รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์
โครงการวิจัยเรื่อง
การผลิตเครื่องประดับโมกุเม่กาเน่ด้วยโลหะแพลเลเดียม เงินสเตอร์ลิง และทองแดง
Mokume Gane jewelry making by palladium, sterling silver and copper

นางสาวปริญญา ชินดุษฎีกุล

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้
จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๕๘
มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 2558A10802290
สัญญาเลขที่ 149/2558

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์
โครงการวิจัยเรื่อง
การผลิตเครื่องประดับโมกุเม่กาเน่ด้วยโลหะแพลเลเดียม เงินสเตอร์ลิง และทองแดง
Mokume Gane jewelry making by palladium, sterling silver and copper

นางสาวปริญญา ชินดุษฎีกุล
คณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา

สิงหาคม พ.ศ. 2559

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณกองทุนวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยบูรพา ประจำปี พ.ศ. 2558 เลขที่สัญญา 149/2558

Acknowledgment

This work was financially supported by the Research and Development Fund Burapha University (Grant no. 149/2558)

บทคัดย่อ

โมกุเม่กาเน่เป็นเทคนิคในการทำเครื่องประดับโดยใช้โลหะที่มีสีสันต่างกันมาเรียงกันเป็นชั้นๆ และทำให้เกิดเป็นลวดลายที่มีลักษณะพิเศษ แผ่นโลหะแพลเลเดียม500 (แพลเลเดียม 50%wt : เงิน 50%wt) แผ่นเงินสเตอร์ลิง (เงิน 96.5%wt : ทองแดง 3.5%wt) และแผ่นทองแดง ถูกเชื่อมติดกันเป็นแท่งโลหะด้วยกระบวนการแพร่โดยใช้อุณหภูมิ 750°C ระยะเวลา 5, 10 และ 15 ชั่วโมง ด้วยเตาไฟฟ้า ทำการเปรียบเทียบโดยใช้สภาวะบรรยากาศออกซิเดชั่นและรีดักชั่นเพื่อดูความแตกต่างระหว่างผิวรอยต่อของโลหะ รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสงบริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นโลหะเงินสเตอร์ลิงและแผ่นทองแดงมีลักษณะเหมือนกันในทุกการทดลอง แต่บริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นโลหะแพลเลเดียม500 และแผ่นเงินสเตอร์ลิง ที่อุณหภูมิ 750°C ในบรรยากาศแบบออกซิเดชั่นพบออกไซด์ทองแดงในเนื้อโลหะเงินสเตอร์ลิงมีลักษณะเป็นจุดสีดำซึ่งเป็นสาเหตุให้ความวาวของโลหะเงินสเตอร์ลิงหายไป ความหนาของชั้นออกไซด์ทองแดงขึ้นกับระยะเวลาในการยืนอุณหภูมิ รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสงในบริเวณรอยต่อระหว่างแพลเลเดียม500 และทองแดงมีลักษณะเดียวกันในทุกการทดลอง ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุจากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงให้เห็นลักษณะการแพร่ของโลหะที่บริเวณรอยต่อ การแพร่ของโลหะมากขึ้นเมื่อระยะเวลาในการยืนอุณหภูมิมากขึ้น ในขั้นตอนของการทำลวดลายบนแผ่นโลหะ การให้ความร้อนชิ้นงานก่อนการรีดมีความสำคัญมาก เนื่องจากชั้นของโลหะจะเกิดการแยกออกจากกันขณะที่ทำการรีดแม้ว่าจะเป็นชิ้นงานที่ใช้ระยะเวลาในการยืนอุณหภูมินานก็ตาม

Abstract

Mokume Gane is a jewelry technique for laminating various colors of metals together to form a billet in order to create the special pattern. The metals, palladium500 (50%wt Pd and 50%wt Ag), sterling silver (96.5%wt Ag and 3.5%wt Cu) and copper plates were joined by diffusion welding at 750°C for 5, 10 and 15 hours in electronic furnace to make the billet. The oxidation and reduction environment conditions were experimented to compared the interface region between the difference metals. The optical microscope picture of contact region between sterling silver and copper were not difference in every conditions. The contact region between palladium500 and sterling silver in oxidation condition at 750°C showed the black spot of copper oxide in the sterling silver that causing the disappear of sterling silver luster. The thickness of copper oxide depended on prolonged heating. The optical microscope pictures of palladium500 and copper contact showed the same characteristic. The results from Scanning Electron Microscope/Energy dispersive spectrometer (SEM/EDS) images showed the diffusion pattern of metal at interface region and the diffusion of metals depended on soaking time. To making the pattern of metal sheet, the annealing of sample before the rolling is very importance. Although the billet was heated for a long time, the metal layers may be slip in the rolling step.

สารบัญ

	หน้า
บทนำ	1
การเชื่อมโลหะด้วยกระบวนการแพร่ (Diffusion welding)	5
การสร้างลวดลายบนแผ่นโลหะ	7
วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย	8
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	9
วิธีดำเนินการวิจัย	10
1. วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือ	10
1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	10
1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทำแท่งโลหะโมกุเม่กาเน่	10
1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบบริเวณรอยต่อของแผ่นโลหะ	11
2. ขั้นตอนการทดลอง	11
2.1 การเตรียมแผ่นโลหะที่ใช้ในการทดลอง	12
2.2 การทำแท่งโลหะโมกุเม่กาเน่	15
2.3 การวิเคราะห์บริเวณรอยต่อของแผ่นโลหะ	17
2.4 การผลิตเครื่องประดับ	17
ผลการวิจัย	18
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์สเปกโทรมิเตอร์	18
ผลการวิเคราะห์บริเวณรอยต่อของแผ่นโลหะ	18
เครื่องประดับที่ใช้เทคนิคโมกุเม่กาเน่	26
อภิปรายผล	27
เอกสารอ้างอิง	31
ภาคผนวก ก	32
ภาคผนวก ข	42
ประวัตินักวิจัย	60

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมปูนหล่อ ปริมาณปูนหล่อ : ตัวประสาน : น้ำ	13
ตารางที่ 2 สภาวะที่ใช้ในการทดลองทำแท่งโลหะโมกุเม่กาเน่	16
ตารางที่ 3 องค์ประกอบของแผ่นโลหะที่ใช้ในการทดลอง	18
ตารางที่ 4 ภาพถ่ายบริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นโลหะของชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 750^{O}C ในบรรยากาศแบบออกซิเดชั่น กำลังขยายของเลนส์ใกล้วัตถุ 10 เท่า	19
ตารางที่ 5 ภาพถ่ายบริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นโลหะของชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 750^{O}C ในบรรยากาศแบบรีดักชั่นกำลังขยายของเลนส์ใกล้วัตถุ 10 เท่า	20

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 1	ตัวอย่างเครื่องประดับที่ผลิตด้วยเทคนิคโมกุเม่กาเน่ โดยใช้ทองแดง เงินสเตอร์ลิง และทองเหลือง	1
รูปที่ 2	ขั้นตอนการทำชิ้นงาน (ก) นำโลหะมาเรียงเป็นชั้น (ข) นำชั้นโลหะใส่ในจิ๊ก นำเข้าเตาเผา (ค) ก้อนโลหะจะถูกนำมาห่อด้วยเหล็ก นำไปให้ความร้อน (ง) นำชิ้นงานที่มีเหล็กห่ออยู่ไปรีด (จ) การตัดแบ่งชิ้นงานสำหรับการทดสอบ	2
รูปที่ 3	วิธีการอัดแผ่นโลหะ (ก) การใช้ลวดมัดแผ่นโลหะให้ติดกัน (ข) การใช้แคมป์โลหะยึดแผ่นโลหะให้ติดกัน	3
รูปที่ 4	วิธีการมัดแท่งโลหะด้วยลวด	4
รูปที่ 5	บริเวณรอยต่อของชิ้นงาน (ก) บริเวณรอยต่อของชิ้นงานที่ใช้แคมป์ยึดแผ่นโลหะ (ข) บริเวณรอยต่อของชิ้นงานที่ใช้หัวเป่าไฟ	4
รูปที่ 6	การให้ความร้อนกับชิ้นงานด้วยการใช้หัวเป่าไฟ	5
รูปที่ 7	การอบชิ้นงานด้วยเตาไฟฟ้า	5
รูปที่ 8	การเชื่อมด้วยกระบวนการแพร่ (ก) แสดงโครงสร้างผลึก (ข) แสดงช่องว่างในโครงสร้างผลึก (ค) แสดงบริเวณผิวสัมผัสของแผ่นโลหะ (ง) แสดงการแพร่ของอะตอมที่ผิวหน้าเนื่องจากความร้อน	6
รูปที่ 9	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงการวิเคราะห์องค์ประกอบของเงินและเหล็ก บริเวณรอยต่อของแผ่นโลหะด้วยเทคนิคเอนเนอร์จีดิสเปอร์ซีฟสเปก-โตสโคปี (ก) ระยะเวลาอบชิ้นงาน 60 นาที (ข) ระยะเวลาอบชิ้นงาน 90 นาที	6
รูปที่ 10	การสร้างลวดลายบนแผ่นโลหะ	7
รูปที่ 11	แผ่นโลหะหลังจากการรีด จากการเจาะลายด้วยเครื่อง CNC รูปหัวใจและสี่เหลี่ยมจัตุรัส	8
รูปที่ 12	โลหะที่ใช้ในการเตรียมแพลเลเดียม500 และเงินสเตอร์ลิง (ก) โลหะเงิน 99.99% (ข) โลหะแพลเลเดียม 99.99% (ค) โลหะทองแดง 99.99%	10
รูปที่ 13	อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทำแท่งโลหะโมกุเม่กาเน่ (ก) แคมป์เหล็ก (ข) กล่องสแตนเลสสำหรับใส่แคมป์เหล็ก (ค) ผงถ่าน (ง) แผ่นฟอยด์สแตนเลส (จ) เตาเผาไฟฟ้า	10
รูปที่ 14	เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบบริเวณรอยต่อของแผ่นโลหะ (ก) กล้องจุลทรรศน์แสง (ข) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	11
รูปที่ 15	ขั้นตอนการทดลอง	11
รูปที่ 16	การเตรียมฐานยางและกระบอกปูนหล่อ	12
รูปที่ 17	ขั้นตอนการเตรียมกระบอกปูนหล่อ	13
รูปที่ 18	อุณหภูมิและเวลาในการอบเบ้าปูน	14
รูปที่ 19	ต้นแบบเทียน และโลหะแพลเลเดียม 500	14
รูปที่ 20	ขั้นตอนการเตรียมแผ่นโลหะเงิน	15

		หน้า
รูปที่ 21	ลำดับการวางชั้นโลหะ	15
รูปที่ 22	ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานก่อนนำเข้าเตาเผา	16
รูปที่ 23	การนำชิ้นงานออกจากเตาเผา	16
รูปที่ 24	การขัดผิวหน้าชิ้นงานสำหรับถ่ายรูปบริเวณรอยต่อด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง	17
รูปที่ 25	ขั้นตอนการสร้างลวดลายบนแผ่นโลหะ	17
รูปที่ 26	รอยต่อระหว่างผิวของแผ่นโลหะทองแดงและแพลเลเดียม500 ชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 750°C ในบรรยากาศแบบออกซิเดชั่น (ก) ระยะเวลายืนอุณหภูมิ 5 ชั่วโมง (ข) ระยะเวลายืนอุณหภูมิ 10 ชั่วโมง (ค) ระยะเวลายืนอุณหภูมิ 5 ชั่วโมง	21
รูปที่ 27	รอยต่อระหว่างผิวของแผ่นโลหะเงินสเตอร์ลิงและทองแดง ชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 750°C ในบรรยากาศแบบออกซิเดชั่น (ก) ระยะเวลายืนอุณหภูมิ 5 ชั่วโมง (ข) ระยะเวลายืนอุณหภูมิ 10 ชั่วโมง (ค) ระยะเวลายืนอุณหภูมิ 5 ชั่วโมง	22
รูปที่ 28	รอยต่อระหว่างผิวของแผ่นโลหะแพลเลเดียม500 และเงินสเตอร์ลิง ชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 750°C ในบรรยากาศแบบออกซิเดชั่น ระยะเวลายืนอุณหภูมิ 15 ชั่วโมง	22
รูปที่ 29	รอยต่อระหว่างผิวของแผ่นโลหะทองแดงและแพลเลเดียม500 ชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 750°C ในบรรยากาศแบบรีดักชั่น (ก) ระยะเวลายืนอุณหภูมิ 5 ชั่วโมง (ข) ระยะเวลายืนอุณหภูมิ 10 ชั่วโมง (ค) ระยะเวลายืนอุณหภูมิ 5 ชั่วโมง	23
รูปที่ 30	แสดงรอยต่อระหว่างผิวของแผ่นโลหะเงินสเตอร์ลิงและทองแดง ชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 750°C ในบรรยากาศแบบรีดักชั่น (ก) ระยะเวลายืนอุณหภูมิ 5 ชั่วโมง (ข) ระยะเวลายืนอุณหภูมิ 10 ชั่วโมง (ค) ระยะเวลายืนอุณหภูมิ 5 ชั่วโมง	24
รูปที่ 31	รอยต่อระหว่างผิวของแผ่นโลหะแพลเลเดียม500 และเงินสเตอร์ลิง ชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 750°C ในบรรยากาศแบบออกซิเดชั่น (ก) ระยะเวลายืนอุณหภูมิ 5 ชั่วโมง (ข) ระยะเวลายืนอุณหภูมิ 10 ชั่วโมง (ค) ระยะเวลายืนอุณหภูมิ 5 ชั่วโมง	25
รูปที่ 32	เครื่องประดับที่ใช้เทคนิคโมกุเม่กาเน่	26
รูปที่ 33	(ก) เฟสไดอะแกรมระหว่างเงินกับแพลเลเดียม (Ag-Pd) (ข) รูปบนคือแท่งโลหะแพลเลเดียม500 หลังจากการหล่อ รูปล่างคือแท่งโลหะหลังกัดกรดไฮโดรฟลูออริก (HF)	27
รูปที่ 34	รอยต่อระหว่างแผ่นเงินสเตอร์ลิงและทองแดง อบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 750°C (ก) ระยะเวลาอบชิ้นงาน 5 ชั่วโมง (ข) ระยะเวลาอบชิ้นงาน 15 ชั่วโมง	28
รูปที่ 35	ออกไซด์ของทองแดงมีลักษณะเป็นจุดสีดำในเนื้อเงินสเตอร์ลิง สามารถดูได้จากแนวเส้นสีดำในวงสีเหลืองซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกับจุดสีเขียวในรูปขวาบนและจุดสีแดงในรูปขวาล่างแสดงถึงโลหะทองแดงและออกซิเจน	29
รูปที่ 36	บริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นโลหะทองแดงและแพลเลเดียม500 ชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 750°C ระยะเวลา 15 ชั่วโมง	29

หน้า

รูปที่ 37 บริเวณรอยต่อของผิวโลหะ ชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 750°C ระยะเวลา 15 ชั่วโมง (ก) รอยต่อระหว่างเงินสเตอร์ลิงกับทองแดง และรูปที่ 37 (ข) รอยต่อระหว่างเงินสเตอร์ลิงกับแพลเลเดียม500 30

บทนำ

จากในสภาวะเศรษฐกิจในปัจจุบัน แม้ว่าสินค้าประเภทเครื่องประดับจะถูกจัดอยู่ในสินค้าประเภทฟุ่มเฟือย (Luxury goods) แต่การบริโภคสินค้าประเภทนี้กลับมิได้ลดลงเหมือนสินค้าจำพวก เสื้อผ้า น้ำหอม และเครื่องสำอาง การบริโภคสินค้าประเภทเครื่องประดับยังคงมีปริมาณสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องมาโดยตลอด ราคาของเครื่องประดับอาจจะเป็นตัวกำหนดปัจจัยในการเลือกซื้อ ประกอบกับราคาทองคำที่สูงขึ้น ทำให้ผู้บริโภคเลือกซื้อเครื่องประดับที่มีราคาถูกและประหยัดลงกว่าเดิม

การผลิตเครื่องประดับด้วยเทคนิคโมกุเม่กาเน่ เป็นการผลิตเครื่องประดับที่ใช้โลหะที่มีสีแตกต่างกันมาเชื่อมติดกันโดยใช้ความร้อนและแรงอัด ทำให้ได้แท่งโลหะที่มีหลากสีสัน หลังจากนั้นนำแท่งโลหะที่ได้ไปทำการเจาะให้เป็นวง หรือนำไปบิดเป็นเกลียวแล้วนำไปรีดเป็นแผ่นทำให้ได้แผ่นโลหะที่มีลวดลายแตกต่างกัน การผลิตด้วยเทคนิคนี้จึงทำให้ได้ชิ้นงานที่มีรูปแบบที่หลากหลาย และมีเอกลักษณ์เฉพาะตัวซึ่งในปีพ.ศ. 2556 ผู้วิจัยได้รับทุนงบประมาณแผ่นดินในการผลิตเครื่องประดับโลหะด้วยการใช้โลหะ 3 ชนิดคือ ทองแดง เงินสเตอร์ลิงและทองเหลือง และได้ดำเนินการทดลองเชื่อมโลหะทั้ง 3 ชนิดให้ติดกัน และผลิตตัวอย่างเครื่องประดับเรียบร้อยแล้ว แสดงในรูปที่ 1

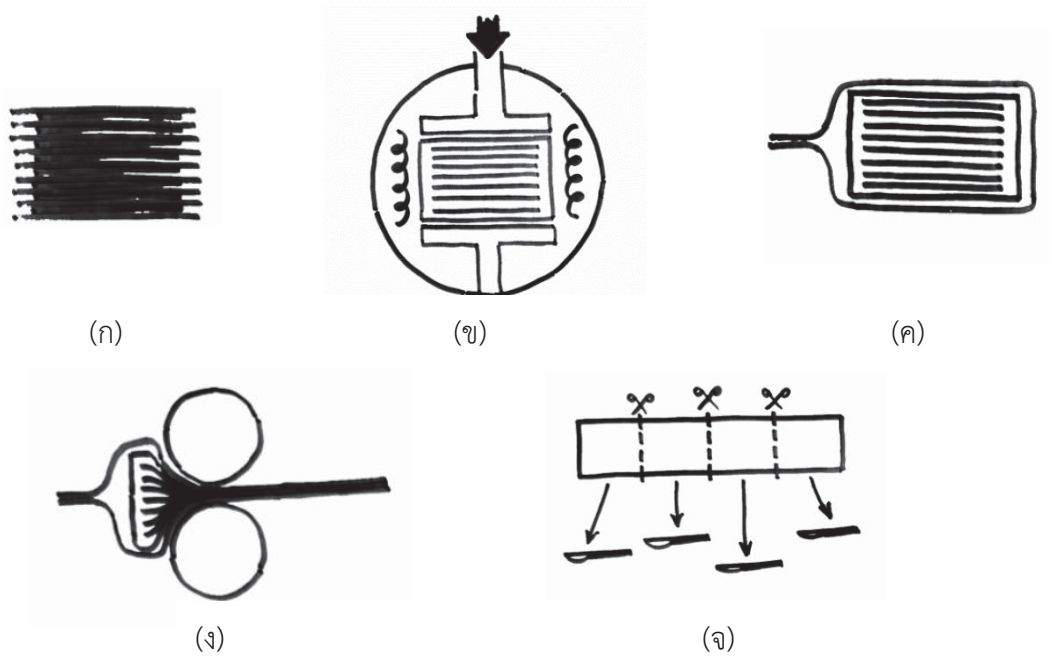
การเลือกใช้โลหะในการผลิตเครื่องประดับด้วยเทคนิคโมกุเม่กาเน่มีความสำคัญมาก เพราะทำให้ได้แผ่นโลหะที่มีสีสันแตกต่างกัน มีความแปลกใหม่ ทำให้ต้นทุนในการผลิตไม่สูงมาก กอปรกับประเทศไทยมีนักออกแบบเครื่องประดับ และช่างฝีมือที่มีความประณีต สามารถเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ได้ จึงเป็นทางเลือกที่ดีในการผลิตเครื่องประดับในปัจจุบัน เพื่อลดต้นทุนในการใช้โลหะในการผลิตที่มีราคาสูง แต่มุ่งเน้นในการผลิตงานที่มีลักษณะที่แตกต่างและแปลกใหม่

รูปที่ 1 ตัวอย่างเครื่องประดับที่ผลิตด้วยเทคนิคโมกุเม่กาเน่ โดยใช้ทองแดง เงินสเตอร์ลิง และทองเหลือง (ปริญญา, 2556)

โมกุเม่กาเน่เป็นเทคนิคงานโลหะอย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นในญี่ปุ่น 300 - 400 ปี มาแล้ว โดยนำแผ่นโลหะตั้งแต่ 2 แผ่นขึ้นไปมาเรียงต่อกันเป็นชั้นๆ ให้ความร้อนด้วยถ่านไม้และตีด้วยค้อนทำให้แผ่นโลหะแต่ละชั้นยึดติดกันด้วยกระบวนการแพร่ของโลหะที่บริเวณผิวหน้าที่สัมผัสกัน

Grace Horne MA, 2006 ศึกษากระบวนการแพร่แบบของแข็งแบบดามัสกัสในการทำมีด โดยได้ให้นิยามความแตกต่างของคำว่า “ดามัสกัส” กับ “โมกุเม่กาเน่” ซึ่งมีกระบวนการทำเหมือนกันคือ การนำแผ่นโลหะมาเรียงต่อกันเป็นชั้นๆ ให้ผิวหน้าของโลหะแต่ละแผ่นยึดติดกัน นำไปให้ความร้อนและทุบเพื่อให้แผ่นโลหะติดกัน หลังจากนั้นจึงนำโลหะก้อนนั้นไปขึ้นรูปในลักษณะต่างๆ เพื่อให้ได้แผ่นโลหะที่มีลวดลายสวยงาม วัสดุที่ใช้ในการทำมีดแบบดามัสกัสคือ เหล็กและอัลลอยด์ของเหล็ก ส่วนวัสดุที่ใช้ในการทำเครื่องประดับโมกุเม่กาเน่คือ โลหะมีค่า เช่น ทองแดง เงิน ทองคำ เป็นต้น

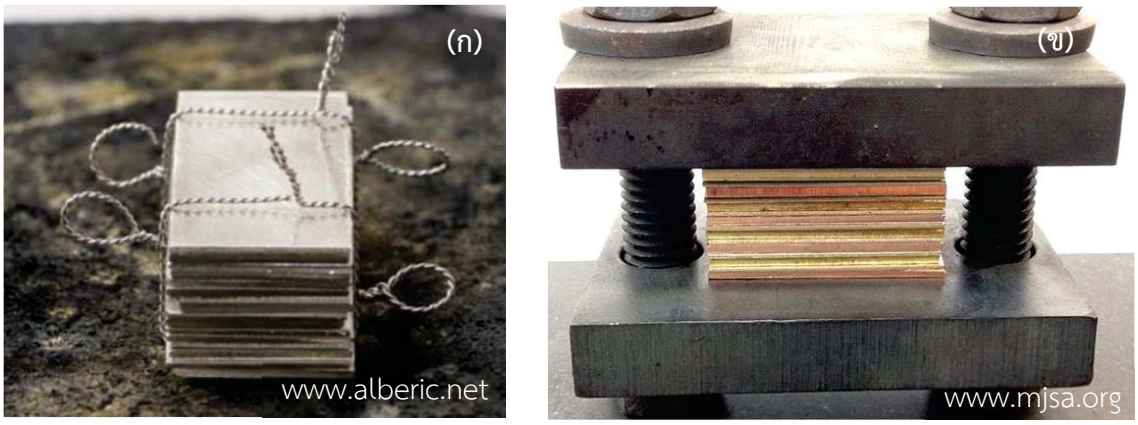
ในทางตรงกันข้าม ถ้าเลือกใช้เหล็กหรืออัลลอยด์ของเหล็กมาทำเครื่องประดับจะเรียกชิ้นงานนั้นว่า โมกุเม่กาเน่ได้หรือไม่ หรือถ้าเลือกใช้โลหะมีค่าในการทำมีดจะยังคงเรียกว่า ดามัสกัสหรือไม่ ความแตกต่างของการใช้ทั้ง 2 คำนี้ ถูกสรุปให้ดูที่การนำไปใช้ประโยชน์ หากประโยชน์ของสิ่งที่ทำขึ้นมาสามารถนำไปใช้ในการตัดสิ่งของให้ขาดออกจากกันได้ให้ใช้คำว่า “ดามัสกัส” แต่ถ้าประโยชน์ของสิ่งที่ทำขึ้นมาไม่สามารถนำไปใช้ตัดสิ่งใดได้ให้ใช้คำว่า “โมกุเม่กาเน่”



รูปที่ 2 ขั้นตอนการทำชิ้นงาน (ก) นำโลหะมาเรียงเป็นชั้น (ข) นำชั้นโลหะใส่ในจิ๊ก นำเข้าเตาเผา (ค) ก้อนโลหะจะถูกนำมาห่อด้วยเหล็ก นำไปให้ความร้อน (ง) นำชิ้นงานที่มีเหล็กห่ออยู่ไปรีด (จ) การตัดแบ่งชิ้นงานสำหรับการทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยของ Grace Horne MA ได้แก่ เหล็ก สแตนเลส420 (C 0.15% Cr 13%) เหล็กกล้าคาร์บอน (C 0.8%) นิกเกิล เงิน และวานาเดียม ขั้นตอนการทำแท่งโลหะแสดงในรูปที่ 2 (ก) นำโลหะมาเรียงเป็นชั้น (ข) นำชั้นโลหะใส่ในจิ๊ก นำเข้าเตาเผา ให้ความร้อนและสภาวะบรรยากาศเหมาะสม เมื่อนำชิ้นงานที่ออกจากเตา แผ่นโลหะทั้งหมดจะเชื่อมติดกันเป็นก้อนโลหะ (ค) ก้อนโลหะจะถูกนำมาห่อด้วยเหล็ก นำไปให้ความร้อน (ง) นำชิ้นงานที่มีเหล็กห่ออยู่ไปรีดด้วยเครื่องรีดขณะที่ชิ้นงานยังร้อนอยู่ เหล็กที่ห่ออยู่ชั้นนอกจะเกิดการฉีกขาด หลังจากชิ้นงานเย็นตัวลงให้นำเหล็กที่ห่ออยู่ด้านนอกออกทั้งหมด (จ) การตัดแบ่งชิ้นงานสำหรับการทดสอบ

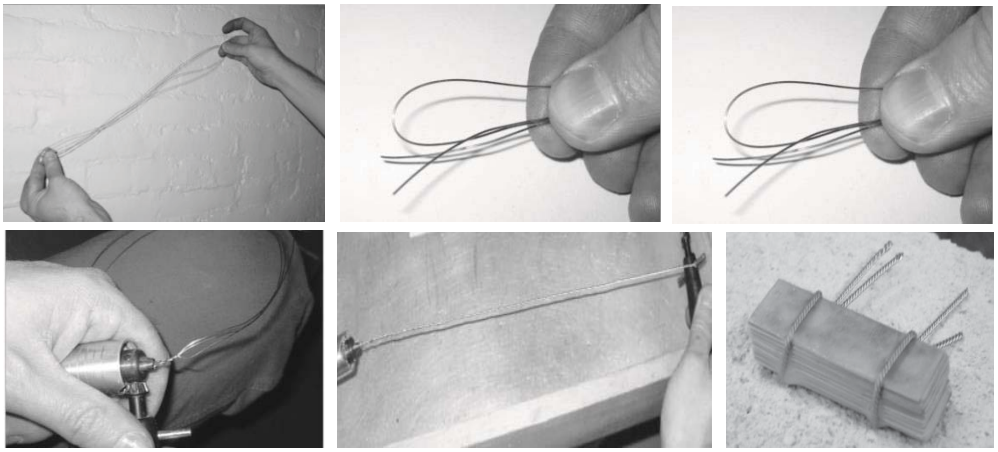
การผลิตเครื่องประดับโมกุเม่กาเน่ ช่างฝีมือจะทำการเลือกโลหะหรืออัลลอยด์ของโลหะที่มีสีแตกต่างกันมาใช้ โลหะแต่ละแผ่นจะถูกตัดให้มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน ขัดคราบออกไซด์ออกจากผิวและทำความสะอาด วิธีการอัดแผ่นโลหะให้แต่ละชั้นยึดติดกันขึ้นกับวิธีของช่างแต่ละคน จากการศึกษางานที่ผ่านมาพบว่ามีอยู่ 2 วิธี 1) การใช้ลวดมัดแผ่นโลหะให้ติดกัน 2) การใช้แคมป์โลหะยึดแผ่นโลหะให้ติดกัน แสดงในรูปที่ 3



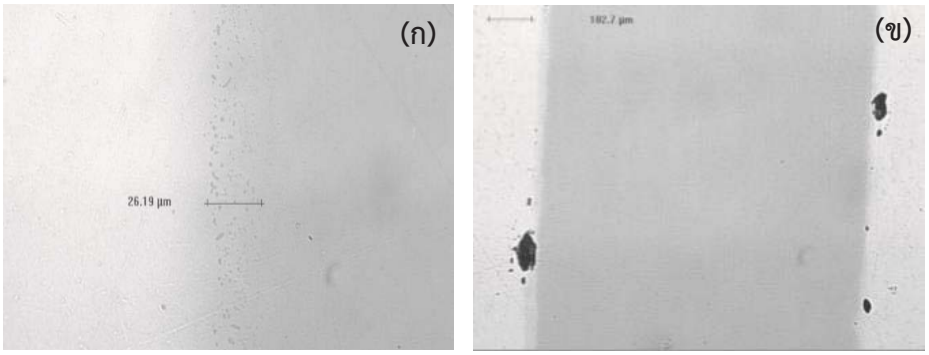
รูปที่ 3 วิธีการอัดแผ่นโลหะ (ก) การใช้ลวดมัดแผ่นโลหะให้ติดกัน (ข) การใช้แคมป์โลหะยึดแผ่นโลหะให้ติดกัน

สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการใช้ลวดมัดแท่งโลหะคือ ในการวางตำแหน่งของชั้นโลหะ โลหะที่อยู่ชั้นนอกสุดของแท่งโลหะทั้ง 2 ด้าน ควรเป็นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่าโลหะที่อยู่ด้านใน (Chris Ploof & Stewart Grice, 2010) เนื่องจากอุณหภูมิการหลอมเหลวของลวดต้องสูงกว่าอุณหภูมิของหัวเป่าไฟที่ใช้ และแผ่นโลหะที่อยู่ชั้นนอกสุดทั้งสองด้านควรเป็นโลหะที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวสูงเพื่อป้องกันการละลายของแผ่นโลหะซึ่งจะทำให้ติดกับลวดที่ใช้ ขั้นตอนการมัดชิ้นงานด้วยลวดแสดงในรูปที่ 4

การใช้หัวเป่าไฟในการทำแท่งโลหะนั้นจะต้องมีความระมัดระวังในการการสังเกตสีของแท่งโลหะอย่างสูง เนื่องจากถ้าอุณหภูมิที่ให้สูงเกินไปโลหะจะเกิดการหลอมละลายทันที เมื่อได้รับความร้อนสีของแท่งโลหะจะเริ่มสว่างขึ้น เปลี่ยนเป็นสีส้มด้าน และกลายเป็นสีส้มที่มีความสว่าง มีลักษณะเยิ้มและเปียก เมื่อถึงจุดนี้แสดงว่าโลหะใกล้จะหลอมเหลวแล้ว รูปที่ 5 (ก) แสดงบริเวณรอยต่อของแท่งโลหะที่ยึดติดกันด้วยการใช้แคมป์ยึดแผ่นโลหะ และบริเวณรอยต่อของชิ้นงานที่ใช้หัวเป่าไฟพบหลุมที่เกิดบริเวณรอยต่อเป็นบริเวณจุดสีดำในรูปที่ 5 (ข)



รูปที่ 4 วิธีการมัดชิ้นงานด้วยลวด (Chris Ploof & Stewart Grice, 2010)

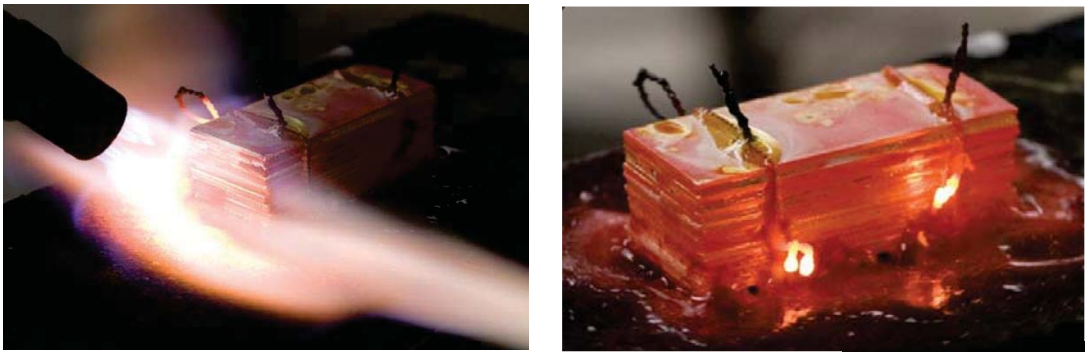


รูปที่ 5 บริเวณรอยต่อของชิ้นงาน (ก) บริเวณรอยต่อของชิ้นงานที่ใช้แคมป์ยึดแผ่นโลหะ (ข) บริเวณรอยต่อของชิ้นงานที่ใช้หัวเป่าไฟ (Chris Ploof & Stewart Grice, 2010)

การให้ความร้อนชิ้นงานมีวัตถุประสงค์ให้เกิดกระบวนการแพร่ของโลหะที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นโลหะซึ่งจะทำให้แผ่นโลหะยึดติดกันได้เรียกว่า “การเชื่อมด้วยกระบวนการแพร่” มี 2 วิธี ตามแหล่งความร้อนที่ใช้ วิธีแรกคือ การให้ความร้อนกับชิ้นงานโดยตรงด้วยการใช้หัวเป่าไฟแสดงในรูปที่ 6 อีกวิธีคือการให้ความร้อนโดยใช้เตาเผา ซึ่งวิธีการนี้มีความหลากหลายมากเนื่องจากเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผามีหลายแบบ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเผาชิ้นงานด้วยเตาถ่าน วิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้กันมาตั้งแต่โบราณ บรรยากาศภายในเตาเป็นแบบรีดักชั่น ซึ่งเป็นบรรยากาศที่เหมาะกับเทคนิคโมกุเม่กาเน่ เนื่องจากไม่ทำให้เกิดฟิล์มออกไซด์ของโลหะซึ่งขัดขวางการยึดติดกันของผิวหน้าโลหะ แต่การควบคุมอุณหภูมิทำได้ยาก

2. การเผาชิ้นงานด้วยเตาไฟฟ้า วิธีการนี้มีข้อดีคือสามารถควบคุมอุณหภูมิได้แน่นอนมากกว่าการใช้เตาถ่าน แต่บรรยากาศปกติมีปริมาณออกซิเจนสูงทำให้ผิวโลหะเกิดฟิล์มออกไซด์ได้ง่าย วิธีที่มีการใช้คือ การห่อชิ้นงานด้วยฟอยด์ ซึ่งชนิดของฟอยด์ที่ใช้ห่อชิ้นงานมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแท่งโลหะ อะลูมิเนียมฟอยด์สามารถใช้ห่อชิ้นงานที่อุณหภูมิเตาต่ำกว่า 650°C ได้ และเปลี่ยนเป็นสแตนเลสฟอยด์เมื่อใช้อุณหภูมิเตาสูงกว่า 650°C (Kageeporn, 2012) การใช้ภาชนะสแตนเลสหรือการนำสแตนเลสฟอยด์มาทำเป็นถุงบรรจุผงถ่านสำหรับใส่แคมป์โลหะ เพื่อสร้างสภาวะรีดักชั่นภายในภาชนะขณะที่อยู่ภายในเตาไฟฟ้า แสดงในรูปที่ 7



www.alberic.net

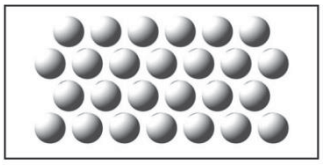
รูปที่ 6 การให้ความร้อนกับชิ้นงานโดยตรงด้วยการใช้หัวเป่าไฟ

www.mjsa.org

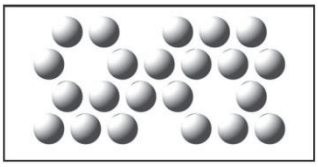
รูปที่ 7 การอบชิ้นงานด้วยเตาไฟฟ้า (Binnion J., 2016)

การเชื่อมโลหะด้วยกระบวนการแพร่ (Diffusion welding)

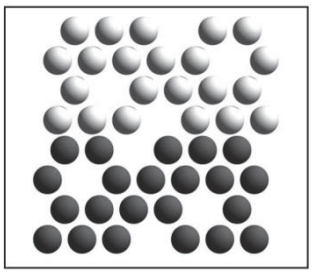
การเชื่อมแผ่นโลหะให้ติดกันด้วยความร้อนและแรงอัดนั้นจะต้องมีความร้อนและความดันที่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการแพร่ของอะตอมที่ผิวหน้าของโลหะ “การเชื่อมด้วยกระบวนการแพร่” (Diffusion welding) โลหะที่ติดกันนั้นอาจเป็นโลหะชนิดเดียวกันหรือเป็นโลหะต่างชนิดกันก็ได้ อุณหภูมิที่ทำให้เกิดการแพร่จะต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะ แต่จะต้องมีอุณหภูมิที่สูงเพียงพอที่จะทำให้เกิดสภาวะ Plastic deformation ของโลหะ (Marinov, 2011) ตัวอย่างการผลิตแหวนด้วยเทคนิคโมกุเม่กาเนโดยใช้โลหะแพลตินัมและเหล็ก บริเวณผิวสัมผัสของโลหะทั้งสองจะถูกยึดติดกันด้วยกระบวนการแพร่แสดงในรูปที่ 8 ความแข็งแรงของการยึดติดจะขึ้นกับอุณหภูมิและระยะเวลาในการแพร่ (Binnion, 2011)



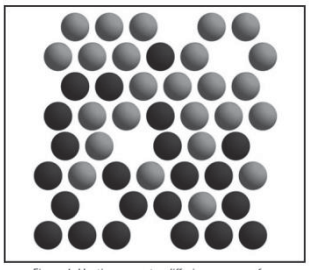
(ก) โครงสร้างผลึก



(ข) ช่องว่างโครงสร้างผลึก



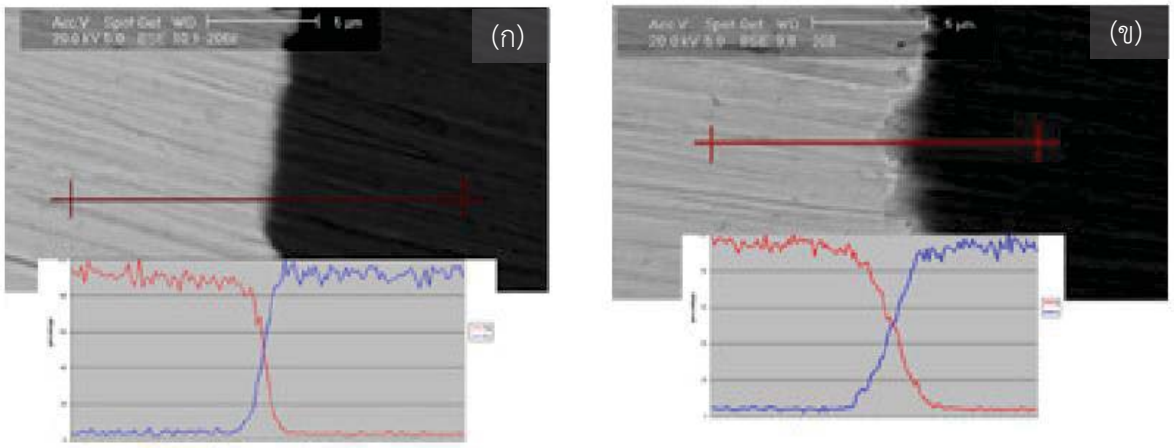
(ค) บริเวณผิวสัมผัสของแผ่นโลหะ



(ง) การแพร่ของอะตอมที่ผิวหน้าเนื่องจากความร้อน

รูปที่ 8 การเชื่อมด้วยกระบวนการแพร่ (ก) แสดงโครงสร้างผลึก (ข) แสดงช่องว่างในโครงสร้างผลึก (ค) แสดงบริเวณผิวสัมผัสของแผ่นโลหะ (ง) แสดงการแพร่ของอะตอมที่ผิวหน้าเนื่องจากความร้อน (www.platinumguild.com/files/pdf/V11N5_diffusion_bonding.pdf)

การทดลองของ Grace Horne MA ในการศึกษาการแพร่ของโลหะที่ใช้ในการทำมีดแบบดามัสกัส มีการใช้วัสดุหลายชนิดได้แก่ เหล็ก สแตนเลส420 (C 0.15% Cr 13%) เหล็กกล้าคาร์บอน (C 0.8%) นิกเกิล เงิน และวานาเดียม ในการทดลองมีการจับคู่วัสดุทีละคู่ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำให้เกิดการแพร่แบบของแข็งอยู่ระหว่าง 0.5 – 0.9 ของจุดหลอมเหลวของโลหะ ในการทดลองนี้ได้ใช้เงินที่มีความบริสุทธิ์ 99.95% ดังนั้นอุณหภูมิที่เลือกใช้สำหรับการทดลองที่มีเงินจะอยู่ระหว่าง 575°C – 860°C



รูปที่ 9 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงการวิเคราะห์องค์ประกอบของเงินและเหล็กบริเวณรอยต่อของแผ่นโลหะด้วยเทคนิคเอนเนอร์จีดิสเปอร์ซีฟสเปกโตรสโคปี (ก) ระยะเวลาอบชิ้นงาน 60 นาที (ข) ระยะเวลาอบชิ้นงาน 90 นาที (Grace, 2006)

ตัวอย่างจากการทดลอง 2 ชิ้น ซึ่งใช้โลหะเงินและเหล็กทำการอบที่อุณหภูมิเดียวกัน แต่มีระยะเวลาในการอบชิ้นงานต่างกันคือ 60 นาที และ 90 นาที ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) และวิเคราะห์องค์ประกอบของเงินและเหล็กด้วยเทคนิคเอนเนอร์จีดิสเปอร์ซีฟสเปกโตรสโคปีพบว่าลักษณะกราฟองค์ประกอบของเงินและเหล็กมีลักษณะที่แตกต่างกัน รูปที่ 9 (ก) ระยะเวลาอบชิ้นงาน 60 นาที (ข) ระยะเวลาอบชิ้นงาน 90 นาที พบว่ามีปริมาณโลหะเงินและเหล็กอยู่ในบริเวณแผ่นโลหะด้านตรงข้ามเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ระยะเวลาเพิ่มขึ้น แต่การทดลองการเพิ่มความสามารถในการแพร่ของโลหะโดยการเพิ่มระยะเวลา ไม่ได้สามารถแก้ปัญหาที่เกิดจากการรีดได้ เมื่อชิ้นงานถูกรีดปัญหาการแยกออกของแผ่นโลหะยังคงเกิดขึ้นเช่นเดิม

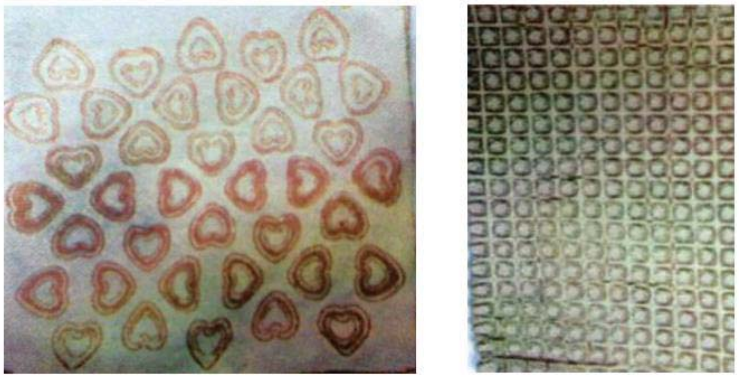
การสร้างลวดลายบนแผ่นโลหะ

รูปที่ 10 การสร้างลวดลายบนแผ่นโลหะ (ปริญญา, 2556)

การสร้างลวดลายบนแผ่นโลหะแบ่งได้เป็น 2 วิธีใหญ่ๆ คือ 1) การเจาะผิวแท่งโลหะแล้วนำไปรีดให้เกิดลวดลาย 2) การรีดแท่งโลหะให้ได้ขนาดแล้วนำไปบิดเกลียวให้เกิดลวดลาย แสดงในรูปที่ 10 นอกจากนี้ช่างฝีมือบางคนอาจมีเทคนิคในการทำให้เกิดลวดลายที่เป็นเทคนิคเฉพาะตัวอีกด้วย

Kageeporn, 2012 ได้ศึกษาการเชื่อมแผ่นโลหะเงินและทองแดงสหรับทำเครื่องประดับโมกุเม่กาเน่ อุณหภูมิที่ใช้ในการอบชิ้นงาน 650^{o}C และ 780^{o}C ระยะเวลายืนอุณหภูมิ 7 ชั่วโมง ใช้แผ่นโลหะจำนวน 2 – 11 แผ่น ใช้ทำแท่งโลหะ จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงพบว่า เมื่อใช้จำนวนแผ่นโลหะมากกว่า 3 ชั้นขึ้นไป แผ่นโลหะมีการยึดติดกันดีทั้งที่อุณหภูมิ 650^{o}C และ 780^{o}C แท่งโลหะถูกนำมาเจาะเป็นรูปหัวใจและสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้วยเครื่อง CNC และใช้ช่างฝีมือในการเจาะเป็นรูปวงกลมและคลื่น หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปรีดด้วยเครื่องรีด

จนความหนาลดลง 30 – 40% พบว่าลายที่เจาะด้วยเครื่อง CNC มีการขยายออก 44.66% ส่วนลายที่ให้ช่างฝีมือลวดลายขยายออกประมาณ 20% รูปที่ 11 แสดงแผ่นโลหะหลังจากการรีด ลายรูปหัวใจและสี่เหลี่ยมจัตุรัส



รูปที่ 11 แผ่นโลหะหลังจากการรีด จากการเจาะลายด้วยเครื่อง CNC รูปหัวใจและสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Kageeporn, 2012)

ปัจจุบันการทำเครื่องประดับที่ใช้เทคนิคโมกุเม่กาเน่มีการใช้โลหะที่หลายชนิดเพื่อให้เกิดชิ้นงานที่มีสีสันหลากหลาย แต่เทคนิคการทำเครื่องประดับด้วยวิธีนี้ยังไม่เป็นที่แพร่หลายในประเทศไทย คณะผู้วิจัยจึงมีความหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาการผลิตเครื่องประดับด้วยเทคนิคโมกุเม่กาเน่กับผู้ที่สนใจได้

วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาสภาวะที่ทำให้โลหะแพลเลเดียม500 เงินสเตอร์ลิง และทองแดงเชื่อมติดกันด้วยแรงอัดที่อุณหภูมิ 750^{O}C

2. ผลิตต้นแบบชุดเครื่องประดับจากเทคนิคโมกุเม่กาเน่ด้วยโลหะแพลเลเดียม500 เงินสเตอร์ลิง และทองแดง

แนวทางความคิดที่นำมาใช้ในการวิจัย

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้ทำการศึกษาการทำเครื่องประดับโมกุเม่กาเน่ด้วยโลหะเงินสเตอร์ลิง ทองแดง และทองเหลือง ที่อุณหภูมิ 700 ^{O}C, 750 ^{O}C และ 800 ^{O}C ใช้เวลาในการยืนอุณหภูมิ 1, 2 และ 3 ชั่วโมง พบว่าการใช้อุณหภูมิ 700 ^{O}C การยึดติดกันของแผ่นโลหะเงินสเตอร์ลิงและทองแดงที่ระยะเวลาดังกล่าวไม่เกิดขึ้น และการใช้อุณหภูมิถึง 800 ^{O}C จะทำให้เงินสเตอร์ลิงเกิดการละลาย อุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำให้โลหะทั้ง 3 ชนิดติดกันคือ 750 ^{O}C นอกจากนี้ยังพบว่าระยะเวลามีผลต่อการแพร่ของโลหะบริเวณผิวหน้า เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นการแพร่ของโลหะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ดังนั้นสภาวะการทดลองที่ให้ผลดีที่สุดในการทำให้โลหะเงินสเตอร์ลิง ทองแดง และทองเหลือง สามารถยึดติดกันได้ดีที่สุดคือ อุณหภูมิ 750 ^{O}C ระยะเวลาการยืนอุณหภูมิ 3 ชั่วโมง ผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดว่าควรจะหาวัสดุใหม่มาใช้ในการทำเครื่องประดับโมกุเม่กาเน่จึงได้เลือกโลหะ

แพลเลเดียมมาใช้ในการทดลอง แต่เนื่องจากราคาแพลเลเดียมในประเทศไทยมีราคาค่อนข้างสูงเมื่อเทียบจากราคาตลาดโลก อาจเป็นผลมาจากการปริมาณใช้โลหะชนิดนี้ในประเทศมีน้อย และยังไม่เป็นที่นิยมในการทำเครื่องประดับในประเทศ จุดหลอมเหลวของแพลเลเดียมสูงถึง 1554 ^{O}C ทำให้ไม่สามารถหลอมแพลเลเดียมได้ด้วยการใช้แก๊สหุงต้มเป็นเชื้อเพลิงได้ การผลิตเครื่องประดับจากแพลเลเดียมจึงต้องใช้กระบวนการหล่อขึ้นรูปเท่านั้น ในประเทศไทยแพลเลเดียมมักจะถูกใช้เป็นโลหะผสมในการหล่อทองขาว ผู้วิจัยจึงได้ทำการผสมโลหะแพลเลเดียมกับโลหะเงินในอัตราส่วน 50 : 50 มาใช้ในการทดลองนี้เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิตลง โดยเลือกใช้อุณหภูมิ 750 ^{O}C และเพิ่มระยะเวลาในการยืนอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 5, 10 และ 15 ชั่วโมง

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

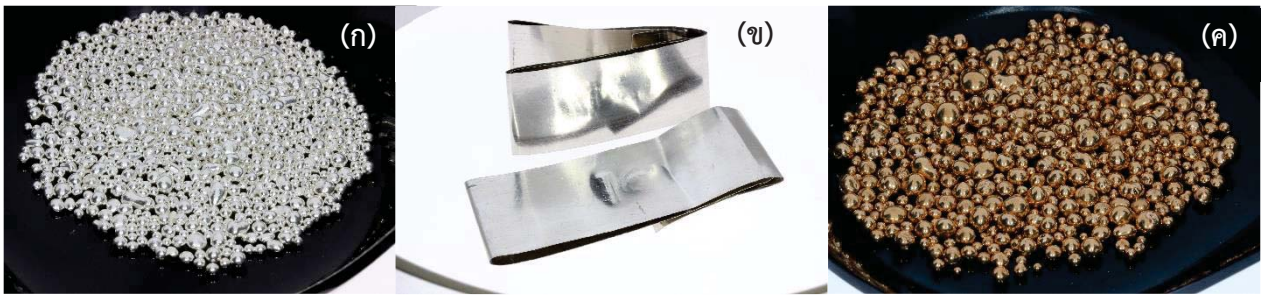
1. ข้อมูลสำหรับการทำให้โลหะแพลเลเดียม500 เงินสเตอร์ลิง และทองแดง เชื่อมติดกันด้วยแรงอัดที่อุณหภูมิ 750^{O}C ระยะเวลาในการยืนอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 5, 10 และ 15 ชั่วโมง
2. ชุดเครื่องประดับจากเทคนิคโมกุเม่กาเน่ด้วยโลหะแพลเลเดียม500 เงินสเตอร์ลิง และทองแดง

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือ

1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

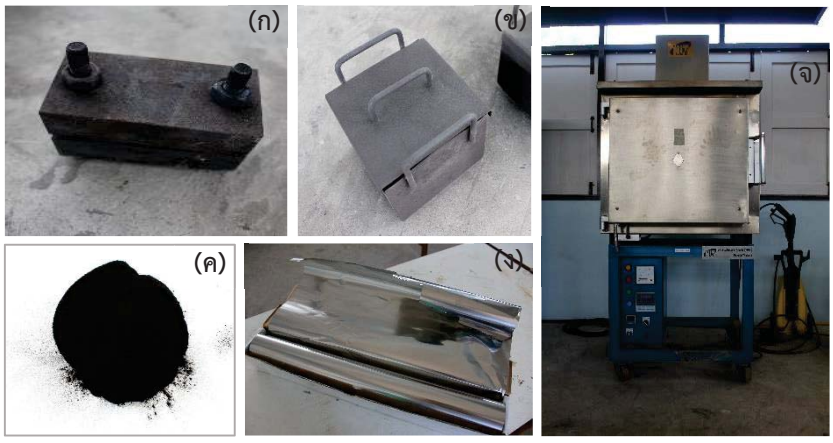
แผ่นโลหะมี 3 ชนิด ได้แก่ แผ่นโลหะแพลเลเดียม500 (Pd 50% : Ag 50%) แผ่นโลหะเงินสเตอร์ลิง และแผ่นโลหะทองแดง ซึ่งแผ่นโลหะเงินสเตอร์ลิง เตรียมได้จากการหลอมด้วยหัวเป่าไฟ ส่วนแผ่นทองแดงที่นำมาใช้เป็นแผ่นทองแดงสำเร็จรูป โลหะที่ใช้ในการเตรียมแพลเลเดียม500 และเงินสเตอร์ลิงแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 โลหะที่ใช้ในการเตรียมแพลเลเดียม500 และเงินสเตอร์ลิง (ก) โลหะเงิน 99.99% (ข) โลหะแพลเลเดียม 99.99% (ค) โลหะทองแดง 99.99%

1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทำแท่งโลหะโมกุเม่กาเน่ (รูปที่ 13)

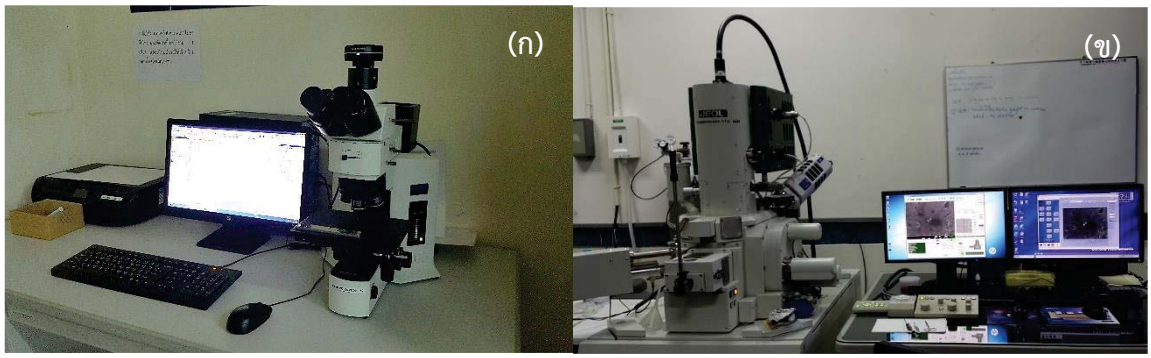
1. แคมป์เหล็ก
2. กล่องสแตนเลสสำหรับใส่แคมป์เหล็ก
3. ผงถ่าน
4. แผ่นฟอยด์สแตนเลส
5. เตาเผาไฟฟ้า



รูปที่ 13 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทำแท่งโลหะโมกุเม่กาเน่ (ก) แคมป์เหล็ก (ข) กล่องสแตนเลสสำหรับใส่แคมป์เหล็ก (ค) ผงถ่าน (ง) แผ่นฟอยด์สแตนเลส (จ) เตาเผาไฟฟ้า

1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบบริเวณรอยต่อของแผ่นโลหะ (รูปที่ 14)

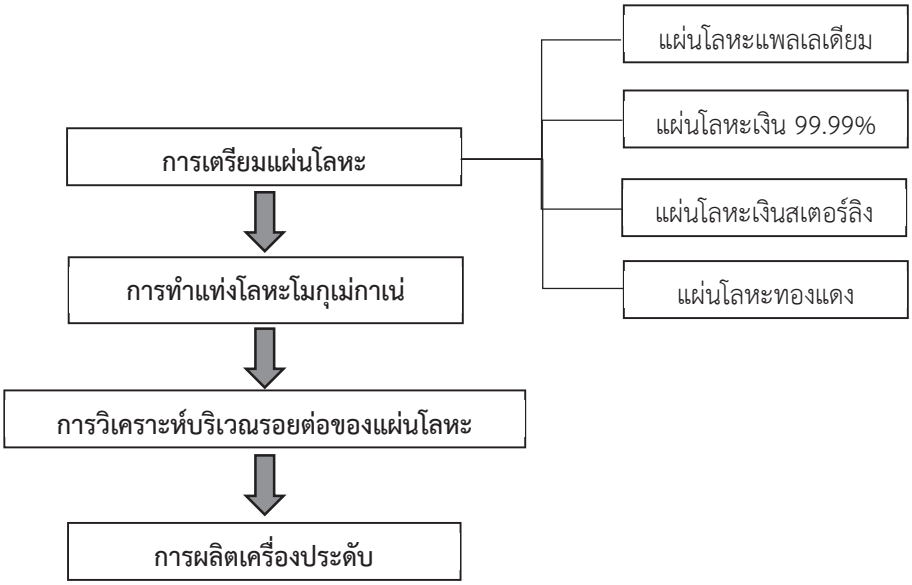
1. กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical microscope)
2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) รุ่น JEOL-JSM-6610



รูปที่ 14 เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบบริเวณรอยต่อของแผ่นโลหะ (ก) กล้องจุลทรรศน์แสง (ข) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (http://www.strec.chula.ac.th/library/)

2. ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองทำเครื่องประดับโมกุเม่กาเน่ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน คือ 1) การเตรียมแผ่นโลหะ 2) การทำแท่งโลหะโมกุเม่กาเน่ 3) การวิเคราะห์บริเวณรอยต่อของโลหะ 4) การผลิตเครื่องประดับ ขั้นตอนการทดลองแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15 ขั้นตอนการทดลอง

2.1 การเตรียมแผ่นโลหะที่ใช้ในการทดลอง

แผ่นโลหะที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยแผ่นโลหะแพลเลเดียม 500 แผ่นเงินสเตอร์ลิง (Ag 96.5% : Cu 3.5%) และแผ่นทองแดง เมื่อได้แผ่นโลหะแล้วนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์สเปกโทรมิเตอร์รุ่น EDAX Orbis Micro – XRF

<u>วิธีการเตรียมแผ่นโลหะแพลเลเดียม500</u>

เนื่องจากไม่สามารถหลอมแพลเลเดียมและเงินได้ด้วยหัวเป่าไฟ เพราะแพลเลเดียมมีจุดหลอมเหลวสูงถึง 1554°C ดังนั้นจึงใช้วิธีการเตรียมโลหะด้วยกระบวนการหล่อเป็นแท่งและนำมารีดเป็นแผ่น

<u>วัสดุและอุปกรณ์สำหรับการหล่อโลหะแพลเลเดียม 500</u>

1. ปูนทนไฟสำหรับการหล่อโลหะอุณหภูมิสูง
2. ตัวประสาน (Binder)
3. น้ำเย็น
4. เครื่องชั่งปูน
5. กระบอกโลหะและฐานยางสำหรับหล่อปูน
6. ต้นเทียน
7. เครื่องหล่อโลหะ

<u>ขั้นตอนการหล่อโลหะ</u>

1. การเตรียมฐานยางและกระบอกปูนหล่อ

เนื่องจากปูนที่ใช้ในการหล่อเป็นปูนที่แห้งช้าจึงต้องมีการเจาะฐานยาง เพื่อให้น้ำสามารถระเหยออกจากปูนได้เร็วมากขึ้น และนำผ้ามารองบนฐานยางด้านบนเพื่อป้องกันการไหลออกของปูนก่อนติดต้นเทียนลงไปบนฐานยาง (รูปที่ 16)

รูปที่ 16 การเตรียมฐานยางและกระบอกปูนหล่อ

2. การทำพิมพ์ปูนหล่อ

หลังจากติดต้นเทียนลงบนฐานยางเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการทำแม่พิมพ์ปูนหล่อ ปูนหล่อที่ใช้ในการหล่อแพลเลเดียมเป็นปูนหล่อที่ต้องทนความร้อนสูง เนื่องจากแพลเลเดียมมีจุดหลอมเหลวสูงถึง 1554^{o}C อัตราส่วนผสมปูนหล่อ ปริมาณปูนหล่อ : ตัวประสาน : น้ำ แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมปูนหล่อ ปริมาณปูนหล่อ : ตัวประสาน : น้ำ

เบอร์ของกระบอกปูนขนาด 6”x 3.5” หรือ 4”x 4”	ปริมาณปูนหล่อ (กรัม)	น้ำ (ซม.^{3})	ตัวประสาน (ซม.^{3})
-	1,000	270	15
2	1,500	405	23
4	3,000	810	45

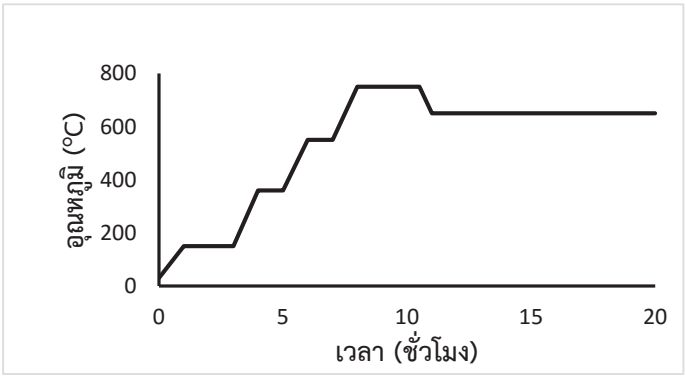
ขั้นตอนการเตรียมกระบอกปูนหล่อ

รูปที่ 17 ขั้นตอนการเตรียมกระบอกปูนหล่อ

ผสมน้ำส่วนหนึ่งกับตัวประสานตีให้เข้ากัน ค่อยๆ เพิ่มปริมาณปูนและน้ำตีให้เข้ากันจนส่วนผสมทั้งหมดเข้ากันดี (รูปที่ 17 (ก) - (ค)) หลังจากนั้นนำภาชนะที่ใส่ส่วนผสมเข้าเครื่องดูดสุญญากาศเพื่อดูดอากาศออกจากส่วนผสม จะเห็นฟองแก๊สถูกดูดขึ้นมาที่ผิวของส่วนผสมและถูกดูดออกไป (รูปที่ 17 (ง)) เทส่วนผสมทั้งหมดลงในกระบอกหล่อที่เตรียมไว้ (รูปที่ 17 (จ) – (ฉ)) รอให้ปูนเริ่มแข็งตัว หลังจากนั้นถอดฐานยางออก เตรียมถังใส่ปูนหล่อชนิดเดียวกันไว้และนำกระบอกหล่อวางลงไปเพื่อช่วยให้ความชื้นออกจากปูนได้เร็วขึ้น (รูปที่ 17 (ช) – (ซ))

<u>การหล่อโลหะ</u>

หลังจากปูนในกระบอกหล่อแห้งแล้ว นำกระบอกปูนหล่อใส่ในเตาเผา อุณหภูมิและเวลาแสดงในรูปที่ 18 เมื่อถึงเวลาที่กำหนดนำกระบอกปูนออกจากเตาเผาและนำไปใส่ในเครื่องหล่อโลหะ อุณหภูมิที่ใช้ในการหล่อโลหะคือ 1500°C



รูปที่ 18 อุณหภูมิและเวลาในการอบเบ้าปูน

การคำนวณน้ำหนักของโลหะที่ใช้สามารถคำนวณได้จากปริมาตรของต้นเทียนที่ใช้ น้ำหนักของโลหะที่ต้องใช้ในการหล่อจากสูตร: น้ำหนักโลหะที่ใช้ = น้ำหนักต้นเทียน x ถ.พ. ของโลหะ + 20% (น้ำหนักต้นเทียน x ถ.พ. ของโลหะ) (ปริศนา, 2556) ต้นแบบเทียน และโลหะแพลเลเดียม 500 แสดงในรูปที่ 19

รูปที่19 ต้นแบบเทียน และโลหะแพลเลเดียม 500

<u>การเตรียมแผ่นเงิน</u>

แผ่นโลหะเงินที่ใช้ในการทดลองมี 2 ชนิด คือ แผ่นโลหะเงินที่มีความบริสุทธิ์ 99.99% และแผ่นเงินสเตอร์ลิง (Ag 96.5% : Cu 3.5%)

<u>อุปกรณ์สำหรับการเตรียมแผ่นเงิน</u>

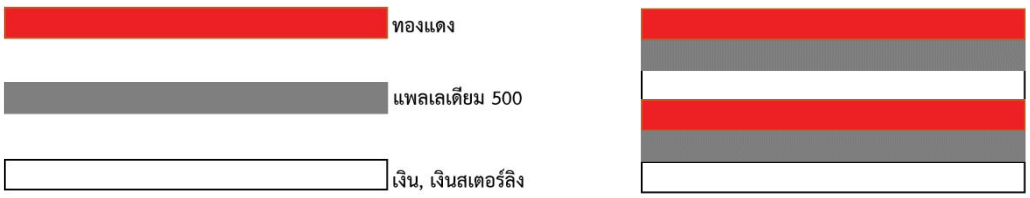
1. เบ้าหลอมโลหะ
2. หัวเป่าไฟ
3. รางเทโลหะ
4. เครื่องรีดโลหะ

นำโลหะเงินและทองแดงมาชั่งตามอัตราส่วนดังกล่าวข้างต้น ใส่ในเบ้าหลอมโลหะและเป่าด้วยหัวเป่าไฟ จนโลหะหลอมละลายทั้งหมดแล้วเทลงในรางโลหะ นำแท่งโลหะไปรีดให้ได้ความหนาที่ต้องการ แสดงในรูปที่ 20

รูปที่ 20 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นโลหะเงิน

2.2 การทำแท่งโลหะโมกุเม่กาเน่

1. เตรียมแผ่นโลหะขนาด 1 ซม. X 1 ซม. X 0.5 มม. สำหรับการทดลอง ในแต่ละการทดลองใช้แผ่นโลหะชนิดละ 2 แผ่น จำนวนรวม 6 แผ่น แสดงในรูปที่ 21 สภาวะที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 21 ลำดับการวางชั้นโลหะ

2. การเตรียมชิ้นงานก่อนเข้าเตาเผา เริ่มจากการนำแผ่นโลหะทั้งหมดไปขัดด้วยกระดาษทรายล้างทำความสะอาด เป่าให้แห้ง และนำไปห่อด้วยฟอยด์สแตนเลส นำห่อฟอยด์ใส่ในแคมป์เหล็ก ขันน็อตให้แน่น ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานก่อนนำเข้าเตาเผาแสดงในรูปที่ 22

- สภาวะแบบออกซิเดชั่น นำแคมป์ใส่เตาทันที
- สภาวะแบบรีดักชั่น นำแคมป์ใส่ในกล่องสแตนเลส และใส่ผงถ่าน

รูปที่ 22 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานก่อนนำเข้าเตาเผา

3. นำชิ้นงานใส่เตา เมื่อถึงเวลาที่กำหนดนำชิ้นงานออกจากเตา แสดงในรูปที่ 23

รูปที่ 23 การนำชิ้นงานออกจากเตาเผา

ตารางที่ 2 สภาวะที่ใช้ในการทดลองทำแท่งโลหะโมกุเม่กาเน่

การทดลอง	วัสดุ	อุณหภูมิ (°C)	บรรยากาศ	เวลายืนอุณหภูมิ (ชั่วโมง)
1	แพลเลเดียม500 เงินสเตอร์ลิง ทองแดง	750	ออกซิเดชั่น	5
2	แพลเลเดียม500 เงินสเตอร์ลิง ทองแดง	750	ออกซิเดชั่น	10
3	แพลเลเดียม500 เงินสเตอร์ลิง ทองแดง	750	ออกซิเดชั่น	15
4	แพลเลเดียม500 เงินสเตอร์ลิง ทองแดง	750	รีดักชั่น	5
5	แพลเลเดียม500 เงินสเตอร์ลิง ทองแดง	750	รีดักชั่น	10
6	แพลเลเดียม500 เงินสเตอร์ลิง ทองแดง	750	รีดักชั่น	15

2.3 การวิเคราะห์บริเวณรอยต่อของแผ่นโลหะ

1. ถ่ายรูปบริเวณรอยต่อด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง หลังจากนำชิ้นงานออกจากแคมป์เหล็ก แกะแผ่นฟอยด์ที่ห่อออกและเลื่อยผ่าชิ้นงาน นำชิ้นงานไปขัดด้วยเครื่องขัดชิ้นงาน แสดงในรูปที่ 24 และถ่ายรูปบริเวณรอยต่อด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง

2. ศึกษาบริเวณรอยต่อของโลหะด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและวิเคราะห์องค์ประกอบของโลหะด้วยเทคนิคเอ็นเนอร์จีดิสเปอร์ซีฟสเปกโตสโคปี

รูปที่ 24 การขัดผิวหน้าชิ้นงานสำหรับถ่ายรูปบริเวณรอยต่อด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง

2.4 การผลิตเครื่องประดับ

1. ทำแท่งโลหะโมกุเม่กาเน่โดยเลือกสภาวะที่ทำให้ได้ชิ้นงานที่ดีที่สุด

2. สร้างลวดลายบนแผ่นโลหะโดยใช้วิธีการเจาะลายลงบนแท่งโลหะ หลังจากนั้นให้ความร้อนกับแท่งโลหะแล้วนำไปรีดเพื่อให้ชิ้นงานเกิดลวดลาย ทำซ้ำทั้ง 3 ขั้นตอนไปเรื่อยๆ จนได้แผ่นโลหะที่เกิดลวดลายตามต้องการ รูปที่ 25 แสดงขั้นตอนการสร้างลวดลายบนแผ่นโลหะ

รูปที่ 25 ขั้นตอนการสร้างลวดลายบนแผ่นโลหะ

3. ออกแบบและผลิตเครื่องประดับ

ผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์สเปกโทรมิเตอร์

การวิเคราะห์องค์ประกอบของแผ่นโลหะที่ใช้ในการทดลองได้แก่ แพลเลเดียม500 เงินสเตอร์ลิง และทองแดง ด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์สเปกโทรมิเตอร์แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 องค์ประกอบของแผ่นโลหะที่ใช้ในการทดลอง

แผ่นโลหะแพลเลเดียม500	Pd (%wt)	Ag (%wt)	Cu (%wt)
จุดที่ 1	50.32	49.68	-
จุดที่ 2	50.19	49.81	-
จุดที่ 3	50.55	49.45	-
ค่าเฉลี่ย	**50.35**	**49.65**	**-**
แผ่นเงินสเตอร์ลิง			
จุดที่ 1	-	96.93	3.07
จุดที่ 2	-	96.55	3.45
จุดที่ 3	-	96.69	3.31
ค่าเฉลี่ย		**96.72**	**3.28**
แผ่นทองแดง			
จุดที่ 1	-	-	100.00
จุดที่ 2	-	-	100.00
จุดที่ 3	-	-	100.00
ค่าเฉลี่ย	-	-	**100.00**

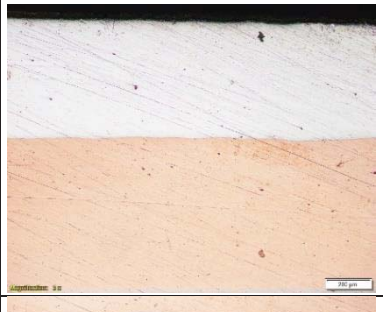
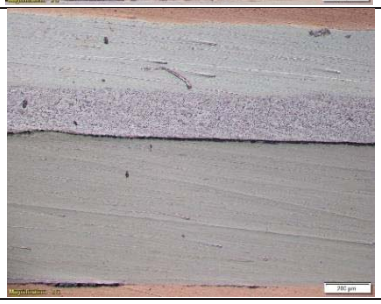
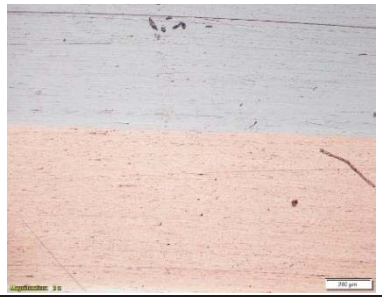
ผลการวิเคราะห์บริเวณรอยต่อของแผ่นโลหะ

1. รูปถ่ายบริเวณรอยต่อของแผ่นโลหะจากกล้องจุลทรรศน์แสง

- ชิ้นงานโมกุเม่กาเน่อบที่อุณหภูมิ 750^{O}C ในบรรยากาศแบบออกซิเดชั่น

รูปถ่ายบริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นโลหะจากกล้องจุลทรรศน์แสงของแท่งโลหะโมกุเม่กาเน่ที่ประกอบด้วยแผ่นโลหะแพลเลเดียม500 เงินสเตอร์ลิง และทองแดง อบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 750^{O}C ในบรรยากาศแบบออกซิเดชั่น กำลังขยายของเลนส์ใกล้วัตถุ 10 เท่า พบว่าบริเวณของแผ่นโลหะเงินสเตอร์ลิงด้านที่ติดกับแพลเลเดียม500 จะเกิดจุดสีดำของออกไซด์ทองแดงที่เรียกว่า “ไฟร์สเตน” หรือ “ไฟร์สเกล” ในเนื้อโลหะ รูปถ่ายบริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นโลหะแสดงในตารางที่ 4

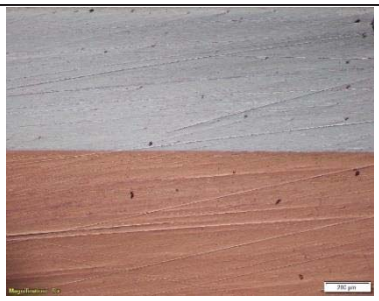
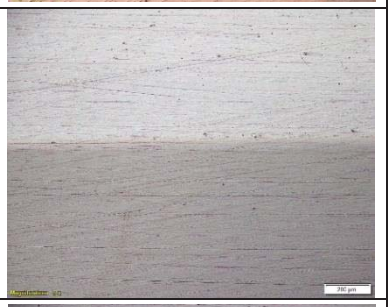
ตารางที่ 4 ภาพถ่ายบริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นโลหะของชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 750^{O}C ในบรรยากาศแบบออกซิเดชั่น กำลังขยายของเลนส์ใกล้วัตถุ 10 เท่า

ตัวอย่าง	เวลายืนอุณหภูมิ		
	5 ชั่วโมง	10 ชั่วโมง	15 ชั่วโมง
เงินสเตอร์ลิง/ทองแดง			
เงินสเตอร์ลิง/แพลเลเดียม 500			
แพลเลเดียม 500/ทองแดง			

- ชิ้นงานโมกุเม่กาเน่อบที่อุณหภูมิ 750^{O}C ในบรรยากาศแบบรีดักชั่น

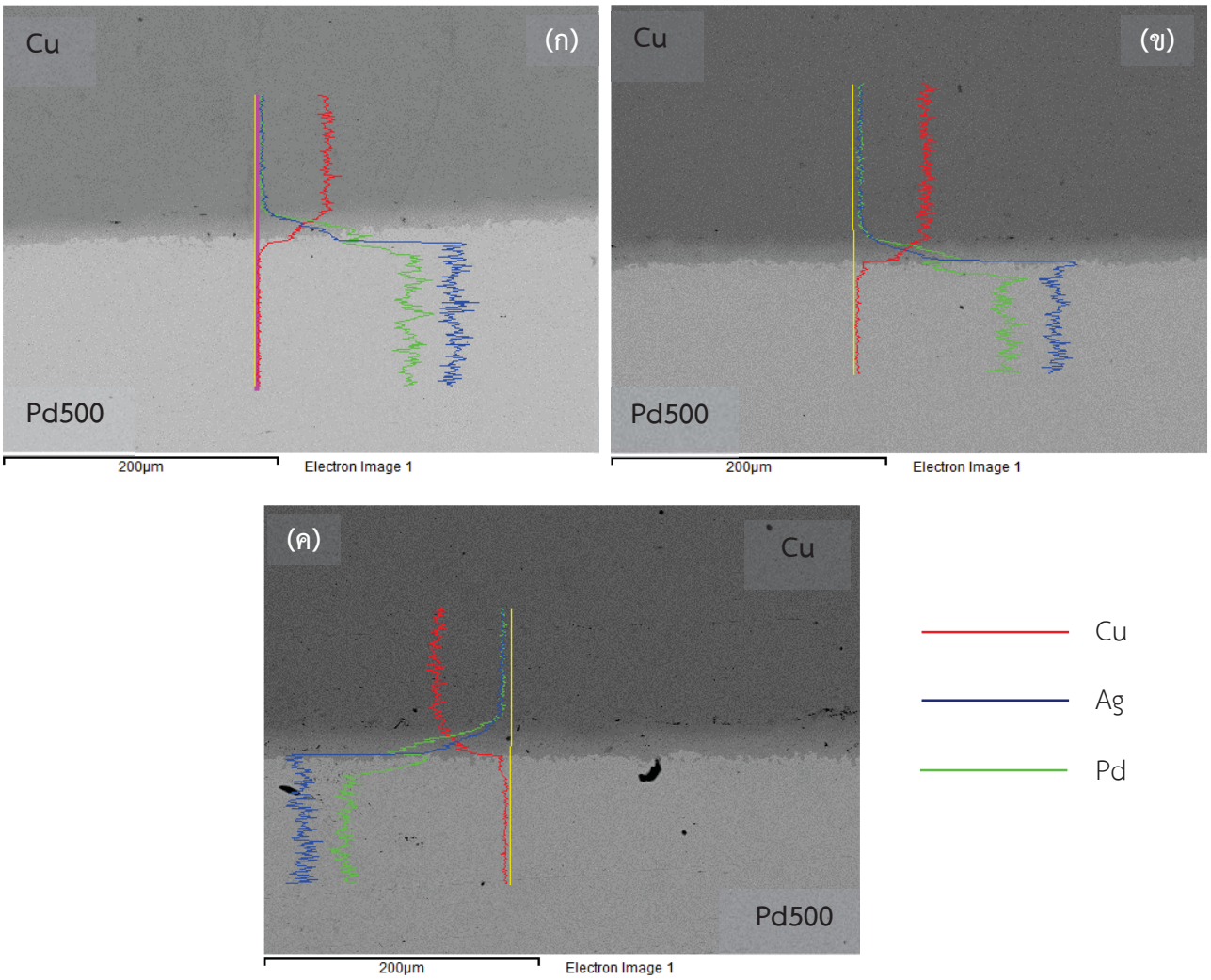
ภาพถ่ายบริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นโลหะจากกล้องจุลทรรศน์แสงของแท่งโลหะโมกุเม่กาเน่ที่ประกอบด้วยแผ่นโลหะ แพลเลเดียม500 เงินสเตอร์ลิง และทองแดง อบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 750^{O}C ในบรรยากาศแบบรีดักชั่น กำลังขยายของเลนส์ใกล้วัตถุ 10 เท่า ไม่พบการเกิดจุดสีดำของออกไซด์ทองแดงในเนื้อโลหะเงินสเตอร์ลิง รูปถ่ายบริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นโลหะแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ภาพถ่ายบริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นโลหะของชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 750^{O}C ในบรรยากาศแบบรีดักชั่น กำลังขยายของเลนส์ใกล้วัตถุ 10 เท่า

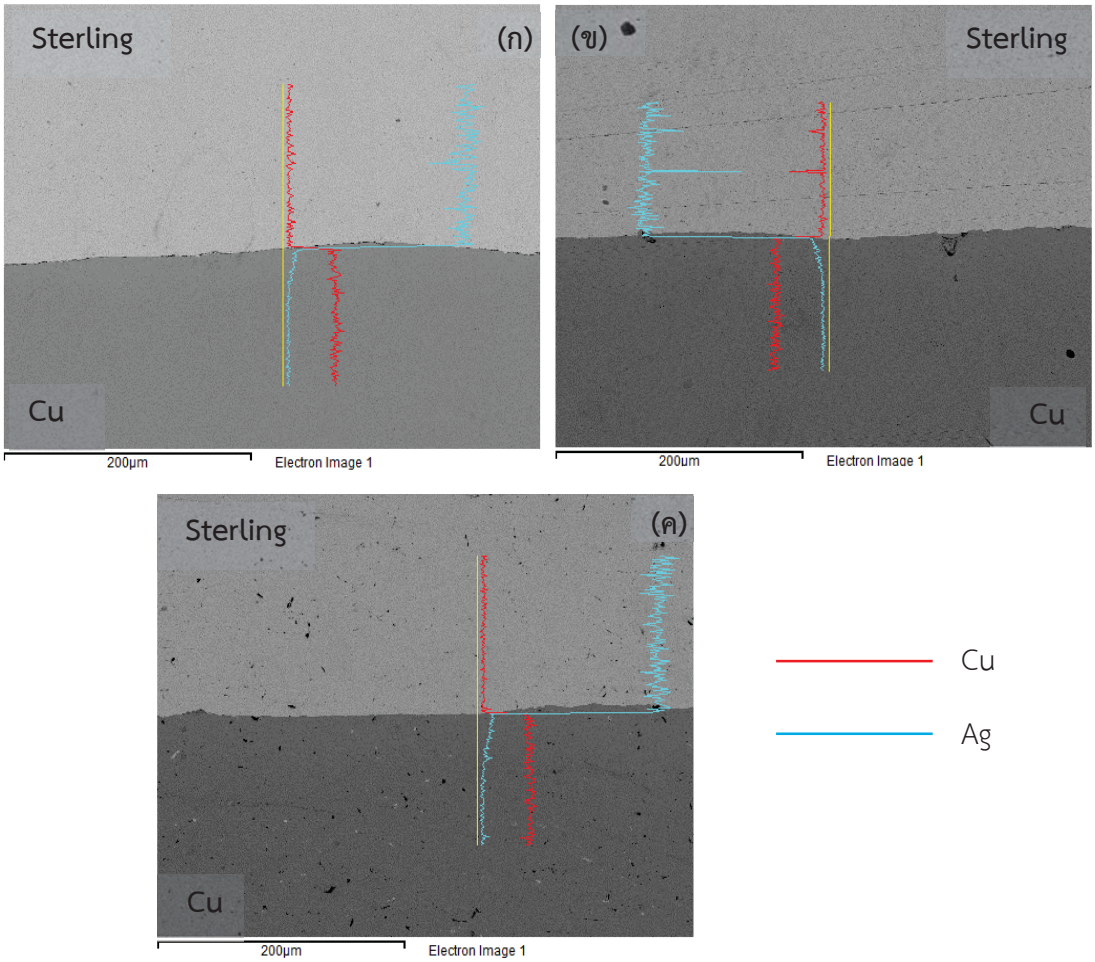
ตัวอย่าง	เวลายืนอุณหภูมิ		
	5 ชั่วโมง	10 ชั่วโมง	15 ชั่วโมง
เงินสเตอร์ลิง/ทองแดง			
เงินสเตอร์ลิง/แพลเลเดียม 500			
แพลเลเดียม 500/ทองแดง			

2. การศึกษาบริเวณรอยต่อของโลหะด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและวิเคราะห์องค์ประกอบของโลหะด้วยเทคนิคเอนเนอร์จีดิสเปอร์ซีฟสเปกโตสโคปี

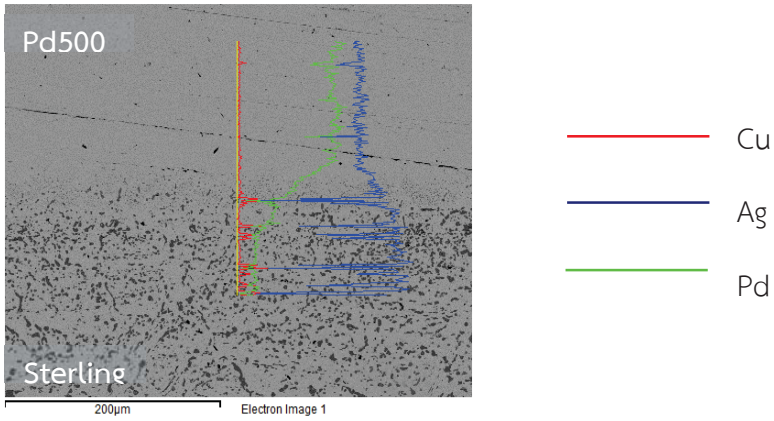
2.1 ผลการวิเคราะห์ระหว่างรอยต่อของผิวหน้าโลหะ ชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 750^{O}C ระยะเวลาในการยืนอุณหภูมิ 5, 10 และ 15 ชั่วโมง ในบรรยากาศแบบออกซิเดชั่น รูปที่ 26 แสดงรอยต่อระหว่างผิวของแผ่นโลหะทองแดงและแพลเลเดียม500 รูปที่ 27 แสดงรอยต่อระหว่างผิวของแผ่นโลหะเงินสเตอร์ลิงและทองแดง และรูปที่ 28 แสดงรอยต่อระหว่างแผ่นโลหะแพลเลเดียม500 และเงินสเตอร์ลิง



รูปที่ 26 รอยต่อระหว่างผิวของแผ่นโลหะทองแดงและแพลเลเดียม500 ชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 750°C ในบรรยากาศแบบออกซิเดชั่น (ก) ระยะเวลายืนอุณหภูมิ 5 ชั่วโมง (ข) ระยะเวลายืนอุณหภูมิ 10 ชั่วโมง (ค) ระยะเวลายืนอุณหภูมิ 5 ชั่วโมง

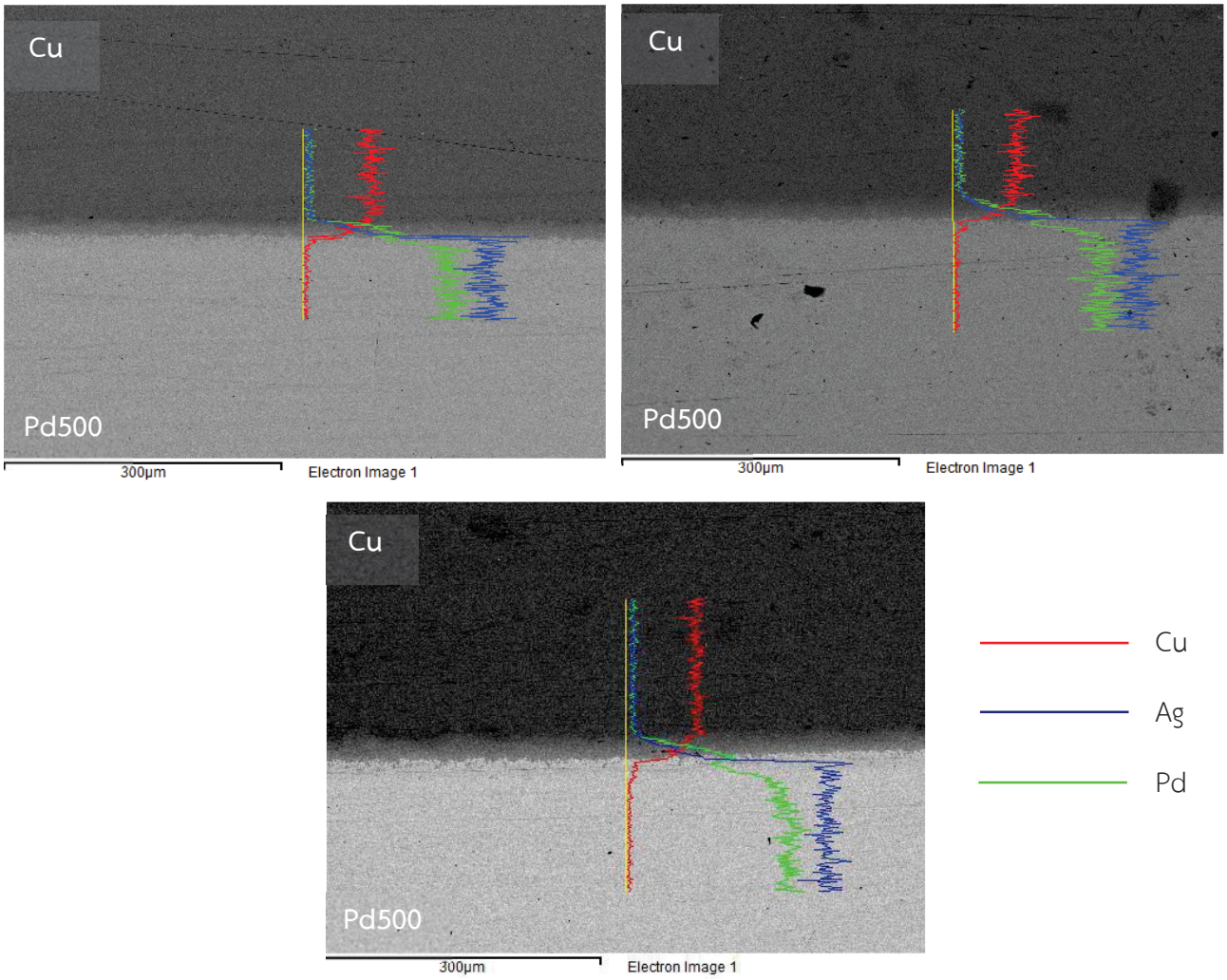


รูปที่ 27 รอยต่อระหว่างผิวของแผ่นโลหะเงินสเตอร์ลิงและทองแดง ชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 750°C ในบรรยากาศแบบออกซิเดชั่น (ก) ระยะเวลายืนอุณหภูมิ 5 ชั่วโมง (ข) ระยะเวลายืนอุณหภูมิ 10 ชั่วโมง (ค) ระยะเวลายืนอุณหภูมิ 5 ชั่วโมง

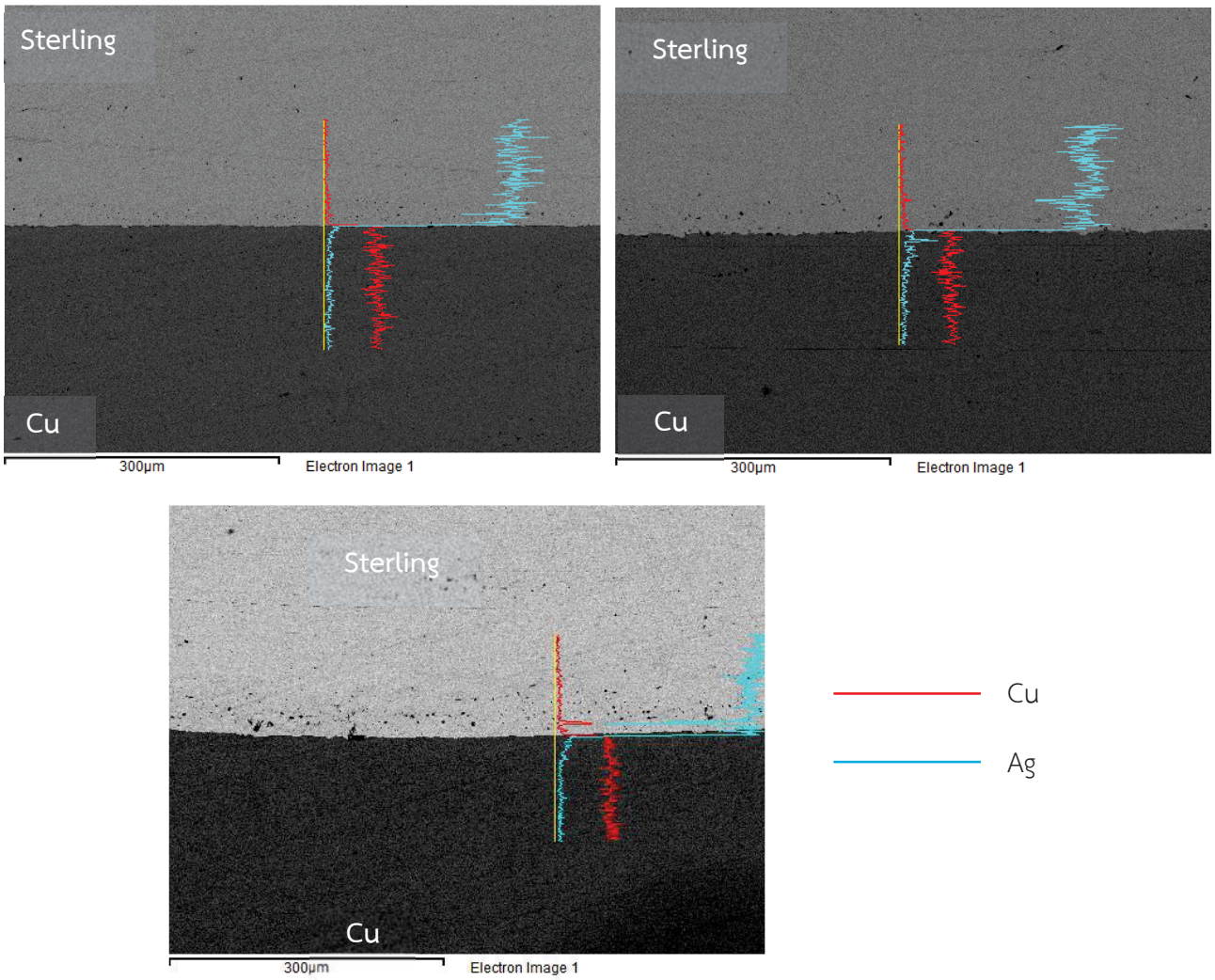


รูปที่ 28 รอยต่อระหว่างผิวของแผ่นโลหะแพลเลเดียม500 และเงินสเตอร์ลิง ชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 750°C ในบรรยากาศแบบออกซิเดชั่น ระยะเวลายืนอุณหภูมิ 15 ชั่วโมง

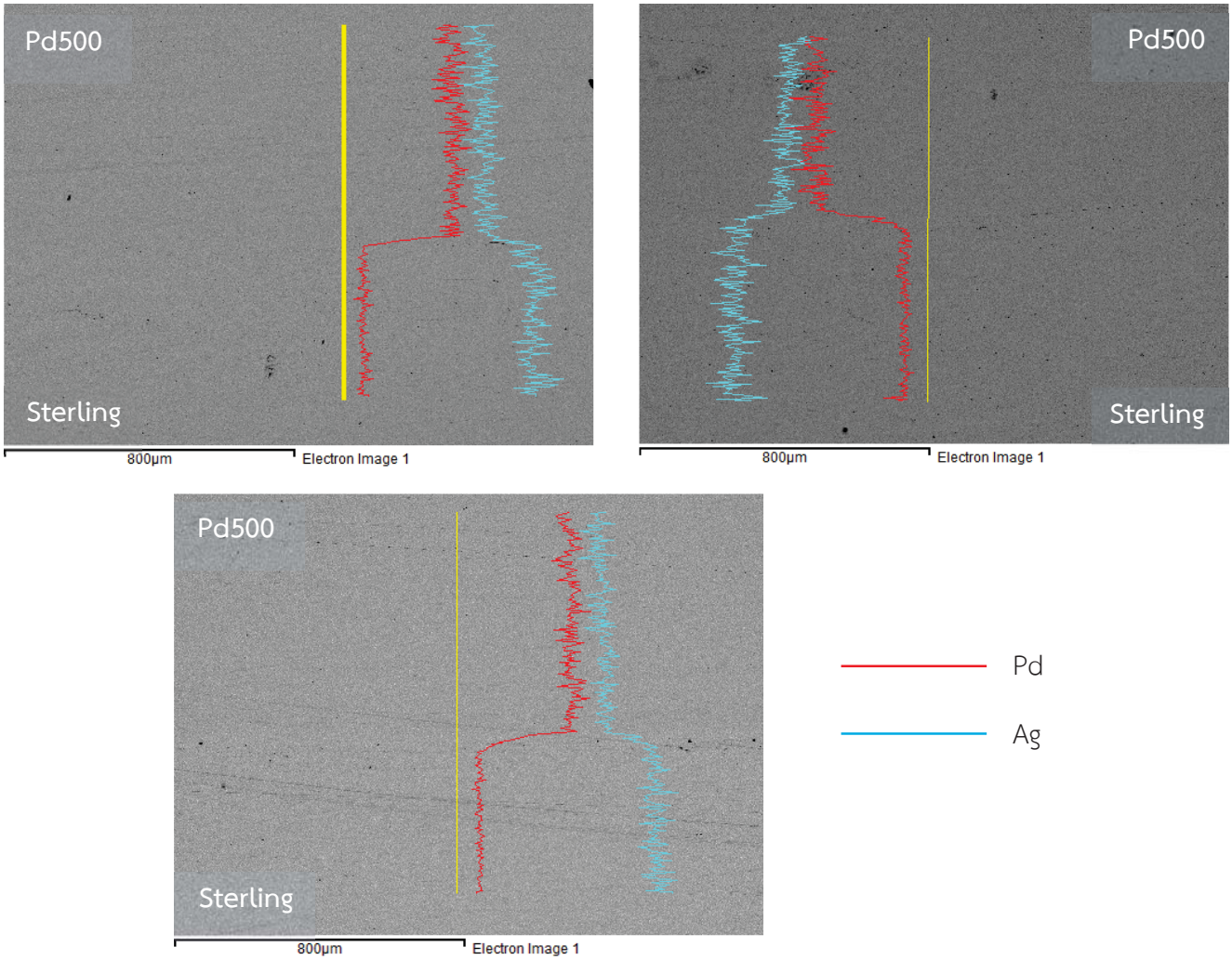
2.2 ผลการวิเคราะห์ระหว่างรอยต่อของผิวหน้าโลหะ ชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 750°C ระยะเวลาในการยืนอุณหภูมิ 5, 10 และ 15 ชั่วโมง ในบรรยากาศแบบรีดักชั่น รูปที่ 29 แสดงรอยต่อระหว่างผิวของแผ่นโลหะทองแดงและแพลเลเดียม500 รูปที่ 30 แสดงรอยต่อระหว่างผิวของแผ่นโลหะเงินสเตอร์ลิงและทองแดง และรูปที่ 31 แสดงรอยต่อระหว่างแผ่นโลหะแพลเลเดียม500และเงินสเตอร์ลิง



รูปที่ 29 รอยต่อระหว่างผิวของแผ่นโลหะทองแดงและแพลเลเดียม500 ชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 750°C ในบรรยากาศแบบรีดักชั่น (ก) ระยะเวลายืนอุณหภูมิ 5 ชั่วโมง (ข) ระยะเวลายืนอุณหภูมิ 10 ชั่วโมง (ค) ระยะเวลายืนอุณหภูมิ 15 ชั่วโมง

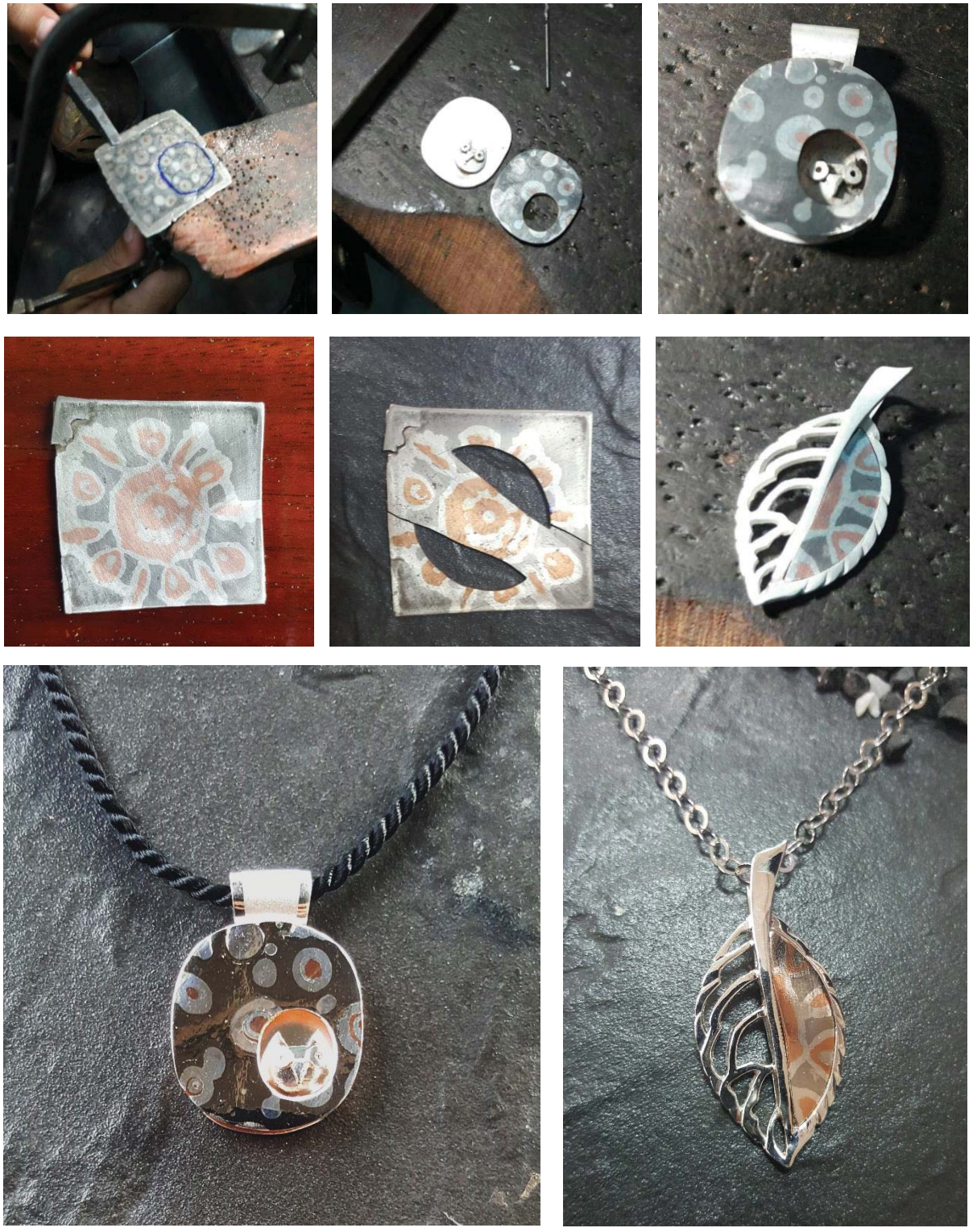


รูปที่ 30 แสดงรอยต่อระหว่างผิวของแผ่นโลหะเงินสเตอร์ลิงและทองแดง ชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 750°C ในบรรยากาศแบบรีดักชั่น (ก) ระยะเวลายืนอุณหภูมิ 5 ชั่วโมง (ข) ระยะเวลายืนอุณหภูมิ 10 ชั่วโมง (ค) ระยะเวลายืนอุณหภูมิ 15 ชั่วโมง



รูปที่ 31 รอยต่อระหว่างผิวของแผ่นโลหะแพลเลเดียม500 และเงินสเตอร์ลิง ชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 750°C ในบรรยากาศแบบออกซิเดชั่น (ก) ระยะเวลายืนอุณหภูมิ 5 ชั่วโมง (ข) ระยะเวลายืนอุณหภูมิ 10 ชั่วโมง (ค) ระยะเวลายืนอุณหภูมิ 15 ชั่วโมง

เครื่องประดับที่ใช้เทคนิคโมกุเม่กาเน่

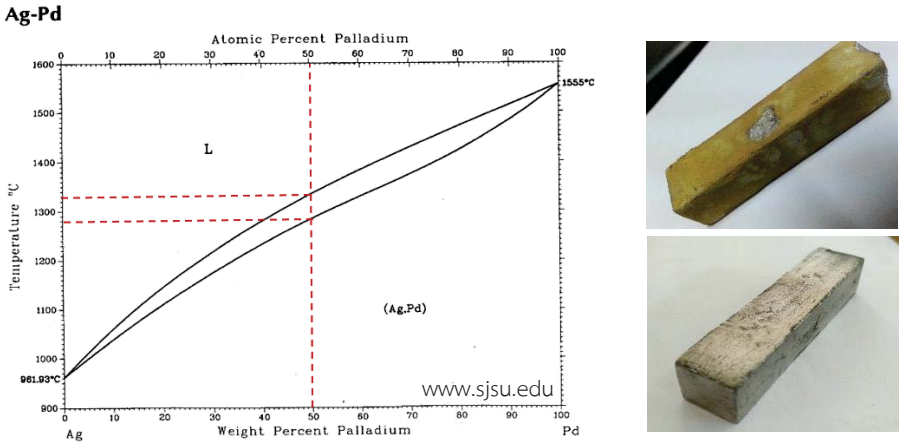


รูปที่ 32 เครื่องประดับที่ใช้เทคนิคโมกุเม่กาเน่

อภิปรายผล

การหล่อโลหะแพลเลเดียม500

โลหะแพลเลเดียมยังไม่เป็นที่นิยมในการนำมาใช้ทำเครื่องประดับในประเทศไทย และมีราคาสูงกว่าราคาตลาดโลก ผู้วิจัยจึงทำการเตรียมโลหะแพลเลเดียม500 ที่ใช้ในการทดลอง โดยใช้อัตราส่วนผสมระหว่างโลหะแพลเลเดียมต่อโลหะเงินเป็น 50 : 50 ด้วยวิธีการหล่อ เนื่องจากจุดหลอมเหลวของแพลเลเดียมสูงถึง 1554°C ไม่สามารถหลอมได้ด้วยหัวเป่าไฟ รูปที่ 33 (ก) เฟสไดอะแกรมระหว่างโลหะเงินและแพลเลเดียม ที่อัตราส่วน 50 : 50 โลหะมีอุณหภูมิหลอมเหลวในช่วงประมาณ 1280 - 1330°C อุณหภูมิในช่วงนี้จะสามารถหลอมโลหะที่ผสมแล้วเท่านั้น จากการทดลองการหล่อแพลเลเดียม500 โดยใช้โลหะบริสุทธิ์ ต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 1500 °C โลหะจึงจะละลายเข้ากันหมด หลังจากการหล่อด้วยอัตราส่วนผสมนี้ได้โลหะมีสีเทา ผิวของชิ้นงานมีการหดตัวไม่เท่ากัน ควรมีการศึกษาการหล่อโลหะแพลเลเดียม500 เพื่อให้สามารถนำมาใช้ในการหล่อเครื่องประดับได้



รูปที่ 33 (ก) เฟสไดอะแกรมระหว่างเงินกับแพลเลเดียม (Ag-Pd) (ข) รูปบนคือแท่งโลหะแพลเลเดียม500 หลังจากการหล่อ รูปล่างคือแท่งโลหะหลังกัดกรดไฮโดรฟลูออริก (HF)

องค์ประกอบของแผ่นโลหะที่ใช้ในการทดลอง

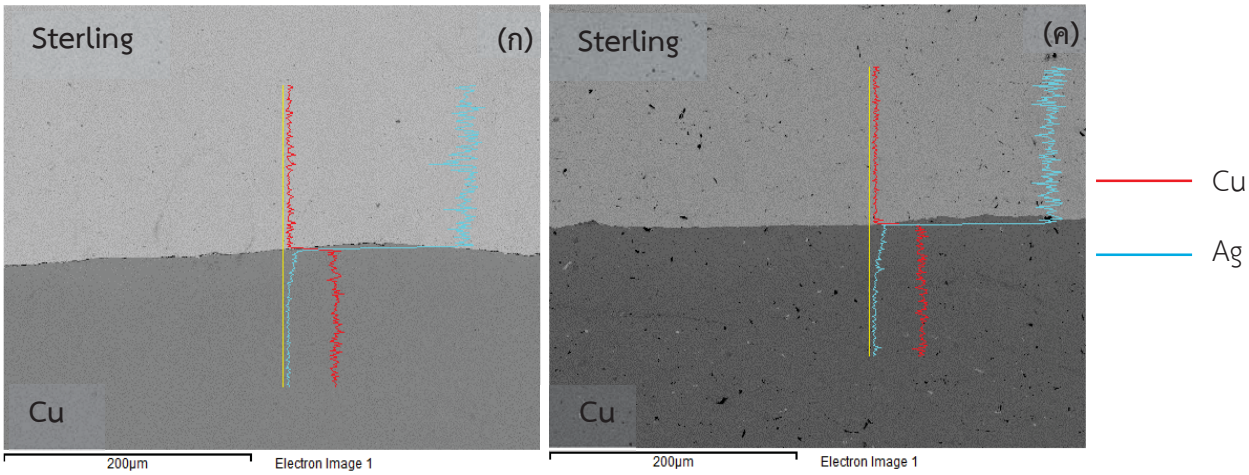
องค์ประกอบของโลหะวิเคราะห์ด้วยด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์สเปกโทรมิเตอร์ แพลเลเดียม 500 มีอัตราส่วนระหว่างแพลเลเดียมต่อโลหะเงินเฉลี่ย 50.35%wt : 49.65%wt แผ่นเงินสเตอร์ลิงที่เตรียมด้วยวิธีการหลอมด้วยหัวเป่าไฟ มีอัตราส่วนระว่างเงินต่อทองแดงเฉลี่ย 96.72%wt : 3.28%wt และแผ่นทองแดงที่ใช้มีความบริสุทธิ์ 100%wt

การวิเคราะห์บริเวณรอยต่อของแผ่นโลหะ

- รอยต่อระหว่างแผ่นโลหะเงินสเตอร์ลิงและทองแดง

รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสงที่แสดงรอยต่อระหว่างแผ่นโลหะเงินสเตอร์ลิงและทองแดงของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 750°C ระยะเวลา 5, 10 และ 15 ชั่วโมง ในบรรยากาศแบบออกซิเดชั่น และรีดักชั่น มีลักษณะแบบเดียวกัน การวิเคราะห์องค์ประกอบบริเวณรอยต่อแสดงให้เห็นลักษณะการแพร่ของโลหะเงินเข้าไปในบริเวณ

แผ่นโลหะทองแดงอย่างชัดเจน แต่การแพร่ของโลหะทองแดงเข้ามาในบริเวณแผ่นเงินสเตอร์ลิงไม่ชัดเจน เนื่องจากในเงินสเตอร์ลิงมีโลหะทองแดงเป็นส่วนผสมอยู่แล้ว รูปที่ 34 แสดงองค์ประกอบของโลหะเงินและทองแดงบริเวณรอยต่อของแผ่นโลหะ อุณหภูมิการอบชิ้นงาน 750°C ระยะเวลา 5 และ 15 ชั่วโมง ในบรรยากาศแบบออกซิเดชั่น พบว่าความชันของสเปกตรัมของโลหะเงินของการอบชิ้นงานที่เวลา 15 ชั่วโมง มากกว่าการอบชิ้นงานที่เวลา 5 ชั่วโมง แสดงว่ามีการแพร่ของโลหะเงินเกิดมากขึ้นเมื่อระยะเวลานานขึ้น

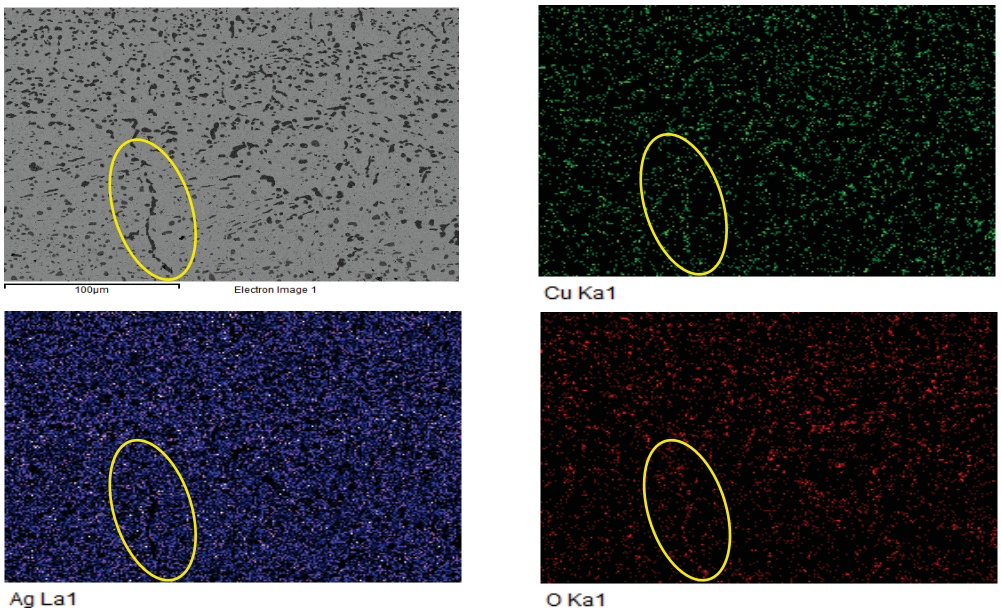


รูปที่ 34 รอยต่อระหว่างแผ่นเงินสเตอร์ลิงและทองแดง อบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 750°C (ก) ระยะเวลาอบชิ้นงาน 5 ชั่วโมง (ข) ระยะเวลาอบชิ้นงาน 15 ชั่วโมง

-รอยต่อระหว่างแผ่นโลหะเงินสเตอร์ลิงและแพลเลเดียม500

รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสงที่แสดงรอยต่อระหว่างแผ่นเงินสเตอร์ลิงและแพลเลเดียม500 อบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 750°C ระยะเวลา 5, 10 และ 15 ชั่วโมง ในบรรยากาศแบบออกซิเดชั่น พบว่าในบริเวณของแผ่นเงินสเตอร์ลิงมีจุดสีดำเกิดขึ้น ตั้งแต่การอบชิ้นงานที่เวลา 5 ชั่วโมง เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น ความหนาของการเกิดจุดสีดำเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน การวิเคราะห์องค์ประกอบบริเวณแผ่นเงินสเตอร์ลิงด้วยเทคนิค SEM/EDS พบว่าจุดสีดำที่เกิดขึ้นเป็นออกไซด์ของทองแดง รูปที่ 35 แสดงองค์ประกอบของธาตุทองแดง ธาตุออกซิเจน และธาตุเงิน ในบริเวณที่เกิดจุดสีดำ

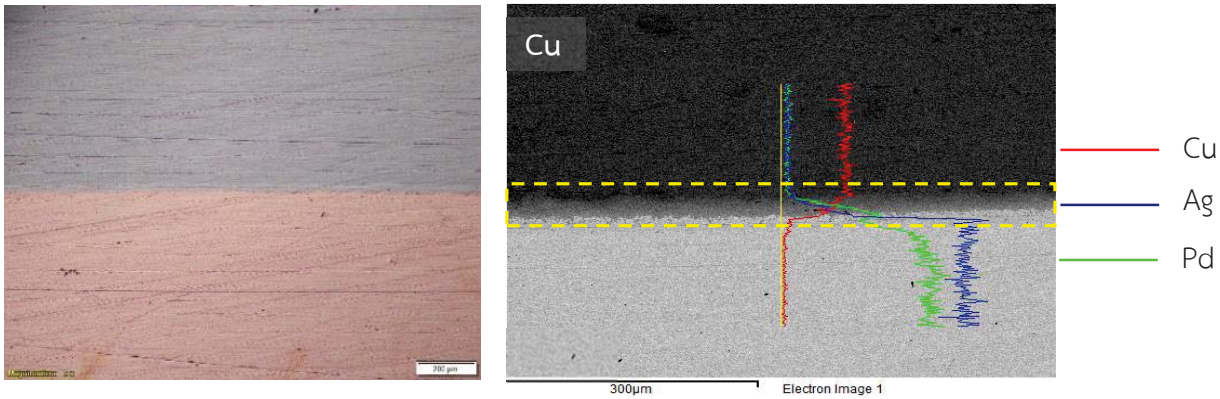
ออกไซด์ทองแดงเกิดขึ้นในขณะที่ให้ความร้อนบริเวณผิวของชิ้นงาน ออกซิเจนจะจับตัวกับทองแดงที่เป็นส่วนผสมในเนื้อเงินสเตอร์ลิงเกิดเป็นออกไซด์ของทองแดงซึ่งมีสีเทา สีดำ หรือสีม่วงแดง การให้ความร้อนสูงเป็นระยะเวลานานเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ออกไซด์ทองแดงเกิดขึ้นบนผิวของเงินสเตอร์ลิง (Deborah E. Love Jemmott, 2005) และทำให้ความเงางามลดลง ส่วนการอบชิ้นงานในบรรยากาศแบบรีดักชั่นที่อุณหภูมิ 750°C ระยะเวลา 5, 10 และ 15 ชั่วโมง ไม่ปรากฏการเกิดออกไซด์ของทองแดง



รูปที่ 35 ออกไซด์ของทองแดงมีลักษณะเป็นจุดสีดำในเนื้อเงินสเตอร์ลิง สามารถดูได้จากแนวเส้นสีดำในวงสีเหลือง ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกับจุดสีเขียวในรูปขวาบนและจุดสีแดงในรูปขวาล่างแสดงถึงโลหะทองแดงและออกซิเจน

- รอยต่อระหว่างแผ่นโลหะทองแดงและแพลเลเดียม500

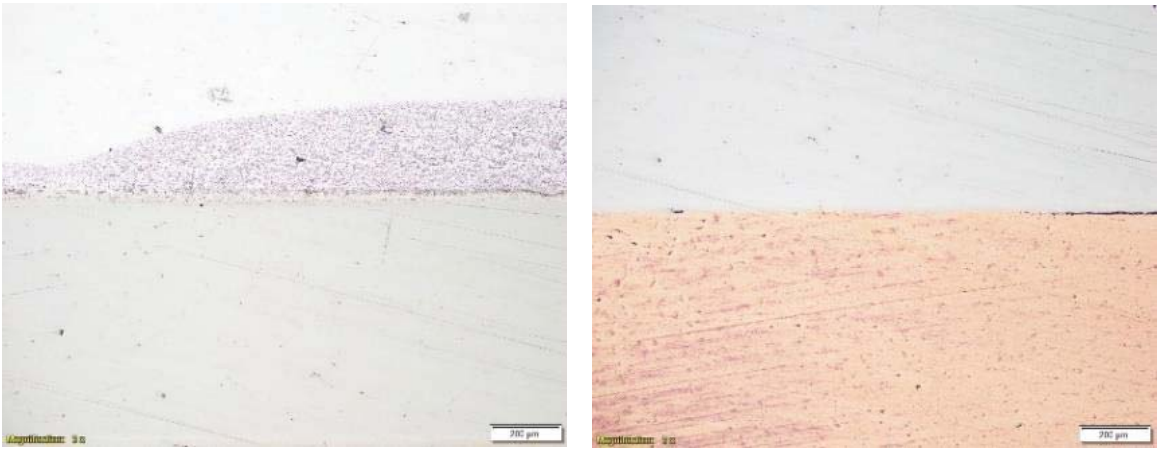
รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสงที่แสดงรอยต่อระหว่างแผ่นโลหะทองแดงและแพลเลเดียม500 อบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 750°C ระยะเวลา 5, 10 และ 15 ชั่วโมง ในบรรยากาศแบบออกซิเดชั่นและรีดักชั่นมีลักษณะแบบเดียวกัน รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศนอิเล็กตรอนแสงแบบส่องกราดแสดงให้เห็นลักษณะการแพร่ของโลหะบริเวณผิวหน้าของรอยต่อมีลักษณะคล้ายการเกิดชั้นฟิล์มในบริเวณกรอบสีเหลือง แสดงในรูปที่ 36 และพบว่าเส้นสเปกตรัมสีเขียวซึ่งแทนปริมาณแพลเลเดียมลดลงอย่างรวดเร็วก่อนถึงบริเวณที่เกิดชั้นฟิล์ม และเพิ่มขึ้นสูงในบริเวณชั้นฟิล์ม และค่อยๆ ลดลงเมื่อเข้าไปใกล้แผ่นทองแดงมากขึ้น โลหะเงินและทองแดงมีลักษณะการแพร่ปกติ



รูปที่ 36 บริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นโลหะทองแดงและแพลเลเดียม500 ชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 750°C ระยะเวลา 15 ชั่วโมง

จากข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการทดลองชี้ให้เห็นว่าการทำแท่งโมกุเม่กาเน่จากโลหะแพลเลเดียม500 เงินสเตอร์ลิง และทองแดง ที่อุณหภูมิ 750°C ควรใช้บรรยากาศแบบรีดักชั่น เนื่องจากการเกิดออกไซด์ของทองแดงในเนื้อเงินสเตอร์ลิงชั้นที่อยู่ติดกับแพลเลเดียม500 ทำความแวววาวของเนื้อโลหะหายไป และไม่สามารถแก้ไขได้ด้วยการขัดออกเหมือนการเกิดคราบออกไซด์ของทองแดงในชิ้นงานจากกระบวนการหล่อที่จะเกิดคราบออกไซด์ทองแดงที่บริเวณผิวเท่านั้น เพราะในการทำแท่งโลหะโมกุเม่กาเน่ใช้ระยะเวลาในการอบชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน การใช้ระยะเวลาในการให้ความร้อนนานมากขึ้นแม้ว่าจะทำให้การแพร่ของโลหะบริเวณผิวหน้ามากขึ้น แต่ทำให้ชั้นของการเกิดออกไซด์ทองแดงในเนื้อเงินสเตอร์ลิงมากขึ้นเช่นเดียวกัน

บริเวณรอยต่อของชั้นเงินสเตอร์ลิงและทองแดงในการทำแท่งโมกุเม่กาเน่ ทั้งในบรรยากาศแบบออกซิเดชั่นและรีดักชั่นที่อุณหภูมิ 750°C ไม่พบการเกิดออกไซด์ทองแดงในเนื้อเงินเสอร์ลิง แสดงให้เห็นว่าถ้าใช้โลหะเพียง 2 ชนิดนี้ สามารถทำแท่งโลหะได้ในบรรยากาศแบบออกซิเดชั่นได้ แต่ในการทำแท่งโลหะโมกุเม่กาเน่จากโลหะเงินสเตอร์ลิงและแพลเลเดียม500 ไม่ควรใช้บรรยากาศแบบออกซิเดชั่น เนื่องจากการเกิดออกไซด์ทองแดงในเนื้อเงินสเตอร์ลิง บริเวณรอยต่อของผิวโลหะของชิ้นงานซึ่งอบที่อุณหภูมิ 750°C ระยะเวลา 15 ชั่วโมง แสดงในรูปที่ 37 (ก) รอยต่อระหว่างเงินสเตอร์ลิงกับทองแดง และรูปที่ 37 (ข) รอยต่อระหว่างเงินสเตอร์ลิงกับแพลเลเดียม 500



รูปที่ 37 บริเวณรอยต่อของผิวโลหะ ชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 750°C ระยะเวลา 15 ชั่วโมง (ก) รอยต่อระหว่างเงินสเตอร์ลิงกับทองแดง และรูปที่ 37 (ข) รอยต่อระหว่างเงินสเตอร์ลิงกับแพลเลเดียม500

ในขั้นตอนของกระบวนการสร้างลวดลายบนแผ่นโลหะพบว่าหลังจากทำการเจาะลายแล้วนำโลหะไปรีดชั้นของโลหะอาจจะมีการหลุดออกจากกัน แม้ว่าชิ้นงานนั้นจะใช้เวลาในการอบชิ้นงานนานกว่า ก่อนทำการรีดแผ่นโลหะให้เกิดลายต้องมีการให้ความร้อนกับชิ้นงานก่อน และค่อยๆ รีดลดความหนาของแผ่นโลหะลง รอยแยกของชั้นโลหะจะเริ่มเกิดขึ้นจากบริเวณขอบนอกสุดก่อน เมื่อพบว่าเริ่มมีการแยกระหว่างชั้นของโลหะเกิดขึ้นให้ทำการเลื่อยตัดบริเวณส่วนนั้นออกทันทีจะช่วยลดความเสียหายให้กับแผ่นชิ้นงานได้

เอกสารอ้างอิง

ปริญญา ชินดุษฎีกุล, พิมพ์ทอง ทองนพคุณ, ดาวรรณ หมัดหลี และอรุณี เทิดเทพพิทักษ์. (2556). รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์เรื่อง “การผลิตเครื่องประดับโลหะหลากสีด้วยเทคนิคโมกุเม่กาเน่”. มหาวิทยาลัยบูรพา.

ปริศนา บุญศักดิ์, รายงานผลการวิจัยเรื่อง “การวิจัยปัญหาในงานหล่อและการพัฒนาแนวทางการแก้ไขปัญหาในงานหล่อเครื่องประดับสมัยใหม่”. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.

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

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

Binnion, J. (2016). Mokumé Gane: Step by Step. [online]. Available. http://www.mjsa.org/publicationsmedia/mjsa_journal/painting_in_metals/step_by_step (15 June 2016)

Brian, M. Seamless Mokume-Gane Rings. [on line]. Available. http://www.alberic.net/Student_Home/Handout_Archive/files/Mokume%20Rings-V1.5-STD.pdf (15 June 2016)

Chris Ploof & Stewart Grice. Mokume Gane firing methods and their effects on appearances and bond strengths. The 24th Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology: 2010 May: 391-414.

Deborah E. L. J. (2005). Firescale on silver. Available. http:// www.debjemmott.com/Home_files/Firescale.pdf. (15 June 2016)

Grace, H. MA. (2006). Solid state diffusion bonded Damascus steel and its role within custom knifemaking. [on line]. Available. http:// www.gracehorne.co.uk/download/?file=workspace/uploads/documents/...pdf (15 June 2016)

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

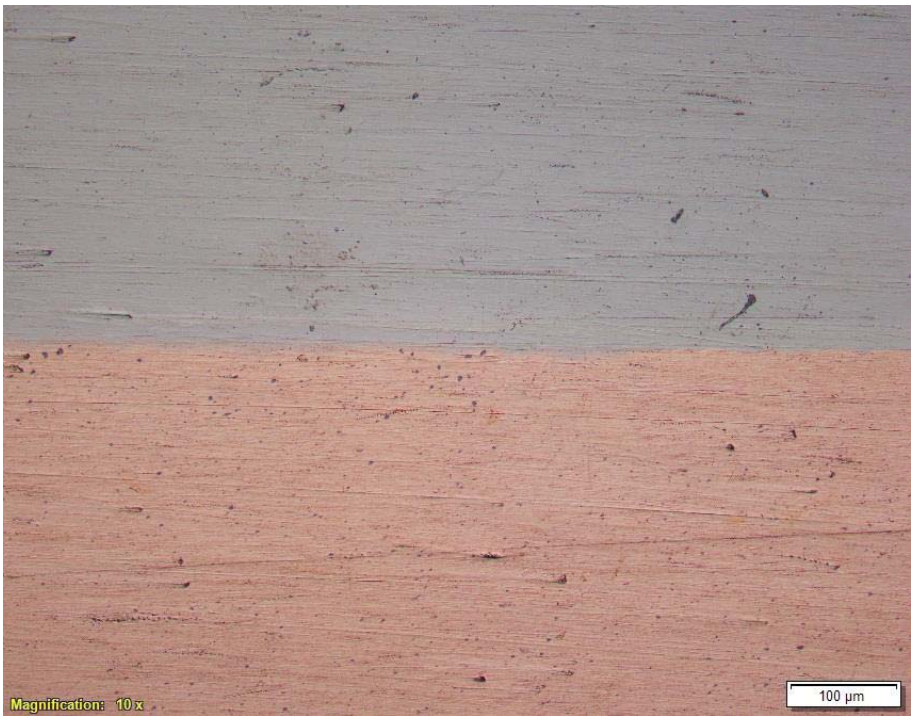
Kageeporn W., Prasarn J., Tipsuda S.i, & Panphot R. (2012). Mokume Gane Processes as a Mass Production in Jewelry Industry. In Proceedings of The 3rd International Gem & Jewelry Conference (GIT2012). Bangkok: Thailand.

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

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

ภาคผนวก ก

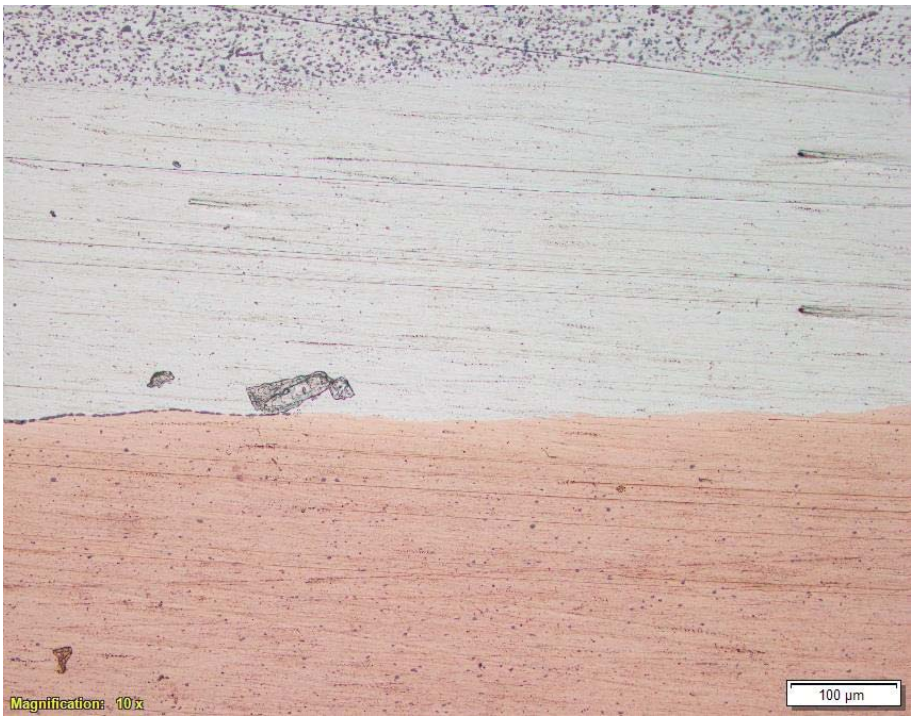
รูปที่ ก-1 ทองแดง/แพลเลเดียม500 อุณหภูมิ 750^{O}C บรรยากาศแบบออกซิเดชั่น ยืนอุณหภูมิ 5 ชั่วโมง



รูปที่ ก-2 ทองแดง/แพลเลเดียม500 อุณหภูมิ 750^{O}C บรรยากาศแบบออกซิเดชั่น ยืนอุณหภูมิ 10 ชั่วโมง

รูปที่ ก-3 ทองแดง/แพลเลเดียม500 อุณหภูมิ 750^{O}C บรรยากาศแบบออกซิเดชั่น ยืนอุณหภูมิ 15 ชั่วโมง

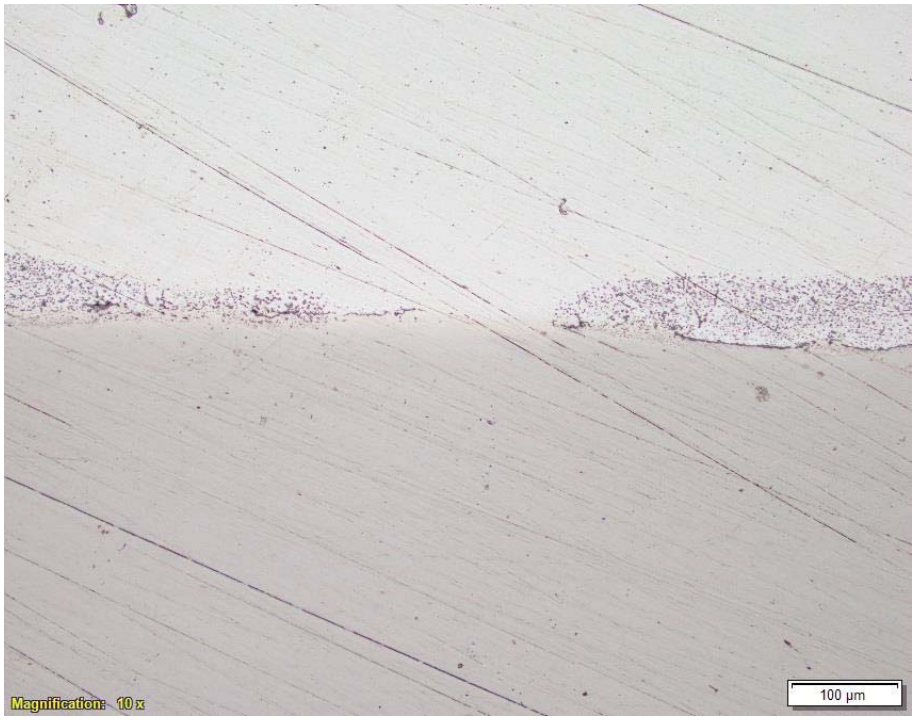
รูปที่ ก-4 ทองแดง/เงินสเตอร์ลิง อุณหภูมิ 750^{O}C บรรยากาศแบบออกซิเดชั่น ยืนอุณหภูมิ 5 ชั่วโมง



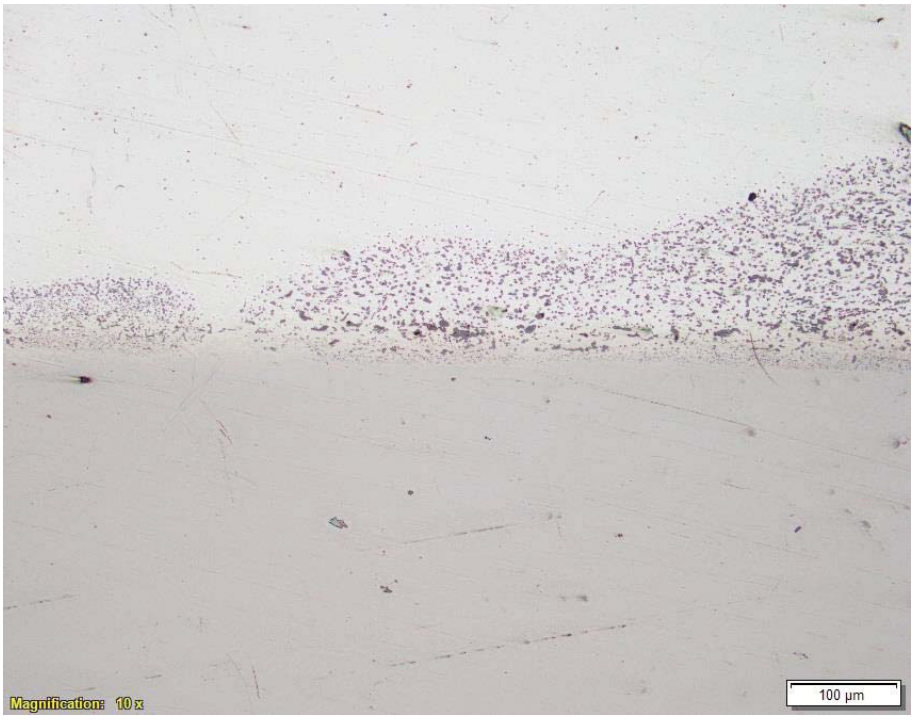
รูปที่ ก-5 ทองแดง/เงินสเตอร์ลิง อุณหภูมิ 750^{O}C บรรยากาศแบบออกซิเดชั่น ยืนอุณหภูมิ 10 ชั่วโมง

รูปที่ ก-6 ทองแดง/เงินสเตอร์ลิง อุณหภูมิ 750^{O}C บรรยากาศแบบออกซิเดชั่น ยืนอุณหภูมิ 15 ชั่วโมง

.

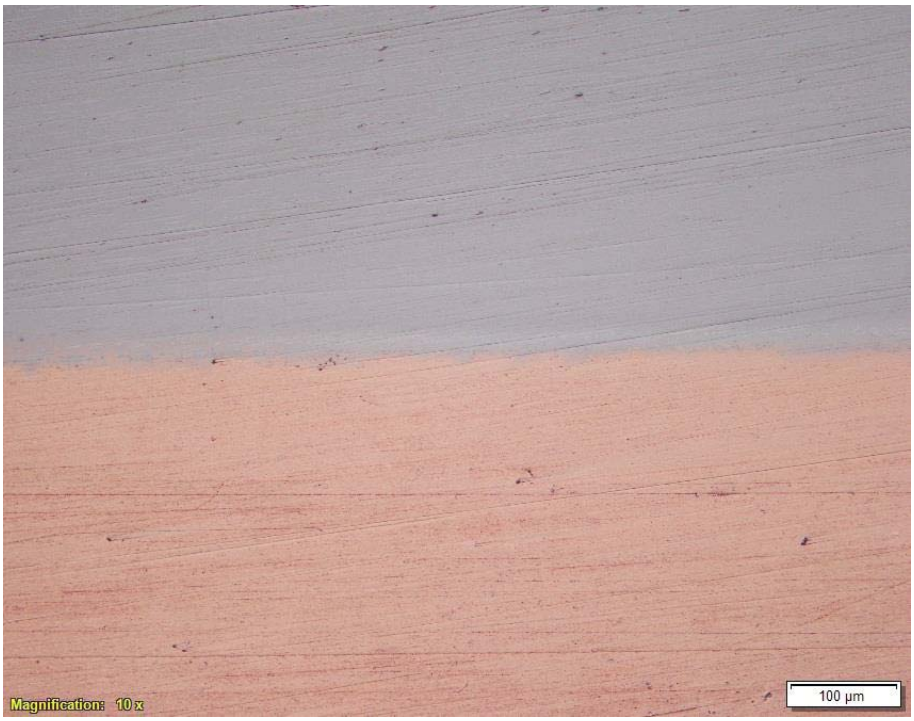


รูปที่ ก-7 แพลเลเดียม500/เงินสเตอร์ลิง อุณหภูมิ 750^{O}C บรรยากาศแบบออกซิเดชั่น ยืนอุณหภูมิ 5 ชั่วโมง



รูปที่ ก-8 แพลเลเดียม500/เงินสเตอร์ลิง อุณหภูมิ 750^{O}C บรรยากาศแบบออกซิเดชั่น ยืนอุณหภูมิ 10 ชั่วโมง

รูปที่ ก-9 แพลเลเดียม500/เงินสเตอร์ลิง อุณหภูมิ 750^{O}C บรรยากาศแบบออกซิเดชั่น ยืนอุณหภูมิ 15 ชั่วโมง



รูปที่ ก-10 ทองแดง/แพลเลเดียม500 อุณหภูมิ 750^{O}C บรรยากาศแบบรีดักชั่น ยืนอุณหภูมิ 5 ชั่วโมง

รูปที่ ก-11 ทองแดง/แพลเลเดียม500 อุณหภูมิ 750^{O}C บรรยากาศแบบรีดักชั่น ยืนอุณหภูมิ 10 ชั่วโมง

รูปที่ ก-12 ทองแดง/แพลเลเดียม500 อุณหภูมิ 750^{O}C บรรยากาศแบบรีดักชั่น ยืนอุณหภูมิ 15 ชั่วโมง

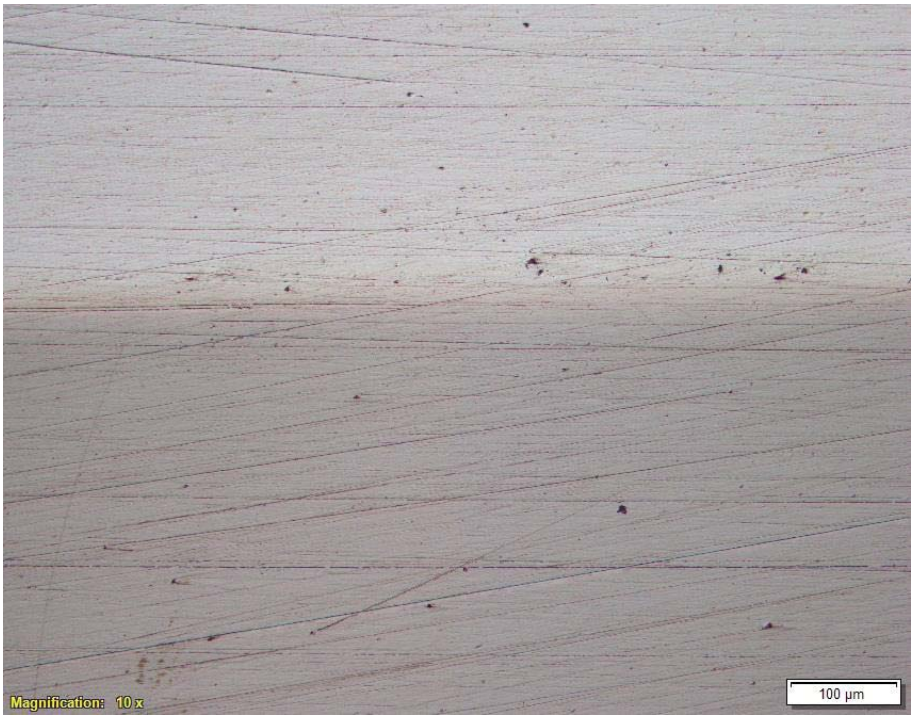
รูปที่ ก-13 ทองแดง/เงินสเตอร์ลิง อุณหภูมิ 750^{O}C บรรยากาศแบบรีดักชั่น ยืนอุณหภูมิ 5 ชั่วโมง

รูปที่ ก-14 ทองแดง/เงินสเตอร์ลิง อุณหภูมิ 750^{O}C บรรยากาศแบบรีดักชั่น ยืนอุณหภูมิ 10 ชั่วโมง

รูปที่ ก-15 ทองแดง/เงินสเตอร์ลิง อุณหภูมิ 750^{O}C บรรยากาศแบบรีดักชั่น ยืนอุณหภูมิ 15 ชั่วโมง

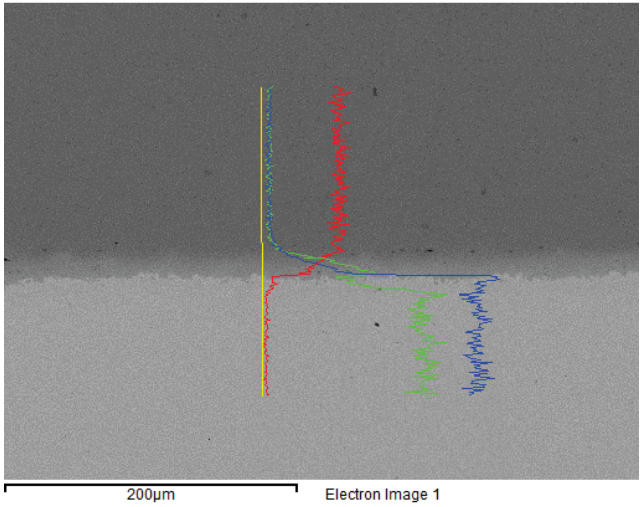
รูปที่ ก-16 แพลเลเดียม500/เงินสเตอร์ลิง อุณหภูมิ 750^{O}C บรรยากาศแบบรีดักชั่น ยืนอุณหภูมิ 5 ชั่วโมง

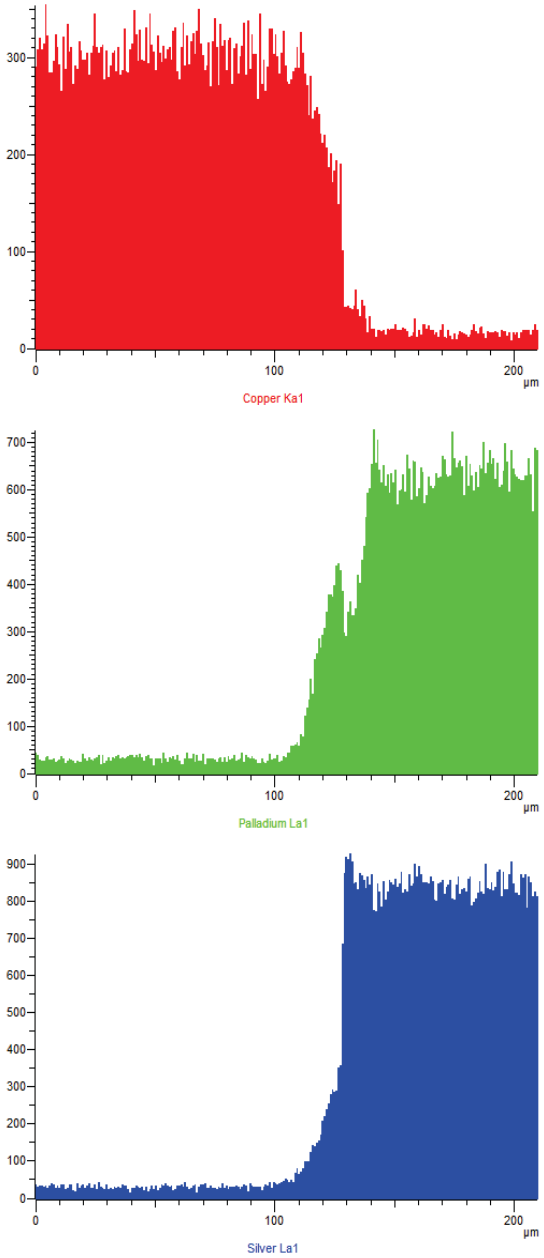
รูปที่ ก-17 แพลเลเดียม500/เงินสเตอร์ลิง อุณหภูมิ 750^{O}C บรรยากาศแบบรีดักชั่น ยืนอุณหภูมิ 10 ชั่วโมง



รูปที่ ก-18 แพลเลเดียม500/เงินสเตอร์ลิง อุณหภูมิ 750^{O}C บรรยากาศแบบรีดักชั่น ยืนอุณหภูมิ 15 ชั่วโมง

ภาคผนวก ข

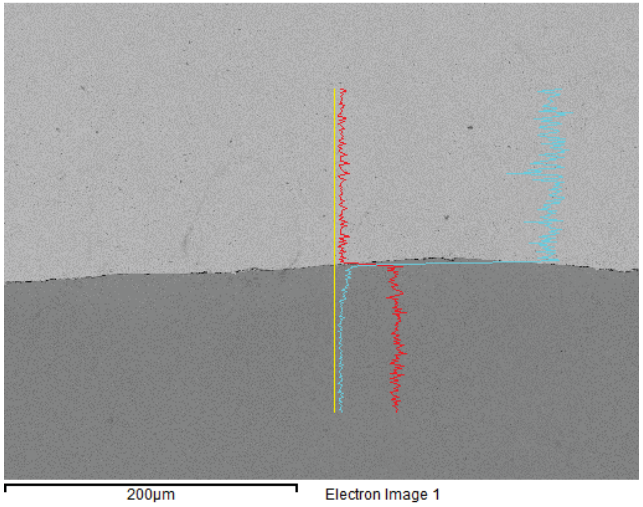


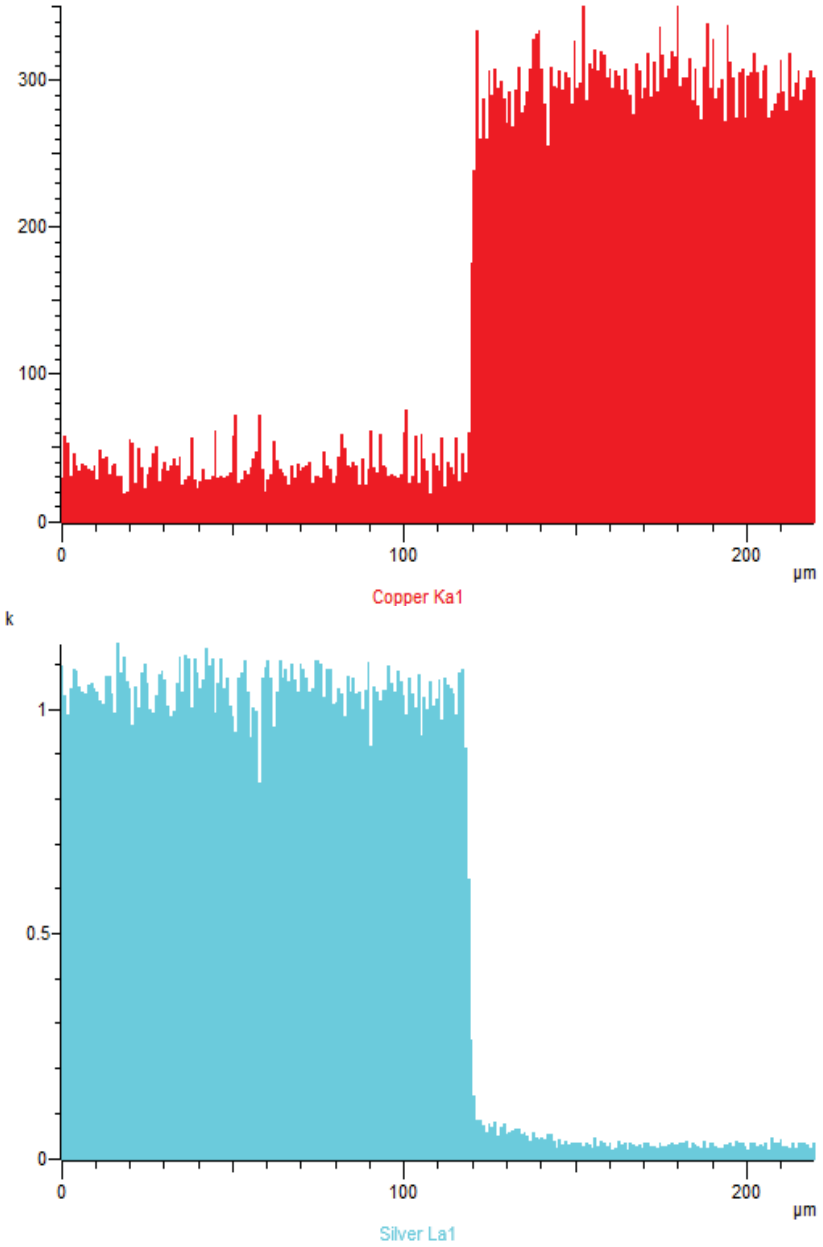


รูปที่ ข-1 บริเวณรอยต่อระหว่างทองแดงและแพลเลเดียม500 ชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 750°C ระยะเวลา 5 ชั่วโมง บรรยากาศออกซิเดชั่น

ชิ้นบน: ทองแดง
ชิ้นล่าง: แพลเลเดียม500

OXFORD INSTRUMENTS
The Business of Science®

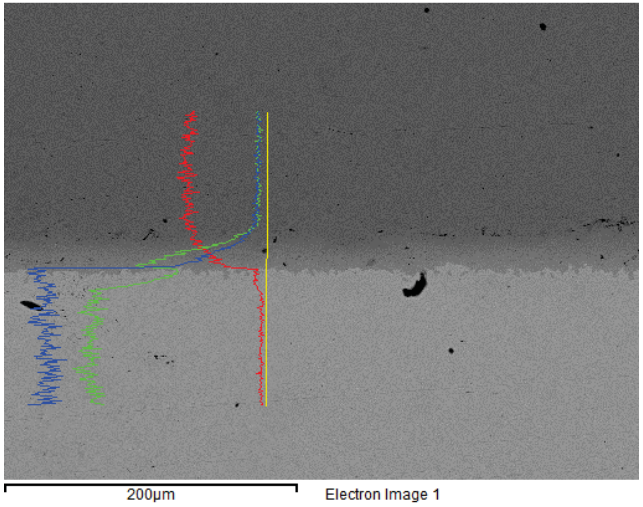


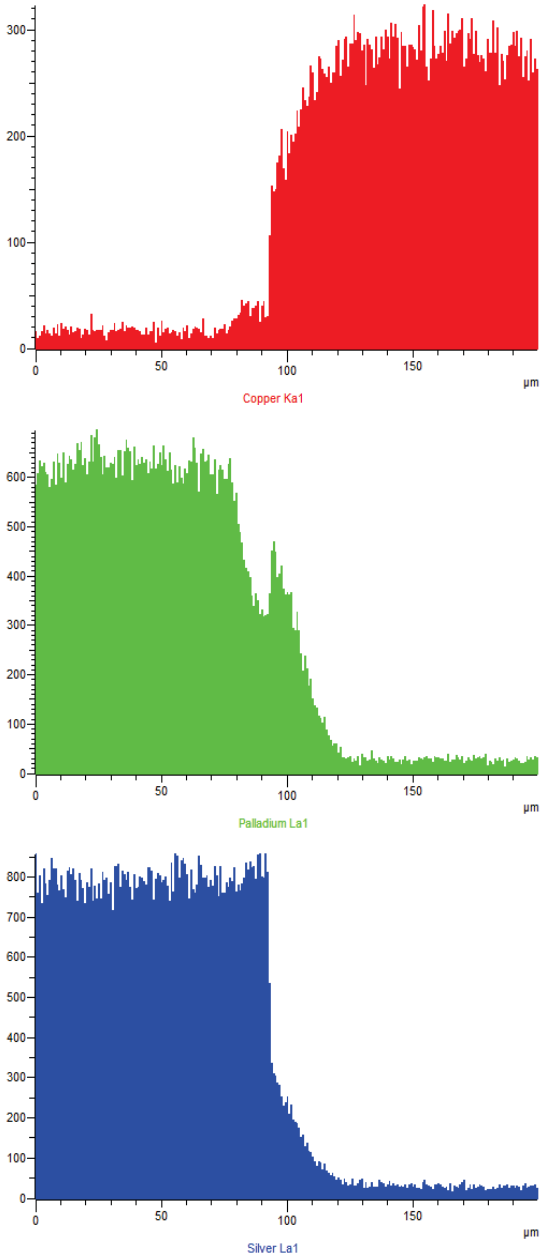


รูปที่ ข-2 บริเวณรอยต่อระหว่างเงินสเตอร์ลิงและทองแดง ชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 750°C ระยะเวลา 5 ชั่วโมง บรรยากาศออกซิเดชั่น

ชิ้นบน: เงินสเตอร์ลิง
ชิ้นล่าง: ทองแดง

OXFORD INSTRUMENTS
The Business of Science®

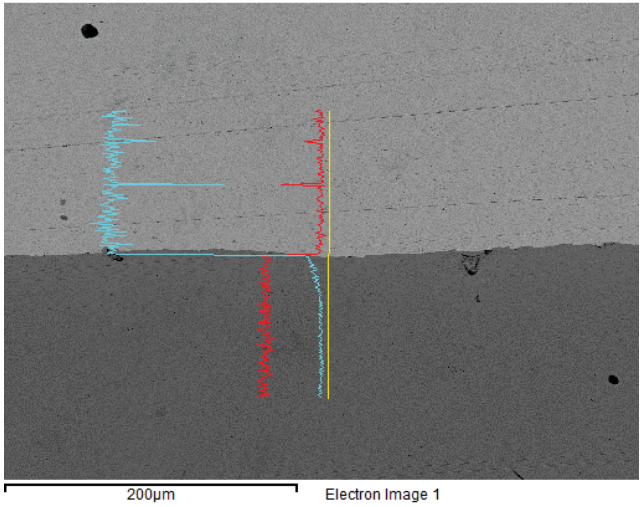


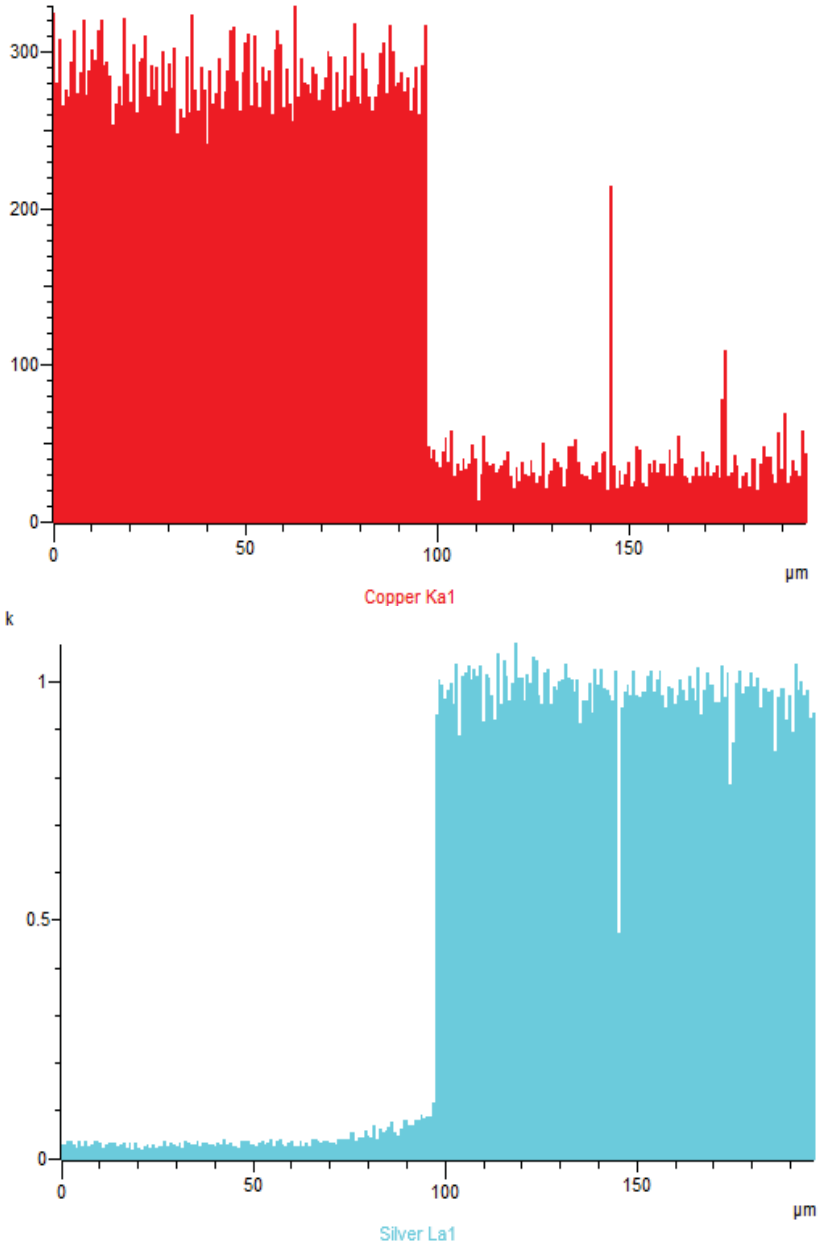


รูปที่ ข-3 บริเวณรอยต่อระหว่างทองแดงและแพลเลเดียม500 ชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 750°C ระยะเวลา 10 ชั่วโมง บรรยากาศออกซิเดชั่น

ชิ้นบน: ทองแดง
ชิ้นล่าง: แพลเลเดียม500

OXFORD INSTRUMENTS
The Business of Science®

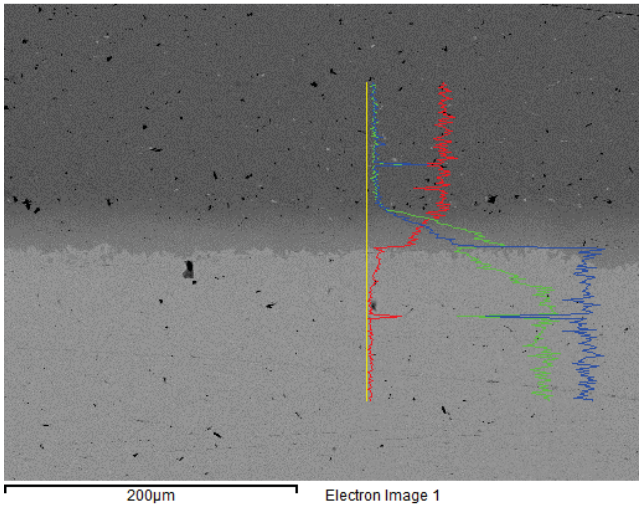


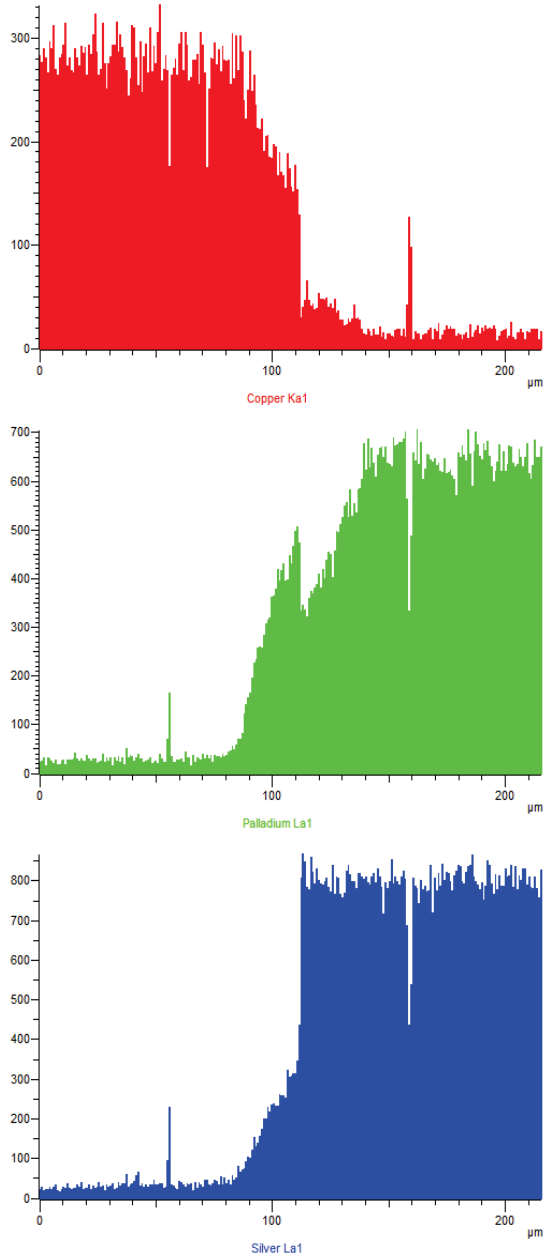


รูปที่ ข-4 บริเวณรอยต่อระหว่างเงินสเตอร์ลิงและทองแดง ชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 750°C ระยะเวลา 10 ชั่วโมง บรรยากาศออกซิเดชั่น

ชิ้นบน: เงินสเตอร์ลิง
ชิ้นล่าง: ทองแดง

OXFORD INSTRUMENTS
The Business of Science®

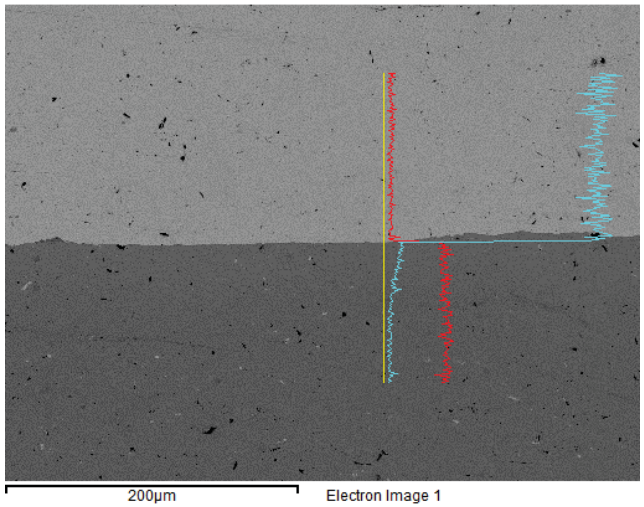


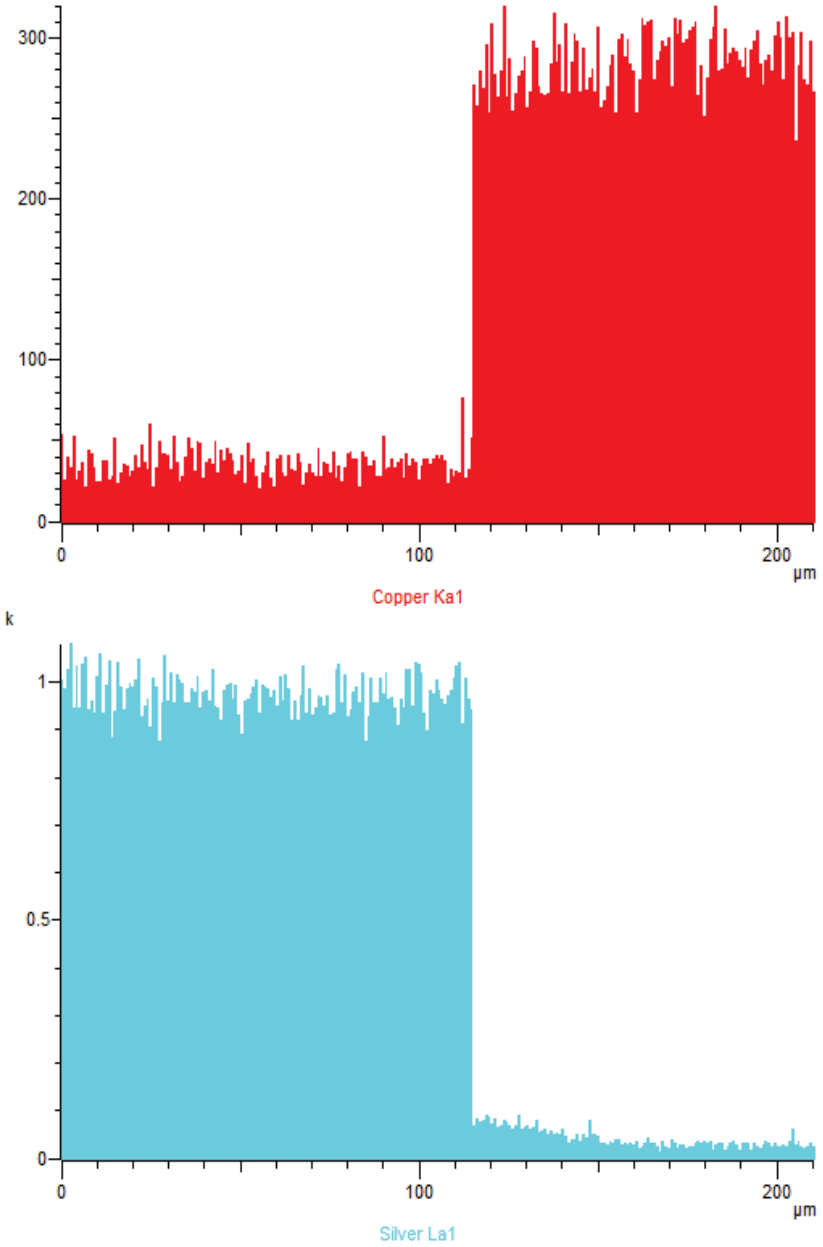


รูปที่ ข-5 บริเวณรอยต่อระหว่างทองแดงและแพลเลเดียม500 ชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 750°C ระยะเวลา 15 ชั่วโมง บรรยากาศออกซิเดชั่น

ชิ้นบน: ทองแดง
ชิ้นล่าง: แพลเลเดียม500

OXFORD INSTRUMENTS
The Business of Science®

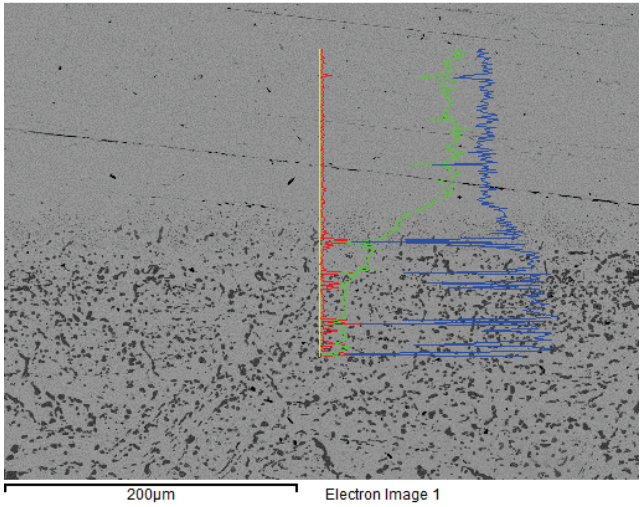


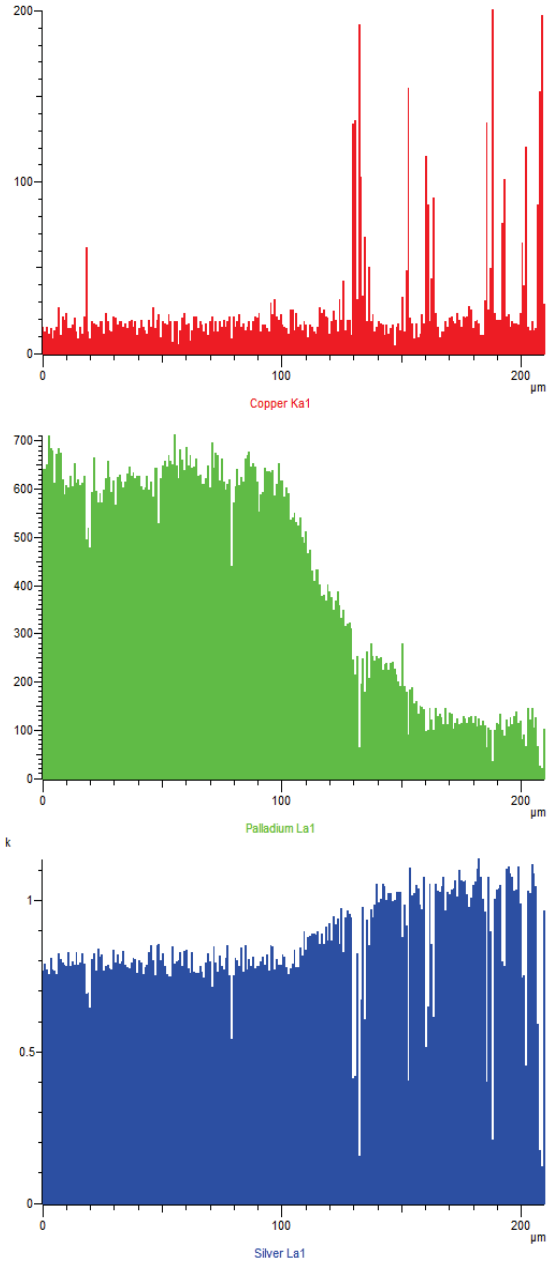


รูปที่ ข-6 บริเวณรอยต่อระหว่างเงินสเตอร์ลิงและทองแดง ชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 750°C ระยะเวลา 15 ชั่วโมง บรรยากาศออกซิเดชั่น

ชิ้นบน: เงินสเตอร์ลิง
ชิ้นล่าง: ทองแดง

OXFORD INSTRUMENTS
The Business of Science®

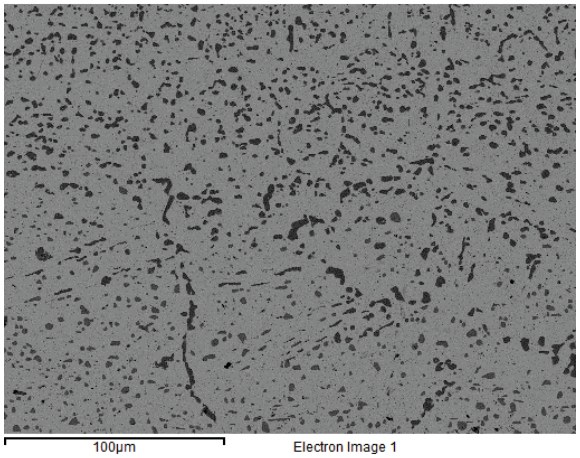


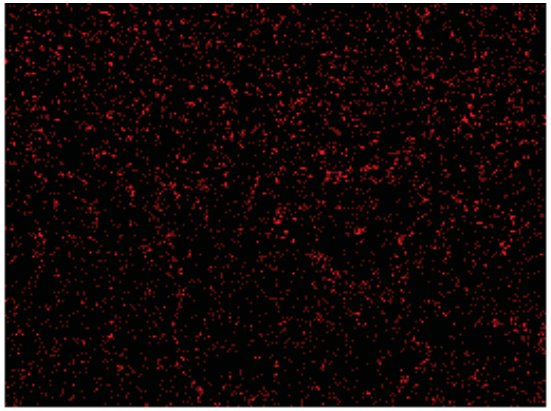


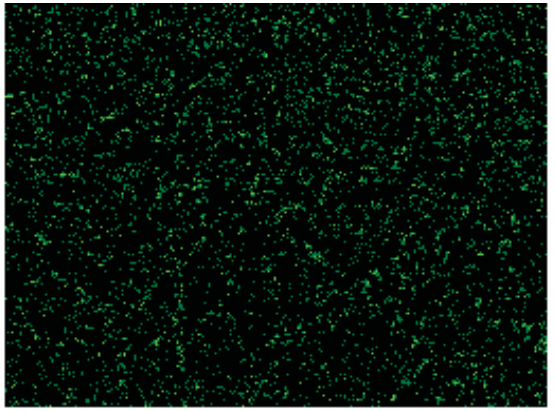
รูปที่ ข-7 บริเวณรอยต่อระหว่างแพลเลเดียม500 และเงินสเตอร์ลิง ชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 750°C ระยะเวลา 15 ชั่วโมง บรรยากาศออกซิเดชั่น

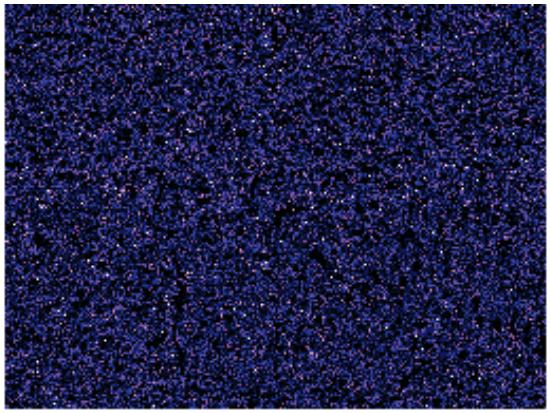
ชิ้นบน: แพลเลเดียม500
ชิ้นล่าง: เงินสเตอร์ลิง

OXFORD INSTRUMENTS
The Business of Science®



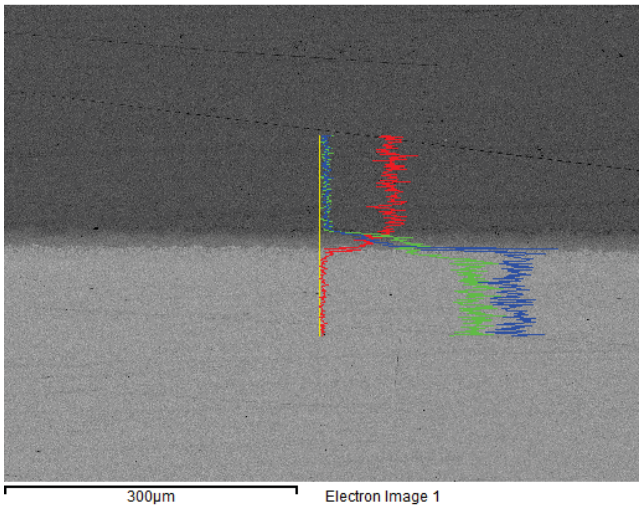

O Ka1

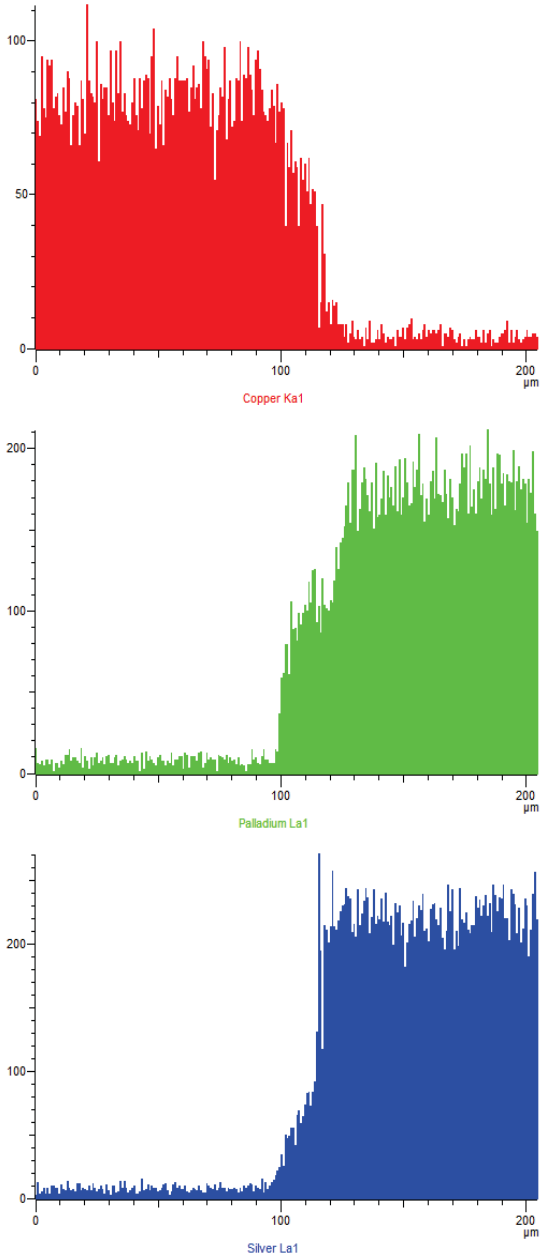

Cu Ka1


Ag La1

รูปที่ ข-8 ผลการวิเคราะห์บริเวณที่เกิดจุดสีดำในเนื้อเงินสเตอร์ลิง

OXFORD INSTRUMENTS
The Business of Science®

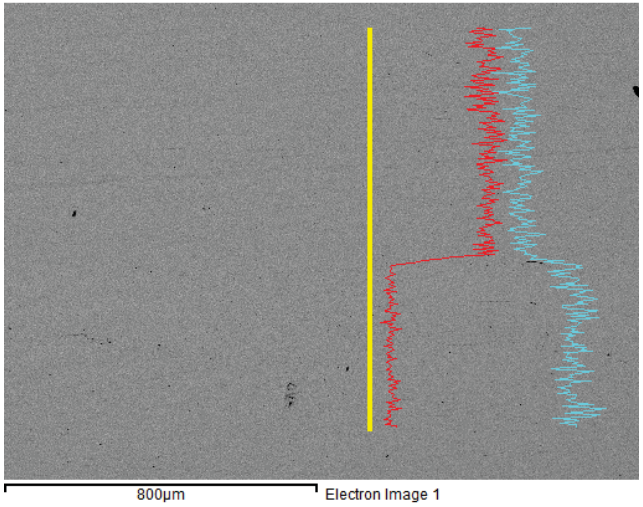


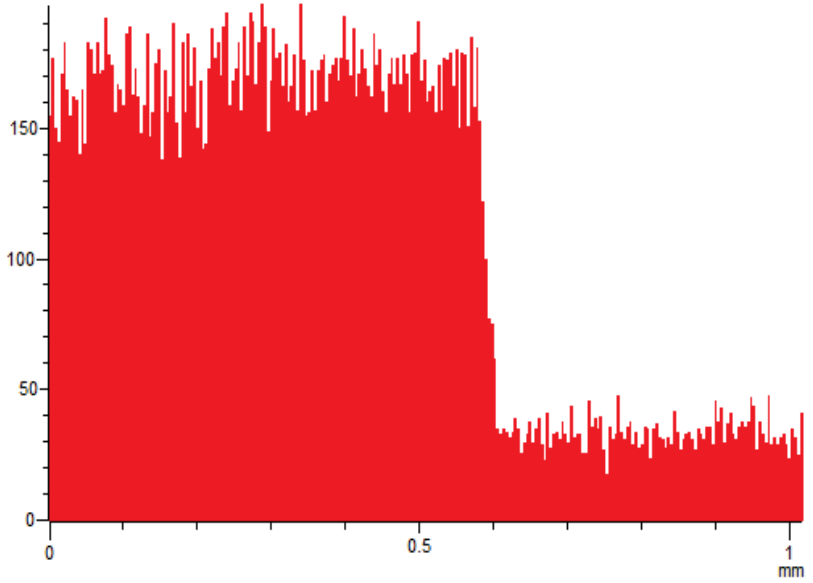


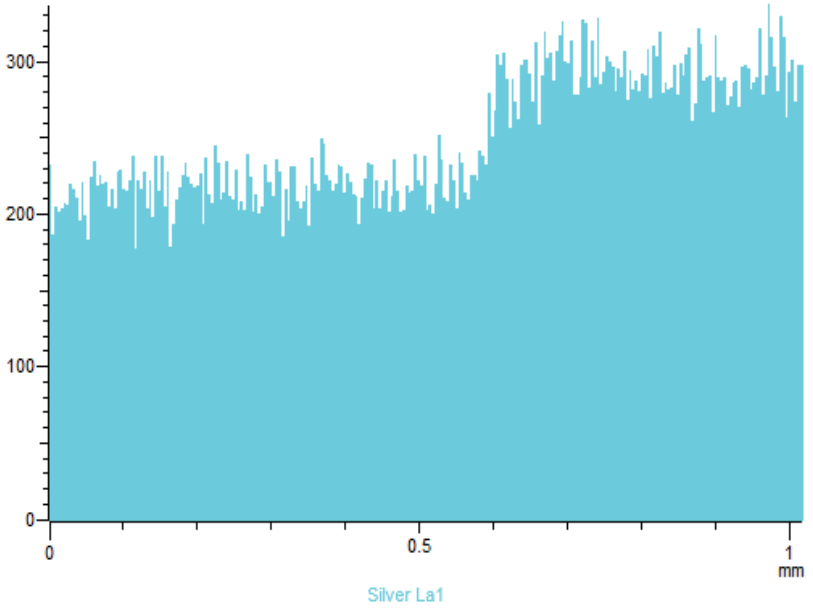
รูปที่ ข-9 บริเวณรอยต่อระหว่างทองแดงและแพลเลเดียม500 ชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 750°C ระยะเวลา 5 ชั่วโมง บรรยากาศแบบรีดักชั่น

ชิ้นบน: ทองแดง
ชิ้นล่าง: แพลเลเดียม500

OXFORD INSTRUMENTS
The Business of Science®



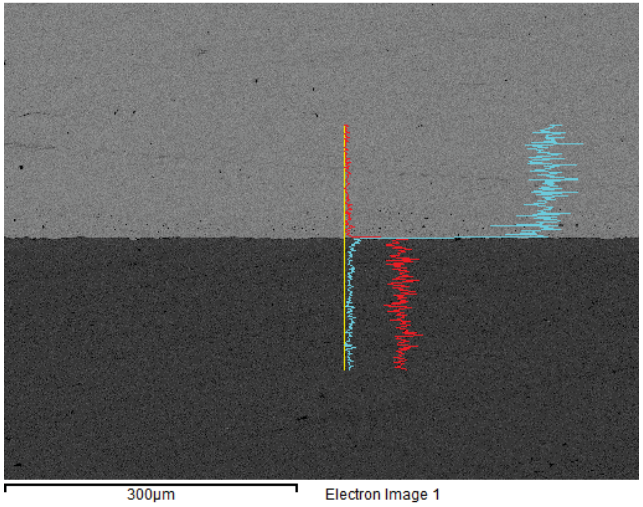


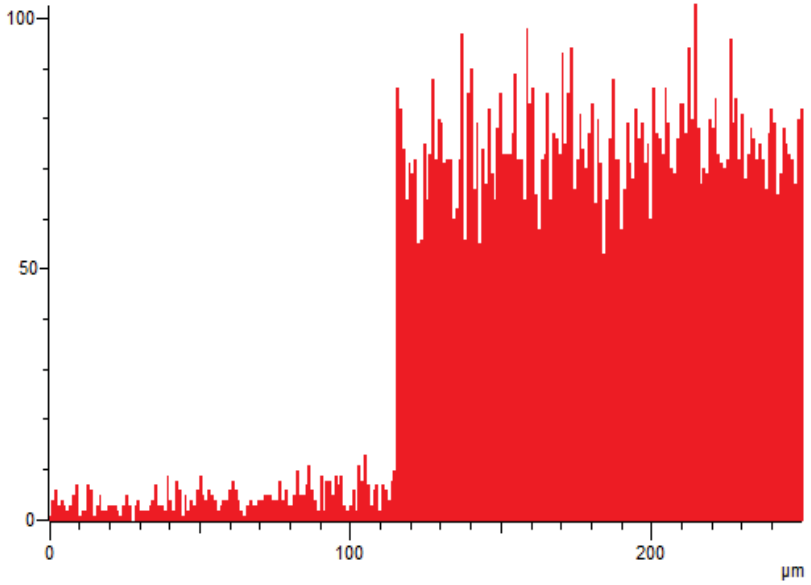


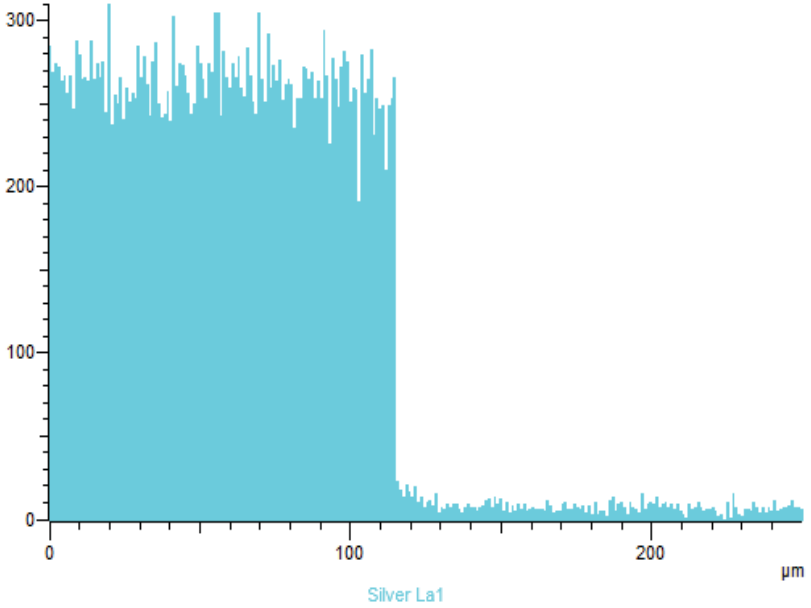
รูปที่ ข-10 บริเวณรอยต่อระหว่างแพลเลเดียม 500และเงินสเตอร์ลิง ชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 750°C ระยะเวลา 5 ชั่วโมง บรรยากาศแบบรีดักชั่น

ชิ้นบน: แพลเลเดียม 500
ชิ้นล่าง: เงินสเตอร์ลิง

OXFORD INSTRUMENTS
The Business of Science®



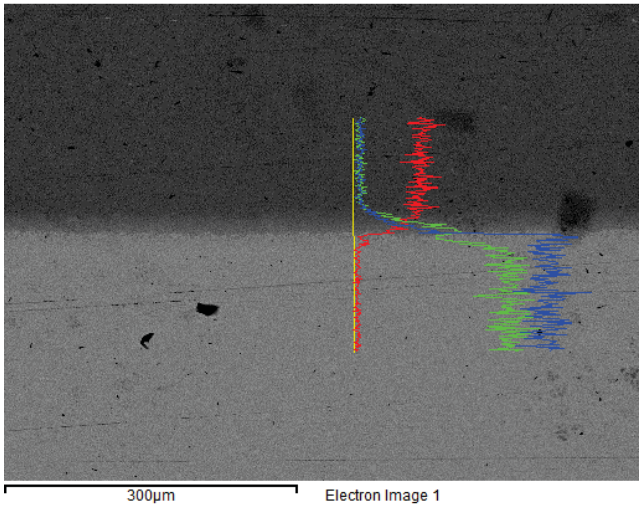


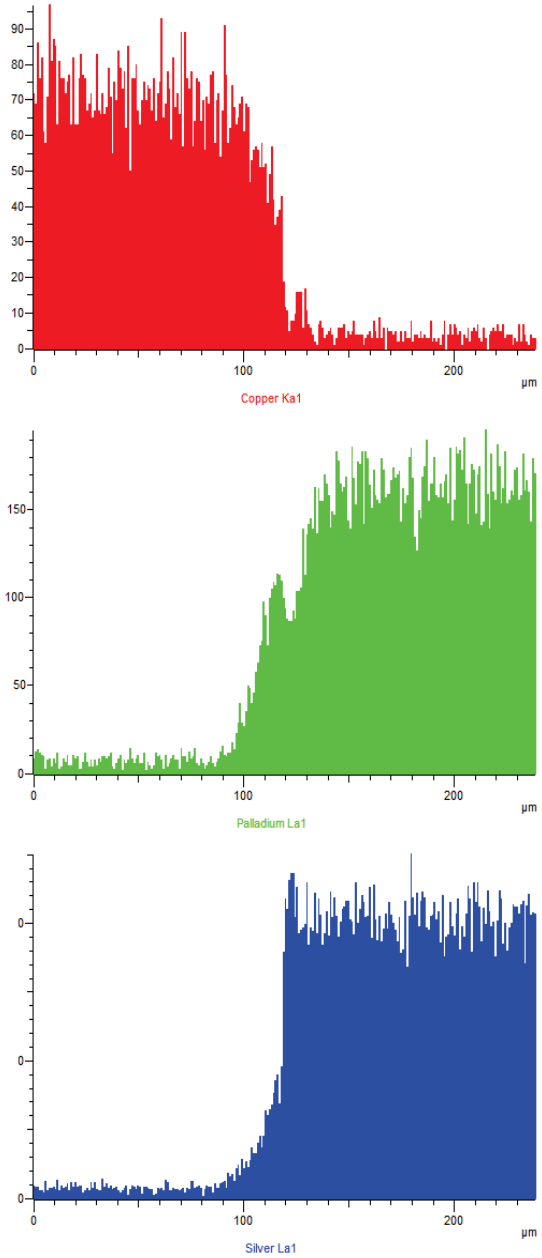


รูปที่ ข-11 บริเวณรอยต่อระหว่างเงินสเตอร์ลิงและทองแดง ชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 750°C ระยะเวลา 5 ชั่วโมง บรรยากาศแบบรีดักชั่น

ชิ้นบน: เงินสเตอร์ลิง
ชิ้นล่าง: ทองแดง

OXFORD INSTRUMENTS
The Business of Science®

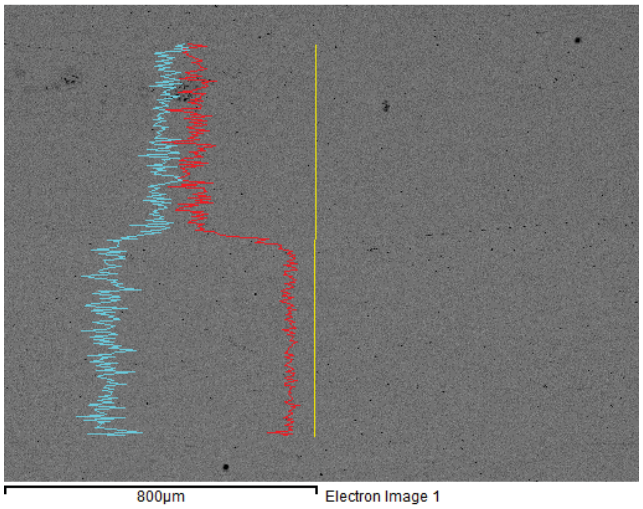


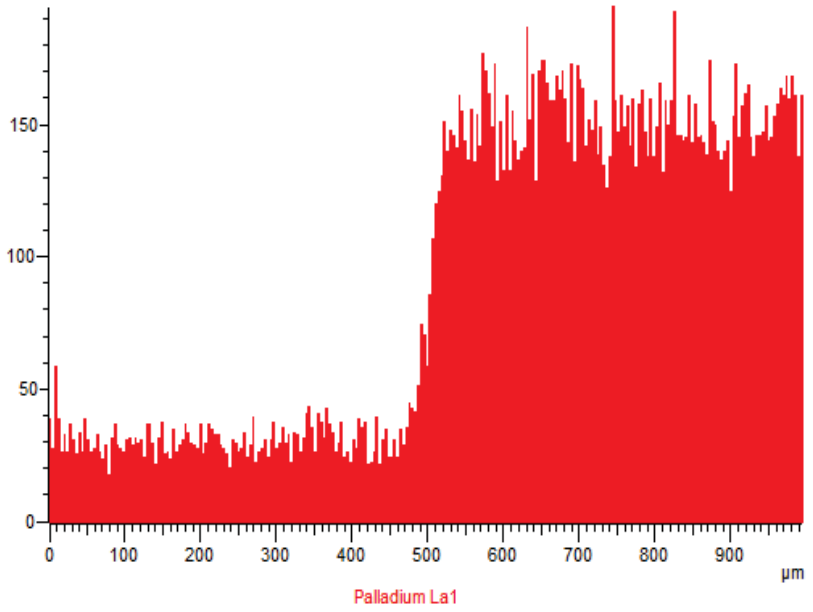


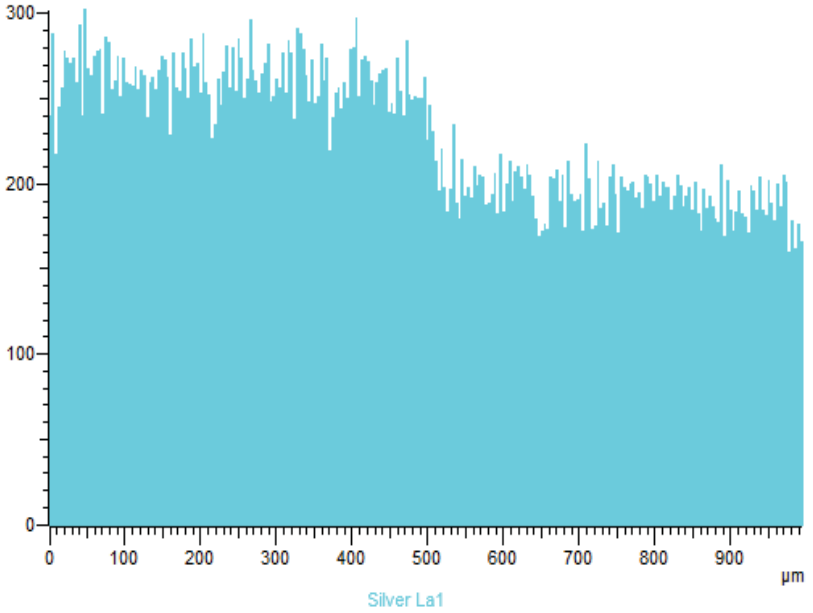
รูปที่ ข-12 บริเวณรอยต่อระหว่างทองแดงและแพลเลเดียม500
ชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 750°C ระยะเวลา 10 ชั่วโมง
บรรยากาศแบบรีดักชั่น

ชิ้นบน: ทองแดง
ชิ้นล่าง: แพลเลเดียม500

OXFORD INSTRUMENTS
The Business of Science®



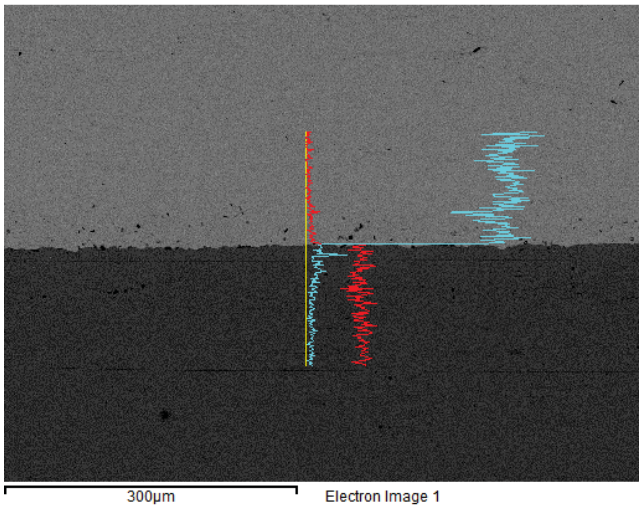


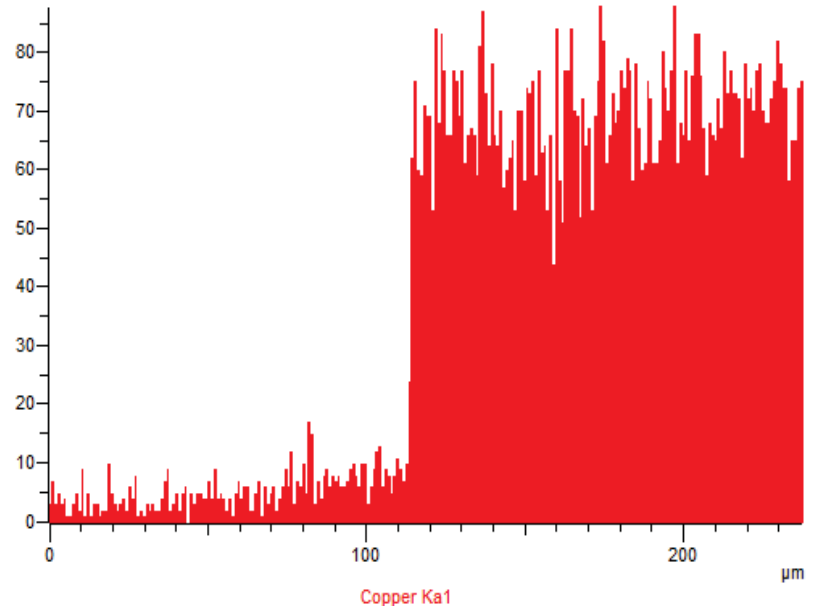


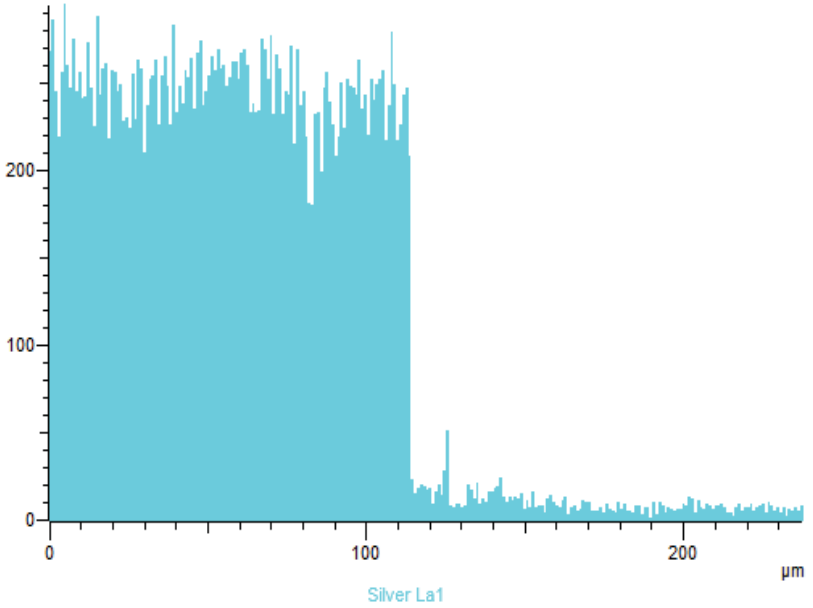
รูปที่ ข-13 บริเวณรอยต่อระหว่างแพลเลเดียม 500 และเงินสเตอร์ลิงชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 750°C ระยะเวลา 10 ชั่วโมง บรรยากาศแบบรีดักชั่น

ชิ้นบน: แพลเลเดียม 500
ชิ้นล่าง: เงินสเตอร์ลิง

OXFORD INSTRUMENTS
The Business of Science®



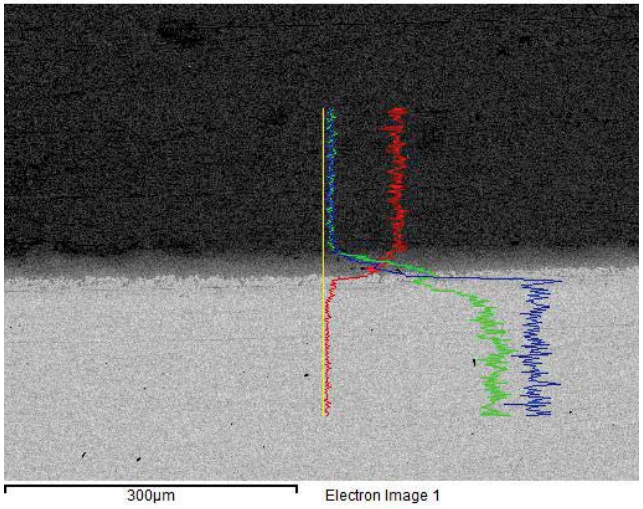


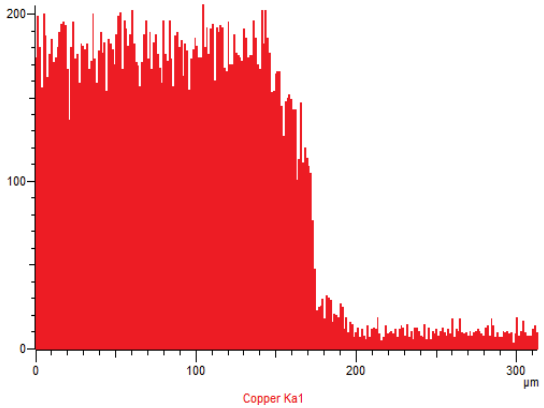


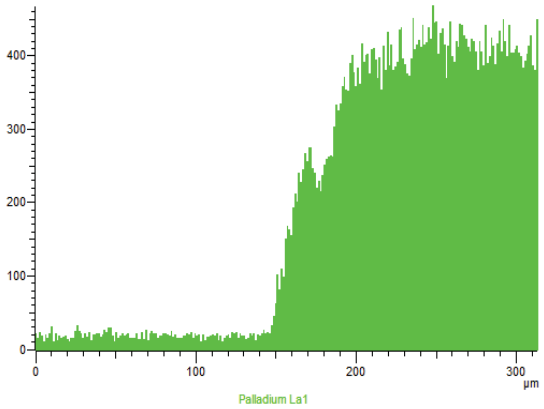
รูปที่ ข-14 บริเวณรอยต่อระหว่างเงินสเตอร์ลิงและทองแดง ชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 750°C ระยะเวลา 10 ชั่วโมง

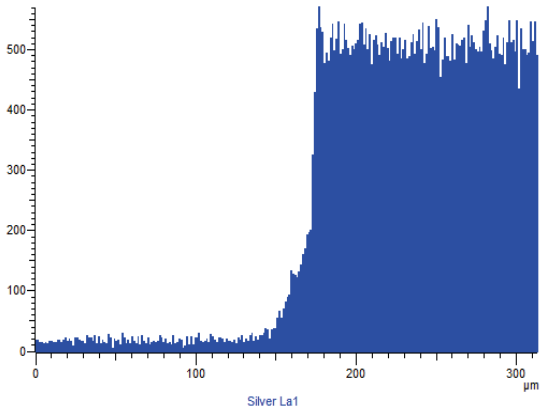
บรรยากาศแบบรีดักชั่น
ชิ้นบน: เงินสเตอร์ลิง
ชิ้นล่าง: ทองแดง

OXFORD INSTRUMENTS
The Business of Science®





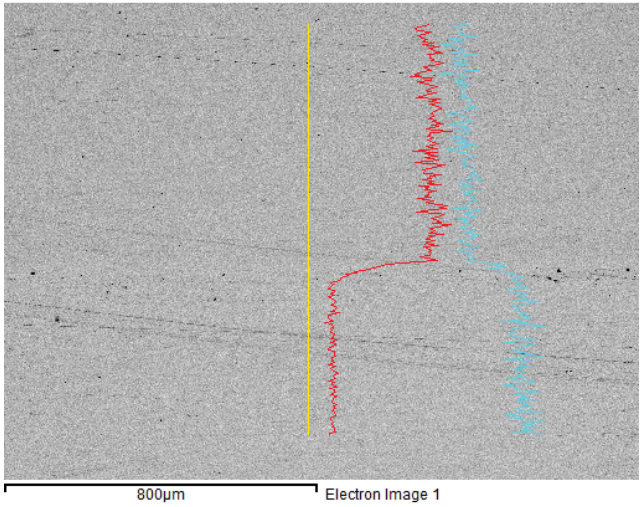


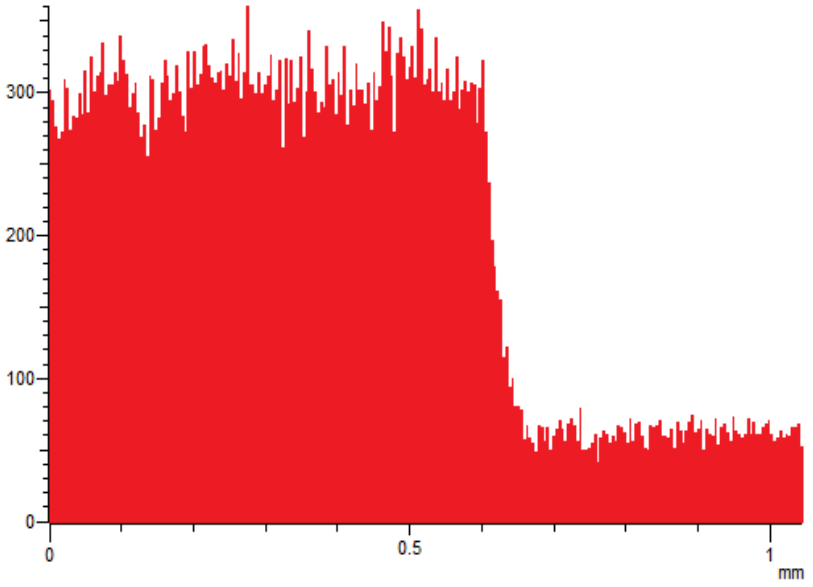


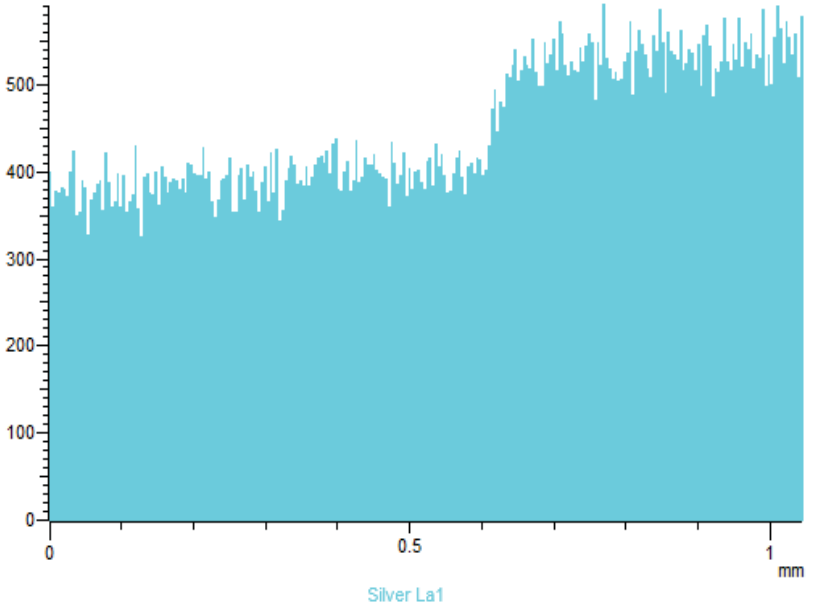
รูปที่ ข-15 บริเวณรอยต่อระหว่างทองแดงและแพลเลเดียม500 ชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 750°C ระยะเวลา 15 ชั่วโมง

บรรยากาศแบบรีดักชั่น
ชิ้นบน: ทองแดง
ชิ้นล่าง: แพลเลเดียม500

OXFORD INSTRUMENTS
The Business of Science®



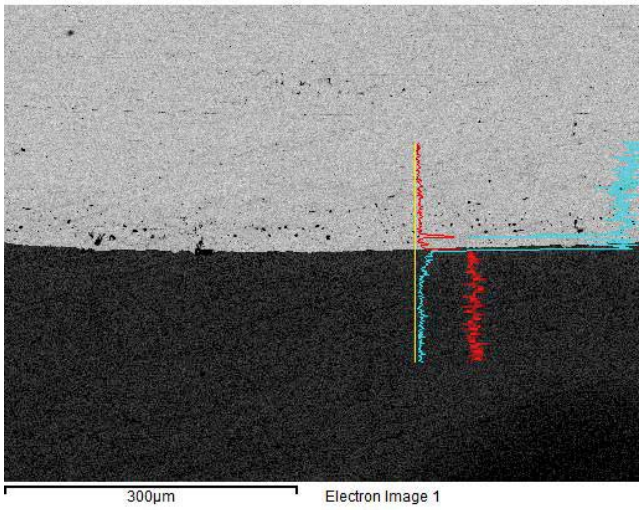


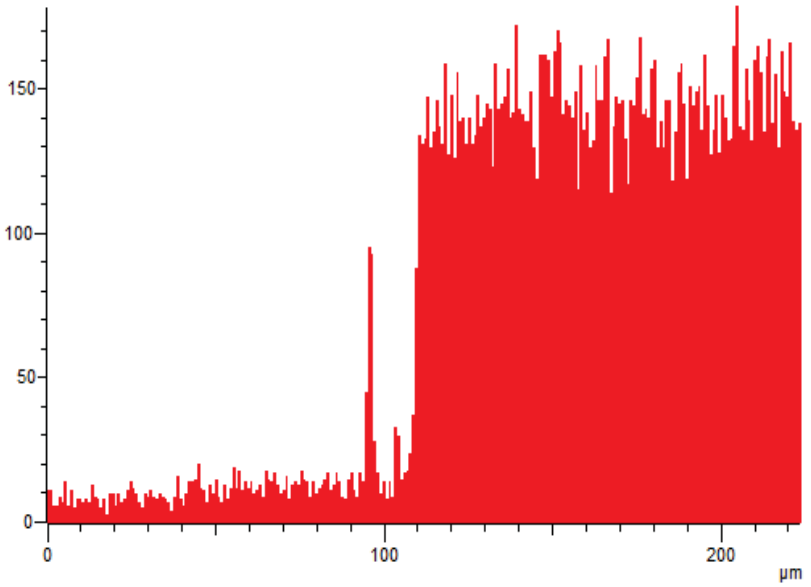


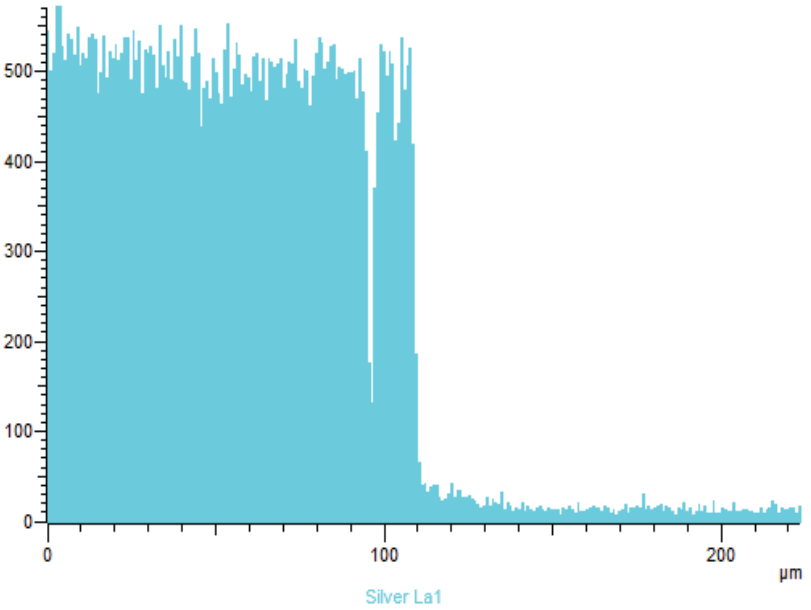
รูปที่ ข-16 บริเวณรอยต่อระหว่างแพลเลเดียม 500 และเงินสเตอร์ลิงชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 750°C ระยะเวลา 15 ชั่วโมง บรรยากาศแบบรีดักชั่น

ชิ้นบน: แพลเลเดียม 500
ชิ้นล่าง: เงินสเตอร์ลิง

OXFORD INSTRUMENTS
The Business of Science®







รูปที่ ข-17 บริเวณรอยต่อระหว่างเงินสเตอร์ลิงและทองแดง ชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 750°C ระยะเวลา 15 ชั่วโมง บรรยากาศแบบรีดักชั่น

ชิ้นบน: เงินสเตอร์ลิง
ชิ้นล่าง: ทองแดง

OXFORD INSTRUMENTS
The Business of Science®