

ผลของอุณหภูมิต่อสมรรถนะการลงถ้ำที่มีต่อสมบัติเชิงกายภาพและสมบัติเชิงกล
ของยาถมดำปราศจากตะกั่ว



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอัญมณีและเครื่องประดับ

มกราคม 2556

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ภัทรา ศรีสุขโข. (2556). ผลของอุณหภูมิในการลงถมที่มีต่อสมบัติเชิงกายภาพและสมบัติเชิงกลของ ยาทมดำปราศจากตะกั่ว. วิทยานิพนธ์ วท.ม.(เทคโนโลยีอัญมณีและเครื่องประดับ).
 กรุงเทพฯ:บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ คณะกรรมการ
 คอบคุม:ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขจีพร วงศ์ปรีดี, รองศาสตราจารย์ ดร.กาญจนา ชูครุวงศ์.

เครื่องถมไทยเป็นศิลปหัตถกรรมที่มีคุณค่าของไทยมาตั้งแต่โบราณ หากแต่พบว่าไม่สามารถสร้างมูลค่าการส่งออกขยายตัวในต่างประเทศได้ เนื่องจากยาทมมีส่วนผสมของตะกั่วเป็นหลัก ทำให้เกิด ข้อกีดกันทางการค้า แม้ว่าปัจจุบันได้มีการคิดค้นสูตรยาทมดำปราศจากตะกั่ว แต่ยังคงความเข้าใจในเทคนิคของการลงยาทมสูตรใหม่นี้ ดังนั้นงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของอุณหภูมิในกระบวนการลงถมดำปราศจากตะกั่ว ที่ผ่านการลงถมบนพื้นชิ้นงานโลหะเงินบริสุทธิ์และอัลลอยเงินที่อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส ยาทมดำปราศจากตะกั่วที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 3 สูตร จากนั้นศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลโดยศึกษาลักษณะเฉพาะของโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ศึกษาปริมาณรูพรุนในยาทมดำปราศจากตะกั่ว ศึกษารูปร่างของยาทมดำปราศจากตะกั่วหลังจากลงถมบนพื้นชิ้นงานเงิน ศึกษาความหนาของรอยต่อระหว่างยาทมดำปราศจากตะกั่วกับพื้นชิ้นงานเงิน ศึกษารอยแตกของยาทมด้วยวิธีการตัดโค้ง ด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสง และใช้โปรแกรม Image J ในการวิเคราะห์ผล นอกจากนี้ยังนำแท่งยาทมดำปราศจากตะกั่ววิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกศาสตร์ ด้วยเทคนิคเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน เพื่อให้เข้าใจการจัดองค์ประกอบของยาทมดำปราศจากตะกั่ว จากผลการวิเคราะห์พบว่ายาทมมีสารประกอบทั้งหมด 6 ชนิด คือ CuAgS , Ag , Cu_2S , Sn_2S_3 , SnS และ Cu_4SnS_4 ในปริมาณที่แตกต่างกันในแต่ละสูตร และผลของกระบวนการลงถมพบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมในการลงยาทมดำปราศจากตะกั่ว คือ 500 กับ 600 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิยิ่งสูงส่งผลให้มีความหนาของชั้นรอยต่อหนามากขึ้น และพบมากในชิ้นงานที่เป็นอัลลอยเงิน สูตรยาทมดำปราศจากตะกั่วสูตร 2 ให้ค่าเฉลี่ยปริมาณรูพรุน และรอยแตกที่ถมหลุดออกจากชิ้นงานอัลลอยเงินน้อยที่สุด สูตรยาทมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 ให้รูปร่างของยาทมดำปราศจากตะกั่วหลังจากลงถมกับชิ้นงานเงินเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด

Pathra Srisukho. (2013). The effect of temperature on the microstructure and mechanical properties of nielloware without lead. Master thesis, M.Sc.(Technology of Gems and Jewelry). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee:Asst.Prof.Dr. Kagreeporn Wongpreedee, Assoc.Prof.Dr.Kanjana Chookruvong.

“ Thai nielloware is an invaluable old craftsmanship. Niello is a black mixture of lead, copper, and silver, used as inlay. Since lead is the main component, it affects trade barrier and cannot be exported to international markets. Although the nielloware production has been developed without lead filled and passed on generation to generation, the artisans cannot be understandable in the new innovation of lead free nielloware. Therefore this research is the study of the effect of temperature in a black amalgam of alloys (niello) without lead filled into carved grooves of 95Ag-5Cu, 99.99Ag bases at 400, 500, 600, and 700 degree Celsius. Three formulas of niello without lead used in this research. Research studies characterization of microstructure, porosity in nielloware and shape of niello after these niello mixture are put in and set on both silver bases as well as the thickness of interface between niello without lead with Ag substrate and crystal structure. Fracture of niello without lead are studied by bending method. The results show that all three formulas comprising of all six compounds of CuAgS , Ag , Cu_2S , Sn_2S_3 , SnS and Cu_4SnS_4 , but in different quantities in each formula. Formula 2 niello bar has less porosity and less fracture. After putting niello mixture into the pattern on silver, formula 1 niello bar changes its shape the least, The best temperature for niello without lead process are 500 and 600 degree Celsius and the higher the temperature, the increasing thickness of the interface layer is. Particularly the 95Ag-5Cu base when bent, it occurs more fracture than the specimen with a thin interface layer. The analysis can be concluded that, niello bar of formula 2 on the 95Ag-5Cu base by the temperature of 500 and 600 degree Celsius makes the most appropriate nielloware product with the lowest porosity and the best shape because of the least changes of niello affecting the pattern of nielloware and make good hardness.

ปริญญาบัตร

เรื่อง

ผลของอนุภูมิในการลงถมที่มีต่อสมบัติเชิงกายภาพและสมบัติเชิงกล

ของยาถมตำปราศจากตะกั่ว

ภัทรา ศรีสุข

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอัญมณีและเครื่องประดับ
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย สันติวัฒน์กุล)

วันที่ เดือน พ.ศ. 2556

คณะกรรมการควบคุมปริญญาบัตร

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

..... ประธาน

..... ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขจีพร วงศ์ปรีดี)

(รองศาสตราจารย์ ดร.ณสรร์ค ผลโภาค)

..... กรรมการ

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.กาญจนา ชูครุวงศ์)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตติกกร ยิ้มนิรัญ)

..... กรรมการ

(ดร.ภูณิศรา ลีมนนทกุล)

..... กรรมการ

(ดร.อมรมาศ กীরดีสิน)

ประกาศการได้รับทุน



ประกาศบัณฑิตวิทยาลัย

เรื่อง รายชื่อผู้ได้รับทุนการศึกษาเพื่อทำวิทยานิพนธ์ของนิสิตบัณฑิตศึกษา
ระดับปริญญาเอก และระดับปริญญาโท ประจำปีงบประมาณ 2555 รอบที่ 2

ตามที่บัณฑิตวิทยาลัยได้ประกาศรับสมัครทุนอุดหนุน สำหรับนิสิตบัณฑิตศึกษาของบัณฑิตวิทยาลัย
ประจำปีงบประมาณ 2555 รอบที่ 2 แล้วนั้น บัณฑิตวิทยาลัยพิจารณาของคณะกรรมการพิจารณาทุนการศึกษาเพื่อทำ
วิทยานิพนธ์ (GRAD S-1-55) ได้เสร็จเรียบร้อยแล้ว มีผู้สมควรได้รับทุนดังต่อไปนี้

นิสิตระดับปริญญาเอก

ชื่อ - สกุล	สาขาวิชา	จำนวนเงินที่ได้รับอนุมัติ
1. นายณัฏฐวิทย์ เข้มหมากะ	ศึกษาศาสตร์ให้คำปรึกษา	30,000
2. นางสาวจิตรารัตน์ บุญนอม	การวิจัยและศึกษาด้านหลักสูตร	20,000
3. นางดวงกมล สวนทอง	การวิจัยพฤติกรรมศาสตร์ประยุกต์	20,000
4. นายณณวัฒน์ จันทร์เดชา	การวิจัยพฤติกรรมศาสตร์ประยุกต์	20,000
5. นางกมลมาศ ทัพย์รัตน์	การบริหารการศึกษา	15,000
6. นางเต็มทรัพย์ จันทร์พร	การบริหารการศึกษา	20,000
7. นางสาวอรอุมา รุ่งเรืองวงษ์กุล	การศึกษายุคใหม่	20,000
8. นางสาวปรวิณี แพทยอนนท์	ศิลปวัฒนธรรมวิจัย	30,000
9. นายจักรพงษ์ แพทย์หลักฟ้า	ศิลปวัฒนธรรมวิจัย	20,000
10. นายนพดล อินทร์จันทร์	ศิลปวัฒนธรรมวิจัย	30,000
11. นางสาววรวรัตน์ ปรมิตานภรณ์	ชีวภาพการแพทย์	15,000
12. นางสาวธันยธร ช่วยชูกษ์เพื่อน	วิทยาศาสตร์ศึกษา	20,000

นิสิตระดับปริญญาโท

ชื่อ - สกุล	สาขาวิชา	จำนวนเงินที่ได้รับอนุมัติ
1. นางสาวฐิตินันท์ ตันมานุช	การวัดผลการศึกษา	15,000
2. นางสาวสุพราทิพย์ เจริญนิพนธ์วานิช	การบริหารการศึกษา	10,000
3. นางวิสุทธิตา ศรีดวงโชติ	การวิจัยและสถิติทางการศึกษา	20,000
4. นางสาวภัทรา ศรีสุโข	เทคโนโลยีข้อมูล	30,000

ประกาศการได้รับทุน (ต่อ)

- 2 -

นิสิตระดับปริญญาโท (ต่อ)

ชื่อ - สกุล	สาขาวิชา	จำนวนเงินที่ได้รับอนุมัติ
5. นายวรทัศน์ วิมลชีวินโปกรณ์	การวิจัยพฤติกรรมศาสตร์ประยุกต์	20,000
6. นายเนศ ทอดบุญชัย	การสอนภาษาอังกฤษในฐานะภาษาต่างประเทศ	5,000
7. นางสาวกมลวรรณ คำพระ	นวัตกรรมการออกแบบ	20,000
8. นายธนกฤต ใจสุลา	นวัตกรรมการออกแบบ	20,000
9. นางสาวัญญาไขัญญา ชันทรังษี	นวัตกรรมการออกแบบ	20,000
10. นางสาวศรทิพย์ กระทรงไทย	นวัตกรรมการออกแบบ	20,000
11. นายวัฒน์ ปริกปรอม	ศิลปศึกษา	20,000
12. นางสาวณัฐญาพร ดอกจันทร์	ศิลปศึกษา	10,000

ประกาศ ณ วันที่ 24 กรกฎาคม พ.ศ. 2555



(รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย ชันศิริวัฒน์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ประกาศคุณูปการ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงในความกรุณาของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขจีพร วงศ์ปรีดี ประธานที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.กาญจนา ชูครุวงศ์ รองประธานที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ที่ได้อุทิศสละเวลาอันมีค่ามาเป็นที่ปรึกษา พร้อมทั้งรองศาสตราจารย์ ดร.กัญญาดา อนุวงศ์ที่ให้คำแนะนำตลอดระยะเวลาในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการปริญญานิพนธ์อันประกอบไปด้วย รองศาสตราจารย์ ดร.ณสรณ์ ผลโภค, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตติกร ยิ้มนิรัญ ดร.ภูนิศรา ลิ้มนนทกุล และดร.อมรมาศ กิรติสิน ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องของปริญญานิพนธ์ด้วยความเอาใจใส่จนทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์และทรงคุณค่า

ขอขอบคุณนายพันธุ์พจน์ ฤทัยชนานานนท์ ที่ร่วมประกวดในทีม Nielli Inlay จนทำให้ยาทมดำปราศจากตะกั่วเป็นที่รู้จัก และได้รับรางวัลดีเด่นอันดับ 1 ในโครงการ "รางวัลความคิดริเริ่มทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืนครั้งที่ 6 (STISA 6)" ของสมาคมวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย (สวคท.) ร่วมกับ บริษัท เอสซีจี เคมิคอลส์ จำกัด บริษัท ดาวเคมิคอล ประเทศไทย จำกัด สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) และสำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (สนช.)

ขอขอบคุณนายสยาม หาบ้านแท่น, นายสุรสิทธิ์ เกิดสินธุ์ และอาจารย์นภัทร คงผอม ที่ให้ความร่วมมือและอำนวยความสะดวกแก่ผู้วิจัยเป็นอย่างดีในการเข้าไปทำวิจัยและการเก็บข้อมูล

กราบขอบพระคุณทางบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่มอบทุนอุดหนุนสำหรับทำงานวิจัย ขอบพระคุณทางมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี ที่มอบทุนสำหรับการศึกษาและขอบคุณเพื่อนร่วมงานทุกท่าน

เหนือสิ่งอื่นใดขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ของผู้วิจัยที่ให้กำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้านอย่างดีที่สุดเสมอมา

ผู้วิจัยเองมีความภาคภูมิใจที่ได้ทำงานวิจัยเรื่องนี้เป็นอย่างมาก เพราะยาทมดำปราศจากตะกั่วไม่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพผู้ทำเครื่องถนอม และสิ่งแวดล้อม อีกทั้งเป็นการช่วยอนุรักษ์ศิลปวัฒนธรรมไทย คุณค่าและคุณประโยชน์อันพึงจะมีจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบและอุทิศแด่ผู้มีพระคุณทุกๆ ท่าน หวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจสามารถนำข้อมูลไปใช้ในอุตสาหกรรม และประเทศชาติต่อไป

ภัทรา ศรีสุโข

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ	1
ภูมิหลัง.....	1
ความมุ่งหมายของการวิจัย.....	2
ความสำคัญของการวิจัย.....	2
ขอบเขตของการวิจัย.....	2
นิยามศัพท์เฉพาะ.....	3
กรอบแนวคิดในการวิจัย.....	3
สมมติฐานในการวิจัย.....	4
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
การศึกษาเครื่องถลุงและกระบวนการผลิตเครื่องถลุงแบบดั้งเดิม.....	5
ขั้นตอนการผลิตเครื่องถลุงไทย.....	6
การศึกษาองค์ประกอบและสมบัติของยาถลุงแบบดั้งเดิม.....	7
วิวัฒนาการของยาถลุงตำปราคาจากตะกั่ว.....	9
สมบัติของแร่ที่ทำให้เกิดสี.....	11
วิวัฒนาการอัลลอยดีบุกสำหรับงานเชื่อมประสาน.....	12
เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	17
กล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสง (Optical Microscope).....	17
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy).....	18
เครื่องมือการวิเคราะห์ธาตุโดยเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer).....	20
เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray Diffraction).....	21
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
แผนการดำเนินงานวิจัย.....	23
วิธีการทำแท่งยาถลุงและชิ้นงานเงินสำหรับลงถมตำปราคาจากตะกั่ว.....	25
การหลอมยาถลุงตำปราคาจากตะกั่วทั้ง 3 สูตร.....	25
การเตรียมชิ้นงานเงินสำหรับการลงถมตำปราคาจากตะกั่ว.....	26

สารบัญ

บทที่	หน้า
3 (ต่อ)	
การลงถมดำปราศจากตะกั่วบนชิ้นงานเงิน.....	28
ชุดทดสอบวัดอุณหภูมิที่หัวเป่าไฟ.....	28
ชุดทดสอบโต๊ะสำหรับลงถมดำปราศจากตะกั่ว.....	29
การลงถมดำปราศจากตะกั่วบนชิ้นงานเงิน.....	30
ศึกษาอุณหภูมิในการลงถมดำปราศจากตะกั่วบนชิ้นงานเงิน.....	32
ศึกษาลักษณะเฉพาะของโครงสร้างทางจุลภาคของแท่งยาถม ดำปราศจากตะกั่ว ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy).....	35
ศึกษาโครงสร้างผลึก วิเคราะห์ธาตุการจัดเรียงตัวของอะตอมใน โมเลกุลของสารประกอบด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray Diffraction).....	36
ศึกษาปริมาณการเกิดรูพรุนบนผิวยาถมดำปราศจากตะกั่วด้วย กล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสง (Optical Microscope).....	37
ศึกษารูปร่างของยาถมดำปราศจากตะกั่วหลังจากลงถมบนชิ้น งานเงิน.....	37
ด้านหน้าชิ้นงาน.....	37
ด้านข้าง (แบบ cross-section).....	39
ศึกษาความหนาของชั้นรอยต่อระหว่างถมดำปราศจากตะกั่วกับ อัลลอยเงินด้วยเครื่องมือการวิเคราะห์ธาตุโดยเชื่อมต่อกับ อุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer).....	40
ศึกษาสมบัติเชิงกลของยาถมดำปราศจากตะกั่วกับชิ้นงานเงินโดย วิธีการตัดโค้ง.....	40
สร้างชุดทดสอบการตัดโค้ง.....	40
ศึกษาลักษณะเฉพาะของโครงสร้างทางจุลภาคของยาถมดำปราศ จากตะกั่วกับชิ้นงานเงินที่ผ่านการตัดโค้ง ด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	42
ศึกษาพื้นที่การแตกของยาถมดำปราศจากตะกั่วกับอัลลอยเงิน หลังจากวิธีการตัดโค้ง.....	43

สารบัญ

บทที่	หน้า
4	การนำเสนอผลของข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูล..... 44
ศึกษาโครงสร้างผลึกศาสตร์และวิเคราะห์ธาตุการจัดเรียงตัวของ อะตอมในโมเลกุลของสารประกอบด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟ แฟรกชัน (X-ray Diffraction).....	44
ศึกษาลักษณะเฉพาะของโครงสร้างทางจุลภาคของแท่งยาถมดำ ปราศจากตะกั่วด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy).....	48
ศึกษาปริมาณการเกิดรูพรุนบนผิวยาถมดำปราศจากตะกั่วด้วย กล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสง (Optical Microscope).....	51
ศึกษารูปร่างของยาถมดำปราศจากตะกั่วหลังจากลงถมกับชิ้น งานเงิน.....	63
ด้านหน้าชิ้นงาน.....	63
ด้านข้าง (แบบ cross-section).....	78
ศึกษาความหนาของชั้นรอยต่อระหว่างถมดำปราศจากตะกั่วกับ ชิ้นงานเงินด้วยเครื่องมือการวิเคราะห์ธาตุโดยเชื่อมต่อกับ อุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer).....	80
ศึกษาสมบัติเชิงกลของยาถมดำปราศจากตะกั่วกับชิ้นงาน เงินโดยวิธีการตัดโค้ง.....	93
สร้างชุดทดสอบการตัดโค้ง.....	93
ศึกษาลักษณะเฉพาะของโครงสร้างทางจุลภาคของยาถมดำ ปราศจากตะกั่วกับชิ้นงานเงินที่ผ่านการตัดโค้ง ด้วยกล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy).....	95
ศึกษาพื้นที่รอยแตกของยาถมดำปราศจากตะกั่วบนชิ้นงาน เงินหลังจากวิธีการตัดโค้ง.....	96
5	การสรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ..... 102
สรุปผลการวิจัย.....	102
ข้อเสนอแนะ.....	105

สารบัญ

บทที่	หน้า
บรรณานุกรม.....	106
ภาคผนวก.....	108
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบทำLine scan.....	108
ภาคผนวก ข ผลวิเคราะห์ธาตุด้วยระบบวิเคราะห์แบบ EDS และภาพถ่ายแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	117
ภาคผนวก ค โปรแกรม image J.....	121
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	122



บัญชีตาราง

ตารางที่		หน้า
ตาราง 1	แสดงสูตรทางเคมี ระบบผลึก สี สีผง และชื่อแร่ของธาตุที่มีกำมะถันเป็นส่วนประกอบ.....	12
ตาราง 2	แสดงโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของอัลลอยเชื่อมประสานกับพื้นชิ้นงานที่ทำจากเงิน และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอัลลอยเชื่อมประสาน Sn-4Ag, Sn-3Cu และSn-37Pb ทำการบ่มแข็งที่ 260 °C ที่เวลาต่างๆกัน.....	16
ตาราง 3	แสดงสูตรยาถมดำปราศจากตะกั่วทั้ง 3 สูตร.....	25
ตาราง 4	แสดงอุณหภูมิสัมพัทธ์ที่ลงถมดำปราศจากตะกั่วบนชิ้นงานเงิน จุด T2 ที่โต๊ะลงถมบนแผ่นเงินตรงกลาง กับจุด T3 ที่โต๊ะลงถมบนแผ่นเงินมุมขวาล่าง.....	34
ตาราง 5	แสดงสมบัติของสารประกอบในยาถมดำปราศจากตะกั่ว.....	46
ตาราง 6	แสดงภาพชิ้นงานเงินที่ลงถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 บนอัลลอยเงิน 95 ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, 700 องศาเซลเซียส ด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสงกำลังขยาย 50 เท่า.....	52
ตาราง 7	แสดงภาพชิ้นงานเงินที่ลงถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 บนโลหะเงินบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, 700 องศาเซลเซียส ด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสงกำลังขยาย 50 เท่า.....	53
ตาราง 8	แสดงภาพชิ้นงานเงินที่ลงถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 บนอัลลอยเงิน 95 ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, 700 องศาเซลเซียส ที่วิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Image J software และแสดงร้อยละพื้นที่การเกิดรูพรุนเปรียบเทียบกับพื้นที่ถมดำ.....	54
ตาราง 9	แสดงภาพชิ้นงานเงินที่ลงถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 บนโลหะเงินบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, 700 องศาเซลเซียส และวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Image J software และแสดงร้อยละพื้นที่การเกิดรูพรุนเปรียบเทียบกับพื้นที่ถมดำ	

บัญชีตาราง

ตารางที่		หน้า
ตาราง 10	แสดงภาพชิ้นงานที่ลงถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3บนอัลลอยเงิน 95 ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, 700 องศาเซลเซียส ด้วยกล้องดิจิทัลความละเอียดสูง.....	63
ตาราง 11	แสดงภาพชิ้นงานเงินบริสุทธิ์ที่ลงถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, 700 องศาเซลเซียส ด้วยกล้องดิจิทัลความละเอียดสูง.....	65
ตาราง 12	แสดงภาพชิ้นงานมาตรฐาน และหาพื้นที่เซาะเป็นร่อง สำหรับลงถมเปรียบเทียบกับพื้นที่ส่วนที่เป็นชิ้นงานเงิน.....	66
ตาราง 13	แสดงภาพชิ้นงานเงินที่ลงถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3บนอัลลอยเงิน 95 ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, 700 องศาเซลเซียส และค่าพื้นที่ถมดำเปรียบเทียบกับพื้นที่ส่วนที่เป็นชิ้นงานเงิน.....	67
ตาราง 14	แสดงภาพชิ้นงานที่ลงถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3บนโลหะเงินบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, 700 องศาเซลเซียส และค่าพื้นที่ถมดำเปรียบเทียบกับพื้นที่ส่วนที่เป็นชิ้นงานเงิน.....	71
ตาราง 15	แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ลงถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร3 แบบภาพตัดขวางเพื่อศึกษารูปร่างของร่องยาถมดำปราศจากตะกั่วหลังจากลงถมบนชิ้นงานเงิน.....	78
ตาราง 16	ตารางแสดงภาพโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นรอยต่อด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และค่าความหนาของชิ้นรอยต่อระหว่างยาถมดำปราศจากตะกั่วกับอัลลอยเงิน 95.....	81
ตาราง 17	ตารางแสดงภาพโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นรอยต่อด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และค่าความหนาของชิ้นรอยต่อระหว่างปราศจากตะกั่วกับโลหะเงินบริสุทธิ์.....	83
ตาราง 18	แสดงโครงสร้างทางจุลภาคแบบภาพตัดขวางเพื่อศึกษาความหนาของร่องยาถมดำปราศจากตะกั่วหลังจากลงถมกับอัลลอยเงิน 95	85

บัญชีตาราง

ตารางที่		หน้า
ตาราง 19	แสดงโครงสร้างทางจุลภาคแบบภาพตัดขวางเพื่อศึกษา ความหนาของร่องยาถมดำปราศจากตะกั่วหลังจาก ลงถมนบนโลหะเงินบริสุทธิ์.....	87
ตาราง 20	แสดงภาพชิ้นงานที่ลงถมนดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 บนอัลลอยเงินร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก ทองแดงร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, 700 องศาเซลเซียส ที่ถ่ายด้วยกล้องดิจิทัลความละเอียดสูง เพื่อหาร้อยละพื้นที่รอยแตกของถมนต่อพื้นที่ถมนทั้งหมด.....	93
ตาราง 21	แสดงภาพชิ้นงานที่ลงถมนดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 บนอัลลอยเงินร้อยละ 99.99 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, 700 องศาเซลเซียสด้วยกล้องดิจิทัลความละเอียดสูง เพื่อหาร้อยละพื้นที่รอยแตกของถมนต่อพื้นที่ถมนทั้งหมด.....	94
ตาราง 22	แสดงภาพชิ้นงานที่ลงถมนดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 บนอัลลอยเงินร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก ทองแดง ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, 700 องศาเซลเซียส ด้วยกล้องดิจิทัลความละเอียดสูง และค่าร้อยละพื้นที่รอยแตกที่ได้จากการตัดโค้งต่อพื้นที่ทั้งหมด.....	97
ตาราง 23	แสดงภาพชิ้นงานที่ลงถมนดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 บนโลหะเงินบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, 700 องศาเซลเซียส ด้วยกล้องดิจิทัลความละเอียดสูง และค่าร้อยละพื้นที่รอยแตกที่ได้จากการตัดโค้งต่อพื้นที่ทั้งหมด.....	98

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบที่	หน้า
1 กรอบแนวคิด.....	3
2 ประเภทเครื่องถลุงทั้ง 3 ชนิด ก)เครื่องถลุงทอง, ข)เครื่องถลุงตะทอง, ค)เครื่องถลุงดำ.....	6
3 แห่งยาถลุงดำ.....	6
4 ขั้นตอนการผลิตเครื่องถลุงแบบดั้งเดิม.....	6
5 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของแห่งยาถลุงด้วยกล้องจุลทรรศน์ ชนิดสะท้อนแสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	8
6 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของแห่งยาถลุงดำปราศจากตะกั่ว ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสะท้อนแสง และกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	10
7 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสงกำลังขยาย 50 เท่า แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของอัลลอยทองเหลืองสองชนิดที่ ลงถลุงดำปราศจากตะกั่ว.....	11
8 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดง โครงสร้างจุลภาคของอัลลอยเชื่อมประสาน Sn-3.5Ag, Sn-3.5Ag-0.7Cu, Sn-3.5Ag-1.7Cu และ Sn-0.5Ag-4Cu.....	13
9 ก) กราฟแสดงความขรุขระของชั้นรอยต่อของอัลลอยเชื่อม ประสาน Sn-3.5Ag, Sn-3.5Ag-0.7Cu, Sn-3.5Ag-1.7Cu และ Sn-0.5Ag-4Cu, ข) กราฟแสดงความหนาของชั้นรอย ต่อของอัลลอยเชื่อมประสาน Sn-3.5Ag, Sn-3.5Ag-0.7Cu, Sn-3.5Ag-1.7Cu และ Sn-0.5Ag-4Cu.....	13
10 กราฟแห่งแสดงสมบัติเชิงกลของอัลลอยเชื่อมประสานที่ ปริมาณเงินแตกต่างกัน.....	14
11 แสดงโครงสร้างทางภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราดแสดงโครงสร้างทางจุลภาคของ Sn-3.5Ag-0.7Cu ที่เติมบิสมัทส่งผลต่อการเจริญเติบโต ของชั้นอินเตอร์เมทัลลิก.....	15
12 กล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสงต่ออุปกรณ์เสริมติดตั้งกล้องถ่ายภาพ.....	17

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบที่	หน้า
13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	19
14 แสดงส่วนประกอบและหลักการทำงานเบื้องต้นของSEM.....	19
15 แสดงสัญญาณที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับตัวอย่าง.....	20
16 แสดงส่วนประกอบของหลอดผลิตรังสีเอกซ์.....	22
17 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน.....	24
18 การหลอมยาถมดำปราศจากตะกั่ว.....	26
19 ร่างยาถมและขนาดชิ้นงานยาถมดำปราศจากตะกั่วที่ใช้ในการศึกษา.....	26
20 แสดงขนาดแผ่นเงินสำหรับลงถมเพื่อศึกษาโครงสร้างสมบัติทาง กายภาพและสมบัติเชิงกล.....	27
21 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบสี่ช่อง รุ่น DP-74SD.....	29
22 อุปกรณ์สำหรับชุดทดสอบเพื่อวัดอุณหภูมิที่หัวเป่าไฟประกอบด้วย (ก) ภาพแท่งวัดอุณหภูมิ type K (ข) หลอดเซรามิค.....	29
23 ภาพสามมิติโต๊ะสำหรับลงถมดำปราศจากตะกั่วต่อกับเครื่องวัด อุณหภูมิแบบสี่ช่อง.....	30
24 โต๊ะสำหรับลงถมพร้อมแท่งวัดอุณหภูมิ type K ต่อเครื่องวัด อุณหภูมิแบบสี่ช่อง.....	32
25 กราฟแสดงความร้อนที่วัดอุณหภูมิที่หัวเป่าไฟ(T1).....	33
26 กราฟแสดงความร้อนที่วัดอุณหภูมิที่โต๊ะลงถมบนแผ่นเงินตรงกลาง(T2).....	33
27 กราฟแสดงความร้อนที่วัดอุณหภูมิที่โต๊ะลงถมบนแผ่นเงินมุมขวาล่าง(T3).....	34
28 แสดงทิศทางในการตัดแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่ว.....	36
29 แสดงภาพการคำนวณหาค่าร้อยละผลต่างของพื้นที่สำหรับ..... ลงถมในชิ้นงานเงินมาตรฐานกับชิ้นงานที่ลงถมดำปราศจากตะกั่ว	38
30 แสดงทิศทางในการตัดชิ้นงานที่ลงถมเพื่อศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค.....	39
31 แท่นวางชิ้นงานสำหรับทดสอบการตัดโค้ง.....	41
32 ชุดทดสอบการตัดโค้ง.....	42
33 แท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วสำหรับทดสอบด้วยเครื่อง เอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน	44
34 ผลการวิเคราะห์ยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 จากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน.....	45

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบที่	หน้า
35 ผลการวิเคราะห์ยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 2 จากเครื่องเอกซเรย์ดีฟแฟรกชัน.....	45
36 ผลการวิเคราะห์ยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 3 จากเครื่องเอกซเรย์ดีฟแฟรกชัน.....	45
37 กราฟเปรียบเทียบสารประกอบของแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่ว สูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 จากเครื่องเอกซเรย์ดีฟแฟรกชัน.....	46
38 กราฟแท่งแสดงการเปรียบเทียบค่าความเข้มของสารประกอบ ในแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3.....	47
39 แท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร สูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3.....	48
40 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และผลวิเคราะห์ธาตุ ด้วยระบบวิเคราะห์แบบ EDS.....	49
41 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 2 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และผลวิเคราะห์ธาตุ ด้วยระบบวิเคราะห์แบบ EDS.....	49
42 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 3 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และผลวิเคราะห์ธาตุ ด้วยระบบวิเคราะห์แบบ EDS.....	50
43 แสดงโครงสร้างทางจุลภาพของแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และแสดงสารประกอบ.....	50
44 แสดงโครงสร้างทางจุลภาพของแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 2 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และแสดงสารประกอบ ก) แสดงภาพถ่ายสารประกอบที่มีลักษณะคล้ายเส้นเข็ม ข) ขยายภาพ ก) ตรงบริเวณที่มีลักษณะคล้ายยูเทคติก.....	50
45 แสดงโครงสร้างทางจุลภาพของแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 3 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และแสดง สารประกอบCuAgS และ SnS.....	50
46 กราฟแสดงปริมาณการเกิดรูพรุนในชิ้นงานที่ลงถมบนชิ้นงานเงิน.....	59
47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชิ้นงานเงินที่ใช้ในการลงถม ดำปราศจากตะกั่วและค่าเฉลี่ยร้อยละการเกิดรูพรุน.....	60

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบที่	หน้า
48 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 และค่าเฉลี่ยร้อยละการเกิดรูพรุน.....	61
49 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการลงถม ดำปราศจากตะกั่วและค่าเฉลี่ยร้อยละการเกิดรูพรุน.....	61
50 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการลงถม ดำปราศจากตะกั่วต่อปริมาณการเกิดรูพรุน.....	62
51 แสดงชิ้นงานเงินที่ไม่ได้ทำการลงถมดำปราศจากตะกั่ว.....	63
52 กราฟแสดงรูปร่างของยาถมดำปราศจากตะกั่วหลังจาก ทำการลงถมบนชิ้นงานเงิน.....	75
53 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชิ้นงานเงินที่ใช้ในการลงถมดำ ปราศจากตะกั่วกับรูปร่างของยาถมดำปราศจากตะกั่วหลังจากลงถม.....	76
54 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 กับรูปร่างของยาถมดำปราศจากตะกั่วหลังจากลงถม.....	77
55 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการลงถมดำปราศจาก ตะกั่วกับรูปร่างของยาถมดำปราศจากตะกั่วหลังจากลงถม.....	77
56 กราฟความหนาของชั้นรอยต่อระหว่างยาถมดำปราศจากตะกั่ว บนชิ้นงานเงิน.....	89
57 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชิ้นงานเงินที่ใช้ในการลงถมดำ ปราศจากตะกั่วเปรียบเทียบค่าความหนาของชั้นรอยต่อ ระหว่างยาถมดำปราศจากตะกั่วกับชิ้นงานเงิน.....	90
58 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 เปรียบเทียบค่าความหนาของชั้นรอยต่อ ระหว่างยาถมดำปราศจากตะกั่วกับชิ้นงานเงิน.....	91
59 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการลงถมดำ ปราศจากตะกั่วเปรียบเทียบค่าความหนาของชั้นรอยต่อ ระหว่างยาถมดำปราศจากตะกั่วกับชิ้นงานเงิน.....	91
60 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการลงถมกับ ความหนาของชั้นรอยต่อระหว่างยาถมดำปราศจากตะกั่วบน ก) อลลอยเงิน 95 ข) โลหะเงินบริสุทธิ์เงิน.....	92
61 เครื่องมือสำหรับทดสอบการตัดโค้ง.....	93

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบที่	หน้า
62 ภาพถ่ายรอยแตกชิ้นงานเงินลงถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 2 ที่ผ่านการตัดโค้ง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	96
63 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของยาถมดำปราศจากตะกั่วหลัง จากลงถมบนชิ้นงานเงินทำการตัดโค้งเปรียบเทียบกับ รอยละพื้นที่รอยแตก.....	99
64 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชิ้นงานเงินที่ใช้ในการลงถมดำ ปราศจากตะกั่วที่ทำการตัดโค้งเปรียบเทียบกับรอยละพื้นที่รอยแตก.....	100
65 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 ที่ทำการตัดโค้งเปรียบเทียบกับรอยละพื้นที่รอยแตก.....	100
66 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการลงถมดำ ปราศจากตะกั่วที่ทำการตัดโค้งเปรียบเทียบกับรอยละพื้นที่รอยแตก.....	101
67 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของพื้นที่รอยแตก ของยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1,2,3 ที่ อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียสบน (ก) อัลลอยเงิน 95 และ(ข) โลหะเงินบริสุทธิ์.....	101

บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

เครื่องถลุงเป็นงานศิลปหัตถกรรมที่รู้จักมาตั้งแต่สมัยอยุธยาตอนต้น ซึ่งสมัยก่อนนิยมทำเป็นเครื่องราชูปโภค หรือเครื่องบรรณาการให้แก่บุคคลที่สำคัญ เครื่องถลุงไทยจำแนกออกได้เป็น 3 ประเภท ตามเทคนิควิธีการทำเครื่องถลุง คือ เครื่องถลุงทอง เครื่องถลุงตะทอง และเครื่องถลุงดำหรือเครื่องถลุงเงิน โดยในที่นี่จะกล่าวเฉพาะเครื่องถลุงเงิน ซึ่งเป็นการนำยาถลุงที่มีสีดำใส่ลงไปบนพื้นร่องลายที่ทำการแกะสลักเป็นลวดลายไทยบนอัลลอยเงินที่มีความบริสุทธิ์ตั้งแต่ 95 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป ส่วนพื้นที่ทำการลงถลุงจะต้องมีสีดำนั่น ซึ่งเครื่องถลุงเงินที่ดีตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนเครื่องถลุงเงิน มผช.365/2547 ลวดลายถลุงจะต้องมีสีดำสนิทไม่ต่าง มีความมันวาว เกาะติดดี สุกท้ายเครื่องถลุงที่คุณภาพสูงและมีราคาดีจะต้องมีรูปทรงหรือตามดน้อย[1]

ส่วนแท่งยาถลุงดำที่ใช้มีกรรมวิธีการผสมของโลหะสามอย่างเข้าด้วยกัน คือ ตะกั่ว ทองแดง เงิน และใส่กำมะถันเพื่อให้ถลุงนี้มีสีดำ[2,3,4] องค์ประกอบหลักของแท่งยาถลุงดำคือ ส่วนผสมของตะกั่วที่เป็นพิษ เมื่อหลอมโลหะตะกั่ว ทองแดง เงิน จนทำให้โลหะไหลตัวได้อาจมีผลให้เกิดไอตะกั่วเกิดขึ้นทั้งในกระบวนการผลิตแท่งยาถลุงดำและขั้นตอนลงถลุงบนชิ้นงาน โดยไอพิษของตะกั่วส่งผลกระทบต่อมนุษย์โดยจะสะสมอยู่ในร่างกายจนปริมาณหนึ่งแล้วจึงแสดงอาการของโรคพิษตะกั่วซึ่งมีผลกระทบต่อสมอง การรับฟัง และอาจถึงตายถ้าได้รับการสะสมในปริมาณที่มาก[5] และตะกั่วยังส่งผลต่อสิ่งแวดล้อม เพราะสามารถสะสมอยู่ในชั้นบรรยากาศ น้ำ ดิน และสามารถเจือปนมาในอาหารของทั้งมนุษย์และสัตว์[6] จึงสามารถกล่าวได้ว่าตะกั่วเป็นพิษต่อทั้งต่อมนุษย์และสัตว์ ทั้งนี้ในปีพ.ศ.2552 ในประเทศสหรัฐอเมริกาได้ออกกฎหมายว่าด้วยความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์สำหรับผู้บริโภค (CPSIA) ห้ามใช้ผลิตภัณฑ์ที่มีสารตะกั่วเจือเกิน 0.06% โดยน้ำหนัก เป็นต้น โดยทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์นั้นๆ จึงทำให้เกิดข้อจำกัดในด้านการส่งออก[7] ซึ่งอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้เครื่องถลุงไม่เป็นที่นิยมทั้งภายในและภายนอกประเทศ จากปัญหาเหล่านี้ในปี พ.ศ. 2554 ขจีพร วงศ์ปรีดี และคณะ[8] ได้มีการคิดค้นประดิษฐ์ยาถลุงดำปราศจากตะกั่วขึ้น โดยการนำดีบุกมาทดแทนตะกั่วและได้จดสิทธิบัตรในนามของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เลขที่คำขอ 1101001747 ชื่อผลงานว่า “แท่งยาถลุงดำปราศจากตะกั่ว” หากแต่ว่ายังคงต้องมีการศึกษาการนำแท่งยาถลุงดำปราศจากตะกั่วไปใช้งานในเชิงพาณิชย์และความเข้าใจในกระบวนการและหลักการทางวิทยาศาสตร์เพื่อการควบคุมคุณภาพในการผลิตจริง

ดังนั้นผู้วิจัยได้เล็งเห็นถึงความสำคัญที่จะศึกษาการใช้งานของแท่งยาถลุงดำปราศจากตะกั่ว โดยทำการลงถลุงที่อุณหภูมิต่างๆกัน เพราะการลงถลุงในอุณหภูมิที่เหมาะสมจะส่งผลต่อโครงสร้างทางจุลภาค เมื่อเกิดโครงสร้างทางจุลภาคที่ดีช่วยลดปัญหาการเกิดรูพรุนบนเนื้อยาถลุงและส่งผลให้มี

การเกาะติดที่ตีระหว่างเนื้อยาถมกับชิ้นงานเงิน จนสามารถผลิตเครื่องถมดำปราศจากตะกั่วได้อย่างมีมาตรฐานคุณภาพเหมือนกันทุกชิ้น

ความมุ่งหมายของการวิจัย

ศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการลงถมดำปราศจากตะกั่ว

ความสำคัญของการวิจัย

1. ศึกษาอุณหภูมิที่ส่งผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคของยาถมดำปราศจากตะกั่ว
2. ศึกษาสมบัติเชิงกายภาพและสมบัติเชิงกลของยาถมดำปราศจากตะกั่วบนพื้นอัลลอยเงินและโลหะเงินหลังกระบวนการลงถมดำปราศจากตะกั่ว

ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาการลงถมดำปราศจากตะกั่ว 3 สูตร ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, 700 องศาเซลเซียส บนพื้นอัลลอยเงิน 95 (โลหะเงินร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก ทองแดงร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก) และโลหะเงินบริสุทธิ์
2. ศึกษาสมบัติเชิงกายภาพของแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1, 2, 3 และชิ้นงานเงินที่ผ่านการลงถมดำปราศจากตะกั่วทั้ง 3 สูตรบนพื้นอัลลอยเงินร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก ทองแดงร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และโลหะเงินบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, 700 องศาเซลเซียส โดยวิเคราะห์และอธิบายลักษณะทางกายภาพ ทางผลึกศาสตร์ เพื่อดูโครงสร้างทางจุลภาคและการจัดเรียงตัวที่มีผลต่อคุณภาพของเครื่องถม
3. ศึกษาสมบัติเชิงกลด้วยสภาพรอยแตกของยาถมจากวิธีการตัดโค้งเพื่อตรวจสอบสภาพประเภทรอยแตก และความแข็งแรงของการยึดติดที่ผิวชิ้นงานเงินกับยาถมดำปราศจากตะกั่วทั้ง 3 สูตรบนพื้นอัลลอยเงิน 95 และโลหะเงินบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, 700 องศาเซลเซียส

ตัวแปรอิสระ คือ

1. อุณหภูมิสำหรับการลงถม 400, 500, 600, 700 องศาเซลเซียส
2. ยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3
3. ชิ้นงานเงินสำหรับการลงถม 2 ชนิด คืออัลลอยเงิน 95 และโลหะเงินบริสุทธิ์

ตัวแปรตาม คือ

สมบัติเชิงกายภาพและสมบัติเชิงกลของรอยแตกของยาถมดำปราศจากตะกั่ว

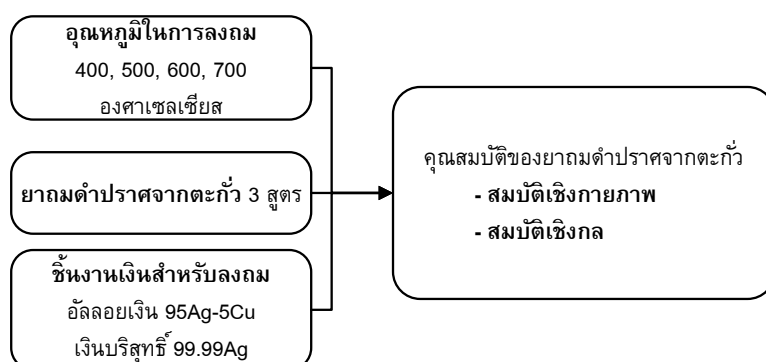
ตัวแปรควบคุม คือ

1. รูปแบบร่องและขนาดของแผ่นเงินสำหรับลงถมดำปราศจากตะกั่ว
2. แรงกระทำการตัดโค้ง 10 psi สำหรับทดสอบความแข็งของยาถมดำปราศจากตะกั่วที่ผ่านการลงถม

นิยามศัพท์เฉพาะ

1. **เครื่องถม** หมายถึง เครื่องเงินที่ทำการแกะสลักลายให้มีลักษณะเป็นร่อง และทำการเติมร่องลายด้วยแท่งยาถมที่มีสีดำ
2. **ยาถม** หมายถึง สารที่ประกอบด้วย ตะกั่ว เงิน ทองแดง และกำมะถัน ซึ่งช่างทำถมจะนำสารทั้งสามชนิดมาหลอมทำเป็น แท่งสีดำ ใช้ทำเครื่องถม
3. **ยาถมดำปราศจากตะกั่ว** หมายถึง ยาถมแท่งสีดำที่ทำการปรับปรุงสูตรโดยไม่ใส่ตะกั่ว
4. **โลหะเงินบริสุทธิ์** หมายถึง โลหะเงินร้อยละ 99.99 โดยน้ำหนัก
5. **อัลลอยเงิน 95** หมายถึง โลหะเงินร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก โลหะทองแดงร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
6. **สมบัติเชิงกายภาพ** ในงานวิจัยนี้ หมายถึง ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของยาถมดำปราศจากตะกั่ว ศึกษาโครงสร้างผลึกของแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่ว ศึกษาปริมาณการเกิดรูพรุน ศึกษารูปร่างของยาถมที่ผ่านการลงถมบนชิ้นงานเงิน และศึกษาความหนาของชั้นรอยต่อระหว่างยาถมกับชิ้นงานเงิน
7. **สมบัติเชิงกล** ในงานวิจัยนี้ หมายถึง ศึกษาสภาพรอยแตกของยาถมดำปราศจากตะกั่ว ด้วยวิธีการตัดโค้งที่ผ่านการลงถมเพื่อตรวจสอบประเภทรอยแตกของยาถม

กรอบแนวคิดในการวิจัย



ภาพประกอบ 1 กรอบแนวคิด

การนำยามตำปราศจากตะกั่ว 3 สูตรลงถมในชั้นงานเงิน 2 ชนิด คือ อัลลอยเงิน 95 และ โลหะเงินบริสุทธิ์ โดยให้ความร้อนในการลงถมที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, 700 องศาเซลเซียส ซึ่ง ผลของอุณหภูมิส่งผลกระทบคุณสมบัติของยามตำปราศจากตะกั่ว คือ สมบัติเชิงกายภาพ และ สมบัติเชิงกล

สมมติฐานในการวิจัย

อุณหภูมิที่ใช้ในการลงถมส่งผลกระทบต่อโครงสร้างจุลภาค และมีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกายภาพและสมบัติเชิงกลของยามตำปราศจากตะกั่ว



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

1. การศึกษาเครื่องถลุงและกระบวนการผลิตเครื่องถลุงแบบดั้งเดิม
2. การศึกษาองค์ประกอบและสมบัติของยาถลุงแบบดั้งเดิม
3. วิวัฒนาการของยาถลุงตำราจากตะกั่ว
4. สมบัติของแร่ที่ทำให้เกิดสี
5. วิวัฒนาการอัลลอยดีบุกสำหรับงานเชื่อมประสาน
6. เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. ศึกษาเครื่องถลุงและกระบวนการผลิตเครื่องถลุงตำแบบดั้งเดิม

เครื่องถลุงเป็นศิลปหัตถกรรมที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายมาตั้งแต่สมัยอยุธยาตอนต้น มีทั้งเครื่องถลุงนครศรีธรรมราช มีชื่อว่า “ถมนคร” เครื่องถลุงในกรุงเทพฯ มีชื่อว่า “บ้านพานถม” เครื่องถลุงสมัยก่อนนิยมทำเป็นเครื่องใช้ และเครื่องบรรณาการให้กับคนชนชั้นสูง ต่อมาปัจจุบันได้นำมาประยุกต์ใช้ทำเป็นเครื่องประดับ เช่น กำไล ต่างหู แหวน เป็นต้น และอาจประดับด้วยเพชรหรือพลอยหลากสีเพื่อเพิ่มมูลค่า[2]

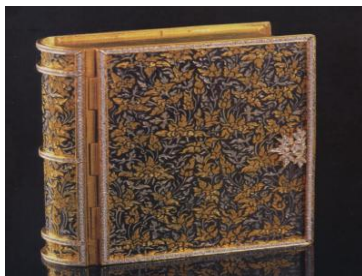
เครื่องถลุงไทยมีอยู่ 3 แบบ คือ เครื่องถลุงทอง เครื่องถลุงตะทอง และเครื่องถลุงดำ หรือเครื่องถลุงเงิน โดยเครื่องถลุงเงิน ดังภาพประกอบ 2 มีลักษณะเป็นเนื้อถลุงที่ใส่ลงไปอยู่บนพื้นโลหะตามร่องลาย มีสีดำมัน บนพื้นสีเงินของโลหะเงิน ตามความนิยมยาถลุงดำที่ดีต้องมีสีดำสนิท[2]

ยาถลุงเป็น วัสดุผสมโดย กรรมวิธีในการผสม จะใช้โลหะสามอย่าง คือ เงิน ตะกั่ว และทองแดง ในอัตราส่วน เงินร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก, ตะกั่วร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก และทองแดงร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก[3] นำมาป่นจนเป็นผงละเอียดและหลอมให้เข้ากันแล้วทำให้เป็นแท่ง เพื่อใช้สำหรับลงพื้นแผ่นเงินที่ชุบร่องเป็นลวดลายไว้

การผลิตแท่งยาถลุงแบบโบราณมีเทคนิคในการทำที่แตกต่างกันแล้วแต่ความชำนาญของช่าง แต่มีการผสมของโลหะหลักสามอย่างเข้าด้วยกัน คือ เงิน ตะกั่ว และทองแดง หลอมในเบ้าแกรไฟต์โดยใช้ความร้อนจากเตาถ่านไม่เนื้ออ่อน เมื่อโลหะทั้งสามหลอมเป็นเนื้อเดียวกันจึงทยอยใส่กำมะถันจนหมด แล้วคนให้เข้ากัน จากนั้นปิดฝาและอุ่นไปเรื่อยๆจนกำมะถันหมดซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 2-3 วัน หลังจากนั้นเทลงรางหลอมเป็นแท่งยาถลุงดำ ดังภาพประกอบ 3



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพประกอบ 2 ประเภทเครื่องถมทั้ง 3 ชนิด ก)เครื่องถมทอง, ข)เครื่องถมตะทอง, ค)เครื่องถมดำ
ที่มา:<http://museum.socanth.tu.ac.th>



ภาพประกอบ 3 แห้งยาถมดำ

ขั้นตอนการผลิตเครื่องถมไทย

ในการทำเครื่องถมไทยมีขั้นตอนการผลิตดังภาพประกอบ 4 [2]



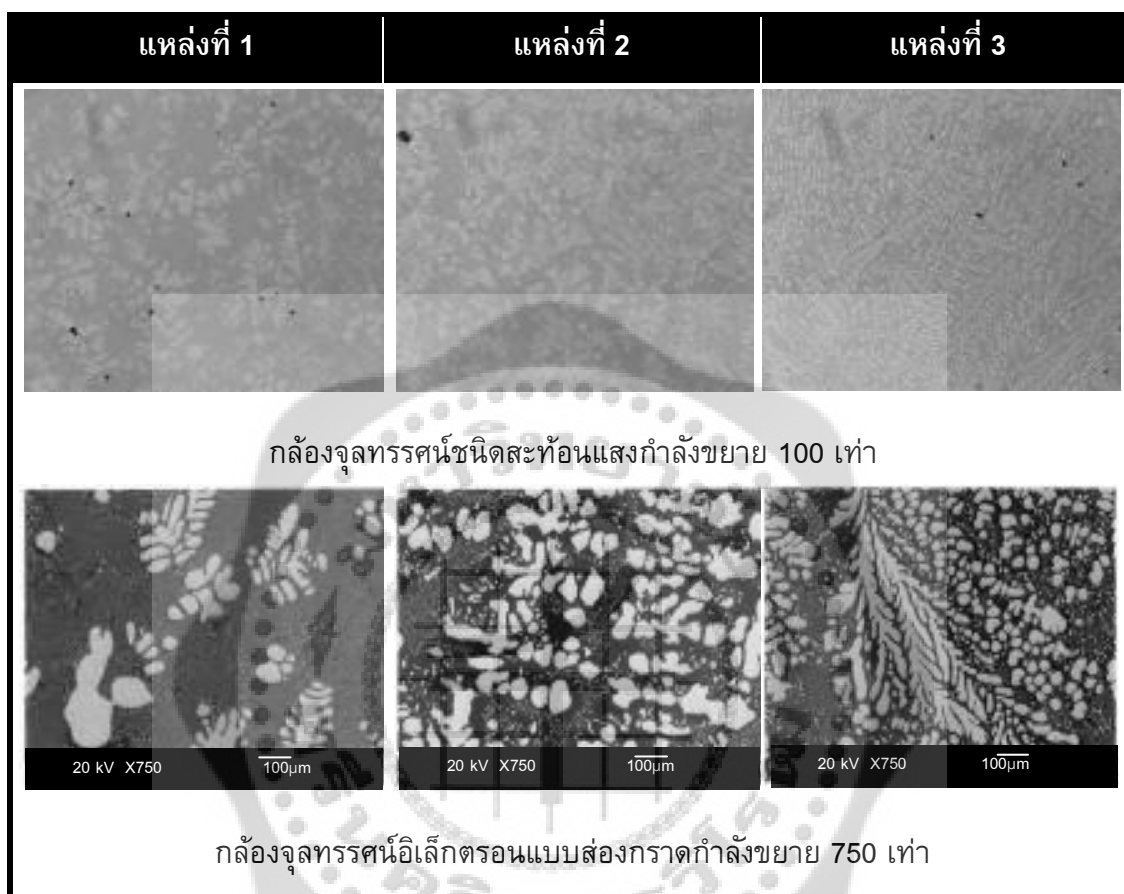
ภาพประกอบ 4 ขั้นตอนการผลิตเครื่องถมแบบดั้งเดิม[9]

1. ขั้นหล่อโลหะ ผสมโลหะเงินที่จะใช้เป็นชิ้นงาน โดยมากนิยมใช้เงิน 95 ส่วน ทองแดง 5 ส่วน
2. ขั้นตอนการขึ้นรูป การทำโลหะให้เป็นรูปร่างโดยใช้ค้อนทุบแต่งเงินให้แผ่ออก จากนั้นมาตัดหรือตีแผ่ให้เป็นรูปภาชนะต่างๆ ตามที่ต้องการ
3. ขั้นเขียนลาย วาดลวดลายตามต้องการลงไปบนภาชนะ จนได้ลวดลายละเอียดตามความต้องการ
4. ขั้นแกะสลักลาย สลักลวดลายด้วยมือ ตอกเป็นรอยลึกลงไปตามลวดลายที่เขียนไว้ โดยสลักให้มีรอยนูนเด่นออกไปอีกด้านหนึ่ง
5. ขั้นลงถม นำแท่งยาถมที่เตรียมไว้แล้วละลายตัวด้วยความร้อนใส่ลงไปบนร่องลวดลายที่แกะสลักไว้ น้ำยาถมจะไหลไปตามร่องนั้นจนทั่ว การลงถมที่ดีนั้นไม่ได้ลงครั้งเดียว ต้องลงถมถึง 2 - 4 ครั้ง เพื่อให้เต็มร่องลวดลาย
6. ขั้นตกแต่งถม แต่งผิวให้เรียบด้วยตะไบ จนกระทั่งเห็นลวดลายหรือภาพปรากฏขึ้นชัดเจน
7. ขั้นขัดเงา ขัดชิ้นงานด้วยเครื่องขัดพร้อมยาขัดยาคินและยาแดงจนเงางาม เช็ดด้วยผ้านุ่มๆ เพื่อทำความสะอาด

2. การศึกษาองค์ประกอบและสมบัติของยาถมแบบดั้งเดิม

องค์ประกอบของแท่งยาถมแบบดั้งเดิมที่มี ตะกั่ว เงิน ทองแดง และกำมะถันเป็นส่วนประกอบ ซึ่งแต่ละแหล่งมีสูตรในการทำแท่งยาถมแตกต่างกัน ดังแสดงในงานวิจัยของณัฐฤตาและคณะ[9] ได้ทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีสมบัติต่างๆในแท่งยาถมของช่างทำเครื่องถมและวิเคราะห์เปรียบเทียบลักษณะของแท่งยาถมจากผู้ผลิตแท่งยาถม 3 แหล่ง คือ แหล่งที่ 1 ยาถมของอาจารย์สมนึก จันทร์จำปา จากกรุงเทพฯ เป็นการนำแท่งจากจังหวัดนครศรีธรรมราชมาผสมเพิ่มโลหะบางชนิด แหล่งที่ 2 ยาถมของอาจารย์ระวี สุดเฉลย จากจังหวัดนครศรีธรรมราช และแหล่งที่ 3 ยาถมของอาจารย์นภัทร คงหอมจากกรุงเทพฯ จากนั้นทำการศึกษาความพึงพอใจจากช่างผู้ใช้แท่งยาถม โดยแท่งยาถมทั้ง 3 แหล่งมีโครงสร้างทางจุลภาคดังภาพประกอบ 5 เมื่อนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีด้วยระบบการวิเคราะห์แบบ Energy Disperive Spectroscopy(EDS) ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่ายาถมทั้ง 3 แหล่ง มีองค์ประกอบของตะกั่วอยู่ในช่วงร้อยละ 40.38-52.64 โดยน้ำหนัก, เงินร้อยละ 2.03-12 โดยน้ำหนัก, ทองแดงร้อยละ 29.80-31.18 โดยน้ำหนัก และกำมะถันร้อยละ 14.14-14.44 โดยน้ำหนัก และผลวิเคราะห์โครงสร้างทางผลึกศาสตร์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน พบว่าแท่งยาถมทั้ง 3 แหล่งประกอบด้วยสารประกอบ PbS, Cu₂S, AgCuS มีโครงสร้างทางผลึกศาสตร์เป็น Orthorhombic แต่ในแท่งยาถมแหล่งที่ 1 จะไม่พบ AgCuS ที่มี สารประกอบ PbS มีโครงสร้างผลึกศาสตร์เป็น Cubic และสารประกอบ Cu₂S มีโครงสร้างผลึกศาสตร์เป็น Monoclinic จากการวิเคราะห์ข้อมูล

แบบสอบถามความพึงพอใจของช่างที่ใช้ยาถมทั้ง 3 คน โดยทดลองใช้ยาถมทั้ง 3 แหล่งลงถมบน
ชั้นงานเงิน เมื่อคิดในเชิงสถิติแล้ว พบว่ายาถมจากแหล่งต่างๆ ทั้ง 3 แหล่งมีสมบัติในเรื่องของ สี
ความมันวาว การเกาะติด รูพรุนและการไหลที่ไม่แตกต่างกัน



ภาพประกอบ 5 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของแท่งยาถมด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสงและ
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด[9]

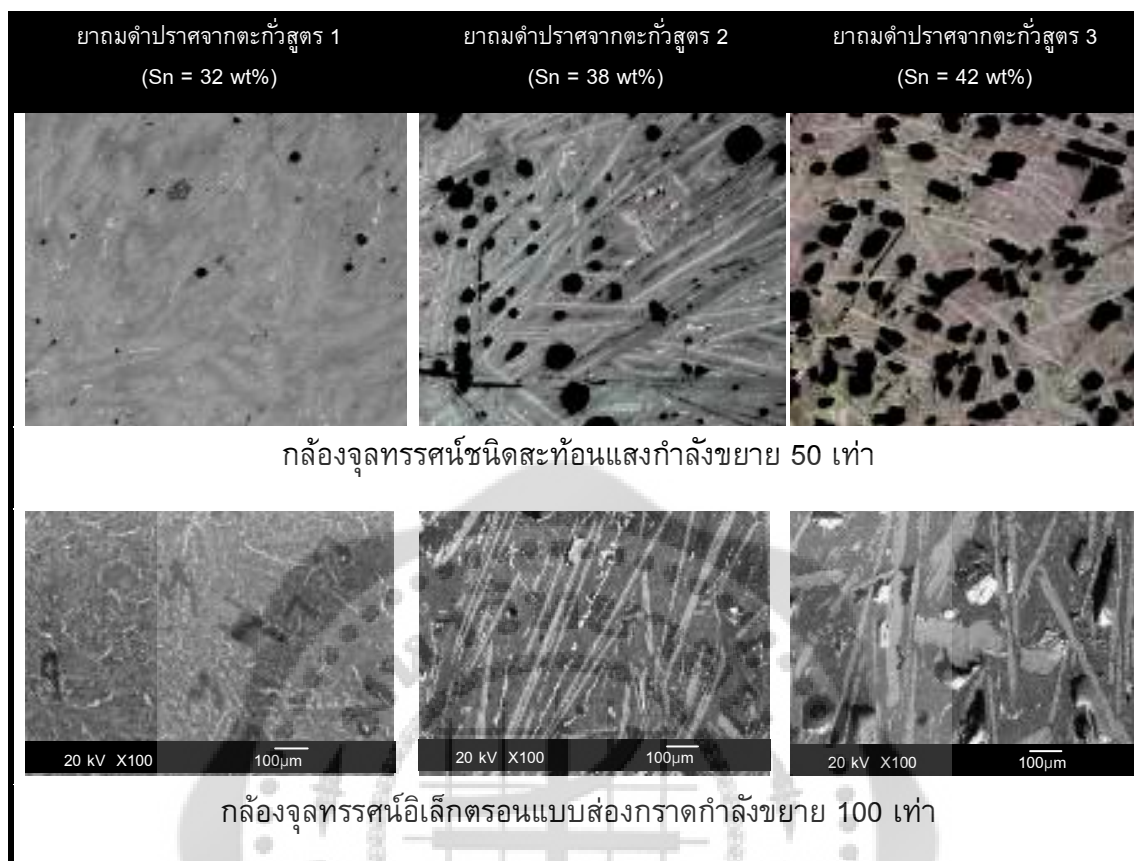
ต่อมางานวิจัยขจีพร วงศ์ปรีดี และคณะ[10] ศึกษาสมบัติของยาถมแบบดั้งเดิม และ
เปรียบเทียบความแข็งที่ผิวระหว่างแท่งยาถมดำที่มีตะกั่วส่วนประกอบกับแท่งยาถมดำปราศจาก
ตะกั่ว โดยนำยาถมจาก 3 แหล่ง [9] และองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence
Spectrometer(XRF)แหล่งที่ 1 จากนครศรีธรรมราชมาปรับสูตรต่อที่กรุงเทพมหานครมีองค์ประกอบของ
ตะกั่วร้อยละ 50.53 โดยน้ำหนัก, เงินร้อยละ 1.43 โดยน้ำหนัก, ทองแดงร้อยละ 29.94 โดยน้ำหนัก
และกำมะถันร้อยละ 14.35 โดยน้ำหนัก อื่นๆร้อยละ 3.75 โดยน้ำหนัก แหล่งที่ 2 จาก
นครศรีธรรมราชมีองค์ประกอบของตะกั่วร้อยละ 44.66 โดยน้ำหนัก, เงินร้อยละ 11.13 โดยน้ำหนัก,
ทองแดงร้อยละ 33.99 โดยน้ำหนัก และกำมะถันร้อยละ 10.31 โดยน้ำหนัก แหล่งที่ 3 จาก
กรุงเทพมหานครมีองค์ประกอบของตะกั่วร้อยละ 40.76 โดยน้ำหนัก, เงินร้อยละ 8.36 โดยน้ำหนัก,

ทองแดงร้อยละ 31.13 โดยน้ำหนัก และกำมะถันร้อยละ 19.79 โดยน้ำหนัก ซึ่งทั้ง 3 แหล่ง มีความแข็งที่ผิว 96.87 ± 6.8 , 83.26 ± 7 และ 99.84 ± 5.4 ตามลำดับ ส่วนยาถมดำปราศจากตะกั่วที่ได้จากการผสมมีความแข็งที่ผิวมากกว่ายาถมแบบดั้งเดิม คือ 182 ± 19.1

3. วิวัฒนาการของยาถมดำปราศจากตะกั่ว

ในปี พ.ศ.2554 ขจีพร วงศ์ปรีดี และคณะ[8] ได้ทำการคิดค้นประดิษฐ์ยาถมดำปราศจากตะกั่วขึ้น เนื่องจากตลาดเครื่องถมของประเทศไทยนั้นอยู่ในวงจำกัด เพราะไม่สามารถส่งออกขายยังต่างประเทศได้ เนื่องจากมีตะกั่วที่เป็นพิษเจือปน ดังนั้นจึงได้คิดค้นสูตรแห่งยาถมดำโดยนำดีบุกมาทดแทนตะกั่วในปริมาณร้อยละ 32-43 โดยน้ำหนัก และได้จดสิทธิบัตรในนามของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ในเลขที่คำขอ 1101001747 ของ ชื่อผลงานว่า “แห่งยาถมดำปราศจากตะกั่ว”

ต่อมางานวิจัยของภัทรา ศรีสุข และคณะ[12] ได้ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและการจัดเรียงตัวของยาถมดำปราศจากตะกั่ว[8] และได้ตั้งชื่อว่า “Nielli inlay” ซึ่งมีโครงสร้างทางจุลภาคดังภาพประกอบ 6 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของแห่งยาถมดำปราศจากตะกั่วในกำลังขยาย 50 เท่า ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสะท้อนแสง และกำลังขยาย 100 เท่า ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลของการเพิ่มปริมาณดีบุกมากขึ้นจะเกิดเฟส Sn-rich มีลักษณะคล้ายเส้นเข็ม (Needle-like plates) ได้ชัดเจนจำนวนมาก หากแต่ถ้าปริมาณดีบุกน้อยเกินไปจะเกิดยูเทคติกในรูปของสารประกอบ ทองแดง-ดีบุก เป็นส่วนใหญ่ ทำให้ไม่เห็นเฟสของเส้นเข็ม Sn-rich นอกจากนี้พบว่าเฟส Ag-rich ที่มีรูปร่างไม่แน่นอนแยกออกมาอยู่บริเวณขอบเกรน และไม่มีกำมะถันเป็นส่วนประกอบ และพบมากในกรณีที่มีปริมาณส่วนผสมของเงินมาก พบมากที่สุดINYาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 นอกจากนี้ผลของการเพิ่มปริมาณดีบุกมากINYาถมดำปราศจากตะกั่วขึ้นส่งผลกระทบให้เกิดปริมาณรูพรุนในแห่งยาถมดำปราศจากตะกั่วมากขึ้นตามปริมาณดีบุกที่เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์หาจุดหลอมเหลวของแห่งยาถมดำปราศจากตะกั่วด้วยเครื่อง Differential scanning calorimetry (DSC) พบว่ายาถมดำปราศจากตะกั่วทั้งสามสูตรมีจุดหลอมเหลวประมาณ $407-414^{\circ}\text{C}$

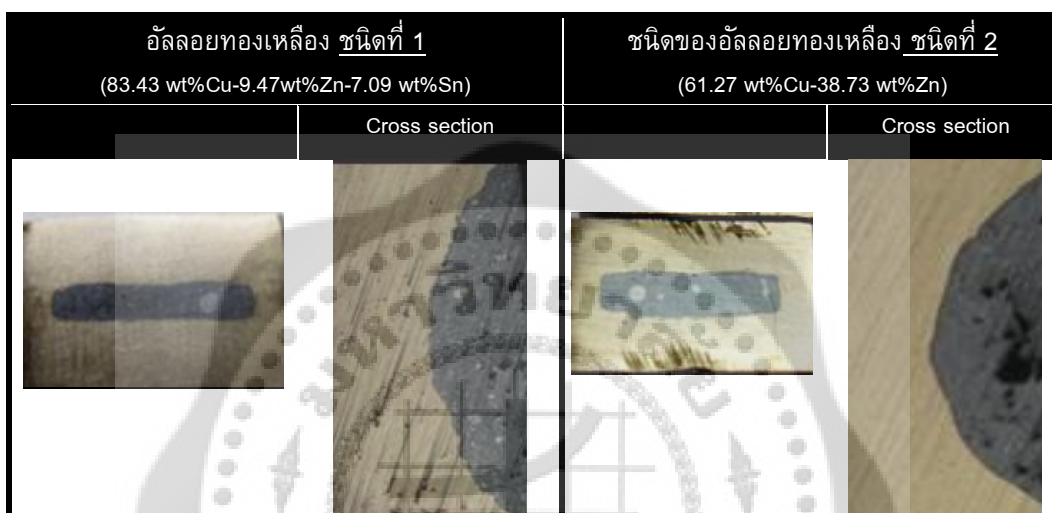


ภาพประกอบ 6 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของแท่งขดลวดปราศจากตะกั่วด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสะท้อนแสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [12]

ปี พ.ศ.2555 ขจีพร วงศ์ปรีดี และคณะ[13] นำขดลวดปราศจากตะกั่วลงมในพื้นอัลลอยทองเหลืองเพื่อเป็นอีกทางเลือกหนึ่งแทนการใช้แต่อัลลอยเงิน โดยศึกษาทองเหลือง 2 ชนิด คือทองเหลืองชนิดที่ 1 ได้จากการหล่อเหวี่ยงและศึกษารูปทรง ขนาดของร่องที่เหมาะสมในการลงม โดยมีส่วนประกอบของทองแดงร้อยละ 83.43 โดยน้ำหนัก, สังกะสีร้อยละ 9.47 โดยน้ำหนัก และดีบุกร้อยละ 7.09 โดยน้ำหนัก ทองเหลืองชนิดที่ 2 เป็นแผ่นสำเร็จมีส่วนประกอบของทองแดงร้อยละ 61.27 โดยน้ำหนัก และสังกะสีร้อยละ 33.73 โดยน้ำหนัก เมื่อทำการกระบวนการลงมขดลวดปราศจากตะกั่วบนทองเหลืองทั้งสองสูตรเกิดฝ้าขาว ดังภาพประกอบ 7 ชั้นงานทองเหลืองทั้ง 2 ชนิดเกิดฝ้าขาวบริเวณเนื้อมเหมือนกัน แต่ทองเหลืองชนิดที่ 1 ที่มีดีบุกอยู่ในส่วนประกอบของทองเหลืองจะมีปริมาณฝ้าขาวที่มากกว่า เป็นสารประกอบ ทองแดง-ดีบุก-เงิน ส่วนการศึกษารูปทรงของร่องไม่มีผลต่อการเกิดรูพรุน แต่มีผลต่อขนาดความกว้างของร่องมีผลต่อการเกิดรูพรุน โดยร่องที่มีขนาดใหญ่จะมีผลต่อปริมาณการเกิดรูพรุนที่มากกว่าร่องที่มีขนาดแคบ ทองเหลืองสูตร

2 ที่มีปริมาณสังกะสีสูง มีการเกิดรูพรุนที่ผิวมากกว่า และเมื่อตัดชิ้นงานแบบภาคตัดขวางพบรอยแตกระหว่างชั้นรอยต่อระหว่างยาถมดำปราศจากตะกั่วกับทองเหลือง

ดังนั้นทองเหลืองที่มีดีบุกเป็นส่วนประกอบมีส่วนทำให้เกิดฝ้าขาวได้ง่ายกว่า เพราะดีบุกชอบรวมตัวกับทองแดงและเงินจนเกิดเป็นฝ้าขาวมากกว่าที่จะจับตัวกับกำมะถันที่เป็นตัวช่วยทำให้เกิดสีดำ ส่วนทองเหลืองที่มีสังกะสีปริมาณมากจะทำให้การยึดเกาะระหว่างชั้นรอยต่อของยาถมดำปราศจากตะกั่วกับทองเหลืองไม่ดี และทำให้รูพรุนมากกว่าทองเหลืองที่มีดีบุกเป็นส่วนประกอบ



ภาพประกอบ 7 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสงกำลังขยาย 50 เท่าแสดงโครงสร้างทางจุลภาคของอัลลอยทองเหลืองสองชนิดที่ลงถมดำปราศจากตะกั่ว[13]

4. สมบัติของแร่ที่ทำให้เกิดสี

การเกิดสีของยาถมเกิดจากธาตุต่างที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในยาถม โดยเฉพาะธาตุที่มีกำมะถันเป็นส่วนประกอบมีส่วนทำให้ยาถมมีสีดำ ซึ่งในงานของ Petr Korbel, et al. (1999) [11] ได้กล่าวถึงชื่อแร่ต่างๆที่มีกำมะถันเป็นส่วนประกอบ ซึ่งแต่ละสารประกอบมีผลทำให้เกิดสีและระบบผลึกที่แตกต่างกัน ดังตาราง 1 แสดงสูตรทางเคมี ระบบผลึก สีแร่ สีผง และชื่อแร่ของธาตุที่มีกำมะถันเป็นส่วนประกอบ ซึ่งธาตุต่างๆชี้ให้เห็นความเชื่อมโยงของอัลลอยดีบุกเชื่อมประสานกับยาถมดำปราศจากตะกั่วที่มีดีบุก เงิน และทองแดงเป็นส่วนประกอบ

ตาราง 1 แสดงสูตรทางเคมี ระบบผลึก สี สีผง และชื่อแร่ของธาตุที่มีกำมะถันเป็นส่วนประกอบ [11]

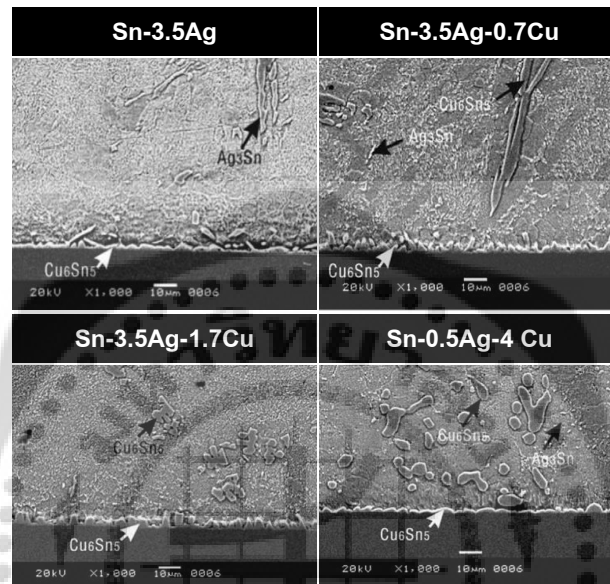
สูตรเคมี	ระบบผลึก	สีแร่	สีผง	ชื่อแร่
Ag ₂ S	Cubic	ดำ	ดำ	Argentite
	Monoclinic			Acanthite
AgCuS	Orthorhombic	สีเทาเข้มถึงดำ	สีเทา	Stromeyerite
Ag ₃ CuS ₂	Tetragonal	สีเทา	ดำ	Jalpaite
Cu ₂ S	Hexagonal	เทาตะกั่ว	ดำเทา	Chalcocite
	Orthorhombic	ดำเทา		
CuS	Hexagonal	น้ำเงินครามหรือ	เทาตะกั่ว	Covellite
		น้ำเงินเข้ม		
Cu ₂ SnS ₃	Triclinic	สีเทาอมเขียว	เทา	Mohite
PbS	Cubic	ดำ	ดำ	Galena

5. วิวัฒนาการอัลลอยดีบุกสำหรับงานเชื่อมประสาน

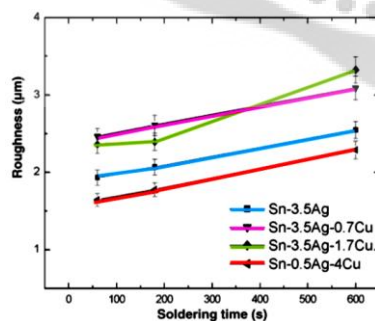
ในอดีตอัลลอยที่ใช้ในการเชื่อมประสานที่ใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์ใช้ตะกั่วกับดีบุกเป็นส่วนประกอบหลัก[14] จนปัจจุบันเลิกใช้ตะกั่วเหลือแต่ดีบุกอย่างเดียวและเติมโลหะอื่นๆเข้าไปทดแทน เช่น เงิน ทองแดง ในปริมาณที่แตกต่างกันเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้นแต่ผลของการใช้อัลลอยดีบุกสำหรับงานเชื่อมประสานมักเกิดชั้นอินเตอร์เมทัลลิกที่หนาระหว่างอัลลอยเชื่อมประสานกับพื้นชิ้นงานจนเป็นสาเหตุของการเกิดรอยแตก นักวิจัยบางรายจึงมีการเพิ่มเติมธาตุอื่นๆประกอบในปริมาณที่ต่ำ เช่น การเติมบิสมาทเพื่อนำมาปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้นลดการโตของชั้นอินเตอร์เมทัลลิก [16] จากการศึกษาสมบัติของอัลลอยดีบุกสำหรับงานเชื่อมประสาน มีทั้งการศึกษาการเชื่อมประสานของกลุ่มดีบุกบนชิ้นงานทองแดงและเงิน ซึ่งอัลลอยดีบุกสำหรับงานเชื่อมประสานที่มีทองแดงมักมีปัญหาการเกิดชั้นอินเตอร์เมทัลลิกที่เป็นสาเหตุของการแตกหัก ดังนั้นความสำคัญเรื่องความขรุขระ ความหนา และการแพร่รวมทั้งจลนพลศาสตร์ มีผลต่อการปรับปรุงสมบัติของอัลลอยดีบุกสำหรับงานเชื่อมประสาน

งานวิจัยของ D.Q. Yu, L.Wang [14] ทำการศึกษาวิวัฒนาการพฤติกรรมการเจริญเติบโตและความขรุขระของชั้นอินเตอร์เมทัลลิกระหว่างอัลลอยเชื่อมประสาน ดีบุก เงินและทองแดงทองแดง โดยมีปริมาณทองแดงที่แตกต่างกัน ผสมอยู่ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 0.7, 1.7 และ 4 โดยน้ำหนัก มีสูตรอัลลอยเชื่อมประสานคือ Sn-3.5Ag, Sn-3.5Ag-0.7Cu, Sn-3.5Ag-1.7Cu และ Sn-0.5Ag-4Cu ทำการเชื่อมบนพื้นชิ้นงานทองแดง จากงานวิจัยทำให้ทราบว่าปริมาณทองแดงมีผลต่อ

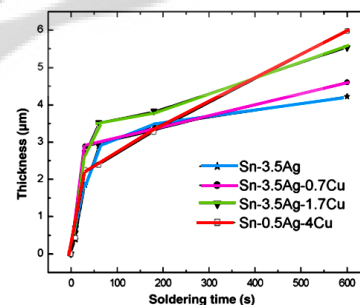
ความหนาของชั้นอินเตอร์เมทัลลิกดังภาพประกอบ 8 เป็นสารประกอบของ Cu_6Sn_5 เมื่ออัลลอยเชื่อมประสานมีปริมาณทองแดงเพิ่มขึ้น กลับมีความขรุขระน้อยลงดังภาพประกอบ 9ก) แต่ความหนากลับมากขึ้นดังภาพประกอบ 9ข) ซึ่งไม่ดีต่อสมบัติของอัลลอยเชื่อมประสานเพราะสารประกอบอินเตอร์เมทัลลิกมีสมบัติแข็งแต่เปราะ และถ้ามีความหนาชั้นอินเตอร์เมทัลลิกมากจะส่งผลให้สมบัติเชื่อมประสานไม่ดีซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดรอยแตก



ภาพประกอบ 8 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงโครงสร้างจุลภาคของอัลลอยเชื่อมประสาน Sn-3.5Ag, Sn-3.5Ag-0.7Cu, Sn-3.5Ag-1.7Cu และ Sn-0.5Ag-4Cu [14]



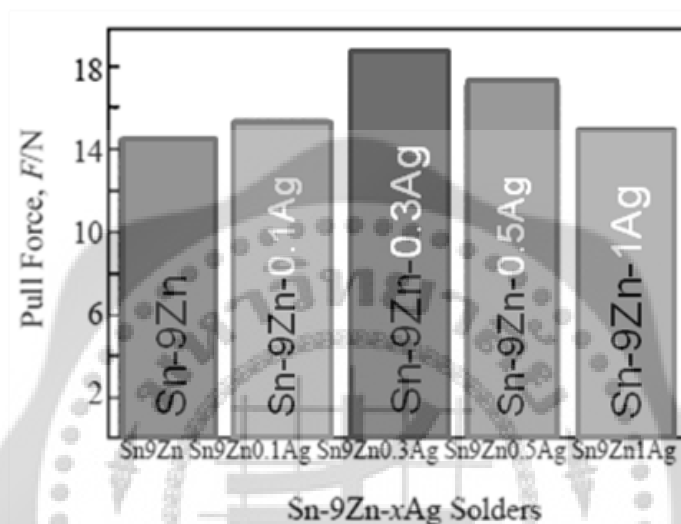
(ก)



(ข)

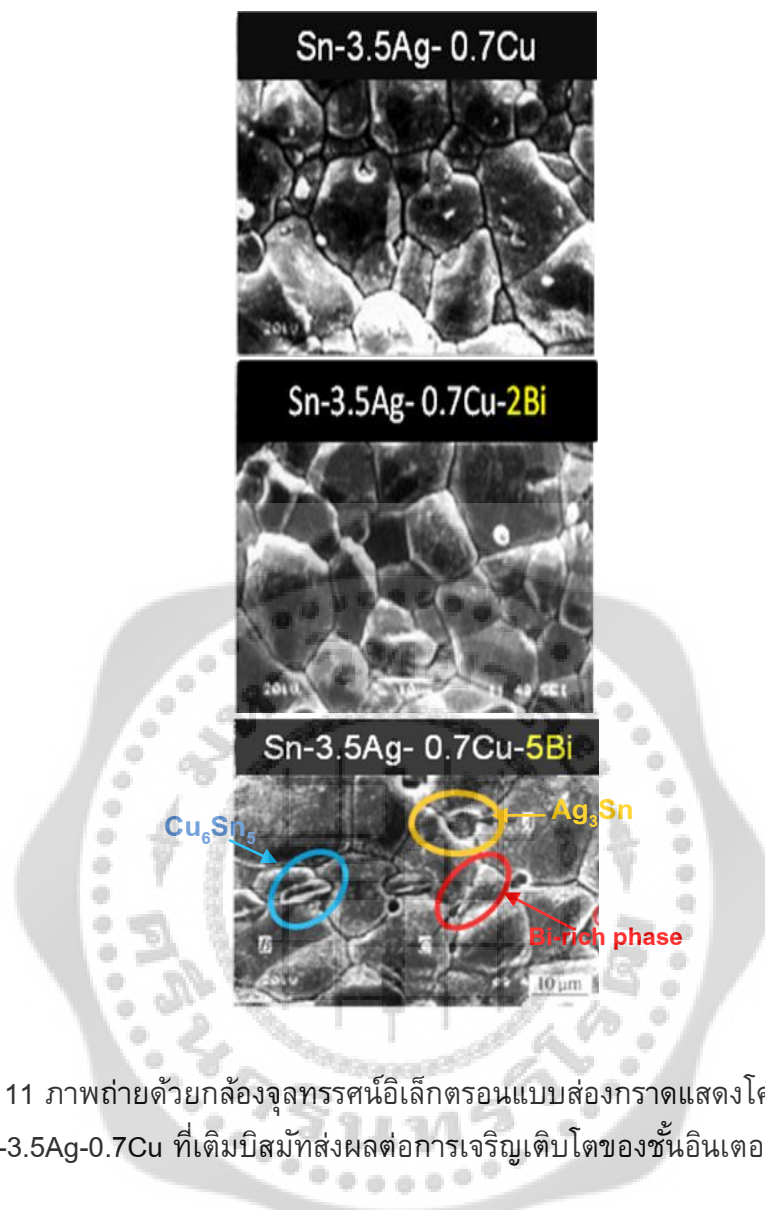
ภาพประกอบ 9 ก) กราฟแสดงความขรุขระของชั้นรอยต่อของอัลลอยเชื่อมประสาน Sn-3.5Ag, Sn-3.5Ag-0.7Cu, Sn-3.5Ag-1.7Cu และ Sn-0.5Ag-4Cu, ข) กราฟแสดงความหนาของชั้นรอยต่อของอัลลอยเชื่อมประสาน Sn-3.5Ag, Sn-3.5Ag-0.7Cu, Sn-3.5Ag-1.7Cu และ Sn-0.5Ag-4Cu[14]

งานวิจัยของ Chen Wenxue, et al.[15] ทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณโลหะเงินที่ใส่ลงในอัลลอยเชื่อมประสานในปริมาณแตกต่างกันส่งผลต่อสมบัติของอัลลอยเชื่อมประสานในสูตร Sn-9Zn ผลการวิจัยนี้พบว่าโลหะเงินที่มีบทบาทสำคัญช่วยเรื่องความสามารถในการเชื่อมและสมบัติเชิงกล ซึ่งผลของการเพิ่มปริมาณเงินร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก สามารถปรับปรุงความต้านทานการเกิดออกซิเดชันของอัลลอยเชื่อมประสานช่วยเรื่องการเกาะติดที่ดีจึงส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด แต่เมื่อมีโลหะเงินเพิ่มขึ้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ทำให้คุณสมบัติเชิงกลกลับลดลงดังภาพประกอบ 10



ภาพประกอบ 10 กราฟแท่งแสดงสมบัติเชิงกลของอัลลอยเชื่อมประสานที่มีปริมาณเงินแตกต่างกัน [15]

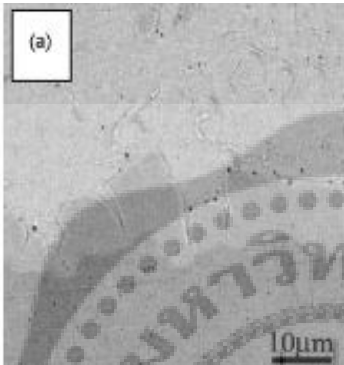
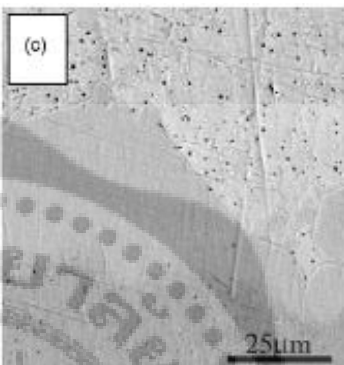
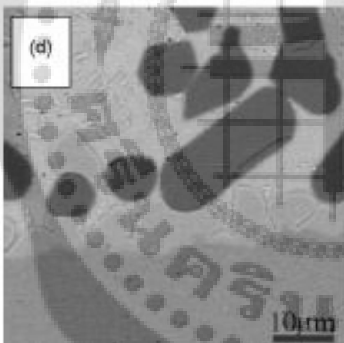
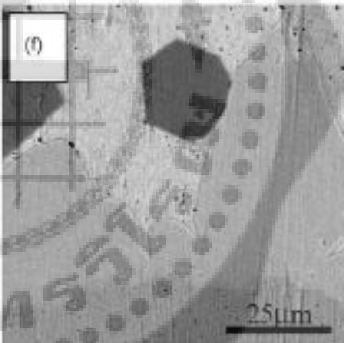
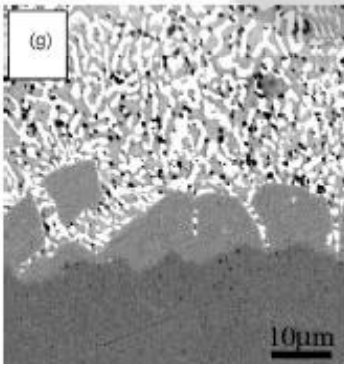
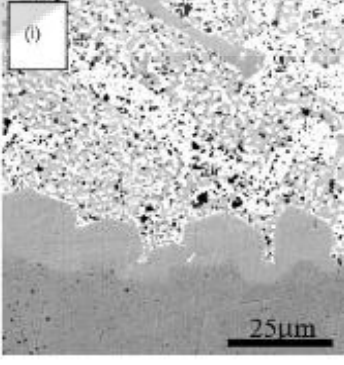
ต่อมาได้มีการคิดปรับปรุงโดยมีการเติมธาตุต่างๆเพียงเล็กน้อย เพื่อให้คุณสมบัติในการเชื่อมดีขึ้น ดังในงานวิจัยของ LI Guo-yuan, SHI Xun-qing[16] ทำการเติมบิสมัทลงไปในอัลลอยเชื่อมประสาน มีผลต่อการเจริญเติบโตของสารประกอบอินเตอร์เมทัลลิก เมื่อทำการตรวจสอบการแพร่ของประกอบและจลนพลศาสตร์ของการเจริญเติบโตของการเกิดชั้นอินเตอร์เมทัลลิก จากการตรวจสอบโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังภาพประกอบ 11 พบว่าผลของปริมาณการเติมบิสมัทสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของชั้นอินเตอร์เมทัลลิก แสดงผลให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณบิสมัทร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก สามารถปรับแต่งขนาดเกรนที่เป็นอินเตอร์เมทัลลิก และยับยั้งการเจริญเติบโตที่มากเกินไปของชั้นอินเตอร์เมทัลลิก



ภาพประกอบ 11 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงโครงสร้างทางจุลภาคของ Sn-3.5Ag-0.7Cu ที่เติมบิสมัทส่งผลต่อการเจริญเติบโตของชั้นอินเตอร์เมทัลลิก[16]

งานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นจะเป็นอัลลอยดีบุกเชื่อมประสานโดยมีทองแดงเป็นพื้น แต่ในงานวิจัยของ H.F. Zou and Z.F. Zhang[17] เป็นการศึกษาจลนพลศาสตร์ของชั้นอินเตอร์เมทัลลิกของอัลลอยเชื่อมประสานกับพื้นชิ้นงานที่เป็นโลหะเงิน โดยอัลลอยเชื่อมประสานมีสูตร Sn-4Ag, Sn-3Cu และ Sn-37Pb และทำการปมแข็งที่เวลาต่าง ๆ กัน เพื่อศึกษาความหนาของชั้นสารประกอบอินเตอร์เมทัลลิก ผลการวิจัยสามารถนำไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ดังตาราง 2 โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอัลลอยเชื่อมประสานที่มีตะกั่วเป็นส่วนประกอบมีค่าต่ำสุด คือ $0.66 \times 10^{-14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ จึงมีผลต่อการเจริญเติบโตของชั้นอินเตอร์เมทัลลิกที่ช้ากว่าทองแดง และเงินตามลำดับ ในงานวิจัยนี้แนะนำว่าพื้นชิ้นงานที่ทำจากเงินดีกว่าที่ทำจากทองแดง เพราะช่วยลดการเกิดอนุภาค Cu_6Sn_5 บริเวณรอยต่อของอัลลอยเชื่อมประสานกับพื้นชิ้นงานทองแดงซึ่งเป็นสาเหตุของการแตกหัก

ตาราง 2 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของอัลลอยเชื่อมประสานกับพื้นชั้นงานที่ทำจากเงิน และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอัลลอยเชื่อมประสาน Sn-4Ag, Sn-3Cu และ Sn-37Pb ทำการบ่มแข็งที่ 260 °C ที่เวลาต่างๆกัน [17]

อัลลอยเชื่อม ประสาน	บ่มแข็ง เวลา 0.5 ชั่วโมง	บ่มแข็ง เวลา 9 ชั่วโมง	ค่าสัมประสิทธิ์ การแพร่ (ตารางเมตรต่อวินาที)
Sn-4Ag/Ag			1.41×10^{-14}
Sn-3Cu/Ag			1.39×10^{-14}
Sn-37Pb/Ag			0.66×10^{-14}

6. เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

6.1 กล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสง (Optical Microscope)

กล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสงดังภาพประกอบ 12 ใช้หลักการของแสงตกกระทบลงบนวัตถุเป็นเครื่องมือวิเคราะห์อย่างง่าย โดยมีแหล่งกำเนิดแสงมาจากหลอดไฟ แสงนี้จะส่งต่อไปยังเลนส์วัตถุลงสู่ผิวหน้าชิ้นงาน และรับแสงที่สะท้อนจากผิวหน้าชิ้นงานไปยังช่องมองภาพหรือเลนส์ใกล้ตาทำให้เห็นภาพที่มีกำลังขยายตั้งแต่ 50-1,000 เท่า ใช้สำหรับตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเพื่อศึกษารูปร่างของเกรน เมื่อต่อกับอุปกรณ์เสริมที่ติดตั้งกล้องถ่ายภาพแล้วต่อสัญญาณไปยังคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งซอฟต์แวร์ทำหน้าที่ดูภาพแล้วบันทึกภาพและสามารถวัดขนาดของเกรน [18]

หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสง เริ่มจากแสงของหลอดไฟชนิดหลอดทังสเตน-ฮาโลเจน จะให้ความเข้มและคุณภาพแสงที่สม่ำเสมอ แสงนี้จะถูกกรองผ่านฟิลเตอร์ โดยฟิลเตอร์จะดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น เพื่อให้แสงที่ผ่านฟิลเตอร์มีช่วงความยาวคลื่นที่ใกล้เคียงกับแสงขาวจากดวงอาทิตย์ จากนั้นแสงนี้จะผ่านไปยังเลนส์วัตถุลงสู่ผิวหน้าชิ้นงาน และแสงที่กระทบที่ผิวชิ้นงานก็จะสะท้อนจากผิวหน้าชิ้นงานไปยังช่องมองภาพหรือเลนส์ใกล้ตา โดยเลนส์วัตถุจะยึดติดอยู่กับแท่นหมุนสำหรับเลือกกำลังขยายที่ต้องการ โดยที่แท่นหมุนจะมีเลนส์วัตถุกำลังขยายทั้งหมด 5 ตัว คือ 5, 10, 20, 50, 100 เท่า และเมื่อรวมกับเลนส์ใกล้ตา สองตัวที่ติดอยู่บนกระบอกรับภาพสำหรับมองภาพ กำลังขยายจะเพิ่มขึ้นจากเดิมอีก 10 เท่า เป็น 50, 100, 200, 1,000 เท่า ภาพที่เห็นนั้นอาจยังไม่คมชัดจึงต้องมีการปรับโฟกัสเพื่อให้เห็นภาพได้ชัดเจน โดยจะมีปุ่มหมุนปรับภาพหยาบและปุ่มปรับภาพละเอียดเพื่อเลื่อนปรับระยะห่างระหว่างผิวหน้าของชิ้นงานให้อยู่ในระยะโฟกัสของเลนส์ ในการบันทึกภาพนั้นกล้องจุลทรรศน์ได้ต่อกับอุปกรณ์เสริมติดตั้งกล้องถ่ายภาพแล้วต่อสัญญาณไปยังคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งซอฟต์แวร์ทำหน้าที่ดูภาพแล้วบันทึกภาพ เป็นต้นภาพที่เกิดขึ้นไม่ได้เกิดจากแสง แต่เป็นการสร้างภาพขึ้นมาจากสีและความสว่างที่เซลล์รับแสงในกล้องส่งสัญญาณมายังคอมพิวเตอร์ ดังนั้นกำลังขยายของภาพที่ปรากฏบนจอคอมพิวเตอร์จึงไม่สามารถคำนวณได้จากกำลังขยายของเลนส์วัตถุกับเลนส์ใกล้ตา แต่ซอฟต์แวร์จะมีสเกลไมโครมิเตอร์เทียบกับระยะทางจริง ดังนั้นในการถ่ายภาพทุกครั้งต้องใส่ขีดบอกระยะวางไว้ในรูปถ่ายทุกครั้งเพื่อจะได้ทราบระยะจริงในภาพถ่ายได้ถูกต้อง[18]



ภาพประกอบ 12 กล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสงต่อกับอุปกรณ์เสริมติดตั้งกล้องถ่ายภาพ

6.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด หรือ SEM ดังภาพประกอบ 13 เป็นเครื่องมือที่สามารถวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของโครงสร้างทางจุลภาค โดยสามารถให้กำลังขยายที่สูงถึง 20,000-50,000 เท่า ตามระดับพลังงานของตัวอย่างซึ่งผลการวิเคราะห์จะได้ทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพ เช่น ลักษณะเฉพาะของชิ้นงานดูขนาดเกรน, ความขรุขระผิว, ความพรุน, การกระจายตัวของอนุภาค, ความเป็นเนื้อเดียวของวัสดุ และดูการแตกหักในระดับโครงสร้าง

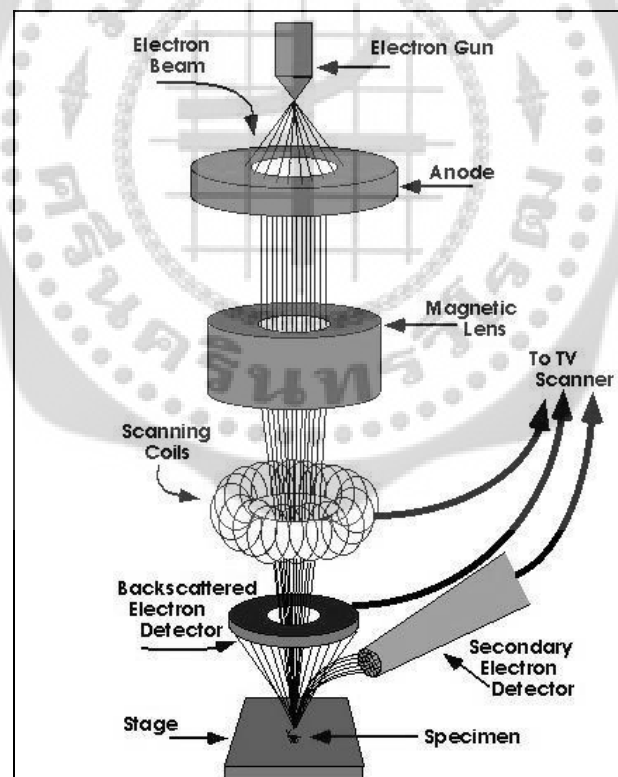
หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงส่วนประกอบดังภาพประกอบ 14 ในเครื่องจะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่ทำมาจากทังสเตนรูปตัววี โดยจะมีการจ่ายศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วทำให้ฟิลาเมนต์เกิดความร้อนสูงและปลดปล่อยอิเล็กตรอนอิสระออกมา เรียกว่า อิเล็กตรอนปฐมภูมิ ซึ่งอิเล็กตรอนปฐมภูมิจะถูกดึงดูดลงสู่เบื้องล่างโดยแผ่นอนาโนดภายใต้ภาวะความดันสุญญากาศ และผ่านชุดคอนเดนเซอร์เลนส์ที่เป็นอิเล็กโทรเมคเนติกเลนส์ (Magnetic Lens) เป็นเลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าทำหน้าที่ในการรวบรวมและบังคับลำอิเล็กตรอนให้เป็นรูปกรวยที่มีขนาดเล็กที่สุดเพื่อเพิ่มความเข้มของลำอิเล็กตรอนวิ่งลงสู่เบื้องล่างผ่านชุดขดลวดควบคุมทิศทาง (Scanning coils) ที่ทำการควบคุมทิศทางเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนบนพื้นผิวตัวอย่างที่ทำการทดสอบ เมื่อลำอิเล็กตรอนกระทบผิวตัวอย่างจะเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมธาตุในตัวอย่างที่ทำการทดสอบ และเกิดการถ่ายโอนพลังงานที่ชั้นความลึกจากพื้นผิวที่ระดับต่าง ๆ ทำให้เกิดการปลดปล่อยสัญญาณอิเล็กตรอนชนิดต่าง ๆ ดังภาพประกอบ 15 ที่แสดงสัญญาณที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับตัวอย่าง จากนั้นจะมีตัวตรวจจับสัญญาณอิเล็กตรอน 3 ชนิด คือ SE detector, BSE detector และ X-Ray detector เพื่อรวบรวมสัญญาณที่เกิดขึ้น โดย SE detector เป็นหัววัดรังสีชนิดพลาสติกเรืองแสงกึ่งตัวนำ โดยสัญญาณภาพที่ได้เกิดจากการจับสัญญาณทุติยภูมิที่เกิดขึ้นที่พื้นผิวระดับไม่ลึกเกิน 10 นาโนเมตร โดยเกิดกับธาตุที่มีแรงยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนที่ผิวต่ำ ส่วน BSE detector เป็นหัววัดรังสีชนิด Solid-State Diode เป็นตัวตรวจจับชนิดกระเจิงกลับความดันไฟฟ้าต่ำ ซึ่งสัญญาณภาพที่ได้เกิดจากกลุ่มอิเล็กตรอนที่สูญเสียพลังงานให้กับอะตอมในชิ้นงานตัวอย่างบางส่วนและกระเจิงกลับออกมา เกิดที่พื้นผิวระดับลึกกว่า 10 นาโนเมตรโดยเกิดได้กับธาตุที่มีเลขอะตอมสูง สัญญาณเหล่านั้นถูกแปรไปเป็นภาพขาวดำที่เกิดจากความแตกต่างระหว่าง ความสว่าง(ขาว) กับความมืด(ดำ) ซึ่งถ้าบริเวณที่มีธาตุมวลอะตอมสูงภาพที่แสดงออกมาจะสว่างกว่ามวลของธาตุอะตอมที่ต่ำ และสุดท้ายตัวตรวจจับรังสีเอกซ์จะใช้หัววัดรังสีชนิดกึ่งตัวนำประเภท Si(Li) ทำงานร่วมกับอุปกรณ์ในการวิเคราะห์พลังงานของรังสีเอกซ์ เพื่อวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ต่อไป

สัญญาณภาพที่เกิดมีสองแบบ คือ แบบแรกสัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิหรือ Secondary Electron Image จะเกิดกับธาตุที่มีแรงยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนที่ผิวต่ำ แบบที่สองสัญญาณภาพอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ หรือ Backscattered Electron Image ที่เกิดจากการกระเจิงกลับของอิเล็กตรอนปฐมภูมิโดยไม่มีการสูญเสียพลังงาน เนื่องจากการทำอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนวงใน

ที่มีพลังงานสูง โดยมากจะเกิดได้กับธาตุที่มีเลขอะตอมสูง ทั้งนี้สัญญาณดังกล่าวจะถูกแปรไปเป็นภาพขาวดำ[19]

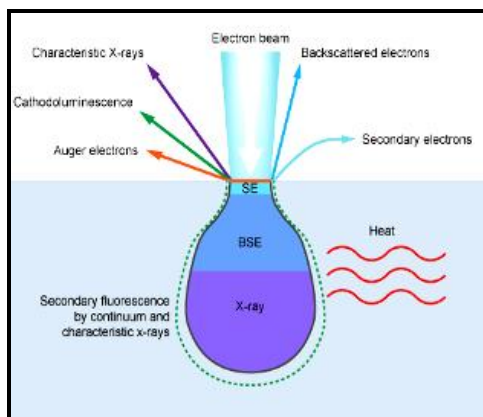


ภาพประกอบ 13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



ภาพประกอบ 14 แสดงส่วนประกอบและหลักการทำงานเบื้องต้นของเครื่องSEM

ที่มา: <http://203.185.131.25/lab/viewTool.php?toolId=7>



ภาพประกอบ 15 แสดงสัญญาณที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับชิ้นงานตัวอย่าง

ที่มา: <http://www.ammr.org.au/myscope/sem/background/concepts/interactions.php>

6.3 เครื่องมือการวิเคราะห์ธาตุโดยเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer) ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

Energy Dispersive X-Ray Spectrometer หรือ EDS เป็นดีเทคเตอร์ตัวหนึ่งที่อยู่ในระบบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดใช้สำหรับวิเคราะห์ธาตุต่างๆที่มีอยู่ในชิ้นงานทดสอบ ซึ่งระบบการวิเคราะห์แบบEDS มีดีเทคเตอร์ทำหน้าที่รับสัญญาณ X-Ray จากชิ้นงานที่ทำการทดสอบ โดยเครื่องมีหลักการคือ ลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงเคลื่อนที่เข้าชนอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นในของอะตอมแล้วเกิดการถ่ายโอนพลังงานให้แก่อิเล็กตรอนในชั้นงานที่ทำการทดสอบ ทำให้อิเล็กตรอนในชั้นที่ได้รับพลังงานนั้นมีพลังงานสูงขึ้นจนเกินพลังงานยึดเหนี่ยวจึงหลุดออกจากวงโคจรและเกิดช่องว่างของชั้นอิเล็กตรอนในชั้นโคจร ทำให้อิเล็กตรอนชั้นถัดไปต้องลดระดับพลังงานมาแทนที่ เพื่อรักษาความสมดุลโดยการปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาซึ่งมีพลังงานเท่ากับความต่างของระดับพลังงานยึดเหนี่ยวเฉพาะชั้นโคจรของอิเล็กตรอนเฉพาะธาตุนั้นๆ เรียกว่า รังสีเอกซ์เฉพาะตัว และเมื่อรังสีเอกซ์เฉพาะตัวผ่านดีเทคเตอร์ที่ทำจากSi(Li) จะเปลี่ยนพลังงานรังสีเอกซ์ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าในรูปศักย์ไฟฟ้า และแสดงผลวิเคราะห์ในรูปสเปกตรัม พร้อมทั้งแสดงผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณและคุณภาพ โดยรูปแบบการวิเคราะห์ธาตุในตัวอย่างในระบบ EDS กระทำได้ 3 วิธี คือ [19]

1. การวิเคราะห์เฉพาะจุด เป็นการวิเคราะห์ที่ให้ลำอิเล็กตรอนกระทบอยู่กับที่บนผิวตัวอย่าง ณ จุดที่ต้องการวิเคราะห์ เพื่อวัดปริมาณรังสีเอกซ์เฉพาะตัวตรงจุดที่ต้องการ

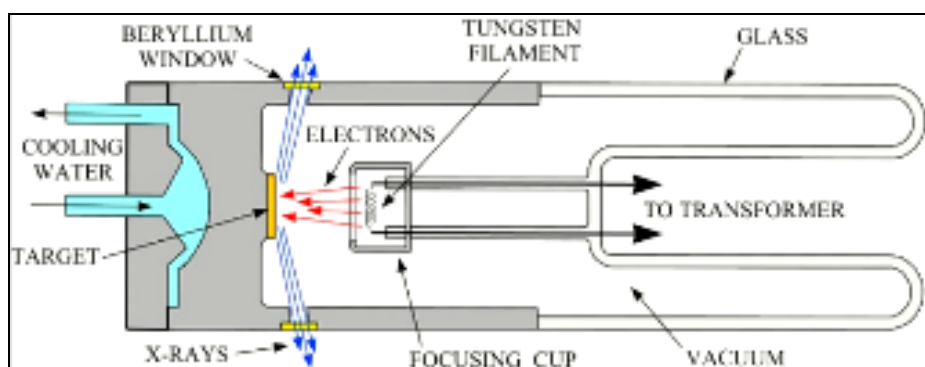
2. การวิเคราะห์ส่องกราดตามแนวเส้นเป็นการวิเคราะห์โดยใช้การส่องกราดลำอิเล็กตรอนเป็นแนวนอนบนตัวอย่าง ณ ตำแหน่งที่สนใจ เพื่อวัดความเข้มของรังสีเอกซ์เฉพาะตัว เพื่อหาขอบเขตของรอยต่อหรือเฟสของโครงสร้าง

3. วิเคราะห์ส่องกราดเฉพาะพื้นที่เป็นการทำเอกซเรย์แมปปิง หรือ X-ray mapping จะทำการวิเคราะห์โดยใช้ลำอิเล็กตรอนส่องกราดบนผิวตัวอย่างเป็นพื้นที่เล็กๆและรังสีเอกซ์เฉพาะตัวจะพุ่งออกมาจากตัวอย่างจะเป็นจุดต่อจุด ภาพที่ได้จะแสดงถึงลักษณะการกระจายของธาตุนบนพื้นที่นั้นๆซึ่งธาตุที่ทำการค้นหาจะแสดงเป็นจุดสีขาว

6.4 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray Diffraction)

เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันหรือ XRD เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่สามารถหาโครงสร้างผลึกวิเคราะห์ธาตุการจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่างๆ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอกซ์ ซึ่งผลที่ได้ประกอบด้วยพีคต่างๆโดยแต่ละพีคจะแสดงลักษณะเฉพาะของสารประกอบนั้นๆที่มีอยู่ในชิ้นงาน และต้องนำไปเปรียบเทียบกับสารประกอบมาตรฐานของ JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards) [19]

หลักการของเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันเริ่มจากในเครื่องมีหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าแรงดันสูงทำหน้าที่ปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ขั้วแคโทดที่ทำจากทังสเตน จนเกิดความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและแอโนด จึงทำให้อิเล็กตรอนที่ขั้วแคโทดวิ่งเข้าชนเป้าแอโนดที่ทำจากทองแดงซึ่งให้ค่าความยาวคลื่น 1.542 อังสตรอมมีทั้ง K_{α} และ K_{β} จนปลดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมาผ่านหน้าต่างที่ทำด้วยเบริลเลียม แล้วกรองความยาวคลื่นให้เหลือแค่ K_{α} ทั้งหมดนี้อยู่ในหลอดรังสีเอกซ์ ดังภาพประกอบ 16 จากนั้นรังสีเอกซ์ K_{α} จะถูกบีบให้แคบลงโดยไดเวอร์เจนสลิตทำหน้าที่ควบคุมพื้นที่ที่รังสีจะตกกระทบบนตัวอย่างชิ้นงานทดสอบที่ทำการขัดมันจนได้พื้นผิวที่เรียบและได้ระนาบ โดยตัวอย่างชิ้นงานจะติดไว้กับแกนของโกนิโอมิเตอร์ จากนั้นรังสีเอกซ์ที่สะท้อนจากตัวอย่างจะผ่านเข้าไปที่รีซีฟิงสลิตเพื่อปรับความสามารถในการแยกแยะความเข้มของรังสีให้เหมาะสม และผ่านเข้าไปยังหน่วยรับสัญญาณ และแปลงสัญญาณเป็นรูปดิฟแฟรกโตแกรมที่แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุม 2θ และค่าความเข้มของรังสี ซึ่งค่าที่ได้ประกอบด้วยพีคต่างๆโดยแต่ละพีคจะแสดงลักษณะเฉพาะของสารประกอบนั้นๆที่มีอยู่ในชิ้นงาน จากนั้นนำไปเปรียบเทียบกับสารประกอบมาตรฐานที่มีอยู่ของ JCPDS จะสามารถทราบสารประกอบและโครงสร้างผลึกชิ้นงานที่ทำการทดสอบ



ภาพประกอบ 16 แสดงส่วนประกอบของหลอดผลิตรังสีเอกซ์

ที่มา: http://www.kruphysics.com/2010_05_01_archive.html



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

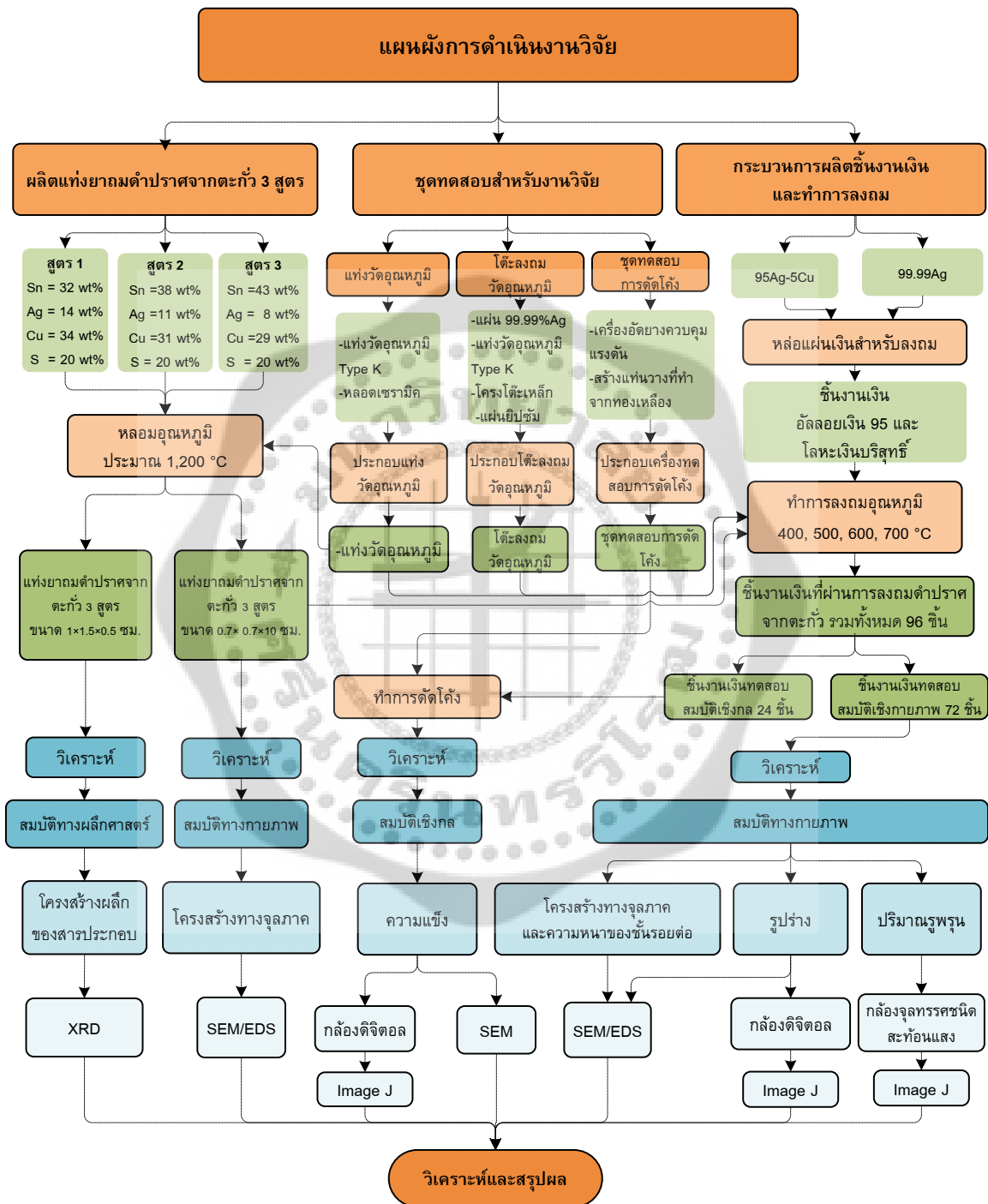
แผนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงทดลอง ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการลงยาถมต่อโครงสร้างทางจุลภาคของยาถมดำปราศจากตะกั่ว และศึกษาสมบัติเชิงกายภาพ และสมบัติเชิงกลของยาถมดำปราศจากตะกั่วบนพื้นชิ้นงานที่ทำจากอัลลอยเงินร้อยละ 95 และโลหะเงินบริสุทธิ์ โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ค้นคว้าหาข้อมูลเรื่องเครื่องถมทั้งถมแบบดั้งเดิมและยาถมดำปราศจากตะกั่ว
2. สร้างชุดทดสอบสำหรับงานวิจัย คือ แท่งวัดอุณหภูมิติดที่หัวเป่าไฟ โตะสำหรับลงถมวัดอุณหภูมิ และชุดทดสอบการตัดโค้ง
3. ผลิตแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่ว 3 สูตร
4. วิเคราะห์แท่งยาถมดำปราศจากตะกั่ว 3 สูตรด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค
5. วิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์ของแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่ว 3 สูตรด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน
6. ผลิตชิ้นงานเงินสำหรับลงถม 2 ชนิด คือ อัลลอยเงิน 95 และโลหะเงินบริสุทธิ์ ด้วยกระบวนการหล่อแบบขี้ผึ้งหาย (lost wax casting) ด้วยเครื่องหล่อสูญญากาศ
7. นำชิ้นงานเงินทั้ง 2 ชนิดลงยาถมดำปราศจากตะกั่ว 3 สูตรที่อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส บนโตะสำหรับลงถมวัดอุณหภูมิและแท่งวัดอุณหภูมิติดที่หัวเป่าไฟ
8. ทำการตัดแนวขวางชิ้นงานเงินที่ผ่านการลงยาถมดำปราศจากตะกั่วทั้ง 3 สูตรที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสง, กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค และรูปร่างของยาถมดำปราศจากตะกั่ว ศึกษาความหนาของชั้นรอยต่อด้วยวิธีการทำ line scan ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ธาตุโดยเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน
9. ศึกษาความแข็งของยาถมโดยวิธีการตัดโค้งชิ้นงานเงินที่ผ่านการลงยาถมดำปราศจากตะกั่ว 3 สูตรที่อุณหภูมิต่างๆ แล้วนำมาทำการวิเคราะห์เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค ด้วยกล้องถ่ายภาพดิจิทัลความละเอียดสูง เพื่อศึกษาพื้นที่รอยแตกที่ถมหลุดออกโดยใช้โปรแกรม Image J และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
10. รวบรวม วิเคราะห์ผลการทดลอง และสรุปผลการทดลอง

การทดลองทั้งหมดแสดงให้เห็นภาพแต่ละกระบวนการตั้งแต่แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานเพื่อศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการลงถมดำปราศจากตะกั่ว



ภาพประกอบ 17 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 วิธีการทำแท่งยาถมและชิ้นงานเงินสำหรับลงถมดำปราศจากตะกั่ว

3.1.1 การหลอมยาถมดำปราศจากตะกั่วทั้ง 3 สูตร

ซึ่งนำให้นักส่วนประกอบของยาถมดำปราศจากตะกั่วตามอัตราส่วนดังตาราง 3 จากนั้นนำไปหลอมด้วยหัวเป่าไฟที่อุณหภูมิประมาณ 1,200 องศาเซลเซียสโดยวัดจากเครื่องวัดอุณหภูมิที่หัวเป่าไฟ หลอมยาถมในเบ้าแกรไฟต์ ในสภาวะบรรยากาศปกติดังภาพประกอบ 18 จนเป็นเนื้อเดียวกัน และเทลงรางเหล็กโดยแบ่งเป็น 2 ขนาดดังภาพประกอบ 19 คือ

1. รางเทเหล็กขนาด $0.7 \times 0.7 \times 10$ เซนติเมตร สำหรับใช้ในการลงถมบนชิ้นงานเงิน

2. รางเทเหล็กขนาด $4 \times 1 \times 12$ เซนติเมตร สำหรับศึกษาโครงสร้างผลึกศาสตร์ เพื่อวิเคราะห์ธาตุการจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน และตัดแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วให้ได้ขนาด $1 \times 1.5 \times 0.5$ เซนติเมตร

วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. โลหะดีบุก
2. โลหะเงิน
3. โลหะทองแดง
4. กำมะถัน
5. เบ้าแกรไฟต์
6. แท่งแกรไฟต์
7. หัวเป่าไฟ
8. แท่งวัดอุณหภูมิและเครื่องวัดอุณหภูมิ
9. รางเทเหล็ก

วิธีการทำ

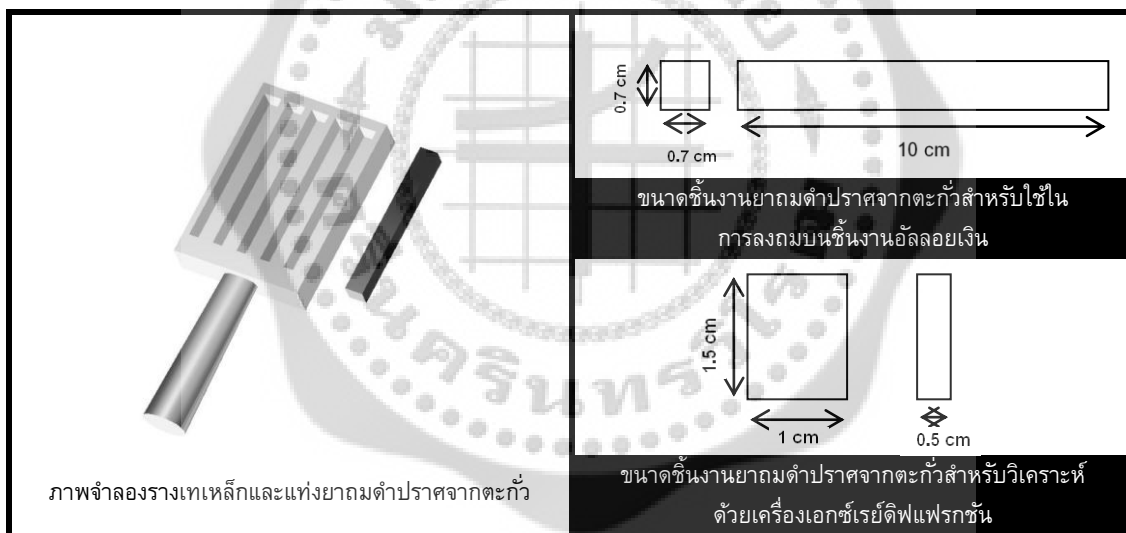
นำส่วนผสมทองแดง เงิน ดีบุก และกำมะถัน หลอมเข้าด้วยกันในเบ้าแกรไฟต์ให้ความร้อนด้วยหัวเป่าไฟที่ติดตั้งวัดอุณหภูมิและเครื่องวัดอุณหภูมิปรับความร้อนของหัวเป่าไฟให้อยู่ในช่วง 1,200 องศาเซลเซียส ในสภาวะบรรยากาศปกติ จากนั้นคนส่วนผสมให้เข้ากันด้วยแท่งแกรไฟต์จนเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วจึงนำมาเทใส่ในรางเทเหล็กทั้ง 2 ขนาด จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นในอุณหภูมิห้อง

ตาราง 3 แสดงสูตรยาถมดำปราศจากตะกั่วทั้ง 3 สูตร

ยาถมดำปราศจากตะกั่ว	Sn (wt%)	Ag (wt%)	Cu (wt%)	S (wt%)
สูตร 1	32	14	34	20
สูตร 2	38	11	31	20
สูตร 3	43	8	29	20



ภาพประกอบ 18 การหลอมยาถมดำปราศจากตะกั่ว



ภาพประกอบ 19 รางเทยาถมและขนาดชิ้นงานยาถมดำปราศจากตะกั่วที่ใช้ในการศึกษา

3.1.2 การเตรียมชิ้นงานเงินสำหรับการลงถมดำปราศจากตะกั่ว

เตรียมชิ้นงานเงินขนาด 1.5×1.0×0.12 เซนติเมตร และร่องสำหรับลงยาถมดำปราศจากตะกั่วอยู่ตรงกลางขนาด 1.0×0.3×0.05 เซนติเมตร เพื่อใช้สำหรับศึกษาสมบัติเชิงกายภาพ และสมบัติเชิงกล ซึ่งในการทดลองนี้มีชิ้นงานเงิน 2 ชนิด คือ

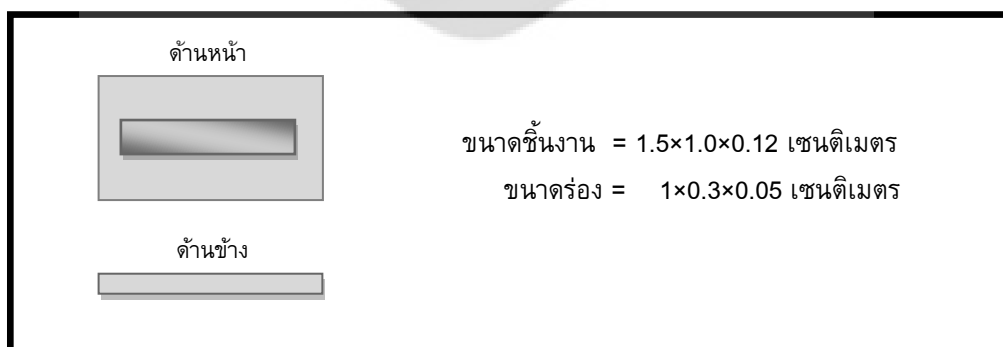
1. อัลลอยเงินที่ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ คือ อัลลอยเงิน 95 ประกอบด้วย โลหะเงินร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก และทองแดงร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
2. เงินบริสุทธิ์ คือ เงินร้อยละ 99.99 โดยน้ำหนัก

วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. โลหะเงิน
2. โลหะทองแดง
3. แวกซ์แผ่นสำหรับกัด CNC และฉีดเทียน
4. ซิลิโคนเหลวสำหรับทำแม่พิมพ์
5. ปูนสำหรับหล่อเงิน ยี่ห้อ JPL
6. อุปกรณ์แต่งเทียน เช่น ชิปโป, มีดแต่งเทียน, หัวแร้ง, คัตเตอร์บัท ฯลฯ
7. เครื่องกัดแวกซ์ CNC
8. เครื่องฉีดเทียน
9. เครื่องตีปูน ยี่ห้อ KWS kachele 75175 Pforzheim
10. เครื่องอบปูน ยี่ห้อ BU - 450
11. เครื่องหล่อสุญญากาศ ยี่ห้อ INDUTHERM – VC 600V

วิธีการทำ

ออกแบบชิ้นงานสำหรับลงถมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ให้ชิ้นงานมีขนาด $1.5 \times 1.0 \times 0.12$ เซนติเมตร ขนาดร่อง $1 \times 0.3 \times 0.05$ เซนติเมตร ดึงภาพประกอบ 20 นำแบบที่ออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาแกะเป็นแม่พิมพ์เทียน (wax) ด้วยเครื่อง CNC จากนั้นนำไปเทซิลิโคนเหลวทิ้งไว้ 12 ชั่วโมงเพื่อทำเป็นแม่พิมพ์ซิลิโคน แล้วทำการฟ่ายางซิลิโคน นำแม่พิมพ์ซิลิโคนฉีดเทียนและติดต้นเทียนสำหรับหล่อสุญญากาศ จำนวน 2 ต้น ต้นละ 60 ชิ้น เตรียมปูนยี่ห้อ JPL สำหรับหล่อผสมกับน้ำกรองโดยใช้อัตราส่วนปูนต่อน้ำ 100:38 ผสมเข้าด้วยกันเทลงไปนกระบอกรูปที่มีต้นเทียน ทิ้งไว้ 30 นาที และนำไปใส่ในเตาอบปูน ตั้งอุณหภูมิสุดท้ายในการอบที่ 580 องศาเซลเซียส จากนั้นนำกระบอกรูปมาหล่อด้วยเครื่องหล่อสุญญากาศ ต้นแรกหล่อเงินบริสุทธิ์ ต้นที่สองหล่ออัลลอยเงิน 95 ใช้อุณหภูมิในการหล่อ 1,000 องศาเซลเซียส



ภาพประกอบ 20 แสดงขนาดแผ่นเงินสำหรับลงถมเพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล

3.2 การลงมดำปราศจากตะกั่วบนชิ้นงานเงิน

เนื่องจากงานวิจัยนี้จะศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการลงมดำปราศจากตะกั่ว จึงต้องใช้เครื่องมือสำหรับลงมดำปราศจากตะกั่วที่สามารถวัดอุณหภูมิในกระบวนการลงมดำได้ จึงดำเนินการติดตั้งวัดอุณหภูมิที่หัวเป่าไฟ สร้างและติดตั้งแท่งวัดอุณหภูมิที่โต๊ะสำหรับลงมดำปราศจากตะกั่วบนชิ้นงานเงิน และดำเนินการลงมดำปราศจากตะกั่วบนชิ้นงานเงิน

3.2.1 ชุดทดสอบวัดอุณหภูมิที่หัวเป่าไฟ

แท่งวัดอุณหภูมิที่หัวเป่าไฟสามารถใช้วัดอุณหภูมิของเปลวไฟที่ออกจากหัวเป่าไฟ ประกอบด้วย แท่งวัดอุณหภูมิ type K มีลักษณะเป็นแท่งเหล็กทรงกระบอกมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.1 เซนติเมตร ยาว 15 เซนติเมตร ภายในประกอบด้วยโลหะ 2 ชนิด คือ โครเมิล ซึ่งเป็น โลหะผสมระหว่างนิกเกิลกับโครเมียม และอลูเมล ซึ่งเป็น โลหะผสมของนิกเกิล อลูมิเนียม แมงกานีส และซิลิคอน จากนั้นนำโครเมิลและอลูเมลมาทำการเชื่อมติดกันที่ปลายและครอบด้วยสแตนเลส ส่วนปลายนี้จะเป็นจุดที่ใช้วัดอุณหภูมิซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิตั้งแต่ -50 ถึง 1,200 องศาเซลเซียส และเพื่อป้องกันความร้อนจากเปลวไฟโดยตรง ตลอดจนป้องกันสิ่งสกปรกที่จะไปทำให้ปลายที่วัดอุณหภูมิเกิดความเสียหาย จึงต้องหุ้มปลายด้วยหลอดเซรามิค หลังจากนั้นต่อแท่งวัดอุณหภูมิกับเครื่องวัดอุณหภูมิแบบสี่เซลล์รุ่น DP-74SD ดังภาพประกอบ 21 เพื่อให้สามารถวัดอุณหภูมิและแสดงผลบนจอได้สี่ค่าพร้อมกัน มีค่าความเที่ยงตรง $\pm(0.4\%+1^{\circ}\text{C})$ ทั้งนี้สามารถบันทึกข้อมูลค่าที่วัดได้นี้เก็บในหน่วยความจำSD card เป็นไฟล์สกุล .XLS และสามารถปรับตั้งเวลาสุ่มในการบันทึกได้ตั้งแต่ 1 ถึง 3,600 วินาที เพื่อบันทึกค่าความร้อนที่เปลวไฟ

วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. แท่งวัดอุณหภูมิ type K
2. หลอดเซรามิค
3. เครื่องวัดอุณหภูมิแบบสี่ช่อง รุ่น DP-74SD

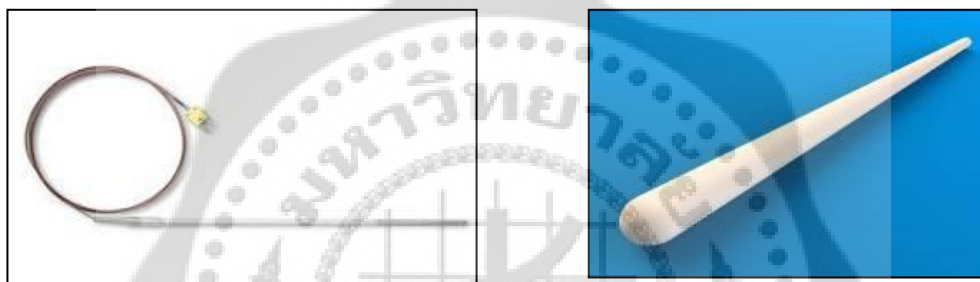
วิธีการทำ

แท่งวัดอุณหภูมิที่หัวเป่าไฟ สามารถใช้วัดอุณหภูมิของเปลวไฟที่ออกจากหัวเป่าไฟ โดยประกอบด้วย แท่งวัดอุณหภูมิ type K มีลักษณะเป็นแท่งเหล็กทรงกระบอกมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.1 เซนติเมตร ยาว 15 เซนติเมตร ดังภาพประกอบ 22(ก) หุ้มปลายด้วยหลอดเซรามิคภาพประกอบ 22(ข) เพื่อป้องกันความร้อนจากเปลวไฟโดยตรง ตลอดจนสิ่งสกปรกที่จะไปทำให้ปลายที่วัดอุณหภูมิเกิดความเสียหาย

ในการใช้งานจะนำแท่งวัดอุณหภูมิไปติดที่หัวเป่าไฟขนาดใหญ่ระยะห่างจากเปลวไฟประมาณ 1.5 เซนติเมตร ระยะห่างนี้ใช้สำหรับกระบวนการหลอมแท่งยาถม แต่ถ้าเป็นหัวเป่าไฟขนาดเล็กที่ใช้สำหรับกระบวนการลงม จะต้องห่างจากปลายหัวเป่าไฟประมาณ 0.8 เซนติเมตร และในการทำงานนี้จะต่อกับเครื่องวัดอุณหภูมิแบบสี่ช่องเพื่ออ่านค่าอุณหภูมิ



ภาพประกอบ 21 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบสี่ช่อง รุ่น DP-74SD



(ก)

(ข)

ภาพประกอบ 22 อุปกรณ์สำหรับชุดทดสอบเพื่อวัดอุณหภูมิที่หัวเป่าไฟประกอบด้วย(ก) ภาพแท่ง
วัดอุณหภูมิ type K (ข) หลอดเซรามิก

3.2.2 ชุดทดสอบโต๊ะสำหรับลงถมดำปราศจากตะกั่ว

ภาพประกอบ 23 แสดงภาพโต๊ะสำหรับการลงถมดำปราศจากตะกั่วบนชิ้นงานเงิน เพื่อใช้วัดความร้อนที่ชิ้นงานเงินขณะทำการลงถม ประกอบด้วยแผ่นเงินบริสุทธิ์ขนาด $6 \times 6 \times 0.18$ เซนติเมตร เป็นตัวพาความร้อนไปให้แท่งวัดอุณหภูมิที่ติดไว้ด้านล่างของโต๊ะสองจุด คือ ตรงกลางและมุมขวาล่าง โต๊ะนี้ต่อกับเครื่องวัดอุณหภูมิแบบสี่ช่องเพื่อบันทึกค่าความร้อนที่แผ่นชิ้นงานเงินสำหรับลงถม

วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

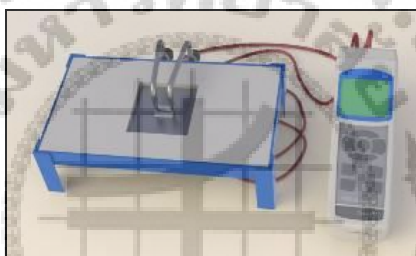
1. แท่งวัดอุณหภูมิ type K จำนวน 2 อัน มีลักษณะเป็นแท่งเหล็กทรงกระบอกมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.16 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร
2. แผ่นเงินบริสุทธิ์ ขนาด $6 \times 6 \times 0.18$ เซนติเมตร
3. แผ่นยิปซัมทำเป็นพื้นโต๊ะ
4. โครงเหล็กทำเป็นโต๊ะ

5. เครื่องวัดอุณหภูมิแบบสี่ช่อง
6. แท่นวางหัวเป่าไฟ

วิธีการทำ

สร้างโครงสร้างของโต๊ะทำจากเหล็กดัดภาพประกอบ 23 พื้นโต๊ะเป็นแผ่นยิปซัมเซาะร่องตรงกลางเพื่อวางแผ่นเงินบริสุทธิ์ขนาด $6 \times 6 \times 0.18$ เซนติเมตร ตั้งล่างแผ่นเงินเชื่อมแท่งวัดอุณหภูมิ type K จำนวนสองตัว ณ บริเวณตรงกลางและล่างขวาของแผ่นเงิน เมื่อใช้งานต้องต่อกับเครื่องวัดอุณหภูมิแบบสี่ช่อง โดยโต๊ะนี้สามารถใช้วัดอุณหภูมิชิ้นงานเงินในขณะที่ทำการลงถมได้

การทำงานบนโต๊ะสำหรับลงถมเริ่มจากนำชิ้นงานที่จะทำการลงถมเงินวางตรงกลางแผ่นเงิน แล้วใช้เหล็กโค้งสองอันเพื่อจับให้ชิ้นงานอยู่กับที่ จากนั้นวางหัวเป่าไฟบนแท่นวาง ให้หัวเป่าไฟห่างจากพื้นโต๊ะประมาณ 17 เซนติเมตร เมื่อต้องการวัดอุณหภูมิให้ต่อแท่งวัดอุณหภูมิเข้าเครื่องวัดอุณหภูมิแบบสี่ช่องเพื่ออ่านและบันทึกค่าอุณหภูมิ



ภาพประกอบ 23 ภาพสามมิติโต๊ะสำหรับลงถมดำปราศจากตะกั่วต่อกับเครื่องวัดอุณหภูมิแบบสี่ช่อง

3.2.3 การลงถมดำปราศจากตะกั่วบนชิ้นงานเงิน

ในงานวิจัยนี้มีการศึกษาอุณหภูมิที่ทำการลงถมดำปราศจากตะกั่วบนชิ้นงานเงิน ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, 700 องศาเซลเซียส บนชิ้นงานเงิน โดยใช้โลหะเงิน 2 ชนิด คือ อลลอยเงิน 95 และโลหะเงินบริสุทธิ์ ลงถม(ถม)ดำปราศจากตะกั่วทั้ง 3 สูตร รวมชิ้นงานทั้งหมด 96 ชิ้น เพื่อนำไปศึกษาสมบัติเชิงกายภาพ และสมบัติเชิงกล

วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. ชิ้นงานเงินสำหรับลงถม โดยใช้โลหะเงิน 2 ชนิด คือ อลลอยเงิน 95 และเงินบริสุทธิ์
2. ยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1, 2, 3
3. อะซิโตนและสำลีพันปลายไม้
4. เครื่องร่อนเซ็ม
5. ชุดทดสอบแท่งวัดอุณหภูมิติดที่หัวเป่าไฟ
6. หัวเป่าไฟ และขาตั้ง
7. ชุดทดสอบโต๊ะสำหรับลงถม

8. เครื่องวัดอุณหภูมิแบบสี่ช่อง รุ่น DP-74SD

9. อุปกรณ์สำหรับขัดแต่งชิ้นงาน เช่น ตะไบหยาบ-ตะไบละเอียด, สว่านสายอ่อน, ยาตินยาแดง, กระดาษทราย เบอร์ 320, 600, 800, 1,000, 1,200

วิธีการทำ

นำชิ้นงานเงินที่ได้จากการหล่อสูญญากาศทำความสะอาดโดยใช้เครื่องร่อนเข็มประมาณ 30 นาที และใช้สาลีพันปลายไม้ซุบอะซิโตนเช็ดชิ้นงานเงินจนทั่วทั้งแผ่นเพื่อขจัดคราบไขมันที่ติดที่ผิวจนสะอาด จากนั้นต่อชุดโต๊ะทดสอบสำหรับลงถลุงภาพประกอบ 24 จุดไฟที่หัวเป่าไฟปรับอุณหภูมิจนกว่าจะถึงอุณหภูมิที่ต้องการจะลงถลุงโดยอ่านค่าที่ชุดโต๊ะทดสอบสำหรับลงถลุงที่ต่อกับอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ เมื่อถึงอุณหภูมิที่ต้องการจึงกดบันทึกค่าที่เครื่องวัดอุณหภูมิแบบสี่ช่อง จากนั้นนำชิ้นงานเงินมาวางบนกลางโต๊ะสำหรับลงถลุงและทิ้งชิ้นงานเงินให้ถูกเปลวไฟเป็นเวลา 2 นาที หลังจากนั้นนำแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วมาทาบนชิ้นงานเงินจนเต็มร่อง จากนั้นนำชิ้นงานที่ลงถลุงเสร็จแล้วออกจากโต๊ะทดสอบ พร้อมกับ(กด)หยุดการบันทึกค่าอุณหภูมิ ทิ้งชิ้นงานไว้ในอากาศ 30 วินาทีแล้วจุ่มน้ำสะอาดทันที สุดท้ายขัดถลุงส่วนเกินออกด้วยตะไบหยาบ ตะไบละเอียด และขัดกระดาษทรายเบอร์ 320, 600, 800, 1,000 และ 1,200 ตามลำดับ หลังจากนั้นขัดเงาด้วยยาตินยาแดง จนชิ้นงานเรียบมัน

ดังนั้น ในการศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการลงถลุง ประกอบด้วย

ชุด A ลงถลุงดำปราศจากตะกั่วบนอัลลอยเงิน 95

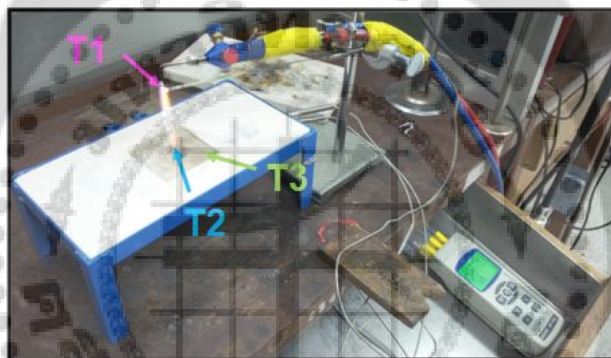
ยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1	ลงถลุงที่อุณหภูมิ 400 °C	จำนวน 4 ชิ้น
	ลงถลุงที่อุณหภูมิ 500 °C	จำนวน 4 ชิ้น
	ลงถลุงที่อุณหภูมิ 600 °C	จำนวน 4 ชิ้น
	ลงถลุงที่อุณหภูมิ 700 °C	จำนวน 4 ชิ้น
ยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 2	ลงถลุงที่อุณหภูมิ 400 °C	จำนวน 4 ชิ้น
	ลงถลุงที่อุณหภูมิ 500 °C	จำนวน 4 ชิ้น
	ลงถลุงที่อุณหภูมิ 600 °C	จำนวน 4 ชิ้น
	ลงถลุงที่อุณหภูมิ 700 °C	จำนวน 4 ชิ้น
ยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 3	ลงถลุงที่อุณหภูมิ 400 °C	จำนวน 4 ชิ้น
	ลงถลุงที่อุณหภูมิ 500 °C	จำนวน 4 ชิ้น
	ลงถลุงที่อุณหภูมิ 600 °C	จำนวน 4 ชิ้น
	ลงถลุงที่อุณหภูมิ 700 °C	จำนวน 4 ชิ้น

ชุด B ลงถลุงบนเงินบริสุทธิ์

ยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1	ลงถลุงที่อุณหภูมิ 400 °C	จำนวน 4 ชิ้น
	ลงถลุงที่อุณหภูมิ 500 °C	จำนวน 4 ชิ้น
	ลงถลุงที่อุณหภูมิ 600 °C	จำนวน 4 ชิ้น

ยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 2	ลงถมที่อุณหภูมิ 700 °C	จำนวน 4 ชั้น
	ลงถมที่อุณหภูมิ 400 °C	จำนวน 4 ชั้น
	ลงถมที่อุณหภูมิ 500 °C	จำนวน 4 ชั้น
	ลงถมที่อุณหภูมิ 600 °C	จำนวน 4 ชั้น
ยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 3	ลงถมที่อุณหภูมิ 700 °C	จำนวน 4 ชั้น
	ลงถมที่อุณหภูมิ 400 °C	จำนวน 4 ชั้น
	ลงถมที่อุณหภูมิ 500 °C	จำนวน 4 ชั้น
	ลงถมที่อุณหภูมิ 600 °C	จำนวน 4 ชั้น
	ลงถมที่อุณหภูมิ 700 °C	จำนวน 4 ชั้น

หมายเหตุ : ชุด A =48 ชั้น, ชุด B= 48 ชั้น รวมทั้งหมด 96 ชั้น



ภาพประกอบ 24 โต้ะสำหรับลงถมพร้อมแท่งวัดอุณหภูมิ type K ต่อเครื่องวัดอุณหภูมิแบบสี่ช่อง

3.2.4 ศึกษาอุณหภูมิในการลงถมดำปราศจากตะกั่วบนชิ้นงานเงิน

จากงานวิจัยนี้ต้องการทราบอุณหภูมิขณะลงถมเพื่อหาอุณหภูมิสัมพัทธ์ซึ่งใช้เป็นอุณหภูมิอ้างอิงในการทำการทดลอง โดยทำการวัดอุณหภูมิด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบสี่ช่อง (channel) วัดอุณหภูมิทุก 1 วินาที เริ่มจับเวลาตั้งแต่ปรับอุณหภูมิให้ได้อุณหภูมิที่ต้องการ จนถึงลงถมดำปราศจากตะกั่วเสร็จจึงกดหยุดการจับเวลา ในการทดลองนี้ทำการวัดอุณหภูมิทั้งหมด 3 จุด ดังภาพประกอบ 24 คือ

1. จุด T1 คือ ที่หัวเป่าไฟ
2. จุด T2 คือ ที่โต้ะลงถมบนแผ่นเงินตรงกลาง
3. จุด T3 คือ ที่โต้ะลงถมบนแผ่นเงินมุมขวาล่าง

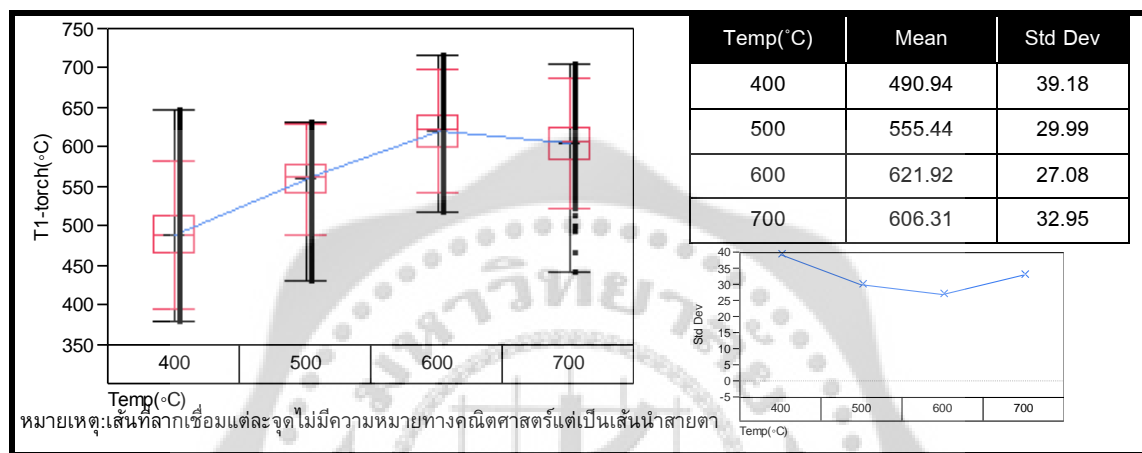
เมื่อได้ค่าวัดอุณหภูมิจากเครื่องวัดอุณหภูมิแบบสี่ช่องระหว่างทำการลงถมทั้งหมดจึงนำไปหาค่าเฉลี่ยในแต่ละช่วงอุณหภูมิที่ต้องการศึกษา โดยทำการรวมค่าอุณหภูมิจากการลงถมทุกชิ้นงานเพื่อหาค่าเฉลี่ยอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, 700 องศาเซลเซียสตามลำดับ แต่ละ

อุณหภูมิมี 24 ชุด รวมทั้งหมด 96 ชุดอุณหภูมิ แต่ละชุดอุณหภูมิใช้เวลาประมาณ 2-3 วินาที รวมเวลาทั้งหมดประมาณ 11,520-17,280 วินาที

ผลการวิเคราะห์

1. จุด T1 ที่หัวเป่าไฟ

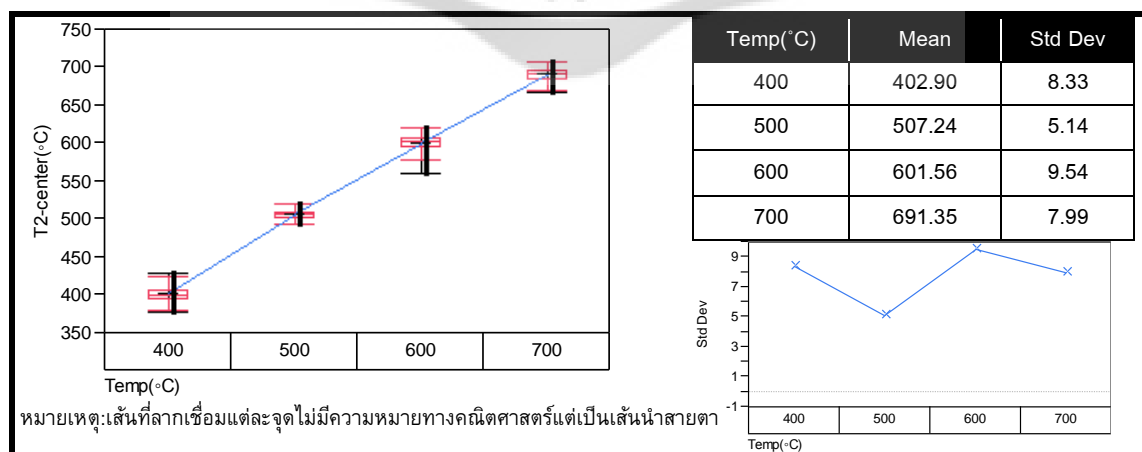
วัดอุณหภูมิขณะลงถมปราศจากตะกั่วบนชิ้นงานเงินโดยใช้แท่งวัดอุณหภูมิวัดที่หัวเป่าไฟ ผลการวัดอุณหภูมิได้ค่าเฉลี่ยแต่ละอุณหภูมิตั้งภาพประกอบ 25



ภาพประกอบ 25 กราฟแสดงความร้อนที่วัดอุณหภูมิที่หัวเป่าไฟ(T1)

2. จุด T2 ที่โต๊ะลงถมบนแผ่นเงินตรงกลาง

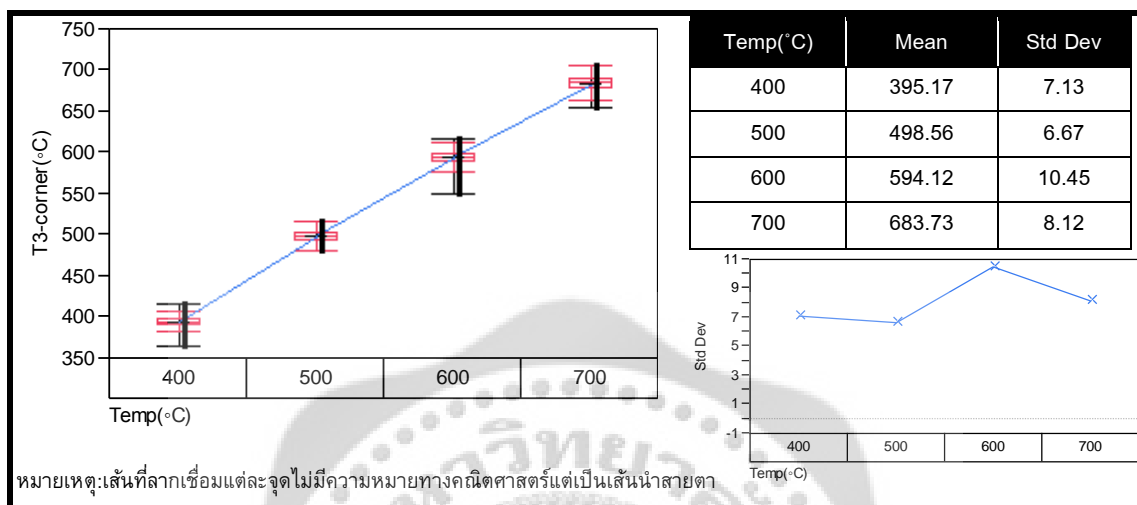
วัดอุณหภูมิขณะลงถมปราศจากตะกั่วบนชิ้นงานเงินโดยวัดที่โต๊ะลงถมบนแผ่นเงินตรงกลาง ผลการวัดอุณหภูมิได้ค่าเฉลี่ยแต่ละอุณหภูมิตั้งภาพประกอบ 26



ภาพประกอบ 26 กราฟแสดงความร้อนที่วัดอุณหภูมิที่โต๊ะลงถมบนแผ่นเงินตรงกลาง(T2)

3. จุด T3 ที่โต๊ะลงถบบนแผ่นเงินมุมขวาล่าง

วัดอุณหภูมิขณะลงถบบ่าปราศจากตะกั่วบนชิ้นงานเงินโดยวัดที่โต๊ะลงถบบนแผ่นเงินมุมขวาล่าง ผลการวัดอุณหภูมิได้ค่าเฉลี่ยได้ค่าเฉลี่ยแต่ละอุณหภูมิดังภาพประกอบ 27



ภาพประกอบ 27 กราฟแสดงความร้อนที่วัดอุณหภูมิที่โต๊ะลงถบบนแผ่นเงินมุมขวาล่าง(T3)

จากภาพประกอบ 25-27 ทำให้ทราบว่าอุณหภูมิที่ทำการลงถบบ่าหัวเป่าไฟ(T1)มีค่าไม่คงที่ เพราะเกิดข้อผิดพลาดจากปัจจัยภายนอกที่ไม่สามารถควบคุมได้ คือ เปลวไฟจากหัวเป่าไฟไม่คงที่ จึงควบคุมอุณหภูมิได้ยากโดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เกิดข้อผิดพลาดเปลวไฟดับบ่อย แต่การวัดอุณหภูมิที่จุด T2 ที่โต๊ะลงถบบนแผ่นเงินตรงกลางกับจุด T3 ที่โต๊ะลงถบบนแผ่นเงินมุมขวาล่างมีค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ได้คงที่มากกว่า เพราะแผ่นเงินที่โต๊ะจะเก็บความร้อนช่วงเวลาหนึ่งจึงทำให้อุณหภูมิที่อ่านได้คงที่มากกว่าที่จุด T1 และแสดงอุณหภูมิสัมพัทธ์ที่วัดจากอุณหภูมิที่โต๊ะลงถบบนแผ่นเงินตรงกลาง กับวัดอุณหภูมิที่โต๊ะลงถบบนแผ่นเงินมุมขวาล่าง และมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 2 ดังตาราง 4

ตาราง 4 แสดงอุณหภูมิสัมพัทธ์ที่ลงถบบ่าปราศจากตะกั่วบนชิ้นงานเงิน จุด T2 ที่โต๊ะลงถบบนแผ่นเงินตรงกลาง กับจุด T3 ที่โต๊ะลงถบบนแผ่นเงินมุมขวาล่าง

Temp(°C)	Mean (T2)	Mean(T3)	(T2+ T3)/2	(T2-T3)	% (T2-T3)/T2
400	402.90	395.18	399.04	7.73	1.92
500	507.24	498.60	502.90	8.68	1.71
600	601.56	594.12	597.84	7.40	1.24
700	691.35	683.73	687.54	7.62	1.10

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอุณหภูมิสัมพัทธ์ที่น่าเชื่อถือและตรงกับชิ้นงานมากที่สุด ควรจะวัดที่โต๊ะสำหรับลงถม และการทำทดลองครั้งนี้อุณหภูมิเฉลี่ยที่โต๊ะลงถมบนแผ่นเงินตรงกลาง (T2) กับที่โต๊ะลงถมบนแผ่นเงินมุมขวาล่าง (T3) คือ 399.04, 502.90, 597.84 , 687.54 องศาเซลเซียส ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะขอใช้เป็นอุณหภูมิ 400, 500, 600, 700 องศาเซลเซียส

3.3 ศึกษาลักษณะเฉพาะของโครงสร้างทางจุลภาคของแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่ว ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy)

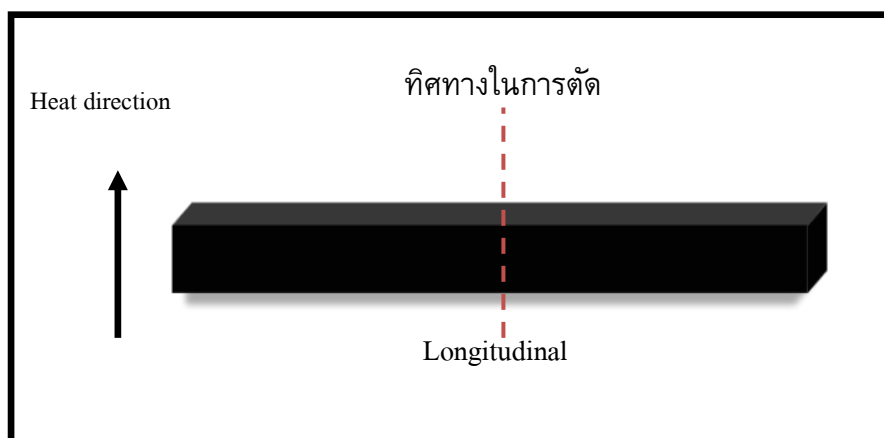
เตรียมชิ้นงานแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 ขนาด $0.7 \times 0.7 \times 10$ เซนติเมตร ด้วยวิธี Cold mount เพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะของโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. แท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วทั้ง 3 สูตร
2. เครื่องตัดละเอียดโดยใช้ใบตัดเพชร
3. เรซินและสารเร่งการแข็งตัว
4. เครื่องขัด
5. กระดาษทรายน้ำเบอร์ 320, 600, 800, 1,000 และ 1,200
6. ผ้าขัดโพลีเอสเตอร์
7. ผงอลูมิเนียมความละเอียด 5 และ 3 ไมครอน
8. กล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสง
9. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและวิเคราะห์ธาตุด้วยระบบวิเคราะห์แบบ EDS

วิธีการทำ

ตัดแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วทั้ง 3 สูตร ในทิศทางดังภาพประกอบ 28 ด้วยเครื่องตัดละเอียดโดยใช้ใบตัดเพชร เตรียมชิ้นงานที่ตัดโดยวิธี Cold mount ด้วยอีพอกซี ซึ่งประกอบด้วยเรซินผสมกับสารเร่งการแข็งตัวคนให้เข้ากันเทลงไปในแบบหล่อให้ท่วมชิ้นงาน เมื่อแข็งตัวจึงแกะออกจากแบบ แล้วนำมาขัดกระดาษทรายน้ำเบอร์ 320, 600, 800, 1,000 และ 1,200 ตามลำดับ และขัดเงาด้วยผ้าขัดโพลีเอสเตอร์พร้อมผงอลูมิเนียมความละเอียด 5 และ 3 ไมครอนจนชิ้นงานมันเงา จากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสง, กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่ว และวิเคราะห์ธาตุด้วยเครื่องมือการวิเคราะห์ธาตุโดยเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer)



ภาพประกอบ 28 แสดงทิศทางการตัดแท่งยาวถมดำปราศจากตะกั่ว

3.4 ศึกษาโครงสร้างผลึกวิเคราะห์ธาตุการจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray Diffraction)

นำแท่งยาวถมดำปราศจากตะกั่ว 3 สุนทร ขนาด $1 \times 1.5 \times 0.5$ เซนติเมตร มาวิเคราะห์เพื่อหาสารประกอบในแท่งยาวถมดำปราศจากตะกั่ว และศึกษาโครงสร้างทางผลึกด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน

วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. แท่งยาวถมดำปราศจากตะกั่วทั้ง 3 สุนทร
2. เลื่อยมือและใบเลื่อย
3. กระดาษทราย เบอร์ 320, 600, 800 และ 1,200
4. ลูกยาง
5. สว่านสายอ่อน
6. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน

วิธีการทำ

เลื่อยแท่งยาวถมดำปราศจากตะกั่ว 3 สุนทรตัดให้ได้ขนาด $1 \times 1.5 \times 0.5$ เซนติเมตร จากนั้นขัดให้ผิวเรียบด้วยกระดาษทราย เบอร์ 320, 600, 800 และ 1,200 ตามลำดับ จากนั้นขัดเงาด้วยลูกยาง ให้มีผิวหน้าเรียบได้ระนาบ แล้วนำไปวิเคราะห์หาสมบัติทางผลึกศาสตร์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน กำหนดค่าการวัดด้วยเทคนิคนี้โดยใช้ step scan 0.44 วินาทีต่อstepและทำกสรscan ในช่วง 2θ เท่ากับ 15-85 องศา

3.5 ศึกษาปริมาณการเกิดรูพรุนบนผิวยาถมดำปราศจากตะกั่วด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสง (Optical Microscope)

นำชิ้นงานที่ผ่านการลงถมดำปราศจากตะกั่วบนชิ้นงานเงินมาหาปริมาณรูพรุนที่ผิวบริเวณเนื้อยาถมโดยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสงด้วยกำลังขยาย 50 เท่า และใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Image J software [ภาคผนวก ค] ทำหาร้อยละปริมาณการเกิดรูพรุนเทียบกับพื้นที่ถมดำทั้งหมด เพื่อศึกษาปริมาณรูพรุนเพราะเครื่องมืที่มีคุณภาพจะต้องมีรูพรุนน้อย วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. ชิ้นงานที่ผ่านการลงถมดำปราศจากตะกั่วบนชิ้นงานเงิน ทั้งหมด 96 ชิ้น
2. กล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสง
3. ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Image J software

วิธีการทำ

ถ่ายภาพชิ้นงานที่ผ่านการลงถมดำปราศจากตะกั่วบนชิ้นงานเงินที่ผ่านการขัดแต่งชิ้นงานเรียบร้อยแล้ว ทั้งหมด 96 ชิ้น ถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสงด้วยกำลังขยาย 50 เท่า โดยถ่ายให้ครอบคลุมบริเวณที่เป็นถมดำปราศจากตะกั่ว จากนั้นนำมาวิเคราะห์หาพื้นที่ปริมาณการเกิดรูพรุนเทียบกับพื้นที่ถมดำทั้งหมดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Image J software

3.6 ศึกษารูปร่างของยาถมดำปราศจากตะกั่วหลังจากลงถมบนชิ้นงานเงิน

การศึกษารูปร่างของยาถมดำปราศจากตะกั่วที่ทำการลงถมดำปราศจากตะกั่วบนชิ้นงานเงินแบ่งเป็น 2 แบบ คือ ด้านหน้าชิ้นงาน กับด้านข้าง (แบบ cross-section) เพื่อศึกษารูปร่างของร่องยาถมดำปราศจากตะกั่วโดยเปรียบเทียบกับชิ้นงานเปล่าที่ไม่ได้ลงถม เพื่อหาค่าร้อยละความแตกต่างของพื้นที่ก่อนทำการลงถมกับหลังลงถม เพราะชิ้นงานที่ลงถมดำปราศจากตะกั่วที่ดีขนาดของร่องจะต้องไม่เปลี่ยนแปลงจากก่อนทำการลงถมมากและเครื่องมืที่ดีจะต้องมีลวดลายที่มีความคมชัด

3.6.1 ด้านหน้าชิ้นงาน

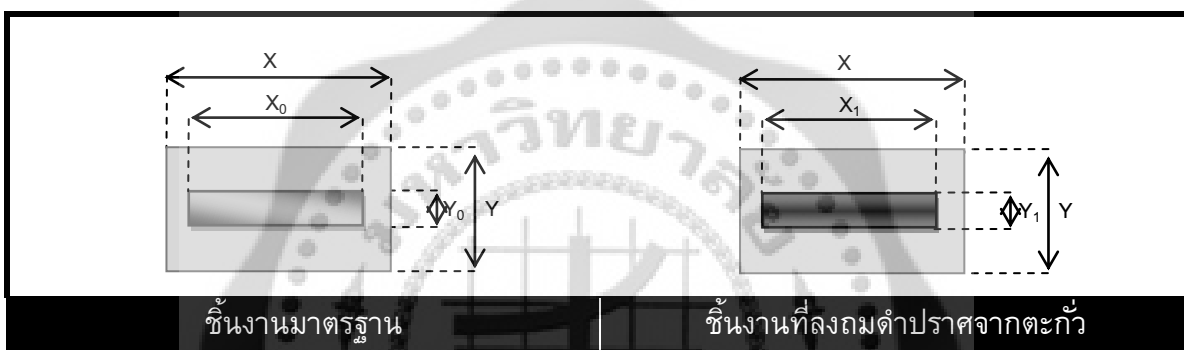
วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. ชิ้นงานเงินที่ผ่านการลงถมดำปราศจากตะกั่วบนอัลลอยเงิน ทั้งหมด 96 ชิ้น
2. ชิ้นงานเงินเปล่าที่ไม่ได้ลงถม 1 ชิ้น
3. กล้องดิจิทัลความละเอียดสูง ใช้เลนส์มาโคร ความยาวโฟกัส 100 มิลลิเมตร
4. ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Image J software

วิธีการทำ

ถ่ายภาพชิ้นงานเงินที่ผ่านการลงถมดำปราศจากตะกั่วทุกอุณหภูมิทั้งสามสูตร (ชุด A และ ชุด B) ทั้งหมด 96 ชิ้น และชิ้นงานเปล่าที่ไม่ได้ลงถม 1 ชิ้นเป็นตัวมาตรฐาน ด้วยกล้องดิจิทัล ความละเอียดสูง ใช้เลนส์มาโคร ความยาวโฟกัส 100 มิลลิเมตร ถ่ายภาพให้เห็นทั้งชิ้นงาน จากนั้นนำมาวิเคราะห์หาพื้นที่ถมดำเปรียบเทียบกับพื้นที่ส่วนที่เป็นเงินทั้งหมดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Image J software และนำผลวิเคราะห์หาค่าร้อยละผลต่างของพื้นที่สำหรับลงถมดำปราศจากตะกั่วชิ้นงานมาตรฐานกับชิ้นงานที่ลงถมดำปราศจากตะกั่วโดยมีวิธีการคำนวณ ดังภาพประกอบ 29

วิธีการคำนวณ



ภาพประกอบ 29 แสดงการคำนวณหาค่าร้อยละผลต่างของพื้นที่สำหรับลงถมในชิ้นงานเงินมาตรฐานกับชิ้นงานเงินที่ลงถมดำปราศจากตะกั่ว

หาค่าร้อยละของพื้นที่สำหรับลงถมดำปราศจากตะกั่วเทียบกับพื้นที่ชิ้นงานทั้งหมด

$$\text{ร้อยละของชิ้นงานมาตรฐาน} \quad A_0 = X_0 Y_0 \times 100 / XY$$

หาค่าร้อยละของพื้นที่ลงถมดำปราศจากตะกั่วแล้วเทียบกับพื้นที่ชิ้นงานทั้งหมด

$$\text{ร้อยละของชิ้นงานที่ลงถมดำปราศจากตะกั่ว} \quad A_1 = X_1 Y_1 \times 100 / XY$$

หาค่าร้อยละผลต่างของพื้นที่สำหรับลงถมดำปราศจากตะกั่วชิ้นงานมาตรฐานกับชิ้นงานที่ลงถมดำปราศจากตะกั่ว

$$\Delta A = A_1 - A_0$$

→ สูตรคำนวณที่ 1

+ΔA หมายถึง ชิ้นงานที่ลงถมดำปราศจากตะกั่ว มีพื้นที่ส่วนยาถมมากกว่าชิ้นงานมาตรฐาน

-ΔA หมายถึง ชิ้นงานที่ลงถมดำปราศจากตะกั่ว มีพื้นที่ส่วนยาถมน้อยกว่าชิ้นงานมาตรฐาน

ดังนั้น ควรให้ ΔA มีค่าเข้าใกล้ศูนย์มากที่สุดเพื่อจะได้รูปร่างของร่องที่ไม่ต่างจากขนาดร่องก่อนทำการลงถมหรือชิ้นงานมาตรฐาน

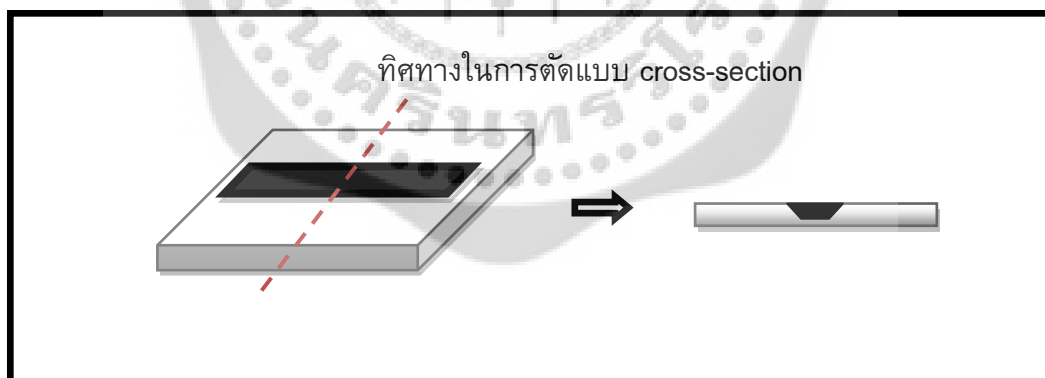
3.6.2 ด้านข้าง (แบบ cross-section)

วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. ชิ้นงานเงินที่ลงถมดำปราศจากตะกั่วทุกอุณหภูมิทั้งสามสูตร (ชุดA และชุดB) สุ่มเลือกมาอย่างละ 1 ชิ้น รวมทั้งหมด 24 ชิ้น
2. เครื่องตัดละเอียดโดยใช้ใบตัดเพชร
3. เรซินและสารเร่งการแข็งตัว
4. กระดาษทรายน้ำเบอร์ 320, 600, 800, 1,000, 1,200
5. เครื่องขัด
6. ผ้าขัดโพลีเอสเตอร์
7. ผงอลูมินาความละเอียด 5 และ 3 ไมครอน
8. กล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสง

วิธีการทำ

สุ่มเลือกชิ้นงานที่ลงถมดำปราศจากตะกั่วทุกอุณหภูมิทั้งสามสูตร (ชุดA และชุดB) มาอย่างละ 1 ชิ้น รวมทั้งหมด 24 ชิ้น ทำการตัดชิ้นงานที่ลงถมแล้วแบบ cross-section ภาพประกอบ 30 ตัดด้วยเครื่องตัดละเอียดโดยใช้ใบตัดเพชร และทำการเตรียมชิ้นงานแบบโลหะวิทยาโดยทำCold mount ด้วยอีพอกซีดังที่กล่าวมาในหัวข้อที่ 3.3 แล้วจึงนำวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสงที่มีอุปกรณ์ต่อกับกล้องถ่ายภาพโดยใช้กำลังขยาย 50 เท่า



ภาพประกอบ 30 แสดงทิศทางในการตัดชิ้นงานที่ลงถมเพื่อศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค

3.7 ศึกษาความหนาของชั้นรอยต่อระหว่างถมดำปราศจากตะกั่วกับชั้นงานเงินด้วยเครื่องมือการวิเคราะห์ธาตุโดยเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer)

นำชิ้นงานที่ฝังถมดำปราศจากตะกั่วทุกอุณหภูมิทั้งสามสูตร(ชุดA และชุดB) ที่สุ่มมาและได้ตัดและเตรียมด้วยวิธีCold mount ไว้แล้วจากข้อ 3.6.2 รวมทั้งหมด 24 ชิ้น นำมาศึกษาความหนาของชั้นรอยต่อระหว่างถมดำปราศจากตะกั่วกับอัลลอยเงินด้วยเครื่องมือการวิเคราะห์ธาตุซึ่งเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานโดยใช้เทคนิคการทำ Line Scan เพื่อหาความหนาของชั้นรอยต่อ และการกระจายของธาตุในแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วที่ต้องการศึกษา เพราะความหนาของชั้นรอยต่อส่งผลกระทบต่อการศึกษาการความแข็งของยาถมดำปราศจากตะกั่ว

วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. ชิ้นงานตัดแบบ cross-section ทำCold mount ด้วยอีพอกซีจากข้อ 3.6.3
2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
3. อุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer)
4. เทปคาร์บอน

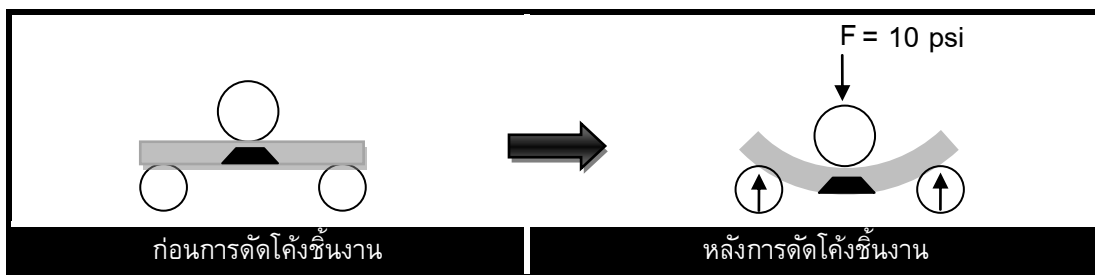
วิธีการทำ

นำชิ้นงานจากข้อ 3.6.2 มาติดคาร์บอนเทปให้ทั่วตรงบริเวณที่เป็นอีพอกซี นำไปถ่ายรูปเพื่อศึกษาโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy) และเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer) ทำLine Scan เพื่อหาความหนาของชั้นรอยต่อ

3.8 ศึกษาสมบัติเชิงกลรอยแตกของยาถมดำปราศจากตะกั่วกับชั้นงานเงินโดยวิธีการตัดโค้ง

3.8.1 สร้างชุดทดสอบการตัดโค้ง

การหาประเภทรอยแตกของถมดำปราศจากตะกั่ว จะทดสอบชิ้นงานเงินที่ฝังถมแล้วด้วยวิธีการตัดโค้ง โดยใช้ชุดทดสอบการตัดโค้งที่ประกอบด้วย เครื่องอัดยางควบคุมแรงดัน และแท่นวางชิ้นงานที่ทำจากทองเหลือง ดังภาพประกอบ 31



ภาพประกอบ 31 แทนวางชิ้นงานสำหรับทดสอบการตัดโค้ง

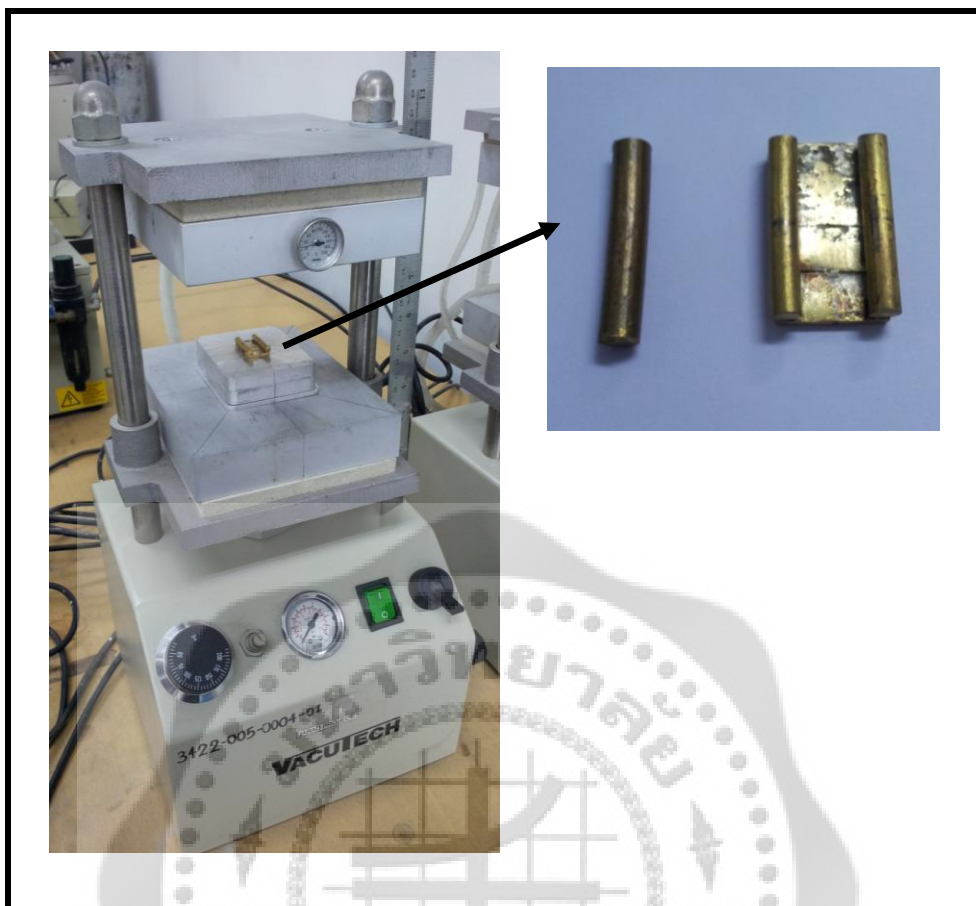
วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. ลวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร ยาว 25 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชิ้น (ฐานล่าง)
2. ลวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ยาว 25 มิลลิเมตร จำนวน 1 ชิ้น (ตัวกด)
3. แผ่นทองเหลือง ขนาด 15×25×1.8 มิลลิเมตร (ฐานล่าง)
4. แผ่นอลูมิเนียม (ฐานล่าง)
5. อุปกรณ์ในการเชื่อมโลหะ เช่น น้ำประสานโลหะ หัวเป่าไฟ
6. เครื่องอัดยางควบคุมแรงดัน ยี่ห้อ Vacutech

วิธีการทำ

นำลวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร ยาว 25 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชิ้น มาเชื่อมกับแผ่นทองเหลือง ขนาด 15×25×1.8 มิลลิเมตร และวางบนแผ่นอลูมิเนียมเพื่อยกฐานให้สูงขึ้น จากนั้นนำไปวางตรงกลางเครื่องอัดยางควบคุมแรงดัน ส่วนลวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ยาว 25 มิลลิเมตร จำนวน 1 ชิ้น นำไปติดไว้ด้านบนตรงกลางของเครื่องอัดยางควบคุมแรงดัน

สุ่มเลือกชิ้นงานเงินที่ลงถมดำปราศจากตะกั่วทุกอุณหภูมิทั้งสามสูตร (ชุด A และชุด B) อย่างละ 1 ชิ้น รวมทั้งหมด 24 ชิ้น มาทดสอบโดยใช้วิธีการตัดโค้ง ใช้แรงดัน 10 psi เป็นเวลา 30 วินาทีดังภาพประกอบ 32 โดยให้ดันจากด้านล่างจนถมหลุดออกหรือเกิดการรอยแตก การทดสอบการตัดงอนี้เพื่อศึกษาความแข็งของยาถมดำปราศจากตะกั่ว และศึกษาลักษณะการเกิดรอยแตกของส่วนที่เป็นถมดำ



ภาพประกอบ 32 ชุดทดสอบการตัดโค้ง

3.8.2 ศึกษาลักษณะเฉพาะของโครงสร้างทางจุลภาคของยาถมดำปราศจากตะกั่ว กับชิ้นงานเงินที่ผ่านการตัดโค้ง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การศึกษาลักษณะการแตกของยาถมดำปราศจากตะกั่วของชิ้นงานที่ลงถมดำหลังผ่านการตัดโค้งจะเลือกเฉพาะชิ้นงานอัลลอยเงิน 95 และเงินบริสุทธิ์ ที่ลงถมด้วยยาถมดำปราศจากตะกั่ว สูตร 2 ทุกอุณหภูมิ นำชิ้นงานที่เลือกไว้มาถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อศึกษาผลกระทบต่อลักษณะการแตกของยาถมดำปราศจากตะกั่ว

วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. นำชิ้นงานเงินที่ลงถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 2 ที่ลงถมบนอัลลอยเงิน 95 และเงินบริสุทธิ์ทุกอุณหภูมิ ที่ผ่านการทดสอบแบบตัดโค้ง จากข้อ 3.8.1
2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

วิธีการทำ

นำชิ้นงานที่ลงถมดำปราศจากตะกั่วที่ผ่านการการตัดโค้ง โดยเลือกเฉพาะชิ้นงานอัลลอยเงิน 95 และเงินบริสุทธิ์ ที่ลงถมด้วยยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 2 ทุกอุณหภูมิ มาถ่ายภาพเพื่อ

ศึกษาลักษณะรอยแตกของยาถมดำปราศจากตะกั่วกับชิ้นงานเงินด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy)

3.8.3 ศึกษาพื้นที่การแตกของยาถมดำปราศจากตะกั่วกับอัลลอยเงินโดยหลังจากวิธีการตัดโค้ง

เมื่อทำการตัดโค้งชิ้นงานเงินที่ผ่านการลงถมดำปราศจากตะกั่วทั้งสามสูตร และลงถมทุกอุณหภูมิ ที่สุ่มเลือกมาอย่างละ 1 ชิ้น ทั้งหมด 24 ชิ้น ที่ชุดทดสอบการตัดโค้ง บริเวณเนื้อถมจะเกิดการแตกหรือหลุดออกมากน้อยแตกต่างกันในแต่ละชิ้นงาน งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาหาพื้นที่รอยแตกหรือพื้นที่ถมหลุดออก หลังจากการตัดโค้ง โดยคิดพื้นที่ที่เกิดรอยแตกหรือพื้นที่ถมหลุดเปรียบเทียบกับพื้นที่ถมดำทั้งหมดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Image J software ในการคำนวณ ซึ่งถ้าค่าที่ออกมาน้อยแสดงว่ายาถมนั้นมีความแข็งที่ดี

วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. นำชิ้นงานเงินที่ลงถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 2 ลงถมบนอัลลอยเงิน 95 และเงินบริสุทธิ์ทุกอุณหภูมิ ที่ผ่านการทดสอบแบบตัดโค้ง จากข้อ 3.8.1
2. กล้องดิจิทัลความละเอียดสูง ใช้เลนส์มาโคร ระยะโฟกัส 100 มิลลิเมตร
3. โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Image J software

วิธีการทำ

หลังจากทดสอบการตัดโค้งชิ้นงานที่ลงถมดำปราศจากตะกั่วทั้งสามสูตร ที่ลงถมทุกอุณหภูมิ (ชุด A และชุด B) ซึ่งสุ่มเลือกมาอย่างละ 1 ชิ้น ทั้งหมด 24 ชิ้น นำชิ้นงานมาถ่ายรูปด้วยกล้องดิจิทัลความละเอียดสูง ด้วยเลนส์มาโคร ระยะโฟกัส 100 มิลลิเมตร การถ่ายภาพทำให้เห็นครอบคลุมทั้งชิ้นงานเงินจากนั้นนำมาวิเคราะห์หาพื้นที่ที่เกิดรอยแตกหรือพื้นที่ถมหลุดออกเปรียบเทียบกับพื้นที่ถมดำทั้งหมดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Image J software

บทที่ 4

การนำเสนอผลของข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ศึกษาโครงสร้างผลึกศาสตร์และวิเคราะห์ธาตุการจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray Diffraction)

ในการวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกและสารประกอบในยาถมตำปราชจากตะกั่วด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน จะเตรียมยาถมตำปราชจากตะกั่วทั้ง 3 สูตร ขนาด $1 \times 1.5 \times 0.5$ เซนติเมตร ดังภาพประกอบ 33 ผลจากการทดสอบจากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน และวิเคราะห์หาสารประกอบโดยใช้ JCPDF V.3.01 แสดงเป็นกราฟจำแนกยาถมตำปราชจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 แสดงดังภาพประกอบ 34-36

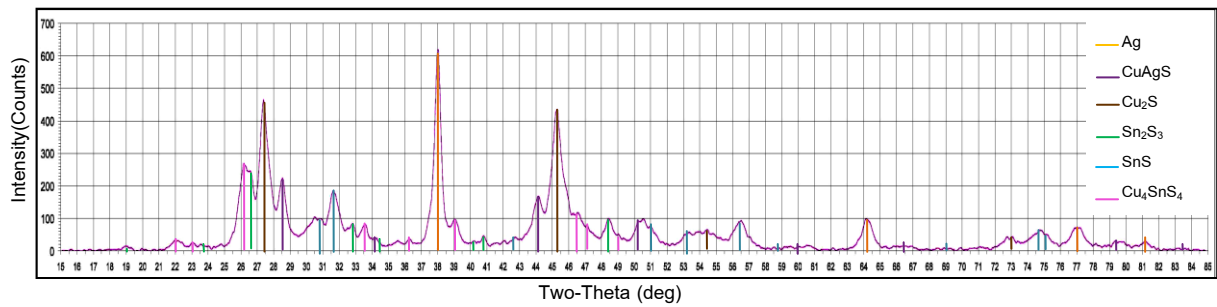


ภาพประกอบ 33 แท่งยาถมตำปราชจากตะกั่วสำหรับทดสอบด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน

ผลการทดลอง

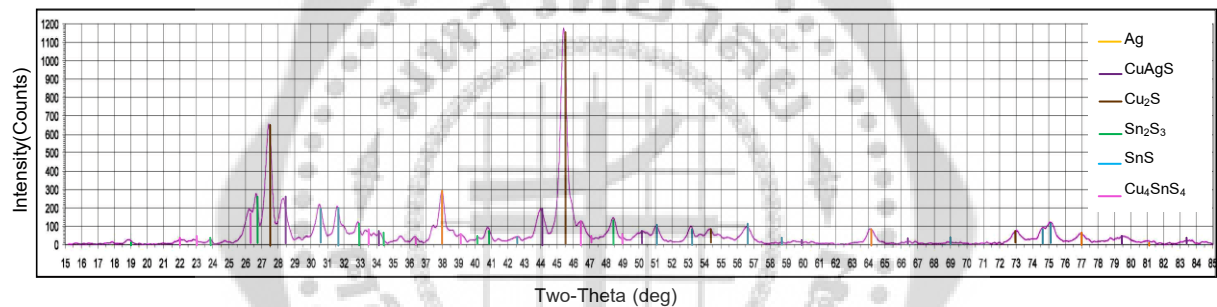
พิจารณาจากกราฟ diffractogram ของยาถมตำปราชจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 ดังภาพประกอบ 34-36 ที่วิเคราะห์หาสารประกอบในแท่งยาถม จากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน ยาถมทั้งสามสูตรประกอบไปด้วยสารประกอบทั้งหมด 6 ชนิด คือ CuAgS , Ag , Cu_2S , Sn_2S_3 , SnS และ Cu_4SnS_4 โดยพิจารณาเฉพาะเส้นกราฟมีค่าความเข้ม (intensity) สูง ทั้งนี้สารประกอบ Ag กับ Cu_2S อยู่ในระบบผลึก Cubic ส่วนสารประกอบ CuAgS , Sn_2S_3 , SnS และ Cu_4SnS_4 อยู่ในระบบผลึก Orthorhombic ดังตาราง 5

ยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1



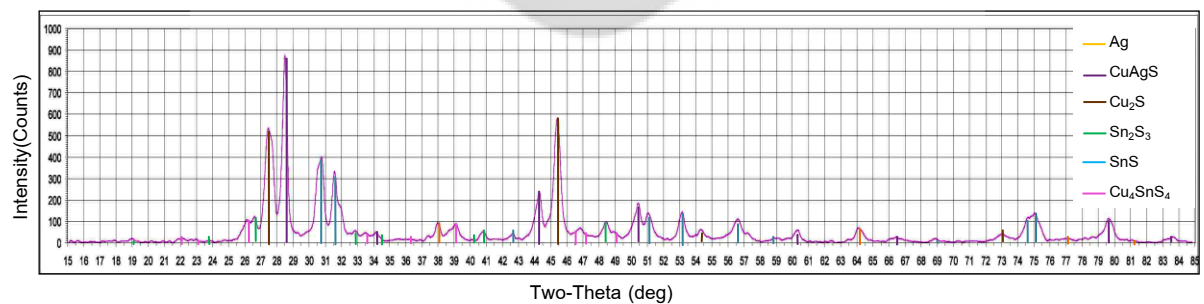
ภาพประกอบ 34 ผลการวิเคราะห์ยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 จากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน

ยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 2



ภาพประกอบ 35 ผลการวิเคราะห์ยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 2 จากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน

ยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 3

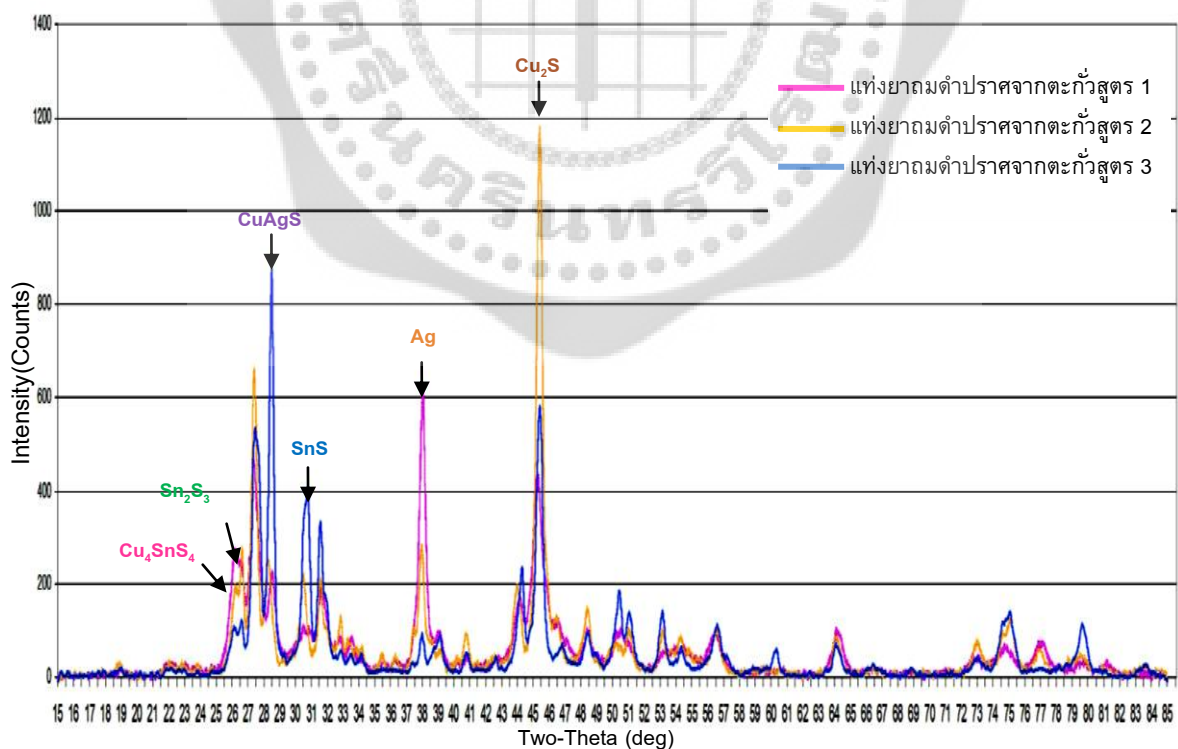


ภาพประกอบ 36 ผลการวิเคราะห์ยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 3 จากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน

ตาราง 5 แสดงสมบัติของสารประกอบในยาถมตำปราศจากตะกั่ว

สูตรยาถมตำปราศจากตะกั่ว	Ag	CuAgS	Cu ₂ S	Sn ₂ S ₃	SnS	Cu ₄ SnS ₄
PDF Number	4-0783	79-1579	84-1770	72-0031	73-1859	71-0129
ระบบผลึก	Cubic	Orthorhombic	Cubic	Orthorhombic	Orthorhombic	Orthorhombic
S.G.	Fm3m(225)	Cmc2 ₁ (36)	Fm3̄m	Pnma(62)	Pnma(62)	Pnma(62)
Cell Parameter	a(4.086)	a(4.059) b(6.617) c(7.967)	a(5.628)	a(8.864) b(14.02) c(3.747)	a(11.18) b(3.982) c(4.329)	a(13.558) b(7.681) c(6.412)
สีแร่	สีเทา	สีเทาเข้มอม น้ำเงิน	สีดำ		สีน้ำตาลเข้ม	

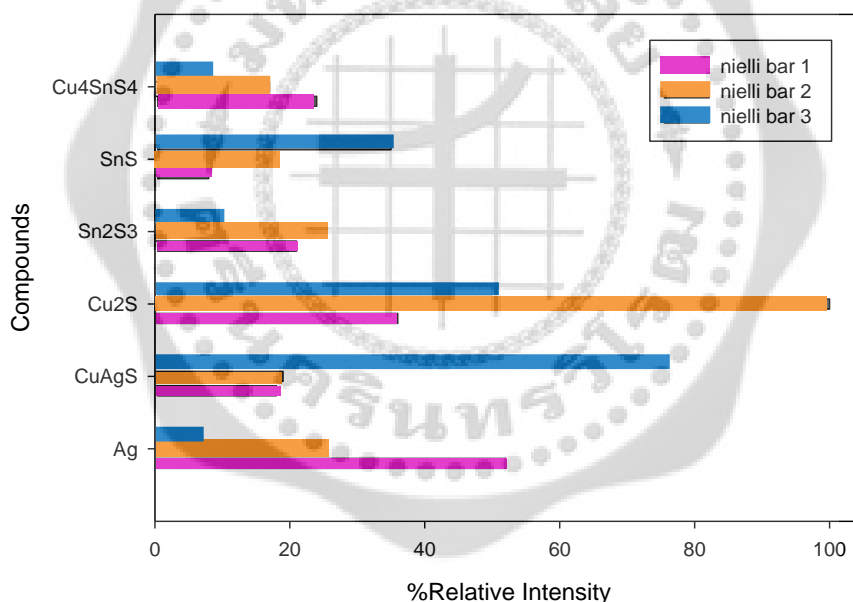
เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์หาสารประกอบแห่งยาถมตำปราศจากตะกั่วทั้งสามสูตร เพื่อเปรียบเทียบค่าความเข้มที่แสดงปริมาณสารประกอบที่แตกต่างกันของแต่ละสูตรยาถมตำปราศจากตะกั่ว ได้ผลแสดงดังภาพประกอบ 37 รวมผลวิเคราะห์หาสารประกอบแห่งยาถมตำปราศจากตะกั่วสูตร 1, 2, 3



ภาพประกอบ 37 กราฟเปรียบเทียบสารประกอบของแห่งยาถมตำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 จากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน

ผลการวิเคราะห์

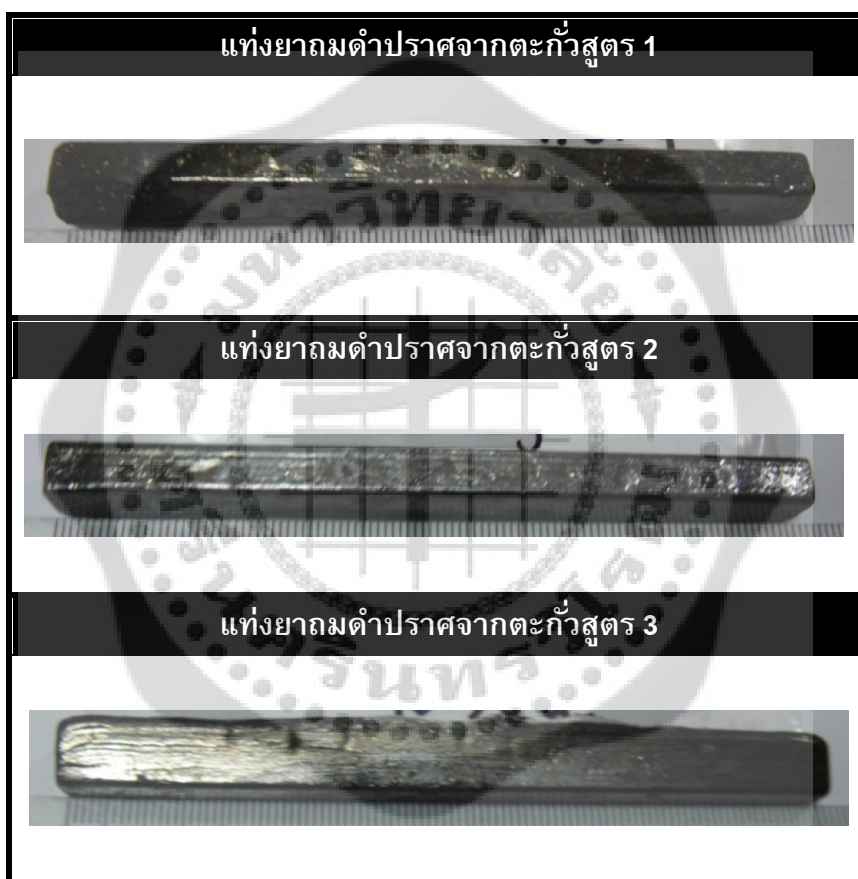
ผลการวิเคราะห์หาสารประกอบของแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 จากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน ทั้งสามสูตรประกอบไปด้วยสารประกอบทั้งหมด 6 ชนิด คือ CuAgS, Ag, Cu₂S, Sn₂S₃, SnS และ Cu₄SnS₄ แต่มีปริมาณเล็กน้อยแตกต่างกันซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้ดังภาพประกอบ 38 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบค่าความเข้มของสารประกอบที่มีอยู่ในยาถมดำปราศจากตะกั่วเชิงคุณภาพของแต่ละสูตร จะเห็นได้ว่ายาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 มีปริมาณสารประกอบ Ag, Cu₄SnS₄ ที่แสดงความเข้มสูงสุด ยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 2 มีปริมาณสารประกอบ Cu₂S, Sn₂S₃ ที่แสดงความเข้มสูงสุด และยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 3 มีปริมาณสารประกอบ CuAgS, SnS ที่มีค่าความเข้มสูงสุด ซึ่งแต่ละสูตรมีสารประกอบที่ให้สีแตกต่างกัน และยาถมที่ดีจะต้องมีสีดำ ซึ่ง พบว่า Cu₂S นั้นให้สีดำของถม และในการศึกษานี้ พบว่ามีสารประกอบนี้สูงในสูตรยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตรที่ 2



ภาพประกอบ 38 กราฟแท่งแสดงการเปรียบเทียบค่าความเข้มของสารประกอบในแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3

4.2 ศึกษาลักษณะเฉพาะของโครงสร้างทางจุลภาคของแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy)

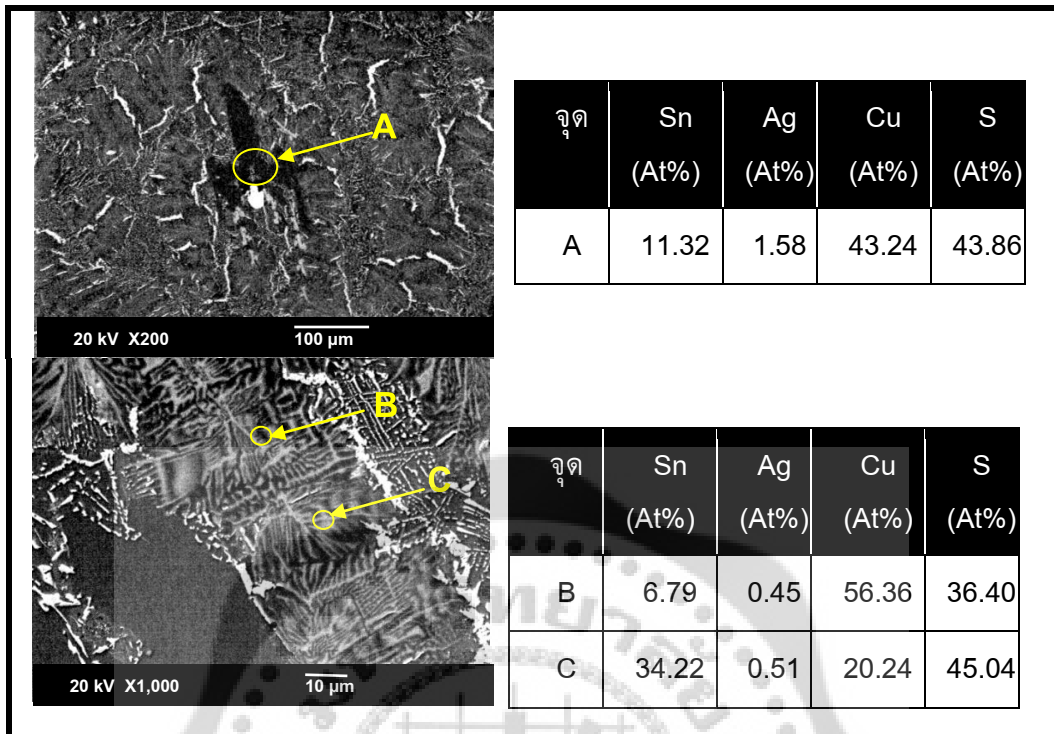
ชิ้นงานแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่ว 3 สูตรจากภาพประกอบ 39 แบบภาคตัดขวาง (cross-section) และนำชิ้นงานมาเตรียมด้วยวิธี metallographic ดังกล่าวในบทที่ 3.3 เพื่อนำมาศึกษาลักษณะเฉพาะของโครงสร้างทางจุลภาคของแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วทั้ง 3 สูตรด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



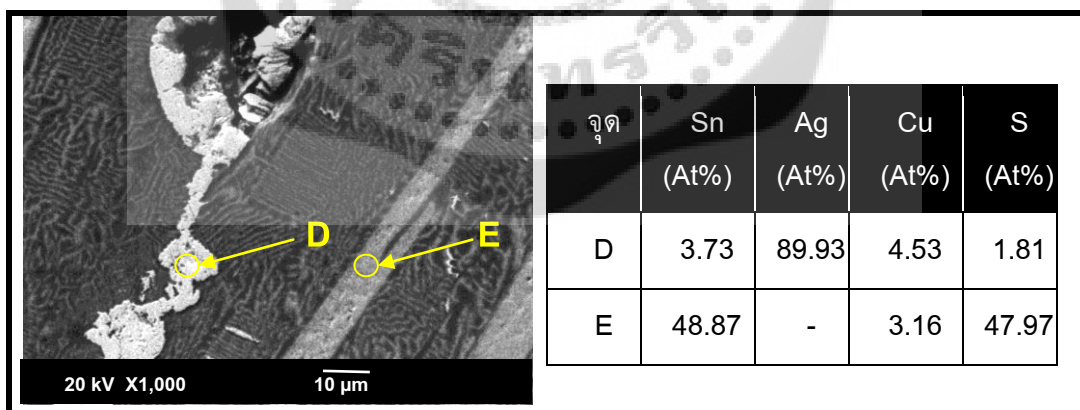
ภาพประกอบ 39 แท่งยาถมดำปราศจากตะกั่ว สูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3

ผลการทดลอง

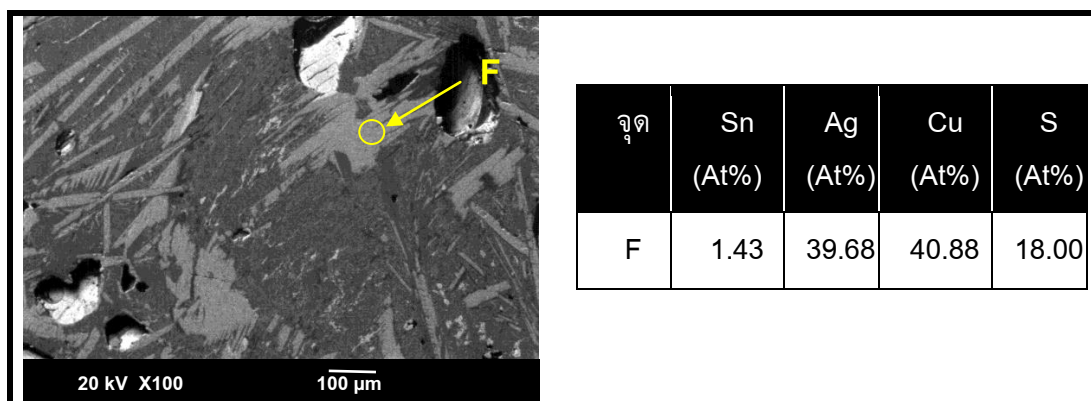
เมื่อนำแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วทั้ง 3 สูตร นำมาภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าโครงสร้างจุลภาคของแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วมีการกระจายตัวของ Dendrite และ phase ต่างๆ ตามภาพประกอบและการวิเคราะห์ธาตุตามโครงสร้างต่างๆ ด้วย และการวิเคราะห์ธาตุด้วยระบบวิเคราะห์แบบ EDS ได้ผลการวิเคราะห์ดังภาพประกอบ 40-42



ภาพประกอบ 40 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคแห่งยาถมต่ำปราศจากตะกั่วสูตร 1 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และผลวิเคราะห์ธาตุด้วยระบบวิเคราะห์แบบ EDS



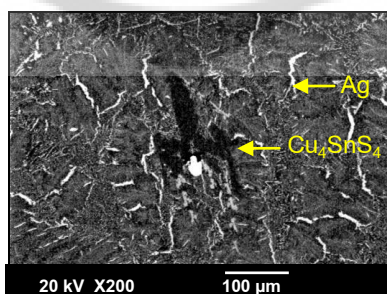
ภาพประกอบ 41 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคแห่งยาถมต่ำปราศจากตะกั่วสูตร 2 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และผลวิเคราะห์ธาตุด้วยระบบวิเคราะห์แบบ EDS



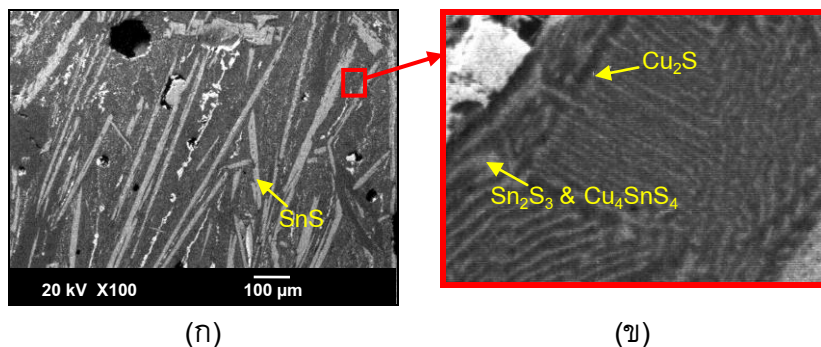
ภาพประกอบ 42 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคแห่งยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 3 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และผลวิเคราะห์ธาตุด้วยระบบวิเคราะห์แบบ EDS

ผลการวิเคราะห์

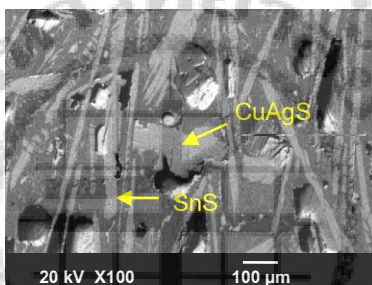
ผลของภาพถ่ายตัดขวางที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการวิเคราะห์ธาตุด้วยระบบวิเคราะห์แบบ EDS แสดงดังภาพประกอบ 40-42 พบว่ายาถมดำปราศจากตะกั่วที่มีปริมาณทองแดงและเงินมากที่สุดจะเกิดเฟส Cu_4SnS_4 (สีดำ) และมีเงินแยกตัวออกมาอยู่บริเวณขอบเกรนมากที่สุดดัง ภาพประกอบ 43 ส่วนภาพประกอบ 44 ก) แสดงให้เห็นว่าแห่งยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 2 มีปริมาณดีบุกมากจนเกิดเส้นเข็มซึ่งเป็นสารประกอบของ SnS ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และสารประกอบ Cu_2S (สีดำ), Sn_2S_3 กับ Cu_4SnS_4 (สีเทา) ดังภาพประกอบ 44 ข) ที่ขยายส่วนภาพ 44 ก ที่มีลักษณะคล้ายยูเทคติกซึ่งพบมากในยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 2 ส่วนยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 3 มีปริมาณดีบุกมากขึ้นส่งผลให้มีสารประกอบ SnS ที่มีลักษณะคล้ายเส้นเข็ม และสารประกอบ CuAgS ขนาดใหญ่มากขึ้นดังภาพประกอบ 45



ภาพประกอบ 43 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของแห่งยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และแสดงสารประกอบ



ภาพประกอบ 44 แสดงโครงสร้างทางจุลภาพของแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 2 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และแสดงสารประกอบ ก) แสดงภาพถ่ายสารประกอบที่มีลักษณะคล้ายเส้นเข็ม ข) ขยายภาพ ของก)แสดงลักษณะโครงสร้างคล้ายยูเทคติก



ภาพประกอบ 45 แสดงโครงสร้างทางจุลภาพของแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 3 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และแสดงสารประกอบ CuAgS และ SnS



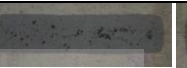

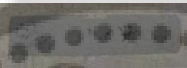



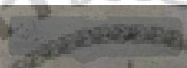





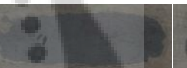

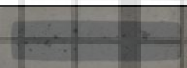
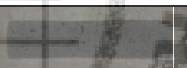








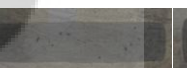









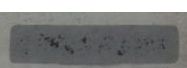











4.3 ศึกษาปริมาณการเกิดรูพรุนบนผิวยาถมดำปราศจากตะกั่วด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสง (Optical Microscope)

ภาพชิ้นงานเงินที่ผ่านการลงถมดำปราศจากตะกั่วที่ผ่านการขัดแต่งชิ้นงานเรียบร้อยแล้ว ทั้งหมด 96 ชิ้น ดังแสดงในตาราง 6 และ 7 และการวิเคราะห์หาพื้นที่การเกิดรูพรุนเทียบกับพื้นที่ถมดำทั้งหมดโดยใช้โปรแกรม Image J software ในตาราง 8 กับ 9 ซึ่งแสดงภาพชิ้นงานที่ลงถมดำปราศจากตะกั่วถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสง กำลังขยาย 50 เท่า

ผลการทดลอง






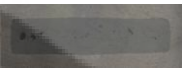




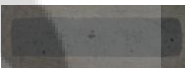



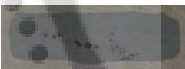











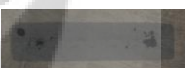



















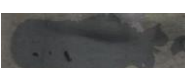

ชุด A ลงถมดำปราศจากตะกั่วบนอัลลอยเงิน 95

ตาราง 6 แสดงภาพชิ้นงานเงินที่ลงถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 บนอัลลอยเงิน 95 ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, 700 องศาเซลเซียส ด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสง กำลังขยาย 50 เท่า

สูตรยาถม	ชิ้นงานเงิน	อุณหภูมิ (°C)	ภาพชิ้นงานทดลองครั้งที่1	ภาพชิ้นงานทดลองครั้งที่2	ภาพชิ้นงานทดลองครั้งที่3	ภาพชิ้นงานทดลองครั้งที่4	
สูตร 1	95Ag-5Cu	400					
			1.1-400-95	1.2-400-95	1.3-400-95	1.4-400-95	
		500					
			1.1-500-95	1.2-500-95	1.3-500-95	1.4-500-95	
	600						
		1.1-600-95	1.2-600-95	1.3-600-95	1.4-600-95		
	700						
		1.1-700-95	1.2-700-95	1.3-700-95	1.4-700-95		
	สูตร 2	95Ag-5Cu	400				
				2.1-400-95	2.2-400-95	2.3-400-95	2.4-400-95
			500				
				2.1-500-95	2.2-500-95	2.3-500-95	2.4-500-95
600							
		2.1-600-95	2.2-600-95	2.3-600-95	2.4-600-95		
700							
		2.1-700-95	2.2-700-95	2.3-700-95	2.4-700-95		
สูตร 3		95Ag-5Cu	400				
				3.1-400-95	3.2-400-95	3.3-400-95	3.4-400-95
			500				
				3.1-500-95	3.2-500-95	3.3-500-95	3.4-500-95
	600						
		3.1-600-95	3.2-600-95	3.3-600-95	3.4-600-95		
	700						
		3.1-700-95	3.2-700-95	3.3-700-95	3.4-700-95		

ชุด B ลงถมดำปราศจากตะกั่วบนโลหะเงินบริสุทธิ์

ตาราง 7 แสดงภาพชิ้นงานเงินที่ลงถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 บนโลหะเงินบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, 700 องศาเซลเซียส ด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสงกำลังขยาย 50 เท่า







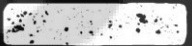

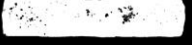







สูตรยาถม	ชิ้นงานเงิน	อุณหภูมิ (°C)	ภาพชิ้นงานทดลองครั้งที่ 1	ภาพชิ้นงานทดลองครั้งที่ 2	ภาพชิ้นงานทดลองครั้งที่ 3	ภาพชิ้นงานทดลองครั้งที่ 4	
สูตร 1	99.99Ag	400					
			1.1-400-99	1.2-400-99	1.3-400-99	1.4-400-99	
		500					
			1.1-500-99	1.2-500-99	1.3-500-99	1.4-500-99	
	600						
		1.1-600-99	1.2-600-99	1.3-600-99	1.4-600-99		
	700						
		1.1-700-99	1.2-700-99	1.3-700-99	1.4-700-99		
	สูตร 2	99.99Ag	400				
				2.1-400-99	2.2-400-99	2.3-400-99	2.4-400-99
			500				
				2.1-500-99	2.2-500-99	2.3-500-99	2.4-500-99
600							
		2.1-600-99	2.2-600-99	2.3-600-99	2.4-600-99		
700							
		2.1-700-99	2.2-700-99	2.3-700-99	2.4-700-99		
สูตร 3		99.99Ag	400				
				3.1-400-99	3.2-400-99	3.3-400-99	3.4-400-99
			500				
				3.1-500-99	3.2-500-99	3.3-500-99	3.4-500-99
	600						
		3.1-600-99	3.2-600-99	3.3-600-99	3.4-600-99		
	700						
		3.1-700-99	3.2-700-99	3.3-700-99	3.4-700-99		





















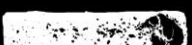



ผลการวิเคราะห์




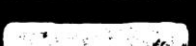




นำภาพชิ้นงานเงินที่ลงถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, 700 องศาเซลเซียส ที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสงกำลังขยาย 50 เท่า มาวิเคราะห์หาพื้นที่การเกิดรูพรุนเปรียบเทียบกับพื้นที่ถมดำทั้งหมดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Image J software แสดงผลดังตาราง 8 และ 9

ชุด A ลงถมดำปราศจากตะกั่วบนอัลลอยเงิน 95

ตาราง 8 แสดงภาพชิ้นงานเงินที่ลงถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 บนอัลลอยเงิน 95 ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, 700 องศาเซลเซียส ที่วิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Image J software และแสดงร้อยละพื้นที่การเกิดรูพรุนเปรียบเทียบกับพื้นที่ถมดำ



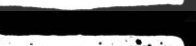

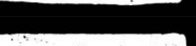




ยาถมดำปราศจาก ตะกั่ว	ชิ้นงานเงิน	อุณหภูมิ (°C)	รหัส	ภาพชิ้นงาน Image J	ร้อยละพื้นที่การ เกิดรูพรุน
สูตร 1	95Ag-5Cu	400	1.1-400-95		5.21
			1.2-400-95		3.95
			1.3-400-95		2.89
			1.4-400-95		19.31
สูตร 1	95Ag-5Cu	500	1.1-500-95		1.71
			1.2-500-95		1.46
			1.3-500-95		3.22
			1.4-500-95		0.90
สูตร 1	95Ag-5Cu	600	1.1-600-95		1.40
			1.2-600-95		5.46
			1.3-600-95		1.60
			1.4-600-95		0.33
สูตร 1	95Ag-5Cu	700	1.1-700-95		0.41
			1.2-700-95		5.24
			1.3-700-95		0.45
			1.4-700-95		0.40

ยาถมต่ำปราศจาก ตะกั่ว	ชิ้นงานเงิน	อุณหภูมิ (°C)	รหัส	ภาพชิ้นงาน Image J	ร้อยละพื้นที่การ เกิดรูพรุน
สูตร 2	95Ag-5Cu	400	2.1-400-95		2.51
			2.2-400-95		2.45
			2.3-400-95		5.87
			2.4-400-95		4.69
สูตร 2	95Ag-5Cu	500	2.1-500-95		1.33
			2.2-500-95		1.98
			2.3-500-95		1.26
			2.4-500-95		1.82
สูตร 2	95Ag-5Cu	600	2.1-600-95		1.47
			2.2-600-95		4.47
			2.3-600-95		0.73
			2.4-600-95		1.25
สูตร 2	95Ag-5Cu	700	2.1-700-95		5.91
			2.2-700-95		0.27
			2.3-700-95		1.21
			2.4-700-95		0.75
สูตร 3	95Ag-5Cu	400	3.1-400-95		13.19
			3.2-400-95		14.56
			3.3-400-95		16.03
			3.4-400-95		11.36
สูตร 3	95Ag-5Cu	500	3.1-500-95		1.81
			3.2-500-95		9.61
			3.3-500-95		3.88
			3.4-500-95		11.20

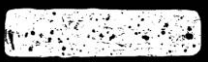















ยาถมดำปราศจาก ตะกั่ว	ชิ้นงานเงิน	อุณหภูมิ (°C)	รหัส	ภาพชิ้นงาน Image J	ร้อยละพื้นที่การ เกิดรูพรุน
สูตร 3	95Ag-5Cu	600	3.1-600-95		1.74
			3.2-600-95		2.90
			3.3-600-95		1.17
			3.4-600-95		2.86
สูตร 3	95Ag-5Cu	700	3.1-700-95		9.35
			3.2-700-95		0.84
			3.3-700-95		7.14
			3.4-700-95		1.90

ชุด B ลงถมดำปราศจากตะกั่วโลหะเงินบริสุทธิ์

ตาราง 9 แสดงภาพชิ้นงานเงินที่ลงถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 บนโลหะเงินบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, 700 องศาเซลเซียส และวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Image J software และแสดงร้อยละพื้นที่การเกิดรูพรุนเปรียบเทียบกับพื้นที่ถมดำ

ยาถมดำปราศจาก ตะกั่ว	ชิ้นงานเงิน	อุณหภูมิ (°C)	รหัส	ภาพชิ้นงาน Image J	ร้อยละพื้นที่การ เกิดรูพรุน
สูตร 1	99.99Ag	400	1.1-400-95		20.49
			1.2-400-95		0.16
			1.3-400-95		1.47
			1.4-400-95		1.10
สูตร 1	99.99Ag	500	1.1-500-95		1.06
			1.2-500-95		0.99
			1.3-500-95		0.37
			1.4-500-95		1.57
สูตร 1	99.99Ag	600	1.1-600-95		11.80

ยาถมต่ำปราศจาก ตะกั่ว	ชิ้นงานเงิน	อุณหภูมิ (°C)	รหัส	ภาพชิ้นงาน Image J	ร้อยละพื้นที่การ เกิดรูพรุน
			1.2-600-95		1.07
			1.3-600-95		0.47
			1.4-600-95		1.19
สูตร 1	99.99Ag	700	1.1-700-95		17.59
			1.2-700-95		0.72
			1.3-700-95		1.31
			1.4-700-95		0.34
สูตร 2	99.99Ag	400	2.1-400-95		2.90
			2.2-400-95		3.93
			2.3-400-95		1.41
			2.4-400-95		2.27
สูตร 2	99.99Ag	500	2.1-500-95		2.57
			2.2-500-95		0.89
			2.3-500-95		1.72
			2.4-500-95		1.27
สูตร 2	99.99Ag	600	2.1-600-95		1.13
			2.2-600-95		2.56
			2.3-600-95		2.08
			2.4-600-95		1.84
สูตร 2	99.99Ag	700	2.1-700-95		13.18
			2.2-700-95		1.517
			2.3-700-95		0.47
			2.4-700-95		4.13

ยาถมดำปราศจาก ตะกั่ว	ชิ้นงานเงิน	อุณหภูมิ (°C)	รหัส	ภาพชิ้นงาน Image J	ร้อยละพื้นที่การ เกิดรูพรุน
สูตร 3	99.99Ag	400	3.1-400-95		4.39
			3.2-400-95		6.96
			3.3-400-95		4.79
			3.4-400-95		14.52
สูตร 3	99.99Ag	500	3.1-500-95		1.97
			3.2-500-95		0.66
			3.3-500-95		3.15
			3.4-500-95		10.05
สูตร 3	99.99Ag	600	3.1-600-95		2.51
			3.2-600-95		1.43
			3.3-600-95		2.39
			3.4-600-95		0.16
สูตร 3	99.99Ag	700	3.1-700-95		23.62
			3.2-700-95		0.52
			3.3-700-95		0.29
			3.4-700-95		8.23

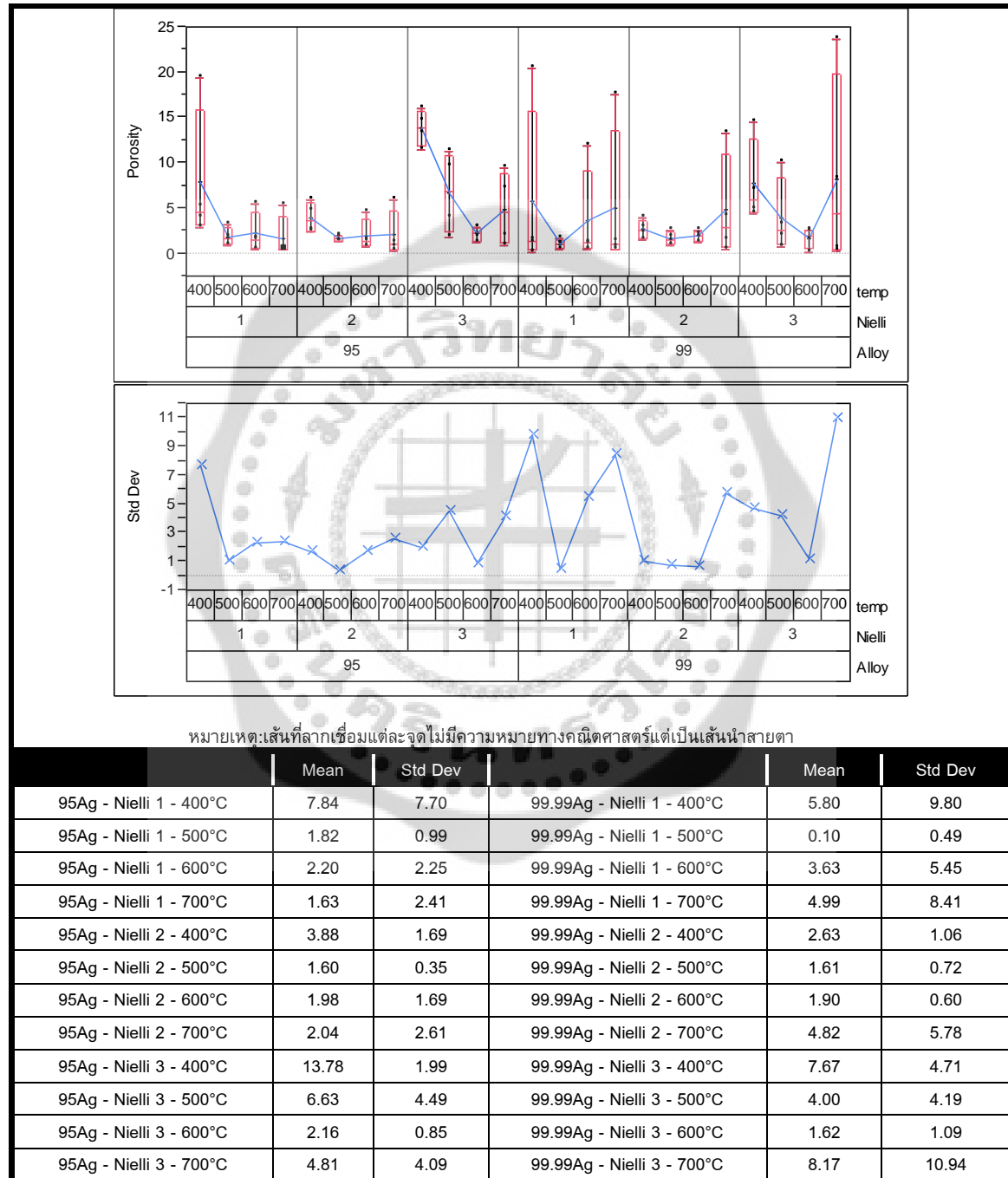
หมายเหตุ : ชุด A =48 ชิ้น, ชุด B= 48 ชิ้น รวมทั้งหมด 96 ชิ้น

พื้นที่ดำแสดงบริเวณรูพรุนที่เกิดบนผิวยาถมดำปราศจากตะกั่วบนชิ้นงานเงิน

พื้นที่สีขาวแสดงผิวยาถมดำปราศจากตะกั่วบนชิ้นงานเงิน

ผลการวิเคราะห์

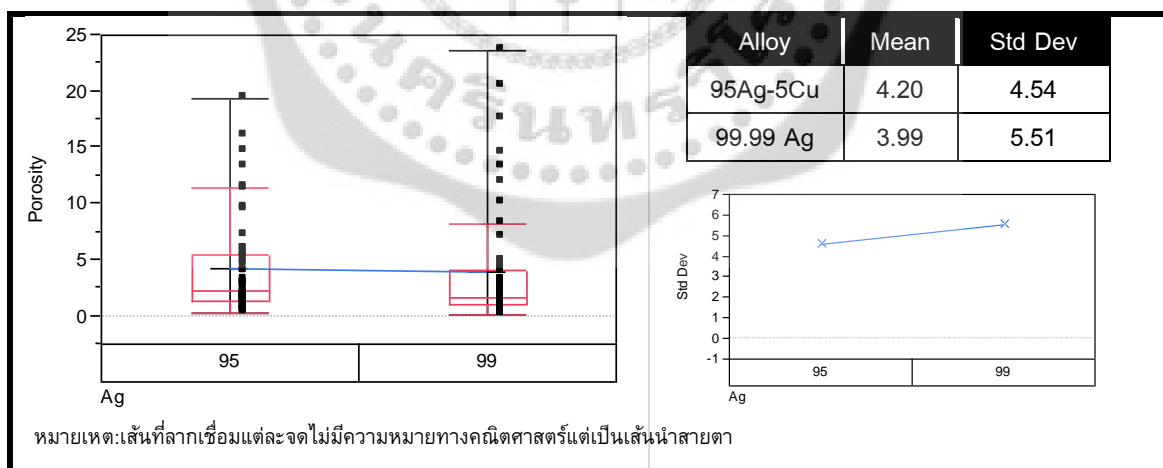
จากการหาค่าร้อยละการเกิดรูพรุนที่เกิดขึ้นในโครงสร้างยาถบเปรียบเทียบกับพื้นที่ถบดำปราศจากตะกั่วทั้งหมด แสดงผลในตาราง 10 กับ 11 มาวิเคราะห์รวมกันทั้งหมด จากนั้นมาวิเคราะห์รวมกันทั้งหมด ดังภาพประกอบ 46



ภาพประกอบ 46 กราฟแสดงปริมาณการเกิดรูพรุนในชิ้นงานที่ถบมบหนักงานเงิน

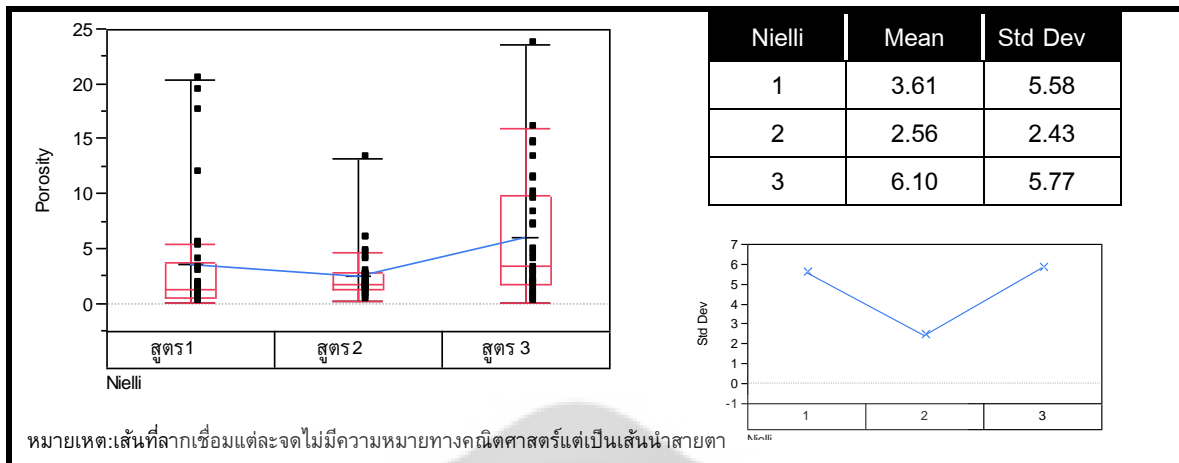
ปัจจัยที่มีผลต่อรูพรุนแบ่งเป็น 3 ประการ คือ ชนิดของชิ้นงานเงิน สูตรยาถมดำปราศจากตะกั่ว และอุณหภูมิที่ใช้ในการลงถม ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ผลที่มีต่อการเกิดรูพรุน จากปัจจัยแรกพบว่าชนิดของชิ้นงานเงินที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อการเกิดรูพรุนอย่างมีนัยสำคัญดังแสดงในภาพประกอบ 47 หากแต่ว่าสูตรของยาถมซึ่งเป็นปัจจัยที่สอง ให้ผลที่เกิดรูพรุนที่แตกต่างในแต่ละสูตร โดยแสดงผลของสูตรของยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 2 มีค่าเฉลี่ยการเกิดรูพรุนที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับสูตรอื่นๆ เท่ากับค่าเฉลี่ยร้อยละ 2.56 ± 2.43 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 มีค่าเฉลี่ยร้อยละการเกิดรูพรุนเท่ากับ 3.61 ± 5.58 และสูตร 3 มีค่าเฉลี่ยการเกิดรูพรุนมากที่สุด คือค่าเฉลี่ยร้อยละการเกิดรูพรุน 6.10 ± 5.79 ดังภาพประกอบ 48 และปัจจัยสุดท้ายคืออุณหภูมิแสดงในภาพประกอบ 49 พบว่าที่อุณหภูมิที่มีค่าเฉลี่ยร้อยละการเกิดรูพรุนจากที่มีค่าน้อยเหมาะสมกับการลงถม คือ 500 กับ 600 องศาเซลเซียส ซึ่งเมื่อพิจารณาอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าเฉลี่ยรูพรุนน้อยที่สุดเท่ากับร้อยละ 2.25 ± 2.43 อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เท่ากับร้อยละ 2.77 ± 3.03 อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เท่ากับร้อยละ 4.41 ± 6.16 และอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เท่ากับร้อยละ 6.93 ± 6.14 เมื่อพิจารณาจากปัจจัยทั้ง 3 ประการ ดังภาพประกอบ 47-49 สรุปได้ว่าสูตรของยาถมและอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อการเกิดรูพรุน โดยปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดคือสูตรยาถมสูตร 2 กับการใช้อุณหภูมิในการลงถม 600 องศาเซลเซียส มีค่าเฉลี่ยร้อยละการเกิดรูพรุนน้อยที่สุด

1. ชิ้นงานเงิน



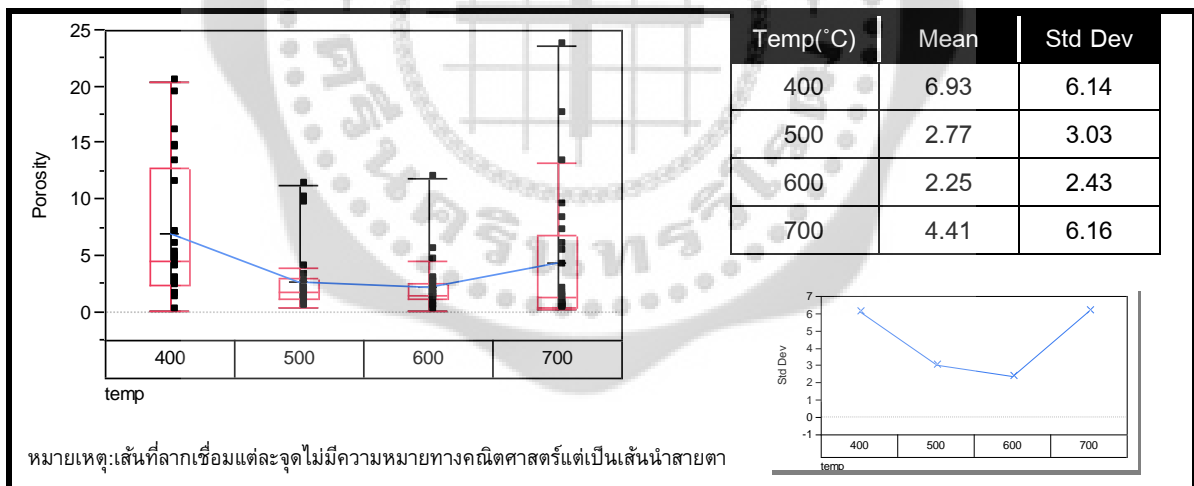
ภาพประกอบ 47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชิ้นงานเงินที่ใช้ในการลงถมดำปราศจากตะกั่ว และค่าเฉลี่ยร้อยละการเกิดรูพรุน

2. สูตรยาถมดำปราศจากตะกั่ว



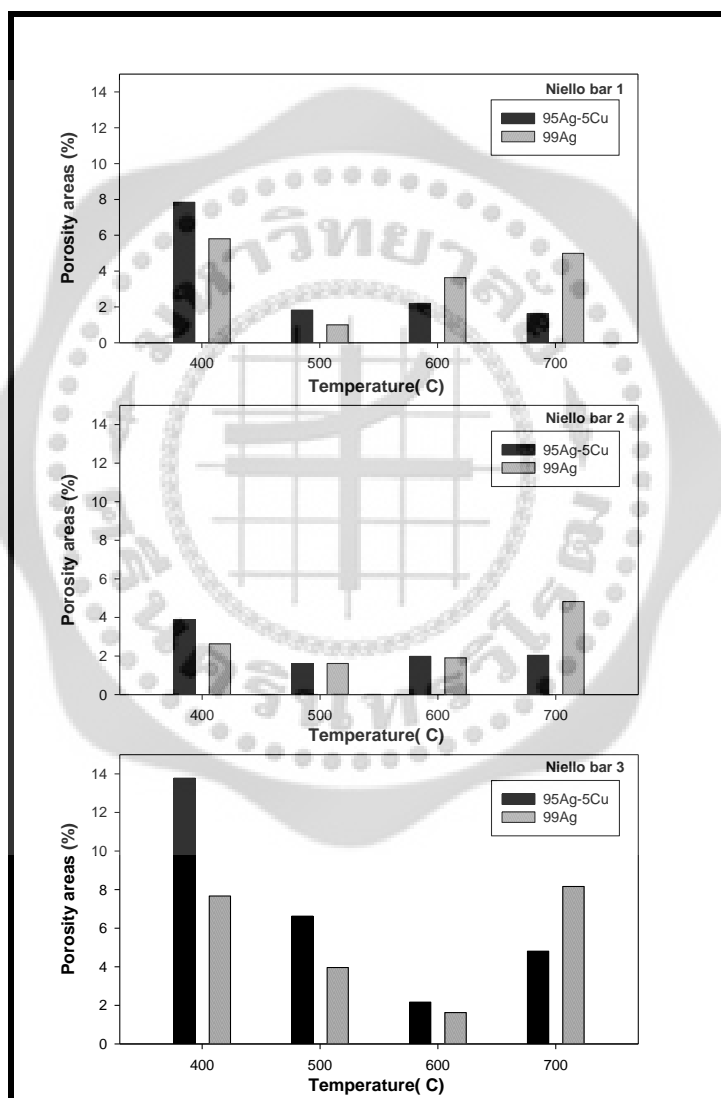
ภาพประกอบ 48 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 และค่าเฉลี่ยร้อยละการเกิดรูพรุน

3. อุณหภูมิ



ภาพประกอบ 49 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการลงถมดำปราศจากตะกั่วและค่าเฉลี่ยร้อยละการเกิดรูพรุน

เมื่อนำผลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์เปรียบเทียบสูตรยาถมดำปราศจากตะกั่วแต่ละสูตร ระหว่างอัลลอยเงิน 95 กับโลหะเงินบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน แสดงผลออกมาเป็นกราฟแท่งดังภาพประกอบ 50 ภาพรวมพบว่ายาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 2 มีปริมาณรูพรุนมีความแตกต่างกันเล็กน้อยในอัลลอยเงิน 95 และโลหะเงินบริสุทธิ์ ดังนั้นจึงเป็นสูตรยาถมที่สามารถจะควบคุมคุณภาพการเกิดรูพรุนของชิ้นงานที่ลงถมดำปราศจากตะกั่วบนอัลลอยเงินได้ดีกว่ายาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 และสูตร 3



ภาพประกอบ 50 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการลงถมดำปราศจากตะกั่วต่อปริมาณการเกิดรูพรุน

4.4 ศีรษะรูปร่างของยาถมดำปราศจากตะกั่วหลังจากลงถมน้ำมัน

4.4.1 ด้านหน้าชิ้นงาน

ศึกษารูปร่างของยาถมในชิ้นงานที่ลงถมน้ำมันดำปราศจากตะกั่วทั้งสามสูตร และลงถมนทุกอุณหภูมิ ชุด A และชุด B ทั้งหมด 96 ชิ้น รวมทั้งชิ้นงานเปล่าที่ไม่ได้ลงถมน 1 ชิ้นเพื่อเป็นตัวมาตรฐาน

ผลการทดลอง

การศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการลงถมน ใช้ชิ้นงานที่ได้ลงถมนทั้งหมด 96 ชิ้น แบ่งเป็น **ชุด A** ลงถมนบนอัลลอยเงิน 95 และ **ชุด B** ลงถมนบนโลหะเงินบริสุทธิ์ ชุดละ 48 ชิ้น ดังตาราง 10 และ ตาราง 11 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังใช้ ชิ้นงานเปล่าที่ไม่ได้ลงถมน 1 ชิ้นเพื่อเป็นตัวมาตรฐานดังภาพประกอบ 51 ที่ถ่ายด้วยกล้องดิจิทัลความละเอียดสูง มีระยะโฟกัส 100 มิลลิเมตร




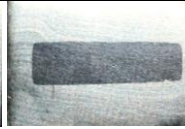












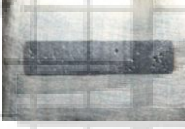



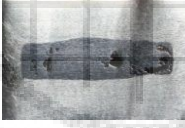

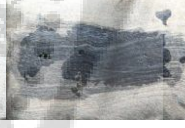



















ภาพประกอบ 51 แสดงชิ้นงานเงินที่ไม่ได้ทำการลงถมนดำปราศจากตะกั่ว

ชุด A ลงถมนดำปราศจากตะกั่วบนอัลลอยเงิน 95









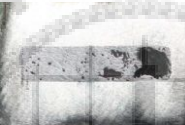


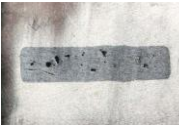




















ตาราง 10 แสดงภาพของชิ้นงานที่ลงถมนดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 บนอัลลอยเงิน 95 ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, 700 องศาเซลเซียส ที่ถ่ายด้วยกล้องดิจิทัลความละเอียดสูง









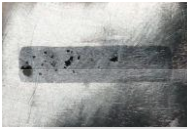
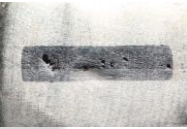

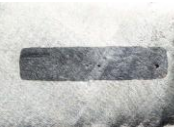




สูตรยาถม	ชิ้นงานเงิน	อุณหภูมิ (°C)	ภาพชิ้นงาน ครั้งที่ 1	ภาพชิ้นงาน ครั้งที่ 2	ภาพชิ้นงาน ครั้งที่ 3	ภาพชิ้นงาน ครั้งที่ 4
สูตร 1	95Ag-5Cu	400				
		500				

สูตรยาถม	ชิ้นงานเงิน	อุณหภูมิ (°C)	ภาพชิ้นงาน ครั้งที่ 1	ภาพชิ้นงาน ครั้งที่ 2	ภาพชิ้นงาน ครั้งที่ 3	ภาพชิ้นงาน ครั้งที่ 4		
		600						
			1.1-600-95	1.2-600-95	1.3-600-95	1.4-600-95		
		700						
			1.1-700-95	1.2-700-95	1.3-700-95	1.4-700-95		
		สูตร 2	95Ag-5Cu	400				
					2.1-400-95	2.2-400-95	2.3-400-95	2.4-400-95
				500				
					2.1-500-95	2.2-500-95	2.3-500-95	2.4-500-95
600								
	2.1-600-95			2.2-600-95	2.3-600-95	2.4-600-95		
700								
	2.1-700-95			2.2-700-95	2.3-700-95	2.4-700-95		
สูตร 3	95Ag-5Cu			400				
					3.1-400-95	3.2-400-95	3.3-400-95	3.4-400-95
				500				
					3.1-500-95	3.2-500-95	3.3-500-95	3.4-500-95
		600						
			3.1-600-95	3.2-600-95	3.3-600-95	3.4-600-95		
		700						
			3.1-700-95	3.2-700-95	3.3-700-95	3.4-700-95		

ชุด B ลงถมดำปราศจากตะกั่วบนโลหะเงินบริสุทธิ์

ตาราง 11 แสดงภาพของชิ้นงานเงินบริสุทธิ์ที่ลงถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, 700 องศาเซลเซียส ที่ถ่ายด้วยกล้องดิจิทัลความละเอียดสูง


สูตรยาถม	อัลลอยเงิน	อุณหภูมิ (°C)	ภาพชิ้นงาน ครั้งที่ 1	ภาพชิ้นงาน ครั้งที่ 2	ภาพชิ้นงาน ครั้งที่ 3	ภาพชิ้นงาน ครั้งที่ 4			
สูตร 1	99.99Ag	400							
			1.1-400-99	1.2-400-99	1.3-400-99	1.4-400-99			
			500						
				1.1-500-99	1.2-500-99	1.3-500-99	1.4-500-99		
		600							
				1.1-600-99	1.2-600-99	1.3-600-99	1.4-600-99		
			700						
				1.1-700-99	1.2-700-99	1.3-700-99	1.4-700-99		
		สูตร 2		99.99Ag	400				
						2.1-400-99	2.2-400-99	2.3-400-99	2.4-400-99
			500						
						2.1-500-99	2.2-500-99	2.3-500-99	2.4-500-99
		600							
				2.1-600-99	2.2-600-99	2.3-600-99	2.4-600-99		
			700						
				2.1-700-99	2.2-700-99	2.3-700-99	2.4-700-99		

สูตรยาถม	อัลลอยเงิน	อุณหภูมิ (°C)	ภาพชิ้นงาน ครั้งที่ 1	ภาพชิ้นงาน ครั้งที่ 2	ภาพชิ้นงาน ครั้งที่ 3	ภาพชิ้นงาน ครั้งที่ 4
สูตร 3	99.99Ag	400				
			3.1-400-99	3.2-400-99	3.3-400-99	3.4-400-99
		500				
			3.1-500-99	3.2-500-99	3.3-500-99	3.4-500-99
	600					
		3.1-600-99	3.2-600-99	3.3-600-99	3.4-600-99	
	700					
		3.1-700-99	3.2-700-99	3.3-700-99	3.4-700-99	

หมายเหตุ : ชุด A = 48 ชิ้น, ชุด B = 48 ชิ้น รวมทั้งหมด 96 ชิ้น

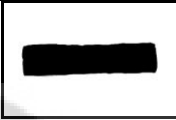



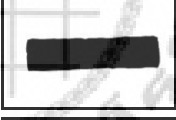

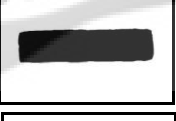
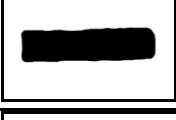
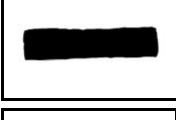
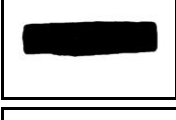
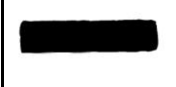
ทำการวิเคราะห์หาพื้นที่ถมดำปราศจากตะกั่วเปรียบเทียบกับพื้นที่ส่วนที่เป็นชิ้นงานเงินด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Image J software จากนั้นนำไปคำนวณหาร้อยละผลต่างของพื้นที่สำหรับलगมดำปราศจากตะกั่วในชิ้นงานมาตรฐานดังตาราง 12 กับชิ้นงานที่लगมดำปราศจากตะกั่ว จากสูตรคำนวณที่ 1 คือ $\Delta A = A_1 - A_0$ โดยจำแนกเป็น **ชุด A** लगมบนอัลลอยเงิน 95 จำนวน 48 ชิ้น ดังตาราง 13 และ **ชุด B** लगมบนโลหะเงินบริสุทธิ์ จำนวน 48 ชิ้น ดังตาราง 14

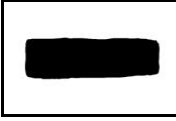
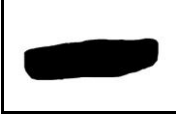
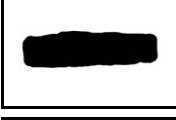
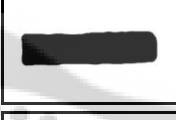


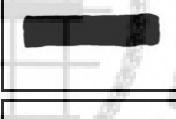


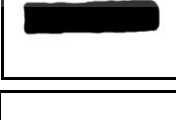
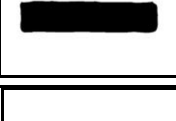
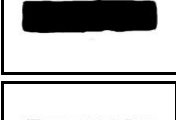

ตาราง 12 แสดงภาพชิ้นงานมาตรฐาน และหาพื้นที่ที่เซาะเป็นร่องสำหรับलगมเปรียบเทียบกับพื้นที่ส่วนที่เป็นชิ้นงานเงิน

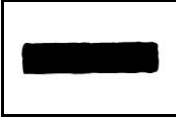
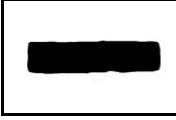
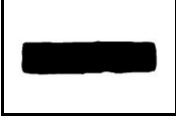


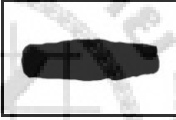
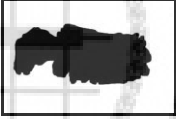
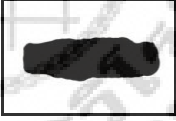

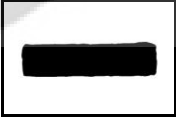
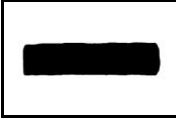
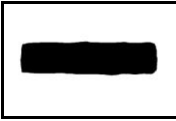
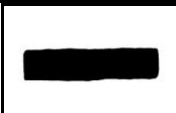
ชิ้นงานมาตรฐาน	ชิ้นงานเงิน	อุณหภูมิ (°C)	รหัส	ภาพชิ้นงาน Image J	%พื้นที่ถมดำ (A_0)	%พื้นที่ถมดำ- %มาตรฐาน(ΔA)
ชิ้นงาน มาตรฐาน	-	-	-		21.721	0

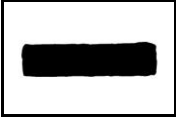
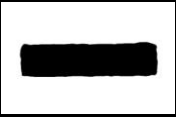
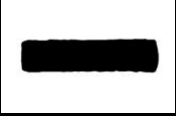


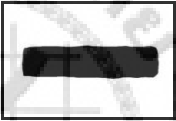
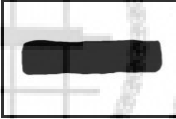

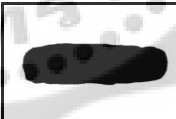
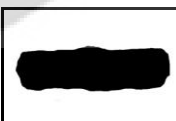
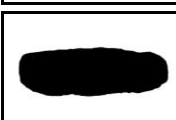
ชุด A ลงถมดำปราศจากตะกั่วบนอัลลอยเงิน 95

ตาราง 13 แสดงภาพชิ้นงานเงินที่ลงถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 บนอัลลอยเงิน 95 ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, 700 องศาเซลเซียส และค่าพื้นที่ถมดำเปรียบเทียบกับพื้นที่ส่วนที่เป็นชิ้นงานเงิน

ยถมดำปราศ จากตะกั่ว	ชิ้นงานเงิน	อุณหภูมิ (°C)	รหัส	ภาพชิ้นงาน Image J	%พื้นที่ถมดำ (A ₁)	%พื้นที่ถมดำ- %มาตรฐาน(ΔA)
สูตร 1	95Ag-5Cu	400	1.1-400-95		20.44	-1.28
			1.2-400-95		23.82	2.10
			1.3-400-95		21.38	-0.34
			1.4-400-95		22.36	0.64
สูตร 1	95Ag-5Cu	500	1.1-500-95		21.376	-0.34
			1.2-500-95		20.26	-1.46
			1.3-500-95		21.95	0.23
			1.4-500-95		21.38	-0.34
สูตร 1	95Ag-5Cu	600	1.1-600-95		20.44	-1.28
			1.2-600-95		21.72	0.001
			1.3-600-95		22.02	0.30




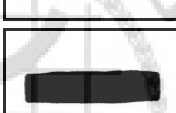


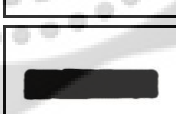
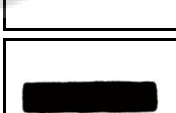
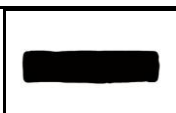
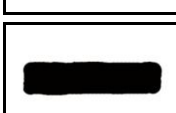
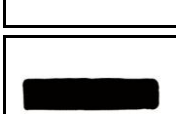
ยาดมต่ำปราศ จากตะกั่ว	ชิ้นงานเงิน	อุณหภูมิ (°C)	รหัส	ภาพชิ้นงาน Image J	%พื้นที่ถมต่ำ (A ₁)	%พื้นที่ถมต่ำ- %มาตรฐาน(ΔA)
			1.4-600-95		26.19	4.47
สูตร 1	95Ag-5Cu	700	1.1-700-95		22.96	1.24
			1.2-700-95		21.78	0.06
			1.3-700-95		21.37	-0.35
			1.4-700-95		32.80	11.08
สูตร 2	95Ag-5Cu	400	2.1-400-95		20.82	-0.90
			2.2-400-95		21.15	-0.57
			2.3-400-95		22.358	0.637
			2.4-400-95		21.19	-0.53
สูตร 2	95Ag-5Cu	500	2.1-500-95		21.32	-0.40
			2.2-500-95		20.77	-0.95
			2.3-500-95		21.04	-0.68
			2.4-500-95		26.23	4.51

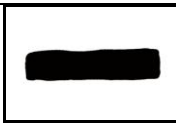

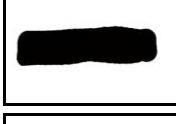



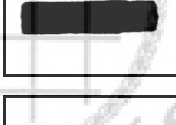



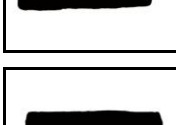

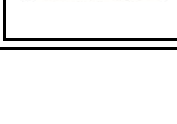
ยาดมต่ำปราศ จากตะกั่ว	ชิ้นงานเงิน	อุณหภูมิ (°C)	รหัส	ภาพชิ้นงาน Image J	%พื้นที่ถมต่ำ (A ₁)	%พื้นที่ถมต่ำ- %มาตรฐาน(ΔA)
สูตร 2	95Ag-5Cu	600	2.1-600-95		21.07	-0.65
			2.2-600-95		20.71	-1.01
			2.3-600-95		21.45	-0.27
			2.4-600-95		21.38	-0.34
สูตร 2	95Ag-5Cu	700	2.1-700-95		23.70	1.98
			2.2-700-95		24.58	2.85
			2.3-700-95		31.60	9.88
			2.4-700-95		25.34	3.62
สูตร 3	95Ag-5Cu	400	3.1-400-95		20.26	-1.46
			3.2-400-95		22.32	0.60
			3.3-400-95		21.61	-0.11
			3.4-400-95		21.51	-0.21
สูตร 3	95Ag-5Cu	500	3.1-500-95		21.36	-0.36

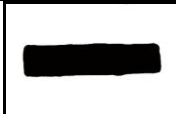
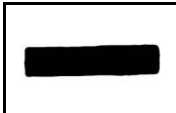
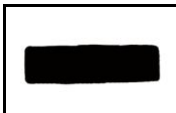




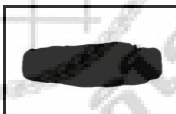

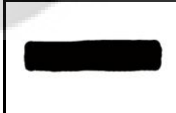
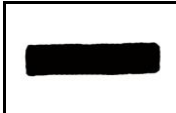
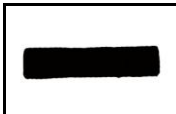
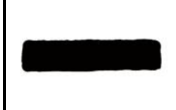
ยาดมต่ำปราศ จากตะกั่ว	ชั้นงานเงิน	อุณหภูมิ (°C)	รหัส	ภาพชั้นงาน Image J	%พื้นที่ถมต่ำ (A _i)	%พื้นที่ถมต่ำ- %มาตรฐาน(ΔA)
			3.2-500-95		22.31	0.60
			3.3-500-95		22.20	0.47
			3.4-500-95		22.13	0.41
สูตร 3	95Ag-5Cu	600	3.1-600-95		20.76	-0.96
			3.2-600-95		19.09	-2.63
			3.3-600-95		21.29	-0.43
			3.4-600-95		22.59	0.87
สูตร 3	95Ag-5Cu	700	3.1-700-95		22.00.	0.28
			3.2-700-95		24.84	3.12
			3.3-700-95		27.55	5.83
			3.4-700-95		29.07	7.35

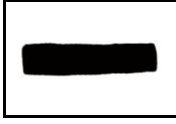
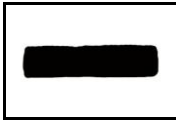
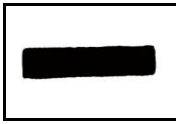



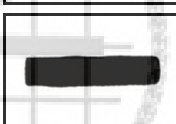

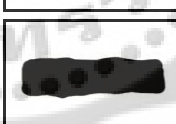

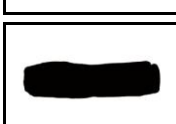
ชุด B ลงถมดำปราศจากตะกั่วบนโลหะเงินบริสุทธิ์

ตาราง 14 แสดงภาพชิ้นงานที่ลงถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 บนโลหะเงินบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, 700 องศาเซลเซียส และค่าพื้นที่ถมดำเปรียบเทียบกับพื้นที่ส่วนที่เป็นชิ้นงานเงิน

ยถมดำปราศจากตะกั่ว	ชิ้นงานเงิน	อุณหภูมิ (°C)	รหัส	ภาพชิ้นงาน Image J	%พื้นที่ถมดำ (A ₁)	%พื้นที่ถมดำ- %มาตรฐาน(ΔA)
สูตร 1	99.99Ag	400	1.1-400-99		18.49	-3.23
			1.2-400-99		19.92	-1.80
			1.3-400-99		21.87	0.15
			1.4-400-99		21.06	-0.66
สูตร 1	99.99Ag	500	1.1-500-99		20.82	-0.90
			1.2-500-99		19.46	-2.26
			1.3-500-99		19.89	-1.83
			1.4-500-99		21.13	-0.59
สูตร 1	99.99Ag	600	1.1-600-99		21.71	-0.01
			1.2-600-99		22.08	0.36
			1.3-600-99		21.32	-0.40

ยาดมดำปราศ จากตะกั่ว	ชั้นงานเงิน	อุณหภูมิ (°C)	รหัส	ภาพชั้นงาน Image J	%พื้นที่ถมดำ (A ₁)	%พื้นที่ถมดำ- %มาตรฐาน(ΔA)
			1.4-600-99		20.06	-1.66
สูตร 1	99.99Ag	700	1.1-700-99		23.65	1.93
			1.2-700-99		24.09	2.37
			1.3-700-99		27.04	5.31
			1.4-700-99		27.83	6.11
สูตร 2	99.99Ag	400	2.1-400-99		20.40	-1.32
			2.2-400-99		22.20	0.48
			2.3-400-99		21.08	-0.64
			2.4-400-99		21.35	-0.37
สูตร 2	99.99Ag	500	2.1-500-99		20.63	-1.09
			2.2-500-99		22.51	0.79
			2.3-500-99		21.75	0.03
			2.4-500-99		21.07	-0.65

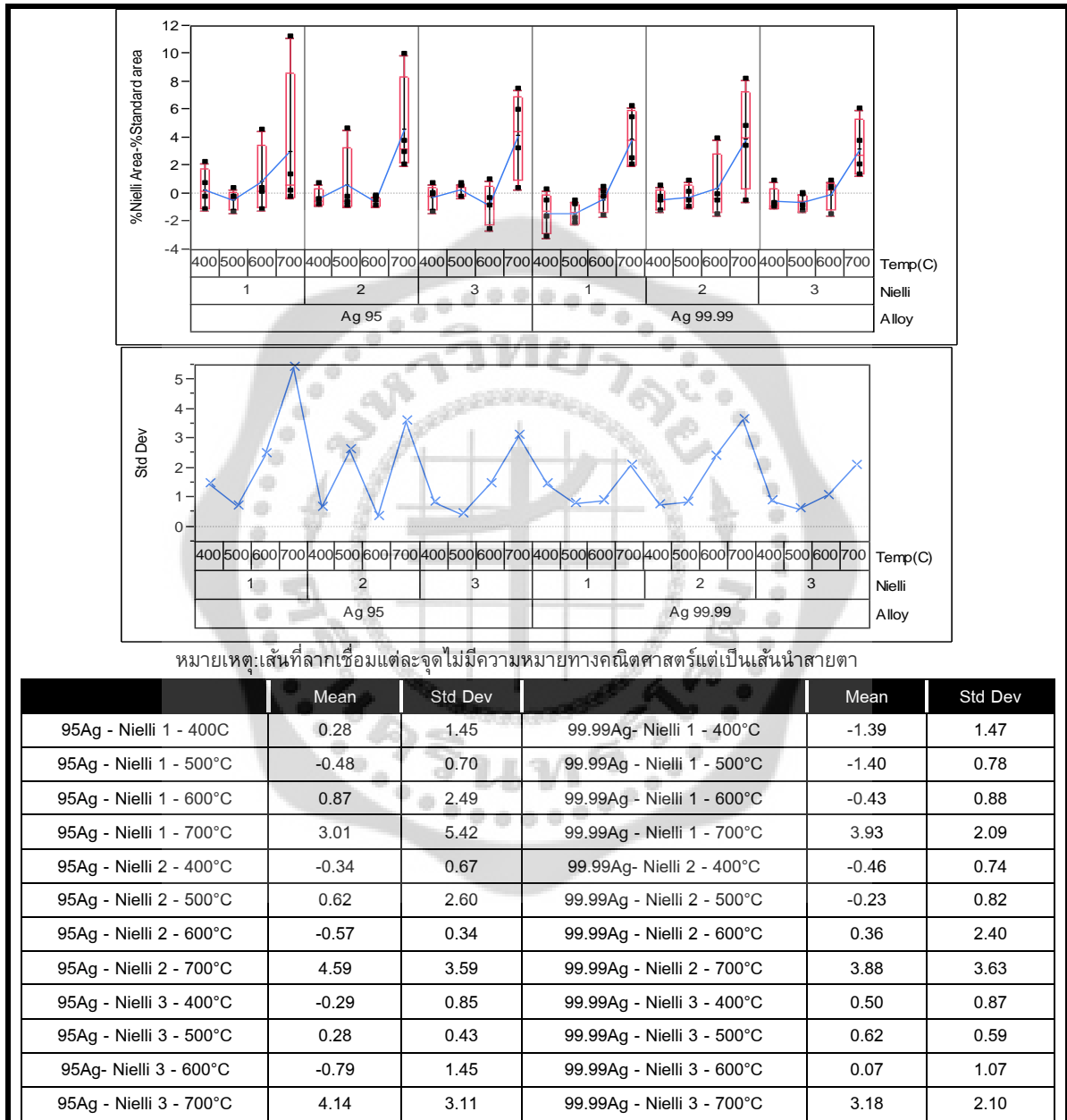
ยอดมดำปราศ จากตะกั่ว	ชั้นงานเงิน	อุณหภูมิ (°C)	รหัส	ภาพชั้นงาน Image J	%พื้นที่ถมดำ (A ₁)	%พื้นที่ถมดำ- %มาตรฐาน(ΔA)
สูตร 2	99.99Ag	600	2.1-600-99		21.09	-0.63
			2.2-600-99		20.11	-1.61
			2.3-600-99		25.56	3.84
			2.4-600-99		21.56	-0.16
สูตร 2	99.99Ag	700	2.1-700-99		25.02	3.30
			2.2-700-99		21.07	-0.65
			2.3-700-99		29.85	8.12
			2.4-700-99		26.46	4.74
สูตร 3	99.99Ag	400	3.1-400-99		22.51	0.79
			3.2-400-99		20.90	-0.83
			3.3-400-99		20.84	-0.88
			3.4-400-99		20.63	-1.09
สูตร 3	99.99Ag	500	3.1-500-99		21.648	-0.073

ยอดมดำปราศ จากตะกั่ว	ชั้นงานเงิน	อุณหภูมิ (°C)	รหัส	ภาพชั้นงาน Image J	%พื้นที่มดำ (A ₁)	%พื้นที่มดำ- %มาตรฐาน(ΔA)
			3.2-500-99		20.78	-0.94
			3.3-500-99		21.54	-0.18
			3.4-500-99		20.43	-1.29
สูตร 3	99.99Ag	600	3.1-600-99		22.53	0.81
			3.2-600-99		21.94	0.22
			3.3-600-99		22.05	0.33
			3.4-600-99		20.09	-1.63
สูตร 3	99.99Ag	700	3.1-700-99		23.63	1.91
			3.2-700-99		25.34	3.62
			3.3-700-99		27.66	5.94
			3.4-700-99		22.95	1.23

หมายเหตุ : ชุด A =48 ชั้น, ชุด B= 48 ชั้น รวมทั้งหมด 96 ชั้น

ผลการวิเคราะห์

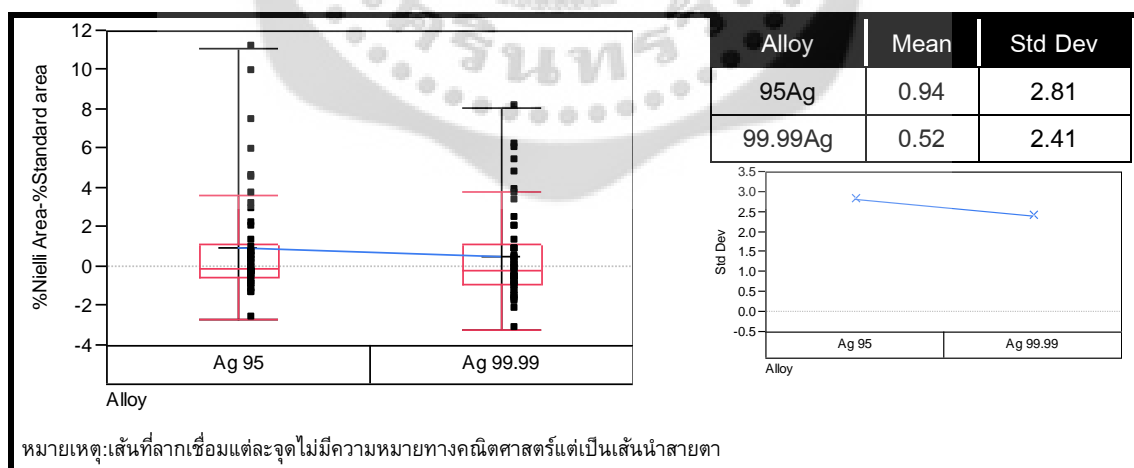
จากการหาค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของร่องหลังจากการลงถมต่ำปราศจากตะกั่วเปรียบเทียบกับขนาดร่องขึ้นงานเงินมาตรฐานก่อนการลงถม ที่แสดงผลในตาราง 12-14 มาวิเคราะห์รวมกันทั้งหมด แสดงดังภาพประกอบ 52



ภาพประกอบ 52 กราฟแสดงรูปร่างของยาถมต่ำปราศจากตะกั่วหลังจากทำการลงถมบนชิ้นงานเงิน

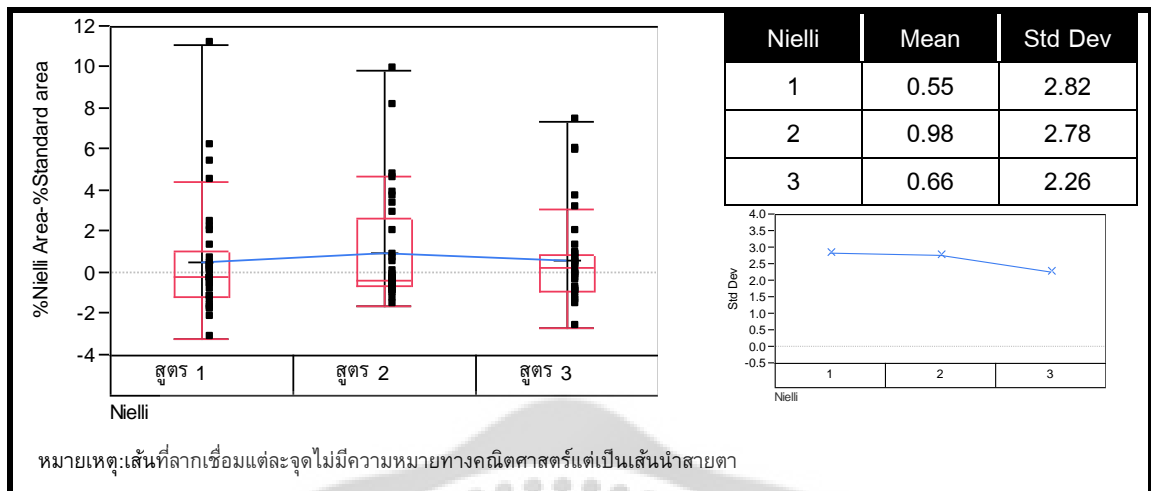
ปัจจัยที่มีผลต่อการลงถมให้ได้ตามขนาดและรูปร่างของถมแบ่งได้ทั้ง 3 ประการ คือ ชนิดของชิ้นงานเงิน สูตรยาถมดำปราศจากตะกั่ว และอุณหภูมิที่ใช้ในการลงถม จากภาพประกอบ 52 ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของร่องยาถมเปรียบเทียบกับชิ้นงานมาตรฐาน(ขนาดชิ้นงานเงินก่อนลงยาถม) ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ปัจจัยแรกชนิดของชิ้นงานเงินบริสุทธิ์มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของร่องยาถมที่น้อยกว่าอัลลอยเงิน 95 เท่ากับร้อยละ 0.52 ± 2.41 ซึ่งน้อยกว่าอัลลอยเงิน 95 เท่ากับร้อยละ 0.94 ± 2.81 ดังแสดงในภาพประกอบ 53 สูตรของยาถมซึ่งเป็นปัจจัยที่สองดังภาพประกอบ 54 พบว่ายาถมสูตร 1 มีค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยาถมมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับร้อยละ 0.55 ± 2.82 ต่อมาคือสูตร 3 และสูตร 2 มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.66 ± 2.26 และ 0.98 ± 2.78 ตามลำดับ ส่วนปัจจัยสุดท้ายคืออุณหภูมิแสดงในภาพประกอบ 55 พบว่าที่อุณหภูมิที่มีค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยาถมเปรียบเทียบกับชิ้นงานมาตรฐานที่มีค่าน้อยเหมาะสมกับการลงถม คือ 600 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าเฉลี่ยรูพรุนน้อยที่สุดเท่ากับร้อยละ -0.10 ± 1.56 อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เท่ากับร้อยละ -0.3 ± 1.27 อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เท่ากับร้อยละ -0.41 ± 1.06 และอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เท่ากับร้อยละ 3.79 ± 3.16 เมื่อพิจารณาจากปัจจัยทั้ง 3 ประการ ดังภาพประกอบ 53-55 สรุปได้ว่าปัจจัยทั้งสามมีอิทธิพลต่อรูปร่างของร่องยาถมหลังการลงถม โดยปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดที่จะทำให้รูปร่างของยาถมไม่ผิดเพี้ยนไปจากต้นแบบมาตรฐานมาก คือ ชนิดของชิ้นงานเงินบริสุทธิ์ ยาถมสูตร 1 กับการใช้อุณหภูมิในการลงถม 600 องศาเซลเซียส มีค่าเฉลี่ยร้อยละการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของร่องยาถมที่น้อย

1. ชิ้นงานเงิน



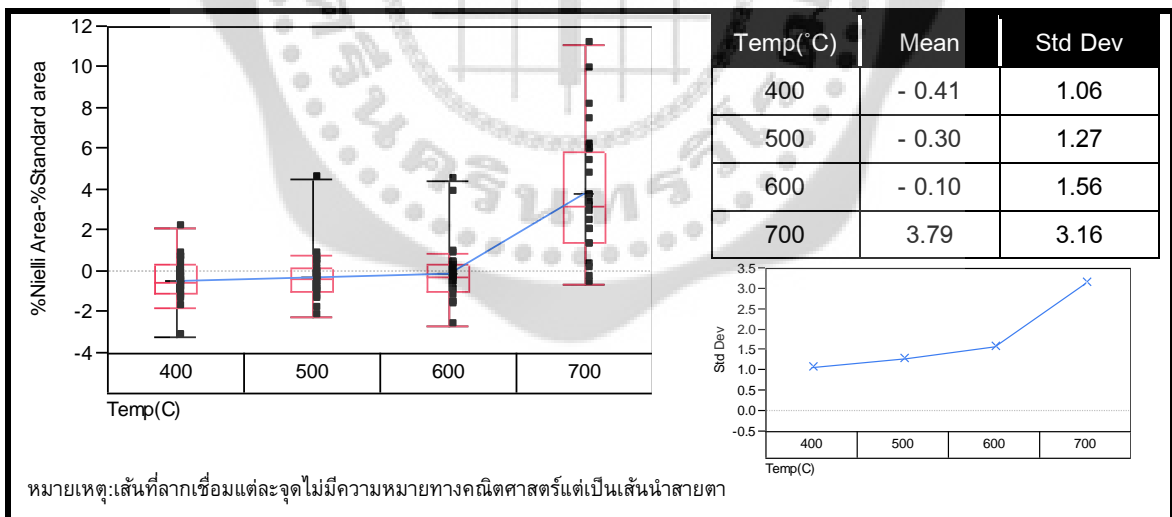
ภาพประกอบ 53 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชิ้นงานเงินที่ใช้ในการลงถมดำปราศจากตะกั่วกับรูปร่างของยาถมดำปราศจากตะกั่วหลังจากลงถม

2. สูตรยาถมดำปราศจากตะกั่ว



ภาพประกอบ 54 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 กับรูปร่างของยาถมดำปราศจากตะกั่วหลังจากลงถม

3. อุณหภูมิ



ภาพประกอบ 55 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการลงถมดำปราศจากตะกั่วกับรูปร่างของยาถมดำปราศจากตะกั่วหลังจากลงถม






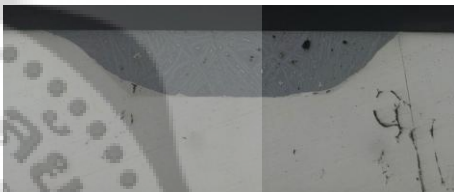


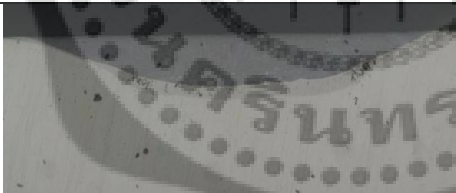


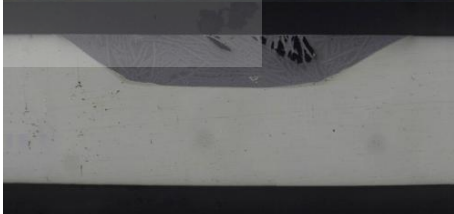


4.4.2 ด้านข้าง (แบบ cross-section)

ตัดแบบภาพตัดขวางชิ้นงานเงินที่ลงถมดำปราศจากตะกั่วทั้งสามสูตร และลงถมทุกอุณหภูมิ (ชุด A และชุด B) และวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสงที่มีอุปกรณ์ต่อเพื่อถ่ายภาพโดยใช้กำลังขยาย 50 เท่า แสดงภาพถ่ายดังตาราง 15

ผลการทดลอง

ตาราง 15 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ลงถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 แบบภาพตัดขวางเพื่อศึกษารูปร่างของร่องยาถมดำปราศจากตะกั่วหลังจากลงถมบนชิ้นงานเงิน

อุณหภูมิ (°C)	สูตร ยา ถม	อัลลอยเงิน 95 (50X)		โลหะเงินบริสุทธิ์ (50X)	
400	1				
	2				
	3				
500	1				
	2				

อุณหภูมิ (°C)	สูตร ยา ถม	อัลลอยเงิน 95 (50X)	โลหะเงินบริสุทธิ์ (50X)
	3		
600	1		
	2		
	3		
700	1		
	2		
	3		

หมายเหตุ : จุด A = 12 ชั้น, จุด B = 12 ชั้น รวมทั้งหมด 24 ชั้น

ผลการวิเคราะห์

เมื่อศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคแบบภาพตัดขวางของชิ้นงานเงินที่ทำการลงถมดำปราศจากตะกั่วทั้งสามสูตรดังตาราง 15 พบว่ารูปร่างของร่องยาถมดำปราศจากตะกั่วหลังจากลงถมบนชิ้นงานเงิน เมื่อเปรียบเทียบกับแบบร่องเดิมที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมคางหมู จะเกิดชั้นรอยต่อระหว่างยาถมดำปราศจากตะกั่วกับชิ้นงานเงินที่หนาขึ้น เมื่อให้ความร้อนสูงขึ้น และมักเกิดรูพรุน ณ บริเวณนั้น ผลคือรูปร่างของมุมอัลลอยเงินหายไป และยาถมดำปราศจากตะกั่วแพร่เข้าไปในเนื้อเงินได้มากขึ้นจึงทำให้รูปร่างของร่องที่เซาะไว้เปลี่ยนไปจากเดิม

4.5 ศึกษาความหนาของชั้นรอยต่อระหว่างถมดำปราศจากตะกั่วกับชิ้นงานเงินด้วยเครื่องมือการวิเคราะห์ธาตุโดยเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer)

นำชิ้นงานเงินที่ผ่านการเตรียมชิ้นงานดังหัวข้อที่ 3.6.2 จากนั้นถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และทำเทคนิค line scan ใช้การส่องกราดลำอิเล็กตรอนเป็นแนวนอนบนตัวอย่างด้วยเครื่องมือการวิเคราะห์ธาตุ เครื่องมือนี้จะเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน เพื่อหาความหนาของชั้นรอยต่อระหว่างยาถมดำปราศจากตะกั่วกับชิ้นงานเงิน

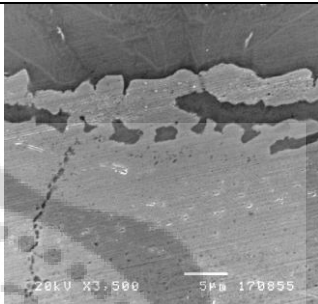
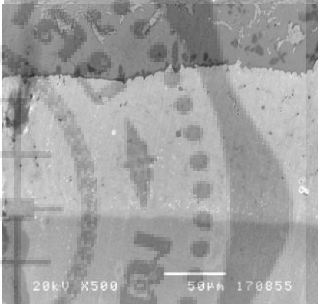
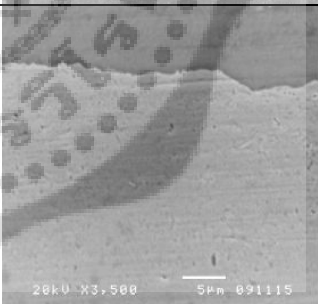
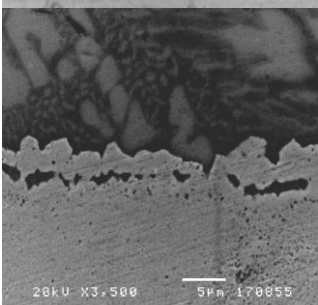
ในการศึกษานี้ จะเลือกทำบางชิ้นงาน คือ ชิ้นงานเงินที่ลงถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 2 ทุกอุณหภูมิ เพราะยาถมสูตร 2 มีทิศทางการเกิดรูพรุนที่น้อย และมีค่าความแตกต่างของการเกิดรูพรุนไม่แตกต่างกันมากระหว่างชนิดของชิ้นงานเงิน ดังแสดงในภาพประกอบ 50 ส่วนยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 และ สูตร 3 จะเลือกชิ้นงานเงินทั้งสองชนิดที่ลงถมอุณหภูมิ 500 กับ 700 องศาเซลเซียส เพราะพบว่าชิ้นงานดังกล่าวมีผลความแตกต่างด้านความหนาของชั้นรอยต่อที่ชัดเจน ดังตาราง 16 กับ 17

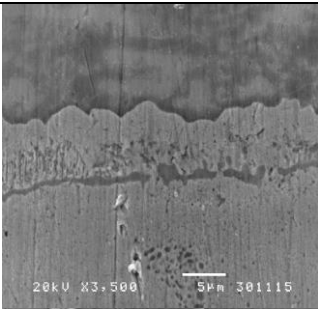
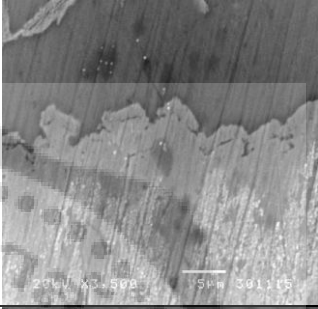

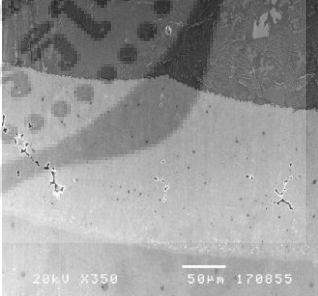
ผลการทดลอง

ผลจากการทำเทคนิค line scan ดังตารางภาพ 16,17 (รายละเอียดในภาคผนวก ก) พบว่าไม่สามารถวิเคราะห์ผลได้ เพราะไม่สามารถแยกแยะการกระจายตัวของแต่ละธาตุได้ชัดเจน จากกราฟและภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดก็ไม่สามารถเห็นความแตกต่างของชั้นรอยต่อได้ชัดเจนทำภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสง ดังนั้นในการหาความหนาของชั้นรอยต่อจึงใช้การหาค่าจากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสงแทนโดยหาค่าเฉลี่ยจากสามจุด แสดงดังตาราง 18 และ 19

ชุด A ชั้นงานเงินที่ลงถมดำปราศจากตะกั่วบนอัลลอยเงิน 95

ตาราง 16 แสดงภาพโครงสร้างทางจุลภาคของชั้นรอยต่อด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และค่าความหนาของชั้นรอยต่อระหว่างยาถมดำปราศจากตะกั่วกับอัลลอยเงิน 95

ยาถมดำปราศจากตะกั่ว	อัลลอยเงิน	อุณหภูมิ (°C)	รหัส	ภาพถ่ายSEM	ความหนา (µm)
สูตร 1	95Ag-5Cu	500	1.4-500-95		*
	95Ag-5Cu	700	1.1-700-95		*
สูตร 2	95Ag-5Cu	400	2.3-400-95		*
	95Ag-5Cu	500	2.1-500-95		*

ยาถมดำ ปราศจากตะกั่ว	อัลลอยเงิน	อุณหภูมิ (°C)	รหัส	ภาพถ่ายSEM	ความหนา (μm)
	95Ag-5Cu	600	2.3-500-95		*
	95Ag-5Cu	700	2.2-700-95		*
สูตร 3	95Ag-5Cu	500	3.1-500-95		*
	95Ag-5Cu	700	3.2-700-95		*

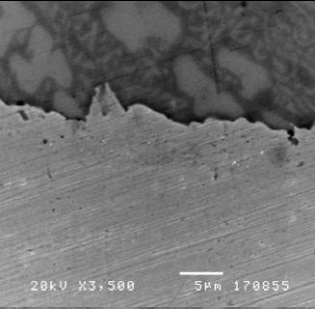
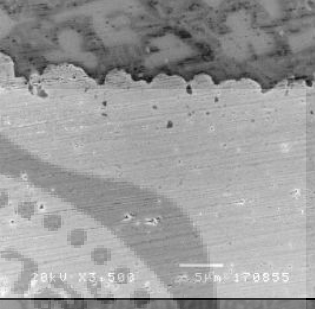
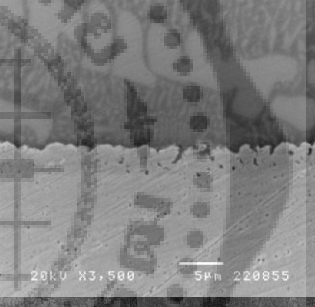
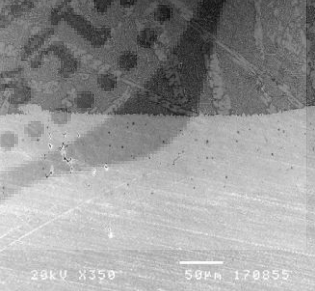
หมายเหตุ : ชุด A = 7 ชั้น, ชุด B = 8 ชั้น รวมทั้งหมด 15 ชั้น

* หมายถึง ไม่สามารถรายงานผลการทำ line scan เพื่อหาความหนาของชั้นรอยต่อ
ระหว่างยาถมดำปราศจากตะกั่วกับอัลลอยเงิน

ชุด B ชิ้นงานเงินที่ลึงถมดำปราศจากตะกั่วบนโลหะเงินบริสุทธิ์

ตาราง 17 ตารางแสดงภาพโครงสร้างทางจุลภาคของชั้นรอยต่อด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และค่าความหนาของชั้นรอยต่อระหว่างปราศจากตะกั่วกับโลหะเงินบริสุทธิ์

ยาถมดำปราศจากตะกั่ว	อัลลอยเงิน	อุณหภูมิ (°C)	รหัส	ภาพถ่ายSEM	ความหนา (μm)
สูตร 1	99.99Ag-	500	1.1-500-99		*
	99.99Ag	700	1.2-700-99		*
สูตร 2	99.99Ag	400	2.4-400-99		*
	99.99Ag	500	2.2-500-99		*







ยาถมดำ ปราศจากตะกั่ว	อัลลอยเงิน	อุณหภูมิ (°C)	รหัส	ภาพถ่ายSEM	ความหนา (μm)
	99.99Ag	600	2.3-600-99		*
	99.99Ag	700	2.2-700-99		*
สูตร 3	99.99Ag	500	3.2-500-99		*
	99.99Ag	700	3.2-700-99		*






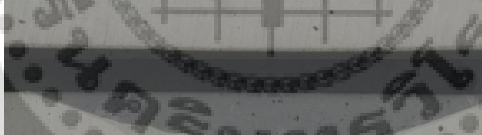

หมายเหตุ : จุด A = 7 ชั้น, จุด B = 8 ชั้น รวมทั้งหมด 15 ชั้น

* หมายถึง ไม่สามารถรายงานผลการทำเทคนิค line scan เพื่อหาความหนาของชั้น
รอยต่อระหว่างยาถมดำปราศจากตะกั่วกับอัลลอยเงิน

ผลการทดลอง




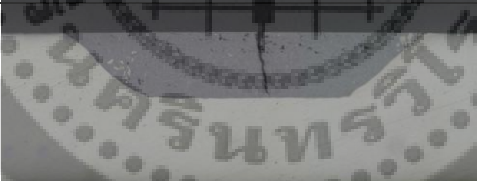


ตาราง 18 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคแบบภาพตัดขวางเพื่อศึกษาความหนาของร่องยาลมดำ
ปราศจากตะกั่วหลังจากลงถมบนอัลลอยเงิน 95

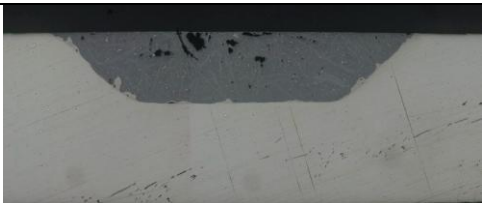





อุณหภูมิ (°C)	สูตรยาลมดำ ปราศจาก ตะกั่ว	อัลลอยเงิน 95 (50X)	ความหนา(μm)		
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
400	1		25.90	20.72	12.95
	2		25.91	31.09	20.72
	3		25.91	38.86	25.91
500	1		51.81	31.09	25.91
	2		31.09	38.86	20.72
	3		31.09	25.91	38.86

อุณหภูมิ (°C)	สูตรยาถมตำ ปราศจาก ตะกั่ว	อัลลอยเงิน 95 (50X)	ความหนา(μm)		
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
600	1		38.86	46.63	31.09
	2		31.09	38.86	103.63
			46.63	51.81	38.86
700	1		129.53	155.44	103.63
	2		207.25	233.16	207.25
			207.25	176.17	194.30
3					

หมายเหตุ : จุด A =12 ชั้น, จุด B= 12 ชั้น รวมทั้งหมด 24 ชั้น

ตาราง 19 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคแบบภาพตัดขวางเพื่อศึกษาความหนาของร่องยาถมดำ
ปราศจากตะกั่วหลังจากลงถมบนโลหะเงินบริสุทธิ์

อุณหภูมิ (°C)	สูตรยาถมดำ ปราศจาก ตะกั่ว	โลหะเงินบริสุทธิ์ (50X)	ความหนา(μm)		
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
400	1		*	*	*
	2		*	*	*
	3		*	*	*
500	1		*	*	*
	2		*	*	*
	3		*	*	*

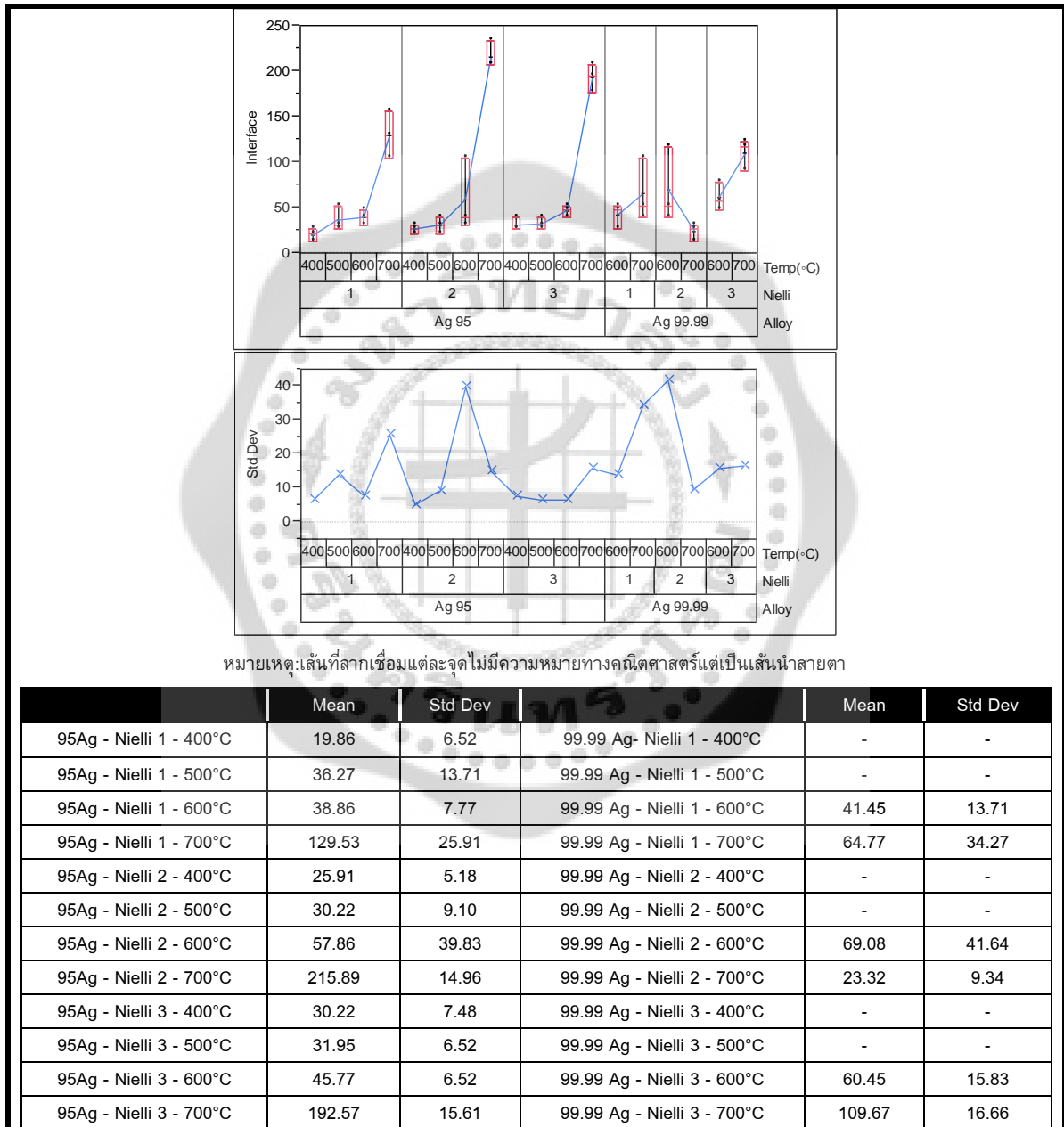
อุณหภูมิ (°C)	สูตรยาถมตำ ปราศจาก ตะกั่ว	โลหะเงินบริสุทธิ์ (50X)	ความหนา(μm)		
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
600	1		51.81	46.63	25.91
	2		38.86	51.81	116.58
	3		56.99	46.63	77.72
700	1		51.81	103.63	38.86
	2		25.91	31.09	12.95
	3		90.67	116.58	121.76

หมายเหตุ : จุด A =12 ชั้น, จุด B= 12 ชั้น รวมทั้งหมด 24 ชั้น

* หมายถึง ไม่สามารถวัดค่าความหนาของชั้นรอยต่อระหว่างยาถมตำปราศจากตะกั่วกับอัลลอยเงินเนื่องจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสะท้อนแสงไม่เห็นชั้นรอยต่อ

ผลการวิเคราะห์

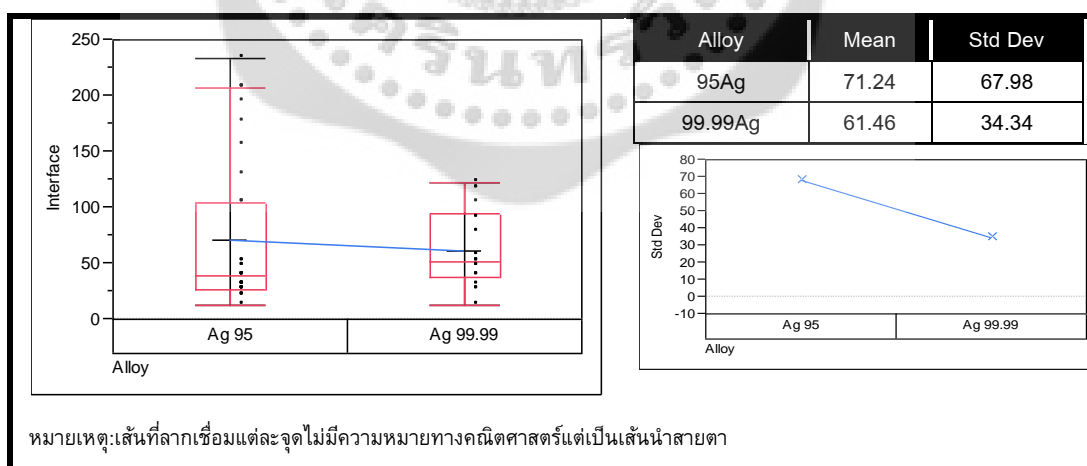
นำภาพชิ้นงานเงินที่ลงมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, 700 องศาเซลเซียส ที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสงกำลังขยาย 50 เท่า เพื่อหาความหนาของชั้นรอยต่อระหว่างยาถมกับชิ้นงานเงิน แสดงผลดังตาราง 18 และ 19 จากนั้นมาวิเคราะห์รวมกันทั้งหมด แสดงดังภาพประกอบ 56



ภาพประกอบ 56 กราฟความหนาของชั้นรอยต่อระหว่างยาถมดำปราศจากตะกั่วบนชิ้นงานเงิน

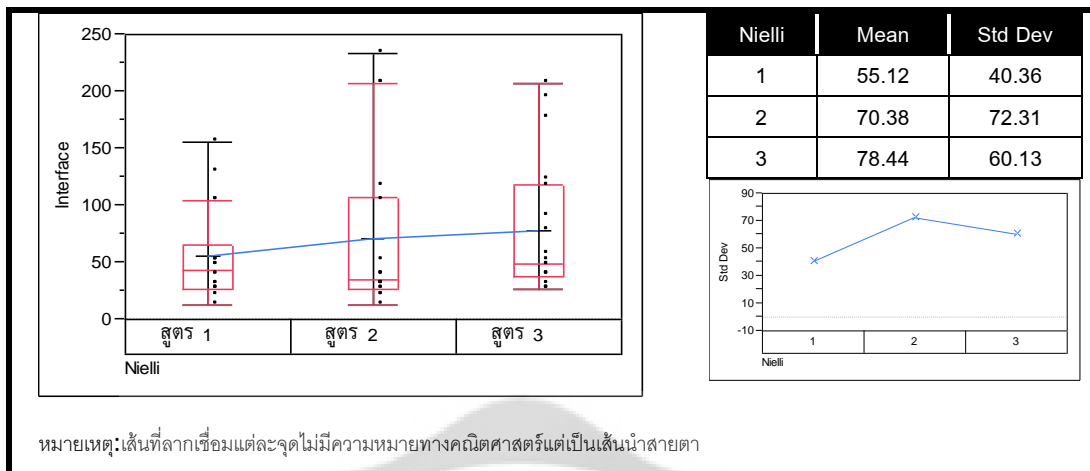
ปัจจัยที่มีผลต่อความหนาของชั้นรอยต่อแบ่งได้ 3 ประการ คือ ชนิดของชิ้นงานเงิน สูตรยาถมดำปราศจากตะกั่ว และอุณหภูมิที่ใช้ในการลงถม ดังแสดงในภาพประกอบ 56 ซึ่งปัจจัยแรกพบว่าชนิดของชิ้นงานเงินของอัลลอยเงิน 95 มีค่าความหนาของชั้นรอยต่อเฉลี่ยมากที่สุด เท่ากับ $71.24 \pm 67.96 \mu\text{m}$ เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานเงินบริสุทธิ์มีค่าเท่ากับ $61.24 \pm 34.34 \mu\text{m}$ ดังภาพประกอบ 57 ส่วนสูตรยาถมซึ่งเป็นปัจจัยที่สอง ดังภาพประกอบ 58 แสดงผลของสูตร 3 มีค่าเฉลี่ยของความหนาของชั้นรอยต่อมากที่สุดเมื่อเทียบกับสูตรอื่นๆ เท่ากับ 78.44 ± 60.13 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 2 มีค่าเฉลี่ยของความหนาเท่ากับ 70.38 ± 72.31 และสูตรของยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 มีค่าเฉลี่ยความหนาของชั้นรอยต่อที่น้อยที่สุด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 55.12 ± 40.36 และปัจจัยสุดท้ายคืออุณหภูมิแสดงในภาพประกอบ 59 พบว่าที่อุณหภูมิที่มีค่าเฉลี่ยความหนาของชั้นรอยต่อที่มากที่สุด คือ 700 องศาเซลเซียสเท่ากับ 122.62 ± 71.29 ที่อุณหภูมิมีค่าเฉลี่ย 600 องศาเซลเซียส เท่ากับ 52.24 ± 24.11 ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 32.81 ± 9.25 และสุดท้ายที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีค่าเฉลี่ยความหนาของชั้นรอยต่อน้อยที่สุด เท่ากับ 25.33 ± 7.19 เมื่อพิจารณาจากปัจจัยทั้ง 3 ประการ ดังภาพประกอบ 57-59 สรุปได้ว่า ชนิดของชิ้นงานเงิน สูตรของยาถมและอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อความหนาของชั้นรอยต่อ โดยปัจจัยที่คือชนิดของอัลลอยเงิน 95 สูตรยาถมสูตร 3 กับการใช้อุณหภูมิในการลงถม 700 องศาเซลเซียส มีค่าเฉลี่ยความหนาของชั้นรอยต่อระหว่างยาถมกับชิ้นงานเงินมากที่สุด

1. ชิ้นงานเงิน



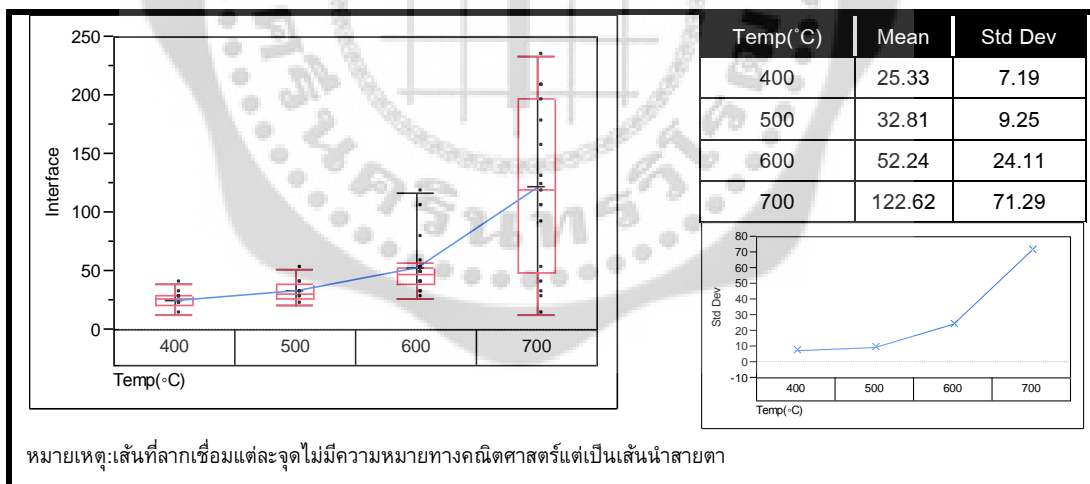
ภาพประกอบ 57 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชิ้นงานเงินที่ใช้ในการลงถมดำปราศจากตะกั่วเปรียบเทียบกับค่าความหนาของชั้นรอยต่อระหว่างยาถมดำปราศจากตะกั่วกับชิ้นงานเงิน

2. สูตรยาถมดำปราศจากตะกั่ว



ภาพประกอบ 58 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 เปรียบเทียบค่าความหนาของชั้นรอยต่อระหว่างยาถมดำปราศจากตะกั่วกับชั้นงานเงิน

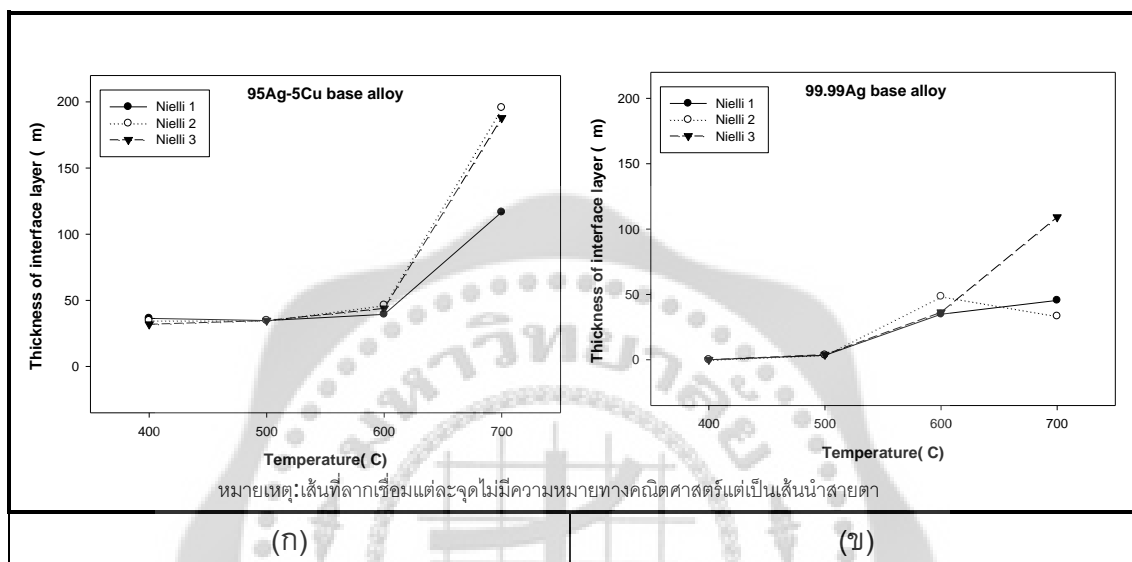
3. อุณหภูมิ



ภาพประกอบ 59 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการลงถมดำปราศจากตะกั่ว เปรียบเทียบค่าความหนาของชั้นรอยต่อระหว่างยาถมดำปราศจากตะกั่วกับชั้นงานเงิน

เพื่อให้เห็นภาพรวม จึงนำผลการทดลองมาแยกวิเคราะห์แต่ละชิ้นงานเงิน โดยศึกษาความหนาของชั้นรอยต่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ลงถม ดังภาพประกอบ 60 พบว่าความหนาของรอยต่อของชิ้นงานเงินทั้งสองสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

เมื่อวัดความหนาของชั้นรอยต่อที่อุณหภูมิเท่ากัน พบว่า ชั้นรอยต่อของอัลลอยเงิน 95 มีค่าความหนาเฉลี่ยสูงมากกว่าชิ้นงานที่ทำจากโลหะเงินบริสุทธิ์



ภาพประกอบ 60 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการลงถมกับความหนาของชั้นรอยต่อระหว่างยาถมดำปราศจากตะกั่วกับ น ก) อัลลอยเงิน 95 ข) โลหะเงินบริสุทธิ์เงิน

4.6 ศึกษาสมบัติเชิงกลของยาถมดำปราศจากตะกั่วกับชิ้นงานเงินโดยวิธีการตัดโค้ง

ในงานวิจัยนี้ การศึกษาสมบัติเชิงกล คือลักษณะเฉพาะของโครงสร้างทางจุลภาคของยาถม จะดูชิ้นงานหลังผ่านการตัดโค้งโดย การสร้างชุดทดสอบ แล้วนำชิ้นงานมาวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ได้ผลดังนี้

4.6.1 สร้างชุดทดสอบการตัดโค้ง

สร้างชุดทดสอบการตัดโค้งดังภาพประกอบ 61 จากนั้นนำชิ้นงานลงถมดำปราศจากตะกั่วทุกอุณหภูมิวางบนแท่นทองเหลืองจากนั้นทำการตัดโค้งด้วยแรง 10 psi และถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัลความละเอียดสูง ความยาวโฟกัส 100 มิลลิเมตร แสดงผลดังตาราง 20 กับ 21


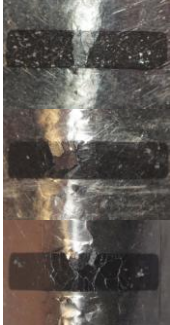







ภาพประกอบ 61 เครื่องมือสำหรับทดสอบการตัดโค้ง

ผลการทดลอง

ชุด A ลงถมดำปราศจากตะกั่วบนอัลลอยเงิน 95

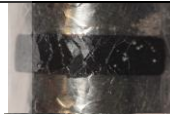





ตาราง 20 แสดงภาพชิ้นงานที่ลงถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 บนอัลลอยเงิน 95 ที่อุณหภูมิ 400 , 500 , 600 , 700 องศาเซลเซียส ที่ถ่ายด้วยกล้องดิจิทัลความละเอียดสูง เพื่อหาค่าร้อยละพื้นที่รอยแตกของถมต่อพื้นที่ถมทั้งหมด







ยาถมดำปราศจากตะกั่ว	ชิ้นงานเงิน	อุณหภูมิ(°C)	รหัส	ภาพชิ้นงาน
สูตร 1	95Ag-5Cu	400	1.1-400-95	
		500	1.1-500-95	
		600	1.3-600-95	
		700	1.2-700-95	
สูตร 2	95Ag-5Cu	400	2.3-400-95	
		500	2.3-500-95	
		600	2.4-600-95	

ยาถมดำปราศจากตะกั่ว	ชั้นงานเงิน	อุณหภูมิ(°C)	รหัส	ภาพชั้นงาน
		700	2.4-700-95	
สูตร 3	95Ag-5Cu	400	3.2-400-95	
		500	3.3-500-95	
		600	3.1-600-95	
		700	3.1-700-95	

ชุด B ลงถมดำปราศจากตะกั่วบนโลหะเงินบริสุทธิ์

ตาราง 21 แสดงภาพชั้นงานที่ลงถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3บนโลหะเงินบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 400 , 500 , 600 , 700 องศาเซลเซียส ที่ถ่ายด้วยกล้องดิจิทัลความละเอียดสูง เพื่อหาค่าร้อยละพื้นที่รอยแตกของถมต่อพื้นที่ถมทั้งหมด

ยาถมดำปราศจากตะกั่ว	ชั้นงานเงิน	อุณหภูมิ(°C)	รหัส	ภาพชั้นงาน
สูตร 1	99.99Ag-	400	1.3-400-99	
		500	1.3-500-99	
		600	1.2-600-99	
		700	1.4-700-99	
สูตร 2	99.99Ag-	400	2.3-400-99	
		500	2.4-500-99	

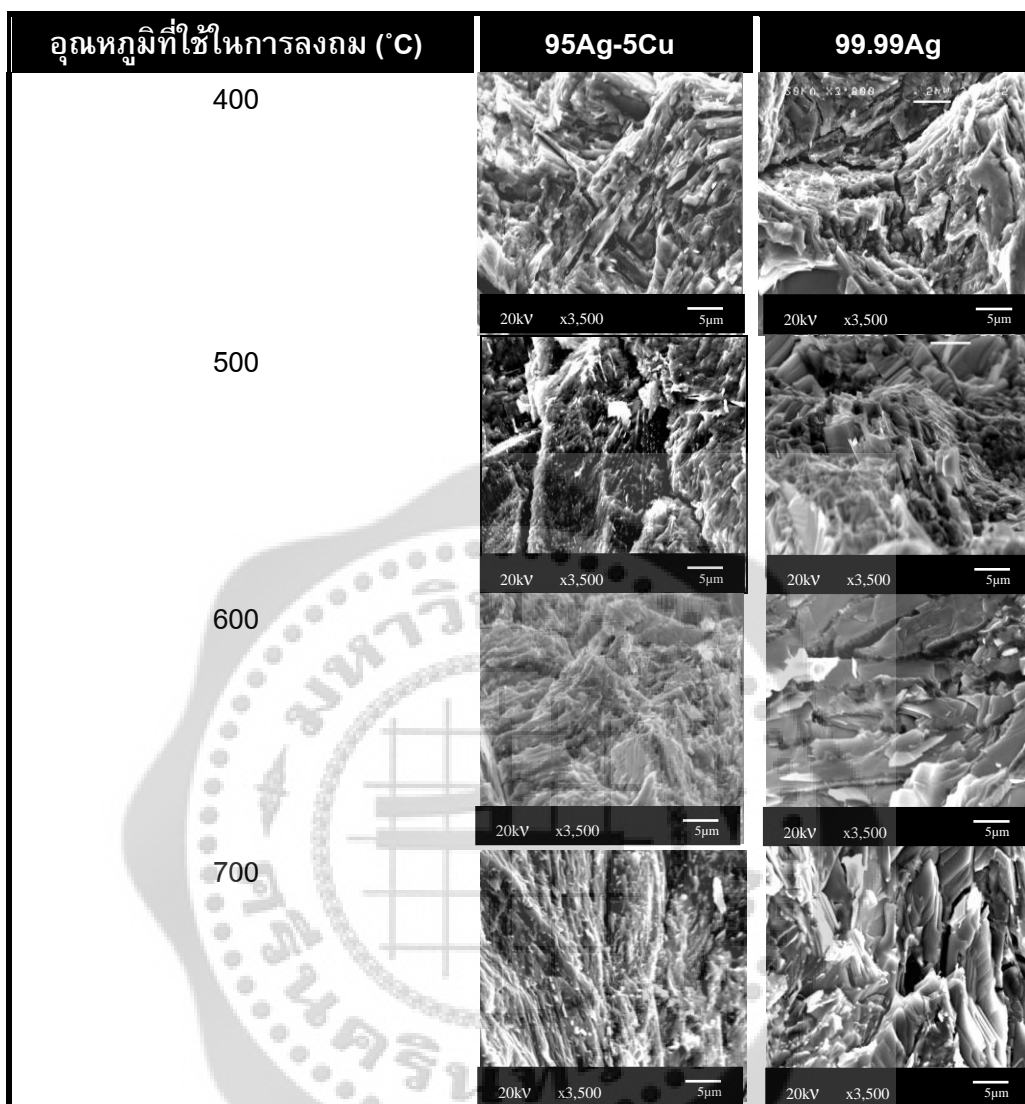
ยาถมดำปราศจากตะกั่ว	ชิ้นงานเงิน	อุณหภูมิ(°C)	รหัส	ภาพชิ้นงาน
		600	2.1-600-99	
		700	2.4-700-99	
สูตร 3	99.99Ag-	400	3.2-400-99	
		500	3.3-500-99	
		600	3.1-600-99	
		700	3.1-700-99	

4.6.2 ศึกษาลักษณะเฉพาะของโครงสร้างทางจุลภาคของยาถมดำปราศจากตะกั่วกับชิ้นงานเงินที่ผ่านการตัดโค้ง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy)

นำชิ้นงานเงินที่ลงถมผ่านการการตัดโค้งแล้ว เลือกเฉพาะยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 2 ที่ลงถมบนบนอัลลอยเงิน 95 และโลหะเงินบริสุทธิ์ ทุกอุณหภูมิ ถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อศึกษาลักษณะรอยแตกของยาถมดำปราศจากตะกั่ว

ผลการวิเคราะห์

จากภาพประกอบ 62 แสดงถึงลักษณะการแตกแบบเปราะปนกับการแตกแบบเหนียวในบางเฟสของยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 2 ถ้าในเนื้อยาถมมีเฟสที่มีความเหนียวมากก็อาจช่วยให้ยาถมดำปราศจากตะกั่วนั้นมีการเกาะติดที่ดี



ภาพประกอบ 62 ภาพถ่ายรอยแตกชิ้นงานเงินลงถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 2 ที่ผ่านการตัดโค้ง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด












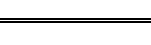
4.6.3 ศึกษาพื้นที่รอยแตกของยาถมดำปราศจากตะกั่วบนชิ้นงานเงินหลังจากวิธีการตัดโค้ง

เลือกชิ้นงานเงินที่ลงถมดำปราศจากตะกั่วทั้งสามสูตร ที่ลงถมทุกอุณหภูมิ มาอย่างละ 1 ชิ้น ทั้งหมด 24 ชิ้น และทำการตัดโค้ง บริเวณถมจะเกิดการแตก และหลุดออก ดังนั้นจึงศึกษาหาพื้นที่รอยแตกที่ยาถมดำปราศจากตะกั่วหลุดออก เพื่อหาพื้นที่ที่เกิดรอยแตกเปรียบเทียบกับพื้นที่ถมดำทั้งหมด ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Image J software ดังตาราง 22-23

ผลการทดลอง













ชุด A ลงถมดำปราศจากตะกั่วบนอัลลอยเงิน 95

ตาราง 22 แสดงภาพชิ้นงานที่ลงถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 บนอัลลอยเงิน 95 ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, 700 องศาเซลเซียส ที่ถ่ายด้วยกล้องดิจิทัลความละเอียดสูง และค่าร้อยละของพื้นที่รอยแตกที่เกิดจากการตัดโค้ง ต่อพื้นที่ทั้งหมด

ยาถมดำ ปราศจากตะกั่ว	ชิ้นงานเงิน	อุณหภูมิ(°C)	รหัส	ภาพชิ้นงาน Image J	%พื้นที่รอย แตก
สูตร 1	95Ag-5Cu	400	1.1-400-95		0.82
		500	1.1-500-95		4.29
		600	1.3-600-95		2.57
		700	1.2-700-95		7.88
สูตร 2	95Ag-5Cu	400	2.3-400-95		0.63
		500	2.3-500-95		1.67
		600	2.4-600-95		2.38
		700	2.4-700-95		5.39
สูตร 3	95Ag-5Cu	400	3.2-400-95		0.35
		500	3.3-500-95		1.21
		600	3.1-600-95		4.55
		700	3.1-700-95		8.39

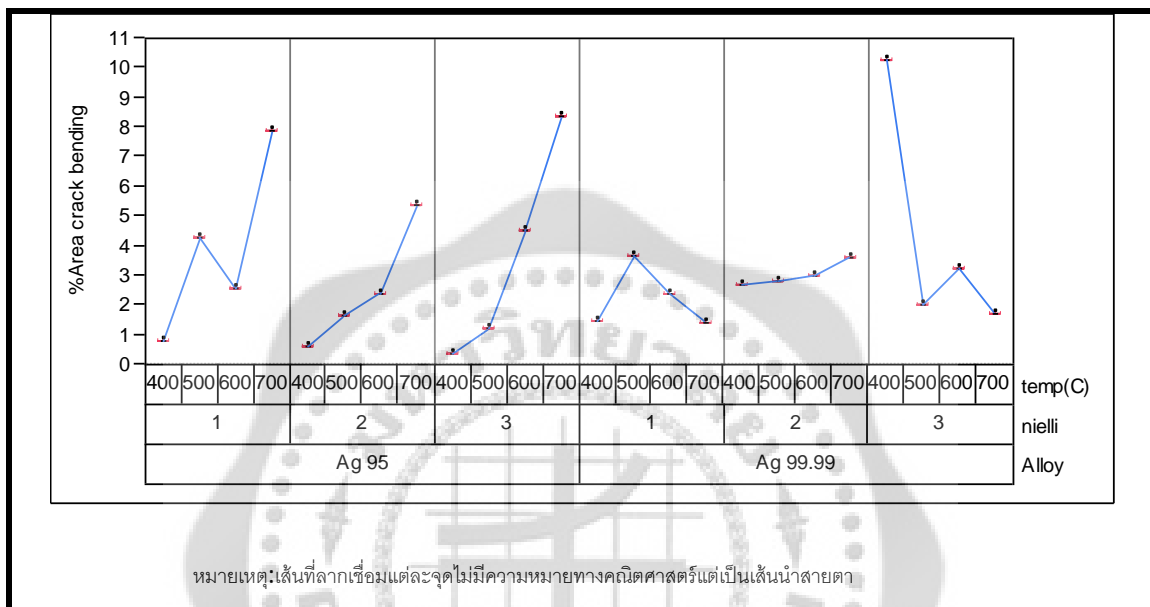
ชุด B ลงถมบนอัลลอยเงิน ร้อยละ 99.99 โดยน้ำหนัก

ตาราง 23 แสดงภาพชิ้นงานที่ลงถมดำปราศจากตะกั่ว สูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 บนโลหะเงินบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, 700 องศาเซลเซียส ที่ถ่ายด้วยกล้องดิจิทัลความละเอียดสูง และค่าร้อยละของพื้นที่รอยแตกที่เกิดจากการตัดโค้งต่อพื้นที่ทั้งหมด

ยาถมดำปราศจากตะกั่ว	ชิ้นงานเงิน	อุณหภูมิ(°C)	รหัส	ภาพชิ้นงาน Image J	%พื้นที่รอยแตก
สูตร 1	99.99Ag	400	1.3-400-99		1.49
		500	1.3-500-99		3.69
		600	1.2-600-99		2.37
		700	1.4-700-99		1.43
สูตร 2	99.99Ag	400	2.3-400-99		2.68
		500	2.4-500-99		2.83
		600	2.1-600-99		3.01
		700	2.4-700-99		3.64
สูตร 3	99.99Ag	400	3.2-400-99		10.29
		500	3.3-500-99		2.02
		600	3.1-600-99		3.23
		700	3.1-700-99		1.72

ผลการวิเคราะห์

จากการหาค่าร้อยละพื้นที่รอยแตกที่ได้จากการตัดโค้ง เปรียบเทียบกับพื้นที่ถมดำปราศจากตะกั่วก่อนการทดสอบการตัดโค้งแสดงผลในตาราง 22 กับ 23 จากนั้นมาวิเคราะห์พร้อมกันทั้งหมด แสดงดังภาพประกอบ 63

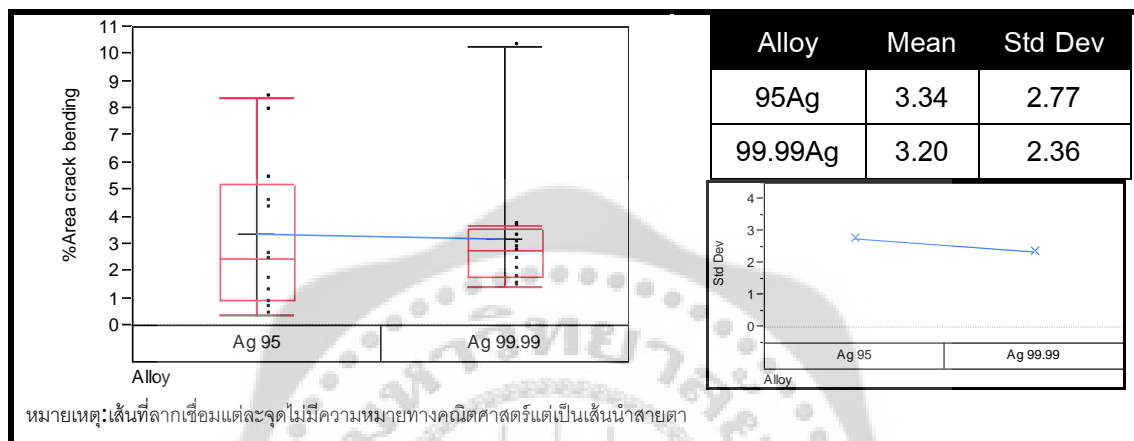


ภาพประกอบ 63 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของยาถมดำปราศจากตะกั่วหลังจากลงถมบนชั้นงานเงินทำการตัดโค้งเปรียบเทียบกับร้อยละพื้นที่รอยแตก

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดรอยแตกของยาถมที่ผ่านการตัดโค้งแบ่งได้ 3 ประการ คือ ชนิดของชั้นงานเงิน สูตรยาถมดำปราศจากตะกั่ว และอุณหภูมิที่ใช้ในการลงถม โดยได้ถูกนำมาวิเคราะห์ในแต่ละปัจจัย คือ ปัจจัยแรกพบว่าชนิดของชั้นงานเงินไม่มีผลต่อการเกิดรอยแตกอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในภาพประกอบ 64 ซึ่งแตกต่างกับสูตรของยาถมเป็นปัจจัยที่สอง แสดงผลของสูตรของยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 2 มีค่าเฉลี่ยพื้นที่รอยแตกที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับสูตรอื่นๆ เท่ากับค่าเฉลี่ยร้อยละ 2.78 ± 1.39 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 มีค่าเฉลี่ยร้อยละพื้นที่รอยแตกเท่ากับ 3.07 ± 2.27 และสูตร 3 มีค่าเฉลี่ยพื้นที่รอยแตกมากที่สุด คือค่าเฉลี่ยร้อยละ $3.97.10 \pm 3.58$ ดังแสดงภาพประกอบ 65 และปัจจัยสุดท้ายคืออุณหภูมิแสดงในภาพประกอบ 66 พบว่าที่อุณหภูมิที่มีค่าเฉลี่ยร้อยละพื้นที่รอยแตกของยาถมที่มีค่าน้อยเหมาะสมกับการลงถม คือ 500 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าเฉลี่ยพื้นที่รอยแตกน้อยที่สุดเท่ากับร้อยละ 2.71 ± 3.81 ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เท่ากับร้อยละ 2.71 ± 3.81 ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เท่ากับร้อยละ 3.02 ± 0.83 และอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เท่ากับร้อยละ 4.74 ± 3.00 เมื่อพิจารณาจากปัจจัยทั้ง

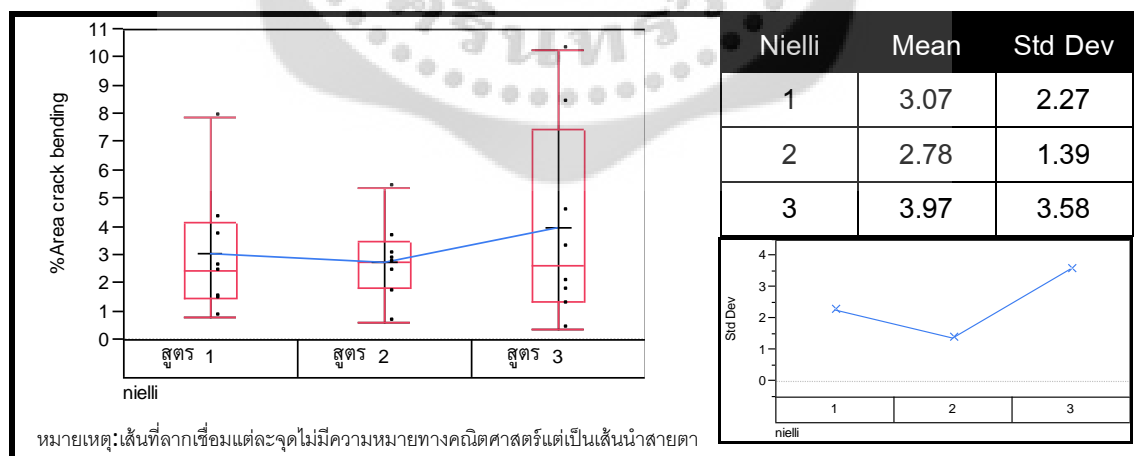
3 ประการ ดังภาพประกอบ 64-66 สรุปได้ว่าสูตรของยาถมและอนุหภูมิมีอิทธิพลต่อการเกิดรอยแตกมีผลต่อความแข็งของยาถม โดยปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดคือสูตรยาถมสูตร 2 กับการใช้อนุหภูมิในการลงถม 500 องศาเซลเซียส มีค่าเฉลี่ยร้อยละพื้นที่รอยแตกน้อยที่สุด

1. ชีงงานเงิน



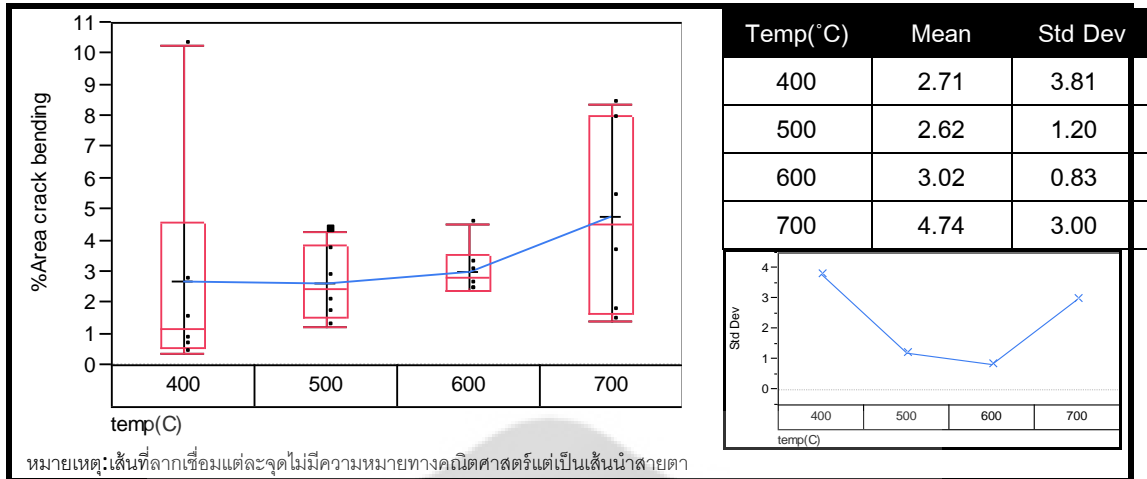
ภาพประกอบ 64 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชีงงานเงินที่ใช้ในการลงถมต่ำปราศจากตะกั่วที่ทำการตัดโค้งเปรียบเทียบกับร้อยละพื้นที่รอยแตก

2. สูตรยาถมต่ำปราศจากตะกั่ว



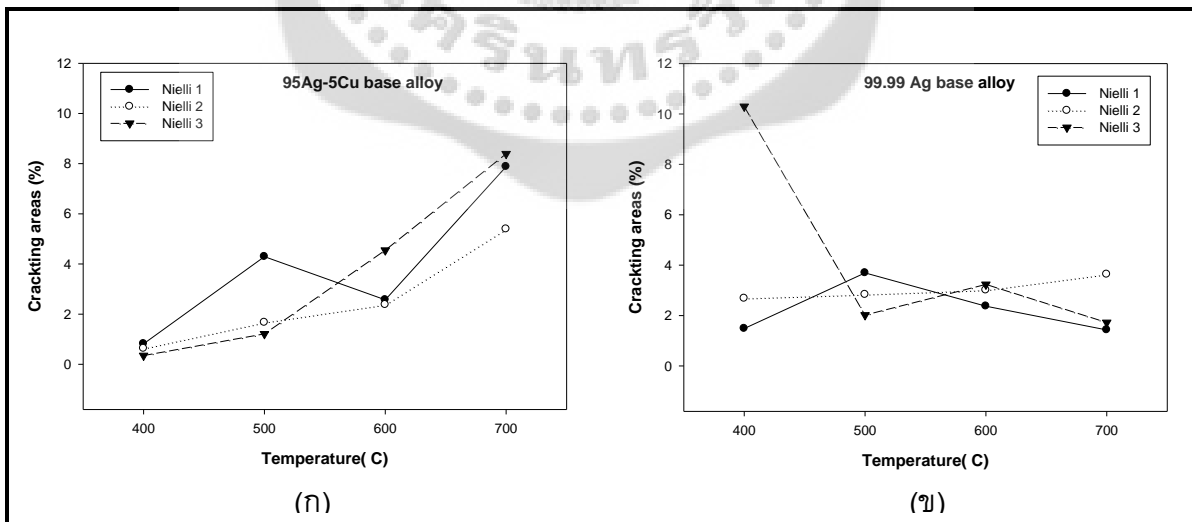
ภาพประกอบ 65 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างยาถมต่ำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 ที่ทำการตัดโค้งเปรียบเทียบกับร้อยละพื้นที่รอยแตก

3. อุณหภูมิ



ภาพประกอบ 66 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการลงถมดำปราศจากตะกั่วที่ทำ การตัดโค้งเปรียบเทียบกับร้อยละพื้นที่รอยแตก

เมื่อนำผลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์หาค่าร้อยละพื้นที่รอยแตกของสูตรยาถมดำ ปราศจากตะกั่วสามสูตร เปรียบเทียบอุณหภูมิในการลงถม ระหว่างอัลลอยเงิน 95 กับโลหะเงิน บริสุทธิ์ แสดงผลออกมาดังภาพประกอบ 67 พบว่ายาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 2 มีค่าร้อยละ พื้นที่รอยแตกมีการทิศทางเปลี่ยนแปลงของแต่ละอุณหภูมิที่น้อยกว่าสูตรอื่น ดังนั้นยาถมดำ ปราศจากตะกั่วสูตร 2 จึงเป็นยาถมที่สามารถควบคุมการเกิดรอยแตกได้ดีกว่าสูตร 1 และสูตร 3



ภาพประกอบ 67 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของพื้นที่รอยแตก ของยาถมดำปราศจาก ตะกั่วสูตร 1,2,3 ที่ อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียสบน (ก) อัลลอยเงิน 95 และ(ข)โลหะเงินบริสุทธิ์

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของอุณหภูมิในการลงถมที่มีต่อสมบัติเชิงกายภาพและสมบัติเชิงกลของยาถมดำปราศจากตะกั่ว โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการลงถมดำปราศจากตะกั่ว โดยมุ่งเน้นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการลงถมดำปราศจากตะกั่วซึ่งจะทำให้ชิ้นงานที่ออกมา มีสมบัติเชิงกายภาพ และสมบัติเชิงกลดี เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์เครื่องถมเงินตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน กล่าวคือยาถมดำจะต้อง มีสีดำสนิทไม่ต่าง มีความมันวาว เกาะติดดี และเครื่องถมที่คุณภาพสูงต้องมีรูปพรุนหรือตามดน้อย ดังนั้นความสำคัญของการวิจัยนี้ คือ ศึกษาอุณหภูมิที่ส่งผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคของยาถมดำปราศจากตะกั่ว โดยศึกษาการลงถมดำปราศจากตะกั่วที่อุณหภูมิต่างๆกันทั้งหมด 4 อุณหภูมิ คือ 400, 500, 600, 700 องศาเซลเซียส บนชิ้นงานเงิน 2 ชนิด คือ อลลอยเงินร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก ทองแดงร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และโลหะเงินบริสุทธิ์ คือ เงินร้อยละ 99.99 โดยน้ำหนัก

ยาถมดำปราศจากตะกั่วที่ใช้ในงานวิจัยมี 3 สูตร คือ สูตรที่ 1 ดีบุกร้อยละ 32 โดยน้ำหนัก, เงินร้อยละ 14, โดยน้ำหนัก ทองแดงร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก และกำมะถัน 20 โดยน้ำหนัก สูตรที่ 2 ดีบุกร้อยละ 38 โดยน้ำหนัก, เงินร้อยละ 11 โดยน้ำหนัก ทองแดงร้อยละ 31 โดยน้ำหนัก และกำมะถัน 20 โดยน้ำหนัก สูตรที่ 3 ดีบุกร้อยละ 43 โดยน้ำหนัก เงินร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก ทองแดงร้อยละ 27 โดยน้ำหนัก และกำมะถัน 20 โดยน้ำหนัก ชิ้นงานเงินที่ทำการทดลองลงถมรวมทั้งหมด 96 ชิ้น จากนั้นนำผลการทดลองมาวิเคราะห์สมบัติเชิงกายภาพ คือ การเกิดรูปพรุน รูปร่างของยาถม และความหนาของชั้นรอยต่อ ส่วนสมบัติเชิงกล คือ ศึกษาลักษณะรอยแตกของยาถมบนพื้นอลลอยเงินร้อยละ 95 และโลหะเงินบริสุทธิ์หลังกระบวนการลงถมดำปราศจากตะกั่วด้วยวิธีการตัดโค้ง สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

ลักษณะทางกายภาพ

1. ศึกษาปริมาณการเกิดรูปพรุนบนผิวยาถมดำปราศจากตะกั่วโดยถ่ายรูปด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสง และวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Image J software พบว่าชิ้นงาน อลลอยเงินบริสุทธิ์ (ร้อยละ 99.99 โดยน้ำหนัก) มีปริมาณรูปพรุนที่ผิวยาถมน้อยที่สุด เมื่อใช้ยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 ลงยาถมที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

2. ศึกษารูปร่างของยาถมดำปราศจากตะกั่วหลังจากลงถมบนชิ้นงานเงินให้มีขนาดร่องที่เขาะทำลวดลายลงถมใกล้เคียงกับรูปร่างเดิมที่ได้ออกแบบไว้แล้วในตอนแรก โดยจำแนกการ

สังเกตเป็น 2 ทิศทาง คือ ทิศทางแรก ด้านหน้าชิ้นงาน(Plan view) เพื่อดูความเปลี่ยนแปลงของขนาดความกว้างของร่องที่ผิวชิ้นงาน โดยถ่ายภาพจากกล้องดิจิทัลความละเอียดสูงใช้เลนส์มาโคร ระยะโฟกัส 100 มิลลิเมตร และวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Image J software พบว่าปัจจัยที่เลือกใช้ชิ้นงานอัลลอยเงินร้อยละ 99.99 โดยน้ำหนัก กับยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 3 ลงถมที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส มีรูปร่างขนาดร่องที่ผิวชิ้นงานต่างจากชิ้นงานมาตรฐานน้อยที่สุด

ทิศทางที่สอง ดูรูปทรงชิ้นงานที่ตัดตามภาพตัดขวาง(Side view) เพื่อศึกษารูปทรงด้านข้างของเหลี่ยมมุมที่เปลี่ยนไปจากเดิม โดยพบว่าหากอุณหภูมิในการลงถมมากขึ้น ทำให้เหลี่ยมมุมของถมดำปราศจากตะกั่วผิดไปจากเดิมมากเนื่องจากการซึมผ่านของโลหะ

3. ศึกษาความหนาของชั้นรอยต่อระหว่างยาถมดำปราศจากตะกั่วกับชิ้นงานเงิน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยใช้เทคนิคการทำ Line scan ผลการศึกษาพบว่าวิธีการนี้หาค่าความหนาของชั้นรอยต่อไม่ได้ จึงเปลี่ยนเป็นการวัดความหนาจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสง พบว่าการเพิ่มของอุณหภูมิมีอิทธิพลให้ความหนาของชั้นรอยต่อเพิ่มขึ้น นอกจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแล้ว ชนิดของอัลลอยเงิน 95 ที่มีทองแดงเป็นส่วนผสมมีรอยต่อหนากว่าชิ้นงานที่เป็นอัลลอยเงินอย่างเดียว ณ อุณหภูมิที่เท่ากัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากทองแดงในอัลลอยเงินช่วยเร่งให้เกิดชั้นรอยต่อที่หนาขึ้น และที่สำคัญความหนาบางของชั้นรอยต่อส่งผลกับความแข็งของยาถมด้วย

ลักษณะทางผลึกศาสตร์

ศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยการวิเคราะห์ธาตุการจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบในแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วโดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน พบว่าสูตรยาถมทั้งสามสูตรมีสารประกอบทั้งหมด 6 ชนิด คือ Ag, Cu_4SnS_4 , Cu_2S , Sn_2S_3 , CuAgS และ SnS , แต่มีปริมาณมากน้อยแตกต่างกัน โดยยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 พบสารประกอบมากที่สุดคือ Ag และ Cu_4SnS_4 โดย Ag มีรูปร่างไม่แน่นอนแยกตัวออกมาอยู่ที่ขอบเกรน และสารประกอบ Cu_4SnS_4 จะรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน เนื่องจากยาถมสูตร 1 เป็นสูตรยาถมดำปราศจากตะกั่วที่มีปริมาณเงินกับทองแดงมากที่สุด

ยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 2 พบว่ามีสารประกอบที่มากที่สุด คือ Cu_2S และ Sn_2S_3 และสารประกอบทั้งสองรวมตัวมีรูปร่างคล้ายยูเทคติก ส่วนยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 3 พบว่ามีสารประกอบมากที่สุด คือ CuAgS และ SnS โดย CuAgS รวมตัวเป็นกลุ่มก้อน มีรูปร่างไม่แน่นอน ส่วนสารประกอบ SnS รวมตัวมีลักษณะคล้ายเส้นเข็ม ซึ่งพบว่าจะมีขนาดใหญ่เมื่อมีปริมาณดีบุกเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเป็นสูตรที่มีดีบุกเป็นส่วนประกอบในยาถมมากที่สุด

เมื่อศึกษาระบบผลึกของสารประกอบ Sn_2S_3 , SnS และ Cu_4SnS_4 พบว่าอยู่ในรูปผลึกระบบorthorhombic ที่มีขนาดใหญ่ของหน่วยเซลล์ ทำให้พบว่าโครงสร้างจุลภาคในสูตรยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 2 และ 3 มีลักษณะเป็นเส้นเข็มในปริมาณมาก เมื่อเปรียบเทียบสารประกอบทั้ง 6 ชนิด พบว่า Cu_2S เป็นสารประกอบที่สำคัญที่ควรจะมีในยาถมที่ดี เพราะอยู่ในระบบผลึก

cubic และเป็นเพียงสารประกอบเดี่ยวที่ให้สีดำ[11] ส่วนสารประกอบ CuAgS ให้สีเทาอมฟ้า ในขณะที่ SnS ให้สีน้ำตาล

ในส่วนผสมของยาถม ธาตุกำมะถันเป็นส่วนประกอบที่จะช่วยให้ถมนั้นมีสีดำเข้ม ดังนั้นในการทำยาถมดำปราศจากตะกั่วไม่ควรจะทำให้เกิดสารประกอบ Ag แยกออกมาที่ขอบเกรนมาก เพราะจะทำให้เกิดสีเทา ลดสีดำและยังสิ้นเปลืองวัตถุดิบอีกด้วย

คุณสมบัติเชิงกล

การศึกษาคุณสมบัติเชิงกล เพื่อวิเคราะห์สมบัติความแข็งของยาถม ใช้เทคนิคการตัดโค้ง ยาถมดำปราศจากตะกั่วทั้ง 3 สูตรกับอัลลอยเงินที่อุณหภูมิต่างๆกัน โดยศึกษาการรอยแตก นำมาคิดคำนวณพื้นที่ที่ถมหลุดออกเปรียบเทียบกับพื้นที่ทั้งหมด การดูปริมาณพื้นที่รอยแตกดูจากภาพที่ถ่ายด้วยกล้องดิจิทัลความละเอียดสูง ใช้เลนส์มาโคร ระยะโฟกัส 100 มิลลิเมตร แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Image J software ผลการศึกษาพบว่าชิ้นงานอัลลอยเงิน 95 ลงถมสูตร 3 ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีเศษถมที่หลุดออกจากการทำตัดโค้งน้อยที่สุด แต่ยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 2 ซึ่งลงถมที่อุณหภูมิ 400-700 องศาเซลเซียส มีความแปรผันของพื้นที่ถมที่หลุดออกมากคงที่กว่าสูตรอื่นๆ

จากการศึกษาความหนาของชั้นรอยต่อระหว่างยาถมกับชิ้นงานเงิน พบว่าความหนาส่งผลต่อความแข็งของยาถม หากชั้นรอยต่อบางหรือหนามาก ยาถมก็จะหลุดออกมาได้ง่าย เช่น ชิ้นงานเงินบริสุทธิ์ลงถมที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส พบว่ามีชั้นรอยต่อบาง และที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส พบชั้นรอยต่อหนามาก เมื่อทำการตัดโค้งยาถมจึงหลุดออกมาเป็นจำนวนมาก แสดงว่ายาถมนี้มีความแข็งน้อย

ดังนั้นจากงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการลงถมปราศจากตะกั่วที่พึง(พึง)ประสงค์ ควรอยู่ในช่วง 500-600 องศาเซลเซียส เพราะยาถมจะมีความแข็งดี มีปริมาณรูพรุนที่ผิวยาถมน้อย และรูปทรงของลวดลายของเครื่องถมไม่เสียรูป สูตรยาถมดำปราศจากตะกั่วที่ดีที่สุดคือ สูตร 2 เพราะได้ให้ผลลัพธ์ของการรวมตัวคล้ายยูเทคติกของสารประกอบ Cu_2S และ สารประกอบ SnS ที่มีรูปร่างคล้ายเส้นเข็ม ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า สารประกอบ SnS ที่มีรูปร่างคล้ายเส้นเข็มจะช่วยรักษารูปทรงยาถมไม่ให้เกิดการยุบตัว ทำให้สามารถลงยาถมได้เต็มร่อง และสารประกอบ Cu_2S มีการรวมตัวคล้ายยูเทคติกเกิดการแข็งตัวที่พอเหมาะจะช่วยลดการเกิดรูพรุน อีกทั้งให้สีดำ ซึ่งเป็นสีที่ต้องการด้วย ดังนั้นในยาถมดำปราศจากตะกั่วควรมีส่วนผสมของสารประกอบ Cu_2S ในปริมาณมาก ดังเช่นผลงานวิจัยที่พบว่ายาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 2 มีสารประกอบ Cu_2S มากที่สุด ให้ผลของการลงยาถมที่ดี และได้เปรียบเรื่องสี ดีกว่ายาถมดำปราศจากตะกั่วสูตรที่ 1 และ 3

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่ทดลองในเรื่องอุณหภูมิของการลงยาถมดำปราศจากตะกั่วที่เป็นสารที่มีพิษต่อร่างกายมนุษย์ เพื่อเป็นแนวทางเลือกสำหรับช่างทำเครื่องประดับถม และเพื่อให้เกิดประโยชน์ในการผลิตเครื่องถมเพื่อการส่งออกของประเทศ แต่เนื่องจากแท่งยาถมดำที่ผลิตใช้กันในงานเครื่องประดับถมนั้น นอกจากจะมี ตะกั่ว ที่มีพิษแล้ว ยังมีส่วนผสมของกำมะถัน ที่เป็นส่วนประกอบสำคัญอีกชนิดหนึ่งที่ต้องใส่ในกระบวนการหลอมยาถมซึ่งเป็นพิษต่อระบบทางเดินหายใจเช่นกัน ดังนั้นในการหลอมยาถมส่วนมากช่างจึงมักทำในบริเวณที่โล่ง และช่างหลอมยาถมจะพยายามยืนอยู่บริเวณต้นลม งานวิจัยที่น่าจะได้มีการดำเนินการต่อในเรื่องการผลิตยาถม คือ การควบคุมให้การหลอมยาถมอยู่ในระบบปิด หรือทดลองหาธาตุหรือสารประกอบอื่นๆ มาทดแทนกำมะถันซึ่งให้สีดำ ก็จะเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมเครื่องประดับไทยมากขึ้น

2. ควรมีการต่อยอดศึกษาหาความแข็งแรงที่ผิวของยาถมดำปราศจากตะกั่ว เพื่อปรับปรุงสูตรยาถมดำปราศจากตะกั่วให้มีความแข็งแรงทนต่อการขีดขีดให้มากกว่าเดิม

3. นำยาถมดำปราศจากตะกั่ว สูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 ไปทดลองใช้ลงในร่องลวดลายเครื่องถมไทยที่มีลวดลายไทยที่ละเอียดอ่อนซับซ้อน เพื่อศึกษาอัตราความเร็วในการไหลลงร่องลาย การเกิดรูพรุน และการเกาะติดลวดลายที่มีขนาดร่องลายเล็กๆ และอ่อนซับซ้อน เพื่อการนำไปใช้ผลิตเครื่องถม และรักษาลวดลายไทยดั้งเดิม

4. ผลิตเครื่องมือที่ควบคุมอุณหภูมิในการลงถมให้คงที่กว่าการใช้หัวเป่าไฟ เพื่อควบคุมคุณภาพของเครื่องถมโดยเฉพาะลวดรูพรุนให้น้อยที่สุด



บรรณานุกรม



บรรณานุกรม

1. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2547). *มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนเครื่องถมเงิน มผช. 365/2547*
2. สมาคมเครื่องถมและเครื่องเงินไทย. (2525). *เครื่องถมและเครื่องเงินไทย*. พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพฯ: ธีระการพิมพ์. 22-57.
3. E. Brepohl. (2001). Niello work . *The Theory & Practice of Goldsmithing*. 370-372
4. คู่มือพัฒนาผู้ประกอบการกิจด้านอัญมณีและเครื่องประดับไทยเชิงอนุรักษ์ภูมิปัญญาท้องถิ่นเครื่องถม. (2553). กรมพัฒนาธุรกิจการค้า กระทรวงพาณิชย์.
5. P.A. Meyer, M.J. Brown, H. Falk. (2008). *Review Global approach to reducing lead exposure and poisoning. Mutation Research*. 659, 166-175
6. ปิยะรัตน์ โตสุโขวงศ์. (2555). การเป็นพิษของสารตะกั่ว lead poisoning. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย [ออนไลน์]. สืบค้นเมื่อ 26 กุมภาพันธ์ 2555, จาก http://cai.md.chula.ac.th/lesson/lesson4613/lesson/page_f.html
7. U.S. Consumer Product Safty Commission. (2010) Total lead content. Retreved June 29, 2011, from <http://www.cpsc.gov/info/toysafety/lead.html>.
8. K.Wongpreedee, P. Ssirukho, P.Ruethaithananon, S.Harbantan, S.Kedsin. (2011). Black Nielloware without Lead. Thai Patent number. 1101001747(patent pending).
9. อนุรักษ์กฤดา เพ็ญแสง; และคณะ. (2552). *การศึกษาองค์ประกอบและสมบัติของยาถม*. วท.บ. วัสดุศาสตร์(อัญมณีและเครื่องประดับ). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. ถ่ายเอกสาร.
10. K.Wongpreedee, P.Srisukho, P.Leuthaithananon. (2012). The Metallurgy Evolution of Thai Nielloware from Lead to Lead Free Niello bar as Commercial Export Products. *The 3rd International Gem & Jewelry Conference (GIT2012)*. Bangkok Thailand and Pailin Cambodia.
11. Petr Korbel, Milan Novak. (1999). *The complete encyclopedia of minerals*
12. P.Srisukho, P.Ruethaitananon, K.Wongpreedee. Microstructure and segregation of Sn-Ag-Cu-S Nielli-Inlay alloys for jewelry industry. (2011). *37th Congress on Science and Technology of Thailand*.
13. K.Wongpreedee , P.Srisukho, N.Kaimuk, P.Sae-ung , S.Settha-o-larn. (2012). Interface layers of Sn-Ag-Cu-S Nielli Inlay in Brass Alloys. *38th Congress on Science and Technology of Thailand*.

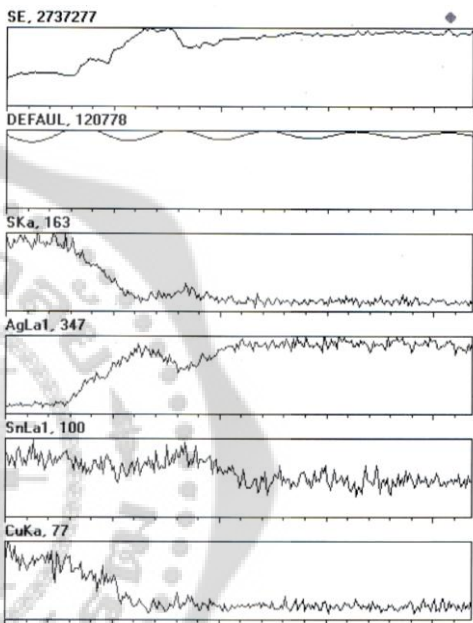
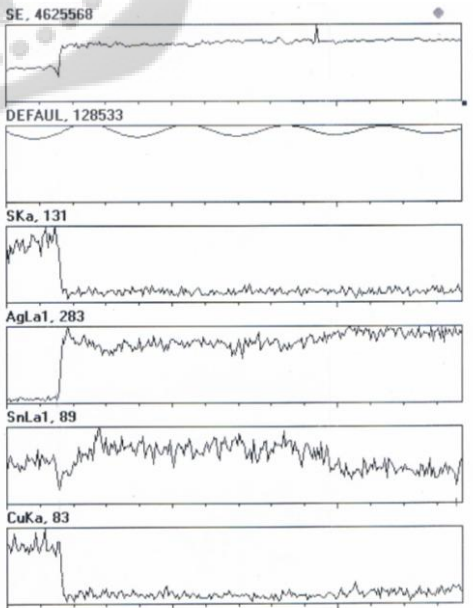
14. D.Q. Yu, L. Wang. (2008). The growth and roughness evolution of intermetallic compounds of Sn–Ag–Cu/Cu interface during soldering reaction. *Journal of Alloys and Compounds*. 458: 542–547.
15. Chen Wenxue, et al. (2010). Effects of Ag on Properties of Sn-9Zn Lead-Free Solder. *Journal of Rare Metal Materials and Engineering*. 39(10): 1702-1706.
16. LI Guo-yuan, SHI Xun-qing. (2006). Effects of bismuth on growth of intermetallic compounds in Sn-Ag-Cu Pb-free solder joints”, *Trans. Nonferrous Met.* 16: 739-743.
17. H.F. Zou and Z.F. Zhang. (2009). Solid-state and liquid-state interfacial reactions between Sn-based solders and single crystal Ag substrate. *Journal of Alloys and Compounds*. 469 207–214.
18. วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา; และคณะ. (2543). เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์: ทฤษฎีและหลักการ ทำงานเบื้องต้น. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: 288-306.
19. แม้น อมรสิทธิ์; และคณะ. (2552). หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: 489-558





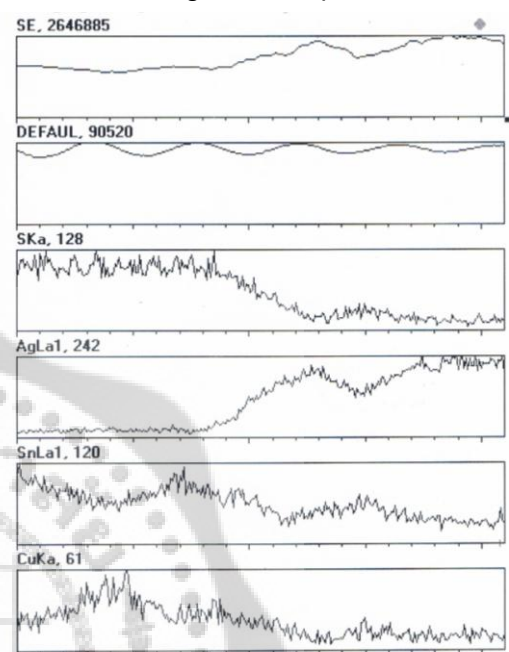
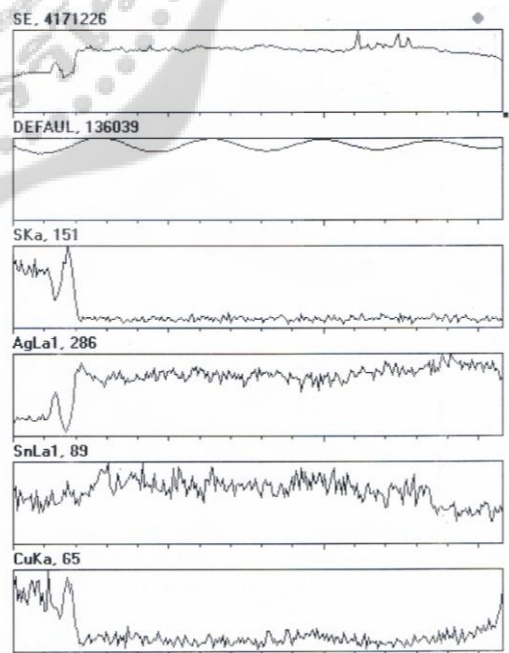


ผลวิเคราะห์การทำLine scan ด้วยเครื่องมือการวิเคราะห์ธาตุโดยเชื่อมต่อ
อุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน

ยาถมตำ ปราศจาก ตะกั่ว	อัลลอยเงิน	อุณหภูมิ (°C)	รหัส	ผลวิเคราะห์การทำLine scan
สูตร 1	95%Ag- 5%Cu	500	1.4-500-95	Length: 21.80 μm 
สูตร 1	95%Ag- 5%Cu	700	1.1-700-95	Length: 137.70 μm 

ยาถมตำ ปราศจาก ตะกั่ว	อัลลอยเงิน (°C)	อุณหภูมิ	รหัส	ผลวิเคราะห์การทำLine scan
สูตร 2	95%Ag- 5%Cu	400	2.3-400-95	Length: 21.44 μm
สูตร 2	95%Ag- 5%Cu	500	2.1-500-95	Length: 59.87 μm

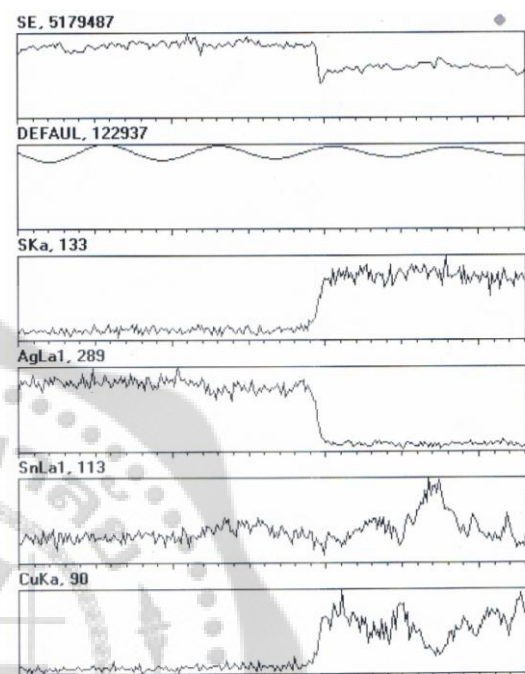
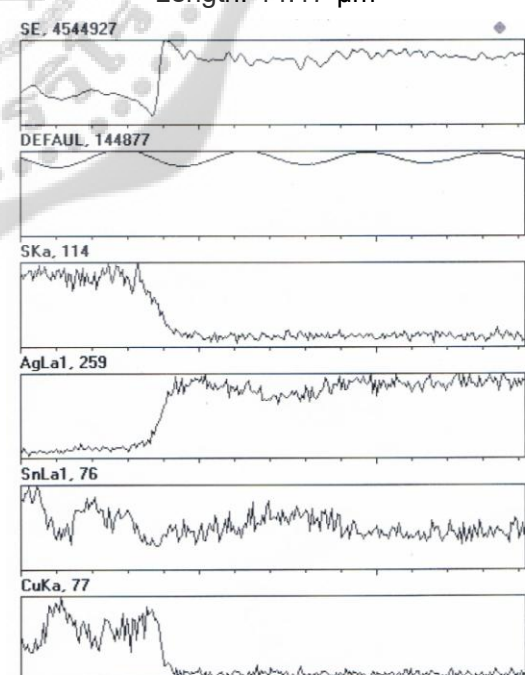
ยาถมตำ ปราศจาก ตะกั่ว	อัลลอยเงิน (°C)	อุณหภูมิ	รหัส	ผลวิเคราะห์การทำLine scan
สูตร 2	95%Ag- 5%Cu	600	2.3-600-95	<p>Length: 21.36 μm</p> <p>SE, 6372368</p> <p>DEFAULT, 145962</p> <p>SKa, 168</p> <p>AgLa1, 385</p> <p>SnLa1, 210</p> <p>CuKa, 92</p>
สูตร 2	95%Ag- 5%Cu	700	2.2-700-95	<p>Length: 177.30 μm</p> <p>SE, 3768375</p> <p>DEFAULT, 121208</p> <p>SKa, 121</p> <p>AgLa1, 263</p> <p>SnLa1, 88</p> <p>CuKa, 66</p>

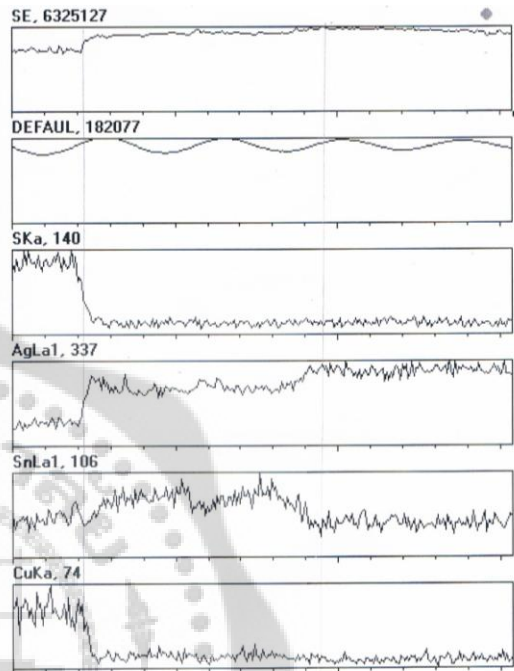
ยาถมตำ ปราศจาก ตะกั่ว	อัลลอยเงิน (°C)	อุณหภูมิ	รหัส	ผลวิเคราะห์การทำLine scan
สูตร 3	95%Ag- 5%Cu	500	3.1-500-95	Length: 21.00 μm 
สูตร 3	95%Ag- 5%Cu	700	3.2-700-95	Length: 157.80 μm 

ยาถมตำ ปราศจาก ตะกั่ว	อัลลอยเงิน (°C)	อุณหภูมิ	รหัส	ผลวิเคราะห์การทำLine scan
สูตร 1	99.99%Ag	500	1.1-500-99	Length: 21.44 μm
สูตร 1	99.99%Ag	700	1.2-700-99	Length: 90.71 μm

ยาถมตำ ปราศจาก ตะกั่ว	อัลลอยเงิน (°C)	อุณหภูมิ	รหัส	ผลวิเคราะห์การทำLine scan
สูตร 2	99.99%Ag	400	2.4-400-99	<p>Length: 23.12 μm</p>
สูตร 2	99.99%Ag	500	2.2-500-99	<p>Length: 21.00 μm</p>

ยาถมตำ ปราศจาก ตะกั่ว	อัลลอยเงิน (°C)	อุณหภูมิ	รหัส	ผลวิเคราะห์การทำLine scan
สูตร 2	99.99%Ag	500	3.2-500-99	<p>Length: 18.65 μm</p>
สูตร 2	99.99%Ag	600	2.3-600-99	<p>Length: 14.17 μm</p>

ยาถมตำ ปราศจาก ตะกั่ว	อัลลอยเงิน (°C)	อุณหภูมิ	รหัส	ผลวิเคราะห์การทำLine scan
สูตร 2	99.99%Ag	700	2.2-700-99	Length: 33.11 μm  <p>SE, 5179487</p> <p>DEFAULT, 122937</p> <p>SKa, 133</p> <p>AgLa1, 289</p> <p>SnLa1, 113</p> <p>CuKa, 90</p>
สูตร 3	99.99%Ag	500	3.2-500-99	Length: 14.17 μm  <p>SE, 4544927</p> <p>DEFAULT, 144877</p> <p>SKa, 114</p> <p>AgLa1, 259</p> <p>SnLa1, 76</p> <p>CuKa, 77</p>

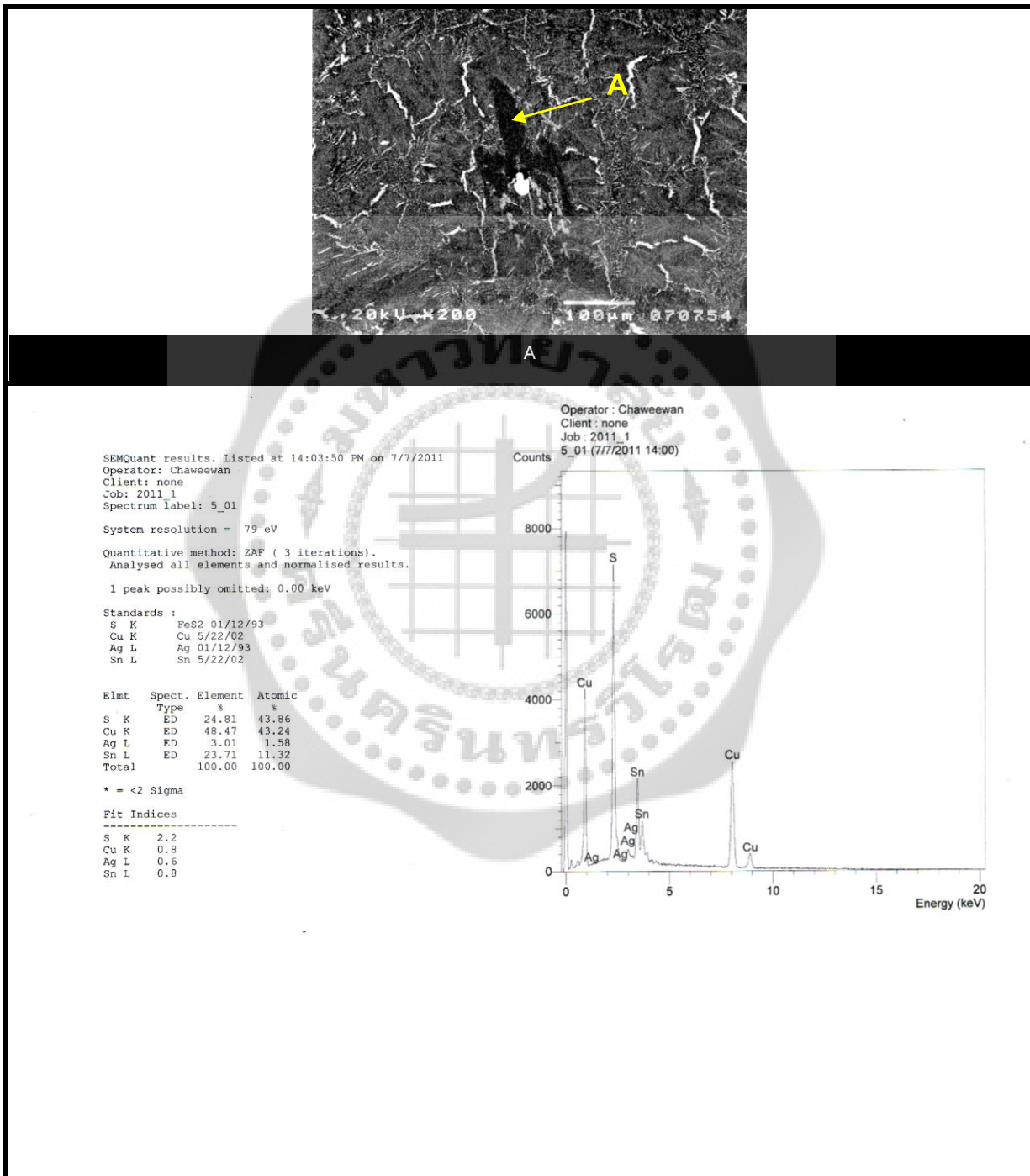
ยาถมตำ ปราศจาก ตะกั่ว	อัลลอยเงิน (°C)	อุณหภูมิ	รหัส	ผลวิเคราะห์การทำLine scan
สูตร 3	99.99%Ag	700	3.2-700-99	Length: 14.17 μ m 



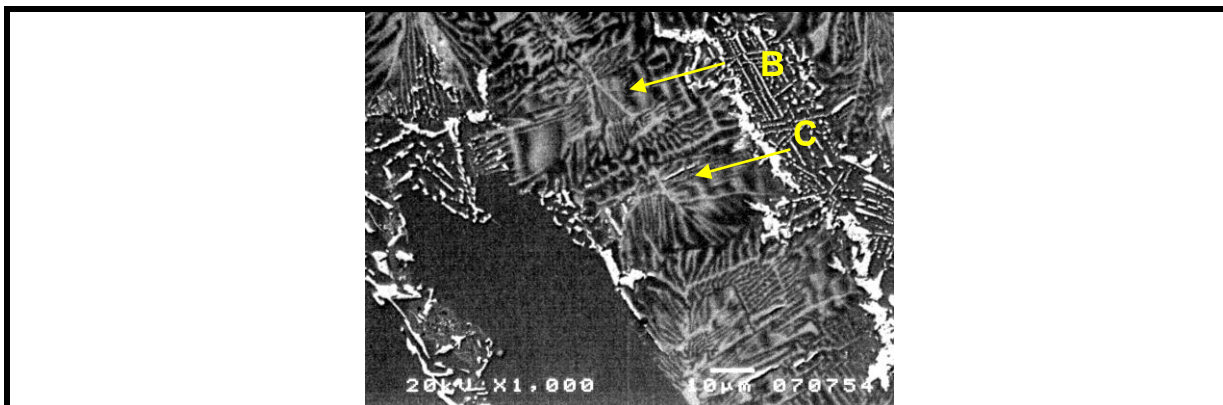


ผลวิเคราะห์ธาตุด้วยระบบวิเคราะห์แบบ EDS และภาพถ่ายแท่งยาถมดำ ปราศจากตะกั่วด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

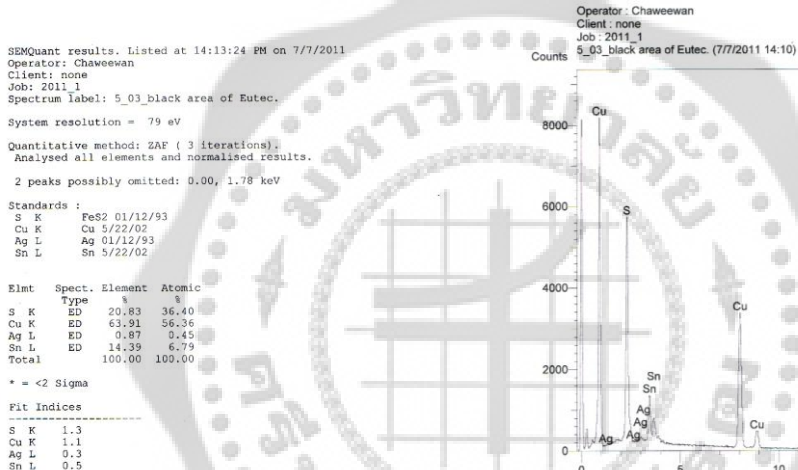
แท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1



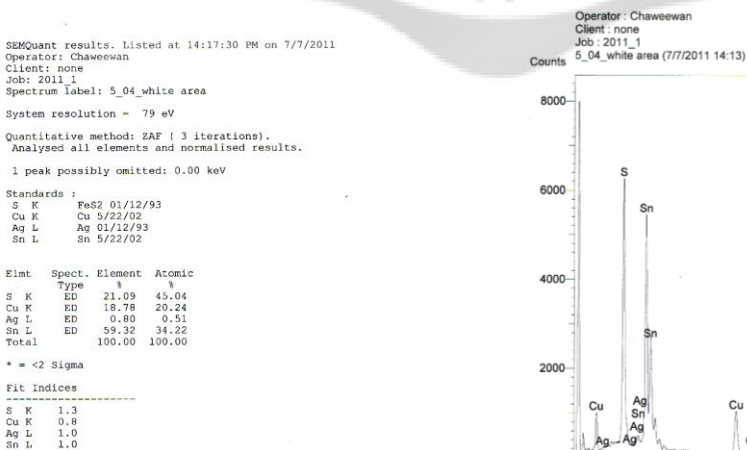
แท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1



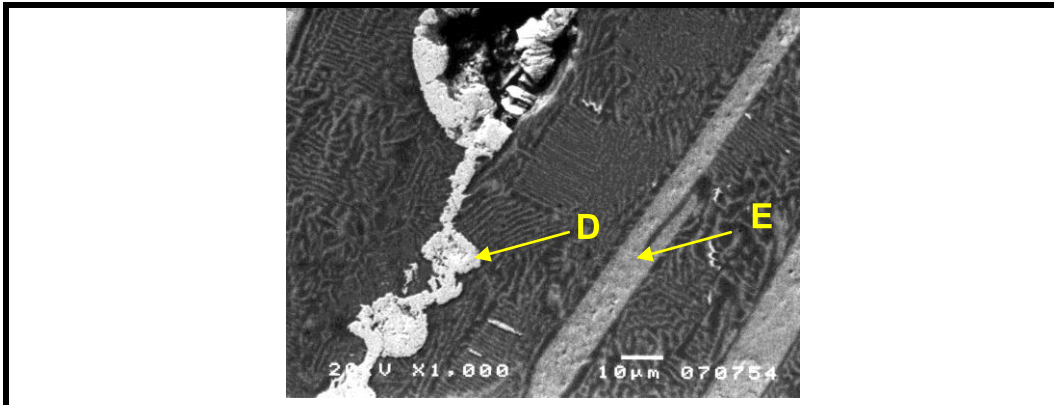
B



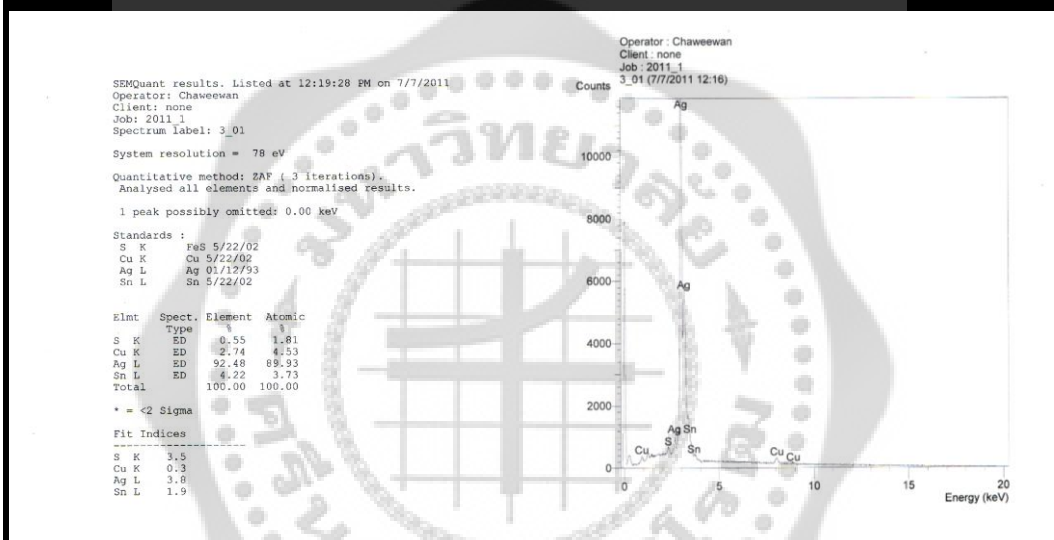
C



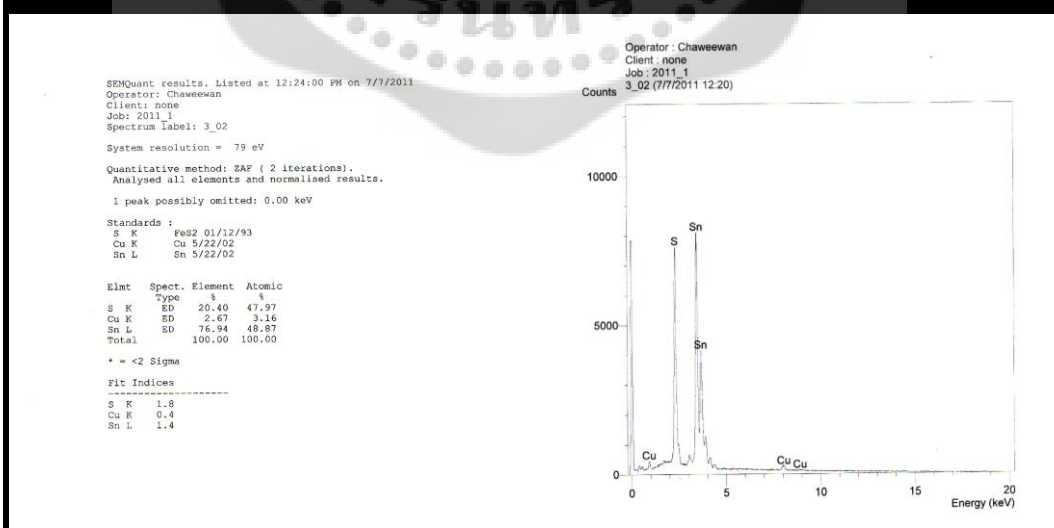
แท่งขดลวดดำปราศจากตะกั่วสูตร 2



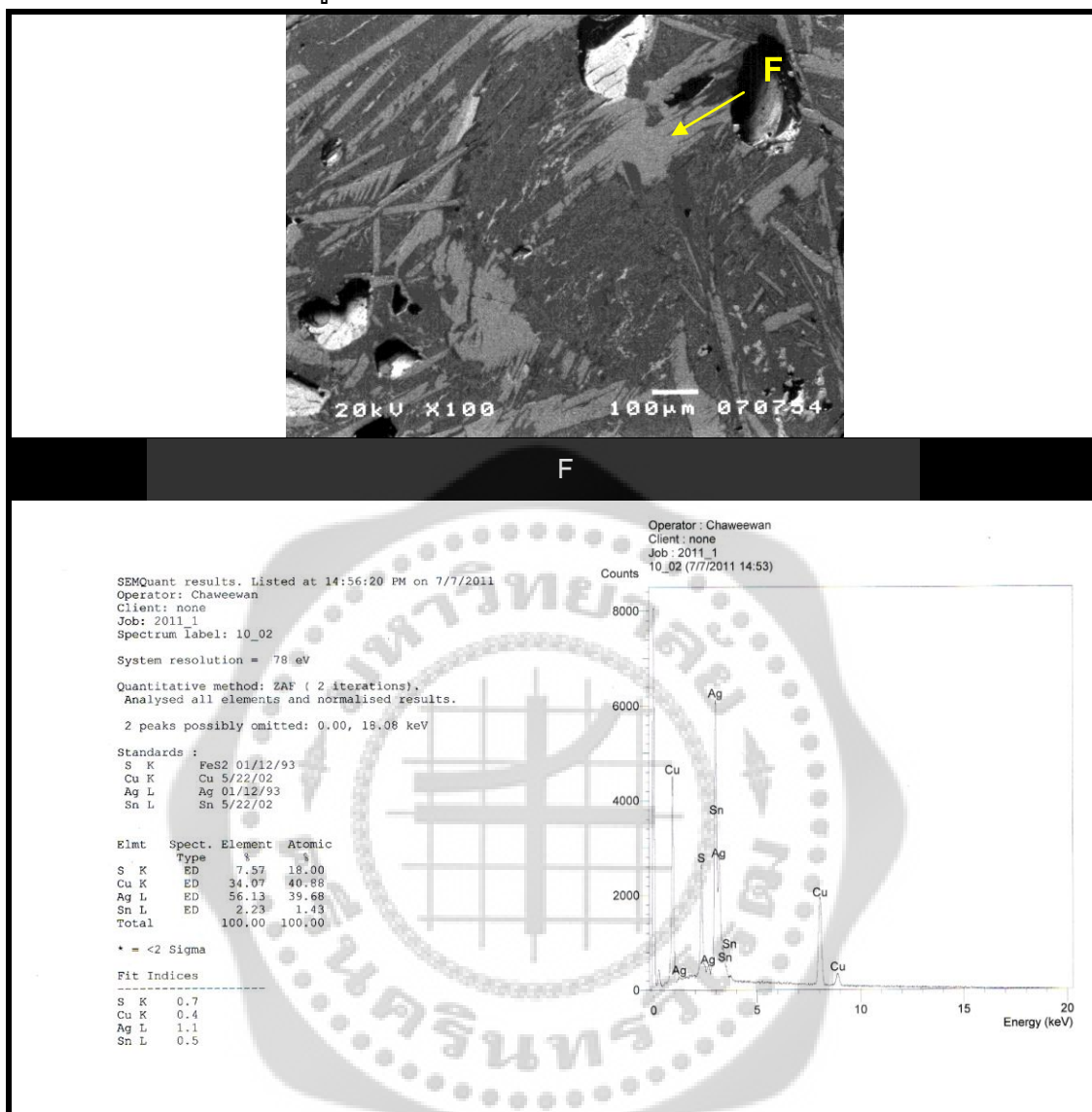
D



E



แท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 3





โปรแกรม image J

โปรแกรม image J คือโปรแกรมในการวิเคราะห์ภาพถ่าย เป็นโปรแกรม freeware ตัวโปรแกรมมีความเป็นมาจากการสร้างของ National Institutes of Health (NIH) พัฒนาที่สำนักวิจัยของสถาบัน National Institute of Mental Health (NIMH) เพื่อใช้กับเครื่อง Macintosh สามารถใช้ได้กับเครื่อง PC (Personal Computer) ธรรมดาที่มีโปรแกรม Java ตั้งแต่เวอร์ชัน 1.4 ขึ้น และไฟล์ที่ตัวโปรแกรมอ่านได้ต้องมีนามสกุล TIFF,GIF,JPEG,BMP,DICOM,FITS และraw imageJ สามารถคำนวณหาสัดส่วนพื้นที่ และสามารถหาพื้นที่ในการวัดได้ สามารถหาค่าได้ทั้งในหน่วยพื้นที่ เช่น ตารางมิลลิเมตร หรือ ค่าในหน่วย pixel ของรูปนั้น สามารถจัดทำค่าต่างๆในรูปสถิติได้ วัดระยะความยาวของเซลล์ วัดความหนาแน่นของรูปภาพแล้วแสดงในรูปแบบแผนภูมิแท่งหรือ Histograms ผู้ดูแลคือ Mr.Wayne Rasband (wayne@codon.nih.gov) หน่วยสถาบันวิจัย National Institute of Mental Health (NIMH) ตั้งอยู่ที่เมือง Bethesda รัฐ Maryland ประเทศอเมริกา





ประวัติย่อผู้วิจัย



ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นางสาวภัทรา ศรีสุขโข
วันเดือนปีเกิด	22 ธันวาคม พ.ศ. 2527
สถานที่เกิด	อ.เมือง จ.พิษณุโลก
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี 41 ม. 5 ต.ท่าช้าง อ.เมือง จ.จันทบุรี 22000
ตำแหน่งหน้าที่การงานในปัจจุบัน	ตำแหน่งอาจารย์พนักงานมหาวิทยาลัย
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี 41 ม. 5 ต.ท่าช้าง อ.เมือง จ.จันทบุรี 22000
ประวัติการศึกษา	ระดับมัธยมศึกษาตอนต้น สำเร็จการศึกษาปี 2542 โรงเรียนเฉลิมขวัญสตรี ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย สำเร็จการศึกษาปี 2545 โรงเรียนเฉลิมขวัญสตรี ระดับปริญญาตรี สำเร็จการศึกษาปี 2550 วท.บ.วัสดุศาสตร์(อัญมณีและเครื่องประดับ) มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ