

ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับกระบวนการผลิต ยาถมดำปราศจากตะกั่ว

ภัทรา ศรีสุข* และ ขจีพร วงศ์ปรีดี

บทคัดย่อ

เครื่องถมไทยเป็นศิลปหัตถกรรมที่มีคุณค่าของไทยมาตั้งแต่โบราณ แต่ไม่สามารถส่งออกขายยตัวในต่างประเทศได้ เนื่องจากเครื่องถมมียาถมเป็นส่วนหนึ่ง โดยยาถมประกอบด้วย ตะกั่ว ทองแดง เงิน และกำมะถัน ดังนั้นยาถมดำปราศจากตะกั่วจึงเป็นอีกทางเลือกเพื่อเผยแพร่ศิลปะไทยให้สามารถส่งออกต่างประเทศได้ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอุณหภูมิในการลงถมดำปราศจากตะกั่วที่อุณหภูมิ 400°C, 500°C, 600°C และ 700°C บนพื้นชิ้นงานโลหะเงินบริสุทธิ์และอัลลอยเงิน ซึ่งยาถมดำปราศจากตะกั่วที่ทดลองใช้มี 3 สูตร โดยศึกษาสมบัติทางกายภาพโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รูปร่างของยาถมดำปราศจากตะกั่วในร่องลาย รอยแตกของยาถมด้วยวิธีการตัดโค้งด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสง และโครงสร้างผลึกศาสตร์ด้วยเทคนิคเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากผลการวิเคราะห์พบว่า ยาถมมีสารประกอบทั้งหมด 6 ชนิด คือ CuAgS, Ag, Cu₂S, Sn₂S₃, SnS และ Cu₄SnS₄ ในปริมาณที่แตกต่างกันในแต่ละสูตร และผลของกระบวนการลงถมพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการลงยาถมดำปราศจากตะกั่ว คือ 500°C กับ 600°C สูตรยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 2 ให้ค่าเฉลี่ยรอยแตกที่หมดหลุดออกจากชิ้นงานอัลลอยเงินน้อยที่สุด ยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 ให้รูปร่างของยาถมดำปราศจากตะกั่วหลังจากลงถมกับชิ้นงานเงินเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด

คำสำคัญ: ยาถมดำปราศจากตะกั่ว รูปร่างยาถม การเกาะติด

The Relations of Temperature and Processes of Niellobar without Lead

Pathra Srisukho* and Kageeporn Wongpreedee

ABSTRACT

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 barriers and cannot be exported to international markets. Therefore, nielloware products had been innovated without lead filled to be an option for exporting products. The aim of this research was to study the temperature effects of a black amalgam of alloys (niello bar or niello) without an lead element at 400, 500, 600, and 700 degree Celsius filled into carved grooves of silver alloys (95 wt%Ag-5 wt%Cu) and pure silver (99.99 wt% Ag) bases. Three formulas of niello without lead were used in this research. Microstructures were studied by using scanning electron microscopy to characterize shapes of niello after inlaying and fractures of niello after bending methods. The results showed that all three formulas comprising of six compounds of CuAgS, Ag, Cu₂S, Sn₂S₃, SnS and Cu₄SnS₄, but in different quantities in each formula. The best temperature processes of niello without lead were 500 and 600 degree Celsius. The 95 wt%Ag-5 wt%Cu bases, it occurred more fracture. Formula 2 of niello bars revealed less fractures. After putting niello mixture into the silver bases pattern, the changing shapes of niello bar formula 1 was the least changing shapes.

Keywords: lead free nielloware, shapes of niello, adhesions

บทนำ

เครื่องถมเป็นงานศิลปหัตถกรรมที่รู้จักมาตั้งแต่สมัยอยุธยาตอนต้น ซึ่งสมัยก่อนนิยมทำเป็นเครื่องราชูปโภค หรือเครื่องบรรณาการให้แก่บุคคลที่สำคัญ เครื่องถมไทยจำแนกออกได้เป็น 3 ประเภทตามเทคนิควิธีการทำเครื่องถม คือ เครื่องถมทอง เครื่องถมตะทอง และเครื่องถมดำหรือเครื่องถมเงิน โดยในงานนี้จะกล่าวเฉพาะเครื่องถมเงิน ซึ่งเป็นกรนำยามที่มีสีดำใส่ลงไปบนพื้นร่องลายที่แกะสลักเป็นลวดลายไทยบนอัลลอยเงินที่มีความบริสุทธิ์ตั้งแต่ 95 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป ส่วนพื้นที่การลงถมจะต้องมีสีดำมัน ซึ่งเครื่องถมเงินที่ดีตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนเครื่องถมเงิน มผช. 365/2547 ลวดลายถมจะต้องมีสีดำสนิทไม่ต่าง มีความมันวาว เกะติดดี สูดถ่ายเครื่องถมที่คุณภาพสูงและมีราคาดีจะต้องมีรูพรุนหรือตามดน้อย [1]

แท่งยามดำมีโลหะสามอย่างผสมเข้าด้วยกัน คือ ตะกั่ว ทองแดง เงิน และใส่กำมะถันเพื่อให้ถมนี้มีสีดำ [2-4] องค์ประกอบหลักของแท่งยามดำ คือ ส่วนผสมของตะกั่วซึ่งเป็นพิษ ในกระบวนการผลิตแท่งยามดำและขั้นตอนลงถมบนชิ้นงานอาจมีไอตะกั่วเกิดขึ้น โดยไอพิษของตะกั่วส่งผลกระทบต่อสุขภาพรุนแรงต่อมนุษย์ โดยจะสะสมอยู่ในร่างกายจนปริมาณหนึ่งแล้วจึงแสดงอาการของโรคพิษตะกั่วซึ่งมีผลกระทบต่อสมอง การรับฟัง และอาจเสียชีวิต ถ้าได้รับการสะสมในปริมาณที่มาก [5] ทั้งนี้ในปี พ.ศ. 2552 ในประเทศสหรัฐฯ ได้ออกกฎหมายว่าด้วยความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์สำหรับผู้บริโภค (CPSIA) ห้ามใช้ผลิตภัณฑ์ที่มีสารตะกั่วเจือเกิน 0.06% โดยน้ำหนัก ทำให้เกิดข้อจำกัดในด้านการส่งออกยังต่างประเทศ [6] ซึ่งอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้เครื่องถมไม่สามารถส่งออกภายนอกประเทศ จากปัญหาเหล่านี้ในปี พ.ศ. 2554 Wongpreedee และคณะ ได้มีการคิดค้นประดิษฐ์ยามดำปราศจากตะกั่วขึ้น โดยการนำดีบุกมาทดแทนตะกั่วและได้จดสิทธิบัตรในนามของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เลขที่คำขอ 1101001747 ชื่อผลงานว่า “แท่งยามดำปราศจากตะกั่ว” [7] ซึ่งต่อมา Srisukho และคณะ ได้มีการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของส่วนผสมที่แตกต่างกัน โดยได้สารประกอบที่มีโลหะผสมระหว่างทองแดง เงิน และดีบุก ร่วมกับกำมะถัน โดยวิเคราะห์ด้วย EDS ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [8] และหลังจากนั้น Wongpreedee และคณะ มีการเปรียบเทียบความแข็ง และสำรวจโครงสร้างจุลภาคของแท่งถมดำปราศจากตะกั่วกับแท่งถมสูตรดั้งเดิมที่มีตะกั่ว ซึ่งได้ศึกษาสารประกอบของทองแดง เงิน กำมะถัน ทั้งที่ผสมกับตะกั่วและปราศจากตะกั่วที่ใช้ดีบุกทดแทน ซึ่งได้สารประกอบที่เหมือนกัน คือ Cu_2S ให้สีดำ ที่มีการรวมตัวอยู่เป็น dendrite-like ที่ดี เป็นระบบผลึก cubic เหมือนกัน ส่วนเป็นสารประกอบ $CuAgS$ ได้ถูกแยกตัวออกมากกระจายตัวอยู่นอก dendrite-like มีระบบผลึกเป็น orthorhombic [9] ทั้งนี้เพื่อให้เกิดการนำแท่งยามดำปราศจากตะกั่วไปใช้งานในเชิงพาณิชย์และความเข้าใจในกระบวนการและหลักการทางวิทยาศาสตร์เพื่อการควบคุมคุณภาพในการผลิตจริง

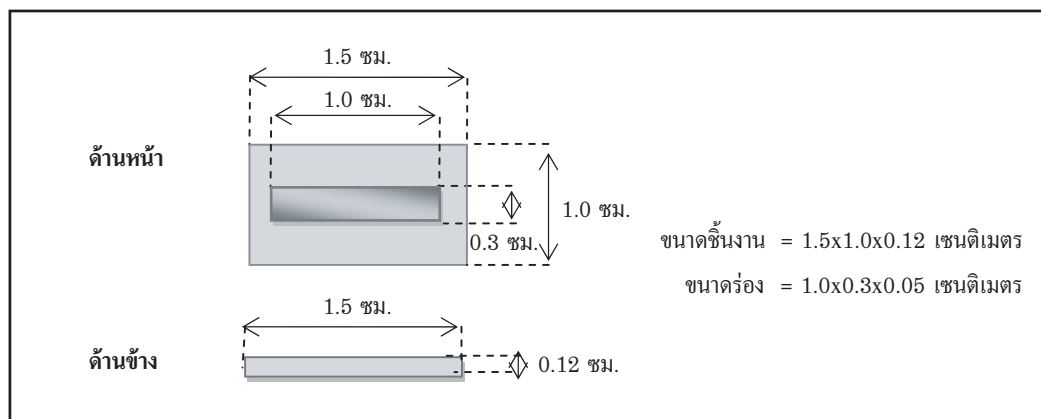
ดังนั้นผู้วิจัยได้เห็นถึงความสำคัญที่จะศึกษาการใช้งานของแท่งยามดำปราศจากตะกั่ว โดยทำการลงถมที่อุณหภูมิต่างๆ กัน เพราะการลงถมในอุณหภูมิที่เหมาะสมจะส่งผลต่อโครงสร้างทางจุลภาค โดยเฉพาะรูปร่างที่ส่งผลต่อลวดลายของเครื่องถม และยังส่งผลให้มีการเกาะติดที่ดีระหว่างเนื้อยามกับชิ้นงานเงิน จนสามารถผลิตเครื่องถมดำปราศจากตะกั่วได้อย่างมีมาตรฐานคุณภาพเหมือนกันทุกชิ้น

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในการทดลองนี้ใช้แท่งยาถมดำปราศจากตะกั่ว 3 สูตร [7] ดังตารางที่ 1 นำไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของ 3 ปัจจัยหลัก คือ สูตรยาถมดำปราศจากตะกั่วชนิดของอัลลอยเงิน และอุณหภูมิที่ลงถม โดยนำไปวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกและสารประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ จากนั้นถ่ายภาพโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วที่อุณหภูมิขณะลงถม 400°C, 500°C, 600°C และ 700°C ลงบนชิ้นงานเงิน 2 ชนิด คือ 99.99 wt% Ag และ 95 wt% Ag-5 wt% Cu (ในที่นี้จะขอเรียกว่า เงินบริสุทธิ์ สำหรับ 99.99 wt% Ag และอัลลอยเงิน 95 สำหรับ 95 wt% Ag-5 wt% Cu) ที่มีขนาดชิ้นงาน = 1.5 × 1.0 × 0.12 เซนติเมตร และขนาดร่อง = 1 × 0.3 × 0.05 เซนติเมตร ตามรูปที่ 1 โดยให้ความร้อนแก่ชิ้นงานด้วยหัวเป่าไฟจนลงถมดำปราศจากตะกั่วหลอมละลายลงไปจนเต็มร่องตาม ทั้งชิ้นงานไว้ 30 วินาที จุ่มด้วยน้ำสะอาด และขัดถมส่วนเกินออก รวมชิ้นงานทั้งหมด 96 ชิ้น

ตารางที่ 1 แสดงสูตรยาถมดำปราศจากตะกั่ว

ยาถมดำปราศจากตะกั่ว	ดีบุก (wt%)	เงิน (wt%)	ทองแดง (wt%)	กำมะถัน (wt%)
สูตร 1	34-30	16-12	36-32	22-18
สูตร 2	40-36	13-9	33-29	22-18
สูตร 3	45-41	10-6	31-27	22-18



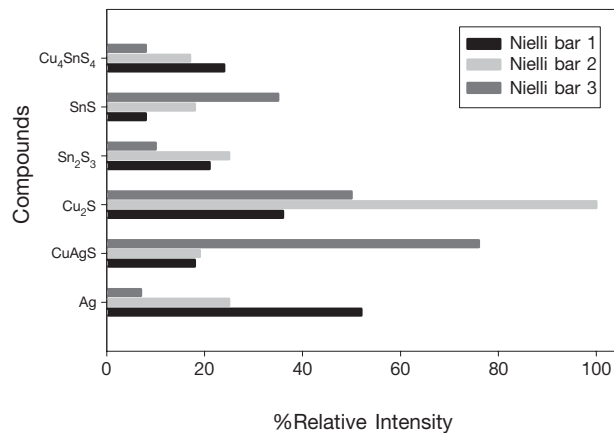
รูปที่ 1 แสดงขนาดชิ้นงานเงินสำหรับลงถมดำปราศจากตะกั่ว

ยอดมดำปราศจากตะกั่วที่ผ่านการลงถมแล้วที่อุณหภูมิต่างๆ ได้ศึกษารูปร่างของถม ซึ่งจำแนกเป็น 2 ทิศทาง คือ ทิศทางแรก ด้านหน้าชิ้นงาน (Plan view) เพื่อดูความเปลี่ยนแปลงของขนาดรูปร่างของร่องที่ผิวชิ้นงาน โดยถ่ายภาพจากกล้องดิจิตอลความละเอียดสูงใช้เลนส์มาโคร ระยะโฟกัส 100 มิลลิเมตร และวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Image J เพื่อหาร้อยละการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของร่องยอดมดำปราศจากตะกั่ว ทิศทางที่สองชิ้นงานที่ตัดตามภาพตัดขวางเพื่อศึกษารูปร่างด้านข้างของเหลี่ยมมุมที่เปลี่ยนไปจากเดิม โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ U-PMTVC 3K12896 camera จากนั้นศึกษาสมบัติเชิงกลของยอดมดำปราศจากตะกั่วบนพื้นโลหะเงิน โดยใช้เทคนิคการตัดโค้ง ใช้แรงดัน 10 psi จากนั้นถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิตอลความละเอียดสูงใช้เลนส์มาโคร ระยะโฟกัส 100 มิลลิเมตร และวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Image J เพื่อหาพื้นที่ที่ถมดำปราศจากตะกั่วหลุดออกจากชิ้นงาน

ผลการทดลอง

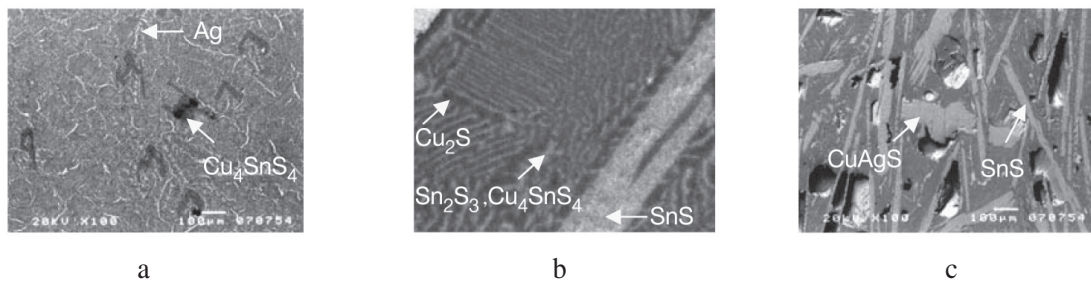
1. ศึกษาโครงสร้างผลึก และสารประกอบของแท่งยอดมดำปราศจากตะกั่ว

แท่งยอดมดำปราศจากตะกั่วที่ประกอบด้วย ดินบุก เงิน ทองแดง และกำมะถัน ผลวิเคราะห์หาจากเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์พบว่าทั้งสามสูตรประกอบไปด้วยสารประกอบของ CuAgS , Ag , Cu_2S , Sn_4S_3 , SnS และ Cu_4SnS_4 แต่มีปริมาณเล็กน้อยแตกต่างกัน ดังรูปที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเข้มของสารประกอบในแท่งยอดมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3



รูปที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบค่าร้อยละความเข้มของสารประกอบในแท่งยอดมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3

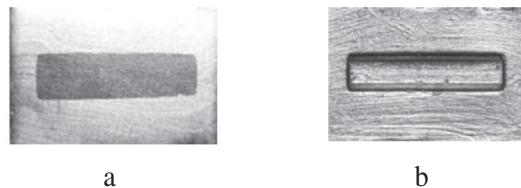
เมื่อนำผลวิเคราะห์หาสารประกอบของแท่งยาถมมาวิเคราะห์ร่วมกับภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลที่ได้ในแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 รูปที่ 3a มีปริมาณทองแดงและเงินมากที่สุดจึงเกิดเฟส Cu_4SnS_4 (สีดำ) และมี Ag-phase แยกตัวออกมามาก ในแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 2 รูปที่ 3b มีการเติมดีบุกมากขึ้นจนเกิดเส้นเข็มสารประกอบ SnS ส่วนยูเทคติก ประกอบด้วย Cu_2S (สีดำ), Sn_2S_3 กับ Cu_4SnS_4 (สีเทา) ในยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 3 รูปที่ 3c มีปริมาณดีบุกสูงที่สุด จึงมีเส้นเข็มสารประกอบ SnS ที่มีขนาดใหญ่ และมี CuAgS แยกตัวออกมาเป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น



รูปที่ 3 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และสารประกอบของแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่ว a สูตร 1, b สูตร 2 และ c สูตร 3

2. ศึกษารูปร่างของถมที่ผ่านการลงถมแล้วที่อุณหภูมิต่างๆ

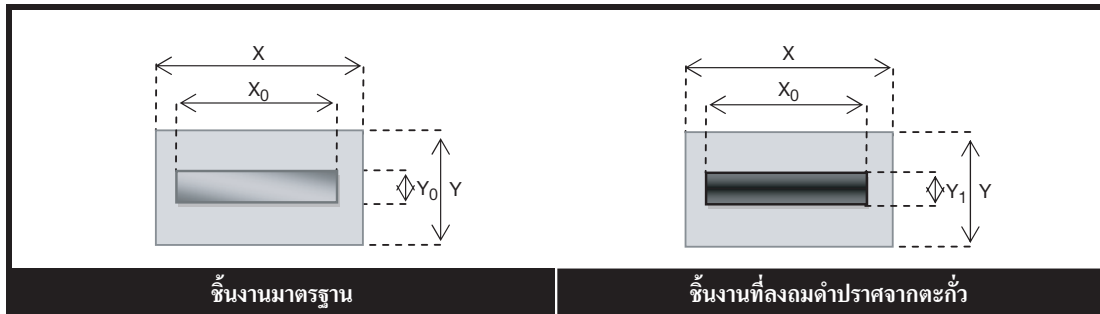
ศึกษารูปร่างของยาถมในชิ้นงานที่ลงถมดำปราศจากตะกั่วทั้งสามสูตร และลงถมทุกอุณหภูมิ ดังรูปที่ 4a รวมทั้งชิ้นงานเปล่าที่ไม่ได้ลงถม 1 ชิ้น เพื่อเป็นตัวมาตรฐานดังรูปที่ 4b จากนั้นมาคำนวณเพื่อการคำนวณหาค่าร้อยละผลต่างของพื้นที่สำหรับลงถมในชิ้นงานเงินมาตรฐานกับชิ้นงานเงินที่ลงถมดำปราศจากตะกั่ว ดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 แสดงชิ้นงานเงินที่ถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัลความละเอียดสูงใช้เลนส์มาโคร ระยะโฟกัส 100 มิลลิเมตร

- a ชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการลงถม
- b ชิ้นงานเงินมาตรฐานก่อนการลงถม

วิธีการคำนวณ



รูปที่ 5 แสดงการคำนวณหาค่าร้อยละผลต่างของพื้นที่สำหรับลงมดในชิ้นงานเงินมาตรฐานกับชิ้นงานเงินที่ลงมด่าปราศจากตะกั่ว

หาค่าร้อยละของพื้นที่สำหรับลงมด่าปราศจากตะกั่วเทียบกับพื้นที่ชิ้นงานทั้งหมด

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

หาค่าร้อยละของพื้นที่ลงมด่าปราศจากตะกั่วแล้วเทียบกับพื้นที่ชิ้นงานทั้งหมด

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

หาค่าร้อยละผลต่างของพื้นที่สำหรับลงมด่าปราศจากตะกั่วชิ้นงานมาตรฐานกับชิ้นงานที่ลงมด่าปราศจากตะกั่ว

$$\Delta A = A_1 - A_0 \rightarrow \text{สูตรคำนวณที่ 1}$$

$+\Delta A$ หมายถึง ชิ้นงานที่ลงมด่าปราศจากตะกั่ว มีพื้นที่ส่วนยอมมากกว่าชิ้นงานมาตรฐาน

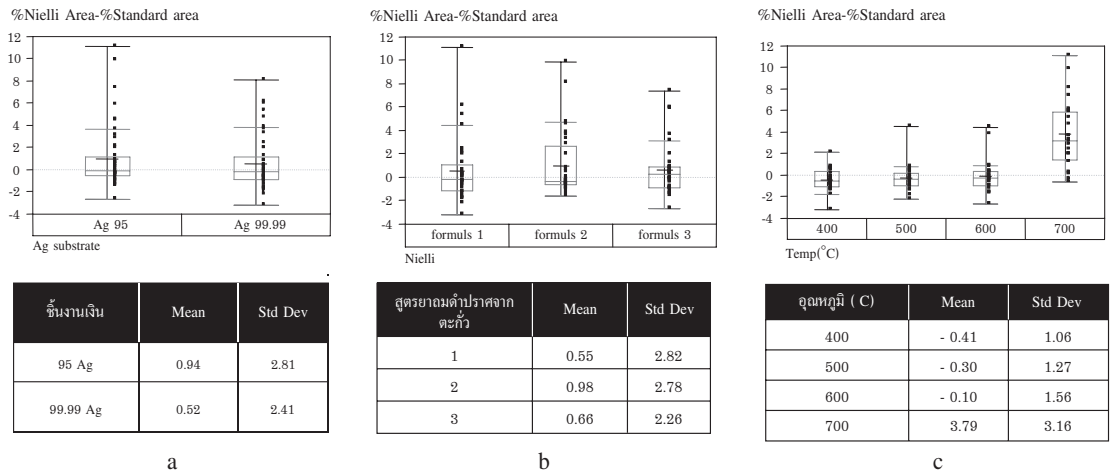
$-\Delta A$ หมายถึง ชิ้นงานที่ลงมด่าปราศจากตะกั่ว มีพื้นที่ส่วนยอมน้อยกว่าชิ้นงานมาตรฐาน

ดังนั้น ควรให้ ΔA มีค่าเข้าใกล้ศูนย์มากที่สุดเพื่อจะได้รูปร่างของร่องที่ไม่ต่างจากขนาดร่องก่อนทำการลงมดหรือชิ้นงานมาตรฐาน

2.1 ด้านหน้าชิ้นงาน (Plan view)

จากการหาค่าร้อยละค่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของร่องหลังจากการลงมด่าปราศจากตะกั่วเปรียบเทียบกับขนาดร่องชิ้นงานเงินมาตรฐานก่อนการลงมด เมื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการลงมดให้ได้ตามขนาดและรูปร่างของมดตามต้องการ แบ่งได้ทั้ง 3 ปัจจัย คือ ชนิดของชิ้นงานเงิน สูตรยาอมด่าปราศจากตะกั่ว และอุณหภูมิที่ใช้ในการลงมด ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ปัจจัยแรกชนิดของชิ้นงานเงินบริสุทธิ์มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของร่องยอมที่น้อยกว่าอัลลอยเงิน 95 เท่ากับร้อยละ 0.52 ± 2.41 ซึ่งน้อยกว่าอัลลอยเงิน 95 เท่ากับร้อยละ 0.94 ± 2.81 ดังแสดงในรูปที่ 6a สูตรของยาอมซึ่งเป็นปัจจัยที่สองดังรูปที่ 6b พบว่ายอมด่าปราศจากตะกั่วสูตร 1 มีค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยอมมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับร้อยละ 0.55 ± 2.82 รองลงมา คือ สูตร 3 และสูตร 2 มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.66 ± 2.26 และ 0.98 ± 2.78 ตามลำดับ ส่วนปัจจัยสุดท้าย คือ อุณหภูมิแสดงในรูปที่ 6c พบว่าที่อุณหภูมิที่มีค่าเฉลี่ย

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยาอมเปรียบเทียบกับชิ้นงานมาตรฐานที่มีค่าน้อยเหมาะสมกับการลงถม คือ 600°C พบว่ามีค่าเฉลี่ยร้อยละการเปลี่ยนแปลงรูปร่างน้อยที่สุดเท่ากับร้อยละ -0.10 ± 1.56 อุณหภูมิ 500°C เท่ากับร้อยละ -0.3 ± 1.27 อุณหภูมิ 400°C เท่ากับร้อยละ -0.41 ± 1.06 และอุณหภูมิ 700°C เท่ากับร้อยละ 3.79 ± 3.16 เมื่อพิจารณาจากปัจจัยทั้ง 3 ประการ สรุปได้ว่าปัจจัยทั้งสามมีอิทธิพลต่อรูปร่างของร่องยาอมหลังการลงถม โดยปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดที่จะทำให้รูปร่างของยาอมไม่ผิดเพี้ยนไปจากต้นแบบมาตรฐานมาก คือ ปัจจัยที่รวมกันของชนิดของชิ้นงานเงินบริสุทธิ์ ยาอมสูตร 1 และการใช้อุณหภูมิในการลงถมที่ 600°C มีค่าเฉลี่ยร้อยละการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของร่องยาอมที่น้อยที่สุด

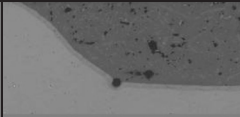
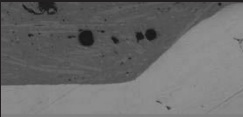



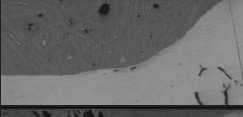




รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a ชิ้นงานเงิน, b สูตรยาอมดำปราศจากตะกั่ว และ c ความร้อนที่ใช้ในการลงถมดำปราศจากตะกั่วกับรูปร่างของยาอมดำปราศจากตะกั่วหลังจากลงถม

2.2 ด้านข้าง (แบบ cross-section)

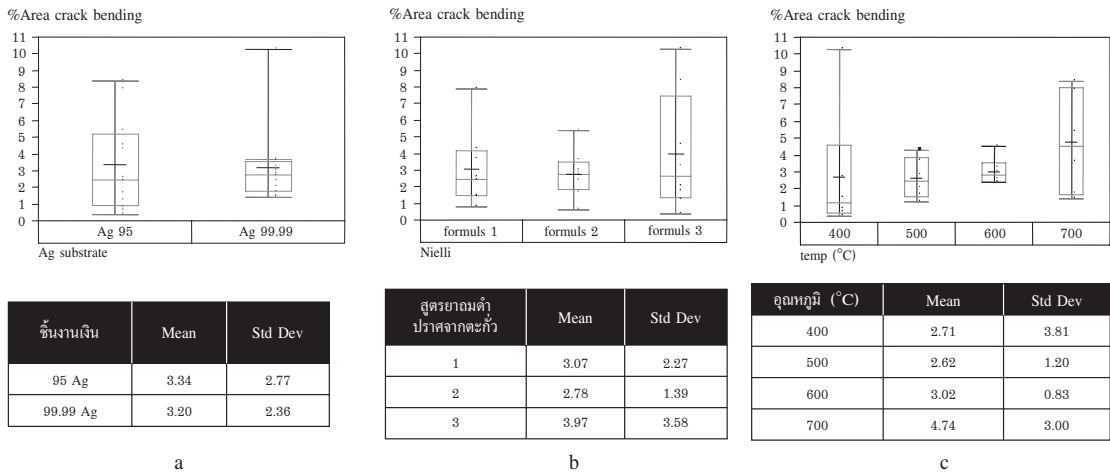
ตัดชิ้นงานที่ลงถมทุกอุณหภูมิ แบบภาพตัดขวางถมดำปราศจากตะกั่ว เลือกแสดงเฉพาะสูตร 2 และวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสงโดยใช้กำลังขยาย 50 เท่า เมื่อศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคแบบภาพตัดขวางของชิ้นงานเงินที่ทำการลงถมดำปราศจากตะกั่วทั้งสามสูตรดังตารางที่ 2 พบว่ารูปร่างของร่องยาอมดำปราศจากตะกั่วหลังจากลงถมบนชิ้นงานเงิน เมื่อเปรียบเทียบจากแบบร่องเดิมที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมคางหมูจะเกิดชั้นรอยต่อระหว่างยาอมดำปราศจากตะกั่วกับชิ้นงานเงินที่หนาขึ้นเมื่อให้ความร้อนสูงขึ้น และมักเกิดรูพรุน ณ บริเวณนั้น ผลคือ รูปร่างของมุมชิ้นงานเงินหายไป และยาอมดำปราศจากตะกั่วแพร่เข้าไปในเนื้อเงินได้มากขึ้น จึงทำให้รูปร่างของร่องที่ออกแบบไว้เปลี่ยนไปจากเดิม

ตารางที่ 2 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ลงพิมพ์จากตะกั่วสูตร 2 แบบภาพตัดขวางด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสะท้อนแสงกำลังขยาย 50 เท่า

อุณหภูมิ (°C)	อัลลอยเงิน 95	โลหะเงินบริสุทธิ์
400		
500		
600		
700		

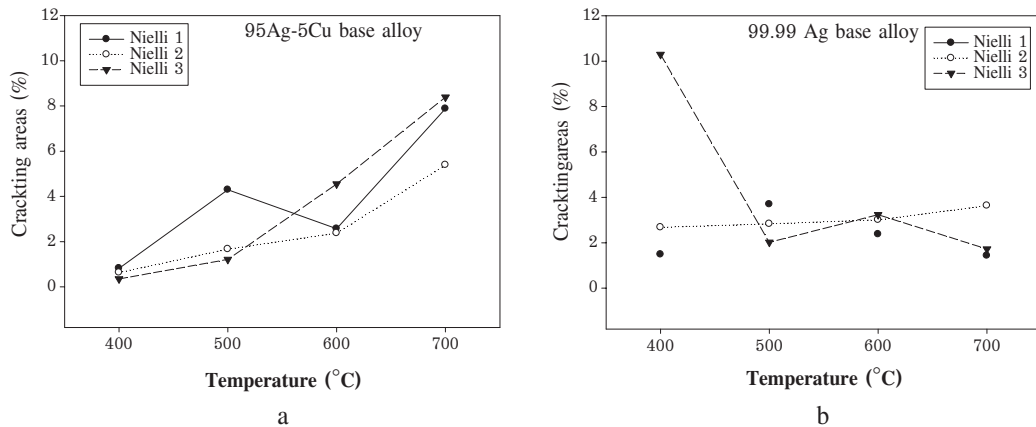
3. ศึกษาสมบัติเชิงกลของยาถมพิมพ์จากตะกั่วบนพื้นชิ้นงานเงิน

หาค่าร้อยละพื้นที่รอยแตกที่ได้จากการตัดโค้งเปรียบเทียบกับพื้นที่พิมพ์จากตะกั่วก่อนการทดสอบการตัดโค้งมาวิเคราะห์รวมกันทั้งหมด ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดรอยแตกของยาถมที่ผ่านการตัดโค้งแบ่งได้ 3 ประการ ปัจจัยแรกพบว่าชนิดของชิ้นงานเงินไม่มีผลต่อการเกิดรอยแตกอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 7a ซึ่งแตกต่างกับสูตรของยาถมเป็นปัจจัยที่สอง แสดงผลของสูตรของยาถมพิมพ์จากตะกั่วสูตร 2 มีค่าเฉลี่ยพื้นที่รอยแตกที่น้อยที่สุด เมื่อเทียบกับสูตรอื่นๆ เท่ากับค่าเฉลี่ยร้อยละ 2.78 ± 1.39 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับยาถมพิมพ์จากตะกั่วสูตร 1 มีค่าเฉลี่ยร้อยละพื้นที่รอยแตกเท่ากับ 3.07 ± 2.27 และสูตร 3 มีค่าเฉลี่ยพื้นที่รอยแตกมากที่สุด คือ ค่าเฉลี่ยร้อยละ $3.97.10 \pm 3.58$ ดังแสดงรูปที่ 7b และปัจจัยสุดท้าย คือ อุณหภูมิแสดงในรูปที่ 7c พบว่าที่อุณหภูมิที่มีค่าเฉลี่ยร้อยละพื้นที่รอยแตกของยาถมที่มีค่าน้อยเหมาะสมกับการลงพิมพ์ คือ 500°C พบว่ามีค่าเฉลี่ยพื้นที่รอยแตกน้อยที่สุด เท่ากับร้อยละ 2.71 ± 3.81 ที่อุณหภูมิ 400°C เท่ากับร้อยละ 2.62 ± 1.20 ที่อุณหภูมิ 600°C เท่ากับร้อยละ 3.02 ± 0.83 และอุณหภูมิ 700°C เท่ากับร้อยละ 4.74 ± 3.00 เมื่อพิจารณาจากปัจจัยทั้ง 3 ประการสรุปได้ว่าสูตรของยาถมและอุณหภูมิมิอิทธิพลต่อการเกิดรอยแตกมีผลต่อความแข็งแรงของยาถม โดยปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด คือ สูตรยาถมสูตร 2 กับการใช้อุณหภูมิในการลงพิมพ์ 500°C มีค่าเฉลี่ยร้อยละพื้นที่รอยแตกน้อยที่สุด



รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a ชิ้นงานเงิน, b สูตรยาถมดำปราศจากตะกั่ว และ c ความร้อนที่ใช้ในการลงมดำปราศจากตะกั่วที่ทำการตัดโค้งเปรียบเทียบกับร้อยละพื้นที่รอยแตก

เมื่อนำผลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ค่าร้อยละพื้นที่รอยแตกของสูตรยาถมดำปราศจากตะกั่วสามสูตรเปรียบเทียบกับอุณหภูมิในการลงมระหว่างอัลลอยเงิน 95 กับโลหะเงินบริสุทธิ์ แสดงผลออกมาดังรูปที่ 8 พบว่ายาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 2 มีค่าร้อยละพื้นที่รอยแตกมีการทิศทางเปลี่ยนแปลงของแต่ละอุณหภูมิที่น้อยกว่าสูตรอื่น ดังนั้นยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 2 จึงเป็นยาถมที่สามารถควบคุมการเกิดรอยแตกได้ดีกว่าสูตร 1 และสูตร 3



รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของพื้นที่รอยแตกของยาถมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1, 2, 3 ที่อุณหภูมิ 400°C, 500°C, 600°C และ 700°C บน a อัลลอยเงิน 95 และ b โลหะเงินบริสุทธิ์

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยการวิเคราะห์ธาตุการจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบในแท่งยาลมดำปราศจากตะกั่วโดยใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ พบว่า สูตรยาลมทั้งสามสูตรมีสารประกอบทั้งหมด 6 ชนิด คือ Ag , Cu_4SnS_4 , Cu_2S , Sn_2S_3 , $CuAgS$ และ SnS , แต่มีปริมาณมากน้อยแตกต่างกัน โดยยาลมดำปราศจากตะกั่วสูตร 1 พบสารประกอบมากที่สุด คือ Ag และ Cu_4SnS_4 โดย Ag มีรูปร่างไม่แน่นอน แยกตัวออกมาอยู่ที่ขอบเกรน และสารประกอบ Cu_4SnS_4 จะรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนเนื่องจากยาลมสูตร 1 เป็นสูตรยาลมดำปราศจากตะกั่วที่มีปริมาณเงินกับทองแดงมากที่สุด

ยาลมดำปราศจากตะกั่วสูตร 2 พบว่ามีสารประกอบอยู่เป็นหลัก คือ Cu_2S และ Sn_2S_3 และสารประกอบทั้งสองมีการรวมตัวเป็นรูปร่างคล้ายยูเทคติก ส่วนยาลมดำปราศจากตะกั่วสูตร 3 พบว่ามีสารประกอบ $CuAgS$ และสารประกอบ SnS เป็นหลัก โดยสารประกอบ $CuAgS$ รวมตัวเป็นกลุ่มก้อน มีรูปร่างไม่แน่นอน ส่วนสารประกอบ SnS รวมตัวมีลักษณะคล้ายเส้นเข็ม

เมื่อศึกษาระบบผลึกพบ Cu_2S กระจายตัวอยู่รอบๆ dendrite ในสูตรที่ 2 สอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของยาลมดั้งเดิมที่มีตะกั่ว [9] ซึ่งมีโครงสร้างแบบ Cubic ทำให้เกิดการกระจายตัวของ dendrite อยู่รอบๆ ส่วนสารประกอบ Sn_2S_3 , SnS และ Cu_4SnS_4 พบว่าอยู่ในรูปผลึกระบบ orthorhombic ที่มีขนาดใหญ่ของหน่วยเซลล์เกิดการแยกตัวออกมาเป็นเส้นเข็ม ทำให้พบว่าโครงสร้างจุลภาคในสูตรยาลมดำปราศจากตะกั่วสูตร 2 บ้าง และพบมากในสูตร 3 ที่บรรจุเส้นเข็มในปริมาณมาก เมื่อเปรียบเทียบสารประกอบทั้ง 6 ชนิด พบว่าสารประกอบ Cu_2S เป็นสารประกอบที่สำคัญที่ควรจะมีในยาลมที่ดี เพราะอยู่ในระบบผลึก cubic และเป็นเพียงสารประกอบเดียวที่ให้สีดำในเนื้อของยาลม [10] ส่วนสารประกอบ $CuAgS$ ให้สีเทาอมฟ้า ในขณะที่สารประกอบ SnS ให้สีน้ำตาล ในส่วนผสมของยาลมธาตุกำมะถันเป็นส่วนประกอบที่จะช่วยให้ลมนั้นมีสีดำเข้ม ดังนั้นในการทำยาลมดำปราศจากตะกั่วไม่ควรจะทำให้เกิดสารประกอบ Ag แยกออกมาที่ขอบเกรนมาก เพราะจะทำให้เกิดสีเทา ลดสีดำของเนื้อยาลม

2. ศึกษารูปร่างของยาลมดำปราศจากตะกั่วหลังจากลงถนอมบนชิ้นงานเงินให้มีขนาดร่องที่เซาะทำลวดลายลงถนอมด้านหน้าชิ้นงาน (Plan view) พบว่าปัจจัยที่เลือกใช้ชิ้นงานเงินบริสุทธิ์ โดยน้ำหนักกับยาลมดำปราศจากตะกั่วสูตร 3 ลงถนอมที่อุณหภูมิ $600^{\circ}C$ มีรูปร่างขนาดร่องที่ผิวชิ้นงานต่างจากชิ้นงานมาตรฐานน้อยที่สุด ส่วนชิ้นงานที่ตัดตามภาพตัดขวางเพื่อศึกษารูปร่างด้านข้างของเหลี่ยมมุมที่เปลี่ยนไปจากเดิมพบว่าหากอุณหภูมิในการลงถนอมมากขึ้นทำให้เหลี่ยมมุมของถนอมดำปราศจากตะกั่วผิดไปจากเดิมมากเนื่องจากการซึมผ่านของโลหะ

3. อุณหภูมิที่ใช้ในการลงถนอมปราศจากตะกั่วควรอยู่ในช่วง $500^{\circ}-600^{\circ}C$ เพราะยาลมจะมีความแข็งดี และทำให้ลวดลายของเครื่องถนอมไม่เสียรูป สูตรยาลมดำปราศจากตะกั่วที่ดีที่สุดคือ สูตร 2 เพราะได้ให้ผลลัพธ์ของการรวมตัวคล้ายยูเทคติกของสารประกอบ Cu_2S และสารประกอบ SnS ที่มีรูปร่างคล้ายเส้นเข็ม ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า สารประกอบ SnS ที่มีรูปร่างคล้ายเส้นเข็มจะช่วยรักษารูปร่างยาลมไม่ให้เกิดการยุบตัว ทำให้สามารถลงยาลมได้เต็มร่องและสารประกอบ Cu_2S มีการรวมตัวคล้ายยูเทคติกเกิดการแข็งตัวที่พอเหมาะจะช่วยลดการเกิดรูพรุน อีกทั้งให้สีดำซึ่งเป็นสีที่ต้องการด้วย ดังนั้นในยาลมดำปราศจากตะกั่วควรมีส่วนผสมของสารประกอบ Cu_2S ในปริมาณมาก ดังเช่นผลงานวิจัยที่พบว่ายาลมดำปราศจากตะกั่วสูตร 2 มีสารประกอบ Cu_2S มากที่สุด ให้ผลของการลงยาลมที่ดี และได้เปรียบเรื่องสีดีกว่ายาลมดำปราศจากตะกั่วสูตรที่ 1 และ 3

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยของนิสิตปริญญาโท ซึ่งได้ทุนจากมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.กาญจนา ชูครูวงศ์ และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่มอบทุนอุดหนุนสำหรับงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

1. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2547. มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนเครื่องถมเงิน มผช. 365/2547. ได้จาก http://app.tisi.go.th/otop/pdf_file/tcps369_47.pdf. 29 มิถุนายน 2556.
2. สมาคมเครื่องถมและเครื่องเงินไทย. 2525. เครื่องถมและเครื่องเงินไทย. พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพฯ. โรงพิมพ์ธีระการพิมพ์. หน้า 22-57.
3. Brepohl, E., McCreight, T., and Lewton-Brain, C. 2001. The Theory & Practice of Goldsmithing. Germany. Brynmorgen Press. p. 370-372.
4. คู่มือพัฒนาผู้ประกอบการธุรกิจด้านอัญมณีและเครื่องประดับไทยเชิงอนุรักษ์ภูมิปัญญาท้องถิ่นเครื่องถม. 2553. กรุงเทพฯ. กรมพัฒนาธุรกิจการค้า กระทรวงพาณิชย์.
5. Meyer, P. A., Brown, M. J., and Falk, H. 2008. Review Global Approach to Reducing Lead Exposure and Poisoning. Mutation Research 659: 166-175.
6. U.S. Consumer Product Safty Commission. 2010. Total Lead Content. Available from URL: <http://www.cpsc.gov/info/toysafety/lead.html>. 29 June 2011.
7. Wongpreedee, K., Srirukho, P., Ruethaitananon, P., Harbantana, S., and Kedsin, S. 2011. Black Nielloware without Lead. Thai Patent number. 1101001747 (Patent Pending).
8. Srisukho, P., Ruethaitananon, P., and Wongpreedee, K. 2011. Microstructure and Segregation of Sn-Ag-Cu-S Nielli-Inlay Alloys for Jewelry Industry. Proceedings of the 37th Congress on Science and Technology of Thailand. 10-12 October 2011. Centara Grand & Bangkok Convention Centre at Central World. Bangkok. Thailand.
9. Wongpreedee, K., Srisukho, P., Kaimuk, N., Sae-ung, P., and Settha-o-larn, S. 2012. Interface layers of Sn-Ag-Cu-S Nielli Inlay in Brass Alloys. Proceedings of the 38th Congress on Science and Technology of Thailand. 17-19 October 2012. The Empress Convention Centre Chiang Mai. Changmai. Thailand.
10. Petr, K., and Milan, N. 1999. The Complete Encyclopedia of Minerals Netherlands. Grange Books PLC.

ได้รับบทความวันที่ 1 เมษายน 2556

ยอมรับตีพิมพ์วันที่ 17 พฤษภาคม 2556