การผลิตเครื่องประดับโลหะหลากสีด้วยเทคนิคโมกุเม่กาเน่
Multicolored metal jewelry making by Mokeme Gane

ปริญญา ชินดุษฎีกุล
พิมพ์ทอง ทองนพคุณ
ดาวรรณ หมัดหลี
อรุณี เทอดเทพพิทักษ์

พฤศจิกายน พ.ศ. 2556
คณะอัญมณี
มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี

การผลิตเครื่องประดับโลหะหลากสีด้วยเทคนิคโมกุเม่กาเน่
Multicolored metal jewelry making by Mokeme Gane

ปริญญา ชินดุษฎีกุล, พิมพ์ทอง ทองนพคุณ, ดาวรรณ หมัดหลี, อรุณี เทอดเทพพิทักษ์
คณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี

บทคัดย่อ

โมกุเม่กาเน่เป็นเทคนิคที่ใช้โลหะหลายชนิดที่มีสีสันแตกต่างกันในการทำให้เกิดลวดลายบนผิวของแผ่นโลหะที่นำมาทำเครื่องประดับ งานวิจัยนี้เป็นการหาเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเชื่อมแผ่นโลหะทองแดง เงินสเตอร์ลิง และทองเหลืองให้ติดกันด้วยความร้อนและแรงอัด จากการทดลองเชื่อมโลหะทีละคู่และดูรอยต่อของแผ่นโลหะจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ทำให้ทราบอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการเชื่อมแผ่นโลหะทองแดงกับเงินสเตอร์ลิงคือ 750°C ระยะเวลายืนอุณหภูมิ 2 ชั่วโมง อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการเชื่อมแผ่นโลหะเงินสเตอร์ลิงกับทองเหลืองคือ 750°C ระยะเวลายืนอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการเชื่อมแผ่นโลหะทองแดงกับทองเหลืองคือ 900°C ระยะเวลายืนอุณหภูมิ 1ชั่วโมง และสุดท้ายการเชื่อมโลหะ 3 ชนิดคือ ทองแดง เงินสเตอร์ลิง และทองเหลือง โดยใช้เงินสเตอร์ลิงเป็นตัวเชื่อมระหว่างชั้น อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการเชื่อมคือ 750°C ระยะเวลายืนอุณหภูมิ 2 ชั่วโมง การทดสอบด้วยเทคนิค Line scan Energy Dispersive Spectroscopy แสดงให้เห็นถึงการแพร่ของโลหะที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อของแผ่นโลหะแต่ละชนิด เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมในการทำแท่งโลหะที่ประกอบไปด้วยโลหะต่างชนิดกันแล้วจึงเข้าสู่ขั้นตอนในการทำแผ่นโลหะโมกุเม่กาเน่ โดยเริ่มจากการนำแผ่นโลหะต่างชนิดกันมาวางเรียงซ้อนกันเป็นชั้นๆ ห่อด้วยแผ่นสแตนเลสบางเพื่อลดการสัมผัสกับอากาศ หลังจากนั้นนำห่อสแตนเลสใส่ในแคมป์เหล็กเพื่อหนีบให้ผิวหน้าของแผ่นโลหะแต่ละแผ่นติดกัน นำแคมป์เหล็กใส่ในกล่องสแตนเลสที่มีถ่านไม้บรรจะอยู่ภายใน ปิดฝาให้เรียบร้อยและนำกล่องสแตนเลสใส่ในเตาไฟฟ้า เมื่อถึงอุณหภูมิและเวลาที่กำหนด นำแคมป์เหล็กออกมาวางบนทั่งเหล็กและใช้ค้อนทุบ รอจนกระทั่งแคมป์เหล็กเย็นลงจึงนำโลหะที่อยู่ในห่อสแตนเลสออกมา ขั้นต่อไปเป็นการให้ทำลวดลายบนแผ่นโลหะซึ่งแบ่งเป็น 2 วิธี คือ 1) การเจาะแท่งโลหะให้เป็นรูแล้วนำไปรีดให้เป็นแผ่นบาง 2) การบิดแท่งโลหะเป็นเกลียวด้วยความร้อนแล้วนำไปผ่าเป็นสองซีก ขั้นตอนสุดท้ายนำแผ่นโลหะมาประกอบลงบนตัวเรือนเครื่องประดับที่เตรียมไว้

บทนำ

โมกุเม่กาเน่ (Mokume Gane) คือเทคนิคการสร้างสรรค์ชิ้นงานโลหะให้มีลวดลายคล้ายกับลายไม้ คำว่า โมกุเม่ (Mokume) หมายถึง ตาไม้ และคำว่า กาเน่ (Gane) หมายถึง โลหะ ดังนั้นคำว่า โมกุเมะกาเน่ น่าจะมีความหมายความถึง โลหะที่มีลวดลายไม้ ประมาณ 300 - 400 ปีมาแล้วในประเทศญี่ปุ่นได้ใช้เทคนิคนี้ในการตีดาบซามูไร โดยนำแผ่นเหล็กไปเผาในเตาหลอมแล้วตีซ้ำไปซ้ำมาหลายๆ ครั้งจนได้ดาบที่มีความบางและคม เทคนิคนี้ไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะในประเทศญี่ปุ่นเท่านั้น ในยุคก่อนที่จะมีการชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า (Electroplating) ในปี ค.ศ. 1743 ช่างทำมีดในอังกฤษชื่อ Thomas Boulsover พบการเชื่อมติดกันโดยบังเอิญของทองแดงและเงินในขณะที่กำลังทำมีด จากการค้นพบนี้ทำให้เกิด Sheffield Plate ซึ่งเป็นชุดจานที่ใช้ในชนชั้นกลางของอังกฤษโดยมีทองแดงอยู่ชั้นในและถูกห่อหุ้มด้วยเงินชั้นนอก ในช่วงปี 1970 – 1989 ได้มีชาวญี่ปุ่น 2 คน คือ Hiroko Sato Pijanawski และ Eugane Michael Pijanawski เป็นผู้ที่ทำการวิจัยและ

นำเสนอเทคนิคโมกุเม่กาเน่มาใช้ในการทำเครื่องประดับต่างๆ และเริ่มเป็นที่รู้จักตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา ตัวอย่างเครื่องประดับที่ผลิตโดยใช้เทคนิคโมกุเม่กาเน่แสดงดังรูปที่ 1

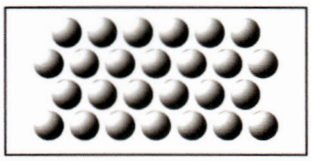
รูปที่ 1 เครื่องประดับที่ผลิตโดยใช้เทคนิคโมกุเม่กาเน่
(www.cutaqcutediamond.wordpress.com/2010/08/09/mokume-gane)

การเชื่อมโลหะด้วยกระบวนการแพร่ (Diffusion welding)

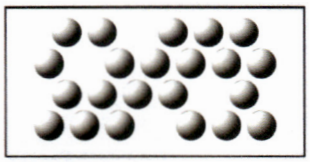
Marinov V. กล่าวถึงการเชื่อมโลหะด้วยแรงอัดว่าจะต้องมีความร้อนและความดันที่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการแพร่ของอะตอมที่ผิวหน้าของโลหะที่ติดกันเรียกว่า การเชื่อมด้วยกระบวนการแพร่ (Diffusion welding) โลหะที่ติดกันนั้นอาจเป็นโลหะชนิดเดียวกันหรือเป็นโลหะต่างชนิดกันก็ได้ อุณหภูมิที่ทำให้เกิดการแพร่จะต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะ แต่จะต้องมีอุณหภูมิที่สูงเพียงพอที่จะทำให้เกิดสภาวะ Plastic deformation ของโลหะ

Binnion J. อธิบายการเกิดพันธะจากการแพร่ของแพลตินัมซึ่งใช้ในการผลิตแหวนจากแพลตินัมและเหล็ก การแพร่เกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสของโลหะ 2 ชนิด รูปที่ 2 (ก) แสดงแลททิส (lattice) ของโครงสร้างโลหะ รูปที่ 2 (ข) แสดงช่องว่าง (vacancies) ซึ่งในโครงสร้างโลหะแพลตินัมและเหล็กมีช่องว่างอยู่ เมื่อนำแผ่นโลหะทั้งสองมาประกบติดกัน รูปที่ 2 (ค) แล้วให้ความร้อนและความดัน สามารถทำให้อะตอมในแลททิสของโลหะชนิดหนึ่งข้ามไปยังช่องว่างของโลหะอีกชนิดหนึ่งได้แสดงดังรูปที่ 2 (ง) และเกิดเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นก่อนถึงจุดหลอมเหลวของโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่า การแพร่ของอะตอมโลหะที่บริเวณผิวสัมผัสทำให้เกิดพันธะระหว่างโลหะทั้งสอง โลหะทั้งสองถูกยึดติดกัน ความแข็งแรงของการยึดติดจะขึ้นกับอุณหภูมิและระยะเวลาในการแพร่ นอกเหนือจากนี้ความสะอาดของผิวโลหะเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญ การเกิดฟิล์มออกไซด์ที่ผิวของโลหะจะขัดขวางการแพร่ของอะตอมที่ผิวหน้าของโลหะ ทำให้การยึดติดไม่ดี

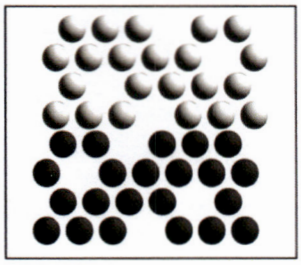
การใช้เตาหลอมเหล็กแบบดั้งเดิม สภาพบรรยากาศที่ใช้เป็นแบบรีดักชันเนื่องจากเชื้อเพลิงที่ใช้เป็นพวกถ่านหิน ถ่านโค้ก ถ่านไม้ หรือแก๊ส ซึ่งเหมาะกับการทำให้เกิดการยึดติดกันของแผ่นโลหะ เนื่องจากการเกิดฟิล์มออกไซด์ของโลหะน้อย ต่อมามีการเปลี่ยนจากการใช้เตาหลอมเหล็กเป็นเตาไฟฟ้าทำให้สภาพบรรยากาศในเตาเปลี่ยนไปจึงมีการใช้แผ่นฟอยด์ที่ทำจากสแตนเลสเป็นถุงหุ้มชิ้นงานและนำถ่านชาโคว์ใส่ลงในเตาเพื่อเป็นการลดออกซิเจนและทำให้เกิดสภาพบรรยากาศแบบรีดักชัน นอกจากนี้ยังมีการใช้ทอล์คเพลต (Torque plate) เพื่อช่วยในการอัดชิ้นงาน



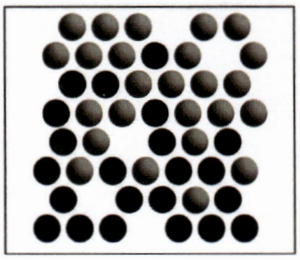
(ก) โครงสร้างผลึก



(ข) ช่องว่างโครงสร้างผลึก



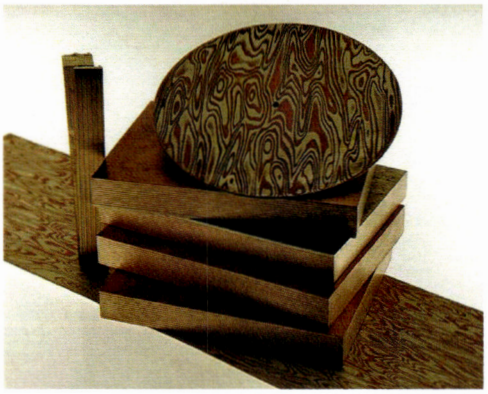
(ค) บริเวณผิวสัมผัสของแผ่นโลหะ



(ง) การแพร่ของอะตอมที่ผิวหน้าเนื่องจากความร้อน

รูปที่ 2 (ก) แสดงโครงสร้างผลึก (ข) แสดงช่องว่างในโครงสร้างผลึก (ค) แสดงบริเวณผิวสัมผัสของแผ่นโลหะ (ง) แสดงการแพร่ของอะตอมที่ผิวหน้าเนื่องจากความร้อน (www.platinumguild.com/files/pdf/V11N5_diffusion_bonding.pdf)

หลังจากเชื่อมโลหะต่างชนิดหลายชั้นให้ติดกันโดยอาศัยความร้อนและแรงอัดทำให้เกิดเป็นแท่งโลหะที่มีสีของชั้นโลหะที่แตกต่างกันแสดงในรูปที่ 3 หลังจากนั้นเป็นขั้นตอนในการทำให้เกิดลวดลายบนแผ่นโลหะ ซึ่งมีวิธีที่นิยมใช้ 2 วิธี วิธีแรกทำได้โดยเจาะแท่งโลหะให้เป็นรูแล้วนำไปรีดให้เป็นแผ่นบาง วิธีที่สองบิดแท่งโลหะเป็นเกลียวด้วยความร้อนแล้วนำไปผ่าเป็น 2 ซีก จะได้แผ่นโลหะที่มีลวดลายเกิดขึ้น



รูปที่ 3 แท่งโลหะที่เชื่อมติดกันเรียบร้อยแล้ว และแผ่นโมกุเม่กาเน่ (http://www.orafaabc.com/Gallery.Mokume.html)

ปัจจุบันการเครื่องประดับที่ใช้เทคนิคโมกุเม่กาเน่ เริ่มมีการจำหน่ายเพิ่มมากขึ้น แต่มีราคาสูงเนื่องจากเป็นงานที่ต้องอาศัยฝีมือ งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาการผลิตโดยใช้โลหะหลายชนิด ทำให้มีความหลากหลายของสีสันในชิ้นงานมากขึ้นสามารถเพิ่มมูลค่าได้มากขึ้น ลวดลายของเครื่องประดับแต่ละชิ้นที่ผลิตด้วยเทคนิคนี้มีความเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว รูปแบบการเรียงชั้นของโลหะและการทำลวดลายเป็นเทคนิคเฉพาะบุคคลที่ต้องอาศัยประสบการณ์ ในบางครั้งผู้บริโภคอาจมีความต้องการรูปแบบชิ้นงานในลักษณะเดิมตัวอย่างเช่น การทำแหวนคู่สำหรับงานแต่งงานหรือต่างหู ผู้บริโภคมักจะต้องการรูปแบบของลวดลายที่ใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นการทำลวดลายของแผ่นโลหะให้มีลักษณะที่ใกล้เคียงกันเพื่อผลิตเป็นเครื่องประดับจำเป็นจะต้องหารูปแบบ

การทำลวดลายที่แน่นอนเพื่อให้ได้ลวดลายที่ใกล้เคียงกันมากที่สุด จุดเด่นอีกข้อหนึ่งของการทำงานด้วยเทคนิคการทำโมกุเม่กาเน่ คือ โลหะที่ใช้ในการผลิตสามารถเลือกได้หลากหลายตั้งแต่โลหะที่มีราคาแพงจนถึงโลหะที่มีราคาถูก ซึ่งราคาของเครื่องประดับที่ทำจากเทคนิคนี้เมื่อเทียบกับราคาโลหะถือว่ามีราคาสูงมาก ราคาของเครื่องประดับขึ้นอยู่กับลวดลายที่ทำได้ และการออกแบบ ด้วยศักยภาพที่โดดเด่นในด้านงานฝีมือที่มีคุณภาพของช่างไทย การผลิตเครื่องประดับที่มีราคาเหมาะสมกับกำลังซื้อของผู้บริโภคในปัจจุบัน กอปรกับการพัฒนาเทคนิคการผลิตและการออกแบบสินค้าให้ทันสมัย และมีความหลากหลายมากขึ้น สามารถใช้งานได้จริง ส่งผลให้คาดว่าการผลิตเครื่องประดับด้วยเทคนิคโมกุเม่กาเน่ เป็นทางเลือกใหม่ในการผลิตเครื่องประดับในปัจจุบัน เพื่อลดต้นทุนในการใช้โลหะในการผลิตที่มีราคาสูง แต่มุ่งเน้นในการผลิตงานที่มีลักษณะที่แตกต่างและแปลกใหม่

วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย

1. เพื่อผลิตเครื่องประดับด้วยเทคนิคโมกุเม่กาเน่ จากโลหะเงินสเตอร์ลิง ทองแดง และทองเหลือง
2. เพื่อหาอุณหภูมิ และระยะเวลาที่เหมาะสมในการเชื่อมแผ่นโลหะด้วยแรงอัดสำหรับการผลิตชิ้นงานโมกุเม่กาเน่

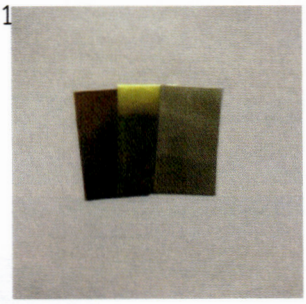
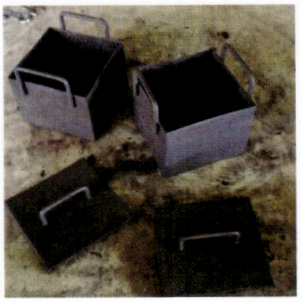
วิธีดำเนินการวิจัยโดยสรุปทฤษฎี และ/หรือแนวทางความคิดที่นำมาใช้ในการวิจัย

จากสภาวะของเศรษฐกิจโลกชะลอตัวในปัจจุบันไม่ว่าจะเป็นสหภาพยุโรป สหรัฐอเมริกา หรือญี่ปุ่น และราคาทองคำที่สูงขึ้นส่งผลให้ผู้บริโภคมีข้อจำกัดในการซื้อเครื่องประดับราคาแพงมากขึ้นและหันไปซื้อเครื่องประดับประเภทอื่นๆ ทดแทน การเพิ่มมูลค่าเครื่องประดับด้วยการใช้เทคนิคโมกุเม่กาเน่ในการสร้างแผ่นโลหะที่เกิดลวดลายจากสีสันของโลหะต่างชนิดโดยใช้เงินสเตอร์ลิง ทองแดง และทองเหลือง ซึ่งเป็นโลหะที่มีราคาถูกมาผลิตเครื่องประดับที่มีรูปแบบแปลกใหม่

วิธีดำเนินการวิจัย (Materials & Method)

1. **การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์สำหรับการเชื่อมด้วยแรงอัด**
   - 1.1 แผ่นโลหะเงินสเตอร์ลิง ทองแดง และทองเหลืองขนาด 1 นิ้ว x 1 นิ้ว x 0.5 มิลลิเมตร สำหรับทำชิ้นงานทดสอบ และขนาด 2 นิ้ว x 1 นิ้ว x 0.5 มิลลิเมตร สำหรับชิ้นงานจริง
   - 1.2 กระดาษทรายเบอร์ 320
   - 1.3 อะซีโตน
   - 1.4 แผ่นสแตนเลสหนา 0.025 มิลลิเมตร
   - 1.5 แคมป์เหล็ก ประกอบด้วยแผ่นเหล็กขนาด 4 นิ้ว x 4 นิ้ว x 1 นิ้ว จำนวน 2 แผ่น เจาะรูที่มุมทั้งสี่เพื่อใช้น็อตยึดให้ติดกัน
   - 1.6 กล่องสแตนเลสสำหรับใส่แคมป์
   - 1.7 ถ่านไม้
   - 1.8 เตาไฟฟ้า
   - 1.9 แท่งเหล็กสำหรับยกกล่องสแตนเลสออกจากเตาไฟฟ้า
   - 1.10 ทั่งเหล็ก
   - 1.11 ค้อนปอนด์

ตารางที่ 1 วัสดุและอุปกรณ์สำหรับการเชื่อมด้วยแรงอัด

1.1 	1.2 	1.3 
1.4 	1.5 	1.6 
1.7 	1.8 	1.9 
1.10 	1.11 	

2. **การทดลองเชื่อมแผ่นโลหะสำหรับใช้ในการทำแผ่นโลหะโมกุเม่กาเน่**

2.1 การทดลองเชื่อมโลหะเงินสเตอร์ลิง/ทองแดง

2.1.1 อบที่อุณหภูมิ 700 $^{\circ}$C เวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง

2.1.2 อบที่อุณหภูมิ 750 $^{\circ}$C เวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง

2.1.3 อบที่อุณหภูมิ 800 $^{\circ}$C เวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง

2.2 การทดลองเชื่อมโลหะเงินสเตอร์ลิง/ทองเหลือง

2.2.1 อบที่อุณหภูมิ 700 $^{\circ}$C เวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง

2.2.2 อบที่อุณหภูมิ 750 $^{\circ}$C เวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง

2.2.3 อบที่อุณหภูมิ 800 $^{\circ}$C เวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง

2.3 การทดลองเชื่อมโลหะทองแดง/ทองเหลือง

2.3.1 อบที่อุณหภูมิ 800 $^{\circ}$C เวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง

2.3.2 อบที่อุณหภูมิ 850 $^{\circ}$C เวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง

2.3.3 อบที่อุณหภูมิ 900 $^{\circ}$C เวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง

2.4 การทดลองเชื่อมโลหะทองแดง/เงินสเตอร์ลิง/ทองเหลือง

ผลจากการทดลองเชื่อมโลหะทีละคู่ทำให้ทราบอุณหภูมิที่ทำให้โลหะสามารถเชื่อมติดกันได้ การทดลองครั้งนี้มีจุดประสงค์ในการเชื่อมโลหะทั้ง 3 ชนิดให้ติดกัน ดังนั้นจึงต้องมีการอบแท่งโลหะ 2 ครั้ง โดยเริ่มจากคู่ที่ต้องใช้อุณหภูมิสูงก่อนคือ ทองแดง/ทองเหลือง หลังจากนั้นจึงนำแผ่นโลหะเงินสเตอร์ลิงเชื่อมติดภายหลังแต่วิธีการนี้จะทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายเนื่องจากต้องนำแท่งโลหะเข้าเตาไฟฟ้าถึง 2 รอบ ผู้ทำการทดลองจึงทดลองใช้แผ่นโลหะสเตอร์ลิงเป็นตัวเชื่อมระหว่างแผ่นโลหะทองแดงและโลหะทองเหลือง ลำดับการเรียงแผ่นโลหะเป็นทองแดง/เงินสเตอร์ลิง/ทองเหลือง โดยกำหนดอุณหภูมิและเวลาในการอบดังนี้

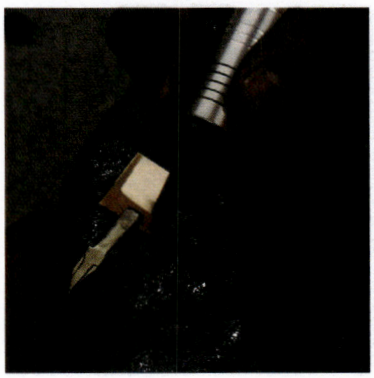
2.4.1 อบที่อุณหภูมิ 750 $^{\circ}$C เวลา 1 ชั่วโมง

2.4.2 อบที่อุณหภูมิ 750 $^{\circ}$C เวลา 2 ชั่วโมง

2.4.3 อบที่อุณหภูมิ 750 $^{\circ}$C เวลา 3 ชั่วโมง

<u>วิธีเชื่อมแผ่นโลหะสำหรับใช้ในการทำแผ่นโลหะโมกุเม่กาเน่</u>

1. นำแผ่นโลหะขนาด 1 นิ้ว x 1 นิ้ว x 0.5 มิลลิเมตร ไปขัดด้วยกระดาษทราย ล้างด้วยน้ำสบู่ตามด้วยอะซีโตนแล้วเช็ดให้แห้ง



รูปที่ 4 การขัดแผ่นโลหะด้วยกระดาษทราย

2. วางแผ่นโลหะ 3 ชิ้นสลับกันเช่น การทดลองเชื่อมโลหะเงินสเตอร์ลิง/ทองแดง ให้นำแผ่นทองแดง 2 แผ่นวางไว้ด้านนอกและให้แผ่นเงินสเตอร์ลิงอยู่ตรงกลาง ลำดับการเรียงแผ่นโลหะเป็น ทองแดง/เงินสเตอร์ลิง/ทองแดง

รูปที่ 5 การเรียงสลับชั้นของโลหะ

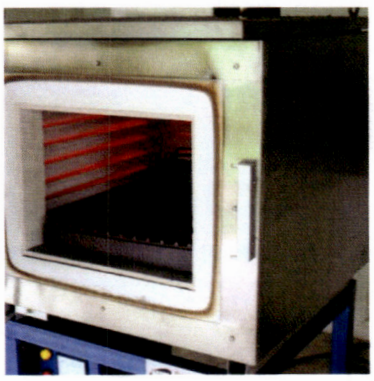
3. ห่อโลหะทั้งหมดด้วยสแตนเลสแผ่นบางแล้วนำไปใส่ในแคมป์เหล็กขันน็อตให้แน่น

รูปที่ 6 การนำห่อโลหะใส่ในแคมป์เหล็ก

4. นำแคมป์และถ่านไม้ใส่ลงในกล่องสแตนเลส

รูปที่ 7 กล่องสแตนเลสสำหรับบรรจุแคมป์เหล็ก

5. นำไปอบในเตาไฟฟ้า ตั้งอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทดลอง นำกล่องสแตนเลสออกจากเตาเมื่อถึงอุณหภูมิและเวลาที่กำหนด



รูปที่ 8 การนำกล่องสแตนเลสใส่ในเตาไฟฟ้า

6. นำแคมป์เหล็กไปวางบนทั่งเหล็กและทุบด้วยค้อน

รูปที่ 9 การทุบแคมป์เหล็กหลังนำออกจากเตาไฟฟ้า

7. รอให้แคมป์เย็นแล้วนำห่อสแตนเลสออกจากแคมป์เหล็ก

รูปที่ 10 แท่งโลหะที่เชื่อมติดกัน

3. การวิเคราะห์การติดกันของแผ่นโลหะด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM)

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

3.1.1 ชิ้นงานเงินสเตอร์ลิง/ทองแดง

- อบที่อุณหภูมิ 700 $^{\circ}$C เวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง
- อบที่อุณหภูมิ 750 $^{\circ}$C เวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง
- อบที่อุณหภูมิ 800 $^{\circ}$C เวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง

3.1.2 ชิ้นงานเงินสเตอร์ลิง/ทองเหลือง

- อบที่อุณหภูมิ 700 $^{\circ}$C เวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง
- อบที่อุณหภูมิ 750 $^{\circ}$C เวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง
- อบที่อุณหภูมิ 800 $^{\circ}$C เวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง

3.1.3 ชิ้นงานทองแดง/ทองเหลือง

- อบที่อุณหภูมิ 800 $^{\circ}$C เวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง
- อบที่อุณหภูมิ 850 $^{\circ}$C เวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง
- อบที่อุณหภูมิ 900 $^{\circ}$C เวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง

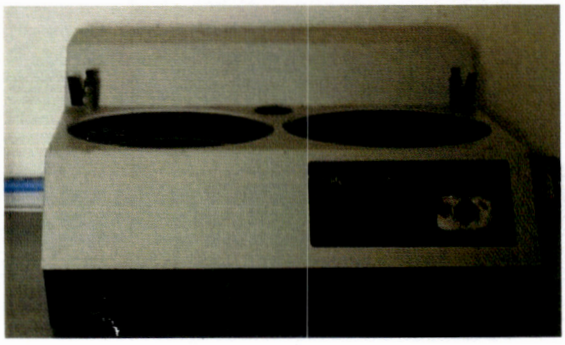
3.1.4 เรซินชนิดเทหล่อ (Castable resins)

อัตราส่วนระหว่างเรซิน : ฮาร์ดเดนเนอร์ = 20 : 0.05

3.1.5 แม่พิมพ์สำหรับเทหล่อเรซิน

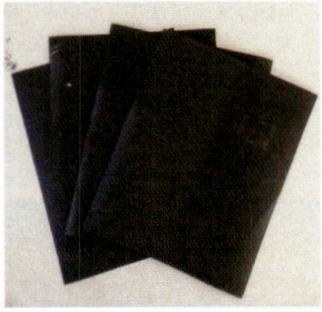
รูปที่ 11 แม่พิมพ์สำหรับเทหล่อเรซิน

3.1.6 เครื่องขัดชิ้นงาน



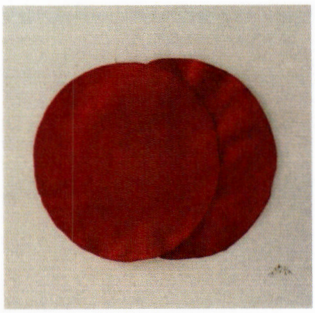
รูปที่ 12 เครื่องขัดชิ้นงาน

3.1.7 กระดาษทรายน้ำเบอร์ 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200



รูปที่ 13 กระดาษทรายน้ำ

3.1.8 ผ้าสักหลาด



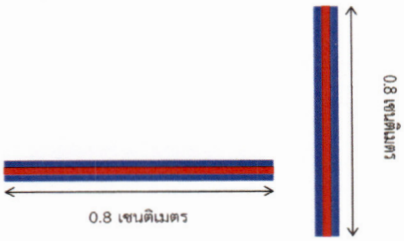
รูปที่ 14 ผ้าสักหลาด

3.1.9 ผงขัดอลูมิน่าขนาด 1 และ 0.3 ไมครอน

รูปที่ 15 ผงขัดอลูมิน่าขนาด 1 และ 0.3 ไมครอน

3.2 การเตรียมตัวอย่างวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3.2.1 ตัดชิ้นงานโลหะที่เชื่อมติดกันเรียบร้อยแล้วให้มีขนาดความยาวของพื้นที่หน้าตัด 0.8 เซนติเมตร และมีความสูง 0.8 เซนติเมตร



รูปที่ 16 ขนาดของชิ้นงานโลหะ

3.2.2 นำชิ้นงานใส่ลงในแม่พิมพ์สำหรับเทหล่อเรซินและเทเรซินที่ผสมกับฮาร์ดเดนเนอร์แล้วลงไป รอจนเรซินแข็งตัวเรียบร้อยจึงนำเรซินออกจากแม่พิมพ์

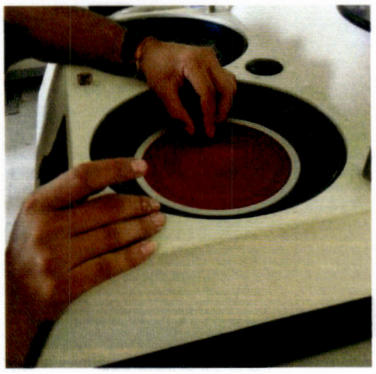
รูปที่ 17 การหล่อเรซินชิ้นงานโลหะ

3.2.3 การขัดหยาบ

ขัดชิ้นงานด้วยเครื่องขัดชิ้นงาน การขัดจะขัดโดยใช้กระดาษทรายน้ำรียงลำดับเบอร์ของกระดาษขัดตั้งแต่ขนาดเม็ดทรายหยาบไปหาขนาดเม็ดทรายละเอียด เริ่มขัดจากกระดาษทรายเบอร์ 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ

3.2.4 การขัดละเอียด

ขัดชิ้นงานด้วยเครื่องขัดชิ้นงาน การขัดจะใช้ผงขัดอลูมิน่าผสมน้ำเทลงบนผ้าสักหลาด เริ่มจากการใช้ผงอลูมิน่าขนาด 1 และ 0.3 ไมครอน ตามลำดับ



รูปที่ 17 การขัดชิ้นงานด้วยเครื่องขัด

4. **การเชื่อมแผ่นโลหะสำหรับใช้ในการทำแผ่นโลหะโมกุเม่กาเน่**

การเชื่อมแผ่นโลหะโลหะเงินสเตอร์ลิง/ทองแดง เงินสเตอร์ลิง/ทองเหลือง ทองแดง/ทองเหลือง และโลหะทองแดง/เงินสเตอร์ลิง/ทองเหลือง จำนวน 7 สำหรับเทคนิคการเจาะ และ 13 ชั้นสำหรับเทคนิคการใช้ความร้อนในการบิดแท่งโลหะ

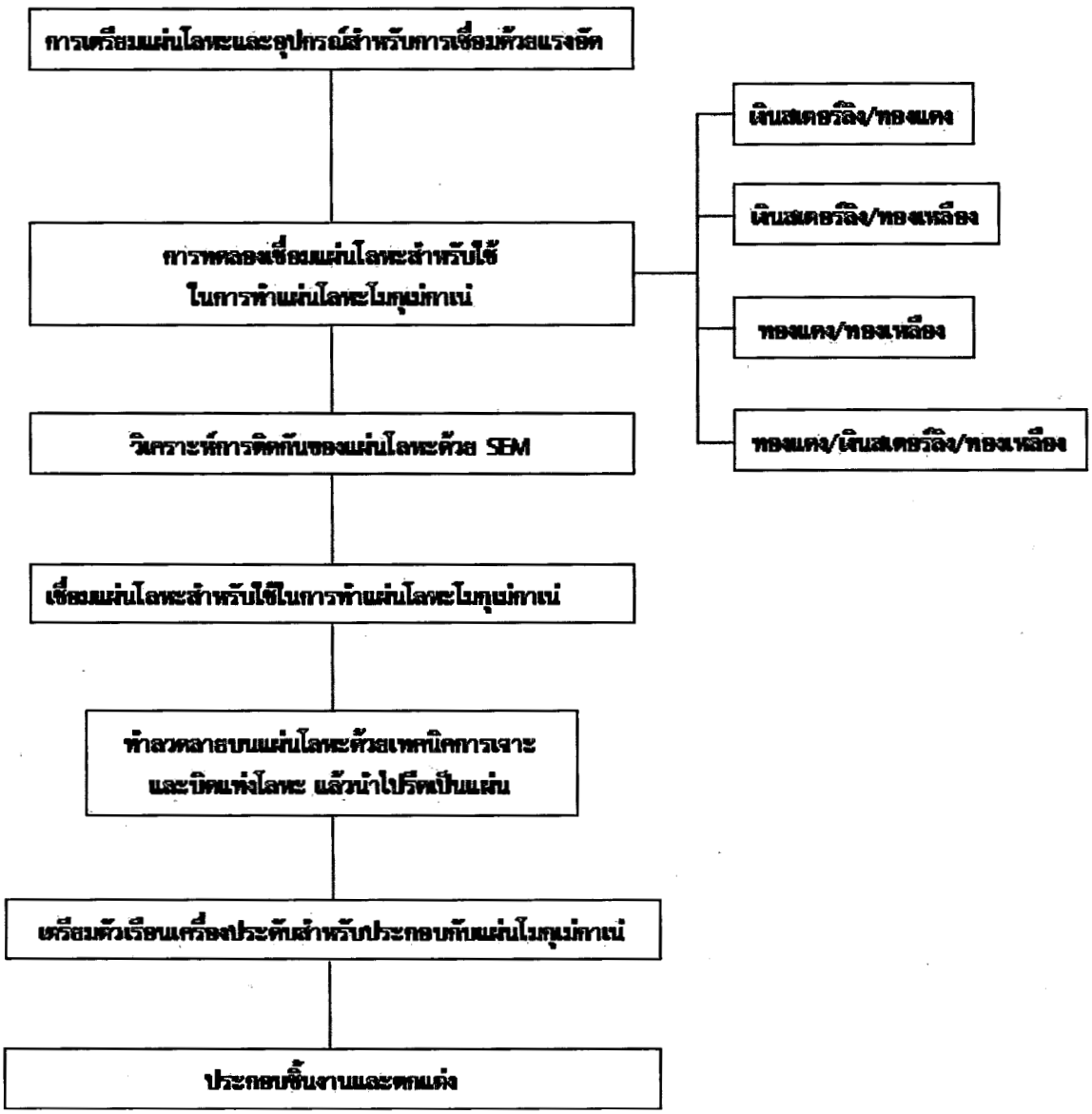
5. **ทำลวดลายบนแผ่นโลหะด้วยเทคนิคการเจาะ และบิดแท่งโลหะ แล้วนำไปรีดเป็นแผ่น**

5.1 การเจาะลวดลายลงบนแผ่นโลหะตามลายที่เขียนไว้แล้วนำไปรีด

5.2 การใช้ความร้อนในการบิดแท่งโลหะเป็นเกลียวและผ่าแท่งโลหะ

6. **เตรียมตัวเรือนเครื่องประดับสำหรับประกอบกับแผ่นโมกุเม่กาเน่**
7. **นำแผ่นโลหะโมกุเม่กาเน่มาประกอบลงบนเครื่องประดับที่เตรียมไว้**

แผนผังการดำเนินงาน



รูปที่ 18 แผนผังการดำเนินงาน

ผลการวิจัย

1. ผลการทดลองเชื่อมโลหะเมื่อนำแท่งโลหะออกจากแคมป์เหล็ก ผลการเชื่อมโลหะเงินกับทองแดง แสดงในตารางที่ 2 ผลการเชื่อมโลหะเงินกับทองเหลืองแสดงในตารางที่ 3 ผลการเชื่อมโลหะทองเหลืองกับทองแดงแสดงในตารางที่ 4 และผลการเชื่อมโลหะทองแดง เงินสเตอร์ลิง และทองเหลืองแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 2 ผลการเชื่อมโลหะเงินกับทองแดง

ระยะเวลา / อุณหภูมิ	1 ชั่วโมง	3 ชั่วโมง	3 ชั่วโมง
700°C	√	√	√
750°C	√	√	√
800°C	X	X	X

ตารางที่ 3 การเชื่อมโลหะเงินกับทองเหลือง

ระยะเวลา / อุณหภูมิ	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	3 ชั่วโมง
700°C	√	√	√
750°C	√	√	√
800°C	X	X	X

ตารางที่ 4 การเชื่อมโลหะทองเหลืองกับทองแดง

ระยะเวลา / อุณหภูมิ	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง
800°C	X	X	X
850°C	√	√	√
900°C	√	√	√

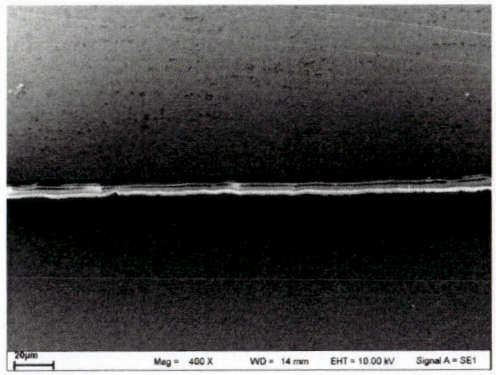
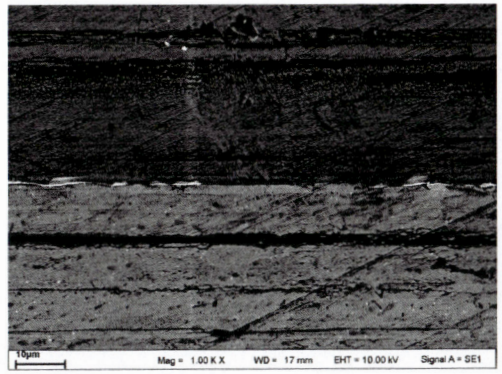
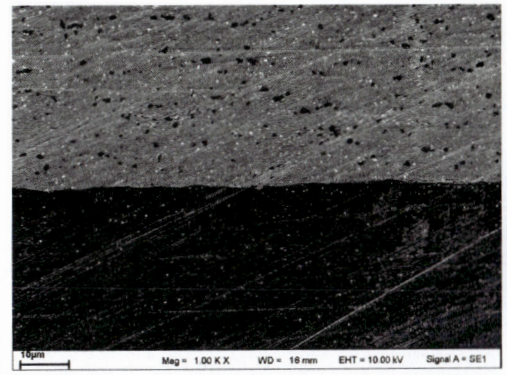
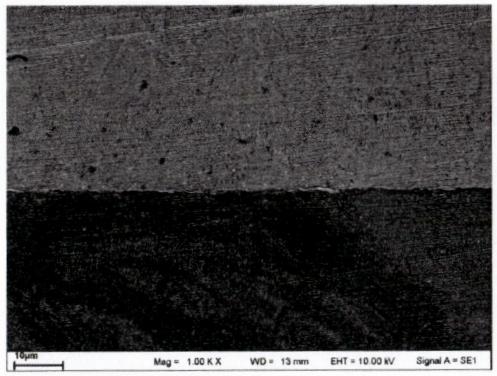
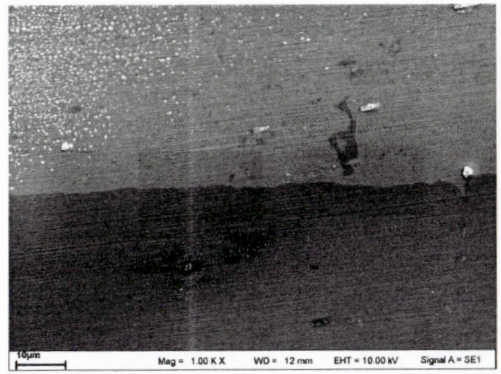
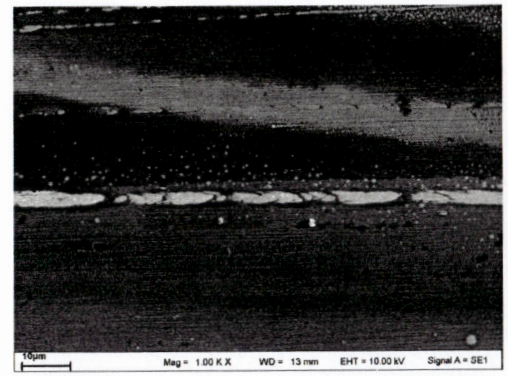
ตารางที่ 5 การเชื่อมโลหะทองแดง/เงินสเตอร์ลิง/ทองเหลือง

ระยะเวลา / อุณหภูมิ	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง
750°C	√	√	√

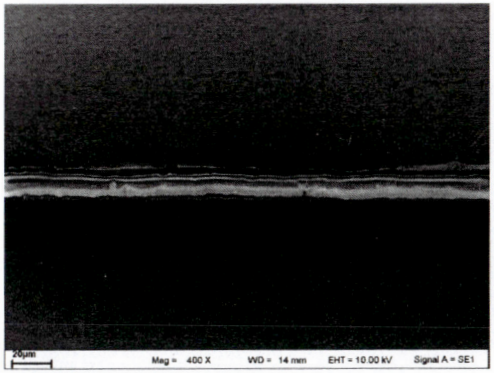
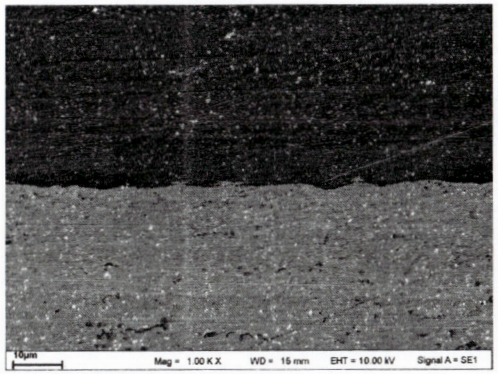
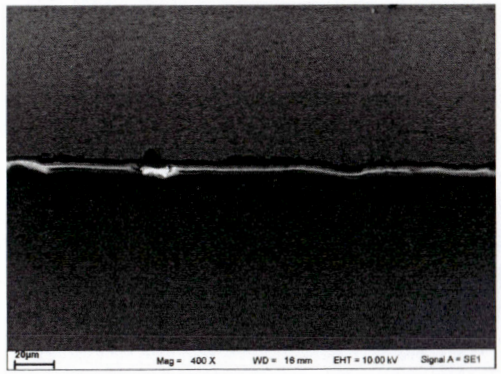
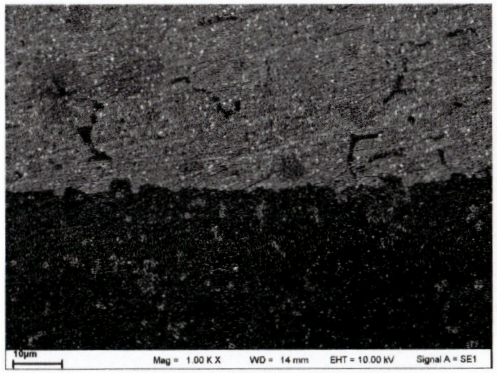
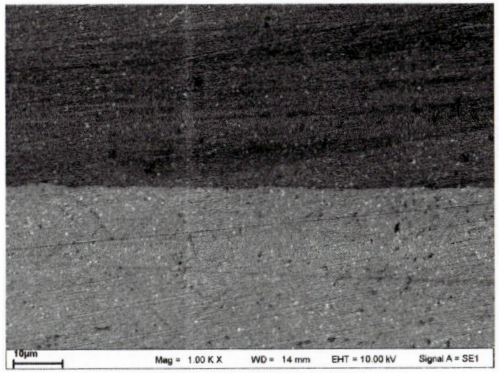
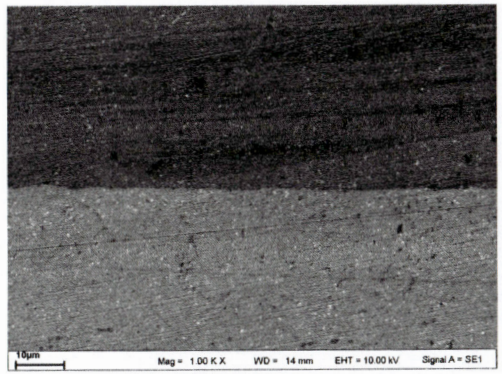
หมายเหตุ เครื่องหมาย √ แสดงว่าแผ่นโลหะเชื่อมติดกัน เครื่องหมาย X แสดงว่าแผ่นโลหะไม่เชื่อมติดกัน

2. ภาพถ่ายการยึดติดกับของแผ่นโลหะจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแบบส่องกราด แสดงในตารางที่ 6 – 8

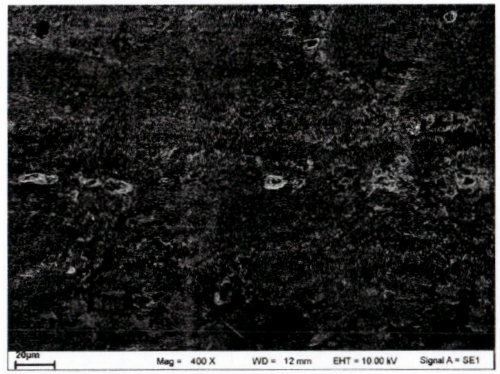
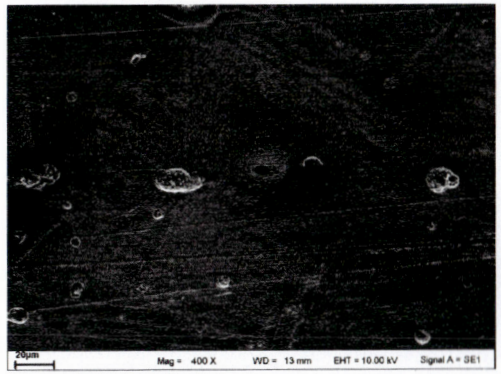
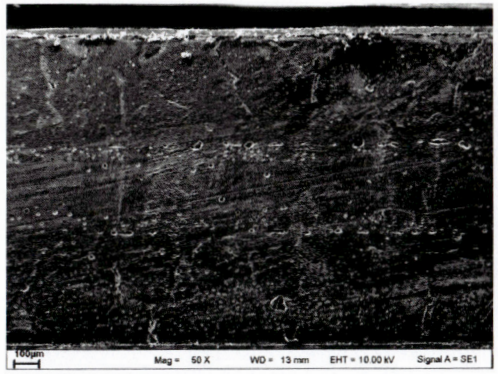
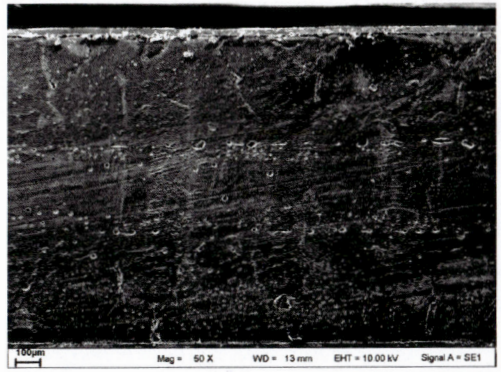
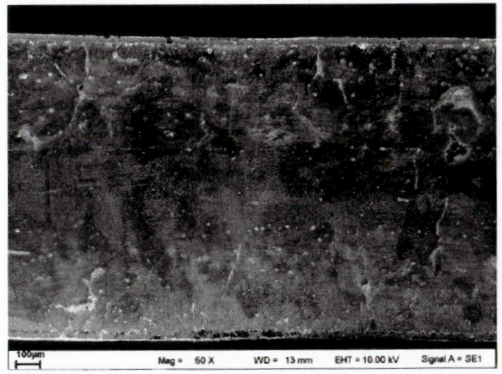
ตารางที่ 6 ภาพถ่ายบริเวณรอยต่อของแผ่นโลหะเงินสเตอร์ลิงกับทองแดง

ระยะเวลา / อุณหภูมิ	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	3 ชั่วโมง
700°C			
750°C			

ตารางที่ 7 ภาพถ่ายบริเวณรอยต่อของแผ่นโลหะเงินสเตอร์ลิงกับทองเหลือง

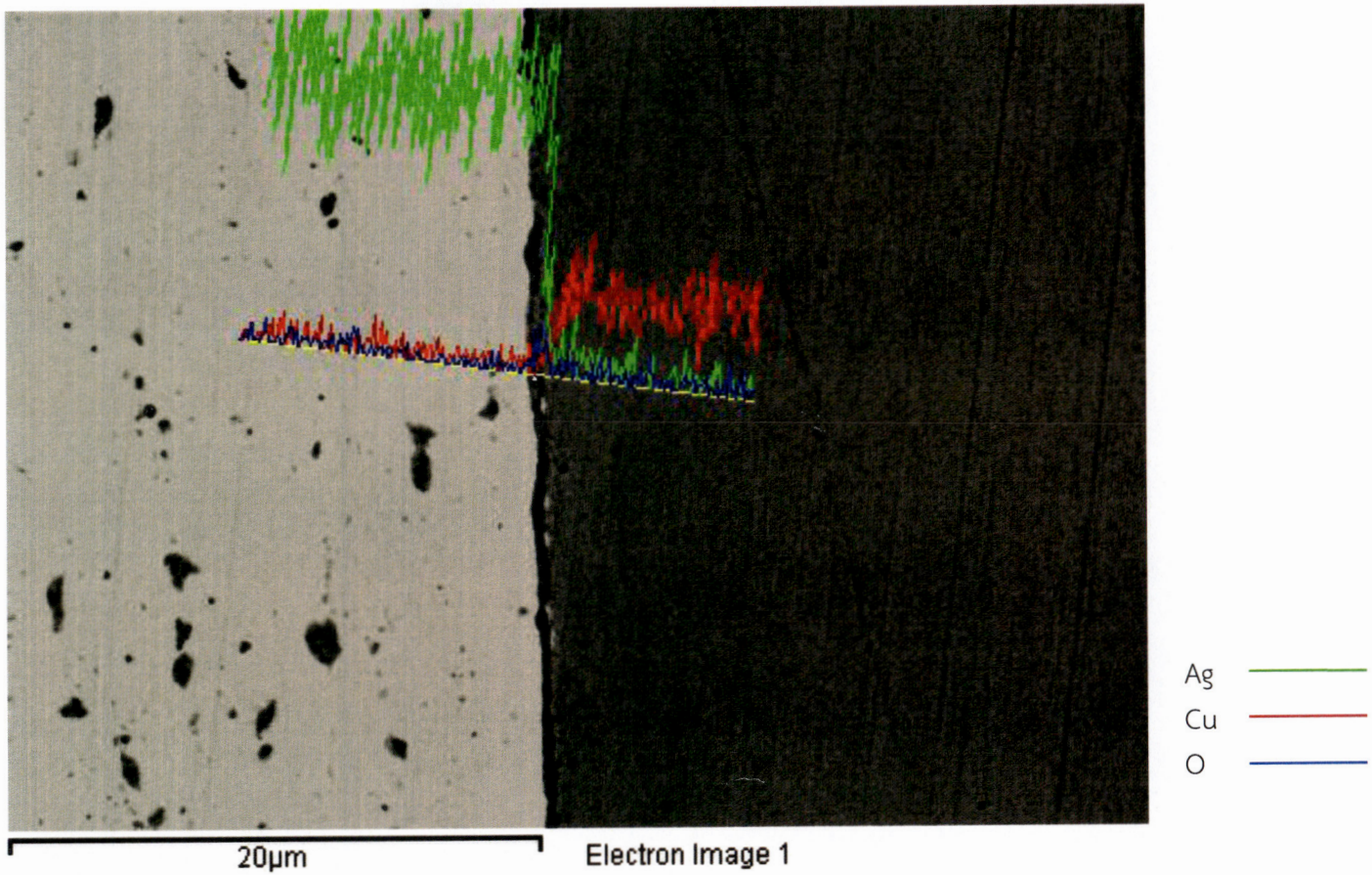
ระยะเวลา / อุณหภูมิ	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	3 ชั่วโมง
700°C			
750°C			

ตารางที่ 8 ภาพถ่ายบริเวณรอยต่อของแผ่นโลหะทองแดงกับทองเหลือง

ระยะเวลา / อุณหภูมิ	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	3 ชั่วโมง
900°C			
950°C			

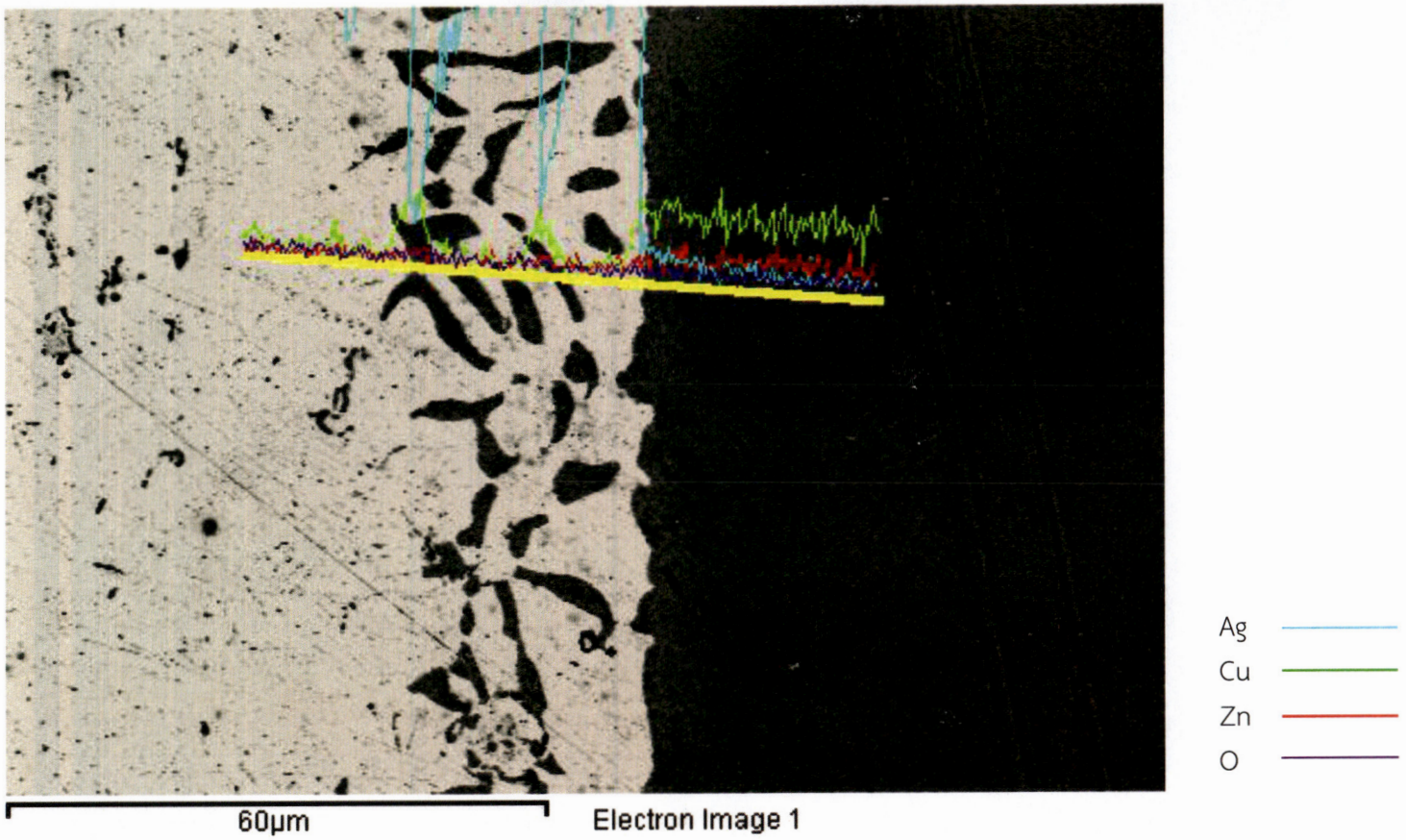
3. การศึกษาแพร่ของโลหะบริเวณรอยต่อของแผ่นโลหะด้วยเทคนิค Line scan Energy Dispersive Spectroscopy

3.1 รอยต่อระหว่างโลหะเงินสเตอร์ลิงกับทองแดง อบที่อุณหภูมิ 750°C ระยะเวลา 2 ชั่วโมง แสดงในรูปที่ 19



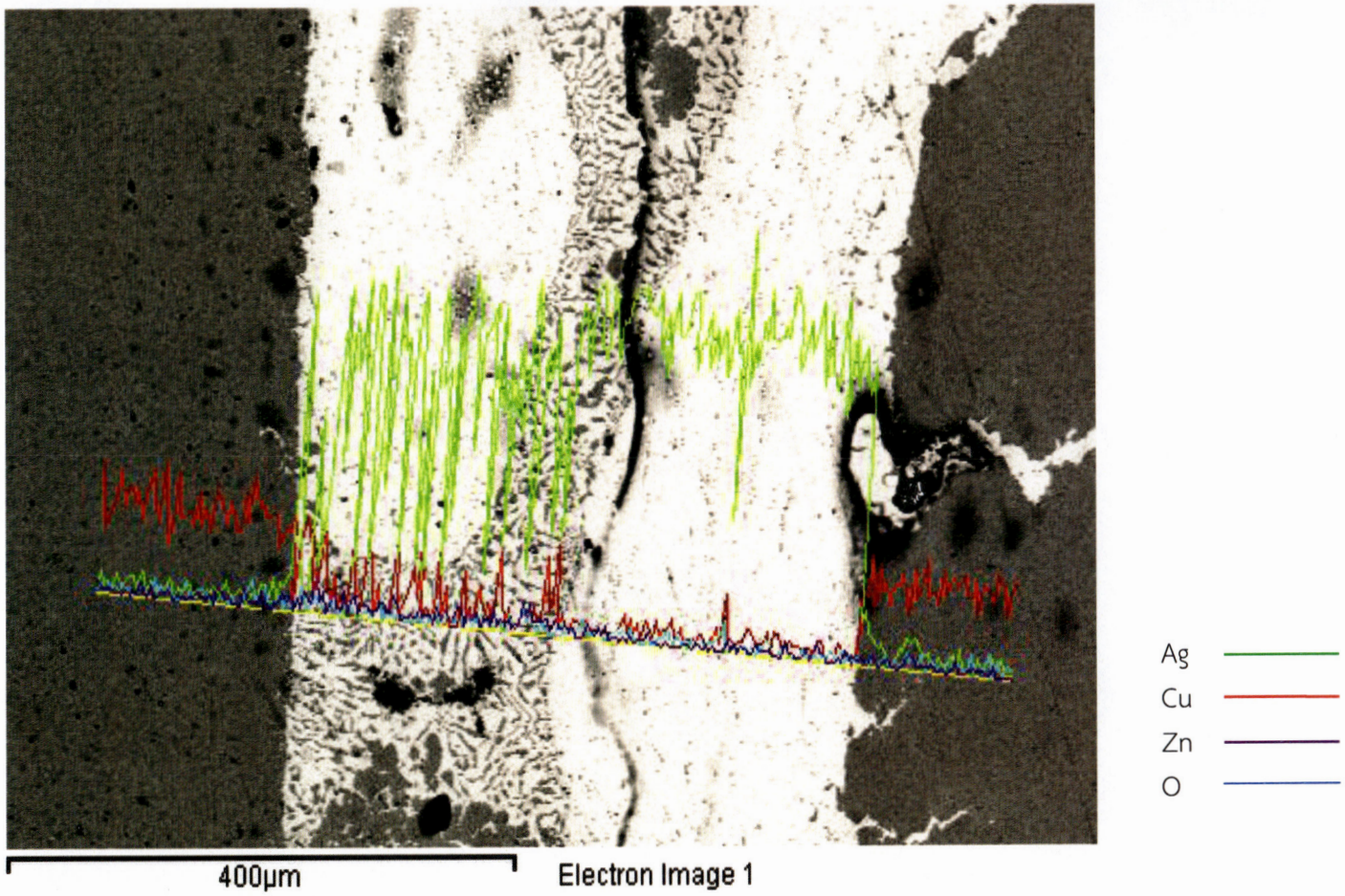
รูปที่ 19 รอยต่อระหว่างโลหะเงินสเตอร์ลิงกับทองแดง อบที่อุณหภูมิ 750°C ระยะเวลา 2 ชั่วโมง

3.2 รอยต่อระหว่างโลหะเงินสเตอร์ลิงกับทองเหลือง อบที่อุณหภูมิ 750°C ระยะเวลา 2 ชั่วโมง แสดงในรูปที่ 20



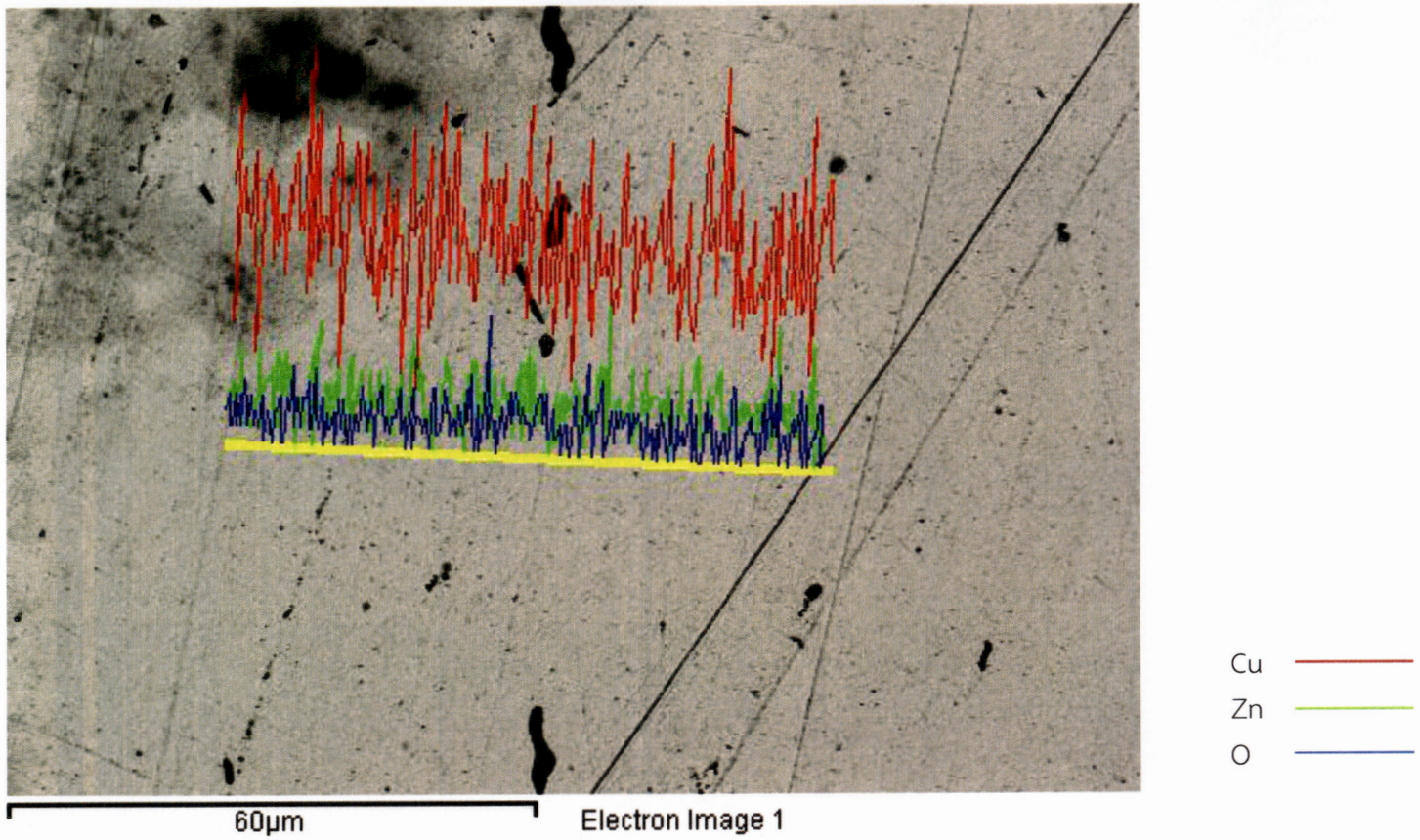
รูปที่ 20 รอยต่อระหว่างโลหะเงินสเตอร์ลิงกับทองเหลือง อบที่อุณหภูมิ 750°C ระยะเวลา 2 ชั่วโมง

3.3 รอยต่อระหว่างโลหะเงินสเตอร์ลิงกับทองเหลือง อบที่อุณหภูมิ 750°C ระยะเวลา 3 ชั่วโมง แสดงในรูปที่ 21



รูปที่ 21 รอยต่อระหว่างโลหะเงินสเตอร์ลิงกับทองเหลือง อบที่อุณหภูมิ 750°C ระยะเวลา 3 ชั่วโมง

3.4 รอยต่อระหว่างโลหะทองแดงกับทองเหลือง อบที่อุณหภูมิ 900°C ระยะเวลา 2 ชั่วโมง แสดงในรูปที่ 22



รูปที่ 22 รอยต่อระหว่างโลหะทองแดงกับทองเหลือง อบที่อุณหภูมิ 900°C ระยะเวลา 2 ชั่วโมง

4. ขั้นตอนการทำเครื่องประดับ

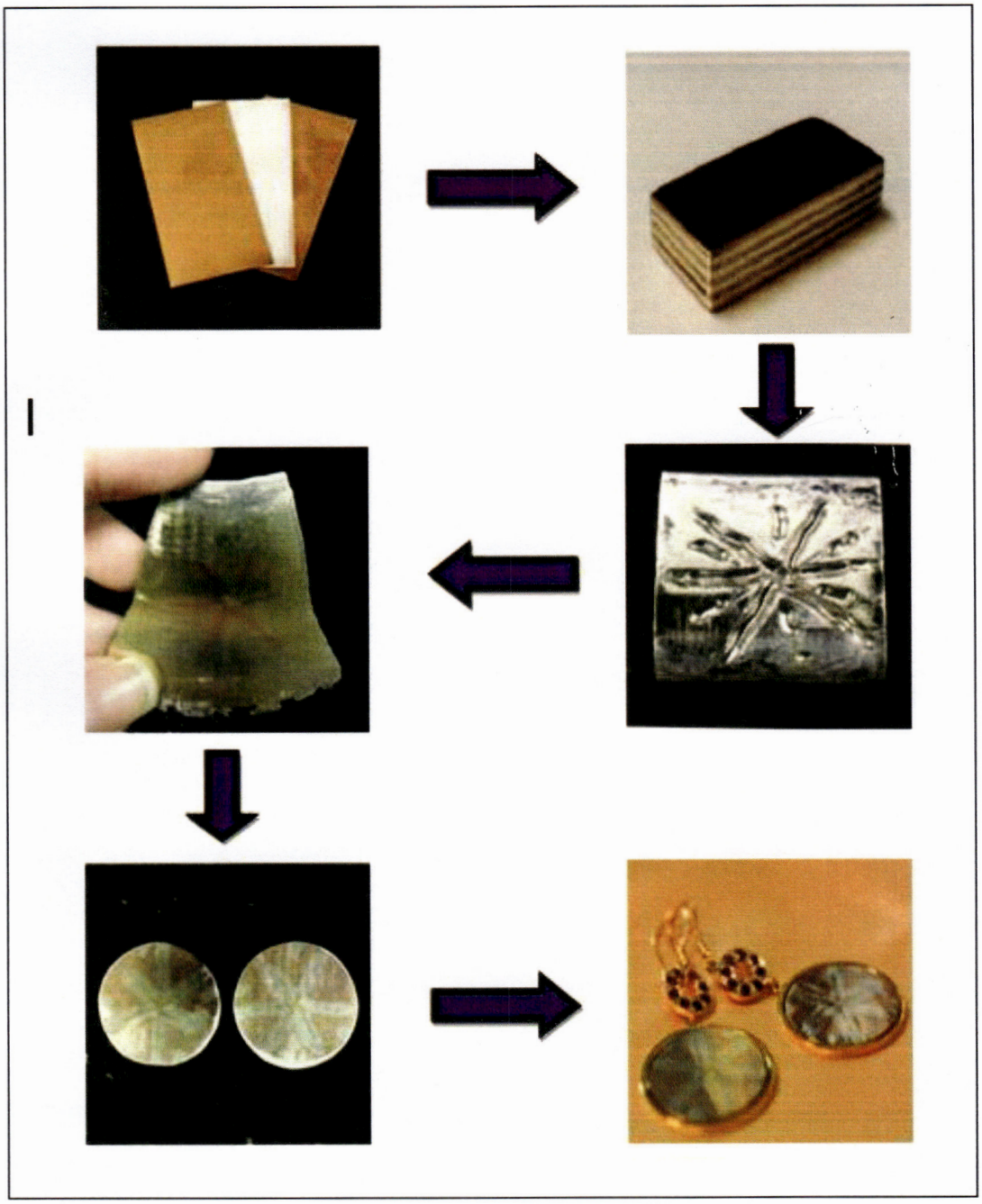
4.1 การทำแผ่นโมกุเม่กาเน่ด้วยการเจาะลวดลายลงบนแผ่นโลหะตามลายที่เขียนไว้แล้วนำไปรีด ขั้นตอนการทำเครื่องประดับแสดงในรูปที่ 23

4.1.1 นำแท่งโลหะที่เชื่อมติดกันเรียบร้อยแล้วมาวาดลายที่จะทำการเจาะ

4.1.2 เจาะแท่งโลหะตามลายที่วาดไว้

4.1.3 นำแท่งโลหะไปรีดให้บางลง (ทำการอบอ่อนแท่งโลหะระหว่างการรีดโลหะ)

4.1.4 นำแผ่นโลหะประกอบกับตัวเรือนที่เตรียมไว้



รูปที่ 23 การทำแผ่นโมกุเม่กาเน่ด้วยการเจาะลวดลายลงบนแผ่นโลหะตามลายที่เขียนไว้แล้วนำไปรีด

4.2 การทำแผ่นโมกุเม่กาเน่ด้วยการใช้ความร้อนในการบิดแท่งโลหะเป็นเกลียวและผ่าแท่งโลหะ ขั้นตอนการทำเครื่องประดับแสดงในรูปที่ 24

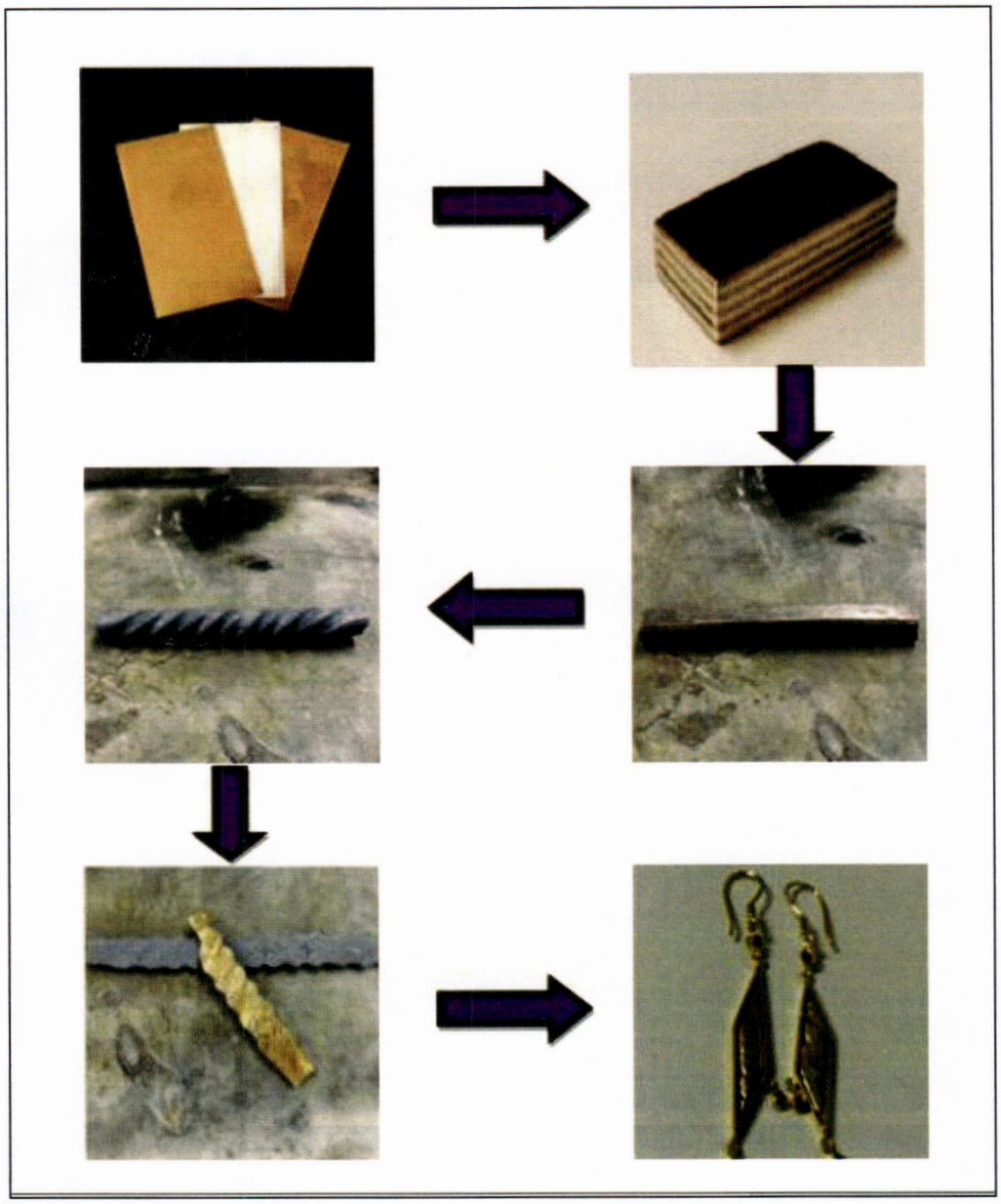
4.2.1 นำแท่งโลหะที่เชื่อมติดกันเรียบร้อยแล้วมามาเลื่อยให้มีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมขนาด 0.8 x 0.8 เซนติเมตร

4.2.2 นำแท่งโลหะที่เลื่อยเสร็จแล้วมาดึงเป็นเส้นด้วยเครื่องรีดจนกระทั่งมีหน้าตัดมีขนาดประมาณ 0.5 x 0.5 เซนติเมตร

4.2.3 บิดแท่งโลหะให้เป็นเกลียวโดยใช้ความร้อน

4.2.4 เลื่อยแท่งโลหะเป็น 2 ส่วน ตามความยาวของแท่งโลหะจะพบลายที่เกิดจากการบิดเป็นเกลียวอยู่ด้านใน

4.2.5 เลื่อยและตะไบตกแต่งชิ้นงานและนำมาประกอบกับตัวเรือนที่เตรียมไว้



รูปที่ 24 การทำแผ่นโมกุเม่กาเน่ด้วยการใช้ความร้อนในการบิดแท่งโลหะเป็นเกลียวและผ่าแท่งโลหะ

สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

1. การเชื่อมติดกันของโลหะเงินสเตอร์ลิง/ทองแดง

เมื่อนำชิ้นงานออกจากเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 700°C และ 750°C เวลายืนอุณหภูมิ 1, 2 และ 3 ชั่วโมง พบว่าชิ้นงานยึดติดกัน แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 800°C พบว่าแผ่นเงินสเตอร์ลิงเกิดการละลาย ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานทดสอบอบที่อุณหภูมิ 700°C แผ่นโลหะเชื่อมต่อกันไม่สนิท ชิ้นงานทดสอบอบที่อุณหภูมิ 750 °C ระยะเวลา 1 ชั่วโมง ชิ้นงานบางส่วนเชื่อมกันไม่สนิท แต่เมื่อเพิ่มเวลาเป็น 2 และ 3 ชั่วโมง พบว่าชิ้นงานเชื่อมติดกันสนิท และจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยต่อด้วยเทคนิค Line scan Energy Dispersive Spectroscopy ของชิ้นงานที่เชื่อมติดกันสนิทพบการแพร่ของโลหะเงิน (Ag) และทองแดง (Cu) ในบริเวณที่แผ่นโลหะยึดติดกัน แม้ว่าการเพิ่มระยะเวลาในการอบให้มากขึ้นจะทำให้การแพร่ของโลหะมากขึ้น แต่เมื่อนำชิ้นงานไปทำแผ่นโมกุเม่กาเน่ซึ่งมีขั้นตอนที่ต้องนำชิ้นงานไปรีดเพื่อให้เกิดลวดลายกลับไม่พบว่าเกิดความแตกต่างจากระยะเวลาในการอบที่เพิ่มขึ้น บริเวณขอบของแผ่นโลหะจะเริ่มมีการแตกและเกิดการแยกออกจากกันเช่นเดียวกัน

2. การเชื่อมติดกันของโลหะเงินสเตอร์ลิง/ทองเหลือง

เมื่อนำชิ้นงานออกจากเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 700 °C เวลายืนอุณหภูมิ 1, 2 และ 3 ชั่วโมง พบว่าชิ้นงานยึดติดกัน แต่เมื่อนำชิ้นงานไปถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกลับพบว่ารอยต่อระหว่างแผ่นโลหะเชื่อมกันไม่สนิท ชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 750 °C ระยะเวลายืนอุณหภูมิ 1 และ 2 ชั่วโมง ชิ้นงานยึดติดกันดีแต่ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง เงินสเตอร์ลิงและทองเหลืองบางส่วนเกิดการหลอมละลายรวมกัน เมื่อดูรอยต่อระหว่างชั้นด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงพบว่ารอยต่อระหว่างชั้นโลหะแนบสนิท การทดลองที่อุณหภูมิ 800°C ระยะเวลายืนอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง เมื่อนำชิ้นงานออกจากเตาไฟฟ้าพบว่าเงินสเตอร์ลิงและทองเหลืองเกิดการละลายรวมกัน และจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยต่อด้วยเทคนิค line scan EDS ของชิ้นงานที่เชื่อมติดกันสนิทพบการแพร่ของโลหะเงิน (Ag) และทองแดง (Cu) และสังกะสี (Zn) ในบริเวณที่แผ่นโลหะยึดติดกัน

3. การเชื่อมติดกันของโลหะทองแดง/ทองเหลือง

การทดลองเชื่อมชิ้นงานโลหะทองแดง/ทองเหลืองที่อุณหภูมิ 850°C ระยะเวลายืนอุณหภูมิ 1, 2 และ 3 ชั่วโมง ชิ้นงานไม่สามารถเชื่อมติดกันได้ แต่การทดลองที่อุณหภูมิ 900°C และ 950°C ระยะเวลายืนอุณหภูมิ 1, 2 และ 3 ชั่วโมง ชิ้นงานมีการยึดติดกันได้ดี ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นว่าบริเวณต่อเกือบจะกลายเป็นเนื้อเดียวกัน เนื่องจากทองเหลืองมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นทองแดงเช่นเดียวกัน

4. การเชื่อมติดกันของโลหะทองแดง/เงินสเตอร์ลิง/ทองเหลือง

จากการทดลองเชื่อมแผ่นโลหะทองแดง/เงินสเตอร์ลิง/ทองเหลือง โดยให้แผ่นโลหะเงินสเตอร์ลิงเป็นตัวเชื่อมระหว่างแผ่นทองแดงและทองเหลือง ที่อุณหภูมิ 750°C ระยะเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อนำชิ้นงานออกจากเตาไฟฟ้าและทุบด้วยค้อนพบว่าชิ้นงานเชื่อมติดกัน แต่เมื่อนำชิ้นงานไปรีดด้วยเครื่องรีดกลับพบการหลุดระหว่างชั้นโลหะทองแดงกับเงินสเตอร์ลิง ซึ่งสอดคล้องกับสรุปผลการทดลองในข้อ 1 เมื่อเพิ่มระยะเวลาเป็น 2 ชั่วโมง ชิ้นงานยึดติดกันได้ดีมากขึ้น จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยเทคนิค Backscattering พบลักษณะการรวมตัวของทองแดง (จุดพื้นสีเข้มในผลการทดลองข้อ 3.2) ในบริเวณแผ่นเงินสเตอร์ลิงมีความกว้างประมาณ 25 ไมครอน การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยต่อด้วยเทคนิค line scan EDS พบว่าเกิดการแพร่ของโลหะเงิน (Ag) และทองแดง (Cu) ในบริเวณรอยต่อ การทดลองยืนอุณหภูมิ 3 ชั่วโมง พบว่าชิ้นงานในส่วนของเงินสเตอร์ลิงและทองเหลืองเริ่มละลายปนกันสอดคล้องกับผลการทดลองใน

ข้อ 2 และจากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะเห็นบริเวณที่มีการรวมตัวของกลุ่มทองแดงกระจายอยู่ในเนื้อเงินสเตอร์ลิงมากขึ้น แต่มีลักษณะการกระจายตัวที่ไม่แน่นอน (จุดพื้นสีเข้มในผลการทดลองข้อ 3.3) ดังนั้นระยะเวลาที่ใช้ในการเชื่อมติดกันของโลหะทองแดง/เงินสเตอร์ลิง/ทองเหลือง ที่ดีที่สุดจากผลการทดลองนี้คือ 2 ชั่วโมง

ข้อเสนอแนะ

1. การเชื่อมโลหะ 3 ชนิดด้วยความร้อนและแรงอัด ควรเลือกโลหะที่อยู่ชั้นกลางให้มีอุณหภูมิการหลอมเหลวต่ำกว่าโลหะที่อยู่ชั้นนอก
2. หลังจากที่เชื่อมด้วยความร้อนและแรงอัดเรียบร้อยแล้วต้องทำการเลื่อยขอบด้านนอกของแผ่นโลหะที่ไม่เสมอกันออกให้หมดและเชื่อมบริเวณรอยแยกที่เกิดขึ้นทั้งหมดด้วยโซลเดอร์ให้เรียบร้อยก่อนทุกครั้งจะช่วยให้การหลุดร่อนออกของแผ่นโลหะลดลงอย่างมาก ในงานวิจัยนี้ใช้เงินสเตอร์ลิงเป็นโลหะชั้นกลางเชื่อมระหว่างแผ่นโลหะทองแดงและทองเหลือง โซลเดอร์ที่ใช้เป็นส่วนผสมระหว่างเงินกับทองเหลืองซึ่งมีสีเดียวกันกับเงินสเตอร์ลิง การใช้โซลเดอร์ช่วยในการเชื่อมรอยต่อด้านนอกของแผ่นโลหะที่ติดกันไม่สนิทจึงไม่ส่งผลต่อความสวยงามของชิ้นงาน

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณหน่วยงานที่ให้ทุนสนับสนุนงบประมาณแผ่นดิน 2556 และคณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลองทำชิ้นงาน เตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์และผลิตชิ้นงานเครื่องประดับ

เอกสารอ้างอิง

ดวงฤดี ศุภติมัสโร. (2553). **โลหะวิทยาฟิสิกส์**. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ชวลิต เชียงกล. (2542). **โลหะวิทยา**. กรุงเทพฯ: ส.เอเชียเพรส.

Binnion, J. (2002). **Old Process, New Technology: Modern Mokume Gane.** [online]. Available. http://www.artmetal.com (21 September 2011)

Binnion, J. (n.d.). **Diffusion Bonding of Platinum**. [online]. Available. http://www.artmetal.com (21 September 2011)

Grimwade, M. (n.d.). **The 19th Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology**. [online]. Available. http://www.springerlink.com (21 September 2011)

Marinov, V. (n.d.). **Solid-State Welding**. [online]. Available. http:// www.me.emu.edu.tr (21 September 2011)

MokuMe gaNe. [online]. Available. http://cutaqcutediamond.wordpress.com/2010/08/09/mokume-gane/. (21 September 2011)

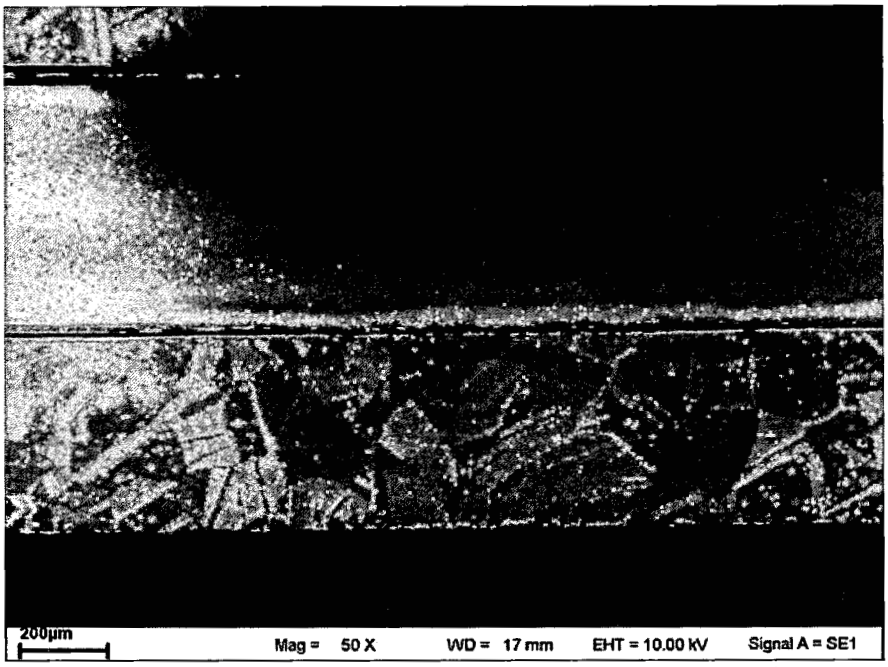
Patnaik, P. (2002). **Handbook of inorganic chemicals**. New York. McGraw-Hill.

ภาคผนวก

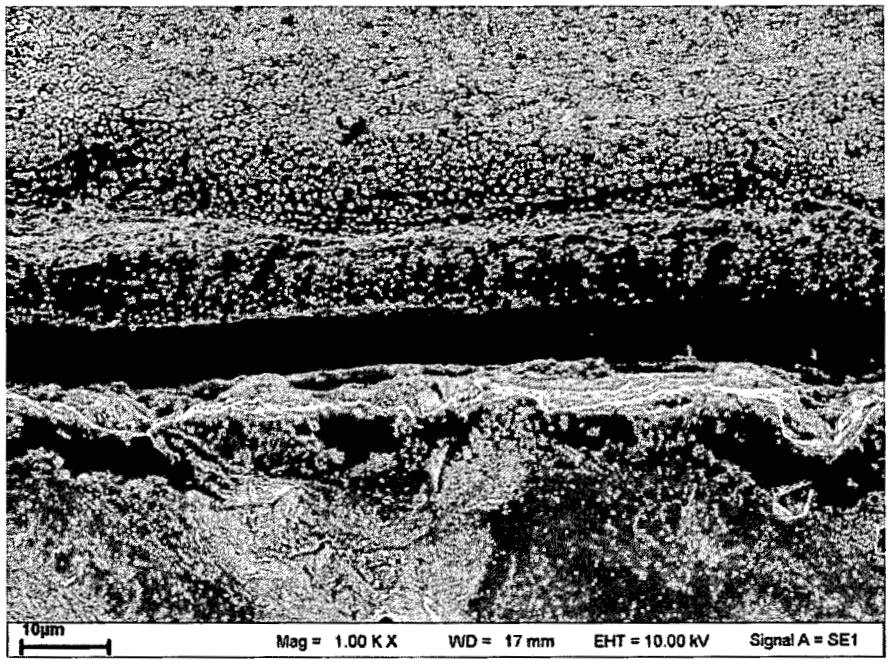
ภาคผนวก ก

ภาพถ่ายแสดงบริเวณรอยต่อของแผ่นโลหะ

ชิ้นงานทองเหลือง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 700°C ระยะเวลา 1 ชั่วโมง

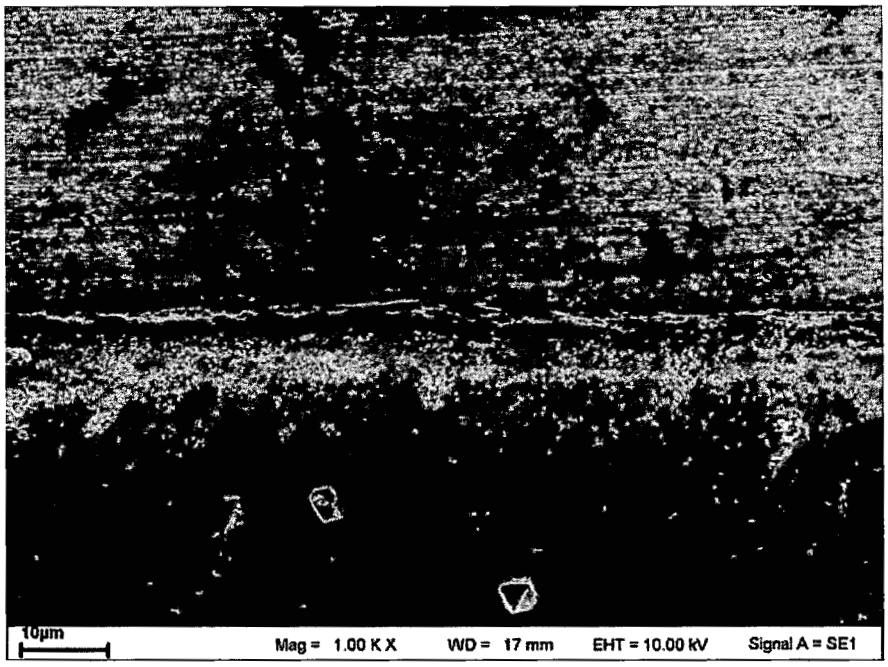


รูปที่ ก-1 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองเหลือง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 700 °C ระยะเวลา 1 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 50 เท่า

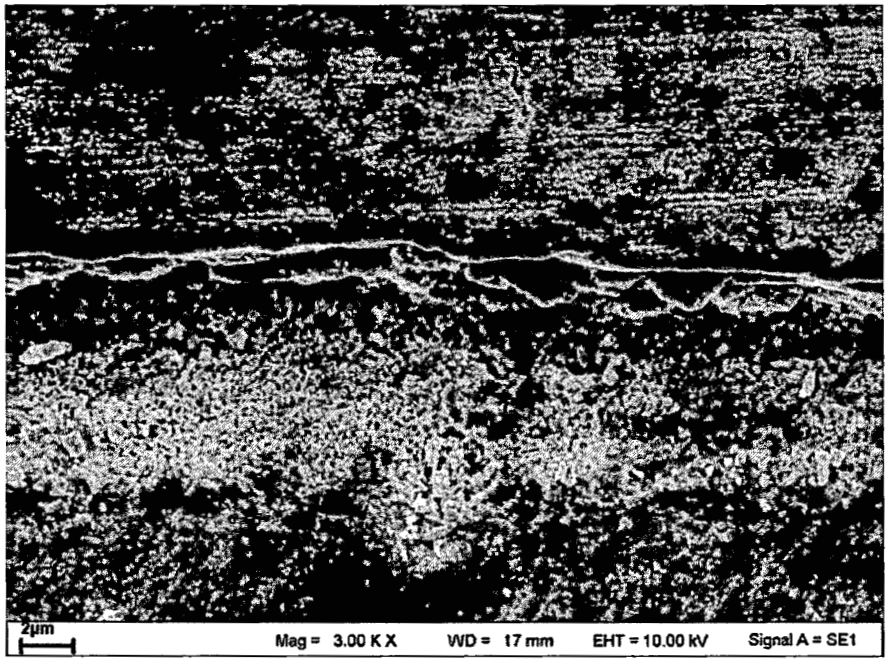


รูปที่ ก-2 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองเหลือง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 700 °C ระยะเวลา 1 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1,000 เท่า

ชิ้นงานทองเหลือง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 700 °C ระยะเวลา 2 ชั่วโมง

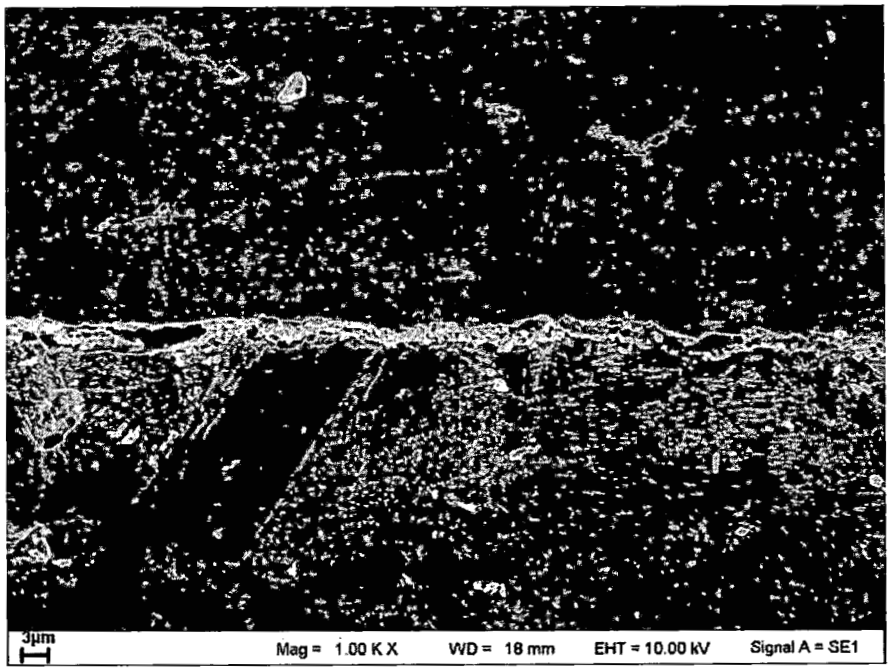


รูปที่ ก-3 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองเหลือง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 700 °C ระยะเวลา 2 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1,000 เท่า

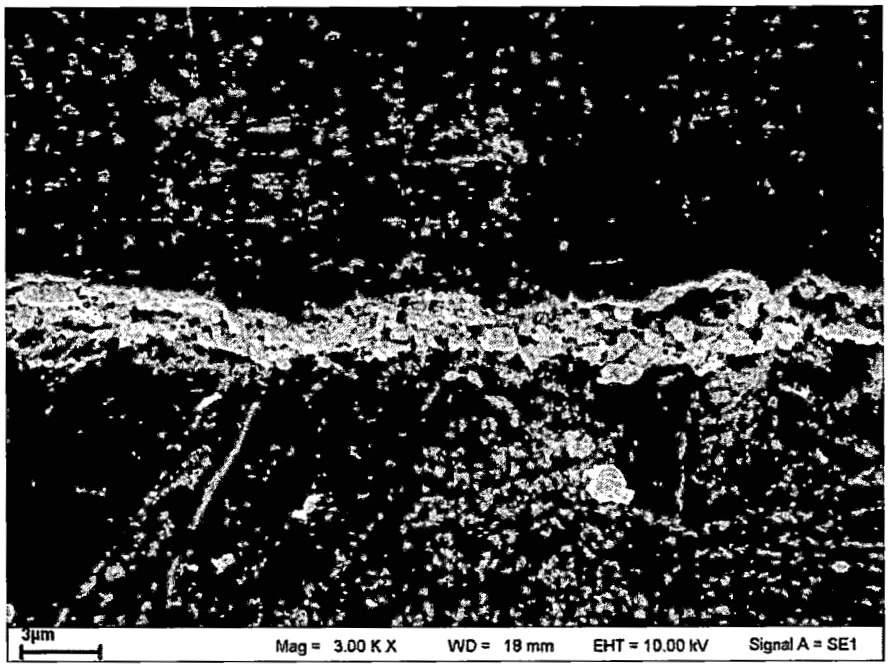


รูปที่ ก-4 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองเหลือง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 700 °C ระยะเวลา 2 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 3,000 เท่า

ชิ้นงานทองเหลือง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 700 °C ระยะเวลา 3 ชั่วโมง

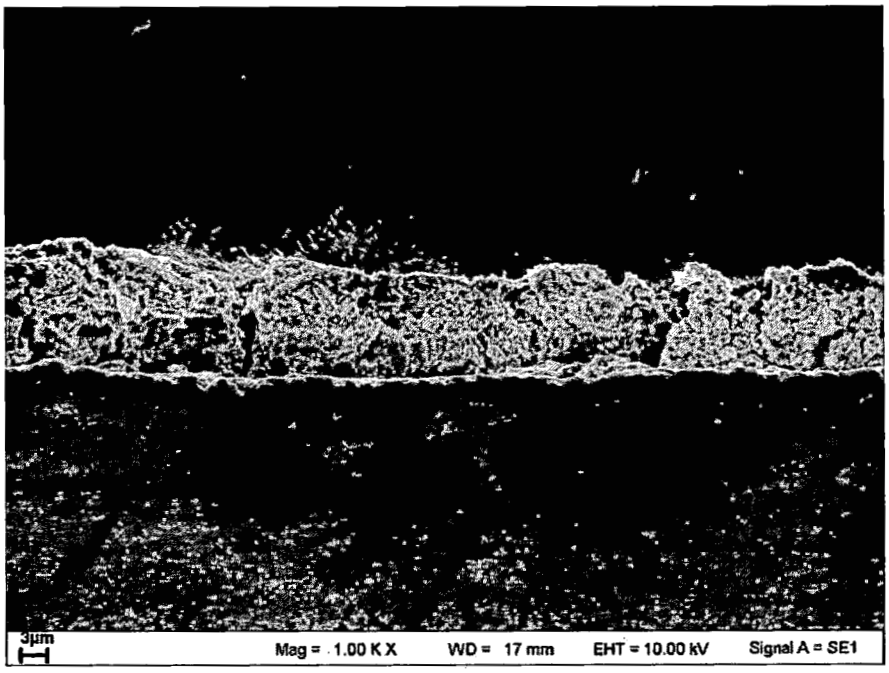


รูปที่ ก-5 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองเหลือง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 700 °C ระยะเวลา 3 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1,000 เท่า

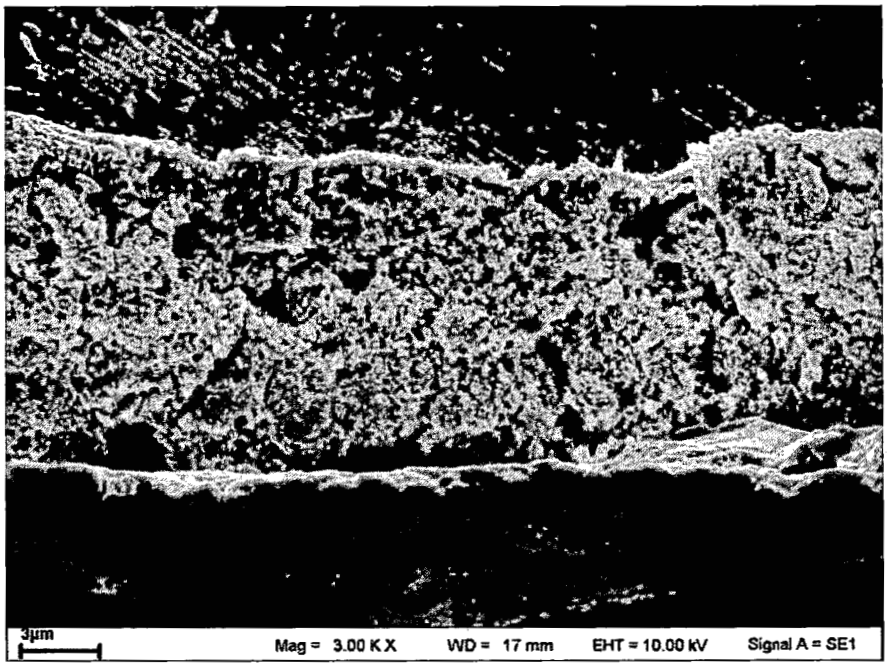


รูปที่ ก-6 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองเหลือง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 700 °C ระยะเวลา 3 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 3,000 เท่า

ชิ้นงานทองเหลือง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 720°C ระยะเวลา 1 ชั่วโมง

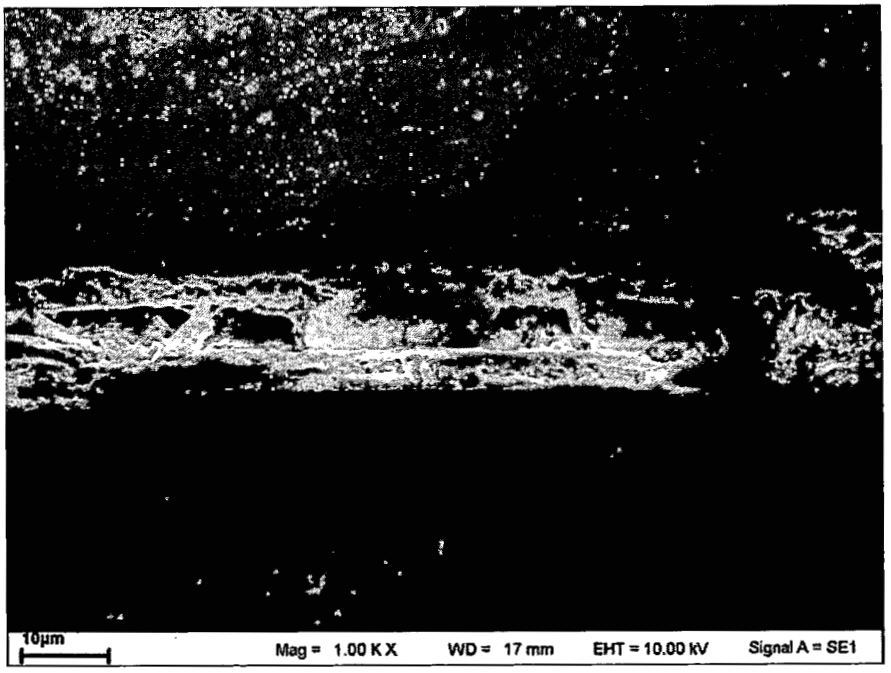


รูปที่ ก-7 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองเหลือง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 720 °C ระยะเวลา 1 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1,000 เท่า

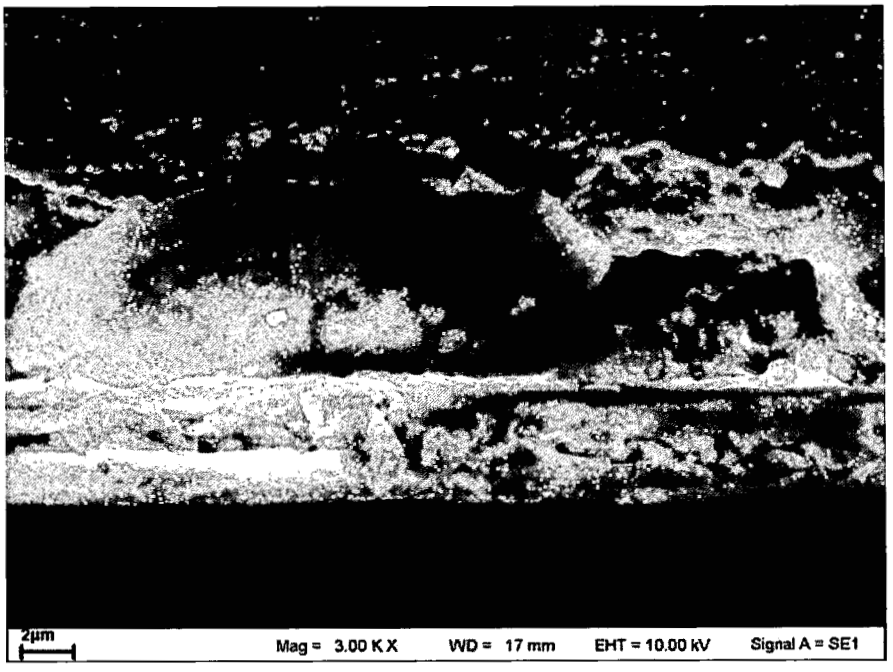


รูปที่ ก-8 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองเหลือง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 720 °C ระยะเวลา 1 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 3,000 เท่า

ชิ้นงานทองเหลือง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 720 °C ระยะเวลา 2 ชั่วโมง

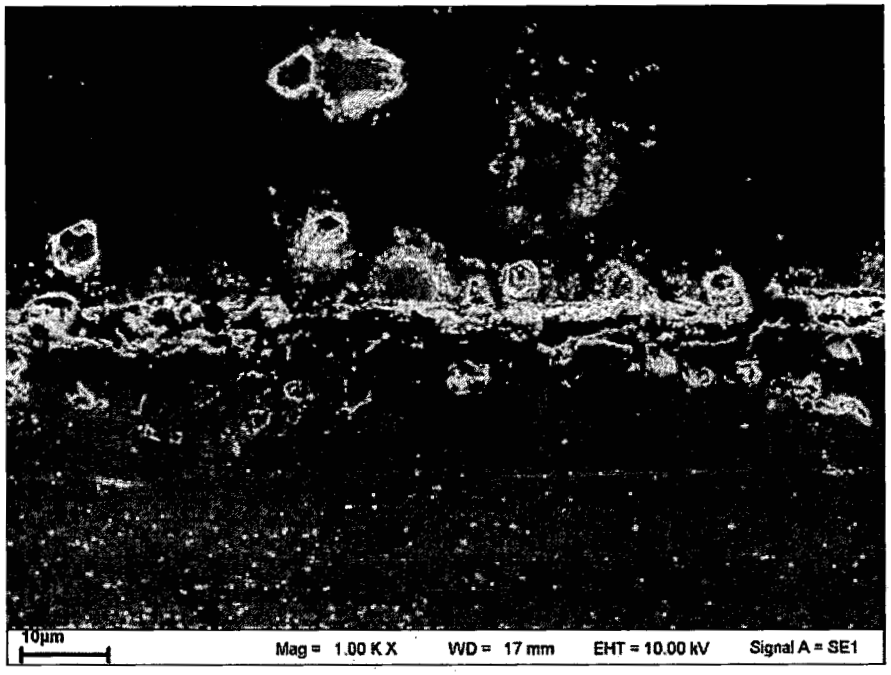


รูปที่ ก-9 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองเหลือง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 720 °C ระยะเวลา 2 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1,000 เท่า



รูปที่ ก-10 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองเหลือง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 720 °C ระยะเวลา 2 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 3,000 เท่า

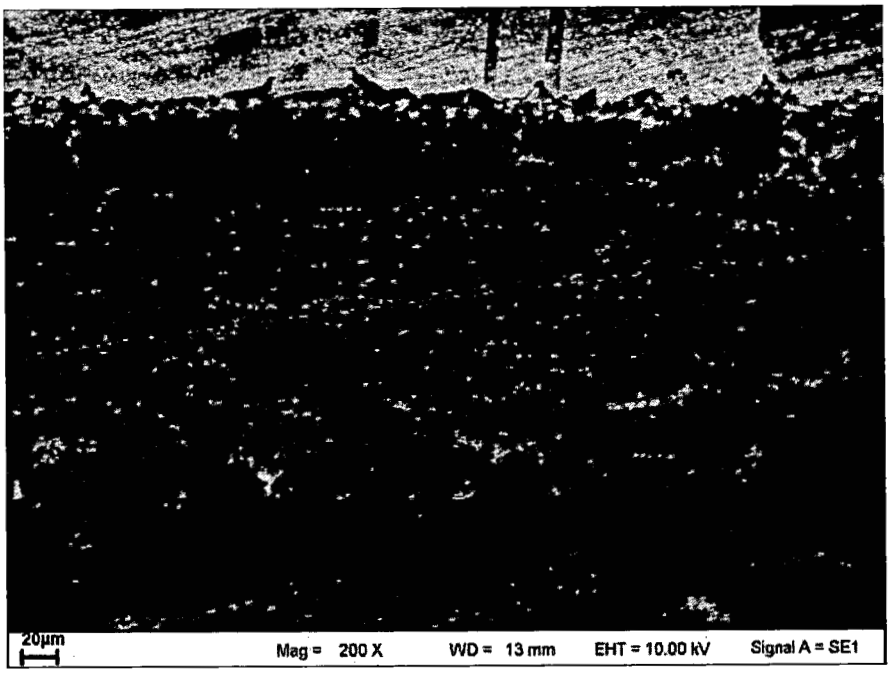
ชิ้นงานทองเหลือง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 720 °C ระยะเวลา 3 ชั่วโมง



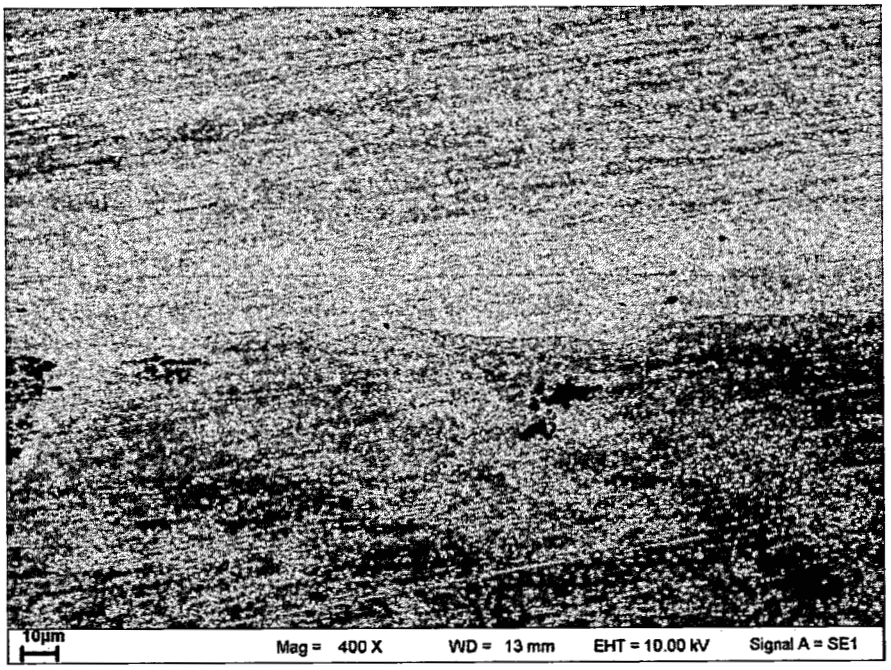
รูปที่ ก-11 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองเหลือง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 720 °C ระยะเวลา 3 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1,000 เท่า

รูปที่ ก-12 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองเหลือง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 720 °C ระยะเวลา 3 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 3,000 เท่า

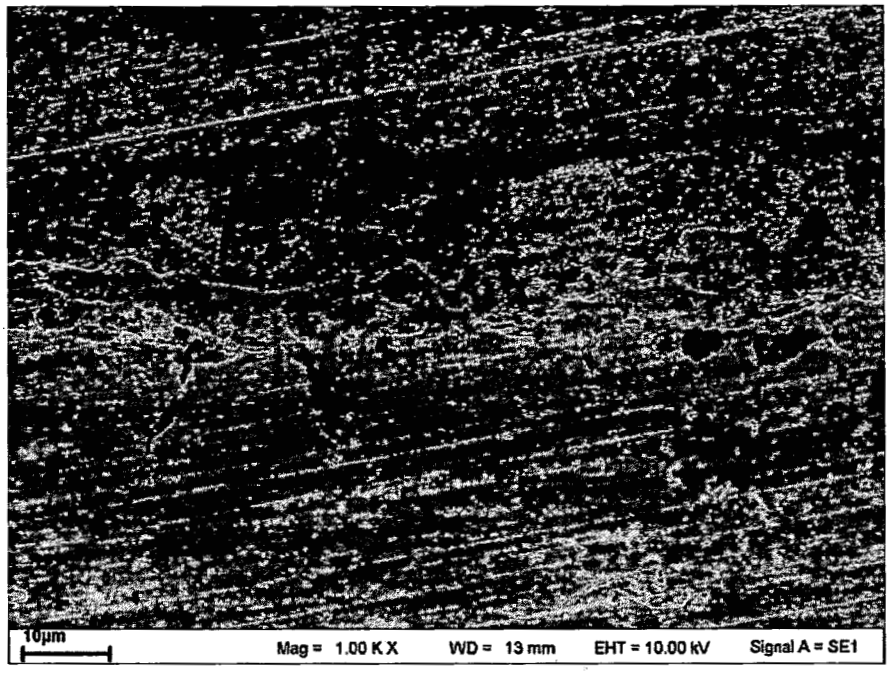
ชิ้นงานทองเหลือง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 730 °C ระยะเวลา 2 ชั่วโมง



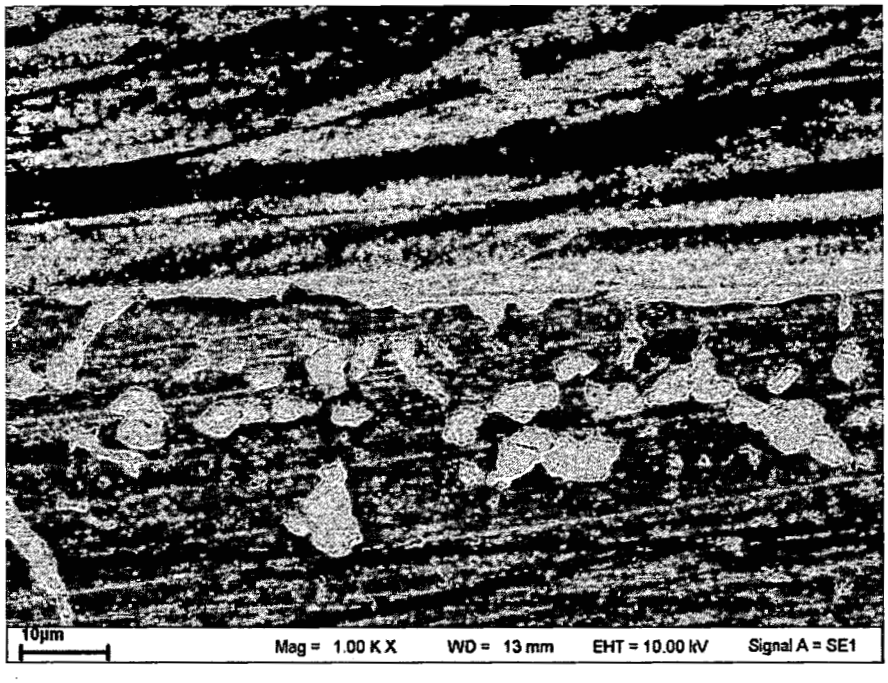
รูปที่ ก-13 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองเหลือง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 730 °C ระยะเวลา 2 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 200 เท่า



รูปที่ ก-14 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองเหลือง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 730 °C ระยะเวลา 2 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 400 เท่า

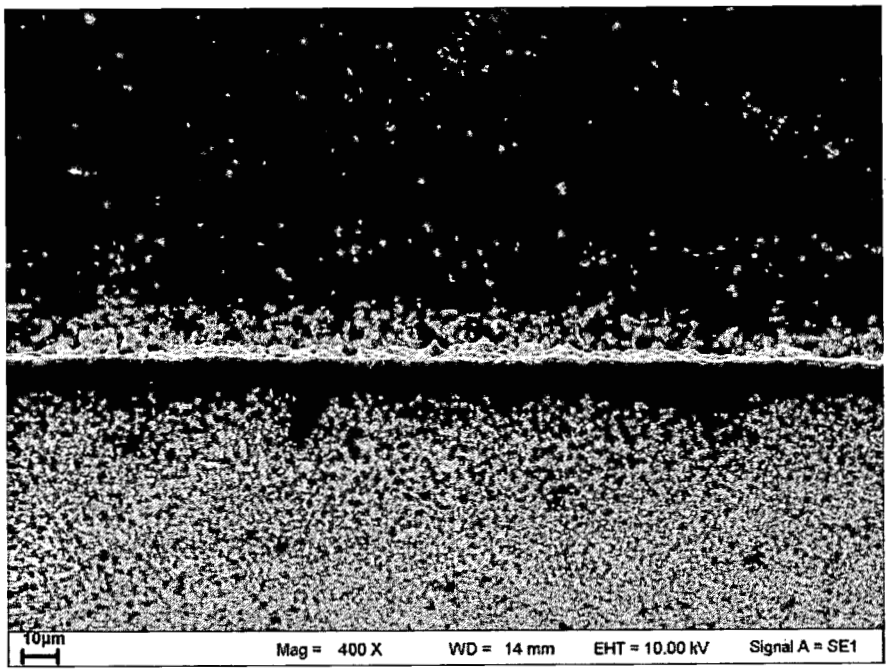


รูปที่ ก-15 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองเหลือง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 730 °C ระยะเวลา 2 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1,000 เท่า

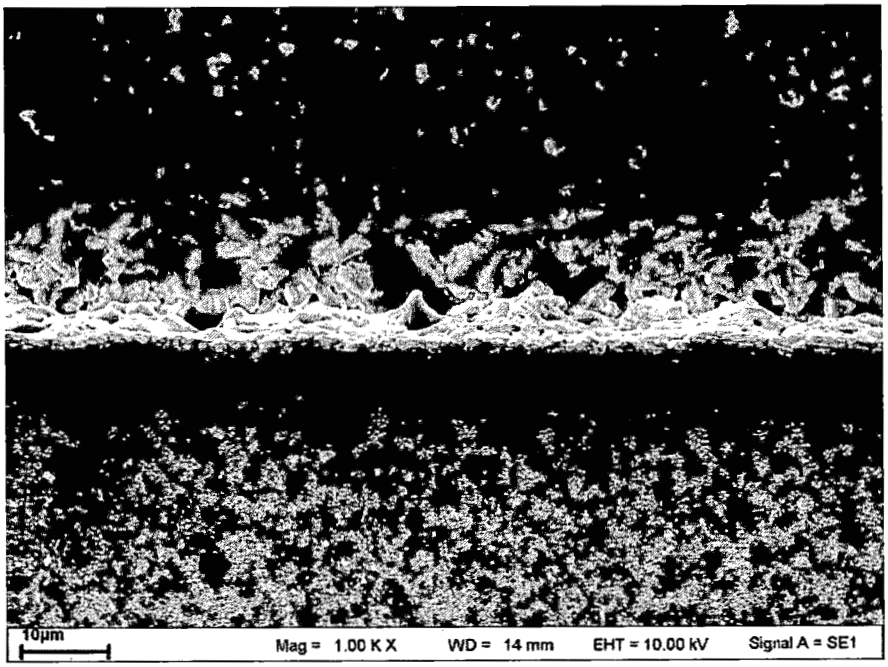


รูปที่ ก-16 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองเหลือง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 730 °C ระยะเวลา 2 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1,000 เท่า

ชิ้นงานทองแดง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 700 °C ระยะเวลา 1 ชั่วโมง

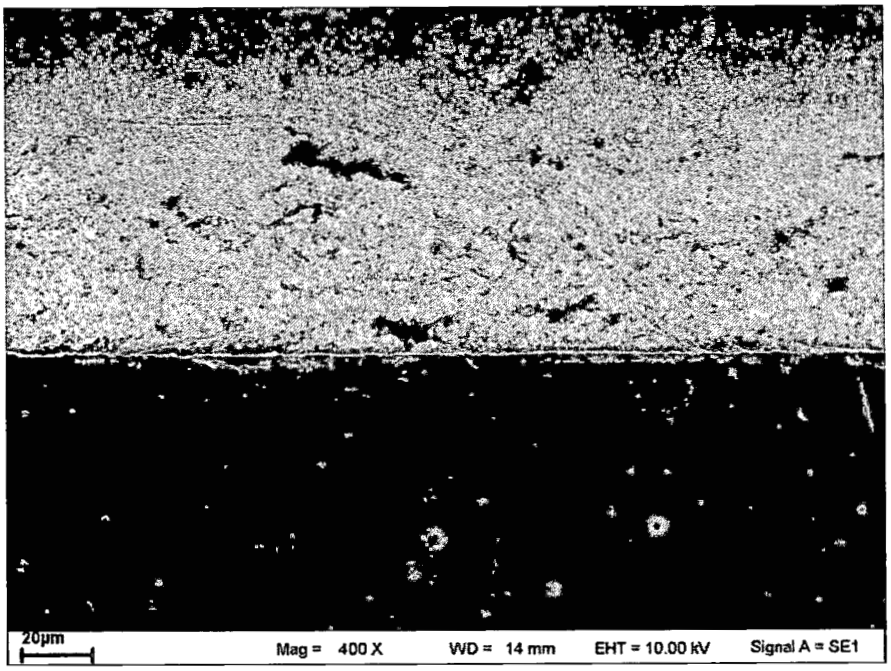


รูปที่ ก-17 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองแดง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 700 °C ระยะเวลา 1 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 400 เท่า

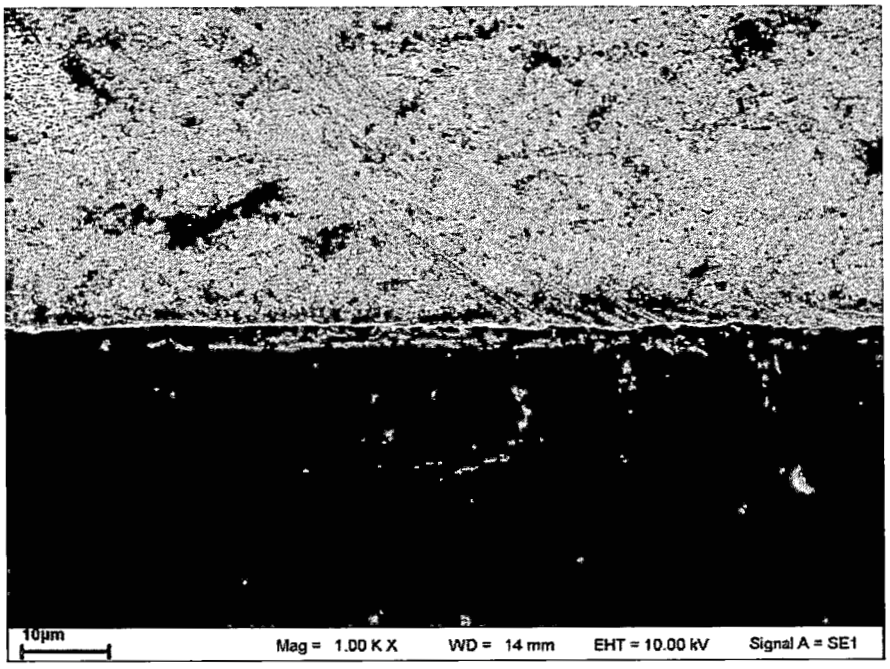


รูปที่ ก-18 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองแดง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 700 °C ระยะเวลา 1ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1,000 เท่า

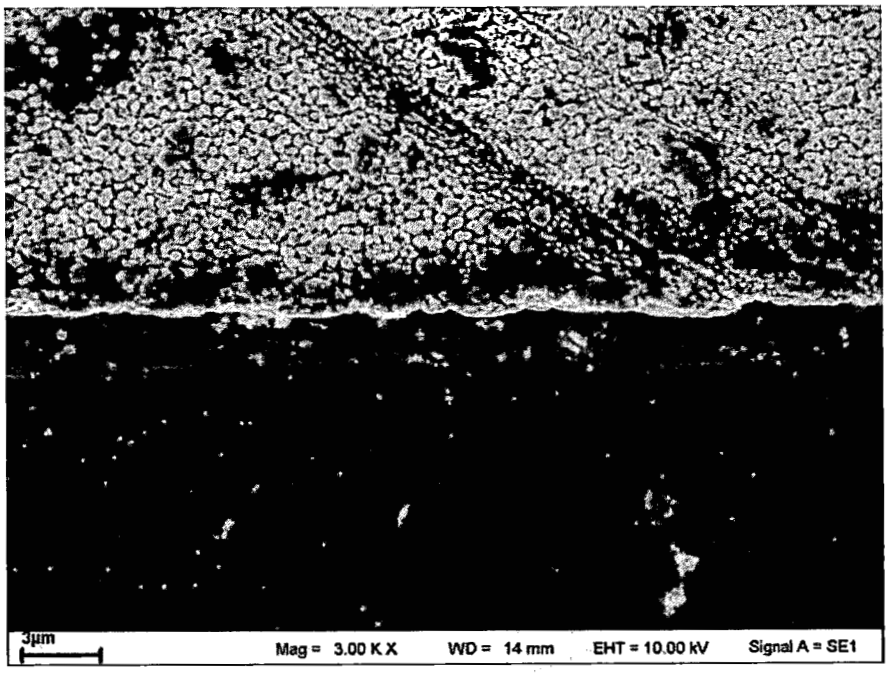
ชิ้นงานทองแดง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 700 °C ระยะเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ ก-19 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองแดง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 700 °C ระยะเวลา 2 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 400 เท่า

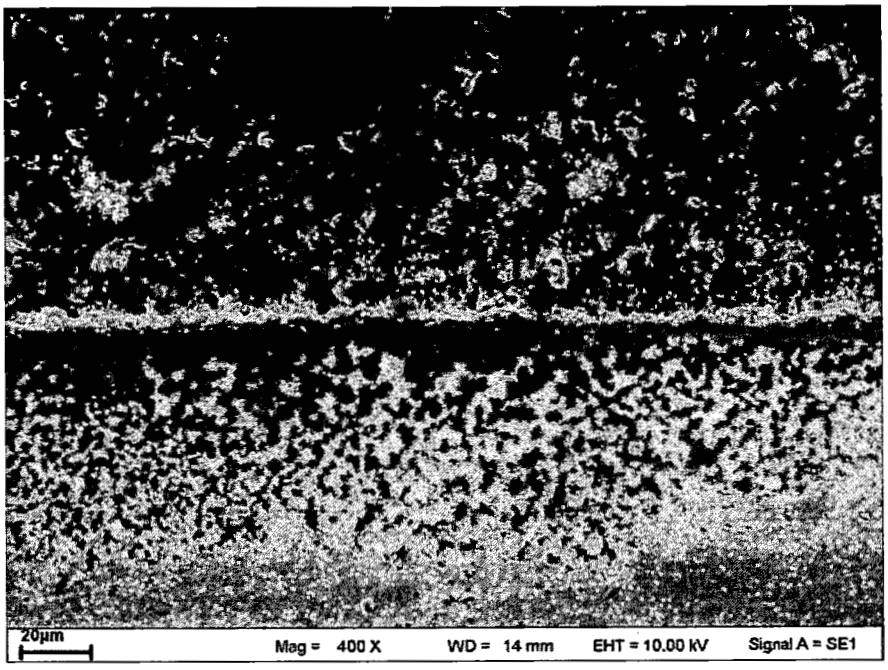


รูปที่ ก-20 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองแดง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 700 °C ระยะเวลา 2 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1,000 เท่า

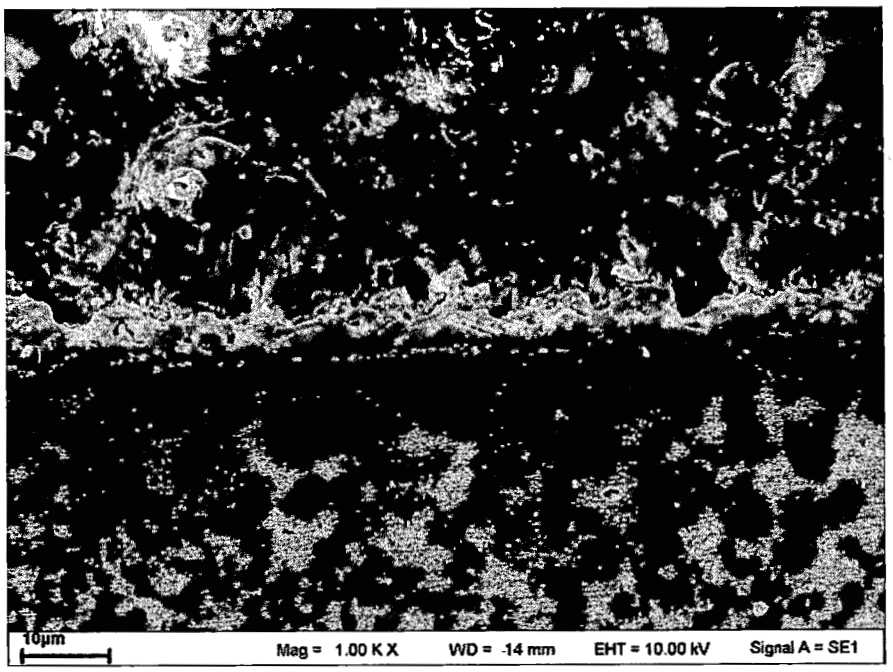


รูปที่ ก-21 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองแดง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 700 °C ระยะเวลา 2 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 3,000 เท่า

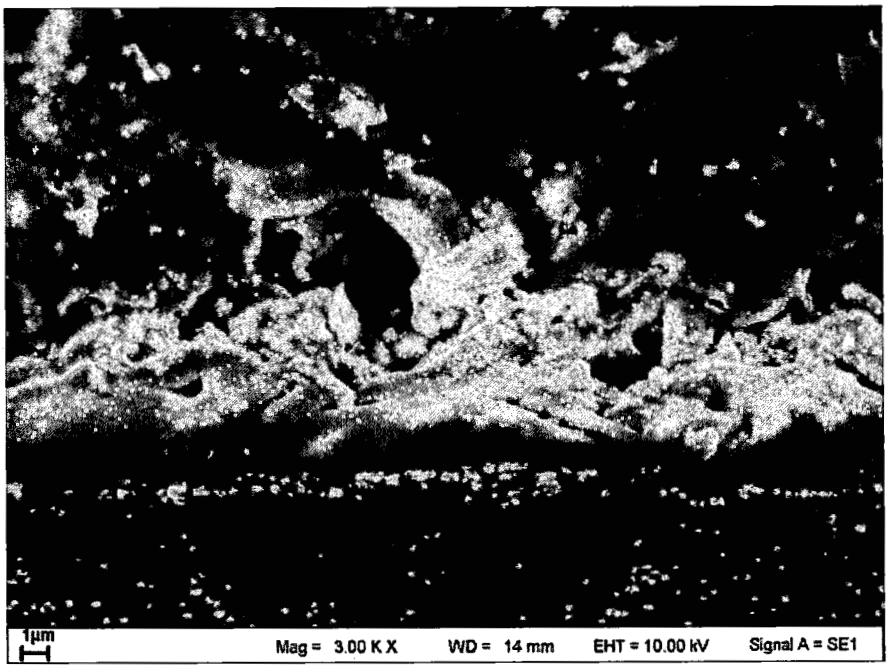
ชิ้นงานทองแดง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 700 °C ระยะเวลา 3 ชั่วโมง



รูปที่ ก-22 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองแดง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 700 °C ระยะเวลา 3 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 400 เท่า

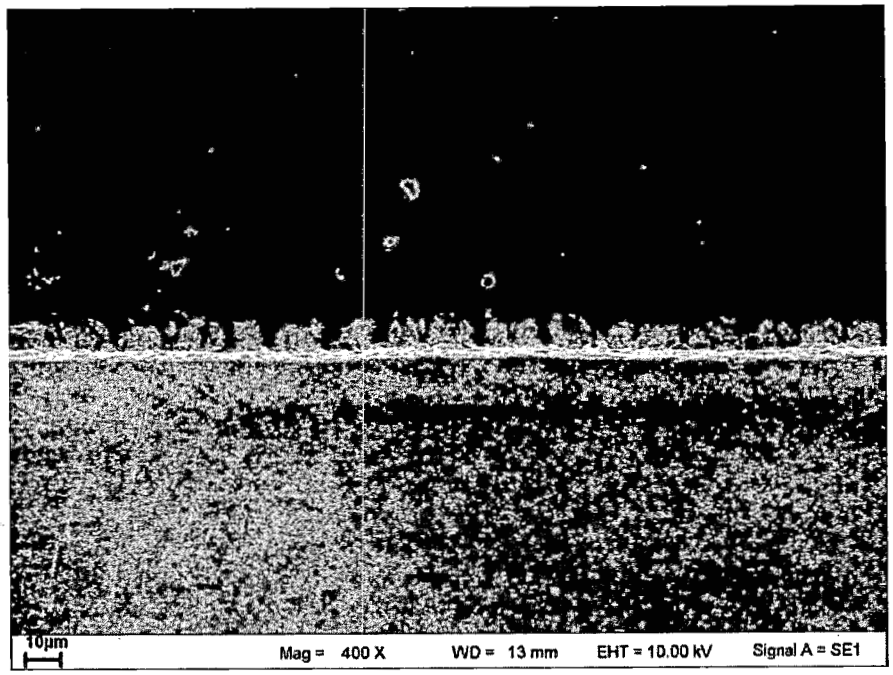


รูปที่ ก-23 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองแดง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 700 °C ระยะเวลา 3 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1,000 เท่า

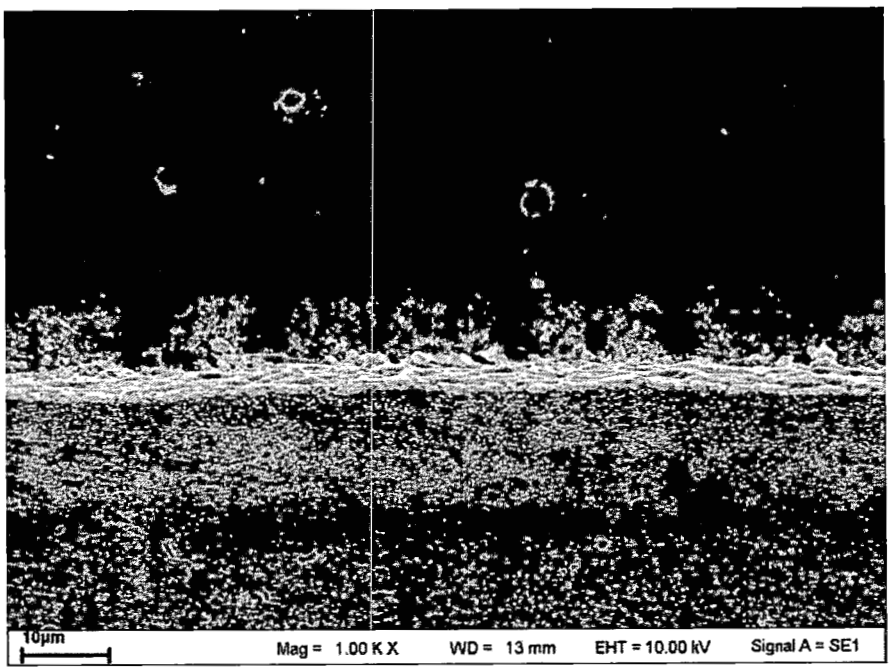


รูปที่ ก-24 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองแดง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 700 °C ระยะเวลา 3 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 3,000 เท่า

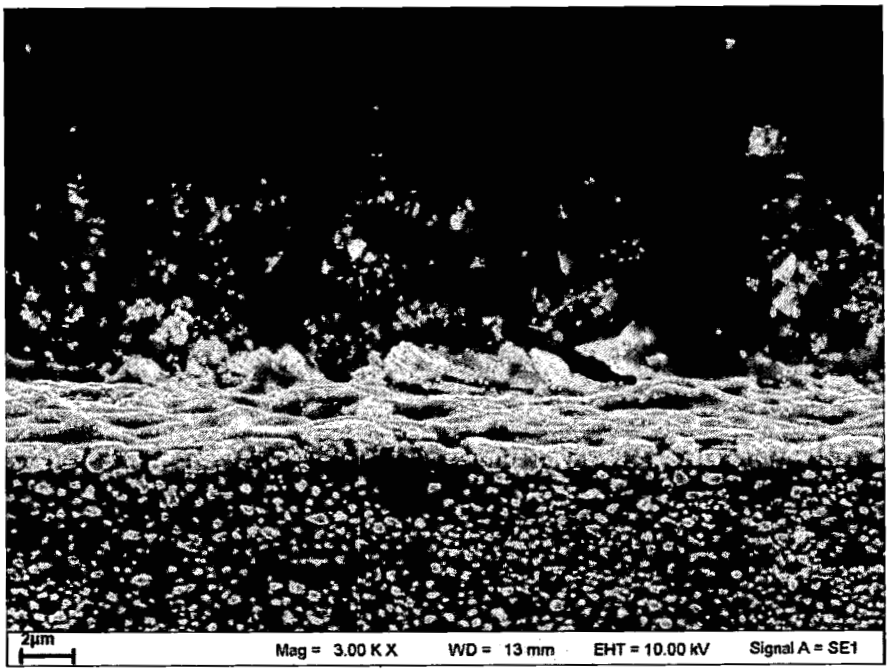
ชิ้นงานทองแดง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 750 °C ระยะเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ ก-25 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองแดง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 750 °C ระยะเวลา 1 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 400 เท่า

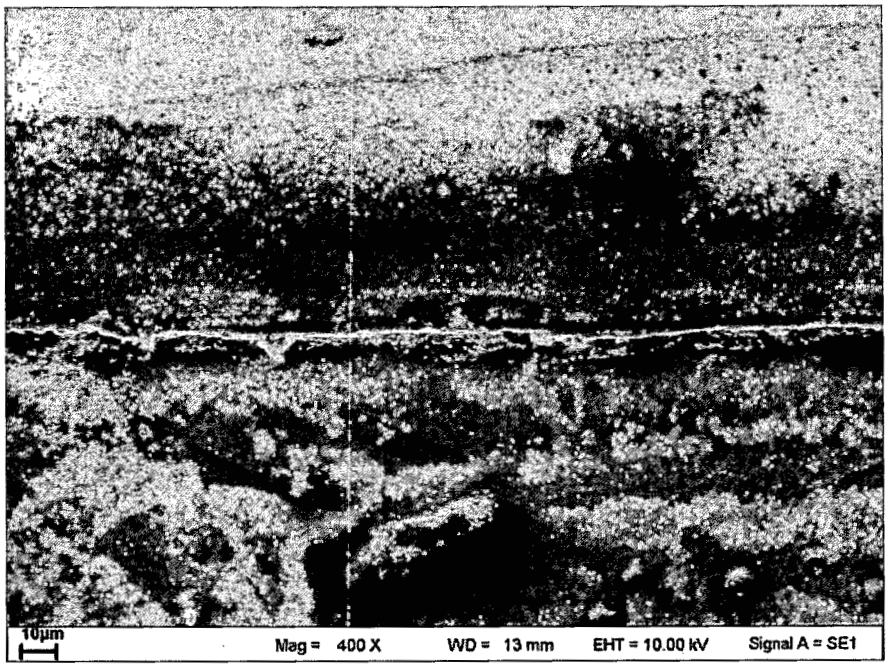


รูปที่ ก-26 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองแดง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 750 °C ระยะเวลา 1 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1,000 เท่า

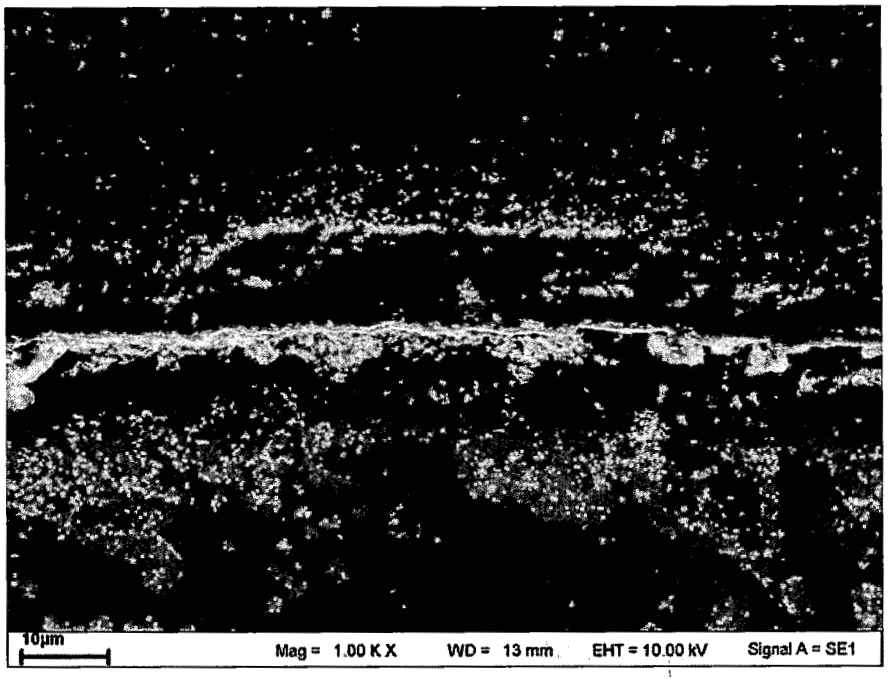


รูปที่ ก-27 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองแดง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 750 °C ระยะเวลา 1 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 3,000 เท่า

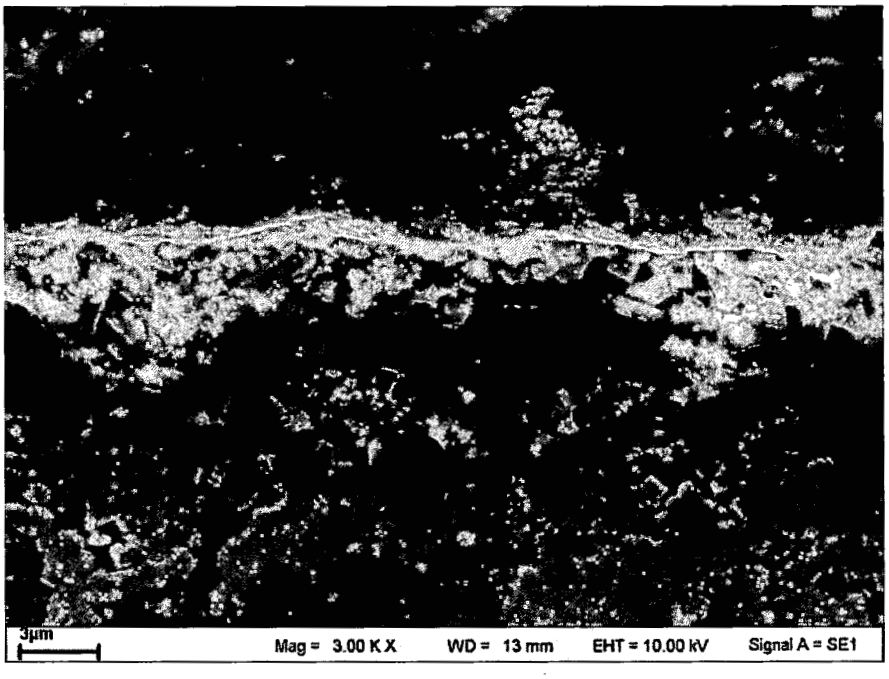
ชิ้นงานทองแดง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 750 °C ระยะเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ ก-28 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองแดง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 750 °C ระยะเวลา 2 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 400 เท่า

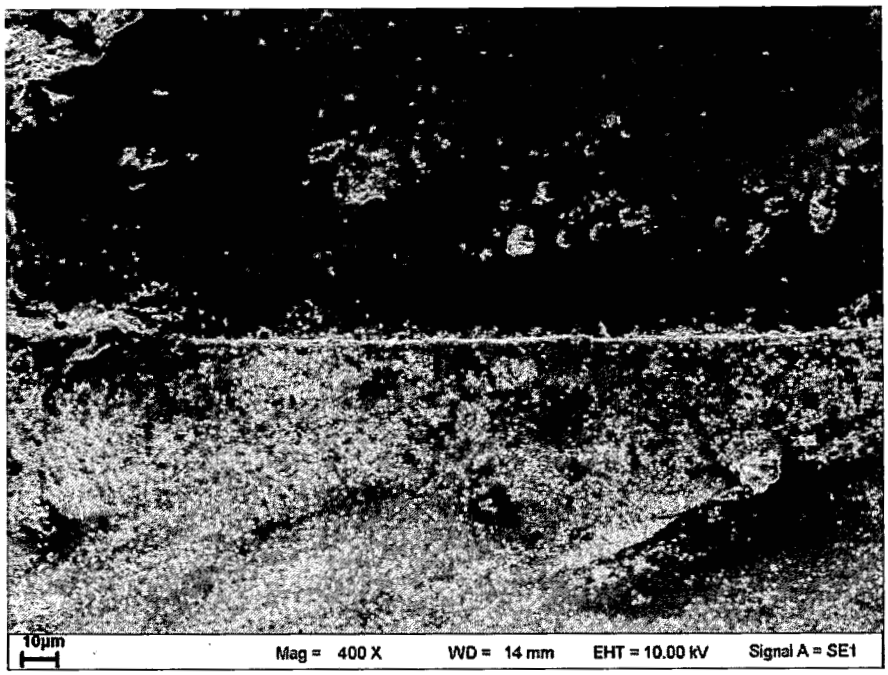


รูปที่ ก-29 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองแดง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 750 °C ระยะเวลา 2 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1,000 เท่า

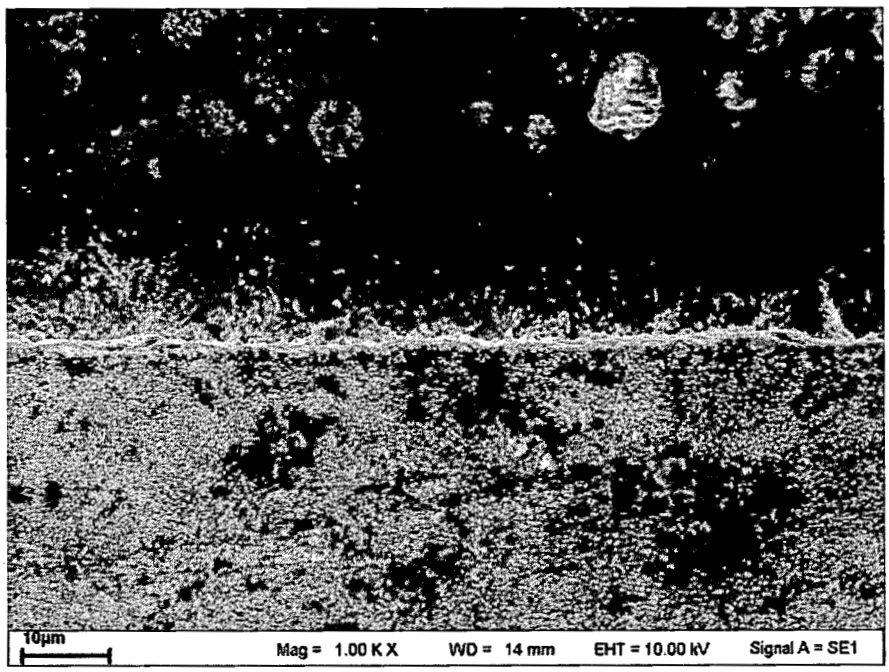


รูปที่ ก-30 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองแดง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 750 °C ระยะเวลา 2 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 3,000 เท่า

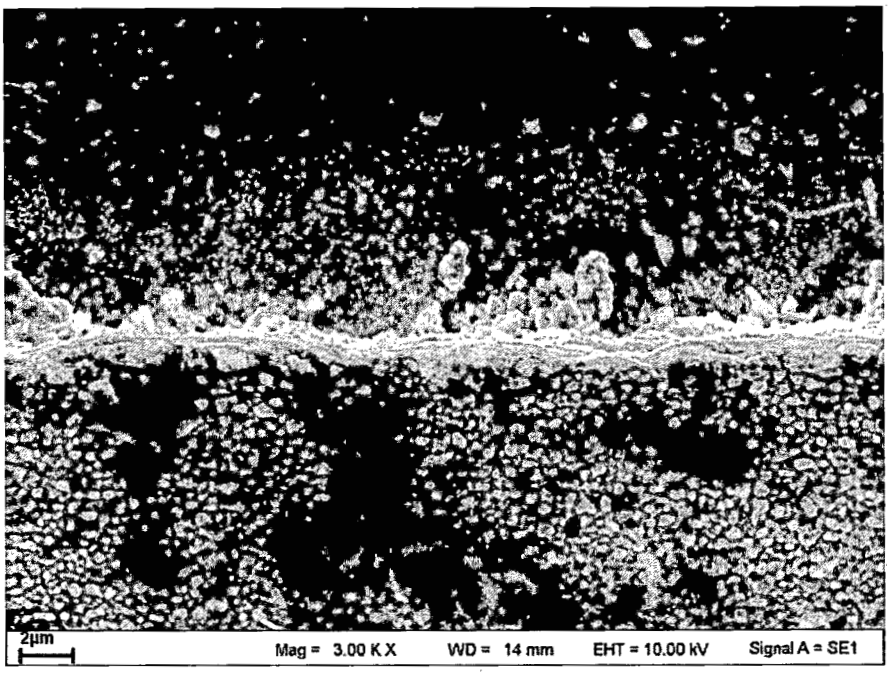
ชิ้นงานทองแดง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 750 °C ระยะเวลา 3 ชั่วโมง



รูปที่ ก-31 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองแดง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 750 °C ระยะเวลา 3 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 400 เท่า

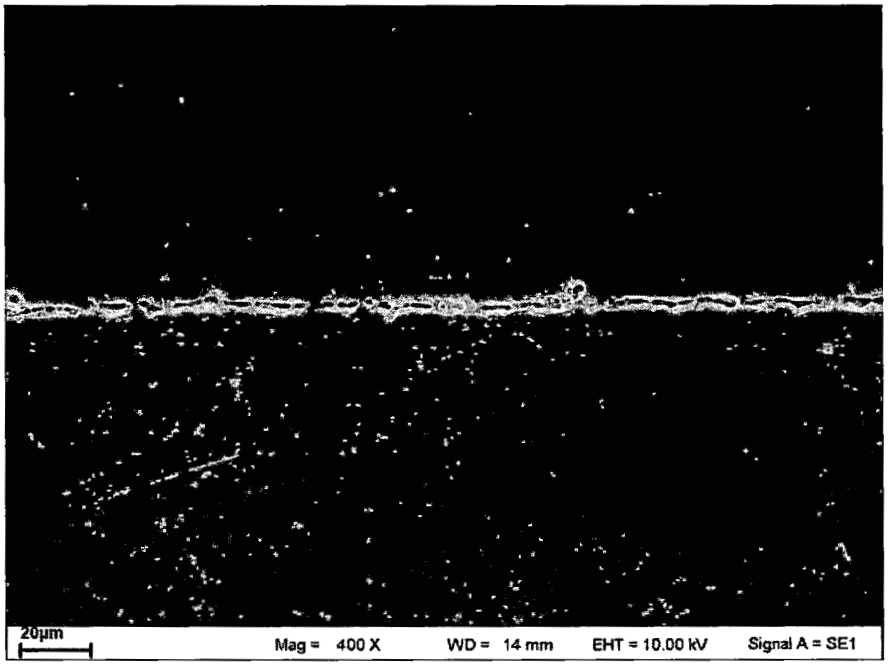


รูปที่ ก-32 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองแดง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 750 °C ระยะเวลา 3 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1,000 เท่า



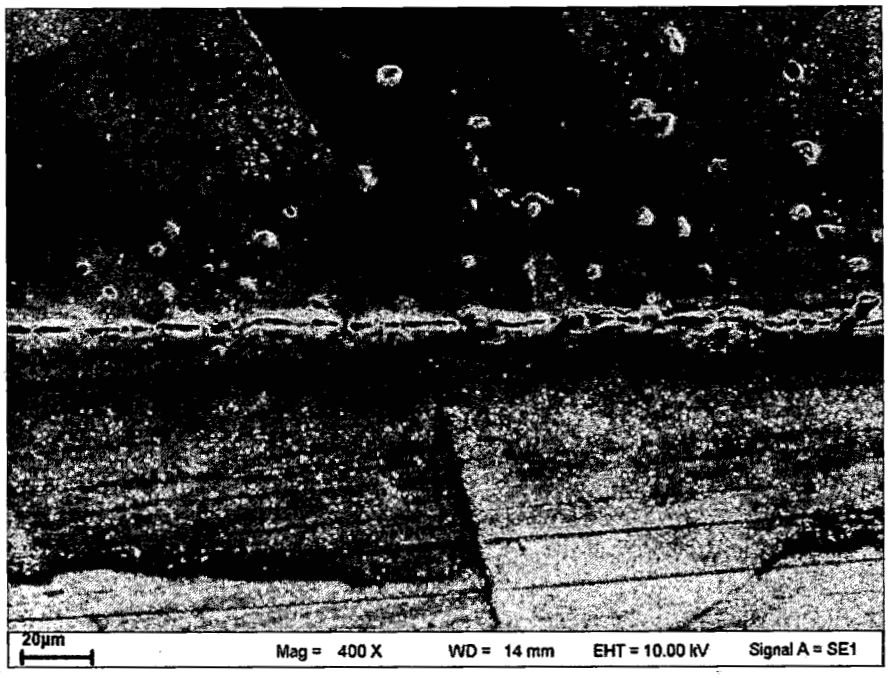
รูปที่ ก-33 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองแดง/เงินสเตอร์ลิง อบที่อุณหภูมิ 750 °C ระยะเวลา 3 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 3,000 เท่า

ชิ้นงานทองแดง/ทองเหลือง อบที่อุณหภูมิ 850°C ระยะเวลา 1 ชั่วโมง



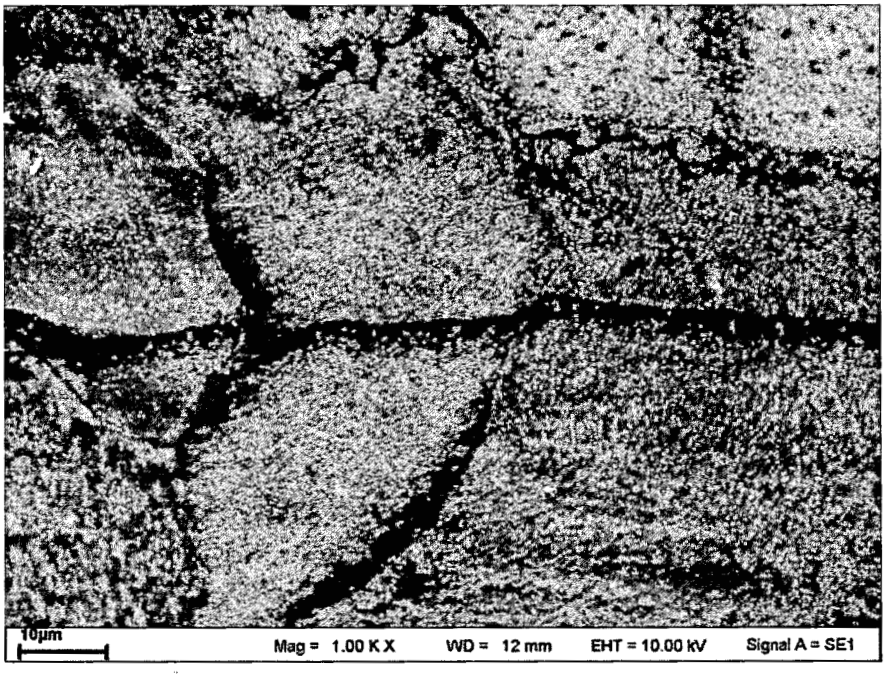
รูปที่ ก-34 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองแดง/ทองเหลือง อบที่อุณหภูมิ 850 °C ระยะเวลา 1 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 400 เท่า

ชิ้นงานทองแดง/ทองเหลือง อบที่อุณหภูมิ 850 °C ระยะเวลา 2 ชั่วโมง

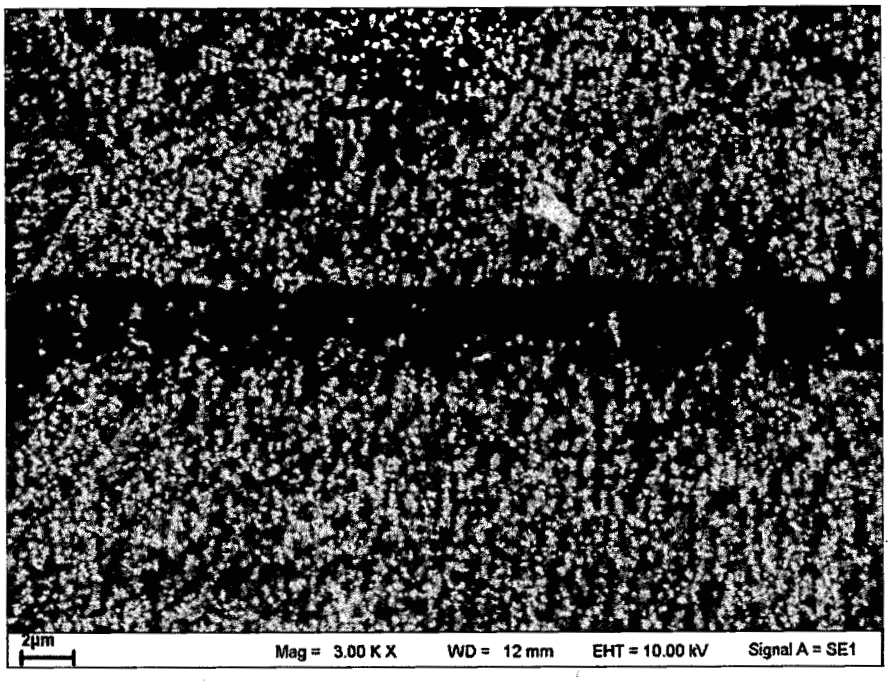


รูปที่ ก-35 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองแดง/ทองเหลือง อบที่อุณหภูมิ 850 °C ระยะเวลา 2 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 400 เท่า

ชิ้นงานทองแดง/ทองเหลือง อบที่อุณหภูมิ 900 °C ระยะเวลา 1 ชั่วโมง

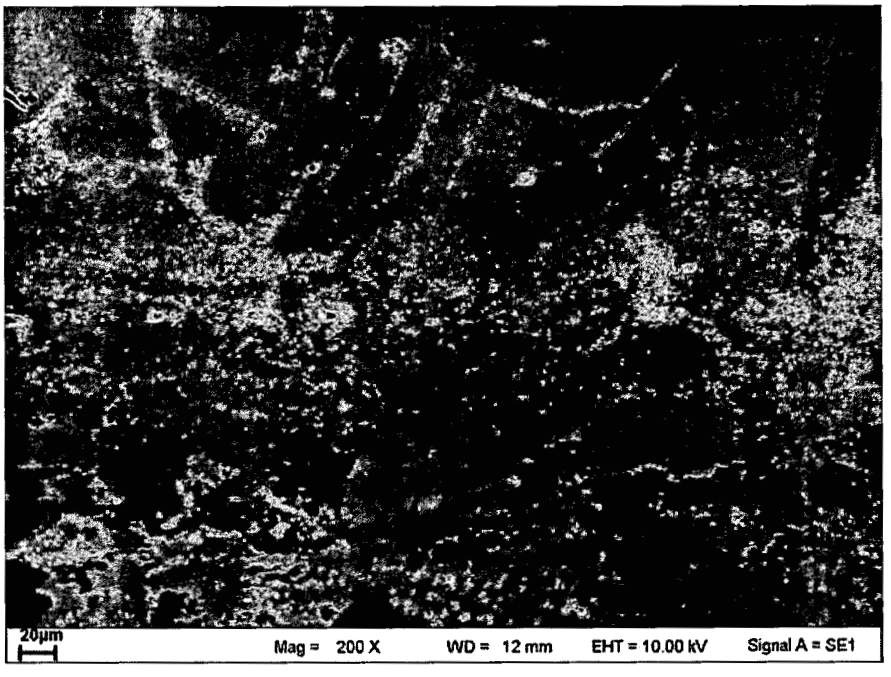


รูปที่ ก-36 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองแดง/ทองเหลือง อบที่อุณหภูมิ 900 °C ระยะเวลา 1 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1,000 เท่า

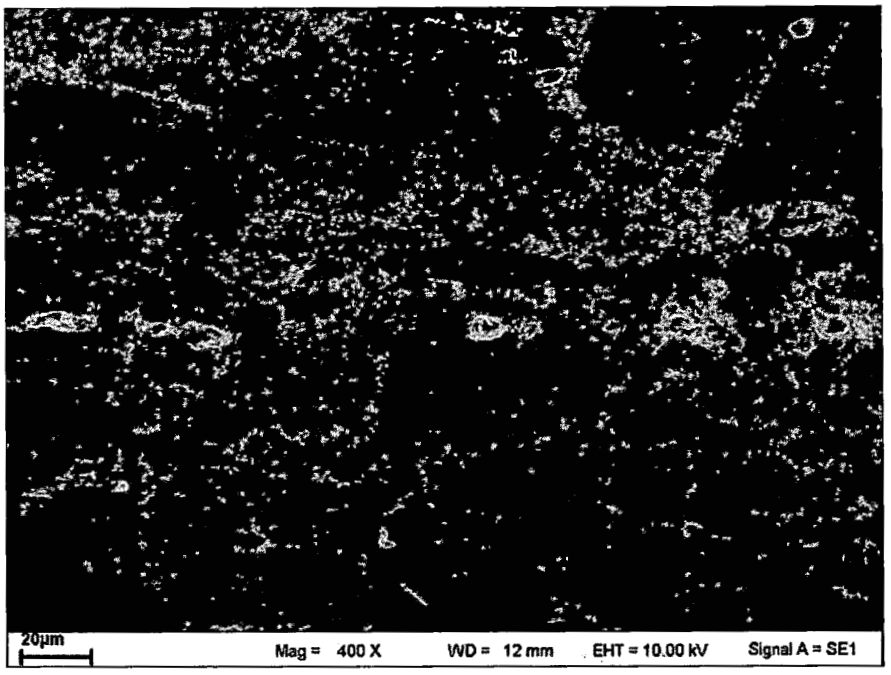


รูปที่ ก-37 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองแดง/ทองเหลือง อบที่อุณหภูมิ 900 °C ระยะเวลา 1 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 3,000 เท่า

ชิ้นงานทองแดง/ทองเหลือง อบที่อุณหภูมิ 900 °C ระยะเวลา 2 ชั่วโมง

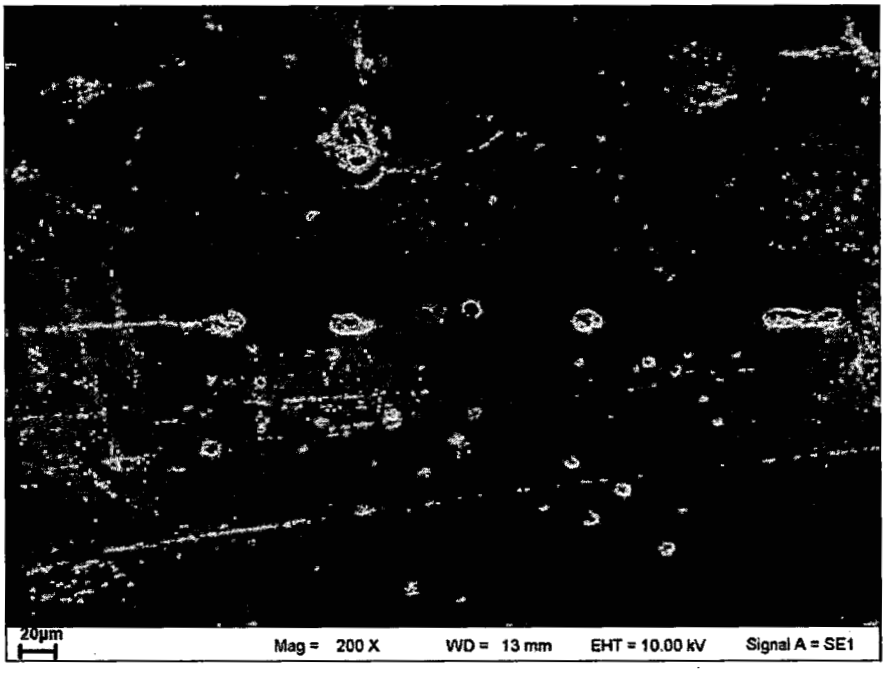


รูปที่ ก-38 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองแดง/ทองเหลือง อบที่อุณหภูมิ 900 °C ระยะเวลา 2 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 200 เท่า

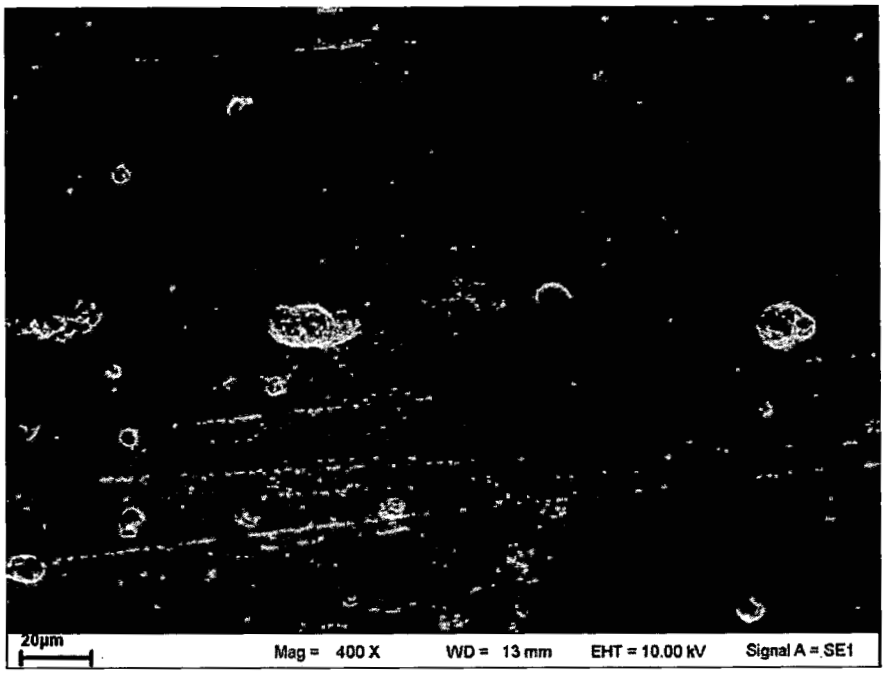


รูปที่ ก-39 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองแดง/ทองเหลือง อบที่อุณหภูมิ 900 °C ระยะเวลา 2 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 400 เท่า

ชิ้นงานทองแดง/ทองเหลือง อบที่อุณหภูมิ 900 °C ระยะเวลา 3 ชั่วโมง

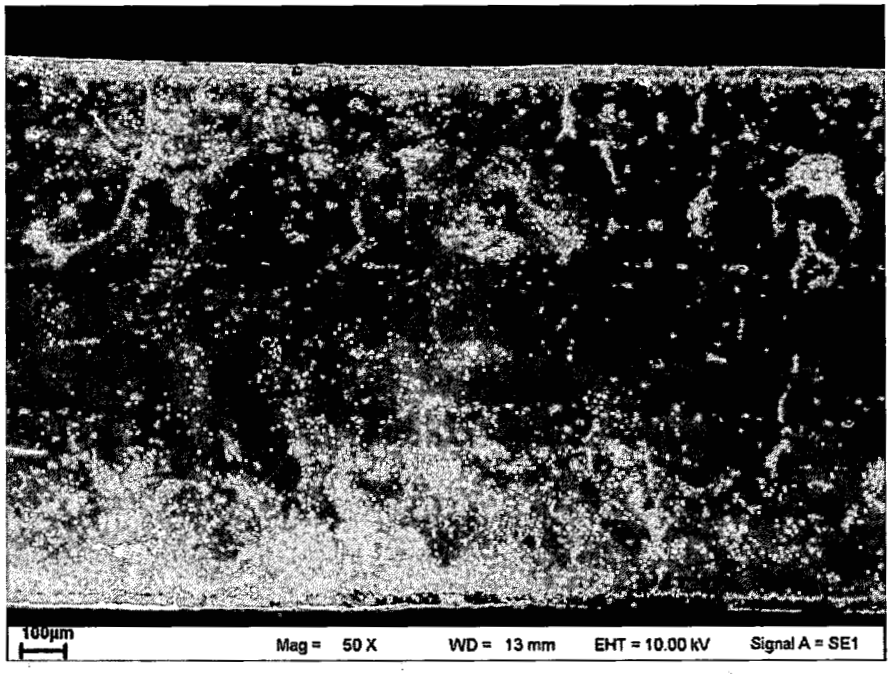


รูปที่ ก-40 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองแดง/ทองเหลือง อบที่อุณหภูมิ 900 °C ระยะเวลา 3 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 200 เท่า



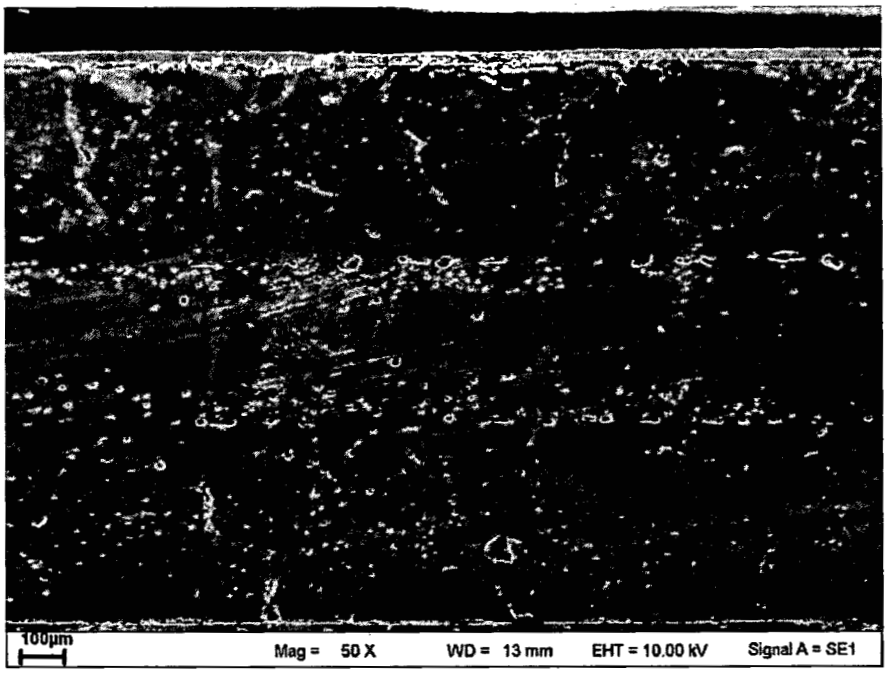
รูปที่ ก-41 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองแดง/ทองเหลือง อบที่อุณหภูมิ 900 °C ระยะเวลา 2 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 400 เท่า

ชิ้นงานทองแดง/ทองเหลือง อบที่อุณหภูมิ 950 °C ระยะเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ ก-42 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองแดง/ทองเหลือง อบที่อุณหภูมิ 950 °C ระยะเวลา 1 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 50 เท่า

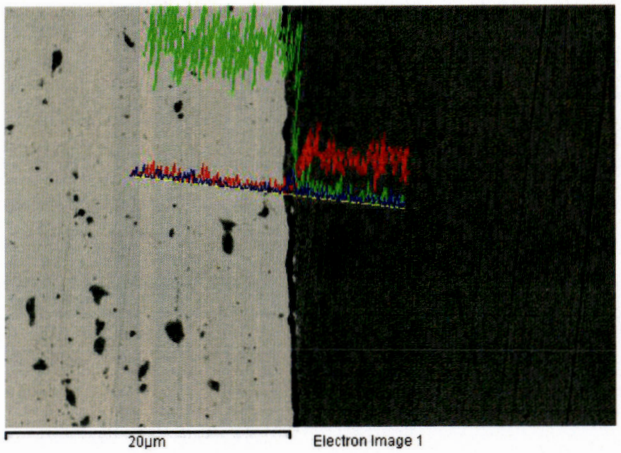
ชิ้นงานทองแดง/ทองเหลือง อบที่อุณหภูมิ 950 °C ระยะเวลา 2 ชั่วโมง

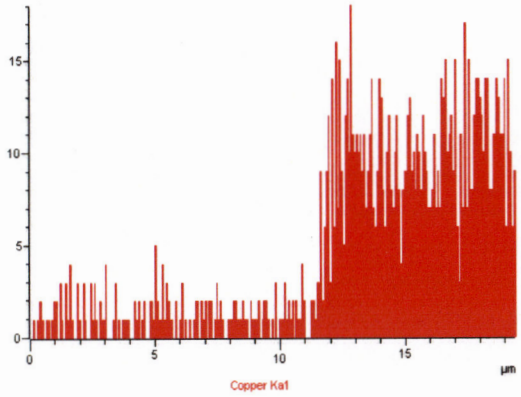


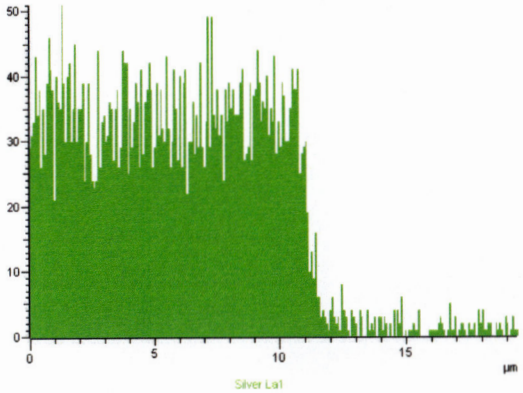
รูปที่ ก-43 ภาพถ่ายรอยต่อของชิ้นงานทองแดง/ทองเหลือง อบที่อุณหภูมิ 950 °C ระยะเวลา 2 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 50 เท่า

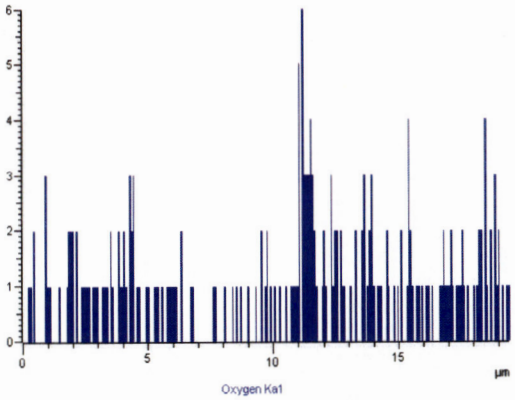
การวิเคราะห์ธาตุบริเวณรอยต่อของแผ่นโลหะด้วย Line scan EDS

Sterling silver/Copper 750 °C 1 hr





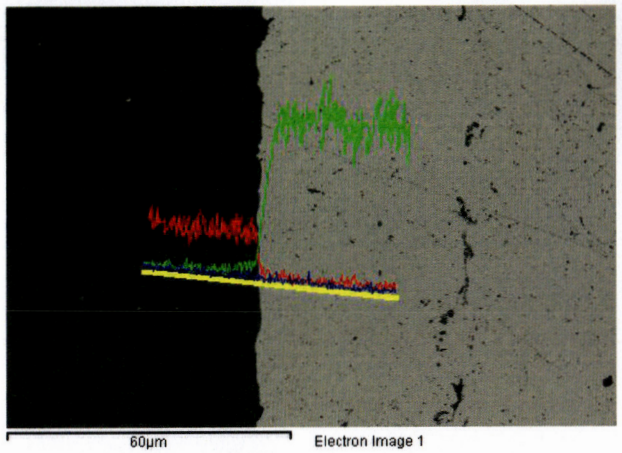


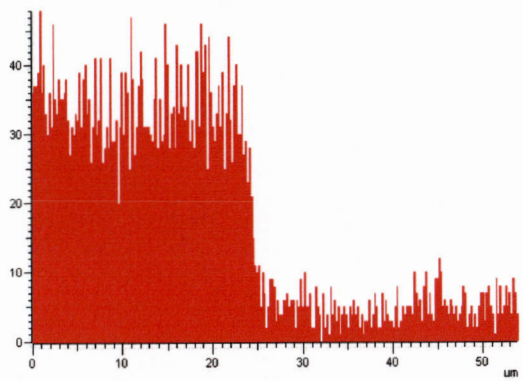


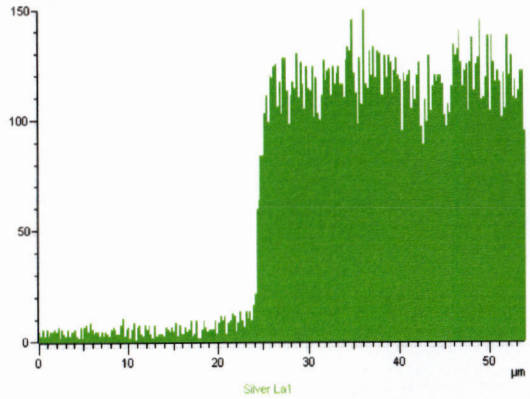
รูปที่ ก-44 การแพร่ของทองแดง (Cu) และเงิน (Ag) ที่บริเวณรอยต่อของแผ่นโลหะเงินสเตอร์ลิงและทองแดง อบที่อุณหภูมิ 750 °C ระยะเวลา 1 ชั่วโมง

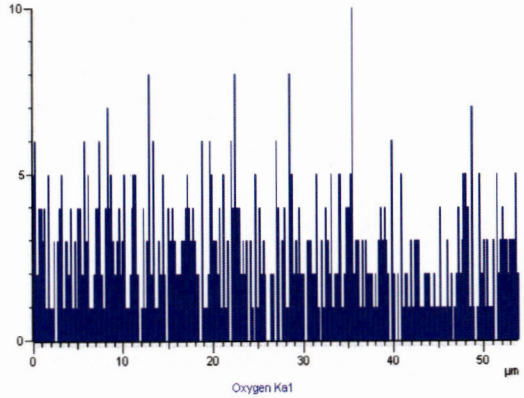
Copper/Sterling silver 750 °C 2 hrs

4/5/2013 11:06:19 PM





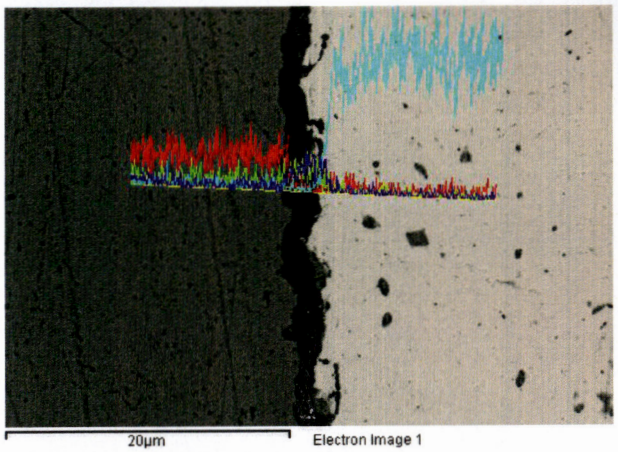


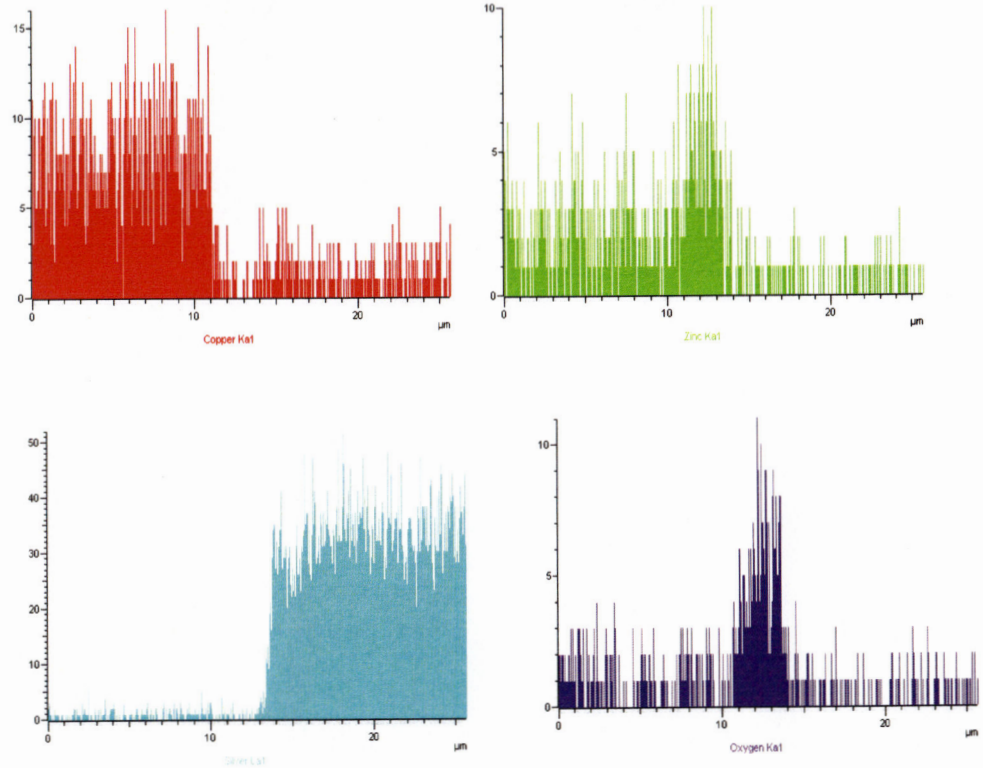


รูปที่ ก-43ก ไวแพร่ของทองแดง (Cu) และเงิน (Ag) ที่บริเวณรอยต่อของแผ่นโลหะเงินสเตอร์ลิงและทองแดง อบที่อุณหภูมิ 750 °C ระยะเวลา 2 ชั่วโมง

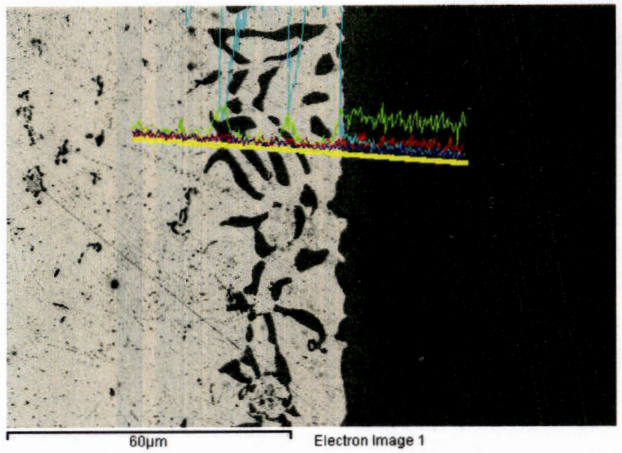
Brass/Sterling silver 750 °C 1 hr

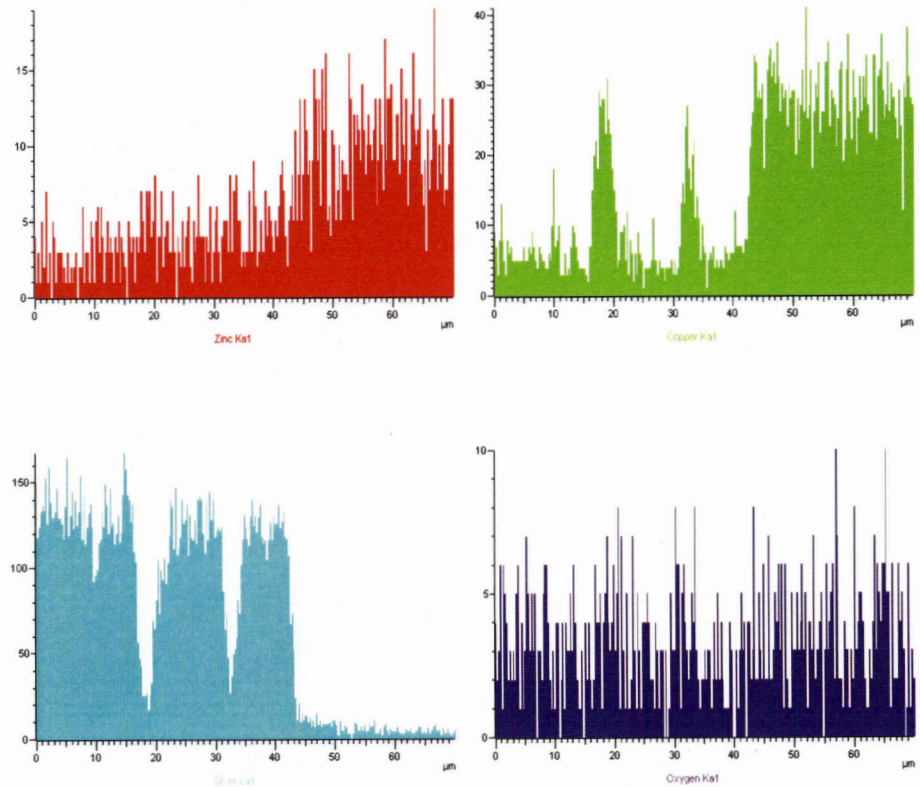
4/5/2013 10:28:16 PM



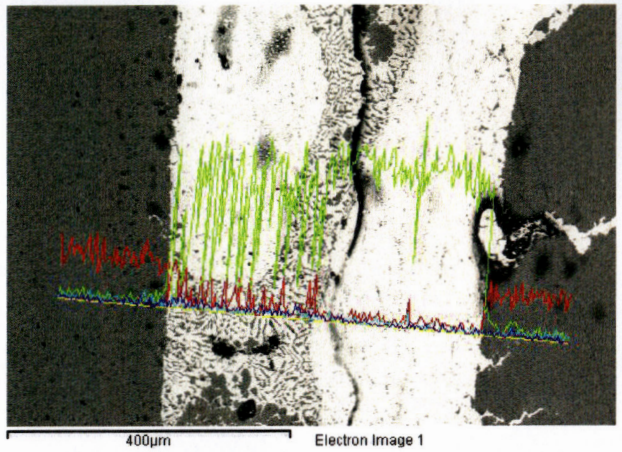


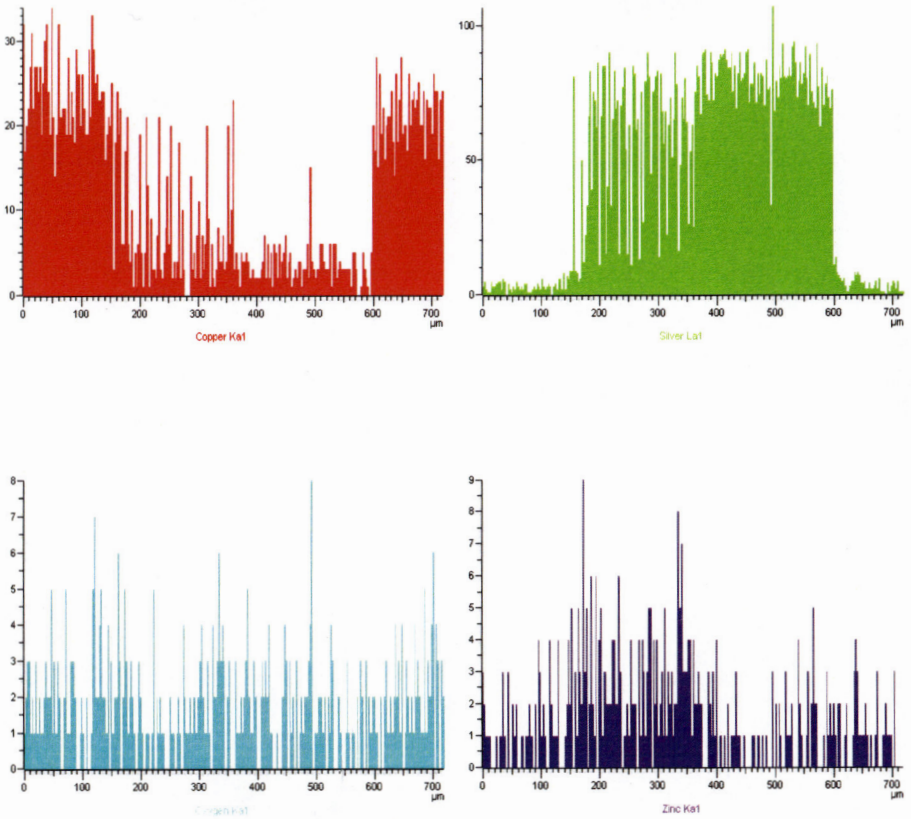
รูปที่ ก-46 การแพร่ของทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) และเงิน (Ag) ที่บริเวณรอยต่อของแผ่นโลหะเงินสเตอร์ลิงและทองแดง อบที่อุณหภูมิ 750 °C ระยะเวลา 1 ชั่วโมง





รูปที่ ก-47 การแพร่ของทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) และเงิน (Ag) ที่บริเวณรอยต่อของแผ่นโลหะเงินสเตอร์ลิงและทองแดง อบที่อุณหภูมิ 750 °C ระยะเวลา 2 ชั่วโมง





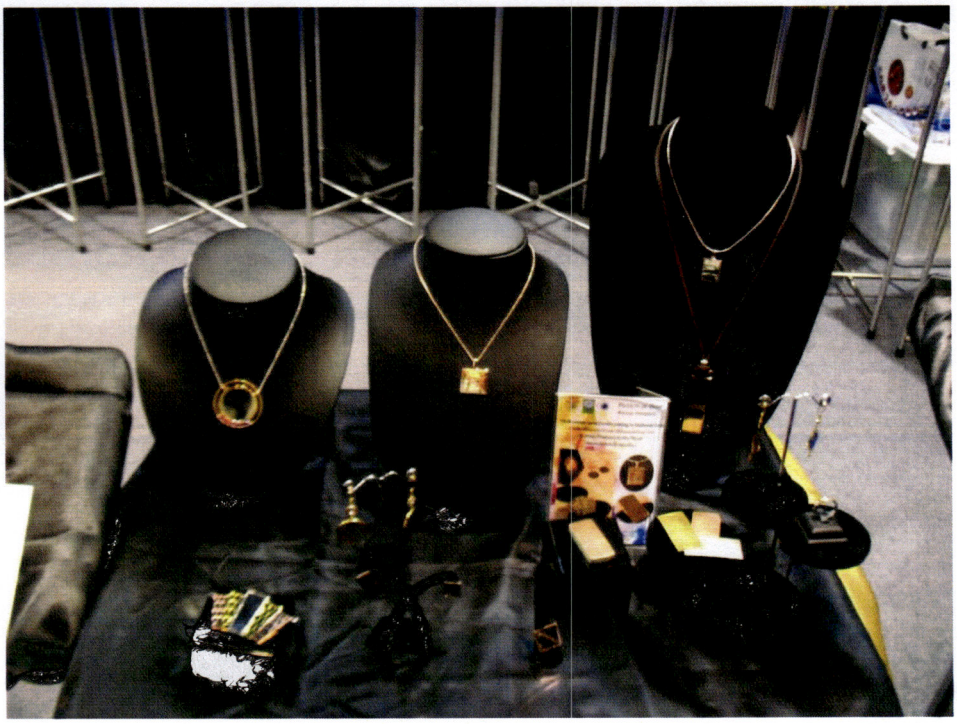
รูปที่ ก-48 การแพร่ของทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) และเงิน (Ag) ที่บริเวณรอยต่อของแผ่นโลหะเงินสเตอร์ลิงและทองแดง อบที่อุณหภูมิ 750 °C ระยะเวลา 3 ชั่วโมง

ภาคผนวก ข
เครื่องประดับที่ผลิตด้วยเทคนิคโมกุเม่กาเน่

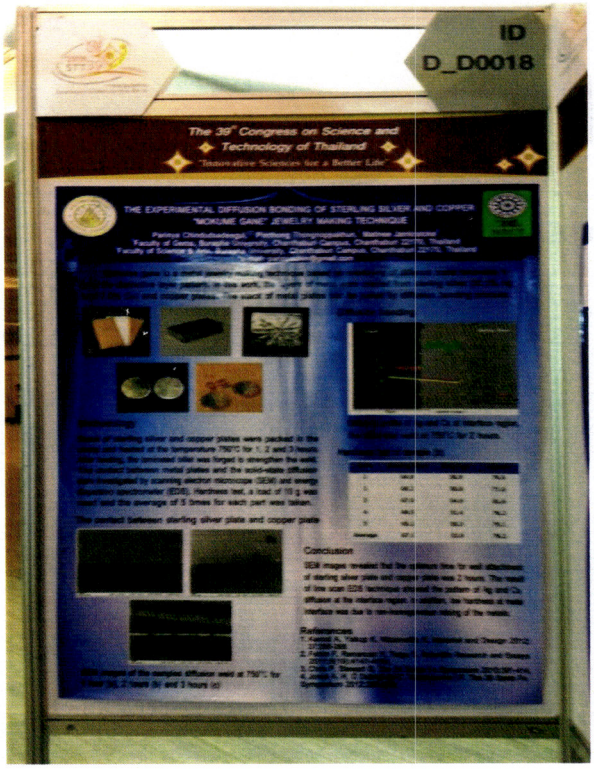
รูปที่ ข-1 เครื่องประดับชุดที่ 1 ประกอบด้วยจี้ และต่างหู

รูปที่ ข-2 เครื่องประดับชุดที่ 1 ประกอบด้วยจี้ และแหวน

รูปที่ ข-3 เครื่องประดับชิ้นเดียวจำนวน 4 ชิ้น ประกอบด้วยจี้ 2 อัน ต่างหู 1 คู่ และแหวน 1 วง



รูปที่ ข-4 การแสดงเครื่องประดับในงาน Bangkok Gems & Jewelry Fair ครั้งที่ 53 ระหว่างวันที่ 6-10 กันยายน 2556 ณ อิมแพ็ค เมืองทองธานี



รูปที่ ข-5 การเสนอโปสเตอร์ในงานประชุมประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 39 ระหว่างวันที่ 21 - 23 ตุลาคม 2556 ณ ศูนย์นิทรรศการและการประชุมไบเทค บางนา กรุงเทพฯ