

การศึกษาผลของความเค้นตกค้างในแผ่นรองทองแดงที่มีต่อการ
เกิดและรูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรี
AN INVESTIGATION ON EFFECTS OF RESIDUAL STRESS
IN COPPER SUBSTRATE ON FORMATION AND
MORPHOLOGY OF INTERMETALLIC COMPOUNDS IN
SOLDER JOINT



นางสาวณัชชา คุณอนเนกสิน

MS. NUTCHA KUNANEKSIN

นางสาวสุพิชฌาย์ สุวรรณชาติรี

MS. SUPITCHA SUWANCHATREE

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมออกแบบการผลิตและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AN INVESTIGATION ON EFFECTS OF RESIDUAL STRESS
IN COPPER SUBSTRATE ON FORMATION AND
MORPHOLOGY OF INTERMETALLIC COMPOUNDS IN
SOLDER JOINT



MS. NUTCHA KUNANEKSIN
MS. SUPITCHA SUWANCHATREE

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
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์

การศึกษาผลของความเค้นตกค้างในแผ่นรองทองแดงที่มีต่อการ
เกิดและรูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรี
AN INVESTIGATION ON EFFECTS OF RESIDUAL STRESS IN
COPPER SUBSTRATE ON FORMATION AND MORPHOLOGY
OF INTERMETALLIC COMPOUNDS IN SOLDER JOINT

นักศึกษา


นางสาวณัชชา คุณอเนกสิน รหัสประจำตัว 59010392
นางสาวสุพิชฌาย์ สุวรรณชาติ รหัสประจำตัว 59011442

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมออกแบบการผลิตและวัสดุ

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์


(รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ)


(ดร.พชรพล ตันทวิรุฬห์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์

การศึกษาผลของความเค้นตกค้างในแผ่นรองทองแดงที่มีต่อการเกิดและรูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรี

นักศึกษา

นางสาวณัชชา คุณอเนกสิน

นางสาวสุพิชฌาย์ สุวรรณชาติ

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมออกแบบการผลิตและวัสดุ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา

2562

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์

รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

ดร.เพชรพล ตันทวีรุฬห์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความเค้นตกค้างในแผ่นรองทองแดงต่อการเกิดและรูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรี โดยใช้แผ่นทองแดงที่ขึ้นรูปโดยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าหนา 70 μm ดัดที่รัศมี 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm และ ∞ ซึ่งเกิดความเค้นตกค้างและความหนาแน่นบริเวณผิวทองแดงที่ต่างกัน โดยขึ้นงานที่ได้รับความเค้นอัดขณะดัดจะเกิดความเค้นตกค้างแบบดิ่งและมีความหนาแน่นบริเวณผิวทองแดงมาก ส่วนขึ้นงานที่ได้รับความเค้นดิ่งขณะดัดจะเกิดความเค้นตกค้างแบบอัดและมีความหนาแน่นบริเวณผิวทองแดงน้อย ใช้โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.7Cu ทำการบัดกรีจุ่มที่อุณหภูมิ 267 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 5 วินาที ทำให้ขึ้นงานเกิดชั้นของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรีเป็นเฟส Cu_6Sn_5 หรือ Cu_3Sn จากการศึกษาพบว่า ความเค้นตกค้างและความหนาแน่นบริเวณผิวของทองแดงมีผลต่อการเกิดและรูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรี โดยขึ้นงานที่มีรัศมี 15 mm เป็นขึ้นงานที่เกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่หนาที่สุด ทั้งกรณีขึ้นงานที่เกิดความเค้นตกค้างแบบอัดและแบบดิ่ง โดยปริมาณการเกิดสารประกอบเชิงโลหะลดลงในขึ้นงานอื่นๆ และสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นทั้งหมดมีรูปร่างแบบ Scallop และขึ้นงานที่เกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่หนากว่าจะมีความขรุขระที่น้อยกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อยอดอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	An Investigation on Effects of Residual Stress in Copper Substrate on Formation and Morphology of Intermetallic Compounds in Solder Joint
Student	Ms. Nutchra Kunaneksin Ms. Supitcha Suwanchatree
Degree	Bachelor of Engineering in Production Design and Materials Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year	2019
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Kannachai Kanlayasiri Dr. Phacharaphon Tunthawiroon

ABSTRACT

The objective of this research was to investigate the effects of residual stress in copper substrate on formation and morphology of intermetallic compounds in solder joint. Electrodeposited copper foil with thickness of 70 μm was bent into 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm and ∞ radius providing different residual stresses and atomic arrangements in copper foils. The specimens with compressive stress while loading provided tensile residual stress and high atomic packing at the outer surface. On the other hand, tensile stressed specimens while loading provided compressive residual stress and low atomic packing. During the soldering process, copper foil was dipped into molten Sn-0.7Cu lead-free solder at 267 °C for 5 seconds. The layer of intermetallic compound was found and the possible phase was either Cu_6Sn_5 or Cu_3Sn . It was found that the residual stress and atomic arrangements in copper foil affect the formation and morphology of intermetallic compounds in solder joint. For both compressive residual stressed and tensile residual stressed specimens, the specimens with 15 mm radius had the maximum thickness of intermetallic compounds while decreasing in other specimens. All specimens showed scallop-type morphology and the one with a thicker intermetallic layer possessed a more uniform layer.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่องการศึกษาผลของความเค้นตักในแผ่นรองทองแดงที่มีต่อการเกิดและรูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรี ผู้ดำเนินงานขอขอบพระคุณบุคลากรผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน ที่ได้ให้การสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณ มูลนิธิทาคาฮาชิ ซึ่งก่อตั้งโดยกลุ่มบริษัทมินิแบ ที่ได้มอบทุนสนับสนุนการทำงานวิจัยนี้จนสำเร็จ

ขอขอบพระคุณ บริษัท บางกอกอินดัสเทรียลลามิเนท จำกัด ที่ให้การสนับสนุนทางด้านข้อมูลและวัสดุสำคัญที่ใช้ในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ประจำภาควิชาและบุคลากรทุกท่าน ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำงานวิจัย รวมทั้งพัฒนาความรู้ความสามารถของผู้ดำเนินงานตลอดมา

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ และ ดร.เพชรพล ตันขวิรุฬห์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้สละเวลาในการให้คำแนะนำ ความรู้ ความช่วยเหลือ และแก้ไขข้อบกพร่อง รวมทั้งความใส่ใจในทุกๆ ด้านตลอดระยะเวลาในการทำงานวิจัยเสมอมา ทำให้งานวิจัยฉบับนี้มีความถูกต้อง สมบูรณ์และสำเร็จลุล่วงด้วยดี

นางสาวณัชชา คุณอนเนกสิน
นางสาวสุพิชฌาย์ สุวรรณชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.5 ระยะเวลาและแผนการดำเนินงาน.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 คุณสมบัติวัสดุ.....	3
2.1.1 ทองแดง.....	3
2.1.2 โลหะบัดกรี.....	5
2.1.3 ชั้นของสารประกอบเชิงโลหะ.....	6
2.2 ทฤษฎีการตัดงอ.....	8
2.3 การคำนวณความเค้นตกค้าง.....	10
2.4 หลักการแพร่ของอะตอม.....	12
2.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	15
2.6 เทคนิคเอกซเรย์สเปคโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน.....	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินงาน	
3.1 วัสดุและวิธีการทดลอง	17
3.1.1 วัสดุ.....	17
3.1.2 การเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง	18
3.2 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค.....	19
3.2.1 การใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	19
3.2.2 การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	20
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	
4.1 การวิเคราะห์ความเค้นขณะตัดชิ้นงานและความเค้นตกค้างหลังตัดชิ้นงาน	22
4.2 โครงสร้างจุลภาคของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรี	24
4.3 ปริมาณมาถนการเกิดของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรี	36
4.4 รูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรี	42
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงาน	
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	52
5.1.1 การวิเคราะห์ความเค้นขณะตัดชิ้นงานและความเค้นตกค้างหลังตัดชิ้นงาน...52	52
5.1.2 การวิเคราะห์สารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรี	52
5.2 ข้อเสนอแนะ	53
เอกสารอ้างอิง	54
ภาคผนวก.....	ผ1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย	2
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติต่างๆ ของทองแดง	4
ตารางที่ 2.2 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำกว่า 180°C.....	5
ตารางที่ 2.3 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 180°C ถึง 200°C.....	5
ตารางที่ 2.4 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 200°C ถึง 230°C.....	5
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีและอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.7Cu	17
ตารางที่ 4.1 รัศมีหลังเกิดการตีตัวกลับและความเค้นตกค้างแบบดึงบริเวณผิวชิ้นงาน.....	22
ตารางที่ 4.2 รัศมีหลังเกิดการตีตัวกลับและความเค้นตกค้างแบบอัดบริเวณผิวชิ้นงาน	23
ตารางที่ 4.3 สัดส่วนโดยจำนวนอะตอมของชิ้นงานที่ไม่ถูกตัด	25
ตารางที่ 4.4 สัดส่วนโดยจำนวนอะตอมของชิ้นงานด้านความเค้นอัด.....	25
ตารางที่ 4.5 สัดส่วนโดยจำนวนอะตอมของชิ้นงานด้านความเค้นดึง	25
ตารางที่ 4.6 พื้นที่ ความยาวรองรับ และความหนาของชั้นของสารประกอบเชิงโลหะ ในรอยบัดกรีของชิ้นงานที่ไม่ตัด.....	36
ตารางที่ 4.7 พื้นที่ ความยาวรองรับ และความหนาของชั้นของสารประกอบเชิงโลหะ ในรอยบัดกรีของชิ้นงานที่มีความเค้นตกค้างแบบดึง	37
ตารางที่ 4.8 พื้นที่ ความยาวรองรับ และความหนาของชั้นของสารประกอบเชิงโลหะ ในรอยบัดกรีของชิ้นงานที่มีความเค้นตกค้างแบบอัด.....	38
ตารางที่ 4.9 เส้นรอบรูป พื้นที่และเส้นรอบรูปต่อพื้นที่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ในรอยบัดกรีของชิ้นงานที่ไม่มีความเค้นตกค้าง	42
ตารางที่ 4.10 เส้นรอบรูป พื้นที่และเส้นรอบรูปต่อพื้นที่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ในรอยบัดกรีของชิ้นงานที่มีความเค้นตกค้างแบบดึง	43
ตารางที่ 4.11 เส้นรอบรูป พื้นที่และเส้นรอบรูปต่อพื้นที่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ในรอยบัดกรีของชิ้นงานที่มีความเค้นตกค้างแบบอัด	44

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 การผลิตแผ่นทองแดงด้วยวิธีการพอกพูนทางไฟฟ้า (Electrodeposition).....	4
รูปที่ 2.2 เฟสไดอะแกรมของ Cu-Sn.....	6
รูปที่ 2.3 ชั้นของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรี	7
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างรูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรีแบบ Scallop type.....	7
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างรูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรีแบบ Prism type	8
รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนรูปแบบของความเค้นจากการตัดงอ	8
รูปที่ 2.7 การเกิดการดีดตัวกลับของชิ้นงานในกระบวนการตัดงอ.....	9
รูปที่ 2.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในการเกิดการดีดตัวกลับ ของชิ้นงาน.....	9
รูปที่ 2.9 ระบบพิกัดของการโค้งงอของแผ่นวัสดุ	11
รูปที่ 2.10 การแพร่เนื่องจากความแตกต่างของความเค้น (Stress gradient).....	13
รูปที่ 2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและระยะทางการแพร่ที่เกิดขึ้น ภายใต้เงื่อนไขของเวลา.....	14
รูปที่ 2.12 สัญญาณที่เกิดขึ้นจากการยิงลำอิเล็กตรอนบนพื้นผิวของตัวอย่าง	15
รูปที่ 3.1 พื้นผิวของชิ้นงานที่ถูกพิจารณาทั้งสองด้าน	17
รูปที่ 3.2 แผ่นทองแดงที่ถูกตัดทั้ง 2 ด้าน	18
รูปที่ 3.3 ชิ้นงานที่ถูกขึ้นเรือนแบบเย็น (Cold mounting).....	19
รูปที่ 3.4 ลักษณะภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	20
รูปที่ 3.5 ตัวอย่างภาพ SEM ของแผ่นรองทองแดงแบบ Electrodeposited.....	20
รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะจากตำแหน่งแกนสะท้อนกับความเค้นตกค้างแบบดึง.....	23
รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะจากตำแหน่งแกนสะท้อนกับความเค้นตกค้างแบบอัด	23
รูปที่ 4.3 การวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS.....	24
รูปที่ 4.4 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ของชิ้นงานที่บัดกรีที่รัศมี ∞	27
รูปที่ 4.5 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ของชิ้นงานที่บัดกรีติดด้านความเค้นอัดที่รัศมี 5 mm	28
รูปที่ 4.6 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ของชิ้นงานที่บัดกรีติดด้านความเค้นอัดที่รัศมี 10 mm.....	29
รูปที่ 4.7 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ของชิ้นงานที่บัดกรีติดด้านความเค้นอัดที่รัศมี 15 mm.....	30
รูปที่ 4.8 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ของชิ้นงานที่บัดกรีติดด้านความเค้นอัดที่รัศมี 20 mm.....	31
รูปที่ 4.9 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ของชิ้นงานที่บัดกรีติดด้านความเค้นดึงที่รัศมี 5 mm.....	32
รูปที่ 4.10 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ของชิ้นงานที่บัดกรีติดด้านความเค้นดึงที่รัศมี 10 mm	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 4.11 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ของชิ้นงานที่บดกรีดด้านความเค้นดึงที่รัศมี 15 mm	34
รูปที่ 4.12 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ของชิ้นงานที่บดกรีดด้านความเค้นดึงที่รัศมี 20 mm	35
รูปที่ 4.13 ตัวอย่างการใช้โปรแกรม Image-Pro Express ในการวัดพื้นที่ ความยาวรองรับ และเส้นรอบรูปของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะ	36
รูปที่ 4.14 การเคลื่อนที่ของ Sn และ Cu ในชิ้นงานที่มีความเค้นตกค้างแบบดึง	39
รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเกิดของสารประกอบเชิงโลหะ กับรัศมีของชิ้นงานที่มีความเค้นตกค้างแบบดึง	39
รูปที่ 4.16 การเคลื่อนที่ของ Sn และ Cu ในชิ้นงานที่มีความเค้นตกค้างแบบอัด	40
รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเกิดของสารประกอบเชิงโลหะ กับรัศมีของชิ้นงานที่มีความเค้นตกค้างแบบอัด	41
รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเกิดของสารประกอบเชิงโลหะ กับรัศมีของชิ้นงาน	41
รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ของสารประกอบเชิงโลหะกับรัศมีของชิ้นงาน ที่มีความเค้นตกค้างแบบดึง	45
รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเส้นรอบรูปต่อพื้นที่ของสารประกอบเชิงโลหะ กับรัศมีของชิ้นงานที่มีความเค้นตกค้างแบบดึง	45
รูปที่ 4.21 รูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะด้านความเค้นอัด 5 mm	46
รูปที่ 4.22 รูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะด้านความเค้นอัด 10 mm	46
รูปที่ 4.23 รูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะด้านความเค้นอัด 15 mm	47
รูปที่ 4.24 รูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะด้านความเค้นอัด 20 mm	47
รูปที่ 4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเส้นรอบรูปต่อพื้นที่ของสารประกอบเชิงโลหะ กับรัศมีของชิ้นงานที่มีความเค้นตกค้างแบบอัด	48
รูปที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ของสารประกอบเชิงโลหะกับรัศมีของชิ้นงาน ที่มีความเค้นตกค้างแบบอัด	48
รูปที่ 4.27 รูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะด้านความเค้นดึง 5 mm	49
รูปที่ 4.28 รูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะด้านความเค้นดึง 10 mm	49
รูปที่ 4.29 รูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะด้านความเค้นดึง 15 mm	50
รูปที่ 4.30 รูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะด้านความเค้นดึง 20 mm	50
รูปที่ 4.31 รูปร่างสารประกอบเชิงโลหะของชิ้นงานที่ไม่ตัด	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.32 กราฟเปรียบเทียบเส้นรอบรูปต่อพื้นที่ของชิ้นงานที่มีความเค้นตกค้างแบบดึงและอัด....51



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียด ความเป็นมา และขอบเขตของงานวิจัยเรื่อง การศึกษาผลของความเค้นตกค้างในแผ่นรองทองแดงที่มีต่อการเกิดและรูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรี ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา
2. วัตถุประสงค์ของการศึกษา
3. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ
4. ขอบเขตของการศึกษา
5. ระยะเวลาและแผนการดำเนินงาน

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การบัดกรี (Soldering) เป็นกระบวนการเชื่อมประสานที่สำคัญในการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยการบัดกรีจะทำหน้าที่เชื่อมชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์เข้ากับวงจรหรือแผ่นรอง (Substrate) ด้วยการใช้โลหะบัดกรี (Solder) เป็นตัวประสาน และในการบัดกรีจะเกิดสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compound) ขึ้นระหว่างโลหะบัดกรีกับแผ่นรอง ซึ่งสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นถึงการเชื่อมประสานทางโลหะวิทยา (Metallurgical bond) ที่สมบูรณ์ของทั้งสององค์ประกอบ อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยรายงานว่า การเกิดขึ้นของสารประกอบเชิงโลหะในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้ความน่าเชื่อถือ (Reliability) ของรอยบัดกรีลดลง เนื่องจากความเปราะ (Brittleness) ของสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในรอยบัดกรี [1-4] นอกจากนี้ยังพบว่า แผ่นรองที่ใช้ในการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านกระบวนการผลิตด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การรีด การอัด หรือ การเคลือบ มักจะมีความเค้นตกค้าง (Residual stress) หลงเหลืออยู่ภายใน [5, 6] โดยจากการสำรวจวรรณกรรมพบว่า นอกจากความแตกต่างของความเข้มข้น (Concentration gradient) แล้ว ความแตกต่างของความเค้น (Stress gradient) เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการแพร่ (Diffusion) ของอะตอม [7, 8] ดังนั้นความเค้นตกค้างในแผ่นรองจึงอาจจะส่งผลต่อการเกิด (Formation) และรูปร่าง (Morphology) ของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรี อย่างไรก็ตามยังไม่พบการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับผลของความเค้นตกค้างในแผ่นรองที่มีต่อรอยบัดกรี ในโครงการวิจัยนี้จะทำการศึกษาอิทธิพลของความเค้นตกค้างในรูปแบบของความเค้นดึง (Tensile stress) และความเค้นอัด (Compressive stress) ที่เกิดขึ้นในแผ่นรองที่มีต่อการเกิดและรูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเค้นตกค้างในรูปแบบของความเค้นดึง และความเค้นอัดที่เกิดขึ้นในแผ่นรองที่มีต่อปริมาณการเกิดและรูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรี

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

องค์ความรู้ทางด้านโลหะวิทยาของการบัดกรี ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

ในโครงการวิจัยนี้จะทำการศึกษาโดยการใช้แผ่นทองแดงบริสุทธิ์เป็นแผ่นรอง และทำการบัดกรีด้วยโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.7Cu ซึ่งเป็นโลหะบัดกรีส่วนผสมยูเทคติก (Eutectic) มีจุดหลอมเหลวที่ 227°C โดยจะทำการตัดแผ่นรองทองแดงให้มีรัศมีความโค้ง 5, 10, 15 และ 20 mm เพื่อให้เกิดความเค้นตกค้างในแผ่นรองทองแดงในปริมาณต่าง ๆ กัน แล้วทำการบัดกรีด้วยวิธีการจุ่ม (Dip soldering) และจะเปรียบเทียบปริมาณการเกิดและรูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรีกับกรณีที่แผ่นรองทองแดงไม่ได้ผ่านการตัด

1.5 ระยะเวลาและแผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

รายละเอียดกิจกรรม	ความก้าวหน้าของโครงการ / เดือน							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1. การเตรียมงานวิจัย/การศึกษาเอกสาร	↔							
2. กำหนดแผนการ/วิธีการดำเนินงาน		↔						
3. ดำเนินงานวิจัย/ปฏิบัติการทดลอง			↔					
4. การวิเคราะห์ผล				↔				
5. จัดทำรายงานและเผยแพร่							↔	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยเรื่องการศึกษาผลของความเค้นตกค้างในแผ่นทองแดงที่มีต่อการเกิดและรูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรี มีเอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเพื่อนำไปปรับใช้เป็นแนวทางในการดำเนินงาน ดังนี้

1. คุณสมบัติวัสดุ
2. ทฤษฎีการตัดงอ
3. การคำนวณความเค้นตกค้าง
4. หลักการแพร่ของอะตอม
5. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
6. เทคนิคเอกซเรย์สเปคโทรสโคปีแบบกระจายพลังงาน

2.1 คุณสมบัติวัสดุ

2.1.1 ทองแดง

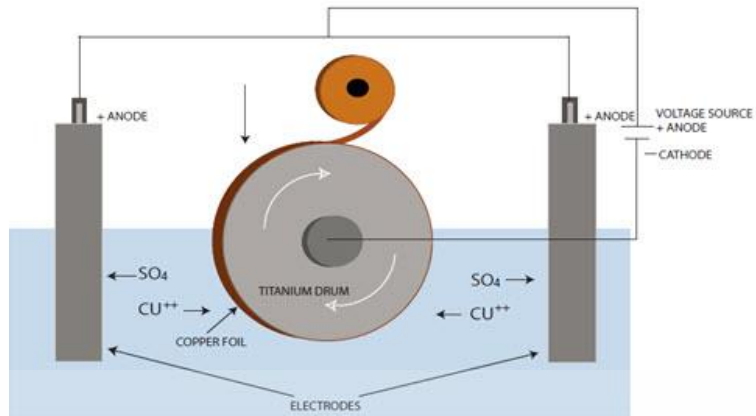
2.1.1.1 กระบวนการผลิต

แผ่นทองแดงถูกสร้างขึ้นได้โดยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า (Electrodeposition) หรือการรีด (Rolling) สำหรับการพอกพูนด้วยไฟฟ้า ทองแดงที่มีเกรดสูงต้องละลายในกรดเพื่อสร้างสารละลายของธาตุทองแดง (Electrolyte) ซึ่งจะถูกสูบเข้าไปในถัง (Drums) ที่หมุนวนบางส่วนที่มีประจุไฟฟ้า และเกิดเป็นแผ่นฟิล์มทองแดง เรียกกระบวนการนี้ว่า การชุบ (Plating)

ในกระบวนการผลิตแผ่นทองแดงด้วยวิธีการแยกสารประกอบทางเคมีด้วยวิธีอิเล็กโทรไลซิส (Electrodeposited) ฟอยล์ทองแดงจะถูกเก็บไว้ในถังหมุนไทเทเนียมจากสารละลายทองแดงซึ่งเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ขั้วลบจะต่ออยู่กับถังหมุนและขั้วบวกจะจมอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ทองแดงจะเกาะอยู่บนถังขณะมีการหมุนที่ช้ามากเมื่อมีการใช้สนามไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.1 พื้นผิวทองแดงส่วนที่ติดกับถังจะเรียบ ในขณะที่อีกด้านหนึ่งหยาบ ความเร็วในการหมุนของถังจะแปรผกผันกับความหนาของแผ่นทองแดง ทองแดงจะถูกสะสมบนพื้นผิวแคโทดของถังไทเทเนียม ด้านหยาบและด้านเรียบของฟอยล์ทองแดงจะผ่านการรักษาต่างกันเพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปผลิตแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed circuit board, PCB) ซึ่งจะช่วยให้การยึดเกาะระหว่างทองแดงกับวัสดุค้ำกลางไดอิเล็กตริกระหว่างกระบวนการเคลือบแผ่นทองแดง ข้อดีอีกประการหนึ่ง

คือช่วยชะลอการเกิดออกซิเดชันของทองแดง [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 การผลิตแผ่นทองแดงด้วยวิธีการพอกพูนทางไฟฟ้า (Electrodeposition) [9]

2.1.1.2 คุณสมบัติทองแดง

ทองแดงมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการทั้งทางเคมี ทางกล และทางกายภาพ ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญของทองแดง ได้แก่ การนำไฟฟ้า (Electrical conductivity), ความยืดหยุ่น (Ductility), การนำความร้อน (Heat conductivity) และความต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion resistant) [10] มีความสามารถในการขึ้นรูปและความเหนียวสูงจึงสามารถแปรรูปด้วยวิธีต่างๆ ได้ง่าย และไม่เสี่ยงต่อการแตกหักเสียหาย นอกจากนี้ยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของทองแดงได้โดยการเติมธาตุผสมต่างๆ เช่น สังกะสี นิกเกิล เบอริลเลียม ก็จะทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และมีความต้านทานความล้าสูง สามารถนำไปใช้งานได้กว้างขวางมากขึ้น [11] โดยค่าคุณสมบัติของทองแดงแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติต่างๆ ของทองแดง [10,11]

Strain hardening exponent, n	0.54
Strength coefficient, K (MPa)	320
Elastic modulus (GPa)	130
Electrical conductivity (S/m)	5.9×10^7
Thermal conductivity (W/(m·K))	386
Melting point (°C)	1,035
Young Modulus (GPa)	110-128
Shear Modulus (GPa)	48
Brinell hardness (MPa)	874
Tensile Strength (MPa)	210
Yield Strength (MPa)	33.3

2.1.2 โลหะบัดกรี

เดิมทีโลหะบัดกรี (Solder) ชนิดดีบุก-ตะกั่ว (Sn-Pb) ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์เนื่องจากเป็นโลหะบัดกรีที่มีประสิทธิภาพเป็นอย่างมาก มีราคาถูกและคุณสมบัติการบัดกรีที่ดี ต่อมาเกิดการตระหนักถึงด้านสิ่งแวดล้อมมากขึ้น และด้วยความเป็นพิษของสารตะกั่วในปริมาณสูง ทำให้หลายประเทศมีการออกกฎหมายเพื่อห้ามไม่ให้ใช้สารตะกั่วในวงการอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จึงมีการพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-free solder) ขึ้น [12]

โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด มีส่วนผสมและอุณหภูมิหลอมเหลวต่างกันไป สามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ดังตารางที่ 2.2-2.4

ตารางที่ 2.2 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำกว่า 180°C [12]

ชนิดโลหะบัดกรี	ส่วนประกอบ (wt.%)	อุณหภูมิหลอมเหลว °C
Sn-Bi	Sn-58Bi	138
Sn-In	Sn-52In	118
Sn-In	Sn-50In	118-125
Bi-In	33Bi-In	109

ตารางที่ 2.3 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 180°C ถึง 200°C [12]

ชนิดโลหะบัดกรี	ส่วนประกอบ (wt.%)	อุณหภูมิหลอมเหลว °C
Sn-Zn	Sn-9Zn	198
Sn-Zn-Bi	Sn-8Zn-3Bi	188-189
Sn-Bi-In	Sn-20Bi-10In	143-193

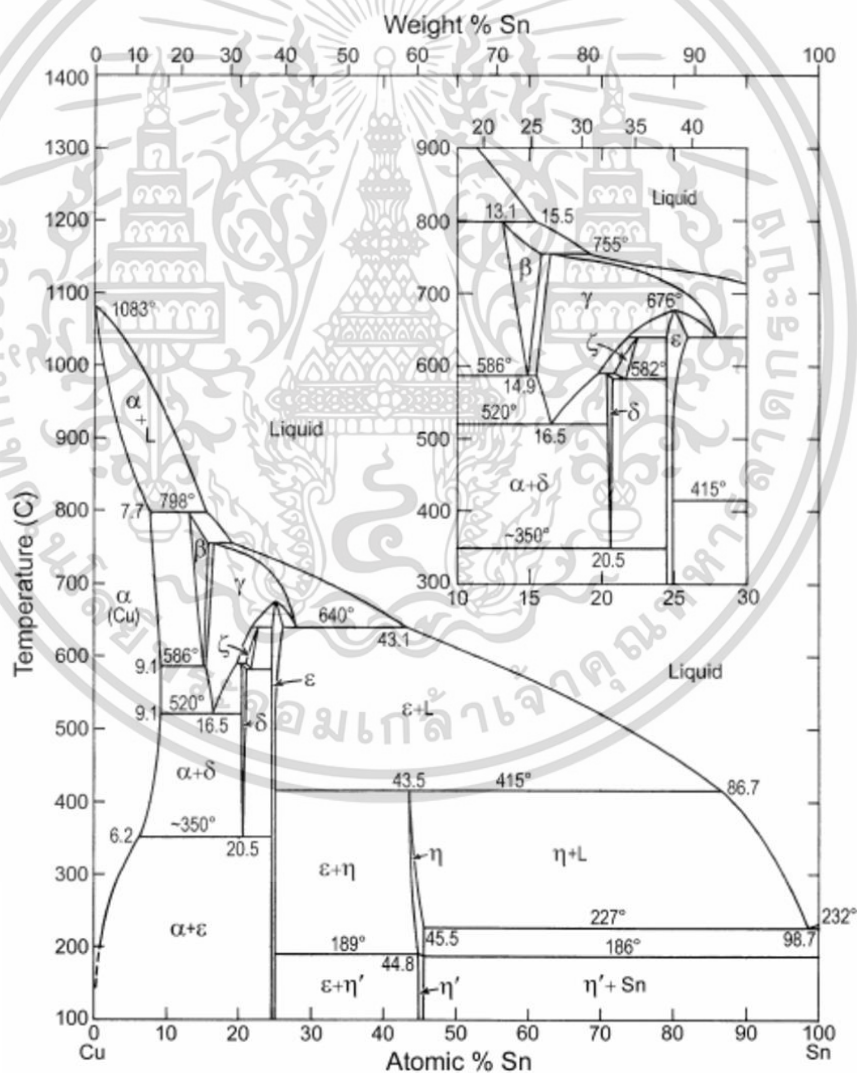
ตารางที่ 2.4 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 200°C ถึง 230°C [12]

ชนิดโลหะบัดกรี	ส่วนประกอบ (wt.%)	อุณหภูมิหลอมเหลว °C
Sn-Ag	Sn-3.5Ag	221
Sn-Ag	Sn-2Ag	221-226
Sn-Cu	Sn-0.7Cu	227
Sn-Ag-Bi	Sn-3.5Ag-3Bi	206-213
Sn-Ag-Bi	Sn-2Ag-7.5Bi	207-212
Sn-Ag-Cu	Sn-0.3Ag-0.7Cu	217
Sn-Ag-Cu-Sb	Sn-2Ag-0.8Cu-0.5Sb	216-222

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อ 5 ว่าจะอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการใช้โลหะบัดกรีชนิด Sn-Cu เมื่อผสมกับดีบุกกับทองแดงอัตราส่วน 99.3Sn-0.7Cu จะทำให้เกิดโครงสร้างยูเทคติกที่จุดหลอมเหลว 227°C โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟส Cu_6Sn_5 ลักษณะเป็นแท่งฝิ่งในเนื้อดีบุก ซึ่งทองแดงจะทำให้โลหะบัดกรีมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปอุณหภูมิใช้งานของโลหะบัดกรีจะสูงกว่าอุณหภูมิหลอมละลาย ดังนั้นอุณหภูมิใช้งานสำหรับโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.7Cu จะอยู่ที่ประมาณ 270°C [13]

ระหว่างทำการบัดกรี โลหะบัดกรีจะสัมผัสกับทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์และเกิดปฏิกิริยาซึ่งขึ้นอยู่กับส่วนประกอบในโลหะบัดกรี จากเฟสไดอะแกรมของ Cu-Sn ดังรูปที่ 2.2 จะเกิดเฟส ϵ และ η ของสารประกอบเชิงโลหะคองที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300°C ซึ่งเฟส ϵ มีส่วนประกอบของ Sn อยู่ระหว่าง 25.7 และ 27.1 wt.% สอดคล้องกับสารประกอบ Cu_3Sn และเฟส η อยู่ระหว่าง 44.8 และ 45.5 wt.% สอดคล้องกับสารประกอบ Cu_6Sn_5 โดย Cu_6Sn_5 เจริญเติบโตได้เร็วกว่า Cu_3Sn [14]

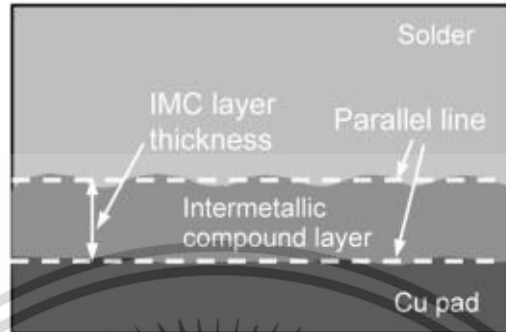


รูปที่ 2.2 เฟสไดอะแกรมของ Cu-Sn [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 ชั้นของสารประกอบเชิงโลหะ

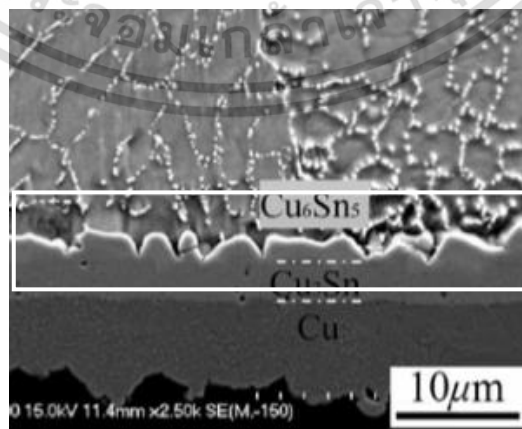
ในกระบวนการบัดกรีจะเกิดชั้นของสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compounds) ระหว่างแผ่นรองกับโลหะบัดกรี ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งแสดงการเชื่อมประสานกัน



รูปที่ 2.3 ชั้นของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรี [16]

การเกิดและรูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรีจะมีความแตกต่างกันตามเงื่อนไขต่างๆ เช่น เวลาและอุณหภูมิ โดยเมื่อเวลาและอุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณการเกิดของสารประกอบเชิงโลหะเพิ่มมากขึ้น ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยบัดกรี หากเกิดในปริมาณมากจะส่งผลให้เกิดความเปราะ ทั้งนี้รูปร่างที่แตกต่างกันของสารประกอบเชิงโลหะก็ส่งผลต่อความแข็งแรงเช่นเดียวกัน อาจเกิดขึ้นได้หลายลักษณะ ดังนี้

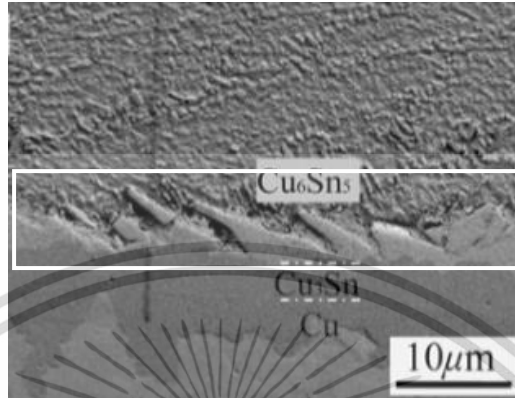
1. Layer-type รูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรีจะมีลักษณะเรียบ การขยายตัวของการเสียรูปแบบถาวรและรอยร้าว (Crack propagation) เกิดขึ้นได้ง่ายที่สุด หากเกิดในปริมาณมาก แสดงถึงการเชื่อมประสานที่ไม่ดี เนื่องจากรอยบัดกรีจะมีความแข็งแรงต่ำ
2. Scallop-type ลักษณะคล้ายกันหอย เป็นรอยหยักโค้งมน ดังรูปที่ 2.4 มีการเชื่อมประสานระหว่างแผ่นรองและโลหะบัดกรีที่แข็งแรงกว่าลักษณะเรียบ



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างรูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรีแบบ Scallop-type [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

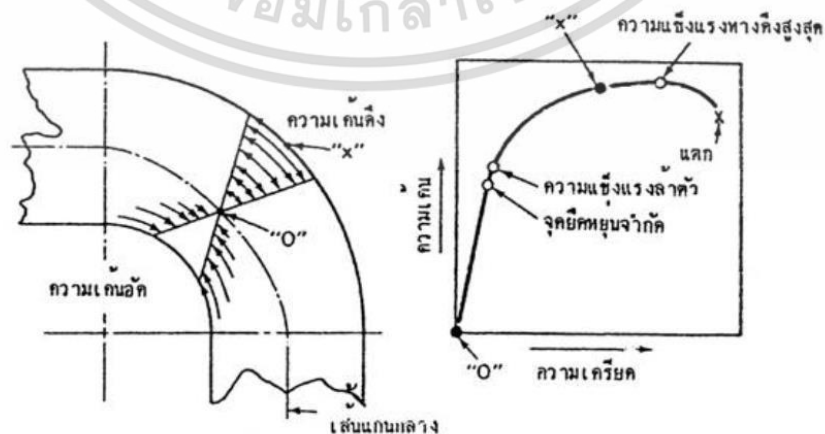
3. Prism-type ลักษณะเป็นแท่ง ดังรูปที่ 2.5 แสดงการประสานกันระหว่างแผ่นรองและโลหะบัดกรีที่มีพื้นที่การขยายตัวกว้าง เป็นลักษณะของรอยบัดกรีที่มีความแข็งแรงมากกว่าแบบอื่น ยับยั้งการเกิดดิสโลเคชัน (Dislocation) และการขยายตัวของรอยร้าวได้ดี



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างรูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรีแบบ Prism-type [3]

2.2 ทฤษฎีการดัดงอ

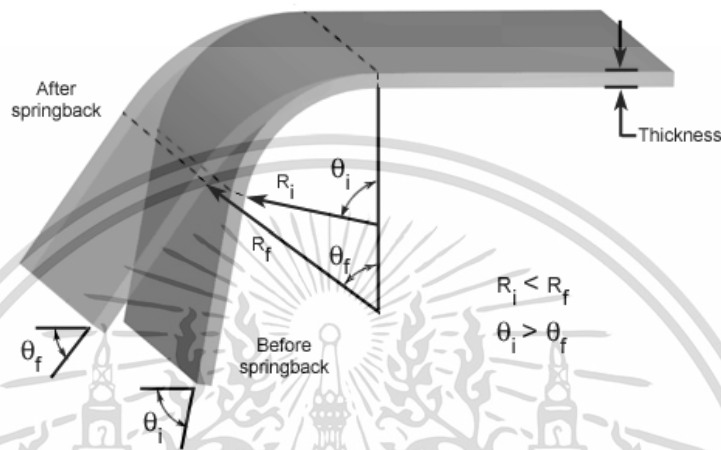
การดัดงอ (Bending) เป็นหนึ่งในกระบวนการขึ้นรูปโลหะที่ใช้กันทั่วไปในอุตสาหกรรมโลหะแผ่น ในระหว่างกระบวนการดัด แรงจะถูกนำไปใช้กับแผ่นโลหะทำให้เกิดการงอและความเค้นเกิดขึ้น วัสดุจะเริ่มงอในบริเวณยืดหยุ่น (Elastic region) และเมื่อกระบวนการดำเนินต่อไปจะเกิดการเสียรูปอย่างถาวร (Plastic deformation) ความเค้นที่เกิดในวัสดุจะเลยค่าความแข็งแรงคราก (Yield strength) แต่ยังคงต่ำกว่าค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) ซึ่งในแผ่นโลหะที่ถูกดัดงอจะเกิดความเค้นในลักษณะของความเค้นดึงที่บริเวณโค้งด้านนอกชิ้นงานและความเค้นอัดที่โค้งด้านในชิ้นงาน โดยความเค้นเหล่านี้จะมีค่าเป็นศูนย์ที่แกนสะเทิน (Neutral axis) ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนรูปแบบของความเค้นจากการดัดงอ

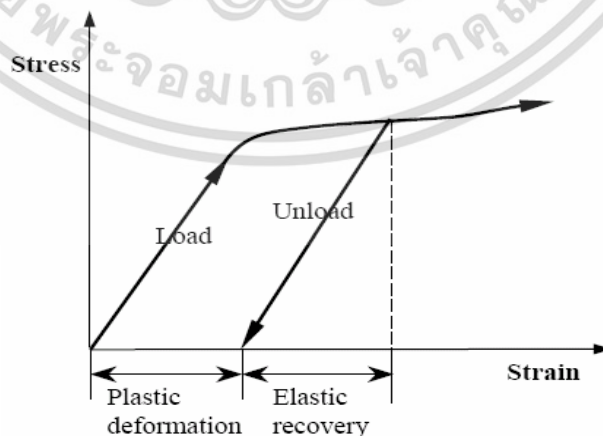
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายหลังการดัดของชิ้นงาน จะมีความเค้นเกิดขึ้นซึ่งมีค่าไม่เท่ากันทุกจุด เป็นผลทำให้เกิดการดีดตัวกลับ (Spring back) ของชิ้นงาน เนื่องจากส่วนที่เป็นแถบยืดหยุ่นเล็ก ๆ พยายามดึงตัวกลับเข้าไปอยู่ในตำแหน่งเดิม แต่ไม่สามารถดึงตัวกลับคืนได้หมดเพราะมีความต้านทานจากส่วนที่เกิดการเสียรูปอย่างถาวร ทำให้มีการดีดตัวกลับเพียงเล็กน้อย ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การเกิดการดีดตัวกลับของชิ้นงานในกระบวนการดัดงอ

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดดังรูปที่ 2.8 แสดงการเกิดการดีดตัวกลับในกระบวนการดัดของขณะปล่อยชิ้นงาน ความเครียดทั้งหมดในชิ้นงานจะลดลงเนื่องจากการคืนตัวของแถบยืดหยุ่นซึ่งเป็นการปล่อยความเครียดแบบยืดหยุ่นและการกระจายของความเค้นตกค้างตามทิศทางความหนา ทำให้เกิดการกระเด็นตัวกลับ [17,18]



รูปที่ 2.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในการเกิดการดีดตัวกลับของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การคำนวณความเค้นตกค้าง (Residual stress)

ความเค้นตกค้างคือความเค้นที่เหลืออยู่ในชิ้นงานขณะที่ชิ้นงานไม่ถูกแรงภายนอกกระทำ เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักภายในซึ่งไม่สามารถตรวจสอบได้ด้วยการมอง [19] ความเค้นตกค้างเกิดได้จาก 3 สาเหตุ [20] ได้แก่

1. ภาระทางกลภายนอก (Applied mechanical load)
2. การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Thermal residual stress)
3. การเปลี่ยนแปลงเฟสของวัสดุ (Phase transformation)

ความเค้นตกค้างสามารถหาได้ทั้งจากการทดสอบแบบทำลายและไม่ทำลาย หรือจากการคำนวณ ซึ่งในการคำนวณสามารถพิจารณาการโค้งงอของแผ่นวัสดุที่ไม่แข็งตึงภายใต้โมเมนต์ดัด จากรูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นถึงระบบพิกัดของการโค้งงอของแผ่นวัสดุ

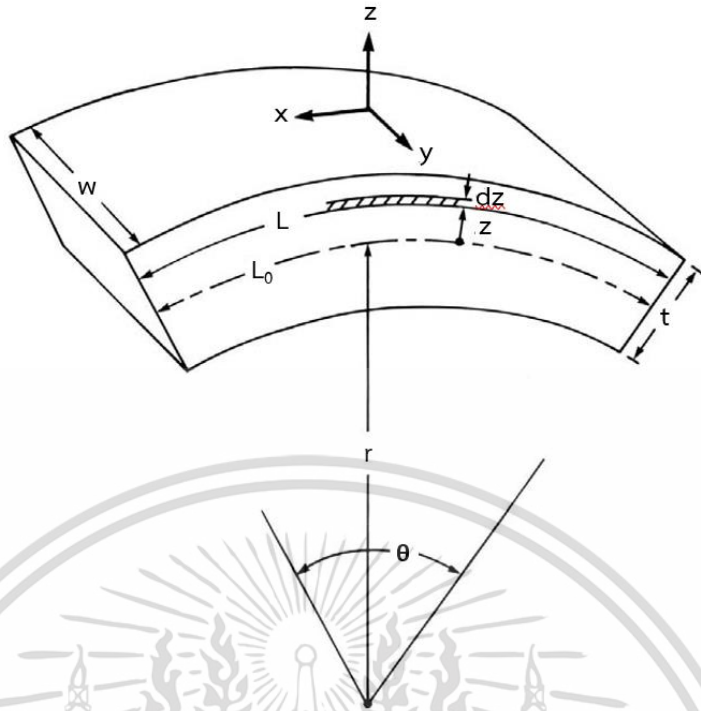
ให้ r คือรัศมีความโค้งที่วัดจากระนาบกึ่งกลางและ z คือระยะทางจากระนาบกึ่งกลางถึงระนาบความยาวที่เปลี่ยนไป ความเครียดทางวิศวกรรมที่จุด z นั้นสามารถหาได้โดยพิจารณาความยาวส่วนโค้ง (L) วัดขนานกับแกน x ความยาวส่วนโค้งที่ระนาบกึ่งกลาง (L_0) จะไม่เปลี่ยนแปลงระหว่างการดัดและได้ว่า $L_0 = r\theta$ โดย θ คือมุมโค้งงอ ที่จุด z จะได้ความยาวส่วนโค้งคือ $L = (r + z)\theta$ ก่อนดัดโค้ง ความยาวส่วนโค้งทั้งสองมีค่าเท่ากัน ดังนั้นความเครียดทางวิศวกรรม (e) จะเท่ากับสมการที่ 2.1

$$e_x = (L - L_0)/L_0 = z\theta/r\theta = z/r \quad (2.1)$$

ความเครียดจริง (ϵ_x) ที่เกิดขึ้นภายในเพียงเล็กน้อยสามารถประมาณค่าได้เป็น $\epsilon_x \approx e_x$ ดังนั้นจะได้สมการที่ 2.2

$$\epsilon_x = z/r \quad (2.2)$$

สำหรับแผ่นวัสดุที่มีความกว้าง (w) มากกว่าความหนา (t) มาก ๆ จะไม่คิดความเครียดจริงในแนวแกน y (ϵ_y) และได้ความเครียดจริงในแนวแกน z เป็น $\epsilon_z = -\epsilon_x$



รูปที่ 2.9 ระบบพิกัดของการโค้งงอของแผ่นวัสดุ

ทั้งนี้ การดัดงอจะทำให้เกิดโมเมนต์ (M) ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.3

$$M = \int_{-t/2}^{+t/2} w \sigma_x z dz = 2 \int_0^{t/2} w \sigma_x z dz \quad (2.3)$$

เมื่อ σ_x คือความเค้นจริงในแนวแกน x ซึ่งโมเมนต์ตัดจากภายนอกต้องเท่ากับโมเมนต์ตัดภายใน เมื่อแรงกระทำภายนอกถูกกำจัดออก โมเมนต์ตัดจะต้องหายไป ($M=0$) เนื่องจากวัสดุจะถูกปล่อยอย่างยืดหยุ่น ได้ความสัมพันธ์ของสมการที่ 2.4

$$\Delta \sigma_x = E' \Delta \epsilon_x \quad (2.4)$$

ให้ E' คือค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus) ขณะปล่อยวัสดุ, E คือค่ามอดูลัสของยังขณะดัด และ r' คือรัศมีความโค้งขณะปล่อย ได้โมเมนต์ตัดที่เปลี่ยนแปลงไป ดังสมการที่ 2.5

$$\Delta M = 2w \int_0^{t/2} \Delta \sigma_x z dz = 2w \int_0^{t/2} E \left(\frac{1}{r'} - \frac{1}{r} \right) z^2 dz \quad (2.5)$$

ภายหลังเกิดการตีตัวกลับของชิ้นงาน (Spring back) โมเมนต์ตัดต้องมีค่าเป็น 0 ดังนั้นค่าโมเมนต์ขณะดัดลบกับโมเมนต์ขณะปล่อยจะมีค่าเท่ากับ 0 ($M - \Delta M = 0$) ได้เป็นสมการที่ 2.6

$$1/r-1/r' = 3Y/(tE') \quad (2.6)$$

ทำให้ได้ความเค้นตกค้าง (σ_x') ซึ่งคือความเค้นขณะใส่แรงลบกับความเค้นขณะปล่อย ความเค้นขณะใส่แรงจะเท่ากับ Y เป็นสมการที่ 2.7

$$\begin{aligned} \sigma_x' &= \sigma_x - \sigma_x = Y - \sigma_x = Y - E' \epsilon_x = Y - E' z(1/r-1/r') \\ &= Y - E' z[3Y/(tE')] \end{aligned} \quad (2.7)$$

ถ้าใช้ความเค้นไหล (Flow stress) ซึ่งเป็นความเค้นที่จำเป็นต่อการเสียรูป เนื่องจากต้องการให้วัสดุยังคงเกิดการเสียรูปอย่างต่อเนื่อง ได้ตั้งสมการที่ 2.8 โดย K' คือสัมประสิทธิ์ความต้านแรงและ n คือเลขชี้กำลังของความเครียดแข็ง

$$\sigma_x = K' \epsilon_x^n \quad (2.8)$$

จะได้โมเมนต์ภายใต้แรงกระทำตั้งสมการที่ 2.9

$$M = 2(wK'/r^n)(t/2)^{2+n}/(2+n) \quad (2.9)$$

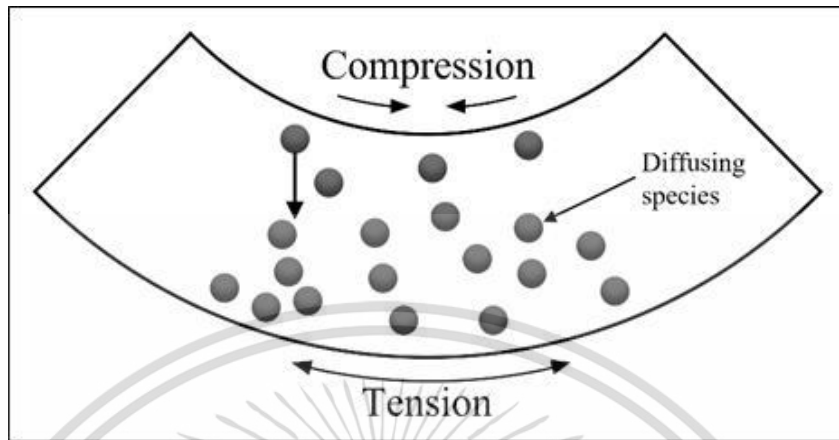
และสามารถหาความเค้นตกค้างได้จากสมการที่ 2.10

$$\sigma_x' = K' \left(\frac{z}{r}\right)^n \left[1 - \left(\frac{3}{2+n}\right) \left(\frac{2z}{t}\right)^{1-n}\right] \quad (2.10)$$

2.4 หลักการแพร่ของอะตอม

สารประกอบเชิงโลหะเกิดขึ้นเนื่องจากการแพร่ (Diffusion) เข้าทำปฏิกิริยากันระหว่างโลหะบัดกรีและแผ่นรอง ซึ่งการแพร่นั้นเกิดได้จากหลายปัจจัย เช่น การแพร่ที่เกิดจากความเข้มข้น (Concentration) ที่อะตอมจะแพร่จากความเข้มข้นมากไปน้อย การแพร่ที่เกิดจากสนามไฟฟ้า (Electric field) ซึ่งประกอบไปด้วย Electrodiffusion ที่ไอออนประจุบวกจะถูกขับเคลื่อนไปในทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้า และ Electromigration ที่เกิดจากการที่อิเล็กตรอนที่นำกระแสไฟฟ้าหลุดออกจากอะตอมของโลหะ ทำให้ข้อไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้าม การแพร่ที่เกิดจากอุณหภูมิ ซึ่งอะตอมจะเคลื่อนที่จากอุณหภูมิต่ำไปสูง สุดท้ายคือการแพร่ที่เกิดจากความเค้นซึ่งมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่น หรือความแตกต่างของความเค้น ก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญ เนื่องจากอะตอมจะ

เคลื่อนที่จากความเค้นอัดซึ่งมีความหนาแน่นของอะตอมสูงไปยังความเค้นดึงซึ่งมีความหนาแน่นของอะตอมต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การแพร่เนื่องจากความแตกต่างของความเค้น (Stress gradient) [8]

การเคลื่อนย้ายของสสารในวัสดุสามารถทำได้โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ที่รู้จักกันในชื่อ กฎการแพร่ของ Fick ข้อที่หนึ่งและข้อที่สอง ซึ่งกฎทั้ง 2 ข้อนี้สามารถนำไปใช้ได้กับปัญหาการแพร่ในของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ดังนี้

1. กฎข้อที่ 1 ของ Fick (Fick's First Law) เกี่ยวข้องกับการแพร่ของสสารภายใต้สถานะคงที่ (Steady-State Diffusion) หรือ $\frac{\partial c_i}{\partial t} = 0$ ซึ่งคือความเข้มข้นไม่ขึ้นอยู่กับเวลา สามารถหาอัตราการแพร่ของอะตอมได้จากค่าฟลักซ์ (J) แสดงดังสมการที่ 4.1

$$J_i = -D_i \frac{\partial c_i}{\partial x} \quad (4.1)$$

เมื่อ J_i คือค่าฟลักซ์การแพร่, D_i คือสัมประสิทธิ์ของการแพร่ (ซึ่งขึ้นอยู่กับทั้งชนิดของฟลักซ์และตัวกลางที่แพร่) และ $\frac{\partial c_i}{\partial x}$ คือค่าความต่างของความเข้มข้น

กฎข้อที่ 1 บ่งชี้ว่าฟลักซ์ของการแพร่เป็นสัดส่วนกับความต่างของความเข้มข้น และแสดงถึงแนวคิดพื้นฐานที่มีแนวโน้มของการไหลลง จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปสู่ความเข้มข้นต่ำ นอกจากนี้ยังระบุว่าการแพร่ (เช่น ขนาดของฟลักซ์) ขึ้นอยู่กับขนาดของการแพร่และความชันของความต่างของความเข้มข้น การแพร่และความชันที่มากกว่าของความต่างของความเข้มข้นจะนำไปสู่ขนาดของฟลักซ์ที่มากขึ้น

2. กฎข้อที่ 2 ของ Fick (Fick's Second Law) เกี่ยวข้องกับการแพร่ของสสารภายใต้เงื่อนไขชั่วคราว (Transient Diffusion) หรือ $\frac{\partial c_i}{\partial t} \neq 0$ ซึ่งก็คือความเข้มข้นที่แพร่ออกไปนั้นมีความแตกต่างกันตามเวลา (ขึ้นอยู่กับเวลา) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 4.2

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = \frac{\partial J_i}{\partial x} = D_i \frac{\partial^2 c_i}{\partial x^2} \quad (4.2)$$

เมื่อ $\partial c_i / \partial t$ คือความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา และ $\partial^2 c_i / \partial x^2$ คืออนุพันธ์อันดับสอง (หรือความโค้ง) ของความเข้มข้น สามารถใช้กฎข้อที่ 2 ของ Fick ในการสังเกตสถานะการแพร่แบบไม่คงที่ และภายใต้เงื่อนไข $D \neq f(c)$ แสดงให้เห็นว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของความต่างของความเข้มข้นเป็นสัดส่วนกับความโค้ง บริเวณที่มีความโค้งสูง (เช่น ลักษณะคม) จะมีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว ขณะที่บริเวณที่มีความโค้งต่ำจะพัฒนาช้าลง นอกจากนี้ยังระบุว่าการแพร่จะสะสมในบริเวณที่ความเข้มข้นมีความโค้งในเชิงบวก (เว้าขึ้น) ขณะที่การแพร่จะกระจายออกจากบริเวณที่ความเข้มข้นเป็นลบ (เว้าลง) ดังนั้น กฎข้อที่ 2 นี้คาดว่าความเข้มข้นที่เกิดขึ้นอย่างฉับพลันมีแนวโน้มที่จะราบเรียบตามเวลา ความเข้มข้นลดลงตามเวลาในบริเวณที่มีความโค้งเชิงลบและเพิ่มขึ้นตามเวลาในบริเวณที่มีความโค้งเชิงบวก ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและระยะทางการแพร่ที่เกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขของเวลา [8]

อย่างไรก็ตามความเค้นอัดที่เกิดขึ้นที่ผิวของแผ่นรองทองแดงจะทำให้อะตอมทองแดงอัดตัวกันอย่างหนาแน่นและขัดขวางการแพร่ของอะตอมดีบุกจากภายนอกเข้าไป ในขณะที่ความเค้นดึงที่เกิดขึ้นที่ผิวของแผ่นรองทองแดงจะทำให้อะตอมทองแดงจัดเรียงตัวกันห่างขึ้นและอะตอมดีบุกจากภายนอกแพร่เข้าไปได้ง่ายขึ้น ซึ่งเมื่ออะตอมของดีบุกสามารถแพร่เข้าไปในแผ่นรองทองแดงได้แล้ว พฤติกรรมการแพร่ที่จะเกิดขึ้นต่อไปก็จะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความเข้มข้นและความแตกต่างของความเค้นที่อยู่ภายในแผ่นรองทองแดง ทำให้มีความเป็นไปได้ว่า ปริมาณการเกิดและรูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในรอยบัดกรีในกรณีนี้แตกต่างจากรอยบัดกรีในกรณีที่ไม่มีความเค้นเข้ามาเกี่ยวข้อง และจะส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือของรอยบัดกรีและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ [8]

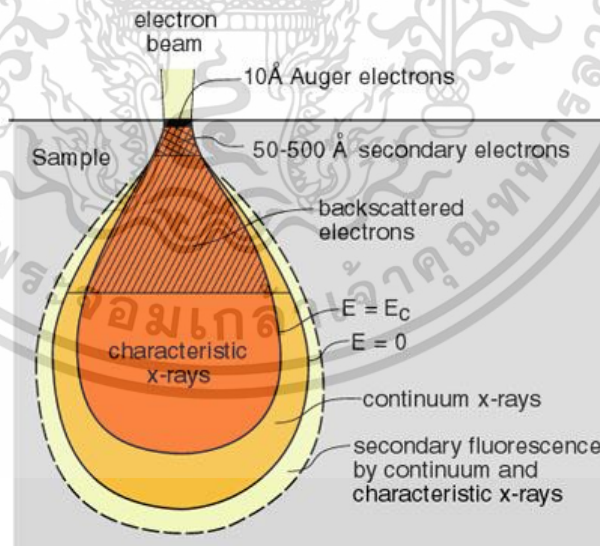
2.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) ทำงานโดยควบคุมให้ลำอิเล็กตรอนกราดไปบนพื้นผิวของตัวอย่างที่ต้องการศึกษา โดยเฉพาะการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา เช่น ลักษณะรูปร่าง ลวดลายบนพื้นผิว และขนาดของตัวอย่าง ซึ่งภาพที่ได้เป็นภาพสามมิติ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูงจึงมีบทบาทต่อการศึกษาและวิจัยด้านต่างๆ มากมาย [21] ซึ่งพื้นผิวของตัวอย่างบริเวณที่ถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอนจะเกิดสัญญาณ (Signal) ต่างๆ ขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกัน และ SEM จะมีอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ (Detector) ชนิดต่างๆ ส่งไปประมวลผลเป็นภาพแสดงบนจอภาพต่อไป ตัวอย่างสัญญาณที่เกิดขึ้น ได้แก่

อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electrons: SE) จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง ถูกนำมาใช้ในการสร้างภาพมากที่สุด

อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back scattered electrons: BSE) ใช้สร้างภาพที่แสดงความแตกต่างของธาตุได้ โดยแสดงในรูปแบบของความเข้มและความสว่างของภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณ ใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงานและเห็นลักษณะความสูงต่ำของพื้นผิว

นอกจากนี้ยังมีสัญญาณอีกหลายชนิดที่เกิดขึ้น เช่น เอ็กซ์เรย์ (X-ray), คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave), โอลิเจอร์อิเล็กตรอน (Auger electron) เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 สัญญาณที่เกิดขึ้นจากการยิงลำอิเล็กตรอนบนพื้นผิวของตัวอย่าง [22]

2.6 เทคนิคเอ็กซ์เรย์สเปคโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน

เป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีที่ใช้ร่วมกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งมีบทบาทสำคัญในปัจจุบันในการวิเคราะห์ธาตุ ทั้งทางด้านวัสดุศาสตร์ ด้านชีวภาพ ภายภาพ และอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่มีชิ้นส่วนขนาดเล็ก นอกจากนี้เทคนิคเอ็กซ์เรย์สเปคโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (Energy dispersive x-ray spectroscopy: EDS) จะสามารถวิเคราะห์ธาตุในเชิงคุณภาพ (Qualitative element analysis) ว่าตัวอย่างที่ต้องการศึกษามีธาตุชนิดใดประกอบอยู่ ยังสามารถวิเคราะห์ธาตุในเชิงปริมาณ (Quantitative element analysis) ซึ่งสามารถบอกเปอร์เซ็นต์ (%) ของธาตุที่วิเคราะห์ที่มีอยู่ได้เช่นกัน

สำหรับการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์แบบ EDS สามารถวิเคราะห์ได้ 3 วิธี ดังนี้คือ

1. Point analysis เป็นการวิเคราะห์ที่ให้ค่าของอิเล็กตรอนกระแทกอยู่หนึ่งบนพื้นผิวของตัวอย่างตรงจุดที่ต้องการวิเคราะห์เพื่อวัดค่าปริมาณรังสีเอกซ์เฉพาะจุดที่ต้องการ
2. Line scan analysis เป็นการวิเคราะห์ที่ใช้ลำอิเล็กตรอนส่องกราดตามแนวบนตัวอย่างตรงตำแหน่งที่สนใจ ซึ่งนิยมใช้ในกรณีหาของเขตของรอยต่อหรือเฟสของโครงสร้าง
3. Mapping analysis ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ที่ใช้ลำอิเล็กตรอนส่องกราดบนพื้นผิวตัวอย่าง ซึ่งภาพที่ได้จากการวิเคราะห์จะเป็นภาพแสดงลักษณะการกระจายของธาตุนั้นๆ [23]

บทที่ 3

วิธีดำเนินงาน

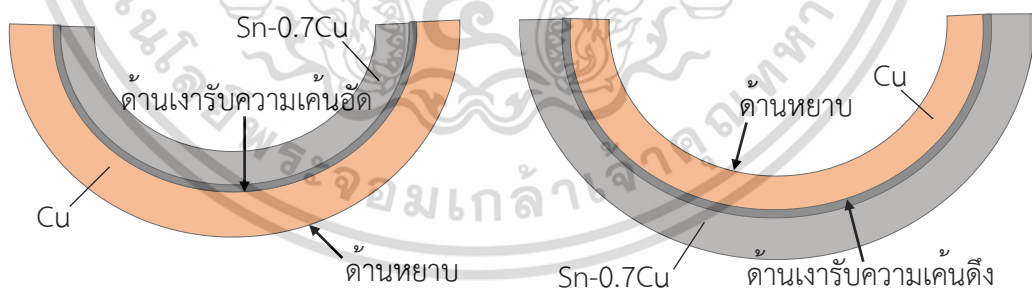
งานวิจัยนี้ศึกษาผลของความเค้นตึงในแผ่นรองทองแดงที่มีต่อการเกิดและรูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรี มีการเตรียมตัวอย่างและการดำเนินงานตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. วัสดุและวิธีการทดลอง
2. การศึกษาโครงสร้างจุลภาค

3.1 วัสดุและวิธีการทดลอง

3.1.1 วัสดุ

ชิ้นงานโลหะพื้นที่ใช้ในการทดลองจะใช้แผ่นทองแดงที่มีความหนา 70 μm ซึ่งถูกขึ้นรูปด้วยวิธี Electrodeposition ซึ่งด้านทั้งสองของแผ่นทองแดงจะแตกต่างกัน ด้านหนึ่งมีพื้นผิวเงาและอีกด้านหนึ่งมีพื้นผิวหยาบ เนื่องจากโลหะบัดกรีไม่สามารถเชื่อมประสานด้านพื้นผิวหยาบได้ จึงทำการทดลองสองชุด คือ พิจารณาด้านพื้นผิวเงาที่รับความเค้นอัดขณะตัด และด้านพื้นผิวเงาที่รับความเค้นดึงขณะตัด ดังรูปที่ 3.1 และโลหะบัดกรีที่ใช้เป็นโลหะบัดกรีแบบแท่งชนิดไร้สารตะกั่ว Sn-0.7Cu ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีแสดงดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 พื้นผิวของชิ้นงานที่ถูกพิจารณาทั้งสองด้าน

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีและอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.7Cu [13]

ส่วนผสมทางเคมี (wt.%)		อุณหภูมิหลอมเหลว ($^{\circ}\text{C}$)
Sn	Cu	
99.3	0.7	227

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง

ในการเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง (Sample preparation) เพื่อศึกษาผลของความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นจากการตัดชิ้นงานที่รัศมีแตกต่างกันที่มีผลต่อการเกิดและรูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรี มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1.2.1 การตัดชิ้นงาน (Sectioning)

ตัดแผ่นทองแดงเป็นรูปสี่เหลี่ยมออกเป็น 5 แผ่น จำนวน 2 ชุด โดยตัดขนาดตามการคำนวณส่วนของวงกลม ดังนี้ ขนาด 10 mm × 7.9 mm ใช้สำหรับชิ้นงานรัศมี 5 mm, ขนาด 10 mm × 15.7 mm สำหรับรัศมี 10 mm, ขนาด 10 mm × 18.5 mm สำหรับรัศมี 15 mm, ขนาด 10 mm × 20.9 mm สำหรับรัศมี 20 mm และขนาด 10 mm × 10 mm สำหรับชิ้นงานที่ไม่ตัด (∞)

3.1.2.2 การตัดชิ้นงาน (Bending)

นำแผ่นทองแดงทั้ง 2 ชุด ไปตัด โดยใช้จิ๊ก (Jig) รัศมี 5, 10, 15, 20 mm และ ∞ โดยตัดแผ่นทองแดงแต่ละชุดคนละด้านกัน ดังรูปที่ 3.2 เนื่องจากแต่ละด้านจะแสดงผลลัพธ์ที่ต่างกันในการบัดกรี โดยเมื่อพิจารณาตามส่วนพื้นผิวเงา สามารถแบ่งได้เป็นชิ้นงานด้านที่เกิดความเค้นตกค้างภายใต้ความเค้นดึง ดังรูปที่ 3.2ก และชิ้นงานด้านที่เกิดความเค้นตกค้างภายใต้ความเค้นอัด ดังรูปที่ 3.2ข



รูปที่ 3.2 แผ่นทองแดงที่ถูกตัดทั้ง 2 ด้าน ก) ชิ้นงานด้านความเค้นดึง ข) ชิ้นงานด้านความเค้นอัด

3.1.2.3 การบัดกรีจุ่ม (Dip soldering)

ทำการบัดกรีเพื่อศึกษาสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้น โดยเริ่มจากทำความสะอาดแผ่นทองแดงทั้ง 2 ชุด ด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) และอะซิโตน (Acetone) นำโลหะบัดกรีแบบแท่งชนิดไร้สารตะกั่ว Sn-0.7Cu ใส่ลงในเบ้าหลอม รอจนโลหะบัดกรีหลอมละลาย จากนั้นจุ่มทองแดงลงในฟลักซ์ (flux) ชนิด AMR 3125 เพื่อเป็นการเคลือบผิวก่อนนำไปบัดกรี แล้วทำการจุ่มทองแดงลงในโลหะบัดกรี ที่อุณหภูมิบัดกรี 267°C เป็นระยะเวลา 5 วินาที ตามมาตรฐาน NIST [24]

รอจนกระทั่งชิ้นงานเย็นตัวลง จะสังเกตเห็นว่าบัดกรีติดเพียงด้านเงาของโลหะพื้นเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2.4 การขึ้นเรือน (Mounting)

ทำการขึ้นเรือนแบบเย็น (Cold mounting) โดยวางชิ้นงานลงในแบบหล่อ แล้วผสมเรซินอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่ออีพ็อกซี (Epoxy) เป็น 2:3 เทลงในแบบ รอจนกระทั่งเรซินแข็งตัว ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ชิ้นงานที่ถูกขึ้นเรือนแบบเย็น (Cold mounting)

3.1.2.5 การขัดหยาบ (Grinding)

นำชิ้นงานไปขัดกับเครื่องขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเพื่อปรับผิวให้เรียบ โดยเริ่มขัดจากกระดาษทรายเบอร์หยาบไปละเอียด 600, 800, 1200, 2000 และ 4000 ตามลำดับ ซึ่งในการขัดกระดาษทรายแต่ละเบอร์ให้ขัดไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อเปลี่ยนเบอร์ละเอียดขึ้นให้ขัดตามแนวขวางกับรอยขัดเดิมจนกระทั่งรอยเดิมออกหมด

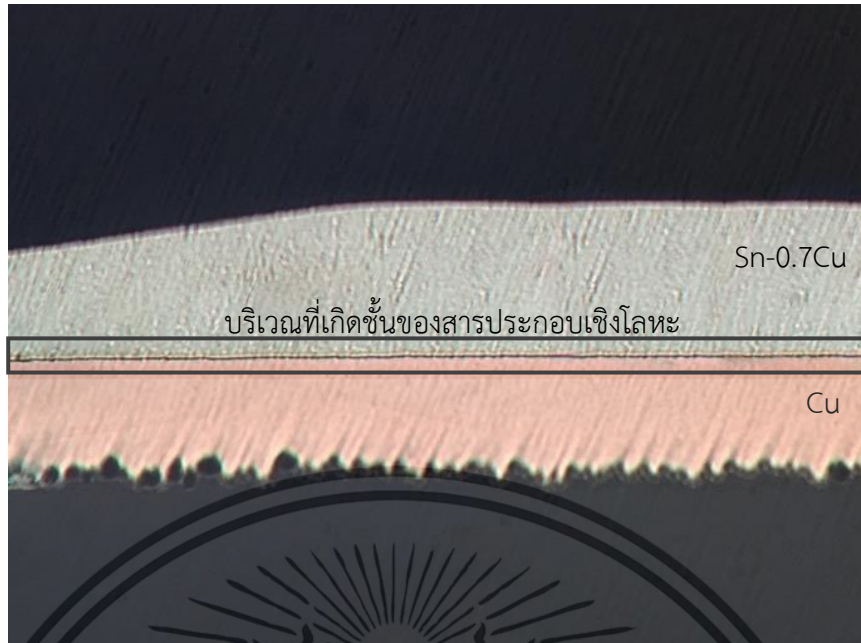
3.1.2.6 การขัดละเอียด (Polishing)

ขัดชิ้นงานบนจานหมุนคลุมด้วยผ้าสักหลาด โดยใช้ผงอะลูมินาขนาด 1 μm และ 0.3 μm ตามลำดับ ผสมกับน้ำ เมื่อขัดจนชิ้นงานเงาแล้วจึงนำไปล้างน้ำและเป่าด้วยเครื่องเป่าลมร้อนจนแห้ง

3.2 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค

3.2.1 การใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

ใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope: OM) Zeiss รุ่น Axio Lab เพื่อตรวจสอบพื้นผิวของชิ้นงาน และสังเกตชั้นของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรีที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นทองแดงและโลหะบัดกรีเบื้องต้น จะเห็นชิ้นงานลักษณะดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ลักษณะภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

3.2.2 การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) Hitachi รุ่น SU3900 สังเกตลักษณะการเกิดและรูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรี ถ่ายภาพบริเวณกึ่งกลางส่วนโค้งของชิ้นงาน เนื่องจากเป็นบริเวณที่เกิดความเค้นตกค้าง ที่กำลังขยาย 1000X, 2000X, 4000X และ 5000X ตามลำดับ จากนั้นวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างภาพ SEM ของแผ่นรองทองแดงแบบ Electrodeposited

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น มิใช่เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.5 สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างของพื้นผิวทั้ง 2 ด้านของทองแดงได้อย่างชัดเจน ส่วนบนคือด้านของทองแดงที่ด้าน ซึ่งด้านนี้การบัดกรีจะไม่เกิดขึ้น ส่วนล่างคือด้านของทองแดงที่เงา ซึ่งจะเกิดการบัดกรีที่ด้านนี้และเกิดขึ้นของสารประกอบเชิงโลหะขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

รายละเอียดสำหรับบทนี้ จะกล่าวถึงผลการดำเนินงาน หลังจากดำเนินการตามขั้นตอนในบทที่ 3 นำภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 1000X, 2000X, 4000X และ 5000X มาเปรียบเทียบการเกิดและรูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรีจากชิ้นงานทั้ง 2 ชุด โดยวิเคราะห์ตามหัวข้อดังต่อไปนี้

1. การวิเคราะห์ความเค้นขณะตัดชิ้นงานและความเค้นตกค้างหลังตัดชิ้นงาน
2. การวิเคราะห์ชั้นของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรี

4.1 การวิเคราะห์ความเค้นขณะตัดชิ้นงานและความเค้นตกค้างหลังตัดชิ้นงาน

จากการทดลองนำแผ่นทองแดงทั้ง 2 ชุด ไปตัด โดยใช้จิ๊ก (Jig) รัศมี 5, 10, 15, 20 mm ทำให้ด้านเงาของแผ่นทองแดงได้รับความเค้นขณะตัดแตกต่างกัน และวัดรัศมีชิ้นงานหลังเกิดการดีดตัวกลับ (Spring back) เพื่อใช้คำนวณค่าความเค้นตกค้างบริเวณพื้นผิวของชิ้นงานได้จากสมการที่ 2.10 โดยใช้ค่าจากตารางที่ 2.1 ได้ค่าความเค้นตกค้างดังแสดงในตารางที่ 4.1-4.2 นำไปสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะจากตำแหน่งแกนสะเทิน (Neutral axis) กับความเค้นตกค้าง (Residual stress) ได้ดังรูปที่ 4.1-4.2

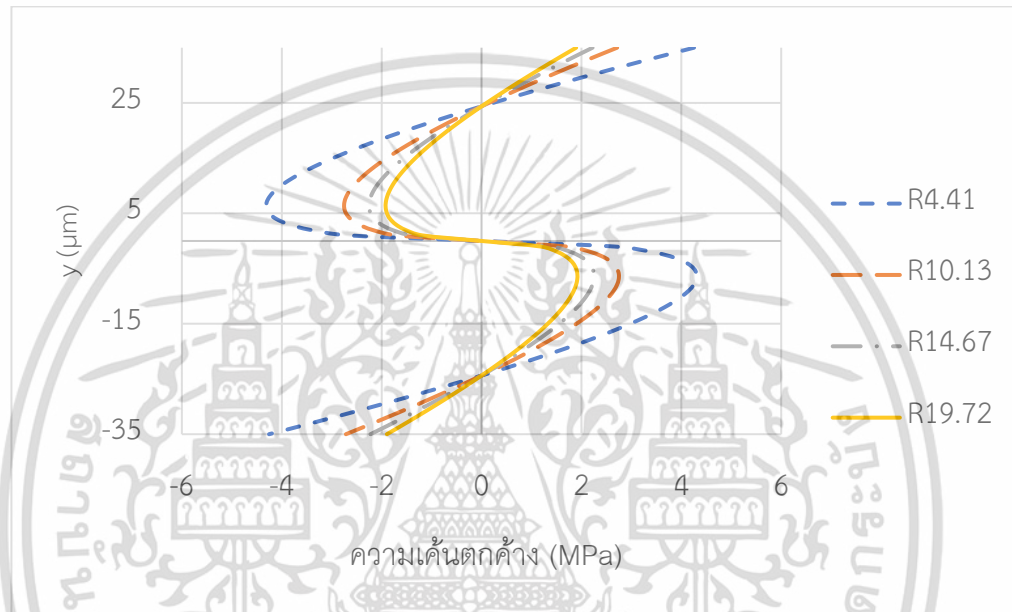
$$\sigma'_x = K' \left(\frac{z}{r}\right)^n \left[1 - \left(\frac{3}{2+n}\right) \left(\frac{2z}{t}\right)^{1-n}\right]$$

ตารางที่ 4.1 รัศมีหลังเกิดการดีดตัวกลับและความเค้นตกค้างแบบดิ่งบริเวณผิวชิ้นงาน

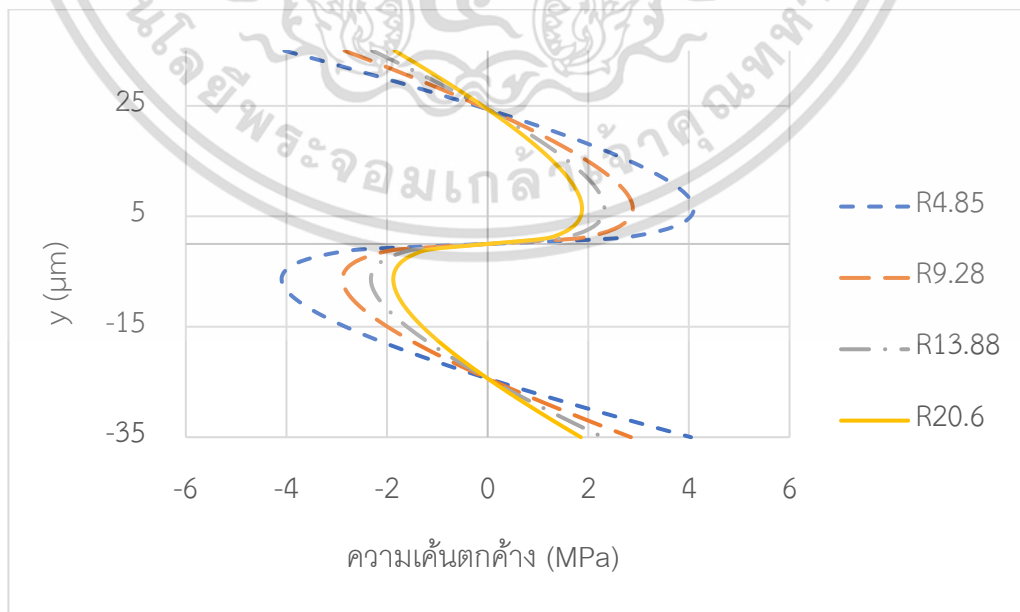
รัศมีหลังเกิดการดีดตัวกลับของชิ้นงาน (mm)	ความเค้นตกค้างที่ผิวชิ้นงาน (MPa)
4.41	4.25475
10.13	2.71545
14.67	2.22330
19.72	1.89505

ตารางที่ 4.2 รัศมีหลังเกิดการดีดตัวกลับและความเค้นตกค้างแบบอัดบริเวณผิวชิ้นงาน

รัศมีจริงของชิ้นงาน (mm)	ความเค้นตกค้างที่ผิวชิ้นงาน (MPa)
4.85	-4.04176
9.28	-2.84705
13.88	-2.29077
20.60	-1.85090



รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะจากตำแหน่งแกนสะท้อนกับความเค้นตกค้างแบบดึง



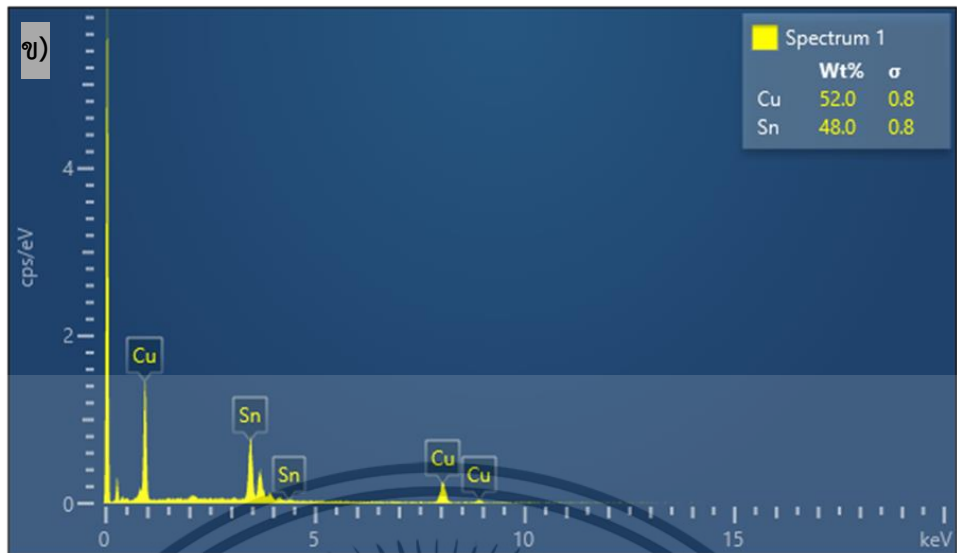
รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะจากตำแหน่งแกนสะท้อนกับความเค้นตกค้างแบบอัด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.1-4.2 ชิ้นงานรัศมี 4.41, 10.13, 14.67 และ 19.72 mm ได้รับความเค้นขณะตัดเป็นความเค้นอัด ภายหลังจากตัดชิ้นงาน เกิดความเค้นตกค้างจากการเสียรูปบริเวณพื้นผิวด้านเงาเป็นความเค้นตกค้างแบบดึง ในขณะที่ชิ้นงานรัศมี 4.85, 9.28, 13.88 และ 20.60 mm ได้รับความเค้นขณะตัดเป็นความเค้นดึง ซึ่งหลังจากตัดชิ้นงาน เกิดความเค้นตกค้างจากการเสียรูปบริเวณพื้นผิวด้านเงาเป็นความเค้นตกค้างแบบอัด โดยชิ้นงานที่ไม่ได้รับความเค้นขณะตัด จะไม่เกิดความเค้นตกค้างจากการเสียรูป

4.2 โครงสร้างจุลภาคของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรี

ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แสดงให้เห็นถึงการเกิดขึ้นของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรี นำมาวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) พบธาตุองค์ประกอบหลัก 2 ชนิด คือ Sn และ Cu โดยทำการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของธาตุของชิ้นงานแต่ละชิ้นในตำแหน่งแสดงตัวอย่างได้ดังรูปที่ 4.3 ได้สัดส่วนโดยจำนวนอะตอม (at.%) ดังแสดงในตารางที่ 4.3-4.5





รูปที่ 4.3 ตัวอย่างการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ก) โครงสร้างจุลภาค ข) สเปกตรัม

ตารางที่ 4.3 สัดส่วนโดยจำนวนอะตอมของชิ้นงานที่ไม่ถูกตัด

รัศมีชิ้นงาน	Cu (at.%)	Sn (at.%)	Possible Phase
∞	54.7	45.3	Cu_6Sn_5

ตารางที่ 4.4 สัดส่วนโดยจำนวนอะตอมของชิ้นงานด้านความเค้นอัด

รัศมีชิ้นงาน (mm)	Cu (at.%)	Sn (at.%)	Possible Phase
4.41	54.1	45.9	Cu_6Sn_5
10.13	87.4	12.6	Cu_3Sn
14.67	66.9	33.1	Cu_3Sn
19.72	52.5	47.5	Cu_6Sn_5

ตารางที่ 4.5 สัดส่วนโดยจำนวนอะตอมของชิ้นงานด้านความเค้นดึง

รัศมีชิ้นงาน	Cu (at.%)	Sn (at.%)	Possible Phase
4.85	59.8	40.2	Cu_6Sn_5
9.28	58.5	41.5	Cu_6Sn_5
13.88	62.2	37.8	Cu_6Sn_5
20.60	58.7	41.3	Cu_6Sn_5

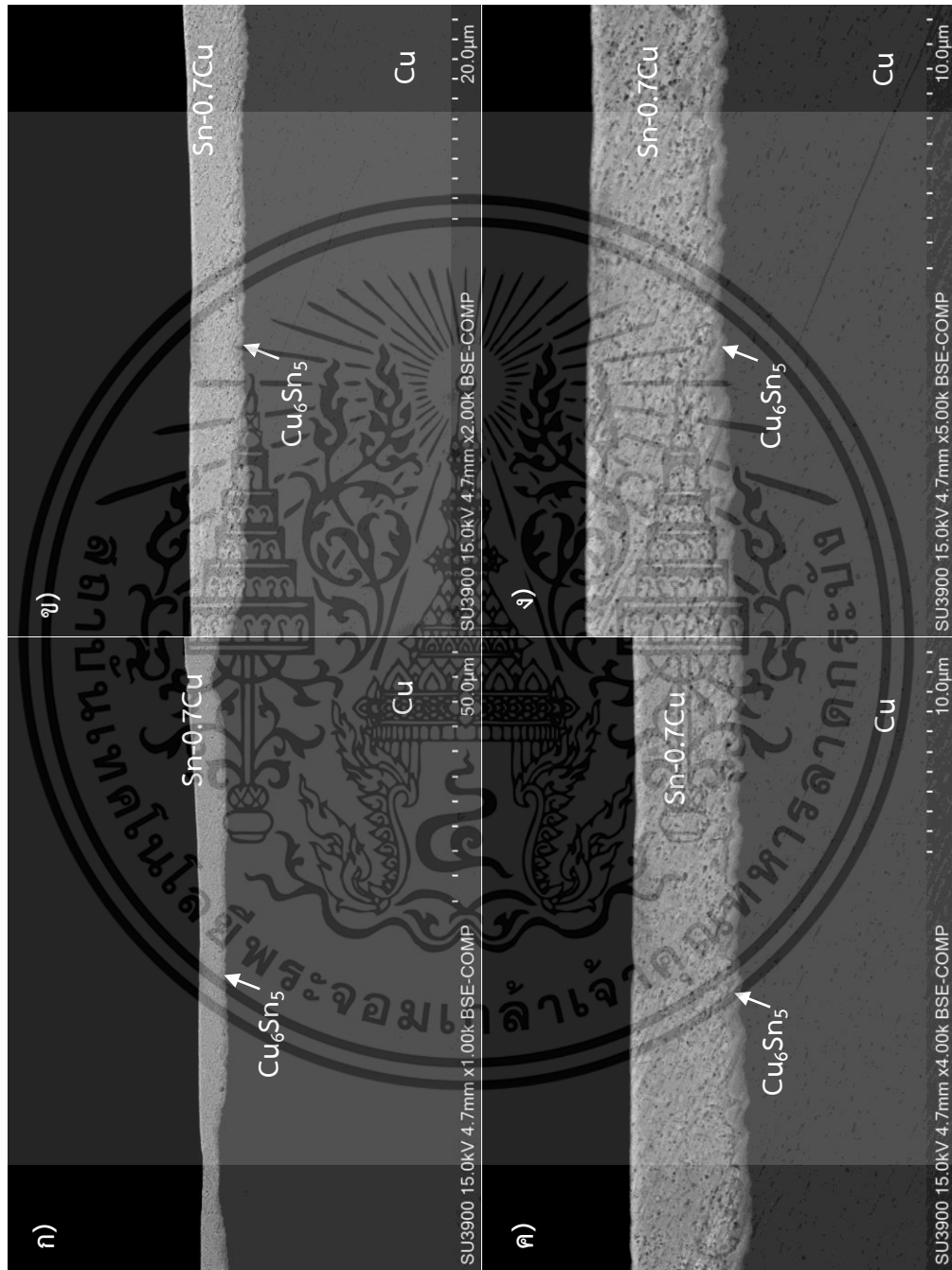
ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ สามารถสังเกตเห็นเป็น 3 ชั้น คือ ชั้นของแผ่นทองแดง สารประกอบเชิงโลหะ และโลหะบัดกรี ซึ่งเห็นชั้นสารประกอบเชิงโลหะได้อย่างชัดเจน ทั้งในส่วนของชิ้นงานที่ไม่เกิดความเค้นตกค้าง ชิ้นงานที่เกิดความเค้นตกค้างแบบดึง และชิ้นงานที่เกิดความเค้นตกค้างแบบอัด ดังรูปที่ 4.4-4.12 จากสัดส่วนโดยจำนวนอะตอมที่ได้ แสดงให้เห็นถึงสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn หรือ Cu_6Sn_5 ที่เกิดขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับทางทฤษฎี





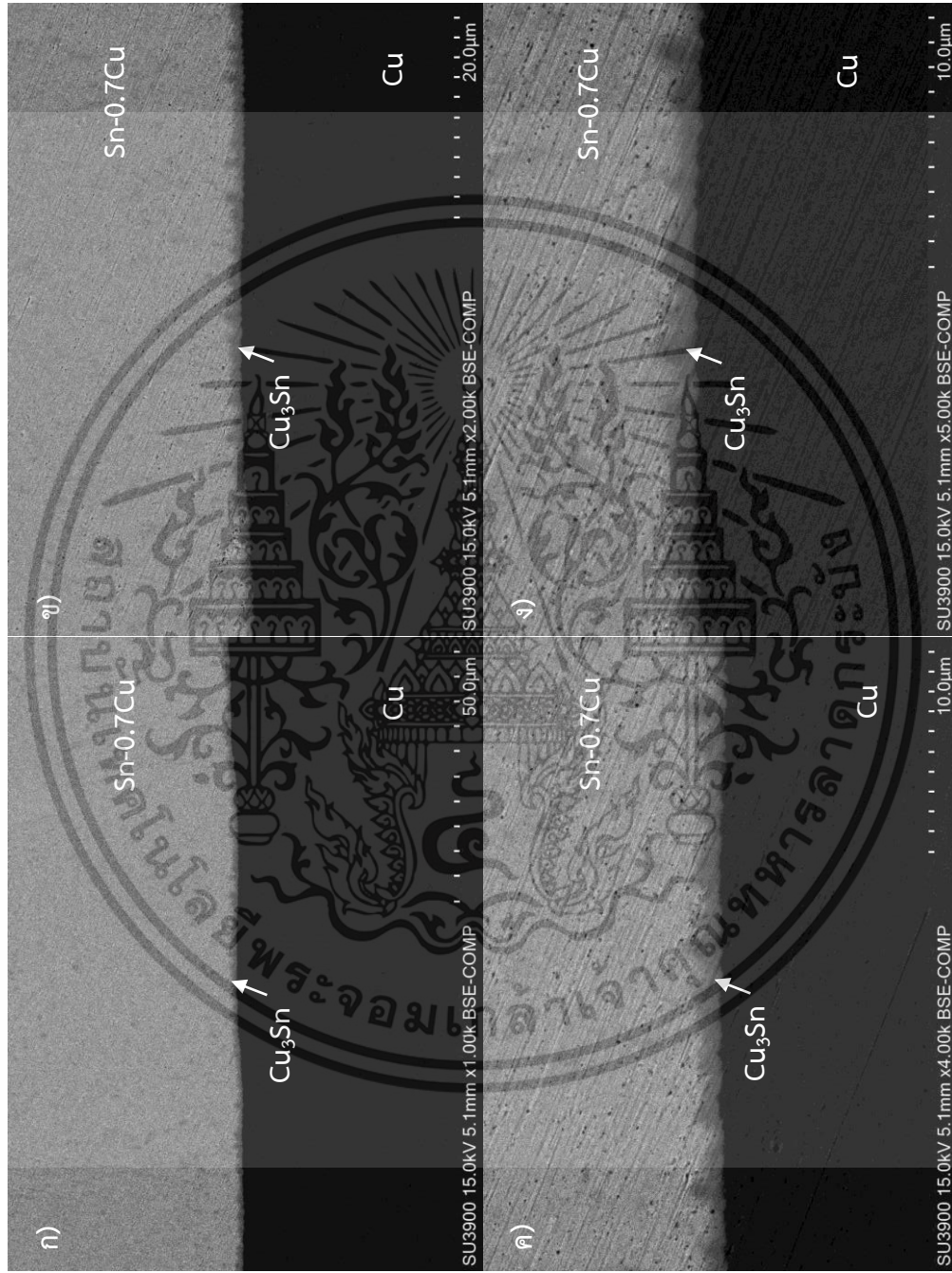
รูปที่ 4.4 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ของชิ้นงานที่บัดกรีที่ปริมาตรมี ∞ ที่กำลังขยาย ก)1000X ข)20000X ค)4000X ง)50000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตั้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ของชิ้นงานที่บัดกรีติดด้านความเค้นอัดที่รัศมี 5 mm ที่กำลังขยาย ก)1000X ข)2000X ค)4000X ง)5000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ของชิ้นงานที่บัดกรีติดด้านความเค้นอัดที่รีดมี 10 mm ที่กำลังขยาย ก)1000X ข)2000X ค)4000X ง)5000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



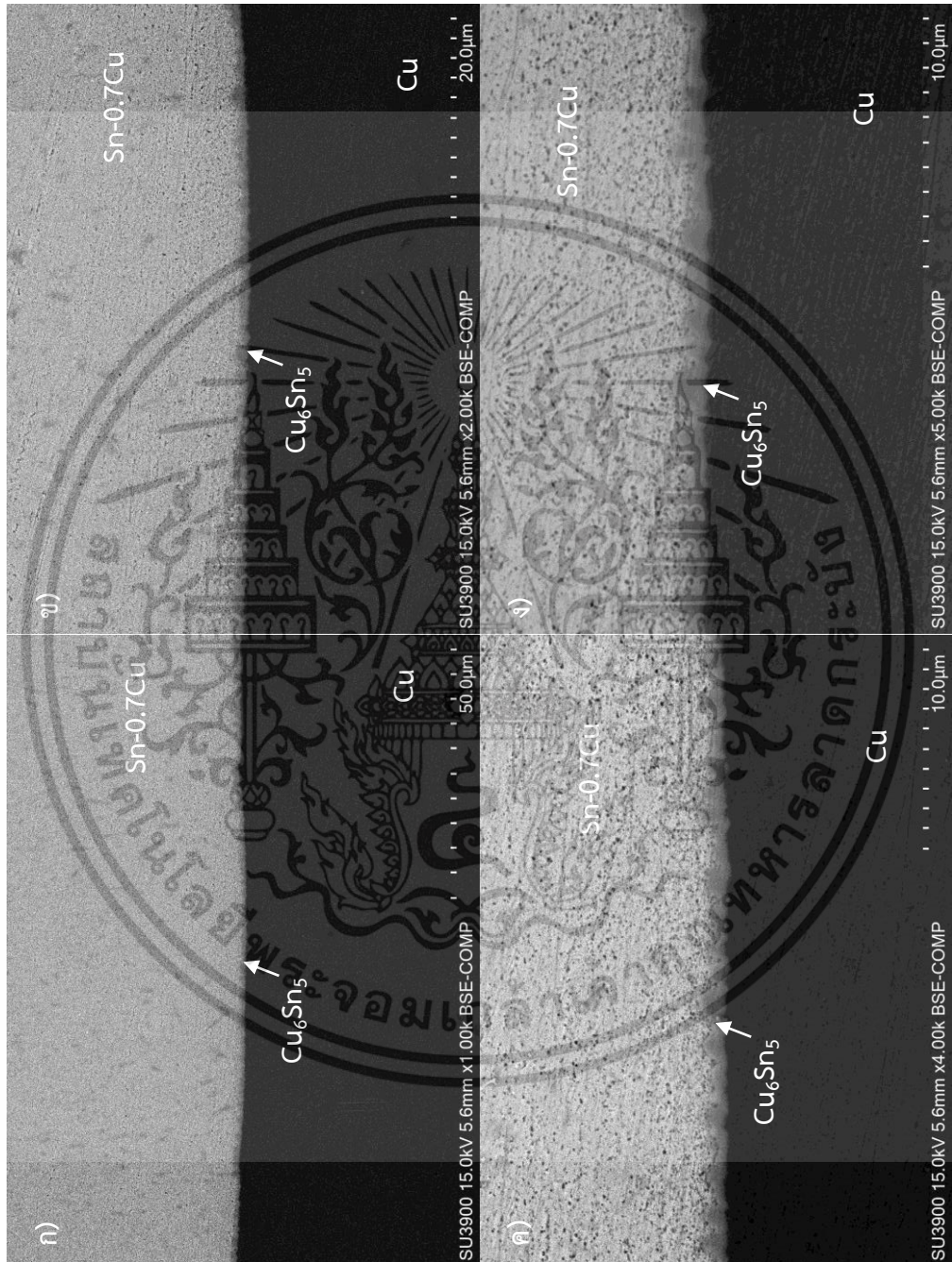
รูปที่ 4.7 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ของชิ้นงานที่บัดกรีติดด้านความเค้นอัดที่รีตีมี 15 มม ที่กำลังขยาย ก)1000X ข)2000X ค)4000X ง)5000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



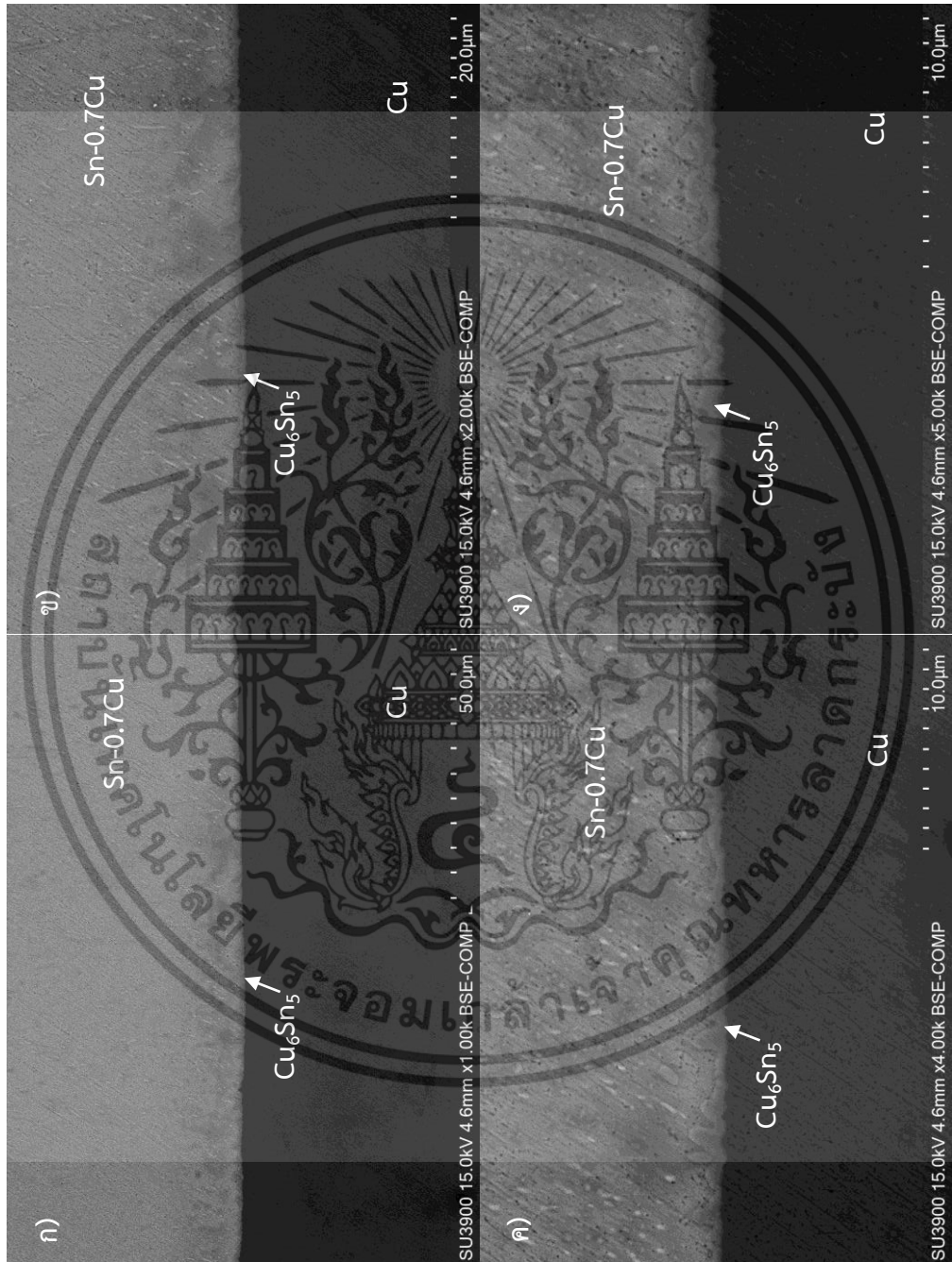
รูปที่ 4.8 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ของชิ้นงานที่บัดกรีติดด้านความแคบอัตราที่มี 20 mm ที่กำลังขยาย ก)1000X ข)2000X ค)4000X ง)5000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



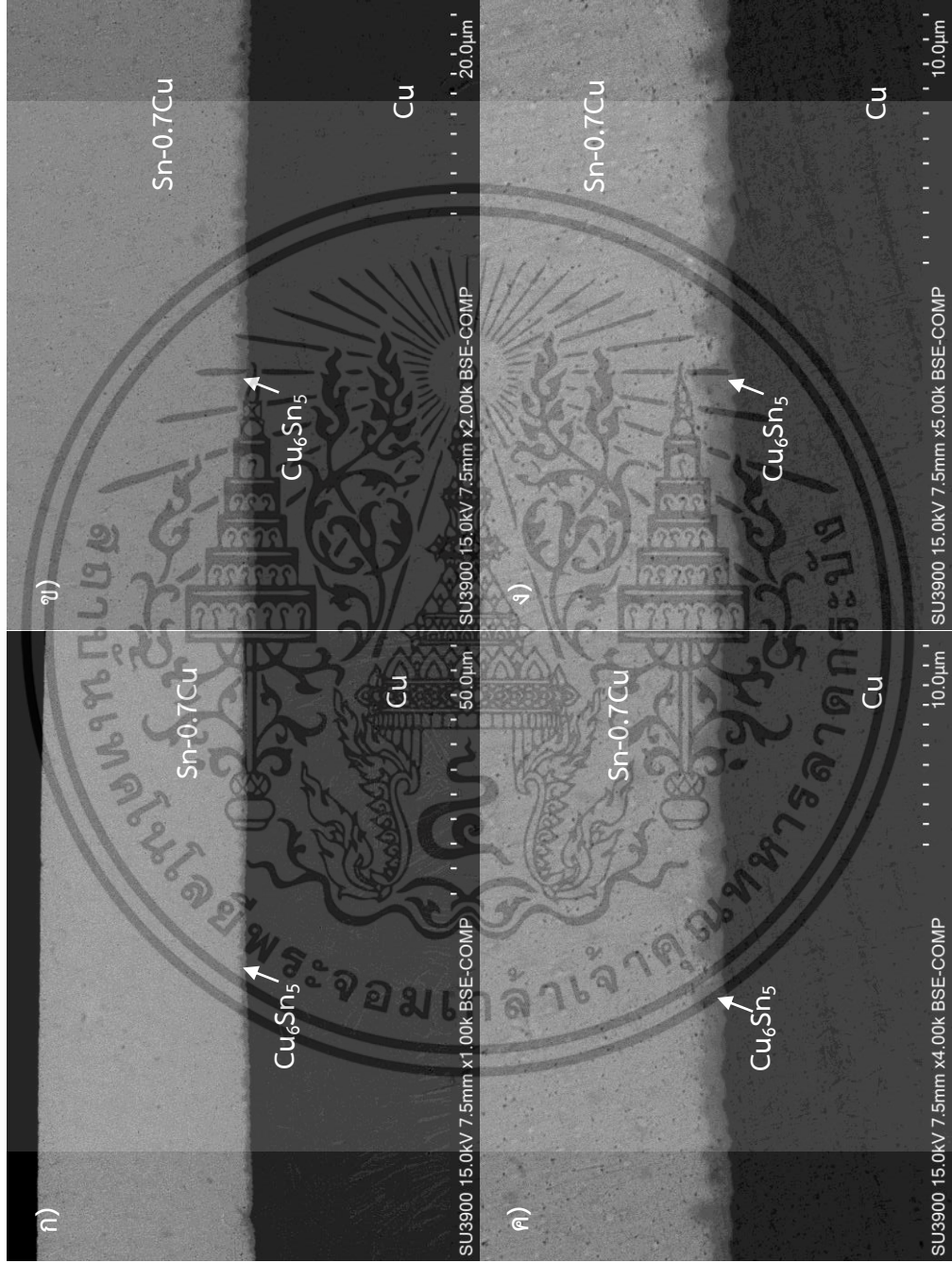
รูปที่ 4.9 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ของชิ้นงานที่ปิดกิริยิตัดด้านความเค้นดึงที่รีตีมี 5 mm ที่กำลังขยาย ก)1000X ข)2000X ค)4000X ง)5000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ของชิ้นงานที่ปิดกิริติดด้านความเค้นดึงที่รีตีมี 10 mm ที่กำลังขยาย ก)1000X ข)2000X ค)4000X ง)5000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ของชิ้นงานที่บัดกรีติดด้านความเค้นดึงที่วัดมี 15 mm ที่กำลังขยาย ก)1000X ข)2000X ค)4000X ง)5000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

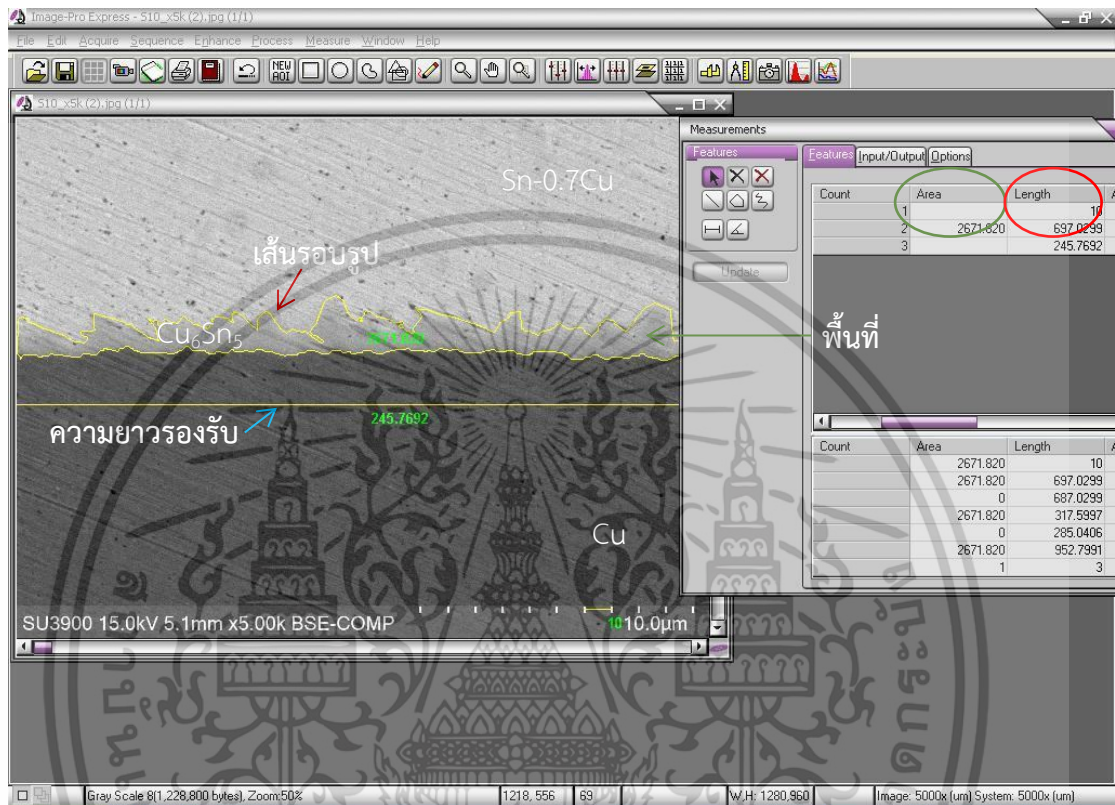


รูปที่ 4.12 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ของชิ้นงานที่ปิดกิริยิตัดด้านความเค้นดึงที่รีตีมี 20 mm ที่กำลังขยาย ก)1000X ข)2000X ค)4000X ง)5000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ปริมาณการเกิดของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรี

รูปที่ 4.13 เป็นตัวอย่างการใช้โปรแกรม Image-Pro Express ในการหาปริมาณการเกิดของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรีของแต่ละชิ้นงาน โดยหาได้จากค่าเฉลี่ยพื้นที่ต่อความยาวที่รองรับของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ หรือความหนาเฉลี่ย แสดงผลดังตารางที่ 4.6-4.8



รูปที่ 4.13 ตัวอย่างการใช้โปรแกรม Image-Pro Express ในการวัดพื้นที่ ความยาวรองรับ และเส้นรอบรูปของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

ตารางที่ 4.6 พื้นที่ ความยาวรองรับ และความหนาของชั้นของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรีของชิ้นงานที่ไม่ตัด

รัศมี (mm)	ครั้งที่	พื้นที่ (μm^2)	ความยาวรองรับ (μm)	ความหนาเฉลี่ย (μm)
∞	1	2241.68	245.77	9.0095
	2	2316.09	245.77	
	3	2085.02	245.77	
	เฉลี่ย	2214.26	245.77	

ตารางที่ 4.7 พื้นที่ ความยาวรองรับ และความหนาของชั้นของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรีของ
ชิ้นงานที่มีความเค้นตกค้างแบบดึง

รัศมี (mm)	ครั้งที่	พื้นที่ (μm^2)	ความยาวรองรับ (μm)	ความหนาเฉลี่ย (μm)
4.41	1	1581.95	246.14	6.6565
	2	1674.85	245.81	
	3	1665.53	247.52	
	เฉลี่ย	1640.78	246.49	
10.13	1	2407.35	245.91	9.9481
	2	2566.75	246.15	
	3	2366.53	245.83	
	เฉลี่ย	2446.88	245.96	
14.67	1	2589.53	245.89	10.7354
	2	2792.97	246.09	
	3	2537.57	245.77	
	เฉลี่ย	2640.03	245.92	
19.72	1	2274.67	245.80	9.5954
	2	2287.57	245.36	
	3	2510.98	245.98	
	เฉลี่ย	2357.74	245.71	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 พื้นที่ ความยาวรองรับ และความหนาของชั้นของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรีของ
ชิ้นงานที่มีความเค้นตกค้างแบบอัด

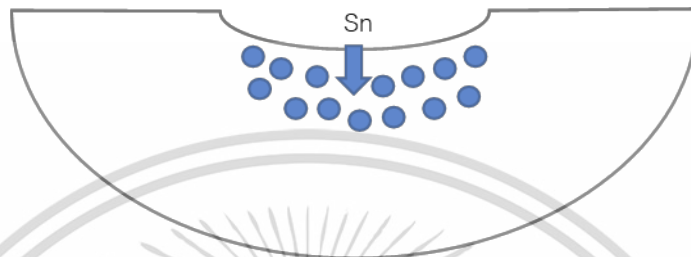
รัศมี (mm)	ครั้งที่	พื้นที่ (μm^2)	ความยาวรองรับ (μm)	ความหนาเฉลี่ย (μm)
4.85	1	2022.93	245.96	8.0339
	2	1967.64	245.87	
	3	1938.05	246.11	
	เฉลี่ย	1976.21	245.98	
9.28	1	2239.27	245.93	9.0063
	2	2206.81	245.83	
	3	2198.45	245.99	
	เฉลี่ย	2214.84	245.92	
13.88	1	2622.12	245.90	10.4649
	2	2459.73	245.96	
	3	2637.28	245.76	
	เฉลี่ย	2573.04	245.87	
20.6	1	2457.95	245.84	10.3465
	2	2600.25	246.01	
	3	2573.08	245.72	
	เฉลี่ย	2543.76	245.86	

4.3.1 ปริมาณการเกิดของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรีในชิ้นงานที่มีความเค้นตกค้างแบบ ดึง

จากการตัดแผ่นทองแดงที่รัศมีต่างๆด้วยความเค้นอัด จะได้ชิ้นงานที่มีความเค้นตกค้างแบบ
ดึงแตกต่างกันดังรูปที่ 4.1 เมื่อนำไปบัดกรี ปริมาณการเกิดของสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดจากการทำ
ปฏิกิริยาของ Sn และ Cu ก็จะแตกต่างกัน โดยเป็นผลจากลักษณะการแพร่ของ Sn ในแผ่นทองแดง
ตามความแตกต่างของความเข้มข้น (Concentration gradient) และการแพร่ของ Sn นี้จะสอดคล้อง
กับหลักการการเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความหนาแน่นของอะตอมมากไปยังบริเวณที่มีความหนาแน่น
ของอะตอมน้อย [8] ซึ่งทำให้ชิ้นงานรัศมี 5 mm มีแรงขับเคลื่อนการแพร่ของ Sn สูงสุด ในขณะที่ชิ้นงาน

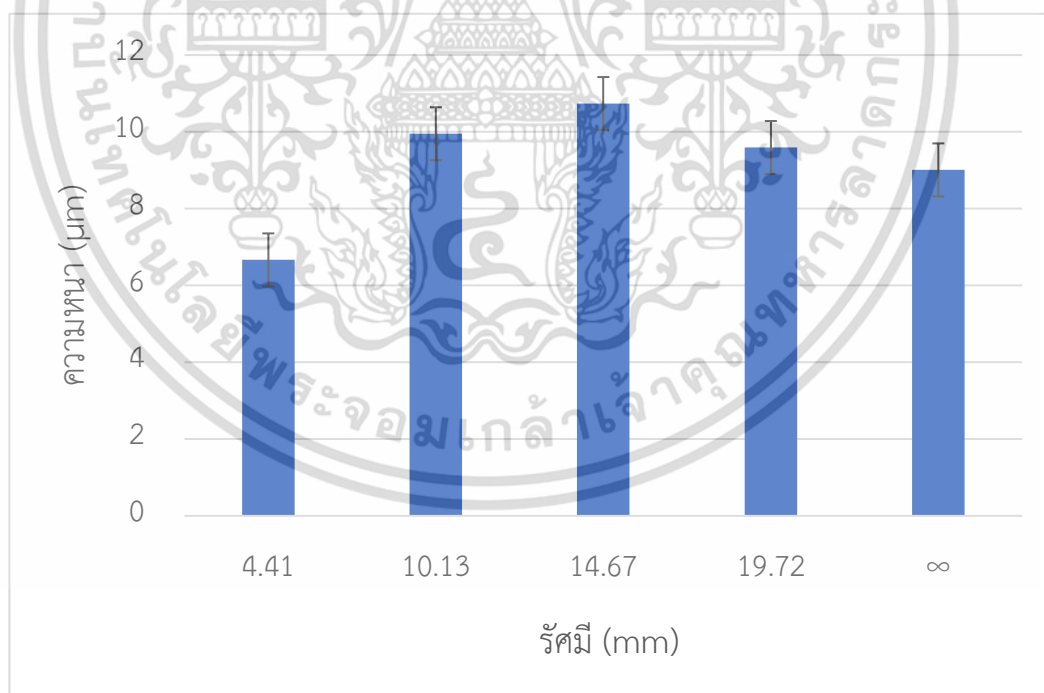
รัศมี ∞ จะมีแรงขับเคลื่อนการแพร่ของ Sn ต่ำสุด ในขณะเดียวกันการแพร่ของ Sn จะถูกต้านจากความเค้น
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตกค้างที่เกิดขึ้นในแผ่นทองแดงดังรูปที่ 4.1 เนื่องจากบริเวณผิวชิ้นงานเกิดความเค้นตกค้างแบบดึง โดยชิ้นงานรัศมี 5 mm จะมีแรงต้านการแพร่ของ Sn สูงสุด ในขณะที่ชิ้นงานรัศมี ∞ mm จะมีแรงต้านการแพร่ของ Sn ต่ำสุด คาดว่าจากรูปแบบของแรงขับและแรงต้านที่เกิดขึ้นนี้ทำให้เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด (Optimal condition) สำหรับการแพร่ของ Sn เกิดขึ้นที่ชิ้นงานรัศมี 15 mm ทำให้ได้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมากที่สุด และความหนามีค่าลดลงในชิ้นงานอื่นๆ



รูปที่ 4.14 การเคลื่อนที่ของ Sn และ Cu ในชิ้นงานที่มีความเค้นตกค้างแบบดึง

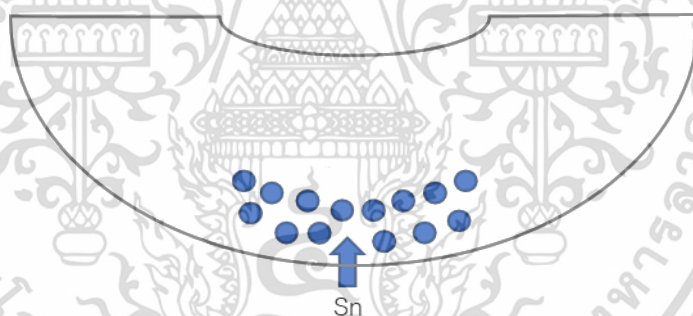
นำค่าที่ได้จากตารางที่ 4.6-4.7 มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเกิดของสารประกอบเชิงโลหะกับรัศมีของชิ้นงาน ได้ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเกิดของสารประกอบเชิงโลหะกับรัศมีของชิ้นงานที่มีความเค้นตกค้างแบบดึง

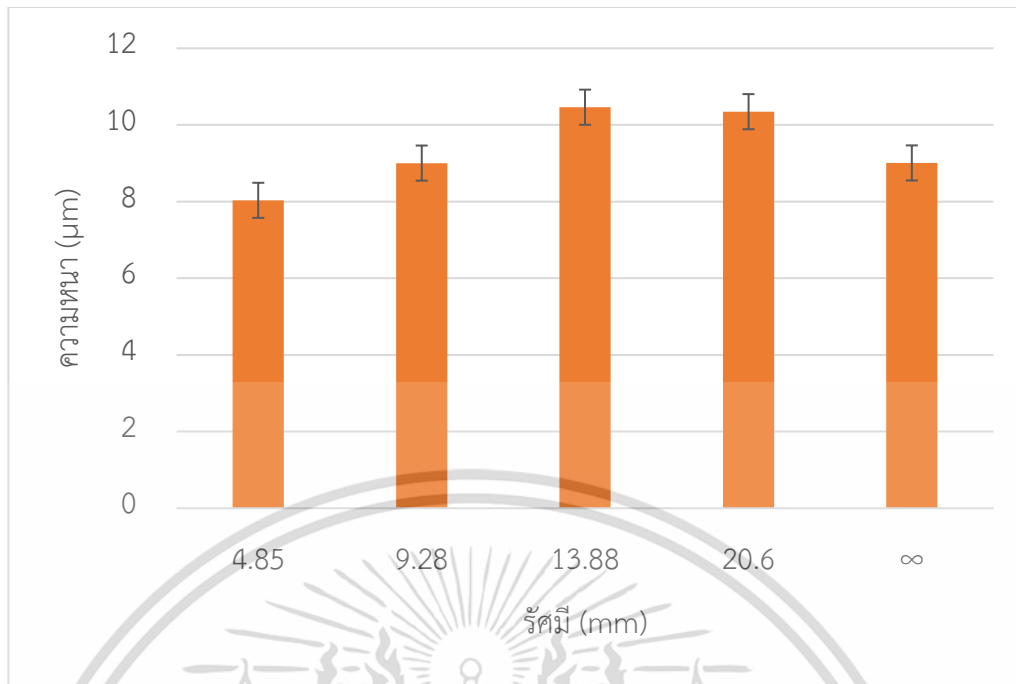
4.3.2 ปริมาณการเกิดของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรีในชิ้นงานที่มีความเค้นตกค้างแบบอัด

จากการตัดแผ่นทองแดงที่รัศมีต่างๆด้วยความเค้นอัด จะได้ชิ้นงานที่มีความเค้นตกค้างแบบดึงแตกต่างกันดังรูปที่ 4.2 เมื่อนำไปบัดกรี ปริมาณการเกิดของสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของ Sn และ Cu ก็จะไม่แตกต่างกัน โดยเป็นผลจากลักษณะการแพร่ของ Sn ในแผ่นทองแดงตามความแตกต่างของความเข้มข้น (Concentration gradient) และการแพร่ของ Sn นี้จะสอดคล้องกับหลักการการเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความเค้นตกค้างแบบอัดไปยังบริเวณที่มีความเค้นตกค้างแบบดึง [8] ซึ่งทำให้ชิ้นงานรัศมี 5 mm มีแรงขับเคลื่อนการแพร่ของ Sn สูงสุดดังรูปที่ 4.2 ในขณะที่ชิ้นงานรัศมี ∞ จะมีแรงขับเคลื่อนการแพร่ของ Sn ต่ำสุด ในขณะเดียวกันการแพร่ของ Sn จะถูกต้านจากการจัดเรียงตัวของอะตอมทองแดง เนื่องจากที่ผิวด้านนอกมีความหนาแน่นของอะตอมน้อยในขณะที่บริเวณด้านในมีความหนาแน่นของอะตอมมาก ทำให้ Sn แพร่เข้าไปได้ยาก โดยชิ้นงานรัศมี 5 mm จะมีแรงต้านการแพร่ของ Sn สูงสุด ในขณะที่ชิ้นงานรัศมี ∞ จะมีแรงต้านการแพร่ของ Sn ต่ำสุด คาดว่าจากรูปแบบของแรงขับเคลื่อนและแรงต้านที่เกิดขึ้นนี้ทำให้เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด (Optimal condition) สำหรับการแพร่ของ Sn เกิดขึ้นที่ชิ้นงานรัศมี 15 mm ทำให้ได้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมากที่สุด และความหนาที่มีค่าลดลงในชิ้นงานอื่นๆ เช่นเดียวกับกับกรณีแรก

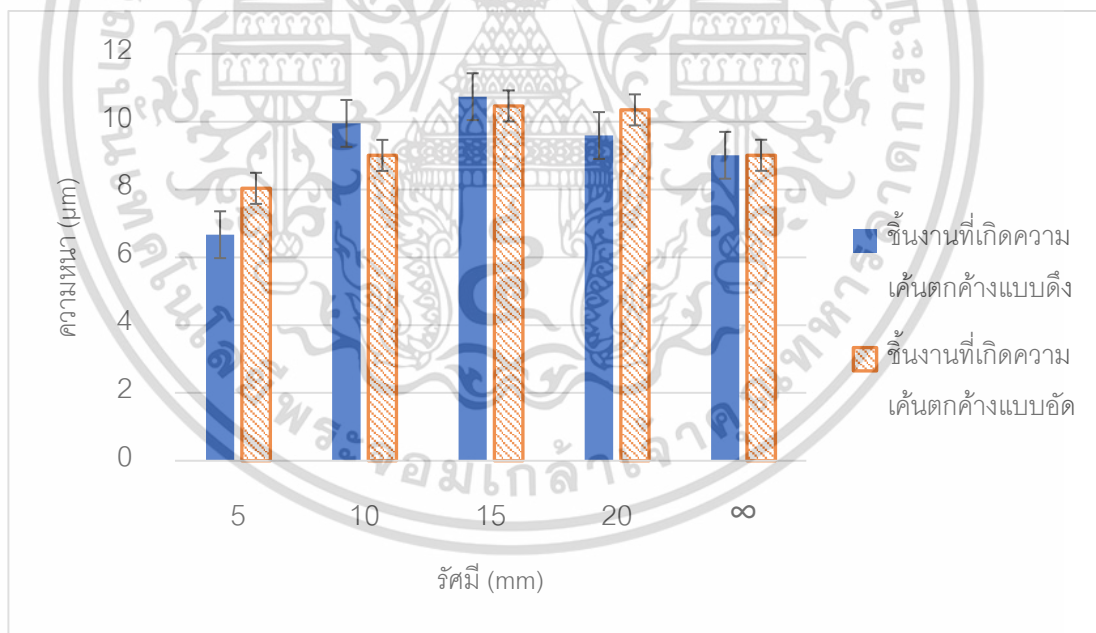


รูปที่ 4.16 การเคลื่อนที่ของ Sn และ Cu ในชิ้นงานที่มีความเค้นตกค้างแบบอัด

นำค่าที่ได้จากตารางที่ 4.6 และ 4.8 มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเกิดของสารประกอบเชิงโลหะกับรัศมีของชิ้นงาน ได้ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเกิดของสารประกอบเชิงโลหะกับรศมีของชิ้นงานที่มีความเค้นตกค้างแบบอัด



รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเกิดของสารประกอบเชิงโลหะกับรศมีของชิ้นงาน

จากรูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานที่เกิดความเค้นตกค้างแบบอัดและชิ้นงานที่เกิดความเค้นตกค้างแบบดึง ปริมาณการเกิดของสารประกอบเชิงโลหะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงรศมี 5-15 mm และมีแนวโน้มลดลงในช่วงรศมี 15 mm - ∞ เช่นเดียวกัน

4.4 รูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรี

รูปร่างที่แตกต่างกันของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ส่งผลต่อความแข็งแรงในรอยบัดกรี โดยลักษณะแบบ Scallop-type แสดงถึงการเชื่อมประสานระหว่างแผ่นทองแดงกับโลหะบัดกรีที่ดีกว่า ลักษณะอื่น สามารถใช้ความยาวเส้นรอบรูปต่อพื้นที่เพื่อนำมาอธิบายรูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้น โดยใช้โปรแกรม Image-Pro Express ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.13 ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.9-4.11

ตารางที่ 4.9 เส้นรอบรูป พื้นที่และเส้นรอบรูปต่อพื้นที่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรีของชิ้นงานที่ไม่มีความเค้นตกค้าง

รัศมี (mm)	ครั้งที่	เส้นรอบรูป (μm)	พื้นที่ (μm^2)	เส้นรอบรูปต่อพื้นที่ (μm^{-1})
∞	1	630.33	2241.68	0.2808
	2	626.60	2316.09	
	3	608.32	2085.02	
	เฉลี่ย	621.75	2214.26	

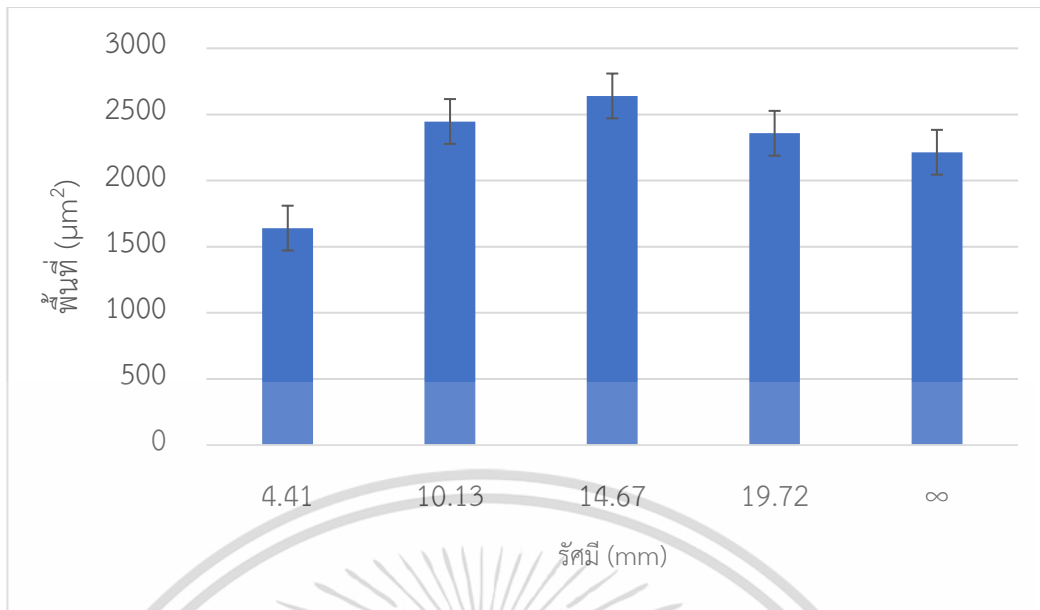
ตารางที่ 4.10 เส้นรอบรูป พื้นที่และเส้นรอบรูปต่อพื้นที่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรี
ของชิ้นงานที่มีความเค้นตกค้างแบบดึง

รัศมี (mm)	ครั้งที่	เส้นรอบรูป (μm)	พื้นที่ (μm^2)	เส้นรอบรูปต่อพื้นที่ (μm^{-1})
4.41	1	594.95	1581.95	0.3703
	2	602.22	1674.85	
	3	625.47	1665.53	
	เฉลี่ย	607.55	1640.78	
10.13	1	662.71	2407.35	0.2730
	2	685.05	2566.75	
	3	656.11	2366.53	
	เฉลี่ย	667.96	2446.88	
14.67	1	680.55	2589.53	0.2753
	2	773.08	2792.97	
	3	727.18	2537.57	
	เฉลี่ย	726.93	2640.03	
19.72	1	736.65	2274.67	0.3087
	2	741.71	2287.57	
	3	705.04	2510.98	
	เฉลี่ย	727.80	2357.74	

ตารางที่ 4.11 เส้นรอบรูป พื้นที่และเส้นรอบรูปต่อพื้นที่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรี
ของชิ้นงานที่มีความเค้นตกค้างแบบอัด

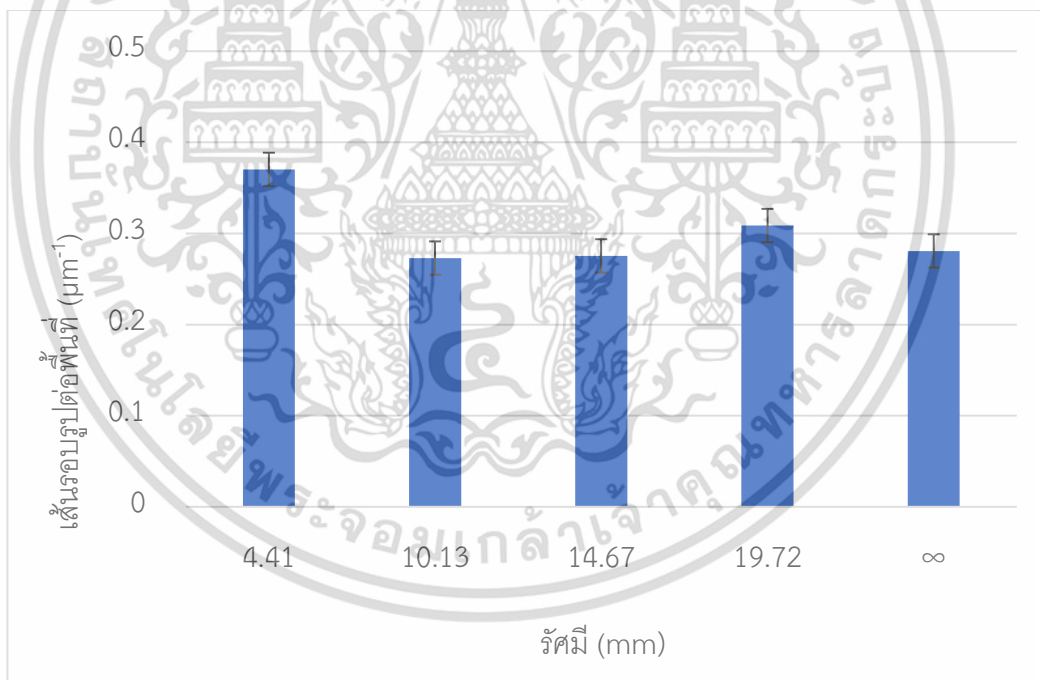
รัศมี (mm)	ครั้งที่	เส้นรอบรูป (μm)	พื้นที่ (μm^2)	เส้นรอบรูปต่อพื้นที่ (μm^{-1})
4.85	1	654.36	2022.93	0.3290
	2	638.49	1967.64	
	3	657.90	1938.05	
	เฉลี่ย	650.25	1976.208	
9.28	1	679.38	2239.27	0.3123
	2	677.55	2206.81	
	3	718.05	2198.45	
	เฉลี่ย	691.66	2214.84	
13.88	1	687.60	2622.12	0.2608
	2	657.95	2459.73	
	3	667.39	2637.28	
	เฉลี่ย	670.98	2573.04	
20.6	1	708.73	2457.95	0.2809
	2	708.55	2600.25	
	3	726.67	2573.08	
	เฉลี่ย	714.65	2543.76	

นำค่าที่ได้จากตารางที่ 4.10 สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ของสารประกอบเชิงโลหะกับรัศมีของชิ้นงาน และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเส้นรอบรูปต่อพื้นที่ของสารประกอบเชิงโลหะกับรัศมีของชิ้นงาน ที่เกิดความเค้นตกค้างแบบดึง ได้ดังรูปที่ 4.19-4.20



รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ของสารประกอบเชิงโลหะกับรัศมีของชิ้นงานที่มีความเค้น

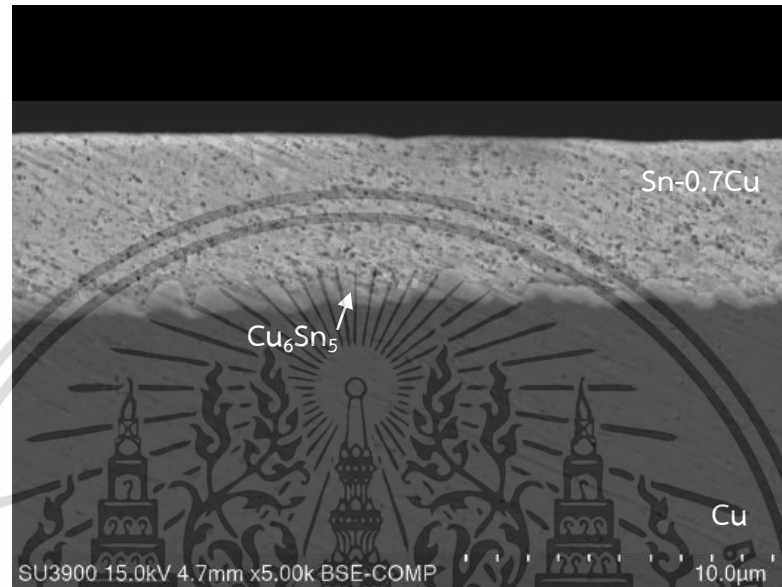
ตกค้างแบบดิ่ง



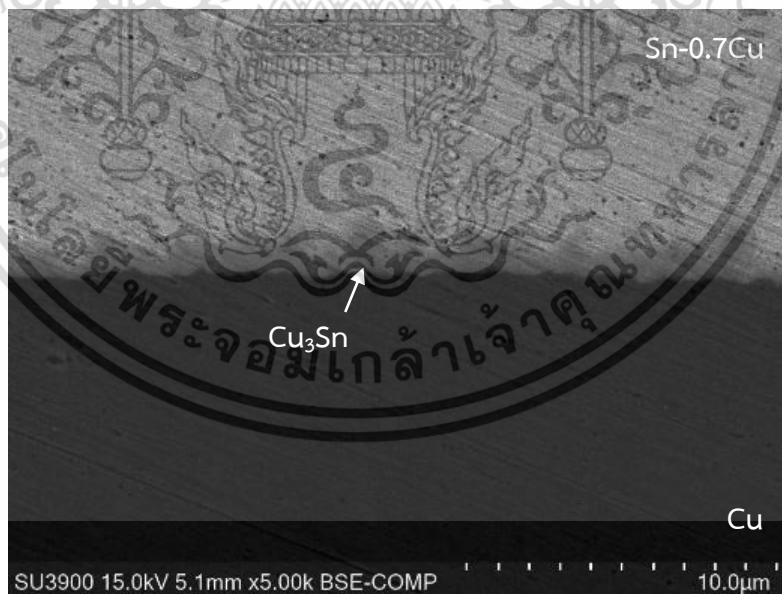
รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเส้นรอบรูปต่อพื้นที่ของสารประกอบเชิงโลหะกับรัศมีของชิ้นงานที่มีความเค้นตกค้างแบบดิ่ง

จากรูปที่ 4.19 และ 4.20 จะเห็นได้ว่ากราฟทั้งสองรูปมีแนวโน้มที่มีลักษณะตรงกันข้ามโดยชิ้นงานที่มีความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะน้อย จะมีอัตราส่วนเส้นรอบรูปต่อพื้นที่ที่มาก หรือมีความขรุขระมาก ในขณะที่ชิ้นงานที่มีความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมาก จะมีอัตราส่วนเส้นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

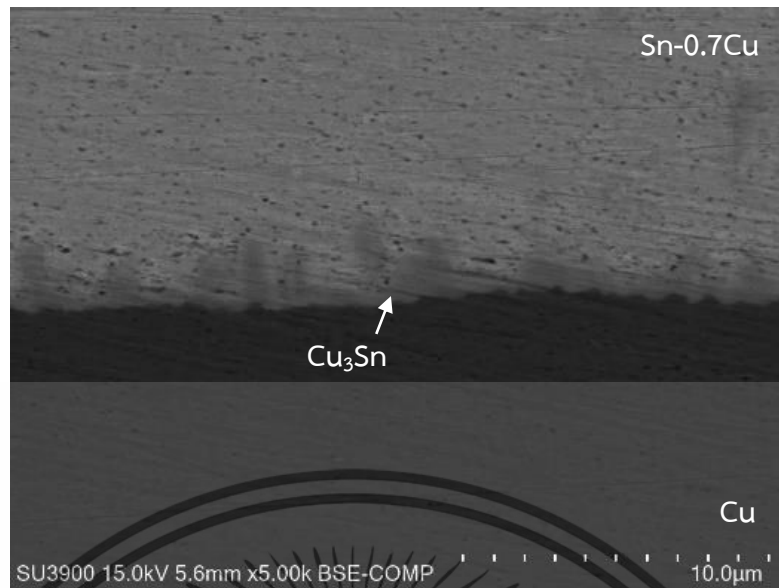
รอบรูปต่อพื้นที่น้อย หรือมีความขรุขระน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ชั้นงานที่เกิดการแพร่ได้ยากจะให้ชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่ขรุขระ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอะตอมที่เกี่ยวข้องเกิดขึ้นแบบไม่สม่ำเสมอ ในขณะที่ชั้นงานที่เกิดการแพร่ได้ดีจะให้ชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เรียบ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอะตอมที่เกี่ยวข้องเกิดขึ้นแบบสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 4.21-4.24



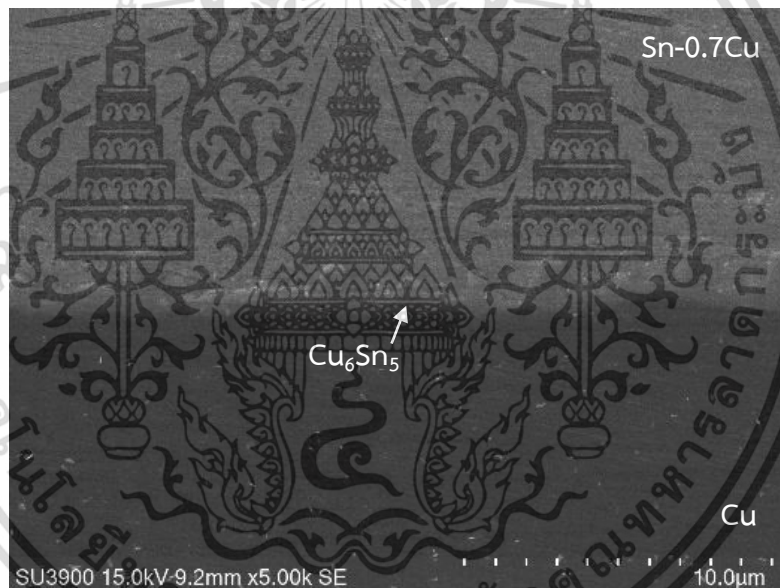
รูปที่ 4.21 รูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะด้านความเค้นอัด 5 mm



รูปที่ 4.22 รูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะด้านความเค้นอัด 10 mm

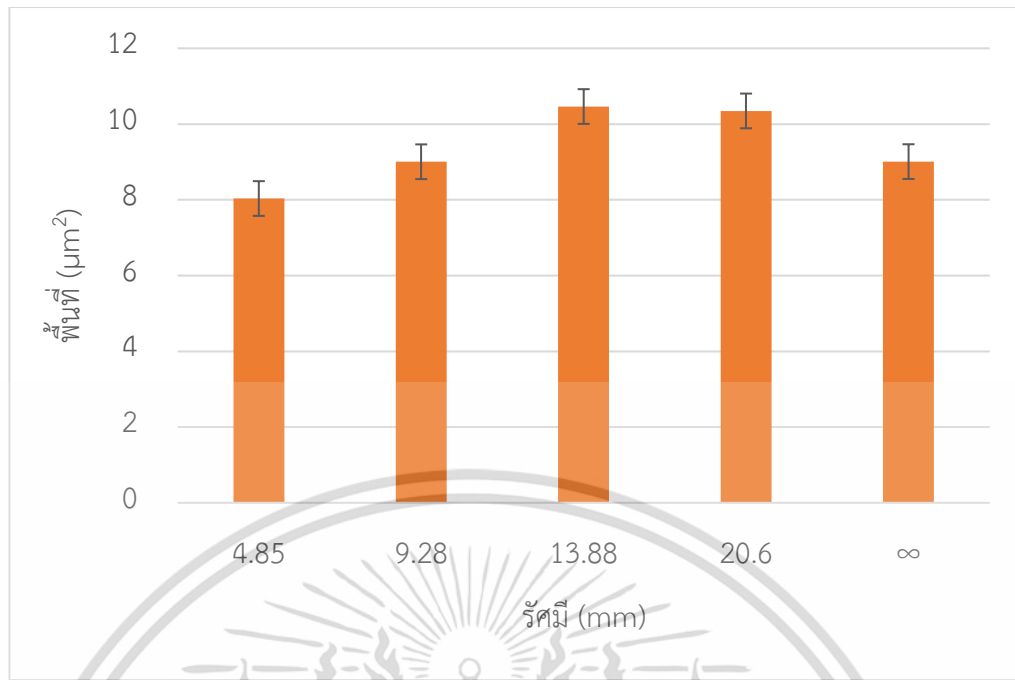


รูปที่ 4.23 รูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะด้านความเค้นอัด 15 mm

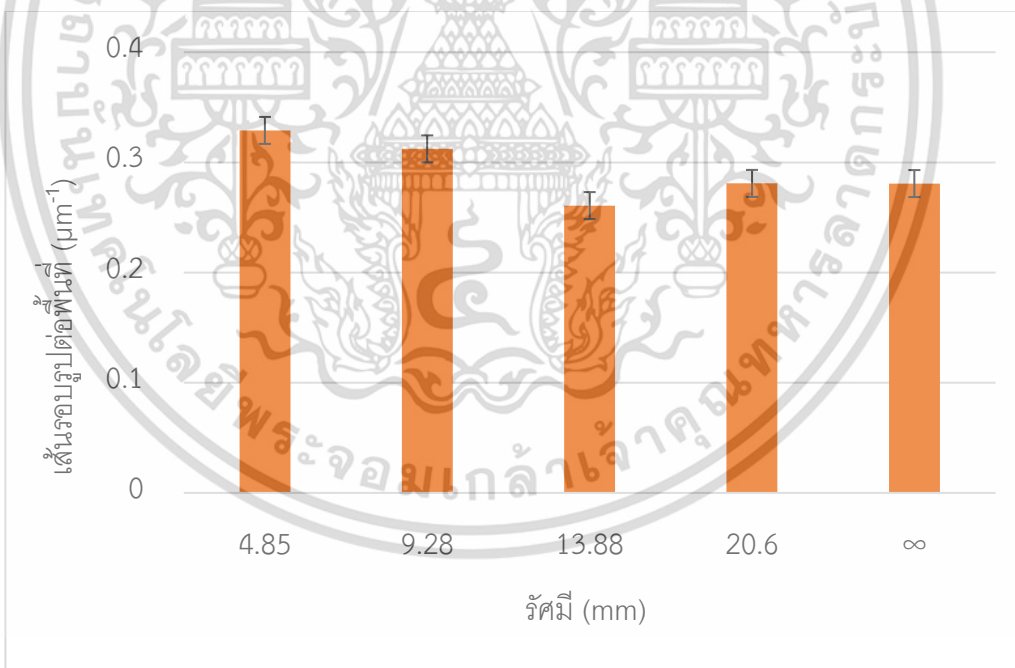


รูปที่ 4.24 รูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะด้านความเค้นอัด 20 mm

นำค่าที่ได้จากตารางที่ 4.11 สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ของสารประกอบเชิงโลหะกับรัศมีของชิ้นงาน และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเส้นรอบรูปต่อพื้นที่ของสารประกอบเชิงโลหะกับรัศมีของชิ้นงาน ที่มีความเค้นตกค้างแบบอัด ได้ดังรูปที่ 4.25-4.26



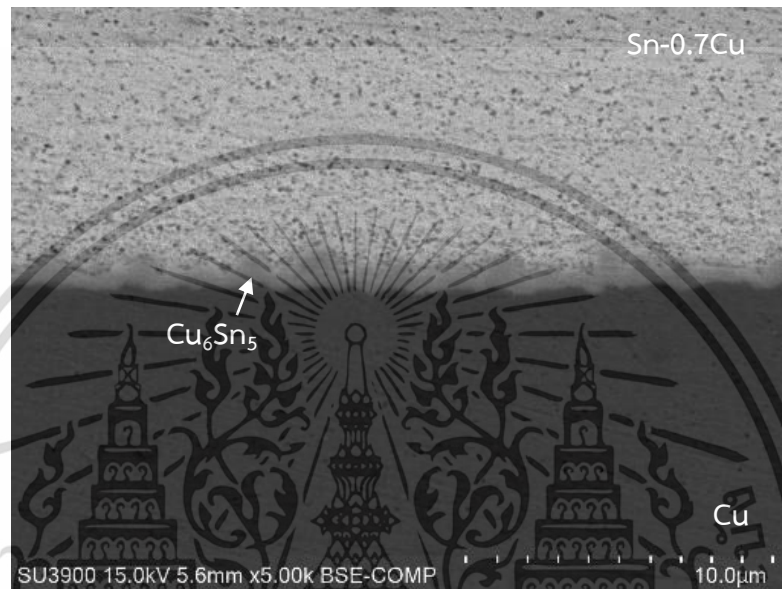
รูปที่ 4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ของสารประกอบเชิงโลหะกับรัศมีของชิ้นงานที่มีความเค้นตกค้างแบบอัด



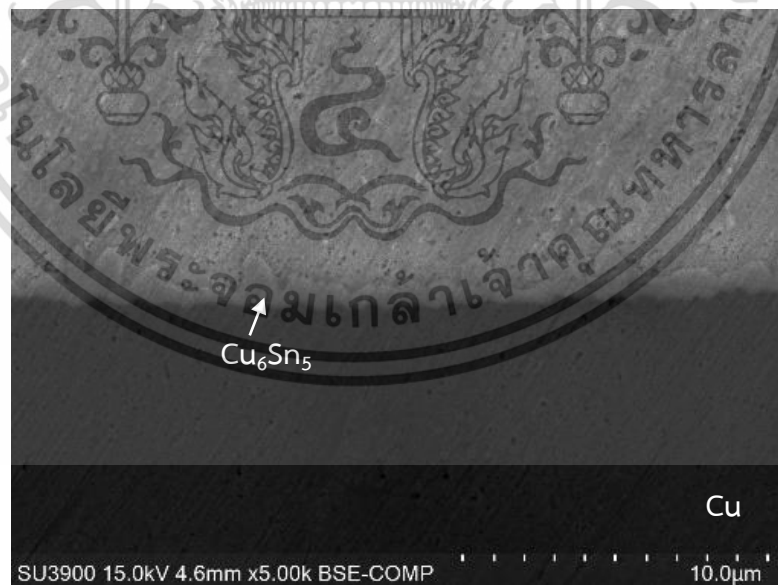
รูปที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเส้นรอบรูปต่อพื้นที่ของสารประกอบเชิงโลหะกับรัศมีของชิ้นงานที่มีความเค้นตกค้างแบบอัด

จากรูปที่ 4.25 และ 4.26 จะเห็นได้ว่ากราฟทั้งสองรูปมีแนวโน้มที่มีลักษณะตรงกันข้ามโดยชิ้นงานที่มีความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะน้อย จะมีอัตราส่วนเส้นรอบรูปต่อพื้นที่ที่มาก หรือมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

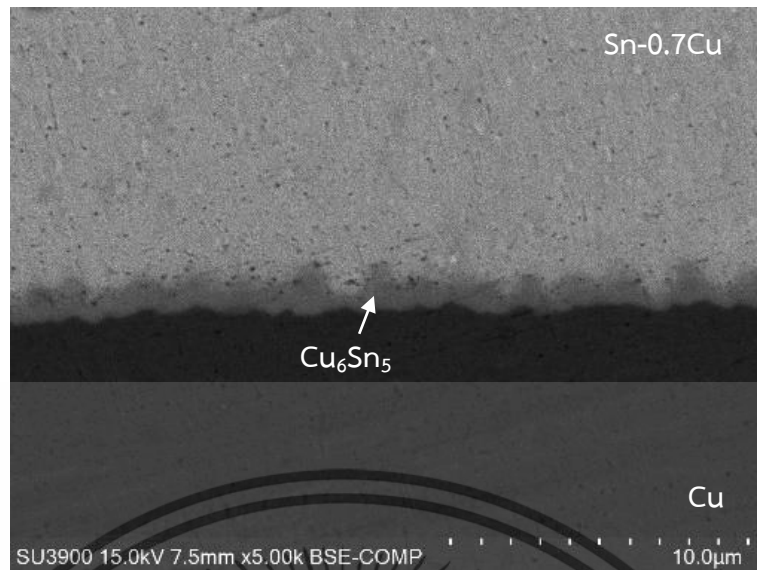
ความขรุขระมาก ในขณะที่ชิ้นงานที่มีความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมาก จะมีอัตราส่วนเส้นรอบรูปต่อพื้นที่ที่น้อย หรือมีความขรุขระน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานที่เกิดการแพร่ได้ยากจะให้ชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่ขรุขระ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอะตอมที่เกี่ยวข้องเกิดขึ้นแบบไม่สม่ำเสมอ ในขณะที่ชิ้นงานที่เกิดการแพร่ได้ดีจะให้ชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เรียบ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอะตอมที่เกี่ยวข้องเกิดขึ้นแบบสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 4.27-4.31



รูปที่ 4.27 รูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะด้านความเค้นดึง 5 mm



รูปที่ 4.28 รูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะด้านความเค้นดึง 10 mm

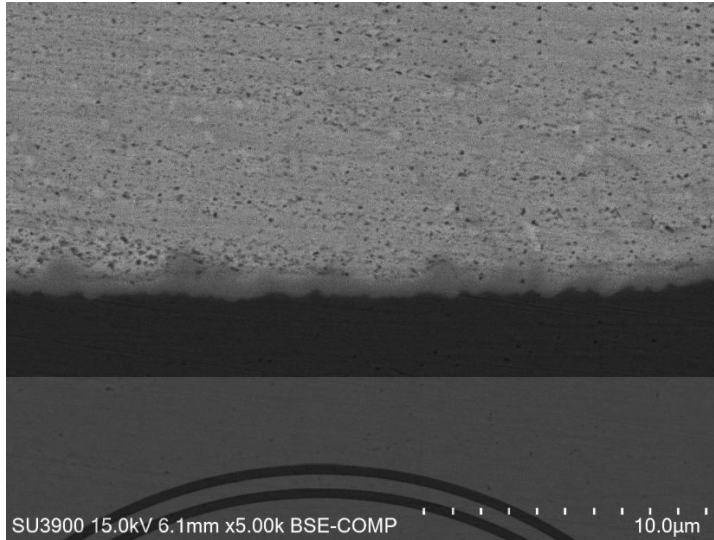


รูปที่ 4.29 รูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะด้านความเค้นดึง 15 mm



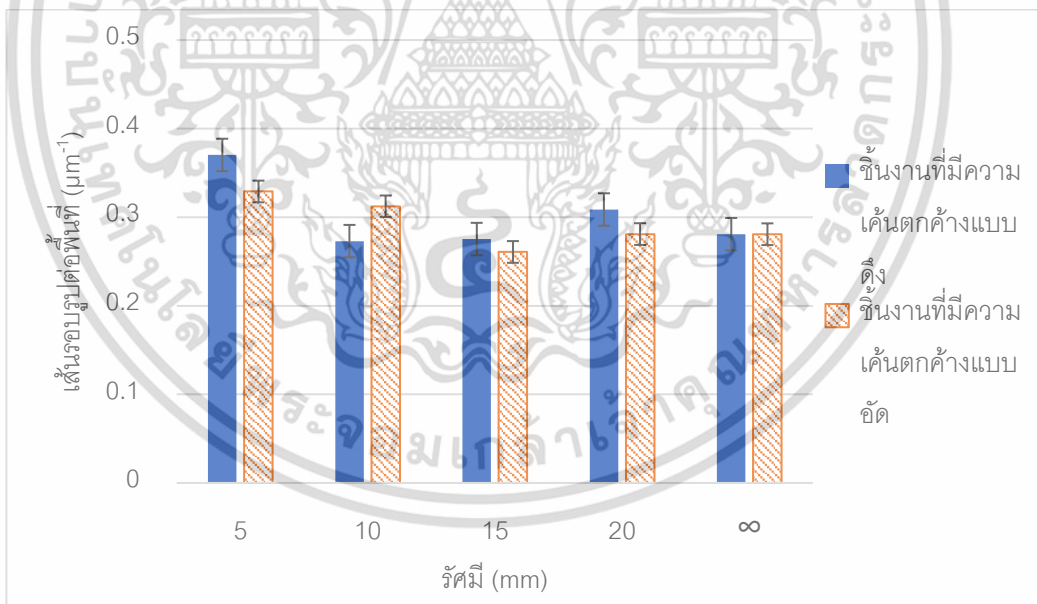
รูปที่ 4.30 รูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะด้านความเค้นดึง 20 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 รูปร่างสารประกอบเชิงโลหะของชิ้นงานที่ไม่ตัด

สามารถสังเกตได้ว่า ชิ้นงานรีดมี 5, 10, 15, 20 mm และ ∞ ลักษณะของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นเป็นลักษณะแบบ Scallop-type ทั้งชิ้นงานที่เกิดความเค้นตกค้างแบบดึงและแบบอัด แต่มีส่วนของสารประกอบเชิงโลหะที่ยื่นเข้าไปในแผ่นทองแดงมากน้อยแตกต่างกัน



รูปที่ 4.32 กราฟเปรียบเทียบเส้นรอบรูปต่อพื้นที่ของชิ้นงานที่มีความเค้นตกค้างแบบดึงและอัด

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงาน

การดำเนินงานในการศึกษาผลความเค้นตกค้างในแผ่นรองทองแดงที่มีต่อการเกิดและรูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรี สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

5.1.1 การวิเคราะห์ความเค้นขณะตัดชิ้นงานและความเค้นตกค้างหลังตัดชิ้นงาน

แผ่นทองแดงที่ได้รับความเค้นอัดขณะตัดจะเกิดความเค้นตกค้างแบบดึง และแผ่นทองแดงที่ได้รับความเค้นดึงขณะตัดจะเกิดความเค้นตกค้างแบบอัดบริเวณผิวของแผ่นทองแดง โดยชิ้นงานรัศมี 5 mm จะเกิดความเค้นตกค้างมากที่สุด และเมื่อรัศมีเพิ่มขึ้น ความเค้นตกค้างจะลดลง ซึ่งแผ่นทองแดงที่มัดตัดจะไม่เกิดความเค้นตกค้าง

5.1.2 การวิเคราะห์สารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรี

5.1.2.1 โครงสร้างจุลภาคของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรี

ภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ ปรากฏเป็น 3 ชั้น ได้แก่ ชั้นของแผ่นทองแดง สารประกอบเชิงโลหะ และโลหะบัดกรี ซึ่งเมื่อนำภาพมาวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุบริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่รอยต่อนั้นจะมีลักษณะของเฟสเกิดขึ้นอยู่สองเฟสคือ Cu_6Sn_5 หรือ Cu_3Sn

5.1.2.2 ปริมาณการเกิดของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรี

ปริมาณการเกิดสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรีของชิ้นงานรัศมี 15 mm สูงที่สุด เนื่องจากปัจจัยที่ส่งผลกับแรงขับและแรงต้านการแพร่ของ Sn ในแผ่นทองแดง ได้แก่ ความต่างของความเข้มข้น ความหนาแน่นของอะตอม และความเค้นตกค้าง ซึ่งเกิดเงื่อนไขที่เหมาะสมทำให้สารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรีของชิ้นงานรัศมี 15 mm หนาที่สุด และชิ้นงานอื่นมีความหนาลดลง

5.1.2.3 รูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรี

รูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรีมีลักษณะแบบ Scallop-type เกิดจากการเคลื่อนที่ของอะตอมที่เกี่ยวข้องแบบไม่สม่ำเสมอ ทำให้มีอัตราส่วนเส้นรอบรูปต่อพื้นที่มาก หรือมีความขรุขระมาก ซึ่งมีส่วนให้ความแข็งแรงในรอยบัดกรีเพิ่มขึ้น โดยชิ้นงานรัศมี 20 mm มีอัตราส่วนเส้นรอบรูปต่อพื้นที่มากที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาเฉพาะผลของความเค้นตกค้างต่อการเกิดและรูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรี พบว่าความเค้นตกค้างมีผลต่อการเกิดและรูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรี โดยชิ้นงานรัศมี 20 mm มีความเค้นตกค้างน้อย ทำให้คุณสมบัติของสารประกอบเชิงโลหะดีที่สุด ดังนั้น จึงควรเลือกใช้แผ่นรองทองแดงในการผลิตแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีความเค้นตกค้างจากกระบวนการผลิตน้อยที่สุด ซึ่งทำให้ปริมาณการเกิดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะน้อย และมีรูปร่างแบบ Scallop-type เพื่อเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือของรอยบัดกรีที่ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์



เอกสารอ้างอิง

- [1] Y.G. Lee, J.G. Duh, Interfacial morphology and concentration profile in the unleaded solder/Cu joint assembly, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 10 (1999) 33–43. doi:10.1023/A:1008975006706.
- [2] J.W. Yoon, S.W. Kim, S.B. Jung, IMC morphology, interfacial reaction and joint reliability of Pb-free Sn-Ag-Cu solder on electrolytic Ni BGA substrate, *J. Alloys Compd.* 392 (2005) 247–252. doi:10.1016/j.jallcom.2004.09.045.
- [3] M. Yang, M. Li, L. Wang, Y. Fu, J. Kim, L. Weng, Cu₆Sn₅ morphology transition and its effect on mechanical properties of eutectic Sn-Ag solder joints, *J. Electron. Mater.* 40 (2011) 176–188. doi:10.1007/s11664-010-1430-y.
- [4] G. Yang, D. Yang, L. Li, Microstructure and morphology of interfacial intermetallic compound CoSn₃ in Sn-Pb/Co-P solder joints, *Microelectron. Reliab.* 55 (2015) 2403–2411. doi:10.1016/j.microrel.2015.06.056.
- [5] J. Coonrod, Different copper foils for different reasons, *The PCB Magazine*, Apr. (2012) 60–64.
- [6] J. Kim, S.B. Jung, J.W. Yoon, Optimal Ni(P) thickness and reliability evaluation of thin-Au/Pd(P)/Ni(P) surface-finish with Sn-3.0Ag-0.5Cu solder joints, *J. Alloys Compd.* 805 (2019) 1013–1024.
- [7] H. Mehrer, *Diffusion in solids: fundamentals, methods, materials, diffusion-controlled processes*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [8] Ryan O’Hayre, *Materials kinetics fundamentals : principles, processes, and applications*, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2015.
- [9] Total Materia (2015). Copper Foil Manufacturing. <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=ktn&NM=352>
- [10] Matmatch. Properties of Copper. <https://matmatch.com/learn/material/copper-properties>
- [11] การสำรวจสถานภาพอุตสาหกรรมโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Non-ferrous metals) ทองแดง. รายงานฉบับสมบูรณ์ ภายใต้โครงการพัฒนาศูนย์วิเคราะห์ข้อมูลเชิงลึกอุตสาหกรรมเหล็กและโลหการ ประจำปีงบประมาณ 2557 สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย.
- [12] M. Zhao, L. Zhang, Zhi-Quan Liu, Ming-Yue Xiong, Lei Sun, Structure and properties of Sn-Cu lead-free solders in electronics packaging, *Science and Technology of Advanced Materials.* 20:1 (2019) 421–444. doi:10.1080/14686996.2019.1591168.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือนำไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

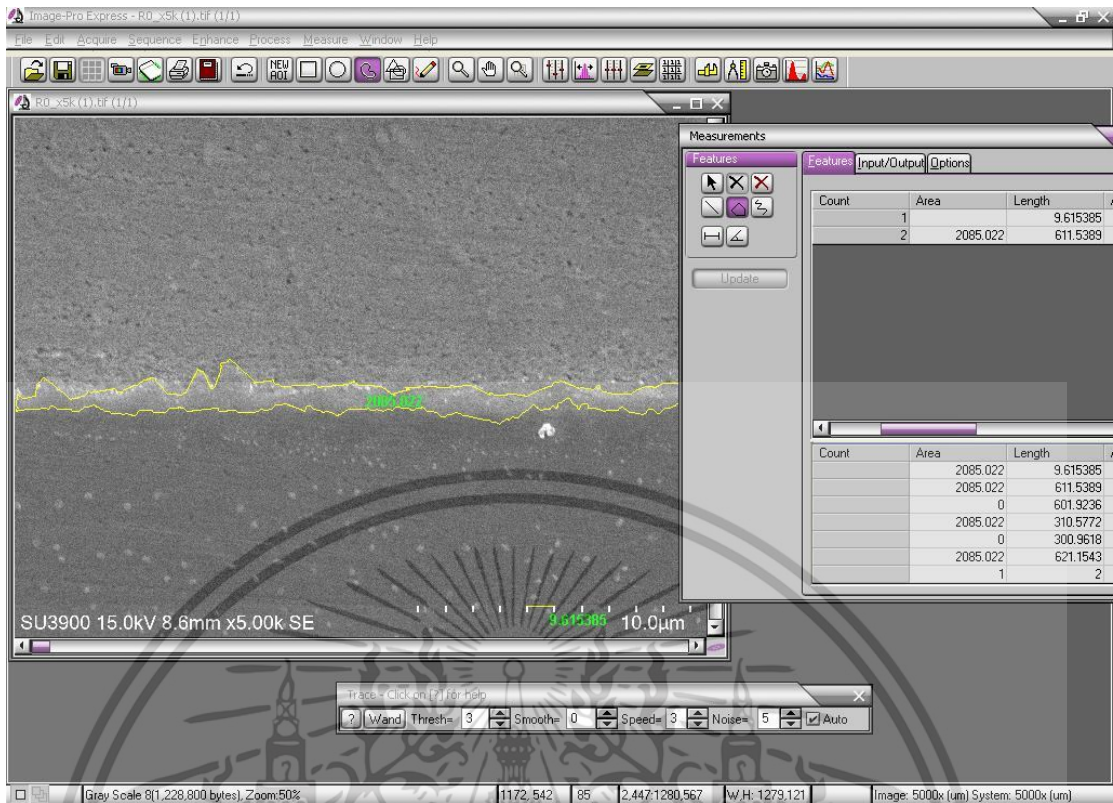
- [13] อรจิตร แจ่มแสง, ปิยวรรณ สุนาสวน, นิวัฒน์ มูเก็ม. (2557). การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความต้านทานแรงเฉือนระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมและโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว. สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหการ คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์.
- [14] Mulugeta Abtey, Guna Selvaduray, Lead-free Solders in Microelectronics, Materials Science and Engineering. 27 (2000) 95-141.
- [15] M. Hanson, Constitution of Binary Alloys, McGraw-Hill, 1958.
- [16] H. Nishikawa, N. Iwata, Formation and growth of intermetallic compound layers at the interface during laser soldering using Sn–Ag Cu solder on a Cu Pad, Journal of Materials Processing Technology. 215 (2015). doi: 10.1016/j.jmatprotec.2014.08.007
- [17] กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น.
<http://eng.sut.ac.th/me/2014/document/LabManuIndAuto/C.pdf>
- [18] Fundamentals of bending.
https://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/22074/9/09_chapter%204.pdf
- [19] ดร. ปรีชา เต็มสุขสวัสดิ์. (2004). การศึกษาความสัมพันธ์ของสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริก (สัมประสิทธิ์ซีเบค) กับความเค้นตกค้างและโครงสร้างของโลหะในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (ระยะที่ 1-2). ทุนวิจัยพระจอมเกล้าธนบุรี. สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานและวัสดุ.
- [20] สินีนาถ ธรรมสุนทร. (2556). ความเค้นตกค้างบนผิววัสดุผสม Al_2O_3-TiC จากกระบวนการเจียรไน. วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [21] พ.ต.ท.ดร. ชิติ มหาเจริญ. (2561). การตรวจลักษณะทางพื้นผิวและธาตุองค์ประกอบในเส้นใยสังเคราะห์ และเส้นใยธรรมชาติที่พบในประเทศไทยโดยวิธี Scanning Electron Microscope/Energy Dispersive X-ray Spectroscopy เพื่อประยุกต์ใช้ในการนิติวิทยาศาสตร์. คณะนิติวิทยาศาสตร์ โรงเรียนนายร้อยตำรวจ.
- [22] ดนัย กิจชัยนุกูล. (2547). เรื่องน่ารู้ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM). โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม.
- [23] ดลฤดี ไตเย็น. การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS). ฝ่ายเครื่องมือและวิจัยทางวิทยาศาสตร์ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [24] T.A. Siewert, C.A. Handwerker, Test Procedures for Developing Solder Data, NIST. Technology Administration. U.S. Department of Commerce.



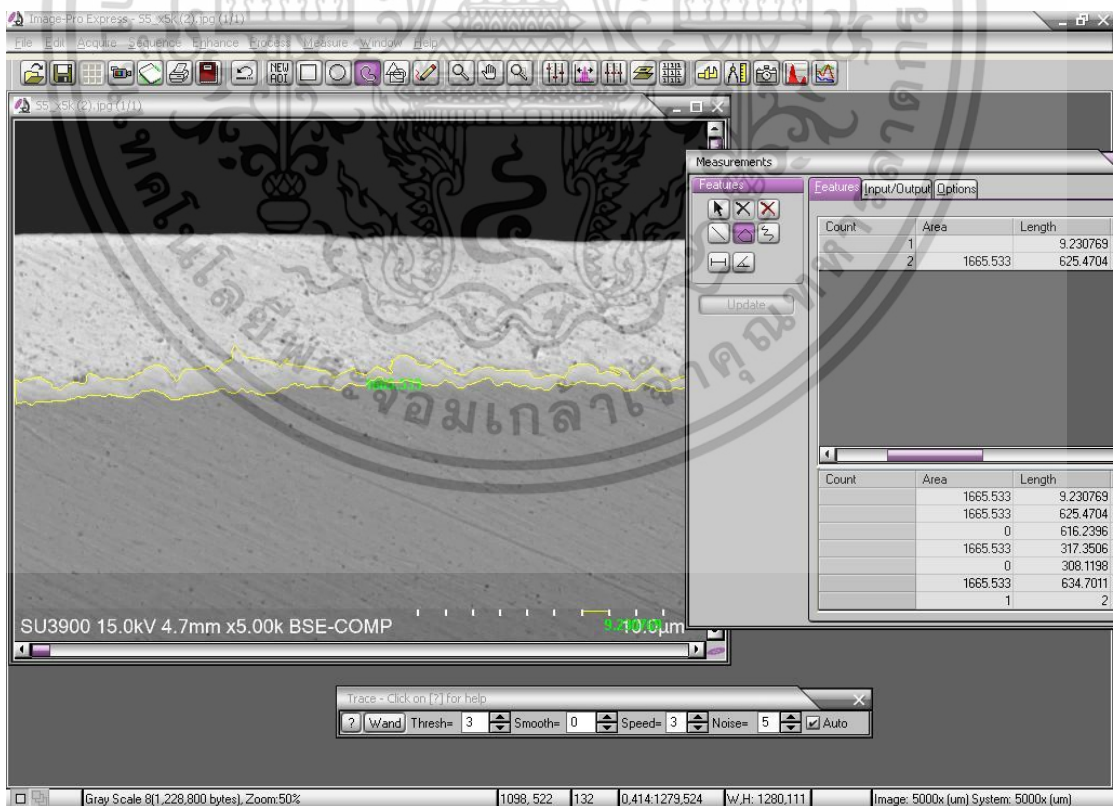
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

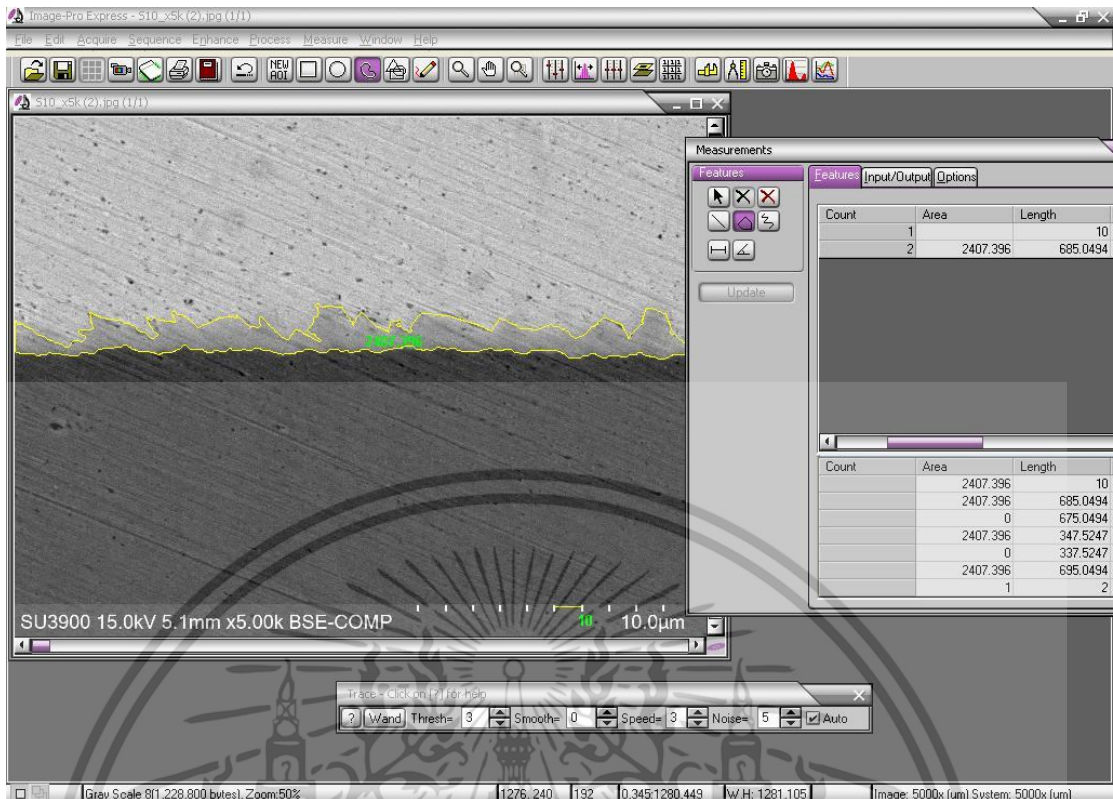


รูปที่ ผก1 การวัดพื้นที่และเส้นรอบรูปของชิ้นงานที่ไม่ถูกตัด

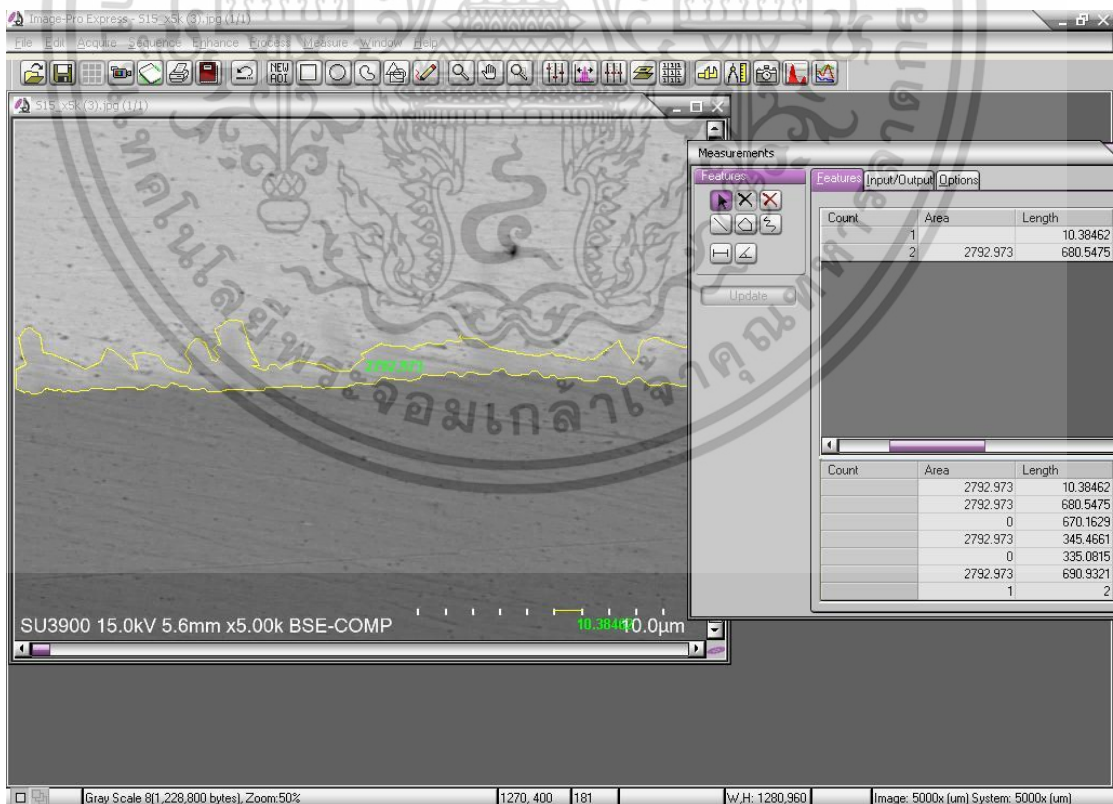


รูปที่ ผก2 การวัดพื้นที่และเส้นรอบรูปของชิ้นงานด้านความเค้นอัดรัศมี 5 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และด้อย่างยิ่งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

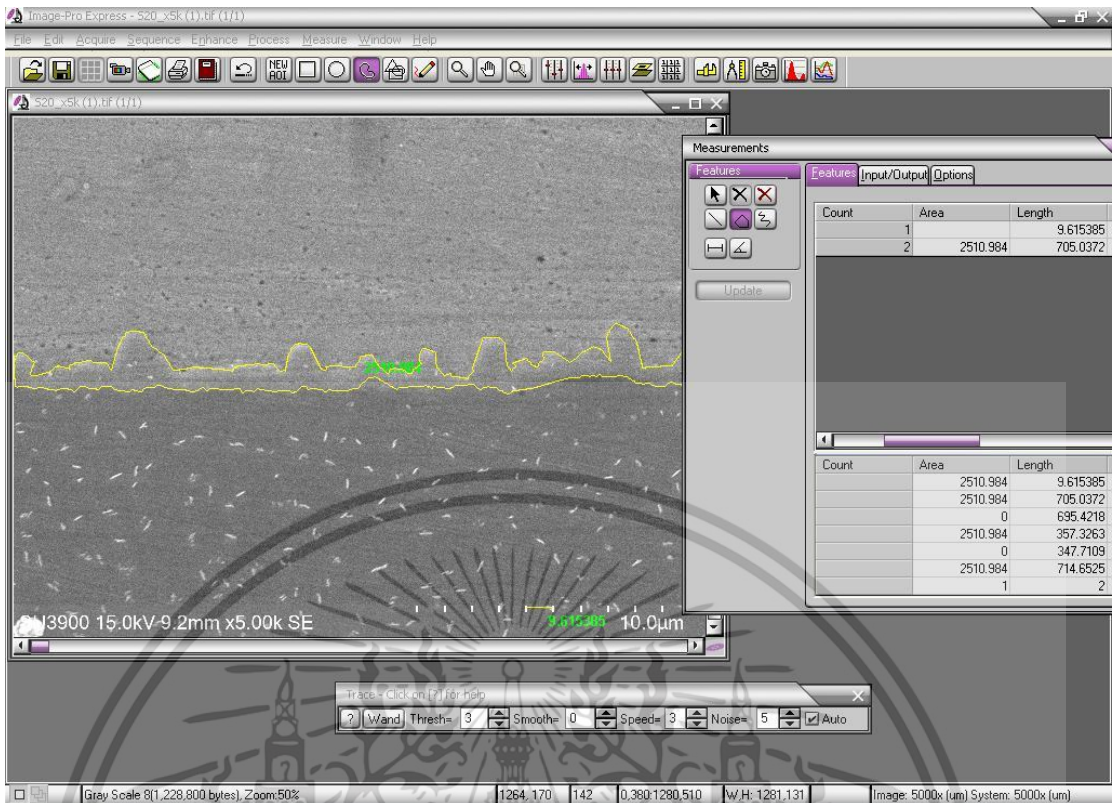


รูปที่ ผก3 การวัดพื้นที่และเส้นรอบรูปของชิ้นงานด้านความเค้นอัดรัศมี 10 mm

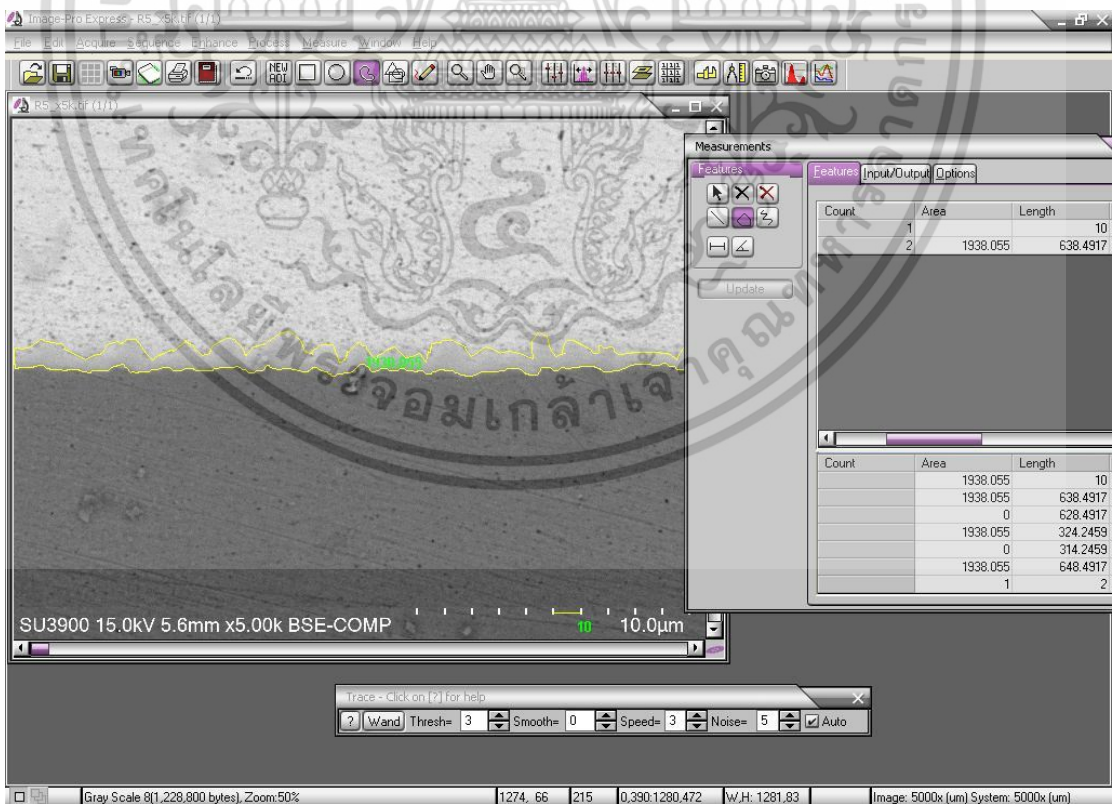


รูปที่ ผก4 การวัดพื้นที่และเส้นรอบรูปของชิ้นงานด้านความเค้นอัดรัศมี 15 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

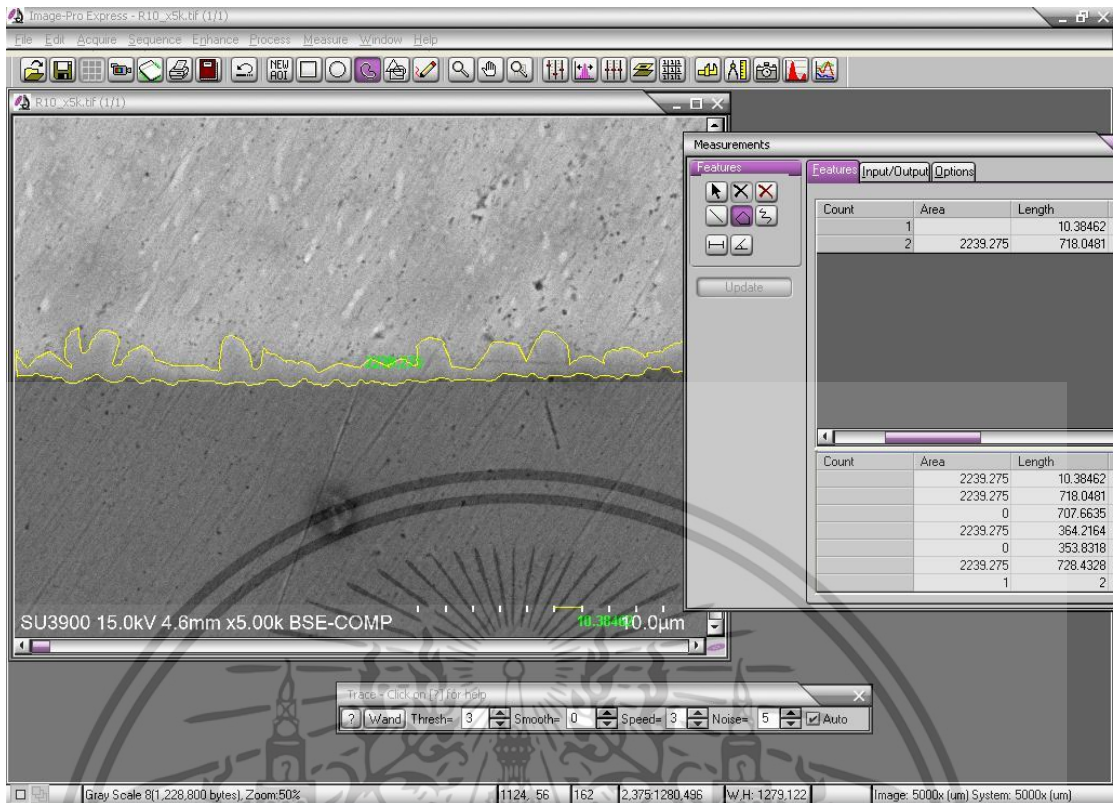


รูปที่ ผก5 การวัดพื้นที่และเส้นรอบรูปของชิ้นงานด้านความเค้นอัดรัศมี 20 mm

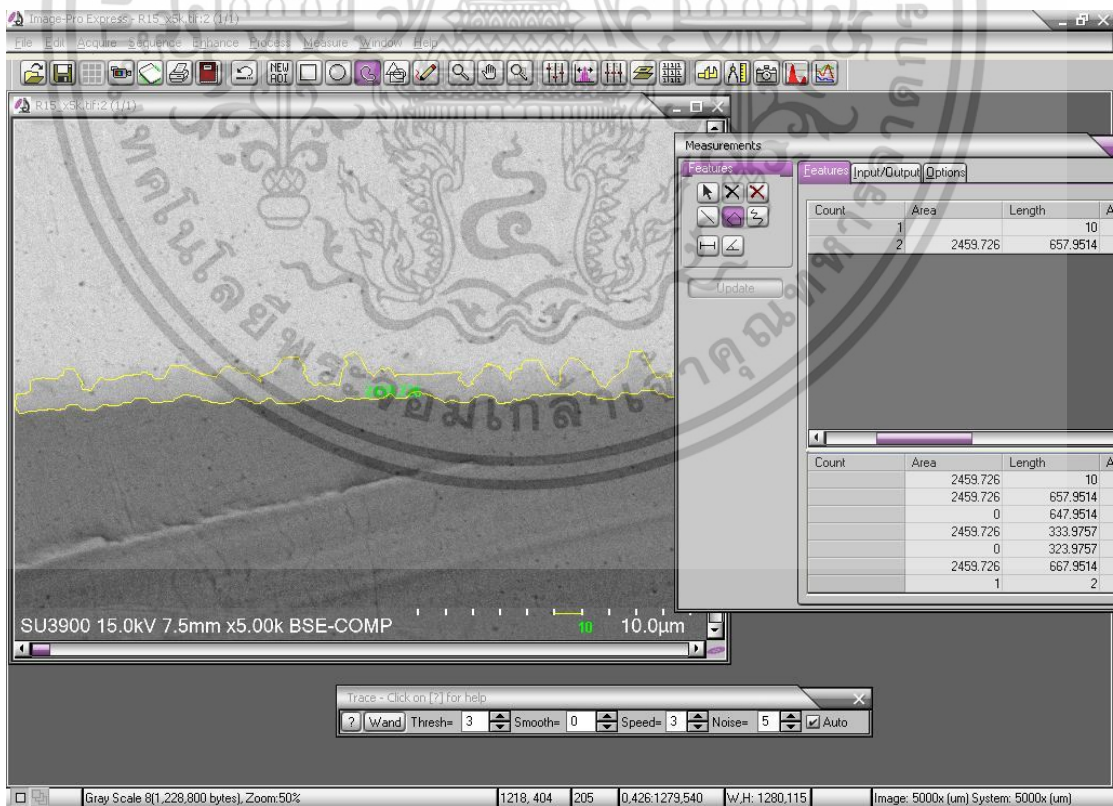


รูปที่ ผก6 การวัดพื้นที่และเส้นรอบรูปของชิ้นงานด้านความเค้นดึงรัศมี 5 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

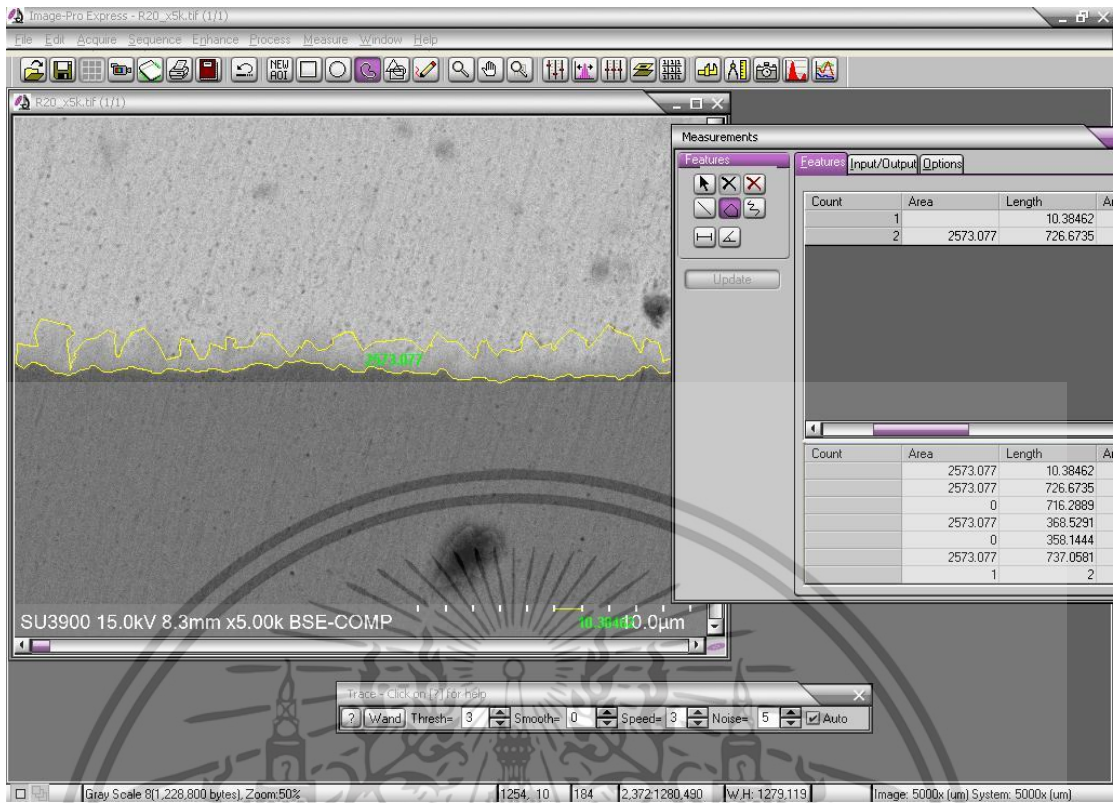


รูปที่ ผก7 การวัดพื้นที่และเส้นรอบรูปของชิ้นงานด้านความเค้นดึงรัศมี 10 mm



รูปที่ ผก8 การวัดพื้นที่และเส้นรอบรูปของชิ้นงานด้านความเค้นดึงรัศมี 15 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

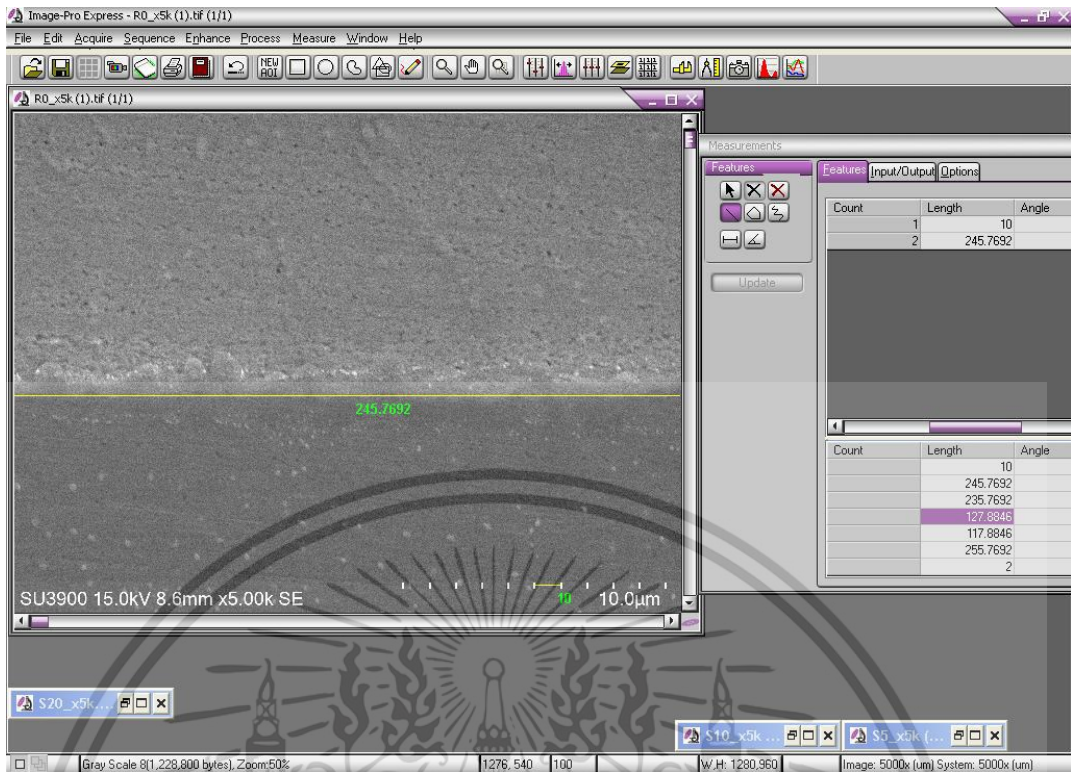


รูปที่ ผก9 การวัดพื้นที่และเส้นรอบรูปของชิ้นงานด้านความเค้นดึงรัศมี 20 mm

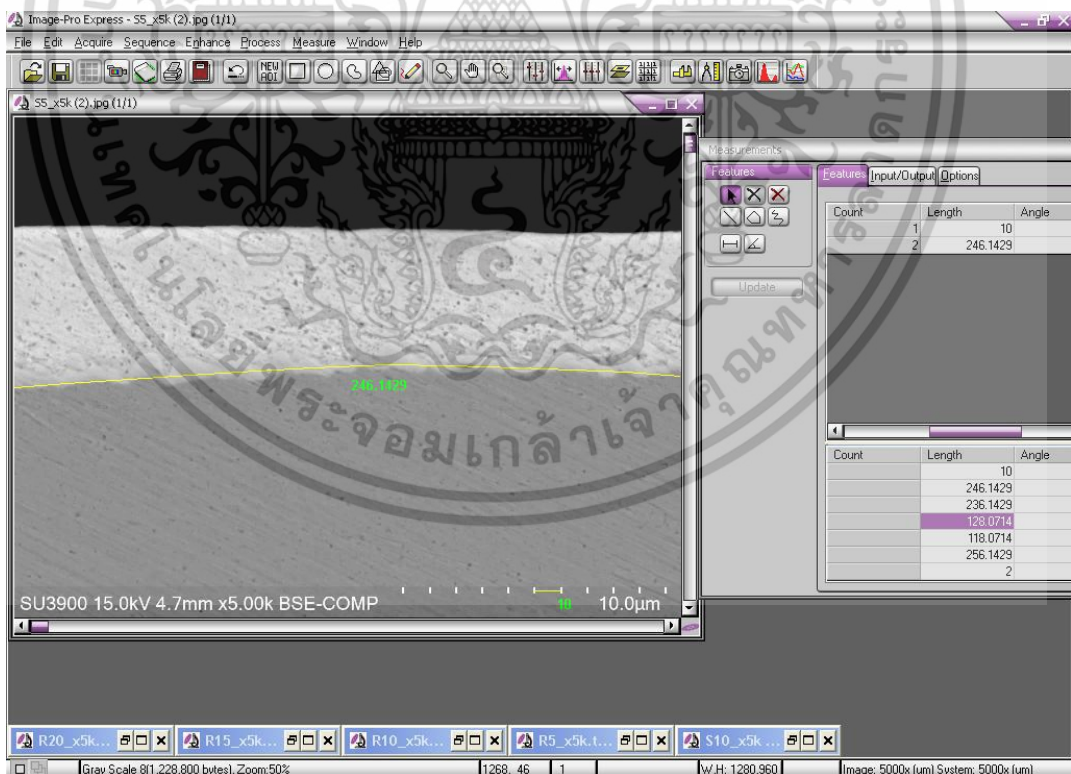
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

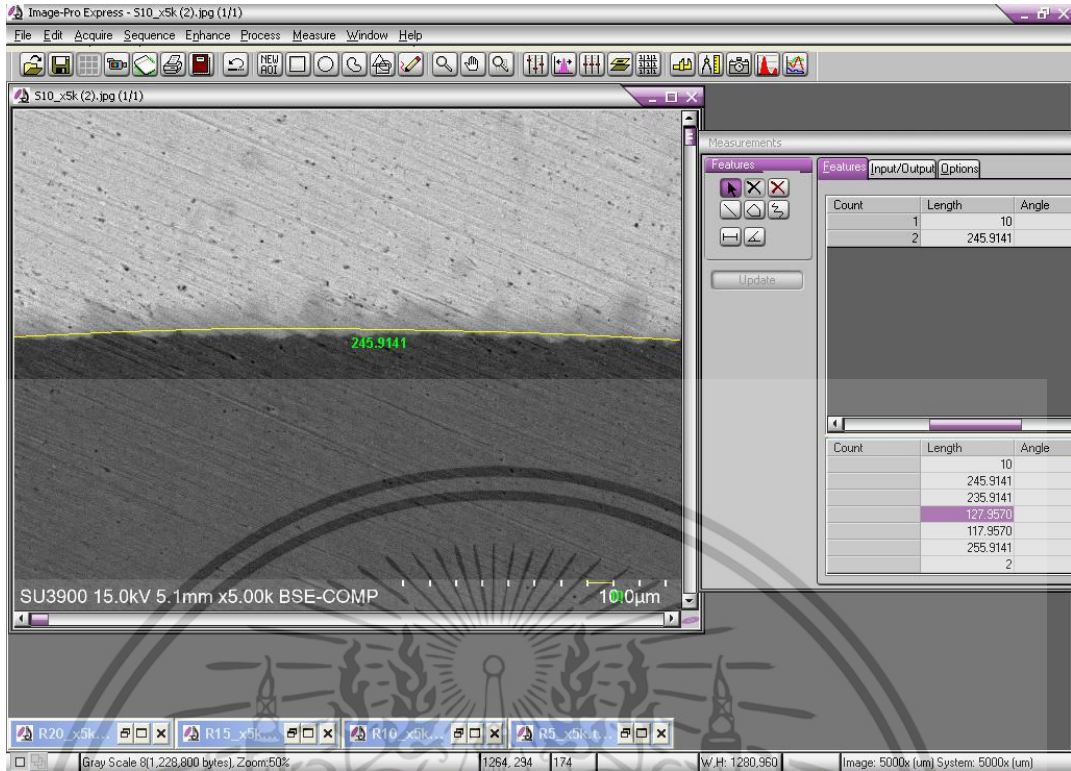


รูปที่ ผข1 การวัดความยาวรองรับชิ้นงานที่ไม่ถูกตัด

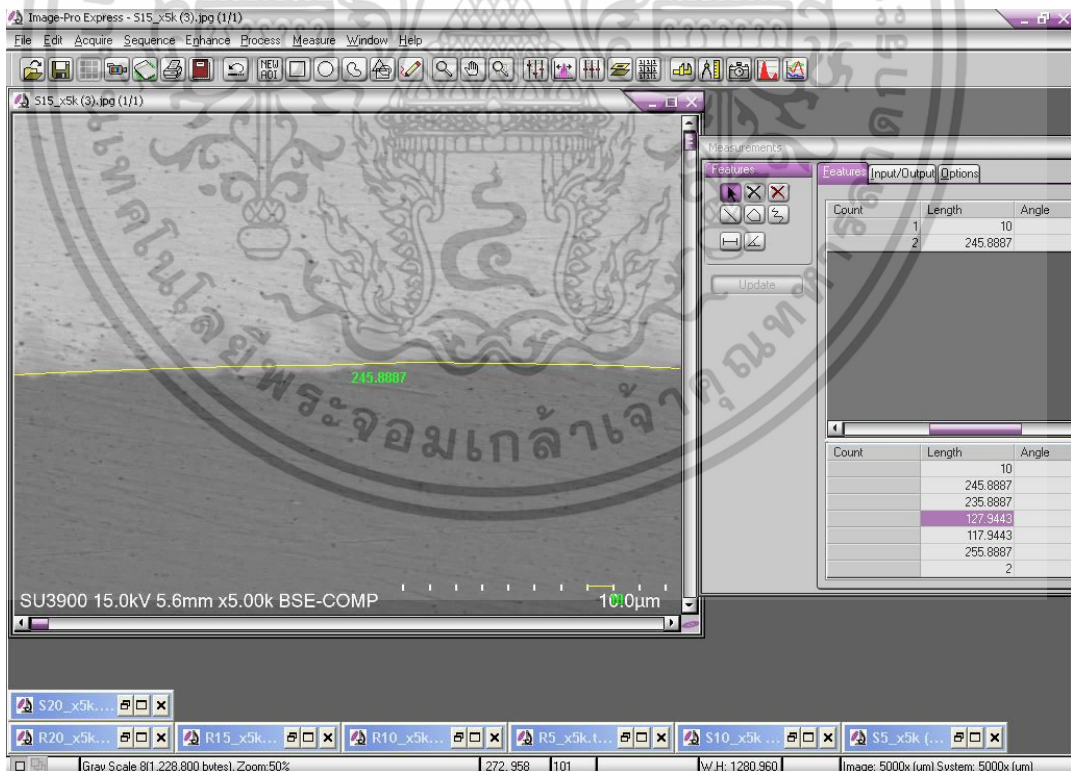


รูปที่ ผข2 การวัดความยาวรองรับชิ้นงานด้านความเค้นอัตราตีมี 5 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

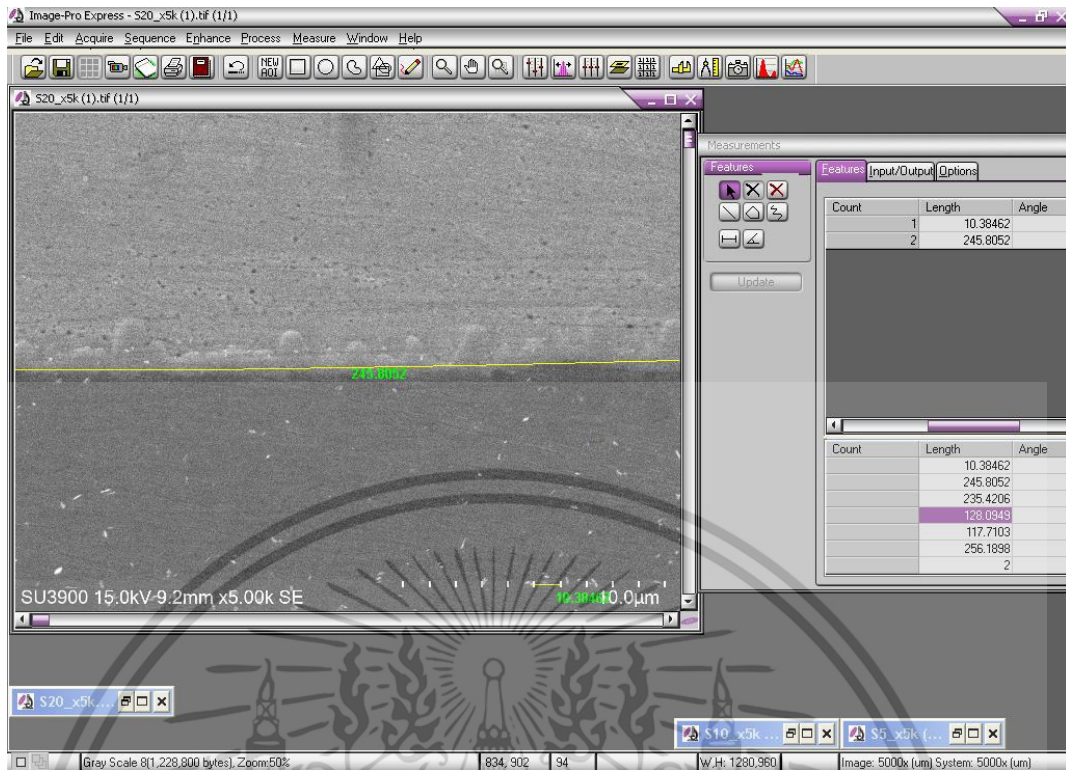


รูปที่ ผข3 การวัดความยาวร่องรับชิ้นงานด้านความเค้นอัดรีดมี 10 mm

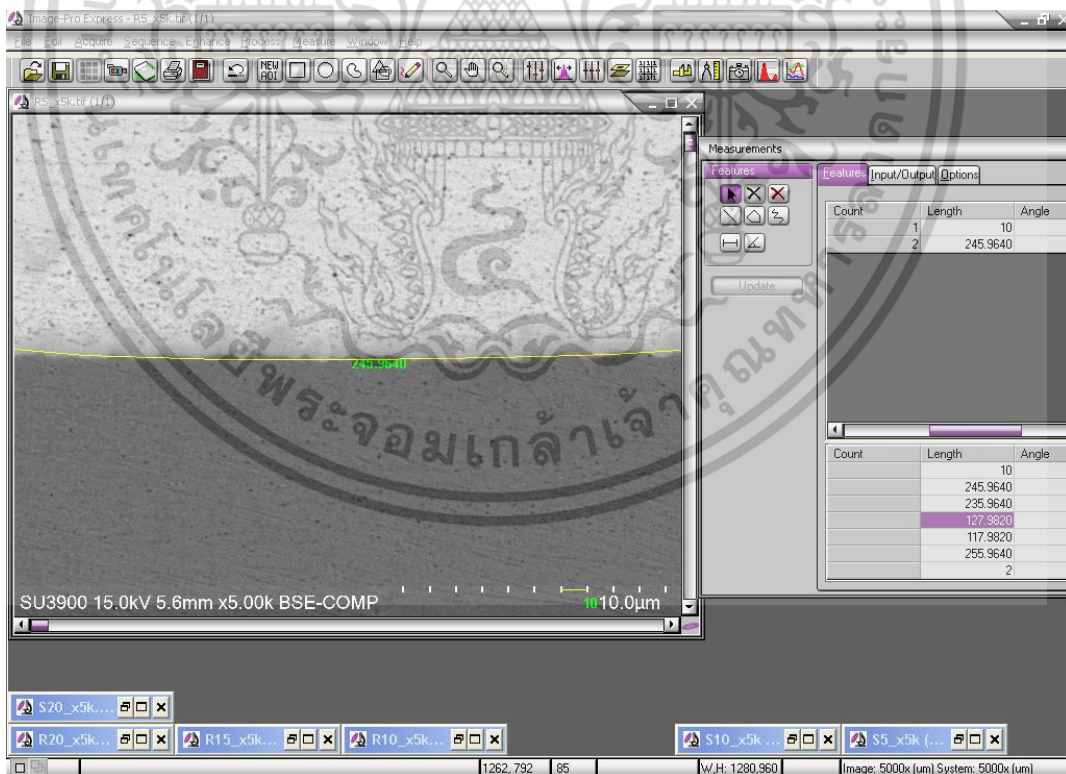


รูปที่ ผข4 การวัดความยาวร่องรับชิ้นงานด้านความเค้นอัดรีดมี 15 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

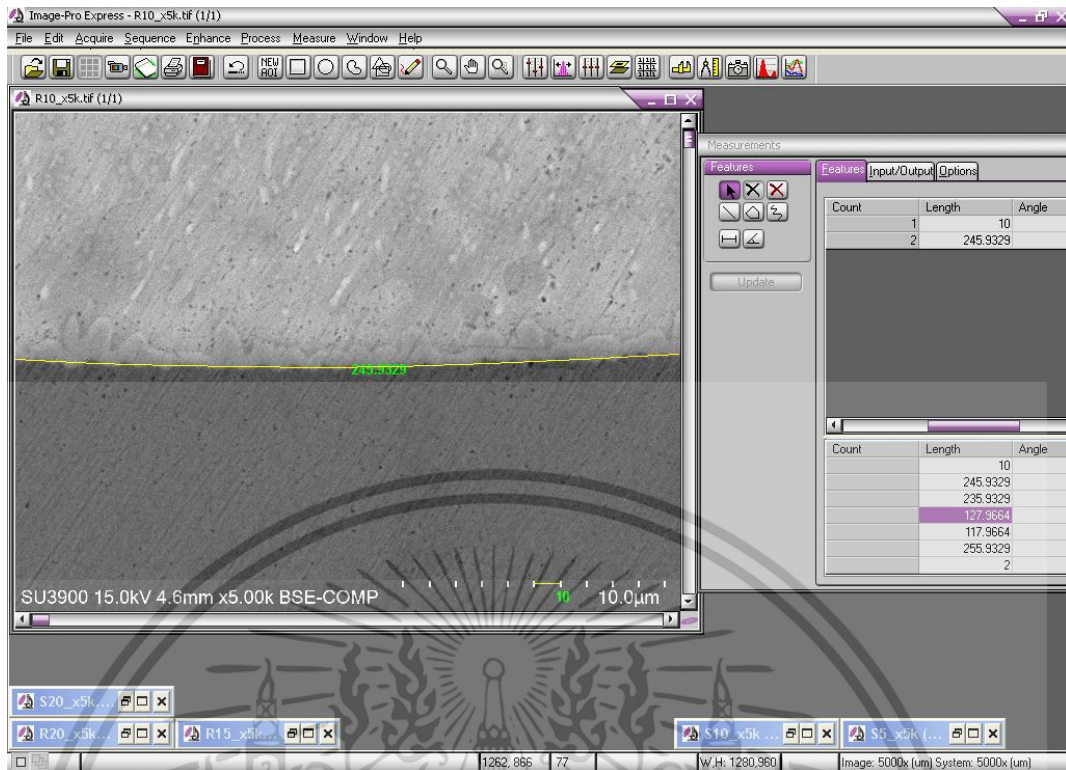


รูปที่ ผข5 การวัดความยาวรองรับชิ้นงานด้านความเค้นอัตราซีมี 20 mm

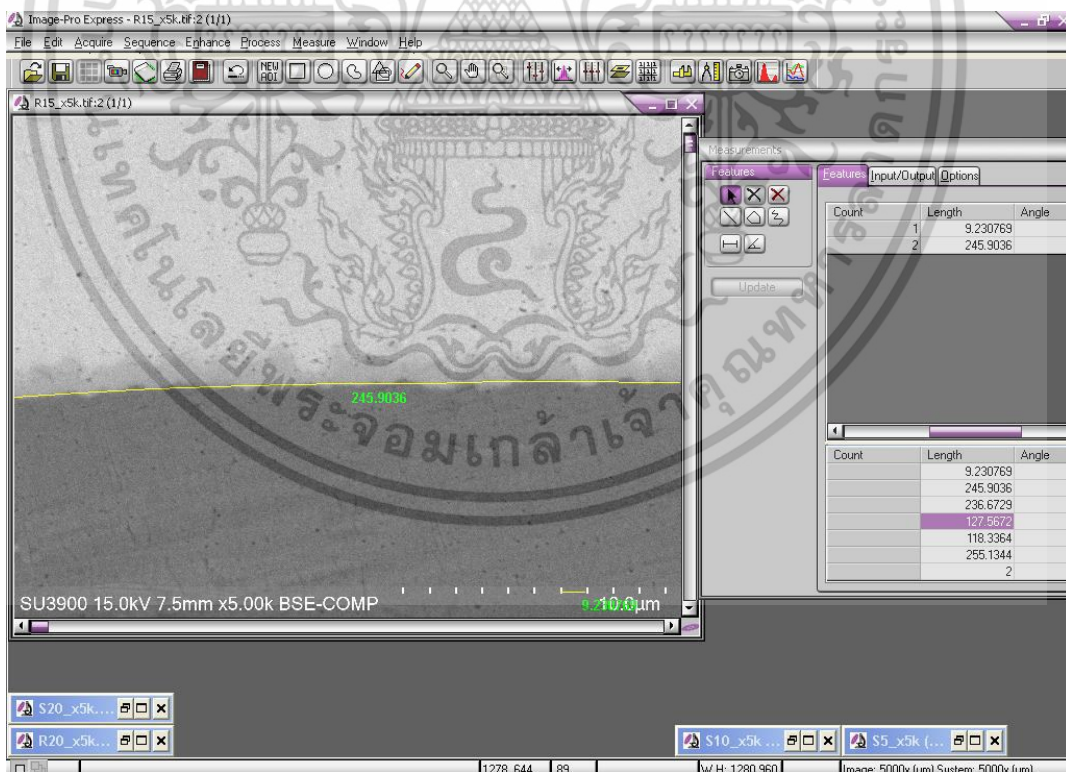


รูปที่ ผข6 การวัดความยาวรองรับชิ้นงานด้านความเค้นดึงรัศมี 5 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

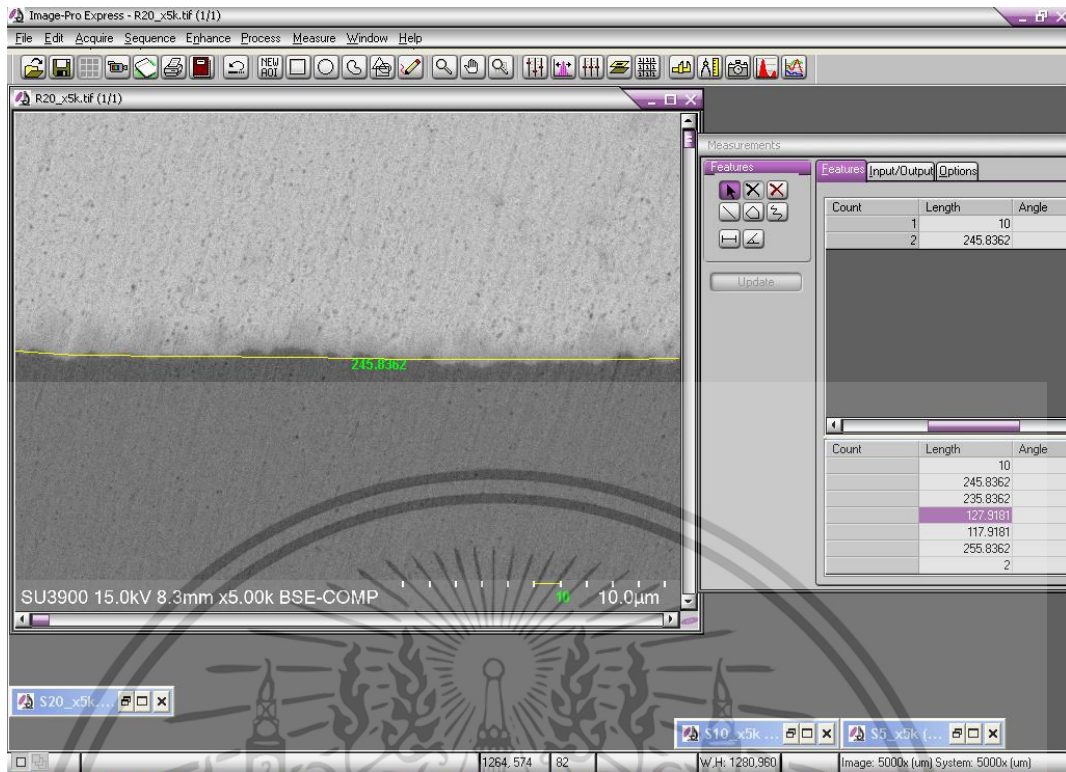


รูปที่ ผข7 การวัดความยาวร่องรับชิ้นงานด้านความเค้นดึงรัศมี 10 mm



รูปที่ ผข8 การวัดความยาวร่องรับชิ้นงานด้านความเค้นดึงรัศมี 15 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผข9 การวัดความยาวรองรับชิ้นงานด้านความเค้นดึงรัศมี 20 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และส่งไปยังเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และส่งไปถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



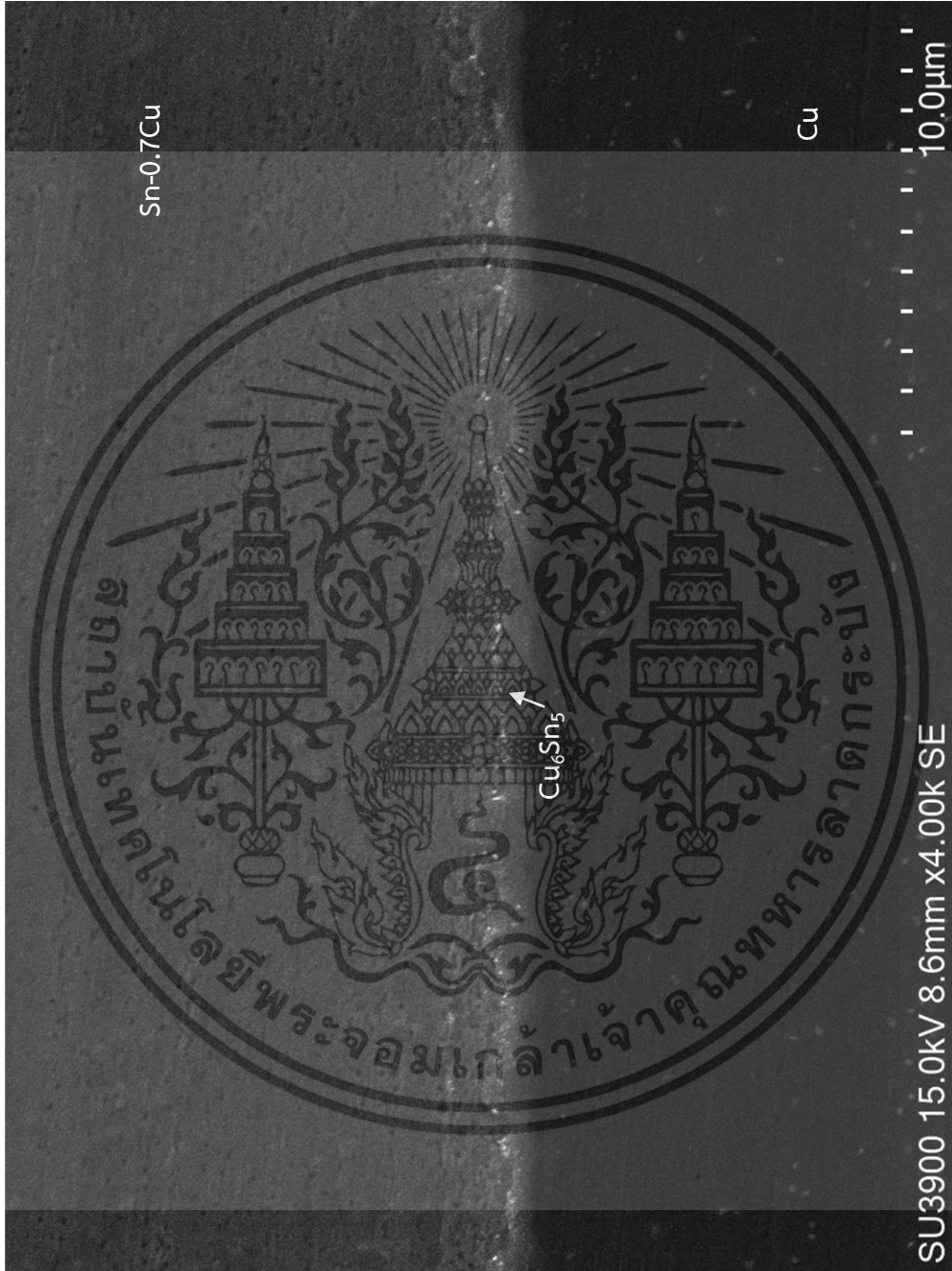
รูปที่ ผค1 ชิ้นงานที่ไม่ถูกตัดที่กำลังขยาย 1000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



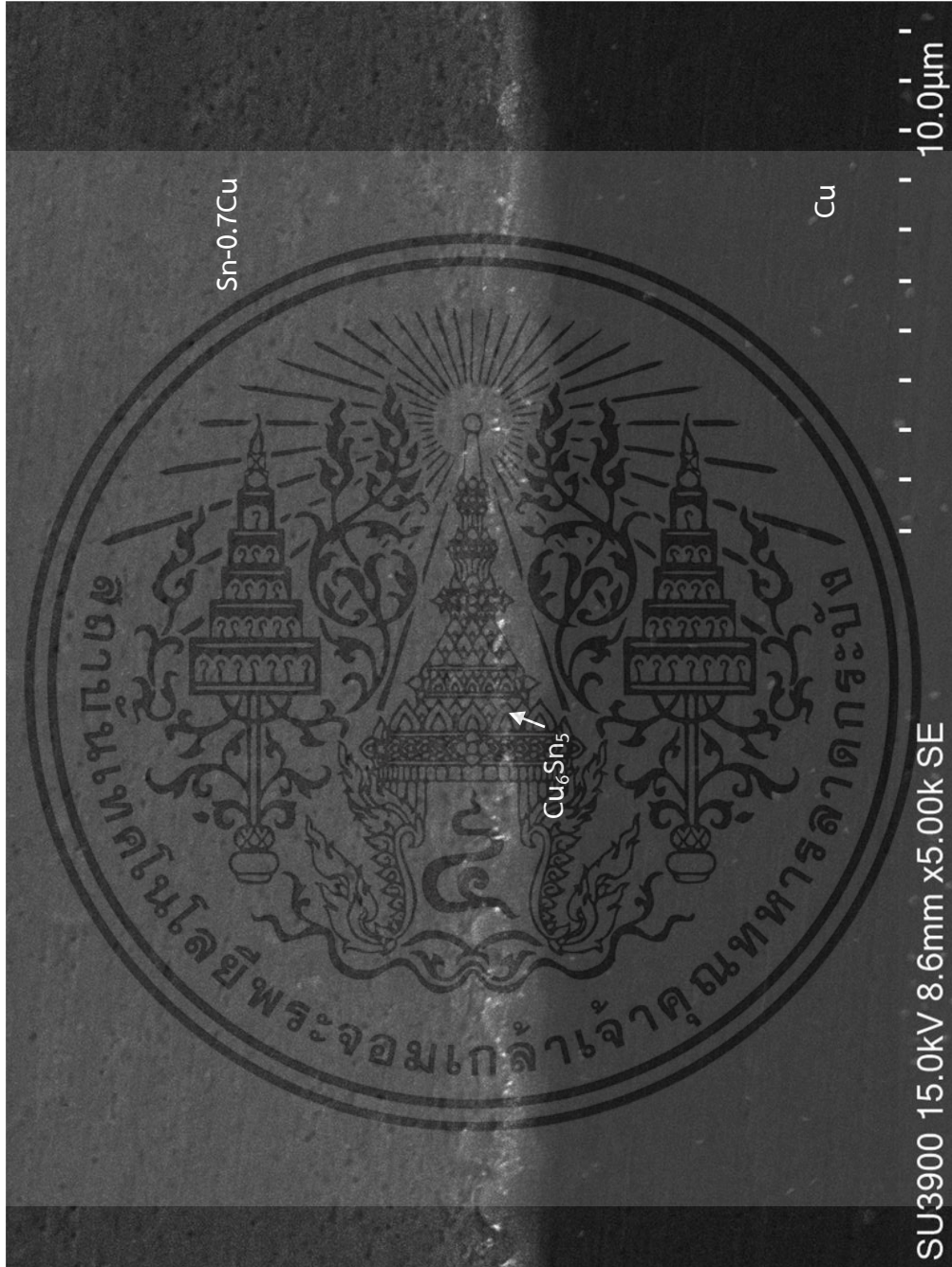
รูปที่ ผศ2 ชิ้นงานที่ไม่ถูกตัดที่กำลังขยาย 2000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผศ3 ชิ้นงานที่ไม่ถูกตัดที่กล้องขยาย 4000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผค4 ชิ้นงานที่ไม่ถูกตัดที่กำลังขยาย 5000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และส่งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผง1 ชิ้นงานด้านความเค้นอัตราตีมี 5 mm ที่กำลังขยาย 1000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



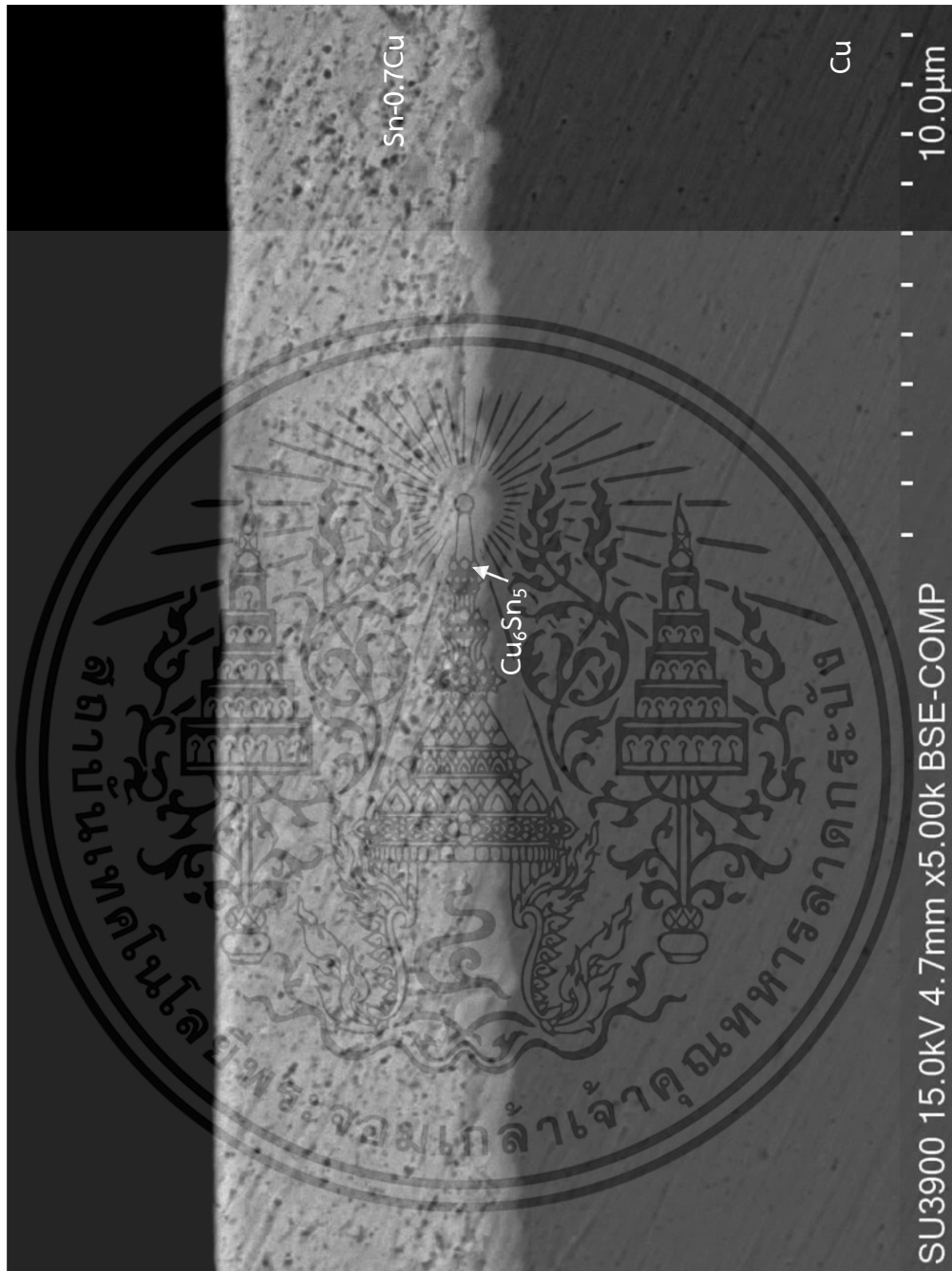
รูปที่ ผง2 ชิ้นงานด้านความเค้นอัตราคีม 5 mm ที่กำลังขยาย 2000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



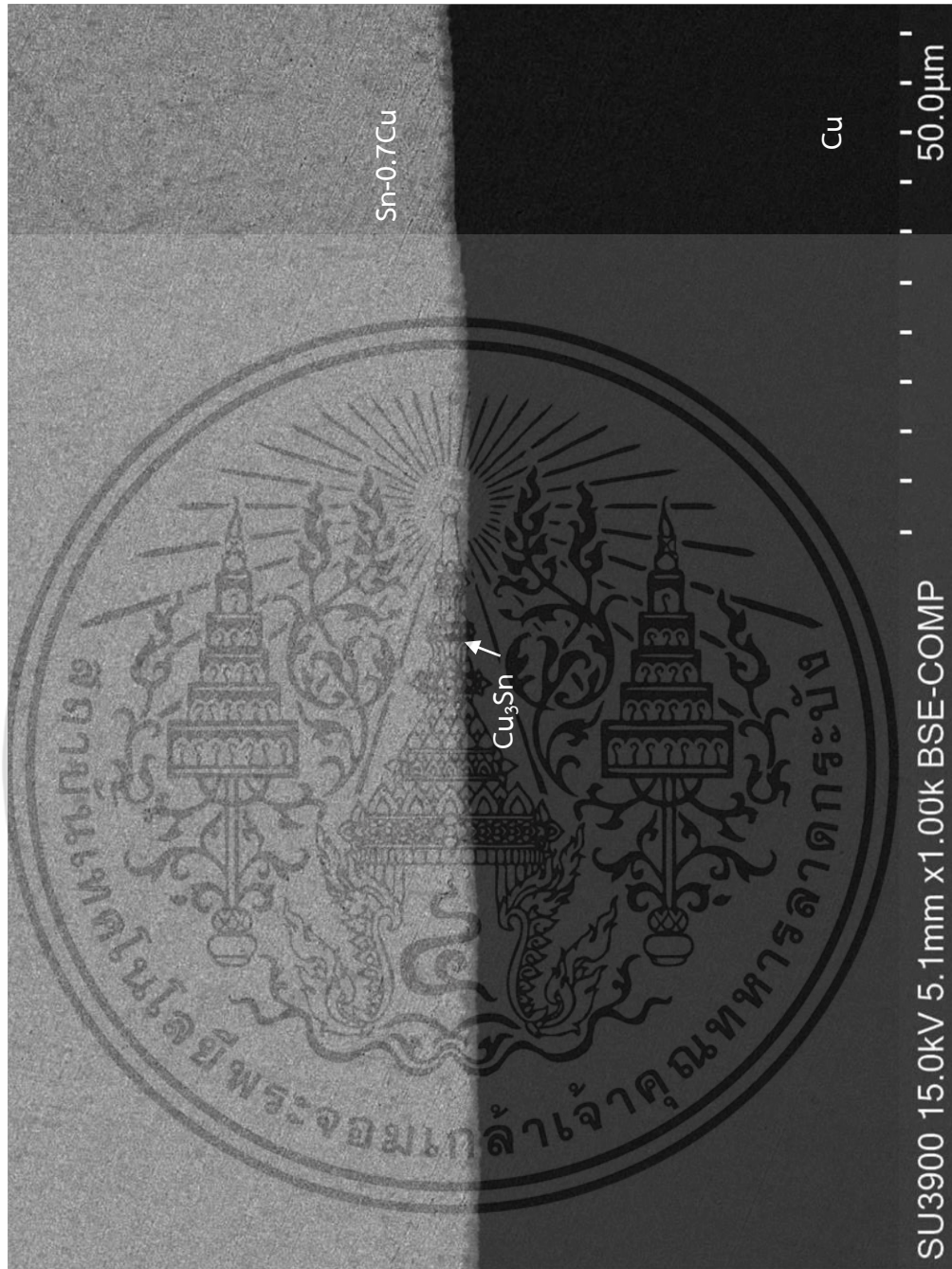
รูปที่ ผง3 ชิ้นงานด้านความเค้นอัดรีดมี 5 mm ที่กำลังขยาย 4000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผง4 ซึ่งงานด้านความเค้นอัดรัศมี 5 mm ที่กำลังขยาย 5000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผง5 ชิ้นงานด้านความเค้นอัตราตีมี 10 mm ที่กำลังขยาย 1000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผง6 ชั้นงานด้านความเค้นอัดรัศมี 10 mm ที่กำลังขยาย 2000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



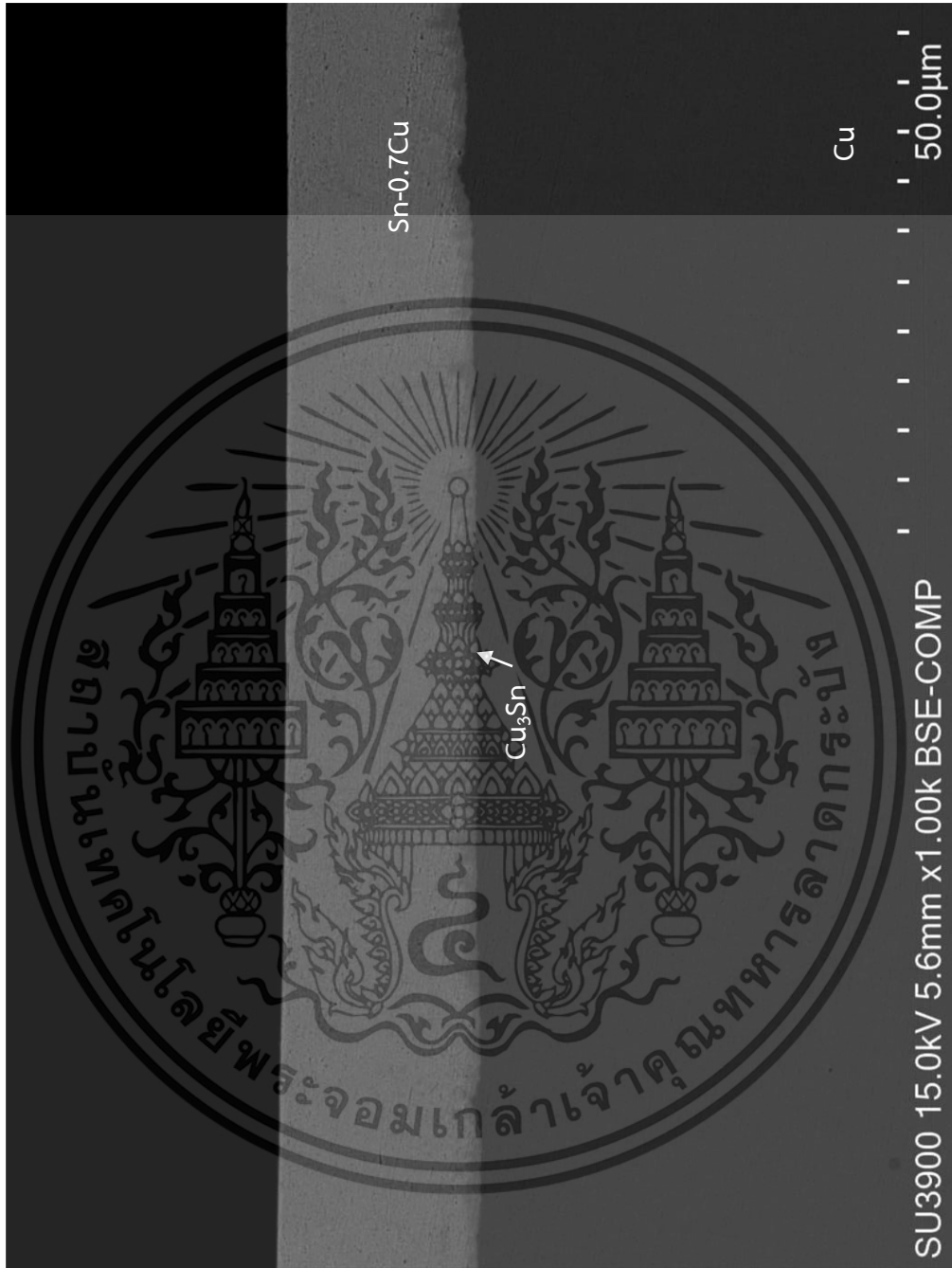
รูปที่ ผง7 ชิ้นงานด้านความเค้นอัดรีดมี 10 mm ที่กำลังขยาย 4000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



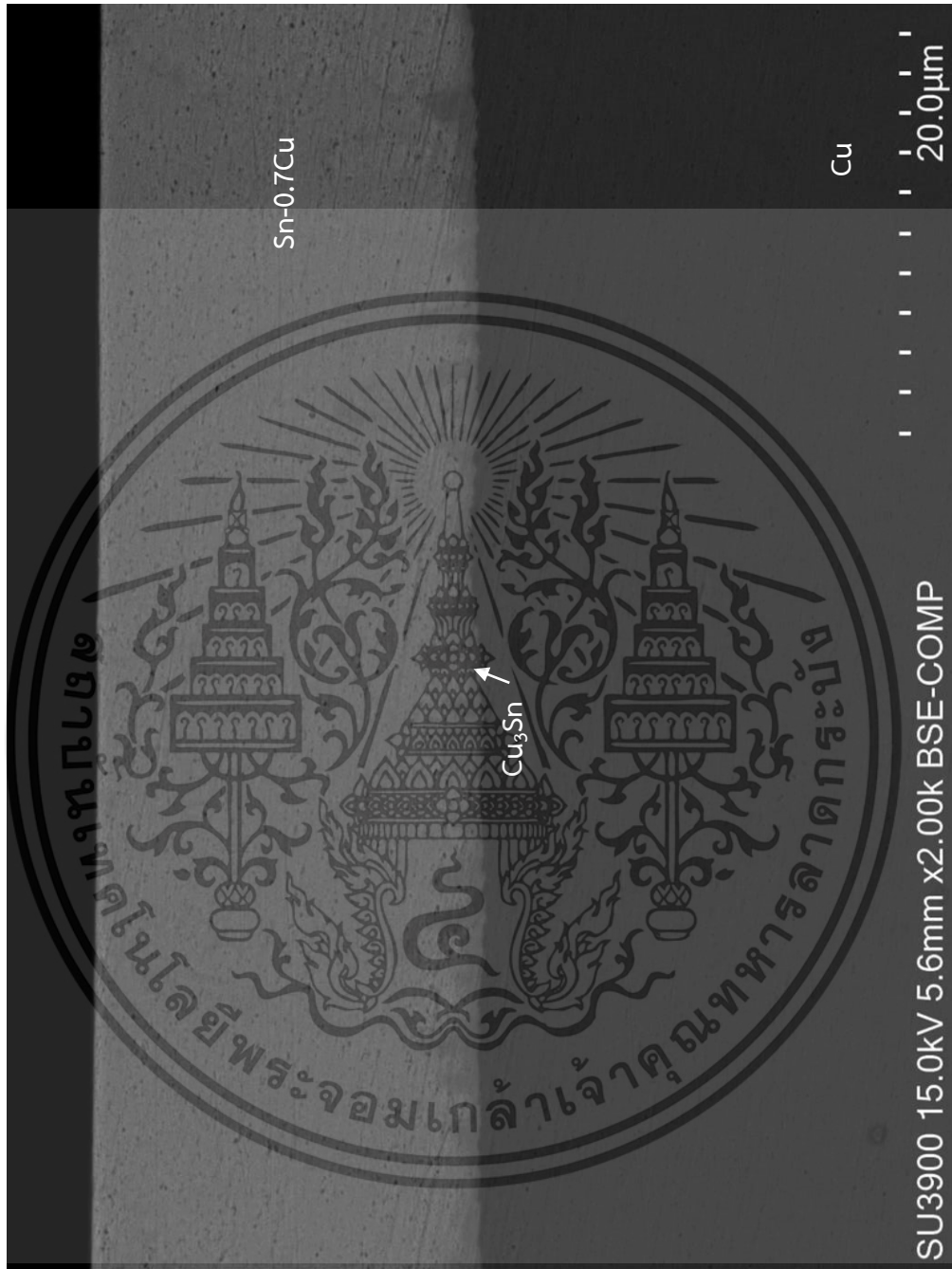
รูปที่ ผง8 ชิ้นงานด้านความเค้นอัดรัศมี 10 mm ที่กำลังขยาย 5000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



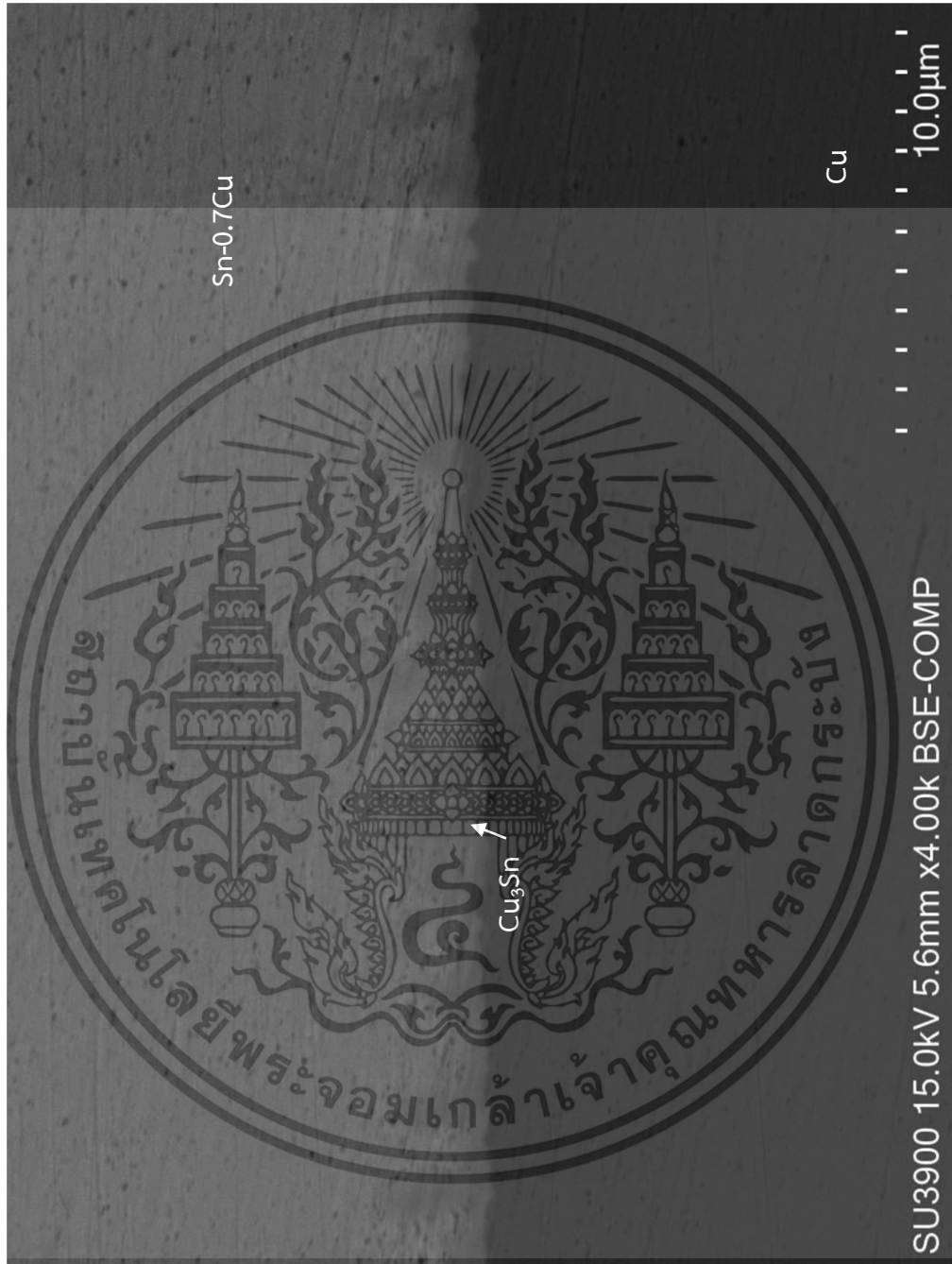
รูปที่ ผง9 ชิ้นงานด้านความเค้นอัตราตีมี 15 mm ที่กำลังขยาย 1000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผง10 ชิ้นงานด้านความเค้นอัดรีดมี 15 mm ที่กำลังขยาย 2000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผง11 ชิ้นงานด้านความเค้นอัดรีดมี 15 mm ที่กำลังขยาย 4000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



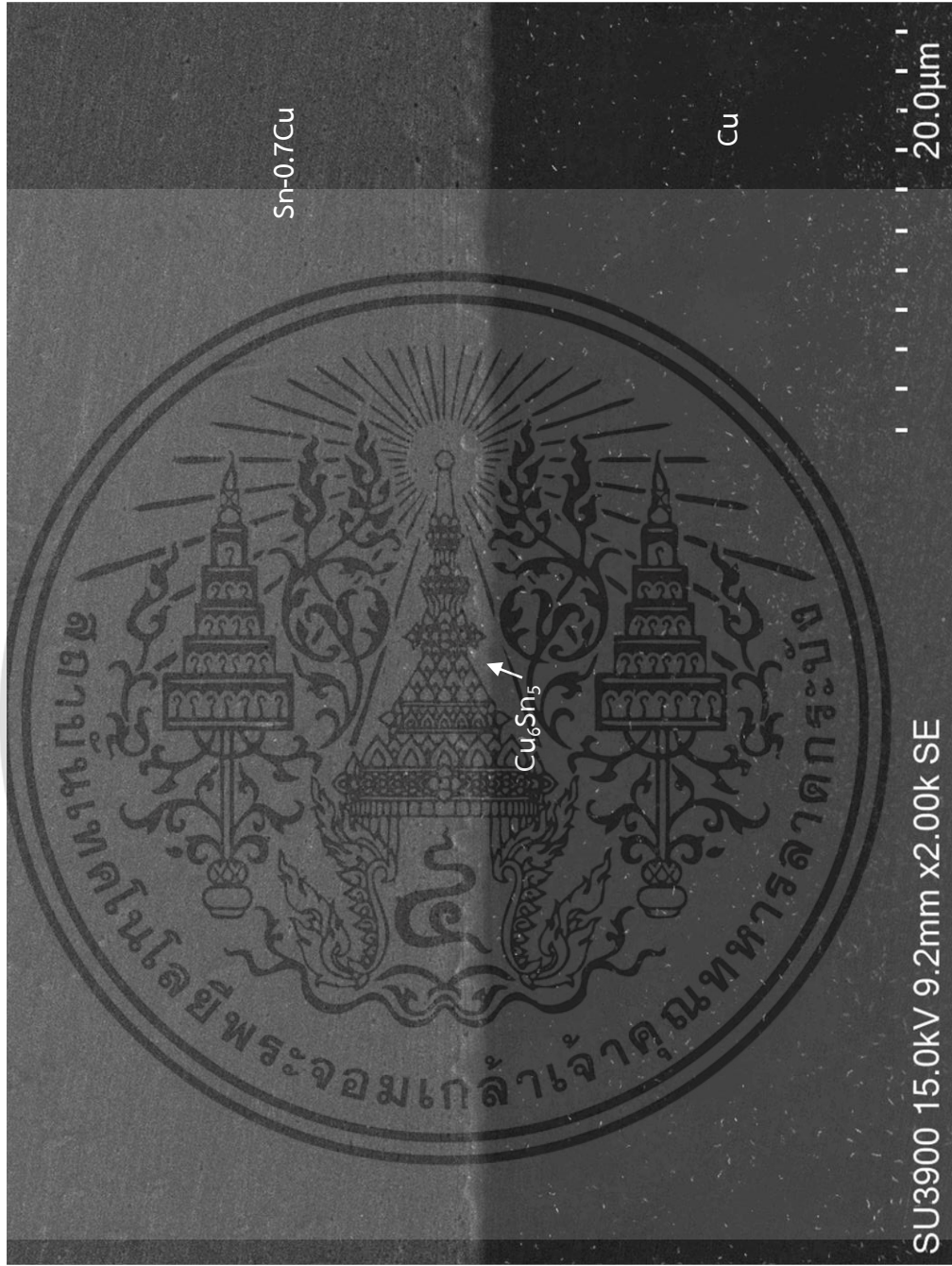
รูปที่ ผง12 ชิ้นงานด้านความเค้นอัดรัศมี 15 mm ที่กำลังขยาย 5000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผง13 ชั้นงานด้านความเค้นอัตราตีมี 20 mm ที่กำลังขยาย 1000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผง14 ชั้นงานด้านความเค้นอัตราตีมี 20 mm ที่กำลังขยาย 2000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผง15 ชั้นงานด้านความเค้นอัดรีดมี 20 mm ที่กำลังขยาย 4000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

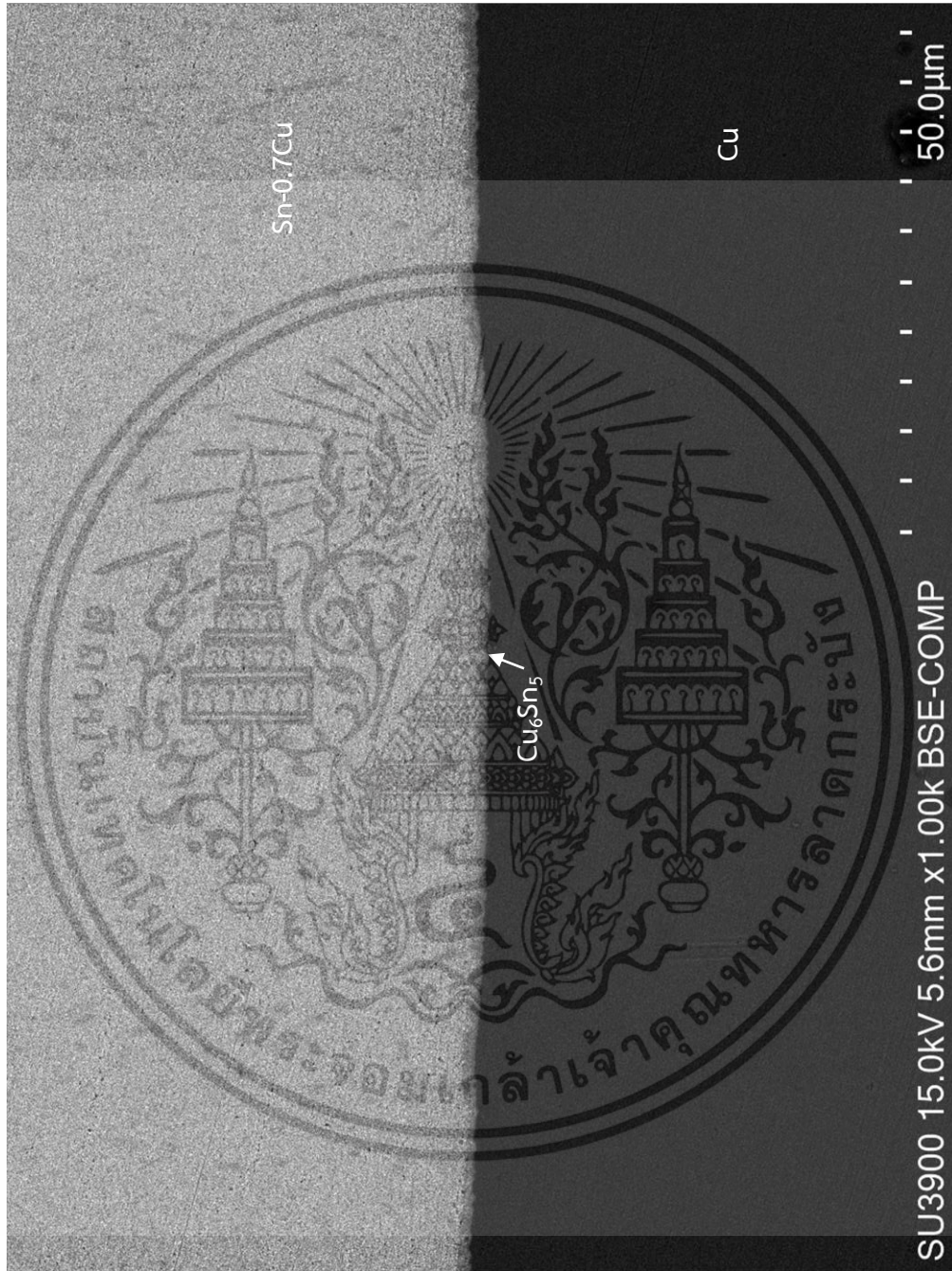


รูปที่ ผง16 ชิ้นงานด้านความเค้นอัตราตีมี 20 mm ที่กำลังขยาย 5000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และส่งไปยังผู้อื่นถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



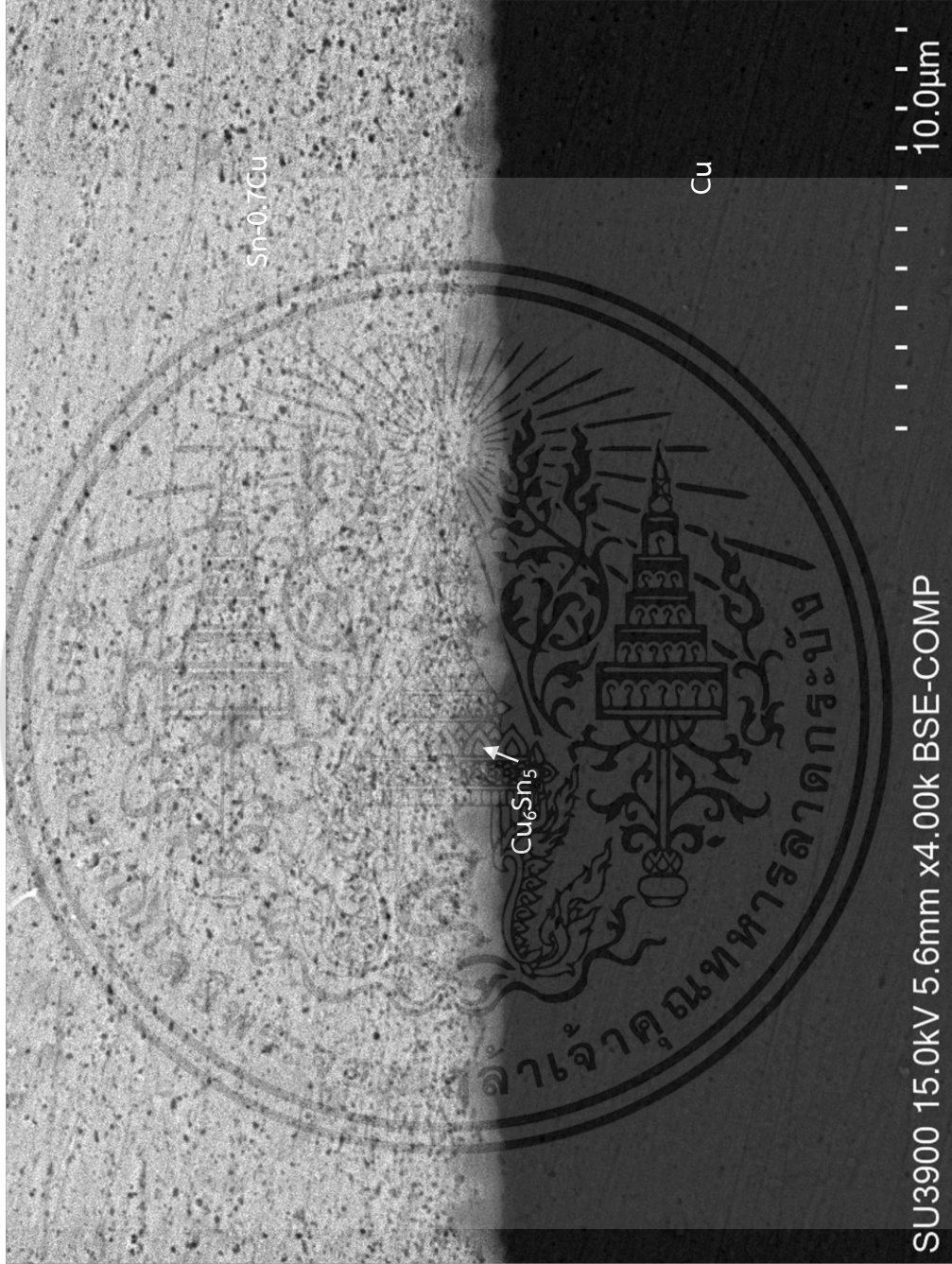
รูปที่ ผจ1 ชิ้นงานด้านความเค้นดึงตีมี 5 mm ที่กำลังขยาย 1000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



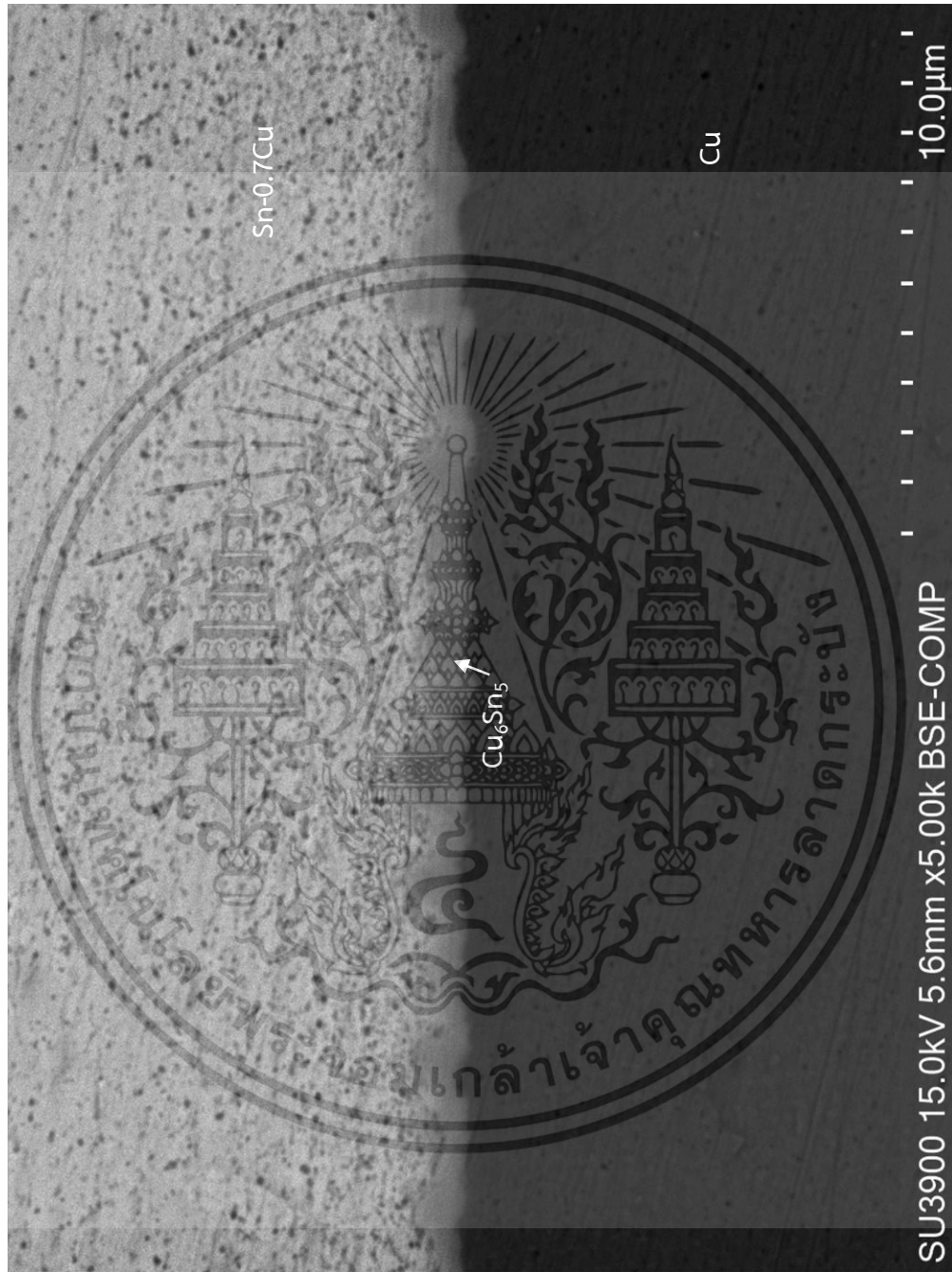
รูปที่ ผจ2 ชิ้นงานด้านความเค้นดึงที่มี 5 mm ที่กำลังขยาย 2000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผจ3 ชิ้นงานด้านความเค้นดึงรัศมี 5 mm ที่กำลังขยาย 4000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผจ4 ชิ้นงานด้านความเค้นดึงรัศมี 5 มม ที่กำลังขยาย 5000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผจ5 ชิ้นงานด้านความเค้นดึงรัศมี 10 มม ที่กำลังขยาย 1000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผจ6 ชิ้นงานด้านความเค้นดึงรัศมี 10 mm ที่กำลังขยาย 2000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผจ7 ชิ้นงานด้านความเค้นดึงรัศมี 10 mm ที่กำลังขยาย 4000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผจ8 ชิ้นงานด้านความเค้นดึงรัศมี 10 mm ที่กำลังขยาย 5000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผล9 ชิ้นงานด้านความเค้นดึงรัศมี 15 mm ที่กำลังขยาย 1000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



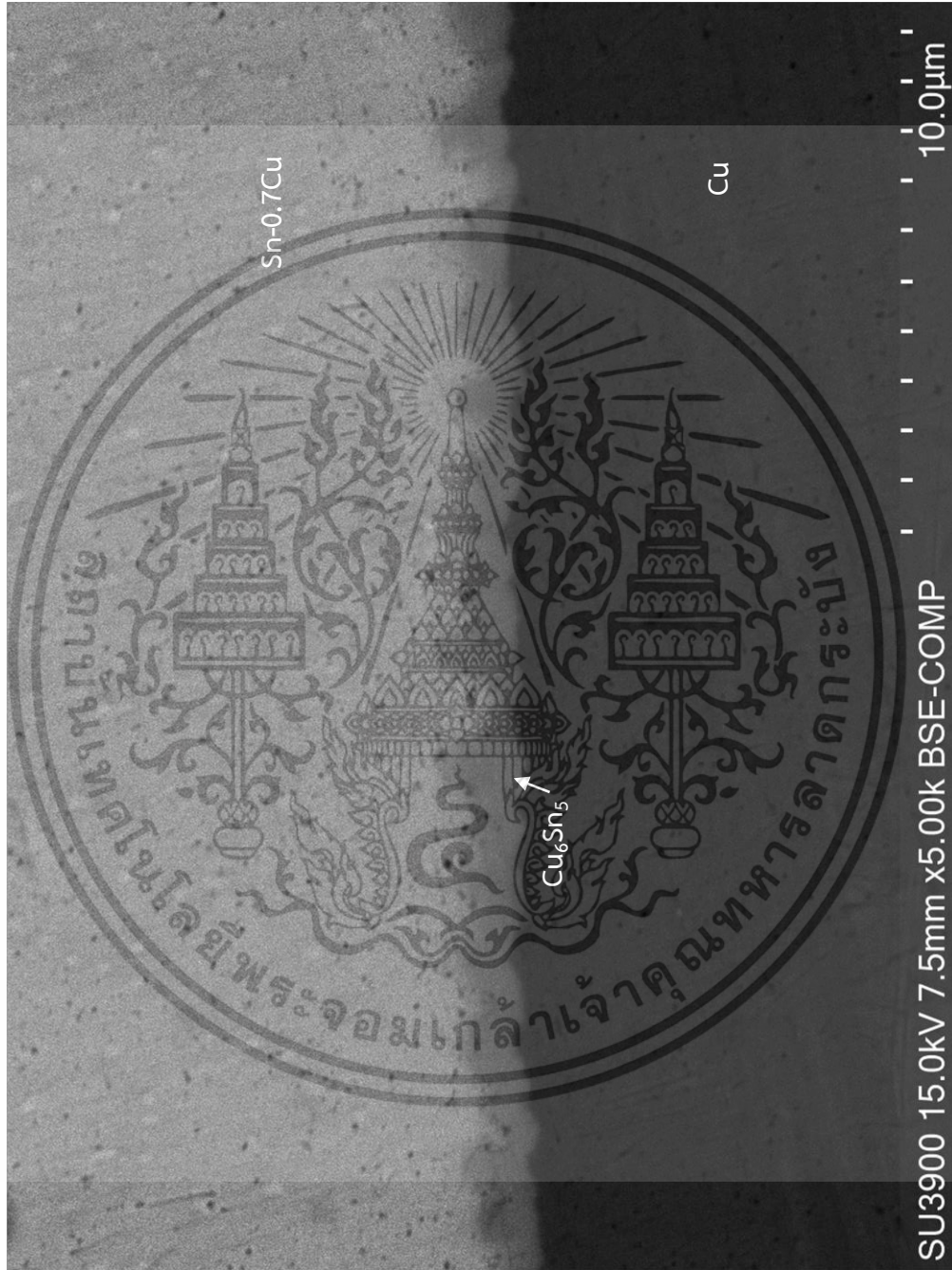
รูปที่ ผจ10 ชิ้นงานด้านความเค้นดึงรัศมี 15 มม ที่กำลังขยาย 2000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผจ11 ชิ้นงานด้านความเค้นดึงรัศมี 15 mm ที่กำลังขยาย 4000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผจ12 ชิ้นงานด้านความเค้นดึงตีมี 15 mm ที่กำลังขยาย 5000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



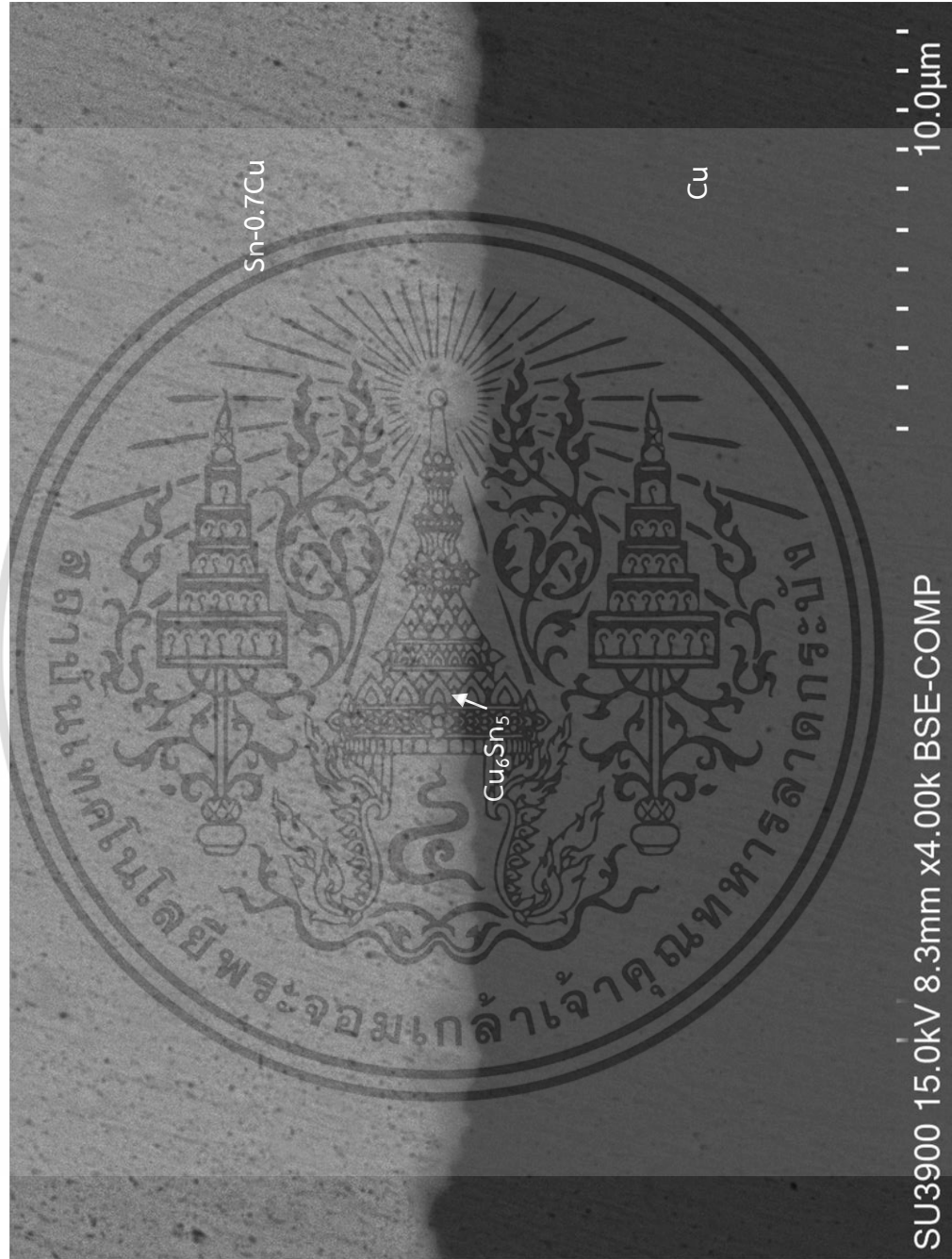
รูปที่ ผจ13 ชิ้นงานด้านความเค้นดึงรัศมี 20 mm ที่กำลังขยาย 1000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



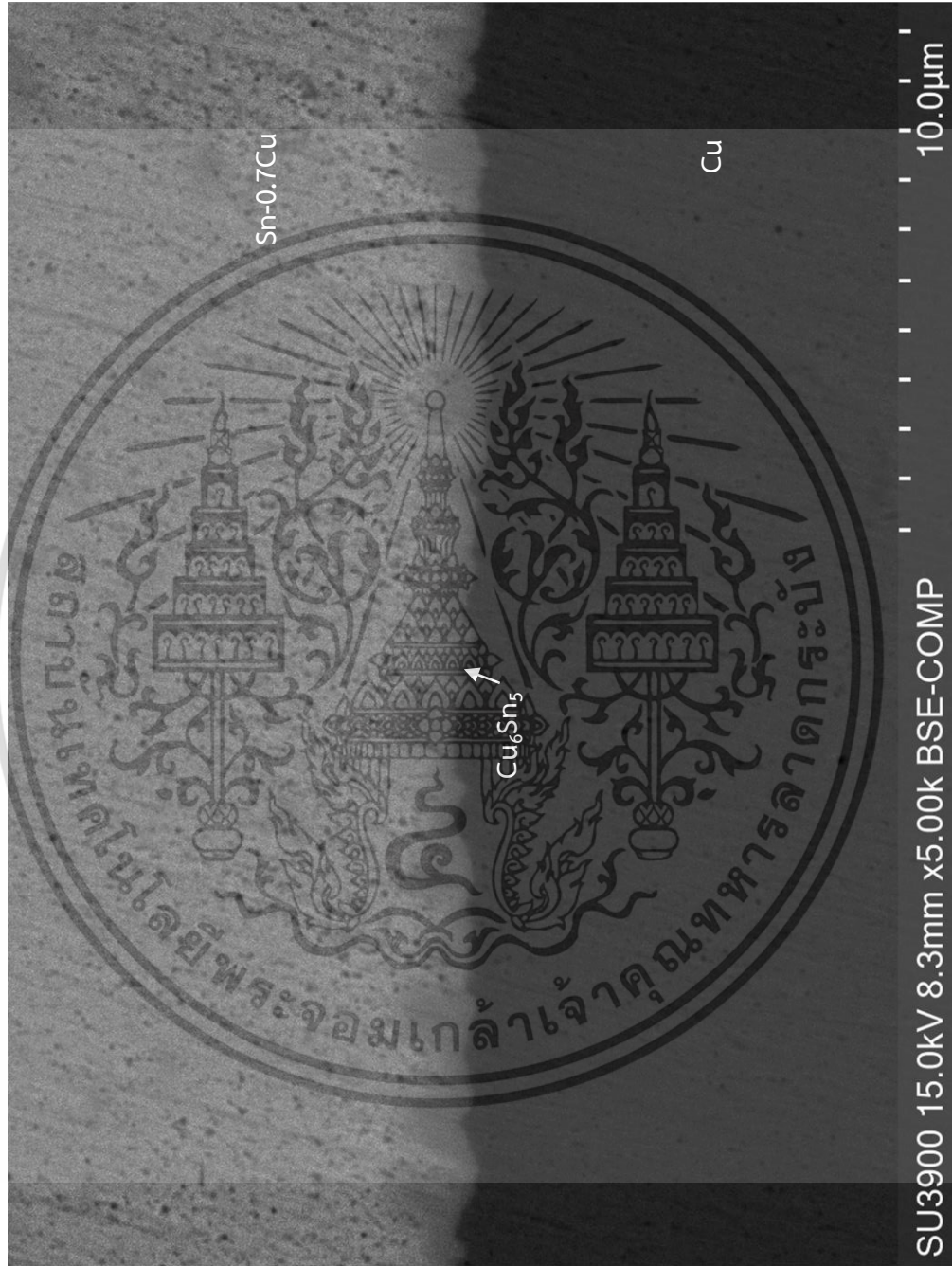
รูปที่ ผจ14 ชิ้นงานด้านความเค้นดึงตีมี 20 mm ที่กำลังขยาย 2000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 15 ชิ้นงานด้านความเค้นดึงรัศมี 20 mm ที่กำลังขยาย 4000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

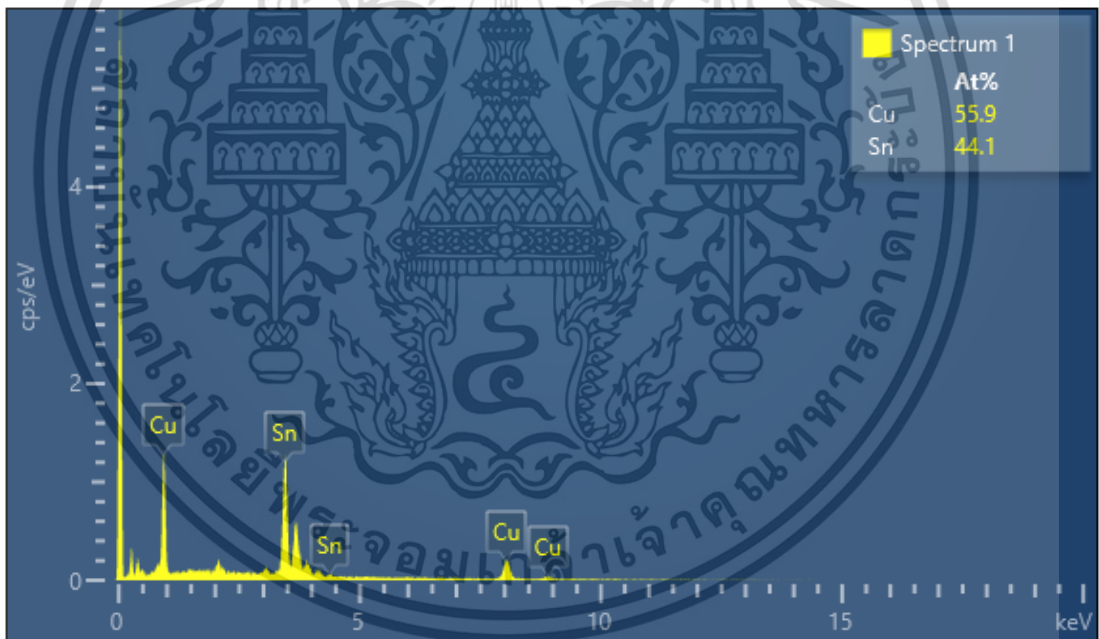
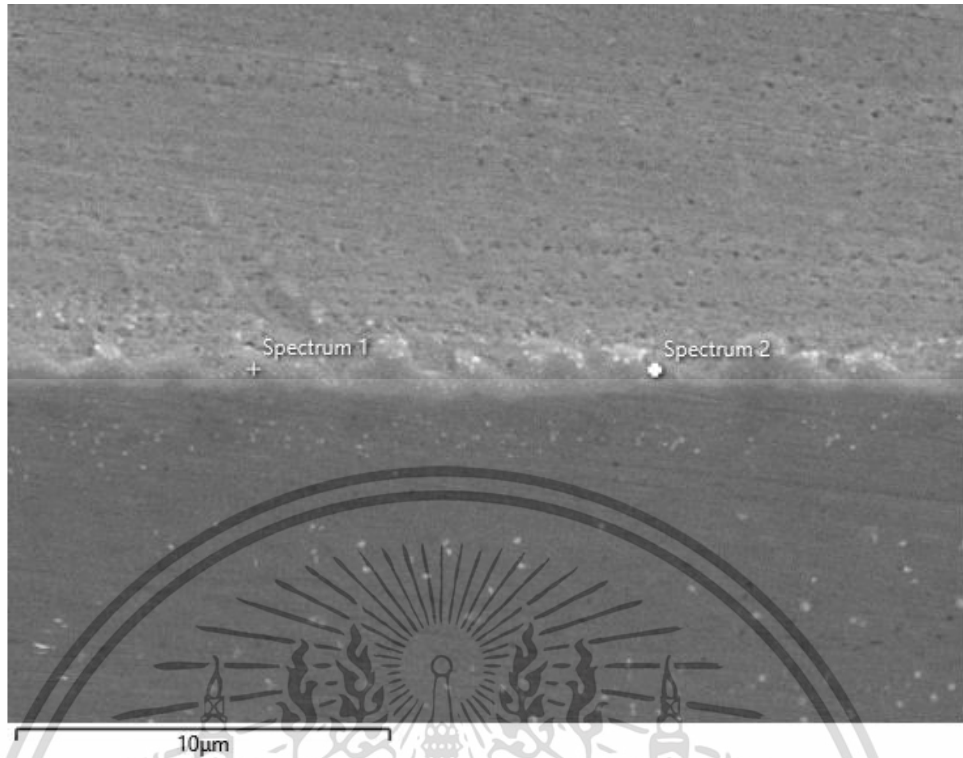


รูปที่ ผจ16 ชิ้นงานด้านความเค้นดึงรัศมี 20 mm ที่กำลังขยาย 5000X

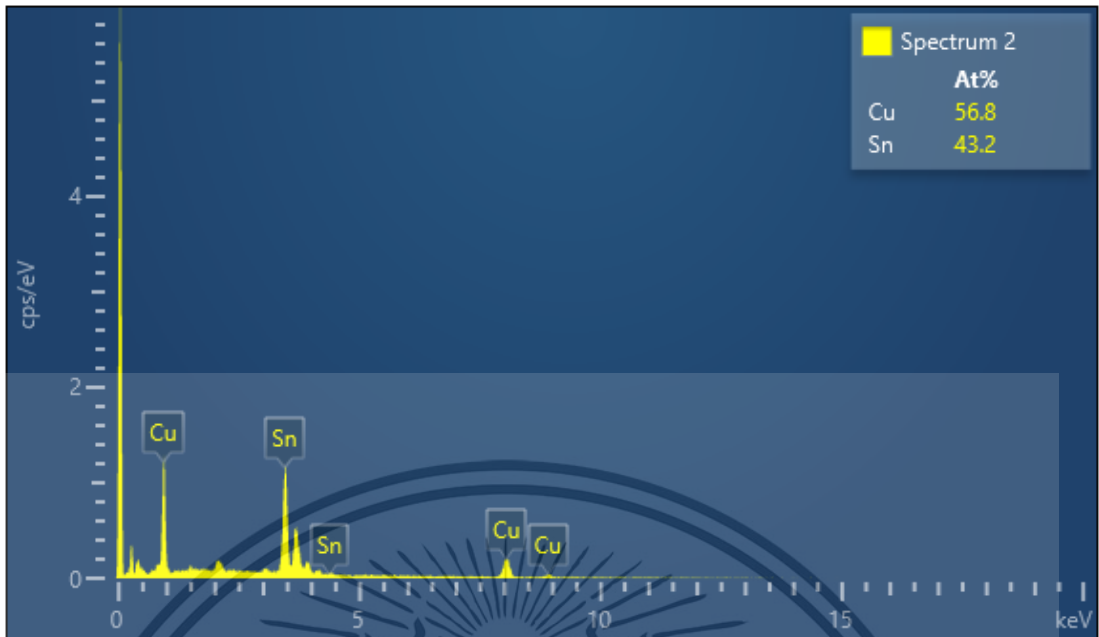
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และส่งไปยังถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

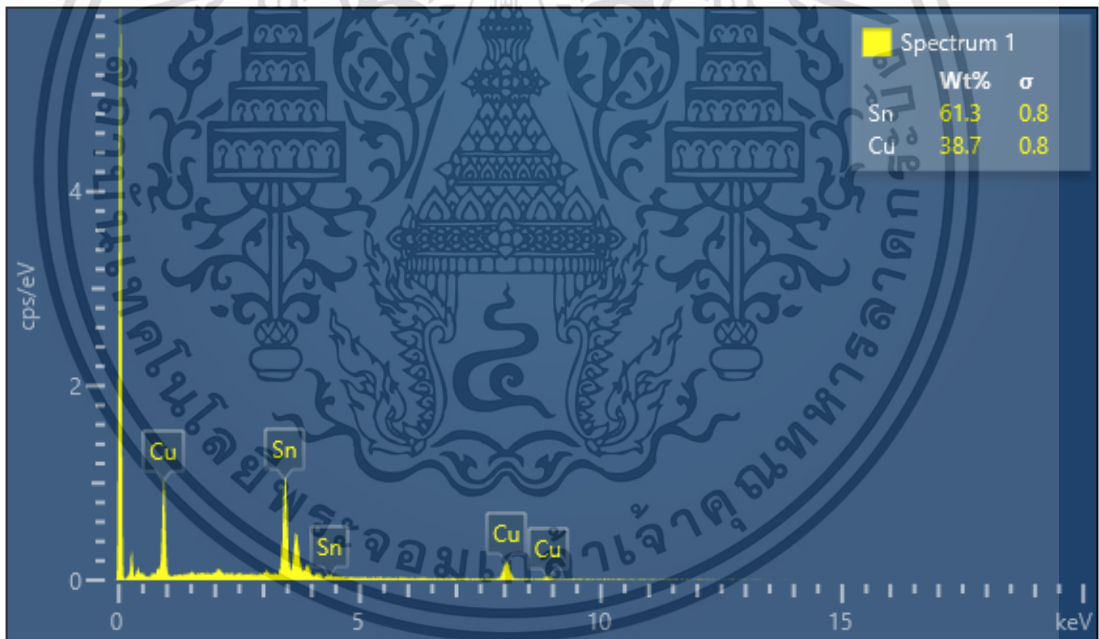
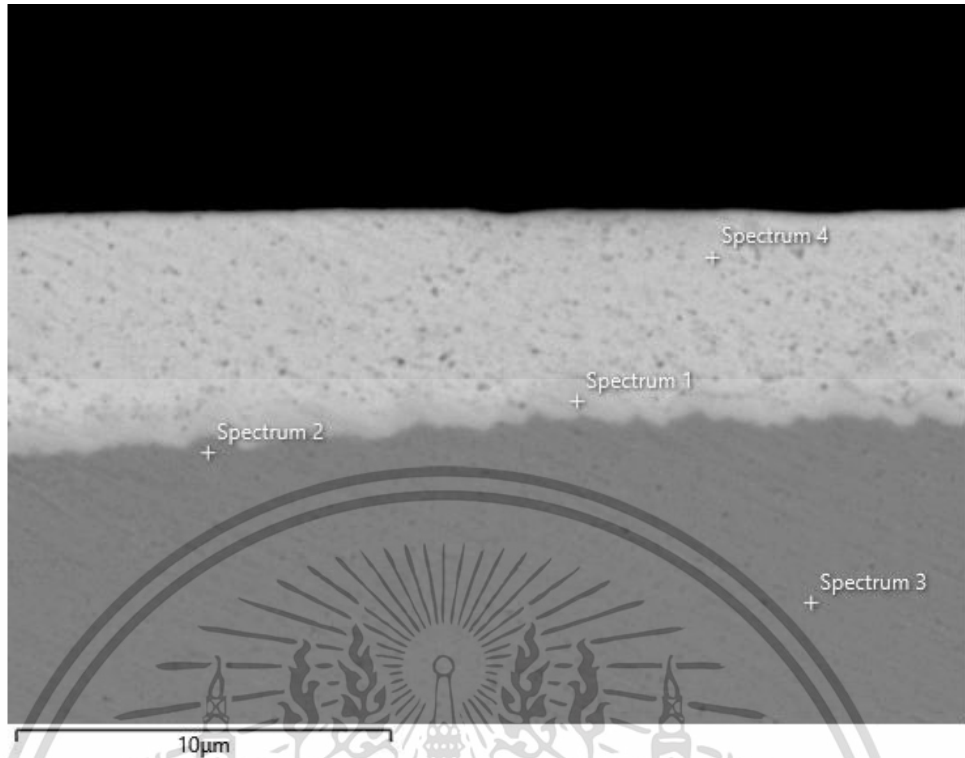


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



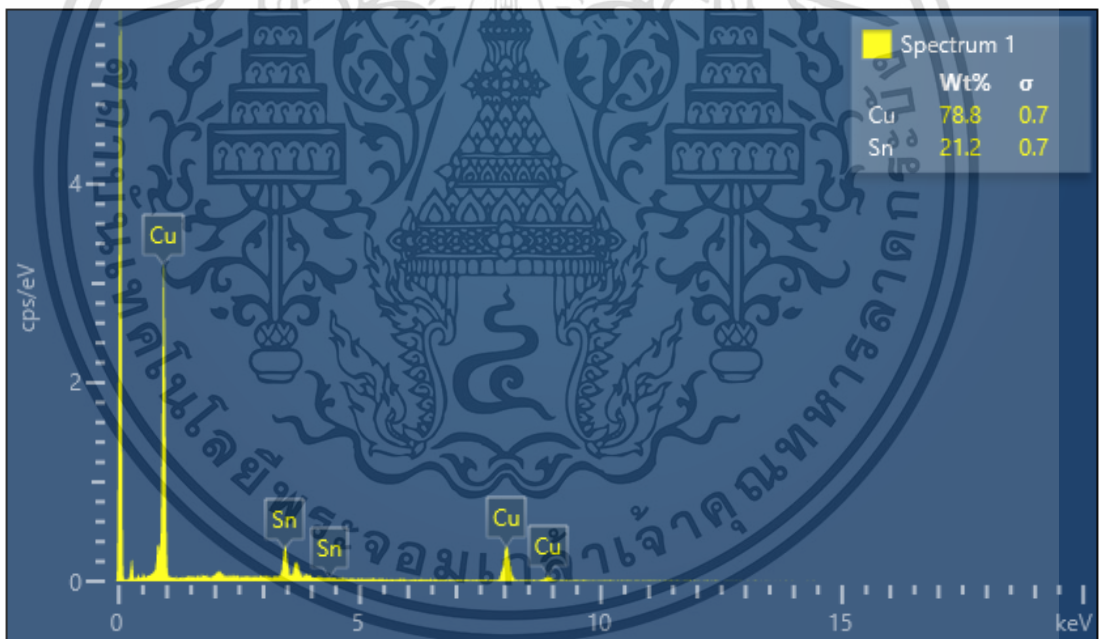
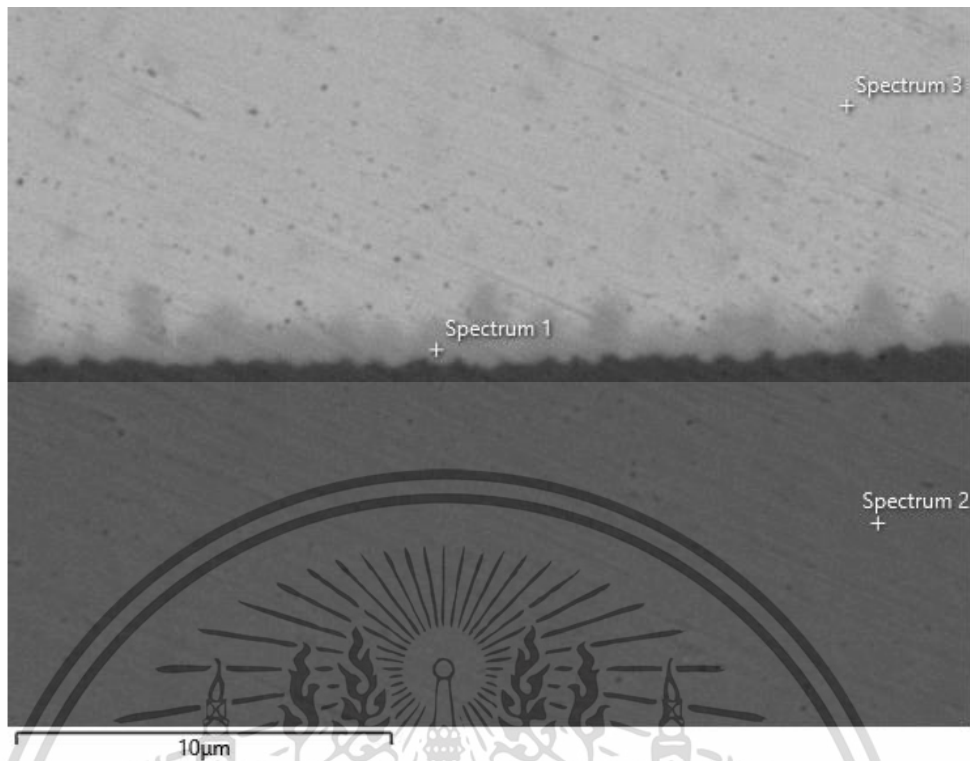
รูปที่ ผฉ1 สเปกตรัมการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS ของ IMC ชิ้นงานที่ไม่ถูกตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และส่งไปยังเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



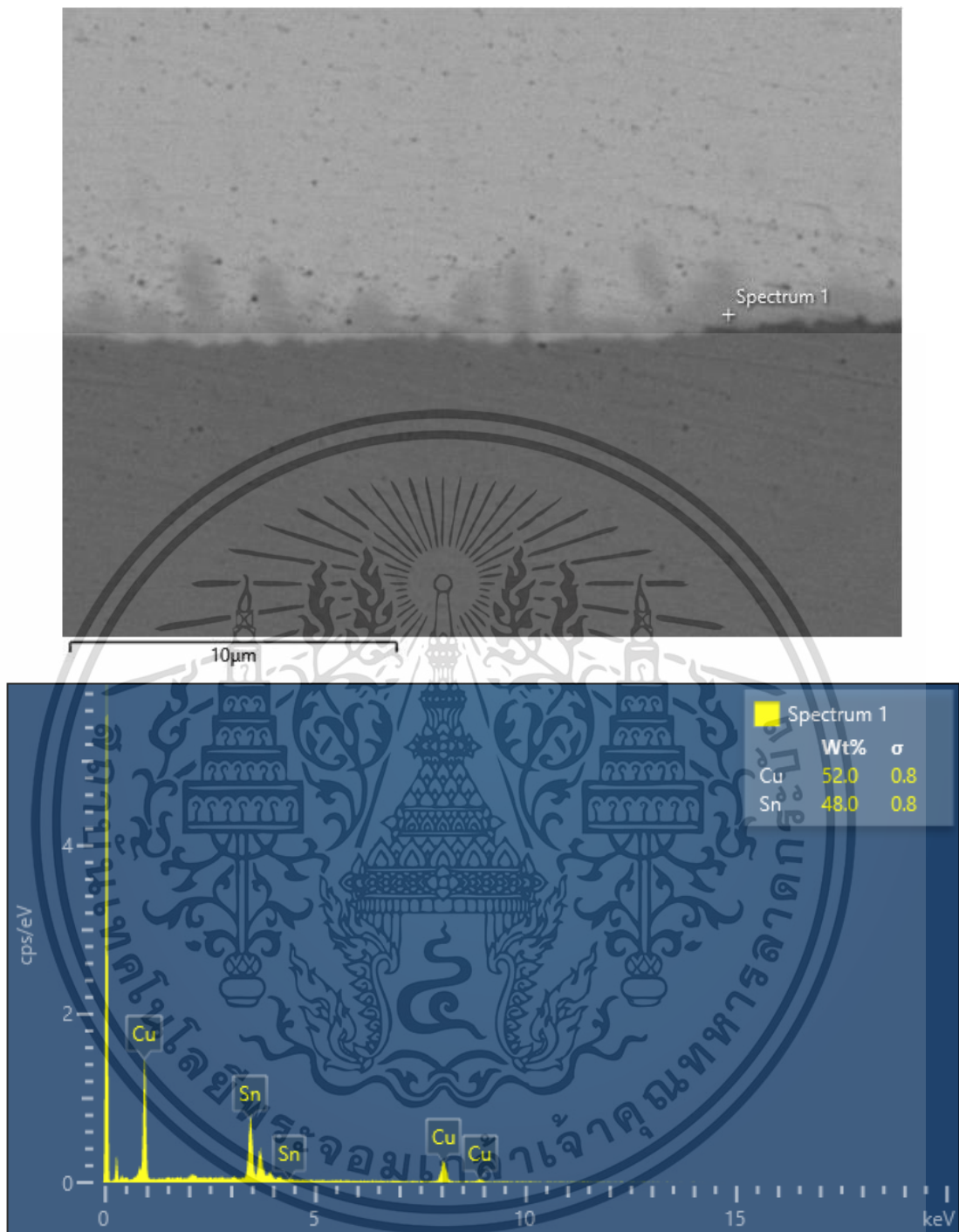
รูปที่ ผฉ2 สเปกตรัมการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS ของ IMC ชิ้นงานด้านความเค้นอัด
รัศมี 5 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



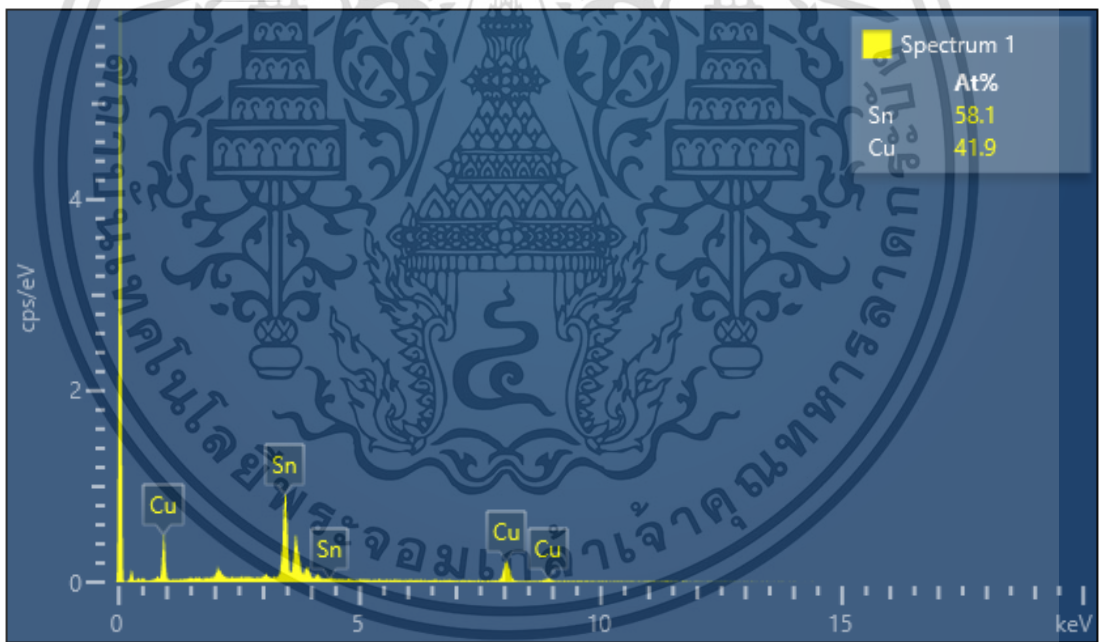
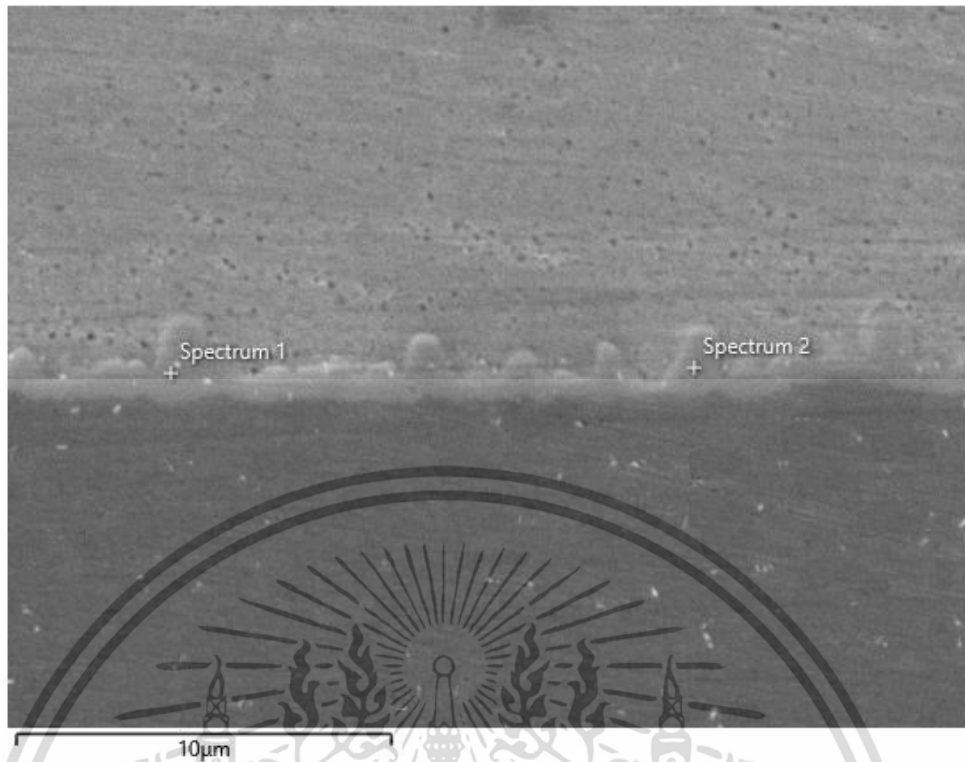
รูปที่ ผฉ3 สเปคตรัมการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS ของ IMC ชั้นงานด้านความเค้นอัด
รัศมี 10 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

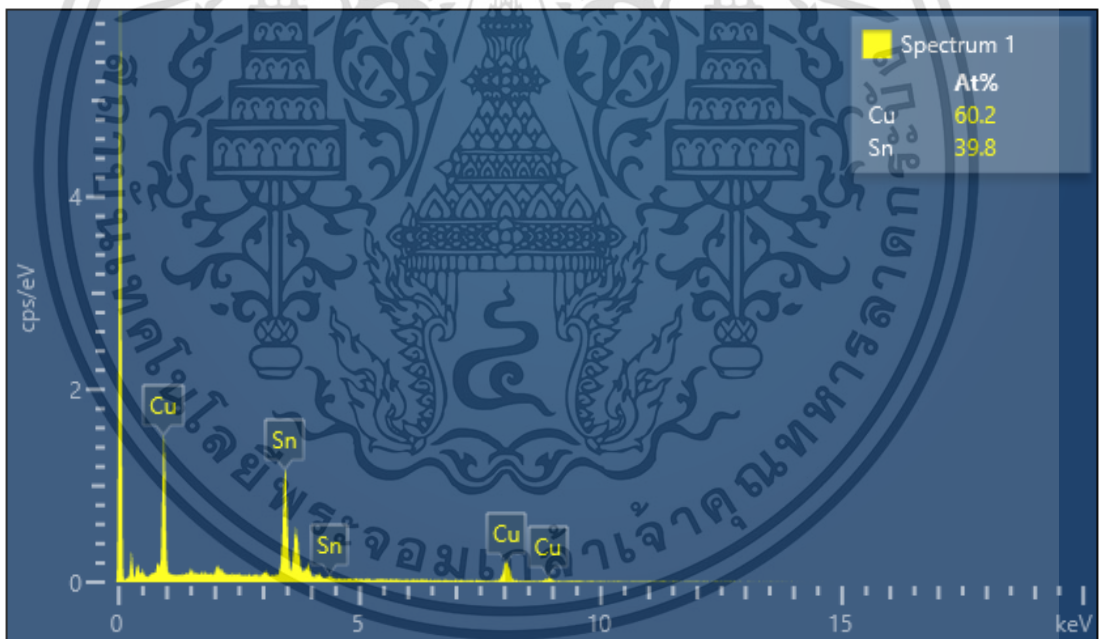
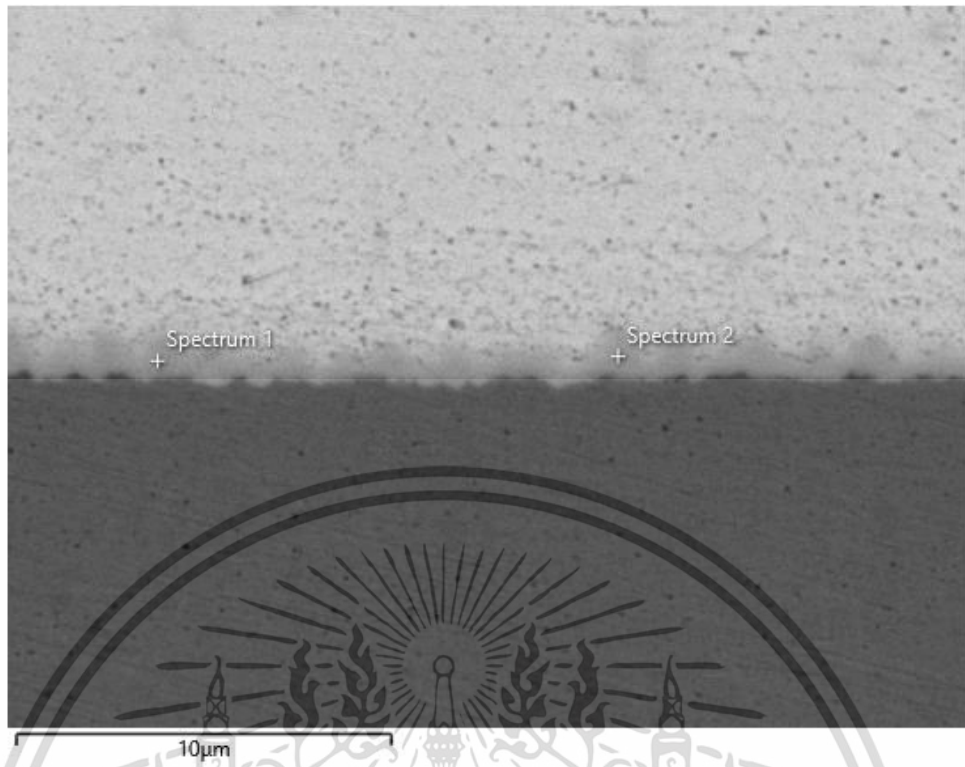


รูปที่ ผจ4 สเปกตรัมการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS ของ IMC ชิ้นงานด้านความเค้นอัด
รัศมี 15 mm

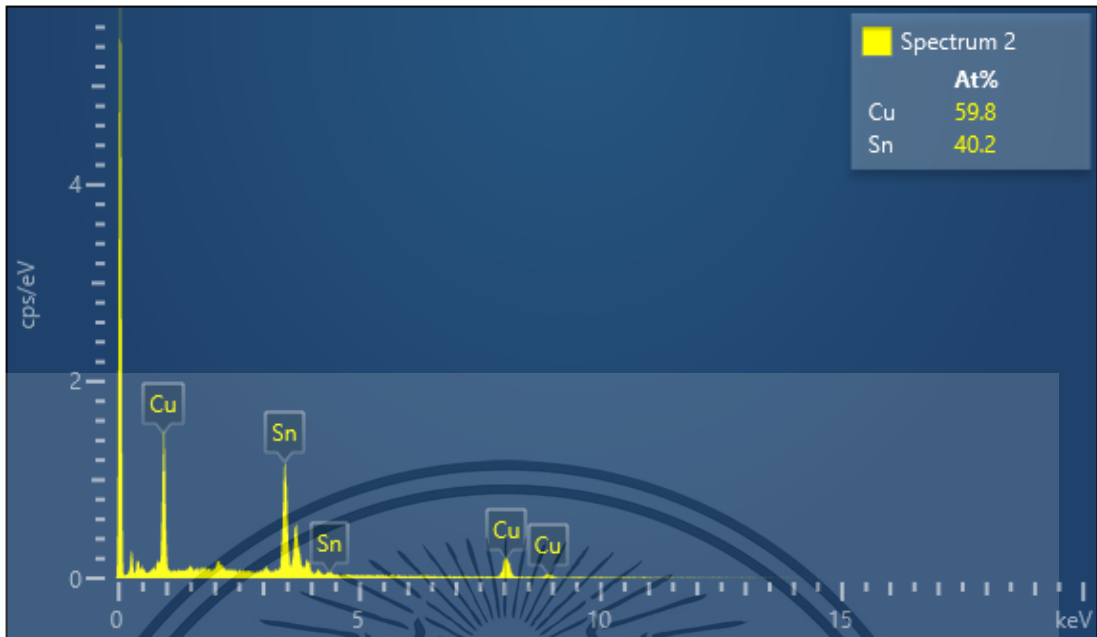
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



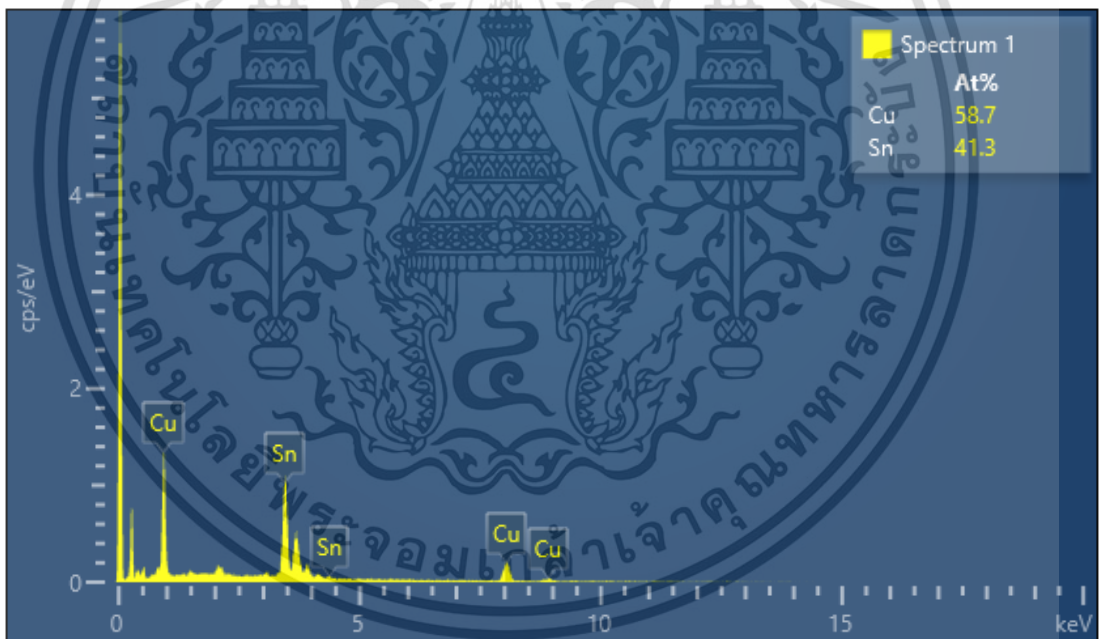
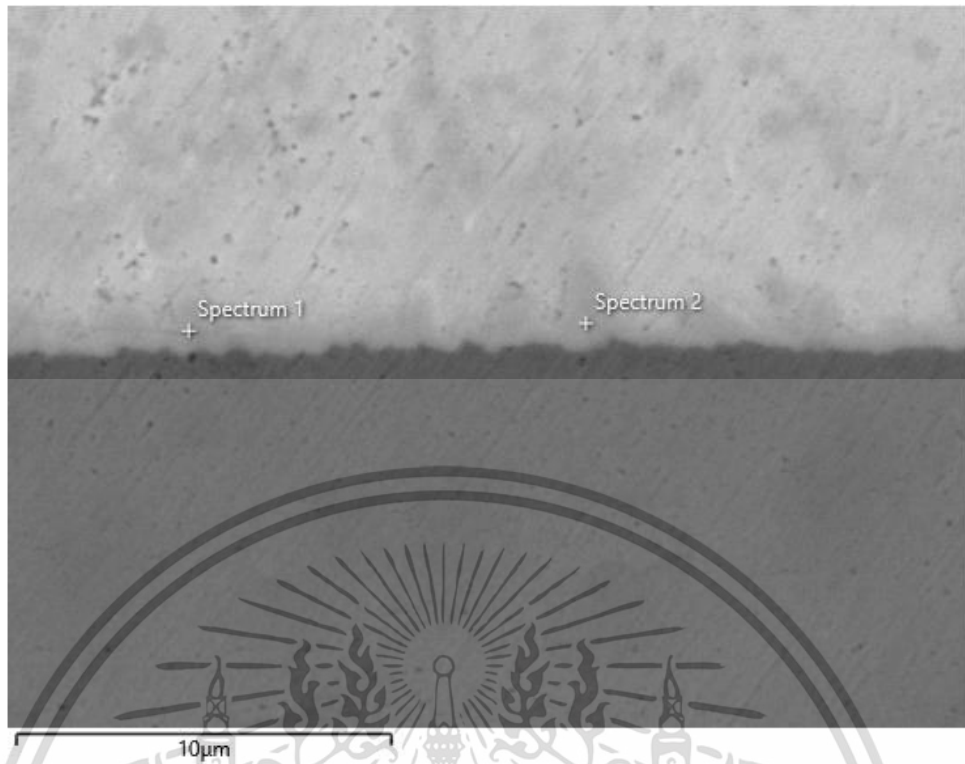
รูปที่ ผฉ5 สเปกตรัมการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS ของ IMC ชั้นงานด้านความเค้นอัด
รัศมี 20 mm



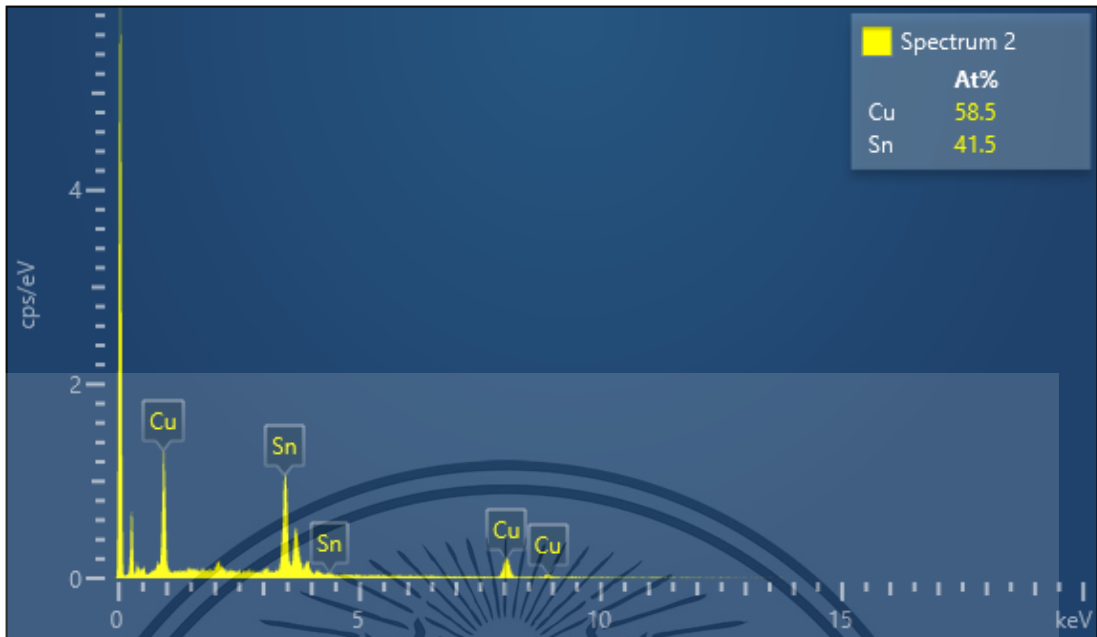
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และส่งไปยังถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



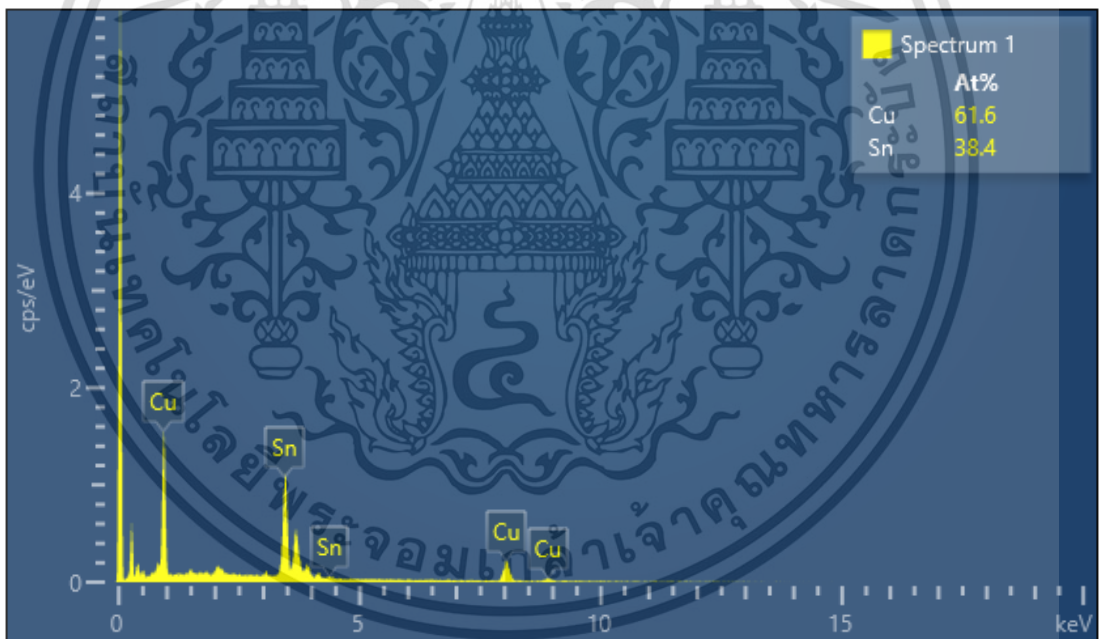
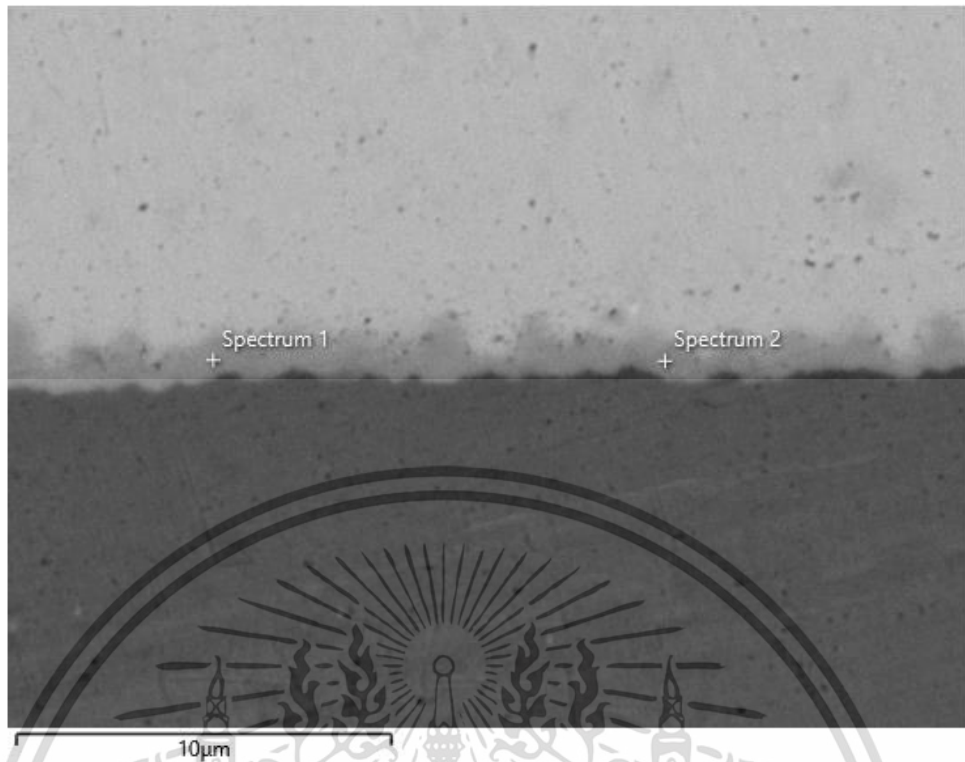
รูปที่ ผ66 สเปกตรัมการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS ของ IMC ชิ้นงานด้านความเค้นดึง
รัศมี 5 mm



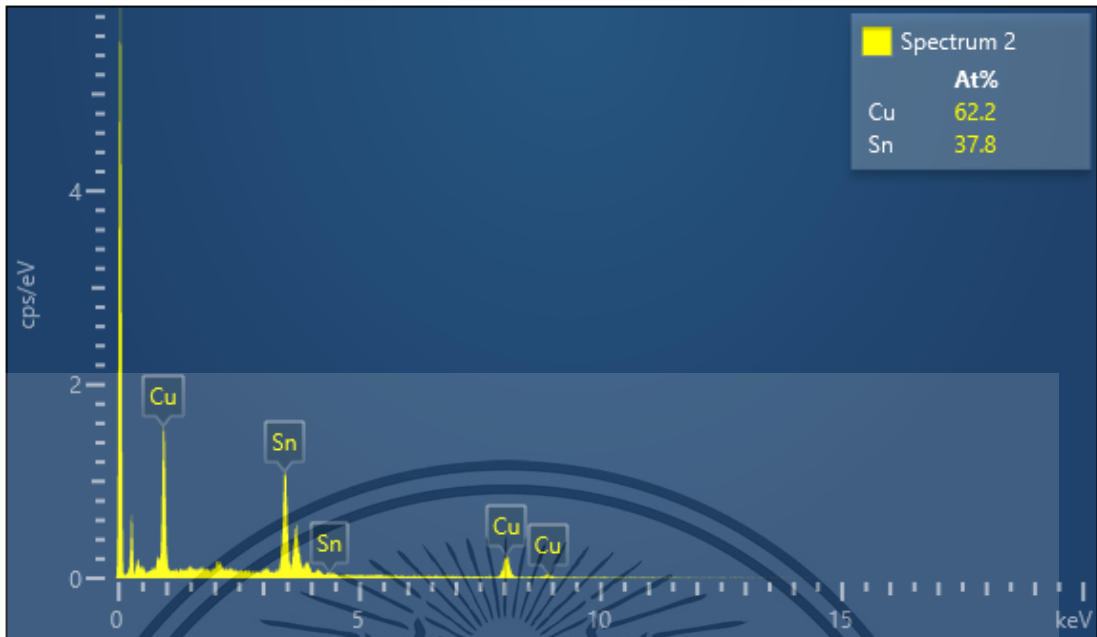
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



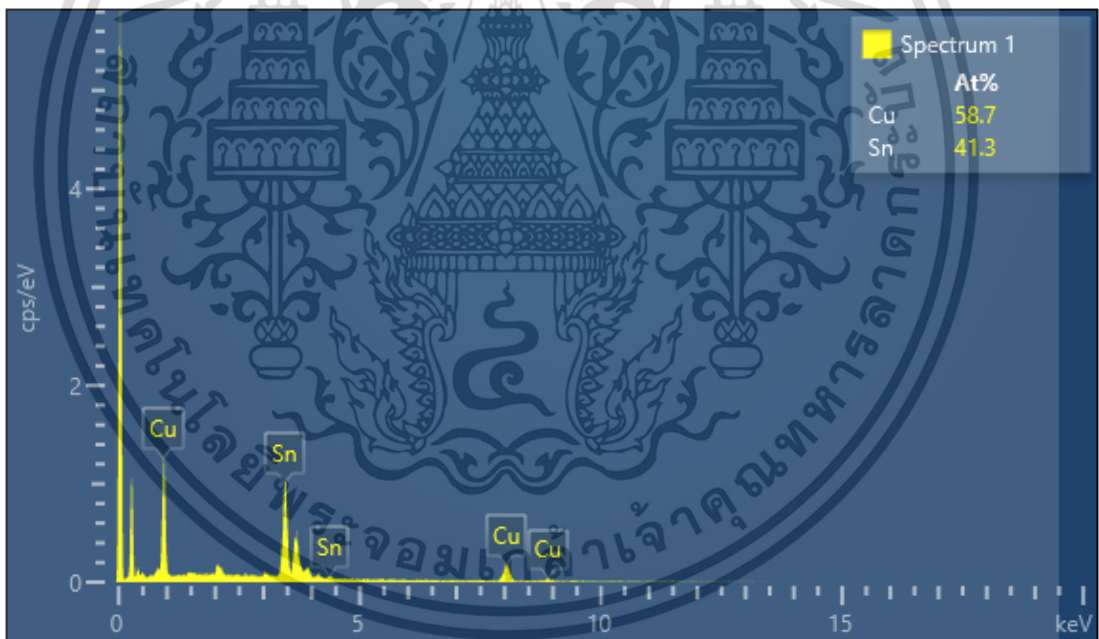
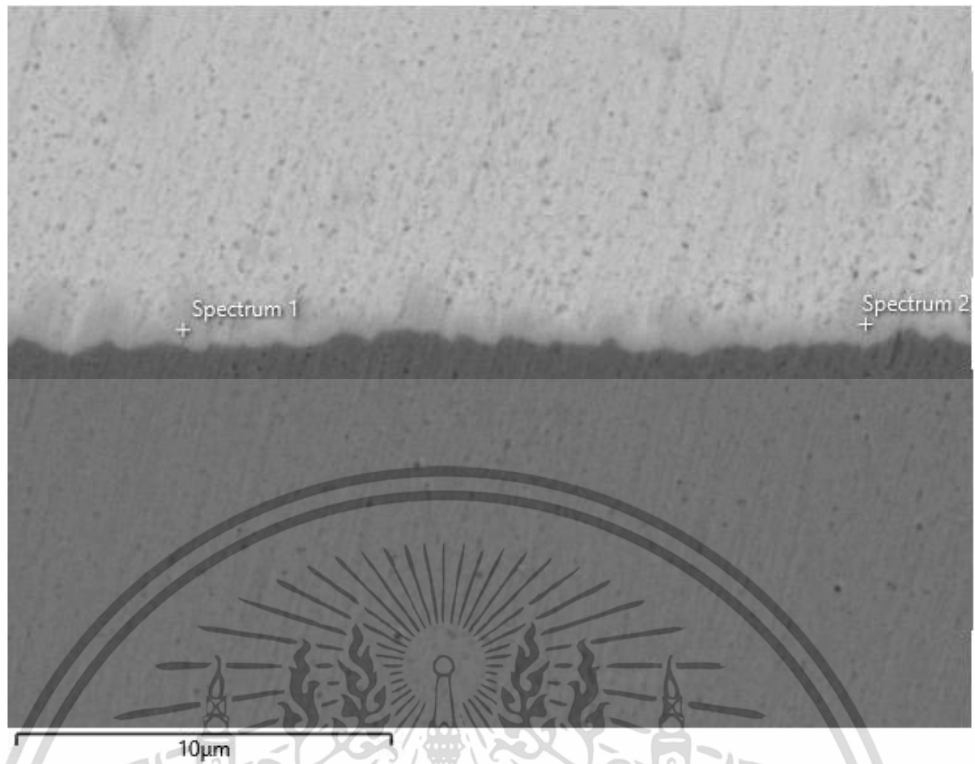
รูปที่ ๗7 สเปกตรัมการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS ของ IMC ชิ้นงานด้านความเค้นดึง รัศมี 10 mm



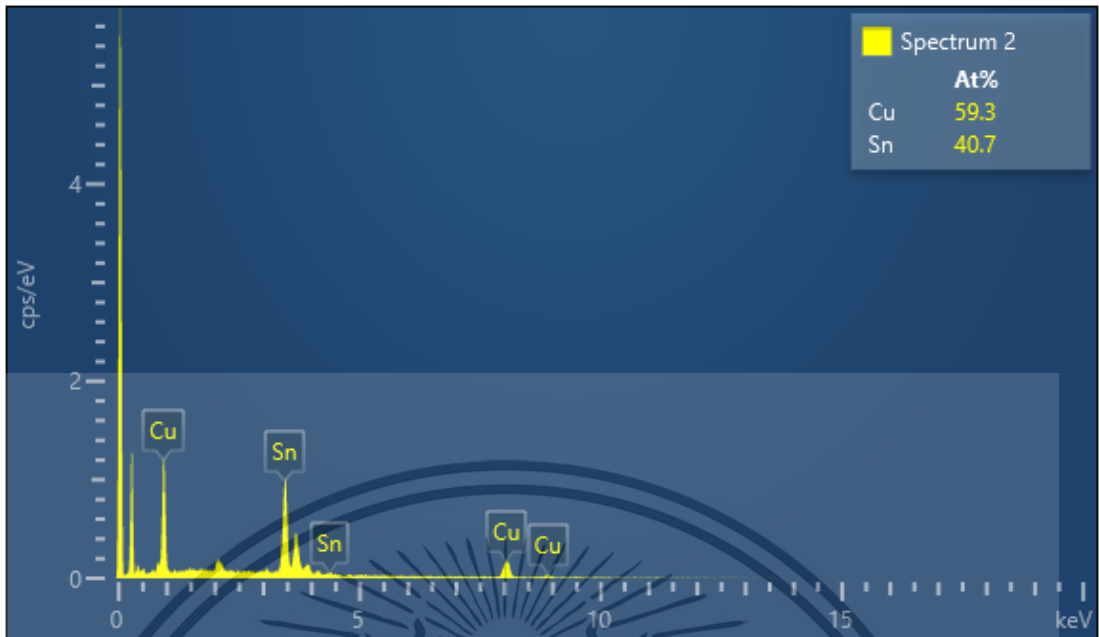
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผอ8 สเปกตรัมการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS ของ IMC ชิ้นงานด้านความเค้นดึง
รัศมี 15 mm



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผจ9 สเปกตรัมการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS ของ IMC ชิ้นงานด้านความเค้นดึง รัศมี 20 mm



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และส่งไปยังเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเค้นตกค้างแบบดึง (MPa)				
z	รัศมีชั้นงาน (mm)			
	4.41	10.13	14.67	19.72
35	4.25474953	2.71544954	2.2233026	1.895051887
34	3.826827686	2.44234294	1.999693726	1.704456861
33	3.403877004	2.172409017	1.778682515	1.516075975
32	2.986119029	1.905789162	1.560384731	1.330007903
31	2.573792466	1.642635722	1.34492511	1.146358966
30	2.167155113	1.383113227	1.132438364	0.965243984
29	1.766486081	1.127399811	0.92307034	0.786787273
28	1.37208836	0.875688846	0.716979365	0.611123785
27	0.984291792	0.628190843	0.514337797	0.438400429
26	0.603456552	0.385135671	0.315333843	0.268777626
25	0.229977215	0.146775155	0.120173687	0.102431119
24	-0.13571243	-0.08661385	-0.07091599	-0.06044588
23	-0.49313366	-0.31472583	-0.25768505	-0.21964016
22	-0.841756	-0.53722221	-0.43985628	-0.37491544
21	-1.18098897	-0.75372614	-0.61712113	-0.52600872
20	-1.51017209	-0.9638161	-0.78913447	-0.67262584
19	-1.8285626	-1.16701805	-0.95550818	-0.81443596
18	-2.1353203	-1.36279574	-1.11580321	-0.95106486
17	-2.4294885	-1.55053861	-1.26951964	-1.08208644
16	-2.70996998	-1.7295464	-1.41608413	-1.20701199
15	-2.97549605	-1.8990094	-1.55483373	-1.32527646
14	-3.22458634	-2.05798284	-1.68499489	-1.43622049
13	-3.45549546	-2.20535274	-1.80565553	-1.53906667
12	-3.66614089	-2.33979004	-1.91572747	-1.63288747
11	-3.85400363	-2.45968707	-2.01389441	-1.71656094
10	-4.01598729	-2.56306764	-2.09853833	-1.78870794
9	-4.14821256	-2.64745593	-2.16763213	-1.84760066
8	-4.2457084	-2.70967807	-2.21857715	-1.89102411
7	-4.30191108	-2.7455488	-2.24794668	-1.91605749
6	-4.30786597	-2.7493493	-2.25105839	-1.91870978
5	-4.25074666	-2.71289484	-2.22121091	-1.89326902
4	-4.11100729	-2.62371093	-2.14819066	-1.83102955
3	-3.85602535	-2.46097736	-2.01495085	-1.71746141
2	-3.4228982	-2.18454865	-1.78862196	-1.52454795
1	-2.65190329	-1.69248731	-1.38574161	-1.18114928
0	0	0	0	0

ความเค้นตกค้างแบบดึง (MPa)				
z	รัศมีชั้นงาน (mm)			
	4.41	10.13	14.67	19.72
-1	2.65190329	1.692487305	1.385741613	1.181149278
-2	3.422898196	2.184548647	1.788621963	1.524547953
-3	3.856025351	2.460977359	2.014950851	1.717461408
-4	4.111007294	2.623710934	2.148190661	1.831029553
-5	4.250746657	2.712894842	2.221210914	1.89326902
-6	4.307865969	2.749349304	2.251058385	1.91870978
-7	4.301911083	2.7455488	2.247946683	1.916057492
-8	4.245706401	2.709678069	2.218577148	1.891024106
-9	4.14821256	2.647455933	2.167632126	1.84760066
-10	4.015987288	2.563067639	2.098538331	1.788707945
-11	3.854003632	2.459687066	2.01389441	1.71656094
-12	3.666140891	2.339790045	1.915727475	1.632887474
-13	3.455495456	2.205352742	1.805655533	1.539066668
-14	3.224586344	2.057982836	1.684994887	1.436220486
-15	2.975496046	1.899009404	1.554833733	1.32527646
-16	2.709969975	1.729546397	1.416084131	1.207011994
-17	2.429488504	1.550538614	1.269519644	1.08208644
-18	2.135320305	1.362795741	1.11580321	0.951064862
-19	1.828562604	1.167018046	0.955508183	0.814435959
-20	1.510172087	0.9638161	0.789134473	0.672625837
-21	1.180988966	0.753726141	0.617121113	0.526008723
-22	0.841755996	0.537222207	0.439856279	0.374915439
-23	0.493133658	0.314725827	0.25768505	0.21964016
-24	0.135712428	0.086613853	0.070915994	0.060445883
-25	-0.22997721	-0.14677516	-0.12017369	-0.10243112
-26	-0.60345655	-0.38513567	-0.31533384	-0.26877763
-27	-0.98429179	-0.62819084	-0.5143378	-0.43840043
-28	-1.37208836	-0.87568885	-0.71697937	-0.61112378
-29	-1.76648608	-1.12739981	-0.92307034	-0.78678727
-30	-2.16715511	-1.38311323	-1.13243836	-0.96524398
-31	-2.57379247	-1.64263572	-1.34492511	-1.14635897
-32	-2.98611903	-1.90578916	-1.56038473	-1.3300079
-33	-3.403877	-2.17240902	-1.77868251	-1.51607597
-34	-3.82682769	-2.44234294	-1.99969373	-1.70445686
-35	-4.25474953	-2.71544954	-2.2233026	-1.89505189

รูปที่ ผข1 ค่าความเค้นตกค้างแบบดึงที่คำนวณได้ของชั้นงานรัศมีต่างๆที่แต่ละระยะทางจากระนาบ
กึ่งกลางถึงระนาบความยาวที่เปลี่ยนไป

ความเค้นดกค้ำแบบอัด (MPa)				
z	รัศมีชั้นงาน (mm)			
	4.85	9.28	13.88	20.6
35	-4.04175792	-2.84704892	-2.29076493	-1.85089822
34	-3.63525773	-2.5607067	-2.06037103	-1.66474396
33	-3.23347985	-2.27769092	-1.83265361	-1.48075224
32	-2.83663472	-1.99814981	-1.60773195	-1.29901945
31	-2.44494911	-1.72224311	-1.38573457	-1.11964943
30	-2.05866792	-1.45014333	-1.16680028	-0.94275433
29	-1.67805627	-1.18203722	-0.95107934	-0.76845556
28	-1.30340199	-0.91812753	-0.73873488	-0.59688494
27	-0.93501841	-0.65863498	-0.5299445	-0.42818594
26	-0.57324768	-0.40380058	-0.32490211	-0.26251526
25	-0.21846462	-0.15388835	-0.12382015	-0.10004453
24	0.1289187	0.090811438	0.073067819	0.059037527
23	0.468447521	0.329978449	0.265504063	0.214522666
22	0.79961792	0.563257716	0.453202968	0.366180116
21	1.121868979	0.790254124	0.635846619	0.51375301
20	1.434573282	1.010525716	0.813079414	0.656954025
19	1.737025257	1.223575479	0.984501451	0.79546005
18	2.02842675	1.428841188	1.149660358	0.928905574
17	2.307868969	1.625682683	1.308041054	1.056874423
16	2.574309614	1.813365757	1.459052791	1.17888928
15	2.826543522	1.991041484	1.602012514	1.294398249
14	3.063164428	2.157719277	1.736123186	1.40275734
13	3.282514292	2.312231201	1.860445074	1.503207263
12	3.482614873	2.453183766	1.973856961	1.594842096
11	3.661073257	2.578891381	2.075002605	1.676566016
10	3.814948055	2.687282108	2.162214901	1.747032035
9	3.940554166	2.775760129	2.23340523	1.804552583
8	4.033167491	2.840997749	2.285896092	1.846964286
7	4.086558582	2.878606891	2.316156795	1.871414409
6	4.092215388	2.88259158	2.319362917	1.874004899
5	4.037955434	2.844370417	2.268609775	1.849156895
4	3.905211386	2.750864372	2.213373847	1.788367574
3	3.662993769	2.590244207	2.076091102	1.677445503
2	3.251548842	2.290418873	1.842894649	1.489026625
1	2.519149731	1.774510862	1.427789582	1.15362915
0	0	0	0	0

ความเค้นดกค้ำแบบอัด (MPa)				
z	รัศมีชั้นงาน (mm)			
	4.85	9.28	13.88	20.6
-1	-2.51914973	-1.77451066	-1.42778958	-1.15362915
-2	-3.25154884	-2.29041887	-1.84289465	-1.48902683
-3	-3.66299377	-2.58024421	-2.0760911	-1.6774455
-4	-3.90521139	-2.75086437	-2.21337385	-1.78836757
-5	-4.03795543	-2.84437042	-2.28860978	-1.8491569
-6	-4.09221537	-2.88259158	-2.31936292	-1.8740049
-7	-4.08655858	-2.87860689	-2.3161568	-1.87141441
-8	-4.03316749	-2.84099775	-2.28589609	-1.84696429
-9	-3.94055417	-2.77576013	-2.23340523	-1.80455258
-10	-3.81494805	-2.68728211	-2.1622149	-1.74703204
-11	-3.66107326	-2.57889138	-2.0750026	-1.67656602
-12	-3.48261487	-2.45318377	-1.97385696	-1.5948421
-13	-3.28251429	-2.3122312	-1.86044507	-1.50320726
-14	-3.06316443	-2.15771928	-1.73612319	-1.40275734
-15	-2.82654352	-1.99104148	-1.60201251	-1.29439825
-16	-2.57430961	-1.81336576	-1.45905279	-1.17888928
-17	-2.30786897	-1.62568268	-1.30804105	-1.05687442
-18	-2.02842675	-1.42884119	-1.14966036	-0.92890557
-19	-1.73702526	-1.22357548	-0.98450145	-0.79546005
-20	-1.43457328	-1.01052572	-0.81307941	-0.65695403
-21	-1.12186898	-0.79025412	-0.63584662	-0.51375301
-22	-0.79961792	-0.56325772	-0.45320297	-0.36618012
-23	-0.46844752	-0.32997845	-0.26550406	-0.21452267
-24	-0.1289187	-0.09081144	-0.07306782	-0.05903753
-25	0.128464618	0.153888349	0.123820153	0.10004453
-26	0.573247681	0.40380058	0.324902111	0.262515255
-27	0.935018412	0.658634984	0.529944501	0.42818594
-28	1.303401989	0.918127533	0.738734883	0.596884937
-29	1.678056268	1.182037218	0.951079337	0.768455564
-30	2.058667917	1.450143326	1.166800277	0.942754331
-31	2.444949114	1.722243112	1.385734571	1.119649433
-32	2.836634722	1.998149811	1.607731947	1.299019452
-33	3.233479846	2.277690918	1.832653605	1.48075224
-34	3.635257731	2.560706704	2.060371026	1.664743955
-35	4.041757924	2.847048924	2.290764929	1.850898222

รูปที่ ผข2 ค่าความเค้นดกค้ำแบบอัดที่คำนวณได้ของชั้นงานรัศมีต่างๆที่แต่ละระยะทางจากระนาบ
กึ่งกลางถึงระนาบความยาวที่เปลี่ยนไป