

การศึกษาอิทธิพลของความเค้นตกค้างในแผ่นทองแดงต่อความหนา
ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีชนิด

ไร้สารตะกั่ว Sn3.5Ag

EFFECT OF RESIDUAL STRESS IN COPPER SHEET ON
INTERMETALLIC COMPOUND THICKNESS OF LEAD-FREE
SOLDER Sn3.5Ag



นางสาวธนัชชา เหมือนมิ่ง

MS. THANADCHA MEANMING

นายกานต์พงศ์ ทองเสมอ

MR. GANTPONG TONGSAMER

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมออกแบบการผลิตและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ปีการศึกษา 2563

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

EFFECT OF RESIDUAL STRESS IN COPPER SHEET ON
INTERMETALLIC COMPOUND THICKNESS OF LEAD-FREE
SOLDER Sn3.5Ag



MS. THANADCHA MEANMING
MR. GANTPONG TONGSAMER

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

ACADEMIC YEAR 2020

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องยกย่องถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์ การศึกษาอิทธิพลของความเค้นตกค้างในแผ่นทองแดงต่อความหนา
ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีชนิด
ไร้สารตะกั่ว Sn3.5Ag
EFFECT OF RESIDUAL STRESS IN COPPER SHEET ON
INTERMETALLIC COMPOUND THICKNESS OF LEAD-FREE
SOLDER Sn3.5Ag

นักศึกษา นางสาวณัชชา เหมือนมิ่ง รหัสประจำตัว 60010417
นายกานต์พงศ์ ทองเสมอ รหัสประจำตัว 60011290

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมออกแบบการผลิตและวัสดุ

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์


(รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

หัวข้อปริญญานิพนธ์

การศึกษาอิทธิพลของความเค้นตกค้างในแผ่นทองแดงต่อ
ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีชนิด
ไร้สารตะกั่ว Sn3.5Ag

นักศึกษา

นางสาวรณชชา เหมือนมิ่ง

นายกานต์พงศ์ ทองเสมอ

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมออกแบบการผลิตและวัสดุ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา

2563

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์

รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความเค้นตกค้างที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคหลังบัดกรีระหว่างโลหะบัดกรี Sn3.5Ag กับแผ่นรองทองแดง และศึกษาผลของความเค้นตกค้างที่มีต่อปริมาณการเกิดและรูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรี โดยตัดชิ้นงานให้มีรัศมีความโค้ง 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm และ ∞ mm ตามลำดับ เพื่อให้มีความเค้นตกค้างที่แตกต่างกัน แล้วทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Electron Back-Scattered Diffraction (EBSD) ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ดังกล่าวสามารถเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงตัวของผลึกภายในชิ้นงานแต่ละชิ้นได้ด้วยมุมความแตกต่างทางผลึก (Misorientation Angle) ในรูปของข้อมูลที่แสดงทิศทางการวางตัวของอะตอม Inverse Pole Figure (IPF) โดยพบว่าความหนาแน่นของรูปแบบทิศทางผลึก (Multiple of Uniform Density) เปลี่ยนแปลงไปหลังจากเกิดการเสียรูปแบบถาวรของชิ้นงาน เมื่อวิเคราะห์ตามแนวแกน X ซึ่งตั้งฉากกับผิวแผ่นทองแดง พบว่าชิ้นงานแผ่นตรง MUD กระจายทุกทิศทาง ชิ้นงานรัศมีความโค้ง 20 mm เริ่มมี MUD สูงที่ทิศทาง [101] ชิ้นงานรัศมีความโค้ง 15 mm มี MUD สูงที่ทิศทาง [101] และยังมีความหนาแน่นสูงขึ้นตามลำดับที่ชิ้นงานรัศมีความโค้ง 10 mm และ 5 mm จึงสรุปได้ว่าปริมาณการเสียรูปที่มากขึ้นทำให้ความหนาของชั้นของสารประกอบเชิงโลหะน้อยลง เนื่องจาก MUD ของทิศทาง [101] มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อะตอมของโลหะบัดกรีแพร่ในทิศทางตั้งฉากกับผิวแผ่นทองแดงได้น้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

Thesis Title	Effect of Residual Stress in Copper Sheet on Intermetallic Compound Thickness of Lead-free Solder Sn3.5Ag
Student	Ms. Thanadcha Meanming Mr. Ganpong Tongsamer
Degree	Bachelor of Engineering in Production Design and Materials Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year	2020
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Kannachai Kanlayasiri

ABSTRACT

The objectives of this research were to study the effect of residual stress on microstructure after soldering Sn3.5Ag solder to a copper substrate, and to investigate the effect of residual stress on the formation and morphology of intermetallic compounds in the solder joint. The copper substrate was bent to a radius of 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm, and ∞ mm to generate the different residual stress. Electron back-scattered diffraction technique was used to analyze the deformation of the sample. Misorientation angle in terms of inverse pole figure was used to compare the alteration of grain orientation. It showed the multiple uniform density changed due to the plastic deformation of the specimen. Along the X axis perpendicular to the substrate surface, it was found that the specimen with a radius of ∞ mm had MUD spread in all directions and the specimen with a radius of 20 mm began to have a high MUD in [101] direction. The specimen with a radius of 15 mm had a high MUD in [101] direction and higher density was found in the specimen with a smaller radius of 10 mm and 5 mm. The higher degree of deformation provided thinner intermetallic compound layer corresponding to the increase of MUD in [101] direction. The increase of MUD resulted in less diffusion of solder atoms in the direction perpendicular to the substrate surface.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่องการศึกษาอิทธิพลของความเค้นตกค้างในแผ่นทองแดงต่อความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีชนิดไร้สารตะกั่ว Sn3.5Ag ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณบุคลากรทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับปริญญานิพนธ์นี้ ทั้งผู้คอยสนับสนุนและให้คำแนะนำปรึกษา อีกทั้งยังเอื้อเพื่อสถานที่ในการดำเนินงานต่าง ๆ ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และบุคลากรทุกท่านที่เอื้อเพื่อสถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือในการดำเนินงานครั้งนี้ ขอขอบพระคุณ ดร.ประจักษ์ จัตกุล ผู้ที่คอยให้ความรู้ด้านวัสดุ วิธีการใช้เครื่องจักรเบื้องต้น และเมตตาพาเราเดินทางไปยังศูนย์บริการวิเคราะห์ทดสอบชิ้นงาน และที่ขาดไม่ได้ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้ความรู้ ความช่วยเหลือ และคำแนะนำในการแก้ไขปัญหาหรือข้อบกพร่อง รวมทั้งความใส่ใจในทุก ๆ ด้านตลอดระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัยเสมอมา

นางสาวธนัชชา เหมือนมิ่ง
นายกานต์พงศ์ ทองเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป.....	ช

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 ระยะเวลาและแผนการดำเนินงาน.....	3
1.6 สถานที่ดำเนินงาน.....	3

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 โลหะบัดกรี.....	4
2.2 ชั้นของสารประกอบเชิงโลหะ.....	5
2.3 ความเค้นและความเค้นตกค้าง.....	7
2.4 การเสียรูปถาวร.....	7
2.5 การแพร่.....	9
2.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	10
2.7 เทคนิคการตรวจจับการแทรกสอดอิเล็กตรอน.....	11
2.8 เทคนิคตรวจจับสัญญาณเอกซเรย์.....	12

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เตรียมขึ้นงานตัวอย่างใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ได้ 13 การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีก 3.1.1 การเตรียมวัสดุ (Materials Preparation) วัสดุของเอกสารทุกครั้งที่มีภาพ 13.1.1.1

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

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

สารบัญ

	หน้า
3.1.2 การตัดชิ้นงาน (Sectioning)	13
3.1.3 การดัดชิ้นงาน (Bending).....	14
3.1.4 การบัดกรีแบบจุ่ม (Dip Soldering)	15
3.1.5 การขึ้นเรือน (Mounting).....	15
3.1.6 การขัดหยาบ (Grinding)	16
3.1.7 การขัดละเอียด (Polishing).....	16
3.1.8 การกัดผิวหน้าด้วยไอออน (Ion Milling)	16
3.2 วิเคราะห์ผลทดสอบ	16
3.2.1 การใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	17
3.2.2 การใช้ชุดอุปกรณ์วิเคราะห์การเรียงตัวของผลึก	17
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	
4.1 ผลก่อนการบัดกรี.....	18
4.2 ผลหลังการบัดกรี.....	22
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงาน	
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน	25
5.1.1 ก่อนการบัดกรี.....	25
5.1.2 หลังการบัดกรี.....	25
5.2 ข้อเสนอแนะ	25
อ้างอิง.....	28
ภาคผนวก.....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน.....	3
ตารางที่ 3.1 รัศมีจริงหลังการตัดชิ้นงานทั้ง 2 ชุด.....	15



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 เฟสไดอะแกรมของ Sn-Ag.....	5
รูปที่ 2.2 ลักษณะการเกิดขึ้นของสารประกอบเชิงโลหะ	6
รูปที่ 2.3 รูปร่าง IMC ลักษณะกันหอยด้านบน (ซ้าย) และภาพตัดขวาง (ขวา)	6
รูปที่ 2.4 รูปร่าง IMC ลักษณะเป็นแท่งด้านบน (ซ้าย) และภาพตัดขวาง (ขวา)	7
รูปที่ 2.5 การเกิดแถบการเลื่อนระหว่างการเสียรูปถาวรภาพลึกลับเดียวภายใต้แรงเค้นดึง (a) แถบการเลื่อนเกิดขึ้นหลังจากแรงกระทำเกินแรงเค้นจำนน (Yield Stress) (b) ภาพขยายรูปการเคลื่อนจำนวนมากในระนาบ (c).....	8
รูปที่ 2.6 พื้นผิวเหล็กกล้าก่อน (ซ้าย) และหลัง (กลาง) การรีด ร่วมกับ IPF แสดงทิศทางที่ปรากฏ (ขวา).....	8
รูปที่ 2.7 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	10
รูปที่ 2.8 การเกิดแถบคิกซี.....	11
รูปที่ 2.9 ชุดอุปกรณ์ EBSD บนกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	12
รูปที่ 3.1 การตัดชิ้นงานตามขนาด 5 ชิ้น	14
รูปที่ 3.2 ชิ้นงานตัวอย่างตัดรัศมี 20 mm	14
รูปที่ 3.3 ตัวอย่างชิ้นงานหลังการขึ้นรูปแบบเย็น.....	15
รูปที่ 3.4 ชิ้นงานรัศมี 15 mm หลังผ่านการกัดผิวหน้าด้วยไอออน (กำลังขยาย 100X)	16
รูปที่ 3.5 การส่องดูพื้นผิวชิ้นงานเบื้องต้น	17
รูปที่ 4.1 ตัวอย่างพื้นผิวงานจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดหลังกัดผิวหน้าด้วยไอออน...19	19
รูปที่ 4.2 PHASE MAP ของชิ้นงานทองแดงโดยสีแดงหมายถึงทองแดง.....	19
รูปที่ 4.3 ภาพ IPF ของ R = ∞(a) R = 20(b) R = 15(c) R = 10(d) และ R = 5(e) แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นรูปแบบทิศทางผลึก (MUD).....	20
รูปที่ 4.4 ทิศทางของภาพหน้าตัดขวาง (Cross Section) ของแผ่นทองแดง (บน) ภาพจำลอง Face Centered Cubic (FCC) ตามทิศทางทั้งสามขนานกับแกน X (ล่าง)	21
รูปที่ 4.5 การวางตัวผลึกของทิศทาง [101] (ซ้าย) และระนาบที่ขนานกับพื้นผิว (ขวา) เมื่อจำลองมุมมองตั้งฉากกับพื้นผิวที่จะทำการบัดกรี.....	22
รูปที่ 4.6 EDS ตรวจจับธาตุ Sn (ซ้าย) Ag (กลาง) และ Cu (ขวา) ของชิ้นงาน R = ∞ หลังการบัดกรี.....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ภายใต้การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ Phase Map จากเทคนิค EBSD แสดงให้เห็นรูปร่างของโลหะ และสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นของชิ้นงาน R = ∞ หลังการบัดกรี.....	23
รูปที่ 4.8 EDS ตรวจจับธาตุ Sn (ซ้าย) Ag (กลาง) และ Cu (ขวา) ของชิ้นงาน R = 5 หลังการบัดกรี.....	23
รูปที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ Phase Map จากเทคนิค EBSD แสดงให้เห็นรูปร่างของโลหะ และสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นของชิ้นงาน R = 5 หลังการบัดกรี.....	24
รูปที่ 5.1 ภาพลูกศรชี้บริเวณที่มีลักษณะคล้ายร่องรอยจากการขีดเป็นแนวตรงยาว ของชิ้นงานหลังการบัดกรี R = 5	26
รูปที่ 5.2 ภาพที่ยังไม่ได้ขยายเกรนซึ่งมีการรบกวน (NOISES) สูง (ซ้าย) ภาพที่ได้หลังการขยายเกรน (ขวา)	26
รูปที่ 5.3 ภาพก่อน (a) และหลัง (b) การระบุ Inverse Pole Figure Map (IPF MAP) แสดงให้เห็นว่าก่อนการระบุ IPF MAP ไม่สามารถบอกได้ว่าเฟสใดสีใดคือ สารประกอบใดบ้าง	27



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

บทที่ 1

บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียด ความเป็นมา และขอบเขตของงานวิจัยเรื่อง การศึกษาอิทธิพลของความเค้นตกค้างในแผ่นทองแดงต่อความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีชนิดไร้สารตะกั่ว Sn3.5Ag ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา
2. ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์
3. ขอบเขตของปริญญานิพนธ์
4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ
5. ระยะเวลาและแผนการดำเนินงาน
6. สถานที่ดำเนินงาน

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การบัดกรี (Soldering) เป็นกระบวนการเชื่อมประสานโลหะที่สำคัญอย่างมากในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ทุกวันนี้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีบทบาทในชีวิตประจำวันมากยิ่งขึ้น ทั้งยานพาหนะและอุปกรณ์ไฟฟ้าจึงต้องใส่ใจต่อความปลอดภัยของชีวิตและทรัพย์สินเป็นสำคัญ การวิบัติของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อาจนำไปสู่ความเสียหายใหญ่หลวงได้ การบัดกรีเป็นการเชื่อมประสานแผ่นรอง (Substrate) ด้วยโลหะบัดกรี (Solder) สำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ากับแผงวงจรพบว่าชั้นความหนาของสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic Compound) ซึ่งเกิดจากการเชื่อมประสานทางโลหะวิทยา (Metallurgical Bond) ของทั้งสององค์ประกอบระหว่างกระบวนการบัดกรีหากมีความหนามากเกินไปจะส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือของรอยเชื่อมประสาน เนื่องจากความเปราะ (Brittleness) ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นอาจนำไปสู่การวิบัติของรอยบัดกรีได้ [1-4] การเกิดขึ้นของสารประกอบเชิงโลหะมาจากการแพร่ (Diffusion) ระหว่างโลหะทั้งสององค์ประกอบมีหลายปัจจัยที่ส่งผลการแพร่ เช่น ความแตกต่างของความเข้มข้น (Concentration Gradient) เวลา (Time) อุณหภูมิ (Temperature) ความเค้นตกค้าง (Residual Stress) เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลการแพร่ [5-7] กระบวนการผลิตแผ่นพิมพ์วงจร (Printed Circuit Board: PCB) มีทั้งกระบวนการตัด กระบวนการอัด และกระบวนการรีด มักจะมีความเค้นตกค้างในแผ่นทองแดงบนแผ่นพิมพ์วงจร [8, 9] จึงอนุมานว่าความเค้นตกค้างอาจส่งผลการเกิด (Formation) และรูปร่าง (Morphology) ของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรี อย่างไรก็ตาม

ตามผลการศึกษาในเรื่องดังกล่าวไม่สามารถพบได้มากนัก ก่อนหน้านี้การบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นิยมใช้จากโลหะบัดกรีซึ่งเป็นโลหะผสม (Alloy) ระหว่างตะกั่วกับดีบุก (Sn-Pb Solder) แต่ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ปัจจุบันมีข้อบังคับเพื่อควบคุมปริมาณสารพิษบางชนิดในสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ เช่น Restriction of use of certain Hazardous Substance in electrical and electronic equipment (RoHS) ออกโดยสหภาพยุโรป ซึ่งควบคุมปริมาณตะกั่วในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จึงต้องเปลี่ยนเป็นโลหะบัดกรีชนิดไร้สารตะกั่ว (Lead Free Solder) ทำให้มีการพัฒนาโลหะบัดกรีชนิดไร้สารตะกั่วขึ้นมาหลายประเภทด้วยกัน ซึ่งโลหะบัดกรีแต่ละชนิดจะเกิดเฟส (Phase) ของสารประกอบเชิงโลหะขึ้นแตกต่างกันไปตามส่วนประกอบของโลหะบัดกรีนั้น ในบรรดาโลหะบัดกรีชนิดไร้สารตะกั่วมีบางกลุ่มได้รับความนิยม เช่น โลหะบัดกรีกกลุ่ม Sn-Ag, Sn-Cu และ Sn-Ag-Cu (SAC) [10] จากการศึกษาพบว่าเฟสที่เกิดขึ้นจะขัดขวางการเติบโตของเฟสอื่น สารประกอบเชิงโลหะที่เกิดจำนวนเฟสน้อยจะทำให้ง่ายต่อการศึกษาอิทธิพลของความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นในแผ่นรองทองแดงที่มีต่อปริมาณการเกิดและรูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรีโดยมีปัจจัยอื่นเกี่ยวข้องน้อยที่สุด [11] จึงเลือกใช้โลหะบัดกรี Sn3.5Ag เนื่องจากไม่มีทองแดงเป็นส่วนประกอบทำให้สังเกตการแพร่ของโลหะบัดกรีได้ง่าย โดยโครงงานวิจัยนี้จะศึกษาอิทธิพลของความเค้นตกค้างในแผ่นรองทองแดงที่มีต่อการเกิดรูปร่างและปริมาณของสารประกอบเชิงโลหะ โดยจะศึกษาจากโครงสร้างจุลภาคของแผ่นทองแดงซึ่งมีความเค้นตกค้าง

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

1. เพื่อศึกษาผลของความเค้นตกค้างที่มีอิทธิพลต่อโครงสร้างทางจุลภาคหลังบัดกรีระหว่างโลหะบัดกรี Sn3.5Ag บนแผ่นรองทองแดง
2. เพื่อศึกษาผลของความเค้นตกค้างที่มีอิทธิพลต่อปริมาณการเกิดและรูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรี

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

1. ทำการศึกษาแผ่นรองทองแดง โดยบัดกรีด้วยโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn3.5Ag ที่อุณหภูมิบัดกรี 261 °C ตามมาตรฐาน National Institute of Standards and Technology (NIST)
2. ทำการตัดแผ่นรองทองแดงให้มีรัศมีความโค้ง 5, 10, 15, 20 และ ∞ mm เพื่อให้เกิดความเค้นตกค้างบนแผ่นรองที่ต้องการศึกษา
3. ทำการบัดกรีด้วยวิธีการจุ่ม (Dip Soldering) และศึกษาปริมาณการเกิดและรูปร่างของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เรียนรู้การเกิดสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรีบนแผ่นรองทองแดงที่มีอิทธิพลมาจากความเค้นตกค้าง
2. ได้รับความรู้ทางด้านโลหะวิทยาของรอยบัดกรีที่เป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

1.5 ระยะเวลาและแผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

รายการ	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1. ศึกษาเอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	←→									
2. รวบรวมทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและจัดเตรียมเอกสารที่เกี่ยวข้อง		←→								
3. กำหนดแผนการดำเนินงานและออกแบบวิธีการทดลอง			←→							
4. ทำการปฏิบัติการทดลอง					←	→				
5. วิเคราะห์ผลและสรุปผลการทดลอง						←			→	
6. จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์									←→	

1.6 สถานที่ดำเนินงาน

ภาควิชาอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร

ศูนย์บริการวิเคราะห์ทดสอบ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องสำหรับการศึกษาอิทธิพลของความเค้นตกค้างในแผ่นทองแดงต่อความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีชนิดไร้สารตะกั่ว Sn3.5Ag เพื่อนำไปประยุกต์เป็นแนวทางในการดำเนินงาน ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

1. โลหะบัดกรี
2. ชั้นของสารประกอบเชิงโลหะ
3. ความเค้นและความเค้นตกค้าง
4. การเสีयरูปถาวร
5. การแพร่
6. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
7. เทคนิคการตรวจจัดการแทรกสอดอิเล็กตรอน
8. เทคนิคตรวจจับสนุญาณเอกซเรย์

2.1 โลหะบัดกรี

กระบวนการบัดกรีสมัยก่อนนิยมใช้โลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมระหว่างโลหะดีบุกและตะกั่ว (Tin-Lead Solder) หรือที่เรียกกันว่า ตะกั่วบัดกรี [12] แต่ตะกั่วเป็นโลหะหนักมีสารพิษที่ส่งผลเสียต่อมนุษย์ด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้หลายประเทศตระหนักถึงความจำเป็นที่จะต้องเลิกใช้โลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมของตะกั่ว เช่น ในสหภาพยุโรป EU (European Union) ได้มีผลบังคับใช้ตั้งแต่วันที่ 1 กรกฎาคม ค.ศ. 2006 และได้ประกาศกฎระเบียบว่าด้วยการห้ามใช้สารที่มีโลหะหนักที่เป็นอันตรายบางประเภทในเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ [13] ส่งผลให้มีการวิจัยเพื่อพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วเพื่อนำมาใช้ทดแทนโลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมของตะกั่วที่ใช้อยู่ [10]

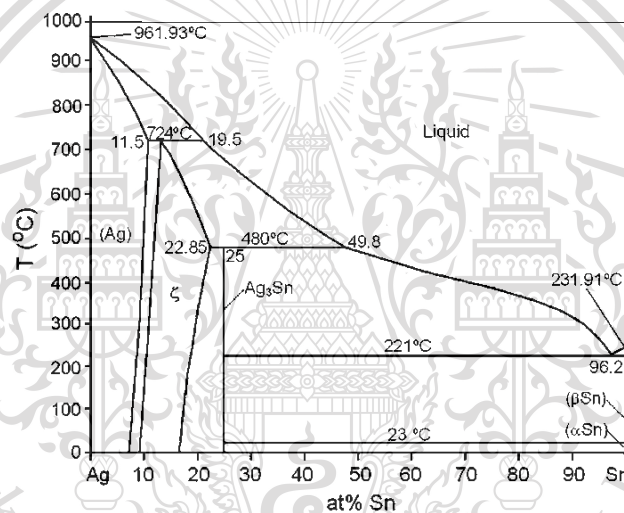
โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วมีด้วยกันหลายชนิด ซึ่งมี Sn เป็นตัวพื้นฐานสำหรับการนำมาทำเป็นส่วนประกอบของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว โดยดีบุกมีความสามารถในการเปียกและแพร่กระจายได้ในอัตราที่กว้างบนแผ่นรองจึงนิยมนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ตัวอย่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่สำคัญ [14] มีดังนี้

1. โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-Zn ซึ่งมีส่วนผสมที่น่าสนใจคือ Sn-9Zn อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ที่ 198 °C ซึ่งเมื่อเทียบแล้วใกล้เคียงกับจุดยูเทคติกของตะกั่วบัดกรี

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

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

- โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-Cu ส่วนประกอบที่เป็นยูเทคติกคือ Sn-0.7Cu มีอุณหภูมิยูเทคติกอยู่ที่ 227 °C และโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟส Cu_6Sn_5
- โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-Bi ส่วนประกอบที่เป็นยูเทคติกคือ 42Sn-58Bi มีอุณหภูมิยูเทคติกต่ำถึง 139 °C
- โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-Ag ส่วนประกอบที่เป็นยูเทคติกคือ Sn-3.5Ag มีอุณหภูมิยูเทคติกอยู่ที่ 221 °C (ดังแสดงในรูปที่ 2.1) และโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟส Ag_3Sn
- โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-In มีส่วนประกอบพื้นฐานคือ In-48Sn และส่วนประกอบที่เป็นยูเทคติกคือ In-49.1Sn มีอุณหภูมิยูเทคติกอยู่ที่ 117 °C



รูปที่ 2.1 เฟสไดอะแกรมของ Sn-Ag [15]

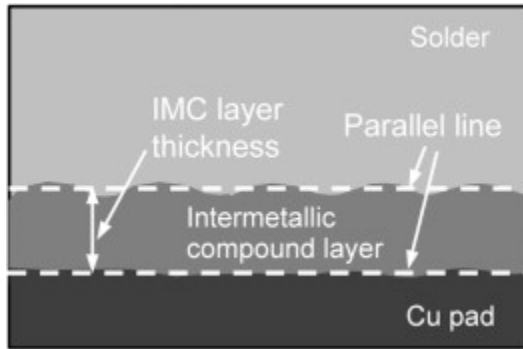
2.2 ชั้นของสารประกอบเชิงโลหะ

ในกระบวนการบัดกรีจะเกิดชั้นของสารประกอบเชิงโลหะขึ้นระหว่างแผ่นรองกับโลหะบัดกรี (ดังแสดงในรูปที่ 2.2) ซึ่งชั้นของความหนาที่เกิดมากเกินไปส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยบัดกรีที่ลดลง โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อชั้นความหนาของสารประกอบเชิงโลหะมี 2 ปัจจัยหลักคือ เวลาและอุณหภูมิ [5] เมื่อปัจจัยดังกล่าวเพิ่มขึ้นชั้นความหนาก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

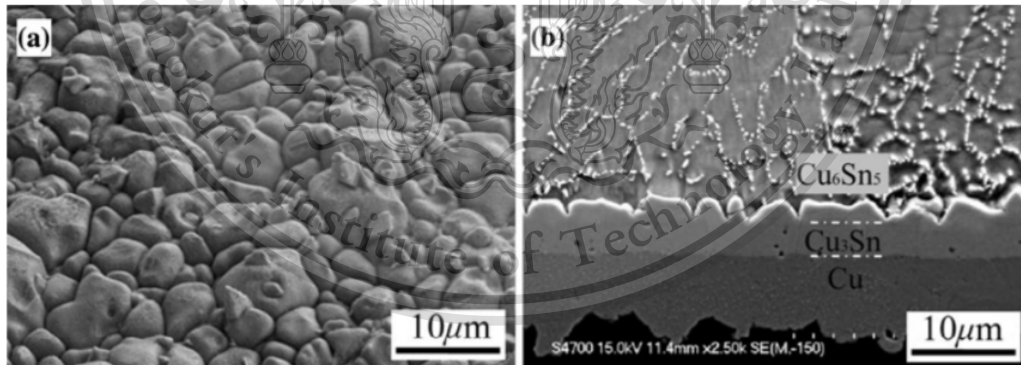
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.2 ลักษณะการเกิดขึ้นของสารประกอบเชิงโลหะ [16]

นอกจากนี้สิ่งที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยบัดกรีอาจเกิดจากรูปร่างที่แตกต่างกันของชั้นสารประกอบเชิงโลหะด้วย รูปร่างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ [3] มีดังนี้

1. Layer-type หรือลักษณะเรียบ หากเกิดในปริมาณมากแสดงถึงการเชื่อมประสานที่ไม่ดี เนื่องจากรูปร่างแบบนี้จะทำให้รอยบัดกรีมีความแข็งแรงต่ำที่สุด
2. Scallop-type หรือลักษณะคล้ายกันหอย (ดังแสดงในรูปที่ 2.3) มีการเชื่อมประสานระหว่างแผ่นรองกับโลหะบัดกรีที่ดีกว่าลักษณะเรียบ เนื่องจากความแข็งแรงของรอยบัดกรีมีมากกว่าแบบแรก



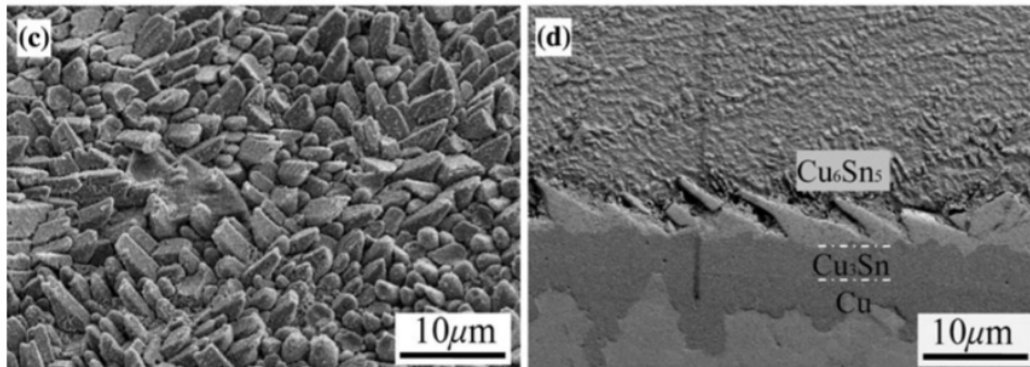
รูปที่ 2.3 รูปร่าง IMC ลักษณะกันหอยด้านบน (ซ้าย) และภาพตัดขวาง (ขวา) [3]

3. Prism-type หรือลักษณะเป็นแท่ง (ดังแสดงในรูปที่ 2.4) การประสานกันระหว่างแผ่นรองกับโลหะบัดกรีที่มีพื้นที่การขยายตัวกว้าง รูปร่างนี้ทำให้รอยบัดกรีที่เกิดขึ้นมีความแข็งแรงมากกว่าแบบอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 2.4 รูปร่าง IMC ลักษณะเป็นแท่งด้านบน (ซ้าย) และภาพตัดขวาง (ขวา) [3]

2.3 ความเค้นและความเค้นตกค้าง

ความเค้นเป็นแรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่เนื่องจากความไม่เหมาะสมทางปฏิบัติและความยากในการวัดค่านี้ เราจึงมักจะพูดถึงความเค้นในรูปของแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ด้วยเหตุผลที่ว่าแรงกระทำภายนอกมีความสอดคล้องกับแรงต้านทานภายใน [17]

ความเค้นตกค้างเป็นความเค้นที่คงเหลือในชิ้นงานแม้ในยามที่ชิ้นงานนั้นไม่ถูกแรงภายนอกมากระทำ ความเค้นตกค้างเกิดจากความไม่สม่ำเสมอในการเปลี่ยนไปแบบพลาสติก (Plastic Deformation) เช่น การขึ้นรูปโลหะ (Metal Working) ทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักภายในซึ่งไม่สามารถตรวจสอบได้ด้วยการมอง [18] ความเค้นตกค้างเกิดได้จาก 3 สาเหตุ [19] ได้แก่

1. ภาระทางกลภายนอก (Applied Mechanical Load)
2. การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Thermal Residual Stress)
3. การเปลี่ยนแปลงเฟสของวัสดุ (Phase Transformation)

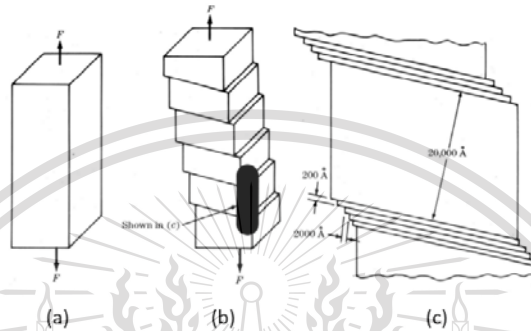
ความเค้นตกค้างสามารถหาได้ทั้งจากการทดสอบแบบทำลายและไม่ทำลาย หรือจากการคำนวณ โดยทั่วไปการทดสอบหาค่าปริมาณความเค้นตกค้างจะเป็นการทดสอบแบบทำลาย การทดสอบแบบไม่ทำลายในการหาค่าความเค้นตกค้างนั้นสามารถหาได้จากเทคนิคการกระจายของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction Technique) ซึ่งยากและใช้เวลานานกว่าการทดสอบแบบทำลาย

2.4 การเสียรูปถาวร

การเสียรูปถาวร (Plastic Deformation) เป็นการเลื่อนของจุดบกพร่องต่าง ๆ ในโครงสร้างผลึกของวัสดุที่เรียกว่า ดิสโลเคชัน (Dislocation) ซึ่งเกิดขึ้นในโลหะทุกชนิด การเปลี่ยนตำแหน่งของพันธะระหว่างอะตอมเป็นเหตุให้เกิดการเสียรูปถาวรมากกว่าการเกิดการแตกร้าวของโลหะ การเสียรูปถาวรจะเกิดขึ้นเมื่อโลหะรับแรงเกินแรงยึดเหนี่ยวของพันธะระหว่างอะตอม [20]

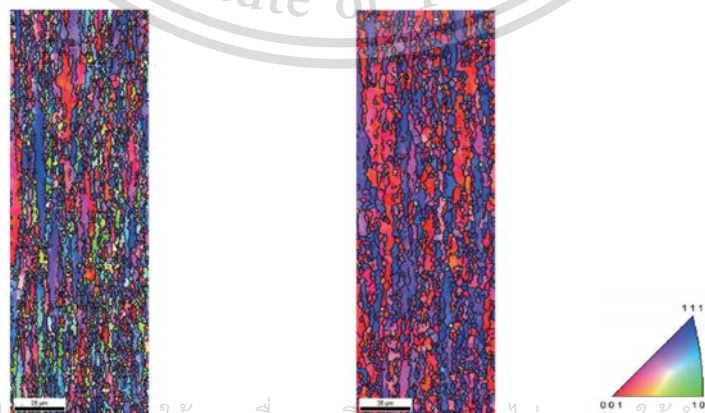
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

ในผลึกเดี่ยวของโลหะ FCC ซึ่งเหนียว เช่น ทองแดงและอะลูมิเนียม การเลื่อนเกิดขึ้นในลักษณะหลายระนาบเสมือนกับการเกิดเป็นรูปแบบของแถบการเลื่อนซ้ำ ๆ กันบนพื้นผิวของโลหะเมื่อโลหะเกิดการเสียรูปเป็นรูปแบบเดียวกันเป็นจำนวนมาก หากสังเกตพื้นผิวของโลหะที่เกิดการเลื่อนให้ใกล้ยิ่งขึ้นด้วยกำลังขยายสูง ๆ พบว่าการเลื่อนที่เกิดขึ้นบนหลาย ๆ ระนาบการเลื่อนเหล่านั้นด้วยแถบการเลื่อน (ดังแสดงในรูปที่ 2.5) [20]



รูปที่ 2.5 การเกิดแถบการเลื่อนระหว่างการเสียรูปถาวรภาพผลึกเดี่ยวภายใต้แรงเค้นดึง (a) แถบการเลื่อนเกิดขึ้นหลังจากแรงกระทำเกินแรงเค้นจำนน (Yield Stress) (b) ภาพขยายรูปการเคลื่อนจำนวนมากในระนาบ (c) [20]

การเลื่อนไถล (Slip) ของระนาบ (Plane) ในการเสียรูปถาวรนั้นส่งผลต่อโลหะหลายผลึก เช่น การเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวเหล็กกล้าก่อนและหลังการรีด (ดังแสดงในรูปที่ 2.6) [21] เหล็กกล้ามีการเปลี่ยนแปลงของผลึกไปในทิศทางที่ใกล้เคียงกันหลังการรีด โลหะที่เสียรูปถาวรจึงมีคุณสมบัติบางประการเปลี่ยนไป โดยมีคุณสมบัติพึงพาทิศทาง (Anisotropy) มากกว่าก่อนการเสียรูปถาวร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 2.6 พื้นผิวเหล็กกล้าก่อน (ซ้าย) และหลัง (กลาง) การรีด (ขวา) แสดงทิศทางการนำพาไปใช้ร่วมกับ IPF แสดงทิศทางที่ปรากฏ (ขวา) [21]

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

2.5 การแพร่

การแพร่เข้าทำปฏิกิริยาของอะตอมโลหะบัดกรีกับแผ่นรองทองแดงบริสุทธิ์ทำให้เกิดสารประกอบเชิงโลหะขึ้น การแพร่มีทั้งการแพร่ในของแข็งและของเหลว ซึ่งปัจจัยที่ทำให้เกิดการแพร่มีหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น การเคลื่อนที่ของดีสโลเคชัน การแพร่จากความเค้น การแพร่ที่เกิดจากอุณหภูมิ และการแพร่ที่เกิดจากสนามไฟฟ้า โดยสมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นที่นิยมสำหรับการแพร่ของสสารในวัสดุ คือ กฎการแพร่ของฟิค (Fick) มีทั้งสิ้นสองข้อด้วยกัน สามารถนำไปใช้กับปัญหาการแพร่ได้ในทุกสถานะของวัสดุ ทั้งของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ประกอบด้วยสมการดังต่อไปนี้ [22]

กฎข้อที่ 1 ของฟิค (Fick's First Law) เกี่ยวข้องกับการแพร่ของสสารภายใต้สถานะคงที่ (Steady-State Diffusion) หรือ $\partial c_i / \partial t = 0$ คือความเข้มข้นของการแพร่ไม่แตกต่างกันตามเวลา กฎข้อที่ 1 ใน 1 มิติ (ในแนวแกนเดียว) (แสดงดังสมการที่ 2.1) [22]

$$J_i = -D_i \frac{\partial c_i}{\partial x} \quad (2.1)$$

เมื่อ J_i คือฟลักซ์ ชนิด i , D_i คือการแพร่ของ i ซึ่งขึ้นอยู่กับทั้งธรรมชาติของ i และตัวกลางที่แพร่ และ $\partial c_i / \partial x$ คือความเข้มข้นของ i (Concentration Gradient)

กฎข้อที่ 1 บ่งชี้ว่าฟลักซ์ของการแพร่ i เป็นสัดส่วนกับความต่างของความเข้มข้นและแสดงถึงแนวคิดพื้นฐานที่มีแนวโน้มของการไหลลงจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปสู่ความเข้มข้นต่ำ นอกจากนี้ยังระบุว่าอัตราของการแพร่ขึ้นอยู่กับขนาดของการแพร่กับความชันของความต่างของความเข้มข้นการแพร่และความชันที่มากกว่าความต่างของความเข้มข้นจะนำไปสู่ขนาดของฟลักซ์ที่ใหญ่ขึ้น

กฎข้อที่ 2 ของฟิค (Fick's Second Law) เกี่ยวข้องกับการแพร่ของสสารภายใต้เงื่อนไขชั่วคราว (Transient Diffusion) หรือ $\partial c_i / \partial t \neq 0$ คือความเข้มข้นที่แพร่ออกไปนั้นมีความแตกต่างกันตามเวลา (ขึ้นอยู่กับเวลา) (แสดงดังสมการที่ 2.2) [22]

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = D_i \frac{\partial^2 c_i}{\partial x^2} \quad (2.2)$$

เมื่อ $\partial c_i / \partial t$ คือความเข้มข้นของ i ตามเวลา สามารถใช้กฎข้อที่ 2 ของ Fick ในการสังเกตสถานะการแพร่แบบไม่คงที่ภายใต้เงื่อนไข $D \neq f(c)$ แสดงให้เห็นว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของความต่างของความเข้มข้นเป็นสัดส่วนกับความโค้ง บริเวณที่มีความโค้งสูงจะมีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว ขณะที่บริเวณที่มีความ

เอกสารนี้โค้งต่ำจะพัฒนาช้าลง นอกจากนี้ยังระบุว่าการแพร่จะสะสมในบริเวณที่มีความเข้มข้นมีความโค้งในเชิงบวก (เว้าขึ้น) ขณะที่การแพร่จะกระจายออกจากบริเวณที่มีความเข้มข้นเป็นลบ (เว้าลง) ดังนั้น กฎข้อที่ 2 นี้คาดว่าจะความเข้มข้นที่เกิดขึ้นอย่างฉับพลันมีแนวโน้มที่จะราบเรียบตามเวลา

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

2.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ใช้หลักการทำงาน (ดังแสดงในรูปที่ 2.7) โดยจะมีส่วนบนสุดเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่เรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน (Electron Gun) ซึ่งอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงตามแนวตั้งที่มีสภาพเป็นสุญญากาศด้วยความต่างศักย์แรง ส่วนทิศทางการเคลื่อนที่จะถูกควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Lens) และปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยแอฟเพอร์เจอร์ (Aperture) หรือช่องเปิด ส่วนถัดมาเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรกเรียกว่า เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser Lens) เป็นเลนส์ที่มีความสำคัญที่สุด เนื่องจากทำหน้าที่บีบอิเล็กตรอนที่วิ่งลงมาจากแหล่งกำเนิดให้เป็นลำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กกลง และส่วนเลนส์ชุดสุดท้ายเรียกว่า เลนส์วัตถุ (Objective Lens) ทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอน (Electron Beam) ให้ไปตกบนผิวชิ้นงานโดยมีสแกนคอยล์ (Scan Coil) ทำหน้าที่กราดอิเล็กตรอนไปบนผิวชิ้นงาน ซึ่งผิวชิ้นงานบริเวณที่ถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอนจะเกิดสัญญาณ (Signal) และจะมีอุปกรณ์ในการตรวจจับสัญญาณ (Detector) แล้วส่งไปประมวลผลเป็นภาพบนจอภาพต่อไป [23]



รูปที่ 2.7 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [23]

ตัวอย่างสัญญาณที่เกิดขึ้น ได้แก่ อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electrons: SE) ให้ข้อมูลลักษณะของพื้นผิวชิ้นงานถูกนำมาใช้สร้างภาพมากที่สุดภาพที่ได้จากสัญญาณชนิดนี้เรียกว่า ภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Image: SEI) และอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back Scattered Electrons: BSE) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนประกอบทางเคมีบนผิวชิ้นงานแสดงลักษณะสูงต่ำของพื้นผิวชิ้นงาน [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

2.7 เทคนิคการตรวจจําับการแทรกสอดอิเล็กตรอน

เทคนิคการตรวจจําับการแทรกสอดอิเล็กตรอน (Electron Back-Scattered Diffraction: EBSD) เป็นเทคนิคที่ใช้ศึกษาทิศทางการวางตัวของผลึก (Crystallographic Orientation) ในวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นผลึก โดยมีหลักการคือ ลำอิเล็กตรอนที่ยิงมาจากกล้อง SEM จะถูกเลี้ยวเบน (Diffracted) โดยระนาบของผลึกและไปตกกระทบบนจอฟอสเฟอร์แล้วเกิดเป็นแถบลาดลายขึ้น ซึ่งมีชื่อ ว่าแถบคิกูชิ (ดังแสดงในรูปที่ 2.8) ซึ่งในแต่ละระนาบของอะตอมในวัสดุก็จะให้แถบคิกูชิออกมา มันจะบ่งบอกถึงลักษณะโครงสร้างผลึก (Crystalline Structure) และทิศทางการวางตัวของผลึก [24]



รูปที่ 2.8 การเกิดแถบคิกูชิ [24]

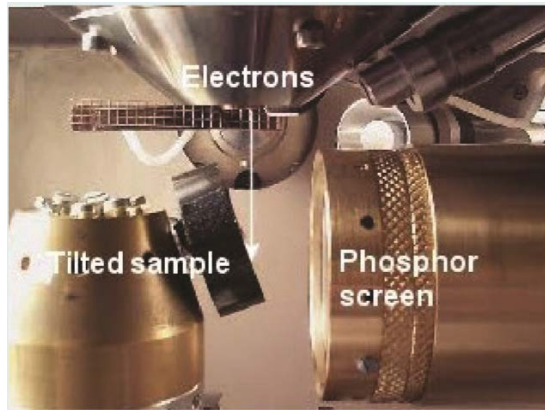
อุปกรณ์ที่จําเป็นสำหรับเทคนิค EBSD คือ กล้อง SEM ที่มีชุดอุปกรณ์ EBSD ติดตั้งอยู่ (ดังแสดงในรูปที่ 2.9) โดยชุดอุปกรณ์ EBSD ประกอบด้วย

1. จอฟอสเฟอร์ที่ทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนที่ถูกเลี้ยวเบนจนทำให้เกิดภาพของแถบคิกูชิ
2. กล้องที่วางในแนวระดับทำหน้าที่บันทึกภาพแถบคิกูชิบนจอฟอสเฟอร์และส่งไปให้คอมพิวเตอร์ในการประมวลผล เพื่อบ่งบอกถึงลักษณะโครงสร้างผลึกและทิศทางการวางตัวของผลึก ตัวอย่างเช่น การประมวลผลเพื่อบอกทิศทางการวางตัวของแต่ละระนาบผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 2.9 ชุดอุปกรณ์ EBSD บนกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [24]

2.8 เทคนิคตรวจจับสัญญาณเอกซเรย์

เทคนิคตรวจจับสัญญาณเอกซเรย์ (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy: EDS/EDX) เป็นเทคนิคที่ใช้แยกแยะสัญญาณเอกซเรย์ลักษณะเฉพาะ (Characteristic X-rays) ของธาตุที่แตกต่างกันด้วยสเปกตรัมเชิงพลังงานควบคู่กับการใช้ซอฟต์แวร์ประมวลผลสัญญาณที่ได้ทำให้หาธาตุที่เป็นส่วนผสมของชิ้นงานได้ และนอกจากจะสามารถวิเคราะห์ธาตุในเชิงคุณภาพ (Qualitative Element Analysis) ว่าตัวอย่างที่ต้องการศึกษามีธาตุชนิดใดประกอบอยู่ได้แล้ว ยังสามารถวิเคราะห์ธาตุเชิงกึ่งปริมาณ (Semi-quantitative Element Analysis) ซึ่งสามารถบอก % การมีอยู่ของธาตุที่วิเคราะห์ได้อีกด้วย แต่ความแม่นยำจะขึ้นอยู่กับวิธีการและชิ้นงานมาตรฐานที่ใช้ [25]

สำหรับการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์แบบ EDS สามารถวิเคราะห์ได้ 3 วิธี [26] ดังนี้

1. Point Analysis เป็นการวิเคราะห์ที่ให้ค่าของอิเล็กตรอนกระทบอยู่หนึ่งบนพื้นผิวของตัวอย่างตรงจุดที่ต้องการวิเคราะห์เพื่อวัดค่าปริมาณรังสีเอกซ์เฉพาะจุดที่ต้องการ
2. Line Scan Analysis เป็นการวิเคราะห์โดยใช้ลำอิเล็กตรอนส่องกราดตามแนวบนตัวอย่างตรงตำแหน่งที่สนใจ ซึ่งนิยมใช้ในกรณีหาขอบเขตของรอยต่อหรือเฟสของโครงสร้าง
3. Mapping Analysis ซึ่งเป็นการวิเคราะห์โดยใช้ลำอิเล็กตรอนส่องกราดบนพื้นผิวตัวอย่าง ซึ่งภาพที่ได้จากการวิเคราะห์จะเป็นภาพแสดงลักษณะการกระจายของธาตุนั้น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของวิธีการดำเนินงานในการศึกษาอิทธิพลของความเค้นตกค้างในแผ่นทองแดงต่อความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีชนิดไร้สารตะกั่ว Sn3.5Ag โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานหลักเป็นการเตรียมชิ้นงานและการวิเคราะห์ชิ้นงาน ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

1. การเตรียมวัสดุ
2. การตัดชิ้นงาน
3. การตัดชิ้นงาน
4. การบัดกรีแบบจุ่ม
5. การขึ้นเรือน
6. การขัดหยาบ
7. การขัดละเอียด
8. การกัดผิวหน้าด้วยไอออน
9. การใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง
10. การใช้ชุดอุปกรณ์วิเคราะห์การเรียงตัวของผลึก

3.1 เตรียมชิ้นงานตัวอย่าง

3.1.1 การเตรียมวัสดุ (Materials Preparation)

แผ่นรองทองแดงความหนา $70\ \mu\text{m}$ ขึ้นรูปด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า (Electrodeposition) เนื่องจากแผ่นทองแดงขนาด $70\ \mu\text{m}$ เป็นที่นิยมในท้องตลาดและใช้อย่างแพร่หลายในทุกขนาดความหนาของแผ่นวงจร และใช้โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบแท่งชนิดดีบุกเงิน (Sn3.5Ag) ซึ่งเป็นโลหะบัดกรีที่ง่ายต่อการทดลองเนื่องจากแผ่นรองที่ใช้เป็นแผ่นรองทองแดง เมื่อเกิดการแพร่หลังจากการบัดกรีแล้วจะทำให้สังเกตเห็นการแพร่ของธาตุแต่ละตัวได้ชัดเจนขึ้นเพื่อบัดกรีชิ้นงานแบบจุ่มต่อไป

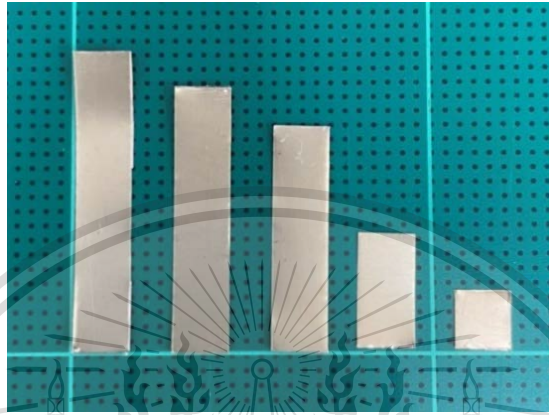
3.1.2 การตัดชิ้นงาน (Sectioning)

ตัดแผ่นทองแดงเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความกว้างเป็น 8 mm ความยาวตามอัตราส่วนรัศมีความเอกสารถือเป็นเอกสารทบทวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนงานวิชาการ
โค้งที่ต้องการตัด (ดังแสดงในรูปที่ 3.1) โดยใช้ความยาว 15.8 mm, 31.4 mm, 37.0 mm และ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

41.8 mm สำหรับรัศมีมีความโค้ง 5 mm, 10 mm, 15 mm และ 20 mm ตามลำดับ สำหรับแผ่นทองแดงตรง (รัศมี ∞) ตัดชิ้นงานให้มีขนาดกว้าง 8 mm และยาว 15 mm รวมทั้งสิ้น 5 ชิ้น จัดทำไว้สองชุดเพื่อใช้เปรียบเทียบผลก่อนและหลังการบัดกรีแบบจุ่ม



รูปที่ 3.1 การตัดชิ้นงานตามขนาด 5 ชิ้น

3.1.3 การตัดชิ้นงาน (Bending)

ตัดแผ่นทองแดงด้วยแม่พิมพ์ที่จัดทำขึ้น โดย Die เป็นดินน้ำมันไร้สารเป็นลูกบาศก์ความหนา 40 mm และกลึงแท่งเหล็กเป็น Punch ขนาดต่าง ๆ เพื่อตัดให้ได้รัศมี 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm และ ∞ ตามที่ต้องการศึกษา (ดังแสดงในรูปที่ 3.2)



รูปที่ 3.2 ชิ้นงานตัวอย่างตัดรัศมี 20 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีอันนำไปใช้

โดยได้รับรัศมีจริงหลังการตัดชิ้นงานทั้ง 2 ชุด วัดด้วยโปรแกรม SolidWorks ตามตาราง ดังนี้

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

ตารางที่ 3.1 รัศมีจริงหลังการตัดชิ้นงานทั้ง 2 ชุด

รัศมีที่ต้องการ (mm)	รัศมีที่ได้ชุดที่ 1 สำหรับชิ้นงานก่อนการบัดกรี (mm)	รัศมีที่ได้ชุดที่ 2 สำหรับชิ้นงานหลังการบัดกรี (mm)
5	4.79	4.56
10	10.38	9.93
15	14.12	14.30
20	20.14	20.27

3.1.4 การบัดกรีแบบจุ่ม (Dip Soldering)

ทำการบัดกรีแบบจุ่ม (Dip Soldering) โดยนำแท่งโลหะบัดกรีชนิดไร้สารตะกั่ว Sn3.5Ag ใส่ในเครื่องหลอมละลาย เมื่อโลหะบัดกรีละลายจนมีลักษณะเป็นของเหลวแล้ว นำแผ่นทองแดงที่จัดเตรียมไว้จุ่มลงในฟลักซ์ (Flux) ชนิด KK#IH 4 เพื่อเคลือบผิวให้โลหะบัดกรีเกาะติดชิ้นงานได้มากยิ่งขึ้น จากนั้นจุ่มแผ่นทองแดงลงในเครื่องหลอมขณะที่โลหะบัดกรีมีอุณหภูมิ 261 °C เป็นระยะเวลา 5 วินาที ตามมาตรฐาน NIST [27] แล้วรอให้ชิ้นงานเย็นตัวลง ทำจนครบ 5 ชิ้นด้วยกัน

3.1.5 การขึ้นเรือน (Mounting)

ทำการขึ้นเรือนแบบเย็น (Cold Mounting) โดยวางชิ้นงานลงในเบ้าหลอม แล้วผสมเรซินอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่ออีพ็อกซี (Epoxy) เป็น 1:5 เทลงในเบ้าหลอม จากนั้นรอจนเรซินแข็งตัว และตัดให้แบบหล่อมีขนาดกว้าง 20 mm ยาว 10 mm และสูง 10 mm (ดังแสดงในรูปที่ 3.3) เพื่อทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบด้วยเทคนิค EBSD ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่ข้อมูลใดๆที่ปรากฏในเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.3 ตัวอย่างชิ้นงานหลังการขึ้นเรือนแบบเย็น

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

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

3.1.6 การขัดหยาบ (Grinding)

นำชิ้นงานไปขัดกับเครื่องขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเพื่อปรับผิวให้เรียบ โดยเริ่มขัดจากกระดาษทรายเบอร์หยาบไปละเอียด 800, 1200, 2000 และ 4000 ตามลำดับ ซึ่งในการขัดกระดาษทรายแต่ละเบอร์ให้ขัดไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อเปลี่ยนเบอร์ละเอียดขึ้นให้ขัดตามแนวขวางกับรอยขัดเดิมจนกระทั่งลบรอยเดิมออกหมด

3.1.7 การขัดละเอียด (Polishing)

ขัดชิ้นงานบนจานหมุนคลุมด้วยผ้าสักหลาด โดยใช้ผงอะลูมินาขนาด $1\ \mu\text{m}$ และ $0.3\ \mu\text{m}$ ผสมกับน้ำให้มีลักษณะเป็นเนื้อครีม เมื่อขัดจนชิ้นงานเงาแล้วจึงนำไปล้างน้ำและเอทิลแอลกอฮอล์ จากนั้นเป่าด้วยเครื่องเป่าลมร้อนจนแห้ง

3.1.8 การกัดผิวหน้าด้วยไอออน (Ion Milling)

ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EBSD หากต้องการแถบคิกซ์ที่ชัดเจนจำเป็นต้องเตรียมผิวหน้าของชิ้นงานให้มีความเรียบยิ่งขึ้นเพื่อลดความเป็นอัญฐานบนชิ้นงานภายหลังจากขัดด้วยผงอะลูมินาขนาด $0.3\ \mu\text{m}$ ต้องทำการกัดผิวหน้าด้วยไอออน (ดังแสดงในรูปที่ 3.4) ที่ความเร็ว 25 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที เนื่องจากเวลาและมุมในการกัดผิวหน้ามีผลต่อคุณภาพของภาพที่ได้ [28] จึงจำเป็นต้องเลือกใช้เวลาที่ให้คุณภาพของภาพที่ดีที่สุด



รูปที่ 3.4 ชิ้นงานรัศมี 15 mm หลังผ่านการกัดผิวหน้าด้วยไอออน (กำลังขยาย 100X)

3.2 วิเคราะห์ผลทดสอบ

การวิเคราะห์ผลการทดสอบแบ่งออกเป็นสองช่วงด้วยกันคือก่อนการบัดกรีและหลังการบัดกรี สำหรับศึกษาผลก่อนการบัดกรีเปรียบเทียบกับหลังการบัดกรี โดยใช้เทคนิค EBSD ทั้งสองช่วง กรณีก่อนการบัดกรีศึกษาทิศทางการวางตัวของผลึกหลังการเสียรูป และกรณีหลังการบัดกรีศึกษาสารประกอบเชิงโลหะ

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

ที่เกิดขึ้นในภาพรวม ซึ่งแตกต่างจากการวิเคราะห์สารประกอบเชิงโลหะด้วยเทคนิค EDS เป็นจุดเพื่อวิเคราะห์ธาตุของสารประกอบเชิงโลหะจากกล้อง SEM ซึ่งอาจเจอสารประกอบเชิงโลหะอื่นนอกเหนือจากนั้น

3.2.1 การใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

ใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope: OM) Olympus รุ่น BX53M เพื่อตรวจสอบพื้นผิวของชิ้นงาน และสังเกตชั้นของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรีที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นทองแดงและโลหะบัดกรีเบื้องต้น



รูปที่ 3.5 การส่องดูพื้นผิวชิ้นงานเบื้องต้น

3.2.2 การใช้ชุดอุปกรณ์วิเคราะห์การเรียงตัวของผลึก

กล้อง SEM Hitachi รุ่น SU-8230 ติดตั้งชุดอุปกรณ์ EBSD วิเคราะห์ชิ้นงานตัวอย่างด้วยการใช้ Step 0.5 ระยะเวลาทั้งสิ้น 1 ชั่วโมง 40 นาที พิจารณาเลือก Step จากความละเอียดของภาพและระยะเวลาที่เหมาะสม โดยสัญญาณจากการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนกระเจิงกลับสามารถบอกทิศทางการเรียงตัวของผลึก รวมทั้งลักษณะและขนาดของเกรน เพื่อดูการเรียงตัวของระนาบของชิ้นงาน โดยพิจารณาหลาย ๆ ปัจจัยซึ่งอาจบ่งชี้ถึงความเค้นหรือความเค้นตกค้างภายใน เช่น ทิศทางการเติบโตของเกรน (Grain Growth Direction) ซึ่งสอดคล้องกับทิศทางของความเค้นเฉือนสูงสุด ทำให้อาจจะสามารถหาความเค้นหลักได้จากการคำนวณด้วยวิธีแบบ Mohr's Circle

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

รายละเอียดบทนี้ จะกล่าวถึงผลการดำเนินงาน หลังดำเนินการตามขั้นตอนในบทที่ 3 นำผลที่ได้จากกล้อง SEM ด้วยเทคนิค EBSD ของชุดแผ่นทองแดงก่อนการบัดกรีมาเปรียบเทียบกัน เพื่อหาความเปลี่ยนแปลงของชิ้นงาน โดยอาศัยข้อมูล IPF ความหนาแน่นของรูปแบบทิศทางผลึกหรือ MUD แล้วจึงเปรียบเทียบผลของชุดแผ่นทองแดงหลังผ่านการบัดกรีเปรียบเทียบปริมาณการเกิดของสารประกอบเชิงโลหะ ได้ผลดังนี้

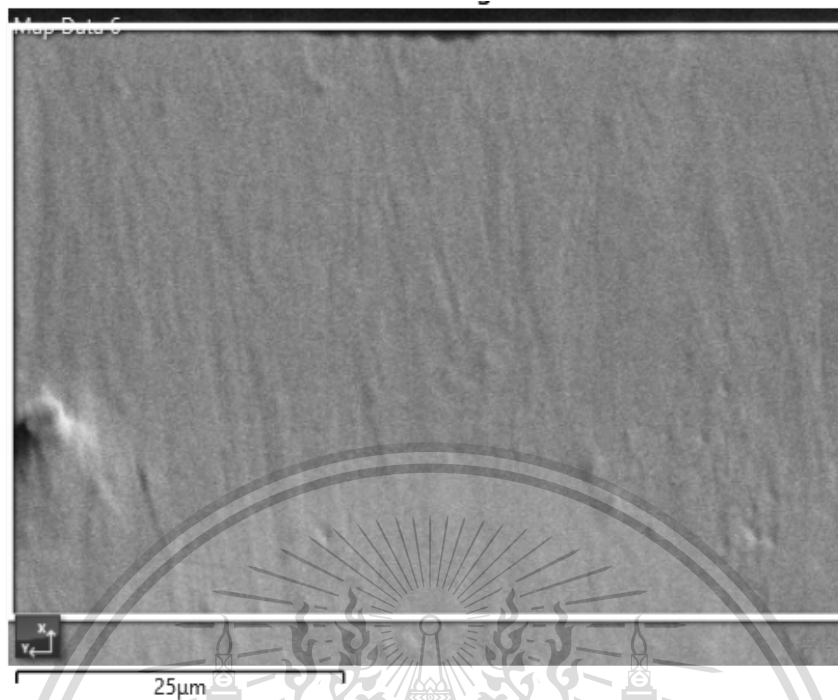
4.1 ผลก่อนการบัดกรี

ส่งชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ดังแสดงในรูปที่ 4.1) แล้ววิเคราะห์ด้วยเทคนิค EBSD ได้ข้อมูลดังต่อไปนี้ Kernel Average Misorientation (KAM), Grain Orientation Spread (GOS), Phase Map, Strain Contouring, Recrystallized Fraction, Maximum Orientation Spread (MOS), Pole Figure, Inverse Pole Figure, Euler Map, Grain Size, Grain Boundaries และ Band Contrast จากข้อมูลดังกล่าวสามารถเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงภายในชิ้นงานแต่ละชิ้นได้โดยอาศัยจากมุมความแตกต่างทางผลึก (Misorientation Angle) ข้อมูลที่บ่งชี้ถึงทิศทางได้ดีที่สุดคือ IPF ซึ่งแสดงทิศทางการวางตัวของอะตอมโดยแสดงออกเป็นสีต่าง ๆ ภาพ IPF แสดงให้เห็นถึงความเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของรูปแบบทิศทางผลึกที่เปลี่ยนไป (ดังแสดงในรูปที่ 4.3) วิเคราะห์จากแนวแกน X ซึ่งตั้งฉากกับพื้นผิวที่ต้องการศึกษา ที่รัศมีความโค้งอนันต์ (แผ่นตรง) MUD ตามแนวแกน X มีความหนาแน่นปานกลางกระจายทุกทิศทาง มีความหนาแน่นน้อยที่ทิศทาง [001] แผ่นทองแดงรัศมีความโค้ง 20 mm เริ่มมี MUD ปานกลางและสูงใกล้เคียงทิศทาง [101] แผ่นทองแดงรัศมีความโค้ง 15 mm มี MUD สูงที่ทิศทาง [101] มีความหนาแน่นปานกลางในทิศทางใกล้เคียง โดยยิ่งชัดเจนมากขึ้นที่ชิ้นงานรัศมีความโค้ง 10 mm และ 5 mm ตามลำดับ หากสร้างภาพจำลองผลึกของทองแดงที่ทิศทาง [101] ขนานตามแนวแกน X (ดังแสดงในรูปที่ 4.4) ด้วยโปรแกรม SolidWorks สามารถเห็นทิศทางการวางตัวของหน่วยเซลล์ (Unit Cell)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างพื้นผิวงานจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด หลังกัดผิวหน้าด้วยไอออน

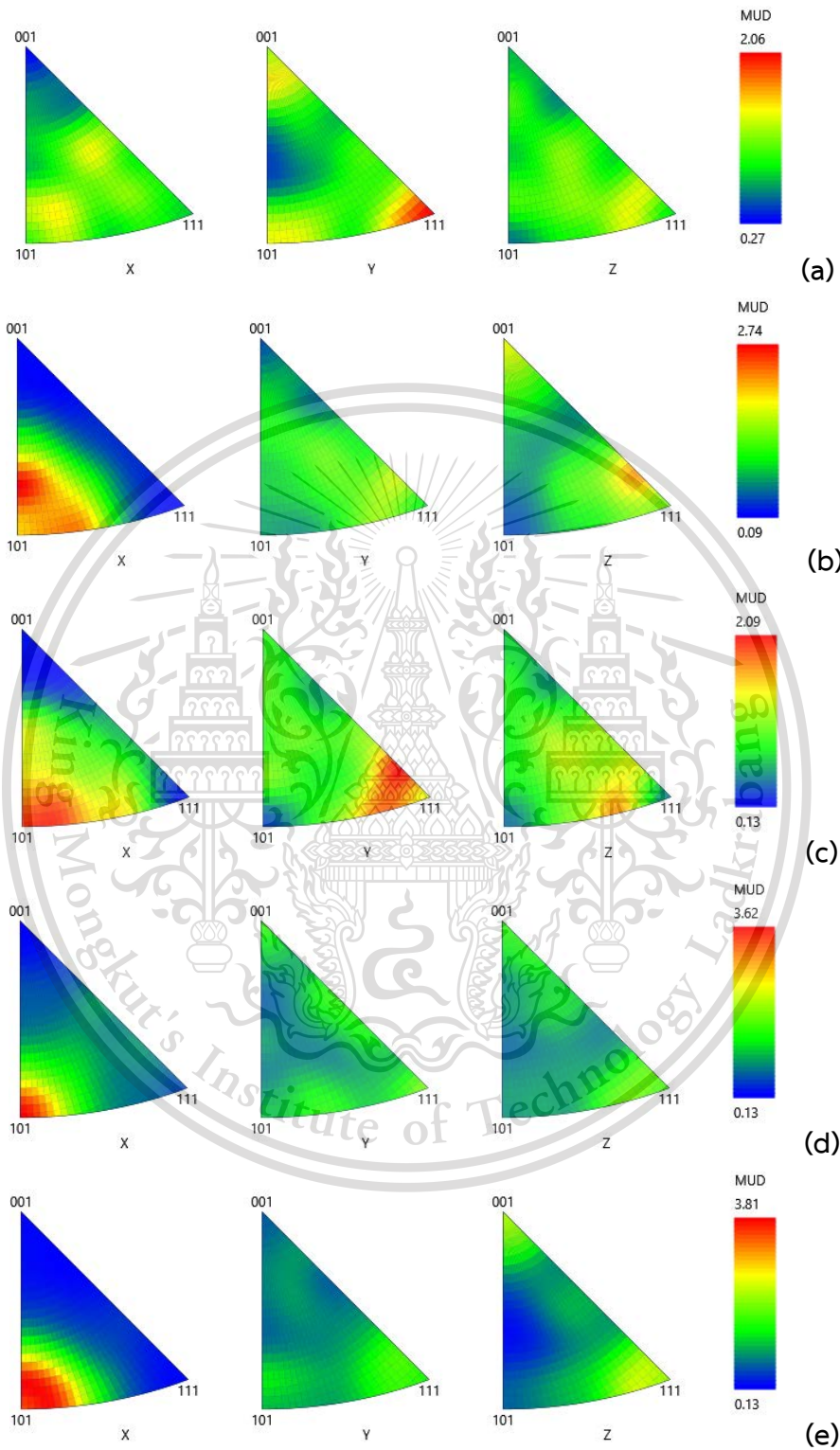


รูปที่ 4.2 Phase map ของชิ้นงานทองแดงโดยสีแดงหมายถึงทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

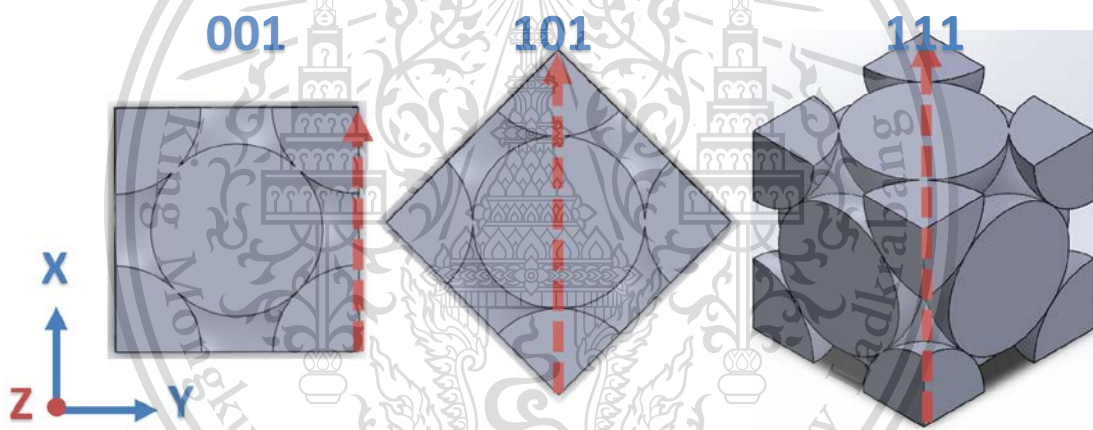
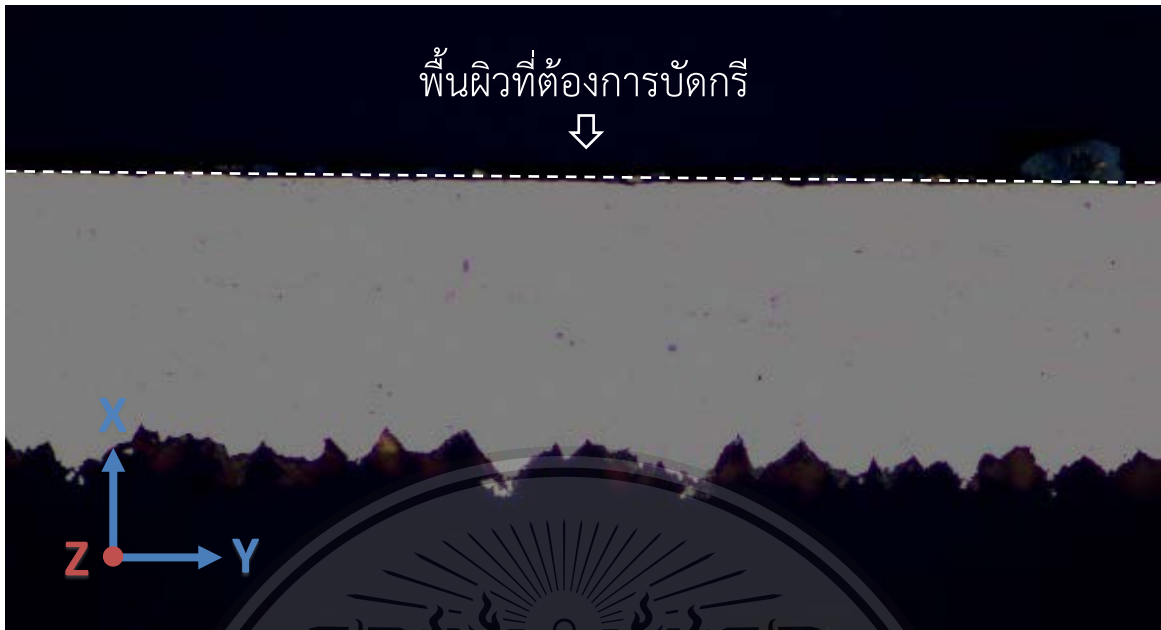
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 4.3 ภาพ IPF ของ $R = \infty$ (a) $R = 20$ (b) $R = 15$ (c) $R = 10$ (d) และ $R = 5$ (e) โยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยอื่นๆที่นำออกไปใช้

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

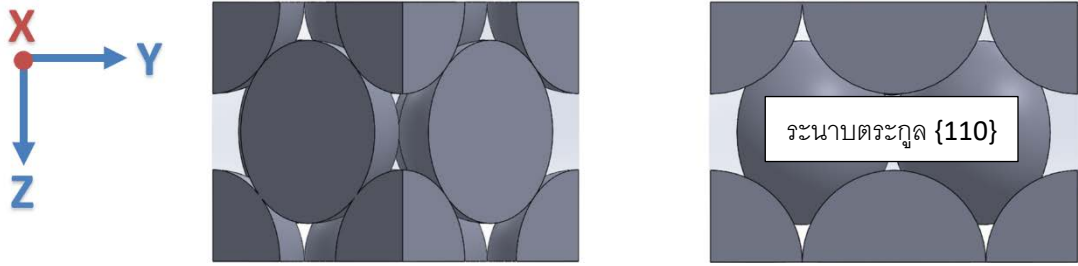


รูปที่ 4.4 ทิศทางของภาพหน้าตัดขวาง (Cross Section) ของแผ่นทองแดง (บน) ภาพจำลอง Face Centered Cubic (FCC) ตามทิศทางทั้งสามขนานกับแกน X (ล่าง)

อะตอมทองแดงซึ่งมีลักษณะแบบ FCC จึงสามารถวิเคราะห์การวางตัวของทิศทางที่มีความหนาแน่นสูงบนพื้นผิวที่จะทำการบัดกรีได้ คือ ทิศทาง $[101]$ ขนานกับแนวแกน X ซึ่งมีแนวโน้มสูงชันอย่างชัดเจน เมื่อจำลองผลึกของอะตอมทองแดง ระนาบที่ขนานกับพื้นผิวที่ต้องการบัดกรี คือ ระนาบตระกูล $\{110\}$ ซึ่งมีความหนาแน่นอะตอมน้อย (Packing Fraction = 0.5554) (ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ขวา) แนวโน้มหลังบัดกรีของแผ่นทองแดงที่เสียรูปมาก (รัศมีความโค้งน้อย) จะเกิดสารประกอบเชิงโลหะน้อยกว่าแผ่นทองแดงที่เสียรูปน้อย (รัศมีความโค้งมาก) เนื่องจากผลึกที่มีทิศทาง $[101]$ มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 4.5 การวางตัวผลึกของทิศทาง [101] (ซ้าย) และระนาบที่ขนานกับพื้นผิว (ขวา) เมื่อจำลองมุมมองตั้งฉากกับพื้นผิวที่จะทำการบัดกรี

ผล IPF นั้นระบุค่า MUD โดยไม่สนใจขนาดเกรนหรือตำแหน่งการวางตัวของผลึก อาจมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลกระทบต่อผลการแพร่ เช่น ขนาดของเกรนในทิศทางอื่น ๆ หรือการกระจายตัวหนาแน่นบริเวณพื้นผิวที่จะทำการบัดกรี ซึ่งต้องศึกษาต่อไปเนื่องจากเป็นข้อมูลเชิงคุณภาพประกอบกับระยะเวลาที่จำกัดในการจัดทำ

4.2 ผลหลังการบัดกรี

คาดการณ์ผลหลังบัดกรีจากการวิเคราะห์ผลก่อนบัดกรีว่ายิ่งเสียรูปมาก ชั้นสารประกอบเชิงโลหะน้อย ลงเนื่องจากค่า MUD ของทิศทาง [101] มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EBSD ของชิ้นงานที่บัดกรีแล้วไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบเชิงโลหะได้เนื่องจากผลดังกล่าวไม่สอดคล้องกับการตรวจจับธาตุด้วยเทคนิค EDS (ดังแสดงในรูปที่ 4.6 – 4.9)

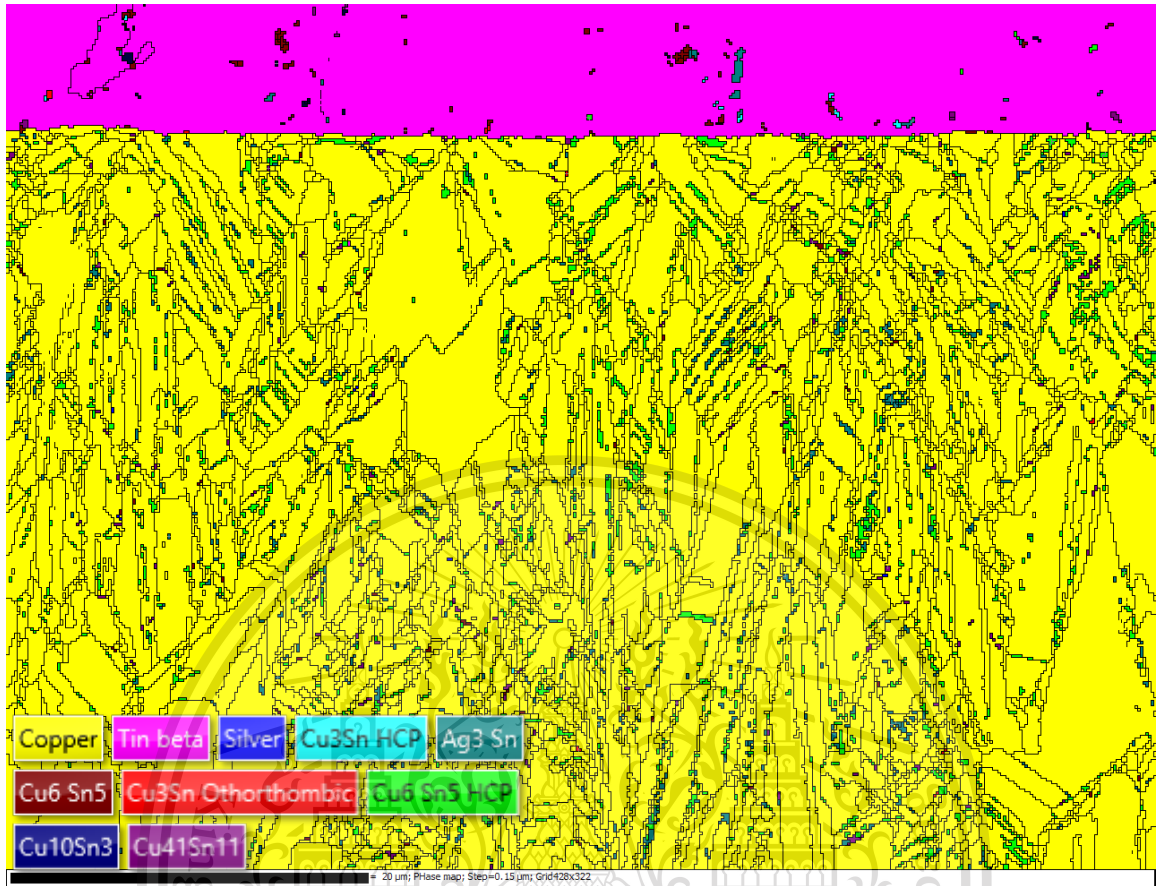


รูปที่ 4.6 EDS ตรวจจับธาตุ Sn (ซ้าย) Ag (กลาง) และ Cu (ขวา) ของชิ้นงาน $R = \infty$ หลังการบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ Phase Map จากเทคนิค EBSD แสดงให้เห็นรูปร่างของโลหะและสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นของชิ้นงาน R = ∞ หลังการบัดกรี

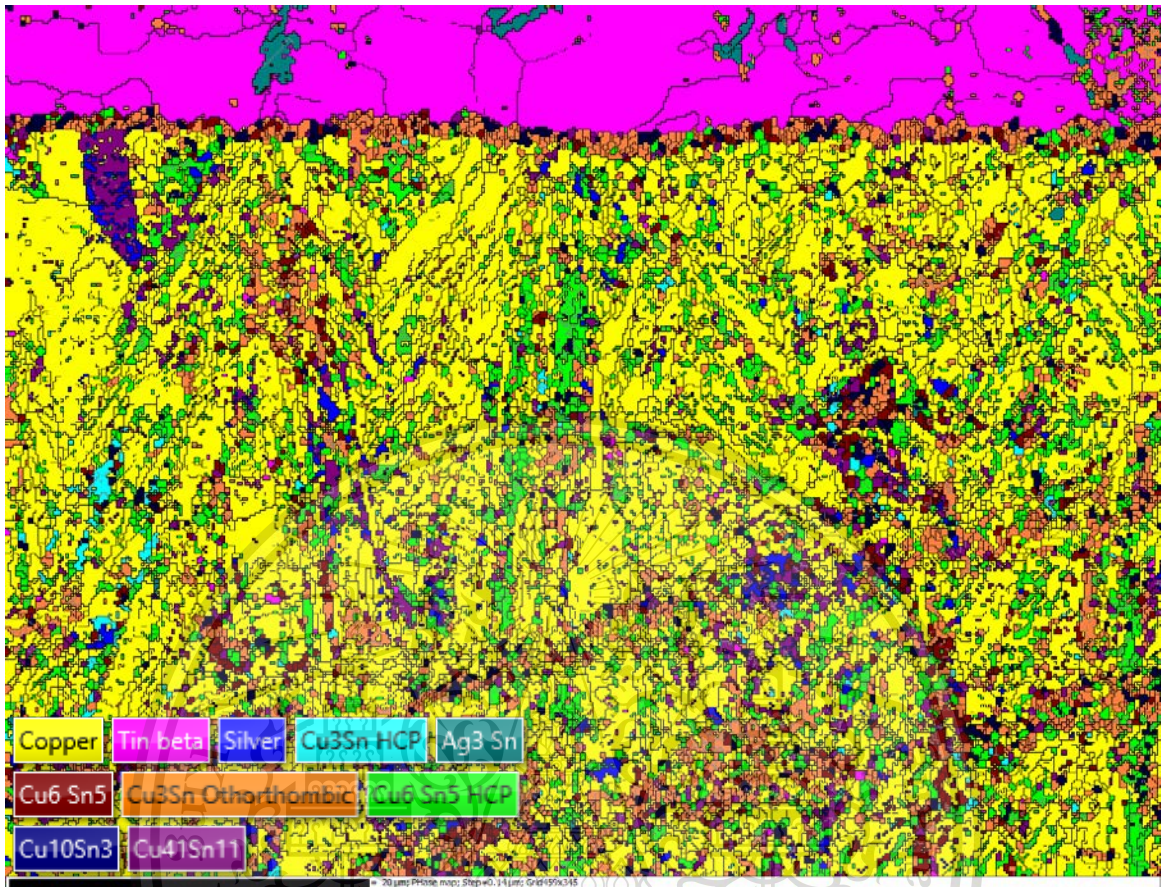


รูปที่ 4.8 EDS ตรวจจับธาตุ Sn (ซ้าย) Ag (กลาง) และ Cu (ขวา) ของชิ้นงาน R = 5 หลังการบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ Phase Map จากเทคนิค EBSD แสดงให้เห็นรูปร่างของโลหะและสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นของชิ้นงาน R = 5 หลังการบัดกรี

ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า Phase Map ของทั้งสองตัวอย่าง ตรวจพบสารประกอบเชิงโลหะซึ่งมีส่วนประกอบของธาตุ Sn และ Ag ในบริเวณที่เป็นธาตุ Cu ซึ่งไม่สอดคล้องกับผลของ EDS ที่ไม่ปรากฏธาตุดังกล่าวในบริเวณนั้น จึงถือได้ว่าไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ผลใด ๆ ได้ เนื่องจากข้อมูลขาดความน่าเชื่อถือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

Forbidden to modify the content, and cite the document when use. 24

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลสรุปของงานวิจัยเรื่อง การศึกษาอิทธิพลของความเค้นตกค้างในแผ่นทองแดงต่อความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีชนิดไร้สารตะกั่ว Sn3.5Ag ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

1. สรุปผลการดำเนินงาน
2. ข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

5.1.1 ก่อนการบัดกรี

ผลการดำเนินงานก่อนการบัดกรีบ่งชี้ถึงความเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนของ MUD จากชุดข้อมูล IPF จึงสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวส่งผลต่อการแพร่ของอะตอมทองแดง

5.1.2 หลังการบัดกรี

หลังการบัดกรีจากการดำเนินงานโดยการวิเคราะห์ชิ้นงานด้วยเทคนิค EBSD จำนวนทั้งสิ้นสองชิ้น ได้แก่ $R = \infty$ และ $R = 5$ เนื่องจากผลกระทบโรคระบาด Covid-19 จึงแก้ไขหรือดำเนินการตามกำหนดการไม่ได้ อย่างไรก็ตามผลการดำเนินการในช่วงก่อนการบัดกรีชี้ให้เห็นแนวโน้มอย่างชัดเจนต่อการเปลี่ยนแปลงทิศทางเนื่องจากการเสียรูป จึงสรุปได้ว่าปัจจัยดังกล่าวส่งผลการแพร่ที่น้อยลงของอะตอมทองแดง

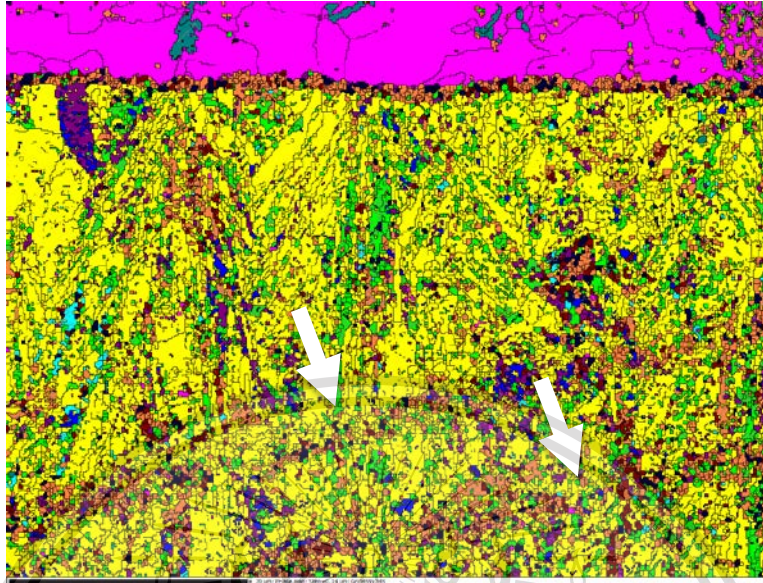
5.2 ข้อเสนอแนะ

ผลการดำเนินงานหลังการบัดกรีซึ่งไม่สอดคล้องกัน จากการสืบค้นมีความเป็นไปได้ 2 ประการด้วยกันประกอบด้วย การเตรียมชิ้นงานที่ไม่ดีเพียงพอ เทคนิค EBSD นั้นตรวจจับการสะท้อนกลับของอิเล็กตรอน การทำความสะอาดผิวหน้าหรือการขัดที่ไม่ดีพออาจทำให้การตรวจจับผิดเพี้ยนได้ (ดังแสดงในรูปที่ 5.1) ประกอบกับความแข็งของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ทองแดง และสังกะสีไม่เท่ากัน จึงทำให้การขัดชิ้นงานให้เรียบแบบชิ้นงานทองแดงล้วนทำได้ยาก ซึ่งมีความเป็นไปได้มากที่สุด

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

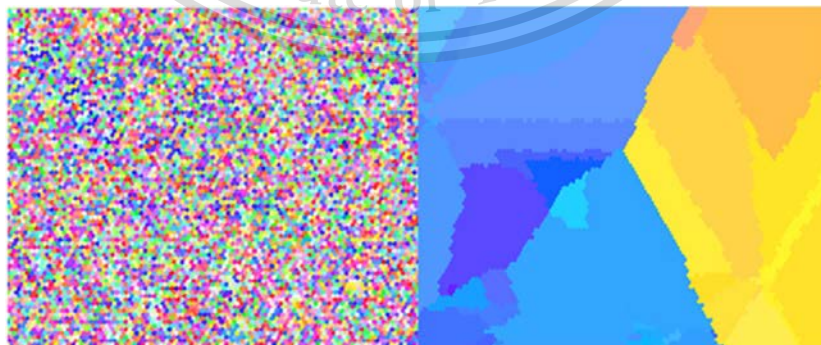
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

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



รูปที่ 5.1 ภาพลูกศรชี้บริเวณที่มีลักษณะคล้ายร่องรอยจากการขัด เป็นแนวตรงยาวของชิ้นงานหลังการขัดกรี R = 5

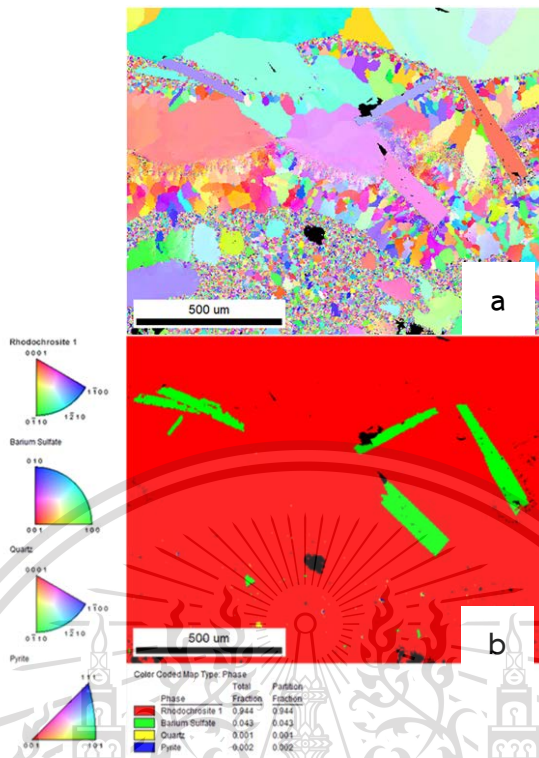
อีกประการหนึ่งคือ ความผิดพลาดในการนำเสนอข้อมูล EBSD [29] เช่น การขยายเกรน (ดังแสดงในรูปที่ 5.2) ซึ่งกระบวนการนี้จะสามารถทำให้เห็นลักษณะเกรนได้ชัดขึ้น และการระบุ Inverse Pole Figure Map (IPF Map) ที่ผิดพลาดมากเกินไปหรือน้อยเกินไป ตัวอย่างก่อนการกำหนด IPF Map (ดังแสดงในรูปที่ 5.3) แสดงให้เห็นข้อมูลที่ยังไม่ระบุและข้อมูลที่ระบุ IPF Map เพื่อแสดงข้อมูลในการนำเสนอที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้น หากทำการล้างข้อมูล (Clean Up) ที่มีความแตกต่างมุมผลึกน้อยโดยไม่คำนึงถึงปัจจัยดังกล่าวอาจทำให้ข้อมูลผิดเพี้ยนได้ ซึ่งนับเป็นความผิดพลาดจากกิจกรรมที่พบได้บ่อยครั้ง



เอกสารนี้รูปที่ 5.2 ภาพที่ยังไม่ได้ขยายเกรนซึ่งมีการรบกวน (Noises) สูง (ซ้าย) ภาพที่ได้หลังการขยายเกรน (ขวา) การคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

Forbidden to modify the content, 26 and cite the document when use.



รูปที่ 5.3 ภาพก่อน (a) และหลัง (b) การระบุ Inverse Pole Figure Map (IPF Map) แสดงให้เห็นว่าก่อนการระบุ IPF Map ไม่สามารถบอกได้ว่าเฟสใดสีใดคือสารประกอบใดบ้าง [29]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

เอกสารอ้างอิง

- [1] G. Yang, D. Yang, L. Li, "Microstructure and morphology of interfacial intermetallic compound CoSn_3 in Sn-Pb/Co-P solder joints," *Microelectronics Reliability*, 55(11), 2403–2411. doi:10.1016/j.microrel.2015.06.056.
- [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," *Journal of Alloys and Compounds*, 392(1-2), 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," *Journal of ELECTRONIC MATERIALS*, 40(2), 176–188. doi:10.1007/s11664-010-1430-y.
- [4] Y.G. Lee, J.G. Duh, "Interfacial morphology and concentration profile in the unleaded solder/Cu joint assembly," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 10 (1), 33–43. doi:10.1023/A:1008975006706.
- [5] กมลวิภา พึ่งเจียก, ชัยพนม หนูแก้ว และกรรณชัย กัลยาศิริ, "การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาบัดกรีที่มีต่อความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับแผ่นรองทองแดง," ใน การประชุมวิชาการรายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2556: 16-18 ตุลาคม 2556, น. 5-7.
- [6] H. Mehrer. *Diffusion in Solids: Fundamentals, Methods, Materials, Diffusion-Controlled Processes*. Springer-Verlag, Heidelberg, Berlin, 2007.
- [7] R. O'Hayre. *Materials kinetics fundamentals: principles, processes, and applications*. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, New York State, 2015.
- [8] 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," *Journal of Alloys and Compounds*, 805, 1013-1024. doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.07.184.
- [9] Mr. Dwearwin MoonDifferent. (2017 Sep). "Different Copper Foils for Different Reasons" [Online]. Available: <http://www.copperfoilroll.com/news/different-copper-foils-for-different-reasons-27456.html>. [Accessed: Nov. 12, 2020].

- [10] วีระพันธ์ สิทธิพงศ์. โลหะวิทยาทางกายภาพ สำหรับวิศวกรภาค 2. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์นิยมวิทย์, 2533.

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

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

- [11] O.M. Abdelhadi, L. Ladani, "IMC growth of Sn-3.5Ag/Cu system: Combined chemical reaction and diffusion mechanisms," *Journal of Alloys and Compounds*, 537, 87-99. doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.04.068.
- [12] ประพิน ประคุณหังสิต, วาสนา คงสุข, "โลหะบัดกรี," *วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ*, ปีที่49, ฉบับที่ 155, หน้า 21-23, มกราคม, 2544.
- [13] D.R. Frear, "Issues related to the implementation of Pb-free electronic solders in consumer electronics," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 18, 319-330.
- [14] M. Abtewa, G. Selvaduray, "Lead-free Solders in Microelectronics," *A Review Journal: Materials Science and Engineering*, 27, 95-141.
- [15] J.F. Li, P.A. Agyakwa, C.M. Johnson, "Suitable Thicknesses of Base Metal and Interlayer and Evolution of Phases for Ag/Sn/Ag Transient liquid-phase Joints Used for Power Die Attachment," *Journal of ELECTRONIC MATERIALS*, 43(4), 983-995. doi:10.1007/s11664-013-2971-7.
- [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, 6-11. doi:10.1016/j.jmatprotec.2014.08.007.
- [17] Jayaram M.A. (2012 Jun). "Strength of Materials: A Fundamental Approach" [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/273453831_Strength_of_Materials_A_Fundamental_Approach. [Accessed: May 17, 2021]
- [18] ดร. ปรีชา เต็มสุขสวัสดิ์, "การศึกษาความสัมพันธ์ของสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริก (สัมประสิทธิ์ซีเบค) กับความเค้นตึงและโครงสร้างของโลหะในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (ระยะที่ 1- 2)," *ทุนวิจัยพระจอมเกล้าธนบุรี สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุคุณะพลังงานและวัสดุ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, 2547.*
- [19] สีนินารถ ธรรมสุนทร, "ความเค้นตึงบนผิววัสดุผสม Al₂O₃ -TiC จากกระบวนการ เจียระไน," *วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2556.*
- [20] e-book มหาวิทยาลัยรามคำแหง, "สมบัติทางกลของโลหะ (Mechanical Properties of Metals)," [Online]. Available: [http://old-book.ru.ac.th/e-book/m/MY318\(51\)/MY318-1.pdf](http://old-book.ru.ac.th/e-book/m/MY318(51)/MY318-1.pdf). [Accessed: 17 พฤษภาคม 2564]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำมาใช้เพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ

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

Forbidden to modify the content, and cite the document when use. 29

- [21] B. Leng, S. Ukai, Y. Sugino, Q. Tang, T. Narita, S. Hayashi, W. Farong, S. Ohtsuke, T. Kaito, "Recrystallization Texture of Cold-rolled Oxide Dispersion Strengthened Ferritic Steel," *ISIJ International*, 51(6), 951-957. doi:10.2355/isijinternational.51.951.
- [22] A. Paul, T. Laurila, V. Vuorinen, S.V. Divinski, "Diffusion and the Kirkendall Effect in Solids," Springer International Publishing Switzerland, 115-139. DOI: 10.1007/978-3-319-07461-0_3.
- [23] ดนัย กิจชัยนุกูล, "เรื่องน่ารู้ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)," *โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม*, 2547.
- [24] ดร.สมบุรณ์ โอตรวรรณะ, "การใช้เทคนิค Electron Back-Scattered Diffraction (EBSD) ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นส่วนอะลูมิเนียมอัลลอยที่ขึ้นรูปจากการหล่อด้วยแรงดันสูง," *ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ*, ปทุมธานี, 2557.
- [25] วัยภรณ์ กรองทอง, "รู้จักอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ," ปทุมธานี, 2559.
- [26] ดลฤดี โตเย็น, "การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)," *สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*, กรุงเทพฯ.
- [27] T.A. Siewert and C.A. Handwerker, *Test Procedures for Developing Solder Data*. National Institute of Standards and Technology (Special Publication 960-8), U.S., 2002.
- [28] Z. Dankházi, S. Kalácska, A. Baris, G. Varga, Z. Radi, K. Havancsák, "EBSD Sample Preparation: High Energy Ar Ion Milling," *Materials Science Forum*, 812, 309-314. doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.812.309.
- [29] Shawn Wallace. (2019 Jan). "COMMON MISTAKES WHEN PRESENTING EBSD DATA" [Online]. Available: Common Mistakes when Presenting EBSD Data | EDAX Blog. [Accessed: May 17, 2021].

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

Forbidden to modify the content, ³¹ and cite the document when use.

การตรวจสอบอักขราพิสูทธิ์

Plagiarism Checking Report

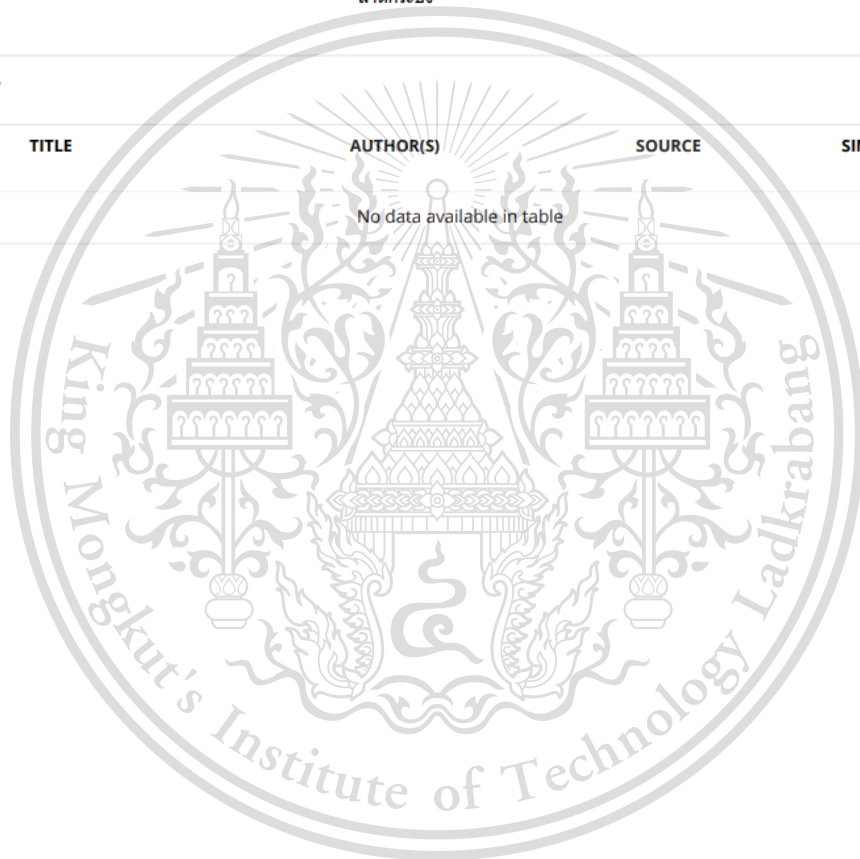
Created on May 17, 2021 at 13:43 PM

Submission Information

ID	SUBMISSION DATE	SUBMITTED BY	ORGANIZATION	FILENAME	STATUS	SIMILARITY INDEX
2074568	May 17, 2021 at 13:43 PM	60011290@kmitl.ac.th	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	Soldering of cold-rolled Cu sheet.docx	Completed	0.00 %

Match Overview

NO.	TITLE	AUTHOR(S)	SOURCE	SIMILARITY INDEX
No data available in table				

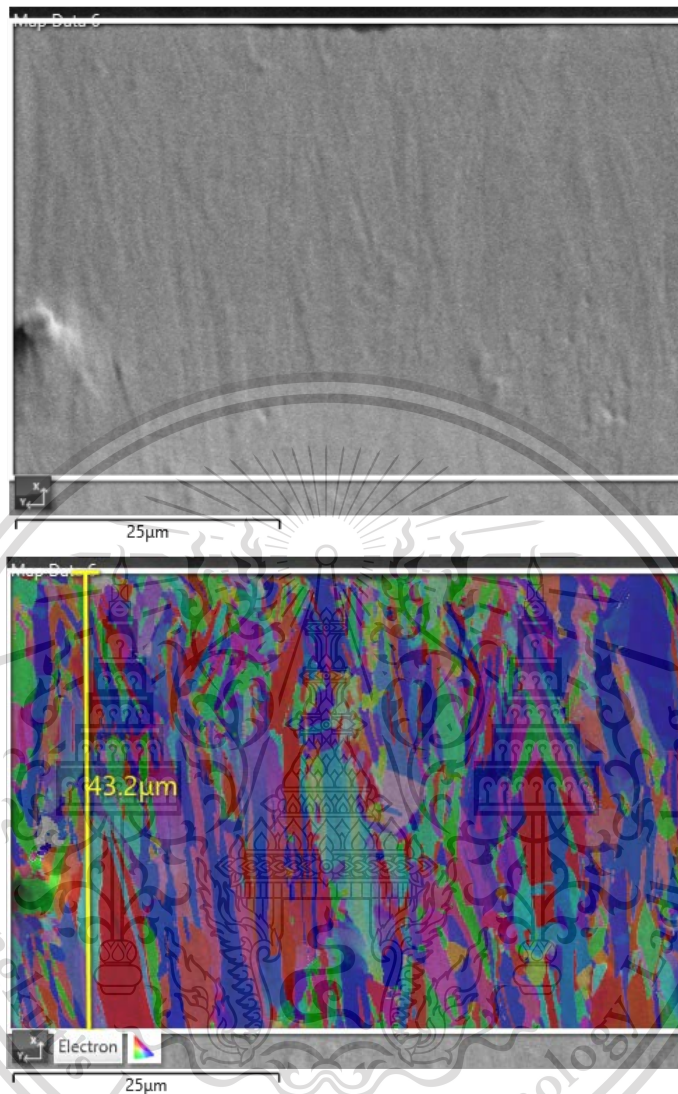


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use ^{๘1} only, not allowed for commercial use.

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

ผลการทดสอบ EBSD ก่อนการบัดกรี R=∞



Settings

Accelerating Voltage	20.00 kV
Specimen Tilt (degrees)	70.00 °
Hit Rate	94.57 %
Speed of Acquisition	40.33 Hz

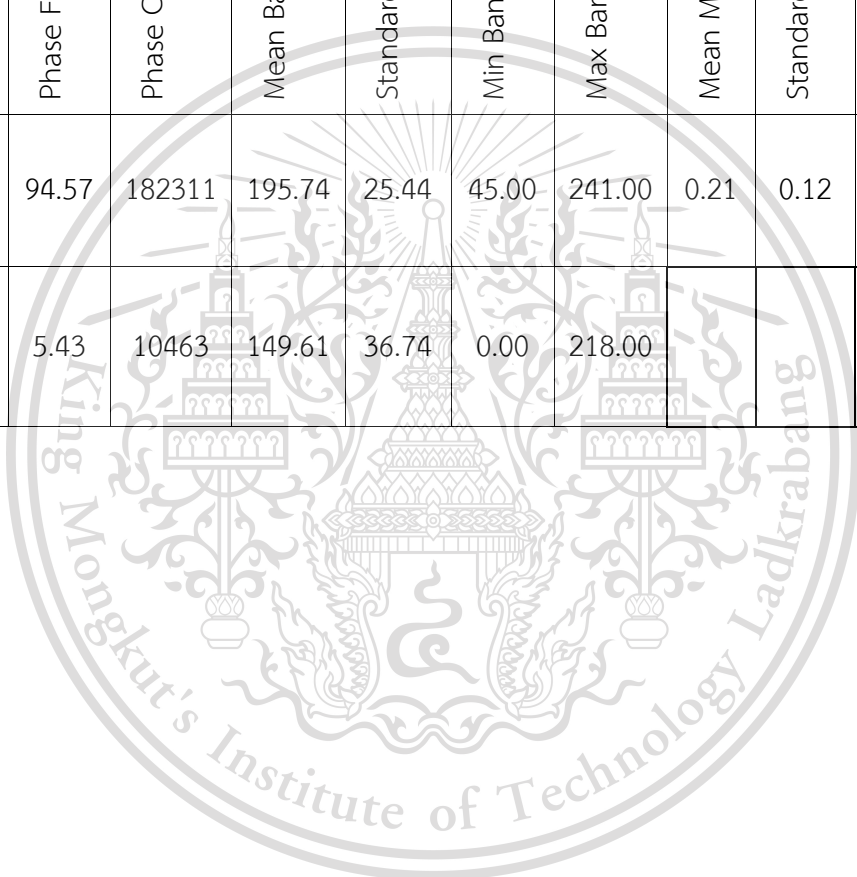
Phases for Acquisition

Phase	a	b	c	Alpha	Beta	Gamma	Space Group	Database
Copper	3.61 Å	3.61 Å	3.61 Å	90.00 °	90.00 °	90.00 °	225	HKL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

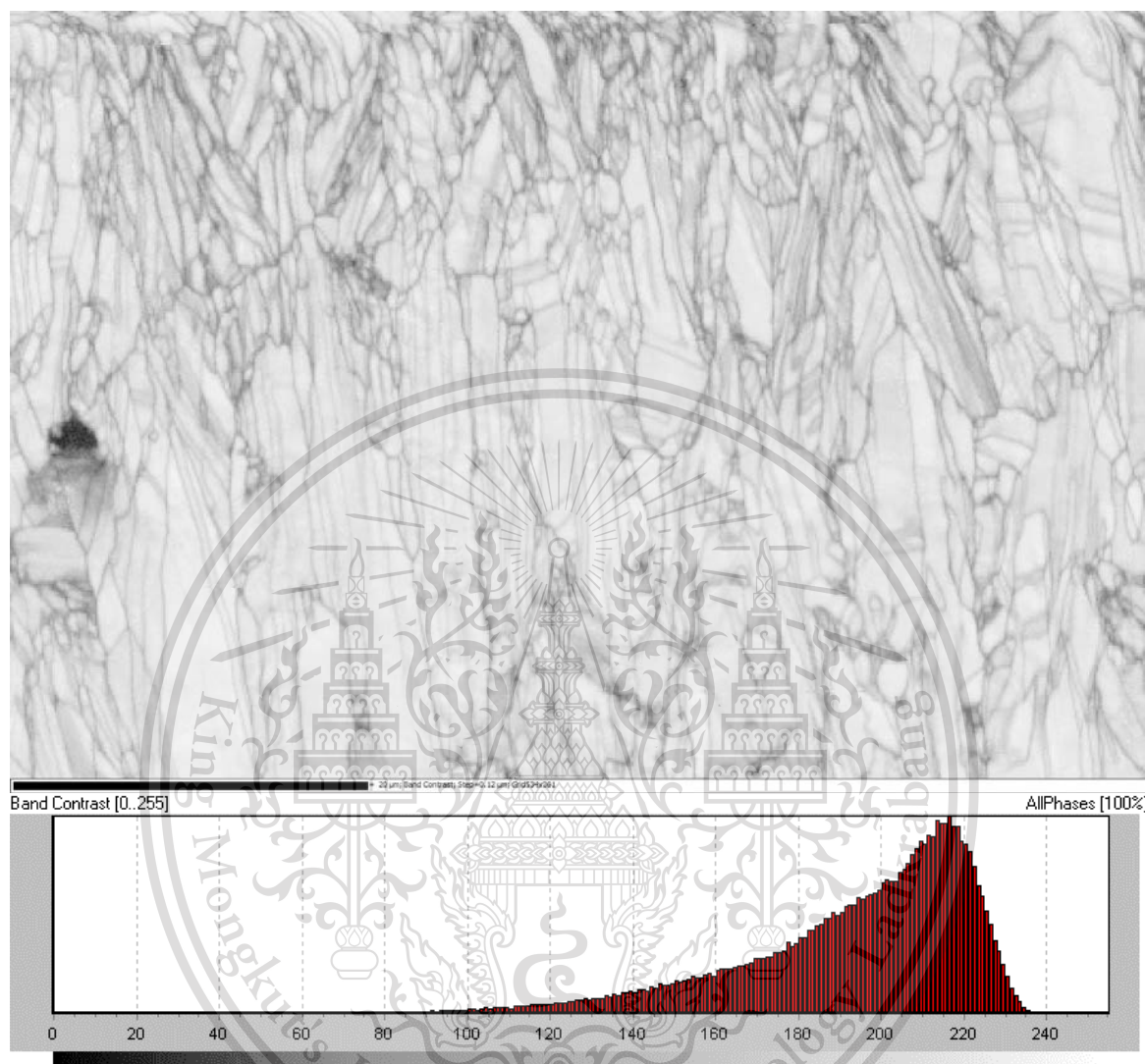
Phase Fraction

Phase Name	Phase Fraction (%)	Phase Count	Mean Band Contrast	Standard Deviation Band Contrast	Min Band Contrast	Max Band Contrast	Mean MAD	Standard Deviation MAD	Min MAD	Max MAD
Copper	94.57	182311	195.74	25.44	45.00	241.00	0.21	0.12	0.04	1.99
Zero Solutions	5.43	10463	149.61	36.74	0.00	218.00				



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Band Contrast



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use ^{๗4} only, not allowed for commercial use.

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

Phase Map

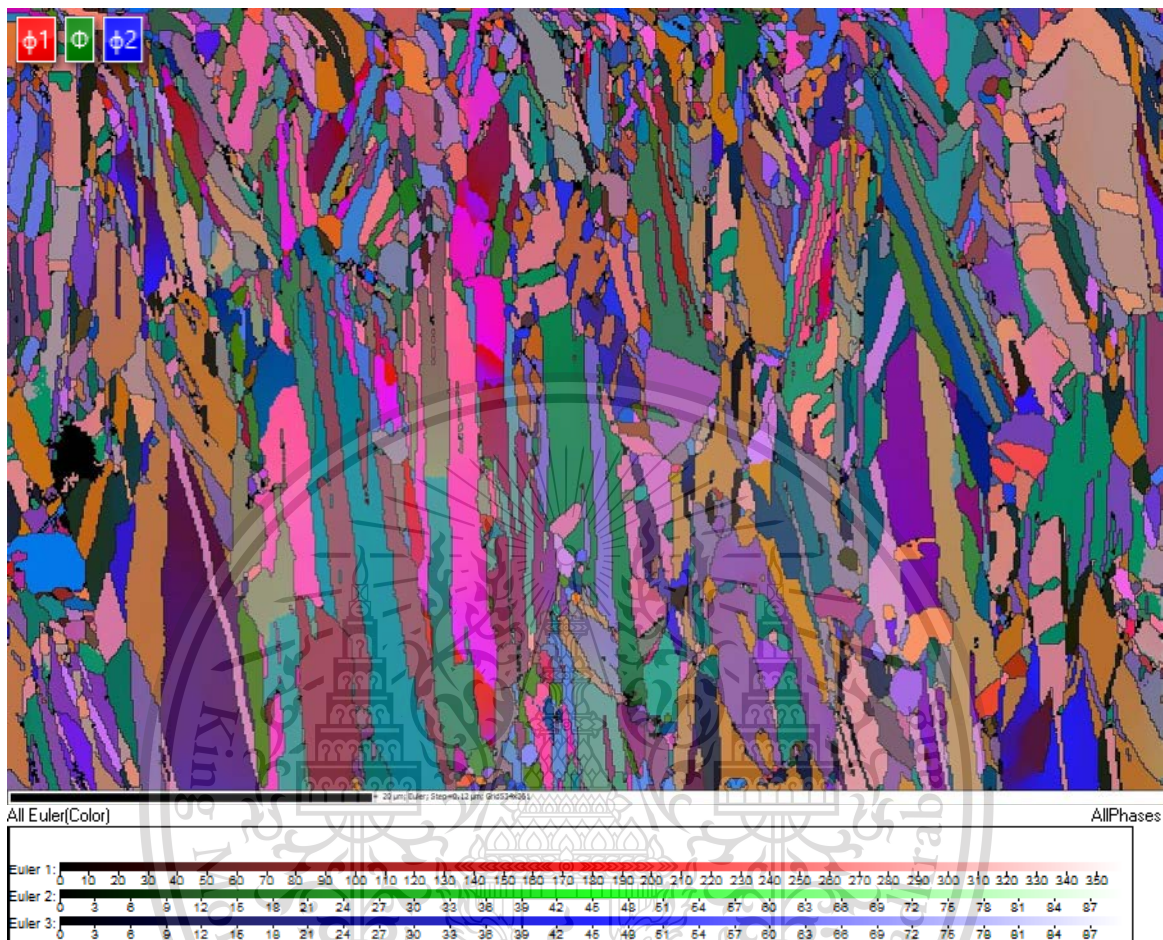


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use ^{๗5} only, not allowed for commercial use.

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

Euler Map

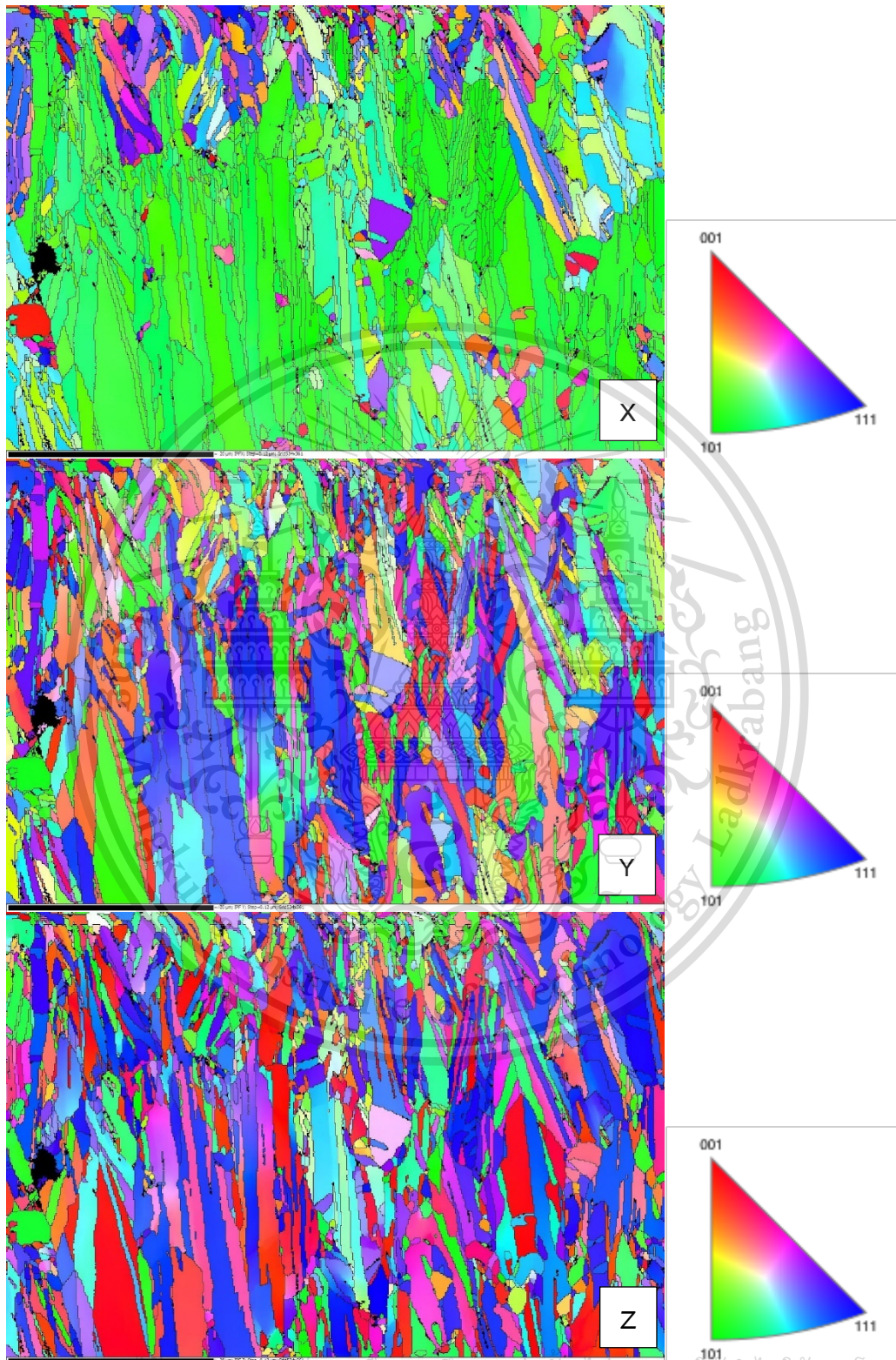


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use ^{๗6} only, not allowed for commercial use.

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

IPF Map



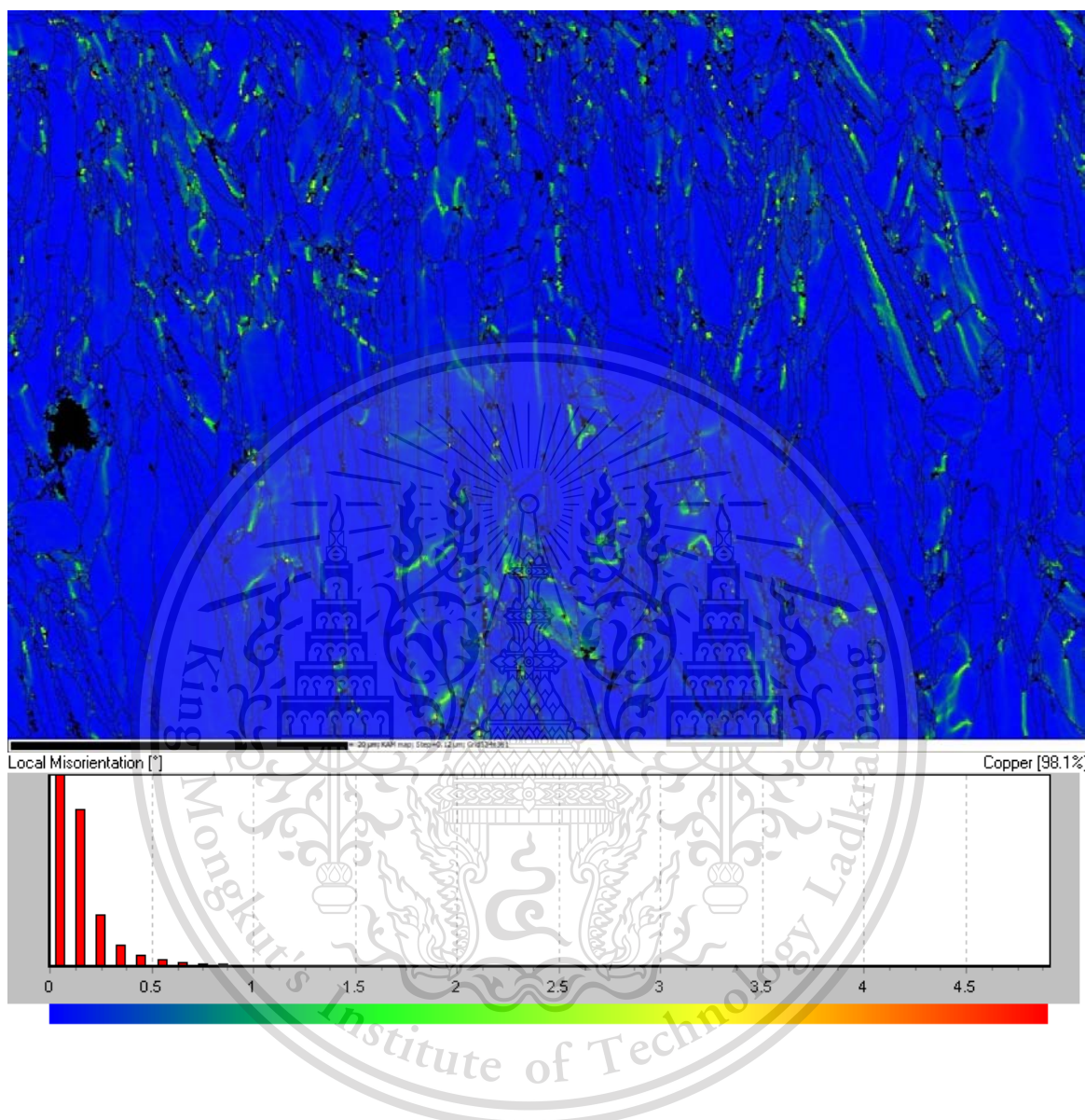
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use ^๗ only, not allowed for commercial use.

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

KAM Map

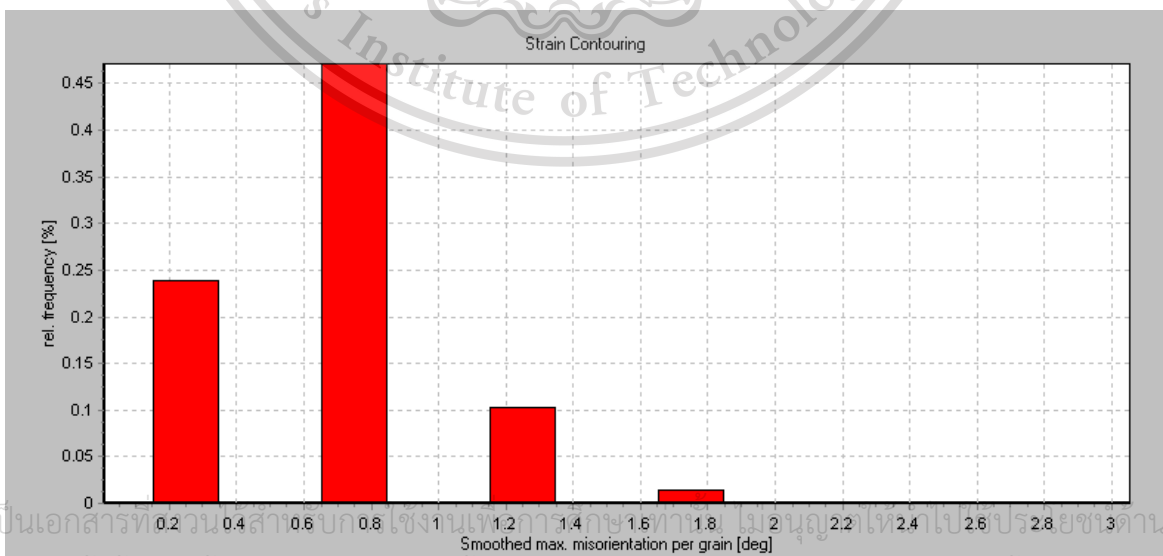
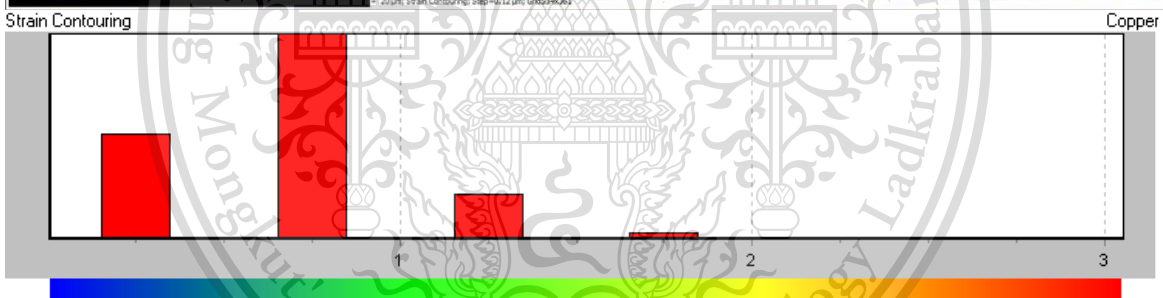
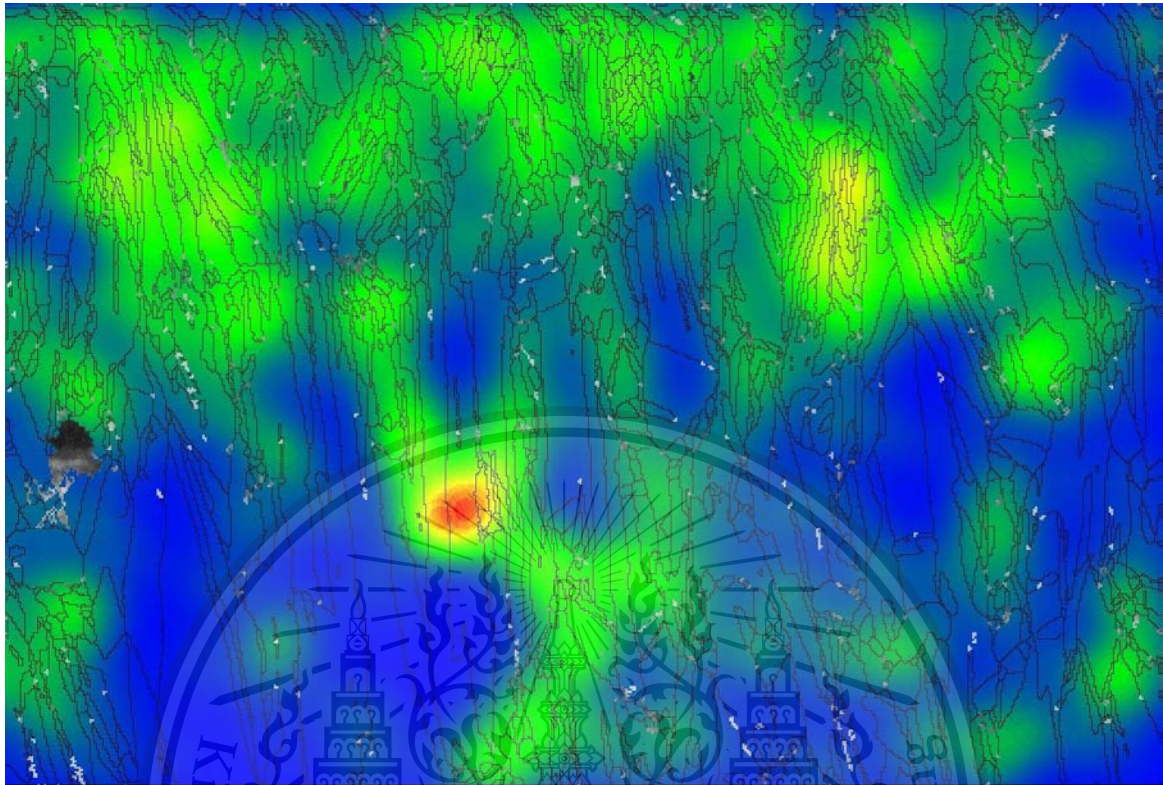


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use ^{๗8} only, not allowed for commercial use.

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

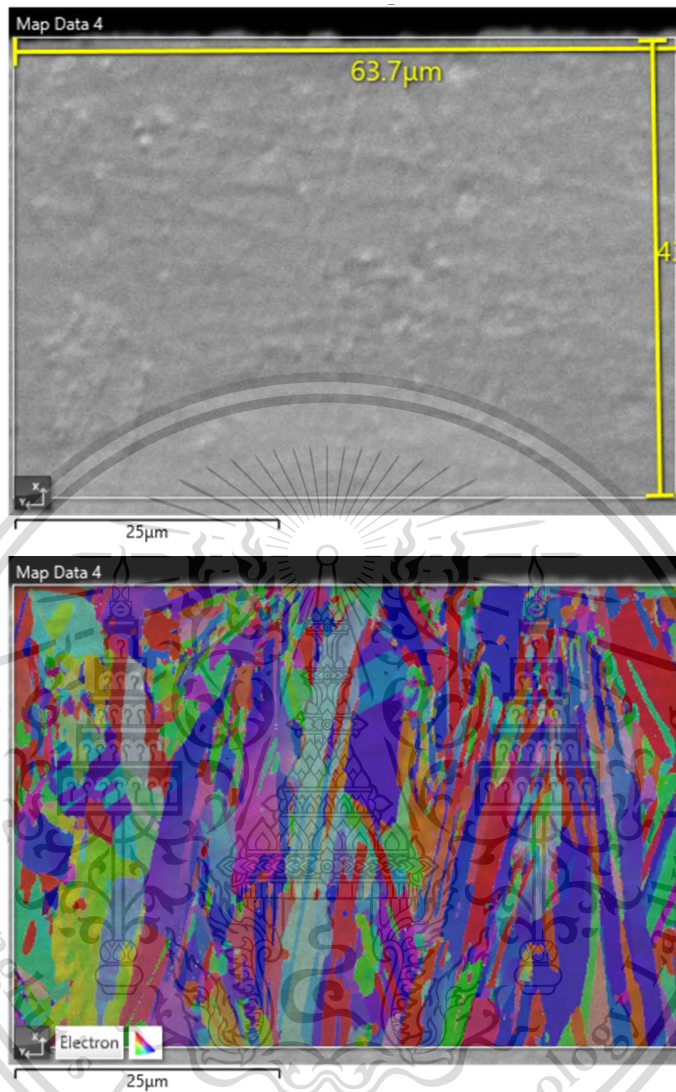
Strain Contouring



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของ King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. ห้ามทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบ EBSD ก่อนการบัดกรี R=20



Settings

Accelerating Voltage	20.00 kV
Specimen Tilt (degrees)	70.00 °
Hit Rate	95.17 %
Speed of Acquisition	40.35 Hz

Phases for Acquisition

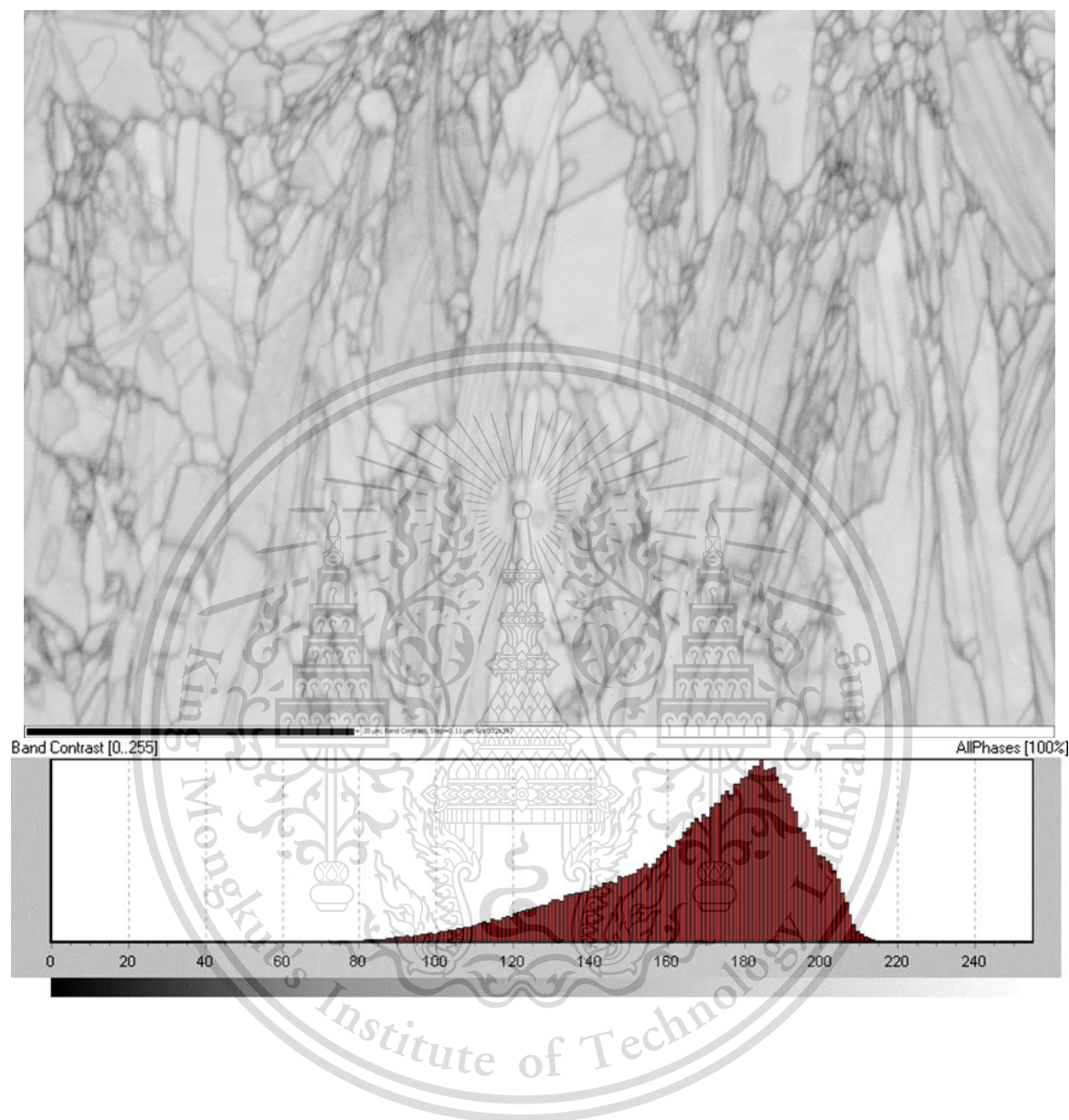
Phase	a	b	c	Alpha	Beta	Gamma	Space Group	Database
Copper	3.61 Å	3.61 Å	3.61 Å	90.00 °	90.00 °	90.00 °	225	HKL

Phase Fraction

Phase Name	Phase Fraction (%)	Phase Count	Mean Band Contrast	Standard Deviation Band Contrast	Min Band Contrast	Max Band Contrast	Mean MAD	Standard Deviation MAD	Min MAD	Max MAD
Copper	95.17	216121	169.79	23.96	51.00	218.00	0.28	0.13	0.08	1.99
Zero Solutions	4.83	10963	131.58	28.74	0.00	198.00				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Band Contrast



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Phase Map

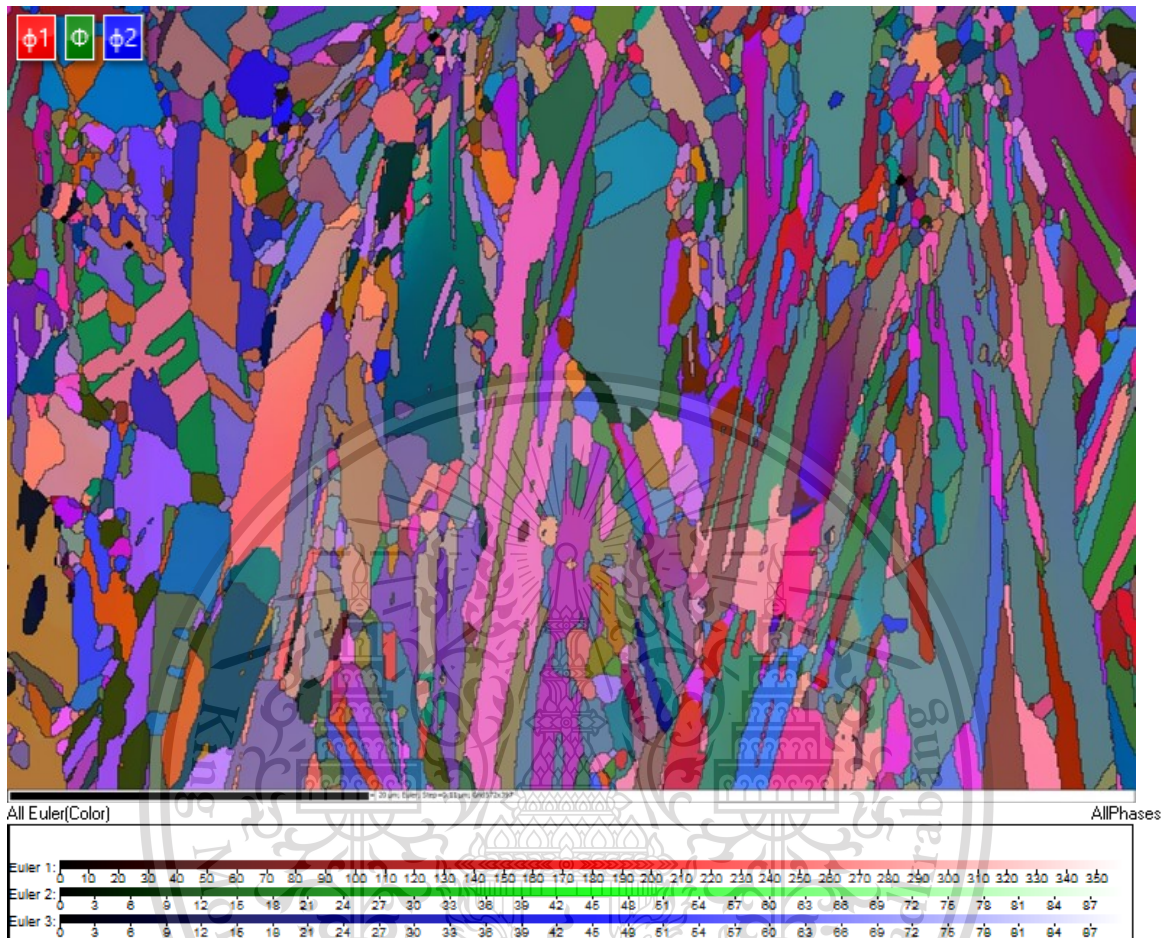


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use^{ณ13} only, not allowed for commercial use.

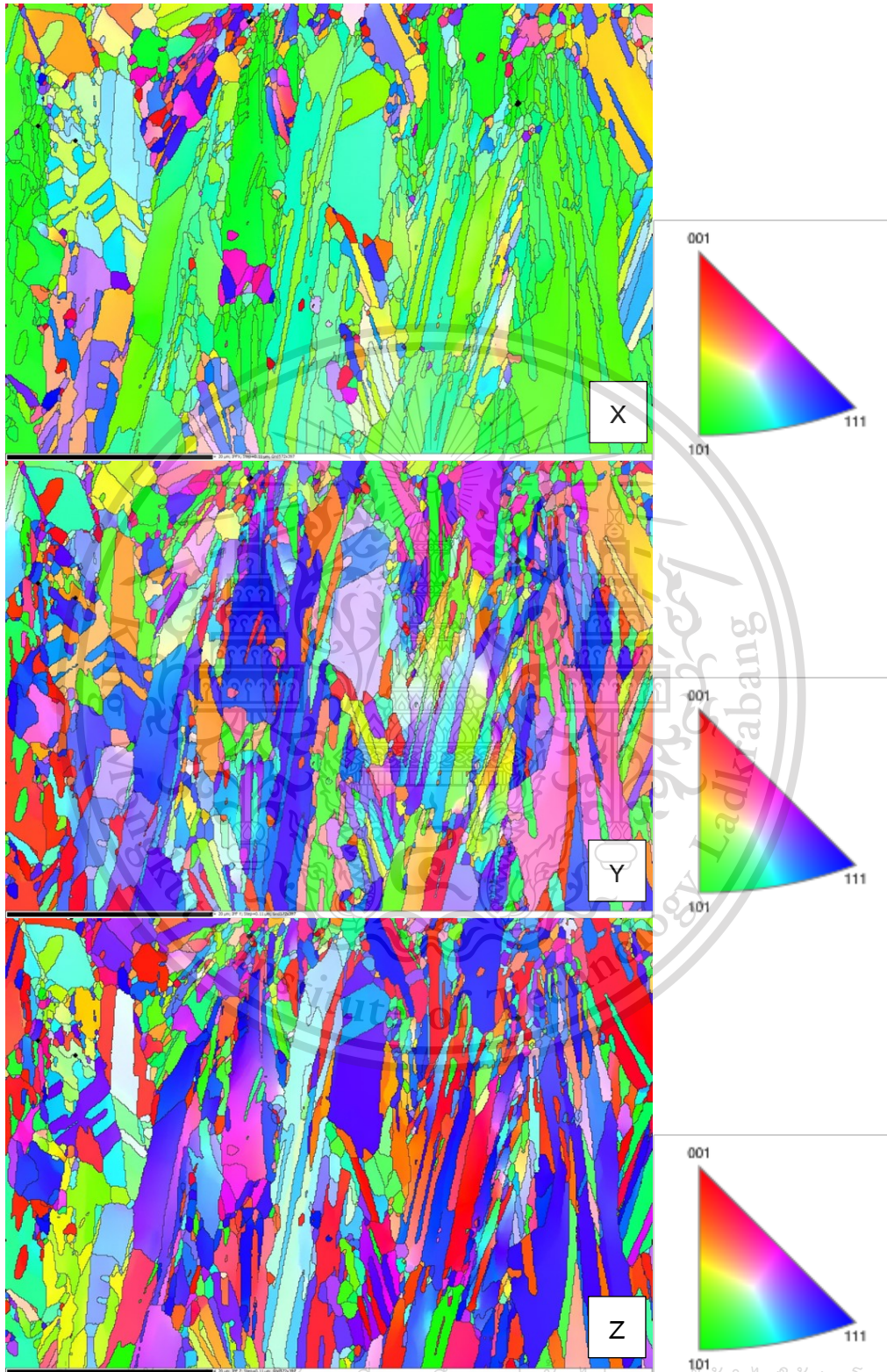
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Euler Map



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

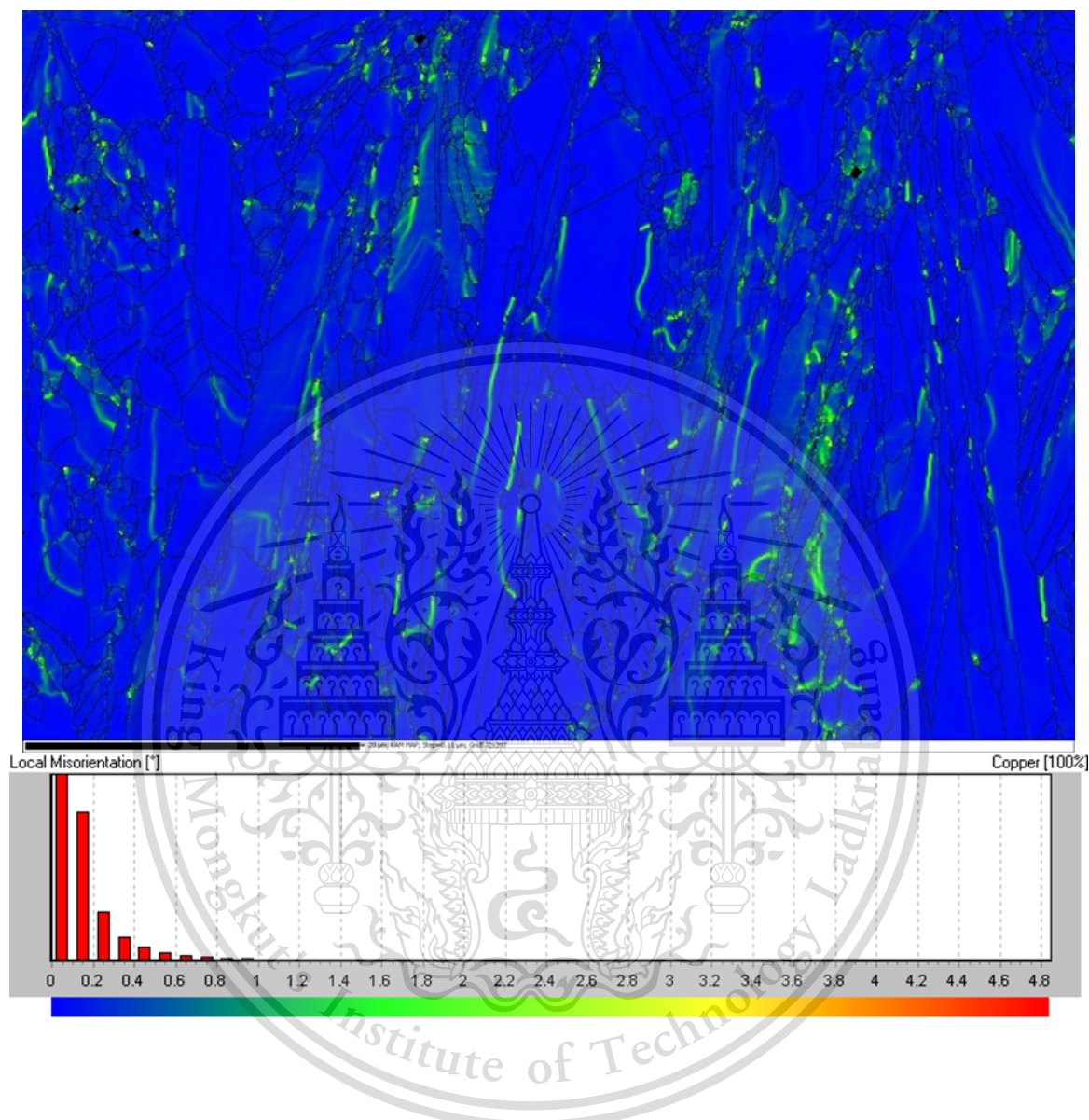
IPF Map



เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

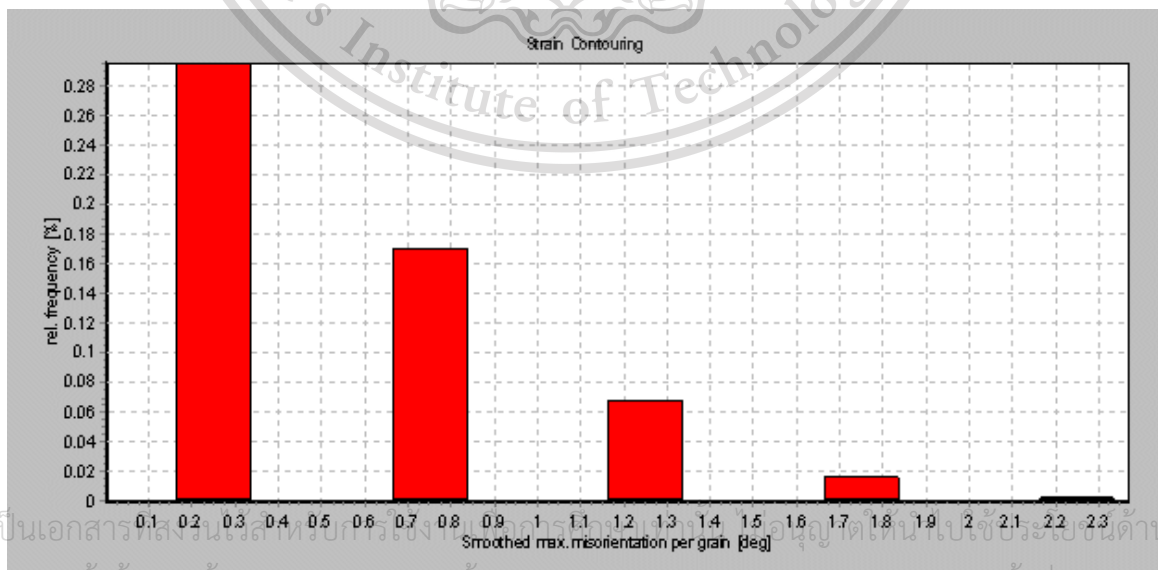
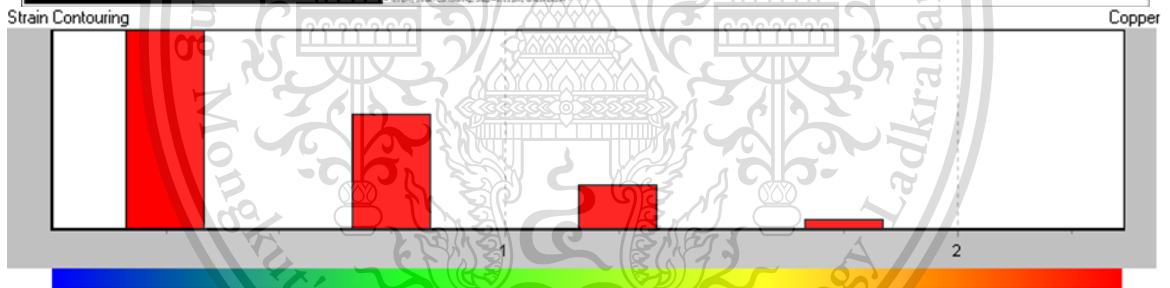
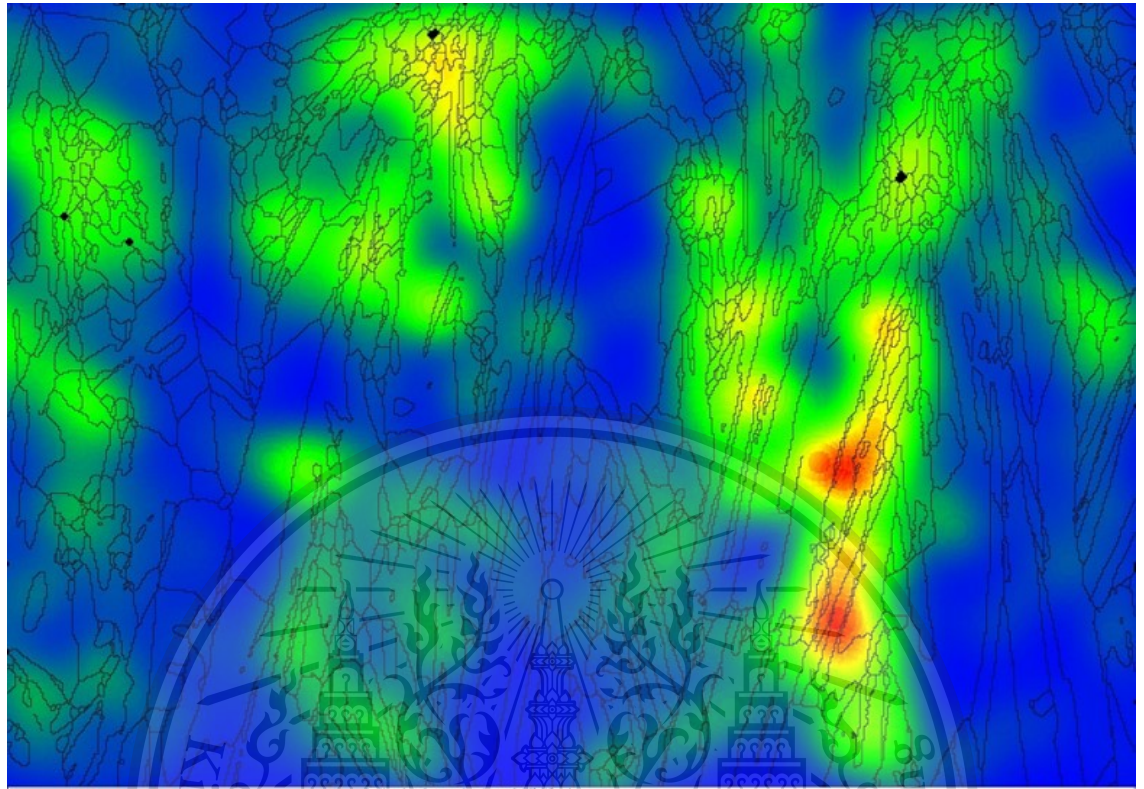
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KAM Map



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

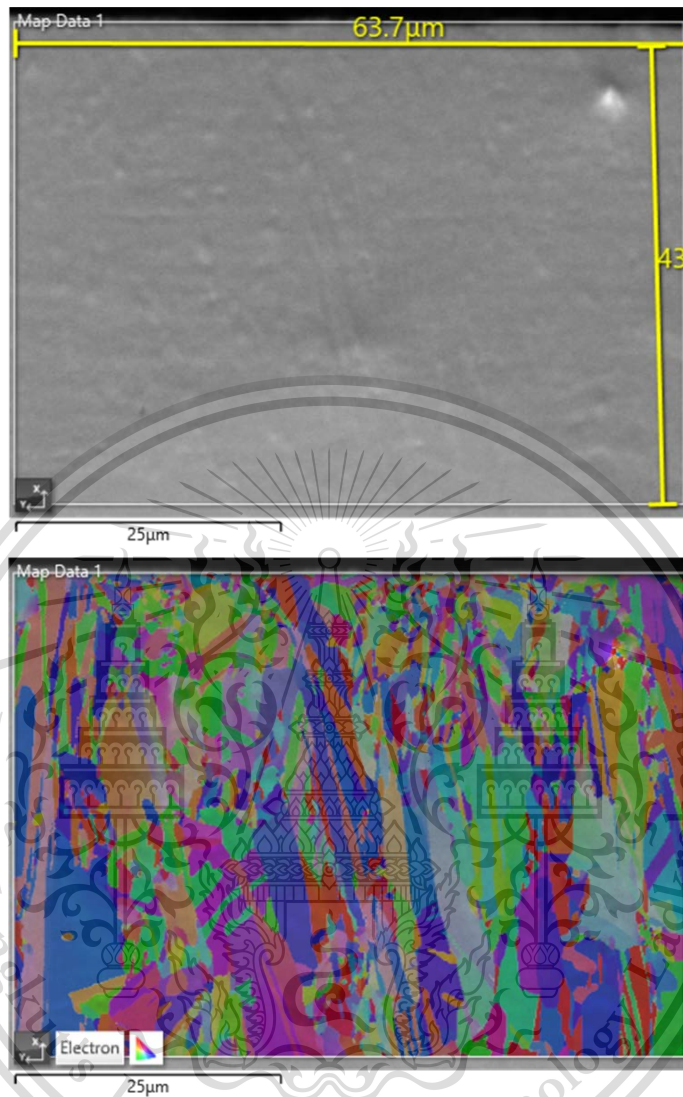
Strain Contouring



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังเท่านั้น ไม่สามารถนำออกเผยแพร่ภายนอกได้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบ EBSD ก่อนการบัดกรี R=15



Settings

Accelerating Voltage	20.00 kV
Specimen Tilt (degrees)	70.00 °
Hit Rate	95.45 %
Speed of Acquisition	40.33 Hz

Phases for Acquisition

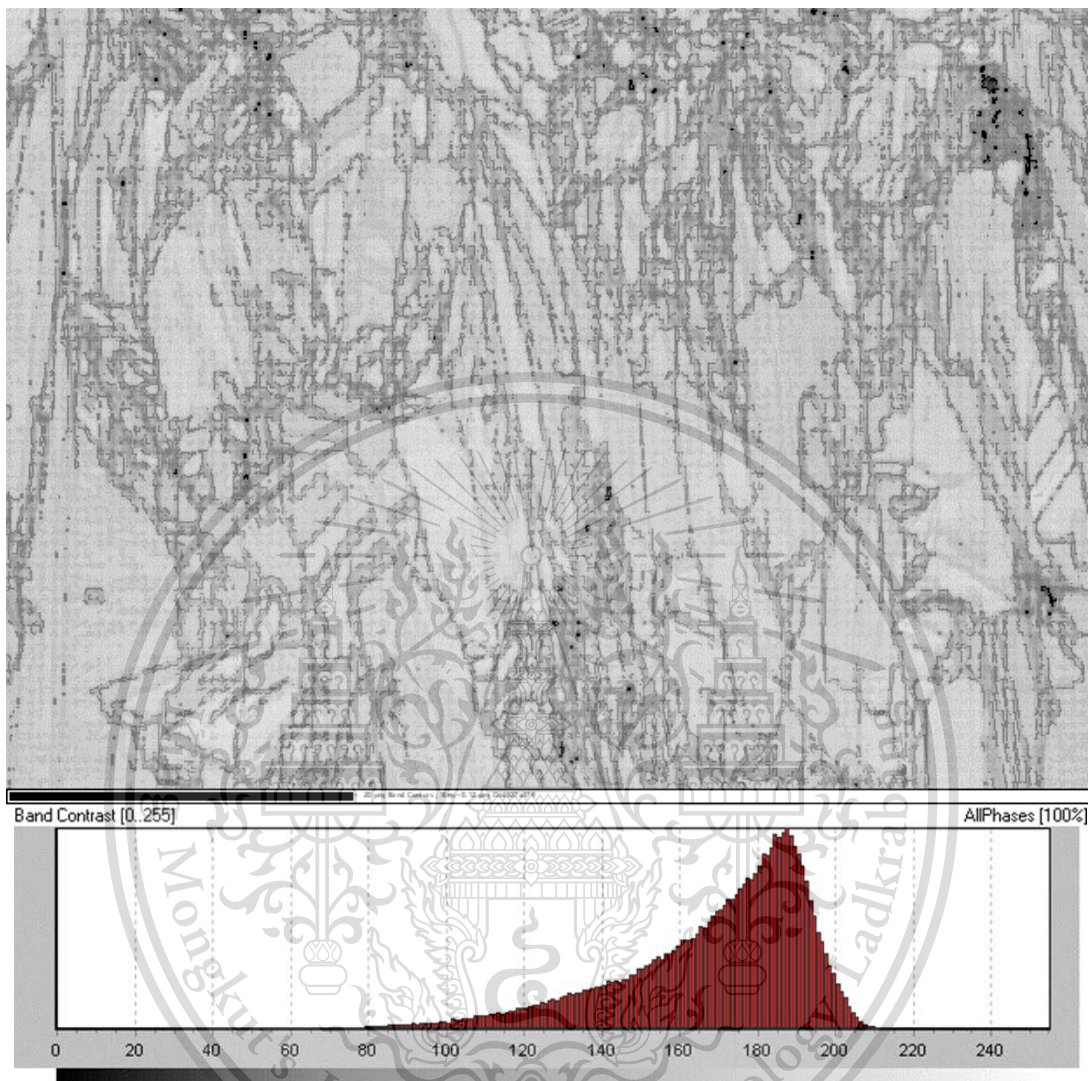
Phase	a	b	c	Alpha	Beta	Gamma	Space Group	Database
Copper	3.61 Å	3.61 Å	3.61 Å	90.00 °	90.00 °	90.00 °	225	HKL

Phase Fraction

Phase Name	Phase Fraction (%)	Phase Count	Mean Band Contrast	Standard Deviation Band Contrast	Min Band Contrast	Max Band Contrast	Mean MAD	Standard Deviation MAD	Min MAD	Max MAD
Copper	95.45	190637	169.96	22.54	49.00	225.00	0.21	0.13	0.04	1.99
Zero Solutions	4.55	9096	129.67	29.46	0.00	198.00				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Band Contrast

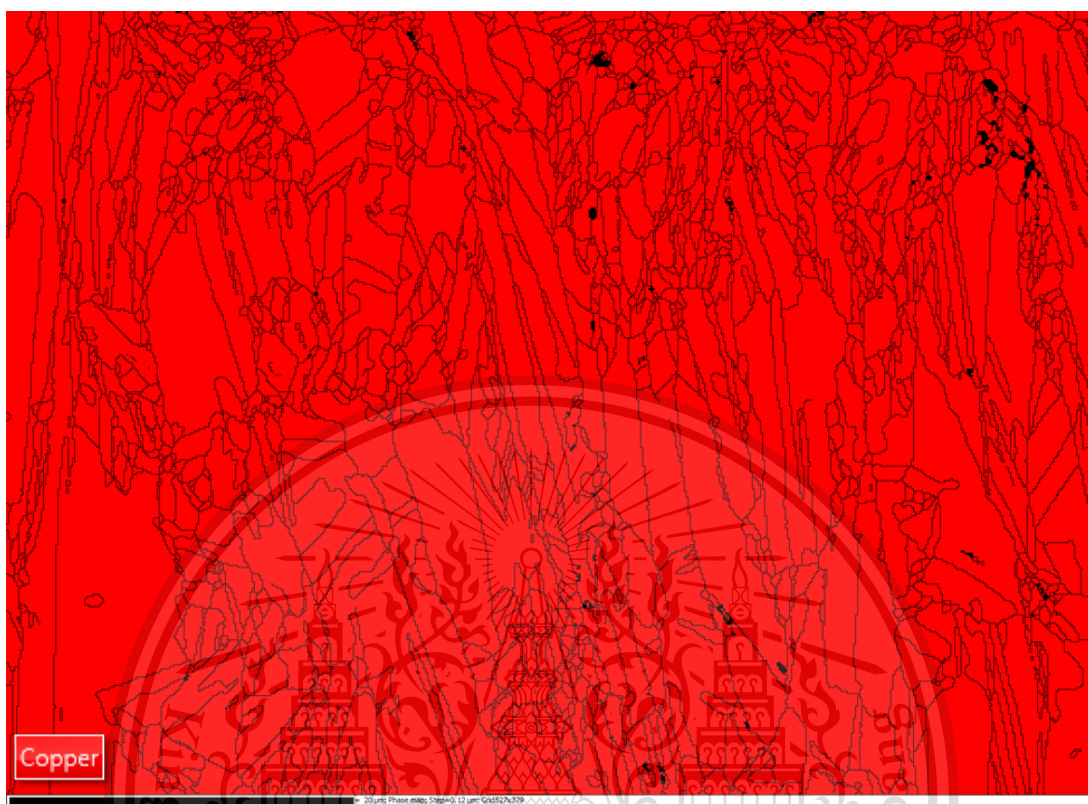


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use^{๘20} only, not allowed for commercial use.

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

Phase Map

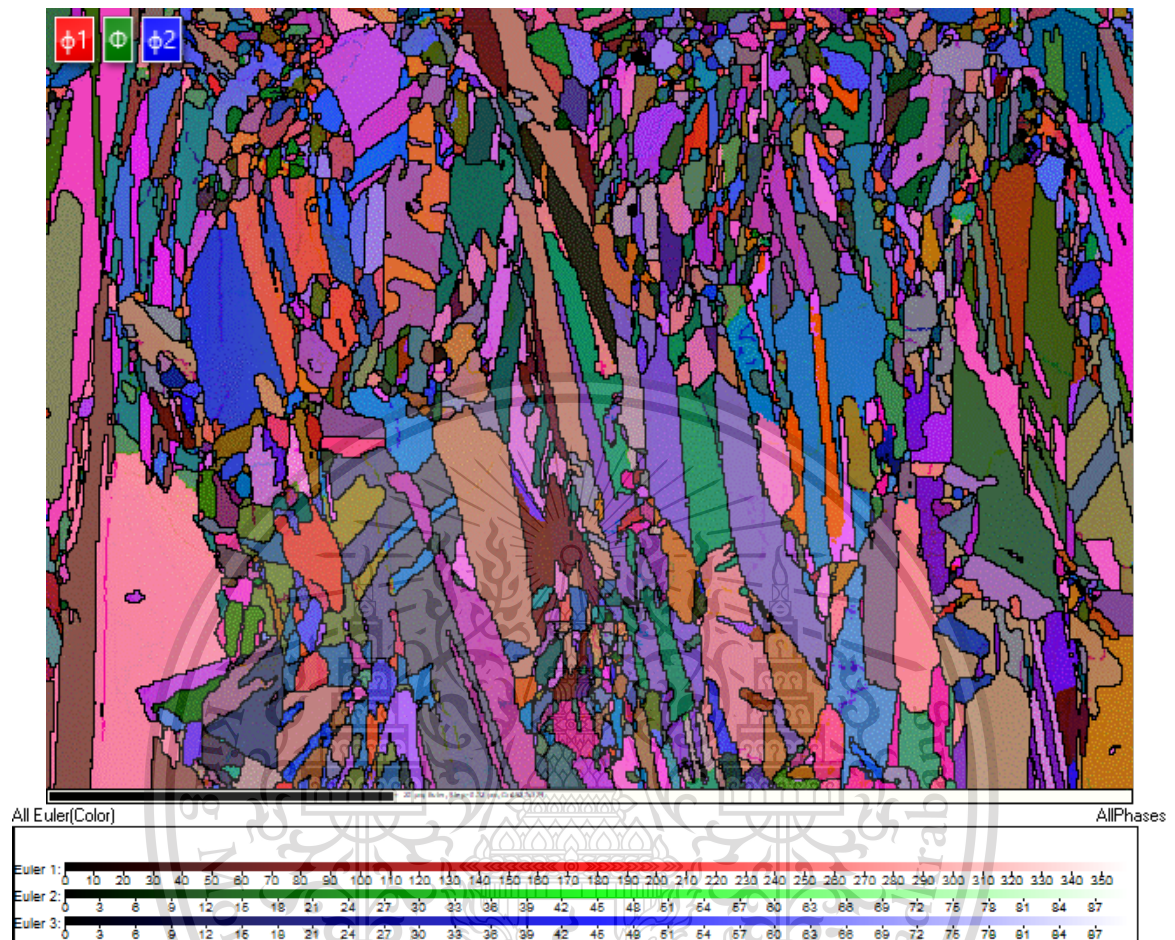


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use^{๘21}, not allowed for commercial use.

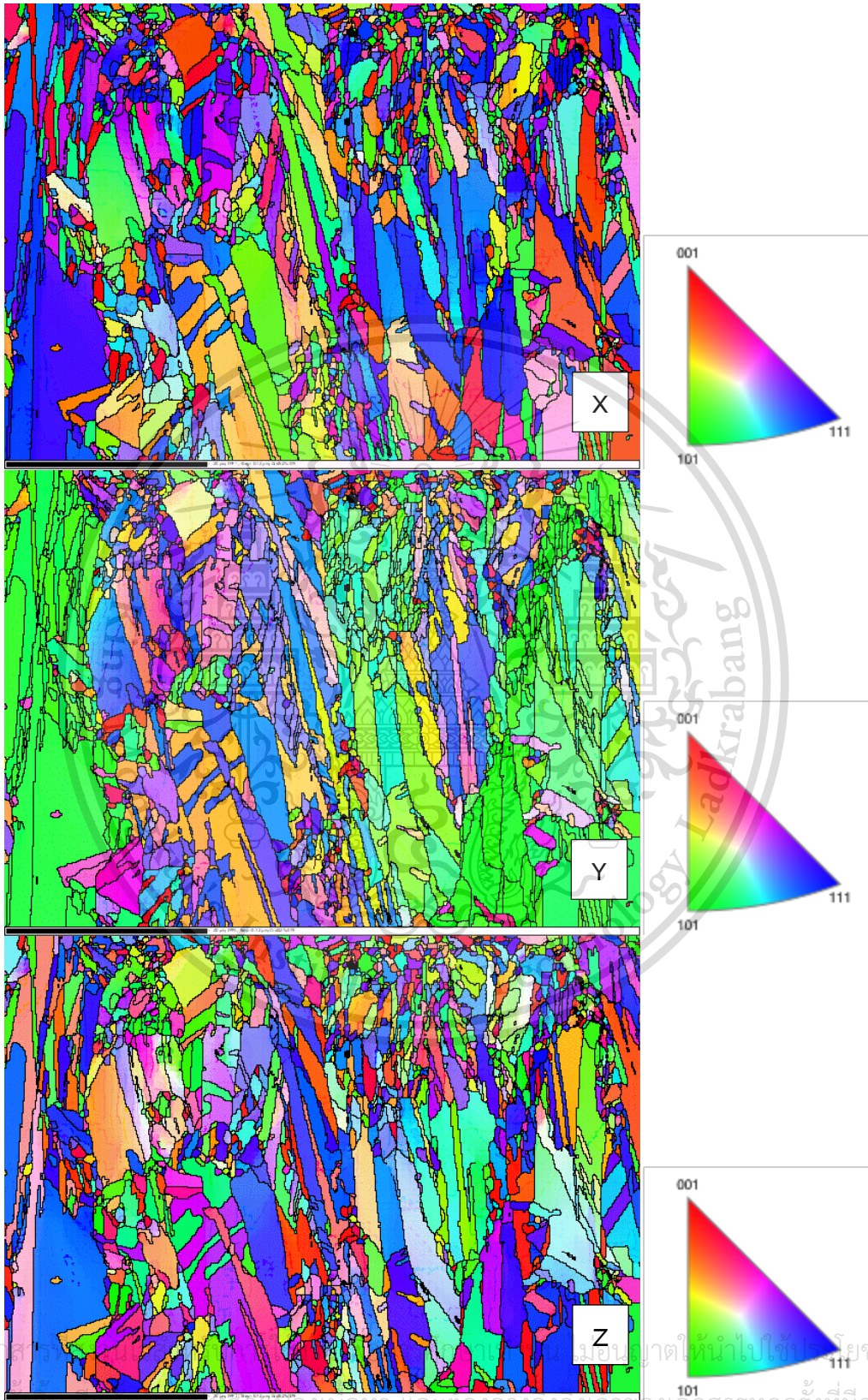
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Euler Map



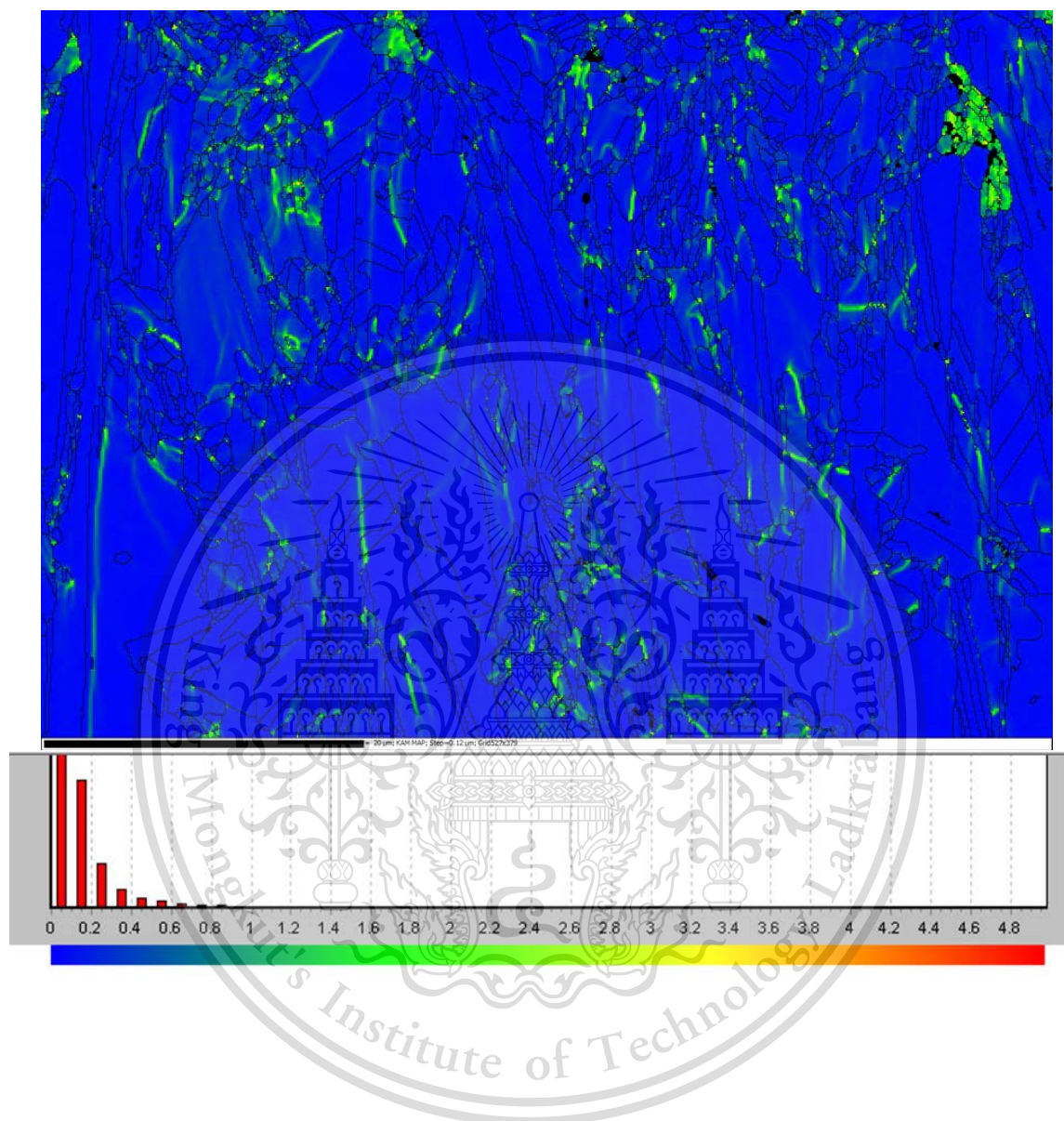
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IPF Map



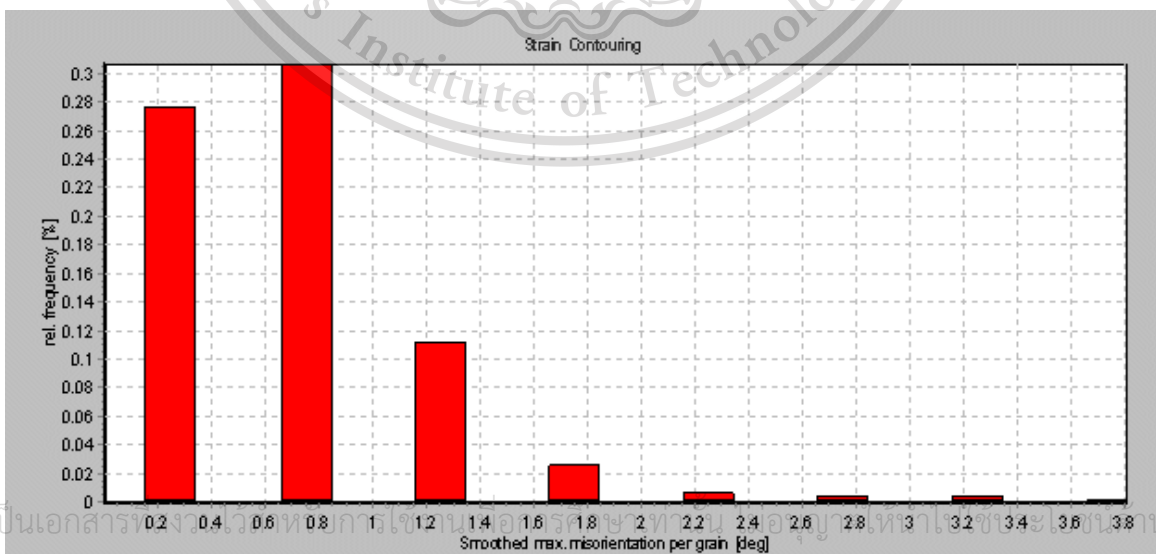
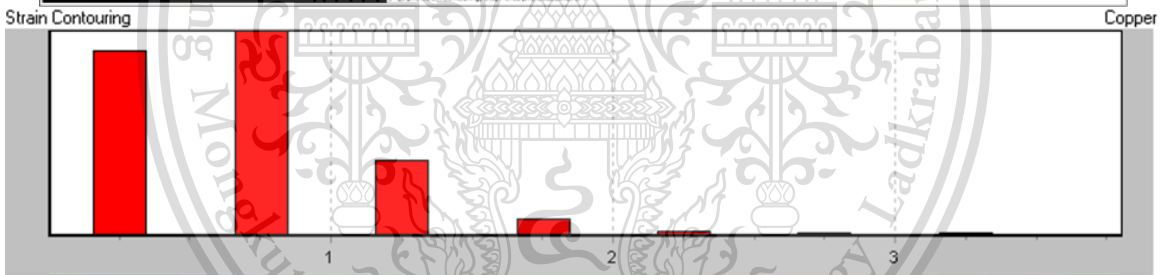
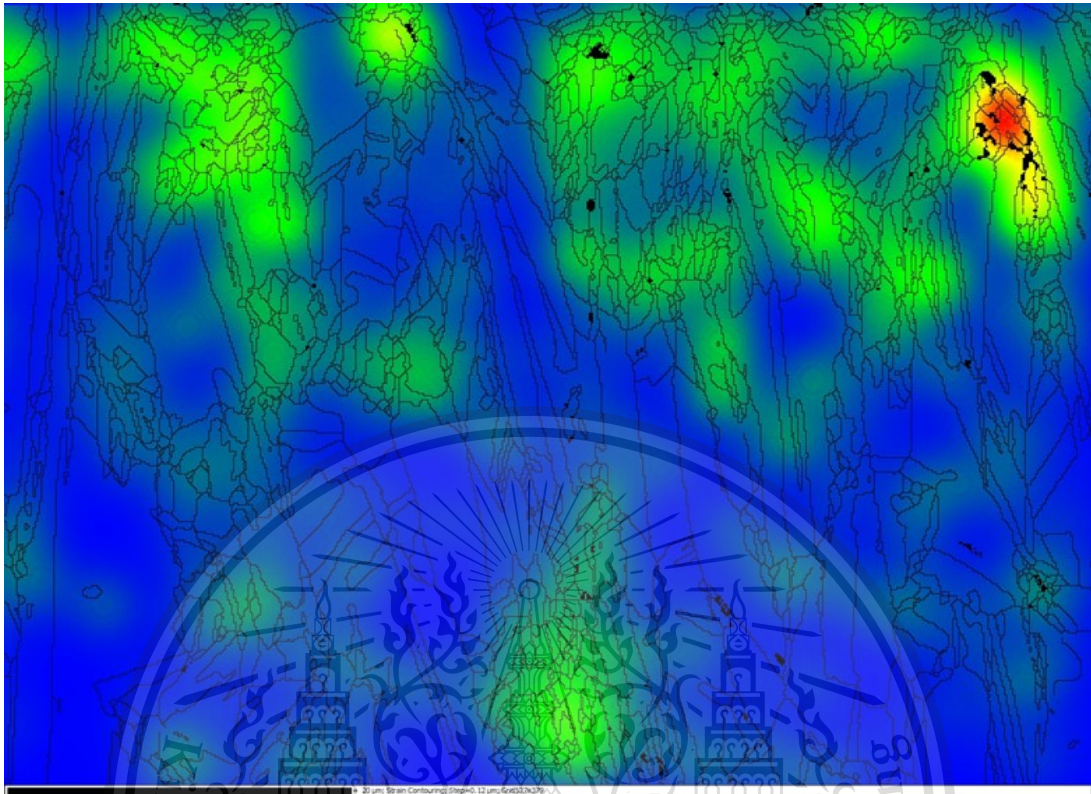
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่ควรนำออกไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ห้ามนำออกให้ผู้อื่นดูโดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องขออนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KAM Map



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

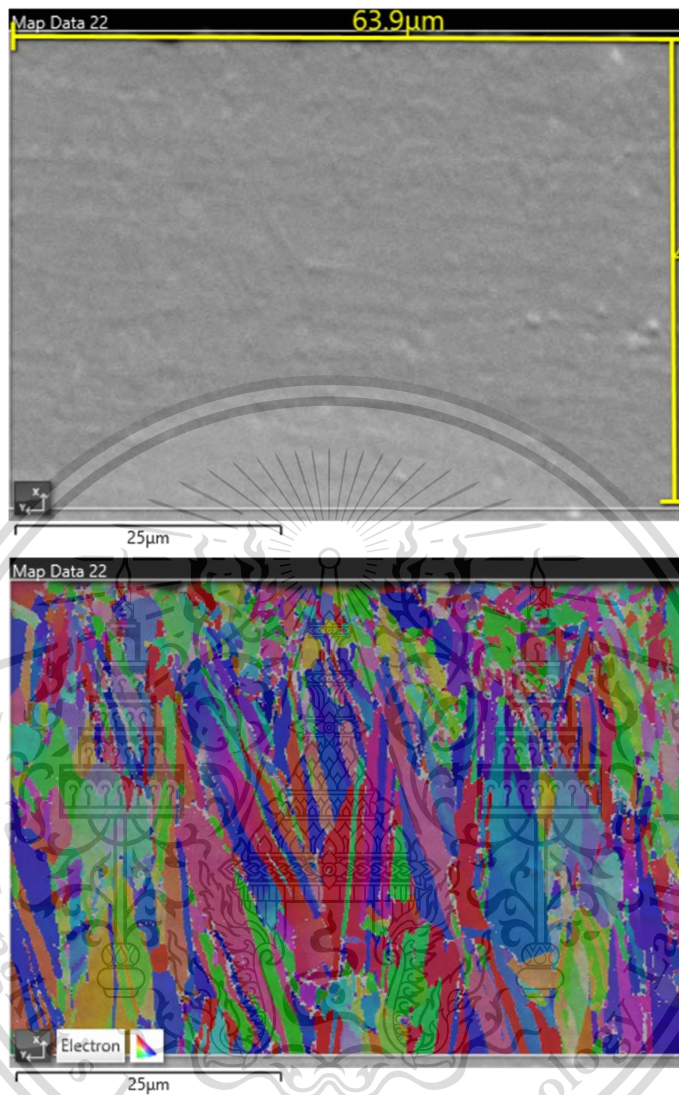
Strain Contouring



เอกสารนี้เป็นเอกสารของ King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบ EBSD ก่อนการบัดกรี R=10



Settings

Accelerating Voltage	20.00 kV
Specimen Tilt (degrees)	70.00 °
Hit Rate	77.83 %
Speed of Acquisition	40.32 Hz

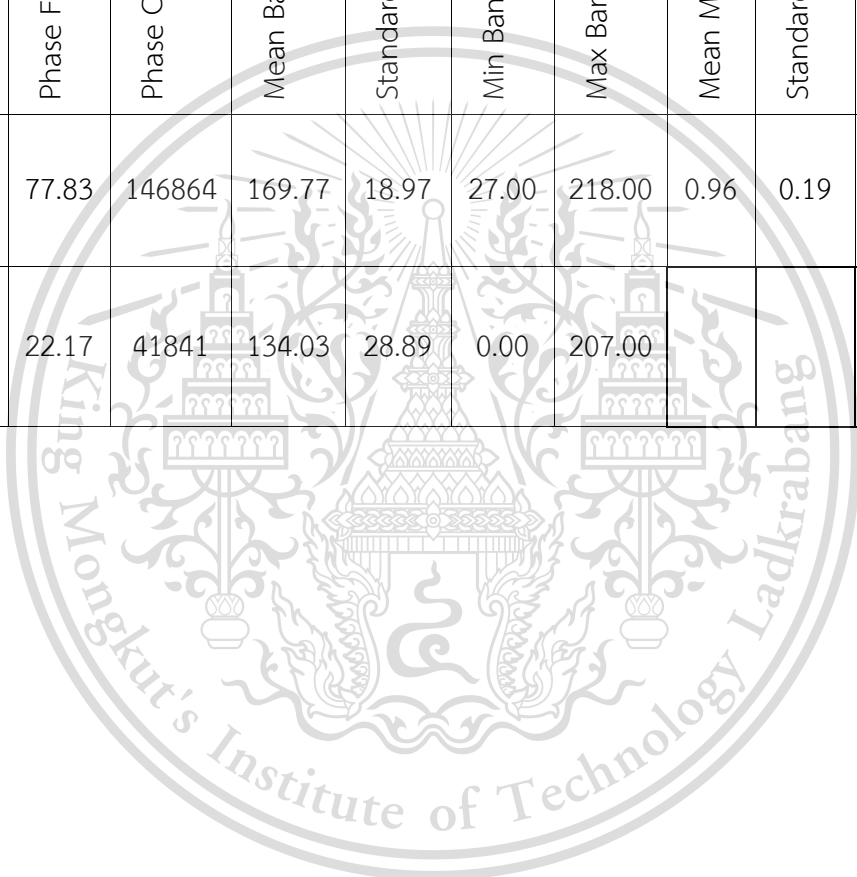
Phases for Acquisition

Phase	a	b	c	Alpha	Beta	Gamma	Space Group	Database
Copper	3.61 Å	3.61 Å	3.61 Å	90.00 °	90.00 °	90.00 °	225	HKL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารในทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

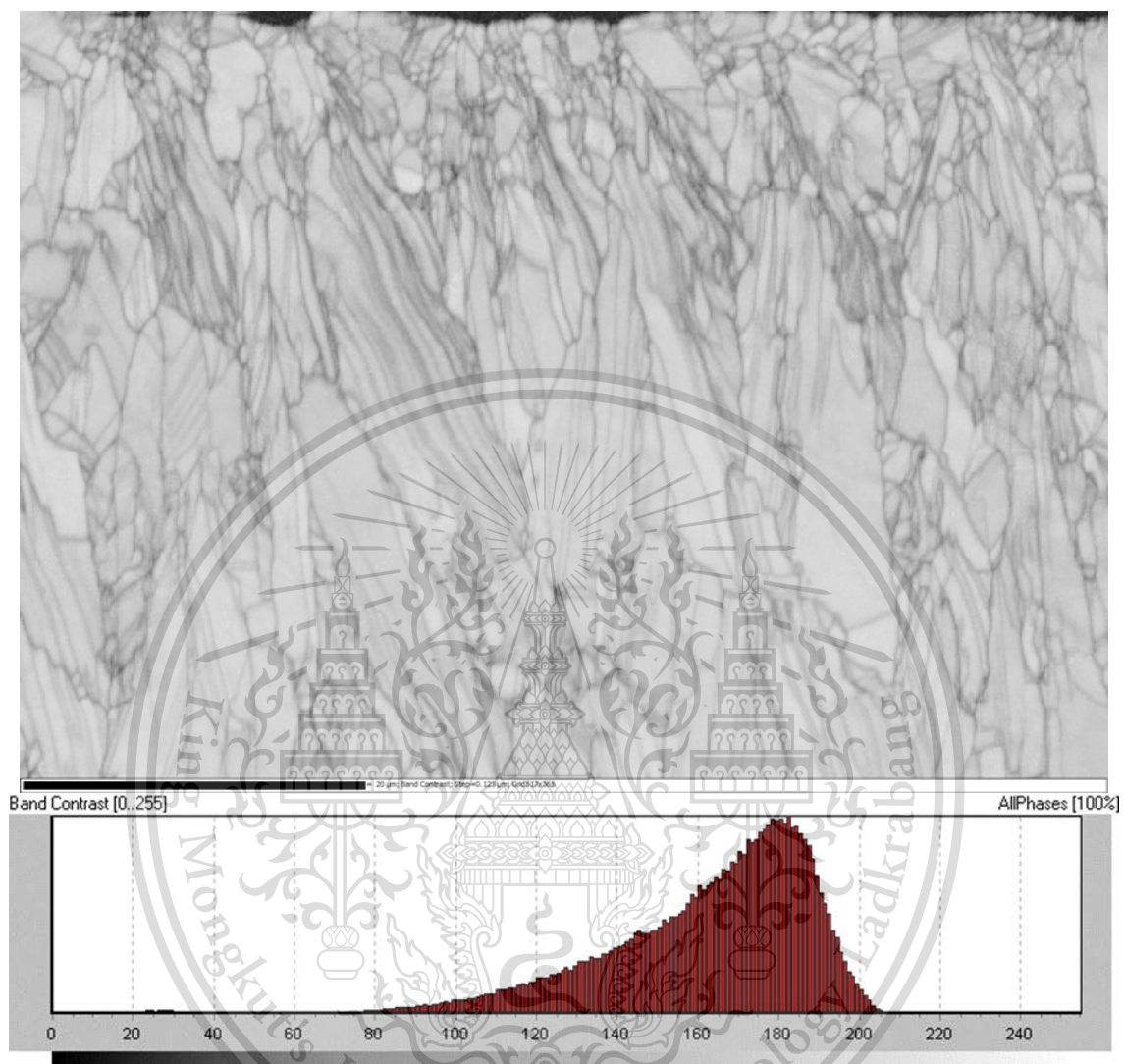
Phase Fraction

Phase Name	Phase Fraction (%)	Phase Count	Mean Band Contrast	Standard Deviation Band Contrast	Min Band Contrast	Max Band Contrast	Mean MAD	Standard Deviation MAD	Min MAD	Max MAD
Copper	77.83	146864	169.77	18.97	27.00	218.00	0.96	0.19	0.26	2.00
Zero Solutions	22.17	41841	134.03	28.89	0.00	207.00				



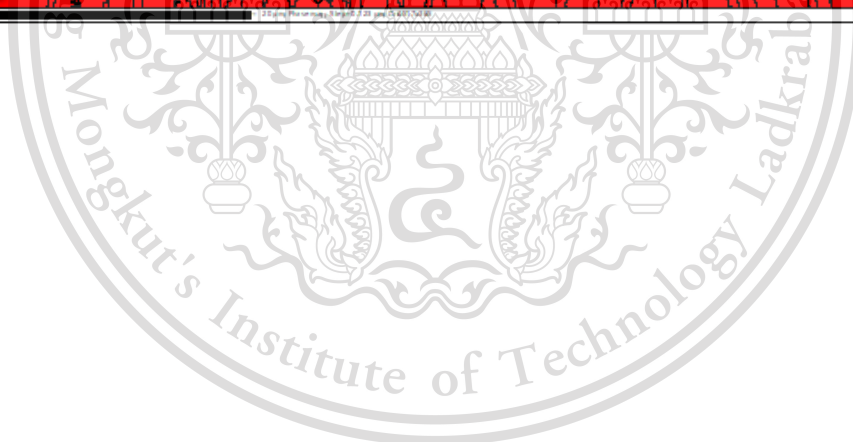
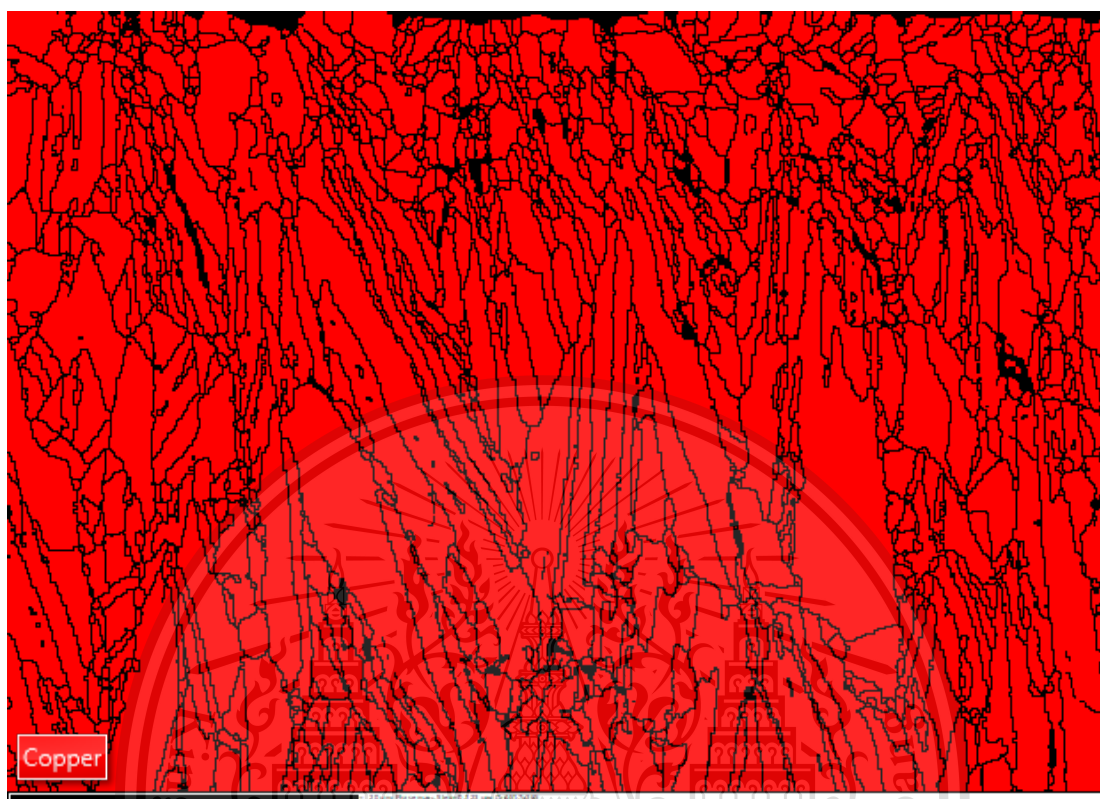
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Band Contrast



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Phase Map

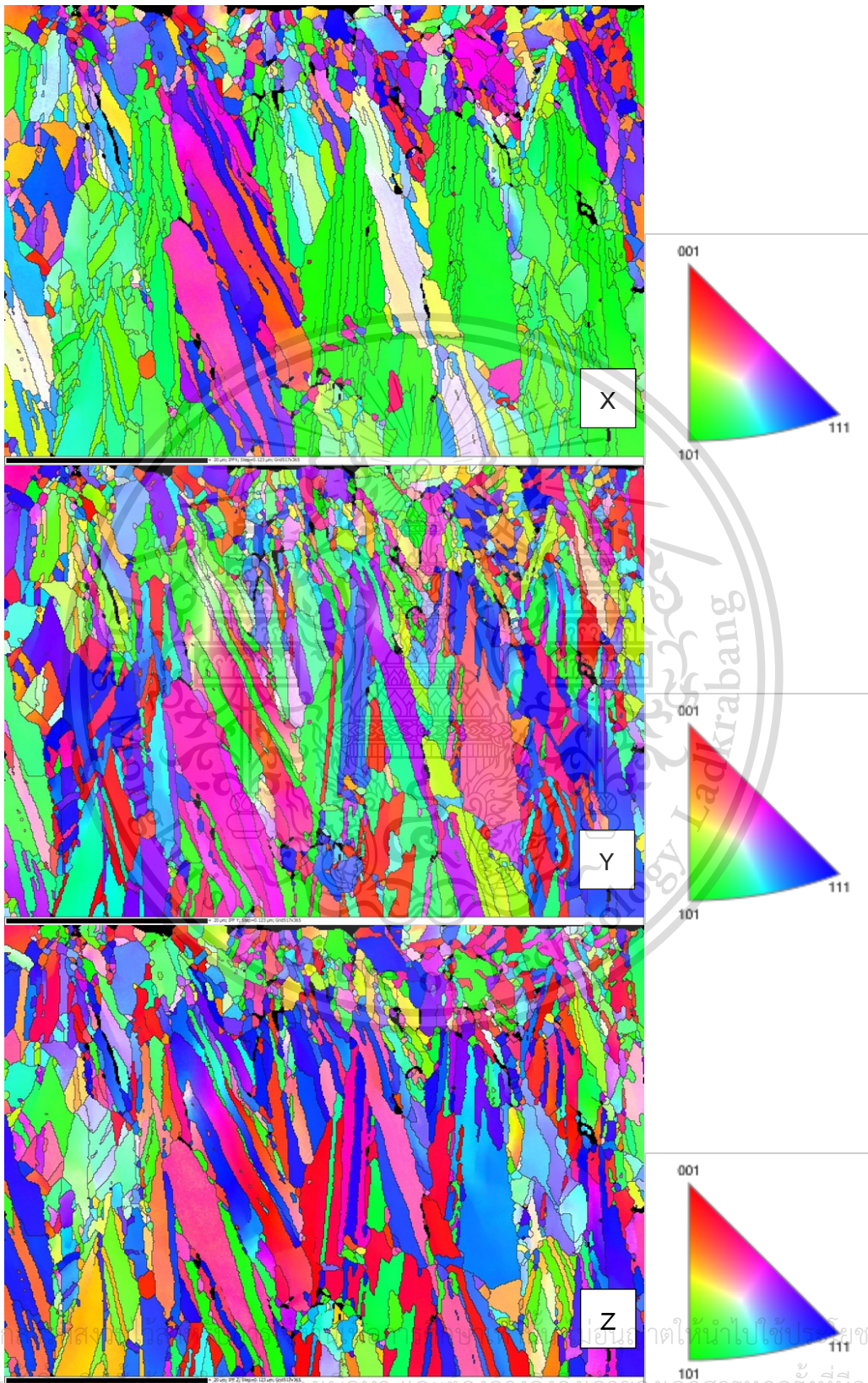


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use^{๘29} only, not allowed for commercial use.

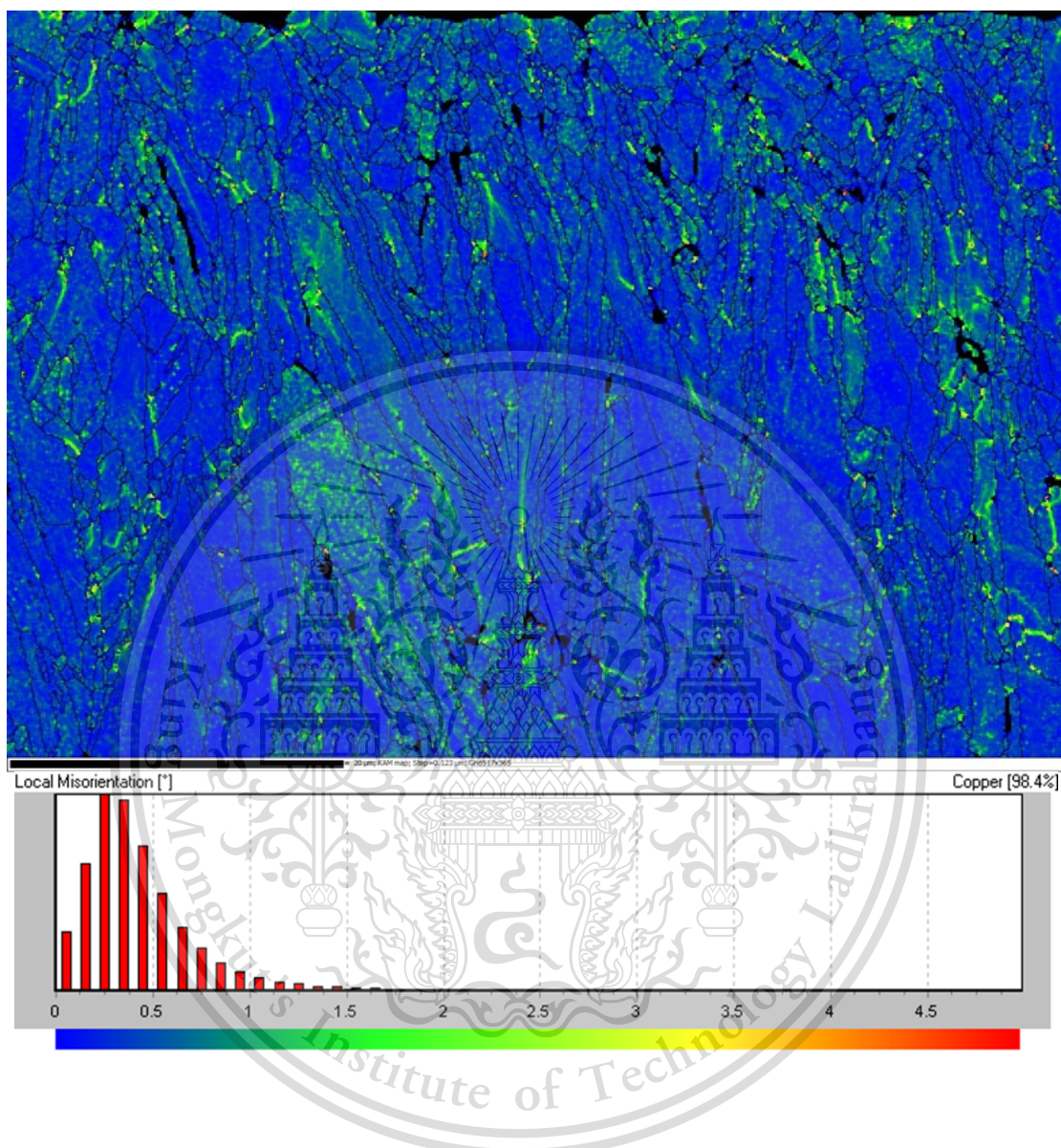
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

IPF Map



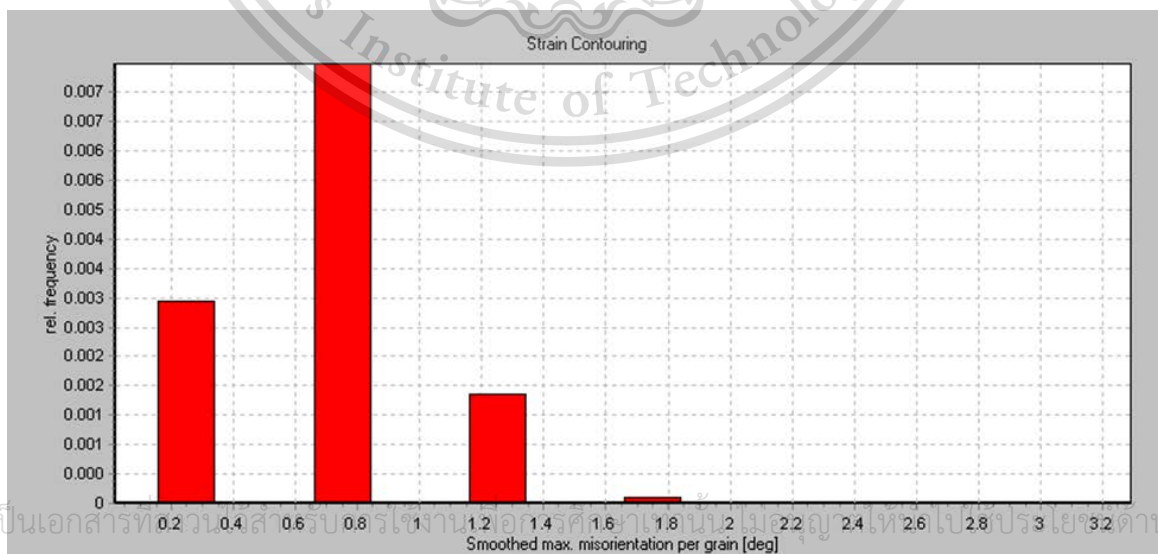
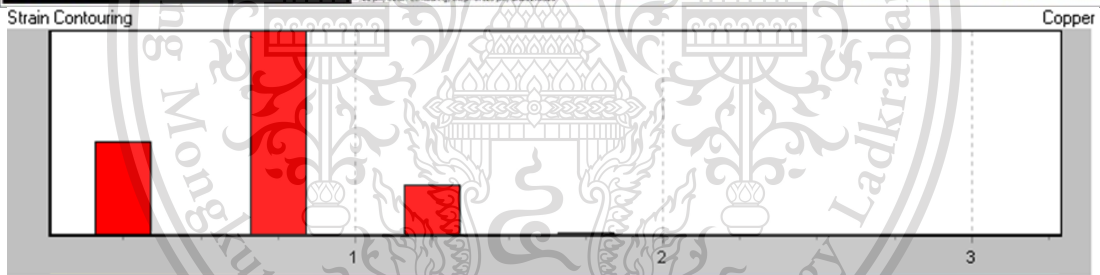
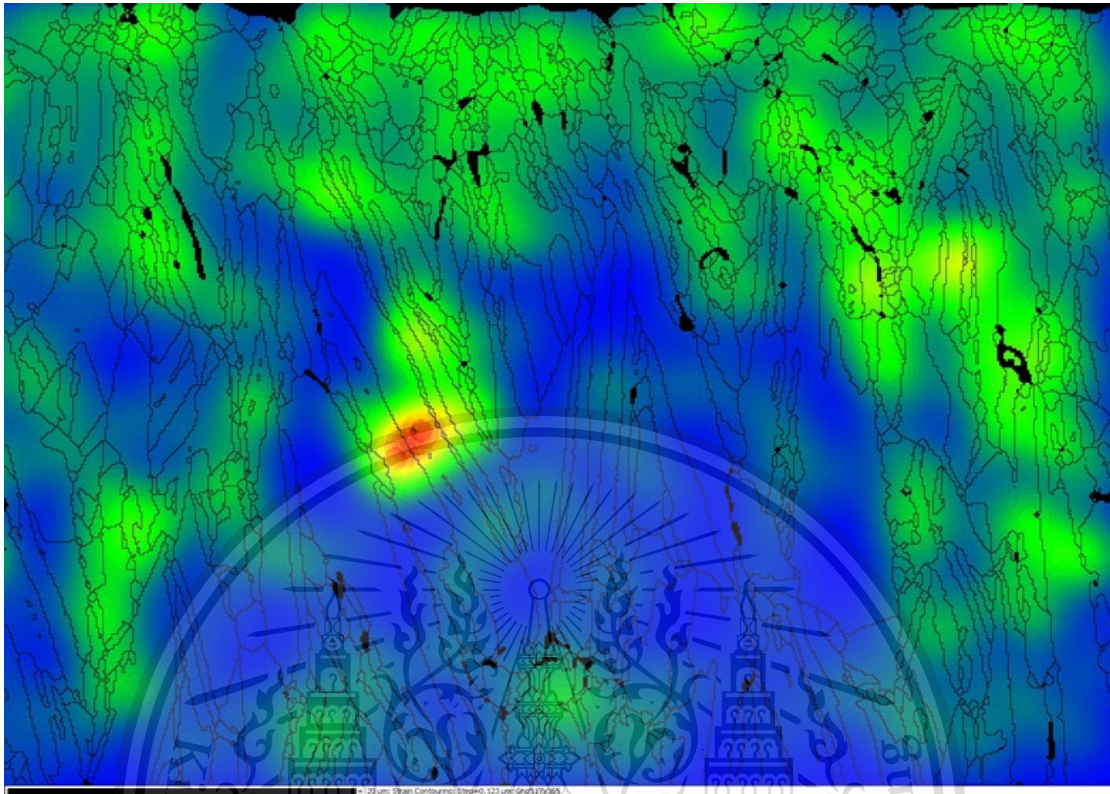
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KAM Map



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

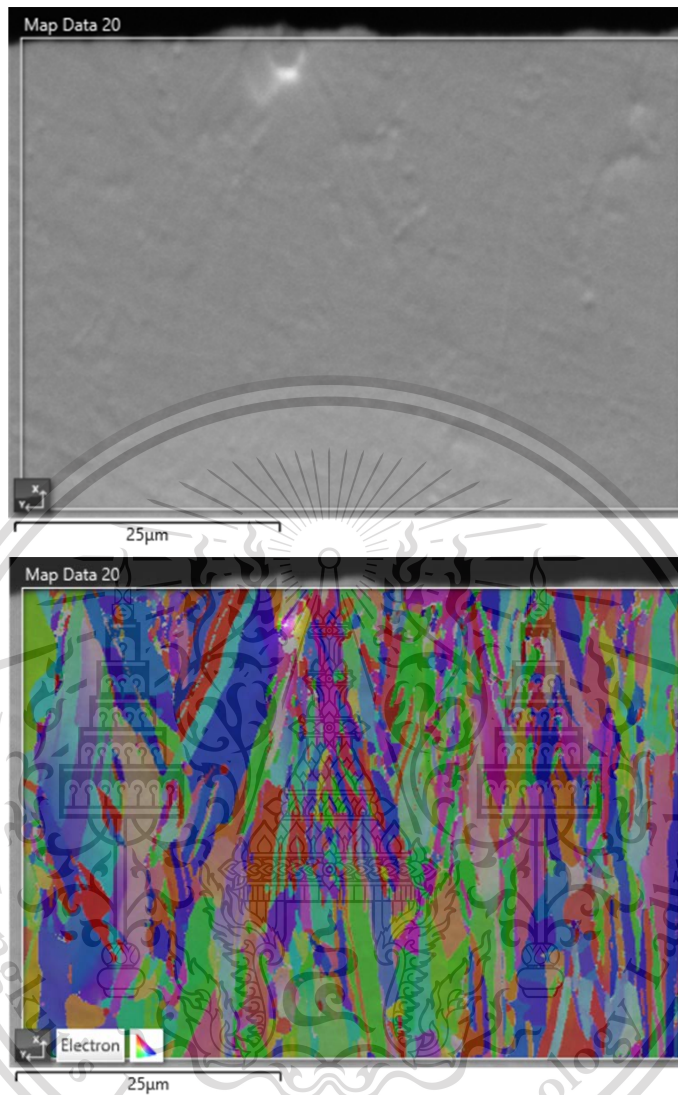
Strain Contouring



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบ EBSD ก่อนการบัดกรี R=5



Settings

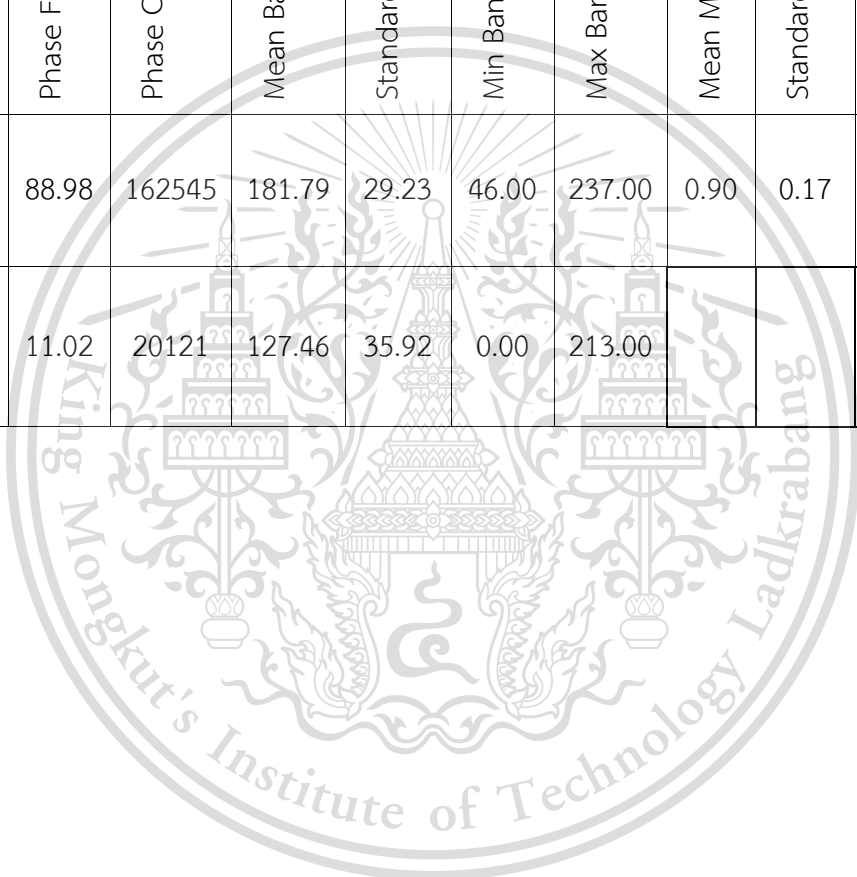
Accelerating Voltage	20.00 kV
Specimen Tilt (degrees)	70.00 °
Hit Rate	88.98 %
Speed of Acquisition	40.31 Hz

Phases for Acquisition

Phase	a	b	c	Alpha	Beta	Gamma	Space Group	Database
Copper	3.61 Å	3.61 Å	3.61 Å	90.00 °	90.00 °	90.00 °	225	HKL

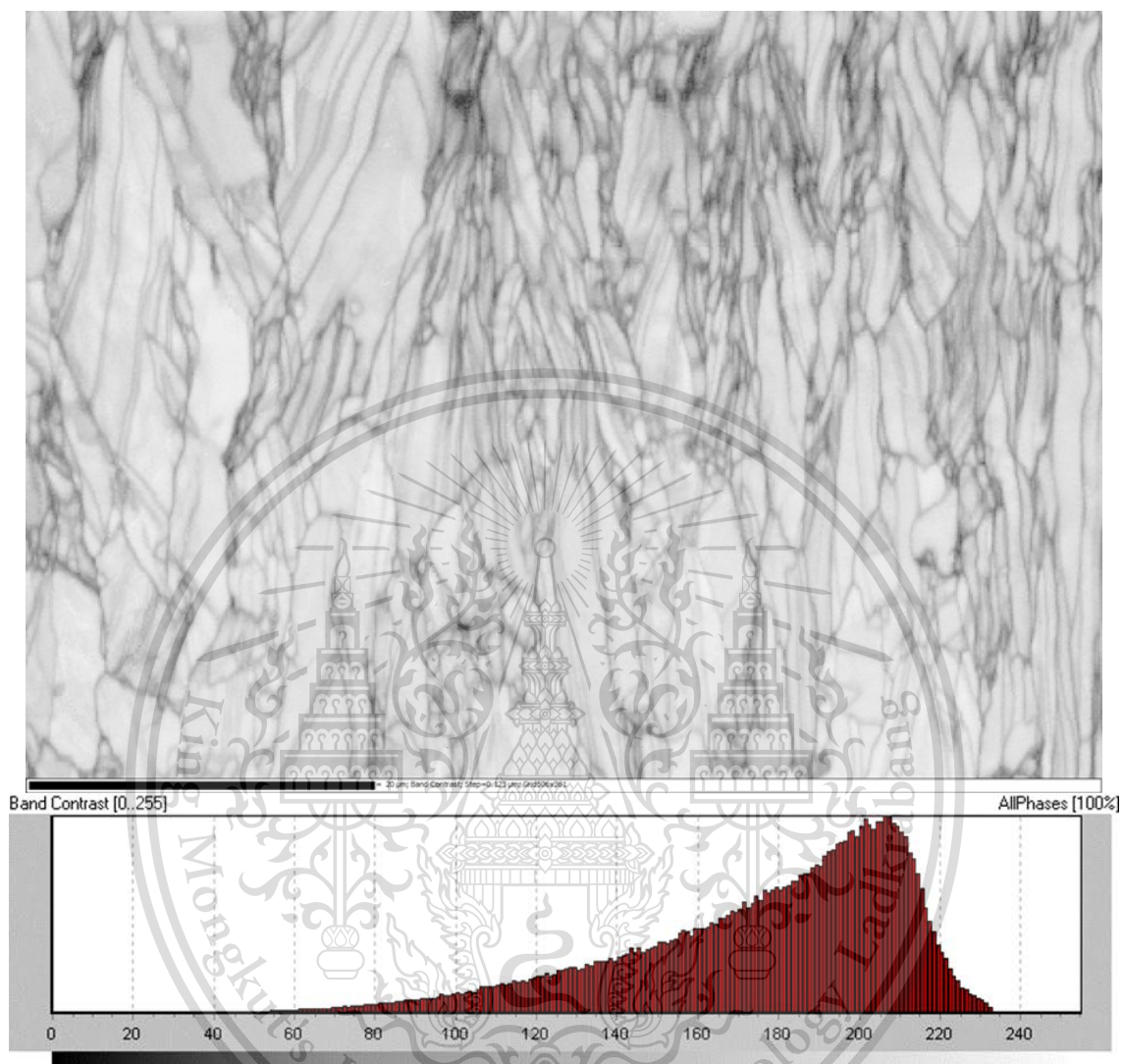
Phase Fraction

Phase Name	Phase Fraction (%)	Phase Count	Mean Band Contrast	Standard Deviation Band Contrast	Min Band Contrast	Max Band Contrast	Mean MAD	Standard Deviation MAD	Min MAD	Max MAD
Copper	88.98	162545	181.79	29.23	46.00	237.00	0.90	0.17	0.19	1.99
Zero Solutions	11.02	20121	127.46	35.92	0.00	213.00				



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Band Contrast



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use^{๗36} only, not allowed for commercial use.

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

Phase Map

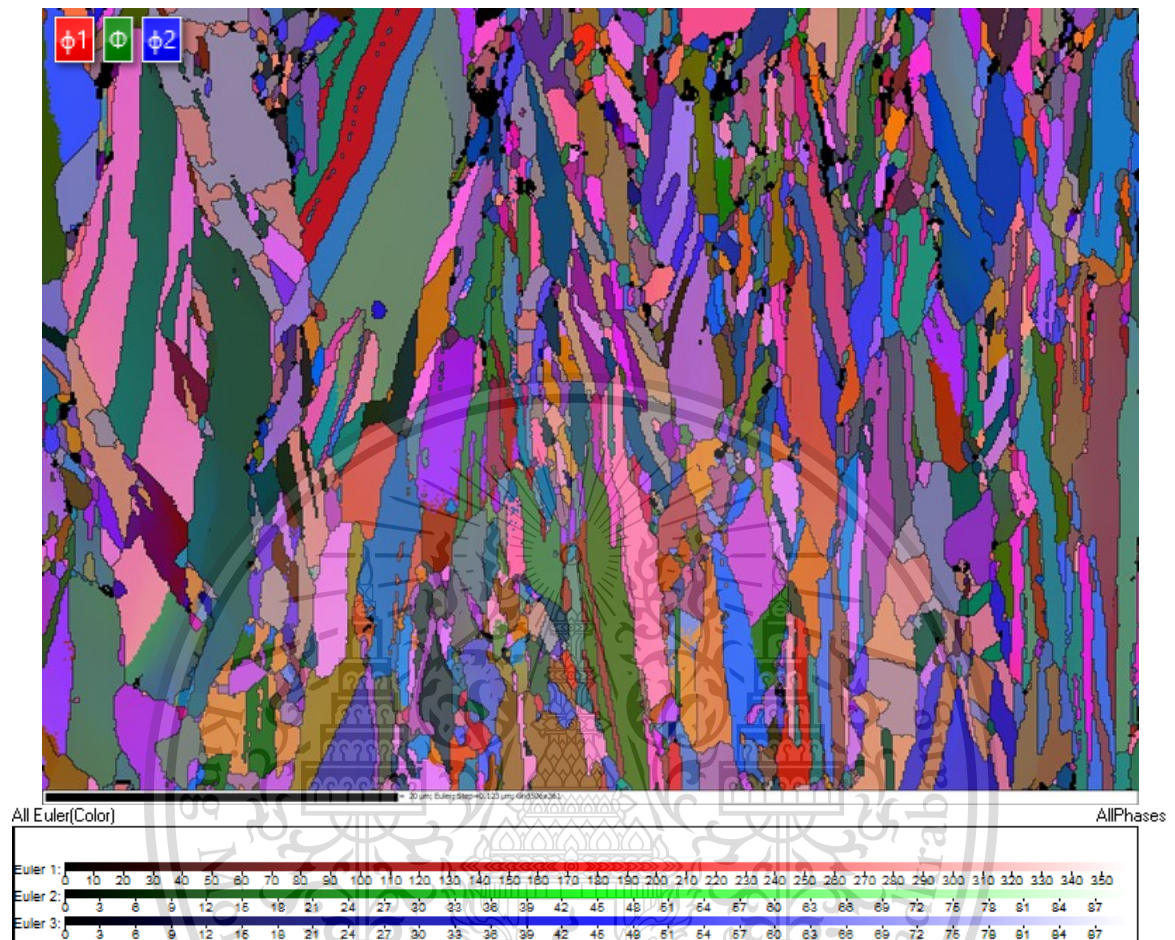


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use^{๗37} only, not allowed for commercial use.

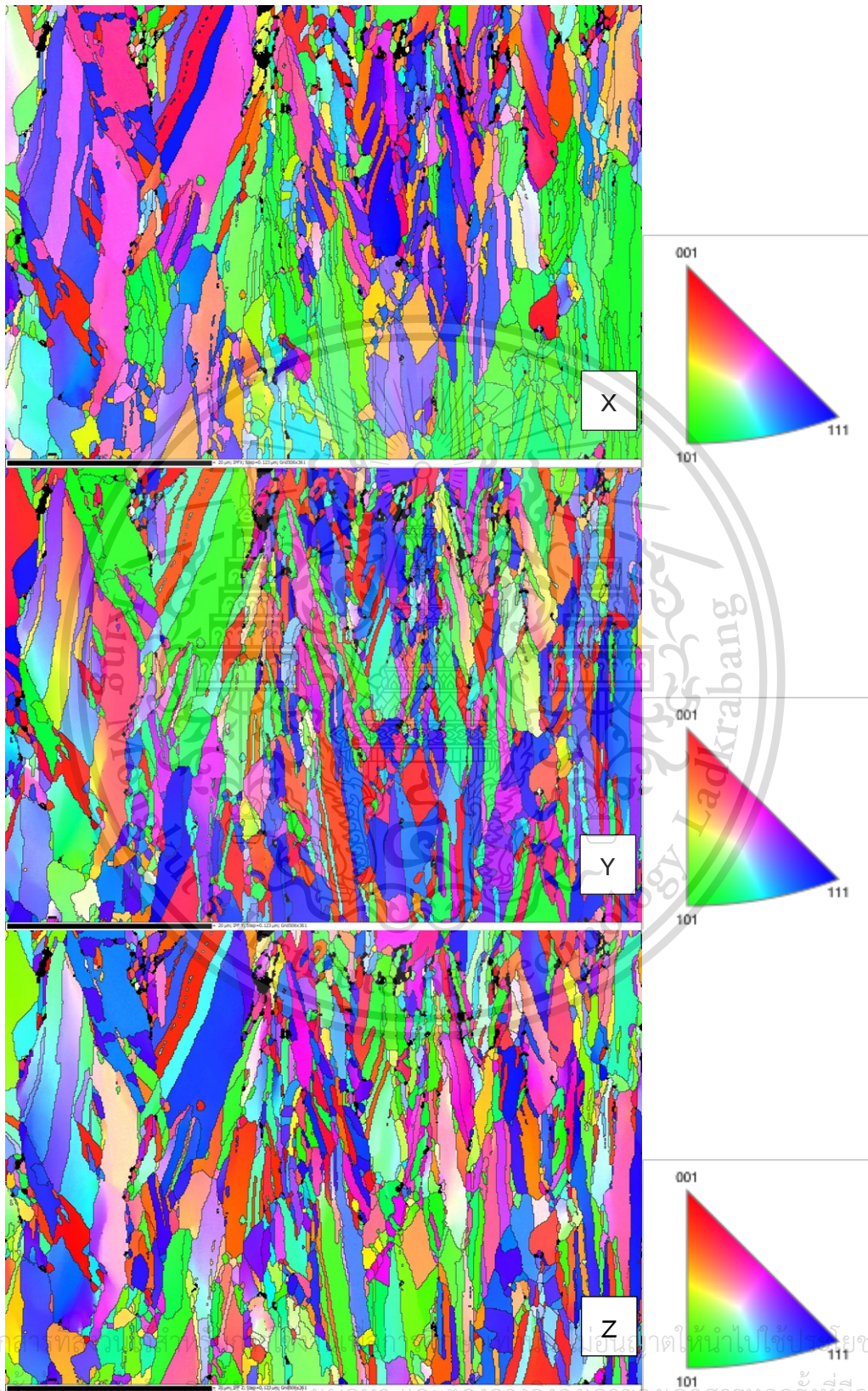
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Euler Map



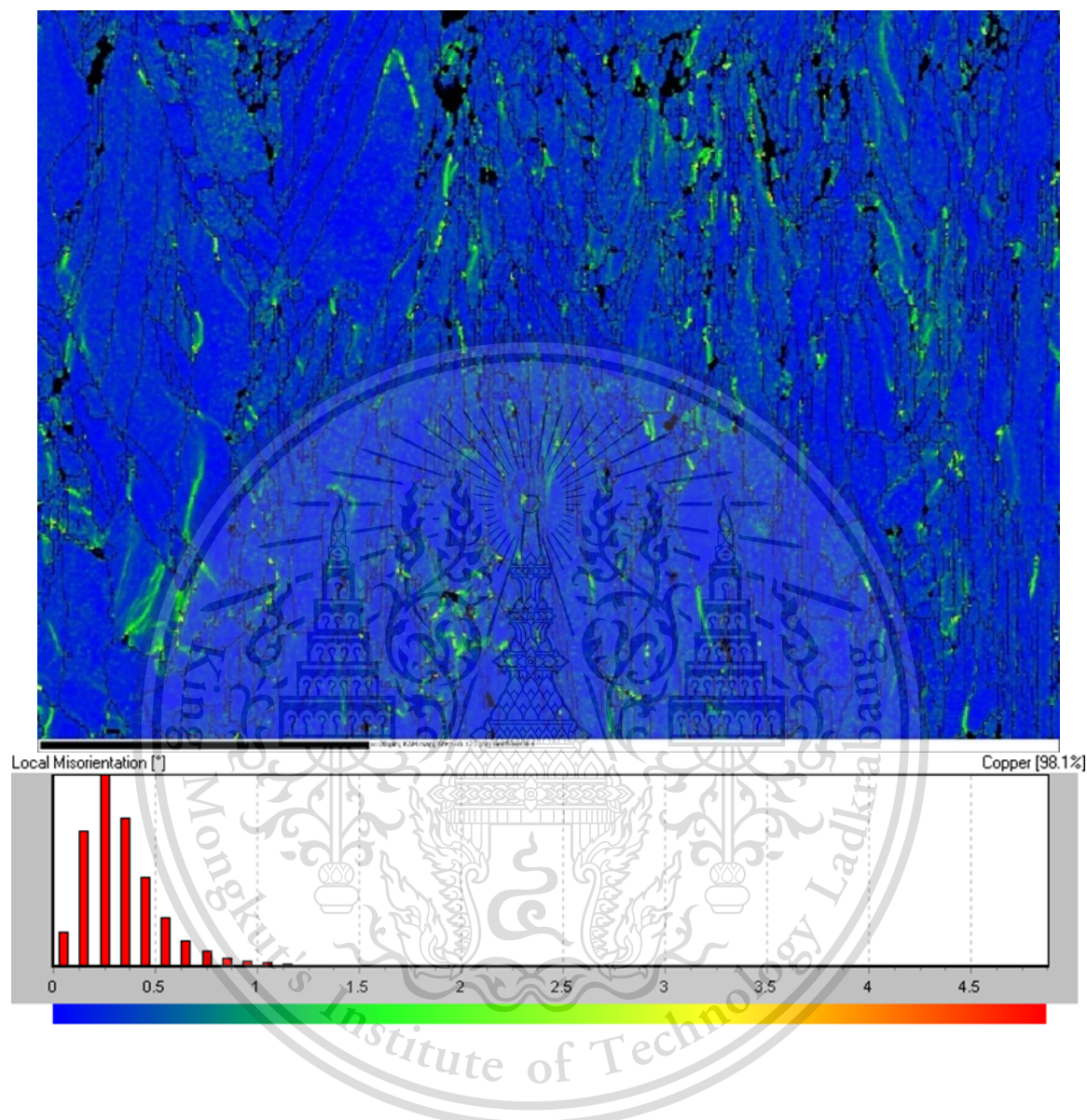
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IPF Map



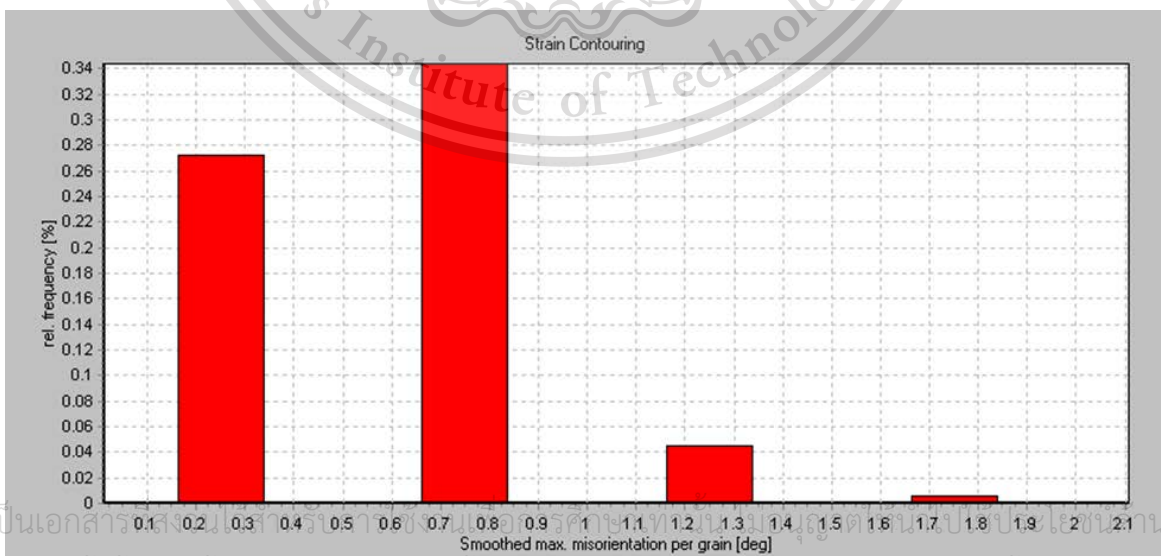
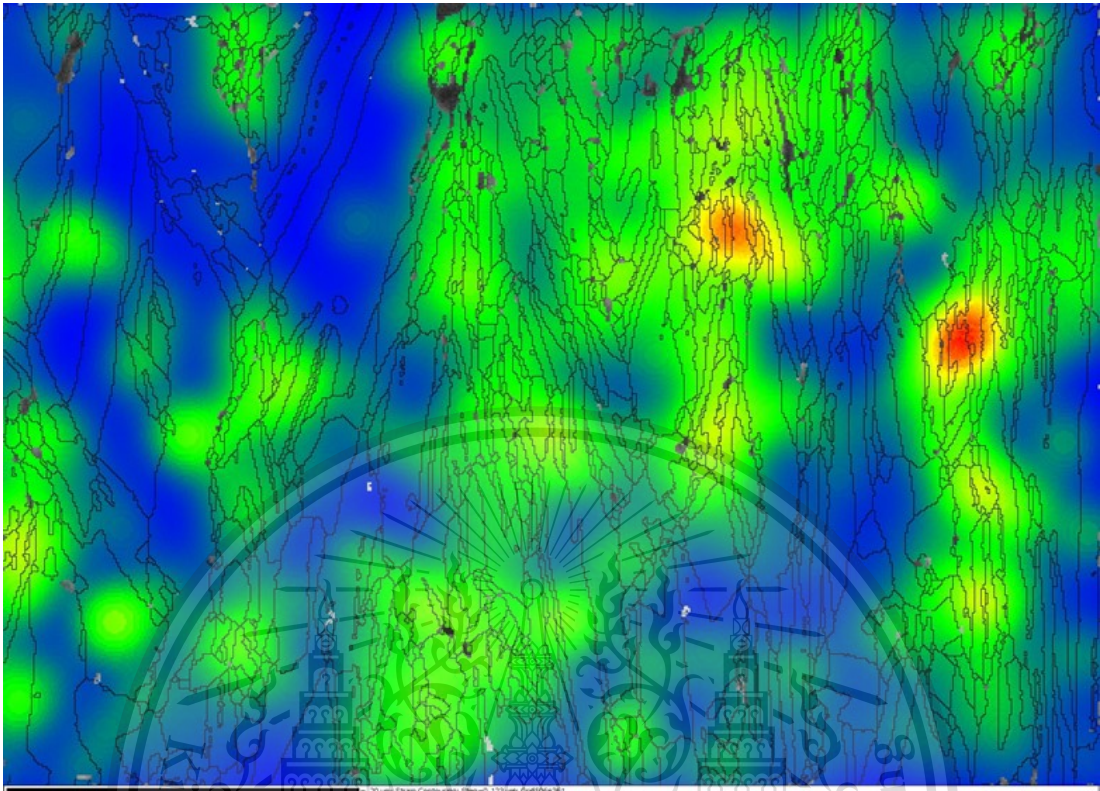
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น
ไม่ว่ากรณีใดๆ ห้ามนำไปใช้เพื่อการค้า และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KAM Map



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Strain Contouring



เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบ EBSD และ EDS หลังการบัดกรี R=∞



Settings

Accelerating Voltage	20.00 kV
Specimen Tilt (degrees)	70.00 °
Hit Rate	98.54 %
Speed of Acquisition	10.72 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use^{๗42} only, not allowed for commercial use.

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

Phases for Acquisition

Phase	a	b	c	Alpha	Beta	Gamma	Space Group	Database
Copper	3.61 Å	3.61 Å	3.61 Å	90.00 °	90.00 °	90.00 °	225	HKL
Tin beta	5.83 Å	5.83 Å	3.18 Å	90.00 °	90.00 °	90.00 °	141	HKL
Silver	4.09 Å	4.09 Å	4.09 Å	90.00 °	90.00 °	90.00 °	225	ICSD
Cu ₃ Sn HCP	5.54 Å	5.54 Å	4.35 Å	90.00 °	90.00 °	120.00 °	191	Cu ₃ Sn HCP17 5.hkl
Ag ₃ Sn	5.97 Å	4.78 Å	5.18 Å	90.00 °	90.00 °	90.00 °	59	ICSD
Cu ₆ Sn ₅	11.03 Å	7.29 Å	9.83 Å	90.00 °	98.82 °	90.00 °	15	Cu ₆ Sn 5.cry
Cu ₃ Sn Orthorhombic	5.51 Å	38.10 Å	4.32 Å	90.00 °	90.00 °	90.00 °	63	Cu ₃ Sn Orthorhombic c98.hkl
Cu ₆ Sn ₅ HCP	4.21 Å	4.21 Å	5.91 Å	90.00 °	90.00 °	120.00 °	194	Cu ₆ Sn 5HCP1 18.hkl
Cu ₁₀ Sn ₃	7.33 Å	7.33 Å	7.87 Å	90.00 °	90.00 °	120.00 °	176	Cu ₁₀ S n3_93. hkl
Cu ₄₁ Sn ₁₁	18.01 Å	18.01 Å	18.01 Å	90.00 °	90.00 °	90.00 °	216	Cu ₄₁ S n11_1 46.hkl

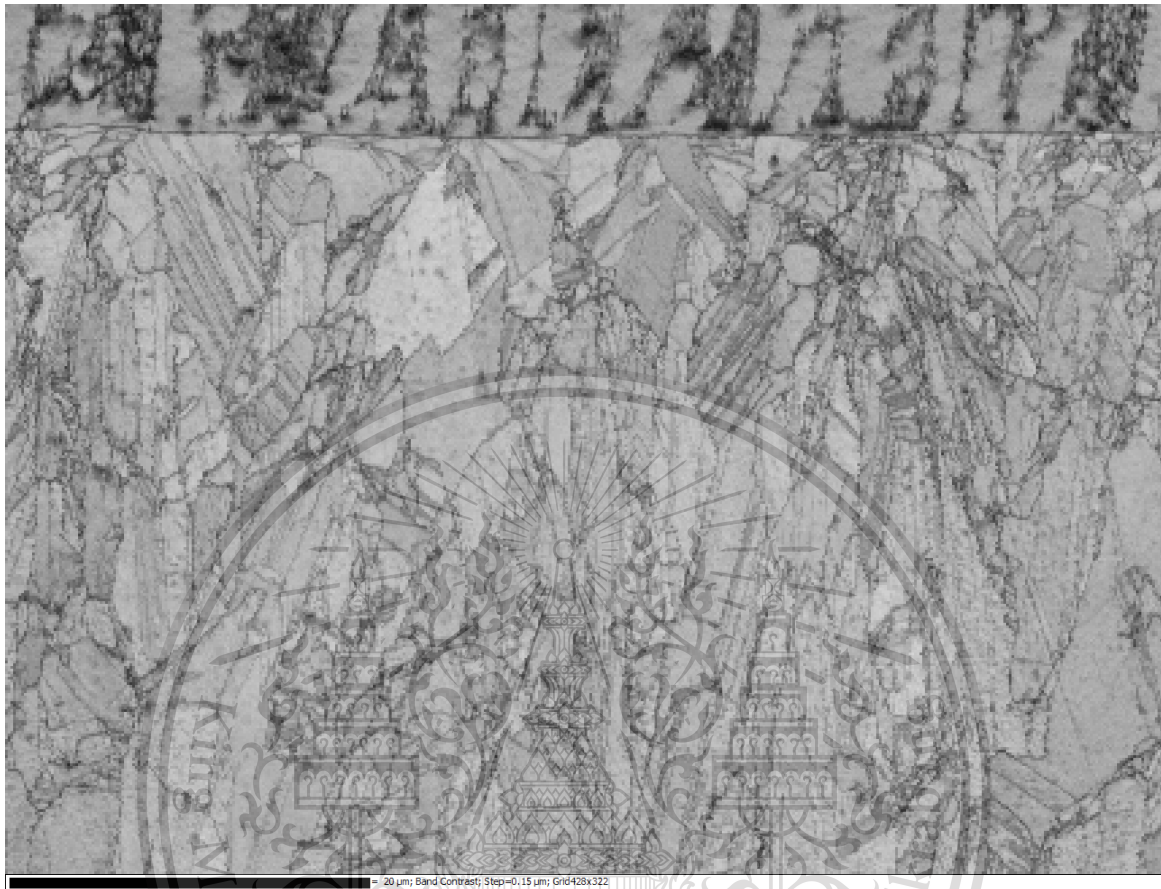
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Phase Fraction

Phase Name	Phase Fraction (%)	Phase Count	Mean Band Contrast	Standard Deviation Band Contrast	Min Band Contrast	Max Band Contrast	Mean MAD	Standard Deviation MAD	Min MAD	Max MAD
Copper	72.74	100250	173.09	18.95	41.00	220.00	0.57	0.16	0.13	1.99
Tin beta	13.12	18087	151.75	30.04	35.00	195.00	0.45	0.15	0.14	1.87
Silver	0.09	121	170.58	17.79	107.00	198.00	0.72	0.11	0.34	0.99
Cu ₃ Sn HCP	0.07	94	118.89	28.68	53.00	180.00	0.88	0.30	0.33	1.94
Ag ₃ Sn	3.79	5218	144.76	22.86	26.00	201.00	0.82	0.26	0.22	1.95
Cu ₆ Sn ₅	2.05	2831	114.55	27.97	25.00	191.00	1.19	0.36	0.31	2.00
Cu ₃ Sn Orthorhombic	0.33	460	107.77	28.07	34.00	175.00	1.29	0.34	0.43	2.00
Cu ₆ Sn ₅ HCP	4.79	6608	147.55	21.02	27.00	196.00	0.65	0.23	0.18	1.97
Cu ₁₀ Sn ₃	0.35	478	110.73	29.83	40.00	182.00	1.12	0.35	0.31	2.00
Cu ₄₁ Sn ₁₁	1.20	1658	141.00	26.08	33.00	201.00	0.78	0.33	0.21	1.98
Zero Solutions	1.46	2011	100.94	30.91	0.00	191.00				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Band contrast

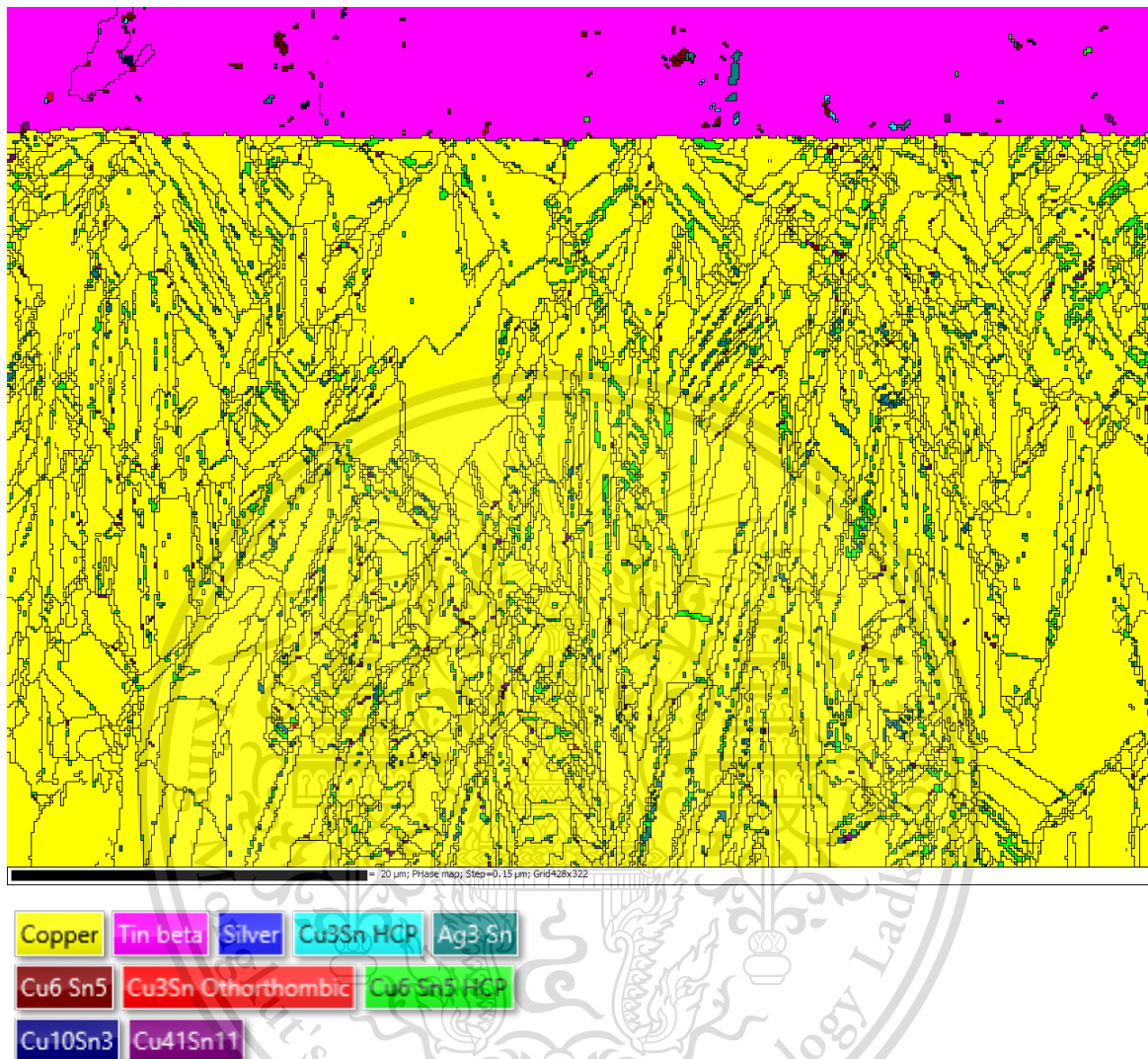


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use^{๗45} only, not allowed for commercial use.

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

Phase Map



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use^{๙46} only, not allowed for commercial use.

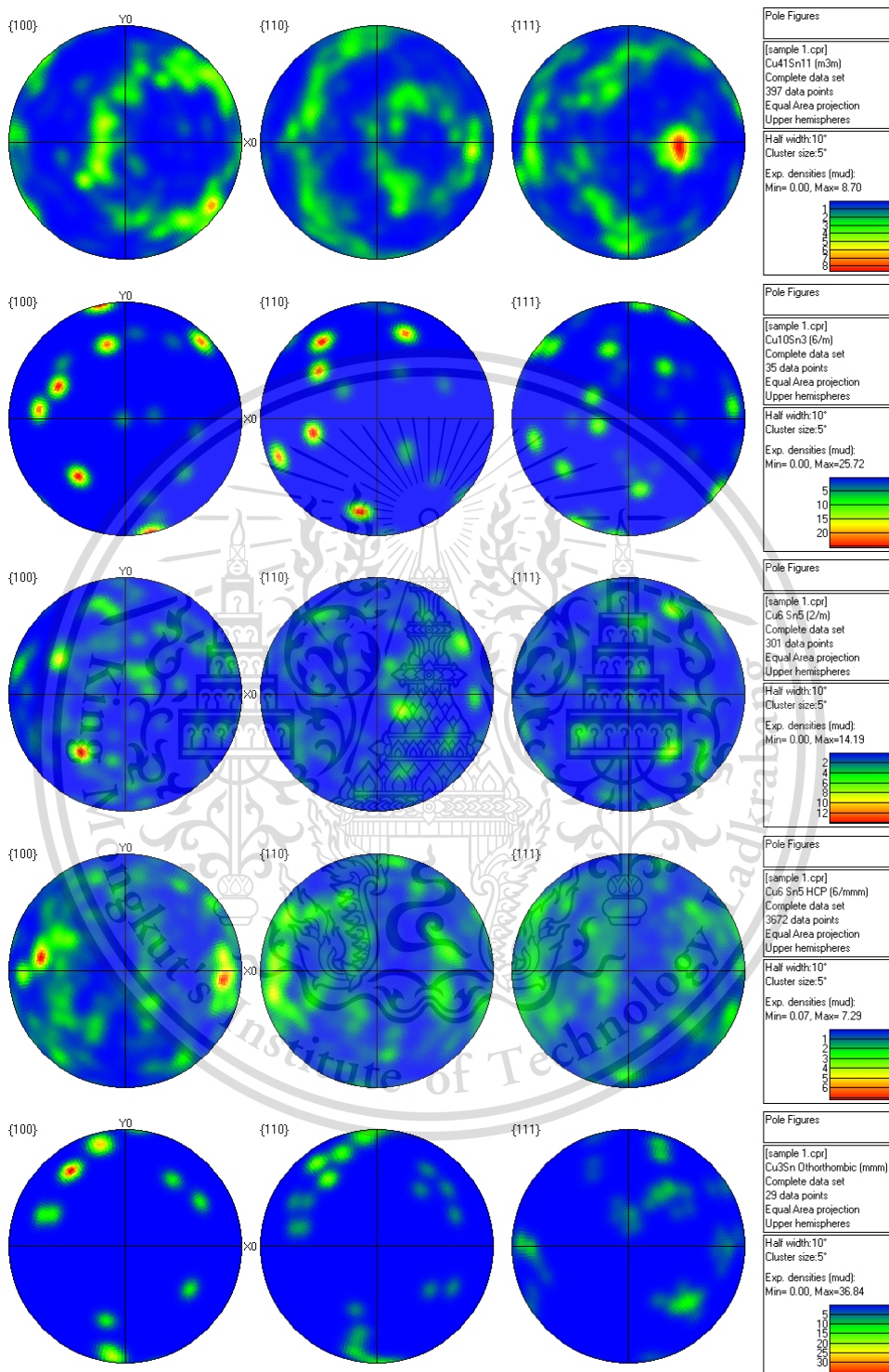
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



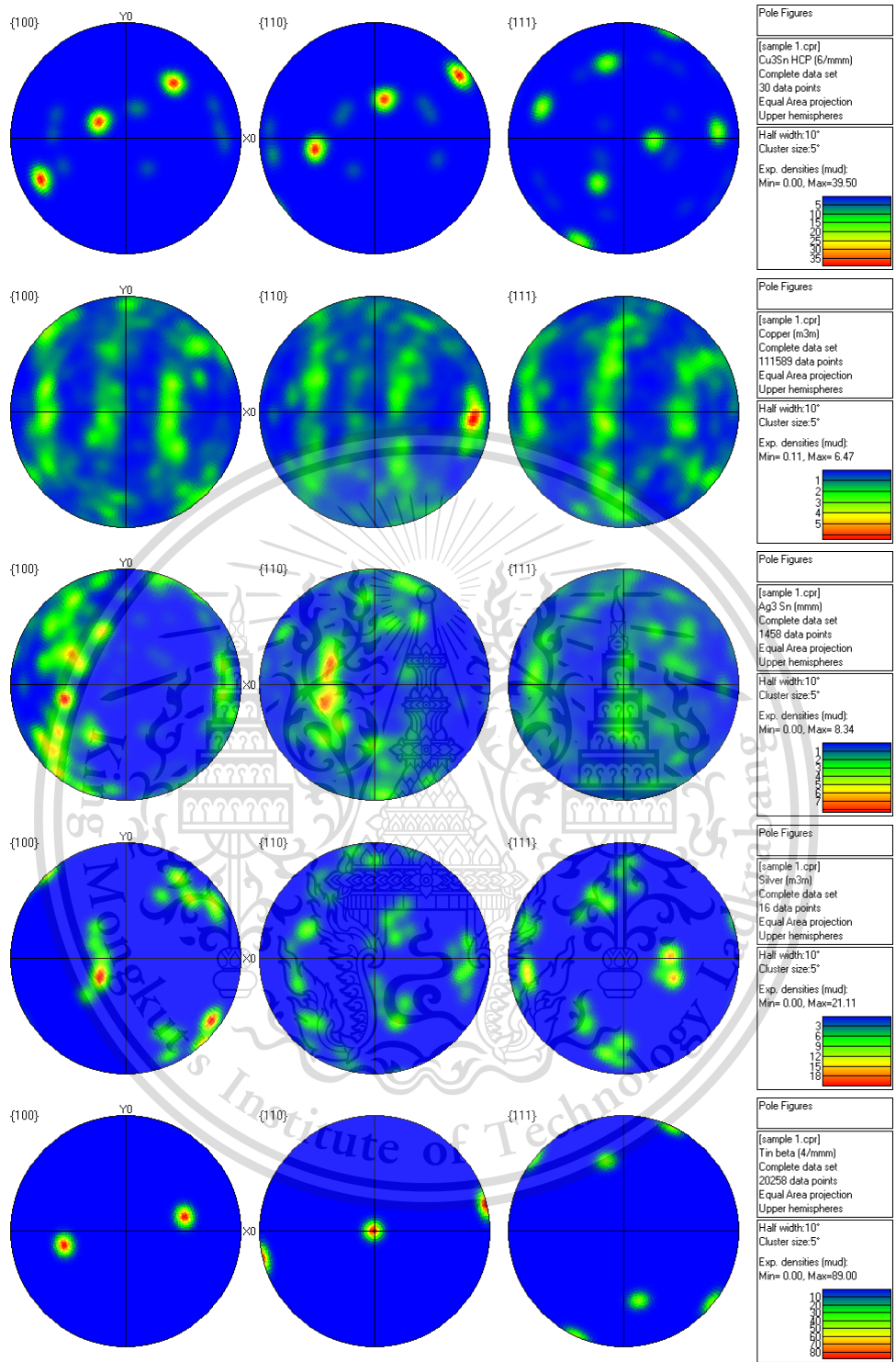
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปตีพิมพ์หรือจำหน่ายการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pole Figure

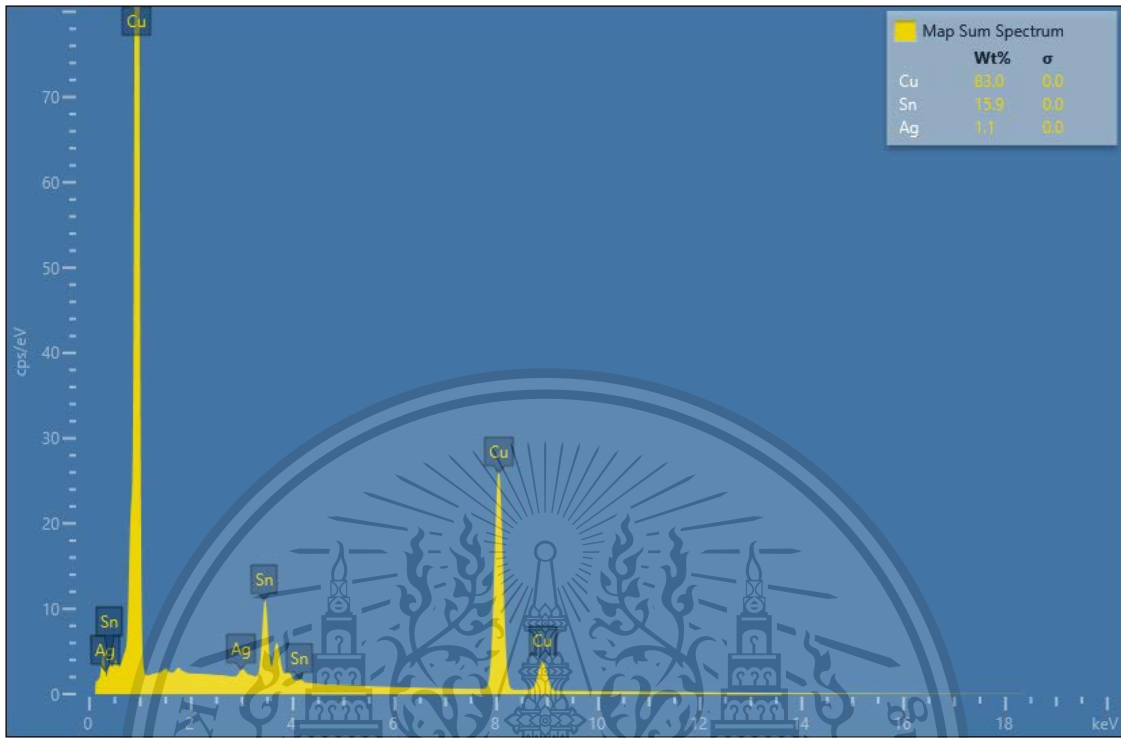


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EDS



Element	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Wt% Sigma	Standard Label	Factory Standard	Standard Calibration Date
Cu	K series	269.60	2.69600	83.02	0.01	Cu	Yes	
Ag	L series	3.08	0.03080	1.09	0.01	Ag	Yes	
Sn	L series	45.02	0.45022	15.89	0.01	Sn	Yes	
Total:				100.00				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EDS Cu K series



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use^{๗51} only, not allowed for commercial use.

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

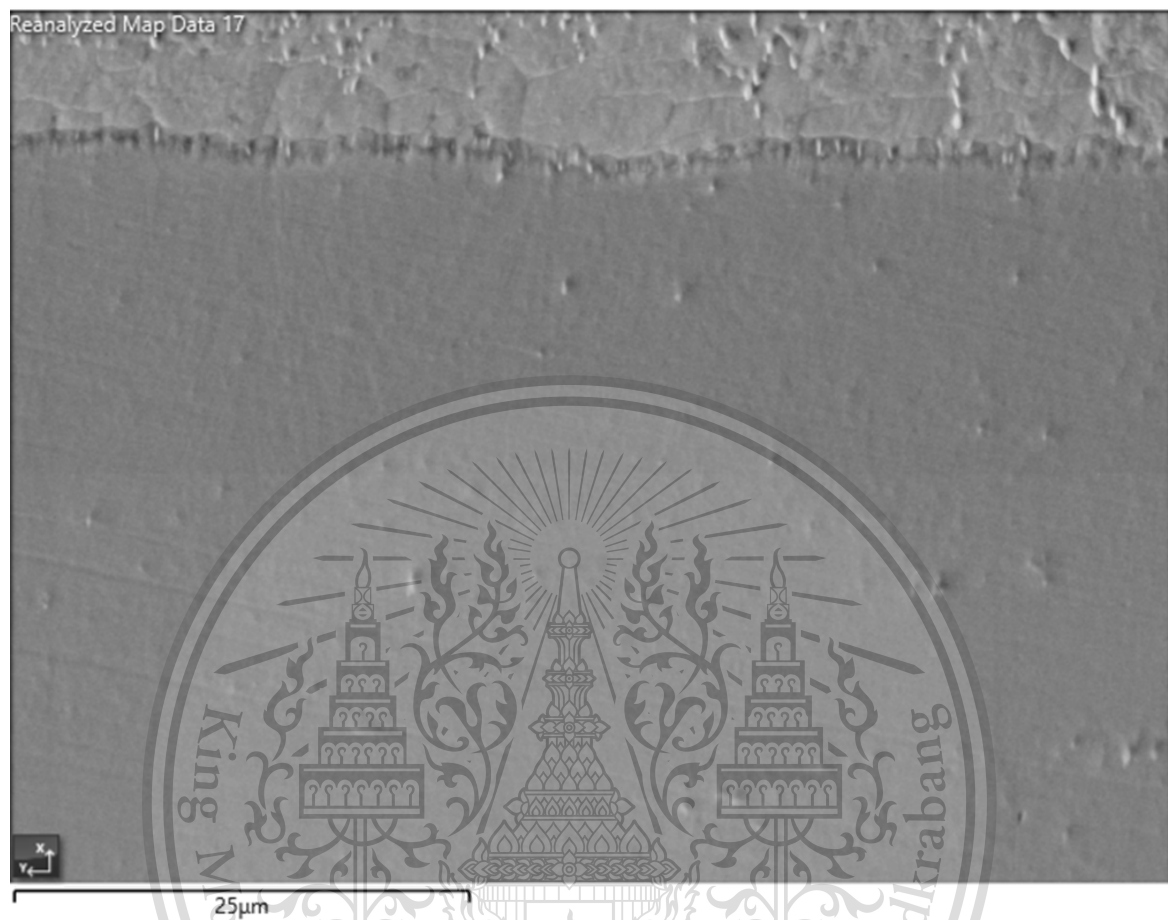


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use ^{๗53} only, not allowed for commercial use.

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

ผลการทดสอบ EBSD และ EDS หลังการบัดกรี R=5



Settings

Accelerating Voltage	15.00 kV
Specimen Tilt (degrees)	70.00 °
Hit Rate	88.04 %
Reanalysis Hit Rate	88.04 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Phases for Acquisition

Phase	a	b	c	Alpha	Beta	Gamma	Space Group	Database
Copper	3.61 Å	3.61 Å	3.61 Å	90.00 °	90.00 °	90.00 °	225	HKL
Tin beta	5.83 Å	5.83 Å	3.18 Å	90.00 °	90.00 °	90.00 °	141	HKL
Silver	4.09 Å	4.09 Å	4.09 Å	90.00 °	90.00 °	90.00 °	225	ICSD
Cu ₃ Sn HCP	5.54 Å	5.54 Å	4.35 Å	90.00 °	90.00 °	120.00 °	191	Cu ₃ Sn HCP17 5.hkl
Ag ₃ Sn	5.97 Å	4.78 Å	5.18 Å	90.00 °	90.00 °	90.00 °	59	ICSD
Cu ₆ Sn ₅	11.03 Å	7.29 Å	9.83 Å	90.00 °	98.82 °	90.00 °	15	Cu ₆ Sn 5.cry
Cu ₃ Sn Orthorhombic	5.51 Å	38.10 Å	4.32 Å	90.00 °	90.00 °	90.00 °	63	Cu ₃ Sn Orthorhombic c98.hkl
Cu ₆ Sn ₅ HCP	4.21 Å	4.21 Å	5.91 Å	90.00 °	90.00 °	120.00 °	194	Cu ₆ Sn 5HCP1 18.hkl
Cu ₁₀ Sn ₃	7.33 Å	7.33 Å	7.87 Å	90.00 °	90.00 °	120.00 °	176	Cu ₁₀ S n3_93. hkl
Cu ₄₁ Sn ₁₁	18.01 Å	18.01 Å	18.01 Å	90.00 °	90.00 °	90.00 °	216	Cu ₄₁ S n11_1 46.hkl

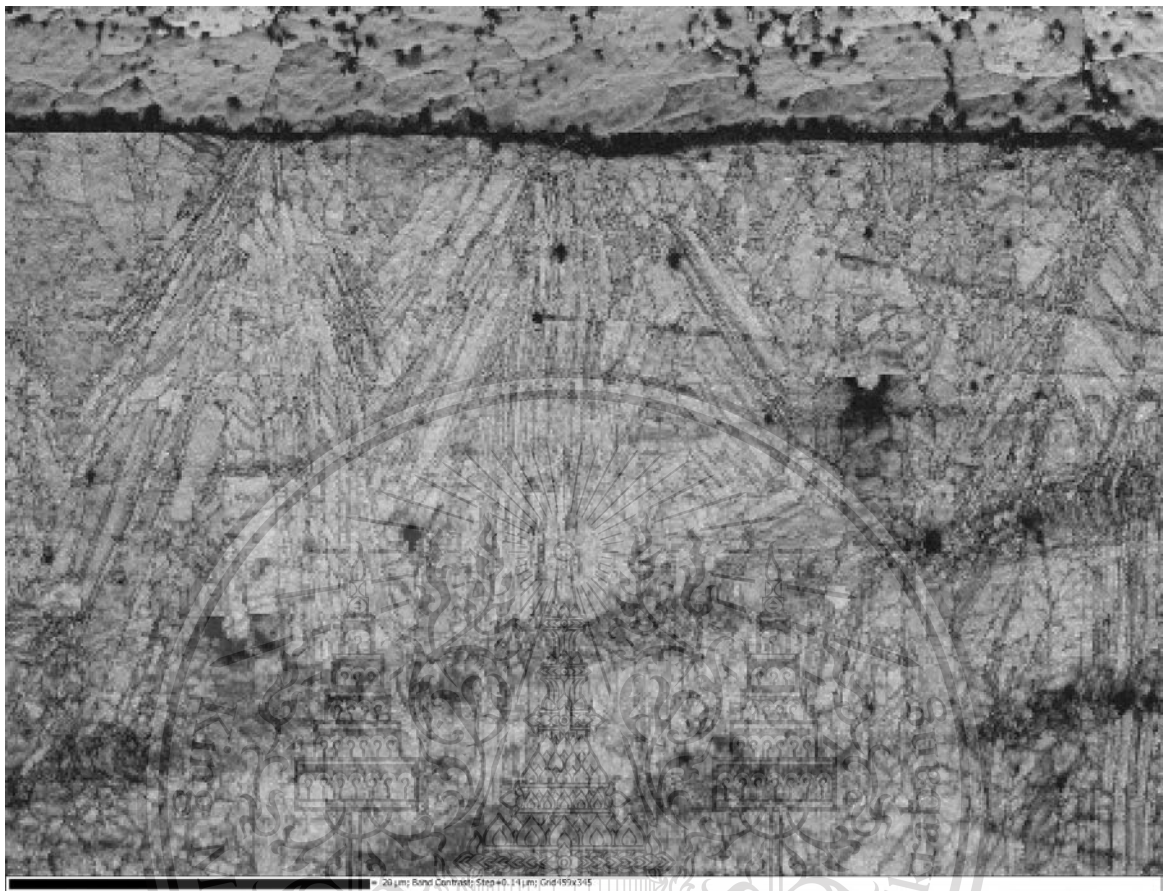
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Phase Fraction

Phase Name	Phase Fraction (%)	Phase Count	Mean Band Contrast	Standard Deviation Band Contrast	Min Band Contrast	Max Band Contrast	Mean MAD	Standard Deviation MAD	Min MAD	Max MAD
Copper	31.59	50029	138.67	28.68	23.00	225.00	0.88	0.30	0.03	2.00
Tin beta	12.11	19184	135.08	26.88	26.00	216.00	0.84	0.25	0.14	2.00
Silver	1.52	2409	140.87	23.43	52.00	205.00	0.77	0.26	0.08	1.96
Cu3Sn HCP	1.45	2303	133.21	30.01	27.00	210.00	1.16	0.40	0.15	2.00
Ag3 Sn	0.57	905	122.49	32.73	29.00	199.00	1.07	0.38	0.22	2.00
Cu6 Sn5	6.31	9988	120.00	36.20	22.00	209.00	1.12	0.39	0.13	2.00
Cu3Sn Orthorhombic	11.03	17473	118.57	38.68	19.00	208.00	1.18	0.43	0.05	2.00
Cu6 Sn5 HCP	12.78	20239	128.56	31.41	23.00	213.00	1.25	0.38	0.13	2.00
Cu10Sn3	4.57	7236	111.22	37.11	20.00	215.00	1.27	0.39	0.16	2.00
Cu41Sn11	6.10	9656	124.83	31.44	22.00	210.00	1.03	0.38	0.13	2.00
Zero Solutions	11.96	18933	96.63	42.67	0.00	207.00				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Band contrast

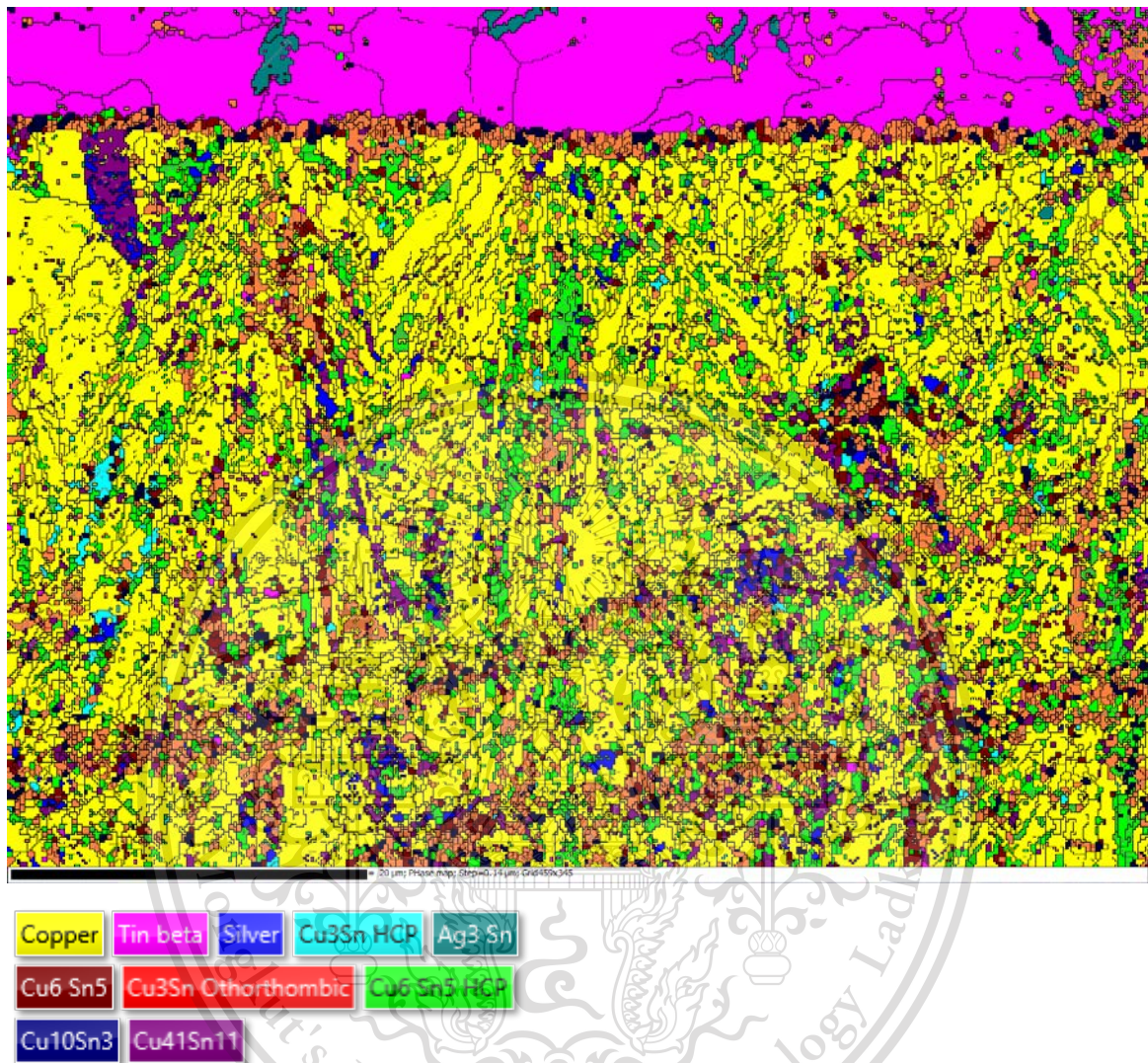


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use^{๗57} only, not allowed for commercial use.

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

Phase Map



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use^{๕58} only, not allowed for commercial use.

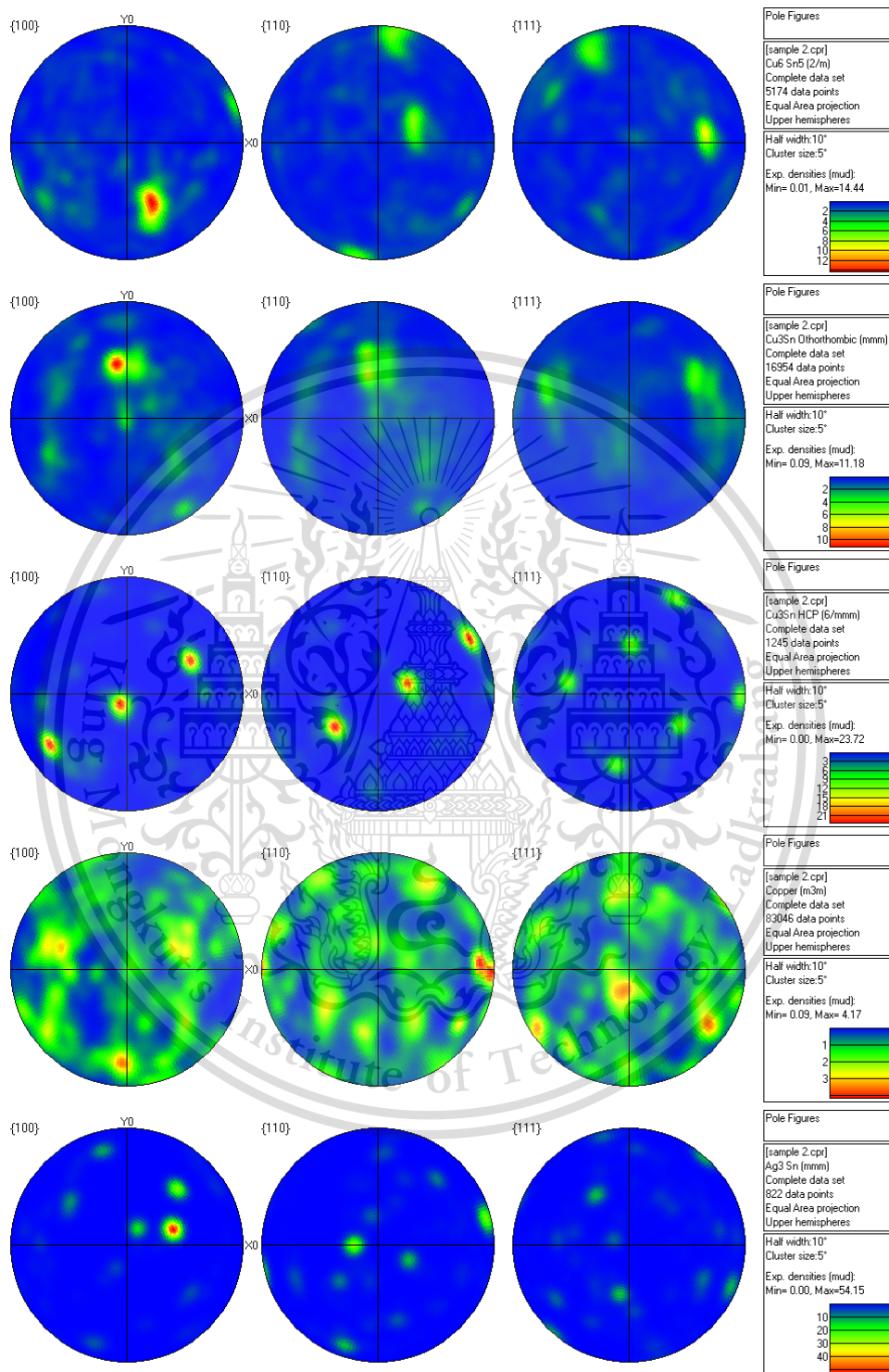
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



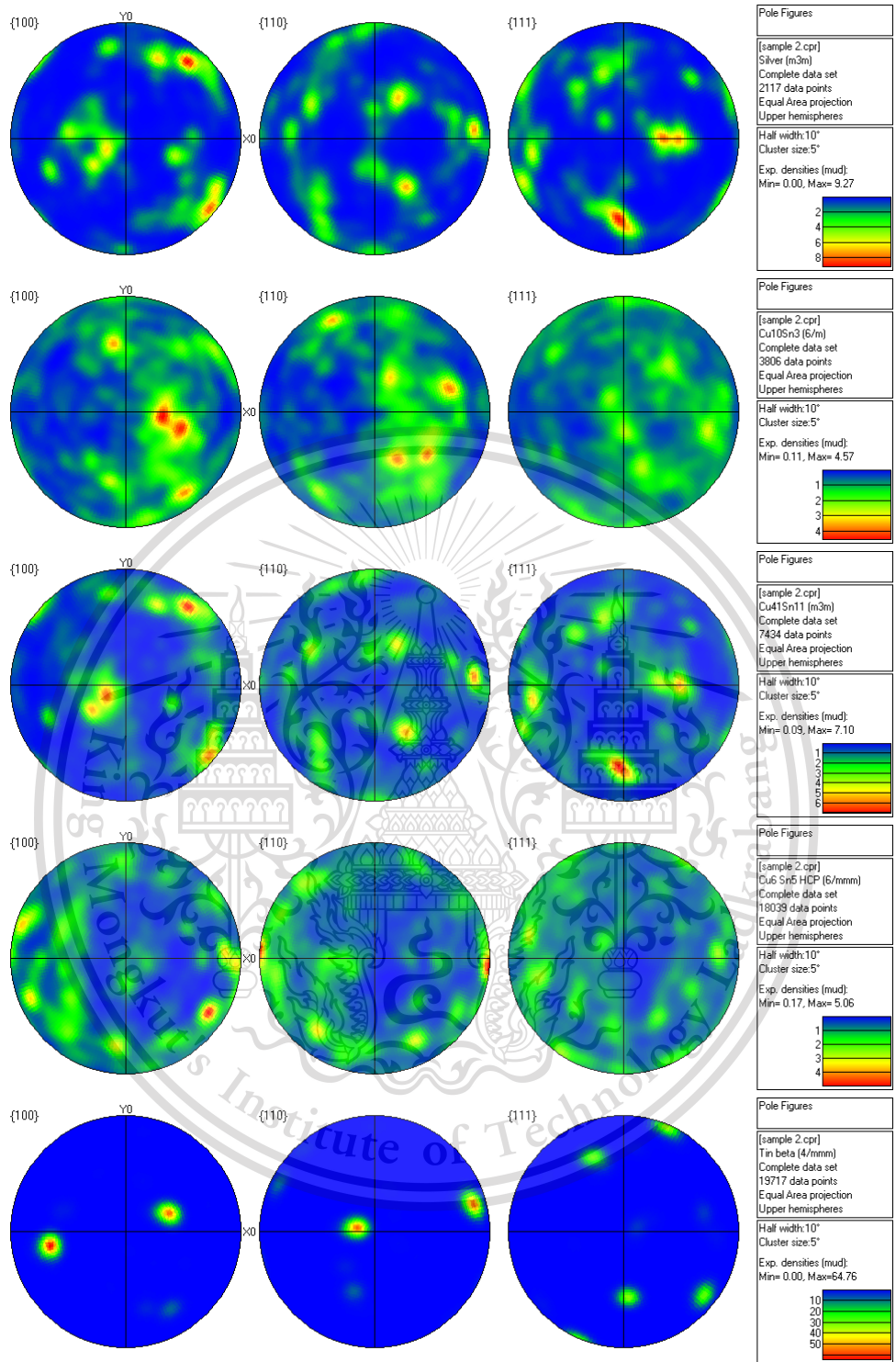
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปตีพิมพ์หรือจำหน่ายการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pole Figure

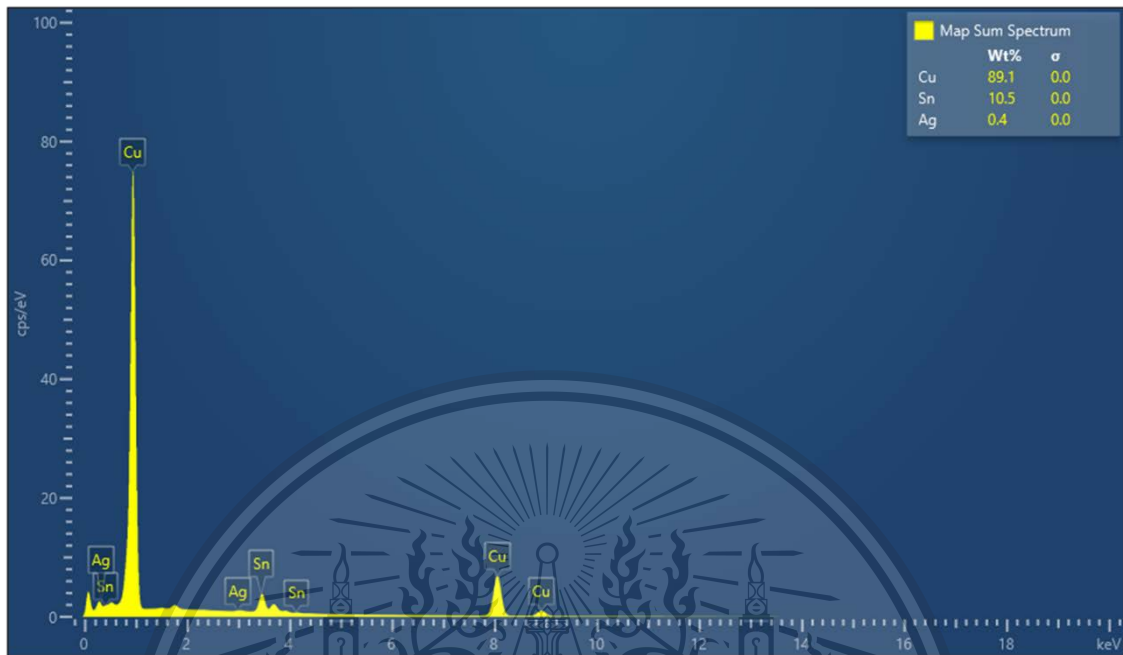


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EDS



Element	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Wt% Sigma	Standard Label	Factory Standard	Standard Calibration Date
Cu	L series	54.63	0.54633	89.14	0.02	Pure Element	Yes	
Ag	L series	0.22	0.00225	0.38	0.01	Pure Element	Yes	
Sn	L series	6.15	0.06152	10.49	0.01	Pure Element	Yes	
Total:				100.00				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EDS Cu L series



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use^{พ63} only, not allowed for commercial use.

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use ^{๗64} only, not allowed for commercial use.

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use^{พ65} only, not allowed for commercial use.

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