00	-	-	-	-	-	-	Cu



รูปที่ 4.61 สเปกตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติม  
 ชนิดอสังฐานและโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 0.8 วินาที (a) ตำแหน่งที่ 1  
 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่งที่ 5

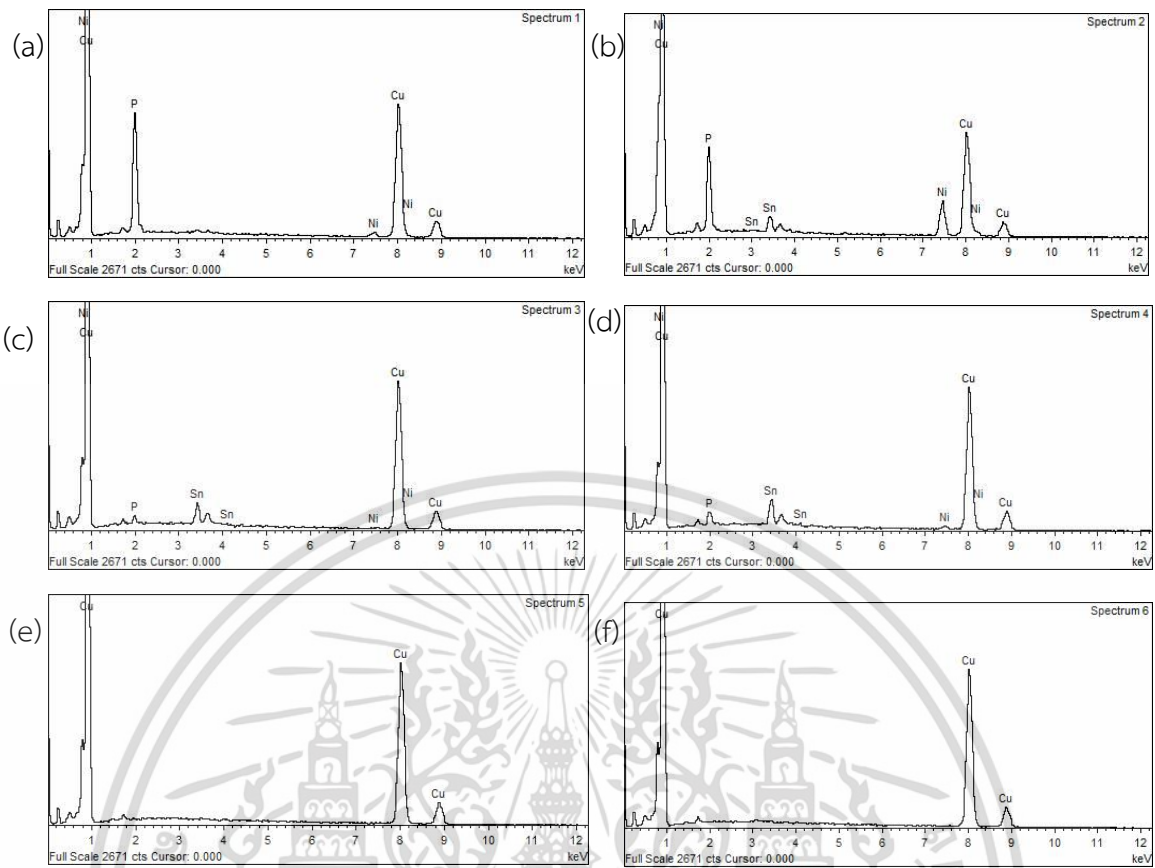
#### 4.2.13 ชิ้นงานภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 0.9 วินาที



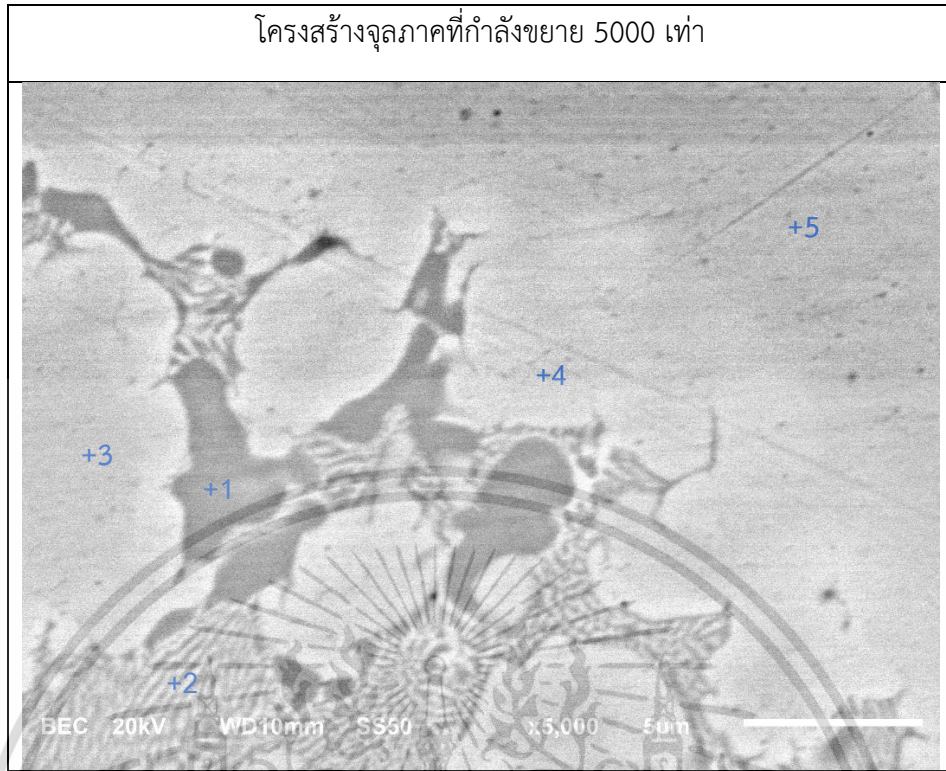
รูปที่ 4.62 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐาน แผ่นทองแดงและโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 0.9 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

ตารางที่ 4.25 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐาน แผ่นทองแดงและโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 0.9 วินาที

ตำแหน่ง	องค์ประกอบทางเคมี								Possible Phase
	Cu		Ni		Sn		P		
	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	
1	81.72	69.67	2.00	1.84	-	-	16.28	28.48	Cu <sub>3</sub> P
2	66.14	59.39	16.20	15.75	5.63	2.70	12.03	22.15	(Cu,Ni) <sub>3</sub> P
3	91.74	93.78	0.04	0.05	7.14	3.91	1.08	2.27	Cu-rich
4	87.80	89.22	1.62	1.78	8.46	4.60	2.11	4.40	Cu-rich
5	100.00	100.00	-	-	-	-	-	-	
6	100.00	100.00	-	-	-	-	-	-	



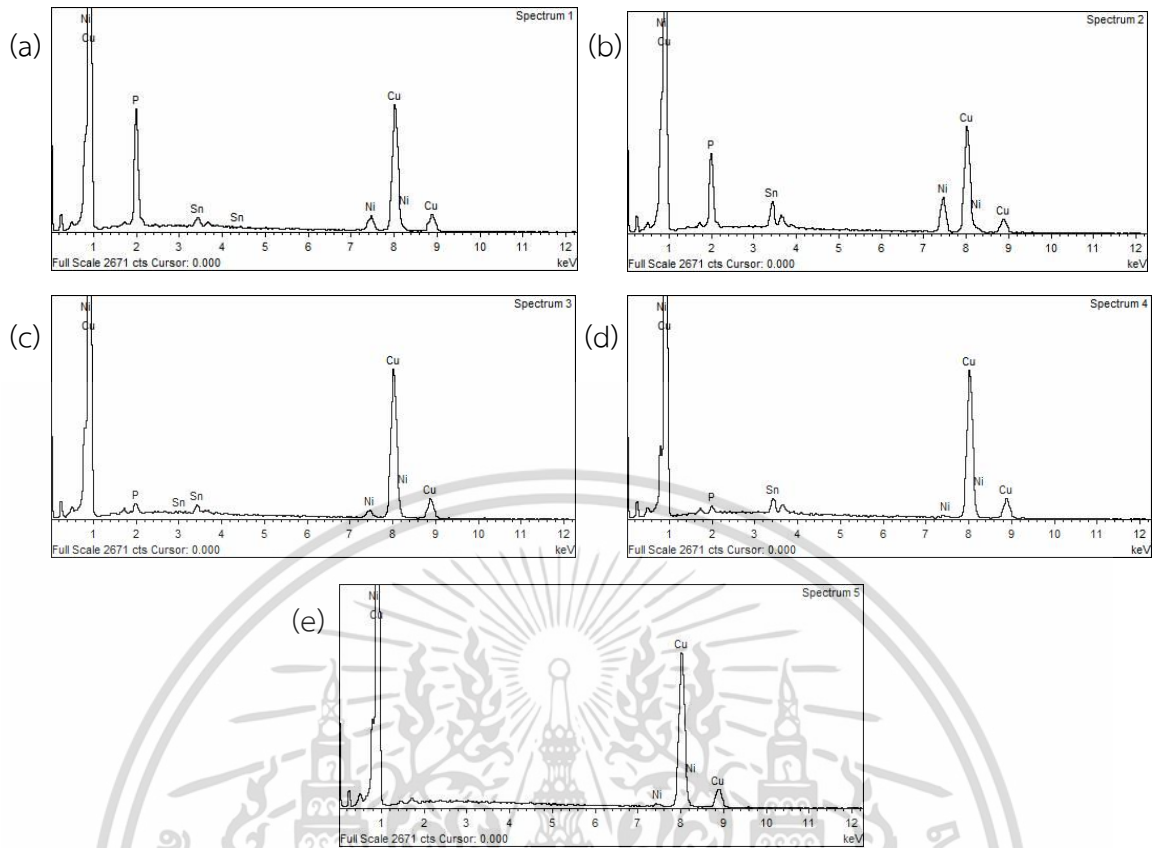
รูปที่ 4.63 สเปกตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเดิม ชนิดอสังฐาน แผ่นทองแดงและโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 0.9 วินาที (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่งที่ 5 (f) ตำแหน่งที่ 6



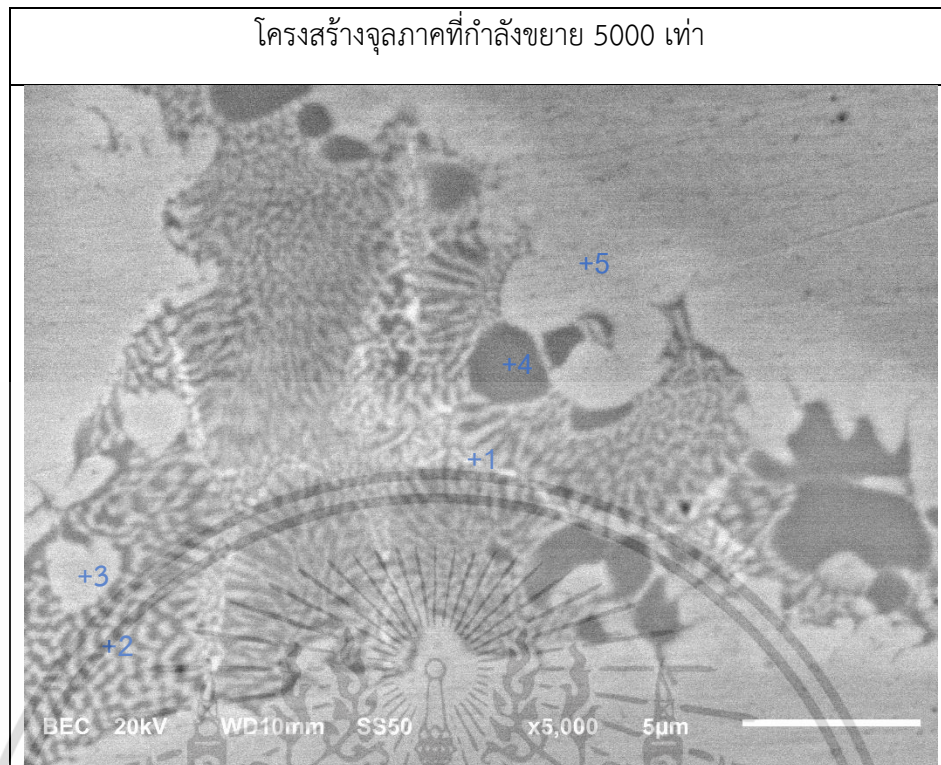
รูปที่ 4.64 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสังฐานและโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 0.9 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

ตารางที่ 4.26 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสังฐานและโพลีทองแดง ภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 0.9 วินาที

ตำแหน่ง	องค์ประกอบทางเคมี								Possible Phase
	Cu		Ni		Sn		P		
	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	
1	75.49	65.52	6.28	5.90	2.93	1.36	15.29	27.22	Cu <sub>3</sub> P
2	64.98	60.18	16.06	16.09	8.75	4.34	10.21	19.39	(Cu,Ni) <sub>3</sub> P
3	92.51	91.95	3.32	3.57	2.68	1.42	1.50	3.05	Cu-rich
4	92.49	93.82	0.75	0.82	5.67	3.08	1.09	2.27	Cu-rich
5	98.94	98.85	1.06	1.15	-	-	-	-	Cu-rich



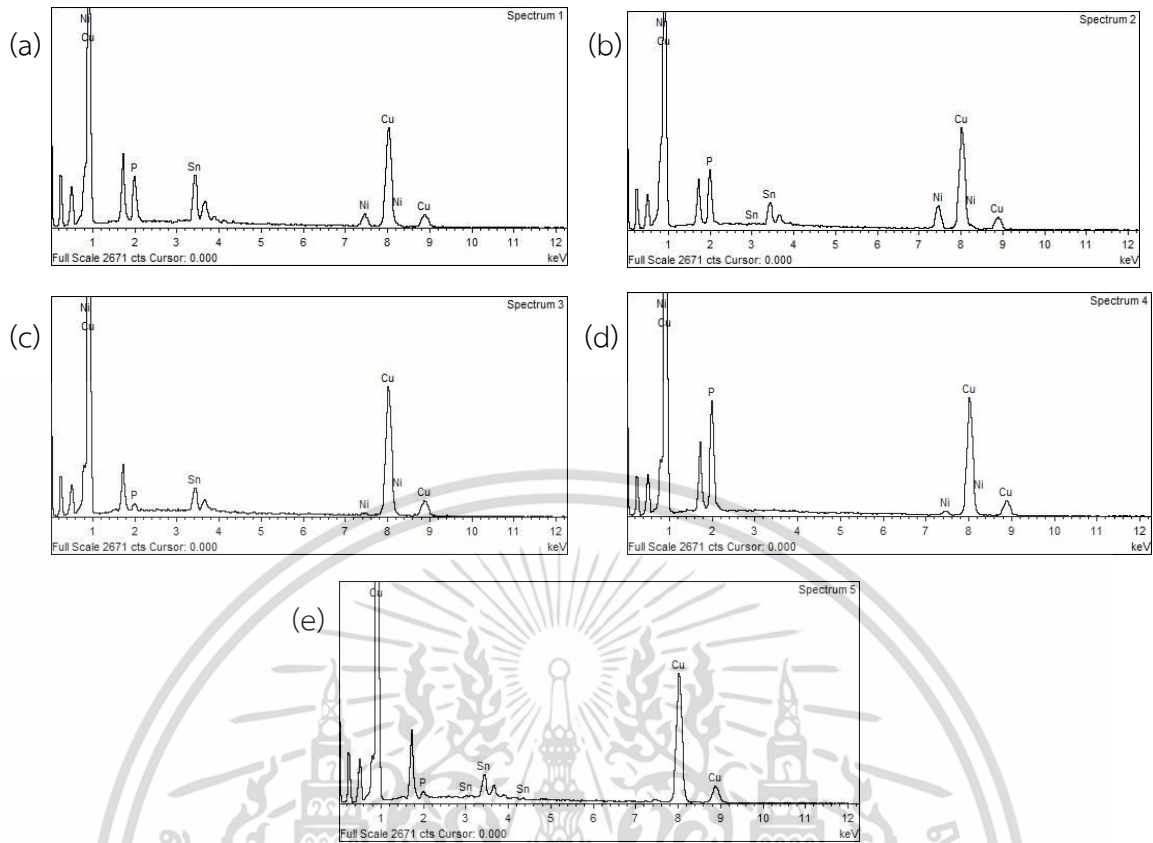
รูปที่ 4.65 สเปกตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเดิม ชนิดอสังฐานและโพนทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 0.9 วินาที (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่งที่ 5



รูปที่ 4.66 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานที่แทรกเข้าไปในโพมทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 0.9 วินาที ที่บริเวณด้านบนของชิ้นงาน ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

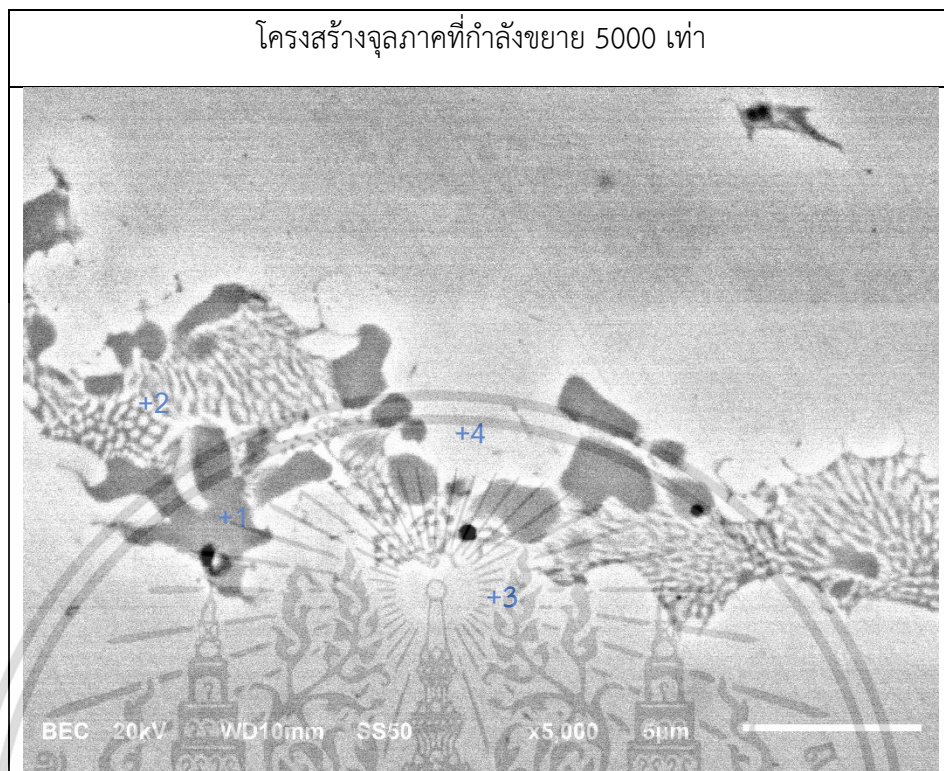
ตารางที่ 4.27 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานและโพมทองแดง ภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 0.9 วินาที ที่บริเวณด้านบนของชิ้นงาน

ตำแหน่ง	องค์ประกอบทางเคมี								Possible Phase
	Cu		Ni		Sn		P		
	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	
1	68.21	68.59	6.09	6.63	18.51	9.96	7.19	14.82	(Cu,Ni) <sub>2</sub> P
2	69.81	65.58	12.50	12.70	8.70	4.37	9.00	17.34	(Cu,Ni) <sub>3</sub> P
3	88.35	90.83	1.13	1.26	9.15	5.04	1.36	2.87	Cu-rich
4	80.96	68.48	1.84	1.69	-	-	17.19	29.83	Cu <sub>3</sub> P
5	89.72	92.37	-	-	9.03	4.97	1.26	2.66	Cu-rich



รูปที่ 4.67 สเปกตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเดิม ชนิดอสนฐานที่แทรกเข้าไปในโคมทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 0.9 วินาที ที่ บริเวณด้านบนของชิ้นงาน a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่งที่ 5

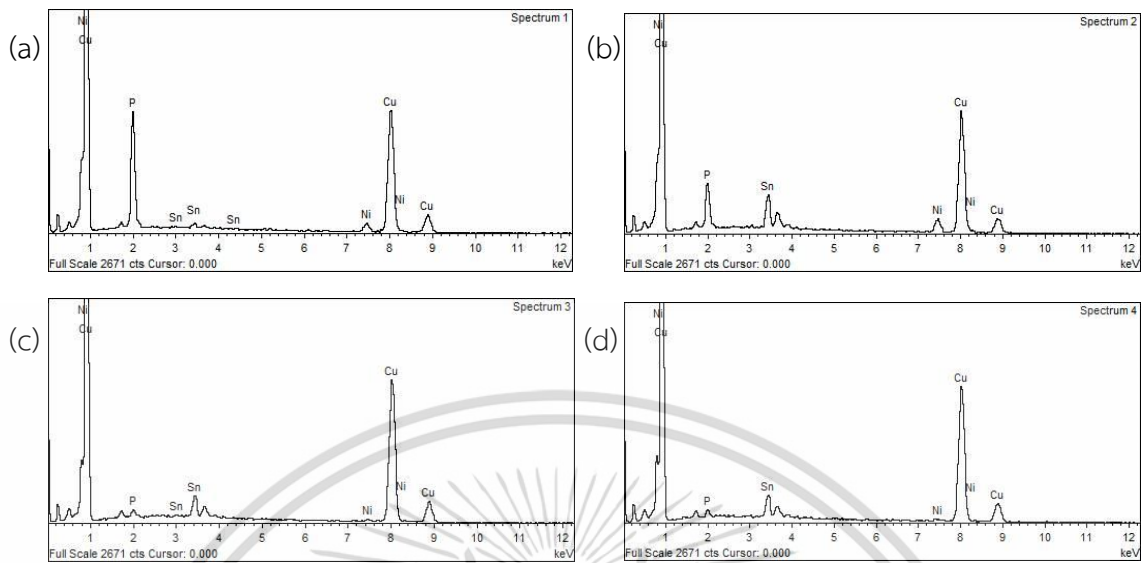
#### 4.2.14 ชิ้นงานภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 1 วินาที



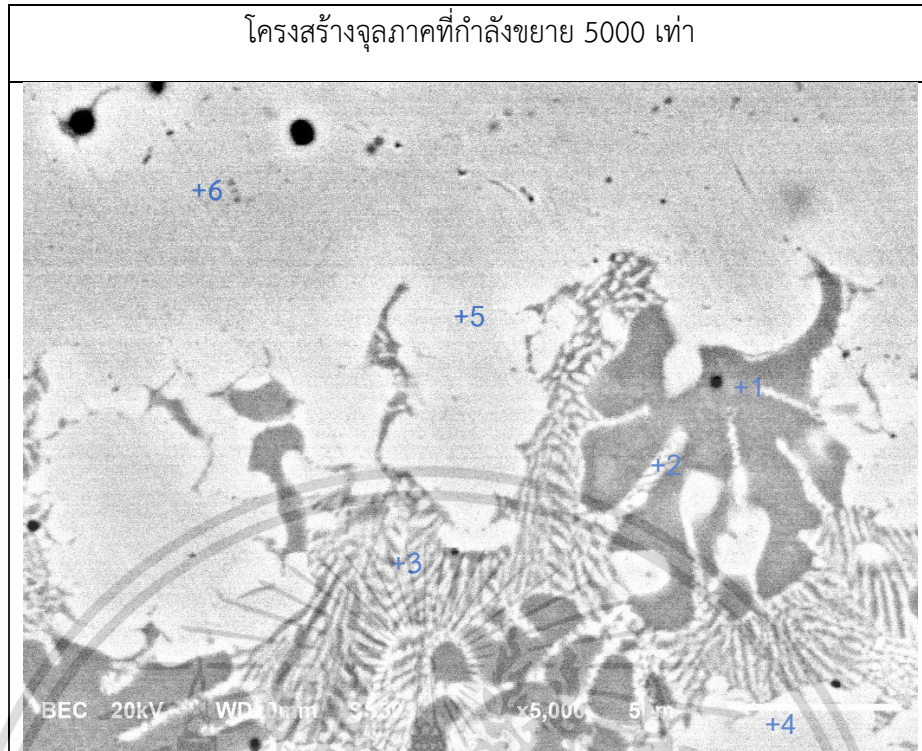
รูปที่ 4.68 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสังฐาน แผ่นทองแดงและโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 1 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

ตารางที่ 4.28 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสังฐาน แผ่นทองแดงและโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 1 วินาที

ตำแหน่ง	องค์ประกอบทางเคมี								Possible Phase
	Cu		Ni		Sn		P		
	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	
1	78.35	67.30	3.83	3.56	1.74	0.80	16.09	28.35	Cu <sub>3</sub> P
2	75.07	73.81	6.26	6.66	12.16	6.40	6.51	13.14	(Cu,Ni) <sub>3</sub> P
3	90.76	93.11	0.85	0.95	7.54	4.14	0.86	1.80	Cu-rich
4	89.87	92.29	0.66	0.73	8.34	4.59	1.14	2.39	Cu-rich



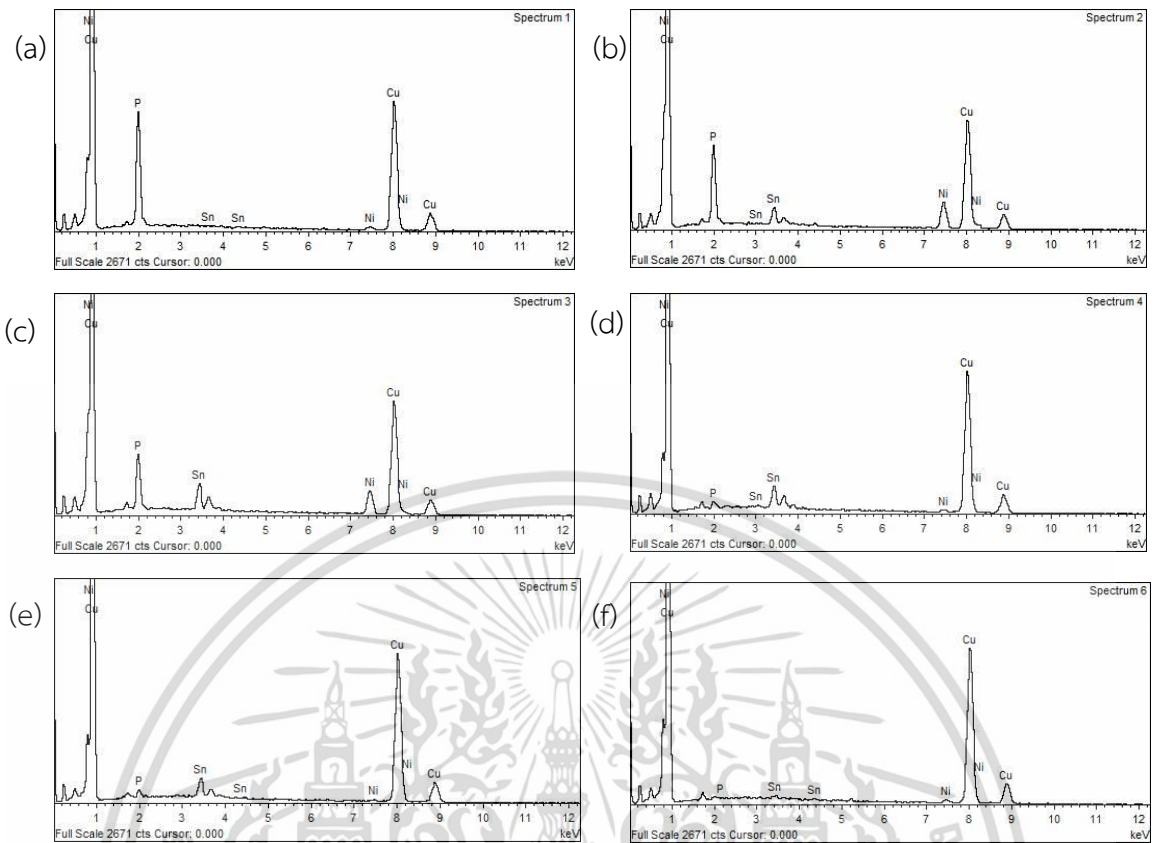
รูปที่ 4.69 สเปกตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติม  
 ชนิดออสตีไนต์ แผ่นทองแดงและโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 1 วินาที  
 (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4



รูปที่ 4.70 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสังฐานและโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 1 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

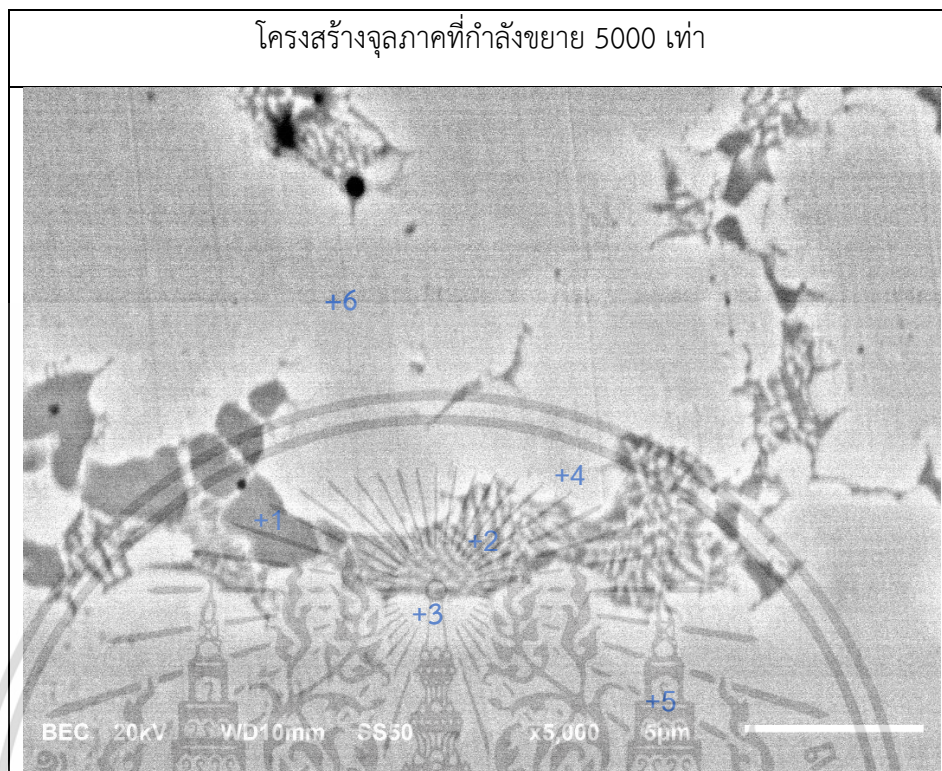
ตารางที่ 4.29 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสังฐานและโพลีทองแดง ภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 1 วินาที

ตำแหน่ง	องค์ประกอบทางเคมี								Possible Phase
	Cu		Ni		Sn		P		
	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	
1	82.75	70.88	1.26	1.17	0.11	0.05	15.88	27.90	Cu <sub>3</sub> P
2	70.35	63.79	13.04	12.79	5.46	2.65	11.16	20.76	(Cu,Ni) <sub>3</sub> P
3	71.19	67.92	11.25	11.61	9.61	4.91	7.95	15.56	(Cu,Ni) <sub>3</sub> P
4	89.95	92.43	1.04	1.16	8.08	4.44	0.93	1.97	Cu-rich
5	91.95	93.46	0.65	0.72	6.24	3.39	1.17	2.43	Cu-rich
6	97.28	97.37	1.18	1.28	1.19	0.64	0.35	0.71	Cu-rich



รูปที่ 4.71 สเปกตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติม  
 ชนิดออสถินและโพลีเมทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 1 วินาที (a) ตำแหน่งที่ 1  
 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่งที่ 5 (f) ตำแหน่งที่ 6

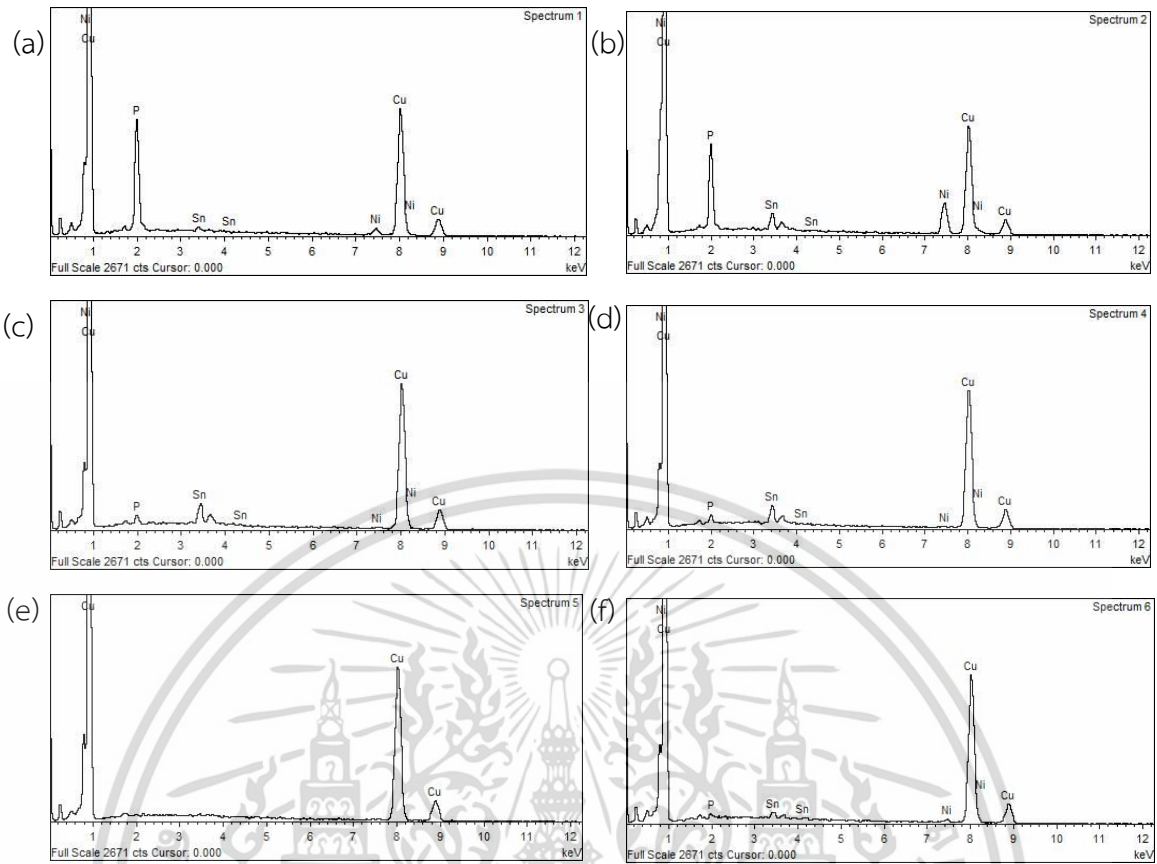
#### 4.2.15 ชิ้นงานภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 1.1 วินาที



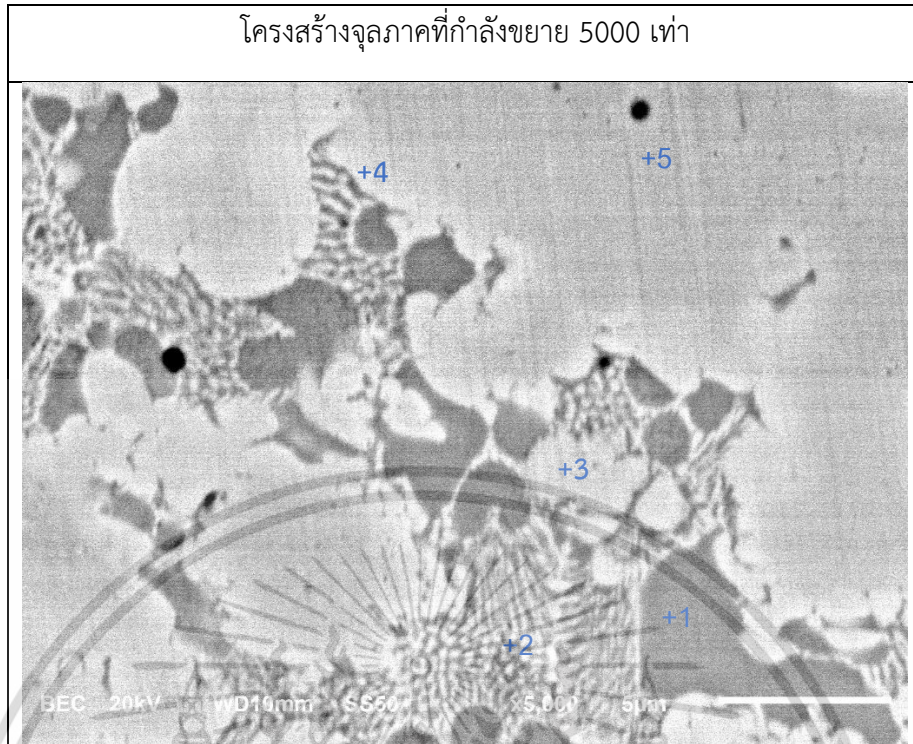
รูปที่ 4.72 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสังฐาน แผ่นทองแดงและโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 1.1 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

ตารางที่ 4.30 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสังฐาน แผ่นทองแดงและโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 1.1 วินาที

ตำแหน่ง	องค์ประกอบทางเคมี								Possible Phase
	Cu		Ni		Sn		P		
	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	
1	80.40	69.33	2.76	2.57	1.30	0.60	15.54	27.49	Cu <sub>3</sub> P
2	67.29	60.58	15.23	14.84	5.64	2.72	11.84	21.86	(Cu,Ni) <sub>3</sub> P
3	91.41	93.15	0.23	0.25	7.04	3.84	1.32	2.76	Cu-rich
4	92.22	93.76	0.34	0.38	6.27	3.41	1.18	2.45	Cu-rich
5	100.00	100.00	-	-	-	-	-	-	Cu
6	95.55	95.85	1.28	1.38	2.48	1.33	0.70	1.43	Cu-rich



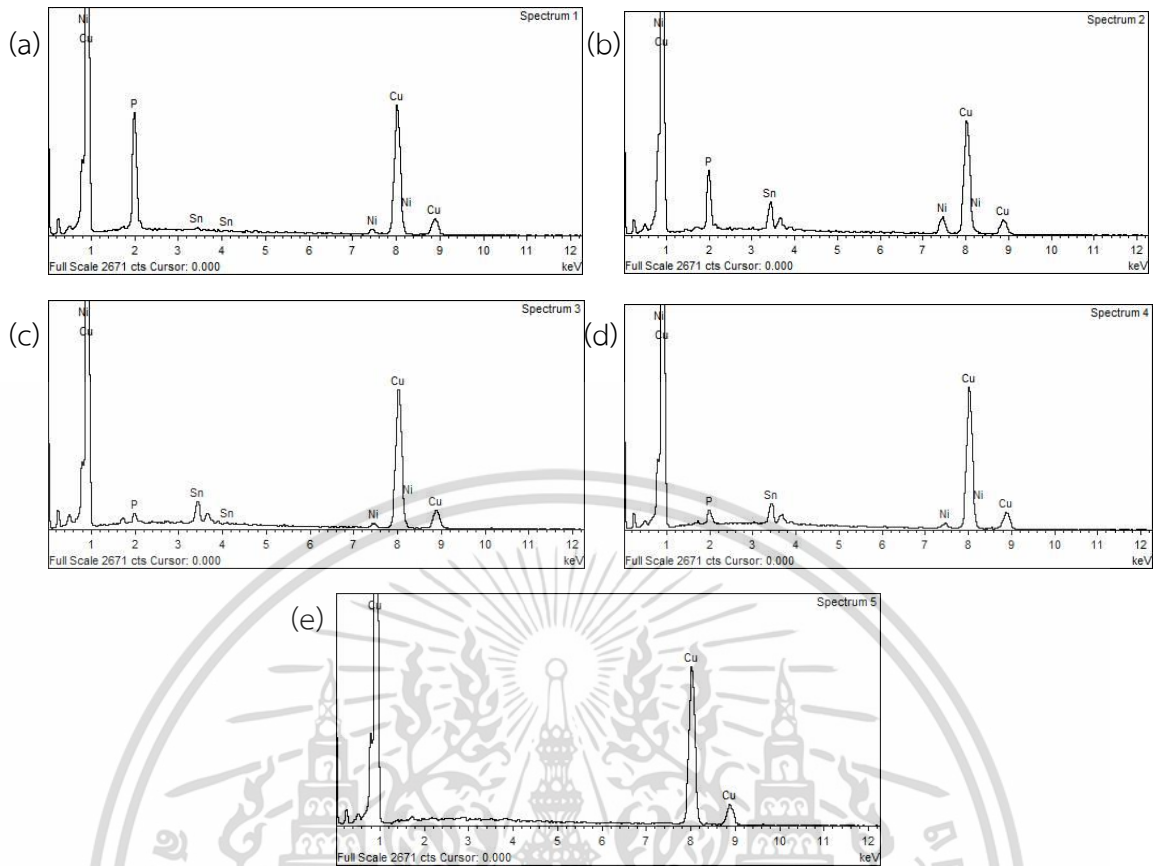
รูปที่ 4.73 สเปกตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติม  
 ชนิดอสัณฐาน แผ่นทองแดงและโพลีทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 1.1 วินาที  
 (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่งที่ 5  
 (f) ตำแหน่งที่ 6



รูปที่ 4.74 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานและโพลีเมทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 1.1 วินาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

ตารางที่ 4.31 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดอสัณฐานและโพลีเมทองแดงภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 1.1 วินาที

ตำแหน่ง	องค์ประกอบทางเคมี								Possible Phase
	Cu		Ni		Sn		P		
	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	(%wt)	(%at)	
1	80.60	68.90	2.15	1.99	0.89	0.41	16.36	28.70	Cu <sub>3</sub> P
2	73.16	69.50	8.25	8.48	9.86	5.01	8.73	17.01	(Cu,Ni) <sub>3</sub> P
3	89.00	90.76	1.95	2.15	7.67	4.19	1.38	2.90	Cu-rich
4	88.74	89.95	1.79	1.96	7.55	4.10	1.92	3.98	Cu-rich
5	100.00	100.00	-	-	-	-	-	-	Cu

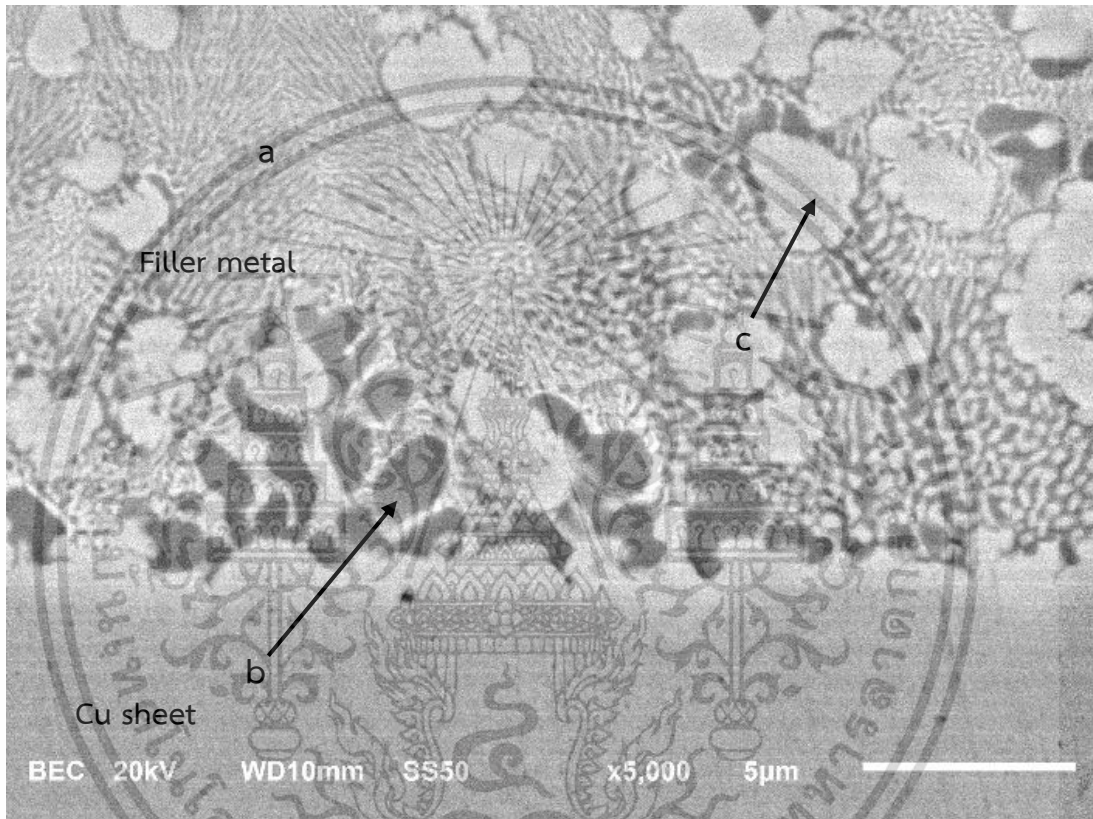


รูปที่ 4.75 สเปกตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณรอยเชื่อมของโลหะเติมชนิดออสโมเนียมและโพรมิเทียมภายใต้กระแสไฟฟ้าขนาด 930 A เวลา 1.1 วินาที (a) ตำแหน่งที่ 1 (b) ตำแหน่งที่ 2 (c) ตำแหน่งที่ 3 (d) ตำแหน่งที่ 4 (e) ตำแหน่งที่ 5

จากรูปภาพข้างต้น เป็นการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 5000 เท่า และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี โดยทำการวิเคราะห์ชิ้นงานในค่ากระแสไฟฟ้าและเวลาที่ต่างกัน ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์ที่จุดต่าง ๆ บนชิ้นงาน โดยแสดงเป็นจุดสเปกตรัมต่าง ๆ ดังรูป แล้วจึงแสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของจุดนั้น ๆ ในรูปของกราฟ และแสดงสัดส่วนร้อยละขององค์ประกอบต่าง ๆ ในสัดส่วนเปอร์เซ็นต์น้ำหนักและสัดส่วนเปอร์เซ็นต์อะตอม ซึ่งจากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีนี้ทำให้ทราบว่าที่จุดต่าง ๆ บนชิ้นงานมีโครงสร้างเป็นอย่างไรและทราบถึงองค์ประกอบทางเคมีที่จุดโครงสร้างนั้น ๆ ซึ่งทำให้สามารถนำไปวิเคราะห์ได้ในขั้นตอนต่อไป

### 4.3 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาค

เมื่อทำการเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคจากภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ที่ กำลังขยาย 2000 เท่า เฟสที่เกิดขึ้นในรอยเชื่อมบริเวณที่เป็นโลหะเติมชนิดออสถินฐาน จะมี Proeutectic alpha (สีดำ) มีความเป็นไปได้ว่าเป็นเฟส  $\text{Cu}_3\text{P}$ , Proeutectic beta (สีขาว) มีความเป็นไปได้ว่าเป็นเฟส Cu-rich และ Eutectic มีความเป็นไปได้ว่าเป็นเฟส  $(\text{Cu,Ni})_3\text{P}$  ซึ่งเฟสเหล่านี้จะเป็นโครงสร้างดุลยภาพ (Equilibrium structure) เนื่องจากการปล่อยให้เย็นตัวตามอุณหภูมิห้อง



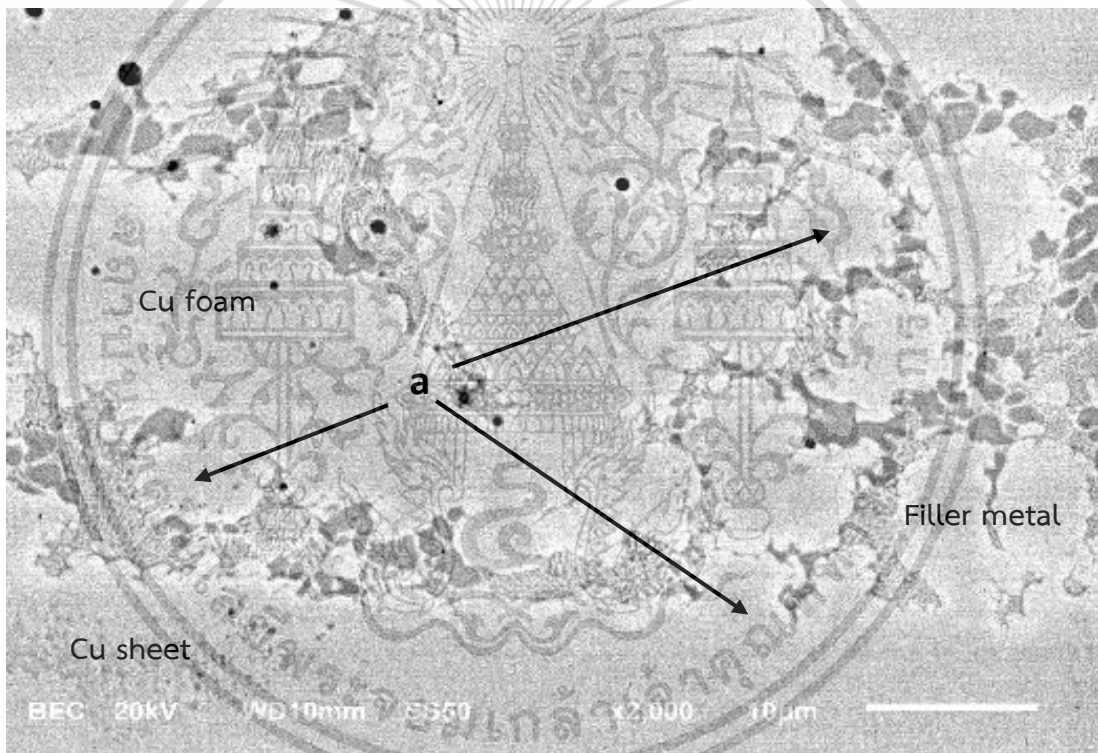
รูปที่ 4.76 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของชิ้นงานภายใต้กระแสไฟฟ้า 232.5 A และเวลา 0.9 วินาที ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

จากรูปที่ 4.76 แสดงเฟสต่าง ๆ ของชิ้นงานดังนี้ (a) เฟส Eutectic  $((\text{Cu,Ni})_3\text{P})$  (b) เฟส Proeutectic alpha  $(\text{Cu}_3\text{P})$  (c) เฟส Proeutectic beta (Cu-rich) เฟส Proeutectic alpha มีปริมาณสัดส่วนอะตอมของฟอสฟอรัส (P) อาจสูงถึง 20 - 30% และในส่วนของเฟส Proeutectic beta (Cu-rich) จะมีปริมาณสัดส่วนอะตอมของดีบุก (Sn) ที่มากกว่าฟอสฟอรัสเพียงเล็กน้อยแต่สัดส่วนอะตอมของทองแดง (Cu) จะอยู่ประมาณ 90% และ Eutectic  $((\text{Cu,Ni})_3\text{P})$  จะมีปริมาณฟอสฟอรัสและดีบุกที่ใกล้เคียงกันและมีนิกเกิล (Ni) เพิ่มขึ้นมาอยู่โดยประมาณ 10%

เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้าเท่ากันแต่เวลาต่างกัน สิ่งที่สังเกตเห็นได้ชัดเจนก็คือขนาดของเกรนที่มีลักษณะเป็นเดนไดรต์หรือในส่วนของเฟส Proeutectic beta (Cu-rich) จะมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

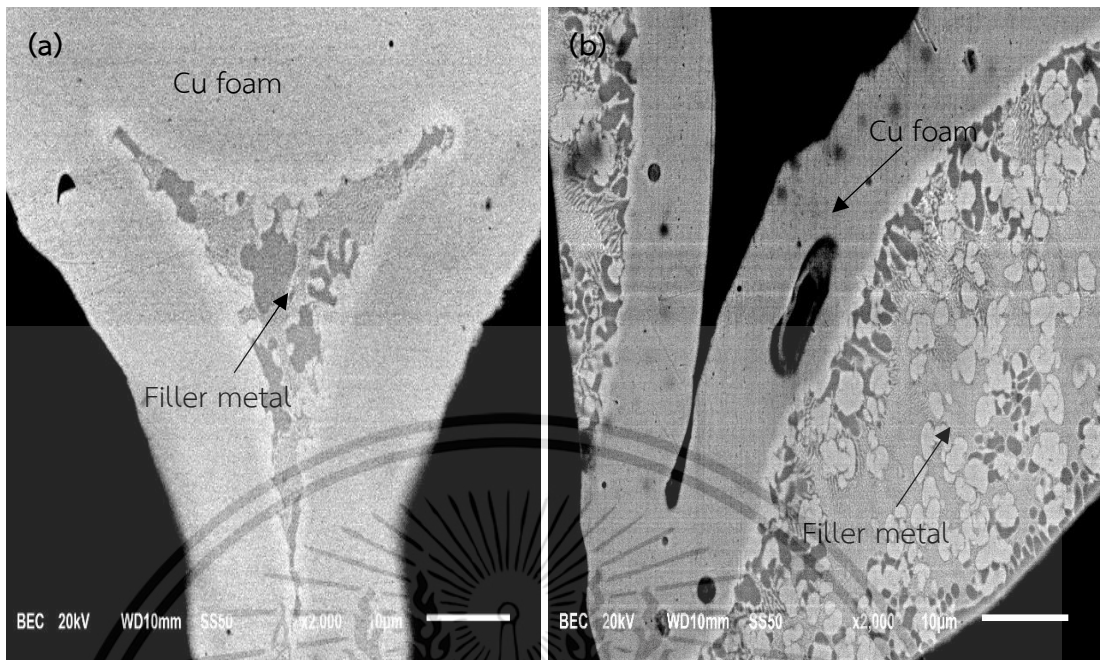
ขนาดใหญ่มากขึ้นเนื่องจากมีระยะเวลาในการขยายตัวที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันเฟสของ Proeutectic alpha ( $Cu_3P$ ) ก็เกิดขึ้นรอบ ๆ ของเดนไดรต์และเมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่ใช้เวลาเท่ากันแต่กระแสไฟฟ้าต่างกัน จะเห็นได้ว่าเมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ความร้อนในชิ้นงานสูงขึ้นทำให้บริเวณขอบของแผ่นทองแดงและ โฟมทองแดง เกิดการหลอมละลายและตัวโลหะเติมที่เป็นออสติฐาน จะหลอมรวมทำให้เกิดเฟส Proeutectic beta (Cu-rich) ขนาดใหญ่หรือที่เป็นโครงสร้างแบบเดนไดรต์และลดการเกิดเฟสอื่น ๆ ซึ่งสัดส่วนอะตอมในบริเวณเหล่านี้จะมีทองแดงที่สูงถึง 90% มีสัดส่วนอะตอมของฟอสฟอรัสและดีบุกที่ใกล้เคียงกันโดยประมาณ 3% และสิ่งที่เกิดขึ้นเมื่อค่ากระแสไฟฟ้าที่สูงและเวลาที่สูงจะเห็นโครงสร้างจุลภาคในลักษณะที่เฟส Proeutectic beta (Cu-rich) ที่มีปริมาณสัดส่วนอะตอมของทองแดง (Cu) สูง จะขยายตัวอย่างเต็มที่และหลอมรวมเข้ากับผิวของแผ่นทองแดงและโฟมทองแดงจนมีขนาดใหญ่และปริมาณเฟสอื่น ๆ จะลดลง



รูปที่ 4.77 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของชิ้นงานภายใต้กระแสไฟฟ้า 930 A และเวลา 1.1 วินาที ที่กำลังขยาย 2000 เท่า

โดย (a) คือเฟส Proeutectic beta (Cu-rich) ที่มีขนาดใหญ่และหลอมรวมเข้าบริเวณผิวของแผ่นทองแดงและโฟมทองแดง เมื่อใช้ SEM ตรวจสอบบริเวณด้านบนของชิ้นงานที่กระแสไฟฟ้ากับเวลาที่สูง ๆ จะเห็นโลหะเติมเกาะอยู่โดยรอบของแท่งโฟมทองแดง (Strut) และบางส่วนจะแทรกเข้าไปในโพรงภายใน (Hollow) ของโฟมทองแดง (รูปที่ 4.78) โครงสร้างจุลภาคจะมีเฟส Proeutectic alpha ( $Cu_3P$ ) และเฟส Eutectic ( $(Cu,Ni)_3P$ ) ที่มากกว่าบริเวณที่เป็นรอยเชื่อม

เนื่องจากความร้อนที่แผ่ขึ้นไปไม่ได้



รูปที่ 4.78 โลหะเติมที่บริเวณด้านบนชิ้นงาน ที่กำลังขยาย 2000 เท่า (a) โลหะเติมที่แทรกเข้าไปในโพรงภายในของโฟมทองแดง และ (b) โลหะเติมที่เกาะอยู่ด้านนอกของแท่งโฟมทองแดง

## บทที่ 5

### สรุปและอภิปรายผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงสรุปและอภิปรายผลของงานวิจัยเรื่อง การเล่นประสานโฟมทองแดงโดยใช้การเชื่อมความต้านทานแบบทางอ้อม ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

1. การสรุปผลและการอภิปรายผล
2. ข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลและการอภิปรายผล

จุดประสงค์หลักของการทดลองเชื่อมชิ้นงานในครั้งนี้คือ เพื่อศึกษาผลของค่ากระแสไฟฟ้าและเวลาในการเล่นประสานที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม โดยสรุปผลได้ดังนี้

##### 5.1.1 การเชื่อมติดกันของชิ้นงาน

จากการทดลองเชื่อมชิ้นงานด้วยค่ากระแสไฟฟ้าและเวลาต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.1 แล้วพบว่า มีชิ้นงานที่เชื่อมไม่ติดกันอยู่หนึ่งค่าคือ ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 232.5 A และเวลา 0.8 วินาที โดยชิ้นงานไม่สามารถเชื่อมติดกันได้เนื่องจากโลหะเติมชนิดอสัณฐานที่ทำหน้าที่ประสานชิ้นงานไม่สามารถละลายได้และจากการทดลองเชื่อมชิ้นงานนอกเหนือจากค่าในตารางที่ 3.1 ยังพบว่า ที่ค่ากระแสไฟฟ้าที่ต่ำกว่าตั้งแต่ 232.5 A และเวลาต่ำกว่า 0.8 วินาที ชิ้นงานจะไม่สามารถเชื่อมติดกันได้เนื่องจากโลหะเติมชนิดอสัณฐานไม่ละลายและที่ค่ากระแสไฟฟ้าที่สูงกว่า 930 A และเวลามากกว่า 1.1 วินาที ไม่เหมาะที่ใช้ในการเชื่อมชิ้นงานนี้เนื่องจากจะทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียรูปทรงได้

##### 5.1.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

จากการศึกษาชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ทำให้สามารถแยกแยะโลหะเติมชนิดอสัณฐานออกจากทองแดงได้อย่างชัดเจน โดยโลหะเติมชนิดอสัณฐานมีแนวโน้มในการละลายและการไหลไปตามชิ้นงานมากขึ้นตามค่ากระแสไฟฟ้าและเวลาที่มากขึ้นและเกรนของโลหะเติมชนิดอสัณฐานมีแนวโน้มโตขึ้นตามค่ากระแสไฟฟ้าและเวลาที่มากขึ้นด้วยเช่นกันและในชิ้นงานที่มีการใช้ค่ากระแสไฟฟ้าสูง ๆ และเวลาในการเล่นที่มาก ชิ้นงานจะเกิดการเสียรูปเนื่องจากเกิดการหดตัวของโฟมทองแดงลงเล็กน้อย

##### 5.1.3 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

โครงสร้างจุลภาคจากภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดพบว่าเฟสที่เกิดขึ้นในบริเวณที่เป็นโลหะเติม จะมี Proeutectic alpha (สีดำ) มีความเป็นไปได้ว่าเป็นเฟส  $Cu_3P$ , Proeutectic beta (สีขาว) มีความเป็นไปได้ว่าเป็นเฟส Cu-rich และเฟส Eutectic มีความเป็นไปได้

ว่าเป็นเฟส (Cu,Ni)<sub>3</sub>P โดยเฟส Proeutectic alpha (Cu<sub>3</sub>P) มีปริมาณสัดส่วนอะตอมของฟอสฟอรัส (P) อาจสูงถึง 20 - 30% และในส่วนของเฟส Proeutectic beta (Cu-rich) จะมีปริมาณสัดส่วนอะตอมของดีบุก (Sn) ที่มากกว่าฟอสฟอรัสเพียงเล็กน้อยแต่สัดส่วนอะตอมของทองแดง (Cu) จะอยู่ประมาณ 90% และ Eutectic ((Cu,Ni)<sub>3</sub>P) จะมีปริมาณฟอสฟอรัสโดยประมาณ 20% แต่จะมีนิกเกิล (Ni) เพิ่มขึ้นมาอยู่โดยประมาณ 10%

เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้าเท่ากันแต่เวลาต่างกัน สิ่งที่ได้สังเกตเห็นชัดก็คือขนาดของเกรนหรือในส่วนของเฟส Proeutectic beta (Cu-rich) จะมีขนาดใหญ่มากขึ้นเนื่องจากมีระยะเวลาในการขยายตัวที่เพิ่มขึ้นและเมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่ใช้เวลาเท่ากันแต่กระแสไฟฟ้าต่างกัน จะเห็นได้ว่าเมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ความร้อนในชิ้นงานสูงขึ้นทำให้บริเวณขอบของแผ่นทองแดงโพมทองแดง เกิดการหลอมเหลวและโลหะเติมจะหลอมรวมทำให้เกิดเฟส Proeutectic beta (Cu-rich) ขนาดใหญ่และลดการเกิดเฟสอื่น ๆ ซึ่งสัดส่วนอะตอมในบริเวณเหล่านี้จะมีทองแดงที่สูงถึง 90% มีสัดส่วนอะตอมของฟอสฟอรัสและดีบุกที่ใกล้เคียงกันโดยประมาณ 3%

เมื่อสังเกตโครงสร้างจุลภาคด้านบนของชิ้นงานในกระแสไฟฟ้าและเวลาที่สูงจะเห็นโลหะเติมแทรกตัวเข้าไปภายในโพรง (Hollow) ของโพมทองแดง แต่จะไม่หลอมรวมเข้ากับแท่งโพมทองแดง (Strut) เนื่องจากความร้อนที่แผ่ไปไม่ถึง

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การทำที่จับชิ้นงานขณะทำการเชื่อมจะต้องมีประสิทธิภาพที่ดี ทนต่อความร้อนและต้องเป็นฉนวน ไม่นำไฟฟ้า แรงกดขึ้นมีผลต่อโครงสร้างที่เกิดขึ้น หากแรงกดไม่เท่ากันในแต่ละการทดลอง จะส่งผลให้ผลลัพธ์ไม่น่าเชื่อถือและโครงสร้างจุลภาคเกิดการเปลี่ยนแปลง หากแรงกดมากเกินไปจะส่งผลเสียหายต่อโพมทองแดง

2. จากการทดลอง งานทดลองหนึ่งชิ้นไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ผลได้ เนื่องจากการเชื่อมที่ไม่สมบูรณ์เพราะค่าตัวแปรที่ใช้ไปไม่เหมาะสม เนื่องจากการปรับค่าของเครื่องมีข้อจำกัด เมื่อขยายสเกลการทดลองให้ค่าสูงขึ้นเพื่อให้รอยเชื่อมสมบูรณ์ทุกชิ้น งานทดลองที่ค่ากระแสไฟฟ้าและเวลาในการเชื่อมสูงจะส่งผลให้ชิ้นงานเย็น ไม่สามารถใช้งานได้

3. การทำให้ก๊าซปกคลุมให้ทั่วถึงเพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชันในชิ้นงาน

4. การตัดชิ้นงานเพื่อทำการวิเคราะห์ผลจาก SEM ควรใช้ใบตัดที่ดี แรงกดไม่สูงมาก ทางที่ดีควรใช้เครื่องตัดด้วยลวดเพื่อป้องกันการเสียหายต่อโพมทองแดงและลดระยะเวลาในการขัดชิ้นงานเพื่อลบลรอยตัด

5. ควรเข้าสู่กระบวนการ SEM ทันทีที่ขัดชิ้นงานเสร็จเนื่องจากการเกิดสนิมของชิ้นงานเมื่อปล่อยทิ้งไว้นานหรือควรจะต้องป้องกันการเกิดสนิมให้ดีหากต้องใช้เวลา ก่อนเข้าสู่กระบวนการนาน และต้องขัดชิ้นงานให้เป็นระนาบเรียบให้ดีเพื่อความชัดเจนจากภาพเพื่อการวิเคราะห์

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Resistance Welder Manufacturers' Association Alliance, 2003. RESISTANCE WELDING MANUAL. Philadelphia.
- [2] “Resistance Welding”, [ออนไลน์]:  
<https://www.swantec.com/technology/resistance-welding/>. (ธันวาคม,2562)
- [3] Muneo Matushita and Rinsei Ikeda. (2011). Indirect spot welding method, Tokyo: JFE Steel Corporation.
- [4] “Fundamentals of Small Parts Resistance Welding”, [ออนไลน์]:  
[http://www.amadamiyachi.com/servlet/servlet.FileDownload?retURL=%2Fapeax%2Feducationalresources\\_articles&file=01530000000Jybm](http://www.amadamiyachi.com/servlet/servlet.FileDownload?retURL=%2Fapeax%2Feducationalresources_articles&file=01530000000Jybm) (ธันวาคม,2562)
- [5] “An Introduction to Brazing”,  
[ออนไลน์]: [https://www.oerlikon.com/ecomaXL/files/metco/oerlikon\\_BRO-0010.4\\_Introduction\\_to\\_Brazing\\_EN.pdf&download=1](https://www.oerlikon.com/ecomaXL/files/metco/oerlikon_BRO-0010.4_Introduction_to_Brazing_EN.pdf&download=1) (มกราคม,2563)
- [6] “Brazing foil”, [ออนไลน์]: <https://vacuumschmelze.com/Products/Further-Technologies/Brazing-Foils---VITROBRAZE> (ธันวาคม,2562)
- [7] สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย, 2014. การสำรวจสถานภาพอุตสาหกรรมโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Non-ferrous metals) ทองแดง.
- [8] “Thermal Conductivity”, [ออนไลน์]:  
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Tables/thrcn.html> (ธันวาคม,2562)
- [9] Hideo Nakajima. (2013). Porous Metals with Directional Pores, Tokyo: Springer.
- [10] “Metallic Foams” [ออนไลน์]: <https://www.filter-elements.org/filter-elements/metallic-foams.html> (ธันวาคม,2562)
- [11] Yang Leng. (2014). Materials Characterization Introduction to Microscopic and Spectroscopic Methods, Second Edition. Singapore: Markono Print Media Pte Ltd.
- [12] “PROTON I+ digital”, [ออนไลน์]: <http://fan-austria.at/en/node/62> (มีนาคม,2563)



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Spot welding device



### Specification

Technical data	Proton E+
Mains voltage	400 V
Mains fuse protection	25 A/32 A
Max. welding output	44 kVA
Dimension l/w/h	500/180/400
Weight	35 kg
Welding current	5.5 kA/7 % ED
Open circuit voltage	11,5 V
Insulation class	I.CI.F
Degree of protection	IP 21
Cooling	Water cooling AF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้